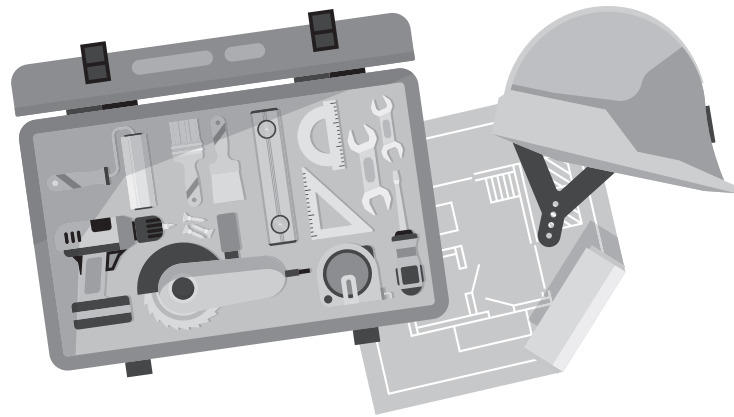


工程技术 与质量管理

Engineering Technology and Quality Management



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



Editors-in-Chief

Yulei Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co. LTD.

Haizhong Gao

Zhejiang Zhongnan Construction Group Co. LTD.

Associate Editor

Pengyue Yu

Shandong Construction Engineering (Group) Co., LTD.

Editorial board member

Sanath Alahakoon

School of Engineering and Technology Centre for Railway Engineering

Salahuddin Azad

School of Engineering and Technology Institute for Future Farming Systems,
Centre for Regional Economies and Supply Chains

Yungang Wang

Ordos Sports Development Center

Qigui Chi

Expert Committee of China Construction Supervision Association

Danhui Chi

Fujian Provincial Institute of Engineering Supervision and Project Management
Association

Yahui Chi

Fujian Provincial Civil Engineering and Construction Industry Association

Chunxiu Liu

Fujian Provincial Association of Engineering Construction Quality and Safety

工程技术与质量管理

Engineering Technology and Quality Management

第3卷 第8期 2025年8月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《工程技术与质量管理》编辑部

ISSN(O): 2992-9806

ISSN(P): 2995-3170

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

网址: <https://www.artdesignp.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:

- 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。
- 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。
- 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。
- 论文未曾以任何形式公开发表过。
- 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。



工程技术 | ENGINEERING TECHNOLOGY

- | | | |
|-----|--|---------------------------------------|
| 001 | 岩棉板薄抹灰外墙外保温施工质量控制
Quality Control of External Insulation Construction of Rock Wool Board
Thin Plastering External Wall | 王洵
Wang Xun |
| 005 | 铜矿空场法转充填法采矿方法
Mining Method of Copper Ore Empty Field Method
to Filling Method | 高志龙, 冯明浩
Gao Zhilong, Feng Minghao |
| 008 | 高喷灌浆防渗工艺工法研究
Study on High Spray Grouting Anti-Seepage Technology and Method | 廖国立
Liao Guoli |
| 012 | 养护工程中微表处技术和预防性养护的有效运用
Effective Application of Micro-Surfacing Technology and Preventive
Maintenance in Highway Maintenance Engineering | 满蕊
Man Rui |
| 015 | 管道法兰使用橡胶垫片密封时紧固力矩的选取和限制
Selection and Limitation of Tightening Torque when Rubber Gasket is
Used for Sealing Pipeline Flange | 李强
Li Qiang |
| 018 | 房建项目全生命周期工程管理策略与实践
Construction Project Whole Life Cycle Engineering Management
Strategies and Practices | 刘崇洋
Liu Chongyang |
| 021 | 硫铁矿制酸生产中的能源管理与节能措施
Energy Management and Energy Saving Measures in Sulfur Iron
Ore Acid Production | 廖东芳
Liao Dongfang |
| 024 | 建筑工程管理视角下房地产项目的技术与风险管理
Technology and Risk Management of Real Estate Projects from the
Perspective of Construction Project Management | 尹晋, 程莉
Yin Jin, Cheng Li |
| 027 | 关于某建筑物饰面砖脱落的技术分析及管理措施
Technical Analysis and Management Measures for the Detachment of
Exterior Facing Tiles in a Residential Building | 仇文龙
Qiu Wenlong |
| 032 | 环保工程设计与技术管理: 生态环境保护的实践路径与技术探索
Environmental Protection Engineering Design and Technology Management: Practical
Path and Technical Exploration of Ecological Environment Protection | 陈智军
Chen Zhijun |
| 035 | 基于核磁共振波谱技术的汽油辛烷值研究
Research on Gasoline Octane Number Based on Nuclear
Magnetic Resonance Spectroscopy Technology | 杨晗玉, 朱建林
Yang Hanyu, Zhu Jianlin |
| 038 | 桥梁工程地基基础检测技术要点及优化策略
Key Technical Points and Optimization Strategies for Foundation
Testing in Bridge Engineering | 吴青峰
Wu Qingfeng |
| 041 | 自动化监测在高速公路边坡中的应用研究
Research on the Application of Automatic Monitoring in Highway Slope | 王一彪
Wang Yibiao |
| 044 | 建筑工程项目精细化施工管理与成本控制策略研究
Research on Fine Construction Management and Cost Control
Strategies for Construction Projects | 洪伟锋
Hong Weifeng |
| 047 | 铁路工程施工图深化与技术管理的协同优化
Collaborative Optimization of Deepening Construction Drawings and
Technical Management in Railway Engineering | 鲜永开
Xian Yongkai |

050	路面粗糙度检测的精度提升技术 Techniques to Improve the Accuracy of Pavement Roughness Detection	吕恒 Lv Heng
-----	--	---------------

水电工程 | HYDROPOWER ENGINEERING

053	建筑施工试验检测在水利工程中的应用与实践 Application and Practice of Construction Testing and Inspection in Water Conservancy Projects	翟维娟 Zhai Weijuan
057	水利枢纽工程混凝土施工技术研究 Research on Concrete Construction Technology of Hydro-junction Projects	张良群，梁骏宇 Zhang Liangqun, Liang Junyu
060	电力工程管理中的分包管理体系构建 The Construction of Subcontracting Management System in Power Engineering Management	王天序 Wang Tianxu
063	智能建筑电气工程施工管理信息化创新路径 Innovative Pathways for Informationisation in the Construction Management of Electrical Engineering in Smart Buildings	朱一琳 Zhu Yilin
066	建筑工程中电气工程与给排水工程的技术管理与质量控制策略 Technical Management and Quality Control Strategy of Electrical Engineering and Water Supply and Drainage Engineering in Construction Engineering	时玉璋 Shi Yuzhang
069	机电一体化技术的发展趋势及在包装设备的应用 Development Trends of Mechatronic Integration and Its Applications in Packaging Equipment	陈太柏 Chen Taibai
072	新能源汽车电池管理系统（BMS）的关键技术与性能优化 Key Technologies and Performance Optimization of Battery Management System (BMS) for New Energy Vehicles	张树富 Zhang Shufu

安全质量 | SAFETY QUALITY

075	金属非金属地下矿山的通风安全管理及通风事故防范 Ventilation Safety Management and Ventilation Accident Prevention of Metal and Non-Metallic Underground Mines	冯明浩，田健健 Feng Minghao, Tian Jianjian
078	总部大楼电梯工程安全管理与技术保障体系研究 Research on Safety Management and Technical Support System of Elevator Project in Headquarters Building	邹健亮 Zou Jianliang
081	试验检测在建筑施工质量验收中的应用与实践 The Application and Practice of Test and Inspection in the Quality Acceptance of Building Construction	张静 Zhang Jing
084	建筑施工安全管理中的职业病防控：现状与优化路径 Occupational Disease Prevention and Control in Construction Safety Management: Current Situation and Optimization Path	贾仁超 Jia Renchao
087	建筑工程管理中的风险预警机制构建与实证研究 Construction and Empirical Research on Risk Early Warning Mechanism in Construction Project Management	乔华春 Qiao Huachun
090	房地产工程与工业厂房工程中的施工质量管理与技术优化策略研究 Research on Construction Quality Management and Technical Optimization Strategy in Real Estate Engineering and Industrial Plant Engineering	李小桥 Li Xiaoqiao
093	建筑工程现场检测与实验室检测的协同管理及质量控制研究 Study on Collaborative Management and Quality Control of Construction Site Testing and Laboratory Testing	陈耀辉 Chen Yaohui
096	装饰装修工程现场管理中的质量控制与成本优化 Quality Control and Cost Optimization In Decoration Project Site Management	欧少民 Ou Shaomin
099	极端天气下公路与城市道路路面抗滑性能提升技术研究 Research on Improving the Anti-slip Performance of Highway and Urban Road Pavement under Extreme Weather Conditions	张春燕 Zhang Chunyan

岩棉板薄抹灰外墙外保温施工质量控制

王洵

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ETQM.2025080031

摘 要 : 随着外墙保温技术的不断发展, 岩棉作为一种比较成熟的绿色 A 级防火外保温材料在国外被广泛应用已有 40 余年, 但是在国内 2009 年中国央视火灾事件发生后, 在 A 级防火材料强制使用政策的推动下, 岩棉才开始普及。岩棉外保温材料主要包含岩棉板和岩棉条, 针对建筑外墙外保温较常用的岩棉板, 本文将结合笔者以往的施工经验并参考相关规范文献对相关施工工艺技术进行一个整合和归纳, 对常见的施工要点提出相应措施, 并针对岩棉薄抹灰保温系统构造创新提出一些拙见。

关 键 词 : 岩棉板薄抹灰; 岩棉板; 外墙外保温; 锚栓

Quality Control of External Insulation Construction of Rock Wool Board Thin Plastering External Wall

Wang Xun

China First Metallurgical Group Co.,Ltd. Wuhan, Hubei 430000

Abstract : With the continuous development of external wall insulation technology, rock wool, as a relatively mature green Class A fireproof external insulation material, has been widely used abroad for more than 40 years. However, in China, after the CCTV fire incident in 2009, driven by the mandatory use policy of Class A fireproof materials, rock wool began to gain popularity. Rock wool external insulation materials mainly include rock wool boards and rock wool strips. For the commonly used rock wool boards in building external wall insulation, this article will integrate and summarize relevant construction techniques based on the author's past construction experience and relevant normative literature, propose corresponding measures for common construction points, and offer some humble opinions on the structural innovation of the rock wool thin plaster insulation system.

Keywords : thin plaster on rock wool board; rock wool board; external wall insulation; anchor bolt

引言

在绿色发展的推动下, 建筑节能技术也在不断完善, 外墙保温材料也在一直推陈出新, 随着建筑节能和防火要求标准的提高, 外墙外保温系统已经成为了降低建筑能耗的重要手段。相比外墙内保温, 外保温具有更高的节能效率, 节省室内空间, 保护建筑结构, 长期经济效益更优等诸多优点。在设计角度应优先考虑使用外保温。

考虑到防火和环保要求, 岩棉作为取代石棉的新型材料, 目前是外墙保温首选材料, 岩棉具有 A (A1) 级防火性能、绿色环保及稳定性强的特点。然而, 岩棉板薄抹灰系统对施工工艺要求较高, 若控制不当易引发严重质量问题。本文将结合工程实践、参考相关规范文献, 对施工过程中重难点进行探讨。并针对岩棉薄抹灰保温系统开裂、脱落频发的质量问题, 从固定保温板的结构形式上提出几种创新思路。

一、岩棉板保温外墙施工材料

岩棉外保温材料主要包含岩棉板和岩棉条, 其中岩棉板尺寸更大, 保温性能更好, 岩棉条是将岩棉板按照一定距离切割后翻转使用, 岩棉条尺寸小, 因纤维结构变向具有抗拉性能更好、不规则墙面施工更加灵活的特点。但是岩棉板因施工缝更少, 施工效率更高, 相比于岩棉条应用更加广泛。

目前主要的外墙保温材料包含: 岩棉板、膨胀聚苯乙烯

板 (EPS)、增强型改性发泡水泥保温板、难燃性挤塑聚苯板 (XPS)、硬质聚氨酯泡沫板。其中岩棉保温板是以玄武岩及天然矿石为主原料, 经加热融化后, 采用四辊离心制棉工序, 加入防尘油、粘结剂、憎水剂, 经过沉降、固化、切割等工艺制作而成的产品。

因岩棉和石棉结构很相似, 如果不注意辨别往往会将两者混淆。石棉严重危害身体健康而岩棉板无毒、无害、无污染、无放射性, 属绿色环保节能建材。

与其他四种无机保温材料相比,岩棉板还具有以下特征:

(1) 具有优异的防火功能,其中岩棉板和增强型改性发泡水泥保温板均能够达到 A1 级别防火要求,但增强型改性发泡水泥保温板自重更大,施工扬尘大。

(2) 因岩棉板为多孔结构岩棉板具有良好的隔声降噪效果。

(3) 在无机保温材料中导热系数相对较低,导热系数 $\leq 0.0040\text{W}(\text{m}\cdot\text{k})$ 。

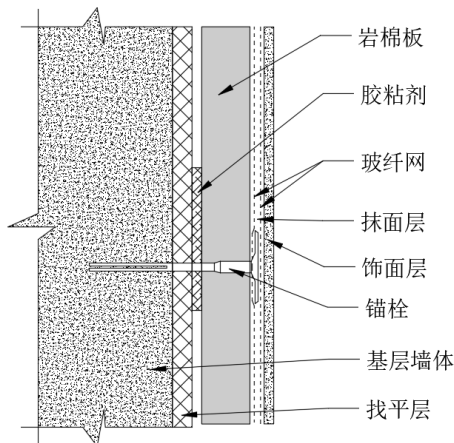
(4) 相比其他保温材料而言岩棉板使用寿命最长,通过优质选材,规范施工,定期维护,岩棉板使用寿命可达50年。

综上,当采用外墙外保温设计时,可以选用的 A 级防火保温材料并不多,岩棉是外墙保温首选材料。

二、岩棉板固定方式

(一) 岩棉板锚盘压网双网固定方式

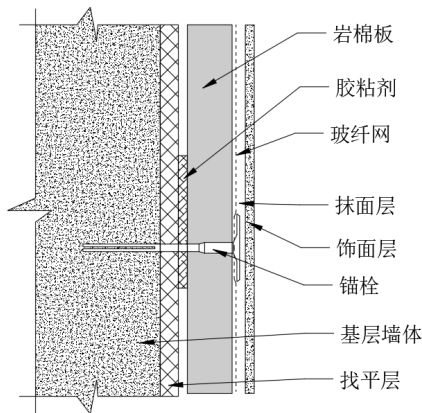
岩棉板外保温宜优先选用锚盘压网双网构造,相比于单网构造双网构造抹面层多一层玻纤网会使得抹灰质量更好,平整度更好并能减少抹面层开裂可能,避免了单网构造因锚栓带来的外观不平整缺陷,同时增加了饰面层的美观性。具体构造如图:



岩棉板锚盘压网双网固定

(二) 岩棉板锚盘压网单网固定方式

岩棉板锚盘压网单网固定的方式施工工序少,相对节省预算成本,但抹面层会因为锚栓影响导致平整度较差。具体构造如图:



岩棉板锚盘压网单网固定

(三) 岩棉板锚盘压板单网构造

在 JGJ/T480-2019《岩棉薄抹灰外墙外保温技术标准》中提出了一种可以借鉴的方式,当建筑物高度不高,抗风压要求不高时,可以直接采用锚栓压住岩棉板,后续在抹面层中设置玻纤网,此种方式减少了锚栓对抹面层平整度的影响,节约了工期。

三、施工工艺

(一) 基层处理

施工前基层应保证干净、整洁。根据验收规范,墙面平整度需 $\leq 4\text{mm}/2\text{m}$,当墙体偏差不能满足要求时,可以使用角磨机磨光,并用 1:3 水泥砂浆进行找平。当基层墙体表面平整度满足要求时可以取消找平层。

(二) 放线定位

测量放线工作前,需注意图纸细节,测量放线工作应该和节点部位岩棉板排版工作同时进行,根据图纸设计好门窗、洞口等节点处尺寸。避免在节点安装岩棉板时造成碎料拼接,错缝不符合要求。

(三) 岩棉板材料要求

施工时应选用合格的岩棉板,岩棉板在施工时容易产生大量粉尘,施工中岩棉会对施工人员造成皮肤刺激、呼吸刺激等危害,应该尽量减少岩棉板现场切割,并做好施工人员防护,同时对岩棉碎料进行集中打包管理。

选用合格岩棉板,根据规范 GB/T25975-2018,选用岩棉板酸度系数应 > 1.8 ,导热系数 $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ (平均温度 25°C) ≤ 0.04 ,燃烧性能应为 A(A1)。

岩棉板外观尺寸需满足下表要求:

岩棉板尺寸和密度允许偏差	
长度 (mm)	+10, -3
宽度 (mm)	+5, -3
厚度 (mm)	± 3
直角偏离度 (mm/m)	≤ 5
密度 (kg/m^3)	$\pm 10\%$

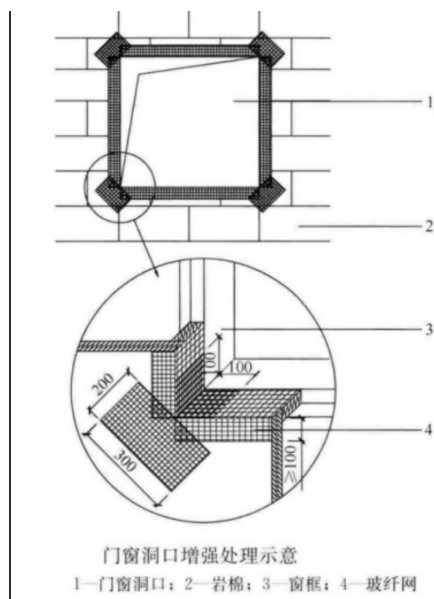
岩棉板的铺设应采用水平顺砌的方式粘贴,竖缝应逐行错开,错开尺寸不宜小于 200mm,相互错开的岩棉条间隙需小于 20mm,并用聚氨酯发泡胶进行封堵。在粘贴过程中用靠尺和拖线板检查安装垂直度和平整度,根据规范 JGJ/T480-2019 门窗洞口四个侧边的外转角需要安装包角件,包角条或双包网。为了避免玻纤网干搭界,需要在四角粘贴 45 度的 200mm*300mm 的玻纤网进行防开裂处理。岩棉板出现翘边脱胶部位往往是从边缘开始,对于岩棉板边缘部位宜进行翻包处理。

在岩棉板安装的起始位置可以安装经过防腐处理的金属托架,金属托架既可以对岩棉板保温系统起始端做包边保护,同时可以起到定位作用。托架应采用镀锌螺钉固定在墙面上,螺钉间距应不大于 300mm,托架之间应留 3mm 间距。

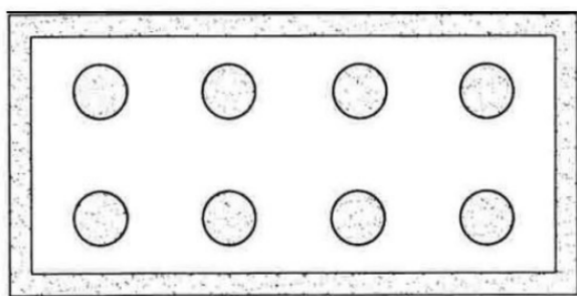
(四) 胶粘剂配备

因胶粘剂的品类、品牌较多,缺乏行业监督,生产质量监督体系并不完善,在选择胶粘剂时,应该注意选择合格产品。

在胶粘剂使用前应按照 JGJ/T110-2017《建筑工程饰面砖粘贴强度检验标准》对其进行现场检验，抗拉强度平均值不得小于 0.3MPa，使用过程中胶粘剂要在 1.5 小时内从加水搅拌到使用完成。鉴于外墙保温材料脱落频发，胶粘剂的使用时间和有效粘接面积应严格控制。



不同于岩棉条的受力特征岩棉板主要靠锚栓固定，但是胶粘剂粘接效果关系到岩棉板平整度和垂直度，因此也需要重点控制，按要求岩棉板有效粘接面积需保证不低于 50%，可采用点框法进行粘接。



点框法粘接示意图

(五) 锚栓选用与安装

岩棉板的固定方式主要以锚栓固定为主粘接固定为辅，锚栓在岩棉板的整个使用期间内，对整个安全起到非常重要的作用。锚栓不宜使用再生塑料，钢制件需要有防锈处理。锚栓抗拉承载力应进行现场检验，根据不同墙体有不同承载力要求，应按标准 JG/T 366《外墙保温用锚栓》进行检测并符合标准 JGJ/T480-2019 的规定。

锚盘的选用直径不应小于 60mm，用于混凝土基层外墙体的锚栓有效锚固深度不应小于 25mm，出于构造安全考虑，标准 JGJ/T480-2019 给出了单位面积锚栓下限数和上线数，即 600mm*1200mm 的岩棉板上至少使用 4 个锚栓，实际使用下限为 6 个 / m²。上限数受到锚栓排列方式影响，最大不应大于 14 个 /

m²，且锚栓中心距离不得小于 260mm。

应该在前一道工序结束 24 小时后，进行锚栓安装。钻孔深度应该大于锚固深度 10mm。当基层墙体为砌块时，可以使用不带冲击功能的普通电钻。采用单层和双层玻纤网构造时，锚盘应压住底层玻纤网。

(六) 抹面层施工和饰面层施工

通常玻纤网的规格是按单位面积质量划分的，用于岩棉板外墙保温系统的玻纤网单位面积质量需不应低于 160g/m²。当使用双层玻纤网时，面层玻纤网进行搭接，底层玻纤网进行拼接，搭接宽度不应小于 100mm。

岩棉外墙保温系统是一个整体功能结构，在各个细部构成都十分重要。根据规范 JGJ/T480-2019 抹面层的厚度有相关要求：

- (1) 设置双层玻纤网时，抹面层厚度宜在 5mm-7mm 之间。
- (2) 设置单层玻纤网时，抹面层厚度宜在 3mm-5mm 之间。

外饰面的施工和验收主要依据 JGJ/T29《建筑涂饰工程施工及验收规程》。

(七) 注意要点

(1) 考虑到不均匀沉降、变形等因素作用，岩棉板外墙保温系统需要和散水留出 20mm 的缝隙，并用建筑密封胶封堵。

(2) 门窗侧边墙面应做保温处理，因部位特殊岩棉板厚度可以低于墙面岩棉板厚度但是不能低于 30mm，保温系统和门窗框之间应该做好防开裂和漏水措施。

(3) 为避免女儿墙岩棉保温系统出现朝天缝，女儿墙体顶端应该设置压顶板。

(4) 穿保温墙体管道用阻燃性 PU 泡沫剂填缝，并用建筑密封胶封口。

(5) 应避免雨天施工，夏季避免阳光直射作业面，施工完成后 24 小时内环境温度不应低于 5℃。

四、质量控制

岩棉板外墙保温工程工艺复杂，控制点多，材料进场时需进行严格把关，在施工过程中进行精细化管控，施工过程中按要求进行隐蔽工程验收和检验批验收，施工完成后进行分项验收，需符合 GB50411 等相关标准。在检验批划分时应该以施工流程为依据，按岩棉板面积 1000 m² 划分为一个检验批。保证主控项目全部合格，一般项目合格 80% 及以上。

(1) 主控项应注意：

1) 保温节能使用的材料，需要保证相关资料齐全合格，岩棉板外墙保温工程需提供系统及组成材料的型式检验报告，胶粘剂和锚栓现场检验的实验报告。

2) 除了需要现场试验报告外，岩棉板及系统配套材料还需要以实际面积 5000 m² 为一个批次，采用见证取样的方式进行现场复验。

3) 施工完成后还应应对锚栓数量，锚固深度进行检查，并按 JG/T366 的规定进行现场拉拔实验。

(2) 一般项应注意

1) 外墙容易受到碰撞的阳角、门窗洞口、及不同保温材料的

交接处等特殊部位，防开裂措施应符合要求。

2) 玻纤网安装质量会严重影响墙面开裂情况应当重点关注。

五、安全措施

岩棉板外保温施工涉及到高处作业、临时用电安全、粉尘控制、动火作业管理等安全问题。

(1) 外保温施工属于高处作业，外脚手应该验收合格，采用吊篮施工时，吊篮检测必须符合要求，作业面积需 $\geq 0.8\text{ m}^2$ ，防护栏杆需要 $\geq 1.2\text{ m}$ 。作业人员需系挂双钩安全带、佩戴安全帽、穿戴防滑鞋，并禁止因赶工期交叉作业。

(2) 电工属于特种人员需持证上岗，电动工具避免破损老化，电动工具线路应避免与岩棉板摩擦接触破损导致漏电。

(3) 在岩棉板外保温施工过程中，为避免工人直接接触岩棉纤维，粘胶剂等材料，需按要求做好防护措施。

必须佩戴 N95/KN95 级别防尘口罩，并至少在每四个小时更换滤芯，必须佩戴全封闭式护目镜防止纤维或碎屑进入眼部，需穿戴长袖，扎好裤脚袖口防止纤维进入，佩戴防切割手套防止手部划伤。

岩棉板切割时建议采用湿法切割，也可以采用带有吸尘装置的切割工具，施工区域需保证通风。

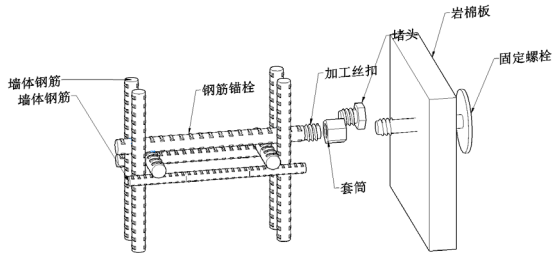
(4) 岩棉虽然不燃，但是涉及到切割、打磨作业时，需开具动火作业证，并清除周边 10 米内可燃物。

六、探讨

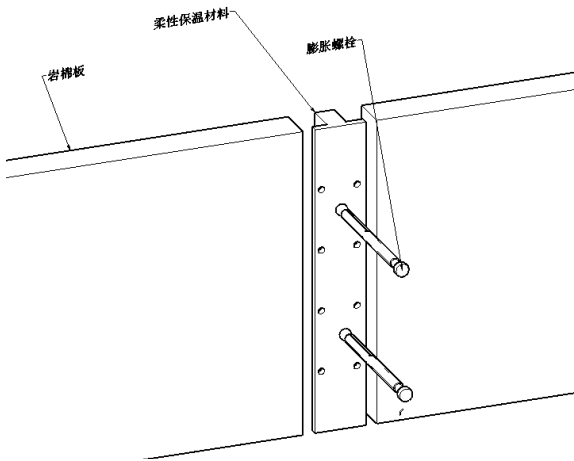
目前外墙岩棉板脱落情况较为常见，但这并非仅仅是因为施工质量控制不当这一单一原因，岩棉保温薄抹灰系统是一个复杂的系统，岩棉板薄抹灰外保温脱落可能受使用材料、施工工艺、设计缺陷、以及环境因素等多方面影响。现针对连接牢固性和环境温度影响，提供 2 种笔者对结构改进的思考，希望能给相关人员提供一定的启发。

(1) 加强结构连接：通过在钢筋网片上预埋带有丝扣的锚固结构，利用废旧钢筋，既可以作为钢筋定位器保证墙体钢筋保护层厚度，又可以作为锚栓连接岩棉板，锚固结构贯穿整个墙体，相比传统锚钉不用钻孔且锚固深度更深结构更加牢固，也可配合

锚栓使用，加强岩棉板安装的稳固度。结构如图所示：



(2) 设置膨胀带：为避免环境影响造成岩棉板膨胀、收缩变形，岩棉板之间留缝设计，并将外保温岩棉互相固定，将外保温岩棉板连接成一个整体增加整体牢固性，连接结构带有柔性保温材料，加强整体保温效果。具体构造如图所示：



七、结束语

岩棉板薄抹灰外墙保温系统是一个工艺复杂，控制要点多，系统性的工程。岩棉板作为 A 级绿色防火材料，岩棉板薄抹灰外墙保温系统技术优势明显，岩棉板薄抹灰外墙保温系统技术是建筑节能和防火安全协同发展的重要技术成果。但是岩棉板薄抹灰外墙保温系统，仍存在过程质量控制难，热桥处理难，交接节点处理难，后期开裂、渗水、甚至脱落等问题。在建筑施工过程中除了对施工材料、工艺进行严格把关外还应注意多思考，多总结，持续创新，为建筑业未来的发展提供助力。

参考文献

- [1] 何鑫. 常见建筑保温隔热材料的组成及性能分析 [J]. 砖瓦. 2023. (8).
- [2] 梁旭琳. 岩棉板外保温施工技术及其质量控制要点 [J]. 广东建设. 2024. (11).
- [3] 汪思迪. 粘贴保温板外保温体系分析：以设计视角看空鼓、开裂、脱落的过程 [J]. 新材料与新技术. 2025.
- [4] 杨建山, 唐哲, 张强. 岩棉薄抹灰外墙外保温施工质量控制要点 [J]. 建设监理. 2023, (10): 34-37.
- [5] 吴梁凤. 岩棉板外保温施工技术 [J]. 石材. 2024. (1).
- [6] JGJ/T 480-2019, 岩棉薄抹灰外墙外保温工程技术标准 [S].
- [7] GB/T 25975-2018, 建筑外墙外保温用岩棉制品 [S].
- [8] GB/50411-2019, 建筑节能工程验收规范 [S].
- [9] JGJ 80-2016, 建筑施工高处作业安全技术规范 [S].

铜矿空场法转充填法采矿方法

高志龙¹, 冯明浩²

1. 云南金诚信矿业管理有限公司, 云南 昆明 650501

2. 金诚信矿业管理有限公司南方分公司, 云南 昆明 650501

DOI:10.61369/ETQM.2025080002

摘 要 : 本文研究目的在于分析铜矿开采阶段如何实现空场法向充填法的有效转换, 从而利用充填法解决空场法的弊端, 提升生产效率同时提升环保效益。研究阶段, 本文基于文献阅读、铜矿开采技术材料分析对空场法、充填法进行技术介绍。随后, 指出铜矿开采阶段空场法转充填法的技术缘由, 并从采场结构优化等维度入手分析如何实现空场法向充填法的顺利转换。期望本文可为我国金属矿业企业提供技术借鉴与指导价值, 在推动生产效益提升同时降低对环境的负面影响, 推进绿色生产目标的落实。

关 键 词 : 空场法; 充填法; 采场结构优化; 回采顺序; 技术衔接

Mining Method of Copper Ore Empty Field Method to Filling Method

Gao Zhilong¹, Feng Minghao²

1. Yunnan Jinchengxin Mining Management Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650501

2. Southern Branch of Jinchengxin Mining Management Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650501

Abstract : The purpose of this paper is to analyze how to effectively convert the empty field method to the filling method in the copper mining stage, so as to solve the disadvantages of the empty field method by using the filling method, improve production efficiency and improve environmental benefits. In the research stage, this paper introduces the empty field method and filling method based on literature reading and copper mining technology and material analysis. Then, the technical reasons for the empty field method to filling method in the copper mining stage are pointed out, and how to realize the smooth conversion from the empty field method to the filling method is analyzed from the dimensions of stope structure optimization. It is hoped that this paper can provide technical reference and guidance value for our country's metal mining enterprises, promote the improvement of production efficiency while reducing the negative impact on the environment, and promote the implementation of green production goals.

Keywords : empty field method; filling method; stope structure optimization; mining order; technology connection

引言

铜矿开采期间, 掌握从空场法向充填法采矿转换技术, 对于采矿效率、环境保护而言均十分必要。空场法开采后, 矿山内会留下大量采空区, 随着开采规模的逐渐扩大, 采空区稳定性将逐渐受到影响, 容易引发地表塌陷问题, 在威胁安全生产同时造成矿石损失, 并对周边环境带来消极影响^[1]。对比空场法、充填法可以有效解决这些问题, 空场法开采后, 对采空区填充砂石、尾砂等材料可有效增强采场围岩的稳定性, 减少采空区地表变形概率并提高资源回收率, 降低铜矿石贫化率。同时, 在国家环保要求、监管工作日益严格的趋势下, 对空场法后的采空区使用充填法, 可对矿山废弃物实现资源化利用, 降低对环境的污染, 推动开采单位实现绿色开采目标, 助力矿山的可持续发展^[2]。

一、空场法与充填法分析

(一) 空场法

空场法隶属传统金属采矿工艺下的典型代表, 该方法的核心逻辑是利用矿岩自身稳定性打造临时的开采空间, 随后使用阶段

性回采形成矿房、矿柱交替形式的立体结构, 矿房负责承担矿石的采出, 矿柱则作为支撑体系负责维持采场的稳定性。

空场法开展金属矿产开采的技术优势在于工艺流程高度简洁, 同时机械化程度较高, 开采单位可利用凿岩台车、铲运机等机械设备开展高效作业, 该方法高度适合矿石、围岩稳固性良

好的矿床^[3]。开采阶段,若节理裂隙发育程度较低、矿体完整,使用空场法能够降低支护结构设置的成本。然而,随着开采深度不断增加,地压活动会逐步加剧,且在矿柱支撑能力逐渐下降影响下采空区通常会存在大面积垮塌的风险。同时,该开采方式之下矿柱资源往往会永久保留、难以回收,矿石损失率通常可达到10%以上,采空区所残留的矿石在长期氧化背景下容易引发对环境的污染,矿业企业对于采空区后续的处理也需支付高额的施工成本^[4]。

(二) 充填法

相比空场法,充填法作为“置换支撑”作为核心理念的作业方式,其原理是利用人工构建的充填体来代替空场法下的矿柱承载围岩带来的压力,让采场实现“动态平衡”。作业期间,充填法会将采矿流程分解为回采→循环填充的模式,矿石采出后立即使用废石、尾砂等材料对采空区域进行填充,构建侧壁支撑结构与假顶,并且所使用的充填体的力学性能,可以基于配比优化实现精准的调控,如此不仅可以满足采场对稳定性刚提出的要求,亦可降低地表沉降概率,并规避采空区后续可能的环境污染问题^[5]。

二、铜矿空场法转充填法的缘由分析

在铜矿开采领域,空场法使用期间向充填法的转换并非孤立因素所推动,而是多种因素综合作用的矿业企业选择结果。这一转变,其本质除了是技术迭代的体现,同时也是行业应对复杂各维度挑战的主动选择。

首先,安全风险是驱动开采技术转换的首要因素。空场法开采后会形成铜矿大面积采空区,随着使用空场法的开采深度增加以及时间推移,顶板、侧壁稳定性均会逐渐恶化,冒顶、片帮等各类安全事故的风险指数会随之上升。此刻转换为充填法,能够有效控制开采区域的地压,为后续继续的开采作业打造一道安全屏障,降低灾难性事故概率^[6]。

其次,资源回收效率的提升也是技术转换的关键硬线各因素。早期使用空场法开采的形式,对于矿岩稳固性要求十分严苛,部分复杂地质条件下的矿体往往难以支持空场法的作业。此刻根据地质条件的变换转换为充填法,利用支撑结构来代替自然矿岩承载,可以对空场法下难以触及的薄矿脉、低品位矿段实现有效,推动资源回收率的提升,从而延长矿山的服务年限,充分释放矿山的潜在经济价值。

最后,成本效益的动态变化也是推动开采技术转换的动因。铜矿早期使用空场法,可以凭借该技术较低成本、施工便捷的优势占据主导。然而随着开采规模的不断扩张,矿山企业需要面临采空区治理、安全防护等隐性成本攀升带来的压力。这一背景下将空场法转换为充填法,在实现技术革新基础上可以利用优化充填料配比、创新输送工艺来有效控制开采生产成本,并且将废石、尾砂进行井下回填亦可以显著减少地表堆存成本以及面向废料的环保处理成本,形成铜矿全新经济优势^[7]。

三、铜矿空场法转充填法采矿的技术策略

铜矿开采生产期间,空场法转充填法采矿的技术策略,集中于对采场结构的优化、充填系统的建设、回采顺序调控以及注重对技术衔接的过渡。

(一) 采场结构优化

在铜矿开采期间,空场法向充填法转型阶段采场结构优化为首要关键环节。这一过程,矿业企业技术单位需根据矿体的具体赋存条件、矿石物理力学性质以及当前企业拥有的开采设备规格对采场参数重新进行设计^[8]。

针对倾斜中厚矿体,技术单位可将传统空场法开采模式下的大跨度矿房向小分段分条回采结构调整,设计阶段可将分段高度控制在8m~12m,分条宽度则应严格依据矿体的稳定性设置,通常为3m~5m,此举可有效减少采场暴露的面积,降低地压活动的风险。在矿柱设计阶段,技术单位可摒弃空场法内永久性矿柱的形式,使用“间隔式矿柱”结合“人工假顶”的组合模式。矿柱宽度可从空场法模式下8m~10m缩减到4m~6m,矿柱间距应增大至15m~20m,充分利用充填体对采空区进行及时支撑,如此既可保证采场的稳定性,亦可达到提高矿石回采率的功效。与此同时,技术单位应优化采准工程的布置,将脉外巷道、脉内巷道融合,其中脉外巷道用于通风、行走以及运输,脉内巷道则作为回采作业的通道,如此可有效缩短矿石的运输距离。

此外,设计阶段,技术单位可创新型引入三维建模技术,专门针对采场结构开展动态模拟分析,利用FLAC3D数值计算软件对不同采场结构参数下的应力分布、变形情况进行数字化模拟,帮助生产单位确定最优的采场结构方案。特别是对于复杂地质条件的区域,更应基于数字化模拟的形式对矿体破碎带等区域适当缩小分段高度、分条宽度,进一步提升采场的稳定性。

(二) 建设充填系统

建设高效、可靠充填系统是实现空场法转充填法的技术核心。首先,企业应根据矿山的实际情况来合理选择充填材料,具体必选阶段应优先采用尾砂为主要骨料,在此基础上合理添加水泥、凝胶以及粉煤灰等,确保充填后可以形成稳固的胶结充填体。这一过程下,为确保提高尾砂的利用率,增强充填体强度,应通过试验的形式来确定最佳配比。通常,推荐尾砂:水泥比例为8:1~10:1,石灰比推荐控制在0.6~0.8范围。

设计充填系统工艺流程阶段,需注重系统的自动化水平与连续性。设计期间,可采用全尾砂管道输送的形式,构建尾砂储存→搅拌→输送→采场充填的完整生产线。其中,尾砂储存环节配置高效浓密机实现尾砂脱水处理,提升尾砂浓度至65%~75%水平,降低尾砂输送过程中对管道、设备的磨损以及作业能耗。搅拌环节,使用双轴强制式搅拌机来充填材料均匀混合,有效提高充填体的质量。输送管道推荐采用耐磨陶瓷复合管材料,管径可根据输送流量、浓度合理选择,通常推荐位150mm~200mm,保证充填材料可以顺利向采场输送。在此基础上,引入智能化充填控制系统,以传感器获取数据形式实时监测充填材料的流量、压力、浓度参数,且基于总线技术同中央控制

系统相连，实现系统化的自动调节、预警，一旦充填材料输送阶段出现管道堵塞、浓度异常，系统可以及时调整设备的运行参数或快速发出警报。

（三）调控回采顺序

合理调控回采顺序，是保证技术转型周期下矿山维持安全生产、资源高效回收的技术举措。这一过程，可采用“隔一采一，自下而上”的回采顺序，对下部矿体优先开采，从而为上部矿体的回采作业提供良好应力环境。每个分段中，要求生产队伍按照分条顺序开展间隔回采，先采中间分条，后采两侧分条，确保充填体有充足的时间到达预期设计强度，实现对低压活动的有效抑制^[9]。

在回采生产过程中，要求生产单位严格控制一次回采暴露的面积与时间。面对稳定性较好的矿体，应控制单次回采距离在15m之内，暴露时间应在7天之内。在面对稳定性较差矿体期间，则应控制单次回采距离在8m~10m，暴露时间不可超过5天，并且需保证充填作业的及时性，以充填体强度增长的规律为依据来确定合理的充填间隔时间。通常，建议在充填后3~5天开展下一分条的回采作业，保证充填体的强度可以有效支撑采场的围岩。具体分析，对于不同矿体稳固条件下的关键参数，应参照表1调控回采方案：

表1 不同矿体稳固条件下的回采参数

技术参数	不稳固矿体	稳固矿体	中等稳固矿体
单次回采距离 /m	≤ 8	≤ 15	10~12
暴露面积 / m ²	≤ 40	75~100	50~70
暴露时间 /day	≤ 3	≤ 7	≤ 5
相邻分条作业前充填体强度要求 /%	70	70	70

（四）技术衔接的过渡

实现铜矿空场法与充填法的技术的无缝衔接过渡，矿业企业需制定科学、合理的过渡技术方案。

首先，过渡期内，需要保留部分空场法采场并继续开展回采作业，与此同时，逐步开展充填法采场的建设工作，形成空场法、充填法并行作业的局面。针对即将结束空场法开采的采场，

再利用充填法进行矿柱回收、空区处理，这一过程核心思路在于避免空区长期存在而引发安全隐患。

其次，设备配置期间，应结合两种采矿方法各自的需求来合理调配设备资源。操作阶段，可将空场法应用的凿岩台车、电耙等设备逐步向适合充填法的设备进行改造或更换，例如遥控铲运机、锚杆钻机。这一过程也需建设充填专用设备，如充填泵、搅拌机，保证采场设备配套齐全，满足充填法采矿工艺提出的要求。

再次，技术转换过渡期间的人员培训，同样是技术衔接过渡之重要环节。矿业企业应组织矿山技术人员、生产队伍操作人员参与充填法采矿技术专项培训，确保人员充分掌握充填系统操作方法、采场结构设计原则、回采顺序控制等一系列专业知识、技能，提高设计、参与者对全新采矿方法的适应能力。

最后，矿业企业应建立完善的技术转换管理体系。例如，可制定充填法采矿技术规范、操作规程，高度明确各个工作岗位的职责、技术操作流程。同时，在转型之前，在明确转型计划后应进一步加强技术创新、研发，针对转型过程中可能出现的技术难题，提前组织技术团队就企业当前技术水平、设备情况、矿山环境进行多维度分析，不断优化采矿工艺以及技术参数，保证铜矿空场法向充填法转型工程的顺利推进^[10]。

四、结束语

综上所述，本文聚焦于铜矿开采阶段空场法向充填法的转换技术研究。在对两项开采技术、技术转化缘由进行分析后，贯穿空场法转充填法的整个工艺流程，深度探讨采场结构优化策略、建设充填系统策略、调控回采顺序策略以及技术衔接的过渡要点。参照本文，可对我国铜矿开采企业生产期间的技术转换作出有效指导，充分发挥充填法替代空场法的优势，即提升开采效率，促进安全生产以及降低环境污染，为矿业企业的可持续发展提供坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 鲍敏,常德才,刘鹏鹏,等.丰山铜矿分段空场嗣后充填采矿法采场充填体稳定性研究[J].采矿技术,2025,25(2):69-73.
[2] 王正奇,李广涛,廉柏栋.拉拉铜矿蟹沟式分段空场嗣后充填采矿法及胶结矿柱结构参数研究[J].采矿技术,2023,23(3):34-37.
[3] 陈志强,王红心.低分段空场小步距嗣后充填法在某铜矿的应用[J].采矿技术,2023,23(4):193-195.
[4] 李云飞.有底柱分段崩落法转充填采矿法在胡家峪铜矿的应用[J].能源与节能,2023(12):97-101.
[5] 黄德镛,贾子月,吕世玮,等.基于正交设计试验方案的云南某铜矿采场结构参数优化研究[J].有色金属工程,2023,13(4):111-119.
[6] 赵兴东,周鑫,田斌,等.西藏帮中锌铜矿采场结构参数优化[J].矿冶工程,2023,43(4):12-15.
[7] 胡建钊.某铜矿采场结构参数优化[J].采矿技术,2023,23(1):7-11.
[8] 张纯锋,付琛,杜双成,等.丰山铜矿中深孔爆破参数优化研究[J].采矿技术,2024,24(5):157-161.
[9] 高进.基于均匀实验的萨热克铜矿嗣后充填参数数值模拟研究[J].中国矿山工程,2023,52(1):16-21.
[10] 莫静,曹易恒,田长林,等.不同矿体厚度二步骤空场嗣后充填采场宽度优化研究[J].采矿技术,2023,23(6):180-186.

高喷灌浆防渗工艺工法研究

廖国立

中国水利水电第七工程局有限公司成都水电建设工程有限公司，四川 成都 611130

DOI:10.61369/ETQM.2025080003

摘 要： 高喷灌浆防渗工艺作为一种重要的地基处理和防渗技术，在水利、建筑等领域有着广泛应用。本文详细阐述了高喷灌浆防渗工艺的原理、工法特点、施工设备与材料、工艺流程、质量控制以及应用实例。通过对该工艺工法的深入研究，为相关工程实践提供全面的技术参考，促进高喷灌浆防渗工艺的进一步推广和应用，提高工程的防渗性能和稳定性。

关 键 词： 高喷灌浆；防渗；工艺工法；研究

Study on High Spray Grouting Anti-Seepage Technology and Method

Liao Guoli

China Hydropower Engineering No. 7 Bureau Co., Ltd. Chengdu Hydropower Construction Engineering Co., Ltd.
Chengdu, Sichuan 611130

Abstract： As an important foundation treatment and anti-seepage technology, high spray grouting anti-seepage technology has a wide range of applications in water conservancy, construction and other fields. This paper elaborates in detail on the principle, work method characteristics, construction equipment and materials, process flow, quality control and application examples of high spray grouting anti-seepage technology. Through in-depth study of the work method, it aims to provide comprehensive technical reference for relevant engineering practice, promote the further promotion and application of high spray grouting anti-seepage technology, and improve the anti-seepage performance and stability of the project.

Keywords： high spray grouting; anti-seepage; technology; research

一、适用范围

在水利工程、地下建筑工程以及一些对地基防渗有严格要求的项目中，确保工程的防渗性能至关重要。高喷灌浆防渗工艺以其独特的技术优势，能够有效地形成连续的防渗墙体或加固土体，阻止地下水的渗漏，提高地基的承载能力和稳定性。该工艺具有施工速度快、适应性强、可靠性高等特点，成为解决各类工程防渗问题的常用方法之一^[1]。

二、工作原理

高喷灌浆防渗工艺是利用高压喷射流的强大能量，将浆液与土体充分搅拌混合，在土体中形成具有一定强度和防渗性能的凝结体。具体来说，通过高压泵将水泥浆液或其他化学浆液以高速喷射到地层中，同时通过钻杆的旋转和提升，使喷射流在土体中切割、破碎土体，并与土体颗粒混合、填充，随着浆液的凝固，在土体中形成圆柱状、板状或块状的凝结体，这些凝结体相互连接，从而形成防渗帷幕或加固土体结构^[2]。

根据喷射形式的不同，高喷灌浆可分为单管法、双管法和三管法。单管法仅喷射水泥浆液；双管法同时喷射水泥浆液和压缩空气，空气在浆液外围形成气幕，可减少喷射阻力，使浆液更好地与土体混合；三管法是分别喷射高压水、压缩空气和水泥浆液，先利用高压水射流切割土体，再通过空气和浆液的作用使土

体与浆液充分混合，形成较大直径的凝结体。^[3]

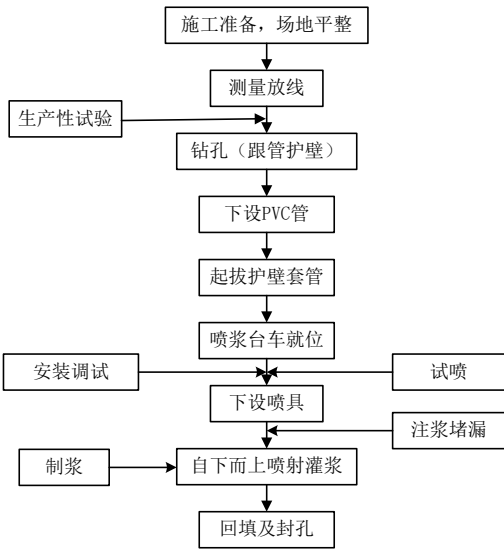


图1 高喷防渗墙施工工艺流程

三、工法特点

（一）适应性强

高喷灌浆防渗工艺适用于多种地层条件，如砂土、粘性土、粉土等，对于复杂地质的工程也能发挥良好的防渗效果。它可以根据不同的地层特性和工程要求，调整喷射参数和施工工艺，满

足工程的实际需要。

（二）施工简便

该工艺施工设备相对简单，施工过程易于控制。无需大型的挖掘设备或复杂的施工场地，能够在狭窄空间或已有建筑物周边进行施工，对周边环境的影响较小。同时，施工速度快，能够在较短时间内完成防渗工程，减少工期。^[4]

（三）防渗效果好

高喷灌浆形成的凝结体具有较高的密实度和强度，渗透系数低，能够有效地阻止地下水的渗漏，形成可靠的防渗屏障。在水利工程中，高喷灌浆防渗帷幕可以大大降低堤坝、水库等建筑物的渗漏量，提高工程的安全性和稳定性。

（四）成本相对较低

与一些传统的防渗方法相比，高喷灌浆防渗工艺的材料成本和施工成本相对较低。它可以充分利用当地的土料和水泥等材料，减少材料运输和加工成本，同时施工设备的租赁和使用费用也相对较少，具有较好的经济效益。

四、高喷灌浆防渗工艺流程

（一）施工准备

- 1.场地平整：清除施工场地内的障碍物，如石块、建筑垃圾等，保持场地平整，确保施工设备能顺利进场和操作。
- 2.测量放线：根据设计图纸，使用测量仪器准确放出高喷灌浆孔的位置，并做好标记^[5]。
- 3.设备调试：对高喷灌浆设备进行安装和调试，检查设备的性能是否正常，如高压泵的压力、钻机的转速。
- 4.材料准备：准备好符合设计要求的水泥、外加剂等材料，并对材料进行检验，确保材料的质量合格。

（二）钻孔

- 1.钻机就位：将钻机移动到设计孔位，调整钻机的垂直度，使钻杆垂直于地面。
- 2.钻孔：采用合适的钻孔方法，如回转钻进、冲击钻进，按照设计要求的孔深和孔径进行钻孔。在钻孔过程中，要注意控制钻孔的垂直度和孔径偏差，防止出现孔斜和缩径问题。
- 3.钻孔记录：详细记录钻孔过程中的地层情况、钻孔深度等信息，为后续的高喷灌浆施工提供参考。

（三）下喷射管

- 1.喷射管组装：将喷射管按照设计要求进行组装，检查喷射管的连接是否牢固，喷嘴是否畅通。
- 2.下管：将组装好的喷射管下入钻孔中，下管过程中要注意防止喷射管扭曲和堵塞。当喷射管下到设计深度后，要进行检查和调整，确保喷射管的位置正确。

（四）高喷灌浆

- 1.浆液制备：根据设计要求，制备符合配合比的水泥浆液。在制备浆液过程中，要严格控制水泥的用量、水灰比和外加剂的掺量，确保浆液的质量稳定。
- 2.喷射灌浆：启动高压泵，将水泥浆液以高压喷射的形式从

喷嘴喷出，同时按照设计要求的提升速度和旋转速度或摆动角度进行喷射管的提升和旋转或摆动。在喷射灌浆过程中，要密切观察浆液的喷射情况、冒浆情况和地面的变化情况，及时调整施工参数。

3.冒浆处理：在高喷灌浆过程中，会有部分浆液从孔口冒出，称为冒浆。对于冒浆量较大的情况，可采取调整浆液配合比、降低喷射压力、减慢提升速度等措施进行处理；对于冒浆量较小的情况，可直接进行回收利用^[6]。

（五）回灌

当喷射管提升到设计高度后，停止喷射，将浆液继续注入孔内，进行回灌，以填补因浆液凝固收缩而产生的空隙，确保凝结体的密实度和防渗性能。

（六）清洗设备

高喷灌浆施工结束后，及时清洗高压泵、喷射管等设备，清除设备内的残留浆液，防止设备堵塞和损坏。

五、高喷灌浆防渗主要设备

（一）钻机

钻机是高喷灌浆施工中用于钻孔的设备，常用的钻机有回转钻机、冲击钻机等。回转钻机适用于各种土层和软岩地层，具有钻孔效率高、孔径精度高的优点；冲击钻机适用于硬岩地层，具有钻孔能力强的优点。在选择钻机时，要根据工程的地质条件和钻孔要求进行合理选择。

（二）高压泵

高压泵是高喷灌浆施工中的关键设备，用于提供高压浆液。常用的高压泵有柱塞泵、活塞泵等。高压泵的压力和流量要根据设计要求和施工条件进行选择，一般要求高压泵的压力能够达到20MPa以上，流量能够满足喷射灌浆的需要。

（三）喷射管

喷射管是将高压浆液喷射到土体中的工具，由内外管组成。内管用于输送高压浆液，外管用于输送压缩空气或水。喷射管的直径和长度要根据工程的要求和施工条件进行选择，一般要求喷射管的直径能够满足浆液的喷射要求，长度能够达到设计孔深。

（四）搅拌机

搅拌机用于制备水泥浆液，常用的搅拌机有强制式搅拌机、自落式搅拌机等。强制式搅拌机具有搅拌效率高、搅拌质量好的优点，适用于制备高浓度的水泥浆液；自落式搅拌机具有结构简单、成本低的优点，适用于制备一般浓度的水泥浆液^[7]。

六、高喷灌浆防渗施工参数选择

（一）喷射压力

喷射压力是高喷灌浆施工中的重要参数之一，会影响喷射流的冲击力和切削力，从而影响凝结体的质量和防渗性能。喷射压力的大小要根据工程的地质条件、喷射方式和设计要求进行选择。一般来说，在砂层、粉土层等软土地层中，喷射压力可选择

20 – 30MPa；在砾石层、卵石层等硬土地层中，喷射压力可选择 30 – 40MPa。^[8]

（二）提升速度

提升速度是指喷射管在喷射灌浆过程中的提升速度，直接影响到凝结体的厚度和强度。提升速度的大小要根据工程的地质条件、喷射压力 and 设计要求进行选择。一般来说，在砂层、粉土层等软土地层中，提升速度可选择 10 – 20cm/min；在砾石层、卵石层等硬土地层中，提升速度可选择 5 – 10cm/min。

（三）旋转速度或摆动角度

对于旋喷，旋转速度是指喷嘴在喷射过程中的旋转速度，一般可选择 10 – 20r/min；对于摆喷，摆动角度是指喷嘴在喷射过程中的摆动角度，一般可选择 15° – 30°。旋转速度或摆动角度的大小要根据工程的要求和地质条件进行选择，以确保凝结体的形状和质量符合设计要求。

（四）水灰比

水灰比是指水泥浆液中水与水泥的质量比，直接影响到浆液的流动性、凝结时间和强度。水灰比的大小要根据工程的地质条件、喷射方式和设计要求进行选择。一般来说，在砂层、粉土层等软土地层中，水灰比可选择 1:1 – 1.5:1；在砾石层、卵石层等硬土地层中，水灰比可选择 0.8:1 – 1:1。

七、高喷灌浆防渗工程案例

（一）案例一：某水库大坝防渗处理工程

1.工程概况：某水库大坝为黏土心墙坝，坝基为砂卵石层，存在渗漏问题。为了提高大坝的防渗性能，采用高喷灌浆防渗工艺进行处理。

2.施工方案：根据工程地质条件和设计要求，采用摆喷的喷射方式，喷射压力为 30MPa，提升速度为 10cm/min，摆动角度为 20°，水灰比为 1:1。高喷灌浆孔间距为 1.5m，孔深为 15m。

3.施工过程：在施工过程中，严格按照工艺流程进行操作，对钻孔、下喷射管、高喷灌浆等环节进行了质量控制。同时，对冒浆情况进行了及时处理，确保了施工的顺利进行。

4.效果评估：工程完工后，对高喷灌浆防渗墙进行了质量检测，检测结果表明，防渗墙的墙体质量良好，渗透系数小于设计要求，达到了预期的防渗效果。

（二）案例二：某地铁车站基坑防渗处理工程

1.工程概况：某地铁车站基坑位于砂层和粉土层中，地下水位较高，为了防止基坑开挖过程中出现渗漏和坍塌问题，采用高喷灌浆防渗工艺进行处理。

2.施工方案：根据工程地质条件和设计要求，采用定喷的喷射方式，喷射压力为 25MPa，提升速度为 15cm/min，水灰比为 1.2:1。高喷灌浆孔间距为 1.2m，孔深为 10m。

3.施工过程：在施工过程中，遇到了一些问题，如钻孔过程中出现塌孔现象、喷射灌浆过程中出现串浆现象等。针对这些问题，采取了相应的解决措施，如增加泥浆护壁、调整喷射参数等，确保了施工的顺利进行。

4.效果评估：工程完工后，对高喷灌浆防渗墙进行了质量检测和监测，检测结果表明，防渗墙的墙体质量符合设计要求，有效地防止了基坑渗漏和坍塌问题的发生，保障了地铁车站基坑的施工安全。^[9]

八、高喷灌浆防渗工艺质量控制

（一）原材料质量控制

1.水泥：选用符合国家标准的水泥，对水泥的品种、强度等级、凝结时间等进行检验，确保水泥的质量合格。

2.外加剂：根据工程的需要，合理选择外加剂，如减水剂、早强剂等。对外加剂进行性能和质量检验，确保外加剂的掺量符合设计要求。

（二）施工过程质量控制

1.钻孔质量控制：严格控制钻孔的垂直度和孔径偏差，确保钻孔符合设计要求。在钻孔过程中，要及时记录地层情况，为后续的高喷灌浆施工提供参考。

2.喷射灌浆质量控制：严格按照设计要求的施工参数进行喷射灌浆，如喷射压力、提升、旋转速度或摆动角度、水灰比等。在喷射灌浆过程中，要密切观察浆液的喷射情况、冒浆情况和地面变化情况，及时调整施工参数。

3.回灌质量控制：在喷射管提升到设计高度后，要及时进行回灌，确保凝结体的密实度和防渗性能。回灌过程中，要控制回灌的压力和流量，防止出现冒浆和空洞等问题。

（三）质量检测

1.墙体质量检测：采用钻孔取芯、压水试验等方法对高喷灌浆防渗墙的墙体质量进行检测。钻孔取芯可以检测墙体的强度和完整性，压水试验可以检测墙体的渗透系数。

2.外观质量检测：对高喷灌浆防渗墙的外观质量进行检查，如墙体的平整度、垂直度、裂缝等。外观质量应符合设计要求，如有问题应及时处理^[10]。

九、高喷灌浆防渗工艺存在的问题及解决措施

（一）存在的问题

1.施工过程中易出现塌孔、串浆等问题：在高喷灌浆施工过程中，由于地质条件复杂、施工参数选择不当等原因，容易出现塌孔、串浆等问题，影响施工进度和质量。

2.凝结体质量不均匀：由于喷射灌浆过程中浆液的扩散不均匀、土体的性质差异等原因，容易导致凝结体的质量不均匀，影响防渗性能。

3.施工成本较高：高喷灌浆防渗工艺需要使用高压设备和大量的水泥浆液，施工成本较高，限制了其在一些工程中的应用。

（二）解决措施

1.针对塌孔、串浆等问题：在施工前，要对地质条件进行详细的勘察和分析，选择合适的施工方法和施工参数。在施工过程中，要加强对钻孔和喷射灌浆的质量控制，如增加泥浆护壁、调

整喷射压力和提升速度等。

2. 针对凝结体质量不均匀问题：在施工过程中，要严格控制施工参数，确保浆液的均匀扩散。同时，可以采用分层喷射灌浆的方法，提高凝结体的质量均匀性。

3. 针对施工成本较高问题：可以通过优化施工方案、合理选择材料和设备、提高施工效率等方式，降低施工成本。例如，采用新型的水泥浆液配方，减少水泥的用量；采用自动化的施工设备，提高施工效率。

十、结论

高喷灌浆防渗工艺作为一种有效的防渗处理技术，具有施工

快、适应性强、防渗效果好等优点，广泛应用于水利和基础工程。经对其原理，流程，设备施工参数等研究，结合工程案例可知，技术原理成熟，能适应不同地质条件，但存在塌孔、串浆、成本高等问题，需通过质量控制、方案优化和材料设备选择等措施改进。未来，需深化该工艺研究应用，完善技术与管理，提升工程质量、降低成本；同时探索融入新技术，新材料，推动其创新发展。

参考文献

[1] 李洪斌. 高喷灌浆技术在高速公路施工中的应用 [J]. 交通世界, 2025, (08): 54–56.
[2] 胡学玉. 高喷灌浆截渗工程生产性试验探析 [J]. 山东水利, 2023, (11): 44–46+52.
[3] 单永亮. 高喷灌浆技术在水库除险加固中的应用 [J]. 中国高新科技, 2022, (24): 44–46.
[4] 韩荣生. 高压旋喷灌浆技术在土石围堰及滦河复杂地质条件下的应用 [J]. 河北水利, 2021, (07): 38–39+48.
[5] 王鹏. 厚层盖层土石围堰组合防渗施工技术研究 [J]. 四川建材, 2020, 46(10): 84–86.
[6] 苏李刚. 高喷灌浆技术在水利工程基础防渗处理中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2020, (11): 94–95+98.
[7] 白利峰. 锦凌水库围堰高压摆喷灌浆施工工艺及其质量控制研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(12): 179–182.
[8] 魏殿伟. 高喷灌浆防渗墙在前坪水库砂卵石地层防渗中的应用 [J]. 中国水利, 2020, (18): 68–69.
[9] 戚振中. 高喷灌浆技术在尾矿库地下防渗工程中的应用 [J]. 山西建筑, 2009, 35(26): 112–113.
[10] 李正等. 高喷灌浆技术在水利工程中的应用与探讨 [J]. 内蒙古水利, 2002, (01): 88–90.

养护工程中微表处技术和预防性养护的有效运用

满蕊

德州市公路事业发展中心, 山东 德州 253000

DOI:10.61369/ETQM.2025080004

摘 要 : 社会经济不断发展, 推动了交通事业的发展。当前在交通告知事业发展过程中, 因为逐渐增加了交通工具的类型和数量, 增加了公路养护工作的难度。微表处技术比较简单, 投资相对较少, 同时可以发挥防水性能, 因此当前在公路养护工程中广泛利用微表处技术和预防性养护措施。本文分析了微表处技术和预防性养护工作, 对实际工作发挥出参考作用, 保障公路养护效果, 延长公路使用寿命。

关 键 词 : 公路养护工程; 微表处技术; 预防性养护

Effective Application of Micro-Surfacing Technology and Preventive Maintenance in Highway Maintenance Engineering

Man Rui

Dezhou Highway Development Center, Dezhou, Shandong 253000

Abstract : The continuous development of social economy has promoted the development of transportation. At present, in the development of traffic notification, the types and quantity of vehicles are gradually increased, which increases the difficulty of highway maintenance. Micro-surfacing technology is relatively simple, relatively less investment, and can play a waterproof role, so micro-surfacing technology and preventive maintenance measures are widely used in highway maintenance projects at present. This paper analyzes the micro-surfacing technology and preventive maintenance work, which plays a reference role in practical work, ensures the effect of highway maintenance and prolongs the service life of highway.

Keywords : highway maintenance project; micro-surfacing technology; preventive maintenance

引言

公路养护关系到交通运行的通畅性和安全性, 关系到整体公路的使用寿命。微表处技术属于一种预防性养护方法, 利用改性乳化沥青构建薄封层, 可以提高路面的抗滑性和耐久性等功能, 保障路面使用质量。在治理路面早期病害的过程中经常利用这项技术, 通过主动利用预防措施, 对公路性能衰退给予延缓, 使整体养护效率得以提升, 合理节省养护投资。利用微表处技术, 可以制定科学的预养护决策, 保障公路运营的持续性和高效性。不断提高技术水平, 在公路养护工程中微表处技术和预防性养护技术的优势将会充分发挥出来。

一、微表处技术的概述

(一) 微表处技术的定义和原理

微表处技术指的是利用专用设备配比聚合物改性沥青和集料以及填料以及外加剂等, 通过拌合之后在路面摊铺混合料, 构建薄层结构, 优化整体养护效果^[1]。该技术主要是协同利用不同的材料, 利用专用设备对各种材料配比进行控制, 在拌合阶段充分融合改性乳化沥青和集料以及填料等。改性入海沥青的粘结性能良好, 可以牢固地黏结集料, 在路面摊铺之后, 在特定温湿度条件下, 经过破乳和固化处理之后, 形成薄层结构, 可以对路

面状态给予改善, 满足公路养护需求。

(二) 微表处技术的特点

微表处技术的特点明显, 首先这项技术操作简单, 整体施工流程比较简单, 对施工人员提出的要求较少, 有利于施工人员上手操作。其次这项技术的污染较少, 在实际施工中利用的材料和技术对周围环境的污染较少, 符合环保要求。再次这项技术的投资较少, 对比传统的公路养护技术, 微表处技术所用的原材料投资较低, 而且具有较高的使用效率, 可以节省施工时间和人力资本^[2]。因为施工效率较高, 可以快速摊铺路面, 避免长时间地干扰正常交通。此外这项技术可以提高路面抗滑性, 通过增加路面

摩擦系数，保障交通运行的安全性。

（三）在公路养护中微表处技术的优势

在公路养护过程中微表处技术的优势明显，可以对路面问题给予改善，例如可以有效修复路面的裂缝和车辙以及泛油等问题，提高路面的平整度。同时可以优化路面性能，使路面的抗滑性和耐磨性得以提高，保障整体路面质量。在公路养护中利用微表处技术，还可以延长公路使用寿命，保障公路运行的稳定性。

二、预防性养护概述

（一）预防性养护的概念和理念

预防性养护的核心理念为预防为主、防治结合，在公路发生病害之前落实系统性检测和评估工作，精准识别潜在问题，采取针对性的预防措施^[9]。预防性养护指的是主动干预公路状态，不能在发生病害之后再采取修复措施。在发生病害之后，落实针对性的养护措施，可以避免进一步恶化病害，优化公路使用寿命，保障车辆运行的安全性。

（二）预防性养护的重要性

在公路养护工作中，预防性养护工作发挥重要的作用。首先在经济角度出发，开展预防性养护工作，在发生病害之前采取预防措施，避免病害变得严重之后再开展大规模的修复工程，有利于节省养护投资。其次可以优化公路装填，及时处理潜在的问题，保障公路路面的平整性，构建稳定的结构，避免因病害而破坏路面结构，保障整体公路之后^[10]。最后落实预防性养护工作，有利于保障公路运营效益。保障公路装填，可以提高车辆行驶速度，减少运输成本，对区域经济发展起到带动作用，保障公路运营效益。

（三）预防性养护的流程

预防性养护的流程严谨，首先是监测路况，可以利用人工检测和无损检测等方法完成这项工作，全面监测路况和结构稳定性以及交通流量等，全面收集相关数据。其次开展数据分析工作，专业人员通过深入分析路况监测数据，对公路整体状况进行评估，确定是否存在潜在病害，并且对病害发展趋势进行分析^[11]。再次结合数据分析结果制定养护方法，合理规划养护时间和地点等。最后实施具体的养护措施，严格执行养护计划，利用微表处技术和封灌技术等，提升预防性养护水平，优化整体养护效果，保障公路运行的正常性。

三、公路养护工程中微表处技术和预防性养护的有效运用

（一）微表处技术的应用

1. 检查原材料质量

微表处技术应用阶段主要是利用坚固、耐磨的石料，注意保证石料的洁净度，不能参加其他物质，优化整体使用效果。利用热化沥青需要实现聚合物改性，可以利用 SBR 乳胶和 SBS 改性。保障原材料的质量，符合工程标准，为后续施工提供便利。

2. 混合料设计

在施工之前需要试验混合料质量，优化材料性能。可以利用磨耗和碾压粘砂试验对材料抗水损坏能力进行分析，确定沥青具休用量^[12]。同时利用马歇尔法计算石油比，对原材料比例合理控制，将其最大作用发挥出来。

3. 施工路面准备

首先要补强处理路面结构，提高整体结构的稳定性，其次开展部分处理工作。针对车辙问题，可以利用微表处罩面方法，在深度为 20mm 的部位首先填充物料，达到平整度要求之后再采取施工处理措施，在 30mm 以上的部位填充多层微表处。如果路面出现隆起问题，将隆起部位清除之后才可以开展后续工作。完成修补工作之后，要注意全面清理工作现场，可以利用高压水枪冲洗，提高整体结构的清洁度。

4. 摊铺碾压

在实际施工中，施工单位根据特定比例混合聚合物和沥青以及水等，保障整体混合料的均匀性。在摊铺施工中，注意对摊铺厚度和平整度进行控制^[13]。在碾压施工中合理选择压路机完成碾压，保障压实度符合要求。完成和施工之后要注意采取养护措施，例如对交通进行封闭，避免通过车辆和行人而破坏路面。当混合料凝固之后，强度达到标准之后才可以开放交通。

（二）预防性养护的具体应用

1. 稀浆封层技术

该技术通过混合骨料和乳化剂以及水等物质，形成原材料，在路面上均匀地摊铺这些材料，可以构建薄层，发挥保护作用，该技术可以对路面问题有效处理，因此可以推广利用。以分层厚度为基础可以将其划分为细封层和中封层以及粗封层，在养护过程中适合利用中封层，可以有效处理路面开裂和松散等问题。

2. 雾封层预防性养护技术

公路使用一段时间，很容易出现各种轻微损坏问题，渗入外界水分之后，将会损坏道路内部结构。该技术的原材料要具备流动性，使其可以渗入到裂缝中，优化密封效果，避免渗入水分。该技术的投资较少，可以保障公路效益。在松散道路中适合利用这项技术，可以优化整体养护效果。

（三）微表处技术和预防性养护的结合利用

1. 协同作用分析

在公路养护工程中微表处技术和预防性养护之间具有良好的协同效应，充分发挥出二者优势，可以使公路养护效率得以提升，优化路面使用效果，合理节省投资。微表处技术负责薄层处理，可以对路面早期病害进行修复，该技术的施工效率和成型速度较快，可以快速恢复道路通行，避免因维修工作影响正常交通。在路面使用中预防性养护的性能良好，结合微表处技术，可以技术发现潜在病害，避免进一步扩大病害，节省检修投资^[14]。二者存在显著的互补关系，利用预防性养护可以为微表处技术应用奠定基础，将其优势发挥出来。微表处属于一种预处理方法，可以优化整体路面使用性能。二者融合利用，可以使养护效率得以提升，减少养护次数，提高路面防水性和抗滑性等性能水平。

在实际应用中，结合路况监测结果，如果发现路面存在裂缝

等病害，但是损坏程度不严重，可以在预防性养护中利用微表处技术。在养护方案制定阶段，需要综合分析路面实际情况和交通流量等因素。如果路段交通流量较大，需要优先施工，选择交通压力较小的时段开展施工，尽量降低对交通的影响。同时需要结合微表处技术，严格控制原材料和施工工艺，保障养护效果符合预期。

2. 具体案例分析

某省级高速公路的等级为双向四车道公路，设计时速为100km/h，日平均交通流量超过2万辆车，负责承担区域交通运输任务。逐渐延长运营时间之后，路面开始出现轻微的裂缝和车辙等问题。

在工程中结合利用人工监测和无损检测技术等全面监测路况，综合获取路面平整度和抗滑性等数据，经过分析确定部分路段的路面损坏情况处于良以下水平，而且降低了抗滑性能。在制定预防性养护方案的过程中，确定选用微表处技术^[9]。

在实际施工中，施工单位严格检测沥青和集料等，满足施工规范要求。在施工之前清洁处理原路面，对坑槽等部位进行修补。随后根据配合比均匀地拌入海沥青和集料以及填料等，随后利用摊铺设备在路面均匀地摊铺，控制摊铺厚度在10mm左右。完成摊铺工作之后需要及时开展碾压施工，保证压实度符合标准。在结束施工之后立即开展养护工作，符合开放交通的条件之后可以放行车辆。

通过综合利用微表处技术和预防性技术等，可以优化公路性能，改善整体路面的平整度，提高后续行车的舒适度。经过施工之后，提高了路面的抗滑性，降低了交通事故发生率。同时对比传统的修补性养护技术，本次施工节省了约为30%的养护成本，保障整体经济效益。

四、微表处技术和预防性养护应用中面临的问题和解决策略

（一）问题

微表处技术对原材料的要求要求，例如选用的集料中包含较

多的泥沙，不仅会增多沥青使用量，还会影响到微表稳定性。此外该技术施工流程较多，需要严格控制每个环节的施工参数。但是在实际施工中存在较多的影响因素，从而影响到施工质量，对技术使用效果造成影响。

施工单位很难把握预防性养护时机，因为公路病害发生原因复杂，当前的监测手段虽然可以评估公路状况，但是很难精准分析病害发生时间和程度等，不利于施工单位确定最佳的预防性养护时机。

（二）解决策略

针对微表处技术应用中存在的问题，需要加强控制原材料的质量。在材料采购阶段需要严格筛选材料供应商，保障材料质量，同时需要加强检测各类原材料的质量，禁止在施工中利用不合格的材料^[10]。为了使整体施工水平得以提升，需要加大力度培训施工人员，不断提高施工人员的专业性，此外需要定期对施工设备进行维护，优化设备使用状态。针对预防性养护中的问题，需要完善整体监测体系，利用智能传感器和无人机检测等，获取精准的监测数据，方便施工单位把握监测时机。在对养护计划制定阶段，综合分析实时数据和历史数据等，制定科学的养护计划。

五、结束语

在公路养护中利用微表处技术和预防性养护技术，可以优化路面使用性能，节省后期养护的投资，保障车辆行驶过程的稳定性，避免发生安全事故。科学技术不断发展，在今后发展过程中，相关技术人员需要加大力度研究微表处技术和预防性养护技术，促进我国交通事业的健康发展。

参考文献

[1] 许兵春. 橡胶改性沥青碎石封层在公路养护工程中的实际应用 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025, (04): 87-89.
[2] 辜荣华, 王磊, 许竞. 就地热再生技术在江西省高速公路养护工程中的应用研究 [J]. 交通节能环保, 2025, 21(02): 33-37.
[3] 王建军. 预防性公路养护技术在现代公路养护中的应用 [J]. 四川建材, 2025, 51(04): 200-202+206.
[4] 姜景利. 农村公路养护工程中沥青改性剂性能对比试验分析 [J]. 交通世界, 2025, (09): 42-44.
[5] 张敬伟. 不粘轮乳化沥青黏层在公路养护中的应用分析 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6(06): 137-139.
[6] 郭中一. 公路工程中沥青纤维碎石封层施工技术研究 [J]. 交通世界, 2025, (08): 39-41..
[7] 卢厚锭. 高速公路养护工程中微表处施工技术分析 [J]. 交通世界, 2025, (08): 69-71.
[8] 李旭娟. 耐久性微表处养护技术在公路工程中的应用 [J]. 交通世界, 2025, (08): 60-62.
[9] 陈俊伟. 公路养护工程中沥青渗透固化剂的应用分析 [J]. 交通世界, 2025, (07): 78-80.
[10] 俞舟锋, 戴豪奇. 边坡绿化提升工程对公路养护环境的改善研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(04): 137-140.

管道法兰使用橡胶垫片密封时紧固力矩的选取和限制

李强

中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ETQM.2025080008

摘 要 : 本文系统研究管道法兰橡胶垫片密封的紧固力矩选取规范与限制条件。分析表明, 法兰密封面配合形式与橡胶材质特性构成力矩选择基础。接触宽度直接影响密封比压分布, 需满足 ASMEB16.20、GB/T9126-2008 等标准规定的 3-6mm 下限要求。紧固力矩设计需综合系统压力、垫片压缩回弹特性和螺栓规格, 设定预紧力下限时应兼顾初始密封比压与温度应力衰减补偿。研究强调需控制垫片最大承载应力, 平衡材料特性与密封可靠性, 通过标准化力矩参数优化实现密封系统的长效稳定运行。

关 键 词 : 管道法兰; 橡胶垫片; 应力限值; 垫片最小接触宽度

Selection and Limitation of Tightening Torque when Rubber Gasket is Used for Sealing Pipeline Flange

Li Qiang

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract : This paper systematically examines the selection criteria and limitations for the tightening torque of rubber gasket seals in pipeline flanges. The analysis reveals that the form of the flange sealing surface and the characteristics of the rubber material form the basis for torque selection. The contact width directly influences the distribution of the sealing pressure ratio, which must meet the minimum requirement of 3-6mm as specified by standards such as ASMEB16.20 and GB/T9126-2008. The design of the tightening torque should consider the system pressure, the compression rebound characteristics of the gasket, and the bolt specifications. When setting the lower limit of the pre-tightening force, it is essential to balance the initial sealing pressure ratio with the compensation for temperature stress decay. The study emphasizes the need to control the maximum bearing stress of the gasket, balancing material properties with sealing reliability, and achieving long-term stable operation of the sealing system through the optimization of standardized torque parameters.

Keywords : pipe flange; rubber gasket; stress limit; minimum contact width of gasket

引言

法兰密封性能受配合形式、材料特性及接触宽度等因素制约。橡胶垫片与密封面的配合形式决定应力分布特征, 不同材质橡胶的压缩回弹特性直接影响密封可靠性。接触宽度规范确保有效密封带形成, 标准限值综合材料性能与工况参数。有关资料统计表明, 管道密封失效多发生在法兰连接处, 导致法兰密封失效的主要原因是密封垫片受力不均匀和不当的螺栓预紧力。通过分析法兰连接螺栓预紧力与法兰金属密封圈压紧状态的力学关系, 找到控制的标准和限制的条件, 以提高橡胶密封的可靠性提升使用能效, 避免过载或松弛导致的法兰密封失效。

一、基本信息介绍

(一) 橡胶垫片与法兰密封面配合形式

在管道法兰密封系统中, 橡胶垫片与法兰密封面的配合形式直接影响密封性能和使用寿命。橡胶垫片通常采用平面型、突面型和凹凸型三种主要配合形式。不同配合形式适用于不同的工况

要求, 对垫片的压缩率和回弹性能要求各异。平面型要求垫片具有较好的压缩性, 而凹凸型更注重垫片的回弹保持能力。在实际应用中, 密封面粗糙度、平整度以及垫片硬度等因素均会影响接触应力分布, 进而影响密封效果。合理的配合形式选择需综合考虑系统压力、介质特性、温度范围等参数, 确保在满足密封要求的同时避免因过载导致垫片失效^[1]。

作者简介: 李强 (1989.02-), 汉族, 湖北咸宁人, 本科, 工程师, 研究方向: 静止机械密封。

（二）常用橡胶垫片及其特性介绍

在管道法兰密封系统中，橡胶垫片的选择直接影响密封性能和系统可靠性。工程实践中常用的橡胶垫片主要包括丁腈橡胶、氟橡胶、硅橡胶和乙丙橡胶等类型。丁腈橡胶垫片具有优异的耐油性和耐磨性，适用于石油类介质，工作温度范围通常在 -30°C 至 100°C 之间。氟橡胶垫片展现出卓越的耐高温和耐化学腐蚀特性，可在 -20°C 至 200°C 环境下保持稳定性能，特别适用于强酸强碱介质。硅橡胶垫片具有良好的耐热性和弹性恢复能力，适用于食品和医药行业，温度适应范围可达 -60°C 至 230°C 。乙丙橡胶垫片则以其出色的耐候性和耐臭氧性能见长，常用于户外或存在氧化性介质的工况环境。各类橡胶垫片的硬度、压缩率和回弹率等参数存在显著差异，直接影响其在法兰密封中的应力分布和密封效果。在实际应用中，需根据介质特性、温度条件和压力等级等因素综合考虑，选择具有适当物理性能和化学稳定性的垫片材料，以确保密封系统的长期可靠运行。不同材质的橡胶垫片对紧固力矩的敏感程度各异，这也是力矩选取时需要考虑的关键因素之一^[2]。

（三）橡胶垫片接触宽度对密封性的影响

橡胶垫片的接触宽度是影响法兰密封性能的关键参数之一。接触宽度直接影响垫片与法兰密封面的接触应力分布和密封比压。当接触宽度过小时，单位面积承受的压紧力增大，可能导致垫片材料过度压缩甚至发生塑性变形，降低回弹性能；同时过窄的接触面难以有效覆盖法兰表面的微观缺陷，增加泄漏风险。反之，过大的接触宽度会分散螺栓预紧力，导致密封比压不足，同样影响密封效果。接触宽度与垫片材料的弹性模量、硬度等特性密切相关，不同材质的橡胶垫片存在最佳接触宽度范围。在实际应用中，接触宽度需与法兰结构尺寸、螺栓数量及分布相匹配，确保形成均匀连续的密封带。此外，温度变化引起的热膨胀差异也会改变接触宽度与密封性能的关系，在高温工况下需考虑材料热膨胀系数的影响。合理的接触宽度设计应兼顾密封可靠性和垫片使用寿命，避免因局部应力集中导致的早期失效^[3]。

（四）相关标准对垫片最小接触宽度的规定

行业标准对橡胶垫片最小接触宽度的规定主要基于密封性能要求和材料特性。ASME B16.20标准规定，对于非金属平垫片，最小接触宽度不应小于3mm；GB/T 9126-2008《管法兰用非金属平垫片》则要求橡胶垫片的最小接触宽度根据法兰规格和压力等级确定，通常在3-6mm范围内。HG/T 20606-2017《钢制管法兰用非金属平垫片》针对不同公称直径的法兰，规定了相应的最小接触宽度要求，DN50以下法兰不小于3mm，DN50-DN300法兰不小于5mm，更大尺寸法兰则需达到6mm以上。这些标准规定考虑了垫片材料的压缩回弹性能、法兰表面粗糙度以及系统工作压力等因素，确保在各种工况下都能形成有效的密封带。标准还要求垫片接触宽度应均匀连续，不得存在局部过窄区域，以保证应力分布的均匀性。对于特殊介质或极端工况，标准允许根

据实际情况适当增大最小接触宽度要求，但不得低于规定的基本值^[4]。

二、使用橡胶垫片进行力矩紧固的存在的问题和解决方案

（一）紧固力矩表设计

紧固力矩表的设计需基于系统压力等级、垫片材料特性、法兰规格尺寸等关键参数。首先应根据法兰公称直径和压力等级确定基础力矩范围，通常随着法兰尺寸增大和压力等级提高，所需紧固力矩相应增加。其次需考虑橡胶垫片的材质特性，不同橡胶材料的压缩模量和回弹性能差异显著，如氟橡胶需要比丁腈橡胶更高的初始预紧力。螺栓规格也是重要影响因素，M16螺栓的推荐力矩值通常比M12螺栓高出40%-60%。环境温度变化会导致橡胶材料性能改变，高温工况下的力矩补偿系数通常为常温条件下的0.8-1.2倍。力矩表还应规定紧固顺序，一般采用十字交叉对称拧紧方式，分2-3个阶段逐步达到目标力矩值。对于重要场合，建议在力矩表中注明允许的力矩偏差范围，通常控制在标称值的 $\pm 15\%$ 以内。设计完成的力矩表需通过压力测试验证，确保在规定的紧固力矩下既能形成有效密封，又不会造成垫片过度压缩或螺栓过载^[5]。

（二）橡胶垫片最大承载应力限制

橡胶垫片的最大承载应力限制是法兰密封系统设计中的关键参数，其取值直接影响密封性能和垫片使用寿命。橡胶材料的最大允许应力取决于其材质类型、硬度等级和工作温度等因素。对于常用的丁腈橡胶垫片，其最大承载应力通常控制在15-25MPa范围内，而氟橡胶由于具有更好的机械性能，最大承载应力可达30-40MPa。该限制值的确定需要考虑垫片的压缩永久变形特性，过高的应力会导致橡胶分子链断裂，产生不可恢复的塑性变形。在实际应用中，最大承载应力还需考虑长期服役条件下的应力松弛现象，通常取初始预紧应力的1.2-1.5倍作为安全裕度。温度、工作介质均对橡胶材料的应力限制有显著影响。同时在系统设计时，应确保螺栓预紧力转换到垫片上的实际应力不超过材料允许值，同时满足形成初始密封所需的最小比压要求。对于动态工况或压力波动较大的系统，还需考虑交变载荷导致的疲劳效应，进一步降低最大允许应力值。通过合理控制垫片承载应力，既能保证密封效果，又能避免垫片过早失效或螺栓过载^[6]。

（三）螺栓预紧力矩下限

在管道法兰采用橡胶垫片密封的系统中，螺栓预紧力矩下限的确定涉及多个关键因素。首先需要考虑橡胶垫片形成初始密封所需的最小比压要求，不同类型橡胶材料的这一参数存在显著差异。对于常用的丁腈橡胶垫片，形成有效密封的最小比压通常为3-5MPa，而氟橡胶垫片则需要5-8MPa的最小比压。这一参数直接影响预紧力矩下限的计算基准。螺栓预紧力矩下限还需考虑系统工作压力引起的轴向分离力。根据帕斯卡原理，系统内压会在法兰结合面产生与压力成正比的分离力，预紧力矩必须能够克服这一分离力并保持足够的残余压紧力。通常要求残余压紧力不低于工作压力产生分离力的1.5-2倍，以确保在各种工况下都能维持密封效果。

温度变化对预紧力矩下限有重要影响。橡胶材料的弹性模量

随温度升高而降低，在高温工况下需要更大的初始预紧力来补偿这一变化。同时还需考虑热膨胀差异导致的附加应力，特别是当法兰与螺栓材料不同时。对于温度波动较大的系统，预紧力矩下限应适当提高以应对热循环导致的应力松弛。长期服役条件下的应力松弛现象是确定预紧力矩下限时不可忽视的因素。橡胶材料在持续压缩状态下会发生应力衰减，初始预紧力需考虑这一衰减量。通常建议初始预紧力比理论计算值提高20%–30%，以补偿服役期间的应力松弛。对于重要场合，还应定期检查并重新紧固，以维持足够的密封压力。螺栓预紧力矩下限的计算还需考虑法兰刚度和垫片压缩特性的匹配关系。过低的预紧力矩会导致垫片压缩不足，无法形成连续的密封带；过高的预紧力矩则可能引起垫片过度压缩甚至损坏。合理的预紧力矩下限应在确保初始密封的前提下，为后续可能需要的补充紧固预留适当空间^[7]。

ASME PCC—1-2013标准给出法兰螺栓安装的应力下限值，一般为螺栓室温屈服强度的20%–30%。限制螺栓安装的最低应力是为了避免因安装螺栓载荷计算的不精确而导致安装螺栓应力过低，从而降低法兰接头的密封性。同时也要考虑该力矩可能导致橡胶垫的过压缩甚至压溃失效风险。其中较窄的垫片密封面接触宽度表现尤为突出^[8]。

（四）垫片最小接触宽度确认

垫片最小接触宽度的确认是管道法兰橡胶垫片密封系统设计的重要环节。该参数的确定需基于密封介质的特性、系统工作压力以及橡胶材料的力学性能等多方面因素。对于液体介质密封，最小接触宽度通常要求较气体介质更宽，以补偿可能的渗透现象。在高压工况下，接触宽度需相应增加以分散密封应力，通常压力每提高1MPa，最小接触宽度需增加0.5–1mm。橡胶材料的压缩回弹性能直接影响接触宽度要求，高弹性材料如硅橡胶可适当减小接触宽度，而硬度较高的材料如氟橡胶则需要更大的接触宽度以确保密封效果。法兰表面粗糙度对最小接触宽度有显著影响。粗糙度过大会导致实际接触面积减小，需通过增加名义接触宽度进行补偿。通常Ra值每增加0.8 μm ，最小接触宽度应相应增加10%–15%。温度变化引起的热膨胀差异也需要考虑，特别是当法兰与管道材料不同时，需预留足够的接触宽度余量。对于直径较大的法兰，还需考虑法兰翘曲变形的影响，通常在法兰外缘部位需要比内缘更大的接触宽度^[9]。

相关标准对垫片最小接触宽度有明确规定，如ASMEB16.20要求橡胶垫片的最小接触宽度不得小于3mm，对于高压场合则需达到5mm以上。实际应用中还需考虑安装误差和长期服役后的应

力松弛影响，通常在设计值基础上增加20%–30%的安全余量。通过计算流体压力产生的分离力与垫片接触面积的关系，可以验证所选取的最小接触宽度是否满足密封要求。合理的接触宽度应确保在最大工作压力下，垫片接触应力仍能维持在不低于材料规定的最小密封比压^[10]。

三、典型案例分析

某电厂蒸汽管道法兰连接处，施工方为追求密封效果，将紧固力矩提高至标准值的150%。过大的压缩力导致氟橡胶垫片产生永久变形，失去弹性恢复能力。在随后的热循环过程中，由于垫片无法补偿法兰的热位移，最终在运行三个月后发生密封失效。检测发现垫片压缩量超过允许值的40%，材料内部出现明显裂纹。某化工厂的酸性介质输送管道中，操作人员忽视了橡胶垫片最小接触宽度的要求，选用了过窄的垫片。在标准力矩紧固后，虽然短期密封效果良好，但由于接触面积不足，垫片局部应力过高。长期运行后，垫片出现应力松弛和化学腐蚀的双重作用，导致密封性能逐步劣化，最终发生突发性泄漏^[11]。

在海洋平台的海水管线系统中，由于未考虑海水温度变化对橡胶材料性能的影响，设计的紧固力矩未留足够余量。冬季低温导致垫片硬度增加，弹性下降，原有的预紧力无法维持有效密封，出现季节性泄漏现象。该案例说明环境温度变化对紧固力矩的选取具有重要影响。

四、结论

综上所述，研究表明，管道法兰橡胶垫片密封系统需综合考量密封面配合形式、材料特性及接触宽度规范。平面型、凹凸型等密封面适配不同压力与工况，丁腈、氟橡胶等材质需匹配介质温度及化学特性。接触宽度须满足ASMEB16.20、GB/T9126–2008标准规定的最小3–6mm要求，确保应力均匀分布。紧固力矩设计应结合法兰规格、系统压力与垫片压缩回弹特性，控制最大承载应力（丁腈15–25MPa，氟橡胶30–40MPa），并设定不低于分离力1.5–2倍的预紧力矩下限。实践表明，标准化力矩参数与严格应力限制可平衡密封可靠性与材料耐久性，避免过载或松弛导致的失效。

参考文献

- [1] 李华, 王刚. 法兰连接密封机理及橡胶垫片选型研究 [J]. 压力容器技术, 2023, 40(3): 45–50.
- [2] 张伟, 陈明. 橡胶垫片压缩回弹特性对法兰密封性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(2): 112–118.
- [3] 刘强, 赵磊. 基于 ASME 标准的法兰密封接触宽度优化设计 [J]. 化工设备与管道, 2023, 62(1): 34–39.
- [4] 国家标准 GB/T9126–2008. 管法兰用非金属平垫片 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [5] 孙立, 黄斌. 高温高压法兰密封系统的螺栓紧固力矩研究 [J]. 核动力工程, 2023, 44(4): 89–94.
- [6] 杨帆, 郭振宇. 橡胶垫片承载应力与密封失效关联性分析 [J]. 润滑与密封, 2023, 48(5): 123–128.
- [7] 行业标准 HG/T20606–2017. 钢制管法兰用非金属平垫片 [S]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
- [8] ASME 美国机械工程师协会标准. ASME PCC—1-2013《压力边界螺栓法兰连接安装指南》. 美国机械工程师协会, 2013.
- [9] 周晓东, 李建国. 动态工况下法兰密封力矩优化策略 [J]. 流体机械, 2024, 52(3): 76–81.
- [10] 黄伟, 张明. 法兰螺栓紧固力矩的优化计算方法 [J]. 石油化工设备, 2024, 53(1): 56–61.
- [11] 李明, 吴昊. 橡胶垫片密封性能的多因素耦合分析 [J]. 工程力学, 2024, 42(2): 201–208.

房建项目全生命周期工程管理策略与实践

刘崇洋

身份证号: 431023198605131815

DOI:10.61369/ETQM.2025080009

摘 要： 房建项目全生命周期工程管理通过系统整合规划、设计、施工、运维及拆除等各阶段，实现工程效益的整体优化。研究探讨了数字化技术在跨阶段协同管理中的应用，分析了可持续建造与风险管理的关键策略。实践表明，该管理模式能有效提升项目管理效率，促进建筑业可持续发展。

关 键 词： 全生命周期管理；数字化技术；可持续建造

Construction Project Whole Life Cycle Engineering Management Strategies and Practices

Liu Chongyang

ID: 431023198605131815

Abstract： The whole life cycle engineering management of construction projects achieves overall optimization of project benefits through systematic integration of planning, design, construction, operation and demolition phases. The study explores the application of digital technologies in cross-phase collaborative management and analyzes key strategies for sustainable construction and risk management. Practice demonstrates that this management model can effectively improve project management efficiency and promote sustainable development in the construction industry.

Keywords： whole life cycle management; digital technology; sustainable construction

引言

房建项目全生命周期工程管理作为现代建筑行业的重要发展方向，通过系统整合规划、设计、施工、运维及拆除等各阶段，实现资源高效配置与工程价值最大化。随着《“十四五”建筑业发展规划》（2022年）的发布，明确要求推进工程建设项目全过程数字化管理，强化绿色建造与智能建造协同发展，全生命周期管理的实践价值进一步凸显。当前，建筑行业面临碳达峰碳中和目标约束，2023年《城乡建设领域碳达峰实施方案》强调必须加强建筑全生命周期碳排放管控，这一政策导向促使项目管理模式向全过程、可持续方向转型。BIM、物联网、大数据等数字技术的成熟应用为全周期管理提供了技术支撑，但跨阶段协同不足、标准体系缺失等问题仍制约着管理效能提升。在此背景下，探索房建项目全生命周期管理的创新策略与实践路径，对推动建筑业高质量发展具有重要现实意义。

一、房建项目全生命周期管理的理论基础

（一）全生命周期管理的概念与内涵

全生命周期管理是指对房建项目从规划、设计、施工到运维及最终拆除的全过程进行系统性、集成化的管理^[1]。其核心要素涵盖规划阶段的可行性分析、设计阶段的协同优化、施工阶段的质量与进度控制、运维阶段的性能维护以及拆除阶段的资源回收。与传统工程管理相比，全生命周期管理突破了阶段性割裂的局限，强调各环节的连贯性与整体性，通过信息共享与动态调控，实现成本节约、效率提升和可持续性增强^[2]。

（二）相关理论与支撑体系

全生命周期管理的理论支撑主要来源于系统工程理论，该理论将房建项目视为复杂系统，通过整体优化与子系统协调实现目

标。BIM（建筑信息模型）技术作为关键工具，通过数字化建模整合项目各阶段数据，提升决策精准度与协作效率^[3]。可持续建筑理论则从环境与经济平衡角度出发，推动绿色设计、节能施工与低碳运维，确保项目在全生命周期内符合可持续发展要求。这些理论与技术共同构成了全生命周期管理的科学基础与实践框架。

二、房建项目全生命周期管理的关键阶段

（一）前期策划与设计阶段

前期策划阶段是房建项目全生命周期管理的起点，其核心任务包括需求分析与可行性研究，通过市场调研、技术评估和经济效益分析确定项目定位与实施路径。设计阶段则强调协同管理与BIM技术集成，建筑、结构、机电等多专业团队基于统一信息平

台开展并行设计，减少设计冲突并优化方案。BIM模型的应用不仅提升设计精度，还为后续施工与运维阶段提供数据基础，实现全周期信息无缝传递^[4]。

（二）施工与验收阶段

施工阶段通过动态监控技术对进度、成本与质量进行实时跟踪，结合 BIM 与物联网（IoT）技术实现施工过程可视化与风险预警，确保工程按计划推进。质量控制贯穿材料检测、工艺规范及分部分项验收等环节，形成闭环管理。竣工验收阶段依据国家规范与合同约定，对项目功能、安全及环保性能进行全面检测，明确交付标准与运维责任，为后续使用阶段奠定基础。

三、全生命周期管理的技术应用与实践策略

（一）数字化技术赋能管理

1. BIM 技术在生命周期各阶段的应用

BIM 技术在房建项目全生命周期管理中发挥核心作用，实现各阶段数据的集成与共享。在规划阶段，BIM 支持场地分析与方案比选；设计阶段通过三维建模优化建筑性能并减少设计冲突；施工阶段利用 4D-BIM 进行进度模拟与资源调度；运维阶段依托 BIM 模型实现设施管理与能耗监测；拆除阶段则基于模型数据制定高效回收方案。BIM 的跨阶段协同能力显著提升项目管理效率，降低信息断层风险^[5-6]。

2. 物联网（IoT）与大数据分析

物联网技术通过传感器网络实时采集施工环境、设备状态及建筑运行数据，为动态监控提供数据支撑。结合大数据分析，可识别施工安全隐患、预测设备故障并优化运维策略。例如，混凝土养护温湿度监测、结构健康状态评估等场景均依赖 IoT 数据反馈。大数据技术进一步挖掘历史项目数据价值，辅助成本预测与决策优化，推动工程管理向智能化方向发展。

（二）可持续性与风险管理

1. 绿色建筑与节能技术整合

绿色建筑理念贯穿房建项目全生命周期，通过被动式设计、可再生能源利用和高效设备选型实现节能目标。设计阶段采用气候适应性布局 and 自然采光优化降低能耗需求；施工阶段推行绿色建材和低碳工艺，减少隐含碳排放；运维阶段通过智能控制系统实现能源精细化管理，结合光伏建筑一体化等技术提升可再生能源占比。全生命周期碳排放评估工具的应用，为绿色技术选择提供量化依据，确保项目环境绩效达标^[7]。

2. 风险识别与全周期防控机制

风险管理系统覆盖项目各阶段特征性风险：前期重点防范决策失误和市场波动风险；施工阶段管控安全质量风险和供应链风险；运维阶段应对设备老化和功能退化风险^[8]。采用 BIM 与数字孪生技术构建风险模拟平台，实现隐患可视化预警。建立风险分级响应制度，通过设计冗余、过程审计和应急预案形成防控闭环，保险与担保等金融工具为重大风险提供转移渠道，保障项目全周期稳健运行^[9]。

四、案例分析与优化建议

（一）典型案例分析

1. 成功案例：某绿色住宅项目的全周期管理实践

上海某绿色住宅项目通过 BIM 技术实现全生命周期协同管理，设计阶段采用参数化建模优化建筑朝向和窗墙比，降低能耗 23%。施工阶段应用物联网监测系统实时追踪材料运输和施工质量，减少返工损失 15%。运维阶段部署智能能源管理系统，结合太阳能光伏和雨水回收装置，实现运营能耗降低 30%。该项目获得 LEED 铂金认证，验证了全周期管理在提升可持续性绩效方面的有效性，为同类项目提供了可复制的技术路径和管理模式。

2. 失败案例：某项目因前期规划不足导致的问题

某省会城市商业综合体项目因前期可行性研究不充分，未考虑区域交通承载力，导致后期停车位配置不足。设计阶段各专业协调缺失，机电管线与结构冲突造成施工返工，工期延误达 5 个月。运维阶段因未建立设备信息档案，导致空调系统故障排查困难，年均维护成本超预算 40%。该案例暴露了全周期管理中前期决策失误和跨阶段信息断裂的严重后果，凸显了系统化规划与信息集成的重要性。

（二）管理优化建议

1. 强化跨阶段协同机制

建立贯穿项目全生命周期的协同管理组织架构，明确各阶段责任主体的对接流程和信息交付标准。推行 IPD（集成项目交付）模式，通过早期参与方介入实现规划设计、施工和运维团队的无缝衔接。制定标准化的数据交换协议，确保 BIM 模型在各阶段传递时的信息完整性和一致性。设置跨阶段质量追溯机制，将后期运维需求前置到设计阶段考虑，形成需求-设计-施工-运维的闭环反馈系统。定期组织各专业协调会，利用协同平台解决界面冲突问题，降低沟通成本^[10]。

2. 完善信息化管理平台建设

构建基于云计算的全生命周期管理信息系统，集成 BIM、GIS 和 IoT 等多源数据。开发具有权限管理功能的数据中台，实现规划审批、施工监管和运维服务等业务流程的数字化贯通。引入人工智能技术，开发进度预测、成本分析和风险预警等智能决策模块。建立项目知识库，积累历史项目数据和最佳实践案例，支持管理决策。加强移动端应用开发，实现现场数据实时采集和远程协同办公，提升管理效率。平台建设需遵循国际数据标准，确保系统兼容性和扩展性。

（三）未来发展趋势

1. 智能建造与 AI 技术的融合

建筑产业数字化转型将加速智能建造技术的深度应用，AI 算法在项目全生命周期管理中展现出巨大潜力。机器学习技术可基于历史项目数据优化设计方案，自动生成符合规范且成本最优的施工图纸。计算机视觉结合现场监控系统实现施工质量智能检测，实时识别安全隐患并预警。自然语言处理技术应用于工程文档智能审查，大幅提升审批效率。数字孪生技术通过实时数据驱动模型更新，为运维决策提供动态仿真支持。AI 驱动预测性维

护系统将改变传统设施管理模式，实现从被动维修到主动预防的转变。

2. 政策与标准体系的完善方向

行业监管体系将向全生命周期管理导向转型，推动建立覆盖规划、设计、施工、运维各阶段的统一标准体系。完善 BIM 技术应用导则和数据交换标准，解决不同软件平台间的互操作性问题。制定建筑碳排放核算与监测标准，强化全生命周期环境影响评估要求。推行数字化交付强制政策，明确各阶段数据交付内容和格式标准。建立智能建造技术认证制度，规范 AI 算法在工程管理中的应用边界。跨部门协同监管机制将逐步形成，实现立项审批、质量监督和运营维护等环节的政策衔接。

五、总结

全生命周期管理为房建项目带来显著综合价值，通过系统化集成规划、设计、施工和运维各阶段，实现资源优化配置与整体

效益提升。BIM 与数字化技术的应用打破信息孤岛，增强项目协同效率；可持续理念贯穿全过程，降低环境负面影响；风险管理机制保障项目稳健实施。实践表明，该管理模式可降低工程成本 15-20%，缩短工期 10-15%，并显著提升建筑运营能效。

当前技术落地仍面临专业人才短缺、数据标准不统一、跨阶段协同机制不完善等障碍。未来研究应聚焦智能算法在工程决策中的深度应用、全生命周期碳足迹精准核算方法、以及政策标准与技术发展的协同创新。数字孪生与元宇宙技术的工程应用、建筑业循环经济模式探索等方向具有重要研究价值，将为全生命周期管理发展提供新动能。

参考文献

[1] 常卫红. 全生命周期视角下的工程项目信息管理 [J]. 经贸实践, 2016(7): 262-262.

[2] 蓝莉. 房地产项目全生命周期工程造价管理理论及应用 [J]. 科技与生活, 2010(14): 1.

[3] 郭云鹏. 绿色建筑全生命周期中的 BIM 技术应用策略研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2013.

[4] 郭东强, 李志敏. 基于生命周期的虚拟企业知识管理应用策略 [J]. 情报理论与实践, 2010(2): 4.

[5] 何溪. 基于 BIM 的全生命周期造价管理应用和示范 [J]. 建设监理, 2015(3): 4.

[6] 聂鹏威, 常海. 关于 BIM 技术与人工智能技术的融合应用的探究 [C]// 第九届全国 BIM 学术会议. 深圳市前海数字城市科技有限公司, 2023.

[7] 姚格梅, 温晓龙, 焦岩, 等. 数智建造技术在建筑工程中的应用 [C]// 中国土木工程学会总工程师工作委员会第三届总工论坛. 陕西建工集团股份有限公司, 2023.

[8] 胡瑛, 张锋. 基于全生命周期的装配式建筑中 BIM 的应用策略 [J]. 中外建筑, 2018(9): 3.

[9] 朱晓杰, 孙宏科. 基于全生命周期的装配式建筑中 BIM 的应用策略 [J]. 新财经, 2019(18): 3.

[10] 刘强, 陈丽萍. 基于项目全生命周期的风险管理过程研究 [J]. 工程管理学报, 2017, 31(6): 6.

硫铁矿制酸生产中的能源管理与节能措施

廖东芳

韶关市广宝化工有限公司, 广东 韶关 512127

DOI:10.61369/ETQM.2025080010

摘 要 : 本文围绕硫铁矿制酸工艺流程, 阐述各工段特性及能源管理相关内容。介绍了能源审计方法, 分析设备能效制约因素、能源梯级利用瓶颈, 还提及多种节能技术与措施, 如配风控制模型、余热回收系统等, 通过实证研究体现能源管理成效并展望未来技术应用方向。

关 键 词 : 硫铁矿制酸; 能源管理; 节能技术

Energy Management and Energy Saving Measures in Sulfur Iron Ore Acid Production

Liao Dongfang

Shaoguan Guangbao Chemical Co., Ltd. Shaoguan, Guangdong 512127

Abstract : This paper focuses on the sulfur-iron ore acid production process, detailing the characteristics of each stage and energy management-related content. It introduces energy audit methods, analyzes factors constraining equipment efficiency and bottlenecks in energy cascading utilization, and also mentions various energy-saving technologies and measures, such as air distribution control models and waste heat recovery systems. Through empirical research, it demonstrates the effectiveness of energy management and looks forward to future technological application directions.

Keywords : sulfur and iron ore acid production; energy management; energy saving technology

引言

硫铁矿制酸工艺流程涵盖焙烧、净化、转化和吸收等工段, 各工段紧密相连且相互影响。随着能源管理日益受到重视, 相关政策如《“十四五”节能减排综合工作方案》(2021年)强调了工业领域节能减排的重要性。在硫铁矿制酸生产中, 从各工段的反应特性到能源消耗特征, 从设备能效水平制约因素到能源梯级利用技术瓶颈, 都需要深入研究。同时, 通过能源审计方法、建立能源平衡表等手段, 以及开发各种节能技术和系统, 如氧浓度调控、多级旋风除尘-热管换热联合系统等, 对于实现能源管理与优化、提高能源利用效率、降低能耗至关重要, 这也是符合节能减排政策导向的必然要求。

一、硫铁矿制酸生产工艺与能源消耗特征

(一) 硫铁矿制酸工艺流程解析

硫铁矿制酸工艺流程主要包括焙烧、净化、转化和吸收四大工段。在焙烧工段, 硫精砂发生焙烧反应, 此过程涉及到复杂的热力学特性。从热力学角度看, 焙烧反应需要适宜的温度、压力等条件来保证反应的高效进行, 且该反应为放热反应, 释放大量的热^[1]。净化工段主要是去除焙烧过程中产生的杂质, 确保后续反应的顺利进行。转化工段是关键环节, 其具有放热特征, 二氧化硫在催化剂作用下转化为三氧化硫, 这一过程的放热情况对整个工艺的能量平衡有重要影响。吸收工段则是将三氧化硫吸收生成硫酸。整个工艺流程各工段紧密相连, 相互影响, 其能源消

耗特征与各工段的反应特性密切相关。

(二) 生产能耗结构量化分析

能源审计方法可用于统计硫铁矿制酸生产中电力、蒸汽、工艺水等介质的消耗数据。通过精确测量与记录各环节的能耗情况, 能获得详细且准确的数据信息。这些数据是进一步分析的基础。基于这些数据建立工序级能源平衡表, 此表能够清晰地揭示能耗在不同工序间的分布规律。例如, 在焙烧工序、转化工序、吸收工序等各个主要工序中, 能源的消耗比例和特点均能通过能源平衡表直观呈现。这有助于深入了解生产过程中能源的流向和利用效率, 为后续的节能措施制定提供关键依据, 从而实现对硫铁矿制酸生产工艺能源消耗的有效管理与优化^[2]。

二、硫铁矿制酸能源管理现存问题

（一）设备能效水平制约因素

硫铁矿制酸过程中，设备能效水平存在多方面制约因素。沸腾炉热效率偏低，可能是由于炉体结构设计不合理，导致热量散失过多，或者是燃烧过程中空气供给不充分，影响燃料的完全燃烧^[3]。转化器催化剂活性衰退会降低反应效率，这可能是因为催化剂长时间使用后中毒、积炭或烧结，使其活性位点减少，无法有效催化反应进行。余热锅炉换热效率下降，原因可能包括换热管结垢、腐蚀，影响热量传递，或者是锅炉内部流场分布不均，使得热量不能充分交换，从而降低了设备整体的能效水平。

（二）能源梯级利用技术瓶颈

硫铁矿制酸过程中，能源梯级利用面临诸多技术瓶颈。中低温位反应热回收效率不足，这是由于现有技术在热量捕捉和转换环节存在缺陷，无法充分利用这部分能量，导致能源浪费^[4]。蒸汽管网输送损耗偏高，一方面是管网的保温性能不佳，热量散失严重；另一方面，管网的设计可能不合理，增加了蒸汽输送的阻力，从而使能量在输送过程中大量损耗。冷凝水回用率低下也是一个突出问题，可能是由于冷凝水回收系统不完善，水质处理不达标，无法满足生产工艺的要求，使得大量冷凝水被排放，而不是被有效地回用，进一步降低了能源利用效率。

三、关键工序节能技术改造路径

（一）焙烧工序能效提升措施

1. 富氧焙烧工艺优化

通过研究氧浓度调控对硫铁矿燃烧效率的影响规律，可深入了解富氧焙烧工艺的关键因素。在此基础上，建立基于DCS系统的动态配风控制模型，能够实现对焙烧过程中风量的精准控制^[5]。合理的配风有助于提高硫铁矿与氧气的接触和反应效率，从而提升燃烧效果，减少能源浪费。同时，该模型可根据生产过程中的实际情况实时调整配风参数，确保焙烧工序在高效、稳定的状态下运行，进一步提高能效，为硫铁矿制酸生产中的能源管理提供有力支持。

2. 沸腾炉余热深度回收

开发多级旋风除尘-热管换热联合系统，实现600℃以上高温烟气余热的高效回收。该系统首先通过多级旋风除尘，有效去除烟气中的灰尘颗粒，减少对后续换热设备的污染和堵塞，提高换热效率^[6]。然后利用热管换热技术，其具有高效的热传导性能，能够快速将烟气中的热量传递给工作介质，实现热量的高效回收。通过这种联合系统，可以最大限度地利用沸腾炉产生的高温烟气余热，用于预热空气、生产蒸汽等，从而提高整个焙烧工序的能效，降低能源消耗，达到节能的目的。

（二）转化工序节能技术创新

1. 钒催化剂低温活性强化

载体改性技术是强化钒催化剂低温活性的关键。通过对载体进行改性，可以改变其物理和化学性质，从而提高催化剂在380

-420℃工况下的转化效率。这种技术能够使催化剂更好地适应低温环境，减少因温度不够而导致的反应不完全情况。当转化效率提高后，生产过程中外供热源的需求就会相应降低。这不仅有助于节约能源，还能降低生产成本，提高生产过程的经济性和环保性^[7]。

2. 热力系统集成优化

构建转化器-省煤器-蒸汽过热器热联合网络，可实现SO₃生成热的梯级利用。通过合理设计和优化该网络，使热量在不同设备间有效传递和利用。转化器中产生的热量首先传递至省煤器，用于预热进入系统的水，提高能源利用效率^[8]。接着，剩余热量进一步传递至蒸汽过热器，对蒸汽进行过热处理，满足生产过程中对高品质蒸汽的需求。这种热联合网络的构建，不仅充分利用了SO₃生成热，减少了能源浪费，还提高了整个转化工序的能源利用效率，对硫铁矿制酸生产中的节能具有重要意义。

四、能源管理系统化建设方案

（一）能源计量监测体系构建

1. 三级计量网络部署

构建三级计量网络需从多方面着手。设计包含32个关键测点的在线监测系统至关重要，其能实现工序、设备、产品维度的精准计量^[9]。该系统通过合理布局测点，全面覆盖生产流程中的关键环节。在工序层面，能够实时监测各道工序的能源消耗情况，为优化工序提供数据支持。对于设备而言，可精确计量单个设备的能耗，有助于及时发现设备的能源利用问题。从产品维度，能明确不同产品生产过程中的能源投入，为成本核算和节能改进提供依据。通过这样的三级计量网络部署，可使能源计量监测更加科学、准确，为硫铁矿制酸生产的能源管理奠定坚实基础。

2. 能耗数据建模分析

运用BP神经网络建立单位产品综合能耗预测模型，以实现硫铁矿制酸生产能耗的有效预测和分析。该模型能够学习能耗数据中的复杂模式和规律，对不同工况下的能耗进行准确预测。通过将实际能耗数据与预测值进行对比，可以及时识别异常能耗波动。这种异常波动可能是由于生产设备故障、工艺参数不合理或其他因素导致的。及时发现并解决这些问题，有助于优化生产过程，提高能源利用效率，降低生产成本。同时，该模型还可以为能源管理决策提供科学依据，帮助企业制定合理的节能措施和生产计划，实现可持续发展目标^[10]。

（二）智能化能管平台开发

1. 能源KPI动态监控

开发包含12项关键能效指标的数字化看板系统，实现实时能效对标管理。通过对硫铁矿制酸生产过程的详细分析，确定这12项关键能效指标，涵盖能源输入、转换和利用的各个环节。利用先进的传感器技术和数据采集系统，实时获取各项指标的数据。将这些数据传输至数字化看板系统，进行集中展示和分析。系统能够自动对比实际能效与预设的标准能效，及时发现能效异常情况。同时，通过数据分析挖掘能效提升的潜在空间，为节能措施

的制定和优化提供科学依据,从而有效提高硫铁矿制酸生产的能源利用效率,降低能源消耗和生产成本。

2.智能诊断与决策支持

集成专家系统与模糊控制算法,实现对硫铁矿制酸生产过程的智能诊断与决策支持。专家系统汇聚行业知识和经验,对生产数据进行分析,提供工艺参数优化建议。例如,根据原料成分和反应条件,精准调整温度、压力等参数,提高生产效率和能源利用率。同时,模糊控制算法可处理复杂的非线性系统,增强系统的适应性和稳定性。通过对设备运行数据的实时监测,结合算法分析,能够及时发出设备维护预警,预防设备故障导致的能源浪费和生产中断,保障生产过程的高效、稳定和节能。

(三)全员节能机制创新实践

1.能源管理绩效考核

建立包含5个维度16项指标的考核体系,将节能目标分解至班组层级。从能源利用效率、节能措施执行、能源消耗控制、设备运行节能、员工节能意识等维度进行综合考量。例如,能源利用效率维度可包括能源转化率、余热回收率等指标;节能措施执行维度涵盖节能设备使用率、工艺优化执行情况等;能源消耗控制维度关注单位产品能耗、能源浪费率等;设备运行节能维度涉及设备能效比、设备待机能耗等;员工节能意识维度可通过员工节能建议数量、节能培训参与度等来衡量。通过这样的考核体系,激励各班组积极参与节能工作,实现能源管理的精细化和高效化。

2.持续改进文化建设

在硫铁矿制酸生产中,通过QC小组活动推进合理化建议征集,形成PDCA循环改进机制,对于能源管理与节能至关重要。QC小组活动鼓励员工积极参与,从生产的各个环节发现问题并提出改进建议。这些建议经评估后实施,进入计划(P)阶段。在实施(D)过程中,密切关注效果,收集相关数据。然后进行检查(C),分析实施结果与预期目标的差异。根据检查结果,进入处理(A)阶段,对有效的措施进行标准化,对不足的地方进行调整和改进,再次进入下一个PDCA循环。如此循环往复,不断优化生产过程中的能源利用,实现节能目标,同时也在企业内部形成了持续改进的文化氛围,提高了全员的节能意识和参与度。

五、总结

硫铁矿制酸生产中的能源管理至关重要。某年产80万吨硫酸企业通过实证研究,综合运用工艺优化、热力系统升级以及智能能管系统,取得显著成效。单位产品综合能耗大幅降低18.7%,年节约标准煤达2.3万吨。这不仅体现了能源管理措施的有效性,也为行业提供了可借鉴的范例。同时,展望未来,低温余热发电、氢能耦合等前沿技术的应用应成为重点关注方向。这些技术有望进一步提升能源利用效率,减少碳排放,助力硫铁矿制酸行业朝着碳中和目标稳步迈进,实现可持续发展。

参考文献

- [1]李旺旺.硫铁矿制酸过程的废稀酸中砷及重金属元素去除及回用研究[D].武汉工程大学,2014.
- [2]常硕.基于能源管理的节能逆向设计与优化[D].河北工业大学,2013.
- [3]夏璐.智能家居集成系统及其能源管理策略研究[D].西南交通大学,2017.
- [4]张羽翔.园区办公建筑能源管理与节能控制[D].广东工业大学,2014.
- [5]梁晓英,袁磊.合同能源管理在中央空调节能改造中的应用分析[J].科技创新与应用,2021,11(27):191-193.
- [6]刘雄文,张岭,汤凯乐,等.硫铁矿制酸余热锅炉仿真模拟研究[J].世界有色金属,2023,(12):156-158.
- [7]潘春迪.硫铁矿制酸产业的困境与对策探索[J].产业与科技论坛,2016,15(15):14-15.
- [8]谈河君,宋冬根,胡继光.硫铁矿制酸中的余热回收[J].有色冶金设计与研究,2009,30(3):22-23,37.
- [9]张承玉.硫铁矿制酸原料掺配的经济效益分析[J].磷肥与复肥,2013,28(06):36-37+50.
- [10]张仕杰.探析大型建筑的能源管理与节能策略[J].工程建设与设计,2019(12):2.

建筑工程管理视角下房地产项目的技术与风险管理

尹晋, 程莉

青岛亿联龙胜投资有限公司, 辽宁 沈阳 110168

DOI:10.61369/ETQM.2025080013

摘要： 房地产项目的技术优化与风险防控协同机制成为行业可持续发展的核心。数字化工具如 BIM、物联网提升风险预测精度，而风险管理通过成本约束和事件反馈促进技术迭代，形成双向增强闭环。2025 年政府工作报告强调“稳市场”与“建模式”，推动 AI、区块链等智能化技术与风险管理深度融合，并推广代建制和 ESG 治理体系。案例显示，这种协同可降低质量事故率超 35%，缩短工期 12%。然而，其普适性受区域政策差异和数据获取限制。未来，技术融合将使风险管理从“被动响应”转向“实时干预”，提供理论支撑与实践路径。

关键词： 技术与风险管理协同；房地产项目；ESG 治理

Technology and Risk Management of Real Estate Projects from the Perspective of Construction Project Management

Yin Jin, Cheng Li

Qingdao Yilian Longsheng Investment Co., Ltd. Shenyang, Liaoning 110168

Abstract： The synergistic mechanism between technical optimization and risk prevention in real estate projects has become a core focus for the sustainable development of the industry. Digital tools such as BIM and IoT significantly enhance the accuracy of risk prediction, while risk management drives technical iteration through cost constraints and event feedback, forming a bidirectional enhancement loop. The 2025 government work report emphasizes "stabilizing the market" and "building a new model," promoting the deep integration of intelligent technologies like AI and blockchain with risk management, alongside the promotion of agency construction systems and ESG governance frameworks. Case studies show that this synergy reduces quality accident rates by over 35% and shortens project durations by 12%. However, its universality is limited by regional policy differences and data accessibility. In the future, technological integration will shift risk management from "passive response" to "real-time intervention," providing theoretical support and practical pathways.

Keywords： technical and risk management synergy; real estate projects; ESG governance

引言

房地产作为国民经济的支柱，对地方财政、居民消费及产业链安全至关重要。自 2024 年起，市场供需调整与风险累积促使政策转向“稳预期”与“防风险”。2025 年政府工作报告强调“推动房地产止跌回稳”，标志着政策进入“稳市场”与“建模式”的新阶段。需求端通过下调首付比例和优化房贷利率释放住房需求；供给端则通过土地供应调控和存量商品房收购增加保障性住房，并辅以专项债支持土地收储和保交楼，形成三端联动。然而，房价下跌导致家庭资产缩水及建筑业增速放缓（2024 年增 3.1%），凸显了复杂的风险传导。2025 年政策创新聚焦智能化工具应用与制度优化，如“白名单”融资机制扩容至 4 万亿元及地方政府专项债支持存量土地回购，为行业提供长效稳定机制。技术与风险管理协同成为破解困局的关键，并为新模式提供理论支撑与实践参考。

一、房地产项目技术管理的核心要素

（一）设计阶段的技术管理

设计阶段的技术管理是房地产项目成功的基础，其核心在于设计方案的可行性分析与技术标准的合规性审查。设计方案的可行性分析需结合项目定位、成本约束及环境条件，通过 BIM 技术

构建三维模型模拟建筑性能，优化空间布局与结构设计，减少后期施工冲突。技术标准与规范的合规性审查则贯穿设计全流程，需确保设计方案符合国家建筑规范、消防要求及地方环保标准，规避因设计缺陷引发的法律风险与返工成本^[1]。例如，在高层建筑设计中，需严格审核抗震等级、荷载分布等参数，并通过数字化审查工具快速识别规范偏差，提升设计效率与可靠性。

（二）施工阶段的技术管理

施工阶段的技术管理聚焦于工艺控制与技术创新，强调动态化质量管理与新技术落地的适应性。施工工艺的精细化控制需依托实时监测系统，对混凝土浇筑、钢结构焊接等关键工序进行数据采集与偏差修正，确保工程质量符合设计要求。绿色建筑技术与智能建造的引入虽能提升能效与施工效率，但面临技术集成复杂、工人技能不足等挑战。例如，装配式建筑需协调预制构件生产与现场安装的精度匹配，而智能建造设备（如无人施工机械）的应用需重构传统施工流程，并建立配套的技术培训体系，以平衡创新效益与实施风险^[2]。

二、房地产项目工程风险管理的体系构建

（一）风险识别与评估

房地产项目工程风险管理需系统识别和科学评估风险源，包括市场、技术、环境和法律风险。采用量化工具如层次分析法（AHP）构建多层次指标体系，对风险优先级排序；蒙特卡洛模拟通过概率分布模型预测工期延误或成本超支的影响。这些工具减少主观判断偏差，提供数据支持决策。例如，在复杂地质项目中，模拟土方开挖风险概率以优化施工方案与资源配置，确保更精准的风险管理和更有效的决策制定。这种方法提升了风险管理的客观性和准确性^[3]。

（二）风险应对策略

风险应对策略需基于风险等级与项目特性差异化设计。风险规避强调前置性防控，例如通过合同条款明确责任边界、设置履约保证金，或筛选高信用供应商以降低合作风险。风险转移借助外部机制分散责任，如购买工程一切险覆盖意外损失，引入第三方担保机构承担履约风险。风险减轻与自留则聚焦可控风险的内部消化，例如建立涵盖质量事故、突发天气的应急预案，通过沙盘推演提升响应效率；同时设立风险储备金应对不可预见成本波动，如在材料价格剧烈波动时，通过资金缓冲保障项目现金流稳定^[4]。三类策略需动态协同，形成“预防-转移-应急”的全链条风险管理闭环。

三、技术与风险管理的协同机制

（一）技术管理与风险控制的互动关系

1. 技术管理对风险预测与控制的支持作用

技术管理通过数字化工具与标准化流程为风险控制提供底层支撑。BIM技术构建的三维模型可模拟施工冲突与结构缺陷，结合AI算法预测潜在质量风险，例如在深基坑工程中提前识别支护结构失稳概率。标准化技术流程通过减少人为操作偏差降低施工安全风险，如基于自动化监测系统实时反馈混凝土养护数据，规避强度不达标隐患^[5]。技术管理的精准性与预见性使风险管控从被动响应转向主动干预，例如利用无人机巡检识别高空作业隐患，动态调整施工计划。

2. 风险管理对技术方案优化的反馈机制

风险管理通过风险成本评估与事件复盘驱动技术方案迭代。

技术选型需权衡风险成本，例如在软土地基处理中，高压旋喷桩技术虽成本较高，但可显著降低沉降风险，优于传统换填法。风险事件则为技术改进提供实证依据，如某项目因装配式构件连接缺陷引发延期后，引入激光扫描技术提升安装精度，并修订技术规范。风险管理通过量化分析揭示技术短板，推动技术升级与创新方向聚焦，形成“风险识别-技术优化-风险再评估”的闭环反馈^[6]。

（二）协同机制的实施路径

1. 组织层面的协同策略

跨部门协作架构是协同机制的组织基础，需整合工程、成本与风控部门的职能边界。例如，设立联合决策小组，在技术方案评审中同步评估风险等级，避免部门割裂导致的管控盲区^[7]。全生命周期管理流程强调从设计到运维的连续性，例如在设计阶段嵌入风控参数（如抗震冗余度），施工阶段同步更新风险数据库，运维阶段利用监测数据反哺技术标准修订。某标杆房企通过“设计-施工-运维”一体化平台，实现风险数据跨阶段共享，缩短决策链30%。

2. 技术层面的协同工具

物联网技术支撑的实时风险监控系统是协同落地的技术载体，例如通过传感器网络采集施工振动、温湿度数据，结合边缘计算即时预警结构安全隐患。风险-技术双维度决策支持平台整合BIM模型、风险数据库与成本数据，例如某房企平台通过蒙特卡洛模拟生成不同技术方案的风险-成本曲线，辅助管理者优选平衡点。案例显示，该平台使某综合体项目技术变更率降低22%，风险储备金使用效率提升17%，验证了技术工具对协同效能的关键作用。

四、实践案例与经验启示

（一）典型案例分析

1. 国内某高层住宅项目的技术风险管控实践

国内某超高层住宅项目通过整合BIM技术与物联网监测系统，实现技术管理与风险控制的协同。项目设计阶段利用BIM模型优化核心筒结构布局，规避管线碰撞风险；施工阶段部署传感器实时监测塔吊倾斜度与混凝土强度，结合AI算法预测沉降偏差，动态调整施工方案。针对深基坑支护风险，引入风险储备金与应急预案，将潜在坍塌事故的响应时间缩短至2小时内。结果表明，技术-风险协同机制使项目工期缩短12%，质量事故率降低35%，验证了技术工具与风险预案联动的有效性。

2. 国际商业综合体项目的风险管理经验借鉴

新加坡某商业综合体项目通过智能建造平台与风险转移策略提升管理效能。项目采用LOD400级BIM模型实现多专业协同设计，减少施工变更风险；施工阶段应用无人机与5G网络构建实时风险监控系統，识别高空坠物与焊接缺陷隐患^[8]。针对东南亚多雨气候风险，通过投保工程延误险与引入国际第三方监理，转移30%以上的环境与合规风险。项目交付后运维阶段，基于区块链技术记录设备维护数据，反哺未来项目的技术选型决策，形成跨

周期风险管理闭环，最终实现成本节约 18% 与零重大安全事故。

（二）成功经验总结

1. 技术管理标准化与风险预警系统的结合。

技术管理标准化通过固化流程降低操作风险，例如将装配式构件安装误差阈值嵌入施工规范，同步联动风险预警系统阈值设定。某房企建立的技术标准库整合了 200 余项风险指标（如混凝土龄期强度曲线），当监测数据偏离阈值时，系统自动触发分级预警并推送应对方案^[9]。标准化与预警的耦合使风险响应效率提升 40%，尤其在高周转项目中避免因人为经验差异导致的管控失效。

2. 动态风险管理与实时数据监测的联动机制。

动态风险管理依赖实时数据驱动的决策优化。例如，某项目通过物联网采集钢材价格波动、施工进度与天气数据，利用蒙特卡洛模拟动态更新风险概率，当材料涨价风险超过 15% 时，自动启动备选供应商切换预案。实时监测与动态评估的联动机制，使风险管理从静态预案转向自适应调整，某商业地产项目的风险储备金利用率因此提高 28%，且应急成本占比下降至总成本的 1.2% 以下，凸显数据驱动决策的实践价值^[10]。

（三）启示与建议

1. 完善技术管理与风险管理的制度体系。

技术管理与风险管理的制度体系应以标准化和动态适应性为核心，通过顶层设计实现深度融合。技术管理规范需设定风险阈值参数，如将 BIM 审查与风险数据库关联，确保设计满足技术和风险要求。风险管理应嵌入技术管理全周期，例如在施工许可中增加风险预案审查，防止管控漏洞。此外，建立动态更新机制，

结合 AI、区块链等新技术及风险变化，定期修订标准与指标。某地《智慧工地技术规范》将物联网数据与安全风险等级挂钩，通过这种制度框架提升管理效能，使项目事故率降低 25%。

2. 强化人才培养与跨领域协作能力。

复合型人才与协作机制对技术与风险管理协同至关重要。工程教育需增设风险量化分析和智能建造等交叉课程，培养兼具技术和风控能力的管理者。通过设立“技术-风控联合办公室”，可统筹方案评审与风险评估，减少沟通成本。某房企实行“数字化工程师-风控专家”双岗制，经联合培训与考核激励，提升技术变更决策效率 40%。产学研合作加速知识转化，如与高校共建风险模拟实验室，针对装配式建筑、绿色技术等开展预研，提供可复用的协作范式，推动行业进步。

五、总结

技术与风险管理的协同对房地产项目成功至关重要。数字化工具如 BIM、物联网提升风险预测精度，而成本约束与事件反馈促进技术优化，形成双向增强闭环。案例显示，此机制能降低质量事故率超 35%，缩短工期 12%。然而，研究多集中于高线城市和东南亚，受地方政策和市场环境的影响，结论普适性需验证；数据依赖企业内部资料，限制了风险模型的泛化能力。未来，智能化技术如生成式 AI、数字孪生和区块链将深化协同效能，从“事后处置”转向“实时干预”，提供更高效的决策支持，优化全生命周期风险追踪和技术方案。

参考文献

[1] 金科. 房地产建筑工程项目风险管理及其应对策略 [J]. 2023(9): 87-89.
[2] 刘玉龙. 房地产建筑工程项目风险管理与决策模型的研究 [J]. 工程设计与施工, 2023, 5(12): 36-38.
[3] 马天宇. G 房地产开发项目市政配套工程风险管理研究 [D]. 山东建筑大学, 2023.
[4] 蒙德森. 基于风险管理的房地产建筑工程施工安全控制研究 [J]. 工程设计与施工, 2023, 5(12): 131-133.
[5] 唐婷婷. 建筑工程管理在房地产项目建设中的运用解析 [J]. 2021(3): 126-126.
[6] 刘晓辉. 建筑工程项目管理中关于合同、索赔和风险管理 [J]. 四川水泥, 2020, No.282(02): 218-218.
[7] 朱正齐. 建筑工程施工项目安全风险管控 [J]. 中国房地产业, 2020, 000(029): 161.
[8] 黄丁钰. 建筑工程管理在房地产项目建设中应用的探究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2021(10): 3.
[9] 张卉. 建筑工程经济管理的风险及控制 [J]. 住宅与房地产, 2021(5): 46-47.
[10] 刘英东. 房地产建设工程项目成本控制研究——基于房地产基金的运作机制和风险管控视角 [J]. 项目管理技术, 2020, 18(9): 5.

关于某建筑物饰面砖脱落的技术分析及管理措施

仇文龙

佛山建发城市发展有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ETQM.2025080014

摘 要 : 近些年来多个住宅楼盘的建筑物出现高空饰面砖脱落情况, 这种事件发生频率随着住宅的年限越来越高, 发生次数越来越多, 不但影响小区的住宅环境, 更加导致居住的安全受到高空饰面砖的威胁, 从开发商的品质品牌到物业的管理, 再到业主的居住安全切身利益等, 饰面砖的施工质量问题越来越受到重视。目前房地产行业已经普遍使用外墙涂料来替代饰面砖, 从美观上和施工上都是一大变革, 极大的提升了楼盘的美观, 更好的解决了以上诸多困扰。过去房地产行业多年以来存在的大量饰面砖外墙建筑的安全问题却是无法回避的, 也是经过时间越长危险系数越来越大且越普遍的安全隐患。以下以某楼盘出现的饰面砖脱落情况的技术分析与处理办法来阐述。

关 键 词 : 外墙饰面砖脱落; 建筑维护; 安全管理; 红外热成像检测; 施工质量控制

Technical Analysis and Management Measures for the Detachment of Exterior Facing Tiles in a Residential Building

Qiu Wenlong

Foshan C&D Urban Development Co., Ltd. Foshan, Guangdong 528000

Abstract : In recent years, numerous residential buildings have experienced frequent detachment of exterior facing tiles at elevated heights. This issue has become increasingly common as buildings age, posing significant risks to residential safety, environmental aesthetics, and property management. While the construction industry has widely adopted exterior coatings as a replacement for facing tiles to enhance aesthetics and safety, existing buildings with tile-clad facades still face unavoidable long-term safety hazards. This study investigates a case of tile detachment in a residential complex, analyzing its technical causes and proposing repair strategies. Key factors contributing to detachment include thermal expansion and contraction stresses, poor adhesion of tile adhesives, and substandard construction practices. The paper outlines a comprehensive repair methodology involving safety protocols, material selection, and infrared thermography for defect detection. The proposed measures emphasize quality control, worker safety, and minimal disruption to residents, offering actionable insights for addressing similar issues in aging buildings.

Keywords : exterior tile detachment; building maintenance; safety management; infrared thermography; construction quality control

一、根据工程概况编制方案

某小区工程两层地下室, 局部一层地下室, 地上3栋39层超高层建筑、2栋45层建筑物, 5栋45层建筑物, 并已交付使用。基础采用旋挖灌注桩, 塔楼结构形式采用剪力墙、商铺裙楼为框架结构。根据小区外墙砖空鼓、脱落现场, 结合以往出现这种事件的经验参考, 针对本项目维修的施工重点和难点, 根据保质量、保工期、保安全的原则, 经过与专家、施工单位、设计单位等多次研究讨论和比较, 最终决定在做好安全防护措施后进行外墙砖专项维修。

二、技术原因分析

建筑物原设计做法为: 墙体; 钢丝网满挂; 15厚1: 3抗裂水

泥砂浆打底(内掺聚丙烯抗裂纤维); 2道各5厚聚合物水泥防水砂浆抹灰罩面; 面砖, 专用勾缝剂勾缝。项目工程在交付近2年后, 出现外墙砖脱落的情况, 以在水泥批荡与饰面砖粘结剂层面发生为主。

根据实际情况判断脱落原因有以下几方面:

1. 外墙面砖经历了两个冷暖周期, 向阳面的温差大, 况且瓷砖胶粘结力低于水泥砂浆, 热胀冷缩造成批荡层与粘结剂层分离, 造成脱落^[1]。
2. 局部因基层空鼓, 造成批荡层与粘结剂层分离, 造成脱落。抹灰空鼓, 或防水层施工时, 找平层有起砂、开裂、浮浆现象未进行处理, 就会导致防水涂膜与基层分层^[2]。
3. 少部分脱落为个别工人在操作的时候未按规定章程作业、粘贴剂过薄。

三、施工准备及安全管理要求

(一) 施工准备

1. 场地准备

(1) 通知业主及周边车辆停放安全位置,布置施工警戒线及夜光灯线,提示切勿靠近。

(2) 施工时通过物业公司通知业主关好门窗。为预防面砖脱落出现坠物伤人、造成不必要的损失,建筑物出入口上方搭好防护。

(3) 按照规范搭设防护通道:A、各楼栋出入口,B、各楼栋二层露台范围,C、小区内园林行人通道。

2. 技术及人员准备

现场已不具备搭设脚手架的条件,采用“蜘蛛人”排查。

“蜘蛛人”施工是属于高空作业,在选择施工人员时,应按要求挑选出技术经验丰富,身体素质良好、不喝酒等不良嗜好人员,在排查前必须做好安全准备及安全技术交底,并经专职安全员复查、批准后,才能进行排查作业。遇4级及以上的大风以及暴雨、打雷、大雾等恶劣天气立即停止作业^[3]。

3. 主要施工机具、设备准备

主要施工机具、设备如下:

使用符合规范检验合格的吊绳及副绳、吊板、钢丝绳、U型蟹扣(钢制)、自锁器、安全带、护目镜、工具包、安全兜网、安全帽、防滑胶鞋、对讲机等。

(二) 检查方法

“蜘蛛人”使用的坐式高空吊板吊绳及保护绳固定点必须以房顶面围栏立柱(框架柱)为固定点,悬挂好吊绳,工人在工作时必须采用一根安全主绳,一根副安全绳,绳子要固定3个点一位,至少栓3圈。所有绳子经过菱角的地方用橡胶垫底,以防摩擦吊绳破损^[3]。

以各栋建筑物的四个立面为子单位进行全覆盖无遗漏排查。从上往下逐层检查,检查宽度约2米,顺时针方向进行。

将空鼓、松动的面砖使用錾子或手锤直接拆除,将脱落的碎砖放置在随身的收纳兜网中、或堆放在空置的住宅内,严禁高空抛洒。

存在质量问题的外墙部位处理完成后,“蜘蛛人”利用对讲机告知普工班长,告知外墙存在问题的栋号、立面向、层数、大概面积或面砖块数,班长如实记录,为随后的修补工作提供材料进场及施工进度计划依据。

另外,在小区公告处公告排查时间:周一至周五8:00~12:00及14:00~18:00,其余时间严禁排查,避开休息时间,将与业主的矛盾尽量降低。

(三) 组织措施

选取拥有相应资格证并经培训合格上岗的人员建立本工程管理组织架构。

1. 组长职责

协调各方关系,督促本维修工程成员在职责范围内做好安全工作,不违章指挥,编制项目安全技术措施计划并组织实施。

2. 副组长职责

(1) 制定维修计划,与各方人员协调,布置现场生产工作,检查、总结安全生产工作;

(2) 对本维修工程人员进行安全生产思想和技术教育。

3. 专职安全员职责

(1) 每天关注天气预报,发现异常即刻向组长、副组长汇报;

(2) 需每天对维修作业处进行细致的安全检查,以确保掌握安全维修进度与情况,待查出安全隐患时,需及时提出整修意见以及措施,制止违章指挥和违章作业,若遇到严重险情,可有权暂停生产,并需汇报领导处理。

4. 班长职责

(1) 做好每日工作任务布置安排;

(2) 记录外墙存在问题的栋号、立面向、层数、大概面积或面砖块数。

(四) 关于安全措施

1. 负荷试验:施工前,吊绳必须经过试验,日常检查吊绳的安全性能,要确保吊绳安全系数在安全操作的范围,使用时需严格把关施工荷载。

2. 身体状态检查:施工前,工人需主动报告身体不适(如头疼、感冒等),由安全员评估后方可上岗;禁酒规定:上岗前24小时及施工结束后均禁止饮酒,违者立即停工。

3. 安全装备检查:安全监督员需逐一检查安全绳系挂牢固性,确保无磨损、断裂风险;双重确认:安全绳与操作绳必须分开生根并扎紧系死,沿口处加垫软物(如橡胶垫)以防磨损。

4. 作业纪律:施工人员禁止接打电话,其他人员不得干扰作业;工具需放入专用工具包,严禁随意抛掷,防止高空坠物。

5. 同步防护:安全兜网需随施工人员同步升降,并牢固系挂于稳定锚点。

6. 高温时段管理:避开正午高温期(如11:00~15:00),合理安排休息时间,确保人员精力充沛。

7. 操作绳与安全绳分离:操作绳、安全绳需独立生根,绳结需打死结并加装防滑锁扣。绳体下端必须接触地面,放绳人需系临时安全绳。磨损防护:沿口处使用软质材料(如帆布套)包裹绳索,定期检查磨损情况。

8. 个人防护装备穿戴:穿戴顺序:工作服→安全帽→安全带→保险锁(安全绳)→卸扣(操作绳)。坐板固定:坐板扣子需双重锁紧,经安全员确认后方可作业。

9. 下绳操作:由施工负责人统一指挥,楼上监护人员实时监控绳索状态,提供必要协助。异常响应:发现绳体松动或人员异常时,立即启动应急停止流程。

10. 辅助工具管理:辅助用具(如扳手、挂钩)需用防坠绳固定,工具包悬挂于腰部。禁止行为:严禁嬉笑打闹及携带无关物品(如手机、钥匙串)进入作业区。

11. 排查时楼下安排专人监护,疏导行人及住户,确保安全。楼上和地面监护人员需坚守岗位,履行职责,观察操作绳、安全绳状态,发现问题及时报告并处理。

12.楼上监护人员不得在楼顶边沿随意走动，需工作时先系好安全绳。地面监护人员不得在施工现场看书看报，要随时制止行人进入危险地段及拉绳、甩绳行为。

13.操作绳、安全绳移位或上下时，监护人员和辅助工人要协调安置，不用时将绳子捆紧。

14.施工员落地前要查看地面、墙壁设施及操作绳、安全绳定位和行人流量，待地面监护人员处理调整并同意后，缓慢下降至地面。

15.高空作业人员和现场监护人员必须服从施工负责人的统一指挥和统一管理。

四、饰面砖修复材料及工艺

现场已不具备搭设脚手架的条件，大部分屋面也不具备吊篮支架搭设条件，采用“蜘蛛人”修复。

修复原则：外墙需要去除一部分外墙砖，然后做重新铺贴外墙砖处理。外墙砖规格按原有外墙砖的规格贴面；贴外墙砖的要求与原外墙的原色和工艺一样，瓷砖粘贴勾缝均采用原有的勾缝工艺处理，基层满刮3mm厚相同材料^[4]。

(一)材料准备

根据检查记录表计算出各材料相应用量，安排材料进场，原材料进场要有出厂证明和试验资料等相关质量文件。

水泥：水泥采用32.5、42.5级（胶粘剂）普通硅酸盐水泥，水泥使用前在施工现场按规定随机抽样，送实验室检验，强度和安定性等指标必须合格。水泥存放时间严禁超过3个月。不得使用过期水泥^[2]。

细沙：含泥量必须小于3%，并不得含有有机杂质。细度模数必须符合施工规范要求。

胶粘剂：胶粘剂：专为瓷砖铺贴与填缝设计，由优质水泥、精细骨料、颜料及特殊添加剂精心配制而成。其核心优势在于简化施工流程：粘贴与填缝可同步完成，操作简便，从而有效缩短施工周期。胶粘剂具备以下特性：

- 1.适用性：特别适合大面积作业，施工效率高。
- 2.经济性：粘贴层厚度薄，减少材料用量，同时满足填缝需求，降低整体用料成本。
- 3.功能性：具有良好的保水性能，确保施工过程中水分不易流失，提升施工效果。
- 4.灵活性：瓷砖粘贴后，允许在一定时间内对错位瓷砖进行调整，方便修正。
- 5.粘结性能：粘结力更强，提供更牢固持久的粘结效果，确保瓷砖粘贴的安全性。
- 6.耐久性：不易产生纹裂，显著提升抗渗性能，有效防止水分渗透，延长瓷砖使用寿命。
- 7.美观性：提供多种色彩选择，满足不同装饰需求。
- 8.耐候性：具备优良的抗老化性能，能长期抵御紫外线、风雨等自然环境因素的侵蚀，确保瓷砖外观持久如新。

胶粘剂满足 <<陶瓷墙地砖填缝剂>>JC/T1004-2006、<<

陶瓷墙地砖胶粘剂>>JC/T547-2005的有关规定^[5]。

面砖：采用原厂生产的同色同规格面砖，面砖的质量要求可从外观与性能两方面考量：首先，表面需具备光洁平整的质感，边角应方正无缺，厚度保持均匀一致，且整体质地坚固耐用；其次，面砖的品种、规格、图案及颜色需统一协调，同一批次产品不应出现明显差异。特别注意，面砖不得存在缺棱掉角、裂纹断裂等影响使用功能与美观的缺陷，确保铺贴后整体效果整齐牢固。吸水率、抗冻性等各检测项目、技术指标、检测结果均满足<<陶瓷砖>>GB/T4100-2006的有关规定。

(二)施工工艺

1.清理至坚实部位

清理墙砖脱落范围基面，凿除松散水泥砂浆层，四周宜凿成方块，应先用小型手提机械切割后进行凿除，防止松散砂浆层由于打凿面积扩大，边缘应凿成斜坡形状，采用钢丝刷打磨处理浮砂，清理至坚实部位，并用清水冲洗干净。

2.喷水润湿基层

(1)基层处理（先进行喷水润湿需要处理的范围）

(2)基层凹先刮界面处理剂一道，然后用处用1：2.5水泥砂浆做补平处理，若补平厚度较大时，则采用分层补法处理。若垂直度或厚度有偏差，且偏差超过30mm时，应该采用钉钢丝网等相关技术补救。

(3)挂网抹底灰：对墙体进行满挂热镀锌1mm@20*20钢丝网，射钉间距500mm，然后刷15厚1：3抗裂水泥砂浆打底（内掺聚丙烯抗裂纤维）。

3.聚合物砂浆施工及养护

施工过程中需要施工2道各5厚刮聚合物砂浆一层，分阶段进行，终凝后浇水养护24小时。

4.镶贴面砖

(1)施工前，需用刷子二次往墙面上补水，需达到干干（外干内湿）条件方可施工。尤其是炎热或大风天气，必须湿水处理。

(2)在需修补墙体基层抹一层4厚品牌瓷砖粘接剂粘结层，再在面砖背面涂一层瓷砖专用粘接剂，厚度参考原瓷砖面层尽量与原面层凹凸一致，需保证每块砖都附上95%以上的水粘接剂为准。快速的把砖贴上，用滚轮来回压3~4次或用胶板逐一拍打，贴上后用灰铲柄轻轻敲打，调整平面和垂直度，即去纸皮。

(3)面砖背面所在的粘合剂要铺满、全粘，若是点粘则不合格。粘贴厚度必须在5mm以上

(4)粘贴后可在20分钟内移动、校正面砖。

(5)转角采用海棠角对碰，之后用水泥粘贴剂抹平接口，或采用配套转角砖

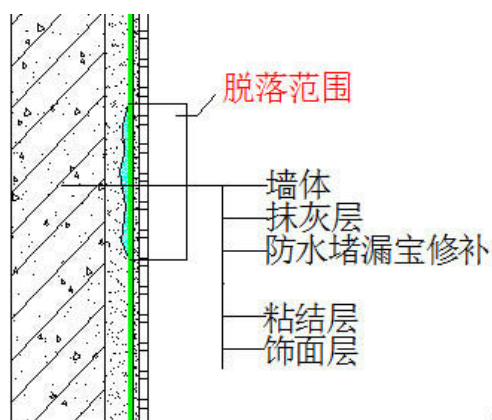
(6)面砖表面的有粘附的粘合剂，要随时清理，保持干净，以免干结后污染砖面。

(7)风雨天要等雨天过后墙表面干后方可施工，施工环境的温度必须在5摄氏度以上。

5.勾缝与擦缝

填缝剂在储运过程中应严格做好防雨防潮措施，避免包装破

损或产品受潮影响使用性能。施工时需选择晴朗干燥天气，禁止在降雨前或降雨过程中进行作业，以防面砖粘合剂中的游离钙遇水析出，在墙面形成白色泛碱痕迹，影响装饰面的整洁美观。此外，新施工的墙面及砖缝在粘结材料固化前，严禁采用蘸水冲刷砖缝或直接用水冲洗墙面的操作，防止水分渗入粘结层破坏固化结构，确保填缝效果的耐久性和装饰面的完整性。填缝时必须沿缝仔细填充并刮平，不得满批。为避免严重影响工程质量，严禁在填缝剂中添加任何其他材料，所以强调必须使用专用的填缝剂和粘合剂。



6. 完工场清

每次施工随时清理遗留的瓷砖、砂浆等建筑垃圾，做到施工完毕，材料堆放有序，争取做到对住户的影响降到最低。

五、检查修补

面砖铺贴完成后，等待砂浆收干，重新安排“蜘蛛人”对面砖逐一进行敲击检查，若有空鼓或起鼓，需要马上处理，排除隐患。同步建立维修组织机构进行管理，职责同施工组织一致。

(一) 质量标准

根据外墙施工规范要求，对保证项目及基本项目进行宣贯，要求使用的材料及施工质量，必须达到合格标准。

1. 保证项目

(1) 设计与标准符合性：饰面砖的品种、规格、颜色、图案需与设计要求一致，同时满足现行标准规定。

(2) 镶贴牢固性：饰面砖镶贴要牢固，无歪斜、缺棱、掉角、裂缝、脱落和缺失等缺陷，确保其在长期使用中的稳定性和安全性。

(3) 非整砖切割规范：非整砖切割应统一，规格一致，以保证整体装饰效果的协调性和美观性。

2. 基本项目

(1) 表面质量：表面应平整、洁净，颜色一致，无变色、污痕，无显著的光泽受损处，同时无空鼓现象，以确保墙面的美观和质量。

(2) 接缝质量：接缝填嵌需连续、密实、平直、光滑，宽窄一致，颜色一致，阴阳角处压向正确，非整砖的使用部位适宜，以提高墙面的整体性和耐久性。

(3) 与周边部件的协调性：外墙砖与顶棚、门窗框之间宽度一致，无大小头现象，保证建筑外观的整齐和协调。

(4) 细节处理：外墙鹰嘴和滴水线应明显，收口整齐平直，外墙孔洞周边收口平直，这些细节处理有助于防止雨水渗透和提高建筑的美观度。

六、饰面砖施工过程管理要求

1. 施工现场管理必须加强，以免不合格产品的出现。在贴砖之前，需要对外架进行彻底检查，安全绳绑扎牢固，该立面住户窗户已关闭并做好覆盖，楼下已做好警戒。

2. 严格筛选劳务分包队伍，从公司合格供方名单中选择，审查其资质并考察过往工程，确保合格队伍进场。

3. 合格劳务分包方进场后，立即对工人进行三级安全教育和技能培训，提升操作技能和专业素质。

4. 工程面砖由建设方提供，进场时须与监理单位共同验收，严格执行检验制度。

5. 选用国家定点厂家生产的水泥，必须具备出厂合格证和材质单，并经复试合格后使用。

6. 材料部门提前准备雨季施工，储备水泥、粘贴剂及填剂等材料。

7. 尽量避免雨天进行面砖施工。

8. 建立主要材料供应商和品牌名册，严格执行材料报审制度。施工单位配合建设单位工程师和监理工程师进行抽样检查或送检，监理工程师负责监督材料送检。

9. 建立工程质量检查体系，包括自查自检和联合检查。每周定期进行质量检查，接受不定期和月度检查，对发现的问题及时整改，避免重复出现。

七、安全文明保证措施

1. 坚决贯彻执行建设部 JGJ59-2011 安全检查评分标准和市有关规定，科学地管理和组织施工。

2. 成立项目施工安全生产领导小组，由项目经理任组长，专职安全员任副组长，其他主要管理人员参与，各作业层设兼职安全员，形成安全生产保证体系，并授予专职安全员“三权”。

3. 加强新工人入场“三级”安全教育，积极组织职工参与各类安全生产活动，提高安全意识。

4. 现场正确使用安全“三宝”：进入施工现场必须佩戴安全帽，高处作业需系好安全带，严禁穿“三鞋”（拖鞋、凉鞋、高跟鞋），禁止酒后作业和现场吸烟。

5. 危险品如油漆、稀料须单独存放，专人管理，并配备防火防爆措施。

6. 材料进出施工现场时，应码放整齐，捆绑牢固，防止散碎材料散落。

7. 施工现场设专人负责卫生，每日专人洒水清扫道路，清扫前先洒水以抑制粉尘。

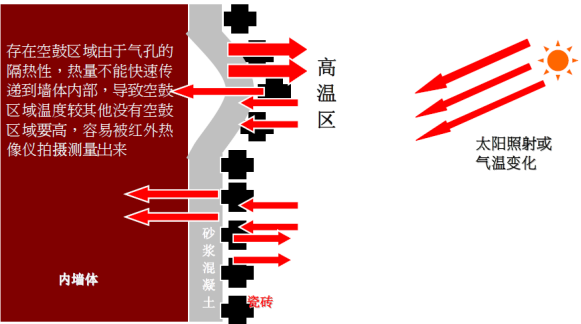
八、辅助维修技术（红外线）

为减少现场人工敲打排除的主观性，引入红外热成像检测技术，进行整栋建筑外墙饰面砖全面普查，检测范围面积全面，增加维修的准确性^[6-7]。

（一）红外检测工作条件

现场检查工作条件选择晴天太阳照射充分的时间段内进行，红外检测过程按照中国工程建设标准化协会标准 CECS 204-2006《红外热像法检测建筑外墙饰面层黏贴缺陷技术规程》^[8]。

（二）红外检测原理说明



（三）检测步骤

1. 进行全面检视，以便选择最合适拍摄红外照片的位置；
2. 对需要红外拍摄勘察外立面进行初步检测和详细检测；
3. 红外照片及数码照片拍摄后，对采集的数据进行数据分析；
4. 根据检测结果维修：根据红外检测分析结果，针对遗漏的缺陷位置安排二次排除修复；
5. 最后，在完成外墙饰面砖检查修补及再次检查合格后，有序拆除外架，同步提升小区内园林施工，为小区业主恢复良好的生活环境。

参考文献

- [1] 郭宗晓. EAST 装置面向等离子体部件的尖缘热聚集效应研究 [D]. 中国科学技术大学, 2024.
- [2] 王荣生. 岩板瓷砖湿铺贴的粘结‘空鼓’现象 [J]. 佛山陶瓷, 2024, 34(12): 41-43.
- [3] “蜘蛛人”不是“蜘蛛侠” 安全必须有保障 [J]. 江苏安全生产, 2015, 0(11): 30-32.
- [4] 邢钟权, 徐瑞江, 李敏, 等. 建筑物外墙装饰材料应用建议 [J]. 城市建筑空间, 2022, 29(S2): 754-755.
- [5] 裴晓鹏, 陈尚伟. 石膏基瓷砖胶粘剂施工质量问题浅析 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50(08): 19-21+29.
- [6] 张九成. 防止建筑外墙装饰抹灰裂缝的施工技术研究 [J]. 智能城市, 2020, 6(23): 165-166.
- [7] 杨丽萍, 闫增峰, 孙立新, 等. 红外热成像技术在建筑外墙热工缺陷检测中的应用 [J]. 新型建筑材料, 2010, 37(6): 53-57.
- [8] 红外热像法检测建筑外墙饰面层粘结缺陷技术规程: CECS 204-2006[S], 2006.

环保工程设计与技术管理：生态环境保护的实践路径与技术探索

陈智军

广州市东建建设有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ETQM.2025080018

摘 要： 介绍环保工程处理技术体系，包括物理、化学、生物等主流技术及膜分离等前沿技术，阐述工艺参数优化、BIM及数字孪生应用等。还涉及设计阶段质量控制、运维监测、技术管理机制创新等内容，强调多技术耦合及跨学科融合的重要性。

关 键 词： 环保工程；技术体系；多学科融合

Environmental Protection Engineering Design and Technology Management: Practical Path and Technical Exploration of Ecological Environment Protection

Chen Zhijun

Guangzhou Dongjian Construction Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This paper introduces the environmental engineering treatment technology system, covering mainstream technologies such as physical, chemical, and biological methods, as well as cutting-edge membrane separation techniques. It elaborates on process parameter optimization, BIM, and digital twin applications. The content also touches on quality control during the design phase, operation and maintenance monitoring, and innovation in technical management mechanisms, emphasizing the importance of multi-technology coupling and interdisciplinary integration.

Keywords： environmental protection engineering; technical system; multidisciplinary integration

引言

随着环保意识的日益增强，我国于2012年颁布了一系列相关环保政策，强调了对环境工程技术创新和管理优化的重视。环保工程处理技术涵盖物理、化学、生物等多种主流技术，每种技术都有其适用范围和处理效果。同时，前沿技术如膜分离、高级氧化等不断涌现，为环保工程注入新活力。在工艺参数优化、污水处理厂建模及运维监测等方面也有重要进展。此外，化工园区废水处理、建筑垃圾再生等特定领域的技术研究也在推进。然而，当前环保工程面临能效瓶颈与二次污染问题，因此探讨其发展现状与创新方向，明确优化路径至关重要。

一、环保工程处理技术体系概述

（一）主流处理技术分类

环保工程处理技术体系涵盖多种主流技术。物理处理技术中，过滤是通过介质截留杂质，沉淀则依靠重力使悬浮物下沉，适用于去除较大颗粒的污染物^[1]。化学处理技术的氧化还原可改变污染物化学价态，絮凝是使胶体聚沉，用于处理特定化学性质的污染物。生物处理技术里，活性污泥法通过微生物代谢分解有机物，生物膜法是微生物附着在介质表面处理污水，它们在处理有机废水方面效果显著。不同技术组合因污染物种类、浓度等因素，在去除效率上存在差异，需根据实际情况合理选择和搭配技

术，以达到最佳的环保工程处理效果。

（二）新型处理技术发展

膜分离技术通过具有选择透过性的膜实现不同组分的分离，在污水处理、1 气体净化等方面有广泛应用，为环保工程提供了高效的分离手段^[2]。高级氧化技术能产生具有强氧化性的自由基，可有效降解难降解有机物，在处理工业废水等领域展现出良好的应用前景。生物电化学系统结合了生物和电化学过程，如微生物燃料电池，可在处理有机污染物的同时实现电能回收。光催化降解技术利用光催化剂在光照下产生的活性物质降解污染物，对难降解污染物具有潜在的高效处理能力。这些前沿技术的创新突破和应用潜力，为环保工程处理技术体系的发展注入了新的活力。

二、环保工程设计优化策略

（一）工艺参数优化方法

构建基于响应面法的工艺参数优化模型是关键。通过该模型，可系统研究水力停留时间、药剂投加量、反应温度等关键参数对处理效果的敏感性影响规律。响应面法能够综合考虑多个工艺参数之间的交互作用，通过合理设计实验，获取足够的数据来构建精确的模型^[3]。对于水力停留时间，其长短直接影响反应的充分程度，过长或过短都可能导致处理效果不佳。药剂投加量需精准控制，过多可能造成浪费和二次污染，过少则无法达到预期处理效果。反应温度对某些化学反应至关重要，适宜的温度能提高反应速率和处理效率。通过模型分析这些关键参数的敏感性，可为环保工程设计中的工艺参数优化提供科学依据。

（二）智能化设计应用

BIM技术在污水处理厂三维建模中具有重要应用。它能够精确呈现污水处理厂的物理结构和空间布局，包括各个处理单元、管道系统以及设备的详细位置和连接关系，为设计人员提供直观的可视化效果，便于优化设计方案^[4]。数字孪生系统则在工艺仿真与故障预判方面展现出巨大潜力。通过构建污水处理厂的数字孪生模型，能够实时模拟工艺运行过程，预测可能出现的故障点，提前采取措施进行预防和修复，提高污水处理厂的运行效率和稳定性，减少因故障导致的环境风险。

三、环保技术管理机制创新

（一）全过程质量管理体系

1. 设计阶段质量控制

在设计阶段质量控制中，建立环境影响预评估制度至关重要。通过该制度，能提前对环保工程可能产生的环境影响进行预估和分析。同时，制定涵盖技术可行性、经济合理性、环境风险性的多维度评价指标体系是关键举措^[5]。技术可行性指标确保所采用的环保技术在实际工程中能够有效实施；经济合理性指标考虑工程成本与效益，保障项目在经济上可行；环境风险性指标则着重评估工程对环境可能带来的潜在风险，以便采取相应措施加以防范和控制，从而实现设计阶段的质量有效控制，为环保工程的顺利实施奠定基础。

2. 运维阶段效能监测

在运维阶段效能监测方面，构建基于物联网的在线监测网络至关重要。通过物联网技术，可实时获取环保设备的各项运行数据，如处理效率、能耗指标以及设备状态等信息^[6]。在此基础上，开发动态评估模型，对这些数据进行综合分析。该模型能够准确评估设备的运行效能，及时发现潜在问题，为运维决策提供科学依据。例如，当处理效率出现异常下降或能耗指标过高时，可通过模型快速定位原因，采取相应的措施进行调整和优化，确

保环保设备始终处于高效运行状态，实现对环境的有效保护。

（二）技术更新决策机制

1. 技术生命周期评估

环保技术管理机制创新的关键在于建立有效的技术更新决策机制以及对技术生命周期进行准确评估。在技术更新决策方面，建立包含环境效益、经济效益、技术成熟度的三维评估模型至关重要。通过该模型，能够全面考量环保技术在不同维度的表现，为决策提供科学依据^[7]。同时，制定技术升级替代的决策支持系统，有助于综合分析各种因素，确定最佳的技术更新时机和方向。在技术生命周期评估过程中，需密切关注技术从研发到应用、再到可能被替代的各个阶段。准确把握技术生命周期，能够合理安排资源，提高环保技术管理的效率和效果，进一步推动环保工程的可持续发展。

2. 技术风险评估体系

构建涵盖二次污染风险、技术稳定性、运维复杂性的风险评估矩阵是技术风险评估体系的关键。需综合考虑各因素间的相互关系及对环境的潜在影响^[8]。对于二次污染风险，要分析技术应用过程中可能产生的新污染物及排放情况。技术稳定性方面，评估技术在不同环境条件下的性能表现及可靠性。运维复杂性则关注技术实施后的维护难度和成本。在此基础上，制定风险分级管控方案，根据风险程度对不同的技术应用场景进行分类，采取针对性的管控措施，确保环保技术的有效应用和环境风险的可控性。

四、工程实践路径探索

（一）工业废水处理案例

1. 化工园区综合处理方案

在化工园区综合处理方案中，预处理-物化处理-深度处理组合工艺对难降解有机物去除至关重要。预处理阶段，通过格栅、调节池等操作，去除大颗粒杂质和调节水质水量，为后续处理创造稳定条件。物化处理环节，采用混凝沉淀、吸附等方法，初步去除有机物及悬浮物。深度处理则针对难降解有机物，运用高级氧化技术、生物处理技术等进一步降解。这些工艺相互协同，预处理为物化和深度处理奠定基础，物化处理减轻深度处理负荷，深度处理确保最终出水达标。这种组合工艺的协同作用机制有效提高了化工园区工业废水处理效果，对生态环境保护具有重要意义^[9]。

2. 重金属废水处理创新

新型吸附材料与电化学沉积技术联用在重金属废水处理中展现出良好的应用前景。吸附材料可通过物理或化学吸附作用快速富集重金属离子，其具有较大的比表面积和丰富的活性位点，能够高效吸附多种重金属离子^[10]。电化学沉积技术则是利用电场作用使金属离子在电极表面还原沉积，从而实现从废水中分离去

除。二者联用可发挥协同效应，吸附材料先对重金属离子进行富集，提高局部浓度，有利于电化学沉积过程更高效地进行。同时，电化学沉积过程中产生的一些化学变化可能会进一步增强吸附材料的吸附性能，从而实现对重金属废水更彻底的处理。

（二）固体废物资源化路径

1. 生物质热解技术应用

不同热解温度显著影响生物炭产率及吸附性能，进而影响碳封存效益。热解温度升高时，生物炭产率一般呈先增后减趋势。这是因为在较低温度下，生物质热解不完全，随着温度升高，热解反应更充分，产率增加；但温度过高会导致部分炭结构被破坏，产率降低。对于吸附性能，适宜的高温热解可增加生物炭的比表面积和孔隙结构，从而提高对污染物的吸附能力。从碳封存效益角度，生物炭产率和稳定性是关键因素。较高产率且结构稳定的生物炭能更好地将碳固定，减少碳排放，对生态环境保护具有重要意义。

2. 建筑垃圾再生系统

建筑垃圾再生系统涉及破碎分选、骨料强化以及再生制品制备等关键环节。在破碎分选阶段，需根据建筑垃圾的成分和特性，选择合适的破碎设备和分选技术，以实现不同材料的有效分离。骨料强化是提高再生骨料质量的重要步骤，通过物理或化学方法改善骨料的性能，使其能更好地满足建筑材料的要求。再生制品制备则是将经过处理的再生骨料用于生产各种建筑制品，如砖块、墙板等。研究这一全流程的技术经济性至关重要，需综合考虑设备投资、运营成本、产品质量和市场需求等因素，以确保建筑垃圾再生系统在经济和技术上的可行性，实现固体废物的资源化利用。

（三）区域环境协同治理

1. 流域综合治理模式

流域综合治理模式是区域环境协同治理的重要实践路径。在流域治理中，需考虑上下游、左右岸等多方面因素。构建点源-

面源污染协同控制技术体系至关重要，要精准识别点源污染排放源头并加以管控，同时针对面源污染的分散性特点，采取综合性措施。人工湿地与生态护岸的复合治理是有效的治理手段。人工湿地通过植物吸附、微生物分解等作用净化水质，生态护岸则能减少水土流失，稳固河岸，同时为生物提供栖息地。二者结合可提升流域生态系统的稳定性和自净能力，实现流域水环境的持续改善，促进区域环境协同治理目标的达成。

2. 工业园区循环系统

生态工业园区建设中，水网络集成与能量梯级利用技术至关重要。水网络集成可优化水资源配置，通过合理规划水的使用、回收和再利用环节，提高水资源利用效率，减少浪费和污染排放。例如，构建企业间的水循环系统，使一个企业的排水成为另一个企业的用水资源。能量梯级利用技术则是依据能量品质的不同，实现多次利用。如在工业园区中，可将高温蒸汽的能量先用于发电，再将剩余的低温热能用于供暖或其他工业生产过程中的预热环节。这两种技术的应用，不仅能提升工业园区的资源利用效率，还有助于减少对环境的负面影响，促进区域环境协同治理，构建可持续发展的工业园区循环系统。

五、总结

环保工程设计与技术管理在生态环境保护中至关重要。当前环保工程技术体系有一定发展，但面临能效瓶颈与二次污染问题。通过对其发展现状总结及创新方向探讨，明确智能监测与绿色工艺的优化路径是关键。多技术耦合创新及管理机制协同发展可有效提升环保工程效果。同时，生物信息学、人工智能等跨学科技术在该领域的融合应用前景广阔，将为环保工程带来新的突破与发展契机，有助于进一步提升生态环境保护的实践水平，实现更高效、更环保的目标。

参考文献

- [1] 郭景州. 环保工程图纸管理系统的设计与实现 [D]. 大连理工大学, 2014.
- [2] 徐凯. 基于建筑生态设计理念下的现代居住区景观设计 [J]. 居舍, 2023, (02): 143-146.
- [3] 王诚, 杨艳超. 涉环保重大工程项目建设的社会稳定风险评估及其防控 [J]. 科技创新导报, 2019, 16(15): 44+46.
- [4] 贾鹏. 养殖场节能环保技术分析及 SAP 应用 [D]. 湖北工业大学, 2017.
- [5] 李金泽. 生态文明的技术体系研究 [D]. 内蒙古大学, 2023.
- [6] 赵珺, 林鹏, 张楠, 等. 环保工程设计中绿色环保理念的应用分析 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(09): 149-151.
- [7] 崔琼文. 绿色环保理念在环保工程设计中的运用研究 [J]. 绿色环保建材, 2019, (05): 51.
- [8] 周霞. 绿色环保理念在环保工程设计中的运用研究 [J]. 新农业, 2021, (05): 67-68.
- [9] 张守泉. 试析环保工程设计中绿色环保理念 [J]. 当代化工研究, 2021, (09): 125-126.
- [10] 林晓明. 贵州水电开发环境保护法律问题研究 [D]. 贵州民族大学, 2018.

基于核磁共振波谱技术的汽油辛烷值研究

杨哈玉, 朱建林

中石油克拉玛依石化有限责任公司, 新疆 克拉玛依 384003

DOI:10.61369/ETQM.2025080022

摘 要 : 从核磁共振 (NMR) 法原理、对汽油辛烷值的测定步骤、模型建立、与经典方法比对等方面以重整重汽油、烷基化油为例介绍了如何运用核磁共振 (NMR) 技术实现对汽油辛烷值的快速检测, 在企业生产中遇高频次检测分析时可替代传统方法达到节能降耗的成效。

关 键 词 : 汽油辛烷值; 核磁共振 (NMR) 技术; 快速; 节能降耗

Research on Gasoline Octane Number Based on Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy Technology

Yang Hanyu, Zhu Jianlin

PetroChina Karamay Petrochemical Co., Ltd. Karamay, Xinjiang 384003

Abstract : This article introduces how to use nuclear magnetic resonance (NMR) technology to achieve rapid detection of gasoline octane number from the principles of NMR method, determination steps of gasoline octane number, model establishment, and comparison with classical methods. Taking reforming heavy gasoline and alkylated oil as examples, it can replace traditional methods in energy saving and consumption reduction when encountering high-frequency detection and analysis in enterprise production.

Keywords : gasoline octane number; nuclear magnetic resonance (NMR) technology; rapid; energy saving and consumption reduction

引言

汽油的辛烷值是表示发动机燃料抗爆性的常用数值, 是评价汽油的重要指标, 传统的马达法和研究法都是通过可压缩比的单缸汽油发动机来测定汽油辛烷值, 一般是采用与标准燃料进行对比, 看异辛烷在待测燃料中的体积分数。这两种方法的测量结果较准确, 但其自身却也存在很多缺陷, 例如: 样品消耗量较大, 耗时长, 仪器维护成本高, 仪器操作过程复杂且对环境污染较大。

目前新型快速测定辛烷值的方法主要有: 介电常数法、核磁共振法、近红外法、气相色谱法等。其中核磁共振 (NMR) 是基于原子核的共振现象来研究物质的分子结构和性质, 与常规分析方法相比, 其最大的特点就是无损检测、耗时短 (每个样品只需 2 ~ 5 分钟)、分析物性全面, 人员工作量能够大大降低, 同时还能及时为生产运行提供数据支持和优化加工方案。通常原料样品, 可对其酸值、S、N、水分、残炭、馏程等 20 多个物性进行分析, 而汽、煤、柴、蜡油等物料, 也可根据实际情况建立模型通过解析, 得到各物性的具体数值^[1,2]。

本文介绍了针对汽油的辛烷值分析, 通过数据库建模、比对验证等工作可以确定利用核磁共振技术可以应用于汽油辛烷值的快速分析。

一、试验

(一) 试验仪器

CFR-2U 辛烷值机

鸿泰天诚核磁共振波谱分析仪

(二) 试验原理

1. 研究法测定辛烷值

测定点燃式发动机燃料的辛烷值, 使用标准的试验发动机在

规定的运转条件下, 使用专用的电子爆震仪器系统进行测量, 将试样燃料与已知辛烷值的正标准混合燃料的爆震特性进行比较, 根据操作表对发动机进行调整使其在标准爆震强度下运转^[3]。调节试样的燃空比使爆震强度达到最大值, 然后调节气缸高度得到标准爆震强度, 不改变气缸高度, 按要求选择两种正标准燃料, 分别测定其标准爆震强度, 通过标准爆震强度读数值之差计算试样的辛烷值, 方法要求所用的气缸高度应在操作表规定的极限范围之内^[4]。

作者简介: 杨哈玉 (1992.01-), 女, 汉族, 陕西人, 学历: 本科, 职称: 工程师, 研究方向: 石油化工。

2.核磁共振法测定辛烷值

核磁共振技术的原理是：通过原子核在磁场中共振，得到样品中不同化学环境下原子核的图谱^[6]，NMR 谱图可以确定不同官能团及其周围化学环境，特征峰的峰面积直接反映了组份的相对含量。选择有代表性的汽油样品进行 NMR 扫描，得到 NMR 谱图如图1、图2所示，采用常规方法对相应样品的辛烷值进行测定，得到准确的物性数据，将谱图和物性数据关联，通过偏最小二乘法计算标准曲线，得到合适的辛烷值模型后即可应用模型对汽油样品的谱图进行评价得到辛烷值数据。

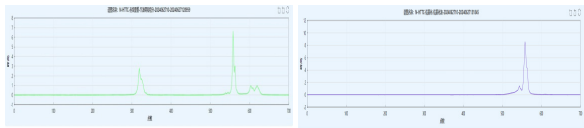


图1 重整重汽油 NMR 谱图

(三) 试验步骤

1. 研究法测定辛烷值

(1) 开电源，人工盘车4-5圈以确认机组组装无问题。将飞轮停在压缩冲程上死点，即刻度盘零点与曲轮零点对齐。做好仪器准备工作后读取本室大气压，查好补正数对计数器进行补正，将计数器调至500以下。

(2) 启动辛烷值机，打开点火开关、空气加热器开关、冷却水阀及制冷机，观察点火角指示仪表恒定在上死点前13度，打开温控开关并切换到空气加热位置^[5]。

(3) 打开爆震仪电源，预热约半小时当各项条件达到要求后将选择阀选至正标燃料杯，根据标准参考表将调整计数器到相应位置，调节燃料—空气比，取得最大爆震，调整展宽值在10—18格/辛烷值。

(4) 测定样品燃料：调整计数器使得爆震表读数在40左右，调节燃料—空气比，取得最大爆震，重条计数器使得爆震表读数为50，读取计数器读数，并从标准参考表中查得辛烷值的数值^[7]。

2.核磁共振法测定辛烷值

(1) 取样（核磁管取1/2），擦拭干净核磁管外壁。在谱图采集系统中停止水循环，从仪器中取出蒸馏水，放入油样。

(2) 在分析方案中选择所测油品名称（重整重汽油、烷基化油），更改分析时间为取样时间并确定。

(3) 待样品完成后，点击谱图分析系统进入油品分析中“模型应用”。

(4) 在“谱图信息”下，点击“重置谱图”，“选择数据”找到所做样品名称（重整重汽油、烷基化油）。

(5) 在“模型信息”中同样找到相对应的样品名称并确定。

(6) 点击“谱图评价”，获得重整重汽油、烷基化油的辛烷值数据。

二、建立 NMR 模型

NMR 分析技术得到的谱图反映了样品的微观结构和组成信息，信息的解析需要专门的数学工具，以实现对样品物性的量化分析。因此，分析模型是 NMR 分析技术中信号解析的关键^[8]。

1. 利用核磁共振法（NMR）测定辛烷值在前期取35组重整装置馏出口重汽油和35组烷基化装置馏出口的烷基化油，利用核磁共振分析仪分别对两组样品进行 NMR扫描得到两组谱图，同时用 CFR 辛烷值机依照《GB/T5487-2015汽油辛烷值的测定 研究法》对样品进行测定，得到准确实验室基础数据。

2. 在 HontyeSAS 软件中分别导入两组谱图，选择新建并编辑基本信息，分别导入重整重汽油及烷基化油的实验室数据。

3. 重整重汽油及烷基化油的相关曲线如图4、5所示。优化模型：以交叉验证集标准偏差 SECV 最小为原则选择合适的因子数，SECV-因子图如图6、7所示。重整重汽油、烷基化油的校正集相关系数 RC 为 0.891 和 0.901、交叉验证集相关系数 RCV 为 0.866 和 0.882，均 ≥ 0.8 且 SECV-因子图形成弧形坡度曲线，说明模型良好，建模完成。

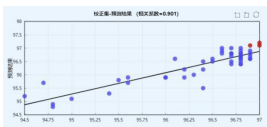


图4 重整重汽油辛烷值相关曲线

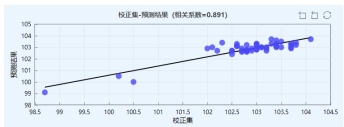


图5 烷基化油辛烷值相关曲线

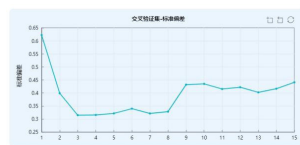


图6 重整重汽油辛烷值模型 SECV-因子图

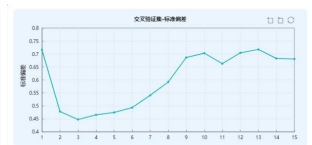


图7 烷基化油辛烷值模型 SECV-因子图

4. 比对验证。分别选取14组重整重汽油及12组烷基化油同时采用研究法和核磁共振法对辛烷值进行测定，对数据进行收集比对，比对结果及相对偏差见表1、表2。

表1 重整重汽油辛烷值比对数据

日期	RON _{研究法}	RON _{核磁}	绝对差	日期	RON _{研究法}	RON _{核磁}	绝对差
2024/6/1	102.8	103	0.2	2024/6/14	102.2	102.4	0.2
2024/6/2	102.9	103.1	0.2	2024/6/16	103.5	103.4	0.1
2024/6/4	103.1	103.2	0.1	2024/6/18	103.2	103	0.2
2024/6/5	103.2	103	0.2	2024/6/20	103.2	102.9	0.3
2024/6/8	103.1	103.3	0.2	2024/6/22	103.3	103.3	0
2024/6/10	102.5	102.9	0.4	2024/7/2	103.1	103	0.1
2024/6/12	102.7	102.9	0.2	2024/7/4	102.5	102.7	0.2

表2 烷基化油辛烷值比对数据

日期	RON 研究法	RON 核磁	绝对差	日期	RON 研究法	RON 核磁	绝对差
2024/6/1	95.8	96.2	0.4	2024/6/20	95.3	95.3	0
2024/6/4	96.2	96.1	0.1	2024/6/22	95.3	95	0.3
2024/6/6	96	96.2	0.2	2024/6/27	95.3	95.1	0.2
2024/6/8	95.5	95.8	0.3	2024/6/29	95.5	95.7	0.2
2024/6/11	95.8	96.1	0.3	2024/7/2	95.0	95.1	0.1
2024/6/18	95.1	95.2	0.1	2024/7/6	95.0	94.9	0.1

由比对数据可得，对重整重汽油、烷基化油采用研究法和核磁共振法测定的辛烷值结果绝对差值在0.4之内，满足方法的再现性要求。

三、经济效益

传统的研究法测定辛烷值过程所需样品量100mL，且消耗较多标准燃料，每次分析耗时90min，辛烷值机每年维护费用3-5万成本高,粗略估计分析成本1065元 /次，而利用 NMR 分析技术测定辛烷值每次所需样品量仅2mL且无需标准物质，且由于 NMR 分析非介入的特点，不需要经常对设备做维护。结合炼厂全年辛烷值的分析量，用核磁共振技术替代研究法测定汽油辛烷值可为企业降本增效，每年节约成本约42万元^[9]。

四、环保安全性

相较于研究法使用的 CFR-2U 辛烷值机在运行中产生较大的噪音及废油、VOC_s对环境污染及人员健康安全的风险，NMR 分

析仪仅需样品量2ml且全程密闭无噪音、零排放。

五、结论

（1）以重整汽油、烷基化油为例，NMR 分析技术可实现对汽油辛烷值的测定，过程中分析速度快、操作简单、仪器稳定性好、抗干扰能力强、安全环保。经过与传统方法比对验证，分析结果准确可靠，解决了长期以来化验成本高、工作量大，分析滞后等难题，节约成本提高时效性，让企业能够更及时的调整、优化生产方案。

（2）在建模过程中，模型的精确度会受到物性数据的选择、谱图预处理方法的选择、区间的选择、主因子数的选择等多个因素的影响。在建立谱图库时，每个样品谱图所对应的实验室物性分析数据都应严格地按照标准方法进行分析和检测，以确保所录入分析数据的准确性^[10]。

参考文献

[1] 陈国, 张立文. 核磁共振波谱法测定石油中的组分及性质 [J]. 当代化工, 2024, 53(03): 753-756. DOI: 10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2024.03.036.

[2] 黄东岩. 基于磁性技术的无损检测方法研究 [D]. 吉林大学, 2012.

[3] 谢道雄. 石油化工核磁技术应用. 北京: 中国石化出版社, 2018, 70-77.

[4] 赵常俊, 吴乐乐. 核磁共振技术在石油行业中的应用 [J]. 山东化工, 2016, 45(03): 86-89. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2016.03.038.

[5] 金永君. 核磁共振技术及应用 [J]. 物理与工程, 2002, 12 (1) 47-48.

[6] 王京. 核磁共振分析技术在石化领域中的应用 [J]. 波谱学杂志, 2005, 21 (4) 527-534.

[7] 罗真. 核磁共振在线分析技术在催化装置油品分析中的应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2004, 31 (4) 46-48.

[8] 吴青. NIR, MIR 和 NMR 分析技术在原油快速评价中的应用 [J]. 炼油技术与工程, 2018, 48 (6) .

[9] 王涛. 九江石化基于 HontyeIRAS 系统的全流程优化应用 [J]. 当代石油化工, 2017, 25 (1) 27.

[10] 蒋碧珠. 核磁共振技术及应用 [J]. 中国科学术语, 2014, 12 (1) 47-48.

桥梁工程地基基础检测技术要点及优化策略

吴青峰

华志（重庆）工程技术有限公司，重庆 400700

DOI:10.61369/ETQM.2025080023

摘 要： 随着交通事业的蓬勃发展，桥梁工程在现代交通运输网络中占据核心地位。地基基础作为桥梁结构的核心支撑，其质量优劣直接关乎桥梁全生命周期的安全性与稳定性。本文深入剖析桥梁工程地基基础检测技术的关键要点，结合大量实际案例与行业数据，详细分析当前检测工作存在的问题，并针对性提出全面、具体的优化策略，旨在推动地基基础检测技术革新，为桥梁工程质量安全筑牢防线。

关 键 词： 桥梁工程；地基基础检测；技术要点；优化策略

Key Technical Points and Optimization Strategies for Foundation Testing in Bridge Engineering

Wu Qingfeng

Huazhi (Chongqing) Engineering Technology Co., Ltd. Chongqing 400700

Abstract： With the rapid development of the transportation industry, bridge engineering has become a core component of modern transportation networks. As the core support structure of bridges, the quality of foundation engineering directly impacts the safety and stability of bridges throughout their entire lifecycle. This paper thoroughly analyses the key points of foundation inspection technology in bridge engineering, combines numerous practical cases and industry data, and provides a detailed analysis of the current issues in inspection work. It also proposes comprehensive and specific optimisation strategies to promote technological innovation in foundation inspection and strengthen the safety and quality of bridge engineering.

Keywords： bridge engineering; foundation inspection; technical key points; optimisation strategies

引言

在现代化基础设施建设浪潮中，桥梁作为跨越江河、山谷等复杂地形的重要交通枢纽，对区域经济协同发展、社会资源高效流通起着关键作用。地基基础作为桥梁结构的根基，不仅承担着桥梁上部结构自重、车辆荷载、风荷载等各类作用，还需抵御地震、洪水等自然灾害的冲击。相关统计数据显示，近十年我国因地基基础问题引发的桥梁安全事故占比达18%，部分事故造成重大人员伤亡与经济损失。因此，强化桥梁工程地基基础检测工作，确保检测数据的准确性、可靠性，已成为保障桥梁工程安全运营的关键环节。

一、桥梁工程地基基础检测技术要点

（一）地基承载力检测

1. 载荷试验法

载荷试验法基于土力学中的应力-应变原理，通过模拟建筑物地基的实际受力状态，直接获取地基土的承载特性。在实际操作中，承压板的选择需遵循严格标准：对于粘性土和粉土，当预估地基承载力特征值小于100kPa时，圆形承压板直径宜取0.707m；当承载力特征值大于等于100kPa时，直径可适当增大至1.0m。对于砂土和碎石土，方形承压板边长在浅层地基检测时一般不小于0.8m，若检测深度超过5m，边长宜增大至1.2m以减少边界效应影响。^[1]

荷载分级通常采用分级加载方式，首级荷载一般为预估极限承载力的1/10-1/8，后续每级荷载增量控制在首级荷载的1/5-1/4。例如，对于预估极限承载力为1000kN的地基，首级荷载可施加100-125kN，后续每级增加20-31.25kN。沉降观测需严格按照时间间隔记录，在每级荷载施加后的前1h内，按5min、5min、10min、10min、15min、15min的时间间隔观测，之后每30min观测一次，直至沉降稳定。沉降稳定标准除满足连续2h每小时沉降量不超过0.1mm，或连续1h每30min沉降量不超过0.05mm外，还需结合P-S曲线形态判断，当曲线出现明显转折点或陡降段时，应停止加载。

2. 动力触探法

动力触探法依据重锤下落产生的动能，通过探头贯入地基土

的难易程度来评估土体性质。轻型动力触探设备的重锤质量为10kg，落距50cm，适用于检测深度小于4m、地基承载力特征值小于150kPa的粘性土、粉土和素填土。其锤击数N₁₀与地基承载力的关系，在华北地区粘性土地基中，当N₁₀=10~15时，地基承载力特征值约为80~120kPa；在华东地区粉土地基中，N₁₀=12~18时，承载力特征值为100~150kPa。重型动力触探重锤质量63.5kg，落距76cm，适用于砂土、中密以下碎石土及极软岩检测，检测深度可达12m。超重型动力触探重锤质量120kg，落距100cm，常用于密实碎石土、软岩和硬岩检测，有效检测深度超过20m。在实际操作中，锤击速率需严格控制在每分钟15~30击，若锤击速率过快，会导致土体局部受热，改变土体物理力学性质；过慢则影响检测效率。每贯入10cm记录一次锤击数，当连续三次贯入10cm的锤击数超过50击时，可终止试验。^[2]

（二）桩基础检测

1. 低应变反射波法

低应变反射波法的激振设备选择需综合考虑桩径、桩长及桩身混凝土强度。对于桩径小于800mm、桩长小于15m的混凝土灌注桩，采用质量为0.5~1kg的手锤，锤头材质宜选用钢质，可激发高频应力波，有效检测桩身浅部缺陷；对于桩径大于1200mm、桩长超过30m的大直径桩，需使用5~10kg的重锤或机械冲击设备，激发低频应力波，以保证应力波在桩身中的传播距离。传感器安装时，应采用黄油、石膏等耦合剂确保传感器与桩顶紧密接触，且传感器与桩顶的接触面积不小于传感器底面面积的80%。信号采集参数设置方面，采样频率一般不低于20kHz，对于超长桩或大直径桩，采样频率需提高至50kHz以上，以准确捕捉高频信号；采样点数根据桩长确定，一般按每米桩长采样点数不小于200点计算。在某跨海大桥桩基检测中，通过低应变反射波法检测出一根桩身12m处存在缩径缺陷，缩径率达15%，经钻孔取芯验证，检测结果与实际情况一致。^[3]

2. 声波透射法

声测管埋设时，其间距不宜大于2m，且声测管应沿桩身钢筋笼内侧呈对称布置。声测管材质一般采用钢管或PVC管，钢管壁厚不小于2.5mm，PVC管壁厚不小于3mm，以保证声测管在混凝土浇筑过程中不发生变形或破损。换能器频率选择需根据桩径和混凝土强度调整，对于桩径小于1.5m、混凝土强度等级C30~C40的灌注桩，发射和接收换能器频率宜选用50~80kHz；当桩径大于2m或混凝土强度等级高于C40时，换能器频率可降至30~50kHz。在数据分析与判定中，常用的声学参数判据包括声速临界值判据、波幅判据和主频判据。以声速临界值为例，当实测声速低于声速临界值（V_c）时，可判定该测区存在缺陷。V_c的计算采用统计修正法，即 $V_c = V_m - k \sigma$ ，其中V_m为测区声速平均值，σ为标准差，k为与检测测点数有关的系数，当测点数为20~30时，k取值2.0~2.5。在某长江大桥桩基检测中，通过声波透射法发现一根桩在8~10m处声速下降20%，波幅降低40%，结合波形畸变，判定该区域存在夹泥缺陷，后经开挖验证属实。^[4]

二、桥梁工程地基基础检测工作存在的问题

（一）检测机构管理不规范

部分检测机构为追求经济利益，存在严重违规操作行为。例

如，在某省高速公路桥梁地基检测项目中，一家检测机构为缩短检测周期，将原计划30组的载荷试验减少至15组，导致部分地基承载力数据缺失，最终该桥梁在通车后半年内出现不均匀沉降。据行业调查数据显示，2022年全国因检测机构违规操作导致的桥梁质量问题投诉案件达236起，同比增长12%。此外，检测市场低价竞争激烈，部分机构以低于成本价30%的报价承接业务，为保证利润，只能通过降低检测标准、减少检测环节等方式压缩成本，严重影响检测质量。

（二）检测人员素质参差不齐

目前，检测行业中约35%的检测人员未取得相关专业资格证书。在实际检测工作中，部分人员对检测技术标准理解偏差。如在低应变反射波法检测中，部分检测人员无法正确识别复杂波形，将桩底反射波误判为缺陷反射波，导致检测结果错误。某检测机构在对一批市政桥梁桩基检测时，因检测人员操作不当，未按规定调整激振设备参数，导致应力波能量不足，未能检测出桩身深部的裂缝缺陷，造成严重质量隐患。^[5]

（三）检测设备落后

据统计，我国仍有40%的检测机构使用超过10年的检测设备。这些老旧设备存在精度下降、稳定性差等问题。以某地级市检测中心为例，其使用的一台服役15年的动力触探设备，重锤落距误差达5%，导致锤击数测量偏差，影响地基承载力计算结果。此外，先进检测设备如三维地质雷达、分布式光纤传感检测系统等在国内的普及率不足20%，与欧美发达国家70%的普及率相比差距显著，难以满足复杂地质条件下桥梁地基基础检测需求。

三、桥梁工程地基基础检测技术优化策略

（一）加强检测机构管理

1. 完善法律法规与监管体系

修订《建设工程质量检测管理办法》时，需细化违规行为的认定标准，增强法规的可操作性。以伪造检测数据为例，可明确规定篡改关键检测指标数据达10%以上，或虚构重要检测项目数据，即认定为伪造数据行为，并处以相应罚款与吊销资质的处罚。^[6]

在建立三级联动监管机制过程中，省级、市级、县级部门需明确各自职责，避免出现监管重叠或空白。省级主管部门负责制定宏观监管政策、统筹协调重大检测质量问题；市级部门着重对辖区内重点桥梁工程检测项目进行随机抽查；县级部门则需对小型桥梁工程检测进行全程跟踪监督。同时，利用信息化技术搭建统一的监管平台，实现检测项目从委托、实施到报告出具的全流程线上监管。例如，检测机构需在平台实时上传检测原始数据、影像资料等，监管部门可随时调取查看，一旦发现异常数据，立即启动调查程序。

2. 建立行业信用评价机制

构建信用评价体系时，需确保各项指标能真实反映检测机构的实际情况。对于检测质量指标，可细化为数据准确率、检测结果与实际情况的吻合度等；服务水平指标可包含服务响应时间、

客户投诉率等。在信用评价结果应用方面,除招投标加分和业务限制外,还可与金融机构合作,为信用等级高的检测机构提供低息贷款、信用担保等金融支持,助力其扩大业务规模、更新检测设备;对信用等级低的机构,在媒体上公开曝光其违规行为,形成舆论监督压力,促使其改进。但在实施过程中,需注意评价数据的真实性和公正性,可引入第三方机构对检测机构数据进行独立审计,防止数据造假。^[7]

(二) 提高检测人员素质策略解读

1. 加强专业培训与考核

专业技术培训内容应紧密结合行业发展趋势和实际工作要求。针对新兴的智能检测技术,如基于人工智能的检测数据分析软件应用,邀请软件开发者和行业专家进行授课,让检测人员掌握从数据采集、软件操作到结果分析的全流程技能。在考核环节,理论考试题目需涵盖检测标准规范、新技术原理等内容;实操考核则模拟真实检测场景,设置不同类型的地基和桩基础缺陷,要求检测人员准确运用检测设备进行检测,并撰写详细的检测报告。对于补考仍不合格的人员,安排到技术实力强的检测机构进行跟岗学习,学习期满后再次考核,直至合格。

2. 强化职业道德教育

将职业道德教育贯穿检测人员的职业生涯,定期组织职业道德培训课程,邀请行业内道德模范分享经验,剖析因职业道德缺失导致的重大工程质量事故案例,引导检测人员树立正确的职业价值观。建立检测人员诚信档案,详细记录其工作中的道德表现,包括是否存在数据造假、违规操作等行为。对于违反职业道德规范的人员,根据情节轻重给予警告、通报批评、取消从业资格等处罚,并将处理结果在行业内公示,起到警示作用。同时,建立职业道德激励机制,对道德表现优秀的检测人员给予表彰和奖励,营造良好的行业风气。^[8]

(三) 更新检测设备策略分析

1. 加大资金投入

政府设立的桥梁工程检测设备更新专项基金,需制定科学合

理的申请流程。检测机构申请补贴时,需提交详细的设备购置计划,包括设备选型依据、预期检测效果、资金预算明细等资料。评审小组由行业专家、财务人员和监管部门代表组成,从技术可行性、经济合理性等方面对申请项目进行综合评估,确保资金用于购置真正需要的先进设备。检测机构自身也可通过与设备供应商签订长期合作协议,争取分期付款、设备租赁等优惠政策;积极寻求与高校、科研院所合作,共同申报科研项目,利用科研经费购置先进检测设备,并将科研成果应用于实际检测工作中。^[9]

2. 加强设备维护与管理

设备全生命周期管理系统的建立,可借助物联网技术,为每台设备安装传感器,实时采集设备运行状态、使用时长、故障次数等数据。通过数据分析,预测设备可能出现的故障,提前安排维护和维修工作,减少设备停机时间。根据设备使用频率和工作环境,制定个性化的维护周期。例如,在沿海地区使用的检测设备,因受盐雾腐蚀影响较大,需缩短维护周期,增加设备表面防腐处理的频次。配备专业的设备管理人员,定期参加设备厂家组织的技术培训,掌握设备的最新维护和维修技术。建立设备维护考核制度,将设备完好率、故障修复及时率等指标与管理人员绩效挂钩,激励其做好设备维护工作,确保检测设备始终处于良好运行状态。^[10]

四、结论

桥梁工程地基基础检测技术是保障桥梁工程质量与安全的关键技术手段。通过深入研究载荷试验法、动力触探法、低应变反射波法、声波透射法等检测技术要点,结合大量实际数据与案例,清晰揭示了当前检测工作存在的管理、人员、设备等方面问题。针对性提出的优化策略,从完善法规监管、提升人员素质、更新检测设备等维度,为提升桥梁工程地基基础检测水平提供了切实可行的路径。

参考文献

[1] 陆萍. 现代地基基础检测技术研究与应用 [J]. 交通科技与管理, 2024(16).
[2] 孔超. 广东富水软土层地基基础施工中土工合成材料的应用研究 [J]. 工程建设与设计, 2024(17).
[3] 李小曼, 耿方方. 苏通大桥地基基础安全监测项目管理 [J]. 现代交通技术, 2011(03).
[4] 李学伟, 宋小金, 车法. 粉质粘土地基超孔隙水压力消散规律研究 [J]. 中外公路, 2014(02).
[5] 陈博. 浅析强夯法的应用 [J]. 黑龙江交通科技, 2013(11).
[6] 王凯, 李阳. 桥梁工程地基基础检测技术要点分析 [J]. 交通世界, 2023(34): 132-133.
[7] 刘畅, 赵强. 桥梁地基基础检测技术与优化措施研究 [J]. 工程建设与设计, 2022(22): 195-197.
[8] 孙明, 张悦. 基于先进技术的桥梁地基基础检测要点探讨 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48 (16): 123-124.
[9] 陈辉. 桥梁工程地基基础检测技术及质量控制策略 [J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43 (06): 134+136.
[10] 李华, 周洋. 桥梁地基基础检测技术的应用及优化研究 [J]. 四川水泥, 2019 (09): 322.

自动化监测在高速公路边坡中的应用研究

王一彪^{1, 2}

1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222

2. 天津港湾工程质量检测中心有限公司, 天津 300222

DOI:10.61369/ETQM.2025080026

摘 要： 在当前高速公路建设进程中，每个施工环节都需要进行严格的地质与技术监控，特别是对高速公路高边坡的监测更是重中之重。将自动化监测系统引入监控作业，能够有效提高高速公路建设过程中的安全系数和结构稳定性。本文阐述了自动化监测系统在高速公路边坡监测中的应用意义，分析了高速公路边坡自动化监测系统构成，深入探究自动化监测系统在高速公路高边坡监测中的具体应用策略。

关 键 词： 自动化监测；高速公路；边坡监测；应用

Research on the Application of Automatic Monitoring in Highway Slope

Wang Yibiao^{1,2}

1. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd. Tianjin 300222

2. Tianjin Port Engineering Quality Inspection Center Co., Ltd. Tianjin 300222

Abstract： In the current highway construction process, each construction phase requires strict geological and technical monitoring, with particular emphasis on the monitoring of high slopes. The introduction of an automated monitoring system into these operations can significantly enhance the safety and structural stability of highway construction. This paper discusses the significance of using automated monitoring systems in slope monitoring for highways, analyzes the components of such systems, and explores specific application strategies for monitoring high slopes in highway construction.

Keywords： automatic monitoring; expressway; slope monitoring; application

引言

高速公路边坡稳定状况受到多重因素交织影响，包括岩土介质属性、构造特征、气象水文变化以及施工扰动等，其动态演化具有高度不确定性与复杂性。因此，及时掌握边坡状态信息、实现风险的早期识别并采取科学防护手段，已成为保障工程安全与人员生命的重要环节。以往所采用的地质目测与人工设点监测方法，因依赖人为判断、监测周期长、抗干扰能力弱，且难以提供连续性和实时性的预警支持，逐渐暴露出明显局限。在此背景下，自动化监测技术应运而生，通过传感器网络与信息系统的深度融合，实现全天候、全时段的边坡动态监控，突破了传统手段在地形、气候及时间方面的限制。这类系统不仅扩大了监测覆盖范围，提高了数据获取的及时性与精度，更显著增强了预警机制的稳定性和响应能力，为边坡风险防控提供了更为坚实的技术保障^[1]。

一、自动化监测系统在高速公路边坡监测中的应用意义

大量实践表明，安全监测在应对边坡稳定性难题、剖析边坡变形破坏的内在规律与影响范围、防范地质灾害等方面，发挥着无可替代的重要作用。自动化监测系统的应用，不仅能有效预防边坡地质灾害，保障施工与运营安全，还能兼顾生态环境保护，助力优化边坡地质灾害治理设计与施工方案，实现成本合理管控，并对滑坡等灾害进行预警。

具体来看，该系统具备显著优势。首先，即使遭遇极端天气，也能通过远程自动化的方式采集监测数据，及时捕捉边坡滑塌前后的各类信息，并实时向监控平台发送预警信号，这对保障高速公路安全通行和行车安全意义重大。其次，多种传感器协同作业，通过交叉验证与分析，能够更精准地揭示边坡变形破坏的机制及演变趋势，及时评估应急支护措施的加固效果，为边坡工程设计与施工方案的优化提供有力技术支持。最后，构建远程自动化监测系统，既是开展边坡崩塌、滑坡等灾害调查、研究与防治工作的必要手段，也是获取灾害预报信息的关键渠道，同时还

能为高速公路日常运营管理和边坡养护提供科学的技术指导。

二、高速公路边坡自动化监测系统构成

自动化监测系统的构建是一项复杂且精细的工程，其架构由感知层、辅助层、网络层、数据层及应用层五大核心模块有机组成。

感知层作为系统的“神经末梢”，是数据采集的前沿阵地，主要由基准站与监测站两类设施构成。这些站点均配备了接收机、天线、观测装置以及避雷设施等精密元件。基准站通常被选址安装在基岩或结构稳固的永久性构筑物之上，其核心功能是为整个监测体系确立精准的变形基准，如同为监测工作树立了可靠的“标尺”。而监测站则被科学地部署在结构物的关键节点或潜在风险区域，这些位置往往是变形易发点，监测站通过持续运作，实时捕捉并记录结构物细微的变形动态，将获取的原始数据及时反馈至系统。

辅助层承担着保障系统能源供给的重要使命。在供电方案的选择上，充分考虑不同环境条件，采用太阳能供电、市电供电、风电供电以及风光互补供电系统等多元化方案。这些供电模式各有优势且相互补充，无论是光照充足的开阔地带，还是市电稳定的城市区域，亦或是风能资源丰富的特殊环境，都能确保自动化监测系统获得稳定电力，维持全天候不间断运行^[2]。

网络层的设计高度贴合监测现场的复杂状况，提供了丰富多样的组网传输选项。4G、5G 通信技术凭借其高速率与广覆盖的特点，适合将大量原始数据完整传输至后台进行深度解算分析；北斗短报文与卫星通信则在偏远地区或通信基础设施薄弱地带发挥关键作用，保障数据传输“最后一公里”的畅通。

数据层堪称整个系统的“智慧大脑”，由工作站、计算机局域网等硬件设施，以及服务器、数据库、防火墙等关键设备组成，同时搭载监测解算软件和设备远程管控平台等核心软件。该层负责接收前端传回的设备状态数据和解算结果，进行细致的处理、解析、存储，并对原始数据开展深度解算。通过建立数据仓库与分析模型，数据层不仅实现了数据的高效管理，更为系统的智能化决策提供了有力支撑。

应用层直接面向用户，通过专用的自动化监测系统平台或 APP，打造出一站式服务体系。用户不仅可以实时监控设备运行状态、管理监测数据、直观查看监测结果可视化图表，还能借助系统的智能分析功能，开展多参数安全模型分析。系统创新集成了短信、微信预警推送与现场声光报警等多种预警方式，确保安全信息第一时间触达相关人员。此外，系统的数据接口具备强大的兼容性，能够无缝对接多型号、多品牌的传感器，极大提升了系统的普适性和扩展性，使其在各类复杂监测场景中都能游刃有余地发挥作用。

整个系统在设计和实施过程中，会紧密结合所需监测项目的具体特征，灵活地进行数据采集、传输、处理与展示。它不仅实现了数据查询、实时展示、数据下载、用户管理、项目管理、预警告知、报表推送、监测频率调整以及稳定性分析等核心功能，

其数据接口还展现出强大的兼容性，能够适配多型号、多品牌的传感器，从而显著提升了系统的包容性与适用性，确保了在各种复杂监测场景下的高效运作^[3]。

三、自动化监测系统在高速公路边坡监测中的应用策略

（一）高速公路边坡变形监测

边坡稳定性监测是一项系统工程，需对边坡体自身形变过程及外部环境影响因素展开全面观测。在形变监测实践中，通常分为深部位移监测与地表位移监测两大类型。其中，深部位移监测多借助钻孔测斜仪实施，地表位移监测则直接追踪地表变化情况。针对本边坡而言，因其潜在滑动方向不存在控制性软弱结构面，发生深层破坏的概率较低，故而监测工作的重点自然聚焦于地表变形监测^[4]。

当前地表变形监测主要采用两种技术路径：一是通过全球导航卫星系统（GNSS）进行绝对位移监测，二是利用表面裂缝计测量相对位移。GNSS 具备高精度和三维监测能力，适用于未出现明显形变的边坡，能全面反映其整体变形趋势；裂缝计则适合对局部裂缝区域开展精细化跟踪。本边坡尚无明显变形征兆，故以布设 GNSS 监测站为主，实现坡面全覆盖；同时，在坡顶后缘可能出现裂缝的位置增设少量裂缝计，作为局部补充。常用 GNSS 系统精度可达 $\pm 5\text{mm}$ ，足以满足大多数监测需求。考虑到该边坡已完成削坡与混凝土支护处理，便于设备安装，共设置 11 台 GNSS 监测站，分布于各级平台。为应对潜在的突发性位移，提高响应能力，GNSS 监测频率设定为每 300 秒采集一次数据。在坡顶裂缝监测方面，选用 2 套表面裂缝计，常规采样周期为 1800 秒。设备具备自适应变频功能，能根据变形速率动态调整监测频率，最快可达每秒一次，确保对突发变形的实时捕捉，为边坡安全提供及时、有效的数据支持^[5]。

（二）高速公路边坡降雨量监测

边坡稳定性预警预报体系是一套环环相扣的系统化作业流程，其核心环节可归纳为以下关键步骤：首先，布设在边坡现场的降雨量监测设备与各类变形监测仪器，会持续不断地将采集到的实时数据传输至中央监测预警大数据平台，以确保信息的及时性与完整性。其次，该大数据平台利用内置的先进预警模型算法，对实时监测数据进行深度处理，精准计算出反映边坡状态的关键参数，并与预设的预警等级阈值进行比对分析，从而科学评估并输出当前边坡的稳定性状态信息。最后，平台根据判定的预警等级，自动触发相应的信息发布机制，通过短信、语音电话等多种渠道，向预设的相关责任人和单位实时推送预警通告。

深入探究这一流程的具体实施细节可以发现：当监测数据显示边坡区域降雨量显著增加，且累计值超过预设的临界雨量阈值时，系统会即刻启动一级响应，发布蓝色预警信息。这一举措旨在对潜在的边坡变形风险进行前瞻性提示，为后续可能采取的应急措施预留时间窗口。如果监测数据进一步表明边坡体已开始出现变形迹象，就必须立即启动相关应急预案，尤其是要对可能受

影响的停车区域或其他人员聚集场所进行严格管控，并有序疏导区域内人员，以确保安全。当变形监测值达到橙色预警的警戒线时，预警级别明显提升，系统会通过短信和语音通话等更为直接的方式，紧急通知所有相关人员必须迅速撤离至安全地带。与此同时，应急指挥部门需要同步启动边坡影响范围内的道路交通管制程序，并做好随时封闭相关路段的准备，以防止次生灾害发生。一旦变形数据达到最为严峻的红色预警级别，就意味着边坡失稳的风险已迫在眉睫，此时应急响应应进入最高级别，必须确保危险区域内所有人员百分之百安全疏散，相关道路交通也必须完全封闭，切断一切潜在威胁。这样做的根本目的在于最大程度规避灾害可能引发的人员伤亡，保障生命财产安全^[6]。

（三）高速公路边坡地质灾害监测

以滑坡灾害为例，在典型滑坡体区域布设的远程智能监测系统，通过集成化传感网络与高效数据传输模块，持续记录坡体位移与降雨过程，系统性捕捉滑坡从微变到失稳的全周期响应特征。经现场调查与数据反演分析发现，该滑坡在降水驱动下呈现出以前缘发育为起点、逐步向后扩展的“渐进式后退滑动”破坏模式。其形变量曲线变化与日降雨量存在高度相关性，整体呈现出阶梯型演进特征。结合裂缝演化趋势和位移特征判定，当前滑坡已步入加速变形阶段，风险等级显著上升，急需强化动态监管与实时预警机制。

为准确研判滑坡未来形变趋势，调取已构建的预测模型库，系统比对多类演化模型。结果表明，GM-AR融合模型在本次滑坡事件中表现优异，能有效刻画降雨对形变过程的驱动作用，预

测精度高，时效性强，为风险预控与预案部署提供了坚实的技术支撑。基于降雨诱发变形机制，应用加卸载响应比理论，在代表性区域布设多个监测点，实施为期7天的短周期动态观测。研究表明，响应比序列分别高度对应局部失稳与整体稳定性变化，表现出良好的阶段识别能力与敏感响应特征。该模型在揭示滑坡时序演化特性方面具有较高适用性，为现场判识与响应策略优化提供了科学依据。

考虑到高速公路边坡地质条件复杂、环境干扰强，自主集成研发了一套低成本、低功耗、高适应性的远程监测系统，涵盖数据采集、趋势分析与智能预警全流程。通过对关键监测变量及其演化模式的深入挖掘，构建了可推广的预警方法框架。实际应用表明，该系统运行稳定、响应高效，在提升高速公路边坡地质灾害防控能力方面具有良好的技术支撑与推广价值。

四、结束语

综上，自动化监测系统在高速公路高危边坡安全监控中的应用，体现了多种前沿信息技术的深度融合。该系统以高精度测量和短观测周期为优势，不仅保障了边坡稳定性，还大幅减少了传统人工监测的误差，规避了人为疏漏导致的漏报风险。从发展趋势看，自动化监测技术将成为边坡监测的主流方向，其核心价值在于缩短监测时间间隔、提升数据采集精度与频次，通过持续的数据验证分析降低结果不确定性，为高速公路边坡安全管理构建更可靠的技术支撑体系。

参考文献

- [1] 庄旭东. 自动化在线监测系统在高速公路边坡监测中的应用 [J]. 机电信息, 2018(21): 52-53.
- [2] 张昭. 自动化监测技术在地铁隧道施工中的应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2017(7): 178-179.
- [3] 梁中沛, 郭兴. 高速公路高边坡治理中对监测技术的应用 [J]. 中国高新科技, 2019(12): 94-95.
- [4] 欧耀祥. 高速公路高边坡变形监测方法及数据处理分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42(5): 22-23+2501.
- [5] 荣美, 黎付安, 满新耀. GNSS自动化监测系统在高速路边坡表面位移监测中的应用 [J]. 西部交通科技, 2020(2): 22-26.
- [6] 赵鹏涛, 张升彪, 鲁光银. GNSS自动化在线监测在高速公路边坡监测中的应用 [J]. 中国科技信息, 2019(18): 66-68.

建筑工程项目精细化施工管理与成本控制策略研究

洪伟锋

身份证号: 44088319861005005X

DOI:10.61369/ETQM.2025080027

摘 要： 本文围绕建筑工程项目，阐述了业主单位关键地位及管理要点，包括工程总承包模式下矩阵式管理架构优势，施工质量与安全管控机制，全生命周期成本控制模型，EPC 合同成本控制要点等多方面内容，还涉及供应商评估、招标采购、报批报建等管理环节，强调精细化管理与成本控制的重要性，并提出创新方向及理论支撑。

关 键 词： 建筑工程；精细化管理；成本控制

Research on Fine Construction Management and Cost Control Strategies for Construction Projects

Hong Weifeng

ID: 44088319861005005X

Abstract： This article focuses on the key position and management points of the owner unit in construction projects, including the advantages of matrix management architecture under the general contracting mode, construction quality and safety control mechanism, full life cycle cost control model, EPC contract cost control points, and other aspects. It also involves supplier evaluation, bidding and procurement, approval and construction, and emphasizes the importance of refined management and cost control, and proposes innovative directions and theoretical support.

Keywords： construction engineering; refined management; cost control

引言

在建筑行业的发展进程中，随着相关政策的不断出台，如《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》（2020 年），建筑工程项目管理面临着新的机遇与挑战。业主单位在建筑工程项目中的关键地位愈发凸显，其管理方向与重点需契合政策导向。工程总承包模式下的矩阵式管理架构优势明显，同时精细化施工管理体系中全过程质量与安全管控机制至关重要。此外，全生命周期成本控制模型的构建以及 EPC 合同条件下成本控制要点等都对项目管理产生深远影响。本研究围绕建筑工程项目精细化施工管理与成本控制展开探讨。

一、建筑工程项目精细化施工管理体系构建

（一）业主视角下的施工管理组织架构优化

业主单位在建筑工程项目中占据关键地位，其定位决定了管理的方向与重点。业主需明确自身对项目质量、进度、成本等多方面的期望，并将其融入到管理目标中。在工程总承包模式下，矩阵式管理架构具有独特优势。它打破了传统的单一管理线条，将职能部门与项目团队有机结合。职能部门提供专业技术支持和资源保障，项目团队则专注于项目的具体实施。这种架构有利于信息的快速传递和资源的高效配置，使业主能够更好地协调各方关系，确保项目按计划推进。同时，它也能增强应对项目变化的灵活性，及时调整策略以满足项目需求，从而提升项目整体管理效率和效果。

（二）全过程施工质量与安全管控机制

建筑工程项目精细化施工管理体系构建中，全过程施工质量

与安全管控机制至关重要。在施工过程中，需建立严格的质量控制标准和流程，确保每一个施工环节都符合相关规范和设计要求^[1]。同时，加强对施工人员的质量意识培训，提高其对质量问题的重视程度。对于安全管控，要制定完善的的安全管理制度，明确各岗位的安全职责。定期进行安全检查和隐患排查，及时发现并整改安全问题。利用先进的技术手段，如监控系统等，对施工现场进行实时监控，确保施工安全。通过这些措施，实现对建筑工程项目全过程的质量与安全精细化管控。

二、工程成本控制策略创新研究

（一）全生命周期成本控制模型构建

在建筑工程项目中，构建全生命周期成本控制模型至关重要。应涵盖前期决策阶段，考虑项目的可行性、投资回报率等因素，综合评估成本效益^[2]。设计优化阶段需注重方案的合理性与

经济性，避免过度设计造成成本浪费。施工实施阶段则要对人工、材料、设备等成本进行严格监控。建立包含各阶段关键成本控制指标的体系，如前期决策的投资估算准确率，设计阶段的造价降低率，施工阶段的成本偏差率等。通过对这些指标的动态监测和分析，及时调整成本控制策略，确保项目全生命周期成本处于合理范围。

（二）合同管理与动态成本控制方法

在EPC合同条件下，成本控制需关注多个要点。首先是对合同条款的细致研读，明确各方责任与风险分担，避免因合同漏洞导致成本增加^[9]。要注重对设计变更的管理，严格控制变更流程，评估变更对成本的影响。同时，加强对采购环节的成本把控，确保材料设备的质量和价格符合项目要求。

基于大数据分析的动态成本预警系统开发具有重要意义。通过收集项目各阶段的成本数据，利用大数据技术进行分析处理，能够实时监控成本的动态变化。当成本出现异常波动时，系统及时发出预警，以便项目团队采取相应措施进行调整，确保项目成本始终处于可控状态^[10]。

三、业主主导的招标采购管理体系

（一）招标采购标准化流程设计

1. 供应商分级评估体系

构建包含技术能力、履约评价、财务指标的多维度供应商评估模型是供应商分级评估体系的关键。技术能力评估涵盖供应商的专业技术水平、生产工艺、研发能力等方面，确保其能满足项目技术要求^[9]。履约评价需考察供应商过往项目的完成情况，包括交货及时性、产品质量稳定性、售后服务响应速度等。财务指标则关注供应商的财务状况，如偿债能力、盈利能力、营运能力等，以评估其经营稳定性和可持续性。通过综合考量这些维度，能准确评估供应商的综合实力，为招标采购提供科学依据，实现优质供应商的筛选和分级管理。

2. 电子招标平台应用研究

电子招标平台可借助区块链技术保障招标采购的公正性与安全性。在招标文件加密方面，利用区块链的加密算法，确保文件传输和存储过程中的保密性，防止信息泄露^[6]。对于投标保证金管理，通过区块链的智能合约功能，实现保证金的自动管理和监督。当满足特定条件时，保证金的退还和处理可自动执行，减少人为干预，提高管理效率和透明度。同时，电子招标平台还能整合各方数据，实现信息共享，方便业主对招标采购全过程进行实时监控和管理，进一步优化招标采购流程。

（二）战略采购与供应链优化

1. 大宗材料集中采购策略

业主主导的大宗材料集中采购策略是战略采购与供应链优化的重要环节。在建筑工程项目中，甲供材采购模式下，集中采购可实现规模经济，降低采购成本^[7]。通过整合需求，与供应商进行集中谈判，争取更有利的采购条件，包括价格、质量和交货期等。同时，集中采购有利于规范采购流程，加强对供应商的管理

和评估，确保材料质量符合工程要求。在实施过程中，需建立完善的信息管理系统，实时掌握材料市场动态和库存情况，以便做出合理的采购决策。还应注重风险控制，如市场价格波动风险、供应商违约风险等，通过签订合理的合同条款和建立风险预警机制来降低风险。

2. 供应链金融创新应用

反向保理等金融工具在工程项目供应链管理中具有重要意义。它能够优化供应链资金流，缓解供应商的资金压力，从而保障项目物资供应的稳定性和及时性^[9]。通过与核心企业的信用绑定，供应商可以获得更有利的融资条件，降低融资成本。这不仅有利于供应商自身的发展，也有助于增强整个供应链的竞争力。同时，反向保理可以提高供应链的透明度和协同性，促进各方之间的信息共享和合作。在实际应用中，需要合理设计保理方案，明确各方的权利和义务，确保金融工具的有效实施，以实现工程项目供应链管理的优化和成本控制。

四、报批报建管理机制优化

（一）项目前期报建流程再造

1. 并联审批机制创新

构建政府部门协同工作平台是优化报批报建管理机制的关键。通过整合各部门资源，实现信息共享，可提高审批效率。例如，利用信息化技术建立统一的项目数据库，各部门可实时获取项目进展及相关信息，避免重复提交材料和沟通不畅的问题^[9]。同时，研究容缺受理机制在规划审批中的应用具有重要意义。对于一些非关键性材料，在项目单位作出书面承诺后可先行受理审批，允许其在规定时间内补齐材料。这既能加快项目前期报建流程，又能在一定程度上激发市场活力，促进建筑工程项目的顺利推进。

2. 数字化报建系统开发

设计基于GIS系统的三维电子报建平台是数字化报建系统开发的关键。该平台利用GIS的空间分析和数据管理功能，对建筑项目的规划指标进行自动校核。通过将项目的设计方案以三维模型的形式导入平台，系统能够准确提取各项规划指标信息，并与相关规范和标准进行比对。这不仅提高了报建审核的效率和准确性，还减少了人为因素导致的误差。同时，三维电子报建平台为项目各参与方提供了一个可视化的交流环境，便于及时发现和解决问题^[10]。

（二）施工过程证照动态管理

1. 重大变更审批流程优化

建立设计变更分级审批制度，明确不同等级变更的审批主体和流程。对于重大变更，需组织专家论证，从技术、经济、安全等多方面进行评估，确保变更的合理性和可行性。同时，建立施工许可动态更新机制，施工过程中若发生涉及工程规模、结构形式、施工工艺等重大变化，及时向相关部门申请更新施工许可。在证照动态管理方面，加强对施工过程中各类证照有效期的监控，提前安排续期或变更手续，确保施工活动的合法合规性。通

过这些措施,优化报批报建管理机制,提高项目实施过程中的管理效率和规范性。

2.合规性风险预警系统

开发整合政策法规数据库的智能预警平台对施工过程证照动态管理及合规性风险预警至关重要。通过收集各类政策法规信息,建立全面的数据库。利用智能算法,对证照有效期等关键信息进行监测。当证照即将到期时,系统自动发出提醒,确保施工企业能及时办理相关手续。这不仅避免了因证照过期导致的合规性风险,如罚款、停工等,还能使施工过程更加顺畅,提高管理效率。同时,该平台可根据法规变化实时更新数据库,保证预警的准确性和及时性,为建筑工程项目的顺利进行提供有力保障。

(三)竣工验收备案管理创新

1.联合验收工作机制

构建多部门协同的数字化联合验收平台,实现各部门信息共享与实时交互。该平台整合规划、消防、环保等多部门验收标准和流程,提高验收效率和准确性。同时,研究承诺制在竣工验收中的应用,建设单位对符合条件的项目作出承诺,相关部门进行事后监管。这不仅能加快项目竣工验收进度,还能强化建设单位主体责任意识。通过这种创新的联合验收工作机制,减少验收环节的重复工作和时间浪费,确保建筑工程项目顺利完成竣工验收备案,为项目投入使用创造有利条件。

2.档案电子化移交标准

在报批报建管理机制优化方面,应建立高效的信息沟通渠道,加强各部门协同,简化流程,提高审批效率。竣工验收备案管理创新需注重引入信息化手段,实现验收流程的实时监控与数据共享,确保备案的准确性与及时性。对于档案电子化移交标准,要制定基于BIM模型的竣工资料交付标准,规范资料格式与内容,保证资料的完整性和准确性。同时,研究电子签章在档案管理中的应用,提高档案的安全性和可信度,通过这些措施实现建筑工程项目精细化施工管理与成本控制,提升整体管理水平和效益。

五、总结

本研究围绕建筑工程项目精细化施工管理与成本控制展开。通过实证研究,验证了精细化施工管理体系的有效性。在业主单位主导模式下,明确了成本控制的关键成功因素,这对合理控制成本具有重要指导意义。同时,考虑到数字化转型的大背景,提出了工程管理的创新方向,为建筑工程项目管理的与时俱进提供了思路。这些研究成果为国有资金投资项目综合效益的提升提供了理论支撑,有助于提高项目管理水平,优化资源配置,降低成本,增强项目的市场竞争力,推动建筑行业的可持续发展。

参考文献

[1] 张嘉铮. 精细化管理与施工深化设计在工程项目成本控制中的应用研究 [D]. 中国科学院大学, 2015.
[2] 周洪. 精细化管理在施工成本控制中的应用与研究 [D]. 浙江工业大学, 2016.
[3] 杨爱歌. 建筑工程项目中绿色施工的成本控制研究 [D]. 华侨大学, 2017.
[4] 潘振升. 建筑工程项目管理中的成本控制与优化策略研究 [J]. 建筑工程技术与设计, 2022, 10(10): 127-129.
[5] 孙千然. 基于精细化管理的Z公司施工项目成本控制研究 [D]. 中国科学院大学, 2021.
[6] 周强. 基于精细化管理的建筑工程施工进度与成本双控技术研究 [J]. 建筑工程技术与设计, 2022, 10(8): 1-3.
[7] 贺燕荣. 建筑施工全过程成本精细化管理与造价控制浅述 [J]. 建材发展导向(下), 2020, 18(5): 335.
[8] 孙飞飞. 建筑施工全过程成本精细化管理与造价控制 [J]. 建筑与装饰, 2022(17): 4-6.
[9] 魏跟虎. 建筑工程施工全过程成本精细化管理与控制探讨 [J]. 建筑与装饰, 2019(3): 98, 101.
[10] 陈晓龙. 建筑施工项目成本控制的精细化管理 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017(23): 4098-4098.

铁路工程施工图深化与技术管理的协同优化

鲜永开

四川省铁路建设有限公司，四川 成都 610000

DOI:10.61369/ETQM.2025080028

摘 要： 阐述铁路工程施工图深化与技术管理协同优化，包括内涵、需求特征等。介绍基于 BIM 等技术的协同方法，如构建协同平台、多专业设计协同机制等。强调构建标准化管理体系、评价指标体系的重要性，还涉及风险预警、数字化管理平台等内容，并通过案例分析验证其可行性和有效性，提出行业推广建议。

关 键 词： 铁路工程；施工图深化；技术管理协同

Collaborative Optimization of Deepening Construction Drawings and Technical Management in Railway Engineering

Xian Yongkai

Sichuan Railway Construction Co., Ltd. Chengdu, Sichuan 610000

Abstract： This article elaborates on the deepening of railway engineering construction drawings and the coordinated optimization of technical management, including their connotations, demand characteristics, etc. Introduce collaborative methods based on BIM and other technologies, such as building collaborative platforms, multi-disciplinary design collaboration mechanisms, etc. Emphasize the importance of building a standardized management system and evaluation index system, which also involves risk warning, digital management platform, and other content. Through case analysis, verify their feasibility and effectiveness, and propose industry promotion suggestions.

Keywords： railway engineering; deepening of construction drawings; technical management collaboration

引言

随着我国铁路工程建设的快速发展，对工程质量、进度和成本的控制要求日益提高。2020 年发布的《中国铁路工程建设指南》强调了工程协同管理的重要性。铁路工程施工图深化与技术管理的协同优化涵盖从设计到施工的全流程，包括信息共享、资源合理配置等多个方面。这种协同优化对于提高设计精度、施工效率和成本控制具有关键作用。同时，基于 BIM 等技术构建的协同平台以及多专业协同机制等创新实践，为铁路工程的综合效益提升提供了有力支撑，也为进一步研究和完善协同优化理论与实践奠定了基础。

一、铁路工程施工图深化与技术管理协同优化的理论基础

（一）协同优化理论框架构建

铁路工程领域协同优化是指通过整合施工图深化与技术管理各要素，实现系统整体性能提升。其内涵包括信息共享、资源合理配置及目标协同等方面。施工图深化与技术管理存在紧密耦合关系，可建立模型来描述。例如，施工图深化为技术管理提供精确指导，技术管理则为施工图深化反馈优化建议，两者相互促进。全生命周期管理理论在工程实践中具有重要应用，涵盖从项目规划到运营维护的各个阶段。它要求在不同阶段综合考虑施工图深化与技术管理的协同，以确保工程质量、进度和成本的有效

控制，提高铁路工程的综合效益^[1]。

（二）铁路工程协同优化的需求特征

铁路工程施工图深化与技术管理协同优化具有重要需求特征。从设计精度维度看，铁路工程涉及众多复杂系统和严格标准，需要施工图深度细化以确保各部分设计准确无误，满足铁路运行安全和功能要求，同时技术管理需紧密配合，保障设计理念在施工中得以精准实现^[2]。在施工效率方面，高效施工是铁路建设的关键，施工图深化应考虑施工流程的便捷性和合理性，技术管理则要对施工过程进行有效组织和协调，避免因设计与施工脱节导致的延误。成本控制上，施工图的合理深化有助于减少不必要的工程变更和浪费，技术管理需从成本角度对施工技术和材料选用等进行把控，实现铁路工程建设经济效益最大化。

二、施工图深化中的技术协同机制

（一）BIM技术驱动的深化设计流程优化

基于BIM技术构建施工图深化协同平台，实现各参与方信息共享与协同工作。通过该平台集成碰撞检测技术，能够在虚拟环境中提前发现设计冲突，减少施工中的变更与返工^[3]。工程量计算功能则可准确快速地获取工程数量信息，为造价控制和资源调配提供依据。可视化交底借助BIM的三维可视化特性，将施工工艺和技术要求直观地展示给施工人员，提高交底效果和施工质量。这种基于BIM的协同机制优化了深化设计流程，提升了铁路工程施工图深化与技术管理的协同效率。

（二）多专业协同设计质量控制体系

在铁路工程中，建立轨道、桥梁、隧道等多专业设计协同机制至关重要。各专业在设计过程中紧密相关，需实现信息的高效共享与交互。通过统一的数据平台，各专业设计人员可实时上传和获取相关设计数据，及时了解其他专业的设计进展和关键参数^[4]。同时，设计冲突智能检测算法可对不同专业设计成果进行自动比对分析，快速识别潜在冲突点。例如在空间布局、结构受力等方面可能出现的矛盾。协调决策模型则依据检测结果，综合考虑各专业的技术要求和工程实际情况，给出合理的解决方案，确保多专业协同设计的质量和效率，使铁路工程施工图深化过程更加科学、合理。

三、技术管理协同优化的实施路径

（一）标准化管理体系的协同构建

1. 设计施工一体化标准体系

铁路工程施工图深化与技术管理的协同优化需构建涵盖全流程的标准化管理体系。对于图纸审查，应明确各方职责与审查要点，确保图纸质量符合工程要求^[5]。变更管理方面，建立规范的变更流程，严格控制变更范围与审批程序，保障工程的顺利进行。技术交底环节，要制定详细的交底内容与方式，使施工人员准确理解设计意图和技术要求。通过协同构建设计施工一体化标准体系，将这些环节有机结合，实现从图纸到施工的无缝对接，提高铁路工程的建设质量和效率。

2. 技术经济协同评价指标

为实现铁路工程施工图深化与技术管理的协同优化，需建立兼顾技术可行性与经济合理性的多维度评价指标体系。该体系应综合考虑工程技术指标、成本效益指标以及工期进度指标等。技术指标涵盖工程质量、施工难度、技术创新等方面，确保工程技术上的可行性与先进性^[6]。成本效益指标需分析工程建设成本、运营成本以及预期收益，以实现经济合理性。工期进度指标则关注工程各阶段的时间安排，确保工程按时交付。通过对这些指标的综合评估，能够全面衡量铁路工程施工图深化与技术管理的协同效果，为决策提供科学依据。

（二）动态协同管理机制创新

1. 风险预警与协同决策机制

开发基于大数据的技术风险预警系统，需收集并整合铁路工程施工图深化及技术管理过程中的各类数据，包括设计变更、施工难点、技术参数波动等数据信息，通过数据分析挖掘潜在风险

因素^[7]。同时构建多主体协同决策模型，明确各主体在决策过程中的角色与职责，如设计单位、施工单位、监理单位等。各主体依据风险预警系统提供的信息，结合自身专业知识和经验，共同参与决策过程，以实现风险的及时有效应对，保障铁路工程的顺利进行。

2. 全过程信息化协同平台

设计融合PDCA循环的数字化管理平台架构，可实现铁路工程施工图深化与技术管理的协同优化。该架构通过PDCA循环的计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）和处理（Act）四个阶段，对铁路工程的各个环节进行系统管理。在计划阶段，明确施工图深化和技术管理的目标与任务；执行阶段确保各项工作按计划开展；检查阶段对过程和结果进行监督评估；处理阶段针对问题及时调整改进。同时，此平台架构实现了数据实时共享与流程联动，不同部门和岗位之间能够及时获取所需信息，避免信息孤岛，提高工作效率和协同效果，促进铁路工程的顺利进行^[8]。

四、协同优化的工程实践验证

（一）典型铁路工程案例选取

1. 项目特征与协同需求分析

选取山区铁路复杂工点作为典型案例，该区域地质条件复杂，涵盖多种不良地质，如断层、岩溶等，给工程设计与施工带来巨大挑战^[9]。同时，山区铁路涉及多个专业，专业接口众多，包括线路、桥梁、隧道、地质等专业。各专业在设计与施工过程中需紧密配合，但由于专业差异，容易出现信息沟通不畅、设计冲突等问题。例如，线路专业确定的线路走向可能与地质专业所揭示的不良地质区域冲突，需要各专业协同优化。这些协同难点凸显了在铁路工程施工图深化与技术管理协同优化的必要性。

2. 协同优化方案制定

针对典型铁路工程案例，制定协同优化方案。采用三维协同设计，利用先进的设计软件构建铁路工程的三维模型，涵盖线路、桥梁、隧道等各个部分，实现各专业设计信息的集成与共享，提高设计质量和效率^[10]。通过施工模拟，对施工过程进行动态演示，预测可能出现的问题，提前制定解决方案，确保施工顺利进行。同时，建立进度成本联控机制，实时监控工程进度和成本，根据实际情况调整资源分配，实现进度和成本的有效控制。综合三维协同设计、施工模拟和进度成本联控，形成一套完整的协同优化实施方案，为铁路工程施工图深化与技术管理提供有力支持。

（二）协同实施效果评价

1. 质量效益提升指标

设计变更率是衡量协同优化对工程质量效益影响的关键指标之一。较低的设计变更率意味着在施工图深化与技术管理协同过程中，前期规划和设计更为精准，减少了因设计不合理导致的工程变更。施工返工率同样重要，它反映了施工过程中因质量问题或不符合设计要求而需要重新施工的情况。通过协同优化，加强了施工图与技术管理的衔接，施工人员能更好地理解设计意图，

从而降低施工返工率。这些指标的良好表现，直接体现了协同优化在铁路工程中的质量效益提升作用，为工程的顺利进行和高质量交付提供了有力保障。

2. 经济性对比分析

运用全生命周期成本分析法对铁路工程施工图深化与技术管理的协同优化进行经济性对比分析。全生命周期成本涵盖从项目规划到运营及维护的各个阶段。在协同优化前，由于施工图深化与技术管理存在脱节，可能导致施工过程中的变更频繁，增加直接成本，同时也可能因技术问题影响运营效率，增加后期运营维护成本。而协同优化后，通过有效的信息共享和流程整合，减少了施工变更，降低了直接成本。并且在技术管理的支持下，工程质量更有保障，可减少运营阶段因质量问题产生的维修成本，从而在全生命周期内实现了成本的节约，验证了协同优化的经济效益。

（三）协同优化经验总结

1. 关键成功要素提炼

在铁路工程施工图深化与技术管理的协同优化中，组织架构方面，建立了跨部门、跨专业的协同团队，明确各成员职责与沟通机制，确保信息流畅传递。技术标准上，统一了设计、施工等各环节的标准，减少因标准不一致导致的矛盾与返工。信息平台建设至关重要，搭建了集成化的信息管理系统，涵盖工程图纸、技术文档、进度信息等，实现实时共享与更新，提高了工作效率与决策科学性。同时，注重人员培训与技术交流，提升团队整体素质，使其能更好地适应协同优化工作模式，保障了铁路工程施

工图深化与技术管理协同优化的顺利实施。

2. 行业推广应用建议

通过多个铁路工程项目的实践验证，总结出协同优化的关键经验。在实践中，针对不同工程类型制定了详细的协同优化实施流程，确保各环节紧密衔接。同时，建立了有效的沟通机制，使设计、施工和技术管理团队能够及时交流，解决问题。基于这些经验，提出以下行业推广应用建议：一是制定统一的协同优化标准和规范，为不同地区和企业提供指导。二是加强人员培训，提高从业人员对协同优化理念和方法的认识与应用能力。三是鼓励企业建立协同优化管理平台，实现信息共享和流程自动化，提高协同效率。通过这些措施，有望在铁路工程行业全面推广协同优化，提升施工图深化和技术管理水平，提高工程质量和效益。

五、总结

铁路工程施工图深化与技术管理的协同优化至关重要。通过系统梳理相关理论创新与实践成果，明确了其在工程建设中的关键作用。一方面，理论创新为协同优化提供了基础支撑，如在智能算法集成上的探索，有助于提高管理效率和精准度。另一方面，实践成果验证了协同优化的可行性和有效性。同时，指出在标准体系完善等方面的发展方向，这将进一步规范协同优化工作。在数字化转型背景下，铁路工程协同管理的重要价值愈发凸显，不仅能提升工程质量和进度控制，还能更好地适应行业发展需求，促进铁路工程建设的可持续发展。

参考文献

- [1] 刘利强. 基于 LSM 的铁路工程施工进度计划优化方法研究 [D]. 北京交通大学, 2018.
- [2] 陈强, 李葭, 冯丛, 等. 浩吉铁路建设设计管理创新与实践 [J]. 中国铁路, 2021(5): 53-58.
- [3] 张辉. 铁路工程施工监理方法及措施 [J]. 四川建材, 2022, 48(7): 222-223.
- [4] 韩荣华. 浅析铁路工程施工图预算编制 [J]. 铁路工程造价管理, 2014, 29(1): 52-54.
- [5] 李甲. 高海拔地区铁路工程施工安全风险耦合机理研究 [D]. 兰州交通大学, 2022.
- [6] 傅跃明. 机电安装工程施工图深化控制与施工技术管理 [J]. 城市建设理论研究, 2014(12).
- [7] 徐海平. 施工图深化与管线综合优化 BIM 应用技术 [J]. 建筑工程技术与设计, 2018(23): 676, 1260.
- [8] 潘潇潇. 机电安装工程施工图深化控制与施工技术管理 [J]. 建筑工程技术与设计, 2015(36): 2261.
- [9] 吴俊刚. 机电安装工程施工图深化控制与施工技术管理 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2014(28): 191-192.
- [10] 顾传军. BIM 技术在医院机电施工图深化中的应用 [J]. 安装, 2021(11): 60-63.

路面粗糙度检测的精度提升技术

吕恒

广东交科检测有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ETQM.2025080030

摘 要： 本文探讨了影响路面粗糙度检测精度的多种因素及提升方法。包括沥青混合料特性、施工工艺参数、检测设备及算法等。阐述了协同工作机制、滤波算法优化等技术，强调检测技术管理体系构建的重要性，指出设备优化、算法改进和管理创新协同提升精度。

关 键 词： 路面粗糙度；检测精度；技术管理

Techniques to Improve the Accuracy of Pavement Roughness Detection

Lv Heng

Guangdong Jiaokexi Testing Co.,Ltd. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This paper discusses various factors that affect the accuracy of pavement roughness detection, including asphalt mixture properties, construction process parameters, testing equipment, and algorithms. It elaborates on collaborative working mechanisms, optimization of filtering algorithms, and other related technologies, emphasizing the importance of constructing a technical management system for detection. It also points out that the coordination of equipment optimization, algorithm improvement, and management innovation can jointly enhance detection accuracy.

Keywords： pavement roughness; detection accuracy; technical management

引言

路面粗糙度检测精度对于道路工程质量至关重要。随着我国交通基础设施建设的不断推进（如2021年发布的《国家综合立体交通网规划纲要》强调提升基础设施质量），对路面粗糙度检测精度提出了更高要求。沥青混合料特性、施工工艺参数、检测系统构建以及检测技术管理体系等多方面因素均会影响检测精度。从混合料级配等影响激光测量，到施工温度和碾压遍数改变路面纹理，再到协同工作机制及各种算法优化，以及检测技术管理体系的完善，都需要综合考虑，以实现路面粗糙度检测精度的提升。

一、路面粗糙度检测精度影响因素分析

（一）路面材料特性对检测精度的影响机制

沥青混合料级配、骨料形状与表面纹理会对激光断面仪测量结果产生干扰，进而影响路面粗糙度检测精度。沥青混合料的级配不同，其内部空隙结构和颗粒分布不同，会导致激光反射和散射情况发生变化，影响测量准确性。骨料形状不规则时，激光照射到骨料表面的角度和反射方向复杂多变，使得测量结果出现偏差。同时，骨料表面纹理粗糙程度不一致，也会干扰激光的反射强度和反射模式，最终影响路面粗糙度检测精度^[1]。

（二）施工工艺参数波动对检测结果的影响

摊铺温度与碾压遍数等施工工艺参数的波动对路面粗糙度检测结果有着显著影响。摊铺温度过高或过低可能导致沥青混合料的流动性异常，进而影响路面的压实效果和表面纹理。温度过高时，沥青可能过度流淌，使得路面表面不够平整；温度过低则可能导致压实困难，出现空隙等情况，改变表面纹理特征^[2]。碾压

遍数的不同也会使路面达到不同的密实程度。碾压遍数不足，路面不够密实，粗糙度可能较大且不均匀；而过度碾压可能破坏路面结构，影响表面纹理的正常形成。这些施工工艺参数的波动最终会导致路面表面纹理特征发生变异，从而影响路面粗糙度检测的精度。

二、检测设备优化与校准技术改进

（一）多源传感器融合检测技术

构建激光测距仪与惯性导航系统的协同工作机制是提升路面粗糙度检测精度的关键。激光测距仪可精确测量路面的距离信息，惯性导航系统能获取车辆的运动姿态和位置变化。通过合理设计二者的协同工作方式，使其优势互补，可更全面准确地获取路面相关数据^[3]。在此基础上，提出基于卡尔曼滤波的数据融合算法。卡尔曼滤波能够对不同传感器获取的数据进行有效融合，降低噪声干扰，提高数据的准确性和可靠性。该算法通过对系统

状态的预测和更新，不断优化融合结果，从而为路面粗糙度的精确检测提供有力支持。

（二）动态校准方法研究

车载检测系统的动态校准对于提高路面粗糙度检测精度至关重要。建立振动补偿模型是关键步骤之一，通过分析车辆在行驶过程中的振动特性，结合传感器采集的数据，运用相关算法构建模型，以补偿振动对检测结果的影响^[4]。同时，设计基于标准试块的在线校准流程。标准试块具有已知的粗糙度特性，在检测过程中定期使用标准试块进行校准，可确保检测设备的准确性和稳定性。通过将检测设备对标准试块的测量结果与已知标准值进行对比和调整，实现对设备的动态校准，从而提高路面粗糙度检测的精度。

三、数据处理算法优化策略

（一）传统算法改进

1. 自适应滤波算法优化

自适应滤波算法优化对于路面粗糙度检测精度提升至关重要。在传统算法基础上，可开发基于路面特征的自适应小波阈值去噪方法。通过对路面特征的深入分析，确定合适的小波基函数以及阈值规则。这种自适应方法能够根据路面信号的特点自动调整去噪参数，更有效地消除环境噪声干扰^[5]。与传统固定参数的滤波方法相比，它能更好地保留路面信号的有效成分，提高数据处理的准确性，从而为路面粗糙度检测提供更可靠的数据支持。

2. 特征提取算法改进

对于特征提取算法的改进，构建多尺度纹理特征提取模型是关键。通过整合不同尺度的纹理信息，能够更全面地捕捉路面的粗糙度特征。该模型可以对路面图像进行多尺度分析，提取出在不同分辨率下的纹理特征。这些特征能够反映路面微观和宏观的粗糙度情况，为后续的分析提供更丰富的数据基础。同时，在优化国际平整度指数 (IRI) 计算精度方面，利用提取的多尺度纹理特征，结合先进的数学算法和模型，可以更准确地计算 IRI 值。这有助于提高路面粗糙度检测的精度，为道路维护和建设提供更可靠的技术支持^[6]。

（二）机器学习算法应用

1. 卷积神经网络特征识别

面向路面图像设计 CNN 架构以实现微观纹理特征自动识别是提升路面粗糙度检测精度的关键。CNN 通过卷积层、池化层和全连接层等结构自动学习图像特征。在卷积层中，通过卷积核在图像上滑动进行卷积操作，提取不同尺度的特征图，有效捕捉微观纹理信息^[7]。池化层则对特征图进行下采样，减少数据量同时保留关键特征。全连接层将学习到的特征进行整合和分类。通过合理调整 CNN 的网络结构参数，如卷积核大小、步长、层数等，可以优化特征识别效果，从而更准确地识别路面微观纹理特征，为路面粗糙度检测精度的提升提供有力支持。

2. LSTM 时序数据处理

建立基于长短期记忆网络 (LSTM) 的检测数据时序分析模

型可提升动态检测稳定性。LSTM 通过特殊的门控机制，能够有效处理时序数据中的长期依赖关系。在路面粗糙度检测中，将采集到的时序数据输入 LSTM 模型，其内部的记忆单元可以记住之前的信息，从而更好地捕捉数据的动态变化特征。这种对时序数据的有效处理方式，能够减少因数据波动带来的误差，提高模型对路面粗糙度检测的准确性。同时，LSTM 还可以通过调整自身的参数，不断优化对数据的拟合能力，进一步提升动态检测的稳定性^[8]。

四、检测技术管理体系构建

（一）标准化检测流程设计

1. 多工况检测规程制定

在路面粗糙度检测中，构建科学的检测技术管理体系至关重要。标准化检测流程设计是基础，需明确从仪器准备到数据采集的每一个环节的标准操作。对于多工况检测规程制定，应充分考虑不同气候条件和交通状态。不同气候条件如高温、低温、降雨、降雪等会对路面粗糙度产生影响，同时不同的交通状态包括车流量大小、车辆类型等也会干扰检测结果。因此，要建立不同气候条件、交通状态下的标准化检测作业指导书，详细规定在各种工况下的检测方法、仪器调整方式以及数据处理规范等，以确保检测结果的准确性和可靠性^[9]。

2. 设备状态监控体系

为提升路面粗糙度检测精度，构建科学的检测技术管理体系至关重要。其中，标准化检测流程设计需涵盖检测前设备校准、检测过程规范操作以及检测后数据处理等环节。在设备状态监控体系方面，开发检测设备健康状态实时监测系统是关键。该系统应包含传感器灵敏度自检模块，可实时监测传感器的工作状态，确保其灵敏度符合检测要求。通过对设备状态的有效监控，能及时发现潜在问题并采取相应措施，避免因设备故障或性能下降而影响检测精度，保障检测结果的准确性和可靠性，为路面粗糙度检测提供有力技术支持^[10]。

（二）人员培训与质量控制

1. 操作人员技能认证体系

路面粗糙度检测的精度提升技术要求构建完善的操作人员技能认证体系。需制定包含设备操作、数据处理、异常诊断的阶梯式培训认证方案。在设备操作方面，操作人员要熟练掌握粗糙度检测设备的使用方法、操作规程及维护要点，通过理论学习和实际操作考核。对于数据处理，要培训操作人员掌握数据采集、整理、分析的方法和软件应用，确保数据准确性和可靠性。异常诊断环节，培养操作人员对检测过程中出现的异常情况进行识别和处理的能力，包括设备故障、数据异常等，通过模拟异常场景进行考核。通过这样的阶梯式培训认证方案，全面提升操作人员技能水平，保障检测质量。

2. 检测数据校验机制

建立三级数据审核制度对于检测数据校验至关重要。现场初检是第一道关卡，检测人员在现场完成检测后，立即对数据进行

初步检查，确保数据的完整性和准确性，及时发现并纠正因设备操作不当或环境因素导致的明显错误。实验室复检则是在数据传输到实验室后，由专业技术人员利用更精密的仪器和方法，对数据进行再次核对和分析，检查数据是否符合相关标准和规范。专家终审是最后一道防线，邀请行业内的专家对经过前两道审核的数据进行最终审定，专家凭借丰富的经验和专业知识，从宏观角度对数据的可靠性和科学性进行评估，确保检测数据的高质量，为路面粗糙度检测精度提升提供可靠的数据支撑。

（三）信息化管理平台建设

1. 检测数据云端管理

构建检测技术管理体系中的信息化管理平台及检测数据云端管理至关重要。开发支持多源数据融合的 BIM 管理平台，可整合不同来源的检测数据。通过该平台，能够实现检测数据的可视化分析。在云端管理方面，利用云计算强大的存储和计算能力，确保海量检测数据的安全存储与高效处理。同时，建立严格的数据访问权限机制，保障数据的安全性和隐私性。借助信息化管理平台和检测数据云端管理，可提高路面粗糙度检测技术管理的效率和精度，为后续的研究和决策提供有力支持。

2. 智能决策支持系统

在检测技术管理体系构建方面，需建立完善的标准与流程，确保检测技术的科学性与规范性。对于信息化管理平台建设，要

整合各类检测数据，利用大数据技术进行存储、分析与管理。通过该平台，实现检测数据的实时共享与交互，提高管理效率。在智能决策支持系统中，基于大数据分析构建施工质量反馈机制。系统对检测数据进行深度挖掘，分析路面粗糙度相关指标与施工环节的关联。当检测到不符合标准的数据时，能迅速反馈给施工方，施工方根据反馈调整施工工艺。同时，系统持续学习优化，不断提升反馈的准确性与及时性，实现检测 - 施工的闭环管理，有效提升路面粗糙度检测的精度。

五、总结

路面粗糙度检测精度的提升是一个综合性的工程，涉及设备优化、算法改进和管理创新三个关键方面。设备的优化能够提高检测的准确性和稳定性，算法改进则为数据处理提供更高效和精确的方法，管理创新确保整个检测过程的高效有序。三者协同作用，共同促进了精度的提升。基于全要素控制的精度保障体系在杭绍甬高速等工程中取得了良好的应用效果，证明了这些技术和方法的有效性。未来，智能无人检测装备开发和多源异构数据融合分析技术将成为研究的重点方向，有望进一步推动路面粗糙度检测精度的提升，为道路工程质量提供更可靠的保障。

参考文献

- [1] 张蒙, 杜广生, 程浩, 等. 杂质浓度对超声波传播特性及流量测量精度影响的研究 [J]. 中国粮油学报, 2020, 35(10): 176-181.
- [2] 未普娇. 超声波矿浆浓度计检测精度的研究 [D]. 河北: 华北理工大学, 2019.
- [3] 胡艳娥, 诸进才, 陈敏. 数控加工精度在机检测技术研究现状 [J]. 机床与液压, 2021, 49(16): 168-173+179.
- [4] 韩晋, 张淑荣, 陈乃玉, 等. 激光传感器振动对壁板厚度测量系统检测速度的影响研究 [J]. 内燃机与配件, 2019, (24): 108-110.
- [5] 蒋国伟, 刘伟, 张凌燕, 等. 微振动对不同支撑形式扫描机构的扫描精度影响研究 [J]. 上海航天, 2017, 34(06): 58-64.
- [6] 唐体伟. 浅谈如何提升万能量具检测精度 [J]. 电子测试, 2018, 29(06): 135-136.
- [7] 孙加法. 浅析如何提升万能量具检测精度 [J]. 山东工业技术, 2015, (01): 41-41.
- [8] 林达. 提高缓蚀防垢剂检测精度 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2016(14): 413-413.
- [9] 胡万斌. 基于 QBSO-ELM 的网络入侵检测系统研究与实现 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2023.
- [10] 梅阳, 刘献游, 王平杰, 等. MsS 超声导波技术的管道缺陷检测精度实验研究 [J]. 石油和化工设备, 2015, 18(11): 47-49.

建筑施工试验检测在水利工程中的应用与实践

翟维娟

雄铁工程检测有限公司，雄安新区 071600

DOI:10.61369/ETQM.2025080006

摘 要： 本文探讨了建筑施工试验检测在水利工程中的应用与实践，强调其在保障水利工程质量与安全性方面的重要作用。通过原材料检测、施工过程监控及数据分析，试验检测为工程质量控制提供了科学依据。当前检测工作面临标准滞后、人员素质不齐等问题，未来需借助智能化技术与动态标准更新机制提升检测水平，以推动水利工程高质量发展。

关 键 词： 水利工程；试验检测；质量控制

Application and Practice of Construction Testing and Inspection in Water Conservancy Projects

Zhai Weijuan

Xiongtie Engineering Testing Co., Ltd. Xiong'an New Area 071600

Abstract： This paper explores the application and practice of construction testing and inspection in water conservancy projects, emphasizing its significant role in ensuring the quality and safety of water conservancy projects. Through the detection of raw materials, monitoring of the construction process, and data analysis, testing and inspection provide a scientific basis for quality control. The current testing work faces issues such as outdated standards and uneven personnel quality. In the future, it is necessary to improve the testing level by using intelligent technology and a dynamic standard updating mechanism to promote the high-quality development of water conservancy projects.

Keywords： water conservancy projects; testing and inspection; quality control

引言

水利工程建设作为国家基础设施建设的重要组成部分，对保障水资源合理利用、防洪减灾以及促进区域经济发展具有深远意义^[1]。建筑施工试验检测在水利工程中扮演着关键角色，其通过科学、系统的方法对施工过程中的原材料、施工工艺以及工程质量进行全方位检测与评估，确保工程符合设计要求与质量标准。近年来，随着《水利工程建设质量提升行动方案》（2023年）的颁布实施，对水利工程建设质量提出了更高要求，强调加强质量检测体系建设，提升检测技术水平，以保障水利工程建设的高质量发展。在此背景下，深入研究建筑施工试验检测在水利工程中的应用与实践，对于推动水利工程高质量建设、提升工程安全性和耐久性具有重要的现实意义。

一、水利工程建筑施工试验检测概述

（一）水利工程建筑施工试验检测的定义

水利工程建筑施工试验检测是贯穿水利工程建设全过程的关键技术手段，旨在通过科学、系统的检测方法和技术手段，对水利工程建设中涉及的原材料、施工工艺、结构质量等环节进行全面检测与评估^[2]。其内容涵盖原材料的物理、化学及力学性能检测，施工过程中的质量控制检测，以及工程竣工后的质量验收检测等^[3]。在水利工程建设中，试验检测不仅是工程质量控制的重要依据，也是保障工程安全运行、延长工程使用寿命的关键环

节，为水利工程的科学建设与管理提供坚实的技术支撑。

（二）水利工程建筑施工试验检测的特点

水利工程建筑施工试验检测具有显著的特殊性。其受自然环境影响大，水利工程多位于自然环境复杂的区域，如山区、河流等，气候条件、地质状况等因素对检测工作干扰多，增加了检测难度和不确定性^[4]。检测对象复杂，水利工程涉及多种材料和结构形式，如混凝土、土石坝、金属结构等，不同材料和结构的检测方法和技术要求差异大，需具备全面的检测技术和专业知识。检测标准严格，水利工程关乎国计民生，其质量直接关系到防洪、灌溉、发电等功能的实现，因此检测标准高，要求检测结果

准确、可靠，能够真实反映工程质量状况^[5]。这些特点要求试验检测工作必须具备高度的专业性、严谨性和适应性，以确保检测结果能够有效指导工程建设和质量控制。

二、试验检测在水利工程建筑施工中的重要性

（一）保障工程质量

试验检测是水利工程建筑施工质量控制的关键环节。在施工过程中，原材料的质量直接影响工程的整体性能。通过严格的试验检测，能够及时发现原材料如水泥、砂石、钢材等存在的质量问题^[6]，如强度不足、成分不符合要求等，从而采取措施进行更换或调整，确保原材料符合设计标准。同时，施工工艺的合理性也是工程质量的重要保障。试验检测可以对混凝土浇筑、土方压实等施工工艺进行实时监测，发现振捣不密实、压实度不足等问题，并及时纠正，避免因施工工艺不当导致的质量缺陷^[7]。此外，试验检测还能对施工过程中的隐蔽工程进行质量把控，如钢筋布置、预埋件安装等，确保这些关键部位的施工质量符合规范要求。通过全方位的试验检测，能够有效保障水利工程建筑施工的工程质量，使其达到设计和规范要求，为工程的顺利竣工和长期稳定运行奠定坚实基础。

（二）提高工程安全性

水利工程建筑结构的安全性是工程建设的核心目标之一，而试验检测在其中发挥着至关重要的作用。水利工程通常面临着复杂的自然环境和长期的运行压力，其结构的稳定性直接关系到工程的安全运行^[8]。通过试验检测，可以对混凝土结构的强度、耐久性进行评估，及时发现因原材料质量问题或施工工艺缺陷导致的结构隐患，如裂缝、渗漏等，从而采取加固或修复措施，防止结构破坏引发的安全事故。对于土方工程，试验检测能够准确测定土壤的压实度、承载力等指标，确保基础工程的稳定性，避免因基础不稳导致的滑坡、沉降等问题^[9]。在施工过程中，试验检测还可以对施工设备的安全性能进行监测，确保设备运行安全，防止因设备故障引发的施工安全事故。通过科学、系统的试验检测，能够全面评估水利工程建筑结构的安全性，有效预防和减少因质量问题引发的安全事故，保障水利工程建设和运行的安全性^[10]，为人民生命财产安全和社会稳定提供有力保障。

三、水利工程建筑施工试验检测的主要方向

（一）原材料试验检测

1. 土壤试验检测

土壤试验检测是水利工程基础施工的重要环节，涵盖土壤的物理性质、化学性质和力学性质等多方面内容。物理性质检测主要包括土壤的颗粒组成、孔隙率、密度等，通过筛分试验、比重试验等方法，可准确评估土壤的透水性和压缩性，为地基处理提

供依据。化学性质检测则涉及土壤的酸碱度、有机质含量等，采用 pH 值测定和化学分析等手段，确保土壤化学稳定性，防止因化学腐蚀影响基础结构。力学性质检测重点在于土壤的抗剪强度和承载能力，通过直剪试验、三轴压缩试验等，确定土壤的力学参数，保障基础承载力满足设计要求。这些检测结果对水利工程基础施工具有重要指导意义，能够有效预防因地基问题引发的工程隐患，确保工程的稳定性和安全性。

2. 混凝土及砂浆试验检测

混凝土及砂浆的试验检测是确保水利工程结构质量的重要手段。检测项目涵盖强度、耐久性和和易性等方面。强度检测通过抗压强度试验和抗折强度试验完成，采用标准试块养护至规定龄期后进行测试，以确保混凝土和砂浆能够承受设计荷载。耐久性检测包括抗冻性、抗渗性和抗侵蚀性等，通过冻融循环试验、渗透试验和化学侵蚀试验等方法，评估材料在恶劣环境下的长期性能。和易性检测则通过坍落度试验和维勃稠度试验等，确保混凝土和砂浆在施工过程中具有良好的流动性、保水性和黏聚性。通过这些检测项目，可以优化混凝土和砂浆的配合比，确保其在水利工程中的应用性能，从而提高工程的使用寿命和可靠性。

（二）施工过程试验检测

1. 土方工程试验检测

土方工程试验检测是控制土方施工质量的重要手段，重点检测指标包括压实度和平整度。压实度检测通过环刀法、灌砂法等方法，确保土方压实后的密实度达到设计要求，防止因压实不足导致的沉降和变形。平整度检测则采用水准仪或全站仪等仪器，测量土方表面的平整度，确保施工面符合后续施工工序的要求。这些检测指标对土方工程施工质量的控制至关重要，能够有效预防因土方施工质量问题引发的工程隐患，保障水利工程的整体施工质量，为后续结构施工提供坚实的基础。

2. 混凝土工程试验检测

混凝土工程试验检测内容包括浇筑质量、振捣密实度和养护情况。浇筑质量检测通过观察混凝土的均匀性和连续性，确保无离析、泌水等现象。振捣密实度检测采用超声波检测和回弹仪检测等无损检测方法，评估混凝土内部的密实程度，避免因振捣不足或过度导致的蜂窝、麻面等缺陷。养护情况检测则通过检测混凝土表面的湿度和温度，确保混凝土在规定龄期内得到充分养护，防止因养护不当导致的干缩裂缝和强度不足。通过这些检测方法和标准，能够有效保证混凝土结构的质量和耐久性，为水利工程的长期稳定运行提供保障。

四、水利工程建筑施工试验检测的实践应用

（一）检测技术与方法的应用

1. 无损检测技术的应用

无损检测技术在水利工程建筑施工中发挥着至关重要的作用

用，其能够有效检测混凝土内部缺陷、钢结构焊缝质量等关键部位，且不破坏被检测对象的完整性和使用性能。超声波检测通过高频声波在介质中的传播特性，可精准探测混凝土内部的裂缝、孔洞等缺陷，其检测速度快、操作简便，适用于大面积混凝土结构的快速筛查。射线检测则利用射线穿透材料后的衰减规律，能够清晰呈现钢结构焊缝内部的缺陷，如气孔、夹渣、未熔合等，为焊接质量的评估提供可靠依据。这些无损检测技术的应用，不仅提高了检测效率，还显著降低了检测成本，为水利工程施工质量控制提供了有力的技术支持，确保了工程质量的可靠性和安全性。

2. 破损检测方法的应用

破损检测方法在水利工程施工中不可或缺，尤其在需要获取精确数据以评估材料性能和结构强度时。钻芯取样检测混凝土强度是一种经典的破损检测方法，通过从混凝土结构中钻取芯样，进行抗压强度试验，可直接获取混凝土的实际强度值，为混凝土质量的最终评定提供准确依据。现场破坏性试验用于检测土体力学性质，如通过标准贯入试验、直接剪切试验等，可获取土体的抗剪强度、压缩模量等关键参数，这些参数对于土方工程的设计和施工具有重要的指导意义。破损检测方法虽然会对被检测对象造成局部破坏，但通过合理的取样和试验设计，能够确保获取的数据具有代表性，为施工质量的精准控制提供科学依据，是水利工程施工质量检测的重要补充手段。

（二）检测设备与仪器的应用

1. 常规检测设备的应用

在水利工程施工试验检测中，常规检测设备是不可或缺的工具，其广泛应用于各类基础检测项目。压力试验机用于测定材料的抗压强度，是检测混凝土、砂浆等材料强度的重要设备，通过精确的加载系统和数据采集装置，能够准确记录材料在受压过程中的应力-应变关系，为材料性能的评估提供基础数据。万能材料试验机则具备多种力学性能检测功能，可进行拉伸、压缩、弯曲等试验，适用于钢材、土工合成材料等多种材料的力学性能测试，其操作简便、精度高，能够满足日常检测工作的多样化需求。土工试验仪器用于测定土壤的物理和力学性质，如含水量、密度、颗粒级配、压缩系数等，这些参数对于土方工程的设计和施工至关重要。常规检测设备在日常检测工作中的应用，为水利工程施工质量控制提供了稳定可靠的技术支持，其操作要点在于设备的定期校准和规范操作，以确保检测结果的准确性和重复性。

2. 先进检测仪器的应用

随着科技的不断进步，先进的检测仪器在水利工程施工试验检测中的应用日益广泛，为提高检测效率和准确性提供了强有力的技术保障。智能检测仪器通过集成传感器技术、自动化控制技术和数据分析算法，能够实现检测过程的自动化和智能化，例如智能超声波检测仪可自动识别混凝土内部缺陷并实时生成检

测报告，显著提高了检测效率和数据处理速度。自动化检测系统则将多个检测环节集成于一体，实现了从样品采集、检测到数据处理的全流程自动化，不仅减少了人为因素对检测结果的影响，还大幅提高了检测精度和重复性。这些先进检测仪器的应用，不仅提升了试验检测工作的技术水平，还推动了水利工程建筑施工质量检测技术的不断发展和创新，为水利工程的高质量建设提供了有力的技术支撑。

（三）检测数据的处理与分析

1. 数据采集与记录

检测数据的采集与记录是水利工程施工试验检测的基础环节，其准确性和完整性直接关系到检测结果的有效性和可靠性。数据采集需严格按照相关标准和规范进行，采用合适的检测设备和仪器，确保采集到的数据真实反映施工质量状况。例如，在混凝土强度检测中，应按照规定取样频率和方法进行试块制作和养护，确保试块具有代表性；在土工试验中，需准确记录土样的采集位置、深度等信息。数据记录应规范、清晰，采用统一的记录表格和格式，详细记录检测过程中的各项参数和结果，包括检测时间、环境条件、设备编号等，以便后续的数据分析和追溯。通过严格的采集与记录流程，确保检测数据的完整性和准确性，为后续的数据分析和施工质量评估奠定坚实基础。

2. 数据分析与评估

对采集到的检测数据进行科学合理的分析与评估是水利工程施工质量控制的关键环节。数据分析通常包括数据的统计分析和与标准规范的对比分析。统计分析通过计算数据的均值、标准差、变异系数等统计量，评估数据的离散程度和集中趋势，从而判断检测结果的稳定性和可靠性。例如，在混凝土强度检测中，通过统计分析可判断一批混凝土试块的强度是否满足设计要求。对比分析则是将检测数据与相关标准规范进行对照，评估施工质量是否符合要求。例如，土体的抗剪强度指标需与设计值进行对比，以确定土方工程的稳定性是否达标。根据分析结果，对施工质量进行综合评价，并提出针对性的改进建议，如调整施工工艺、加强原材料质量控制等，从而实现水利工程施工质量的持续优化和提升，确保工程质量符合设计和规范要求。

五、总结

建筑施工试验检测在水利工程中的应用与实践表明，其对保障水利工程质量、提升工程安全性具有不可替代的重要作用。通过系统的原材料试验检测，能够确保土壤、混凝土及砂浆等关键材料符合工程要求，从源头把控质量；施工过程中的试验检测则有效监控土方工程、混凝土工程等环节的质量状况，及时发现并纠正问题，避免质量隐患积累。无损检测技术与破损检测方法的结合，以及先进检测设备与常规设备的协同应用，进一步提高了检测的全面性与准确性，为工程质量评估提供了可靠依据。

当前试验检测工作仍面临一些挑战。一方面，检测标准的更新与工程实践的快速发展之间存在一定的滞后性，导致部分检测项目难以精准适应新型材料和复杂施工工艺；另一方面，检测人员的专业素养参差不齐，影响检测结果的准确性和可靠性。此外，检测数据的信息化管理尚不完善，数据共享与深度分析能力有待提升，制约了检测工作的高效开展。展望未来，随着科技的不断进步，试验检测技术将朝着智能化、自动化方向发展，智能

检测设备与大数据分析技术的融合将为工程质量控制提供更为精准、高效的技术支持。同时，检测标准的动态更新机制将逐步完善，以更好地适应水利工程建设的新需求。加强检测人员的专业培训，提升其综合素养，也将成为推动试验检测工作高质量发展的关键。通过这些努力，建筑施工试验检测在水利工程中的作用将得到进一步发挥，为水利工程建设的高质量发展提供坚实保障。

参考文献

[1] 胡江浩. 水利工程试验检测及质量控制研讨 [J]. 车时代, 2023(1): 191-193.
[2] 刘洋, 马霄. 水利工程中混凝土检测试验及其质量控制措施分析 [J]. 科技资讯, 2023, 21(6): 83-86.
[3] 刘艳洲. 水利工程建设中混凝土试验检测及其质量控制 [J]. 内蒙古水利, 2023(2): 71-72.
[4] 王蓝. 水利工程混凝土试验检测及质量控制研究 [J]. 水电水利, 2022, 6(12): 43-45.
[5] 王艳震. 工程检测在水利工程质量控制中的作用及措施研究 [J]. 明日, 2021(24): 0414-0414.
[6] 《混凝土材料技术及其质量控制管理》编委会编. 混凝土材料技术及其质量控制管理 [M]. 中国水利水电出版社, 2013.
[7] 吴世辉. 水利工程中混凝土检测试验与质量控制研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2022(29): 157-159.
[8] 陈新. 水利工程中混凝土检测及质量控制的要点 [J]. Water Conservancy & Electric Power Technology & Application, 2022, 4(8).
[9] 周舒畅. 新形势下水利工程试验检测的质量控制分析 [J]. 2021(17): 161-161.
[10] 罗忠珍. 水利工程中的混凝土试验检测与质量控制措施 [J]. 电脑乐园, 2021(012): 000.

水利枢纽工程混凝土施工技术研究

张良群¹, 梁骏宇²

1. 江苏淮阴水利建设有限公司, 江苏 淮安 223001

2. 淮安新水建设有限公司, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/ETQM.2025080012

摘 要 : 水利枢纽工程混凝土施工技术对工程整体质量和安全性具有决定性作用。为满足结构稳定性、耐久性和抗渗性的要求, 施工中需科学选择原材料, 优化配合比设计, 严格控制浇筑温度和养护条件。大型水工混凝土的温度裂缝控制是关键难点, 常借助分层分块浇筑、温控系统和外加剂协同调控。此外, 现代施工技术如滑模、智能监测和信息化管理也不断提高施工效率与工程质量, 推动水利建设高质量发展。

关 键 词 : 水利枢纽; 混凝土施工; 温度控制; 结构耐久性; 智能建造

Research on Concrete Construction Technology of Hydro-junction Projects

Zhang Liangqun¹, Liang Junyu²

1. Jiangsu Huaiyin Water Conservancy Construction Co., Ltd. Huai'an, Jiangsu 223001

2. Huai'an Xinsui Construction Co., Ltd. Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : Concrete construction technology in hydro-junction projects plays a decisive role in the overall quality and safety of the engineering. To meet the requirements of structural stability, durability, and impermeability, it is necessary to scientifically select raw materials, optimize mix design, and strictly control pouring temperature and curing conditions during construction. Temperature crack control in large-scale hydraulic concrete is a key challenge, often addressed through layered and blocked pouring, temperature control systems, and the coordinated use of admixtures. Additionally, modern construction techniques such as sliding formwork, intelligent monitoring, and information management continuously improve construction efficiency and engineering quality, promoting high-quality development in water conservancy construction.

Keywords : hydro-junction; concrete construction; temperature control; structural durability; intelligent construction

引言

随着水资源调控与开发利用需求的不断增长, 大型水利枢纽工程日益增多, 其施工质量直接关系到防洪、灌溉、发电等多重功能的实现。混凝土作为主体结构的核心材料, 其施工工艺在保障工程安全与使用寿命中占据重要地位。如何在复杂环境中实现高强度、高耐久性与施工效率的统一, 已成为技术攻关的关键。探索并优化混凝土施工技术, 正是提升水利工程质量与可持续发展的必由之路。

一、水利枢纽工程混凝土施工的技术要求与工程特点

水利枢纽工程作为国家基础设施建设的重要组成部分, 肩负着防洪、供水、发电、航运等多重职能, 对工程结构的稳定性和安全性提出了极高要求。混凝土是水利枢纽的主体结构材料, 其施工技术直接关系到工程的整体性能和运行寿命。由于水利工程多处于地质复杂、水位变化频繁的环境中, 混凝土施工必须具备良好的抗渗性、抗冻性和耐久性, 确保在长期服役条件下结构不出现渗漏、裂缝或强度衰减等问题。同时, 大体积混凝土在施工中容易产生温度裂缝, 如何有效控制水化热、避免内部结构应力

集中, 是施工过程中必须重点解决的技术难点之一。

在施工组织方面, 水利枢纽工程通常规模庞大, 周期长, 施工面广, 对混凝土连续供应能力、施工机械配套性和多工种协调提出了更高要求。为了满足不同结构部位的性能需求, 需根据坝体、闸墩、引水渠等构造特点合理选择混凝土配比方案, 调整骨料粒径、水胶比、外加剂种类与掺量, 从而在保证强度的同时, 提高工作性与可泵性。此外, 水利工程施工常常需要面对雨季、高温或低温等复杂气候条件, 施工技术必须具备良好的适应性, 例如通过设置遮阳棚、防雨设施或加热系统, 保障混凝土浇筑质量和养护效果^[1]。施工过程中的测量控制、振捣密实、表面处

理等环节也需严格把控，以防止蜂窝麻面、冷缝和空洞等质量问题。

随着科技的发展，水利枢纽混凝土施工技术不断向智能化、绿色化方向迈进。信息化技术的引入使施工过程更加可控，通过温控系统、自动化监测设备及三维建模平台实现施工数据的实时采集与分析，提升了质量管理水平和决策效率。新型施工工艺如滑模、塔吊远程控制、高性能混凝土泵送等技术的应用，不仅提高了施工效率，也降低了人工操作误差。同时，节能环保理念在混凝土施工中逐步得到贯彻，绿色外加剂、再生骨料和低碳生产工艺的应用日益增多。水利枢纽混凝土施工已从传统经验驱动转向多因素协同优化和科技创新支撑的新阶段，对保障工程高质量建设和运行发挥着越来越关键的作用。

二、原材料选择与混凝土配合比优化方法

在水利枢纽工程中，混凝土结构的质量直接受原材料性能的影响，因此科学选择原材料是确保施工质量的前提。水泥作为混凝土的重要胶结材料，必须具备良好的稳定性和适宜的水化热释放速率，常采用硅酸盐水泥或中热水泥，以减少水化过程中的温度升高，降低大体积混凝土开裂风险。骨料的选择同样关键，应具备较高的强度和良好的级配，粗骨料粒径分布合理、颗粒坚硬、洁净，有助于提高混凝土的密实性和抗渗性。细骨料则需保证含泥量低、细度模数适中，过细或含泥量高会影响水泥浆的包裹性与流动性，进而降低混凝土的施工性能与强度发展。此外，掺合料如粉煤灰、矿粉和硅灰等能够显著改善混凝土的工作性和耐久性，同时降低水化热和收缩变形，已被广泛用于水利枢纽工程中^[2]。

在外加剂的选择与应用方面，减水剂、缓凝剂和引气剂的合理搭配对优化混凝土性能具有重要作用。高性能减水剂可在保持工作性的前提下降低水胶比，提高混凝土的强度与密实度；缓凝剂适用于大体积混凝土施工，延缓初凝时间，避免施工过程中冷缝产生；引气剂则可改善抗冻性，提高混凝土的耐久性能。针对不同气候条件和施工环境，需结合实际情况调整外加剂掺量及配比策略。例如，在高温施工环境中，应适当提高缓凝剂掺量以延长施工时间窗；而在寒冷地区施工，则需考虑防冻剂的使用，防止早期冻害。此外，原材料之间的相容性也是混凝土配合比优化的关键因素，应通过室内试验全面评估各组分材料的匹配性能，确保混凝土在拌合、运输、浇筑及养护全过程中保持稳定性与可靠性。

混凝土配合比设计需综合考虑工作性、力学性能、耐久性 & 经济性等多方面因素。在水利枢纽工程中，为实现高抗渗、高强度及优异的耐久性能，常采用低水胶比、大掺合料量的设计方案。优化配合比不仅有助于提高结构的服役年限，还能在一定程度上降低施工成本。设计初期应开展系列性能试验，确定目标强度与坍落度，通过正交试验或灰色关联分析等方法找出最佳配比参数。在生产过程中，应严格控制各原材料称量精度、拌合时间和出料顺序，并根据现场气温、湿度等实际工况灵活调整用水量

和外加剂掺量。通过动态反馈机制及时修正配比方案，可有效提升混凝土的稳定性与施工适应性^[3]。

三、温控与裂缝控制技术在施工中的应用

在水利枢纽工程的大体积混凝土施工中，温度控制是保障结构整体稳定性与耐久性的重要环节。由于水泥水化过程中会释放大量热量，若温差控制不当，将导致混凝土内部与表面之间产生较大温差，诱发温度应力，从而引起裂缝。为避免这种情况发生，施工中需制定科学的温控方案，合理安排浇筑顺序与时间，尽量避免高温或骤冷天气对混凝土温度的剧烈影响。通过采用分层、分块、跳仓等浇筑工艺，可有效减小单次浇筑体积，降低内部水化热累积。此外，采取浇筑前预冷骨料、拌合用水以及使用低热水泥等措施，也可降低混凝土初始入仓温度，为后续温度梯度控制创造有利条件^[4]。

在实际应用中，温控系统通常由内埋测温管道、温度传感器和智能监测平台组成，可实现对混凝土内部温度的实时监测和数据反馈。根据监测数据动态调整养护方式，如采用表面保温棉毯覆盖、喷水养护或风机降温等手段，确保温差控制在安全范围内。部分关键部位还可设置强制冷却系统，通过内部水管通冷水或循环制冷液体，降低核心区温度，减少水化热聚集带来的风险。在施工调度上，需加强施工进度与温控策略之间的协同管理，避免因施工节奏过快或不均匀造成不同区域温升差异过大，影响结构整体性。

裂缝控制作为温控工作的延伸目标，既要预防温度裂缝的产生，也要兼顾干缩、塑性收缩以及结构约束引起的非温度型裂缝。控制裂缝的关键措施包括优化混凝土配合比，采用低收缩、低水胶比的设计方案，同时提高混凝土自身的抗裂性能。在结构设计层面，可通过设置伸缩缝、后浇带、止水带等手段释放温度变形能量，减缓约束应力集中。施工过程中应加强模板拆除时间控制、振捣密实质量及养护制度的执行力度，尤其是早期养护要及时到位，防止表面水分迅速蒸发引起的收缩开裂。综合温控与裂缝控制技术的应用，不仅提升了水利枢纽混凝土结构的安全性与耐久性，也为高质量、高标准施工提供了坚实保障^[5]。

四、现代施工工艺在水利枢纽工程中的实践探索

现代施工工艺在水利枢纽工程中得到了广泛应用，显著提升了施工效率与结构质量。随着工程规模不断扩大、施工环境日益复杂，传统施工方式已难以满足高强度、高精度、高安全性的要求。为此，滑模施工、预冷混凝土、智能振捣、高性能泵送系统等新技术被逐步引入。例如，在高坝心墙浇筑中，滑模技术可实现连续升模作业，每天提升速度达15 ~ 20厘米，不仅节省了大量模板拼装与拆卸时间，还显著提高了混凝土表面质量和成型精度。针对深部或狭小区域结构，采用多点分布泵送系统，最远泵送距离可达500米以上，解决了传统泵送因压力衰减造成混凝土离析或堵管的问题，保障了连续稳定浇筑^[6]。

智能施工装备的投入使用是现代化施工的核心亮点。以混凝土智能拌合站为例，集成了自动称量、水灰比调节、温度控制与实时监测系统，可将配合比误差控制在 $\pm 1\%$ 以内，大幅提升混凝土拌合质量与生产效率。在某水电站枢纽工程中，使用该系统后，每天生产能力提高至3000立方米，混凝土强度合格率达到99.5%以上。此外，振捣作业从人工转向智能振捣设备控制，可根据混凝土拌合物流动性自动调整振捣频率和时间，避免过振或漏振，有效降低孔隙率和表面缺陷率。塔吊和混凝土运输系统也实现远程控制与路径优化，减少施工现场人员调度压力，提高作业协同效率^[7]。

数字化管理平台在水利枢纽混凝土施工中的应用也取得了良好成效。通过 BIM 建模、GIS 地理信息系统、物联网感知与大数据分析，实现对施工进度、温度数据、养护条件、施工质量等关键指标的可视化管理。在某大型枢纽工程中，通过数字化平台协同调度，使混凝土浇筑进度提前完成5天，节省人工成本约8%。同时，这些数据可沉淀为工程数字档案，为后期运行维护与技术总结提供详实依据。随着5G网络、人工智能和机器人技术的不断进步，水利枢纽工程的施工工艺正加速迈向“少人化、自动化、智能化”方向发展。现代技术的系统集成不仅提升了施工质量控制水平，也为今后更大规模、更复杂结构的水利工程提供了可复制、可推广的技术路径。

五、施工信息化与智能化管理技术的发展趋势

随着信息技术和智能装备的持续发展，水利枢纽工程施工正逐步迈向数字化、智能化的新阶段。传统依赖人工经验和手工记录的管理方式已无法满足当前工程体量大、技术要求高、协同复杂的施工需求。施工信息化管理技术通过将 BIM（建筑信息模型）、GIS（地理信息系统）、IoT（物联网）、大数据等多种技术融合应用，实现对施工全过程的数字化管控。施工进度、资源调配、质量监测、安全巡查等关键环节均可通过可视化平台实时

掌握，有效提升了现场管理的效率与透明度，减少了人为失误和资源浪费。

在混凝土施工过程中，智能化设备的引入大大提高了施工的精度与一致性。例如，自动化拌合站可根据实时传感数据调整原材料投放比例，保证混凝土配比精准稳定；智能泵送系统可根据施工区域混凝土需求自动调节流量，确保连续供应；温控传感系统和应力监测模块实时采集施工过程中的温度变化和结构受力状态，为施工管理人员提供决策支持。部分工程还配备了基于无人机的空中巡检系统与 AI 图像识别技术，对施工现场的进展、异常情况自动识别与记录，提高了监督响应的及时性与准确性^[8]。

展望未来，水利枢纽工程的施工管理将进一步朝着“云端协同、数据驱动、智能决策”的方向发展。基于云平台的多方协作机制使设计、施工、监理、运维等各参与方实现高效数据共享和跨地域调度，大幅提高项目整体运转效率。同时，随着 AI 算法和数字孪生技术的逐步成熟，施工管理将不仅限于信息记录和过程控制，更将转向预测性管理与智能优化，通过对历史数据和现场信息的融合分析，实现对工程质量风险、施工进度瓶颈和资源使用效率的提前预判与自动调整。信息化与智能化的深度融合，正在重塑水利枢纽施工管理模式，为行业迈向高质量、智能化发展提供坚实技术支撑。

六、结语

水利枢纽工程作为国家重大基础设施，其混凝土施工技术直接关系到工程的安全、稳定与耐久。通过科学选材与配合比优化，强化温控与裂缝控制，融合现代施工工艺与智能管理手段，极大提升了施工质量与效率。当前，施工技术正向绿色、智能、数字化方向迈进，推动水利工程建设水平不断提升。未来，应继续深化技术融合与应用创新，构建更加高效、安全、可持续的施工体系，为水资源的科学利用与国家基础设施现代化提供坚强支撑。

参考文献

- [1] 杨永强, 王达, 史立新, 等. 滑模技术在大兴水利枢纽工程调压井混凝土施工中的应用 [J]. 水利水电工程设计, 2019, 38(03): 41-44.
- [2] 任艳. 大石峡水利枢纽工程导流洞进口渐变段混凝土衬砌施工技术 [J]. 西北水电, 2020, (04): 69-73.
- [3] 黄志文. 峡江水利枢纽工程船闸断层混凝土施工技术研究 [J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 211-212+214.
- [4] 李凤来. 水利枢纽工程面板混凝土配合比与施工技术分析 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(10): 50-53+75. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2022.10.042.
- [5] 郭冉, 李志鹏. 水利枢纽工程施工技术及优化研究 [C]// 江西省工程师联合会. 2024 年智能工程与经济建设学术会议论文集（工程管理与经济建设专题）. 河南黄河河务局信息中心, 2024: 135-137. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.068870.
- [6] 张立阳. 水利枢纽隧洞工程混凝土衬砌施工技术研究 [J]. 工程机械与维修, 2024, (05): 55-57.
- [7] 李琪. 水利枢纽工程中的混凝土防渗技术及施工方案研究 [J]. 建筑技术开发, 2025, 52(02): 31-33. DOI: 10.20259/j.jzjskf.2025.02.0031.
- [8] 严伟. 基于实时监控与仿真技术的碾压混凝土坝施工优化研究——以韩庄水利枢纽工程为例 [J]. 海河水利, 2025, (06): 83-87.

电力工程管理中的分包管理体系构建

王天序

上海电力大学, 上海 200090

DOI:10.61369/ETQM.2025080016

摘 要： 在当前电力工程项目日益增多背景下，其复杂性和技术要求也呈现不断提高态势。为提高工程效率和质量，电力工程管理中引入分包管理体系，其中涉及对分包商选择、管理、监督以及与总包商间的协调。基于此，本文研究中将首先分包管理体系内涵及其优化必要性进行探究，在此基础上从分包商选择、合同管理、施工监管以及评价等角度提出具体构建策略。

关 键 词： 电力工程；分包管理；构建

The Construction of Subcontracting Management System in Power Engineering Management

Wang Tianxu

Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090

Abstract： In the context of the increasing number of power engineering projects, their complexity and technical requirements are also increasing. In order to improve the efficiency and quality of the project, a subcontracting management system is introduced in the management of power projects, which involves the selection, management, supervision and coordination with the general contractor of subcontractors. Based on this, this paper first explores the connotation of subcontracting management system and the necessity of its optimization, and proposes specific construction strategies from the perspectives of subcontractor selection, contract management, construction supervision and evaluation.

Keywords： power engineering; subcontracting management; construct

引言

电力工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，项目管理工作复杂性和专业性要求相对较高，而分包管理在提高项目效率、控制成本、保证工程质量方面发挥重要作用。分包管理体系构建主要涉及对分包商资质审核、合同管理、进度控制和质量监督等内容，然而在实际操作过程中，分包管理体系构建需面临分包商选择标准不一、管理流程不规范、信息沟通不畅等问题诸多问题，此情况严重影响电力工程项目整体进度和质量。因此，当前行业内开始将构建高效、规范的分包管理体系作为重点研究内容，以实现为电力工程管理提供科学管理方法和策略支持^[1]。

一、分包管理体系内涵

项目分包管理核心目标为打造出全面系统的施工分包管理体系，通过科学合理的措施切实保障施工分包工作有序高效进行。在此过程中，总承包方应在充分遵循“标准引领、精细管控、提质增效”方针基础上开展施工分包管理工作，此充分体现出对分包工作的高标准要求，同时也明确强调管理过程中的精细化与效率提升。

为达成上述目标，首先需要构建出完善的施工分包管理制度框架。该框架应覆盖分包管理各个方面，包括但不限于分包商的

选择、合同的签订与执行、施工过程的监督与管理、质量与安全的把控等。通过制度建立与完善实现为分包管理提供坚实制度保障^[1]。同时，总承包方还需对内外部资源进行充分整合，优化跨部门、跨专业、跨层级之间的施工分包管理流程，切实打破部门壁垒并加强各专业间沟通与协作，以保障信息顺畅传递与资源有效利用。此过程中还需对现有管理流程进行梳理与优化，去除冗余环节以提高管理效率。

在此基础上，总承包方还需构建出“职责、制度、标准、流程、考核”一体化的施工分包管理全过程管控体系，切实明确各参与方职责与权限，确保各项制度得到有效执行；同时通过制定

统一的标准与流程实现分包管理标准化与规范化发展；最后通过严格的考核机制对分包管理效果进行客观评价，为持续改进提供依据。

此外，总承包方在实际工作中还需积极建立“科学分工、分层管理、纵向贯通、横向协同”的施工分包管理长效机制，强调对分包管理工作进行科学规划与合理分工，实现各层级、各部门间有效沟通与协作目标。依托于该机制，可有效实现施工分包业务全面覆盖、全员参与以及全过程管控目标实现，切实推动分包管理工作制度化建设与标准化管理向纵深发展。

二、电力项目分包管理体系优化必要性

（一）送变电企业转型对施工分包管理提出新要求

在当前新时期背景下，国家电网公司提出送变电施工企业向管理型、监理型、专业型方向转型发展，后续发展中又进一步细化省级送变电企业的战略定位，明确要求向施工管理型、专业技术型方向转型，并配套出台具体的转型升级方案。该方案中明确强调，在保留核心施工能力前提下，必须重点提升技术支撑水平，优化现场管理流程，完善质量安全管控体系，强化施工方案策划与技术措施制定等关键环节。同时要求合理运用社会资源，科学实施分包管理模式。在当前企业深化改革与创新发展的背景下，施工分包管理问题的有效解决，不仅关乎送变电企业管理水平的提升，更将决定其向专业技术型企业转型的成败。

（二）电网建设新常态对施工分包管控提出更高标准

国家电网公司当前正全力推进全球能源互联网和中国能源互联网的战略布局，加速构建以特高压为核心支撑、多层级电网协同发展的现代化智能电网体系。电网基础设施建设取得突破性进展，庞大的电网施工规模在为电力施工企业创造重要发展契机的同时，也带来了前所未有的管理压力。具体表现为：繁重的施工任务与分包监管不足的矛盾日益突出，建立规范的分包商竞争体系与优质分包资源稀缺的矛盾持续加剧，提升企业综合效益与解决历史分包结算问题的矛盾愈发明显。在此背景下，电力施工企业亟须全面提升分包管理效能，创新分包管理机制，这既是推进“施工管理型、专业技术型”企业转型的关键环节，更直接关系到企业能否高质量完成各项电网建设任务^[3]。

三、电力工程分包管理体系构建要点

（一）供应商遴选机制

在电力工程建设领域，分包管理体系完善程度直接影响项目整体实施效果。实际工作中应注意针对不同工程项目特性与施工要求精准界定分包范围，同时对候选分包单位实施多维度考核评估，此是保障工程顺利推进的核心环节。依据现行法规要求，单项施工合同预算超过400万元的工程项目，必须通过公开招标方式确定分包单位。招标评审环节通常采用复合型评价体系，其中需涵盖商务指标、技术参数、报价因素三大模块，同时需综合考量企业运营状况及工程款项结算周期等要素，以此筛选出最匹配

项目需求的分包单位。在评审体系构建时，应积极设立基础筛选标准，包括企业资质等级、施工周期承诺、质量保障能力、投标保证金缴纳情况等，以此防范投标单位可能存在的串通投标、关联交易等违规行为。商务评审维度具体包含企业财务健康度、历史工程业绩、资质等级、专业技术人员配置、过往合作评价等关键指标。技术评审要素则涉及项目概况解析、现场管理架构、施工工艺方案、进度计划编排、质量管控目标、安全保障体系、环境保护措施及文明施工规范等具体内容。分包单位应充分根据项目特性科学配置商务、技术、报价等评审维度的权重比例，切实保障专业招标机构可据此遴选出最优合作伙伴。

（二）合约管理框架

该体系需覆盖合约全生命周期管理流程，主要管理内容包括前期立项审批、文本拟定审核、签署生效执行、变更调整控制以及终止归档保存等关键环节。通过建立标准化的操作规范与风险防控机制，切实保障各类商业合约在法律合规性、条款严谨性和执行有效性等方面达到行业要求。具体实施过程中应配备专业法务团队进行条款审查，同时采用信息化手段实现电子签约与文档集中存储，并定期开展履约情况评估与风险排查工作。

在确定与分包商建立合作关系后，正式协议的签署与履行环节具有决定性意义。协议文本不仅构成双方协作法律根基，同时也是划分各自权责的规范性文书。为切实保障项目有序推进并维护各方合法权益，实际管理中应注意在协议中系统性地完善劳务分包的各项细则。主要包含以下要点：1）协议文本需对劳务分包的具体实施内容进行清晰界定，涵盖作业边界、详细施工工序、工艺规范及技术要求等要素。2）协议应系统标明品质管控具体标准，如质量验收准则、检测手段、质保周期等关键指标。3）协议中必须准确标注工程启动与完工时限，以及重要施工节点的进度要求。同时需预先考虑潜在的进度滞后风险，并建立相应的处置预案。4）协议需规范劳务报酬的核算规则、结算形式、付款周期等财务条款，同时针对工程变更、原材料价格浮动等变量因素，设立动态调整机制。5）除上述基础条款外，协议还应设置特殊情形的处置方案。具体包括工程变更时的审批流程与责任界定；索赔事件的处理程序与适用条件；同时明确违约追责标准、违规惩戒措施及赔偿计算方式，以确保施工过程符合安全生产、环境保护及文明施工等规范要求^[4]。

（三）工程施工管理机制

在电力工程建设中，为切实保障各分包单位严格遵守合同并安全高效地完成施工任务，建立起系统化的项目管理体系具有重要意义。该体系不仅可有效提升工程管理标准化程度，还可显著减少各类风险的发生概率。项目管理规范应全面覆盖安全生产、工程质量、工期控制和成本核算等关键环节，为各项任务设定明确的执行标准。

在实际管理操作中，应积极制定专业的安全作业规章制度，详细规定施工现场安全防护设施具体配置需求，包括但不限于防护栏、安全网、警示标识等关键设施的布局与数量要求。同时还需对作业人员安全培训计划做出详尽规划，包括新员工入职培训、定期安全知识更新教育以及应急处理能力锻炼等多方面内

容,确保所有施工人员均可充分掌握必要的安全知识与技能。为确保工程质量持续提升,还需建立起完善的工程质量控制细则,明确界定工程验收标准并对各项检测工作具体流程进行详细标注,同时还需对不同施工阶段应采取的质量控制措施做出明确说明。相关规范性文件可为分包单位提供清晰且易于实现的操作指南,可切实保障其施工行为符合既定技术标准,减少因操作不当而导致的质量问题。在监督机制构建方面则需实现全面覆盖与动态监控目标。通过对施工现场的安全状况、质量水平以及进度安排进行持续性的跟踪与评估,及时发现并解决潜在的安全隐患与质量问题。为此,应定期组织巡查工作,由专业安全与质量管理人員深入现场进行实地检查,确保各项安全措施与质量控制措施得到有效执行^[5]。同时,还需加强对分包单位施工全过程的指导与监控,通过定期的沟通与交流及时纠正其施工中的不当行为,使得分包商可严格遵循合同条款与管理规定进行作业。

为进一步提升项目应对能力,项目管理部门还应预先制定应对突发事件的详细方案。该方案中应涵盖可能出现的自然灾害、设备故障、人员受伤等各种紧急情况,并明确相应处置流程与责任人。在此基础上还需建立快速响应机制,确保在紧急情况发生时能够迅速启动预案,采取有效措施进行应对,从而最大限度地减少损失与影响,为项目顺利进行提供有力保障。

(四) 供应商分级评估机制

分包商评估机制是在项目完成后,对分包单位在项目全周期内综合表现进行系统评估的制度框架。该评估系统主要由资质审查和履约评估两部分组成。其中,资质审查主要包括企业资质认证、资金状况、人才储备、设备配置、历史项目经验、行业荣誉和项目管理水平等要素;履约评估则涵盖项目筹备、安全管控、质量监督、进度与成本控制、综合协调能力等方面。

在实际开展电力项目分包商评价工作过程中,建议将现行评估周期缩短至每季度进行一次,以实现对外包单位工作表现进行实时反映目标,并在年末对各季度评分结果进行汇总分析。在构建该评估体系时应构建全面细致的奖惩机制,确保其公平性和有效性。

扣分标准制定应充分参考总承包方、业主单位以及监管机构

所发布的各项检查通报。根据问题性质严重程度设定不同的扣分等级,以确保评估结果准确性和公正性。同时为充分激励分包单位提升施工质量,评估体系中应增加加分项,如获得专项工程奖项、在抢险救灾中的突出贡献以及行业内的表彰等,此均可作为加分依据。

在完善的加减分标准基础上,分包管理部门应注意对评估结果进行合理应用。对于年度评级达到A类的分包单位可将其视为优质合作伙伴,与其建立长期稳定的合作关系,并通过授予荣誉称号、颁发证书等方式进行表彰和激励。在后续项目采购评审中,可给予相关单位满分履约评价,以示对其优秀表现的认可;对于评级为B级的分包商应保持其合作资格,允许其参与下一年度招投标活动。在履约评价方面可给予其标准分的80%,以此作为对其表现的肯定,同时也留有提升空间;而对于C级分包商则需采取谨慎合作的态度。虽然不将其纳入长期合作名录,但仍然保留其投标资格。在履约评价方面,可将其分值调整为基准分的50%,以此作为对其需要改进之处做出明确指引。

通过该差异化处理方式,可切实保障评估机制在发挥正向激励作用同时,也具备反向约束功能,以此切实提升分包单位工作质量和效率,并促进行业整体健康发展^[6]。

四、总结

综上所述,电力项目分包管理体系优化对送变电企业转型和电网建设新态势具有重要影响。随着国家电网公司推动送变电施工企业转型,施工分包管理面临新要求,急需持续提升技术支撑力度,优化流程并完善管控体系,此外当前电网建设加速使得项目管理压力增大,亟须创新分包管理机制。由此,构建电力工程分包管理体系过程中,需从完善供应商遴选、合约管理、工程施工管理和供应商分级评估机制等方面入手,通过精准界定分包范围、多维度考核评估分包单位,建立标准化合约管理流程,制定专业安全作业规章和质量控制细则,以及实施分包商系统评估等措施,切实提升分包管理效能以保障项目有序推进,为电力工程建设任务高质量完成提供有力保障。

参考文献

- [1] 罗明,尚庆明.电力施工企业工程分包安全管理问题与应对措施[J].户外装备,2023(7):307.
- [2] 魏振忠.配电网电力工程施工中的安全管理措施探究[J].电工技术,2023(S01):53-55.
- [3] 王喆.对电力工程违法分包的认定及法律风险研究[J].大众用电,2023(2):14-16.
- [4] 徐宁.EPC总承包模式下的工程项目分包管理分析[J].经济技术协作信息,2024(7):0016-0018.
- [5] 董平果,谭舟洋.分包队伍穿透式管理模式探索与实践[J].中国电力企业管理,2024(11):37-39.
- [6] 张磊.电力建设工程网格化体系研究及应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(26):14-16.

智能建筑电气工程施工管理信息化创新路径

朱一琳

上海电力大学, 上海 200090

DOI:10.61369/ETQM.2025080017

摘 要 : 近年来, 我国的信息技术产业得到了高速发展, 各行各业也陆续迈进了信息化转型的关键时期。随着信息化技术在建筑工程中的广泛应用, 为智能建筑行业的发展奠定了坚实的基础。本文将深入讨论智能建筑工程电气工程施工管理信息化的应用价值, 并从技术层面, 管理层面, 人员层面以及安全层面这四个层面出发, 分析智能建筑电气工程施工管理信息化面临的困难和挑战, 最后将对这四个方向上存在的问题提出针对性解决建议。

关 键 词 : 智能建筑; 电气工程; 信息化

Innovative Pathways for Informatization in the Construction Management of Electrical Engineering in Smart Buildings

Zhu Yilin

Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090

Abstract : In recent years, China's information technology industry has experienced rapid development, and various industries have entered a critical phase of informatization transformation. With the widespread application of information technology in construction projects, a solid foundation has been laid for the development of the smart building industry. This paper will delve into the application value of information technology in the construction management of electrical engineering projects for smart buildings. From four perspectives—technical, managerial, personnel, and safety—it will analyse the challenges and difficulties faced in the information technology-driven construction management of electrical engineering projects for smart buildings. Finally, it will propose targeted solutions to the issues identified in these four areas.

Keywords : smart buildings; electrical engineering; informatization

引言

随着我国经济水平的不断攀升, 人们的生活水平得到了质的飞跃, 人们对建筑的要求也逐渐提高。由此智能建筑得以广泛的应用于我国的建筑行业, 不能忽略的是, 与传统建筑相比智能建筑电气工程更为复杂, 因此做好智能建筑电气工程的施工管理工作是尤为必要的。通过将信息技术融入到电气工程施工管理工作中, 可以实现对电气工程施工全过程的数字化, 智能化, 可视化管理。在这样的管理模式, 智能建筑电气工程的施工效率得到了显著提升, 在保障施工质量的同时还有减少施工成本。由此可见, 推动电气工程施工管理的信息化是促进智能建筑行业持续发现的重要一环。

一、智能建筑电气工程施工管理信息化的应用价值

(一) 加强了工程施工的信息共享

利用信息化手段对电气工程施工进行管理, 可以实现施工信息的实时共享, 利用信息技术可以实现对电气工程施工现场情况的实时监测, 通过实时监测收集施工现场的工程数据, 如施工进度, 施工质量, 安全状况等。利用信息系统可以将施工数据传输给相关工作人员或管理人员, 确保有关人员能够及时了解施工现场的施工情况^[1]。利用信息化管理可以建立电气工程施工信息平

台, 将收集到的施工现场数据上传并存储到信息平台, 由信息平台统一管理, 相关工作人员可以通过信息平台更加方便的调取施工现场的信息数据。与此同时, 借由信息化的施工管理方式, 促进了建筑工程内各部门之间的信息交流, 帮助施工人员了解其他部门的运作模式, 提升了部门之间的协调合作能力, 通过信息共享各部门可以共同协作解决施工中出现的问题, 提升了工作效率。

(二) 提升了智能建筑管理能力

利用信息技术对电气工程施工进行管理, 可以实现对智能建

筑中施工设备及相关系统的实时监控。通过实时监控可以更加容易获取到施工作业过程中的数据信息，如施工设备的使用情况，施工作业中对能源的消耗，以及施工现场的环境情况，根据这些信息，管理者可以更加自如的做出施工安排^[2]。利用智能建筑电气工程施工管理信息化系统对施工过程中能源器材的消耗进行监测，可以识别出能源器材消耗的高峰期，利用这些信息施工管理者可以调整能源的使用安排，降低能源消耗，节约工程成本，提升能源管理能力。如图1所示。除此之外，电气工程施工管理信息化使施工作业过程中的安全管理更加智能化，利用信息技术实现对安全设备使用状态安全系统的运行情况的实时监控，一旦有出现安全事故的风险，信息系统就会及时上报管理人员并对施工人员进行预警，进而提升智能建筑电气工程施工的安全管理水平^[3]。

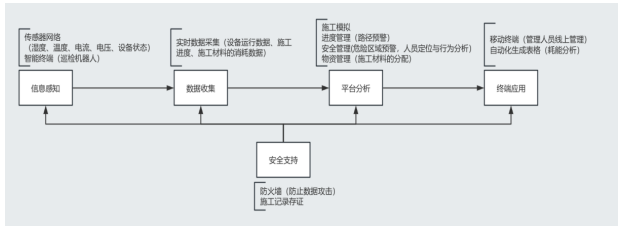


图1 智能建筑电气工程施工管理信息化体系框架

（三）推动了智能建筑产业发展

智能建筑电气工程施工管理信息化的过程中需要应用到许多先进的信息技术以及通讯手段，在应用这些先进信息技术的过程中，实际上也推动了相关技术领域的发展和创新。不仅如此，智能建筑电气工程施工管理信息化的过程也推动了建筑行业由传统建筑模式到智能化建筑模式的转型升级，随着信息技术在建筑行业应用范围愈加广泛，建筑行业的智能化信息化水平也在逐步提升^[4]。除此之外，智能建筑电气工程施工管理信息化应用范围的扩大，丰富了智能建筑实用功能，满足了新时代下人们对建筑智能化，舒适化新需求，为智能建筑行业指明了未来的发展方向。在推动智能建筑电气工程施工管理信息化的过程中，也为建筑行业产业链上下游企业提供了交流的机会，随着上下游企业交流的更加频繁和深入，实现了上下游企业的信息共享并促进了他们的合作，最终实现了智能建筑产业的蓬勃发展^[5]。

二、智能建筑电气工程施工管理信息化面对的问题

（一）现场信息化基础设施薄弱

想要实现智能建筑电气工程施工管理的信息化，首先要做好现场信息化基础设施的建设，但通过对施工现场的调查可以发现，目前许多施工现场信息化基础设施的建设还比较薄弱。首先，由于没有统一的信息化管理平台，各个部门使用的管理系统各不相同，不同系统之间又会出现不兼容的问题，这就导致各个部门之间无法进行信息传递，管理人员进行施工管理的负担也比较重。其次，一些施工现场的网络覆盖较差，网络只能覆盖到地面上的施工区域，地下的施工区域如地下室，竖井则成为了信号盲区，网络覆盖不充分为施工管理带来难度。最后，一些信息技

术在实际应用中存在技术瓶颈，众所周知施工场地是不断变化的，一些先进的信息设备在进入施工现场后，常常会受到施工现场的灰尘高，温等环境因素的影响，阻碍设备的正常使用，进而降低施工效率。

（二）施工人员管理理念落后

施工人员的管理理念也会影响到智能建筑电气工程施工管理信息化的进程。一些管理人员习惯于传统的施工管理方法，依赖于纸质办公，不习惯使用信息化管理平台。电气工程施工管理模式下，管理人员需要根据信息化施工管理平台所提供的施工现场数据信息做出管理决策，但一些管理人员不信任信息化施工管理系统所提供的数据信息，因此排斥信息化的施工管理模式。除此之外，在一些施工现场，实际的施工流程与信息化工具不相匹配，因此，管理人员无法利用信息化工具进行施工管理，甚至会影响管理人员的正常工作。与此同时，部分企业对智能建筑电气工程施工管理信息化的回报率存在疑问，因而不愿意将信息化的施工管理模式落实到施工现场。

（三）施工人员信息技术水平不足

信息技术的使用是智能建筑电气工程施工管理信息化的重要一环，但目前许多管理人员信息技术的使用能力还达不到既定要求。信息化管理也需要施工作业的同步信息化，随着技术的发展，施工管理设备的先进程度逐步提升，施工管理信息化设备使用的复杂程度也随之加强，经过实地调查，许多施工人员认为设备的使用难度大，如果没有统一的培训，施工人员无法正常使用信息化设备。与此同时，一些基层人员也认为，将信息化设备应用到施工作业中，会加重自己的工作量，因此对信息化系统的使用有抵触情绪。除此之外，一些施工人员认为使用信息化设备如果造成施工问题，影响施工进度，没有明确的管理条例责任规划不清晰，反而会影响施工进度，较低工程施工效率。

（四）施工管理信息化存在安全风险

现阶段，智能建筑电气工程施工管理信息化的发展还不够成熟，施工管理信息化还存在许多安全隐患。施工管理信息化存在的安全风险主要可以分为两个方面。一方面，是电气工程施工的信息数据安全，施工管理人员要考虑系统崩溃、施工数据消失或泄露的风险，除此之外黑客的网络攻击也是管理人员需要防范的危险，虽然信息化施工管理可以帮助管理人员掌握更多的施工信息，但施工数据采集、存储及分析过程中可能产生的错误使得施工数据的真实性及准确性无法得到保证，因此管理人员也要做好施工信息的甄别。另一方面是施工管理信息化设备的使用安全，例如当使用巡检无人机时，如操作不当有可能造成高空坠物，严重时则有可能威胁到施工人员的人身安全。因此如何在利用好信息化管理设备的同时降低使用风险，也是管理人员需要考虑的问题。

三、智能建筑电气工程施工管理信息化的应用对策

（一）推动信息技术基础设施建设

做好施工现场信息化基础设施建设是实现智能建筑电气工程施工管理信息化的基础。对于当前信息化基础设施存在的问题，

可以从以下几个方向入手。首先,要建设统一的电气工程施工信息化管理平台,通过统一各部门之间不同的管理平台,解决平台之间不兼容的问题,使部门间信息共享更加顺畅,推动部门之间的互相交流,减轻管理人员的工作负担^[6]。其次,要重新规划施工工地信息化设施的建设,例如网络的铺设问题,为了实现施工工地的全方位信息化管理,要将信息化设施设置到各个角落,彻底消灭可能存在的管理盲区,实现信息化管理的全覆盖。最后,针对信息化技术存在的使用瓶颈,企业可以通过与高校和科研机构合作,共同研究出适合施工环境的信息化设备,以满足施工现场的设备需求,最终推动施工现场信息技术基础设施的全面建设。

（二）做好施工管理理念的信息化转变

推动智能建筑电气工程施工管理信息化进程,就必须解决施工人员管理理念落后的问题。对于施工管理人员对信息化施工管理系统不信任的问题,可以通过项目试点,让施工管理人员了解电气工程施工管理信息化的运行模式,通过与传统的管理模式进行对比,转变施工管理人员对信息化施工管理的看法,鼓励施工管理人员使用信息化的管理模式^[7]。对于现行施工流程与信息化管理工具不能匹配的问题,要根据现行的施工流程结合信息化管理工具,规划新的施工管理流程。对于部门企业对智能建筑电气工程施工管理信息化投资回报率的质疑,可以为其提供已经将信息化管理模式落实到施工管理中的优秀范例,让其深入了解电气工程信息化管理模式为施工管理带来的便利,进而推动智能建筑电气工程施工管理信息化在这些企业中的落实^[8]。

（三）培养施工人员熟练掌握信息技术

提升施工人员与施工管理人员对信息技术的掌握也是推动电气工程施工管理信息化的重要环节。首先,可以在施工现场设立项目试点,让施工人员初步了解信息化智能设备的使用方法,也让施工人员了解使用信息化智能管理设备所带来的便利。其次,企业要明确人员的培养方向,即对施工人员和施工管理人员信息化设备使用能力的培养,并根据此培养目标指定培养计划,企业可以通过内部组织培训,参加外部课堂,员工在线学习等方式对施工人员和施工管理人员进行定期培训。企业也可以设立员工激励机制,通过薪酬奖励等方式提升员工的积极性。最后,要设立明确的管理条例,做好责任划分,减轻施工人员使用信息设备的心理辅导,推动电气工程施工管理信息化的落实^[9]。

参考文献

[1] 马海祥. 智能建筑电气工程施工管理信息化创新路径 [J]. 中国建设信息化, 2024(14):50-53.
[2] 林剑东. 电气工程配电线路施工质量管理信息化探讨 [J]. 科学与信息化, 2024(8): 175-177.
[3] 李运暖, 蒋光华. 基于智能建造的建筑施工管理信息化创新 [J]. 智能城市应用, 2024, 7(9):56-59.
[4] 王贺. 建筑施工信息化管理研究 [J]. 智能建筑与工程机械, 2025, 7(02):65-67.
[5] 刘颖. 电气工程施工图审查的信息化管理模式研究 [J]. 大武汉, 2022(23):247-249.
[6] 高金建. 加强电气工程管理及提高工程质量的策略研究 [J]. 科技创新导报, 2022, 19(21): 130-132.DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2203-5640-9556.
[7] 李金宝, 郑家福. 浅谈电气工程施工管理现状及安全防护措施 [J]. 2021.
[8] 刘小涛. 基于建筑智能化的电气工程设计与应用 [J]. 信息周刊, 2020(5):1.
[9] 吕福利. 智能建筑的电气施工技术 [J]. 工程技术发展, 2022, 3(8):7-8.DOI: 10.12238/etd.v3i8.6170.
[10] 钟正飞. 基于智能建造的建筑施工管理信息化创新 [J]. 中国建设信息化, 2024(9):68-71.

（四）做好施工管理信息化的安全保障

在推动智能建筑电气工程施工管理信息化落实的同时,也要解决信息化管理过程中信息设备使用存在的安全风险。在信息安全方面,为了保护施工过程中数据信息的安全,可以指定一套严格的身份识别系统和审查机制,对于需要保密的施工数据信息,只允许特定的管理人员能够调阅,同时还可以设立访问日志或其他管理工具来保护施工信息数据的安全^[10]。对于可能出现的黑客网络攻击,企业可以与相关机构合作,提升信息化管理系统的安全性,防止施工数据信息遭到窃取,如图2所示。对于信息化管理设备的使用安全,首先要规范信息化管理设备的使用流程,可以定期组织针对管理人员信息化管理设备使用的考核,降低信息化管理设备的使用风险,保障施工人员的人身安全。

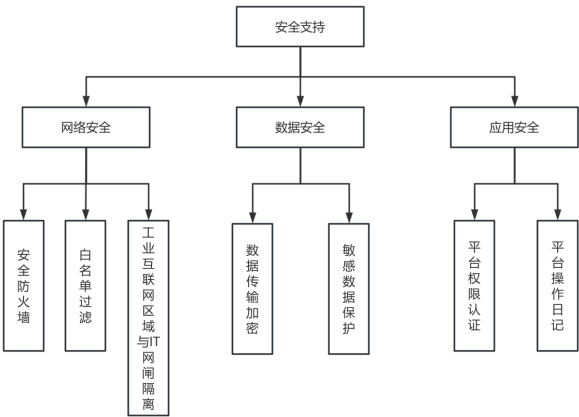


图2 智能建筑电气工程施工管理信息化安全保障

四、结束语

随着我国建筑行业的日益发展,信息技术的稳步升级,将信息技术运用到建筑施工管理工作中是大势所趋。随着智能建筑电气工程施工管理信息化的进一步落实,建筑施工管理的工作效率将得到进一步提升。可以预见的是,在未来信息技术与建筑行业的融合将更加深入更加紧密,进而推动建筑行业从传统的施工管理模式向智能化信息化施工管理模式的转型升级,最终实现建筑行业的可持续发展。

建筑工程中电气工程与给排水工程的技术管理与质量控制策略

时玉璋

广东力中建设发展有限公司, 广东 东莞 523000

DOI:10.61369/ETQM.2025080020

摘 要 : 阐述电气工程与给排水工程技术管理要点。电气工程包括设计、施工、调试等阶段的技术管理,如供配电系统设计规范、变配电设备安装等。给排水工程涵盖管网布局、连接密封性检测等。还介绍了质量控制方法及未来发展方向,如PDCA循环、全生命周期管理及技术融合等。

关 键 词 : 电气工程; 给排水工程; 技术管理

Technical Management and Quality Control Strategy of Electrical Engineering and Water Supply and Drainage Engineering in Construction Engineering

Shi Yuzhang

Guangdong Lizhong Construction Development Co., Ltd. Dongguan, Guangdong 523000

Abstract : This paper elucidates the key points of technical management in electrical engineering and water supply and drainage engineering. Electrical engineering involves technical management at stages such as design, construction, and commissioning, including standards for power distribution system design and installation of transformer and distribution equipment. Water supply and drainage projects cover aspects like pipeline layout and connection seal testing. It also introduces quality control methods and future development directions, such as the PDCA cycle, full lifecycle management, and technology integration.

Keywords : electrical engineering; water supply and drainage engineering; technical management

引言

随着建筑行业的发展,相关政策对工程质量提出了更高要求。例如2019年颁布的《建筑工程质量提升政策》强调了各工程环节需严格把控质量。在建筑工程中,电气工程与给排水工程的技术管理和质量控制是关键部分。电气工程涉及供配电系统设计、施工及调试等多个方面,需确保电力供应可靠性与安全性;给排水工程包括管网布局、节水器具选型及系统功能性试验等内容,关乎水资源合理利用与系统正常运行。合理的技术管理和有效的质量控制措施对保障整个建筑工程质量至关重要,也是实现工程全生命周期管理和可持续发展的必要条件。

一、电气工程技术管理体系构建

(一) 电气工程设计阶段技术管理

在电气工程设计阶段,技术管理至关重要。对于供配电系统,需严格执行设计规范要点^[1]。准确计算负荷,合理选择变压器容量及线缆规格,确保电力供应的可靠性与安全性。同时,要考虑系统的短路保护、接地保护等措施,满足电气设备的运行要求。在管线综合排布方面,BIM技术的协同管理应用可有效提高设计效率与质量。通过创建三维模型,直观展示各管线的空间位置关系,及时发现并解决碰撞问题。合理规划管线走向,优化空间利用,为后续施工提供准确的指导,减少施工中的变更与返

工,保障电气工程设计的科学性与合理性。

(二) 电气工程施工过程控制策略

在电气工程施工过程中,对于变配电设备安装工艺标准的研究至关重要。需明确设备安装的各项参数和规范要求,确保设备的正常运行和安全性^[2]。同时,防雷接地系统施工质量验收指标体系的制定是保障电气工程质量的关键环节。这一体系应涵盖接地电阻值、防雷引下线的连接方式等多个方面的验收标准,严格按照标准进行验收,能够有效避免雷电对电气系统造成的损害,提高整个电气工程的可靠性和稳定性,为建筑工程的正常使用提供有力保障。

二、给排水工程技术管理路径

（一）给排水系统设计优化管理

构建基于流体力学计算的管网布局优化模型是给排水系统设计优化管理的重要内容。通过准确的流体力学计算，分析管网中水流的运动状态和压力分布，合理确定管径、管材及管网走向，提高供水效率，减少能量损失和漏水风险^[3]。同时，制定节水器具选型技术标准也至关重要。根据不同建筑类型和用水需求，选择合适的节水器具，如节水型水龙头、马桶等。这些器具应符合相关的节水标准，在满足使用功能的前提下，最大程度地减少水资源浪费，实现给排水系统的高效、节水设计。

（二）施工过程质量监控体系

建立管道连接密封性检测规程是确保给排水系统正常运行的关键。通过规定严格的检测方法和频率，及时发现连接部位可能存在的泄漏隐患。例如，可采用无损检测技术对关键部位进行检测^[4]。同时，完善水压试验与通水能力验收标准体系至关重要。水压试验应明确不同管径、材质管道的试验压力及保压时间等参数，确保管道能承受正常运行压力。通水能力验收则要综合考虑流量、流速等因素，模拟实际使用情况进行检测，保证给排水系统在投入使用后能够满足用户需求，避免出现水流不畅等问题。

三、质量协同控制策略研究

（一）电气工程质量控制要素

1. 隐蔽工程监管机制

构建电缆敷设路径三维可视化监控系统，能够实时监测电缆敷设情况，及时发现敷设路径偏差等问题，提高隐蔽工程质量监管的效率和准确性^[5]。同时，制定线管弯曲半径量化检测标准，明确线管弯曲半径的合理范围，避免因线管弯曲半径过小导致电缆受损或影响电气性能。通过这些措施，可以加强对电气工程隐蔽工程的监管，确保隐蔽工程符合质量要求，为整个电气工程的质量提供保障。

2. 系统调试与运行保障

对于建筑工程中的电气工程，系统调试与运行保障至关重要。设计智能照明系统联动调试方案是关键环节之一，需考虑不同场景下的照明需求及各设备间的协同工作，确保照明系统的智能化和稳定性^[6]。同时，建立继电保护装置整定值验证流程，以保障在电气系统出现故障时，继电保护装置能准确动作，避免设备损坏和安全事故。这一流程需严格按照相关标准和规范执行，对整定值进行精确验证和调整，从而提高电气工程的可靠性和安全性，为整个建筑工程的正常运行提供有力保障。

（二）给排水质量保障措施

1. 材料进场质量控制

PPR 管材热熔连接工艺需建立评定标准，确保连接质量符合要求。通过对工艺参数、操作流程等方面进行规范和评估，保障管材连接的可靠性和稳定性^[7]。同时，针对阀门应制定气密性抽样检测规范。明确抽样比例、检测方法和判定标准等内容，严格

把控阀门质量。对进场的阀门按照规范进行抽样检测，只有检测合格的阀门才能用于给排水工程中，从而避免因阀门气密性问题导致的漏水等质量隐患，保障给排水系统的正常运行。

2. 功能性试验标准

给排水系统的功能性试验对于确保工程质量至关重要。开发排水系统通球试验智能化监测装置可提高试验的准确性和效率^[8]。该装置能够实时监测球的通过情况，避免人工监测的误差和不及时。同时，优化水锤效应防护措施验证程序也是关键。水锤效应可能对给排水管道造成严重损坏，合理的验证程序可以确保防护措施的有效性。通过模拟实际工况，对防护措施进行严格测试，以保障给排水系统在运行过程中的稳定性和安全性，满足建筑工程对给排水质量的要求。

四、工程实践与优化策略

（一）电气工程典型案例分析

1. 超高层建筑供电系统案例

在超高层建筑供电系统案例中，双电源自动切换系统调试至关重要。调试过程需严格按照相关标准和规范进行，确保系统在主电源故障时能迅速、准确地切换到备用电源，保障电力供应的连续性^[9]。同时，针对供电系统中可能出现的谐波问题，提出谐波治理优化方案。谐波会影响电力设备的正常运行，降低电能质量。通过采用合适的滤波装置和控制策略，对谐波进行有效的抑制和消除，提高供电系统的稳定性和可靠性，为超高层建筑的正常运行提供有力的电力保障。

2. 智能建筑弱电系统案例

在智能建筑弱电系统案例中，综合布线系统交叉干扰是一个关键问题。当多种线路近距离铺设时，电磁信号可能相互影响，导致数据传输错误或系统性能下降。为解决此问题，可从线路布局 and 屏蔽措施两方面着手。合理规划线路走向，增大不同类型线路间的距离，减少电磁耦合的可能性。同时，采用具有良好屏蔽性能的线缆和线槽，对敏感线路进行有效屏蔽，阻止外部电磁干扰的侵入。此外，制定电磁兼容性测试标准至关重要。通过明确的测试指标和方法，对布线系统的电磁兼容性进行定期检测，确保其符合相关要求，保障系统的稳定运行^[10]。

（二）给排水工程实践难点

1. 大管径管道安装案例

在给排水工程大管径管道安装实践中，面临诸多难点。由于管径大，运输和吊装难度增加，需要大型设备且对场地和操作空间要求高。管道连接技术要求严格，如焊接时需确保焊接质量，避免出现裂缝、气孔等缺陷，同时要考虑焊接变形对管道安装精度的影响。在实际案例中，某大型建筑给排水工程，大管径管道安装过程中，为解决运输问题，采用分段运输并在现场组装的方式。对于焊接变形，通过精确计算焊接参数，采用合理的焊接顺序和工艺，如对称焊接等方法进行控制。在管道应力消除方面，采用了加热退火等施工工法，有效保证了管道安装质量和系统运行安全。

2. 特殊水质处理案例

在给排水工程中，特殊水质处理是一大难点。例如在处理含腐蚀性介质的水质时，管道选材至关重要。需考虑介质的化学性质、浓度以及温度等因素。对于酸性较强的介质，可能选用耐酸不锈钢或塑料管道更为合适。同时，化学防腐处理工艺也需优化。这包括表面预处理，如除锈、除油等，以确保防腐涂层能更好地附着。防腐涂层的选择要根据水质特点和管道材质确定，有的可能需要多层涂层体系来增强防腐效果。此外，还需考虑防腐处理后的维护和检测，定期检查涂层是否有破损，及时修复，以保证管道的使用寿命和水质安全。

（三）技术管理优化策略

1. 数字化管理平台构建

设计基于物联网的工程质量管理信息系统架构，需综合考虑电气工程与给排水工程的特点。利用物联网技术实现设备间的互联互通，实时采集工程数据，包括电气设备运行参数、给排水管道压力流量等。通过传感器网络将数据传输至云端进行分析处理，为质量控制提供准确依据。

开发移动端质量巡检模块，方便现场人员操作。巡检人员可利用移动设备随时记录工程现场情况，如电气线路连接是否规范、给排水管道有无渗漏等。模块应具备拍照上传、实时定位、数据同步等功能，确保巡检信息的及时性和准确性，实现对工程质量的动态监管，提高技术管理效率和质量控制水平。

2. PDCA 循环应用

PDCA 循环是一种质量管理方法，在建筑工程的电气工程与给排水工程技术管理中可有效应用。计划（Plan）阶段，要明确

工程目标、标准以及可能出现的质量问题，制定相应的预防措施和质量计划。实施（Do）阶段，严格按照计划执行施工操作，确保施工人员遵守相关规范和标准，同时合理安排施工进度和资源。检查（Check）阶段，对施工过程和结果进行全面检查，包括电气设备的安装质量、给排水管道的连接情况等，及时发现质量偏差和问题。处理（Act）阶段，针对检查出的问题，分析原因并采取有效的纠正措施，同时将经验教训纳入质量问题追溯数据库，为后续工程提供参考，实现持续改进的闭环管理流程。

五、总结

建筑工程中电气工程与给排水工程的技术管理与质量控制至关重要。在机电安装工程中，需明确技术管理要点，包括设备选型、安装工艺、线路铺设等方面，确保各环节符合标准。同时，要不断创新质量控制方法，从材料检验到施工过程监督，再到竣工后的验收，全方位保障工程质量。基于全生命周期管理的技术优化路径是未来发展方向，它涵盖了工程从规划到拆除的各个阶段，通过精细化管理提升整体效益。此外，BIM 技术与人工智能的融合将为工程质量管控带来新的机遇，如智能检测、风险预警等，有助于提高管理效率和准确性，推动建筑工程行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 杨毅. 给排水工程招标质量控制研究 [D]. 东南大学, 2020.
- [2] 李想. 市政给排水工程设计质量评价体系研究 [D]. 中国科学院大学, 2019.
- [3] 李佳津. 给排水工程施工成本管理的控制和研究 [D]. 青岛大学, 2015.
- [4] 栗宁静. 给排水工程自主定额的快速生成与更新 [D]. 兰州交通大学, 2018.
- [5] 孙晓晶. 给排水工程常用塑料管道应用及施工质量研究 [D]. 山东建筑大学, 2016.
- [6] 朱泽林. 市政给排水工程技术管理要点分析 [J]. 技术与市场, 2015, 22(12): 261, 263.
- [7] 赵成. 市政给排水工程技术管理要点分析 [J]. 山西建筑, 2018, 44(33): 248-250.
- [8] 胡银宗. 浅析市政给排水工程施工技术管理 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2012(9).
- [9] 王明华. 市政给排水工程技术管理要点分析 [J]. 建材发展导向 (上), 2020, 18(12): 419.
- [10] 刘彩娥. 市政给排水工程技术管理要点分析 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(6): 1523.

机电一体化技术的发展趋势及在包装设备的应用

陈太柏

佛山天玻包装有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ETQM.2025080021

摘 要： 本文探讨了机电一体化技术在包装设备中的应用及其发展趋势。随着智能制造和工业 4.0 的推进，机电一体化技术在包装行业得到了广泛应用，并显著提升了设备的自动化和智能化水平。文章概述了机电一体化技术的发展方向，包括人工智能和模糊数学在该领域的应用。分析了包装设备的基本概念和分类，指出传统设备的局限性。介绍了机电一体化技术在包装设备中的具体应用，如自动化与智能化升级、智能传感器与执行器的集成，以及基于 AI 的故障预测与维护系统。并探讨了包装设备的创新与优化，并通过实例展示了降本增效的显著成果。本文认为，机电一体化技术在包装设备领域具有广阔前景，将推动行业向更高效、智能、绿色的方向发展。

关 键 词： 机电一体化；智能制造；包装系统；人工智能驱动的自动化；可持续生产

Development Trends of Mechatronic Integration and Its Applications in Packaging Equipment

Chen Taibai

Foshan Tianbo Packaging Co., Ltd. Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This paper discusses the application of mechatronics technology in packaging equipment and its development trend. With the promotion of intelligent manufacturing and Industry 4.0, mechatronics technology has been widely used in the packaging industry and has significantly improved the automation and intelligence of equipment. The article outlines the development direction of mechatronics technology, including the application of artificial intelligence and fuzzy mathematics in this field. The basic concept and classification of packaging equipment are analysed, and the limitations of traditional equipment are pointed out. Specific applications of mechatronics technology in packaging equipment, such as automation and intelligent upgrading, integration of intelligent sensors and actuators, and AI-based fault prediction and maintenance system, are introduced. It also discusses the innovation and optimisation of packaging equipment, and demonstrates the remarkable results of cost reduction and efficiency through examples. This paper argues that mechatronics technology has a broad prospect in the field of packaging equipment, which will promote the industry to develop in a more efficient, intelligent and green direction.

Keywords： mechatronic integration; smart manufacturing; packaging systems; AI-driven automation; sustainable production

引言

从行业背景来看，机电一体化技术的发展离不开全球工业自动化的浪潮。随着“中国制造 2025”等战略的深入实施，我国制造业正朝着智能制造方向转型升级^[1]。随着机电一体化技术的应用，包装设备在性能方面取得了巨大进步。当代的包装机械利用精准的传感器和控制系统，可以随时调整包装过程中的各项参数，以确保每个包装都符合严格的质量标准。因此，对包装设备的技术应用进行研究是非常重要的。

一、机电一体化技术的发展趋势

（一）机电一体化技术的整体发展方向

机电一体化技术标志着工业从机械化向信息化、智能化的跃迁，深刻体现了科技对生产力的革新作用。人工智能和模糊数学

的融入赋予机械系统学习优化与模糊决策能力，如具备环境适应性的无人驾驶汽车和自主优化的工业机器人。该技术已渗透制造、医疗、航天等领域，显著提升设备自主决策能力，使机械从程序化工具转变为能分析创新的智能体。未来结合物联网、大数据等技术，将推动更智能、网络化的机电系统发展，持续引发社

会生产与生活方式的变革。其中人工智能赋予了机械设备学习和自我优化的能力，使其能够根据环境和任务的变化进行动态调整，提高工作效率和精度^[2]。

（二）机电一体化与包装设备相关的技术趋势

机电一体化技术驱动包装设备向自动化、智能化转型，通过融合机械、电子、信息等技术实现性能跃升。其控制系统依托微机技术精准调控设备动作，提升精度与良品率，如高精度灌装机可精确控制液体流量^[3]。集成传感与数据分析系统实时监控压力、温度等参数，预判并规避生产异常。模块化设计赋予设备灵活组合能力，支持快速切换产线配置；标准化部件则降低制造成本并简化维护流程。以德国包装机械为例，模块化机电一体化设备已广泛应用于食品、医药等领域，推动全球包装行业技术迭代与产业升级^[4]。

（三）机电一体化与包装设备提升生产效率

机电一体化包装设备融合机械与电子技术，借助传感器、计算机及通信技术实现智能运作。典型设备包括自动折叠封箱机（适配流水线，高效封箱）、给袋式（自动装袋，多形态兼容）、给罐式（高效密封罐装）和制袋式（灵活可调）包装机。通过精准控制与智能协同，推动行业向高精度、柔性化升级，降低人工干预并提升生产效率^[5]。

二、机电一体化技术在包装设备中的具体应用

（一）自动化与智能化升级

自动化控制系统能够实现灌装机、封口机、包装机等包装设备的全自动化操作，采用 Siemens 的 S7-1500 PLC（可编程逻辑控制器）作为核心控制器^[6]，通过 Omron 的 E3Z 光电传感器和 Honeywell 的压力传感器，实时监控生产线的状态。

该系统可以根据产品的特性和包装要求，精确地控制物料的重量和体积。对于重量控制，系统的精度可以达到 $\pm 0.5\text{g}$ ；在体积控制方面，系统能够精确到 $\pm 0.1\text{ml}$ ，从而确保每个包装严格符合预设标准^[7]。假设有一个液体充填系统，希望控制每个包装瓶中的液体体积精确到指定的量。可使用以下公式来计算所需的充填时间：

$$T = \frac{V_i + \Delta V}{Q_{\text{avg}}} + \tau_{\text{delay}} + \frac{K_a}{\sqrt{Q_{\text{avg}}}} \quad (1)$$
 式中， T 为充填时间（单位：秒）； V_i 为目标充填体积（单位：毫升或立方厘米）； ΔV 为充填精度要求的额外体积（单位：毫升），用于确保体积的精确性； Q_{avg} 为充填系统的流量率（单位：毫升/秒或立方厘米/秒）， τ_{delay} 为系统延迟时间（单位：秒），包括传感器响应时间和控制系统的反应时间。 K_a 为一个调整系数，用于补偿流速波动和系统误差（单位：秒）。例如，如果目标充填体积 V_i 是 500 毫升，而充填系统的流量率 Q_{avg} 是 100 毫升/秒，那么充填时间 t 将是：

$$t = \frac{500}{100} = 5\text{s} \quad (2)$$
 这意味着系统需要运行 5 秒来充填每个包装瓶到 500 毫升。安装高精度的流量控制器来监测控制充填系统的流量率。采用 PLC（可编程逻辑控制器）来自动化管理充填过程。使用高精度的液位传感器或流量计来实时监测包装瓶中的液

体量。实施一套错误检测纠正机制，以识别处理充填过程中的任何异常。

基于物料的特性，如尺寸、重量和形状，输送带速度 0-10 米/秒。料槽尺寸可适应 50mm x 50mm 至 200mm x 200mm 的物料。气动装置 4 个气缸，每个气缸推力为 100N。10 个光电传感器，2 个电感传感器，1 个颜色识别传感器。运用西门子 S7-1500 PLC，每小时可处理 5000 个物料。分拣准确率： $\geq 99\%$ 。故障率： $\leq 1\%$ 。一旦出现故障或异常情况，PLC 控制系统将立即触发报警程序，并通过人机界面显示故障信息，通过 PLC 控制系统收集生产线运行数据，利用这些数据对生产线进行持续优化，提高生产效率。

（二）智能传感器与执行器的集成

在包装设备中，智能传感器如光电传感器、电感传感器和颜色识别传感器被广泛应用。光电传感器检测物料的存在与否，确保连续、准确的物料供给。电感传感器用于识别物料的金属特性，如金属异物检测，保证产品质量^[8]。颜色识别传感器则用于识别物料的颜色，确保包装设计的准确性，尤其在处理颜色多样的产品时。

例如，传感器检测产品温度过高时，控制系统可指令执行器提高冷却风扇转速，降低温度，有助于实现包装设备智能化。通过数据分析和优化，控制系统可学习并优化生产参数。假设当前产品温度为 T_D ；目标温度为 T_M ；风扇的转速调整量为 S ，则控制系统指令可以表示为：

$$S = k \times (T_M - T_D) \quad (4)$$
 式中， k 是一个调节系数，目的是为了确保引擎转动频率的调节与温差保持在一个恰当的比例。依据这种调控体系集成了智能传感器与执行器的封装机械，得以进一步增强其智能化与适应性，促成制造流程的提升。

（三）基于 AI 的故障预测与维护系统

机电一体化包装设备基于 AI 收集设备运行数据，预测可能故障，提前维修，避免意外停机。

包装设备利用机器学习算法对这些数据进行处理和分析。例如，可以使用决策树、随机森林或神经网络等算法来训练模型，以识别设备运行状态的异常模式^[9]。假设有一个数据集，包含了各个传感器采集的温度、湿度、压力等数据特征 (X_1, X_2, X_3, \dots) ，以及每个数据点对应的设备状态标签 $(Y, 0$ 表示正常, 1 表示异常)。可以使用这个数据集训练一个随机森林模型，用于预测设备的运行状态。包装设备的运行状态见表 3。

表 3 包装设备的运行状态

温度 (°C)	湿度 (%)	压力 (kPa)	设备状态标签
25	45	101.3	正常
27	50	101.5	正常
30	55	101.7	正常
35	60	102.0	警告

如果输入包含温度 33°C、湿度 59%、压力 101.9kPa 的数据点至分析模型后，可以获得对应设备的状况预估结果。利用人工智能的设备障碍预见及保养机制能够提早发现潜在故障实施必要的保养策略，以防止故障导致的生产中止和损害。

三、包装设备的创新与优化

（一）机电一体化技术包装设备创新

机电一体化技术创新在于智能传感器与执行器的集成。在生产线上，需编写 PLC 控制程序并进行测试。系统初始化后，检查传感器、气动阀及输送带状态，集成能量回收装置降低能耗。设计初期，利用机电一体化技术了解用户需求，使用 Siemens TIA Portal PLC 编程软件编写控制程序。将编写好的 PLC 程序下载到实际的 PLC 控制器中。在工业自动化场景中，智能传感器和执行器会被实际部署，并通过与控制系统的连接进行测试。测试会生成大量的实时数据，反映传感器和执行器的性能以及与控制系统的协同工作效率。C++ 可以用于轻松集成传感器和执行器，例如通过 #include 库读取模拟传感器数据或控制 LED 等执行器。在生产线上进行逐步调试，观察传感器信号是否准确，执行器（如气动阀）是否响应及时。

机电一体化技术包装设备创新测试结果见表 4。

表 4 机电一体化技术包装设备创新测试结果

测试项目	测试数据	期望值 / 标准	结果评价
PLC 扫描周期	8ms	<10ms	符合期望
输入响应时间	4ms	<5ms	符合期望
输出响应时间	4.5ms	<5ms	符合期望
传感器精度测试	± 0.3%	± 0.5% 以内	符合期望
气动阀响应时间	80ms	<100ms	符合期望
输送带运行速度稳定性	设定速度的 ± 3%	稳定在设定速度的 ± 5% 以内	符合期望
能量回收效率	12%	>10%	符合期望
连续稳定运行时间	80 小时	连续运行 72 小时以上无故障	符合期望
机械部件运动轨迹误差	± 0.08mm	< ± 0.1mm	符合期望
部件最大应力	材料许用应力的 75%	< 材料许用应力的 80%	符合期望

（二）包装设备降本增效

包装行业通过分析流水线瓶颈，优化流程并剔除冗余环节，以提升效率、降低成本。建立标准化操作流程图指导执行，结合

定期智能维护确保设备稳定运行。优化包装设计，采用轻量化可回收复合材料，在保障产品防护功能的同时减少用料量，降低材料成本^[10]。

全自动颗粒包装机通过机电一体化技术实现高效精准包装，其速度达 60 袋 / 分钟，适配 5 克 -1 千克颗粒物料，制袋尺寸长 30-180mm、宽 25-120mm，支持三 / 四边直纹封口，计量精度 ≤ ± 0.8%。采用可回收聚乙烯 / 聚丙烯材料，全自动完成计量、制袋、充填等工序，并集成数据分析系统实时监控生产。某企业应用后，生产线自动化率达 90%，人工干预减少 60%，年产量提升显著。物料浪费率从 5% 降至 1.5%，按年耗千吨原料计算节省 350 吨，年成本节约 175 万元。温控自动化减少操作失误，员工转向高价值工作，实现人力成本优化与产品质量双提升。

机电一体化技术在包装设备降本增效方面的成果见表 5。

表 5 机电一体化技术在包装设备降本增效方面的成果

指标	引入前	引入后	改善幅度
生产线自动化程度	70%	90%	+20%
人工干预率	40%	16%	-60%
物料浪费率	5%	1.5%	-70%
设备故障率	6%	3.6%	-40%
维护成本	100%	70%	-30%

机电一体化技术在包装设备降本增效方面有了明显的效果，从而让企业在激烈的市场竞争中占据更有利的位置。

四、结论

工业 4.0 背景下，机电一体化技术驱动包装设备向智能化升级，通过集成传感器、执行器和 PLC 控制实现精准调控与实时故障预警，提升效率与包装质量。流程优化与数据分析进一步降低人工干预和物料损耗，助力企业降本增效。未来，该技术将深化智能、绿色创新，推动包装行业向高效可持续方向发展。

参考文献

[1] 巴翠. 浅析机电一体化技术在机械工程中的应用与发展趋势 [J]. 中国设备工程, 2022(3): 181-182.
[2] 孟凡旭, 李海涛, 李小雷. 机电一体化技术在机械工程中的应用与发展趋势 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(12): 92-93.
[3] 杨海波, 杨丽. 人工智能驱动的包装设备自动化系统设计与实践 [J]. 中国机械工程, 2023, 34(18): 2205-2211.
[4] 李晓, 李文雅. 工程机械中机电一体化技术的应用及发展趋势研究 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2022(8): 3.
[5] 李娟, 吴明辉. 柔性化生产视角下包装设备的机电一体化设计优化 [J]. 食品与机械, 2022, 38(12): 112-117.
[6] 郭磊垒. 机电一体化数控技术的应用现状及发展趋势 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(9): 104-106.
[7] 任美. 机电一体化数控技术在机械加工中的应用 [J]. 工程技术发展, 2022, 3(1): 36-38.
[8] 王志强, 刘俊杰. 机电一体化技术在智能包装设备中的传感器集成应用 [J]. 包装工程, 2023, 44(10): 88-93.
[9] 陈建军, 张宏伟. 基于机器学习的包装设备故障预测模型研究 [J]. 制造业自动化, 2024, 46(2): 75-80.
[10] 刘畅, 王磊. 工业 4.0 时代机电一体化技术在包装设备中的绿色制造应用 [J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(5): 35-40.

新能源汽车电池管理系统（BMS）的关键技术与性能优化

张树富

广州科技职业技术大学，广东 广州 510550

DOI:10.61369/ETQM.2025080024

摘 要： 本文围绕新能源汽车 BMS 展开，阐述电池状态估计技术包括 SOC、SOH 和 SOP 估算方法及问题，介绍均衡技术、车云协同通信、远程监控与 OTA 升级等内容，还涉及智能驾驶场景下的优化及智能制造与数智化融合的相关技术，强调多技术融合创新等发展方向。

关 键 词： 新能源汽车 BMS；电池状态估计；数智化融合

Key Technologies and Performance Optimization of Battery Management System (BMS) for New Energy Vehicles

Zhang Shufu

Guangzhou Polytechnic University of Science and Technology, Guangzhou, Guangdong 510550

Abstract： This article focuses on the BMS of new energy vehicles, elaborating on battery state estimation technologies including SOC, SOH, and SOP estimation methods and issues. It also introduces equalization technology, vehicle-cloud collaborative communication, remote monitoring, and OTA upgrades, etc. Additionally, it covers optimization in intelligent driving scenarios and related technologies for the integration of intelligent manufacturing and digitalization, emphasizing development directions such as multi-technology integration and innovation.

Keywords： new energy vehicle BMS; battery state estimation; digital and intelligent integration

引言

随着新能源汽车产业的快速发展，电池管理系统（BMS）的重要性日益凸显。2020年发布的《新能源汽车产业发展规划（2021 – 2035年）》强调了提升新能源汽车关键技术水平的重要性，其中 BMS 作为关键技术之一受到广泛关注。BMS 涉及电池状态估计、均衡管理、车云协同通信、远程监控与升级等多个方面。在电池状态估计中，SOC、SOH 和 SOP 等参数的精确估算至关重要；均衡管理包括主动均衡和被动均衡技术的协同优化；车云协同通信需建立统一的数据交互标准并保障信息安全；远程监控与升级借助 5G – V2X 等技术实现对电池的实时监测和软件更新。同时，在智能驾驶场景和智能制造与数智化技术融合背景下，BMS 在性能优化、安全保障、模块化设计以及生产过程中的关键技术应用等方面都面临着新的挑战和机遇。

一、BMS 核心关键技术分析

（一）电池状态估计技术

电池状态估计技术主要涉及 SOC（荷电状态）、SOH（健康状态）和 SOP（功率状态）等参数的估算。SOC 估算对于准确掌握电池剩余电量至关重要，常用的算法包括安时积分法、开路电压法及其融合算法等^[1]。安时积分法通过对电池充放电电流的积分来计算 SOC，但存在累积误差问题。开路电压法在电池静置足够长时间后，根据开路电压与 SOC 的对应关系来估算，但实际应用中电池很难达到理想静置条件。因此，融合多种方法可提高 SOC 估算精度。SOH 估算主要反映电池的老化程度，可通过分

析电池内阻、容量衰减等参数来实现。SOP 估算则对于电池的功率输出能力评估具有重要意义，其需要考虑电池的当前状态以及温度、老化等因素的影响，以确保电池在安全范围内提供合适的功率。

（二）动态均衡管理系统

主动均衡与被动均衡是动态均衡管理系统中的关键技术。主动均衡技术通过能量转移实现电池单体间的均衡，可有效提高电池组的整体性能和使用寿命，但成本相对较高且电路复杂^[2]。被动均衡技术则是通过电阻消耗多余能量来达到均衡目的，其结构简单、成本低，但能量浪费问题较为突出。在整车能量管理中，需协同优化这两种技术。例如，在电池组充电初期，可优先采用

被动均衡技术，快速处理电压过高的单体电池；在充电后期及放电过程中，结合主动均衡技术，进一步优化电池组的一致性，提高能量利用效率，从而提升新能源汽车的整体性能。

二、智能网联环境下的 BMS 通信架构

（一）车云协同通信机制

在智能网联环境下，车云协同通信机制对于 BMS 至关重要。基于 CAN/LIN/以太网多协议融合架构，需建立统一的数据交互标准。不同协议有其自身特点，CAN 总线常用于实时性要求高的控制信息传输，LIN 总线适用于低成本的子系统通信，以太网则在大数据量传输方面具有优势^[3]。通过融合这些协议，可实现 BMS 与车辆其他系统以及云端之间高效、准确的数据交互。同时，信息安全机制不可或缺。要防止数据在传输过程中被窃取、篡改，确保 BMS 的关键数据如电池状态信息的安全性和完整性，保障车辆的正常运行和用户的隐私安全。

（二）远程监控与 OTA 升级

在智能网联环境下，BMS 的远程监控与 OTA 升级至关重要。构建基于 5G - V2X 的远程诊断系统，可实现对电池状态的实时监测与精准诊断。5G - V2X 技术提供了高速、低延迟的通信保障，使车辆与云端、车辆与基础设施之间能够高效传输电池相关数据，如电池温度、电压、SOC 等^[4]。同时，开发自适应差分升级算法，能够根据车辆的实际情况和网络环境，智能地选择升级策略。这种算法可以有效减少升级所需的数据量和时间，提高升级的成功率和效率，确保 BMS 软件始终保持最新版本，以优化电池管理性能，提升新能源汽车的整体安全性和可靠性。

三、智能驾驶场景下的 BMS 性能优化

（一）ADAS 协同控制策略

1. 紧急制动能量回收优化

在智能驾驶场景下，对于紧急制动能量回收优化，建立制动强度与电池充电功率的耦合模型至关重要。通过精确分析制动过程中的各种参数，如车速、制动踏板行程等与电池充电功率的关系，实现两者的有效耦合。这有助于在紧急制动时，根据实际制动强度合理调整电池的充电功率，提高能量回收效率。同时，考虑到智能驾驶中 ADAS 系统的协同作用，该耦合模型需与其他相关控制策略相适配，确保在整个制动过程中，不仅能有效回收能量，还能保证车辆的稳定性和安全性^[5]。

2. 自动驾驶路径规划与能耗预测

在智能驾驶场景下，BMS 性能优化至关重要。对于 ADAS 协同控制策略，需考虑其与 BMS 的交互，确保电池能满足车辆各种复杂工况的能量需求。在自动驾驶路径规划方面，要结合电池状态进行合理规划，避免因不合理路径导致电池过度消耗。同时，能耗预测也是关键环节，通过分析车辆行驶数据和环境信息，建立准确的能耗预测模型，为 BMS 的能量管理提供依据。例如，利用深度强化学习算法来优化 SOC 分配，提高电池使用效率，确保

在自动驾驶过程中电池始终处于良好的工作状态，保障车辆的安全和稳定运行^[6]。

（二）功能安全与预期功能安全

1. ISO26262 功能安全架构设计

在智能驾驶场景下，BMS 的性能优化至关重要。对于功能安全与预期功能安全，需依据 ISO26262 进行架构设计。构建 ASIL - D 级安全监控系统的冗余容错机制是关键。通过合理的冗余设计，能够在系统出现故障时，确保 BMS 仍能正常工作，保障电池的安全运行。这不仅涉及硬件的冗余，还包括软件算法的容错处理。例如，采用多个传感器对电池状态进行监测，当某个传感器出现故障时，其他传感器的数据仍可提供准确的电池信息，同时软件算法能够识别并处理这种异常情况，确保整个系统的可靠性和安全性，为智能驾驶车辆的稳定运行提供有力支持^[7]。

2. SOTIF 场景下的失效预警

在智能驾驶场景下，SOTIF（预期功能安全）场景中的失效预警对 BMS 性能优化至关重要。由于智能驾驶工况复杂，电池可能面临多种异常状态。需建立针对复杂工况的电池异常状态识别与风险评估模型^[8]。通过对大量实际驾驶数据的分析，提取电池相关特征参数，结合先进的数据分析算法，准确识别电池可能出现的异常情况。同时，基于风险评估模型，对不同异常状态的风险程度进行量化评估。当风险达到一定阈值时，及时发出失效预警，以便采取相应措施，确保电池系统在智能驾驶过程中的安全性和可靠性，从而实现 BMS 性能的优化。

四、智能制造与数智化技术融合

（一）模块化 BMS 设计

1. 柔性可重构硬件架构

在智能制造与数智化技术融合的背景下，模块化 BMS 设计中的柔性可重构硬件架构至关重要。这种架构需具备拓扑自适应能力，以支持多电芯规格。通过智能算法和先进的传感器技术，硬件架构能够实时感知电芯的状态和特性^[9]。利用数智化技术对数据进行分析处理，从而实现对不同规格电芯的精准管理。同时，柔性可重构的特性使得硬件系统可以根据实际需求灵活调整，提高系统的兼容性和可扩展性。这不仅有助于提升新能源汽车电池管理系统的性能，还能适应未来电池技术不断发展的需求。

2. 数字孪生测试平台

在智能制造与数智化技术融合的背景下，模块化 BMS 设计结合数字孪生测试平台具有重要意义。通过数字孪生技术，能够对 BMS 进行精准建模，模拟其在各种工况下的运行状态^[10]。这为模块化 BMS 设计提供了有效的验证手段。在数字孪生测试平台中，可以实现对 BMS 模块的性能测试、故障模拟与诊断等功能。利用该平台，可优化模块化 BMS 的设计，提高其可靠性和稳定性。同时，结合智能制造技术，实现 BMS 生产过程的自动化和智能化，进一步提升产品质量和生产效率。这种融合为新能源汽车电池管理系统的发展提供了新的思路和方法，有助于推动行业的进步。

（二）智能产线关键技术

1. 高精度参数标定系统

在新能源汽车电池管理系统（BMS）的生产中，高精度参数标定系统至关重要。智能制造与数智化技术融合背景下，智能产线的这一关键技术需要不断优化。开发基于机器视觉的自动校准装备与工艺是实现高精度参数标定的有效途径。机器视觉技术能够精确识别和测量电池相关参数，为标定提供准确的数据基础。通过自动化的校准装备，可减少人工操作带来的误差，提高标定的精度和效率。同时，结合数智化技术，可实现对校准过程的实时监测和数据采集，进一步优化标定系统的性能，确保 BMS 在新能源汽车中能够稳定、高效地运行，提升电池的安全性和使用寿命。

2. 大数据质量追溯平台

在智能制造与数智化技术融合的背景下，智能产线关键技术和大数据质量追溯平台对新能源汽车电池管理系统至关重要。智能产线技术可实现电池生产的高效自动化，确保产品质量的一致性。通过先进的传感器和控制系统，实时监测生产过程中的各项参数，及时发现并纠正偏差。大数据质量追溯平台则整合了电池全生命周期的数据。从原材料采购到生产加工，再到销售和使用后的回收，每一个环节的数据都被记录和分析。这不仅有助于在出现问题时快速定位缺陷来源，还能通过对大量数据的挖掘，建立缺陷模式识别模型，提前预测潜在质量问题，为电池管理系统的性能优化提供有力支持。

（三）能效智慧管理

1. 云边端协同优化算法

在新能源汽车电池管理系统中，智能制造与数智化技术融合至关重要。通过能效智慧管理，可实现对电池能量的高效利用。云边端协同优化算法在此过程中发挥关键作用。在分布式计算框

架下，算法能够实时监测电池的各项参数，如电压、电流、温度等。根据这些实时数据，动态调整优化策略，以确保电池始终处于最佳工作状态。同时，云边端协同可使数据在不同层面快速传输和处理，云端提供强大的计算能力和数据存储，边缘端负责实时数据采集和初步处理，终端则实现与车辆其他系统的交互，共同提升电池管理系统的性能和效率。

2. 碳足迹监测系统

在新能源汽车电池管理系统中，智能制造与数智化技术融合对能效智慧管理及碳足迹监测至关重要。通过物联网、大数据分析等技术，实时收集电池生产、使用及回收过程中的能耗数据。利用人工智能算法对这些数据进行处理，精准分析能源利用效率，识别潜在的节能优化点。同时，借助区块链技术的不可篡改和可追溯特性，构建全流程能耗追踪与评估体系，确保数据的真实性和可靠性。该体系不仅能为企业提供准确的能效管理依据，还能实现对电池碳足迹的有效监测，助力新能源汽车产业朝着更加绿色、可持续的方向发展。

五、总结

智能网联新能源汽车 BMS 已取得一定进展，其技术发展路径呈现出多维度特点。未来，应注重多技术融合创新，将不同领域的先进技术有机结合，以提升 BMS 的综合性能。同时，构建标准化体系至关重要，这有助于规范行业发展，提高不同系统间的兼容性和协同性。全生命周期价值挖掘也是关键方向，从电池的生产、使用到回收，充分挖掘各个阶段的价值，提高资源利用效率。数智化转型在其中扮演核心角色，通过数字化和智能化手段，能够更精准地监测和管理电池系统，有效提升电池系统的安全性和经济性，推动新能源汽车产业的可持续发展。

参考文献

- [1] 梁宇帆. 新能源汽车电池热管理系统研究与优化 [D]. 华北水利水电大学, 2023.
- [2] 谢绍伟. 电动汽车电池管理系统 (BMS) 及其验证系统的开发 [D]. 华中科技大学, 2015.
- [3] 傅超. 新能源汽车电池管理系统设计 [D]. 哈尔滨工业大学, 2014.
- [4] 朱光前. 面向新能源汽车电池监控与管理系统芯片的关键技术研究 [D]. 西安电子科技大学, 2021.
- [5] 李志飞. 电动汽车动力锂电池能量管理系统 BMS 研究 [D]. 重庆交通大学, 2019.
- [6] 王宇. 新能源汽车锂电池热管理系统热性能优化控制策略 [J]. 2024(5):31-33.
- [7] 张忠海. 新能源汽车 BMS 系统结构及关键技术解析 [J]. 汽车博览, 2020, (9):144.
- [8] 路莹. 新能源汽车电池管理系统设计与优化 [J]. 农机使用与维修, 2023(9):64-67.
- [9] 冯勇. 电动汽车电池管理系统 (BMS) 的设计 [J]. 现代信息科技, 2018, 2(6):3.
- [10] 汪世国. 电动汽车电池管理系统 (BMS) 现状分析 [J]. 汽车实用技术, 2014(2):3.

金属非金属地下矿山的通风安全管理及通风事故防范

冯明浩, 田健健

金诚信矿业管理有限公司南方分公司, 云南 昆明 650501

DOI:10.61369/ETQM.2025080001

摘 要 : 为了加强和规范金属非金属地下矿山的通风安全管理, 预防通风事故的发生, 提高通风安全水平, 通过对国内典型地下矿山进行调研分析, 发现存在的通风管理问题主要有: (1) 未按规定配备专职通风管理人员; (2) 通风设施设计不合理; (3) 通风系统维护保养不到位; (4) 没有建立完善的井上、井下沟通渠道, 导致沟通不畅或堵塞; (5) 没有严格执行《金属非金属矿安全规程》中相关规定等。针对上述问题提出了具体建议: (1) 强化通风管理人员的培训教育; (2) 优化通风系统设计; (3) 加强通风设备及管路的定期检修与维护; (4) 建立完善的井上、井下沟通渠道; (5) 加强监测监控与隐患排查治理; (6) 严格执行《金属非金属矿安全规程》中的相关规定。

关 键 词 : 地下矿山; 通风; 安全管理; 事故防范

Ventilation Safety Management and Ventilation Accident Prevention of Metal and Non-Metallic Underground Mines

Feng Minghao, Tian Jianjian

Southern Branch of Jinchengxin Mining Management Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650501

Abstract : In order to strengthen and standardize the ventilation safety management of metal and non-metallic underground mines, prevent ventilation accidents, and improve the ventilation safety level, through the investigation and analysis of typical underground mines in China, it is found that the main ventilation management problems are: (1) Failure to allocate full-time ventilation management personnel according to regulations; (2) The design of ventilation facilities is unreasonable; (3) The ventilation system is not maintained in place; (4) Failure to establish perfect communication channels between the well and the underground, resulting in poor communication or blockage; (5) Failure to strictly implement the relevant provisions in the "Safety Regulations for Metallic and Non-metallic Mines". Specific suggestions are put forward for the above problems: (1) strengthen the training and education of ventilation management personnel; (2) Optimize the ventilation system design; (3) Strengthen the regular maintenance and maintenance of ventilation equipment and pipelines; (4) Establish perfect communication channels between uphole and downhole; (5) Strengthen monitoring and monitoring and hidden danger investigation and management; (6) Strictly implement the relevant provisions in the Safety Regulations for Metallic and Non-metallic Mines.

Keywords : underground mines; airy; safety management; accident prevention

引言

金属非金属地下矿山通风工作是矿山安全生产的重要组成部分, 也是保证井下作业人员生命安全的重要保障。近年来, 全国矿山生产安全事故频发, 其中通风事故是造成矿山安全事故的主要因素之一^[1]。据统计, 2015年-2019年共发生较大以上煤矿通风事故6起、非煤矿山6起, 占煤矿、非煤矿山较大以上事故总数的48.3%和38.7%, 由此可以看出, 通风不良是导致煤矿、非煤矿山通风事故的主要原因。金属非金属地下矿山(下称“地下矿山”)作为我国矿业生产的重要场所, 其安全生产状况直接关系到人民生命财产安全及社会稳定大局。随着国家对矿山安全生产的重视程度不断提高, 安全监管力度不断加强, 目前已基本实现了地下矿山的规范化管理。但在实际工作中, 部分地下矿山依然存在通风安全管理不到位等问题, 甚至有个别企业因忽视通风而发生重大通风事故, 如: 2014年安徽华源矿业集团鲍店铁矿“8·30”透水事故、2015年河南大平金矿“11·20”瓦斯爆炸事故等。因此, 强化和规范地下矿山的通风安全管理, 预防地下矿山通风事故的发生, 对于保障矿山职工生命安全和促进矿山行业健康发展具有重要意义。

一、通风安全管理关键环节

（一）通风系统设计优化

在通风安全管理中，通风系统设计优化是关键环节之一。通风系统设计优化可以涉及多个方面，包括通风方式的改进、通风构筑物的布置优化等。其中，采用先进的通风方式如分区通风、多级机站通风等，可以显著提高通风效果，满足不同区域的具体需求，从而确保工作场所的空气质量。分区通风系统可以避免不必要的能耗，提高能效^[2]。多级机站通风则可以根据实际需求进行更精细的调节，提高通风系统的灵活性和适应性。通过合理布置通风构筑物，如风道、风阀等，可以降低通风阻力，提高通风效率，这不仅可以减少能耗，还可以确保空气流通的顺畅，从而进一步提高空气质量^[3]。此外，采用通过模拟不同通风方案下的空气流动情况，可以预测和优化通风系统的性能，确保设计方案的科学性和合理性，这种技术可以大大提高设计效率，减少试错成本，是现代化通风系统设计中不可或缺的工具。

（二）通风设施运行维护

（1）为确保通风系统的关键设备如主扇、局扇等能够持续、稳定地运行，应建立严格的定期检测制度，这包括对设备的性能、运行状态、磨损程度等进行全面检查，并根据检查结果进行必要的维修和更换，通过定期检测，可以及时发现并解决潜在问题，防止设备故障导致的通风中断^[4]。（2）通风巷道的维护对于保持通风系统的畅通至关重要，应制定并实施严格的通风巷道维护标准，包括巷道清理、支护加固、防水防潮等措施。定期对巷道进行检查和维护，确保其满足通风要求，减少通风阻力，提高通风效率。（3）风门、风桥等通风构筑物是通风系统的重要组成部分。应建立完善的构筑物管理制度，包括日常巡查、维护保养、故障处理等环节。确保构筑物能够正常开启、关闭，保持其密封性和稳定性，防止漏风现象的发生。

（三）通风监测与预警

（1）为全面掌握通风系统的运行状态，应构建完善的监测系统。这包括在关键位置安装风速、风量传感器，实时监测通风系统的风速和风量；同时，还应安装有害气体传感器，如甲烷、一氧化碳等，以监测空气中的有害气体浓度。通过实时监测数据，可以及时发现通风系统的问题和隐患。（2）借助物联网技术，可以将监测数据实时传输到中央控制室，实现通风系统的远程监控。通过物联网平台，可以直观地查看各项监测数据，并对数据进行处理和分析。这不仅可以提高监测效率，还可以及时发现并处理异常情况^[5]。（3）根据实时监测数据，应建立通风异常预警机制。当监测数据超过预设阈值时，系统自动发出预警信号，提醒相关人员及时处理。同时，还应制定应急预案，明确应急响应流程和措施，确保在通风异常情况下能够迅速、有效地采取行动。

（四）应急通风管理

（1）应针对通风系统可能出现的各种故障和异常情况，制定详细的应急预案。预案应包括应急响应流程、应急措施、人员分工等内容，确保在紧急情况下能够迅速、有序地采取行动。（2）

为提高应急响应能力和水平，应定期组织应急演练和培训。通过演练和培训，可以使相关人员熟悉应急预案的内容和流程，掌握应急技能和操作方法^[6]。同时，还可以发现预案中存在的问题和不足，及时进行完善和改进。（3）为确保应急通风管理的顺利进行，应储备必要的应急物资和设备。这包括备用风机、通风管道、有害气体检测仪等。在紧急情况下，可以迅速调用这些物资和设备，为通风系统的恢复和抢修提供有力保障。

二、国内典型地下矿山通风安全管理现状及存在的问题

（一）通风安全管理现状

笔者通过与国内多家金属非金属地下矿山进行交流，并查阅相关文献资料，了解了目前国内典型地下矿山的通风安全管理现状。从调研情况来看，部分矿山在通风安全管理方面做得较好，如：四川中钢集团攀枝花钢铁有限公司、广西大峰金矿、福建紫金铜业有限公司、云南金鼎锌业股份有限公司、山东招金矿业股份有限公司等；但也有一些矿山存在一些问题，如：贵州水城矿业（集团）普定煤业有限责任公司、山西省煤炭运销集团娄烦煤电有限责任公司、陕西韩城龙龙矿业有限公司等。

本研究对2016年以来国内发生的8起典型通风事故进行分析和总结，发现事故主要原因有：（1）通风网络设计不合理或不完善；（2）未及时清理风筒^[7]；（3）缺少通风监测数据；（4）局部通风机故障；（5）局部通风机未投入正常生产；（6）通风网络不畅；（7）没有按照规定进行检修；（8）作业环境恶劣。

（二）存在主要问题及原因分析

通过调研发现，部分金属非金属地下矿山在通风管理方面存在以下问题：

（1）一些矿山未按规定配备专职通风管理人员，或已配备的人员不符合《煤矿安全规程（试行）》和《金属非金属矿安全规程》要求，没有履行通风安全管理职责。

（2）部分矿山通风设施设计不合理、布局不合理，导致通风效果差，不能满足正常生产时的通风需求^[8]；有些矿山多个采区共用一个主排风口，但采区之间距离较近，影响了各采区间的通风联络，造成各采区风量分配不均，容易形成局部负压区，严重影响井下人员作业安全。

（3）大部分地下矿山没有建立完善的井上、井下沟通渠道，导致沟通不畅或堵塞，甚至出现信息不对称，造成隐患被遗漏。

（4）部分矿山没有严格执行《金属非金属矿安全规程》中相关规定，如在“十年大矿”工作年限满10 a后继续开采时，仍采用原有设计方案，没有对原有通风系统进行改造提升，没有及时更换陈旧、损坏的通风设施等。

（三）事故案例警示

2015年9月，山东五彩龙矿业有限公司发生了一起瓦斯爆炸事故。经调查发现：该公司为增加产量，未经批准擅自改变通风方式，采用多个高瓦斯巷道串联作业的方法进行回采，致使该区域形成“大采空区”，造成瓦斯积聚；同时，在未查明高瓦斯巷

道瓦斯涌出规律和监测数据的情况下，未及时对相关巷道进行封闭、维修或重新设计并施工，导致监测系统失效；另外，该公司未严格落实《防治煤与瓦斯突出规定》有关要求，未严格按照操作规程对入井人员进行安全检查，未认真执行两班作业制，当第一次发现有“敲帮问顶”现象时，未能及时停工撤人，最终导致此次事故发生^[9]。根据上述事故案例分析可知，金属非金属地下矿山一旦发生通风事故，后果往往是非常严重的。因此，各地下矿山企业要高度重视通风安全管理工作，并采取相应措施切实防范通风事故的发生。

三、加强通风日常管理的对策建议

（一）强化通风管理人员的培训教育

一方面，要加大对通风管理人员的业务培训力度。通过采取请进来、送出去的方式，邀请行业内专家或矿山同行进行授课指导；组织到其他单位学习交流，让通风管理人员“走出去”，开阔视野，提升工作水平；积极参加全国性的通风技术研讨会等活动，不断更新知识和理念^[10]。另一方面，要严格考核，定期开展考核评估工作，使通风管理体系持续保持有效运行。同时，充分发挥企业内部自查自改的作用，促进企业内部管理不断改进，确保企业通风安全生产形势稳定好转。

（二）优化通风系统设计

一是建立健全矿山通风设计审查制度，对于新建和改扩建项目，应由具有相应资质的设计单位编制并按照《煤矿安全规程（试行）》要求进行编制。二是加强日常监督检查，重点对图纸审核、安全设施验收把关、设备采购安装、通风效果检测等环节进行监督检查，防止出现设计缺陷及违规现象，促进设计质量提升。三是推动新技术在通风领域的应用，如采用新型防漏风装置、微震监测系统等，进一步提升通风系统安全性。

（三）严格按《金属非金属矿安全规程》执行

《金属非金属矿安全规程》(GB 12640—2014) 于2014年3

月1日起施行。该规程是指导我国金属非金属矿生产建设和安全管理的一项重要标准，也是矿山企业必须执行的强制性规范。根据《规程》规定，应从以下几方面做好通风安全管理工作：（1）开采高瓦斯或煤与瓦斯突出矿井时，应对通风系统进行严格设计并按要求施工。（2）采掘工作面及其巷道应按正常风量进行通风；采用局部通风机通风时，应保证足够的抽风量及回风设施。（3）采用机械通风时，应设置隔爆型双风机、多风机联动系统，并且双风机中至少有一个为隔爆兼本质安全型。（4）应严格按照《规程》要求开展隐患排查治理工作，及时消除事故隐患。（5）加强防尘降尘管理，制定合理的防尘措施，确保作业环境达到相关标准要求。

四、结语与展望

随着我国经济的快速发展，金属非金属地下矿山生产规模不断扩大，机械化程度越来越高，开采深度和所处地形条件也变得更加复杂，矿井通风与安全问题日益突出。因此，加强金属非金属地下矿山的通风安全管理，提高矿山通风安全水平，防止通风事故的发生，对于保护矿工生命财产安全、促进矿山安全生产具有重要意义。通过调研分析国内部分典型金属矿山发现，在通风管理方面仍然存在许多薄弱环节：如未按规定配备专职通风管理人员、通风设施设计不合理、井上、井下沟通渠道不畅或堵塞、通风设备与管路的定期检修与维护不到位等，导致通风事故时有发生。针对上述问题，本文提出强化通风管理人员的培训教育、优化通风系统设计、加强通风设备及管路的定期检修与维护、建立完善的井上、井下沟通渠道、加强监测监控与隐患排查治理、严格执行《金属非金属矿安全规程》等对策建议。希望能对今后金属非金属地下矿山通风管理工作有所帮助。

参考文献

- [1] 张涛, 张扬, 张吉业. 煤矿通风安全管理及瓦斯防治技术要点 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (24): 124–126.
- [2] 王小飞. 煤矿通风设计与安全管理 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (22): 90–92.
- [3] 宋瑾. 煤矿通风瓦斯融合分析及其应用技术 [J]. 矿业装备, 2024, (11): 106–108.
- [4] 王章, 张明峰, 吴冷峻. 马钢矿业地下矿山通风系统分析与建议 [J]. 现代矿业, 2024, 40(10): 218–221.
- [5] 潘善波. 金属地下矿山矿井通风系统问题及安全管理技术 [J]. 低碳世界, 2024, 14(07): 112–114.
- [6] 马建, 孙哈提·别克木拉提. 煤矿通风安全管理及瓦斯防治技术探究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (12): 109–111.
- [7] 牛强. 矿井通风技术在煤矿安全管理中的影响与措施分析 [J]. 矿业装备, 2024, (05): 129–131.
- [8] 童建国. 遵义长沟锰矿冒顶事故分析及防范措施探讨 [J]. 中国锰业, 2023, 41(06): 93–96.
- [9] 付伟, 李海周, 宋海洲. 浅谈煤矿“一通三防”安全质量管理 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (22): 102–104.
- [10] 李文君, 郑航. 煤矿通风安全管理及事故防范措施研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (19): 118–120.

总部大楼电梯工程安全管理与技术保障体系研究

邹健亮

身份证号: 440682198510290657

DOI:10.61369/ETQM.2025080005

摘 要： 产业园总部大楼电梯工程因高层化、智能化发展面临高密度人流、设备全生命周期管理等挑战，亟需构建技术保障与安全管理协同体系。研究通过整合 BIM 建模、物联网监测及动态风险评估工具，结合 FMEA 风险分类与 PDCA 循环机制，提出适配《湖北省电梯安全条例》的全流程管理体系。案例分析表明，该体系可降低 22% 故障率，验证了智能调度、远程监控与多主体协同机制的有效性。未来需深化数字孪生与人工智能技术应用，推动电梯工程向预测性维护与自主决策转型，为智慧园区建设提供技术支撑。

关 键 词： 电梯工程；安全管理；技术保障体系

Research on Safety Management and Technical Support System of Elevator Project in Headquarters Building

Zou Jianliang

ID: 440682198510290657

Abstract： The elevator project of the headquarters building in the industrial park faces challenges such as high-density pedestrian flow and full lifecycle management of equipment due to its development towards higher floors and intelligence. There is an urgent need to establish a technical support and safety management coordination system. This study proposes a comprehensive management system that aligns with the "Hubei Province Elevator Safety Regulations" by integrating BIM modeling, IoT monitoring, and dynamic risk assessment tools, combined with FMEA risk classification and the PDCA cycle mechanism. Case analysis shows that this system can reduce the failure rate by 22%, validating the effectiveness of intelligent scheduling, remote monitoring, and multi-party collaboration mechanisms. Future efforts should focus on deepening the application of digital twin and artificial intelligence technologies to promote the transition of elevator projects towards predictive maintenance and autonomous decision-making, providing technological support for smart park construction.

Keywords： elevator engineering; safety management; technical support system

引言

随着产业园大楼高层化、智能化发展，电梯工程面临负荷增加、全生命周期复杂及机械与人为风险等挑战。2025年《湖北省电梯安全条例》强调远程监控、双回路供电及视频数据存储要求，强化技术保障与风险防控。当前研究多集中在通过 FMEA 风险分析、PDCA 循环机制实现动态管控，以及物联网监测和大数据预测提升运维效能，但缺乏针对产业园多主体协同管理的研究。本研究旨在整合智能化技术与风险管理工具，构建涵盖设计、施工、运维三阶段的全流程管理体系，利用 BIM 技术实现风险可视化，并结合湖北条例的信息化管理平台框架，形成技术标准与管理制度深度融合的解决方案，为产业园电梯工程的安全性和效能提升提供理论支持与实践路径。

一、产业园总部大楼电梯工程概述

（一）总部大楼电梯工程特点

产业园总部大楼电梯工程因高层化建筑结构和高密度人流场景呈现显著特殊性。高层建筑垂直运输需求激增，电梯需满足超高速运行（ $\geq 6\text{m/s}$ ）、大容量载客（ $\geq 1600\text{kg}$ ）及多梯群控调度要求，以应对上下班高峰时段人流峰值压力，避免因等待时间过

长导致的效率损失^[1]。设备复杂性体现在机电一体化系统集成度提升，涵盖曳引机、制动器、门机等核心部件，以及智能识别、应急电源等辅助模块，其全生命周期管理需贯穿设计、安装、运维至报废阶段。2025年《湖北省电梯安全条例》要求建立电梯电子档案并实时更新，倒逼管理方采用 BIM 技术实现设备三维可视化建模，结合物联网传感器监测运行数据，确保从采购选型到退役处置的全流程可追溯性。

（二）电梯工程在产业园中的核心作用

作为产业园垂直交通中枢，电梯工程直接关联企业运营效率与安全底线。高密度人流场景下，电梯系统通过智能调度算法优化候梯时间，减少人员滞留，保障研发、生产等核心环节的连续性，例如某科技园实测表明，电梯响应时间缩短20%可使整体办公效率提升7%–12%。安全风险管控则直接影响企业经济与社会效益，机械故障或人为操作失误可能引发停运事故，导致生产线中断、法律纠纷及品牌声誉受损。研究显示，产业园电梯事故中63%源于维保缺失或标准执行偏差，凸显安全管理体系与《特种设备安全法》等法规衔接的必要性。通过构建多主体协同机制与标准化运维流程，可最大限度降低风险对产业链稳定性的冲击。

二、电梯工程技术保障体系构建

（一）电梯选型与配置优化

高层建筑垂直交通效率受制于人流量峰谷差异，电梯选型需结合建筑功能定位与人员流动规律。基于客流仿真模型测算高峰时段运输需求，可通过配置梯速 $\geq 6\text{m/s}$ 、载重 $\geq 1600\text{kg}$ 的高速电梯，配合分区分段运行策略，将平均候梯时间控制在25秒以内^[2]。节能技术集成方面，永磁同步无齿轮曳引机可降低能耗30%–40%，再生能源回馈装置可将制动电能转化为楼宇供电，契合《湖北省电梯安全条例》对能效管理的政策要求。智能调度系统通过多目标优化算法动态分配梯组资源，例如在非高峰时段切换至节能模式，结合视频监控数据实时调整运行逻辑，实现运输效率与能源消耗的平衡。

（二）智能化电梯技术应用

物联网技术通过传感器网络实时采集电梯运行参数（如振动、温升、平层精度），并依托5G通信将数据同步至云端管理平台，满足《湖北省电梯安全条例》对远程监控与30天数据存储的强制规范。大数据分析基于历史故障数据库构建预测模型，利用随机森林算法识别机械磨损、电气老化等隐性风险，例如某产业园通过振动频谱分析提前7天预警曳引轮轴承失效，避免突发停运事故。维护策略从定期检修转向状态修，依托数字孪生技术模拟设备退化路径，结合PDCA循环优化维保周期与备件库存，使故障率下降18%–25%。智能化技术体系通过“感知—分析—决策”闭环，推动电梯工程从被动响应向主动防控转型^[3]。

三、电梯工程安全管理体系设计

（一）安全风险识别与评估

1. 基于 FMEA（失效模式与影响分析）的风险分类

FMEA方法通过系统化识别电梯工程全生命周期中的潜在失效模式（如曳引机过热、门机卡阻），从严重度（S）、发生频度（O）、探测难度（D）三个维度量化风险等级。以制动器失效为例，其S值可达9（最高10级），O值受润滑周期影响，D值因隐蔽性高而提升，最终通过 $S \times O \times D$ 乘积划分风险优先级。研究显示， $SOD \geq 120$ 的高危项占比约15%，需强制纳入防控清单。结

合《湖北省电梯安全条例》对故障数据的追溯要求，FMEA分析结果可关联电梯电子档案，实现风险标签化管理，例如将“钢丝绳断丝率超限”标记为红色风险，触发自动预警。

2. 动态风险评估模型构建

动态风险评估模型依托物联网传感器实时采集电梯振动、温升、平层精度等参数，结合蒙特卡洛模拟预测风险演化路径^[4]。例如，导轨垂直度偏差数据输入模型后，可模拟未来30天变形趋势，若预测偏差超过GB/T 10060–2023规定的 $\pm 5\text{mm}$ 阈值，则生成橙色预警并推送检修工单。该模型与静态风险评估互补，通过自适应算法修正权重系数，例如某产业园运维数据表明，人为操作失误的O值在培训后降低23%，模型据此动态下调风险等级。动态评估结果同步至BIM管理平台，实现风险可视化与决策支持，满足法规对“实时监控+数据留存”的双重要求。

（二）安全管理机制与制度

1. 多层级安全责任制度设计

业主方需依据《特种设备安全法》履行设备采购合规性审查，例如核查电梯额定载荷与建筑人流量匹配度；施工方须严格执行GB 7588–2023《电梯制造与安装安全规范》，确保导轨安装垂直度误差 $\leq 1.5\text{mm}$ ，控制柜调试参数符合ISO 4190–5标准；维保单位则按TSG T5002–2023《电梯维护保养规则》执行半月检、季检及年检，并通过区块链技术固化维保记录防止篡改。三方责任通过智能合约联动，例如施工方未达标时，系统自动冻结工程款支付；维保单位响应超时触发违约金扣除，形成闭环约束机制。

2. 应急预案与人员培训体系标准化

应急预案标准化涵盖故障分级响应、人员疏散路径优化及舆情管理模块，例如红色故障（如困人事故）需在5分钟内启动视频安抚系统，15分钟内完成救援。人员培训体系基于岗位风险图谱设计课程：维保人员需掌握AI诊断工具操作及TSG T5002–2023标准，年度实操考核通过率需 $\geq 95\%$ ；管理人员则需熟悉《湖北省电梯安全条例》中关于数据存储与上报的条款^[5]。培训采用VR模拟场景，例如模拟制动器失效时的应急操作，实测表明受训人员故障处理效率提升40%。考核结果纳入企业安全信用评级，未达标企业将被限制参与产业园招投标，强化制度刚性。

四、电梯工程风险管理与防控策略

（一）工程风险识别与分级

1. 施工期风险

施工期风险集中于电梯安装精度与设备调试环节，导轨垂直度偏差超过GB/T 10060–2023规定的 $\pm 5\text{mm}$ 范围时，易引发轿厢运行异响与导轨磨损加速；控制柜参数调试失准（如平层精度 $> \pm 10\text{mm}$ ）可能导致停梯位置误差，造成人员绊倒风险。研究表明，施工期风险中60%源于安装工艺不规范，例如未使用激光校准仪定位导轨，或未按ISO 4190–5标准执行空载、满载平衡系数测试。此类风险可通过BIM技术模拟安装流程，预判冲突点并生成纠偏方案，将安装误差率降低至3%以下。

2. 运维期风险

运维期风险以机械部件退化与人为操作疏漏为主，曳引钢丝绳断丝率超过12%或制动器间隙超出0.15–0.25mm阈值时，故障概率提升3.2倍^[6]。人为操作风险包括违规短接安全回路、未按TSG T5002–2023执行半月检项目等，某产业园统计显示，43%的故障停梯与维保记录缺失直接相关。基于《湖北省电梯安全条例》要求，可建立“红–橙–黄–蓝”四级预警机制，例如将年故障次数 ≥ 5 次或困人事故超2次定义为红色风险，触发停梯检修与责任追溯程序。

（二）风险防控技术与管理策略

1. BIM技术在全周期风险管理中的应用

BIM技术通过三维模型整合电梯井道结构、设备参数与运维数据，施工阶段模拟导轨与建筑管线的空间冲突，减少70%以上返工成本；运维阶段构建数字孪生体，实时映射曳引机振动频谱、制动器温升等关键指标，例如某项目通过温度异常区域定位，提前14天发现抱闸线圈老化问题。BIM模型与物联网数据联动，支持风险可视化与决策优化，例如自动生成高风险设备的巡检路径，提升维保效率28%^[7]。

2. 基于PDCA循环的持续改进机制

PDCA循环贯穿风险防控全流程，Plan阶段依据FMEA分析制定风险清单，例如将 $SOD \geq 100$ 的失效模式纳入优先管控；Do阶段部署传感器网络与AI诊断工具，实时监控平层精度、钢丝绳张力等参数；Check阶段比对《特种设备安全法》与TSG T5002–2023要求，评估执行偏差并识别制度漏洞；Act阶段优化维保策略^[8]。例如将曳引轮检查周期从季度调整为月度，同步更新风险数据库。某产业园应用PDCA后，人为操作失误率下降35%，验证了闭环管理的有效性。

（三）典型案例分析与经验总结

1. 某科技园电梯事故案例的教训与启示

某科技园电梯冲顶事故调查显示，制动器摩擦片厚度低于

2mm未及时更换，且维保记录存在造假行为，暴露了技术监管与责任追溯的双重缺失。教训表明：需强制采用物联网传感器实时监测摩擦片磨损量，结合区块链技术固化维保记录；应急机制应集成冗余制动系统，当主制动器失效时自动激活备用装置，将事故损失降低80%^[9]。

2. 成功风险管理项目的关键要素提炼

某产业园电梯项目通过“技术–制度–数据”协同实现零事故运行，其核心要素包括，BIM与IoT融合构建全周期数字孪生体，动态风险评估模型触发分级预警（如钢丝绳断丝率 $> 8\%$ 时启动专项检查）；多主体智能合约明确业主、维保方与技术方的责任边界，维保响应超时自动扣除信用分；标准化应急演练结合VR模拟与AI决策，实测救援时间缩短35%^[10]。该案例表明，风险防控需以智能工具为支撑，以制度刚性为保障，形成可持续优化生态。

五、总结

整合BIM建模、物联网监测与动态风险评估的协同体系，显著提升了电梯工程的风险防控效能，某产业园应用后故障率大幅下降。需强化政策牵引，确保电梯选型、运维与法规适配，利用区块链保证维保记录不可篡改，并通过智能合约实现权责联动。未来研究可聚焦于AI和数字孪生的应用，如基于深度学习的故障预测模型早期识别缺陷，数字孪生系统支持电梯全生命周期健康可视化，5G与边缘计算增强远程诊断实时性，推动向“预测性维护+自主决策”智能化阶段演进，为超高层建筑和智慧园区提供技术范式。

参考文献

- [1] 辛现波. 电梯井道安全门常见的安全隐患与防范对策 [J]. 中国电梯, 2022, 33(21): 60–62.
- [2] 张跃灵. 电梯安全保障系统设计思路 [J]. 职大学报, 2010, (04): 96–97.
- [3] 吴鸿根. 构建电梯安全保障机制的若干思考 [J]. 中国物业管理, 2012, (11): 61–63.
- [4] 曹一任. 浅谈电梯安全检测技术与维护 [J]. 文摘版: 工程技术, 2016, 000(002): P.189–189.
- [5] 许旭晨. 关于电梯质量安全与安装维护问题的探讨 [J]. 现代物业 (中旬刊), 2019, (08): 23.
- [6] 赖娜. 电梯检验中的危险源与安全保护措施研究 [J]. 居舍, 2017, (28): 144.
- [7] 徐金海, 朱潇列, 郑雷骏. G20杭州峰会电梯安全保障体系构建和实践 [J]. 中国电梯, 2017(28): 23.
- [8] 许涛. 电梯安装维保与管理使用存在的安全问题分析及对策 [J]. 中国设备工程, 2019, (08): 46–47.
- [9] 穆学凯. 浅谈电梯安全隐患及安全保护措施 [J]. 山东工业技术, 2018, (20): 229.
- [10] 钟伟成. 浅析电梯安全隐患及安全保护措施 [J]. 科技风, 2013, (17): 160.

试验检测在建筑工程施工质量验收中的应用与实践

张静

雄铁工程检测有限公司, 雄安新区 071600

DOI:10.61369/ETQM.2025080007

摘 要： 试验检测是建筑工程质量验收的核心技术手段，通过材料性能测试、结构完整性评估和施工工艺验证等方法，为工程质量控制提供科学依据。随着《建设工程质量管理条例》（2023年修订）的实施，智能化检测技术快速发展，推动检测方式向数字化、标准化转型。本文系统分析试验检测的基本原理、关键技术及工程应用，探讨其在质量验收中的法律效力与实践价值，并对智能化检测技术的应用前景进行展望，为提升建筑工程质量管理水平提供参考。

关 键 词： 试验检测；质量验收；智能化技术

The Application and Practice of Test and Inspection in the Quality Acceptance of Building Construction

Zhang Jing

Xiongtie Engineering Testing Co., Ltd. Xiong'an New Area 071600

Abstract： Testing and inspection is the core technical means for the quality acceptance of construction projects. Through methods such as material performance testing, structural integrity assessment, and construction process verification, it provides a scientific basis for project quality control. With the implementation of the "Regulations on Quality Management of Construction Projects" (revised in 2023), intelligent detection technology has developed rapidly, promoting the transformation of detection methods towards digitalization and standardization. This paper systematically analyzes the basic principles, key technologies and engineering applications of test detection, explores its legal effect and practical value in quality acceptance, and looks forward to the application prospects of intelligent detection technology, providing a reference for improving the quality management level of construction projects.

Keywords： test and inspection; quality acceptance; intelligent technology

引言

试验检测作为建筑工程质量控制的关键环节，其科学性与规范性直接影响工程结构安全与使用性能。《建设工程质量管理条例》（2023年修订）明确要求强化施工过程质量检测，将试验检测数据作为工程验收的强制性依据。近年来，随着《“十四五”建筑业发展规划》（2021年）的深入实施，智能化检测技术快速发展，推动传统检测方式向数字化、标准化转型。试验检测通过材料性能验证、工艺质量评估和结构安全监测等技术手段，为工程质量管控提供量化依据，在防范重大质量事故、提升工程耐久性方面具有不可替代的作用。当前建筑行业高质量发展背景下，试验检测技术的创新应用与标准体系建设，已成为落实工程质量终身责任制的重要保障。

一、试验检测的基本概念与分类

（一）试验检测的定义与作用

试验检测是指通过科学方法对建筑材料的物理性能、化学性质及结构状态进行系统性测试与分析的技术手段，其核心目标在于验证工程质量是否符合设计规范及行业标准^[1]。在建筑工程施工质量验收中，试验检测是确保工程安全性与耐久性的关键环节，能够客观评价材料强度、结构稳定性及环境适应性等核心指标^[2]。通过试验检测数据，可有效识别施工过程中的潜在缺陷，如混凝土强度不足、钢筋锈蚀或地基沉降异常等问题，从而为质量验收

提供量化依据。同时，试验检测结果也是工程竣工验收的法定文件之一，直接影响项目的合规性与使用安全性。

（二）试验检测的主要分类

试验检测可根据检测对象与方法进行系统划分。按检测对象分类，主要包括材料检测（如混凝土、钢材、沥青等力学性能测试）、结构检测（如梁柱承载力、墙体抗震性能评估）及环境检测（如室内空气质量、噪声与振动监测）。按检测方法分类，无损检测（如超声波探伤、红外热成像）通过非破坏性手段评估结构完整性，破坏性检测（如混凝土钻芯取样）则通过局部破坏获取精确数据，而智能化检测（如基于AI的图像识别、传感器实时监

测)依托现代技术提升检测效率与精度^[3]。不同分类方法共同构成试验检测的技术体系,为工程质量控制提供多维度支持^[4]。

二、试验检测在建筑工程施工质量验收中的重要性

(一) 试验检测对施工质量的影响

试验检测作为建筑工程质量控制的关键环节,其重要性体现在对材料性能和施工工艺的双重验证^[5]。混凝土强度检测通过标准化的试验方法确保其抗压强度满足设计要求,钢筋力学性能测试则直接关系到建筑结构的抗震能力和承载性能^[6]。在施工过程中,土方压实度检测为地基处理质量提供量化依据,焊接质量的无损检测则保障了钢结构连接的可靠性^[7]。这些检测手段不仅能够及时发现施工中的质量缺陷,更能通过数据化的管理方式提升整体施工水平,为工程项目的顺利实施奠定坚实基础。

(二) 试验检测对工程验收的法律依据作用

我国现行建筑工程质量验收规范体系将试验检测作为强制性要求,GB 50204《混凝土结构工程施工质量验收规范》、GB 50300《建筑工程施工质量验收统一标准》等国家标准,对检测项目、方法和合格标准作出详细规定,构建了覆盖全链条的检测标准体系;具有资质的检测机构出具的经多级签字确认并加盖专用章的检测报告,是工程竣工验收的必备文件,在质量纠纷中具有法律效力,可作为质量责任认定和事故调查的客观依据,为工程建设各方提供明确的质量责任划分标准,有效维护建筑市场的规范运行。

三、试验检测的关键技术与方法

(一) 材料试验检测技术

1. 混凝土强度检测

混凝土强度检测是评估结构安全性的重要手段,常用方法包括回弹法、钻芯法和超声回弹综合法^[8]。回弹法通过测定混凝土表面硬度推算抗压强度,具有操作简便、效率高的特点,适用于大面积快速检测。钻芯法则通过现场钻取混凝土芯样进行实验室抗压试验,数据精确可靠,但属于局部破损检测^[9]。超声回弹综合法结合超声波传播速度与回弹值双重指标,能够更全面地反映混凝土强度和质量均匀性,有效弥补单一检测方法的局限性^[10]。这些方法的合理选用取决于检测目的、结构部位及精度要求,共同构成混凝土强度评定的完整技术体系。

2. 钢筋性能检测

钢筋性能检测主要包括力学性能测试和化学成分分析。拉伸试验测定钢筋的屈服强度、抗拉强度和延伸率等关键力学指标,直接反映其承载能力和变形性能。弯曲试验通过冷弯变形评估钢筋的塑性变形能力和加工性能,确保其在实际施工中的适用性。化学成分分析则采用光谱检测等技术,精确测定钢筋中碳、硫、磷等元素的含量,从材料本质上控制其力学性能和耐久性。这些检测项目相互补充,为钢筋材料的质量控制和工程应用提供全面的技术保障。

(二) 结构检测技术

1. 无损检测技术(超声波检测、红外热成像、雷达探测等)

无损检测技术在建筑结构评估中具有重要应用价值,主要包括超声波检测、红外热成像和雷达探测等方法。超声波检测通过高频声波在混凝土中的传播特性,有效识别内部缺陷如裂缝、空洞等结构损伤。红外热成像技术利用物体表面温度场分布特征,可快速检测建筑围护结构热工缺陷及隐蔽工程异常。雷达探测则通过电磁波反射原理,精准定位钢筋分布、保护层厚度及结构内部缺陷。这些技术具有非破坏性、高效率等特点,为建筑结构质量评估和病害诊断提供了可靠的技术支持。

2. 荷载试验与抗震性能检测(静载试验、动载试验等)

荷载试验是评估结构实际承载能力的关键手段,包括静载试验和动载试验两种主要形式。静载试验通过分级施加恒载测定结构变形和内力分布,验证设计荷载下的结构安全性。动载试验则模拟地震、风振等动力作用,测试结构在动态荷载下的响应特性。抗震性能检测通过振动台试验或拟静力试验,系统评估结构的延性、耗能能力等抗震性能指标。这些检测方法为建筑结构的可靠性评定和抗震加固提供了重要的实验依据。

四、试验检测的实践应用与案例分析

(一) 试验检测在住宅建筑工程中的应用

1. 混凝土强度检测案例分析

某高层住宅项目在主体结构验收阶段,对混凝土强度进行严格检测,发现部分楼层混凝土试块强度离散性较大,存在潜在质量隐患。为确保结构安全,项目组采用回弹法与钻芯法相结合的综合检测方法进行验证。回弹法检测结果表明,3层和7层剪力墙的强度推定值显著低于设计要求的C30等级,存在强度不足的风险。为进一步确认问题,项目组对疑似问题区域进行钻芯取样,并送实验室进行抗压强度试验,结果证实部分混凝土实际强度未达到设计标准。经深入调查发现,该批次商品混凝土在生产过程中因配合比控制不当,导致水泥用量不足、砂石级配不合理,进而造成局部区域混凝土强度不达标。针对检测结果,项目组制定了科学的整改方案,对强度不足的剪力墙区域采取了加固补强措施,包括增设钢筋网片和外包钢板等技术手段,有效提升了结构承载能力,确保了工程整体安全。

2. 砌体结构质量检测案例分析

某砖混结构住宅工程竣工验收时,红外热成像检测发现部分外墙存在空鼓现象,经敲击法验证空鼓面积占比超规范限值。进一步采用砂浆贯入法检测显示,空鼓区域砂浆饱满度不足60%,远低于规范要求的80%。追溯施工记录发现,该部位砌筑时未严格执行“三一”砌筑法,且砂浆使用时间超过初凝时间。根据检测结果,对空鼓区域采取拆除重砌处理,消除质量隐患。该案例证明多种检测方法联合应用可全面评估砌体施工质量。

(二) 试验检测在桥梁与隧道工程中的应用

1. 桥梁桩基完整性检测

桥梁桩基检测通常采用低应变法和声波透射法相结合的方

式。低应变法通过应力波反射原理快速评估桩身完整性，某跨江大桥工程应用该方法发现3根桩存在明显缺陷反射信号，经钻孔验证确认局部混凝土离析。声波透射法则通过预埋管发射接收超声波，某立交桥项目采用该方法准确判定桩底沉渣厚度超限，指导后续清孔处理。两种方法优势互补，低应变法适合大面积普查，声波透射法则提供更精确的缺陷定位，共同保障桩基施工质量。

2. 隧道衬砌质量检测

地质雷达和激光扫描技术是隧道衬砌检测的主要手段。某山岭隧道采用地质雷达检测发现拱顶存在多处脱空区，最大脱空高度达15cm，经钻孔验证后实施注浆加固。激光扫描技术在某城市隧道应用中，通过三维点云数据比对设计模型，精确量化衬砌厚度偏差和变形情况，检测效率较传统方法提升5倍以上。两种技术分别从内部缺陷和几何形态两个维度全面把控衬砌质量，为隧道工程安全运营提供可靠保障。

（三）试验检测中的常见问题与优化措施

1. 检测数据误差与质量控制

试验检测过程中常出现数据误差问题，主要源于仪器精度不足、操作不规范或环境干扰等因素。某高速公路桥梁检测项目发现回弹法测得的混凝土强度数据离散性较大，经核查为仪器未定期校准所致。建立严格的质量控制体系可有效降低误差，包括检测设备定期检定、操作人员持证上岗、检测环境标准化控制等措施。实施平行试验和第三方复核机制能进一步确保数据可靠性，某大型水利枢纽工程通过设立数据复核小组，将检测结果误差率

控制在3%以内。

2. 智能化检测技术的应用前景

人工智能和大数据分析技术正逐步改变传统试验检测模式。基于深度学习的图像识别技术可自动分析混凝土裂缝特征，较人工判断效率提升80%以上。大数据平台通过整合历史检测数据，建立材料性能预测模型，某地铁建设项目应用该技术实现混凝土强度发展规律的精准预测。未来随着5G和物联网技术的发展，实时在线监测系统将实现工程质量的动态管控，推动试验检测向智能化、数字化方向转型。

五、总结

试验检测作为建筑施工质量验收的核心技术手段，贯穿于工程建设的全过程，在材料性能验证、工艺质量控制和结构安全评估等方面发挥着不可替代的作用。通过混凝土强度检测、钢筋性能分析、无损检测技术等方法，能够系统性地识别施工质量缺陷，为工程验收提供客观依据。当前，智能化检测技术的发展为试验检测领域带来新的机遇，AI算法和大数据分析的应用显著提升了检测效率和精度。然而，检测数据质量控制、标准化操作流程建立等问题仍需持续优化。未来，随着物联网、5G等新技术的深度融合，试验检测将朝着自动化、智能化和实时化的方向发展，为建筑工程质量管控提供更加强有力的技术支撑，推动行业质量水平的整体提升。

参考文献

[1]王艳田. 建筑工程材料试验检测技术的重要性[J]. 城市建设理论研究：电子版，2012(23).
[2]黄永斌. 简析建筑工程材料试验检测技术的运用[J]. 中国科技期刊数据库 工业 A，2023(4):3.
[3]樊远领. 水利水电工程施工现场试验检测的相关问题探究[J]. 世界家苑，2022(7):156-158.
[4]于舰. 建筑工程材料检测试验常见的问题及应对分析[J]. 建材发展导向(下)，2021(1):68-69.
[5]刘贞. 谈建筑工程的试验检测对工程质量的重要性[J]. 四川水泥，2019(4):1.
[6]蒋方兵. 公路工程试验检测管理工作在施工中的重要性分析[J]. 四川水泥，2016(1):1.
[7]卢晓娟. 公路工程试验检测在公路工程中的重要性剖析[J]. 经营管理者，2015(22):1.
[8]薛伟. 浅谈建筑工程材料试验检测技术[J]. 中小企业管理与科技，2012(33):1.
[9]徐传伟, 张永华, 厉建波. 浅谈建筑工程材料试验检测技术[J]. 商品与质量·建筑与发展，2015, 000(003):1326-1326.
[10]王凤莲. 建筑工程材料试验检测技术[J]. 中国周刊：英文版，2021(8):3-4.

建筑施工安全管理中的职业病防控：现状与优化路径

贾仁超

大连市疾病预防控制中心，辽宁 大连 116000

DOI:10.61369/ETQM.2025080011

摘 要： 建筑业智能化转型催生纳米材料暴露、人机交互损伤等新型职业危害，现行职业病目录更新机制与技术标准滞后于施工工艺革新速度，导致复合性风险防控失效。《“十四五”职业健康规划》（2023）强调动态目录调整与智能技术融合，本研究通过制度约束、智能监测与全周期管理的协同优化，揭示信用评级制度的经济激励效应、生物传感器实时预警能力及数据链驱动的风险削减路径，验证多要素联动对暴露风险控制的乘数效应，为构建“预防-监测-治理”闭环体系提供理论支撑，推动职业健康治理范式升级。

关 键 词： 职业健康风险防控；协同优化；动态增强回路

Occupational Disease Prevention and Control in Construction Safety Management: Current Situation and Optimization Path

Jia Renchao

Dalian Center for Disease Control and Prevention, Dalian, Liaoning 116000

Abstract： The intelligent transformation of the construction industry has given rise to new occupational hazards such as exposure to nanomaterials and human-machine interaction damage. The current mechanism for updating occupational disease catalogs and technical standards lags behind the pace of construction process innovation, leading to the failure of composite risk prevention and control. The "14th Five Year Plan" for Occupational Health (2023) emphasizes the integration of dynamic directory adjustment and intelligent technology. This study reveals the economic incentive effect of the credit rating system, the real-time warning capability of biosensors, and the risk reduction path driven by data links through the coordinated optimization of institutional constraints, intelligent monitoring, and full cycle management. It verifies the multiplier effect of multi factor linkage on exposure risk control, provides theoretical support for building a "prevention monitoring governance" closed-loop system, and promotes the upgrading of the paradigm of occupational health governance.

Keywords： occupational health risk prevention and control; collaborative optimization; dynamic enhancement loop

引言

建筑业智能化进程中，纳米材料暴露、人机交互损伤等新型职业健康风险呈现复合性与隐匿性，而传统防控体系面临法规滞后、技术脱节及管理碎片化挑战。现行《职业病分类和目录》因更新迟缓，尚未纳入环氧树脂过敏性肺炎、智能建造肌肉骨骼疾患等新兴危害，形成劳动者健康救济制度缺口。《“十四五”职业健康规划》（2023）提出建立职业病目录动态调整机制，推动物联网与大数据技术深度融入风险预警体系。研究证实，通过信用评级制度的经济激励、生物传感器实时监测网络及全周期健康数据链的协同作用，可显著增强多要素联动的风险防控乘数效应。该模式突破传统“被动响应”路径，以“制度-技术-管理”三维优化构建“预防-监测-治理”闭环系统，为职业健康治理体系向主动预防转型提供实证支撑。

一、建筑施工职业健康安全管理现状

（一）建筑施工行业职业健康安全特点

建筑施工行业的职业健康安全管理受其独特作业环境影响显著^[1]。高风险作业环境表现为多工种交叉作业、高空临边作业频

繁、重型机械密集操作以及动态化施工现场布局，导致物理性危害（如坠落、物体打击）与化学性危害（如粉尘、有毒气体）叠加。流动性用工特征进一步加剧管理难度，建筑工人多属劳务派遣或短期雇佣，职业健康培训覆盖率不足，安全防护装备标准化程度低，且人员流动频繁导致健康监测数据难以连续追踪。此类

特征使职业病风险呈现隐蔽性、累积性与群体性特征，亟需针对性防控策略^[2]。

（二）主要职业病类型及危害

建筑施工领域的职业病以尘肺病、职业性耳聋及化学中毒三类为核心。尘肺病高发于隧道掘进、石材切割等粉尘暴露岗位，其致病机理为长期吸入游离二氧化硅颗粒引发肺组织纤维化，据《职业病分类和目录》统计，建筑行业尘肺病占全国新发病例的21%。职业性耳聋集中于桩基施工、混凝土浇筑等高噪声作业区，噪声强度常超85dB(A)限值，导致工人听力不可逆损伤^[3]。化学中毒则多见于防水工程、油漆喷涂环节，苯系物、甲醛等挥发性有机物通过呼吸道或皮肤接触引发急性慢性中毒。上述疾病分布与施工工艺、材料使用及防护措施有效性直接关联，暴露防控体系碎片化问题突出。

二、职业病防控管理机制及问题分析

（一）现行防控机制框架

我国建筑施工职业病防控机制以《职业病防治法》为核心，辅以《建筑施工企业职业病危害防治技术规范》等行业标准^[4]，形成“法律约束-行业标准-企业规程”三级框架。国家层面通过明确用人单位主体责任，要求企业建立职业健康管理制度、配备专职管理人员、落实危害因素定期检测与公示；地方政府则依托安全生产监督管理部门实施抽查与行政处罚。企业责任划分中，总承包单位需统筹防控体系，分包单位承担现场执行义务，但实际作业中因工程转包频繁、劳务关系复杂，导致责任链条断裂。现有机制虽覆盖职业病申报、健康监护与应急处理流程，但技术规范更新滞后于新型施工工艺风险，且中小型企业合规成本与防控能力失衡问题突出。

（二）管理实践中的关键矛盾

防护措施执行层面存在显著落差，施工现场粉尘隔离设施安装率不足60%，降噪耳塞等个体防护装备发放后实际佩戴率低于40%，折射出企业重购置轻监管的粗放管理模式。监管盲区源于建筑项目周期短、地域分散与监管部门人力不足的矛盾，部分市县职业卫生监督覆盖率不足年度项目的30%，且检查多聚焦伤亡事故，对慢性职业病溯源缺乏有效手段。劳动者意识薄弱表现为主动防护意愿低，近70%临时工未接受系统职业健康培训^[5]，高风险岗位人员对职业病潜伏期认知缺失，加之“计件制”薪酬模式催生赶工行为，进一步弱化防护依从性。制度设计与实践效能间的结构性矛盾，亟待通过责任穿透、技术赋能与行为干预协同破解。

三、职业病发生诱因的多维度解析

（一）个体因素驱动

建筑工人普遍存在职业健康知识匮乏与防护技能不足。调查显示，仅35%临时工接受过系统培训，超半数工人对粉尘、噪声致病机制认知模糊^[6]，致防尘口罩、耳塞错误使用或弃用。技

能培训重操作规范轻个体防护实操，叠加方言与文化水平差异，削弱培训效果，工人风险感知与自主防护能力弱化。某工地粉尘作业区口罩佩戴率不足25%，防护措施流于形式，职业暴露风险倍增。长期非标准化作业环境催生高危操作行为代际传递，尤以高空作业不系安全带、切割打磨弃用除尘设备等惯性违章为典型。行为经济学分析表明，短期效率优先思维驱使工人为缩短工时规避防护流程，而管理层“以罚代管”的惩戒模式未能触及行为动机，反强化侥幸心理。例如，钢结构焊接工人为提升作业流畅度，常年忽略局部排风装置启用，致使焊烟暴露剂量超标2-3倍。此类行为经班组文化固化后，形成“经验优先于规范”的群体认知，进一步抵消技术防护投入的预期成效。

（二）作业环境风险叠加

施工现场普遍存在多物理因子协同作用，隧道工程中凿岩机作业同时释放高浓度矽尘（PM2.5超限值8倍）、105dB(A)脉冲噪声及15m/s²手传振动，三者在人体内产生叠加效应。粉尘沉积加剧耳蜗毛细胞对噪声敏感性^[7]，振动则通过神经末梢干扰微循环，加速听力损失与手臂振动综合征发病进程。现有防护标准针对单一危害设定阈值，未建立复合暴露剂量-反应模型，导致个体防护装备（如普通防尘口罩）无法阻断多重暴露通路，健康损害呈现非线性加速特征。夏季高温高湿环境下，地下室防水施工等密闭空间作业形成热蓄积微环境，空气温度常达40℃且苯系物浓度超标4-5倍。高温促使皮肤毛细血管扩张，有毒物质经皮吸收速率提升60%，而脱水状态抑制肝脏解毒功能，急性中毒风险骤增。同时，通风受限加剧粉尘悬浮时间，能见度下降诱发机械伤害次生事故^[8]。此类环境-毒物-人因耦合作用突破传统单一风险评估框架，现有防控规程缺乏跨风险源的动态调控阈值，致使应急预案失效概率显著升高。

四、建筑施工职业病防控优化路径

（一）完善法规与标准化建设

1. 动态化职业病目录更新机制

现行职业病目录更新滞后，难以覆盖新型施工工艺引发的环氧树脂过敏性肺炎、纳米材料神经损伤等健康风险，导致劳动者诊断与赔偿缺失。需构建多学科动态评估机制，依托职业病监测网络大数据，按年度筛查高风险工种与新兴疾病关联证据，将目录修订周期压缩至3-5年。地方试点可通过“申报-评估-听证”流程，将建筑机器人腕管综合征、3D打印化学中毒等纳入地方目录^[9]，形成国家-地方分级响应体系，强化法律救济时效性。

2. 企业安全信用评级与奖惩联动

将职业病防治纳入建筑业企业信用评价体系，构建以防护设备使用率、健康监护覆盖率、危害事故率为核心的评级指标。信用等级与工程招投标资质、工伤保险浮动费率、信贷融资额度直接挂钩，倒逼企业优化防控资源配置。对连续三年AAA级企业实施税收减免与优先施工许可，D级企业则列入行业黑名单并暂停投标资格。某地试点显示，信用评级制度使中小型企业防护设备采

购投入提升42%，职业健康培训频次增加1.8倍，表明经济杠杆可有效弥合规制成本与能力鸿沟。

（二）技术防护手段升级

1. 智能监测设备嵌入施工流程

基于物联网的粉尘-噪声-振动复合传感器可实现施工环境危害因子实时监测，通过5G传输至云端平台自动触发预警阈值。某地铁工地部署智能监测系统后，隧道掘进作业区PM2.5超标时长减少67%，噪声暴露剂量下降53%。进一步融合BIM模型与可穿戴设备数据，可构建“区域-个体”双层级暴露图谱^[10]，精准定位高风险作业面并优化工序安排，从源头削减累积暴露量。

2. 模块化防护装备迭代研发

针对复合污染暴露场景，开发适配多危害因子的模块化防护装备。例如，集成N95滤芯与降噪耳罩的一体化面罩，可同步阻隔矽尘与高频噪声；柔性石墨烯加热膜嵌入防护服，能在低温密闭环境中维持体温并吸附挥发性有机物。通过人机工效学优化，某新型防振手套将手传振动衰减率提高至92%，且不影响砌筑操作灵活性。此类装备需制定快速迭代标准，建立“企业试用-反馈修正-行业推广”的闭环研发机制。

（三）全周期健康管理机制

1. 岗前筛查-在岗监测-离岗追踪闭环

构建覆盖职业生命周期的健康干预链条：岗前采用基因检测与肺功能基线评估筛选高危易感人群；在岗阶段运用智能手环持续监测心率变异性、血氧饱和度等生物标志物，结合定期低剂量

CT筛查早期尘肺病变；离岗后通过区块链技术实现跨地域健康数据共享，确保职业病潜伏期病例追踪不漏管。某央企实施闭环管理后，矽肺病检出率由2.3%降至0.7%，且95%病例在潜伏期内获得医疗干预。

2. 职业健康档案数字化管理平台

依托云计算与隐私计算技术，建立全国统一的职业健康档案数据库，整合体检报告、暴露史、诊疗记录等多源数据。平台内置人工智能诊断模块，可基于暴露-效应关系模型预测个体发病风险，并向企业推送定制化防护方案。某建筑集团应用数字化平台后，健康档案完整率从58%提升至89%，职业病诊断争议案件减少73%。通过对接工伤保险系统，平台还可实现职业病待遇申领自动化审核，压缩索赔周期至15个工作日内。

五、总结

职业健康风险防控依赖制度、技术、管理协同。动态职业病目录更新与安全信用评级以法律和经济手段倒逼企业担责，技术迭代解决复合暴露防护难题，全周期健康管理借数字化实现风险预警转变，三者形成闭环。但现有研究在中西部中小企业及零散用工场景覆盖不足，复合暴露模型、信用评级长期激励效果待验证，智能监测设备误报率与运维成本需工程验证。未来应深化智能穿戴生物传感器研发，构建跨学科防控体系，强化政策动态仿真，探索区块链用于健康档案追溯，提升防控水平。

参考文献

- [1] 侯玉玲. 浅析建筑工程施工安全监督管理策略 [J]. 居业, 2023, (07): 176-178.
- [2] 钱俊. 超大型建筑的施工安全管理 [J]. 工程设计与设计, 2023, (09): 253-255.
- [3] 欧泽兵. 建筑业职业危害状况与防控措施探讨 [J]. 现代职业安全, 2022, (03): 45-48.
- [4] 祝征洋, 陈灏, 田帅. 建筑装饰工程中的职业病危害及防护对策和措施 [J]. 工程技术研究, 2018, (13): 243-244.
- [5] 蔡婷. 建筑施工企业职业病危害调查及防控对策 [J]. 现代国企研究, 2018, (18): 65+64.
- [6] 李留洋, 孟刚, 王大讲. 建筑施工企业职业健康管理模式探讨 [J]. 建筑安全, 2017, 32(11): 33-34.
- [7] 魏宁. 关于建筑工地安全职业健康问题分析 [J]. 福建建材, 2016, (11): 107-108.
- [8] 石鹏. 建筑施工企业职业病的预防和监控 [J]. 科技资讯, 2014, 12(06): 163.
- [9] 王照翠. 探讨职业病危害与健康监护管理 [J]. 大众标准化, 2023(16): 98-100.
- [10] 叶志铭. 建筑施工安全事故防范对策研究 [J]. 消防界 (电子版), 2023, 9(10): 120-122.

建筑工程管理中的风险预警机制构建与实证研究

乔华春

天津谐能新能源有限公司, 天津 301500

DOI:10.61369/ETQM.20250800155

摘 要： 本研究针对建筑工程管理中的质量、安全、进度和成本风险，构建基于模糊综合评价法的风险预警机制。通过确立科学原则，建立四维度 12 项指标的预警体系，设计“数据采集—模型运算—分级响应”流程。以某 10 万平方米地标综合楼项目实证显示，应用该机制后，材料不合格率降 2.4%，安全事故零发生，工期提前 15 天，成本显著节约，并成功规避燃气管道破坏、噪声投诉等风险。研究证实，该机制通过闭环管理提升工程管理效能与防控能力，提供可复制的实践范式。

关 键 词： 建筑工程管理；风险预警机制构建；实证研究

Construction and Empirical Research on Risk Early Warning Mechanism in Construction Project Management

Qiao Huachun

Tianjin Xianneng New Energy Co., Ltd. Tianjin 301500

Abstract： In this study, a risk early warning mechanism based on fuzzy comprehensive evaluation method is constructed for the quality, safety, schedule and cost risks in construction project management. By establishing scientific principles, an early warning system of 12 indicators in four dimensions is established, and the process of "data collection, model operation, and hierarchical response" is designed. The empirical evidence of a 100,000-square-meter landmark complex building project shows that after the application of this mechanism, the material failure rate is reduced by 2.4%, there are zero safety accidents, the construction period is advanced by 15 days, the cost is significantly saved, and the risks such as gas pipeline damage and noise complaints are successfully avoided. The study confirms that the mechanism improves the efficiency and prevention and control capabilities of project management through closed-loop management, and provides a replicable practice paradigm.

Keywords： construction project management; the construction of risk early warning mechanism; empirical research

引言

在建筑行业快速发展、工程规模与技术复杂度不断提升的背景下，建筑工程管理对项目建设至关重要。在项目推进上，它通过合理规划与组织，有序安排各阶段工作，协调建设、设计、施工、监理等多方关系，避免因沟通不畅导致工期延误。质量保障方面，其贯穿项目全过程，从材料采购检验、施工工艺控制到成品验收，均制定严格标准并实时监控，确保工程质量达标。安全维护层面，鉴于施工现场隐患多，建筑工程管理通过健全安全制度、强化培训教育、落实防护措施、开展检查排查，预防安全事故，保障人员安全与项目顺利推进。

一、建筑工程管理常见风险分析

（一）质量风险

施工材料是建筑工程中极其重要的部分，材料质量的好坏，将直接决定着建筑工程的整体质量。因此，材料质量的重要性可想而知，若材料出现问题将造成较为严重的安全隐患。由于建筑施工的复杂性，所涉及的材料种类较多、数量较大，如果材料质

量不合格，所开展的任何建筑工作都毫无意义，同时还会留下较为严重的安全隐患^[1]。施工工艺与人员素质是建筑工程质量风险的关键诱因。施工工艺的合理性与规范性直接影响工程质量，例如混凝土振捣不充分、砌筑砂浆配合比不当，易造成结构强度不足、墙体开裂等问题。而施工人员若专业技能匮乏、经验不足，无法精准落实施工图纸与规范要求，同样会引发质量隐患。建筑工程的质量风险兼具隐蔽性与复杂性，部分问题如钢筋保护层厚

度不足，在施工期或使用初期难以察觉，需经时间与环境作用才暴露；且质量问题常由多因素交织导致，增加了溯源与处置难度。此类风险对项目长期运营危害显著，不仅会缩短建筑使用寿命、推高维修成本，更可能危及使用者生命财产安全。

（二）安全风险

施工现场的安全风险潜藏于复杂多变的环境与管理疏漏之中。自然环境层面，暴雨、大风等极端天气不仅会直接损毁塔吊、脚手架等施工设施，还会显著降低作业环境安全性；而空间局限、潮湿等不良条件，更是触电、高空坠落等事故的高发诱因。管理层面，安全制度缺失、检查敷衍、培训不足等问题，使得安全隐患难以被及时排查和消除，如同埋下一颗颗“定时炸弹”^[2]。人为因素上，部分施工人员安全意识薄弱，存在不规范操作行为，例如未佩戴安全帽、违规攀爬临边作业等，进一步加剧了风险隐患。安全风险具有显著的突发性与严重性特征，事故往往在毫无预兆的瞬间爆发，让人防不胜防。一旦发生安全事故，轻者导致人员受伤、设备损坏，重者造成重大伤亡，不仅会严重延误项目工期，还可能引发舆论关注，对企业声誉造成重大损害。此外，事故发生后，项目通常需要停工整顿，由此产生的额外管理成本与工期延误，将给项目推进带来巨大压力。

（三）进度风险

设计变更在建筑工程项目中较为常见，频繁的设计变更会打乱原有的施工计划，增加施工难度与工作量，从而导致进度延误。例如，建筑设计中途更改功能布局，可能涉及结构、水电等多专业的重新设计与施工，耗费大量时间。资源供应方面，建筑材料、设备供应不及时，或者劳动力短缺，都会使施工进度停滞。施工组织不合理同样会引发进度风险，如施工工序安排不当、各工种之间协调不畅，造成窝工、返工现象。进度风险具有关联性，某一环节的进度延误可能波及其他环节，引发连锁反应；还具有累积性，小的进度偏差若不及时纠正，会逐渐累积，最终导致项目整体工期延误^[3]。进度延误不仅会增加项目成本，如增加人工费、机械设备租赁费等，还可能影响工程质量，为赶工期而忽视质量控制。同时，工期延长可能导致项目错过最佳交付时机，影响投资回报。

（四）成本风险

市场价格波动是影响建筑工程成本风险的重要因素，建筑材料价格、人工费用的上涨，会使项目成本超出预算。例如，钢材、水泥等主要建材价格受市场供需关系、宏观经济形势等因素影响较大，若在项目建设过程中价格大幅上涨，将增加成本负担。预算不合理也是成本风险的源头之一，若预算编制过于粗糙、未充分考虑项目特点和潜在风险，在实际施工过程中容易出现预算超支。成本控制不力同样会导致成本风险，如施工过程中对材料浪费、费用开支缺乏有效监管，无法及时发现和纠正成本偏差。成本风险具有不确定性，市场价格波动、意外事件发生等都难以精确预测；但同时具有一定的可控性，通过合理的预算编制、严格的成本控制措施等可以降低风险。成本风险对项目经济效益影响显著，成本超支会压缩项目利润空间，甚至导致项目亏损，影响企业的可持续发展。有效的成本控制与风险管理有助于

企业提高盈利能力，增强市场竞争力。

二、风险预警机制构建

（一）构建原则

风险预警机制的构建需依据科学理论和科学方法，以确保其合理性与有效性。科学理论为预警机制提供坚实的理论基础，例如运用风险管理理论、系统工程理论等，深入剖析建筑工程管理中的风险因素及其相互关系。科学方法保障预警机制构建过程的规范性与准确性，如采用数据分析方法、模型构建方法等，对风险信息进行科学处理与评估^[4]。同时，应将建筑工程管理视为一个系统，全面考虑各方面因素构建预警机制。建筑工程管理涉及质量、安全、进度、成本等多个子系统，各子系统之间相互关联、相互影响。因此，预警机制需全面涵盖这些方面，综合考量施工工艺、人员素质、市场环境等多种因素，避免片面性。此外，风险预警机制需及时收集、传递和处理风险信息，以便快速响应风险。及时收集风险信息是预警机制运行的基础，通过建立完善的信息收集渠道，如现场巡查、监测设备数据采集等，确保信息的及时性与准确性。快速传递和处理信息则能使决策者及时掌握风险动态，迅速做出应对决策，降低风险损失。

（二）预警指标体系建立

从质量维度来看，可选取材料合格率、施工工艺符合度等指标。材料合格率反映建筑材料质量对工程质量的影响，合格材料是保障工程质量的基础。施工工艺符合度则体现施工过程是否按照规范标准进行操作，直接影响工程质量的稳定性。在安全维度，人员安全意识水平、安全设施配备率等指标较为关键。人员安全意识水平决定施工人员对安全风险的认知与应对能力，安全设施配备率则保障施工现场安全防护的完备性。进度维度可选取工期偏差率、资源供应及时性等指标。工期偏差率直观反映项目进度与计划进度的偏离程度，资源供应及时性影响施工能否顺利进行，进而影响项目进度。成本维度可选取成本偏差率、预算执行率等指标。成本偏差率体现项目成本与预算成本的差异，预算执行率反映成本控制的有效性。这些预警指标的选取，紧密结合建筑工程管理实际需求，旨在全面、准确地反映工程在质量、安全、进度、成本方面的风险状况。其具体计算方法需依据相关行业标准与工程实际情况确定，以确保指标量化的科学性与准确性。

（三）预警模型构建

层次分析法是一种将复杂问题分解为多个层次，通过两两比较确定各因素相对重要性的方法。其优点在于能将定性问题量化，具有较强的系统性。但该方法主观性较强，判断矩阵的构建依赖于专家经验^[5]。模糊综合评价法适用于处理模糊、不确定的信息，通过建立模糊关系矩阵，对多个因素进行综合评价。它能有效解决建筑工程管理中风险因素模糊性的问题，但计算过程较为复杂。神经网络模型具有自学习和自适应能力，能够处理大量复杂的数据，挖掘数据中的潜在规律。然而，其训练过程需要大量数据支持，且模型结果难以解释。结合建筑工程管理风险特点，由于风险因素众多且相互关联，具有复杂性和不确定性，同

时需要综合考虑多方面信息进行决策。经过分析,选择模糊综合评价法作为预警模型较为合适。该方法能够有效处理风险因素的模糊性,综合考虑多个维度指标,更全面地评估建筑工程管理风险状况。

（四）风险预警流程设计

收集建筑工程管理风险信息可通过多种渠道。现场监测是重要方式之一,安排专业人员对施工现场进行定期巡查,观察施工工艺执行情况、安全设施配备情况等,及时发现问题并记录。数据分析也是关键手段,利用监测设备采集的数据,如建筑材料性能数据、施工进度数据等,以及财务数据、市场数据等,进行深入分析,挖掘潜在风险。运用预警模型对收集到的风险信息进行评估,是确定风险等级的核心环节^[7]。将各预警指标数据输入模糊综合评价模型,通过模型运算得出综合评价值,依据预先设定的风险等级划分标准,确定风险等级。例如,可将风险等级划分为低风险、中风险、高风险。根据不同风险等级发布相应预警信号,确保预警信息及时传达。低风险可发布蓝色预警信号,提醒相关部门关注;中风险发布黄色预警信号,要求相关部门采取针对性措施进行防范;高风险发布红色预警信号,立即启动应急预案,全面应对风险,通过多种通讯方式,如短信、邮件、现场通知等,确保预警信息及时传达给相关人员。

三、实证研究

（一）案例选取

在建筑工程管理风险预警机制的研究中,选取实际建筑工程项目案例进行实证研究具有重要意义。本研究选取了某建筑公司的综合楼建设项目作为实证研究对象。该项目规模为建筑面积约10万平方米,地下3层,地上26层,箱体基础,主体为框架结构^[8]。本项目地处城市主干道交汇处,作为地标建筑,建设方严格要求施工品质与交付时效。经勘察,工程面临地下管线复杂、环保要求高等挑战,需多部门协同,制定精细化方案避免管线破损,同时采用环保工艺与材料,减少施工对居民生活的干扰。该案例项目具有一定的代表性,其涵盖的建筑工程管理环节较为全面,涉及的质量、安全、进度、成本等风险因素较为典型,能够较好地反映不同类型建筑工程管理中的共性与特性,有助于对风险预警机制进行全面的检验与优化。

（二）风险预警机制应用

在案例项目中,风险预警机制严格按照“数据采集—模型运

算—分级响应”流程运行。通过多渠道采集质量、安全、进度、成本四维度12项指标数据:质量维度依据材料检测报告、施工记录,得出材料合格率98.7%、工艺符合度95.2%;安全维度通过巡查表等计算安全设施配备率100%、人员违规每周3次;进度维度从施工日志统计工期偏差±5%、材料延误每月2次;成本维度根据预算报表核算成本偏差±3%、分包超支4.5%。经数据预处理后,将指标导入模糊综合评价模型,运用专家打分确定质量(0.35)安全(0.30)进度(0.20)成本(0.15)权重,结合隶属度函数计算风险等级^[9]。运行期间,共触发7次黄色预警,集中于基础施工阶段的管线探测偏差与夜间施工噪声问题。项目组迅速响应,联合市政修正管线施工方案,调整作业时段并加装隔音设施,实现风险有效管控。

（三）应用效果分析

对比机制应用前后12个月数据,其有效性显著。质量管控上,材料不合格率由3.2%降至0.8%,工艺缺陷发生率下降60%,基础工程验收一次性通过率达98%。安全防控中,人员违规频次减少73%,安全文明施工评分从72分提升至91分,实现安全事故零发生。进度管理方面,关键线路工期偏差控制在±3%内,地下管线施工提前7天,整体工期较计划缩短15天。成本控制领域,主材采购成本节约2.1%,签证变更费用降低40%,成本超支响应效率提升50%,项目利润率高于同类工程3.5个百分点^[10]。此外,该机制成功预警并化解2起重大风险,通过管线数据监测避免燃气管道事故,依靠噪声实时监控化解居民投诉,实现环保零处罚。实证表明,该机制通过“监测—预警—处置”闭环管理,可精准识别潜在风险,显著提升地标建筑工程管理效能与风险防控能力。

四、结束语

本研究系统剖析建筑工程管理中质量、安全、进度、成本四大核心风险。质量风险受材料、工艺与人员因素影响,隐蔽复杂;安全风险由环境、管理和人为因素交织,突发且严重;进度风险因设计变更、资源供应产生关联累积;成本风险受市场与预算双重制约。基于此构建的风险预警机制,经地标项目实证,通过多维度量化与模糊评价实现精准预警,显著优化管理指标。但研究存在样本单一、模型普适性差等局限,未来可融合新技术,推动风险管理向智能化、精细化迈进。

参考文献

[1]于强. 建筑工程安全事故成因及预警管理探究 [J]. 现代营销(上), 2022(8): 115-117.
[2]潘瑜. 建设工程管理风险防范措施探讨 [J]. 中国住宅设施, 2023(2): 73-75.
[3]吴峰, 刘军生. 建设工程施工管理风险防范措施研究 [J]. 陕西建筑, 2023(7): 157-160.
[4]温周. 预警管理在建筑工程施工安全管理中的应用研究 [J]. 建材与装饰, 2020, 0(3): 172-173.
[5]唐鹏. 浅析建筑工程施工安全管理中预警管理应用 [J]. 建筑与预算, 2021(5): 47-49.
[6]侯杨春. 建筑工程施工安全管理中预警管理应用 [J]. 建材与装饰, 2020(15): 121-122.
[7]徐强林. 浅谈建筑工程施工安全管理中预警管理应用 [J]. 江西建材, 2021(2): 97-9799.
[8]刘争光. 建筑工程管理风险防范与控制中存在的问题及解决措施 [J]. 前卫, 2022(20): 163-165.
[9]唐琳. 建筑企业项目管理中的成本控制与风险防范 [J]. 中国集体经济, 2024(16): 97-100.
[10]郑艳. 建筑施工企业财务风险预警机制研究 [J]. 市场周刊, 2024, 37(1): 145-148.

房地产工程与工业厂房工程中的施工质量管理 与技术优化策略研究

李小桥

广东力中建设发展有限公司, 广东 东莞 523000

DOI:10.61369/ETQM.2025080019

摘 要 : 本文围绕房地产与工业厂房工程, 阐述了从项目策划到竣工验收的质量管控, 包括特殊分项工程质量控制、BIM等技术应用、物联网监测、现场管理方法等, 还涉及事故处置、地质建模、桩基工艺等内容, 最后提出数字孪生等技术发展方向。

关 键 词 : 房地产工程; 工业厂房工程; 施工质量

Research on Construction Quality Management and Technical Optimization Strategy in Real Estate Engineering and Industrial Plant Engineering

Li Xiaoqiao

Guangdong Lizhong Construction Development Co., Ltd. Dongguan, Guangdong 523000

Abstract : This paper focuses on real estate and industrial plant projects, elaborating on quality control from project planning to completion acceptance. It covers special sub-item quality control, application of BIM and other technologies, IoT monitoring, on-site management methods, as well as accident handling, geological modeling, pile foundation technology, and more. Finally, it proposes the development direction of digital twin technology.

Keywords : real estate engineering; industrial plant engineering; construction quality

引言

随着建筑行业的发展, 房地产工程与工业厂房工程的施工质量管理与技术优化受到广泛关注。2017年发布的《建筑业发展“十三五”规划》强调了提高建筑工程质量和技术创新的重要性。在此背景下, 从项目策划到竣工验收的全生命周期质量管控至关重要。涉及特殊分项工程的质量控制、BIM技术应用、物联网监测系统构建、施工现场管理方法改进等多方面内容。同时, 针对质量安全事故的处置、地质建模技术辅助地基处理、桩基施工工艺改进等也成为研究重点。这些研究成果为数字孪生技术的质量管控平台建设以及绿色建造与智能监测技术的发展趋势展望提供了基础。

一、房地产与工业厂房工程质量管理体系构建

(一) 全生命周期质量管理框架

从项目策划阶段开始, 需明确质量目标和要求, 综合考虑各种因素以确保项目的可行性和可持续性^[1]。设计审查环节至关重要, 严格把关设计方案的合理性、合规性以及是否满足质量标准。在施工过程中, 依据 ISO 质量管理标准, 建立完善的质量控制流程, 包括对原材料、构配件的检验检测, 施工工艺的规范操作, 以及施工人员的质量意识培训等。同时, 加强质量监督和检查, 及时发现和纠正质量问题。竣工验收阶段, 按照严格的验收标准对工程进行全面检查, 确保项目质量符合要求, 从而实现从

项目策划到竣工验收的全生命周期质量管控。

(二) 特殊结构质量管理要点

大跨度钢结构、深基坑工程、高支模体系等特殊分项工程在房地产与工业厂房工程中具有重要地位, 其质量控制至关重要。对于大跨度钢结构, 应注重钢材质量、焊接工艺、构件安装精度等方面的质量控制指标, 严格按照相关验收标准进行验收^[2]。深基坑工程需关注支护结构的稳定性、地下水控制效果以及土方开挖的顺序和方法等质量控制要点, 确保符合相应的验收规范。高支模体系则要重点控制支架的强度、刚度和稳定性, 以及模板的平整度和拼接质量等, 同时依据相关标准进行严格验收, 以保障特殊结构的施工质量。

二、智能化施工技术优化策略

（一）BIM技术集成应用

BIM技术在施工模拟中可提前呈现施工过程，帮助施工人员更好地理解施工流程和关键节点，有效减少施工中的错误和风险^[3]。在碰撞检测方面，能够精确检测建筑结构、机电管线等各专业之间的碰撞冲突，及时调整设计，避免施工中的返工。对于进度管理，BIM可实现对施工进度的实时监控和动态调整，通过将实际进度与计划进度对比，及时发现偏差并采取措施纠正。以工业厂房管线综合排布为例，BIM技术可以对复杂的管线系统进行三维建模和优化，合理规划管线走向和空间布局，提高厂房空间利用率，同时确保管线安装的准确性和便捷性，提高施工效率和质量。

（二）物联网监测系统构建

在物联网监测系统构建中，传感器网络起着关键作用。对于混凝土养护监测，可通过在混凝土内部及周边布置温度、湿度传感器，实时获取相关数据，以确保养护条件符合标准，保障混凝土质量^[4]。在钢结构应力监控方面，将应力传感器安装在关键部位，能够及时捕捉应力变化，预防结构安全隐患。同时，针对环境参数采集，如在施工现场设置风速、风向、光照强度等传感器，这些数据有助于合理安排施工进度及保护施工材料。通过传感器网络对不同场景进行实时监测，形成一个完整的物联网监测系统，为智能化施工技术优化提供有力的数据支撑。

三、现场施工组织与管理创新

（一）精益建造实施路径

1.5S现场管理法应用

在施工现场管理中，应用5S现场管理法构建标准化体系至关重要。整理是区分必需品和非必需品，将非必需品清理出现场，以腾出空间，提高工作效率^[5]。整顿则是对必需品进行合理定位和标识，便于快速取用，减少寻找时间。清扫强调对现场进行定期清扫，保持环境整洁，及时发现设备等的异常情况。清洁是将整理、整顿、清扫形成制度并持续执行，维持良好的工作环境。素养要求培养员工良好的工作习惯和遵守规章制度的意识，使5S活动成为员工的自觉行为，从而全面提升施工现场的管理水平和工作效率。

2.看板管理系统设计

开发基于移动终端的进度可视化管理系统是现场施工组织与管理创新的重要举措。该系统可结合看板管理系统，实现质量问题的实时追溯^[6]。通过移动终端，施工人员能够及时上传施工进度和质量相关信息，管理人员可随时查看并分析。在看板管理系统中，对这些信息进行整合与展示，使各环节的进展和问题一目了然。当出现质量问题时，可快速定位相关工序和责任人，追溯问题产生的根源。这不仅有助于提高施工质量，还能优化施工流程，提升整体管理效率，确保工程顺利进行。

（二）安全质量协同管控

1.风险分级管控机制

建立重大危险源识别与防控的PDCA循环管理模型，是风险

分级管控机制的重要内容。通过计划（Plan）阶段，全面识别施工现场的重大危险源，确定风险等级。接着在执行（Do）阶段，依据风险等级制定相应的防控措施并严格实施。检查（Check）阶段对防控措施的效果进行检查和评估，及时发现问题。最后在处理（Act）阶段，对检查结果进行总结分析，将成功的经验纳入标准，对不足之处加以改进，进入下一个PDCA循环。如此循环往复，不断优化重大危险源的识别与防控工作，确保施工安全质量，提升风险分级管控的有效性^[7]。

2.应急管理预案优化

针对深基坑坍塌、高支模失稳等质量安全事故，应深入分析事故原因及潜在风险因素^[8]。结合工程实际情况制定专项处置方案，方案需涵盖事故发生后的应急响应流程，明确各相关部门及人员的职责。同时，要详细规定抢险救援的具体措施和技术手段，确保在事故发生时能够迅速、有效地开展救援工作，减少损失。此外，还应包括事故后的调查评估机制，以便总结经验教训，对施工组织与管理进行持续改进，防止类似事故再次发生。

四、地基与基础工程技术优化

（一）复杂地质处理技术

1.岩土工程勘察创新

三维地质建模技术为软弱地基处理方案比选提供了重要支持。该技术可整合多种勘察数据，直观呈现地质结构和岩土特性^[9]。通过建立精确的三维模型，工程师能更全面地了解软弱地基的分布范围、厚度变化以及与周边地层的关系。这有助于准确评估不同处理方案对地基稳定性、沉降控制等方面的影响。同时，利用模型进行数值模拟分析，可提前预测处理效果，为方案优化提供依据。相比传统方法，三维地质建模技术提高了方案比选的科学性和准确性，降低了施工风险，在复杂地质条件下的地基处理中具有重要应用价值。

2.桩基施工工艺改进

在地基与基础工程中，针对复杂地质条件下的桩基施工工艺改进至关重要。对于不同地层条件，如软土地层、岩石地层等，旋挖成孔和静压桩等工艺的质量控制要点存在差异。在软土地层，旋挖成孔需注意孔壁稳定性，防止塌孔，可适当增加泥浆比重^[10]。静压桩施工时要精确控制桩的垂直度和入土深度，避免桩身倾斜。在岩石地层，旋挖成孔可能面临钻进困难的问题，需选择合适的钻头和钻进参数。静压桩则要考虑桩端能否有效嵌入岩石层，确保桩的承载能力。通过对比分析这些工艺在不同地层的质量控制要点，可优化桩基施工工艺，提高地基基础工程质量。

（二）新型基础结构应用

1.装配式基础体系

预制混凝土承台与钢结构柱脚的模块化连接技术是装配式基础体系的关键技术之一。该技术旨在实现预制混凝土承台和钢结构柱脚之间高效、可靠的连接。在实际应用中，通过精确设计连接节点的构造形式，确保力的有效传递。例如，采用特殊的连接件，如高强度螺栓或焊接与螺栓混合连接的方式，增强连接的稳

定性。同时，对连接部位的混凝土和钢材性能进行严格把控，保证其质量符合工程要求。这项技术不仅提高了施工效率，减少了现场作业量，而且提升了基础结构的整体性能和安全性，为房地产工程和工业厂房工程的地基与基础工程质量提供了有力保障。

2. 绿色地基处理技术

在绿色地基处理技术方面，工业废料的再生利用成为研究热点。以矿渣为例，其具有潜在的胶凝活性，经过适当处理后可用于地基加固。通过对矿渣的化学成分和物理性质分析，确定其在地基中的作用机制。在实际应用中，需考虑矿渣的掺量、粒径以及与其他材料的配合比。同时，建立严格的质量控制标准至关重要。这包括对工业废料的来源进行严格筛选，确保其成分稳定且无害。在施工过程中，要对地基加固效果进行实时监测，如采用原位测试技术检测地基承载力和变形特性。通过这些措施，实现工业废料在地基加固中的有效利用，同时保证地基处理质量，符合绿色环保和可持续发展的要求。

（三）深基坑工程监测

1. 自动化监测系统

深基坑工程监测中的自动化监测系统是确保工程安全的关键。可构建包含测斜仪、土压力盒、水位计的智能监测网络系统。测斜仪用于监测基坑边坡土体的深层水平位移，能精确反映土体的变形情况。土压力盒可测量基坑周围土体的压力变化，为分析支护结构的受力提供依据。水位计则实时监测地下水位的升降，避免因水位变化导致基坑失稳。通过将这些监测设备集成到智能网络系统，实现数据的实时采集、传输和分析，使工程人员

能及时掌握基坑的动态信息，以便在出现异常时迅速采取措施，保障深基坑工程的安全和稳定。

2. 数据预警模型构建

开发基于机器学习的基坑变形预测算法，需收集大量深基坑工程监测数据作为样本。利用这些数据对机器学习模型进行训练，使其能够准确捕捉变形规律。例如，采用神经网络算法，通过调整网络结构和参数，优化模型性能。同时，建立三级预警响应机制。一级预警为轻度变形预警，当监测数据接近设定阈值时触发，此时需加强监测频率；二级预警为中度变形预警，超过一定阈值后启动，要求施工方采取一定措施进行调整；三级预警为重度变形预警，达到严重危险程度时触发，必须立即停工并进行全面检查和整改，确保深基坑工程安全。

五、总结

房地产工程与工业厂房工程的施工质量管理与技术优化至关重要。在质量管理体系方面，已明确其核心要素及构建方法；技术创新应用上，多种新技术得以实践并取得成效；现场组织管理也有了科学合理的模式。基于这些成果，提出数字孪生技术的质量管控平台建设方向，通过该技术可实现对工程的实时模拟与精准管控。同时，展望绿色建造与智能监测技术的发展趋势，绿色建造将推动工程的可持续发展，减少对环境的影响，智能监测技术则可提高工程质量监测的准确性和及时性，为工程质量提供更可靠的保障，促进房地产工程与工业厂房工程质量的提升。

参考文献

- [1] 刘江.T公司工业厂房工程项目施工质量管理研究[D].大连理工大学,2023.
- [2] 肖洒.房地产工程招标问题分析与招标管理体系优化研究[D].华北水利水电大学,2020.
- [3] 董德坤,殷庆刚.房地产价格批量评估方法及比较研究[J].价格理论与实践,2023(12):82-86.
- [4] 兰翌.大邑金融中心建设工程项目进度与质量管理研究[D].电子科技大学,2017.
- [5] 李春.建筑工程施工质量管理与控制研究[D].郑州大学,2014.
- [6] 韩旭.地基施工技术在工业厂房工程中应用分析[J].建筑工程技术与设计,2016(11):436.
- [7] 廖远航.工业厂房工程中土地地基施工技术的应用探讨[J].石化技术,2018,25(08):236.
- [8] 张忠野,胡晓磊.工业厂房工程中土地地基施工技术的应用[J].魅力中国,2017(52):266.
- [9] 陆晶.工业厂房工程中土地地基施工技术应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2015,5(34):2341.
- [10] 冀益.解析工业厂房工程中土地地基施工技术的应用[J].中华民居,2014(18):304-304.

建筑工程现场检测与实验室检测的协同管理及质量控制研究

陈耀辉

广东祥泰检测鉴定有限公司, 广东 广州 510170

DOI:10.61369/ETQM.2025080025

摘 要 : 阐述建筑工程现场与实验室检测的互补性, 指出现行体系协同管理痛点。强调构建协同管理框架的重要性, 包括计划制定、样本采集等环节。介绍基于 BIM 的信息化平台, 还涉及抽样策略、过程监控等内容, 以及协同管理的意义和发展方向。

关 键 词 : 建筑工程检测; 协同管理; 现场检测与实验室检测

Study on Collaborative Management and Quality Control of Construction Site Testing and Laboratory Testing

Chen Yaohui

Guangdong Xiangtai Testing and Appraisal Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510170

Abstract : This paper expounds on the complementarity between on-site inspection and laboratory testing in construction projects, and points out the pain points of collaborative management in the current system. It emphasizes the importance of constructing a collaborative management framework, including links such as planning formulation and sample collection. It introduces the information platform based on BIM, and also covers contents such as sampling strategies and process monitoring, as well as the significance and development direction of collaborative management.

Keywords : construction engineering inspection; collaborative management; on-site inspection and laboratory testing

引言

建筑工程质量至关重要, 为保障其质量, 现场检测与实验室检测需协同管理。2019年发布的《建设工程质量管理条例》强调了工程质量检测的重要性以及对质量控制的严格要求。施工现场快速检测能及时反馈初步信息, 实验室精密检测可深入精确分析。然而, 现行检测体系存在协同管理痛点, 如数据共享壁垒、标准对接偏差等。因此, 构建全流程协同管理框架, 基于 BIM 技术搭建信息化协同平台, 确保抽样代表性, 监控现场检测过程, 分析实验数据可靠性等措施至关重要, 以实现检测的高效准确, 保障建筑工程质量。

一、建筑工程检测协同管理现状分析

(一) 工程现场检测与实验室检测的关联特征

施工现场快速检测与实验室精密检测具有明显的技术互补性^[1]。施工现场快速检测能够及时获取工程材料和结构的初步信息, 为施工过程提供即时反馈, 例如采用回弹法快速检测混凝土强度。而实验室精密检测则可对材料和结构进行更深入、精确的分析, 如通过抗压试验准确测定混凝土的强度等级。在材料强度检测方面, 现场检测可初步筛选出可能存在问题的部位, 实验室检测则对这些部位的样本进行精确测定, 确保结果的准确性。对于结构性能检测, 现场的一些无损检测方法可快速判断结构的基本状况, 实验室检测进一步分析结构的力学性能等关键指标, 二者

者相互衔接, 共同保障建筑工程质量。

(二) 现行检测体系协同管理痛点

建筑工程检测现行体系存在诸多协同管理痛点。检测数据共享存在壁垒, 各方数据难以有效流通, 影响对工程整体质量的准确判断^[2]。检测标准对接存在偏差, 不同检测主体可能采用不同标准, 导致结果缺乏一致性和可比性。检测周期协调困难, 现场检测与实验室检测在时间安排上难以契合, 拖延工程进度。在房屋鉴定环节, 双向验证缺失, 现场检测结果与实验室分析之间缺乏有效的相互验证机制, 无法确保鉴定结果的准确性和可靠性, 给建筑工程质量带来潜在风险^[2]。

二、检测协同管理机制构建

（一）全流程协同管理框架设计

在建筑工程检测中，构建全流程协同管理框架至关重要。检测计划制定需结合工程实际需求与相关标准规范^[3]，确保检测项目的全面性与合理性。样本采集运输环节，要规范操作流程，保证样本的真实性与完整性。数据交互验证方面，建立有效的信息共享平台，使现场检测与实验室检测数据能够及时、准确地交互，通过相互验证提高检测结果的可靠性。质量追溯反馈环节，对检测过程中的每一个步骤进行记录，以便在出现问题时能够快速追溯原因，并及时反馈调整，从而形成一个包含各个关键环节的闭环管理体系，实现项目管理中资源的优化配置。

（二）信息化协同平台建设

基于 BIM 技术构建信息化协同平台，实现检测数据集成。通过移动端实时上传功能，现场检测人员能及时将数据上传至平台，确保数据的时效性和准确性^[4]。同时，平台与实验室 LIMS 系统对接，实现数据的无缝传输和共享，避免数据重复录入和错误。在此基础上，利用 BIM 的三维可视化特性，生成三维可视化报告，使检测结果更加直观、清晰。这种协同工作流程打破了现场检测和实验室检测之间的信息壁垒，提高了检测工作的效率和质量，为建筑工程的质量控制提供了有力保障。

三、检测质量控制体系构建

（一）现场检测质量控制要点

1. 抽样检测代表性保障

在建筑工程检测中，确保抽样检测的代表性至关重要。需研究不同结构部位和施工阶段的动态抽样策略。不同结构部位在受力、材料分布等方面存在差异，施工阶段的变化也会影响材料性能和结构状态，因此要根据这些特点制定针对性抽样策略^[5]。同时，建立基于统计学原理的样本量计算模型。通过合理的统计学方法，综合考虑工程总体规模、检测项目的变异性以及所需的检测精度等因素，准确计算样本量，从而保证所抽取的样本能够有效代表整体工程质量状况，为检测结果的准确性和可靠性提供有力保障。

2. 现场检测过程监控

现场检测过程监控需从多方面着手。应制定包含环境参数记录、设备校准验证、操作规范执行的三级过程控制标准^[6]。对于环境参数，要准确记录温度、湿度等关键指标，确保其符合检测要求，避免环境因素对检测结果产生干扰。设备校准验证是保障检测准确性的关键，定期对检测设备进行校准，检查其准确性和稳定性，在使用前验证设备是否处于正常工作状态。操作规范执行方面，检测人员必须严格按照既定的操作流程进行检测，确保每一个步骤都符合标准，从而保证检测结果的可靠性和有效性。

（二）实验室检测质量控制要点

1. 实验数据可靠性分析

实验数据可靠性分析是实验室检测质量控制的关键。构建包

含离群值处理、重复性检验、不确定度评定的数据质量评估体系至关重要。离群值可能因实验操作失误、仪器故障等产生，需通过合理方法识别并处理，以确保数据真实性^[7]。重复性检验可验证实验结果的一致性，多次重复实验，分析数据偏差，保证结果的可靠性。不确定度评定则综合考虑各种因素对测量结果的影响，给出测量结果的可信赖程度，为实验数据的准确性提供量化指标，从而全面保障实验数据的可靠性。

2. 标准规范执行监控

建立检测方法适用性评价矩阵是确保标准规范执行的重要环节。通过对不同检测方法在各种条件下的适用性进行评估，为实际检测工作选择最合适的方法，保障检测结果的准确性和可靠性^[8]。同时，设计温湿度补偿措施至关重要。环境温湿度对检测结果可能产生显著影响，通过精确的温湿度补偿，能够减少环境因素带来的误差。设备系统误差修正也是关键步骤。检测设备可能存在系统误差，需采用科学的方法进行修正，如定期校准设备、采用标准物质进行验证等，确保设备的准确性符合标准规范要求，从而保证实验室检测质量。

四、协同管理实施路径研究

（一）管理措施优化

1. 检测计划协同编制

基于施工进度网络图预测检测窗口期，以此为基础制定检测资源动态调配方案。施工进度网络图清晰呈现各施工环节的时间节点与逻辑关系，通过分析可确定适合开展检测工作的时间段，即检测窗口期^[9]。根据窗口期对检测资源如人员、设备等进行动态调配。在资源充足的窗口期，可安排更多复杂或关键项目的检测；在资源紧张时，优先保障重要部位或紧急检测需求。同时，考虑不同检测项目的先后顺序和相互影响，合理安排检测计划，确保检测工作既能满足工程进度要求，又能保证检测质量和资源的高效利用。

2. 跨部门协作机制

为实现建筑工程现场检测与实验室检测的协同管理，构建包含建设单位、监理单位、检测机构的联席会议制度至关重要。通过该制度，各方可定期沟通检测进展、问题及需求，共同商讨解决方案，确保检测工作顺利进行。同时，设计检测争议快速响应流程，当出现检测结果不一致等争议时，能迅速启动该流程，明确各方责任，组织专家进行论证分析，及时给出科学合理的判定结果。这不仅有助于提高检测效率，还能增强检测结果的准确性和可靠性，保障建筑工程质量^[10]。

（二）技术保障措施

1. 检测设备联校体系

建立现场便携设备与实验室基准设备的定期比对制度是确保检测数据准确性的关键。通过规定合理的比对周期，如每季度或半年进行一次全面比对，可及时发现设备间的偏差。在比对过程中，应严格遵循相关标准操作程序，确保环境条件、检测方法等的一致性。同时，制定量值溯源实施方案，明确每台设备的溯源

途径和校准周期。对于现场便携设备，可采用与实验室基准设备比对或送至有资质的计量机构校准的方式实现量值溯源。对于实验室基准设备，应直接溯源至国家基准或国际基准，以保证其测量结果的准确性和可靠性，从而为建筑工程现场检测与实验室检测的协同管理提供坚实的技术保障。

2. 新型检测技术融合

建筑工程现场检测与实验室检测的协同管理需要新型检测技术的融合作为技术保障。无人机巡检技术可对建筑工程现场进行大面积、快速的检测，获取宏观的结构信息和外观缺陷情况。其能覆盖难以到达的区域，与传统人工巡检相互补充。智能传感器监测技术则可实时、连续地监测建筑结构的各项参数，如应力、应变、温度等。通过在关键部位安装传感器，能及时发现结构的微小变化，为实验室检测提供更精准的数据支持。将这些新型检测技术与传统检测方法相结合，能够实现优势互补，提高检测的全面性、准确性和时效性，从而更好地保障建筑工程的质量。

（三）质量控制实践验证

1. 房屋鉴定协同案例

在房屋鉴定协同案例中，某既有建筑因使用年限较长且出现一些外观损伤迹象，需进行全面鉴定。现场检测团队对建筑的结构构件进行了详细检测，包括混凝土强度检测、钢筋锈蚀情况检测等，并对建筑外观的裂缝分布、变形情况进行了记录和分析。同时，实验室对从现场采集的混凝土芯样、钢筋样本等进行了材料性能分析。通过现场检测数据与实验室分析数据的互证，如现场检测的混凝土强度推定值与实验室芯样抗压强度试验结果相互印证，钢筋锈蚀程度的外观判断与实验室微观分析结果相符等，

准确评估了房屋的结构安全状况，为后续的维修加固决策提供了科学依据，体现了现场检测与实验室检测协同管理在房屋鉴定中的重要作用。

2. 质量效益评估

构建综合评价指标体系是质量效益评估的关键。检测成本节约率可反映协同管理及质量控制措施对成本的影响，通过对比实施前后成本数据得出。质量问题追溯准确率体现对质量问题根源查找的精准程度，这依赖于完善的检测记录和追溯机制。验收通过率则是衡量工程质量是否达标的重要指标，受现场检测与实验室检测协同效果的直接影响。综合考量这些指标，能全面评估协同管理及质量控制的效益，为后续改进提供依据，确保建筑工程质量，提升行业整体水平。

五、总结

建筑工程现场检测与实验室检测的协同管理具有重要意义。通过协同管理，能够提高检测效率和准确性，保障工程质量。在实施过程中，取得了多方面的效果，如检测流程更加规范、资源利用更加合理等。同时，随着技术的发展，检测数据区块链存证和人工智能辅助决策成为了后续研究的重要方向。区块链存证可确保检测数据的真实性和不可篡改，人工智能辅助决策则能提高检测结果的分析效率和准确性。质量控制体系在整个过程中起到了关键作用，它不仅保障了检测质量，还推动了工程验收规范的升级，为建筑工程行业的发展提供了有力支持。

参考文献

- [1] 杜丹丹. 唐山市建筑工程检测实验室质量管理体系研究 [D]. 华北理工大学, 2019.
- [2] 蓝天锐. 基于本体的建筑工程检测实验室管理系统构建 [D]. 广东: 广东工业大学, 2021.
- [3] 王威威. 基于 BIM 的建筑工程施工质量协同管理研究 [D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2018.
- [4] 武治含. 印染协同管理调度问题研究及协同管理系统实现 [D]. 上海: 东华大学, 2019.
- [5] 李保良. 中卫模式产业集群质量协同管理研究 [D]. 辽宁: 东北大学, 2013.
- [6] 吴建亮. 浅析建筑工程检测质量管理 [J]. 科技风, 2019(28): 138.
- [7] 梁昭. 关于建筑工程质量检测及管理的几点思考 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2016(10): 4168-4168.
- [8] 李中华. 建筑工程质量检测重要性及控制探讨 [J]. 建材发展导向 (下), 2019, 17(7): 150.
- [9] 王加威, 何状. 浅谈建筑工程检测质量的影响因素与对策 [J]. 新材料新装饰, 2014(12): 544-544.
- [10] 王慧. 建筑工程检测实验室规范化管理问题分析 [J]. 科学与信息化, 2022(9): 187-189.

装饰装修工程现场管理中的质量控制与成本优化

欧少民

身份证号: 445122198905045972

DOI:10.61369/ETQM.2025080029

摘 要： 本文探讨装饰装修工程现场管理，阐述质量控制现状及影响因素，包括材料、工艺和人员等。分析成本构成要素，介绍价值工程应用及质量成本平衡模型构建。还涉及设计与施工阶段管理方法，如 BIM、PDCA 循环，及装配式装修技术等，最后说明优化策略效果及质量与成本协同发展的重要性。

关 键 词： 装饰装修；质量控制；成本优化

Quality Control and Cost Optimization In Decoration Project Site Management

Ou Shaomin

ID: 445122198905045972

Abstract： This paper explores on-site management in decoration and renovation projects, discussing the current status of quality control and its influencing factors, including materials, processes, and personnel. It analyzes cost components, introduces value engineering applications, and constructs a quality-cost balance model. The paper also covers management methods during the design and construction phases, such as BIM, PDCA cycle, and prefabricated decoration technology. Finally, it highlights the effectiveness of optimization strategies and the importance of coordinated development between quality and cost.

Keywords： decoration and renovation; quality control; cost optimization

引言

随着建筑行业的发展，装饰装修工程的质量和成本控制成为关键问题。2018年颁布的 GB50210《建筑装饰装修工程质量验收标准》对工程质量进行了规范，但实际工程中仍存在诸多挑战。空鼓、色差、接缝处理等质量问题受材料性能、施工工艺和人员技能等多种因素影响。同时，主材采购、人工配置和机械租赁等成本构成要素复杂。价值工程、质量成本平衡模型、经济质量水平确定方法等理论在成本优化和质量控制中有重要应用。此外，BIM 技术、PDCA 循环管理体系、装配式装修技术等在不同阶段对工程管理起到关键作用，推动装饰装修工程现场管理向质量与成本协同发展的方向迈进。

一、装饰装修工程质量控制的现状与挑战

（一）工程质量控制现状分析

装饰装修工程质量控制的现状面临诸多情况。一方面，空鼓问题较为常见，在墙面瓷砖、地面石材铺设中，由于基层处理不当或粘结材料不合格等原因，导致空鼓现象时有发生^[1]。另一方面，色差问题也不容忽视，在涂料、木材、石材等装饰材料使用中，因材料批次不同或施工环境差异，造成颜色不一致，影响整体美观。接缝处理同样是关键问题，在门窗安装、板材拼接处，若密封胶使用不当或施工工艺不精细，会出现缝隙过大、不平整等情况。现行 GB50210《建筑装饰装修工程质量验收标准》虽对这些问题有规范，但在实际实施过程中，由于施工人员技术水平参差不齐、质量监管不到位等因素，导致部分工程未能达到标准

要求的质量效果。

（二）质量控制的影响因素

装饰装修工程质量受多种因素影响。材料性能是关键因素之一，材料的质量、规格等直接关系到装修效果与耐久性^[2]。优质材料能提升工程质量，反之则可能导致诸多问题。施工工艺同样重要，合理的工艺流程确保各工序顺利衔接，提高施工效率与质量。不规范的工艺会引发如墙面不平、缝隙过大等缺陷。人员技能对质量控制也有显著影响。熟练且具备专业知识的施工人员能更好地把握施工要点，保证工程质量。反之，技能不足可能导致操作失误，影响整体质量。通过鱼骨图对这些因素进行因果分析，有助于清晰梳理各因素间的关系，为质量控制提供依据。

二、成本优化的关键因素与方法

（一）成本构成要素分析

在装饰装修工程中，成本构成要素至关重要。主材采购方面，材料的质量、价格、运输成本等都影响总成本。优质材料可能价格较高，但能保证工程质量，减少后期维修成本；而价格低廉的材料可能存在质量隐患，增加潜在成本^[3]。人工配置上，工人的技能水平、工资待遇以及工作效率是关键。高技能工人虽工资可能较高，但能高效完成工作，减少工时成本；低技能工人可能导致工作延误，增加成本。机械租赁需考虑设备的租赁价格、使用频率和维护成本。合理选择租赁设备，提高设备使用率，可降低单位成本。通过对这些成本构成要素的分析，为基于 ABC 分类法的敏感性分析和成本控制优先级模型建立提供基础。

（二）价值工程在成本优化中的应用

价值工程在成本优化中具有重要应用。以功能价值分析为核心，可深入探究产品或项目的功能与成本关系。例如在装饰装修工程中，通过材料替代方案比选能很好地验证其价值。像瓷砖与石材的经济性对比，需考虑两者的功能是否能满足工程需求以及成本的差异。运用价值工程中的 $V=F/C$ 公式（ V 为价值系数， F 为功能评价价值， C 为总成本），若某种材料在满足基本功能的前提下成本更低，即 V 值更大，则该材料更具优势。这不仅能保证工程质量，还能有效降低成本，实现成本优化的目标，为装饰装修工程现场管理提供科学的决策依据^[4]。

三、质量与成本的协同管理机制

（一）质量成本平衡模型构建

1. 预防成本与故障成本关系研究

质量成本平衡模型的构建需深入研究预防成本与故障成本关系。预防成本是为预防质量问题而投入的费用，如人员培训、质量计划制定等。故障成本则是因质量问题产生的损失，包括内部故障成本（如返工、报废）和外部故障成本（如客户投诉赔偿）。通过建立质量成本曲线模型，可以分析不同质量投入水平下的总成本变化。前期适当增加预防成本，可能会降低故障成本。例如，对施工人员进行专业培训，可提高施工质量，减少返工次数，从而降低返工损失。这体现了前期质量投入对返工损失的边际效益，即随着预防成本的增加，返工损失的减少幅度会逐渐变化，需找到一个平衡点使质量成本达到最优，这对于装饰装修工程现场管理中的质量控制与成本优化具有重要意义^[5]。

2. 经济质量水平确定方法

在经济质量水平确定方法中，可运用六西格玛理论确定质量合格率最优区间。六西格玛通过定义、测量、分析、改进和控制等步骤，旨在减少过程变异，提高产品或服务的质量。通过该理论找到的最优区间，能在保证一定质量水平的前提下，合理控制成本。同时，结合蒙特卡洛模拟进行风险量化。蒙特卡洛模拟通过随机抽样和模拟试验，能够对各种不确定性因素进行分析，评估不同质量水平下的成本风险。这种结合方式有助于构建质量成本

平衡模型，实现质量与成本的协同管理，为装饰装修工程现场管理中的质量控制与成本优化提供科学依据^[6]。

（二）全过程协同控制体系

1. 设计阶段协同策略

在设计阶段，可借助 BIM 技术实现材料规格优化与施工可行性验证，以达到质量与成本的协同管理。BIM 技术能够对建筑模型进行精细化分析，精确计算材料用量，避免材料浪费，优化材料规格选择，在保证装修质量的前提下降低成本^[7]。同时，通过施工可行性验证，提前发现设计中存在的问题，避免施工过程中因设计不合理而进行变更，从而减少因设计变更导致的成本浪费，确保工程质量和成本都能得到有效的控制。

2. 施工阶段动态监控

在施工阶段动态监控中，构建 PDCA 循环管理体系至关重要。通过计划（Plan）明确质量目标与成本预算，依据规范和项目要求制定详细的施工计划和质量控制标准，同时预估各项成本^[8]。执行（Do）阶段严格按照计划施工，利用物联网传感设备实时采集施工过程中的质量数据，如温湿度、材料性能等，以及成本相关数据，如材料消耗、设备使用时长等。检查（Check）环节对比实际数据与计划标准，及时发现质量偏差和成本超支情况。处理（Act）阶段针对问题采取调整措施，优化施工工艺或调整成本投入，确保质量与成本始终处于协同管理状态，不断提升装饰装修工程的综合效益。

四、现场管理优化策略实证研究

（一）项目案例背景分析

1. 工程概况与难点

某五星级酒店精装修项目具有独特的工程概况与难点。该项目涵盖了酒店大堂、客房、餐厅、会议室等多个区域，空间布局复杂多样，不同区域有着不同的功能需求和设计风格^[9]。大堂区域追求豪华大气，需要高品质的材料和精湛的工艺来打造；客房则注重舒适度和私密性，对装修细节要求极高；餐厅要营造出独特的用餐氛围，在灯光、色彩和装饰上都有特殊要求。同时，作为五星级酒店，对品质的要求近乎苛刻，不仅要保证装修质量符合高端标准，还要在成本控制的前提下，实现装饰装修的美观与实用相结合，这给现场管理带来了巨大挑战。

2. 原始管理方案评估

在装饰装修工程传统管理模式下，质量合格率和成本控制方面存在诸多问题。从质量合格率来看，由于缺乏精细的工序把控和严格的质量检验标准，一些关键工序如墙面平整度、瓷砖铺贴等容易出现瑕疵，导致整体质量合格率难以达到理想水平^[10]。在成本方面，常因材料浪费、人工效率低下以及不合理的施工安排等因素，造成成本超支。例如，材料采购计划不准确，导致材料积压或短缺，增加了材料成本；施工人员技能参差不齐，工作效率差异大，使得人工成本增加。这些问题都表明传统管理模式在质量和成本管理上存在明显不足，亟待优化。

（二）优化方案实施过程

1. 质量控制措施改进

在装饰装修工程现场管理中，质量控制措施改进至关重要。实施材料封样制度，在材料进场前，由建设单位、施工单位和监理单位共同对材料进行封样，确保材料质量符合设计要求。同时，建立工序交接检制度，每道工序完成后，由施工班组进行自检，合格后报质检员检查，质检员检查合格后再报监理工程师验收，只有验收通过才能进行下一道工序。此外，引入第三方检测机构，对关键材料和重要工序进行抽检，以确保工程质量。通过这些措施的实施，可以有效提高装饰装修工程的质量，减少质量问题的发生，从而提高工程的整体效益。

2. 成本控制方法创新

装配式装修技术在装饰装修工程现场管理中具有重要作用。它通过标准化的预制构件生产，在工厂完成大部分加工工序，然后运输到现场进行组装。这极大地减少了现场作业量，降低了人工成本和因现场施工操作不规范导致的质量问题。同时，建立动态材料库存管理系统也是成本控制的关键。该系统能实时监控材料的出入库情况和库存余量，根据工程进度准确预测材料需求，避免材料积压或缺货。合理安排材料采购计划，降低库存成本和资金占用，提高资金周转率，从而实现成本的有效控制和优化。

（三）实施效果对比分析

1. 质量绩效提升指标

在装饰装修工程现场管理优化策略实施后，质量绩效有了显著提升。空鼓率方面，经过优化管理措施，如严格把控施工工艺、加强材料检验以及对施工人员的专业培训，空鼓率大幅下降了35%。这意味着墙面和地面等部位的空鼓问题得到了有效控制，减少了后期维修成本和安全隐患。同时，观感合格率也有了

极大提升，达到了98%。这得益于对施工细节的严格把控，包括表面平整度、阴阳角的处理以及颜色的一致性等方面。通过现场监督和质量检验的强化，装修效果更加美观，符合高品质装修的要求，极大提高了用户满意度和工程的整体质量水平。

2. 经济效益评估

通过对装饰装修工程现场管理优化策略的实施效果对比分析，进行了经济效益评估。成本偏差分析结果显示，总成本得到显著节约，达到12%。这主要得益于在材料采购管理优化方面，减少了浪费和不合理支出；在人工成本控制上，提高了劳动效率，避免了无效工时。同时，工期缩短了20天，这不仅减少了项目的间接成本，如设备租赁费用、管理费用等，还使项目能够更快交付使用，提前产生经济效益。例如，提前开业的商业装修项目可提前获得租金收入或营业利润。这些数据充分证明了现场管理优化策略在经济效益方面的积极作用。

五、总结

装饰装修工程现场管理中，质量控制与成本优化需协同发展。通过对质量控制措施和成本优化策略的探讨，明确二者相互影响、相互制约的关系。在技术路径上，要注重从材料选用、施工工艺到质量检测等环节的精细化管理，同时合理规划资源、控制工期以降低成本。BIM与物联网技术的整合应用将成为未来趋势，可实现信息实时共享和精准决策，提高管理效率。建立装饰工程全生命周期管理数据库也是重要方向，有助于积累经验数据，为后续项目提供参考，从而更好地实现质量和成本的双重目标，提升装饰装修工程的整体效益。

参考文献

- [1] 张红. 基于价值工程的工业化全装修住宅成本优化研究 [D]. 重庆大学, 2018.
- [2] 刘晶. 家装工程项目管理与成本优化研究 [D]. 浙江工业大学, 2017.
- [3] 闫清. 苏州 A 装修公司装修工程质量控制研究 [D]. 江苏大学, 2018.
- [4] 刘向武. 建筑装饰装修环保节能技术的应用管理 [C]// 中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会. 2021 工程技术与管理研讨会论文集. [出版者不详], 2021: 74-79.
- [5] 富龙. 房屋建筑装饰装修施工技术管理 [C]// 中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会. 2021 工程技术与管理研讨会论文集. 北京: 晴山装饰配套工程有限公司, 2021: 15-18.
- [6] 谢辉. 建筑装饰装修工程的质量控制与管理 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2015(21): 4997-4997.
- [7] 陈迪青. 建筑装饰装修工程的质量控制与管理 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2013(6).
- [8] 黄益睿. 浅谈装饰装修工程的质量控制 [J]. 装饰装修天地, 2016(13): 10.
- [9] 王昆, 王世永. 建筑装饰装修工程的施工质量控制与管理 [J]. 居业, 2020(10): 161-162.
- [10] 陈国栋. 装饰装修工程施工管理及质量控制 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2011(16).

极端天气下公路与城市道路路面抗滑性能提升技术研究

张春燕

天津市通建建筑工程有限公司，天津 300450

DOI:10.61369/ETQM.2025080032

摘 要： 极端天气（如暴雨、暴雪、冰冻等）对公路与城市道路路面抗滑性能的负面影响显著，直接威胁行车安全。本文通过分析极端天气对路面抗滑性能的作用机制，系统梳理表面处治、刻槽、防滑涂层等提升技术的原理与应用特点，结合工程案例探讨技术适配性，并展望智能化、环保化的发展趋势，旨在为极端天气下道路交通安全保障提供技术参考。

关 键 词： 极端天气；公路与城市道路；路面抗滑性能；提升技术；交通安全

Research on Improving the Anti-slip Performance of Highway and Urban Road Pavement under Extreme Weather Conditions

Zhang Chunyan

Tianjin Tongjian Construction Engineering Co., Ltd. Tianjin 300450

Abstract： Extreme weather conditions (such as heavy rain, heavy snow, freezing, etc.) have a significant negative impact on the anti-slip performance of highway and urban road surfaces, directly threatening driving safety. This article analyzes the mechanism of extreme weather on the anti-slip performance of road surfaces, systematically summarizes the principles and application characteristics of improvement techniques such as surface treatment, grooving, and anti-slip coatings. Combining engineering cases to explore the suitability of the technology, and looking forward to the development trend of intelligence and environmental protection, the aim is to provide technical reference for road traffic safety under extreme weather conditions.

Keywords： extreme weather; highways and urban roads; pavement anti-slip performance; improvement technology; traffic safety

引言

公路与城市道路行车安全的核心要素为路面抗滑性能，路面抗滑性能的优劣程度与制动距离、操控稳定性及事故发生率密切相关，受全球气候变化影响，极端天气事件频发，路面水膜因暴雨形成，积雪结冰由暴雪引起，摩擦系数急剧减少至临界值，大幅增加车辆滑移及追尾事故的几率。雨天气象下，路面交通事故发生率显著增加，超出晴朗天气逾三倍，面对冰雪天气，交通事故发生率可膨胀至5至8倍，针对极端气候属性，采纳高效的路面抗滑性能改进方案，对降低交通事故频次与维护交通顺畅性具有迫切现实意义，本文专研极端气候中公路及城市道路的防滑需求，对技术根本、应用实施与未来趋势进行综合考察，理论及技术支撑矩阵支撑道路养护与安全管理。

一、极端天气对路面抗滑性能的影响机制

（一）雨天对路面抗滑性能的影响

路面在雨天抗滑性能下降的根本原因可归结为水膜效应和路面纹理的阻塞，在降雨量超出路面排水极限的节点，路面表层将聚积一层薄水层，轮胎与地面的接触界域缩窄，摩擦力随之降低，易发生水漂效应之高速行驶，易造成车辆失控，雨滴冲刷着路面的表层，促成沥青层剥落及集料棱角的磨损，在长期作用下，路面纹理（宏观纹理诸如车辙、坑槽，微观纹理诸如集料表

面粗糙度）发生退化，抗滑性能明显下降，雨季油污及泥沙等污染成分混搭，填充路面纹理的裂隙，生成润滑面层，增强路面抗滑性能的退化趋势。

（二）冰雪天气对路面抗滑性能的影响

冰雪天气对路面抗滑性能的负面影响更为明显，积雪覆盖路面时，轮胎与路面间的接触形态从“橡胶-集料”过渡至“橡胶-冰雪”形态，干燥路面摩擦系数降至0.1-0.2，较之0.6-0.8水平显著下降，积雪层变硬，碾压后的积雪，密实化生成冰层，冰层摩擦系数极低（仅为0.05-0.1），致制动距离显著增加5至

10倍，横向滑移倾向明显。路面结构损伤的加剧与冻融循环效应紧密相连：路面缝隙中水分子侵入后，迅速结冰膨胀，引起集料松散及沥青裂缝现象，加剧路面纹理的退化，引发“抗滑性能减弱与结构损伤恶化”的恶性循环态势^[1]。

（三）极端温度对路面抗滑性能的影响

高温天气下，沥青铺设面软化易发，轮胎压实效应令路面纹理变浅，集料结合力降低，尤其是经重载车辆长期反复作用，车辙变形引发路表排水障碍，间接引发雨水水膜效应的加剧，低温天气则会使沥青材料脆性增加，路面表层频繁遭遇龟裂困扰，集料与沥青的粘结力下降，在车辆荷载与冰雪冻融作用下，集料易于剥落，导致路面抗滑性能退化。

二、路面抗滑性能提升技术的核心原理

（一）增强路面纹理构造

路面纹理构成摩擦力之核心要素，涉猎宏观纹理，宏观纹理借助排水与储水，显著减少水膜厚度，微观纹理借助轮胎与集料表面的机械咬合，实现摩擦力的产生，技术发展需同步兼顾两个层面：实施雕刻、磨削技术以扩大宏观纹理的深度与间隔，选用表面粗糙、棱角丰富的集料（如玄武岩、花岗岩），保留微观纹理，确保轮胎与路面达成有效贴合。

（二）优化路面材料性能

材料自身性能是抗滑性能的基础。对于沥青路面，需选用高粘度沥青、改性沥青等，提高集料与沥青的粘结力，抵抗雨水冲刷与冰雪冻融的侵蚀；对于水泥混凝土路面，需控制水灰比、优化集料级配，增强表层强度与耐磨性，减少集料脱落。此外，通过添加防滑添加剂（如橡胶颗粒、钢纤维），可提升材料表面粗糙度与摩擦系数，延长抗滑性能衰减周期。

（三）主动应对极端天气的功能设计

针对冰雪天气，应纳入融雪及去冰功能：于路面材料中掺杂蓄盐改性剂，采纳盐类低温融雪特性，降低冰雪融解的起始温度，阻制冰壳的发育；需强化排水设计，引入透水性路面材料，诸如大孔隙沥青混合料，提高路面水分渗透速度，减少路面水分积聚现象，辅以排水沟槽及路缘石开口，有效导流路面积水^[2]。

三、极端天气下路面抗滑性能提升技术实践

（一）表面处治技术

采用路面表层敷设功能薄层材料的技术，迅速提升路面抗滑系数，适用于预防性维护与应急修复实施，1. 精表处技术：实施环氧改性沥青胶结料与特制集料的融合，强力渗透作用下，形成了紧密的防护壳体，纹理深度拓展至1.5至2毫米，滑移阻力系数BPN数值逾65，且具备出色的抗水冲刷与耐磨特性。在暴雨频发地区应用时，该产品在排水与防滑方面的效果预计维持3至5年，尤其匹配城市主干道与高速公路之长下坡区域，2. 超薄磨损层技术——NovaChip：实施断级配混合料，同步施工改性乳化沥青防水粘结层与磨损层，层厚为2至3毫米之极。采用大孔隙结构加速

排水过程，减轻水膜效应的干扰，集料紧密锁合，该技术滑动摩擦系数值上限突破60，施工效率超群，适于多雨季节及高交通流量的城市快速路，3. CAP抗滑翻新封层技术：该混合剂由沥青还原剂及抗磨砂配伍，本还原剂可恢复沥青的老化特性，抗磨砂借助粘结和嵌锁机制，塑造出粗糙的表层，滑阻系数提升30%以上水平，施工进度迅猛，每日施工面积突破千平方米，中小型桥梁与县道的抗滑修复适宜性分析。

（二）刻槽技术

路面经机械切割，显现出有序槽迹，增强路面宏观纹理结构，尤其适用于水泥混凝土路面，1. 混凝土路面槽形切割：普遍采用梯形槽形，深度区间设定为2至4毫米，距离设定为15至25毫米，纵向刻槽技术显著降低了车辆横向侧滑的风险系数，采用横向刻槽设计，制动距离显著缩短，冰雪天气下，缩短比例可达20%–30%，针对陡峭坡面与弯曲道路等高风险区域，横向刻槽应优先部署。刻槽深度须均等化，维护基层完整性，刻槽后需及时清理碎屑，2. 路面沥青刻痕处理：针对沥青路面车辙、纹理变浅问题，采用特制铣刨机械进行槽道刻划，铣刨深度介于0.001米与0.002米，可形成连续沟槽，增强雨天排水与防滑性能水平，必须调整刻槽的间隔与密度，防止切割过深引起路面结构强度下降。

（三）防滑涂层技术

于路面表层实施高摩擦材料层，实施短期与长期抗滑工程，适用于应急抗滑用途及特定区域，1. MMA彩色防滑涂层：采用甲基丙烯酸甲酯作为基质，掺杂陶瓷微细颗粒，滑阻指数超80，赋予自融冰特性，在-30℃至0℃环境下，冰雪冻结进程受阻，冻结效果减弱，大雪易于脱落，服务周期为3至5年，适用于北方城市的人行道与公交站台铺设，2. 抛丸+防滑涂层复合技术：运用高速钢丸抛射技术，清除路面浮浆与油污，表面处理实现均匀粗糙，摩擦系数提升至原值的1.5倍，敷设聚氨酯防滑涂层，双防护机制，适宜于积水频繁的桥梁与隧道进出口地带。

（四）功能性材料技术

1. 蓄盐类自融冰材料：将表面处理后的氯盐型改性剂（氯化钙微胶囊等）混入沥青及混凝土结构，逐步释放盐分，实现冰点降低，阻绝冰壳生成，中等降雪地带，路面冰雪冻结温度降低，降低区间为5至8摄氏度，融雪剂撒布量减半以上，成功阻绝了传统蓄盐材料的吸潮及腐蚀状况。2. 透水性路面材料：实施20%–25%空隙率的开级配沥青混合料与透水混凝土组合，直接渗透至地壳，减少路面水分沉积，集料界面粗糙度较高，摩擦系数（BPN）超出60级，需依托地下排水体系，阻隔水分侵入路基层，适宜于城市广场、次级道路等低负荷交通地带。

四、工程应用案例分析

（一）高速公路长下坡路段抗滑改造

山区高速路段坡度设定为3%至5%，暴雨天气事故频次急剧上升，实施精表处技术优化项目，路面抗滑等级由45提升至70，纹理深度实现1.8毫米，雨时水膜厚度减少60%，经过半年的观察，事故发生率降低了75%，路面磨损未留下明显痕迹，证实了

该技术具备卓越的极端雨季抗滑特性。

（二）北方城市主干道冰雪天气抗滑处理

该北方城市核心道路，面对冬季的冰雪天气，必须频繁投放融雪药剂，仍存在结冰隐患，采用 MMA 自融冰防滑涂层后，滑阻系数高达 85，-10℃ 环境下路面冰雪冻结时间延迟 3-4 小时，融雪剂消耗量削减 60%，显著提升了夜间行车安全系数，冬季交通事故发生率降低 58% 以上。

（三）水泥混凝土桥面抗滑修复

该城市跨越江河，采用水泥混凝土桥面结构的大桥，因长期雨水冲刷导致抗滑值降至 35，存在安全结构缺陷，执行横向刻槽（深度 3mm，间距 20mm）并实施抛丸作业，滑动阻力等级提升至 65，雨天制动行程缩短至原长的 75%，且槽纹与路面牢固镶嵌，两年车辆碾压实验中，剥落现象未出现，效果稳定。

五、技术应用中的关键问题与优化策略

（一）技术适配性选择

不同技术的适用场景存在差异，应依据气候条件、道路类别及交通压力进行综合考量，多雨地带应优先实施排水技术，诸如 NovaChip 和透水路面，冰雪地区侧重融冰抗滑技术（如 MMA 自融冰涂层、蓄盐材料）；高速公路与主干道应优先采用长效技术措施，次级道路与人行道适宜采用成本效益高的防滑层，应杜绝技术误用之弊病，过度雕刻沥青路面或引发结构破坏，施工参数必须严密监管。

（二）成本与效益平衡

抗滑技术的实施应兼顾经济层面的平衡：初期投资成本较低，针对预防性养护技术，其耐用性相对有限，仅为 1 至 2 年，适宜于预算约束较小的中小型道路；初期资本投入显著的长效技术，整体生命周期成本表现卓越，符合高流量及高安全标准要求的路段，采用技术集成策略以实现成本削减，实施“抛丸处理与简易防滑涂层”组合措施以临时提升抗滑能力，同步短期需求与长远效益的匹配^[3]。

（三）施工质量控制

施工工艺直接影响抗滑效果：表面处理材料需实现均匀分布，杜绝材料分离与鼓胀情形；刻槽需严格控制深度与间距，维持纹理连贯性；涂层厚度必须达到既定标准线，防止涂层出现气泡与剥落点，施工完成后，应迅速对滑移阻力指标（如 BPN、SFC）及纹理深度进行质量评估，对不合格路段实施返工，确保技术性能契合规范要求。

六、技术发展趋势与展望

（一）智能化与精准化

未来将结合物联网技术平台，实施采用传感器技术的路面抗滑性能实时监测系统构建，借助大数据分析预测路面抗滑性能的退化动态，实现“按需养护”，智能化施工机械（诸如自动刻槽机、精确喷涂机器人）显著提升技术实施精度，降低人为操作误差，AI 视觉技术赋能的路面检测车辆可自动识别纹理退化带，引导铣刨机精准刻槽，升级抗滑修复的效率水平。

（二）环保与可持续化

开展生态材料创新，生物降解防滑涂层、由工业废弃物加工而成的防滑集料，降低环境冲击；倡导再生技术采纳，将废旧轮胎橡胶颗粒与沥青相掺，显著增强路面抓地力，实现资源循环再利用的成果，通过采用长效抗滑技术（如自修复涂层），维护频率得以大幅减少，实现成本全生命周期节约，路面结构采用微胶囊修复剂，微裂缝一旦出现，修复剂便自动释放，增强抗滑性能的持久效力。

（三）多功能一体化

推进抗滑、融雪、降噪及自洁技术融合的综合技术路径，该“防滑涂层 + 光伏融雪”系统利用涂层吸收太阳能并实现热能转换，消融积雪、采用透水路面与抗滑纹理结合方案，满足极端气候多样性挑战的多元需求，实施“大孔隙沥青 + 蓄盐改性剂”组合式技术的路段，雨后排水效率增长 40 个百分点，冰雪天融冰速度加快 30%，噪音降低 5 至 8 分贝量级，综合效应实现协同进步。

七、结语

极端天气下路面抗滑性能提升技术的核心是通过增强纹理构造、优化材料性能、融入功能设计，针对性应对水膜、冰雪等不利因素。表面处治、刻槽、防滑涂层等技术各有优势：表面处治适合长效抗滑与排水，刻槽适用于水泥路面纹理恢复，防滑涂层适合应急与特殊路段。工程实践表明，根据气候特点、道路类型合理选择技术，可显著提升极端天气下的行车安全性。

技术应用中需注重适配性选择、成本效益平衡与施工质量控制，避免盲目应用。未来，随着智能化、环保化、多功能化技术的发展，路面抗滑性能提升将更加精准、高效、可持续。道路管理部门应结合实际需求，建立“监测 - 评估 - 养护”一体化体系，推动技术落地应用，为极端天气下的道路交通安全提供坚实保障。

参考文献

[1] 彭维弟. 公路混凝土路面抗滑性能提升策略 [J]. 中国水泥, 2025, (06): 86-88.

[2] 任仲山, 张武兴, 马辉, 等. 高速公路路面抗滑性能衰减规律及提升策略研究 [J]. 市政技术, 2024, 42(11): 92-98.

[3] 郝旭东. 雨天路面抗滑性能提升的微表处技术应用研究 [J]. 水上安全, 2024, (07): 178-180.

