

# 工程研究前沿

## Frontiers of Engineering Research

Volume 3 · Issue 1 · January 2026 3060-9054(Print) 3060-9062(Online)

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 3 · Issue 1 · January 2026 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



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

### Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

### 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](mailto:info@nassg.org)

Tel: +65-65881289

Website: <http://www.nassg.org>



### 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

### 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

### 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 3 Issue 1 January 2026  
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  | 老旧排水管网更新改造的技术路径研究<br>/ 郭佐时                    | 34 | 基于计量标准的检验检测能力提升策略<br>/ 刘彦麟                   |
| 4  | 基于 OBE 的土木类《土力学与地基基础》课程教学策略<br>/ 蔡帅军 薛美丽      | 37 | 智能钻井技术在复杂构造地层中的适应性改进及效能提升<br>/ 艾波 刘锐         |
| 7  | 基于多源数据融合的水库大坝安全风险评估模型研究<br>/ 牙侯泽              | 40 | 欧拉图在区域双城协同分析中的实践——以雄安新区与北京市为例<br>/ 胡文勃       |
| 10 | 海绵城市理念下园林设计的系统构建与实践路径研究<br>/ 付国冬              | 43 | 供水管网示踪气体检漏应用及复杂地质适应性研究<br>/ 赵杰克 陈秋蝉 詹毅 马文波   |
| 13 | 海陆交互深厚富水软土砂层冷冻法联络通道施工技术研究<br>/ 崔玉章            | 46 | 房屋建筑工程质量安全风险识别与全过程控制路径研究<br>/ 相凯 王茂东         |
| 16 | 致密油藏水平井钻井轨迹精准控制技术研究<br>/ 刘晓龙                  | 49 | 基于新时期建筑工程技术管理与创新<br>/ 付立行                    |
| 19 | 绿色节能型建筑给排水工程施工成本与质量协同管理研究<br>/ 肖龙             | 52 | 复杂地质条件下长输油气管道施工期保护措施探讨<br>/ 张雷 唐静 王振 王海涛 肖易博 |
| 22 | 输电线路故障特性变化对继电保护性能的影响分析<br>/ 张杰 林圣锴 杨宇肖 程艳 姚琬莹 | 55 | 医院建筑保温泡沫混凝土施工技术<br>/ 王卫群                     |
| 25 | 山区公路地质灾害风险评估与分级防治工程体系构建与实践<br>/ 安建辉           | 58 | 建筑工程电子招投标代理实操痛点及精细化解决路径<br>/ 王盼              |
| 28 | 水利工程建设中安全管理与风险防控研究<br>/ 张安强                   | 61 | 基于振动分析的汽轮发电机组轴系故障诊断与动平衡校正技术应用<br>/ 苏守安       |
| 31 | 建筑工程施工中 BIM 技术的实践应用及效果评价<br>/ 李成峰 张晓彤 曹爱萍 高波  | 65 | 超百米火电厂烟囱筒壁垂直度控制技术及其误差分析<br>/ 胡朝刚             |

- 1 Research on the Technical Path of the Old Sewer Pipe Network Renewal and Reconstruction  
/ Zuoshi Guo
- 4 Teaching Strategy of Soil Mechanics and Foundation Course Based on OBE  
/ Shuaijun Cai Meili Xue
- 7 Research on Dam Safety Risk Assessment Model Based on Multi-source Data Fusion  
/ Houze Ya
- 10 Research on the System Construction and Practice Path of Garden Design under the Concept of Sponge City  
/ Guodong Fu
- 13 Research on Construction Technology of Frozen Linkage Channel in Deep Water-rich Soft Soil Layer of Land-sea Interaction  
/ Yuzhang Cui
- 16 Research on Precision Control Technology for Horizontal Well Drilling Trajectories in Tight Oil Reservoirs  
/ Xiaolong Liu
- 19 Research on Cost and Quality Coordinated Management of Green Energy-saving Building Water Supply and Drainage Engineering Construction  
/ Long Xiao
- 22 Analysis of the Influence of Transmission Line Fault Characteristics on Relay Protection Performance  
/ Jie Zhang Shengkai Lin Yuxiao Yang Yan Cheng Wanying Yao
- 25 Construction and Practice of Engineering System for Risk Assessment and Graded Prevention of Mountain Road Geological Disasters  
/ Jianhui An
- 28 Research on Safety Management and Risk Prevention in Water Conservancy Engineering Construction  
/ Anqiang Zhang
- 31 Practical Application and Effect Evaluation of BIM Technology in Construction Engineering  
/ Chengfeng Li Xiaotong Zhang Aiping Cao Bo Gao
- 34 Strategies for Enhancing Inspection and Testing Capability Based on Metrological Standards  
/ Yanlin Liu
- 37 Adaptive improvement and efficiency enhancement of intelligent drilling technology in complex-structured strata  
/ Bo Ai Rui Liu
- 40 The Practice of Euler Diagram in Regional Twin Cities Collaborative Analysis: Taking Xiongan New Area and Beijing as an Example  
/ Wenbo Hu
- 43 Application of Tracer Gas Leak Detection in Water Supply Pipeline and Its Adaptability to Complex Geology  
/ Jieke Zhao Qiuchan Chen Yi Zhan Wenbo Ma
- 46 Research on Quality and Safety Risk Identification and Whole Process Control Path of Housing Construction Project  
/ Kai Xiang Maodong Wang
- 49 Based on the management and innovation of construction engineering technology in the new era  
/ Lixing Fu
- 52 Discussion on Protection Measures of Long-distance Oil and Gas Pipeline Construction Period under Complex Geological Conditions  
/ Lei Zhang Jing Tang Zhen Wang Haitao Wang Yibo Xiao
- 55 Construction Technology of Hospital Building Insulation Foam Concrete  
/ Weiqun Wang
- 58 Pain Points and Fine Solution Path of Electronic Bidding and Tendering Agency in Construction Engineering  
/ Pan Wang
- 61 Application of fault diagnosis and dynamic balance correction technology of turbine generator set based on vibration analysis  
/ Shou'an Su
- 65 Verticality Control Technology and Error Analysis of Chimney Wall of 100 m High Thermal Power Plant  
/ Chaogang Hu



# Research on the Technical Path of the Old Sewer Pipe Network Renewal and Reconstruction

Zuoshi Guo

Xi'an Western Airport Group Construction Engineering (Xi'an) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 712035, China

## Abstract

With the continuous advancement of urbanization, the renovation and upgrading of old drainage networks has gradually become an important topic in urban infrastructure construction. Due to years of neglect, aging pipes, and outdated design standards, old drainage networks often face problems such as leakage, blockages, and poor drainage, which severely impact the drainage capacity and water environment quality of cities. Therefore, the renovation and upgrading of old drainage networks is of significant importance. This paper analyzes the current situation of old drainage networks, discusses the main problems and challenges they face, and further outlines the commonly used renovation technologies. It also explores the prospects for the application of new technologies, such as intelligent and green environmental protection technologies. Through the optimization of technological pathways, not only can the drainage capacity of the networks be improved, but also operational costs can be reduced, and the sustainable development capacity of urban drainage systems can be enhanced, providing technical support for the construction of smart cities.

## Keywords

Old drainage networks; Renovation and upgrading; Technological pathways; Intelligent technology; Green environmental protection

## 老旧排水管网更新改造的技术路径研究

郭佐时

西部机场集团建设工程(西安)有限公司, 中国·陕西 西安 712035

## 摘要

随着城市化进程的不断推进,老旧排水管网的更新改造逐渐成为城市基础设施建设中的重要课题。老旧排水管网由于年久失修、管材老化以及设计标准落后,常常出现渗漏、堵塞和排水不畅等问题,严重影响城市的排水能力和水环境质量。因此,开展老旧排水管网的更新改造具有重要意义。本文通过分析老旧排水管网的现状,探讨了其面临的主要问题与挑战,进一步梳理了当前常用的更新改造技术路径,并提出了智能化、绿色环保等新技术的应用前景。通过技术路径的优化,不仅能够提高管网的排水能力,还能够降低运营成本,提升城市排水系统的可持续发展能力,为实现智慧城市建设提供技术支持。

## 关键词

老旧排水管网; 更新改造; 技术路径; 智能化; 绿色环保

## 1 引言

老旧排水管网在城市中扮演着至关重要的角色,但随着使用年限的增加,许多城市的排水管网系统已经无法满足现代化城市的排水需求。由于设计、施工、管理等方面的历史遗留问题,老旧排水管网普遍存在排水能力不足、管道破损、漏水严重等问题,这些问题不仅影响了城市的排水效率,还对城市水环境造成了负面影响。因此,老旧排水管网的更新改造迫在眉睫,成为了当前城市基础设施建设中的重要任务之一。本文将从技术路径的角度出发,分析老旧排水管网面临的现状与挑战,并探讨如何通过创新技术提升其功能

性、经济性和可持续性。通过研究当前国内外的相关经验与技术,本研究旨在为老旧排水管网的更新改造提供可行的技术路径和实践指导。

## 2 老旧排水管网更新改造的现状分析

### 2.1 老旧排水管网的主要问题

老旧排水管网的主要问题集中在管道老化、损坏严重及排水能力不足等方面。由于大部分管网建于几十年前,使用的材料和设计标准已经不符合现代城市的需求。随着时间推移,许多管道出现了破裂、漏水、渗漏等现象,这些问题不仅影响了管网的排水效率,也导致了周边环境的污染。与此同时,老旧管网的排水能力无法应对现代城市的高密度建设和突发的暴雨天气,导致了城市内涝频发。加之,管网管理和维护不足,部分管道因长期缺乏更新和检测,运行状态

【作者简介】郭佐时(1986—),男,中国陕西西安人,本科,工程师,从事建筑工程施工研究。

难以掌握。这些问题严重影响了城市排水系统的正常运行，增加了治理成本，迫切需要进行更新改造。

## 2.2 老旧排水管网改造的必要性

老旧排水管网的改造具有极其重要的现实意义。首先，随着城市人口的不断增加，现有的排水系统面临着更大的压力。原有管网的容量远不能满足现代城市对排水能力的需求，导致了城市排水系统在暴雨、突发天气等情况下常常失效，形成严重内涝。其次，老旧管网的腐蚀、破损和泄漏不仅浪费了大量的水资源，还可能引发水污染，危及居民的饮用水安全。此外，随着气候变化的影响，极端天气的发生频率逐渐增加，传统排水管网的适应性和抗风险能力不足，亟需通过技术手段进行优化升级。为了提高城市排水系统的可靠性与可持续性，保障城市居民的生活质量，更新改造老旧排水管网已成为城市基础设施建设中的紧迫任务<sup>[1]</sup>。

## 3 老旧排水管网更新改造的技术要求

### 3.1 排水管网的功能性与安全性要求

老旧排水管网更新改造的首要要求是提升管网的功能性和安全性。管网系统的主要功能是确保城市的污水和雨水能够顺畅流通，不发生堵塞或溢流。在此过程中，管网的承载能力需要满足现代城市生活的排水需求，同时要具备适应极端气候条件的能力，保证管网在高负荷情况下不出现泄漏和故障。此外，安全性是排水管网设计中的重要要求。老旧管网常常存在结构不稳、耐久性差的问题，容易发生断裂、破损等现象。为确保安全运行，新的管网设计不仅要增强管道的抗压能力、抗腐蚀性，还要避免出现系统性风险。因此，更新改造过程中，管网的安全性和可靠性要得到充分保障，以减少运行中的隐患和事故。

### 3.2 水质、水量与排放标准要求

水质、水量与排放标准是排水管网改造过程中必须严格遵守的技术要求。随着环境保护意识的提升，排水管网的改造不仅仅是提升排水能力，还需要确保污水排放的水质达到环保标准。排水系统在收集、输送污水的过程中，必须避免污水泄漏和二次污染，确保水质符合国家或地区相关排放标准。与此同时，排水管网设计要考虑水量的波动和管网的负荷。不同区域的排水需求差异较大，尤其在雨季时，降水量急剧增加，排水管网需具有调节水量的能力，防止水流过多造成系统超负荷。为此，更新改造后的管网设计必须兼顾水质控制和水量调节，确保排放水质和排水量的稳定性和合规性<sup>[2]</sup>。

## 4 老旧排水管网更新改造的技术路径

### 4.1 传统更新改造技术路径

传统的老旧排水管网更新改造通常采用直接更换管道或修复管道的方式。对于管道破损严重、功能失效的部分，常常采取切割和替换的方式进行修复或更换。更换的管材一般选用耐腐蚀、强度高的材料，如PVC、HDPE等，这些

材料具有较好的抗老化性能和适应性，能够延长管网的使用寿命。对管道的接头和接口部分，采用焊接、热熔等工艺，确保接口密封性良好。此外，对于管网的改造，还可以通过更换或增加雨水收集井、检查井等设施，提高管道的排水能力。传统的更新改造技术路径主要依赖人工施工，施工周期较长，且施工过程中对环境的影响较大。在技术层面，传统方法存在着许多局限性，例如无法有效地监测管道的健康状态，且缺乏对复杂地质条件的适应性，因此，这一技术路径在现代化城市中逐渐显示出不足之处。

### 4.2 智能化与信息化技术应用

随着信息技术和智能化技术的发展，老旧排水管网更新改造逐渐向智能化和信息化方向发展。智能化排水系统通过安装传感器、监控系统 and 数据采集设备，实时监测排水管网的运行状态，包括水流量、水位、管道压力等指标。这些数据通过无线传输上传至数据中心，进行实时分析和处理，帮助管理者及时发现管网运行中的潜在问题，如管道堵塞、泄漏等，从而进行早期预警和处理。信息化技术的应用还包括利用GIS（地理信息系统）技术建立排水管网的数字化模型，对管网的布局、管道材质、老化程度等进行全面管理。结合大数据分析和云计算技术，排水管网的运行管理能够更加精准和高效。此外，智能化管网还能够通过自动化调度优化排水流程，在雨季或突发暴雨时，自动调整排水系统的运作方式，以提高排水效率。智能化与信息化技术的应用不仅提升了排水管网的管理效率，还能有效降低管网故障发生的概率。

### 4.3 绿色环保与可持续发展技术路径

在老旧排水管网更新改造的过程中，绿色环保与可持续发展技术逐渐成为主流。环保技术的应用旨在减少对环境的负面影响，优化资源的利用效率。在排水管网更新改造中，采用透水性材料和绿色排水技术（如LID技术）来增加雨水的渗透性和减少地表径流，缓解城市内涝问题。透水砖和透水混凝土作为新型环保材料，具有良好的渗水功能，能够有效减少地面水流量，降低排水系统的负荷。与此同时，废水回用技术也得到广泛应用，通过对污水的初步处理后进行回用，既节约了水资源，又减轻了污水排放的压力。此外，利用太阳能和风能等可再生能源进行排水系统的驱动，减少传统能源的依赖，符合绿色能源的发展方向。排水管网的智能化改造、绿色技术的应用以及能源的高效利用，都体现了可持续发展的理念，有助于构建低碳、环保的城市排水系统。这一技术路径不仅符合环境保护的需求，还提高了系统的经济性和长期运行的可持续性。

## 5 老旧排水管网更新改造的施工技术与管理

### 5.1 施工技术与工艺优化

老旧排水管网更新改造的施工技术与工艺优化的核心在于提升施工效率，减少施工过程中的环境影响，并确保最

终的管网质量。在施工过程中,采用无开挖技术(如顶管技术、定向钻进技术)已成为一种重要的工艺选择,这些技术可以避免大规模开挖,降低对周围环境的破坏。顶管技术通过液压设备将管道顶进地下,适用于城市中心区域和交通繁忙的地方,能够在不打扰交通和周围建筑物的情况下完成管道更换。定向钻进技术利用钻头在地下按预定轨迹定向钻进,适用于跨越道路或复杂地形的管道施工。除去这些新兴技术外,对于老旧管网改造的传统方法也逐渐得到优化,如采用喷射灌浆技术进行管道修复,可以有效增强管道的强度并填补管壁的裂缝。对于一些管道状况较好的区域,通过外包修复法(如CIPP法)将新的管道衬里安装在现有管道内部,这样可以减少对原有管网结构的破坏,提高施工效率并节省时间和成本。通过这些技术和工艺的优化,施工周期大大缩短,能够有效降低项目的社会成本 and 环境影响<sup>[3]</sup>。

## 5.2 施工质量与进度管理

在老旧排水管网更新改造项目中,施工质量与进度管理至关重要。为保证施工质量,必须严格按照设计图纸和施工标准进行每一环节的操作,确保管网改造后的功能性和安全性。质量管理的第一步是明确施工标准和验收规范,采用先进的监测设备进行施工过程中的实时检测。通过安装传感器和监控系统,能够实时监控管道的铺设质量、材料的使用情况以及施工过程中可能出现的问题,确保质量问题及时发现并解决。同时,施工质量控制还包括对施工材料的检验,只有符合标准的管材、连接件等才能投入使用,避免因材料问题引发的后期隐患。在进度管理方面,合理安排施工计划,细化每个阶段的施工目标,结合项目的实际情况灵活调整施工进度。为避免工程延期,采用项目管理软件进行动态监控,实时跟踪工程进展,及时协调资源和解决突发问题。通过对施工质量和进度的严格管理,确保项目能够按时、按质、按量完成,减少工程返工和资源浪费。

## 5.3 施工安全与风险控制

老旧排水管网更新改造施工过程中的安全管理至关重要,施工现场的安全风险防控直接关系到工程的顺利进行和人员的生命安全。首先,要进行施工前的全面安全评估,

对施工场地进行详细的风险分析,识别潜在的安全隐患,如地下管道的气体泄漏、施工人员坠落等情况。然后根据评估结果,制定详细的安全防护措施,包括对施工人员进行安全培训、配备必要的安全防护设备(如安全帽、安全绳、安全警示标志等)。在施工过程中,进行严格的现场监督,确保所有施工人员按照标准操作程序进行作业,减少违规操作带来的风险。此外,使用先进的安全管理系统进行全程监控,可以通过实时数据采集和分析,对可能出现的安全问题进行预警。例如,在进行地下施工时,利用气体检测仪实时监测空气中的有害气体浓度,防止中毒事故发生。风险控制还应包括对施工环境的管理,确保施工过程中避免对周边建筑、交通和公众的影响。最后,对于突发事件的应急处理也要事先规划,确保在出现突发情况时能够迅速响应并采取有效措施,最大程度地降低安全事故的发生率。通过安全管理与风险控制,确保工程的顺利实施和施工人员的安全<sup>[4]</sup>。

## 6 结语

老旧排水管网的更新改造是提升城市排水系统能力、保障居民生活质量的重要举措。通过对老旧排水管网面临的现状分析以及技术路径的探讨,可以看出,采用智能化、绿色环保等新技术,不仅能够提高排水能力,还能优化资源利用,促进可持续发展。在施工过程中,技术的不断创新和质量、进度、安全的严格管理是确保项目成功的关键。通过科学的施工工艺和精细的管理手段,可以有效减少施工对城市的影响,提高改造效率,确保工程质量。

## 参考文献

- [1] 王建军,李涛.城市污水管网老化改造技术的研究与实践[J].环境工程学报,2025,43(06):112-125.
- [2] 张晓阳.智能化技术在老旧排水管网改造中的应用研究[D].导师:李明;王建国.北京交通大学,2024.
- [3] 赵俊峰.绿色环保材料在排水管网更新改造中的应用研究[D].导师:刘永平.华南理工大学,2023.
- [4] 刘鹏飞.排水管网更新改造过程中施工安全管理的现状与优化对策[J].建筑施工管理,2024,18(05):99-110.

# Teaching Strategy of Soil Mechanics and Foundation Course Based on OBE

Shuaijun Cai Meili Xue

Baise University, Baise, Guangxi, 533000, China

## Abstract

With the advancement of modern engineering, educational reforms in engineering education have deepened, emphasizing student-centered approaches to enhance comprehensive competencies. In this context, the OBE (Outcomes-Based Education) philosophy is integrated into the teaching of Civil Engineering's "Soil Mechanics and Foundation Engineering" course. By adopting a student-focused approach and prioritizing competency development, this methodology effectively boosts students' innovative and practical skills, better aligning them with contemporary engineering demands and driving pedagogical innovation in civil engineering disciplines. This paper analyzes OBE-based teaching strategies for the "Soil Mechanics and Foundation Engineering" course, aiming to elevate instructional quality and foster students' innovative capabilities.

## Keywords

OBE; civil engineering; soil mechanics and foundation engineering; course teaching

# 基于 OBE 的土木类《土力学与地基基础》课程教学策略

蔡帅军 薛美丽

百色学院, 中国 · 广西 百色 533000

## 摘要

随着现代工程的发展, 工程教育教学改革逐渐深入发展, 着重突出学生的主体性, 促进学生综合能力的提升。在此背景下, 在土木类《土力学与地基基础》课程教学中, 引入 OBE 理念, 以学生为主体, 以培养学生能力为目标, 有效提升学生的创新能力和实践能力, 使其更加适应新时期工程发展需求, 真正推动土木类专业教学改革。文章主要对基于 OBE 的土木类《土力学与地基基础》课程教学策略进行分析, 从而有效提升课程教学水平, 促进学生创新能力的提升。

## 关键词

OBE; 土木类专业和; 土力学与地基基础; 课程教学

## 1 引言

OBE 理念即以学生为中心, 以产出为导向的教育理念, 尤其是在教育教学中以学生学习成果为导向, 促进反向设计, 突出学生主体性, 转变教学模式。在教学中, 教师要结合土木类《土力学与地基基础》课程内容和特点, 编制科学合理的教学目标, 实施线上线下混合教学, 挖掘思政元素, 强化对学生实践能力的培养, 优化设计开放型大作业, 虚拟

仿真综合实验, 组织开展多元化的考核模式, 促进课程教学水平的提升。

## 2 基于 OBE 的土木类《土力学与地基基础》课程教学价值

OBE 理念, 就是成果导向模式, 就是遵循结果导向, 方向设计教学体系, 属于需求导向、能力导向、目标导向的教学理念。OBE 教育模式, 更加注重学生成果为核心, 教学活动的设计都是为了帮助学生达成预期的学习成果。在土木类《土力学与地基基础》课程教学中引入 OBE 理念, 能够积极推动课程体系改革, 明确课程教学目标, 并把目标细化为多个具体的学习成果, 如培养学生对土的物理力学性质测试和分析能力、培养学生利用所学知识进行地基基础设计的能力等, 有效提升学生解决实际问题的能力<sup>[1]</sup>。此外, 需要结合预期的学习成果为导向进行教学设计, 同时引进实际工程项目, 把知识点融入到不同的项目模块中, 并对学生对各个模块的学习成果进行量化评估, 进而详细掌握学生的

**【基金项目】**百色学院 2019 年度校级科研项目 (项目编号 2019KN10); 百色学 2024 年度校级教学改革工程项目 (项目编号: 2024JG29); 百色学院 2025 年度校级科研项目 (项目编号: 2025KN09); 百色学院 2022 年度校级一流课程 (项目编号: 2022KC68)。

**【作者简介】**蔡帅军 (1989—), 男, 中国河南商丘人, 硕士, 讲师, 从事地灾智能监测与防护、绿色建筑研究。

学习情况,针对性调整教学计划和教学策略,促进学习效果的提升,实现预期的教学目标。OBE理念下的教学模式,明确课程学习成果,设计以学生为中心的教学活动,能够使学生更加主动地参与到学习过程中,提高学生对知识的掌握程度和应用能力。同时,这也有助于培养学生的团队协作能力、沟通能力和解决实际问题的能力,为学生未来的职业发展奠定坚实的基础。

### 3 基于 OBE 的土木类《土力学与地基基础》课程教学策略

#### 3.1 明确教学目标

在土木工程专业教学过程中,《土力学与地基基础》课程占据重要地位,且该课程的实践性、理论性较强,在OBE理念指导下,教师要结合该课程特点、教学内容等,制定明确的教学目标,即确保学生能够掌握土力学基本原理,可以独立分析土的特性,能够独立解决实际工程中与土体相关的稳定、变形、渗流等工程问题;此外,还可以精准计算地基变形、承载力、土压力等数据,掌握桩基础设计、地基处理原理等,能够对实际工程问题进行有效解决;通过实验教学,需要深化学生对原理知识的感性认知,并强化动手能力,掌握基本的土力学相关指标参数测试的基本原理和技能,引导学生独立分析和设计工程实验,激发学生的创新思维。在此基础上还需要进一步培养血行的科学研究和创新能力<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 线上线下融合教学

线上线下混合教学模式应用中,教师可以从网络上下载相关的教学视频,如优秀教师录制的精品课程、中国慕课网站中的教学视频等,有效提升教学效率。例如,在学习《土的组成》的相关知识时,教师可以把下载的教学视频上传到网络教学平台,鼓励学生课前预习;在此基础上设置课堂测试试卷,对该章节主要的知识点进行考核,如土的组成、土中的矿物质等知识,并通过线上、线下模式进行考核,同时组织学生开展圆桌讨论,有效提升学生的自主学习能力,更加清晰明确的掌握概念知识,强化学习效能。

#### 3.3 构建思政课程

OBE理念下的《土力学与地基基础》课程教学过程中,需要充分挖掘课程中的思政元素,强化课程育人效果,真正培养学生良好的人文素养,强化社会责任感,真正构建高质量的教学课堂。在课程教学中,要深入挖掘教材中的思政元素,如融入地基基础工程故事、历史建筑故事,同时还需要引入知名土力学家的故事,如黄文熙、沈珠江等的人生事迹,让学生深刻领悟到土力学家无私奉献的事迹,使其形成良好的大国工匠精神,提高使命担当<sup>[3]</sup>。在课程教育中融入育人元素、价值,能够深化学生的课堂投入度,自觉引发学生的思考和感悟,调动学习热情,突出以学生为中心的教育理念,教师角色转变为合作者,更加注重学习效果的达成,促进以学生为本的教学模式的落实。其中,课程思政内容体现为表1。

表1 课程思政内容

课程思政教育目标	课程思政内容	课程知识单元
培养学生追求真理的理想和探索创新的精神	土力学经典理论及著名科学家的科研典故	达西定律,地基附加应力,太沙基一维固结理论,库伦定律,朗肯土压力理论,库伦土压力理论,地基极限承载力,土坡稳定分析
理论与实验相结合,培养学生科学的思维方式和动手能力	课内实验	土的组成、物理性质及分类,土的压缩性,土的抗剪强度
建立工程思维和创新意识,激发学生的爱国热情和大国自信,培养学生敬业务实、团队协作精神	优秀工程案例启智	土的渗透,浅基础设计,桩基础设计,沉井基础,区域性地基,地基处理
培养学生的行业标准意识、规范意识、质量意识	以工程灾害和事故案例为载体,分析惨痛教训	土的渗流,土的压缩性和地基沉降计算,土的抗剪强度,挡土墙设计,地基承载力,边坡稳定性

#### 3.4 强化实践指导

为了提升学生的实践操作能力,使其能够对所学理论知识进行实际应用,需要在课堂引入工程实例,邀请工程技术人员到课堂教学,让学生接触更多的工程实例,促进理论教学与实践教学的相互结合,强化学生的感性认知。此外,教师还可以利用多媒体设备向学生展示工程实例图片、视频等资料,然后引导学生自主提问和相互探讨。该课程的实践教学环节主要包含课内实验、课后开放性实验、创新性实验等环节,通过以上环节的开展,能够培养学生的实践操作能力,形成创新思维,促进学生解决实际问题的能力。同时在

课内实验中还需要组织开展试验考核工作,有效提升学生的实验完成能力,促进教学目标的实现。

#### 3.5 虚拟仿真综合实验

为了实现OBE理念指导下的教学目标,需要对虚拟现实技术等现代化技术进行优化应用,尤其可以充分发挥该技术的沉浸性、交互性、构想性等优势,为学生创建虚拟仿真实验,该技术在极端环境、不可逆操作等实验中较为适用,且可以充分应用该技术为学生创设身临其境的实验场景,如基坑开挖、边坡支护、地基基础选用等,减少实验操作中的危险,深化学生的实验感知,调动学生的参与兴趣,突出体

现学生主体性,推动教学目标的实现。例如,在学习地基基础边坡稳定性等相关知识点时,教师可以为学生设计以下虚拟仿真综合实验框架,如图1所示。在第一模块,需要对所学理论知识进行回顾,引导学生明确实验目的,巩固所学知识;第二模块为实验模块,即通过虚拟仿真实验平台,引导学生开展边坡稳定性交互式实验,让学生更加直观性的感知边坡失稳引起土方滑移带来的工程地质灾害,并精准计算边坡稳定性,选择合适的边坡加固措施,强化学生对土力学知识的综合应用;第三模块为交互学习,即引导学生对实验过程、实验数据等进行综合性分析,强化基础知识,培养学生创新思维,使其能够对工程实践问题进行创新结局,促进学生岩土工程科研能力的提升,真正实现教学目标。

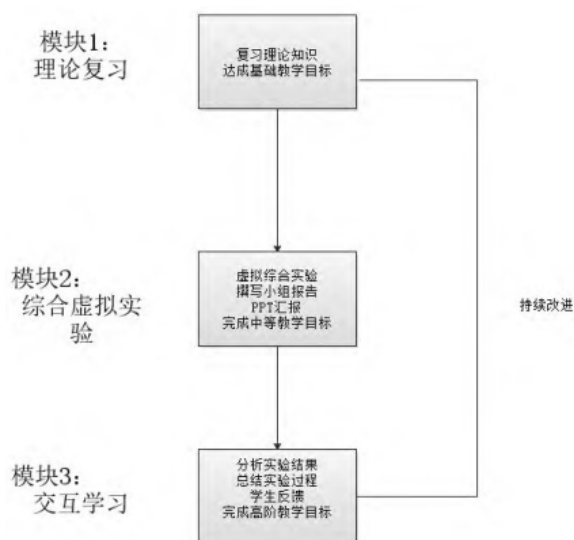


图1 虚拟仿真综合实验设计图

### 3.6 设计开放型大作业

在OBE理念下,为了进一步培养学生的自主学习能力,强化团队协作效果,需要结合教学目标,为学生设计开放型大作业。例如,教师可以结合教材内容和教学目标,为学生布置“挡土墙设计”的开放型分组大作业,具体要求为:稳定性、经济性、安全性,且土层不少于2层,要求学生分组设计两种挡土墙设计方案,并做有限元分析<sup>[4]</sup>。在完成作业的过程中,学生可以对挡土墙设计方面的知识进行熟练掌握,使其能够利用所学知识结合实际问题,同时在此过程中需要对查阅各类书籍,查找各类网站等,并使用Abaqus软件开展有限元分析工作,促进分组大作业的顺利完成,让学生对“土”相关的力学知识进行详细掌握,调动学习兴趣,促进学生创新能力的有效培养。

### 3.7 完善考核方式

基于OBE理念的教学过程中,为了促进教学目标的实

现,需要创新考核方式,转变成绩评定理念,引进多元化的考核标准,不仅要对学习成果进行考核,同时还需要综合性评定学生的学习过程,构建形成性评价方法,把学生平时学习过程中的综合表现纳入课程考核结果,其中平时成绩包含作业成绩、实验成绩等方面,此外还需要把学生日常课堂参与度、课堂提问情况等进行分析,评价学习态度和思维能力。教师还可以对学生通过在线学习平台的学习行为数据进行分析,包含学习时间、访问次数、参与讨论频率等,进而分析学生的学习习惯和投入程度。教师可以对学生的学习成果进行直接评估,尤其可以按照不同的知识模块对学生的考试成绩进行划分,如土的物理性质、地基沉降计算、土压力等知识点上的得分率,如果某一块知识点的得分率过低,需要针对性改进教学方法<sup>[5]</sup>。此外,教师还可以利用课程作业、实验报告等对学生的知识应用能力进行评估。学校还需要开展毕业生跟踪调查,尤其要深化校企合作,对毕业生在工作中的表现评价和职业发展数据进行收集和分析,例如发现学生在实际工作中对地基处理知识解决实际问题过程中表现不足,需要针对性改革教学课程,深化培养学生对岩土工程勘察能力的培养,强化实践培训。

## 4 结语

综上所述,新时期,为了提升土木类专业教育教学水平,尤其要强化《土力学与地基基础》课程的教学质量,需要结合现代工程发展趋势,在课程教学中引入OBE教学理念,以学习成果为导向,优化课程教学设计,并引进思政课程,同时对人工智能技术等现代化技术进行优化应用,构建仿真虚拟综合实验,有效锻炼学生的实践操作能力,开发学生的创新思维,促进学生综合能力的全面提高,培养出更多适应社会发展需求、具备创新能力和实践能力的高素质土木工程专业人才,推动我国土木工程领域不断向前发展。

## 参考文献

- [1] 马肖彤,何妍亭,吕阳川. 基于成果导向教育理念的土木工程专业“钢结构课程设计”教学改革探索[J]. 房地产世界, 2025, (06): 56-58.
- [2] 冉然,刘燕,周楚兵. 基于成果导向的“结构力学”课程改革与实践——以土木工程专业为例[J]. 科技风, 2023, (09): 138-140.
- [3] 庄宇,李广军,赵艳,等. 基于“成果导向”土木工程专业课程体系的规划与设置[J]. 佳木斯大学社会科学学报, 2021, 39 (01): 207-209.
- [4] 董艳秋,房树田,田刚. 基于成果导向理念土木工程施工课程设计与实践探索[J]. 黑龙江教育(理论与实践), 2021, (01): 73-74.
- [5] 孟庆娟,贾开武. 基于成果导向教育(OBE)理念的土木工程专业课程教学改革探析——以《土力学与基础工程》为例[J]. 唐山学院学报, 2019, 32 (06): 95-98.

# Research on Dam Safety Risk Assessment Model Based on Multi-source Data Fusion

Houze Ya

Guangxi Hechi Haoyu Engineering Consulting Co., Ltd., Hechi, Guangxi, 547000, China

## Abstract

As critical water conservancy infrastructures, reservoir dams play a vital role in regional flood control, water supply security, and social stability. With the continuous advancement of monitoring technologies, a large amount of heterogeneous data has been generated during dam operation, including structural monitoring, seepage monitoring, deformation monitoring, hydrological and meteorological data, as well as operation and management information. Traditional risk assessment approaches driven by single data sources are no longer sufficient to comprehensively reflect the safety status of reservoir dams. In this context, this study focuses on the concept of multi-source data fusion and systematically investigates the technical pathways and model construction methods for reservoir dam safety risk assessment. Emphasis is placed on analyzing the fusion mechanisms of heterogeneous data within a unified spatiotemporal framework and their role in improving the accuracy of risk identification. The study provides theoretical support and technical references for enhancing the systematic, objective, and dynamic assessment of reservoir dam safety risks.

## Keywords

multi-source data fusion; reservoir dams; safety risk assessment; indicator system; assessment model

# 基于多源数据融合的水库大坝安全风险评估模型研究

牙侯泽

广西河池浩宇工程咨询有限公司, 中国·广西河池 547000

## 摘要

水库大坝作为重要的水利基础设施,其安全运行直接关系到区域防洪安全、供水保障与社会稳定。随着监测手段的不断丰富,大坝运行过程中形成了结构监测、渗流监测、变形监测、水文气象及运行管理等多类型数据,传统单一数据驱动的风险评估方法已难以全面反映大坝安全状态。基于此,本文围绕多源数据融合理念,系统探讨水库大坝安全风险评估的技术路径与模型构建方法,重点分析多源异构数据在统一时空框架下的融合机制及其对风险识别精度的提升作用,为提升水库大坝安全风险评估的系统性、客观性与动态性提供理论支撑与技术参考。

## 关键词

多源数据融合; 水库大坝; 安全风险评估; 指标体系; 评估模型

## 1 引言

水库大坝数量持续增加、服役年限不断延长,使其安全风险呈现出隐蔽性增强、影响因素复杂化的特征。受地质条件、结构老化、运行工况变化及极端水文事件等多重因素影响,大坝安全问题具有明显的综合性与动态性。当前大坝安全管理中已积累了大量监测与运行数据,但数据类型多样、来源分散、尺度差异明显,尚未形成高效协同的风险评估体系。如何充分挖掘多源数据的内在关联,提升风险识别与判识的准确性,成为水库大坝安全研究的重要方向。在此背景下,引入多源数据融合技术,将不同监测信息有机整合到统一评估框架中,对构建系统化、精细化的水库大坝安全

风险评估模型具有重要的理论意义与现实价值。

## 2 多源数据在水库大坝安全风险评估中的基础构成

水库大坝安全风险评估所依托的数据体系呈现出来源多样、结构复杂与时空差异显著的特征,主要涵盖结构安全监测数据、渗流与变形监测数据、水文气象数据、运行调度数据及基础地质资料等内容。结构安全数据反映坝体应力、应变与振动响应特征,通常以秒级或分钟级频率连续采集,能够揭示结构状态变化趋势;渗流与变形数据通过位移、渗压等指标刻画坝体内部稳定性,其时间尺度多以小时或日为主;水文气象数据则描述降雨、库水位与来水过程,对风险演化具有直接驱动作用;运行调度与历史巡检记录提供了人为管理因素与长期演变信息。多类型数据在时间尺度、空间分布与精度层级上的差异,使水库大坝安全风险呈现出多维

【作者简介】牙侯泽(1986—),男,壮族,本科,中级职称,从事水利评估、水利检测、水利工程技术指导研究。

度耦合特征,为综合风险评估提供了丰富信息基础,同时也对数据整合与分析能力提出更高要求。

### 3 多源数据融合技术在水库大坝安全风险评价中的应用原理分析

#### 3.1 多源数据融合的基本理论与技术路径

多源数据融合技术以信息互补与冗余消解为核心思想,通过对不同来源、不同尺度数据进行关联建模与协同处理,提升风险识别的可靠性与稳定性。在水库大坝安全评估中,融合过程通常包括数据预处理、特征提取、信息关联与结果综合等环节。预处理阶段对监测数据进行缺失修补、异常剔除与尺度转换,保证数据可比性;特征提取阶段将高频监测序列转化为表征状态变化的关键参数;信息关联阶段通过统计分析、概率推断或模型映射方式建立多源数据间的内在联系;结果综合阶段形成对大坝安全状态的综合判断。该技术路径能够有效缓解单一数据不完整或波动带来的评估偏差,使风险评估结果更加稳定可信。

#### 3.2 多源数据融合在水库大坝安全状态表征中的方法

在安全状态表征层面,多源数据融合通过将结构、渗流、水文与运行信息纳入同一分析框架,实现对大坝运行状态的整体刻画。技术实现过程中,常将结构位移、应力变化与渗流参数进行同步映射,结合库水位与降雨量数据构建状态响应关系,从而识别异常演化模式。时间序列分析用于揭示长期趋势与周期特征,空间关联分析用于刻画坝体不同部位的响应差异,风险辨识模型则对多维特征进行综合计算,输出可量化的安全状态等级<sup>[1]</sup>。通过数据融合方法,原本分散的监测信息被转化为具有明确物理含义和风险指向的状态指标,使水库大坝安全评估由单点判断转向整体表征,为后续风险分级与管理决策提供清晰依据。

### 4 水库大坝安全风险评价指标体系的构建

#### 4.1 水库大坝结构安全风险评价指标设置

结构安全风险以坝体稳定性与受力响应为核心,指标设置围绕变形、应力与材料性能展开。坝顶水平位移与竖向沉降是反映整体稳定的重要参数,长期监测中位移累计值达到 15 mm、年变化率超过 3 mm 时,结构风险水平显著上升;坝体内部应力以应变计与应力计数据为依据,当混凝土拉应变超过  $80\mu\varepsilon$ 、压应变接近  $300\mu\varepsilon$  时,局部开裂与压碎风险同步增加。渗流安全通过渗压水位与渗流量指标表征,坝基渗压梯度高于 0.25、渗流量年增长率达到 10% 时,潜在管涌与渗透破坏概率明显提高。材料劣化指标关注混凝土弹模与强度衰减,当弹模下降幅度超过 12%、抗压强度低于设计值的 85% 时,结构耐久性风险需重点关注。通过将多项结构响应指标纳入评估体系,可实现对坝体安全状态的定量刻画。

#### 4.2 水库大坝运行工况与环境风险评估指标设置

运行工况与环境风险评估重点反映外部条件对大坝安

全的驱动作用,指标体系涵盖水位、流量、气象与调度参数。库水位变幅是关键控制指标,当日水位涨幅达到 2.0 m、年内最大变幅超过 25 m 时,对坝体变形与渗流状态产生明显影响。入库洪峰流量与泄洪流量反映水动力条件,洪峰流量超过设计值的 1.1 倍、泄洪闸启闭频率高于 20 次/年时,结构与设备运行风险同步增加。降雨强度与累计雨量是环境风险的重要因素,单日降雨量达到 100 mm、连续 5 日累计降雨超过 250 mm 时,坝坡稳定性与渗流压力显著增强。运行调度指标关注非常工况比例,当超汛限水位运行时间占比超过 5%、非常调度次数达到 8 次/年时,运行风险水平明显抬升。上述指标共同构成运行与环境风险评估的量化基础<sup>[2]</sup>。

#### 4.3 水库大坝综合安全风险评价指标体系整合

综合指标体系整合以结构安全、运行工况与环境风险为三大维度,通过权重分配与归一化处理形成统一评估框架。结构类指标在总体权重中占比 0.45,运行与环境类指标占比 0.40,其余 0.15 用于反映管理与维护状态。各指标经标准化转换后映射至 0-1 区间,风险值接近 1 时表示高风险状态。综合风险指数计算结果中,当指数低于 0.30 时判定为低风险区间,0.30-0.60 对应中等风险区间,超过 0.60 进入高风险区间。指标间相关性分析显示,坝体位移与库水位变幅的相关系数达到 0.72,渗流量与累计降雨量相关系数为 0.68,表明多类指标之间存在显著耦合关系。通过系统整合多源指标,可避免单指标判断偏差,提高综合风险评估的客观性与稳定性。

### 5 基于多源数据融合的水库大坝安全风险评价模型构建

#### 5.1 水库大坝安全风险评价模型的总体框架设计

评估模型总体框架由数据层、融合层、计算层与输出层构成。数据层接入结构监测、渗流监测、水文气象与运行管理等 4 类数据源,时间分辨率覆盖 1 min、1 h 与 1 d 三个尺度。融合层通过时间同步与空间映射技术,将不同频率数据重采样至统一时间轴,并完成特征降维处理,关键特征数量由原始的 120 项压缩至 35 项。计算层基于风险函数模型,对结构响应因子、环境驱动因子与运行因子进行联合计算,形成综合风险指数。输出层以数值结果与等级判识形式呈现评估结论,实现风险状态的直观表达<sup>[3]</sup>。该框架能够支撑连续运行条件下的动态评估需求,适用于不同规模与类型的水库大坝。

#### 5.2 多源数据融合驱动的风险评估模型计算方法

模型计算采用加权融合与概率判识相结合的方法。结构风险子模型通过变形、应力与渗流指标构建状态向量,采用线性加权函数计算结构风险值,权重取值范围 0.10-0.25。运行与环境风险子模型引入水位、流量与降雨等变量,利用标准化指数模型计算风险贡献度。多源信息融合阶段采用贝叶斯更新算法,将各子模型输出作为先验信息进行修正,使

综合风险值对异常数据的敏感度降低约 20%。时间维度上引入滑动窗口机制，窗口长度设置为 30 d，可有效平滑短期波动对评估结果的干扰。该计算方法在保证模型响应灵敏度的同时，提高了结果的稳定性与连续性。

### 5.3 水库大坝安全风险分级与判识模型构建

风险分级与判识模型以综合风险指数为核心判据，结合历史运行数据进行阈值校准。通过对 15 a 运行样本进行统计分析，将风险等级划分为 I、II、III、IV 四级，对应风险指数区间分别为 0-0.25、0.25-0.50、0.50-0.75 与 0.75 以上。判识模型在计算过程中同步引入趋势判定算法，当风险指数连续 7 d 上升且增幅超过 0.08 时，自动触发等级上调机制。模型验证结果显示，在历史异常工况样本中，判识准确率达到 0.87，误判率控制在 0.10 以内<sup>[4]</sup>。通过构建清晰的分级与判识规则，模型能够为水库大坝安全管理提供可操作的风险预警与决策依据。

## 6 基于多源数据融合的水库大坝安全风险评估模型应用分析

### 6.1 模型在水库大坝安全风险动态评估中的应用

基于多源数据融合的安全风险评估模型在实际运行中表现出良好的动态适应能力，能够对水库大坝安全状态进行连续更新与滚动分析。在应用过程中，模型以 1 h 为基本计算步长，对坝体位移、渗流压力、库水位及降雨量等关键参数进行同步输入，形成随时间变化的风险曲线。当库水位在 48 h 内累计上涨 4.5 m、坝顶水平位移增量达到 6 mm 时，模型计算得到的综合风险指数由 0.38 上升至 0.57，准确反映出风险水平的阶段性变化。通过引入 30 d 滑动窗口机制，模型能够识别长期趋势与短期波动之间的差异，在连续降雨 7 d、累计雨量达到 210 mm 的情形下，风险指数上升速率明显加快。该动态评估方式有效避免了静态评估滞后问题，使安全风险随工况变化得到及时反映。

### 6.2 模型对水库大坝安全预警与决策支持的作用

在安全预警与决策支持方面，模型通过风险指数阈值与变化速率双重判据，为管理部门提供清晰的预警信号。当综合风险指数超过 0.60 且连续 3 d 保持上升趋势时，系统自动进入强化预警状态；当指数达到 0.75 并伴随渗流量增幅超过 12% 时，模型触发高等级预警提示。预警结果与运行

调度参数联动分析表明，在洪水过程峰值流量达到设计值 1.15 倍时，模型给出的调度建议可使风险指数回落约 0.10。决策支持模块将风险等级与处置措施进行对应，缩短了人工分析时间，决策响应周期由原有的 12 h 压缩至 3 h。该应用模式提升了风险应对的及时性与针对性<sup>[5]</sup>。

### 6.3 模型在水库大坝安全管理中的适用性分析

从安全管理角度看，该模型在不同规模与运行条件的水库大坝中具有较好的适用性。模型接口支持不少于 5 类监测系统数据接入，可兼容 1 min 至 1 d 不同时间分辨率的数据格式，适用于新建与在役水库。在中型水库应用中，结构监测点数量为 45 个、渗流监测点为 28 个的条件下，模型运行稳定，风险评估结果波动幅度控制在 0.05 以内。在管理实践中，模型输出的风险等级与巡查重点实现联动，使重点巡查比例由 30% 提升至 65%，资源配置效率明显提高。长期运行结果表明，模型可在不增加额外监测设备的前提下提升安全管理精度，为水库大坝安全管理提供可靠的技术支撑。

## 7 结语

基于多源数据融合的水库大坝安全风险评估模型，能够在综合结构响应、运行工况与环境因素的基础上，实现对大坝安全状态的系统刻画与动态判识。通过构建科学的风险评估指标体系并引入数据融合与风险分级方法，模型有效提升了风险识别的敏感性与评估结果的稳定性。在实际应用中，该模型对安全预警、运行调度与管理决策具有良好支撑作用，有助于推动水库大坝安全管理的经验判断向数据驱动转变，为保障水利工程长期安全运行提供可靠技术路径。

### 参考文献

- [1] 张舒,徐云乾,黄文康,刘建文,袁明道.多源数据融合的大坝三维重建与隐患探测技术研究[J].广东水利水电,2025,(09):49-53.
- [2] 盛金保,李宏恩,王芳.智能大坝建设与韧性提升发展路径研究[J].中国水利,2024,(24):68-77.
- [3] 李宏恩,王芳,赵建国.融合历史溃坝数据的水库大坝溃坝风险演化机制研究[J].中国水利,2024,(08):40-45.
- [4] 安觅,李瑶.水库大坝三维可视化安全监测平台研究与应用[J].水利技术监督,2023,(12):47-50.
- [5] 徐鲲.融合语义信息的水库大坝安全监测三维模型构建技术研究[D].导师:霍亮;刘万增.北京建筑大学,2021.

# Research on the System Construction and Practice Path of Garden Design under the Concept of Sponge City

Guodong Fu

Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu Branch, Chengdu, Sichuan, 610000, China

## Abstract

Against the backdrop of high-density urban development and the increasing frequency of extreme rainfall events, traditional landscape design has revealed limitations in rainwater regulation, ecological restoration, and system coordination. Guided by the sponge city concept, this study focuses on the system construction and practical pathways of landscape design, examining new requirements from the perspectives of integrity, ecological orientation, and functional integration. By integrating functional elements such as rainwater collection, infiltration, detention, and purification, the fundamental role of landscape space as a basic unit within the urban water cycle system is clarified. A landscape design framework centered on ecological security and characterized by system coordination is proposed, providing theoretical support and practical guidance for enhancing comprehensive runoff regulation capacity, ecological service functions, and environmental resilience of urban landscapes.

## Keywords

sponge city; landscape design; system construction; ecological function; practical pathway

## 海绵城市理念下园林设计的系统构建与实践路径研究

付国冬

武汉市政工程设计研究院有限责任公司成都分公司, 四川 成都 610000

## 摘要

在城市高密度开发与极端降雨频发背景下,传统园林设计在雨洪调蓄、生态修复与系统协同方面暴露出适应性不足的问题。以海绵城市理念为导向,围绕园林设计系统构建与实践路径展开研究,从整体性、生态性与功能复合性角度梳理园林设计的新要求。通过整合雨水收集、渗透、滞蓄与净化等功能要素,明确园林空间在城市水循环体系中的基础单元作用,构建以生态安全为核心、以系统协同为特征的园林设计框架,为提升城市园林的综合调蓄能力、生态服务功能与环境韧性提供理论依据与实践指引。

## 关键词

海绵城市; 园林设计; 系统构建; 生态功能; 实践路径

## 1 引言

随着城市空间持续扩张,地表硬化程度不断提高,降雨径流增加、内涝风险加剧等问题对城市生态安全形成长期制约。园林绿地作为城市生态空间的重要组成部分,在缓解雨洪压力、改善水环境和提升景观品质方面具有不可替代的作用。传统园林设计多侧重景观营造与游憩功能,对水文过程和系统协同关注不足,难以满足新阶段城市可持续发展的要求。海绵城市理念强调自然积存、自然渗透与自然净化,为园林设计提供了新的技术逻辑与方法体系。在此背景下,从系统构建角度重新审视园林设计的功能定位与实践路径,对于推动园林设计由单一景观向复合生态系统转型具有现

实意义。

## 2 海绵城市理念下园林设计系统构建的理论基础

### 2.1 海绵城市理念在园林设计中的内涵界定

海绵城市理念强调城市空间对降雨过程的主动调节能力,其核心在于通过空间结构与生态要素的合理配置,实现雨水在城市中的自然积存、缓释转化与有序利用。在园林设计语境下,该理念不再局限于单纯的景观塑造或绿量配置,而是将园林空间视为城市水文系统的重要组成部分,承担雨洪调蓄、径流削减、水质改善与生态修复等多重功能。园林设计中引入海绵城市理念,意味着设计对象从视觉景观拓展为生态过程,设计目标从美学表达延伸至系统效能。园林空间通过地形塑造、植被组合、土壤结构与水体形态的综合设计,使雨水在空间内部完成渗透、滞留与净化过程,从而降

【作者简介】付国冬(1983—),女,中国四川达州人,本科,高级工程师,从事市政园林规划设计研究。

低对传统排水系统的依赖。这一理念强调自然过程的参与度，突出园林设计在城市水循环中的基础性作用，使园林不再是被动接受环境条件的空间载体，而是具备主动调控能力的生态系统。

## 2.2 园林设计系统化构建的目标定位与功能要求

在海绵城市理念引导下，园林设计系统化构建的目标已由单一景观营造转向多功能协同运行，其核心在于实现生态效益、环境效益与社会效益的综合提升。系统化构建要求园林设计在整体尺度上明确自身在城市空间结构中的功能定位，通过系统思维统筹地形、水体、植被与铺装等要素之间的关系，使其在运行过程中形成稳定、有序的功能体系。功能要求层面，园林设计需具备雨洪调蓄能力，以降低降雨峰值径流对城市排水系统的冲击；需具备水质调节能力，通过生物过滤与土壤吸附作用改善雨水径流水质；需具备生态修复能力，为城市生物提供连续、稳定的生境空间。同时，园林系统还应兼顾公共活动与景观体验需求，在满足生态功能的前提下提升空间可达性与使用舒适度。系统化目标的实现依赖于设计阶段对功能关系的整体统筹，而非局部要素的简单叠加<sup>[1]</sup>。

## 2.3 海绵城市理念对传统园林设计模式的重构作用

海绵城市理念的引入对传统园林设计模式形成了深层次的结构性重构。传统模式多以视觉景观与功能分区为主导，雨水往往被视为需要快速排除的不利因素，导致园林空间在水文调节方面参与度有限。新的理念改变了雨水在设计中的角色认知，将其视为可被管理、利用与转化的重要资源，从而推动设计逻辑由排放导向转向调蓄导向。在空间组织方式上，园林设计由平面化布置转向立体化构建，通过高差变化增强雨水滞留路径；在要素选择上，由强调硬质构筑转向软性生态要素，提升系统弹性；在运行方式上，由静态景观转向动态过程管理，使园林在不同降雨条件下呈现差异化功能状态。这种重构不仅改变了设计方法，也推动园林设计从单一专业走向多学科协同，为园林系统长期稳定运行奠定基础。

## 3 海绵城市理念下园林设计系统的总体架构

### 3.1 园林空间系统与雨洪调蓄系统的协同构成

在海绵城市理念框架下，园林空间系统与雨洪调蓄系统不再是相互独立的功能单元，而是通过空间结构与功能设置形成高度协同的整体。园林空间通过地形起伏、空间层次与景观序列的设计，将雨洪调蓄功能有机嵌入日常使用环境之中，使调蓄过程在不影响景观品质的前提下自然发生。下凹绿地、雨水花园、景观水体等空间形式在园林系统中承担雨水暂存与缓释任务，通过连续分布形成多级调蓄网络。园林空间系统为雨洪调蓄提供载体，雨洪调蓄系统则反向塑造园林空间形态，两者在结构与功能上相互依存。通过这种协同构成，园林空间在暴雨条件下发挥安全缓冲作用，在常态条件下维持良好景观与生态状态，实现功能与形态的双重

协调。

### 3.2 园林生态系统与水循环系统的耦合关系

园林生态系统与水循环系统之间存在密切的相互作用关系，海绵城市理念强调通过设计手段强化这种耦合程度。园林中的植被群落、土壤结构与微地形共同影响雨水的下渗效率与滞留时间，进而调节水循环过程的空间分布与时间节奏。水循环为生态系统提供必要的水分条件，生态系统则通过蒸腾、吸附与生物作用参与水质净化与水量调节。二者的耦合使园林系统具备自我调节能力，在降雨变化条件下保持相对稳定的运行状态。通过合理配置植被类型与空间布局，园林生态系统可在不同水分条件下维持结构稳定，从而支撑水循环系统的连续运行。这种耦合关系强化了园林设计在城市整体水循环中的节点作用。

### 3.3 园林设计系统中多要素协同运行机制

园林设计系统的有效运行依赖于多要素之间的协同配合，包括空间结构、生态要素、工程设施与管理机制等方面。在海绵城市理念指导下，各类要素不再以孤立形式存在，而是通过功能关联形成整体运行机制。空间结构为雨水路径提供引导，生态要素承担调节与净化功能，工程设施保障系统稳定运行，管理机制则维持长期效能。多要素协同要求在设计阶段明确各要素的功能边界与协作方式，使其在运行过程中形成互补关系。这种机制强调系统整体效能，而非单一要素性能，通过协同运行提升园林设计系统在不同环境条件下的适应能力与稳定性<sup>[2]</sup>。

## 4 海绵城市理念下园林设计的关键技术路径

### 4.1 低影响开发技术在园林设计中的集成应用

低影响开发技术在园林设计中的应用重点体现在对降雨径流全过程的精细化调控，通过空间渗透、就地滞留与缓释转化实现雨水资源的高效利用。在园林场地尺度内，降雨强度 30mm 条件下，采用组合式渗透与滞留设施可削减地表径流比例 60% 以上，使径流峰值出现时间延后 20min 以上。园林设计中将雨水花园、植草沟与调蓄洼地嵌入景观空间，可在不增加额外用地的前提下提升调蓄容量，单位面积雨水滞留量可达到 35L/m<sup>2</sup>。低影响开发技术强调与园林空间形态的融合，通过路径式布局将雨水引导进入生态单元，减少集中排放压力。在年降雨量 900mm 条件下，园林系统内部消纳雨水比例可稳定在 70% 左右，有效降低对市政排水系统的依赖程度，提升整体运行韧性<sup>[3]</sup>。

### 4.2 透水铺装与下凹绿地的系统化配置路径

透水铺装与下凹绿地的系统化配置是园林设计中实现雨水快速下渗与暂存的重要技术手段。透水铺装与园林步道与活动广场中的应用比例达到 40% 时，可使地表径流量减少 45%，渗透速率保持在 15mm/min 以上。下凹绿地通过低于周边地面的空间构造形成雨水汇集区，单次降雨 50mm 条件下，下凹深度 200mm 的绿地可实现雨水滞留率 65% 以上。二者协同配置能够构建连续的雨水渗透链条，使雨水在

铺装区域完成初步下渗,在绿地空间实现二次滞留与净化。系统化配置强调尺度衔接与空间连续性,通过点状、线状与面状组合布局,提高园林整体雨水调控效率,使场地内径流外排量控制在设计降雨量的30%以内。

#### 4.3 植被配置与土壤改良在雨水调控中的作用

植被配置与土壤改良是园林雨水调控体系中具有长期效应的基础性措施。多层次植被结构可通过冠层截留与根系吸水降低有效降雨量,乔灌草复合配置条件下,降雨初期截留率可达到20%。土壤有机质含量由2%提升至4%时,土壤渗透系数可提高1.5倍以上,雨水下渗效率显著增强。园林设计中通过配置耐湿与耐旱植物组合,使系统在降雨波动条件下保持稳定运行,在连续降雨3d情况下,土壤含水率仍可控制在饱和度的80%以下。植被蒸腾作用在夏季高温条件下可降低地表温度2℃左右,同时加速雨水循环过程,实现生态调控与微气候改善的协同效果。

### 5 海绵城市理念下园林设计的实践实施模式

#### 5.1 城市公园园林设计的海绵化实施模式

城市公园作为开放性生态空间,在海绵化实施中具备承载雨洪调蓄的重要条件。公园用地中绿地比例达到65%时,可在单次降雨40mm条件下实现雨水就地消纳率75%以上。通过设置多级水体与生态洼地,公园内部调蓄容量可达到5000m<sup>3</sup>规模,有效削减周边区域径流压力。园林设计中将休闲草坪、景观水面与雨水调蓄空间复合布局,使功能转换在不同降雨情景下自然完成。晴天状态下空间以游憩功能为主,降雨状态下转化为雨洪缓冲单元,实现空间利用效率最大化。该实施模式强化公园在城市雨洪管理体系中的节点作用。

#### 5.2 道路与居住区园林系统的综合设计路径

道路与居住区园林系统具有线性分布与高使用频率特征,其综合设计需兼顾安全性与调蓄功能。道路绿化带宽度达到3m时,配合下凹结构可承接周边路面径流量的50%以上。居住区绿地率控制在35%条件下,通过分散式雨水设施布局,可使雨水外排量减少40%。园林系统沿道路连续布置,形成雨水导流通道,使径流在不同节点逐级消减。居住区内部通过庭院绿地与公共绿地联动,实现雨水在生活空间内的缓释转化,在暴雨条件下维持道路积水深度低于100mm,保障使用安全与环境品质<sup>[4]</sup>。

#### 5.3 园林设计与城市排水系统协同实施机制

园林设计与城市排水系统的协同实施是海绵城市理念

落地的重要保障。通过园林系统削减初期径流量,可使进入管网的峰值流量降低30%以上,缓解排水系统瞬时负荷。园林调蓄设施与排水管网在设计阶段进行水位与流量匹配,使调蓄释放过程与管网运行能力保持协调。在降雨强度60mm/h条件下,协同运行可将内涝发生概率控制在5%以下。园林系统承担前端调节功能,排水系统负责末端输送与排放,两者形成分工明确、相互支撑的运行关系,从而提升城市整体雨洪管理水平。

#### 5.4 园林设计系统持续优化与适应性调整机制

园林设计系统的持续优化依赖于运行反馈与环境变化的动态适应过程。随着城市发展与气候条件变化,原有设计参数可能逐渐偏离实际需求,需要通过适应性调整机制实现系统更新。该机制以运行监测结果为基础,对空间结构、设施配置与管理方式进行阶段性修正,使系统功能与外部条件保持协调。适应性调整强调渐进式改进,通过局部优化带动整体效能提升,避免大规模改造对既有空间造成干扰。在这一过程中,园林系统逐步形成自我修正能力,使设计成果在长期运行中不断贴近海绵城市理念要求,增强城市生态空间的稳定性与韧性。

### 6 结语

在海绵城市理念引导下,园林设计已由传统景观营造模式转向以系统构建与功能协同为核心的综合设计路径。通过对园林设计理论基础、总体架构、关键技术路径、实践实施模式及运行管理机制的系统梳理,可以看出园林空间在城市雨洪调控、生态修复与环境品质提升中的基础性作用不断强化。园林设计系统化构建不仅提升了雨水调蓄与生态服务能力,也推动了园林空间在城市运行体系中的功能重塑。通过科学的运行管理与持续优化机制,园林设计系统能够在复杂环境条件下保持稳定运行,为城市可持续发展提供长期支撑。

#### 参考文献

- [1] 唐相亭.海绵城市理念下“双碳”园林设计研究——以济南趵突泉公园为例[J].城市建筑空间,2025,32(07):78-80.
- [2] 高波.海绵城市理念在城市景观园林设计中的应用[J].城市开发,2025,(14):37-39.
- [3] 章灿,黄孟阳.基于海绵城市理念的城市园林设计探析[J].工程与建设,2025,39(02):320-321+380.
- [4] 倪伟飞.浅析海绵城市理念在城市景观园林设计中的应用[A].2025年第一届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集[C].广西网络安全和信息化联合会:2025:17-18.

# Research on Construction Technology of Frozen Linkage Channel in Deep Water-rich Soft Soil Layer of Land-sea Interaction

Yuzhang Cui

Guangzhou Metro Construction Management Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

## Abstract

The advancement of socio-economic development and the growing transportation demands have driven the refinement of underground rail transit networks. The safe and efficient construction of inter-tunnel connection passages has become a critical focus in the construction industry. Under complex geological conditions such as saturated soft soil and sandy soil, the construction of these passages presents significant challenges. The application of the horizontal freezing method can enhance construction quality and efficiency while ensuring safety. This approach emphasizes four key phases: preparatory stage, freezing system installation and active freezing, excavation and permanent structure construction, and maintenance of freezing and settlement control. This paper analyzes the key aspects of the freezing method in connection passage construction, strengthens technical oversight, and improves construction quality.

## Keywords

freezing method; connection passage; construction technology; construction quality

# 海陆交互深厚富水软土砂层冷冻法联络通道施工技术研究

崔玉章

广州地铁建设管理有限公司, 中国·广东广州 510000

## 摘要

经济社会的发展以及人们交通需求的不断上升推动地下轨道交通网络完善。盾构隧道间联络通道的安全、高效施工也成为了施工界十分关注的焦点问题。而饱和软土、砂土等相应复杂地质条件下, 联络通道施工难度是相对较高的, 这时则可通过水平冻结法的应用提高联络通道施工质量和效率, 保障施工安全, 可紧抓施工前期准备阶段、冻结系统施工与积极冻结阶段、开挖与永久结构构筑阶段、维护冻结与融沉控制阶段四个关键阶段, 分析冷冻法在联络通道施工中的应用要点, 加强技术控制, 提高施工质量。

## 关键词

冷冻法; 联络通道; 施工技术; 施工质量

## 1 引言

随着城市轨道交通向沿海、沿江地区延伸, 隧道联络通道常需穿越典型的“海陆交互富水砂层”地质。该类地层具有高渗透性、高含水率、地层不均匀、受潮汐或地下水活动影响大等特点, 传统工法风险极高。人工地层冻结法作为一种“绿色”的临时加固工法, 通过将地层中的水冻结成冰, 形成高强度、不透水的冻土帷幕, 是解决此类富水软土工程难题的最有效方法之一。海陆交互环境的特殊性和富水砂层的高流动性, 使得冻结过程、冻土墙形成与维护、施工风险与传统内陆环境有显著差异, 亟需进行针对性研究。

水平冻结法又称冷冻法, 是通过人工制冷的方式将隧道周边含水地层冻结成强度高、渗透性低的冻结壁, 为开挖构筑作业的开展提供良好的基础, 是一种“以冻代撑、以冻代堵”的临时支护与止水方法。合理应用冷冻法可更好地提高联络通道施工的施工质量和施工效率, 保障施工安全。尤其在海陆交互富水砂层中, 该工法能有效解决传统施工面临的高渗、高流、含盐等难题。相关单位需紧抓以下关键阶段, 加强技术控制和技术管理。

## 2 施工前期准备阶段

需全面查明地层及水文关键参数, 不仅包括地下水位、水流速度、方向、含水率、孔隙比、导热系数、土层分布, 还需重点明确地下水流速流向、水力联系、盐度分布及潮汐影响规律, 同时排查地下障碍物、空洞、透镜体、承压水层

【作者简介】崔玉章(1981—), 男, 中国河南汝南人, 本科, 高级工程师, 从事轨道交通建设管理研究。

等特殊情况，为冻结方案设计提供精准依据。为确保勘察结果准确客观，应采用物探与钻探技术联合应用的方式：先通过高密度电法、地质雷达等技术了解地下地层分布及异常体情况，再借助钻探技术获取样品，通过室内试验获得物理力学参数，尤其需测试含盐地层的冻结特性参数（如冰点、未冻水含量等）。按照《土工试验方法标准》(GB50123-2019)和《非金属固体材料导热系数的测定热线法》(GB10297-2015)测定土壤导热系数，采用 ISOMET 热导仪测定土壤导热系数及比热按照《土工试验方法标准》(GB50123-2019)，采用 XT5201FST 冻土冻结温度测定仪测定土壤的结冰温度试验。

表 1 土壤导热、比热及结冰温度实验结果

序号	岩性	导热系数 $\lambda$ [w/(m·k)]		比热 [KJ/kg·K]		结冰温度
		20℃	-10℃	20℃	-10℃	
1	4N-2 粉质粘土	1.239	1.913	1.18	0.732	-0.56
2	4-2BG 固结淤泥质土	1.197	1.68	0.806	0.793	-0.65
3	3-1 粉细砂	1.725	2.01	1.035	0.85	-0.79
4	3-2 中粗砂	1.558	1.978	1.058	1.102	-0.58
5	3-3 砾砂	1.221	1.928	0.873	0.977	-0.27

在此之后则需要进行冻结方案设计。在冻结方案设计中，应紧抓冻结壁设计、冻结孔布置、制冷系统选型和监测系统设计四大关键点来展开分析。冻结壁设计需根据水土压力，具体问题具体分析，对冻结壁的厚度、平均温度、强度要求作出明确规定，这其中需要尤为引起关注和重视的则是分析平均温度，一般多将平均温度设置为 -10℃ ~ -20℃ 之间，这可以更好的保障冻结壁的抗压强度和抗渗透性，一般情况下冻结壁的厚度可通过力学计算确定，分析其是否能够有效应对土压力、水压力以及施工过程中的开挖扰动，若底层为饱和软土地层，需确保其厚度在 1.2m 以上。而在冻结孔设计的过程中需从数量、位置、角度来展开分析。一般情况下，可将冻结孔按单排或双排梅花形布置在隧道管片上，在联络通道开挖轮廓线外侧确定具体位置，孔间距可以设置在 0.8m ~ 1.2m 之间，为后续冻土柱能够有效搭接奠定良好的基础。在制冷系统选型中，应根据冻结壁的总热负荷，确定制冷量，在此基础之上，对制冷机组进行选择，确定盐水循环泵、冷却塔及配套管道系统的设计。最后需设计实时监控系統，更好地明确冻结过程、地层变形、结构安全等相应信息<sup>[1]</sup>。

在方案设计的过程中，需注意不同地质条件下，冻结方案中冻结孔间距、冻结管直径、积极冻结时间和冻结壁平均温度都是存在鲜明差异的，必须坚持具体问题具体分析的原则，对方案参数作出适当调节，如表 1 所示。例如砂土的导热系数是相对较高的，因此相较于其他土质，砂土的冻结速度快，但是在使用冷冻法过程中也很有可能因水分迁移活跃出现冻胀问题。再例如黏土的导热系数较低，因此冻结

速度更慢，但是其塑性强，冻胀融沉的变形会更大，因此应根据前期的勘测数据，明确不同地区的地质特点，针对性的分析可能出现的问题，并对冻结方案参数作出科学调整，始终保障冻结方案的可靠性、针对性和适切性，进而有效提升施工质量。

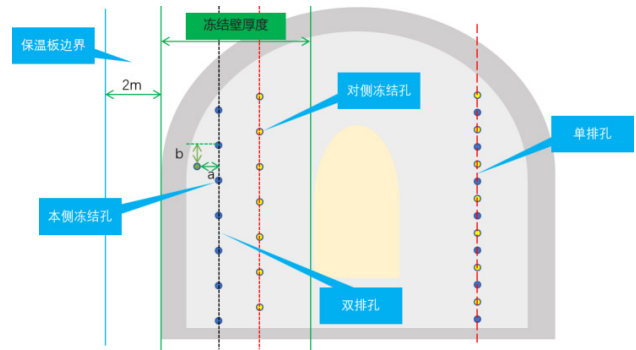


图 1 冻结示意图

### 3 冻结系统施工与积极冻结阶段

在冻结系统施工与积极冻结阶段，需紧抓冻结孔施工、制冷系统安装与调试、积极冻结与过程监测三大关键点，加强技术控制。在冻结孔施工的过程中，需关注盾构隧道中作业面狭小的问题，可采用专用仪器设备，定向施工钻好冻结孔，在施工建设的过程中，应严格按照设计图纸，确定钻孔的角度及深度。一般多使用水平定向钻机，保障施工精度达标，符合设计要求。在钻孔结束以后，可下入无缝钢管作为冻结管，同时孔口与管片之间的间隙应采用高压注浆进行密封，避免出现地下水流入或盐水渗漏的问题<sup>[2]</sup>。

在制冷系统安装与调试的过程中需要根据设计图纸明确制冷机组、盐水箱、循环泵等相应设施设备的安装位置，并且根据设计图纸布设盐水循环管道，形成闭合回路。在安装结束以后可通过压力测试和全面调试工作的落实，确保所有设备及管道能够正常使用。

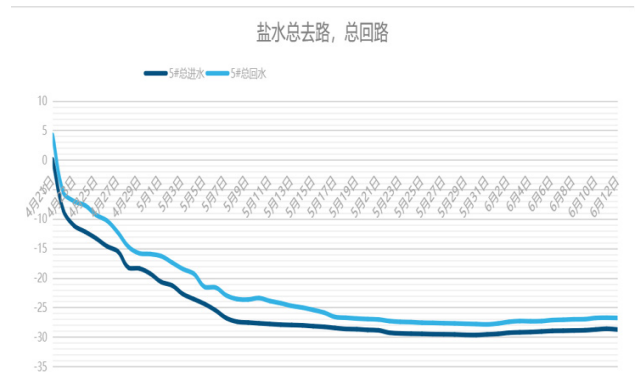


图 2 积极冷冻盐水总去路、总回路

在积极冻结与过程监测的过程中需先启动制冷机组，将氯化钙盐水溶液冷却至 -25℃ ~ -30℃，通过循环泵压入冻结管中，形成冻结壁。通过冻结系统监测、冻结壁监测和环

境与结构监测,动态调整制冷系统参数。但需要明确监测频率及技术要求,保障监测结果可靠,可应用于运行参数调整当中,如表2所示。在冻结系统监测中,应紧抓盐水温度、流量、压力及制冷机组运行参数等相应关键点进行监测,盐水温度、流量和压力应每小时监测一次,而制冷机组运行参数则需要持续监测,确保出口温度、压力稳定,流量均匀无堵塞且电压、电流、油温、油压等参数正常。在冻结壁监测中应紧抓温度场和壁厚进行监测,确保冻结壁的温度均匀且达到设计标准,同时保障冻结壁的厚度符合要求。环境与结构监测中可以着重监测地表沉降/隆起问题、临近隧道管片位移问题及邻近地下管线变形问题,一般情况下地表沉降/隆起的速率应在3mm/天以下,管片收敛值、径向位移值以及邻近地下管线变形量都需要做出特殊规定,明确安全限值<sup>[3]</sup>。

## 4 开挖与永久结构构筑阶段

在正式落实开挖作业之前相关工作人员需要通过钻芯取样的方式展开室内实验,了解冻结壁的实际强度,分析其是否达到了设计标准。与此同时,还需要在开挖面中心位置打一个探查孔,用于分析冻结壁的密闭性是否达到标准和要求。若探查口中并无明显水流,则代表冻结壁隔水效果达标,后续开挖作业可以进行<sup>[4]</sup>。

在开挖中需要分步开挖并做好临时支护工作,这可以最大限度地降低对冻结壁产生的扰动和影响。一般情况下,在开挖作业开展的过程中,应坚持“短进尺、多循环”的原则。例如,相关工作人员可以先完成上半断面的开挖作业,在贯通结束以后,落实下半断面的开挖,每次循环的开挖进尺可以控制在0.5~1m之间。在开挖作业结束以后,应当立刻通过架设钢拱架、铺设钢筋网、喷射混凝土的方式,完成初期支护,支撑暴露的冻结壁,避免因温度回升导致其强度下降。

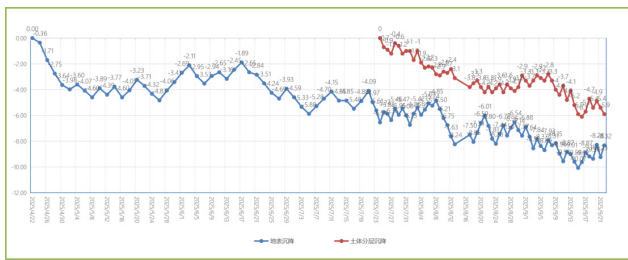


图3 开挖期间监测数据

在此之后进行永久结构施工,先完成防水层铺设,然后绑扎钢筋、立模,最后完成防水混凝土的浇筑作业。在浇筑作业开展的过程中应当坚持分层对称的原则,同时在混凝土浇筑结束以后应当振捣密实,以此来保障结构的密实度和耐久性。然后落实混凝土养护作业,当混凝土的强度达到设计标准和要求时,则可以拆除临时模板<sup>[5]</sup>。

## 5 维护冻结与融沉控制阶段

在永久结构施工结束以后,还需做好冻土融化问题的预测、分析和处理。在混凝土养护期间,需做好冻结维护,保障制冷功率达标,进而确保冻结壁的稳定。只有当混凝土的强度达到设计标准和要求,能够独立承受水土压力以后,才可以停止制冷。

在此之后则需要进行人工解冻和融沉控制。在制冷结束以后,冻结壁会出现自然融化,这时土体体积会收缩,引发地面沉降及融沉风险,影响施工质量。为此,在该环节,相关工作人员应当严格控制融化速度,通过逐步提高盐水温度或分段停止冻结管供冷的方式,缓慢、均匀地解冻。这样融化水则可以被周围土体吸收,也可以通过排水系统排出。

然后工作人员则需要跟踪注浆,即在冻结孔施工时,应当预埋注浆管,在解冻的过程中,根据监测数值,了解地表沉降状态,然后向融化区的土体中注入水泥浆或化学浆液,用于填补空隙,补偿土体的体积损失,进而将地面沉降控制在允许范围内<sup>[6]</sup>。

## 6 结语

在联络通道施工过程中,冷冻法的应用可有效保障施工质量和安全,尤其在海陆交互富水砂层这类极端复杂地质条件下,其优势更为显著。该类工程是“水文地质是基础,冻结设计是核心,过程控制是关键,风险防控是保障”的系统工程,需聚焦水流与盐分两大核心影响因素,通过理论分析、数值模拟、现场试验与智能监控相结合的手段,攻克关键技术难题。相关工作人员需严格把控施工前期准备、冻结系统施工与积极冻结、开挖与永久结构构筑、维护冻结与融沉控制四大阶段,强化精细化勘察、针对性设计、智能化监测、精准化控制,全面提升施工技术水平,为类似极端复杂地层条件下的地下工程建设提供安全、可靠、经济的解决方案。

## 参考文献

- [1] 陈铭辉. 侧壁式冷冻法联络通道施工技术[J]. 建设监理, 2024, (09): 111-114.
- [2] 高民富. 非对称异性隧道联络通道冷冻法施工技术[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (03): 157-162.
- [3] 赵杰. 地铁运营线路冷冻法施工联络通道沉降后道床结构整治施工技术分析[J]. 工程技术研究, 2024, 9 (02): 55-57+136.
- [4] 王巍. 钱塘江冲海粉砂地层联络通道冷冻法施工技术研究[J]. 四川水泥, 2024, (01): 16-18.
- [5] 武相坤,豆红尧,张元师,等. 冷冻法施工技术在盾构区间联络通道施工中的应用研究[J]. 价值工程, 2023, 42 (34): 93-95.
- [6] 赵王飞. 冷冻法联络通道地面注浆改良地层施工技术[J]. 中国新技术新产品, 2022, (03): 123-125.

# Research on Precision Control Technology for Horizontal Well Drilling Trajectories in Tight Oil Reservoirs

Xiaolong Liu

Fourth Engineering Project Department Changqing Drilling Corporation Sinopec Chuanqing Drilling Company, Xi'an, Shaanxi, 710018, China

## Abstract

Tight oil, one of China's most critical unconventional oil and gas resources, plays a vital role in national energy security through efficient extraction. Horizontal wells, which maximize reservoir contact and enhance single-well productivity, represent a key technological approach for developing tight oil resources. However, the unique characteristics of tight oil reservoirs—including low porosity, low permeability, strong heterogeneity, and thin interbedding—pose stringent requirements for precise drilling trajectory control. Addressing these technical challenges, this study systematically investigates core technologies such as geological guidance optimization, drilling tool matching, trajectory design and dynamic adjustment, wellbore stability control, and green-low-carbon coordinated control. A comprehensive “design-control-monitor-adjust” precision control technology system has been established. Through practical case validation, this research aims to provide valuable references for professionals in the industry.

## Keywords

tight reservoir; horizontal well; drilling trajectory; precision control

# 致密油藏水平井钻井轨迹精准控制技术研究

刘晓龙

中石油川庆钻探公司长庆钻井总公司第四工程项目部, 中国·陕西 西安 710018

## 摘要

致密油是我国最主要的非常规油气资源之一, 其高效开采关系到国家能源安全。水平井能够最大限度地接触储层, 提高单井产能, 是我国致密油气资源开发的重要技术途径, 然而, 由于致密油储层具有低孔、低渗透、强非均质性和薄互层等特点, 对其钻进轨迹的精确控制提出了苛刻的要求。基于此, 本文针对致密油藏水平井钻井轨迹控制面临的技术难题, 系统研究了地质导向优化、钻井工具适配、轨迹设计与动态调整、井眼稳定性控制、绿色低碳协同控制等核心技术, 构建了“设计-控制-监测-调整”全流程精准控制技术体系。并通过实例验证, 以为行业内相关人员提供参考。

## 关键词

致密油藏; 水平井; 钻井轨迹; 精准控制

## 1 引言

由于致密油具有孔、渗、砂含量高特点, 常规的直井开采效果十分低下, 单井生产很难实现经济效益。水平井通过建立长水平段储层与储层之间的有效接触, 极大地增加了渗流区, 是实现致密油气藏高效开采的唯一途径。但是, 由于致密油储层的厚度通常很小(3-10m), 并且具有很强的横向非均质性和复杂的界面形状, 使得在钻进过程中的轨迹发生轻微的偏差就会造成脱靶现象, 从而降低了可采性。同时, 由于致密储层的岩石力学特性复杂, 井壁稳定性难以保证, 因此, 在轨迹控制中, 需要在保证钻井速度的前提下,

实现井壁的完整性。当前, 我国致密油储层水平井钻进轨迹控制还面临着设计不符合地质条件、随钻导向精度不高、实时调整滞后等难题, 严重影响了其开采效益的提高。基于此, 本文聚焦致密油藏水平井钻井轨迹精准控制技术, 从难点分析、关键技术研发、现场应用验证等方面开展研究, 为致密油藏高效开发提供技术保障。

## 2 致密油藏水平井钻井轨迹控制技术难点

### 2.1 地质条件复杂导致轨迹控制难度大

致密油气藏大多在陆相沉积条件下发育, 储层横向连续性差, 厚度变化大, 常伴有断层、夹层等地质灾害, 给油气勘探开发带来了很大的不确定性。一方面, 由于储层厚度较薄(3-10m), 需要将水平段的轨迹严格控制在“甜点”之内, 靶心距离的容许误差一般不超过1m, 大大超过了常规油气

【作者简介】刘晓龙(1981—), 男, 中国甘肃宁县人, 本科, 从事石油工程、钻井现场安全管理研究。

藏的需求。而致密油储层孔隙率低（通常小于10%）、渗透率极低（ $<0.1\text{mD}$ ），且储层与非储层的岩性差别较大，在随钻时很难对油气藏界面进行快速识别，造成轨迹穿出储层。另外，由于致密储层的抗压强度高（60-120MPa），井壁容易缩径坍塌，在轨迹调节时需要兼顾造斜率和井壁的稳定，这就更加大了其控制的难度。

## 2.2 随钻导向数据解释精度不足

随钻导向作为水平井轨迹控制的关键，其测量结果的准确性取决于随钻资料的精确判读。由于致密油储层与周围环境的地球物理响应相差较小，常规测井资料如自然伽马、电阻率等分辨率较低，很难精确判别油气藏中的轨迹。

## 2.3 钻井工具性能适配性差

致密油储层水平井需要同时满足高造斜率、高稳定性和高精度导向等条件，这对钻具的性能提出了苛刻的挑战。致密油储层普遍具有高研磨性、非均质性强的特征，进一步放大了工具适配难题。常规螺旋钻具成坡能力较弱，轨迹调整响应滞后，很难适应薄油气藏对轨迹精准把控的要求；然而，传统的回转导钻工具在高密度、高硬度的地层中易与岩石发生剧烈摩擦，不仅容易出现磨损、卡钻等现象，还会因工具失效导致钻井周期延长。

## 2.4 轨迹调整与井眼稳定矛盾突出

在致密油储层中，水平井的轨迹调整需要通过改变钻压、排量和速度等钻进参数或工具的姿态来实现，而这些参数的调节有可能导致井壁失稳。如增大钻井压力来增大造斜率，容易造成井壁垮塌；在提高携岩效率的过程中，为了提高携岩效率，会出现井内渗漏。另外，长水平断面钻进阻力矩较大，且在轨迹调节时刀具的受力情况较为复杂，极易产生偏差，且难于精确控制。

# 3 致密油藏水平井轨迹精准控制核心技术

## 3.1 地质导向优化技术

地质导向是精确控制轨迹的先决条件，其核心是利用随钻测井资料对油气藏进行实时定位，并将其引导到油藏有效厚度范围内。为了解决致密油储层难以识别的难题，从数据采集、解释模式和导向策略三个角度对其进行了优化。在资料收集上，选择适合致密油的随钻测井组合，综合利用天然伽马、电阻率、密度、中子孔隙度等多种测井手段，并辅以随钻地震（LWD-VSP）资料，实现多源信息的融合，提高油气藏识别的可靠性。针对致密油储层和非储层测井响应差别较小的难题，利用已钻测井数据和岩心数据作为训练样本，通过对GR-RES-DEN的联合解释，实现储层识别精度由常规方法的75%提高到90%以上。在导向策略上，采用“预判-验证-调整”的闭环导向模式。基于前期地质建模成果，通过对储层倾向、厚度的预测，确定储层的运动方向、厚度的变化规律，并设置相应的报警阈值；在钻进过程中，将LWD资料与预测模型进行实时对比，一旦出现油气藏界

面偏离情况，应立即进行调整；考虑到水平段的薄油层，本项目拟采取“中轴导向”的控制措施，保证油层的纵向分布在油层的中部，从而有效地防止油藏侧向改变而造成轨迹的脱层。

## 3.2 钻井工具适配与参数优化

钻井工具的适配性直接影响轨迹控制精度，结合致密油藏地质特征和钻井要求，为取代常规的滑动式导钻工具，选择了旋转式导钻组合钻具。采用新型的可360度旋转钻进新技术，解决了因导向滑移而引起的井眼阻力大、轨迹不光滑等难题，并能提高造斜精度（ $0.5^\circ/30\text{m}$ ）。根据致密油储层各井段的钻进要求，对钻具组合进行了优化，即在纵向上，采用PDC钻头+高效电机+稳定器的组合，保证了钻进速率；造斜段采用变径稳定器，可灵活调节造斜量；在水平井段，为了减小钻具震动对井眼轨迹的影响，采取了“长保直径PDC钻头+旋转式导钻+LWD”的组合方式。采用正交实验法对钻进工艺和钻进工艺进行了优选。造斜段的最佳钻进压力为80-100kN，转速60-80r/min，排量30-35L/s，以保证造斜段的造斜率达到设计要求；在水平井段，钻进压力为60-80kN，转速80-100r/min，排量28-32L/s，提高了钻进效率，同时保证了井眼的平稳。在此基础上，利用数值仿真技术，研究钻进过程中各因素对井眼轨迹的影响规律，构建参数优选数据库，为实际生产提供依据。

## 3.3 轨迹设计与动态调整技术

根据致密油储层特征，提出了“多目标优选+分段造斜”轨迹设计方法。在此基础上，对靶位进行合理布局，靶位间距控制在300-500m之间，以保证井眼轨迹能够灵活地适应油藏的变化；在造斜段，为了减小造斜时钻孔应力集中，减小了井塌的危险性，采取了“缓慢造斜-快速造斜-稳造斜”的三级方案；横向断面采用“微曲率”曲线，曲率半径 $\geq 1500$ 米，保证了钻具的顺利通过。针对轨迹调节存在时滞的问题，提出了一种基于PID的动态调节方法。以油藏中心轴线为研究对象，通过实时获取井眼实际偏移量（ $\Delta x$ ， $\Delta y$ ， $\Delta z$ ）、造斜率偏差（ $\Delta K$ ）等参数，利用PID控制器进行校正，得到井眼轨迹的修正值，并输出钻井工具的导向命令。以致密油储层为研究对象，利用模糊控制原理对其进行参数（比例系数 $K_p$ ，积分系数 $K_i$ ，微分系数 $K_d$ ）进行优化，以增强其抗扰动能力。实验结果表明，所提出的动力学调节方法在响应时间 $\leq 5$ 分钟的情况下，能够较大幅度地提高轨迹偏移的控制精度，提高30%以上。

## 3.4 井眼稳定性控制技术

井眼稳定是轨迹精准控制的保障，致密油储层由于天然裂缝发育，岩石脆性大，在钻进时极容易出现井崩，造成井眼轨迹的失控。为了提高钻孔的稳定性，对钻井液系统进行了优化，并对其进行了压力控制。对钻井液配方进行了优化，研制了适合致密油储层的防塌型润滑钻井液。本项目拟在聚磺钻井液体系中添加纳米阻堵剂（50-100nm）及弹性

微粒,对储层的微观裂隙、孔隙进行封闭,减少滤失的渗透;在钻井液中加入润滑油(3%-5%),可使钻井液摩擦因数低于0.15,从而减小了钻头与井壁之间的摩擦力;通过对钻井液密度的调节,使其达到1.25-1.35克/厘米<sup>3</sup>的目的,达到了平衡地层压力、防止井壁垮塌的目的。利用动压控制技术,实现对环空压的实时监控,并通过调整钻井液密度、排量等参数,使环空压降至安全窗口(地层孔压~破岩压力)。为解决水平井段岩屑沉积所引起的地层压力异常问题,提出了“分段循环+脉冲振荡”的方法,以防止因地层压力过大而造成井漏、井崩等事故。实践证明,该方法可使井筒复合事故发生率由18%下降到5%以内,为实现精确轨迹的精确控制创造了有利的井况。

### 3.5 绿色低碳协同控制技术

面对“双碳”战略和能源安全的双重需求,我国致密油气资源的高效利用和低碳环境保护是亟需解决的关键问题。钻井液系统采用可循环利用配方,利用纳米级阻堵剂和弹性颗粒的最佳配合比,使钻井液损失降低30%以上,并减小废物排放带来的环境污染风险。在钻具能量控制上,采用旋转导向钻进联合动力管理系统,对其进行能量的动态调节,并与传统的燃油驱动方式相结合,使其在单井钻进过程中的碳排放量比常规工艺减少18%。在此基础上,采用“分段循环+脉动”的方法,减小了钻井液的堆积,减少了钻井液的补充频率,满足了非常规油气资源的“绿色化”发展趋势。

## 4 现场应用案例

### 4.1 应用区块概况

选取鄂尔多斯盆地某致密油区块作为试验区块,该区储层主要为孔隙度为6%-9%,渗透率为0.01-0.08mD的长石砂岩,储层厚度4-7m,具有较高的侧向非均质性和较多的自然裂缝。试验井为水平井ZJ-1井,设计垂深2850m,设计了3个靶点,使其在水平方向上的偏移不超过±0.2m,油藏可钻遇率≥90%。

### 4.2 技术实施过程

采用本文研究的轨迹精准控制技术体系进行施工:一是在地质导向上,选择了GR-RES-DEN-CNL随钻测井组合,并采用机器学习的方法进行油气藏界面的实时识别;二是钻

具选用回转式钻具,在造斜段,钻压90kN,转速70r/min,水平井段,70kN,转速90r/min;三是轨迹设计为多目标分段造斜型,横向断面为1800米,采用PID-模糊控制方法进行动力调节;四是为了提高井壁的稳定性和稳定性,使用了高密度1.30g/cm<sup>3</sup>的防塌型钻井液,对环空压进行了实时监控。

### 4.3 应用效果

ZJ-1井的钻探工作取得了较好的效果,水平段轨迹最大偏差0.12m,其平均值为0.08米,符合设计要求(±0.2米);油藏可采率为93.5%,比(常规工艺)区块相邻的油井高出14.2个百分点;与邻近的油井相比,该油井的钻探周期为28.5天,钻探效率提高15.6%;井筒复合事故发生率为3.2%,比相邻井减少12.8%。单井日产油量为18.6t,与常规工艺相比,提高了62.1%。为进一步验证技术的普适性,在该区块后续部署的5口水平井中推广应用,平均井眼轨迹偏移0.10m,油层可钻性92.3%,平均钻进时间减少13.8%,日产单井原油17.8t,总体上提高了开采效率。

## 5 结语

综上所述,致密油气藏水平井钻进轨道精确调控是解决其开发的关键技术支撑。本文针对地质条件复杂、导向精度不足等行业难题,构建了“设计-控制-监测-调整”全流程技术体系,通过多学科交叉融合,实现轨迹控制精度、储层可采性和开采收益的同时提高。现场应用表明,可望实现水平井井眼轨迹偏移不超过0.12米、油藏可钻遇率超过92%、单井日产油能力提高60%以上,减少二氧化碳排放和井眼事故,并验证所提出的方法的科学性和实用性。未来,随着我国深部油气资源的深度开采和能源转型,我国致密油开采面临着超深层、极薄油气藏等更加复杂的环境条件,亟需加强智能智能引导、低碳装备集成等关键技术研究,促进其“自适应、自决策、全绿色”发展。

### 参考文献

- [1] 李根生,黄中伟,牛继磊.致密油藏水平井高效钻井技术进展与展望[J].石油学报,2020,41(5):632-646.
- [2] 高德利,刁斌斌,曲从锋.水平井轨迹控制技术现状与发展趋势[J].石油钻采工艺,2019,41(2):137-144.
- [3] 王敏生,张洪伟,李勇.致密油藏地质导向钻井技术优化与应用[J].天然气工业,2021,41(8):102-109.

# Research on Cost and Quality Coordinated Management of Green Energy-saving Building Water Supply and Drainage Engineering Construction

Long Xiao

Jiangxi Zhihe Engineering Project Management Co., Ltd., Ganzhou, Jiangxi, 341000, China

## Abstract

Under the “dual carbon” strategy, green and energy-efficient buildings have gained widespread adoption. As a critical component of infrastructure, water supply and drainage systems require stringent cost control and quality management. This study examines the core challenges in cost and quality control within such projects, guided by green building principles, and explores collaborative management mechanisms throughout the construction process. Through case studies, it proposes practical management strategies and technical approaches to enhance both economic efficiency and environmental sustainability. The research demonstrates that collaborative frameworks not only reduce project costs but also significantly improve quality control, providing theoretical foundations and practical references for sustainable green construction development.

## Keywords

green building; water supply and drainage engineering; construction cost; quality management; collaborative mechanism

## 绿色节能型建筑给排水工程施工成本与质量协同管理研究

肖龙

江西致和工程项目管理有限公司，中国·江西赣州 341000

## 摘要

绿色节能型建筑在“双碳”战略背景下得以广泛推广，其中给排水工程作为基础设施的重要组成部分，其施工成本与质量控制尤为关键，本文基于绿色建筑理念，分析给排水工程中成本控制与质量管理的主要矛盾，探讨在施工全过程中如何构建协同管理机制。通过对典型案例的研究，总结出若干具有实践意义的管理措施与技术路径，旨在提高施工项目的经济效益与绿色质量水平。研究表明，协同机制的构建不仅能够有效降低项目成本，还能显著提升质量管控效率，为绿色建筑工程的可持续发展提供理论支撑与实践借鉴。

## 关键词

绿色建筑；给排水工程；施工成本；质量管理；协同机制

## 1 引言

绿色节能型建筑已成为建筑行业发展的重要方向，给排水工程作为其关键组成部分，对整体节能效果和运行质量有着直接影响，施工过程中存在成本控制难、质量管理复杂等问题，亟需建立科学有效的协同管理机制，提升资源利用效率与工程质量水平，本文围绕绿色节能型建筑的特点，深入探讨给排水工程在施工阶段的成本与质量协同管理策略，旨在为相关工程实践提供理论依据与技术支持。

## 2 成本控制管理分析

### 2.1 成本构成特点

绿色节能型建筑给排水工程的成本构成具有明显的系统性与技术性，主要包括材料采购成本、人工施工成本、机械使用成本、现场管理费用以及技术服务与检验费用，材料成本占据主导地位，特别是在选择绿色环保管材、节能型设备与智能控制系统等方面投入较高，人工成本则受到施工组织方式与技术熟练度的影响较大，特别是在复杂工艺或精细施工中体现明显。机械使用成本受限于施工周期与设备配置水平，若未进行合理配置或利用率不足，往往会造成资源浪费<sup>[1]</sup>。

### 2.2 施工阶段控本方法

在施工阶段实施有效成本控制应从多维角度出发，突出全过程动态管理与节点控制策略，预算控制不应停留于招投标阶段，而需贯穿材料进场、工序衔接与现场管理全过程，

【作者简介】肖龙（1988—），男，中国江西赣州人，本科，工程师，从事建筑工程研究。

通过合同管理与责任界面划分,形成成本责任清晰的管理机制,材料采购应依据施工进度计划进行分批统筹,并结合BIM技术进行数量精算与施工模拟,避免因超储或误购产生二次搬运或浪费,施工组织应强化流程再造与标准作业制度,通过优化施工工艺与交叉作业时序,降低重复作业与待工时间从而提升资源配置效率,在管理费用方面,需借助项目管理信息系统进行实时数据采集与反馈,构建成本预警机制,使管理层能够及时调整计划与资源,降低不可控支出<sup>[2]</sup>。

### 2.3 成本控制常见问题

成本控制中存在诸多制约因素,主要体现在管理制度不健全、技术手段落后与责任落实不到位等方面。部分项目未建立标准化成本核算体系,缺乏统一的材料价格数据库与成本分析模型,导致实际成本与预算存在较大偏差。施工过程中计划执行不严,材料管理松散,易造成重复采购与闲置浪费,形成隐性成本。施工现场动态监管不到位,资源调配失衡与劳动力组织混乱,使得人工与机械费用占比异常。在绿色施工要求下,新型节能设备与环保材料的技术门槛较高,部分施工单位对其认知不足,导致选型不当与施工适应性差,进而引发返工与损耗。

## 3 质量控制管理分析

### 3.1 质量控制关键点

绿色节能型建筑的给排水工程在质量控制方面具有特殊要求,其关键控制点涵盖设计深化、材料选用、管道敷设、节点施工、水密性处理与系统调试等多个方面。设计阶段需高度契合绿色建筑的技术标准与能效指标,在系统布局、立管分区、水力平衡与节能控制方案方面形成系统化配置,以减少后续施工过程中的变更与返工风险。在材料选用方面,不仅应符合国家环保标准,还应具备良好的物理性能与施工适应性,例如耐腐蚀性、抗压强度与接口密封性能等参数必须满足现场实际安装及长期运行要求。施工阶段质量控制的重点集中于管道预制、接口处理和支吊架安装等工艺细节,任何节点处理不到位或工艺执行偏差都可能对系统运行造成隐患。隐蔽工程的质量控制则更为关键,需加强对埋地管道、穿墙套管及防水密封节点的逐项验收,确保系统具备良好的密闭性和运行安全性。此外,施工组织应强化专业分工与工序衔接,避免交叉施工带来的质量干扰。调试阶段应重点关注系统运行状态、水压平衡与智能控制反应能力,通过压力测试、水质检测和功能测试等手段,评估系统运行的稳定性与节能水平<sup>[3]</sup>。

### 3.2 检查评估机制

质量检查与评估机制是实现全过程质量控制的基础,需构建覆盖设计交底、材料进场、过程管控与完工验收的多层级、闭环管理体系。项目开工前应组织质量技术交底会,由设计、监理与施工单位对关键施工节点、技术参数及质量标准进行明确,并建立技术复核机制。材料进场必须进行批

次抽检与合格证审核,结合第三方检测机构的复验结果,建立现场材料质量台账。施工过程中应实施分段验收与交接制度,每个重要工序完成后需经监理或技术负责人检查合格方可进入下道工序,避免质量缺陷在后续施工中被掩盖。对于重点部位如水表井、雨水口、泵房等区域应设立质量控制样板段,由现场技术人员对照样板施工工艺进行质量评估与偏差分析,推动标准化施工执行。系统完工后,应组织综合性能测试,包括管道压力试验、水流量测定、能耗测试与控制逻辑功能验证等,形成系统质量评估报告。质控过程中数据记录应统一格式,图文并存,形成可追溯的质量档案,项目结束后可为运营维护阶段提供有效的技术支撑。各类检查活动应与施工进度同步推进,强化动态监测能力,使质量评估具备及时性与指导性。

### 3.3 常见质量缺陷与对策

绿色节能型建筑给排水工程中常见质量缺陷多集中于管道接口渗漏、水压不足、水质不达标与智能系统响应延迟等问题,主要源自施工细节控制不到位、材料选型不当与调试流程不规范等方面。管道接口渗漏通常由连接工艺不规范、接口清洁不到位或密封材料老化引起,应选用质量稳定的密封件,并配合使用专业施工工具与扭力控制标准,确保连接密实。水压不足多见于立管设计不合理、水泵选型与系统阻力计算偏差或管道内壁粗糙度增大,需在设计阶段进行全面的水力模拟分析,施工过程中控制管道切割与对接的精度,降低局部水头损失<sup>[4]</sup>。水质不达标往往与管道清洗不彻底、施工污染控制不到位或管材本身释放有害物质有关,应在施工结束后组织高强度水冲洗与二次清洁处理,并根据系统规模决定是否投加临时净水药剂。智能控制系统响应延迟可能由通讯模块配置不匹配、传感器精度不足或逻辑程序设置偏差引发,需要在设备选型时充分考虑与现场实际的适配性,调试阶段则需对控制逻辑逐一测试并校准参数以优化响应曲线。针对上述问题,应强化培训机制,提高一线施工人员与调试技术人员的专业水平,增强现场应变能力,同时推动形成从设计、采购、施工到验收全过程质量闭环管理模型,提升工程整体运行的可靠性与节能效益。

## 4 成本与质量协同机制研究

### 4.1 协同管理原则

绿色节能型建筑给排水工程的成本与质量管理往往存在目标冲突与资源竞争的关系,因此构建有效的协同管理机制,需要基于系统性、动态性与价值导向性原则,建立贯穿项目全周期的集成管理思维。在系统性方面,协同管理应打破传统成本管理与质量控制的分离状态,将两者纳入统一管理平台,从目标设定、方案设计、资源配置到过程控制各环节形成联动逻辑,使成本控制行为能够服务于质量提升目标,质量标准亦能反向优化资源投入结构。在动态性方面,协同管理不应停留在施工准备阶段的静态配比,而应嵌入施

工全过程的实时监测与调整机制,通过反馈回路优化项目执行路径,使管理行为具备响应能力与适应能力。在价值导向性方面,绿色建筑强调生命周期综合效益,因此协同管理不应仅关注短期成本节约或局部质量提升,而应在节能效益、环境影响、运行维护与用户满意度等层面进行整体优化<sup>[5]</sup>。协同机制的核心在于建立清晰的目标协调体系、合理的绩效激励机制与高效的沟通协调平台,使项目参与各方在明确边界与权责的基础上实现管理行为的一致性。

#### 4.2 协同管控措施

为实现施工成本与质量目标的有效协同,需构建基于项目管理全过程的管控措施体系,从技术路径、组织结构、制度设计与操作方法等多个层面展开。一方面,技术路径上应构建成本与质量控制一体化模型,建立分阶段的成本与质量耦合分析模型,对关键节点进行成本效益评估,识别高风险部位并配置资源优先级。施工前阶段应组织多专业联合评审会议,对设计方案进行成本敏感性与质量风险的同步分析,提前介入优化路径。招采阶段应将质量评价指标纳入采购合同与绩效评估体系,使供应链参与主体的行为符合协同目标。施工阶段应采用同步审计与联动检查机制,在材料进场、隐蔽工程、安装工序等关键节点实施双向核查,并由成本与质量管理人员共同签字确认,以形成责任闭环。另一方面,组织结构上应设立协同管理小组,构建跨职能协调机制,在项目管理办公室设立成本质量协同专岗,统筹协调计划调整、资源调配与目标修正。制度设计方面应强化全过程目标分解与动态控制机制,将总目标分解至阶段与专业,并根据实际偏差设定预警阈值与响应级别,提升调控的及时性与精准性。在操作方法上,应推行标准化作业指引与样板引路制度,通过工艺标准统一施工行为,减少返工带来的资源浪费,同时促进施工质量的稳定性。数据管理方面应构建全过程数据共享机制,打通成本台账、质量记录与现场进度数据,提升管理决策的透明度与一致性。

#### 4.3 信息化协同管理平台应用

在绿色节能型建筑给排水工程管理实践中,信息化协同管理平台的引入为成本与质量协同控制提供了技术支撑与数据基础,其功能主要体现在集成建模、数据可视、过程追踪与智能决策等方面,平台建设应围绕 BIM 模型、成本数据库、质量台账与物联网感知终端等核心模块展开,通过 BIM 模型整合设计信息、施工工艺与物料参数,为成本核算与质量控制提供精准的数据基础。系统可嵌入成本动

态分析模块,实时采集现场材料用量、设备运转、人工工时等关键数据,并与预算模型进行比对,识别成本偏离趋势。质量管理方面,平台可实现施工工序的视频记录、照片上传与隐蔽工程节点的图纸比对,构建可追溯的质量档案体系。物联网设备可采集管道安装位置、水压测试数据与施工环境参数,并上传至云端数据库,供管理人员进行远程监控与分析。在协同功能方面,平台支持多角色权限管理,业主、监理、施工与设计各方可基于角色参与进度查询、问题标注与任务协调,形成闭环处理流程。平台还能提供基于大数据的风险识别模型,利用历史项目数据与现场实时数据进行趋势分析,对成本异常或质量隐患进行预警提示与决策建议。此外,平台在信息交互方面可实现移动端接入,使现场人员可随时录入数据或接收任务指令,提高信息响应速度与执行效率。在实际应用中,应重视平台与现场管理流程的融合性,通过培训与流程再设计使管理人员充分掌握信息化工具的操作逻辑,推动协同机制从制度层面向技术层面深入发展。构建基于数据驱动的智能协同系统,有助于实现绿色节能建筑施工中成本与质量的同步优化,提升整体项目管理水平与绿色建筑综合价值。

## 5 结语

绿色节能型建筑给排水工程的施工管理要求在保障工程质量的基础上合理控制成本,实现两者的协同发展有助于提升项目整体效益与可持续水平。构建科学的协同管理机制,明确各阶段关键控制点,借助信息化平台提升管理效率与透明度,是推动绿色建筑高质量发展的关键路径。未来需在实践中不断优化方法体系,深化管理集成理念,提升全过程管控能力。

#### 参考文献

- [1] 林淑娇. 基于“双碳”理念的装配式绿色建筑给排水工程研究[J]. 智能建筑与智慧城市,2024,(09):138-140.
- [2] 张文文,彭鹏. 基于“双碳”理念的装配式绿色建筑给排水工程研究[J]. 住宅与房地产,2024,(02):55-57.
- [3] 蒋福才. 关于绿色建筑设计理念在建筑设计中的整合与应用探讨[J]. 居舍,2022,(21):90-93.
- [4] 李志军. 建筑给排水节能节水措施探析[J]. 安徽建筑,2022,29(07):80-81+122.
- [5] 韩辉. 绿色建筑给排水工程中节水节能措施分析[J]. 住宅与房地产,2021,(06):193-194.

# Analysis of the Influence of Transmission Line Fault Characteristics on Relay Protection Performance

Jie Zhang Shengkai Lin Yuxiao Yang Yan Cheng Wanying Yao

Guangdong Saiyuan Electric Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 430200, China

## Abstract

During long-term operation, transmission lines are influenced by factors such as power system structural adjustments, load fluctuations, and changes in the external environment, resulting in pronounced dynamic variations in fault characteristics. Alterations in fault current magnitude, phase relationships, and impedance characteristics directly affect the accuracy of protection criteria and the operational reliability of protective relays. Focusing on changes in transmission line fault characteristics, this study conducts a systematic analysis of the mechanisms by which such variations influence the performance of different types of protective relays, with emphasis on short-circuit faults, grounding faults, and comprehensive characteristics under complex operating conditions. By examining the intrinsic relationships between fault characteristic variations and protection sensitivity, selectivity, and stability, the major influencing factors faced by protective relays in complex operating environments are identified, providing a theoretical basis for the optimization of relay protection parameters and the enhancement of operational performance.

## Keywords

transmission lines; fault characteristic variation; relay protection; protection performance; operational reliability

# 输电线路故障特性变化对继电保护性能的影响分析

张杰 林圣锴 杨宇肖 程艳 姚琬莹

广东塞远电气科技有限公司, 中国·广东广州 430200

## 摘要

输电线路在长期运行过程中,受系统结构调整、负荷波动及外部环境变化等因素影响,其故障特性呈现出明显的动态变化特征。故障电流幅值、相位关系及阻抗特征的改变,直接影响继电保护装置的判据准确性与动作可靠性。围绕输电线路故障特性变化这一核心问题,从短路故障、接地故障及复杂运行条件下的综合特性入手,系统分析故障特性变化对不同类型继电保护性能的作用机理。通过梳理故障特性变化与保护灵敏度、选择性及稳定性之间的内在联系,揭示继电保护在复杂运行环境下面临的主要影响因素,为继电保护参数优化与运行性能提升提供理论依据。

## 关键词

输电线路;故障特性变化;继电保护;保护性能;运行可靠性

## 1 引言

随着电网规模不断扩大和输电结构日益复杂,输电线路已成为电力系统安全稳定运行的重要组成部分。在多电源接入和运行方式频繁调整的背景下,线路故障表现形式和电气特性较以往更加多样,其变化规律对继电保护装置的正确动作提出了更高要求。传统继电保护多基于相对稳定的故障特性进行整定,当故障电流和电压特性发生偏移时,易引发保护拒动或误动等问题。深入研究输电线路故障特性变化对继电保护性能的影响,有助于全面认识保护装置在复杂运行条件下的适应能力。通过系统分析故障特性变化与保护性能之间的关系,可为继电保护方案的完善和运行可靠性的提升

提供必要支撑。

## 2 输电线路故障特性变化的基本类型与形成机理

### 2.1 短路故障特性变化及其电气特征

输电线路发生短路故障时,电气量的变化特征与系统结构、运行方式及线路参数密切相关。在不同电源配置条件下,短路点电流幅值呈现出明显差异,等值阻抗变化会导致故障电流分布不均。随着电网规模扩大,短路容量整体抬升,部分线路在近区故障时电流增长幅度显著,而远区故障则表现为电流衰减与相位偏移并存。线路长度、导线分裂方式及运行温度变化,也会对短路电流的暂态分量和稳态分量产生影响,使电流上升过程更为复杂。这类变化使短路故障的电气特征不再保持稳定模式,对继电保护的判别基础形成挑战。

【作者简介】张杰(1988—),男,本科,助理工程师,从事继电保护原理及计算软件开发研究。

## 2.2 接地故障特性变化及其演变规律

接地故障在输电线路运行中具有发生概率高、形式多样的特点,其特性变化受接地方式和系统中性点运行状态影响显著。不同接地电阻条件下,零序电流幅值和分布特征存在明显差异,弱接地故障时电流数值偏小且波动性较强。随着线路老化和环境温度变化,接地路径电阻呈动态变化状态,导致故障特征在时间维度上持续演变。多回线路并行运行时,零序耦合效应进一步放大接地故障特性的复杂程度,使故障判别难度增加,进而影响继电保护对接地故障的识别准确性。

## 3 输电线路故障特性变化对电流型继电保护性能的影响

### 3.1 故障电流幅值变化对保护灵敏度的影响

电流型继电保护依赖故障电流幅值作为主要判据,其灵敏度与故障电流水平直接相关。当系统运行方式变化导致短路电流下降时,保护装置接收到的电流信号可能接近整定阈值,动作可靠性随之降低。长距离输电线路在轻载或单电源运行条件下,故障电流衰减更加明显,容易出现灵敏度不足问题。相反,在高短路容量区域,故障电流快速增大,可能使保护动作范围扩大,增加误动风险。故障电流幅值的双向变化,使电流型保护在灵敏性和选择性之间面临更为突出的平衡压力<sup>[1]</sup>。

### 3.2 故障电流相位特性变化对动作判据的影响

故障发生后,电流相位关系会随系统阻抗结构变化而发生偏移,这对基于相位判据的电流型保护产生直接影响。在多电源供电条件下,故障点电流相位由多侧电源共同决定,相位角差异增大,导致方向判据的判别边界变得模糊。暂态分量叠加会引起电流相位在短时间内剧烈波动,使保护装置在初始阶段难以准确识别故障方向。相位特性的变化增加了动作判据的不确定性,降低了保护对复杂故障工况的适应能力。

### 3.3 非稳定故障电流对保护可靠性的影响

非稳定故障电流通常伴随弧光波动、接地电阻变化及暂态过程延长等现象,其波形具有明显的不规则特征。电流幅值和相位在短时间内反复变化,使继电保护采集到的信号存在较大波动。对于依赖固定判据的电流型保护而言,这类非稳定特性容易引发误判,表现为拒动或延时动作。非稳定故障电流持续时间的不确定性,也增加了保护与重合闸配合的复杂程度,对继电保护整体运行可靠性构成不利影响。

## 4 输电线路故障特性变化对电压型与阻抗型继电保护性能的影响

### 4.1 故障电压特性变化对电压保护判据的影响

输电线路发生故障后,故障点及其邻近节点电压水平随故障类型和位置发生显著变化,该变化直接影响电压型继电保护的判据。在110 kV输电线路中,近区三相短路

时母线电压由额定1.0 pu迅速下降至0.35~0.55 pu,而同一线路在距离故障点80~120 km的远区短路条件下,母线电压仍可维持在0.70~0.85 pu范围内,电压跌落深度差异超过0.3 pu。负荷水平变化使故障前运行电压在0.95~1.08 pu之间波动,当低电压保护整定值设定为0.75 pu时,部分远区故障在20~40 ms内难以满足启动条件。接地故障条件下,非故障相电压可升高至1.20~1.35 pu,零序电压幅值在5~25 V之间变化,使电压型保护在多运行方式下出现判据漂移。故障电压恢复时间由40 ms延长至80 ms时,电压保护对瞬时性与永久性故障的区分能力明显下降,影响动作可靠性<sup>[2]</sup>。

### 4.2 阻抗轨迹变化对距离保护整定的影响

距离保护以测量阻抗为核心判据,其整定基础依赖故障阻抗轨迹在R—X平面内的稳定分布。当系统短路容量由1800 MVA提升至3600 MVA时,线路等值电抗明显减小,故障测量阻抗整体向原点收缩,I段和II段阻抗边界间距缩小约10%~18%。在220 kV、线路长度300 km条件下,运行方式变化使阻抗角由75°偏移至90°,角度变化达到15°,阻抗轨迹在X轴方向产生明显旋转。重负荷运行状态下,线路负载电流由600 A升至1200 A,测量阻抗叠加负荷分量后偏差可达8%~12%。故障初期30 ms内暂态分量占比超过40%,阻抗轨迹呈现摆动状态,使距离保护在启动阶段出现越区或欠区风险,削弱整定参数的稳定适用性。

### 4.3 过渡电阻变化对阻抗型保护准确性的影响

过渡电阻是影响阻抗型继电保护测量精度的关键因素,其取值在实际运行中可由5Ω增大至60Ω以上。在220 kV输电线路单相接地故障条件下,当过渡电阻由10Ω升至40Ω时,测量阻抗实部增加幅度可达到线路正序阻抗的30%~45%,故障点等效阻抗超出I段整定范围。对于线路长度超过250 km的场景,过渡电阻与线路电抗叠加后,使测量阻抗偏移量达到15~25Ω。弧光燃弧过程中,过渡电阻在20~50 ms内呈周期性波动,阻抗轨迹出现明显抖动现象,导致阻抗型保护对区内故障的判别准确性下降。在弱电源送端运行条件下,故障电流低于2 kA时,过渡电阻对阻抗测量结果的放大效应更加明显,保护拒动风险进一步增加<sup>[3]</sup>。

## 5 输电线路运行条件变化叠加故障特性对继电保护的综合影响

### 5.1 系统运行方式变化对故障特性判识的影响

系统运行方式调整会引起输电线路等值结构发生改变,从而对故障特性判识形成直接影响。在220 kV输电系统中,由双电源运行切换为单电源运行后,近区短路电流可由8~10 kA下降至3~4 kA,电流衰减幅度超过50%,使基于电流和阻抗判据的保护灵敏性明显降低。潮流方向反转

时,线路两端电压相角差由 $5^{\circ}$ 扩大至 $15^{\circ}$ 以上,方向判据的判识边界随之发生偏移。系统解列或重构过程中,等值阻抗变化量可达 $20\% \sim 30\%$ ,导致同一故障在不同运行方式下呈现出差异明显的电压、电流特征。运行方式频繁变化使继电保护依赖的故障特性假设稳定性下降,增加误判和拒动风险。

## 5.2 线路参数变化对保护计算模型的影响

输电线路参数受环境温度、载流水平及运行年限等因素影响呈现动态变化特征。在导线温度由 $20^{\circ}\text{C}$ 升高至 $70^{\circ}\text{C}$ 条件下,线路电阻增加约 $15\% \sim 20\%$ ,直接影响故障测量阻抗计算结果。以 $300\text{ km}$ 线路为例,电阻变化引起的阻抗测量偏差可达到 $6\% \sim 10\%$ ,使距离保护区段边界出现压缩现象。线路电抗受频率和分布参数影响,在重负荷运行时变化幅度可达 $5\%$ 。当保护计算模型仍采用额定参数时,实际运行参数与模型之间的偏差不断累积,影响阻抗、电压及方向等判据的计算准确性,削弱继电保护对复杂工况的适应能力。

## 5.3 互感器误差与暂态效应对保护性能的影响

互感器在大电流和暂态条件下产生的误差是影响继电保护性能的重要因素。在短路电流达到 $10 \sim 15\text{ kA}$ 时,电流互感器易进入饱和状态,饱和持续时间可达 $20 \sim 40\text{ ms}$ ,使二次侧电流幅值被削减 $30\% \sim 60\%$ 。电压互感器在故障初期同样受到暂态分量影响,电压测量误差可达到 $5\% \sim 8\%$ 。互感器比差和角差同步增大后,阻抗计算结果出现明显偏移,方向判据的相角判断精度下降。暂态分量衰减速度不一致,使继电保护在启动阶段获取的电气量存在失真,对动作速度、选择性和可靠性形成综合性不利影响<sup>[4]</sup>。

# 6 适应输电线路故障特性变化的继电保护性能优化方向

## 6.1 继电保护整定参数的动态优化方向

在输电线路运行条件不断变化的背景下,继电保护整定参数若长期保持静态设置,难以有效匹配故障特性的动态演变趋势。系统运行方式调整、短路容量变化以及线路参数波动,都会导致故障电流和测量阻抗在不同工况下呈现明显差异。通过引入与运行状态关联的整定参数调整机制,可使保护动作门槛随电网结构和负荷水平变化进行适度修正。当系统由双电源运行转为单电源运行时,电流定值可根据故障电流水平变化进行同步调整,避免灵敏度不足问题。在重负荷条件下,对距离保护阻抗定值进行修正,有助于保持区段边界的合理间隔。整定参数动态优化有助于减小故障特性变化对保护性能的冲击,使继电保护在复杂运行环境中维持稳定、准确的动作特性。

## 6.2 多判据协同保护结构的应用方向

单一判据继电保护在面对复杂故障特性变化时易受到局限,多判据协同保护结构可通过信息互补提升判别可靠性。将电流、电压、阻抗及相位等多种判据进行综合应用,有助于降低个别电气量异常对保护判断结果的影响。在短路电流幅值下降而相位特征仍较为明显的情况下,相位与方向判据可为电流判据提供支撑。在过渡电阻较大导致阻抗测量偏移时,电压变化特征可作为辅助判据参与判断。多判据协同结构通过多维信息交叉验证,使保护逻辑更加稳健,减少误动与拒动发生概率,提高继电保护对故障特性变化的整体适应能力。

## 6.3 继电保护系统稳定性与可靠性提升路径

继电保护系统稳定性与可靠性提升需从装置性能、信号质量和运行管理等多个层面协同推进。通过优化采样算法和滤波策略,可有效抑制暂态分量和谐波对保护判据的干扰,提高故障初期判断的准确性。强化互感器选型与配置管理,有助于减小饱和和测量误差对保护性能的不利影响。在运行管理层面,结合线路运行数据开展周期性评估,可及时发现整定参数与实际工况之间的偏差。通过技术措施与管理手段协同作用,继电保护系统在面对输电线路故障特性持续变化时,能够保持良好的稳定性和运行可靠性。

## 7 结语

输电线路故障特性在电网结构复杂化和运行方式多样化背景下呈现出明显的动态变化趋势,对继电保护性能提出了更高要求。故障电流、电压及阻抗特性的变化,不仅影响保护装置的灵敏性和选择性,也对其动作可靠性和稳定性产生持续作用。通过系统分析故障特性变化对不同类型继电保护的影响机理,可以更为全面地认识继电保护在复杂运行条件下面临的关键问题。在此基础上,从整定参数优化、判据结构改进和系统运行保障等方面加以完善,有助于提升继电保护对多工况故障特性的适应能力,保障输电线路安全稳定运行,为电力系统整体可靠性提供坚实技术支撑。

## 参考文献

- [1] 许永治.柔性低频输电线路的故障特性分析与继电保护研究[D].导师:李海锋;李平.华南理工大学,2024.
- [2] 朱旭东,马宏博,张林,刘熠,辛业春.高压直流输电线路送端LCC换流站交流侧故障特性分析[J].吉林电力,2021,49(04):53-56.
- [3] 韩伟,杨睿璋,刘超,李程昊,孟沛或,孙仕达,刘磊,向往,文劲宇.混合三端直流输电系统线路故障特性及故障电流抑制策略[J].高压电器,2021,57(06):179-188.
- [4] 秦天洋.半波长交流输电线路故障特性及保护判据研究[D].导师:杨明玉.华北电力大学,2021.

# Construction and Practice of Engineering System for Risk Assessment and Graded Prevention of Mountain Road Geological Disasters

Jianhui An

Xinjiang Jiaotou Maintenance Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

## Abstract

As critical infrastructure for regional economic and social development, mountainous roadways are susceptible to geological hazards such as landslides, debris flows, and rockfalls due to factors including geological conditions, topographical variations, and climate changes, posing significant threats to traffic safety and ecological environments. This study employs geological surveys, remote sensing interpretation, GIS spatial analysis, and numerical simulation techniques to establish a multi-factor risk assessment model. It investigates the types, distribution patterns, and risk levels of geological hazards in mountainous roadways, and constructs a risk-based hierarchical prevention and control engineering system. The system encompasses disaster identification, monitoring, risk zoning management, information-based early warning, and emergency decision-making, effectively transitioning from "post-incident remediation" to "pre-incident prevention." This approach enhances disaster mitigation capabilities and operational safety of roadways, providing scientific basis and practical references for the sustainable development of mountainous transportation infrastructure.

## Keywords

mountainous road; geological hazard; risk assessment; hierarchical prevention and control; engineering system

## 山区公路地质灾害风险评估与分级防治工程体系构建与实践

安建辉

新疆交投养护集团有限责任公司, 中国·新疆乌鲁木齐 830000

## 摘要

山区公路作为区域经济与社会发展的关键基础设施, 受地质条件、地形起伏和气候变化等因素影响, 易发生滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害, 严重威胁交通安全与生态环境。本文通过地质勘测、遥感解译、GIS空间分析及数值模拟技术, 建立了多因素风险评估模型, 对山区公路地质灾害的类型、分布规律及风险等级进行研究, 并构建了以风险评估为核心的分级防治工程体系。该体系涵盖灾害识别、监测、风险分区治理、信息化预警和应急决策等环节, 能够有效实现从“事后治理”到“事前防控”的转变, 提升公路的防灾减灾能力与运行安全, 为山区交通基础设施的可持续发展提供科学依据与实践参考。

## 关键词

山区公路; 地质灾害; 风险评估; 分级防治; 工程体系

## 1 引言

山区公路在国家交通运输体系中占据重要地位, 其建设与运行往往面临复杂地质环境的制约。由于山区地形起伏大、地层结构复杂、降雨集中且强度高, 滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害成为影响公路安全运行的主要隐患。传统防治模式多以工程治理为主, 缺乏系统的风险评估与科学的分级管控, 导致治理投资大、预防不足、应急响应滞后。随着地理信息系统(GIS)、遥感(RS)、人工智能(AI)等技术

的应用, 地质灾害风险评估和动态防控体系的构建成为研究热点。本文旨在构建一套适应复杂地质环境的风险评估与分级防治体系, 从理论模型、技术路径到工程实践进行全面分析, 为山区公路的安全管理提供系统化解决方案。

## 2 山区公路地质灾害特征与风险形成机制

### 2.1 山区公路地质环境特征分析

山区公路多分布于构造活动频繁的地带及地形起伏较大的区域, 地质条件复杂且稳定性差。沿线的地层主要由砂岩、页岩、灰岩及风化碎屑物组成, 这些岩层的抗剪强度较低, 遇水容易软化, 导致岩土结构的不稳定。山区道路常经过河谷切割地带, 坡度较大, 边坡裸露, 地表植被稀疏, 这

【作者简介】安建辉(1975—), 男, 中国河南人, 本科, 高级工程师, 从事公路工程、运营与养护研究。

些因素共同增加了地质灾害发生的风险。地质构造的作用也较为频繁,诸如断层、褶皱、节理裂隙等现象的发育使坡体结构破碎,进而为滑坡和崩塌提供了潜在的滑动面。山区降雨强度大且时空分布不均,暴雨过程往往成为地质灾害的直接诱发因素。所有这些地质环境特征加剧了山区公路的地质灾害风险,成为公路建设与运营中的重大隐患<sup>[1]</sup>。

## 2.2 地质灾害类型及分布规律

山区公路沿线的地质灾害类型主要包括滑坡、崩塌、泥石流和地面塌陷等,其中滑坡灾害占比最大,通常发生在切坡路段和回填路基区域。崩塌灾害常见于高陡岩质边坡,受到重力作用与降雨渗透的共同影响。泥石流主要分布在沟谷交汇处及排水不畅的区域,其发生通常具有突发性与强烈的破坏性。通过遥感监测和实地调查,可以发现灾害的分布与地形起伏度、岩性特征以及人为活动强度密切相关。工程开挖、边坡扰动及排水不当等因素进一步加剧了地质体的不稳定性,成为诱发灾害的主要外部因素。因此,了解灾害的类型和分布规律对于山区公路地质灾害防治具有重要意义,有助于制定有针对性的防治措施<sup>[2]</sup>。

## 2.3 风险形成机制及演化过程

地质灾害的形成过程呈现多因素耦合特征,主要包括内因(地质条件)与外因(气候与人类活动)两类。内因决定了灾害的孕育条件,如岩体结构、地下水运动以及断层构造等,决定了灾害的潜在发生可能性。外因则通过降雨、地震及施工扰动等作用诱发灾害发生。以滑坡为例,其演化通常经历“孕育—加速—滑动—稳定”四个阶段。在降雨作用下,孔隙水压力升高、剪切强度降低,导致滑体整体失稳。尽管不同类型的地质灾害机理有所不同,但它们普遍具有动态累积与突发失稳的规律性,这为灾害风险评估提供了理论基础。通过对风险形成机制与演化过程的深入研究,可以为地质灾害的早期识别与防治提供更加精准的理论依据<sup>[3]</sup>。

## 3 山区公路地质灾害风险评估体系构建

### 3.1 风险评估指标体系建立

为实现地质灾害风险的科学评估,首先需要构建一个系统的指标体系,涵盖地形地貌、岩土结构、气候水文、植被覆盖和人类活动等五个方面。这些因素共同决定了山区公路地质灾害的发生概率与影响范围。主要评估指标包括坡度、坡向、岩性类别、断层密度、降雨强度、流域汇水面积、土地利用类型以及道路开挖深度等。通过专家打分与层次分析法(AHP),为各项指标赋予权重,并建立综合权重模型,确保评估结果的客观性与可比性。该指标体系遵循系统性、代表性与可操作性原则,确保能反映灾害的空间分布特征及成灾潜势。此体系不仅为地质灾害的风险评估提供了科学依据,还为后续防治措施的制定提供了理论支持和数据基础,有助于实施科学、精准的灾害防控管理<sup>[4]</sup>。

### 3.2 多源数据融合与空间分析方法

风险评估的精确性依赖于多源数据的综合支持,包括

遥感影像、DEM高程数据、地质勘查资料、气象监测数据等。通过GIS平台对这些空间数据进行集成与分析,利用空间叠加模型(Overlay Model)计算综合危险度指数,得到区域的地质灾害风险分布图。同时,采用地统计学方法进行空间插值,进一步提高数据的连续性与空间精度。为了提高评估的精度与预测能力,结合机器学习算法,如随机森林(RF)与支持向量机(SVM),对潜在灾害区域进行分类识别与预测。这些技术的融合不仅增强了评估模型的准确性,还提供了强有力的技术支持,为灾害预测与风险管理提供了更加科学的依据。此外,利用多源数据融合技术,可以有效克服传统方法的数据局限性,实现全面、精准的地质灾害风险分析。

### 3.3 风险分级与结果验证

基于综合评估的结果,风险等级被划分为五级:极高风险、高风险、中风险、低风险和极低风险。在模型的应用过程中,结合现场调查与历史灾害数据对评估结果进行验证,结果显示模型的预测精度达到86%以上。极高与高风险区主要分布在坡度大于35°的岩质地段及排水不畅的沟谷地带,这些区域的滑坡、崩塌等灾害频发;中低风险区则多集中在地势相对平缓或已经采取治理措施的区域。风险分级结果为灾害防治工程的布设与资源优化提供了科学依据,确保了工程的针对性与合理性。通过验证与应用,评估结果使得灾害防治工作更具精准性和科学性,从而实现了“以评促防”的科学管理目标,极大地提升了防灾减灾工作的效能与应对能力,有助于降低灾害发生的风险并提高公路的安全性与运营稳定性<sup>[5]</sup>。

## 4 山区公路地质灾害分级防治工程体系设计

### 4.1 防治原则与总体思路

山区公路地质灾害防治的核心原则是“预防为主、监测预警、分级治理、系统防控”。首先,地质灾害防治应从源头进行风险识别与评估,明确各类灾害的风险区域,并建立科学、系统的防治体系。风险评估是防治工作的基础,通过识别潜在的灾害风险区,结合地质、气候等因素,制定有效的防治措施。基于风险评估结果,按照不同风险等级实施分区治理,确保在高风险区域采取强有力的防护措施,从而实现灾害的预防与早期控制。其次,应构建全方位的监测预警系统,实时监测地质、气候、环境等多方面因素,确保在灾害发生初期及时获取相关信息并发出预警信号。通过系统化的防治思路,结合工程防护与信息管理,构建综合防控体系,为公路的安全运行提供持续保障,确保山区公路的安全、可靠与可持续发展。

### 4.2 防治工程分级体系构成

根据风险评估结果,山区公路地质灾害防治工程可分为三级防治体系:一级防治针对极高风险区,采取强制性工程措施,如抗滑桩、锚索框架梁、抗冲防护墙等,并辅以地表排水与截渗系统,确保最大程度的安全性;二级防治适用

于高风险区，主要通过喷锚支护、柔性防护网和排水渠整治进行主动防护，以降低灾害发生的概率；三级防治面向中低风险区，侧重生态修复与监测预警，采用植被恢复、坡面固化及信息监测相结合的综合治理方式。该分级体系在设计上实现了从“点防”向“面防”的转变，兼顾了工程效益与环境协调，确保在不同风险区域实施差异化治理，既保障了治理效果，又提高了资源的高效利用。通过这种分级防治体系，可以精准调配防治资源，有效减少地质灾害对公路运营和周边环境的影响。

#### 4.3 信息化监测与智能预警系统

为提升灾害防控的实时性与科学性，基于物联网（IoT）的信息化监测系统显得尤为重要。该系统集成了地表位移监测、地下水位监测、降雨自动采集与边坡视频监控等多个模块，通过无线网络实现数据的实时传输，并结合大数据分析的人工智能模型对监测数据进行动态分析。通过这一系统，能够实时跟踪山区公路的地质状况，精确预测潜在的失稳趋势，做到“早识别、早预警、早处置”，在灾害发生前及时发出预警信号。系统能够对复杂的地质灾害进行综合评估，极大提高了灾害预测的精确度和反应速度，为山区公路的防灾减灾提供了坚实的技术保障。通过信息化监测与智能预警系统的应用，确保了公路的安全性和稳定性，有效提升了公路管理与运营的抗灾能力。

### 5 山区公路地质灾害防治体系的工程实践与应用成效

#### 5.1 典型工程案例

以西南某山区高速公路为例，该项目全长 78 公里，沿线地质灾害隐患点多达 120 余处。项目团队通过风险评估划定了 27 处高风险区，并在其中布设了 42 个一级防治工程点与 58 个二级防治工程点，同时建设了 12 处实时监测站。针对滑坡和边坡风险，采取了抗滑桩支护、边坡格构梁加固、柔性防护网铺设等综合治理措施。经过一段时间的治理后，监测数据显示滑坡位移速率下降了 70%。此外，灾害隐患得到有效降低，公路的安全性得到了显著提升。该工程展示了现代地质灾害防治技术在实际项目中的有效应用，并为类似山区公路提供了可借鉴的成功经验。

#### 5.2 体系运行的综合效益

该地质灾害治理体系的实施，取得了显著的安全性、经济性和生态性效益。在安全性方面，灾害发生率同比下降了 40% 以上，显著提高了公路运行的安全性。经济性方面，

工程的投资节约约 15%，而维护成本则降低了 20%，实现了较高的经济效益。生态性方面，项目通过实施植被修复与排水优化，边坡稳定性得到了有效提升，周围景观的协调性也得到了改善。

#### 5.3 推广与优化方向

在推广过程中，针对不同地区的地质特征与气候条件，防治措施和评估参数需要根据实际情况进行调整。例如，山区和丘陵地带的防治方案应结合地质、气候等特点，确保有效性与适用性。未来，地质灾害管理的智能化和网络化将成为发展方向，通过引入遥感动态监测、AI 预测模型与云端数据库，可以实现实时、精准的风险监控与预测，提升灾害预警和响应能力。

### 6 结语

山区公路地质灾害的防治是保障交通基础设施安全运行的关键。本文通过系统研究风险评估理论与分级防治体系，建立了“评估—分级—防控—监测”一体化的防治工程体系，实现了从静态治理向动态管理、从单一防护向系统防控的转变。该体系通过综合考虑地质风险、气候变化与人类活动等多因素，采用分区治理与实时监测预警技术，提高了灾害防控的准确性与及时性。实践证明，系统的防治措施有效提升了山区公路的安全韧性和运行可靠性，显著降低了地质灾害风险与维护成本。此外，该防治体系在实际应用中表现出良好的灵活性与适应性，适应了复杂多变的山区地质环境。未来研究应加强地质灾害多源数据的融合与智能识别技术应用，进一步完善风险动态评估模型，探索生态防治与工程防护相结合的新路径。这将为山区交通工程的可持续建设提供坚实的技术支撑与科学依据，助力实现更高效、更绿色的灾害防控体系。

#### 参考文献

- [1] 陈智.西南山区公路隧道施工地质灾害风险评估及应急处置研究[D].西华大学,2024.
- [2] 蒋瑜阳,向波,王东,等.震后山区公路地质灾害风险评估体系研究——以川九公路震后恢复重建为例[J].地震工程学报,2023,45(05):1026-1034.
- [3] 李伟华.京新高速公路山区地质灾害风险评估及保障关键技术研究.河北省,京新高速公路张家口管理处,2023-05-13.
- [4] 赵宝云.山区公路滑坡地质灾害风险评价与预警关键技术.重庆市,重庆科技大学,2023-03-04.
- [5] 朱力.决策树算法在山区公路地质灾害风险评估系统中的应用[D].重庆师范大学,2019.

# Research on Safety Management and Risk Prevention in Water Conservancy Engineering Construction

Anqiang Zhang

Shandong Dashun Construction Group Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257091, China

## Abstract

As is well known, the construction of water conservancy projects plays an important role in the domestic economic development, but there are many safety risks during the construction period, which may have a huge impact on the progress, quality, and investment of the project. In recent years, with the rapid development of domestic water conservancy engineering scale and construction technology, the construction environment and conditions have become more complex. In this situation, how to implement safety management and risk prevention in water conservancy engineering construction has become a top priority. Traditional safety management methods and construction techniques have significant limitations in dealing with complex and changing engineering environments. Therefore, further improving the safety management level of water conservancy engineering construction, especially in risk identification, assessment, and prevention, has become the key to enhancing the efficiency of water conservancy engineering projects. Based on this, this article will delve into the types of risks in water conservancy engineering construction, with a focus on analyzing the current deficiencies in safety and risk management, and proposing improvement measures.

## Keywords

Water conservancy engineering; Construction; Safety management; Risk prevention and control

## 水利工程建设中安全管理与风险防控研究

张安强

山东大舜建设集团有限公司, 中国·山东 东营 257091

## 摘要

众所周知, 水利工程建设对国内经济发展有重要作用, 但其施工期间存在较多安全风险, 可能对工程进度、质量及投资等产生巨大影响。近年来, 随着国内水利工程规模与建设技术的快速发展, 施工环境与条件变得较为复杂。在此种情势下, 如何在水利工程建设中实施安全管理与风险防控现已成为目前的重中之重。传统安全管理手段与施工技术在应对复杂及多变的工程环境时存在较大局限性, 因此, 进一步提高水利工程建设的安全管理水平, 尤其在风险识别、评估及防控方面, 成为了提升水利工程项目成功率的关键所在。基于此, 本文将深入探究水利工程建设中的风险类型, 重点分析当前安全与风险管理不足之处, 并提出改进措施。

## 关键词

水利工程; 建设; 安全管理; 风险防控

## 1 引言

水利工程主要目标是优化水资源的配置与利用, 涵盖防洪、灌溉、供水和发电等多个领域, 对社会经济发展具有重要意义, 但水利工程通常涉及投资规模大、建设周期长、技术要求高及广泛施工环节, 因此在实施过程中必然面临各种风险<sup>[1]</sup>。安全管理与风险防控是确保项目顺利进行的核心手段, 能有效识别潜在风险并评估其影响, 进而采取措施降低风险, 提升项目的成功率和效益。通过科学的风险管理, 施工过程中可能发生的技术问题、环境变动及人为失误等风

险可以得到有效控制, 避免损失。对于水利工程建设而言, 建立健全风险防控体系, 不仅能确保项目顺利推进, 还能提高资源配置效率和工程质量, 进而推动水利事业的可持续发展。因此, 重点探究水利工程中的安全管理与风险防控具有重要现实指导意义。

## 2 水利工程建设中安全管理的意义

水利工程建设作为中国经济推动的基础建设设施, 有着较大社会与经济价值, 但由于其投资规模大、施工周期长、技术要求高, 且涉及复杂环境因素, 在建设期间存在诸多安全风险。因此, 安全管理在水利工程建设中起着重要作用。

首先, 水利工程建设常涉及大规模土方施工和极其复杂技术操作, 任何一方的疏忽都有可能造成极其严重安全事故。例如, 在建设大坝和引水系统期间, 涉及大量工程机

【作者简介】张安强 (1989—), 男, 中国山东泰安人, 本科, 工程师, 从事水利水电研究。

械、重型设备及危险化学品,若为实施有效的安全管理措施,则易引发安全事故,造成人员伤亡、设备损坏等一系列问题。因此,安全管理能通过对施工过程的实时监控和管理,有效避免上述风险,保证施工人员生命安全和工程设备正常运转。其次,水利工程的建设还涉及自然环境多变的不可预测性,如地震、洪水、泥石流等自然灾害都有可能在建设期间突发,给工程建设带来巨大挑战。而安全管理通过对施工环境的实时监测、风险预测及应急预案的制定,可提前识别潜在风险并采取应对措施,减少自然灾害对工程进度和质量的影响,保证工程建设的安全。此外,水利工程建设期间还可因管理不善致使安全隐患持续发生,例如:施工人员安全意识培训严重缺乏、现场管理不合规、工期安排不合理等因素都可引发意外事故,而安全管理通过规范管理制度、增强施工人员培训、促进施工现场安全保护措施完善,能确保整个工程施工团队安全意识和应急响应能力,从而有效降低人为失误带来的风险。

### 3 水利工程建设中的风险类型

#### 3.1 自然风险

自然风险是水利工程建设期间难以预料的风险之一,而水利工程常与水资源紧密相连,因此建设期间极易受自然环境多变的影响,主要自然风险包括:

气象因素:如暴雨、洪水、干旱等天气因素的多变会直接影响水利工程施工进度,尤其在大规模水利设施的建设过程中,极端天气可导致施工现场出现严重泥石流、滑坡等灾害,严重时可能造成施工暂停。

地质条件:施工现场地质条件差异大,可存在岩层不稳定、地下水位高、土壤湿度大等一系列问题,从而直接影响施工稳定性与安全性。

自然灾害:如地震、泥石流等灾害可导致建筑物严重受损、施工设备损坏、人员伤亡等不良后果,给工程建设带来巨大威胁。为及时应对上述自然风险,需通过科学勘探与调查、精准预测天气变化、制定应急预案等多种手段,减少自然风险对工程的严重影响。

#### 3.2 技术风险

水利工程建设时的技术风险来源于设计、施工及技术应用等多方面的不确定性,包括:(1)设计风险:水利工程设计合理性与可行性直接影响工程安全性与稳定性,在设计阶段出现失误或忽略各种因素,可导致后期施工困难或存在较大安全隐患。例如,水坝设计不合理可导致水坝溃坝风险发生。(2)施工技术风险:在水利工程建设期间,施工技术不成熟或不合规操作可导致工程质量问题出现。例如,混凝土浇筑期间若温度控制不当或施工期间机械设备故障等,都有可能影响施工进度和工程质量。(3)新技术应用风险:随着科学技术的进一步发展,诸多新技术被用于水利工程,如智能监控、大数据分析、无人机测绘等,虽然这些

新技术提高了工程建设效率和精度,但其操作难度较高,如果没有充分技术培训,可导致技术失误或项目延误。因此,在技术层面,除了要确保设计和施工方案的科学性与合理性,还要在全程中进行严格质量控制和技术审核,确保施工期间技术操作无误。

#### 3.3 经济风险

(1)资金短缺或超支:项目预算不足或资金管理不当可导致建设进度落后,甚至无法按计划完成。此外,随着工程的进行,若出现物资价格波动、工期延误等因素,也可导致项目资金超支,影响工程最终完成<sup>[2]</sup>。

(2)投资回报率风险:由于水利工程投资周期长,且回报期相对较长,投资者可能面临资金流动性差的问题,如果项目未能按规定计划完成或效益低于预期,可导致资金回收不及时,甚至影响双方利益。

(3)经济政策变化:政府宏观经济政策、金融政策等变化也可影响水利工程项目的资金支持和投资环境,例如:利率变动、汇率波动、财政预算调整等都有可能项目融资困难或资金成本上升。为应对经济风险,必须在项目初期进行详细的财务规划和预算,并对工程面临的外部经济环境变化进行充分预估,确保资金充足供应和有效使用。

#### 3.4 管理风险

管理风险主要由工程管理不当或组织协调不足所带来的风险,这类风险直接影响项目的整体进度和质量,常见管理风险包括:(1)项目管理不善:水利工程建设涉及多个部门和单位协作,如设计单位、施工单位、监理单位等,管理层如果未能有效协调各方,可导致信息流通不畅、职责划分不清、项目进度滞后等问题,从而影响工程建设的整体顺利进行。(2)人员管理风险:施工队伍的安全培训、技术培训、人员素质等因素直接影响到工程质量和进度。缺乏经验和能力的施工人员,或者不重视安全生产的管理,易导致操作失误、工程质量问题和事故发生。(3)合同与法律风险:项目合同的执行和法律事务处理若不严格,可导致合同纠纷或法律诉讼,进而影响项目推进和资金使用,例如:施工合同中的违约条款、项目延期赔偿等问题都可能引发不必要的法律纠纷。因此,水利工程建设中管理风险防控,要求建立健全的项目管理制度,确保信息透明、各方职责明确,同时加强施工团队的专业技能培训,避免人为管理失误。

### 4 水利工程建设中的风险评估

水利工程建设中的风险评估是识别、分析和量化潜在风险的重要过程,旨在为项目的安全管理和决策提供依据。风险评估通过系统分析方法,帮助预测项目建设过程中遇到的各种风险,从而采取有效防控措施,确保工程顺利推进。首先,风险识别是评估的基础,通过现场调查、文献研究和专家咨询等手段,全面识别水利工程中可能存在的风险类型,包括自然风险、技术风险、管理风险和经济风险。

识别过程应覆盖工程建设的各个环节,从设计、施工到运营各个阶段,确保不遗漏任何潜在风险<sup>[3]</sup>。其次,风险分析是评估的核心,常用风险分析方法包括定性分析和定量分析,定性分析如专家判断法、SWOT分析等,主要用于识别风险的性质和影响程度;定量分析如故障模式与效应分析(FMEA)、模糊综合评判等,能够通过数学模型对风险进行量化,评估其发生的概率及可能的损失,这一过程帮助决策者了解每项风险的严重性,并对其进行优先排序。最后,风险应对与控制是评估的关键目标,评估结果应指导项目在前期制定相应的风险防控策略,如风险规避、风险转移、风险减轻等,例如:针对地质风险,可采取改进设计、强化施工监测等措施;对经济风险,可通过合理财务规划和资金控制手段来减少资金压力。

## 5 水利工程建设中的风险防控策略

### 5.1 自然风险的精准防控

自然风险作为工程建设中最基础、最不可控的风险类型,主要包括洪水、暴雨、地质灾害、极端气候等,防控自然风险应以科学勘察和精准预测为前提,在工程开展前期进行全面水文、地质及气象勘察与调查,全面掌握区域自然条件及其变化规律。在设计阶段,应合理提高防洪标准和安全裕度,优化工程结构布置,增强工程对自然灾害的抵御能力。在施工阶段,构建完善的气象和水情监测预警制度,实时调整施工计划,避免在高风险时段组织关键工序施工<sup>[4]</sup>。同时,合理制定应急预案,加强应急演练,确保在突发自然灾害时能迅速响应并有效处置。

### 5.2 技术风险的全程管控

技术风险贯穿于水利工程勘测、设计、施工和运行全过程,主要来源于设计不合理、施工工艺不当、设备材料不合格等方面。对此,应强化技术风险的全过程管控。在设计阶段,严格执行国家和行业技术规范,开展多方案比选和技术论证,避免因设计缺陷埋下安全隐患。在施工阶段,加强对关键工序和重点部位的技术交底与过程控制,严格落实质量检验和验收制度,确保施工工艺和技术参数符合设计要求。同时,加强新技术、新材料、新工艺的应用评估,防止盲目推广所带来的技术风险。

### 5.3 经济风险的多元化解

经济风险大多出现在资金筹措、成本控制及市场变化

等方面,对工程顺利推进具有直接影响。因此,防控经济风险应从资金管理和成本管控入手,构建科学合理的投资预算和资金使用计划,确保资金来源稳定和使用规范。在工程实施期间,可进一步加强动态成本管理,及时对工程变更、材料价格波动等因素进行评估和调整,防止成本失控。同时,通过合同管理、风险分担机制及保险制度等方式,合理转移和分散经济风险,提高工程建设经济安全性和抗风险能力。

### 5.4 管理风险的协同治理

管理风险通常由组织协调不合理、责任落实不到位、制度执行不严谨等引发的综合性风险,应通过协同治理方式加以防控<sup>[5]</sup>。一方面,明确建设、设计、施工、监理等各方安全管理职责,建立权责清晰、协同高效的管理体系;另一方面,完善安全管理制度和 workflows,加强信息沟通与共享,避免因管理脱节导致风险放大。同时,加强施工及管理人员安全意识和管理能力培训,全面推动安全管理由被动向主动预防转变,从而提升水利工程建设整体风险防控水平。

## 6 结语

综上所述,水利工程建设具有投资规模大、施工周期长、作业环境复杂、风险因素多等特点,安全管理与风险防控贯穿工程建设的全过程,是保障工程质量、施工人员生命安全和工程长期稳定运行的关键环节。通过系统识别水利工程建设中的主要安全风险,建立健全安全管理制度,强化风险分级管控和隐患排查治理机制,并充分运用信息化、智能化技术手段,可有效降低事故发生率,提高工程建设整体安全水平。同时,应不断增强参建各方的安全责任意识,增强各大人员培训与现场管理,形成预防为主、综合治理的安全管理体系。

### 参考文献

- [1] 岳建军. 水利工程建设项目重大事故隐患防范对策研究[J].水利技术监督,2026,(02):91-95.
- [2] 丁向向,董伟. 水利工程建设中监理的质量控制作用研究[J].低碳世界,2025,15(12):132-134.
- [3] 吴思. 水利工程建设中的水上安全技术与管理策略研究[J].水上安全,2025,(21):47-49.
- [4] 徐鲁斌. 水利工程建设质量与安全监督管理研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(10):251-253.
- [5] 柳孟军. 物联网技术在水利工程建设现场安全管理中的应用研究[J].中国新技术新产品,2025,(16):139-141.

# Practical Application and Effect Evaluation of BIM Technology in Construction Engineering

Chengfeng Li<sup>1</sup> Xiaotong Zhang<sup>2\*</sup> Aiping Cao<sup>3</sup> Bo Gao<sup>4</sup>

1. Shandong Zhaocaitong Project Management Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

2. Dongying Xiangtai Human Resources Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257091, China

3. Shandong Zhengben Qinglan Petroleum Technology Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257091, China

4. Woda Construction Group Co., Ltd., Dongying, Shandong, 271000, China

## Abstract

The complexity and systematicity of construction projects have put forward higher requirements for technological innovation and management optimization. The emergence of BIM technology provides a new path for the full process control of construction. This article focuses on the field of construction engineering, systematically reviewing the core application scenarios of BIM technology in early planning, process control, and final stages, and analyzing its practical value in 3D collaborative design, resource dynamic management, and completion model construction. At the same time, a performance evaluation index system is constructed from the three dimensions of technology, economy, and management, combined with quantitative, qualitative, and comparative analysis methods, to comprehensively evaluate the application effectiveness of BIM technology. Through this study, the aim is to provide practical guidance for the standardized application of BIM technology in construction, and to provide theoretical and data support for the digital transformation of the industry.

## Keywords

construction engineering; BIM technology; Practical application

# 建筑工程施工中 BIM 技术的实践应用及效果评价

李成峰<sup>1</sup> 张晓彤<sup>2\*</sup> 曹爱萍<sup>3</sup> 高波<sup>4</sup>

1. 山东招采通项目管理有限公司, 中国·山东 东营 257000

2. 东营市祥泰人力资源有限公司, 中国·山东 东营 257091

3. 山东正本青蓝石油科技有限公司, 中国·山东 东营 257091

4. 沃达建设集团有限公司, 中国·山东 东营 271000

## 摘要

建筑工程施工的复杂性与系统性对技术创新和管理优化提出了更高要求, BIM技术的出现为施工全流程管控提供了全新路径。本文聚焦建筑工程施工领域, 系统梳理BIM技术在前期规划、过程管控及收尾阶段的核心应用场景, 剖析其在三维协同设计、资源动态管理、竣工模型搭建等方面的实践价值。同时, 从技术、经济、管理三个维度构建效果评价指标体系, 结合定量、定性及对比分析方法, 全面评估BIM技术的应用成效。通过本文研究, 旨在为BIM技术在建筑施工中的规范化应用提供实践指引, 为行业数字化转型提供理论与数据支撑。

## 关键词

建筑工程; 建筑信息模型技术; 实际应用

## 1 引言

随着建筑行业向精细化、数字化转型, 传统施工模式面临信息割裂、管控滞后、资源配置失衡等诸多痛点, 制约了工程质量与效益提升。在此背景下, 建筑信息模型(BIM)

技术凭借三维可视化、全周期数据整合、多方协同等核心优势, 逐渐成为破解行业发展瓶颈的关键技术支撑。因此, 深入探究 BIM 技术的施工应用场景并构建完善的效果评价机制, 成为推动建筑行业数字化升级的重要课题。

## 2 建筑工程施工中 BIM 技术的实践应用

### 2.1 施工前期规划阶段的 BIM 应用

施工前期规划是工程建设的基础环节, 其科学性 with 精准度直接决定项目后续实施的效率与质量。BIM 技术以三维数字化建模为核心, 整合多专业数据信息, 在施工前期规

【作者简介】李成峰(1994—), 男, 中国山东东营人, 本科, 从事建筑工程利用新技术施工研究。

【通讯作者】张晓彤(1995—), 女, 中国山东东营人, 本科, 从事建设工程管理、项目管理研究。

划阶段实现了从传统二维设计向多维协同管控的转型,有效破解了前期规划中信息割裂、预判不足等痛点,为项目顺利推进筑牢根基。

三维协同设计与图纸会审优化是 BIM 技术在前期规划中的核心应用之一。传统图纸会审依赖各专业二维图纸交叉核对,易因信息传递偏差、空间关系模糊导致错漏碰缺问题。借助 BIM 技术可构建涵盖建筑、结构、机电等全专业的三维协同模型,各专业设计人员基于统一模型开展并行设计,实时共享设计思路与数据参数。在图纸会审阶段,通过模型的可视化浏览与碰撞检测功能,能够精准定位管线交叉冲突、构件空间干涉等潜在问题,同步生成碰撞检测报告并标注问题位置与类型。设计人员可依据报告直接在模型中进行优化调整,避免传统会审中反复沟通、修改图纸的繁琐流程,大幅提升图纸会审效率,降低因设计缺陷引发的后期返工成本<sup>[1]</sup>。

施工进度模拟与计划编制是 BIM 技术提升前期规划前瞻性的关键支撑。传统进度计划多以横道图、网络图形式呈现,抽象性强,难以直观反映各施工工序的衔接关系与资源配置需求,易出现进度脱节、资源闲置等问题。基于 BIM 技术可构建融合时间维度的 4D 进度模型,将施工工序、作业时间、资源配置等信息与三维模型深度绑定。通过进度模拟功能,能够动态演示项目从开工到竣工的全流程施工过程,清晰呈现各分部分项工程的先后逻辑与搭接顺序,直观预判施工过程中可能出现的工序冲突、工期延误等风险。依据模拟结果,可对进度计划进行优化调整,合理划分施工流水段,精准配置人力、材料、机械设备等资源,确保进度计划的科学性与可行性,为后续施工进度管控提供精准依据。

针对复杂节点施工、大型设备吊装等关键环节, BIM 技术的施工方案可视化论证发挥着不可替代的作用。此类关键环节施工工艺复杂、技术要求高,传统方案论证依赖文字描述与二维简图,难以全面展现施工流程与关键控制点,易因方案考虑不周引发安全隐患或施工质量问题。借助 BIM 技术可构建关键环节的精细化三维模型,还原施工场景的空间环境与构件细节,将施工方案的工艺流程、操作步骤、设备摆放位置等内容通过可视化方式呈现。通过模拟不同施工工况下的作业过程,可对施工方案的合理性进行全面论证,优化施工参数与操作流程。

## 2.2 施工过程管控阶段的 BIM 应用

施工过程管控是保障工程质量、安全、进度与成本目标达成的关键环节,传统管控模式易受信息传递滞后、数据碎片化、预判性不足等问题制约。BIM 技术以三维模型为数据载体,融合施工全流程动态信息,实现对施工过程的精准化、可视化、协同化管控,为现场作业与管理决策提供实时、可靠的技术支撑,有效提升施工管控的科学性与高效性<sup>[2]</sup>。

现场施工放样与定位指导是 BIM 技术落地施工一线的基础应用。传统放样依赖全站仪等设备与二维图纸对照,易因图纸解读偏差、数据计算误差导致定位精度不足,影响后

续工序衔接。基于 BIM 技术可将设计模型中的构件坐标、尺寸等数据直接导入放样设备,通过移动端设备与 BIM 模型的实时联动,现场精准定位构件安装位置、管线走向等关键控制点。作业人员可通过移动端直观查看三维定位基准,实时核对放样结果与设计模型的偏差,及时修正调整,大幅提升放样精度与效率,尤其适用于复杂节点、异形构件等高精度要求的施工场景,为后续施工质量把控筑牢基础。

施工资源动态管理依托 BIM 技术实现人、材、机配置的精准优化。传统资源管理多为静态计划编制,难以应对施工过程中工况变化带来的资源需求波动,易出现资源闲置或短缺问题。借助 BIM 模型与进度计划的深度绑定,可动态模拟各施工阶段的资源需求峰值与配置节点,生成精准的资源需求计划。通过实时录入现场资源消耗、进场、闲置等数据,系统可动态更新资源状态,对比分析计划与实际的偏差,及时调整资源调配方案。例如,根据施工进度动态调整劳务班组进场时间、材料采购批量与进场节点,优化机械设备调度路线与使用时段,最大限度提升资源利用效率,降低资源浪费与管理成本。

质量与安全隐患预警通过 BIM 技术实现风险的提前预判与精准防控。针对质量管控,利用 BIM 模型的碰撞检查功能,可实时核查现场施工构件与设计模型的偏差,及时发现管线错接、构件安装错位等质量隐患;针对安全管控,通过构建包含危险区域、安全防护要求的 BIM 安全模型,模拟深基坑、高支模、起重吊装等危险作业场景,精准标注危险区域范围与风险等级。现场管理人员可通过移动端实时查看隐患预警信息,跟踪整改落实情况,实现质量与安全隐患的早发现、早处置,降低质量事故与安全风险发生概率<sup>[3]</sup>。

施工过程数据协同共享打破了传统施工中建设、施工、监理、设计等多方主体的信息壁垒。基于 BIM 搭建的协同管理平台,可整合施工进度、质量、安全、成本等全维度数据,实现多方主体的实时数据共享与联动协作。各方人员可通过平台实时查看更新的施工数据、提交审批意见、反馈现场问题,无需依赖线下会议、纸质文件传递,大幅缩短沟通与决策周期。例如,设计单位可通过平台实时接收现场施工反馈的设计优化建议,快速完成设计变更并同步至 BIM 模型,施工单位及时根据变更调整施工方案,确保信息传递的及时性与准确性,提升多方协同效率。

## 2.3 施工收尾阶段的 BIM 应用

施工收尾阶段是工程建设衔接施工实施与后期运维的关键节点,核心目标是确保工程顺利竣工交付、为运维阶段奠定基础。BIM 技术依托全周期数据整合优势,在该阶段聚焦竣工模型构建与运维数据交付两大核心应用,有效破解传统收尾工作中竣工资料零散、验收效率低下、运维数据缺失等痛点,实现施工向运维的平滑过渡。

竣工模型搭建与验收辅助是 BIM 技术在收尾阶段的核心应用。传统竣工资料多以纸质文件、二维图纸为主,存在信息碎片化、与实际施工工况脱节等问题,增加验收难度与

后期追溯成本。基于 BIM 技术的竣工模型搭建，需整合施工全过程数据，将施工变更、隐蔽工程记录、材料验收报告等信息精准关联至三维模型对应构件，形成与工程实体完全一致的数字化竣工模型。在验收环节，验收人员可通过模型可视化查阅工程细节，对照模型核查构件安装精度、管线走向、隐蔽工程施工质量等关键指标，同步调取关联的施工记录佐证验收结果，大幅提升验收精准度与效率，同时为后续工程质量追溯提供完整的数据支撑。

运维数据对接与交付是 BIM 技术实现工程全周期价值的重要延伸。后期运维阶段对工程构件参数、设备信息、管线布局等数据需求迫切，传统交付模式难以提供系统、精准的运维基础数据。依托竣工模型，BIM 技术可完成运维所需核心数据的整合与对接，补充设备厂家信息、产品说明书、维保周期、管线检修通道等运维专属数据，构建标准化的运维基础模型。通过将该模型交付至运维单位，可为后期设备巡检、故障排查、管线维修、应急处置等运维工作提供精准的数字化支撑，帮助运维单位快速定位构件与设备位置、掌握核心参数，降低运维管理成本，提升运维工作效率，实现工程建设全周期的精细化管理。

### 3 建筑工程施工中 BIM 技术应用的效果评价

#### 3.1 效果评价指标体系构建

##### 3.1.1 技术效果指标

技术效果指标聚焦 BIM 技术对施工技术水平的提升成效，核心用于衡量技术应用的实操价值。其中，施工效率提升程度通过实际工期与传统施工模式计划工期的差值计算工期缩短比例，直观反映 BIM 技术在进度推进中的赋能作用；施工精度改善效果以传统施工误差为基准，通过构件安装、管线布设等关键环节的实际误差降低幅度量化；技术难题解决效率则以复杂节点施工成功率为核心衡量标准，精准评估 BIM 技术在破解异形构件施工、大型设备吊装等技术难点中的实际效能。

##### 3.1.2 经济效果指标

经济效果指标聚焦技术应用的成本效益平衡，核心用于量化 BIM 技术的经济价值。成本节约额度主要核算材料损耗率降低、返工费用减少、工期缩短带来的人工及机械租赁费用节约等核心维度的累计金额；投资回报率通过 BIM 技术全周期投入（含软件采购、人员培训、模型搭建等）与实际经济效益产出的比值计算，直观反映技术投入的性价比；资源利用效率提升则通过对比传统施工模式，以人工、材料、机械设备的闲置率降低幅度为核心衡量指标，体现资源配置优化的经济价值。

##### 3.1.3 管理效果指标

管理效果指标聚焦 BIM 技术对施工管控效能的优化作

用，核心用于评估管理模式升级成效。多方协同效率提升通过沟通成本降低金额、决策周期缩短时长量化，反映 BIM 协同平台打破信息壁垒的实际效果；质量与安全管理成效以质量隐患整改率提升幅度、安全事故发生率降低幅度为核心指标，体现技术对风险防控的支撑作用；进度管控精准度则通过实际工期与基于 BIM 制定的计划工期的偏差率计算，衡量进度管控的科学性与精准性。

#### 3.2 效果评价方法

##### 3.2.1 定量评价法

定量评价法以数据为核心支撑，通过对各评价指标相关的施工数据、成本数据、管理数据进行系统统计分析并精准量化计算，实现对应用效果的客观衡量。该方法可通过明确的数值结果直观呈现评价结论，如工期缩短比例、成本节约金额等，为评价提供坚实的数据依据。

##### 3.2.2 定性评价法

定性评价法聚焦难以量化的评价维度，通过组织行业专家对 BIM 技术应用的合理性、技术适配性、管理优化有效性等进行专业评审，结合建设、施工、监理、设计等多方主体的满意度调研，全面收集实际应用中的主观体验与专业判断，弥补定量评价法在隐性价值评估中的不足。

##### 3.2.3 对比分析法

对比分析法通过构建对照组，将应用 BIM 技术的项目与采用传统施工模式的同类项目在各评价指标上的表现进行横向对比，清晰凸显 BIM 技术的应用优势与差异化价值。同时，结合项目自身施工全流程的纵向对比，可进一步精准定位 BIM 技术在不同施工阶段的应用成效，为评价结论的可靠性提供有力支撑。

### 4 结语

本文系统探讨了 BIM 技术在建筑工程施工前期规划、过程管控及收尾阶段的实践应用，明确了其在提升施工精准度、优化资源配置、强化多方协同等方面的核心作用。通过构建多维度评价指标体系并采用多元评价方法，证实了 BIM 技术对提升施工效率、降低成本、优化管理效能的显著价值。BIM 技术的深度应用是建筑行业数字化转型的必然趋势，未来需进一步完善技术应用标准，推动其与新兴技术深度融合，助力实现建筑工程全周期精细化管理，推动行业高质量发展。

#### 参考文献

- [1] 罗永新. BIM技术在建筑工程施工进度协同管理中的应用及优化策略[J].建设机械技术与管理,2025,38(06):132-134.
- [2] 魏文学,陈光,谢颖. BIM技术在建筑工程施工安全管理中的应用[J].四川水泥,2025,(10):39-41.
- [3] 霍金朋. BIM技术在建筑工程施工质量管理中的应用[J].中华建设,2025,(09):31-3.

# Strategies for Enhancing Inspection and Testing Capability Based on Metrological Standards

Yanlin Liu

Yunnan Qujing Inspection, Testing and Certification Institute, Qujing, Yunnan, 655000, China

## Abstract

With the continuous innovation and widespread application of metrology technology, the fields of quality supervision and inspection testing are facing new challenges. The improvement of metrological standards and the optimization of testing methods will jointly drive the high-quality development of the inspection and testing industry. This will make test results more accurate and reliable, with higher authority and credibility, thereby making testing services more efficient and convenient. First, the key elements, technical challenges, and their solutions in different application scenarios are analyzed. Then, the principles for constructing a metrological standards system and the methods for evaluating testing capabilities are discussed. Finally, the pathways for enhancing inspection and testing capabilities based on metrological standards, along with their practical applications and effectiveness evaluation, are explored.

## Keywords

measurement standards; Inspection and testing; Ability enhancement; quality control

## 基于计量标准的检验检测能力提升策略

刘彦麟

云南省曲靖市检验检测认证院, 中国·云南 曲靖 655000

## 摘要

伴随计量技术的持续革新与广泛应用, 质量监管与检验检测领域正面临全新挑战, 随之而来的计量标准体系完善与检测方法优化将共同推动检验检测行业的高质量发展。这将使检测结果更加精准可靠, 具备更高的权威性与公信力。从而使检测服务更加高效便捷, 首先分析了不同应用场景下检验检测的关键要素、技术难点及其解决方案。随后阐述了计量标准体系的构建原则与检测能力评估的方法。最后探讨了基于计量标准的检验检测能力提升路径及其实际应用与效果评估。

## 关键词

计量标准; 检验检测; 能力提升; 质量控制

## 1 引言

伴随科技发展、产业转型升级的深入推进, 检验检测行业即将步入高质量发展新阶段, 做好检验检测能力提升的战略规划与实施工作至关重要。行业健康发展, 应以服务经济社会高质量发展为目标, 所有检验检测活动都应符合国家法律法规要求, 确保数据准确可靠、结果客观公正。在数字化转型背景下检验检测面临新机遇与挑战, 与传统检测模式相比现代检测技术更加复杂多元, 其精准度要求, 对检验检测机构提出了更高标准。检验检测机构应当强化计量基础能力建设, 分析技术标准更新、设备精度提升和人员素质培养对检测质量的影响, 检测结果的可靠性保障, 充分认识计量标准与检测技术的内在联系及其相互作用, 检测数据的准确性提升。随后, 在标准体系建设、技术方法创新和人才培养

等方面开展深入研究, 对检验检测能力从多维度进行系统评估, 确定关键指标, 技术能力和服务水平均达到国际先进水平, 从而构建以计量标准为基础, 以技术创新为驱动, 以质量提升为核心、符合新时代要求的检验检测能力提升体系。

## 2 计量标准与检验检测的关系

### 2.1 计量标准的内涵与作用

计量标准体系下的技术规范是检验检测活动的基础支撑, 或检测结果准确可靠的保障机制。在标准的约束与指导下, 检验检测机构能够建立科学、系统的质量管理体系, 确保检测过程的规范性与结果的可靠性, 强化对检测质量的有效控制。因此, 计量标准体系建设, 在检验检测行业高质量发展的进程中, 标准的作用就是规范行为和保障质量, 亦即: ①以国际标准作为行业发展的基准; ②把质量管理的重点从结果审核转移到过程控制和风险预防上来, 在日常检测活动中; ③以标准的更新迭代和技术融合作为检验检测能力持续提升的关键。在标准实施过程中, 还需要关注新兴技术应用,

【作者简介】刘彦麟(1981—), 女, 中国山东潍坊人, 本科, 工程师, 从事计量检验检测研究。

并将其纳入标准体系的考量范围，尤其是人工智能以及大数据分析当中，需要全面评估新技术、新方法、新设备带来的影响，以此构建完善的标准体系和质量保障机制，保证检测结果的可信度，同时能够提升其市场竞争力。

## 2.2 计量标准的发展趋势

随着检测技术的不断创新和应用，计量标准的内涵和外延已显著拓展，标准体系建设必须与时俱进、持续完善。首先，在传统检测领域，计量标准是基础支撑，依据检测需求制定相应的技术规范；但当面对新兴检测需求时，要先进行技术可行性评估，再确定标准制定的优先级。这不仅行业发展的需要，更是质量保障和市场信任的基石。可见，计量标准体系的建设应紧跟技术发展趋势，结合行业需求并注重前瞻性<sup>[1]</sup>。其次，按照现代检测环境下计量标准制定的原则和方法，标准体系构建的方式和路径，现在有国际标准化组织制定的标准体系中的最佳实践参考。最后，对标准体系建设的建议：①加快标准更新速度以适应技术发展和市场需求；②加强标准的协调性，尽量减少标准之间的冲突和重复；③强化标准的实施监督；④加强标准的国际交流与合作，提升标准在国际贸易中的认可度。

## 3 基于计量标准的检验检测能力构建

### 3.1 检验检测能力的基本要素

随着计量标准体系的不断完善，检验检测能力将显著提升，成为行业发展的核心竞争力和具有战略价值的重要资源。作为一个综合性技术服务平台，其价值是在满足客户多样化需求和保障检测质量的前提下，使检测过程更加高效规范，为经济社会发展提供可靠的技术支撑。因此，检测能力构建，例如设备配置水平、技术方法、人员素质和管理体系，以及硬件和软件的投入或优化等，基本上由标准体系指导，以满足客户需求为前提，整合标准化的技术流程、规范的操作程序以完善的质量管理体系。从能力建设角度分析，对于检测机构需要持续强化的技术支撑体系，如运用先进计量技术和智能化检测手段，能够通过标准化流程对检测数据采集、分析处理等进行规范管理，这样才能对检测质量进行有效控制，从而提升检测效率。作为检测机构更要合理地运用计量标准，以及科学的质量管理方法，保证检测过程和结果能够真实可靠，促使检测服务持续改进，也能提升行业整体水平。

### 3.2 检测能力的评估与优化

随着检测需求的日益增长，检测能力的系统化建设显得尤为重要。计量标准的制定与实施，是指为检测活动提供技术依据的规范文件，例如国际标准、行业标准、地方标准等。但是，由于标准体系的复杂性，检测能力评估面临多重挑战：①对标准适用性的评估，即对标准与检测需求的匹配程度；②对标准实施效果的评估，即标准执行对检测质量的实际影响；③对标准更新需求的评估；④对标准协调性的评

估；对标准间关系的评估，即对标准体系内部协调性的评估。而且，在实际应用中，将标准要求与检测实践以技术指标与管理要求相结合<sup>[2]</sup>。因此，在考虑其对检测各方面影响的基础上，做好这些评估工作在标准实施过程中的动态调整。随着标准化工作的推进，促使检测能力得以提升，行业发展也在向规范化、专业化方向迈进，能力建设应当构建系统化评估体系，其中应该包括指标体系、评估方法等，同时要合理运用数据分析、人工智能等技术手段，对检测能力的短板进行识别及改进，以保证检测服务更高质量。

## 4 检验检测能力提升策略

标准化建设策略 随着计量技术的快速发展，在构建检验检测能力时，将标准化建设作为核心要素，最终在技术能力和管理效能的提升过程中发挥关键作用，而检测质量和效率的提升则仍依赖于标准化工作的深入推进。这种标准化建设强化了检验检测将作为一个独立的、专业的技术服务领域，质量保障和技术创新的驱动力，向各行业提供准确、可靠和高效的技术服务，并推动行业进步，以提升其市场竞争力和可持续发展能力<sup>[3]</sup>。同时，应重视计量标准体系的完善与技术规范更新，技术标准可以多样化，但基础标准必须统一。检验检测机构应加强能力建设，在对设备管理、人员培训、方法验证、数据处理及结果报告、客户反馈、持续改进和风险管理等环节的标准化建设，确保检测过程的规范性与结果的可靠性。

### 4.1 能力提升面临的挑战

①技术更新速度加快。随着科技的快速发展，检测技术将向智能化、数字化方向发展，由于检测设备更新换代周期缩短，技术标准的制定也会加快，标准更新的速度，则检测机构的适应能力也将面临更大挑战。另外，还包括新兴技术与传统方法的融合问题，这是标准体系建设中、技术应用中、能力提升中是关键的，它受到技术发展水平和市场实际需求的影响，②标准体系复杂性增加。随着检测领域的扩展，标准体系由单一向多元化发展，标准的协调性往往难以保证，这对检测机构来说都是难题，给标准实施带来困难。③标准实施效果评估困难。包括标准适用性评价、标准实施效果监测等。在实际应用中，标准从理论要求出发，会遇到实际操作的困难，导致标准执行效果不佳，机构也难以评估；并且，随着对标准要求的提高，机构可以采用更多评估方法，标准实施的监测也将更加复杂，甚至可能出现标准与实践脱节的情况，这些都增加了标准实施的难度，原来的简单评估方法已不适用。除了通过实践检验来评估标准效果外，也可以采用数据分析技术，以便更全面地评估标准实施效果。④资源投入不足。例如：由于标准更新导致设备升级成本是机构面临的实际问题。⑤专业人才短缺。行业中有些岗位存在技能要求高的专业问题，而人才的培养往往是需要长期投入的过程，这样就会对标准实施的顺利推进带来阻碍。⑥国际

标准对接问题。众所周知,国际标准的差异会给跨国检测带来不便,而这往往是标准本地化过程中需要解决的。行业要应对这些挑战,使检验检测能力的提升和优化,相对于传统的能力建设来说更为复杂。

## 4.2 能力提升的关键路径

①对检测机构的管理者和技术人员来说,需要系统的标准知识、专业的技术能力及持续的学习能力和创新精神。②对检测机构发展来说,标准化建设必然使检测流程更加规范并提高效率:一旦标准实施不到位,容易导致检测结果的偏差,因此需要完善的培训体系、有效的监督机制或科学的评估方法来保障标准实施的质量和效果。③检验检测能力的提升应从技术和管理两个维度进行分析,评估技术能力和管理水平的提升效果。一方面,针对特定检测领域,提出针对性的能力建设方案,例如以智能制造为背景,提出工业检测能力提升的路径,在考虑技术更新的同时,综合考虑设备投入和人员培训的平衡。另一方面,在原有的标准基础上探索创新应用,例如智能检测系统,就是在传统检测方法基础上融合现代信息技术的创新。④标准与技术的协同发展。由于计量标准的制定、实施具有专业性,因此在能力建设中还要重视标准的适应性。一个好的标准体系应能有效指导技术实践和管理活动,并能反映技术发展和市场需求的变化,以确保标准体系的实用性和前瞻性。

## 4.3 具体实施策略

①技术创新驱动。随着数字化转型和智能化技术的普及,使得检测技术创新更加活跃,例如智能检测设备等,它们解决的是传统检测的局限性,现在检测机构的技术需求越来越迫切,例如人工智能技术在环境监测、医疗诊断和产品质量检测中的应用。智能检测技术的开发应用和传统检测方法的优化升级。其中:技术创新为能力提升提供技术支持;标准建设为使检测结果达到可比性而制定的技术规范和管理要求;标准实施为因标准要求达到检测质量而采取的具体措施。②质量管理强化。质量管理是检验检测的核心,是能力建设的重中之重。目前,质量管理在检测机构中都已建立,但实施效果参差不齐。为了提升质量管理效能,需要关注以下关键环节:确定质量管理的目标及关键绩效指标的设定与监控;根据客户需求确定标准要求;对检测过程的全面监控和持续改进;特别在关键环节对检测质量进行重点把控,检测结果的准确性应得到充分保障。③人才队伍建设。由于检

测技术通常涉及多学科知识,因此,当开展复杂检测任务时,将考验人员的专业知识、技能和经验,人才的培养和引进。这就要求机构的人力资源管理进行系统规划。

4)标准与技术融合创新。例如,在环境检测中,传感器技术的进步会带来检测方法的革新,因此标准更新时还必须考虑对新技术应用的适应性。另外,可以在标准的制定基础上引入新技术和新方法,例如某机构引入了区块链技术对检测数据溯源进行了创新,并得到了更加可靠的检测数据管理效果。为了让检验检测能力提升有明确的方向,可以设定阶段性目标、建立评估机制等,使得能力提升能够达到预期效果、满足市场需求等目的,这样能够提升其服务水平。对于能力提升的具体实施还需要系统的规划管理,尤其要在资源配置上做好统筹安排。对于标准实施,需要建立反馈机制、如定期评估等都应纳入标准管理体系内,从而实现能力持续提升,在数字化环境下,能够促进检验检测行业高质量发展。

## 5 结语

计量标准与检验检测能力是行业发展的基石,因此需要对标准体系的完善、技术方法的创新及人才培养等方面持续投入,以适应经济社会发展的新要求。检验检测能力的全面提升将推动行业高质量发展,行业标准的制定也需要与时俱进的创新思维。由标准体系支撑的技术能力、管理能力、服务能力、创新能力和可持续发展能力都将显著提升,而且需要系统化的推进策略。在数字化转型下,检验检测已经进入新阶段,它更趋向于智能化的发展方向,在标准引领下,检验检测能够实现精准高效,更能满足多元化需求,同时能够提升质量、效率的服务水平,在能力建设需要关注技术、管理、服务等方面的系统优化,利用现代信息技术手段与管理方法,保证检验检测事业持续健康发展。

## 参考文献

- [1] 田成成,高超,李双全.基于产业计量的铝产业标准化检验检测方法[J].中国质量监管,2025(2):106-107.
- [2] 张蕾蕾,康健,栾添,等.量子科技产业领域计量技术及其标准研究现状与对策分析[J].中国电子科学研究院学报,2025,20(3):249-257.
- [3] 程万强.长度计量技术标准化管理与应用的提升策略[J].大众标准化,2024(21):182-184.

# Adaptive improvement and efficiency enhancement of intelligent drilling technology in complex-structured strata

Bo Ai Rui Liu

Western Drilling Pipe Tools and Well Control Technology Service Branch of China National Petroleum Corporation, Karamay, Xinjiang, 834000, China

## Abstract

This study focuses on the challenges of drilling efficiency and safety that arise when oil and gas exploration and development expand into deep and complex strata. It centers on the adaptive optimization of the intelligent drilling technology system, integrating core technologies such as high-precision measurement-while-drilling, intelligent guidance control, and adaptive wellbore stability, and incorporating real-time decision optimization algorithms based on machine learning for research. Through research and analysis, this efficiency improvement strategy has significantly enhanced the adaptability of the technical system in complex geological environments such as faults, high and steep structures, salt-gypsum layers, and fracture zones. By optimizing the configuration of drilling parameters, achieving advanced risk early warning, and intelligent guidance control, a coordinated improvement in engineering operation efficiency and economic benefits has been achieved. This research aims to provide practical and feasible technical improvement plans and performance verification basis for the large-scale promotion and application of intelligent drilling technology in complex geological scenarios.

## Keywords

Intelligent Drilling technology; Complex structural bottom layer; Measurement while drilling; Adaptive control

# 智能钻井技术在复杂构造地层中的适应性改进及效能提升

艾波 刘锐

中国石油集团西部钻探管具与井控技术服务分公司, 中国·新疆 克拉玛依 834000

## 摘要

此次研究针对油气勘探开发向深层复杂构造地层拓展时所引发的钻井效率与安全难题, 围绕智能钻井技术体系的适应性优化, 整合高精度随钻测量、智能导向控制及自适应井壁稳定等核心技术, 融入基于机器学习的实时决策优化算法进行研究。通过研究分析, 此效能提升策略能够大幅增强了该技术体系在断层、高陡构造、盐膏层及破碎带等复杂地质环境中的适配能力, 通过优化钻进参数配置、实现风险超前预警及智能化导向控制, 达成了工程作业效率与经济效益的协同提升。此次研究旨在为智能钻井技术在复杂地质场景下规模化推广应用, 提供切实可行的技术改进方案与效能验证依据。

## 关键词

智能钻井技术; 复杂构造底层; 随钻测量; 自适应控制

## 1 引言

传统的钻井技术通常依托于有限的地质资料与间断性测井数据, 在应对该类地层时, 往往表现出机械钻速偏低、卡钻与井漏等井下复杂事故高发等问题, 从而会导致钻井周期延长、工程成本高。以信息化、自动化与智能化为核心特征的智能钻井技术, 被公认为破解上述技术难题的核心发展路径。此技术通过井下实时数据采集、地面高速传输、智能分析决策与自动化执行的全流程协同, 对钻井过程的闭环进行优化。但是现有智能钻井系统在遭遇极端非均质、强各向异性的复杂构造地层时, 凸显出模型失准、决策滞后、控制

指令与地层动态响应失配等关键问题<sup>[1]</sup>。因此, 开展面向复杂构造地层的智能钻井技术靶向性适应性优化, 同步量化评估其效能提升幅度, 对于促进钻井技术革新升级、支撑复杂油气资源高效开发具有重要的现实价值与紧迫性。本文系统剖析了智能钻井技术在复杂构造地层中面临的核心技术挑战, 构建了从感知层、决策层到执行层的系统性改进方案, 并依托真实区块的现场应用数据, 深入验证了技术改进后的综合效能提升效果。

## 2 智能钻井技术体系核心组成及挑战

智能钻井技术并非孤立的单项技术, 而是融合先进传感技术、数据传输技术、智能算法与自动化执行单元的综合技术体系。其核心构成可划分为以下三个层次。

【作者简介】艾波(1972—), 男, 中国四川内江人, 工程师, 从事钻井工程研究。

## 2.1 感知与测量层

该层次承担钻井过程与地层环境多维数据的实时采集功能，核心技术装备涵盖高精度随钻测量系统、随钻测井系统、随钻地震与地层压力测试技术。其中，高精度随钻测量系统可提供井斜、方位、工具面等几何参数，测量精度达 $\pm 0.1^\circ$ ，分辨率为 $0.01^\circ$ ，并同步采集近钻头振动、扭矩、压力等工程力学参数。随钻测井系统集成电阻率、伽马、密度、中子、声波等传感器阵列，可对地层岩性、物性、含油性及孔隙压力进行实时评价。当前主流先进系统的数据采样频率达10Hz，地层分辨率为0.1米。随钻地震与地层压力测试技术通过钻井振动或专用震源开展随钻地震成像，结合随钻压力测试技术实时更新地层孔隙压力与破裂压力剖面。

## 2.2 数据传输与决策层

该层次承担井下海量数据向地面的高速可靠传输功能，并依托智能算法开展实时数据分析与决策制定。在高速数据传输技术方面，通过采用电磁波遥测技术或改进型泥浆脉冲遥测技术。新一代高速泥浆脉冲遥测系统的传输速率已提升至40bps以上，可充分满足多参数实时上传需求<sup>[2]</sup>。在智能决策中心部署于地面终端或云端服务器，集成数据融合平台与智能决策算法模块。其核心技术逻辑为运用机器学习算法与数字孪生技术，将实时采集数据与地质模型、力学模型进行耦合分析，实现井筒稳定性预测、钻头磨损状态诊断、最优钻井参数推荐及钻井风险预警等功能。

## 2.3 执行与控制层

该层次依据决策层输出的指令，通过自动或半自动控制模式调控井下作业工具，达成精准钻井作业目标。旋转导向系统可在不中断旋转钻进作业的前提下，通过可调式稳定器或指向式钻头结构，对井眼轨迹进行连续精准调控，其造斜率可控范围常规为 $0-15^\circ/30m$ 。自动钻井系统接收决策层下发的优化参数，借助顶驱、泵组等设备的自动控制回路，实现恒参数或变参数优化钻进作业。自适应井壁稳定工具包括当量循环密度自动调节系统、智能堵漏材料投放装置等，用于实时防控井壁失稳与漏失风险。

## 2.4 复杂构造地层对智能钻井提出的主要挑战

复杂构造地层的独特地质禀赋对上述技术体系各环节均形成严峻挑战。于断层破碎带、盐膏层塑性蠕变区域，井下振动剧烈且呈非规则性，致使MWD/LWD传感器采集信号的信噪比显著降低，甚至出现信号跳变与失真现象。现有基于常规地层建立的钻速预测模型与井壁稳定性模型，在复杂构造环境中精度显著衰减；地应力方向在短距离范围内易发生剧烈波动，导致基于初始地应力模型的轨迹优化与稳定性预测功能失效。在破碎性地层条件下，旋转导向系统的导向力传递效率衰减，轨迹控制精度降低，实际造斜率与设计值的偏差幅度可达30%。

## 3 面向复杂构造的智能钻井技术适应性改进方案

### 3.1 多源异构数据融合与抗干扰设计

引入基于深度学习的信号处理算法，构建面向强振动

噪声的随钻信号自适应滤波与重构模型<sup>[3]</sup>。该模型借助长短期记忆网络学习噪声与有效信号的时空特征，在四川威远区块页岩气井现场试验中，使强振动环境下方位伽马信号的恢复率由65%提升至92%。部署近钻头多物理场融合测量短节，于钻头后方1.5米范围内集成声波传感器、微电阻率成像传感器及三轴应变传感器。基于声波速度差异时序数据、微电阻率图像各向异性特征及应变反演方法，实现对半径0.5米范围内地层裂缝产状与地应力方向的近实时辨识。现场应用结果显示，该技术可提前2-5米识别断层界面或裂缝发育带。发展分布式光纤声波传感与井筒成像技术，将光纤缆嵌入智能钻杆或套管结构，实现对全井筒长度范围内温度与声波振动信号的连续式、分布式测量。该技术能够捕捉钻井液漏失位置、套管外窜流等微弱物理信号，在荷兰格罗宁根气田应用于诱发地震活动监测，定位精度达米级水平。

### 3.2 基于机器学习的自适应实时优化与预警

构建“数字孪生-实时数据”双驱动自适应决策模型，建立涵盖区域地质构造、地应力场及岩石力学特性的高精度初始数字孪生模型。钻井作业过程中，基于实时随钻监测数据，例如机械钻速、扭矩、压力、成像数据等，借助在线机器学习算法，对孪生模型中关键不确定参数进行持续反向标定与动态更新。更新后的数字孪生模型用于超前模拟钻井作业过程，实现钻井参数优化与风险预警。研发基于时序模式识别的早期风险智能预警系统，摒弃传统单一参数超阈值报警模式，聚焦多参数，例如如扭矩、立压、返砂量、气体含量的时序协同变化模式分析。该系统借助卷积神经网络进行特征提取，可识别“小幅持续立压下降伴随返砂量减少”等表征裂缝性漏失起始阶段的微弱前兆模式。在塔里木盆地库车山前克深区块超深井现场应用中，实现重大漏失风险平均提前15分钟预警，预警准确率达85%。

### 3.3 高鲁棒性导向与自适应井控

研发强扰动环境下鲁棒自适应导向控制算法，针对导向力传递不确定性难题，将旋转导向系统的导向执行机构建模为含参数摄动与外部干扰的非线性系统。采用滑模变结构控制与模糊逻辑融合的设计方法，构建自适应控制器，使其对地层抗力变化具备强鲁棒性。准噶尔盆地南缘高泉背斜高陡构造的实钻数据表明，改进后系统在破碎地层中实际造斜率与设计值的平均偏差由28%缩减至9.5%。集成智能循环当量密度调控与实时堵漏系统，实现井下压力随钻测量、水力模型实时计算与地面自动节流管汇、智能堵漏材料加注装置的协同联动。该系统可依据实时ECD监测数据与漏失预警信息，在1-2个循环周期内自动调节泵排量与节流阀开度，并触发预定配方及粒径的堵漏材料加注流程。在南海东部莺歌海盆地某高温高压裂缝性气田的现场应用中，该系统使中等及以上级别漏失的处理时间平均缩短58%。

## 4 改进后智能钻井技术的效能提升分析

通过集成上述系统性改进方案，构建的“增强型智能钻井系统”已在多个复杂构造区块开展规模化先导性试验。

以S省盆地龙门山前带某超深层页岩气区块——XY区块10口井的对比试验数据为依托，对系统效能提升效果进行详细分析：对照组为5口采用改进前常规智能钻井技术的邻井，试验组为5口应用增强型智能钻井系统改进后的试验井。

### 4.1 钻井效率显著提升

改进后对数据进行分析，XY区块智能钻井技术改进前后主要指标对比如表1所示。机械钻速得到提升，其核心驱动因素为自适应决策模型输出的实时最优钻压转速组合，以及鲁棒导向控制技术降低了因轨迹纠偏导致的非生产性滑动钻进时长<sup>[4]</sup>。在水平段施工中，机械钻速从12.1m/h提升至15.8m/h。优化了轨迹控制精度，近钻头测量技术与鲁棒导向控制的协同作用，实现系统对地层变化的超前感知及轨迹调整指令的高精度执行，有效保障了优质储层钻遇率。显著减少了复杂事故，早期风险预警系统与智能井控系统的联动运行，将漏失、卡钻等主要井下复杂事故的处置模式从“事后处理”转变为“事前预防”与“事中快速处置”相结合的防控体系，大幅压缩了事故处置时长。其中，井漏类复杂情况时间占比从7.2%降至1.8%。优化了综合钻井成本，钻井周期缩短与材料消耗减量，直接转化为显著的经济效益。初步测算，该区块单井综合钻井成本降幅约为15%-20%。

表1 XY区块智能钻井技术改进前后主要指标对比

评估指标	改进前(5口井均值)	改进后(5口井均值)	提升幅度
平均机械钻速(m/h)	8.7	10.95	+25.8%
井眼轨迹控制精度	靶心距平均8.5m	靶心距平均5.1m	+40.0%
复杂事故时效(%)	12.4%	4.03%	-67.5%
平均单井钻井周期(d)	78.5	64.2	-18.2%
钻井液漏失量(m <sup>3</sup> /井)	1250	580	-53.6%
优质储层钻遇率(%)	82.3%	95.6%	+13.3个百分点

### 4.2 安全与地质认知能力增强

基于时序模式识别的智能预警系统，在XY区块试验井中累计触发17次有效预警信号，涵盖9次井漏前兆信号、5次钻具失效风险前兆及3次气侵早期信号，所有预警均得到及时响应与处置，有效规避了事故升级风险。以X-2井为例，系统提前18分钟预警钻具托压加剧态势，现场技术人员及时优化钻井参数，成功规避一起潜在卡钻事故。多源近钻头融合测量技术的应用，使地质工程技术人员可实时获取高分辨率地层成像数据与裂缝发育信息。X-3井钻井作业期间，系统提前3米识别出一厚度仅0.8米的关键优质小层，随即启动轨迹调整流程，确保该小层被全程钻穿，经测试该小层产量贡献率达30%。这一成效主要得益于近钻头电阻率成像技术所具备的厘米级分辨率地层界面识别能力。

### 4.3 技术集成与协同效应可视化

下图呈现了改进后的增强型智能钻井系统在复杂构造地层工况下，核心技术与数据流的协同运行机制，构建了“感

知-决策-执行-优化”的增强型闭环体系。该图系统展现了增强型智能钻井体系的完整工作流程。

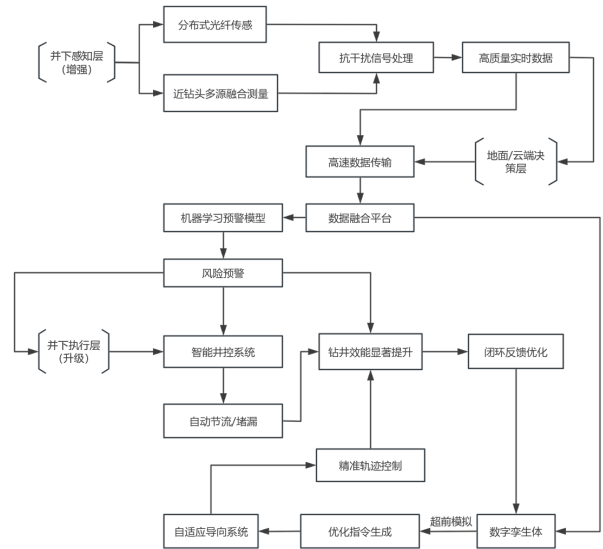


图1 增强型智能钻井系统集成架构与闭环工作流程示意图

## 5 结语

面对复杂构造地层带来的严峻钻井技术挑战，本文对智能钻井技术感知层、决策层、执行层的系统性适应性进行优化，成功研发了一套增强型智能钻井技术体系。通过聚焦于提升数据抗干扰处理与多源融合能力、引入机器学习驱动的自适应实时决策机制、以及增强执行机构的鲁棒性与动态响应速率。S省盆地XY区块的现场应用实践验证，该技术体系可有效抵御复杂地层的不确定性干扰，实现钻井作业效率、井眼轨迹控制精度的全方位提升，综合技术经济效益突出。实践表明，以实时数据驱动与智能算法为核心的技术优化路径，是充分释放智能钻井技术潜力、破解复杂构造钻井技术瓶颈的关键举措。未来，随着井下边缘计算能力的提升与人工智能模型的迭代升级，智能钻井技术有望实现更深层次的自主优化与全流程闭环控制，为全球复杂油气资源的经济高效开发提供更为强劲的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 徐志远,罗青桂,唐山.智能钻井技术现状与发展趋势探讨[J].石化技术,2025,32(09):192-194.
- [2] 孙虎,郭阳,张媛,等.智能化钻井完井技术研究与工程实践[J].钻采工艺,2025,48(01):46-54.
- [3] 苏延鹤.智能钻井液监测技术研究现状及发展趋势[J].西部资源,2024,(02):62-66.DOI:10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2024.02.011.
- [4] 苏延鹤.智能钻井液监测技术研究现状及发展趋势[J].西部资源,2024,(02):62-66.DOI:10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2024.02.011.

# The Practice of Euler Diagram in Regional Twin Cities Collaborative Analysis: Taking Xiongan New Area and Beijing as an Example

Wenbo Hu

Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, 100044, China

## Abstract

As a visualization tool for set logical relationships, Euler diagrams provide a novel perspective for analyzing interactive relationships among stakeholders in regional coordinated development. The Xiongan New Area and Beijing share clear strategic synergy and functional complementarity in their development positioning. While maintaining distinct core functions, both regions achieve deep integration within the broader framework of the Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development. Building on the theoretical foundation of Euler diagrams, this study constructs an analytical model of “Beijing’s Core Function Set vs. Xiongan’s Functional Reception and Innovation Set.” By examining the intersection, union, and complement relationships between these sets, it elucidates the developmental logic of Xiongan and Beijing’s transition from functional decentralization to collaborative symbiosis. The findings offer theoretical references and practical pathways for advancing the construction of a world-class urban cluster in the Beijing-Tianjin-Hebei region.

## Keywords

Euler diagram; Xiongan New Area; Beijing; regional coordination; functional decentralization

## 欧拉图在区域双城协同分析中的实践——以雄安新区与北京市为例

胡文勃

北京建筑大学, 中国·北京 100044

## 摘要

欧拉图作为集合逻辑关系的可视化工具, 为解析区域协同发展中的主体互动关系提供了全新视角。雄安新区与北京的发展定位具有明确的战略协同性与功能互补性, 二者既存在核心功能的区分, 又在京津冀协同发展大框架下形成深度交融。本文基于欧拉图的理论内核, 构建“北京核心功能集合—雄安承接与创新功能集合”的分析模型, 通过解构两集合的交集、并集与补集关系, 阐释雄安与北京从功能疏解到协同共生的发展逻辑, 为推动京津冀世界级城市群建设提供理论参考与实践路径。

## 关键词

欧拉图; 雄安新区; 北京; 区域协同; 功能疏解

## 1 引言

京津冀协同发展是我国重大国家战略, 其核心目标在于破解北京“大城市病”, 优化区域空间布局, 构建功能互补、协同高效的城市群发展格局。雄安新区的设立, 被定位为“疏解北京非首都功能集中承载地”, 与北京形成“一核两翼”的战略布局, 二者的关系并非简单的“转移”与“承接”, 而是蕴含着更复杂的功能分工、资源配置与发展联动逻辑。

欧拉图由18世纪瑞士数学家欧拉提出, 通过圆形等封

闭图形的叠加、分离关系, 直观呈现不同集合间的包含、相交、相离等逻辑关联, 其核心优势在于将抽象的关系具象化, 便于解析多主体间的互动边界与融合维度。将欧拉图理论引入雄安与北京的关系分析, 可将二者的功能定位、发展资源、战略目标等抽象要素转化为可可视化的“集合”, 通过解构集合间的逻辑关系, 清晰界定二者的功能边界与协同空间, 为理解区域协同发展的内在机理提供新的理论工具。

现有关于雄安与北京关系的研究, 多集中于功能疏解路径、产业协同模式、政策机制设计等实践层面, 缺乏从逻辑关系视角的理论解构。本文以欧拉图为分析框架, 将北京界定为“核心功能集合”(A集合), 雄安界定为“承接与创新功能集合”(B集合), 通过分析A与B的交集( $A \cap B$ )、

【作者简介】胡文勃(1990—), 女, 中国河北石家庄人, 本科, 在读硕士, 从事建筑信息化研究。

并集 ( $A \cup B$ ) 及补集 ( $A-B$ 、 $B-A$ ) 所对应的发展内涵,系统阐释二者协同发展的逻辑基础与实现路径,丰富区域协同发展的理论研究范式。

## 2 理论依据

### 2.1 欧拉图的核心理论

欧拉图的核心是通过图形语言表达集合间的逻辑关系,其基本要素包括“集合”(用封闭图形表示)与“关系”(用图形的叠加、分离状态表示)。在欧拉图的逻辑体系中,不同集合间主要存在四种核心关系:一是包含关系 ( $A \supseteq B$ ),二是相交关系 ( $A \cap B \neq \emptyset$ );三是相离关系 ( $A \cap B = \emptyset$ );四是等同关系 ( $A=B$ ),即两个集合元素完全一致,反映主体间的同质化逻辑。

其优势在于“可视化”与“逻辑化”的双重属性:一方面,通过图形将抽象的集合关系转化为直观的视觉符号,降低了复杂关系的理解难度;另一方面,通过形式逻辑的分析框架,可精准界定不同主体间的边界、交集与互补空间,为多主体互动关系的解构提供严谨的逻辑支撑。

### 2.2 理论适配性

雄安与北京的关系本质上是区域发展中两个核心主体的功能分工与协同关系,其内在逻辑与欧拉图的集合关系具有高度适配性。从协同发展的核心需求来看,二者的关系解构需要解决三个关键问题:一是“边界何在”,即北京核心功能与雄安承接功能的明确区分;二是“交集何在”,即二者可协同发力的领域与空间;三是“互补何在”,即二者各自的独特优势与发展定位。这三个问题恰好对应欧拉图中集合的“补集”“交集”“包含/相离”关系,形成精准的逻辑对应。

北京作为首都,其核心功能是“四个中心”(政治中心、文化中心、国际交往中心、科技创新中心),构成了相对稳定的“核心功能集合”;雄安新区的核心功能是承接北京非首都功能,同时培育创新驱动发展新引擎,构成了“承接+创新”的功能集合。两个集合既存在因功能疏解形成的交集(如部分产业、资源的转移与衔接),又存在因定位差异形成的补集(如北京的核心政务功能、雄安的新兴产业功能),这种“交集+补集”的关系结构,与欧拉图的分析框架完全契合,为二者关系的系统解构提供了可行的理论工具。

## 3 欧拉图下雄安与北京关系的核心结构

基于欧拉图理论,本文构建“北京核心功能集合(A)—雄安承接与创新功能集合(B)”的分析模型,其中A集合的核心元素包括:政治中心功能、文化中心功能、国际交往中心功能、科技创新中心核心功能、高端服务业核心功能等;B集合的核心元素包括:北京非首都功能承接(如一般性产业、区域性物流基地、部分教育医疗资源等)、创新驱动发展功能、绿色生态宜居功能、现代化智慧城市功能等。通过解析A与B的交集、补集、并集关系,可清晰呈现二者的

协同发展逻辑。

### 3.1 交集 ( $A \cap B$ ): 功能衔接与协同共生空间

在科技创新领域,北京拥有全国顶尖的科研院所、高校与创新资源,是科技创新中心的核心承载地;雄安新区则聚焦“创新驱动发展引领区”定位,承接北京的科技创新成果转化、中试基地等功能,二者形成“北京研发+雄安转化”的协同模式,构成科技创新功能的交集。其中,最具代表性的案例是雄安宣武医院与北京协和医学院的协同创新项目——双方联合建立的“京津冀神经科学创新中心”,依托北京协和医学院的科研优势开展基础研究,在雄安实现神经介入器械、康复医疗设备等成果的中试与产业化。此外,清华大学雄安研究院、北京大学雄安国际医院等10余个校地合作平台已落地雄安,覆盖人工智能、生物医药、新能源等多个领域,充分体现了交集的协同价值。

在产业分工领域,北京疏解的一般性制造业、区域性物流产业等,与雄安承接的产业功能形成精准衔接,构成产业功能的交集。根据《北京非首都功能疏解产业目录(2024年版)》,北京累计向雄安疏解符合要求的企业1200余家,其中制造业企业占比45%,物流仓储企业占比28%。同时,二者在高端服务业领域形成互补:北京聚焦金融、商务等核心高端服务业,2024年北京金融产业增加值占GDP比重达19.8%;雄安则培育与科技创新、绿色发展相配套的高端服务业,重点发展绿色金融、科技服务等业态,截至2024年底,雄安新区绿色金融机构数量达47家,科技服务企业超800家,形成“核心+配套”的产业协同格局。此外,京雄产业协同发展示范区建设成效显著,2024年示范区内北京疏解企业与雄安本地企业合作项目达189个,合作金额超200亿元,进一步强化了交集的产业联动属性。

在公共服务领域,北京疏解部分优质教育、医疗资源到雄安,形成公共服务功能的交集,推动区域公共服务均等化发展。教育领域,北京林业大学雄安校区、北京科技大学雄安校区已正式招生;医疗领域,北京协和医院雄安院区、北京大学第三医院雄安院区等4所三甲医院分院已投入运营;公共服务共享方面,2024年实现了120项政务服务事项“跨省通办”,教育资源互通、医疗检查结果互认覆盖范围持续扩大,让群众切实享受到协同发展的红利,进一步夯实了公共服务交集的民生价值。

### 3.2 补集 ( $A-B$ 与 $B-A$ ): 功能边界与独特定位

欧拉图中的补集包括A-B(属于A但不属于B的元素)与B-A(属于B但不属于A的元素),对应雄安与北京各自的核心功能边界与独特发展定位,体现了二者“分工明确、各有侧重”的发展逻辑。

A-B集合代表北京独有的核心功能,这部分功能具有不可替代性,是北京作为首都的核心价值所在,也是不能疏解、必须强化的功能。其核心元素包括政治中心核心功能、文化中心核心功能、国际交往中心核心功能等。这些功能是

北京的“核心竞争力”，决定了北京在区域发展中的核心地位，无法被雄安替代，构成了A集合的独特属性。

B-A集合代表雄安独有的承接与创新功能，这部分功能是雄安区别于北京的核心定位，也是雄安实现高质量发展的关键支撑。其核心元素包括非首都功能集中承接功能、绿色生态宜居功能、现代化智慧城市功能等。这些功能是雄安的“特色竞争力”，旨在破解北京“大城市病”，同时培育区域发展新引擎，与北京的核心功能形成互补，构成了B集合的独特属性。

补集的存在，明确了雄安与北京的功能边界：北京聚焦“核心功能强化”，雄安聚焦“承接创新突破”，二者避免功能同质化竞争，形成“各安其位、各展所长”的分工格局。

### 3.3 并集 (A ∪ B)：区域协同与整体发展格局

欧拉图中的并集 (A ∪ B) 代表两个集合的所有元素，对应雄安与北京协同发展形成的区域整体功能集合，标志着雄安与北京从“个体发展”走向“整体联动”。在这一体系中，北京的核心功能提供“战略引领”，雄安的承接创新功能提供“空间支撑”，二者的协同联动推动区域资源优化配置：北京的高端资源通过疏解与协同，辐射带动雄安发展；雄安的新兴功能通过创新突破，为北京核心功能的强化提供保障。

例如，雄安承接北京的非首都功能，缓解了北京的人口、环境压力，使北京能够集中精力强化核心功能；北京的科技创新资源与雄安的产业转化平台协同，推动区域科技创新能力提升；雄安的绿色生态功能与北京的生态保护需求协同，构建区域生态安全屏障。

## 4 欧拉图视角下雄安与北京协同发展的优化路径

### 4.1 巩固交集：强化功能衔接，拓展协同空间

交集是雄安与北京协同发展的核心纽带，巩固交集需聚焦科技创新、产业分工、公共服务三大核心领域，强化功能衔接机制。

在科技创新协同方面，建立“北京研发—雄安转化”的常态化联动机制，鼓励北京高校、科研院所与雄安企业共建创新平台，推动科技创新资源跨区域流动；在产业分工衔接方面，细化产业疏解与承接清单，明确北京疏解产业的类型与标准，同时强化雄安承接产业的配套能力建设，形成“核心产业在北京、配套产业在雄安”的分工格局；在公共服务联动方面，推动北京优质教育、医疗资源向雄安的实质性疏解，建立跨区域公共服务共享机制，实现公共服务标准互认、

资源互通，提升区域公共服务均等化水平。

### 4.2 明晰补集：强化功能定位，避免同质化竞争

补集是雄安与北京独特定位的核心体现，明晰补集需进一步强化二者的功能边界，避免同质化发展。

对北京而言，应聚焦“四个中心”核心功能，持续疏解非首都功能，优化核心功能布局，提升核心功能承载力；对雄安而言，应聚焦“疏解承接+创新驱动”核心定位，强化非首都功能集中承接能力，培育新兴产业、绿色生态、智慧城市等特色功能，打造区域发展新引擎。同时，建立区域功能定位动态监测机制，及时调整功能布局，确保二者始终保持“各有侧重、互补发展”的格局。

### 4.3 优化并集：强化区域联动，提升整体竞争力

并集是雄安与北京协同发展的整体目标，优化并集需从区域整体视角出发，推动资源优化配置与政策协同。

在资源配置方面，建立跨区域资源要素市场化配置机制，推动资金、人才、技术等资源在雄安与北京之间自由流动；在交通联动方面，进一步完善京雄城际、京雄高速等交通基础设施，构建“一小时通勤圈”，强化二者的空间联系；在政策保障方面，建立京津冀协同发展政策协同机制，统一区域发展规划、产业政策、生态环保政策等，消除跨区域发展的政策壁垒，为并集的优化提供制度保障。

## 5 结语

通过构建“北京核心功能集合—雄安承接与创新功能集合”的欧拉图模型，发现二者的交集是协同共生的核心纽带，补集是功能边界的核心体现，并集是区域发展的整体目标。雄安与北京的协同发展，本质上是通过巩固交集、明晰补集、优化并集，实现“分工明确、功能互补、协同高效”的发展格局。要强化二者的功能衔接机制，明晰功能定位边界，优化区域资源配置与政策协同，推动雄安与北京从“功能疏解”向“协同共生”深度转型。这一发展逻辑，不仅为雄安与北京的协同发展提供了实践路径，也为其他区域协同发展的理论研究与实践探索提供了有益借鉴。

### 参考文献

- [1] 中共中央国务院. 京津冀协同发展规划纲要[Z]. 2015.
- [2] 雄安新区规划纲要[Z]. 2018.
- [3] 李铁. 雄安新区与北京非首都功能疏解的协同机制研究[J]. 城市发展研究, 2020, 27(5): 1-7.
- [4] 张可云. 区域经济学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2021.
- [5] 王缉思. 北京“四个中心”功能建设与京津冀协同发展[J]. 北京大学学报(哲学社会科学版), 2019, 56(3): 153-160.

# Application of Tracer Gas Leak Detection in Water Supply Pipeline and Its Adaptability to Complex Geology

Jieke Zhao Qiuchan Chen Yi Zhan Wenbo Ma

Wenzhou Public Utilities Development Group Yueqing Water Supply Co., Ltd., Yueqing, Zhejiang, 325600, China

## Abstract

To address the challenges of uneven leakage distribution and detection difficulties in water supply networks across typical scenarios including coastal saline-alkali land, urban paved roads, and mountainous green spaces in Yueqing City, this study developed a tracer detection technology using a 95% nitrogen and 5% hydrogen gas mixture. Through systematic analysis of tracer gas diffusion paths, permeation rates, and concentration decay characteristics under various geological conditions, the research optimized detection point density, sampling frequency, and parameter configurations, followed by multi-regional pilot validation. Results demonstrate that this technology can accurately locate concealed leakage points, significantly improving detection efficiency and precision. It provides scientific support for refined leakage control in water supply networks, demonstrating substantial engineering application value.

## Keywords

water supply network; gas tracer leak detection; leakage control; geological adaptability

## 供水管网示踪气体检漏应用及复杂地质适应性研究

赵杰克 陈秋蝉 詹毅 马文波

温州公用事业发展集团乐清水务有限公司，中国·浙江 乐清 325600

## 摘要

针对乐清市沿海盐碱地、城区硬化路面、山地绿化地等典型场景下供水管网漏损分布不均、检测难度大的问题，本研究研发基于95%氮气与5%氢气的混合介质示踪检漏技术。通过系统分析示踪气体在不同地质条件下的扩散路径、渗透速率及浓度衰减特性，优化检测布点密度、采样频次与参数配置方案，并开展多区域试点验证。结果表明，该技术可精准定位隐蔽漏点，有效提升管网漏损检测效率与精度，为供水管网精细化漏损控制提供了科学技术支撑，具有重要的工程应用价值。

## 关键词

供水管网；气体示踪检漏；漏损控制；地质适应性

## 1 引言

随着经济社会的发展，对供水需求量不断深化，管道的布置也日益复杂紧密。自来水管道的漏水时，准确定位漏点成为一项技术上的难题。作为一项民生工程，多地供水测漏部门不断强化学习，掌握并通过科学的检测技术，确保供水安全。

## 2 项目背景与核心技术

### 2.1 项目背景

2015年4月2日，国务院发布《水污染防治行动计划》（简称“水十条”），再次强调，到2020年，全国用水总量控制在6700亿m<sup>3</sup>以内。并进一步明确提出加强城镇节水，对使用超过50年和材料落后的供水管网进行更新改造，

到2017年，全国公共供水管网漏损率控制在12%以内；到2020年，控制在10%以内。到2025年，全国城市公共供水管网漏损率应控制在9%以内。

乐清市现有DN75以上市政供水管道总长约4300多公里，其中球墨管占比约7%、钢管占比约24%、PE管占比约21%、砼管占比约5%、钢塑等其他材质管道占比约43%。2022至2024年，乐清水务年度产销差（产销差率是衡量管网漏损的核心指标，主要由漏失率及计量误差构成）均稳定控制在10%以下，但漏损分布呈现显著不均性。部分区域由于管网复杂、管道健康度低、PE管材占比高、管道埋深较大等原因，产销差率仍高于10%阈值，传统听声法检漏法、流量监测法等技术手段因定位精度有限，已难以满足精细化漏损控制需求。

针对传统检测手段（人工听漏、声波检测）的短板：高度依赖漏水点发出的声音来判断漏水点的准确位置，对于微小渗漏、水包管等漏水点根本无法检测。项目核心研发目

【作者简介】赵杰克（1989—），男，中国浙江乐清人，本科，助理工程师，从事地理信息管理研究。

标明确为：研发落实一套“高效、精准、实用”的供水管网气体示踪检测方法，从技术原理、操作工艺、场景适配等多维度突破传统技术瓶颈，为乐清市不同地质条件、不同管材类型、不同工况场景下的供水管网检漏提供系统性解决方案。

## 2.2 技术原理

采用 5% 氢气与 95% 氮气组成的安全混合气体作为示踪介质，利用氢气小分子结构、低密度的物理特性，使其从管道漏点快速垂直渗透至地表；通过搭载灵敏度达 1ppm、响应时间 ≤0.5 秒的高精度氢气传感器，沿管线上方区域进行扫描检测，定位气体浓度峰值点即可实现漏点精准定位。该混合气体具备无毒、无腐蚀、无可燃性等特性，对管道材质、土壤生态及人体健康均无不良影响。

操作过程中，通过消防栓、排气阀等现有接口注入气体，结合 GIS 管网数据，依据“ $P_{\text{气瓶}} \times V_{\text{气瓶}} = P_{\text{管道}} \times V_{\text{管道}}$ ”公式（等温条件下，基于理想气体状态方程简化推导），根据管道长度、口径及压力精准计算气体用量；注入过程中同步在管道末端排气并实时监测气体浓度，确保气体均匀覆盖检测区域管道，大幅缩短停水时间（单次检测停水时间控制在 2-4 小时）。

## 3 地址条件与气体扩散特性分析

气体示踪技术以氢氮混合气（95% 氮气 +5% 氢气）为核心示踪介质，通过向管道注入气体并追踪地表逸出信号定位漏点，其检测效果直接依赖于气体在不同地质环境中的扩散行为。地质条件的土壤结构、含水率、地表覆盖等差异，会显著改变气体的扩散速度、路径及稳定性。针对沿海盐碱地、城区硬化路面（混凝土、沥青）、绿化地等三类典型场景，系统解析气体扩散特性，为现场检漏提供技术支撑。

### 3.1 示踪气体的固有属性

主流氢氮混合气具有分子量小、扩散系数高、无毒无味无腐蚀性的特点，这些属性决定了其“易逸散、易追踪”的核心优势，但也使其扩散行为极易受外部地质环境干扰。气体扩散的本质是沿介质孔隙迁移，地质介质的孔隙率、连通性、含水率直接决定了扩散阻力与迁移方向，这是分析不同场景扩散特性的核心逻辑<sup>[1]</sup>。

### 3.2 扩散特性分析

#### 3.2.1 沿海盐碱地

土壤结构以黏质土或粉质土为主，颗粒细且排列紧密，孔隙率仅 20%-30%，含盐量相对较高，易导致土壤板结，孔隙连通性差。土壤含水率高，部分区域形成盐渍不透水层，

直接阻断纵向通道。一定程度上受海水潮汐影响，地下水位周期性升降，会反复挤压、稀释气体，破坏浓度稳定性。

#### 3.2.2 城区硬化路面

城区硬化路面以沥青路面和混凝土路面为核心，二者均呈现“致密层阻隔 + 有限通道逸出”的扩散特征，其中沥青路面因应用广泛且裂缝特性突出，成为分析重点。

沥青路面孔隙率 3%-5%，混凝土路面 < 2%，硬化层厚度 5-15cm，透气性极差，形成纵向扩散“绝对屏障”。但存在路面裂缝、井盖周边缝隙、路缘石接口、施工接缝等天然“逸出通道”。硬化层下多为回填土，孔隙率相对较高，排水条件良好，为气体横向扩散提供基础空间。

扩散速度与路径：纵向扩散几乎为零，需 4-6 小时到达远处透气通道；气体沿裂缝、井盖缝隙垂直逸出，形成“点状高浓度区”，漏点正上方无通道时，可能横向迁移数十米至绿化带二次逸出。

浓度分布规律：地表浓度呈“非连续点状分布”，裂缝密集区浓度峰值高，无扩散通道区域信号完全缺失；硬化层下气体浓度沿扩散方向逐渐衰减，形成“漏点 + 通道距离”的浓度梯度。如无天然“逸出通道”，需要路面钻孔辅助检测，浓度分布会根据钻孔密度而改变<sup>[2]</sup>。

关键影响因素：路面裂缝和扩散通道密度是核心变量（裂缝和通道密度高 → 逸出点高 → 检测信号强）。因“热胀冷缩”特性，温度的变化对气体扩散存在一定影响，温度高会一定程度缩短气体到达通道的时间。同时，降雨天气会使路基含水率升高，雨水填充土壤孔隙导致扩散阻力增加，需避开降雨后 24 小时内检测。

补充特性：混凝土路面因孔隙率更低、整体性更强，裂缝出现概率低于沥青路面，扩散路径更集中于井盖和路缘石接口；其表面更光滑，气体逸出后不易滞留，需更快完成扫描检测，避免信号被风吹散。

#### 3.2.3 绿化地

绿化地是气体示踪技术的“理想应用场景”，土壤孔隙发达、无地表阻隔，气体扩散呈现“纵向快速扩散 + 气体浓度稳定”的特征。

绿化地以壤土和沙土壤土为主，相比较盐碱地和硬化路面孔隙率最高，含有植物根系，孔隙连通性极佳，扩散阻力小。含水量适中，灌溉后短期积水但排水性好，无明显积水阻隔。无硬化阻隔，植物根系形成天然“逸出通道”，气体可直接垂直上升至地面。如表 1（核心特性对比）

表 1（核心特性对比）

对比方向	沿海盐碱地	硬化路面	绿化地
核心制约因素	高含水量、盐碱硬化层阻隔	硬化层屏障、透气通道有限	无明显制约
扩散主导方向	横向扩散 + 通道逸出	横向扩散 + 通道逸出	纵向
扩散速度	极慢	慢	快
定位精度	大（取决于通道密度）	中（取决于通道密度）	≤0.5m
检测等待时间	长	中	短

## 4 试点成果分析

### 4.1 试点区域地质条件分析

结合乐清供水管网分布特性，梳理 GIS 系统的管网资料，选定了多个试点地区，重点针对四类典型地质条件开展研究，其中以雁荡所（环山富岙支线）、乐成所（新市区支线）、虹桥所（镇小路支线）、经开区所（翁垟小微园支线）最具代表性。

项目在四类典型地质区域开展试点应用，累计精准定位并修复漏点 12 处，其中包含 6 处传统检漏方法无法识别的微小漏点（漏量 < 0.1 吨/小时）。

经实际检测，山地绿化型地质因土壤孔隙率高、无地表硬化阻隔，示踪气体扩散速度最快（1.5m/h），定位精度最高（≤0.5m），是气体示踪检漏技术的最优应用场景；沿海盐碱型地质受高盐高湿环境的双重阻隔作用，气体扩散速度最慢，且信号稳定性最差，需针对性制定强化检测方案；城区硬化型地质受硬化层物理屏障影响，气体纵向扩散受阻，主要依赖路面裂缝、井盖缝隙、道路绿化带等透气通道逸出，检测时需优先排查此类潜在逸出口。

### 4.2 典型案例分析（经开区经八路）

该案例涉及经开区经八路支线（与表 3 中翁垟小微园支线为经开区不同供水管网支线，因地质类型相近被纳入同一类试点分析）。该区域为填海造陆形成，地质类型属沿海盐碱与硬化路面混合型，土壤高盐高湿且硬化层阻隔，

导致气体渗透阻力极大。同时区域沉降现象突出，道路多次修复导致管网实际埋深较初始设计逐步增加。案涉支线为 DN110PE 管，总长 1200 米，设计埋深 1.2 米，敷设于非机动车道下方；管道沿线工厂密集，24 小时连续生产造成复杂环境干扰，传统听声检漏法受环境噪声及地质条件双重影响，信号衰减显著，难以精准定位漏点。

项目团队通过前期流量监测发现该支线数据异常，经系统分析核实确认存在持续性漏失，测算月漏水量约 4500 吨。

在当地水管所配合下，技术团队结合 GIS 管网数据，完成阀门、三通及水表等关键节点排查，确认该支线具备气体示踪检测条件。技术团队依据管道长度、口径及运行压力参数，精准核算气体用量后，采用 10 升高压气罐（输出压力 4MPa），经减压阀调节至适配压力，从消防栓接口注入氢氮混合示踪气体；为缩短停水影响时长、提升检测效率，同步在管道末端设置排气口，注气半小时后，末端排气口成功监测到稳定的示踪气体信号<sup>[3]</sup>。

技术团队随即采用高精度氢气传感器开展全线路扫描检测，成功定位 3 处漏点；经现场开挖验证，漏点类型包括 2 处微小针孔漏点及 1 处水包管型大漏点。完成漏点修复后，漏失率稳定降至 5%，漏损控制效果达到预期。

## 4 技术验证成果

如表 2。

表 2（成果量化统计）

成果类型	指标	成果数据
技术成果	技术文件输出	形成《供水管网气体示踪检漏技术分析报告》1 份，《供水管网气体示踪检漏技术操作手册》1 份
检测性能	漏点定位准确率	100%（12 处漏点均精准定位并验证）
检测效率	相对传统听漏法提升幅度	攻坚克难和环境复杂地区提升 60% 以上（时间、人力、物力累计投入）
微小漏点检出能力	最小可检出漏量	0.1 吨/小时（传统方法最小检出限为 1 吨/小时）
人才培养	专业化技术团队规模	12 人，涵盖施工管理、实操检测、数据分析 3 个方向
行业价值	适用管材类型	PE 管、钢管、球墨铸铁管等主流供水管材
行业价值	适用场景覆盖范围	绿化地、硬化路面、沿海盐碱地等复杂地质环境

## 5 结语

针对传统检漏技术在复杂管网环境中定位精度有限、疑难漏点检出能力不足的行业痛点，本项目重在研究匹配乐清本地的气体示踪检漏技术。该技术以安全环保的氢氮混合气体为示踪介质，依托氢气小分子扩散特性与高精度传感检测技术，突破了传统方法对声音信号的依赖，实现了漏点的精准识别与定位。技术研发过程中，系统解析了沿海盐碱地、城区硬化路面、绿化地等典型地质环境的气体扩散机理，形成了与不同土壤结构、地表覆盖条件相适配的差异化检测方案，彰显了技术在复杂场景下的机理适配性与环境兼容性。通过融合 GIS 管网数据与气体用量精准核算模型，优化了操作流程，在保障检测效果的同时，最大程度降低了对供水服务的影响，体现了技术的实用性与精细化设计思路。

试点应用验证表明，该技术可有效破解微小渗漏、水包管等传统方法难以攻克检测难题，兼容各类主流供水管材，形成了标准化操作规范与专业化技术团队，为管网漏损治理提供了科学、高效的技术支撑。作为供水管网精细化运维的核心技术革新，该技术不仅显著提升了漏损控制的精准度与效率，更构建了可复制、可推广的技术范式，推动供水漏控向更具科学性、系统性的治理模式转型。

### 参考文献

- [1] 毛嘉荣.试论自来水管网的检漏技术[J].科技创新与应用, 2017(22):40+42.
- [2] 祝晓明.检漏技术在自来水管网中的应用[J].科技经济市场, 2016(08):10-11.
- [3] 叶立军.关于自来水管网的检漏技术的分析[J].科技创新与应用, 2015(20):185.

# Research on Quality and Safety Risk Identification and Whole Process Control Path of Housing Construction Project

Kai Xiang Maodong Wang

Qingdao Haiyuan Construction Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266100, China

## Abstract

During the construction of building engineering projects, various quality and safety risks are encountered. These risks not only affect the smooth progress of the project but may also lead to resource waste, construction accidents, and other issues. Therefore, the identification and control of quality and safety risks in building engineering are particularly important. This paper analyzes the definition and characteristics of quality and safety risks in building projects, discusses the types of risks at different stages, including design, construction, and acceptance/operation, and proposes corresponding risk identification methods. The research shows that through systematic risk identification and the implementation of a comprehensive control path throughout the project, the quality and safety level of building engineering projects can be significantly improved, ensuring the smooth execution of the project.

## Keywords

Quality and safety risks; Comprehensive control; Design phase; Construction phase; BIM technology

## 房屋建筑工程质量安全风险识别与全过程控制路径研究

相凯 王茂东

青岛海元建设集团有限公司, 中国 · 山东 青岛 266100

## 摘要

房屋建筑工程在建设过程中面临着多种质量安全风险, 这些风险不仅影响工程的顺利推进, 还可能导致资源浪费、施工事故等问题。因此, 房屋建筑工程质量安全风险的识别与控制显得尤为重要。本文通过分析房屋建筑工程质量安全风险的定义与特征, 探讨了设计、施工及验收运营等不同阶段的风险类型, 并提出了相应的风险识别方法, 研究表明, 通过系统化的风险识别和全过程控制路径的实施, 可以显著提高房屋建筑工程的质量与安全水平, 保障工程的顺利进行。

## 关键词

质量安全风险; 全过程控制; 设计阶段; 施工阶段; BIM技术

## 1 引言

随着现代建筑工程规模的不断扩大与复杂度的提升, 质量安全管理已成为影响房屋建筑工程顺利实施的关键因素之一。工程建设过程中, 质量安全风险普遍存在, 并且这些风险往往具有多样性和复杂性, 涵盖了设计、施工、验收及运营等各个阶段。因此, 如何在不同阶段准确识别风险, 并采取有效的控制路径, 已成为当前建筑行业亟待解决的问题。本文将结合房屋建筑工程的实际情况, 系统分析质量安全风险的类型与识别方法, 探索如何通过全过程管理控制风险, 提出切实可行的解决方案。同时, 随着 BIM 技术、智慧工地等新技术的兴起, 其在风险管理中的应用也为质量安全控制提供了新的思路和方法。通过对质量安全风险的精准识别与全程控制, 能够有效提升房屋建筑工程的施工效率与

质量, 减少事故发生, 确保工程项目的顺利交付与使用。

## 2 房屋建筑工程质量安全风险识别的重要性

### 2.1 质量安全风险的定义与特征

质量安全风险是指在房屋建筑工程的各个环节中, 可能影响工程质量和施工安全的各种不确定因素。这些风险可能来自设计、施工、材料、人员、设备等方面, 具有潜在的危害性。其特征主要表现在复杂性、隐蔽性和动态性, 具体表现为无法在项目初期完全预见所有潜在危险。此外, 质量安全风险通常是多种因素交织的结果, 往往涉及到多个环节和多个因素的共同作用。因此, 对这些风险的识别和分析显得尤为复杂。质量安全风险的发生往往伴随着直接或间接的经济损失、人员伤亡或设备损坏, 对工程的顺利进行造成严重影响。随着项目规模和工期的延长, 风险的影响力和复杂性也随之增加, 带来的后果也愈加显著。

### 2.2 质量安全风险对工程的影响

质量安全风险对房屋建筑工程的影响是多方面的。首

【作者简介】相凯(1989—), 男, 中国山东临沂人, 本科, 工程师, 从事房屋建筑工程研究。

先,风险可能直接影响到工程的施工进度,造成工期延误,从而增加项目的整体成本。其次,某些重大安全事故或质量问题可能导致工程无法通过验收,造成资金和人力的巨大浪费。施工过程中,安全事故不仅损害了工程人员的身体健康,也可能造成不良的社会舆论和法律责任。此外,质量安全问题还可能对建筑的后期使用造成隐患,例如结构安全性不足、环保不达标等,影响建筑的使用寿命和业主的正常使用需求。质量安全风险的发生不仅影响了项目的直接收益,还可能带来项目的声誉损失,进而对企业的未来承接项目产生不利影响<sup>[1]</sup>。

### 3 房屋建筑工程质量安全风险的主要类型

#### 3.1 设计阶段风险分析

设计阶段的风险主要来自设计方案本身的缺陷、设计人员的错误或设计变更的频繁。在设计阶段,如果未能充分考虑工程的实际情况,可能会导致设计不合理或缺乏可实施性,进而影响工程的施工质量和安全性。此外,设计人员的失误、对材料性能的误判、设计标准的不符等也容易引发质量问题。随着建筑设计理念的不断发展,工程的复杂性和多样性要求设计人员具备更高的专业素养和创新能力。设计阶段的风险还可能因设计变更频繁、与其他部门的沟通不畅等问题而加剧,这些问题在施工阶段可能导致不必要的重复工作或工程进度延误。因此,设计阶段的质量控制至关重要,任何细微的风险都可能在后续阶段放大,导致更严重的后果。

#### 3.2 施工阶段风险分析

施工阶段的风险主要表现在施工技术不当、施工材料不合格、施工人员操作不规范等方面。施工现场环境复杂,受气候、工人技能、设备运行等多重因素的影响,任何一个环节的疏忽都可能导致质量安全事故的发生。例如,工人未按照施工规范进行操作,或由于设备故障、施工计划不合理等原因,可能会导致安全事故或质量缺陷的产生。施工阶段的风险还可能涉及到工程的进度管理,工期延误和资源浪费往往是由于施工管理不当、人员调度不合理等因素引起的。此外,外部环境的变化,如天气、地质条件等,也会对施工过程产生影响。因此,施工阶段的风险需要得到充分识别和有效管控,以确保工程顺利进行<sup>[2]</sup>。

### 4 房屋建筑工程质量安全风险的识别方法

#### 4.1 定性分析方法

定性分析方法主要依靠专家经验和知识,通过对可能存在的风险进行描述和分类,从而为后续的风险控制提供依据。这种方法不依赖于具体的数据分析,更多地依赖于对工程项目各环节潜在风险的直观识别。通过召开专家研讨会或小组讨论,工程管理者可以识别出设计、施工、验收及运营过程中可能存在的质量安全风险。技术上,常见的定性分析工具包括故障树分析(FTA)和鱼骨图分析法(Ishikawa

Diagram)。故障树分析法可以帮助识别工程中可能引发重大质量问题的关键因素,利用“或”、“与”等逻辑关系建立风险树形结构图,逐层深入分析。鱼骨图则通过将问题与多种可能的原因进行归类,帮助识别根本原因及其潜在影响。这些方法在数据不可获得或数据不完整的情况下尤为重要,能够为实际操作提供合理的指导和预警。在实际应用中,定性分析通常与其他方法结合使用,以增强风险识别的全面性与准确性。

#### 4.2 定量分析方法

定量分析方法通过对工程数据进行统计分析,基于大量历史数据或实时数据,量化地评估风险的发生概率和后果大小。这种方法能够为决策者提供精确的数值支持,帮助他们了解各类风险对工程的潜在影响。例如,蒙特卡罗模拟(Monte Carlo Simulation)是一种通过生成大量随机样本来模拟工程项目中的不确定性,进而估算不同风险发生概率的技术。在建筑工程中,蒙特卡罗模拟可用于估算施工周期延误、成本超支等风险的概率分布,并根据模拟结果制定合理的应对措施。此外,敏感性分析(Sensitivity Analysis)也常用于定量分析中,通过分析不同参数变动对项目结果的影响,帮助识别关键的风险因素。数据技术如大数据分析与机器学习技术的应用,也能通过海量数据分析识别潜在的质量安全风险。这些技术能够帮助项目管理者更科学地识别和预测风险,从而减少人为误差,提高风险管理的准确性和可靠性。

### 5 房屋建筑工程质量安全风险的全过程控制路径

#### 5.1 设计阶段的质量安全控制路径

在设计阶段,质量安全控制路径的核心是确保设计方案的合理性和可实施性,以避免因设计错误或不合理设计而导致的安全隐患。技术上,采用建筑信息模型(BIM)技术能够提高设计的精准度,减少设计阶段的潜在错误。BIM技术通过三维建模,整合了建筑设计、结构设计、机电设计等多个方面,帮助设计人员在方案初期就发现可能的冲突和问题。在实际应用中,BIM可以模拟建筑物的实际施工过程,预测潜在的质量问题,从而提前进行调整。此外,设计阶段还应注重加强与施工单位的沟通,确保设计与施工方案的可操作性和一致性。通过设计阶段的质量审查和审核流程,可以提前发现设计缺陷并进行修正。风险管理人员可通过定期组织设计评审会、方案优化等方式,对设计方案进行风险分析和管控。数据采集和分析工具,如有限元分析(FEA)和计算流体力学(CFD)等,也能对设计方案的结构稳定性和抗震能力进行精确计算,确保设计质量和安全<sup>[3]</sup>。

#### 5.2 施工阶段的质量安全控制路径

施工阶段的质量安全控制路径主要集中在工程执行过程中,确保施工活动的质量和安全符合设计要求。在此阶段,

采用质量管理体系（QMS）如 ISO 9001 质量管理体系能够系统化地规范施工过程，确保各项施工活动按标准执行。技术层面，施工现场应配备全面的安全监控设备，使用智能化的现场管理系统对施工过程进行实时监控。具体技术包括自动化监测设备、现场信息管理系统（如项目管理软件）以及无人机监测等，这些工具能帮助施工管理人员实时掌握施工进度、材料使用情况以及人员安全状况，从而及时调整施工计划。此外，施工质量安全的控制还应依赖于科学的工艺流程和严格的材料检测标准。通过对原材料的质量检验与试验检测，确保所用材料符合国家标准和设计要求。施工过程中，实行严格的施工工艺标准和操作规程，依靠技术交底和定期培训确保工人操作规范化。安全技术措施的实施，包括防护设施、现场安全管理等，确保施工过程中不发生安全事故，降低质量隐患。

### 5.3 验收与运营阶段的质量安全控制路径

在验收与运营阶段，质量安全控制的重点是确保建筑物符合所有相关的质量标准和使用要求。在验收阶段，实施详细的质量检查与检测，包括结构、材料、设施等各方面的全面检测，确保建筑物符合设计要求和规范标准。技术层面，自动化检测设备和传感器技术的应用，可以实时监控建筑物的质量状况。例如，通过安装温湿度传感器、结构健康监测系统（SHM），可以对建筑的结构进行长期监测，发现潜在的质量问题并及时处理。在运营阶段，建筑物的质量安全依赖于持续的维护和监控。运营管理人员需要定期进行设备检修、设施维护和隐患排查，确保建筑物的安全性和使用功能。数字化技术，如智能建筑管理系统（BMS），能够集成建筑的电力、暖通空调（HVAC）等系统，实现对建筑各项设施的远程监控与管理，从而在出现问题时迅速响应，防止小问题扩大化。此外，建筑物的运营风险还涉及到环境变化、用户行为等因素，因此应建立常态化的风险评估机制，根据运营数据进行动态调整和优化。

### 5.4 技术与管理手段在全过程控制中的应用

在房屋建筑工程的全过程控制中，技术手段和管理措施的结合起到了至关重要的作用。BIM 技术在全过程控制中的应用，不仅仅限于设计阶段，还能贯穿到施工、验收和运营各个环节。通过 BIM，项目团队可以共享实时数据和

信息，使得设计、施工和运营各阶段的管理更加高效和精准。施工阶段，智能化的施工设备与安全管理系统能够提供实时监控和预警，确保施工过程中的质量与安全得到有效控制<sup>[4]</sup>。同时，大数据分析技术在风险识别和决策支持中发挥了重要作用。通过对施工现场、工程进度、材料使用等数据的实时采集和分析，可以及时发现潜在问题，并为管理层提供科学决策依据。在运营阶段，基于物联网（IoT）技术的智能监控系统可以帮助管理者实时掌握建筑物的运营状况，包括安全监测、能效管理和设备维护等。这些技术手段能够提升管理效率和质量安全控制的精度，确保项目从设计到运营全过程的质量与安全。同时，项目管理者应加强风险管理意识，运用风险评估和控制模型，如风险矩阵和多目标优化模型，综合考虑项目各类风险，制定切实可行的风险防控措施。

## 6 结语

通过对房屋建筑工程质量安全风险的识别与全过程控制路径的深入研究，可以看出，全面的风险管理体系是确保工程顺利实施的关键。设计、施工、验收与运营各阶段的质量安全风险控制，必须依赖于先进的技术手段和科学的管理方法。从 BIM 技术在设计阶段的应用，到施工过程中的智能化管理，再到运营阶段的持续监控和维护，技术手段的引入为项目的质量安全提供了坚实的保障。同时，科学的风险评估方法和精准的控制路径，帮助项目管理者及时识别潜在的风险并采取有效措施，避免了事故的发生和资源的浪费。随着建筑行业的不断发展，风险管理将更加依赖于数据驱动和智能化决策，未来的房屋建筑工程将在更加安全、高效的环境下推进。通过不断优化风险管理体系，可以实现建筑项目质量和安全的最大化保障。

### 参考文献

- [1] 吉宗祥.智慧工地视域下房屋建筑工程质量安全路径[J].住宅与房地产,2025,(35):68-70.
- [2] 杜智斌.房屋建筑工程施工中的质量安全分析[J].散装水泥,2025,(04):148-150.
- [3] 张广东.BIM技术在房屋建筑工程质量安全中的应用[J].绿色建筑与智能建筑,2025,(06):94-97.
- [4] 邓发权.房屋建筑工程质量安全监督管理关键措施研究[J].中国建筑装饰装修,2025,(10):141-143.

# Based on the management and innovation of construction engineering technology in the new era

Lixing Fu

Xining Huangshui Development and Construction Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810000, China

## Abstract

With the deepening of digital transformation in the construction industry, the development of technology management and innovation will present a new trend. Along with this, the comprehensive upgrade of construction project management and the deep innovation of construction technology will be deeply integrated with the refined requirements of engineering quality management. This will enhance the synergy and systematicity between construction engineering technology and project management. In order to make the engineering management process more efficient, the connotation, characteristics, and evolution laws of construction engineering technology management under the background of the new era were first analyzed. Then, the core elements of construction engineering technology management and the key path of innovative development were introduced. Finally, the practical exploration and management innovation strategies and methods for optimizing the technical management system in the construction industry were introduced.

## Keywords

construction engineering; technical management; Innovation-driven development; digital transformation

# 基于新时期建筑工程技术管理与创新

付立行

西宁湟水开发建设有限公司, 中国·青海 西宁 810000

## 摘要

随着建筑行业数字化转型的深入推进, 技术管理与创新发展将呈现崭新气象, 随之而来的是建筑工程项目管理的全面升级和建筑施工技术的深度革新将与工程质量管理精细化要求深度融合。这将会使建筑工程技术和项目管理具有更强的协同性和系统性。从而使工程管理过程更加高效, 首先剖析了新时期背景下建筑工程技术管理的内涵、特征及其演变规律。然后介绍了建筑工程技术管理的核心要素和创新发展的关键路径。最后介绍了建筑行业技术管理体系优化的实践探索和管理创新的策略与方法。

## 关键词

建筑工程; 技术管理; 创新发展; 数字化转型

## 1 引言

随着建筑工业化、信息化水平的不断提升, 建筑行业即将步入高质量发展新阶段, 做好建筑工程技术管理的优化与创新工作至关重要。建筑工程技术管理的完善, 应以提升工程质量与效率为目标, 所有的管理活动都应围绕技术创新与应用展开, 注重质量控制与安全保障。在数字化转型背景下建筑工程管理面临诸多挑战, 与传统管理模式相比存在明显差异, 其复杂程度显著提高, 对技术管理人员提出了更高要求。建筑企业应该加强技术管理体系建设, 分析技术标准规范、施工工艺流程和项目管理方法对工程质量的影响, 技术管理的优化路径, 充分把握技术发展趋势和管理创新要点

及其实施策略, 工程管理的科学化水平。然后, 在技术标准制定、工艺流程优化和管理机制完善等方面采取有效措施, 对技术管理从多角度进行系统分析, 确定关键环节, 管理效率和工程质量均达到预期目标, 从而构建以技术创新为驱动, 以质量控制为核心, 以安全管理为保障、符合新时代要求的建筑工程技术管理体系。

## 2 建筑工程技术管理概述

### 2.1 建筑工程技术管理的概念与内涵

建筑工程项目的技术管理是确保工程建设全过程有序进行的重要保障, 或实现工程质量目标的关键支撑。在项目实施的不同阶段, 技术管理涉及设计优化、施工组织、质量控制、安全监管等多个维度, 建立科学、规范的技术管理体系, 有效保障工程项目的顺利实施。因此, 技术管理工作的核心, 在于技术标准的严格执行与技术方案的优化创新,

【作者简介】付立行(1989—), 男, 中国吉林白山人, 本科, 从事建筑工程技术研究。

亦即：①以标准化流程作为管理的基础框架；②把技术管理的重点从传统经验型向数据驱动型和智能化管理转变，在技术管理实践中；③以技术指标的量化评估和过程监控作为技术管理体系运行效果的评判依据。在管理实践中，还需要建立技术风险预警机制，并将其纳入项目管理的全过程，尤其是新技术应用以及复杂施工环节中，需要全面评估技术可行性、经济合理性和环境影响带来的综合效益，以此构建科学决策和技术保障机制，保证项目顺利推进，同时能够提升其技术创新能力。

## 2.2 建筑工程技术管理的发展历程

随着建筑行业的快速发展和科技进步，建筑工程技术管理的内涵和外延已发生深刻变化，技术管理方法必须与时俱进、不断创新。首先，在传统建筑项目中，技术管理是相对独立的，根据项目规模确定技术管理的组织架构；但当项目复杂度提升之后，要先进行技术可行性分析，再制定技术实施方案。这不仅是项目成功的保障，更是质量和安全的基础。可见，建筑工程技术管理的水平应紧跟行业发展步伐，结合国际先进经验并本土化应用。其次，按照现代建筑工程技术管理的规范要求和技术标准，建筑工程技术管理的体系和方法，现在有数字化技术在建筑项目管理中的广泛应用案例。最后，对技术管理工作的持续改进：①建立技术标准动态更新机制来适应和引领行业发展；②加强技术人才培养，尽量减少技术断层和知识流失的风险；③加强技术档案管理；④加强技术交流与协作平台建设，增大技术创新在项目管理中的比重。

## 3 新时期建筑工程技术管理的特点与挑战

### 3.1 新时期建筑工程技术管理的特征

随着建筑行业数字化转型的深入推进，建筑工程项目将更加注重技术创新，将成为行业的核心竞争力和具有战略意义的关键要素。作为一个系统性工程管理活动，其核心是在满足工程质量要求和安全标准的前提下，使技术管理更加科学化、精细化，为项目全过程提供技术支撑。因此，技术管理创新实践，例如 BIM 技术应用、装配式建筑、智能建造和绿色施工，以及新材料和新工艺的应用或优化等，基本上由技术管理团队主导，以项目实际需求为前提，整合各方技术资源的协同配合，技术标准的执行、工艺流程的优化以项目目标的实现为最终导向。从管理实践分析，对于复杂技术问题需要建立科学的决策机制，如运用专家咨询及技术论证方法，能够通过数据分析对施工方案、质量控制等进行评估，这样才能对技术方案进行优化调整，从而提高工程质量。作为技术管理人员更要合理地运用现代管理工具，以及先进的技术手段，保证技术方案和管理措施能够有效实施，促进建筑产业升级，也能提升项目综合效益。

### 3.2 建筑工程技术管理的挑战

随着建筑行业的快速发展，建筑工程技术管理面临诸

多挑战。技术管理创新或技术体系重构，是指建筑行业技术管理的系统性变革，例如 BIM 技术应用、装配式建筑、智能建造等。但是，由于技术更新速度快，技术管理面临的主要挑战有：①对技术标准的适应，即对新标准规范的快速理解与应用；②对技术变革的应对，即新技术应用对传统管理模式冲击；③对技术人才的需求，④对技术风险的管控：对技术安全的保障，即对质量和安全的双重把控。而且，在数字化转型过程中，将传统技术管理与现代信息技术以合理方式与有效途径融合<sup>[1]</sup>。因此，在考虑其对管理各方面影响的基础上，做好这些技术变革在实际项目中的应用落地。随着建筑工业化的发展，促使装配式建筑得以普及，施工技术也在向智能化、绿色化方向推进，企业的技术管理应该构建全方位技术支撑体系，其中应该包括技术标准库、专家资源库等，同时要合理配置技术资源、优化管理流程等要素，对技术管理的效果进行评估及改进，以保证管理更加高效。

## 4 建筑工程技术管理创新策略

### 4.1 技术管理创新的必要性

随着建筑行业竞争的加剧，在项目实施过程中，将面临更加复杂的技术管理需求，最终在质量和成本的双重压力下寻求突破，而质量和安全的技术保障则仍需依靠科学的管理方法。这种管理需求决定了技术管理将作为一个系统的、综合的管理活动，质量控制和安全管理的核心，向工程项目提供专业、高效和可靠的技术支持，并实现管理目标，以提升其市场竞争力和可持续发展能力。同时，应关注技术发展趋势和管理创新实践，技术管理的方法可以多样化，但管理的核心价值不变。技术管理创新应立足实际，在对设计图纸、施工方案、材料选用、工艺流程及质量验收、安全管理、成本控制和进度管理等环节的全面把控，实现技术管理的系统化和标准化。另外，还要关注技术管理对项目整体及其相关方的综合影响，加强技术评估和风险防控等方面的管理措施。

### 4.2 建筑工程技术管理面临的主要问题

1) 技术标准执行不到位。随着行业的发展，技术规范将向更加严格，由于技术标准体系复杂，执行的难度也会增加，监管的力度，则违规行为也会增加的几率。另外，还包括技术培训和人员素质的提升的持续投入这是技术管理的基础，它受到企业重视程度和资源投入的影响，2) 技术管理机制不健全。随着项目规模的扩大，技术管理由分散向集中转变，技术管理的规范性往往难以保证，这对项目管理来说都是隐患，给工程质量带来风险<sup>[2]</sup>。3) 技术与管理脱节现象明显。包括技术方案可行性评估不足的技术管理问题等。在管理过程中，技术人员从技术角度出发，会忽视管理要求，导致技术方案脱离实际，管理也难以落地；并且，随着项目复杂度提高，技术可以更加精细化，技术管理的复杂度也将随之增加，甚至可能超出管理能力的范围，这些都增加了技术管理

的难度,原来的管理方法可能不再适用。除了加强培训来提升管理能力外,也可以采用信息化手段,以便实现技术管理的精细化和智能化。4) 技术风险识别不足。例如:由于技术方案不合理导致施工质量隐患是常见的。5) 技术人才梯队建设不完善。工作中有些环节存在技术断层的风险,而技术人才的培养往往是长期的过程,这样就会对技术管理体系的稳定运行带来影响<sup>[1]</sup>。6) 技术管理投入不足。众所周知,技术管理的投入会给企业带来长期效益,而这往往是短期难以量化的。

企业要重视技术管理创新,使技术管理的效率和效果,相对于传统的管理方式来说更具优势。如何构建科学的技术管理体系,是建筑企业面临的重要课题。

### 4.3 建筑工程技术管理创新的路径

1) 对技术标准和管理规范来说,需要建立完善的制度体系、专业的管理团队及科学的评估方法和工具。2) 对施工过程管理来说,技术管理必然使施工过程更加规范化并提升管理效能:一旦出现问题,容易造成质量安全隐患,因此需要建立预警机制、应急预案或专业团队的技术支持来保障施工过程的安全性和可控性。3) 技术管理创新应从理论和实践两个层面进行分析,评估技术创新和管理创新的可行性。一方面,针对具体工程项目,提出针对性的技术管理方案,例如以 BIM 技术应用为背景,提出数字化技术管理的实施路径,在考虑技术可行的同时,综合考虑经济效益和社会效益的平衡。另一方面,在原有的管理经验基础上引入创新思维,例如装配式建筑技术管理,就是在传统施工管理基础上融合现代制造理念的技术管理创新。4) 技术管理评价体系构建。由于技术管理工作的系统性、复杂性,因此在创新过程中还要关注评价机制的建立。一个有效的评价体系应能全面反映技术管理效果和项目绩效,并能识别管理优势和不足,以指导技术管理的持续改进。

### 4.4 建筑工程技术管理创新的具体措施

1) 技术标准体系完善。随着行业规范和企业需求的不断提升,使得技术管理方面需要更加系统化的标准体系,例如技术标准手册等,它们体现的是行业的最新要求,现在项目管理的精细化要求越来越高。技术标准的执行力度,标准的完善程度,要求越来越严格。技术标准体系的完善和管理流程的优化。其中:技术标准为实现项目目标而制定的规范和要求;管理流程为因标准执行而形成的管理程序和方法。2) 技术人才培养机制。技术管理创新是行业发展的关键,是企业竞争力的重中之重。目前,建筑企业在技术人才培养方面

都有所投入,但系统性不足。为了提升技术管理水平,需要采取以下措施:确定技术人才的层级及职业发展路径和培养方式;根据人才特点制定个性化培养方案;对技术人才进行持续跟踪评估和反馈;企业应在项目实践中对人才进行锻炼,人才培养的效果应得到实际验证。3) 技术风险防控体系。由于技术问题通常具有连锁反应,因此,当技术风险出现时,将影响项目的进度、质量和成本,风险的识别和应对。这就要求企业的技术管理部门进行专业的风险评估。

4) 技术管理与创新平台建设。例如,在项目管理中,技术方案的确定会影响整体效果,因此技术管理平台建设时还必须考虑对技术创新的支持。另外,可以在现有管理平台基础上引入大数据和人工智能,例如某企业引入了智能算法对施工技术难点进行了分析,并得到了更加科学合理的技术解决方案。为了能够让技术管理创新有实效的成果,可以开展技术攻关、创新竞赛等,使得技术能力能够达到行业领先、管理高效等目的,这样能够提升其核心竞争力。对于技术管理平台还需要专业的运维团队,尤其要在数据安全上加强防护措施。对于创新机制,需要纳入激励机制、如绩效考核等都整合到管理体系内,从而实现技术管理的良性循环,在数字化环境下,能够促进建筑行业技术管理持续发展。

## 5 结语

建筑工程技术和管理创新是行业发展的必然趋势,因此需要对技术管理体系的构建、运行及持续优化等方面深入研究,以适应新时代的发展要求。建筑工程技术管理的创新发展将推动行业进步,技术管理的实践也需要理论的指导。由技术标准、管理流程、人才培养、风险控制和创新机制等都将不断完善,而且需要系统的管理思维。在数字化转型下,建筑工程技术管理已经取得显著成效,它更趋向于智能化的管理模式,在政策引导下,技术管理能够实现精细化运作,更能促进产业升级,同时能够提升质量、安全的保障水平,在未来发展中需要关注标准化、智能化、绿色化等方面的管理创新,利用现代管理理念与技术手段,保证建筑工程高质量发展。

### 参考文献

- [1] 张国栋,沈亚琳,王林堂,等.城市更新背景下历史建筑消防工程管理工作调查与研究[J].今日消防,2024,9(10):17-20.
- [2] 戴世东.新时期建筑市场开发与经营工作对策研究[J].经济技术协作信息,2024(10):0037-0039.
- [3] 冯霞.新时期建筑工程管理方法的智能化运用分析[J].住宅与房地产,2024(23):24-26.

# Discussion on Protection Measures of Long-distance Oil and Gas Pipeline Construction Period under Complex Geological Conditions

Lei Zhang Jing Tang Zhen Wang Haitao Wang Yibo Xiao

China National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Central China Branch, Wuhan, Hubei, 430000, China

## Abstract

Long-distance oil and gas pipeline projects frequently traverse complex geological zones including landslides, karst formations, and permafrost. During construction, geological hazards may trigger pipeline deformation or fractures, posing direct risks to both engineering quality and operational stability. This study identifies multiple critical risks under complex geological conditions, such as mechanical damage from geological disasters, structural failure due to uneven foundation settlement, and human-induced damage from improper construction techniques. Targeted protective measures are proposed through geological pre-treatment, optimized construction methods, and early warning monitoring systems. Case validation demonstrates that after implementing these measures, the slope displacement during the initial construction phase showed a slight increase but stabilized later, with a maximum cumulative displacement of 18.5mm. This provides valuable technical references for similar projects.

## Keywords

complex geology; long-distance oil and gas pipeline; construction period; protective measures; monitoring and early warning

# 复杂地质条件下长输油气管道施工期保护措施探讨

张雷 唐静 王振 王海涛 肖易博

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司, 中国·湖北武汉 430000

## 摘要

长输油气管道工程常穿过滑坡、岩溶、冻土等复杂地质区域, 施工期地质灾害容易引发管道变形、破裂之类的安全隐患, 直接危及工程建设质量与后期运营稳定性。本文结合复杂地质条件类型及特点, 施工期管道面临多种主要风险, 像地质灾害引发机械性损伤、地基不均匀沉降致使结构失效、施工工艺不当造成人为破坏等, 需进行分析, 从地质预处理、施工工艺优化、监测预警体系构建这些方面给出针对性的保护措施。凭借工程实例验证措施有效性, 该案例工程实施上述保护措施后, 施工前期边坡位移小幅上升, 后期变得稳定, 最大累计偏移数值18.5mm, 给同类工程供应技术参照。

## 关键词

复杂地质; 长输油气管道; 施工期; 保护措施; 监测预警

## 1 引言

长输油气管道是能源输送核心设施, 其建设范围包含山地、丘陵、沼泽等多种复杂地貌类型, 地质条件的不确定, 让施工期管道保护难度大增<sup>[1]</sup>。部分管道施工事故和地质灾害有直接关联, 因滑坡、泥石流而产生的管道移位, 占比较大, 传统施工保护措施面临针对性不足、监测滞后这类问题, 难以跟上复杂地质环境的动态变化<sup>[2]</sup>。研究复杂地质条件下管道施工期的保护措施, 对提高工程抗风险能力、保证能源安全输送意义重大。

## 2 复杂地质条件的类型及对管道施工的影响

### 2.1 复杂地质条件的主要类型

长输油气管道穿越的复杂地质类型可分成构造破碎带地质、岩溶发育地质、冻土地质、滑坡与泥石流易发地质 4 大类, 各类地质的分布特征及工程特性如表 1 所示。

### 2.2 复杂地质对管道施工的影响机制

复杂地质条件对管道施工的影响, 关键在地基稳定性、管道结构完整性、施工工艺适配性等三个层面。以岩溶地质为例, 管道地基承载力不均因溶洞随机分布, 倘若未预处理便径直铺设管道, 运行时荷载作用容易造成管道局部应力集中, 接着出现裂痕; 冻土地质的冻融循环会让土体出现冻胀与融沉变形, 直接让管道产生轴向位移, 损害管道接口密封性。复杂地质区域一般交通不畅, 大型施工设备进场遇难题, 传统开挖技术效率欠佳, 进一步延长了施工期管道暴露的风险时长。

【作者简介】张雷(1981—), 男, 中国辽宁丹东人, 本科, 助理工程师, 从事理地长输油气管道保护研究。

表 1 长输油气管道穿越的复杂地质类型及工程特性

地质类型	分布区域	核心工程特性	施工风险点
构造破碎带地质	板块交界带、山区褶皱带	岩体破碎、节理发育，力学稳定性差	基坑坍塌、边坡失稳，管道基础不均匀沉降
岩溶发育地质	碳酸盐岩分布区	溶洞、溶蚀裂隙发育，地下水位波动大	地基空洞塌陷，管道悬空变形
冻土地质	高纬度、高海拔地区	冻融循环作用显著，土体强度随温度变化剧烈	冻土融化导致地基沉降，管道拉伸断裂
滑坡泥石流地质	山区、丘陵区冲沟地带	土体含水量高、坡度陡峭，易受降雨诱发	滑坡体推移管道移位，泥石流冲毁施工设施

### 3 施工期管道面临的主要风险

#### 3.1 地质灾害引发的机械性损伤

滑坡、泥石流等突发地质灾害是施工期管道的主要威胁。因滑坡体作用，管道承受持续的侧向推力，当推力超出管道屈服强度，管道将产生塑性变形甚至发生断裂；泥石流裹挟石块、土体对管道及施工支架进行冲击，引发管道外壁有划痕、防腐层发生破损，埋下后期腐蚀的隐患<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 地基不均匀沉降导致的结构失效

复杂地质区域地基土，物理力学性质差别大，施工阶段基坑开挖、降水等作业会进一步干扰土体平衡，造成地基沉降不均匀。沉降差一旦超过管道允许变形量，管道接口焊缝会出现疲劳裂纹，严重状况下焊缝发生开裂，造成油气泄漏现象。岩溶地质区的空洞塌陷会让管道直接悬空，外部荷载与自身重量作用下的悬空段管道，极易产生屈曲失稳现象。

#### 3.3 施工工艺不当造成的人为破坏

面对复杂的地质状况，若施工工艺选取不合理，会加大管道受损风险。在冻土区域应用传统开挖工艺，会损害冻土的热平衡，让冻土加速融化<sup>[4]</sup>；在构造破碎带进行爆破施工的时候，爆破冲击波给管道带来振动荷载，影响到管道焊缝质量。施工机械操作出错会导致管道碰撞、挤压，施工事故里这类人为破坏占比较大。

### 4 复杂地质条件下管道施工期保护措施

#### 4.1 地质预处理措施

在管道施工前，要针对复杂地质区域做专门预处理，排除或降低地质隐患。针对浅层滑坡，采用抗滑桩和截排水系统一起加固方案<sup>[5]</sup>。抗滑桩扎进稳定岩层，间距设定为 5 - 8m，用钢筋混凝土浇筑桩体；截排水系统由截水沟与盲沟构成，滑坡体后缘设有截水沟，盲沟被埋进滑坡体里，切实减少土体含水量，增强边坡稳固性。针对深层滑坡，可采用预应力锚索来加固，锚索锚固段长度最少 8m，滑坡推力决

定预应力值的大小。采用注浆充填加换填垫层的手段处理溶洞。直径不足 3m 的小型溶洞，采用水泥砂浆进行注浆充填，把注浆压力控制在 0.5 - 1.0MPa；针对直径 ≥3m 的大型溶洞，先填充碎石，再次灌注混凝土，筑牢稳定根基。于管道下方安置级配砂石垫层，厚度最少 0.5m，使地基承载力均匀性提高。冻土地区施工时，采取保温棚加隔热层的组合办法。保温棚搭建用钢结构骨架和阻燃保温布，棚子里安了温控系统，让温度维持在 0℃以下；管道下方敷设聚氨酯隔热层，厚度最少 10cm，减少外界热量进到冻土层。施工尽量安排在冬季冻土稳定阶段实施，避免夏季冻融期对土体的扰动。

#### 4.2 施工工艺优化措施

不同复杂地质情形，改良施工工艺，降低施工对管道及地质环境的干扰。针对滑坡、岩溶等地质敏感区域而言，优先采用定向钻穿越及顶管施工工艺。利用定向钻穿越能实现管道地下铺设，不用大范围开挖，防止边坡稳定性受损；顶管施工适合浅埋管道穿越，借助顶管机把管道顶进地层，减少对土体的扰动。如输油管道工程穿越岩溶发育区时，采用定向钻这种施工工艺，管道敷设完成以后，把地基沉降差控制到 5mm 以内，大幅低于规范允许数值。将复杂地质区域的管道分成多个施工段落，每段长度控制在 100-200m，一段完成后即刻着手进行地基加固与管道回填，防止管道长时间裸露。施工期间依据地质监测数值调整工艺参数，以在冻土区域开展的开挖为例，若监测到冻土温度上升，马上终止施工，运用保温手段。管道出厂前涂三层 PE 防腐层，厚度不低于 2.5mm；施工进程里，用聚乙烯防腐胶带缠绕管道外壁，提升防腐成效。针对穿越滑坡、泥石流区域的管道，给保护层加上混凝土包覆，包覆厚度要达到 10cm 及以上，增强管道抗冲击水平。

#### 4.3 施工期监测预警体系构建

建立地质 - 管道 - 环境三位一体式监测预警体系，实时掌控施工期地质和管道情况，具体监测内容及方法如表 2 所示。

无线传输系统实时把监测数据上传到监控中心，把阈

表 2 施工期监测预警体系监测内容及方法

监测类别	监测指标	监测方法	预警阈值
地质监测	边坡位移、土体沉降、地下水位	全站仪、沉降计、水位计	边坡日位移 > 5mm，土体沉降速率 > 2mm/d
管道监测	管道变形、焊缝应力、防腐层完整性	应变片、超声探伤仪、防腐层检漏仪	管道变形量 > 3mm，焊缝应力 > 150MPa
环境监测	降雨量、气温、冻土温度	雨量计、温度计、冻土温度传感器	日降雨量 > 100mm，冻土温度 > 0℃持续 24h

值预警与趋势预警相结合,监测数据达到预警阈值时出现异常变化趋势时,即刻发出预警信号,实施应急处置预案。在工地设置应急物资储备点,筹备沙袋、抗滑桩、应急堵漏器材之类物资,保障突发状况下能快速应对。

#### 4.4 施工管理措施

面向复杂地质区域,制定专项施工方案,把施工流程、技术参数、安全措施弄明确,专家论证通过方案后才可实施<sup>[6]</sup>。施工人员参与复杂地质施工技术及安全培训,主要讲解地质灾害识别与应急处置手段,考核合格方可进行上岗作业。聘请专业监理单位全程监督施工过程,严格把关地质预处理、管道敷设、监测数据等相关内容,让施工质量合乎规范规定。

### 5 工程实例分析

以中亚天然气管道某一段工程为例,该段管道穿过天山山脉滑坡与冻土复合地质区域,管径 1219mm,设计压力值为 10MPa。施工前通过抗滑桩及预应力锚索加固滑坡体,一共设置了 52 根抗滑桩,桩 25m;冻土区用保温棚加聚氨酯隔热层做保温,施工的时候运用定向钻穿越工艺,同步实施地质-管道-环境监测工作。施工阶段监测数据显示,边坡最大日位移值 2.3mm,管道变形量 1.8mm,全都比预警阈值低。管道敷设结束,以超声探伤进行检测,焊缝合格比例为 100%。工程实施 3 年后进行回访,管道运行态势佳,变形、泄漏等问题未曾出现,证实了本文提出的保护措施有效。该案例工程边坡位移在施工前期小幅增长,后期趋于稳定,最大累计位移 18.5mm。

### 6 结语

复杂地质条件下的长输油气管道施工阶段,主要风险涵盖地质灾害引起的机械性损伤、地基不均匀沉降带来的结构失效、施工工艺不当造成的人为破坏,应从地质预处理、工艺优化、监测预警、施工管理等方面打造综合保护体系。针对性地质预处理手段可有效去除地质隐患,非开挖施工技术能明显减轻对地质环境的扰动,三位一体的监测预警体系可做到风险早发现、早处理。综合保护措施的有效性被工程实例证实,可为同类复杂地质管道工程给予技术借鉴。长输油气管道往更复杂地质区域伸展,未来可进一步研究智能化监测技术和新型防护材料。运用物联网、大数据技术构建起智能监测平台,做到监测数据的自动分析及预警;研发高硬度、耐侵蚀的管道防护材料,提高管道在复杂地质环境下的长久性。

#### 参考文献

- [1] 段瑞峰.油气长输管道防腐施工质量关键控制措施研究[J].石油和化工设备,2025,28(08):233-235.
- [2] 刘皎果.油气管道施工工艺优选与安装工程控制研究[J].石油和化工设备,2025,28(06):136-138.
- [3] 曲智超,张世彬,李雷,等.浅谈油气管道工程施工与高原生态环境保护对策[J].油气田地面工程,2024,43(03):58-63.
- [4] 段含斌.基于第三方施工的长输油气管道保护方案研究[J].化工管理,2022,(13):161-168.
- [5] 李未晚,寇小平.长输(油气)管道安全隐患分析[J].大众标准化,2020,(17):173-174.
- [6] 冉伟.长输油气管道安全隐患及管理措施研究[J].石化技术,2020,27(03):293+295.

# Construction Technology of Hospital Building Insulation Foam Concrete

Weiqun Wang

Jiangxi Provincial People's Hospital, Nanchang, Jiangxi 330006, China

## Abstract

As a lightweight, thermal-insulating, fire-resistant, and eco-friendly building material, foam concrete provides a solid foundation for improving construction quality in hospitals. Its excellent thermal performance, mechanical properties, and construction adaptability make it a valuable asset. Moreover, proper application of this technology can effectively reduce operational costs during hospital operations. Construction units should focus on three critical phases—preparation, construction, and maintenance/acceptance—to clarify key technical points of foam concrete insulation. Strengthening technical control and management will better leverage the advantages of foam concrete, thereby enhancing construction quality and overall performance.

## Keywords

hospital; thermal insulation; foam concrete construction; technical points

# 医院建筑保温泡沫混凝土施工技术

王卫群

江西省人民医院, 中国 · 江西 南昌 330006

## 摘要

泡沫混凝土作为一种轻质、保温、防火且环保的新型建筑材料,其优异的热工性能、力学特性及施工适应性为医院施工质量提升打下了坚实的基础,同时合理应用该项技术还可以有效降低医院运行期间的成本损耗,施工单位可从准备阶段、施工阶段、养护与验收阶段三大关键阶段明确保温泡沫混凝土施工技术要点加强技术控制和技术管理,更好地发挥泡沫混凝土的优势,提高施工质量和施工水平。

## 关键词

医院; 保温; 泡沫混凝土施工; 技术要点

## 1 引言

在双碳战略持续推进以及医疗建筑高质量发展的双重背景下如何在医院建筑施工中兼顾节能需求和使用需求成为了相关人员十分关注的焦点问题。而泡沫混凝土以其密度小、导热系数低、防火性能优、整体性强等相应特质逐渐取代了传统的保温材料,在医院建筑施工中得到了广泛应用。想要更好地发挥保温泡沫混凝土的技术优势,可从如下几点着手加强技术管理,提高施工效果。

## 2 准备阶段的技术要点

### 2.1 基层处理

基层质量对于泡沫混凝土保温层与基层的粘结强度会起到至关重要的影响,施工人员需根据《屋面工程技术规范》等相应文件政策要求明确基层处理要点及工作规范落实基

层处理工作。首先需要去除基层表面的油污、浮灰、杂物及松动结构,并落实找平工作,确保基层坚实、平整,并通过平整度检测平整度偏差控制在 5mm/2m 的范围内。在此之后需通过外观检查分析基层上是否存在裂缝、积水等相应问题。若基层为混凝土基层,还需涂刷界面处理剂更好地提高其粘结力。若基层为加气块基层,可先抹薄砂浆进行找平处理,避免保温层与基层出现空鼓脱落的情况。若保温层施工部位为屋面,还需通过淋水或蓄水实验的方式及时发现渗漏问题,为后续保温层施工打下坚实基础,其中淋水试验的持续时间应超过 2h,蓄水试验的持续时间应超过 24h,确保试验结果准确。

### 2.2 材料准备

材料作为施工建设的重要物质基础,加强材料准备管理是十分必要的,需从材料采购到应用的全过程出发明确材料管理要点<sup>[1]</sup>。在泡沫混凝土施工中工作人员可围绕水泥、粉煤灰、发泡剂等相应关键材料,明确在材料质量性能管控中应注意的核心指标,如表 1 所示,通过材料检验确保材料

【作者简介】王卫群(1972—),男,中国江西湖口人,本科,工程师,从事建筑工程管理研究。

质量性能达标。还需要根据医院建筑施工环境特点及设计方案明确施工建设过程中所需应用的仪器设备，一方面应按照施工方案购买或租赁相关设备，确保设备齐全并在规定的周期内抵达施工现场，另外一方面需要组建专业设备维护团队落实设备校准及维护工作，确保设施设备始终处于最佳运转状态。

表 1 泡沫混凝土原料及性能指标检测重点

材料类别	性能指标名称	规范要求
水泥	强度等级	不低于设计要求的通用硅酸盐水泥
	安定性	符合国家标准
粉煤灰	等级	I 级或 II 级
发泡剂	发泡倍数	性能稳定，发泡倍数适宜
	泡沫特性	泡沫细腻均匀，与胶凝材料相容性好
泡沫混凝土成品	施工环境温度	5℃ ~ 35℃
	导热系数	符合设计保温要求
	抗压强度	满足设计规定
	干密度	按设计要求控制
	燃烧性能	不低于 B1 级

### 3 施工阶段技术要点

#### 3.1 泡沫制备

在泡沫混凝土施工中泡沫质量对于泡沫混凝土整体的保温性能和结构稳定性会起到极大的影响，因此加强泡沫制备管理是十分必要的。工作人员需先按产品说明书确定发泡剂和水的稀释比例，并通过现场实验的方式确定具体数值，以保证后续发泡效果的稳定性为核心对稀释比例做出适当调整。在泡沫制备中可借助高压空气型发泡机，利用压缩空气保障泡沫产出均匀、稳定、细腻洁白、泡径均匀。此外在泡沫制备过程中还需要遵循“稳泡 30 分钟”原则，同时也需加强对发泡剂的管控以及泡沫制备过程中稀释比例的管控，避免使用变质发泡剂或随意更改稀释比例的情况。若在泡沫制备过程中发现泡沫出现发黄、结块、等相应问题，需通过调整发泡剂或设备参数保障泡沫质量，制备好的泡沫需及时使用，否则易出现泡沫破灭问题，影响料浆质量<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 料浆制备与搅拌

在料浆制备过程中应严格按照规范要求做好各组份的计量工作，明确不同环节需重点控制的参数。可将料浆制备与搅拌工艺划分为配料计量、干料搅拌、浆料搅拌、泡沫掺入、混合搅拌、输送料浆、使用等相应关键环节，并根据不同环节确定参数管理要点，如表 2 所示。

在料浆制备过程中需尤为引起关注和重视的是加强对搅拌的控制，遵循“先干后湿、最后加泡沫”的原则，即施工人员需先将水泥、粉煤灰、外加剂等相应干物料投入搅拌机中，搅拌 1~2min，确保干物料混合均匀后按照规定要求加水，并持续搅拌 2~3min，生成均匀的水泥浆体，最后

将制备好的泡沫通过输送管道缓慢且均匀地加入到水泥浆体当中再次搅拌，保障泡沫与浆体完全融合，进而确保泡沫混凝土浆料流动性和稳定性达标。同时在后续搅拌工作开展过程中还需要避免剧烈搅拌致使泡沫破灭，工作人员需加强现场观察，分析是否存在泡沫含量不足、分层离析等相应问题，针对性地调节搅拌时间和泡沫掺入量<sup>[3]</sup>。

表 2 泡沫混凝土料浆制备与搅拌参数要点

工艺环节	参数名称	规范要求
配料计量	干料计量方式	重量法计量
	水胶比	按配合比设计控制
干料搅拌	搅拌时间	1-2 分钟（干拌均匀）
浆料搅拌	搅拌时间	2-3 分钟（搅拌成均匀水泥浆体）
泡沫掺入	掺入方式	缓慢、均匀加入水泥浆体
混合搅拌	搅拌时间	搅拌至泡沫与浆体充分混合均匀
输送要求	出料口高度	离基层不超过 1m
	泵送压力	低压泵送
料浆使用	有效时间	随拌随用，避免长时间存放

#### 3.3 浇筑与摊铺施工

在浇筑与摊铺施工中需根据不同施工场景对施工重点作出适当的调整和优化，例如屋面保温找坡是泡沫混凝土的经典应用场景，在施工建设的过程中需一次浇筑完成设计找坡层，利用泡沫混凝土良好的流动性形成自然坡度，在浇筑结束以后可引入刮杠对设计坡度进行刮平，避免二次修补影响整体性。而在卫生间及沉箱回填中需确保防水层的完好性，可通过 24 小时蓄水实验来分析防水层的施工质量是否达标。在管道安装中需做好防护工作，并通过检测确保管道安装牢固。在回填作业开展的过程中应坚持轻铺、慢推的原则，避免对防水层和管道造成破坏和影响，常用配比可参考 1m<sup>3</sup> 空间约用水泥 300kg、水 200kg、发泡剂 1kg。在地面保温层施工中，若施工面积相对较大可采用分仓浇筑的方式，控制每仓面积约在 20~30m<sup>2</sup>，并通过设置间距小于 6m 的伸缩缝避免开裂问题，在施工结束以后需落实养护工作，保障其抗压强度超过 1Mpa 才可以落实后续施工。

浇筑期间须坚持“随拌随用”的原则，确保在拌合完成后可以快速运输至现场使用。为保障浇筑质量可采用分段分区施工的方式，有效避免集中堆放导致泡沫破损的问题。在浇筑期间应关注浇筑的连续性，可采用输送设备或通过人工布料的方式将料浆运送至作业面，注意出料口和基层的高度差应小于 1m。若施工区域为高层屋面在浆料输送时还需通过软管加设减压弯的方式最大化降低对料浆产生的冲击和影响，在料浆泵送中应采用低压泵送的方式，避免在泵送期间因压力过大导致泡沫结构破损。若保温层结构厚度超过 200mm 必须采用分层浇筑的方式，并确保上一层浇筑的料体终凝后再展开下一层浇筑。在摊铺作业中可引入长度超过 2m 的刮杠，沿着灰饼或冲筋落实刮平作业轻轻推动刮杠，避免破坏泡沫结构。若对表面平整度要求相对较高还可以在

混凝土初凝前引入木抹子进行抹平处理<sup>[4]</sup>。

## 4 混凝土养护与质量验收

### 4.1 养护

养护工作的落实对于泡沫混凝土的强度、性能会起到至关重要的影响。在养护工作开展过程中可以以自然养护为主,根据《屋面工程技术规范》的相关规定确定养护方式和养护时间<sup>[5]</sup>。

在养护期间还需要注意如下几点问题。首先需确保养护覆盖物湿润,避免保温层表面失水过快进而引发开裂等相应问题。其次,在养护工作落实过程中需做好现场管理,避免踩踏、机具材料堆放导致结构受损问题。最后需坚持具体问题具体分析的原则,结合施工过程中该地区的气候特点确定和调整养护措施,在养护工作落实结束以后才可以开展防水层和保护层施工。

泡沫混凝土在医院建筑中的应用效果是相对较好的,例如江西省人民医院二部外立面改造工程中屋面采用泡沫混凝土保温找坡,将坡度控制在2%。施工以后屋面保温性能得到了明显提升,冬季室内温度得到了改善,在室内温度调节上所需要消耗的成本大幅降低。再例如红谷滩新院一期工程在住院楼、卫生间、沉箱及地面保温垫层施工中则采用了泡沫混凝土施工,通过配比优化和施工工艺优化有效预防了卫生间渗漏隐患,同时地面平整度偏差也得到了有效控制,保温效果也得到了提升。

### 4.2 质量验收

在泡沫混凝土质量验收过程中应结合《建筑节能工程施工质量验收规范》《屋面工程质量验收规范》等相应标准要求展开验收,并紧抓隐蔽工程、外观质量、性能指标、资料核查等关键点落实质量验收,及时发现问题并进行有效处理。

在隐蔽工程验收中需从基层处理质量、材料进场检验

报告、配合比计量记录、浇筑厚度控制、板状保温材料拼接质量、隔气层施工质量等相应关键点展开验收。在外观质量验收中需着重观察保温层表面是否存在裂缝、空鼓、脱落等相应缺陷问题,分析板状保温层拼缝是否整齐、嵌填是否密实。在性能检测中可从干密度、抗压强度、导热系数、阻燃性能等方面落实检测工作,分析施工质量是否符合规范要求;最后在验收工作开展过程中需要收集整合施工图纸、设计变更文件、材料出厂合格证等相应文件信息,确保资料齐全且符合要求。

## 5 结语

泡沫混凝土凭借其优异的保温隔热性能、防火安全性和环保特性在医院建筑保温工程中得到了广泛应用,保障泡沫混凝土的应用质量对于医院投入使用后的节能效果、室内热环境稳定性和建筑物使用安全性都会起到至关重要的影响。相关单位可从施工准备阶段、施工阶段及养护验收阶段三大关键阶段明确技术要求和工作标准,结合《屋面工程技术规范》《建筑节能工程施工质量验收规范》等相应文件调整技术应用重点和管理重心,更好地发挥泡沫混凝土的优势,提升最终建筑效果。

### 参考文献

- [1] 朱颢天. 泡沫混凝土材料在屋面保温找坡层施工的实践探索[J]. 中国水泥, 2025, (08): 112-114.
- [2] 何明剑. 建筑外墙和屋面泡沫混凝土保温板施工技术研究[J]. 重庆建筑, 2025, 24 (04): 41-44.
- [3] 张金林. 泡沫混凝土复合保温外墙体系施工工艺分析[J]. 散装水泥, 2024, (02): 107-109+112.
- [4] 丁润民. 泡沫混凝土施工技术在屋面工程中的应用[J]. 建材与装饰, 2020, (02): 3-4.
- [5] 余顺新. 建筑保温泡沫混凝土施工技术的研究与应用[J]. 四川水泥, 2017, (08): 123+127.

# Pain Points and Fine Solution Path of Electronic Bidding and Tendering Agency in Construction Engineering

Pan Wang

China Post Construction Consulting Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210003, China

## Abstract

Electronic bidding and tendering has become deeply integrated into the construction engineering sector, driving agencies into a critical phase of digital transformation. In practice, four core pain points—technological incompatibility, lax process control, personnel capability mismatch, and insufficient regulatory coordination—not only undermine service efficiency but also harbor significant compliance risks. Drawing on industry experience, this paper proposes a four-dimensional refined solution to address these challenges. It is crucial to recognize that refined management is not about optimizing individual processes but reshaping capabilities across the entire chain, thereby enhancing the compliance and efficiency of agency services. Only by proactively adapting to technological and policy changes can agencies strengthen their core competitiveness and contribute to building a fair and efficient industry ecosystem.

## Keywords

construction engineering; electronic bidding; agency practice; pain point analysis; refined approach

## 建筑工程电子招投标代理实操痛点及精细化解决路径

王盼

中邮通建设咨询有限公司，中国·江苏南京 210003

## 摘要

电子招投标已深度融入建筑工程领域，直接推动代理机构迈入数字化转型的关键阶段。从实操场景来看，技术适配不畅、流程管控松散、人员能力不匹配、监管协同不足四大核心痛点，不仅拉低服务效能，还潜藏不少合规隐患。本文结合行业实操经验，构建了四维精细化解决路径，针对性破解上述难题。需要明确的是，精细化管理并非单一环节优化，而是全链条能力重塑，可有效提升代理服务的合规性与效率。代理机构唯有主动适配技术与政策变革，方能筑牢核心竞争力，助力共建公平高效的行业生态。

## 关键词

建筑工程；电子招投标；代理实操；痛点分析；精细化路径

## 1 引言

国家不断推进招投标领域“放管服”改革，发改委等部门出台的《关于深化公共资源交易平台整合共享的指导意见》《电子招标投标办法》，直接推动建筑工程招投标告别传统线下模式，迈入全面线上化阶段。招标代理机构是这场变革的核心服务者，要负责流程统筹、技术支撑和合规审核等工作，其专业能力直接影响招投标活动的规范性。从行业实操来看，多数代理机构转型难度较大，既不擅长电子平台操作，流程管控也不够精细，人员专业能力也跟不上数字化需求。这些问题直接拉低了服务水平，还增加了合规风险。找准这些实操难题，搭建科学的解决框架，才能帮助代理机

构突破发展困境，跟上行业变革步伐。因此，本文将对建筑工程电子招投标代理实操痛点及精细化解决路径展开分析。

## 2 建筑工程电子招投标代理实操核心痛点

### 2.1 平台适配不足，技术支撑薄弱

电子招投标的顺畅运转，离不开技术平台与配套工具的支撑，但从行业实操来看，代理机构在技术落地中麻烦不少。各地、各行业的电子招投标平台没有统一技术标准，部分平台功能设计粗糙，操作步骤繁琐不说，系统响应还经常滞后<sup>[1]</sup>。很多代理机构要同时对多个不同架构的平台，数据没法跨平台流通，只能重复录入招标信息，文件传输也常出问题。像跨省市政项目，就常因平台接口不兼容，招标信息没法一次性同步发布，间接减少了潜在投标人。CA证书“一平台一证书”的乱象很普遍，投标人要办多个证书，既增加成本，也给代理机构核验工作添了负担。多数代理机构

【作者简介】王盼（1985—），男，中国安徽淮北人，本科，工程师，从事建设工程招标代理方向研究。

没有专业技术团队，遇到证书失效、文件加密解密故障等突发情况，根本没法及时解决，很容易引发投标纠纷。而且对大数据、AI等新技术运用不足，没法通过技术筛查投标文件类同、预警异常行为，服务价值难以提升。此外，数据安全与系统衔接也有漏洞，核心信息存在泄露、篡改风险，新旧系统迭代时数据迁移不全、历史数据查不到，也打乱了招投标流程。

## 2.2 规范缺失失衡，效率与合规矛盾突出

电子招投标线上化重构了传统操作流程，但代理机构在流程管控上仍有明显短板，规范不完善、执行打折扣的情况很普遍。招标文件的编制与审核方面，不少代理机构没有统一的标准化模板，编制人员对平台功能不熟悉，容易出现条款表述模糊、格式错乱、参数设置不合理等问题。更关键的是缺乏多级审核把关，招标文件发出去后常要反复澄清、修改，拖累投标进度。再看异议处理和流程衔接，电子招投标要求异议线上提交、线上答复，但部分代理机构还在用线下沟通老办法，没搭建高效线上机制，要么答复滞后，要么内容不规范。而且澄清修改、异议答复和投标截止时间衔接不当，部分澄清信息发布过晚，投标人没时间调整，很容易引发投诉。远程异地评标已成行业常态，但代理机构在专家抽取、现场协调、结果复核等环节缺乏规范，常出现数据不同步、无异常预警、复核繁琐等问题<sup>[2]</sup>。同时效率与合规难以兼顾，有些环节为赶进度简化操作，反而埋下合规隐患。

## 2.3 能力结构失衡，专业适配不足

电子招投标给代理人员的能力划出了复合型门槛，既要懂招投标法规、建筑工程专业知识，还得熟练操作数字化平台与工具。但从行业实操来看，代理机构人员能力失衡问题很突出，不少人都跟不上行业需求。技能适配问题方面，多数代理人员有扎实的线下招投标经验，可对电子平台的操作流程、技术规范却很生疏，操作失误频发。专业知识储备方面，2025年福建、辽宁等地推行评定分离、标准招标文件更新等新规，倒逼代理人员提升政策解读能力。但很多机构没有常态化培训机制，人员对新规理解不透彻，编制文件、组织流程时容易踩合规红线。而且建筑工程细分领域多，部分人员对水利、新能源等专项工程不了解，制定的招标方案针对性不足，导致投标与项目需求脱节。此外，服务与风控意识跟不上，对线上服务需求差异忽视，中小企业难获指导，对围标串标等风险也缺乏预判能力。

## 2.4 机制不完善，风险防控滞后

电子招投标线上化重构了监管模式，传统现场监督逐渐被线上线下协同监管取代。但从实操来看，代理机构在监管协同上的短板很明显，各类问题屡见不鲜<sup>[3]</sup>。不少代理机构没和监管部门搭建高效数据共享通道，招投标全流程数据没法及时同步，监管部门自然难以实现动态管控。加上部分人员对监管要求理解不到位，组织流程时很容易触碰合规红

线。再看内外部监管的衔接，代理机构内部风控体系薄弱，关键环节的监督复核多是走过场，根本起不到管控作用。外部监管又偏重事后检查，对过程中的异常行为缺乏预警，像某省级房建项目中，投标文件存在大量类同内容，代理机构没有能力主动检索，监管部门也无法通过实时数据监测发现围标串标线索。此外，投诉处理与责任界定也很模糊，代理机构常因流程记录残缺、责任划分不清，难以配合监管调查，且代理机构、招标人等多方责任界定机制不完善，相互推诿成为常态，直接拖慢纠纷解决进度。

为清晰呈现核心痛点与对应解决方向，现梳理如下表1所示。

表1 建筑工程电子招投标代理实操核心痛点与精细化路径对应表

核心痛点	精细化路径核心措施
技术支撑薄弱	搭建一体化智能平台，融合新技术
流程规范缺失	建立标准化模块，优化关键环节
人员能力失衡	打造复合型团队，强化分层培训
监管机制不完善	构建多维联动监管体系

## 3 建筑工程电子招投标代理实操精细化解决路径

下文将对各精细化路径展开详细阐述，结合实操经验与案例，明确具体落地措施。

### 3.1 构建一体化平台体系，强化技术支撑

破解电子招投标平台适配不畅、技术支撑不足的问题，核心是靠技术升级，搭建起“一体化、智能化、安全化”的技术服务体系。从行业实操来看，这套体系的落地需分步骤推进，每一环都要贴合实际需求。先从平台整合入手，代理机构要主动对接区域公共资源交易平台，牵头推动跨平台数据互通和接口统一，同时搭建自有一体化平台，把公告发布、文件编制、评标辅助等功能整合起来，实现全流程线上闭环。贵州推行的模式很值得借鉴，用企业唯一信用代码实名验证替代传统CA证书，不仅降低了近40%的证书管理成本，还实现了远程解密递交，大幅提升便捷性。

### 3.2 建立标准化体系，实现合规与效率协同

流程管控的核心是精细化管理，唯有搭建标准化、模块化体系，才能在守住合规底线的同时提升效率。从实操落地来看，这套体系需聚焦核心环节逐个突破，避免流于形式。首先聚焦招标文件编制与审核，按房建、市政等细分领域制定专属标准模板，明确条款表述、参数设置等细节，从源头减少编制误差。同时建立“编制—审核—复核”三级把关机制，专业人员逐一审查合规性、完整性，重点核查资格条件、评标标准等关键条款<sup>[4]</sup>。借鉴贵州做法，招标文件在交易平台免费公开，标注精准坐标图示，可减少近30%的投标人咨询量。再优化异议处理与流程衔接，搭建线上专属沟通通道，明确异议提报、答复的时限与流程，实现全程留痕可追

溯。澄清修改信息发布后，需预留至少3个工作日调整时间，避免耽误投标。同时搭建流程动态监控系统，实时跟踪各环节进度并预警延误风险。

### 3.3 构建复合型团队，提升专业服务能力

代理团队的核心竞争力源于能力建设，唯有打造兼具政策素养、专业知识与数字化技能的复合型队伍，才能适配电子招投标的行业需求。从实操来看，能力建设不能一概而论，需聚焦培训、结构、风控三大维度精准发力。先从培训体系搭建入手，针对新人、资深员工、管理人员制定差异化计划，每月开展政策法规、平台操作等专项培训。重点解读2025年各地新规，尤其是不见面开标、评定分离等政策，同时邀请技术专家带教实操演练，让数字化操作通过率提升至95%以上。

### 3.4 构建多维联动机制，强化全流程风险防控

要提升电子招投标风险防控效能，核心是搭建“内部

管控+外部协同+技术监测”的多维监管体系。从监管实操来看，单一监管模式难以覆盖全流程风险，需三者联动形成闭环，才能筑牢合规防线。筑牢内部监管防线，搭建覆盖招投标全流程的监督框架，重点把控招标文件审核、评标专家抽取、结果复核等关键节点，建立详实监督台账，确保每一步操作可追溯。每月开展一次内部专项审计，精准排查合规隐患，对发现的问题建立整改清单，限期闭环处理，避免风险遗留<sup>[9]</sup>。强化外部协同联动，主动与监管部门、公共资源交易中心搭建实时数据共享通道，同步全流程数据支撑线上动态监管。积极对接行业协会，参与自律规范制定，借鉴同行先进监管经验。明确代理机构、招标人、评标专家等多方责任边界，建立纠纷快速处置机制，优化投诉处理流程，将纠纷解决周期缩短25%以上。此外需构建智能监管体系，依托大数据、AI技术搭建预警平台，实时监测文件雷同、报价异常等行为，全程音视频记录留痕。

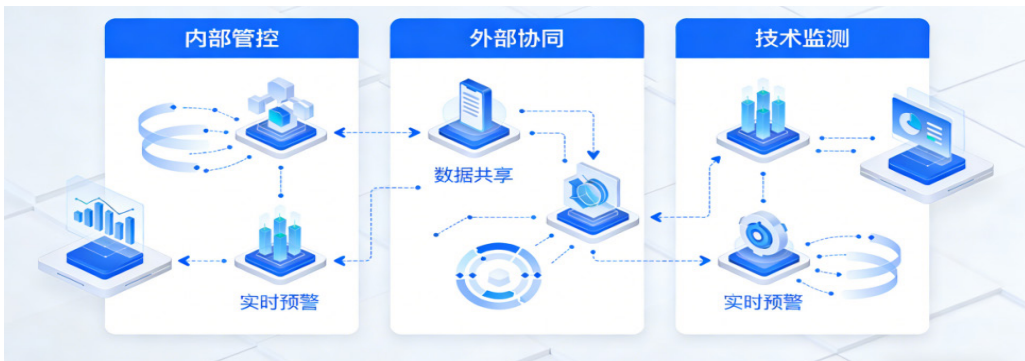


图1 电子招投标多维监管体系示意图

## 4 结语

电子招投标的全面普及，正推动代理机构进入数字化转型的攻坚阶段。从行业实操来看，技术适配不足、流程规范缺失等四大痛点，仍是制约服务质量升级的核心瓶颈，多数代理机构仍面临转型阵痛。本文提及的精细化路径，通过技术赋能搭建一体化平台、流程优化建立标准体系等举措，能精准破解这些实操难题，切实提升服务合规性、效率与公信力。随着AI、区块链等技术深度落地，行业将向更智能、精准的方向迈进。代理机构需持续深化精细化管理，主动适配政策与技术变革，从基础流程服务转向全周期咨询服务。同时强化行业协同，推动技术标准统一与监管机制完善，共建公平透明的招投标生态，为建筑领域高质量发展赋能。

## 参考文献

- [1] 林俊文.数字经济背景下电子招投标系统在建筑工程招投标中的应用[J].房地产世界,2025,(08):140-142.
- [2] 郝亮.电子招投标技术要点及其在建筑工程招投标中的应用[C]//江西省工程师联合会.第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(一).河北国运项目管理有限公司,2025:264-267.
- [3] 戴建军.基于电子招投标系统的建筑工程招投标实践研究[J].中国招标,2024,(11):121-123.
- [4] 邱琴.电子招投标系统在建筑工程招投标中的实际应用[J].活力,2024,42(01):163-165.
- [5] 韦尧鹏.建筑工程全流程电子招投标的应用[J].中国招标,2023,(09):143-145.

# Application of fault diagnosis and dynamic balance correction technology of turbine generator set based on vibration analysis

Shou'an Su

Zhejiang Huaye Electric Power Engineering Co., Ltd., -Nanyang Project Department, Nanyang, Henan, 474350, China

## Abstract

Abnormal shaft system vibration in steam turbine generator sets constitutes a critical safety hazard that jeopardizes the stable operation of thermal power plants. This study investigates the periodic fluctuations and gradual escalation of bearing vibrations in Units 3 and 4 of D Power Generation Co., Ltd.'s 600MW unit, conducting systematic research on shaft system fault diagnosis and mitigation. By integrating advanced diagnostic technologies, the study precisely identifies root causes including mass imbalance in the low-pressure rotor, steam seal wear, and thermal misalignment between adjacent rotors. Based on these findings, a comprehensive technical solution is developed, centered on online dynamic balancing with supplementary alignment adjustments and steam seal clearance optimization. The research establishes a replicable technical framework for shaft system fault diagnosis and dynamic balancing calibration based on precision vibration analysis, providing essential engineering references for vibration control and condition-based maintenance of similar large-scale steam turbine generator sets.

## Keywords

Steam turbine generator set; Shaft vibration; Fault diagnosis; Dynamic balance correction

# 基于振动分析的汽轮发电机组轴系故障诊断与动平衡校正技术应用

苏守安

浙江华业电力工程有限公司 - 南阳项目部, 中国 · 河南 南阳 474350

## 摘要

汽轮发电机组轴系振动异常是制约火力发电厂安全稳定运行的关键隐患之一。本文以D发电有限责任公司600MW机组为研究载体, 聚焦其运行阶段3、4号轴承振动周期性波动与缓慢爬升的技术难题, 开展轴系故障诊断与治理的系统性研究。研究综合运用先进诊断技术, 精准定位故障根源系低压转子存在质量不平衡、汽封碰磨现象, 且与相邻转子间存在热态对中偏差。基于上述诊断结果, 构建“以在线动平衡为核心, 辅以对中调整与汽封间隙优化”的综合治理技术方案。构建了一套可复制的、基于精密振动分析的轴系故障诊断与动平衡校正技术体系, 为同类型大型汽轮发电机组的振动治理及状态检修提供了重要的工程实践参考。

## 关键词

汽轮发电机组; 轴系振动; 故障诊断; 动平衡校正

## 1 引言

在电力生产领域, 汽轮发电机组作为能量转换的核心枢纽设备, 其运行状态直接关联电网运行的可靠性与经济性。轴系作为机组的关键旋转构件, 其振动水平是表征机组健康状态的核心评价指标。振动异常不仅会加剧轴承、密封等部件的磨损进程, 严重情况下还可能引发转子断裂、动静

部件严重摩擦甚至机组损毁等灾难性事故。对轴系振动实施精准监测、故障诊断与校正优化, 是保障发电企业安全生产、提升设备精益化管理水平、延长机组服役寿命的关键技术环节<sup>[1]</sup>。

## 2 工程概况

### 2.1 机组基本参数与历史问题

在电力生产领域, D发电有限责任公司5号机组为东方电气集团研制的600MW亚临界、单轴、三缸四排气凝汽式汽轮发电机组, 于2005年正式投入商业运行, 5机组轴系设计参数与近期典型振动数据如表1所示。该机组轴系由

**【作者简介】**苏守安(1994—), 中国青海互助人, 本科, 助理工程师, 从事发电厂汽轮机设备安装、检修方向的工作及研究。

高压转子、中压转子、低压转子 A、低压转子 B 及发电机转子通过刚性联轴器串联构成，采用 9 个径向轴承进行支承设计，额定转速为 3000 r/min，主蒸汽压力 16.67 MPa，主蒸汽温度 538℃。自 2021 年起，该机组在运行过程中逐渐显现 3、4 号轴承，即低压转子 A 支承轴承振动周期性波动特征，在负荷变动或环境温度变化工况下尤为显著。依据电厂厂级监控信息系统历史数据记录，2022 年至 2023 年期间，

该部位振动呈现缓慢递增趋势，多次接近了 GB/T 6075.2-2012《在非旋转部件上测量和评价机器的机械振动 第 2 部分：50MW 以上，额定转速 1500r/min、1800r/min、3000r/min、3600r/min 陆地安装的汽轮机和发电机》所规定的报警阈值（80 μm）。期间虽实施常规巡检与维护作业，但未能从根本上消除该问题，已成为制约机组带负荷能力与运行经济性的关键性隐患。

表 1 5 机组轴系设计参数与近期典型振动数据

轴承编号	对应转子	轴承类型	设计载荷 (t)	垂直方向振动 (μm, 工频分量)	水平方向振动 (μm, 工频分量)	轴向方向振动 (μm)
1	高压转子	椭圆轴承	38.5	28.5	25.8	35.2
2	高压转子	椭圆轴承	42.1	36.7	32.1	33.8
3	低压转子 A	可倾瓦轴承	68.3	85.6	45.2	48.9
4	低压转子 A	可倾瓦轴承	65.9	79.8	50.1	52.3
5	低压转子 A/B 联轴器侧	椭圆轴承	72.5	42.3	38.7	46.1
6	低压转子 B	椭圆轴承	70.8	39.5	36.9	44.7
7	低压转子 B	椭圆轴承	71.2	35.8	33.2	41.5
8	发电机转子	椭圆轴承	58.6	30.1	28.5	32.6
9	发电机转子	椭圆轴承	56.3	25.4	24.1	29.8

## 2.2 振动问题特征详述

对振动数据开展深度解析，识别出如下特征。工频分量占主导地位：3、4 号轴承振动信号中，工频（50Hz）分量占比始终高于 65%，为振动响应的核心贡献分量。负荷、温度相关性特征：振动幅值随电负荷提升呈轻微增长趋势，且在夏季环境温度较高工况下，整体振动水平较冬季升高约 10-15 μm。周期性波动特征：恒定负荷工况下，振动幅值存在 ±5 μm 左右的周期性波动，波动周期约为数小时。历史演化趋势：通过调取近三年大修前后的振动数据进行对比分析可知，每次大修后振动幅值可恢复至较优水平（约 40 μm），但运行约 8-10 个月后，振动幅值逐渐回升至高位区间。

## 3 振动分析技术与故障诊断

### 3.1 综合诊断技术路线

本次故障诊断采用“在线监测数据分析与离线精密测试相结合”的综合技术方案。首先，依托机组既有在线振动监测诊断系统长期监测数据，开展趋势分析与历史图谱对比分析<sup>[2]</sup>。其次，于机组计划停运前实施全面的离线振动测试，采集涵盖启停机瞬态过程的完整数据集，为深度解析提供数据支撑。

### 3.2 数据采集方案

离线测试采用多通道数据采集器及适配的加速度传感器、电涡流位移传感器。测点布置涵盖全部 9 个轴承的垂直、水平及轴向方向，并同步采集键相信号。测试工况具体包括：升速工况：从盘车转速升至 3000 r/min，采集临界转速区间振动特性数据。定速空载工况：3000 r/min、无励磁

状态，记录基准振动数据。带负荷工况：从空载状态逐步升至 600MW 额定负荷，捕捉振动随负荷、温度的演化规律。热稳定工况：600MW 额定负荷下稳定运行 4 小时，记录振动波动特征。全部测试数据的采样频率设定为 12.8 kHz，分析频率区间覆盖 0-1000 Hz，能够满足精密分析的技术要求。

## 4 轴系故障诊断的具体应用

### 4.1 频谱与相位特征分析

对 3、4 号轴承在 600MW 热稳定工况下的振动信号开展高分辨率频谱分析。频谱结果显示，1X（50Hz）频率分量幅值分别为 78.5 μm 与 72.3 μm，占总振动能量的 68% 和 71%；同时存在显著的 0.5X（25Hz）分频分量，其幅值约为 1X 分量的 8%，且伴随丰富的高频噪声带（>200Hz）。上述特征为质量不平衡与轻微动静摩擦故障并存提供了关键佐证，摩擦故障大概率发生于汽封或油挡等部件处。相位分析结果表明，3、4 号轴承 1X 振动的相位差约为 160°，未呈现标准的同相（0°）或反相（180°）特征，表明转子可能存在一定程度的弯曲变形或不对中偏差，进而影响了纯一阶不平衡的相位特性。

### 4.2 轴心轨迹与波形观察

3 号轴承轴心轨迹整体呈现椭圆形态，其边缘伴随轻微毛刺及微小环圈结构，且椭圆长轴方向呈现缓慢进动特征。时域波形分析表明，在近似正弦波的基础上，每周周期存在轻微削顶畸变。上述特征进一步佐证了摩擦故障的诊断结论。

### 4.3 启停机瞬态数据分析

对升速过程的波特图进行解析可知，低压转子 A 的一阶临界转速约为 1350 r/min，该转速下 3、4 号轴承出现振

动峰值，相位变化幅度约  $90^\circ$ ，与一阶临界转速的典型特征相符。然而，转子通过临界转速后，振动未呈现快速衰减趋势，而是维持于较高幅值区间，直至达到  $3000 \text{ r/min}$  额定转速。这一现象通常表明，除不平衡力外，还存在其他与转速无关或随转速变化微弱的激振力，例如由对中偏差引发的恒定弯矩或摩擦作用。该波特图清晰呈现  $1350 \text{ r/min}$  处的临界振动峰值及后续持续的高振动幅值平台。

#### 4.4 故障诊断结论

综合上述分析，诊断结论如下。主导故障：低压转子 A 存在显著质量不平衡，此为引发 3、4 号轴承 1X 高频振动的核心成因。并发故障：存在局部轻微动静摩擦，诱发 0.5X 分频分量及高频噪声，且造成轴心轨迹畸变与振动波动现象。潜在隐患：转子存在轻微热弯曲风险或与相邻转子间存在热态对中偏差，致使振动特性随负荷 / 温度变化，且相位关系呈现非典型特征。

### 5 动平衡校正技术原理与方案制定

#### 5.1 动平衡基本原理与方法选择

本案例中的低压转子 A 可界定为刚性转子。刚性转子的不平衡状态，可通过在任意选定的两个校正平面施加校正质量实现完全补偿。工程常用的现场平衡技术包括试重法、

影响系数法及振型平衡法。影响系数法凭借原理严谨、计算精度高、适配多平面多测点平衡场景的技术优势，被确定为本项目治理的优选方案。影响系数法的核心机理在于构建“校正质量增量”与“振动响应增量”之间的线性映射关系<sup>[1]</sup>。该线性关系通过复数影响系数表征，其幅值对应单位试重所引发的振动变化幅值，相位则反映振动变化相对于试重角向位置的滞后相位角。

#### 5.2 平衡面选择与试重方案

选择低压转子 A 的两端（3 轴承侧和 4 轴承侧）作为平衡面 I 和 II。在机组小修期间，转子处于冷态可接近状态，实施试重。#3、#4 轴承垂直方向工频矢量动平衡试重试验数据记录如表 2 所示。

初始状态测量：机组冲转至  $3000 \text{ r/min}$  空载，稳定后记录各轴承振动矢量  $\vec{v}_0$ 。

初始状态测量：机组冲转至  $3000 \text{ r/min}$  空载，稳定后记录各轴承振动矢量  $\vec{v}_0$ 。

第一次试重：仅在平衡面 I（#3 侧）添加试重  $\vec{w}_1$  ( $400 \text{ g} \angle 0^\circ$ )。稳定运行后测量振动  $\vec{v}_1$ 。

第二次试重：取下  $\vec{w}_1$ ，仅在平衡面 II（#4 侧）添加试重  $\vec{w}_2$  ( $400 \text{ g} \angle 0^\circ$ )。稳定运行后测量振动  $\vec{v}_2$ 。

表 2 动平衡试重试验数据记录（#3、#4 轴承垂直方向工频矢量）

试验状态	#3 轴承振动 ( $\mu\text{m} \angle^\circ$ )	#4 轴承振动 ( $\mu\text{m} \angle^\circ$ )	备注
初始状态 $\vec{v}_0$	$82.5 \angle 135$	$76.8 \angle 320$	$3000 \text{ r/min}$ 空载
平衡面 I 试重后 $\vec{v}_1$	$65.1 \angle 110$	$85.2 \angle 305$	试重 $\vec{w}_1 = 400 \text{ g} \angle 0^\circ$
平衡面 II 试重后 $\vec{v}_2$	$90.3 \angle 150$	$60.5 \angle 350$	试重 $\vec{w}_2 = 400 \text{ g} \angle 0^\circ$

#### 5.3 影响系数计算与校正质量求解

根据表 2 数据，计算两个平衡面对两个测点的影响系数矩阵：

平衡面 I 对 3 轴承的影响系数： $\vec{A}_{11} = (\vec{v}_1 - \vec{v}_0) / \vec{w}_1 = (65.1 \angle 110 - 82.5 \angle 135) / 400 \angle 0^\circ = 0.048 \angle -35^\circ (\mu\text{m/g})$

平衡面 I 对 4 轴承的影响系数： $\vec{A}_{21} = (85.2 \angle 305 - 76.8 \angle 320) / 400 \angle 0^\circ = 0.023 \angle 145^\circ (\mu\text{m/g})$

平衡面 II 对 3 轴承的影响系数： $\vec{A}_{12} = (90.3 \angle 150 - 82.5 \angle 135) / 400 \angle 0^\circ = 0.028 \angle 75^\circ (\mu\text{m/g})$

平衡面 II 对 4 轴承的影响系数： $\vec{A}_{22} = (60.5 \angle 350 - 76.8 \angle 320) / 400 \angle 0^\circ = 0.045 \angle -70^\circ (\mu\text{m/g})$

设需要在平衡面 I 和 II 上添加的校正质量矢量  $\vec{C}_1$  和  $\vec{C}_2$ ，目标是使最终振动  $\vec{v}$  最小化。建立方程：

$$\begin{aligned} \vec{v}_0 + \vec{A}_{11} \cdot \vec{C}_1 + \vec{A}_{12} \cdot \vec{C}_2 &= \vec{v} \approx \vec{0} \\ \vec{v}_0 + \vec{A}_{21} \cdot \vec{C}_1 + \vec{A}_{22} \cdot \vec{C}_2 &= \vec{v} \approx \vec{0} \end{aligned}$$

使用最小二乘法求解，使  $\|\vec{v}\|^2$  最小，得到最优解：

平衡面 I 校正质量： $\vec{C}_1 = 520 \text{ g} \angle 215^\circ$

平衡面 II 校正质量： $\vec{C}_2 = 340 \text{ g} \angle 330^\circ$

### 6 综合治理方案与实施

#### 6.1 动平衡校正实施

依据计算结果，于低压转子 A 的指定平衡平面处，采用高精度钻孔去重法开展校正作业。去重的角向位置与深度经精确计算并标记，由资深技术人员执行操作，以保障质量去除量的精准性。作业完成后，对转子开展低速盘车检查，验证其状态正常。

#### 6.2 辅助治理措施

为根治并发故障，在动平衡校正基础上，实施以下辅助治理措施。对中状态复查及调整：于机组冷态及模拟热态工况下，采用激光对中仪复查并调整低压转子 A 与中压转子、低压转子 B 间的联轴器对中精度，确保机组热态运行时处于良好对中状态。汽封间隙优化调整：依托检修工况，核查并调整低压缸汽封间隙，消除潜在摩擦过紧点，同时保障密封性能达标。轴承状态核查：核查 3、4 号可倾瓦轴承的瓦块磨损状况、预紧力参数及油路流通状态，确保润滑系统运行正常。

#### 6.3 启动验证与精细调整

机组重启后，在升速及带负荷全过程中对振动参数进

行严密监测：3000 r/min 空载工况：3、4号轴承垂直方向振动幅值降至 38 μm 和 35 μm，初步验证动平衡校正效果有效。带负荷工况：振动幅值随负荷升高呈轻微增长趋势，600MW 满负荷工况下，3、4号轴承振动幅值稳定在 45 μm 和 42 μm 左右，仍显著优于治理前水平。精细校正：依据带负荷后的振动监测数据，实施单次单平面微调平衡，最终

将满负荷工况下的振动幅值控制于目标区间内。

## 7 治理效果验证与长期跟踪

### 7.1 即时效果对比

治理前后，机组在相同工况（600MW，主参数相同）下的振动对比如下表所示：

表 3 综合治理前后关键轴承振动值对比

轴承位置	治理前振动 (μm)	治理后振动 (μm)	下降幅度	国标报警值 (μm)
#3 轴承垂直向	85.6	31.2	63.6%	80
#3 轴承水平向	45.2	22.5	50.2%	—
#4 轴承垂直向	79.8	28.7	64.0%	—
#4 轴承水平向	50.1	24.8	50.5%	—
轴系最大振动	85.6 (#3V)	31.2 (#3V)	—	—

## 8 结语

本文以 D 发电有限责任公司 600MW 机组振动治理工程为典型案例，系统阐述了精密振动分析的轴系故障诊断与动平衡校正技术的完整应用范式。基于影响系数法构建精准动平衡技术方案，辅以必要的辅助调整措施，实现了振动问题的根治性治理。工程实践验证，先进振动分析技术可深度解析故障机理，模型化动平衡方法能够实现高效精准的校正作业，二者协同构成解决大型旋转机械振动问题的高效技术体系，此次研究为同类型机组的振动治理及预测性维护提供

了一定参考。

### 参考文献

- [1] 唐明,孟芳,苏丽华,等.汽车发动机曲轴扭转振动分析及控制[J].山东工业技术,2016,(12):53.DOI:10.16640/j.cnki.37-1222/t.2016.12.044.
- [2] 王宝安.基于MATLAB的汽车发动机轴系振动的激励分析研究[D].山东中医药大学,2015.
- [3] 张德满,钱海挺,董大伟.汽车轴系强迫扭转振动模型的建立及分析[J].噪声与振动控制,2008,(03):78-80.

# Verticality Control Technology and Error Analysis of Chimney Wall of 100 m High Thermal Power Plant

Chaogang Hu

China Power Construction Group Hebei Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050021, China

## Abstract

Verticality control of super-high chimney walls represents a critical technical challenge in thermal power plant construction, with errors stemming from the coupling of environmental disturbances, structural deformation, and measurement system precision. This study investigates a 240-meter reinforced concrete chimney project at a Huaneng Power Plant. A benchmark transfer system integrating laser plumb line and zenith instrument was established, while intelligent platform-based template center positioning and leveling technologies were developed. High-precision total stations were employed for real-time 3D coordinate verification. Systematic analysis of deviation characteristics caused by wind loads, solar thermal variations, platform eccentricity, and concrete creep led to the establishment of a mathematical model for measurement error propagation. A predictive model-based template pre-bias compensation process and environmental sensitive period avoidance strategy were proposed. Post-construction 3D laser scanning validated that the final verticality deviation remained within 62% of the specified limit.

## Keywords

Super high chimney; Verticality control; Datum transfer; Error analysis; Pre-bias compensation

# 超百米火电厂烟囱筒壁垂直度控制技术及其误差分析

胡朝刚

中国电建集团河北工程有限公司, 中国·河北 石家庄 050021

## 摘要

超高烟囱筒壁垂直度控制是火电厂建设中的关键技术难题, 其误差来源涉及环境扰动、结构变形与测量系统精度的多重耦合。本研究以华能某电厂240米钢筋混凝土烟囱工程为对象, 构建激光铅直仪与天顶仪联测的基准传递体系, 开发基于智能平台的模板中心定位与调平技术, 并采用高精度全站仪实施三维坐标实时校核, 系统分析风荷载、日照温差、平台偏心及混凝土徐变等因素引起的偏差特征, 建立测量误差传播数学模型, 提出基于预测模型的模板预偏置补偿工艺与环境敏感时段测量规避策略, 通过成筒后三维激光扫描验证最终垂直度偏差控制在规范限值的62%以内。

## 关键词

超高烟囱; 垂直度控制; 基准传递; 误差分析; 预偏置补偿

## 1 引言

火电厂烟囱高度突破 200 米后, 筒壁垂直度控制的技术难度呈现非线性增长态势, 传统依靠经验调整的施工方法已难以满足精度要求。华能某电厂 240 米烟囱工程的设计垂直度限值为  $H/1000$ , 即全高偏差不得超过 240 毫米, 而实际施工中环境扰动与结构变形产生的动态误差往往在数十毫米量级波动, 若不能建立系统的误差识别与补偿机制, 累积偏差极易突破控制阈值。筒壁垂直度偏差的形成机理涉及多个物理过程的叠加, 风荷载使筒身产生弹性挠曲, 日照温差导致向阳面与背阴面产生差异伸长, 施工平台的偏心荷载引起筒顶倾斜, 混凝土的徐变与收缩则造成长期累积变形,

这些因素在时间尺度上表现出不同的特征频率, 短周期扰动可能在单次测量中引入数毫米的随机误差, 长周期变形则形成系统性偏差趋势。垂直度控制技术的核心在于将这些误差源分离识别并采取针对性的补偿或规避措施, 最终实现筒壁几何中心与设计轴线的高精度吻合。

## 2 筒壁垂直度控制核心技术体系

### 2.1 激光铅直仪与天顶仪联测基准传递技术

垂直度控制的首要环节是将地面控制点的平面坐标精确传递至施工作业面, 传统方法采用单台激光铅直仪向上投点, 其缺陷在于仪器自身的轴系误差无法自校, 且易受筒内上升气流扰动影响, 华能 240 米烟囱工程采用激光铅直仪与天顶仪联测的双重校核体系。激光铅直仪安置于筒底基准点, 向上发射激光束在各施工层的接收靶上成像, 天顶仪则从地面通过光学系统观测筒顶标志点的天顶距与方位角, 两

【作者简介】胡朝刚 (1992—), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 助理工程师, 从事火电厂土建工程研究。

套系统的测量结果相互独立又可交叉验证,当两者偏差超过3毫米时触发复测程序<sup>[1]</sup>。基准点的布设采用中心点加对称辅助点的配置,中心点用于日常投点作业,四个对称辅助点用于仪器对中误差的检核与消除,通过正倒镜观测取平均值可将投点精度控制在 $\pm 1.5$ 毫米以内。

## 2.2 基于智能平台的模板中心定位与调平技术

滑模或爬模平台的中心位置与水平状态直接决定了新浇筑筒壁的几何精度,传统人工调整依赖操作者经验且效率低下,华能工程引入智能平台控制系统实现模板中心的自动定位与调平。平台上布设四组液压千斤顶,每组配备高精度位移传感器与倾角传感器,控制系统实时采集传感器数据并与目标位置比对,偏差超限时自动驱动千斤顶进行微调,调整精度可达0.5毫米与0.01度。模板中心的确定采用激光接收靶的图像识别技术,CCD相机捕捉激光光斑位置并计算其相对于靶心的偏移量,该偏移量即为模板中心与铅垂基准的偏差,系统将偏差值转换为各千斤顶的调整量并执行闭环控制。智能平台的应用使单层调整时间从传统的40分钟缩短至15分钟,且调整精度显著提升<sup>[2]</sup>。

## 2.3 高精度全站仪三维坐标实时校核技术

激光铅直仪传递的是平面位置信息,高程传递与三维空间姿态的校核需借助全站仪完成。华能工程在筒外布设三个强制对中观测墩,构成边长约150米的三角形控制网,全站仪架设于观测墩上可观测筒壁各标高层预埋的反射棱镜,通过三维坐标解算获取筒壁圆心位置及其相对于设计轴线的偏差。测量时段选择在日出前或日落后的温度稳定期进行,以规避日照温差引起的筒身变形干扰,每个标高层至少观测八个均匀分布的棱镜点,通过最小二乘拟合确定该截面的圆心坐标。全站仪的测角精度为0.5秒,测距精度为1毫米加1ppm,在150米测距条件下点位精度约为 $\pm 2$ 毫米,与激光铅直仪的投点结果进行比对可有效识别系统误差。

# 3 垂直度偏差来源于数学模型分析

## 3.1 风荷载与日照温差引起的动态变形误差

风荷载使烟囱筒身产生顺风向弯曲变形,变形量与风速的平方成正比并与筒身刚度成反比,华能240米烟囱在6级风条件下的筒顶位移计算值约为35毫米,这一变形在风荷载撤除后可完全恢复,属于弹性变形范畴,然而测量期间的风速波动会导致读数的随机散布<sup>[3]</sup>。日照温差的影响机理更为复杂,阳光照射使向阳面混凝土温度升高并产生热膨胀,背阴面温度较低膨胀量小,差异伸长导致筒身向背阴侧弯曲,夏季正午时分的筒顶热弯曲位移可达25毫米,且弯曲方向随太阳方位角变化而转动。上述动态变形若在测量数据中未加识别将直接计入垂直度偏差,实际上这些变形在长期平均意义下趋于零,不应作为施工偏差处理。

## 3.2 施工平台偏心荷载与混凝土徐变导致的系统偏差

滑模平台上的施工荷载难以做到完全对称分布,偏心

荷载产生的弯矩使筒顶向重载侧倾斜,倾斜角度虽小但经筒身高度放大后筒顶位移可观,华能工程监测数据显示混凝土浇筑高峰期的平台偏心引起的筒顶附加位移约为8至12毫米。混凝土徐变是另一类长周期系统偏差源,早期浇筑的筒壁在上部荷载持续作用下产生蠕变变形,若筒壁厚度或配筋存在不对称性,徐变变形将表现为筒身整体倾斜,这种倾斜随时间缓慢发展且不可逆。徐变引起的偏差在施工期间难以直接测量,需通过理论计算进行预测,华能工程采用的徐变系数为2.0,计算得到的施工期徐变附加倾斜约为 $H/8000$ 量级,相对于垂直度限值影响较小但仍需纳入综合分析<sup>[4]</sup>。

## 3.3 测量仪器自身精度与对中误差的传播模型

测量误差的传播遵循误差理论的基本规律,独立误差源的影响可按方和根法则合成。激光铅直仪的投点误差包括仪器轴系残差与光束发散导致的光斑弥散,综合精度约为 $\pm 1.5$ 毫米;接收靶的判读误差约为 $\pm 1$ 毫米;仪器对中误差在采用强制对中装置后可控制在 $\pm 0.5$ 毫米以内,上述误差合成后单次投点的综合精度约为 $\pm 2$ 毫米。全站仪测量的误差源包括测角误差、测距误差与棱镜对中误差,在150米测距条件下综合点位精度约为 $\pm 2.5$ 毫米。两套系统相互独立,取其加权平均可进一步提高可靠性,若两者偏差超过5毫米则表明存在误差或系统误差需排查原因。误差传播模型的建立为测量方案设计与成果评定提供了理论依据。

## 3.4 筒壁几何中心与设计轴线的空间偏差合成分析

各标高层测得的圆心坐标与设计轴线坐标之差即为该层的平面偏差,全筒各层偏差矢量的空间分布特征反映了垂直度状态。偏差合成分析需区分随机分量与系统分量,随机分量表现为各层偏差矢量的方向散布,主要来源于测量误差与短周期环境扰动;系统分量表现为偏差矢量沿某一方向的趋势性累积,通常与施工过程中的模板调整偏差或长周期结构变形相关。华能工程的偏差分析采用最小二乘拟合方法,以设计轴线为基准拟合实测圆心坐标序列的最佳直线,该直线的倾斜度即为筒身整体倾斜,各层圆心相对于拟合直线的离散度则反映局部偏差水平。最终垂直度评定以筒顶圆心相对于筒底基准点的总偏差为判据,同时考察各层局部偏差是否存在突变。

# 4 误差控制工艺优化与效果验证

## 4.1 基于预测模型的模板预偏置补偿施工工艺

动态变形误差虽然在长期平均意义下趋于零,但施工期间的测量时机与浇筑时机往往不一致,测量时刻的筒身姿态与浇筑凝固时刻的姿态存在差异,这种差异若不加补偿将形成永久偏差。预偏置补偿工艺的理论基础在于将筒身视为弹性悬臂结构,其在外荷载作用下的变形可通过结构力学方法进行定量描述,变形量与荷载强度、作用位置及筒身刚度之间存在明确的函数关系,这一关系经过实测数据的标定后可用于变形预测。预偏置补偿工艺的核心思想是根据预测

模型估算测量时刻与浇注凝固时刻之间的筒身姿态变化量,在模板调整时预先施加反向偏置以抵消该变化量,其实施要点在于预测模型的精度与时效性,模型参数需根据工程实际进行动态修正以适应施工进度与季节变化。工程实践表明,预偏置补偿工艺将被动的事后修正转变为主动的事前控制,有效打断了偏差累积的链条,其应用使施工期偏差波动幅度显著降低<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 环境敏感时段测量规避与数据滤波处理方法

测量时段的选择对数据质量具有决定性影响,风荷载与日照温差作为主要的环境扰动源,其作用强度呈现明显的日变化规律,在扰动峰值时段进行测量将导致数据离散度急剧增大。环境敏感时段的界定需结合当地气候特征与筒身的热惯性进行分析,一般而言日出前后与日落前后的温度梯度最为平缓,风速通常也处于日变化的低谷期,是最适宜开展高精度测量的时间窗口。对于无法完全规避的环境扰动,数据滤波处理提供了一种事后修正的技术手段,其基本思想是利用扰动信号与有用信号在频域上的差异进行分离,短周期的随机扰动表现为高频分量,长周期的结构变形趋势表现为低频分量,低通滤波可有效提取后者。滤波算法的选择需兼顾平滑效果与相位保持,过度平滑会模糊真实偏差的时变特征,滤波处理后的数据更能反映筒身的真实几何状态,避免将瞬时扰动误判为永久偏差。

#### 4.3 关键标高断面垂直度验收与偏差趋势评估

施工过程中设置若干关键标高断面进行阶段性垂直度验收,华能240米烟囱在60米、120米、180米及240米四个标高设置验收断面,每个断面的验收限值为该标高对应的H/1000值。验收测量采用多时段多测回的冗余观测方案,至少在三个不同时段各进行两测回观测,取各时段成果的加权平均作为最终验收值,权重依据该时段的环境条件与数据离散度确定。偏差趋势评估通过绘制各层圆心偏差的矢量图与标量图进行,矢量图显示偏差的方向分布特征,标量图显示偏差绝对值随标高的变化趋势,若出现偏差加速增长或方向突变则需排查原因并采取纠偏措施<sup>[6]</sup>。

#### 4.4 四成筒后实体三维激光扫描与最终偏差分析报告

烟囱筒身施工完成后采用地面三维激光扫描仪进行整体扫描,这一技术手段可在短时间内获取筒壁外表面的海量点云数据,空间分辨率可达毫米级,为几何偏差的全面评估

提供了充分的数据支撑。点云数据处理的关键环节包括多站数据的配准拼接、噪声点与离群点的剔除以及目标几何体的拟合,配准精度直接影响最终成果的可靠性,需借助高精度控制点进行约束平差。圆柱面拟合采用最小二乘准则确定各标高层的圆心坐标与半径,拟合残差的分布特征可反映筒壁表面的局部不规则性,圆心坐标序列与设计轴线的比对即为垂直度偏差的直接度量。最终偏差分析报告详细记录了各阶段的测量数据、偏差演化过程及控制措施的实施效果,报告的编制应遵循完整性与可追溯性原则,为竣工验收提供技术文件支撑并为同类工程积累经验<sup>[7]</sup>。

## 5 结语

超百米烟囱筒壁垂直度控制是测量技术、施工工艺与误差分析的系统工程,华能240米烟囱工程的实践表明,激光铅直仪与天顶仪联测的基准传递体系可有效提高投点精度与可靠性,智能平台控制系统显著提升了模板调整效率与精度,基于预测模型的预偏置补偿工艺有效削减了动态变形误差的影响,环境敏感时段的测量规避与数据滤波处理保障了测量成果质量。最终垂直度偏差控制在规范限值的62%以内,验证了所采用技术体系的有效性。后续研究可关注实时监测与自适应控制技术的融合,进一步提升超高层结构施工的自动化与智能化水平。

### 参考文献

- [1] 罗鸣,超高层建筑物垂直度控制施工技术探讨[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(9):005-008.
- [2] 王新鹏,黄声享,康超.BDS/GPS组合定位在超高层建筑垂直度控制中的应用[J].测绘通报,2016(S2):89-92+129.
- [3] 谢力分,孙彪.某工程超高层建筑垂直度控制方法[J].长江工程职业技术学院学报,2016,33(1):22-25.
- [4] 王宇,张佳敏.超深大直径旋喷桩垂直度检测及控制研究[J].山西建筑,2024,50(16):83-88.
- [5] 钟英卓,崔忠辉,潘冬.钢筋混凝土烟囱滑模施工筒身垂直度控制[J].中国高新技术企业,2010(12):151-153.
- [6] 李常兵.烟囱施工控制的重点及常见质量问题的防控[J].企业科技与发展:下半月,2010(3):2.DOI:10.3969/j.issn.1674-0688.2010.06.014.
- [7] 缙慧娟,杨成龙.基于间接平差法的大型烟囱垂直度监测方法的研究[J].测绘与空间地理信息,2020.