

水利电力 科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2024 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



编委 Editorial board member

付金泽 国网冀北电力有限公司唐山市丰润区供电分公司

Fu Jinze State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Tangshan Fengrun District
Power Supply Branch

张世元 景德镇市水利规划设计院

Zhang Shiyuan Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

詹丽 景德镇市水利规划设计院

Zhan Li Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

李岩 辽宁红沿河核电有限公司

Li Yan Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., LTD.

目录CONTENTS

水利电力科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology

第2卷 第9期 2024年9月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《水利电力科学与技术》编辑部

ISSN(O): 2995-438X

ISSN(P): 2995-4371

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。

- | | | |
|-----|---|--|
| 001 | 水利工程对河流生态系统结构与功能的影响研究
Research on the Impact of Water Conservancy Projects on the Structure
and Function of River Ecosystems | 倪晓冉
Ni Xiaoran |
| 004 | 新型电力系统下虚拟电厂的优化调度策略研究
Study on Optimal Scheduling Strategy of Virtual Power Plant under
New Power System | 刘亚光
Liu Yaguang |
| 007 | 试析电表仪表在线计量要点
Analysis of the Key Points of Online Measurement of Electrical
Instruments | 陈媛媛, 张琼月, 李艳, 何媛, 郭谋, 严伟
Chen Yuanyuan, Zhang Qiongyue, Li Yan, He Yuan, Guo Mou, Yan Wei |
| 011 | 电力企业可再生能源项目的审计重点与风险控制研究
Research on Audit Focus and Risk Control of Renewable Energy
Projects in Power Enterprises | 杜雪芬
Du Xuefen |
| 014 | 水利水电工程设计过程中生态理念的应用分析
Analysis of the Application of Ecological Concepts in the Design Process
of Water Conservancy and Hydropower Projects | 黄乐
Huang Le |
| 017 | 内部审计在电力企业工程成本控制中的作用研究
Research on the Role of Internal Audit in Engineering Cost Control
of Power Enterprises | 云琦
Yun Qi |
| 020 | 风力发电机组设备的预防性维护策略
Preventive Maintenance Strategy for Wind Turbine Generator Equipment | 范士杰
Fan Shijie |
| 023 | 水利工程施工中土石方作业技术的理论与实践
Theory and Practice of Earthwork Operation Technology in Water
Conservancy Engineering Construction | 王细金
Wang Xijin |
| 026 | 生态恢复在水土保持中的应用与效果评估
The Application and Effect Evaluation of Ecological Restoration in
Soil and Water Conservation | 张俊奇
Zhang Junqi |
| 029 | 大中型水利工程征地补偿和移民安置实践与探讨——以淮河入海水道
二期工程淮安市境内工程安置为例
Land Compensation and Resettlement Practices and Exploration in Large and
Medium-Sized Water Conservancy Projects—Taking the Second Phase
of the Huaihe River Estuary Project in Huai'an City
as an Example | 王志林, 张双林, 王盟, 姜小青
Wang Zhilin, Zhang Shuanglin, Wang Meng, Jiang Xiaoqing |
| 033 | 混流式水轮机过流部件磨损机理及防护措施研究
Study on Wear Mechanism and Protective Measures of Flow
Passages in Francis Turbines | 秦庆松
Qin Qingsong |

水利工程对河流生态系统结构与功能的影响研究

倪晓冉

泰安市河湖管理保护服务中心，山东 泰安 271000

DOI:10.61369/WCEST.2024090001

摘要： 本论文围绕水利工程对河流生态系统结构与功能的影响展开深入研究。通过梳理水利工程的建设与运行特点，从河流物理形态、生物群落组成、物质循环和能量流动等维度，分析水利工程对河流生态系统结构的改变，探讨其在水资源调节、生物栖息地维持等功能上的正负效应。研究表明，水利工程在带来巨大社会效益的同时，不可避免地对河流生态系统造成扰动，需要采取科学合理的生态修复与补偿措施，以实现水利工程效益与生态保护的平衡。

关键词： 水利工程；河流生态系统；生态结构；生态功能；生态修复

Research on the Impact of Water Conservancy Projects on the Structure and Function of River Ecosystems

Ni Xiaoran

Tai'an River and Lake Management and Protection Service Center, Tai'an, Shandong 271000

Abstract： This paper conducts in-depth research on the impact of water conservancy projects on the structure and function of river ecosystems. By analyzing the construction and operation characteristics of water conservancy projects, this paper explores the changes in river ecosystem structure caused by water conservancy projects from the perspectives of river physical morphology, biological community composition, material circulation, and energy flow. Additionally, it discusses the positive and negative effects of these projects on water resource regulation, biological habitat maintenance, and other functions. The research indicates that while water conservancy projects bring significant social and economic benefits, they also inevitably disturb river ecosystems. Therefore, scientific and reasonable ecological restoration and compensation measures are necessary to achieve a balance between the benefits of water conservancy projects and ecological protection.

Keywords： water conservancy projects; river ecosystems; ecological structure; ecological function; ecological restoration

引言

水利工程作为人类改造自然、利用水资源的重要基础设施，在防洪、发电、灌溉、供水等领域发挥着不可替代的作用^[1]。从古至今，水利工程的建设和发展深刻影响着人类社会的进程。以中国为例，截至 2023 年底，全国已建成各类水库 9.88 万座，总库容达 9412 亿立方米，这些水利工程为保障国家水安全、促进经济发展做出了卓越贡献。然而，随着全球范围内水利工程建设规模的不断扩大，其对河流生态系统的负面影响逐渐显现。河流生态系统是一个复杂的动态系统，由生物群落与非生物环境相互作用构成，具有独特的结构与功能。水利工程的建设与运行，改变了河流的自然水文过程、河道形态等，进而对河流生态系统的结构与功能产生多方面的影响。深入研究水利工程对河流生态系统结构与功能的影响，对于合理规划水利工程建设、实现生态保护与工程效益的协调发展具有重要的理论与现实意义。当前，国内外学者在该领域已开展诸多研究，但仍需进一步结合不同区域河流生态系统特点，深入剖析水利工程影响的内在机制，为生态友好型水利工程建设提供更具针对性的理论支撑。

一、水利工程对河流生态系统结构的影响

（一）河流物理形态改变

水利工程的修建，尤其是大坝的建设，极大地改变了河流的物理形态。大坝拦截河水，形成库区，使河流流速减缓，水位抬

升，原本连续的河流被分割成不连续的水体。这种改变导致河道纵向连续性遭到破坏，阻断了鱼类等水生生物的洄游通道，影响其正常的繁殖、觅食等活动。相关研究数据显示，全球约 60% 的大型河流因水利工程建设导致鱼类洄游通道被阻断。同时，水库蓄水改变了河流水沙运动规律，大量泥沙在库区沉积，下游河道

泥沙含量减少，引发河道冲刷、河岸崩塌等问题，河道形态也随之发生改变。例如，长江三峡大坝建成后，库区上游水位上升，淹没了大量陆地，形成了长达 600 余公里的巨型水库；而下游河道因泥沙减少出现冲刷下切现象，部分河段河床高程降低，据监测，自三峡工程运行以来，宜昌至湖口段河床平均下切深度达 2 – 3 米，导致河岸防护压力增大，部分岸坡稳定性降低^[2]。此外，水库的存在还改变了河道的横向形态，水库蓄水后，水位波动范围扩大，使得库岸侵蚀加剧，岸线形态发生改变。

（二）生物群落组成变化

河流物理形态的改变，直接影响了生物群落的组成。一方面，大坝的阻隔使得一些洄游性鱼类无法完成繁殖等生命活动，导致其种群数量急剧减少，甚至濒临灭绝。例如，中华鲟是长江中典型的洄游性鱼类，三峡大坝的建设严重阻碍了其洄游产卵，其种群数量从 20 世纪 80 年代的约 2176 尾下降至 2020 年的不足 20 尾，生存状况岌岌可危。另一方面，水库的形成改变了水体的理化性质，如水温、溶解氧等，适合静水生存的生物物种逐渐增多，而适应流水环境的生物物种则受到抑制。研究发现，水库中浮游植物的生物量通常比自然河流高出 2 – 5 倍，而底栖动物的种类和数量则因水流条件改变而显著减少。此外，水利工程建设过程中对河岸带植被的破坏，也减少了陆生生物的栖息地，影响了陆地生物与河流生态系统的物质与能量交换，进一步改变了生物群落结构^[3]。以某大型水电站建设为例，工程施工导致周边 10 公里范围内的河岸带植被覆盖率从原来的 70% 下降至 30%，许多依赖河岸植被生存的鸟类、两栖动物数量明显减少。

（三）生态系统空间格局调整

水利工程的存在使得河流生态系统的空间格局发生显著调整。水库形成后，库区与下游河道在生态环境上出现明显差异，形成了不同的生态单元。库区以静水生态系统为主，具有独特的浮游生物、底栖生物群落；而下游河道由于水文过程改变，其生态系统特征也与未建坝前大不相同。同时，水利工程建设还会改变周边地区的土地利用方式，如水库周边的灌溉农田、城市建设用地的增加等，这些变化进一步影响了河流生态系统与周边生态系统的相互关系，改变了生态系统的空间格局^[4]。以美国科罗拉多河为例，格伦峡谷大坝建成后，库区形成了大面积的人工水体生态系统，而下游河道由于水量减少，河岸植被退化，沙漠化趋势加剧，原本连续的河流生态系统被割裂为多个独立的生态斑块，生态系统的连通性和完整性遭到严重破坏。此外，水利工程引发的土地利用变化还会导致生态系统服务功能的空间分布发生改变，如水库周边区域的水资源供给功能增强，但下游地区的洪水调蓄和生物栖息地功能则明显减弱。

二、水利工程对河流生态系统功能的影响

（一）水资源调节功能的强化与弱化

水利工程在水资源调节方面具有重要作用。水库可以在洪水期蓄水，削减洪峰，减轻下游洪水灾害；在枯水期放水，补充下游河道水量，保障供水与生态用水需求，强化了水资源的时间分

配调节功能。例如，黄河小浪底水库自建成以来，通过科学调度，有效调节了黄河的水沙过程，使下游河道主槽最小过流能力从不足 2000 立方米 / 秒提高到 4000 立方米 / 秒以上，极大地提升了黄河下游的防洪能力。然而，过度的水资源调节也可能带来负面影响。例如，一些地区为了满足农业灌溉、工业用水等需求，过度利用水库蓄水，导致下游河道长期处于低流量状态，影响了河流的自净能力和生态系统健康，弱化了河流原本的生态调节功能。据统计，全球约 30% 的河流因过度取水和水库蓄水，出现了断流或生态基流不足的现象。此外，水库蓄水改变了局部地区的水循环过程，可能引发区域气候、土壤湿度等方面的变化。研究表明，大型水库蓄水后，库区周边地区空气湿度增加，年平均气温升高 0.5 – 1℃，对周边生态环境和农业生产产生一定影响^[5]。

（二）物质循环与能量流动的改变

水利工程对河流生态系统的物质循环和能量流动产生重要影响。在物质循环方面，大坝拦截泥沙，使得下游河道泥沙含量减少，影响了营养物质的输送与分配。同时，水库内水体的滞留时间延长，促进了水体中营养物质的积累，可能引发水体富营养化问题。例如，太湖流域的一些水库由于营养物质积累，蓝藻水华频繁爆发，严重影响了水质和水生生态系统。在能量流动方面，河流流速的改变影响了水生生物对能量的获取与利用。例如，流水环境中鱼类通过捕食游动获取能量，而在水库静水环境中，鱼类的能量获取方式和食物来源发生变化，能量流动途径也随之改变^[6]。此外，水利工程建设对河岸带植被的破坏，减少了陆地向河流输入的有机物质，影响了河流生态系统的能量来源。研究发现，河岸带植被破坏后，河流生态系统中有机物质的输入量可减少 30% – 50%，进而影响整个生态系统的能量流动和食物网结构。

（三）生物栖息地维持功能的变化

水利工程建设改变了河流生态系统的生物栖息地维持功能。水库形成后，为一些水生生物提供了新的栖息地，但这些栖息地与自然河流栖息地在生态特征上存在差异。例如，水库水温分层现象明显，影响了鱼类的生存环境；水库的库岸带由于水位涨落频繁，植被生长受到限制，影响了陆生生物与水生生物的过渡栖息地功能。而对于下游河道，由于流量、水位等变化，原有的河滩、湿地等栖息地面积减少或消失，许多依赖这些栖息地生存的生物面临生存威胁。以珠江流域为例，随着流域内水利工程的不断建设，下游河口湿地面积减少了约 40%，导致大量候鸟栖息地丧失，生物多样性受到严重威胁^[7]。此外，水利工程建设过程中的施工活动，如开挖、填土等，也会直接破坏生物栖息地，影响生物的生存与繁衍。施工产生的噪音、震动以及废弃物排放等，还会对周边生物的生存环境造成干扰和污染，进一步加剧栖息地的退化。

三、水利工程生态影响的应对策略

（一）科学规划与设计

在水利工程规划设计阶段，需以河流生态系统完整性为核心

导向,遵循生态优先原则开展系统性布局。通过构建多学科协同的规划框架,科学论证工程选址与规模,从源头上降低对河流生态系统的扰动。以大坝工程为例,可通过设置鱼道、鱼梯等过鱼设施,构建鱼类洄游的“生命通道”;优化水库调度方案,模拟自然水文节律,确保下游河道生态基流稳定。美国埃尔瓦河大坝拆除工程提供了成功范例,通过恢复自然河道形态,鲑鱼种群数量在数年内实现显著增长,印证了生态修复的可行性。

在工程设计环节,应强化生态功能与工程结构的有机融合。采用生态护坡、生态护岸等新型技术手段,构建水陆交错带生态缓冲系统。例如,生态护坡可运用植物根系固土与土工合成材料相结合的复合技术,既保障边坡结构稳定,又为水生生物、两栖动物及昆虫营造多样化栖息地,激活生态系统自组织修复能力,维护流域生态廊道的空间连通性^[8]。

（二）生态修复与补偿

针对已建成并对河流生态系统产生负面影响的水利工程,需系统推进生态修复与补偿体系建设。在生物资源修复层面,通过科学规划人工增殖放流,精准补充因工程建设锐减的鱼类种群;同步实施河滩湿地生态修复工程,重构水生生物栖息网络,优化栖息地生态功能。以长江流域“十年禁渔”政策与增殖放流协同实施为例,该举措已显著促进刀鱼、四大家鱼等物种资源量回升,展现出生态修复组合拳的显著成效。

在水资源调控方面,需建立动态化生态补水机制,通过精准调度水库下泄流量,保障下游河道生态基流需求,有效缓解断流、水体萎缩等问题,提升河流生态系统自我修复能力^[9]。同时,构建多元化生态补偿机制,通过财政转移支付、生态税征收、绿色金融工具等手段,对受损生态环境实施系统性修复,并对因工程建设产生利益损失的群体给予合理补偿。这种市场化与行政化相结合的补偿模式,既能确保生态保护者获得可持续收益,又能激发全社会参与生态保护的内生动力,最终实现生态效益与经济效益的动态平衡。

（三）加强监测与管理

构建系统完备的河流生态系统动态监测体系,针对水利工程

全生命周期实施多维度生态指标的长期追踪。借助大数据分析与模型模拟技术,量化评估水利工程对河流生态系统的影响程度,为工程优化调度和生态修复策略制定提供科学依据。监测体系应覆盖水文情势、水质参数、生物多样性、栖息地结构等核心要素,综合运用卫星遥感、无人机航测、物联网水质在线监测等先进技术手段,实现数据采集的高精度与实时性^[10]。

在工程运行管理层面,需建立动态适应性调度机制,通过科学制定水位调控、流量分配方案,在保障防洪、供水等核心功能的同时,将生态影响降至最低限度。同步推进制度体系建设,完善《水法》《环境保护法》等相关法规,明确水利工程建设与运营主体的生态保护权责清单,强化生态补偿、环境影响后评价等制度执行,对违规行为实施分级分类处罚,构建“监测-评估-管控-修复”的全链条生态保护体系。

四、结束语

水利工程对河流生态系统结构与功能的影响是复杂而多面的。尽管水利工程在防洪、发电、灌溉等方面带来了巨大的社会效益,但不可否认其对河流生态系统造成了一定程度的破坏。河流生态系统结构的改变,包括物理形态、生物群落组成和空间格局的变化,直接影响了其功能的正常发挥,如水资源调节、物质循环与能量流动、生物栖息地维持等功能都受到不同程度的影响。为了实现水利工程效益与生态保护的平衡,我们需要采取科学规划与设计、生态修复与补偿、加强监测与管理等一系列措施。未来,随着人们对生态环境保护的重视程度不断提高,以及生态水利工程技术的不断发展,我们有理由相信,在保障水利工程发挥重要作用的同时,能够更好地保护河流生态系统的健康与稳定,实现人与自然的和谐共生。同时,还需要进一步加强跨学科研究,深入探索水利工程与河流生态系统相互作用的内在机制,为全球水资源可持续利用和生态环境保护提供更科学、更有效的解决方案。

参考文献

- [1] 张连刚; 谢宇. 生态水利规划对水环境产生的积极影响 [J]. 水利技术监督, 2023(09).
- [2] 张晶; 于子铨; 董哲仁; 赵进勇; 彭文启. 河流地貌单元研究综述 [J]. 水生态学杂志, 2021(05).
- [3] 唐超. 浅谈生态理念在淡水涌整治工程中的应用 [J]. 广东水利水电, 2020(04).
- [4] 王宏涛; 董哲仁; 赵进勇; 张晶. 蜿蜒型河流地貌异质性及生态学意义研究进展 [J]. 水资源保护, 2015(06).
- [5] 董哲仁; 张爱静; 张晶. 河流生态状况分级系统及其应用 [J]. 水利学报, 2013(10).
- [6] 董哲仁. 河流形态多样性与生物群落多样性 [J]. 水利学报, 2003(11).
- [7] 曾国雄; 赵国荣; 张伟. 疏勒河流域水生态补偿机制探索 [J]. 中国水利, 2015(20).
- [8] 于鲁冀; 朱桂香; 樊万选. 构建河南矿产资源开发生态补偿机制研究 [J]. 河南科学, 2009(09).
- [9] 庾莉萍. 水资源保护生态补偿机制的思考 [J]. 资源与人居环境, 2008(02).
- [10] 庾晋. 水资源保护生态补偿机制的思考 [J]. 防灾博览, 2008(01).

新型电力系统下虚拟电厂的优化调度策略研究

刘亚光

内蒙古鲁电蒙源电力工程有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020

DOI:10.61369/WCEST.2024090002

摘 要： 随着新型电力系统建设的推进，可再生能源大规模接入、分布式能源广泛分布以及电力市场改革的深化，虚拟电厂作为一种整合分布式能源资源、实现灵活高效电力调度的创新模式，受到广泛关注。本文聚焦于新型电力系统背景下虚拟电厂的优化调度策略。首先阐述新型电力系统的特征及其对虚拟电厂调度提出的新要求，分析虚拟电厂的组成与运行机制。接着深入探讨影响虚拟电厂优化调度的关键因素，包括可再生能源出力不确定性、电力市场价格波动、用户需求响应特性等。在此基础上，提出综合考虑经济性、可靠性和环保性的多目标优化调度模型，并介绍相应的求解算法。最后对虚拟电厂优化调度策略的未来发展方向进行展望，旨在为提升虚拟电厂在新型电力系统中的运行效能提供理论支持和实践参考。

关 键 词： 新型电力系统；虚拟电厂；优化调度策略

Study on Optimal Scheduling Strategy of Virtual Power Plant under New Power System

Liu Yaguang

Inner Mongolia Lude Mengyuan Electric Power Engineering Co., LTD., Hohhot, Inner Mongolia 010020

Abstract： With the advancement of new power system construction, large-scale integration of renewable energy, widespread distribution of distributed energy, and deepening reforms in the electricity market, virtual power plants have gained significant attention as an innovative model for integrating distributed energy resources and achieving flexible and efficient power dispatching. This paper focuses on the optimization scheduling strategies of virtual power plants under the context of new power systems. It first outlines the characteristics of new power systems and the new requirements they impose on virtual power plant scheduling, and analyzes the composition and operational mechanisms of virtual power plants. Next, it delves into the key factors influencing the optimal scheduling of virtual power plants, including the uncertainty of renewable energy output, fluctuations in electricity market prices, and user demand response characteristics. Based on this, it proposes a multi-objective optimization scheduling model that comprehensively considers economic efficiency, reliability, and environmental protection, and introduces corresponding solution algorithms. Finally, it looks ahead to the future development directions of virtual power plant optimization scheduling strategies, aiming to provide theoretical support and practical references for enhancing the operational performance of virtual power plants in new power systems.

Keywords： new power system; virtual power plant; optimal scheduling strategy

新型电力系统以新能源为主体，具有高比例可再生能源接入、高比例电力电子设备应用、源网荷储互动等显著特征。这一转变在推动能源清洁低碳转型的同时，也给电力系统的安全稳定运行和高效调度带来了诸多挑战。分布式能源如太阳能光伏、风力发电等具有间歇性、波动性和随机性的特点，导致电力供应的不确定性增加；电力负荷侧的多样化和智能化发展，使得需求侧管理的重要性日益凸显。虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP）通过先进的通信、控制和信息技术，将分布式电源、储能装置、可控负荷等分散的能源资源进行聚合和协调优化，作为一个整体参与电力系统的运行和市场交易。它能够有效整合分布式能源，提高能源利用效率，增强电力系统的灵活性和可靠性，是解决新型电力系统调度难题的重要手段。因此，深入研究新型电力系统下虚拟电厂的优化调度策略具有重要的现实意义。

一、新型电力系统特征及对虚拟电厂调度的要求

（一）新型电力系统特征

新型电力系统在能源供给层面，高比例可再生能源接入态势显著，风能、太阳能等在能源结构中的占比逐步攀升。在设备应用方面，大量电力电子设备接入电网，这一趋势改变了电力系统原有的动态特性。伴随而来的是系统谐波、电压波动等问题的增多。此外，源网荷储互动愈发紧密频繁，电源侧、电网侧、负荷侧和储能侧借助信息通信技术实现协同运行^[1]。这种互动模式有效提升了电力系统的整体效率与灵活性，有助于更好地适应能源转型和负荷变化。

（二）对虚拟电厂调度的要求

在新型电力系统背景下，对虚拟电厂调度提出了多维度要求。在应对可再生能源特性方面，鉴于风能、太阳能等分布式可再生能源出力受自然因素影响大，虚拟电厂需拥有精准的出力预测能力以及灵活的调度手段。面对电力市场改革浪潮，虚拟电厂要积极投身市场竞争。依据市场价格信号，动态优化调度策略。同时，密切关注市场规则的变化，及时调整运营模式，提升自身在市場中的竞争力。此外，随着用户需求的多样化发展，用户对电能质量、供电可靠性及用电成本等方面有了更高期待^[2]。虚拟电厂应深入分析用户需求响应特性，为用户量身定制个性化的用电服务方案，在满足用户需求的同时实现自身的可持续发展。

二、虚拟电厂的组成与运行机制

（一）虚拟电厂的组成

虚拟电厂是一个复杂且高效的系统，主要由分布式电源、储能装置、可控负荷以及能量管理系统这几大关键部分构成。分布式电源是虚拟电厂的能量基石，涵盖了太阳能光伏、风力发电、小型燃气轮机和生物质能发电等多种形式。储能装置在虚拟电厂中扮演着“能量调节器”的角色，能有效实现削峰填谷与功率平衡。可控负荷则包括工业可中断负荷、商业空调负荷、居民电动汽车充电负荷等，借助需求响应技术，可依据电力系统运行状况和调度指令灵活调整用电行为^[3]。而能量管理系统作为虚拟电厂的核心，负责收集各部分运行信息、分析处理数据，并制定优化调度策略，以协调控制虚拟电厂内的各类能源资源。

（二）虚拟电厂的运行机制

虚拟电厂的运行机制涵盖信息交互、优化调度与协同控制三个紧密相连的环节。在信息交互环节，借助先进的通信技术，虚拟电厂内的分布式电源、储能装置、可控负荷等各组成部分与能量管理系统之间能够达成实时信息传输。优化调度环节中，能量管理系统基于收集到的信息，综合考虑电力系统在经济性、可靠性、环保性等方面的运行目标，构建优化调度模型。通过特定的算法求解模型，进而得出各组成部分的最优运行计划，以实现整体效益的最大化^[4]。协同控制环节则是将优化调度结果精准下发至各组成部分，利用相应的控制设备，对分布式电源的发电功率、储能装置的充放电行为以及可控负荷的用电量进行实时调

控，确保虚拟电厂严格依照预定计划稳定运行。

三、影响虚拟电厂优化调度的关键因素

（一）可再生能源出力不确定性

可再生能源出力深受自然因素制约，呈现出显著的不确定性。天气状况和季节更替等对其影响极大，像太阳能光伏发电，其出力直接与光照强度挂钩，光照不足时发电量锐减；风力发电的出力则由风速大小与方向决定，风速不稳定或风向改变都会使发电出力产生波动^[5]。这种不确定性为虚拟电厂优化调度增添了难题，需借助科学的预测方法和适宜的调度策略来削弱其带来的不利影响。

（二）电力市场价格波动

电力市场价格受诸多因素左右，供需关系的变化会直接反映在价格上，当电力供应紧张或需求旺盛时，价格往往上扬；燃料成本的波动也会传导至电价，燃料价格上涨会推高发电成本，进而影响电价；政策法规的调整同样不可忽视，相关政策变动可能改变市场格局与成本结构。在此背景下，电力市场价格波动较大^[6]。虚拟电厂参与交易时，需依价格信号调整计划，但价格的不确定性也加大了调度策略制定的难度。

（三）用户需求响应特性

用户需求响应特性体现为用户依据电价波动信号或相关激励举措，调整自身用电行为的能力与意愿。不同用户因生活习惯、用电目的等因素，用电习惯大相径庭，需求弹性也各不相同。并且，用户需求响应行为并非完全可预测，存在一定的随机性。鉴于此，虚拟电厂在制定优化调度策略时，必须将用户需求响应特性纳入重要考量范畴，以此提升需求响应成效与调度策略的可行性。

（四）储能装置的充放电特性

储能装置的充放电特性受多重因素制约。其容量大小决定了可储存与释放的能量规模；充放电效率影响能量在充放电过程中的损耗；充放电功率限制则划定了储能装置充放电的速率范围。制定合理的充放电策略，有助于提升虚拟电厂运行效率与经济效益。然而，在此过程中，还需兼顾储能装置的寿命和成本因素，这无疑为虚拟电厂的优化调度增添了复杂程度。

四、虚拟电厂优化调度模型与求解算法

（一）多目标优化调度模型

为全面考量虚拟电厂运行中的经济性、可靠性与环保性，本文构建了多目标优化调度模型。该模型包含目标函数与约束条件两部分。在目标函数方面，设有经济性、可靠性和环保性三个目标。经济性目标旨在最小化虚拟电厂的运行成本，涵盖分布式电源发电所产生的燃料、维护等成本。可靠性目标聚焦于最大化虚拟电厂的供电可靠性，通常采用缺电概率（LOLP）或期望缺供电量（EENS）等指标来量化评估，以确保电力供应的稳定。环保性目标则致力于最小化虚拟电厂的污染物排放量，重点关注分布

式电源发电过程中产生的二氧化碳、二氧化硫等污染物，推动绿色低碳发展。约束条件方面，功率平衡约束要求虚拟电厂在任意时刻，其发电功率、储能装置充放电功率与可控负荷用电功率之和必须等于总负荷需求。分布式电源出力约束规定各分布式电源的出力需在其最小和最大出力范围内。储能装置约束涉及容量限制、充放电功率限制以及充放电状态转换限制等。可控负荷约束则确保可控负荷的调节量处于允许的调节范围内，保障系统安全稳定运行。

（二）求解算法

为求解前文所构建的虚拟电厂多目标优化调度模型，本文选用多目标进化算法。该算法具备同时处理多个目标函数的能力，通过模拟生物进化过程中的选择、交叉和变异等关键操作，在解空间内广泛搜索，最终得到一组非支配解。算法的具体流程如下：首先进行初始化种群操作，随机生成一组满足约束条件的初始调度方案，以此构成初始种群。接着开展适应度评估，依据目标函数计算每个个体的适应度值，以此衡量个体的优劣程度。随后进入选择操作阶段，采用轮盘赌选择、锦标赛选择等经典方法，从当前种群中筛选出适应度较高的个体，使其进入下一代种群。之后进行交叉操作，对选中的个体进行两两配对并交换部分基因，从而产生新的个体，增加种群的多样性。紧接着开展变异操作，对新个体进行随机扰动，进一步探索解空间。之后对新生成的种群进行非支配排序，并计算每个个体的拥挤度，以此保持种群的多样性。最后进行终止条件判断，当达到最大迭代次数或满足其他预设的终止条件时，算法停止运行，输出非支配解集；若未满足终止条件，则返回适应度评估步骤继续迭代。

五、虚拟电厂优化调度策略的未来发展方向

（一）人工智能与大数据技术的应用

随着人工智能和大数据技术的不断发展，将其应用于虚拟电厂的优化调度中将成为未来的研究热点^[7]。例如，利用深度学习算法提高可再生能源出力的预测精度，通过强化学习算法实现虚拟电厂的自主优化调度，借助大数据分析挖掘用户需求响应的潜在规律，为调度策略的制定提供更准确的依据。

（二）跨区域虚拟电厂的协同调度

未来，随着电力系统的区域互联和能源互联网的发展，跨区域虚拟电厂的协同调度将成为必然趋势。不同区域的虚拟电厂具有不同的能源资源和负荷特性，通过建立跨区域的协同调度机制，可以实现能源资源的优化配置和互补利用，提高整个电力系统的运行效率和可靠性^[8]。

（三）与电动汽车等新兴负荷的深度融合

电动汽车等新兴负荷的快速发展为虚拟电厂的优化调度带来了新的机遇和挑战。将电动汽车纳入虚拟电厂的调度范围，通过合理引导电动汽车的充电和放电行为，不仅可以实现电动汽车与电网的互动，还可以为虚拟电厂提供灵活的调节资源，进一步提高虚拟电厂的运行效能^[9]。

（四）考虑碳交易机制的优化调度

鉴于全球对气候变化问题关注度持续提升，碳交易机制在电力系统中的应用将愈发广泛。在虚拟电厂开展优化调度工作时，把碳交易成本纳入考量范畴十分必要。这一举措能够发挥引导作用，促使虚拟电厂在发电方式选择上倾向于低碳模式，进而推动可再生能源得到更充分的消纳^[10]。如此一来，不仅有助于降低碳排放，还能实现电力系统朝着低碳方向稳步发展。

六、结论

新型电力系统的发展对虚拟电厂的优化调度提出了更高的要求。本文在分析新型电力系统特征及对虚拟电厂调度要求的基础上，阐述了虚拟电厂的组成与运行机制，探讨了影响虚拟电厂优化调度的关键因素，构建了综合考虑经济性、可靠性和环保性的多目标优化调度模型，并介绍了相应的求解算法。同时，对虚拟电厂优化调度策略的未来发展方向进行了展望。未来的研究应进一步深入探索人工智能、大数据等新技术在虚拟电厂优化调度中的应用，加强跨区域虚拟电厂的协同调度研究，推动虚拟电厂与电动汽车等新兴负荷的深度融合，并考虑碳交易机制的影响，以不断提升虚拟电厂在新型电力系统中的运行效能，为能源的清洁低碳转型和电力系统的安全稳定运行提供有力支持。

参考文献

[1] 楼家树, 李继红, 薛必克, 等. 储能型虚拟电厂参与国外电力市场的报价收益方式及对中国的启示思考 [J]. 供用电, 2023, 40(12): 7-15+31. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2023.12.002.

[2] 张超, 赵冬梅, 季宇, 等. 基于改进深度 Q 网络的虚拟电厂实时优化调度 [J]. 中国电力, 2024, 57(01): 91-100.

[3] 彭道刚, 税纪钧, 王丹豪, 等. “双碳”背景下虚拟电厂研究综述 [J]. 发电技术, 2023, 44(05): 602-615.

[4] 闫冬. 新型电力系统中的虚拟电厂关键技术分析 [J]. 仪器仪表用户, 2024, 31 (05): 101-103.

[5] 李平. 基于新型电力系统战略背景下水电企业基层人才培养的绩效管理优化路径 [J]. 云南电力, 2024, (07): 45-52.

[6] 郭松, 张玥劼. 新型电力系统中的虚拟电厂模式与关键技术分析 [J]. 电子技术, 2023, 52 (11): 56-57.

[7] 梁作放, 孔令勃, 潘华. 新型电力系统面临的挑战及关键技术 [J]. 电力与能源, 2024, 45(02): 154-159.

[8] 程环宇, 许相敏, 郭凤凤, 等. 新型电力系统下虚拟电厂常态化运营研究 [J]. 煤炭经济研究, 2024, 44 (08): 38-43.

[9] 宋天琦, 刘惠萍. 新型电力系统中虚拟电厂技术发展现状与趋势 [J]. 中国国情国力, 2024, (06): 37-40.

[10] 谭忠富, 王冠然. 新型电力系统下虚拟电厂技术应用与发展建议 [J]. 华北电力大学学报 (社会科学版), 2023, (04): 29-39.

试析电学仪表在线计量要点

陈媛媛, 张琼月, 李艳, 何媛, 郭谋, 严伟
湖北省计量测试技术研究院, 湖北 武汉 430223
DOI:10.61369/WCEST.2024090003

摘要： 本论文围绕电学仪表在线计量展开深入分析，阐述在线计量的重要意义，详细探讨电流、电压、电阻、功率等电学参数计量过程中的要点，结合具体数据说明计量标准、误差范围及操作规范，同时引入计量设备选型要点、软件技术应用、实际案例分析等内容，旨在为保障电学仪表在线计量的准确性与可靠性提供全面参考。

关键词： 电学仪表；在线计量；计量要点；数据；设备选型；软件技术

Analysis of the Key Points of Online Measurement of Electrical Instruments

Chen Yuanyuan, Zhang Qiongyue, Li Yan, He Yuan, Guo Mou, Yan Wei
Hubei Institute of Metrology and Testing Technology, Wuhan, Hubei 430223

Abstract： This paper delves into the online measurement of electrical instruments, elucidating the significance of online measurement. It meticulously examines key points in the measurement processes for electrical parameters such as current, voltage, resistance, and power. By presenting specific data, it explains measurement standards, error ranges, and operational norms. Additionally, it introduces considerations for selecting measuring equipment, software technology applications, and case studies. The aim is to provide comprehensive references to ensure the accuracy and reliability of online measurements of electrical instruments.

Keywords： electrical instrument; online measurement; measurement points; data; equipment selection; software technology

引言

在现代工业生产和科研活动中，电学仪表广泛应用于电力系统、电子设备、自动化控制等领域，其测量数据的准确性直接影响生产过程的控制、设备的安全运行以及科研结果的可靠性。在线计量能够实时获取电学仪表的测量数据，并对其准确性进行评估和校准，及时发现仪表故障和测量偏差，对于保障生产安全、提高产品质量、降低能源消耗具有重要意义。随着工业自动化和智能化程度的不断提高，对电学仪表在线计量的要求也越来越高，不仅需要保证计量的准确性，还需提高计量效率和智能化水平。因此，深入研究电学仪表在线计量要点，确保计量的准确性和可靠性，是当前亟待解决的重要问题。

一、电流计量要点

（一）计量标准规范

电流计量的标准依据国家计量检定规程，对于直流电流计量，常用的标准器有标准电阻和直流数字电流表。以0.01级直流数字电流表作为标准器，其测量范围为0-10A，最大允许误差为 $\pm(0.01\%RD+0.005\%FS)$ ，其中RD为读数，FS为满量程。交流电流计量标准器一般采用电流互感器和标准表，例如0.02级电流互感器，变比为(0.1-100)A/5A，其比差不超过 $\pm 0.02\%$ ，角差不超过 $\pm 1'$ 。此外，在高精度电流计量场景中，霍尔效应电流传感器作为新型标准器逐渐得到应用，其具有非接触测量、频

带宽等优点，在一些特殊环境下能发挥独特作用^[1]。

（二）计量操作方法

1. 直流电流计量：采用直接比对法开展测量工作，将待校准直流电流表与标准直流数字电流表串联接入直流电路。当电路电流稳定后，同步读取两块电表的测量值。例如，在测量2A直流电流时，标准表显示2.001A，被检表显示2.005A，由此可计算出被检表在该测量点的绝对误差为0.004A，相对误差约为0.2%。为提升测量效率与精度，可引入自动化测量系统，通过程序控制实现多电流值自动切换测量，减少人为干扰。并完成数据的自动采集与分析。

2. 交流电流计量：借助电流互感器将大电流转换为标准表可

测量的电流，再与被检交流电流表进行对比测量。如在测量100A交流电流时，通过100A/5A的电流互感器转换后，标准表测量值为4.998A，被检表测量值为5.01A，经计算被检表比差约为0.24%，角差则需使用专门的相位测量仪器进行测定计算。在实际应用中，针对谐波含量较高的交流电流测量，需配备特殊的宽频电流互感器以及具备谐波分析功能的测量设备，从而保障测量结果的准确性。

（三）误差影响因素及处理办法

环境温度和湿度会显著影响电流计量的准确性。一般情况下，温度每变化1℃，部分直流电流表的误差变化可达到±0.05%。为减少环境因素的影响，电流计量应在恒温恒湿的环境中进行，温度宜控制在（20±2）℃，相对湿度保持在40%–60%。同时，要保证计量电路的稳定运行，防止因电路接触问题、电源波动等导致测量误差^[2]。另外，电磁干扰也是影响电流计量准确性的重要因素，特别是在高频电流测量时，需要使用屏蔽性能良好的电缆和测量设备，并合理安排测量线路，以降低电磁干扰的影响。

二、电压计量要点

（一）计量标准规范

直流电压计量标准常用标准电池、标准电阻和高准确度的直流数字电压表。例如，标准电池的电动势稳定性为 $\pm 1 \times 10^{-6}/\text{年}$ ，0.005级直流数字电压表测量范围为0–1000V，最大允许误差为 $\pm (0.005\% \text{RD} + 0.002\% \text{FS})$ 。交流电压计量标准器主要有电压互感器和标准电压表，0.05级电压互感器，变比为（6–10）kV/5V，比差不超过±0.05%，角差不超过±2′。在高压电压计量中，电容式电压互感器因其体积小、重量轻等优点得到广泛应用，其计量标准也需符合相关规范要求。

（二）计量操作方法

1. 直流电压计量：主要运用分压法和直接比较法。分压法是通过标准电阻组成的分压器，把高电压转化为标准电压表能够测量的范围后进行比较。比如在测量500V直流电压时，使用分压比为10:1的分压器，标准电压表测得值为49.98V，那么实际电压为499.8V，若被检表测量值是501V，绝对误差为1.2V，相对误差约0.24%。直接比较法是将被检直流电压表与标准直流数字电压表并联接入直流电路，直接进行测量对比^[3]。在高精度直流电压计量中，基于量子霍尔效应的电压标准装置因稳定性和准确性高而被采用。

2. 交流电压计量：与交流电流计量方式类似，先借助电压互感器把高电压转换为低电压，再与被检交流电压表进行对比测量。在测量380V交流电压时，经过380V/100V的电压互感器，标准电压表测量值为99.95V，被检表测量值为100.2V，计算得出比差约0.25%，角差则需通过相位测量仪器确定。对于存在畸变电

压的交流电路测量，需要使用具备波形分析功能的测量设备，从而精确获取电压参数。

（三）测量注意要点

在进行电压计量时，需谨慎选择合适的量程。量程选取不当，过大可能导致测量误差增加，过小则可能损坏测量仪表。同时，要防范感应电压对测量结果的干扰，特别是在高压电压计量场景下，应做好屏蔽措施，保证计量过程的安全与准确。此外，当需要同时测量多路电压时，必须注意各测量通道之间的隔离，避免相互干扰影响测量数据的可靠性。

三、电阻计量要点

（一）计量标准规范

电阻计量的标准器具主要为标准电阻器，其精度等级划分细致，涵盖0.001级、0.002级等。在20℃环境下，0.001级标准电阻器若标称值为100Ω，其年稳定性波动不超过 $\pm 5 \times 10^{-6}$ ，电阻温度系数不超过 $\pm 2 \times 10^{-6}/\text{℃}$ 。随着纳米技术的发展进步，纳米级电阻标准器逐渐进入人们视野，在超精密电阻计量范畴内拥有可观的应用前景。

（二）计量操作方法

1. 直流电阻计量：电桥法是常见的测量手段，其中单臂电桥适用于1Ω–1MΩ的中值电阻测定，双臂电桥则用于1Ω以下的低值电阻测量。例如，使用0.01级单臂电桥对100Ω电阻进行测量，得到测量值为100.05Ω，由此可算出绝对误差为0.05Ω，相对误差为0.05%。此外，数字欧姆表法凭借操作简单、测量快速的特点，常被用于现场直流电阻的快速检测。

2. 交流电阻计量：主要采用交流阻抗电桥法和伏安法。以伏安法为例，通过测量交流电路中的电压与电流，利用欧姆定律计算电阻值。如某次测量中，电压测量值为220V，电流测量值为2A，计算出电阻值为110Ω，若标准值为108Ω，经计算相对误差约为1.85%。在高频交流电阻测量场景下，由于趋肤效应和邻近效应的影响，必须采用专门的高频测量技术与设备来保证测量准确性。

（三）测量影响因素控制

电阻值极易受温度变化干扰，计量过程中需精确测定环境温度，并按照电阻温度系数对测量结果实施修正^[4]。同时，要着重消除接触电阻带来的影响，确保测量电极与被测电阻接触稳固。此外，湿度同样会对电阻测量产生影响，尤其在绝缘电阻测量时，需严格遵循规定湿度条件开展测量工作，从而保障测量结果的可靠性。

四、功率计量要点

（一）计量标准规范

功率计量的主要标准器是标准功率表，其准确度等级能达到

0.05级。在三相功率计量方面，常使用三相标准功率表，当测量范围在0-10kW时，最大允许误差为 $\pm(0.05\% \text{测量值} + 0.02\% \text{满量程})$ 。在智能电网和新能源领域不断发展的背景下，新型的宽频带、高精度功率标准装置不断出现，以满足复杂电能质量条件下的功率计量要求。

（二）计量操作方法

1.直流功率计量：通过测量直流电压和直流电流，运用公式 $P=UI$ 来计算功率。比如在测量某直流电路时，电压测量值为24V，电流测量值为5A，计算得到的功率是120W，若标准功率表测量值为120.5W，绝对误差为0.5W，相对误差约0.42%。为了提高直流功率测量精度，可采用四端测量法，减少引线电阻对测量结果产生的影响。

2.交流功率计量：单相交流电路采用 $P=UI\cos\phi$ （ ϕ 为电压电流相位差）进行功率计算；三相交流电路需根据三相三线制、三相四线制等不同接线形式选择对应公式。如在三相四线制电路功率测量中，三相标准功率表测得值为5kW，被检功率表测量值为5.02kW，经计算相对误差为0.4%。在谐波丰富的交流电路中，需借助基于傅里叶变换的测量手段，精确区分并计算基波功率与谐波功率。

（三）计量关键点

在功率计量过程中，准确测量电压、电流和相位差是保证计量准确性的关键所在。要选择合适的电压互感器和电流互感器，并确保其相位误差符合要求。同时，必须注意功率表的正确接线方式，防止因接线错误致使测量结果出现偏差。此外，针对动态变化的功率测量，需要选用具备高速采样和数据处理能力的测量设备，以便实时、准确地获取功率参数^[5]。

五、计量设备选型要点

（一）依测量参数适配选型

各类电学参数的计量工作，对应着不同类型的计量设备需求。就电流计量而言，大电流测量时，需选择量程恰当、精度达标的电流互感器和电流表；小电流测量任务，则适宜采用高灵敏度的微安表或皮安表。在电压计量范畴内，高压测量必须借助高压电压互感器与高压电压表，低压测量使用普通电压表便能完成。电阻计量需根据电阻值大小，合理选用电桥或数字欧姆表；功率计量则要依据电路特性和功率数值，挑选适配的功率表。

（二）按需确定准确度等级

计量设备的准确度等级是影响测量结果可靠性的关键因素。在设备选型时，需紧密结合实际测量需求以及允许误差范围，科学选定适配的准确度等级。通常情况下，科研实验以及高精度测量领域，对设备的准确度要求极为严格，需选用高准确度等级的设备；而在工业生产的常规测量环节，可在满足生产过程控制要求的前提下，适当放宽准确度标准^[6]。

（三）注重设备稳定性和可靠性

计量设备在长时间使用过程中，稳定可靠的性能至关重要。选型时，需综合考量设备的制造工艺、材料质量以及厂家的售后服务等因素。具备良好稳定性和可靠性的设备，能够减少测量误差的起伏，保证计量结果的准确性和一致性，同时降低设备维护和校准成本。

六、软件技术在电学仪表在线计量中的应用

（一）数据采集处理一体化软件

数据采集处理一体化软件能够高效实现电学仪表测量数据的实时采集、存储及分析功能。借助与计量设备通信接口的连接，软件可自动获取测量数据，并对数据实施滤波、校准、误差剖析等处理操作。比如在电流计量过程中，该软件可对采集到的电流数据开展实时监测分析，判断电流稳定性状况，精确计算测量误差，并生成数据报表，为计量工作提供直观的数据支持^[7]。

（二）自动化计量智能控制软件

自动化计量操作软件推动计量过程迈向自动化，实现测量设备的智能切换、测量参数的自动设定以及测量流程的自动运转。用户只需通过编程设置计量任务和流程，软件便能按照预定规则自动完成电学仪表在线计量工作，显著提高计量效率，同时减少因人为操作不当引发的误差，保障计量工作的规范性和准确性。

（三）远程监控与管理软件

随着物联网技术的普及，远程运维管理软件在电学仪表在线计量中得到广泛应用。该软件支持对分布在各处的电学仪表进行远程监控与管理，实时掌握仪表运行状态和测量数据，开展远程校准和故障诊断工作，有效突破地域限制，提升计量管理的灵活性和工作效率，为电学仪表在线计量的智能化管理提供新途径^[8]。

七、实际案例分析

（一）电力变电站电流计量故障处理案例

于某电力变电站的电流计量工作中，以0.02级电流互感器和0.01级直流数字电流表作为标准器，对站内交流电流测量设备进行在线校验。在测量进程中，监测数据显示某一路电流互感器的比差超出允许误差范围^[9]。技术人员随即展开排查，发现是电流互感器二次侧接线存在接触不良的情况，进而致使测量误差扩大。找到问题根源后，工作人员重新规范接线，并对设备进行全面校准，成功使测量误差恢复至正常水平，确保了变电站电流计量的精准度。

（二）电子生产车间电阻计量误差优化案例

在某电子生产车间的电阻计量中，使用0.001级标准电阻器和单臂电桥对生产线上的电阻元件进行在线检测。在测量过程中，

发现部分电阻元件的测量值与标称值偏差较大，经过分析，发现是环境温度变化导致电阻值发生变化^[10]。通过对测量结果进行温度修正，并加强对环境温度的控制，有效提高了电阻计量的准确性，保证了产品质量。

八、结论

电学仪表在线计量涉及多参数测量校准，各参数需特定标准、方法与规范。计量标准明确各类标准器，科学的计量方法为

测量提供路径。实际工作中，环境、设备选型和操作规范影响计量结果，通过控制环境、合理选型设备、规范操作可降低误差。同时，计量设备选型要点、软件技术应用及实际案例经验，都为保障计量准确性提供支撑。计量人员需严格遵循规程，综合运用多种手段，才能确保测量数据真实有效，筑牢计量保障根基。

参考文献

[1] 康宁 . 试析电学计量仪表在线检测要点 [J]. 数码设计 , 2020 (12) : 88-89.

[2] 张小龙 . 电子仪器仪表计量管理及计量检测分析 [J]. 新潮电子 , 2024 (2) : 130-132.

[3] 蔡文嘉, 唐登平, 李亮波, 郭正, 李云峰 . 低压电流互感器自动化检定系统在线计量检测 [J]. 沈阳工业大学学报 , 2022 (6) : 613-619.

[4] 段志明 . 电气仪表计量检定及自动化探究 [J]. 电气技术与经济 , 2023(9):214-216.

[5] 杨晓梅, 杨琪华, 王慧 . 电学计量仪表在线检测探讨 [J]. 工业计量 , 2004 (S1) : 187-190.

[6] 潘炳全 . 试析电学计量的现状和发展趋势 [J]. 百科论坛电子杂志 , 2022(19):13-15.

[7] 曹莉君 . 电学计量检定和测量的系统误差因素分析 [J]. 产品可靠性报告 , 2023(6):88-89.

[8] 明艳 . 基于物联网与大数据的电学计量检测架构研究 [J]. 计量与测试技术 , 2020, 47(6):3.

[9] 王开文, 赵雷, 于萌 . 试析电学计量中测量不确定度评定的应用 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术 , 2021(12):3.

[10] 程丽萍, 李剑, 夏春, 等 . 电化学氧测定仪计量比对结果与分析 [J]. 化学分析计量 , 2022(007):031.

电力企业可再生能源项目的审计重点与风险控制研究

杜雪芬

内蒙古能源集团有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010000

DOI:10.61369/WCEST.2024090004

摘 要 : 在“双碳”目标引领下, 电力企业大力推进可再生能源项目投资, 风电、光伏、生物质能等新型项目快速扩张, 带来了审计工作的新挑战。由于项目具有政策依赖度高、技术复杂、资金密集等特点, 其在决策、建设和运营各阶段均存在显著风险。本文聚焦电力企业可再生能源项目审计中的关键环节, 系统识别财务管理、工程实施、合规运营等方面的审计重点, 深入分析政策波动、建设管理、资金安排与运营控制中常见的风险类型及其成因, 进一步提出强化事前审计、完善建设期监督、推进数字化审计及提升组织保障等多维风险控制策略。旨在为电力企业提升审计质效、强化全过程风险防控提供理论依据与实践路径, 助力企业实现可再生能源项目的高质量、可持续发展。

关 键 词 : 电力企业; 可再生能源; 审计重点; 风险控制

Research on Audit Focus and Risk Control of Renewable Energy Projects in Power Enterprises

Du Xuefen

Inner Mongolia Energy Group Co., LTD. Hohhot, Inner Mongolia 010000

Abstract : Under the guidance of the "dual carbon" goals, power enterprises are vigorously promoting investment in renewable energy projects. The rapid expansion of new projects such as wind power, photovoltaic power, and biomass energy has brought new challenges to auditing work. Due to the project's characteristics such as high policy dependence, complex technology and high capital intensity, there are significant risks at all stages of decision-making, construction and operation. This article focuses on the key links in the audit of renewable energy projects of power enterprises, systematically identifies the audit priorities in aspects such as financial management, project implementation, and compliant operation, and deeply analyzes the common risk types and their causes in policy fluctuations, construction management, fund arrangement, and operation control. Further propose multi-dimensional risk control strategies such as strengthening pre-audit, improving supervision during the construction period, promoting digital audit and enhancing organizational guarantee. It aims to provide theoretical basis and practical paths for power enterprises to improve the quality and efficiency of auditing and strengthen the risk prevention and control throughout the process, and to assist enterprises in achieving high-quality and sustainable development of renewable energy projects.

Keywords : electric power enterprises; renewable energy; audit focus; risk control

引言

在“双碳”战略深入推进的大背景下, 电力企业正加快向以风电、光伏和生物质能为代表的可再生能源转型。这一趋势不仅重塑了电力行业的能源结构, 也对企业的治理模式与风险管理体系提出了更高要求。与传统火电项目相比, 可再生能源项目具有高度依赖政策支持、技术路径多样、投资回收周期长等显著特征, 使得其在投资决策、工程建设及运营管理等各环节潜藏着复杂而多变的风险因素。在此过程中, 审计作为企业内部控制和风险防范的重要工具, 承担着识别问题、规范流程、提升效益的关键职责^[1]。然而, 传统审计方法与机制在面对新能源项目的多元化场景时, 常出现审计范围模糊、监督颗粒度不足、风险识别滞后的问题, 难以满足企业高质量发展的需求。因此, 研究可再生能源项目全过程中的审计重点, 梳理各阶段典型风险及其成因, 并探索科学、高效的审计控制策略, 对于提升电力企业治理水平、保障绿色投资稳健运行具有重要意义。本文聚焦电力企业可再生能源项目审计实践, 针对项目关键环节识别审计重点, 剖析典型风险类型与成因, 并提出切实可行的控制策略, 旨在提升审计效能, 服务企业绿色发展战略, 为实现高质量可再生能源投资提供理论支撑与实践参考。

一、电力企业可再生能源项目的审计重点识别

电力企业的可再生能源项目具有政策牵引性强、投资密集度高、周期跨度大等特征，决定了审计工作必须覆盖项目全生命周期，并针对不同阶段存在的风险特征实施差异化审计。审计的核心任务不仅在于查证财务信息的真实性与合规性，更重要的是对潜在管理漏洞进行系统识别与制衡预警，以增强企业整体项目治理能力。

（一）投资决策阶段审计重点

投资阶段是项目风险链条的起点，其决策质量直接影响后续建设效率与运营绩效。审计工作在此阶段应聚焦于立项程序的合法性、技术路径的可行性与财务测算的合理性。对项目审批手续的审计需明确是否取得发改、能源、生态环境、国土资源等部门核准或备案文件，是否符合国家清洁能源发展导向及区域能源规划要求。技术路线的选择是否与项目所在地的资源禀赋相匹配（如风资源、日照强度、土地条件），也是审计关注重点，应明确是否通过实测数据支撑建设条件评价^[2]。财务审计则应穿透项目经济测算逻辑，关注 IRR、NPV 等指标背后的关键假设前提，包括上网电价、补贴政策、装机容量利用小时数、设备折旧年限及维护成本等，结合情景敏感性分析，判断项目在不同政策或市场条件下的盈亏平衡点，防止基于不合理预期作出高风险决策。

（二）工程建设阶段审计重点

建设期是项目实施中的关键阶段，直接关系到投资效率、工程质量与预算控制。审计应从三个维度着手：采购流程、合同执行与现场管理。采购审计主要聚焦招标程序是否规范，评标过程是否存在内部控制失效、供应商资格设置不合理或串标等问题。特别是在关键设备（如风机、逆变器、升压站系统）采购环节，应审查选型依据、验收标准与质保协议，确保技术参数与项目需求高度匹配。合同执行方面，需审计合同条款执行情况，包括是否严格依据合同履行付款计划、履约保函是否生效、是否存在超出合同范围进行追加投资等行为，特别是针对变更签证、材料替换等应设立事前审批与痕迹留存机制，防范隐性造价上涨。施工现场的审计重点在于质量控制体系是否健全，是否严格执行“三检制度”，是否建立有效的工程监理与巡检制度，并对关键节点施工进度与资金支付的同步性开展逐笔核对，防止资金拨付滞后工程进度或提前付款形成账实不符的虚假完成现象。

（三）运营管理阶段审计重点

项目进入运营期后，审计的核心是收入真实性、资产完整性及成本合理性。对发电收入的审计需从源头核查发电量数据的采集、上传、结算等关键环节，验证电量数据是否通过独立计量系统采集，是否存在人为干预、虚报发电量以获取电价补贴的行为，进一步核实电费结算是否与购售电合同相符。资产审计应明确固定资产登记是否及时、分类是否科学，折旧政策是否与设备寿命周期一致，是否存在资产账实不符、重复计提、闲置浪费等问题，尤其对大功率风机组件、太阳能电池板等高值设备应实施实物核对与使用效率评估。成本审计则聚焦运维费用的合理性，重点审查外包服务合同的履行、检修记录的真实性与费用开支是

否经过审批合规，识别潜在的虚列支出、内外协价格失真或转移费用等舞弊风险^[3]。同时，还应关注项目的环保履约状况，审查是否取得排放合规许可，是否按期进行环境影响后评价，是否在碳排放权交易中存在计量偏差或数据隐瞒现象，确保企业绿色资产信息在环境监管与审计中保持一致性和透明度。

二、面临的主要风险类型与成因分析

（一）政策与补贴风险

可再生能源项目对政策和补贴高度依赖，一旦政府补贴标准下调、核准机制变更或相关政策退出，将直接导致项目盈利能力下滑。部分地区财政承压严重，补贴资金长期拖欠，造成项目现金流紧张，影响偿债与后续运维安排。政策的不确定性还可能影响项目审批周期、并网进度以及碳交易收益预期，使原本测算合理的经济模型出现系统性偏差^[4]。

（二）工程建设风险

项目建设环节存在诸多不可控因素，尤其在设备采购与施工阶段表现突出。部分企业为控制初始投资成本，采用低价中标策略，导致所采购设备质量不过关，运行效率和寿命均难以保障。施工管理中存在监理流于形式、工程变更缺乏有效审批等问题，造成现场施工标准执行不一，工程质量难以统一控制。个别项目选址前期论证不足，未充分考虑地质、水文、极端气候等自然因素，易引发结构性工程隐患或系统性发电障碍。

（三）财务与资金风险

项目财务模型构建阶段常因数据基础薄弱或预测方法不当，导致对未来收益判断偏离实际。项目资金管理方面存在预算超支、资金拨付计划不科学、资金使用手续不完善等问题，增加项目执行过程中的财务不确定性。部分项目高度依赖外部融资，融资结构中短期债务比例偏高，偿债能力不足，一旦电价下调或补贴滞后，将出现偿债压力集中释放的风险，危及企业整体财务稳健性。

（四）运维与管理风险

投产后的运营阶段要求对设备状态、电量产出和技术维护高度实时化与系统化管理。部分项目存在运维队伍力量不足、响应滞后、维保记录不完整等现象，影响设备运行效率和系统稳定性。数字化管理能力薄弱，缺乏统一的信息化监控平台，导致数据孤岛现象严重，不利于故障溯源和综合绩效评估。安全生产责任机制落实不到位，安全风险识别不足，缺乏系统的安全评估与预警体系，极易诱发安全事故和运行中断^[5]。

三、审计风险控制策略与优化路径

（一）强化前端审计与事前控制

前端审计是提升项目整体管控力的核心环节，重点在于将审计职能嵌入项目决策与筹备全过程，促使风险防控从源头着手。在项目立项初期，审计人员应深度介入项目可行性研究、技术方案遴选和投资回报测算等关键流程，围绕资源勘测结果的真实

性、政策匹配度、技术可行性和财务假设逻辑开展全面评估，防止由估算偏差或数据失真引发的系统性决策风险。项目评估阶段应建立标准化的多维风险识别模型，结合项目所处地域的政策稳定性、并网资源容量、电价机制等因素进行动态评分，确定审计资源投向优先级^[6]。在机制建设方面，需构建支持性信息平台，集成行业政策数据库、历史投资绩效信息、区域项目案例库等内容，为审计判断提供系统化支撑，提升事前识别力和预判力。

（二）完善工程建设期监督体系

工程建设阶段资金密集、业务繁杂，是风险易发高发期，审计需从制度执行、过程管控与节点核查三方面并行推进，提升监督效能。资金管理方面，应对资金拨付计划实行精准审计，将工程进度、付款节点、材料到货及验收结果有效挂钩，规避资金提前拨付、无验即付、重复支付等问题。在施工环节，应建立涵盖关键节点的阶段性审计机制，审查设备采购合同是否执行到位、施工图纸是否与现场一致、变更管理是否留痕清晰，并通过现场走访与资料比对相结合的方式核实工程进度与账面数据匹配性。针对外协单位及供应商，应建立关联交易识别机制，审查是否存在利益输送或虚构交易的风险，并强化对中标流程、公示过程和合同履行全链条的审计闭环管理。为增强监督深度，应有序引入第三方专业技术审计力量，聚焦土建质量、电气设备选型、安装工艺等关键技术领域开展技术性核验，形成内部审计与外部专业能力的复合保障体系。

（三）推进数字化审计与智能监管

数字化技术在审计中的集成应用是提升风险识别精度和过程监督广度的关键抓手，尤其适用于可再生能源项目“点多面广、数据碎片化”的管理特点。应建设统一的智能审计平台，实现电量数据、设备运行状态、资金流向等多源异构数据的集中归集与可视化管理，打破项目运营中的信息孤岛问题。通过部署边缘计算节点与智能传感器，实时采集设备运行数据，并结合数据挖掘模型，自动识别设备效率波动、电价异常变化、电量采集与结算数据不符等潜在风险信号，减少人工抽查的盲区与延时^[7]。同时，应对重要数据链路采用区块链加密技术进行确权与存证，确

保关键运行数据和财务数据不可篡改，提升审计证据的有效性。数字化平台应具备远程取证和自动生成问题清单的功能，结合“无人审计”技术，在边远区域实现项目审计的实时可达与精准定位，为低成本、高效率审计提供技术支撑。

（四）强化组织保障与能力建设

完善的组织架构和人才机制是提升审计效能、推动策略执行的制度基石。应在企业内部构建专业化程度高、运行机制明晰的审计组织体系，设置专责新能源审计机构，对风电、光伏、生物质等不同项目类型实施差异化管理。在职责分工上，应明确审计、纪检、财务、技术等职能部门边界，建立信息共享与联合审查机制，提升监督协同效率。为适应可再生新能源项目的技术多样性与管理复杂性，需加强审计队伍专业能力建设，推动审计人员在新能源技术标准、碳资产管理、能源计量等领域形成跨界复合能力，并通过轮岗机制与项目实训提升实践经验。在审计结果运用层面，应建立审计发现问题与项目调整、责任追溯、绩效评价联动机制，推动问题整改闭环管理，强化审计成果在治理结构优化中的制度驱动功能，确保审计监督在企业绿色战略落地过程中发挥核心支撑作用。

四、结语

电力企业在可再生能源项目建设与运营中面临多维度、多层次的风险挑战，审计工作需紧扣项目特性，贯穿全生命周期，从源头决策到建设执行再到运营管理，构建系统性、前瞻性的监督机制。通过强化前端审计、完善建设期监管、推动数字化转型与组织能力提升，不仅能够有效防范投资偏误、工程失控与运营失真等关键风险，还能增强企业在绿色转型过程中的治理效能与战略执行力。审计职能的深度嵌入与主动延伸，将成为保障新能源项目规范运行、提升资源配置效率和支撑“双碳”战略落地的重要支柱。未来，随着政策机制持续演进和技术路径不断更新，审计方法与风控体系亦需持续优化与动态迭代，以更好适应能源转型发展新要求。

参考文献

- [1] 金琳媛. 电力企业开展风险管理审计的路径研究 [J]. 企业改革与管理, 2021, (19): 179-180.
- [2] 杨士祺. 电力工程审计工作的目标及风险控制研究 [J]. 现代企业文化, 2024, (11): 46-48.
- [3] 赵拓. 审计视角下促进可再生能源高质量发展的研究 [J]. 中国审计, 2022(15): 63-65.
- [4] 张雅淇. 政府环境责任下电力企业碳审计流程研究 [D]. 兰州财经大学, 2022.
- [5] 王坤. 以风险为导向的计划审计风险控制策略研究 [J]. 中外企业家, 2020, (11): 11-12.
- [6] 吕萌. 电力企业审计项目质量管理的探索分析 [J]. 产业创新研究, 2023, (11): 168-170.
- [7] 威星索. 基于风险导向下企业财务内部控制审计的思考 [J]. 审计与理财, 2023, (09): 20-21.

水利水电工程设计过程中生态理念的应用分析

黄乐

中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550003

DOI:10.61369/WCEST.2024090005

摘 要 : 水利水电工程属于我国的民生工程工程, 项目建设关系着居民的日常工作与生活, 工程质量对于推进经济增长有着重要作用。水利水电工程项目施工地的结构复杂, 而且施工路线较长, 周围环境容易受到破坏, 如果无法满足水利水电工程项目建设的环境, 保护及易造成施工中的水体污染, 不利于我国工程项目建设的可持续发展。在水利水电工程项目施工中, 相比于其他的工程项目, 施工施工范围较大, 而且对环境保护的要求较为严格, 需要积极开展水利水电工程的生态理念运用, 确保工程项目顺利开展。同时, 做好施工中的环境保护, 减少环境破坏现象出现。基于此, 本文针对水利水电工程设计中的生态理念运用进行分析, 仅供参考。

关 键 词 : 生态理念; 水利水电工程; 施工技术; 环保节能

Analysis of the Application of Ecological Concepts in the Design Process of Water Conservancy and Hydropower Projects

Huang Le

China Power Construction Group Guiyang Survey and Design Institute Co., LTD. Guiyang, Guizhou 550003

Abstract : Water conservancy and hydropower projects are among the vital public welfare projects in China. The construction of these projects is closely related to the daily work and life of residents, and the quality of these projects plays a significant role in promoting economic growth. The construction sites of water conservancy and hydropower projects have complex structures, long construction routes, and the surrounding environment is prone to damage. If the environmental protection requirements for the construction of water conservancy and hydropower projects are not met, it may lead to water pollution during construction, which is not conducive to the sustainable development of engineering projects in China. During the construction of water conservancy and hydropower projects, compared with other projects, the construction scope is larger and the requirements for environmental protection are stricter. Therefore, it is necessary to actively apply ecological concepts in water conservancy and hydropower projects to ensure the smooth progress of the projects. At the same time, environmental protection during construction should be strengthened to reduce environmental damage. Based on this, this paper analyzes the application of ecological concepts in the design of water conservancy and hydropower projects for reference only.

Keywords : ecological concept; water conservancy and hydropower project; construction technology; environmental protection and energy saving

引言

近年来, 经济飞速发展, 城市化建设进程加快, 水利水电工程是我国的民生工程, 受到的关注度极高, 水利水电工程施工要求较为严格, 而且施工范围较大, 在施工过程中经常会出现资源浪费或者环境破坏现象, 这些都会影响到项目的顺利施工, 也无法满足水利水电工程的可持续发展要求。近年来, 人们的环境保护意识越来越强, 为了促进工程可持续发展, 需要在水利水电工程设计中积极落实生态理念的运用。生态理念主要是满足工程项目建设的资源节约, 减少环境破坏, 促进工程项目的可持续发展, 将该理念应用在水利水电工程中, 不仅能够提升工程项目的质量与安全, 还能有助于提升工程施工的环境效益和经济效益。

一、水电工程设计过程中生态理念的应用价值

（一）发挥工程生态价值

在水利水电工程项目设计中加大对生态理念的运用，主要目标是积极体现工程项目建设的生态价值。一些水利水电工程项目建设中设计以及建设的核心与生态环境并无关系，主要是满足工程建设项目中的防洪需求以及发电需求等，一些水利水电工程项目建设中可能会存在生态环境破坏现象，为了满足对生态环境的保护，减少生态污染，需要在水利水电设计过程中加大工程项目的科学组织，在设计中积极应用生态理念，减少对环境的破坏优化设计方案。即使在施工中以及施工完成之后，也需严格秉承生态环境保护理念，充分发挥工程项目设计方案的价值，在施工中总结经验教训，促进水利水电工程的生态价值增长。^[1]

（二）提升工程综合效益

在水利水电工程项目中加大生态理念的运用，能够不断提升工程项目的综合效益，综合效益主要包含生态效益、目标效益以及社会效益、经济效益等等。在工程项目设计中，结合生态效益要求在不影响工程项目基本目标的前提下，提升工程生态价值，保障工程的可持续发展优化环境建设，更好地为周围居民提供服务。在水利水电工程项目设计中，对工程设计的论证与分析，需要相关组织与工程项目设计单位加大沟通，在整个过程中满足对生态目标的维护，落实科学的区域管控，能够更好地实现工程项目的建设目标效益，积极开展水利水电工程项目中的各项培训以及管控，加快区域内的教育事业建设，让水利水电工程在生态环境理念的支持下提升综合效益。

（三）减少后续运行支出

生态理念的有效运用能够满足水利水电工程项目质量与效率的提升，减少施工中存在的破坏与威胁，对于推进整个工程项目的运行效果有着重要作用。通常情况下，在水利水电项目建设完成之后，需要投入的周期较长，在整个过程中需要不断落实对水利水电工程设备的维护，而这些费用维护也是成本支出的重要环节。通过生态理念的运用能够在满足周围生态环境不受破坏的前提下减少运维费用，比如，在水土控制方面，需要根据水利水电工程建设要求，落实生态护岸技术的运用，通过生态护岸能够减少水流对周边建筑结构的冲刷，降低了破坏力，在一定程度上削减了维护所需成本。生态理念的运用在其他环节也可以发挥其应用价值，满足水利水电工程项目运维活动的顺利开展，对于推进工程的发展有着重要作用。^[2]

二、水利水电工程设计过程存在的环境问题

（一）水源污染问题严重

水利水电工程建设受到的影响因素众多，水源污染是其中造成的严重后果，设计人员需要在水利水电工程项目设计中做好对自然资源的利用与保护，坚持生态保护原则，减少污染现象。然而，在水利水电工程项目中，一些工作人员并未按照规定要求进行工程项目施工中的废弃物科学处理，将一些废弃物随意

排放到水体中，进而造成了水源污染。另外，在一些水利水电项目中，对于一些老旧区域并未及时做好水利设施的维护与保养，在这些设施的运用过程中出现了一定程度的泄露，而有害物质会随之渗漏到水体中，进而造成水源污染。除此之外，在工程项目的运行过程中，水利水电项目周边存在工业区或者废水排放区域时也会引起水源污染现象，在废水排放过程中包含着诸多的化学物质以及有害物质，未结合实际情况对这些问题进行科学处理，将会造成水源破坏现象的加剧，不仅无法有效确保水资源的优化利用，还会威胁到饮水安全，不利于周围居民的身体健康。^[3]

（二）没有完善的生态环境保护设施

结合现阶段的水利水电工程项目实际情况进行分析，生态环境保护体系建立并不健全，在工程项目施工中，尤其是针对一些地质较为复杂的区域下施工，往往需要涉及到诸多的土方开挖与回填，这些施工极易引起工程项目建设中的土壤侵蚀，不利于环境保护工作的实施。在施工过程中，施工单位不能及时做好水土保持工作，无法满足工程施工中的护坡要求，甚至会对于植被覆盖情况造成破坏，将会导致大量的土壤被侵蚀，进而导致河道淤积或者生态环境被破坏。另外，在水利水电工程项目中存在着一些洗车水或者冲洗废水，这些并未建立良好的处置措施，随意排放将会造成水体污染以及土壤污染。水利水电工程建设项目的规模较大，势必会应用到大量的施工机械以及工程车辆，这些设备运转也包含着诸多的有害颗粒物和废气，如果不能及时建立有效的环境保护措施，将会出现大气污染，影响到周围的生态环境建设。

（三）环保档案建设混乱

水利水电工程项目中，为了满足环境保护要求，往往会应用到诸多的环境保护措施，而实际的这些措施实施过程中需要根据要求做好相关档案的管理与收集，而很多环保档案管理非常混乱。档案资料是工程项目进行环境评价以及环境监测工作的依据，必须要做好对档案资料的编制。然而，在实际的管理过程中，并未建立完善的环境档案管理制度，而且缺乏统一的管理机制，很多档案资料管理过程中格式不够统一，无法有效开展对工程项目管理资料的检索。在水利水电工程环境管理档案的建立中存在着诸多问题，很多工作人员对文档的管理与收集重视程度不足，存在着职权不明以及保护不当等现象。施工单位在资料的收集与整理时出现了问题，将会导致环境管理资料的不完善，无法积极有效地开展环境评估与监测工作。如果无法及时对这些资料与信息进行更新和维护，将会导致大量的数据和信息丢失，既会影响到环境保护工作的顺利开展，又容易造成工程项目施工中的漏洞。^[4]

三、水利水电工程设计过程中生态理念的应用

（一）施工方案生态合理性审查

为了满足生态理念的高效运用，需要对施工方案进行合理审查，针对工程项目中应用到的施工工艺，需要查看其是否满足低扰动技术的使用需求，在土方作业时降低对周围环境的破坏，减少

扬尘。在水利水电工程项目的施工布局方面，需要根据施工要求，满足施工中的地形、水流方向等的分析，落实合理的规划，确保施工布置紧凑，减少在施工中出现的水流干扰。为了满足环境保护，可以加大太阳能、风能等自然资源的高效利用。在对施工方案进行审查时，能够确保工程项目方案具备较强的生态价值，在施工完成之后恢复植被状态，减少施工地周围的生态功能受到影响，满足工程项目建设符合生态理念的运用要求。

（二）加强实用功能与生态功能衔接

在水利水电工程项目建设中，需要满足实用性与生态功能之间的衔接。比如，在进行廊道设计时，需要建立以生态为主题的廊道项目，为动物提供更多的休息场所，维护施工地周围的生物多样性。在水库设计时，需要将水质、水量等作为重点设计内容，通过设置的自然过滤体系，既满足对水体环境净化，又减少水利水电项目建设给鱼类以及其他的水生植物造成的不良影响。为了满足水利水电工程项目中生态理念的运用，在设计过程中，设计人员需要加大对环境问题的考量，根据不同的区域划分相应的功能。比如，在某农田水利工程项目建设中，需要根据施工地周围的情况进行全面勘测，施工地土壤养分充足，水源充足的情况下，满足对水利项目的科学规划，将生态环境以及农田水利的需求进行融合，打造多样化的生态管理体系，既要满足农业灌溉以及排水需求，又需要做到对周围环境的净化，改变局部气候，让周围的动物和植物焕发生机。^[5]

（三）开展环境影响评价，及时发现并解决问题

第一，在水利水电工程建设项目的的设计阶段以及竣工阶段等，积极开展对环境指标的分析，建立标准化的环境评价体系，可以将环境保护的概念引入到建立的标准中，满足水利水电工程项目的可持续发展。通过加大对环境保护情况的分析与监控，能够及时发现工程项目中存在的环境破坏现象并落实科学的处理机制。在工程项目完工之后，结合建立的环境评价体系，能够满足对工程施工情况的经验总结，为后续的施工提供指导。第二，在工程项目中，需要加大对环境管理的分析，如果发现环境管理存在漏洞与不足，需及时进行处理，减少对环境的破坏，比如，在规划过程中，建立合理的管理计划，落实精准的环境保护措施，在工程项目施工中改进现有的施工技术应用体系，促进施工技术应用与环境保护之间的融合，降低工程施工中存在的噪音与垃圾，强化环境监督，满足水资源保护。

（四）超级真空抽水技术

水利水电工程建设项目中应用的超级真空抽水技术，主要是

利用气压实现基坑中水的搬运，营造干净整洁的施工环境，减少施工中的环境破坏，降低地基不均匀沉降现象的出现。在技术运用过程中，需要根据施工要求一次性完成降水井的钻孔，在钻孔过程中需要保持轻压慢转的状态，精准控制孔的垂直度。在钻孔过程中，钻头达到设计位置之后需要提升钻井工具，积极开展清孔作业，直至清孔工作达到规定要求。管道安装中，需要先进行外管的安装，在管壁周围设置多层滤网，外管安装完成之后，及时进行滤料的回填，在井管与孔壁之间进行泥浆的灌注，逐步缩小泥浆灌注量，直至恢复稳定。井壁清理完成之后进行内管的安装，内管与外管需要保持同心状态。为了确保密封状态达到要求，需要利用法兰与密封垫同时作业的施工方式，确保固定的合理性。安装施工顺序科学设置潜水泵，自动启停水线要高于入口水位线，形成漏斗装置。根据施工现场的具体情况，满足施工技术的运用，每一位工作人员都需要具备较强的能力与素养，保持所有的施工技术操作规范化与合理化，充分发挥技术的应用价值。

（五）再生材料使用

水利水电工程项目中加大环保理念的运用需要满足再生材料的优化利用，再生材料主要是指回收利用工程项目施工中的一些废弃物以及建筑废料等，经过加工之后再次应用于项目建设，通过此种方式能够降低工程项目施工中对材料的消耗，减少环境破坏，同时满足工程项目施工的经济效益增长。目前，再生材料被广泛应用于工程项目建设中，比如，在水利水电工程中可以利用再生钢筋和再生骨料满足项目建设，既提升了工程施工的经济效益，减少对环境的破坏，又能够结合这些材料具备的抗压性能以及强度等满足工程质量与安全要求，对于推进工程可持续发展有着重要作用。

四、结束语

总而言之，在水利水电工程建设项目中，通过绿色理念的运用能够满足工程可持续发展，对于推进工程建设有着重要作用。结合绿色理念的应用与指导，加大工程中先进技术的运用，降低工程施工对环境造成的破坏。在未来，水利水电工程项目中需要加大对绿色理念的运用，让绿色技术在水利水电工程项目中得到推广与运用，同时加大对绿色技术的研发，让其更好地发挥作用与价值，为水利水电工程项目建设提供支持。

参考文献

- [1]田明亮.生态理念在水利工程设计过程中的应用分析[J].水上安全,2023,(04):104-106.
- [2]李文品.生态理念在水利工程设计过程中的应用分析[J].中国水运,2022,22(06):79-81.
- [3]吕贺.生态理念在水利工程设计中的应用分析[J].陕西水利,2021,(08):225-226+230.
- [4]刘庆红.生态理念在水利水电设计中的渗透路径[J].智能城市,2021,7(14):163-164.
- [5]徐杰.水利水电工程设计过程中生态理念的应用分析[J].工程建设与设计,2021,(12):87-89.

内部审计在电力企业工程成本控制中的作用研究

云琦

内蒙古送变电有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010000

DOI:10.61369/WCEST.2024090006

摘 要： 在电力企业工程项目日益增多、投资规模持续扩大的背景下，工程成本控制面临预算失衡、采购不规范、合同管理松散等多重挑战，严重影响企业的资金效率与风险防控能力。内部审计作为企业内部控制的重要工具，在项目全生命周期中具备独特优势。本文从电力企业成本控制的薄弱环节切入，系统分析内部审计在预算审核、流程监督、结算审计及绩效评价等环节的作用机制，揭示其在提高资源配置效率、规范资金使用及防范成本风险方面的实际成效。研究指出，通过健全制度体系、打造专业团队、推动数字化转型及强化成果闭环运用，可显著提升内部审计在工程成本管控中的治理效能，为电力企业构建高效、透明、可持续的成本管理体系提供路径支持。

关 键 词： 内部审计；电力企业；工程成本控制；全过程监督；治理效能

Research on the Role of Internal Audit in Engineering Cost Control of Power Enterprises

Yun Qi

Inner Mongolia Power Transmission and Transformation Co., LTD. Hohhot, Inner Mongolia 010000

Abstract： Against the backdrop of the increasing number of engineering projects and the continuous expansion of investment scale in power enterprises, engineering cost control is confronted with multiple challenges such as budget imbalance, non-standard procurement, and loose contract management, which seriously affect the capital efficiency and risk prevention and control capabilities of enterprises. Internal auditing, as an important tool of enterprise internal control, has unique advantages throughout the entire project life cycle. This paper starts from the weak links of cost control in power enterprises, systematically analyzes the mechanism of internal auditing in links such as budget review, process supervision, settlement audit and performance evaluation, and reveals its actual effectiveness in improving the efficiency of resource allocation, standardizing the use of funds and preventing cost risks. Research indicates that by improving the institutional system, building professional teams, promoting digital transformation and strengthening the closed-loop application of results, the governance efficiency of internal auditing in engineering cost control can be significantly enhanced, providing path support for power enterprises to build an efficient, transparent and sustainable cost management system.

Keywords： internal audit; electric power enterprise; engineering cost control; full-process supervision; governance effectiveness

引言

随着国家能源战略的持续推进，电力企业承担的工程项目日益增多，涵盖范围广、投资金额大、实施周期长。这些特性决定了工程成本控制的重要性愈发突出。然而，实践中许多项目存在预算失真、采购失范、合同执行不严等问题，导致成本超支现象频发，严重影响企业资金使用效率与风险防控能力^[1]。工程管理制度尚不健全固然是问题根源之一，但内部审计职能弱化、介入滞后与手段单一，亦是制约成本管控水平提升的重要因素。当前，内部审计在部分电力企业仍主要定位于传统的事后查错，对预算编制、合同评审、采购执行等关键环节的前置监督不足，难以实现对工程全过程的有效嵌入与动态控制。与此同时，工程项目管理日益复杂化，对审计人员的专业结构与信息处理能力也提出了更高要求。在此背景下，亟需系统审视内部审计在成本控制中的角色与路径，探索其在事前预防、事中监督和事后评价中的具体作用与治理价值。基于此，本文从电力企业工程成本管理的关键短板出发，剖析内部审计介入的机制与节点，旨在构建一套契合工程项目实际、具备系统性与前瞻性的审计控制体系，为提升成本管理水平与企业治理效能提供理论支持与实践路径。

一、电力企业工程成本控制的现状

（一）预算控制机制失衡，前期管理基础薄弱

电力工程项目在预算编制阶段普遍缺乏科学性与动态适应能力，投资估算与设计概算往往脱离实际，缺乏基于市场行情、施工环境与资源变化的综合分析机制。项目立项时预算评估周期滞后、测算依据不完备，导致初期成本边界模糊，形成“高估—调整—再追加”的恶性循环。在实际执行中，预算缺乏刚性约束，频繁变更成为常态，管理人员责任不清、成本预控机制弱化，严重影响了项目成本的可控性与前期管控效能。

（二）成本核算体系割裂，信息流通障碍突出

财务系统与工程管理系统间缺乏有效衔接，导致成本核算口径不统一、数据接口不通畅。财务侧重事后核算与合规报表生成，工程部门则更关注施工过程与资源消耗，二者信息采集标准与分析目标存在系统性错位，造成成本数据难以及时整合与交叉验证。缺乏统一的成本科目体系与动态核算机制，使得管理层难以获取全面、准确、实时的成本信息，削弱了项目执行过程中的成本预警与决策支持功能。

（三）采购流程控制松散，资源配置效率低下

在采购与招标环节，流程执行力度不足、制度落实不严，导致合规风险与资源浪费并存。供应商筛选存在非市场化倾向，评标机制缺乏透明度，资质审核标准模糊，采购价格与市场行情脱节明显。一些项目存在计划脱节与重复采购的问题，造成物资闲置、库存积压与资源错配。采购各环节缺乏可追溯的审计记录，管理责任难以有效界定，进一步削弱了采购环节对工程成本的控制能力与约束力^[2]。

（四）合同管理制度不健全，费用变动风险高发

合同文本制定不规范、条款约定不严谨是导致费用失控的核心因素。关键节点定义模糊、付款条件设置随意，缺乏与实际施工进度相匹配的履约条款安排，易引发执行偏差和资金流动失序。工程变更、索赔协议频繁发生，事后补充性文件大量存在，既加大成本浮动空间，也增加了合规风险。合同履行过程中缺少闭环监督与实时记录机制，导致责任划分不明，影响审计监督深度与合同管控实效。

（五）审计介入力度不足，监督效果弱化

内部审计对工程成本控制的嵌入深度不足，普遍停留在事后查账与报销审核层面，缺乏对关键业务环节的前瞻性介入。审计资源配置与工程管理复杂度不匹配，专业队伍对工程建设业务流程认知有限，难以对成本形成全过程实施精准监督。审计发现反馈渠道不畅，整改落实机制不健全，形成“查而不改、改而不实”的常态化问题，制约了内部审计在提升成本治理能力中的作用发挥。

二、内部审计在电力企业工程成本控制中的具体作用机制

（一）事前阶段：预算审核与合同管理介入

在项目前期，内部审计通过对预算编制内容的系统性复核，

强化成本预测的精准度与编制过程的合规性。审计重点应落在成本测算依据的有效性、价格参数的市场匹配程度、项目划分的合理性及预算控制指标的科学性。通过对可研报告、设计概算和投资估算文件的横向与纵向比对，识别高估、漏项、重项等失真因素，从源头规避项目实施中的资金浪费风险。在合同管理方面，内部审计需全程参与关键合同的评审流程，围绕工程量清单完整性、价款支付条款的合理性、履约保障机制的完备性以及工程变更处理的规范性进行审查^[3]。对合同中存在风险承担不清、违约责任模糊或结算规则不明等问题，及时提出修正建议。对供应商选择过程进行独立审验，核实招标文件编制的完整性、评标过程的公正性以及中标单位的资质真实性，严防采购环节出现非市场化干预与关联交易行为，夯实成本控制的制度基础。

（二）事中阶段：动态审计与流程监督

工程执行阶段，内部审计通过嵌入式监督机制，实施全周期、分阶段的动态审计，有效监控成本执行偏差。审计应对施工计划、形象进度与资金支付进行同步比对，确保已支付款项与实际完成工程量形成有效对应，防止虚报进度、提前结算等套取资金行为。在物资采购与设备管理方面，审计需核查采购计划的编制依据与审批流程，审核采购合同条款是否与项目预算匹配，验证招标流程是否规范，核对采购入库数据与现场实际物资的一致性，杜绝重复采购、物资积压和账实不符问题。工程变更环节应设置专门审计流程，审查变更的必要性、定价依据及审批程序，判断是否符合预算控制范围与合同调整条件，防止通过非正常手段规避原有预算约束，导致项目成本失控。通过定期形成审计工作底稿和问题台账，为后续整改与绩效评价提供系统依据。

（三）事后阶段：成本结算审计与绩效评价

在项目竣工及结算阶段，内部审计对结算资料进行全流程审计，重点审查合同条款履行的完整性、工程量清单的准确性与支付金额的合理性，确保财务账目与工程实际形成有效闭环。对工程变更记录、追加协议、进度款支付记录进行系统性核查，判断是否存在重复支付、虚增工程量或规避招标的违规行为，提升结算环节的规范性和透明度。针对项目成本偏差，开展系统分析，追溯偏差源头，明确责任主体，并就制度漏洞、管理失误等问题提出整改建议。绩效评价方面，内部审计可构建以成本控制、合同履行、进度执行与质量保障为核心的绩效评估模型，对项目管理效果实施量化评价^[4]。依据评价结果明确奖惩机制，推动项目管理责任的实质落实。同时，将审计发现纳入企业知识管理体系，为后续项目实施提供经验借鉴和风险预警依据，强化审计成果的管理转化功能。

三、提升电力企业内部审计在工程成本控制中效能的对策建议

（一）健全内部审计制度体系，构建清晰的职责边界

电力企业应从制度层面明晰内部审计在工程成本控制中的定位与权责关系，形成可操作、可考核的制度体系。内部审计机构应独立于项目执行部门，其管理归属应直接隶属于董事会或审计

委员会，以保证审计行为不受行政干预、利益干扰。在制度设计上，应细化审计工作覆盖的关键节点，包括预算审查、合同签订、采购执行、进度支付及结算审核等内容，明确审计流程中的参与方式、审核标准与报告路径，防止职责交叉或审计空档。对于不同规模或复杂程度的项目，应设置差异化的审计策略，提升审计资源配置效率与针对性，从而构建“制度健全、边界明确、执行有据”的审计治理格局。

（二）打造专业化审计团队，提升复合型人才储备能力

有效的工程成本审计依赖具备复合知识结构的审计人才队伍。电力企业在审计团队建设中，应注重吸纳熟悉工程造价、施工管理、合同法规、信息系统等多领域知识的专业人员，打破传统“财务型”审计思维的局限，构建能够深度理解工程实际与管理逻辑的复合型审计体系。应设立岗位胜任力评价标准，将工程项目经验纳入人员遴选和晋升考核体系，增强团队整体专业能力。在工作机制上，可推行轮岗制与项目制相结合的人员流动制度，促进审计人员跨项目、跨职能的知识积累与实践锤炼。此外，面向高难度或高风险项目，应建立外部专家协同机制，引入第三方审计机构提供技术咨询、专项核查与成果复核，保障审计结论的客观性与专业性。

（三）推动审计数字化转型，强化数据驱动的监督能力

信息技术的集成与运用是提升审计效率与深度的关键手段。电力企业应着力打造基于统一数据标准的综合成本管理平台，将预算数据、合同信息、采购记录、工程进度和财务支付等关键数据实现系统整合，打破信息孤岛，形成数据共享基础。在此基础上，内部审计可借助数据挖掘、异常识别、流程建模等智能审计工具，对项目执行中的关键风险指标实施实时监控与趋势分析，实现对高风险事项的提前预警与干预。对于工程物资采购、设计变更审批、施工进度支付等环节，应设置审计触发条件，构建自动化审计规则体系，提升监督的敏感性和反应速度。通过数字化手段将传统的抽样式审计拓展为全量数据覆盖，显著增强审计的发现力与精准性。

（四）加强审计成果运用机制，推动整改闭环与绩效问责

内部审计工作的最终价值在于发现问题并推动其解决。电力企业应建立审计发现问题的快速反馈机制，将审计报告提交给企业管理层与相关业务部门同步备案，设定整改时限与责任主体，

并将整改进展纳入内部监督体系定期跟踪。对于整改不到位、拒不执行或重复出现的问题，应建立问责清单并与管理绩效考核挂钩，形成审计成果与责任落实之间的闭环。同时，应将审计结果纳入项目管理绩效评价模型，对项目预算控制能力、合同履行合规性、变更管理规范性等指标进行量化评分，为今后同类项目实施提供可借鉴的评估基础^[5]。通过健全成果应用与反馈机制，确保审计不仅“发现问题”，更能“解决问题”，将审计价值延伸至治理改进与管理优化层面。

（五）构建多维协同机制，推动审计与业务部门联动融合

提升工程成本控制的审计成效，需打破内部审计与业务管理的职能壁垒，构建协同联动的治理模式。内部审计应主动融入项目管理流程，在项目前期参与项目立项评估与风险识别，在实施阶段与工程、财务、招采等职能部门保持常态化信息沟通机制，在关键环节形成联合审核与风险会商机制，增强监督合力。可通过设立项目审计联络员机制，将审计信息需求嵌入日常业务流程，实现业务数据实时共享、异常行为及时识别。各业务部门应将审计要求内嵌于内部制度与操作标准之中，提升自我监督能力。通过制度协同、流程协同与文化协同，形成审计推动管理、管理支撑审计的良性互动局面，促进审计效能从监督向治理升级。

四、结语

在电力企业工程项目日益复杂、投资风险持续上升的环境下，工程成本控制正逐步成为企业管理能力的集中体现。内部审计通过嵌入项目预算、合同、采购、实施与结算的各个关键环节，强化全过程监督，有效提升了资源配置效率与风险防控水平。以制度为基础、以专业为支撑、以数据为抓手的审计体系，能够打通企业治理链条中的“盲区”和“断点”，推动成本管理从经验驱动向科学化、精细化转变。强化内审职能不仅有助于规范资金使用、压缩非必要开支，更有助于形成责任清晰、流程闭环的项目管控机制，提升组织的整体运营韧性和战略执行力。未来，随着智能技术与审计工具的不断融合，内部审计将在企业治理体系中展现更高价值，助力电力企业迈向高质量发展新阶段。

参考文献

- [1] 张启银. 企业内部控制对风险管理的影响与优化 [J]. 市场周刊, 2024, 37(14): 49-52.
- [2] 蔡正杰. 内部审计在企业工程项目管理中的作用研究 [J]. 中国科技投资, 2024, (21): 157-160.
- [3] 才仁拉毛. 内部审计如何在施工企业项目管理中发挥作用 [J]. 财经界, 2020, (11): 199-200.
- [4] 遆娜. 内部审计视角下合同管理在施工工程项目管理中的重要性探究 [J]. 大众投资指南, 2023(17): 134-137.
- [5] 雷建红. A 施工企业工程项目内部审计研究 [D]. 江西: 南昌大学, 2020.

风力发电机组设备的预防性维护策略

范士杰

河北龙源风力发电有限公司，河北 张家口 075000

DOI:10.61369/WCEST.2024090007

摘 要： 全球能源需求不断增长，风力发电作为一种新能源发电形式，逐渐得到了大范围的普及应用。风力发电机组运行中，由于作业环境特殊，长期运行中可能出现设备磨损、老化，或是受环境因素影响出现安全隐患，因此加强风力发电机组设备的预防性维护显得尤为重要。文章聚焦风力发电机组设备预防性维护内容，明确其重要性基础上，总结切实可行的预防性维护策略，以期提高风力发电机运行稳定性。

关 键 词： 预防性维护；风力发电；机组设备；设备故障；可靠性

Preventive Maintenance Strategy for Wind Turbine Generator Equipment

Fan Shijie

Hebei Longyuan Wind Power Generation Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei 075000

Abstract： With the continuous growth of global energy demand, wind power generation, as a new form of energy generation, has gradually gained widespread popularity and application. During the operation of wind turbine generators, due to the special operating environment, equipment wear and aging may occur during long-term operation, or potential safety hazards may arise due to environmental factors. Therefore, strengthening the preventive maintenance of wind turbine generator equipment is particularly important. This article focuses on the preventive maintenance of wind turbine generator equipment, clarifies its importance, and summarizes practical preventive maintenance strategies to improve the operational stability of wind turbines.

Keywords： preventive maintenance; wind power generation; unit equipment; equipment failure; reliability

目前我国风力发电规模持续扩大，风力发电机组作为和新设备，运行是否稳定，关系到风力发电效率与质量。但由于风力发电机组设备多处于恶劣野外环境中运行，长期高负荷运行，加之复杂多变的气候条件影响，使得设备容易出现故障几率。而传统的设备故障维修方式已经无法满足新时期工作需求，实行预防性维护策略，致力于全面掌握风力发电机组设备运行状况，通过故障诊断和预防性维护，及早发现潜在的隐患，从而降低威胁设备正常运转的故障发生几率，提高风力发电机组整体发电效率和效益。

一、风力发电机组设备预防性维护的效益目标

（一）提高风力发电效率

预防性维护风力发电机组设备，能够有效提高风力发电效率，创造更大的效益。风力发电机组内部结构复杂，加强齿轮箱、叶片、发电机等核心部件检查和维护，有助于减少外部因素干扰，使这些部件始终处于最佳运行状态。例如，清洁叶片表面的杂物、油污，一定程度上减少了叶片空气流动阻力，提高风能捕捉效率^[1]。结合相关研究表明，发电叶片经过清洁后发电效率提升3%~5%左右。齿轮箱同样是重点维护部件，提高齿轮箱润滑性能，可以大幅度降低机械传动中的能耗，使得机组整体功率输出得到有效优化。及时更换受损零部件，还可以降低故障导致的设备停机时间，使得风力发电机组始终处于最佳运行状态。

（二）提高设备运行稳定性

风力发电机组设备运行过程中，面临低温、强风以及沙尘等恶劣条件，加强机组设备预防性维护，能够有效发现和解决潜在设备故障问题。通过红外热成像技术精准监测电气连接部位的发热情况，在故障发生前及时更换或修复部件，以预防电气故障并保障设备运行的稳定性。而且设备稳定运行，还可以减少设备故障停机维修带来的发电量损失，为发电系统稳定运行提供坚实保障^[2]。

（三）降低维护成本

预防性维护强调故障发生前对机组设备检修和维护，尽管需要一定的资源和资金投入，但长远角度来看，却可以大幅度降低设备总体维护成本。机组设备一旦出现故障，往往需要紧急抢修，所消耗的成本费用较高^[3]。与之相比，预防性维护可以及早

发现磨损严重的零部件，及早修复或更换，其成本远远小于设备故障维修成本，延长设备使用寿命，使得维护成本进一步缩减。

二、风力发电机组设备故障类型和原因

（一）发电机故障

发电机长时间运行中，绕组绝缘材料由于温度过高、潮湿等因素侵蚀，出现不同程度磨损、老化，绕组绝缘性能下降到一定程度后，电流无法正常流通，诱发短路故障^[4]。对于温湿度较高的沿海地区，空气中盐分含量高，绕组绝缘材料腐蚀问题严重，大幅度增加了绕组故障几率。部分有刷发电机的电刷和滑环接触紧密，滑动摩擦传输电能，随着时间推移，电刷磨损程度随之增加，与滑环的接触面积反向减小，接触电阻变大导致发热问题严重，威胁发电机输出电流和电压。发电机组的轴承由于污染颗粒入侵，润滑性能下降或轴向载荷分布失衡等因素影响下产生振动，温度升高到80℃，最终轴承失效。另外，转子偏心故障，由于安装公差超出标准，联轴器对重失效或是磁拉力失衡等因素存在，使得电磁转矩脉动幅值显著增加，诱发转子偏心故障^[5]。

（二）叶片故障

长期处于交变载荷作用下，叶根部位承受弯曲应力较大，一旦叶片承受应力超出材料疲劳极限值，叶根可能产生裂纹，随着时间推移逐渐延伸扩展。叶片制造环节由于工艺、材料缺陷等因素影响，树脂固化不完全，叶片纤维铺设不规范等，同样会降低叶片结构强度^[6]。叶片裂纹如果发现不及时在风里持续作用下，叶片裂纹随之扩展，超出可承受载荷后断裂。风力发电机组遭受雷击、强风等恶劣条件影响，可能导致叶片断裂，造成更为严重的安全事故，如图1。除此之外，风力发电机组设备位于沙尘较大区域，叶片表面受到沙尘颗粒磨损冲击，表面涂层磨损逐步加剧，年均质量损失超过200g/㎡，进而侵蚀本体材料；昆虫附着层厚度超过3mm，破坏叶片的层流边界层。由于叶片表面磨损使得粗糙度增加，空气动力学性能下降，风能捕捉效率受影响下，机组整体发电功率大幅度下降。

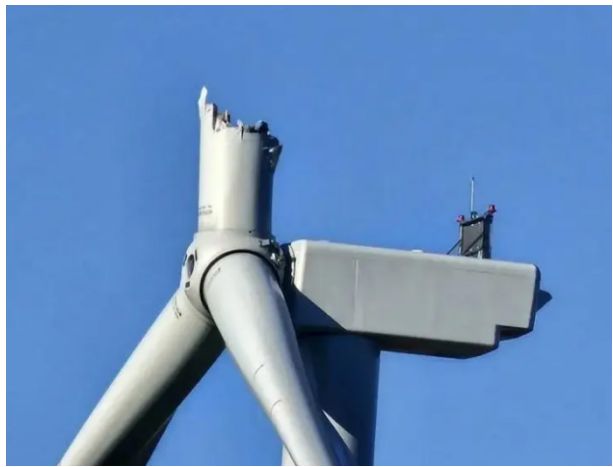


图1 风力发电机组叶片断裂

（三）控制系统故障

风力发电机组控制系统故障，表现在硬件故障和软件故障两

方面。

（1）硬件故障。控制系统需要根据各类传感器监测设备运行状态，包括温度传感器、风向传感器和风速传感器等，反馈各项数据参数到控制系统。控制系统在户外环境下运作，传感器容易受到电磁干扰、机械振动以及温湿度因素影响，导致传感器精度下降^[7]。例如，长期处于沙尘较大的区域，风速传感器被沙尘磨损可能变形，监测的风速数据精度下降；温度传感器受水分侵蚀，测量精度下降，传输错误信号。由于传感器采集数据存在偏差，影响控制系统正确决策，威胁风力发电机组运行安全。控制系统中包含多个部件，控制器作为核心部件，主要用于收集传感器各项数据，并发送控制指令。长期处于高符合运行状态，受静电、热量等因素影响，控制器内部芯片、集成电路等电子元件可能损坏，影响控制系统稳定运行。

（2）软件故障。控制系统运作离不开软件程序支持，前期软件程序开发时，不可避免存在程序漏洞，后期风力发电机组运作中可能在多种因素联合作用下触发漏洞，一旦系统出现异常问题，则会影响机组稳定运行。例如，若软件算法中边界条件处理不合理，当机组运行参数接近边界值时，可能触发软件故障^[8]。

（四）电缆故障

电缆在安装和维护环节，由于工作人员操作不当可能挤压电缆，导致电缆导体和绝缘层变形损害。施工现场基础挖掘时由于电缆保护不到位，同样可能受机械压力作用下导致电缆破损。风力发电机组运行期间，由于摆动和振动等因素影响，使得各部位连接电缆发生弯曲，长期处于动态应力作用下，电缆绝缘层和导体会疲劳加剧，内部应力集中，超出可承受限度后就会断裂，诱发电缆故障^[9]。

三、风力发电机组设备的预防性维护策略

（一）加强设备状态监测

风力发电机组长期处于盐雾腐蚀、高低温以及动态载荷冲击等复杂环境，传统定期维护模式无法全面覆盖发电机组设备关键部件，存在很多隐蔽部件漏检。加之固定周期维护与部件老化速度不匹配，可能存在维护不足或是维护过剩等问题。鉴于此，应加强设备状态监测，建立多维度传感网络，具体监测项目如表1所示。

表1 预防性维护状态监测指标

监测项目	监测内容	监测方法
温度监测	齿轮箱和发电机等温度	温度传感器
振动监测	齿轮箱、叶片、轴承、发电机等	振动传感器
油液监测	油液质量以及磨损颗粒	油液分析

（1）温度监测。温度监测，在发电机组绕组、轴承、齿轮箱等容易发热区域安装温度传感器，实时监测部件温度变化。如，发电机组绕组温度过高，其原因可能是绕组短路、散热性能差以及过载运行等因素导致。因此，可以设定温度报警阈值，超出标准后系统即可自动发出预警信息，运维人员应立足实际情况，检查电气故障、通风系统等，通过有效措施解决温度异常问题，避

免设备严重受损。采用红外热像仪，可以精准检测发动机绕组热点情况，如果温度异常升高达到15℃以上，则要及时干预处置^[10]。

(2) 振动监测。风力发电机组状态监测中，振动监测是一项核心监测指标，将振动传感器安装在主轴、齿轮箱以及发电机等位置，实时收集设备异常振动感信号，频率响应范围0.5Hz ~ 20kHz范围，发现异常情况及时反馈给工作人员。使用专业振动分析软件对振动信号处理，即可精准定位故障位置，了解故障严重程度，为后续故障维护提供支持。

(3) 油液监测。油液监测是面向液压系统、齿轮箱等使用润滑油的设备，采集油样，经过铁谱分析或光谱分析后，精准监测油液中的金属磨粒成分、含量，以及油液酸碱度、黏度以及含水量等。使用光谱分析技术，精准检测油液中各类金属元素含量，一旦齿轮箱齿轮磨损，将导致油液中的铜、铁等元素含量增加；铁谱分析能可视化展现磨粒大小、形状以及分布情况等，借此反馈使用润滑油设备的磨损程度。油液监测能够帮助维护人员掌握设备内部零部件磨损程度，及时修复或更换，从而避免润滑不良导致设备故障。

(二) 定期检修与维护

风力发电机组设备运行中，为降低设备故障概率，延长其性能和使用寿命，定期检修与维护工作至关重要。每月每季度检查风力发电机叶片内外部情况，发现叶片裂缝、腐蚀等损伤缺陷，组织人员及时维修缺陷。调节机组叶片平衡，提高风机运转稳定性，避免叶片不平衡诱发噪声、振动，延长设备使用寿命。齿轮箱定期检修中，重点检查齿轮箱的润滑性能，使用内窥镜检查设备内部齿轮磨损或其他油污等问题，便于技术人员及时补充、修复、更换，紧固松动的电器接头，提高齿轮性运行稳定性。年度检修，重点检查机械设备性能，包括主轴扭矩大小、叶片动平衡、电气系统调试等，保证各项指标合乎标准，及时发现和解决

潜在安全隐患。

(三) 建立故障预测模型

为了实现风力发电机组设备故障隐患提前预测、提前解决，需要运用机器学习技术、大数据技术，建立故障预测模型，从而实现故障问题的预防性维护。因此，工作人员要手机设备状态监测数据、机组设备运行环境数据以及历史故障数据等，采用数据挖掘算法，摸索数据潜在联系，完善故障预测模型。

故障预测模型主要包括数据层、算法层。期货总数据层包括SCADA数据、气象数据、CMS振动数据；算法层包括随机森林（分析叶片的损伤类型、程度）、LSTM网络（预测齿轮箱使用寿命）。模型采用交叉验证方式，K-fold（K=5），提高故障预测模型的泛化能力。

(四) 加强技术人员专业培训

定期组织技术人员参加专业培训活动，掌握风力发电机组运行原理、结构、性能，并掌握设备的维护维修工艺以及故障诊断等技术。条件允许下，邀请专家和技术人员组织讲座活动，分享前沿技术动态以及运维经验，组织技术人员前往厂家实地学习，了解设备制造工艺、内部结构，提高维修技能水平。内部定期组织技术交流和案例分享活动，全面提升团队整体技术水平，为风力发电机组设备运行安全保驾护航。

四、结论

综上所述，风力发电机组运行环节恶劣，设备容易受到外部环境干扰影响，出现不同程度的磨损和老化，如果忽视这些问题可能诱发严重的安全问题。故此，实行预防性维护，根据设备性能组织人员及早检修和保养，能够大幅度降低设备故障几率，为风力发电机组设备安全稳定运行提供坚实保障。

参考文献

[1] 杨秋利. 风力发电机组变桨系统的分析与研究 [J]. 科学中国人, 2014, (20): 47.
[2] 石港, 王伟, 雷志鹏, 等. 风力发电机组状态监测与故障诊断研究综述 [J]. 山西电力, 2023, (01): 43-46.
[3] 李绵基. 海上风电场风力发电机运行维护策略研究 [J]. 光源与照明, 2022, (12).
[4] 王双林. 海上风电场风力发电机状态监测与运行维护策略 [J]. 海峡科学, 2024, (08): 48-51.
[5] 倪铭, 王玮玮. 风力发电机组火灾事故分析与消防处置对策研究 [J]. 消防界 (电子版), 2024, 10 (13): 104-106.
[6] 张轶东. 风电场中风力发电机组运行故障与维护 [J]. 电气技术与经济, 2024, (06): 328-329+337.
[7] 李沿君. 风力发电机组状态监测和故障诊断技术研究 [J]. 光源与照明, 2024, (02): 100-102.
[8] 李刚, 齐莹, 李银强, 等. 风力发电机组故障诊断与状态预测的研究进展 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (04): 180-191.
[9] 范贵华, 黄文君, 赵红飞. 风力发电机组液压系统常见问题与维护策略 [J]. 河南科技, 2023, 42 (20): 49-52.
[10] 胡超波. 风电场中风力发电机组运行故障及维护 [J]. 仪器仪表用户, 2023, 30 (09): 110-112+31.

水利工程施工中土石方作业技术的理论与实践

王细金

南昌市新建区河道圩堤维护中心, 江西 南昌 330000

DOI:10.61369/WCEST.2024090008

摘 要 : 在现代水利工程建设过程中, 土石方作业既是工程实体形成的物质载体, 又是决定项目经济指标的关键变量。作为连接设计蓝图与实体建筑的转化界面, 该工序承载着地形重塑、地基处理、防渗体系构建等多重功能目标。随着我国水资源配置工程向地质条件复杂区域延伸, 传统施工范式正面临岩土力学特性突变、生态保护红线约束、极端气候频发等复合挑战, 这种现实矛盾倒逼着施工技术体系必须实现从经验驱动向数据驱动的模式转换。

关 键 词 : 水利基础设施; 土石平衡; 机械联合作业; 地质适配性; 过程控制

Theory and Practice of Earthwork Operation Technology in Water Conservancy Engineering Construction

Wang Xijin

Nanchang New District River embankment Maintenance Center, Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract : In the construction of modern water conservancy projects, earthwork and rock excavation serve as both the material foundation for the formation of the project's physical structure and a critical factor in determining its economic performance. Acting as the interface between design plans and the actual construction, this process is responsible for multiple functions, including terrain reshaping, foundation treatment, and the establishment of waterproofing systems. As China's water resource allocation projects expand into areas with complex geological conditions, traditional construction methods are facing challenges such as sudden changes in soil mechanics, ecological protection red lines, and frequent extreme weather events. These real-world challenges compel the construction technology system to shift from being data-driven to being experience-driven.

Keywords : water conservancy infrastructure; earth and rock balance; mechanical joint operation; geological adaptability; process control

二十世纪后期大规模水利建设积累的土石方施工经验, 在应对常规地质条件时已形成相对稳定的技术路径。然而当工程选址逐步向喀斯特地貌区、强震断裂带、深厚覆盖层区域推进时, 既有的土方开挖系数、石方爆破参数、压实度控制标准等基础数据频繁出现系统性偏差^[1]。这种偏差不仅造成施工成本的非线性增长, 更潜藏着边坡失稳、基础沉降等重大风险。特别是近年来绿色施工理念的强制性推广, 要求作业过程必须同步解决弃渣场生态修复、施工扬尘动态控制等新命题, 这使得传统以机械效能最大化为导向的施工组织模式面临多维重构压力^[2]。在此背景下, 如何建立兼顾施工效率与风险防控的技术决策系统, 已成为制约现代水利工程高质量发展的瓶颈问题^[3]。

一、水利工程施工中土石方作业技术应用的基础理论

(一) 岩土力学特性与施工荷载耦合机理

土石方作业技术的理论根基建立在岩土材料力学响应与施工荷载的动态平衡之上, 不同地质构造中的土层与岩体在挖掘、运输、压实过程中呈现差异化的应力应变特征, 这种材料属性与外部作用力的相互作用直接决定了施工工艺的选择边界^[4]。岩土体的内摩擦角、粘聚力、渗透系数等固有参数构成了施工可行性分

析的基准指标, 在制定开挖边坡角度或填筑碾压方案时, 必须将土石混合料的颗粒级配、含水率波动范围纳入力学计算模型, 特别是在遭遇断层破碎带或软弱夹层区域时, 需要依据莫尔-库仑强度准则重新评估临时支护结构的承载能力。施工机械的动荷载传递路径与岩土介质蠕变特性的匹配程度同样是理论研究的重点领域, 当振动碾压设备的激振频率接近土体固有频率时可能引发共振效应, 此时需通过调整行进速度与碾压遍数形成新的能量耗散机制^[5]。

（二）土石方量动态平衡与调配路径优化模型

工程区域内土石方的挖填平衡不仅涉及几何体积的简单匹配，更需要建立考虑运输损耗、压实系数、临时堆存损耗等多因素影响的动态计算体系。基于三维地形曲面拟合技术生成的数字高程模型，可将地表起伏特征转化为土方量的空间分布函数，配合地质勘探数据中的岩层产状信息，能够预判不同施工阶段的开挖难度系数与石方占比变化规律^[6]。运输路径优化理论需要综合机械转向半径、爬坡能力、重载下坡制动性能等参数，运用图论中的最短路径算法构建包含时间成本与燃油消耗的多目标规划模型。

（三）地质环境与施工工艺的适配性判据体系

不同成因类型的地质单元对土石方作业技术存在选择性适应的内在规律，冲积平原区的粉细砂层与冰川堆积区的漂石层在施工工艺选择上表现出截然不同的技术路线。第四纪松散沉积物的空间变异性要求施工前必须建立基于概率统计的地质参数置信区间，通过蒙特卡洛模拟预测潜在的地质异常体对施工进度的影响概率。在喀斯特地貌区实施爆破作业时，溶洞发育密度与地下水位波动幅度的耦合作用会改变爆破冲击波的传播衰减规律，这需要修正传统的爆破参数计算公式中的能量分配系数^[7]。针对高陡边坡开挖过程中的卸荷回弹现象，地应力测试数据与岩石质量指标的结合分析能够预警潜在滑动面的形成趋势，进而指导分级开挖高度的确定原则。

（四）施工过程控制的信息熵理论应用框架

土石方作业系统的有序性程度可通过信息熵值进行量化表征，从土料开采、运输中转、摊铺整平到最终压实的每个环节都存在能量耗散与信息损失。运用熵增原理分析施工机械群组的协作效率，能够识别装载机与自卸卡车匹配数量失衡导致的系统混乱度上升现象，据此建立的设备配置优化模型可降低非生产性等待时间的发生概率。质量检测数据的离散程度反映施工过程控制水平，通过计算压实度检测值的香农熵指数，可动态评估碾压工艺参数的合理性并及时触发调整机制^[8]。在复杂气候条件下，降雨强度与蒸发量的信息熵变化会改变土料含水率的稳定状态，基于马尔可夫链的预测模型能够提前预判需要进行防雨覆盖作业的关键时段。

二、水利工程施工中土石方作业技术应用时的常见问题

（一）地质勘察数据与施工动态的匹配偏差

土石方作业实施阶段频繁出现前期地质勘探成果无法准确反映施工揭露地质条件的现象，勘察报告中标注的岩土层分布规律、地下水位线高程等关键参数与开挖面实际揭露情况存在系统性偏离，这种数据断层导致施工方案中的边坡支护强度、排水沟布置密度等设计要素失去指导价值。勘探点布设间距过大时难以捕捉断层破碎带或软弱夹层的局部突变特征，当挖掘设备进入未探明区域后，原先确定的爆破孔距、装药量等参数往往引发超挖或欠挖问题，继而造成边坡轮廓线超限修正的连锁反应^[9]。施工

期间地下水位的季节性或突发性变化未被及时纳入动态监测体系，导致基坑降水方案中的井点布置模式与真实渗流场产生显著偏差，这种水文地质条件的实时演变若未被施工方有效捕获，极易诱发流砂或管涌事故。岩土体物理力学指标的实验室测定值与现场原位测试结果之间的统计差异未被纳入施工风险预警模型，使得填筑体压实度控制标准与真实土料性质之间出现适配性错位。

（二）施工机械群组协同作业效率损耗

土石方施工机械配置方案常出现单机性能参数与群体作业需求不匹配的问题，装载设备斗容与运输车辆厢体容积的整数倍关系未达成最优比例，导致装车作业时产生等待卸料或空载循环的无效工时。不同功率等级的压实设备在同一作业面的交替使用缺乏振动参数衔接机制，不同型号压路机的激振力幅值差异引发填筑层内部形成刚度突变界面，这种隐性质量缺陷往往在后续沉降观测中才被察觉。机械转场路线的平面交叉设计未充分考虑设备转弯半径与爬坡角度的物理限制，自卸卡车在狭窄工作面调头时频繁发生倒车拥堵，造成燃油效率下降与工期延误的双重损失^[10]。操作手技能水平参差不齐导致同类机械的作业效能波动幅度超过工艺允许范围，推土机铲刀切入深度控制偏差引发原地表植被土与下层填料的非预期混合，这种人为因素引起的材料污染问题直接降低土石方利用率。

（三）土石方调配路径的时空冲突

施工平面布置图中规划的土方运输路线在实际操作中常因交叉作业干扰失去通行效率，混凝土搅拌车与弃渣运输车的路径重叠区域形成周期性交通瓶颈，这种未预见的路权冲突使得运输机械的有效作业时间占比下降至理论值的60%以下。临时堆土场容量设计与开挖进度之间缺乏弹性缓冲空间，雨季来临前突击转运土方时发生的机械密集排队现象，暴露出静态调度模型无法适应天气突变引发的作业强度陡增需求。填筑区不同高程工作面的进料优先级未建立动态调整规则，高处作业面的供料中断与低处作业面的集料过剩同时存在，这种空间维度上的资源配置失衡导致压路机不得不反复碾压局部过厚铺料层。石方爆破区与土方回填区的工序衔接存在时间窗口计算误差，爆破后石料解小工序未能在运输机械到达前完成备料任务，致使装载机面临“等料作业”的非正常工况。

三、水利工程施工中土石方作业技术的实践策略

（一）地质数据动态融合与施工参数实时修正机制

建立基于多源信息融合的地质模型更新体系，将施工揭露的地层界面产状、裂隙发育程度等实时数据与原始勘察资料进行空间叠加分析，通过地质雷达扫描与无人机倾斜摄影技术的联合应用，构建可动态扩展的三维地质信息数据库。针对开挖过程中遇到的未探明软弱夹层，开发嵌入式传感器网络实时监测岩土体应力释放速率，结合有限元反演算法快速修正支护结构的锚杆间距与喷射混凝土厚度参数。实施地下水位的分布式光纤监测方案，在降水井群中部署压力变送器阵列，依据渗流场重构结果自动调

节水泵启停组合模式。当填筑料含水率受天气影响超出击实试验确定的最优区间时，启动级配改良剂自动掺混装置，通过土石料输送带上的在线含水率检测仪触发石灰或水泥的定量添加指令。爆破作业参数库引入机器学习迭代优化功能，每次爆破后收集岩石块度分布数据与设计值的偏差量，自动调整后续孔网密度与装药结构计算系数。

（二）施工机械群组效能协同提升方案

构建机械性能参数与施工场景的匹配度评估矩阵，根据运输距离、爬坡角度、转弯半径等工况特征，建立装载机斗容与自卸卡车载重量的黄金分割比例模型，通过离散事件仿真预演不同设备组合下的作业流程瓶颈。开发振动压路机多机协同控制系统，利用北斗定位模块实时追踪相邻设备的碾压轨迹，自动生成激振力梯度变化方案以避免刚度突变界面形成。针对狭窄作业面的机械调度难题，设计基于 UWB 定位技术的动态路权分配算法，当自卸卡车进入弯道区域时，系统自动推送减速指令并激活两侧防撞雷达的监测频次。建立操作手技能数字画像系统，通过驾驶室内的压力传感器与操纵杆位移监测装置采集操作行为数据，对推土机铲刀切入深度偏差超过阈值的情况触发实时纠偏指导提示。

（三）土石方全流程智能调度与路径优化

开发基于数字孪生技术的土石方调配仿真平台，将实时开挖进度、运输车辆位置、堆料场库存量等数据映射到虚拟施工场景中，通过多智能体协同算法预测未来两小时内的机械冲突热点区域。构建运输路径动态权重评估模型，综合考虑路面扬尘浓度、轮胎附着系数、急弯陡坡分布等动态因子，生成包含安全风险系数与燃油经济性指标的实时导航路线。针对交叉作业导致的交通堵塞问题，设计分时分区通行控制策略，根据混凝土浇筑进度与

土方开挖强度的时空分布特征，动态划分不同机械群组的通行时间窗口。建立填料需求预测与供应匹配系统，利用填筑区高程变化速率与碾压设备行进速度的耦合关系，提前触发特定堆料场的备料指令。

（四）全过程质量监控与工艺参数自适应调整

部署压实度连续检测系统，在压路机钢轮内部嵌入介电常数传感器，通过土体电磁特性变化实时反演压实度分布云图，当检测值波动超过预设阈值时自动调整振动频率与碾压遍数组合参数。构建基于机器视觉的摊铺平整度监测网络，利用布置在摊铺机两侧的高清摄像头捕捉填料扩散形态，通过边缘计算设备即时计算横向坡度偏差并生成刮板高度调节指令。开发含水率闭环控制系统，在取土场、运输车厢、摊铺现场分别设置微波含水率检测节点，当检测到填料含水率超出最优区间时，联动现场雾炮设备实施精准加湿或启动快速晾晒作业区。建立碾压轨迹智能规划算法，根据填筑层厚度与边界几何特征自动生成无重复无遗漏的碾压路径，通过压路机群组间的通信模块实现碾压带重叠宽度的毫米级控制。

四、总结

水利工程土石方作业技术经过理论与实践的双向迭代，已逐步形成覆盖地质适配、机械协同、路径优化与质量控制的完整技术体系。通过构建跨学科交叉的技术创新平台，推动土石方作业从机械化向智能化、从经验化向知识化的根本性转变，为新时代水利工程高质量建设提供坚实的技术支撑。

参考文献

[1]赵风海. 水利水电工程施工土石方调配方法及其应用 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13 (05): 177-180.
[2]史永鹏. 水利水电工程施工土石方调配方法及其应用 [J]. 四川水泥, 2021, (07): 145-146.
[3]庄桂亮. 水利水电工程施工土石方调配方法及其施工工艺 [J]. 科技创新与应用, 2021, (11): 127-129.
[4]李坤. 水利水电工程中土石方工程施工技术的研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2018, (44): 212.
[5]骆荣江. 水利工程施工土石方调配方法及其应用 [J]. 建材与装饰, 2017, (07): 270-271.
[6]韩朝胜. 水利水电工程施工土石方调配方法及其应用 [J]. 建材与装饰, 2016, (39): 281-282.
[7]胡谊国. 水利工程施工中的土石方施工技术探析 [J]. 科技展望, 2016, 26 (17): 40.
[8]林江莉. 水利水电工程施工土石方的调配与计算方式探析 [J]. 中国水运 (下半月), 2016, 16 (10): 192-193.
[9]孙福权. 某水利工程施工场内交通运输系统研究 [D]. 天津大学, 2016.
[10]邢磊磊. 论水利工程施工过程中的质量控制措施 [J]. 山东工业技术, 2015, (21): 80.

生态恢复在水土保持中的应用与效果评估

张俊奇

嵩县白云山水利服务中心，河南 洛阳 471400

DOI:10.61369/WCEST.2024090009

摘 要： 生态恢复指以人工干预的方式将退化的生态系统恢复到被破坏前状态的过程。对水土流失地区而言，植被恢复是生态恢复的关键。水土流失地区存在土层薄、土质差、微生物活动性差等问题，植被自然恢复困难而缓慢，人工恢复是促进矿区植被恢复的必然原则。文章基于此，围绕准备工作的细致性、土壤处理的针对性、生态恢复技术的适宜性、植被选择的科学性、载种技术的合理性、养护方式的全面性、管理体制的科学性七个方面，探讨了生态恢复在水土保持中的应用策略，并围绕土壤的理化指标，提出了效果评估策略。

关 键 词： 生态恢复；水土流失；水土保持

The Application and Effect Evaluation of Ecological Restoration in Soil and Water Conservation

Zhang Junqi

Song County Baiyunshan Water Conservancy Service Center, Luoyang, Henan 471400

Abstract： Ecological restoration refers to the process of restoring degraded ecosystems to their pre-destruction state through artificial intervention. For areas affected by soil erosion, vegetation restoration is the key to ecological restoration. In areas prone to soil erosion, there exist problems such as thin soil layers, poor soil quality, and poor microbial activity. The natural recovery of vegetation is difficult and slow. Artificial restoration is an inevitable principle for promoting the recovery of vegetation in mining areas. Based on this, this article explores the application strategies of ecological restoration in soil and water conservation from seven aspects: the meticulousness of the preparatory work, the pertinence of soil treatment, the suitability of ecological restoration techniques, the scientific nature of vegetation selection, the rationality of seed carrying techniques, the comprehensiveness of maintenance methods, and the scientific nature of the management system. Moreover, it proposes effect evaluation strategies around the physical and chemical indicators of the soil.

Keywords： ecological restoration; soil erosion; soil and water conservation

引言

两次工业革命以来，人类改造、征服自然的能力大为提升，对自然的破坏也日益严重，并导致了严峻的生态危机。1987年，世界环境与发展委员会（WCED）提出可持续发展理念，并将其定义为：一种既满足当代人的需求，又不对后代人满足其自身需求的能力构成危害的发展理念^[1]。加强生态环境治理，推进生态文明建设，是贯彻落实可持续发展理念的必然要求。2022年，党的二十大报告提出“中国式现代化”的重要概念，并将“人与自然和谐共生”作为中国式现代化的重点，为生态文明建设指引了方向^[2]。水土流失是当前主要的生态问题之一，不仅会造成土地退化，耕地减少，威胁粮食安全，削弱生态系统的调节功能，加重旱灾损失和面源污染，对生态安全和饮水安全构成严重威胁。生态恢复在水土保持中具有良好的作用，是破解水土流失问题的有效手段。

一、生态恢复在水土保持中的应用策略

系统完备的修复方案，不仅能够为生态恢复提供周密的指导，也能为新时期生态文明建设积累经验。

1. 准备工作的细致性。准备工作主要包括植被栽种时间的选

择、树坑的挖掘等。我国幅员辽阔，纵跨49个纬度，南北地区的气候环境差异极大。应根据区域气候情况，合理选择移植时间。比如，对北方地区而言，由于其纬度较高，秋冬季节较为寒冷，不适合树木移植，春夏两个季节，特别是春季，是树木栽种的适宜季节。对南方地区，特别是广东、广西、海南等热带地区，秋

作者简介：张俊奇（1989-），男，汉族，河南洛阳人，助理工程师，本科，主要从事水土保持工作。

冬季同样是树木移植的理想季节，特别是柑橘类等果树，低温环境下能够进入休眠期。不同树种的最佳移植季节也有一定的差异性，对针叶树木，如杉树、柏树、松树等，早春季节是其最佳移植季节。早春季节温暖湿润的环境，能够促进树木根系生长。对槭树、杨树、樟树等裸根阔叶树木，除早春外，秋季也是较为理想的移植季节。一般情况下，春天是最为理想的挖坑季节。春天刚刚经历了严寒的冬季，土壤尚未完全解冻，表层土较为松软，能够放入挖坑设备，再往下，则土壤较为坚硬，仍处于紧密严实的状态。如此，既能保证挖坑工作的有序开展，也能减少土壤脱落的情况。树坑的大小要和树木土球的大小对接起来，比树木土球略大。如此，土球能够完整落入坑中。对周围的缝隙，则可以进行填实、碾压处理。

2.土壤处理的针对性。土壤是植被成长的“摇篮”，不仅为植被的底盘生长提供养分，且能对植被的水分情况进行调节。因此，做好土壤处理，就成为生态恢复前的必备工作。应做好植被生长习性、周围环境的观察工作，根据植被的实际情况，选择适宜的环境、土壤，尽可能减少植被栽种后的不适应性，提高成活率。土壤处理中要避免一个误区，即土质越好，越适合植被成长。事实上，对长期处于恶劣环境中的植被而言，它们已经具备一定的土壤抵抗性，黏土、硬土等土质，反而更适宜于植被生长，也能保证植被移植后的成活率。对此类植被，可通过在土壤中增加石头、瓦片的方式，提高其土壤适应性。对土质薄以及透水性不佳的土壤，要进行换土处理，以有机质含量高、透气性良好的土壤，更换原来的土壤。

3.生态恢复技术的适宜性。生态恢复的方法主要有自然恢复法、人工促进自然恢复法以及人工重建法三种，生态恢复法主要依靠自然的力量，让受损的植被在不受人为干扰的情况下，通过自身的繁殖、演替等过程逐步恢复，适用于自然条件较好、干扰程度较轻的区域。人工促进自然恢复法以人工干预的方式促进植被的恢复进程，适用于遭受中度破坏的生态系统，或者自然条件较差但经过适当改善后可以恢复的区域。人工重建法通过人工种植、移栽等方式，直接建立新的植被群落，适用于自然恢复困难或需要快速恢复植被的区域。应根据植被破坏情况以及生态系统自我恢复的潜能，采取适宜的生态恢复技术。

4.植被选择的科学性。植被的选择需要综合考虑植被的存活率以及经济性^[9]。对此，本土树种是最佳选择。本土树种已经适应了当地生态环境，栽种中，不会出现环境适应的问题，同时，本土树种的运输成本较低，能够有效降低植被修复的成本。“两山”理论下的生态恢复，不仅注重生态环境的治理，也要求通过生态环境的治理，使生态成为重要的经济资源，创新区域的发展模式。本土树种作为地区自然生态文化的独特载体，能够强化修复治理的地域性，为区域的创新性发展，如生态旅游等提供区域化的自然景观。

5.栽种技术的合理性。植被栽种是生态恢复的重点环节，栽种技术的合理性，不仅关系到植被的存活率，对生态恢复的效果也有着巨大的影响。以树木移植为例，大树的移植，能够有效促进生态恢复，涵养水土，同时，大树移植也是生态恢复的难点，

需要从多个方面提高技术水平。以树木的起吊为例，大树的起吊方法主要有夹板起吊、棕绳起吊、裸土起吊，不同的起吊方法有着不同的特点和适用范围，对树木干径在20cm以内，且根系较为发达的树木而言，裸土起吊方法是较为适宜的方法。当然，裸土起吊方法对移植树木的土球质地以及重量也有一定的要求，需要移植树木的土球质地较硬，且重量在2t以内。与其他两种方法相比，裸土起吊方法最为主要的优势在于效率高、成本低。裸土起吊方法在树木的起吊、装卸以及栽植等作业中，无需对树木进行特殊处理，极大地缩减了树木移植的环节，也减少了树木移植的费用。裸土起吊方法的缺点则在于成活率较低，因为其未对树木根系采取必要的保护措施，移植树木易因根部损害等问题死亡。对一些不太名贵，且生长力较为顽强的树木，如合欢、法桐以及中槐等，可以采用裸土起吊的方法，压缩树木移植的总体成本，提高树木移植的经济效益。

6.养护方式的全面性。植被栽种后，后续的养护管理同样极为重要。养护方式是否全面，直接关系到修复工程的整体效益与持续效益。比如，水肥管理。树木栽种后，应在24小时内进行透浇水一次。夏季高温，更应在栽种后的第一时间透浇水。一般而言，透浇水需要进行三次，第二次、第三次透浇水的时间，宜安排在栽种后3-5天、7-10天时。三次透浇水不仅可以给树木根部补充充足的水分，也能促进树木根系与土壤的紧密结合，促进新根发育，降低树木死亡风险。考虑到频繁浇水会导致烂根的问题，输液也是树木水肥管理的有效措施。对茎干在6cm以上的树木，可采用吊针营养液输液，保证树木成长所需的水分及营养物质。又如，病虫害防治。树木栽种后，易出现病虫害，而病虫害一旦处理不到位，轻则导致枝叶枯黄、树木落叶，重则导致树木死亡。因此，要积极做好移植树木的病虫害防治工作。对尚未感染病虫害的树木，可在根部涂抹石灰或喷洒抗病虫害药物，来预防病虫害。对已经感染病虫害的树木，应根据树木的树种、特性以及病虫害的类型，选择高效、低毒的化学药剂，如氰戊马拉、溴氰菊酯、阿维菌素、吡蚜灵等。除化学防治措施外，生物防治措施也是树木病虫害防治的常用措施。并且，与化学防治措施相比，生物防治措施具有污染更低、环境友好性更强的优点。当前，常见的生物防治措施主要有微生物防治措施、寄生性天敌防治措施以及捕食性天敌防治措施三类。

7.管理体制的科学性。生态恢复同样要构建配套的管理机制，以协调各项资源，确保植被修复工作的顺利进行，如管理层级与分工、法律法规、资金投入等。

二、生态恢复在水土保持中的应用效果评估

土壤是生物生存、繁衍的物质基础，土壤环境评价，也是生态恢复在水土保持中应用效果评估的重点内容。改革开放以来，随着工业化、城镇化水平的不断提升，我国土壤环境污染现象加剧，不少地区土壤出现酸化、盐碱化、重金属超标的现象。随着我国环保力度的不断加大，土壤环境影响因素评价工作得到了有效的开展，2018年，生态环境部发布了《环境影响评价技术导

则——土壤环境（试行）》，为土壤环境影响评价工作的规范化、标准化提供了有效的参照。环评工作中，因子通常较多，尤其是污染较为重要的地区，污染因子多达十几个甚至几十个。土壤环境影响评价显然不可能将所有因子均纳入其中，因为这样不仅会极大地增加环评工作的负担，也容易导致主次不分现象，无法准确地反映出土壤环境的污染状况。事实上，一些污染因子在土壤环境承载力之内，并不会破坏土壤生态环境。土壤环境评价主要围绕土壤的理化性质开展。

1. 化学性质。从生态恢复的角度而言，土壤化学性质评价包括有机质、全氮、有效磷、速效钾四个因子。有机质是土壤中含碳的有机化合物的总称，包括动植物残体、微生物体及其分解和合成的物质。有机质不仅可以改善土壤结构，也能增加土壤保水保肥能力，调节土壤温度和酸碱度。有机质含量越高的土壤，越能为植被生长提供良好的基质，并提高植被根系对水分和养分的吸收能力。氮是植物生长必需的大量元素之一，对植物的茎叶生长、光合作用等生理过程起着关键作用。全氮是土壤中各种形态氮的总和，包括有机氮、无机氮两大类型。生态恢复中，氮素的缺乏，会导致植物生长缓慢，影响生态恢复的效果，而充足的全氮供应，则能显著促进植物光合作用，使植物快速增长，形成稳定的群落结构。磷对植物根系繁育以及开花结果等有着重要的影响，有效磷指的是土壤中可被植物直接吸收利用的磷形态，具体包括水溶性磷、吸附态磷等。生态恢复早期阶段，土壤中的有效磷含量越高。钾不仅对于植物的光合作用、碳水化合物代谢等生理过程有重要作用，也能增强植物的抗逆性。速效钾即土壤中可迅速被植物吸收利用的钾形态，有利于植被在不良环境条件下恢

复和生长。速效钾的缺乏会导致植物生长不良，降低植被的存活率。

2. 物理性质。与生态恢复相关的物理性质主要包括含水率、孔隙率以及 PH 值。从含水率的角度而言，含水率指土壤中所含水分的数量，通常以重量百分比或体积百分比来表示。土壤含水率是影响植被生长的关键因素，适宜的土壤含水率能促进植物根系的生长和发育，增强植物的水分吸收能力，有利于植被的快速恢复和生长。含水率偏低，会导致植物萎凋，降低植被的存活率。从孔隙率的角度而言，孔隙率指土壤中通气孔隙、持水孔隙的比率，对土壤内部水分的存储与渗透以及空气的流通有着重要影响。不同地区土壤的孔隙率有较大的差异性，黏质土壤孔隙率较小，但持水能力较强，沙质土壤孔隙率较大，但持水能力较弱。生态恢复中，需要根据土壤的实际情况，选择最为适宜的植被。从 PH 值的角度而言，PH 值指的是土壤的酸碱度，PH 值小于 7 为酸性，大于 7 为碱性，等于 7 为中性。不同的植被，对土壤酸碱度的要求有所差别，马尾松、云杉、冷杉、落叶松等植物，偏好酸性土壤，而柳树、白蜡树、黑杨树等植物，则偏好碱性土壤。植被选择中，应将土壤的酸碱度纳入到考虑范畴。

三、结语

以植被恢复为核心的生态恢复具有重要意义，不仅有助于恢复植被和生态系统，提高生物多样性，改善空气质量，调节气候，为周边地区提供生态服务，也能改善水土流失的问题，减少因生态破坏而引发的社会矛盾和纠纷，促进社会的和谐稳定。

参考文献

-
- [1] 联合国. 可持续发展目标 [EB/OL]. [2023-08-25]. <https://www.un.org/sustainable-development/zh/development-agenda/>.
- [2] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告 [N]. 人民日报, 2022-10-26(01).
- [3] 冯汉华, 曹翥畅, 鲍熙梅, 等. 干热河谷主要植被恢复树种干季光合光响应生理参数 [J]. 林业科学, 2010 (03): 68-73.

大中型水利工程征地补偿和移民安置实践与探讨 ——以淮河入海水道二期工程淮安市境内工程安置为例

王志林¹, 张双林², 王盟¹, 姜小青¹

1. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225007

2. 淮安市淮泗涵闸管理所, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/WCEST.2024090010

摘要： 基于淮河入海水道二期工程淮安市境内工程征地补偿和移民安置实践，本文以淮河入海水道二期工程淮安市境内工程征地补偿和移民安置实践为基础，探讨大中型水利工程征地补偿和移民安置以人民为中心、依法合规的实施流程。实践表明：通过对征收农民集体所有的土地给予公平、合理的补偿，对失地农民进行社会保障，对房屋及其附属物进行补偿安置，使被征地农民原有生活水平不降低、长远生计有保障是做好新时代征地移民安置工作的最好体现。

关键词： 征地补偿；移民安置；政策执行

Land Compensation and Resettlement Practices and Exploration in Large and Medium-Sized Water Conservancy Projects—Taking the Second Phase of the Huaihe River Estuary Project in Huai'an City as an Example

Wang Zhilin¹, Zhang Shuanglin², Wang Meng¹, Jiang Xiaoqing¹

1. Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute CO., Ltd., Yangzhou, Jinagsu 225007

2. The Management Office of Huai'an Huaisi Sluice, Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract： Based on the practices of land acquisition, demolition, and resettlement for the Huai'an section of the Phase II Huaihe River Seaward Waterway Project, this paper explores the people-centered and lawfully compliant implementation process for land compensation and resettlement in large and medium-sized water conservancy projects. The practice demonstrates that properly conducting land acquisition and resettlement in the new era entails: providing fair and reasonable compensation for expropriating collectively owned rural land; establishing social security systems for land-lost farmers; compensating for and resettling houses and attached structures; thereby ensuring that the original living standards of affected farmers are not lowered while securing their long-term livelihood.

Keywords： land compensation; resettlement; policy implementation

淮河入海水道二期工程通过扩挖深槽、扩建枢纽、加固堤防等措施，将洪泽湖防洪标准提升至300年一遇，降低100年一遇洪水位，并改善渠北排涝能力。工程横跨淮安、盐城两市，全长162.3公里，从洪泽湖二河闸至滨海县扁担港入海。

工程涉及搬迁安置4754户18361人，采用新建17个安置区与货币补偿相结合方式。生产安置54085人，其中16岁以下8821人领取生活补助，16岁以上45264人通过社保和就业培训安置。

淮安段66.6公里，征收集体土地40208亩，临时用地5500亩，搬迁1604户6929人，新建3个安置区。影响企事业单位21家，电力线路99.47公里，通讯线路416公里。生产安置34196人（16岁以下5210人，16岁以上28986人）。

一、征地补偿和移民安置

淮河入海水道二期工程在一期工程基础上实施扩挖扩建，主要对堤防范围内滩地、加高加宽堤防、调度河、建筑物及弃土区进行征收，并搬迁受影响居民。鉴于二期与一期工程涉及相同村组但补偿政策差异较大，淮安市及辖区政府提前统筹谋划，严格依据

移民安置规划大纲和初步设计，依法合规开展征迁工作。通过成立专门机构、引入第三方监督、制定实施方案、完成用地报批等系列措施，确保前期准备充分，既避免政策反复引发群众疑虑，又保障工程及时合法用地。

（一）实施准备

工程征地补偿和移民安置实施前期工作主要包括：1）建立

省、市、县三级管理机构，明确各级政府主体责任；2）项目法人依据审批规划与县（区）政府签订协议，细化职责、标准及进度；3）县（区）政府组建征迁机构，制定制度并培训人员；4）通过招标委托监督评估单位实施全过程监管；5）设计单位进行规划交底并拆分概算，确保依法执行；实地放样征迁红线，明确用地范围；6）项目法人申请建设用地并履行组卷报批程序，包括公告、调查、听证及签订补偿协议；7）编制审批《移民安置实施方案》作为工作依据；8）设立移民资金专户实行封闭管理。通过上述系统化的工作流程，可确保征地补偿和移民安置工作前期依法依规推进，为工程征迁顺利实施奠定坚实基础。

（二）征地补偿和移民安置实施

- （1）发布征收公告。用地获批后，县级政府十五日内发布公告，公布范围、时间，对未签约户作出补偿决定并组织实施。
- （2）组织宣传培训。开展政策宣传与工作人员培训，涵盖工程信息、征迁范围、时限、补偿标准、安置政策、资金管理等。
- （3）实物评估调查。在放样红线内，由专业机构评估受影响房屋、附属物、企事业单位资产；分解土地及地上附着物权属、数量到户，调查结果各方签字确认。
- （4）张榜公示复核。对实物实行“三榜公示”。有异议的，村级登记后，多部门现场复核并再公示（可多次），终榜拍照存档。
- （5）登记建卡存档。县级实施部门建立“一户一卡”，明确补偿项目、数量、标准、金额，监督评估审核后存档作为签约依据。
- （6）签订补偿协议。县或乡政府与受影响单位、住户签订协议，明确拆迁任务、时限、补偿标准、资金及安置政策。
- （7）移民资金拨付。项目法人按协议、计划和县级申请（附监督评估意见）拨付资金。实施机构按规支付，补偿支出须经监督评估审核后兑付。
- （8）房屋拆除清理。拆除房屋、迁移坟墓、砍伐树木（补偿归产权人，通常分期兑付）。迁改建项目按“三原”原则补偿自拆。清理完毕验收后交接用地。监督评估全过程。



- （9）搬迁生活安置。确定方式→落实用地→配套建设（路水电等）→农户自行建房过渡（获过渡费）→货币补偿（自愿申请）→困难帮扶→集镇安置（自愿置换）。
- （10）社会保障安置（生产安置）。按批复费用和规定（如苏政发[2021]87号），将16周岁以上失地农民纳入社保体系，16

- 岁以下足额支付安置补助费。
- （11）征迁安置协调：按“属地负责”原则分级处理群众反映问题。做好信访矛盾排查化解（力争不出县），依法妥善处理诉求，建立警地联席机制。
- （12）征迁信息报送。及时收集、整理、传递进度、质量、资金等实施信息，准确报送报表报告，支撑决策和用地服务。
- （13）征迁监督检查。接受监督评估、政府检查及上级稽查审计监察。对违规立即纠正，依法追究相关单位及人员责任（行政、刑事）。
- （14）移民资金审计。县级审计部门依据批复概算、协议、实施方案对移民资金进行专项审计并出具报告。
- （15）征迁安置档案。县级实施机构专人负责收集、整理、归档全过程真实档案，作为验收基础和依据。档案验收由县档案部门负责。
- （16）征迁安置验收。工作完成后，按程序组织县级自验、市级初验、省级终验。

二、征地补偿和移民安置的政策执行

（一）以人民为中心

“以人民为中心的发展思想”是习近平总书记于2015年10月党的十八届五中全会提出的治国方针理论。必须坚持以人民为中心的发展思想，把增进人民福祉、促进人的全面发展作为发展的出发点和落脚点，发展人民民主，维护社会公平正义，保障人民平等参与、平等发展权利，充分调动人民积极性、主动性创造性^[5]。征地补偿和移民安置涉及人民群众切身利益和基本权益，随着中国经济社会的发展，指导思想由“以人为本”提升到“以人民为中心”，充分体现了人民当家作主思想、群众路线思想、保障改善民生思想^[6]。

（二）法律法规执行

根据《中华人民共和国土地管理法》，国家战略性基础设施建设项目可依法征收集体土地，适用于能源、交通、水利、通信等重大公共事业。征收须经审批并由县级及以上政府公示实施，确保程序合法。补偿应保障农民生活质量，包括土地补偿、安置补助、青苗及附着物赔偿，并落实社会保障，所有款项须依法足额及时发放。

《大中型水利水电工程建设征地补偿和移民安置条例》中主要遵循以下原则：1）土地补偿和安置补助参照铁路等重大基建项目的补偿标准，具体金额按当地省级政府规定执行；2）地上青苗、零星树木等附属物的补偿同样依据省级标准；3）房屋等建筑物按原状或同等功能标准补偿，对特别困难的移民可额外补助；4）占用国有耕地参照耕地补偿标准，未开发利用的国有土地则不予补偿。

（三）江苏省和淮安市、区相关文件

《江苏省土地管理条例》、《省政府关于公布江苏省征地区片综合地价最低标准的通知》（苏政发〔2020〕44号）、《省政府关于印发江苏省被征地农民社会保障办法的通知》（苏政发〔2021〕87号）、《省政府办公厅关于转发省水利厅省发展改革委、省国土资源厅江苏省大中型水利工程建设征地拆迁和安置补偿意见的通知》（苏政办发〔2016〕106号）、《市政府关于公布淮安市所辖各县区征地区片综合地价执行标准的通知》（淮政发〔2020〕15号）和等有关规定。

淮河入海水道二期工程淮安市境内涉及淮安区、清江浦区、工业园区、洪泽区，均根据初步设计批准的移民安置规划与项目法人签订了《移民安置协议》，并编制了《征地补偿和移民安置实施方案》，经审查后报区级政府批准实施，确保被征地农民原有生活水平不降低、长远生计有保障。

三、征地补偿和移民安置的实践与探讨

（一）用地审批高效推进

淮河入海水道二期工程淮安市境内先导工程于2022年7月开工，用地834.85亩（国有水工建筑用地），创江苏省当年批复可研当年开工先例；2022年11月获批13854亩先行用地并开工，2023年5月总体初步设计获批，同年12月国务院批准65811亩建设用地。沿线县（区）在批文下达15个工作日内启动征地补偿与移民安置，截至2024年底，淮安区、清江浦区、工业园区、洪泽区完成土地补偿和社会保障工作，其中清江浦区、工业园区拆迁安置全部结束，淮安区、洪泽区按计划推进，有效保障了工程建设用地需求。

（二）严控补偿兑付机制

淮安市在淮河入海水道二期工程征地补偿中，通过预缴专户直拨征迁专户确保资金及时兑付。按照《江苏省土地管理条例》要求，土地补偿费在征收公告发布后15个工作日内足额支付至农村集体经济组织，集体经济组织须在10个工作日内向农户发放不少于70%的补偿款。针对工程用地紧迫性，市政府协调清江浦区等4个辖区实施补偿费直补到户机制，由征迁办统一将70%款项直接发放至农户账户，30%支付给集体经济组织，既保障了资金及时足额发放，又提高了农户配合度，有效满足了工程建设用地需求。

（三）社保精准落实

依据《江苏省被征地农民社会保障办法》，社保资金实行预存制；用地报批时足额预存至区财政社保专户，以批文日为基准核定标准。公告后10个工作日内，人社部门将资金记入农民个人分账户。工程涉及生产安置29874人，落实社保27306人：16周岁以下领取安置补助费；16-60周岁社保资金入个人账户，辅以技能培训促进就业；60周岁以上按月领取养老金（不低于1080元

/人），保障基本生活。

（四）集约化拆迁安置优化

拆迁安置充分尊重群众意愿和发展权益，结合乡村振兴与城镇化：引导搬迁群众选择存量农改房或城集镇房屋安置，推行农村拆迁房合法面积等价置换临近城集镇安置房，确保群众得实惠、权益有保障。同时精准土方平衡，集约用地减少拆迁。淮安区苏嘴镇采纳建议优化方案：减少临时弃土区807亩，压减拆迁安置242户（911人），节省投资近4000万元，实现节地惠民双赢。

（五）资金闭环监管强化

在移民资金管理方面，淮安市严格执行专款专用制度并强化监督评估机制。工程开工前，项目法人需依据批准的移民安置规划及概算，与相关县（区）政府签订安置协议并设立资金专户。项目法人按照年度计划和实施进度，将征地补偿和移民安置资金支付给签约县（区）政府，且每笔用款申请必须附有监督评估单位的审核意见。县级政府根据复核的实物量，将土地补偿费、安置补助费和集体财产补偿费直接全额拨付至村集体经济组织或村委会；同时将搬迁费及个人房屋、附属建筑物、零星树木、青苗、农副业设施等个人财产补偿费直接全额发放给移民个人。特别规定未经监督评估单位出具意见，任何补偿资金都不得支付，确保资金使用的规范性和透明度^[7]。

（六）矛盾源头预防治理

淮安市在征地拆迁工作中坚持“依法拆迁、政策透明、宣传前置、程序规范”原则，通过多渠道宣传解读移民安置政策、补偿标准等内容，确保政策家喻户晓。严格执行公告公示制度，保障群众知情权和监督权^[8]。同时建立健全矛盾化解机制：一方面压实地方责任，常态化开展矛盾排查和舆情监测，做到风险早发现、早评估、早处置；另一方面对群众反映强烈的问题，由市县政府专题会办，将矛盾化解在基层。针对可能出现的突发情况，还制定了完善的应急预案，确保群体性事件能够依法快速处置、平稳可控，实现“及时清账，杜绝隐患”的工作目标。

四、结论

大中型水利工程建设征地补偿和移民安置是工程建设的基础性工作，既是工程顺利实施的前提条件，也是关系民生福祉的社会工程^[9]。在新时代背景下，坚持以人民为中心的发展思想，创新开展征地补偿和移民安置工作，对保障被征地群众可持续发展具有重要意义。以县级政府为主体实施征迁安置工作，其运作效率直接关系到工程建设进度和被征地农民“生活水平不降低、长远生计有保障”目标的实现。

淮河入海水道二期工程作为淮河流域防洪体系的关键项目，征迁安置工作是工程开工建设的先决条件。淮安市通过建立规范的准备流程和实施流程，重点抓好政府主体责任落实、征迁宣

传、实物调查复核、公告公示、补偿安置、社会保障等关键环节，并创新构建权责明晰的协同治理机制，有效解决了以往权责不清、程序混乱等问题。江苏省出台的被征地农民社会保障办法，为征迁工作提供了制度保障，实现了工程建设与移民安置的高效衔接。

后续工作中，需要深入贯彻落实习近平总书记在南水北调后

续工程高质量发展座谈会上的重要讲话精神，借鉴“千万工程”成功经验，坚持规划引领、规范实施、严格验收的工作原则^[10]。要统筹推进移民安置与乡村振兴战略，通过完善社会保障体系、加强技能培训、发展特色产业等举措，切实保障移民合法权益，不断提升移民生活水平，推动移民安置工作高质量发展，为重大水利工程建设创造和谐稳定的社会环境。

参考文献

- [1] 《中华人民共和国土地管理法》（2019年修订）。
- [2] 曾秋怡. 城镇化背景下我国农村发展问题研究 [D]. 西安：西安工业大学，2014.
- [3] 江苏省人民政府. 省政府关于印发江苏省被征地农民社会保障办法的通知 [EB/OL]. （2021.12.31）https://www.jiangsu.gov.cn/art/2022/1/9/art_46143_10311368.html
- [4] 国务院南水北调工程建设委员会. 关于印发南水北调工程建设征地补偿和移民安置暂行管理办法的通知 [EB/OL]. （2005.1.27）https://www.gov.cn/gongbao/content/2005/content_68992.html
- [5] 海娜，南储鑫. 论习近平新时代中国特色社会主义思想战略思维的逻辑基础 [J]. 兵团党校学报，2023，（06）.12-18.
- [6] 刘燕杰，刘鑫，郭佳乐. 白龙江饮水工程藏区移民安置思路探讨 [J]. 水利水电工程设计，2023，42（04）.23-26.
- [7] 王昱淇，曹良兵. 对完善水库移民监督管理工作的几点思考 [J]. 广西水利水电，2023（06）.136-139.
- [8] 梁振城. 鱼梁航运枢纽工程移民安置工作实践 [J]. 广西水利水电，2022（03）.96-99.
- [9] 姜小青，蒋志强，胡玉龙，金晶. 水利水电工程移民监督评估时间存在的问题及完善措施 [J]. 水利经济，2019，37（01）.70-72+78+82.
- [10] 伍晓涛，查双全，张军伟. 乌东德水库蓄水移民安置专项验收实践 [J]. 水利水电快报，2024，45（S1）.83-87.

混流式水轮机过流部件磨损机理及防护措施研究

秦庆松

大唐云南发电有限公司德宏分公司, 云南 德宏 678400

DOI:10.61369/WCEST.2024090011

摘要： 混流式水轮机过流部件长期服役于复杂多相水流环境，不可避免地遭受严重的磨损破坏。针对其磨损机理，本文展开了深入探讨，涉及的系统性防护途径涵盖多个方面，其中有高性能材料的研发、表面强化技术的革新、部件结构的水力优化、精细化的运行维护，还有基于数据的智能监测预警等内容。研究成果旨在为提升水轮机关键部件服役寿命和电站运行可靠性提供坚实的理论支撑与实用技术参考。

关键词： 混流式水轮机；过流部件；磨损机理；防护措施

Study on Wear Mechanism and Protective Measures of Flow Passages in Francis Turbines

Qin Qingsong

Dehong Branch of Datang Yunnan Power Generation Co., Ltd., Dehong, Yunnan 678400

Abstract： The flow passages of Francis turbines are constantly exposed to a complex multiphase water flow environment during long-term operation, leading to inevitable and severe wear damage. This paper conducts an in-depth exploration of the wear mechanism involved, discussing systematic protective measures including the research and development of high-performance materials, innovations in surface strengthening technology, hydraulic optimization of component structures, refined operation and maintenance, as well as intelligent monitoring and early warning based on data. The research results aim to provide solid theoretical support and practical technical reference for improving the service life of key turbine components and the operational reliability of power stations.

Keywords： francis turbine; flow passage components; wear mechanism; protective measures

引言

混流式水轮机作为水能转换的核心装备，其过流部件长时间经受着高速含沙水流以及剧烈水力脉动带来的严酷考验，它可不单单是直接对导叶、转轮叶片等部件的材料完整性进行侵蚀，而且还降低了水轮机的水力效率与运行稳定性，这已然变成了对大型水电站经济性和可靠性起到制约作用的瓶颈难题。本文对磨损内在规律展开探究，这对于保障水能资源得以高效且稳定地利用而言有着极为深远的现实意义。

一、混流式水轮机过流部件概述

（一）混流式水轮机的工作原理

在混流式水轮机中，能量转换的核心所在是凭借特定的流道结构，对具有高势能的水流予以精确引导以及高效利用。压力水流沿空间螺旋状蜗壳内壁收敛加速，形成包裹导水机构的均匀环流进入固定导叶阵列，导叶精密调节水流方向与流量后精准冲向转轮入口。旋转的弯扭转叶片组迫使水流由径向急剧转向为轴向流出，此过程中水流动量矩的改变对转轮产生持续扭转力矩，驱动主轴连接的外部发电机转子切割磁感线，将流体动能转化为机

械能最终变成电能。流出转轮的尾流在渐扩型尾水管内流速降低，部分剩余动能重新转变为静压势能完成有效回收，整套水力机械的高效率运行依托于这种从压力势能到旋转机械能的递进式转化机理。

（二）过流部件的组成与结构

混流式水轮机的过流部件构成了引导水流并驱动能量转换的核心物理系统。蜗壳作为压力引水通道，其空间螺旋结构使得高速水流均匀覆盖静止导水机构外缘，形成具备稳定流向与动量的环流环境。布置在蜗壳内部的固定导叶及可调节导叶阵列肩负精确调整进入转轮水流角度与流量的关键任务，为能量高效转化

奠定基础。高速水流冲击具有三维扭曲叶型的旋转转轮装置，强迫流体急剧改变轴向方向并释放动量驱动主轴旋转产生机械功。经转轮流出的尾水进入渐扩型尾水管，水流在此扩散空间内速度梯度显著下降，部分动能有效地重新转化为静压能量。这些相互衔接的结构单元共同履行水力传递、动能转换和残余能量回收的系统职责。

（三）过流部件的材料选择

混流式水轮机过流部件制造商必须针对水轮机内苛刻水沙环境制定严格材料选配规范。蜗壳与固定导叶通常选用具备优异整体强度和抗磨损能力的普通碳钢或低合金钢材料，确保抵抗高静水压力下的结构稳定性。旋转转轮叶片等承受剧烈流场冲击区域需要应用硬度显著提升的高铬不锈钢或马氏体沉淀硬化不锈钢，强化其对抗高速水流携带固体颗粒持续冲刷破坏的能力。关键表面修复工程依赖专门研发的高铬铸铁或钴基硬质合金堆焊层，最大限度减缓磨粒冲击与空蚀溃灭导致的材料流失。高应力部件可考虑特殊调质的高强度结构钢，依靠淬火与回火处理的微观组织强化提升疲劳寿命。材料工程师综合成本约束与服役需求选取不同金属体系，构建起覆盖整机从压力边界到高耗损区域的梯度防护方案。

二、混流式水轮机过流部件磨损机理分析

（一）磨粒磨损机理

混粒磨损是过流部件材料表面遭受高速水流携带硬质固体颗粒反复撞击和摩擦形成的渐进式破坏现象。旋转机械内沙粒在湍流裹挟下以不同入射角度冲击导叶和转轮叶片工作曲面，瞬时高压接触产生局部塑性变形或微观撕裂。粒子尖锐棱角对金属表面施加的微切削作用刮除材料形成密集划痕，伴随冲击能量转化导致材料表层微观疲劳裂纹快速萌生与扩展。后续粒子持续涌入流道造成撞击路径重叠区域材料薄片分层剥离，使磨损深度随服役时间逐步加剧。高流速下大量粒子脱离主流轨迹撞击区域边界产生难以预测的二次侵蚀，显著扩大损伤范围。该磨损过程与沙粒浓度、粒子几何特性和材料动态韧性特征密切相关，迫使制造商采用新型耐冲击合金建立韧性防护体系^[1]。

（二）冲蚀磨损机理

冲蚀磨损源于高速流体中局部压力骤变诱发空化泡剧烈溃灭对材料造成的冲击破坏。水流在压力梯度急剧变化区域分离形成瞬时微小气泡，遭遇高压环境时气泡突然崩溃产生超高速微射流冲击邻近金属表面。这些微米级高速液弹以数十倍水速持续轰击过流表面特定区域，造成金属晶格瞬间塑性变形和局部残余应力集中。材料反复承受极高冲击应力引发位错密度持续累积，促成表面保护性氧化膜早期碎裂形成裸露活性金属区。溃灭空泡释放的高能量不断驱动微裂纹向材料纵深方向扩展并相互连接为宏观裂纹网络，最终导致疲劳累积至临界值的表层金属薄片成片剥落。该失效模式在转轮叶片出口边和固定导叶卡门涡脱流区表现尤其突出，迫使设计人员加强流体动力学分析优化壁面曲率半径抑制流动分离。

（三）空蚀磨损机理

空蚀磨损主要由过流系统内周期性压力波动诱发的蒸汽空泡连续生成、溃灭循环引起。高速水流在低压区域超越汽化压力时孕育微米级蒸汽空泡，伴随流动进入高压区域产生剧烈内爆，释放强大的冲击波动能冲击金属表面。反复作用的激波传播在材料表层引发弹性变形场叠加效应，导致微观位错密度超出临界值形成亚微观裂纹源。腐蚀介质在冲击波连续撬动下深入活化新形成的微裂纹缝隙，加速裂纹尖端的化学腐蚀与机械撕裂协同作用。材料经历数万次应力循环后产生疲劳性能衰减，保护膜层与基体交界面逐渐累积裂纹网络形成蜂窝状破损结构。损伤区域深度随时间扩展至临界尺寸时，表层金属因强度丧失而呈脆性剥落。该现象在转轮上冠迷宫环区域和活动导叶枢轴端面尤其严重，驱使运维团队采取流态整型装置减轻局部压降梯度。

（四）腐蚀磨损机理

腐蚀磨损表现为水流溶解性化学成分与机械运动联合驱动的材料渐进失效模式。腐蚀介质持续侵蚀破坏金属表面具有保护作用的钝化膜层，暴露出活跃金属晶格与电解液发生电化学反应，阳极区域金属离子不断溶解流失形成点蚀坑。湍流冲击持续作用于蚀坑边缘造成应力集中与冷加工硬化现象，加速坑底微观裂纹沿晶界方向扩展进程。剥落碎屑随水流冲刷带走加速材料流失，新生金属表面再度暴露于化学腐蚀循环。溶解氧浓度与水流流速变化共同决定阴阳极反应强度，特定区域的涡流运动持续输送高活性介质抑制再钝化形成。蚀坑网络在交变流体压力作用下向纵深发展，深度逐步超过表面硬化层临界厚度时引发结构强度突变性能下降。该协同作用严重影响固定导叶端面间隙密封环耐久性，推动选材侧重耐蚀合金配合流道抗湍流设计来缓解复合破坏。

三、混流式水轮机过流部件磨损的防护措施

（一）高性能抗磨材料的开发与应用

高性能抗磨材料的开发聚焦于三个核心方向。材料成分设计必须兼顾基础强度与抗冲击韧性，在传统马氏体不锈钢基体中精确引入微量铌、钒等碳化物形成元素，促使硬质相均匀弥散分布，既提升基体抵抗硬质粒子犁削的能力，又避免因脆性相过量引发的宏观裂纹。制造工艺革新关键在于控制材料内部组织的均匀性与致密性，采用多级控轧控冷技术优化奥氏体晶粒度，配合真空脱气冶炼降低非金属夹杂物含量，使锻件在承受高频水流冲击时能有效延缓疲劳裂纹的萌生扩展。服役适应性设计则要求材料体系具备环境响应特性，例如在含沙量波动水域服役的转轮叶片，其表层可设计为梯度硬化的微观结构，内层保持韧性支撑而外层逐步递增硬度，实实在在缓冲高速涡流对材料表面的反复撕扯效应。这类材料体系从成分到结构的协同优化，为过流部件提供了贯穿全生命周期的稳定抗磨保障^[2]。

（二）表面强化技术的优化选择

针对混流式水轮机过流部件的独特磨损特性，表面强化技术的优化选择需紧密结合具体区域的冲蚀环境与受力状态。涂层材

料的匹配性是核心考量，优先选用兼具优异抗冲击韧性及高显微硬度的金属陶瓷复合体系，例如碳化钨基涂层凭借其高硬度和韧性成为优选，确保其在高速含沙水流反复冲击下维持良好的界面结合力，避免硬质粒子嵌入引发的涂层剥落。工艺参数的精细调控直接决定了强化层的内在质量，通过优化热喷涂或堆焊过程中的热输入、粒子速度及沉积温度场分布，能有效抑制涂层内部气孔、微裂纹等缺陷生成，形成致密均匀的强化表层。几何结构的适应性优化同样不可或缺，在满足过流要求的前提下，对易损部位如转轮叶片出水边、下环内侧等区域实施适度增厚或局部流线型改良，能够显著削弱高速涡流对边界的直接剪切作用，分散流体动压负荷。这种系统性的技术选配显著提升了过流部件在严苛水力条件下的表层抗损能力，延长关键区域的实际服役周期。

（三）过流部件结构的水力优化

针对混流式水轮机高速含沙水流引发的磨损问题^[3]，过流部件结构的水力优化需从流场本质入手。流道形状的精心规划着力削弱局部涡旋强度，适当扩大蜗壳进口截面曲率半径并平滑过渡到尾水管锥段，有效降低高流速区对固定导叶根部的直接冲刷强度。叶片几何参数的精确调整成为关键环节，依据实际水沙特性重新计算叶片安放角和包角分布，使水流相对速度更贴近设计攻角范围，大幅减轻转轮叶片吸力面头部与出水边区域的空蚀-磨损耦合损伤^[4]。局部结构细节的改良同样不容忽视，在导叶端面增设流体动力学修型圆角，引导水流平顺掠过密封间隙而非垂直冲击，同时优化泄水锥的锥度匹配关系，使从转轮下泄的固液混合物能迅速扩散降压。这些基于流场重构的几何改进措施，从根源上削弱了高速粒子对过流边界的机械破坏能量，切实提升关键区域的流体润滑保护效果。

（四）运行维护策略的改进

基于历史运行数据，维护人员对日常操作流程予以分析优化；针对汛期水流泥沙含量升高这一特征，操作员对机组负荷分配进行动态调整，以此避开导叶空蚀风险区间。在关键过流区域，智能监测系统部署高灵敏度振动传感器以连续采集数据，借助内置算法识别异常频率分量，进而触发预警信号来指导及时干预。结合磨损速率模型，维护团队对部件检查周期加以修正；对于固定导叶根部等易损位置，采用便携式硬度检测工具评估其表面退化程度，从而制定出差异化保养决策。当日常水流条件发生变化时，操作员依据实时仪表数据对叶片角度分布作微调，通过该措施确保流体动力压力均匀分布，减轻局部冲刷破坏的强

度^[5]。智能监测系统将转轮密封区热成像数据与历史曲线自动关联，以此预测寿命拐点，为维护团队制定精准更换时机提供支撑，减少非计划停机的频率。把部件状态数据导入维修计划管理软件，生成优先干预清单，维护人员在雨季后实施针对性清洁工艺，清除滞留磨粒，阻止几何尺寸变形的积累。通过连续优化运行维护实践，累积形成动态防护屏障，显著削弱非正常工况对材料的侵蚀效应，维持水轮机稳定且高效的运转状态^[6]。

（五）智能监测与预警系统的构建

面对混流式水轮机过流部件复杂的磨损演变过程，构建智能监测与预警系统依赖于三个紧密关联的核心环节。多源传感器阵列的科学布设构成了感知基础，依据磨蚀敏感区域的水动力特性，在蜗壳过渡段、活动导叶枢轴及转轮上冠腔室等关键位置部署耐高压的振动、声发射复合探头，持续捕捉材料表面遭受粒子冲击产生的应力波微妙特征。磨损状态识别模型的深度开发是核心中枢，融合流体力学机理与运行大数据训练神经网络算法，从海量噪声信号中剥离出表征涂层微裂纹萌生或基体材料疲劳损伤的特定频谱模态，建立磨损速率与声学特征量之间的动态映射关系。预警响应机制的闭环设计则保障了干预时效性，当模型输出的磨损累积量逼近预设阈值时，系统自动触发分级报警并联动调速机构调整机组负荷点，同步生成包含损伤定位与预估剩余寿命的诊断报告供维护决策。这套从实时感知到智能诊断再到主动调控的闭环管理链条，为过流部件磨损风险提供了前置化管控的技术支撑。

四、结语

对于混流式水轮机过流部件而言，其磨损呈现出复杂的动态状况，仅依靠单一的防护手段，往往是难以收获理想效果的。材料的流失，因磨粒、冲蚀、空蚀及腐蚀的协同作用而被显著加速，这也将其防护所面临挑战的深层原因揭示了出来。在现有材料体系范畴内对耐磨性极限进行提升的同时，高耐磨抗蚀合金以及先进涂层的应用，再加上经精准水力优化的部件设计，这些都为减轻磨损给予了关键的突破契机。唯有把科学制定的运行维护规程和基于先进感知技术的早期磨损预警系统相结合，才能够达成从被动修复朝着主动防御与寿命管理模式转变的目标，进而为保障水轮机长期处于高效可靠运行的状态奠定极为坚实的基础。

参考文献

- [1] 庞佑霞,郭源君,刘厚才.水轮机过流部件磨蚀机理的研究[J].润滑与密封,2001(4):2.
- [2] 雷军,江雄,刘丁.高水头混流式水轮机过流部件磨损的特点分析[J].水电站设计,2009,25(02):55-58.
- [3] 王华仁.水轮机过流部件的磨蚀与表面防护[J].东方电气评论,2008,22(4):5.
- [4] 张庆霞.水轮机过流部件磨蚀原因与有效防治措施研究[J].华东科技:学术版,2012(11):1.
- [5] 刘娟,陆力,朱雷,等.冲击式水轮机过流部件泥沙磨损的试验研究[C]//第十九次中国水电设备学术讨论会论文集.2013.
- [6] 熊茂涛,卢池,杨昌明,等.水轮机过流部件磨蚀问题的研究与防护[J].小水电,2006(1):4.

