

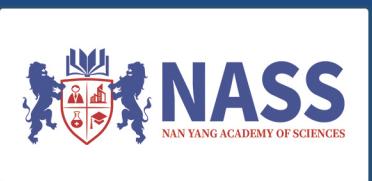
工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 9 · September 2025 3060-9054(Print) 3060-9062(Online)



Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.: +65 62233839
E-mail: contact@nassg.org
Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 · Issue 9 · September 2025 3060-9054(Print)

3060-9062(online)



中文刊名：工程研究前沿
ISSN：3060-9054（纸质）3060-9062（网络）
出版语言：华文
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Frontiers of Engineering Research
ISSN: 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)
Language: Chinese
URL: <http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>
Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《工程研究前沿》征稿函

期刊概况:

中文刊名：工程研究前沿
ISSN：3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)
出版语言：华文刊
期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn>
出版社名称：新加坡南洋科学院

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure
www.cnki.net

出版格式要求:

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819
Email: info@nassg.org
Tel: +65-65881289
Website: <http://www.nassg.org>



出刊及存档:

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

作者权益:

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

评审过程:

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 2 Issue 9 September 2025
ISSN 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)

主 编

虞 斌

Bin Yu

编 委

王振波 zhenbo Wang

赵希强 Xiqiang Zhao

刘永军 Yongjun Liu

张新儒 Xinru Zhang

- | | | | |
|----|---------------------------------------|----|---|
| 1 | 既有建筑装饰装修改造中的结构安全与材料创新应用
/ 高速 | 1 | Structural safety and innovative application of materials in existing building decoration and renovation
/ Su Gao |
| 4 | 电力工程项目物资计划编制的常见问题与改进策略
分析
/ 丁欣峰 | 4 | Common Problems and Improvement Strategies of Material Planning in Electric Power Engineering Projects
/ Xinfeng Ding |
| 7 | 箱梁预制过程中预埋件精准定位技术与误差控制研究
/ 孙宏斌 | 7 | Research on Precise Positioning Technology and Error Control of Embedded Parts in Box Beam Prefabrication Process
/ Hongbin Sun |
| 10 | 水利工程建设与水利工程管理
/ 朱紫郡 | 10 | Construction and Management of Water Conservancy Projects
/ Zijun Zhu |
| 13 | 市政工程施工中管廊和管网施工技术的运用研究
/ 蒋海龙 | 13 | Research on the Application of Utility Tunnel and Pipeline Construction Technology in Municipal Engineering Construction
/ Hailong Jiang |
| 16 | 水利水电工程围堰施工要点研究
/ 祁月宗 | 16 | Research on Key Points of Construction of Dredger in Water Conservancy and Hydropower Projects
/ Yuezong Qi |
| 19 | 挥发性有机物监测要点思考
/ 赵云鹤 | 19 | Key Points of Monitoring Volatile Organic Compounds
/ Yunhe Zhao |
| 22 | 山区输水工程倒虹吸沉管段防渗与结构稳定性分析
/ 张锐 | 22 | Analysis on anti seepage and structural stability of inverted siphon immersed pipe section of water conveyance project in mountainous area
/ Rui Zhang |
| 25 | 新时期高速公路工程项目管理绩效评价研究
/ 赵忠波 | 25 | Research on performance evaluation of expressway project management in the new era
/ Zhongbo Zhao |
| 28 | 低碳经济与西藏水电“开发”和“改造”并重
/ 次仁旦塔 | 28 | Low-carbon economy should be prioritized alongside the “development” and “renovation” of hydropower in Tibet
/ Cirendanta |
| 31 | 越南海上风电开发建设限制性因素分析
/ 路建华 王刚 余壮果 | 31 | Analysis of Restrictive Factors of Offshore Wind Power Development and Construction in Vietnam
/ Jianhua Lu Gang Wang Zhuangguo Yu |
| 34 | 高压管道斜井灌浆施工中的质量控制与风险防控对策
/ 甘全坤 | 34 | Quality Control and Risk Prevention Countermeasures in Grouting Construction of High Pressure Pipeline Inclined Shaft
/ Quankun Gan |
| 37 | 电力负荷预测方法在配网规划中的应用
/ 刘洋 | 37 | Application of Power Load Forecasting Method in Distribution Network Planning
/ Yang Liu |

Structural safety and innovative application of materials in existing building decoration and renovation

Su Gao

China Water Resources and Hydropower Engineering Bureau Co., Ltd. International Company, Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract

In the context of urban renewal, existing buildings often face challenges such as functional incompatibility, aging facilities, and reduced structural durability during their service life, posing certain safety risks. Decoration and renovation are not merely about updating aesthetics and spatial effects; more crucially, they require structural load-bearing capacity assessments and reinforcement based on current conditions. However, some projects in practice excessively prioritize visual effects while neglecting structural safety and material compatibility, leading to quality issues like cracks, leaks, and structural weakening. In recent years, the development of lightweight high-strength materials, inorganic composites, and recyclable eco-friendly materials has provided effective technical pathways for improving building performance. This paper discusses three aspects: structural safety evaluation, reinforcement strategies, and application of new materials, emphasizing that renovations should achieve a balance between safety, functionality, and sustainability. The study suggests that future renovations will trend toward intelligent material applications, low-disruption construction methods, and full lifecycle maintenance management, providing practical guidance for building renewal.

Keywords

existing building; decoration and renovation; structural safety; material innovation; reinforcement technology; urban renewal

既有建筑装饰装修改造中的结构安全与材料创新应用

高速

中国水利水电第八工程局有限公司国际公司，中国·湖南长沙 410000

摘要

城市更新背景下，既有建筑在使用周期内常出现功能不匹配、设施老化和结构耐久性下降等问题，存在一定安全隐患。装饰装修改造不仅是外观与空间效果的更新，更关键在于基于结构现状进行承载力评估与加固处理。然而，实践中部分工程过度追求视觉效果，忽视结构安全与材料性能匹配，易导致开裂、渗漏和结构弱化等质量问题。近年来，轻质高强、无机复合及可回收环保材料的发展，为既有建筑性能提升提供了有效技术路径。本文从结构安全评估、加固策略及新型材料应用三个方面展开论述，强调改造应在安全性、功能性与可持续性之间实现平衡。研究认为，未来改造将趋向智能材料应用、低扰动施工及全生命周期维护管理，为建筑更新提供实践依据。

关键词

既有建筑；装饰装修改造；结构安全；材料创新；加固技术；城市更新

1 引言

近年来，城市建设进入存量更新阶段，大量既有建筑因建造年代较早、维护不足或使用功能变化而出现结构老化、围护系统性能下降、机电设备效率偏低及空间利用不匹配等问题，不仅影响使用舒适性，也潜在威胁运营安全。在此背景下，装饰装修改造已成为提升建筑品质与延长建筑寿命的重要途径。相较于新建工程，既有建筑改造具有原结构条件不可随意改变、材料性能差异大、隐蔽工程多且节点复杂等特征，需要在原有结构体系承载能力与新功能需求之

间寻找平衡点，确保改造设计与施工过程不破坏主体结构安全。在此过程中，材料技术的进步为改造提供了更具适应性与可持续性的解决路径，如纤维增强复合材料能在不增加结构自重的前提下提升构件强度和延性，超高性能混凝土可用于构件薄层修补与耐久性增强，功能型装饰材料与节能围护系统的推广有助于改善室内环境质量和建筑能效表现。基于结构安全分析、加固技术选择、材料性能匹配与施工协同管理，既有建筑改造正向精细化、绿色化和长寿命化方向发展，为城市更新提供了可持续的实践框架。

【作者简介】高速（1977-），男，中国安徽人，本科，高级工程师，从事建筑施工、技术、建筑装饰装修研究。

2 既有建筑装饰装修改造的结构安全风险与评估要点

2.1 既有建筑结构现状特点与损伤表现

许多既有建筑在长期使用过程中会因环境作用、荷载变化与材料劣化而产生不同程度的结构损伤。钢筋混凝土结构普遍存在钢筋锈蚀、碳化深度增加、保护层剥落和承载能力下降等问题；砌体结构则常见灰缝粉化、砌块松散、剪切裂缝及抗震性能不足。部分建筑在最初建设阶段标准偏低或施工质量控制不严格，使得潜在结构缺陷在时间作用下被放大。此外，使用功能变化也会对结构安全构成威胁，如商改住、住改办、老旧住宅改为餐饮或健身场所，会显著增加活荷载；不合理的隔墙拆除、设备加层或室内管井扩设，可能破坏整体受力路径，诱发应力集中或结构变形。因此，装修改造前对结构现状的全面调查是基础性工作。

2.2 结构安全评估的技术方法与判定原则

既有建筑结构安全评估通常包括现场查勘、构件检测、材料性能测试、变形监测与结构计算分析等内容。具体方法包括回弹法、超声法、钻芯法检测混凝土强度；钢筋位置及锈蚀程度检测；红外热像法用于识别空鼓与界面脱粘；结构有限元分析用于计算承载能力和变形性能。评估的原则在于判断结构是否满足现行规范要求及使用功能需要，并明确是否需要加固以及加固范围。同类型建筑中，老旧公共建筑、学校医院等人群密集场所评估标准需更严格，抗震性能、竖向承载可靠性及楼板开洞安全是评估重点。

2.3 结构安全隐患在装修改造中的典型问题案例

在实际工程中，不少事故与缺陷与不当改造直接相关。部分商业改造工程因拆除承重墙或切断圈梁引发整体结构开裂；部分住宅改造中地暖系统与给排水改造破坏原结构保护层，导致板面裂缝与渗漏；某些建筑外立面改造中大量使用重质石材挂板，加重墙体荷载导致构件超载。有些项目只关注装饰效果，未考虑施工振动、湿作业对原结构的影响，引发延迟性损伤。这些问题均说明结构安全必须贯穿改造全过程，避免以美观与表面更新替代结构安全与性能改善。

3 既有建筑装饰装修改造中的结构加固与承载力提升策略

3.1 基于结构类型的差异化加固技术路径

钢筋混凝土结构、钢结构与砌体结构在加固技术上存在显著差异。钢筋混凝土结构可采用粘贴纤维增强复合材料、外包型钢、截面加大与预应力加固等方式；砌体结构常通过设置钢筋网—砂浆面层、增设混凝土构造柱或置换式修补来提升整体性；钢结构则更侧重节点加固、螺栓更换、防腐保护与构件补强。加固应兼顾施工可行性、荷载传递路径合理性与原结构构造特征。

3.2 既有建筑楼板承载力与振动性能提升

许多建筑在改造中新增重型家具、餐饮设备、储物架、

大型空调机组等，这使楼板承载与振动性能成为关键问题。针对楼板承载不足，可采取钢筋网砂浆加固、碳纤维增强、楼板叠合层增厚或设置下部支撑体系等方法。对于楼板振动舒适度不佳的空间，如舞蹈室、健身房，可通过隔振垫、弹性地坪和阻尼层材料进行结构与材料协同控制。

3.3 抗震性能补强与结构延性提升策略

既有建筑在使用过程中可能因设计标准落后、材料老化或荷载变化而存在抗震性能不足的问题。为提高其抗震能力，可通过增设抗震墙、加设钢结构框架支撑体系、增大截面或外包型钢等方式增强整体结构刚度与侧向承载能力。同时，通过节点延性提升、梁柱连接加强、设置粘滞阻尼器或隔震支座等手段，提高结构的耗能能力和变形适应性。抗震加固过程应避免单纯提高刚度，否则可能引起内力重新分配，导致局部构件受力突增，反而形成新的薄弱环节。因此，应坚持整体协同的抗震策略，兼顾承载力、延性与构造措施，以实现地震作用下结构变形可控、破坏模式明确和抗震韧性提升的综合目标^[1]。

4 材料创新在既有建筑装饰与结构改良中的应用价值

4.1 轻质高强材料在装饰与加固中的复合化应用

既有建筑装修改造中，结构体系、设备系统及装饰做法需要在同一逻辑框架下统筹考虑，以避免各系统之间的相互干扰与后期大面积返工。改造设计应以结构安全为前提，基于原有结构体系的承载力、变形性能、节点连接状况和耐久性进行系统评估，同时结合用途变化、人员密度及设备荷载对结构进行再校核。在设计初期即需同步展开暖通、电气、消防、给排水、声学控制等专业的管线布置与机房设备位置规划，避免后期因设备迁移导致结构破坏或装饰层拆除。装饰材料的厚度、重量及安装方式也应纳入结构受力分析中，尤其是在大面积石材幕墙、更换外饰面板及新增吊顶系统时，更需明确荷载传递路径与锚固节点安全性。利用 BIM 进行三维协同设计，可提前发现系统冲突，确保结构、设备与装饰层之间形成协调统一的系统性解决方案^[2]。

4.2 绿色节能材料在室内外装饰中的功能拓展

既有建筑改造施工普遍存在着场地受限、结构状态老化及周边环境敏感等特征，因此对施工扰动的控制和细部构造处理提出了更高要求。对于混凝土基层，应通过打磨、喷砂或涂刷界面剂等方式提升新旧材料的粘结性能，避免装饰层脱粘与空鼓；湿作业需严格控制含水量与固化周期，减少渗水、碱化等二次损伤。墙体、立柱及楼板的局部拆除或开槽应遵循“分段、限力、先支后拆”原则，确保荷载转移过程平稳，防止结构应力突变引发隐性裂缝。挂板与幕墙系统安装中，锚固构件位置应避开弱化区和钢筋密集区，并进行力学复核。对于易受震动和荷载叠加影响的老旧构件，应减少重型设备施工与高频震动工具使用。通过强化现场工序管

理、安装节点复核和关键部位样板先行，可有效提升施工质量和结构安全。

4.3 智能化材料与可逆性材料的未来应用趋势

既有建筑装修改造并非一次性工程，后期维护与运行管理决定改造效果能否长期稳定发挥。应建立基于全生命周期的维护机制，从竣工起即开展结构健康监测、饰面层老化检测、设备运行状态跟踪及室内环境评估等工作。可通过应力计、沉降计、裂缝传感器、环境传感器等监测元件结合数字化管理平台，对结构变形、材料老化、温湿度变化等关键指标进行动态监控，形成可视化运行数据。对外饰面、防水系统、保温层等耐候性组件，应设定定期检修周期；机电系统需制定保养计划与能效评估策略，以降低能耗并延长设备寿命。维护经费应采取年度预算与专项储备相结合方式，以避免后期维修缺乏资金支持。通过数字化、标准化与计划性维护管理，可实现“预防性修缮”替代“故障性修缮”，保障建筑安全运行并提升改造投资的持续效益^[3]。

5 装修改造中结构安全与材料应用的协同设计与施工管理

5.1 结构、安全、设备与装饰系统的整体化设计原则

既有建筑装饰装修改造的设计过程需坚持整体化理念，将结构安全、设备系统与装饰效果视为相互制约、相互作用的统一体。在方案生成阶段，应对原有结构体系进行全面调查与性能评估，包括承载力状况、节点连接可靠性、构件耐久性和可能存在的隐性损伤，并结合改造后功能需求重新进行荷载核算，防止因局部空间调整和新增设备荷载导致结构失衡。同时，装饰材料、机电设备布置、消防排烟系统、给排水管线、暖通风道、电气桥架及智能控制系统需在设计初期进行协同排布与综合校核，保证各系统空间占用与安装路径明确，不产生冲突。声学、防水、保温和安全疏散等技术指标也应与装饰层次进行一体化融合，以避免后期因功能不达标而反复拆改。

5.2 施工过程中的扰动控制与节点细部处理

既有建筑改造施工过程往往在原结构、原管线和已有装饰环境中进行，因此对现场扰动的控制与细部节点处理是保障施工质量与结构安全的重要环节。湿作业需严格控制含水率和干燥时间，避免因界面水化不充分或基层受潮导致装饰层空鼓与脱粘。在界面处理上，应采用机械开凿、打磨、喷砂或界面剂涂刷等方式增强新旧材料之间的粘结性能。对

于挂板、饰面板和幕墙系统，支撑构件锚固位置及构造节点必须经过精确计算，保证荷载传递路径清晰可靠。老旧构件拆除时需按照“先上后下、先外后内”的顺序布置施工工序，并设置临时支撑以避免结构应力突变造成隐患。使用振动设备时需结合构件状况调控作业强度，避免引发结构微裂或脆性破坏。通过强化施工组织与细部控制，可有效降低二次损伤与潜在质量缺陷，为建筑后期稳定使用奠定基础。

5.3 建筑全生命周期视角下的维护与管理机制

既有建筑装修改造的完成并不意味着工程管理的终结，后续的维护与运行管理更是保障结构安全与材料性能长期稳定的关键环节。应基于建筑全生命周期理念，建立系统化维护体系，包括结构健康监测、设备运行监控、材料老化评估与定期维护计划。通过布设位移计、应变传感器、温湿度监测器和智能报警系统，可实时掌握结构应力变化与材料耐久性退化趋势，从而实现预测性维护，避免突发性故障。维护资金应纳入长期运营预算，并建立透明的维保台账管理制度，对维修记录、检测数据和部件更换信息进行数字化存档。基于BIM、建筑运行管理平台和物联网监测系统，可实现建筑信息的动态更新与可视化管理，提升维护决策的准确性和效率。全生命周期管理机制的建立，有助于延长建筑服役年限、降低运行成本，并实现改造效益的可持续发挥。

6 结语

既有建筑装饰装修改造是实现城市更新、提升城市环境品质与促进可持续发展的重要途径。结构安全是改造工程的底线与前提，材料创新是性能提升与形态表达的重要手段。只有在结构评估、加固技术、材料选择、施工控制与维护管理之间建立系统化关联，才能确保改造工程的功能适配性、安全可靠性和长期使用效益。未来，随着智能材料、信息化技术与绿色建造理念的深入发展，既有建筑改造将朝着更加精细化、低扰动化、长周期化和可持续化方向演进，为城市空间品质提升提供持续动力。

参考文献

- [1] 杨成珠.既有建筑内外装饰改造工程精细化设计施工一体化模式分析[J].中国建筑装饰装修,2025,(20):139-141.
- [2] 潘静安.既有建筑二次装修改造工程施工审查中的要点[J].陶瓷,2022,(11):157-159.
- [3] 张学玲.既有建筑节能改造、舒适性改善技术[J].绿色环保建材,2020,(03):43-44.

Common Problems and Improvement Strategies of Material Planning in Electric Power Engineering Projects

Xinfeng Ding

State Grid Shandong Electric Power Company, Dingtao District Power Supply Company, Heze, Shandong, 274000, China

Abstract

Power engineering projects are characterized by extended construction periods, cross-disciplinary expertise, complex material categories, and lengthy supply chains. The quality of material planning directly impacts project schedule control, cost constraints, and on-site operational efficiency. Within the State Grid power system, as transmission and transformation projects expand in scale and management models become more standardized, material planning has transitioned from experience-based approaches to institutionalized and refined processes. However, practical implementation still reveals multi-level and structural contradictions. By integrating domestic and international power engineering practices with State Grid's management requirements, this study systematically identifies typical issues in material planning and proposes actionable improvement strategies at the engineering implementation level. These insights will facilitate the transformation of project material management from reactive responses to proactive coordination.

Keywords

State Grid Power; Power Engineering; Project Material Planning; Compilation; Common Issues; Improvement Strategies

电力工程项目物资计划编制的常见问题与改进策略分析

丁欣峰

国网山东省电力公司菏泽市定陶区供电公司，中国·山东 菏泽 274000

摘要

电力工程项目具有建设周期长、专业交叉多、物资品类复杂且供应链条较长等特点，物资计划编制质量直接影响工程建设的进度受控、成本约束与现场组织秩序。在国网电力体系内，随着输变电工程规模持续扩大、工程管理模式不断规范，物资计划编制逐步由经验主导向制度化、精细化转变，但在实际执行中仍暴露出多层次、结构性的矛盾。结合国内外电力工程实践以及国网电力工程管理要求，对物资计划编制中的典型问题进行系统梳理，并在工程实践层面提出可操作的改进思路，有助于推动项目物资管理由被动响应向主动统筹转型。

关键词

国网电力；电力工程；项目物资计划；编制；常见问题；改进策略

1 引言

物资计划管理作为电力企业管理运营工作的重要组成部分，做好电力工程项目物资计划编制工作，可以为物资计划管理工作的科学性和合理性提供保障^[1]。有鉴于此，本文围绕工程实际展开分析，力求形成具有工程针对性的研究结论，为后续实践提供参考依据。

2 电力工程项目物资计划概述

电力工程项目物资计划是围绕工程建设与运行需要，按照工程量、工序节拍、质量标准与供货周期对物资品类、数量、交付节点及保障措施进行的系统性编制与管控文件。

其核心包括需求预测与分解、物资标准化清册与协议库存安排、采购/联合采购节奏、应急物资储备及在途交付跟踪与质量验收节点。编制流程由设计成果挂接、施工组织校核、计划申报、专家/规则库审查并与招标联动构成，需结合历史消耗校核与信息化工具提升准确性与审查效率。实施要点为统一计量口径、建立多专业协同机制、推进物资与建设数据贯通、落实应急储备与区域联合采购以增强供应保障与成本控制。

3 电力工程项目物资计划编制的常见问题

3.1 设计与物资计划衔接不充分

在国网电力工程项目实施过程中，物资计划编制通常以初步设计或施工图设计成果为依据推进，但在实际操作中，设计成果成熟度与现场实施需求之间往往存在不匹配情况。部分工程在设计尚未完全稳定、关键技术参数和设备选

【作者简介】丁欣峰（1982—），男，中国山东菏泽人，本科，从事工业工程生产计划方向研究。

型仍处于调整阶段时即提前启动物资计划编制，计划人员只能依据经验或概算数据进行测算，导致物资规格、数量和技术条件存在不确定性。同时，在设计深化或方案优化过程中，设计单位对设备型号、构件形式及配置标准进行调整，但相关变更信息未能及时、完整传递至物资计划编制环节，使已形成的计划与最新设计成果不一致。该类问题在变电站一次设备、线路金具及定制化构件等物资中尤为突出，容易引发计划反复修订，增加计划管理复杂度，削弱物资计划对采购和供应组织的稳定支撑作用。

3.2 施工进度变化对计划刚性冲击明显

电力工程项目施工过程受征地协调进展、外部环境条件以及气候因素等多方面影响，实际施工节奏与前期计划存在偏差属于常态。但在部分项目的物资计划编制阶段，仍以理想化施工进度为依据安排物资需求，未对进度不确定性进行充分预留和分析。当关键工序或重要节点发生调整后，已上报并进入执行阶段的物资计划缺乏灵活调整空间，导致部分物资提前到场形成库存占用，或关键设备未能按实际需求时间到位，制约现场施工组织。进度变化与物资供应之间的脱节，使计划执行过程中协调工作量明显增加，也在一定程度上削弱了物资计划对施工组织的支撑和引导作用^[2]。

3.3 计划编制基础数据准确性不足

电力工程项目物资计划编制高度依赖工程量清单、设计参数、历史消耗记录及类似工程经验数据，但在实际工作中，基础数据来源分散、统计口径不统一的问题较为突出。不同专业在材料计量规则、计算方法及损耗考虑方面存在差异，导致同类物资在汇总时出现数量偏差。同时，部分计划编制过程中对施工损耗、备用需求及现场周转因素考虑不足，使测算结果与实际消耗存在出入。该问题在电缆、钢材及各类辅材等用量较大的物资中表现尤为明显，容易在施工阶段出现追加计划或临时采购需求，增加计划管理难度，也影响物资供应的整体均衡性和可控性。

3.4 专业协同不足影响计划完整性

电力工程项目涉及土建、电气、线路、通信等多个专业，物资需求具有明显的专业差异性。然而在部分项目中，物资计划仍以单一专业视角进行汇总，缺乏跨专业统筹审核，导致部分专用物资遗漏或重复申报。此外，施工单位、监理单位与项目管理机构之间在计划编制阶段参与程度不均，也使部分现场实际需求未能及时反映到计划中，影响计划的完整性和可执行性^[3]。

4 电力工程项目物资计划编制常见问题的改进策略

4.1 强化设计阶段与计划编制的同步机制

围绕电力工程设计阶段与项目物资计划编制不同步这一常见问题，需在现有工程管理实践基础上，从流程衔接、信息传递、协同审核与计划弹性四个方面进行系统化强化。

首先，在设计成果具备可执行条件后启动物资计划编制，应将初步设计审查结论作为计划编制的前置约束条件，由项目管理部门明确技术参数冻结范围，重点锁定设备型号、主要材料规格及工程量口径，避免在设计深度不足时提前测算物资需求，同时通过设计专业出具可用于采购测算的成果清单，减少后续反复修订带来的计划失真。其次，针对设计变更频繁影响计划稳定的问题，应在项目层面建立设计变更与物资计划联动管理机制，对涉及物资规格调整、数量增减及供货条件变化的设计修改，统一纳入变更影响清单，由设计单位同步说明变更原因及影响范围，物资计划编制人员据此开展针对性修订，防止非关键变更被简单放大为整体计划调整，从而削弱计划严肃性。再次，在计划形成过程中，应组织设计、施工与物资管理相关人员开展联合评审，重点围绕设计意图理解、施工组织安排与物资供应条件进行交叉核对，通过多专业视角对计划中关键资源配置的合理性进行校核，避免单一专业依据自身经验判断而产生偏差，同时在评审记录中明确责任分工，为后续执行提供依据。最后，在计划文本编制阶段，应对暂定性内容进行规范化处理，对尚未完全明确的设备选型、替代方案及阶段性用量设置清晰边界，并在计划中注明调整条件和控制原则，使计划既能满足阶段管理需要，又为后续设计深化预留合理调整空间，确保计划在执行过程中具备可操作性与延续性。

4.2 将施工节奏因素纳入计划编制逻辑

在电力工程项目物资计划编制中引入施工节奏因素，应以施工组织实施规律为主线，对计划逻辑进行针对性重构。首先，依据经审定的施工组织设计和专项施工方案，对工程结构划分、作业面展开顺序及工序衔接关系进行系统梳理，将原本集中申报的一次性物资需求，细化为与施工阶段、施工区段和作业节点相对应的分批需求清单，在计划层面明确各批次物资的使用起点和持续周期，避免因施工面未展开而形成超前到货或现场积压。其次，围绕工程关键线路和控制性工序，对钢构件、主材设备及专用材料等核心物资实施差异化管理，在计划中不简单固化单一到货时间，而是结合施工进度可能存在的波动区间，设置合理的提前量和缓冲期，通过区间化到货安排降低关键工序受进度调整影响的敏感度，同时在计划编制说明中明确区间测算依据和适用条件，增强执行过程中的可操作性。再次，在计划形成阶段引入施工单位深度参与，通过组织施工、物资、技术等多专业联合校核，对计划中各批次物资的运输条件、现场堆放能力、安装准备情况进行逐项核查，重点识别施工节奏变化下可能出现的到货与使用错配问题，并据此对计划节拍进行修正，使计划内容与现场实施条件保持一致，减少计划与实际脱节的情况^[4]。最后，在计划文本中同步建立施工节奏变化情景下的调整原则，对因天气、交叉施工或外部协调因素导致的进度偏移，明确物资需求调整的触发条件、调整顺序及审批路径，避免临时变更缺乏依据而造成计划失控，使物资计划

在既定框架内具备随施工节奏变化进行有序修订的能力。

4.3 夯实计划编制的数据基础与核算方法

针对国网电力工程项目物资计划编制中基础数据偏差较为突出的现实情况，计划编制阶段应围绕数据源头规范与核算逻辑约束同步推进。一是从工程量和物资需求的统计口径入手，在初设批复和施工图会审完成后，明确以设计有效版本为唯一计算依据，对单位工程、分部分项工程的计量边界进行统一界定，同时结合国网现行定额及同类工程管理要求，明确材料损耗、二次倒运及现场不可预见消耗的计人规则，避免各专业自行放大或压缩用量导致基础数据失真。二是在完成理论测算的基础上，引入近三至五年同电压等级、同建设规模工程的实际领用与结算数据进行对标校核，对偏差较大的材料类别开展专项复算，重点分析施工组织差异、设计优化调整及现场条件变化对消耗的影响，据此对计算结果进行针对性修正，使计划数据更贴近真实施工消耗水平。三是在计划编制流程中设置分层复核机制，由专业负责人、计划管理人员和项目管理部门分别从技术合理性、数量完整性和计划协调性三个层面进行审查，对主材、大宗材料及技术条件复杂物资实施清单化复核，逐项核对规格型号、数量逻辑及交付节奏，防止因遗漏、重复或规格偏差引发后续执行风险。四是在计划执行过程中系统整理物资到货、领用及结余情况，对计划偏差原因进行分类记录，并形成可追溯的项目物资消耗台账，在项目收尾阶段对计划测算与实际结果进行对比分析，将成熟的测算参数和修正方法纳入后续项目参考数据库，以逐步提升计划核算的稳定性和一致性。

4.4 完善多专业参与的计划统筹模式

在国网电力工程项目物资计划编制实践中，完善多专业参与的计划统筹模式应围绕组织协同与职责清晰同步推进，首先在项目管理层面建立固定化的物资计划统筹机制，由项目物资管理部门牵头，明确设计、土建、电气、一次设备、二次设备及安装等专业在计划编制中的责任边界和数据提交深度要求，将各专业物资需求落实到可核算、可追溯的专业清单层级，避免因职责模糊导致需求遗漏或责任推诿；其次，在计划形成过程中采用集中会商方式，对各专业提报的物资需求进行横向比对和结构化校核，重点核查工程

量口径一致性、物资型号规格的专业适配性以及需求时间的逻辑合理性，对存在交叉或边界不清的需求由统筹主体统一协调确认，防止重复申报或计划碎片化；再次，在计划定稿前引入施工单位和监理单位参与审查，结合施工组织设计、现场施工顺序及施工方法，对设计阶段难以完全覆盖的临时性、辅助性和消耗性物资进行补充修正，同时对施工阶段可能出现的调整情形提出前置性修订建议，使计划更贴近实际执行条件；最后，对多专业交叉使用的共性物资实行统一归口管理，由物资管理部门依据工程结构和施工阶段进行集中测算和统筹安排，明确计量规则和分摊原则，避免多头申报引发数量失真或计划结构紊乱，通过上述协同机制的连续运转，使物资计划在专业覆盖、数量准确性和结构完整性方面形成稳定可控的编制模式^[5]。

5 结语

综上所述，电力工程项目物资计划编制是一项系统性、综合性工作，其质量受设计深度、施工组织、数据基础及协同机制等多重因素影响。通过对国网电力工程实践中常见问题的分析可以看出，物资计划并非单纯的数量统计行为，而是工程管理体系中的重要组成部分。围绕工程实际不断优化编制思路和工作方法，有助于提升计划的可执行性和稳定性。随着工程管理要求持续深化，物资计划编制工作仍需在实践中不断校正和完善，以更好地服务于电力工程建设全过程。

参考文献

- [1] 任惊勃.电力工程的项目物资质量管理及应用研究[J].活力, 2024(19):154-156.
- [2] 胡馨怡,姚伯羽.电力企业工程项目物资分类与成本需求预测[J].电气时代, 2025(5):120-126.
- [3] 王斌,高世锋.电力工程物资管理的发展方向及应用[J].电脑采购, 2024(22).
- [4] 潘丐多,王剑,吴越人,等.电力物资计划编制工作的重要性与方法[J].金融文坛, 2021(1):2.
- [5] 柳创,王亚磊,刘辉.新形势下电网项目投资计划管理探究[C]//全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集（七）.2024.

Research on Precise Positioning Technology and Error Control of Embedded Parts in Box Beam Prefabrication Process

Hongbin Sun

China Railway Third Bureau Group Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030006, China

Abstract

Prefabrication of box girders has become a core construction method in highways, urban rail transit, and large-scale municipal bridge projects, and its quality control requirements are constantly increasing under the trend of structural complexity and assembly. As an important interface connecting the structural function, construction process, and later operation and maintenance of the beam body, the positioning accuracy of the embedded parts directly affects the alignment of the duct, the transmission path of the support reaction force, the matching degree of the installation of ancillary facilities, and the structural performance throughout the entire life cycle. To this end, this article constructs a full process control framework for precise positioning of box girder embedded parts from multiple dimensions, including structural construction requirements, error generation mechanisms, positioning technology systems, and engineering application effects. A comprehensive solution path based on high stiffness tire frames, BIM+3D coordinate verification, digital twin models, and machine vision assisted detection is proposed. Provide effective technical support for large-scale prefabricated bridge construction.

Keywords

precast box girder; Positioning of embedded parts; Error control; Digital measurement

箱梁预制过程中预埋件精准定位技术与误差控制研究

孙宏斌

中铁三局集团建筑工程有限公司，中国·山西太原 030006

摘要

箱梁预制已成为城市轨道交通及大型市政桥梁工程中的核心施工方式，其质量控制要求在结构复杂化和装配化趋势下不断提高。预埋件作为连接梁体结构功能、施工工序与后期运营维护的重要界面，其定位精度直接影响孔道线形、支座反力传递路径、附属设施安装匹配度以及全寿命周期的结构性能。为此，本文从结构构造需求、误差成因机理、定位技术体系与工程化应用效果等多个维度出发，构建箱梁预埋件精准定位的全过程控制框架，并提出基于高刚度胎架、BIM+三维坐标复核、数字孪生模型与机器视觉辅助检测的综合解决路径。为大规模装配式桥梁建设提供有效技术支撑。

关键词

箱梁预制；预埋件定位；误差控制；数字化测量

1 引言

箱梁预制是现代桥梁工程中生产效率最高、标准化水平最高的施工方式之一。随着交通基础设施建设对施工速度、标准化质量以及全寿命周期性能要求的提升，预制箱梁中承载功能、施工辅助功能及监测功能的预埋件数量呈显著增长趋势。以典型项目为例，其内部预埋件往往超过 40 处，涵盖预应力孔道定位件、支座垫石锚固件、泄水管、横隔板内模板拉结件以及传感器腔体等。在此背景下，本文围绕箱梁预制中预埋件的类别特征、定位精度要求、误差形成机制及其传播路径展开系统分析，并提出可在工程实践中推广的

精准定位与误差控制技术体系，通过案例验证其效果，为提升装配式桥梁制造的精益化水平提供理论与实践支持。

2 箱梁预制中预埋件定位需求与结构特征

箱梁内部预埋件的设置目的包含力学传力、工序衔接、功能集成与后期监测维护，其功能属性决定其定位精度需求。根据其结构作用，可分为以下四类^[1]。力学功能类构件，包括预应力管道定位件、支座锚固钢板、横隔板吊装钢板等，该类预埋件直接参与力流传递，对梁体受力性能影响显著。例如，孔道位置偏差超过 5 mm 将导致张拉过程中摩阻增加、管道偏折甚至孔道破损；支座锚固件偏位会引起反力偏心，导致腹板局部开裂。因此，此类预埋件定位精度需控制在 $\pm 2\sim 3$ mm 管线及设备类预埋件包括泄水管、护栏安装件、电缆管等，其位置偏差主要影响后续安装匹配度和功能实现

【作者简介】孙宏斌（1983-），男，中国黑龙江海伦人，本科，高级工程师，从事桥梁（箱梁预制）研究。

效果, 精度一般要求控制在 $\pm 5 \text{ mm}$ 以内。

监测与维护类预埋件, 如健康监测传感器预留腔体、光纤通道等, 因监测设备结构尺寸小、空间受限, 需要较高的安装精度, 大多需控制在 $\pm 2 \text{ mm}$ 范围。施工辅助类预埋件包括临时拉接件、定位埋板等, 其位置偏差对结构功能影响有限, 但过大偏差会影响施工便利性, 通常需控制在 $\pm 5 \text{ mm}$ 左右。箱梁预埋件呈现“多类型、多精度、多界面”的特征, 建立适应不同等级定位需求的精准控制体系是提升预制梁质量的基础。

箱梁截面几何复杂, 布置预埋件需满足相应结构约束, 使预埋件定位体系受到以下影响。其一, 腹板倾斜及箱室空间限制使预埋件安装环境狭窄, 胎架布置空间受限, 要求定位工具具有高刚度与轻量化特征^[2]。其二, 纵向预应力孔道呈三维空间曲线, 定位装置需匹配曲线几何, 不能出现局部强制变形, 否则会在张拉时形成应力集中。其三, 横隔板内钢筋密度大、孔洞多, 使预埋件布置容易发生碰撞, 需要在设计阶段通过 BIM 模型提前检测干涉问题。其四, 顶板薄弱区域的振捣扰动较大, 预埋件易产生位置漂移。因此, 预埋件定位技术不仅依赖高精度测量, 更需要从梁体结构几何特性与施工工况出发, 构建适应不同区域、不同工序的综合定位方案。

3 预埋件定位偏差的形成机理与误差传播路径

3.1 初始安装基准的不稳定与施工过程扰动的叠加效应

预埋件定位误差首先来源于安装基准体系的不稳定性, 包括模板体系刚度不足、钢筋笼几何偏差及其在施工过程中的二次变形。箱梁钢模板在侧压力、振动及温度变化作用下易产生 $1\sim3 \text{ mm}$ 的挠曲或侧移, 而这些变形会通过刚性连接直接传递至预埋件位置, 使其在安装伊始便产生初始偏差。此外, 模板周转使用造成的定位销磨损、连接点松动进一步削弱其重复定位精度, 导致基准体系具有明显的“累积误差”特征。

钢筋笼的空间几何误差也是影响预埋件定位的主要因素。由于焊接收缩、吊装变形及保护层垫块高差等问题, 钢筋笼在实际施工中常出现局部 $3\sim5 \text{ mm}$ 的横向偏移与顶板钢筋网的 $\pm 5 \text{ mm}$ 起伏。当预埋件依附钢筋笼布置时, 这些变形会导致其位置产生二次漂移, 尤其在孔道密集区域更为突出。钢筋笼具有一定柔性, 其微小形变在浇筑前后均可能继续发展, 使预埋件位置呈现动态变化。因此, 安装前的精度控制只能解决“静态偏差”, 而施工过程中的体系变形则会进一步产生“演化偏差”。

3.2 浇筑振动、材料变形与人为因素的误差传播机制

在混凝土浇筑阶段, 振捣扰动是导致预埋件位置偏移的关键诱因。振捣棒插入与拔出的瞬时冲击会使薄弱区域和空间受限区域的预埋件发生 $2\sim6 \text{ mm}$ 的位移, 若定位胎架刚度

不足或限位装置未有效锁定, 则振动效应将在多个工序中叠加传播, 使整体偏差显著放大。浇筑过程的施工节奏、混凝土流动性及浇筑顺序的变化, 也会改变局部压力分布, 引起预埋件在初凝前发生缓慢迁移^[3]。混凝土材料在硬化过程中的早期收缩以及水化热引起的温度膨胀, 会在初凝与终凝阶段形成 $1\sim2 \text{ mm}$ 的后期偏移, 尤其对敏感型预埋件(如监测腔体、小口径管线)影响更为显著。这类偏差往往不易在浇筑过程中被及时识别, 但对后续安装与结构性能具有潜在影响。人工作业误差仍是不可忽视的影响因素。传统放样方式受测量经验、读数误差、角度判断等影响, 通常存在 $1\sim2 \text{ mm}$ 的不确定性。操作人员的加工、焊接和组装偏差亦会在不同工序间传递, 使局部误差逐步扩散至整体空间坐标体系, 形成典型的“多源—链式传播”模式。

4 预埋件精准定位的技术体系构建

4.1 基于高稳定基准体系的安装精度提升技术

为解决预埋件在初始安装阶段易受模板挠曲、钢筋笼变形和人工放样误差影响的问题, 需构建高稳定性、可微调的统一安装基准体系。综合工程需求, 本研究提出以高刚度组装式胎架为核心的稳定框架。胎架采用 Q345 型钢构建, 通过数控加工形成高平整度基准面, 并配置丝杆微调机构, 实现 $\pm 1 \text{ mm}$ 范围内的连续调节, 使预埋件在安装阶段即可达到接近成型精度的水平。胎架关键节点设置锁紧与限位结构, 可显著减少振捣冲击与混凝土侧压力对定位构件的扰动传递, 使其在浇筑全过程中保持稳定刚度。为了进一步提升安装阶段的空间协调性, 将胎架参数化设计与 BIM 模型关联, 提前对不同预埋件间的几何关系、孔洞布设与钢筋密度进行干涉校核, 避免现场适配造成的额外误差。同时, 将胎架、钢筋笼与预埋件的三维位置统一纳入同一坐标体系, 有助于减少基准散乱和多界面协调困难带来的累积偏差。工程应用结果显示, 采用该体系后, 预埋件初始偏差可稳定控制在 2 mm 左右, 较传统经验式安装显著提升精度与重复性。

4.2 基于数字化测量与动态稳控的全过程误差控制技术

由于预埋件定位受到施工动态扰动、材料早期变形及多阶段工序耦合的综合影响, 仅依靠安装阶段的精度控制难以确保成型阶段的空间稳定性。因此, 需要将数字化测量手段与施工过程稳控策略相结合, 形成从安装到成型的全过程控制体系。第一, 以 BIM 三维模型为坐标基准, 通过全站仪开展三维放样, 实现对孔道曲线、支座钢板及监测类预埋件的空间坐标精准输出。放样完成后, 利用三维激光扫描获取钢筋笼、胎架及已装构件的点云数据, 与 BIM 模型进行偏差比对, 可直观识别局部挠曲、构件碰撞与隐藏变形, 为浇筑前复核提供量化依据。第二, 在浇筑过程中设置抗扰动限位器, 并针对孔道密集区、薄壁区域开展实时复测, 以抑制振捣造成的瞬时位移放大效应。随着混凝土进入初凝阶

段，再次通过点云扫描完成终检，并对可能存在温度收缩或早期变形的部位进行及时调整，使预埋件在成型阶段保持稳定几何位置。数字化测量与动态稳控的结合，使误差控制由“静态精准”转向“动态可控”。工程验证表明，该体系可将关键预埋件成型偏差控制在 $\pm 2 \text{ mm}$ 以内，并显著降低误差传播风险。

5 工程案例分析与定位精度提升效果

5.1 工程背景及数字化定位体系实施流程

为验证预埋件精准定位技术体系在高速铁路梁场的工程适用性，选取某大型高铁预制梁场作为研究对象。该梁场承担约 32 m 标准箱梁的批量化生产任务，年产量约 700 桁，梁体截面尺寸大、孔道曲线复杂，预埋件数量普遍在 50~70 处之间，涵盖预应力孔道定位构件、支座锚固钢板、泄水管道、传感器腔体以及无砟轨道附属安装预留件等。针对上述瓶颈，项目在梁场全面部署“高刚度胎架—BIM 三维协同放样—三维激光扫描复核—浇筑全过程稳控”的数字化定位体系，通过将设计模型、放样基准、构件安装与浇筑扰动统一纳入同一坐标体系，构建贯通式质量控制链条。体系实施流程主要包括四个阶段：

第一，构建高速铁路箱梁与预埋件的 BIM 三维协同模型，实现设计坐标、干涉校核与构造约束条件的数字化解析，为胎架布置及后续放样提供统一基准。

第二，基于参数化模型生成胎架加工数据，使胎架结构在工厂阶段即可保证与预埋件几何关系的高精度匹配，并通过可调机构满足 $\pm 1 \text{ mm}$ 的安装微调需求。

第三，采用全站仪进行三维坐标放样，并利用激光扫描同步获取钢筋笼、模板及胎架的点云数据，将实测状态与 BIM 模型进行比对，可快速识别几何偏差、构件挠曲及干涉风险，实现浇筑前的精度闭环验证。

第四，在混凝土浇筑及初凝阶段实施动态稳控策略，包括关键部位限位器布置、振捣过程实时复测及成型阶段的二次扫描复核，确保预埋件在受到振动、侧压力和早期收缩作用下仍保持稳定位置。

通过上述配置，梁场从“经验式安装”转向“数据驱动的全过程定位控制”，使生产流程具备可量化、可预测、可追溯特征，为大规模流水化生产提供结构化质量保障。

5.2 定位精度对比与工程应用效果

为评估数字化定位体系的实际效果，将其与传统施工工艺的定位偏差进行对比分析。以孔道外露端、支座锚固构件、泄水管线及监测腔体等典型预埋件为代表开展统计，结果如表 1 所示。数字化体系显著降低了预埋件的成型偏差，其中孔道外露端偏差由传统工艺下的 6.2 mm 降至 2.1 mm ，改善率达 66%；支座锚固构件偏差减少 60%；泄水管及小口径管线构件偏差减小幅度达到 67%；监测腔体偏差控制在 1.2 mm 范围内，显著优于传统方法。数据表明，数字化体系可将关键预埋件的成型偏差稳定控制在 $\pm 2 \text{ mm}$ 范围内，已满足高速铁路结构对装配精度提出的高等级标准。除几何精度大幅提升之外，体系在工程效率和质量稳定性方面也产生显著收益：返工率下降 80% 以上，模板周转周期缩短约 10%，钢筋笼安装效率提升超 15%，梁体成型质量一次验收合格率提升至 98.7%。同时，数字化流程显著降低了施工对经验型技工的依赖，使质量控制更加可复制、可推广，为高铁梁场规模化生产提供了系统化能力支撑。

6 结语

预埋件作为连接箱梁构造功能、工序衔接和运营维护的重要界面，其定位精度直接影响结构性能和后续装配效率。预埋件定位误差具有多源耦合、动态演化与阶段传播特点，传统依赖人工经验的装配方式难以满足毫米级精度需求。本文构建了包含高刚度胎架、BIM 坐标放样、三维扫描校核和全过程稳控的综合技术体系，并通过工程案例验证了其显著的精度提升效果。随着数字化技术与智能装备的发展，预埋件定位将进一步迈向自动化、可预测与智能化，为装配式桥梁高质量发展提供坚实基础。

参考文献

- [1] 罗志涛. 火力发电厂小型预埋件精准定位工装精细化施工技术分析[J]. 科技与创新, 2025, (02): 124-127. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2025.02.034.
- [2] 陈少军, 郎中秋, 李明月, 等. 基于 BIM 技术的幕墙预埋件精准定位与安装技术[J]. 建筑施工, 2024, 46(02): 177-179. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2024.02.009.
- [3] 李勇, 孙国, 黄海清, 等. 综合管廊电力支架与预埋件精准定位施工技术探析[J]. 工程建设与设计, 2023, (19): 189-191. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.10.058.

Construction and Management of Water Conservancy Projects

Zijun Zhu

Qujing Irrigation District Management Bureau, Qujing, Yunnan, 655000, China

Abstract

Based on the current practical needs of water conservancy construction, combined with the technological innovation methods and management systems of intelligent water conservancy engineering construction, this paper summarizes the application of smart water conservancy and ecological restoration technologies in typical engineering practices, and summarizes the new concept of water conservancy construction implementation with digital twin technology as the core.

Keywords

Smart Water Conservancy; Ecological restoration; Digital twin; Engineering construction; management innovation

水利工程建设与水利工程管理

朱紫郡

曲靖灌区管理局，中国·云南曲靖 655000

摘要

结合目前水利建设实践需求，结合智能水利工程建设的技术创新方法及管理体系，对典型工程实践中的智慧水利、生态修复技术应用进行归纳，总结以数字孪生技术为核心的水利建设实施新理念。提出智能感知、生态修复工艺有机结合的新模式，在提高工程管理水平、水资源有效保护利用、改善生态环境方面发挥重要作用，进一步为水利管理部门的工程建设管理提供科学依据。

关键词

智慧水利；生态修复；数字孪生；工程建设；管理创新

1 引言

当下，全球气候变暖及局部区域水资源短缺的趋势明显，当前的水利工程建设面临着巨大的挑战和新的形势，传统的水利工程建设发展模式已经不能顺应现代的水资源建设要求。实际上，现阶段中国的水利工程建设正处在走向信息化和智能化的节点，但是水利工程项目建设过程中存在着相应的水利工程中的技术性应用手段不足，生态影响评估不够，水利工程建设管理的协同机制不完善，以及其基本形式得不到扩展等问题。

2 水利工程建设与管理协同的重要意义

2.1 推动工程建设智能化升级

智慧水利的建设，就是在水利工程中利用物联网、大数据等技术对工程的主要节点进行实时监控、动态调整。对于大中型的水利枢纽工程，工程建设过程中，可在工程重要节点架设智能传感器进行混凝土浇筑、结构变化等重要环节进行实时监控，在工程建设过程中还能够进行 BIM 技术进

行工程主要因素的数字化。但是，由于在智能化的驱动下，水利工程进行科学管控，工程实际运行中可以利用分析技术对工程建设中的工序进行调整，因此，工程的建设水平和施工质量都会有所提升。

2.2 促进水利工程生态价值最大化

水利工程的生态价值实现要求科学化规划设计，生态友好型工程理念要求下的水利工程只要采用合适的生态修复技术即可，并不需要解决其他工程的主体结构及功能由专门的人完成，这也与传统工程的模式要求发生了明显的变化，从而实现工程与生态的有机结合。得以实现水利工程生态价值的载体，实现其工程生态价值主要是因为水利工程的工程效益和生态效益的统一，工程建设中的生态修复技术的应用、将生态理念贯穿于水利工程的设计、建设、管理和运行的整个过程中，强化工程建设的生态保护功能。智慧水利既是现代水利工程的建设方向之一，同时也是水利工程管理的必然要求。智慧水利的工程建设规划与布局，既要做到工程建设功能齐全，也需要尽可能做到生态效果显著，实现工程与生态的协调发展。

2.3 实现水利管理精细化转型

现阶段，水利工程建设已进入品质工程建设阶段。将

【作者简介】朱紫郡（1992-），女，中国云南曲靖人，本科，工程师，从事水利结构与安全或水利工程管理类研究。

工程建设与管理相融合，能够有效提升水利工程的管理能力。通过在整个工程建设过程中应用智能感知技术，可以确保施工的准确性和高效性。智慧水利作为水利管理现代化建设重要的载体，是水利工程技术创新和技术管理相融合的产物，更是水利管理精细化升级转型的必经之路。工程建设应重视对工程信息的采集与研判，利用数字模拟技术确保工程建设全生命周期的管理，从而为水利工程管理决策提供科学判断。

3 水利工程建设中存在的问题

3.1 工程建设技术应用深度不足

由于工程建设技术的复杂性，智能技术应用并不完全符合工程实际需求，不同工程类型的适用性差异明显。目前，部分工程对智能技术应用重视不足，忽视了智能技术对工程建设质量的保障作用，简单认为智能技术属于“锦上添花”，影响工程建设的智能化水平，在实际应用中不需要深入推广，这在一定程度上阻碍了智能技术的广泛应用。另外，部分工程的技术应用缺乏系统规划，使智能技术在应用过程中缺少科学支撑。智能技术的应用理念，会直接影响到工程建设的智能化水平。

3.2 生态影响评估体系不完善

生态影响评估作为一项重要环节贯穿于工程项目建设管理的各个环节中，水生态修复、生物多样性保护等以及环境影响评估等环节，均存在技术上的短板、评估方法不科学的问题。智慧水利要实现高质量发展，必须加强生态影响评估体系的建设工作。目前的生态影响评估体系普遍不健全，评估指标不够科学，造成评估结果失真，影响了工程建设决策的科学性。智慧水利在工程建设完毕之后，多注重工程功能，而忽视了对生态效益的跟踪评估，这是在工程管理中出现的新问题，上述情况也出现在实际工程建设之中，生态影响评估的技术标准不统一，对生态影响定量评估、缺乏系统化的生态评估方法、没有形成完善的评估体系，直接影响着工程项目建设的科学决策。

3.3 工程管理协同机制不健全

水利工程建设是在快速发展进程中，技术创新和管理改进是促进提升工程建设质量和进度的必然结果。从工程实际运行来看，水利工程建设效益更体现了工程价值意义，也能够推动水利工程的现代化管理进程。水利工程的建设和水利现代化管理工作结合越来越紧密，在工程建设中，水利工程工程建设的发展就是行业的主攻点，促进了高质量水利事业的发展。水利工程与水利管理工作是结合体，在工程建设实际中，诸多问题互相交错，对工程建设和水利管理工作带来影响。建设管理和建设协同需要相关的协同机制形成，若缺乏协同机制，相应的评价体系不完善也会产生偏差的结果，比如生态影响评价不准、工程管理工作效率不足等，这

些问题都会影响工程建设。

4 水利工程建设与管理协同策略

4.1 构建智能化工程建设体系

工程建设需要系统化的智能技术支撑，应以工程需求为导向，从工程建设的全周期规划出发，才能实现智能化建设目标。在工程建设中，工程主体需要关注智能技术的深度应用，明确智能化建设的路径，形成规划、设计、施工、运维的全链条智能化体系，在工程建设全周期实现智能化应用，更具科学性。智能技术的系统应用根据工程特点进行定制化设计，确保技术应用与工程需求精准匹配。例如：某大型水库工程存在智能技术应用深度不足的问题，对工程建设的关键环节把控不够精准，对工程管理的支撑作用不够明显^[1]。因此，工程建设在智能化转型过程中，需要制定针对性策略，客观分析工程特点、管理需求等，做好工程建设与管理的协同，明确智能化建设的实施路径，结合工程实际，保障工程建设的科学性与管理的有效性。在工程建设的全周期管理中，要统筹考虑技术应用与管理需求，这样能够充分满足工程建设的实际需求。

4.2 建立生态友好型工程评估标准

工程生态评估体系的完善需要系统性思考，各环节之间需要协同配合，即便技术条件有限，在工程实施中也应优先考虑生态影响。工程与生态评估需要加强技术支撑，做好生态评估标准制定及评估方法的完善，最大限度降低生态影响。如果评估体系不完善，就要加强评估标准的制定。工程评估体系还应加强技术支撑和评估方法的创新，定期开展生态影响评估，科学分析，尽可能减少生态影响，也要加强评估结果的应用，避免评估流于形式，确保评估结果有效指导工程建设^[2]。例如：某河道治理工程要重视生态影响评估，不仅关注工程功能，还应关注生态修复效果，同时关注生态效益的评估。如果工程的生态影响或生态修复效果不理想，则应进行针对性调整，各环节应协同配合进行改进。工程评估体系的完善决定工程建设的生态效益水平，保障生态评估是工程建设的必然要求。目前，水利工程建设的生态评估体系正处于完善阶段，应加强标准制定，工程则要注重生态评估体系的建立，进而提升工程建设的生态效益。

4.3 创新水利工程管理机制

水利工程管理机制的创新需要多方协同，各管理主体之间需要密切配合，即便面临挑战，在工程管理中也应坚持创新理念。工程管理机制的创新需要加强管理理念更新，做好管理流程优化及评估机制完善，最大限度降低管理风险。工程管理机制的创新还应加强技术应用和管理创新，定期开展管理效能评估，科学分析，尽可能提升管理效能，也要加强管理创新的应用，避免创新流于形式，确保创新成果有效落地^[3]。工程管理机制的创新决定工程建设的管理效能，保

障管理机制创新是工程建设的必然要求。

4.4 推动工程全生命周期管理

在工程建设与管理协同影响下，工程全生命周期管理的实施，有助于提升工程管理效能。智慧水利作为工程管理的创新载体，进一步推动了工程全生命周期管理的科学化，通过数字孪生技术、物联网等手段，能实现工程建设全过程的精细化管理，保证工程建设质量具有科学性，更好地服务工程建设与管理。例如：某水库工程的全生命周期管理需要系统规划，通过数字孪生技术和工程监测系统。对于工程各阶段的管理，应在工程实施过程中实现了质量控制和安全管理，同时关注工程效益的评估。对工程建设，智慧水利是工程管理的创新方向。对工程管理，智慧水利应注重管理创新。智慧水利的全生命周期管理，让工程通过数字孪生技术形成规划、设计、施工、运营的闭环管理，让工程借助物联网、大数据、人工智能等技术。实现规划科学化、设计精细化、施工标准化、运营智能化效果，为水利工程建设奠定坚实基础。在智慧水利支持下，将工程全生命周期管理理念融入工程建设，通过数字孪生技术进行全周期管理，实现工程效益最大化，最终达成工程全生命周期的科学管理。

4.5 建立多部门协同工作机制

无论工程建设还是工程管理，协同机制始终是高效运行的关键所在，工程管理部门应加强协同，为工程建设提供有力支撑，并对管理流程、管理标准进行引导。针对工程建设与管理协同的难点是机制不完善，只有建立完善的协同机制，才能实现高效协同。工程管理要注重协同机制的建立，通过多方沟通，做好规划协调与管理协同，互相支持，通过协同机制对工程管理进行优化，保障工程建设的顺利进行。例如：从工程实践来看，某流域综合治理工程的协同机制，这也体现了工程管理的协同价值，从而促进工程管理的协同优化。针对工程建设与管理的协同，可以建立跨部门协同机制，并明确各方职责，进一步优化协同机制，对工程建设与管理进行系统性优化。工程管理，协同机制的建立一定要科学合理，从规划、设计、施工、运营等环节，加大协同机制的实施力度，确保工程建设与管理协同得到落实。在工程建设中，工程管理部门也要加强协同机制的建设，加快工程协同机制的实施，进一步提升工程建设与管理的协同水平。伴随着工程协同机制的完善，工程管理的协同水平也能够得到提升，协同机制的建立与完善，从而实现工程建设与管理的高效协同。

4.6 完善水利工程建设标准体系

对于水利工程，应该系统规划，确保在工程实施前完成标准制定，保障工程建设质量，开展工程建设的标准化管理，保障工程实施的规范化，这与传统模式形成鲜明对比，也更加科学。工程管理要保障工程建设标准体系的完善，加强标准制定与实施，进而提升工程的标准化水平。例如：某水利枢纽工程下，工程标准体系建立，通过标准制定、技术规范等措施，确保工程标准化实施，基于工程实践，达到了工程建设标准化的目的。工程管理，标准体系的完善也要加强，推动了工程建设标准化，工程管理的标准化水平得以提升。不仅工程建设的标准化水平得到提升，工程管理的标准化也体现出管理水平。在工程管理的标准化实施过程中，可以加强标准制定与技术规范的协同，做好工程管理的标准化，进而提升工程管理的效率，实现工程建设的标准化目标。工程管理与工程建设标准体系的结合，工程管理与工程建设标准体系。工程管理，工程管理在工程建设中，同时工程管理以工程建设标准为依据。工程管理与工程建设标准体系。工程管理与工程建设标准体系。工程管理与工程建设标准体系。如此一来，工程管理的标准化水平得到提升，从而实现工程建设与管理的高效协同。

5 结语

水利工程建管协调不仅是理论课题也是实践难题，在智能化程度日益提升、生态化理念逐渐强化的背景下，水利工程的建设模式及管理手段势必会得到改善，文章中所提及的协调方法亦可作为进一步解决问题的有效途径，并为日后水利工程的发展提供参考借鉴。水利工程服务于民、利国利已是目标所在，工程建设和工程管理是实现这个目标的重要手段，没有这两者的密切配合以及广大水利人员的付出，就不会有最终的目标实现。在这个过程中，我们的责任不仅是建造水利工程，更是为生态与人类的未来铺设可持续发展的桥梁。

参考文献

- [1] 于建华,阿木古楞.加强水利工程建设管理的几点思考与建议[J].内蒙古水利,2024(10):111-112.
- [2] 耕野张,晓君王.BIM技术在水利工程安全管理中的应用研究[J].工程施工技术,2024,2(2):125-128.
- [3] 正堂贾.新形势下水利施工企业安全生产管理解析[J].工程施工技术,2024,2(1):42-45.

Research on the Application of Utility Tunnel and Pipeline Construction Technology in Municipal Engineering Construction

Hailong Jiang

Science City (Guangzhou) Construction Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510700, China

Abstract

The continuous advancement of urban infrastructure has elevated standards for underground utility tunnels and pipeline systems. As critical components of municipal engineering, these systems play vital roles in urban energy distribution, water supply, and communication transmission. With the systematic implementation of urban renewal and the “Three Olds Renovation” initiative, underground pipeline networks have grown increasingly complex. However, traditional construction methods face challenges such as inefficient underground space utilization, environmental impacts, and safety hazards. This study explores the rational application of utility tunnel and pipeline construction technologies to systematically evaluate the strengths and limitations of existing technical frameworks, identifying optimization strategies to enhance project quality and efficiency. Through in-depth analysis of specific construction phases, the research provides theoretical support for standardized and safe municipal engineering practices, thereby meeting the long-term operational demands of modern cities.

Keywords

Utility tunnel construction technology; Pipeline network construction technology; Collaborative application; Construction management; Municipal engineering

市政工程施工中管廊和管网施工技术的运用研究

蒋海龙

科学城（广州）建筑工程有限公司，中国·广东广州 510700

摘要

城市基础建设的不断推进让地下管廊和管线系统有了更高标准，作为市政工程的关键组成部分，承担着城市能源输送、水源供应和通讯传递的重要作用。随着城市更新与“三旧改造”工作的系统化推进，地下管线网络变得越来越复杂，可传统施工方式存在地下空间使用效率不高、对环境有影响以及存在安全隐患等问题。研究管廊和管线施工技术的合理使用，是为了系统整理现有技术体系的优势与不足，寻找优化的办法来提高工程的质量和速度。通过深入分析施工的具体环节，为市政工程的规范、安全发展提供理论支持，进而满足现代城市运行的长期需要。

关键词

管廊施工技术；管网施工技术；协同运用；施工管理；市政工程

1 引言

市政工程里的管廊和管线施工是城市基础建设的关键部分，其技术应用直接关系到城市功能的稳定和可持续性。随着城市规模不断扩大，地下管线系统面临着施工精准度要求高、干扰因素多的实际难题，迫切需要研究高效又可靠的施工方式。管廊施工有明挖、暗挖和预制装配等多种工艺，涉及前期准备、防水防火和质量把控等重要方面；管线施工包括开槽埋管、非开挖技术和顶管施工等模式，需要兼顾防腐保温和安全管理。本文旨在研究这些技术的整合与改进方向，目的是为施工实践提供科学依据，推动城市地下工程的规范实施。

【作者简介】蒋海龙（1983-），男，中国山东梁山人，本科，高级工程师，从事建筑施工、市政施工研究。

2 管廊施工技术运用研究

2.1 管廊施工前期准备工作

管廊工程实施前的准备工作是让工程能顺利进行的基本部分，进行实地查看要完全了解地形地貌特点和地质结构分布情况，特别要准确确定已有的地下管道在空间中的走向，这些基础资料直接关系到后面方案设计是不是合理。所以设计队伍要根据查看的结果多次调整施工方案的具体内容，综合考虑施工可行性与环境影响控制等因素，让技术思路和现场状况很好地适应。在这个前提下同时推动材料和设备的准备工作，严格检查管片、钢筋等主要材料的出厂合格凭证，对盾构机、顶进设备等大型机器在进入场地前进行性能检验，保证设备运行稳定。同时规划好材料运输的路线和临时堆放场地的位置，防止因为物流不畅而耽误关键节点的施工时间。此类系统化的准备方式为后面的主体施工打下

了牢固的技术基础和资源保证^[1]。

2.2 常见管廊施工技术

2.2.1 明挖法施工技术

明挖法作为传统的管廊建造方式，重点在于开挖工作的细致掌控。因为要完全暴露施工区域，前期一定要精确做好基坑支护和降水工作，不然可能会出现边坡不稳定或者地下水渗透的问题。所以土方开挖要按照分层分段的原则进行，同时监测周边建筑的位移情况，保证附近的结构安全。要是碰到松软的地层，还得增加临时支撑系统，这时混凝土垫层浇筑和模板安装的准确程度会直接影响后续管廊主体的线型质量。等主体结构完成且强度达到标准后，回填工作必须采用对称分层夯实的方法，尤其要注意管线交叉区域的密实度检查，防止完工后沉降导致路面塌陷^[2]。这种方法适合在场地开阔、地下障碍较少的区域使用，它具有工序直观、成本可控的优点，但需要承担交通疏导和环境保护的额外费用。

2.2.2 暗挖法施工技术

暗挖技术通过在地下挖掘来避免对地表造成干扰，其中盾构法依靠机械化的掘进设备进行连续作业。当刀盘切割土层时，同步注浆系统会马上填充管片和岩壁之间的缝隙，这种动态的平衡既能够保持开挖面的稳定，又能抑制地表的沉降。而顶管法更适合短距离的管道穿越，它的液压顶进装置推动管节前进，在这个过程中需要持续监测轴线的偏差，并启动纠偏千斤顶。要是遇到卵石层或者孤石，需要提前用破碎或者置换的工艺处理障碍物。这两种工艺都要求严格控制掘进的参数，比如盾构的土仓压力和顶管的顶力变化必须和地质勘探的数据相匹配，不然可能会引起地层扰动甚至发生塌方事故^[3]。暗挖法在穿越建筑密集的区域或者河流时有着不可替代的作用，但设备投入的成本较高，而且对地质突然变化的适应能力较差。

2.2.3 预制装配法施工技术

预制装配技术把现场施工转移到工厂化生产，关键在于构件的标准化设计和误差控制。因为管廊节段是在工厂的模具中浇筑成型的，混凝土的养护条件和钢筋的定位精度都比露天作业好很多，所以构件的强度和防水性能有明显的提高。运输过程中需要用专用的平板车配合三维防震支架，避免长距离的颠簸导致结构出现微小的裂纹。当构件运到现场后，在全站仪引导下的吊装系统会把节段精确放置到位，这时高强螺栓连接或者承插式橡胶密封圈的施工质量直接决定了整体的防水效果^[4]。这种方法特别适合工期紧张或者环保要求严格的城区，其现场作业量可减少约 60%，但要求施工方具备 BIM 协同设计能力和大型构件吊装的经验，不然接口错位的风险会大大增加。

2.3 管廊施工中的防水与防火技术

2.3.1 防水技术

地下综合管廊的防水系统依靠材料特性和施工方法共

同起作用，一般会选用高分子自粘防水卷材或者水泥基渗透结晶型防水涂料作为主要的防水层。在处理变形缝或者施工缝的时候，一定要提前埋设可以拆卸的止水带，并且注入遇水就会膨胀的胶条，这种双重密封的方式能够很好地弥补结构位移产生的缝隙。要是基层有蜂窝麻面这样的问题，需要先用聚合物砂浆进行修补，让表面变得平整，不然涂料形成的膜的连续性就会受到破坏。卷材铺设的过程中，要求热熔搭接的宽度均匀，而且不能有气泡和空鼓的情况，转角的地方附加层应该延伸到阴角外侧 200 毫米以上。等防水层验收通过后，要马上做细石混凝土保护层，防止后续进行钢筋绑扎工作时造成机械损伤^[5]。

2.3.2 防火技术

防火设计需要同时考虑材料的耐火能力和对烟气的控制能力，管廊的内壁最好使用厚型防火涂料或者硅酸钙防火板材。因为电缆比较密集的区域火灾风险较高，防火分区隔墙须延伸至结构顶板，它的耐火时间需要达到两小时以上的标准。在安装防火门和防火卷帘时，轨道的预埋件需要和主体钢筋焊接固定，门框的缝隙要用阻燃密封膏填充，防止高温时烟气窜出。如果穿越防火分区的管线没有进行封堵，火灾发生时就会成为火势蔓延的通道，所以金属套管和岩棉填充层的施工紧密程度直接关系到阻火的效果。机械排烟系统需要和温感探测器联动调试，确保在火灾初期能够及时启动风机形成负压区域，这时排烟阀的开启方向必须和烟气流动的方向一致。

3 管网施工技术运用研究

3.1 管网施工前期准备工作

管网工程开始前的详细勘察对项目效果影响很大，所以要用地质雷达和管线探测设备相互验证地下障碍物的情况，尤其应明确已有的管线埋在地下的深度和材料特点。设计小组要根据勘察得到的数据调整管道路线方案，如果碰到和重要管线交叉的情况，就得用不用开挖的工艺来避开，这时三维坐标的准确计算会对施工安全产生影响。在这个前提下同时进行材料和设备的准备工作，仔细检查聚乙烯管材的熔体指数以及球墨铸铁管防腐层的厚度，对定向钻机、焊接设备做不加载的测试，保证它们性能良好。规划运输路线时要避开交通繁忙的时段和路段，转运大型管材时一定要配备专门的托架，防止管材变形，这种细致的准备工作为后面施工的顺利进行排除了可能存在的问题^[6]。

3.2 常见管网施工技术

3.2.1 开槽埋管施工技术

开槽埋管要精确掌控沟槽边坡的稳固状况，所以在开挖之前一定要根据地质方面的报告来明确放坡的比例或者支护的方式。要是碰到地下水位比较高的地方，轻型井点降水装置要提前运作三天以上，不然槽底出现涌水会使得管基受到干扰。管道安装的时候要用激光水准仪来核对中心线的

高度，承插接口的橡胶圈一定要均匀地涂上食品级的润滑油脂，如果插入的深度不够，就要马上退出来更换密封件。回填工作要严格按照两侧对称夯实的原则来进行，胸腔部位最好选用中粗砂，分层进行水密夯实，这时每层虚铺的厚度不能超过三百毫米。这种方法适用于埋深比较浅而且土质均匀的区域，它的好处是工序看起来直观，成本也能够控制，但需要协调好临时交通的引导和渣土的清理工作。

3.2.2 非开挖施工技术

非开挖技术是通过定向钻来穿过障碍区域，导向孔轨迹的设计要避开已有的管线，保持三米的安全距离。在钻头推进的过程中，随钻测量系统会实时反馈方位角的偏差，操作人员根据这个来调整钻压和转速，以保持设计的轴线。扩孔阶段要根据管径来搭配分级扩孔器，如果遇到粉砂层，就要增加泥浆的粘度，防止孔壁坍塌。管道回拖之前，要在聚乙烯管的外壁缠绕防磨带，拖管机的牵引速度要和注浆泵的流量联动控制，避免管体和孔道之间产生真空负压。这种工艺特别适合穿越河流或者交通干道，它对地表的扰动只有传统开挖方式的五分之一，但对地质突然变化的适应能力比较弱，而且需要专业设备的支持。

3.2.3 顶管施工技术

顶管施工依靠工作井的液压系统来提供顶推力，导轨安装的精度会直接影响初始顶进的轴线。当管节进入土层时，激光靶会实时显示前端的偏移量，这时纠偏千斤顶要在五度的范围内微调方向。触变泥浆注入系统必须和顶进速度同步，在管壁外围形成持续的减阻泥膜，不然顶力突然增大可能会导致后背墙位移。如果遇到孤石或者树根等障碍，人员需要进入气压舱进行人工破碎，这时舱内的气压要保持比地下水压高零点二兆帕。这种方法在穿越建筑基础时具有独特的优势，它可以把地表沉降控制在十毫米以内，但要求施工方具备处理复杂地质情况的经验和精密的测量技术^[7]。

3.3 管网施工中的防腐与保温技术

3.3.1 防腐技术

金属管道的防腐依靠涂层和阴极保护两种方式，所以管道外面一般会用熔结环氧粉末涂层当作基本的防护层，这个涂层固化后的厚度要用电火花检测仪来检查是否合格。当管道经过有杂乱电流的地方时，一定要加上排流锌带并且调整阴极保护的电位，不然电流的干扰会让涂层更快老化。修补接口的地方要先用喷砂机处理到露出金属的光亮，然后用热收缩套包起来加热固定，这时候密封胶有没有溢出来可以直接判断是不是密封好了。如果管道埋在腐蚀性很强的土壤里，聚乙烯胶粘带缠绕时的搭接宽度要增加到五十五毫米，而且每一层缠绕的拉力要保持一样。

3.3.2 保温技术

保温层的主要作用是减少介质热量的散失，聚氨酯硬质泡沫作为常用的保温材料，需要严格控制闭孔率和密度这两个指标。在发泡成型的时候，要求环境温度低于百分之八十五，不然气泡的结构不均匀会导致导热系数急剧增加^[8]。当输送高温介质时，工作钢管和外护管之间必须设置铝箔反射层，这样能让热辐射损失减少大约三成。电伴热系统要根据管道的走向分成一段一段来铺设，温度传感器要安装在弯头和阀门等容易散热的地方，如果某一段的温度下降超过了设定的范围，伴热带的功率要自动调整到平衡状态。外护管的焊缝要进行百分之百的真空检漏，任何小的针孔都会让泡沫吸水失效，所以成品管道一定要标明介质的流动方向和保温层的维护要点，这样可以保证热力管网全年的运行效率。

4 结语

对管廊和管线施工技术的深入研究为市政工程实践提供了可操作的指导，施工人员应严格执行质量控制体系，加强防水防火措施并落实安全管理规定，以防范施工风险并保证工程的耐用性。在实际操作中需要优化协同施工模式，合理规划布局以避免相互干扰，提高地下空间的利用效率。在未来的发展中，技术创新将成为推动力量，引入数字化工具和智能设备有望提高施工的精准度和环境友好性，推动行业向绿色、标准方向发展。从业者应持续关注技术的发展，加强培训和标准化推广，适应城市建设的复杂需求，让市政工程更好地支持城市的可持续发展。

参考文献

- [1] 聂凯昊.市政工程管廊和管网施工技术的要点[J].建材发展导向,2024,22(05):55-57.
- [2] 梁振春.市政工程管廊和管网施工技术要点研究[J].工程技术研究,2022,7(22):76-78.
- [3] 陈杰.市政工程管廊及管网的施工技术与要点分析[J].住宅与房地产,2022,(10):235-237.
- [4] 孟凯.市政工程管廊和管网施工技术的要点分析[J].技术与市场,2021,28(12):125-126.
- [5] 刘正刚.市政工程管廊和管网施工技术要点[J].工程技术研究,2021,6(15):106-107.
- [6] 陆文斌.市政工程管廊和管网施工技术要点分析[J].工程技术研究,2021,6(14):126-127.
- [7] 狄艳林.市政工程管廊和管网施工技术的要点分析[J].中国建材科技,2020,29(05):138-139.
- [8] 卢永红.市政工程管廊和管网施工技术[J].建材与装饰,2019,(10):30-31.

Research on Key Points of Construction of Dredger in Water Conservancy and Hydropower Projects

Yuezong Qi

Beijing Chaoyang Water Conservancy Engineering Co., Ltd., Beijing, 100020, China

Abstract

The smooth progress of water conservancy and hydropower construction projects enhances construction quality and ensures stable operation of engineering projects. Current requirements for such projects are increasingly stringent. In the cofferdam construction phase, it is essential to implement technical guidelines, strengthen quality control, and improve overall quality. Cofferdams come in various types, and construction plans should be selected appropriately based on actual project conditions and site-specific circumstances. Strengthening the control of key construction techniques provides a reliable guarantee for safe and efficient project execution. To address these needs, this study briefly outlines cofferdam construction techniques and analyzes their key aspects, offering valuable references for relevant professionals.

Keywords

hydraulic and hydroelectric engineering; cofferdam; construction points

水利水电工程围堰施工要点研究

祁月宗

北京市朝阳水利工程有限公司，中国·北京 100020

摘要

水利水电工程施工的顺利推进，可以提高施工质量，确保工程项目稳定运行。现阶段对水利水电工程施工提出了更高的要求，在围堰施工环节，需要落实技术要点，加强质量控制，提高整体质量。围堰有多种类型，根据施工情况和现场情况不同，结合实际工程情况对施工方案进行合理选择，并加强对各项施工技术要点的把控，为工程安全施工、高效施工提供了可靠保证。鉴于此，开展本文的研究工作，简单概述围堰施工技术，分析该技术的施工要点，以供相关人员参考。

关键词

水利水电工程；围堰；施工要点

1 引言

围堰是水利水电工程施工中，为创造干地作业条件而修建的临时性挡水建筑物。围堰施工的质量直接关系到整个工程的安危、工期与成本，它不仅是简单的土石方工程，更是一项融合了水力学、岩土工程、结构力学以及现代监测技术的复杂系统工程。在具体的施工中，通过加强前期规划，做好主体结构施工，并进行安全监测，可以提高整体的施工质量，保障水利水电工程顺利推进，实现预期的建设目标。

2 水利水电工程围堰施工技术概述

2.1 类型

水利水电工程中围堰的类型多种多样，它的核心功能是拦截河道水流，排除基坑积水，保障主体工程在无水环境

下顺利施工，它是一种临时性结构，需要满足挡水、防渗、抗滑、抗倾覆等各项要求。在施工过程中，其施工质量会直接影响主体工程的施工安全进度和成本。围堰分为多种类型，土石围堰主要采用石块，通过砌筑的方式进行施工，而且要在两层石块之间进行。空隙的预留是在必要的情况下，也可在砌筑的过程中，使用拉线的方式进行辅助，可以避免石块内部产生空洞。钢筋混凝土围堰以钢筋混凝土套箱结构作为堰体结构，具有较强的稳定性和承载力，而且现场环境不同，钢筋混凝土围堰发挥的作用也有一定的差异^[1]。总体来看，该结构具有更稳定的力学性质，应用价值比较高。钢板桩围堰采用钢板桩和止水材料，具有刚度大、防渗性好和可回收的结构特点，适用于软土地基或深水基坑中。草土围堰使用稻草、麦秸、粘土作为施工材料。施工快速，成本低廉，柔性好，适用于临时应急防水或小型水利工作中。土工膜围堰采用高密度聚乙烯土工膜、无纺布和填料，有着良好的防渗性能，重量轻，施工高效，适用于对防渗要求高的中小型工程或临时挡水设施。

【作者简介】祁月宗（1987-），男，中国河北保定人，本科，工程师，从事水利水电工程研究。

表 1 常见的几种围堰类型

围堰类型	核心材料	结构特点	适用场景	挡水高度范围
土石围堰	土料、石料、黏土、土工膜	结构简单、取材方便、适应性强	水深≤15m、流速≤3m/s，地质条件较好的平原或丘陵河道	3-20m
钢板桩围堰	钢板桩、止水材料	刚度大、防渗性好、可回收	水深≤25m、流速≤5m/s，软土地基或深水基坑	5-30m
混凝土围堰	常态混凝土、碾压混凝土	强度高、稳定性好、抗冲刷强	水深≥15m、水头差大(≥10m)，需长期挡水或作为永久结构一部分	10-50m
草土围堰	稻草、麦秸、黏土	施工快速、成本低廉、柔性好	水深≤6m、流速≤2m/s，临时应急挡水或小型水利工程	2-8m
土工膜围堰	高密度聚乙烯(HDPE)土工膜、无纺布、填料	防渗性能优、重量轻、施工高效	水深≤10m、流速≤3m/s，对防渗要求高的中小型工程或临时挡水设施	3-12m

2.2 原则

水利水电工程的围堰施工中，需要遵循恰当的原则。一要遵循安全优先原则，围堰需要满足抗滑稳定系数的要求，如混凝土围堰需要 ≥ 1.5 ，土石围堰要 ≥ 1.3 ，确保在设计洪水标准下，不发生渗漏等事故。二，围堰施工还需要遵循稳定性原则。安全稳定是一切施工的先决条件，围堰施工前做好安全性的勘察工作，确保方案符合要求。同时在设计施工中要着重考虑围堰施工的稳定性，选择与施工现场的地质条件和水泥条件相符合的材料，确保交工以后不会出现渗漏、腐蚀、塌方等各种情况^[2]。三，遵循经济合理原则，在满足安全与技术要求的前提下，优先选择当地易得材料，优化施工方案，降低材料运输与施工成本，同时减少后期拆除的工作量。

3 水利水电工程围堰施工要点

3.1 施工前期

在水利水电工程的围堰施工中做好前期准备工作，可以确保后续施工顺利推进。首先要开展地质勘察与水位监测工作，施工前相关人员进行详细的地质勘查，查明围堰基础范围内的土层分布、地基承载力、地下水位埋深以及渗透系数。同时还要了解软土地基的压缩模量、抗剪强度等各项指标，从而为地基处理提供重要依据。在水文监测中，连续监测河道水位流速、流量变化，收集历年的洪水资料，确定围堰的设计挡水高度与防渗标准。其次，选择科学合理的围堰形式。基于多种类型的围堰形式特点与施工条件，对施工要求进行对比分析，优化选择。决策时，还需要明确围堰是过水还是不过水，过水围堰允许汛期洪水漫顶，可降低堰体的高度，但必须对下游坡面和堰脚进行可靠的加固保护，设计需专门的水力计算和模拟试验验证^[3]。不过水围堰则要求在任何情况下，堰顶均高于水位，安全性更高，是更常见的选择。施工方案中还需要明确围堰的施工顺序，施工机械选型，材料运输路线以及施工进度计划。第三，做好材料与设备的准备工作。土石围堰中的土料需要满足塑性指数15~20，含泥量 $\leq 30\%$ ，粒径 $\leq 30\text{cm}$ 。土工膜需要选择HDEP材质，厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ ，通过渗透试验检测防水性能。钢板桩

的材质需要选择Q235B，长度要根据水深确定，拼接处采用焊接，焊缝需要进行渗透检测，确保没有渗漏的情况。混凝土选择C25~C30混凝土，骨料级配良好，坍落度控制在120~150mm。

3.2 围堰主体结构施工核心技术

3.2.1 土石围堰施工要点

在土石围堰施工中，首先做好基础处理，使用挖掘机配合推土机，清除表面的腐殖土、淤泥，清基范围要超出围堰基础边缘1~2m。清基后地基承载力要大于设计要求。而后，使用振动压路机碾压地基，压实度 $\geq 93\%$ ，避免围堰沉降过大。而后选择合适的填料，优先选择当地天然土石料，控制好土料的含水量，石料粒径 $\leq 30\text{cm}$ ，避免使用风化岩、软弱夹层^[4]。随后采用分层填筑和分层碾压的方法，碾压方向平行于围堰轴线，碾压重叠宽度 $\geq 0.5\text{m}$ 。防渗是土石围堰的生命线，根据地质条件和材料来源分为多种形式。粘土防渗体需要严格控制粘土的含水量和压实度。垂直防渗墙中，混凝土防渗墙、高压旋喷墙和自凝灰浆墙等成为主流选择。施工时需要确保墙体的连续性、垂直度和嵌入基岩的深度。采用土工膜防渗，土工膜铺设前需要平整坡面，清除尖锐杂物，采用热熔焊接法拼接，焊缝检测采用充气法。

3.2.2 混凝土围堰施工

首先安装合适的模板。选用钢模板，拼接处采用螺栓连接，设置止水条，防止漏浆。模板支撑采用满堂脚手架，支撑系统高度需要满足混凝土浇筑时的侧向压力。安装结束后，检查轴线偏差、标高偏差、平整度，验收合格以后进行钢筋绑扎。要加强钢筋质量的控制工作，钢筋绑扎时采用铁丝绑扎，受力钢筋保护层厚度 $\geq 50\text{mm}$ 。直径 $\geq 25\text{mm}$ 的钢筋采用机械连接，直径 $< 25\text{mm}$ 的钢筋采用焊接连接。进入混凝土浇筑阶段，采用分层浇筑的方法，从围堰一端向另一端推进，相邻两层浇筑的间隔时间，需要 \leq 混凝土的初凝时间^[5]。浇筑结束后及时养护，防止出现裂缝。

3.2.3 钢板桩围堰施工

钢板桩进场后需要检查外观，测量几何尺寸，若出现变形情况，要采用冷弯矫正法进行矫正。采用焊接拼接的方式，拼接处焊缝高度 $\geq 8\text{mm}$ ，焊接以后进行渗透检测，确

保无气孔、夹渣等缺陷。拼接以后的钢板桩长度需要满足设计要求。然后根据围堰设计轴线，采用全站仪定位，设置导向架，确保钢板桩沉桩精度。水深≤10m时，采用锤击法，水深大于10m时，采用振动法。沉桩顺序从围堰一角开始，向两侧对称推进，避免单排沉桩导致的倾斜^[6]。沉桩过程中监测垂直度，采用经纬仪双向监测，发现倾斜及时调整。钢板桩也需要做好防渗处理，在接缝处采用橡胶止水条，外侧涂抹防水涂料，确保接缝不渗漏。如果底基为砂层，在钢板桩的底部采用高压喷射注浆，形成防渗帷幕。

3.2.4 进行支护工作

围堰建造的过程中，要进行恰当的支护工作。组织人力将黄土装袋，支撑时将装着黄泥的沙袋放平，使它的上下左右、缝隙都要排齐，逐步提高至所需的高度。在合适的深度下，将钢板嵌入土中，用土袋填满堰体与钢板之间的空隙，以便预防围堰滑动，可以更好地保障围堰的稳定性。

3.2.5 基坑排水

在围堰施工中需要设置合理的排水系统。可采用集水井排水。在基坑底部设置集水井，集水井采用砖砌或混凝土浇筑，内壁铺设土工布，防止泥沙涌入。根据渗流量计算排水泵功率，采用离心式水泵。排水的过程中要控制好顺序，先排地表水，后排地下水，基坑水位降至施工面以下0.5~1.0m后，再进行主体工程施工。同时采用流量计监测渗流量，若渗流量超过允许值，则需要及时采取加固措施。

3.3 围堰安全监测与运行维护体系

围堰施工结束后投入运行中，需要建立全天候、全方位的安全监测体系。了解围堰运行使用的实际情况，及时发现其中存在的影响因素，保障整体的安全。首先，监测需要覆盖围堰结构和环境因素。使用全站仪、GNSS、静力水准仪等，监测堰顶的水平位移、垂直位移和深层水平位移^[7]。土石围堰竣工以后，沉降量可达堰高的0.8%~1.5%，需要开展持续监测，了解具体情况。开展渗流监测工作，如果渗流量突然增大或水质变浑，则是管涌和流土等渗透破坏的先兆。在混凝土围堰和钢板桩内埋设应变计和钢筋计，监测结构内力。同时还要持续监测上游水位、降水量和气温等诸多情况，获得详细的数据信息。其次，整合各类监测数据，开展分析工作，要与设计计算值、预警阈值等进行对比。现代工程常建立自动化监测与预警平台，实现数据的实时传输、动态分析和超标报警。发挥技术优势，当发现异常情况及时预警，可以提高工作人员的重视，及时采取相应的措施，避免出现安全隐患。此外，还需要开展定期的人工巡查与维护工作，检查堰体有无裂缝、滑坡、渗漏点和损坏的情况。发

现问题及时记录，评估并处理。

3.4 围堰拆除要点

围堰拆除要把控好时机，主体工程完工，具备永久挡水条件以后，要拆除围堰。拆除前需要完成基坑排水和废渣清理等一系列工作。明确拆除的方案，包括拆除顺序、方法、机械的选择以及相关的安全保护措施，对拆除人员进行安全技术交底，提高他们的重视。其次，明确拆除施工要点，土石围堰拆除时通常采用挖机和爆破等方式，将堰体拆除至设计高程，妥善处理拆除料。混凝土围堰拆除时，若不影响永久工程，可部分保留。否则需要爆破或机械破碎拆除。钢板桩围堰拆除时，可采用振动拔桩法，拔桩顺序与沉桩顺序相反，拔桩前需要清理桩周泥土，减少拔桩的阻力。同时在拔桩的过程中要监测钢板桩变形的情况，若变形过大，采用切割法分段拆除。做好河道清理工作，清除各种废弃物，恢复河道原貌和行洪能力。要采取环保措施，对弃土场施工便道进行植被恢复，可种植本地草本植物，防止水土流失，恢复生态环境。

4 结语

综上所述，在水利水电工程施工中，围堰起到了极其重要的作用。围堰有多种类型，要根据现场的实际情况和施工要求，选择合适的围堰类型，制定详细的施工方案。做好现场的技术交底，优化地基处理，加强主体建设，做好基坑排水。并监测围堰的使用情况，及时发现问题，有效处理。才能保证交工后不会出现渗漏、腐蚀坍塌的现象，预防产生重大围堰安全事故，保障水利水电工程施工能够顺利进行。

参考文献

- [1] 季闯. 水利水电工程围堰施工技术及要点研究[C]/新技术与新方法学术研讨会论文集. 2024:1-4.
- [2] 王兆强. 水利水电工程围堰施工技术要点分析[J]. 水上安全, 2024(12):22-24.
- [3] 李磊. 水利水电工程围堰施工技术要点分析[J]. 大众标准化, 2023(2):147-149.
- [4] 孔旺. 水利水电工程围堰施工技术及要点研究[J]. 城市建筑与发展, 2025,6(15).
- [5] 黄大舜. 水利水电工程围堰施工技术要点分析[J]. 砖瓦世界, 2023(21):200-202.
- [6] 何蛟. 水利水电工程围堰施工技术要点分析[J]. 水利电力技术与应用, 2023,5(5).
- [7] 何君. 水利水电工程施工难点及施工技术要点分析[J]. 工程技术与质量管理, 2025,1(12).

Key Points of Monitoring Volatile Organic Compounds

Yunhe Zhao

Hebei Runfeng Environmental Testing Service Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

Volatile organic compounds (VOCs), primarily emitted from vehicle exhaust, agricultural chemicals, and industrial processes, pose significant threats to ecosystems. These pollutants contribute to haze pollution, photochemical smog, ozone depletion, and other environmental hazards, while also endangering human health. To address this, implementing comprehensive VOC monitoring is essential. This requires adopting scientifically validated sampling and analytical methods to establish a robust monitoring network. By precisely tracking the concentration, chemical composition, and polarity of airborne VOCs, we can develop targeted control strategies to effectively improve air quality. This article analyzes key aspects of VOC monitoring, proposes evidence-based remediation measures, and ultimately enhances environmental governance outcomes.

Keywords

Volatile organic compounds; monitoring points; preventive measures

挥发性有机物监测要点思考

赵云鹤

河北润峰环境检测服务有限公司，中国·河北 石家庄 050000

摘要

挥发性有机物主要来源于汽车尾气、农药化肥、化工生产等，对生态环境造成严重破坏，容易引起雾霾污染、光化学烟雾、臭氧增加等问题，且危害人体健康。因此，要做好挥发性有机物监测工作，采用科学合理的采样方法和监测方法，形成完善的监测网络，详细掌握空气中挥发性污染物的浓度、种类、极性等特征，才能选择合适的治理方法和管控措施，有效改善空气质量。文章主要对挥发性有机物监测要点进行分析，从有效提升监测效果，以此为依据提出针对性的治理措施，进而优化控制质量，优化环保效果。

关键词

挥发性有机物；监测要点；预防措施

1 引言

为了有效改善空气质量，改变温室效应、酸雨、光化学烟雾等环境问题，需要做好大气污染监测工作，尤其要全方位监测空气中挥发性有机物种类、浓度等特征，为后续污染防治工作的开展提供重要数据支撑。

2 挥发性有机物的危害性

通常情况下，在企业排放的飞灰、废水中往往包含一定量的挥发性有机物，不仅破坏生态环境平衡，且对人体健康造成严重威胁。挥发性有机物的来源主要分为：植物释放、微生物的降解等自然源；人为源类型多样，如人们日常生活中汽车排放尾气、燃料燃烧烟气、清洁剂中都含有挥发性有机物，同时化工、石油化工、制药等行业排放的废水、废气也含有挥发性有机物，这是大气固定污染源，污染物种类繁

多，对空气环境的危害性较大^[1]。挥发性有机物危害性如下：污染空气，挥发性有机物经过紫外线照射，容易与空气中的氮氧化合物等物质产生光化学反应，产生臭氧、二次有机气溶胶等，降低空气能见度，且引起对流层臭氧增加，引起光化学烟雾事件，且致使气候变暖，引发温室效应；危害人体健康，一旦该物质进入人体内，会刺激呼吸道、眼睛，引起皮肤过敏，引发头痛、乏力、咽喉痛、咳嗽等。如果人体长期接触该物质，会抑制中枢神经系统正常生长发育，甚至引发神经系统损害、癌症、呼吸道疾病等。

3 挥发性有机物监测要点

3.1 明确监测目的

为了保障挥发性有机物监测工作的有序开展，需要明确监测目的，有效预防监测过程中可能影响的因素。其中，常见的监测目的有：（1）识别污染源，通过监测结果精准识别挥发性有机物的污染源，并以次为依据分析排放特征。（2）评估空气质量，全方位分析挥发性有机物对大气化学反应的影响，如光化学烟雾、温室效应等，实现大气质

【作者简介】赵云鹤（1987-），女，中国石家庄晋州人，本科，工程师，从事环境监测与治理工程研究。

量评估工作的准确开展。(3)评估健康风险。监测挥发性有机物中不苯、甲醛、甲醇等污染物的浓度，并分析可能引起的健康风险，进而有效保障公共健康和安全^[2]。在监测前明确监测目的，才能指引正确的监测方向，优化监测程序，促进监测工作的有序进行。

3.2 完善采样工作

采样质量与挥发性有机物监测效果息息相关，因此要严控样品采集工作的各个环节。(1)要选择合适的采样点位，确保采样区域的代表性，能够全面覆盖典型污染源，且要远离建筑物等，减少干扰因素。(2)根据相关技术规范要求，合理把控采样时间和频率，如果某区域短时间内的挥发性有机物波动较大，需要定时、高频率采集和监测；针对长期影响的挥发性有机物污染源，需要采取周期性采样方式。

(3)检测维护采样设备，为了保障采样质量，需要优选采样设备，并做好校准检验工作，并科学设置设备参数，确保采样设备始终处于良好的运行状态，如检验流量控制器，避免限流阀被堵塞、零件老化破损；检查过滤器，避免出现堵塞问题。此外，还需要检查采样罐性能，保障气密性、内壁惰性符合标准要求，以免吸附高沸点、极性组分^[3]。

(4)优选采样方法。容器捕集法，即利用注射器、塑料袋、玻璃容器、不锈钢等容器捕集浓度较高的挥发性有机物，其中不锈钢容器可以安装为空过滤采样头，提前抽空容器中的空气，实现便捷化采样。吸附法，利用活性炭、活性炭纤维等吸附剂或者吸附液对空气中的苯系物进行吸附采集，要结合挥发性有机物的种类、极性、沸点等特征优化选择吸附剂种类，确保具备较高的吸附容量和稳定的化学性质。此外还可以通过泵把空气样品通过吸附剂、吸附液，进而采集目标化合物，可以精准测量挥发性有机物平均浓度。固相微萃取法，这是一种被动式采集法，主要针对密闭室内空气中的挥发性有机物进行监测，即把吸附剂暴露于空气，直接吸附空气中流动性的挥发性有机物，该方法对外界环境要求较高，

容易受到湿度、温度干扰。此外常见的被动式采集方法还有扩散式采样、渗透式采样等方式。(5)样品运输、保存。完成样品采集工作后，要对样品进行科学保存，尽量使用封闭容器低温保存，减少运输过程中的污染，尽快运输到实验室，快速开展检测工作，保障测量精度。

3.3 优选监测方法

(1)气相色谱法。该方法属于实验室分析技术，主要是利用色谱柱对挥发性有机物中的各种组分进行分离，然后利用热导池检测器、质谱检测仪、氮磷检测器等开展定量分析，该方法可以对复杂样品进行高效检测，分离效率高，且灵敏度高。同时能够结合挥发性有机物的具体特征，采用差异化的方式进行预处理，如利用顶空进样方式处理挥发性较强的样品；吹扫捕集技术能够与吸附剂联合应用，利用惰性气体吹扫，进而分离出挥发性有机物中的组分；固相微萃取技术应用中，往往需要借助具备特殊涂层的石英纤维吸附进行处理。必要情况下，可以对气相色谱仪和质谱检测器联合应用，进而强化挥发性有机物分离、检测效率和精度。

(2)液相色谱法，该方法主要针对难以气化或者热不稳定的挥发性有机物监测中进行使用，利用液相流动性质对样品中的各类组分进行高效分离，然后利用电化学检测器、荧光检测器等专业设备进行检测。在实际作业中需要在室温环境操作，防止样品发生热分解现象，且要使用粒径较小的填料，进而提高分析速度。(3)在线监测技术，如膜萃取气相色谱技术、傅里叶变换红外光谱法、差分光学吸收光谱法^[4]。同时开发多样化的传感器，如半导体传感器、光离子化学传感器、电化学传感器等，能够对挥发性有机物进行持续性动态监测，为工作人员提供全面、精准的监测数据。例如，质子转移反应质谱技术应用中，需要对挥发性有机物电离，将其转化为单一离子，然后使用质谱仪器快速识别。其中，在线监测系统框架如图1所示。

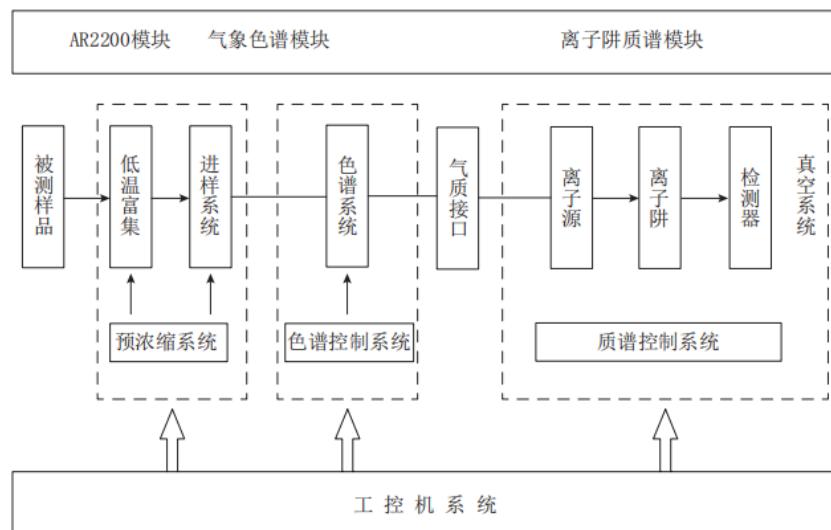


图1 在线监测系统构成

3.4 维护仪器设备

为了提升监测效果，需要优化选择仪器设备，并做好设备维护和保养工作，使其始终保持正常的运行状态。在实际工作中，需要选择灵敏度较高的高精尖仪器设备，如气相色谱质谱联用仪、气相色谱与光谱联用设备；要安排专业人员定期校准仪器设备，定期检查设备性能，做好现场快速检测工作，引进便携式设备，方便现场样品采集。

3.5 数据分析工作

针对短时间波动较大的挥发性有机物，需要实时监测，这样方便公众人员实时掌握污染情况，进而第一时间提出应对措施，有效控制空气污染蔓延趋势。工作人员需要对采集的数据进行科学的统计分析，对污染源进行详细解析，并预测污染发展趋势和变化规律，并根据大气污染扩散模型，进而全方位评估挥发性有机物对空气质量造成的影响。

4 挥发性有机物治理方法

4.1 冷凝回收技术

在具体应用中，需要利用气压方式对气体压缩，并将其温度降到露点以下，使其形态转化为液态物质，方便后续回收。该技术主要在浓度和沸点较高的挥发性有机物治理中进行使用。其中常见的降温方式有：使用机械设备将其温度降低到冷凝点；对液氮进行气化，在此过程中吸收大量热量，进而有效降温。但是该方法需要采购专业设备，且需搭配吸附、燃烧方式，回收成本较高。

4.2 吸附法

利用活性炭、分子筛等多孔吸附剂把挥发性有机物分子吸附到固体表面，以便对空气进行净化。如果废气湿度较大且浓度较高，需要使用沸石转轮技术，在旋转轮中放置蜂窝式沸石，该物质的吸附能力较强，在分子筛旋转轮持续转动过程中，有效吸附、净化有机废气^[5]。而分子筛的孔道结构较为均匀，能够选择性吸附挥发性有机物组分，且方便操作，在低浓度有机废气处理中发挥重要作用。

4.3 光催化技术

该方法应用中往往需要让挥发性有机物与二氧化钛、氧化锌等充分接触，产生化学反应，生成无害的二氧化碳和水。该技术主要处理醛类污染物，需要在常温常压环境中进行操作，并向挥发性有机物照射可见光，进而实现甲醛等污染物的有效降解。其中 TiO_2 这种光催化的毒性较低、化学性质较为稳定，活性较强，在挥发性有机物污染治理中发挥重要作用。

4.4 膜分离技术

挥发性有机物中不同组分在膜中的溶解能力、扩散速度存在很大不同，当挥发性有机物穿过纤维膜后，进行有效

分离，并在膜联测形成浓度梯度，实现污染物的有效分离和吸收。该方法方便操作，不会造成二次污染，但是成本较高。

4.5 生物降解法

在该技术应用中，需要驯化筛选微生物菌种，其养分主要为废气中的有机物，利用微生物的新陈代谢功能对其降解，转化为二氧化碳和水。其中，常见的生物降解法有：洗涤法，结合有机物特点选择合适的液体，并向其中投放微生物、营养物质，然后把含有挥发性有机物的废气通过其中，在此过程中微生物可以吸收废气中的污染物，并转化为液相实现有效降解。其中，生物洗涤法的应用流程如图 2 所示。生物过滤法，废气通过固体介质和微生物，以便吸收并降解废气中的挥发性有机物；生物滴滤法，把废气通过由惰性填料床构成的固体介质，有效处理废气中的挥发性有机物。

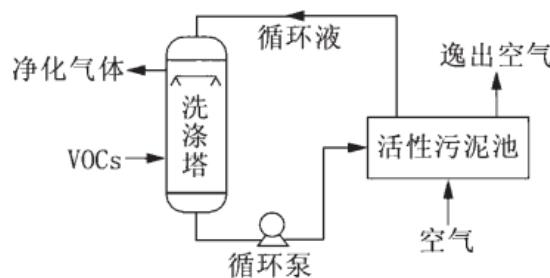


图 2 生物洗涤法应用流程

5 结论

综上所述，在挥发性有机物监测工作中，需要严格各个工作环节，关注数据异常，提高监测数据准确性。同时要优化有机物采样工作，减少采样误差。同时要对各种监测方法进行优化应用，保障监测效果，为后续污染治理提供数据依据，才能有效改善空气质量。

参考文献

- [1] 申凌霄. 挥发性有机物在线监测与溯源技术研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6 (18): 56-58.
- [2] 张福杰. 环境空气中挥发性有机物 (VOCs) 的监测及治理方法分析 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6 (15): 82-84.
- [3] 李俊峰. 工业园区挥发性有机物污染特征及溯源解析技术研究 [C]// 江西省工程师联合会. 工程技术与新能源经济学术研讨会论文集 (一). 湖北强佳环境工程有限公司;, 2025: 237-239.
- [4] 王晨阳, 金琼瑶, 姜翔. 浅析大气中挥发性有机物的监测要点 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6 (10): 75-77.
- [5] 姜欣. 关于大气污染的环境监测及治理思考[C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会, 重庆建筑编辑部, 重庆市建筑协会. 智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集 (二). 河南鑫福盛环保设备有限公司;, 2025: 508-511.

Analysis on anti seepage and structural stability of inverted siphon immersed pipe section of water conveyance project in mountainous area

Rui Zhang

China Railway Shanghai Engineering Bureau Group Huahai Engineering Co., Ltd., Shanghai, 201101, China

Abstract

In water conveyance projects in mountainous areas, inverted siphon immersed tube is an important water conveyance structure across valleys, across channels and under complex terrain conditions. Its safety directly affects the continuous operation ability of the water conveyance system and the level of regional water supply guarantee. However, in practice, affected by the factors such as large topographic relief, complex geological structure, significant water pressure gradient and high intensity of external environmental disturbance, the inverted siphon immersed pipe section often faces the risks of seepage damage, pipeline floating, joint leakage, uneven settlement of the pipeline and fatigue damage. In order to systematically reveal the anti-seepage demand and structural stability control mechanism of inverted siphon immersed pipe section under mountain conditions. Based on the research of using composite impermeable layer, flexible joint sealing, foundation bearing layer reinforcement, longitudinal constraint optimization and anti floating measures configuration, this paper can significantly improve the safety margin of immersed pipe section in complex mountainous environment, and provide technical reference for similar projects.

Keywords

inverted siphon; Immersed pipe section; Seepage prevention; Structural stability; Seepage analysis

山区输水工程倒虹吸沉管段防渗与结构稳定性分析

张锐

中铁上海工程局集团华海工程有限公司，中国·上海 201101

摘要

山区输水工程中，倒虹吸沉管作为跨谷、穿槽及复杂地形条件下的重要输水结构，其安全性直接影响输水系统的连续运行能力与区域供水保障水平。但实践中受地形起伏大、地质构造复杂、水压梯度显著和外界环境扰动强度高等因素影响，倒虹吸沉管段常面临渗流破坏、管道浮托、接头渗漏、管道不均匀沉降以及疲劳损伤等风险。为系统揭示山区条件下倒虹吸沉管段的防渗需求与结构稳定性控制机理。本文基于研究采用复合防渗层、柔性接头密封、基础持力层加固、纵向约束优化及抗浮措施配置，可在复杂山区环境下显著提升沉管段的安全裕度，为类似工程提供技术参考。

关键词

倒虹吸；沉管段；防渗；结构稳定性；渗流分析

1 引言

随着山区水资源调配规模的不断扩大，跨山谷输水工程中倒虹吸结构的应用场景愈加广泛，其在地形适应性与高压输水能力方面具有不可替代的作用。倒虹吸沉管需在地下或低洼区域承担较高水头差，运行工况中不仅承受内部水压，还需面对复杂地应力、地基变形及环境温度的动态变化。本研究旨在提供一套覆盖设计、施工与运行阶段的综合分析框架，为山区输水工程的安全运行提供理论与实践依据。

【作者简介】张锐（1980-），男，中国吉林吉林人，本科，工程师，从事水利工程研究。

2 山区输水工程倒虹吸沉管段的工程特征与风险暴露机制

山区地貌具有高差大、坡面陡峭、谷地狭窄及地层发育不均的典型特征，使得倒虹吸沉管的选线多需穿越陡坡崩塌堆积体、风化岩层或松散坡积物。山区地层结构常呈现明显的节理裂隙，渗透系数空间差异大，当沉管段处于高渗透性土体中时，外部渗流容易沿管壁—土体界面浓集，造成局部冲刷、空洞扩展以及基础承载能力衰退。而山区岩土体季节性干湿变化强烈，体积收缩与膨胀交替出现，使管道周围约束状态随时间波动，增加不均匀沉降与结构弯曲变形的可能性。尤其在高地应力区域，若管身埋深较大，围岩侧压不可导致纵向附加应力升高，使接头部位成为潜在薄弱点^[1]。

倒虹吸系统依赖压力流输水,由于入口与出口水位差通常较大,沉管段内部水压长期维持在高水平。运行中,阀门操作、水泵启停及突发停水可产生水锤效应,使管壁承受高幅度的瞬态压力波。压力波传播速度与管道材质、内壁粗糙度及周围介质阻尼相关,其耦合作用可能诱发疲劳裂纹的形成与扩展。在综合分析山区输水工程的地形特征、渗流行为与结构

受力机理的基础上,本文构建了“风险识别—渗流与受力分析—防渗体系设计与结构稳控—施工质量控制—运行监测与反馈优化”的研究路线框架。

该框架不仅体现了倒虹吸沉管段在设计、施工与运行全过程中的技术逻辑,也为后续章节的结构布局提供了明确指引,如图1所示。

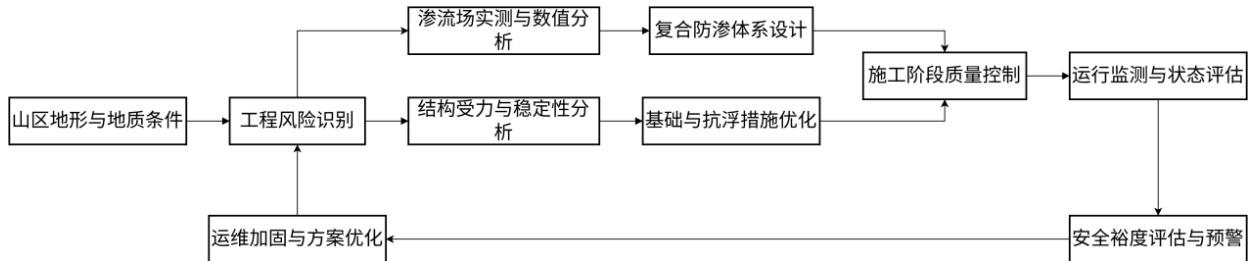


图1 山区输水工程倒虹吸沉管段防渗与结构稳定性图

3 倒虹吸沉管段的渗流场分布规律与防渗机理分析

3.1 渗流场形成机理与关键影响因素

倒虹吸沉管段的渗流场是在内部高水压、外部天然水力系统以及管道与土体界面多因素共同作用下形成的复合渗流体系,其演化过程具有明显的空间异质性和时间依赖性。首先,管壁渗透性能是影响渗流场分布的首要因素^[2]。对于未完全密实的混凝土管道或因老化、腐蚀导致微裂隙扩展的钢衬类结构,其微观孔隙会在高水头作用下形成渗水通道;而玻璃钢、HDPE等材料虽然本体渗透性较低,但在受温度循环和应力集中影响时仍可能出现界面渗漏。其次,周围土体的渗透系数决定了水流的扩散模式和渗压消散路径。山区输水工程多处于坡积层、崩积物与风化岩混合分布的场地条件中,土体渗透性差异显著,局部高渗透性碎石夹层会造成渗流场的集中通道,使局部渗压显著抬升;而低渗透性粘性土则会在渗流扩散过程中导致渗压堆积,增加对防渗层的压力作用。

除材料和土体因素外,水头差是驱动渗流的主要动力来源。倒虹吸结构在运行中内部水压通常远高于外部孔隙水压,当两者形成较大差值时,将诱发由内向外的渗流过程。特别是在高压段或低谷地形区,水头差可以达到数百千帕,使防渗系统承受持续且强烈的渗透应力。与此同时,季节性降雨、地表径流汇集以及地下水位上升也会对渗流场产生外部扰动。当外部水位显著超过管内水位时,渗流方向可能发生倒置,使外界渗水沿管壁薄弱处或接头缝隙倒灌入管体,形成外渗内漏的反向渗流过程。这种间歇性渗流方向变化不仅加速孔隙结构劣化,还可能导致土体颗粒被反复迁移,引发潜蚀与管底局部冲刷^[3]。在渗流演化过程中,接缝部位由于结构不连续、应力集中及密封材料老化,是渗压集中和渗漏发生的高风险区域。渗流水头在接缝区的突跳效应会显著提高局部渗流速度,使防渗材料在较短时间内出现疲劳破

坏。因此,充分理解渗流场形成机制及其影响因素,是制定可靠防渗策略的前提。

3.2 防渗结构体系的构成原理

为了有效阻隔倒虹吸沉管段复杂渗流场的扩展,工程设计中通常构建多层次、多材料协同的复合防渗结构体系,使其具备高抗渗能力、良好界面适应性和长期耐久性。整体防渗体系由管壁本体、外包防水层、接头密封构造及周围土体处理层四部分构成,其核心思想是通过连续封闭、柔性适应与低渗透性包围相结合,形成阻断渗流路径、延长渗流距离并降低局部渗压的综合防护格局^[4]。第一,管壁材料是防渗体系的主体屏障。对于钢筋混凝土管道而言,其防渗性能依赖于骨料级配、孔隙率、龄期及外加剂应用,通过采用低水胶比、高性能减水剂与致密化外加剂,可显著降低本体渗透性。对于HDPE或玻璃钢管等柔性管材,其本体基本不渗透,但需要重点关注安装阶段的机械损伤和运行中的温度变形,这些因素往往是防渗失效的源头。为进一步增强管壁抗渗能力,工程中常在管外表面设置喷涂聚脲、环氧涂层或防水砂浆外包层,这类材料具备优异的粘结性及延展性,可在地基变形或温度变化引起的微裂缝中保持连续性,从而形成沉管段外部的第一道连续防水屏障^[1]。

第二,接头密封是防渗体系的关键环节。接头部位不仅承受内部水压和外部土压力,还需适应管道因地基沉降、温差变化或运行压力变化产生的位移,因此需采用具有柔性与恢复能力的密封型式。常用构造包括双道橡胶圈密封、柔性胶浆密封与钢套筒压紧结构。橡胶圈通过适当的压缩量产生径向密封力,可抵抗高水压条件下的渗流侵入;柔性密封胶能在微裂纹出现时自动填充缝隙;套筒式结构通过机械压紧作用保证接头在位移作用下仍保持密封性。为了提升耐久性,部分工程在接头处增设加固环,以减少应力集中并提升密封构造的稳定性。可见复合防渗体系通过材料特性、结构构造与地基处理的协同作用,在倒虹吸沉管段形成具有连续

性、冗余性与耐久性的防护体系。其核心目标在于阻断渗流通道、降低渗压集中并提升结构稳定性，为沉管段长期安全运行提供可靠保障。

4 倒虹吸沉管段的结构受力特征与稳定性影响机制

4.1 内部水压力与外部荷载共同作用下的结构受力特征

倒虹吸沉管在运行过程中呈现出典型的压力管道受力特征，其结构安全受内部水压、外部土压力、地基反力以及温度应力的耦合作用影响。内部水压力是主导环向应力与径向拉应力的根本来源，在高水头输水条件下，水压沿管壁产生均布的环向拉应力，使管壁的抗拉强度成为控制爆管风险的关键参数^[2]。当输水系统出现水锤时，瞬态压力急剧升高，环向应力与轴向应力同步放大，使结构短时间内承受远高于稳态工况的加载，若材料存在疲劳微裂纹，则可能在瞬变压力下迅速扩展。

外部荷载主要包括覆土压力、地下水压力与可能存在的附加动土压力。在山区地形中，覆土厚度分布不均，使管壁受到的外压呈现显著差异，局部压力集中会引发椭圆化变形，进而导致环向压应力失稳。地基反力的均匀性直接关系到管道纵向弯矩的大小，若地基呈现软硬不均的特征，容易形成管道的悬空段与高应力集中区，使纵向拉应力周期性变化，增加疲劳累积效应。根据经验观察不难发现温度变化会引起管壁的热胀冷缩，在约束条件下形成附加应力，长期作用可能导致材料性能退化或接头松动，使结构稳定性受到进一步削弱。

4.2 结构失稳模式及其形成机制

在多种荷载长期耦合作用下，倒虹吸沉管段可能发生多类型结构失稳，其典型破坏模式包括环向拉裂、纵向弯折变形、接头失稳与抗浮失效。环向拉裂多由高内压或材料老化引起，当管壁强度不足或表面存在缺陷时，内部水压作用将导致裂缝沿环向出现并逐步扩展，最终发展为爆管事故。纵向弯折破坏常与不均匀沉降密切相关，当地基承载能力沿线路变化显著时，管道在纵向方向形成弧形变形，使拉压应力在管节交接处集中，接头承载状态恶化，更易产生脱节、剪切破坏或密封失效。接头区域失稳是倒虹吸结构中最常见且最危险的破坏形式之一^[3]。由于接头在结构上具有先天不连续性，其密封构造容易在水压波动、地基沉降及温度变化的共同作用下发生压缩量不足、局部开裂或密封层老化，从而形成渗漏路径。进一步发展时，渗流侵蚀土体导致管道支承条件削弱，使接头受力进一步偏离设计工况，形成恶性循环。抗浮失效则多发生在高地下水位或洪季条件下，当浮托力超过管道自重及覆土重量时，结构会产生整体上浮趋势，引发覆土破坏、管道位移甚至结构变形。此类破坏往往突

然发生，治理难度大，因此在设计阶段须严格开展抗浮稳定校核。

4.3 倒虹吸沉管段防渗设计与结构稳定性控制技术

防渗体系的设计需遵循“多道阻隔、整体封闭”的原则，在材料、构造与界面处理层面同时发力。针对管壁，应采用厚壁高密实度材料，通过外包环氧、聚脲或防水砂浆提升表面抗渗能力^[4-5]。对接头区域，需优化橡胶圈压缩量，设置双道密封构造，并通过加强环或钢套筒提高受力均匀性，使其在地基变形情况下仍保持密封效果。周围土体防渗采用注浆加固与黏性土回填联合方式，形成低渗透率环状土体屏障，使渗流路径尽量延长。对运行期可能出现的裂缝，需预设注浆管，为后续维修提供通道，实现结构全寿命周期防渗能力的可恢复性。在结构安全控制方面，可通过纵向约束体系、抗浮设计与地基加固措施提升整体稳定性。纵向约束体系包括支墩、锚固桩与限位墩，可抑制管道在高压与温度变化下产生过大轴向位移。抗浮应力校核需基于最不利水位条件，若浮托力明显大于管道自重与覆土重量之和，应增设抗浮锚杆、压重块或加厚覆土层，以保证抗浮稳定。地基加固措施包括换填、强夯、注浆加固与桩基支撑等方式，通过提高地基承载力、降低变形量、减少差异沉降，使管道受力更加均匀。

5 结论

山区输水工程中的倒虹吸沉管段面临渗流复杂、结构受力耦合明显、地基条件差异大及环境变化频繁等共同挑战，其防渗与稳定性控制是一项系统性工程。研究表明，渗流场的演化与管身材料、接头密封、外部渗透条件共同作用，结构稳定性则由水压力、地基反力与温度应力的耦合决定。通过构建复合防渗体系、加强接头密封、实施地基加固、优化结构约束与配置抗浮措施，可显著提升沉管段在全寿命周期内的安全性。工程实例进一步说明，基于地形特征、地质条件与水力作用的精细化设计，能够有效预防渗漏与结构失稳风险。未来应加强对水力瞬变、渗流—应力联合作用机理的研究，并结合数字孪生和监测技术，构建沉管段运行状态的实时评估体系，为山区输水工程提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 廉俊霞. 张坞渠灌区提升改造工程倒虹吸设计[J]. 河南水利与南北水调, 2025, 54(09): 55-56.
- [2] 杨奇, 马福恒, 叶伟, 等. 超标准暴雨洪水下长距离调水工程风险评估研究[J]. 水利水运工程学报, 2025, (05): 101-112.
- [3] 刘巧银. 明渠调水工程泵站故障情景下上游闸群应急调控研究 [D]. 河北工程大学, 2025. DOI: 10.27104/d.cnki.ghbjy.2025.000480.
- [4] 张帅康. 大流量倒虹吸充水过程及出口流态水力特性研究[D]. 黑龙江大学, 2025. DOI: 10.27123/d.cnki.ghlju.2025.001207.
- [5] 菡征. 浅析山区输水工程渡槽方案设计与研究[J]. 地下水, 2022, 44(05): 116+122. DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2022-05-037.

Research on performance evaluation of expressway project management in the new era

Zhongbo Zhao

Xinjiang Communications Investment Construction Management Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830501, China

Abstract

Highway Engineering is an important part of the national comprehensive transportation system, with large investment scale, long construction cycle and many participants. Management performance directly determines the efficiency of resource allocation and the level of value creation in the whole life cycle. In the new development stage, the restriction of land elements, the improvement of technical complexity, the strengthening of Green Governance and the rapid popularization of digital construction make the traditional result oriented management mode difficult to meet the needs of project governance. Based on the analysis framework of goal oriented management theory, value engineering and data governance paradigm, this paper studies from four dimensions: the theoretical basis of performance evaluation, the construction of evaluation index system, data-driven model path and institutional coordination mechanism, and puts forward the governance strategies of phased evaluation, digital twin empowerment and collaborative optimization of stakeholders, in order to provide method support and decision-making basis for highway project management in the new era.

Keywords

Highway Engineering; Performance evaluation; Project management; Digital governance

新时期高速公路工程项目管理绩效评价研究

赵忠波

新疆交投建设管理有限责任公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830501

摘要

高速公路工程是国家综合交通体系的重要组成部分，其投资规模庞大、建设周期长、参与主体众多，管理绩效直接决定资源配置效率与全生命周期价值创造水平。在新发展阶段，土地要素约束、技术复杂性提升、绿色治理强化与数字化施工迅速普及，使传统以结果为导向的管理模式难以适应项目治理需求。本文以目标导向管理理论、价值工程与数据治理范式为分析框架，从绩效评价的理论基础、评价指标体系构建、数据驱动模型路径与制度协同机制四个维度展开研究，并提出分阶段评价、数字孪生赋能与利益主体协同优化的治理策略，以期为新时期高速公路项目管理提供方法支持与决策依据。

关键词

高速公路工程；绩效评价；项目管理；数字化治理

1 引言

高速公路工程项目管理绩效具有多维目标属性，其评价不再局限于造价控制、施工质量与节点进度这一传统“三要素”，而是扩展至工程安全稳定性、环境友好性、供应链韧性、全生命周期经济性以及区域经济活动辐射等维度。其核心逻辑在于投资方强调资本效率及项目投资回报，政府主管部门关注公共治理责任、合规性与生态保护，承包企业追求利润目标与施工效率，运营单位关注交通通达性与服务能力。因此，高速公路工程绩效评价必然从单一维度走向多主体价值均衡的评价范式，通过综合指标体系体现不同利益目标的协同，实现“工程成果—社会效益—运营绩效”三重价

值统一。

2 高速公路工程项目绩效指标体系的构建原则与结构设计

2.1 指标体系构建原则分析

高速公路工程项目绩效指标体系的构建应以科学性为基础，通过指标与工程目标之间的逻辑一致性确保评价结果真实反映项目绩效状态。科学性首先体现于指标可度量、可解释和可验证，即指标必须与工程实体属性或管理行为存在清晰因果映射，例如路面平整度指数与摊铺温控策略呈显著相关，桥梁线形偏差能够反映张拉过程参数控制水平，供应链履约率可直接反映材料到场能力与组织协同效率。系统性要求指标体系覆盖工程建设全过程，包括策划、调查设计、施工组织、质量控制、安全管理乃至试运行阶段，使评价不单针对结果指标，而形成“输入—过程—输出—影响”的多

【作者简介】赵忠波（1985-），男，中国山东菏泽人，本科，高级工程师，从事公路工程项目管理研究。

维结构。差异化原则强调指标必须与项目情境相适应，高速公路工程受地形地貌、气候环境、资金结构及建设模式影响明显，山区隧道群项目的绩效侧重点与平原路基大断面段存在本质差异，因此指标权重与评价阈值必须根据地质风险等级、工序耦合程度与工期紧迫性进行调整，否则将导致指标“同质化”而失去治理有效性。可操作性原则则要求指标具备明确的数据获取路径、统计周期与判定标准，避免“抽象指标”或“空洞指标”，如针对施工安全绩效，不应仅以事故数量衡量，而应采用危险源识别准确率、作业许可闭环完成率、监测报警响应时效等过程指标，使评价体系具备实际管理意义。

2.2 “层级—维度—指标—数据源”的结构化指标体系设计

面向新时期高速公路工程治理需求，绩效指标体系建设建议采用“层级—维度—指标—数据源”的四层结构，以确保评价目标与项目执行状态保持一致。目标层用于锚定项目全生命周期价值，包括建设质量、投资效率、工程安全、环境友好与运营服务能力，体现绩效评价的战略指向；维度层将目标解构为可管理的核心领域，如工程质量维度涵盖结构性能、材料合格性与工序稳定性，进度维度聚焦关键节点达

成与关键路径偏差，成本维度针对资金使用效率、供应链资源占用与变更控制能力，安全维度关注事故预防、危险源控制与施工行为合规性，绿色与社会维度则纳入生态扰动、节能指标与社会接受度等内容；指标层呈现可量化对象，包括面向施工实体的硬指标，如路基压实模量、隧道衬砌强度、桩基完整性，也包括行为指标，如节点延误率、施工装备利用率、供应链到货稳定性与作业许可闭环完成度；数据源层则规定指标的采集方式，包括物联网传感器输出、试验检测数据、施工日志、人员行为数据、供应链履约记录及监测报警响应时间等，通过确定采集频率与自动化程度，使指标体系不依赖经验判断，而以客观数据构成评价依据。上述结构可实现从“指标孤岛”到“指标网络”的转变，通过指标之间的逻辑关联形成动态治理能力，使绩效评价不再停留于静态结果描述，而在项目执行过程中对偏差趋势进行识别，从而促使管理行为提前介入并形成闭环调控。

如图 1 所示，“层级—维度—指标—数据源”的四层结构将生命周期绩效目标依次分解为可管理维度与可量化指标，并通过统一的数据源体系实现客观采集与动态更新，使指标体系从静态列举走向过程化、网络化治理。

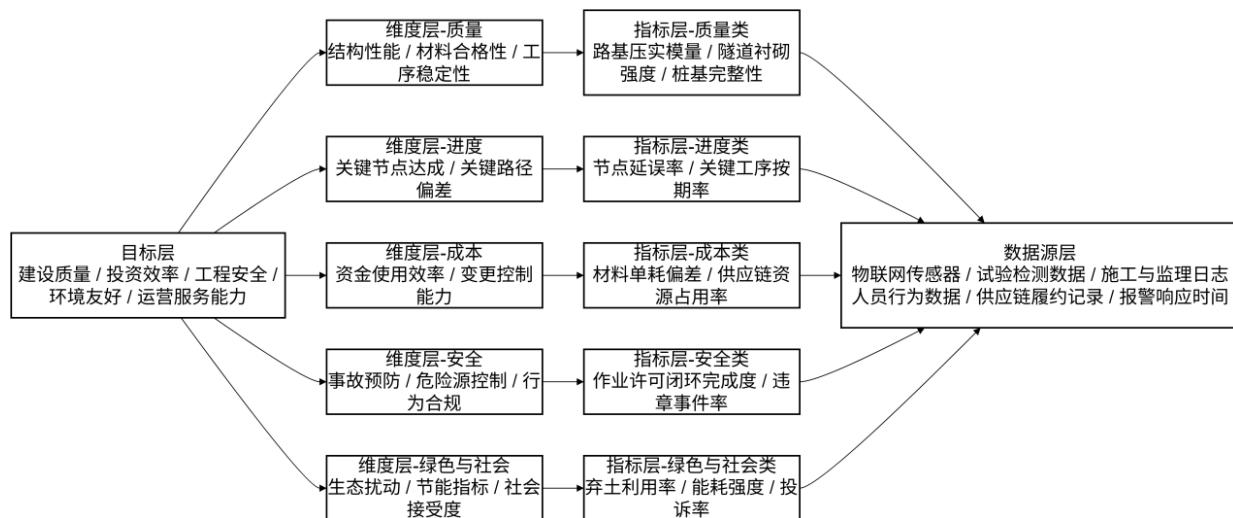


图 1 高速公路建设绩效评价的结构化指标体系

3 高速公路施工与交付阶段的动态治理机制

3.1 施工节点：过程质量闭环与风险释放控制

施工阶段处于高速公路生命周期治理的执行中心，其核心任务不仅在于实现设计图纸的实体化，更在于在动态环境中控制质量偏差、吸收前期阶段可能累积的技术与组织风险。传统施工管理侧重事后验收与规范校核，忽视施工过程的动态波动性，使得质量偏差在阶段内难以及时发现，从而在竣工后表现为结构性能的不确定性。现代施工治理应以过程闭环管理为理念，通过实时监测、模型预测与反馈调节构建“目标—执行—验证—修正”的动态机制。

施工治理的另一关键维度是质量责任链与数据可追溯体系的构建。材料性能、施工机具状态、工序衔接质量与环境因素均需纳入统一的质量评价体系，通过数字化工具实现信息同步采集与自动校核，从而避免人为经验“掩盖”质量波动。质量数据应建立跨主体共享机制，使监理单位、设计单位与建设单位均能基于同一数据源实现实时校核，形成施工行为的透明化治理结构。同时，施工阶段的风险释放应通过精细化组织管理来实现，包括对关键工序设定风险阈值、建立动态调度机制、强化分包责任边界等，以防止因组织不协调导致工程节点性风险扩大。通过上述路径，施工节点能够实现质量偏差的即时反馈与风险的提前释放，使工程实体

性能在施工阶段即得到有效保障。

3.2 交付节点：性能量化评估与责任边界转移

竣工交付节点在高速公路生命周期中具有制度转换与责任重构的双重功能，其治理核心不在于“项目完成”，而在于是否能够在工程性能、质量责任与未来维护机制之间形成清晰的界面。传统交付模式往往依赖外观检查、局部指标测试和结构完整性评定，无法充分反映工程长期服役能力，使得部分潜在缺陷在运营期才逐步暴露，导致维护压力加剧甚至风险事件发生。因此，交付节点应从静态验收向性能导向评估转型，通过综合量化指标体系评估工程实体的长期耐久性与服务能力。交付阶段的治理逻辑还体现在责任边界的制度化划分中。设计单位应对寿命预测误差承担相应责任，施工单位需对潜在工艺缺陷提供质量保证，运营单位则需在明确的性能基准下开展维护活动。通过绩效约束机制，可将责任主体在全生命周期中的行为纳入统一评价体系，使其激励方向与长期性能目标保持一致。与此同时，交付节点应通过信息回收机制，将施工过程数据、材料批次信息与现场测试结果纳入数字孪生平台，使工程的初始状态能够在虚拟模型中得到准确表达，为运营期性能仿真、病害预测与维护策略优化提供数据基础。最终，交付节点由单一质量认定环节转变为全生命周期治理的制度枢纽，使工程资产在进入运营阶段前即具备透明、可靠与可追溯的性能基础。

4 运营维护阶段的价值回流与生命周期治理工具体系

4.1 结构衰退机理模型与维护干预策略

高速公路运营阶段的核心特征在于结构性能随时间呈现衰退趋势，这一过程受荷载谱变化、环境暴露等级、材料老化行为及施工偏差等多源因素共同影响。路面结构中，车辙增长、疲劳裂缝扩展与表面抗滑性能衰退是最典型的病害，其演化路径具有明显的累积性与不可逆性。基于 Pavement Management System (PMS) 的预测模型，可通过车流增长率、等效标准轴载、温度梯度及材料粘弹系数构建车辙增长与裂缝扩展曲线，使维护行为从经验性判断转向定量化调控。在此基础上，可根据关键性能指标变化率确定最佳干预窗口，例如在车辙发展曲线的加速段前实施薄层罩面，可显著降低未来养护成本，并避免因结构损伤叠加导致的整体翻修。

对于桥梁与隧道等结构性工程，疲劳裂纹萌生、钢筋腐蚀扩散及耐久性衰退规律更具复杂性。腐蚀环境指数、氯离子扩散模型、钢筋失重率与混凝土碳化深度等指标可用于构建剩余寿命评估模型，通过分段线性拟合或概率可靠性分析预测结构耐久性边界。采用健康监测系统 (SHM)，通过布设应变计、加速度传感器、位移计与湿度监测节点，可实时捕捉结构响应的微小变化，实现对病害萌生阶段的提前识别。在维护策略制定中，不仅需考虑技术层面的恢复效果，

还应综合区域交通功能、社会成本与施工扰动等外部约束。

4.2 生命周期治理的数字化与制度化实现路径

全生命周期治理的现代化进程依赖数字化工具体系与制度结构的协同构建。数字化方面，BIM 与 GIS 的融合技术能够实现空间信息、材料参数、地理环境及施工记录的可视化整合，使工程实体的几何特征、材料性能与施工过程状态在三维空间中同步表达。在运营阶段，通过与传感器网络、视频识别系统与交通流监测平台联动，数字孪生系统可实时呈现结构性能演化与交通负荷变化，实现工程实体在虚拟空间中的即时映射。通过对虚实模型间偏差的持续分析，可进行病害趋势预测、维护策略模拟与风险场景再现，从而显著提高养护决策精准度。

制度框架是生命周期治理得以落地的关键保障。传统竣工验收制度以阶段性评价为主，难以覆盖结构全寿命的性能要求，因此需要构建以“性能目标”为核心的长期治理制度。性能合同机制要求设计、施工与运营主体在合同中明确寿命指标、结构耐久性阈值与维护责任边界，使治理目标从短期交付转向长期性能；责任链制度通过全过程质量追溯与问责体系，确保各主体在决策、设计、施工与维护阶段承担一致的绩效责任；全生命周期成本 (LCC) 核算体系则通过将建设成本、维护成本与社会经济成本纳入同一评估框架，引导投资主体从“短期造价最低”转向“长期成本最优”。当制度保障与数字化工具形成协同后，高速公路建设便可实现从线性治理向循环治理、从经验判断向预测管理的深层转型，为工程资产的长期稳定与价值最大化提供系统化支撑。

5 结论

新时期高速公路工程项目管理绩效评价呈现从事后验证向过程治理、从单一目标向多维价值、从经验判断向数据驱动的深度演化趋势。科学指标体系必须锚定全生命周期价值，并通过数据采集、模型反馈与制度协同形成治理闭环。实践证明，动态数据驱动评价不仅能降低工程偏差风险，还能提升供应链效率、施工组织能力与安全韧性，是当代高速公路建设实现高质量发展的关键路径。未来研究应进一步引入碳排放指标、数字孪生结构监测与风险博弈机制，为绩效评价提供更加精准与前瞻的决策基础。

参考文献

- [1] 王恩雨.高速公路项目中机电工程监理的精细化成本控制方法[J].运输经理世界,2025,(14):154-156.
- [2] 邓媛媛,蒋雨航,陈惺,等.基于云模型的高速公路工程项目母子公司协同水平评价研究[J].工程管理学报,2025,39(3):71-77.
- [3] 王青娥,彭玉珍,樊金婵,等.高速公路工程品质影响因素作用机理[J].公路交通科技,2025,42(4):85-93.
- [4] 程万里,吴建平,吴赞平,等.高速公路养护工程项目管理规范创新[J].交通企业管理,2025,40(6):37-39.
- [5] 曹成龙.浅析智慧高速公路机电工程项目管理[J].中国设备工程,2025,(11):26-28.

Low-carbon economy should be prioritized alongside the “development” and “renovation” of hydropower in Tibet

Cirendanta

Yajiang Clean Energy Development Co., Ltd., Linzhi, Tibet, 860000, China

Abstract

The development concept of a low-carbon economy has driven the green transformation of China's energy system. Today, the development and utilization of clean energy have long become a key path to achieving the “dual carbon” goals, and also play a strategic supporting role in the sustainable development of the Tibet region. As a core component of the Xizang energy system, hydropower development has demonstrated the potential to optimize the energy structure and enhance comprehensive benefits by applying the approach of balancing “development” and “renovation” to the utilization of hydropower resources. Currently, the development of Xizang hydropower still faces some challenges. Before thoroughly implementing the concept of a low-carbon economy, it is necessary to conduct a comprehensive review of the current situation, carry out systematic evaluation and planning, and prioritize ecological and environmental protection as well as social benefits. Only in this way can the demands of all parties be coordinated, and the construction of a green and sustainable energy base in Xizang be promoted. Based on the dual perspectives of low-carbon economy and regional sustainable development, this paper mainly analyzes the problems faced by Xizang hydropower under the model of balancing “development” and “renovation,” and proposes corresponding improvement strategies for reference.

Keywords

low-carbon economy; Xizang Hydropower; development; renovation

低碳经济与西藏水电“开发”和“改造”并重

次仁旦塔

雅江清洁能源开发有限公司，中国·西藏 林芝 860000

摘要

低碳经济的发展理念推动了我国能源体系的绿色转型。如今，清洁能源的开发利用早已成为实现“双碳”目标的关键路径，对于西藏地区的可持续发展来说也具有战略支撑作用。水电开发作为西藏能源体系建设的一个核心环节，将“开发”与“改造”并重的思路应用到水能资源利用当中，已经显示出优化能源结构、提升综合效益的潜力。当前，西藏水电发展仍面临一些挑战。在深入贯彻低碳经济理念之前，有必要对现状进行全面审视，进行系统性的评估与规划，将生态环境保护与社会效益置于优先位置，这样方能协调各方诉求，推动西藏绿色、可持续的能源基地建设。本文基于低碳经济与区域可持续发展的双重视角，主要就西藏水电在“开发”与“改造”并重模式下面临的问题进行分析，并提出相应的改进策略，以供参考。

关键词

低碳经济；西藏水电；开发；改造

1 引言

随着全球应对气候变化共识的深化与我国“双碳”战略的推进，西藏的清洁能源资源禀赋要转化为高质量发展优势，实现经济效益与生态效益的统一。由于西藏特殊的生态环境极为敏感脆弱，水电项目的规划与建设必须严格依据生态保护红线和科学评估，实现水电开发与环境影响的精细化管理，以进一步提升区域生态文明建设水平。对于西藏而言，

由于其地广人稀、电网基础相对薄弱，搭建与水电开发相配套的、高效稳定的电力输送与消纳体系能提升清洁能源的利用率与经济价值，同时随着水电技术升级与智能化改造水平的提升，水能资源能更好地服务于本地民生改善与产业绿色转型，这保障了西藏经济社会长期稳定发展，使低碳经济理念在雪域高原获得坚实的产业支持。

2 西藏水电“开发与改造并重”中存在的问题

2.1 低碳发展与生态优先理念落实不够

由于不同发展阶段和认知水平的差异，各方对水电开发中低碳与生态内涵的理解不同，理念并不总能完全转化为一致的行动，不同项目在生态环保投入与标准执行上存在一

【作者简介】次仁旦塔（1989—），男，中国西藏日喀则人，硕士，工程师，从事水电工程，风电，光伏等清洁能源资源管理与开发利用研究。

定差异。目前，部分开发主体对水电项目的低碳化、生态化改造不够重视，忽视了社会对绿色发展的追求，存在认为过高环保标准属于额外负担，会影响项目的经济收益率，在西藏特殊环境下不需要过高的生态门槛，这样的想法在实践中一定程度上阻碍了先进环保技术与改造措施的应用。另外，部分项目的规划与设计阶段缺少对全流域生态系统的综合认知，使项目在应用“改造”理念对既有设施进行生态修复时缺少科学依据与系统方案。同时，由于现代生态文明与低碳经济理念的引领不足，严重制约了“开发与改造并重”模式在西藏水电领域的深入应用和广泛推广。在具体实施层面，很多项目仍以工程建设任务完成为主，对后续长期的生态监测与适应性管理投入不足，这样做短期内完成了发电目标，但是却使生态措施的长期效果、可持续性打折扣，未能真正体现生态优先、绿色发展的根本要求^[1]。

2.2 缺少统筹协调的规划与长效机制

“开发与改造并重”是新建项目科学开发与既有项目绿色改造的结合体，属于系统性工程，其中包含电源规划、电网配套、生态修复、移民后期扶持等，以及技术标准、资金保障等细节问题，涉及领域极为广泛。为实现水电优化发展，西藏必须加强顶层设计与跨部门协调。当前，相关领域的协调机制普遍有待完善，加之部分基层专业力量相对薄弱，导致规划缺乏足够的前瞻性和有效性，进而影响了整体实施成效。部分项目在实施开发建设以后，忽视了对改造升级的预留和规划，只关注当前装机，这对未来进行增效扩容或生态化改造又增加了难度。在实际操作中，不同项目存在各自为政的情况，对于流域的整体生态承载力、累积性影响，且缺乏统一的生态监测数据平台，没有信息共享机制，这不利于整体生态保护与综合效益最大化。实际调查显示，各方虽在理论上认同“改造”的重要性，但在实际资源配置和资金安排时，往往优先保证新开发项目，不给技术改造和生态修复留足资金与空间，甚至在需要为生态改造让渡部分发电效益时，推行难度大，长此以往，“改造”这一环容易被边缘化。

2.3 技术支撑与专业人才短缺

西藏水电的“改造”升级与高质量开发对先进技术应用与专业人才储备存在密切联系，在高海拔、脆弱生态的特殊环境下，许多技术问题需要适应性创新，对技术路线的成熟度和本地化解决方案提出更高要求。对于水电改造而言，需要针对高寒地区设备性能退化、生态修复技术等特殊问题提出针对性解决方案。若简单套用平原地区的技术方案，则势必会出现“水土不服”的现象，防冻保温、生态流量精准控制、高寒地区植被恢复等技术难题若得不到有效解决，会给项目带来潜在风险与额外成本。在低碳经济背景下，鉴于西藏的生态敏感性，所以无论是新建还是改造，都要求采用更环保、更智能的技术，根据本地实际，挖掘适合高原环境的低碳水电技术，帮助实现精细化、友好型开发^[2]。

3 西藏水电“开发与改造并重”的改进策略

3.1 强化顶层设计与规划引领

西藏水电的健康发展需要得到科学规划与政策的有力支持，应始终遵循“生态优先、绿色发展”的根本要求，将“开发与改造并重”的总体策略，从流域的整体生态系统承载力与低碳发展需求出发，才能形成协调有序的发展格局。在规划当中，要统筹考虑到新建项目与存量电站改造的时空布局，明确不同阶段开发与改造的重点任务，形成开发有序、改造及时的整体方案，在此基础之上实现资源的优化配置，更有针对性地解决面临的生态与技术问题。规划制定一定要根据西藏当前的生态环境本底、电网建设进度和经济社会发展需求开展，确保规划的科学性、前瞻性与可操作性^[3]。例如：当前存在的一个问题在于部分项目对自身可能产生的累积性生态环境影响评估不够充分，对改造升级的潜力认识不足。因此，决策部门在进行水电发展规划与项目审批的过程当中，一定要贯彻“生态优先、绿色开发”策略，客观评估能源需求、生态保护、社区发展等多方面的平衡需求，做好新建项目与存量改造之间的衔接，明确西藏水电发展的低碳化、生态化路径需求，结合实际情况设定分阶段目标，保障水电开发的速度与自身生态环保能力相匹配。在落实规划的过程当中，一定要严格按照规划的要求去开展项目布局，也要结合最新技术发展和环境变化进行动态调整，这样才能确保“开发与改造并重”落到实处，充分满足西藏可持续发展的长远需求。

3.2 提升项目全过程生态化管理水平

“开发与改造并重”模式的生态效益目标需要贯穿项目全生命周期，各管理环节之间需紧密衔接，即便在项目设计阶段融入了生态理念，在施工和运行阶段也需严格执行。环保部门、能源主管部门和项目业主需要定期开展协同监管与评估，做好生态监测数据的收集及共享分析，最大程度减少因管理不到位出现不可逆生态损害的后果。另外，项目环境影响评价和后评价制度也应该得到强化，做好规划环评对项目环评的指导，做好项目运行期的生态跟踪评估。为了提升管理效果，选择适用的生态友好型技术一定充分考虑西藏本地的高原高寒特点，保障其长期稳定运行，使生态保护措施发挥持久作用。运营单位需要建立完善的生态环境监测体系和应急预案，面对突发生态环境问题及时启动应急响应工作。如果发现原设计生态措施效果不佳，就要及时研究并进行适应性改造。管理部门还应该鼓励公众监督和社区参与，定期公开生态环境信息，及时发现和解决问题，尽可能将生态影响降至最低，也要做好生态补偿与修复工作，避免生态欠账，对于已造成的生态损伤，也要尽快启动修复工程，实现开发与保护的良性循环。例如：对既有电站进行改造，不仅要评估其增效潜力，还应该全面评估其生态短板，同时做好改造期间的生态保护预案，如果涉及泄放生态流量改造

或建设鱼类增殖站，则必须作为改造项目的核心内容同步完成，各相关部门应就此进行联合督查。生态化管理水平决定着西藏水电的绿色低碳发展水平，保障生态安全是水电可持续发展的生命线。目前，西藏水电正处于优化发展的重要阶段，“开发与改造并重”需要不断完善其生态管理工具箱，各方则要做好协同配合，进而有效约束和引导开发行为，提升水电项目的整体生态效益。

3.3 在技术创新与应用中实现提质增效

在低碳技术与数字化技术影响下，西藏水电“开发与改造并重”的实施拥有了更先进的手段，有助于构建智能、高效、绿色的水电体系，有效利用水能资源。先进技术的应用进一步挖掘了存量电站的改造价值和新建项目的优化潜力，水电项目借助智能监测、预警系统、先进环保技术等，能有效对工程行为与生态环境进行协同管理，保证水电发展的低碳路径具有现实可操作性，更好地开展生态保护与修复工作。对于新建水电项目的生态保护来说，在规划设计过程中应用的生态流量科学核定技术、过鱼设施技术等实现了生态需求与工程设计的结合，同时减少了运营期的生态争议。在数字化技术支持下，将大数据、物联网应用于电站运行与流域生态监测，通过智能调度系统进行水资源优化配置，实现发电与生态需求的双赢，最终实现水电综合效益的最大化。

3.4 提高资金与政策保障力度

无论是在新项目开发还是旧电站改造，资金投入始终是关键制约所在，政府应该创新投融资机制，为水电的绿色开发与改造提供专项资金、绿色信贷、税收优惠等支持，并对生态效益显著的项目予以奖励，对环保不达标的项目进行约束，引导资金流向绿色领域。针对西藏水电的低碳化改造与生态化升级是一个长期的过程，相关支持政策只有保持延续性和稳定性，才能激发市场主体的积极性。政府要发挥引导作用，通过公私合作（PPP）等模式去推动社会资本参与水电改造，做好政府部门、企业、金融机构的沟通，互相协作，通过设立绿色发展基金对符合要求的项目进行贴息或担保，保障水电“改造”环节的资金需求。例如：水电技术改造的融资一定要拓宽渠道，从中央财政、地方财政、企业自筹、绿色债券等多方面，加大资金扶持力度，完善价格机制确保投资主体合理收益得到保障。在这个过程中，政府也要做好服务与监管，加快绿色金融产品创新脚步，在风险可控的前提下，进一步提升金融对西藏绿色水电发展的支持效能。

3.5 建立多方参与的协同治理体系

对于西藏水电这一涉及多方利益和公共利益的领域，应该建立政府主导、企业主体、社会组织共同参与的协同治理体系，在项目规划和决策阶段，就去充分听取各利益相关方的意见与诉求，保障信息的公开透明，更好地开展项目的环境影响评价与社会风险评估，保障水电发展的决策过程体现科学与民主，这需要制度创新，也需要平台建设。要保障沟通渠道的畅通有效，加强各方常态化沟通和联系，进而加快共识形成与问题解决的步伐。例如：在流域综合管理框架下，可以建立由政府部门、水电企业、科研机构、环保组织、社区代表等组成的协商平台，通过定期会议、信息共享、联合考察等方式，共同商讨开发与改造中的重大议题，基于共同认可的准则，达到了平衡发展、保护与民生利益的目的。不可否认的是，协同治理体系的建设也要结合西藏实际，推动了决策的科学化与民主化，提升了项目的公众接受度，在凝聚社会共识的基础上，进一步提升西藏水电发展的可持续性。

4 结语

西藏想要走出一条符合区域特点的低碳经济发展之路，就需要清洁、稳定、可持续的电力能源支持。水电直接关系西藏的能源安全与绿色发展根基，随着“双碳”战略的深入推进，西藏一定要做好水电“开发”与“改造”并重的这篇大文章，逐渐提升水电产业的绿色低碳发展水平，尽可能预见和化解开发过程中可能出现的生态环境与社会问题，减少发展的负外部性，助力西藏国家生态文明高地建设的开展。各方应通过理念更新、规划统筹、技术创新、管理强化、资金保障、协同治理等方式，为西藏水电的优化发展提供全方位支持。实现水电开发与生态保护、民生改善的协调统一，能夯实西藏低碳经济的能源基础，也最大限度地保护好青藏高原的生态环境，保障国家生态安全，进而提升西藏经济社会发展的整体可持续水平。

参考文献

- [1] 张永奇. 关于西藏水利水电工程地质勘察的经验简述及问题思考[J]. 科技创新与应用, 2025, 15 (06): 137-141.
- [2] 王倩茜. 高海拔地区碾压混凝土坝裂缝处理变更分析与单价编制——以西藏某水电工程为例[J]. 建筑经济, 2024, 45 (S2): 136-141.
- [3] 西藏电力装机容量中清洁能源占比超九成[J]. 新西部, 2024, (01): 158.

Analysis of Restrictive Factors of Offshore Wind Power Development and Construction in Vietnam

Jianhua Lu Gang Wang Zhuangguo Yu

China Power Construction New Energy Group Co., Ltd. Southern Marine Energy Investment Branch, Haikou, Hainan, 570311, China

Keywords

Vietnam; offshore wind power; restrictive factors

Abstract

Vietnam has a long coastline and abundant offshore wind power resources along the central and southern coasts. Its "National Electric Power Development Plan Eighth Edition" has set a target of 6-17GW for offshore wind power installation from 2030 to 2035, and 113-139GW by 2050. However, as of the end of 2024, the cumulative installed capacity is only 875MW, indicating a significant development gap. Most of the existing projects in Vietnam are located in shallow waters near the coast, using designs such as offshore boosting stations, low-voltage submarine cables, small and medium-sized wind turbines, and high pile foundations. Future projects will develop towards deep-sea and large-scale wind turbines, with offshore boosting stations and high-voltage transmission systems becoming mainstream. Currently, Vietnam is facing restrictions such as dependence on imported key equipment, insufficient port capacity, shortage of professional construction equipment, and talent shortage. By introducing international experience and implementing the "market for industry" strategy, Vietnam is expected to break through bottlenecks, promote the potential conversion of wind power resources into green electricity, and help achieve the net zero emissions goal by 2050.

越南海上风电开发建设限制性因素分析

路建华 王刚 余壮果

中电建新能源集团股份有限公司南方海洋能源投资分公司，中国·海南海口 570311

摘要

越南海岸线绵长，中南部沿海海上风电资源富集，其《国家电力发展计划第八版》明确 2030-2035 年海上风电装机目标 6-17GW，2050 年达 113-139GW，但截至 2024 年底累计装机仅 875MW，发展差距显著。越南既有项目多为近岸浅水布局，采用无海上升压站、低电压海缆、中小容量风机及高桩承台基础设计。未来项目将向深远海化、风机大型化方向发展，海上升压站与高电压输电系统将成主流。当前越南面临关键设备依赖进口、港口承载不足、专业施工装备短缺及人才缺口等限制。通过引入国际经验、实施“以市场换产业”战略，越南有望突破瓶颈，推动风电资源潜力转化为绿色电力，助力 2050 年净零排放目标实现。

关键词

越南；海上风电；限制性因素

1 背景

越南拥有长达 3,260km 的海岸线，中南部和南部沿海地区海上风电资源富集。越南政府在 2025 年 4 月 15 日正式发布了修订后的《国家电力发展计划第八版》^[1]，该计划中海上风电装机容量的目标为：到 2030-2035 年实现 6-17GW 装机，到 2050 年实现 113-139GW 装机。而据 GWEC 发布的《2025 全球风能报告》，截至 2024 年底，越南的海上风电累计装机容量只有 875MW。越南在海上风电这一领域，拥有巨大的资源潜力和雄心勃勃的规划，但也面临政策与电

价机制、电网配套、基础设施条件、产业发展结构和人才培养等诸多方面的挑战。

2 既有海上风电项目特点回顾

越南海上风电项目建设大部分集中在 2020 年~2021 年，2021 年电价补贴关门后，又有少量项目建成并网。2023 年、2024 年则鲜有项目并网。回顾以上海上风电项目的特点，总结如下。

- ◆ 多位于近岸浅水区域，离岸距离通常在 5-10 公里以内，水深较浅，不足 10m。甚至部分项目为保证可达性采购量采用了栈桥方案，以便人员、轻量物资直接抵达风机基础位置而不受海上风浪条件限制（越南茶荣 V1-1 海上风电场）。
- ◆ 由于场区离岸距离普遍较近，为节约成本，现有海

【作者简介】路建华（1986-），男，中国辽宁朝阳人，硕士，工程师，从事海上风电建设管理研究。

上风电项目（如茶荣、朔庄等项目）均未建设海上升压站，而是通过海底电缆将电力汇集后，直接输送至在岸上专门建造的陆上升压站并入电网^[2]。

◆有的项目采用了 35kV 海缆方案（茶荣 II 号项目），有的项目甚至采用 22kV 架空线方案（永隆省 Thanh Hai 1 项目），区间缆和送出缆电压等级相同。以上设计正是基于项目离岸距离较近、无需建设海上升压站而形成的典型方案。

◆采用的风电机组单机容量主要在 3.3MW 至 5.25MW 范围。代表性项目包括薄寮、朔庄项目（金风 GW155-3.3MW），槟榔平大、茶荣 II 号项目（金风 GW155-4.5MW），金瓯 350MW 项目使用的（明阳 MySE5.0-166 机组）。近期并网的越南广治省海英 40MW 风电项目则采用了上海电气 WH5.25N-172 风机^[3]。

◆大部分项目风机基础结构主要采用高桩承台基础（PHC 管桩）。极少量项目采用了单桩基础（电建华东院槟榔、茶荣等项目）。PHC 高桩承台基础的选择一方面考虑了越南近海水文地质条件，另外一方面也受限于设计技术水平、当地制造能力和可供使用的施工船机。

3 海上风电发展趋势

海上风电的发展始终遵循“资源禀赋驱动技术迭代，政策规划引导市场方向”的规律。欧洲北海风电从近岸 10 公里内的试验项目，逐步拓展至离岸 100 公里以上的深远海集群；中国则在十年内完成了从“潮间带风电”到“深远海漂浮式风电”的跨越，这些国际经验为越南提供了清晰的参照。海上风电的发展趋势所呈现出的技术升级与模式创新特征，具体可归纳为以下几点。

◆场址深远海化成为必然选择。越南近岸海域虽开发便捷，但存在风能资源不稳定（年平均风速仅 5-6m/s）、与渔业养殖（越南南部沿海是重要的鱼虾养殖区）和航运通道冲突等问题，且可开发面积已接近饱和。而离岸 20 公里以上的中南部深远海区域，年平均风速提升至 7-8m/s，年利用小时数可达 3000 小时以上，较近岸提升 20% 以上，发电效益显著更高。这一发展路径与中国“双十”标准（水深超 10 米或离岸超 10 公里）乃至“单三十”标准（离岸超 30 公里）的演进逻辑高度契合。

◆“海上升压站+陆上集控中心”协同模式将全面替代无升压站设计。随着场址向深远海延伸，输电距离从 10 公里以内增至 30 公里以上，若仍采用风机直送陆上的模式，电能损耗将超过 15%，且需要更大截面的海缆，成本大幅上升。海上升压站可在海上完成电能汇集与升压（通常从 35kV 升至 220kV），将输电损耗控制在 5% 以内；搭配的陆上集控中心则通过远程监控系统实现风机状态监测、故障预警和运维调度，大幅降低海上作业频次。欧洲北海的 Hornsea 风电集群、中国广东阳江海上风电项目均采用该模

式，其成熟性已得到充分验证。

◆集电线路与送出系统电压等级同步升级。电压等级提升是匹配深远海、大容量开发的核心技术支撑：风机与海上升压站之间的中压区间海缆，将从现有 35kV 主流升级至 66kV，单条海缆的输电容量可从 200MW 提升至 400MW，减少海缆敷设数量；海上升压站至陆上电网的高压送出海缆，将根据项目规模采用 220kV 或 500kV 等级——单体 GW 级项目需选用 500kV 海缆，实现大容量电能的远距离高效输送。这种升级不仅是技术必然，更能通过规模效应降低单位输电成本，例如 66kV 海缆的单位千瓦输电成本较 35kV 降低约 18%。

◆风机大型化趋势加速推进。风机单机容量每提升 1MW，单位千瓦投资成本可降低 5%-8%，同时减少机位数量和海缆用量，大幅压缩海洋空间占用。当前全球风电市场已进入 10MW+ 时代，金风科技 GW175-16MW、明阳智能 MySE18.X-242 等超大容量风机已实现商业并网。越南为达成 GW 级装机目标，将优先选用大型化机型，预计 2026 年后新建项目中，10MW 以上风机占比将超 70%，部分重点项目可能直接采用 15MW 级机型，这一选择既符合国际技术潮流，也能通过提升单机发电效率缩短投资回收周期。

◆基础结构随场址条件与风机容量迭代升级。高桩承台基础仅适用于水深 10 米以内、单机容量 5MW 以下的场景，难以满足深远海、大型化需求。对于水深 20-50 米的区域，单桩基础凭借结构简单（单根直径 6-8 米的钢管桩）、施工效率高（单桩沉桩仅需 4-6 小时）的优势将成为主流；水深超 50 米或地质条件复杂的区域，导管架基础（由多根钢管桩与钢结构框架组成）将凭借更强的抗风浪能力和承载性能得到应用。这一变化将推动越南海上风电基础施工技术从“浅水筑巢”向“深海扎根”转型，同时倒逼本土相关制造与施工能力提升。

4 未来越南海上风电开发建设限制因素

政策与电价机制是影响海上风电投资意愿的“外部变量”，而项目执行层面的技术性与工程管理难题则是决定项目能否落地的“内部硬约束”。越南要实现从“近岸小项目”到“深远海大基地”的跨越，必须直面关键设备、港口设施、施工装备、人才储备等方面短板。这些限制因素相互交织，形成“设备依赖进口→运输依赖专业港口→施工依赖国际装备→管理依赖外籍人才”的恶性循环，导致项目实施难度陡增。

4.1 关键设备的生产和运输

越南本土工业体系以轻工业为主，风电核心设备制造能力薄弱：大直径单桩（直径 6 米以上、长度 80 米以上）的卷制、焊接技术尚未突破，导管架基础的防腐处理工艺不达标，海上升压站的核心电气部件（如主变压器、GIS 设备）完全依赖进口。依赖进口则面临多重挑战：运输方面，1000

吨级单桩需专用重型运输船，70米以上风机叶片需定制运输支架，而越南仅有头顿港具备临时卸载条件，单次卸载成本超50万美元；清关方面，越南海关对风电设备的归类标准不清晰，需提交多达20余种技术文件，临时进出口的打桩船、吊装船常因“设备用途证明”不符被滞留，平均滞留时间达15-20天，每滞留一天产生的滞期费超1万美元，直接推高项目成本。

4.2 港口承载能力不足

海上风电建设对母港的要求极为苛刻：需具备长度超300米的重型泊位（承载1500吨级设备）、起重量超1200吨的龙门吊、硬化处理的堆场（承载力 ≥ 30 吨/平方米）以及深度超15米的航道。越南现有港口中，归仁港重型泊位仅180米，起重设备最大起重量500吨；头顿港堆场硬化率不足40%，雨季易积水导致设备锈蚀；胡志明港以集装箱运输为主，风电设备堆存需挤占货运空间，且航道疏浚深度仅12米，无法容纳大型风电运输船。以一个500MW项目为例，需堆存40套单桩、40台风机（含叶片、机舱），至少需要5万平方米硬化堆场，而越南南部符合条件的堆场总面积严重不足，难以支撑多个项目同时推进。

4.3 专业施工装备短缺

深远海风电建设需三类核心装备：打桩船（需具备800吨以上锤击力）、风机吊装船（起重量超1500吨）、海缆敷设船（具备深水埋设能力）。越南本土船设备无法满足单桩沉桩需求；风机吊装船和海缆敷设船完全依赖国际租赁，而全球此类装备缺口达30%，租赁价格逐年上涨，且调度周期长达3-6个月。此外，跨境入关时，装备需提交“海上作业许可”“设备检验证书”等文件，部分欧洲籍船舶因未办理越南船员签证，需额外花费2-3周办理临时入境手续，严重影响施工计划。

4.4 人才缺口以及多语言沟通障碍

海上风电是技术密集型行业，需风电结构工程师、海上施工安全员、运维数据分析师等专业人才，而越南本土人

才少且缺乏实践经验。项目现场常出现“外籍工程师主导技术决策，本土人员负责基础执行”的局面，沟通效率低下。多语言障碍进一步加剧问题：技术文件需在越南语、英语、中文间转换；现场指令传达中，越南籍船员对英语安全术语理解偏差，曾引发吊装作业临时停工，凸显人才与沟通问题的严重影响。

5 结语

越南在2021年格拉斯哥联合国气候变化大会上承诺到2050年实现净零排放，然而当前不足1GW的装机现状及诸多限制因素，意味着要实现其能源转型可谓时间紧、任务重。为破解困局，可重点考虑以下战略性措施。

积极引入国际先进经验：系统性学习中国在海上风电领域全产业链的优势，涵盖项目规划、设备供应、施工建设以及大型装备租赁。同时，借鉴欧洲企业在深远海技术、项目管理、融资模式及ESG方面的成熟经验，以快速弥补短板，降低技术风险。

实施“以市场换产业”战略：以巨大的市场潜力作为筹码，通过清晰的产业政策，引导国际投资者在越南设立风机、海缆等关键部件的本土化生产线。降低项目成本、创造就业，更能通过技术外溢，逐步构建本国可再生能源产业体系，为能源安全与经济发展奠定基础。

综上，通过深化国际合作与推动本土产业培育双轨并进的策略，越南有望将其巨大的海上风电资源潜力转化为现实的绿色电力，从而克服挑战，稳步迈向2050年净零排放的目标。

参考文献

- [1] 王达.越南第八个国家电力发展规划下的海上风电发展[J].风能,2023(11):66-68.
- [2] 王忠锋,熊根,姚泽阳.越南南部海域海上风电项目实施经验探讨[J].风能,2022(01):38-43.
- [3] 吉其荣,陶闯,张智杨.海上风电场风机安装风险辨识及对策[J].珠江水运,2024(21):16-18.

Quality Control and Risk Prevention Countermeasures in Grouting Construction of High Pressure Pipeline Inclined Shaft

Quankun Gan

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

The grouting construction of the inclined shaft for the high-pressure pipeline in the main diversion tunnel serves as both a critical process for connecting the water diversion system and a decisive factor in ensuring anti-seepage and stability performance throughout the pipeline's entire service life. The interaction among the inclined shaft structure, surrounding rock conditions, and high-pressure grouting parameters directly impacts the grouting density and pore permeability characteristics, which in turn affects pipeline operational safety. Based on the engineering practices of the Luoning Pumped Storage Power Station in Henan Province, this paper focuses on the closed-loop quality control and systematic risk management of inclined shaft grouting construction, proposing actionable quality control measures and a tiered risk management framework.

Keywords

main tunnel of water diversion; high pressure pipeline; grouting construction of inclined shaft; quality control; risk prevention and control; countermeasures

高压管道斜井灌浆施工中的质量控制与风险防控对策

甘全坤

中国水利水电第七工程局有限公司，中国·四川成都 611130

摘要

引水主洞高压管道斜井的灌浆施工，既是贯通引水体系的关键工序，也是确保全寿命期防渗与稳定性能的决定性环节。斜井结构、围岩赋存状态与高压灌浆参数三者的相互作用，往往直接影响灌浆体密实度与孔隙渗透特性，进而关系到管道运行安全。本论文以河南洛宁抽水蓄能电站工程实践为基础，聚焦斜井灌浆施工的现场质量闭环与体系化风险管理，提出可操作的质量控制措施与分级风险处置方案。

关键词

引水主洞；高压管道；斜井灌浆施工；质量控制；风险防控；对策

1 引言

斜井灌浆施工是引水主洞高压管道斜井施工的重要工序，也是保障施工质量的关键环节。同时由于斜井段灌浆施工安全风险大，如何提高斜井段灌浆施工安全性能及最大限度地方便施工也成了施工中重点关注内容^[1]。有鉴于此，下文将通过查阅相关文献资料以及结合自身实践情况下，针对引水主洞高压管道斜井灌浆施工中的质量控制与风险防控对策展开探讨，以供参考。

2 工程概括

本工程为河南洛宁抽水蓄能电站引水主洞高压管道斜

井灌浆施工，含两条斜井，长928m(倾角36.2°)与873m(倾角38.7°)，衬砌形式为混凝土与钢管衬里并存。施工内容包括帷幕灌浆、固结灌浆、回填与接触灌浆等，主要工程量为固结灌浆约6144m、帷幕灌浆约720m。钻孔孔径按灌浆类型确定，固结孔Φ56mm、帷幕孔Φ76mm，采用YT-28与100B钻机及3SNS型高压灌浆泵系列注浆泵，施工采用分段分序与并联相结合的组织方式，并配套自动记录仪、计量校验与应急安全措施以保障质量与施工安全。

3 高压管道斜井灌浆施工中的质量控制对策

3.1 严格的原材料与配比控制体系

实施灌浆原材料与配比控制，首要建立严密的进场检验制度。水泥须提供出厂检验单并开展化学与物理性能复核，包括细度、比表面积与凝结时限，并对不同批次实施试配比对与存档以防材料变异引起工艺偏差。外加剂进场后应

【作者简介】甘全坤（1988—），男，中国四川眉山人，本科，工程师，从事水利水电施工及管理研究。

完成现场小试以验证与当地水质和骨料的相容性,任何批次或供应方变更均需通过不少于三次试配并满足设计与试验要求后方可使用。配比管理采取分级策略,依据围岩渗透性、裂隙宽度与含水状况划分开灌、增稠、固结三类水灰比。施工期间以注入压力曲线、瞬时注入率、累计注入量与回浆比为核心监测指标,压力传感器与流量传感器应具备实时采集与历史回放功能,制定阈值触发的应急技术流程,出现注入率骤降或压力异常升高时应按预案先行暂停增压并实施低压灌注,所有调整措施与时间节点须同步记录并签字确认^[2]。岗位职责须明确分工,配浆操作员与现场技术负责人必须通过岗前考核并参加定期能力核查,试配能力与判定一致性测试应形成台账以减少人为差错。

3.2 钻孔与孔口质量控制

首先,施工前应对斜井内表面与拟孔位实施精确复测与几何校核,采用光学导线复核设计坐标并结合地质剖面优化孔网布置,凡超出允许偏差的孔位须制定替代孔或调整钻进方位并形成书面变更单,复测数据应上传项目资料库以备后续溯源并供监理审核。钻后须开展反冲排渣与裂隙冲洗,冲洗作业以回水浊度下降和粒径分布稳定为合格判据,清孔合格后按分段压水试验测定泄水量、渗透系数与异常渗流点,试验采用标准化流程并生成数字化报告,试验结果用于制定局部工艺调整。其次,孔口封堵与放浆管安装实行工艺化管理,封堵材料与金属套管接口须通过拉压、气密及耐压试验验证密封性,放浆管布置应便于在线检测、快速更换与泄压操作,起泵前进行接口复核并记录初始压力零点,注浆期间采用在线压力与流量传感器实时采集数据并同步归档,所有逐孔逐段的压力曲线、瞬时注入率与累计注入量须作为分段验收与质量追溯的原始资料,放浆管及封堵件如发生泄漏或损伤应立即停泵更换并完成故障记录与原因分析。计量与检测器具需在投入使用前完成校准并建立周检与月检记录。

3.3 灌浆施工质量控制

在高压管道斜井灌浆过程中,主要从各方面控制其各环节参数的状态以及施工要点。

灌浆前要进行压水试验,根据流量的变化情况,来判定试段的渗透性,以此作为确定灌浆压力、段长及浆液级配的依据。并且还可以利用声波检测确定岩体完整和灌浆的必要性,进一步明确加固范围。

灌浆环节应采用孔内循环或者纯压工艺,按照围岩类别及孔位分布确定浆液在裂隙体系内的分布。并且控制射浆管距孔底的距离,保证浆液由射浆管中的合理距离处溢出的位置同设计加固区匹配。此外需按照“排内分序、排间不分序”的组织形式开展施工作业,通过序孔施工杜绝浆液串流。不同深度需采用不同的分段压力,确保浆液能有足够的渗透力而不造成过大的裂隙扩宽。

灌浆达到设计压力后,当注入率稳定低于1L/min并

持续30 min时,可认定该孔段加固效果满足施工要求。灌浆结束后须经监理工程师验收确认,方可进行封孔作业。封孔采用全孔灌浆封闭方式,先利用导管将孔内余浆置换为水灰比0.5的浓浆,再以纯压式方式完成封孔,封孔压力与该孔灌浆施工压力一致,屏浆时间控制在30 min。封孔完成后,对孔口空腔以砂浆进行人工填实,使孔道形成稳定封闭结构。

4 高压管道斜井灌浆施工中风险防控对策

4.1 钻孔作业风险识别与防护机制

高压管道斜井灌浆前期的钻孔工序中由于设备比较复杂、环境的影响较大,所以它的安全隐患较多。现场人员对钻机的结构、工作原理、操作要点以及维护方法不清楚,容易造成钻机运行不稳定或发生误操作,使安全事故发生。而且在钻孔作业过程中使用的管线如果出现缠绕、打结或者接头漏紧的现象,则很容易出现管线瞬时甩动、脱扣以及压力异常,会对人员和设备都产生直接伤害。

因此,需要建立健全风险识别系统,在施工前将所有潜在危险点查出,技术交底工作要在开工前完成,要使施工人员了解设备工作原理、动力传递装置及紧急停止运转的方式,能够掌握设备运转的状态以及异常的表现。并且操作人员必须经过培训,持有技能合格证后才准许上岗操作,不能无证擅自操作。因为钻机的维护保养要求比较高,钻机各种关键部位的润滑、螺栓的锁紧、转子的旋转等方面的工作都应事先完成,钻机稳定后才能开始钻进工作。此外,在施工之前还要依照钻机布置和孔位的方向逐根检查动力管、供水管、排渣管等是否按图布置且方向正确、布置清晰、互不交叉缠绕、接头紧固牢靠、各管能否顺利通至各部位,以免在钻进时突然发生脱落或拉扯现象。最后,管线在作业时要布设好保持定位,不能拖拉压踩,并安排专人跟随管道巡视,以防震动和地面不平造成接头松动。并且还应建立班前检查制度,每次施工前都要进行检查,从钻机状况、管线固定、通讯设施、照明状况等方面入手,消除隐患^[3]。

4.2 高压设备与输送管路失效引发的危险源控制

设备选型与进场验收应以工程实例验证为依据,优先选用经大型帷幕或高压固结工程检验过的注浆泵与缓冲装置,并在进场后开展完整性能试验,试验内容包括额定压力与流量稳定性、启动与停泵响应、放空及泄压能力与密封件耐压试验,试验结果作为设备验收与施工参数库的初始记录。高压软管、阀门与接头的静态与动态泄漏试验需成文化,所有管件按不小于额定压力的1.5倍进行耐压试验,运行中采用脉动压力试验模拟工作循环并记录微泄漏与温升行为,发现泄漏或接头松动应停止使用并按更换程序更换,所有更换件需有出厂检验证书并纳入物资台账。施工现场应划设高压作业隔离区并实施物理隔离与人员管理,启泵前执行设备点检清单包括油压、密封状况、紧固件扭矩与安全阀动作性

检验,点检结果须经操作员与试验员签认后方可启泵,所有点检与交接记录进入质量闭环管理体系以便追溯。管路疲劳与失效管理实施寿命计时与循环计数制度,按运行小时或注浆循环数对高压管路进行分级更换或降压使用,严禁超寿命继续服役,发生爆裂或阀体失效时立即切断动力源并按“一级停泵—二级泄压—三级撤离”程序实施,同时开展失效模式与效应分析并将结论用于工艺修订与备件更新。

4.3 浆液飞溅伤害风险识别与处置体系构建

在高压灌浆过程中,由于浆液输送系统的输浆状态长时间受压,当存在承压构件的老化、磨耗以及链接松动等问题时,在受压作用下极易出现喷溢或者泄露甚至出现瞬间冲击现象,浆液与人体皮肤乃至眼睛容易发生直接接触情况,会给人造成极大的伤害风险^[4]。

因此应对输浆系统的组成材料、输浆系统的运行状况和输浆操作方式等进行全周期管理。比如钢编管作为承压构件,要对其抗压、耐磨以及抗拉性能要求极高,且链接可靠度极强,必须选用经过检测并证明合格的产品,安装完毕后要定期检视磨损情况,必要时要及时更换。除了要加强对设备巡检保养外,还要对压力表、泵体、输浆阀及各级连接点保养到位,保证管路畅通、稳定受压。严禁带压情况下拆卸任何部件,防止突然泄压造成的浆液喷射。同时为防止作业人员受到伤害,将预防措施前置,加强现场防护,待灌注时应佩戴密闭式护目镜或面罩。如发生浆液喷入眼内事故应马上让伤员用水持续清洗 20 分钟左右,避免加大伤害面积,并尽快将伤员送往医院。

4.4 施工安全与环境类风险的系统化防控

施工安全与环境类风险防控应构建分层分级与闭环治理体系,先在项目启动阶段依据水利安全生产规范进行危险源辨识并形成风险分级目录,针对斜井施工特有的高处作业、受限空间与起重作业分别制定作业票制度、受限空间进入许可与起重设备专项检查表,所有高危作业实施逐项签证并按风险等级配置监护与应急人员。针对粉尘与浆液污染采取源头控制与末端治理并举的技术措施,井口设置多级沉淀池与塑料导流槽以实现废浆初沉与浓浆回收,细颗粒采用絮

凝沉淀或带式过滤回收系统处理,临时堆放区以防渗衬垫隔离并配套雨水收集与处理设施以防面源污染^[5]。电气与照明管理实行防潮防溅与回路冗余设计,所有临时配电箱设防水等级并配置漏电保护、短路保护与分段快速切断装置,移动机械与电缆实行定期红外热成像检测与绝缘电阻测试,接地电阻应≤ 4Ω 并有接地连续性检测记录,电气作业人员持证上岗并实行交接班与点检台账管理。应急与演练体系遵循“常态化、场景化、量化”原则,制定包含人员伤害、溢浆污染与设备失效三类应急处置预案并明确启动阈值、指挥链与物资清单,按月组织桌面推演与季度实战演练并对演练过程进行录像与评分,演练后依据缺陷清单逐项整改并将处置凭证纳入工程安全档案以形成可追溯的改进闭环^[5]。

5 结语

对斜井灌浆施工而言,扎实的质量控制制度与周密的风险防控体系是工程安全与功能实现的基础。上文在结合河南洛宁抽水蓄能电站引水主洞高压管道斜井灌浆施工方案与相关规范、现场实践的基础上,提出了针对原材料、钻孔与分段灌浆、在线监测三方面的质量控制措施,并就突水、设备失效与施工安全等风险给出分级处置与预防性技术手段。上述对策可在施工项目中作为操作性技术标准与管理流程进行试行并通过施工试验与验收数据不断优化。另外,建议工程实施单位将质量记录与风险处置结果纳入项目知识库,以便在类似工程中持续改进与推广。

参考文献

- [1] 罗龙,宋浩,晏攀.取水隧洞斜井段灌浆施工台车运行安全问题及对策[J].人民黄河,2021(S1):270-271.
- [2] 孙启佑,曹富俊,杨庆美,等.引水斜井灌浆施工技术[J].云南水力发电,2024,40(S02):53-58.
- [3] 孙启佑,曹富俊,杨庆美,等.引水斜井灌浆施工技术[J].云南水力发电,2024,40(S02):53-58.
- [4] 贾畅东.引水隧洞长斜井灌浆提升系统设计与施工[J].电脑采购,2025(12).
- [5] 刘伟,吴应谦,张兰洲.无轨灌浆台车在斜井灌浆施工中的应用[J].中国房地产业,2020,000(036):160.

Application of Power Load Forecasting Method in Distribution Network Planning

Yang Liu

State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. Shenyang Power Supply Company, Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract

The continuous advancement of power systems has raised the bar for the rationality and long-term planning of distribution networks. Accurate load forecasting serves as the cornerstone of distribution network planning, directly impacting the effectiveness of grid investments, operational safety, and power supply stability. This study investigates the fundamental principles of various load forecasting methods and their practical applications across different planning phases, evaluates their applicability and performance, and provides methodological support for enhancing distribution network planning. The research highlights that precise load forecasting plays a pivotal role in optimizing resource allocation, guiding grid construction, and ensuring reliable power supply.

Keywords

power load forecasting; distribution network planning; intelligent forecasting; grid structure optimization; investment evaluation

电力负荷预测方法在配网规划中的应用

刘洋

国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司，中国·辽宁 沈阳 110000

摘要

电力系统不断进步对配电网规划的合理性和长远性有了更高标准。精确预估电力负荷是配网规划的根本和关键步骤，会直接关系到电网投资的效果、运行的安全性以及供电的稳定程度。研究的目的是探究各种电力负荷预估办法的基本道理和它们在配网规划各个时期的具体运用形式，分析不同办法的适用情况和实际成效，为提高配网规划水平提供方法方面的支持。研究着重指出，精确的负荷预估在优化资源分配、指导电网建设、保障电力供应中有着关键作用。

关键词

电力负荷预测；配网规划；智能预测；电网结构优化；投资评估

1 引言

配电网作为连接主电网和用户的最后一环，其规划水平直接关系到电力供应的安全、稳定和经济。随着社会经济活动的发展和能源结构的转变，配网的负荷特点变得越来越复杂多变，给规划工作的准确性带来了严峻考验。电力负荷预估作为规划决策的开端和核心信息，其准确程度决定了规划方案的合理和可行与否。传统的预估办法和现代的智能算法各有特色，在面对不同的预估情况时都有自己的优点和不足。深入了解这些办法的原理和它们在规划各个环节的应用价值，对于建立科学高效的配网规划体系有着基础作用。本文主要关注负荷预估办法在配网规划整个流程中的融入和作用原理。

2 电力负荷预测方法概述

2.1 传统预测方法

2.1.1 时间序列法

时间序列法按照过去用电负荷数据里的内在规则来搭建预测模型，它的关键之处在于找出数据随着时间改变的趋势特点、周期特点和随机特点。移动平均的方式通过让短期的波动变得平稳来抓住基本的变化方向，指数平滑的方法则是给近期的数据更大的权重，这样能让反应更加灵敏，ARIMA 模型会通过差分计算来处理不稳定的序列（如图 1），并且把自回归和移动平均的特点结合起来。这类方法在用电负荷模式比较稳定的短期预测情况中，表现得比较可靠，不过对于突然发生的事件或者结构上的变化，适应能力是有限的，数据的质量和完整程度会直接对预测的准确程度产生影响^[1]。

【作者简介】刘洋（1991-），男，满族，中国吉林通化人，硕士，工程师，从事电力配电相关工作。

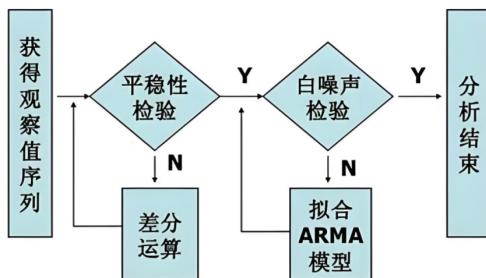


图 1 时间序列 arima 模型建模

2.1.2 回归分析法

回归分析的方法努力去量化用电负荷和影响因素之间的统计联系，把用电负荷当作因变量，而像气温、经济指标等因素则当作自变量放进线性或者非线性的方程里。这种方法能够清楚地说明变量之间的驱动原理，特别适合在政策调整或者气候出现异常等外部因素影响下的用电负荷推测。但模型是否有效取决于因素选择是否合理以及数据样本是否广泛，变量之间的多重共线性问题可能会让因果推断的可靠性下降，而且对于未知的影响因素，泛化能力比较弱。

2.1.3 灰色预测法

灰色预测的方法针对样本量小、信息不够完备的系统，提出了一种生成性的建模思路，它的典型模型 GM(1,1) 通过累加操作来减弱原始数据的随机性，利用微分方程来建立指数增长的趋势。这种方法在配电网新建的区域或者历史数据不足的情况下，体现出了独特的价值，只需要少量的数据就可以建立起预测的框架。不过灰色系统在长期预测时存在固有的偏差，指数增长的假设和复杂的用电负荷变化模式的匹配程度，可能会随着预测周期的延长而降低，需要结合其他方法来对结果进行校正。

2.2 智能预测方法

2.2.1 人工神经网络法

人工神经网络参照生物神经细胞处理信息的原理搭建多层网络框架，其隐藏层在训练期间会自行提炼输入数据里的非线性特征。多层感知器借助误差向后传播的方式修改权重参数，径向基函数网络则运用核转换映射到高维空间来完成函数近似，这种从头到尾的学习模式不用预先设定数学模型就能捕捉到负荷的复杂规律^[2]。虽然网络结构的挑选和训练样本的大小对结果有很大作用，但它强大的泛化能力在应对多因素相互关联的负荷系统时展现出特别的优势，不过隐藏层决策依据的不清晰性让模型的可解释性面临难题。

2.2.2 支持向量机法

支持向量机依据统计学习原理追求结构风险的最小化，通过核函数的手段把低维的非线性问题转变为高维空间里的线性可分问题。这种方法在样本数量有限的情况下依然能有不错的泛化效果，尤其适合负荷数据波动较大或者有异常值干扰的情况。核函数的种类和惩罚系数的选择会直接影响边界划分的细致程度，但模型训练的复杂程度会随着样本量

的增加呈指数级上升，处理大规模数据集的效率明显比神经网络低，而且多输出预测需要依靠特定的扩展架构。

2.2.3 模糊逻辑法

模糊逻辑方法模仿人类主观判断的近似推理过程，用隶属度函数来量化负荷影响因素的不确定性。通过建立基于模糊规则库和推理机的决策系统，能够有效整合专家经验和定性知识，特别适合历史数据不足或者负荷突变频繁的规划场景。由于规则库的构建依赖领域知识的积累，规则的完整性和一致性会直接影响预测的可靠性，它与神经网络结合形成的模糊神经网络架构能够融合知识驱动和数据驱动的双重特点，在一定程度上弥补了单一方法的不足。

3 电力负荷预测方法在配网规划中的具体应用

3.1 负荷预测在配网现状分析中的应用

充分了解配电网当下的运行状况是规划工作的基础，负荷预测在这个环节起着类似诊断的重要作用。借助过去的负荷数据，再结合区域的发展特点来开展预测分析，规划人员能够准确地找到现有网络里的薄弱之处。就拿预测结果来说，它可以清楚地显示出某些线路或者变压器在特定时间段已经快要达到或者超过其承载的极限，这种具有前瞻性的判断有助于发现潜在的过载风险点。同时，预测还能帮助判断低电压区域的原因，看是由于负荷自然增长造成的，还是网络结构本身存在问题，进而为后续的规划决策提供坚实、客观的依据。基于预测的现状剖析避免了只依靠经验或者局部观察的片面性，让规划工作能够有针对性地进行，把有限的资源优先用在最需要解决的现实问题上^[3]。

3.2 负荷预测在配网负荷预测阶段的应用

配电网规划的主要目的是满足未来一段时间内的电力需求，所以科学地预测规划目标年的负荷水平及其空间分布是非常关键的。负荷预测方法在这个阶段的运用，本质上是为整个规划过程提供量化的目标指导。通过综合考虑经济指标、人口变化、产业政策以及用户用电的行为模式等多种因素，预测模型能够计算出不同区域、不同电压等级在规划期内各个时间阶段的负荷需求。这些预测值不是简单的数字组合，而是准确地描述了未来负荷在空间上的集中形态和时间上的波动特点。规划部门必须依靠这些通过科学方法得到的预测数据，才能合理确定规划需要涵盖的负荷总量和分布重点，避免规划规模和未来实际需求之间出现较大的偏差，保证规划方案能够有效地承担未来的电力供应任务。

3.3 负荷预测在配电网结构规划中的应用

电网结构规划关系到配电网的长期运行效率、可靠性和可扩展性，负荷预测在这个环节是优化网架设计的核心依据。预测所提供的未来负荷分布数据，直接影响着主干网架的走向、变电站的布点位置以及供电分区的划分方案。规划人员需要根据负荷预测的空间分布情况，设计出经济合理的供电半径，确保主要的电源点能够有效地覆盖负荷密集的区

域。如果预测表明某个区域未来的负荷会快速增长，那么规划方案中就需要考虑在该区域新建变电站或者提前预留站址用地，并且相应地调整上级电网的接入容量。另一方面，针对负荷预测所显示的均衡增长或者波动特点，规划人员可以选择最合适的网络结构，比如是采用更可靠的环网接线方式，还是采用性价比更高的辐射状接线方式^[4]。因此，负荷预测为电网结构规划增添了动态适应能力，引导规划方案向灵活、稳固、经济的方向发展。

3.4 负荷预测在配网设备选型与配置中的应用

配电网中各种设施的参数确定，尤其是容量大小，其核心依据来自于对以后负荷需求的估计。负荷预估在这个环节的运用，会对设施的选型准确程度和资产使用效率产生很大影响。预估结果给出的负荷最高值、负荷变化情况以及负荷增长速度，是确定变压器额定容量、开关设施断开能力、导线横截面积的关键因素。比如，变压器容量的布置既要能满足预估的最大负荷需求，也要考虑经济运行范围，随便选过大的容量会让设施长时间在低负荷状态下运行，造成资源浪费和能源利用效率不高，而容量选得不够又会很快有过载的风险，不得不提前更换设施。导线横截面积的选择也是这样，要根据预估的负荷电流及其增长趋势，满足长时间载流量的要求和电压下降的限制。所以，准确的负荷预估能让设施选型从静态地满足现在的需求，转变为动态地适应未来的趋势，实现设施整个生命周期成本的优化布置。

3.5 负荷预测在配网投资估算中的应用

配电网规划项目的经济合理性和可行性，最后需要通过细致的投资预算来评估，负荷预估在这个环节是资金需求计算和价值评估的关键支持。预估所描述的未来负荷大小和增长轨迹，直接决定了规划中新建或改造工程的实际大小，进而决定了所需的主要设施数量、线路长度以及土建工程数量。根据这些预估数据，规划人员可以比较准确地确定工程

所需的主要设施材料成本。更重要的是，负荷预估是评估项目投资效果的基础。预估的负荷增长量直接关系到项目投入运行后能承担的售电量增长，进而影响项目经济收益的计算。科学合理的负荷预估提高了投资预算的准确程度，让规划方案在提交审批时更有财务方面的说服力，有助于规划项目在激烈的资金竞争中表现突出，优先获得实施的机会，保证电网建设资金能流向需求最紧迫、效果最明显的领域^[5]。

4 结语

电力负荷预估办法为配网规划提供了必不可少的决策参考，贯穿于现状评价、负荷增长判断、电网结构设计、设备选择配置以及投资效益分析等重要环节。传统办法在数据规律比较明显时具有应用价值，而智能预估技术在处理非线性和不确定性问题方面表现出色。未来的研究需要致力于提高预估模型对复杂多样数据的整合处理能力，探索适合高比例新能源接入和新型负荷特点的预估理论。加强预估结果和规划方案的动态协同反馈机制，开发融合多方面评估的规划决策支持系统，是提高配网规划适应性和弹性的重要方向。不断优化负荷预估技术并在规划实践中深入应用，对建设安全、高效、智能的现代配电网非常重要。

参考文献

- [1] 赵会茹,高婧瑶,殷商莹.电力负荷预测方法在配网规划中的应用[J].山东电力技术,2018,45(05):15-18+23.
- [2] 谢谦.电力负荷预测方法在配网规划中的应用[J].科技风,2015,(24):127.
- [3] 邓永生,焦丰顺,张瑞锋,等.配电网规划中电力负荷预测方法研究综述[J].电器与能效管理技术,2019,(14):1-7.
- [4] 曾庆武.基于大数据技术的电力配网规划与负荷预测方法研究[J].电气技术与经济,2025,(08):65-68.
- [5] 李小伟,陈楚.负荷预测在配网规划中的研究及应用[J].能源与环保,2021,43(03):143-147.