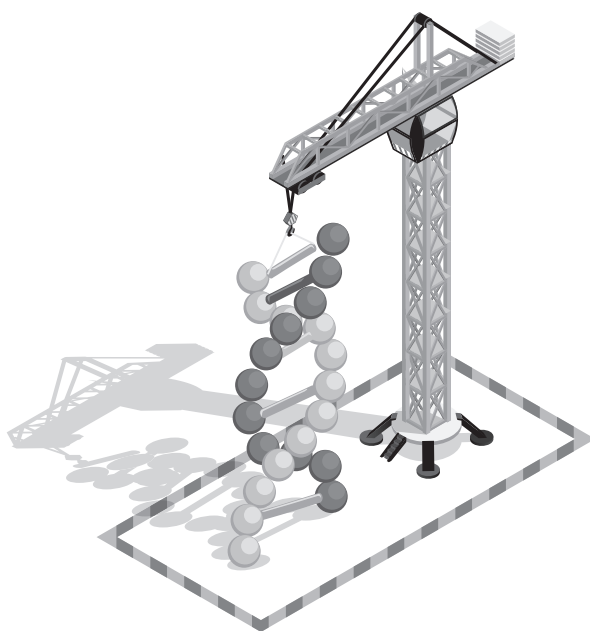


# 工程 研究与应用

Engineering Research and Application



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



## Editorial Board

### Editors-in-Chief

Xiaolei Ju

China Architectural Design and Research Institute, China

Meilian Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co., LTD.

### Editorial Board Member

Xianbo Tu

Guizhou Institute of Geological Exploration, General Bureau of Geology  
and Mines, Sinochem, China

Neda Abbasi

School of Engineering and Technology

Tanvir Ahamed

School of Engineering and Technology

Zhen Xu

Zhongtong Bus Holding Co., LTD.

Yang Li

Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd.

# 工程研究与应用

Engineering Research and Application

第3卷 第6期 2025年6月刊

主 管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主 办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编 辑 《工程研究与应用》编辑部

ISSN(O): 2993-2742

ISSN(P): 2995-3154

地 址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey  
Park, CA 91754

网 址: <https://www.artdesignnp.com>

## 本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事项如下:

1. 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、翻译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作权在世界范围内免费转让给本刊。
2. 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单位造成的全部损失。
3. 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作者的身份真实。
4. 论文未曾以任何形式公开发表过。
5. 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。



## 工程科学 | ENGINEERING SCIENCE

- 001 修井作业油管自动传输机的研制与应用 王波, 汪勇彪, 管俊, 苏占雄, 王军  
Development and Application of Automatic Transmission Machine for Oil Pipe in Well  
Repair Operations Wang Bo, Wang Yongbiao, Guan Jun, Su Zhanxiong, Wang Jun
- 004 超载预压技术在软土路基工程中的应用实践与效益分析 李扬, 谢模红  
——以江北快速路武湖段为例  
Application and Practice of Overload Preloading Technique in Soft Soil Subgrade  
Engineering and Benefit Analysis — Case Study of Wuhu Section of Jiangbei  
Expressway Li Yang, Xie Mohong
- 007 机械工程技术对集装箱轻量化设计的推动作用探究 张洪勇  
Research on the Role of Mechanical Engineering Technology in Promoting the  
Lightweight Design of Containers Zhang Hongyong
- 010 机组并网时刻功率参数突变原因分析及功能完善 孙长春  
Analysis of the Causes of Sudden Changes in Power Parameters During  
Grid Connection of the Unit And Improvement of Its Function Sun Changchun
- 014 路基稳定性对沥青路面使用寿命的影响 王旭炜  
The Influence of Roadbed Stability on the Service Life  
of Asphalt Pavement Wang Xuwei
- 017 基于工业 4.0 的 LED 封装制造数字化生产线构建与集成技术研究 王国君  
Research on the Construction and Integration Technology of Digital Production  
Lines for LED Packaging Manufacturing Based on Industry 4.0 Wang Guojun
- 020 化工仪表自动化在安全生产监测中的应用与改进 郑斌, 丛晓东  
The Application and Improvement of Chemical Instrument  
Automation in Safety Production Monitoring Zheng Bin, Cong Xiaodong
- 023 基于数值模拟的砂模铸造充型过程分析及工艺改进 罗育胜  
Analysis and Process Improvement of Sand Mold Casting Filling Process  
Based on Numerical Simulation Luo Yusheng
- 026 线路鸟害故障分析与防治 许莉, 王盛, 李金娥, 李俊锋  
Analysis and Prevention of Bird Damage Faults on  
Overhead Transmission Lines Xu Li, Wang Sheng, Li Jin'e, Li Junfeng
- 030 基于大数据分析的反窃电技术与应用研究 杨卓, 张雪, 吕国昭  
Research on Anti-Stealing Technology and Application  
Based on Big Data Analysis Yang Zhuo, Zhang Xue, Lv Guozhao
- 034 探究人性五大需求对地图绘制的启示与应用 王婷  
Exploring the Enlightenment and Application of the Five Demands  
of Human Nature to Map Drawing Wang Ting
- 038 长输管道地质灾害防范与应对 刘丽涛  
Geological Hazard Prevention and Response for  
Long-distance Pipelines Liu Litao
- 041 结构专业中 BIM 技术的应用现状与发展趋势 董志鹏  
Current Application Status and Development Trends of BIM  
Technology in Structural Engineering Dong Zhipeng
- 044 食品检测技术存在的问题及解决策略探索 胡珍珍, 宋婷婷  
Problems of Food Detection Technology and the Solution  
Strategy Exploration Hu Zhenzhen, Song Tingting
- 047 基于催化裂化装置的关键设备选型与优化设计研究 吴汉东  
Research on Key Equipment Selection and Optimal Design  
of Catalytic Cracking Unit Wu Handong

050	基于政策视角的用地预审与用地报批制度创新探讨 Discussion on Innovation of Land Pre-Examination and Land Application for Approval System Based on Policy Perspective	梁裕敏 Liang Yumin
053	机电安装工程施工中的关键技术与管理策略研究 Research on Key Technologies and Management Strategies in Electromechanical Installation Engineering Construction	商庆良 Shang Qingliang
056	静密封垫片在炼化企业的重要性 The Importance of Static Sealing Gaskets in Refining and Chemical Enterprises	刘双羽 Liu Shuangyu
060	锅炉压力容器检测中的常见事故及检验策略探究 Common Accidents and Inspection Strategies in Boiler and Pressure Vessel Inspection	李自然, 李运成, 刘先发 Li Ziran, Li Yuncheng, Liu Xianfa
063	锅炉检验检测中裂纹问题分析 Analysis of Crack Problems in Boiler Inspection and Testing	于淘, 杨湘, 梁晶 Yu Tao, Yang Xiang, Liang Jing
066	电梯检验检测工作及检测现场安全管理探究 Exploration of Elevator Inspection and Testing Work and Safety Management of Testing Site	廖龙萍, 刘昶熠, 方爱民 Liao Longping, Liu Changyi, Fang Aimin
069	饱和黏土中注浆引起的土体水平变形研究 Research on Horizontal Deformation of Soil Caused By Grouting in Saturated Clay	贺翀, 唐剑华, 尚祖光, 刘澄赤 He Chong, Tang Jianhua, Shang Zuguang, Liu Chengchi
074	风电混塔施工技术与质量控制研究 Research on Construction Technology and Quality Control of Wind Power Hybrid Tower	周浩 Zhou Hao
077	烟草制丝工艺质量影响因素及控制措施分析 Analysis of Influencing Factors and Control Measures of Tobacco Primary Processing Quality	张振武, 朱建松 Zhang Zhenwu, Zhu Jiansong
080	地铁信号系统中车地通信技术的优化与应用研究 Research on Optimization and Application of Train-Ground Communication Technology in Subway Signal System	包安伦, 江松, 李梦豪, 刘嘉诚, 王立新 Bao Anlun, Jiang Song, Li Menghao, Liu Jiacheng, Wang Lixin
083	工程总承包项目沟通管理：关键环节与优化策略探究 Communication Management in Engineering General Contracting Projects: Exploring Key Aspects and Optimization Strategies	李红强 Li Hongqiang
086	基于多传感器融合技术的输油管道泄漏定位方法研究 Research on Leak Location Method of Oil Pipeline Based on Multi-sensor Fusion Technology	李运成, 岳晟, 李自然 Li Yuncheng, Yue Sheng, Li Ziran

建筑科学 | BUILDING SCIENCE

089	精细化管理在民用建筑施工管理中的应用分析 Analysis of the Application of Fine Management in Civil Construction Management	董金凤 Dong Jinfeng
092	公路工程施工现场安全管理标准化建设策略 Strategies for Standardized Safety Management Construction at Highway Engineering Sites	余阳 Yu Yang
095	基于建筑工程管理质量提升的精细化管理应用 Application of Refined Management for Improving the Quality of Construction Project Management	莫德新 Mo Dexin
098	公路工程施工扬尘污染防治技术与管理模式探讨 Discussion on Prevention Technology and Management Mode of Dust Pollution from Highway Construction	严少卿 Yan Shaoqing
101	桥梁工程地基基础检测的重要性及关键技术 Importance and Key Technologies of Foundation Detection in Bridge Engineering	吴青峰 Wu Qingfeng
104	基于智慧工地的建筑工程安全管理研究 Research on Safety Management of Construction Engineering Based on Smart Construction Site	吴建伟 Wu Jianwei
107	智能建造技术驱动下建筑工程管理模式创新与实践路径 Innovation and Practical Path of Construction Engineering Management Mode Driven by Smart Construction Technology	王玲 Wang Ling
110	填石路基施工技术在江北快速路工程中的应用 Application of Stone-Filled Roadbed Construction Technology in Jiangbei Expressway Project	谢模红, 李扬 Xie Mohong, Li Yang
113	后官湖畔的涟漪——第七届世界军人运动会武汉商学院游泳馆建筑设计 Ripples on the Shore of Houguan Lake— Architectural Design of the Wuhan Business School Natatorium for the 7th World Military Games	姜俊杰 Jiang Junjie

水利与港口工程 | WATER CONSERVANCY AND PORT ENGINEERING

116	水利工程勘测设计质量监督管理探讨 Discussion on Quality Supervision and Management of Water Conservancy Engineering Survey and Design	傅天宇 Fu Tianyu
119	水库地形测绘中无人机载雷达的应用 Application of UAV-borne Radar in Topographic Surveying and Mapping of Reservoirs	符家辉 Fu Jiahui
123	基于无人机测绘技术在水利工程测量中的应用 Application of UAV Surveying and Mapping Technology in Hydraulic Engineering Survey	张必斌 Zhang Bibin
128	复杂水域中船舶靠泊操纵关键技术和实践分析 Analysis of Key Techniques and Practices for Ship Docking Maneuver in Complex Waters	曲东庆 Qu Dongqing



# 修井作业油管自动传输机的研制与应用

王波, 汪勇彪, 管俊, 苏占雄, 王军

克拉玛依众城石油装备研究院股份有限公司, 新疆 克拉玛依 834000

DOI:10.61369/ERA.2025060002

**摘 要 :** 小修作业中, 油管的起下作业占用了70% 以上的时间。目前起下油管多采用人工传送方式, 劳动强度大、安全风险高、不易实现修井作业自动化。研制了一种油管传输机, 以机械自动化运作代替人工作业, 实现修井作业中油管的自动化传 输。油管传输机基于西门子 S7-1200 设计, 控制液压系统运行, 与液压吊卡协同工作实现油管在井口与地面管排架之间的自动 化传输。现场试验表明: 该装置可只由一名操作人员遥控操作即实现油管在液压吊卡与地面之间的传输, 大大降低了劳动强 度和劳动风险, 提高了工作效率。

**关 键 词 :** 修井作业; 油管传输; 机械结构; PLC 控制; 液压系统

## Development and Application of Automatic Transmission Machine for Oil Pipe in Well Repair Operations

Wang Bo, Wang Yongbiao, Guan Jun, Su Zhanxiong, Wang Jun

Karamay Zhongcheng Petroleum Equipment Research Institute Co., Ltd. Karamay, Xinjiang 834000

**Abstract :** In minor repair operations, the lifting and lowering of oil pipes takes up more than 70% of the time. At present, manual transportation is commonly used for lowering oil pipes, which has high labor intensity, high safety risks, and is not easy to achieve automation in well repair operations. A tubing transfer machine has been developed to replace manual operation with mechanical automation, achieving automated transfer of tubing during well repair operations. The oil pipe transmission machine is designed based on Siemens S7-1200, which controls the operation of the hydraulic system and works in conjunction with the hydraulic hoist to achieve automated transmission of oil pipes between the wellhead and the ground pipe rack. Field tests have shown that the device can be remotely operated by only one operator to achieve the transmission of oil pipes between hydraulic elevators and the ground, greatly reducing labor intensity and risks, and improving work efficiency.

**Keywords :** well repair operation; oil pipeline transmission; mechanical structure; PLC control; hydraulic system

在油田开发过程中, 为保持油气产量长期稳定, 进一步 挖掘油藏剩余潜力和提高采收率, 修井作业工作量将越来越 大<sup>[1]</sup>。在目前的小修作业中, 70% 以上的时间是用来起下油管<sup>[2]</sup>。目前, 国内大部分油田修井作业一直采用吊卡与惯性小滑车互相配合对管柱进行起吊与下甩, 4 人协同、轮流交换的作业方式<sup>[3-4]</sup>。人工传送的方式不仅工人劳动强度大, 安全风险高, 而且难以实现修井作业自动化<sup>[5]</sup>。在以加强油气田工作效率、实现资源合理利用为核心的新时代油气生产背景下, 本文中介绍的油管自动传输机以机械自动化作业代替人工作业, 减轻了工人劳动强度和安全风险、降低了修井作业成本, 具有广阔的应用价值和推广前景。

### 一、总体结构设计

该油管自动传输机总体由控制系统、液压系统、机械机 构部分 3 大模块组成。装置的整体设计原理框图如图 1 所示。其中控制系统是油管自动传输机的控制核心, 液压系统为传 输机整体提供动力来源, 机械结构中各运动单元由各自对应 的液压缸或液压马达驱动。由遥控按钮下达动作指令至配电 柜中的西门子 S7-

1200 型 PLC 控制器, 通过 PLC 控制器控制各 液压缸、液压马达对应的电磁阀的开度, 从而 实现各动作单元进行相 应的动作<sup>[6]</sup>。

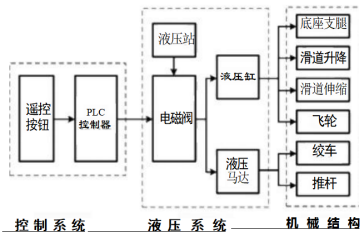


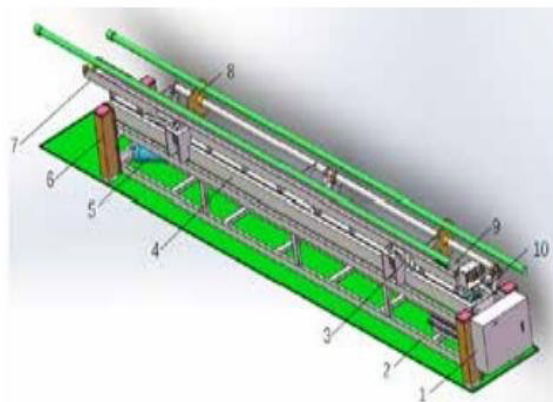
图1 油管传输机总体结构框图

基金项目: 本文系新疆维吾尔自治区科学技术厅重点科研项目: 面向油田修井作业的成套智能装备研发。

作者简介: 王波 (1981.03-), 男, 汉族, 四川省蓬溪县人, 大专, 研究方向: 油田修井机及修井作业配套设备改造。

## 二、机械结构

油管自动传输机械结构部分主要由固定底座、支腿、滑道、绞车、飞轮、推杆等组成,如图2所示。推杆和飞轮机构实现油管在管排架和输送滑道之间的上下动作,通过滑道的升降、伸缩和绞车的移动将油管输送至井口。



1- 配电箱; 2- 固定底座; 3- 推杆; 4- 升降机构; 5- 主油缸;  
6- 支腿; 7- 伸缩机构; 8- 飞轮; 9- 绞车; 10- 副油缸

图2 传输机机械结构图

### （一）固定底座

固定底座为各运动单元的安装基座,由钢材焊接而成。底座四角安装四个高度可调的液压支腿,四个支腿底部安装在接油盒上,防止油污落地。底座两侧分别安装两个推杆和飞轮,滑道安装于底座上部位置居中。配电柜安装于滑道非起升端一侧的底座前部,操作便利<sup>[7]</sup>。

### （二）支腿与滑道

修井作业现场环境一般比较恶劣,地面可能存在高低不平现象,因此采用液压油缸代替固定支腿,4个液压支腿高度可独立调节,液压支腿行程500mm。在高低不平的作业场地可通过调节各支腿高度保证传输机水平安放,防止传输机侧翻和油管滑落伤人。同时可调节滑道位置与地面管排架高度一致,便于油管上下<sup>[8]</sup>。

滑道用于将地面油管升举后送至井口,由升降机构与伸缩机构两部分组成,分别由主副液压油缸驱动<sup>[9]</sup>。滑道升降机构的升降端与主液压油缸连接,主液压油缸铰接于底座底部,固定端与固定底座成铰链连接,通过油缸行程变化实现滑道升降动作,其最大升起角度为30°,起升高度为3米。滑道伸缩机构安装在升降机构内部,一端与副液压油缸连接,油缸另一端连接在滑道固定端,油缸行程的变化控制滑道伸缩长度,最大伸长长度为3米。

### （三）绞车与飞轮和推杆

绞车安装于滑道上。表面挖有三排凹槽,当液压吊卡抓取油管起吊时,油管一端卡入凹槽以防止滑落,绞车跟随油管沿滑道移动。绞车通过钢丝绳由安置于滑道固定端的液压马达驱动。飞轮和推杆用于使油管在滑道和管排架之间上下。推杆安装底座外侧,通过液压马达驱动可绕定轴在0至90°范围内摆动。飞轮通

过连杆机构由液压缸驱动。

### （四）油管传输机工作流程

油管传输机工作分为送油管和下油管两个工作流程,流程简图如图所示。

### （五）送油管与下油管

向井口输送油管时,液压缸通过连杆机构带动飞轮转动,飞轮勾齿勾取油管送至滑道并由推杆扶正,主液压油缸推动滑道升起至合适位置,副液压油缸推动滑道伸缩机构伸长将油管一端送至井口处,待液压吊卡抓取油管提升,绞车随油管沿滑道前进至顶端,完成送油管工作。

在接取井口起出的油管时,滑道升降机构升起,滑道伸缩机构伸长至井口合适位置,绞车前进至滑道顶端,油管下端放置绞车凹槽内,绞车后退将油管平稳放置在滑道,滑道伸缩机构缩回,滑道升降机构下降至水平,然后推杆将油管推送至飞轮齿槽处,飞轮转动将油管甩至管排架,完成下油管工作。

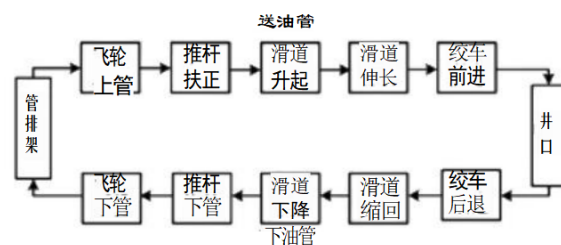


图3 油管传输机流程图

## 三、液压系统

液压系统设计液压站采用分离式结构,使用32排量高压齿轮泵,由18.5 kW电机直联带动,系统润滑性好,瞬变小;泵站出口配置了压力表、安全阀、减压阀等标准设备,液压系统执行元件包括专用9路4WE10J31B/CG24N9Z5L型电磁换向阀,1支 $\phi 160\text{mm}$ 举升液压缸,1支 $\phi 160\text{mm}$ 伸缩液压缸,4支 $\phi 100\text{mm}$ 支腿液压缸和4支50ml/r的液压马达。液压缸全部采用国产出口级液压缸,进口密封件、纯铜线圈,换向顺畅灵敏,马达是带有轴承支撑的轴配流液压马达,可承受加大的径向力,密封圈全部采用进口,承受背压高,使用寿命长,确保设备在各种状况下的正常运行<sup>[10]</sup>。

## 四、控制系统

控制系统集成安装在控制柜内,主要由控制电路与遥控系统组成。遥控系统用于对控制电路下达动作指令,控制电路接收到动作指令后控制各电磁换向阀动作实现各种动作。

### （一）控制电路

控制电路是整个控制系统的核心,控制电路以西门子S7-1200PLC控制器为控制核心、连接了变压器、继电器、电源开关、动作开关、接线端子、警铃、遥控接收器等。遥控接收器接收遥控器发出的动作指令传输至PLC控制器,

PLC 控制器依据预先编写的逻辑程序，将操作指令和限位开关与位移传感器的反馈信号进行处理，然后对被控对象发出通断命令。为防止遥控系统故障，控制柜面板同时安装有与遥控器功能相同的动作开关。

### （二）遥控系统

遥控系统采用台湾禹鼎 (TELECRANE)F24-14S 型工业无线遥控器，采用 400MHz 工业通讯频段，有效距离为 100 m。遥控器配有 14 个双速按键，其中 12 个为功能按键，1 个急停按键，1 个启动按键，1 个旋转钥匙，1 个警报按键。其工作温度范围为 -40℃ ~+85℃，适应国内绝大多数修井作业区域。

遥控系统设有自动与手动两种操作模式。进行手动模式操作时，先将控制柜模式选择开关打到“手动”，而后由遥控器上的“飞轮上管”“飞轮下管”“推杆上管”“推杆下管”“滑道上升”“滑道下降”“滑道伸长”“滑道缩回”“绞车前进”“绞车后退”等按键完成手动控制操作。进行自动模式操作时，将模式开关打到“自动”模式，按下“参数记忆”按键，然后根据手动操作模式完成一次上、下管操作，控制系统会记录传输机升降机构升降高度和伸缩机构伸长长度，完成后按下“参数设置”按键，此时可使用遥控器“一键式上管”“一键式下管”按键，进而完成油管自动化传输。

## 五、现场应用

目前，该油管自动传输机已在克拉玛依油田经过多次现场试

验，如图所示，并已投入建业能源有限公司多个修井作业队使用。通过现场试验与作业队修井现场使用效果验证，该油管自动化传输机可只由一名操作人员通过遥控设备或配电柜面板旋钮完成油管传输工作，手动、自动控制模式效果均达到设计要求，输送高度和起升重量均达可满足小修作业需要，平均输送速度可达 2 根 / 分钟，满足了小修作业中油管传输工作的需要。

## 六、结论

1. 该油管自动化传输机取代了传统修井作业中靠人力搬运的油管传输方式，以机械化自动控制代替，传输效果和传输能力均满足了小修作业的需要。可以大量减少修井作业人员数量，同时降低了修井作业劳动强度，降低了作业人员的安全风险，对降低修井作业成本、提高修井作业效率和安全性有十分重要的意义。
2. 该油管自动化传输机自动化程度较高，设计结构简单、生产成本较低，可与目前大多数修井设备配套使用，便于大范围普及。
3. 该油管自动化传输机与本公司自主研发的最新型自动修井车配套使用可实现 2 ~ 3 名操作人员即可完成小修作业工序，对完全实现修井作业自动化具有十分重要的指导意义。

## 参考文献

- [1] 孙昊. 连续油管修井作业技术的应用探讨 [J]. 化学工程与装备, 2018(06): 99-100.
- [2] 沈银虎. 油田修井作业质量管理存在的问题及解决策略 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024(24): 19-21.
- [3] 何宝林; 陈小伟; 类淑菊; 黄儒康. 海洋石油修井作业安全智慧评估方法研究 [J]. 石油和化工设备, 2025(02): 13-15.
- [4] 吴小亮; 赵天增; 朱宏业. 提高井下修井作业施工中质量管理的对策探讨 [J]. 石化技术, 2023(12): 230-232.
- [5] 赵光磊. 试油修井作业过程中的安全管理策略 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024(03): 60-62.
- [6] 杨正军; 晁伟伟. 延长油田修井作业中油田气层的保护技术 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024(13): 157-159.
- [7] 王宏亮. 油田修井作业自动化装置的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023(10): 104-106.
- [8] 汪迪; 黄聪聪; 常双利. 水下井口轻型修井作业技术及设备发展概述 [J]. 海洋工程装备与技术, 2023(02): 126-130.
- [9] 刘成贵; 黄大勇. 清洁修井作业关键技术及发展方向 [J]. 设备管理与维修, 2022(23): 127-131.
- [10] 孟祥革. 油田修井作业自动化装置的应用 [J]. 化学工程与装备, 2022(03): 55-56.

# 超载预压技术在软土路基工程中的应用实践与效益分析——以江北快速路武湖段为例

李扬, 谢模红

武汉航空港发展集团有限公司, 湖北 武汉 432200

DOI:10.61369/ERA.2025060005

**摘要：**针对长江中下游地区软土地基路基沉降控制难题，以武汉市江北快速路武湖段工程为依托，开展超载预压技术的工程应用与管理效益研究。通过地质勘察精细化分析、加载参数优化设计、施工流程标准化管控及智能监测体系构建，系统阐述该技术在软基处理中的关键实施路径。研究表明：超载预压结合分层监测技术可将工后沉降有效控制在30 cm以内，较传统刚性桩法节约成本15%、缩短工期2个月，路面平整度达标率提升至98%。构建了“设计—施工—监测—管理”一体化技术体系，提供了可复制的“技术增效+绿色管控”解决方案，对同类工程的沉降控制、成本优化及风险防控具有重要参考价值。

**关键词：**软土路基；超载预压；沉降控制；动态监测

## Application and Practice of Overload Preloading Technique in Soft Soil Subgrade Engineering and Benefit Analysis — Case Study of Wuhu Section of Jiangbei Expressway

Li Yang, Xie Mohong

Wuhan Aviation Port Development Group Co., Ltd. Wuhan, Hubei 432200

**Abstract：** To address the challenge of subgrade settlement control in soft soil foundations in the middle and lower reaches of the Yangtze River, this study focuses on the Wuhu Section of Jiangbei Expressway in Wuhan, investigating the engineering application and management benefits of surcharge preloading technology. Through refined geological survey analysis, optimized design of loading parameters, standardized construction process control, and the establishment of an intelligent monitoring system, the critical implementation pathways of this technology in soft soil treatment are systematically elaborated. The research demonstrates that surcharge preloading combined with layered monitoring technology effectively restricts post-construction settlement to within 30 cm, achieving a 15% cost reduction and a 2-month schedule acceleration compared to traditional rigid pile methods, while improving pavement flatness compliance to 98%. An integrated technical framework of 'design-construction-monitoring-management' is established, providing a replicable solution of 'technology-driven efficiency enhancement + green management.' This offers significant reference value for settlement control, cost optimization, and risk mitigation in similar projects.

**Keywords：** soft soil subgrade; overload preloading; settlement control; dynamic monitoring

## 引言

在我国长江中下游冲积平原区，软土地基具有高压缩性、低渗透性及流变性显著等工程特性，导致路基工后沉降控制成为高等级公路建设的核心技术难题<sup>[1]</sup>。传统刚性桩法（如水泥搅拌桩、CFG桩）虽能快速提升地基承载力，但存在造价高昂、施工扰动大及环境影响突出等问题，难以满足绿色建设要求<sup>[2-3]</sup>。超载预压技术通过超载荷载加速软土排水固结，兼具经济性与环保性，但其固结效率受地质条件、加载参数及监测精度影响显著，亟需结合工程实践开展技术优化与管理创新。

国内外学者针对超载预压开展了系列研究：张军民等<sup>[4]</sup>通过室内试验揭示了超载预压下软土固结变形规律；凌道盛等<sup>[5]</sup>分析了城市软基处理中超载预压的场地适应性限制；龚晓南等<sup>[6]</sup>改进了基于双曲线模型的沉降预测方法，然而对“技术实施—过程管控—效益评价”一体化管理体系的研究仍显不足。

第一作者简介：李扬（1981—），男，高级工程师，硕士研究生，研究方向：市政工程与软基处理技术。





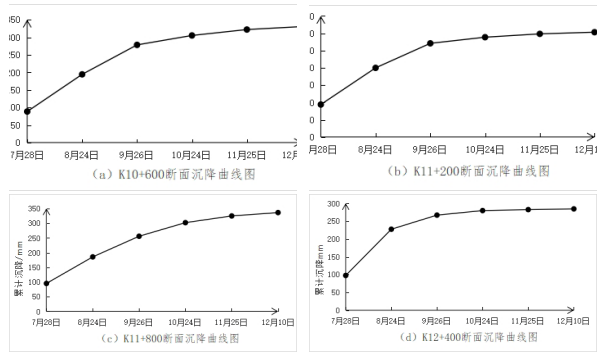


图2 预压期沉降曲线图

## (二) 成本节约与工期优化

### 1. 经济性优势显著

与传统刚性桩法相比，超载预压技术节约地基处理成本约15%；预压土循环利用减少弃土场租赁费用，降低材料采购成本。综合成本节约率达18%，超额完成项目成本控制目标。

### 2. 工期优化效果突出

通过动态加载控制和施工流程优化，软基处理阶段实际用时5.5个月，较计划工期（6个月）提前0.5个月，整体项目工期缩短2个月，提前实现通车目标，社会效益显著。

## (三) 安全环保与风险管理成效

### 1. 绿色施工达标

施工期噪声监测结果显示，超载预压作业区噪声值低于限值75dB；预压土运输采用封闭式渣土车，扬尘污染指数较刚性桩施工降低40%。

### 2. 风险可控性提升

智能监测体系累计采集数据10万条，预警响应及时率100%，精准识别K12+300段软土层厚度超设计15%的异常工况，通过分区加载（增加0.3 m 超载高度、延长预压15 d）避免沉降超标，提升风险应对效率。

## 四、技术局限性与改进措施

### (一) 场地适应性限制

超载预压需占用红线外场地作为堆载区，在城市密集区实施

时场地不足，可结合 BIM 技术进行场地三维建模，预留备用场地应对突发情况。

### (二) 边坡稳定性风险

坡度较陡或压实度不足堆载区易发生滑坡，可通过堆载前修筑反压护道、设置纵向排水沟和横向盲沟、采用加筋土工布包裹预压土体，提升整体稳定性。

### (三) 地质变异性影响

局部区域软土层厚度超设计值，导致沉降量超出预估，可通过建立地质动态勘察机制，实时更新 BIM 地质模型；采用“分区加载”策略，通过差异化设计确保处理效果。

## 五、结论与启示

### (一) 研究结论

超载预压技术，通过“荷载参数优化 + 动态监测控制”，可有效解决软土地基工后沉降问题，将工后沉降控制在设计范围内；融合绿色施工理念，通过材料循环利用与工艺优化，实现成本节约15%、工期缩短近2个月、有效提升环保效益，构建了技术与管理协同增效的软基处理模式；智能监测与风险预警体系，保障超载预压成功实施。

### (二) 工程启示

强化地质勘察精度，结合 BIM 技术优化堆载场地规划；建立多参量动态监测系统，实现“监测 - 分析 - 决策 - 调整”的智能化管理；推广预压材料循环利用技术，探索工业废料在超载预压中的应用，降低项目环境影响与资源消耗；制定分级预警与应急处理方案，提升项目抗风险能力。

## 参考文献

- [1] 张军民, 李强, 王刚. 软土地基超载预压固结特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 890-896.
- [2] 李建中, 陈伟, 刘洋. 高速公路软基处理技术经济性对比分析 [J]. 公路交通科技, 2020, 37(3): 25-32.
- [3] JTG/T D31-02-2013, 公路软土地基路堤设计与施工技术规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [4] 刘松玉, 吴春林, 章定文. 软土地基处理技术最新进展与工程实践 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2019: 120-135.
- [5] 凌道盛, 郑刚, 周航. 城市软基处理中超载预压技术的应用限制与对策 [J]. 岩土工程技术, 2018, 32(2): 65-70.
- [6] 龚晓南, 胡敏, 张杰. 基于双曲线模型的软基沉降预测方法改进 [J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 2031-2038.

# 机械工程技术对集装箱轻量化设计的推动作用探究

张洪勇

天津中集集装箱有限公司, 天津 300461

DOI:10.61369/ERA.2025060006

**摘要：**在全球贸易蓬勃发展以及环保、成本控制要求趋严的背景下，集装箱轻量化设计成为行业关键需求。机械工程技术持续创新为其提供了有力支持。在设计理论方面，拓扑优化、模块化设计等先进理念以及多学科协同设计方法，优化了集装箱结构与材料选择；材料工程技术创新带来铝合金、碳纤维增强复合材料等轻质材料的应用，同时提升了现有材料性能；机械制造工艺的优化，如激光切割、搅拌摩擦焊接等先进工艺的应用，以及制造工艺的创新，保障了轻量化设计的实现。这些技术共同作用，降低了集装箱运输能耗，提高了运输效率，推动了集装箱运输行业的可持续发展，并且随着机械工程技术进步，集装箱轻量化设计前景广阔。

**关键词：**机械工程技术；集装箱轻量化设计；设计理论革新；材料工程技术；制造工艺优化

## Research on the Role of Mechanical Engineering Technology in Promoting the Lightweight Design of Containers

Zhang Hongyong

Tianjin CIMC Containers Co., Ltd. Tianjin 300461

**Abstract：** In the context of booming global trade and increasingly stringent environmental protection and cost control requirements, lightweight container design has become a key demand in the industry. Continuous innovation in mechanical engineering technology has provided strong support for this. In terms of design theory, advanced concepts such as topology optimization and modular design, as well as multidisciplinary collaborative design methods, have optimized container structure and material selection. Innovations in materials engineering technology have led to the application of lightweight materials such as aluminum alloys and carbon fiber-reinforced composites, while improving the performance of existing materials. The optimization of mechanical manufacturing processes, such as the application of advanced processes like laser cutting and friction stir welding, as well as innovations in manufacturing processes, have ensured the realization of lightweight design. These technologies work together to reduce energy consumption in container transportation, improve transportation efficiency, and promote the sustainable development of the container transportation industry. With the advancement of mechanical engineering technology, the lightweight design of containers has broad prospects.

**Keywords：** mechanical engineering technology; lightweight design of containers; innovation in design theory; materials engineering technology; optimization of manufacturing processes

## 引言

在全球化经济浪潮的强劲推动下，集装箱运输凭借装卸高效、转运便捷等显著优势，已然成为国际贸易货物运输的中流砥柱。近年来，全球贸易量呈持续攀升态势，与此同时，环保标准和成本控制要求愈发严苛。在此背景下，集装箱的轻量化设计成为行业突破发展的关键方向。机械工程技术作为一门综合性学科，凭借在材料力学、结构优化等理论层面，以及加工工艺等实践环节的持续创新，为集装箱轻量化设计筑牢技术根基，显著推动该领域的创新发展。下文将深入探讨其推动作用。

## 一、机械工程设计理论革新助力集装箱轻量化设计

在集装箱设计迈向轻量化的进程中，机械工程设计理论层面的革新发挥着极为关键的引领作用。它从理念革新与方法优化两个维度出发，为集装箱轻量化设计注入了全新的活力，极大地推

动了行业的技术进步。以下将从先进设计理念的引入以及多学科协同设计两个方面，深入探讨其在集装箱轻量化设计中的助力作用。

### （一）先进设计理念的引入

机械设计是一种将机械的工作原理、运动模式、力和能量传

输方式、结构、外在形式等作为基础，通过构思、集成、计算和归纳，最终使机械装备具备预期性能的设计<sup>[1]</sup>。机械工程设计理论的持续演进，为集装箱轻量化设计开辟了前所未有的路径。过去，集装箱设计多将重点置于强度和耐用性上，对重量的考量相对不足。但现代机械设计理论秉持创新思维，强调在满足多样化功能需求的基础上，借助优化结构与合理选择材料来达成产品的轻量化。

以拓扑优化理论为例，其核心在于对结构的材料分布进行科学优化。通过精确的算法和模拟分析，精准识别并去除那些对结构性能贡献较小的材料部分，在不损害结构整体性能的情况下，显著减轻结构重量<sup>[2]</sup>。将这一理论应用于集装箱设计时，能够针对集装箱的框架结构进行深度优化，精准确定材料的最优分布，有效减少冗余材料，进而推动集装箱实现轻量化。

模块化设计理念在集装箱轻量化进程中同样发挥着重要作用。模块化设计把集装箱拆分为多个功能模块，每个模块都具备独立设计、制造和组装的特性。在这一过程中，针对每个模块采用轻量化材料，并进行精心的结构设计优化，实现各个模块的轻量化。随后，将这些轻量化的模块进行有序组装形成完整的集装箱。如此一来，既能够充分保证集装箱在运输等实际应用场景中的整体性能，又成功达成了轻量化的设计目标，为集装箱行业的发展注入新的活力。

## （二）多学科协同设计

集装箱的轻量化设计是一项极具复杂性的系统工程，它深度融合机械、材料、力学等多个学科领域，每个学科都在其中扮演着不可或缺的关键角色<sup>[3]</sup>。机械工程领域所倡导的多学科协同设计方法，恰似一条纽带，将各学科的独特优势紧密整合，为实现集装箱的优化设计提供了有力保障。

在集装箱的设计过程中，机械工程师肩负着整体架构规划的重任，他们需要综合考虑运输需求、空间利用以及制造工艺等诸多因素，精准确定集装箱的外形尺寸和框架结构，为后续的设计工作奠定坚实基础。材料科学家则依据机械工程师提出的设计要求，深入研究并筛选适配的轻量化材料。这不仅涉及对各类新型材料的探索，还需要对所选材料的强度、密度、耐腐蚀性等关键性能进行严格的测试和评估，确保其能够满足轻量化与功能性的双重需求。力学专家通过运用专业知识，对集装箱在不同运输工况下的受力情况展开全面分析，从静态承载到动态冲击，精确模拟各种受力场景<sup>[4]</sup>。基于这些分析结果，他们为结构设计和材料选择提供可靠的理论依据，从而保障集装箱在减轻重量的同时，依然具备足够的强度和稳定性，能够安全、可靠地投入使用。通过多学科的紧密协作，各学科的优势得以充分发挥，实现了集装箱轻量化设计的最优化，推动集装箱行业朝着更高效、更环保的方向发展。

## 二、材料工程技术创新为集装箱轻量化提供物质基础

在集装箱轻量化的探索进程中，材料的革新是实现这一目标的物质根基。材料工程技术的持续创新，不仅为集装箱轻量化提

供了多样化的轻质材料选择，还进一步挖掘现有材料的潜力，提升其性能。这不仅有力地推动了集装箱轻量化设计的实现，还为整个行业的可持续发展筑牢了基础。下面将从轻质材料的研发与应用、材料性能的提升与改进两个方面进行详细阐述。

### （一）轻质材料的研发与应用

随着材料工程技术持续创新，为集装箱轻量化设计创造了极为有利的条件，提供了种类丰富的轻质材料选择。铝合金凭借其突出特性，成为当前集装箱轻量化设计中应用广泛的材料<sup>[5]</sup>。它密度低，意味着在保证结构完整性的同时可有效减轻重量；强度高，能够承受运输过程中的各种应力；耐腐蚀性能优异，大大延长了集装箱的使用寿命。与传统钢制集装箱相比，铝合金集装箱重量能减轻20%~30%，而且具备良好的隔热、隔音性能，在侧板、顶板和底板等部件采用铝合金，能直接降低集装箱整体重量，提升运输效率。

复合材料，像碳纤维增强复合材料、玻璃纤维增强复合材料等，在集装箱轻量化设计领域展现出巨大潜力。它们比强度高，在承受相同载荷时可减少材料用量；比模量高，保证结构具有良好的刚性；可设计性强，这一特性尤为关键。以碳纤维增强复合材料为例，用其制成的集装箱比传统钢制集装箱重量轻30%~50%，大幅降低运输能耗<sup>[6]</sup>。同时，根据集装箱不同的使用场景，如长途海运、内陆运输等，复合材料能够定制不同的材料结构和性能，满足多样化需求，为集装箱轻量化设计开辟了新的发展方向。

### （二）材料性能的提升与改进

在集装箱轻量化设计的材料研发领域，除了积极探寻新型轻质材料，材料工程技术还聚焦于提升和优化现有材料性能，以此契合集装箱轻量化设计的严苛要求。通过表面处理、合金化等一系列专业技术手段，能够有效增强材料的强度、硬度以及耐腐蚀性等关键性能，在维持材料性能稳定的基础上，合理减少材料的使用量，进而达成集装箱的轻量化目标<sup>[7]</sup>。

以钢材为例，表面涂层处理是一种广泛应用且效果显著的技术。在钢材表面覆盖特定涂层，能够在其表面形成一层保护膜，有效阻隔外界腐蚀性物质的侵蚀，显著提高钢材的耐腐蚀性能。这不仅延长了钢材的使用寿命，还意味着在满足使用要求的情况下，可以适当减少钢材的厚度。厚度降低，钢材重量自然减轻，直接推动了集装箱的轻量化进程。

合金化技术同样发挥着重要作用。在钢材中精准添加适量的锰、硅、铬等合金元素，这些元素会与铁基体发生复杂的物理化学反应，从而改变钢材的组织结构。锰元素能有效提高钢材的强度和韧性，增强其抵抗变形和断裂的能力；硅元素有助于提高钢材的强度和硬度；铬元素则主要提升钢材的耐腐蚀性。通过合金化，钢材在实现轻量化的同时，依然能够具备足够的强度和韧性，满足集装箱在各种复杂运输环境下的使用要求。

## 三、机械制造工艺优化保障集装箱轻量化设计的实现

在集装箱轻量化设计从理念走向现实的过程中，机械制造工



艺发挥着不可替代的保障作用。制造工艺的持续优化，不仅让先进技术得以落地实施，还通过创新手段不断突破原有局限，为轻量化设计目标的达成提供了坚实支撑。以下将从先进制造工艺的应用以及制造工艺的优化与创新两个维度，深入探讨其对集装箱轻量化设计的推动作用。

### （一）先进制造工艺的应用

机械制造工艺的持续进步，为集装箱轻量化设计的落地实施构筑起坚实的技术保障体系。其中，激光切割技术凭借诸多突出优势，在集装箱制造领域获得了广泛应用。其切割精度极高，能够以极高的准确性切割出各种复杂形状的零部件，确保尺寸误差控制在极小范围内<sup>[9]</sup>。同时，切口质量良好，边缘光滑整齐，无需额外的精细加工，有效提升了生产效率。而且，热影响区小，极大地减少了对切割部件材质性能的不良影响。通过采用激光切割技术，能够最大限度地减少材料的浪费，显著提高材料的利用率。这不仅降低了集装箱的制造成本，还直接减轻了集装箱的重量，为轻量化设计提供了有力支持。

焊接技术作为集装箱制造的核心工艺，对集装箱的强度和密封性起着决定性作用。近年来，随着焊接技术的不断创新发展，搅拌摩擦焊接、激光焊接等新型焊接工艺逐渐在集装箱制造中崭露头角。以搅拌摩擦焊接为例，它具有焊接接头强度高的特点，能够使焊接部位的力学性能与母材相近甚至更优，确保集装箱整体结构的稳固<sup>[9]</sup>。而且，该工艺在焊接过程中产生的变形极小，几乎不会出现焊接缺陷，有效提高了集装箱的焊接质量。与此同时，由于焊接质量的提升，可适当减少焊接材料的使用量，进而实现集装箱的轻量化目标，有力推动了集装箱制造行业的发展。

### （二）制造工艺的优化与创新

在集装箱轻量化设计的推动下，机械制造企业积极应对挑战，不断在制造工艺上进行优化与创新。在生产流程方面，企业深入剖析每一个环节，对工艺流程展开全面且细致地优化。通过严谨地分析与研究，去除那些不必要的加工工序，使生产过程更加简洁高效。这一举措不仅极大地提高了生产效率，减少了生产周期，还显著降低了生产成本，提升了企业的经济效益。

其中，自动化生产线的采用成为关键的发展方向。借助先进的自动化设备与技术，实现了集装箱零部件从加工到组装的全自动化操作<sup>[10]</sup>。自动化生产线凭借其高度的精准性和稳定性，不仅能够快速完成大量零部件的生产任务，而且可以保证产品质量始终维持在较高水平，有效避免了人工操作可能带来的误差和质量波动。

与此同时，为适应轻量化材料的特性，制造企业大力开展工艺创新。以复合材料为例，这类材料具有比强度高、可设计性强等优点，但对加工工艺要求也较为苛刻。为此，企业研发出真空袋压成型、树脂传递模塑成型等先进的成型工艺。这些工艺能够精准控制复合材料在成型过程中的温度、压力等参数，确保复合材料零部件具备优异的质量和性能，为集装箱轻量化设计的最终实现提供了不可或缺的技术支撑。

## 四、结束语

机械工程技术在设计理论、材料工程和制造工艺等多个关键维度持续创新发展，为集装箱轻量化设计构建起一套全方位、多层次的技术支持体系。在设计理论层面，先进理念的引入与多学科协同设计方法的应用，从根源上优化了集装箱的设计思路，提升设计的科学性与合理性。材料工程领域，轻质材料的研发与应用，以及对现有材料性能的提升改进，为轻量化提供了坚实的物质基础。制造工艺的优化和创新，则确保了轻量化设计能够精准落地。

通过这一系列举措，成功实现了集装箱的轻量化设计。这不仅有效降低了运输过程中的能耗，减少了能源成本与环境污染，还显著提高了运输效率，增强了集装箱运输行业的竞争力，推动其朝着可持续方向发展。展望未来，随着机械工程技术持续突破，集装箱轻量化设计将不断拓展边界，迎来更广阔的发展空间，在全球贸易的大舞台上发挥更为关键的作用，有力促进全球贸易的繁荣。

## 参考文献

- [1] 敖国安. 新型机械设计在汽车工程中的应用 [J]. 汽车测试报告, 2024, (10): 14-16.
- [2] 童晖. 港口装卸机械振华重工完成世界首创 ABC 岸边集装箱起重机方案设计 [J]. 起重运输机械, 2021, (09): 34-35.
- [3] 陈哲, 周琳, 李强. 集装箱载铁矿石智能机械取样设备系统探究 [J]. 质量与认证, 2024, (06): 42-44. DOI: 10.16691/j.cnki.10-1214/t.2024.06.008.
- [4] 唐军, 樊连海, 钱世江, 等. 新型集装箱用木地板外部机械强度损伤（破坏）因素的力学分析与探究 [J]. 林产工业, 2023, 60(08): 43-46. DOI: 10.19531/j.issn1001-5299.202308008.
- [5] 庞国斌, 吴婷婷, 黄运. 智慧型机械式冷藏集装箱油电混合电力包设计 [J]. 电工技术, 2023, (14): 112-114. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.14.032.
- [6] 丁飞虎, 张斌, 牛建涛, 等. 自动化集装箱码头变电所机械通风及空调远程控制系统设计 [J]. 水运工程, 2016, (09): 167-170. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2016.09.035.
- [7] 彭宜蕾, 封学军, 顾建, 等. 基于发动机活动的集装箱港作机械排放清单研究 [J]. 安全与环境学报, 2017, 17(03): 1136-1141. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2017.03.061.
- [8] 宋海涛, 张连钢, 杨杰敏, 等. 利用堆场机械称重系统提升集装箱码头对外服务的探讨 [J]. 中国水运 (下半月), 2015, 15(14): 35-37.
- [9] 于绍政, 孙冬石, 陈靖, 等. 自动化集装箱码头机械配置仿真优化研究 [J]. 系统仿真学报, 2019, 31(12): 2750-2757. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0335.
- [10] 卓宏明, 侯舟波. 四位一体虚实结合的高职专业教学改革——以港口集装箱机械与输送机机械课程为例 [J]. 物流工程与管理, 2019, 41(01): 148-150.

# 机组并网时刻功率参数突变原因分析及功能完善

孙长春

国能国华（北京）燃气热电有限公司，北京 100018

DOI:10.61369/ERA.2025060035

**摘 要：** 本文对机组并网时刻功率参数突变的原因进行分析，并针对其影响在控制功能上进行完善，进而提升了设备可靠性。  
**关 键 词：** 功率参数

## Analysis of the Causes of Sudden Changes in Power Parameters During Grid Connection of the Unit And Improvement of Its Function

Sun Changchun

Guoneng Guohua (Beijing) Gas Thermal Power Co., Ltd. Beijing 100018

**Abstract：** This article analyzes the reasons for the sudden change of power parameters during the grid connection of the unit, and improves the control function in response to its impact, thereby enhancing the reliability of the equipment.

**Keywords：** power parameters

### 引言

2023年6月20日20:27:04,某厂#2燃机(M701F4型)并网时刻功率参数由0大幅突变至116.066MW持续1秒,随后在7秒钟内快速下降至正常功率25MW左右。#2燃机CSO(控制信号输出)信号正常,无突变。因并网功率数突变,联锁TCA至高压汽包调整门开至4.9%,TCA(冷却空气系统)至高压汽包调整门后电动门全开(功率值大于60MW联开整门电动门),由于以上两个阀门开启,使得低温水(113℃左右)进入高温(312℃)的高压汽包,造成撞管。#2燃机启动前,机组运行模式为一拖一运行方式,即#1燃机带汽机运行,机组协调在手动控制方式。#2机并网时刻因功率数大幅突变,使得机组总功率参数由389MW突变至499MW。因#2燃机启动阶段,机组未投协调控制,因此未对正常运行机组构成影响。

### 一、原因分析

(1) 对功率表信号输出回路电缆绝缘、屏蔽等进行检查,信号回路是由电气柜先传输到TCS系统,再由TCS系统传输至DCS系统,经查整个信号回路接线正常,信号线路屏蔽层有可靠的电气连续性,且同一线路屏蔽层只有一个接地点,无浮空或重复接地。

(2) #2燃机并网时刻,来自TCS系统CSO指令信号正常,无突变,可排除#2燃机控制指令突变因素。燃机空负荷运行时CSO约为25%~27%;并网时刻CSO约为30%~31%,输出功率约为20MW~22MW,与以往相同。由于并网时刻CSO为30.5%,且不存在燃料阀(燃料值班流量控制阀、燃料主A流量控制阀、燃料主B流量控制阀、燃料顶环流量控制阀)突开现象,如图1所示,所以推断功率数突变并不是由于实际增加燃料量所导致的。

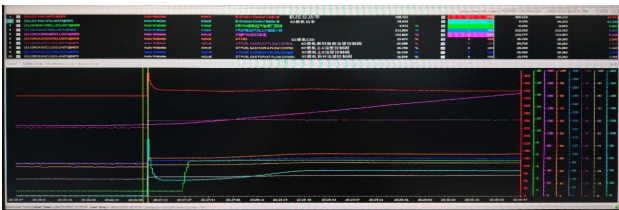


图1

#2燃机功率发生大幅突变时,在DCS系统查阅#2燃机功率,该测点在DCS侧由两个输入信号,进入二选块后,通过Leadlag算法,供其他设备逻辑运算使用,如图2示。

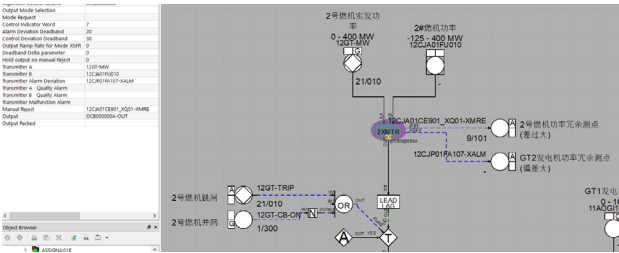


图2: #2机功率计算逻辑图

从图纸中可以看到，二选块的输入信号1为 12GT-MW，输入信号2为12CJA01FU010。经过 leadlag 输出后的点名为 12CJP01FA107-SELO。正常情况下，二选块的输出可以为输入信号1，或者输入信号2，或者两个输入信号的平均值。调阅当前逻辑发现，目前二选块的输出值选择的是输入2，未取两个输入的平均值。

调取趋势图3，可查询到图2中 leadlag 的输出值点名为 12CJP01FA107-SELO即（浅蓝色线）出现明显突变现象。



图3

图3以数值列表显示如表1所示

测点名	12CJA01FU102	12CJA01FU010	12CJP01FA107-SELO	12GT-CB-ON	12CJA01CE901_XQ01-XMRE	12CJP01FA107-XALM
描述	2# 燃机功率	2# 燃机功率	Leadlag 计算后的功率值	2号燃机并网	两个功率输入值偏差过大	两个功率输入值偏差大
备注	二选块输入1	二选块输入2	Leadlag 输出	并网信号	二选块输入偏差过大	二选块输入偏差大
20:27:14	24.971	24.971	25.058	1	0	0
20:27:13	24.611	24.691	25.248	1	0	0
20:27:12	23.93	24.09	25.834	1	0	0
20:27:11	24.09	24.09	26.56	1	0	0
20:27:10	24.531	24.651	27.691	1	0	0
20:27:09	24.531	24.491	29.591	1	0	0
20:27:08	24.21	23.529	33.184	1	0	0
20:27:07	23.129	22.768	39.503	1	0	0
20:27:06	21.326	21.086	51.329	1	0	0
20:27:05	18.042	15.519	73.807	1	0	0
20:27:04	13.356	2.341	116.066	1	0	0
20:27:03	12.034	-1.505	0	0	0	0
20:27:02	-0.984	-1.304	0	0	0	0
20:27:01	-1.665	-1.304	0	0	0	0
20:27:00	-1.264	-1.304	0	0	0	0
20:26:59	-1.545	-1.304	0	0	0	0

表1

由于相关点的历史趋势图均以1秒为间隔进行记录，从表1中可以看到，并网时，两个输入值均未发生突变，但 Leadlag 的输出值由0突变为116.066MW。

Leadlag 算法块输入、输出记录趋势不同的原因分析：

① Leadlag 算法的输入为二选块的输出，只有两个输入测点数值发生变化，才会引起输出的变化；所以输出数值的突变，必然是由于输入值突变引起的。至于输入值在趋势中未发现突变，是由于历史记录精度为1秒导致。该逻辑所在任务区为250ms扫描周期。如果输入值发生了突变，且变化的时间过短，只是一个毛刺，该突变值会被逻辑抓取到，正常执行计算，传导到 Leadlag 算法。但这个毛刺很可能不会被历史记录抓取。1秒钟内可能有三个周期的数据不能被历史记录抓取到。

②可以从趋势中看到，并网时，两个输入测点的数值偏差为11，通过查询历史报警，可以看到二选算法发出了输入偏差大的报警（设定值为20），如图3。从侧面说明当时两个输入值存在较大偏差，而历史趋势并未捕捉到。

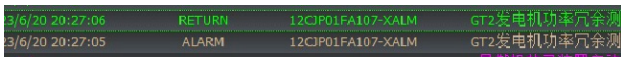


图3二选块报警偏差大报警

四块功率表数据传输至 TCS 系统，功率3和功率4先进行大选运算，其大选后的运行结果再与功率1、功率2再进行大选运算，四取大之后的功率信号作为 #2燃机功率信号为其它逻辑使用，包括输出至 DCS 系统，如图4。

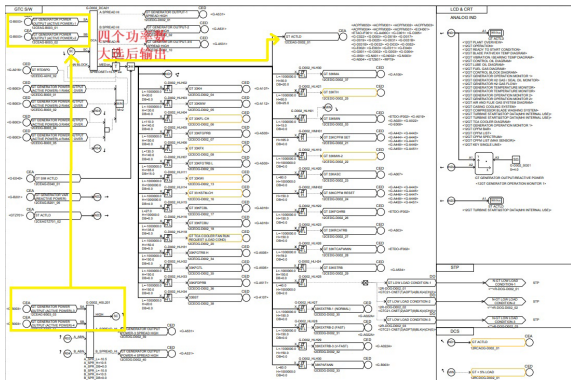


图4



大选之后的功率值通过 TCS 系统 AO 卡的两个通道传输至 DCS 系统 AI 卡接收, 如图5。



图5

上述控制系统 I/O 卡未发生故障报警, 可排除 I/O 卡件故障所导致的信号突变。

由于 TCS 系统历史趋势库中只记录四取大之后的功率值, 而每块功率表的数据未记录在历史趋势库。

综合所述, 推断功率表出现突变的概率较大。

## 二、制定措施

### (一) 制定捕捉功率突变的措施

#### (1) TCS 系统捕捉功率突变的措施

因 TCS 系统历史趋势库未记录每个功率表数值, 且历史趋势库的精度为 1 秒, 功率数突变发生的时间较为短暂, 存在扫描周期恰巧漏过突变最明显的数据点。TCS 系统的“飞行记录仪”记录精度为 200 毫秒, 记录时间可达 120 秒, 记录精度和记录时长均可满足后续分析所需, 因此在“飞行记录仪”中增加功率值记录, 如图6。

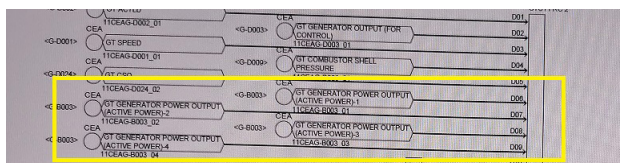


图6

#### (2) DCS 系统捕捉功率突变的措施

在 DCS 系统中将 #2 机功率信号点如: 12CJA01FU102、12CJA01FU010、12CJA01FA107-SELO, 由慢速广播点 (SLOW) 修改为快速广播点 (FAST) 修改为快速广播点。以 12CJA01FU102 为例, 如图7。

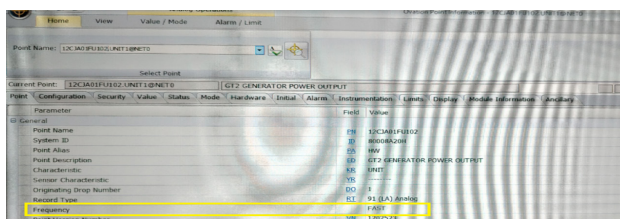


图7

同时在 DCS 系统的历史站的组中标记为快速记录点, 以保证这些点的历史趋势以 100ms 的间隔进行记录, 如图8。

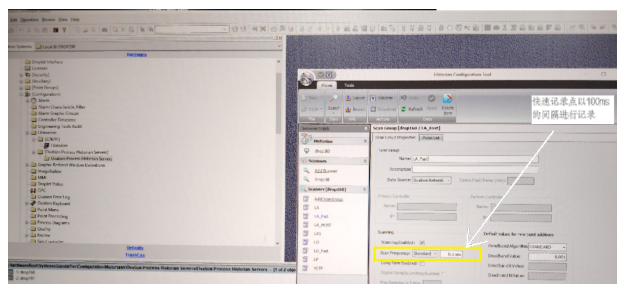


图8

这样在逻辑计算中任何的数值变化, 都会在历史趋势中有所反映。

### (二) 制定功率突变时的应对措施

#### 1. 抑制并网时刻功率突变措施

由控制逻辑可知, TCA 至高压汽包调整门的开度大小与功率、压气机进口温度<sup>2</sup>校准因子有关。经查 #2 燃机功率突变时刻, 压气机入口温度校准因子未变化, 由此推断 #2 燃机功率突变导致 TCA 至高压汽包调整门由 0% 突开至 4.9%, 且功率与开度的对应关系验证了当时的开度值。图中 M-D351\_FX01 为功率与调门开度的对应函数, 如图9。

为抑制功率突变所导致的调门突开所带来的风险, 在控制逻辑中增加速率限制块, 限制功率升速率, 如图9。升速率限值设定要既可满足并网时刻的正常的功率阶跃变化量通过, 又可抑制功率值非正常阶跃量变化导致的调整门突开。降速率设定值置为最大值, 当正常停机时, 功率变为 0 后可迅速关闭调整门。

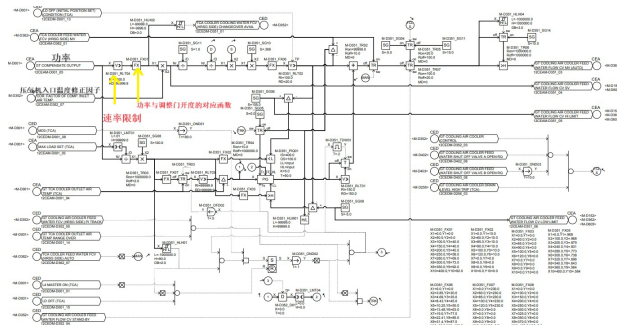


图9

#2 机并网时刻功率突变联锁至 TCA 至高压汽包调整门突开至 4.9%。因为, 此调整门在 TCS 控制系统, 经参数核查可知, 在 TCS 系统中 #2 机功率突变量确实已经超过 50MW, 图中左侧 X 参数代表功率值, 右侧 Y 参数代表调整门开度。当功率值处于 X2 ~ X3 之间时, 调整门开度对应 Y2 ~ Y3 之间, 如图9中 M-D351\_FX01 函数对应值。由于, #2 并网时刻功率短暂突变使得该调整门突开至 4.9%, 由功率与调整门开度的对应关系进一步验证功率突变量至少超过了 50MW。

DCS 系统控制中 #2 燃机功率高于 40MW 且又高于 60MW, 可联锁开 TCA 至高压汽包调整门后电动门, 由于在该电动门前的调整门已做了速率限制块, 可以抑制功率参数突变造成的调整门突开的工作, 所以可不在电动门这里增加限制条件。

优化 DCS 系统中自动功率调节控制逻辑中的功率信号来源。通过查阅逻辑发现, 功率计算逻辑在 DROP1 控制器, 二选块的

Input1 输入的功率信号引用自 DROP21 控制器, 但该信号最终又是来自 DROP1 控制器。这就增加了 1 个不必要的中转环节。因此我们将二选块的 Input1 输入的功率信号 (12GT-MW) 源自 DROP21, 见图 1, 改为直接由 DROP1 控制器读取, 其对应信号为 12CJA01FU102, 见图 11。这样避免了测点无意义的中转, 也有利于更为清晰地分析原因。

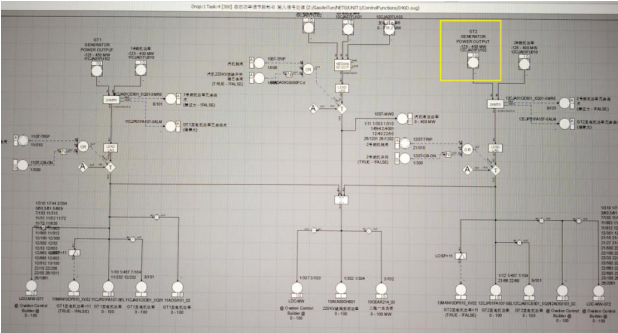


图 11

### 三、结论

通过在控制系统中增加速率限制可有效抑制功率突变, 进而消除功率突变对机组稳定运行所造成的安全风险; 优化控制逻辑, 减少不必要的信号中转环节, 使设备控制流程清晰高效; 加强对缺陷点的采集、记录功能, 为分析判断提供可靠数据。

### 参考文献

[1] 国家能源局. DL 5190.4-2019《电力建设施工技术规范第 4 部分: 热工仪表及控制装置》2019.  
[2] 罗志浩. 火电厂热控热控专业规程解读 2016.  
[3] 苏坚. M701F 燃气轮机 / 汽轮机分册 2014.  
[4] 赵燕平. 火电厂分散控制系统检修运行维护手册 2003.  
[5] 叶伟成. 大型燃气 - 蒸汽联合循环发电技术丛书性能试验分册 2009.  
[6] 何育生. 机组自动控制系统 2005.  
[7] 沈丛奇. 艾默生 Ovation 系统 2012.  
[8] 李遵基. 热工自动控制系统 1997.  
[9] 孙长生. 火电厂热控系统可靠性配置与事故预控 2010.

# 路基稳定性对沥青路面使用寿命的影响

王旭炜

新昌县交通投资集团有限公司，浙江 绍兴 312500

DOI:10.61369/ERA.2025060007

**摘要：**路基稳定性是决定沥青路面使用寿命的核心因素，其受地质条件、设计施工质量及环境作用的综合影响，本文系统分析了土体力学特性与水文地质特征对路基承载力的制约机制，揭示了弯沉检测、CBR 试验等传统方法与有限元模拟、光纤传感等现代技术在稳定性评价中的协同逻辑，研究证实，路基性能的可持续维护需融合生态排水、全寿命周期成本模型等创新策略，为降低路面病害发生率、延长道路服役周期提供理论支撑与工程实践范式。

**关键词：**路基稳定性；沥青路面寿命；材料改良

## The Influence of Roadbed Stability on the Service Life of Asphalt Pavement

Wang Xuwei

Xinchang County Transportation Investment Group Co., Ltd. Shaoxing, Zhejiang 312500

**Abstract：** Roadbed stability is the core factor determining the service life of asphalt pavement, which is comprehensively influenced by geological conditions, design and construction quality, and environmental effects. This article systematically analyzes the constraint mechanism of soil mechanics and hydrogeological characteristics on the bearing capacity of roadbeds, and reveals the collaborative logic between traditional methods such as deflection detection and CBR testing and modern technologies such as finite element simulation and fiber optic sensing in stability evaluation. The research confirms that the sustainable maintenance of roadbed performance requires innovative strategies such as ecological drainage and life cycle cost models, providing theoretical support and engineering practice paradigms for reducing the incidence of pavement diseases and extending the service life of roads.

**Keywords：** roadbed stability; asphalt pavement lifespan; material improvement

## 引言

随着交通荷载的日益增长与环境变迁的加剧，沥青路面早期病害频发已成为制约公路工程可持续发展的突出问题，路基作为路面结构的承载基础，其稳定性直接决定了上层结构的应力分布与疲劳寿命，本文聚焦路基稳定性的多尺度影响因素，通过力学解析、数值模拟与工程实践相结合的方法，揭示荷载-环境耦合作用下的路基劣化规律，旨在为提升路面耐久性、降低全寿命周期养护成本提供科学依据。

## 一、影响路基稳定性的核心因素

### （一）地质条件

路基的稳定性首先取决于其基础土体的力学特性，包括颗粒组成、密实度及抗剪强度等核心参数，不同土质在荷载作用下的响应差异显著，例如黏性土因其高压缩性和低渗透性，易在水分侵入后发生塑性变形，导致路基局部沉降或侧向位移，此类土体在长期荷载下易产生累积形变，尤其在缺乏有效排水措施时，孔隙水压力逐渐升高，进一步削弱土体骨架的支撑能力；相反，砂性土虽透水性良好且压缩性较低，但其颗粒间缺乏黏结力，在动

态交通荷载反复作用下易发生颗粒重排形成松散结构，进而引发路基整体性下沉，因此在工程实践中需通过土工试验精确测定土体的 CBR 值（加州承载比）和回弹模量并据此选择适配的填筑材料或改良方案，以确保土体力学特性与设计荷载的匹配性<sup>[1]</sup>。除此之外，地下水的赋存状态及其动态变化是威胁路基稳定性的另一核心地质因素，当地下水位接近或高于路基基底时，土体长期处于饱和状态，孔隙水压力持续作用于土颗粒骨架，导致有效应力降低，进而诱发软化、液化等灾害，例如：在冲积平原或河网密集区域，季节性水位波动会加剧土体的干湿循环效应，促使黏土矿物膨胀收缩，最终形成贯穿性裂缝，另外毛细水上升作用可将



水分输送至路基上层，在冻结区引发冻胀或在盐渍化区域导致盐分结晶膨胀，针对此类问题，需在勘察阶段明确地下水埋深、径流方向及化学组分，并通过设置隔水层、盲沟或竖向排水体等工程措施，阻断水分迁移路径，进而维持路基内部湿度平衡，避免因水文作用引发的结构性劣化<sup>[2]</sup>。

## 二、设计与施工质量

### （一）材料适配性与结构设计的科学逻辑

路基的耐久性高度依赖于材料选择与结构设计的协同优化，填筑材料需与地基土体在刚度、渗透性等参数上形成梯度过渡，以避免界面处因模量突变产生剪切破坏，例如：在软土地基上直接填筑高模量碎石土时，界面处易因应力集中形成滑移面，需通过铺设土工格栅或掺入水泥改良过渡层以增强界面黏结；结构设计层面，合理的横断面坡度与分层厚度可有效分散交通荷载产生的应力波，而排水系统的立体化布局则能加速水分排出，减少其对路基的侵蚀。另一方面，施工质量的控制精度直接决定了设计目标的实现程度，以压实工艺为例，碾压遍数、机械类型及填料含水率的微小偏差均可导致密实度分布不均，形成局部薄弱区，此类区域在后续使用中易发展为应力集中点，加速裂缝扩展与结构层剥离，更隐蔽的风险源于施工时序安排不当，例如在雨季进行填筑作业时，未及时覆盖的土体会因含水量超标而无法达到压实要求，后续干燥收缩将引发不可逆的体积变化，另外地基处理深度不足或排水设施施工误差可能导致预设功能失效，此类问题往往在竣工初期难以察觉，却会在环境与荷载的长期耦合作用下逐步暴露，最终演变为结构性破坏，因此，需通过动态监测与闭环反馈机制确保每道工序的严格落地，进而规避人为失误对路基稳定性的潜在威胁。

### （二）环境因素

在季节性气候区，温度周期性变化对路基稳定性的影响尤为显著，冻融循环过程中，土体孔隙水的相变引发体积膨胀与收缩，导致结构内部产生反复拉压应力，以东北地区为例，冬季土体冻结时，水分向冻结锋面迁移并形成冰透镜体，造成路基隆起；春季消融后，土体含水量骤增且承载力骤降，在车辆荷载作用下易形成翻浆冒泥，此类破坏具有显著的方向性特征，常表现为纵向裂缝或网状龟裂且修复后易因未根除的含水层而反复发作。除此之外，降水会作为化学介质参与路基材料的劣化过程，在强降雨区域，地表径流对边坡表土的冲刷可导致防护层剥离，而持续入渗的水分则溶解土体中的可溶盐（如硫酸钠），随毛细作用上升至路基上层，水分蒸发后盐分结晶膨胀产生膨胀应力，逐步撕裂土体结构，除此之外，在工业污染区域，酸雨中的硫酸根离子可与路基材料中的钙质成分反应，生成石膏等二次矿物，造成胶结结构崩解，此类化学-物理耦合作用往往具有潜伏期长、破坏范围广的特点。

## 三、路基稳定性的评价方法

### （一）传统评价技术

弯沉检测作为评价路基承载力的经典方法，其核心在于通过静态或动态荷载模拟实际交通作用，量化路基表面在垂直荷载下的变形量，该技术的理论基础源于弹性层状体系理论，通过测定弯沉值可反演路基各结构层的模量参数，例如：贝克曼梁弯沉仪通过固定轴载的卡车施加荷载，利用位移传感器记录路基回弹变形，进而推算其整体刚度，若弯沉值超出设计阈值，则表明路基存在局部软弱区或压实不足，需通过灌浆或换填进行补强，值得注意的是，弯沉检测的精度受环境温湿度、加载速率及设备校准状态的多重影响，尤其在季节性冻土区域，冻融界面导致的模量突变可能掩盖真实承载性能。另一方面，加州承载比（CBR）试验通过测定标准贯入针在特定压实度土体中的贯入阻力，量化土体抗剪强度与荷载扩散能力，为路基填筑材料的选择提供直接依据，试验过程中，试样需经过浸水饱和和处理以模拟最不利水文条件，其 CBR 值越高，表明土体在饱和状态下抵抗变形的能力越强，例如：高速公路路基填料的 CBR 值通常上路床不低于 8%，下路床不低于 5%，而二级公路可适当放宽至上路床不低于 6%，下路床不低于 4%，这一指标的工程意义在于通过实验室标准化试验筛选出与设计荷载匹配的填料类型，避免因材料强度不足引发结构性破坏，然而 CBR 试验的局限性在于其仅能反映土体在特定条件下的局部力学响应，无法全面表征复杂应力路径下的路基行为，因此在工程应用中需结合现场压实度检测与土工合成材料性能测试，形成多维度的材料评价体系<sup>[3]</sup>。

### （二）现代监测与模拟手段

数值模拟技术通过构建路基、路面与地基相互作用的分析模型，能够研究交通荷载、温度变化及水分渗透对路基稳定性的综合影响，例如在分析冻胀问题时，可通过整合温度场、水分场与力学场的相互作用，得出冻结过程对路基变形的影响规律，与依赖经验公式的传统方法相比，这种技术能够模拟复杂场景（如暴雨与重载交通同时作用下的路基性能衰减）并识别出关键设计参数（如材料刚度、排水效率等），进而优化防冻措施<sup>[4]</sup>。然而其准确性依赖于模型参数的合理设定，需结合现场监测数据进行反复验证，以确保模拟结果与实际工程行为的一致性。另一方面，分布式光纤传感技术通过埋设于路基内部的传感光纤，可实时获取温度、应变与振动信号的连续空间分布数据，实现对路基健康状态的毫米级分辨率监测，其原理基于光时域反射（OTDR）技术，通过解析激光脉冲在光纤中的背向散射信号定位并量化外界扰动引起的微应变变化，例如：在软土路基中，光纤网络可捕捉到沉降发展过程中不同深度的应变累积规律，预警潜在滑动面的形成，该技术的突破性在于突破了传统点式监测的空间局限性，能够全域感知路基的隐蔽性损伤，然而光纤布设工艺的复杂性及长期服役中的信号漂移问题仍需进一步突破，当前研究聚焦于开发自修复光纤涂层与智能算法滤波技术，以提升监测系统的环境适应性与数据可靠性，为路基稳定性评价从“事后诊断”向“事前预警”转型提供技术支撑。

## 四、提升路基稳定性的技术措施

### （一）设计与施工优化

#### 1. 路基材料改良

路基填料的化学改良是通过向天然土体中掺入特定添加剂，改变其矿物组成与微观结构，以此提升力学性能与环境适应性的关键技术，以高液限黏土为例，其天然状态下膨胀性黏土矿物含量高，易在水分变化时发生体积膨胀或收缩，导致路基开裂，通过掺入3%–6%的生石灰，石灰中的 $\text{Ca}^{2+}$ 可与黏土矿物发生离子交换反应，中和黏土颗粒表面负电荷、降低双电层厚度，进而抑制膨胀势，同时石灰与黏土中的硅酸盐等矿物反应生成胶凝物质，形成稳定的团粒结构，显著提高土体的抗剪强度与长期水稳性，在工程实践中，此类改良技术需结合室内击实试验与无侧限抗压强度测试，优化掺量配比与养护周期，以确保改良土体在施工碾压后达到设计压实度与CBR值要求<sup>[5]</sup>。另一方面，土工格栅、土工布等合成材料的引入，基于增强土体颗粒间的机械咬合与摩擦阻力，可有效抑制路基不均匀沉降与侧向位移，以双向拉伸聚丙烯格栅为例，其纵横交错的肋条结构在填筑层间形成三维加筋网络，当土体受荷载作用产生剪切变形时，格栅通过张拉作用将局部应力扩散至更大范围，降低应力集中风险，在软土地基处理中，分层铺设土工格栅可显著提高复合地基的整体刚度，减少工后沉降<sup>[6]</sup>。

#### 2. 合理排水系统设计

路基排水系统的核心功能在于快速排出入渗水分并阻断毛细水上升路径，其设计需综合考虑地形、水文与气候特征，垂直排水体会通过缩短渗流路径加速超静孔隙水压力消散，尤其在软土地基处理中，垂直排水体与预压荷载的联合应用可显著加速固结沉降进程，例如：在滨海滩涂区路基工程中，采用“水平砂垫层+竖向塑料排水板”组合体系，可将工后沉降量降低40%以上，设计过程中需通过达西定律与有限元渗流模拟，优化排水层厚度、间距及坡度，确保排水能力与预期降雨强度及地下水位波动相匹配，避免因排水不畅导致土体长期饱和<sup>[7]</sup>。除此之外，传统刚性排水结构（如混凝土边沟）虽能快速导流，但其生态割裂效应与维护成本问题日益凸显，基于海绵城市理念的生态排水技术，通过透水铺装、植草沟等柔性结构，可实现降水资源的自然渗透，例

如：在低交通量公路的路肩区域设置植草沟，利用植被根系对水分的吸收作用与土壤的过滤性能可减少地表径流对路基边坡的冲刷，同时补充地下水，其关键在于平衡渗透速率与路基稳定性需求，透水材料的级配需满足既能快速排水又避免细颗粒流失导致结构松散，植物品种选择则需兼顾抗淹能力与根系固土效果<sup>[8]</sup>。

### （二）维护与管理策略

路基的长期稳定需依托“监测–分析–决策”的闭环管理体系，其核心在于通过智能化技术实现从数据采集到维护行动的无缝衔接，首先需通过部署多类型智能传感器（如光纤湿度计、倾角变形仪、分布式温度传感器等）实时获取路基关键状态数据，以冻土区为例，由于冻融循环对路基稳定性威胁极大，可在路基不同深度埋设温度传感器网络，实时监测冻结深度与融化锋面的动态变化，例如：青藏高原某冻土路段采用此类技术，发现春季融化期路基表层温度波动可达 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，而深层冻土温度变化滞后约15天，此类数据为预测冻胀风险提供了直接依据<sup>[9]</sup>。然而，监测过程中产生的海量数据常伴随噪声干扰，例如传感器漂移、电磁干扰或环境突变导致的异常值，针对这一问题，需采用自适应滤波算法（如卡尔曼滤波或小波去噪）对原始数据进行清洗，以某高速公路监测项目为例，通过卡尔曼滤波处理后，变形数据的信噪比提升了60%，显著提高了分析可靠性，同时结合专家知识库（如冻土病害特征库、盐渍化膨胀案例库）对清洗后的数据进行智能识别，可快速定位潜在病害模式，例如：当系统检测到某路段湿度突增且伴随不均匀变形时，可自动匹配知识库中的“渗透性沉降”案例，触发分级预警并推荐注浆加固方案，进而提升预警准确性，缩短从发现问题到制定对策的时间窗口，使维护决策更加精准高效<sup>[10]</sup>。

## 五、结束语

路基稳定性的提升是延长沥青路面使用寿命的核心突破口，本文通过剖析地质条件、施工质量与环境因素的交互作用机制，构建了涵盖材料改良、排水优化与智能监测的综合性技术体系，未来研究需进一步探索新型环保材料、人工智能预警算法在路基维护中的深度应用，推动道路工程向高韧性、低能耗方向转型。

## 参考文献

- [1] 曹茂宇. 公路沥青路面病害处理技术研究 [J]. 运输经理世界, 2022, (22): 119–121.
- [2] 魏巍. 简谈公路沥青路面病害及防治措施 [J]. 大众标准化, 2022, (06): 107–109.
- [3] 张红梅. 城乡沥青公路路面病害原因及养护对策分析 [J]. 科技资讯, 2019, 17 (19): 55–56.
- [4] 杨荟. 高速公路路基稳定性施工技术研究 [J]. 山西建筑, 2018, 44 (16): 127–128.
- [5] 王文华. 路桥工程沥青路面面层施工技术分析探讨 [J]. 汽车周刊, 2023(8): 0234–0236.
- [6] 曲磊, 刘刚, 李艳. 公路沥青路面结构层水稳冷再生施工技术应用探讨 [J]. 中国公路, 2022(11): 170–171.
- [7] 喻敏东. 市政工程沥青路面面层施工技术探讨 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2022(4): 0088–0090.
- [8] 李剑锋. 沥青路面就地冷再生施工技术分析 [J]. 江西建材, 2023(5): 358–360.
- [9] 孔令云, 李春萍, 顾韬. 彩色沥青混合料的设计及路用性能的影响因素 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4): 1580–1586.
- [10] 喻杰, 李九苏, 姜舜君, 等. 反应型彩色环氧冷拌沥青混合料制备及性能研究 [J]. 公路与汽运, 2021(5): 53–58.



# 基于工业4.0的LED封装制造数字化生产线构建与集成技术研究

王国君

宁波升谱光电股份有限公司, 浙江 宁波 315000

DOI:10.61369/ERA.2025060009

**摘要：** 本文聚焦LED封装制造工艺流程与技术特点，探讨数字化生产线的集成方法及其关键技术应用。通过物联网、云计算、大数据、人工智能等技术的深度融合，实现设备互联、数据流通与智能管控，提升生产效率与产品质量。结合工业4.0理念，分析实际案例中数字化转型的实施路径与成效，为企业提供可借鉴的经验。研究强调技术集成与跨部门协同的重要性，为LED封装行业智能化升级提供理论支持与实践指导。

**关键词：** LED封装；数字化生产线；工业4.0；智能制造

## Research on the Construction and Integration Technology of Digital Production Lines for LED Packaging Manufacturing Based on Industry 4.0

Wang Guojun

Ningbo Shengpu Optoelectronics Co., Ltd. Ningbo, Zhejiang 315000

**Abstract：** This paper focuses on the manufacturing process and technical characteristics of LED packaging, and explores the integration methods of digital production lines and the application of key technologies. Through the deep integration of Internet of Things, cloud computing, big data, artificial intelligence and other technologies, it realizes equipment interconnection, data circulation and intelligent control, thereby enhancing production efficiency and product quality. Combined with the concept of Industry 4.0, it analyzes the implementation path and effectiveness of digital transformation in actual cases, providing referenceable experience for enterprises. The research emphasizes the importance of technology integration and cross-departmental collaboration, providing theoretical support and practical guidance for the intelligent upgrade of the LED packaging industry.

**Keywords：** LED packaging; digital production line; industry 4.0; intelligent manufacturing

随着工业4.0理念的不断深入，数字化制造已成为制造业发展的重要方向，尤其在电子制造业，LED封装作为技术密集型产业，对于提高生产效率、降低生产成本意义重大。传统LED封装生产线普遍存在自动化程度不高，生产效率不高，产品质量不稳定的问题。基于工业4.0的数字化生产线通过集成先进的物联网、云计算、大数据分析智能化设备，能够实现生产过程的实时监控、优化调度和自适应控制，从而提高生产过程的透明度和灵活性<sup>[1]</sup>。该模式不仅可以提高LED封装的生产效率，提高产品品质，而且可以实现资源管理、设备维修、生产计划等多个环节的精确智能管理。通过建立和整合数字化生产线，使LED封装行业能够更好地应对全球化市场的竞争压力，实现技术创新与持续发展，为产业的未来转型升级打下坚实的基础。

## 一、LED封装制造的工艺流程与技术特点

### （一）LED封装制造的工艺流程

LED封装工艺包括许多关键环节，每个环节都直接关系到产品的性能与质量。首先，以LED芯片为核心的封装单元，采用切割、刻蚀技术将其分割成多个LED单体，以保证各单体具有优良的光电性能。然后，用焊接的方法把LED芯片固定到管脚或基片上，一般用银、金线作连接材料，以保证电流能稳定地通过芯片。然后，在芯片表面涂覆一层透明封装材料（如环氧树脂、硅

胶等），既可以保护芯片不受外界环境干扰，又可以提高光的透射率，提高光的利用率<sup>[2]</sup>。封装后，再用模具或机械将其固化，以保证结构稳定耐用。最后，对封装后的LED灯进行测试和检测，确认其电、光等性能符合相关标准，并通过筛选后，才能进行下一步的应用。

### （二）LED封装制造的技术特点

LED封装在保证电流顺畅传导的同时，也需要对其进行高效的热管理与光效率优化。因此，对封装材料的选择、工艺的控制和精密仪器的使用都是非常重要的。封装材料必须具有良好的

导热性、绝缘性及良好的透光性，以保证其工作稳定性及使用寿命。另外，LED 封装工艺对高精度控制和检测技术提出了更高的要求。尤其是在焊接和光学封装工艺中，如何精确控制芯片与封装材料之间的键合质量，避免漏电流、光衰减等问题，是决定芯片与封装材料结合质量的关键因素。另一方面，随着 LED 工艺的进步，封装形式也呈现出多样化的发展趋势，如单片 LED 封装、片-板封装、集成光源封装等，既提高了发光效率，又增强了器件的适应性及灵活性<sup>[9]</sup>。最后，LED 封装工艺对环境控制和自动化水平提出了更高的要求。为确保封装过程的高效性和一致性，自动化设备及智能化生产线逐渐替代传统的手工作业，提高生产效率，减少人为因素引起的不稳定。

## 二、LED 封装制造数字化生产线的集成技术

### （一）设备与生产线的集成方法

LED 封装生产数字化生产线的核心是设备和生产线之间的有效整合。这个过程不仅仅是物理设备的互联，更是信息系统的深层次融合。设备的集成一般是由自动化控制系统和信息技术相结合来实现的。生产线上各种设备，如自动焊机、包装设备、检测设备等，均需经过中央控制系统的协调。为了保证每个设备都能按预先设定的程序和节奏运行，一般采用可编程逻辑控制器（PLC）或者分布式控制系统（DCS）。融合的核心是实时反馈机制，通过传感器、智能设备和中央控制系统的互联，实现设备在生产过程中自动调节参数，保证生产效率和精度。

### （二）信息系统与硬件设备的深度融合

随着物联网技术的发展，生产线上的各种硬件设备都具备了智能化的功能，可以利用传感器对生产数据进行实时采集，如温度、湿度、压力、电流等。数据采集模块将采集到的数据传送到信息系统，对数据进行实时的分析和处理，生成数据流。通过对这些数据的分析，生产线不仅可以对各工艺参数进行实时监测，而且具有自诊断和故障预报功能，保证了设备的稳定运行。硬件设备和信息系统的深度融合对信息系统提出了更高的要求，即具有较强的数据处理能力和决策支持能力，能对生产线的变化做出及时的反应<sup>[10]</sup>。比如，通过大数据分析，可以对生产过程中存在的瓶颈和设备失效进行预测，并提出相应的优化建议。通过软硬件协同工作，极大地提高了生产过程的智能化和自动化水平，确保了生产效率和产品质量。

### （三）跨部门协同与数据流整合

在传统生产模式下，各部门间的信息交流存在滞后和断层，形成了信息孤岛，影响了生产效率和产品质量。通过数据整合平台，数字化生产线将研发、生产、质检、仓储、销售等各个部门之间的信息连接起来，达到跨部门协作的目的。在共享平台上，各部门可以实时获取生产进度、设备运行状况、质量检验结果等重要信息，从而有效地进行信息传递和有效执行。数据流集成的实现有赖于先进的 ERP、MES 和 PLM 系统。通过统一的接口和标准，实现了各种数据源的无缝连接，实现了信息的高度整合和实时同步。例如，在生产过程中，质量测试数据可以直接反馈到生产过程中，从而对生产过程进行调整；同时，销售部还能与生产系统进行整合，及时掌握库存和生产状况，实现供应链管理的优化。通过跨部门的协作和数据流的集成，不仅提高了生产效率，而且

提高了整个企业的反应速度和市场竞争力。

### （四）数字化流程管控与实时监测技术

生产过程的管控与监测不仅仅依赖于生产设备的自动化，还需要信息系统的实时监测与精细化管理。数字化生产线采用温、湿、压等先进监测技术，实现对生产环境和设备状态的实时监测，保证工艺参数在规定的范围内波动。当生产过程出现异常情况时，系统能及时发出警报，并将相关信息通过信息系统传达给操作人员和管理人员，使其能够及时采取措施。此外，数字化流程管控还实现了生产过程的可视化和可追溯性，管理者可在系统界面上对设备运行状态、工艺参数、人员操作等各个环节进行查看，从而实现整个生产过程的透明和可控<sup>[11]</sup>。通过对实时数据的采集和分析，数字生产线也可以进行自适应控制，根据生产状况的变化对生产节奏和工艺参数进行自动调整，使生产效率和质量得到最大的优化。这些技术不仅提高了生产的自动化与智能化程度，还为企业提供了更为精准的生产预测与决策支持，推动了生产管理的精细化与高效化。

## 三、LED 封装制造数字化生产线构建与集成技术研究

### （一）物联网技术在 LED 封装中的应用

通过物联网平台，实现了设备、传感器、生产系统的实时监测和管理。通过传感器及智能设备对生产线上的设备、工艺参数及环境数据进行采集，并将其传输到物联网平台，对其进行集中处理和分析。该技术可以对设备进行远程监控，以便对设备发生故障及时采取措施，缩短生产停滞时间，提高生产效率。物联网技术还能生产提供实时数据支撑，可以帮助生产管理者准确把握生产状况，优化生产计划。物联网技术通过对设备、环境和生产数据的全面采集和分析，有效地提高了 LED 封装生产线的可视化管理和决策能力。另外，物联网技术使生产系统可以和企业的 ERP、MES 等系统无缝连接，形成一个可追溯的生产管理系统，保证生产过程的高效和可靠。

### （二）云计算与大数据在生产中的应用

云计算与大数据技术在 LED 封装生产中的应用，显著提升了数据处理和分析的能力，推动了生产决策的科学化与精准化。在云平台上实现了对设备状态、生产进度、质量检验结果等大量生产数据的集中存储和管理。云计算平台利用分布式处理架构，突破了局部硬件资源的限制，为生产管理提供了更强的计算能力。大数据分析是生产工艺优化、质量控制和预测维护的重要手段。通过深度挖掘和分析历史生产数据，云平台可以识别生产过程中存在的设备故障、工艺偏差等潜在问题，提前预警，降低停工时间，提升生产效率。在质量管理中，通过大数据分析，可以发现影响产品质量的关键因素，从而对生产过程进行优化，降低次品率。此外，云计算和大数据还能帮助企业更准确地预测需求和资源调度，实现生产计划的柔性化和效率，实现生产资源的最大利用。

### （三）传感器与自动化设备集成

传感器用于实时采集生产过程中各类物理、化学参数，如温度、湿度、压力、电流、电压等，这些数据通过集成的控制系统进行分析与处理。自动设备是按照控制系统发出的指令来完成生产作业的。将传感器和自动控制装置相结合，可以实现对生产过

程的闭环控制，保证各个环节的工艺参数稳定在最优范围，从而提高产品的精度和质量。该传感器不但可以对设备的运行状况进行实时监控，而且可以对生产过程中出现的异常情况进行检测，及时发现设备的故障和生产偏差，并将其反馈给操作人员，使其能够自动校正和调整。自动化设备的引进，不但提高了生产效率，而且降低了人工作业的不确定性，使生产更稳定、更具可控性。随着传感器技术和自动化装备的不断发展，LED封装制造正朝着智能化和精细化方向发展。

（四）人工智能与机器学习在生产中的应用

通过引入人工智能与机器学习，生产线能够实现自我学习与智能优化，提升生产效率与质量。人工智能在视觉检测、疵点识别、生产排程等领域有着广泛的应用前景。在视觉检测方面，采用人工智能图像识别技术，可以快速发现LED封装中存在的缺陷，并自动剔除缺陷，提高检测精度和效率。机器学习通过对大量生产数据的分析，识别影响生产效率与质量的关键因素，进而对生产过程及设备维修进行优化。人工智能和机器学习技术可以实时学习并反馈数据，自动调整生产参数，实现生产过程智能化优化。比如，在设备维修领域，机器学习可以根据历史数据，预测设备潜在的故障点，提前预防维修，减少设备的故障率，减少停机时间。在生产调度方面，人工智能能够通过实时数据和历史数据对需求变化进行预测，从而对生产计划和资源进行自动调整，提高生产线的柔性和响应能力。在LED封装制造中引入人工智能和机器学习技术，可以提高生产效率和智能化程度，显著提高企业的综合竞争能力。

四、基于工业4.0的LED封装数字化生产线的实施案例分析

（一）企业概况

某LED封装企业，为提升生产效率和产品质量，决定实施基于工业4.0的数字化生产线。该企业主要从事高亮度LED封装，产品广泛应用于照明、显示和汽车等领域。在实施前，企业面临生产线自动化程度低、设备利用率不足、产品质量波动较大等问题。为解决这些问题，企业引入了物联网技术、云计算、大数据分析、人工智能等先进技术，构建了数字化生产线。

（二）数字化生产线实施过程

在实施过程中，首先要对现有生产线进行全面的评估，找出关键环节及瓶颈。随后，将物联网技术引入到企业中，将生产设备、传感设备与信息系统深度融合，实现对设备的远程监测与预

警。借助云计算平台，企业可以集中存储、分析生产数据，运用大数据技术优化生产过程。在质量控制上，将人工智能技术引入到智能检测系统中，实现对产品缺陷的自动识别，提高检测精度与效率。同时，通过优化生产流程，减少人工干预，提高生产线自动化程度。

（三）效果评估与经验总结

经过一段时间的运行，数字化生产线取得了显著成效。生产效率提高了约15.3%，产品合格率提升至98.7%，设备利用率从原来的75.2%提高到90.5%。见表1。

表1 数字化生产线实施前后主要生产指标对比

指标	实施前	实施后	提升幅度
生产效率（单位：件/小时）	120.5	138.5	15.30%
产品合格率（%）	95.2	98.7	3.50%
设备利用率（%）	75.2	90.5	15.30%

此外，生产线的故障率降低了约20.8%，生产成本降低了约12.5%。见表2。

表2 数字化生产线实施前后故障率与生产成本对比

指标	实施前	实施后	降低幅度
故障率（%）	8.5	6.7	20.80%
生产成本（单位：万元）	500	437.5	12.50%

通过此次数字化转型，企业的生产效率，产品质量，设备利用率，成本控制都有了很大的提高。实践证明，数字化转型必须站在全局的高度，从技术引进、人才培养、流程优化三方面进行综合考虑，才能达到预期的目标。此外，不断地对数据进行监控与分析，是及时发现问题、优化生产工艺的关键。

五、结语

LED封装制造数字化生产线的构建与集成技术在推动行业智能化升级中展现出显著优势，通过物联网、云计算、大数据及人工智能等技术的应用，实现了设备互联互通、数据实时采集与智能决策优化，大幅提升了生产效率与产品一致性。同时，跨部门协同与数据流整合为企业的精细化管理提供了有力支撑。然而，当前仍面临技术标准不统一、数据安全风险及人才短缺等问题。未来研究应着重于开发更高效的集成解决方案，强化边缘计算与区块链技术在生产线中的应用，以提高系统灵活性与安全性。此外，随着工业4.0的深入发展，人机协作与自适应生产系统的探索将成为重要方向，助力LED封装行业向更高水平的智能制造迈进。

参考文献

[1] 申含笑. 专利视角下LED封装产业PEST分析及对策研究[D]. 景德镇陶瓷大学, 2023.  
[2] 张云龙. 微型LED有机硅封装材料低温磨削加工及应用[D]. 华南理工大学, 2023.  
[3] 胡亨汶. 面向工业互联的制造资源数字化封装技术研究[D]. 西南交通大学, 2022.  
[4] 宋琳琳, 吴屏, 杨轶. LED封装与检测实验实训平台建设[J]. 科学技术创新, 2020, (29): 172-173.  
[5] 张莉, 喻晓鹏, 陈思敏, 等. LED封装车间智能制造新模式探讨[J]. 中国照明电器, 2018, (09): 1-4.



# 化工仪表自动化在安全生产监测中的应用与改进

郑斌<sup>1</sup>, 丛晓东<sup>2</sup>

1. 福斯特安吉新材料有限公司, 浙江 杭州 310000

2. 浙江石油化工有限公司, 浙江 舟山 316000

DOI:10.61369/ERA.2025060010

**摘 要 :** 化工仪表自动化技术在安全生产监测中的应用日益广泛, 成为确保化工生产过程安全、稳定运行的核心技术。本文探讨了自动化仪表的分类、系统构成及工作原理, 分析了化工仪表自动化技术在实时参数监测、故障诊断与预警、自动化控制与安全联锁等方面的应用。文章还探讨了该技术在实际应用中存在的仪表技术局限性、系统集成与信息化问题以及操作人员短缺等挑战, 并提出了引入智能传感器与自校准技术、基于物联网的智能集成平台、虚拟现实与增强现实技术的培训与远程支持等创新改进措施, 以提升化工行业的安全生产水平。

**关 键 词 :** 化工仪表自动化; 安全生产监测; 实时参数监测

## The Application and Improvement of Chemical Instrument Automation in Safety Production Monitoring

Zheng Bin<sup>1</sup>, Cong Xiaodong<sup>2</sup>

1.Foster Anji New Materials Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310000

2.Zhejiang Petrochemical Co., Ltd. Zhoushan, Zhejiang 316000

**Abstract :** The application of chemical instrumentation automation technology in safety production monitoring is increasingly widespread, becoming a core technology to ensure the safe and stable operation of the chemical production process. This paper discusses the classification, system composition, and working principle of automated instruments, and analyzes the application of chemical instrumentation automation technology in real-time parameter monitoring, fault diagnosis and early warning, automated control, and safety interlock. The article also explores the challenges existing in the practical application of this technology, such as the technical limitations of instruments, system integration and informatization issues, and the shortage of operators, and proposes innovative improvement measures such as the introduction of intelligent sensors and self-calibration technology, intelligent integrated platforms based on the Internet of Things, and virtual reality and augmented reality technology for training and remote support, to enhance the safety production level of the chemical industry.

**Keywords :** chemical instrumentation automation; safety production monitoring; real-time parameter monitoring

随着技术的不断进步, 化工仪表自动化在安全生产监测中的应用日益广泛, 尤其在化工生产过程中, 自动化仪表能够实时监测设备运行状态、化学反应过程以及危险源的变化, 从而有效防范安全隐患, 降低事故发生风险。随着化工产品生产规模的扩大和过程复杂性的不断增加, 传统的人工监控手段已经不能满足生产过程中的高效、安全和精确的监控要求, 因此引入自动化系统显得非常重要。智能仪表的引入, 可以实现数据的精确采集和处理, 实时准确的预警信息, 实现全过程的安全监测。此外, 该自动仪表具有自诊断功能, 能及时发现设备故障, 及时调整、报警, 使设备运行更加可靠。对化工仪表自动化系统进行研究和改进, 既能提高生产效率, 又能对企业安全管理系统进行优化, 降低因人为因素造成的安全事故, 有很大的实用价值。

## 一、化工仪表自动化技术概述

### (一) 自动化仪表的分类

自动仪表在化学工业中得到了广泛的应用, 其作用是对化工生产中各种物理化学参数进行监控与控制。根据功能和工作原理

的不同, 自动化仪表可分为测量仪表、控制仪表和调节仪表三大类<sup>[1]</sup>。测量仪表主要用来对温度、压力、流量、液位等过程参数进行实时采集, 并将这些信息转化成电信号进行处理。控制仪表根据测量仪表的反馈信息, 对生产过程进行自动调整, 以确保生产过程稳定可靠。调节仪表根据控制仪表的指示, 调整生产过程中

的控制装置,保证工艺参数保持在规定的范围内。

## （二）化工仪表自动化系统的构成与工作原理

化工仪表自动化系统通常由传感器、信号传输装置、控制系统、执行机构等组成。传感器是整个系统的前端,其主要功能是采集化工生产过程中的各种物理化学参数,并将其转化为标准的电信号,并将其传输到控制系统中。信号传送单元负责将传感器输出的讯号经由传输线传送至控制系统,以保证讯号之准确及稳定。在化工仪表自动化系统中,控制系统一般由计算机或专用控制器组成,对采集到的信号进行处理、判断,并给出相应的控制命令。执行器根据控制系统的指示,对阀门、水泵、加热器等相关控制装置进行调整,以保持或改变生产过程中的变量<sup>[9]</sup>。利用闭环控制原理,实现了化工生产过程的动态调整。将实时采集到的工艺信号与设定值相比较,生成误差信号,再由控制系统的调整算法对执行器进行自动调节,从而实现控制目标。

## （三）化工仪表自动化技术的特点与优势

化工仪表自动化技术具有多个显著特点。自动控制技术提高了化工生产的精度与稳定性,降低了人为干扰,保证了生产过程在设定的区间内稳定运行;该技术可有效提高生产效率,降低对人工作业的依赖程度,优化生产计划,减少能耗,减少资源浪费。同时,该系统还具备故障诊断与报警功能,能够迅速发现和解决设备故障,保证生产安全。另外,化工仪表自动化系统还可以实现海量数据的采集和处理,为企业提供实时生产数据及历史数据分析,辅助工艺优化及决策支持。同时,该自动化系统还可以实现对生产过程的全面控制和管理,提高了整个资源的利用率,促进了企业的智能化发展。化工仪表自动控制技术在工业生产中的广泛应用,不仅提高了生产过程的安全稳定,而且在节能减排和提高产品质量上显示出其独特的优势。

# 二、化工仪表自动化在安全生产监测中的应用

## （一）实时参数监测

化工生产涉及到多个复杂的工艺过程,工艺参数的变化直接影响生产安全与产品质量。通过安装各种自动化仪表,如温度传感器、压力变送器、流量计、液位计等,可以24小时不间断地监测生产过程中的温度、压力、流量、液位、浓度等重要参数<sup>[9]</sup>。这些仪表将实时采集到的数据传送到中央控制系统,经过处理、分析,得到实时的生产状况信息。该系统能够对生产过程进行高频实时数据采集与反馈,使操作人员能够及时掌握生产过程变化情况,及时发现异常发展趋势,避免因监控滞后带来的安全隐患。如当压力、温度等超出安全范围时,可立即报警,提醒操作者采取相应的措施,避免设备的损坏和生产事故的发生。这种实时监控能力极大地提高了生产过程的安全性,使工艺控制更准确和及时。

## （二）故障诊断与预警

化工仪表自动化技术在故障诊断与预警中起到了至关重要的作用。通过对设备运行状态的全面监控,可以及时发现设备潜在的故障,并给出预警信号。各种传感器可以不断地采集设备运行数据,并与标准运行参数进行比较,一旦出现异常变化,就会触发预警机制。例如,当温度传感器发现冷却系统出现异常升温时,就有可能是冷却装置发生了故障,然后根据数据分析,自动

诊断出故障类型,从而实现对设备失效时间的预测。控制系统根据检测到的信息,产生故障报告,提醒操作人员进行维修或更换零件。此外,该系统还具备对设备老化、磨损和腐蚀等隐患进行早期识别的功能,从而避免突发故障<sup>[4]</sup>。由于设备故障,可以及早发现、排除隐患,降低人因疏忽而造成的事故发生率。同时,结合数据分析,提出优化建议,帮助企业制定更加科学的维修策略,达到预防维修的目的,提高设备的可靠性和使用寿命

## （三）自动化控制与安全联锁

化工仪表自动化系统还能实现生产过程的自动控制和他安全联锁,保证了生产过程的安全稳定运行。该自动控制系统利用实时数据反馈和决策算法,实现了对生产过程参数的准确调整。例如,在化工反应过程中,对温度、压力的控制是非常重要的,自动控制系统利用传感器对数据进行实时采集,并将其与设定值相比较,按照设定的控制算法,对加热、冷却或排气装置进行自动调节,使反应过程处于稳定状态<sup>[5]</sup>。联锁系统把生产过程中的各种设备和仪表按照一定的逻辑关系连接起来,这样当发生一些异常时,系统可以自动启动安全保护措施,防止设备或人员受到伤害。如当储液罐内气体压力超出安全临界值时,自动关闭进料阀,打开减压阀,并向工作人员发出警报,避免因压力过大而引发爆炸、泄漏等事故。这种自动控制与安全联锁功能,既能保证生产安全,又能提高生产运行的灵活性与稳定性。通过对控制策略及联锁机制的持续优化,可以有效地应对各种突发情况,降低因人误操作和设备故障造成的安全事故。

# 三、化工仪表自动化在安全生产监测中存在的问题

## （一）仪表的技术局限性

在化工仪表自动化系统监控过程中,由于仪表技术上的限制,往往会影响到它的性能及使用效果。很多化工过程都涉及到复杂的物理化学变化,一些传统的测量仪表已经很难满足其高精度和高稳定性的需要。在高温、高压、强腐蚀等特殊环境下,现有传感器及测量仪表难以以长时间稳定运行,造成数据获取不准确甚至失效。这些技术上的限制,将直接影响其测量精度与稳定性,进而影响自动化系统的安全监控效果。此外,在快速变化的生产环境下,某些仪表的响应速度与精度可能无法满足实时监测的需求。一些化学成分检测、微量元素测定需要依赖高精度设备,但这些设备成本高、维护难度大,难以在中小型化工企业推广应用。

## （二）系统集成与信息化问题

在实际应用中,许多化工企业的自动化仪表系统与企业的信息化系统之间存在较大隔阂,导致数据无法有效共享与整合。虽然很多自动化系统都可以对某一种设备或者某一条生产线进行监测,但是这些系统之间并没有很好地融合在一起,使得数据处理能力受到限制,难以实现对安全生产的全面监测和管理。在系统集成过程中,经常会出现软硬件不兼容和控制系统不兼容的问题。由于不同厂家生产的仪器与控制系统在通讯协议、数据格式等方面存在差异,导致设备间不能进行有效的联动与数据交互,影响了整个自动化监测系统的整体性能。另外,一些化工企业还没有建立起完善的信息平台,造成了企业信息化水平低下,无法对大量收集到的数据进行及时的处理与分析。孤立的数据使信息

得不到有效利用，影响预警和决策的准确性和时效性，从而影响到企业的安全生产管理。

### （三）操作人员与技术人才短缺

化工仪表自动化技术在工业生产中的广泛应用，对操作人员及技术人员提出了更高的要求。然而，目前很多化工企业仍然面临着操作人员短缺、熟练工人短缺的问题。随着自动化程度的提高，新的控制算法与监控手段不断涌现，但很多企业操作人员对这些新技术仍有很大难度，特别是对复杂精密仪器的操作，操作人员的技能与经验还有待提高。另外，对于自动化系统的维护与故障排除，更多的是依靠专业技术人员的专业知识与经验。但是，在产业快速发展的同时，专业人才的数量与质量却未能同步提高。部分企业由于技术支持不足，当仪器发生故障或者系统发生异常时，很难做出快速的反应，及时解决故障。这不仅增加了生产停摆的风险，而且还会引发安全事故。由于缺乏专业技术人才，特别是在突发事件发生时，由于缺乏专业知识及应急能力，很难及时发现并解决安全隐患。

## 四、化工仪表自动化在安全生产监测中的改进措施

### （一）引入智能传感器与自校准技术

为提升测量精度与可靠性，引入智能传感器和自校准技术已成为改进措施的核心。智能传感器不仅具有高灵敏度，而且可以通过集成的智能算法实时处理数据，并进行误差校正。该传感器能自适应过程变化，降低人为因素对测量结果的影响，增强系统对动态变化的响应能力。自标定技术利用内置的标定模块，实现了传感器在运行过程中的周期性自动检测，并对其偏差进行调节，保证了长时间运行的准确性。例如，温度、压力传感器经常会受到环境温度、机械振动等因素的影响，从而造成测量结果的漂移。自标定功能可在设备运行期间对传感器误差进行周期性修正，保持测量精度稳定，降低人为干预要求，减少人为误差。基于自标定技术的智能传感器在复杂化学反应及苛刻环境下的生产监测中具有更高的精度与稳定性，对提高生产安全水平具有重要意义。

### （二）基于物联网（IoT）的智能集成平台

物联网技术可以将化工生产过程中的各种传感器、仪器和控制设备通过无线网络连接起来，构成一个完备的智能监测网络。该平台不仅可以实现实时数据的采集，而且可以利用云计算、大数据分析等手段对生产计划进行优化，提高决策支持能力。该智能集成平台以标准化的通讯协议与格式为基础，实现不同设备间的无缝对接与信息共享。例如，在化工生产中，各种反应器、储

罐、管线等设备上都安装了智能传感器，这些传感器可以将采集到的压力、流量、温度、液位等重要数据上传到物联网平台，从而实现实时监测，并对潜在的安全隐患进行预警。另外，物联网平台还可以与企业的 ERP、MES 等信息平台进行整合，实现跨系统的数据连接，提高生产线的安全和自动化水平。利用物联网技术，化工企业能够对生产过程的各个环节进行精准监控，及时发现设备故障或运行异常，从而提高整个生产过程的安全与效率。同时，通过物联网技术，管理者可以对生产数据进行远程监控，并对设备操作进行监控，提高了监控的便利性和响应性。

### （三）虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术的培训与远程支持

虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术可以为操作者提供一种全新的训练与支撑模式，提升操作者实战能力，特别是应急处置能力。虚拟现实技术可以模拟化工生产环境与设备运行状况，给操作者提供沉浸式训练体验，让操作者可以在仿真环境中进行设备操作、故障排除以及安全应急处理。这样，操作人员就可以在没有风险的虚拟环境中，事先熟悉设备的工作程序及应急预案，提高实际操作的熟练程度，并对紧急情况作出反应。虚拟现实技术可以将虚拟信息和真实环境相结合，并实时呈现给操作者，大大提高了操作者对生产过程的控制能力。当设备发生故障时，AR 眼镜能实时显示设备的运行状况，并对故障进行分析，并给出相应的解决方案。利用 AR 技术，工程师可实时查看设备运行参数及维修历史，远程专家可利用视频对现场人员进行指导，缩短故障排除周期，提高维护效率。这一举措，不仅提高了现场作业人员的业务素质，而且有效地减少了因设备故障而带来的安全隐患。同时，将虚拟现实技术和 AR 技术相结合，不仅可以提高员工的技能训练效果，而且可以降低操作失误带来的安全风险。

## 五、结语

化工仪表自动化技术在安全生产监测中的应用具有重要意义，不仅可以提高生产过程的实时监测能力，而且可以增强故障预警与自动控制系统的响应能力。将智能传感、物联网、虚拟现实等技术相结合，可有效提高生产安全，降低事故发生率。然而，现有技术仍然面临着仪器性能局限性、系统集成困难、人才匮乏等问题，亟须进一步优化和创新。随着人工智能、大数据分析、5G 等技术的快速发展，化工仪器自动化系统将进一步向智能化、集成化方向发展，实现更加精准的风险预测，优化生产流程，保障安全生产。

## 参考文献

- [1] 金武鑫. 化工仪表在安全生产中的作用与影响研究 [J]. 仪表仪表用户, 2024, 31(09): 62–63+66.
- [2] 姜蓉蓉. 仪表及自动化在化工生产中的应用 [J]. 内蒙古石油化工, 2024, 50(08): 24–27.
- [3] 权刚, 张瑞. 现代化化工仪表及化工自动化过程控制分析 [J]. 数字通信世界, 2023, (03): 91–93.
- [4] 付宏刚. 化工仪表中智能自动化的应用 [J]. 科学技术创新, 2019, (14): 155–156.
- [5] 范有刚. 化工仪表中的自动化控制技术分析 [J]. 天津化工, 2018, 32(02): 58–59.



# 基于数值模拟的砂模铸造充型过程分析及工艺改进

罗育胜

广东省广裕集团梅州嘉宝实业有限公司，广东 梅州 514000

DOI:10.61369/ERA.2025060012

**摘要：**砂模铸造在工业生产中应用广泛，但传统经验设计方法难以优化其工艺。数值模拟技术为砂模铸造充型过程研究提供有力支持。本文阐述了砂模铸造充型过程及数值模拟基础，包括充型特点、模拟技术原理和作用。基于数值模拟，对充型过程中金属液流动形态、温度场分布、气体情况进行分析，并提出工艺改进策略，如优化浇注系统、控制充型速度与温度、提升砂型型芯性能、控制凝固过程等。数值模拟技术有助于理解充型机制、预测缺陷，提升铸件质量、降低成本、缩短周期，未来在砂模铸造领域的应用将更广泛深入。

**关键词：**砂模铸造；充型过程；数值模拟；工艺改进；缺陷预防

## Analysis and Process Improvement of Sand Mold Casting Filling Process Based on Numerical Simulation

Luo Yusheng

Guangdong Guangyu Group Meizhou Jiabao Industrial Co., Ltd. Meizhou, Guangdong 514000

**Abstract：** Sand mold casting is widely used in industrial production, but traditional empirical design methods are difficult to optimize its process. Numerical simulation technology provides strong support for the study of the sand mold casting filling process. This article describes the sand mold casting filling process and the basics of numerical simulation, including filling characteristics, simulation technology principles, and functions. Based on numerical simulation, the flow pattern, temperature field distribution, and gas conditions of the molten metal during the filling process are analyzed, and process improvement strategies are proposed, such as optimizing the pouring system, controlling filling speed and temperature, improving sand mold core performance, and controlling the solidification process. Numerical simulation technology helps to understand the filling mechanism, predict defects, improve casting quality, reduce costs, and shorten the cycle. Its application in the field of sand mold casting will be more widespread and in-depth in the future.

**Keywords：** sand mold casting; filling process; numerical simulation; process improvement; defect prevention

## 引言

砂模铸造作为一种应用广泛的铸造工艺，在工业生产中占据重要地位。然而，铸造过程涉及复杂的物理现象，传统经验设计方法难以全面准确地分析和优化工艺。数值模拟技术的出现，为砂模铸造充型过程的研究提供了强有力的工具。通过数值模拟，能够深入了解充型过程中金属液的流动行为，预测可能出现的缺陷，进而针对性地改进工艺，提高铸件质量与生产效率。本文将围绕数值模拟在砂模铸造充型过程中的应用，对充型过程进行分析，并探讨相应的工艺改进策略。

## 一、砂模铸造充型过程与数值模拟基础

在砂模铸造工艺的研究与优化进程中，深入理解砂模铸造充型过程，掌握数值模拟技术的原理及其在该领域的应用，是实现工艺改进与质量提升的重要基础。以下将从砂模铸造充型过程的基本特征、数值模拟技术的底层原理，以及数值模拟在砂模铸造充型过程中的关键作用展开详细阐述。

### （一）砂模铸造充型过程概述

在砂型铸造领域，浇注系统设计与铸件的质量存在密切联系。通过合理的浇道设计与布置，可以控制金属液的流速与充型效率，减少铸件出现缩孔、卷气、缩松等铸造缺陷的可能性。但在传统砂型铸造工艺中，浇道需依赖模具进行造型，因此在结构上受起模所限，不能自由地进行设计与优化<sup>[1]</sup>。砂模铸造，是以砂子为主要造型材料制作铸模的铸造方法。在砂模铸造过程中，将液

态金属通过浇注系统引入铸型型腔，液态金属在重力或压力作用下填充型腔，随后冷却凝固形成铸件。在充型阶段，金属液的流动行为对铸件质量有着决定性影响。若充型速度过快，金属液可能卷入气体，导致铸件产生气孔缺陷，还可能引发金属液飞溅，造成冲砂等问题；若充型速度过慢，金属液在尚未完全填充型腔时就开始凝固，会产生冷隔、浇不足等缺陷。同时，砂型的透气性、紧实度以及浇注系统的设计等因素，都会显著影响充型过程的顺利进行。

## （二）数值模拟技术原理

数值模拟技术基于计算机科学与计算流体力学，对砂模铸造充型过程进行数学建模与仿真分析。在模拟过程中，通常将充型过程视为粘性不可压缩流体的流动，通过建立控制方程来描述金属液的流动行为。这些控制方程包括连续性方程、动量方程和能量方程。连续性方程保证了质量守恒，动量方程反映了力与运动的关系，能量方程则描述了热量的传递和转化<sup>[2]</sup>。为求解这些复杂的偏微分方程，常用的数值方法有有限元法（FEM）、有限差分法（FDM）和光滑粒子流体动力学法（SPH）等。有限元法将求解区域离散为有限个单元，通过在单元上近似求解方程来获得整体解；有限差分法直接对控制方程进行差分近似，求解节点上的数值解；光滑粒子流体动力学法则是一种无网格方法，能够较好地处理大变形和自由表面问题。

## （三）数值模拟在砂模铸造充型过程中的作用

数值模拟在砂模铸造充型过程中发挥着重要作用。首先，在工艺设计阶段，通过模拟不同工艺参数下的充型过程，能够提前预测铸件可能出现的缺陷，如气孔、冷隔、缩孔等，从而避免盲目试错，缩短新产品的研发周期，降低生产成本。其次，数值模拟能够直观展示金属液在型腔内的流动形态和温度分布，为工艺优化提供依据<sup>[3]</sup>。工程师可以根据模拟结果，调整浇注系统的结构、充型速度、浇注温度等参数，优化工艺方案，提高铸件质量。此外，数值模拟还可以作为一种教学工具，帮助学生和初学者更好地理解砂模铸造充型过程的物理原理和复杂现象。

# 二、基于数值模拟的砂模铸造充型过程分析

当借助数值模拟技术对砂模铸造充型过程展开研究时，全方位剖析充型过程的多个关键层面，对于精准把控铸造质量，规避各类缺陷具有重要意义。下面将从金属液流动形态、温度场分布，以及气体卷入与排出情况这三个维度，借助数值模拟技术展开深入分析。

## （一）金属液流动形态分析

在砂模铸造充型进程中，金属液流动形态对铸件品质影响重大。借助数值模拟技术，研究人员可精确观测金属液在型腔内的流动轨迹和速度分布。充型初始，高温金属液从浇口涌入，凭借惯性以高速射流推进，其动能产生的冲击力影响充型初始状态。随着型腔填充，金属液与型腔壁相互作用增强，因型腔形状和阻力差异，其流动速度和方向改变，出现分流、汇流现象。

若浇注系统设计不合理，型腔内易产生紊流，致使大量气体

卷入。这些气体在铸件凝固时无法排出，会在内部形成气孔缺陷，降低铸件的强度、韧性等机械性能，使铸件在承受压力或负载时易破裂，严重影响产品质量和使用寿命<sup>[4]</sup>。同时，型腔壁面附近因摩擦阻力，金属液流速降低，形成边界层，阻碍热量传递，影响铸件表面凝固，导致表面粗糙度增加、出现局部冷隔，降低外观质量和尺寸精度。

通过对金属液流动形态的模拟分析，工程师能全面掌握其流动状态，进而优化浇注系统设计。调整浇口形状、尺寸、位置，改变金属液进入型腔的初始角度和速度，可使金属液平稳有序填充型腔，减少紊流和气体卷入风险，提高铸件质量。

## （二）温度场分布分析

充型过程中，温度场的分布情况犹如一个“隐形的指挥家”，对铸件的凝固过程和最终质量起着至关重要的调控作用。数值模拟技术凭借其强大的计算能力，能够实时、精确地计算金属液和铸型在充型过程中的温度变化，并以直观的温度场云图形式呈现出来。

在充型开始的瞬间，金属液处于高温液态，携带大量的热量。随着充型的进行，金属液与铸型之间发生强烈的热交换，热量不断从金属液传递到铸型中，金属液的温度逐渐降低<sup>[5]</sup>。然而，如果型腔内的温度分布不均匀，就如同在凝固的道路上设置了不同的“障碍”，会导致铸件各部位的凝固速度出现差异。

以铸件的厚壁部位为例，由于其体积较大，热容量高，热量散失相对较慢，在充型过程中温度下降的速度较为平缓。这使得该部位在凝固过程中成为一个“热节”区域，即热量相对集中、凝固时间较长的区域。在热节处，金属液凝固时产生的收缩无法得到及时、有效地补充，从而极易形成缩孔、缩松等缺陷。这些缺陷会严重削弱铸件的结构强度和致密性，降低铸件的整体质量，甚至可能导致铸件在后续的加工或使用过程中发生失效。

通过对温度场分布的模拟分析，能够提前准确地识别热节位置。基于此，工艺人员可以采取一系列有效的工艺措施来调整铸件的凝固顺序。例如，在热节附近设置冷铁，利用冷铁良好的导热性能，加快热节部位的冷却速度，使其与周围区域的凝固速度趋于一致；合理设计冒口的位置和尺寸，让冒口在铸件凝固过程中作为“补给站”，为热节处提供足够的补缩金属液，确保铸件实现顺序凝固，从而显著减少缩孔、缩松缺陷的产生，提高铸件的质量和性能<sup>[6]</sup>。

## （三）气体卷入与排出分析

在砂模铸造的充型环节中，气体卷入是导致铸件出现气孔缺陷的主要“元凶”之一。型腔内的气体来源较为复杂，主要包括砂型中原本存在的空气、水分蒸发产生的水蒸气以及涂料等添加剂在高温下分解产生的气体。

数值模拟技术能够如同“追踪器”一般，精确地追踪气体在型腔内的运动轨迹，详细分析气体的卷入和排出情况。当气体不能及时从型腔内排出时，就会在型腔内逐渐积聚。随着气体的不断积累，其在型腔内形成高压区域，如同筑起一道“屏障”，阻碍金属液的正常流动<sup>[7]</sup>。在这种情况下，金属液在填充型腔的过程中，会被迫裹挟这些气体，当铸件凝固后，这些气体就被困在铸



件内部,形成气孔缺陷。

为了有效解决这一问题,通过模拟分析可以对铸型的排气系统进行优化设计。一方面,可以增加排气通道的数量,使气体有更多地排出路径;另一方面,合理增大排气通道的尺寸,确保气体能够顺畅地排出,避免因通道狭窄而导致排气不畅。此外,精确设置排气位置也至关重要,需要根据气体在型腔内的运动规律,将排气口设置在气体容易积聚的区域,确保气体能够及时、有效地排出型腔,从而最大限度地减少气孔缺陷的产生,提高铸件的内部质量和可靠性。

### 三、基于数值模拟的砂模铸造工艺改进策略

在前文对砂模铸造充型过程深入分析的基础上,依托数值模拟技术,针对性地制定工艺改进策略,对提升砂模铸造工艺水平、保障铸件质量而言至关重要。下面将从浇注系统设计、充型关键参数调控、砂型与型芯性能优化,以及凝固过程控制等多个方面,详细阐述基于数值模拟的砂模铸造工艺改进策略。

#### (一) 浇注系统优化设计

浇注系统是引导金属液进入铸型型腔的通道,其设计的合理性直接影响充型过程和铸件质量。基于数值模拟结果,可以对浇注系统的结构和尺寸进行优化。首先,确定合适的浇口类型和位置<sup>[8]</sup>。浇口的类型有顶注式、底注式、侧注式等,不同的浇口类型会导致金属液在型腔内的流动性态不同。通过模拟不同浇口位置和类型下的充型过程,选择能够使金属液平稳填充型腔、减少紊流和气体卷入的浇口方案。其次,优化浇道的尺寸和形状。浇道的截面积和长度会影响金属液的流速和流量,通过模拟分析,确定合理的浇道尺寸,保证金属液在充型过程中具有合适的流速,避免流速过快或过慢。此外,还可以在浇道中设置过滤器,去除金属液中的夹杂物,提高铸件质量。

#### (二) 充型速度与浇注温度控制

充型速度和浇注温度是砂模铸造工艺中的重要参数,对充型过程和铸件质量有着显著影响<sup>[9]</sup>。通过数值模拟,可以确定不同铸件结构和材质下的最佳充型速度和浇注温度。对于薄壁铸件,为防止金属液在填充过程中过早凝固,需要较高的充型速度和浇注温度;而对于厚壁铸件,为避免金属液卷入过多气体和产生过大的热应力,充型速度和浇注温度应适当降低。在实际生产中,可以采用先进的浇注设备,如定量浇注机、自动浇注系统等,精确

控制充型速度和浇注温度,确保工艺参数的稳定性,提高铸件质量的一致性。

#### (三) 砂型与型芯性能优化

砂型和型芯的性能对充型过程和铸件质量也有着重要影响。通过数值模拟,可以分析砂型的透气性、紧实度和热物理性能对充型过程的影响,进而优化砂型和型芯的制备工艺。在保证砂型强度的前提下,提高砂型的透气性,有利于气体的排出,减少气孔缺陷的产生。可以通过选择合适的型砂粒度、添加透气剂等方法来提高砂型的透气性<sup>[10]</sup>。此外,合理控制砂型的紧实度,避免因紧实度过高导致透气性下降,或因紧实度过低导致砂型强度不足,引发冲砂等问题。对于型芯,还需要考虑其溃散性,以便在铸件凝固后能够顺利取出,减少清理工作量。

#### (四) 凝固控制与缺陷预防

凝固过程是铸件形成的关键阶段,合理控制凝固过程可以有效预防缩孔、缩松等缺陷的产生。基于数值模拟的温度场分析结果,可以通过设置冷铁、冒口等工艺措施,调整铸件的凝固顺序,实现顺序凝固。冷铁能够加快铸件局部区域的冷却速度,使铸件按照预定的顺序凝固,从而将缩孔转移到冒口部位,最后通过切除冒口去除缩孔缺陷。冒口的尺寸和位置应根据铸件的结构和凝固特性进行合理设计,确保其能够在铸件凝固过程中提供足够的补缩金属液。此外,还可以采用热节圆法、模数法等方法,对铸件的凝固过程进行理论分析,结合数值模拟结果,优化凝固控制工艺,提高铸件的致密性。

## 四、结束语

数值模拟技术为砂模铸造充型过程的分析和工艺改进提供了科学、高效的手段。通过对充型过程中金属液的流动形态、温度场分布和气体行为的模拟分析,能够深入了解充型过程的物理机制,准确预测可能出现的缺陷。基于模拟结果,采取针对性的工艺改进策略,如优化浇注系统设计、控制充型速度和浇注温度、提高砂型和型芯性能以及合理控制凝固过程等,可以有效提高铸件质量,降低生产成本,缩短生产周期。随着计算机技术和数值模拟算法的不断发展,数值模拟技术在砂模铸造领域的应用将更加广泛和深入,为铸造行业的技术进步和可持续发展提供强大的支持。

## 参考文献

- [1] 杨铁毅,郭为忠.3D打印砂模浇道曲线化设计与性能仿真[J].机械设计,2018,35(09):1-7.DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2018.09.001.
- [2] 杨铭,廖敦明,陈宇豪,等.基于Projection VOF方法的熔模铸造蜡模充型过程数值模拟[J].铸造,2023,72(02):107-114.
- [3] 时俊克.钛合金复杂薄壁构件离心熔模铸造充型与凝固过程数值模拟[D].华中科技大学,2022.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2022.000978.
- [4] 彭静,郭玲宏.消失模铸造充型过程的数值模拟分析[J].成都纺织高等专科学校学报,2012,29(03):5-7+16.
- [5] 方圆,周吉祥,于赞,等.排气歧管熔模铸造充型和凝固过程数值模拟与优化[J].常州大学学报(自然科学版),2013,25(03):45-49.
- [6] 杨智鹏.双相钢闭式循环泵后导叶数值模拟研究及铸造工艺优化[D].哈尔滨理工大学,2016.
- [7] 杜晓明,张倩,黄勇,等.消失模铸造充型过程中的气膜压力及其厚度的数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2011,31(12):1136-1139.
- [8] 宿文龙.镁合金消失模铸造充型性能数值模拟[D].太原科技大学,2011.
- [9] 刘太权,朱权利,白砚飞,等.炉排片熔模铸造充型与凝固过程的数值模拟及验证[J].热加工工艺,2009,38(15):46-49.
- [10] 王延露.基于MAGMASoft的铸造充型凝固过程分析与研究[D].兰州理工大学,2006.

# 线路鸟害故障分析与防治

许莉<sup>1</sup>, 王盛<sup>1</sup>, 李金娥<sup>2</sup>, 李俊锋<sup>3</sup>

1. 荆州三新供电服务有限公司荆城分公司, 湖北 荆州 434000

2. 荆州三新公司供电服务有限公司江陵分公司, 湖北 荆州 434000

3. 华强方特(荆州)旅游发展有限公司, 湖北 荆州 434000

DOI:10.61369/ERA.2025060013

**摘要 :** 本文全面分析输电线路鸟害故障的形成原因和影响, 通过案例统计展示鸟类筑巢、排泄物闪络及撞击行为的危害特点。针对传统防治措施的不足, 提出综合防治体系, 结合鸟类行为研究和电力工程技术, 实现线路安全运行和生态保护都能做好。研究显示, 不同情况采取不同防治策略能明显降低鸟害故障率, 推动电网向绿色智能方向发展。

**关键词 :** 鸟害故障; 输电线路; 防治技术; 生态保护

## Analysis and Prevention of Bird Damage Faults on Overhead Transmission Lines

Xu Li<sup>1</sup>, Wang Sheng<sup>1</sup>, Li Jin'e<sup>2</sup>, Li Junfeng<sup>3</sup>

1.Jingzhou Sanxin Power Supply Service., Ltd. Jingcheng Branch, Jingzhou, Hubei 434000

2.Jingzhou Sanxin Power Supply Co., Ltd. Jiangling Branch. Jingzhou, Hubei 434000

3.Huaqiang Fangte (Jingzhou) Tourism Development Co., Ltd. Jingzhou, Hubei 434000

**Abstract :** This paper comprehensively analyze the formation and effects of bird damage faults on transmission lines, and through case statistics, it shows the hazards of bird nesting, excrement flashover, and collision behavior. In view the shortcomings of traditional prevention and control measures, this paper proposes a comprehensive prevention and control system, combines bird behavior research and power engineering technology, and achieves safe operation of lines and protection. The research shows that different prevention and control strategies can significantly reduce the incidence of bird damage faults and promote the development of the power grid towards a green and intelligent direction.

**Keywords :** bird damage fault; overhead transmission line; prevention and control technology; ecological protection

## 引言

### (一) 研究背景

在全球, 随着经济快速发展, 电网规模不断扩大。但是, 这个过程和生态保护的矛盾越来越大。鸟类是生态系统重要部分, 它们的活动和输电线路经常碰到, 鸟害已经成了输电线路故障的重要原因。在我国, 特高压工程集中的地方, 鸟害事故率逐年上升, 平均每年增长 12%。比如, 华东某特高压线路区域, 因为鸟害造成的故障次数从 2015 年的 15 次, 很快增加到 2020 年的 26 次, 严重影响电网稳定运行。

### (二) 研究意义

#### 1. 经济层面

鸟害故障给电力系统带来很大经济损失。统计显示, 一次鸟害故障直接损失超过 50 万元, 这包括设备维修、换零部件等费用。它间接造成的停电影响更大, 能到千万元级别, 包括工业生产停了、商业活动中断, 还有居民生活受影响带来的一系列经济损失。拿某大型工业园区来说, 一次因鸟害停电事故, 让园区很多企业停工停产, 直接经济损失 80 万元, 像订单延误赔偿、设备重启损耗等间接损失, 加起来超过 1500 万元<sup>[1]</sup>。

#### 2. 生态层面

全球气候变化, 人类活动影响自然环境, 鸟类种群的迁徙路线和栖息地分布有很大变化。这给输电线路鸟害防治工作带来新挑战。一些以前不在输电线路附近栖息的鸟类, 因为栖息地改变, 开始在杆塔上筑巢, 或者在导线附近活动, 增加了鸟害故障发生的可能性。比如, 一些珍稀候鸟迁徙路线因为湿地环境变化改变了, 有的路线和新建输电线路重合, 让这些地方鸟害防治形势更严峻。

## 一、鸟害故障类型与典型案例解析

### （一）故障分类体系

#### 1. 筑巢类故障

大型鸟类，像喜鹊、乌鸦等，选筑巢地方时，经常喜欢输电线路的杆塔。它们用的巢材很多，铁丝、树枝、布条等导电材料的使用比例超过 80%。这些导电巢材在杆塔上搭的鸟巢离带电部位太近，很容易引起线路短路故障。例如，华北某 220kV 输电线路，一只喜鹊用铁丝和树枝搭了个鸟巢，鸟巢的部分铁丝不小心搭在两相导线之间，线路马上短路跳闸，造成大面积停电事故<sup>[2]</sup>。

#### 2. 排泄物类故障

鸟类排泄物一般有盐分和水分，导电性强。鸟粪排在绝缘子串上，会沿着绝缘子表面形成导电通道，引起绝缘子闪络故障<sup>[3]</sup>。特别是在潮湿天气，鸟粪导电性更强，闪络风险大大增加。在华南某 500kV 输电线路，这地方鸟类活动多，大多是大型水鸟，排泄物多。一次连续降雨后的潮湿天气，鸟粪在绝缘子串上形成明显导电通道，绝缘子闪络，线路跳闸<sup>[4]</sup>。

#### 3. 撞击类故障

猛禽，像鹰、隼等，捕食或飞行时，有时因为视线不好或者判断错，撞到输电线路的复合绝缘子上。它们撞击力大，可能让复合绝缘子的伞裙破了、芯棒断了，影响绝缘子的绝缘性能和机械强度。在东北某 110kV 输电线路，一只鹰追猎物时，很快撞到复合绝缘子上，绝缘子好几个伞裙破裂，严重威胁线路安全运行。

### （二）区域差异分析

#### 1. 东北林区

东北林区森林资源丰富，是很多大型鸟类的栖息地。这地方输电线路，大型鸟类筑巢现象很多。以某 500kV 线路为例，这条线路穿过东北林区的部分，每年因为鸟类筑巢引起的故障次数有 12 次。这些大型鸟类喜欢用树枝、铁丝等材料在杆塔上搭大鸟巢，鸟巢大，和带电部位距离难保证安全，很容易引起短路故障。

#### 2. 东南湿地

东南湿地是很多候鸟迁徙停歇的地方。候鸟迁徙季节，大量候鸟聚集，它们排泄物引起的闪络故障是这地方输电线路的主要问题。比如，华东某 220kV 线路，线路周边湿地面积大，候鸟迁徙时，线路跳闸率比其他季节提高 40%。候鸟在杆塔上排很多粪便，潮湿环境下，鸟粪很快形成导电通道，绝缘子经常闪络<sup>[5]</sup>。

### （三）时间分布规律

#### 1. 春季筑巢高峰期

春季（3—5 月）属于鸟类繁殖季节，也是筑巢高峰期。这个时候，鸟害故障在全年故障总数里占比能到 65%。好多鸟类忙着找合适地方和材料筑巢。输电线路的杆塔又高，视野又开阔，就

成了鸟类筑巢的好地方。很多杆塔上都有鸟类筑巢，这就大大提高了线路短路故障出现的可能性。

#### 2. 冬季大雾天气

到了冬季大雾天气，空气湿度大，鸟粪里的水分不好蒸发，导电性变强。有研究显示，这种天气下，鸟粪闪络的概率比正常天气高 3 倍。大雾还影响鸟类视线，让它们在杆塔上排泄更频繁，又增加了闪络故障的风险。在华中某输电线路，冬季大雾天多次出现因鸟粪闪络造成的线路跳闸事故。

## 二、鸟害故障机理研究

### （一）鸟类行为学分析

#### 1. 巢材选择偏好

观察研究很多鸟类筑巢行为发现，鸟类选巢材有偏好。铁丝、布条等细长又有柔韧性的材料，因为容易搭建和固定鸟巢，是鸟类首选。分析 200 个鸟巢的巢材，发现铁丝、布条等导电材料使用率超过 80%。这些导电巢材在杆塔上搭的鸟巢，一旦和带电部位接触，就有短路隐患。

#### 2. 排泄物成分检测

检测鸟类排泄物成分，发现里面有氯化钠、氯化钾等多种盐分，还有一定比例水分。这些成分让鸟粪导电性强。在实验室模拟环境，把鸟粪涂在绝缘子表面，加一定电压，鸟粪表面形成明显导电通道，证明鸟粪导电性强会影响绝缘子闪络。

### （二）电气故障触发机制

#### 1. 鸟粪闪络动态建模

建立鸟粪闪络动态模型，研究粪流路径和空气间隙击穿临界条件的关系。模拟不同长度、形状粪流在绝缘子表面分布，还有不同电场强度下空气间隙击穿过程，发现粪流长度到一定值，空气间隙电场强度超过临界值，就会引起绝缘子闪络。比如模拟实验中，粪流长度到绝缘子串长度的 1/3，空气间隙电场强度到 20kV/cm 时，绝缘子闪络<sup>[6]</sup>。

#### 2. 撞击力学仿真

用有限元分析软件对不同鸟类撞击绝缘子过程做力学仿真。研究不同鸟类体重、飞行速度等因素对撞击力的影响，还有撞击力对绝缘子机械强度的破坏程度。结果显示，大型猛禽高速飞行撞绝缘子时，撞击力能有好几吨，能让绝缘子伞裙破、芯棒变形，严重影响绝缘子性能。比如，一只体重 3kg、飞行速度 30m/s 的鹰撞复合绝缘子，产生的撞击力大概 2.7kN，超过绝缘子设计承受力。

### （三）环境耦合作用

#### 1. 强降雨后鸟巢吸水率增加

强降雨时，鸟巢吸水率明显增加。实验测量，强降雨后鸟巢吸水率能增加 50%。吸水后鸟巢变重，导电性也增强，鸟巢和带电部位短路风险大大提高。在西南某输电线路，一次强降雨



后，鸟巢吸水变重下垂，和导线接触，引起短路故障。

## 2. 大风天气鸟巢脱落引发多相接地故障

大风时，杆塔上鸟巢容易被风吹掉。鸟巢掉的时候，可能同时碰到多相导线，引起多相接地故障。分析很多大风天气鸟害故障案例，确定风速阈值是 25m/s。风速超过这个值，鸟巢脱落概率明显增加。在西北一次大风天气，风速到 28m/s，多条输电线路上鸟巢被吹落，造成多起多相接地故障，大面积停电。

## 三、现有防治技术评估与优化

### （一）传统技术局限性

#### 1. 防鸟刺有效率仅 68%

防鸟刺是常见鸟害防治装置，在杆塔上装尖锐刺状结构，不让鸟类在杆塔停留和筑巢。但实际用的时候发现，防鸟刺有效率只有 68%。有些鸟类，像喜鹊等，适应能力强，能在防鸟刺间隙找地方筑巢。而且防鸟刺安装位置和角度不合适，也影响防护效果。防鸟刺还会给线路检修带来麻烦，增加检修人员工作难度和安全风险<sup>[7]</sup>。

#### 2. 驱鸟剂需频繁补涂，环保隐患突出

驱鸟剂靠散发刺激气味或味道赶鸟。但驱鸟剂效果持续时间短，一般 15 天就得重新涂一次，不仅增加维护成本，还费很多人力。部分驱鸟剂有对环境有害的化学成分，长期用可能污染土壤、水源等，环保隐患大。比如，有些驱鸟剂化学物质会留在土壤里，影响土壤微生物活性，对周边生态环境有不良影响。

### （二）新技术进展

#### 1. 智能声波驱鸟器：动态变频技术降低适应性

智能声波驱鸟器用动态变频技术，能根据鸟类行为和环境变化自动调整发出声波频率和强度。模拟多种鸟类天敌声音和鸟类不舒服的声音，有效赶鸟。和传统声波驱鸟器比，智能声波驱鸟器能避免鸟类适应单一频率声波，提高驱鸟效果。在华南某输电线路装智能声波驱鸟器后，鸟类活动明显减少，鸟害故障发生率降低 30%。

#### 2. 光纤振动监测：鸟巢搭建实时预警系统

光纤振动监测系统利用光纤敏感特性，实时监测输电线路杆塔振动情况。鸟类在杆塔搭鸟巢，活动会引起杆塔微小振动，光纤振动监测系统能及时捕捉这些振动信号，通过数据分析判断是不是鸟巢搭建行为。确认后，系统马上发预警信息，通知运维人员处理。在华北试点应用，这个系统成功预警 18 起鸟巢搭建事件，有效避免鸟害故障发生<sup>[8]</sup>。

### （三）材料创新

#### 1. 疏水涂层绝缘子：鸟粪附着率降低 75%

疏水涂层绝缘子在绝缘子表面涂一层疏水材料，让鸟粪难附着在绝缘子表面。实验测试，疏水涂层绝缘子鸟粪附着率比普通绝缘子降低 75%。鸟粪落在疏水涂层绝缘子表面，因为表面

疏水，鸟粪很快滑落，不会形成导电通道，降低绝缘子闪络风险。在华东某输电线路换疏水涂层绝缘子后，鸟粪闪络故障明显减少。

#### 2. 芳纶纤维防鸟罩：兼具防护与透光性

芳纶纤维防鸟罩用芳纶纤维材料做的，强度高、耐腐蚀。这个防鸟罩透光性好，不会明显影响鸟类视觉，减少鸟类因视觉问题撞击的可能。芳纶纤维防鸟罩能有效保护绝缘子不被鸟类撞击和筑巢破坏。在华中某输电线路装芳纶纤维防鸟罩后，没发生过因鸟类撞击让绝缘子损坏的事。

## 四、综合防治体系构建

### （一）三级防御策略

#### 1. 源头防控：生态廊道建设引导鸟类远离线路

在输电线路周边建生态廊道，种适合鸟类栖息的树木、灌木等植物，给鸟类合适栖息地，引导鸟类远离输电线路。在生态廊道设人工鸟巢、鸟类喂食点等设施，吸引鸟类在这活动。比如，华北某输电线路沿线，建了一条 50 米宽的生态廊道，种了很多本地树种和花卉。观察一年发现，这区域鸟类在输电线路活动明显减少，鸟害故障发生率降低 40%<sup>[9]</sup>。

#### 2. 过程监测：无人机红外巡检 + 智能传感器网络

用无人机装红外热像仪定期检查输电线路，能很快发现杆塔上鸟巢、鸟类活动，还有设备发热等异常情况。在输电线路装智能传感器网络，实时监测线路电气参数、振动情况等信息。传感器检测到异常数据，系统自动分析发预警。比如，华南某输电线路部署无人机红外巡检系统和智能传感器网络后，能及时发现处理鸟害隐患，鸟害故障发现时间比传统人工巡检缩短 80%。

#### 3. 应急处理：移动式激光驱鸟平台

在鸟害故障多的地方，设移动式激光驱鸟平台。监测系统发现鸟类在输电线路附近活动，可能威胁线路安全，移动式激光驱鸟平台马上启动，发射低能量激光束赶鸟。激光束强度和照射范围能根据实际情况调整，既能有效赶鸟，又不伤害鸟类。在西北一次鸟害应急处理中，移动式激光驱鸟平台成功驱散聚在输电线路附近的很多鸟类，避免鸟害故障发生。

### （二）差异化防治方案

#### 1. 城市郊区：超声波驱鸟 + 人工鸟巢安置

在城市郊区，人口密度相对高，环境复杂，用超声波驱鸟器和人工鸟巢安置的办法比较合适。超声波驱鸟器装在杆塔上，发超声波赶鸟。在离输电线路远的合适地方放人工鸟巢，给鸟类提供别的筑巢地方。比如，华东某城市郊区输电线路，装了 30 个超声波驱鸟器，设了 20 个人工鸟巢。运行一段时间，这区域鸟害故障发生率降低 50%<sup>[10]</sup>。

#### 2. 原始森林：绝缘子伞裙结构优化 + 生态补偿机制

在原始森林地区，生态环境脆弱，鸟类种类和数量多，用绝

缘子伞裙结构优化和生态补偿机制的方案。优化绝缘子伞裙形状和尺寸，让鸟粪难滑落，降低绝缘子闪络风险。建立生态补偿机制，对输电线路建设影响的鸟类栖息地补偿，像开展森林植被恢复、湿地保护等项目。在东北某原始森林地区输电线路用这个方案后，鸟害故障得到有效控制，也保护了当地生态环境。

## 五、结语

文章深入分析输电线路鸟害故障，成功建了“监测－预警－处置”闭环防治体系，明显降低鸟害故障率。实践证明，这个体

系给特高压工程提供全生命周期鸟害管理方案，很有应用价值。随着物联网技术快速发展，智能防治系统可能实现自适应变化，进一步提高防治效果。同时，生态保护和电网安全的平衡机制还得深入研究，推动电网行业可持续发展。

## 参考文献

- [1] 徐秋. 基于YOLOv7的输电线路鸟害检测及危害鸟种识别研究 [D]. 南昌大学, 2024.DOI:10.27232/d.cnki.gnchu.2024.000891.
- [2] 帅埏灵. 110kV 输电线路硅橡胶包覆均压环鸟粪闪络特性研究 [D]. 重庆理工大学, 2024.DOI:10.27753/d.cnki.gcqgx.2024.000647.
- [3] 邱海阳, 李亮海, 郑海波. 油田6(10)kV 电力配网线路隐患现状分析及对策措施 [J]. 化工安全与环境, 2024, 37(03): 12–14.
- [4] 陆阳, 徐茜, 周刚, 等. 一起220 kV 变电站鸟害故障跳闸分析 [J]. 农村电气化, 2024, (01): 77–79.DOI:10.13882/j.cnki.ncdqh.2024.01.020.
- [5] 谢康胜. 一起10kV 配电线路鸟害事故分析及防治措施 [J]. 大众用电, 2023, 38(12): 41–42+47.
- [6] 王翼虎, 徐浩. 330kV 紧凑型铁塔鸟害故障研究 [J]. 电工技术, 2023, (22): 202–205.DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2023.22.061.
- [7] 王涛, 刘浩, 刘宁波, 等. 架空输电线路新型防鸟装置的研制及应用 [J]. 宁夏电力, 2023, (06): 55–59.
- [8] 吴菲. 试论输电线路架设及故障预防 [J]. 产品可靠性报告, 2023, (09): 107–108.
- [9] 李志鹏. 输电线路运行维护及状态检修技术 [J]. 光源与照明, 2023, (07): 93–95.
- [10] 邵建涛. 电力输电线路运行维护与故障排除研究 [J]. 光源与照明, 2023, (04): 165–167.

# 基于大数据分析的反窃电技术与应用研究

杨卓, 张雪, 吕国昭

国网武汉市经开区(汉南区)供电公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ERA.2025060014

**摘要 :** 电力行业不断发展, 窃电行为给供电企业造成经济损失, 还威胁电力系统安全。本文研究基于大数据分析的反窃电技术与应用。通过分析大数据技术原理、电力数据特点和反窃电业务, 构建反窃电技术体系。结合实际案例, 说明该技术在反窃电预警、现场核查和工作协同管理方面的应用, 分析应用效果和面临的挑战, 提出应对策略, 为供电企业反窃电工作提供新思路和方法。

**关键词 :** 大数据分析; 反窃电技术; 电力数据; 预警系统

## Research on Anti-Stealing Technology and Application Based on Big Data Analysis

Yang Zhuo, Zhang Xue, Lv Guozhao

State Grid Wuhan Economic Development Zone (Hannan District) Power Supply Company, Wuhan, Hubei 430000

**Abstract :** With the continuous development of the power industry, the behavior of electricity theft causes economic losses to power supply enterprises and also threatens the safety of the power system. This studies the anti-electricity theft technology and application based on big data analysis. Through the analysis of the principles of big data technology, the characteristics of power data and the anti-ity theft business, the anti-electricity theft technology system is constructed. Combined with practical cases, the application of this technology in anti-electricity theft early warning, on- verification and work collaboration management is explained, and the application effect and challenges faced are analyzed. Finally, corresponding strategies are put forward to provide new ideas and methods for the anti-ity theft work of power supply enterprises.

**Keywords :** big data analysis; anti-electricity theft technology; power data; early warning system

## 引言

电力是国民经济的重要能源, 稳定供应对社会运转和经济发展很重要。但是, 窃电行为一直困扰供电企业。窃电让供电企业损失电量, 损害经济利益, 还可能损坏电力设备, 影响电力系统安全, 甚至引发安全事故, 威胁公众生命财产安全。传统反窃电技术靠人工巡检和经验判断, 效率低, 难以发现隐蔽窃电行为。随着信息技术发展, 大数据技术进入各个领域。在电力行业, 大数据技术为反窃电工作带来新机会。分析海量电力数据, 能发现异常用电行为, 精准识别和打击窃电行为。因此, 研究基于大数据分析的反窃电技术有现实意义, 有助于提升供电企业管理水平, 维护电力市场秩序。

## 一、反窃电工作概述与大数据技术基础

### (一) 反窃电工作现状

#### 1. 窃电行为的类型与特点

窃电行为手段多样, 常见的有绕越计量装置窃电、改变计量装置接线窃电、伪造或开启计量装置封印窃电, 以及用高科技手段干扰计量装置工作。随着技术发展, 窃电行为更隐蔽、智能化程度更高。一些窃电者用专业工具和技术, 让窃电行为难以被发现, 增加了反窃电工作难度。而且, 窃电行为分布范围广, 涉及

居民、商业和工业等各类用户, 让反窃电工作更复杂<sup>[1]</sup>。

#### 2. 传统反窃电技术与方法

传统反窃电技术依靠人工巡检、用户举报和简单电气检测设备。人工巡检是工作人员定期到现场检查计量装置和线路连接, 寻找窃电线索。用户举报借助社会力量获取窃电信息。简单电气检测设备如钳形电流表、相位伏安表, 用来检测电流、电压等参数, 判断是否有窃电嫌疑。但是, 这些方法有很多缺点。人工巡检效率低、覆盖面有限, 难以满足大量用户的检查需求; 用户举报信息可能不准确、不及时; 简单检测设备只能发现明显的窃电

行为，对隐蔽窃电手段无效。

## （二）大数据技术及其在电力领域的应用

### 1. 大数据技术原理与特点

大数据技术是从海量、复杂数据中快速、准确提取有价值信息的技术。核心原理包括数据采集、存储、处理和分析。大数据数据量大、类型多样、处理速度快、价值密度低。通过分布式存储和并行计算技术，大数据技术能高效处理海量数据，挖掘数据关系，为决策提供支持。在电力领域，大数据技术能帮助企业管理电力数据，优化电力系统运行，提高服务质量<sup>[2]</sup>。

### 2. 电力大数据的来源与特点

电力大数据来源广泛，包括电力生产过程数据，如发电厂、变电站运行数据；电力营销数据，如用户用电信息、缴费记录；还有电网设备监测数据。电力大数据实时性强、准确性高、连续性好。这些数据能全面反映电力系统运行状态和用户用电行为，为反窃电技术提供丰富数据资源。分析这些数据，能及时发现电力系统异常，识别窃电行为。

### 3. 大数据技术在电力领域的应用现状

目前，大数据技术在电力领域应用取得一定成果。在电力系统运行管理方面，分析电网设备监测数据，能评估设备状态、预测故障，提前安排检修，提高电网可靠性。在电力营销方面，用大数据分析用户用电习惯和需求，开展精准营销，提高客户满意度。在反窃电领域，部分供电企业开始用大数据技术，分析用户用电数据，建立反窃电模型，识别窃电嫌疑用户，取得一定成效。但是，大数据技术在反窃电领域还处于探索阶段，还有很大提升空间<sup>[3]</sup>。

## 二、基于大数据分析的反窃电技术体系构建

### （一）反窃电数据采集与预处理

#### 1. 数据采集方案

为获取全面、准确的电力数据，要制定合理的数据采集方案。数据采集范围要涵盖电力生产、营销和设备监测各个环节，包括用户基本信息、用电数据、电表状态数据和电网运行数据。采集方式可以自动采集和人工采集相结合。自动采集通过智能电表、数据采集终端实时获取电力数据；人工采集补充无法自动采集的数据，如现场勘查记录。同时，要保证数据采集准确、完整，建立数据质量监控机制，及时发现和纠正数据采集错误<sup>[4]</sup>。

#### 2. 数据清洗与转换

采集到的数据可能有噪声、缺失值和异常值，需要进行数据清洗。数据清洗通过去除重复数据、填补缺失值、纠正错误数据，提高数据质量。数据转换是把采集到的数据转换成适合分析的格式，如把文本数据转换成数值数据，对数据进行标准化处理。通过数据清洗和转换，为数据分析提供可靠的数据基础。

### 3. 数据存储与管理

海量电力数据需要高效存储和管理。可以用分布式存储技术，如 Hadoop 分布式文件系统（HDFS），把数据分散存储在多个节点上，提高存储容量和读写性能。同时，建立数据管理系统，对数据分类管理，设置访问权限，保证数据安全、可用。通过数据存储和管理，方便查询和分析数据。

## （二）反窃电数据分析模型构建

### 1. 数据特征提取与选择

构建反窃电数据分析模型前，要从大量电力数据中提取和选择与窃电行为相关的特征。常见特征有用户用电功率、电流、电压、功率因数等电气参数，以及用户用电时间、用电习惯等行为特征。通过特征提取，把原始数据转化为更具代表性的特征向量，减少数据维度，提高模型训练效率和准确性。同时，用特征选择算法去除冗余和无关特征，优化特征集。

### 2. 常用数据分析算法介绍

反窃电数据分析常用的算法有聚类算法、分类算法和关联规则挖掘算法。聚类算法如 K-Means 算法，能把用户按用电行为特征聚类，发现异常聚类，识别窃电嫌疑用户。分类算法如支持向量机（SVM）、决策树，能根据已知的窃电和正常用电样本训练分类模型，对新用户数据分类，判断是否有窃电行为。关联规则挖掘算法如 Apriori 算法，能挖掘用户用电数据的关联关系，发现潜在窃电模式<sup>[5]</sup>。

### 3. 模型构建与训练

根据选择的算法和特征集，构建反窃电数据分析模型。模型训练时，把采集到的电力数据分为训练集和测试集。训练集用来训练模型，调整模型参数，让模型准确识别窃电行为；测试集用来评估模型性能，检验模型准确性和泛化能力。通过不断调整模型参数和优化算法，提高模型性能。

## （三）反窃电模型评估与优化

### 1. 模型评估指标与方法

为评估反窃电模型性能，要采用一系列评估指标，如准确率、召回率、F1 值。准确率是模型正确识别窃电和正常用电的比例；召回率是模型正确识别窃电行为的比例；F1 值综合考虑准确率和召回率。常用评估方法有交叉验证法和留出法。通过评估模型，了解模型性能好坏，为模型优化提供依据。

### 2. 模型优化策略

针对模型评估发现的问题，采取相应优化策略。可以通过调整模型参数、改进算法、增加训练数据，提高模型准确性和泛化能力。还可以结合多种算法，构建集成模型，发挥不同算法优势，提升模型性能。同时，定期更新和优化模型，适应不断变化的窃电形势<sup>[6]</sup>。



### 三、基于大数据分析的反窃电技术应用实践

#### （一）反窃电预警系统设计与实现

##### 1. 系统架构设计

反窃电预警系统采用分层架构，包括数据采集层、数据处理层、模型分析层和应用展示层。数据采集层通过智能电表、传感器收集电力数据，保证数据实时、准确。数据处理层用数据清洗算法对采集到的数据去噪、转换格式，再存储到数据库。模型分析层集成多种反窃电数据分析模型，通过大数据运算识别窃电嫌疑用户。应用展示层用可视化技术，把分析结果以图表、报表形式呈现给工作人员，推送预警信息。分层架构提高了系统可扩展性和稳定性，为反窃电工作提供技术支持。

##### 2. 预警指标体系建立

建立科学的预警指标体系是反窃电预警系统的关键。预警指标包括电气参数指标和行为特征指标。电气参数指标中，电流、电压、功率因数等参数的异常变化可能是窃电信号。行为特征指标中，用户用电时间突然改变、用电量大幅波动等情况要重点关注。根据不同指标对窃电行为判断的重要性，用层次分析法设置权重，综合计算得出预警分值。根据预警分值，把用户窃电嫌疑程度分为不同等级，为核查工作提供指引<sup>[7]</sup>。

##### 3. 系统功能实现与应用案例

反窃电预警系统实现了数据采集、分析、预警和报表生成功能。工作人员通过系统能实时查看用户用电曲线、功率趋势等信息，及时获取窃电预警信息。以某供电公司为例，应用反窃电预警系统后，系统监测到某区域用户深夜用电量异常激增。工作人员根据预警信息调查，成功查处多起窃电案件，挽回大量经济损失。实际案例证明，反窃电预警系统在打击窃电行为中有效、实用。

#### （二）反窃电现场核查与证据固定

##### 1. 现场核查流程优化

接到反窃电预警信息后，要对嫌疑用户进行现场核查。为提高核查效率，先分析预警信息，结合用户历史用电数据、设备运行情况，制定详细核查计划，明确核查重点和方法。现场核查时，用专业检测设备如钳形电流表、相位检测仪，检查计量装置、线路连接，收集窃电证据。同时，和用户沟通，询问用电情况，核实异常原因，排除设备故障、操作失误导致的用电异常<sup>[8]</sup>。

##### 2. 证据固定技术与方法

证据固定是反窃电工作的重要环节。用拍照、录像、现场笔录等方式固定窃电现场证据。拍照要记录窃电设备位置、连接方式等信息；录像要涵盖核查全过程，保证证据完整。对于电子证据，如电表数据、用电记录，用专业数据备份工具备份，加密保全。通过规范证据固定流程，保证证据合法、真实、完整，为法律诉讼提供支持。

#### （三）反窃电工作协同与管理

##### 1. 部门间协同机制建立

反窃电工作涉及多个部门，如营销部门、运维部门、法律部门。建立部门间协同机制，明确各部门职责分工，对提高反窃电工作效率很重要。营销部门用掌握的用户用电数据，为反窃电工作提供数据支持，发现异常用电线索。运维部门负责现场核查和设备维护，实地排查嫌疑用户，保证设备正常运行。法律部门处理窃电案件法律事务，为反窃电工作提供法律保障。各部门沟通协作，形成反窃电工作合力<sup>[9]</sup>。

##### 2. 反窃电绩效考核体系构建

构建反窃电绩效考核体系，考核评价各部门和工作人员的反窃电工作。考核指标包括窃电案件查处数量、挽回经济损失金额、预警信息准确率等。设置明确考核标准，对表现优秀的部门和个人表彰奖励，对工作不力的督促整改。绩效考核能激励工作人员参与反窃电工作，通过分析考核数据，发现工作薄弱环节，优化反窃电工作流程，提高工作效率和质量。

### 四、基于大数据分析的反窃电技术应用效果与挑战

#### （一）应用效果分析

##### 1. 经济效益评估

基于大数据分析的反窃电技术给供电企业带来显著经济效益。过去，窃电行为隐蔽，供电企业排查困难，电量损失大。现在，借助大数据分析技术，系统能实时监测用户用电数据，定位异常用电行为。比如，某供电公司部署该技术后，通过大数据模型分析，识别出多个隐蔽窃电团伙。查处这些窃电行为后，每年挽回数百万元经济损失。同时，反窃电工作效率提高，减少了人工成本，降低运营资源消耗，实现降本增效。

##### 2. 社会效益评估

高效开展反窃电工作产生积极社会效益。一方面，保障了电力系统安全稳定运行。窃电行为破坏电网正常运行，影响电力供应稳定性。打击窃电能为公众提供可靠电力供应，满足生活和生产用电需求。另一方面，营造了公平竞争的市场环境。窃电是不正当竞争，损害合法用电企业利益。打击窃电能促进电力市场有序竞争，推动电力行业健康发展，助力社会经济稳定发展。

#### （二）面临的挑战与应对策略

##### 1. 数据安全和隐私保护问题

大数据分析过程中，数据安全和隐私保护很重要。电力数据包含用户个人信息和用电行为信息，一旦泄露，用户隐私会被侵犯，财产安全可能受威胁。比如，不法分子获取用电数据后可能实施诈骗。为应对这一问题，供电企业要加强数据安全管理体系建设，用加密技术加密传输和存储的数据，防止数据被窃取。同时，用访问控制技术限制人员数据访问权限，制定数据使用规范，防止数据滥用，保护用户隐私。



## 2. 技术更新与人才短缺问题

大数据技术和反窃电技术不断发展，窃电手段也在翻新。目前，供电企业普遍存在技术更新滞后和人才短缺问题。一些地区因为技术更新不及时，难以识别新型窃电行为，又缺乏专业技术人才，无法有效应用新技术。为解决这一问题，供电企业要加大技术研发投入，引进先进反窃电技术和设备，提高技术水平。还要制定人才培养计划，定期组织内部培训，为员工提供进修机会，培养反窃电专业人才<sup>[10]</sup>。

## 3. 法律法规与标准规范不完善问题

我国反窃电方面的法律法规和标准规范还不完善，给反窃电工作带来困难。处理窃电案件时，法律依据不足，对新型窃电行为定性困难，处罚标准不明确，执法自由裁量权过大。比如，不同地区对同类窃电案件处罚差异大。为解决这一问题，相关部门

要完善反窃电法律法规和标准规范，明确窃电行为界定标准，细化处罚标准，规范执法程序，为反窃电工作提供法律支持。

## 五、结语

基于大数据分析的反窃电技术为供电企业打击窃电行为提供了新的有效手段。通过构建完整的技术体系，实现了对窃电行为的精准识别和有效打击，取得了良好的经济效益和社会效益。然而，在应用过程中仍面临数据安全、技术更新、法律法规不完善等诸多挑战。未来，需要进一步加强技术创新，完善法律法规，培养专业人才，推动基于大数据分析的反窃电技术不断发展，为电力行业的健康发展保驾护航。

## 参考文献

- [1] 杨帅. 电力电网大数据驱动的反窃电分析 [J]. 互联网周刊, 2024, (21): 18–20.
- [2] 张杰, 蔺雪震, 高燕增. 基于大数据分析的供电所反窃电自动检验技术 [J]. 电气技术与经济, 2024, (09): 113–115.
- [3] 崔亚洲, 曹敬立, 王玉君, 等. 基于电力营销大数据技术的反窃电检查应用分析 [J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(05): 131–134+162.
- [4] 李慧翔, 刘博. 电力营销大数据在反窃电检查中的应用分析 [J]. 电气技术与经济, 2024, (04): 240–242.
- [5] 王玮, 李梦宇, 耿泉峰. 基于电力大数据分析的反窃电平台应用研究 [J]. 农村电工, 2021, 29(11): 51–52.
- [6] 梅畔畔. 大数据分析在物流运输中的应用 [J]. 中国航务周刊, 2025, (11): 63–65.
- [7] 李晓亭, 叶亮. 基于大数据分析的物流规划方法探讨 [J/OL]. 综合运输, 1–8[2025–03–29].
- [8] 周前飞, 曹宏伟, 庆光蔚, 等. 基于大数据分析的电梯应急处置智能引导方法 [J]. 物联网技术, 2025, 15(06): 107–112.
- [9] 吴恒. 基于大数据分析的工程安全治理机制探析 [J]. 边疆经济与文化, 2025, (03): 48–52.
- [10] 崔玉萍, 刘昀雯. 基于大数据分析的创新创业团队决策支持系统设计 [J]. 农机使用与维修, 2025, (03): 28–30.

# 探究人性五大需求对地图绘制的启示与应用

王婷

广东省地图院, 广东 广州 510075

DOI:10.61369/ERA.2025060015

**摘 要 :** 为了让地图设计者在地图绘制时少走弯路, 地图绘制成果更加满足用户需求, 本文立足人性五大需求新视角, 针对构建用户需求理论基本框架、各需求在地图设计中的体现、各需求与地图设计的实现方法、自我实现需求的动机如何促进地图绘制创新等方面, 结合实例深入探究了人性五大需求在地图绘制领域中的启示与应用。通过实证表明, 将人性需求对地图绘制的启示深刻理解并巧妙融入地图绘制, 是地图绘制成果迈向卓越的关键。

**关 键 词 :** 人性五大需求; 地图设计; 地图绘制; 用户需求; 绘制创新

## Exploring the Enlightenment and Application of the Five Demands of Human Nature to Map Drawing

Wang Ting

Guangdong Cartographic Institute, Guangzhou, Guangdong 510075

**Abstract :** In order to reduce the detours of map designers in map drawing and make the results of map drawing better meet the needs of users, this article is on the new perspective of the five human needs. It deeply explores the enlightenment and application of the five human needs in the field of map drawing, such as the construction the theoretical basic framework of user needs, the embodiment of various needs in map design, the implementation methods of various needs and map design, and how the motivation of selfization needs to promote the innovation of map drawing. Through empirical evidence, it is shown that a deep understanding and ingenious integration of human needs into map drawing is the key the excellence of map drawing results.

**Keywords :** five demands of human nature; map design; map drawing; user needs; innovative drawing

## 引言

人性五大需求理论是美国著名心里学家亚隆·马斯洛于1943年提出的, 其中包括生理需求、安全需求、社交需求、尊重需求和自我实现需求<sup>[1]</sup>, 不同的需求会影响人类空间认知的方式和深度。例如, 安全需求会促使人类倾向于构建一个稳定、可预测的空间认知。与此同时, 地图是人类空间认知的结果<sup>[2]</sup>, 地图绘制更是人类空间认知、规划路径和实现目标的过程, 而绘制成果便是人类对空间认知结果的表达, 受人的主观意志和认知差异而不同<sup>[3]</sup>。不同由此可见, 人性五大需求理论的确能给地图绘制提供多个启示, 尤其是在思考用户需求层次与自我实现方面, 深刻理解人性需求对地图绘制至关重要。

为此, 本文从人性五大需求出发, 探究从人性各需求对地图绘制的启发到搭建用户需求理论基本框架, 再到基于需求框架的地图设计, 详细探究人性五大需求在地图绘制实践中的启发与应用, 最终不仅提升地图的实用性与美观性, 更能满足用户的深层次需求。

## 一、人性需求对地图绘制的启示

人性需求是地图绘制和创新的源泉, 它启示我们深入探索用户内心的五大核心需求——路径规划的生理需求、精准定位的安全需求、信息获取的社交需求、趣味互动

的尊重需求及个性化服务的自我实现需求, 最终引领地图绘制迈向更加人性化的未来。

生理需求, 即地图绘制时需要考虑用户的基本生存和移动需求。例如, 城市地图可以突出交通设施、公共服务设施(如医院、超市等)的位置。心里研究表明, 用户在寻找生理性服务时, 倾向选择到达时间最短路线。因此, 地图绘制时若使用清晰明显的符号和色彩, 满足用户的生理需求, 确保其快速识别重要服务设施, 进而增加地图的使用效率。

安全需求, 即地图绘制时需要承载用户的安全寄托, 体现在

数据的安全保密性、数据来源权威性以及可信赖的地图绘制环境。同时，安全需求在城市规划、防灾减灾地图中的应用更为强烈。例如，针对用户的安全感，在自然灾害频发地区，绘制避难所和应急服务点至至关重要。实际案例中，某县城在超强台风降雨发生后，通过识别《强降雨期间地质灾害防御分级图》地图信息，快速掌握地质灾害等级，使灾害等级最严重区域的受灾居民在最短时间得以疏散，保障了人们生命财产安全。此方面还可以借鉴热力图等数据可视化技术，通过动态展示来提升安全保障。

社交需求，体现在人们对于社会交往与邻里关系的重视。地图可以作为社交活动的载体，提高人们的社交互动。利用地理信息系统，绘制出人们重点聚集区域，如“单身社交角”“动漫次元交汇点”等，实现目标人群的最优匹配。有数据显示，社交活动参与率与交通便利可达成正比，故有效绘制周边交通信息来满足人类社交需求，可行有效。

优质的地图设计能够给用户带来愉悦并增强归属感。那么，尊重需求则体现在地图设计的美观性和满足用户的体验感。实际案例中，与用户交互式的“南粤古驿道数字体验站”，利用虚拟现实 VR 技术加深用户体验感。同时，基于心理学“图式理论”——对过去经验的反映<sup>[4]</sup>，地图设计中应注意符号的熟悉度、色彩的和谐搭配，以及布局的清晰性。例如，若在自助制图功能模块界面设计中引入用户反馈机制或将用户制图的表达设置进行记录与统计，让用户偏好得到有效表达，极大满足了地图在用户心中的归属感，提高地图的整体认可度。

自我实现需求则强调个体在特定环境中的自我价值和目标导向。地图作为导航工具，能够辅助用户实现个人精神上与目标需求之间的情感互动<sup>[5]</sup>。如赏花路线图、美食场合路线等，针对以美感和亲切感来满足用户自我实现需求<sup>[6]</sup>，“个性化地图定制”应运而生。用户可通过地图导航服务自主选择路线、标记偏好地点等，不仅能提升用户的参与感，更促进了个人的目标实现。

二、人性需求在地图绘制的应用

（一）用户需求理论基本框架

在分析人性需求在地图绘制的应用时，需要重点关注如何将理论框架应用于绘制实践中。首先需要搭建一个基于人性需求层次理论的基本框架，通过此框架确切分析用户需求，从而着手提升地图的实用性和用户满足度，如图1所示。

首先确定研究对象，即在利用地图产品过程中表现出人性需求的用户群体。随即总结用户对地图的总体需求，紧接着基于人性需求，重点洞察用户深层心理模式，绘制出用户五大需求层次对照表，最终以用户的自我实现为愿

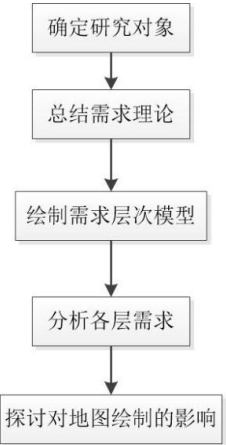


图1 用户需求理论基本框架  
Fig.1 The basic framework of user demand theory

景，探讨如何将地图绘制影响最大化。

（二）用户五大需求层次模型

建立用户五大需求层次模型，可将用户心理需求和动机具体化，了解用户心理从低到高的层次需求，从而针对每个层次需求制定具体的实现目标和设计方向，不仅能助力地图产品高度符合用户需求，同时也能激发地图设计者的创新思维，为地图产品带来差异化竞争优势。

（三）用户五大需求层次与地图设计

明确人性各层次具体化需求后，将需求与地图设计环节建立对应关系。

生理需求方面，用户满足指标定为不低于95%，旨在提升用户对地图界面辨析的直观性和响应性。设计者需要确保地图的清晰度与易读性达到最优，即便在复杂环境下也能迅速辨认关键信息，加载速度同样不可忽视。例如优化地图表达，提升地图辨析度；优化数据传输和图像处理技术，减少用户等待时间。

安全需求方面，用户满足指标定为100%。地图绘制不仅要考虑保密数据的使用问题，还需确保用户的权限得到妥善控制。通过签署数据保密协议、实施多层次访问控制系统，采用高强度加密标准，如 AES-128，我们力求为用户提供一个安全稳定的地理信息环境，确保敏感信息的流转严格受控。

社交需求方面，用户满足指标定为不低于85%。旨在让用户对地图产生共鸣。纸质地图通过在地图适当位置添加热点信息或互动元素（二维码、刮刮乐等）；网络地图功能设计则必须包含实时通讯和共享能力，如采用 WebSocket 协议支持实时交互，亦可支持一键生成日志或记录等，分享至社交平台，确保社交需求指标达标。

尊重需求方面，地图个性化尤其重要，用户满足指标定为用户参与度不低于80%，旨在提升用户对地图产品的使用体验。纸质地图可通过提供多样化地图比例尺、设计人性化版面布局、跨语言或跨界整合以及提供高质量印刷技术等；网络地图则为用户提供个性化地图皮肤、勋章系统及引入智能推荐算法为用户推送偏好信息，增加用户粘性。

自我实现需求方面，尤其强调协助用户将地图绘制影响最大化，用户满足指标定为为用户价值体验感不低于60%。纸质地图通过鼓励用户参与地图修正和完善、提供地图解读培训、定期更新服务或个性化包装等，增强用户自豪感和自我价值感。同时，亦可引入故事线索，激发用户的探索欲望。网络地图则一方面利用数据挖掘技术实现新功能，另一方面与社交媒体或政务平台深度合作，将用户的地图产品分享，将地图绘制影响最大化，满足用户的自我实现需求。

针对以上需求层次分析与设计，可以制定一张独特的需求层次对照表，并将其转化为地图产品功能、用户体验及情感连接的设计要点，确保地图产品设计全面贴合用户需求。如表1所示。

表1 用户需求层次对照表  
Tab.1 Comparison table of user needs hierarchy

需求层次	地图绘制要素影响	用户满足指标	功能项	实现方法	影响因素
生理需求	1. 地图辨析度 2. 加载速度	≥ 95%	1. 地图表达 2. 快速呈现	1. 优化地图模板、符号库、样图等 2. 优化数据传输及图像处理技术	1. 技术与经验 2. 地重要信息及主要矛盾 3. 网络带宽
安全需求	1. 数据保密 2. 用户权限控制	100%	1. 承诺书 2. 多层次访问控制	1. 签署协议 2. 访问控制列表（ACL）、高强度加密	1. 手续办理 2. 用户认证
需求层次	地图绘制要素影响	用户满足指标	功能项	实现方法	影响因素
社交需求	传统纸质 实时通讯 分享功能	≥ 85%	1. 热点 2. 地图社交	1. 添加热点 / 互动信息 2. WebSocket 协议	1. 筛选信息 2. 服务器稳定性
尊重需求	人性化 个性化及智能算法	用户参与度 ≥ 80%	1. 人性化布局与整合 2. 个性化定制	1. 版面整饰、多比例尺制图、跨界整合数据 2. 出客户端皮肤引擎 3. 引入智能算法推送	1. 技术与数据收集 2. 设备兼容性 3. AI 算法
自我实现需求	配套服务 地图故事创建 创新功能 媒体	用户体验值 ≥ 60%	1. 地图修正 2. 故事编纂 3. 新技术 4. 媒体合作	1. 用户参与地图修正与完善 2. 提供后期服务 3. 故事为导线，贯穿地图 4. 高级算法与数据挖掘技术 5. 与社交媒体或政务平台合作	1. 制图技术 2. 资金支持 3. 数据准确性与权威性 4. 渠道

三、自我实现需求与绘制创新

（一）自我实现需求模型算法

自我实现需求是人性五大需求层次理论中的顶层需求，它是个体追求潜能最大化的内在驱动力。与此同时，地图作为一种信息载体工具，其绘制创新不仅展现在图像和表达形式的多样性，更深刻地体现在特定的思维内容和思维模式中<sup>[7]</sup>。自我实现需求与绘制创新之间的关系如下公式所示：

$$M=f(S) \times k$$

式中：S 为自我实现需求；M 为地图绘制创新能力；K 为激发系数，表示自我实现需求对地图绘制创新能力的激发作用，是一个介于0和1之间的常数，其中0表示无激发作用，1表示完全激发。

这个公式表达出地图绘制创新能力（M）是自我实现需求（S）的函数，并且受到激发系数（K）的影响。当自我实现需求增强时，如果激发系数接近1，则激发地图绘制创新能力，反之，如果激发系数接近0，则无论自我实现需求如何，都不会对地图绘制创新能力产生影响。

（二）系数激发建设思路

由上述公式可见，激发系数是一个关键因素，决定了自我实现需求对地图绘制创新能力的实际影响程度，其从0至1的发展取决于多种因素。例如，环境支持度、资源获取度等。笔者认为激发系数需按“向内丰满、向外链接”两方面展开，确保系数正向发展，方能最终满足个体的自我实现需求。

“向内丰满”可归纳为以下方法：

提供自主权和决策参与。给予个体在地图制图、设计、功能

开发等方面的自主权和决策参与机会。

建立激励机制。对在地图创新方面表现突出的个体给予奖励和认可。

鼓励跨团队协作和交流。鼓励不同团队的设计想法与观点相互碰撞与反馈、共享资源，激发创新的火花。

个性化定制地图创新任务。根据个体在制图上的兴趣及特长，为其定制个性化的地图编制创新任务。

“向外链接”可归纳为以下方法：

提供个体与外部业界专家合作、交流的平台，引进前沿技术和理念，由外向内拓宽个体的视野与思维。

支持个体参加外部举办的业界创新比赛、创新工作坊等活动。

积极为个体提供外部业界学习和进修的机会。

以上方法，可以有效提高激发系数，使得个体的自我实现需求对地图创新能力产生最大的正面影响。

四、示范案例

利用人性五大需求理论已在地图绘制中使用。地图绘制前，首先构建一个由地图设计原则、需求层级、用户互动性、功能实用性、数据准确度与可视美感度组成的多维评价指标体系表，如表2所示，在表中详细列出相关评价指标和绘制启示与应用。地图绘制中，不同属性的地图，其需求层级也会不一样，设计者围绕此体系表，绘制出了更贴合人性需求的绘图成果，为探究人性五大需求在地图绘制中的启示与应用提供了实证基础。



表2 需求多维评价指标体系表  
Tab.2 Table of Multi-dimensional Evaluation Indicators for Requirements

案例名称	设计原则	需求层级	用户互动性	功能实用性	数据准确度	可视美感度	绘制启示	绘制应用
某市地铁图	传统纸质：抽象化设计（非地理空间表达）	社交需求	低	高	高	中	1. 抽象化 2. 线划图形	1. 思维导图 2. 简化表达路线拓扑，突出路网功能性关系
某市领导工作用图	传统纸质： 1. 现势性高 2. 综合要素齐全，便于工作决策	安全需求	低	高	高	高	1. 数据准确 2. 各类要素表示清晰且全面	1. 强调数据来源可靠性 2. 优化地图表达，要素搭配协调
某行政村空间布局专题地图	传统纸质： 1. 现势性高 2. 专题信息清晰，便于工作决策	安全需求	低	高	高	中	1. 专题数据准确且表示清晰 2. 基础地理底图时效性 3. 图幅尺寸适中，方便阅读	1. 强调专题数据来源可靠性 2. 完善专题信息地图表达 3. 现势性高的基础地理底图资料 4. 制图比例尺
某市中心城区电子地图	1. 地名地址、交通等要素现势性 2. 定期更新 3. 用户体验感 4. 热点齐全	自我实现需求	高	极高	高	中	1. 确保数据时效性、精确性与全面覆盖性 2. 制定定期更新机制 3. 地图皮肤与用户反馈	1. 确保数据精确性与全面性 2. 签订更新协议 3. 多版本、多样化地图表达 4. 用户纠错 / 分享功能
某市赏花地图	传统纸质： 1. 互动导览 2. 情感引导 3. 交通指引辅助明显	尊重需求	中	中	高	极高	1. 添加互动元素 2. 情感链接 3. 交通要素及路线	1. 二维码等 2. 故事性或趣味性植入 3. 优化地图表达
某省历史沿革地图	传统纸质： 1. 时序演变 2. 数据准确 3. 用户历史认同感	尊重需求	低	中	高	高	1. 历史叙述 2. 数据来源 3. 历史感视觉传输	1. 按时序植入历史人物与故事 2. 确保历史数据来源可靠及准确 3. 历史感地图符号、文字及配色
某省区域分布示意图	传统纸质： 1. 简单清晰 2. 准确	生理需求	低	中	高	中	分布导向	1. 数据来源 2. 优化地图表达

五、结束语

本文基于人性五大需求理论，分析了用户在面对不同属性地图时，其人性五大需求（生理需求、安全需求、社交需求、尊重需求与自我实现需求）对地图绘制的启示与应用。在分析人性需求在地图绘制的启示中，首次提出搭建基于人性需求层次理论的基本框架，旨在洞察用户深层次心理需求，为后续地图绘制指引了方向（以下简称“方向”）。在地图绘制中，提出建立用户需求层次对照表，将明晰方向后的用户需求与地图设计建立对应关系及实现方法，将其视为地图绘制的关键环节，最终使地图成果更贴合用户需求，从而增强地图绘制人文关怀与地图绘制成果的实

用性。

同时，本文通过用公式论证自我实现需求与绘制创新的关系并提出能在关系中起到调节作用的激发系数，分析总结了如何正向激发系数的建设思路。笔者通过地图编制具体案例进行了实证，结果表明，人性五大需求在地图绘制中的不同应用范式确实能够为后续的地图设计与绘制提供“中心思想”与“行为准则”。人性五大需求与地图绘制的密切关系，深刻诠释了地图绘制的本质就是人性、技术、创新与艺术深层次的融合，成功的融合能为用户创造更为丰富的使用场景与价值体验，实现地图绘制成果影响最大化。

参考文献

[1] 高林娟. 基于马斯洛需求层次理论的文创产品设计研究 [J]. 信阳农林学院学报, 2024, 34(03):64–67.  
[2] 艾廷华. 适宜空间认知结果表达的地图形式 [J]. 遥感学报, 2008, 2008(02):347–354.  
[3] 郑束雷. 地理空间认知理论与地图工具的发展 [J]. 测绘学报, 2021, 50(6):766–776.  
[4] 张丽峰, 陕晋芬. 大学英语听力中图式理论的激活与具体应用研究 [J]. 湖北经济学院学报（人文社会科学版）, 2020, 17(07):157–159.  
[5] 庞艳萍, 林丹. 基于马斯洛需求层次理论的海报设计——以澳门节会海报设计为例 [J]. 设计, 2023, 36(24):120–123.  
[6] 赵斯航, 徐杨杨. 浅析个性化地图 [J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(10):41–44.  
[7] 李毅民, 杨覃, 王丽欣, 等. 关于创新地图设计方案与方法的探讨 [J]. 测绘地理信息, 2025, 50(01):63–66.

# 长输管道地质灾害防范与应对

刘丽涛

中石化胜利油建工程有限公司, 山东 东营 257300

DOI:10.61369/ERA.2025060016

**摘要：**长输管道作为能源输送的“生命线”，其安全稳定运行对国家能源战略和经济社会发展起着关键支撑作用。然而，复杂多样的地质环境使长输管道极易遭受各类地质灾害的威胁。本文深入剖析长输管道面临的主要地质灾害类型及其破坏机制，从前期规划、工程防护、监测预警等多维度提出系统性的防范措施，并针对灾害发生后的应急处置、恢复重建等环节制定科学合理的应对策略，旨在全面提升长输管道抵御地质灾害的能力，保障能源输送的安全与可靠。

**关键词：**长输管道；地质灾害；防范措施；应对策略

## Geological Hazard Prevention and Response for Long-distance Pipelines

Liu Litao

Sinopec Shengli Oilfield Engineering Construction Co., Ltd. Dongying, Shandong 257300

**Abstract：**As the "lifeline" of energy transportation, the safe and stable operation of long-distance pipelines plays a key supporting role in national energy strategies and economic and social development. However, the complex and diverse geological environment makes long-distance pipelines highly susceptible to various geological hazards. This article deeply analyzes the main types of geological hazards faced by long-distance pipelines and their damage mechanisms. It proposes systematic preventive measures from multiple dimensions such as early planning, engineering protection, monitoring and warning. Scientific and reasonable response strategies are developed for emergency response, restoration and reconstruction after disasters. The aim is to comprehensively enhance the ability of long-distance pipelines to resist geological hazards and ensure the safety and reliability of energy transportation.

**Keywords：**long-distance pipeline; geological hazard; preventive measures; response strategy

## 引言

长输管道具有输送距离长、途经区域广、穿越地形地貌复杂等显著特点。随着我国能源产业的快速发展，长输管道网络不断延伸扩展，其在能源输送中的地位愈发重要。但与此同时，管道沿线面临的地质灾害风险也日益凸显。地质灾害一旦爆发，可能引发管道泄漏、破裂甚至爆炸等严重事故，不仅会造成巨大的直接经济损失，还可能对周边生态环境、居民生命财产安全以及社会稳定产生深远的负面影响。据相关统计数据显示，近年来因地质灾害导致的长输管道事故呈上升趋势，给能源行业带来了严峻挑战。因此，深入开展长输管道地质灾害防范与应对研究，已成为保障国家能源安全和推动能源产业可持续发展的迫切需求。

## 一、长输管道面临的主要地质灾害类型及危害

### （一）滑坡

滑坡是比较常见的一种地质灾害，在自然条件和地质的共同作用下，导致岩体发生破坏，受到重力作用影响，会引发灾害<sup>[1]</sup>。其形成通常是由于斜坡上的土体或岩体在河流冲刷、地下水活动、降雨、地震以及人为不合理切坡等多种因素综合作用下，岩土体的稳定性遭到破坏，在重力的主导下沿着特定的软弱面或软弱带整体或分散地顺坡下滑。当长输管道穿越滑坡易发区域时，一旦滑坡发生，管道将承受来自滑坡体强大的推挤和剪切作用力。这种外力作用可能导致管道发生严重变形、扭曲，甚至直接

断裂，进而引发油气泄漏。油气泄漏不仅会造成能源资源的浪费，还可能引发火灾、爆炸等次生灾害，对周边环境和人员安全构成极大威胁<sup>[2]</sup>。

### （二）泥石流

泥石流多发生于山区沟谷地带，是由暴雨、冰雪融水等突发水源激发，裹挟大量泥砂、石块等固体物质的特殊洪流。泥石流具有流速快、流量大、冲击力强等特点，其瞬间释放的巨大能量对长输管道的破坏力不容小觑。当发生泥石流时，石块及其他物质会随着山洪或洪水从山顶爆发，泥石流破坏力较强，如果长输管道铺设在泥石流发生区域，会遭受腐蚀破坏，使其丧失输送功能<sup>[3]</sup>。此外，泥石流还会对管道周边的防护设施造成严重破坏，进

一步加剧管道的安全风险。被泥石流掩埋的管道在后续维护和修复过程中也面临诸多困难，需要耗费大量的人力、物力和财力。

### （三）崩塌

崩塌指在自然条件下，地质运动对斜坡岩石产生一定影响，山体上的物质下落，出现崩塌的情况<sup>[4]</sup>。崩塌主要发生在较陡斜坡地段，是岩土体在重力作用下突然脱离母体，崩落、滚动并堆积在坡脚或沟谷的地质现象。崩塌具有突发性强、难以准确预测的特点，对长输管道安全构成极大威胁。崩塌发生时，岩土体从高处高速坠落，直接砸落在管道上，极易造成管道严重损坏<sup>[5]</sup>。这种破坏往往在瞬间发生，导致管道输送介质泄漏，进而引发一系列安全事故。而且，由于崩塌发生的突然性，给提前采取防范措施带来了极大挑战。

### （四）地面沉降

地面沉降是在自然因素（如地壳运动、地下水水位变化等）和人为因素（如过度抽取地下水、大规模工程建设等）共同作用下，地壳表层土体发生压缩变形，导致区域性地面标高降低的环境地质现象。对于长输管道而言，所在区域发生地面沉降会使管道随着地面向下沉而受到拉伸、弯曲等复杂应力作用。长期处于这种应力状态下，管道容易出现变形、接口处松动等问题，严重时将引发管道泄漏事故。地面沉降对管道的影响是一个渐进性的过程，初期往往难以察觉，但随着时间的推移，其积累效应会逐渐显现，对管道安全运行造成潜在威胁<sup>[6]</sup>。

## 二、长输管道地质灾害的防范措施

### （一）前期规划与选线优化

在长输管道建设项目启动的前期规划阶段，全面、深入的地质勘查工作至关重要。通过综合运用地质测绘、地球物理勘探、钻探等多种先进技术手段，能够详细获取管道沿线的地质构造特征、岩土体物理力学性质、水文地质条件以及潜在地质灾害隐患分布情况等关键信息。在充分掌握这些信息的基础上，结合管道工程的实际输送需求、建设成本以及运行维护便利性等多方面因素，对管道选线方案进行精心优化<sup>[7]</sup>。优先选择地质条件稳定、地质灾害风险较低的区域进行管道铺设，尽量避开诸如断裂带、滑坡频发区、泥石流沟谷等地质灾害高发地段。对于因客观条件限制无法完全避开的地质灾害隐患区域，应在设计阶段提前制定针对性强、切实可行的防护措施，并将其纳入整体工程设计方案中，从源头上降低地质灾害对管道的威胁。

### （二）工程防护措施

针对可能发生滑坡的地段，可采用多种工程防护措施相结合的方式。抗滑桩是一种常用的滑坡防治手段，它通过将滑坡体的推力传递至稳定的地层深处，有效阻止滑坡体的滑动，从而保护管道安全。挡土墙则通过在滑坡体下部设置阻挡结构，直接抵抗滑坡体的滑动，增强坡体的整体稳定性。削坡减载是通过在滑坡体上部进行适当开挖，减小滑坡体的重量，降低其下滑力，进而提高滑坡体的稳定性<sup>[8]</sup>。此外，在滑坡体表面合理设置完善的排水系统，及时排除地表水和地下水，减少水对滑坡体岩土体的软化

和润滑作用，对增强滑坡体稳定性也具有重要意义。

在泥石流易发区域，修建拦挡坝和排导槽是较为有效的防护措施。拦挡坝能够拦截泥石流中的固体物质，降低泥石流的整体冲击力，减少其对管道的直接破坏。排导槽则通过引导泥石流按照预定的安全路线流动，避免其对管道造成正面冲击。同时，在管道周围设置坚固的防护堤，可进一步增强管道抵御泥石流冲击的能力，确保管道在泥石流灾害发生时能够保持安全稳定。

对于可能发生崩塌的地段，可采用锚杆、锚索对危岩体进行加固处理。锚杆、锚索能够将危岩体与深部稳定岩体紧密连接在一起，提高危岩体的稳定性，防止其崩塌坠落。此外，在危岩体下方的管道上方设置防护网，可有效拦截崩塌的岩土体，避免其直接砸落在管道上，为管道安全提供可靠保障。

在地面沉降区域，可采取管道基础加固和设置补偿器等措施来应对。通过采用桩基础等方式对管道基础进行加固，能够显著提高管道基础的承载能力，有效减少地面沉降对管道的影响。设置补偿器则可以吸收管道因地面沉降产生的变形，防止管道因过度变形而损坏，确保管道在地面沉降环境下仍能正常运行。

### （三）监测预警系统建设

构建全方位、多层次的地质灾害监测体系，对滑坡、泥石流、崩塌、地面沉降等各类地质灾害进行实时动态监测。利用全球定位系统（GPS）、合成孔径雷达干涉测量（InSAR）、光纤传感技术等先进监测技术，能够精确获取地质体的位移、变形、地下水位变化等关键参数。通过对这些监测数据进行深入分析，能够及时捕捉到地质灾害发生的早期迹象，为提前采取有效的防范措施提供科学依据。

加强对长输管道本体的监测力度，综合运用管道内检测和外检测技术，实时掌握管道的腐蚀、变形、泄漏等状况。管道内检测通常借助智能清管器等设备，对管道内部的腐蚀、结垢等问题进行检测；管道外检测则通过漏磁检测、超声检测等技术手段，对管道外部的腐蚀、损伤情况进行精准监测<sup>[9]</sup>。通过对管道本体的全面监测，能够及时发现管道存在的安全隐患，确保管道始终处于安全运行状态。

基于地质灾害监测和管道本体监测所获取的数据，建立智能化的预警系统。该系统能够根据设定的阈值，当监测数据超出正常范围时，迅速发出警报，并通过短信、邮件、应急管理平台推送等多种方式及时通知相关部门和人员。同时，预警系统还应具备强大的数据分析和预测功能，能够对地质灾害的发展趋势进行准确预测，为制定科学合理的应急处置方案提供有力支撑。

## 三、长输管道地质灾害的应对策略

### （一）应急组织与预案制定

建立健全完善的长输管道地质灾害应急组织体系，明确各部门、各单位在应急处置过程中的职责与分工。成立专门的应急指挥中心，负责统一指挥和协调长输管道地质灾害的应急处置工作。组建专业的应急抢险队伍，包括具备丰富经验的管道维修队伍、地质灾害抢险专业队伍等，确保在灾害发生时能够迅速、高

效地开展抢险救援行动。

制定详尽、科学的长输管道地质灾害应急预案，针对不同类型的地质灾害以及可能出现的各种事故场景，制定细致的应急处置流程和具体措施。应急预案应涵盖应急响应程序、抢险救援方案、人员疏散计划、物资保障方案等关键内容。同时，定期组织开展实战化的应急演练，通过演练检验应急预案的科学性、合理性和可操作性，提高应急队伍的协同作战能力和应急处置水平。

## （二）应急抢险与救援

当地质灾害发生导致长输管道受损时，应立即启动应急预案，迅速组织应急抢险队伍赶赴事故现场。首先，要及时采取有效措施控制事故现场，如设置警戒区域、疏散周边人员，防止事故进一步扩大。对于管道泄漏事故，应迅速采用夹具、封堵器等专用设备进行堵漏作业，最大程度减少油气泄漏量。对于管道断裂等严重事故，需根据现场实际情况制定科学合理的抢修方案，争分夺秒恢复管道的输送功能。

建立完备的应急救援物资储备体系，储备充足的抢险救援设备、器材和物资，如管道抢修工具、消防设备、个人防护用品、通信设备等。加强对救援物资的日常管理和维护，确保物资始终处于良好的备用状态。在灾害发生时，能够迅速、高效地调配救援物资，满足抢险救援工作的实际需求。

在应急抢险救援过程中，要切实做好医疗保障工作，配备专业的医疗人员和先进的医疗设备，及时对受伤人员进行救治。同时，做好后勤保障工作，为应急抢险人员提供必要的生活保障，确保他们能够全身心投入到抢险救援工作中，提高救援工作的效率和质量<sup>[10]</sup>。

## （三）灾后评估与恢复重建

地质灾害发生后，应立即组织专业人员对灾害造成的损失进行全面、准确的评估，包括管道设施的损坏程度、周边环境的破坏情况、经济损失等多个方面。通过科学、严谨的灾害损失评估，为后续制定恢复重建方案提供可靠依据。

依据灾害损失评估结果，制定科学合理的长输管道恢复重建规划。恢复重建规划应充分考虑地质灾害的防治要求，对受损的管道设施进行修复或重建，并进一步加强管道的防护措施，提高管道抵御地质灾害的能力。同时，对周边受到破坏的生态环境进行同步修复和治理，减少地质灾害对生态环境的长期影响。

在恢复重建工作完成后，应对地质灾害应急处置全过程进行深入总结，分析存在的问题和不足之处，总结经验教训。针对发现的问题，提出切实可行的改进措施，进一步完善应急预案和应急管理体系，不断提升长输管道地质灾害防范与应对能力。

## 四、结束语

长输管道地质灾害防范与应对是一项复杂而系统的工程，涉及从前期规划到后期恢复重建的各个环节。通过科学合理的前期规划与选线优化、扎实有效的工程防护措施、精准可靠的监测预警系统建设以及及时高效的应急处置与恢复重建，能够显著降低地质灾害对长输管道的威胁，保障管道的安全稳定运行。在未来长输管道建设与运营过程中，需进一步强化对地质灾害防范与应对工作的重视，持续加大技术研发投入，不断提升管理水平，为国家能源安全和社会经济发展提供坚实有力的保障。

## 参考文献

- [1] 袁哲. 长输管道地质灾害定量风险评价技术研究——评《长输管道地质灾害风险评价与控制》[J]. 新疆地质, 2021, 39(01): 178.
- [2] 邓梁, 高博颖, 吴昊, 等. 石油天然气长输管道中危险因素及其设计的分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(16): 17-19.
- [3] 张洋, 郑家友. 浅谈长输管道山区安全设计及施工[J]. 工程建设与设计, 2023, (11): 208-210. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.06.064.
- [4] 王宇. 长输油气管道地质灾害防治统筹管理浅析[J]. 化工矿产地质, 2021, 43(04): 356-363.
- [5] 康春景, 高轩, 何旭麒. 湿陷性黄土地区长输管道工程地质灾害分析及管控[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(03): 119-121.
- [6] 吴秀亮. 天然气长输管道优化策略探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(11): 84-85.
- [7] 陈杏子. 长输管道沿线地质灾害评价预测研究[D]. 北京交通大学, 2019.
- [8] 黄鹏. 甘肃长输管道某滑坡灾害综合分析及治理研究[J]. 地质灾害与环境, 2016, 27(02): 19-25.
- [9] 王珀, 程诚, 黄锐. 长输管道地质灾害定量风险评价技术研究[J]. 化工管理, 2016, (08): 255.
- [10] 穆树怀, 王腾飞, 霍锦宏, 等. 长输管道施工诱发地质灾害防治——以中缅管道云南段为例[J]. 油气储运, 2014, 33(10): 1047-1051.



# 结构专业中 BIM 技术的应用现状与发展趋势

董志鹏

身份证号: 231121199102164914

DOI:10.61369/ERA.2025060017

**摘要：** 本文聚焦 BIM 技术在结构专业的应用，它在设计、施工、运维阶段，借三维建模等功能发挥积极作用。尽管面临软件局限、工程师接受度低等挑战，但其与新技术融合带来机遇，将走向数字化、智能化与全生命周期管理。BIM 技术还具备显著经济效益，能降本增效、保障建筑质量，推动行业可持续发展，为建筑行业注入新动力。

**关键词：** BIM 技术；结构专业；应用现状；挑战；新技术融合

## Current Application Status and Development Trends of BIM Technology in Structural Engineering

Dong Zhipeng

ID : 231121199102164914

**Abstract :** This article focuses on the application of BIM technology in structural engineering. It plays an active role in the design, construction, and operation and maintenance phases through functions such as 3D modeling. Although it faces challenges such as software limitations and low acceptance among engineers, its integration with new technologies brings opportunities and will move towards digitization, intelligence, and full lifecycle management. BIM technology also has significant economic benefits, can reduce costs and increase efficiency, ensure construction quality, promote sustainable development of the industry, and inject new momentum into the construction industry.

**Keywords :** BIM technology; structural engineering; current application status; challenges; new technology integration

### 引言

在建筑行业迈向现代化时，BIM 技术极大推动行业变革。与传统二维图纸不同，它基于数字模型，以三维、全景形式直观精确呈现建筑信息。在建筑工程中，BIM 能助力设计师在设计阶段解决潜在问题，提升设计质量与效率，施工管理时优化流程，减少资源浪费。对于作为建筑设计支柱的结构专业，其率先采用 BIM 意义重大，强大可视化便于展示方案，参数化设计提升设计精准性，为建筑安全稳定奠定基础。

### 一、结构专业中 BIM 技术的应用现状

#### （一）BIM 在结构设计中应用

在结构设计环节，BIM 技术的三维建模功能优势尽显。三维模型是 BIM 技术的核心，是项目实施过程中与设计、施工等阶段衔接的关键，对后续的信息集成与传递具有重要作用。BIM 技术的三维模型是一个立体的建筑模型，具有可视化、协调性和模拟性等特征，其直观、清晰和准确地反映了建筑的外观、结构、设备等信息，便于设计人员对项目进行分析与优化。在土木工程结构设计中，BIM 技术可以将复杂的建筑结构建模工作简化为直观的平面图形，进而实现模型构建和数据集成<sup>[1]</sup>。得益于 BIM 的参数化设计特性，一旦结构中某部分参数发生改变，与之相关联的部分会在模型中自动更新，大幅提升设计效率，极大地减少了重

复性劳动。

#### （二）BIM 在结构施工阶段应用

在结构施工阶段，BIM 技术优势尽显。基于 BIM 模型开展施工模拟，能提前精准预判施工顺序不合理、构件安装困难等潜在问题，为施工方案优化提供关键依据，有力保障施工顺畅推进。借助 BIM 模型，可精确计算工程量与材料需求，避免材料浪费和库存积压，有效管控施工成本。利用其可视化技术进行技术交底，施工人员能直观清晰地掌握施工要点与难点，显著提升施工质量与效率。BIM 还能实时跟踪施工进度，对比分析实际与计划进度，一旦出现偏差，能及时调整施工计划，确保项目按时交付。面对复杂节点施工，BIM 技术生成的详尽施工工序与工艺动画，为施工人员提供精准操作指导，有效降低施工错误概率，提升施工精细化程度，全方位助力结构施工高效优质开展。

### （三）BIM 在结构运维管理中的应用

在结构运维管理领域，BIM 技术同样发挥着至关重要的作用。它将建筑的几何信息、物理信息、功能信息等全方位集成于一个模型之中，为运维人员提供了全面且精准的建筑信息资源。借助 BIM 模型，运维人员可迅速定位设备位置，全面了解设备参数及运行状态，极大地方便了设备的日常维护与管理工作。在能耗管理方面，通过将 BIM 与物联网技术深度融合，能够实时监测建筑能耗情况，并对采集到的数据进行深入分析，进而实现能源的合理配置与高效利用，助力建筑达成节能减排目标<sup>[9]</sup>。当建筑结构出现问题时，BIM 模型能够辅助运维人员快速分析问题产生的原因，并据此制定科学合理的维修方案，显著缩短故障处理时间，大幅提升运维效率，有效延长建筑的使用寿命，实现建筑全生命周期的高效管理与维护。

## 二、结构专业应用 BIM 技术的挑战与问题

### （一）BIM 软件在结构专业中的局限性

在结构专业领域，BIM 软件暴露出诸多局限性。面对复杂的非线性结构分析需求，现有 BIM 软件能力略显不足。其难以精准模拟结构在实际受力状态下的复杂力学行为，致使计算结果的可靠性大打折扣，无法为结构设计提供坚实的数据支撑。同时，BIM 软件对计算机硬件配置要求颇高。当处理大型模型文件时，软件运行速度会急剧下降，严重拖慢工作节奏，极大地影响了工作效率<sup>[9]</sup>。而且，不同品牌和类型的 BIM 软件之间数据兼容性欠佳，在数据转换过程中，极易出现信息丢失、数据错误等状况，大幅增加了数据处理的难度与复杂性。

### （二）结构工程师对 BIM 技术的接受度

结构工程师群体对 BIM 技术的接受程度呈现出较大差异。部分年轻工程师凭借较强的学习能力和对新事物的敏锐感知，能够迅速掌握 BIM 技术的应用要点。然而，众多经验丰富的资深工程师由于长期习惯传统设计模式，思维定式较为严重，对 BIM 技术持有抵触态度。在培训方面，尽管当下 BIM 培训活动日益增多，但培训内容往往过度聚焦于软件操作层面，缺乏与实际工程案例紧密结合的系统性教学。这使得工程师在学习后，难以将所学的 BIM 知识有效运用到实际工作场景中，无法切实发挥 BIM 技术的优势。引入 BIM 技术后，工程师工作量增加，且缺乏激励机制，导致其主动应用的积极性不高，严重阻碍了 BIM 技术在结构专业的普及推广。

### （三）数据共享与协同工作困难

在 BIM 技术的实际应用过程中，数据共享与协同工作面临重重困境。不同专业通常使用各自偏好的 BIM 软件，这些软件的数据格式各不相同，导致数据在不同专业间难以顺畅直接共享。在跨专业协同工作时，由于各方对 BIM 模型的构建流程、信息需求的理解存在偏差，极易出现数据传递错误或关键信息缺失的问题。此外，行业内缺乏统一的数据标准和信息交换规范，不同参与方对模型信息的分类方式、编码规则等存在较大差异，这进一步加剧了数据共享和协同工作的复杂性，严重制约了 BIM 技术在

结构工程领域应用效果的充分发挥，难以实现高效的跨专业协作与项目整体推进<sup>[14]</sup>。

### （四）行业标准对 BIM 应用的影响

行业标准对于 BIM 技术在结构工程中的应用起着至关重要的作用。虽然目前国家和部分地方已出台了一系列 BIM 相关标准，但在实际应用场景中，这些标准的覆盖范围不够全面，执行力度也有所欠缺。不同地区、不同项目对 BIM 标准的理解和执行存在显著差异，导致 BIM 模型在不同项目之间的通用性和互用性较差，无法实现有效的数据交互与经验借鉴。而且，行业标准的更新速度明显滞后于 BIM 技术的快速发展步伐，对于一些新兴的 BIM 技术应用场景，缺乏及时、明确的标准规范予以指导<sup>[15]</sup>。

## 三、BIM 技术与新技术的融合趋势

### （一）人工智能与 BIM 的融合

人工智能与 BIM 深度融合，极大提升 BIM 模型的智能分析与优化能力。在设计时，融入人工智能算法的 BIM 系统如同智能助手，依据设计方案与建筑数据，迅速精准优化建筑结构。通过分析不同结构力学性能，筛选出符合需求且经济的方案，提高设计效率，减少设计师试错。施工管理中，借助 BIM 模型的可视化与信息集成，结合人工智能的数据处理和模式识别能力，实时监测施工过程。对施工进度、人员设备调配、质量检测等数据实时分析，人工智能系统能敏锐预测施工进度延误、质量缺陷等潜在风险，一旦发现风险，立即预警并提供应对策略，助力管理者提前防控，让项目管理更精准高效，保障施工顺利推进。

### （二）物联网与 BIM 的结合

物联网与 BIM 有机结合，为结构工程实时监测与预警提供强大技术支撑。在建筑结构关键受力和变形敏感部位，安装位移、沉降、倾斜等高精度传感器，它们如同“神经末梢”，实时采集结构关键参数。借助物联网技术，这些数据被实时传输至 BIM 模型系统。BIM 模型作为数据集成与可视化平台，融合传感器数据与自身三维模型信息，实时可视化呈现建筑结构状态<sup>[9]</sup>。一旦结构参数超出预设安全阈值，系统自动触发预警机制，通过声光报警、短信推送等方式通知管理人员。

### （三）大数据分析在 BIM 中的应用

大数据分析在 BIM 应用体系中至关重要。BIM 平台凭借强大整合能力，接入设计、施工、运维等多源异构数据。经清洗、转化后，运用先进技术挖掘数据隐藏价值。项目决策时，大数据分析结果为决策者提供全面准确信息，助力基于客观数据科学决策，降低风险。如分析历史和当前项目数据，预测不同施工方案的成本、工期等指标，辅助选定最优方案。项目实施中，大数据分析全方位评估项目。挖掘潜在规律，确定科学施工顺序与方法，提升效率；及时发现资源分配不合理等问题，依据分析结果调整，保障项目顺利推进，提升项目管理科学性与合理性，让 BIM 应用更高效、精准，推动项目高效开展。

### （四）BIM 技术的未来发展方向

展望未来，BIM 技术将在多个前沿方向持续突破。在数字化

浪潮下，它将贯穿工程项目全流程，实现从规划到运维的数字化管控，各方能在统一平台协同作业、实时共享信息。云计算助力下，BIM 模型存储与处理效率飞升，复杂模型云端畅行，摆脱本地硬件掣肘<sup>[7]</sup>。智能化进程中，人工智能与自动化技术深度嵌入，实现设计与施工自动化，如机器学习优化设计，自动化设备精准施工，提升效率与质量。同时，综合性 BIM 平台呼之欲出，整合多专业需求，打破专业隔阂，提升协同效能。

## 四、BIM 技术的经济效益和社会效益

### （一）降低成本和风险

在结构工程领域，BIM 技术在成本控制与风险降低方面优势显著。其三维建模可精细搭建建筑结构，碰撞检测能在设计时精准揪出各专业潜在冲突，提前明确建筑结构与给排水、电气管线的碰撞点，避免施工时因设计问题返工，减少时间与成本损耗。借助 BIM 技术，还能精准统计工程量、高效管理材料。通过深度剖析模型，精确算出材料用量，防止估算偏差导致浪费，控制库存，降低采购与管理成本<sup>[8]</sup>。同时，利用 BIM 模拟施工流程，提前优化方案，规避因施工顺序、工艺不当引发的成本增加和安全隐患。从设计到施工各环节，BIM 技术全面提升项目经济效益，保障资金合理利用与高效周转，助力结构工程更好地把控成本与风险。

### （二）提高建筑质量和安全性

BIM 技术是保障建筑质量与安全的关键力量，贯穿建筑全生命周期。在设计阶段，凭借丰富分析工具，它能精准开展建筑结构的力学性能分析、抗震性能模拟等，通过对比不同设计方案，选出最优，从根源确保设计方案既满足建筑功能，又具备可靠安全性，为建筑质量奠定基础。施工准备阶段，利用 BIM 模型进行直观可视化技术交底，施工人员借此能清晰把握各构件位置关系、连接及施工顺序，有效避免操作失误，提升施工质量。建筑运维阶段，BIM 模型整合设计至施工的全部信息。运维人员借助它可快速定位设备、掌握运行状态，实时监测建筑结构并分析问题<sup>[9]</sup>。

### （三）对环保和可持续发展的影响

BIM 技术在建筑行业环保与可持续发展中至关重要。在设计阶段，其能耗模拟分析功能，依据建筑朝向、围护结构材料、采光通风设计等，精准模拟不同工况下的能耗。基于模拟结果，调整设计方案，如采用节能灯具、高效保温材料，合理设计窗户位置与大小，利用自然采光，减少人工照明能耗，实现节能降耗。施工阶段，BIM 技术实现精准材料管理，降低材料浪费，减少对自然资源的过度开采。同时，提前解决设计冲突，避免返工，减少建筑垃圾，降低环境污染。运营阶段，BIM 与物联网深度融合，实时监测建筑能源消耗，通过智能控制系统优化调控空调、照明等设备，实现能源合理分配与高效利用。

### （四）提升项目整体效益

BIM 技术从多维度显著提升建筑项目整体效益。其强大的协同功能打破专业壁垒，搭建统一数字化平台，使结构、建筑、给排水、电气等专业人员能实时共享信息、协同工作，及时解决设计与施工问题，减少因信息不畅导致的错误与工期延误，提高推进效率。在数据管理方面，BIM 技术精准整合成本、进度、质量等数据，为项目决策提供全面可靠依据，助力管理者科学分析预测，降低决策风险<sup>[10]</sup>。从项目设计方案优化，到施工进度控制与质量保障，再到运维阶段的设备管理与能耗优化，BIM 技术优化各阶段资源配置，提升各环节工作效率与质量，实现项目价值最大化，有力推动建筑行业迈向更高水平，为行业创新发展注入新活力。

## 五、结束语

BIM 技术对结构专业意义重大、前景广，能提升各阶段工作水平。但当前存在软件局限、工程师接受度低、数据共享协同难、行业标准不完善等问题。好在其与新技术融合带来机遇，将朝数字化、智能化发展。要促进应用，需加强软件研发、加大工程师培训、建立标准规范，政府和企业也应出台激励政策。

## 参考文献

- [1] 李璐.BIM 技术在土木工程结构设计中的应用研究 [C]// 贵州煤炭经济 2024 年论文选编. 南阳市中心医院 ; ,2024:40-42.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.060539.
- [2] 林钊如，王子璇.装配式结构设计中 BIM 技术的应用及效果分析 [J]. 价值工程 ,2024,43(28):73-75.
- [3] 宋婷.BIM 技术在绿色智能建筑设计中的应用 [J]. 居舍 ,2024,(29):113-116.
- [4] 董嘉欣.基于 BIM 技术的建筑结构设计建模及应用研究 [J]. 广东建材 ,2024,40(10):154-158.
- [5] 颜超.BIM 技术在大型建筑结构设计管线布置一体化优化中的应用探讨 [J]. 新城建科技 ,2024,33(10):84-86.
- [6] 阳丹.BIM 技术在“混凝土结构设计”课程教学中的应用路径研究 [J]. 教师 ,2024,(31):108-110.
- [7] 石林.BIM 技术在地铁车站结构设计中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市 ,2024,(11):71-73.DOI:10.13655/j.cnki.ibci.2024.11.022.
- [8] 刘枫，赵增阳，朱恒.BIM 技术在钢结构设计及建造中的应用 [J]. 钢结构 (中英文),2024,39(11):101-107.DOI:10.13206/j.gjgS24101528.
- [9] 覃新元.BIM 技术在污水处理厂结构设计中的应用实践 [J]. 绿色建造与智能建筑 ,2024,(12):87-89.
- [10] 熊威.BIM 技术在土木工程结构设计中的应用研究 [J]. 新城建科技 ,2024,33(09):4-6.

# 食品检测技术存在的问题及解决策略探索

胡珍珍<sup>1</sup>, 宋婷婷<sup>2</sup>

青岛市华测检测技术有限公司, 山东 青岛 266000

DOI:10.61369/ERA.2025060018

**摘 要 :** 食品安全一直是全球关注的焦点, 它不仅关系到消费者的健康与生命安全, 也直接影响着食品行业的可持续发展。随着食品种类的丰富和加工工艺的复杂化, 食品中的潜在危害因素也随之增多, 这对食品检测技术提出了更高的要求。然而, 当前食品检测技术仍面临诸多挑战, 制约了食品安全监管的有效性和效率。因此, 本文深入研究食品检测技术存在的问题, 并探索有效的解决策略, 旨在保障食品安全、促进食品行业健康发展。

**关 键 词 :** 食品检测技术; 高精尖检测技术; 优化流程; 降低成本; 简化步骤

## Problems of Food Detection Technology and the Solution Strategy Exploration

Hu Zhenzhen<sup>1</sup>, Song Tingting<sup>2</sup>

Qingdao Huace Detection Technology Co., Ltd. Qingdao, Shandong 266000

**Abstract :** Food safety has always been the focus of global attention, it is not only related to the health and life safety of consumers, but also directly affects the sustainable development of the food industry. With the enrichment of food types and the complexity of processing technology, the potential harm factors in food also increase, which puts forward higher requirements for food detection technology. However, the current food testing technology still faces many challenges, which seriously restricts the effectiveness and efficiency of food safety supervision. Therefore, this paper deeply studies the problems existing in food detection technology, and explores effective solution strategies, aiming to ensure food safety and promote the healthy development of the food industry.

**Keywords :** food testing technology; advanced testing technology; optimize process; reduce cost; simplify steps

食品检测技术是指根据生物化学的理论和操作技术, 按照国家制定的食品质量、卫生、安全标准, 对食品的原材料、辅佐料等进行检测的过程, 旨在确保食品的质量、安全性和合规性, 保护消费者的健康和权益, 涵盖了多种方法和手段, 包括感官检测、理化检测、色谱技术、质谱技术、光谱分析、生物检测技术等, 这些方法各有特点, 适用于不同的检测需求和场景。通过提升食品检测技术的准确性和效率, 不仅能够更及时、准确地发现食品中的安全隐患, 有效防止问题食品流入市场, 保障消费者的健康权益, 而且有助于食品企业加强质量控制, 提高产品竞争力, 辅助监管部门加大监管力度, 维护市场秩序, 促进食品行业的健康发展。

### 一、食品检测技术存在的问题

#### (一) 检测精度待提升

食品的成分复杂多样, 包含大量的有机物、无机物以及各种添加剂等, 在检测特定的目标物质时, 容易受到其他成分的干扰, 影响检测结果的准确性。在检测食品中某些特定的农药残留或重金属的微量有害物质时, 由于食品中其他成分的存在, 可能会导致检测信号被掩盖或误判, 使检测精度难以达到理想状态。不同的检测方法和仪器在精度上存在差异, 先进的检测技术, 虽然在理论上具有较高的精度, 但在实际应用中, 可能会受到环境因素、操作人员技术水平等多种因素的影响, 导致检测精度不稳定。

#### (二) 耗时长效率低

对于含有复杂基质的食品样品, 需要进行提取、净化、浓缩

等多个步骤, 才能进行后续的检测分析, 这些前处理过程需要耗费大量的时间和人力, 严重拖慢了检测的进度<sup>[1]</sup>。检测方法需要等待试剂反应完全、仪器稳定等, 这些等待时间加起来会延长检测的总时间。在紧急情况下, 需要快速得出检测结果以采取相应的措施, 但现有的检测技术无法满足这种时间要求, 影响了对食品安全问题的及时处理。

#### (三) 设备成本高昂

先进的检测设备通常价格昂贵, 高效液相色谱仪、气相色谱—质谱联用仪等高端仪器, 购买价格高昂, 维护和运行成本也很高, 需要专业的技术人员进行操作和维护, 并定期进行校准和维修, 这都增加了检测的成本<sup>[2]</sup>。随着科技的不断进步, 新的检测技术和设备不断涌现, 为了保持检测的准确性和先进性, 检测机构需要不断更新设备, 然而, 频繁的设备更新需要大量的资金投入。



入，这对于小型检测机构或企业来说是一个沉重的负担。

#### （四）样品前处理繁琐

不同类型的食品需要不同的前处理方法，对于固体食品、液体食品和半固体食品，其前处理方法可能会有很大的差异，对于肉类、奶制品、蔬菜，增加了检测的工作量，导致目标成分的损失或污染<sup>[9]</sup>。前处理过程中需要使用多种化学试剂和仪器设备，这些试剂和设备的选择和使用需要专业的知识和技能，否则可能会影响前处理的效果和检测结果的准确性。在提取和净化过程中，如果选择的试剂不当，会引入新的杂质或干扰物质；如果使用的仪器设备操作不当，会导致样品损失或污染。

## 二、食品检测技术问题的解决策略

#### （一）研发高精尖检测技术

加强对新型检测材料的研究，开发具有高选择性和高灵敏度的纳米材料传感器，能够特异性地识别目标物质，减少其他成分的干扰。利用纳米金颗粒的光学特性，可以设计出针对特定农药残留的快速检测传感器，当目标农药存在时，纳米金颗粒的颜色会发生变化，通过肉眼或简单的仪器即可判断农药是否超标。以检测蔬菜中的某种特定农药残留为例，准备含有纳米金颗粒的检测试剂，将待检测的蔬菜样品进行简单处理，提取其汁液；将提取出的汁液与检测试剂混合，如果蔬菜中含有目标农药，农药分子会与纳米金颗粒发生特定的相互作用，导致纳米金颗粒的聚集状态发生改变，此时，纳米金颗粒的颜色会从原本的红色变为蓝色或紫色等。检测人员可以通过肉眼直接观察颜色变化，或者使用简单的分光光度计等仪器进行更精确的判断，若颜色发生明显变化，即可初步判断该蔬菜样品中农药超标，需要进一步采用专业检测方法确认具体的农药含量，以便采取相应的处理措施，保障食品安全<sup>[4]</sup>。结合人工智能和大数据技术，提升检测的准确性和智能化水平，通过对大量的检测数据进行分析和学习，建立智能检测模型，能够快速准确地判断食品中的成分和质量。在检测食品中的添加剂时，利用人工智能算法可以对复杂的光谱数据进行分析，准确识别出不同种类的添加剂及其含量<sup>[5]</sup>。结合生物技术和化学分析方法，开发出更加灵敏和准确的生物传感器，用于检测食品中的微生物和毒素。

#### （二）优化流程缩短时间

对样品前处理过程进行简化和优化，采用固相微萃取、超临界流体萃取等先进的样品前处理技术，可以快速有效地提取目标成分，减少传统方法中繁琐的步骤和时间消耗。固相微萃取技术可以在几分钟内完成对食品中挥发性有机物的提取，缩短了样品前处理时间。以检测水果中的挥发性有机物为例，准备固相微萃取装置，包括萃取纤维等部件，将水果样品进行适当处理，如切碎或榨汁以增加挥发性有机物的释放；将固相微萃取纤维暴露在水果样品的上方或插入样品中，由于萃取纤维对挥发性有机物具有选择性吸附作用，在几分钟内，目标挥发性有机物就会吸附在纤维上；随后，将萃取纤维插入气相色谱仪等分析仪器的进样口进行热解吸，分析仪器会对解吸出来的挥发性有机物进行分离和

检测，确定水果中挥发性有机物的种类和含量<sup>[6]</sup>。合理安排检测顺序和流程，根据不同检测项目的特点和要求，制定科学合理的检测计划，避免重复操作和等待时间，对于可以同时进行的检测项目，采用并行检测的方式，提高检测效率。利用自动化和智能化设备，实现检测过程的自动化操作，使用自动进样器、自动化分析仪器等，减少人为操作的时间和误差，提高检测速度<sup>[7]</sup>。

#### （三）降低设备购置成本

鼓励国内企业加大对食品检测设备的研发和生产力度，通过技术创新和产业升级，提高国内检测设备的质量和性能，降低生产成本。政府可以出台相关政策，支持企业进行技术研发和设备生产，给予资金补贴、税收优惠等扶持措施，加强国内企业与科研机构的合作，共同攻克关键技术难题，提高国内检测设备的竞争力<sup>[8]</sup>。推动检测设备的共享和租赁模式，建立检测设备共享平台，让不同的检测机构和企业可以共享设备资源，减少设备的重复购置和闲置浪费，小型检测机构或企业可以通过租赁设备的方式，满足临时的检测需求，降低设备购置成本。以某小型食品加工企业为例，该企业需要对其新生产的一批果酱进行农药残留检测，由于其自身没有专业的检测设备，若购买设备成本过高，此时，企业可以通过检测设备共享平台寻找所需设备，在平台上，企业提交检测需求和时间要求，平台根据其需求匹配合适的检测设备提供方。设备提供方可能是一家大型检测机构，双方通过平台协商租赁价格和使用期限等事宜，确定后，小型企业在约定时间内取得设备使用权，进行果酱样品的检测，检测完成后，按照约定归还设备。这样，小型企业以较低成本满足了临时检测需求，而大型检测机构的闲置设备也得到了充分利用，减少了设备的重复购置和闲置浪费，实现了资源的优化配置，推动了食品检测行业的高效发展<sup>[9]</sup>。

#### （四）简化样品处理步骤

开发新型的样品处理技术和方法，采用直接进样技术，无需对样品进行复杂的前处理，直接将样品注入检测仪器进行分析，缩短样品处理时间，减少试剂的使用和废弃物的产生。结合微流控技术和芯片实验室技术，实现样品处理的微型化和自动化，利用微流控芯片可以在微小的空间内完成样品的提取、净化和分析等多个步骤，提高检测效率<sup>[10]</sup>。优化现有样品处理方法的参数和条件，通过对提取剂的选择、提取时间、温度等参数的优化，提高样品处理的效率和效果。在提取食品中的农药残留时，选择更加环保和高效的提取剂，减少提取时间和温度，提高提取效率。以检测茶叶中的农药残留为例，确定一种环保高效的提取剂，某种新型的生物降解性溶剂，将茶叶样品粉碎后，取适量放入容器中；加入选定的提取剂，控制提取温度在相对较低的水平，通常为 40℃左右，避免高温对农药残留的影响以及降低能源消耗；然后进行搅拌或超声处理，加速提取过程，由于提取剂的高效性，在较短时间内，通常为 30 分钟左右，农药残留就会从茶叶中充分溶解到提取剂中；接着，对提取液进行过滤或离心分离，去除杂质；最后，采用气相色谱——质谱联用法，对提取液进行进一步检测分析，提高农药残留的提取效率，而且更加环保，减少对环境的影响，为准确检测食品中的农药残留提供可靠的前期处理步骤<sup>[11]</sup>。

三、结束语

针对食品检测技术存在的问题，本研究提出了以下解决策略：通过加强新型检测材料的研究，开发具有高选择性和高灵敏度的传感器，减少对其他成分的干扰，提高检测精度；结合人工智能和大数据技术，提升检测的智能化水平，实现对食品成分的快速准确识别。采用先进的样品前处理技术和自动化检测设备，简化样品处理步骤，缩短检测时间；合理安排检测顺序和流程，

避免重复操作和等待时间，提高检测效率。鼓励国内企业加大研发力度，提高检测设备的质量和性能，降低生产成本；推动检测设备的共享和租赁模式，减少设备的重复购置和闲置浪费，降低检测成本。开发新型的样品处理技术和方法，如直接进样技术和微流控技术等，减少试剂的使用和废弃物的产生，提高检测效率；优化现有样品处理方法的参数和条件，提高样品处理的准确性和可靠性。

参考文献

[1] 于翠翠, 曲军霞, 徐宏楠. 浅析食品检测技术在保健食品质量控制中的应用 [J]. 现代食品, 2024, 30(4): 163-165.

[2] 陶瑞, 刘晨晨, 王远远, 等. 保健食品检测技术指导原则解读及发展方向探讨 [J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(14): 166-174.

[3] 秦靖, 黄彩云, 劳思琪, 等. 浅谈预制菜食品安全现状与食品检测技术的应用 [J]. 现代食品, 2023, 29(12): 143-145.

[4] 杨金伟, 熊碧玉, 陆大智, 等. 农产品质量安全问题及食品检测技术发展现状、展望 [J]. 食品安全导刊, 2024(16): 39-42.

[5] 刘源, 张开惠, 王莹莹, 等. 多重免疫层析检测技术在食品安全快速检测中的研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(1): 337-346, 360.

[6] 靖博彬, 邱永祥, 王义峰, 等. 食源性病原微生物核酸检测技术在铁路食品安全保障中的应用研究 [J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2024, 14(4): 41-47.

[7] 王薇, 付群, 郑艳敏, 等. 应用于食品检测领域的分子即时检测技术研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(1): 48-56.

[8] 童兰艳, 毛子钰, 蔡雨芯, 等. 食品中多溴二苯醚检测技术研究进展及标准化现状 [J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(14): 9-19.

[9] 赵红梅. 食品安全检测中重要有机有害化学物质的残留检测技术探讨 [J]. 现代食品, 2024, 30(10): 67-69.

[10] 赵亚风. 快速检测技术在食品营养成分检测中的应用研究进展 [J]. 现代食品, 2024, 30(6): 71-73.

[11] 张翔渝. 食品安全快速检测技术在食源性致病菌检测中的应用 [J]. 现代食品, 2024, 30(14): 79-81.

# 基于催化裂化装置的关键设备选型与优化设计研究

吴汉东

中海油能源发展股份有限公司渤海地区管理服务中心 工程建设中心, 天津 300452

DOI:10.61369/ERA.2025060021

**摘要：** 本文聚焦催化裂化装置，阐述其工艺及炼油厂应用。着重介绍关键设备选型与优化设计，如油浆泵、催化剂循环系统等设备，依据工况和性能，从材质、结构等多维度给出选型建议，并说明不同厂家设备特性与适用场景。在优化设计中，通过提升热效率等举措，运用材料创新等方法，实现装置在能效、稳定性、安全性及经济性上的提升，为炼油企业提供设备选型与优化参考。

**关键词：** 催化裂化装置；设备选型；优化设计

## Research on Key Equipment Selection and Optimal Design of Catalytic Cracking Unit

Wu Handong

Engineering Construction Center, Bohai Region Management Service Center, CNOOC Energy Development Co., Ltd. Tianjin 300452

**Abstract：** This paper focuses on catalytic cracking units, expounding on their processes and applications in oil refineries. It emphasizes the selection and optimal design of key equipment, such as slurry pumps and catalyst circulation systems. Based on operating conditions and performance, equipment selection suggestions are provided from multiple dimensions, including material and structure. Additionally, the characteristics and applicable scenarios of equipment from different manufacturers are explained. In optimal design, measures such as improving thermal efficiency and utilizing material innovation are employed to enhance the energy efficiency, stability, safety, and economy of the unit. This provides references for equipment selection and optimization for oil refining enterprises.

**Keywords：** catalytic cracking unit; equipment selection; optimal design

## 引言

在石油炼制行业中，催化裂化工艺占据着至关重要的地位。它可将重质油品通过裂解反应转化为轻质油品，如汽油、柴油等，是实现重质油轻质化的关键途径。这不仅提高了石油原料的利用效率，还为市场提供了大量运输燃料调和组分。而且，通过催化裂化还能生产出高价值的化学品乙烯和丙烯等。随着全球石油资源日益紧张，催化裂化工艺在提升石油炼化效率、践行资源节约与节能环保等方面，发挥着愈发关键的作用，对缓解石油资源短缺意义重大。

## 一、催化裂化工艺概述

### （一）催化裂化工艺相关概述

催化裂化装置是炼油企业中最常见的炼油装置，也是炼油生产中重要的加工装置。在催化裂化装置中，原油在高温与催化剂相互作用发生催化裂化反应，从而生产出汽油、柴油、液化气、油浆等油品，这些油品通过进一步加工后成为合格产品进入市场。催化裂化装置是炼化企业直接或间接获取经济效益的重要装置，它的重要性不仅体现在经济效益方面，也体现在整个生产流程中，它是整个生产流程中的核心装置<sup>[1]</sup>。催化裂化具有诸多特点，它能显著提高轻质油的产率，得到的汽油辛烷值较高，柴油

安定性较好。同时，还能生成富含烯烃的液化气，是优质的有机化工原料。而催化裂化装置主要设备包括：反应器、再生器、分馏塔、油浆泵、催化剂循环系统（滑阀/塞阀）、旋风分离器、主风机、烟气余热锅炉、压缩机控制系统等。其中，油浆泵、催化剂循环系统、旋风分离器、主风机为关键设备，直接影响装置运行效率与稳定性。

### （二）催化裂化工艺在炼油厂中的应用

在炼油厂中，催化裂化工艺的应用十分广泛且复杂。一般由反应—再生系统、分馏系统、吸收—稳定系统等组成。新鲜原料油经换热后与回炼油、循环油浆混合，进入提升管反应器，与高温再生催化剂接触反应，生成油气、焦炭等。反应后的油气进

入分馏塔进行分离，得到汽油、柴油等产品。焦炭则在再生器中与空气接触燃烧，使催化剂再生。再生烟气经能量回收系统后排放。整个流程环环相扣，各系统相互配合，共同完成重质油向轻质油品的转化，为炼油厂生产出大量市场所需的燃料和化工原料<sup>[2]</sup>。

## 二、关键设备的选型原则与方法

### （一）油浆泵

油浆泵的选型原则上，设备必须具备良好的耐磨损性能，能够适应油浆中每升含有5至25克催化剂颗粒的冲刷工况。同时，要具备抗腐蚀能力，由于面临硫化物腐蚀的情况，所以材质需选用CA6NM合金或者采用双层衬里结构。另外，还需拥有高吸入性能，以避免因油浆黏度较高而产生气蚀问题。选型方法方面，优先考虑全衬里双层泵壳结构，例如劳伦斯FLS-6000这种类型，其内部衬有CA6NM合金，外泵壳则起到承压的作用<sup>[3]</sup>。为提升吸入能力，设备需配置诱导轮设计，并且叶轮要采用洛氏硬度在HRC34至38之间的高铬铁材质，从而满足在复杂工况下的使用需求，确保设备稳定、高效运行。

### （二）催化剂循环系统（滑阀/塞阀）

催化剂循环系统在选型时，要求阀体必须具备耐高温耐磨特性，要能承受500℃以上的高温以及催化剂颗粒的持续冲刷。在调节精度方面，塞阀的灵敏度需达到 $\pm 2\%$ ，滑阀的压差调节范围应为0.02–0.1 MPa。选型方法上，根据装置类型不同进行选择。对于同轴式装置，由于塞阀阀杆直径小，灵敏度高，所以应选用塞阀；而高低并列式装置则应选择单动滑阀。在材质选用上，阀体需采用司太立合金（Stellite），并且密封面硬度要达到HRC60及以上，以此确保阀门在复杂工况下能够稳定、精准地运行，满足实际生产需求<sup>[4]</sup>。

### （三）旋风分离器

在旋风分离器的选型原则方面，分离效率务必不低于99%，同时将压降控制在3kPa以内，以保障设备的高效运行；考虑到设备工作环境的复杂性，为实现抗磨损目标，需在内壁铺设厚度处于10–15mm的陶瓷衬里，增强设备的耐用性。选型方法方面，需依据实际工况进行抉择。当面对大流量工况时，多管式设备是理想之选，比如直径达1500mm的多管组，能很好地满足大流量需求；而在布局紧凑的场景中，单管式设备凭借其小巧灵活的特性更为适用<sup>[5]</sup>。此外，为优化设备性能，要将入口线速精准控制在8–12m/s的范围，并合理配备导流叶片，有效减少湍流冲击，确保设备稳定运行，充分发挥其最佳效能。

### （四）主风机

主风机的选型原则要先实现风量匹配，需按照再生器的烧焦负荷来计算风量，具体公式为风量等于焦炭量乘以10.5，同时空气系数要控制在1.2至1.5之间。其次，为了防止喘振现象发生，设备需要配备变频器或旁路阀，并且要能适应流量 $\pm 30\%$ 的波动范围。选型方法方面，根据压力需求来选择不同类型的风机。对于中低压范围，即压力在0.2至0.5MPa之间的情况，应选择离心

式风机；而当压力大于0.5MPa时，则选择轴流式风机<sup>[6]</sup>。在材质选择上，叶轮要采用1Cr18Ni9Ti不锈钢，轴承要能够耐受400至500℃的高温，以确保风机在相应的工作环境下能够稳定可靠地运行。

### （五）重点关键设备选型建议

在设备选型落地时，有诸多要点需考量。优先选用国产化设备是明智之举，以油浆泵为例，国产化改造后成本降低30%，稳定性却与进口产品相当，对降本及保障生产稳定意义重大。智能化集成也至关重要，中控技术的MPS5000振动保护系统可实时监测压缩机异常，降低停机风险。材料选择上，上海禹轩阀门提供的CA6NM合金衬里耐磨又耐腐蚀，适用于易磨损、腐蚀的油浆泵与旋风分离器，能延长设备寿命。模块化设计优势明显，如上海岩征实验室反应装置便于快速安装，利于中小型装置改造，提升效率、降低成本和风险。

不同厂家设备各有特色与适用场景。劳伦斯的油浆泵FLS-6000全衬里双层结构，耐磨且运行周期长，国产化改造后能耗降低20%，适合大型炼厂重油催化装置，但初期投资与维护成本高。中控技术的催化剂循环阀（T5100控制系统）智能化与调节精度高，集成喘振保护，适用于高精度控制场景，不过依赖进口核心部件，备件采购周期长<sup>[7]</sup>。上海岩征的旋风分离器模块化设计，安装便捷、陶瓷衬里抗磨损，适用于中小型催化裂化装置，大流量时压降略高。东方电气和上海电气的主风机，轴流式效率高、离心式结构紧凑，适用于高压再生系统，只是高压工况噪音大，需配套消音装置。中控技术的控制系统（DCS/SIS/MMS）支持API 670标准，集成振动监测，适用于新建或智能化改造装置，然而系统复杂，需专业维护团队。

## 三、关键设备的优化设计研究

### （一）提升热效率的优化举措

热效率提升技术路径优化在催化裂化装置能效提升方面具有显著工程价值。研究发现，通过材料创新与结构优化协同作用可有效提升系统热效率。采用纳米复合热障涂层技术可将设备热传导系数降低40%以上，其梯度结构设计能有效抑制高温区热逸散现象，减少非生产性热损失。基于计算流体力学（CFD）优化的反应器流道设计，通过优化催化剂流化状态与油气接触动力学，使反应转化率提升2.3–3.5个百分点，热能利用率显著提高。集成余热锅炉与热管换热器构建的多级余热回收系统，可将再生器烟气余热回收效率提升至78%，回收的蒸汽既可用于原料预热又可驱动布雷顿循环发电，形成热功联产的能源闭环。工程实践表明，该技术体系可使装置综合能耗降低15%~20%，吨油加工能耗指标达到行业领先水平。

### （二）降低能耗与磨损的结构优化

在催化裂化装置结构优化领域，运用多物理场耦合设计实现能耗与磨损协同控制，工程价值显著。以分馏塔系统为例，采用旋流导向型筛板与波纹填料复合结构，优化流道几何参数，相际传质效率能提升超25%，塔内压降低18%~22%，风机功率需求



减少15%<sup>[8]</sup>。在催化剂输送系统,基于流体动力学优化管道弯头曲率半径( $D/d \geq 5$ ),搭配自适应调节阀门,摩擦压降可降30%,年节约电费超200万元。针对磨损控制,利用多目标优化算法对反应器搅拌装置拓扑优化,动态匹配叶片曲率半径与转速,湍流强度分布均匀性提升40%,降低磨损速率。同时,通过激光熔覆技术在关键部件表面制备 WC-Co 基等梯度耐磨涂层,结合渗氮处理,部件耐磨性提升3倍-5倍,如旋风分离器入口衬里寿命从1800小时延至8000小时。经结构优化与材料创新协同,装置年维护成本降低25%~30%,MTBF提升45%,构建出“结构-材料-工艺”降本增效技术体系。

### (三) 延长设备寿命的设计策略

在催化裂化装置寿命优化领域,协同运用结构强化、表面工程与热应力管理可显著提升设备耐久性。对于再生器等核心设备,借助变截面有限元分析,优化筒体壁厚分布,对应力集中部位进行圆角过渡,采用厚壁容器强化方案,能让其在高温高压下的疲劳寿命提升超30%。制造时,运用激光熔覆-渗氮复合技术,在关键部件表面形成0.3-0.5mm厚的 CrN-WC 复合涂层,耐磨蚀性比传统镀层提升5倍-8倍,像旋风分离器耐磨衬里寿命从1.2年延长至5年多。热应力管理上,利用多层膨胀节与自适应滑动支座组合结构,优化动态补偿系数,补偿效率达95%以上,消除热应力集中。结合数字孪生技术预测关键焊缝剩余寿命,精度达 $\pm 8\%$ ,优化维护周期<sup>[9]</sup>。经工程验证,该技术体系使设备整体寿命延长40%~50%,年维护成本降低35%,还避免每年200万-300万元的非计划停工损失,形成全生命周期管理技术闭环。

### (四) 提升工艺安全性的设计要点

在催化裂化装置安全设计领域,运用风险预控、智能监测与结构强化的三维策略,能显著提升本质安全水平。结构安全上,采用爆破片与先导式安全阀组合的复合泄压系统,泄压响应时间缩至50ms内,超压保护可靠性达99.99%。借助拓扑优化重构反应器承压部件应力,疲劳安全系数超1.8,符合API标准。智能安全系统构建多参数融合预警平台,集成12类传感器,裂解炉管壁温偏差超50℃时0.5秒内预警。ESD按SIL3等级设计,含双通道冗余模块,关键阀门3秒内全行程切断。经HAZOP-LOPA分析识别127个风险节点,增设18项本质安全设施。密封可靠性采取三级防护,基础密封用磁力驱动泵加双端面机械密封,辅助密封

配氮气吹扫,应急密封设碳化硅硬质隔离阀。实验室测试显示,密封失效泄漏率控制在极低水平,满足API标准。工程应用表明,该体系使装置事故率下降76%,安全停机时间减少85%,形成全链条安全保障<sup>[10]</sup>。

### (五) 优化设计的方法和策略

在催化裂化装置关键设备的优化设计中,通过多维度技术融合实现性能提升已成为行业趋势。新材料的应用为设备耐高温、抗腐蚀性能带来突破,例如采用新型耐高温合金材料制造反应器和再生器核心部件,有效抵抗高温变形与腐蚀,延长设备使用寿命;复合材料在分馏塔塔板和填料中的应用,不仅减轻质量,更通过优化气液传质效率提升分馏效果。先进制造技术则贯穿设备全生命周期,智能化传感器与物联网系统实现运行状态实时监测与精准控制,数字孪生技术通过虚拟模型模拟运行场景,提前识别设计缺陷与潜在故障,增材制造技术则为复杂部件的快速定制提供可能。计算机仿真技术作为核心工具,通过三维建模与物理场分析,精确预测设备应力分布与温度场变化,为工艺参数优化(如反应温度、压力、进料速度等)提供科学依据,同时支持预防性维护策略制定,降低故障率。此外,通过动态调整催化剂量、空气流量等工艺参数,可在确保设备安全的前提下,进一步挖掘原料转化率与产品收率潜力。上述技术协同作用,最终实现催化裂化装置在稳定性、效率及经济性上的全面优化。

## 四、结束语

本研究聚焦催化裂化装置关键设备的选型与优化设计。从工艺剖析入手,明确设备功能、选型原则及方法,指出技术参数与经济成本主导设备选型,优化设计可提升设备性能、延长寿命。实际应用证明,合理选型与优化能带来显著效益,反之易引发工艺问题,本研究成果为相关工作提供理论与实践支撑。展望未来,该领域将迈向智能化、数字化。人工智能与大数据助力精准选型和性能预测,新材料、新制造技术广泛应用,有望大幅提升设备性能与效率。不过,面临的挑战也不容小觑。环保标准趋严,设备须满足更严苛的排放标准与能效要求;设备大型化、复杂化增加选型和优化难度,对技术人员提出更高要求。为此,需持续创新技术和方法,以应对这些挑战。

## 参考文献

- [1] 金星彤. 催化裂化装置工艺优化与长周期运行关键因素分析 [D]. 沈阳工业大学, 2022. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2022.000754.
- [2] 闫俊杰, 李弘扬, 杨玺, 等. 催化裂化催化剂生产装置高压喷雾设备的优化 [J]. 装备机械, 2023, (04): 74-78.
- [3] 陶金福, 王冠, 杨剑锋, 等. 典型催化裂化装置关键单元腐蚀分析与防护 [J]. 炼油与化工, 2023, 34(06): 57-61. DOI: 10.16049/j.cnki.lyyhg.2023.06.013.
- [4] 张旭亮, 莫力根. 关于石油化工催化裂化工艺技术的优化措施研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(17): 184-186.
- [5] 王峰, 钱贺明, 黄博. 催化裂化干气脱硫塔冲塔事件分析及处理 [J]. 石油技师, 2023, (02): 51-54.
- [6] 侯和乾. 催化裂化装置分馏塔结盐分析及对策 [J]. 中外能源, 2023, 28(09): 86-91.
- [7] 王裕振. 石油化工催化裂化工艺技术的优化措施 [J]. 化工管理, 2023, (26): 137-139. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2023.26.041.
- [8] 周广响. 催化裂化装置典型管道设计 [J]. 化工设计通讯, 2023, 49(08): 18-20.
- [9] 朱少伦, 卢俊文, 湛立宁, 等. 催化裂化装置换热器典型腐蚀分析与防护措施 [J]. 石油化工安全环保技术, 2023, 39(04): 39-42+7.
- [10] 杨轶男, 吴昊, 任晔, 等. 催化裂化装置碳排放影响因素分析 [J]. 当代石油石化, 2023, 31(07): 30-33+38.

# 基于政策视角的用地预审与用地报批制度创新探讨

梁裕敏

湖南中规土地测绘规划设计咨询有限公司, 湖南 长沙 410001

DOI:10.61369/ERA.2025060022

**摘要：** 用地预审与报批制度作为土地资源管理的核心环节，他的创新对于提升资源配置效率、推动政府治理现代化及平衡公共利益来说是至关重要的。但是由于当前制度存在审批流程冗杂、权责不清、与现实需求脱节等问题，这些问题严重的制约着土地资源的高效利用。所以本文将基于政策视角去通过流程整合与标准化、信息化转型、全链条监管及多要素协同等策略，希望这些策略可以重构审批机制，破解制度瓶颈，实现土地资源保护与经济社会发展的动态平衡，为国土空间治理体系现代化提供支撑。

**关键词：** 政策；用地预审；用地报批制度

## Discussion on Innovation of Land Pre-Examination and Land Application for Approval System Based on Policy Perspective

Liang Yumin

Hunan Zhonggui Land Surveying, Mapping, Planning and Design Consulting Co., LTD. Changsha, Hunan 410001

**Abstract：** As the core link of land resource management, land pre-examination and approval system, its innovation is crucial to improve the efficiency of resource allocation, promote the modernization of government governance and balance the public interest. However, there are some problems in the current system, such as complicated examination and approval process, unclear rights and responsibilities, and disconnection from real needs, which seriously restrict the efficient use of land resources. Therefore, based on the policy perspective, this paper will adopt such strategies as process integration and standardization, informatization transformation, full-chain supervision and multi-factor coordination, hoping that these strategies can reconstruct the approval mechanism, break the institutional bottleneck, achieve a dynamic balance between land resource protection and economic and social development, and provide support for the modernization of the territorial space governance system.

**Keywords：** policy; pre-examination of land use; land application and approval system

## 引言

在新型城镇化与生态文明建设背景下传统用地审批模式已难以适应土地资源集约化利用需求。其中当前制度中存在审查环节重复、监管机制薄弱等问题严重加剧了行政成本与资源错配风险，所以需要政府通过制度创新优化管理效能。不过在政策视角下的改革需兼顾效率提升与公共利益保障，既要简化流程、强化标准化建设，也要依托信息化手段推动治理能力升级，从而为土地资源可持续利用奠定制度基础。

## 一、基于政策视角的用地预审与用地报批制度创新的重要性

### （一）制度创新是推动土地资源高效配置的核心动力

用地预审与用地报批制度的创新本质上是国家土地管理体系适应新时代发展需求的必然选择。因为在传统审批模式下审查环节冗杂、流程重复、标准模糊等问题长期存在，不仅会大幅增加

行政成本，同时该问题还会导致用地审批周期延长，严重制约着土地资源的合理流动与高效利用。而且政府通过政策层面的制度创新还能够从根本上优化审批流程，明确审查边界，减少重复性审查，从而提升土地资源的配置效率。例如政府通过整合规划选址与用地预审的职能，可以将原本分散的审查环节合并为统一的管理流程，这样做既能够避免多头审批的弊端，同时又可以强化规划引领的作用，从而确保土地资源向符合国家战略和公共利益

的方向倾斜<sup>[1]</sup>。

## （二）制度创新是实现政府治理现代化的重要抓手

如今在全面深化改革的背景下用地预审与报批制度的创新成为政府职能转变的典型实践，因为传统的审批模式过度依赖行政干预，所以他们的审查内容与程序往往会复杂化且容易导致权力寻租和监管盲区。而政府通过政策层面的系统性优化，如政府推行“多审合一、多证合一”改革可以将用地预审与规划选址合并办理，这样做不仅能够减少审批层级，同时还可以通过标准化、信息化的手段去实现审查流程的透明化与规范化。

## （三）制度创新是保障公共利益与权益平衡的关键保障

土地作为稀缺资源，他的利用往往会涉及多方利益博弈，尤其是农民权益保护、生态环境保护与经济发展需求之间的平衡。其中用地预审与报批制度的创新主要是通过政策设计去强化对公共利益的刚性约束。例如政府在审批环节中会明确要求对土地征收的必要性、公共利益属性进行严格审查，同时政府还会通过规范征地补偿标准和程序确保农民在土地转用过程中的合法权益不受侵害。除此以外政策创新还非常注重将生态保护、耕地红线等要求嵌入审批流程，如政府通过前置审查和动态监管可以避免土地资源过度开发对生态环境的破坏。

# 二、当前用地预审与用地报批制度存在的问题

## （一）审批流程复杂冗长与重复审查问题突出

当前用地预审与报批制度在实际操作中普遍存在流程繁琐、环节重叠的问题，无论是从用地申请到最终审批，他都需经历预审、农地转用、土地征收、规划供地等多个阶段，且每一环节都需逐级上报审查，这样做最终会导致审批链条过长。而且不同层级、不同部门之间的审查内容会重复，例如用地预审阶段已审核的内容在后续报批中仍需重复提交和复核，这样做不仅会严重增加行政成本，同时还会延长项目落地的周期<sup>[2]</sup>。除此以外由于审批标准化程度不足，不同地区或部门对同一材料的审查标准存在差异，所以就会导致申报主体在准备材料时难以精准把握要求，进一步加剧流程的复杂性。这种多头审批、重复把关的模式不仅会大量消耗大量行政资源，还容易因信息传递不畅或责任推诿造成审批效率低下，难以适应快速推进项目建设的现实需求。

## （二）审批权责不清与监管机制薄弱

在简政放权改革背景下用地审批权逐步下放至地方，但配套的监管体系未能同步完善导致权责边界模糊。一方面由于地方政府在承接审批权限后，因缺乏统一的监管标准或技术支撑，所以容易出现审批尺度宽松、把关不严的现象。例如有部分基层政府为追求短期经济效益，对农用地转用审查标准执行不彻底，不经意间忽视耕地保护和生态红线要求。另一方面有些基层政府的审批与监管职能分离问题明显，他们审批部门侧重前期材料审核，而对批后土地利用的跟踪监管较为薄弱，所以就会导致“批而未供”“供而未用”等土地闲置现象频发。除此以外多部门协同监管机制缺失，自然资源、规划、建设等部门职责交叉但衔接不足，难以形成全流程、全要素的监管合力，进一步削弱了制度执行的

刚性约束。

## （三）制度设计与现实需求存在脱节

现行用地预审与报批制度的部分规定已难以适应新形势下的发展需求，例如如今政府用地预审阶段仍保留过多与项目可行性无关的审查内容，如地质灾害评估、压覆矿产证明等会导致预审功能偏离了《土地管理法》设定的规划引导初衷。与此同时政府的土地规划指标频繁变更的问题长期存在，如部分地方政府或开发企业为追求经济利益会擅自调整容积率、绿化率等规划参数，这样做只会造成实际开发与审批方案不符，从而破坏掉国土空间规划的严肃性。除此以外制度对新兴用地需求的响应不足<sup>[3]</sup>，如线性工程因施工调整需反复报批、多要素（用地、用林、用海）统一审批缺乏法律衔接等问题，都反映出制度灵活性与现实复杂需求之间的矛盾。

# 三、基于政策视角的用地预审与用地报批制度创新策略

## （一）以流程整合与标准化为核心优化审批机制

用地预审与报批制度的创新，首要任务是解决审批流程的复杂性与重复性问题。当前制度下，不同层级、不同部门的审查环节相互叠加，既增加了行政成本，也延长了项目落地周期。政策创新应聚焦于系统性整合现有审批流程，通过合并重复审查环节、统一审查标准，构建更加简洁高效的审批链条。例如，将用地预审与规划选址、土地征收等环节的审查内容进行横向整合，避免同一材料在不同阶段反复提交，减少因多头管理导致的效率损耗。同时，推行审批流程的标准化建设，明确各环节的审查要点与时限要求，通过制定统一的申报材料清单和审查规范，降低申报主体因标准模糊而产生的合规成本。这种改革不仅能缩短审批周期，还能通过规范化的流程设计增强审批结果的公信力，为市场主体提供稳定预期。除此以外政策创新需注重审批权限的合理配置，如在简政放权的大背景下，审批权的下放需与地方监管能力的提升同步推进。对于技术性强、涉及公共利益的核心审查事项，如耕地保护、生态红线管控等，应保留中央或省级层面的统筹权，确保刚性约束不被突破；而对于地方特色明显、操作性强的审批内容，则可通过权限下放激发地方自主性。通过“分类放权、分级负责”的模式，既能避免“一放就乱”的风险，又能调动地方政府的积极性，形成权责匹配的审批体系。

## （二）强化信息化支撑推动审批智能化转型

信息化技术的深度应用是破解用地审批效率难题的关键路径。当前审批流程中，纸质材料流转、人工重复核验等问题普遍存在，严重制约了审批效能的提升。政策创新需以数据共享与系统互联为突破口，构建覆盖全流程的数字化审批平台。例如，通过整合国土空间规划、土地利用现状、生态保护红线等基础数据，建立统一的国土空间信息库，实现用地预审阶段对规划符合性、生态敏感性的智能预判。同时，推广电子证照、在线申报、智能审查等功能，减少纸质材料提交与人工干预，缩短组卷与审批时间。广东省在探索用地、用林、用海统一审批时，已尝试通



过“统一收件、统筹审核”模式打破部门数据壁垒，但实践中仍需进一步优化系统兼容性与数据更新机制<sup>[4]</sup>。其次智能化转型的另一重点是引入算法与人工智能技术辅助决策。例如政府在用地预审阶段，可通过算法模型自动筛选项目选址的合规性，识别占用基本农田、生态保护区等风险；在用地报批阶段，利用自然语言处理技术对申报材料进行语义分析，快速定位关键审查内容。除此以外政府可以建立审批过程的实时追踪与预警系统，对超期未办结的环节自动触发督办提醒，确保审批流程的透明性与时效性。这种技术驱动的改革不仅能提高审批效率，还能通过数据留痕与算法透明减少人为操作空间，增强制度的公平性与科学性。

### （三）构建全链条监管体系实现“放管结合”

审批制度改革的核心逻辑是“放权”与“监管”的平衡。当前政府用地审批权下放后部分地区因监管机制不完善，出现了审查标准执行不严、批后土地利用监管薄弱等问题。所以政策创新需围绕“事前预防、事中控制、事后追责”构建全链条监管体系。在事前阶段政府可以强化用地预审的实质性审查功能，重点审核项目是否符合国土空间规划、是否突破耕地保护红线等核心指标，避免将矛盾后移至报批阶段。例如三明市通过整合规划选址论证、节地评价、生态保护分析等内容形成“综合论证专章”，既减少了重复审查，又强化了前期准入的把关作用。而事中监管的关键在于动态跟踪与协同联动，如政府可以建立跨部门协同监管机制，整合自然资源、生态环境、农业农村等部门的监管职能，对土地利用中的规划执行、耕地保护、生态修复等环节实施联合检查。例如政府可以对“批而未供”“供而未用”土地，通过卫星遥感监测与实地核查相结合的方式定期排查，督促地方政府或企业加快土地开发。除此以外政府还可以推行“双随机、一公开”监管模式，随机抽取检查对象与执法人员，及时公开检查结果，形成常态化监督压力。事后追责则需完善责任倒查与惩戒机制，对违规审批、土地闲置等行为依法追究行政或法律责任，并通过信用体系将违规主体纳入黑名单，限制其后续用地申请资格。

### （四）完善制度衔接与多要素协同审批机制

用地审批涉及土地、林业、海洋、环保等多重要素，现行制度中因法律依据分散、审批标准不一导致跨要素协同审批困难。政策创新需以顶层设计推动多要素审批的深度融合。一方面政府需要修订完善相关法律法规，明确用地、用林、用海等审批事项的法律衔接规则，消除因制度冲突导致的审批梗阻。例如政府可以针对线性工程穿越不同资源类型区域的情况，可制定统一的审批流程，允许一次性提交多要素申请材料，由牵头部门统筹协调各资源管理部门的审查意见。另一方面政府可以建立跨部门联审联批机制并通过设立联合审批窗口或线上协同平台，实现用地预审与林业许可、海洋使用论证等环节的并联办理。广东省在“三统”审批改革中虽面临法律障碍，但其“统一收件、统筹审核”的经验仍为全国提供了重要参考。除此以外政策创新需回应新业态与复杂项目的用地需求。例如这个服对新能源基础设施、智慧物流园区等新型用地类型，应动态调整审查标准，避免机械套用传统工业或住宅用地指标。同时政府还要探索弹性供地机制，允许根据项目阶段性需求分期报批用地，减少因方案调整引发的反复审查。对于重大民生工程或应急项目，可建立“绿色通道”制度，通过容缺受理、先行用地等政策保障项目及时开工，但需同步强化事后监管，确保承诺事项按期落实。这种灵活性与原则性相结合的策略，既能适应经济社会发展的多样化需求，又能守住资源保护与合规利用的底线。

## 四、结语

总而言之，用地预审与报批制度创新是破解土地管理矛盾的关键路径。通过流程再造、技术赋能与监管协同，制度设计逐步从“重审批”转向“全流程服务”，既提升了资源配置效率，也强化了耕地保护与生态安全底线。未来需进一步深化多部门联动机制，完善弹性供地政策，推动制度灵活性与社会发展多元需求深度融合，为构建现代化国土空间治理体系提供持续动力。

## 参考文献

- [1] 杜启勇, 李琪琪. 面向重大项目土地要素精准保供的用地报批工作困境与对策研究 [J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22 (07): 36-42.
- [2] 李瑞杰, 刘永海, 李盘升, 等. “三调”背景下的公路建设项目用地报批策略探讨 [J]. 中阿科技论坛 (中英文), 2022, (11): 52-58.
- [3] 湖北省国土资源厅关于改进和优化建设项目用地预审和用地审查的通知 [J]. 湖北省人民政府公报, 2017, (20): 14-48.
- [4] 广东省国土资源厅关于贯彻落实国家改进和优化建设项目用地预审和用地审查意见的通知 [J]. 广东省人民政府公报, 2017, (26): 6-10.



# 机电安装工程施工中的关键技术与管理策略研究

商庆良

身份证号: 370402198408260012

DOI:10.61369/ERA.2025060024

**摘要：** 本文深入剖析机电安装工程施工中的关键技术与管理策略。在关键技术层面，全面阐释电气、管道、通风与空调等安装技术要点；管理策略方面，从质量、进度、安全、成本等维度展开探讨，旨在为提升机电安装工程施工水平提供全面的理论支撑与实践指导，助力工程优质、高效完成。

**关键词：** 机电安装工程；关键技术；管理策略

## Research on Key Technologies and Management Strategies in Electromechanical Installation Engineering Construction

Shang Qingliang

ID : 370402198408260012

**Abstract :** This paper provides an in-depth analysis of key technologies and management strategies in electromechanical installation engineering construction. It comprehensively explains the technical essentials of electrical, piping, ventilation, and air conditioning installations at the key technology level. In terms of management strategies, it explores quality, progress, safety, and cost dimensions, aiming to provide comprehensive theoretical support and practical guidance for improving the construction level of electromechanical installation engineering. This helps to achieve high-quality and efficient completion of the project.

**Keywords :** electromechanical installation engineering; key technology; management strategy

### 引言

机电安装工程作为建筑工程的关键环节，对建筑整体功能的实现及使用者体验影响深远。在建筑行业持续发展的当下，机电安装工程规模不断扩大，复杂程度日益提高，对施工技术与管理策略提出了更高要求。深入研究机电安装工程施工中的关键技术与管理策略，对保障工程质量、提高施工效率、控制成本以及增强建筑整体性能意义重大。通过梳理与分析相关技术和管理要点，期望为行业发展贡献有价值的参考。

### 一、机电安装工程概述

机电安装工程是指在建筑领域中涉及到机械和电气设备的安装与调试工作，广泛应用于工业、商业和住宅建筑等领域。这类工程不仅包括了电力系统、照明系统、通风与空调系统等电气设备的安装，还涵盖了各种机械设备的布置和连接。机电安装工程的质量直接关系到整个建筑工程的安全性、可靠性以及后期运行的有效性<sup>[1]</sup>。若机电安装存在质量问题，可能会引发电气故障、管道泄漏、设备运行不稳定等一系列问题，不仅会增加建筑后期的维护成本，还可能对人员生命财产安全造成威胁。因此，确保机电安装工程的高质量施工，是建筑工程顺利交付和长期稳定运行的重要保障。

### 二、机电安装工程施工中的关键技术

#### （一）电气安装技术

电气安装作为机电安装工程的核心部分，其质量直接影响整个工程的运行。在确定电气设备安装位置时，技术人员需依据详细的设计图纸，严格按照规范标准执行<sup>[2]</sup>。以配电箱、开关柜为例，安装高度的偏差需控制在极小范围内，水平度与垂直度也要借助专业测量工具精准校准，只有这样，才能为设备长期稳定、安全运行筑牢基础。电缆敷设前，工作人员要逐条核对电缆型号与规格，确保与设计完全相符。敷设过程中，借助专业设备控制电缆弯曲半径，通过合理规划路径，杜绝电缆交叉与缠绕现象，实现布线的整齐、有序。对于电线连接，不管是压接还是焊接，

都要经过严格的质量检测，保证连接牢固，从而降低接触电阻。在电气接地系统安装时，从接地极埋设深度到接地导线截面，每一个环节都要严格遵循规范，确保接地电阻符合要求，为人员与设备安全提供保障<sup>[3]</sup>。

## （二）管道安装技术

管道安装涉及给排水、消防等多个系统，安装质量直接关系到建筑的正常使用。安装前，利用超声波探伤仪、外观卡尺等专业检测工具，对管材进行全面检查，确保管材无裂缝、砂眼等质量问题。根据管道的使用功能与设计的要求，合理选择连接方式。对于给排水管道，热熔连接时，借助智能温控热熔机，精确设定加热时间与温度，确保连接紧密、无渗漏；螺纹连接时，使用扭矩扳手控制拧紧力矩，保障连接的密封性。

管道坡度的设置在安装过程中至关重要。合理的坡度能确保管道内液体顺利流动，避免积水，影响管道正常使用。排水管道坡度需依据管径与设计流量，运用水力计算公式精确计算设置<sup>[4]</sup>。在管道支吊架安装环节，借助专业的力学计算软件，依据管道管径、重量及敷设方式，确定支吊架的选型与安装间距，确保管道安装稳固，防止管道出现位移、变形等问题，保障管道系统的安全运行。

## （三）通风与空调安装技术

通风与空调系统安装直接影响建筑室内环境质量。在通风管道制作过程中，严格把控风管的材质、厚度，确保符合设计要求。使用平整度检测平台，保证风管平整度，采用密封胶填充接口缝隙，确保接口严密性。安装时，结合建筑结构和通风需求，规划合理的风管走向与高度，确保通风顺畅<sup>[5]</sup>。

在空调系统中，制冷设备安装是关键。制冷机组安装时，运用高精度水平仪找平，使用专业工具紧固地脚螺栓，确保机组安装稳固。连接制冷管道时，通过氮气吹扫、真空干燥等工艺，严格保证管道清洁度，防止杂质进入管道，影响制冷效果。在调试阶段，使用多功能环境测试仪，对空调机组的风量、风压、温度、湿度等参数进行精确调试，营造舒适的室内环境，满足用户的使用需求。

# 三、机电安装工程施工的管理策略

## （一）质量管理策略

质量管理无疑是机电安装工程施工管理的核心，如同大厦的基石，支撑着整个项目的质量与安全。企业需构建一套完善的质量管理体系，清晰界定各部门、各岗位人员的质量职责。从项目负责人、技术主管到一线施工人员，每一个环节都明确质量责任，让质量管理工作做到责任到人<sup>[6]</sup>。施工前，组织专业技术人员对施工图纸进行细致会审。在这个过程中，不同专业的人员共同探讨，从电气、管道、通风等多个维度对图纸进行分析，及时发现图纸中存在的尺寸标注不清、设计不合理等问题，并与设计单位沟通解决，杜绝因图纸问题导致施工质量缺陷，避免后期返工带来的人力、物力浪费。

对于进入施工现场的材料和设备，必须严格检查其质量证明

文件，仔细核对规格型号。针对一些关键材料，如电缆、管材等，必要时进行抽样检验。例如，对于电缆的绝缘性能，使用专业的绝缘电阻测试仪进行检测；对于管材的壁厚，使用卡尺进行精确测量，确保其质量符合相关标准要求。在施工过程中，全面强化质量监督与检查，严格执行“三检”制度。施工人员完成每道工序后，先进行自检，确认合格后，由同班组人员进行互检，最后由专业质量检验人员进行专检。只有上道工序质量合格，才能进入下道工序，从而确保每一道工序的质量都得到有效把控。一旦检查发现质量问题，立即组织相关人员进行分析，制定详细的整改措施，并安排专人跟踪整改效果，直至问题得到彻底解决，形成质量管理的闭环。

## （二）进度管理策略

合理的进度管理是机电安装工程按时完工的有力保障。项目启动前，项目管理团队要依据合同工期和工程实际情况，制定出详细的施工进度计划。这个计划不仅要明确各施工阶段的开始与结束时间，还要精确定关键节点，同时充分考虑各施工工序间的逻辑关系与合理衔接。例如，在电气安装和管道安装过程中，要根据空间位置和施工顺序，合理安排先后顺序，避免相互干扰。

在施工过程中，建立行之有效的进度跟踪与监控机制。安排专人定期对施工进度进行检查和分析，通过对比实际进度与计划进度，及时发现进度偏差。一旦发现进度滞后，迅速组织相关人员分析原因<sup>[7]</sup>。若是因为人员不足导致进度滞后，立即增加施工人员投入；若是因为施工方案不合理，对施工方案进行优化调整；若是因为施工顺序不合理，重新规划施工顺序。此外，加强与其他施工专业的协调沟通至关重要。在交叉作业时，提前召开协调会议，明确各专业的施工时间和空间范围，避免因交叉作业导致施工冲突，影响施工进度。

## （三）安全管理策略

安全管理是机电安装工程施工的重要保障，关乎每一位施工人员的生命安全和企业的稳定发展。首先，要树立“安全第一、预防为主”的管理理念，通过定期组织安全培训、开展安全知识讲座等方式，加强对施工人员的安全教育培训，提高他们的安全意识与自我保护能力。在施工现场，设置明显的安全警示标志，对危险区域，如高处作业区、电气设备安装区等，进行有效隔离，防止无关人员进入。

加强施工设备与工具的安全管理，定期对设备进行检查和维护。对于起重设备，每次使用前都要进行严格的检验检测，确保其性能可靠。规范施工人员的操作行为，要求他们严格遵守安全操作规程，杜绝违规作业<sup>[8]</sup>。例如，在电气设备安装过程中，严禁带电作业；在高处作业时，必须系好安全带。同时，制定完善的安全应急预案，并定期组织演练。通过模拟火灾、触电、坍塌等事故场景，提高施工人员应对突发事件的能力，确保在安全事故发生时，能够迅速、有效地开展救援，最大限度减少事故损失。

## （四）成本管理策略

成本管理对提高机电安装工程经济效益具有重大意义。在项目实施过程中，制定科学合理的成本控制目标，并将其分解到各

个施工阶段和部门。在施工材料与设备采购环节，通过招标、询价等方式，广泛收集供应商信息，选择性性价比高的供应商，降低采购成本。在人员和设备安排上，根据工程进度和施工任务，合理调配人员和设备，避免人员和设备闲置浪费<sup>[9]</sup>。

严格控制施工过程中的变更与签证。对于必要的变更，要进行严格的审批与成本核算。例如，当因设计变更需要增加施工内容时，要对增加的工程量、材料费用、人工费用等进行详细核算，防止因变更导致成本超支。加强施工现场管理，通过制定材料使用规范、加强施工人员培训等方式，减少材料浪费与返工现象，降低施工成本。

（五）人员管理策略

施工人员作为机电安装工程的直接执行者，其素质与工作状态对工程质量和进度有着至关重要的影响。在人员招聘环节，制定严格的招聘标准，选拔具备专业知识与技能、工作经验丰富的人员。新员工入职后，开展针对性培训，包括新技术、新工艺培训以及安全知识培训等。例如，针对 BIM 技术的应用，组织专业培训课程，让施工人员掌握其操作方法和应用技巧，提升他们的专业水平与安全意识。

建立科学合理的绩效考核制度，将施工人员的工作表现与薪酬、晋升挂钩。通过设立质量奖、进度奖等多种奖项，激励施工人员积极工作，提高工作效率与质量。营造良好的团队氛围，组织各类团队建设活动，促进施工人员之间的沟通与协作，提高团队凝聚力，为工程顺利推进提供有力保障<sup>[10]</sup>。

（六）技术创新管理策略

在科技快速发展的背景下，技术创新对提升机电安装工程施工水平至关重要。施工企业应加大技术研发投入，积极引进和应

用新技术、新工艺、新材料。例如，采用 BIM 技术进行施工模拟与管理，通过建立三维模型，提前发现施工中可能存在的问题，提高施工精度与效率；应用新型节能材料，降低工程能耗，实现绿色施工。

建立技术创新激励机制，对于在技术创新方面有突出贡献的团队和个人给予物质和精神奖励，激发施工人员的创新积极性。加强与高校、科研机构的合作，开展产学研合作项目。借助高校和科研机构的科研力量，解决企业在技术创新过程中遇到的难题，提升企业技术创新能力，推动机电安装工程施工技术不断进步。

四、结束语

机电安装工程施工中的关键技术与管理策略相互关联、相互影响，共同决定工程质量、进度、安全与成本。通过精准把控电气安装、管道安装、通风与空调安装等关键技术，实施质量管理、进度管理、安全管理、成本管理、人员管理以及技术创新管理等有效管理策略，能够显著提升机电安装工程施工水平。在未来工程实践中，随着技术不断进步与管理理念持续更新，机电安装工程施工应持续优化技术应用与管理模式，以适应建筑行业发展需求，为打造优质、高效、安全的建筑项目奠定坚实基础。这不仅有助于提升企业市场竞争力，对推动整个建筑行业健康发展也具有重要意义。

参考文献

[1] 张爱国. 机电安装工程中的质量控制关键因素分析 [J]. 居业, 2024, (11): 52-54.  
[2] 徐长占. 机电安装工程变更的控制与管理研究 [J]. 江西建材, 2024, (11): 384-386.  
[3] 于小龙. 建筑机电安装工程项目质量管理探讨 [J]. 工程建设与设计, 2024, (20): 248-250. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2024.10.281.  
[4] 李子光. 浅谈水电站机电安装施工成本控制措施 [J]. 水电站机电技术, 2024, 47(09): 156-158. DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2024.09.047.  
[5] 李冬黎. BIM 技术在建筑机电安装工程施工质量控制中的应用 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2024, (09): 96-98+112.  
[6] 杜晓英, 黄瑞, 杨智明, 等. BIM 技术在装配式建筑机电安装工程中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (08): 63-65. DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2024.08.019.  
[7] 潘笑豪. 装配式建筑机电安装施工技术研究 [J]. 中国设备工程, 2024, (08): 214-216.  
[8] 陈石峰. 机电安装工程项目施工安全风险管控研究 [J]. 电气技术与经济, 2024, (04): 262-264+284.  
[9] 赵飞. 智能建筑机电安装工程施工及质量控制 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2024, (02): 93-95+99.  
[10] 张国圣, 胥文锋, 兰立春, 等. 装配式高层住宅机电安装工程施工及管理要点 [J]. 四川水泥, 2023, (12): 107-109.

# 静密封垫片在炼化企业的重要性

刘双羽

玉门炼油厂, 甘肃 酒泉 735211

DOI:10.61369/ERA.2025060025

**摘要：**在现代工业与科技飞速发展的当下，炼化企业对设备密封性能的要求愈发严苛。静密封垫片作为炼化设备不可或缺的密封元件，对生产的安全性、稳定性以及环保性起着关键作用。本文全面深入地探讨静密封垫片的基本概念、性能特点、在炼化企业中的多元应用、重要意义、常见问题及解决方案，同时展望其未来发展趋势，为炼化企业的持续稳定运营提供有力参考。

**关键词：**静密封垫片；炼化企业；安全生产；可持续发展

## The Importance of Static Sealing Gaskets in Refining and Chemical Enterprises

Liu Shuangyu

Yumen Oil Refinery, Jiuquan, Gansu 735211

**Abstract：** In the current era of rapid development in modern industry and technology, refining and chemical enterprises have increasingly stringent requirements for equipment sealing performance. As an indispensable sealing component in refining equipment, static sealing gaskets play a crucial role in ensuring production safety, stability, and environmental protection. This paper comprehensively and in-depth explores the basic concepts, performance characteristics, diverse applications in refining enterprises, significant importance, common problems, and solutions of static sealing gaskets, while also looking forward to their future development trends, providing a strong reference for the sustained and stable operation of refining enterprises.

**Keywords：** static sealing gasket; refining and chemical enterprises; safety production; sustainable development

## 引言

炼化企业在国民经济体系中占据着举足轻重的地位，其生产过程的连续性和稳定性直接关系到能源供应的稳定以及经济的健康发展。然而，炼化生产涉及众多易燃易爆、有毒有害的介质，如原油、天然气、液化石油气等。一旦这些介质发生泄漏，不仅会造成资源的严重浪费和对环境的污染，还极有可能引发火灾、爆炸等重大安全事故，对人员生命和财产安全构成巨大威胁。因此，对炼化设备的密封性能提出了极高的要求。

静密封垫片作为炼化设备中广泛应用的密封形式之一，其性能优劣直接决定了生产系统的安全性、稳定性和环保性。在管道法兰、压力容器、阀门等各类设备中，静密封垫片都发挥着关键作用，它通过有效填充连接部件之间的间隙，防止流体或气体泄漏，确保设备正常运行和安全生产。深入研究静密封垫片在炼化企业中的重要性，对提升炼化企业的安全生产水平和可持续发展能力具有重要的现实意义。

## 一、静密封垫片的基本概念与性能特点

### （一）静密封垫片的基本概念

静密封垫片是用于连接两个静止表面，以阻止流体或气体泄漏的密封元件。在炼化企业的设备中，它广泛应用于管道法兰、

压力容器、阀门等设备的连接处。静密封垫片通常由弹性材料制成，像橡胶、塑料、金属或复合材料等。这些材料凭借良好的弹性和密封性能，能在一定的压力和温度范围内形成可靠的密封屏障，同时具备一定的耐腐蚀性和耐磨损性，以应对炼化介质中可能存在的腐蚀性物质和机械磨损。<sup>[1]</sup>



## （二）静密封垫片的性能特点

1. 良好的密封性能：在一定压力和温度范围内，静密封垫片能有效防止流体或气体泄漏，这是其最基本也是最重要的性能要求，是在炼化企业广泛应用的基础。

2. 优良的压缩回弹性能：垫片受压缩时会发生弹性变形，压力释放后能恢复原状，确保密封持续有效。这种性能使静密封垫片能适应不同压力和温度条件下的密封需求，保障设备长期稳定运行。

3. 稳定的应力松弛性能：垫片在长期使用过程中，应力会逐渐松弛，导致密封性能下降。但优质垫片能保持稳定的应力松弛性能，保证密封效果的持久性，这对需要长时间连续运行的炼化设备至关重要。

4. 良好的耐腐蚀性：炼化介质中含有多种腐蚀性物质，如酸、碱、盐等，静密封垫片必须具备良好的耐腐蚀性，抵御这些物质的侵蚀，确保设备长期安全运行。

5. 易于安装和拆卸：垫片结构简单，安装和拆卸方便，有利于设备的维护和检修。这一特性可降低设备维护和检修成本，提高设备运行效率。

## 二、静密封垫片在炼化企业中的应用

### （一）静密封垫片在管道法兰连接中的应用

1. 法兰连接的结构与特点：法兰连接是通过螺栓将两个法兰盘紧密连接在一起的方式，具有结构简单、易于拆卸和安装的优点，在炼化企业管道系统中应用广泛。但法兰连接处存在间隙，需静密封垫片填充，以确保管道密封性。

2. 常用法兰垫片类型：

金属垫片：具有高强度、耐高温、耐高压的优点，适用于高温高压环境，常用材料有不锈钢、碳钢、铜合金等。然而，其密封性能受温度和压力变化影响较大，且易产生应力松弛现象，使用时需特别注意。

非金属垫片：具有良好的柔性和弹性，适用于低温低压环境，常用材料有橡胶、塑料、石墨等。这些材料耐腐蚀性和耐磨损性良好，加工成各种形状和尺寸方便，但耐高温和耐高压性能较差。

复合垫片：结合了金属垫片和非金属垫片的优点，适用范围更广。通常由金属骨架和非金属密封层组成，兼具金属垫片的高强度、耐高温性能和非金属垫片的柔性、弹性，在管道法兰连接中应用广泛。

3. 法兰垫片的选型原则：

根据介质的性质选择垫片材料：对于腐蚀性介质，应选择具有良好耐腐蚀性的垫片材料；对于高温高压介质，应选择具有高强度和耐高温性能的垫片材料。

根据压力和温度选择垫片类型：低温低压环境可选择非金属垫片；高温高压环境则应选择金属垫片或复合垫片。

根据法兰的结构和类型选择垫片尺寸和形状：不同结构和类型的法兰需要不同尺寸和形状的垫片来确保密封效果，选择时需根据法兰具体情况确定。

### （二）静密封垫片在压力容器中的应用

1. 压力容器的结构与特点：压力容器能承受内部或外部压力，在炼化企业中用于储存和运输各种高压、高温、易燃易爆介质，对其密封性能要求极高。

2. 压力容器垫片的类型与选择：

金属缠绕垫片：由金属带和填充物交替缠绕而成，弹性和密封性能良好，能在高温高压环境下保持稳定密封效果，且易于加工成各种形状和尺寸，在压力容器中的应用广泛。

石墨复合垫片：由石墨层和金属骨架组成，具有优良的耐高温、耐高压和耐腐蚀性能，能在极端环境下保持稳定密封效果，安装和拆卸方便，适用于承受高温高压和腐蚀性介质的压力容器。

波齿复合垫片：由金属骨架和波齿形密封层组成，弹性和密封性能良好，能在高压环境下保持稳定密封效果，易于加工成各种形状和尺寸，适用于承受高压介质的压力容器。

3. 压力容器垫片的安装与维护：安装压力容器垫片时，需严格按照操作规程进行，确保垫片正确安装和压紧。同时，要定期对垫片进行检查和维护，及时发现并处理潜在问题。若发现垫片老化、损坏或密封性能下降，应及时更换，以保障设备安全稳定运行。

### （三）静密封垫片在阀门中的应用

1. 阀门的结构与特点：阀门是通过启闭件控制介质流动和分布的设备，广泛应用于炼化企业的各种管道和设备中，控制介质流量、压力和方向等参数，其密封性能直接关系到介质是否泄漏以及设备的正常运行和安全生产。<sup>[2]</sup>

2. 阀门垫片的类型与选择：

金属垫片：适用于高温高压环境下的阀门密封，常用材料有不锈钢、铜合金等。这些材料强度和耐高温性能良好，但易产生应力松弛现象，使用时需注意。

非金属垫片：适用于低温低压环境下的阀门密封，常用材料有橡胶、塑料等。这些材料柔性和弹性良好，但耐高温和耐高压性能较差。

复合垫片：结合了金属垫片和非金属垫片的优点，适用范围更广。由金属骨架和非金属密封层组成，兼具金属垫片的高强度、耐高温性能和非金属垫片的柔性、弹性，在承受一定温度和压力变化的阀门中应用广泛。

3. 阀门垫片的安装与维护：安装阀门垫片时，要严格按照操作规程操作，确保垫片正确安装和压紧。定期对垫片进行检查和维护，及时发现并处理潜在问题。若垫片老化、损坏或密封性能下降，应及时更换，以保证阀门密封性能和使用寿命。

## 三、静密封垫片在炼化企业中的重要性

### （一）保障生产安全

1. 防止介质泄漏：静密封垫片填充连接部件间隙，形成可靠密封屏障，防止介质泄漏到设备外部或相邻设备中，减少资源浪费和环境污染，避免火灾、爆炸等严重安全事故。

2. 提高设备可靠性：良好的密封性能确保设备正常运行和稳定生产。若垫片性能不良或失效，会导致介质泄漏和设备损坏，影响设备可靠性和使用寿命。

### （二）提高生产效率

1. 减少停机时间：垫片失效导致介质泄漏或设备损坏时，需停机维修和更换，这会浪费大量时间和资源，影响生产效率和产品质量。

2. 降低能耗损失：有效密封可防止介质泄漏和能量损失。垫片性能不良或失效会导致介质泄漏，造成能源浪费和环境污染。选择优质垫片能降低能耗损失，提高生产效率。

### （三）保护环境

1. 减少污染物排放：静密封垫片填充间隙，防止介质泄漏到环境中，减少污染物排放和废弃物产生，降低对环境的污染和破坏程度。

2. 推动绿色生产：随着环保意识提高和法规完善，绿色生产成为炼化企业发展趋势。选择对环境影响小的垫片材料和制造工艺，可减少污染物排放和废弃物产生，推动绿色生产实现。

### （四）降低维护成本

1. 延长设备使用寿命：有效密封确保设备和管道完整性，防止介质泄漏和能量损失，延长设备使用寿命，减少维修次数，降低维护成本，提高设备可靠性。

2. 减少维修工作量：垫片性能不良或失效导致介质泄漏或设备损坏时，需停机维修和更换，增加维修工作量和维护成本。

## 四、静密封垫片在炼化企业中的常见问题及解决方案

### （一）垫片选型不当

1. 问题分析：垫片选型不当主要原因包括对介质性质、压力、温度等条件了解不充分；对垫片性能特点和适用范围认识不足；对设备结构和类型考虑不周全等。这些因素会影响设备密封性能和使用寿命。

2. 解决方案：为解决垫片选型不当问题，可采取以下措施：加强对介质性质、压力、温度等条件的分析；深入研究垫片性能特点和适用范围；充分考虑设备结构和类型进行选型。同时，借鉴行业成功经验，结合实际情况开展选型工作。

### （二）垫片安装不当

1. 问题分析：垫片安装质量影响密封效果，安装不当如位置不正确、压紧力不够或过大等，会导致密封不良或失效。主要原

因包括对安装要求和操作规程了解不充分；对设备结构和类型了解不足；安装过程缺乏检查和测试手段等。<sup>[3]</sup>

2. 解决方案：解决垫片安装不当问题，可采取以下措施：加强对安装要求和操作规程的学习培训；深入研究设备结构和类型；安装过程中加强检查和测试，确保垫片正确安装和压紧。借鉴行业经验，结合实际进行安装工作。

### （三）垫片老化损坏

1. 问题分析：垫片在使用过程中受介质、温度、压力等因素影响会老化损坏，严重时导致介质泄漏和设备损坏。主要原因有介质中腐蚀性物质的侵蚀；高温高压环境的破坏；垫片材料本身性能和寿命限制等。

2. 解决方案：为解决垫片老化损坏问题，可采取以下措施：选择具有良好耐腐蚀性和耐高温性能的垫片材料；加强对垫片使用过程的监测和维护；定期检查和更换垫片，确保密封性能和使用寿命。借鉴行业经验，结合实际进行维护和更换工作。

### （四）垫片应力松弛

1. 问题分析：垫片使用过程中会发生应力松弛，导致密封性能下降。主要原因包括垫片材料本身的应力松弛特性；长时间受压力和温度作用加剧应力松弛；安装过程中压紧力不均匀或过大等。

2. 解决方案：解决垫片应力松弛问题，可采取以下措施：选择具有优良应力松弛性能的垫片材料；加强对垫片使用过程的监测和维护；采用增加垫片厚度、提高压紧力等方法提高密封性能。借鉴行业经验，结合实际选择和使用垫片。

## 五、静密封垫片的发展趋势

### （一）高性能化

随着炼化企业对密封性能要求的不断提高，静密封垫片向高性能化发展。

1. 改进制造工艺：采用先进制造工艺和技术，如精密加工、热处理、表面处理等，提高垫片制造精度和表面质量，提升密封性能和使用寿命。同时，利用自动化生产线和智能化设备提高生产效率和产品质量。

2. 研发新型材料：研发新型材料和技术，如纳米材料、复合材料、智能材料等，拓展垫片性能特点和适用范围。纳米材料具有自修复和耐磨损性能；复合材料综合多种材料优点提升综合性能；智能材料能根据外界环境变化自动调节性能和形状。这些新型材料和技术为静密封垫片发展带来机遇和挑战。

### （二）智能化

随着智能化技术发展，静密封垫片也朝着智能化方向发展。

1. 嵌入传感器和监测装置：在垫片中嵌入传感器和监测装置，实时监测密封性能和状态，如监测压力、温度、应力等参数变化，及时发现并处理潜在问题，为智能化发展提供支持。

2. 开发智能诊断系统：开发智能诊断系统，对垫片性能和状态进行智能化分析和诊断。通过分析传感器采集的数据，判断垫片是否存在故障或异常，并给出处理建议，为智能化维护和管理提供支持。

**（三）环保化**

环保是社会关注的热点，静密封垫片选择和使用需考虑环保因素。

- 1. 选择环保材料：优先选择对环境影响小的材料，如可降解材料、再生材料或低毒无害材料等，减少污染物排放和废弃物产生，推动绿色生产和可持续发展。
- 2. 采用环保制造工艺：制造工艺优先考虑环保因素，如采用低能耗、低排放或资源循环利用工艺，减少对环境的影响。加强

生产过程中废弃物处理和回收利用，实现资源最大化利用和废弃物最小化排放。

**六、结论**

静密封垫片在炼化企业中具有不可替代的重要地位，其性能直接关系到生产系统的安全性、稳定性和环保性。炼化企业应高度重视静密封垫片的选择、使用和维护工作，确保垫片密封性能和使用寿命。同时，积极关注行业发展动态，不断研究和开发新型高性能、智能化、环保化的静密封垫片，以满足炼化企业对密封性能的高要求和可持续发展的需要。

**参考文献**

[1] 鲁立；胡梦佳；蔡志鹏；李克俭；吴瑶；潘际奎. 核级管端法兰面在线堆焊修复的残余应力 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2020(01).  
[2] 徐红彦；苗奎；舒晓君. 浅谈装配中螺纹联接扭矩分析 [J]. 新技术新工艺, 2021(01).  
[3] 蔡暖姝；闻克勤. 非石棉密封垫片及其在石油化工工程中的应用 [J]. 化工设备与管道, 2007(04).

# 锅炉压力容器检测中的常见事故及检验策略探究

李自然, 李运成, 刘先发

湖南安广检验检测有限公司, 湖南 常德 415137

DOI:10.61369/ERA.2025060027

**摘 要 :** 工业生产中, 锅炉压力容器作为核心设备之一, 用于加热气体或液体, 并将其转化为蒸汽提供热能、动能。锅炉压力容器运行环境恶劣、复杂, 长期超负荷运转下性能下降, 做好锅炉压力容器检测工作至关重要。但由于锅炉压力容器自身特性及作业环境的复杂性, 易引发多种事故, 如何规避事故、提升检验质量, 成为企业重点关注的内容。文章围绕锅炉压力容器检测事故进行探究, 提出一系列检验策略以供参考, 以期保障锅炉压力容器安全稳定运行。

**关 键 词 :** 检验策略; 锅炉压力容器; 检测; 设备故障

## Common Accidents and Inspection Strategies in Boiler and Pressure Vessel Inspection

Li Ziran, Li Yuncheng, Liu Xianfa

Hunan Anguang Inspection and Testing Co., Ltd. Changde, Hunan 415137

**Abstract :** In industrial production, boiler and pressure vessels are one of the core equipment used to heat gases or liquids and convert them into steam to provide thermal and kinetic energy. The operating environment of boiler and pressure vessels is harsh and complex, and their performance declines under long-term overloaded operation. Therefore, it is crucial to do a good job in boiler and pressure vessel inspection. However, due to the complexity of the boiler and pressure vessel's own characteristics and operating environment, it is easy to cause a variety of accidents. How to avoid accidents and improve inspection quality has become the focus of enterprises. This article explores the detection accidents of boiler and pressure vessels and proposes a series of inspection strategies for reference, aiming to ensure the safe and stable operation of boiler and pressure vessels.

**Keywords :** inspection strategy; boiler and pressure vessel; detection; equipment failure

锅炉压力容器作为一种特种设备, 投入运行后长期处于高压状态, 如果锅炉压力容器出现质量缺陷, 将诱发严重的安全事故, 带来不可估量的经济损失。锅炉压力容器通常应用在石油化工领域, 由于作业环境复杂、恶劣, 容易受到多种因素影响, 威胁到压力容器正常运行。因此, 生产企业为了保障锅炉压力容器安全稳定运行, 应定期检测锅炉设备运行状况, 选择合理有效的检验策略, 创设安全可靠的生产环境, 为企业生产活动安全有序进行提供坚实保障。

### 一、锅炉压力容器检测重要性

锅炉压力容器在现代工业生产体系中占据重要地位, 在化工、电力以及石油等领域广泛应用, 高质量检测锅炉压力容器具有重要意义。

(1) 提高设备运行可靠性。锅炉压力容器长期处于高压、高温等复杂环境, 伴随着锅炉压力容器运行时间延长, 设备容易出现一系列质量缺陷, 如, 变形、腐蚀、老化等, 定期检查设备缺陷, 制定针对性设备检修和维护措施, 有助于为锅炉压力容器设备安全稳定运行提供保障, 避免设备故障导致生产中断。以反应釜压力容器为例, 内部腐蚀缺陷检测不及时, 后期在高压作用下出现内部介质泄漏现象, 导致生产线停工, 后期重启生产线需要消耗更多的资源, 生产成本大幅度增加<sup>[1]</sup>。

(2) 保障人员生命财产安全。锅炉压力容器出现安全事故, 对于人员生命财产安全会产生严重威胁。锅炉压力容器运行环境高温、高压, 内部涉及大量腐蚀、有毒有害介质, 可能产生高温蒸汽、爆炸、喷射等事故, 缺少有效防护将造成重大人员伤亡。因此, 通过合理、有效的检测工作, 便于及早发现事故萌芽, 并采用紧急维修和停工维护等方式扼杀隐患在萌芽状态, 为现场人员生命财产安全提供坚实保障。

(3) 保护生态环境。锅炉压力容器出现事故, 内部化学物质会泄漏到外部环境, 污染周边水体、土壤、大气环境。通过有效的压力容器检测工作, 有助于拦截有毒有害物质泄漏到自然环境中, 避免对生态环境污染破坏, 为生态系统平衡提供坚实保障<sup>[2]</sup>。



## 二、锅炉压力容器检测中的常见事故分析

### （一）有害物质威胁

锅炉压力容器检测中的事故类型多样，其中有毒物质威胁最为典型，将导致人员人身安全受到威胁。锅炉压力容器处理介质包含了强酸强碱、有毒有害以及易燃易爆等物质，设备一旦故障会导致大量有害物质泄漏，诱发不可估量的后果。化工生产中，部分压力容器存储大量腐蚀性强烈的溶液，设备内部受腐蚀导致防护层损坏，随着腐蚀加剧，最终出现穿孔现象，大量强酸、强碱溶液喷射而出，接触到人体皮肤和黏膜，会对人体产生严重的灼伤，如工作人员吸入过多有毒有害气体，同样会加剧身体器官损伤。在石油化工领域，压力容器多存储易燃易爆的油气资源，一旦锅炉开裂导致密封失效，可能接触火源引发火灾或爆炸事故<sup>[3]</sup>。例如，2013年某石化公司油罐区爆炸，造成了巨大的人员伤亡与经济损失，其原因在于油罐呼吸阀故障，使得轻质油品挥发可燃气体大量聚集，接触明火后瞬间爆炸、燃烧。除了企业工作人员伤亡外，后期多名消防救援人员在扑救过程中牺牲。

### （二）设备安全缺陷

锅炉压力容器的设备安全缺陷，表现为制造缺陷、材料缺陷以及生产缺陷等。设备制造环节，材料选择并未严格遵循设备运行压力、温度以及存储介质等时机特性，后期设备投入运行过程中承受不住工作压力而损坏。部分锅炉压力容器采用的钢材耐高温、耐压性能不足，伴随着时间推移材料蠕变，强度下降，情况严重下导致设备完全损坏<sup>[4]</sup>。制造缺陷类型多样，如，焊接过程中工艺不合理出现夹渣、气孔、裂纹等缺陷，后期锅炉运行中在温度、压力和腐蚀介质作用下，缺陷将进一步扩展，诱发严重安全事故，影响企业生产活动连续、安全进行。另外，高温、高压环境下，设备频发启停还会产生诸多新的缺陷。例如，锅炉受热面长期处于高温冲刷、腐蚀状态，锅炉内部会磨损变薄，达到一定程度无法承受压力后将破裂，诱发爆管事故。频繁压力下，筒体、接管连接区域会产生疲劳裂纹，处理不及时，裂纹会逐渐扩大化，诱发严重安全事故<sup>[5]</sup>。

### （三）电力和电磁辐射危险

复杂工业环境下，锅炉设备多配备了自动化控制系统、电气仪表以及电机设备等，这些电气设备运行中会产生电力、电磁辐射，一旦辐射强度超出设备承受标准，则为锅炉设备运行埋下隐患，威胁作业人员安全。例如，2021年某检测机构检测电阻值时，未能严格遵循 GB/T 13869-2017 要求布置双重绝缘保护，使得电源击穿检测仪器外壳，使得检测人员出现二级电击事故。通过事故调查了解到，便携式检测设备防护等级未达到 IP54 防护等级，接地电阻值实测值  $8.6\Omega$ ，超过标准的  $4\Omega$ ；未严格执行“一人操作、一人监督”制度<sup>[6]</sup>。

强电磁辐射致使电子元件误动，采集的监测数据存在一定偏差。检测锅炉运行温度、压力等指标的传感器容易受电磁干扰，发出虚假信号，控制系统误动下威胁锅炉运行安全与稳定，甚至诱发超温、超压等安全事故<sup>[7]</sup>。同时，部分单位并未设置安全防护距离，长期处于高频辐射环境中，可能出现神经衰弱等健康问题。

题。其根本原因在于辐射功率密度超出限值  $5\text{mW}/\text{cm}^2$ ，检测舱体的电磁辐射屏蔽效能不足。

### （四）运行生产和环境缺陷

锅炉在化工生产领域应用广泛，运行中可能由于空间资源不足，通风条件不畅，使得锅炉运行环境较为恶劣，无形中弱化了锅炉生产能力，对于企业生产成本控制同样产生了负面影响。部分企业的锅炉压力容器内部结构强度偏低，生产人员安全意识不足，运行中可能出现锅炉设备结构损伤，辐射泄漏后导致现场人员出现中毒事故。与此同时，部分沿海地区空气湿度高，并且伴有大量腐蚀性盐分，与锅炉压力容器接触会产生电化学腐蚀现象。一旦锅炉设备表面保温层受损，水分更容易侵入金属表面，加剧设备避腐蚀，腐蚀到一定程度后容易诱发爆炸或泄漏等事故，造成重大的人员伤亡和经济损失<sup>[8]</sup>。

## 三、锅炉压力容器的检验策略

### （一）提高锅炉压力容器质量

为了保障锅炉压力容器稳定、安全运行，提高锅炉压力容器质量，有助于从源头降低安全事故发生几率。具体从以下几点展开：

（1）材料选用。根据锅炉压力容器运行压力和温度等参数，选用合适的材料很有必要。对于长期处于高温、高压且介质腐蚀环境下的压力容器，适合选择耐腐蚀、抗高温、蠕变性能优良的合金钢材料。在确定合适材料基础上，充分市场调查选择高资质供应商，各批次材料的力学性能、化学成分等全面检验，规避劣质材料混入，保障设备质量和性能<sup>[9]</sup>。

（2）优化指导工艺。锅炉压力容器制造工作中，焊接工艺占据重要地位，需要制定合理的焊接规程，明确焊接参数、方法以及流程等内容。焊接过程中依据标准、流程，运用自动化焊接设备进行焊接处理，避免人为主观意识干扰增加误差。焊接后使用超声波无限弹上技术进行检测，消除裂纹、夹渣、气孔等焊接缺陷<sup>[10]</sup>。

### （二）选择合适的检验方法

#### 1. 常规检验

锅炉压力容器日常检验中，严格遵循 GB/T 30579-2014 规定，对锅炉压力容器目视检查，设备表面裂纹检出灵敏度在  $0.55\text{mm}$  以上，变形测量精度在  $0.1\text{mm}$  上下。使用小锤敲击设备，根据声音、弹力反馈和振动等情况，判断锅炉压力容器是否存在腐蚀、裂纹等缺陷，但细小的裂纹很难无法检出。采用白粉煤油检查法，在锤击法基础上检查裂纹的走向、大小。锤击发现设备表面存在裂纹时，使用砂布对表面清洁、打磨，涂抹一定量硝酸溶液侵蚀裂纹，等待一段时间后在表面上涂抹一层煤油， $20\text{min} \sim 30\text{min}$  后，擦去煤油，涂抹百分在裂纹表面，使用小锤敲击裂纹周围区域，裂纹煤油则会析出，在白粉中留下明显的形状和走向痕迹，为后续维修提供依据。另外，使用拉线的方式可以检查设备弯曲度，或是区域是否存在鼓包现象，此种检查方式直观、简便，适合多数设备<sup>[11]</sup>。

2. 射线检测

射线检测方法多应用于体积型缺陷检测中，基于  $\gamma$  射线和 X 射线穿透物体，不同物体密度不同，对于射线的吸收程度也不尽相同，根据这一原理可以在探测器上形成灰度不同的影响，缺陷检测灵敏度较高，具体参数如表 1。

表 1 射线检测技术参数

项目	传统胶片法	数字射线技术
灵敏度	2% ~ 3%	1% ~ 1.5%
分辨率	15LP/mm	25LP/mm
曝光时间	5min ~ 15min	0.3min ~ 3min
缺陷量化误差	$\pm 0.3\text{mm}$	$\pm 0.1\text{mm}$

运用射线检测方法检测锅炉压力容器的焊缝缺陷时，射线穿透焊缝，由于夹渣、气孔等缺陷区域密度远远低于正常焊缝金属，因此对射线的吸收能力较弱，探测器上的灰度影响较为明亮。根据影像特征分析，即可精准掌握缺陷大小、类型以及分布等情况。通常情况下，射线检测法多应用于锅炉压力容器角焊缝、对接焊缝检测中，即便是一些大型储罐拼接焊缝，射线检测技术仍然可以全面覆盖，为锅炉压力容器的焊缝质量提供保障。具体检测时，检验人员需要提前设定射线源和检测位置距离、角度等参数，获取清晰、全面的影像。同时，为了保障检验人员安全，采用射线检测方法时要做好安全防护，穿戴铅防护服，或是在内部建设铅屏蔽房，采集精准、全面的检验数据，为锅炉压力容器安全运行提供保障。

3. 超声波检测

超声波检测是一种无损检测方法，根据不同介质中超声波传播特性表现，检验压力容器缺陷。超声波传入到压力容器内部，遇到缺陷后发生折射或反射，收集这些折射或反射波，即可精准定位缺陷的位置、大小形状。具体检测中，检验人员需要在设备表面涂抹一定量的浆糊或凡士林，使得超声波探头和设备密切接触，避免部分声能损失影响检验精准度。探头根据预设轨迹在设备表面移动检测，发射、接收超声波信号。随着此项技术更新升级，现阶段的超声波检测技术采用了全聚焦法成像，分辨率提升 60%，并通过自适应滤波算法的引入，信噪比  $\geq 20\text{dB}$ ，检测灵敏

度较高，能够检出很多微小缺陷，并且不会产生辐射危害，适合广泛应用于锅炉压力容器检测领域。

4. 声发射检测

声发射检测技术，重点检测应力波变化情况。锅炉压力容器内部有缺陷，说道温度、压力等因素作用下，缺陷周围材料会发生局部结构形变，声发射接收这些弹性应力波信号，转化为电信号并输送到采集分析系统，通过持续分析信号频率、幅度等参数，在此基础上精准判断缺陷类型以及具体位置。例如，基于声发射检测高压反应釜缺陷，根据 ASTM E1316 标准确定传感器布置间距，碳钢容器传感器布置间距 6m ~ 8m，复合材料传感器布置间距 3m ~ 4m，如果接收到频繁、异常的信号，说明设备内部有裂纹扩展延伸，设备应立即停止运行检修维护。声发射检测技术优势鲜明，不需要设备停机即可掌握缺陷类型和发展情况，定位可疑区域范围缩小 70%，及时组织人员处置缺陷，预防安全事故发生。此项技术适合应用于无法停机的锅炉压力容器设备，对于保障设备运行安全，提高企业生产连续性具有重要意义。

（三）提高检验人员综合能力

锅炉压力容器检测中，为了避免安全事故爆发，维护检验人员人身安全，提高检验人员综合能力显得尤为必要。因此，企业应当定期组织检验人员学习专业知识，了解锅炉压力容器不同材料在不同工况下的指标参数变化，学会运用先进检验技术和设备确定缺陷类型。通过反复训练，逐步提高检验人员专业能力，为企业锅炉压力容器安全稳定运行保驾护航。

四、结论

综上所述，锅炉压力容器运行是否安全、稳定，很大程度上决定了企业生产安全。锅炉压力容器常见事故包括变形、裂纹、泄漏、腐蚀等，需要检验人员灵活运用射线检测、声发射检测、超声波等检测方法，便于及时发现质量问题，提升检测效率与质量，助力企业安全生产与持续发展。

参考文献

[1] 王喆. 锅炉压力容器检测中的常见事故及检验方法探究 [J]. 中国金属通报, 2024, (09): 234-236.

[2] 朱勇吉, 万明松. 锅炉能效测试计算及误差分析——评《锅炉能效测试与远程监控技术》[J]. 应用化工, 2023, 52 (12): 3484.

[3] 赵长龙, 孔鹏. 锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题分析 [J]. 山东工业技术, 2023, (04): 87-90.

[4] 武学涛, 武学忠, 蒲霞. 工业锅炉和压力容器检验的相关问题探讨 [J]. 中国金属通报, 2023, (04): 234-236.

[5] 于松义. 提高油田燃气工业锅炉运行效率初探 [J]. 石油工业技术监督, 2021, 37 (07): 17-20.

[6] 欧凤林. 在役燃气工业锅炉定期能效测试分析与研究 [J]. 工业计量, 2021, 31 (02): 70-73+75.

[7] 冯选明. 超声波技术在锅炉压力容器检测中的运用 [J]. 设备管理与维修, 2020, (13): 150-151.

[8] 凌富银. 浅析压力容器检验风险的防控 [J]. 石油工业技术监督, 2020, 36 (04): 45-47+56.

[9] 张沛. 锅炉压力容器检验中的问题及解决措施 [J]. 中国设备工程, 2020, (03): 162-163.

[10] 刘勇. 热式气体质量流量计在锅炉风量检测中的应用 [J]. 工业计量, 2018, 28 (06): 45-46.

[11] 秦之炜, 孙嘉. 锅炉压力容器及压力管道检验技术研究 [J]. 中国机械, 2024, (21): 146-149.

# 锅炉检验检测中裂纹问题分析

于淘, 杨湘, 梁晶

湖南安广检验检测有限公司, 湖南 常德 415137

DOI:10.61369/ERA.2025060029

**摘 要 :** 工业生产体系中, 保障锅炉运行安全是企业安全管理重中之重。由于锅炉压力容器运行环境特殊性, 长期处于高温、高压环境, 加之锅炉内部介质腐蚀性, 可能导致锅炉产生裂纹, 影响锅炉运行安全。因此, 应高度重视锅炉检验检测工作, 选择合适的检测方法掌握锅炉运行状态, 从而及时发现和处置裂缝问题, 创设安全稳定的作业环境。文章围绕锅炉检验检测中裂纹问题进行分析, 总结相应的处置措施提升锅炉检测检测水平。

**关 键 词 :** 裂纹; 锅炉; 检验检测

## Analysis of Crack Problems in Boiler Inspection and Testing

Yu Tao, Yang Xiang, Liang Jing

Hunan Anguang Inspection and Testing Co., Ltd. Changde, Hunan 415137

**Abstract :** In the industrial production system, ensuring the safe operation of boilers is a top priority for enterprise safety management. Due to the special operating environment of boiler pressure vessels, which are subject to long-term exposure to high temperatures and high pressure, coupled with the corrosiveness of the internal media of the boiler, cracks may occur in the boiler, affecting its operational safety. Therefore, it is imperative to attach great importance to boiler inspection and testing, select appropriate testing methods to monitor the boiler's operating status, so as to promptly detect and address crack issues, and create a safe and stable working environment. This article analyzes the crack problems encountered during boiler inspection and testing, and summarizes corresponding measures to improve the level of boiler inspection and testing.

**Keywords :** cracks; boiler; inspection and testing

经济社会蓬勃发展背景下, 工业领域逐步转型升级, 现阶段锅内锅炉压力容器已经趋近发达国家水平。锅炉作为一种特种压力容器, 根据生产需要设置锅炉参数, 将燃料燃烧产生的热量转化为蒸汽, 从而满足生产需要。锅炉压力容器的运行安全是企业安全管理的核心, 而威胁锅炉运行安全的一个典型缺陷即裂纹, 需要日常维护中重点检验检测, 并选择合理措施有效处置锅炉裂纹问题。

### 一、锅炉检验检测的主要方法

#### (一) 外观检查

锅炉检验检测中, 外观检查是一种常规且简单的检验方法。检验人员现场通过肉眼、触摸, 或使用放大镜、手电筒等简单工具检查锅炉可见区域。外观检查重点在于锅炉表面是否有磨损、腐蚀以及明显裂纹痕迹; 焊缝区域重点检查焊缝是否存在气孔、咬边或夹渣等缺陷, 此类缺陷若未及时处理, 可能发展为尺寸不一的裂纹。例如, 某工厂锅炉外观检验时, 检验人员使用放大镜观察锅炉焊缝区域是否存在细小裂纹, 经过检查确认属于早期裂纹, 需要及时处置。由此看来, 外观检查方式尽管较为宽泛、简单, 但是一些明显的裂纹能够及时发现, 为后续深入、细致检查提供支持<sup>[1]</sup>。

#### (二) 无损检测方法

##### 1. 射线检测

射线检测是一种对锅炉设备外观或内部构造不会产生损坏的

检测方式, 通过发射 x 射线或  $\gamma$  射线, 穿透锅炉部件, 根据不同材质、不同缺陷位置的射线吸收程度, 确定缺陷位置、大小和形状, 并且在人机交互界面中可视化呈现。使用射线检测对接焊缝区域, 能够精准描绘出裂纹长度、宽度和延伸方向, 检测精度较高<sup>[2]</sup>。具体检测中, 检测人员需要根据锅炉部件材质、厚度、大小等参数信息, 选择适宜的射线源、曝光参数, 并且将底片放置在另一侧接受射线, 为裂纹处置提供精准数据支持。

##### 2. 超声检测

超声检测方式的无损检测优势鲜明, 在诸多行业领域中得到了广泛应用。采用超声检测锅炉裂纹, 根据材料传播特性反馈锅炉设备缺陷。超声波传播过程中遇到裂纹缺陷, 会出现不同程度的折射与反射, 接收探头获取反射波信号后, 通过分析确定缺陷大小、位置以及形状<sup>[3]</sup>。对于部分厚度较大的锅筒等部件, 超声检测是首选方式, 检测灵敏度高、结果精度高。实际操作中, 检测人员在锅炉检测表面涂抹适量耦合剂后, 超声探头紧贴锅炉探测



区域,转动探头对锅炉进行全方位扫描检测。

### 3. 磁粉检测

磁粉检测方式,重点检测锅炉铁磁性材料表面裂纹缺陷,部件磁化后,表面或表面如果存在裂纹会产生漏磁场,导致表面上吸附大量磁粉,可视化呈现磁痕位置与形状。对于锅筒以及管板等铁磁性部件检测中,需要对其磁化后均匀喷洒磁粉到表面,能够实现多条表面裂纹检测,为锅炉运行安全提供坚实保障<sup>[4]</sup>。

### 4. 理化性能检验

理化性能检验形式多样,涵盖力学性能测试、化学成分分析等方式,其中化学成分分析是检测锅炉材料构成部分,分析材料是否满足设计标准。如果化学成分存在偏差,则会导致材料性能下降,增加锅炉表面裂纹出现几率。力学性能测试包括冲击试验、拉伸试验等,能够精准检测材料韧性、强度等指标,从而客观反映不同工况下表面抵抗裂纹的能力。

## 二、锅炉检验检测中的裂纹问题分析

### (一) 疲劳裂纹

疲劳裂纹是一种常见的锅炉裂纹问题,在锅炉压力容器和管道试验中频频出现,多表现为应力集中区域,初期的裂纹普遍较小,随着后期发展逐渐延伸扩大<sup>[5]</sup>。疲劳裂纹包含热疲劳裂纹、机械疲劳裂纹等,其中机械疲劳裂纹多出现在叶片、齿轮等机械零部件表面,裂纹形状为直线形,如果未能及早处置,后期逐渐蔓延形成一段细长裂纹。此类裂纹多出现在机械加工连接区域、刀痕区域以及细小孔洞等区域。热疲劳裂纹则是材料表面拉伸强度下降,在反复应力作用下产生金属裂纹。疲劳斜纹适合选用磁粉检测等无损检测方式,在表面形成明显的磁痕,直观展示裂纹具体形状大小、走向。

### (二) 蠕变裂纹

蠕变裂纹的产生,由于应力作用和环境温度变化影响导致,伴随着锅炉运行时间延长,锅炉压力容器以及管线性能下降,受外力破坏下金属原子逐渐扩散,使得材料内部晶体结构改变<sup>[6]</sup>。随着时间延长,晶界区域会产生大量微小空洞,并持续聚集、长大,最后形成蠕变裂纹,如图1。蠕变裂纹多产生于集箱、管线等应力聚集区域,或是热力膨胀的管线外表区域,受应力作用下导致材料形变、变质,最终形成裂纹带,围绕主裂纹平行分散众多细小裂纹。蠕变裂纹是一个长期过程,一旦形成,锅炉材料承载力随之下降,威胁锅炉运行安全。通过对锅炉金相分析,能够直观了解材料内部晶界变化、裂纹形态。如,某台锅炉的过热器管金相检验时,晶界区域有着显著的空洞聚集现象,部分空洞连接成为蠕变裂纹,说明过热器管长期处于高温、高压环境,材料性能已经不符合技术标准。



图1 炉管蠕变裂纹

### (三) 应力腐蚀裂纹

应力腐蚀裂纹的产生,原因在于锅炉金属材料在氯离子、碱

性溶液环境以及应力作用导致,通常出现在水冷壁、省煤器等部件区域,如图2。应力腐蚀裂纹产生环境中, $\text{Cl}^-$ 浓度超标,或是 $\text{pH}$ 值 $>10$ 的高浓度 $\text{NaOH}$ 溶液。例如,锅炉内部介质为准,氯化物含量过高,受到高压、高温环境影响,使得大量氯离子吸附在金属表面,使得金属钝化膜手术,表面产生阳极区,未破坏钝化膜区域属于阴极区,相互作用下形成腐蚀微电池。拉应力下,阳极区金属持续溶解,在金属表面产生大量的腐蚀坑洞,并随着时间推移腐蚀坑底部应力集中,诱发应力腐蚀裂纹。裂纹多呈树根状分布,沿着晶界扩展,并且表面上存在一定量的腐蚀产物。应力腐蚀裂纹检测中,适合选择此份检测、超声检测等方法,能够精准检出表面区域应力腐蚀裂纹问题,通过分析裂纹周围化学成分、腐蚀产物,客观反映腐蚀介质类型,从而为后续裂纹问题处置提供有效参考依据<sup>[7]</sup>。



图2 应力腐蚀裂纹

### (四) 温度裂纹

锅炉运行期间,温度裂纹产生原因在于部件温度分布失衡,或是在剧烈温度波动下形成。锅炉是工业生产中的热交换设备,锅炉运行中不同位置温度大小不一,在初期启动时炉膛内部火焰温度高,邻近水冷壁管外部受热后温度快速升高,内部工质升温速度缓慢,管壁内外温度呈梯度变化产生热应力,随着热应力逐步升高,一旦材料屈服强度,则会产生温度裂纹。锅炉热交换频繁区域,属于温度裂纹产生的主要区域<sup>[8]</sup>。例如,过热器区域由于高温烟气和蒸汽的热交换,使得内部热负荷过高,与正常温度区域存在显著温差,在热胀冷缩作用下产生温度裂纹。锅炉炉墙和金属部件连接区域,二者热膨胀系数不一,同样会产生较大的热应力,成为温度裂纹形成的主要区域。锅炉温度裂纹检验检测时,多选择红外热成像技术完成表面裂纹初步筛查,快速检测锅炉表面温度分布情况,进而精准定位温度裂纹位置。随后可以联合使用超声检测技术,进一步探寻裂纹深度、扩展情况。

## 三、锅炉检验检测中裂纹问题处置策略

### (一) 优化裂纹检验检测流程

锅炉检验检测中,为了及时发现和处置裂纹问题,优化裂纹检验检测流程显得尤为必要。首先,明确裂纹检验检测重点区域,根据不同区域产生裂纹的几率、严重程度,精准划分检测区域。对于疲劳裂纹频繁出现的部件,如,蒸汽管道、启动分离器的弯头区域,或是温度裂纹影响较大的再热器等区域,每次检测



时需要适当的增加检测点数和市场<sup>[9]</sup>。锅炉的启动分离器检测时，使用超声波全面检查，随后对于疑似裂纹区域使用磁粉检测方式进一步确认，从而精准探寻具体的裂纹。其次，制定标准的检测流程，检测人员需严格遵循标准化流程操作，检测前期设备校准和部件表面灰尘清理等，设置合理的检测仪器参数，以及探头检测时的移动速度。例如，射线检测时射线源、与待检测部件距离、曝光时间等，提高检测结果精准性。对于检测人员应当定期培训考核，熟练掌握操作规范，尽可能规避人为因为出现检测误差。最后，根据锅炉运行工况和年限，确定最佳的检测周期。不同锅炉运行工况以及运行环境等有所不同，部分锅炉存在裂纹处置历史，因此要因地制宜，有计划的制定检测周期。新投入运行的锅炉，运行工况稳定，并无裂纹修复历史，裂纹检测周期适当延长；长期运行，并且频繁出现裂纹的锅炉，适当缩短锅炉检测周期<sup>[10]</sup>。

### （二）建立锅炉压力容器检验系统

锅炉压力容器检验系统架构搭建，其中涵盖了软硬件综合检验系统。硬件设备配备高分辨率超声相控阵检测仪或是智能磁粉探伤仪等，实现各类裂纹精准检测；设置多个传感器，设置采集锅炉压力、温度、流量等运行参数。软件层面，建立统一数据采集和分析平台，收集整合传感器数据。平台采用分层架构，数据采集层负责整合无损检测设备、传感器以及运行参数；数据分析层融合 AI 算法和大数据平台，关联锅炉运行工况、裂纹特征进行数据分析；决策支持层，智能生成裂纹检验报告，并给出裂纹处置建议。系统设计多个功能模块，实时监测模块借助各类传感器实时监控锅炉运行状态，一旦某项参数异常波动，及时发出预警信息；裂纹分析模块，整合数据分析算法、图形识别技术，深度剖析裂纹图像数据，精准判断裂纹类型、尺寸规格以及未来发展趋势等。在人工智能时代背景下，现阶段许多工厂已经建立了锅炉裂纹智能诊断技术，收集过往历史裂纹数据，建立 CNN、SVM 等分类模型，从而精准识别应力腐蚀、热疲劳以及蠕变裂纹等缺陷；基于数字孪生技术建立锅炉三维模型，模拟分析锅炉裂纹的发展路径、危害程度以及锅炉的使用寿命。

锅炉检验检测数据管理方面，分类存储，并且提供数据索引，输入关键词即可快速检测锅炉裂纹数据。例如，建立云平台数据库记录和存储检测数据、历史维修记录等；结合裂纹类型、尺寸和扩展速度，按照低、中、高划分具体风险等级，根据不同

等级确定最佳的检验周期；运用三维模型，可视化展示锅炉各类裂纹分布情况。

### （三）严格把控锅炉容器质量

为了降低锅炉裂纹出现几率，延长锅炉设备的使用寿命，前期锅炉设备制造环节需要严格把控制造质量。根据锅炉设备类型、使用场景等情况，选购优质原材料，各类钢材、管材的力学性能指标满足国家标准。例如，锅炉承压元件制造中需要运用大量的钢材，应重点监测钢材中磷、硫、碳等元素含量，避免各项元素超标降低材料抗裂性能。原料进厂后抽样检测，使用拉伸试验以及光谱分析等手段，为每批次材料质量提供坚实保障。在锅炉制造环节，采用冷加工、焊接以及热处理等核心工艺，严格遵循工艺流程进行执行。例如，锅炉焊接环节，结合不同材料特性和厚度，选择适宜的焊接方法，合理化控制焊接电压、电流和焊接速度等参数，提高焊缝质量。部分冷加工部件应做好变形量控制，避免过度加工导致应力集中，有效规避裂纹风险。

### （四）定期检验维护锅炉设备

企业应制定设备巡检计划，组织人员定期巡检锅炉设备运行状况。巡检人员使用测厚仪、测温仪等设备检测锅炉运行压力、水位、温度等指标，通过日常巡检检查锅炉是否有变形、泄漏、裂纹等缺陷。工作人员应重点检查焊缝、弯头以及接管等区域，此类区域属于容易出现裂纹区域，及时发现，并选择合理措施修复处理，避免裂纹恶化造成严重的安全事故。另外，根据技术标准定期检验锅炉运行状况，通常每年一次内部检验，间隔6年一次水压试验，及时发现锅炉是否存在潜在裂纹，组织技术人员及时、有效处置。

## 四、结论

综上所述，裂纹是锅炉运行中常见缺陷，如果裂纹处置不及时，可能诱发燃烧、爆炸、泄漏等安全事故，为企业带来重大经济损失与人员伤亡。因此，企业日常生产中应当提高锅炉检验检测力度，确定适宜的检验周期，优化检验检测流程，并根据实际工作要求选择不同的检验检测技术和设备，便于裂纹缺陷精准检出，为后续裂纹及时处置提供支持。通过锅炉裂纹有效处置，有助于保障锅炉运行安全、稳定，助推企业持续发展。

## 参考文献

- [1] 李建，张剑，陈昕，等. 母管制电站锅炉主蒸汽管道典型裂纹分析 [J]. 中国特种设备安全，2024，40 (11): 84-87+93.
- [2] 吴琦. 目视检测技术在锅炉管道裂纹检验中的应用 [J]. 设备管理与维修，2024，(08): 142-145.
- [3] 李孝梁，韩海江，魏民. 中心回燃卧式燃气锅炉前管板贯穿性裂纹损伤机理分析研究与处置 [J]. 工业锅炉，2024，(02): 56-59.
- [4] 吴超，朱承正. 锅炉、压力容器与压力管道裂纹及预防分析 [J]. 中国机械，2023，(06): 91-95.
- [5] 章捷. 锅炉压力容器裂纹的形成原因及预防措施探索 [J]. 中国设备工程，2022，(23): 179-181.
- [6] 吴祖利. 对于承压特种设备检验检测中裂纹问题的思考 [J]. 化学工程与装备，2022，(11): 266-267.
- [7] 刘召东，崔维刚，杨忠杰，等. 在用电站锅炉主蒸汽阀门安全隐患问题的探讨 [J]. 中国特种设备安全，2022，38 (08): 51-54.
- [8] 李波. 锅炉、压力容器、压力管道检验中的裂纹问题及预防 [J]. 新型工业化，2022，12 (02): 116-119.
- [9] 徐惠刚，周龙海. 燃气热水锅炉管板和烟管开裂原因分析及处理 [J]. 特种设备安全技术，2020，(05): 1-4.
- [10] 王欣. 锅炉、压力容器、压力管道检验中的裂纹问题解析 [J]. 中国石油和化工标准与质量，2020，40 (14): 55-56.
- [11] 庄国华，张德超，孙磊. 电站锅炉主蒸汽管道中喷嘴流量计的检验检测方法探讨 [J]. 特种设备安全技术，2020，(03): 6-9+62.

# 电梯检验检测工作及检测现场安全管理探究

廖龙萍<sup>1</sup>, 刘昶熠<sup>2</sup>, 方爱民<sup>3</sup>

1.2 湖南安卓特种设备科技有限公司常德分公司, 湖南 常德 415000

3. 湖南安广检验检测有限公司, 湖南 常德 415137

DOI:10.61369/ERA.2025060030

**摘 要 :** 在我国城市化进程全面加速的背景下, 建筑数量和高度不断增加, 电梯使用愈发频繁, 必须保证其安全运行。本文对电梯检验检测工作内容及检测现场安全管理策略进行了分析, 从关键部件性能查验、运行参数测量、安全装置核验、电气系统检测等方面对电梯检验检测工作进行论述, 从现场防护设施设置、检测流程监督、应急处置预案准备、设备工具检查等方面对检测现场安全管理展开探讨。提出完善检验检测流程与安全管理的方法, 旨在通过严谨规范的操作, 达到保障电梯安全运行、降低事故风险的效果, 解决电梯检验检测及现场安全管理中存在的不规范、不完善等问题, 为电梯安全运行保驾护航。

**关 键 词 :** 电梯; 检验检测; 现场安全; 防护设施; 应急处置预案

## Exploration of Elevator Inspection and Testing Work and Safety Management of Testing Site

Liao Longping<sup>1</sup>, Liu Changyi<sup>2</sup>, Fang Aimin<sup>3</sup>

1.2 Changde Branch of Hunan Anzhuo Special Equipment Technology Co., Ltd. Changde, Hunan 415000

3. Hunan Anguang Inspection and Testing Co., Ltd. Changde, Hunan 415137

**Abstract :** In the context of the comprehensive acceleration of urbanization in China, the number and height of buildings are constantly increasing, and the use of elevators is becoming more frequent. Therefore, it is necessary to ensure their safe operation. This paper analyzes the content of elevator inspection and testing work and the safety management strategies of the testing site. It discusses the elevator inspection and testing work from the aspects of key component performance inspection, operating parameter measurement, safety device verification, and electrical system testing. It also explores the safety management of the testing site from the aspects of on-site protective facilities setup, testing process supervision, emergency response plan preparation, and equipment tool inspection. This paper proposes methods to improve the inspection and testing process and safety management, aiming to ensure the safe operation of elevators and reduce accident risks through rigorous and standardized operations. It addresses issues such as non-standardization and incompleteness in elevator inspection, testing, and on-site safety management, providing support for the safe operation of elevators.

**Keywords :** elevator; inspection and testing; on-site safety; protective facilities; emergency response plan

电梯检验检测, 是依据相关标准与规范, 借助专业工具和技术手段, 对电梯的各部件性能、运行参数、安全装置及电气系统等进行全面检查与测试的工作, 其目的在于精准判断电梯运行状态, 及时发现潜在故障隐患, 确保电梯安全、稳定运行。电梯检测现场安全管理, 是围绕电梯检测作业现场, 通过严格设置防护设施、规范监督检测流程、充分准备应急处置预案以及定期检查设备工具状态等一系列举措, 营造安全作业环境, 保障检测人员人身安全, 促使检测工作顺利开展的管理活动。在现代建筑中, 电梯已然成为不可或缺的垂直运输工具, 其运行状况直接关系到人们的生命财产安全。然而, 电梯运行故障时有发生, 给使用者带来诸多困扰甚至严重危害。这背后, 电梯检验检测工作的精准度与检测现场安全管理的有效性起着决定性作用。为提升电梯运行的安全性与可靠性, 有必要对电梯检验检测工作及检测现场安全管理进行深入探究, 完善相关工作流程与管理策略, 保障电梯平稳安全运行。

## 一、电梯检验检测工作内容

### （一）关键部件性能精准查验

电梯的关键部件的性能直接关乎电梯运行安全与稳定，在查验时，首当其冲的是对电梯轿厢的检查。轿厢作为承载乘客的空间，其结构完整性不容有丝毫闪失，检验人员需通过专业工具，仔细查看轿厢壁、轿厢门以及连接部位是否存在变形、磨损或松动迹象。对于轿厢门的滑动轨道，要检查其是否有异物阻碍，滚轮是否转动灵活，因为哪怕极微小的卡顿，都可能在开关门瞬间引发故障。接着是对电梯曳引机的深度检测，曳引机作为驱动电梯升降的核心动力装置，需检测其电机的输出功率是否符合额定标准，可通过功率测试仪接入电路进行测量。检查减速箱内的润滑油量与油质，油量不足或油质恶化会加剧齿轮磨损，降低曳引机使用寿命，严重时甚至导致曳引能力下降，引发电梯溜梯等重大事故。对电梯的钢丝绳也需进行全方位探伤，利用电磁探伤仪沿着钢丝绳长度方向缓慢移动，检测是否存在断丝、磨损、锈蚀等情况。一根看似完好的钢丝绳，内部若存在断丝隐患，随着电梯频繁运行，断丝数量会逐渐增加，最终可能导致钢丝绳断裂，后果不堪设想。

### （二）运行参数全面细致测量

运行参数是反映电梯运行状态的关键指标，对其全面细致测量能精准洞察电梯的健康状况。电梯的运行速度是首要测量参数，检验人员需在电梯空载、半载和满载三种工况下，使用高精度的速度测试仪进行测量。通过在电梯运行过程中，在不同楼层间选取多个测量点，记录电梯通过这些点时的速度值，计算出平均运行速度以及加、减速度。在高层建筑中，电梯从底层快速升至顶层，若速度过快或加、减速度不合理，会使乘客产生明显的不适，甚至危及安全。还要测量电梯的平层精度，平层精度指的是电梯轿厢到达目标楼层时，与楼层地面的高度偏差。检验人员借助专业的平层精度测量仪，在电梯多次停靠不同楼层时进行测量<sup>[1]</sup>。通常情况下，高质量的电梯平层精度应控制在极小范围内，偏差过大不仅会给乘客进出轿厢带来不便，还可能导致电梯门与楼层门之间的间隙异常，存在夹人或物品掉落井道的风险。对电梯的运行噪声也需严格测量，在电梯运行的各个阶段，包括启动、加速、匀速、减速和停靠时，在轿厢内、机房以及井道附近等不同位置，使用噪声测试仪进行测量。过高的噪声不仅影响乘客的乘坐体验，还可能暗示电梯某些部件存在异常摩擦或松动，需要及时排查修复。

### （三）安全装置有效性核验

安全装置是电梯运行的最后一道防线，必须对其有效性进行核验。对电梯限速器-安全钳系统的测试，限速器安装在电梯机房，通过钢丝绳与轿厢连接，当电梯运行速度超过额定速度一定比例时，限速器会触发动作。检验人员通过专业的限速器动作速度测试仪，模拟电梯超速状态，检测限速器能否准确触发。一旦限速器触发，安全钳应立即动作，将轿厢紧紧卡在导轨上。在安全钳动作后，检验人员需检查安全钳与导轨的咬合情况，查看是否有足够的制动力使轿厢停止，以及导轨是否有损伤。对电梯的

缓冲器也需进行全面检测，缓冲器安装在电梯井道底部和顶部，用于在电梯发生冲顶或蹶底事故时吸收轿厢的动能<sup>[2]</sup>。检验人员检查缓冲器的外观是否有损坏，液压缓冲器的油位是否正常，弹簧缓冲器的弹簧是否有变形或断裂。并且通过模拟轿厢以一定速度撞击缓冲器的试验，检测缓冲器的缓冲效果，确保其能有效减缓轿厢的冲击，保护乘客安全。监测电梯的门保护装置，对于光幕保护装置，检验人员应用不透明物体遮挡光幕上的光束，观察电梯门是否能立即停止关闭并重新打开。对于安全触板，在电梯门关闭过程中，轻轻触碰安全触板，检查其是否能及时感应并触发动作，防止夹人事故发生。

### （四）电气系统合规性检测

电气系统是电梯的神经中枢，其合规性直接影响电梯运行的可靠性与安全性，在检测时，要对电梯的供电电源进行严格检查。使用电能质量分析仪，测量电源的电压、频率、谐波等参数，稳定的电源是电梯正常运行的基础，电压过高或过低、频率波动过大以及谐波超标，都可能导致电梯控制系统故障，使电梯出现异常运行甚至停机。在一些老旧建筑中，电力系统可能存在供电不稳定的情况，需要重点检测电梯电源是否受其影响。对电梯的电气控制系统进行深入检测，检查控制柜内的接触器、继电器、熔断器等各种电气元件，查看其外观是否有损坏、发热迹象，接线是否牢固。通过专业的检测软件，对电梯控制系统的程序进行读取和分析，检查程序是否存在漏洞或错误，是否符合相关的安全标准<sup>[3]</sup>。对电梯的接地系统也需进行细致检测，使用接地电阻测试仪，测量电梯的接地电阻值。良好的接地能有效防止电梯电气设备漏电时对乘客造成触电伤害，若接地电阻不符合要求，一旦发生漏电事故，后果将极其严重。还要对电梯的照明、通风等辅助电气系统进行检测，确保其能正常工作，为乘客提供舒适的乘坐环境。

## 二、电梯检测现场安全管理策略

### （一）现场防护设施严格设置

现场防护设施的设置绝非随意为之，必须严格遵循相关安全规范与标准。针对电梯井道，要在各楼层出入口设置坚固且醒目的防护栏，高度需符合人体工程学安全要求，一般不低于1.2m，确保人员不会意外坠入井道。防护栏的材质应具备足够强度，采用壁厚达标的钢管，并刷上警示漆，以鲜明色彩警示过往人员。在井道底部及顶部，需铺设严密的防护网，网眼大小严格控制，防止工具或零部件意外掉落造成下方人员伤亡<sup>[4]</sup>。检测轿厢时，在轿厢出入口安装临时防护门，此门应与轿厢门紧密配合，且具备自动关闭功能，防止检测人员在操作过程中不慎踏出轿厢。在机房等检测区域，设置明显的安全警示标识，划分出安全作业区域与危险区域，让检测人员时刻清楚自身所处位置的安全状况<sup>[5]</sup>。对于电梯顶部这一类可能存在高空作业的部位，必须搭建稳固的脚手架，脚手架的搭建需由专业人员依据相关标准进行，其承载能力要经过严格计算与测试，确保能承受检测人员及工具的重量。脚手架的踏板应铺满且固定牢固，四周设置防护栏杆及踢脚板，



防止人员滑倒或物品掉落。

（二）检测流程规范监督执行

检测流程的制定是基于大量实践经验与安全法规，具有科学性与严谨性。在检测前，检测团队需组织详细的技术交底会议，由项目负责人向每位检测人员明确阐述此次检测的具体流程、重点环节及安全注意事项，确保每个人都对检测流程烂熟于心<sup>[6]</sup>。在实际检测过程中，设立专门的监督岗位，监督人员应具备丰富的电梯检测经验与专业知识。监督人员需时刻跟随检测人员，观察其操作是否符合流程规范。在进行电梯限速器－安全钳系统测试时，检测人员应严格按照先检查限速器外观、再连接测试仪器、逐步模拟超速等步骤进行，监督人员要确保每一步操作都准确无误，若发现检测人员跳过某个环节或操作顺序错误，必须立即制止并纠正。对于检测过程中使用的各种仪器设备，监督人员也要检查其是否按照规定进行校准与操作。每完成一项检测任务，检测人员需及时填写详细的检测记录，监督人员要对记录进行审核，确保记录真实、准确、完整，涵盖检测过程中的各项数据及发现的问题<sup>[7]</sup>。定期对检测流程进行回顾与优化，收集检测人员在实际操作中遇到的问题及建议，结合新的安全法规与技术标准，对流程进行调整完善，使检测流程始终保持科学性与适应性。

（三）应急处置预案充分准备

应急处置预案的制定要全面且细致，涵盖电梯检测过程中可能出现的各类紧急情况。针对人员被困轿厢的情况，预案要明确规定救援人员的响应时间、救援流程及所需工具<sup>[8]</sup>。救援人员在接到被困报告后，应在规定时间内（一般不超过5min）携带手动盘车装置、电梯钥匙、通讯设备等专业救援工具到达现场。按照先确定轿厢位置、再与被困人员保持通讯安抚、然后实施救援操作（如通过手动盘车使轿厢平层）的流程进行救援，确保被困人员能在最短时间内安全脱困。对于火灾事故，预案要明确现场的灭火设备配置，在机房、井道附近等关键位置配备足够数量且符合标准的灭火器，规定火灾发生时的报警流程、人员疏散路线及灭火分工。检测人员在发现火灾迹象时，应立即按照预定路线疏散，并使用灭火器进行初期灭火<sup>[9]</sup>。针对电梯突然失控、坠落等严重事故，预案要详细规划应急救援指挥体系，明确各部门及人员的职责，包括现场指挥、医疗救援、技术支持等，确保在事故发生时各方面能迅速响应、协同作战，减少人员伤亡与财产损失。定

期对应急处置预案进行演练，模拟各种紧急情况，检验救援人员的响应速度与操作熟练程度，及时发现预案中存在的问题并加以改进。

（四）设备工具状态定期检查

电梯检测所使用的设备工具种类繁多，从精密的检测仪器到普通的扳手等工具，都需要纳入定期检查范围。对于速度测试仪、接地电阻测试仪等检测仪器，每次使用前，检测人员都要进行外观检查，查看仪器是否有损坏、显示屏是否正常显示等。按照仪器的校准周期，定期送专业校准机构进行校准，确保仪器测量数据的准确性<sup>[10]</sup>。在校准有效期内，若仪器出现测量结果异常或故障，应立即停止使用，并送修校准。对于扳手、螺丝刀等普通工具，每次使用后要进行清洁保养，检查是否有磨损、变形等情况。对于柄松动的扳手等存在安全隐患的工具，要及时维修或更换。在存放设备工具时，设置专门的工具柜，按照类别、规格等进行分类存放，防止工具丢失或损坏，并建立设备工具管理台账，详细记录每一件设备工具的购买时间、使用情况、维修记录、校准时间等信息，方便随时查询与管理<sup>[11]</sup>。定期对设备工具进行全面盘点，确保数量准确，对于老旧、损坏无法修复的设备工具，及时进行报废处理，并补充新的设备工具，保证检测工作的正常开展。

三、结束语

本研究明确了电梯检验检测工作各环节的关键要点，包括对轿厢、曳引机、钢丝绳等关键部件的细致查验，对运行速度、平层精度、噪声等运行参数的精确测量，对限速器－安全钳系统、缓冲器、门保护装置等安全装置的严格核验，以及对供电电源、电气控制系统、接地系统等电气系统的全面检测，确保了电梯检验检测工作的科学性与准确性。在检测现场安全管理方面，通过严格设置防护设施、规范监督检测流程、充分准备应急处置预案以及定期检查设备工具状态，构建了一套完善的管理体系，降低检测现场的安全风险。研究表明，完善的电梯检验检测工作及有效的检测现场安全管理，能提升电梯运行的安全性与稳定性，为人们的日常出行提供坚实保障。

参考文献

[1] 方雷. 电梯检验检测工作及检测现场的安全管理研究 [J]. 模具制造, 2023, 23(11): 280–282.  
[2] 陈达. 电梯检验检测工作的常见问题及检测现场的安全管理研究 [J]. 今日自动化, 2023(2): 167–169.  
[3] 徐波. 关于电梯检验检测工作及检测现场的安全管理探讨 [J]. 广东安全生产技术, 2024(4): 121–123.  
[4] 寇雪峰, 白朝中, 刘东东, 等. 电梯电气 / 可编程电子安全相关系统中极限开关功能的检验方法 [J]. 中国电梯, 2024, 35(9): 12–14.  
[5] 侯冲, 宋章亭, 刘洋, 等. 对拆除电梯轿门锁或其电气安全装置施工的检验 [J]. 中国电梯, 2024, 35(11): 42–43.  
[6] 张传龙, 董恩源, 王国华, 等. 基于深度学习的电梯层门安全检测关键技术研究 [J]. 中国特种设备安全, 2024, 40(z1): 27–30, 35.  
[7] 吴佩龙. 电梯井道安全门检验问题及整改案例分析 [J]. 中国机械, 2023(16): 99–102.  
[8] 俞平, 郭长兴, 王叶峰, 等. 电梯轿门开门限制装置和轿门锁的区别及其检验判定 [J]. 中国电梯, 2024, 35(2): 13–16.  
[9] 任伟彬, 刘福建, 李阳, 等. 曳引式电梯导轨安装精度与平层准确度检验方法研究 [J]. 黑龙江科学, 2023, 14(14): 22–24.  
[10] 兰天, 李俊林, 蒋裕文. 一起电梯制动器和安全钳双重紧急制动引发事故 [J]. 中国电梯, 2024, 35(10): 51–52, 55.  
[11] 李奕章, 李红美. 一则电梯安全回路接地保护线被人为拆卸的案例分析 [J]. 中国电梯, 2022, 33(19): 46–48.



# 饱和黏土中注浆引起的土体水平变形研究

贺翀, 唐剑华, 尚祖光, 刘澄赤  
上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011  
DOI:10.61369/ERA.2025060031

**摘 要 :** 轨交隧道施工或基坑施工容易引起邻近建筑物发生沉降变形, 有关注浆应用于控制基坑开挖引起的隧道水平变形的研究较少, 目前有关注浆抬升既有建筑物或者隧道的研究较多, 而有关注浆控制隧道水平变形的研究较少, 且已有研究多是工程案例分析, 尚缺乏控制隧道水平变形的系统注浆理论及策略。此外, 基坑施工不仅引起隧道产生竖向变形, 还会同时引起水平变形, 应采用注浆同时控制隧道变形和竖向变形。而目前尚缺乏同时控制隧道水平变形和竖向变形的系统注浆理论及策略, 有必要对其进行深入研究。本文采用圆孔扩张理论对饱和黏土中注浆引起的土体水平变形受力机制进行解析研究, 并形成一套适用于跟踪注浆引起土体位移的计算方法。

**关 键 词 :** 轨交隧道; 注浆变形; 基坑施工

## Research on Horizontal Deformation of Soil Caused By Grouting in Saturated Clay

He Chong, Tang Jianhua, Shang Zuguang, Liu Chengchi  
Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd. Shanghai 200011

**Abstract :** Subway shield tunneling or foundation pit construction can easily cause settlement and deformation of adjacent buildings. There is relatively little research on the application of grouting to control the horizontal deformation of tunnels caused by foundation pit excavation. Currently, there is more research on grouting to lift existing buildings or tunnels, while there is less research on grouting to control the horizontal deformation of tunnels. Moreover, most of the existing research is based on engineering case analysis, and there is still a lack of systematic grouting theory and strategies to control the horizontal deformation of tunnels. In addition, foundation pit construction not only causes vertical deformation of the tunnel, but also horizontal deformation. Grouting should be used to control both tunnel deformation and vertical deformation simultaneously. At present, there is a lack of systematic grouting theory and strategies to simultaneously control the horizontal and vertical deformation of tunnels, and it is necessary to conduct in-depth research on it. This article uses the theory of circular hole expansion to analyze and study the horizontal deformation mechanism of soil caused by grouting in saturated clay, and forms a set of calculation methods suitable for tracking soil displacement caused by grouting.

**Keywords :** tunneling; grouting deformation; excavation

## 引言

上海是典型的软土地区, 深大基坑施工对周边环境的变形影响一向不容忽视, 如何将地下空间开发过程中深大基坑施工对地铁车站和隧道区间的影响控制在毫米级的“微变形”范畴是上海地区岩土工程领域的重点和难点<sup>[1-2]</sup>。为开发地下空间而进行的基坑施工不可避免地引起周边土体产生变形, 从而引发邻近轨交隧道产生变形。这给轨交线路的结构安全和运营安全带来威胁。

基坑施工会对邻近轨交隧道产生较大的变形, 通常可采用跟踪注浆恢复隧道水平位移或水平收敛, 由于柱孔扩张理论形式简单, 力学原理明确, 被广泛地应用于旁压试验、静力触探、静压沉桩以及注浆等岩土工程领域<sup>[3]</sup>, 本文采用柱孔扩张相关理论模拟注浆周围土体的物理力学变形机制。

## 一、柱孔扩张理论解析研究

在图1中,  $P_u$  为柱孔扩孔压力,  $R_u$  为扩孔柱孔内径,  $R_p$  为弹塑性区边界半径,  $\sigma_p$  为弹塑性边界区径向应力, 根据 Vesic<sup>[4]</sup> 的相关研究弹塑性区边界半径与柱孔扩孔内径之间的关系可根据下式得到:

$$\frac{R_p}{R_u} = \sqrt{I_{rr} \sec \phi} \quad (1)$$

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta \sec \phi} \quad (2)$$

$$I_r = \frac{E}{2(1+\nu)(c+q \tan \phi)} = \frac{G}{S_u} \quad (3)$$

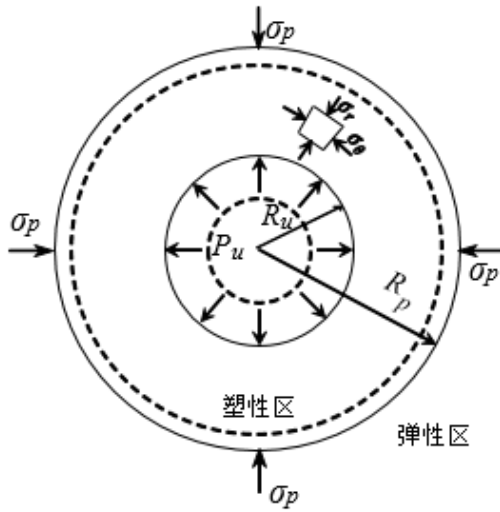


图1 柱孔扩张示意图

在上式中,  $\phi$  为土体内摩擦角,  $c$  为土体粘聚力,  $I_r$  为刚性指数,  $I_{rr}$  为修正刚性指数,  $\Delta$  为平均体应变,  $E$  为杨氏模量,  $\nu$  为泊松比,  $G$  为剪切模量,  $S_u$  为不排水剪切强度, 其为土体内摩擦角  $\phi$  与土体粘聚力  $c$  的函数,  $q$  为初始平均正应力, 其表达式可用下式表示:

$$q = \frac{(1+2K_0)\sigma_{v0}}{3} \quad (4)$$

式(4)中  $K_0$  为静止土压力系数,  $\sigma_{v0}$  为初始竖向应力, 结合以上各式, 若已知柱孔内径  $R_u$ , 则可通过式(1)计算得到弹塑性区边界半径  $R_p$ 。

根据 Vesic<sup>[4]</sup> 的研究, 柱孔的扩孔压力可根据下式获得:

$$P_u = S_u F_c + P_0 F_q \quad (5)$$

$$F_c = \ln(I) + 1 \quad (6)$$

$$F_q = (\sin \phi + 1) \left( \sec \phi - \frac{\sin \phi}{\sin \phi + 1} \right) \quad (7)$$

根据式(5)~式(7)得到的球孔扩孔压力  $P_u$  以及塑性区边界半径与球孔扩孔内径比值  $R_p/R_u$ , 可求得弹塑性边界区域的径向应力  $\sigma_p$ , 如式(8)所示

$$\sigma_p = (P_u + c \cot \phi) \left( \frac{R_u}{R_p} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{\sin \phi + 1}} - c \cot \phi \quad (8)$$

通过以上各式得到了弹塑性边界处的径向应力  $\sigma_p$  与弹塑性边界处对应的球孔半径  $R_p$ , 通过本构关系可得到弹塑性边界处的径向位移:

$$\delta_p = \frac{1+\nu}{2E} R_p (\sigma_p - q) \quad (9)$$

本文假设扩孔过程中周围土体为不排水过程, 因此塑性区体应变为0, 考虑有限变形, 根据扩孔前后土体体积不变的原则, 可得到塑性区径向位移为

$$\delta = \frac{2R_p + \delta_p}{2r + \delta} \delta_p (R_u \leq r \leq R_p) \quad (10)$$

上式中  $r$  为径向距离, 径向位移  $\delta$  为径向距离  $r$  的隐式函数, 上式不能直接求解, 为了简化数字迭代过程, 假设小变形的条件下径向位移  $\delta$  可用下式表示

$$\delta \approx \frac{R_p}{r} \delta_p (R_u \leq r \leq R_p) \quad (11)$$

将上式代入式(10), 可得到径向位移的近似值

$$\delta \approx \frac{2R_p + \delta_p}{2r + \delta_p R_p / r} \delta_p (R_u \leq r \leq R_p) \quad (12)$$

对于弹性区径向位移, 通过胡克定律以及边界条件可得到, 其解析表达式为

$$\sigma_r = (\sigma_p - q) \left( \frac{R_p}{r} \right)^2 + q \quad r > R_p \quad (13)$$

弹性区的径向位移可用下式表示

$$\delta = \frac{R_p^3}{r^3} \delta_p \quad (14)$$

## 二、单排多孔注浆解析

上述表达式只适用于单孔注浆对周围土体产生的位移, 而实际施工过程中, 大多存在单排多孔同时注浆, 图2为多孔注浆平面布置示意图。

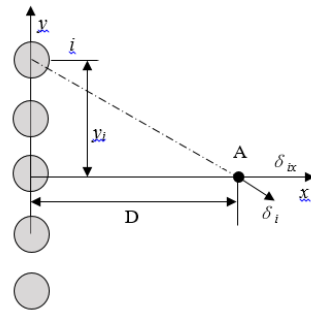


图2 多孔注浆平面布置示意图

在图2中, 对于  $x$  轴给定的  $A$  点, 由第  $i$  孔注浆引起  $A$  点  $x$

轴方向位移为  $\delta_{ix}$ ，根据几何关系可用式 (15) 表示

$$\delta_{ix} = \delta_i \frac{D}{\sqrt{D^2 + y_i^2}} \quad (15)$$

式 (15) 中  $D$  为计算点  $A$  与  $y$  轴的距离， $y_i$  为第  $i$  个注浆孔与  $x$  轴的距离， $\delta_i$  为第  $i$  个注浆孔注浆在  $A$  点产生径向方向的位移，其方向如图2所示。

假定第  $L$  个注浆孔对  $A$  点产生的位移可以忽略不计，此时注浆孔与  $x$  轴的垂直距离为  $y_L$ ，为了考虑多个注浆孔注浆施工对目标点  $A$  产生的位移，拟采用线性叠加法，因此只需对所有的注浆孔对  $A$  点产生的位移进行求和，可得到式 (16)：

$$\delta_{ix} = \frac{2D}{S} \int_0^L \frac{\delta}{\sqrt{D^2 + y_i^2}} dy \quad (16)$$

式 (16) 中  $S$  为相邻注浆孔的中心距离， $L = \min(y_L, Y_{ac})$ ， $Y_{ac}$  为目标点与第  $i$  个注浆孔的实际距离，当径向距离  $\delta_a = \sqrt{D^2 + y^2} > R_p$ ，可通过弹性区位移计算公式 (14) 结合式 (16) 计算得到，反之可通过塑性区位移计算公式 (12) 结合式 (16) 计算得到。因此需分三类情况进行计算：

①第一类情况为目标测点既位于部分注浆孔的弹性区，又位于另一部分注浆孔的塑性区，即  $D < R_p$  且  $\sqrt{D^2 + L^2} > R_p$ ，计算结果如下：

$$\delta_{x1} = \frac{2D(2R_p + \delta_p)\delta_p}{S\sqrt{4D^2 + 2R_p\delta_p}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{2(R_p^2 - D^2)}{2D^2 + R_p\delta_p}} + \frac{R_p^3\delta_p}{SD^2} \cdot \frac{DL}{D^2 + L^2} \quad (17)$$

②第二类情况为目标测点位于所有注浆孔的弹性区，即  $D < R_p$  且  $\sqrt{D^2 + L^2} \leq R_p$  计算结果如：

$$\delta_{x2} = \frac{2D(2R_p + \delta_p)\delta_p}{S\sqrt{4D^2 + 2R_p\delta_p}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{2L^2}{2D^2 + R_p\delta_p}} \quad (18)$$

③第三类情况为目标测点位于所有注浆孔的弹性区，即  $D \geq R_p$ ，计算结果如下：

$$\delta_{x3} = \frac{R_p^3\delta_p}{SD^2} \cdot \left( \frac{DL}{D^2 + L^2} + \tan^{-1} \frac{L}{D} \right) \quad (19)$$

式 (17)~式 (19) 可计算多孔注浆对目标点  $A$  产生的位移，图2假设注浆孔关于  $A$  点对称，若多孔注浆孔关于  $A$  点不对称，则需对  $y$  轴正负半轴分别积分。

### 三、多排多孔注浆理论解析

上节讲述了单排多孔注浆施工，实际施工过程中大多为多排多孔注浆施工，本节主要针对多排多孔注浆施工对目标测点  $A$  产生的位移进一步解析。

若注浆施工后，注浆体与土层性质保持不变，则多排孔注浆施工顺序对于目标测点  $A$  产生的位移基本保持一致注浆施工后注浆体的物理力学参数显然强于周围土层，已施工注浆体对后施工注浆体会产生遮脸效应，产生增强或者减弱后施工注浆体对于目标测点  $A$  的位移变形。因此，对于多排注浆孔，不同排之间施工顺序不同对目标测点亦会不同。

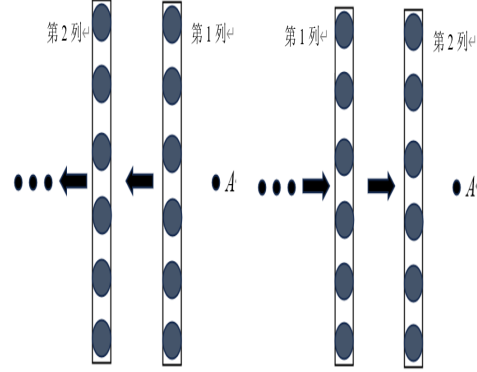


图3(a) 由近而远施工

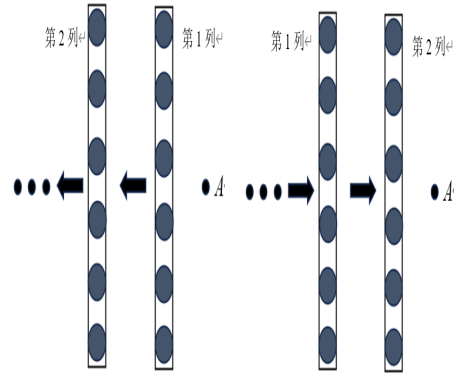


图3(b) 由远而近施工

图3 注浆孔施工顺序以及平面布置图

实际施工过程中可能会存在多种施工顺序，本文考虑两种典型的施工顺序，如图3 (a) 所示，该种施工顺序为自  $A$  点由近及远施工，若先施工第一列，由于已施工注浆体物理力学参数强于原状土体，当施工第二列注浆体的时候，由于已施工第一列注浆体的存在，会减弱第二列注浆体施工在目标点  $A$  的横向位移。如图3 (b) 所示，该种施工顺序为自  $A$  点由远及近施工，若先施工远离  $A$  点第一列，由于已施工注浆体物理力学参数强于原状土体，当施工第二列注浆体的时候，由于已施工第一列注浆体的存在，会增强第二列注浆体施工在目标点  $A$  的横向位移。

结合以上分析本文假定两种极端的模式：1) 假定已施工的注浆体与原状土体物理力学参数性质相同，此种情况下，可考虑多排多孔注浆施工对目标点  $A$  的引起的位移采用线性叠加的方法求得。2) 若采用由近及远的方式施工，考虑第一列已施工注浆体对后续即将施工的注浆体的遮帘效应，极端情况下，仅需考虑第1列注浆体施工对土体引起的位移。以上两种情况均为理想中的计算模型，而实际施工过程中，目标点的位移介于二者之间。

## 四、工程案例研究

本文采用 Shen<sup>[5]</sup> 论文中的案例, 图4为土体参数示意图, 注浆管深度为20m, 注浆量为 $0.146\text{m}^3/\text{m}$ , 不排水强度  $S_u$  为土体剪切强度  $q_u$  的一半, 扩孔半径  $R_{u0}$  为0.58m, 与其相对应的弹塑性边界半径  $R_{p0}$  为  $E/S_u=150$ , 泊松比  $\nu=0.5$ 。

图5为单排多孔注浆, 分别在不同深度处测试随遇注浆距离而变化的土体横向位移, 案例中分别测试深度分别为5m, 10m, 15m 深度处的土体横向位移随径向距离变化的规律。

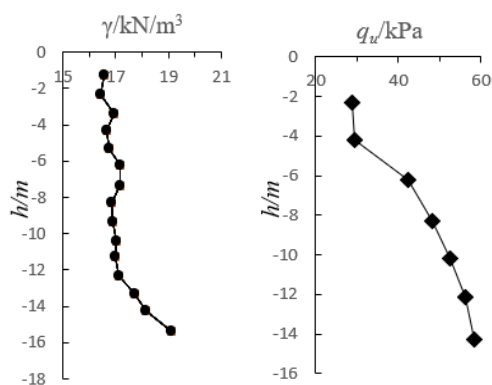


图4 土体参数示意图

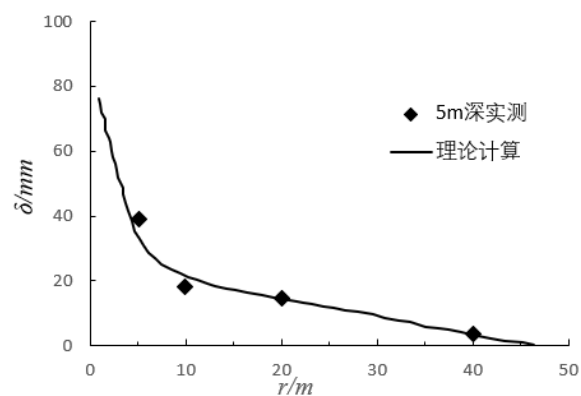


图5 (a) 5m 深度处土体位移随径向距离变化

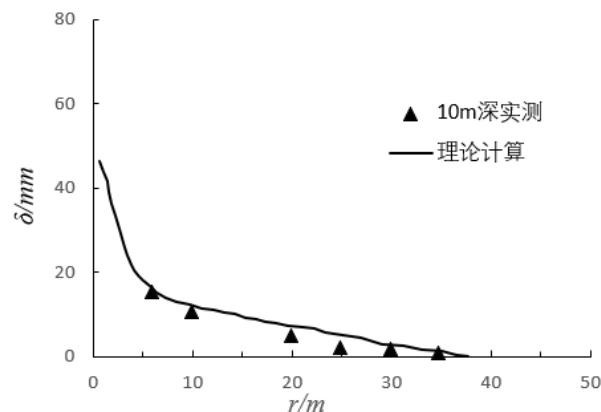


图5 (b) 10m 深度处土体位移随径向距离变化

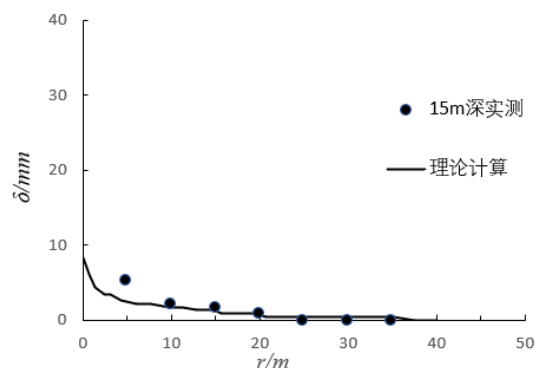


图5 (c) 15m 深度处土体位移随径向距离变化

图5 不同深度处土体位移随径向距离变化

如图5所示, 本文所示理论计算值与实测数据吻合的较好, 在一定程度上验证了理论解析方法的有效性。总体上土体位移随径向距离减小而减小, 在注浆管周边10m 距离以内土体位移急剧减小, 在10m 范围以外土体位移衰减速度相对较慢。在深度方向上5m 深度处土体位移变化较大, 这主要是随着深度增加土体强度增大, 相对应刚度系数亦随深度增大, 因此在深度变化方向上, 随深度增大, 土体横向逐渐减小。在5m 处, 位移为0区域半径约为46m, 在深度10m 处, 位移为0的区域半径约为39m, 在深度15m 处, 位移为0的区域半径约为36m, 因此可得出结论, 随着深度增加, 注浆对土体位移影响逐渐减小。

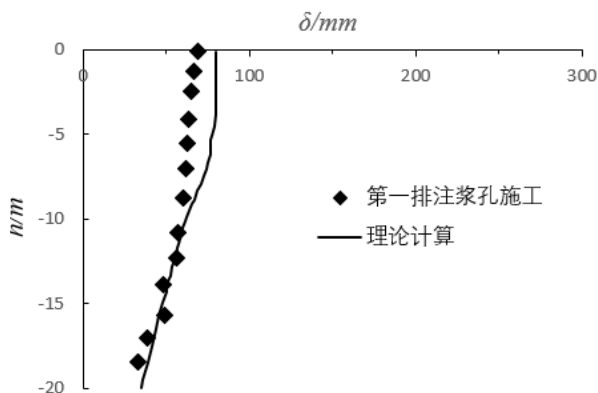


图6 (a) 由远及近施工第一排注浆孔

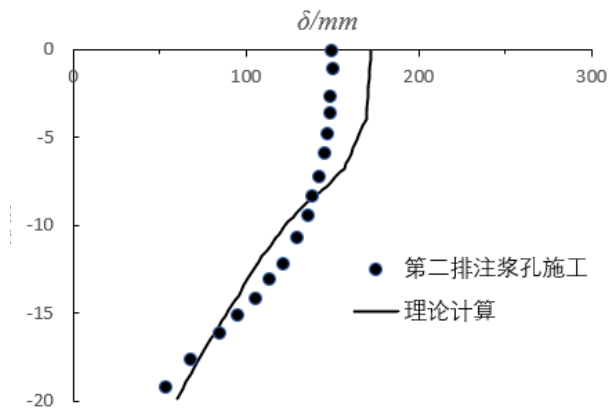


图6 (b) 由远及近施工第二排注浆孔

图6 由远及近的施工方式土体位移变化规律



如图6所示为由远及近的方式施工,分别施工两排注浆,图6(a)为施工第一排注浆引起与注浆管距离为6m处测点的水平位移,图6(b)为施工第二排注浆引起目标测点的水平位移,两种工况下理论计算值与实测值吻合的均相对较好,且施工第二排注浆时,测点水平位移显著增大。同时根据图6发现随着深度增加,土体的水平位移逐渐减小。

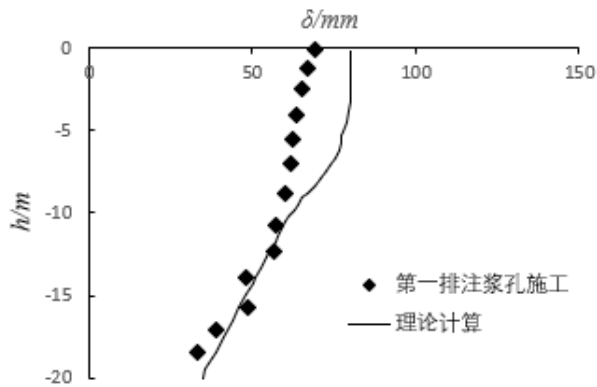


图7(a) 由近及远施工第一排注浆孔

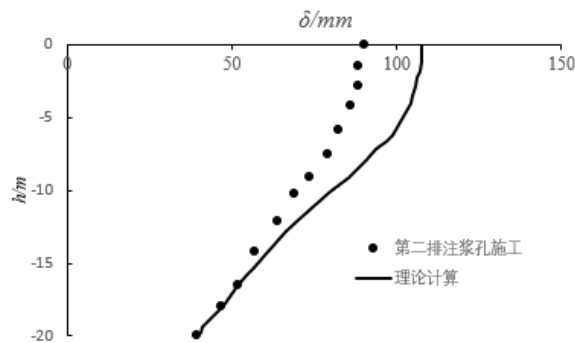


图7(b) 由近及远施工第二排注浆孔

图7由近及远的施工方式土体位移变化规律

如图7所示为由近及远的方式施工,分别施工两排注浆,图7(a)为施工第一排注浆引起与注浆管距离为6m处测点的水平位移,图7(b)为施工第二排注浆引起目标测点的水平位移,两种工况下理论计算值与实测值吻合的均相对较好,且施工第二排注浆时,测点水平位移略微增大。与图2.7相比,施工完第二排注浆后,目标测点土体位移小于由近及远的施工方式的土体位移,表明由近及远的方式施工,存在遮帘效应。

## 五、结论

通过圆孔扩张理论模拟了土层中的注浆过程,通过解析公式的方法得到了注浆引起的土体中的位移,主要结论如下:

(1) 通过理论推导法获得了单排孔注浆施工引起的土体的水平位移,水平方向上,在一定范围以内,土体位移急剧减小,随之衰减速度减弱,在竖向方向上,随着深度的增加,土体的水平位移逐渐减小。

(2) 通过叠加法获得了多排注浆孔引起土体的位移的计算方法,并通过案例计算说明了当存在多排注浆孔时,说明了由远及近的施工方式与由近及远的施工方式产生位移差异的力学机理,验证了多排注浆孔先后施工会存在遮帘效应。

## 参考文献

[1] 徐长节, 孙凤明, 陈金友, 等. 基坑相邻地铁隧道变形与应力控制措施 [J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(S1): 75-80.  
[2] 王卫东, 沈健, 翁其平, 等. 基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策 [J]. 岩土工程学报, 2006, (S1): 1340-1345.  
[3] 蒋明镜, 沈珠江. 考虑剪胀的弹脆塑性软化柱形孔扩张问题 [J]. 河海大学学报, 1996, 24(4): 65-72.  
[4] Vesic, A. S. Expansion of cavities in infinite soil mass [J]. Soil Mech. Found. Div., 1972, 98(3), 265 - 290.  
[5] Shen, S. L., Wu, H. N., Cui, Y. J. & Yin, Z. Y. Long-term settlement behavior of the metro tunnel in Shanghai. Tunneling Underground Space Technol., 2014, 40 (2), 309 - 323.

# 风电混塔施工技术 with 质量控制研究

周浩

中电投东北新能源发展有限公司, 辽宁 沈阳 110623

DOI:10.61369/ERA.2025060032

**摘要：** 在世界范围内，人们对清洁能源的要求越来越高，风能被认为是一种新的可再生能源。混风塔是风电机组中的核心部件，其建造工艺水平及质量控制效果对风电场的安全、稳定、发电效益具有重要意义。本文通过对风电混塔建造工艺的研究，对其建造过程中的关键环节进行系统的分析，建立起一套完整的质量管理系统，并对常见的质量问题进行有效地处理，从而为我国的混塔工程的高品质建设提供理论支撑和实际指导。

**关键词：** 风电混塔；施工技术；质量控制；常见问题；应对策略

## Research on Construction Technology and Quality Control of Wind Power Hybrid Tower

Zhou Hao

Northeast New Energy Development Co., LTD. Shenyang, Liaoning 110623

**Abstract：** Globally, the demand for clean energy is increasing, and wind power is considered a new renewable resource. The hybrid tower is a core component of wind turbines, and its construction technology level and quality control are crucial to the safety, stability, and power generation efficiency of wind farms. This paper studies the construction process of hybrid towers in wind power plants, systematically analyzes key stages, establishes a comprehensive quality management system, and effectively addresses common quality issues, thereby providing theoretical support and practical guidance for high-quality construction of hybrid towers in China.

**Keywords：** wind power hybrid tower; construction technology; quality control; common problems; countermeasures

## 引言

随着世界各国都在提倡绿色能源的转变，风能因其具有的清洁和可再生的优点而被广泛关注。混风塔作为风电机组的主要承载构件，与常规塔架相比，具有成本低、强度高、适应性强等优势，因此被越来越多地用于风力发电领域。但是由于风力发电系统的特殊性，其建设过程中涉及到多个专业、多个工序，其施工质量受到诸多因素的影响。因此开展混合风电塔架的建造工艺及质量调控研究，是确保风电工程顺利实施，提高风电设备运行的可靠性与耐久性的关键。

## 一、风电混塔施工技术概述

### （一）风电混塔结构与原理

风电混塔一般是将混凝土基础部分与塔架部分结合在一起。由于其抗压能力强，自重较大，可对塔架整体起到稳固的支撑作用，有效抵御风荷载下的大弯矩及水平力。而钢塔架分段，其剪强度高、质量轻，以及便于搬运、安装，可在高海拔区段上灵活地适应不同的风速，该方法利用塔架支撑风机中心点，将收集到的风电功率传输到地面，并保证整机在多种天气环境下的平稳运行。该结构可使混凝土与钢的材料性能相结合使塔架受力性能达

到最优，同时也是经济合理的选择。

### （二）风电混塔施工技术分类

风电混塔按其施工工艺及材料结合形式可分为预制拼装和现浇两种。其中预制拼装工艺是指在厂房或预制场对混凝土地基、塔架进行预制、加工，并将其运到工地进行拼装，该工艺施工速度快，施工质量容易控制，受场地环境的影响小，但对装配的精度、运输、施工等提出更高的要求。而现浇法是指在建筑工地上先浇筑混凝土地基，再进行塔架部分的安装，该方法具有对场地的适应能力强、整体性能好等优点，但是建设时间比较长，施工管理也比较困难。

（三）风电混塔施工工艺流程

风电混塔的施工流程包括基础施工、塔架施工和配套设备的安装。在地基建设阶段应先对工程地质情况进行调查，依据调查成果对地基进行设计，并决定地基的型式及尺寸。在此基础上，对基坑开挖、支护，保证工程的安全。然后是桩基础，为地基提供牢固的支承，在塔架建造阶段，如果是采用预制拼装的工艺，则需要首先进行塔架的制造再将其运到现场，由专业的起重设备进行吊装，最后再进行塔架间的连接。如采用现浇工艺，应先浇注混凝土地基，待混凝土强度达到设计要求后，才能安装塔架，附属设施安装阶段主要包括电气设备安装、防雷接地系统安装等工作，确保风电机组能够正常运行并具备安全防护功能<sup>[1]</sup>。

二、风电混塔施工技术关键点

基础施工环节	主要工作内容	具体要点	常见方式
地质勘察与基础设计	获取地质条件信息，依此结合荷载要求进行基础设计	获取土壤类型、土层分布、地下水位、地质构造等信息；选择基础形式，确定尺寸、埋深、配筋等参数；考虑抗震要求	软土地基常用桩基础，岩石地基常用扩展基础
基坑开挖与支护	依设计尺寸和地形规划开挖，对较深基坑采取支护措施	控制开挖深度和坡度，防止超挖或边坡失稳；控制支护结构施工参数；做好基坑排水	钢板桩支护、灌注桩支护、地下连续墙支护
桩基施工技术	在地基中形成桩体	钻孔灌注桩控制钻孔速度、泥浆比重等参数；预制桩注重桩身质量和施工设备	钻孔灌注桩、预制桩

三、风电混塔施工质量控制体系

（一）质量控制目标与标准

风电混塔施工质量控制的目标是确保塔筒结构安全可靠，该系统能够满足风机长周期稳定运行的要求。《风力发电场设计规范》《混凝土结构工程施工质量验收规范》《钢结构工程施工质量验收规范》等国家及行业的有关标准对其进行了质量管理，该规程对风电混塔工程的所有阶段，包括原材料、施工、竣工验收等，均有详尽的质量标准及检测方法。如在混凝土地基的强度要求方面，提出标准养护状态下各标号混凝土的抗压强度标准值，同时对塔架垂直度的误差也有明确的容许值。

（二）质量控制组织与职责

为了实现质量控制目标，必须要有一个健全的质量管理机构。质量管理通常以工程经理为总负责人，下设技术主管、质检主管、施工组长等职位，并对每个岗位的责任进行详细的划分。其中技术主管负责制订工程的工艺计划及质量控制措施，并对工程中出现的技术难题提出建议，并予以解决；质检人员负责根据质量标准对原材料、施工工艺及最终产品进行检查、验收，发现不合格之处及时提供改正建议；施工组长应根据施工计划及质量

标准，组织工人进行施工并且保证工程质量。各个岗位之间互相配合、互相监督，才能保证工程的质量。

（三）质量控制流程与方法

质量控制阶段	工作内容	操作要点	作用
施工前	施工图纸会审、施工人员技术交底	组织各方对施工图纸详细审查，向施工人员说明质量要求、施工工艺等	提前发现图纸问题，使施工人员明确工作标准与流程
施工过程中	旁站监督、抽样检验、平行检验	质量检验员现场监督关键工序；按比例随机抽取原材料、构配件检验；建设或监理单位独立开展平行检验	确保施工操作合规，判断原材料等质量，验证施工单位自检准确性
施工后	按标准对成品全面验收	依据质量验收标准检查成品各项指标	确定成品是否合格，决定能否进入下道工序或交付使用

四、风电混塔施工质量控制要点

（一）原材料质量控制

原材料类别	关键控制环节	质量要求及操作要点
水泥	选择与检验	依工程及环境选品种、强度等级；检验安定性、凝结时间、强度等，确保符合国标
骨料（粗、细）	质量要求	颗粒级配良好，含泥量、泥块含量低，坚固性佳，提升混凝土和易性、强度、耐久性
外加剂	使用控制	依说明书控掺量，做适应性试验，保证与水泥等相容性好
钢筋	进场、存储、加工安装	进场查证证明文件并抽样复验屈服强度、抗拉强度等；存储防受潮生锈；加工安装按设计控尺寸、弯钩角度、绑扎间距等参数

（二）施工过程质量控制

1. 基础施工质量控制

在基础施工过程中要严格控制产品的质量，例如，对于基坑的开挖应严格控制其大小、高程，避免过深、过深，在桩基础上，要保证桩的位置和垂直度。混凝土浇筑时，应注意混凝土的塌落度、浇筑速度及振捣质量，避免混凝土离析、气孔等缺陷的产生。在砼浇筑完毕后，应及时养护以确保砼的正常生长，同时要注意地基的表面质量，有无裂缝、蜂窝麻面等缺陷并及时进行治理。

2. 塔筒施工质量控制

塔筒施工质量控制重点在于预制、运输、吊装和连接环节。在塔架装配时，应对模具质量、原材料及浇注工艺进行严格控制，以保证塔架的外形和尺寸精度；在塔架吊装时，为避免塔架损坏应采取有效保护措施；在塔架的吊装中，要保证吊装装置的安全性、施工的规范性和塔架的精确定位。在塔架的连接中，不管是采用焊接或螺栓的方式，均应严格遵守施工规范以保证接头的质量。同时对塔架的垂直度也要进行检验，以保证塔架的安装达到设计的要求。

3. 电气安装质量控制

电气安装是风电混塔施工的重要组成部分，风力发电机是一

种新型的风力发电设备，它的好坏直接关系到风力发电机的正常工作。在安装电器之前，必须对其进行检验和检测，以保证其运行状况以及工作性能良好。在安装时，要严格遵守电器安装图上的线路及线路，保证线路的连接正确、牢固，同时对用电设备进行接地处理，保证其接地电阻满足规定，从而保证用电设备的安全性。在设备安装完毕后，要进行试运转，并对各电器设备的功能参数进行检测<sup>[2]</sup>。

### （三）成品质量验收与检测

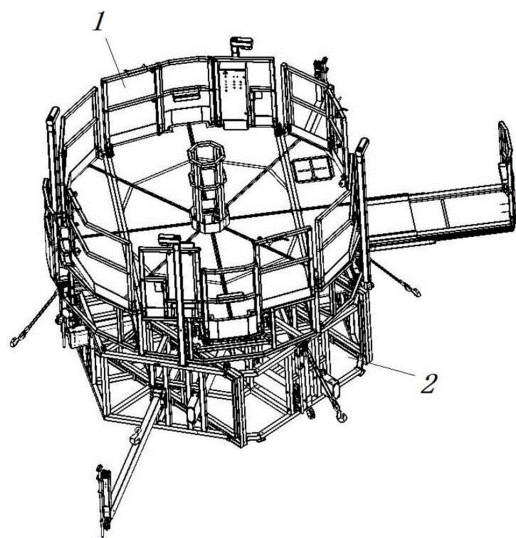
#### 1. 外观质量检查

产品的外观检验是产品质量验收中的一个重要环节。对风力混合塔架应检查地基的平整度，有无裂缝，蜂窝，麻面等缺陷；塔架表面平整，有无变形、刮花以及油漆脱落等现象；接头的强度和焊接的表面，有没有气孔和夹杂物等。产品外观质量检验以目测、量具量测为主，对产品出现的产品外观质量问题要做好记录，并及时改正。

#### 2. 内在质量检测

内部质量检查主要是对风力混合塔受力情况进行检验，以检验其是否满足设计要求。通常对内部质量进行测试的方法有非破坏性测试和载荷测试，针对混凝土内部缺陷、钢筋位置及保护层厚度、高塔焊缝质量的非破坏性检测，采用超声波回弹法检测混凝土强度，利用钢筋扫描器确定钢筋位置及保护层厚度，通过射线检测和超声检测焊缝质量<sup>[3]</sup>。载荷试验是对塔架进行仿真载荷测试，测试塔架的变形和应力等参数，从而对塔架的承载力进行评价。而产品内部质量检验应由具备相关资格的检验机构实施，其检验结果也是最终产品的质量验收的主要依据。

## 五、风电混塔施工质量问题及应对策略



一种风电混凝土塔筒安装平台的制作方法

### （一）常见质量问题分析

风电混塔易出现地基沉降、塔架开裂和连接松动等质量问题。其中地基沉降的成因主要有地质调查不准确、地基设计不合理以及桩基施工质量不佳等，地基沉降将导致风机塔架发生倾斜，严重时还会引起风机的安全事故。同时由于混凝土配合比不合理、养护不当、温度应力和施工荷载过大，造成塔架开裂的原

因比较复杂。塔体裂纹严重影响塔架结构的强度、耐久性能，并对其寿命产生不利影响。而连接不规范、螺栓拧紧力矩不够以及焊接质量不佳，容易引起连接松动，从而降低塔架的整体性能<sup>[4]</sup>。

### （二）质量问题预防措施

工作人员需要从设计、施工和管理三个方面着手，防止出现质量问题。在设计阶段，应加强地质调查，保证准确、可靠的地质数据，做好地基、塔架的设计，并对各种不利因素进行全面的考虑。在施工过程中，要对原材料的质量进行严格的管理，并根据施工技术规范对施工过程中的质量进行监测，及时纠正出现的问题。在管理方面，应完善质量管理制度，确定各个单位及个人的质量责任，强化对员工的培训与教育，增强员工的质量意识与技术水平。在此基础上，应加强与建设、监理等方面的联系和配合使工程质量得到有效的控制。

### （三）质量问题处理方法

对已发生的质量问题，应及时有效地加以解决。在沉降不大的情况下，可采取注浆法和树根桩加固法；如果沉降过大，则需拆除并重建地基，针对高塔的开裂问题，如果裂纹很小可以采取表面封堵的方法，例如涂环氧树脂胶粘剂；如果出现大范围的裂纹，可以通过注浆方法对其进行修复并在缝隙中注浆，从而使塔架的强度和密封性能得以恢复<sup>[5]</sup>。如果连接处出现松动，则要将其重新紧固并且要查看螺丝、螺帽有无破损，如果有破损则要及时更换；而如有接头松动，则需重焊，并检查焊缝质量。同时在处理质量问题时，要制定详细的处理方案，并经相关部门和专家论证后实施，确保处理效果符合要求。

## 六、结语

风力发电设备的设计、制造、安装、调试等方面对风电混塔施工质量都有很大的影响。因此对施工工艺中的关键环节进行研究，建立健全的质量管理系统，以及强化整个施工过程的质量监控是保证风电混流铁塔建造质量的有效保证，提升风电场建造水平的有效途径。本文在此基础上，提出相应的防治对策以减少风机产品的质量隐患，并且保证风机的长周期安全稳定运行。在我国，随着我国风电技术的持续发展与创新，我国的混塔建造工艺与质量管理手段也将得到进一步的改进与优化，为风力发电行业的可持续发展提供坚实的技术支撑。

## 参考文献

- [1] 黄显, 徐明华. 海上风电导管架基础施工水平度控制关键技术研究 [J]. 水电与新能源, 2024, 38(12): 85-88.
- [2] 屈江昆, 高富文. 山地风电筏板基础施工技术与管理 [J]. 价值工程, 2024, 43(32): 162-165.
- [3] 章鸣浩. 山地风电设备基础土建施工难点与关键技术研究 [J]. 大众科学, 2024, 45(18): 40-42.
- [4] 田志, 王岩松. 海上风电桩-桶结构复合灌浆施工工艺及质量控制研究 [J]. 港口技术与管理, 2023, (04): 8-13.
- [5] 韩天灵. 风电场土建工程施工技术及质量控制研究 [J]. 企业科技与发展, 2020, (12): 87-88+91.



# 烟草制丝工艺质量影响因素及控制措施分析

张振武，朱建松

江苏中烟工业有限责任公司南京卷烟厂，江苏 南京 210019

DOI:10.61369/ERA.2025060034

**摘 要：** 烟民是常年吸烟的人群，也是烟草消费的主力军，是支撑烟草产业发展的中坚力量。随着烟草制丝技术的发展，市面上的烟草产品百花齐放，为烟草制丝产品质量提出了新的要求。本文将基于烟草制丝工艺质量影响因素，讨论相关控制措施，希望有所帮助。

**关 键 词：** 烟草制丝工艺；工艺质量；影响因素；控制措施

## Analysis of Influencing Factors and Control Measures of Tobacco Primary Processing Quality

Zhang Zhenwu, Zhu Jiansong

Nanjing Cigarette Factory, China Tobacco Jiangsu Industrial Co., Ltd. Nanjing, Jiangsu 210019

**Abstract：** Smokers are people who smoke regularly all year round. They are the main force of tobacco consumption and the backbone supporting the development of the tobacco industry. With the development of tobacco primary processing technology, various tobacco products are available on the market, posing new requirements for the quality of tobacco primary processing products. Based on the influencing factors of tobacco primary processing quality, this article discusses relevant control measures, hoping to be helpful.

**Keywords：** tobacco primary processing technology; process quality; influencing factors; control measures

### 一、烟草制丝工艺质量影响因素

烟草制丝工艺质量，通常受到以下因素的影响：首先，流量因素。烟草制丝所指的流量，涵盖流量计流量与物料流量两方面，这两方面均会极大影响烟草制丝工艺质量。具体而言，烟丝制作阶段需要通过加水、蒸汽和各类香料等，增强烟丝的风味，这些添加的物质，都会纳入到流量计流量的统计范畴之中。实践中，应以低于0.5%的标准控制流量计精度，避免烟草制丝工艺质量下降。而物料流量指的则是加工阶段其他影响因素施加的均匀度，包括香料、湿度和温度等，同样需要以低于0.5%的标准控制精度<sup>[1]</sup>。

其次，水分因素。烟丝制作过程中，需要频繁在烟丝中加水和脱水，并适当调控烟丝温度，欲保障烟草制丝工艺质量，就需要格外重视水温的控制，避免水分含量过高，对烟叶物理性质造成影响，减少烟叶表面光泽，影响其结构稳定性。水分的控制，同样可避免烟叶产生大量损耗，保障烟叶成分和为消费者带来的感官感受。

另外，组分因素。烟草产品的最终品质，和组分均匀性、稳定性有较大关联，会直接影响消费者的体验感受。合理的组分分配可以增强烟草产品的辨识度，提高消费者对特定产品的粘性，

也可以成为在同类型竞品中脱颖而出有效竞争力。组分分配比主要包括梗丝、膨胀烟丝、气流叶丝之间配比，香精、糖料配比，以及原料烟叶之间的不同组合，质量控制难度较大，需要生产人员加以重视<sup>[2]</sup>。

最后，温度因素。温度是影响烟草制丝工艺质量的重要因素，很多烟丝成品的理化性能不达标，很大程度都和温度直接相关，值得生产人员高度重视。烟丝的实际制备阶段，都会借助外部蒸汽管路保证蒸汽源源不断的供应，进而形成稳定的温度热源，持续增加温度和湿度，保障烟丝良好的生产环境。也可借助热交换器，使生产滚筒中进入热风，从而均匀接触烟草。各类燃料直接燃烧生成的热量，也可以热交换设备为媒介，保障加工环境的均匀热量，避免气体温度难以达到规定的温度，影响烟丝的正常制备<sup>[3]</sup>。

### 二、提升烟草制丝工艺质量的控制措施

#### （一）质量因素定向控制

##### 1. 流量因素控制

针对流量因素的控制，可采用自动化控制投料设备，保证投料的精准性，使其体积与重量等符合烟草制丝工艺生产质量要

作者简介：张振武（1997-），男，汉族，河南开封人，本科，助理工程师，江苏中烟工业有限责任公司南京卷烟厂，研究方向：工艺质量，质检，设备控制。张振武身份证号：41022519970515003X。

求。例如电子秤和投料机等设备，应当由工作人员，每隔一段时间对仪器精度进行校准，在生产阶段之余，对投料精度进行试验，查看配比控制效果与精准度是否符合质量要求。以电子秤为例，通常需要以低于5%的标准控制精度，一旦超出这个标准，则需要针对性维修或替换。也可通过称重法，向称重容器中加入流量计，称出水重，比较水与流量计累计量。若是蒸汽流量计，校准方法也可选择容积法，也就是在试验管路中安装需要检测的流量计，比对流量计累计量与试管容积体积。此外，针对流量计等精度要求较高的设备，也可以通过提前设定自动化程序（例如PID算法），实现控制效果。PID控制算法本质上属于反馈控制算法，集合了微分、积分等计算优势，可以实时监测烟草制丝工艺生产流量和预期流量的差异，保证生产阶段流量全程稳定<sup>[4]</sup>。另外，也可在烟草制丝工艺生产线中，安装PLC自动化控制原件，提高流量控制的自动化水平。

实际生产阶段，还需要对流量计计量精度，以及物料流量稳定性进行控制，这就需要工作人员依照瞬时比例变异系数，以及流量变异系数等规定进行控制。随着烟草制丝工艺生产技术的成熟，物料流量变异系数的规定也更加明确，具体而言，叶片干燥流量变异系数应不超过0.15%，叶片加料流量变异系数应不超过0.25%，梗丝加香流量变异系数应不超过0.15%，梗丝干燥流量变异系数应不超过0.15%，梗丝加料流量变异系数应不超过0.15%。加香加料精度和瞬时比例变异系数方面，单纯叶片加料的精度应不超过1%，瞬时比例变异系数应不超过1%；混合梗丝加香精度应不超过0.5%，瞬时比例变异系数应不超过0.5%<sup>[5]</sup>。

## 2. 水分因素控制

水分的控制，可以等同于烟草制丝工艺生产阶段含水量的控制。除了需要控制含水量的大小，水分稳定性与均匀性等也需要格外重视。工作人员生产阶段，由于每一步的含水率标准可能各不相同，因此工作人员需要熟练掌握，保证烟草制丝工艺生产达到质量要求。具体而言，烟草松散状态下，且有回潮表现，含水率最低应为17%，最高不超过21%，允许误差为 $\pm 1.5\%$ ；叶片加料状态下，含水率最低应为18%，最高不超过21%，允许误差为 $\pm 1.0\%$ ；烟叶干燥状态下，含水率最低应为12%，最高不超过14%，允许误差为 $\pm 0.5\%$ ；烟叶膨胀后叶丝含水率最低应为5%，最高不超过10%，允许误差为 $\pm 1.0\%$ ；膨胀叶丝加香状态下，含水率最低应为11.5%，最高不超过14%，允许误差为 $\pm 0.5\%$ ；贮梗后烟梗含水率最低应为28%，最高不超过38%，允许误差为 $\pm 1.5\%$ ；梗丝加料状态下，含水率最低应为30%，最高不超过40%，允许误差为 $\pm 1.0\%$ ；梗丝干燥状态下，含水率最低应为12%，最高不超过14.5%，允许误差为 $\pm 0.5\%$ ；梗丝加香状态下，含水率最低应为12%，最高不超过13.5%，允许误差为 $\pm 0.5\%$ <sup>[6]</sup>。

除了工作人员对含水率的控制，烟草制丝工艺生产质量的保障，还需要含水率控制设备的辅助，一般可选择红外水分设备控制水分。这种设备不仅可避免工作人员接触，还能够对生产阶段的水分进行监测，将显示的数据作为参数调节的重要参考。红外水分设备同样需要维修人员每隔一段时间检修，避免设备精度下

降，影响水分均匀与准确性。

## 3. 组分因素控制

不同等级的烟丝成品，组分配比要求各不相同，对于工作人员而言，应当在正式投料之前，对照烟草原料高架库系统，明确烟草批次号、薄片等级和片烟等级等是否符合要求，明确上述信息和叶组配方之间的差异。若烟草物料本身不符合生产要求，重量和预期标准有差异，烟草制丝工艺生产线中控设备可以报警，向投料设备发送指令，避免投料设备持续出料的同时，高架库也可做出反应，替换掉原先错误的薄片和片烟等，并重新开启生产进程。欲进一步控制掺配工序，应当在正式掺配之前，反复核对烟草物料批次、重量和牌号等，明确配方和烟草重量要求是否一致。若信息有误，同样应由中控设备报警，并控制投料设备停机，人员确认之后，再重新开启生产进程<sup>[7]</sup>。

香精和糖料的配比控制同理，工作人员同样应严格对照各类物料的重量，保证物料和配方要求一致，使其和生产批次要求相同。若信息有误，中控设备会报警，向投料设备发出停机指令，人员需将正确的料罐提前准备到位，并快速完成更换。一切无误之后，才能重启生产进程。

## 4. 温度因素控制

由于烟草制丝工艺生产加温一般会以喷射蒸汽为媒介，保证烟丝制备的温度和湿度达到预期标准，因此可以通过温度传感器、热交换器和加热系统在生产线中的设置，使烟叶能够均匀受热，保证温度符合烟草制丝工艺生产标准。此外，工作人员除了需要定期对温度监控设备进行检修，还需要学习和掌握不同工序温度标准，具体而言，片烟松散回潮状态下，热风温度最低标准为45℃，最高不能超过80℃，允许误差为 $\pm 3^\circ\text{C}$ ；片烟松散回潮状态下，出料温度最低标准为45℃，最高不能超过70℃，允许误差为 $\pm 3^\circ\text{C}$ ；叶片加料后，热风温度最低标准为40℃，最高不能超过70℃，允许误差为 $\pm 3^\circ\text{C}$ ；叶片加料后，出料温度最低标准为45℃，最高不能超过80℃，允许误差为 $\pm 3^\circ\text{C}$ ；叶片干燥后，气流出料温度最低标准为55℃，最高不能超过75℃，允许误差为 $\pm 3^\circ\text{C}$ ，滚筒出料温度最低标准为50℃，最高不能超过65℃，允许误差为 $\pm 3^\circ\text{C}$ ；混丝加香状态下，来料温度应低于45℃<sup>[8]</sup>。

## （二）管理措施

### 1. 建立并落实质量控制体系

烟草企业应提高对制度价值的认识，建立并落实质量控制体系，实现烟草制丝工艺生产质量的提升。具体而言，企业应做好如下工作：首先，应做好前瞻性规划，深入分析当前烟草制品市场，保证体系能够应对复杂的市场环境，承受未来变化与挑战。质量控制体系还需要明确烟草制丝生产质量标准，使生产活动能够围绕标准展开，保证产品最终的稳定性。其次，相关部门应当充分明确自身职责，落实岗位要求，形成较大的组织合力，保证自身影响力，争取落实烟草制丝工艺生产质量活动。另外，还需要结合烟草制丝工艺实际生产情况，找出当前质量管理体系不符合生产要求的地方，结合企业实际状况加以改进，并建立完善的反馈与评估机制，提高制度的说服力，彰显制度的指导性。最后，企业应重视质量信息管理体系的建立，为相关事项投入一定

资源，实时监控并分析质量数据，以提高管理工作的现代化水平<sup>[9]</sup>。

质量控制体系实施方面，首先应重视对工作人员的教育培训，树立工作人员较强的质量意识，提高其学习质量控制活动的积极性，使其能够对有关程序与政策等，形成较强的理解力。其次，管理层应落实质量管理体系文件编制工作，例如质量手册、操作说明和程序文件等，涵盖烟草制丝工艺生产各道工序，使质量活动能够符合生产标准。对于烟草制丝工艺质量，除了需要工作人员进行内部审核，管理层还需要对质量控制体系运行状况进行评估，找出潜在问题。针对生产过程的质量控制，需要保证全面性，例如产品检验、参数监控等，保证生产稳定性与一致性。

2. 加强烟草制品检验测试

烟草制丝的产品需要在生产之后做好产品检验测试，测试的内容较多，大致包括以下几点：第一，物理特性。也就是通过看、摸、量等方式，明确烟丝尺寸、重量等是否和产品质量要求相符。第二，化学成分。可采用液相色谱法、气相色谱法等技术，对一氧化碳、焦炭、尼古丁等成分进行检测，使其化学成分

和规定相符。第三，生物化学。对烟丝的影响进行评价，例如检测烟丝是否会极大刺激人体肺部、咽部、口腔等，尼古丁是否会 影响血液健康等。第四，感官评价。评吸员会评价烟丝的烟气、香味等，保证其感官质量达到要求。第五，微生物。烟丝中的微生物，不能伤害人体。第六，添加剂。对烟丝中的添加剂进行检查，内部不能有违禁物质。第七，理化分析。通过设备分析烟丝理化性质，例如灰分、水分和酸碱度等，保证产品质量稳定与一致<sup>[10]</sup>。

三、结束语

综上所述，流量、水分、组分和温度，都会成为影响烟草制丝工艺生产质量的重要因素，为了减少上述因素的负面影响，提高烟丝的生产质量，工作人员除了应掌握生产质量标准，最大程度减少影响因素，还需要着重加强管理，完善质量体系，重视烟草制品检验测试，从而实现烟丝整体质量的提升。

参考文献

[1] 程传玲, 余鑫, 龔元春, 等. 烟丝 / 卷烟纸组合对卷烟焦油量变异的影响 [J]. 陕西科技大学学报, 2023, 41(6): 1-5.

[2] 李超, 李陈巧, 郭国宁, 等. 卷烟动态吸阻及稳定性影响因素分析 [J]. 烟草科技, 2023, 56(11): 87-93.

[3] 郭鸿雁, 田俊岭, 周天宇, 等. 烟叶外观和评吸质量特征与化学成分间的关系研究 [J]. 化工管理, 2023(32): 38-40.

[4] 王瑞珍, 李春光, 孙觅, 等. 含水率和温度对烟丝破碎规律的影响 [J]. 中南农业科技, 2023, 44(6): 118-124.

[5] 汪文良, 范兴, 朱雪峰, 等. 基于帕累托图的卷烟制丝工艺质量分析 [J]. 现代农业科技, 2021(13): 235-239.

[6] 刘欢, 王浩宇, 李春光, 等. 加工工艺参数对烟丝加工过程中破碎规律的影响 [J]. 江西农业学报, 2023, 35(10): 134-140.

[7] 王桂瑶, 王建伟, 周汉平, 等. 清甜香型产区烤烟物理特性及其常规化学成分和感官质量的关系 [J]. 江西农业, 2024(6): 172-174.

[8] 陈泽亮, 梁伟锋, 骆东, 等. 综合测试台测量卷烟物理指标的不确定度分析 [J]. 造纸科学与技术, 2024, 43(7): 19-23.

[9] 李钰靓, 杨帅, 范礼峰, 等. 基于机器视觉的烟支搭口夹杂缺陷在线检测方法 [J]. 烟草科技, 2023, 56(2): 93-98.

[10] 廖仲生, 王昭焜, 邵书音, 等. 基于补偿加水的烘丝入口含水率调控系统的设计 [J]. 烟草科技, 2021, 54(6): 101-106.

# 地铁信号系统中车地通信技术的优化与应用研究

包安伦<sup>1</sup>, 江松<sup>2</sup>, 李梦豪<sup>2</sup>, 刘嘉诚<sup>2</sup>, 王立新<sup>2</sup>

1. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430070

2. 中铁建电气化局集团南方工程有限公司, 湖北 武汉 430074

DOI:10.61369/ERA.2025060036

**摘要 :** 随着城市轨道交通的快速发展, 地铁在城市交通体系中的地位日益重要。车地通信技术作为地铁信号系统的关键组成部分, 对于保障地铁的安全、高效运行起着至关重要的作用。本文从信号技术、安全方面出发, 深入探讨地铁信号系统中车地通信技术的优化与应用, 分析当前车地通信技术的现状及存在的问题, 提出针对性的优化策略, 并对其应用前景进行展望, 旨在为提升地铁信号系统的性能和可靠性提供参考。

**关键词 :** 地铁信号系统; 车地通信技术; 优化

## Research on Optimization and Application of Train-Ground Communication Technology in Subway Signal System

Bao Anlun<sup>1</sup>, Jiang Song<sup>2</sup>, Li Menghao<sup>2</sup>, Liu Jiacheng<sup>2</sup>, Wang Lixin<sup>2</sup>

1.Wuhan Metro Group Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430070

2.China Railway Construction Electrification Bureau Group South Engineering Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430074

**Abstract :** With the rapid development of urban rail transit, the subway is becoming increasingly important in the urban transportation system. As a key component of the subway signal system, train-ground communication technology plays a crucial role in ensuring the safe and efficient operation of the subway. Starting from signal technology and safety aspects, this paper deeply explores the optimization and application of train-ground communication technology in the subway signal system, analyzes the current status and existing problems of train-ground communication technology, proposes targeted optimization strategies, and looks forward to its application prospects, aiming to provide a reference for improving the performance and reliability of the subway signal system.

**Keywords :** subway signal system; train-ground communication technology; optimization

## 引言

铁路信号车地通信系统作为列车安全运行的核心支撑, 承担着列车状态实时监测、调度指令精准传输、行车安全保障等关键职能。伴随全球铁路运输向高速化、高密度化方向演进, 传统车地通信技术逐渐暴露出固有局限性。通过车地通信, 列车与地面控制中心能够实时交换信息, 包括列车的位置、速度、运行状态以及地面的行车指令、线路状况等, 从而实现列车的自动控制、安全防护和高效运营。随着地铁运营规模的不断扩大和运营要求的日益提高, 对车地通信技术的性能和可靠性提出了更高的挑战。因此, 研究地铁信号系统中车地通信技术的优化与应用具有重要的现实意义。

## 一、地铁信号系统中车地通信技术现状

### (一) 常见车地通信技术类型

无线局域网 (WLAN) 技术在地铁车地通信领域具有广泛应用, 其基于 2.4GHz 或 5.8GHz 等开放频段, 采用先进的调制解调技术, 可实现较高的数据传输速率, 能够满足地铁信号系统对列车运行状态、控制指令等大容量数据的传输要求<sup>[1]</sup>。在基于通信的列车控制系统 (CBTC) 中, WLAN 技术是轨旁自动列车保护 (ATP) 设备与车载 ATP 设备之间数据通信的常用方式。通过在

轨道沿线合理部署无线接入点, 并在列车上配置车载无线设备, 可构建稳定的双向通信链路。

在信号技术方面, WLAN 技术部署灵活性强, 可根据地铁线路实际情况进行灵活调整, 能够适应不同线路环境和运营需求。然而, 该技术在实际应用面临诸多挑战。在安全方面, WLAN 工作于开放频段, 易受到乘客携带的电子设备、周边其他无线系统的干扰, 导致通信信号不稳定, 影响数据传输的准确性和及时性。同时, 信号覆盖范围受无线接入点发射功率以及隧道、车厢等遮挡物的限制, 存在覆盖盲区, 可能造成车地通信中断, 进而



影响列车运行安全和信号系统的可靠控制<sup>[2]</sup>。

漏泄同轴电缆作为特殊同轴电缆，外导体设有周期性槽孔。电缆内传输信号时，会经槽孔向周边空间辐射，也能接收外界信号。在地铁车地通信场景中，它沿轨道全程铺设，为列车运行提供全程连续通信覆盖。尤其在隧道这类复杂环境下，凭借信号传输稳定、抗干扰能力强的特性，保障通信顺畅。然而，其安装需精确铺设，对施工工艺要求高，后续维护也需专业设备与技术，成本高昂。而且因自身物理结构与传输原理，数据传输速率难以大幅提升，难以满足大数据量传输需求<sup>[3]</sup>。

## （二）当前车地通信技术存在的问题

地铁运行环境复杂，多种干扰源严重威胁车地通信的信号质量与安全。乘客信息系统（PIS）因与车地无线信号传输系统安装位置临近，且传输数据量大，极易对车地无线信号产生干扰，影响列车控制指令与运行状态信息的稳定传输；同站台换乘场景下，若两条线路信号传输方式相同，本线与另线信号覆盖冲突，会导致信号传输混乱；在开放式无线网络环境中，乘客携带的手机等电子设备，存在致使地铁信号系统重要信息或加密信息泄露的风险，威胁运营安全；地铁高速移动引发的多普勒效应，使列车接收信号频率改变，显著提升系统误码率，降低信息传输的安全性与稳定性<sup>[4]</sup>。

随着地铁智能化发展，车地通信在信号技术上面临严峻挑战。列车自动驾驶、实时视频监控等场景对数据传输速率和实时性要求极高，但现有技术难以满足。以无线局域网技术为例，在高速移动状态下，多径效应与多普勒效应使其信息传输速率大幅降低，无法及时传输大量数据，致使列车运行控制响应延迟，影响系统运行效率与行车安全<sup>[5]</sup>。

此外，车地通信系统兼容性与扩展性问题突出。不同地铁线路或建设时期采用不同厂家设备与技术标准，导致系统间兼容性差。在线路延伸、换乘站建设或系统升级时，设备与技术难以无缝对接，增加建设与运营成本。同时，随着智能运维、大数据分析等新业务涌现，对车地通信系统扩展性提出更高要求。但现有系统设计时未充分考虑未来业务发展，难以适配新业务接入，限制了地铁智能化发展进程，给信号技术的持续优化与安全保障带来新的难题<sup>[6]</sup>。

# 二、地铁信号系统中车地通信技术优化策略

## （一）提升抗干扰能力的优化措施

针对不同的干扰源，采用相应的抗干扰技术和设备。例如，对于信号及乘客信息信号干扰，可以采用频点隔离技术，根据不同频段信号系统特点，合理分配频点，减少干扰；对于同站台换乘频率干扰，可通过分开车地无线信号传输系统中的频点，提升频点使用灵活性，或改变车-地通信方式，如本地使用无线电台方式，相邻线采用感应环线等，同时合理选择定向天线角度，避免站台空间开放和环境复杂产生的干扰；对于电子设备干扰，加强网络安全防护，采用加密技术、访问控制等手段，防止信息泄漏；对于高速移动多普勒效应干扰，应用 OFDM（正交频分复

用）技术，该技术能够有效抵抗信号失真和衰弱，提升信号的抗干扰能力，降低误码率，提高通信系统的准确性。

合理规划无线接入点的位置和覆盖范围，采用冗余设计，确保在部分设备出现故障或受到干扰时，通信仍能正常进行。例如，在采用无线局域网技术时，根据无线电台的覆盖范围，合理计算并布置无线接入点，使相邻的三个 AP 可实现中间无线电台故障时相邻的两个无线电台仍可覆盖该区域，实现无线网络覆盖的双重冗余<sup>[7]</sup>。同时，优化信号传输路径，减少信号反射和遮挡，降低干扰的影响。例如，在隧道等环境中，合理选择漏泄同轴电缆或波导管的安装位置和方式，确保信号传输的稳定性。

## （二）提高数据传输速率和实时性的优化方法

采用先进的通信协议和技术，提高数据传输速率和实时性。例如，引入第五代移动通信技术（5G）或长期演进技术（LTE）等。5G 具有高数据速率、低延迟、广连接等特点，能够满足地铁车地通信对大数据量实时传输的需求。LTE 技术与传统无线局域网相比，具有延迟降低、分组传送、广域覆盖、高数据速率和移动支持能力强等诸多优势。通过升级通信协议和技术，能够有效提升车地通信系统在高速移动环境下的数据传输性能，确保列车运行状态、控制指令等重要信息的及时准确传输。

对车地通信系统的数据处理和传输流程进行优化，减少数据处理和传输过程中的延迟。采用高效的数据压缩算法，对传输的数据进行压缩，减少数据传输量，提高传输效率<sup>[8]</sup>。同时，优化数据缓存和调度机制，确保数据能够按照优先级及时传输。例如，对于列车的紧急制动指令等关键数据，设置高优先级，优先进行传输和处理，保证列车运行的安全。

## （三）增强系统兼容性和扩展性的优化策略

相关部门和行业协会应制定统一的地铁车地通信技术标准 and 规范，明确设备接口、通信协议、数据格式等方面的要求，确保不同厂家的设备和技术能够相互兼容。在新线路建设和系统升级时，严格按照统一标准进行选型和设计，避免出现技术不兼容的问题<sup>[9]</sup>。例如，规定车地通信系统的无线频段使用规则、数据传输接口标准等，促进不同设备和系统之间的互联互通。

车地通信系统采用模块化和开放式的架构设计，便于系统的扩展和升级。将系统划分为多个功能模块，每个模块具有独立的功能和接口，当需要增加新功能或接入新业务时，只需对相应的模块进行升级或扩展，而无需对整个系统进行大规模改造。同时，开放式的架构能够方便地与其他系统进行集成，如与地铁智能运维系统、大数据分析平台等进行对接，实现数据共享和业务协同，为地铁的智能化发展提供支撑。

# 三、地铁信号系统中车地通信技术的应用前景

## （一）保障地铁信号安全，助力智能化运营

在地铁智能化运营场景下，车地通信技术为信号安全提供了坚实支撑。加密技术在车地通信中发挥着关键作用，例如采用先进的加密算法，对列车运行控制指令、位置信息等重要数据进行加密处理，有效防止数据在传输过程中被窃取或篡改，确保列车

运行指令准确无误地传达，避免因指令错误导致的安全事故，为列车的安全运行奠定基础。

同时，车地通信技术实现了对列车信号的实时监测。通过在列车上部署各类传感器，将列车关键部件的运行数据，如速度、制动状态等，借助车地通信实时传输到地面控制中心。一旦监测到信号异常，系统能够迅速发出预警，地面维护人员可及时采取措施进行处理，有效预防故障的发生和扩大，保障列车的安全稳定运行。

在列车自动驾驶方面，车地通信的高精度定位技术和稳定的信号传输，使列车能够精确获取自身位置和运行方向，实现精准控制。通过实时与地面控制中心进行数据交互，列车能够及时调整运行状态，确保运行的安全性和高效性。

### （二）优化信号交互，推动交通系统融合

在地铁与其他交通系统融合的进程中，车地通信技术在信号交互方面发挥着重要作用。与铁路融合时，双方通过统一的信号传输协议和数据交互标准，利用车地通信实现列车运行时刻、轨道占用等信息的实时共享。地铁信号系统能够根据铁路列车的运行情况，提前调整自身列车的运行计划，避免换乘站出现客流拥堵和列车延误，保障乘客的安全换乘<sup>[10]</sup>。

与公交系统融合时，公交站台可接收地铁车地通信传来的实时客流数据，公交调度系统根据这些数据合理调整线路和发车频率。同时，地铁信号系统依据公交车辆的实时位置，优化站内换乘引导信号，为乘客提供更加便捷的换乘指引，提升出行体验。

### （三）整合通信数据，助力智慧城市交通管理

在智慧城市建设中，地铁车地通信收集的大量数据为城市交

通管理提供了有力支持。通过车地通信，将地铁运行数据，如列车运行轨迹、客流分布等传输至城市交通数据中心，与其他交通方式的数据进行整合分析。

在交通流量调控方面，结合地铁客流数据和路面交通流量信息，城市交通管理系统能够精准掌握交通拥堵点和拥堵时段，通过车地通信向地铁和道路交通信号系统发送调控指令，实现两者的协同工作，有效缓解交通拥堵。

在智能停车管理方面，车地通信与城市停车场管理系统相连，乘客可通过手机获取地铁沿线停车场的实时车位信息并提前预订。地铁信号系统将乘客的停车需求传输至停车场管理系统，便于停车场预留车位并提供精准的停车引导，提高城市停车资源的利用率，推动智慧城市交通管理的智能化发展。

## 四、结束语

车地通信技术是地铁信号系统的核心技术之一，其性能和可靠性直接影响地铁的安全、高效运行。当前，地铁信号系统中车地通信技术存在抗干扰能力不足、数据传输速率和实时性有待提高、系统兼容性和扩展性差等问题。通过采取提升抗干扰能力、提高数据传输速率和实时性、增强系统兼容性和扩展性等优化策略，能够有效解决这些问题，提升车地通信技术的性能。优化后的车地通信技术在支持地铁智能化运营、助力地铁与其他交通系统融合、推动智慧城市建设等方面具有广阔的应用前景。未来，随着技术的不断进步和创新，车地通信技术将不断完善和发展，为地铁行业的持续发展提供更有力的支撑。

## 参考文献

- [1] 胥巧丽. 5G 技术在城市轨道交通车地无线通信中的应用 [J]. 中国宽带, 2024, 20(08): 73-75. DOI: 10.20167/j.cnki.ISSN1673-7911.2024.08.25.
- [2] 牛志斌. CBTC 系统车地通信数据丢失故障研究 [J]. 交通世界, 2024, (24): 43-45. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2024.24.012.
- [3] 张扬, 张晋恺, 刘桂宏, 等. 基于自主感知和车车通信技术的全自动运行系统 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(06): 314-317. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.058.
- [4] 朱力, 唐涛, 龚泰源, 等. 面向城市轨道交通列车控制系统的车车通信技术探讨 [J]. 都市快轨交通, 2023, 36(06): 13-21.
- [5] 王崇国, 李云. 5G 通信技术在城市轨道交通信号车地通信中的应用探讨 [J]. 数字通信世界, 2022, (09): 130-132.
- [6] 潘威伟. 城市轨道交通车地无线通信技术的演进历程及未来发展 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(08): 149-152. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.08.033.
- [7] 钟俊波. 面向地铁乘客信息系统的车地无线通信技术研究 [D]. 北京交通大学, 2022. DOI: 10.26944/d.cnki.gbfju.2022.003506.
- [8] 杜雅茹. 无线网络技术在城轨信号系统车地通信中的应用 [J]. 郑州铁路职业技术学院学报, 2021, 33(04): 17-19. DOI: 10.13920/j.cnki.zztlyzjxyxb.2021.04.006.
- [9] 朱俊, 陶小婧, 张郁, 等. 上海城市轨道交通信号系统车地通信演进研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 46-49+55. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.11.011.
- [10] 贾蕾. 基于 LTE 技术的地铁车地无线通信技术研究 [J]. 数字通信世界, 2021, (06): 112-113.

# 工程总承包项目沟通管理：关键环节与优化策略探究

李红强

华电和祥工程咨询有限公司, 山西 太原 030072

DOI:10.61369/ERA.2025060023

**摘要：** 本文聚焦工程总承包项目沟通管理，深入剖析关键环节，针对现存问题提出优化策略。通过完善沟通计划、优化信息传递、强化反馈机制及提升冲突处理能力等举措，旨在提升沟通效率与效果，保障项目目标达成，为项目管理提供理论与实践参考。

**关键词：** 工程总承包项目；沟通管理；关键环节；优化策略

## Communication Management in Engineering General Contracting Projects: Exploring Key Aspects and Optimization Strategies

Li Hongqiang

Huadian Hexiang Engineering Consulting Co., Ltd. Taiyuan, Shanxi 030072

**Abstract：** This paper focuses on communication management in engineering general contracting projects, providing an in-depth analysis of key aspects and proposing optimization strategies for existing issues. By improving communication plans, optimizing information transmission, strengthening feedback mechanisms, and enhancing conflict resolution capabilities, the aim is to improve communication efficiency and effectiveness, ensure the achievement of project objectives, and provide theoretical and practical references for project management.

**Keywords：** engineering general contracting projects; communication management; key aspects; optimization strategies

### 引言

在工程建设领域，工程总承包模式凭借资源整合、工期缩短、成本降低等优势，广泛应用于各类项目。但随着项目规模扩大、技术复杂及参与方多元化，项目沟通管理面临诸多挑战。有效沟通管理是项目运行的关键，能确保信息在各参与方精准、及时、完整流通，促进协同作业，提升执行效率、降低风险、保障质量。反之，沟通不畅将引发误解、冲突，导致项目进度滞后、成本超支，甚至失败。因此，探究工程总承包项目沟通管理关键环节与优化策略，对推动项目成功实施意义重大。

## 一、工程总承包项目沟通管理概述

### （一）沟通管理的内涵

工程总承包项目沟通管理涵盖项目信息的收集、传递、存储、处理及反馈等系列活动，是对总承包项目实施过程中的各种内容的沟通行为进行管理的过程，其目的是保证总承包项目的有关信息能够在适当的时间，以适当的方式保证项目信息及时、正确的提取、收集、传播、存储以及最终进行处置，沟通管理范围广泛，包括项目会议、书面报告等正式沟通，以及日常交流、即时通信等非正式沟通<sup>[1]</sup>。

### （二）沟通管理的重要性

在工程总承包项目中，沟通管理至关重要。其一，有效沟通是明确项目目标和范围的基础。通过与各方充分沟通，确保项目团队、业主等对项目预期目标、交付成果及工作范围有清晰一致

认知，避免因目标模糊或范围不清导致项目偏差。其二，沟通是协调项目各参与方工作的纽带。工程总承包项目涉及多专业领域和主体，各方工作相互关联，只有通过良好沟通，才能及时协调工作，解决衔接问题，保障工作流程顺畅。其三，沟通对项目风险管控举足轻重。及时准确的信息传递，有助于项目团队识别潜在风险并迅速应对，降低风险发生概率和影响程度。此外，有效沟通还能营造和谐积极的项目氛围，增强团队凝聚力，提高团队成员工作积极性和满意度<sup>[2]</sup>。

## 二、工程总承包项目沟通管理的关键环节

### （一）沟通计划制定

沟通计划是项目沟通管理的基础与行动指南。制定时，需全面考量项目各阶段沟通需求。明确沟通对象，涵盖项目内部团队



成员及外部业主、设计单位、分包商、供应商、政府监管部门等。精心规划沟通内容，如项目进度报告、技术方案讨论、变更通知等。根据实际情况灵活选择沟通方式，面对面会议、电话会议、电子邮件、即时通讯工具、项目管理软件平台等各有适用场景<sup>[3]</sup>。例如，项目重要里程碑节点，宜组织项目团队与业主面对面汇报会议，确保信息准确及时传达；日常工作进展沟通，利用项目管理软件平台实时更新查看更便捷高效。同时，明确沟通责任主体，确保沟通任务有效落实。

### （二）信息传递与共享

信息传递与共享是沟通管理的核心。工程总承包项目中，大量技术、进度、成本、质量等信息需在各方快速流转。确保信息传递及时、准确、完整是关键<sup>[4]</sup>。一方面，构建高效信息传递渠道，借助现代化信息技术，如项目管理信息系统、云存储平台等，实现信息瞬间传递与实时共享。设计单位可通过项目管理信息系统及时向施工单位和业主传递设计图纸更新信息，施工单位也能通过该系统反馈施工进度和现场问题。另一方面，规范信息传递流程，明确信息收集、整理、审核、发布等环节要求和责任人，防止信息传递失真、遗漏或延误。

### （三）沟通反馈与协调

沟通反馈与协调是保障沟通效果的关键。信息传递后，及时收集团队成员、业主等各方反馈意见至关重要。通过沟通反馈，了解信息接收方对信息的理解、疑问、不同见解及对项目工作的建议等<sup>[5]</sup>。例如，项目进度汇报会议后，积极收集业主对进度的评价期望及项目团队成员对后续工作安排的反馈。针对反馈意见，迅速组织协调处理。对问题和分歧，召集相关人员讨论，共同寻求解决方案，确保各方在项目工作上达成一致。有效沟通反馈与协调，能持续优化项目沟通管理，提高项目执行效率。

### （四）沟通冲突管理

工程总承包项目中，因各方利益诉求、专业背景、工作习惯等差异，沟通冲突难以避免，沟通冲突管理成为重要部分。首先，敏锐识别沟通冲突迹象，如讨论中言辞激烈、对决策消极抵触等。然后，深入分析冲突根源，可能是信息不对称、目标不一致、利益分配不均等。针对不同冲突原因，采取相应解决策略<sup>[6]</sup>。因信息不对称引发的冲突，可通过重新沟通、补充信息化解；目标不一致导致的冲突，需重新审视项目目标并协调调整；利益分配冲突，则通过协商、谈判寻求平衡各方利益的方案。冲突解决过程中，秉持公平、公正、客观原则，维护各方合作关系，避免冲突升级影响项目。

## 三、工程总承包项目沟通管理现状及问题分析

### （一）沟通计划不完善

部分工程总承包项目沟通计划制定存在不足。对沟通需求分析不全面深入，未充分考虑项目不同阶段、参与方的多样化需求。如项目前期设计阶段，忽视施工单位对设计意图深入理解的沟通需求；项目后期竣工验收阶段，对政府监管部门验收标准和程序的沟通计划不够细致<sup>[7]</sup>。沟通对象确定不准确，关键利益相

关者未纳入有效沟通范围，影响信息全面传递。沟通方式选择不当，未根据沟通内容和对象特点合理匹配。如紧急重要信息采用电子邮件传递，可能导致接收不及时。沟通频率设置不科学，要么过于频繁干扰工作效率，要么间隔过长导致信息滞后，无法指导项目工作。

### （二）信息传递障碍

信息传递环节存在诸多阻碍，极大地制约了沟通效果。工程总承包项目所涉及的信息量极为庞大，涵盖技术、进度、成本、质量等各个方面。团队成员在面对如此海量的信息时，往往陷入信息筛选与处理的困境。重要信息可能在繁杂的信息洪流中被忽视，或者因处理不及时而延误项目进程。信息孤岛现象尤为突出，不同部门以及参与方之间各自为战，所使用的信息系统相互独立，缺乏有效的共享机制。以设计部门和施工部门为例，若两者所使用的软件数据不兼容，在设计图纸传递过程中，就会出现格式错误、数据丢失等问题，严重影响图纸的正常使用与解读，进而阻碍项目的顺利开展。另外，信息传递失真情况时有发生<sup>[8]</sup>。这可能是由于信息在多环节传递过程中，被人为误解，或者原始信息表述不够清晰明确，导致最终接收方获取的信息与原始信息存在偏差。这种偏差一旦影响到项目决策层面，将对项目的走向产生误导，降低决策的准确性。

### （三）沟通反馈不及时

当前，众多项目都饱受沟通反馈不及时困扰。信息接收方常常未能按照规定时间给予反馈，使得信息发送方无法确切知晓信息是否被准确接收以及接收方的理解程度，这给后续决策调整带来极大困难。例如，业主在收到项目进度报告后，若长时间不反馈意见，项目团队将难以判断业主对当前进度的认可程度，从而无法合理规划后续工作计划，导致项目进度安排陷入僵局。部分项目还缺乏完善的反馈渠道与机制，使得反馈信息难以顺畅、准确地传递给相关责任人员<sup>[9]</sup>。即便收集到了反馈意见，也会因处理流程繁琐复杂，责任划分不清晰，导致反馈意见得不到及时有效的处理。如此一来，沟通反馈本应具备的优化项目工作的作用便无法充分发挥。

### （四）沟通冲突处理不当

当沟通冲突出现时，部分项目团队的应对方式存在严重缺陷。对冲突没有给予足够重视，往往采取拖延或回避的消极态度，使得冲突在日积月累中逐渐升级，最终对项目造成严重破坏。在冲突处理过程中，缺乏有效的沟通技巧与协商机制，很容易使冲突双方情绪愈发激动，难以理性地达成共识。以工程变更问题的讨论为例，施工单位和设计单位常常因立场不同、考虑角度各异而各执一词。若此时缺乏有效的协商沟通平台与机制，双方难以在变更方案上达成一致，就会导致变更决策的延误，进而影响项目整体进度。此外，部分项目在冲突处理过程中，没有统一的标准与原则作为指导，最终的处理结果往往倾向于强势一方的意见，无法做到公平公正地解决冲突。这不仅严重损害了项目参与方之间的合作关系，还极大地打击了弱势一方的工作积极性。



## 四、工程总承包项目沟通管理的优化策略

### （一）完善沟通计划

项目启动阶段，组建专业项目管理团队，通过问卷调查、访谈等方式，全面深入调研分析项目各阶段沟通需求。广泛征求项目团队、业主、设计单位、分包商等各方意见，精准把握对项目信息的需求内容、格式及频率等。依据需求分析结果，结合项目组织结构和 workflows，准确确定沟通对象，涵盖所有关键利益相关者。针对不同沟通对象和内容，精心选择合适沟通方式。重要复杂信息优先采用面对面会议沟通，保障信息准确传递和及时反馈；日常工作信息和通知借助即时通讯工具或项目管理软件平台便捷传递。根据项目进度计划和关键节点，科学设定沟通频率，保证信息及时传递，避免过度沟通影响工作效率。明确各项沟通任务责任主体，将沟通计划细化到具体责任人、时间节点和工作要求，确保有效执行。

### （二）优化信息传递渠道

搭建统一项目信息管理平台，整合项目各参与方信息系统，打破信息孤岛。运用云计算、大数据等技术，实现项目信息集中存储、共享和实时更新。如构建基于云平台的项目管理信息系统，设计单位、施工单位、业主等可在平台实时上传下载项目图纸、进度报告、质量检验报告等文件数据，确保信息一致及时。优化信息传递流程，简化不必要环节，明确信息收集、整理、审核、发布等环节操作规范和责任人<sup>[10]</sup>。建立信息筛选分类机制，对海量项目信息有效筛选分类，突出关键信息，减轻信息过载对团队成员的困扰。加强信息传递过程监控管理，及时发现解决问题，确保信息准确完整。

### （三）强化沟通反馈机制

制定严格沟通反馈制度，明确信息接收方反馈时间。如规定业主收到项目进度报告后3个工作日内，通过指定渠道反馈意见。设立多样化反馈渠道，在线反馈表单简洁明了，设常见问题选项与自由填写区；专门反馈邮箱配备专人管理，确保邮件及时处理；即时通信群组方便各方随时交流反馈。针对反馈意见，建立专门处理流程与跟踪机制。收到反馈后，项目管理部门分类整理，依据问题类型分配至相应责任部门或责任人。责任部门需在

规定时间内制定解决方案，并向项目管理部门及反馈方反馈处理进度。项目管理部门定期总结分析沟通反馈情况，通过数据统计、满意度调查评估机制运行效果。若发现反馈渠道不畅、处理效率低等问题，立即调整优化，实现信息双向高效流动，提升项目执行精准度与效率。

### （四）提升沟通冲突处理能力

定期组织项目团队成员参加专业的沟通技巧和冲突管理培训，邀请行业资深专家授课。培训内容包括清晰表达技巧，使用简洁明了语言、合理逻辑顺序传递信息；有效倾听技巧，专注倾听、不中断对方以理解意图；谈判技巧，寻找利益平衡点、运用让步策略解决分歧；情绪管理，在冲突中保持理性；团队协作训练，增强团队凝聚力。建立公平公正的沟通冲突解决机制，冲突发生时，先迅速了解双方观点诉求、剖析原因，可能涉及利益分配、信息不对称等。随后组织双方从项目整体目标出发协商，寻找共同利益点制定解决方案。若双方僵持不下，及时引入行业协会专家、资深项目顾问等有公信力的第三方调解。同时，注重对冲突案例复盘，反思项目沟通管理问题，避免类似冲突再次发生。

## 五、结束语

工程总承包项目沟通管理是项目成功的关键要素，对项目顺利实施至关重要。通过剖析沟通管理关键环节，包括沟通计划制定、信息传递与共享、沟通反馈与协调、沟通冲突管理等，明确当前项目沟通管理存在的沟通计划不完善、信息传递障碍、沟通反馈不及时、沟通冲突处理不当等问题。针对这些问题，提出完善沟通计划、优化信息传递渠道、强化沟通反馈机制、提升沟通冲突处理能力等针对性和可操作性的优化策略。实际工程总承包项目中，项目管理者应重视沟通管理工作，结合项目特点和实际情况，灵活运用优化策略，不断完善项目沟通管理体系，提高沟通效率和效果，保障项目目标实现，提升项目整体效益和竞争力。未来，随着工程建设行业发展和项目管理技术进步，工程总承包项目沟通管理将面临新挑战与机遇，需进一步深入研究探索，以适应行业发展需求。

## 参考文献

- [1] 王浩. 浅析工程总承包项目的沟通管理工作 [J]. 湖北水力发电, 2008, (03): 69-71.
- [2] 王书泽. DZ 公司工程总承包项目沟通管理研究 [D]. 大连理工大学, 2022.DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2022.000867.
- [3] 陈倩倩. EPC 总承包工程项目沟通管理研究 [D]. 广西大学, 2017.
- [4] 袁铁夫, 韩菲. 垃圾二次转运站工程总承包项目沟通管理实践探讨 [J]. 天津科技, 2018, 45(08): 38-39+43.DOI: 10.14099/j.cnki.tjkj.2018.08.011.
- [5] 牛斌, 周小波. 论水电工程总承包项目的设计管理 [J]. 四川水力发电, 2012, 31(S1): 17-19.
- [6] 徐选华, 陈晓红. 基于 P3&EXP&VS 平台的重庆西滩水电站枢纽工程总承包项目管理信息系统 [J]. 项目管理技术, 2009, 7(08): 72-76.
- [7] 谭京. ZQ 公司工程总承包项目执行力研究 [D]. 中南大学, 2007.
- [8] 许永超. 浅谈石化工程设计项目中的沟通管理 [J]. 石油化工设计, 2024, 41(04): 61-64+81.
- [9] 郭艳强. 跨国研发项目沟通管理研究 [D]. 北京邮电大学, 2023.DOI: 10.26969/d.cnki.gbydu.2023.001479.
- [10] 李丹. 电力行业基建管理平台项目沟通管理研究 [D]. 电子科技大学, 2022.DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2022.005090.

# 基于多传感器融合技术的输油管道泄漏定位方法研究

李运成, 岳晟, 李自然

湖南安广检验检测有限公司, 湖南 常德 415137

DOI:10.61369/ERA.2025060028

**摘 要 :** 本文对基于多传感器融合技术的输油管道泄漏定位方法进行了论述, 通过优化传感器布局、构建融合算法及实时动态跟踪等手段, 提出基于压力流量、声波信号、温度变化传感协同的定位方法, 进一步提升泄漏定位精度与可靠性的效果, 解决输油管道泄漏难以及时精准定位的问题, 为保障管道安全运行提供有力支撑。

**关 键 词 :** 多传感器; 融合; 输油管道; 泄漏定位

## Research on Leak Location Method of Oil Pipeline Based on Multi-sensor Fusion Technology

Li Yuncheng, Yue Sheng, Li Ziran

Hunan Anguang Inspection and Testing Co., Ltd. Changde, Hunan 415137

**Abstract :** This paper discusses the leak location method of oil pipelines based on multi-sensor fusion technology. By optimizing sensor layout, constructing fusion algorithms, and real-time dynamic tracking, a positioning method based on pressure and flow, acoustic signals, and temperature change sensing collaboration is proposed. This method further improves the accuracy and reliability of leak location, solves the problem of difficult and timely precise positioning of oil pipeline leaks, and provides strong support for ensuring the safe operation of pipelines.

**Keywords :** multi-sensor; fusion; oil pipeline; leak location

输油管道作为能源输送关键纽带, 其安全运行关乎国计民生。然而, 管道泄漏事故频发, 不仅造成经济损失, 还威胁生态环境。传统单一传感器定位方法存在诸多不足, 难以满足精准、及时定位需求。多传感器融合技术凭借独特优势, 为输油管道泄漏定位带来新契机。本文聚焦此技术, 深入探究其在输油管道泄漏定位中的应用, 力求突破现有定位困境, 提升管道安全监测水平。

### 一、多传感器融合技术的特点

#### (一) 数据多元丰富精准感知

多传感器融合技术凭借其数据多元丰富的特性, 能够提升泄漏定位的精准度。输油管道运行涉及压力、流量、温度、声波等多种物理量变化, 通过部署压力传感器, 可实时监测管道内压力波动, 一旦发生泄漏, 压力会出现异常下降; 流量传感器则能捕捉流量变化, 泄漏处会导致流量失衡。温度传感器可感知因泄漏引发的局部温度差异, 声波传感器能探测到泄漏瞬间产生的声波信号。这些不同类型传感器采集的数据从多个维度反映管道状况。将这些多源数据融合, 利用数据融合算法进行分析处理, 能有效去除噪声干扰, 挖掘数据间潜在关联, 精准定位泄漏点。虽然单纯依据压力数据可能误判泄漏位置, 但若结合流量、温度等数据综合分析, 便能更准确锁定泄漏位置, 为及时抢修提供有力依据。

#### (二) 提升系统可靠稳定性能

输油管道分布广泛, 运行环境复杂多变, 恶劣天气、电磁干

扰等因素随时可能影响传感器正常工作。多传感器融合技术通过多源数据相互校验, 提升系统在输油管道泄漏定位中的可靠稳定性能。当某一压力传感器因受到电磁干扰出现数据异常波动时, 流量传感器、声波传感器等其他类型传感器的数据仍保持正常。融合系统可依据这些正常数据, 运用特定算法对异常压力数据进行修正或排除, 确保对管道状态判断的准确性<sup>[1]</sup>。不同类型传感器对环境干扰的敏感程度各异, 部分传感器在高温环境下性能稳定, 另一些在强电磁环境中表现良好。将多种传感器融合, 即便部分传感器受环境影响出现故障, 其他传感器仍能正常工作并提供有效数据, 维持系统基本功能, 保证泄漏定位工作持续进行。

#### (三) 智能互补拓展监测范围

不同类型传感器具有不同监测特性, 声波传感器对近距离泄漏产生的高频声波敏感, 能精准定位近处泄漏点; 分布式光纤传感器可沿管道长距离铺设, 通过监测光纤中光信号变化, 实现对长距离管道的整体监测, 虽定位精度相对较低, 但能快速发现大范围潜在泄漏区域<sup>[2]</sup>。将两者融合, 当声波传感器检测到疑似泄漏信号后, 分布式光纤传感器可进一步确定泄漏大致位置, 缩小排

查范围，实现优势互补。压力传感器、流量传感器等也能与其他传感器协同工作，从不同角度监测管道状态。这种智能互补的监测方式拓展了输油管道监测范围，使管道沿线任何位置发生泄漏都能被及时察觉并精确定位，全面提升输油管道泄漏监测与定位能力。

## 二、基于多传感器融合技术的输油管道泄漏定位方法

### （一）压力流量数据融合定位

在输油管道沿线，按照一定间隔合理布置压力传感器和流量传感器，确保能全面覆盖管道。压力传感器实时采集管道内各监测点的压力值，流量传感器则同步获取对应位置的流量数据。当管道发生泄漏时，泄漏点上游压力会升高，下游压力降低，而流量在泄漏点处会出现异常波动，上游流量增加，下游流量减少。通过建立压力与流量的数学模型，结合流体力学原理，对采集到的压力和流量数据进行深度分析。运用基于质量守恒和能量守恒定律的管道流动方程，将压力和流量数据代入方程中进行求解；根据压力变化趋势初步判断泄漏点所在的大致区间，再利用流量数据进一步精确泄漏位置<sup>[3]</sup>。在实际操作中，由于压力和流量数据可能受到管道摩擦、油泵运行状态等多种因素干扰，可采用卡尔曼滤波算法对原始数据进行预处理，去除噪声干扰，提高数据的准确性和稳定性；将经过滤波处理的压力和流量数据输入到融合定位算法中，该算法综合考虑压力和流量的变化关系，通过不断迭代计算，最终确定泄漏点的准确位置。

### （二）声波信号联合分析定位

当输油管道发生泄漏时，油品泄漏瞬间会产生强烈的声波信号，该信号会沿着管道壁和周围介质传播。在管道沿线安装多个声波传感器，形成声波监测网络。这些声波传感器能够捕捉到不同位置、不同强度的声波信号。在具体操作过程中，需对声波传感器采集到的原始信号进行预处理，采用小波变换等信号处理技术，去除信号中的噪声和干扰成分，突出泄漏产生的有效声波特征。根据声波传播的特性，利用时差定位原理进行泄漏点定位。由于泄漏产生的声波信号会在不同时间到达各个声波传感器，通过精确测量声波信号到达不同传感器的时间差，并结合声波在管道介质中的传播速度，运用双曲线定位算法，就可以计算出泄漏点的位置。假设有三个声波传感器 A、B、C，当泄漏发生时，声波信号先到达传感器 A，然后依次到达 B 和 C，通过测量声波到达 A 与 B、A 与 C 的时间差，以及已知的声波传播速度，在以 A、B、C 为焦点的双曲线簇上确定泄漏点所在的位置<sup>[4]</sup>。为了提高定位精度，还可以引入更多的声波传感器，增加定位方程的约束条件，减少定位误差。考虑到实际环境中可能存在管道内油品流动的噪声、外界环境噪声等多种声波干扰源，还需采用模式识别技术对声波信号进行分类和识别，排除干扰信号，准确识别出由泄漏产生的声波信号，提高声波信号联合分析定位的准确性和可靠性，实现对输油管道泄漏点的快速、精准定位。

### （三）温度变化传感协同定位

在输油管道周围的土壤或管道壁上安装分布式光纤温度传感

器和接触式温度传感器，分布式光纤温度传感器可沿管道长距离连续测量温度分布，能快速发现管道沿线温度异常区域；接触式温度传感器则对重点监测部位进行定点精确测温，两者相互配合，实现对温度变化的全面感知。当管道发生泄漏时，泄漏的油品与周围环境发生热交换，导致泄漏点附近温度场发生变化。对于埋地输油管道，泄漏油品会使周围土壤温度升高，分布式光纤温度传感器能够捕捉到这种温度升高的趋势，并将温度变化信息以光信号的形式传输至解调仪，解调仪将光信号转换为温度数据。通过对分布式光纤温度传感器采集的温度数据进行分析，运用温度场反演算法，初步确定泄漏点所在的大致范围。利用接触式温度传感器对初步确定的泄漏区域进行精确测温，获取更准确的温度变化数据。结合传热学原理，建立泄漏点温度场模型，将接触式温度传感器测量的数据代入模型中进行求解，精准锁定泄漏点的位置。在实际操作中，考虑到环境温度的自然波动、太阳辐射等因素对温度测量的影响，采用自适应滤波算法对温度数据进行处理，消除环境因素干扰，突出泄漏引起的温度变化特征<sup>[5]</sup>。通过对历史温度数据的学习和分析，建立温度变化趋势预测模型，提前预警可能发生的泄漏风险，实现对输油管道泄漏的实时监测与精准定位，保障输油管道的安全运行。

## 三、基于多传感器融合技术的输油管道泄漏定位策略

### （一）优化传感器布局

在输油管道复杂的运行环境中，合理的传感器布局能够最大程度发挥多传感器融合的优势。需全面分析输油管道的地理信息、运行工况以及历史泄漏数据，对于断层、软土地基等管道穿越地质条件复杂区域，由于管道受地质因素影响易发生变形进而引发泄漏，应加密布置传感器，确保对可能出现的泄漏情况能及时察觉<sup>[6]</sup>。在泵站进出口、阀门连接处等管道的关键节点，因压力变化大、机械应力集中，是泄漏高发区域，需重点部署各类传感器，包括压力、流量、声波以及温度传感器等，实现对这些部位的全方位监测。考虑到传感器的监测范围与精度，根据不同传感器的特性确定其安装间距。分布式光纤温度传感器监测范围广但定位精度相对较低，可沿管道长距离均匀铺设，用于初步筛查大面积温度异常区域；接触式温度传感器精度高，在重点怀疑区域或已通过分布式光纤传感器锁定的大致泄漏区间内，按照合适间距精准安装，获取更精确的温度数据<sup>[7]</sup>。对于声波传感器，依据声波在管道介质中的传播特性以及衰减规律，计算出合理的安装间隔，确保能有效捕捉到泄漏产生的声波信号且信号不会因传播距离过长而失真。还需考虑传感器的安装方式，保证其与管道紧密连接，避免因松动影响数据采集的准确性。通过综合考量这些因素，构建起科学、高效的传感器布局网络，为后续基于多传感器融合技术的泄漏定位工作提供可靠的数据来源，提升泄漏定位的及时性与准确性。

### （二）构建融合算法运算

输油管道上各类传感器采集到的数据具有不同特征与量纲，需借助有效的融合算法对其进行整合分析。在构建融合算法时，



要根据传感器类型与数据特点，选择合适的融合模型。对于压力、流量这类连续变化且物理意义明确的数据，可采用基于物理模型的融合算法，结合流体力学原理的管道流动方程，将压力和流量数据代入方程进行求解，充分利用两者在泄漏发生时的内在关联，提高定位精度。对于声波信号和温度数据，因其受环境干扰较大且信号特征复杂，可运用基于机器学习的融合算法<sup>[8]</sup>。以声波信号为例，采用神经网络算法，先对大量包含泄漏与非泄漏情况下的声波信号进行训练，让神经网络学习到泄漏声波信号的独特特征。当有新的声波信号输入时，神经网络能够准确判断是否为泄漏信号，并结合其他传感器数据进一步确定泄漏位置。在实际运算过程中，考虑到不同传感器数据的可信度与重要性不同，引入数据加权机制。在泄漏初期，压力传感器数据可能对判断泄漏位置更具指示性，赋予其较高权重；随着泄漏发展，流量数据的变化趋势对精确定位更为关键，适时调整权重，突出流量数据作用<sup>[9]</sup>。为提高算法运算效率与实时性，采用并行计算技术，将不同传感器数据的处理任务分配到多个计算单元同时进行，缩短数据处理时间，实现对输油管道泄漏的快速响应与精准定位。通过不断优化融合算法运算，充分挖掘多传感器数据的潜在价值，提升基于多传感器融合技术的输油管道泄漏定位系统的智能化水平与定位效能。

（三）实时动态跟踪定位

输油管道运行状态处于动态变化中，泄漏情况也可能随时间推移而发展，需进行实时动态跟踪定位。在实际操作中，利用实时通信技术，将各类传感器采集的数据以最短延迟传输至数据处理中心。数据处理中心运用构建好的融合算法对实时数据进行持续分析，一旦发现异常，立即启动实时动态跟踪流程。当通过压

力流量数据融合定位初步确定泄漏点位置后，持续监测该区域周边传感器数据变化<sup>[10]</sup>。若声波传感器检测到该区域声波信号强度持续增强，结合温度传感器显示温度异常升高，印证泄漏情况，并依据新采集的数据不断更新泄漏位置信息。为实现更精准的动态跟踪，建立泄漏传播模型。根据流体力学、传热学以及声学原理，模拟泄漏油品的扩散路径、温度场变化以及声波传播范围随时间的演变。将实时采集的传感器数据代入模型中，对模型参数进行实时修正，使模型更贴合实际泄漏情况。借助地理信息系统（GIS），将输油管道地理位置信息与泄漏定位数据相结合，以直观可视化方式呈现泄漏位置及其动态变化过程，为工作人员提供清晰的决策依据<sup>[11]</sup>。实时动态跟踪定位还需具备预警功能，当预测到泄漏可能扩大至周边居民区、水源地等敏感区域，及时发出预警信息，以便提前采取防控措施，降低泄漏造成的危害。通过实时动态跟踪定位，在输油管道泄漏发生的全过程中，持续、精准地掌握泄漏位置与发展态势，为高效抢修与应急处置提供有力支持，保障输油管道安全运行与周边环境安全。

四、结束语

根据以上分析可知：合理布局传感器，能全面获取管道数据；构建有效融合算法，深度挖掘数据价值；实施实时动态跟踪，精准掌握泄漏动态。基于此技术的压力流量、声波信号、温度变化传感协同定位方法，大幅提高了定位精度与可靠性，实现对泄漏点的快速、准确锁定，为输油管道抢修及安全保障提供了可靠技术方案。

参考文献

[1] 陈伟. 基于 ICEEMDAN 和加权融合算法的多传感器输油管道泄漏定位方法研究 [J]. 油气田地面工程, 2025, 44(2): 49-54, 64.

[2] 白柯祯, 刘艳红, 翟延忠, 等. 成品油管道运输混油界面多传感器融合检测 [J]. 华北科技学院学报, 2024, 21(5): 57-64.

[3] 丛军, 王薇, 牟建荣. 管道附件影响的管道声发射信号衰减特性 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(4): 445-452.

[4] 王斌, 郭岩宝, 于海文, 等. 基于超声法清洗的管道蛇形机器人研究 [J]. 机床与液压, 2022, 50(11): 35-40.

[5] 张继峰. 石油储运管道的智能监测与维护技术研究 [J]. 石油石化物资采购, 2023(23): 67-69.

[6] 蔡昌新, 易康, 廖锐全. 长输油管道泄漏检测与定位技术研究进展 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(24): 10177-10189.

[7] 李明, 李慧娜, 郭辉, 等. 管道泄漏检测及定位算法的改进和应用 [J]. 焊管, 2023, 46(3): 31-34, 40.

[8] 刘珊珊. 基于负压波法输油管道泄漏监控软件的开发 [J]. 北京石油化工学院学报, 2023, 31(4): 40-44.

[9] 田海峰, 张藤, 陈默, 等. 一种基于气压感知的地下输油管道泄漏监测系统 [J]. 曲阜师范大学学报 (自然科学版), 2023, 49(2): 77-80.

[10] 施晓东. 基于次声波的海底输油管道泄漏监测系统实施 [J]. 科技资讯, 2022, 20(11): 1-3.

[11] 沈志军, 冯弋秦, 韩艳敏. 长距离石油输油管道泄漏原因分析与泄漏事故应急抢险技术 [J]. 现代职业安全, 2024(10): 37-39.



# 精细化管理在民用建筑施工管理中的应用分析

董金凤

湖北道华建设有限公司, 湖北 黄冈 438000

DOI:10.61369/ERA.2025060008

**摘要：**当前建筑行业正经历从规模扩张向质量效益转型关键阶段，民用建筑施工管理涉及协同多环节主体，管理复杂度高，传统粗放式管理模式已难以满足现代工程质量安全与效率需求，细化施工管理成为提升核心竞争力必然选择。精细化管理理论应用于建筑领域，能够重构传统施工组织运行逻辑。该方法以流程优化为基础，以数据驱动为手段，实现施工全过程可控化。本文分析了精细化施工管理的特点，探究了精细化管理在民用建筑施工管理中的实践应用。

**关键词：**精细化管理；民用建筑；施工管理；实践应用

## Analysis of the Application of Fine Management in Civil Construction Management

Dong Jinfeng

Hubei Daohua Construction Co., Ltd. Huanggang, Hubei 438000

**Abstract：** The current construction industry is undergoing a critical stage of transformation from scale expansion to quality and efficiency. Civil construction management involves collaborative multi link entities, with high management complexity. The traditional extensive management model is no longer able to meet the requirements of modern engineering quality, safety, and efficiency. Refining construction management has become an inevitable choice to enhance core competitiveness. The application of refined management theory in the field of architecture can reconstruct the traditional construction organization and operational logic. This method is based on process optimization and uses data-driven methods to achieve controllability of the entire construction process. This article analyzes the characteristics of refined construction management and explores the practical application of refined management in civil construction management.

**Keywords：** refined management; civil buildings; construction management; practical application

## 引言

建筑工程项目的施工管理具有显著复杂性，项目实施过程要统筹协调多种专业技术、管理大量施工设备、组织众多作业人员，同时还需应对各类潜在风险因素。项目工期要求严格并投入巨额资金，须建立全面覆盖、全程可控管控施工管理体系。采取精细化管理模式能够有效解决施工过程中信息不对称、责任不明确痛点，为建筑企业实现降本增效提供新思路。在推进新型城镇化建设背景下，探索精细化管理在施工实践的应用具有重要现实意义。

## 一、精细化施工管理的特点

### （一）数据驱动决策精准，流程细化效率可控

精细化施工管理在于将数据与流程紧密结合，形成一套高度可控运作体系。数据作用体现在收集环节，深度挖掘信息并实时反馈。施工过程中各类指标，均被转化为可量化数据单元，基于动态监测分析，为每个环节决策提供客观依据。数据驱动模式可以消除经验判断的模糊性，使人员调配、进度调整操作具备明确指向性。流程细化体现在对传统施工环节的拆解与重组，将原本

笼统任务分解为多个相互衔接子步骤，每个步骤都有对应时间节点。拆分应基于优化实际操作逻辑，确保各环节之间衔接紧密。每个流程节点都设有数据采集点，形成闭环反馈，出现偏差可立即定位问题源头并介入调整。数据与流程协同作用构建双重保障机制，数据为流程提供实时校准参数，流程为数据搭建结构化载体。这种模式下施工方不再依赖单一环节推进施工进度，而是基于多线程并行调控提升整体效率。管理者能够从宏观层面掌握各环节动态平衡状态，微观层面精确到每个岗位当日作业完成质量。精细化管理将效率概念转化为具体数据指标，使施工过程呈

现出高度透明性。

## （二）需求适配资源弹性，环保施工降耗提质

精细化施工管理在资源配置方面展现出高度的适应性，能够根据项目实际需求动态调整人力、物料设备投入规模。弹性机制可避免出现资源闲置或短缺极端情况，使各类要素始终处于高效运转状态。施工方在施工前期阶段，依据工程规模、工期要求关键参数建立资源分配模型，预设多套调配方案。随着工程推进，现场数据采集系统实时监测材料消耗速率、工序衔接效率指标，触发资源配比动态优化。当作业面进度滞后时，系统会自动调拨备用班组增援，发现特定建材库存逼近警戒线，则启动应急采购流程。精细化施工管理下的响应式调配模式能够有效防止盲目储备造成的资金沉淀，消除供应断链导致的工期延误。环保施工要求进一步强化资源弹性价值，管理系统将能耗控制与废弃物生成量纳入资源调度算法。同时在降耗提质目标驱动下，评估每吨钢材、每立方米混凝土的使用效益，并在施工日志详细记录材料实际效能与设计预期偏差值。基于真实数据的反馈机制为后续工程中持续改进资源调度方案提供基础，形成粗放铺张向精准匹配转化。资源弹性配置深层价值在于建立施工要素流动平衡，使人员、机械、材料三者始终维持最佳配比关系，系统依靠自调节快速恢复环节波动。

## 二、精细化管理在民用建筑施工管理中的实践应用

### （一）优化工序衔接，缩短工期提升效率

在民用建筑施工过程，精细化管理强调拆解重组施工流程，合理规划各工序先后逻辑关系，减少不必要等待时间。基于关键路径法分析各节点依赖关系，识别制约工期关键环节，优先调配资源保障关键线路施工。同时动态调整非关键线路施工节奏，确保均衡推进整体进度。系统化工序管理能够有效压缩施工周期，提升人机料使用效率，实现精准控制工期目标。

施工方需在施工前编制详细工序流程图，明确各分项工程开始结束时间，标注工序间逻辑关系，采用 BIM 技术模拟施工，提前发现可能存在的工序冲突，优化作业面移交顺序。每日召开进度协调会，汇总各班组完成情况，根据实际进展调整次日作业计划。针对存在先后约束的工序，建立严格交接验收制度，确保前道工序质量达标后再开展后续作业。同时设置现场调度指挥中心，实时监控各作业面施工动态，及时协调解决工序衔接问题。环节出现延误时，立即评估对后续工序影响程度，采取增加人力或调整工艺措施补救。对于可并行施工工序，可以确保安全质量前提下，安排同步作业，主体施工与安装工程部分穿插施工。材料与设备进场时间需与工序安排严格匹配，避免过早堆放占用场地或延迟到场耽误施工。采用准时制配送模式配送预制构件，根据安装进度分批次运输至现场。施工方使用大型机械时，应编制详细设备使用计划，提高塔吊、升降机共享资源利用率。同步建立工序完成质量确认机制，每道工序结束后由质检人员验收签字，杜绝因质量问题返工。进度管理方面，施工方可采用看板可视化方式，对比展示计划进度与实际进度，便于管理人员及时发

现偏差。并为关键线路工序设置进度预警阈值，延误风险达到临界值时启动应急预案。定期分析工序衔接数据，总结优化经验，持续改进施工组织方式，实现工序无缝衔接，可以限度提升施工效率。

### （二）细化责任分工，确保质量全程可控

精细化管理核心在于将责任分解到具体岗位，使每个环节都有明确责任主体。细化责任分工建立清晰责任矩阵，将施工流程拆解为可管理单元，确保每个步骤都有专人负责。同时将责任划分与考核相结合，促使作业人员主动落实质量管控，提升施工规范性，增强作业人员质量意识，减少因职责不清导致质量波动。

在施工准备阶段，施工方需制定详细质量责任清单，明确工人具体职责。项目经理统筹整体质量管理，技术负责人负责施工方案交底，施工员监督现场执行情况，班组长确保工人按规范操作。责任划分要细化到具体工序，钢筋绑扎、混凝土浇筑关键环节均需指定直接责任人。施工过程采用实名制管理，存档每个作业面施工人员信息、操作时间及质量检查记录。质量检查过程中实行“谁施工谁负责，谁验收谁签字”原则，确保问题可追溯至具体个人。每日施工前进行简短质量交底，强调当日作业关键控制点，避免因理解偏差导致操作失误。为强化管理成效，施工方应建立分层级质量检查制度，班组自检、施工员复检、质检员专检形成三级管控。自检记录由班组长签字确认，施工员抽查关键节点复检，专检重要分部分项工程。检查结果需实时录入管理系统，形成质量数据链，便于后续分析改进。施工方还可以在施工阶段引入数字化管理工具辅助责任落实，使用移动端 APP 记录检查情况，自动关联责任人并生成整改通知。实行闭环管理整改质量缺陷，发现问题后立即下发整改单，明确整改期限，未按时完成则触发预警机制。除此之外，定期召开质量分析会，汇总阶段性质量问题，分析责任归属并制定改进措施。对重复出现的质量缺陷，重新评估责任分工合理性，必要时调整管理架构或作业流程。责任考核直接挂钩绩效，对质量管控表现优秀个人或班组给予奖励，对屡次出现问题责任人采取调整岗位措施。在竣工验收过程，责任档案作为重要资料归档，后期发现质量缺陷，可依据档案精准定位责任主体，确保问题得到及时有效处理。

### （三）精准材料管理，减少浪费降低成本

精准材料管理是精细化管理的重要实践方向，建立科学系统材料管控体系，实现采购到使用全过程跟踪。精准材料管理强调数据驱动决策，使用量化分析确定合理材料供给计划，减少冗余库存。管理过程动态监控材料消耗情况，可以确保管理人员及时发现异常并调整策略，实现资源利用最大化。实行精准化材料管理能降低直接成本，减少因材料问题引发的二次施工，提升整体施工效率。

材料采购阶段需结合施工进度计划，编制详细材料需求表，明确各类材料的规格数量及进场时间。采购前要，施工方要进行详尽地市场调研，对比供应商资质货品价格，优先选择质量稳定、供货及时合作伙伴。合同条款中需具有明确的材料验收标准，规定不合格材料处理方式，避免后续纠纷。材料进场时，安排专人负责验收，核对质量证明文件，抽样检测，确保符合设计

要求，并针对易损或特殊材料，制定专门运输存储方案，避免因保管不当导致性能下降。为避免材料混杂损坏，施工方可以制定分类管理计划，设置专门库房或堆放区域。同时建立库存台账，实时记录材料出入库及结余情况，定期盘点核对数据。对于水泥、钢筋大宗材料，采取防潮防锈措施，延长可用期限。领料环节实行审批制度，施工班组要提前提交用料计划，经审核后按需发放，避免随意领取造成浪费。及时回收并登记剩余材料，鼓励跨班组调剂使用，减少重复采购。同时施工过程中，施工方还需加强材料使用监督，确保作业人员严格按照工艺要求操作，拆除模板时避免暴力拆卸损坏周转材料，控制振捣时间减少混凝土浇筑材料离析。管理人员可定期巡查现场，检查材料使用情况，及时纠正浪费或违规操作。面对装饰面材高精度材料，优化排版方案，提高切割利用率，建立材料消耗分析机制，对比预算与实际用量，查找偏差原因并优化后续管理策略。成本核算方面，将材料使用效率纳入考核指标，与相关人员绩效挂钩。项目结束后，汇总材料管理数据，分析节约或超支原因，形成经验总结，持续优化各环节管控措施，逐步建立高效低耗的材料管理体系。

**（四）强化安全检查，杜绝隐患保障施工**

安全检查关系到作业人员生命安全，应强调预防为主，将系统化检查机制贯穿施工全过程。该方法基于风险预控理念，要求施工方科学识别各类危险源，制定针对性防控措施。列举标准化检查清单避免遗漏关键风险点，以动态化监督保证及时发现问题。安全责任落实到具体岗位，可以形成全员参与管理体系，同时依靠数据化记录为分析安全趋势提供依据，及时发现潜在规律并优化管理策略。

施工方可建立分层次安全检查制度，每日开展班组级巡查，重点检查个人防护装备佩戴情况、高空作业安全措施。每周组织项目级综合检查，确保覆盖脚手架稳定性、消防设施完好率关键

项目。检查过程应采用标准化表格，明确各项指标合格标准，避免主观判断带来偏差。发现隐患后立即张贴整改通知单，注明问题描述、整改要求，安排专人跟踪验证。若高频出现同类问题，施工方需召开专题分析会，从管理流程与操作规范两个维度查找根源。新工人入场前必须接受三级安全教育，考核合格后上岗，特种作业人员要持证信息备案。每季度开展安全技能复训，结合近期行业事故案例强化风险意识，并在危险作业环节实施前进行专项交底，所有参与人员签字确认应急措施。为确保防护装备的有效性，施工方可以设置实名制管理，建立安全防护用品领取使用更换全周期台账。大型设备完成安装后，必须经第三方检测合格后投入使用，并将日常维护保养记录纳入月度安全检查内容。施工方还需在施工现场设置智能监控系统，24小时视频巡查重点区域，自动识别未戴安全帽、违规跨越警戒线危险行为。监测数据实时上传管理平台，异常情况触发预警通知。施工方应定期邀请行业专家审计现场安全措施，从第三方视角发现管理盲区。同时每日早班会强调当日安全重点，作业过程中安排专职安全员流动巡查，收工后汇总安全问题并制定改进计划，以全方位多角度管理方式确保安全控制无死角，为顺利施工提供坚实保障。

**三、结束语**

在日益激烈建筑市场合理利用精细化管理，从本质提升工程施工细节质量，让我国建筑工程行业技术与管理迈向新阶段。深入应用精细化管理模式，标志着我国建筑工程行业正从传统粗放式发展转型升级为智能化方向。同时建筑施工中还应提高人员专业素质，积极培养高素质人员，提高建筑工程管理水平，为新时代建筑行业的高质量发展注入持久动力。未来，随着深度融合数字化技术，精细化管理将引领建筑工程行业更加高效精准。

**参考文献**

[1] 苏琦. 精细化管理在民用建筑施工管理中的应用分析 [J]. 工程建设与设计, 2021, (16): 186-188+191.  
[2] 王长奎. 精细化管理在建筑工程施工管理中的应用分析 [J]. 砖瓦, 2021, (08): 140-141.  
[3] 方可, 徐婷婷. 精细化管理在建筑工程施工管理中的应用分析 [J]. 居业, 2021, (06): 123-124.  
[4] 李伟炎. 精细化管理在建筑施工项目管理中的应用分析 [J]. 居业, 2021, (04): 133-134.  
[5] 敖力. 精细化管理在住宅建筑工程施工中的运用 [J]. 新城建科技, 2025, 34(01): 186-188.  
[6] 黄娜娜. 精细化管理在建筑工程施工管理工作中的实践研究 [J]. 建材发展导向, 2023, 21(24): 162-164.  
[7] 叶小路. 精细化管理在建筑工程施工管理中的应用要点探析 [J]. 企业科技与发展, 2022, (11): 173-175.  
[8] 安倩龙. 精细化管理在建筑工程施工管理工作中的应用探讨 [J]. 大众标准化, 2023, (13): 130-132.  
[9] 罗娥樱. 精细化管理在建筑施工项目管理中的实践研究 [J]. 房地产世界, 2021, (04): 99-100.  
[10] 陈露. 探析精细化管理在建筑工程施工监理中的应用研究 [J]. 农家参谋, 2020, (20): 114.



# 公路工程施工现场安全管理标准化建设策略

余阳

重庆成渝垫丰武高速公路有限公司, 重庆 408512

DOI:10.61369/ERA.2025060011

**摘 要：**公路工程施工现场管理中，安全管理始终是第一位。但是由于公路工程涉及到的专业多，施工内容复杂，在工程管理中容易出现比较多的安全隐患。因此在公路工程施工现场管理中，针对安全管理工作需要构建标准化管理策略，促进安全管理工作的有效落实。本文主要对公路工程施工现场安全管理标准化建设的重要性进行分析，并调查当前公路工程施工现场安全管理现状，了解安全管理中存在的问题，最后提出公路工程施工现场安全管理标准化建设策略，为公路工程安全施工提供一定的参考。

**关 键 词：**公路工程；施工现场；安全管理；标准化建设

## Strategies for Standardized Safety Management Construction at Highway Engineering Sites

Yu Yang

Chongqing Chengyu Dianfengwu Expressway Co., Ltd. Chongqing 408512

**Abstract：** Safety management always comes first in the management of highway engineering construction sites. However, due to the multiple professions and complex construction content involved in highway engineering, there are many potential safety hazards in engineering management. Therefore, in the management of highway engineering construction sites, it is necessary to construct standardized management strategies for safety management work to promote the effective implementation of safety management. This article mainly analyzes the importance of standardized safety management construction at highway engineering construction sites, investigates the current status of safety management at such sites, understands the problems existing in safety management, and finally proposes strategies for standardized safety management construction at highway engineering construction sites, providing certain reference for safe construction of highway engineering.

**Keywords：** highway engineering; construction site; safety management; standardized construction

当前公路工程施工项目规模不断扩大，同时公路工程施工安全管理工作也发生一定的变革，对安全管理的要求更高。为了提升公路工程施工现场安全管理效率和质量，更好的应对当前公路工程施工安全挑战<sup>[1]</sup>。需要构建标准化的安全管理体系，形成科学安全管理制度，保证公路工程施工的安全开展。公路工程施工现场安全标准化工作的推进，可以有效化解工程管理中的矛盾，促进安全管理各项规则有效落实。

## 一、公路工程施工现场安全管理标准化建设的重要性

### （一）保证公路工程施工顺利开展

公路工程施工安全管理工作开展中，通过安全管理标准化建设，有利于加强对施工流程的规范，防止施工中因为安全事故影响施工进度。比如，在公路路基施工中，涉及到土方开挖、碾压等工作内容。通过安全管理标准化的落实，可以保证所有工作都严格按照标准化规范开展，减少因人为因素引发的事故率，保证施工进度的顺利开展。同时标准化安全管理，还可以结合不同的施工环节做好衔接工作，防止因为施工衔接和交底不完善，出现返工等问题。此外，施工安全管理标准化中，还针对施工应

用的各项机械设施制定安全管理和维护标准，保证所有设备都处于良好的运行状态<sup>[2]</sup>。公路工程施工现场管理还可以通过安全管理标准化合理规划布局，保证材料分类堆放合理，降低因为堆放问题引发的安全隐患，提升公路工程施工管理效率。

### （二）提升施工企业管理能力

公路工程施工安全管理标准化建设有利于提升施工企业管理能力，利用规范化、系统化的安全管理体系和管理标准，降低公路工程施工现场安全风险。施工现场安全管理标准化的建设，有利于对传统施工现场管理体系的优化，形成更科学的安全管理组织框架，优化安全管理流程，保证所有现场管理工作都可以有章可循，避免出现管理漏洞<sup>[3]</sup>。同时现场管理标准化建设，还可以加



强企业风险控制，标准化管理中会将现场管理风险，根据风险的严重程度，分成不同风险等级管控体系。同时根据每一项风险控制对应的防控方案，可以针对现场管理的重大危险源进行精准防控。同时通过智能监控设备的应用，还可以及时发现安全隐患，并及时排查，降低事故发生概率。此外，安全管理标准化建设有利于规范作业流程，保证所有工序都能顺利开展，减少施工中的交叉作业互相影响，保证公路工程施工的稳定进行<sup>[4]</sup>。

## 二、公路工程施工现场安全管理现状

### （一）公路工程施工现场安全管理意识薄弱

施工管理人员的安全管理意识，在公路工程施工现场安全管理中起到决定性作用，如果管理人员的安全意识薄弱，必然会影响安全管理标准的落实，导致安全隐患无法及时被发现和改进，形成严重的安全问题。同时，部分施工管理人员对自身工作职责认知不足，在工程施工中没能根据施工管理制度针对现场管理情况进行考察和制定有效的安全管理策略，导致公路工程施工管理落实存在偏差，难以形成标准化管理体系<sup>[5]</sup>。此外，施工人员对施工安全管理的意识不足，施工中没有将安全管理放在首位，为了方便施工随意更改施工方法和工序，或者在一些危险性施工节点没有做好安全防护。

### （二）公路工程施工现场管理制度不完善

公路工程施工现场管理制度是安全管理工作实施的参考标准，因此公路工程施工现场管理制度必须要保证完善性和全面性，才能使施工安全管理工作有据可依。但是从当前公路工程施工现场管理制度的建设情况来看，安全管理制度的制定过于盲目，形式化严重，在安全风险管理方面仍然存在较多的漏洞<sup>[6]</sup>。首先，公路工程施工现场管理制度与公路工程施工现场管理工作脱节，制度没有根据施工情况进行完善，导致施工现场安全管理制度的安全风险规避能力降低，起到的作用有限。其次，公路工程施工现场管理制度缺乏科学性，当前公路工程施工中应用的施工安全管理制度，大部分都是沿用以前的制度。现代科技发展下，公路工程施工的理论和方法都发生巨大的变化，传统安全管理制度已经无法满足当前施工管理要求。管理制度中的管理理论和方法无法为现代化施工安全管理提供预警。再次，公路工程施工现场管理执行力度不足。公路工程施工现场安全管理制度在执行中，部分管理条款的使用效力被削弱，导致安全事故的控制能力降低。最后，公路工程施工现场管理制度中缺乏有效的应急预案。一旦施工现场出现安全事故，无法及时启动预案，导致安全事故<sup>[7]</sup>。

### （三）公路工程施工现场管理人员素质有待提升

公路工程施工中现场管理人员素质和专业能力直接影响公路工程施工安全管理效率，但是由于部分管理人员的专业素质和专业知识有限，导致在公路工程施工中无法针对施工中存在的问题，进行细致、全面指导。同时公路工程施工管理人员自身的专业能力不足，一旦施工中出现技术性问题，难以有效解决<sup>[8]</sup>。此外，管理人员对标准化管理的认知不足，在公路工程施工现场规

范化方面，管理流程混乱，造成大量资源浪费，加大施工安全风险。

## 三、公路工程施工现场安全管理标准化建设策略

### （一）提升现场安全管理人员标准化意识

公路工程施工现场安全管理人员的标准化意识培养直接关系到标准化管理效率和质量，从当前公路工程施工现场安全管理人员的现状来看，管理人员的标准化管理意识不强，在安全管理落实中存在一定的隐患。针对这个问题需要构建标准化意识培养体系，首先重塑公路工程施工现场安全管理人员认知，从法规、技能以及行为三个方面形成施工现场安全管理培养矩阵<sup>[9]</sup>。针对不同层级和不同管理范围的人员开展针对性的培训工作。带领现场管理人员深度分析当前公路施工安全管理的相关法律法规，讲解公路工程施工相关行业标准，并定期开展考核工作，保证学习质量。为了提升施工现场管理人员的应用技能，可以构建标准化风险管控模型，比如，针对公路桥梁施工中的各种风险问题形成动态演示模型，使管理人员意识到安全管理的重要作用，掌握有效的防范措施，有效避免安全事故。此外，每天定期开展安全管理晨会，利用5-10分钟讲解施工管理标准化的相关事项以及工序标准等，保证公路工程施工安全防护效果。其次，形成标准化行为约束框架。制定公路工程施工现场安全管理标准化的相关巡查事项，并设置违规行为扣分清单，明确扣分标准。监督人员在现场监督中可以针对具体的违规情况进行扣分，督促现场安全管理人员提升安全管理意识。最后，可以利用AI赋能，对公路工程现场安全管理标准化提供智能监督网络。比如，可以为安全管理人员配备安全管理记录仪，并在其中输入违规行为参数，记录仪通过摄录和识别的方式可以及时发现违规行为，并进行记录。同时还会发出警示，提醒改正各种违规行为。

### （二）完善现场安全管理标准化制度

公路工程施工现场安全管理标准化建设中，完善的现场安全管理标准化制度建设有利于为现场安全管理工作开展形成有效的保障。在现场安全管理标准化制度的建设中，首先，完善现场安全管理责任体系，在责任体系中针对项目管理中的各层级人员的安全管理职责进行明确，防止现场安全管理中存在岗位不清，职责不明的模糊管理问题。并提前做好对现场安全管理的统筹工作，制定相应的安全管理责任战略规则。施工管理人员严格落实日常监督制度，严格把控公路施工现场的一线施工作业规程，一旦发现安全隐患后及时上报。并针对公路工程施工现场的责任层层分解，促进各层级责任的有效落实，实现对安全管理的纵横向延伸，使每项工作内容都有相关责任人把控。其次，实现公路工程施工作业流程的标准化，针对公路工程生产中的各个环节进行梳理定位，保证安全作业标准的有效落实<sup>[10]</sup>。比如，在公路路面摊铺中，摊铺的顺序，摊铺料温度的控制等都需要符合规定和要求。并针对施工作业流程进行标准化评估，降低作业流程操作的安全风险。再次，针对现场环境安全管理形成标准化管理制度。针对危险施工地点要设置防护栏和安全警示标识。施工作业区域

内的所有材料都要按照规定合理摆放，要求物料摆放整齐，材料的各项参数的都在标准范围内。并定期进行环境安全检测，及时治理环境污染超标问题。最后，公路施工现场安全管理教育培训的标准化。为了提升施工现场安全管理效率，加强安全管理人员培训是关键。在培训制度的建设中，需要保证培训内容的全面性，充分涵盖各项法律法规，保证操作规程的合规性。同时通过案例分析以及模拟演示等方式，提升施工人员的安全管理认知，并制定激励和考评制度，促进安全管理责任的有效落实。此外，还需要构建完善的监督和考核制度。组建专门的安全管理监督小组，负责现场安全管理制度的落实情况进行监督管理，针对施工现场的违规行为进行严肃处理。可以结合违规行为造成的后果给予不同的处罚。对于安全管理工作到位，及时遏制安全风险的人员给与一定的表彰和奖励。通过考核制度的构建提升企业现场施工和管理人员安全管理标准化的积极性。

（三）加强现场安全管理人员标准化培训

公路工程施工管理中，现场安全管理人员是有效防控风险的主体，安全管理人员的专业能力和素养直接影响公路工程施工安全管理效果。因此需要加强对公路工程施工现场安全管理培训的标准化，针对安全生产法规，落实现场安全管理人员的责任，并通过相关法规内容的解读，以及典型案例的分析，使管理人员可以更好的把握安全法规底线，在遇到现场安全管理问题时，可以及时采取有效的安全管理举措，降低安全风险隐患。同时加强对安全管理人员的核心业务能力培训，利用公路施工现场模型构建安全风险管理平台，对公路施工中的风险元素进行分析，精准识

别公路工程施工中的各种缺陷和问题，使安全管理人员在现场安全管理中能够及时、准确评估潜在风险。此外，聚焦现场安全管理标准化专业技能的提升。着重对公路工程施工现场安全隐患风险防控方法进行学习，比如公路施工中的高空作业、触电以及深基坑坍塌等风险防控措施。并结合施工现场的具体情况和风险隐患形成风险等级评估，做好风险管理精准定位，并熟练掌握各种安全隐患的排查方法。最后，加强对公路工程施工现场安全管理标准化应急处理能力的培训，公路施工现场可能遭遇暴雨、泥石流等各种突发事件。需要经常带领安全管理人员开展实战演练，针对抢救物资以及迅速撤离等风险预案进行演习。保证施工管理人员在面对各种危机时，能冷静应对，降低公路工程施工现场安全隐患造成的损失。

四、结语

综上所述，公路工程施工现场安全管理标准化建设，有利于提升现场安全管理效率，保证安全管理工作的时效性，降低施工中的安全事故发生概率。公路工程施工中安全影响因素比较多，为了提升施工现场安全管理效率，需要从施工管理制度、管理人员、管理规程等多个方面进行标准化建设。使公路工程施工现场安全管理工作得到有效落实，精准识别施工中存在的风险问题，并及时采取有效的安全防控措施，保证公路工程施工现场安全管理效率。

参考文献

[1] 谭建德. 公路工程施工现场安全管理标准化现状及趋势展望 [J]. 大众标准化, 2023(9): 151-152, 155.  
[2] 马子岳, 高 暖, 代嘉文, 等. 高速公路工程施工技术中安全管理的对策及方法 [J]. 建筑工程与设计, 2023, 2(7): 96-98.  
[3] 高红平. 公路工程施工现场安全管理存在的问题及解决方法研究 [J]. 运输经理世界, 2024(27): 109-111.  
[4] 王军. 公路工程现场施工安全管理及风险预警系统的构建 [J]. 大众标准化, 2024(18): 83-85.  
[5] 张金会. 公路工程施工以人为现场安全管理要点分析 [J]. 大科技, 2024(47): 88-90.  
[6] 蔡大江. 论高速公路建设工程施工现场安全管理 [J]. 新材料·新装饰, 2023, 5(20): 195-198.  
[7] 焦吉泰. 公路桥梁现场施工安全管理影响因素及策略 [J]. 城镇建设, 2023(13): 157-159.  
[8] 朱国强. 公路工程施工安全管理措施及施工技术分析 [J]. 数字化用户, 2024(21): 54-55.  
[9] 宋平, 张粹星. 高速公路路基扩建工程施工安全管理措施分析 [J]. 科技资讯, 2023, 21(1): 130-133.  
[10] 陈伟强. 高速公路施工现场安全管理难点及应对措施 [J]. 数字化用户, 2024(28): 109-110.

# 基于建筑工程管理质量提升的精细化管理应用

莫德新

智埔国际建设集团有限公司东莞分公司, 广东 东莞 523000

DOI:10.61369/ERA.2025060019

**摘要：** 随着城市进程的发展，城市规模的不断扩展，传统工程管理模式逐渐不适应新趋势发展要求，建筑企业在管理质量提升举步维艰。因此，本文探讨了精细化管理在建筑工程质量提升中的应用及其重要性。通过分析设计、施工准备、施工过程和竣工验收等关键阶段的精细化管理实践，揭示了其在优化资源配置、提高施工效率、降低成本及保障工程质量方面的显著效果，为相关从业者提供参考。

**关键词：** 精细化管理；建筑工程；资源配置；施工效率

## Application of Refined Management for Improving the Quality of Construction Project Management

Mo Dexin

Dongguan Branch of Zhipu International Construction Group Co., Ltd. Dongguan, Guangdong 523000

**Abstract：** With the development of urban process and the continuous expansion of city sizes, traditional engineering management models are gradually failing to meet the requirements of new trends, making it difficult for construction companies to improve management quality. Therefore, this paper explores the application and importance of refined management in enhancing construction project quality. By analyzing the practices of refined management in key stages such as design, construction preparation, construction process, and completion acceptance, it reveals significant effects in optimizing resource allocation, improving construction efficiency, reducing costs, and ensuring project quality, providing reference for relevant professionals.

**Keywords：** fine management; construction engineering; resource allocation; construction efficiency

### 引言

建筑工程质量管理是确保项目成功的关键环节。随着城市化进程飞速发展和建筑规模的不断扩大，传统的管理模式逐渐暴露出管理粗放、效率低下、资源浪费等问题。精细化管理通过科学规划、精准控制和动态调节，为建筑工程质量提供了新的思路。建筑企业若要在激烈的市场竞争中实现可持续发展，将精细化管理提升至战略高度，基于企业实际发展需求，持续优化管理模式与方法体系。通过系统性地推进精细化管理实践，企业方能充分释放其潜在价值，从而构建持久的市场竞争优势。

### 一、建筑工程精细化管理理论分析

#### （一）建筑工程精细化管理概述

1911年，泰勒发表了《科学管理原理》一书，视为世界上第一部精细化管理著作。建筑工程精细化管理是指采用科学、系统的管理方法和手段，对建筑工程项目进行全过程、全要素、全环节的精细化管理，其管理范畴涵盖项目全过程，包括前期规划、设计优化、施工组织、资源配置、成本管控、质量监督、安全保障、进度协调、信息化建设以及绩效评估等关键环节。通过建立精细化的分工协作机制、制定周密的实施计划、优化资源配置效

率以及强化信息技术应用等具体措施，能够实现工程质量提升、工程进度保障和项目效益优化的多重目标，同时有效控制建设成本和规避各类风险，从而推动建筑工程实现高质量可持续发展。

#### （二）建筑工程精细化管理的重要性

建筑工程作为一项涵盖设计规划、施工建造、监理控制、质量检测及材料管理等多元环节的系统性工程，其复杂性决定了必须通过全面推行精细化管理来确保工程质量目标的实现。

##### 1. 提升企业核心竞争力

建筑企业通过精细化应用提升和优化管理质量，不仅可以提高企业对项目管理的能力与水平，还能精准把控项目在具体实



施，确保项目有序进行。建筑企业可依托 BIM 技术进行三维建模，优化设计方案，减少设计失误，从而优化企业设计与规划，降低项目成本，提升工作效率。依托 BIM、物联网技术实现管理决策的数据化、可视化，以达到精细化管理目标。在项目成本管控中，精细化模式展现出显著的管理价值。该模式通过建立全面的成本核算机制，采用动态分析方法对项目支出进行系统监测，能够有效识别潜在的超支风险并实施及时干预。具体实施过程中，通过引入作业成本法（ABC）和关键绩效指标（KPI）体系，实现对各项费用的精准追踪与评估。精细化管理方法不仅能够优化资源配置效率，还能显著降低无效支出，从而有效提升项目的整体经济效益。

## 2. 提高施工管理效率

在建筑工程施工过程中推行精细化管理，关键在于对各类施工资源实施科学配置与高效利用。精细化管理的核心价值在于通过系统性管控提升工作质量与执行效率。该管理模式强调全流程的精准把控，要求对项目实施全过程进行科学分解与标准化设计，确保各环节作业规范得到严格执行。通过精细化管理，可以最大程度地降低错误和失误的发生，提高工作的准确性，并为项目的顺利进行提供了有力保障<sup>[1]</sup>。此外，在过程管控维度，精细化管理依托动态监测机制实现效能提升。该模式通过建立关键绩效指标（KPI）监控体系，对项目进度、质量、成本等核心要素进行实时跟踪与数据分析，确保问题能够被及时发现并快速响应。这种持续优化的管理方式不仅强化了各环节的协同配合，更显著提升了整体工作效率，为项目按期高质量交付提供了有力支撑。

## 二、精细化管理在建筑工程管理中的具体运用

### （一）设计阶段的精细化管理

在建筑工程的设计阶段尤为重要，决定着工程的总体运营与实施，科学合理的设计能够显著减少工程在实施过程中出现的各项问题。建筑工程设计阶段的精细化管理是通过系统化、标准化和数字化的方法，对设计全过程实施精准管控的专业实践，有利于建筑工程质量水平的提升。

在项目前期策划阶段，应当系统的论证项目的可行性，应用 BIM 技术进行方案模拟验证，通过建立三维数字模型，可以自动检查管道与结构的碰撞问题，优化空间布局；模拟分析室内采光、通风效果，帮助选择最佳设计方案；还能预演施工过程，提前发现可能遇到的问题。同时，模型数据可以直接计算工程量，实时掌握成本变化。这种数字化的工作方式减少了设计错误，提高了整体效率，让工程建设更加顺利。

设计管理的精细化管理是提升建筑工程管理的重要环节。它设计整个项目的宏观把控与导向，包括现场考察、专家研讨和设计交流的前期准备工作。通过加强设计管理，可以减少设计变更与错误，提高设计效率，确保设计满足工程要求。

### （二）施工准备阶段精细化管理

项目实施准备阶段是工程建设的核心环节，关乎整个项目完成时效、工程进度、竣工验收等后续工程进度。其管理质量直接

影响后续施工的顺利开展。

科学合理的准备工作能够有效规避施工过程中的潜在风险，确保项目高效推进。在施工准备阶段，运用物联网技术通过实时监控实现全方位精细化管理，人员佩戴智能定位设备，结合电子围栏实现危险区域智能管控；大型机械装备传感器实时监测运行状态，预防超限作业；建材运输车辆集成环境监测装置，确保材料品质；工地环境监测系统自动采集扬尘、噪音等数据，联动降尘设备智能响应。

实施准备阶段的精细化管理能够为后续施工奠定坚实基础，所有监控数据实时汇聚至管理平台，通过智能分析实现资源优化配置，显著提升施工准备效率，强化风险预警能力。

### （三）施工过程的精细化管理

施工过程阶段是工程建设的关键实施环节，其管理水平直接影响工程实体质量与综合效益。科学规范的施工过程管控能够有效预防质量缺陷和安全事故的发生，确保项目高质量完成。施工过程阶段的精细化管理是通过流程化、数据化和智能化的手段，对施工全流程实施精准控制的专业实践，对提升工程建造品质具有显著效果。

在施工实施阶段，动态监控系统通过智能技术实现全过程精细化管理。在主体结构施工时，采用智能传感设备实时监测混凝土凝固过程中的温度和应力变化，及时预警可能的质量问题；钢结构安装环节运用自动测量仪器跟踪构件定位精度，确保安装位置准确无误；通过智能图像识别技术自动检查各工序完成情况，对比计划进度及时发出预警；同时部署环境监测设备，当检测到扬尘超标时，自动启动降尘措施。所有监控数据都集中到管理平台过智能分析实现施工质量的实时把控和问题的快速响应，将传统的被动检查转变为主动预防，大幅提升施工过程管控水平。

施工过程阶段的精细化管理是确保工程质量的核心保障。通过智能监控精细化措施，能够显著提升施工质量水平，为创建精品工程奠定坚实基础。

### （四）竣工验收阶段的精细化管理

竣工验收作为工程建设的最后一道质量关口，其管理成效直接关系到项目的交付质量和使用安全。实施精细化的验收管理能够系统性地发现并解决潜在质量问题，为工程投入使用提供可靠保障。

在建筑工程竣工验收阶段，精细化管理的核心在于建立科学的质量验收体系并组建专业验收小组。具体实施时，首先依据工程特点制定分层分类的验收标准，将国标规范细化为可量化检测的验收清单，如墙面平整度采用激光扫描复核、管道气密性进行分级压力测试。验收小组采用“专业+责任”双维度组建，由建设单位牵头，整合施工、监理、设计三方技术骨干，同时引入第三方检测机构专业人员，形成土建、机电、消防等专业分组，每组配备专职质量员和资料核查员。实施过程中采用“三步验收法”：初验由施工单位自查自纠，复验由监理单位逐项核验，终验由建设单位组织多方联合验收，重点部位实行“双随机”抽查（随机选点、随机选人）。验收数据实时录入 BIM 运维模型，形成可追溯的电子档案，确保每个验收环节责任到人、标准落地，最



终实现从“符合性验收”向“精细化验收”的质变提升。

通过建立科学的质量验收体系并组建专业验收小组的精细化措施，能够全面提升验收工作质量，为工程顺利交付和长期使用奠定坚实基础。这种管理模式不仅提高了验收效率，更有效控制了工程质量风险，实现了工程建设的完美收官。

### 三、精提升建筑工程管理精细化管理水平的优化策略

#### （一）树立精细化工程管理观念

现阶段，在建筑工程管理要求不断提高的大环境下，施工单位必须要树立起精细化工程管理理念，以促进工程施工安全、质量、进度等管理指标的有效提升，进而推动企业的进一步发展<sup>[2]</sup>。建筑企业应当充分认识到精细化工程管理的重要价值，将精细化管理思想全面贯彻到施工各个环节。建筑企业还应持续开展自我诊断与分析，准确识别管理短板，并采取有效措施逐步解决现存问题。这种持续改进的机制不仅能提升企业的综合竞争力，更有助于在激烈的市场竞争中赢得优势地位。

#### （二）培养精细化工程管理人员

在建筑工程管理人员的培养过程中，应以精细化管理培训为重点，引导其转变传统的粗放式管理思维，掌握更加科学、系统的管理方法，从而有效满足现代工程建设的各项管理要求。为提升管理团队的专业水平，通过具有竞争力的薪酬福利体系吸引高素质建筑管理人才加入，构建专业化的管理团队，为工程质量管理奠定基础。设立严格的录用标准，确保引进人员具备相应的专业能力和责任意识，从源头上保障精细化管理的实施效果，加强对现有管理人员的培训教育，使其充分认识精细化管理的重要性，主动更新管理理念，提升工程管理效能，确保建筑工程管理质量，促进建筑行业的高质量可持续发展。

#### （三）建立精细化工程施工队伍

在建筑工程施工队伍建设过程中，应将精细化施工理念作为核心培养方向，引导施工人员逐步摒弃传统的粗放式作业模式，在后续施工过程中采用更加规范、高效的操作方法，从而确保工程建设质量符合现代工程标准。打造一支高水平的精细化施工队伍，应优先选拔技术扎实、经验丰富的施工人员，并通过具有竞

争力的薪资待遇和职业发展空间吸引优秀技能人才加入，从而组建一支专业素质过硬的施工团队，加强对现有施工人员的精细化作业培训，通过理论教学、实操演练和案例分析等方式，使其深入理解精细化施工的重要性，掌握标准化、规范化的施工工艺，提高施工效率和工艺水平。通过精细化施工队伍的建设，可逐步形成一支技术精湛、管理规范、执行力强的精细化施工队伍，为建筑工程的高质量建设提供坚实保障。

#### （四）健全精细化监督管理机制

为了真正达成建筑工程全面管理目标，要全面监督管理人员的实际工作情况，不放过任何施工细节<sup>[3]</sup>。通过全面排查和深入分析管理过程中的薄弱环节，识别关键控制点，据此制定针对性的精细化管理措施。这种基于问题诊断的管理方法能够有效提升管理措施的精准度。同时，需要构建完善的制度保障体系。要建立覆盖全流程的标准化监督机制，通过制度化的考核评价体系规范管理人员行为。在制度执行过程中，必须坚持标准化、透明化的原则，确保考核评价的客观公正，以此强化管理人员的责任意识。最后，要强化施工过程的协同管理。以施工方案为基准，建立动态监督机制，确保施工人员规范作业。通过制度落实与过程管控的双重保障，实现各工序的有效衔接，最终提升工程管理的整体效能。这三个方面环环相扣，共同构成了一个完整的工程管理体系，既注重制度约束，又强调过程控制，能够切实提升建筑工程的管理水平。

### 四、结语

精细化管理作为现代建筑工程管理的先进模式，通过系统化、标准化和智能化的手段，为工程质量提升和项目效益优化提供了有效路径。本文从设计、施工到验收的全过程入手，阐述了精细化管理的具体应用与优化策略，强调了其在提升企业竞争力、整合资源和提高管理效率中的重要作用。未来，建筑行业应进一步深化精细化管理理念，加强人才培养和技术创新，推动管理模式向更高效、更精准的方向发展，以实现工程建设的高质量与可持续发展。

### 参考文献

- [1] 周佳晶. 建筑工程管理工作中精细化模式的应用 [J]. 价值工程, 2025, 44(08): 145-147.  
[2] 高启. 精细化管理模式在建筑工程管理中的应用研究 [J]. 房地产世界, 2023, (24): 94-96.  
[3] 苏禹. 建筑工程管理现代化与精细化策略分析 [J]. 住宅与房地产, 2025, (02): 83-85.

# 公路工程施工扬尘污染防治技术与管理模式探讨

严少卿

湖州市公交集团有限公司, 浙江 湖州 313000

DOI:10.61369/ERA.2025060020

**摘 要 :** 公路建设过程产生的扬尘污染主要来源为土方施工、道路开挖、物料输送等, 具有粒径小、易悬浮、扩散广的特性, 严重影响生态环境与人类健康。通过对高速公路施工扬尘污染的形成机理和主要污染物特征进行了分析, 并对其在高速公路建设中的应用进行了探讨。同时, 从管理制度、监测和评价以及建筑企业的内部管理等几个方面着手, 建立一套完善的扬尘控制管理模式。希望通过本研究为高速公路建设扬尘污染治理提供理论基础与实践指导。

**关 键 词 :** 公路工程; 施工扬尘污染; 防治技术; 管理模式

## Discussion on Prevention Technology and Management Mode of Dust Pollution from Highway Construction

Yan Shaoqing

Huzhou Bus Group Co., LTD. Huzhou, Zhejiang 313000

**Abstract :** The main sources of dust pollution in the process of highway construction are earthwork construction, road excavation, material transportation, etc., which has the characteristics of small particle size, easy suspension and wide diffusion, seriously affecting the ecological environment and human health. This paper analyzes the formation mechanism and main pollutant characteristics of dust pollution in expressway construction, and discusses its application in expressway construction. At the same time, from the management system, monitoring and evaluation and internal management of construction enterprises, a set of perfect dust control management mode is established. It is hoped that this study can provide theoretical basis and practical guidance for the control of dust pollution in expressway construction.

**Keywords :** highway engineering; construction dust pollution; prevention and control technology; management mode

## 引言

随着我国交通基础设施建设的不断深入, 公路建设规模也在不断扩大。但是, 高速公路建设引起的扬尘污染问题却越来越突出, 给周边环境带来了不可忽视的影响。粉尘污染不仅严重影响空气质量, 而且易引发呼吸系统疾病, 对人体健康构成严重威胁。更严重的是, 扬尘污染将扰乱生态平衡, 威胁生物多样性, 给生态系统带来长期的不利影响<sup>[1]</sup>。因此, 全面、深入地研究高速公路施工扬尘污染问题, 制定切实可行的治理对策, 对于营造和谐的高速公路建设环境, 营造良好的人居环境具有重要的现实意义。这种协调发展既符合国家环保工作的总要求, 又符合人民群众对美好生活需求的积极响应, 体现了现代社会追求人与自然是和谐共生的理念。因此, 加强该领域的研究与实践, 对促进我国公路建设和环保事业的发展具有十分重要的意义。

## 一、公路工程施工扬尘污染源与成因分析

### (一) 公路施工过程中的扬尘污染源

公路建设过程中涉及到多种扬尘源。在土方开挖过程中, 由于机械作用, 土体颗粒受到扰动, 产生了大量的扬尘。建筑材料如砂石、水泥等在风的作用下, 会随风飘散到大气中。工地道路上, 因车辆频繁行驶, 车轮与地面的摩擦而扬起了地面灰尘, 同时, 车辆在行驶时产生的气流也会将周围的灰尘吹起。另外, 在

混凝土搅拌过程中, 由于物料的搅拌和装卸, 会产生大量的粉尘, 这也是建筑扬尘的另一个来源。

### (二) 扬尘污染的形成机制

粉尘污染是多因素综合作用的结果。气象条件是影响沙尘天气的重要因子之一, 风速越大, 沙尘就越容易被扬起和扩散。风的方向决定着粉尘污染向何处传播。空气湿度对粉尘的生成有一定的抑制作用, 湿度越大, 粉尘颗粒越重, 越不容易被吹起。施工活动本身的强度和方式也很重要, 高强度大面积的土方作业、

频繁的装卸物料及车辆的行驶，都会使粉尘扰动的频率和强度增大，从而导致扬尘污染的发生<sup>[2]</sup>。

（三）主要污染物的特点与影响

道路施工过程产生的粉尘主要是可吸入颗粒物（PM10）、PM2.5（空气动力学当量直径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ ）。这些颗粒具有粒径小，表面积大，能在大气中长期悬浮的特性。可吸入型可吸入呼吸道，对呼吸道黏膜造成刺激，引起咳嗽、气喘等症状<sup>[3]</sup>。PM2.5因其粒径较小，可进入肺部，甚至进入血液循环，严重影响心肺功能，增加心血管病、肺癌等疾病的发生风险。同时，扬尘污染也会影响大气能见度、扰乱交通秩序、影响植物光合作用等生理过程，破坏生态平衡。如下表1所示：

表1 主要污染物的特点与影响

污染物	主要特性	健康影响	环境影响
PM10（可吸入颗粒物）	粒径较大，长期悬浮	刺激呼吸道黏膜，引起咳嗽、气喘等	降低能见度，影响交通
PM2.5（细颗粒物）	粒径小，可进入肺部和血液循环	损害心肺功能，增加心血管病、肺癌风险	干扰植物光合作用，破坏生态平衡
扬尘	含多种颗粒物，易扩散	刺激呼吸系统，加重呼吸道疾病	影响空气质量，扰乱交通秩序

二、公路工程施工扬尘污染防治技术

（一）防尘设施与设备的选择与应用

在公路工程建设中，合理地选用和使用防尘设施及设备是十分重要的。高效防尘网是一种常见的设备，它是由高密度聚乙烯等材料制作而成。防尘网的网孔密度、网孔大小要根据施工现场的具体情况来确定，一般情况下，网孔密度大，防尘效果好。例如，在有风和堆料的地方，可以选择2000目/100厘米网目密度的防尘网，它可以有效地阻挡大多数粉尘粒子。真空吸尘器也是一种重要的除尘设备，它利用负压原理，经过高效的过滤系统，将建筑作业产生的灰尘收集起来。在混凝土搅拌站等粉尘浓度较高的地方，安装大功率工业吸尘设备，吸尘效率大于95%，可有效降低作业区域粉尘浓度。

（二）覆盖与抑尘技术

覆盖技术是一种行之有效的控制扬尘污染的方法。在工地上堆放材料的地方，可以用土工布或篷布覆盖。土工织物具有很好的透水性、渗透性，不仅可以防止雨水冲刷，还可以抑制粉尘的产生。在砂料堆上铺设土工织物时，必须将土工织物完全盖住，并将其牢固地固定，以免被风吹走。抑尘剂的用途也越来越广。抑尘剂喷洒于物料表面后，可在物料表面形成具有一定强度及内聚力的保护膜，使粉尘颗粒紧密结合，从而降低粉尘的产生。例如，在土方开挖区，可以选择生物降解型抑尘剂，按1:50稀释后喷洒，可以在一定时间内有效地抑制扬尘，并且不会对环境造成污染。

（三）湿法作业与喷雾降尘技术的应用

湿法施工对高速公路施工扬尘控制效果明显。在挖土和清扫道路时，用洒水车定时喷洒，可以使地面的灰尘变得潮湿，减少灰尘的产生。洒水车的洒水量和次数要根据现场实际情况适当调整，通常情况下，在高温、干燥、车辆行驶频繁的路段，一天至少要喷洒5次以上，洒水量要控制在0.5–1升/平方米。喷雾降尘

技术是通过喷雾装置将水雾化成极小的颗粒，并与空气中的降尘粒子结合在一起进行沉降。常用的喷洒机有高压喷洒机、风送式喷洒机等。高压喷雾机可以安装在施工现场的主干道及堆料场周围，喷雾距离20–30m，雾化粒径50–150微米，可以有效地减少空气中的粉尘浓度<sup>[4]</sup>。

（四）临时围挡与防尘墙的作用

临时围挡、防尘墙可以有效地阻止粉尘的扩散。临时围挡通常由彩钢板或金属围篱等材料制作而成，高度一般为1.8 ~ 2.5米。在工地周围设置临时围挡，可以形成一道物理屏障，降低扬尘向周围环境的扩散。防尘墙由水泥、砖石等材料构成，强度高，稳定性好。在环境敏感地区，如住宅区、学校等，可以设置3–5米高的防尘墙，墙面可以采用粗糙的材料，增加对粉尘粒子的吸附、阻隔作用，进一步减少灰尘对周围环境的影响<sup>[5]</sup>。

三、公路工程施工扬尘污染管理模式

（一）施工现场扬尘污染的管理体系与责任分工

在这一制度中，建设单位作为工程建设的核心和主导力量，担负着不可推卸的责任。它需要根据项目所在地的环境条件、相关的环保法规和项目建设的特点，精确地制定出扬尘污染防治的总体目标和具体要求。施工单位应在施工全过程中对施工单位进行监督，以保证各项防治措施的落实。一旦因扬尘污染而引发相关问题，建设单位需要承担相应的法律责任，因此对扬尘污染防治给予了高度的关注。作为直接实施者，施工企业必须建立严格的扬尘控制管理体系，并配备有专业、有经验的管理人员。这些管理人员对防尘设施的选择、安装和日常维护等各个方面负责，以确保它们一直在良好的状态下工作；科学规划和严格管理物料堆放，避免因乱堆而引起的扬尘；同时，不断优化施工工艺，降低扬尘污染的源头。监理单位是这个系统的重要组成部分，它需要对施工单位的扬尘污染进行全过程和细致的监督。定期深入工地各部位，对扬尘污染状况进行检查，对不符合防治要求的情况，及时提出有针对性、可操作性强的整改意见，并及时上报建设单位，使施工单位能够及时采取措施，保证扬尘污染防治工作的顺利进行。

（二）扬尘污染防治的监测与评估管理模式

在监测环节，采取了在线监测装置和人工监测相结合的方法。依托先进的传感技术，在线监测设备可以对施工现场的可吸入颗粒物、PM2.5等主要污染物进行实时监测。这些设备被合理地部署在容易产生扬尘污染或者受到扬尘影响较大的区域，如材料堆放区、施工道路、生活区等，并利用无线传输技术将采集到的数据快速准确地传送到监控中心，让管理人员可以随时、直观地掌握扬尘污染的动态。人工监测作为在线监测的重要补充，利用专业空气采样设备，定期在施工现场不同位置采集空气样品，并使用高精度的专业仪器准确分析样品中污染物的浓度，对在线监测数据进行验证与补充，保证监测结果的全面性和准确性。在评价管理模式上，制定了一系列定量、细致的评价指标，如扬尘污染达标天数比例等，可以直观地反映建筑工地一段时期内的空气质量是否达到了环保标准；此外，还包括污染物浓度下降幅度，它清楚地反映了控制措施执行后污染物浓度的变化趋势。根据这些指标，定期评价施工现场扬尘污染防治效果，可以及时发



现在防治工作中存在的问题和缺陷，从而有针对性地调整防治措施，提高防治工作的准确性和有效性。

（三）施工企业内部扬尘污染防治管理模式

从企业整体战略的角度来看，要把扬尘污染防治纳入公司的长期发展目标和总体规划中，把它作为公司发展战略的一部分。制定了扬尘污染防治战略规划，确定了各个阶段企业扬尘污染防治的目标和任务，为具体工作指明了方向。同时，公司也十分重视员工的培训，定期组织员工进行粉尘污染防治技术和管理方面的专业培训。培训内容涵盖了扬尘污染对环境及人类健康造成的严重危害，以此来增强员工的环保意识和责任感，同时也包含了各种先进的防治技术和科学的管理方式，让员工们切实地了解到正确的作业流程和有效的预防措施，并能在实际工作中正确地应用。在项目管理层次上，全面推行项目经理负责制，把扬尘污染防治工作纳入项目绩效评价体系。对在防治扬尘污染方面成绩突出的项目团队或个人，给予物质及精神上的奖励，以激励他们继续保持积极向上的工作态度；对于达不到防治要求的团队或个人，将按照有关规定给予严厉的惩罚，从而形成一种有效的激励和约束机制，促使项目组全力以赴地实施扬尘污染控制措施，从而有效地控制项目建设过程中的扬尘污染。

四、案例分析

（一）项目概况

某高速公路项目全长35km，路基宽度24.5米，设计为双向4车道。该工程涉及的地区包括一些农田和村庄，还有一些山区。该地区气候干旱，年均降雨量少，多风，平均风速每秒3.5米。根据现场环境特点和施工技术，对该工程进行了扬尘污染风险评价，确定为中。施工期间，土方开挖约200万立方米，大量的材料堆放在工地上，车辆频繁行驶，产生了较大的扬尘污染隐患。

（二）技术与管理措施应用

该项目采用组合抑尘技术。在土方开挖范围内，配置多台风送式喷雾机，按1000平方米布置1台，喷雾角度、射程可根据现场地形变化调整，保证全开挖面均可覆盖。同时，选用环境友好型抑尘剂，按1:80比例稀释，在开挖面及堆料区定期喷洒，形成稳定的抑尘保护膜。运输物料的车辆均采用全封闭运输模式，车厢顶部装有自动密封装置，以避免因运输过程中物料抛洒而引起的扬尘。

在施工现场主要部位设置8个在线监测点，对可吸入颗粒物、PM2.5等污染物进行实时监测。当污染物浓度超出设定值时，自动启动喷雾降尘装置及洒水车实施降尘作业。同时，管理者还可以通过手机APP实时查看工地扬尘污染状况，并根据数据的变化

及时调整相应的控制措施，达到对扬尘污染控制的智能化管理。

（三）防治效果评估

通过对施工期与非施工阶段PM10浓度的对比分析，发现采取一系列防治措施后，施工期内各监测点PM10平均浓度比施工前有所下降，并逐步接近未施工阶段，说明防治措施是有效的（见表2）。

表2 PM10浓度对比（施工期 vs 非施工期）

监测时间段	监测点位	PM10浓度平均值（mg/m³）
施工期（第1个月）	物料堆放区	0.35
施工期（第1个月）	施工道路	0.42
施工期（第1个月）	生活区	0.28
非施工期（相同季节）	物料堆放区	0.15
非施工期（相同季节）	施工道路	0.18
非施工期（相同季节）	生活区	0.12
施工期（第6个月）	物料堆放区	0.22
施工期（第6个月）	施工道路	0.28
施工期（第6个月）	生活区	0.16
非施工期（相同季节）	物料堆放区	0.13
非施工期（相同季节）	施工道路	0.15
非施工期（相同季节）	生活区	0.10

从成本效益分析的结果来看，尽管在扬尘污染防治中投入了一些资金，但是，由于对扬尘污染进行了有效的削减，使得由于环境违法行为而产生的罚款数额降低了（见表3）。

表3 成本效益分析（抑尘投入 vs 环境罚款减少）

项目	金额（万元）
抑尘设备采购与安装费用	56.50
抑尘剂采购费用	23.80
洒水车租赁及用水费用	35.60
人工费用（扬尘防治相关）	42.30
环境罚款减少金额（预计）	120.50
综合效益（环境罚款减少 - 抑尘投入）	12.30

五、结语

公路施工扬尘污染防治是一项复杂的系统工程，涉及到污染源解析、防治技术应用和管理模式构建。通过对扬尘来源和成因的深入研究，采取先进的防治技术，建立科学、合理的管理模式，可以有效地减少公路建设过程中产生的扬尘污染，促进公路建设和环境保护的协调发展。实例分析表明，采用组合抑尘技术及信息化管理平台，取得了较好的防治效果，取得了较好的经济效益。随着技术的不断进步与管理经验的不断积累，公路工程施工扬尘污染的治理将得到进一步的改善，为我国交通基础设施建设的可持续性发展提供强有力的保证。

参考文献

[1] 解晓亮. 现代城市建筑施工扬尘治理策略研究[J]. 工程设计与设计, 2024, (20): 236-238.  
[2] 周婷婷, 王会娟. 建筑施工扬尘污染防治措施有效性评价方法研究[J]. 资源节约与环保, 2023, (10): 88-91.  
[3] 梁华, 李桂兰, 董焕焕, 等. 公路工程施工扬尘污染防治效果分析[J]. 能源研究与管理, 2022, 14(04): 173-177.  
[4] 郑丹. 建筑施工扬尘排放特征及防治对策[J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38(04): 135-139.  
[5] 王鸯. 浙江省公路工程施工扬尘防治费费率标准研究[J]. 运输经理世界, 2021, (22): 45-47.



# 桥梁工程地基基础检测的重要性及关键技术

吴青峰

华志（重庆）工程技术有限公司，重庆 400700

DOI:10.61369/ERA.2025060026

**摘 要：** 桥梁工程的安全稳定运行依赖于坚实可靠的地基基础，而地基基础检测是确保其质量与性能的关键环节。本文详细阐述了桥梁工程地基基础检测的重要性，包括保障结构安全、满足设计要求、预防病害发生以及为维护决策提供依据等方面。同时，深入探讨了地基基础检测中的关键技术，如地基承载力检测技术、桩基础检测技术以及地基处理效果检测技术等，并分析了各种技术的原理、适用范围及优缺点。通过对这些内容的研究，旨在提高对桥梁工程地基基础检测的重视程度，推动检测技术的发展与应用，从而保障桥梁工程的质量与安全。

**关 键 词：** 桥梁工程；地基基础检测；重要性；关键技术

## Importance and Key Technologies of Foundation Detection in Bridge Engineering

Wu Qingfeng

Huazhi (Chongqing) Engineering Technology Co., Ltd. Chongqing 400700

**Abstract：** The safe and stable operation of bridge engineering relies on a solid and reliable foundation, and foundation detection is a key link to ensure its quality and performance. This article elaborates on the importance of foundation detection in bridge engineering, including ensuring structural safety, meeting design requirements, preventing the occurrence of diseases, and providing a basis for maintenance decisions. At the same time, it explores in depth the key technologies in foundation detection, such as foundation bearing capacity detection technology, pile foundation detection technology, and foundation treatment effect detection technology, and analyzes the principles, scope of application, advantages and disadvantages of various technologies. Through the study of these contents, the aim is to increase the emphasis on foundation detection in bridge engineering, promote the development and application of detection technology, and thereby ensure the quality and safety of bridge engineering.

**Keywords：** bridge engineering; foundation detection; importance; key technologies

## 引言

桥梁作为交通基础设施的重要组成部分，承担着连接不同区域、促进经济发展和人员流动的重要作用。其安全性和稳定性直接关系到公众的生命财产安全以及社会的正常运转。地基基础作为桥梁结构的重要支撑部分，犹如建筑的根基，对桥梁的整体性能起着决定性作用。若地基基础存在质量问题，如承载力不足、沉降过大、桩身缺陷等，可能引发桥梁结构的变形、开裂甚至倒塌等严重事故。因此，开展桥梁工程地基基础检测工作，及时发现并解决潜在问题，对于保障桥梁工程的安全与稳定具有重要意义。

## 一、桥梁工程地基基础检测的重要性

### （一）保障桥梁结构安全

地基基础是桥梁结构的承载主体，其质量状况直接影响桥梁的结构安全。通过检测，可以准确掌握地基基础的实际承载能力、变形特性等参数，判断其是否能够满足桥梁在各种荷载作用下的稳定性要求。例如，在桥梁运营过程中，随着交通流量的增

加以及环境因素的影响，地基基础可能会出现强度降低、沉降不均匀等问题。通过定期检测，能够及时发现这些隐患，并采取相应的加固或修复措施，防止结构安全事故的发生。据相关统计资料显示，许多桥梁垮塌事故的根源在于地基基础的失效，而有效的检测工作可以提前预警，避免此类悲剧的发生。

### （二）确保满足设计要求

桥梁设计是基于一定的地质条件和使用要求进行的，设计文

件中对地基基础的各项参数和性能指标都有明确规定。在施工过程中,由于实际地质情况可能与勘察报告存在差异,以及施工工艺、材料质量等因素的影响,地基基础的实际情况可能偏离设计预期。通过地基基础检测,可以将检测结果与设计要求进行对比,验证施工是否达到设计标准。若发现偏差,可及时调整施工方案或采取补救措施,确保地基基础的性能与设计相符,从而保证桥梁结构的合理性和可靠性。例如,在某桥梁工程中,通过检测发现桩基础的实际承载力低于设计值,经分析原因后,对桩基础进行了加固处理,避免了因承载力不足而可能导致的结构安全问题。<sup>[1]</sup>

### (三) 预防地基基础病害发生

桥梁地基基础长期处于复杂的地质环境和外界荷载作用下,容易受到各种病害的侵蚀,如地基土的湿陷、膨胀、冻融破坏,桩身的腐蚀、断裂等。这些病害在初期可能不易察觉,但随着时间的推移会逐渐发展,对桥梁结构造成严重威胁。地基基础检测能够及时发现这些潜在病害的早期迹象,通过采取针对性的预防措施,如改善排水条件、加强防腐处理等,阻止病害的进一步发展,延长地基基础的使用寿命,降低桥梁的维护成本。例如,对处于湿陷性黄土地区的桥梁地基进行定期检测,及时发现地基土的湿陷变形迹象,并采取相应的地基处理措施,可有效防止因地基湿陷而导致的桥梁病害。

### (四) 为桥梁维护决策提供依据

随着桥梁使用年限的增加,地基基础的性能会逐渐劣化。为了保证桥梁的安全运营,需要定期进行维护和保养。地基基础检测能够为桥梁维护决策提供准确、详细的数据支持。通过对检测数据的分析,可以了解地基基础的劣化程度和发展趋势,评估桥梁的剩余使用寿命,从而制定合理的维护计划和方案。例如,根据检测结果判断出地基基础的某些部位出现了严重的病害,需要及时修复或加固;或者根据地基基础的整体性能状况,确定是否需要桥梁进行限载、限速等措施,以保障桥梁的安全运营。<sup>[2]</sup>

## 二、桥梁工程地基基础检测关键技术

### (一) 地基承载力检测技术

#### 1. 平板载荷试验

平板载荷试验是确定地基承载力的一种常用原位测试方法,适用于各类土、软质岩和风化岩体。该试验通过在地基表面放置一定尺寸的刚性承压板,逐级施加竖向荷载,并测量承压板在各级荷载作用下的沉降量,绘制荷载-沉降( $p-s$ )曲线。根据曲线的形态和特征,结合相关规范和经验方法,确定地基的承载力特征值、变形模量等参数。平板载荷试验的优点是能够直接反映地基在实际受力状态下的承载性能,测试结果较为可靠;缺点是试验过程较为繁琐,需要耗费大量的时间和人力,且对试验场地的要求较高。在实际应用中,平板载荷试验可分为浅层平板载荷试验和深层平板载荷试验,分别适用于不同深度的地基检测。<sup>[3]</sup>

#### 2. 动力触探试验

动力触探试验是利用一定质量的落锤,以一定高度自由落

下,将一定规格的探头打入土中,根据打入土中的难易程度(即贯入锤击数)来判定土层的性质和状态,进而估算地基承载力。该方法适用于粘性土、砂类土和碎石类土等多种土体。动力触探试验设备简单、操作方便,可在不同场地条件下快速进行测试,能够连续获取土层的贯入阻力信息,对地层的变化反应灵敏。但其测试结果受多种因素影响,如落锤的能量、探头的规格、土体的不均匀性等,需要通过经验公式或地区性经验进行承载力的估算,存在一定的误差。在实际工程中,常用的动力触探类型有轻型动力触探、重型动力触探和超重型动力触探,可根据不同的土层条件和检测要求选择合适的类型。

#### 3. 静力触探试验

静力触探试验是通过以静压力将圆锥形探头按一定速率匀速压入土中,测量其贯入过程中的锥尖阻力和侧壁摩阻力(或摩阻比),并根据这些阻力值划分土层,确定土的工程性质,进而估算地基承载力。该试验适用于软土、粘性土、粉土、砂类土及含少量碎石的土层。静力触探试验具有测试速度快、数据连续、精度较高等优点,能够准确反映土层的变化情况,且不受人为因素影响。同时,该方法还可结合地区性经验公式或相关规范,较为准确地估算地基承载力。但其对设备要求较高,试验成本相对较大,且在含有大块石、坚硬土层等复杂地质条件下,可能会出现探头损坏或无法贯入的情况。<sup>[4]</sup>

### (二) 桩基础检测技术

#### 1. 低应变反射波法

低应变反射波法是一种常用的桩身完整性检测方法,其基本原理是在桩顶施加一个低能量的瞬态激振力,使桩身产生弹性波,该弹性波沿桩身传播过程中遇到桩身阻抗变化(如桩身缺陷、桩底等)时,会产生反射波。通过在桩顶安装传感器,接收反射波信号,并对其进行分析处理,根据反射波的传播时间、幅值、相位等特征,判断桩身的完整性,确定缺陷的位置和类型。低应变反射波法具有检测速度快、操作简便、成本低等优点,能够对大量桩进行快速普查。但该方法对缺陷的定量分析能力有限,对于一些深部缺陷或微小缺陷的检测效果可能不理想,且易受桩周土和测试条件的影响。在实际应用中,为提高检测结果的准确性,需要合理选择激振设备和传感器,优化测试参数,并结合工程经验进行综合分析。<sup>[5]</sup>

#### 2. 声波透射法

声波透射法是在灌注桩施工过程中,于桩内预埋若干根声测管,在桩身混凝土达到一定强度后,将超声发射换能器和接收换能器分别置于两根声测管内,通过发射和接收超声波,检测超声波在桩身混凝土中的传播速度、波幅、频率等声学参数的变化情况,从而判断桩身混凝土的完整性,确定缺陷的位置和范围。该方法适用于各种直径的灌注桩,尤其对于大直径灌注桩的检测效果较好。声波透射法能够全面、准确地检测桩身混凝土的质量,对缺陷的定位和定量分析精度较高,且不受桩长、桩径和桩身周围土的影响。但其需要在施工过程中预埋声测管,增加了施工成本和工序,且声测管的安装质量和堵塞情况会对检测结果产生影响。

### 3. 钻芯法

钻芯法是通过采用钻机在桩身中钻取芯样，对芯样进行直观观察和物理力学性能测试，以判断桩身混凝土的强度、完整性、桩底沉渣厚度以及桩端持力层情况等。该方法适用于各类桩基础，是一种直接、可靠的检测方法。钻芯法能够获取桩身混凝土的真实质量信息，对缺陷的判断准确直观，可作为其他检测方法的验证手段。但钻芯法属于半破损检测方法，会对桩身结构造成一定的损伤，且检测成本较高、效率较低，检测数量有限。在实际应用中，通常在对桩身质量存在疑问或其他检测方法无法准确判断时，采用钻芯法进行验证检测。<sup>[6]</sup>

### （三）地基处理效果检测技术

#### 1. 标准贯入试验

标准贯入试验在地基处理效果检测中，可用于评估处理后地基土的密实度和强度变化情况。其试验过程与常规标准贯入试验类似，通过对比处理前后地基土的标准贯入击数，判断地基处理是否达到预期效果。例如，在采用强夯法处理地基后，通过标准贯入试验检测处理后地基土的贯入击数，若击数明显增加，说明地基土的密实度和强度得到了提高，地基处理效果良好。标准贯入试验设备简单、操作方便，但测试结果受多种因素影响，且对地基处理效果的评估较为定性，缺乏精确的定量分析。<sup>[7]</sup>

#### 2. 静力触探试验

如前所述，静力触探试验能够获取地基土的贯入阻力信息，在地基处理效果检测中，通过对比处理前后静力触探测试数据，如锥尖阻力、侧壁摩阻力等参数的变化，可直观地反映地基土工程性质的改变，从而评估地基处理效果。例如，在采用粉喷桩加固软土地基后，对加固区域进行静力触探检测，若处理后地基土的锥尖阻力和侧壁摩阻力显著增大，表明粉喷桩加固效果良好，地基土的承载能力得到了提高。静力触探试验测试数据连续、精度较高，能够较为准确地评估地基处理效果，但对设备和操作要求较高，且在复杂地质条件下可能存在一定局限性。<sup>[8]</sup>

#### 3. 载荷试验

载荷试验在地基处理效果检测中，可直接测定处理后地基的承载力和变形特性，是评估地基处理效果最直接、最可靠的方法之一。通过在地基上进行处理后进行平板载荷试验或其他类型的载荷试验，获取地基在不同荷载作用下的沉降数据，绘制荷载 - 沉降曲线，根据曲线特征和相关规范确定地基的承载力特征值、变

形模量等参数，并与设计要求进行对比，判断地基处理是否满足设计要求。例如，在采用换填法处理地基后，进行平板载荷试验，若试验测得的地基承载力和变形模量达到或超过设计值，说明换填处理效果良好。载荷试验测试结果准确可靠，但试验过程繁琐、成本高、时间长，且对试验场地要求严格，通常在重要工程或对地基处理效果要求较高的情况下采用。<sup>[9]</sup>

## 三、检测技术的融合与发展趋势

当下，单一检测技术难以满足复杂多变的桥梁地基基础检测需求，多种检测技术的融合应用成为趋势。例如，在桩基础检测中，低应变反射波法用于快速普查桩身完整性，发现异常后，再采用声波透射法或钻芯法进行精确定位和定量分析，这样既能提高检测效率，又能保障检测精度。

同时，随着物联网、大数据和人工智能技术的不断进步，桥梁工程地基基础检测正朝着智能化、自动化、高精度方向发展。借助传感器网络，可实时采集地基基础的应力、应变、沉降等数据，并通过大数据分析挖掘潜在问题。人工智能算法能对检测数据进行智能诊断，快速准确地识别病害类型和程度，大幅提升检测工作的质量与效率，为桥梁工程地基基础检测开辟新的路径。<sup>[10]</sup>

## 四、结论

综上所述，桥梁工程地基基础检测在保障桥梁结构安全、确保满足设计要求、预防地基基础病害以及为桥梁维护决策提供依据等方面具有不可替代的重要作用。同时，随着工程技术的不断发展，各种地基基础检测关键技术也在不断完善和创新，为准确评估地基基础的质量和性能提供了有力的手段。在实际工程中，应根据桥梁的类型、地质条件、设计要求以及施工情况等因素，合理选择检测技术和方法，确保检测工作的科学性、准确性和有效性。此外，还应加强对检测人员的培训和管理，提高检测技术水平和质量意识，严格按照相关规范和标准进行检测操作，以保证检测结果的可靠性。通过不断重视和加强桥梁工程地基基础检测工作，能够有效提升桥梁工程的质量和安全性，延长桥梁的使用寿命，为交通运输事业的发展提供坚实的保障。

## 参考文献

- [1] 尤奎. 桥梁工程地基基础检测的重要性及关键技术 [J]. 绿色环保建材, 2019 (12):228+230.
- [2] 陈磊. 桥梁工程地基基础检测技术分析 [J]. 交通世界, 2020 (11):116-117.
- [3] 张旭. 桥梁工程地基基础检测的重要性及关键技术 [J]. 建材与装饰, 2019 (28):265-266.
- [4] 刘立军. 桥梁工程地基基础检测技术要点分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43 (01):127+129.
- [5] 朱光强. 桥梁工程地基基础检测技术研究 [J]. 四川水泥, 2019 (09):292.
- [6] 王磊. 桥梁工程地基基础检测的重要性及关键技术探讨 [J]. 居舍, 2019 (27):173.
- [7] 刘斌. 桥梁工程地基基础检测技术的应用 [J]. 工程建设与设计, 2019 (16):116-117.
- [8] 李庆华. 桥梁工程地基基础检测技术研究 [J]. 科技创新导报, 2019, 16 (22):54-55.
- [9] 宋磊. 桥梁工程地基基础检测技术的应用分析 [J]. 四川建材, 2019, 45 (07):162-163.
- [10] 李勇. 桥梁工程地基基础检测技术要点探究 [J]. 交通世界, 2019 (19):128-129.

# 基于智慧工地的建筑工程安全管理研究

吴建伟

中建三局集团有限公司, 湖北 黄石 435500

DOI:10.61369/ERA.2025060033

**摘要：** 当下建筑行业蓬勃发展、规模不断扩大，工程安全管理面临着更为复杂的挑战，传统管理模式已难以满足实际需求。本文聚焦基于智慧工地的建筑工程安全管理研究，详细分析了其在提升智能水平、优化管理流程、构建智慧体系等方面的重要意义，阐述了建立智能监测系统、强化人员定位监管、运用数据分析手段、完善预警响应机制的策略，旨在提升建筑工程安全管理的效率与水平，为保障工程安全提供有力支撑。

**关键词：** 智慧工地；建筑工程；安全管理

## Research on Safety Management of Construction Engineering Based on Smart Construction Site

Wu Jianwei

China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd. Huangshi, Hubei 435500

**Abstract：** With the vigorous development and continuous expansion of the construction industry, engineering safety management is facing increasingly complex challenges, and traditional management models can no longer meet actual needs. The introduction of the smart construction site concept offers new opportunities for improving safety management in construction projects. This paper focuses on the study of construction safety management based on smart construction sites, thoroughly analyzing its significance in enhancing intelligence, optimizing management processes, and building intelligent systems. It also outlines strategies such as establishing intelligent monitoring systems, strengthening personnel positioning supervision, applying data analysis techniques, and improving early warning and response mechanisms. The goal is to improve the efficiency and effectiveness of construction safety management and provide strong support for ensuring engineering safety.

**Keywords：** smart construction site; construction engineering; safety management

## 引言

面对日益增长的工程体量，传统的安全管理模式在信息获取、决策效率或者资源协调上暴露出明显短板，智慧工地不是对原有体系的简单技术补充，而是安全管理范式的一次跃迁，施工单位建立高精度传感、实时数据流及智能算法的新型安全生态能够实现从点状监管到系统感知的转变。在这种架构下安全不只是落实规范，更成为信息流、管理流与执行流协同作用的结果。由此展开的智慧工地安全管理探索不但能回应技术进步的现实呼声，也能揭示出工程治理逻辑重构的内在动力。

## 一、基于智慧工地的建筑工程安全管理研究意义

### （一）提升智能水平，强化安全理念

施工单位将感知技术、人工智能等系统性工具深度嵌入施工环境中能够使建筑工程的管理链条从数据采集到风险识别形成完整闭环，从而促使管理者在认知路径上更加依赖实时信息或智能决策，改变以往“经验主导”的思维惯性。这种变化能够增强安全意识的前置性，让安全管理从“被动响应”逐步转向“智能预

防”，在本质层面推动理念的结构升级<sup>[1]</sup>。智能化的渗透还能促使建筑施工活动在运行逻辑上逐渐系统化，管理行为能够实时映射，这样一来，安全理念不再只是抽象口号而是以数据形态融入现场调度及资源配置的各个环节。同时，管理者在数字支持下能更清晰地识别潜在风险、更科学地评估安全状态，进而形成以数据驱动为内核的安全文化，建立这种文化能够提升工程管理的专业深度并强化工程参与者的整体安全自觉<sup>[2]</sup>。



## （二）优化管理流程，提高决策效率

施工单位引入智慧工地能够使这些流程由线性走向网状，由静态走向动态，各类传感器设备及数据终端的布设能够打破信息传递的滞后，让施工现场的运行状态能够实时上传并汇聚于统一平台。信息的通畅能压缩管理反应的时间维度也能为后续的决策提供精准的基础数据，这种结构性优化能够显著提升组织效率以及指挥调度的响应速度<sup>[3]</sup>。在复杂工程环境中传统的判断模式面对多工种交叉、多节点协同的管理挑战，通常受限于信息不全或认知偏差，而智慧工地建立的数据图谱及关联网络能够对潜在风险或瓶颈环节提前发出提示，这种系统性的支持让管理层能够在最短时间内做出相比之下最优的决策，以避免信息滞后带来的误判，进一步提高管理的科学性以及工程推进的连贯性<sup>[4]</sup>。

## （三）构建智慧体系，推动行业升级

智慧工地构建贯穿施工全周期的信息集成体系能够打破传统工地“信息孤岛”现象，让数据成为驱动资源配置、流程优化的关键变量，这种体系化的技术融合不再依赖于个体经验或人为判断，而是利用标准化的运行机制逐步建立以数据流为核心的组织结构，让行业整体的运作逻辑慢慢向现代产业体系靠拢<sup>[5]</sup>。智慧工地相关技术的系统不断嵌入能够使建筑行业在信息技术与工程实践的双重推动下释放更大的能效，工程管理平台与现场设备之间形成多层联动的智能感知链能够实现施工状态的透明化并催生出全新的产业接口，这一体系能够为企业内部管理提供高度协同的技术支撑并促使行业从以劳动密集为特征的传统形态迈向以科技密度为标志的现代格局<sup>[6]</sup>。

# 二、基于智慧工地的建筑工程安全管理的策略

## （一）建立智能监测系统，排查安全隐患

建筑工地属于高风险作业环境，安全管理的有效性取决于对风险信息的即时掌握及精准判断，施工单位构建智能监测系统，可以将环境感知、人员行为识别、机械运行状态等关键数据实时采集、统一传输并进行自动分析处理。该系统的核心价值在于将感知节点、数据平台与安全预警功能进行有机联通，实现对隐患因素的快速识别<sup>[7]</sup>。相对于传统手段来讲，智能监测具备可视化、动态化、全过程的特点，能够让安全管理具有更强的前瞻性，从而减少因信息滞后带来的管理盲区并增强整体工程的安全韧性。

例如，在施工现场施工单位借助智能监测系统布设多类型传感器，实时感应脚手架倾斜、塔吊运行、基坑变形等关键指标并将数据自动上传至统一管理平台，该平台具备强大的数据处理能力，能够实现数据的自动汇聚或分类，还能依据设定参数进行状态识别或趋势分析。如果检测到塔吊晃动频率超过安全阈值，系统会立即启动预警机制，将警示信息同步传达至管理终端及移动设备并以图像、文字或语音的形式进行多渠道提示，这种自动响应方式可以在短时间内完成信息的识别处理，避免人为判断带来的延误，进而大幅提升现场响应的时效性。除了对环境因素的监测，智能系统还可融合视频识别及定位技术实时监管人员作业行为，如果识别到施工人员未佩戴安全帽、误入危险区域或存在高

空作业未系安全绳等违规行为，系统会自动抓拍影像并发出警报，同时将事件记录生成日志，供管理者留存，这种方式能够实时干预违规行为并为事后复盘提供完整的证据链。在数据处理逻辑上，系统能够依据不同隐患类型建立事件等级模型并根据风险轻重推送差异化处理策略，对轻度异常提出操作建议，对严重隐患实施强制停工指令，从而进一步实现差异化管理，管理工作在这种智能化体系的支持下不再只依赖于人工经验的主观判断，而是利用数据逻辑实现客观决策，显著提升排查效率或预警精准度。

## （二）强化人员定位监管，规范作业行为

在建筑工程安全管理中，作业人员的行为规范性直接关系到现场秩序或整体风险水平，施工单位应用定位监管技术可以实现对人员位置的精准追踪并掌握其在场时间、活动轨迹以及进入区域的合规性<sup>[8]</sup>。相较于传统点名巡查方式，智能化监管更具实时性，它可建立动态的人员监测机制，清晰描绘作业人员的实时分布并有效识别异常移动、长时间停留等风险行为以及及时发出干预信号。施工单位进行这种系统化管理方式，有助于将个体行为纳入整体监管架构并提升作业安全的组织效率及规范性，从而建立以数据支撑为基础的安全运行逻辑。

例如，施工单位在实际场景中可借助人员定位系统布设信号基站及佩戴式定位设备，实现对施工人员全时段的精准追踪，每位作业人员的进出场时间等数据都会被自动记录并上传至管理平台，系统会持续运行并生成动态分布图帮助管理者实时掌握现场人力分布情况，这种自动响应机制能够让监控作业秩序更加主动高效，减少管理的盲区。系统还支持设定区域权限与作业时间段，限定焊接工段或起重设备作业区仅对持证人员开放，一旦识别到非授权身份靠近系统会立即识别并启动阻断机制，这些权限设置能够有效降低因误入、误操作引发的事故概率。同时，管理平台可基于人员行为轨迹开展周期性统计，输出个体及班组的行为稳定性报告，便于评估作业规范程度及团队管理成效，对于频繁越界的行为模式将会在平台上清晰可见，为后续行为纠偏提供数据支撑。人员定位监管不仅是现场调度的工具，更是一种系统化、数字化的安全管理方式，能够促使施工现场从经验管理走向数据治理，提升工程整体的组织效能。

## （三）运用数据分析手段，预警风险区域

施工单位利用数据分析手段对施工现场的大量运行信息进行归纳并分类可以识别出存在高频异常的空间区域以及阶段性隐患积聚点，数据能提供对现场状态的多维视角，也能为预警机制的构建提供科学支撑<sup>[9]</sup>。施工单位借助管理平台对传感器信息、作业行为记录、设备运行日志等数据的持续分析能够动态判断各作业区的安全等级，从而建立起基于风险概率的区域管控逻辑，这种方式能够大幅提升隐患识别的系统性，让安全管理由结果导向转变为过程控制，推动风险识别从静态清单走向动态预警。

例如，在实际应用中施工单位可利用管理平台定期汇总施工现场温湿度变化、结构受力变化、设备运行异常记录、人员聚集密度及环境扰动频率等各类数据。数据处理程序可将不同指标交叉分析，识别出风险因子密集区域并以图像热力图或分级风险区

域图的方式呈现在管理界面上,便于管理人员快速了解重点关注区域的位置或风险水平,当同一位置短时间内出现多次人员停留、设备报警频繁且结构传感器出现微小但持续的变化,系统就会标注该区域为中高风险区并启动预警提示程序,同时记录该风险区域的演变过程。平台还可生成时间序列图追踪风险区域的扩展趋势,为管理者提供干预节奏或优先顺序的判断依据,在这个基础上系统会进一步支持设定自动关联机制,如果有区域被判定为高风险区域,则相关作业权限会自动冻结,人员定位系统会同步提醒管理人员强化监管。另外,数据分析还能用于长周期趋势识别,在高温季节或连续降雨后一些区域的风险波动更频繁,系统可据此提供针对性预案建议,这种深度整合的方式能够使数据分析提升风险感知的广度并促使管理者从经验主导的模式走向系统化的安全管理路径。

#### (四)完善预警响应机制,提高应急效率

建筑工程具有工序密集、人员流动性大、作业环境复杂等特点,突发安全事件一旦发生,影响范围就会很广且处置难度极大,预警响应机制不应该止步于信息提示,而应形成信息判断、资源联动等多环节协同体系<sup>[10]</sup>。施工单位借助智慧工地平台整合各类安全监测、人员管理或通信系统,能够在发现风险信号后迅速响应并协调处置路径,有效避免应急资源的无序调配,此类机制的关键在于将预警信号从提示层面延展到行动层面并借助系统联动缩短事件从发现到干预的时间跨度,提升风险控制的即时性。

例如,在项目实施过程中施工单位可利用系统平台对人员密集程度变化、设备运行波动、气体浓度异常等各类风险指标进行

自动识别,若异常数据触发预警阈值,平台就会将相关信息同步至现场终端并自动生成事件响应方案,明确疏散路线、责任分工及处置流程。如果有区域被标定为危险区,语音广播系统就会同步启动并通知附近人员撤离,系统中的应急资源调度模块会根据事先配置的响应逻辑,自动启动就近的安全员定位,并指引其前往预设处置点。同时视频监控系统自动聚焦该区域,便于远程监看现场动态。平台还具备状态反馈功能,能实时记录响应过程中的预警响应时间、处置步骤、人员反馈情况与事件关闭时间等每一处动作,整个过程会被系统自动归档并生成响应评估报告,用于分析应急效果或后期改进方向。此外,该机制还可与移动端应用打通,让现场人员能在第一时间接收指令、反馈状况,实现“通知—行动—反馈”的快速闭环。

### 三、结束语

智慧工地能够重构安全管理的技术体系并深刻推动工程治理理念的范式转变,是建筑工程管理模式的革新方向。智能感知、数据联动及系统决策的多维协同能够让建筑现场的风险识别更加精准,响应机制更具时效,安全管理实现从经验依赖向科技驱动的跃迁。施工单位的这一变革能够回应高风险作业环境下对精细化监管的现实需求并为推动建筑行业整体迈向数字化、智能化与规范化发展注入结构性动力。未来,在制度设计及技术创新持续深化下智慧工地所建立的安全管理体系将不再局限于项目层面,而将在行业治理格局中扮演更加基础而关键的角色。

### 参考文献

- [1] 赖勇坚. 智慧工地在建筑工程安全管理和质量管理中的应用[J]. 广西城镇建设, 2025, (02): 61-65.
- [2] 杨智南. 智慧工地在建筑工程安全管理中的应用研究[J]. 散装水泥, 2024, (03): 181-183.
- [3] 陈耀华. 智慧工地视域下房屋建筑工程质量安全路径探析[J]. 建设科技, 2024, (10): 69-71.
- [4] 吴东晋. 探究智慧工地在建筑工程安全管理和质量管理中的应用[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (05): 137-139.
- [5] 刘力. 基于智慧工地管理系统的建筑工程安全管理研究[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(04): 31-33.
- [6] 王娟. 智慧工地建设下建筑工程安全管理措施[J]. 中华建设, 2024, (04): 65-67.
- [7] 汪庆胜. 智慧工地在建筑工程安全管理中的应用研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (33): 35-37.
- [8] 陈俊宇. 探究智慧工地在建筑工程安全管理和质量管理中的应用[J]. 产品可靠性报告, 2023, (08): 45-46.
- [9] 袁超超. 智慧工地在建筑工程安全管理中的应用[J]. 智慧中国, 2023, (06): 94-95.
- [10] 韩转弟. 智慧工地在建筑工程安全管理中的优势研究[J]. 智慧中国, 2023, (Z1): 92-93.

# 智能建造技术驱动下建筑工程管理模式创新与实践路径

王玲

武汉市市政建设集团有限公司，湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ERA.2025060037

**摘 要：** 本文深入剖析智能建造技术的核心构成要素，及其对管理流程重构、协同模式升级、成本安全精准管控的多维影响，探讨传统管理模式在组织架构、决策机制、执行效率等层面的局限性，明确智能化转型的创新方向。在此基础上构建“技术层－管理层－应用层－保障层”四位一体的立体化创新框架，并从政策引导体系构建、企业数字化能力提升、标杆项目示范引领、产学研用协同创新四个维度提出可落地的实践路径，以期为建筑业高质量发展提供兼具理论深度与实操价值的转型范式。

**关 键 词：** 智能建造技术；建筑工程管理；数字化转型；创新框架；实践路径

## Innovation and Practical Path of Construction Engineering Management Mode Driven by Smart Construction Technology

Wang Ling

Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430000

**Abstract：** This paper deeply analyzes the core components of smart construction technology and its multi-dimensional impact on management process reconstruction, collaboration mode upgrading, and precise cost and safety control. It explores the limitations of traditional management modes in terms of organizational structure, decision-making mechanisms, and execution efficiency, and clarifies the innovative direction of intelligent transformation. On this basis, a four-in-one three-dimensional innovation framework of "technology layer – management layer – application layer – support layer" is constructed, and practical paths are proposed from four dimensions: policy guidance system construction, enterprise digital capability enhancement, benchmark project demonstration leadership, and industry-university-research collaborative innovation, aiming to provide a transformation paradigm with both theoretical depth and practical value for the high-quality development of the construction industry.

**Keywords：** smart construction technology; construction engineering management; digital transformation; innovation framework; practical path

## 引言

随着全球建筑业向绿色化、工业化、智能化升级，传统以人工协调和经验驱动为特征的管理模式已难以适应高质量发展需求。智能建造技术以数字化赋能与智能化重构为核心，通过技术集成与管理创新的深度融合，正在重塑建筑工程全生命周期的管控逻辑。本文系统梳理智能建造技术对管理模式的影响机制，构建创新框架并提出可落地的实践路径，以期为行业转型升级提供理论支撑与实践指引。

## 一、智能建造技术及其对建筑工程管理模式的影响

### （一）智能建造技术概述

智能建造技术是融合数字化、信息化、自动化与智能化理念的新型建造体系，通过建筑信息模型（BIM）、物联网（IoT）、人工智能（AI）、大数据分析、云计算、5G 通信、自动化机器人、虚拟现实（VR）/ 增强现实（AR）等技术的集成应用，实现建筑工程从设计、施工到运维全生命周期的效率提升、质量优化与安全强化。其中 BIM 技术作为基础框架，以三维数字化模型整

合全流程信息，支撑设计方案的可视化模拟与优化；物联网通过传感器网络实时采集施工现场数据，构建智能监控体系；自动化机器人则替代人工完成高风险、重复性作业，提升施工精度。建筑工业化强调标准化、模块化和批量化生产，以提高建筑质量和效率，是智能建造的重要基础。智能建造则强调在工程建造过程中融入人工智能为核心的新一代信息技术，它不仅是工程建造技术的创新，还将从经营理念、市场形态、产品形态、建造方式以及行业管理等方面重塑建筑业，它是建筑业发展的新质生产力<sup>[1]</sup>。



## （二）智能建造技术对建筑工程管理模式的影响

智能建造技术通过技术赋能，推动建筑工程管理模式从“碎片化、经验化、滞后性”向“数字化、集成化、动态化、智能化”变革。全生命周期数字化平台将设计、施工、运维阶段数据集成于统一 BIM 模型，实现信息实时共享与动态更新<sup>[2]</sup>。设计阶段利用参数化设计与 AI 算法自动生成多方案比选，优化建筑性能；施工阶段通过 4D 进度模拟动态调整资源配置、预警偏差；运维阶段基于物联网数据实现设施设备预测性维护。云端协同平台打破业主、设计、施工、监理等参与方的信息壁垒，支持跨地域、跨专业实时协作，例如设计单位通过 BIM 模型同步沟通变更以减少返工，业主通过可视化仪表盘实时监控决策，各参与方基于 IFC 等统一数据标准降低沟通成本<sup>[4]</sup>。大数据分析机器学习算法实现精准管控，成本控制借助历史数据建模对比实际与目标成本、区块链技术提升供应链透明度；进度控制基于物联网采集的施工数据（如机械作业时长、人员考勤），通过 AI 算法动态优化计划、缩短工期。安全与质量管理则通过智能感知与预警系统实现革新：安全管理利用安全帽传感器、塔吊防碰撞系统、基坑监测雷达等实时监测风险并预警，结合 VR 培训提升应急能力；质量管理通过 3D 激光扫描检测施工偏差，运用区块链追溯材料全流程数据。企业向扁平化、专业化转型，设立 BIM 中心、智能建造研究院等数字化部门统筹技术应用，同时人才需求从单一技能型转向“建筑+科技”兼具传统工程管理知识与 BIM、编程、数据分析等技能的复合型人才。尽管技术应用带来显著变革，但其推广面临技术投入高、数据安全风险、标准体系不完善、劳动力技能转型慢等挑战，需通过政策扶持、产学研合作、建立行业标准、强化人才培养等方式逐步推进管理模式智能化转型。

## 二、智能建造技术驱动下建筑工程管理模式创新

### （一）传统建筑工程管理模式的特点与局限性

传统建筑工程管理模式以层级化组织架构为核心，管理流程呈现碎片化特征，决策高度依赖经验且反馈机制滞后。设计、施工、运维各阶段由不同主体分割管理，信息传递依赖纸质文件与人工协调，形成“信息孤岛”，导致设计变更需多次会议确认、施工进度调整缺乏动态手段，突发因素易引发工期延误。成本控制依赖人工事后核算，无法实时监控偏差；质量安全管理以抽样检查和事后处理为主，如混凝土浇筑后强度检测、安全风险依赖人工巡查，难以实现过程纠偏与风险预判<sup>[4]</sup>。此外传统模式对劳动力密集型作业的过度依赖，加剧了行业对人口红利的消耗，随着劳动力成本上升与老龄化问题凸显，其可持续性面临严峻挑战。

### （二）智能建造技术驱动下建筑工程管理模式创新方向

智能建造技术以数字化赋能与智能化重构为核心驱动力，推动建筑工程管理模式向全流程集成化、决策智能化、协同实时化、管控动态化深度变革。基于建筑信息模型（BIM）构建的全生命周期数字化管理体系，将设计参数、施工工艺、运维数据等全要素集成于统一数字平台，实现从概念设计到运营维护的全链条信息贯通。设计阶段依托 AI 算法对建筑形体、能耗指标等进行智能优化；施工阶段通过物联网传感器实时采集机械运行数据，动态调整工序衔接与资源配置；运维阶段基于设备运行数据自动生成预测性维护工单<sup>[5]</sup>。跨参与方协同管理借助云端平台与 5G 通

信技术打破主体壁垒，形成实时联动的协作网络：设计团队通过 BIM 模型与施工方同步标注超万处管线碰撞点，减少 90% 现场返工；业主利用 VR 技术沉浸式介入施工管控，在幕墙工程等场景中即时反馈调整需求，规避传统二维沟通的理解偏差；各参与方基于 IFC 等统一数据标准实现模型互通，单项目可减少超 500 万元因数据冲突引发的沟通成本。智能建造技术的价值并非单一工具的替代，而是通过数据贯通、流程再造、决策升级、装备革新的系统协同，推动管理模式从“经验驱动”向“数据驱动”的范式跃迁。

### （三）智能建造技术驱动下建筑工程管理模式创新框架

智能建造驱动的管理模式创新需构建“技术层—管理层—应用层—保障层”协同的立体化框架。技术层以 BIM 为核心搭建数字化平台，集成云计算、区块链技术实现数据存储与供应链透明化，并通过物联网传感器与自动化机器人构建“数据采集—决策—执行”闭环，如塔吊智能防碰撞系统实时监测并触发制动。管理层通过设立数字化管理中心（如 BIM 技术中心）推动组织架构扁平化，重构管理流程并建立数据采集、传输、应用的全流程标准，同时通过校企合作培养“建筑+信息技术”复合型人才，例如企业与高校联合开设智能建造管理研修班<sup>[6]</sup>。应用层覆盖设计、施工、运维全场景，设计阶段利用生成式设计 with VR 技术缩短周期 30%，施工阶段通过 4D 进度模拟与无人机巡检实现动态管控，运维阶段借助 AR 技术与大数据分析降低成本 40%。保障层依赖政策支持（如浙江省建筑机器人补贴）、产学研协同创新攻克技术瓶颈，并制定数据安全标准与伦理规范，确保技术应用的规范性与安全性。

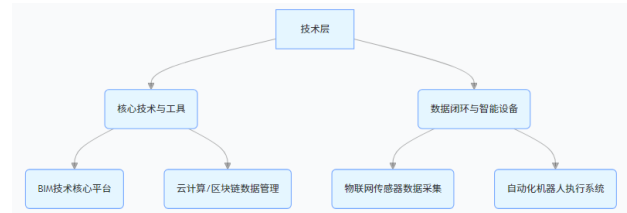


图 2.1 技术层框架图

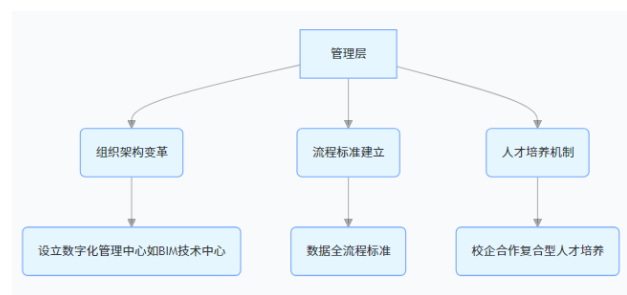


图 2.2 管理层框架图

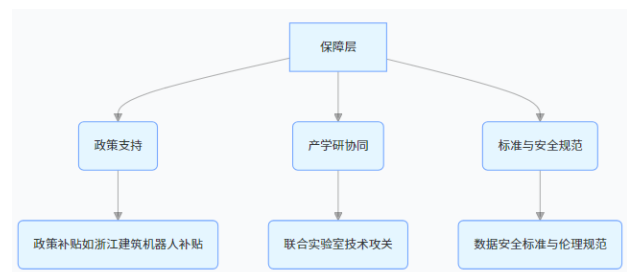


图 2.3 保障层框架图



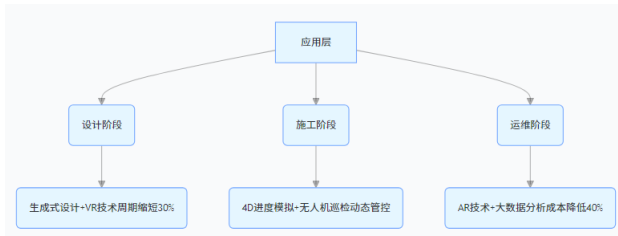


图 2.4 应用层框架图

### 三、智能建造技术驱动下建筑工程管理模式创新的实践路径

#### （一）政策引导与标准体系建设

政策支持与标准体系是智能建造管理模式创新的顶层驱动力，政府需通过宏观规划、资金扶持、法规完善三位一体的政策框架，为技术应用营造制度环境。例如我国《“十四五”建筑业发展规划》明确将智能建造列为重点任务，地方政府可借鉴浙江省经验，对应用建筑机器人、BIM 技术的项目给予每台设备最高 50 万元补贴或税收减免，降低企业技术投入门槛。在标准建设方面，需加快制定跨行业数据交互标准（如建筑工程数据分类分级标准）、智能装备作业规范（如《施工机器人安全操作指南》）及管理流程标准（如《智能建造项目全流程管理规程》），解决当前技术应用中数据孤岛、操作规范缺失等问题<sup>[7]</sup>。例如深圳市住建局发布《建筑信息模型（BIM）实施管理标准》，统一了设计、施工、运维阶段的 BIM 应用流程与交付要求，提升了项目协同效率。

#### （二）企业转型升级与能力建设

建筑企业是管理模式创新的实践主体，需从组织变革、技术应用、人才储备三方面推进转型升级。传统企业可参照某大型央企做法，成立智能建造事业部或 BIM 中心，统筹技术应用与跨部门协作，打破层级化架构对数字化转型的阻碍。优先在试点项目部署 BIM + 智慧工地平台，集成物联网监测、无人机巡检等模块，实现成本、进度、安全的动态管控<sup>[8]</sup>。例如某建筑集团在商业综合体项目中采用 BIM 技术优化管线综合，减少现场返工量 40%，同时通过智慧工地平台实时监控塔吊运行数据，杜绝了设备超载事故。人才培养方面，企业需建立“内部培训 + 外部合作”机制，如与高校共建智能建造产业学院，开设 Python 编程、机器学习在工程管理中的应用等课程，培养既懂施工工艺又具备数据

分析能力的复合型人才。

#### （三）项目实践与应用示范

项目是智能建造技术落地的核心场景，通过标杆项目示范可形成可复制的管理模式。在房建领域，可选取医院、学校等功能复杂项目，应用 BIM + 装配式建造技术，实现设计预制一体化。例如上海某医院项目采用 BIM 模型指导预制构件生产，现场装配效率提升 50%，工期缩短 6 个月。在基础设施领域，桥梁、隧道项目可引入物联网监测与自动化施工设备，如港珠澳大桥岛隧工程通过部署 thousands of 传感器实时监测沉管应力应变，结合 AI 算法预测结构安全风险，保障了海底隧道的精准对接<sup>[9]</sup>。示范项目需重点关注技术集成应用效果，如某智慧小区项目整合了 BIM 运维管理、光伏智能供电、垃圾智能分类系统，实现了建筑全生命周期能耗降低 30%、运维成本减少 40% 的目标，为绿色智能建筑提供了实践样本。

#### （四）产学研用协同创新

产学研用协同是突破技术瓶颈、加速成果转化的关键机制，高校与科研机构可聚焦前沿技术研发，如清华大学研发的机器人自主导航系统、东南大学的多源工程数据融合算法，为智能建造提供理论支撑。企业需与科研团队建立联合实验室或“揭榜挂帅”机制，针对性解决工程难题。例如某建筑企业与中科院合作开发的混凝土 3D 打印技术，已实现 10 层住宅的全流程自动化建造，施工效率提升 80%<sup>[10]</sup>。行业协会应发挥桥梁作用，组织编写智能建造技术应用案例库，推广成熟经验。此外可借鉴德国“双元制”模式，建立校企联合培养基地，如某高校与中建集团合作开设“智能建造订单班”，学生在校学习 BIM 建模、机器人操作等理论，在企业完成项目实践，毕业后直接上岗，缓解了行业人才短缺问题。

### 四、结束语

智能建造技术驱动的建筑工程管理模式创新，不仅是技术工具的迭代，更是建筑业生产方式与管理理念的根本性变革。从传统模式的“经验依赖”到智能模式的“数据驱动”，其核心在于通过技术集成打破管理壁垒、通过流程再造释放协同效能、通过智能决策提升管控精度。尽管当前技术投入成本、数据安全标准、人才技能转型等挑战仍需破解，但上海超高层综合体的全生命周期数字化管理、港珠澳大桥的智能监测体系等实践已证明，智能建造正以不可逆转的趋势重塑行业格局。

### 参考文献

- [1] 周绪红. 发展智能建造技术培育建筑业新质生产力 [J]. 建筑, 2024, (12): 10-11.
- [2] 李胤. 智能建造与建筑工业化关键技术分析 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(24): 206-208. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2024.24.067.
- [3] 陈棉, 陈晶, 王义. 智能建造背景下 BIM 在住宅建筑安全管理中的应用研究 [J]. 建筑经济, 2024, 45(S2): 251-254. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.2024S2251.
- [4] 林炬. 基于智能建造技术的智慧工地项目实践分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (33): 103-105. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202433034.
- [5] 王元彬, 尚佳伟. 智能建造在建筑施工中的应用实践 [C]// 中国图学学会. 2024 第十三届“龙图杯”全国 BIM 大赛获奖工程应用文集. 中天建设工程集团有限公司, 2024: 102-107. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.043032.
- [6] 伍传瑜, 张真心, 宋瑞芸, 等. 基于全生命周期的智能建造技术系统研究与设计 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2024, (11): 70-73.
- [7] 郭跃, 管吟波. 智能建造技术技能人才培养路径优化研究 [J]. 教育理论与实践, 2024, 44(30): 30-33.
- [8] 郝毅. 智能建造技术在建设工程管理中的创新应用研究 [J]. 新城建科技, 2024, 33(07): 188-190.
- [9] 吕哲琦, 温董瑶. 智能建造技术建筑全生命周期应用研究 [J]. 项目管理技术, 2024, 22(07): 110-114.
- [10] 赵志远, 周建良. BIM 技术在智能建造项目中的全过程应用 [C]//《施工技术 (中英文)》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2024 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集 (中册). 中建八局第三建设有限公司, 2024: 930-934. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.028137.

# 填石路基施工技术在江北快速路工程中的应用

谢模红, 李扬

武汉航空港发展集团有限公司, 湖北 武汉 432200

DOI:10.61369/ERA.2025060038

**摘 要 :** 针对江北快速路工程中部分路段存在规划排水通道无法实施、地下水丰富且水位高、堤防压浸台填土质量差及地势低导致施工环境受限等问题, 本研究以汉口至阳逻江北快速路工程为例, 详细介绍了填石路基施工技术在江北快速路工程中的应用。分析发现, 填石路基施工技术在江北快速路工程中的成功应用, 为复杂地质条件下的城市快速路建设提供了典型范例。通过分析, 文章旨在总结填石路基施工技术在工程中的应用经验, 为类似工程提供技术参考, 以推动填石路基施工技术在城市快速路建设中的进一步应用和发展。

**关 键 词 :** 江北快速路; 填石路基; 施工技术; 质量控制; 地质水文

## Application of Stone-Filled Roadbed Construction Technology in Jiangbei Expressway Project

Xie Mohong, Li Yang

Wuhan Airport Development Group Co., Ltd. Wuhan, Hubei 432200

**Abstract :** In view of the problems in some sections of the Jiangbei Expressway project, such as the inability to implement planned drainage channels, abundant groundwater and high water levels, poor soil quality of the embankment impregnation platform, and limited construction environment due to low terrain, this study takes the Hankou-Yangluo Jiangbei Expressway project as an example to introduce the application of stone-filled roadbed construction technology in detail. Analysis found that the successful application of stone-filled roadbed construction technology in the Jiangbei Expressway project provides a typical example for the construction of urban expressways under complex geological conditions. Through analysis, the article aims to summarize the application experience of stone-filled roadbed construction technology in this project, provide technical reference for similar projects, and promote the further application and development of stone-filled roadbed construction technology in the construction of urban expressways.

**Keywords :** Jiangbei Expressway; stone-filled roadbed; construction technology; quality control; geology and hydrology

## 引言

在城市交通高速发展的背景下, 城市快速路所面对的地质、水文等问题日益严峻且复杂。以高强度、高稳定性和良好渗透性为主要特点的填石路基施工技术已被广泛用于高填方和软土地基的处理中。汉口—阳逻江北快速路工程是我国重要的交通枢纽, 其施工面临着许多路基处理的难点, 常规的地基处理方法难以满足高含水率及高压缩性土的要求, 常常伴随压实难度大、沉降控制难等困难, 而以其高强度、高渗透性和高施工效率的填石路基施工技术成为解决这一问题的核心<sup>[1]</sup>。

## 一、工程概况

汉口—阳逻江北快速路(江岸段—黄陂段)工程是一条以60—80km/h为设计速度的快速路, 其红线规划宽度50—70m。本项目以二七长江大桥与沿线大道的交叉口为起点, 经过八厂联防、朱家河、谌家矶、新河、武湖、花楼街、过沙口村后与在建的新洲区阳逻段连接, 主路总长21.335km, 主路桩号

K0+000 ~ K21+437.254。

“堤路结合”是该项目的核心设计思想, 而谌家矶路段由于受到了国际足球馆的干扰, 因此采取了分离式的路基处理方式, 在左侧公路和谌家矶南路的设计标高中, 路面的构造层要高于原来的地面; 为减小填土工作量, 花楼街路段采取了与压浸台相配合的设计方法, 使设计高程在原有基础标高之上1.5m左右。

在实际建设中, 由于原有的规划红线以外的一些排水设施

无法实施，加之地下水水位较高，局部堤防的压浸台填料不合格，致使路基的质量得不到保证。此次路基整治工程的范围是：谏家矶段设计桩号 K5+500 ~ K5+760（整体式路基）、TK0+000 ~ TK3+500 段（谏家矶段分离式左半幅）、谏家矶南路，花楼街至沙口村路段的 K13+980.3 ~ K20+000 段。

工程区地处长江北部的第一级台阶上，地势平坦，地形开阔，底层主要岩性为人工填土、全新统的冲统冲、湖积层等，有些地段还含有淤泥质和粉土。该地区的地下水以上部滞水区和孔隙承压水为主，其上部滞水区具有明显的季节性差异，对路基的建设有重要的影响。

## 二、填石路基施工技术准备

### （一）材料准备

在填石路基施工技术中，石料的选择是一个非常重要的步骤。本项目中以机制无分化碎石为填充材料，石料强度在 30MPa 以上、粒径 20~100mm、级配较好、碎石含量占总重量 60% 以上，但应注意不应超过 70%。随时路基填料应采用液限不超过 50%、塑性指数不超过 26 的低液限黏性土，以满足路基填筑的需要<sup>[2]</sup>。

为了保证石材的品质，施工方制定了一套严谨的原材料检测程序。石材进场前，供货商都要提交一份包含抗压强度，吸水率，粒径分布等指标的品质检测报告。在工地现场采取随机抽检方式，对强度不够、颗粒尺寸偏大或级配不好的石材，禁止在施工中使用。比如，在“花楼街—沙口村”路段，通过取样检验，发现有几块石头大小在 100mm 以上，施工方立即让供货商将其粉碎处理，直到达到设计标准为止。

### （二）机械设备准备

针对填石路基施工技术的具体施工技术及数量要求，施工方选用了合适的设备，以确保工程的顺利进行及质量控制。该项目采用的机械装备有：挖掘机进行路基基底清理、石料开挖和装卸，选用容积 1.2—1.5m<sup>3</sup> 的液压挖掘机，保证开挖的高效稳定。装载机适用于石材的装卸、搬运，选择 5t 以上的装载机，并与挖掘机协同作业，以提高搬运材料的效率。大型振动压路机是填石路基压实的核心装备，项目选用 25t 以上的且振动频率为 25 ~ 35Hz，振幅为 1.5 ~ 2.0mm 的重型振动压路机，实现了对不同填筑厚度及填料颗粒级配的碾压要求。在谏家矶路段，为了保证路基的压实度，在路堤填料上采取了“静态碾压”和“振动压”相结合的方法。采用自卸车运送石材，按路程、工作量选用了 20t 左右的自卸货车，以确保石材能按时到达工地<sup>[3]</sup>。

在工程开始之前，施工方对机器设备进行了调试和试运行，并重点对机器的发动机功率、液压系统、刹车系统等进行了检测，以保证机器的正常运转。并制定了设备的日常维修与维修体系，并由专人负责对其进行检测与维修，以达到延长其使用年限，提升建设效率的目的。

### （三）技术准备

在工程实施之前，施工方组织专家认真审查填石路基的设计方案，并对路基的结构形式、填料要求和排水设计等内容有较深的了解。重点对路基填料的技术要求、地基处理要求、压实度要求等方面进行了检查，并对出现的问题与设计单位进行了沟通处

理。比如，对谏家矶路段分离式路基的施工方案的审查时，发现路基填筑材料的压实规范与工程地质情况不符，经与设计部门联系，对压实要求进行了相应的修改，保证了地基的施工质量。

在此基础上，对施工现场进行了细致的测量放线。利用高精度 GPS 观测设备及水准仪按图计算出填筑边界、高程、坡度等参数。为了保证工程的精确性，必须在工地上设立永久的测量控制点，并对其进行周期性的复查<sup>[4]</sup>。以花楼街路段为例，利用 GPS 定位仪放样测量出了路基边线、中线，为后续路基的基底处理及回填工程的正确实施奠定了基础。

另外，施工方对现场施工工人进行了技术指导与培训，让他们对填石路基施工技术的施工工艺、质量标准以及施工中的一些安全问题都有了一定的认识。通过实地演示与解释，使工人熟练地掌握摊铺厚度、压实顺序、压实次数等要点。在工程建设中，施工方还安排了专门的工程师到工地上进行指导，并对工程中遇到的一些技术难题进行及时地处理。

## 三、填石路基施工技术在江北快速路工程中的应用

### （一）地基处理

基地处理是填石路基施工的重要组成部分，对路基的承载力及稳定具有重要的作用。首先，将基地表面的杂物、腐殖土和杂填土等清理干净<sup>[5]</sup>。其中，表面杂填土（1ZT）由于其工程性质不佳，不能再使用，必须彻底清理掉。以谏家矶路段 K5+600~K5+960 路段为例，利用挖土机将厚度为 2m 左右的表面杂填土全部清理干净，并将其运到指定的弃土场地。

针对地基为淤泥质土（2CO）、粉土（2M）等不良地层的地段，按不同深度、不同厚度采用不同的处治方法。对于淤泥质土，若深度不大，可将淤泥质土开挖后，再进行天然碎石或毛屑填充；若埋深较深，可采取短桩基础或预压法等方法处理。针对花楼街—沙口村这一段，部分路段基地为 4—7.5m 的淤泥质土，特采用了搅拌桩处理，其中桩长为 10—13m，桩径 0.6m，桩间距 1.0 ~ 1.3m，呈正三角形排列，以增加地基的承载力。

当路段原有路面横坡在 1:5 以上时，采用挖台阶处理，台阶宽不低于 2.0m，每级台阶不能超过 80cm，台阶底部要有 2% ~ 4% 的坡度，以加强路基与原地面之间的粘结，避免发生滑动。谏家矶路段左半幅原有的横向坡度比较大，采用了挖台阶的方法，然后进行了基础夯实，有效地保证了基底的平坦和牢固。

### （二）填前碾压

当地基清理完毕后，就要进行预压填料。为了保证基底的压实度达到设计的目的，必须使用重型振动压路机对基底进行压实，至少 3 次。在堤防区域，基底压实度要大于 93%；堤防范围以外的基底的压实强度要大于 90%。在碾压施工期间，要经常检测路基基底的平整度及紧实度，对出现的部分疏松、密实不够的部位，应采取回填措施<sup>[6]</sup>。例如，在花楼街段，基底清表后，采用 25t 重型振动压路机进行碾压，经检测，基底压实度均满足设计要求。

### （三）上料

在上料时，用自卸车把石材运到工地，按照填料的填筑厚度、宽度来确定出每车石料的卸料间隔，这可以保证石料在场地的分布是均衡的。卸料时采取逐步卸料或后退式卸料的方法，



以防止石料聚集、滚动，从而对路基的平整及填料的品质产生不利的影响<sup>[7]</sup>。在谿家砬分离式路基左侧，因填土宽度较窄，采取了后退式卸料方法，并安排了工作人员对卸车地点进行指导，以保证碎石能够精确地卸到预定的地点。

#### （四）整平

在石料卸载完毕后，用推土机或装载机对路基进行初摊铺和整平，以保证路基填料的基本平整。在此基础上，采用平整机进行了进一步整平，并对回填土的厚度及坡降进行了控制。填石路基每层的填料按碾压机械及石料粒径大小而定，通常为30—50cm<sup>[8]</sup>。在花楼街段，由于石料粒径较大，填筑厚度控制在40cm左右，通过平地机整平后，路基表面平整度误差控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内。

#### （五）压实与铺筑

压实是填石路基施工的核心环节，直接影响路基的压实度和稳定性。采用重型振动压路机进行压实，压实顺序按照“先静压后振动压、先两侧后中间”的原则进行。初压采用静压1~2遍，速度控制在2~3km/h，使石料初步稳定；然后进行振动压实4~6遍，速度控制在3~4km/h，振动频率和振幅根据石料粒径和填筑厚度进行调整；最后静压1~2遍收光，消除表面轮迹<sup>[9]</sup>。

在压实过程中，实时监测压实度和沉降差。采用灌砂法检测压实度，每1000m<sup>2</sup>至少检测3点，确保压实度符合设计要求；通过沉降差法检测路基的均匀性，相邻测点的沉降差不大于5mm。在谿家砬段整体式路基，经过振动压实6遍后，检测压实度均达到96%以上，沉降差控制在3mm以内，满足设计要求。

#### （六）检测

在填石路基施工中，施工方制定了一套完整的质量检验制度，并对路基各项指标进行了检验。除检测压实度、沉降差以外，还检测了路基的平整度，宽度，坡度等指标。平整度由3m直尺测量，其测量结果偏差小于 $\pm 2\text{cm}$ ；使用钢尺检测宽度，其宽度不得低于图纸规定的宽度；坡度的测量是用坡度尺测量的，其测量结果的偏差小于 $\pm 0.5\%$ 。

在花楼街至沙口村段，每填筑一层，及时进行各项指标检测，对于不符合要求的部位，及时进行整改，确保上一层施工质量符合要求后，再进行下一层填筑。通过严格的质量检测，保证了填石路基的施工质量。

#### （七）特殊部位处理

##### 1. 桥台与路堤连接部位

桥台与路堤连接部位是填石路基的薄弱环节，容易产生不均

匀沉降，导致“桥头跳车”现象。在江北快速路工程中，对于与谿家砬A和B匝道桥台、沙口立交和港区高架两侧桥台相邻的路基，采用搅拌桩处理。搅拌桩桩长10~15m，桩径0.6m，桩间距1.0~1.2m，正三角形布置。桩身28天无侧限抗压强度不小于1.0MPa，复合地基承载力满足设计要求。同时，在桥台后设置砟搭板，均衡交接处的沉降差异，减少“桥头跳车”现象的发生。

##### 2. 填挖交界部位

在填挖交界处，因基础土性质的不同，极易发生不一致的沉降。在工程建设中，对填挖交界上原有的地表进行了超挖、换填处理，换填厚度不得低于80cm，并以天然碎石或者毛渣作为填料。为了提高路基的整体性能，降低路基的差异变形，减少不均匀沉降，特在填挖交界处设置了三向土工格栅。在谿家砬段南路，填挖交界部位通过超挖换填和设置土工格栅后，路基沉降差控制在10cm以内，满足设计要求。

##### 3. 边坡码砌

为了确保填石路基边坡的稳定，边坡码砌是一项十分必要的工作。施工方采用了高强度、大颗粒的石材进行边坡码砌，码砌石材的厚度在50cm以内，码砌石料要排列整齐且紧密，防止有通缝或重叠码砌的现象出现。在码砌时，对边坡的倾斜度及平面度进行了严格的检查，确保坡面的倾斜度误差不超过 $\pm 1\%$ ，平整度不超过5cm。在花楼街段，边坡码砌完成后，采用植被防护措施，种植草皮和灌木，防止边坡水土流失，提高边坡的稳定性和美观性<sup>[10]</sup>。

## 四、结语

填石路基施工技术在江北快速路工程中的应用，有效解决了工程中存在的规划排水通道无法实施、地下水丰富、堤防压浸台填土质量差及地势低导致的施工难题。随着城市快速路建设的不断发展，填石路基施工技术将在更多复杂地质和水文条件的工程中得到应用。展望未来，随着城市道路向集约化、生态化方向发展，填石路基技术需进一步与智能监测技术（如BIM+GIS融合监测）、再生材料利用（如建筑垃圾破碎再加工）相结合，以实现施工工艺的智能化、低碳化升级。江北快速路的实践表明，科学的技术选型与精细化施工管理是解决复杂路基问题的核心，该经验可为长江经济带类似工程提供重要参考，推动我国城市道路建设技术的创新与发展。

## 参考文献

- [1] 李雪峰. 公路工程施工中填石路基施工技术及应用实践分析[J]. 居业, 2024, (04): 43-45.
- [2] 饶龙锋. 填石路基施工技术在公路工程中的应用研究[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(04): 61-62.
- [3] 安子阳. 高填方填石路基沉降机理及压实工况方案比选研究[J]. 山西交通科技, 2023, (03): 33-36.
- [4] 安桂萍. 公路工程施工中填石路基施工技术及应用实践分析[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(05): 183-185.
- [5] 贾达. 公路施工中填石路基施工技术的应用研究[J]. 四川建材, 2024, 50(10): 174-175+202.
- [6] 杨秀华. 填石路基施工技术在公路工程中的应用[J]. 工程建设与设计, 2022, (23): 180-182.
- [7] 韩胜. 填石路基施工技术在公路工程中的应用[J]. 交通建设与管理, 2022, (03): 142-143+156.
- [8] 李文俊. 山区公路填石路基施工要点及碾压质量测控[J]. 交通世界, 2025, (Z2): 90-92.
- [9] 段剑辉. 公路填石路基施工的关键环节控制及管理工作[J]. 运输经理世界, 2024, (14): 14-16.
- [10] 刘晨颖. 火山熔岩洞区域内的高速公路路基填筑施工技术[J]. 交通世界, 2023, (36): 13-15..



# 后官湖畔的涟漪——第七届世界军人运动会武汉商学院游泳馆建筑设计

姜俊杰

中南建筑设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430070  
DOI:10.61369/ERA.2025060039

**摘 要 :** 武汉商学院游泳馆承担军运会现代五项全能中的游泳比赛项目, 定位为甲级比赛场馆, 兼顾赛时及平时教学使用。游泳馆的设计紧扣水的母题, 赋予这座场馆独特的文化意义, 成为片区一座地标建筑。本文从概念构思、空间布局、数字化设计、绿色建筑一级技术成效等方面解析武汉商学院游泳馆的设计理念及技术创新。

**关 键 词 :** 游泳馆; 空间; 数字化设计; 绿色建筑

## Ripples on the Shore of Houguan Lake— Architectural Design of the Wuhan Business School Natatorium for the 7th World Military Games

Jiang Junjie

Central-South Architectural Design Institute Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430070

**Abstract :** The Wuhan Business School Natatorium, hosting the swimming events of the modern pentathlon in the Military World Games, is positioned as a Grade A competition venue that balances between competition use and regular teaching use. The design of the natatorium closely follows the motif of water, giving this venue a unique cultural significance and making it a landmark building in the area. This article analyzes the design philosophy and technological innovation of the Wuhan Business School Natatorium from various aspects such as conceptual ideas, spatial layout, digital design, and the technical effectiveness of green building at Level 1.

**Keywords :** natatorium; space; digital design; green building

### 一、项目概况



图1 实景鸟瞰

世界军人运动会, 被誉为“军人奥运会”。第七届世界军人运动会于2019年10月18日在中国武汉举办。

武汉商学院游泳馆坐落于武汉市经济技术开发区武汉商学院西北(如图1), 承担军运会现代五项全能中的游泳比赛项目, 定位为甲级比赛场馆, 兼顾赛时及平时教学使用。武汉商学院游泳总建筑面积为14382 m<sup>2</sup>, 地上建筑面积10320 m<sup>2</sup>, 地下建筑面积4062 m<sup>2</sup>, 馆内建设25米 × 50米的标准比赛池及50米 × 20米的

训练热身池各一个, 观众坐席数约550座。

校园临近汉阳区后官湖, 项目用地东临校园内部景观湖(如图2), 游泳馆的造型紧扣水的母题, 整体形象以优美的湖水幻化而来。建筑外轮廓模拟水流动时的自然形态, 优美灵动, 起伏的屋面轮廓与游泳馆的内部功能空间完美契合。建筑立面上的遮阳板纹理以水面涟漪曲线抽象而成, 金属外遮阳板不仅保证了游泳馆的自然采光, 同时也解决了建筑的遮阳问题。游泳馆在夜色中散发出丰富变幻的视觉效果, 彰显现代体育建筑的独特魅力。<sup>[1]</sup>

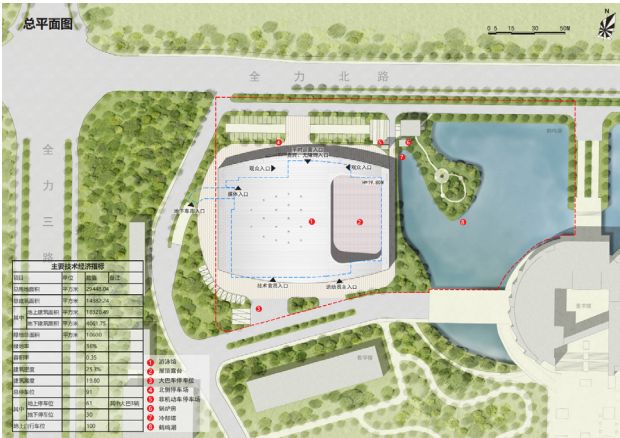


图2 总平面图

## 二、技术特点

### （一）合理的空间布局

设计寻求紧凑高效的布局方式，合理安排各功能流线，形成一个空间高度集约的体育建筑。经过多方案比选，方案训练池布置于临湖方向，比赛池平层布置于训练池西侧，利用训练池与比赛池之间的空间设置运动员更衣淋浴、检录等空间，在训练池上方布置室外活动平台，师生可以在活动平台之上饱览校园湖光山色（如图3）。

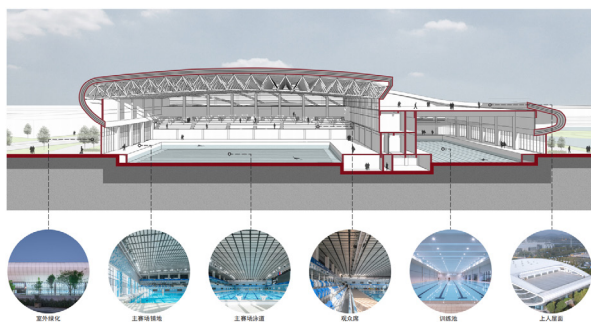


图3 剖透视图

### （二）灵活的建筑平面布置

建筑坐席一半为临时看台，在保证赛事功能的前提下，平时可将座椅收纳，将空间改为器械训练、有氧训练等功能，为师生健身所用，大大提高了空间的灵活性和利用率。游泳跳水馆主体部分为大跨度空间，部分附属用房区域有夹层，整体建筑最高点控制在20米以内。

一层主要功能为各功能区域门厅、运动员更衣淋浴、裁判员休息区、技术官员办公、媒体中心以及其他赛事技术用房。训练池层高10m，净高约7m。比赛池区域为通高的大跨度空间（如图4）。二层主要为观众门厅、灯光音响控制室及组委会办公区。地下室主要布置设备用房及地下车库（如图5）。

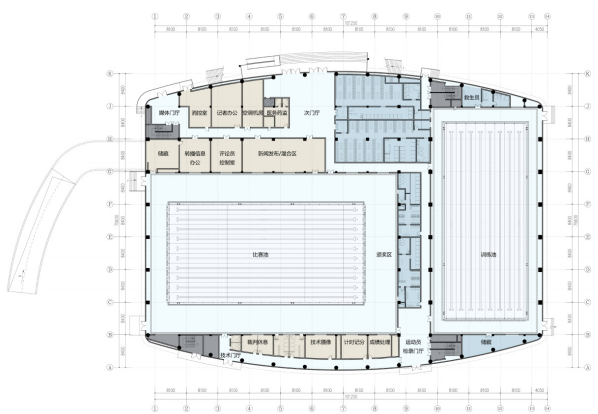


图4 一层平面图

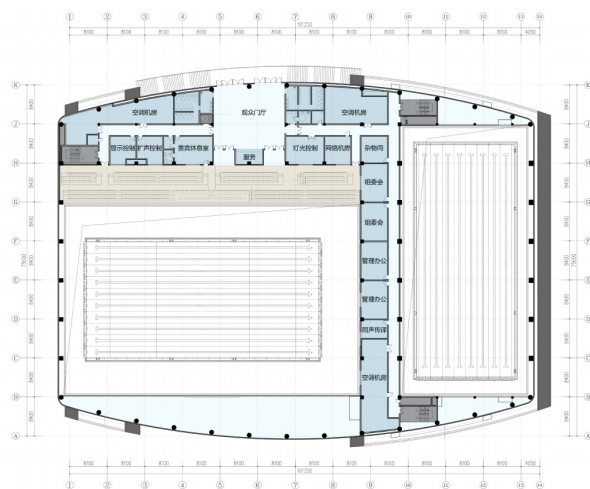


图5 二层平面图

### （三）数字化设计

建筑形态曲面较多、结构系统复杂，项目设计各环节的精确性、各专业间的协同、设计修改的实时反馈性都尤为重要。本项目概念创意构思独特，建筑具有非线性的外部复杂形态和内部功能空间。设计采用以BIM为载体的数字化设计工作流（如图6），将数字三维技术应用在概念方案深化、建筑体型逻辑生成、结构设计与分析、外表皮构造设计等方面，同时利用参数化编程技术以及建筑信息化模型生成矢量化与精确化的数字技术信息，并且进一步进行智能化的调整和修正，优化工程后续的生产、建造与运行工序。

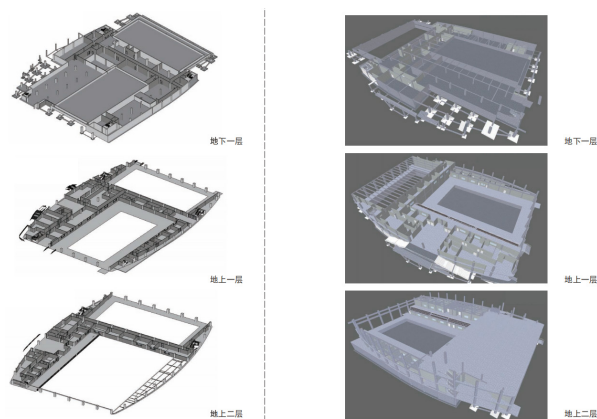


图6 BIM设计模型

### （四）绿色建筑技术

作为一项大型体育赛事的主要场馆，设计之初除了满足赛事复杂使用要求外还需考虑赛后市民及师生的健身要求。特别是对于游泳项目，舒适的室内环境是设计成败的重要因素。比赛池及训练池空间均可通过顶部设置的可自动开启的通风窗，通过室内的“热压效应”加强建筑内的自然通风效果，从而有效减少游泳馆在过渡季节对空调的使用，降低建筑能耗（如图7）。

本项目采用温湿度独立控制空调系统，通过配置调湿预冷式空调机组及高温冷水源（14/19℃）的方式达到降温除湿的目的，满足室内人员的温湿度需求。一方面，高温冷水机组的能效比远高于常规，可节省大量运行能耗，同时可避免空调送风空气再热



造成能源浪费；另一方面，采用温湿度独立控制的空调系统进行机械通风时，溶液除湿机组可以处理室内的主要湿负荷。<sup>[2]</sup>

项目比赛大厅属于高大空间，对于人员活动区域采用分层空调，侧送风，下部集中回风，降低空调系统的负担。此外，泳池池岸区域冬季设地板辐射采暖辅助供暖，池区外围护结构内侧设吊顶式空调机组下送风，防止围护结构结露。<sup>[3]</sup>

此外，比赛池大厅的顶部设置了16处圆形天窗和条形的高侧窗，通过有效的遮阳处理只允许漫射天光进入室内，在满足室内照明的同时，避免了直射阳光对室内的不利影响。立面的条状铝板外遮阳系统，构造简单、实用，可通过手动或电动控制满足建筑在不同季节对日光的不同需求，适应武汉地区夏热冬冷的气候变化。

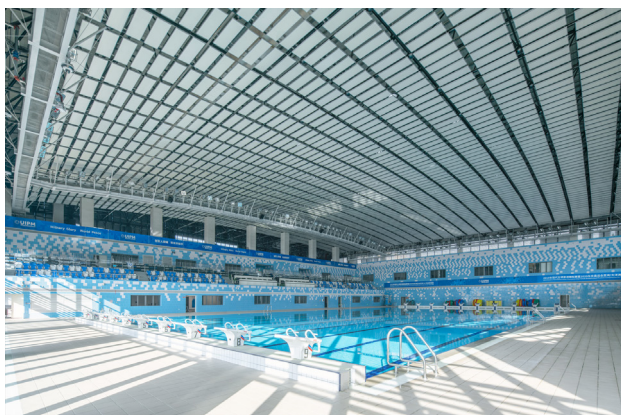


图7 比赛大厅室内实景

### 三、项目技术成效

#### 创新的幕墙系统设计——

军运会武汉商学院游泳馆南北立面为大面积玻璃幕墙，设置有完备的建筑一体化外遮阳系统。在本方案的幕墙设计中，我们通过计算，优化室内幕墙挡风桁架的设置，并与条形铝板外遮阳系统的龙骨合二为一，既减小了幕墙挡风桁架对室内空间的占用，又使得整个幕墙系统简洁干净，真正做到了立面设计的内外兼修（如图8）。



图8 立面幕墙实景

#### 数字化技术运用——

基于游泳馆流线型的外部形态与内部空间，我们将 BIM 数字化平台贯穿至各个设计环节，从前期规划研究、概念方案设计、施工图绘制、绿色建筑等多方面同时进行工作，对与建筑相关的各种因素进行全面精确的整合与控制，通过建立与工程进度同步的、高质量、可调控的数据信息模型，实现前所未有的高质量建筑语言与美学形式。

#### 建筑结构一体化设计——

项目采用钢筋混凝土框架 + 正放四角锥曲面钢网架屋盖结构，曲面钢网架的最大跨度为75.6m。建筑最高点标高19.8m，游泳馆左右两边分别形成58.0m x 64.7m和28.4m x 58.8m的通高无柱泳池区域，配合建筑空间端部大弧度流线型造型，结构端部设置弧形钢梁，体系化的结构布置为游泳馆高度跨层的外凸大曲面屋盖结构布置提供最优的解决方案。

### 四、结语

军运会武汉商学院游泳馆以清晰的设计逻辑、灵动的形态、精致的细部、舒适的室内环境，与先进的数字技术相融合，以充满未来感的建筑科技回应当下建筑学人性化设计的思考。随着军运会的成功举办，将会有更多的市民与师生在这份独特的体验中感受到人与环境、城市与建筑的和谐互动与交融。

#### 图片来源

图1 ~ 图8：中南建筑设计院股份有限公司

### 参考文献

- [1] 孙一民，陈辉镇，陶亮，等. 华中科技大学游泳馆 [J]. 城市环境设计，2024，(06):92-97.  
[2] 邓芳. 广州大学城华工体育馆可持续设计创作实践 [J]. 建筑创作，2012，(07):34-45.  
[3] 孙一民，应亦宁，胡晟国. 应对城市建设复杂性的体育建筑实践与思考 [J]. 当代建筑，2024，(12):19-24.

# 水利工程勘测设计质量监督管理探讨

傅天宇

身份证号码: 6523281991\*\*\*\*0817

DOI:10.61369/ERA.2025060001

**摘 要 :** 勘测设计是水利工程建设的关键环节,也是水利工程建设的重要组成部分。而在此基础上,对整个建设项目是否能够成功建设并投入生产运营,以及在建设完成之后是否能够产生期望的社会与经济效益,起着至关重要的作用。本文作者根据自己的工作经历,首先对水利工程勘测设计工作所面对的状况及发展状况进行了剖析,然后对如何加强水利工程勘测与设计工作进行了探讨。

**关 键 词 :** 水利工程;勘测设计;质量;监督管理

## Discussion on Quality Supervision and Management of Water Conservancy Engineering Survey and Design

Fu Tianyu

ID: 6523281991\*\*\*\*0817

**Abstract :** Survey and design of water conservancy and hydropower engineering are key links and important components of water conservancy and hydropower engineering construction. On this basis, it plays a crucial role in determining whether the entire construction project can be successfully constructed and put into production and operation, as well as whether it can produce the expected social and economic effects after completion. Based on his own work experience, the author of this article first analyzed the situation and development status faced by water conservancy and hydropower survey and design work, and then explored how to strengthen water conservancy and hydropower survey and design work.

**Keywords :** water conservancy engineering; survey and design; quality; supervision and administration

### 引言

在水利工程施工中,勘测设计是第一步工作,它是利用测绘、勘探等手段收集地质、地形、地貌和地理信息,为水利工程的顺利施工奠定了基础。所谓设计,就是利用现代科学方法,依据实地勘察、测绘所获得的资料,并将其与现有的建筑设计经验相融合,最终形成一份设计文档的过程。水利工程勘测与设计的好坏,对人们的生命财产与工程建设的质量有着重要的影响。本文就水利勘测与设计工作中的质量监督管理对策进行了初步探讨。

### 一、水利工程勘测设计质量面临的形势

水利工程勘测设计工作是一项极为复杂的工程活动,涉及到众多技术和管理方面的知识。随着近年来我国水利建设事业的快速发展,勘测设计作为其基础环节之一,受到了越来越多的关注。然而,在实际操作过程中,我们发现一些问题和挑战不容忽视。

首先,许多水利勘测设计单位在经历了一系列制度改革后,往往过分追求经济效益,导致了对质量监管的重视程度有所下降。这种急功近利的态度,使得企业内部缺乏必要的质量保障机制,自我约束能力不足,从而影响了整个行业的专业水平。此

外,对于科学人才的专业素养的培养也显得不够重视,这直接造成了工程师们专业技能不足。而相关的法律法规尚不完善,也未能形成一个健全的质量管理系统,这进一步加剧了质量监管上的问题<sup>[1]</sup>。同时,企业的质量监管意识有待加强,对如何实现持续改进和优化质量监管体系的了解不足。

其次,我国的水利勘测、设计工作目前处于一种供需矛盾的状态。部分勘测设计机构为了争夺有限的市场份额,采用了不合理的竞争手段,如虚报业绩、挂靠资质、欺骗等行为,这些都是不公平竞争行为的体现。在市场经济的大环境下,建筑企业面临着激烈的竞争压力,为了降低成本,他们不惜一切代价削减勘测设计的投入,这样的做法严重影响了勘测设计的质量。

作者简介:傅天宇(1991.12—),男,汉族,新疆木垒县人,本科学历,中级工程师,主要从事农田水利工程勘测设计方面的研究工作。



此外,还有一部分水利水电工程的业主是从海外筹集资金、投资或者私营的角度出发,他们更倾向于从自身的经济效益角度出发,尽量减少投资规模,以增加个人收入,但这样做往往会牺牲社会公共利益。结果是,设计图纸可能与实际施工条件存在巨大差异,进而导致工程无法按计划顺利进行,甚至出现安全隐患。

最后,勘测设计过程中的不确定性因素繁多。水利工程勘测从设计阶段至施工开始,需要经过漫长的时间跨度,期间需要考虑到众多复杂的因素。这些因素包括当地的经济状况,例如材料价格、施工设备以及施工工艺等;还包括气象、水文、地质和地形等自然条件,这些自然条件的变化都可能对工程的实施产生重大影响,增加了整个项目的不确定性<sup>[2]</sup>。

## 二、水利工程勘测设计质量管理所面临的主要问题

通过对现行的水利产业质量管理体系审核、勘测设计质量抽检、近年来开展的工程勘测设计中发现,目前我国水利勘测设计工作中还出现了参数选择不当、设计工况不合理、计算不够标准、个别设计未按照相关流程报批、论证等问题。据水利部水利水电勘测设计院对该工程进行验收后发现,工程质量状况不容乐观,一次工程的合格率低于30%。通过对病险水库除险加固工程的调研,发现其设计图纸设计不够深入,设计方案不够科学,前期工作不够深入,有些工程还未进行坝体稳定分析。同时,项目施工也经常出现工期延误,设计变更频率高,项目资金管理效果差的问题<sup>[3]</sup>。从已有的工程勘察中发现,大部分工程都没有达到规范和国家规定的标准,造成工程安全事故的最重要因素是勘测设计中的质量问题。

## 三、强化水利工程勘测设计质量监督管理的具体策略

要加强勘测设计质量的管理,就必须要对施工企业的质量负责进行有效的监管,同时要注重对施工企业的质量进行监督,同时还要注重对勘测设计的流程与设计结果的质量进行监督,同时还要对其进行营销活动的监管。加强测绘设计工作的质量控制,是保证测绘工作的基础,对规范测绘设计市场具有重要意义。

### (一) 增强企业自律意识

加强企业的自我约束,第一,就是要建立一套严谨的勘测设计质量管理体系,建立起一套行之有效的档案式勘测设计质量管理体系,对勘测设计质量问责制和终身制进行了完善,并对其进行了相应的奖励和惩罚,并对其进行了内部的监管,并根据勘测设计合同的规定来执行。严格遵照国家有关规范及设计规范,严格依照审批文件开展项目勘测设计工作。同时,要加强企业的自我约束,使其参与到勘察、设计等领域,并在其基础上逐步推进,以提升企业抵御风险的实力。

### (二) 加强政府监管力度

国家对勘测设计机构进行监督,主要包括对其进行审查、对其进行监督,其中,市场约束机制的构建、设计质量的监督以及

设计成果的审查是三种主要的监督手段。

#### 1. 建立市场约束机制

在我国,要构建我国的社会主义市场经济体制,就需要对其加以合理的制约。进而,对该产业的发展现状进行改进,并逐渐使该产业的市场活动趋于规范化,并推动该产业的自我约束。从信用体系、资质管理和信息管理三个层面入手,构建测绘设计行业的行业自律体系。首先要建立健全社会诚信制度,并将其列为社会诚信建设的一项重点内容。其次,要强化对勘测设计机构的资质与素质的审核,并将其作为监督的主要对象。在此基础上,提出了一种基于网络技术的测绘工程质量控制体系,并对其进行了全面的分析<sup>[4-6]</sup>。

#### 2. 开展设计质量监督

工程质量监理既有法定的基础,又是国家制订和实施的一种强制性的行政手段。监理主体是正在施工的工程项目,勘测设计单位,并有专门的工作人员,定期或不定期的抽查,监测质量管理的程序、体系、活动和全过程。要使勘测设计监理工作制度化 and 规范化,充分发挥其对水利工程建设保护功能。要想进一步提升测绘项目建设质量,就需要对其进行施工监督。

#### 3. 审查设计成果

在我国,现行的水利勘察、设计工作中,对其进行了全面的审核。经过严格的政府部门审核,在经济和技术上对勘测设计进行了严密的审核,在技术和经济上都有一定的权威。通过对勘测设计成果的审查,对勘测设计单位的设计过程及营销行为进行针对性的审查,也不失为一种行之有效的方法。将设计工作与勘察相融合,可使监理工作发挥更大的效益。

### (三) 加强标准化设计管理

在水利水电工程勘察中,必须强化规范化设计,加快进度,才能更好地保证水利水电工程勘察与设计的质量。由于水利水电工程规模庞大,周边自然地理环境等因素的影响,勘察、设计难以实现规模化运行。与建筑、市政和交通等领域的设计相比,目前的专业设计软件、图集较少,普适性不强,设计规范化水平不高,设计时间较久。如果在工期紧迫的条件下,必然会对工程的质量产生不良的影响。根据各项的具体情况,制订测绘设计软件的开发、升级和应用的管理方法,充分发挥设计工作者的积极性,对重复工作量大、可模块化的部分进行综合设计,将其进行规范化设计,将图集、图册、计算软件或计算出图集成软件集成在一起,经审核确认后,再加以推广应用,从而提升设计的效率与品质<sup>[7]</sup>。

### (四) 加大强制性条文落实和检查力度

在工程勘察中,工作都应遵循的强制性条款具有重要的现实意义,还应加强强制性条款的监管,颁布和修订。设计者应充分认识到强制性条款执行的法律品质和义务,强化对强制性条款的学习与认识,注重对强制性条款的辨识与执行,并在递交审核之前完成强制性条款的自我检查。在审核过程中,设计者应注重对强制性条款的审核,并对条款内容提出审核建议,以确保其满足强制性条款的要求。以严格执行规范为指导,从整体上强化实施规范的工作,切实提升勘测设计品质。

（五）加强设计变更管理

由于水利水电工程的设计和建设周期很长，而且受到的外部环境干扰也比较大，因此，工程的设计变更就更加难以避免。调查设计机构要强化设计变更的管理，对设计变更进行收集、统计和分析，将由于本身设计上的不足引起的设计变更进行分析，并对其产生的原因进行分析，并制订相应的对策，为以后同类项目的设计者提供参考。这样才能使设计的品质得到进一步的提升，降低变更的次数。对设计更改要有一个严格的流程，不管是何种理由造成的，一经决定，都要按照设计修改的流程进行，并且要在原有的审批机关批准之后才能提出。

（六）发挥第三方作用

第三方介入是中国水利水电工程勘察、设计和施工过程中不可忽视的一个环节。首先，第三方必须具备合格的资质，并且已经通过质量管理体系的审计。在第三方的协助下，对水利勘测设计的质量进行了有效的控制，但是该部门必须具备合格的资质，能够对其进行质量控制，并且具备一些专门的知识，在遇到问题时可以通过自身的专长加以改进，从而促进其长远的发展<sup>[8-10]</sup>。其次，要加强对水利水电勘测设计的监管，要按照契约的要求，对水利水电勘测设计的整个过程进行全方位、严格的监督与管理，充分发挥第三方的作用。同时，根据企业的特殊需求，增设专门

的咨询机构。在此基础上，分析了我国水利水电勘测设计工作中存在的主要问题。在实际工作中，由于一些缺乏相应的专业知识，导致了在水利勘测设计工作中出现了很多的问题，这个时候，就必须借助第三方组织的力量，为参与到测绘工作中的企业提供有偿的服务，为他们提供人力和技术上的支援，从而提升调查设计的品质，促进其长远的发展。

四、结语

水利水电工程的勘测设计不仅仅是一个简单的程序，它是整个项目的基石，涉及到对水能资源的精确评估、设计方案的周密规划以及施工技术的科学论证。这一过程要求设计师不仅具备丰富的专业知识和实践经验，还需要深入理解自然条件和人类活动之间错综复杂的关系，以确保最终建成的设施既经济又实用。从最初的可行性研究开始，到详细的勘测设计阶段，再到施工的各个环节，都需要有明确的质量标准和严格的质量管理体系来确保工程质量。只有这样，才能有效避免因勘测设计工作失误而带来的潜在风险，确保工程建设的安全性和可靠性，为后续的施工过程打下坚实基础。

参考文献

[1] 杨峰. 水利勘测设计项目管理模式的探讨 [J]. 水利规划与设计, 2005, 15(01): 86- 87.  
[2] 刘立雪. 水利工程勘测设计质量管理对策 [J]. 河北水利, 2018(6): 44, 47.  
[3] 杜晓云. 水利工程勘测设计质量管理问题探析 [J]. 水利规划与设计, 2015(09): 90-91.  
[4] 石小强. 水利水电工程设计项目管理的实践与探索 [J]. 水利水电技术, 2000, 12(01): 63.  
[5] 张超, 曾欣. 水利工程勘测设计质量监督探讨 [J]. 水利技术监督, 2024, (12): 11-15.  
[6] 成旋. 分析强化水利工程勘测设计质量管理的策略 [J]. 科技资讯, 2018, 16(29): 38-39.  
[7] 唐彬. 强化水利工程勘测设计质量管理的策略探讨 [J]. 居业, 2018, (09): 13+15.  
[8] 刘国臣. 加强水利工程勘测设计质量管理的途径与建议 [J]. 智能城市, 2016, 2(12): 249-250.  
[9] 胡娟, 高文. 强化水利工程勘测设计质量管理的探讨 [J]. 水利规划与设计, 2016, (12): 26-27+86.  
[10] 侯树贤. 加强水利工程勘测设计质量管理的途径与建议 [J]. 黑龙江科技信息, 2016, (16): 237.

# 水库地形测绘中无人机机载雷达的应用

符家辉

海南省水利水电勘测设计研究院有限公司，海南 海口 570203

DOI:10.61369/ERA.2025060003

**摘 要：** 水库是以防洪、灌溉、供水、发电、渔业等综合效益为主要目标的大型水利工程。在水库建设过程中，需要对水库周边的地形地貌进行测绘，以便为水库的运行和管理提供必要的基础资料。本文结合实例，探讨了机载激光雷达在水库地形测绘中的应用。

**关 键 词：** 无人机机载雷达；三维点云；地形测绘

## Application of UAV-borne Radar in Topographic Surveying and Mapping of Reservoirs

Fu Jiahui

Hainan Provincial Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd.

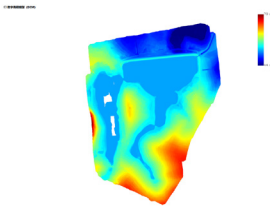
Haikou, Hainan 570203

**Abstract：** Reservoirs are large-scale water conservancy projects with comprehensive benefits such as flood control, irrigation, water supply, power generation, and fisheries as their main objectives. In the process of reservoir construction, it is necessary to survey and map the topography and landforms around the reservoir to provide essential basic data for the operation and management of the reservoir. This article explores the application of airborne lidar in reservoir topographic surveying and mapping through practical examples.

**Keywords：** UAV-borne radar; 3D point cloud; topographic surveying and mapping

### 引言

机载激光雷达系统可以实时获取大范围内地形地貌数据，具有快速获取地形高程信息，获取地形图和三维影像，精确采集地物属性信息等优点。机载激光雷达系统可以通过高分辨率、高精度的测绘数据，准确获取水库周边地形地貌的三维数据模型，为水库建设方案设计、水文分析等提供依据。如图所示：



### 一、工程概况

海口市岭后水库，是一座兼具防洪、灌溉、供水及发电等多功能的重要水利枢纽。随着时间推移以及周边环境变化，原有的水库地形数据已无法满足当下水库管理、安全评估以及水资源合理调配等工作需求。例如，在防洪方面，精准的地形数据对于洪水演进模拟、防洪预警至关重要；灌溉时，了解水库地形能更科学地规划灌溉范围与水量分配。因此，开展新一轮高精度的水库地形测绘工作迫在眉睫。

#### （一）机载激光雷达系统

机载激光雷达系统由飞行平台、激光发射系统、接收系统、数据处理软件等组成。该系统可以在无地面控制点的情况下，快速获取大范围高精度的三维点云数据，具有全天候、全天时、快

速获取地形信息的能力<sup>[1]</sup>。

该设备采用了世界先进的固态激光雷达技术，通过接收机载激光接收器，将其发射出的激光束转化为脉冲形式，脉冲经整形后形成波形，并以此为基础生成数字地面模型。由于激光在空中传播时，会受到空气中大量悬浮颗粒及各种障碍物的影响，因此其产生的回波信号具有很强的随机性。经过分析和研究，该设备采用了两种解决方案来解决这个问题：一是采用多通道同步探测技术来提高系统的探测能力；二是采用主动式滤波技术来提高系统的探测精度。这两种方案都可以有效地提高系统的探测精度和抗干扰能力<sup>[2]</sup>。

为了降低系统测量误差，避免出现人工干预、人为干扰等问题，在实际应用中一般采用2套激光扫描仪进行测量。机载激光雷达系统可以连续工作数小时甚至数天，而不需要休息或进行其

它工作。因此,在本次项目中采用了2套机载激光雷达系统进行测量。

## (二) 无人机系统

本次项目中的无人机系统采用了某公司生产的某公司的 M300rtk 无人机。M300rtk 无人机是一款多旋翼无人直升机,可以搭载多种载荷,包括激光雷达、多光谱相机、电子地图等,满足不同的测绘需求。

M300rtk 无人机的机身采用了复合材料制造,具有重量轻、强度高、耐腐蚀、抗氧化等特点。它可以在无电源的情况下执行任务,无需为其配备电池,这对于野外作业非常有利。它的电机采用了无刷直流电机,可以实现高速飞行,同时也更加的平稳可靠<sup>[3]</sup>。

M300rtk 无人机还配备了 GPS 模块和无线通信模块,可以实现数据的实时传输。M300rtk 无人机配备了一块智能电池,该电池具有自动充电功能。在飞行过程中,M300rtk 无人机可以根据电池电量的变化自动调节飞行高度和速度,确保其始终保持在最佳的工作状态下。

M300rtk 无人机还可以加装遥控设备,实现对其的遥控操作。该遥控设备可以设置飞行高度和速度等参数,完成对无人机的各种控制和数据传输工作。

M300rtk 无人机具有自动返航功能,当它到达预定高度时会自动返航。同时,该无人机还具有一定的自动悬停功能和自动降落功能。

## (三) 测量成果

为了检验测量成果的精度,本次测绘采用了禅思 L2 雷达系统进行采集数据。无人机获取数据后,将数据导入到 ArcGIS 软件中,可以得到本次测绘项目的地形图。

在地形图的基础上,为了更好地进行水库的施工管理,还需要对水库周边的山体 and 河流进行测量。本次项目中,采用的是利用无人机机载激光雷达系统进行测量,无人机机载激光雷达系统采用了高精度的 RTK 设备,对水库周边进行了全方位的测绘<sup>[4]</sup>。

由于本次测量项目所涉及到的区域面积较大,在进行激光雷达测绘时,需要结合无人机飞行高度和飞行速度来确定位置。根据以往测量经验以及本次项目的实际情况,在确定激光雷达位置时,一般会选择在山体与河流交接处附近。此外,为了避免地形过于复杂而影响激光雷达正常工作,需要对周围环境进行考察。同时在进行测量时也要注意天气因素对测绘工作的影响<sup>[5]</sup>。因此本次项目采用了多个控制点来进行控制测量,并且采用 RTK 技术对其进行加密。

## 二、数据采集

1. 地形资料比例尺 1:1000,坐标系为大地 2000 坐标系,1985 国家高程基面,2007 年版图式;标示清楚:(1)测量时间;

(2)测量人员;(3)校审人员。

2. 测量成果须符合《工程测量标准》(GB 50026-2020)和《水利水电工程测量规范》(SL 197-2013)要求。

3. 测量图中应反映测量范围内的原有地形地貌(含水下地形)和所有构筑物。

4. 测量范围:按 1:1000 的比例及精度施测水库大坝平面图,坝肩处往上 5m(垂直高度)或延伸 50m,坝脚处及主要建筑物如涵管出口等往外水平伸展 20m 范围内为测量范围。

5. 平面图中应标明大坝坝脚(上下游)迹线,标明坝上游的干砌石护坡范围及其顶高程,下游坝脚排水棱体范围及顶高程;应落实涵管进、出口高程,涵管内径及管壁厚度,渠道出口断面等建筑物的尺寸。

## (一) 飞行控制

飞行控制系统是无人机任务执行的基础,其主要负责无人机的姿态控制、飞行控制以及路径规划等。本次任务采用的是固定翼无人机,其动力系统为三轴增稳机械,结构简单、稳定性高,具备较强的抗风性能。其飞行高度和航高受到机体尺寸和负载能力的限制,在实际应用中需对其进行适当的调整。通过在 GPS 基准站上进行 GPS 定位,获取飞机位置坐标;通过地面控制站接收 GPS 信号,获取飞机姿态信息。在飞行过程中,通过实时监测机身姿态参数,采用 PID 控制算法实现飞机飞行姿态的自动解算,从而完成对航向和横滚角的精确控制<sup>[6]</sup>。

## (二) 航飞方案设计

根据任务要求,飞行高度控制在 120m 以下,航高控制在 80m 以下。每次飞行前都要进行航飞方案设计,根据设计方案确定每条航线的飞行参数及飞行顺序。例如:基线航线 1 号线的初始参数为:高度 120m、距离 2000m;基线航线 2 号线的初始参数为:高度 120m、距离 4000m;基线航线 3 号线的初始参数为:高度 120m、距离 6000m。

## 三、精度分析

无人机机载激光雷达系统是利用无人机搭载激光雷达传感器,在航线飞行过程中采集地面高程数据,将原始数据经过处理后,生成 DEM、DOM、DSM 等产品,用于水库的勘测和规划<sup>[7]</sup>。

为了验证无人机机载激光雷达系统在水库地形测绘中的应用精度,在水库周边选取一定面积的区域进行了试验。在该区域内共布设了 3 个测站,测站与测站之间的距离为 3 km。按照每 2 km 布设一个像控点的方式对本次试验进行控制。本次试验共布设了 9 个像控点,其中 5 个点位于测区边缘,其余 5 个点位于测区中心。当距离测区边缘 4 km 时,测站与测站之间的平均误差为 0.086m;当距离测区中心 6 km 时,测站与测站之间的平均误差为 0.323m。因此,本次试验采用无人机机载激光雷达系统可以满足水库地形测绘精度要求。如图所示:





### （一）平面精度

采用测区中心的像控点对整个测区进行平面控制。在距离测区中心2 km处，控制点的平面误差最大，为2.78 cm；在距离测区中心6 km处，控制点的平面误差最小，为0.47 cm。同时可以看出，在测区边缘，平面精度相对较高；而在测区中心，平面精度较低。这是由于距离测区中心越近，航线角度越小，从而使得高程精度下降。另外，在距离测站边缘2 km和6 km处分别布设了3个像控点。因此可以认为在测区边缘布设的3个像控点能够满足精度要求<sup>[8]</sup>。

### （二）高程精度

在本次试验中，选取了两个具有代表性的点，即测区边缘点和测区中心点。测区边缘点的高程误差为7.839m，测区中心点的高程误差为7.837m。无人机机载激光雷达系统采用全球定位系统（GPS）和惯性导航系统（INS）获取机载传感器所获得的三维坐标数据<sup>[9]</sup>。在数字地面模型（DTM）中，高程数据的精度直接影响DTM精度。而机载激光雷达系统是通过获取高精度DEM数据，从而获得地面三维点云的空间分布情况，因此从某种意义上说，激光雷达数据本身就具有高精度。在本次试验中，测区边缘点和测区中心点的高程精度均达到了厘米级；当距离测站4 km时，测区边缘点和测区中心点的平均误差为5.652m；当距离测站6 km时，测区边缘点和测区中心点的平均误差为7.837m。

### （三）点云分类精度

将无人机机载激光雷达系统获取的点云数据，通过激光雷达技术进行地物分类，并输出相关数据。其中，高程数据采用激光雷达点云数据进行处理，利用激光雷达点云数据的点密度和高度信息计算地物高程值。同时，将三维坐标转换为平面坐标和高程，并生成三维点云模型。

地面点的分类精度较高。根据所获取的三维点云模型，可以将地面点分为3类：建筑、树木和其他地物。其中，建筑和树木

的分类精度较高。对于建筑地物，通过测量地物的高度差、坡度差、棱线差等参数来判断建筑物是否属于建筑地物；对于树木和其他地物，通过测量树木与地面之间的高度差判断其是否属于树木地物；对于其他地物，通过测量地面与相邻地面之间的高度差判断其是否属于其他地物。

## 四、水库三维模型的构建

在水库周边，我们可以看到各种建筑物，但这些建筑物不能用简单的几何图形来表示，它们应该由三维空间几何体来表示。所以，在构建水库三维模型时，应根据已有的地形地貌特征进行提取。

对于建筑物来说，可通过分析建筑的不同角度的图像，将其分为多个层次，利用计算机软件进行数据处理，从而形成建筑物三维模型。在构建三维模型时，可以利用TIN（TIN是Terrain Index Number的缩写）进行划分和提取。通过分析建筑物的不同角度图像数据，可以生成建筑物表面的三维模型。

构建三维模型时应注意以下几点：

（1）在构建三维模型时，需要将所有的地面点和地面线都包括在内。

（2）在构建三维模型时，应该先建立建筑物表面。

### （一）生成三维模型

通过无人机机载雷达生成的数字高程模型数据，可以直接应用于数字高程模型数据的创建，还可以对其进行几何处理，从而生成具有真实地形地貌的三维模型。通过无人机机载雷达生成的数字高程模型，可以应用于多种领域。在水库建设中，无人机机载雷达的应用能够快速获得水库周边的三维地形地貌信息。由于三维地形地貌信息是从多个角度进行采集和获取的，因此在获取数据时需要应用不同的软件和方法。通过建立TIN结构，并将其划分为多个层次，可以生成具有不同拓扑结构的三维地形地貌信息。在利用无人机机载雷达采集数字高程模型数据时，需要注意以下几点：（1）对植被进行处理。（2）对建筑物进行处理。

### （二）三维模型的提取与分析

点云生成：经过预处理的数据以点的形式呈现，每个点包含了在地理坐标系下的三维坐标信息（X、Y、Z）。这些点构成了点云数据，直观反映了水库地形表面的离散分布情况。通过特定的软件工具，将雷达采集的原始数据解析并生成点云文件，为后续的模式构建奠定基础。表面重建：基于点云数据，运用表面重建算法构建水库地形的连续表面模型。常用的算法有三角网生成算法（如Delaunay三角剖分），它将点云数据中的离散点连接成三角形网格，形成一个近似的地形表面。通过对三角形网格进行优化和细化处理，可提高表面模型的精度和光滑度。纹理映射：为了使构建的三维模型更加真实直观，可将无人机同时搭载的光学相机拍摄的影像数据作为纹理信息，映射到地形表面模型上。通过纹理映射，三维模型不仅能够呈现地形的几何形状，还能展示地面物体的颜色、纹理等特征，增强模型的可视化效果<sup>[10]</sup>。

五、结束语

综上所述，无人机机载激光雷达系统在水库地形测绘中的应用，解决了传统测绘方法效率低、劳动强度大的问题，提高了工作效率，降低了生产成本，为水库的建设和管理提供了有力支

持。同时，利用无人机机载激光雷达系统，可以采集更多、更准确、更全面的数据信息，为水库规划设计、工程管理提供基础资料。在今后的工作中，需要不断改进机载激光雷达系统的技术和应用方法，不断提高其数据处理能力，为水库地形测绘工作提供更加优质的服务。

参考文献

[1] 闫宝华. 论无人机在地形测绘工程中的应用 [J]. 数字通信世界, 2022(3):119-121,124.

[2] 张安信. 无人机技术在工程检测行业上的运用现状和展望 [J]. 四川建筑, 2022, 42(2):76-78,82.

[3] 元立壮, 安士凯, 田超, 等. 基于无人机激光雷达技术的开采沉陷监测方法与参数反演川 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12):4752-4761.

[4] 杜梦飞, 刘俊锋. 测绘工程中无人机的应用流程及要点分析 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(3):220-222.

[5] 罗宇, 梁晓军. 无人机测绘技术用于工程测量的实践探究 [J]. 科技资讯, 2019, 17(32):52-54.

[6] 黄丹. 无人机机载雷达在广西古皂水库地形测绘中的应用 [J]. 水利水电快报, 2022, 43(S2):18-22.DOI:10.15974/j.cnki.slsdkb.2022.S2.006.

[7] 李森华. 基于无人机 LiDAR 技术的复杂地形测绘精度优化方法 [J]. 水利建设与管理, 2023, 43(S1):101-106.DOI:10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2023.S1.20.

[8] 黎广, 黎亮, 杨智翔. 机载 LiDAR 系统在水库地形测绘中应用研究 [A]. 江苏省测绘地理信息学会. 第二十二届华东六省一市测绘学会学术交流会论文集(二) [C]. 江苏省测绘地理信息学会:《现代测绘》编辑部, 2021:4.DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.019203.

[9] 史佳豪, 鲁健, 黎娟. 无人机机载雷达作业的航线控制优化研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023(08):150-154.DOI:10.14016/j.cnki.1001-9227.2023.08.150.

[10] 左罗, 田其, 郭力驰. 利用无人机机载雷达测量进行输电线路竣工通道检测分析 [J]. 湖北电力, 2023, 47(01):91-97.DOI:10.19308/j.hep.2023.01.013.

# 基于无人机测绘技术在水利工程测量中的应用

张必斌

海南省水利水电勘测设计研究院有限公司, 海南 海口 570100

DOI:10.61369/ERA.2025060004

**摘 要 :** 随着无人机技术与低空遥感技术的快速发展, 其在水利工程测量中的应用日益广泛。本文通过运用无人机摄影测量与激光雷达测量相结合的技术手段, 对自然河道进行了测量并对数据进行数据处理及产品输出。结果表明, 无人机技术可高效获取高分辨率正射影像 (DOM) 及三维模型 (OSGB), 并结合激光雷达点云数据生成高精度数字高程模型 (DEM) 及点云数据, 为水利工程规划设计、施工监测及运维管理提供可靠的数据支持。

**关 键 词 :** 无人机; 摄影测量; 激光雷达; 水利工程测量

## Application of UAV Surveying and Mapping Technology in Hydraulic Engineering Survey

Zhang Bibin

Hainan Provincial Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute Co.,  
Ltd. Haikou, Hainan 570100

**Abstract :** With the rapid development of unmanned aerial vehicle (UAV) technology and low-altitude remote sensing technology, their application in hydraulic engineering surveys has become increasingly widespread. This paper utilizes a combination of UAV photogrammetry and lidar surveying techniques to measure natural river channels, process data, and produce outputs. The results demonstrate that UAV technology can efficiently acquire high-resolution digital orthophoto maps (DOM) and three-dimensional models (OSGB). Additionally, it can generate high-precision digital elevation models (DEM) and point cloud data by combining lidar point cloud data, providing reliable data support for the planning, design, construction monitoring, and operation and maintenance management of hydraulic engineering projects.

**Keywords :** unmanned aerial vehicle (UAV); photogrammetry; lidar; hydraulic engineering survey

## 引言

随着我国民用型无人机产业的不断升级、低空遥感测量技术的不断革新。无人机低空摄影测量与机载激光雷达 (LiDAR) 遥感技术在我国基础地理信息数据生产及应急测绘应用中已呈常态化趋势, 成为有人机航空遥感与卫星遥感的有力补充。

相较于传统人工测量, 无人机摄影测量能够快速获取照片数据并进行内业解译, 能够实现地物、建筑物和构筑物的快速分类识别分类及工程规划所需的精细化三维模型; 机载激光雷达通过主动发射激光脉冲 (主动遥感), 可穿透植被冠层并直接获取地表三维信息, 显著提升了在密林、陡坡等遮蔽区域的测量能力。随着多波束激光扫描仪、高精度惯导系统 (IMU) 与载波相位实时动态差分定位 (RTK) 技术的融合, 机载激光雷达的测量精度已达到厘米级, 同时具备全天候作业优势。

在水利工程领域, 这无人机测绘技术为实现水利工程设计规划, 地表形变监测、为大坝安全评估、河道淤积分析等提供动态化、高精度的数据支撑, 成为传统测量手段的重要补充。

## 一、水利工程测量的特点、需求

### (一) 特点

水利工程测量具有一定的显著特点, 其一, 测量区域地形复杂, 水利项目常建于河流、湖泊周边或是山谷等地, 如峡谷中建设水电站, 既有陡峭的山体, 又有湍急的水流, 水下地形也错综

复杂, 给测量工作带来诸多阻碍<sup>[1]</sup>。其二, 涉及范围十分广泛, 大型跨流域调水工程能绵延数百公里, 跨越不同的地理区域, 必须全面把控整个工程区域各类状况, 测量工作量极大。其三, 水利工程关乎防洪、灌溉、供水等重要民生功能, 对测量精度要求严苛, 从大坝的微小沉降、渠道的精确坡度, 任何细微偏差都可能影响工程效益与安全。



## （二）需求

水利工程测量的精度需求：规划设计阶段，为合理确定水利工程布局、规模等，需高精度测量地形地貌、地质条件等。例如，精确掌握水库库盆的地形起伏，测量精度需达到厘米级，才能准确计算库容等关键参数，为坝址选择、坝高设计提供可靠依据<sup>[2]</sup>。施工阶段更是对精度要求十分严格，如大坝的混凝土浇筑、水闸安装等，施工放样的精度往往要控制在毫米级，以此保障各构建物的位置、尺寸精准无误，确保工程质量符合设计要求。进入运营管理阶段，针对大坝、堤防等关键部位进行变形监测，更是进一步提高精度要求，需达到亚毫米级，以便及时察觉细微的变形情况，提前预警安全隐患，确保水利设施能安全稳定运行<sup>[3]</sup>。

从水利工程测量的时效性需求：规划设计时，要第一时间获取最新、全面的测量数据，特别是一些受季节、气候影响大的区域，如北方河流冬季封冻、夏季丰水期水位大幅变化，需抓住合适时间节点进行测量，及时为工程的可行性研究、初步设计等提供支撑，避免因数据滞后影响决策进度。施工阶段，测量工作必须紧密配合施工进度，如河道清淤、护坡施工时，要实时提供高程、坡度等数据，一旦测量不及时，可能导致施工返工，延误工期。运营阶段，面对洪水、地震等突发情况，要迅速开展测量工作，实时掌握工程状态，如水库遭遇洪水时，需及时监测水位变化、坝体状况，方便工作人员快速做出科学调度、应急处置，充分发挥水利工程潜在功能，守护人民生命财产安全<sup>[4]</sup>。

## 二、无人机摄影测量的原理及技术流程

### （一）无人机摄影测量的原理

无人机摄影测量基于摄影测量学原理，利用无人机搭载的相机从空中对目标区域进行多角度拍摄，获取一系列重叠影像。核心原理是通过同名像点的匹配、空间前方交会来确定地面点的三维坐标。无人机飞行过程中，相机按一定时间间隔、航线间隔拍摄地面景物，这些影像存在一定重叠度，因为同一地面点在不同影像上会成像，通过影像匹配技术可找出这些同名像点，依据共线条件方程，即物点、像点和摄影中心三点共线，利用已知相机内方位元素——相机主距、像主点坐标等，外方位元素——摄影瞬间相机的位置、姿态参数，结合同名像点的像平面坐标，通过空间前方交会计算，就能得出地面点的三维坐标（X、Y、Z）<sup>[5]</sup>。

### （二）无人机摄影测量的技术流程

#### 1. 外业工作流程

（1）低空数字航空摄影：根据测量任务要求，规划无人机飞行航线，设定飞行高度、速度、拍摄间隔等参数，利用无人机搭载的相机对目标区域进行摄影，获取覆盖目标区域的航空影像数据<sup>[6]</sup>。

（2）准备工作：飞行前需对无人机、相机设备进行检查调试，确保设备性能良好；同时收集测区已有资料，如地形图、控

制点成果等，为后续工作做准备。

（3）像片控制点选点、布设、测量：在测区内均匀布设像片控制点，通过全球定位系统（GPS）等测量手段精确测定控制点的坐标、高程，为后续影像处理提供高精度的地面控制信息<sup>[7]</sup>。

（4）低空数字摄影测量内业：将外业获取的影像数据、控制测量成果传输至内业处理环境，为内业数据处理做准备。

（5）检查与上交成果：对整个外业工作进行质量检查，确保数据的完整性、准确性，合格后将相关成果资料整理上交。

#### 2. 内业工作流程

（1）准备工作：整理外业获取的数据，包括影像数据、控制点数据等，导入专业摄影测量软件，同时检查软件运行环境、相关参数设置。

（2）数据预处理：对影像进行辐射校正、几何校正处理，消除因相机镜头畸变、飞行姿态等因素引起的影像变形，提高影像质量<sup>[8]</sup>。

（3）空中三角测量：通过影像匹配技术自动识别同名像点，利用像片控制点信息，采用平差计算方法，解算每张像片的外方位元素、加密点的三维坐标，建立测区的空中三角网。

（4）基础地理信息数字成果生产：基于空中三角测量成果，进行数字高程模型（DEM）、数字正射影像图（DOM）、数字线划图（DLG）等基础地理信息产品的生产，进一步构建三维模型<sup>[9]</sup>。

（5）检查验收和上交成果：对生产的各类成果实施质量检查，包括精度检查、逻辑一致性检查等，确保成果符合相关标准、要求，检查合格后将成果整理上交。

## 三、无人机机载激光雷达测量的原理及技术流程

### （一）无人机机载激光雷达测量的原理

无人机机载激光雷达（LiDAR）测量系统集成激光测距技术、全球定位系统（GPS）和高精度IMU（惯性测量单元）等。激光雷达发射激光脉冲，激光脉冲射向目标物体并反射回来，被传感器接收。通过精确测量激光脉冲从发射到接收的时间间隔，结合光速，利用公式  $d=c \times t/2$ （其中  $d$  为目标距离， $c$  为光速， $t$  为飞行时间），可计算出传感器与目标点之间的距离<sup>[10]</sup>。同时，无人机搭载的GPS用于确定激光雷达在空间中的位置，IMU则实时测量无人机的姿态（包括俯仰、翻滚和偏航角度）。通过这些信息，能够精确确定每个激光脚点在三维空间中的坐标（X、Y、Z）。且激光雷达可以在短时间内获取大量的三维点云数据，这些点云数据能够详细地反映目标区域的地形地貌、物体表面特征。

### （二）无人机机载激光雷达测量的技术流程

#### 1. 数据准备：

（1）点云数据；

（2）航迹文件（GPS 时间、位置信息 X,Y,Z）与姿态信息



(H,R,P) 相对应的列表文件) 等参考 文件;

- (3) 地面检查点, 即用于精度检测的野外实测数据;
- (4) 成果坐标系与点云坐标系统之间的转换参数;
- (5) 其他有关数据, 如与数据处理、成果检验相关的数据。

#### 2. 点云处理:

(1) 噪声点滤除: 将明显低于地面的点或点群 (低点) 和明显高于地表目标的点或点群 (空中点), 以及移动地物点定义为噪声点。在进行地面点分类之前, 应首先将这类点分离出来。

(2) 分类算法: 利用基于反射强度、回波次数、地物形状等的算法或算法组合, 对点云数据进行自动分类。

(3) 提取地面点云: 裸露地表处有且只有一次回波, 此次回波对应的反射点即为地面点。植被覆盖区域可能对应多次回波, 正常的地面点是最后一次回波对应的反射点。相对于地物点, 地面点的高程是最低的。从较低的激光点中提取初始地表面; 基于初始地表面, 设置地面坡度阈值进行迭代运算, 直至找到合理的地面。

(4) 质量控制: 对分类结果进行检查。通过将点云分类显示、按高程显示等方法, 目视检查分类后点云; 对有疑问处用断面图进行查询、分析。

(5) 数字高程模型制作及质量控制: 根据需要, 对点云中所有地面点均作为特征点进行数字高程模型构建; 基于地面点云或数字高程模型, 根据成图比例尺、地形类别和等高距, 计算生成等高线数据; 根据成图的比例尺, 设置高程注记点距离; 通过三维透视及晕渲, 检查数字高程模型的可靠性。对模型不连续、不光滑处应重新核实地面点分类的可靠性; 使用实地施测的地面检查点, 在数字高程模型中内插获取相应平面位置的高程, 计算并统计检查点与内插点间的高程误差。

(6) 成果输出: LAS/PNTS 格式点云数据、平差后的轨迹文件、地面点文件及 DEM 产品。

## 四、海南省某河道治理工程中的实际应用

### (一) 工程概述

1. 项目概况: 测区位处于海南省中大型某河流中上游, 河道长度2km, 测量范围约为: 0.36km<sup>2</sup>。地形起伏变化大, 植被茂密, 河坎落差大, 岸线走向及地形较为复杂, 全站仪及 RTK 的等测量手段获取数据难度较大。因此, 通过无人机摄影测量与激光雷达测量相结合的技术手段来完成项目的测绘工作。

#### 2. 任务书及设计要求:

- (1) 坐标系: CGCS2000坐标系, 85国家高程;
- (2) 测量精度: 对测量范围区域进行 1:1000 地形图测量;
- (3) 内容要求: 与河道交叉的建筑物或路网高程地形地貌地物信息需要详细测量; 与河道交叉的管网、电缆、高压电等构筑物的高程和地形地貌地物信息需要详细测量。

(4) 设计及作业要求: 航测外业及内业内容符合《CH/T3003-2021 低空数字航空摄影测量内业规范》; 《CH/3004-

2021 低空数字航空摄影外业规范》; 《CH/T3005-2021 低空数字航空摄影规范》; 《CH/T 8023-2011 机载激光雷达数据处理技术规范》; 《CH/T3006-2011 数字航空摄影测量 控制测量规范》等测绘行业标准

### (二) 无人机摄影测量及激光雷达测量工作流程:

前期准备工作: 像控点的布设及采集, 根据规范及现场情况合理布设平高点及检查点。

(1) 像控点布设略况 (红色钉子为平高控制点, 蓝色钉子位置为检查点) 如下图1示:



图1 像控点点位布设略况图

(2) GNSS 接收仪器现场采集点位如下图2、3示:



图2 像控点采集



图3 基础控制点采集

飞行平台的航线规划及参数设置:

- (1) 飞行器: 大疆 Matrice 300 RTK、DJI Mavic 3E (自带镜头)
- (2) 机载设备: 禅思 L2 (相机 + 激光雷达)
- (3) 参数设置: 规划类型为航带飞行, 航向重叠为80%, 旁向重叠65%; 激光雷达扫描方式为重复扫描, 设置航高为100米, 地面分辨率 (GCD) 为2.58cm/px; 等时曝光拍照。



图4 大疆 Matrice 300 RTK 搭载禅思 L2

(三) 正射影像及三维模型的处理及输出

获取的原始照片, 在瞰景 smart3d 及大疆制图软件中进行导入及对照片 POS 数据查看 Yaw,Ptich,Roll 的三种飞行姿态及相关精度是否正常, 随后进行空三解算, 检查空三结果精度, 其中连接点的中误差符合低空数字航空摄影内业规范的精度要求, 丘陵地区平面位置小于0.2m, 高程中误差小于0.28m; 导入像控点进行地理匹配及高程纠正, 并检查像控点的误差及检查点的平面中误差均不超过0.12m, 高程中误差不超过0.1m, 符合限差要求。空三重建质量报告如下图4:

空三重建质量报告

1. 基础信息

数据源名称

1

最小地面分辨率 (GSD)

2.58 cm

飞行高度

100 m

影像分辨率

2448 px

影像分辨率 (GSD)

2.58 cm

影像分辨率 (GSD)

2.58 cm

2. 精度指标

计算方式

最小二乘法

相机高度

100 m

相机型号

禅思 L2

精度指标

精度

点

面

体

体

精度

点

面

体

体

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

3. 精度指标

精度

点

面

体

体

精度

点

面

体

体

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

精度指标

精度

点

面

体

体

精度

点

面

体

体

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

图5 空三重建质量报告

根据项目的要求, 输出成果图为坐标系为 CGCS2000, 高程坐标系为85国家高程; 地面采样间隔 (GSD) 为3.78cm 的正射影像 (DOM) 及三维模型 (OSGB)。如下图6:



图6 正射影像 (DOM)

(四) 激光雷达点云的处理及输出

本次项目采用大疆 M300 搭载的禅思 L2 进行原始数据的获取, 点云数据的处理在大疆制图软件中实现。

导入原始点云数据, 因为是通过 RTK 实时定位飞行获得的点云数据, 所以参数设置选择高精度点云处理模式。点云密度按百分比设置为100%, 点云有效距离设置为3-300米, 点云精度优化及点云平滑 (去噪); 地类点分类设置中, 根据经验设置地面类型选择缓坡, 最大建筑物对角线20m, 迭代角度6°, 迭代距离0.5m; 按比例尺1:500生成 DEM; 设置等高线间隔及基准高程; 设置高程注记为5m, 导入像控点, 根据像控点进行匹配纠正; 根据项目的要求设置成果输出坐标系, 产品的输出格式为 (PNTS|LAS) 及 DEM, 点云数据选取高程显示预览查看。如下图7:

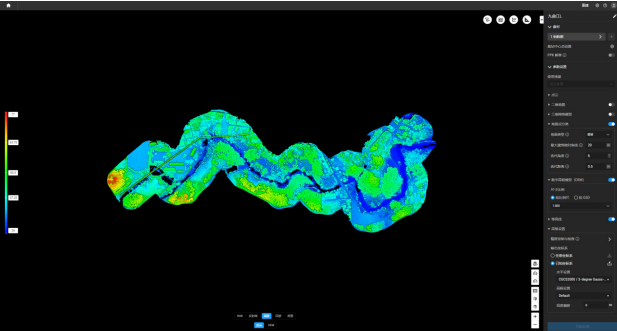


图7 点云数据高程显示

通过将点云分类显示、按高程显示等方法, 目视检查分类后点云, 对有疑问处用断面图进行查询、分析。最后, 查看质量报告, 控制点误差小于0.05cm, 符合精度要求, 如下图8。

精度指标									
1. POS 精度									
精度	点	面	体	体	精度	点	面	体	体
精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m
精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m
2. IMU 精度									
精度	点	面	体	体	精度	点	面	体	体
精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m
精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m
3. 点云精度									
精度	点	面	体	体	精度	点	面	体	体
精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m
精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	精度	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m	0.000001 m

图8 IMU 轨迹误差及控制点误差报告

## 五、结语

综上所述，本文通过对海南省某河道治理工程测绘的实际应用，验证了无人机测绘技术在复杂水利工程测量中的高效性与可靠性。相较于传统人工测量，激光雷达与摄影测量相结合的技术

方法可快速获取大面积、高精度地理信息数据，显著缩短成图周期并降低人力成本。为水利工程的规划设计、施工及灾害监测提供了重要技术支撑。未来，随着多传感器融合与 AI 算法的深化应用，无人机测绘技术将在水利工程全生命周期管理中发挥更大价值。

## 参考文献

[1] 金佳栋, 仅然. 基于三维激光扫描与无人机倾斜摄影的多测合一作业模式 [J]. 北京测绘, 2024, 38(11): 1575–1579.

[2] 范小亮, 康彦伟. 基于倾斜测量技术的水利工程库区遥感影像测绘方法探讨 [J]. 内蒙古水利, 2024, (11): 87–89.

[3] 张颖, 熊云. 测绘工程测量中无人机遥感技术的运用——以贵阳市观山湖区金华水库、观山水库水利工程为例 [J]. 石材, 2024, (03): 153–155.

[4] 石刚. 无人机低空摄影测量技术在水利工程测量中的应用探究 [J]. 住宅与房地产, 2019, (30): 187–188.

[5] 杨李. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用研究 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(09): 98–99.

[6] 李尤瑾, 崔恒军, 焦建超. 水利工程测量中数字化测绘技术的应用探析 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023, (09): 32–34.

[7] 包善文. 航空摄影与机载激光雷达集成技术在水利测量中的应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(S1): 236–239.

[8] 周伟. 论无人机测绘技术在工程测量中的应用 [J]. 产品可靠性报告, 2024(06): 95–96.

[9] 汪建波, 程锦. 浅析无人机测绘技术在建筑工程测量中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023(22): 172–174.DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202322056.

[10] 何惠霞. 浅析无人机遥感技术在测绘工程测量中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023(08): 98–100.DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202308032.



# 复杂水域中船舶靠泊操纵关键技术和实践分析

曲东庆

烟台打捞局海工船队, 山东 烟台 264000

DOI:10.61369/ERA.2025060040

**摘要：** 本文聚焦复杂水域船舶靠泊操纵展开系统性研究。通过剖析复杂水域特征与靠泊难点，深入探讨环境因素应对、船速船位控制及拖轮协同等关键技术，并结合典型案例挖掘实践经验。最后针对性提出安全增效策略，旨在为航海领域提供科学且实用的操作指引与理论参考。

**关键词：** 复杂水域；船舶靠泊；关键技术

## Analysis of Key Techniques and Practices for Ship Docking Maneuver in Complex Waters

Qu Dongqing

Yantai Salvage Bureau Marine Engineering Fleet, Yantai, Shandong 264000

**Abstract：** This article focuses on a systematic study of ship docking maneuvers in complex waters. By analyzing the characteristics of complex waters and the difficulties of docking, it delves into key techniques such as environmental factor response, ship speed and position control, and tugboat coordination, combined with typical cases to explore practical experience. Finally, it proposes targeted safety and efficiency enhancement strategies, aiming to provide scientific and practical operational guidance and theoretical reference for the nautical field.

**Keywords：** complex waters; ship docking; key techniques

### 引言

在全球贸易深度融合的当下，海运作为国际贸易的核心运输方式，承载着约 90% 的世界贸易量。船舶靠泊作为海运链路的关键节点，其操纵安全性与效率直接影响物流周转与运输成本。随着船舶大型化趋势加剧（如超大型集装箱船已达 24000TEU），以及港口作业密度持续攀升，复杂水域（狭窄航道、强流区域、高流量港口等）的靠泊作业风险日益凸显。据国际海事组织（IMO）统计，近五年全球因靠泊失误引发的事故占港口作业事故总量的 38%，单次重大事故平均造成经济损失超千万美元，同时伴随严重的海洋生态污染风险<sup>[1]</sup>。因此，系统研究复杂水域船舶靠泊操纵技术，对保障航运安全、推动绿色航运发展具有重要现实意义。

### 一、复杂水域的特点及靠泊操纵难点

#### （一）复杂水域的特点

##### 1. 航道狭窄

受地理条件制约，部分港口航道呈现“瓶颈”特征。以荷兰鹿特丹港“新水道”为例，其航道宽度仅 230 米，却需满足双向通航需求，超大型船舶通过时横向操作裕度不足船长的 1.5 倍，稍有不慎就可能发生碰撞。此外，内河航道常伴有弯道、浅滩等复杂地形，船舶转向半径受限，需精准控制航迹。例如长江中游荆江河段，连续弯道与水下暗礁并存，船舶需在曲率半径仅 500 米的弯道内完成转向，对舵效和航速控制要求极高<sup>[2]</sup>。

##### 2. 水流复杂

潮汐、河口冲淤、海流系统共同作用，形成多变的流场环境。在长江口北槽航道，涨落潮最大流速差达 4.5 节，且存在明

显的分层流现象，上层水流与下层水流流速、流向差异显著，导致船舶出现“横倾”“打横”风险。某些海峡区域受地转偏向力影响，会产生横向补偿流，对船舶产生持续的侧推力。如英吉利海峡，受北大西洋暖流与潮汐叠加影响，船舶在通过时需实时修正航向，若未及时调整，每航行 1 海里横向偏移可达 30 米<sup>[3]</sup>。

##### 3. 气象条件多变

复杂水域常受多种天气系统叠加影响。在东亚季风区，冬季寒潮大风可引发 10 级以上强风，阵风风速超过 28m/s，对船舶稳性造成极大挑战；夏季台风季节伴随暴雨、巨浪，中心附近最大浪高可达 15 米，曾导致多起船舶断缆搁浅事故。地中海部分海域存在突发性的“玛尔玛风”，风速短时间内可骤增至 30m/s，且风向突变频率高，船舶锚泊期间易发生走锚险情。大雾天气年均出现天数在某些港口可达 60 天以上，能见度低于 500 米时，船舶需依赖雷达和 AIS 系统辅助靠泊，但浓雾会削弱雷达回波强



度，导致目标识别精度下降 30% 以上<sup>[4]</sup>。

#### 4. 船舶密度大

世界级枢纽港作业密度惊人，新加坡港每日进出港船舶超 500 艘，港区内船舶间距常不足安全距离的 1.2 倍，形成高密度船舶流。同时，渔船、游艇等非标准船舶频繁穿插，加剧了交通流的复杂性。例如鹿特丹港的马斯勒伊斯港区，集装箱船、散货船与休闲游艇混行，小型船舶航迹多变，大型船舶因惯性大难以快速避让，导致碰撞风险指数较普通港区高出 2.3 倍<sup>[5]</sup>。

### （二）靠泊操纵难点

#### 1. 船位控制困难

环境力耦合作用导致船位控制呈非线性特征。研究表明，横向水流速度每增加 1 节，船舶横向漂移量每分钟增加约 30 米；强风作用下，万吨级船舶横向漂移速度可达 0.5 – 1 节，传统操纵经验难以满足精准控制需求。

#### 2. 船速调整复杂

船舶惯性与环境力相互作用形成复杂的动力学响应。以 20 万吨级油轮为例，从全速（15 节）制动至完全停止需滑行约 3 公里，且在变速过程中，螺旋桨的伴流、沉深横向力等因素会改变船舶运动状态，增加速度控制难度<sup>[6]</sup>。

#### 3. 操纵反应滞后

大型船舶的水动力惯性显著，舵效响应存在时间延迟。实测数据显示，300 米长集装箱船从满舵操舵到产生明显转首效应需 15 – 20 秒，在紧急避让场景下易错失最佳操纵时机。

#### 4. 环境因素影响大

风、流、浪的动态耦合作用形成复合干扰。例如，斜向强风与横向水流叠加时，船舶所受合力方向与大小难以精确预测，需驾驶员实时解算环境力矢量并调整操纵策略。

## 二、船舶靠泊操纵的关键技术

### （一）环境因素应对技术

#### 1. 风力应对

采用“分级响应”策略，构建精细化风力应对体系。当风速低于 6 级时，可灵活利用侧推器补偿风致漂移，通过调整侧推器的推力大小与方向，有效抵消横向风力影响；6 – 8 级风需提前规划风流压角，运用“车舵配合”技巧保持航迹，根据船舶实际受风面积与风舷角，合理调整主机转速与舵角组合，确保船舶稳定航行。超过 8 级风则立即启动避风预案，选择安全锚地避风。以顺风靠泊为例，需在距离泊位 2 海里处将航速降至 8 节以下，提前计算并预留足够的倒车冲程，避免因速度过快难以控制；逆风靠泊时，虽可利用风力辅助减速，但需密切关注风压变化，通过实时监测风压中心位置，警惕风压过大导致船舶失控风险，必要时结合侧推器和拖轮辅助操作<sup>[7]</sup>。

#### 2. 水流应对

运用“流压角预配”技术，基于船舶操纵运动数学模型，通过精确计算水流矢量与船舶航向夹角，提前调整航速与舵角。在涨潮急流区，采用“顶流靠泊”策略，将航速控制在与流速相当水平，保持船舶与水流的相对平衡，降低横向流对靠泊的影响；落潮时，由于水流拉力增大，需加大主机功率以克服水流拉力，同时根据流态变化动态调整舵角。现代船舶借助 ADCP（声学多

普勒流速剖面仪）实时测量三维流速场，获取不同水层的流速与流向数据，结合电子海图系统进行可视化分析，提升流场感知精度，为靠泊决策提供更准确的数据支持<sup>[8]</sup>。

#### 3. 气象条件应对

构建“多源信息融合”决策体系，深度整合雷达、AIS、气象卫星等多源数据。大雾天气启用 ARPA 雷达的“目标录取”功能，设置 0.5 海里安全警戒圈，通过雷达回波分析周围船舶动态，结合 AIS 信息准确识别目标，确保航行安全；雷暴天气需提前获取气象卫星云图数据，分析雷暴移动路径与强度，远离港口雷暴高发区域，当闪电距离小于 5 公里时，立即终止靠泊作业，选择安全水域抛锚避险，并做好防雷击措施，如关闭非必要电子设备，确保船舶电气系统安全。

### （二）船速与船位控制技术

#### 1. 船速控制

实施“三段式减速”方案，在距离泊位 3 海里处进入预备减速区（降至 10 – 12 节），1 海里处进入主减速区（降至 5 – 7 节），500 米内进入精细控制区（3 – 5 节）。结合主机遥控系统（ECS）与侧推器协同控制，实现  $\pm 0.1$  节的速度精度。例如，LNG 船因货舱压力限制，需采用“微速倒车 – 微进车交替”的特殊减速策略<sup>[9]</sup>。

#### 2. 船位控制

应用“动态参考线”技术，基于电子海图构建虚拟航迹线，通过 GPS 差分定位（精度  $\pm 1$  米）与视觉导航融合，实时监测船位偏差。当横向偏差超过 10 米时，启动“分级纠偏”：先采用小舵角（5 – 10°）微调，若偏差持续扩大则结合侧推器进行强力纠正。

### （三）拖轮协助操纵技术

#### 1. 拖轮的作用

构建“主从协同”作业模式，首拖轮负责航向引导（偏转力矩可达  $1000\text{kN} \cdot \text{m}$ ），尾拖轮控制速度与横移，傍拖轮提供横向推力与稳性支持。研究表明，三拖轮协同作业可使大型船舶靠泊效率提升 40%，碰撞风险降低 65%。

#### 2. 拖轮的使用方法

依据船舶参数（船长、吃水、方形系数）与环境条件，通过“操纵性指数法”计算拖轮配置方案。常用拖带方式包括：首八字拖（适用于强风环境）、尾直拖（精确控制速度）、傍拖（狭窄水域）。作业中采用 VHF16 频道建立主副通讯链路，通过标准化指令代码（如“Tug 1, Increase Power 30%”）确保操作协同。

## 三、复杂水域船舶靠泊操纵实践分析

### （一）案例介绍

选取某东南亚集装箱枢纽港为研究对象，该港航道宽度 180 米，弯曲半径仅 1200 米，潮流最大流速 3.8 节，日均船舶流量 450 艘。某 18000TEU 集装箱船在春季季风期执行靠泊任务，作业时段遭遇 7 级东南风，流向与风向夹角 60°，形成复杂的风流耦合环境<sup>[10]</sup>。

### （二）靠泊操纵过程

前期准备，依托港口大数据平台获取 72 小时气象水文预报，结合船舶操纵性手册制定《风流联合作用下靠泊方案》。组织船岸多方通过 VR 模拟系统进行预演，明确拖轮配置（首拖 1 艘、尾

拖 1 艘、傍拖 1 艘)与各阶段操纵参数。在接近码头阶段,在距离泊位 3 海里处启动“渐进式减速”,同步调整航向预配 3° 风流压角。利用激光测距仪实时监测与航道边界距离,通过 ECDIS 系统生成动态安全走廊。靠泊阶段,距离泊位 500 米时,拖轮按预定方案就位。首拖轮采用八字拖方式抵消风致偏转,尾拖轮通过“脉冲式拖带”控制船速,傍拖轮保持 0.5 米安全间距随时应对突发横移。最终船舶以 2 节速度平行靠泊,横移速度控制在 0.1 节以内。

### (三) 经验与教训

基于大数据的精准环境预测、VR 模拟预演及标准化指令体系显著提升了协同效率;多源导航设备融合应用确保了船位精度。对潮流的垂向分层效应估计不足,导致船舶在靠泊初期出现意外横倾,后续需加强三维流场数据的分析与应用。

## 四、提升复杂水域船舶靠泊操纵安全性和效率的建议

### (一) 加强船员培训

#### 1. 构建“理论-模拟-实船”三维培训体系

通过分层递进的教学模式强化船员实操能力。在理论教学环节,系统梳理船舶操纵动力学、流体力学等核心知识;模拟训练阶段,引入 VR/AR 技术搭建 1:1 还原的极端场景(如台风过境时的强风急流、船舶动力系统突发故障),利用交互反馈机制提升危机处理能力;实船操作阶段,安排资深引航员全程跟船指导。要求每位船员每年参与不少于 60 小时的专项培训,并建立培训档案追踪学习成效。

#### 2. 建立船员操纵技能评估数据库

依托船舶黑匣子(VDR)、电子海图系统(ECS)等设备,实时采集船舶航行数据、车舵操作记录及环境参数。运用大数据分析技术对历史航行数据进行深度复盘,通过聚类算法识别高频操作失误场景,生成个性化能力评估报告。针对转向过度、靠泊速度控制失准等薄弱环节,定制专项训练方案,并定期组织技能复训与考核,形成“评估-改进-验证”的闭环提升机制。

### (二) 完善港口设施

#### 1. 推进“智慧港口”建设,构建多层次感知体系

在码头前沿部署毫米波雷达阵列,利用其高分辨率特性实时捕捉船舶三维运动参数,精度可达厘米级;同步布设水下声呐监测网,覆盖港池全水域,实现对暗礁、涡流等水下风险的 24 小时动态监测。各感知设备通过 5G+光纤混合组网,构建全域感知系统,为船舶靠泊提供全方位环境数据支撑。

#### 2. 开发“数字孪生港池”平台,整合 GIS 地理信息、船舶动力学模型与实时感知数据。

通过 AI 算法对港池气象、潮汐、航道条件进行多维度分析,每秒生成超 10 万次靠泊模拟,提前预测偏荡、擦碰等潜在风险。基于风险评估结果,平台自动生成包含航速控制曲线、舵角调整方案的最优靠泊路径,并通过船岸协同系统实时推送至驾驶室,实现船舶靠泊过程的智能化决策与动态优化。

### (三) 建立应急响应机制

#### 1. 编制《复杂水域靠泊风险图谱》

运用大数据分析 with 风险评估模型,系统梳理急流、大雾、强风等 32 类典型风险场景,从气象水文、船舶设备、人为操作等维度构建风险矩阵。针对每类风险制定标准化处置流程,明确风险

预警分级、应急响应措施及多方协同机制,形成可视化、可操作的风险防控指南。

#### 2. 每季度开展船岸联合应急演练

模拟碰撞搁浅、燃油泄漏、人员落水等复杂场景,采用“双盲”演练模式提升应急处置实战性。重点强化多船协同救援调度能力,优化应急资源调配流程;同时,联合环保部门开展污染应急处置演练,规范溢油围控、污染物回收等操作流程,通过演练复盘持续完善应急预案体系。

### (四) 加强信息共享

#### 1. 搭建区域性海事信息云平台

该平台通过物联网传感器网络实时采集港口水域的风速风向、潮汐变化、流速流向等关键数据,结合船舶 AIS 自动识别系统和 VTS 船舶交通管理系统的动态信息,构建三维可视化数据模型。运用大数据分析技术,对采集数据进行深度挖掘,基于船舶类型、吃水深度、操纵性能等参数,为船舶靠泊提供个性化航行建议与风险预警,助力船员提前制定最优靠泊方案。

#### 2. 推广基于区块链技术的船岸信息交互系统,确保数据不可篡改与实时可信

该系统利用区块链分布式账本特性,将船舶靠泊计划、货物装卸清单、港口调度指令等关键信息加密存储于去中心化节点网络中。通过智能合约自动执行船岸数据交互规则,实现装卸流程自动化与数据实时共享。当船舶进港时,系统自动核验船舶证书、航行日志等文件,确保信息真实性,有效规避因数据篡改引发的靠泊安全隐患与法律纠纷,提升船岸协同作业效率与安全性。

## 五、结论

复杂水域船舶靠泊操纵是融合航海技术、环境科学与系统工程综合性课题。本文通过理论分析、技术研究与案例实践,系统揭示了复杂环境下的操纵规律,提出的关键技术 with 优化策略具有较强的工程实用性。未来研究可进一步结合人工智能、数字孪生等前沿技术,构建智能化靠泊决策支持系统,推动航运业向安全、高效、绿色方向发展。

## 参考文献

- [1] 陈锦标,洪碧光,张新宇.基于数值模拟的船舶靠泊水动力研究[J].中国航海,2022,45(4):8-13.
- [2] 刘敬贤,杨益生,石爱国.受限水域船舶靠泊操纵运动建模与仿真[J].系统仿真学报,2021,33(11):2337-2346.
- [3] 王洪波,李铁山,章文俊.基于模糊推理的船舶靠泊风险评估[J].中国航海,2021,44(3):10-15.
- [4] 张显库,刘佳,王鹏.船舶自动靠泊控制技术综述[J].大连海事大学学报,2020,46(4):1-10.
- [5] 李丽娜;陈国权;杨凌波;许春亮;王兴华;文婷.船舶拟人智能避碰决策算法测试及应用[J].中国航海,2022(01).
- [6] 黄立文;李浩宇;梁宇;赵兴亚;贺益雄.基于操纵过程推演的船舶可变速自动避碰决策方法[J].交通信息与安全,2021(06).
- [7] 贺益雄;梁宇;熊勇;牟军敏;李梦霞;张可.开阔水域多物标动态自适应智能航行方法[J].交通运输工程学报,2021(05).
- [8] 谢鸿伟;张英俊;邢胜伟;高宗江.基于模型预测控制的船舶自主避碰方法[J].船舶工程,2021(08).
- [9] 李宗宜;卜仁祥;章沪淦.结合改进 RBF 与虚拟圆弧的船舶路径滑模控制[J].西北工业大学学报,2021(01).
- [10] 马杰;苏钰栋;熊勇;张煜;杨鑫.基于速度障碍和人工势场的受限水域船舶避碰决策方法[J].中国安全科学学报,2020(11).