



# 科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 2 Issue 12 December 2025 ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(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



科技创新与工程  
Technological Innovation and Engineering  
Volume 2 · Issue 12 · December 2025 · ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)



中文刊名：科技创新与工程

ISSN：3060-8996（纸质）3060-8988（网络）

出版语言：华文

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Technological Innovation and Engineering

ISSN: 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

Language: Chinese

URL: <http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn>

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《科技创新与工程》征稿函

期刊概况：

中文刊名：科技创新与工程

ISSN：3060—8996（Print） 3060—8988（Online）

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/tie-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。

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>



# 科技创新与工程

## Technological Innovation and Engineering

Volume 2 Issue 12 December 2025  
ISSN 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

主 编

康继军

Jijun Kang

编 委

刘 敏 Min Liu

龚勤林 Qinlin Gong

陈 升 Sheng Chen

包 艳 Yan Bao

夏旭东 Xudong Xia



1	电力技术在发电厂中的应用分析	25	输电线路弧垂在线监测方法
	/ 李金臣		/ 徐晟
4	基于液冷储能系统的建模与热管理分析	28	智能无功补偿技术在电力自动化中的应用
	/ 刘江跃 王亚东 刘英文 毛乃睿 宋圆美		/ 张鹤赢
7	极端气候背景下森林火灾风险预警模型构建及防控技术优化	31	复杂地层石油钻井设备安全监测与故障预警技术
	/ 李寅		/ 刘晓龙
10	森林病虫害监测与森林资源精细化管理实践	34	化妆品中微生物指标检验的质量控制体系构建与应用
	/ 张会岐		/ 胡冬立
13	大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术分析	37	智能化锚固板安装设备的设计与应用研究
	/ 秦岭		/ 谷志强
16	智能传感器在机电设备状态监测中的实践应用	40	光纤通信系统中光信号调制解调技术的创新应用
	/ 薛强强 白利敏		/ 王家强
19	FTTR 全屋千兆宽带用户迁移现状及难度分析研究	43	新能源集中式光伏 + 安全管理 + 生态环保三维协同模式构建与实践验证
	/ 桑维 谭颖芳 谷桂初		/ 吴永辉
22	智能电网输电线路的在线监测技术研究	46	新时期加强计量检定工作的措施分析
	/ 林静		/ 刘彦麟



1	Analysis of the Application of Power Technology in Power Plants / Jincheng Li	25	On-line Monitoring Method of Transmission Line Sag / Sheng Xu
4	Modeling and Thermal Management Analysis of Liquid-Cooled Energy Storage System / Jiangyue Liu Yadong Wang Yingwen Liu Nairui Mao Yuanmei Song	28	Application of Intelligent Reactive Power Compensation Technology in Power Automation / Heying Zhang
7	Construction of Forest Fire Risk Early Warning Models and Optimization of Prevention and control Technologies under Extreme climate conditions / Yin Li	31	Safety Monitoring and Fault Early Warning Technology for Complex Petroleum Drilling Equipment / Xiaolong Liu
10	Practice of Forest Pest Monitoring and Fine Management of Forest Resources / Huiqi Zhang	34	Construction and Application of Quality Control System for Microbial Indicator Testing in Cosmetics / Dongli Hu
13	Analysis of deformation control technology for large diameter shield tunneling under operating metro tunnel / Ling Qin	37	Design and Application Research of an Intelligent Anchor Plate Installation Device / Zhiqiang Gu
16	Application of Intelligent Sensor in Condition Monitoring of Electromechanical Equipment / Qiangqiang Xue Limin Bai	40	Innovative Application of Optical Signal modulation and Demodulation Technology in Optical fiber Communication systems / Jiaqiang Wang
19	Research on the current situation and difficulty analysis of FTTR gigabit broadband user migration / Wei Sang Yingfang Tan Guichu Gu	43	Construction and Practice Verification of a Three-Dimensional Collaborative Model of New Energy Centralized Photovoltaics + Safety Management + Ecological Environmental Protection / Yonghui Wu
22	Research on Online Monitoring Technology of Smart Grid Transmission Lines / Jing Lin	46	Analysis of Measures to Strengthen Metrological Verification Work in the New Era / Yanlin Liu

# Analysis of the Application of Power Technology in Power Plants

Jinchen Li

Hebei Jian Tou Renqiu Thermal Power Co., Ltd., Cangzhou, Hebei, 062550, China

## Abstract

Power plants serve as the supply side of energy transition, and the innovative application of power technology is the primary support for their high-quality development. From a micro-level perspective, this paper analyzes the significance of power technology in power plants, identifies existing issues such as imbalanced unit output regulation, inefficient operation and maintenance of power generation equipment, weak security protection for production data, and insufficient technical application coordination. Corresponding application strategies are proposed based on these problems, including the establishment of a power plant-level source-grid-load-storage coordinated regulation system, the construction of an intelligent operation and maintenance platform for the entire lifecycle of power generation equipment, the improvement of a hierarchical encryption protection mechanism for production data, and the creation of a technical collaborative operation framework. The research aims to provide feasible practical pathways for the implementation of power technology in power plants, enhancing the stability, efficiency, and safety of power plant operations.

## Keywords

Power technology; Power plant; Unit output regulation; Equipment operation and maintenance; data security

# 电力技术在发电厂中的应用分析

李金臣

河北建投任丘热电有限责任公司, 中国 · 河北 沧州 062550

## 摘 要

发电厂是能源转型的供给端, 电力技术的创新应用是发电厂高质量发展的主要支撑。本文从微观角度出发分析电力技术在发电厂的应用意义, 提出目前存在的机组出力调节不平衡、发电设备运维低效、生产数据安全防护薄弱、技术应用协同不足等问题。根据以上问题提出相应的应用策略, 建立发电厂级源网荷储协同调控体系、搭建发电设备全生命周期智能运维平台、完善生产数据分级加密防护机制、打造技术协同运行架构。研究目的在于给电力技术在发电厂中的落地应用提供可行的实践路径, 提高发电厂运行的稳定性、高效性、安全性。

## 关键词

电力技术; 发电厂; 机组出力调控; 设备运维; 数据安全

## 1 引言

随着新能源发电(光伏、风电)大规模并入、用电需求升级及能源结构转型加速, 传统发电厂由单一发电主体转变为源网荷储多主体协同的综合能源供给单元。结构性变革给发电运行的稳定性、能源利用效率、安全防控水平等各方面带来了新的挑战, 促使发电厂向智能化方向加速转型<sup>[1]</sup>。电力技术是智能发电厂建设的重要支撑, 包含构网型控制、人工智能调度、智能感知等诸多方面, 电力技术的应用效果直接关系到发电厂运行水平。从发电机组调节、核心设备维

护、生产数据采集传输、安全防护等环节, 电力技术的应用创新正在改变发电厂的运行逻辑。本文主要针对发电厂核心运行场景, 对电力技术的应用现实意义、存在问题和解决对策进行分析, 给提高智能发电厂实操能力提供参考。

## 2 电力技术应用于发电厂的意义

新能源普及、用电需求升级给发电厂带来稳定性、效率性、安全性三方面的考验。电力技术的应用可以解决以上的问题。平抑新能源出力波动、优化机组运行调度、革新运维模式、降低安全风险, 其价值体现在发电厂运行的全过程中。从稳定保障、效率提升、运维革新三个方面来分析技术应用的现实意义。

### 2.1 保障发电运行的稳定性

新能源大规模接入后, 传统发电厂因风光发电具有随机性、波动性, 容易出现机组出力失衡、电网接入端电压波

【作者简介】李金臣(1980-), 男, 中国河北清河人, 本科, 工程师, 从事运用系统工程、优化技术、管理科学等方法, 提升电力系统规划、设计、建设、运营和维护的效率、可靠性、安全性和经济性研究。

动、频率异常等问题,进而影响供电质量。电力技术的应用可以有效地解决这些问题,构网型技术把新能源发电机组、储能设备和传统火电、水电机组整合在一起,形成具有惯性支撑作用的复合电源,在系统出现故障的时候迅速调整机组出力、电压、频率等关键参数。智能调控技术可以及时响应发电厂源荷动态变化,防止机组过载、出力不足或者供电中断,给居民生活和企业生产提供稳定可靠的电力保障,从能源供给端筑牢电力系统安全防线。

## 2.2 提升能源利用的高效性

传统发电厂能源浪费、利用效率低的问题,在新能源消纳、机组负荷优化分配上表现得尤为明显。电力技术通过精准感知与智能调度,实现对能源的优化配置。人工智能预测模型能够提前掌握区域内用电负荷、新能源出力变化趋势,优化传统机组启停计划、引导储能设备在电价低谷充电、高峰放电,既降低发电厂运行成本,又促进绿电消纳。发电厂厂区内智能电力监控技术可以对锅炉、汽轮机、发电机等主要设备及辅助系统的能耗情况进行实时监测,找到无效耗能的场景,给节能改造提供数据支持,使能源利用达到高效化的目的。

## 2.3 推动发电运维的智能化

传统的发电厂运维依靠人工巡检,存在效率低、隐患发现不及时等问题,对锅炉炉膛、烟囱、高压输电线路等高危或者复杂区域,人工巡检成本高、安全性差<sup>[2-3]</sup>。电力技术的应用使运维方式发生变化,无人机、智能巡检机器人配合三维建模软件,可以对发电厂核心设备、附属设施进行全方位自动巡检,准确找出设备磨损、泄漏、温度异常等隐患。远程监测技术使运维人员可以在主控室随时掌握机组运行状况、设备参数变化,由被动抢修变为主动预警,大大提高了运维效率,降低了人力成本和安全风险。

# 3 电力技术在发电厂应用中的突出问题

虽然电力技术给发电厂的发展提供支持,但是实际落地过程中还存在着许多现实的障碍。新能源接入后源荷波动加剧,传统调控技术难以应对,人工主导的运维模式低效且有盲区,海量生产数据增长给安全防护带来压力,多系统数据不通造成技术应用碎片化。这些问题都会对发电厂的运行效率产生影响,必须从实际运行场景出发,对问题进行准确的分析,为之后的策略制定提供依据。

## 3.1 机组出力调控失衡,技术适配性不足

发电厂由于新能源发电机组集中接入、用电负荷动态波动,源荷平衡难度增大,传统调控技术不能实现实时精准平衡。部分发电厂仍然沿用固定化的“一刀切”调控方式,不能根据新能源出力、用电负荷的动态变化实时调整机组运行参数,造成新能源电力浪费或者机组出力与负荷不匹配,导致供电稳定性下降。同时,不同发电厂的机组类型(火电、

水电、新能源)、负荷特性、能源结构存在差异,通用型调控技术难以精准匹配实际需求,造成调控效果参差不齐,不能充分发挥能源资源利用价值。

## 3.2 发电设备运维模式传统,全周期管理缺失

目前部分发电厂设备运维仍然以定期人工巡检为主,该种模式存在着明显的不足。汽轮机叶片、变压器绕组等精密零件,人工巡检容易漏检、误判;分散布置的辅助设备,巡检周期长,不能及时发现潜在故障。设备从采购、安装、运行到报废的全生命周期数据分散在不同管理系统中,未进行整合分析(或“未统一分析”),不能根据设备的运行状态来制定有针对性的维护计划,造成过度维护或者维护不足的现象,影响设备的使用寿命以及运行可靠性。

## 3.3 生产数据安全防护薄弱,风险防控有漏洞

发电厂运行产生大量的核心数据,包括机组运行参数、调度指令、设备运维记录、人员操作信息等,这些数据的安全防护存在很多隐患。数据传输过程中部分环节使用未加密的通信方式,容易造成数据被篡改或者窃取;存储时敏感数据没有分级保护,存在泄露风险<sup>[5]</sup>。缺少专业的安全监测系统,不能对数据访问异常、网络攻击等行为进行实时识别,一旦发生数据安全事件,将会影响发电厂正常运行和电力系统的稳定,损害企业及用户的权益。

## 3.4 技术应用协同不足,资源整合能力差

电力技术在发电厂的应用具有碎片化的特征,各个系统之间没有有效的协同。机组调控系统与设备运维平台数据不通,调控指令不能结合设备健康状况来制定;通信系统与安全防护系统各自为政,不能在数据传输过程中同步开展安全监测。协同不足造成技术资源不能很好地整合,产生重复建设、功能重叠等问题,增加发电厂建设和运营成本,降低整体运行效率,限制电力技术价值的最大化发挥。

# 4 电力技术在发电厂中的应用策略

解决上述发电厂运行问题,以技术落地为主,根据发电厂实际运行情况提出相应的策略。围绕机组出力调控、设备运维、数据安全、技术协同四个痛点,依托现有的电力技术基础,聚焦实际场景的可操作性,用定制化的方案破解适配难题、提高运维效率、筑牢安全防线、强化资源整合,使技术真正为发电厂高效安全运行服务。

## 4.1 构建发电厂级源网荷储协同调控体系,实现精准适配

就机组出力调控失衡问题而言,以传统机组、新能源发电机组、储能设备协同运行为中心,创建“云边协同”的智能调控体系。在边缘侧部署发电厂智能中枢终端,实时采集各类机组、储能系统、电网接入端的运行数据,作为就地决策的小脑,利用时空预测模型准确判断源荷波动趋势。采用混合粒子群算法和遗传算法制定差异化调控策略,根据发



电厂机组类型、负荷特性,在新能源出力高峰时,引导储能设备充电、调整传统机组降出力运行状态;在用电高峰时,调度储能设备放电、传统机组满负荷运行,实现源荷实时平衡。云端创建智能发电调度中枢,汇总各个发电厂的数据进行全局优化,然后给边缘终端下发协同调控指令,实现就地响应和全局优化的有机融合。并构建调控策略动态更新机制,利用边缘 AI 小模型持续学习的方式去适应机组状态变化、负荷波动和设备升级需求,保证调控效果的长期稳定。

#### 4.2 搭建发电设备全生命周期运维平台,推行智能联动运维

以提高设备运维效率、可靠度为最终目的,创建包含采购、运行、维护、报废全过程的智能运维平台。设备采购时录入型号、技术参数、质保期等基本信息,运行阶段用物联网传感器实时采集设备温度、振动、压力、通信状态等数据,接入平台形成完整的设备健康档案[6]。对发电厂集中布置的核心设备(锅炉、汽轮机、发电机)采取无人机和巡检机器人协同巡检的方式,利用三维建模软件规划出最佳巡检路线,采用一点多拍、图像识别技术准确发现故障隐患。对于分散布置的辅助设备,采用生产数据采集系统进行远程监测,根据运行数据的趋势分析自动生成维护提醒。创建设备故障分级响应机制,明确 A 级故障(机组跳闸、重大泄漏)需在 30 分钟内启动远程或现场抢修, B 级故障(辅助设备异常)需在 2 小时内派人到达现场处理,将故障处理结果录入平台形成运维闭环,为设备升级更新提供数据支撑。

#### 4.3 建立生产数据分级加密机制,强化全流程安全防护

以防范数据安全风险为主,创建传输加密、存储保护、监测响应全流程防护体系。首先对生产数据进行分类分级,把机组核心运行参数、调度指令、用户用电隐私信息列为敏感数据,把环境监测数据、普通设备运行参数列为普通数据。传输环节使用 TLS/SSL 加密协议和 VPN 隧道技术,对敏感数据进行双重加密传输,保证数据从终端到平台之间的完整性、保密性。存储环节使用 AES256 加密算法对敏感数据进行加密存储,实行基于角色的访问控制,不同岗位人员只可以访问权限范围以内的数据,定期进行数据备份以及容灾演练。建立智能安全监测平台,对数据访问行为、网络流量进行实时监测,部署入侵检测系统来发现异常访问和攻击行为,发现风险立即触发告警并启动自动化响应机制,阻止风险的扩散。定期开展数据安全培训,提高运维和操作人员的安全意识,防止人为操作造成的安全隐患。

#### 4.4 打造发电厂技术协同运行架构,提升资源整合能力

针对技术应用碎片化问题,创建云边端协同的技术运行架构,实现各系统资源高效整合。在云端创建统一的数据共享平台,打通机组调控系统、设备运维平台、安全防护系统之间数据接口,使数据实时共享互认。机组调控系统制定调度策略的时候,可以调用运维平台的设备健康数据,防止给故障设备下达不合理指令;安全防护系统可以实时获取通信系统的传输数据,从而实现对安全风险的精准识别。加强边缘侧智能中枢的协同调度能力,对发电厂内各种感知终端、调控设备、安全装置进行统筹协调,实现信息流、控制流、能量流的协同运行。统一终端设备接入标准,使新增发电设备和技术可以快速接入系统与已有设备协同工作,避免重复建设,提高技术资源利用率。

### 5 结语

电力技术在发电厂的应用是推动发电厂转型升级的重要力量,其应用效果直接决定着发电厂运行是否稳定、高效、安全。目前发电厂在机组出力调节、设备维护、数据安全和技术协同等方面存在的不足,限制了发电厂价值的最大化发挥。创建精准匹配的源网荷储协同调控体系、全生命周期的智能运维平台、全流程的数据安全防护机制、协同高效的技术运行架构,可以较好地解决上述实际问题,提高电力技术应用的针对性、可操作性。随着电力技术不断创新,它在发电厂的应用会越来越深入,给能源转型、新型电力系统建设提供强有力的支撑,促使发电厂由单一发电主体向综合能源供给平台转变。

#### 参考文献

- [1] 谢礼. 智能电网运维技术在电力工程输电线路故障检测中的应用[J]. 电气技术与经济, 2025, (10): 121-123.
- [2] 徐国辉, 吴俊佚, 刘涛, 武刚, 葛宏泽. 智能电网在电力技术及电力系统规划中的应用研究[J]. 中国管理信息化, 2021, 24 (02): 131-132.
- [3] 常宽, 路英伟, 张竹青, 严伟, 吴春雷. 新时期智能电网在电力技术及电力系统规划中的运用[J]. 电工技术, 2025, (S1): 701-703+706.
- [4] 陆妍. 智能电网建设中远程用电检查技术在电力营销中的应用[J]. 城市建筑空间, 2025, 32 (S1): 471-473.
- [5] 王哲. 电价模型与智能电网技术在电力工程管理与营销中的应用研究[J]. 城市建筑空间, 2024, 31 (S2): 428-429.
- [6] 陆妍. 智能电网建设中远程用电检查技术在电力营销中的应用研究[J]. 城市建筑空间, 2024, 31 (S2): 434-436.

# Modeling and Thermal Management Analysis of Liquid-Cooled Energy Storage System

Jiangyue Liu<sup>1</sup> Yadong Wang<sup>2</sup> Yingwen Liu<sup>2</sup> Nairui Mao<sup>1</sup> Yuanmei Song<sup>1</sup>

1. School of Mechanical and Vehicle Engineering Linyi University, Linyi, Shandong, 276000, China

2. Shandong Aode Shengkai Energy Co., Ltd., Linyi, Shandong, 276000, China

## Abstract

With the rapid development of China's economy and the continuous rise in social electricity consumption, traditional distribution networks face the contradiction of peak-valley difference and the difficulties of dispatching management. Energy storage systems have become an important direction to solve this problem. This study systematically investigates liquid-cooled energy storage systems, demonstrating the feasibility of liquid cooling technology in large-capacity applications through theoretical modeling and thermal analysis. Using a 280Ah lithium iron phosphate battery assembled into a 1.066MWh liquid-cooled system, precise thermal modeling and optimized configuration enabled effective temperature control within the optimal range of  $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  during 1C-rate discharge, with total heat generation of approximately 28kW. The research reveals that liquid-cooled systems exhibit significant advantages in heat dissipation efficiency, temperature control precision, and space utilization, providing reliable technical support for the safe and stable operation of large-capacity energy storage systems.

## Keywords

liquid-cooled energy storage system; model assembly; thermal analysis calculation

# 基于液冷储能系统的建模与热管理分析

刘江跃<sup>1</sup> 王亚东<sup>2</sup> 刘英文<sup>2</sup> 毛乃睿<sup>1</sup> 宋圆美<sup>1</sup>

1 临沂大学机械与车辆工程学院, 中国·山东·临沂 276000

2. 山东奥德圣凯能源有限公司, 中国·山东·临沂 276000

## 摘 要

随着中国经济的高速发展和社会用电量持续攀升, 传统配电网面临峰谷矛盾和调度管理的难题, 储能系统成为解决这一方向的重要方向。本文对液冷储能系统进行了系统性研究, 从理论建模到热分析计算, 论证了液冷技术在大容量储能系统中应用的可行性。通过使用280Ah磷酸铁锂电池组装成1.066MWh液冷储能系统, 通过精确的热模型计算和优化配置, 在1C倍率放电时系统总产热功率约28kW的情况下, 成功将电池工作温度控制在 $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的最佳范围内。研究表明, 液冷储能系统在散热效率、温度控制精度、空间利用率等方面均展现出了显著的优势, 为大容量储能系统的安全稳定运行提供了可靠技术保障。

## 关键词

液冷储能系统; 模型装配; 热分析计算

## 1 引言

随着当前中国经济的高速发展, 整个社会用电量攀升, 传统的配电网存在昼夜间, 季节间负荷差异较大的情况, 传统的“即发即用”的供电模式不断地显现出其缺陷, 每年的电网的谷电余量巨大导致其浪费, 解决电网峰谷差的矛盾已

成为国家能源局电力改革的重要方向<sup>[1]</sup>, 且电网调度管理的难度也在逐渐增大。而储能系统的搭建可以很好的解决这一问题, 当今国家电网使用储能系统来对电网进行调频、调峰, 解决余电的浪费已成为重要趋势。但储能系统也会有缺陷, 热失控正是储能系统最大的安全隐患, 尤其是在大规模的储能系统当中, 随着电池能量密度和运行环境复杂性的提升, 热失控的风险会更加显著<sup>[2]</sup>, 近几年我国储能系统的火灾事故频发, 造成了不小的经济财产损失。所以对储能系统的合理规划和分析显得尤为重要。

为保证储能系统的安全运行, 设计一个合理的储能系统模型, 并对其进行热分析尤为关键, 目前常用的系统包含传统风冷和新型液冷型两种, 传统的风冷系统存在很多的弊

【基金项目】山东省科技型中小企业提升计划项目(项目编号: 2024TSGC0872)及临沂大学大学生创新创业项目支持(项目编号: X2025104520635)。

【作者简介】刘江跃(2005-), 男, 中国重庆人, 本科, 从事能源动力研究。

端,如“木桶效应”即但储能系统当中,单个电芯出现故障或容量衰减时会导致整个储能系统故障而容量输出也会异常。电芯会出现温差,风冷散热是通过风扇将电芯产生的热量带走,再通过空调集中带到系统的外部没有办法均匀快速的导出电芯的热量,导致电池的电芯出现温差,对整个系统的寿命和安全产生很大的影响。且占地空间大,为保证风冷储能系统的散热有效,同等容量的储能系统需要布置大量的风道和大功率的工业空调<sup>[3]</sup>。液冷储能系统使用液冷技术通过液体对流换热,将电池的热量带走降低电池温度,而液体(如水、乙二醇)的比热容和导热系数远高于空气,可实现对电芯的精准、高效散热,并且可显著延长电池寿命与系统性能,且液冷系统优异的温控均匀性减少了电芯衰减,提升全生命周期放电容量<sup>[4]</sup>。且液冷系统结构紧凑,能量密度高,液冷管路体积远小于风道,省去了庞大的内部风道空间,使系统集成度大幅提升,在相同容量下,液冷储能系统的占地面积可减少40%以上。因此,本文以先进的液冷储能系统为例,通过实际建模设计电池组模型,再通过经典储能电池数据和公式对模型进行简要的热分析并确定其可行性。

## 2 液态储能系统的设计

本文所涉及液冷储能系统的设计基于实际实施项目,采用“电池包—电池簇—电池舱”三级架构,并配置混合容量的储能设备。液态储能系统主要由电池包、电池簇、电池舱三个主要部分组成。电池簇是由电池包组成的(如图1),左边为电池包,中间为电池簇,最右侧为电池舱,内有多个电池簇,还有直流汇流箱、隔离变压器、交流配电柜等结构。同时,在电池包里有散热片将电芯进行围绕,同时为确保高效散热与温度分布的均匀性,设计过程遵循了以下原则:首先要遵循散热路径最短化原则,通过优化导热界面以减少热阻;第二要实施散热面积最大化原则,增大散热片与电芯的接触面积通过增加散热鳍片或扩大液冷流道截面积以提升散热效率;最后还要遵循热均衡原则,通过合理布置热管理单元,确保电池包内部温度场的均匀分布,避免出现局部温度过高<sup>[5]</sup>。本设计采用冷却介质为50%水与50%乙二醇混合液,液冷板采用铝合金材质并设计为微通道流道,通过导热界面与电芯底部贴合,单簇有效换热面积约为0.8m<sup>2</sup>,该设计直接关联后续牛顿冷却定律中的换热面积与温差计算,旨在实现将电池工作温度控制在25℃±3℃的目标,从而验证液冷系统在均匀散热与温度控制方面的有效性。

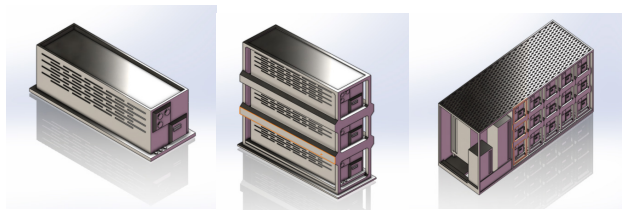


图1 液冷储能系统示意图

## 3 电池组热模型的计算与液冷的可行性分析

我们采用经典的280Ah电池作为研究对象,单体尺寸为174mm×54mm×208mm,单体标称电压3.2V,工作温度范围-20℃至55℃,最佳工作温度区间为20℃至35℃,将其装配起来组成电池簇,作为核心的储能单元,单个电池簇规格为761.6V/280Ah,额定容量213.25kWh,整个系统共配置5台电池簇,总容量达到1.066MWh。这种大容量的电池在充放电的过程当中会产生大量的热量,需要做到及时有效的散热,否则会导致电池温度的升高,进而影响到电池的性能和寿命,加速电池容量的衰减,甚至会引发热失控导致火灾。

在充放电过程中,电池的产热主要来源于内阻产生的焦耳热和电化学反应热。根据经典的电池热模型理论,单体电池的产热功率可以表示为两部分之和,即欧姆热和极化热与反应热的综合。280Ah磷酸铁锂电池,在1C倍率放电时电流为280A,其内阻约为0.3mΩ。

由焦耳定律(1)得,其中Q为单体电池的欧姆产热功率,I为电流,R为内阻,即 $280^2 \times 0.0003 = 23.52\text{W}$ 。根据电池簇的电压配置,利用公式(2)计算单体电池数量,其中n表示单簇包含多少节电池, $U_{\text{pack}}$ 表示电池簇电压, $U_{\text{cell}}$ 表示单体电压,即单簇包含238节单体电池( $761.6\text{V} \div 3.2\text{V} \approx 238$ 节),单个电池簇在1C放电工况下的总产热功率利用公式(3)进行计算,其中 $P_{\text{total}}$ 为总产热功率, $Q_{\text{cell}}$ 为单体产热,n为电芯数量,即 $23.52 \times 238 = 5597.76\text{W}$ ,约为5.6kW。整个储能系统共有5个电池簇,用公式(4)得,其中 $P_{\text{system}}$ 表示的就是总产热功率, $P_{\text{pack}}$ 表示为单簇产热,N表示为电池簇数量,即总产热功率将达到28kW左右。

$$Q = I^2 \times R \quad (1)$$

$$n = \frac{U_{\text{pack}}}{U_{\text{cell}}} \quad (2)$$

$$P_{\text{total}} = Q_{\text{cell}} \times n \quad (3)$$

$$P_{\text{system}} = P_{\text{pack}} \times N \quad (4)$$

为了使电池的温度可控,我们通过液冷系统对其进行散热,冷却液为50%水与50%乙二醇的混合液,其比热容约为3.5kJ/(kg·K),密度约为1050kg/m<sup>3</sup>,导热系数约为0.4W/(m·K),这种混合液相对空气具有优异的参数,相对比空气的比热容仅为1.005kJ/(kg·K),导热系数仅为0.026W/(m·K),这更加证明了液冷系统比风冷系统具有更高的效率,能够对电芯进行快速、均匀散热。

液冷板采用铝合金材质制作,铝合金具有约200W/(m·K)的高导热系数,能够快速将电池表面的热量传导至液冷板内部的流道中。液冷板内部采用微通道设计,通过增加流道数量和优化流道布局来增大换热面积,提高换热效率。每个电池簇配置专用的液冷板,液冷板通过导热界面材料与电芯紧密接触,由于单体电芯尺寸为174mm×54mm×



208mm, 单节电芯底部面积  $= 0.174\text{m} \times 0.208\text{m} = 0.036\text{m}^2$ , 如果所有的 238 节电芯都与液冷板接触, 那么理论总面积  $= 0.036 \times 238 = 8.57\text{m}^2$ , 但在实际模型当中, 电芯之间包含间隙, 液冷板也不是和所有电芯都直接接触, 更具液冷储能工程的设计经验, 有效换热面积约为理论面积的 10%-15%, 也就是  $0.8\text{m}^2$ 。牛顿冷却定律描述了固体表面与流体之间的对流换热过程, 其数学表达式为 (5), 同时在定律液冷系统的对流换热系数  $h$  约为  $1000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 利用公式 (5), 其中  $Q$  为传热功率  $\text{W}$ ,  $h$  为对流换热系数  $2.3$  数  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $A$  为换热面积  $\text{m}^2$ ,  $\Delta T$  为固体表面与流体之间的温度差  $^{\circ}\text{C}$ 。我们已经计算出了单个电池簇的散热需求其在 1C 放电工况下的产热功率约为  $5.6\text{kW}$ , 单个电池簇配置的液冷板有效换热面积为  $0.8\text{m}^2$ , 液冷系统的对流换热系数  $h$  约为  $1000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 为了将  $5.6\text{kW}$  的热量有效导出, 所得的温度差可通过公式 (5) 的变形公式 (6) 反推  $\Delta T = 7^{\circ}\text{C}$ , 假设冷却液入口温度设定为  $20^{\circ}\text{C}$ , 那么电芯表面温度约为  $27^{\circ}\text{C}$ , 完全处于宁德时代磷酸铁锂电池  $20^{\circ}\text{C}$  至  $35^{\circ}\text{C}$  的最佳工作温度区间内。

$$Q = h \times A \times \Delta T \quad (5)$$

$$\Delta T = \frac{Q}{h \times A} \quad (6)$$

根据上述对液冷系统的精心设计和优化配置, 可以将电池工作温度精确控制在  $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  的理想范围内, 这一区间刚好处于研究对象宁德时代磷酸铁锂电池的最佳工作温度范围, 对比传统的风冷系统可能出现  $10^{\circ}\text{C}$  温差显著提升了温度的均匀性。可以有效延长电池寿命、提高系统的可靠性, 进而优化前面所提到的风冷储能系统的“木桶效应”。

并且从系统集成的角度来看, 液冷系统的结构更加紧凑、能量密度更高, 其液冷管路的体积远远小于风冷系统所需的风道空间, 省去了庞大的内部风道和大功率工业空调, 使得系统的集成度大幅度的提升, 在相同容量的条件下液冷储能系统可以有效的减少 40% 以上的占地面积。

综上所述, 基于 280Ah 电池的该液冷储能系统热模型

设计十分合理, 经过详细的热分析计算, 验证了该系统能够满足  $1.066\text{MWh}$  储能容量的散热需求。凸显了液冷技术高效的散热能力、精准的温度控制以及优异的温度均匀性, 为大容量储能系统的安全稳定运行提供可靠的技术保障, 奠定了储能系统向更高能量密度、更大规模方向的基础。

## 4 结语

本文对液冷储能系统进行了初步探索和研究, 先对整个液冷系统进行了理论建模再进行热分析计算, 证明了液冷技术在大容量储能系统中的应用可行性。对比于传统风冷系统, 液冷储能系统在散热效率、温度控制精度、空间利用率等方面均展现出显著优势, 很好的弥补了风冷储能系统的缺点。通过使用经典的 280Ah 磷酸铁锂电池组装成  $1.066\text{MWh}$  液冷储能系统, 进行了精确的热模型计算和优化配置, 成功将电池工作温度控制在  $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  的最佳范围内, 相比风冷系统显著提升了温度均匀性。有效解决了传统风冷系统的“木桶效应”问题, 为电池全生命周期的安全稳定运行提供了可靠保障, 并且还可以有效的减少占地面积, 为液冷储能系统的工程化应用提供了理论依据和设计参考, 也为推动储能技术向更高能量密度、更大规模、更高安全性方向发展奠定了基础。未来, 随着液冷技术的不断优化和成本的进一步降低, 液冷储能系统将在构建新型电力系统、完成我国的“双碳”目标中发挥更加重要的作用。

## 参考文献

- [1] 董华佳, 曾智勇, 周厚国. 智慧能源在储能领域的应用[J]. 环境技术, 2018, 36(05): 92-95+109.
- [2] 王雅博, 刘渊, 李海龙, 等. 电池储能系统热管理现状综述[J]. 制冷与空调, 2025, 25(10): 60-70+90.
- [3] 曾春保, 李春生, 李长成. 液冷储能系统关键技术设计及应用[J]. 中国高新科技, 2025, (06): 63-65.
- [4] 吴超, 王罗亚, 袁子杰, 等. 液冷散热技术在电化学储能系统中的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3596-3612.
- [5] 王乃新. 新型锂离子储能系统散热结构优化设计[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(07): 32-34.

# Construction of Forest Fire Risk Early Warning Models and Optimization of Prevention and control Technologies under Extreme climate conditions

Yin Li

Tulihe Forest Industry Co., Ltd., Inner Mongolia Daxing 'anling Forest Industry Group, Hulun Buir, Inner Mongolia, 022150, China

## Abstract

Global warming has led to frequent extreme weather events such as high temperatures, droughts, and strong winds, significantly increasing the frequency, intensity, and spread speed of forest fires, posing a serious threat to ecosystem security, biodiversity conservation, and the human living environment. Based on the driving mechanism of extreme climate on forest fires, this paper systematically analyzes the core elements and technical paths for the construction of early warning models, proposes a multi-dimensional index system covering meteorology, vegetation, terrain, and human factors, and focuses on discussing the application of intelligent models such as deep learning in risk early warning. At the same time, in combination with the modern prevention and control practices in Chongqing and other places, optimization strategies for prevention and control technologies are proposed from four dimensions: monitoring and early warning, barrier prevention and control, emergency response, and technological support, providing theoretical support and practical reference for precise prevention and control of forest fires under extreme climate conditions.

## Keywords

Extreme climate; forest fire; Risk warning model; Prevention and control technology; Intelligent optimization

# 极端气候背景下森林火灾风险预警模型构建及防控技术优化

李寅

内蒙古大兴安岭森工集团图里河森林工业有限公司, 中国·内蒙古 呼伦贝尔 022150

## 摘 要

全球气候变暖导致高温、干旱、强风等极端天气事件频发,显著加剧了森林火灾的发生频率、强度及蔓延速度,对生态系统安全、生物多样性保护和人类生存环境构成严重威胁。本文基于极端气候对森林火灾的驱动机制,系统分析了预警模型构建的核心要素与技术路径,提出了涵盖气象、植被、地形、人为因素的多维度指标体系,重点探讨了深度学习等智能化模型在风险预警中的应用;同时结合重庆等地现代化防控实践,从监测预警、阻隔防控、应急处置、科技支撑四个维度提出防控技术优化策略,为极端气候背景下森林火灾精准防控提供理论支撑与实践参考。

## 关键词

极端气候; 森林火灾; 风险预警模型; 防控技术; 智能化优化

## 1 引言

在全球变暖趋势日益明显的今天,极端天气和气候事件已经形成“新常态”,世界各地频发的高温热浪、持续干旱和大风等灾害,显著改变了林火的发生规律,并表现出“频次高、范围广、强度大、周期长”的新特点,使得传统的预警和防控方法很难满足新的要求。在这一背景下,建立科学、精确的林火风险预警模型,并对防控技术系统进行优化升级,以达到“早期预警、早期发现、早期处置”的目的,对减少林火损失,保障生态安全,具有重大的现实与战略价值。

【作者简介】李寅(1986–),男,中国内蒙古通辽人,本科,工程师,从事林业研究。

值。因此,本项目拟借鉴国际上的最新研究成果和实际应用经验,系统地研究极端天气条件下林火风险预警模型的建立方法,并提出有针对性的林火防控技术方案。

## 2 极端气候背景下森林火灾风险预警模型构建

### 2.1 预警模型构建的核心原则

在极端气候背景下构建森林火灾风险预警模型,应重点把握以下三项关键原则:

首先,模型必须具备动态适应能力,能够灵敏响应极端天气的实时变化,尤其要能准确捕捉高温、干旱、强风等关键气象因子的突变趋势。其次,模型构建应坚持多因子融合的思路,需要综合纳入气象条件、植被状态、地形特征及人为活动等多维度要素,避免因依赖单一因子而导致预警结

果片面。最后,模型需在精准性与时效性之间取得平衡,在确保预警结果可靠的前提下,尽可能优化算法效率,保障预警信息能够及时发布,为应急响应争取宝贵时间。

## 2.2 多维度预警指标体系构建

本研究从极端气候驱动机制出发,构建了一套包含4个一级指标与12个二级指标的森林火灾风险预警指标体系,具体构成如下:

(1) 气象极端性指标:涵盖极端高温累积天数(连续 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 日数)、干旱程度(采用标准化降水蒸散指数 SPEI 衡量)、极端风速(取最大瞬时风速)及闪电频次。这些指标主要用于刻画极端气象条件对火灾发生的影响。其中,干旱程度评估需综合 SPEI 在近30天、60天和90天三个时间尺度上的表现,以全面反映可燃物的干湿状况。

(2) 植被可燃物指标:包括植被类型、归一化植被指数(NDVI)、地表可燃物载荷以及可燃物含水率。该组指标着重体现森林本身的易燃属性。例如,针叶林通常比阔叶林更容易燃烧;NDVI则能够指示植被覆盖密度和生长状态,间接反映可燃物积累情况。

(3) 地形环境指标:选取坡度、坡向、海拔和平面曲率四个因素。地形通过改变局部气候条件和火势蔓延路径来影响火灾风险。一般而言,坡度愈大,火蔓延越快;阳坡因太阳辐射较强,可燃物更干燥,故火灾风险也相对较高。

(4) 人为活动指标:包括与道路的距离、与居民点的距离以及历史人为用火频次。这些指标反映了人类活动对火灾发生的“放大”作用。通常,离道路和居民区越近的区域,由人为原因引发火情的可能性越大,需要加强监测。

在指标预处理阶段,首先采用最小-最大归一化方法将各指标数值转换到(0,1)区间。随后,通过计算方差膨胀因子(VIF)并结合 Pearson 与 Spearman 相关系数分析,剔除其中信息重叠的冗余指标,以降低多重共线性问题对后续预警模型准确性的干扰<sup>[1]</sup>。

## 2.3 基于深度学习的预警模型构建与优化

传统预警模型(如逻辑回归、支持向量机)在处理极端气候下复杂时空数据时存在精度不足的问题,深度学习模型凭借强大的特征提取能力,已成为森林火灾预警的主流技术方向:

(1) 数据获取与融合:利用谷歌地图获取 MCD64A1 卫星遥感影像资料,并联合 ASTERGDEM 地形资料、中国科学院气象资料、中国科学院植被指数、人类活动因子等数据,构建 2009-2018 年的林火及其致因因子数据库。在此基础上,利用光谱综合技术,建立多源栅格数据集。

(2) 样本构建与平衡:选取历史火点作为正样本(火灾发生概率=1),通过随机点生成工具生成非火点作为负样本(火灾发生概率=0),构建 5560 个训练样本,解决数据不平衡问题。

(3) 模型训练与优化:构建包含输入层、卷积层、池

化层、全连接层和输出层的 CNN 模型。输入层接收多维度指标数据,卷积层通过  $3\times 3$  卷积核提取时空特征,池化层采用最大池化减少参数维度,全连接层将提取的特征映射到风险等级空间,输出层采用 Softmax 函数输出高、中、低三个风险等级。通过网格搜索法优化模型参数,设置学习率为 0.001,迭代次数为 100, batch\_size 为 32。

(4) 模型验证与对比:本研究以被试作业特性曲线下积(AUC)为评估指标,其 AUC 值达 0.86,超过了传统模型如随机森林(AUC=0.79)和 SVM(AUC=0.76),具有较高的预测准确率。在此基础上,引入极端天气突变因素的权重,实现对高温、大风等极端天气事件预警阈值的动态调整,提高模式对极端天气的适应能力<sup>[2]</sup>。

## 3 极端气候背景下森林火灾防控技术优化路径

### 3.1 优化火情监测预警技术体系

立足极端气候条件下森林火情的突发性、隐蔽性与蔓延快等特征,对现有监测预警体系进行迭代升级,健全卫星遥感监测、航空巡护排查、智能视频监控、塔台定点瞭望、地面人员巡护、网络舆情监测六位一体的立体化火情监测网络,全面强化极端天气下火情监测的全天候覆盖能力与高精度识别水平。

在具体技术优化层面,首要推进高精度遥感监测技术的落地应用,依托哨兵-2号高分辨率卫星遥感数据提升火点定位与识别的精准度,搭配无人机航空巡护模式完成重点林区的全域覆盖式监测,针对高纬度偏远林区、极端气候影响的高风险片区,适当提升航空与地面巡护的频次,消除火情监测盲区;搭建基于 5G 通信技术的应急传输保障网络,破解强风、暴雨、雷电等极端天气下的通信传输难题,保障火情监测数据的实时稳定回传,最终实现火情信息的一屏统览、应急指令的一键调度,筑牢智慧化火情监测预警防线。

### 3.2 升级林火阻隔防控技术布局

极端气候诱发的森林火灾常呈现蔓延迅猛、影响面广、扑救艰巨的特征,围绕提升阻隔效能这一核心目标,需对林区防火阻隔网络开展科学优化与系统性布局。

其一,打造“天然阻隔+人工防控”协同发力的复合型林火阻隔网络,结合林区地形地貌条件,深度挖掘并利用河流、沟壑、山体陡坡等天然防火屏障的阻隔价值,同步配套建设防火公路、生物防火林带、林下防火通道等人工阻隔设施,推动重点林区林火阻隔网密度达到 4.7 米/公顷以上,构建起多层次、无死角的物理阻隔防线。

其二,全域推进以水灭火技术应用体系建设,结合极端高温干旱的气候背景,秉持“自然水源利用与人工补水互补、固定消防水池与移动蓄水装置搭配、消防管网全域联通”的建设理念,在火灾高风险林区合理布设消防水池、消防栓及输水管网,切实解决极端干旱天气下灭火供水不足的难题。



其三,改进林区可燃物清理整治技术方法,在森林火灾高发期来临前,推行以机械清理为主、计划烧除为辅的综合整治手段,精准清除林下枯枝落叶、杂草等易燃堆积物,降低林区易燃物承载量,从源头遏制极端森林火灾的发生风险与燃烧强度<sup>[3]</sup>。

### 3.3 完善火灾应急处置技术与机制

在应对极端天气条件下,必须坚持“快速响应、科学扑救、安全处置”的核心理念,实现对整个过程的技术和机理的优化,使其整体水平得到有效的提高。在此基础上,针对高温干旱、持续大风、暴雨后干旱等多种气象场景,建立有针对性的火灾应急处置方案,确定不同级别火灾的分级响应流程、处置标准和职责分工,使火灾处置规范化、科学化。

在此基础上,加强专业扑火队伍的建设和应急设备的更新,依托国有林场,建立“一专多能”的专职扑火队伍,配备齐高性能的消防水车、高压水泵、移动式储水设备等以水灭火的核心设备,并在此基础上推广应用北斗导航定位系统,使扑火队员的位置精确定位、火情现场态势研判和应急指令的有效调度,提高扑火作业的精准性与安全性。

同时,深化跨地区联防联控、联勤协作机制,建立省、市、县、乡、村五级扑火队伍的协调联动机制,加强与专业消防队伍的应急联动衔接,常态化开展联合演练与应急值守,有效提升大规模、复杂极端森林火灾的协同处置能力。

### 3.4 强化森林防灭火科技支撑技术赋能

运用数字技术全面提升森林火灾防控各环节能力,推动相关技术向更智能、更科学的方向发展,逐步构建起全域协同、统一高效的智慧防火体系,从而为应对极端气候下的森林火灾提供关键技术支持。

具体而言,可以从以下三方面着手:

首先,建立智能化的森林防火指挥调度中心。全面整合林区火险预警信息、全域实时监测数据、扑救力量与装备分布、防火隔离带布局等多方资源,打破信息孤岛,形成数据闭环。以此为基础,实现对火灾风险等级的科学预警、对火情动态的实时监控、对应急力量的精准指挥,以及对火灾现场处置的全流程智能化管理。

其次,加快推动前沿技术的转化与实际应用。例如,大力推广数字孪生技术在林区的模拟演练。通过导入真实的地形、植被、气候等数据,构建虚拟林区模型,模拟在极端气候条件下火灾可能发生的地点、蔓延方向与过火区域。这种仿真推演能为优化防火隔离带规划、制定扑救方案、调配应急资源提供直观且科学的决策依据。

第三,组建专业化的专家智库支撑体系,深化与高校、科研院所的产学研协同合作,聚焦极端气候与森林火灾发生的关联性、智能化防控技术研发、火情精准扑救技术创新等

前沿课题开展专项研究,推动森林防火领域的科技创新成果快速转化为实际防控能力,形成“科技研发-成果转化-实战应用”的良性循环<sup>[4]</sup>。

## 4 重庆现代化森林防灭火体系实践

重庆作为集大城市、大农村、大山区和大库区于一体的地区,受极端气候常态化影响,森林防火任务艰巨。近年来,重庆构建了以组织管理、基础设施、预警监测、早期处理、应急处置、科技支撑、工作保障七大体系为核心的现代化森林防灭火体系,取得显著成效:国有林区路网密度达每公顷3.1米,重点林区林火阻隔网密度达每公顷4.7米,重点林区森林火情智能监控覆盖率超过95%,一般森林火灾24小时扑灭率超过95%,森林火灾受害率控制在0.3‰以内。

在极端气候应对方面,重庆的实践经验值得借鉴:一是强化党建统领与责任落实,将森林火灾受害率等指标纳入平安报表考核,压实各级林长责任;二是精准预警与源头管控结合,开展本地火险预警模型研究,根据极端天气情况及时发布禁火令、封山令,严格火源管控;三是科技赋能提升防控效能,打造智慧防火大脑,推广红外热成像识别、北斗定位等新技术,实现“人机”双网格协同管控。重庆的实践表明,构建全方位、智能化、多层次的防控体系,是极端气候背景下森林火灾防控的有效路径<sup>[5]</sup>。

## 5 结语

极端气候背景下,森林火灾风险呈现出高频次、高强度、大范围的新特征,传统预警与防控模式面临严峻挑战。本文构建的基于CNN的多维度森林火灾风险预警模型,通过融合气象极端性、植被可燃物、地形环境、人为活动四大类指标,实现了极端气候情景下的精准预警;提出的“监测预警-阻隔防控-应急处置-科技支撑”全链条防控技术优化路径,为提升极端火灾防控能力提供了实践方案。重庆的现代化防控实践表明,通过智慧化赋能、体系化构建和责任化落实,能够有效降低极端气候下森林火灾的灾害损失。

### 参考文献

- [1] 方正. 护林防火体系下森林火灾风险评估与预警机制[J]. 农村科学实验, 2025, (23): 144-146.
- [2] 张真瑞, 张天腾, 曾文华, 等. 森林火灾卫星遥感监测技术应用进展研究[J/OL]. 西南林业大学学报(自然科学), 1-10 [2025-12-29].
- [3] 高婷, 宋静. 林业信息技术在森林火灾防控中的应用研究[J]. 河南农业, 2025, (12): 43-45.
- [4] 黄云, 文军, 葛翔宇, 等. 森林火灾的卫星遥感监测与风险预警研究[J]. 成都信息工程大学学报, 2025, 40(03): 384-389.
- [5] 魏婧杨. 基于改进半监督聚类算法的森林火灾风险预警研究[D]. 中南林业科技大学, 2025.

# Practice of Forest Pest Monitoring and Fine Management of Forest Resources

Huiqi Zhang

Qishan County Forestry Station, Baoji, Shaanxi, 722400, China

## Abstract

Sustainable forest resource management faces challenges from forest pests and diseases, while traditional approaches exhibit limitations in monitoring accuracy and process coordination. This study focuses on integrating pest monitoring with refined forest resource management. It enhances the monitoring system through three dimensions: indicators, technologies, and data management. Practical pathways are explored, including data-driven dynamic supervision, targeted conservation measures, and digital platform development. Finally, a multi-dimensional support system is established across four dimensions—policy, technology, funding, and organization—to provide institutional, technical, material, and operational support for implementation. The research aims to improve the scientific rigor, precision, and efficiency of forest resource management through deep integration of monitoring and management, offering practical references

## Keywords

Forest pest and disease monitoring; Refined management of forest resources; Monitoring system for forest ecosystem protection and sustainable utilization

# 森林病虫害监测与森林资源精细化管理实践

张会岐

岐山县林业工作站, 中国·陕西 宝鸡 722400

## 摘 要

森林资源可持续管理面临森林病虫害挑战, 传统管理模式存在监测精准、流程协同等短板。本文聚焦森林病虫害监测与森林资源精细化管理融合, 从指标、技术、数据管理三方面完善监测体系, 探索监测数据驱动的动态监管、针对性调控保护及信息化平台建设等实践路径, 最后从政策、技术、资金、组织四个维度建立多元保障体系, 为融合工作落地提供制度、技术、物质与实施支撑。研究旨在通过监测与管理的深度协同, 提升森林资源管理的科学性、精准性与高效性, 为森林生态系统保护与可持续利用提供实践参考。

## 关键词

森林病虫害监测; 森林资源精细化管理; 监测体系

## 1 引言

森林生态安全至关重要, 但病虫害频发与传统管理短板制约管护效果。推动监测与精细化管理融合是破解困境的关键, 本文围绕相关体系构建与路径探索提供借鉴。

## 2 森林病虫害监测体系构建与优化

### 2.1 森林病虫害监测指标体系设计

构建科学高效的森林病虫害监测体系, 需从指标、技术、数据管理三方面协同发力。指标体系设计需遵循科学性、系统性、可操作性原则, 明确虫害、病害、环境影响等核心分类, 建立阈值动态调整机制以适配不同林区生态特征; 技术体系

构建应实现传统监测技术优化升级与现代信息技术深度融合, 通过遥感监测、物联网感知、大数据分析、人工智能识别等技术融合, 设计全流程监测链路; 数据管理体系优化则聚焦标准化采集规范制定, 强化数据传输与存储安全保障, 搭建跨主体数据共享与协同应用平台, 为监测效能提升筑牢基础<sup>[1]</sup>。

### 2.2 森林病虫害监测技术体系构建

森林病虫害监测技术体系构建需立足“传统优化+现代集成”的核心思路, 形成全覆盖、高精度、高效能的监测技术链路。在传统监测技术应用层面, 通过优化踏查路线规划、规范标准地设置、完善人工观测记录流程等方式, 提升地面巡查的精准度与效率, 充分发挥其在局部精细化监测、样本实地核验中的基础支撑作用。在此基础上, 推动现代信息技术的深度集成应用, 构建多技术协同监测格局, 不同技术的应用特征与适配场景如下表 1 所示。

【作者简介】张会岐（1975—），男，中国陕西宝鸡人，本科，工程师，从事造林设计、森林病虫害防治、森林资源管理研究。

表 1 森林病虫害监测技术应用特征与适配场景表

技术类型	核心技术手段	核心优势	适配监测场景
传统监测技术	人工踏查、标准地观测、诱捕器监测	成本较低、操作简便、数据直观	局部林区精细化监测、样本实地核验、小范围病虫害溯源
遥感监测技术	多光谱遥感、高光谱遥感、无人机遥感	覆盖范围广、监测效率高、可实现动态追踪	全域林区病虫害发生范围识别、大面积灾害态势研判
物联网感知技术	温湿度传感器、光照传感器、虫情传感器	实时性强、数据连续、自动化程度高	重点林区环境因子监测、病虫害发生动态实时捕捉
智能识别技术	图像识别算法、深度学习模型	识别精度高、可实现自动化分类	病虫害种类精准识别、发生程度量化评估

2.3 森林病虫害监测数据管理体系优化

森林病虫害监测与森林资源精细化管理的深度融合，需健全多元保障体系筑牢实践根基。政策层面需完善相关法律法规，出台针对性政策扶持与激励措施，为融合发展提供制度遵循；技术层面要强化研发创新支撑，搭建技术推广与人才培养体系，提升核心技术应用能力；资金层面需建立财政投入稳定增长机制，探索多元资金筹措模式，保障各项工作持续推进；组织层面应构建跨部门协同管理机制，加强基层管理队伍建设，破解权责壁垒与基层执行短板，形成全方位、多层次的保障合力。

3 基于病虫害监测的森林资源精细化管理实践路径

3.1 监测数据驱动的森林资源动态监管

监测数据驱动的森林资源动态监管是实现精细化管理的关键环节，基于病虫害监测获取的发生面积、种群密度、寄主范围等数据，能够精准评估森林资源的现状，既可以明确不同林分的健康等级、资源存量及生长潜力，也能识别出病虫害对资源造成的损害程度与影响范围，为后续管理提供基础依据，在现状评估的基础上，通过构建病虫害风险预警模型，结合气象数据、林分特征等因素，可对病虫害的发生趋势进行预判，并按照风险等级将森林资源划分为高、中、低风险区，实施分级管理，对高风险区采取优先监测与防控措施，对中低风险区则以常态化监测为主，同时借助物联网、卫星遥感等技术手段，建立森林资源动态变化的实时追踪与反馈机制，实时更新病虫害发生动态与资源生长状况，一旦发现数据偏离预期范围，立即触发预警并反馈至管理决策层，以便及时调整监管策略，形成“评估—预警—追踪—反馈”的动态监管体系<sup>[2]</sup>。

3.2 针对性的森林资源调控与保护策略

根据病虫害监测结果制定有针对性的森林资源调控和保护策略，在林分结构上按照监测得出的结果，明确病虫害的寄主偏好以及传播规律，对树种进行适当的调整，降低单一树种纯林面积占比，大力提倡抗病虫树种与乡土树种混交种植，形成结构稳定的林分生态系统，提高林分的抗逆能力，降低大面积爆发的风险；同时在病虫害防控与资源保护并重的原则下，应优先采取以生物防治和物理防治为主的防控手段，例如引入天敌昆虫、设置诱捕装置等方式来防控，避免

大量使用化学农药，尽量减少对土壤、水体和非靶标的破坏，并且重视保护森林生态系统中的一些有益生物，以此实现森林生态系统的生态平衡。实现精细化抚育和病虫害防治相互融合需要将两者相结合，并且需要结合实际情况将抚育措施与病虫害防治手段结合起来，在森林修枝、间伐等抚育作业的时候及时清理出患有疾病或已经死亡或者枯死的树木还有受害树木以及枯枝落叶，消灭它们身上的病虫害传染源和传病媒介。

3.3 森林资源精细化管理的信息化平台建设

森林资源精细化管理信息化平台建设能提高森林资源管理水平和精准化程度，对设计开发此类平台而言，要根据实际需要，分析设计平台各核心功能模块，其中监测数据集成模块需将卫星遥感、地面监测、无人机巡查等多种来源的数据汇聚起来，统一存储、分类管理和快速调用；资源管理模块以小班为基本单位，创建森林资源数字化档案，可随时动态更新资源信息并方便快捷地进行可视化查询；预警发布模块基于预先内置好的风险评估模型可自动生产病虫害预警信息，并可及时通过短信或平台推送等方式发送给相应管理人员；除此之外，应完善平台运行及维护机制、落实平台运维责任主体，并定时对硬件设施进行检查与维护，更新升级软件系统，健全数据质量校验机制，确保监测数据的真实可靠；针对平台管理决策应用的方式，利用数据可视化技术将复杂的数据转换成图表和地图，使管理者能够通过不同视图看到当前的资源状况以及存在的风险分布，给出适合自身特点的差异化管护措施。

4 森林病虫害监测与精细化管理融合的保障体系

4.1 政策保障机制

完善法律法规。完善森林病虫害监测与森林病虫害精细化管理融合过程中存在的权力义务划分不清、程序性规定不全等问题，完善修订林业相关条例，明晰监测数据的所有权属性、监测数据的信息共享制度以及监测数据在森林病虫害精细化管理决策中具有法律效力的条件，细化监测、防控、资源管护各个环节的职责任务和行为准则；完善有关森林病虫害监测和精细化管理融合方面的相关法律法规空白条款。健全政策支持及激励措施。通过设立专项扶持资金的方式，对开展森林病虫害监测融合管理试点工作区域及先进监测



技术的引进主体予以财政补贴或者税收减免；建立科学的考核评价标准体系，将森林病虫害防控成效及精细化管理程度作为对林业主管部门的绩效考核指标，对开展监测融合管理工作较好的单位和个人予以表彰奖励。

4.2 技术保障机制

技术保障机制是支撑融合工作高效推进的核心支撑，需构建“研发创新—推广应用”的完整闭环，具体核心内容与实施路径可通过下表 2 清晰呈现：

表 2 技术保障机制核心内容与实施路径表

技术保障维度	核心内容	实施路径
技术研发与创新支撑	多源监测数据融合分析技术、病虫害智能识别模型、精细化管理数字化平台核心技术	依托科研院校与林业企业组建攻关团队，设立专项研发课题，开展小范围试点验证后逐步优化
技术推广与人才培养	先进监测设备应用推广、精细化管理技术普及、复合型专业人才队伍建设	组建技术推广专班，开展分层分类实操培训，建立“科研人员+基层骨干”结对帮扶机制

4.3 资金保障机制

资金保障机制为融合工作提供持续物质支撑，需构建“政府主导、多元补充”的资金供给体系。一方面要建立财政投入稳定增长机制，将森林病虫害监测、精细化管理相关经费足额纳入各级财政预算，根据森林管护面积、病虫害发生风险等级等因素动态调整经费标准，重点保障监测设备更新、核心技术研发、基层队伍培训等关键环节的资金需求；另一方面要积极探索多元资金筹措模式，通过政策引导吸引社会资本参与林业管护项目，鼓励林业经营主体加大自我投入力度，同时建立跨区域资金统筹调剂机制，对病虫害高发、管护任务繁重的欠发达区域给予重点资金倾斜，确保资金配

置与融合管理实际需求精准匹配<sup>[3]</sup>。

4.4 组织保障机制

组织保障机制为融合工作提供实施保障，重点构建跨部门协同体系与强化基层队伍建设。在跨部门协同管理方面，需打破林业、农业、气象、生态环境等相关部门的信息壁垒与职能分割，建立常态化联席会议制度与联动处置机制，明确各部门在监测数据共享、风险预警发布、联合防控实施等工作中的职责分工，实现资源统筹配置与管理行动协同。在基层管理队伍建设上，要明确乡镇林业站、国有林场等基层管理单元的融合管理职责，通过开展常态化专题培训，提升基层人员的病虫害监测技术应用能力、精细化管理实操水平及跨部门协作意识；同时完善基层队伍激励机制，优化人员配备与待遇保障，确保融合管理的各项措施能够在基层落地生根。

5 结语

综上所述，监测与精细化管理融合是提升森林资源管护效能的必然选择。本文构建监测体系、探索实践路径、建立保障体系，为林业管理提供实操方案。未来可进一步强化前沿技术应用，优化区域适配性管理方案，持续提升融合模式的推广价值，助力森林资源可持续管理与生态文明建设。

参考文献

[1] 杨慧,王芊,陈国锐,等.人工智能在森林病虫害自动识别和监测技术中的应用[J].甘肃科技,2025,41(11):94-98.

[2] 蒋凯薇.森林病虫害智能监测预警系统的构建与应用[C]//郑州市社会学学会.2025年社会学研讨会人文与发展分论坛论文集(下册).诸暨宏枫林业勘察设计有限公司,;2025:198-200.

[3] 梅展铭.无人机多光谱遥感在森林病虫害早期监测中的应用与优化路径[J].广东蚕业,2025,59(09):40-42.

# Analysis of deformation control technology for large diameter shield tunneling under operating metro tunnel

Ling Qin

China Water Resources and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610213, China

## Abstract

Under the context of intensive urban underground space development, large-diameter shield tunneling beneath existing operational metro lines has become an unavoidable engineering practice. The construction-induced disturbances exhibit three key characteristics: extensive impact range, pronounced stress redistribution, and highly coupled structural responses. This study systematically analyzes the intrinsic evolution path of additional deformation in existing metro tunnels under large-diameter shield tunneling conditions, based on theoretical foundations including stratum stress redistribution, soil volume loss transfer, and dynamic coupling mechanisms between shield and metro structures. Building upon this analysis, a multidimensional collaborative control system is constructed to provide a systematic technical approach for controllable and predictable deformation management of existing metro tunnels under complex tunneling scenarios.

## Keywords

large-diameter shield; subway tunnel; construction deformation; control technology

# 大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术分析

秦岭

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国 · 四川 成都 610213

## 摘 要

在城市地下空间高强度开发背景下, 大直径盾构下穿既有运营地铁已成为不可避免的工程形态, 其施工扰动具有作用范围广、应力重分布强和结构响应高度耦合等典型特征。本文以地层应力再分布、土体体积损失传递及盾构—地铁结构动力耦合机理为理论基础, 系统解析了大直径盾构下穿条件下既有地铁隧道产生附加变形的内在演化路径, 并在此基础上构建了多维协同控制体系, 旨在为复杂下穿工况下既有地铁隧道变形的可控化与可预期化提供系统性技术路径。

## 关键词

大直径盾构; 地铁隧道; 施工变形; 控制技术

## 1 引言

随着城市地下轨道交通网络的不断完善, 大直径盾构隧道已逐渐成为主要的施工方法, 此类新建的大口径盾构隧道近距离穿越既有地铁隧道的案例越来越多。大直径盾构穿越施工过程中如果对地层变形控制不当, 极易影响既有运营地铁隧道的安全, 为此必须深入探讨大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术。

## 2 大直径盾构下穿运营地铁的变形作用机理

### 2.1 地层应力再分布机理

在大直径盾构掘进过程中, 刀盘切削与舱内土体卸载使原有土体三向应力状态被破坏, 围岩由原始自重应力场转变为以盾构开挖轮廓为核心的再分布应力场。下穿运营地铁

时, 盾构前方及周边土体产生明显的径向松弛区, 拱顶及侧壁处主应力方向发生旋转, 使地铁隧道所处土层承受的附加应力沿纵向与横向叠加变化。当应力集中区向既有隧道扩展时, 其衬砌内力由原有稳定状态转变为受拉受剪复合状态, 从而诱发结构微变形与刚度重新分配。

### 2.2 土体体积损失传递路径

盾构推进中不可避免存在超挖、刀盘扰动和同步注浆时滞, 这些因素导致开挖断面周围形成体积损失区。该体积损失沿土层孔隙与结构面向上传递, 在下穿条件下呈现“倒漏斗”式扩散形态, 逐步影响到上覆的地铁隧道基础土。当地铁隧道处于该传递路径内时, 其底部土体的有效应力降低, 产生不均匀沉降, 使隧道衬砌在纵向上出现差异化变形<sup>[1]</sup>。

### 2.3 盾构扰动对地铁结构的耦合影响

大直径盾构的开挖面宽度远大于常规地铁隧道, 其扰动范围覆盖地铁结构全断面。盾构通过时产生的振动、土体剪切重排及泥水压力波动, 会在地铁衬砌周围形成动态应力

【作者简介】秦岭 (1989—), 男, 中国四川成都人, 本科, 工程师, 从事城市轨道交通施工及管理研究。

场。该应力场与地铁隧道原有的静力荷载共同作用,使衬砌环在短时间内经历反复受力调整,局部接缝处易出现微张开或闭合变化,进一步改变整体受力路径。

## 2.4 地层分层特性引起的差异变形

下穿区由不同土层所构成,各层的压缩性、透水性和强度指标差别较大;盾构掘进产生的应力释放后,在不同的土层中的释放速度以及衰减程度是不同的,所以会造成地铁隧道底部和两侧的土体产生变形速率存在较大差异;如果软弱夹层处在地铁隧道结构和盾构之间,则极易造成变形集中带,可能引起地铁隧道产生局部下沉或者横向偏移。

# 3 大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术

## 3.1 开挖面压力与推进参数协同控制

在大直径盾构下穿既有运营地铁隧道时,开挖面压力与推进参数的协同控制需要围绕地层应力重分布及隧道—土体耦合响应开展精细调控,主要是通过建立盾构土仓压力、刀盘扭矩、推进速度及地层变形等参数间的映射关系来保证掘进过程一直处于“低扰动—可平衡”运行区间。因此,不能仅仅根据覆土厚度或静止土压力确定开挖面压力值,而是应综合考虑地铁隧道衬砌埋深、围岩类别以及结构刚度等因素,针对原有地层应力场采用修正反演方法确定隧道—土体接触面的压力大小,并且保证其略大于隧道拱顶处的等效竖向应力,以此来平衡盾构掘进时带来的卸荷效应,防止地铁隧道上方土体沉降梯度扩大。在匹配推进参数时,可根据当前单缸推力和总推力增长斜率变化情况,使单缸推力峰值分配及总推力增长斜率变化与单管前进速度及土仓压力涨落变化情况相匹配,避免盾构机超速推进造成前方掌子面不稳定或者推进速度过慢形成土体回弹区现象<sup>[2]</sup>。此外,根据地铁隧道平面位置进行布控,利用穿越地铁隧道工况下地层的刀盘扭矩变化率和土仓含砂量等参数,修正推进速率与土仓补压量之间的比例系数,使盾构在穿越区地层强度及土体固结程度发生变化时保持总体平衡,使盾构穿越地铁隧道的全过程控制在一个相对平稳的轨道上运行。与此同时,开挖面压力调节应与推进节奏形成闭环关系,当监测到地铁隧道拱顶竖向位移或周边土体孔隙水压力出现非线性变化时,优先通过微调土仓压力梯度进行补偿,而非单纯依靠降低推进速度,以避免形成长时间低速掘进导致的土体应力松弛区扩展。

## 3.2 同步注浆与二次补浆精细调节

在大直径盾构下穿运营地铁隧道过程中,同步注浆与二次补浆的精细调节构成围岩—衬砌—注浆体协同受力体系稳定性的关键控制环节,同步注浆需依据盾尾间隙的动态变化与地层变形响应进行参数匹配,通过对盾构姿态、推进速度与盾尾刷磨耗状态的实时计算,确定浆液充填量与注入压力的耦合关系,使浆液在盾尾脱空区内形成连续致密的支

撑带以抑制土体回弹与松弛扩散,在软弱可压缩地层条件下需提高初凝强度并降低离析风险,通过调整水胶比与外加剂比例使浆体在短时间内获得足够早期承载能力,从而在盾构掘进扰动释放前锁定围岩结构,同时注浆压力应沿盾尾环向分区控制以避免偏压导致地铁隧道受力不均引起的附加位移,结合盾构后方地层应力重分布特征建立压力—位移反馈模型,使同步注浆由固定设定转化为随变形调节的闭环控制过程;二次补浆则针对同步注浆后形成的微孔隙与局部脱空进行补偿加固,通过对监测到的地铁隧道沉降曲线与周围地层体变形梯度进行反演分析,精准锁定需补强的空间位置与注浆量级,补浆工艺应优先采用低黏度可渗透浆液以实现既有浆体裂隙与土体毛细孔隙的充分填充,并通过分段、分序注入方式控制扩散半径,避免因过量注入诱发地层隆起或隧道抬升偏移,在时间控制上需结合盾构通过后的应力调整阶段进行分期补浆,使补浆体在地层逐步稳定过程中持续发挥承载补偿作用,进一步削减盾构扰动残余变形对既有地铁结构的传递效应,通过同步注浆与二次补浆在空间与时间维度上的协同调控,使围岩松弛区、注浆固结区与衬砌受力区形成连续过渡,从而将施工诱发的附加位移限制在可控范围内<sup>[3]</sup>。

## 3.3 地铁隧道周边地层加固处理

在大直径盾构下穿运营地铁隧道的施工条件下,隧道周边地层加固处理需要围绕“刚度重构与渗流调控协同”的技术逻辑展开,其核心在于通过人为调节土体结构状态与孔隙水运移路径,削弱盾构扰动在既有隧道范围内的空间传递效应。针对软弱可塑层及松散填土层,应优先采用低压分区注浆与微扰动渗透加固组合方式,通过控制浆液扩散半径与固结速率,使地层由原有的压缩主导型变形模式转化为剪切约束型响应状态,从而提高地铁隧道周边土体在盾构扰动下的变形阻尼能力;在砂层或高渗透系数地层中,应通过硅酸盐类或微细水泥浆进行网状渗透加固,构建连续性较强的固结体,以降低开挖诱发的渗流重分布对衬砌结构产生的附加位移。对于盾构穿越区上覆与侧向影响范围内的土体,应依据隧道轴线与既有地铁结构的空间关系实施分层加固布置,在靠近地铁隧道拱顶及拱腰区域布设高模量注浆体以提高局部地层抗剪刚度,在远离既有结构一侧设置柔性加固带以缓释应力集中,避免刚度突变引发二次扰动。加固参数的确定需基于地层压缩模量、孔隙比及地下水条件进行反演计算,通过试验段实测注浆压力与注入量对地表及隧道变形响应的反馈关系,对加固区的等效弹性模量进行动态校正,从而使加固体与原状土体形成连续过渡区。在施工实施过程中,应同步布置隧道收敛、轨道几何及地层地压监测点,依据监测数据对注浆节奏和范围进行实时调整,当出现孔压异常回升或位移速率增大的趋势时,及时启动补强注浆以修复因盾构推进产生的微裂隙通道。通过上述加固路径,使盾构施工引起的应力释放与地层重排被限制在可控空间内,既有



地铁隧道周边土体保持相对稳定的力学状态,从而形成对盾构扰动的有效屏蔽。

### 3.4 盾构姿态与掘进轨迹控制

在大直径盾构下穿既有运营地铁隧道过程中,盾构姿态与掘进轨迹的稳定性直接关联到上覆隧道的附加变形响应,因此需将姿态控制从传统的“几何对中”转向“变形约束导向”的精细调控模式。在施工实施阶段,首先应基于下穿区段既有地铁结构轴线、埋深及轨道限界条件建立三维坐标基准体系,通过盾构导向系统将设计轴线、实时掘进轴线与地铁隧道空间位置进行同步映射,使盾构机姿态偏差能够对既有结构影响敏感方向为权重进行分解,从而避免仅以平面或竖向偏移作为修正依据而引发的空间误判。在具体掘进控制中,应将盾构俯仰角、滚转角及偏航角与推进油缸分区推力实行联动约束。当盾构进入下穿影响区时,优先抑制可能引起地铁隧道拱顶附加沉降的俯仰角变化,通过降低上部油缸推力增幅、提高下部油缸推力稳定性来维持刀盘姿态的平缓演进。同时,在平面方向上对偏航角的调整应采用小幅、多次的渐进式修正方式,避免因一次性纠偏导致开挖轮廓与原状地层产生剪切扰动。掘进轨迹的控制不宜单纯依赖导向系统的几何偏差报警,而应结合既有地铁隧道监测到的沉降、水平位移及收敛数据建立反馈修正机制。当上覆结构出现非对称变形趋势时,应对盾构掘进方向进行反向微调,使掘进轨迹在空间上对地层应力重分布产生补偿效应,从而削弱变形集中区的持续发展。在盾构通过下穿核心区段时,还需将姿态控制与同步注浆参数联动。当盾构因纠偏产生局部超挖或欠挖时,通过调整对应方位注浆量与浆液流变特性,使盾尾间隙的填充效率与盾构姿态变化保持同步,防止因轨迹修正引发地层失稳。此外,应通过连续里程段的姿态变化率控制盾构运动的平顺性,对俯仰和偏航的变化幅度设定梯度阈值,使盾构轨迹在空间上呈现连续曲线而非折线形态,从而降低地层结构的反复剪切与松弛对既有地铁隧道变形的叠加效应。

### 3.5 施工过程监测与参数反馈调控

基于此,大直径盾构下穿运营地铁隧道高风险工况下需要实现全方位贯通式“感知—判读—调参—验证”的闭环监测与参数反馈调节体系。

在空间布局中,以既有隧道拱顶、拱腰以及轨道板为现场监测的核心敏感区,根据盾构机掘进方向,在既有隧道顶部等处布设足够数量的测点,形成高位覆盖的密集化监测带,将沉降、收敛、倾斜及振动等与盾构姿态、刀盘扭矩、土压及注浆量等相关指标按照不同时间戳有序采集,借助相同的数据接口,在同一时空坐标系下进行跨源数据的自动对齐,消除分散式测量可能存在的信息缺失与错位问题。在数据处理中,使用滑动窗口法和趋势外推算法把短时扰动和长期变形区分开来,并基于实测数据,实时拟合出当前既有隧道结构与盾构施工参数之间的相关性。监测值不仅要用来判别是否越限,更重要的是能够具体判断某个参数应该往哪一项方向进行调整。例如:当盾构拱顶下沉速率突然加快并伴随土压波动变大时,要调整盾构推进速率与开挖面压力之间的比例关系,而不是简单地将某个参数值径直调整。在现场调控机制方面,将监测系统与盾构控制台之间进行硬连接,一旦发生超阈值变形,即可触发参数联动。在监测前,为了保证同步注浆浆量、注浆压力、推进推力同步受控,可以通过监测系统联动控制台进行两者的调整。在验证环节,通过对调参前后的既有隧道变形速率及盾构工况曲线的对比分析,实时修正监测阈值与反馈灵敏度。

## 4 结语

大直径盾构下穿运营地铁隧道本质上是一种多场耦合、多尺度传递的地下结构相互作用过程,其变形控制不再是单一参数优化问题,而是涉及地层力学重构、盾构运行状态调节与既有结构响应反馈的系统工程。本文所构建的技术框架以地层—结构—施工参数的协同演化为主线,将开挖面稳定、注浆支撑、地层刚度重构、盾构轨迹约束及实时监测反馈纳入统一控制逻辑之中,使盾构施工由传统经验型控制转向数据驱动与机理约束并行的精细化控制模式。

### 参考文献

- [1] 金典琦,李德行,黎莉,等.超大直径盾构隧道正交下穿对既有地铁隧道影响分析[J].建筑结构, 2023, 53(S01):2952-2959.
- [2] 周群,邵华,李家平.超大直径盾构下穿施工引起既有地铁隧道变形分析及控制要点[J].城市轨道交通研究, 2024, 27(S01):79-83.
- [3] 周群,邵华,李家平.超大直径盾构下穿施工引起既有地铁隧道变形分析及控制要点[J].城市轨道交通研究, 2024, 27(S01):79-83.



# Application of Intelligent Sensor in Condition Monitoring of Electromechanical Equipment

Qiangqiang Xue Limin Bai

Yuyang Zhongneng Yuantan Mining Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

## Abstract

Currently, smart sensors have been widely implemented in various electromechanical equipment such as wind turbine generators, automotive production lines, and power transformers. By enabling real-time monitoring of critical parameters including vibration, temperature, and current, these sensors effectively reduce operational losses and enhance maintenance efficiency. However, given the varying operating environments and structural characteristics of electromechanical equipment across industries, the selection criteria, deployment strategies, and data application logic of smart sensors still require targeted optimization. This paper, grounded in practical perspectives, explores typical application scenarios of smart sensors in electromechanical equipment condition monitoring. It analyzes their technical implementation pathways and application outcomes, summarizes key challenges encountered in practice, and proposes solutions. The study aims to provide actionable references for enterprises upgrading intelligent maintenance systems and promote the deep integration of smart sensing technology with electromechanical equipment management.

## Keywords

smart sensor; electromechanical equipment; condition monitoring; predictive maintenance; acoustic vibration temperature monitoring

# 智能传感器在机电设备状态监测中的实践应用

薛强强 白利敏

榆林市榆阳中能袁大滩矿业有限公司, 中国·陕西 榆林 719000

## 摘 要

当前, 智能传感器已在风电发电机组、汽车生产线、电力变压器等多种机电设备中实现实践应用, 通过对振动、温度、电流等关键参数的实时监测, 有效降低了故障损失, 提升了运维效率。然而, 不同行业机电设备的运行环境、结构特性存在差异, 智能传感器的选型标准、部署方案与数据应用逻辑仍需针对性优化。基于此, 本文立足实践视角, 深入探讨智能传感器在机电设备状态监测中的典型应用场景, 剖析其技术实现路径与应用成效, 总结实践中的关键问题与解决思路, 旨在为相关企业的智能化运维升级提供实践参考, 推动智能传感技术与机电设备管理的深度融合。

## 关键词

智能传感器; 机电设备; 状态监测; 预测性维护; 声振温监测

## 1 引言

随着《中国制造 2025》等政策的推进, 智能制造成为产业升级的核心方向, 机电设备状态监测逐步向数字化、智能化转型。智能传感器的出现与技术突破, 为这一转型提供了核心支撑。机电设备作为工业生产、能源供应、交通运输等领域的核心基础设施, 其运行状态直接决定生产效率、运营成本与安全水平。传统设备状态监测依赖人工巡检与滞后报警, 难以应对复杂工况下的隐性故障预警需求。智能传感器凭借多维度感知、精准数据采集、实时分析预警等核心优势, 已成为机电设备状态监测的核心支撑技术。

【作者简介】薛强强（1986-），男，中国陕西榆林人，本科，工程师，从事机电智能化技术在新能源装备中的创新应用研究。

## 2 机电设备状态监测的行业需求与技术优势

### 2.1 行业需求

在工业 4.0 转型背景下, 机电设备正朝着大型化、精密化、智能化方向发展, 其运行工况日趋复杂, 任一部件的微小故障都可能引发连锁反应, 导致设备停机甚至安全事故。据工业设备运维协会统计, 传统运维模式下, 机电设备突发故障导致的非计划停机损失占工业企业总生产成本的 15%-25%, 其中电机、泵机、输送机等核心设备的故障停机单次损失可达 10-300 万元。以煤矿行业带式输送机为例, 滚筒轴承故障若未能及时发现, 可能导致输送带撕裂、火灾等严重事故。

传统机电设备状态监测主要依赖人工巡检与定点仪表监测, 存在三大核心痛点: 一是人工巡检依赖经验判断, 漏检率高达 25% 以上, 难以识别微米级振动异常、轻微温度

升高等隐性故障；二是传统温控器、振动表等设备仅能在故障濒临爆发时报警，留给维修的响应时间不足1小时，无法实现提前预警；三是数据采集不连续、不全面，难以形成设备全生命周期健康档案，导致维护策略趋于保守，过度维护成本占比达30%。在此背景下，具备多维度感知、无线传输、智能分析能力的智能传感器，成为破解传统监测困境、实现预测性维护的关键技术支撑。

## 2.2 智能传感器的技术优势

与传统传感器相比，智能传感器集成了感知单元、数据处理单元、无线通信单元与能量供应单元，具备三大核心优势：一是多参数协同感知，可同时采集振动、温度、声纹、转频等多维度数据，通过交叉验证提升故障识别准确性，如声振温一体化传感器可实现振动1Hz-10kHz、温度-20℃-300℃、声纹20Hz-20kHz的全频段覆盖监测；二是边缘智能分析，通过内置AI算法在传感器端完成数据预处理与特征提取，将原始数据量压缩70%以上，实现10秒内故障预警推送，大幅降低云端传输与计算压力；三是灵活部署与环境适配，采用磁吸式安装、IP68防护等级、防爆设计，可在高粉尘、高湿度、高温差等恶劣工况下稳定运行，单台设备部署时间≤15分钟，无需拆改原有管线。这些优势使智能传感器能够精准捕捉机电设备的早期故障特征，为预测性维护提供可靠的数据支撑。

## 3 智能传感器在机电设备状态监测中的核心技术体系

### 3.1 核心感知技术与传感器类型

机电设备状态监测的核心是捕捉设备运行中的异常物理信号，不同类型的智能传感器针对不同故障特征形成互补监测体系，常见类型及技术参数如下：

#### 3.1.1 振动传感器

振动是机电设备旋转部件故障的核心表征，如轴承磨损、转子不平衡、齿轮啮合异常等均会引发振动频率与幅值的变化。目前主流采用压电陶瓷传感器与MEMS加速度传感器，其中压电陶瓷传感器可捕捉1Hz-10kHz频段振动，能识别轴承滚珠0.005毫米（约头发丝直径1/12）的微小磨损；MEMS加速度传感器则具备低功耗优势，如RIILinX-WS30M-CH传感器的X/Y/Z轴频响范围达0.1-8kHz，测量精度±5%（160Hz），可实现秒级振动数据采集。在实际应用中，通过监测振动峰值、有效值、峭度等特征参数，结合频谱分析技术，可精准定位故障类型，如水泵叶轮积灰失衡时，Z轴振动峰值会从0.5g骤升至1.2g，通过频谱图可直接锁定故障频率成分。

#### 3.1.2 温度传感器

温度异常是机电设备电气部件与摩擦部件故障的重要信号，如电机绝缘层老化、轴承润滑失效、密封件磨损等均会导致局部温度升高。智能温度传感器采用红外+热电

偶双技术融合方案，测温范围覆盖-40℃-300℃，精度可达±0.5℃，其中RIILinX系列传感器的设备表面测温精度为±1℃，能捕捉到密封件磨损导致的5℃微小温升。值得注意的是，电机温度超过额定值5-10℃时，绝缘层老化速度会加快60%以上，传统温控器仅在温度濒临临界值时报警，而智能传感器可提前3-5小时预警，为维修预留充足时间。

#### 3.1.3 声纹传感器

设备运行中的异常声音是故障的直观反映，如轴承润滑失效的“沙沙声”、叶轮气蚀的“气泡破裂声”等。智能声纹传感器采用64通道麦克风阵列，可过滤背景噪音，提取20Hz-20kHz全频段声纹信号，信噪比达66dBA，通过构建声纹特征库实现故障模式匹配。与振动、温度数据交叉验证后，可将故障误报率压至0.5%以下，显著提升监测可靠性。

### 3.2 数据传输与智能分析技术

智能传感器的核心价值不仅在于数据采集，更在于通过数据传输与分析实现故障预警。目前主流采用“边缘计算+云端协同”的架构：传感器端通过内置SOC芯片完成数据预处理，提取峭度、包络解调、声纹特征值等关键信息，数据压缩比达7:1，大幅降低传输压力；传输层面采用蓝牙5.0与4G双协议，蓝牙用于现场调试与近距离数据读取，4G实现远距离实时传输，支持32K字节的波形数据传输，无网关直接连接云端，数据延迟控制在10秒内。

智能分析算法是故障识别的核心，目前应用较成熟的包括APEF自适应滤波算法、NanoEdge AI异常检测模型等。APEF算法可根据设备运行状态动态调整振动烈度阈值，降低环境干扰导致的误报；NanoEdge AI模型通过终端设备学习，可适应不同转速下的电机故障检测，异常识别准确率达99.45%，仅需5.7千字节内存与6.9千字节闪存，可嵌入微型传感器节点。通过构建涵盖正常工况、内外圈故障、滚动体损伤等典型模式的健康数据库，算法可实现故障类型精准判定与严重程度分级，为运维人员提供明确的维修指引<sup>[1]</sup>。

## 4 智能传感器在多领域机电设备监测中的实践案例

### 4.1 工业制造领域

泵机与电机是工业生产的动力核心，其故障停机将直接导致生产线中断。某汽车零部件制造厂针对车间20台水泵与15台冲压机电机，部署了声振温一体化智能监测系统，传感器采用磁吸式安装于轴承座与密封区，实时采集振动、温度、声纹数据。

在水泵运维中，系统通过监测轴向振动与密封区温度变化，提前7天捕捉到1台水泵密封件磨损隐患，预警时振动峰值达0.8g，密封区温度较基线升高3℃。维修人员在2小时内完成密封件更换，避免了水泵抱死导致的生产线停机。系统部署一年后，水泵维修成本下降40%，电机更换次数从每年4次降至0次，单台水泵年均运维成本降低1.2万元。

在冲压机电机监测中,系统通过振动频谱分析,提前7天识别出1台电机轴承的内圈剥落故障,特征频率为48.2Hz,与轴承内圈故障特征频率(BPFI)理论计算值完全吻合。维修人员利用生产间隙8小时完成轴承更换,避免了8小时非计划停机,减少直接经济损失200万元。数据统计显示,电机维修周期延长2倍,设备故障率下降60%。

## 4.2 矿山运输领域

带式输送机是煤矿运输的核心设备,滚筒轴承长期在重载、高粉尘环境下运行,极易发生疲劳磨损与润滑失效,传统人工巡检漏检率达25%。某大型煤矿针对10条总长10公里的带式输送机,部署了VB43LoRa智能无线温振传感器,安装于滚筒轴承座,传感器内置滤波算法消除机身振动干扰,采样率达6400Hz。

2025年1月,系统监测到某带式输送机滚筒轴承振动加速度峰值从基线值 $1.2\text{m/s}^2$ 升至 $7.5\text{m/s}^2$ ,频谱分析显示45.3Hz的特征频率,与轴承外圈故障特征频率(BPFO)完全匹配,判定为外圈局部剥落。维修人员依据预警信息,2.5小时内完成维修,较原计划8小时检修时间缩短68.75%,避免连带损失10万元<sup>[3]</sup>。

## 4.3 能源电力领域

螺杆压缩机是电力行业的关键辅助设备,其振动超标与润滑油老化会导致能效下降、寿命缩短。某电厂针对3台螺杆压缩机,部署了RIILinX-WS30M-CH声振温一体式传感器,监测范围涵盖振动、温度、声纹、转频,传感器防护等级达IP68,适应电厂高湿度、高电磁干扰环境。

系统运行初期,监测到1台压缩机振动值达 $6.2\text{mm/s}$ ,噪音95dB,通过声振数据交叉分析,判定故障源于转子不平衡与润滑油老化。维修人员调整供油压力至2.5MPa,完成转子动平衡校正后,压缩机振动值降至 $3.8\text{mm/s}$ ,噪音降至82dB,符合GB/T 7777-2019标准要求。数据显示,优化后压缩机故障率下降60%,使用寿命延长22%,单位产气能耗降低8%,年均节省电费支出15万元。传感器采用4G直接连接云端,无需网关部署,施工成本较传统有线监测系统降低70%,电池续航达2年,大幅降低运维负担<sup>[4]</sup>。

# 5 智能传感器应用的核心成效与数据价值

## 5.1 提升故障预警精准度,降低安全风险

多维度数据协同监测与智能算法分析,使智能传感器的故障识别准确率普遍达到94%以上,漏检率控制在3%以下,误报率低于0.5%,远超人工巡检的75%准确率。在隐性故障识别方面,智能传感器可捕捉到0.005毫米的部件磨损、3-5℃的微小温升,提前3-7天预警,较传统监测手段的预警时间提前80%以上,为维修决策预留充足时间,

有效避免故障扩大引发的安全事故。如煤矿带式输送机、电厂压缩机等高危设备,通过精准预警将重大安全事故发生率降低90%以上。

## 5.2 优化运维策略,降低综合成本

智能传感器推动运维模式从“事后维修”“定期检修”向“预测性维护”转型,大幅降低过度维护与非计划停机成本。从实践数据来看,部署智能监测系统后,机电设备维修成本平均下降40%,备件库存成本降低18%-30%,非计划停机时间缩短68%以上。以汽车厂电机、煤矿皮带机、电厂压缩机为例,单台设备年均运维成本降低1.2-15万元,大型生产线年减少停机损失200-300万元。此外,智能传感器的无线部署与低功耗特性,使单台设备部署时间 $\leq 15$ 分钟,年运维成本较传统有线监测系统降低70%,电池续航达2年以上,进一步降低长期运营成本。

## 5.3 延长设备寿命,提升能效水平

通过及时发现并处理微小故障,避免部件过度磨损与工况恶化,智能传感器可有效延长机电设备使用寿命。实践数据显示,电机、压缩机等设备的使用寿命延长22%-30%,轴承更换周期延长30%,设备全生命周期价值显著提升。同时,基于精准数据的工况优化,可提升设备能效,如螺杆压缩机单位产气能耗降低8%,电机运行效率提升5%-10%,为企业实现节能降碳目标提供技术支撑<sup>[5]</sup>。

# 6 结语

智能传感器凭借多维度感知、精准数据采集、实时智能分析等核心优势,已成为机电设备状态监测的核心技术手段,在工业制造、能源电力、矿山运输等领域的实践中展现出显著价值。尽管当前仍面临恶劣环境适应性、数据标准化、成本门槛等挑战,但随着技术升级与产业成熟,智能传感器必将在机电设备健康管理中发挥更重要的作用,推动工业运维向智能化、精准化、高效化转型,为高质量发展提供坚实支撑。

## 参考文献

- [1] 刘佳鸣. 电气设备运行状态监测系统在水厂安全管理中的应用研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(12):132-134.
- [2] 孙文锋. 电力工程中电气设备状态监测与故障诊断[J].灯与照明,2025,49(06):170-172.
- [3] 杜俊红. 物联网技术下煤矿机电设备运行状态安全监测方法研究[J].煤矿机械,2025,46(12):255-258.
- [4] 何佳珉. 基于物联网的高速公路机电设备状态监测与故障预警研究[J].交通科技与管理,2025,6(22):7-9.
- [5] 林世谭. 变电站电气设备状态监测技术与智能运维系统应用实践[J].光源与照明,2025,(10):188-190.



# Research on the current situation and difficulty analysis of FTTR gigabit broadband user migration

Wei Sang Yingfang Tan Guichu Gu

China Mobile Communications Group Yunnan Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650200, China

## Abstract

The traditional FTTH + router networking mode has pain points such as uneven coverage and multi-device concurrent sticking, which makes it difficult to adapt to new requirements. FTTR technology, as the core solution to achieve seamless gigabit coverage throughout the house, faces multiple practical challenges in user migration. This paper analyzes the crux of the problem from the dimensions of technology deployment and cost, user demand and cost-effective contradiction, and studies and formulates technical solutions and cost, user demand and scenario marketing strategies and countermeasures to meet the needs of operators and customers for gigabit broadband.

## Keywords

whole house gigabit; user migration; Mobile Communication

# FTTR 全屋千兆宽带用户迁移现状及难度分析研究

桑维 谭颖芳 谷桂初

中国移动通信集团云南有限公司昆明分公司, 中国 · 云南 昆明 650200

## 摘 要

智能家居、超高清视频、云游戏等新兴应用蓬勃发展, 推动家庭网络需求从“基础可用”向“优质、稳定、高速”迭代升级。传统FTTH+路由器组网模式存在覆盖不均、多设备并发卡顿等痛点, 难以适配新需求, FTTR技术作为实现全屋千兆无缝覆盖的核心解决方案, 在用户迁移上面临多重现实挑战, 本文从技术部署与成本、用户需求与性价比矛盾等维度分析问题症结, 研究制定技术方案与成本、用户需求与场景化营销等策略对策, 以此满足运营商和客户千兆宽带需求。

## 关键词

全屋千兆; 用户迁移; 移动通信

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

数字化浪潮推动家庭网络成为核心数字基础设施, 智能家居、超高清视频、云游戏等新兴应用蓬勃发展, 推动家庭网络需求从“基础可用”向“优质、稳定、高速”迭代升级。传统 FTTH (光纤到房间) + 路由器组网模式存在覆盖不均、多设备并发卡顿等痛点, 难以适配新需求, FTTR (光纤到房间) 技术应运而生<sup>[1]</sup>。作为实现全屋千兆无缝覆盖的核心解决方案, FTTR 不仅是运营商推进宽带业务升级、挖掘存量市场价值的关键举措, 更通过光纤直连各房间的全光组网架构, 具备单纤  $\geq 10\text{Gbps}$  超高速率、端到端  $< 0.1\text{ms}$  超低时延、全域无缝覆盖、抗干扰性强及扩展能力优异等核心优势<sup>[2]</sup>, 可精准匹配高带宽应用场景与智能家居规模化发展需求。

当前 FTTR 用户迁移仍面临多重现实挑战: 已装修房屋用户对布线改造的抵触情绪、设备安装成本偏高、用户技术认知不足、Mesh 组网等低成本方案的竞争挤压。系统研究 FTTR 用户迁移核心难点, 对运营商优化推广策略、提升用户体验、加速技术规模化落地具有重要实践价值, 可有效降低用户迁移门槛、推动 FTTR 技术普及, 助力家庭网络迭代升级, 为数字经济发展夯实基础支撑。

### 1.2 研究目标

本研究旨在系统剖析 FTTR 用户迁移的现状特征与核心难点, 为 FTTR 技术规模化应用提供理论支撑与实践指引。具体研究目标包括三方面: 一是梳理 FTTR 用户迁移发展现状, 涵盖市场推广进程、用户规模增长态势及区域分布特征; 二是从技术、经济、认知、服务多维度解构用户迁移的核心障碍; 三是针对性提出兼具可行性与适用性的迁移促进优化策略。

【作者简介】桑维 (1985-), 男, 中国四川南充人, 硕士, 工程师, 从事移动通信研究。



## 2 FTTR 全屋千兆宽带用户迁移现状分析

### 2.1 FTTR 技术与市场发展历程

FTTR 的发展进程与通信技术迭代、用户需求演进深度绑定。早期家庭网络以数十 Kbps 速率的拨号上网为主，仅能满足基础网页浏览需求；随着光纤通信技术成熟，FTTH（光纤到户）实现百兆至千兆带宽普及，但在大户型场景中仍存在覆盖不均、多设备并发卡顿等突出痛点。FTTR 通过“主网关+从网关”全光架构将光纤延伸至各房间，精准破解上述难题：主光猫接入运营商 OLT 设备并集成 Wi-Fi 6 功能，从光猫分布式部署于各房间，实现各房间独立光纤带宽供给，有效突破传统网络速率瓶颈<sup>[3]</sup>。

实践验证表明，FTTR 核心优势显著：理想环境下载速率超 1.2Gbps，可稳定支撑 4K/8K 超高清视频流畅播放；云游戏场景 ping 值稳定 < 5ms，保障操作实时性与流畅性；可支持 256 台终端并发接入，充分适配智能家居规模化部署需求。截至 2025 年 11 月末，1000Mbps 及以上接入速率的固定互联网宽带接入用户达 2.39 亿户，比上年末净增 3252 万户，占总用户数的 34.3%，占比较上年末提升 3.4 个百分点<sup>[4]</sup>。

### 2.2 用户迁移的区域与群体差异

FTTR 用户迁移呈现显著的区域不平衡特征：江苏、广东等东部省市依托雄厚的经济实力与完善的基建基础，FTTR 普及进程领先，其中深圳推动 FTTR 成为高端楼盘标配，加速技术场景落地；上海将 FTTR 纳入城市信息化升级体系，通过“光耀申城”计划打造示范标杆，品牌辐射效应显著。西部省份中，贵州依托政策扶持与大数据产业发展机遇，推动 FTTR 向农村区域延伸，渗透率超 30%，成为西部普及典型。东北地区受经济发展滞后、严寒气候增加运维成本、人口外流等多重因素制约，FTTR 普及进程相对迟缓。

用户群体分化态势清晰：电竞玩家、智能家居用户、多成员家庭构成核心迁移群体，FTTR 的低时延、高并发、全域覆盖特性可精准匹配其高频高带宽需求；普通家庭因日常需求以轻量级应用为主，对 FTTR 技术价值感知薄弱，且存在技术门槛顾虑，迁移意愿相对低迷。

### 2.3 运营商迁移策略与典型案例

运营商围绕 FTTR 用户迁移构建多元化套餐体系与推广矩阵。套餐设计以“基础宽带+FTTR 设备+增值服务”绑定为核心模式，推广层面构建“线上线下融合”体系：线上依托官方网站、手机 APP 实现便捷办理，通过社交媒体矩阵开展技术科普与产品宣传；线下在营业厅设置沉浸式体验区进行实景演示，开展社区地推活动，并推出“免费安装+设备租用”模式，大幅降低用户尝试门槛。

## 3 FTTR 用户迁移核心难度剖析

### 3.1 技术部署与成本层面

技术部署层面，FTTR 施工复杂性突出，老旧小区与已装修家庭的问题尤为尖锐。老旧小区普遍存在弱电管道资源

匮乏问题，传统管道多被网线、有线电视线占用，无法容纳 FTTR 光纤布线；虽可采用明装隐形光纤兼顾美观性，但对墙体打孔精度、线路走向规划要求极高，单户平均施工周期达 4-6 小时，是传统宽带安装时长的 2-3 倍，显著推高施工成本与时间成本。

已装修家庭布线难度更高，用户对装修破坏的抵触情绪突出，需结合房屋结构制定墙角、踢脚线、天花板等隐蔽式布线方案，这对施工人员的经验与技术水平提出更高要求，进一步延长施工周期、提升实施成本，部分用户因此明确拒绝 FTTR 升级。成本层面，设备与安装费用偏高是核心制约因素：单户 FTTR 核心设备（主从路由器、分光器等）采购成本，叠加专业安装费用，初期投入远高于传统宽带。运营商推出的设备租用模式虽降低初期投入，但长期租金累计可能超过设备购置价，且终止租用即无法继续使用服务，长期费用压力导致价格敏感型用户流失。

### 3.2 用户需求与性价比矛盾

FTTR 理论性能与用户实际体验存在显著落差，削弱技术价值感知。速率体验上，其理论峰值可实现 10 秒下载 10GB 文件，但受网盘限速、视频平台服务器带宽限制等外部因素影响，实际速率远低于理论值，如主流网盘对普通用户下载速率限制在 100-200KB/s，导致超高速率优势无法充分发挥。多设备并发能力方面，FTTR 理论可支持 256 台终端接入，但普通家庭实际设备连接数多在 20 台以内，技术优势难以体现，进而降低用户升级意愿。

资费门槛与需求不匹配进一步加剧性价比争议，FTTR 套餐月费较普通千兆宽带高出 50%-100%。调研数据显示，60% 的普通用户认为现有宽带可满足日常需求，仅 23% 的用户愿意为 FTTR 额外支付月费，高资费与普通用户轻量级需求的错配，成为制约用户迁移的核心因素。

### 3.3 用户认知与接受度障碍

用户对 FTTR 技术的认知盲区构成重要迁移障碍。FTTR 涉及光纤组网、Wi-Fi 6/7 协议等专业技术概念，普通用户对其技术原理、核心优势认知不足，主要存在三大顾虑：一是担忧光纤网络故障排查与修复需专业人员介入，增加后期使用麻烦；二是顾虑 FTTR 设备与现有智能终端存在兼容性问题；三是质疑新兴技术的成熟度与运行稳定性。

此外，用户对隐形光纤耐用性的固有认知偏差加剧抵触情绪。受传统网线“易损坏”的认知惯性影响，普通用户普遍认为纤细的隐形光纤更易因踩踏、拉扯导致断裂，虽隐形光纤在技术上已具备较高的强度与耐用性，但固有认知难以在短期内改变。同时，运营商普遍设置 24-36 个月 FTTR 合约期，提前解约需支付违约金。

## 4 促进 FTTR 用户迁移的对策建议

### 4.1 优化技术方案与成本结构

针对技术部署复杂、成本高企的核心瓶颈，需从技术

优化与成本管控双向突破。老旧小区布线推广成熟的“隐形光纤+线槽”免打孔方案,沿墙角、踢脚线等隐蔽区域布设,不破坏墙体,兼顾施工可行与美观,提升老旧小区及已装修家庭适配性。同时推广“光猫+无线 Mesh”混合组网,融合高速接入与灵活组网优势,解决卫生间、阳台等光纤难铺区域信号覆盖问题,Mesh节点自动优化连接实现无缝漫游,提升部署灵活性与场景适配性。

成本管控核心是运营商与设备厂商规模化协同采购,以大额订单降低设备采购成本;用户规模扩大后,规模效应将分摊初期投入,实现运营商控成本、用户降费用的双赢。资费构建分层分级体系,推出聚焦核心区域覆盖的“基础版 FTTR”套餐,精简非必要服务控费;同步提供“设备买断/租用”双选项,适配不同用户需求,提升市场接受度。

#### 4.2 精准匹配用户需求与场景化营销

以用户细分为核心精准营销,提升迁移转化率。电竞玩家主打“全屋无死角覆盖+低时延稳定连接”,配套电竞加速、4K/8K 超高清片源等增值权益;智能家居用户聚焦多设备并发接入,实景演示设备互联便捷性及智能系统稳定支撑;多成员家庭强调全屋千兆覆盖,满足办公、学习、观影需求,保障多场景并发无卡顿。

普通家庭推广核心“隐形光纤美观+智能网管便捷”,突出光纤“纤细透明、不破坏装修”优势,契合家居需求;强调手机 APP 监控、管控、一键排障功能,降低使用门槛;对比传统宽带痛点强化 FTTR 体验优势。构建“网络+应用”生态闭环,推出“FTTR+智能设备”捆绑优惠及一站式方案;开发家庭云存储、远程办公加速等专属应用,发挥高速优势。通过短视频、直播展示测速、漫游实景,增强用户信任。

#### 4.3 提升服务透明度与用户体验

规范销售流程与合约告知机制:建立标准化销售规范,要求套餐宣传显著标注合约期限、违约金、退订政策等关键信息;开发线上自助查询系统,支持用户实时查询合约及费用明细,消除信息不对称。建立“7天无理由退订”机制,用户签约后7天内可免费体验,不满意可无条件退订免违约金,既为用户兜底,也倒逼运营商提升服务技术质量。

推行“标准化安装+智能验收”全流程管理,要求装维人员按规范施工,保障布线合规、设备牢固、核心功能到位;安装后通过 APP 推送测速结果、信号热力图等验收数据,实现可视化验收,用户不满意及时整改。建立 7\*24 小时售后响应机制,开通专属热线、APP 客服等多渠道通道,要求售后限时响应并提供方案,核心问题上门免费整改,提升用户获得感与忠诚度。

#### 4.4 政策引导与区域协同发展

强化政府政策引导支撑:建议地方政府出台老旧小区 FTTR 改造补贴政策,承担主要施工成本,减轻用户负担;推广试点经验,通过政企协同推动老旧小区规模化改造。新建住宅领域,制定通信配套标准,要求规划阶段预留 FTTR

布线通道与接口,实现房建与网建同步规划建设,从源头破解布线难题。

打造 FTTR 示范社区发挥标杆作用,政企联合投建高品质网络及配套服务,通过参观体验、案例宣讲展示应用价值,总结可复制推广经验。实施区域差异化策略:东部发达地区聚焦技术迭代与高端用户渗透,加快 Wi-Fi 7 普及,推出定制化服务;西部及东北地区结合数字乡村、智慧城市建设,将 FTTR 纳入基础网络升级,加大政策倾斜与投入扩大覆盖,支撑民生业务,融合智慧场景提升数字化治理水平。

## 5 结论与展望

### 5.1 研究结论

FTTR 具备超高速率、低时延、全域覆盖等显著优势,是家庭网络升级的核心方向,但用户迁移呈现显著的区域不平衡与群体分化特征:东部地区普及进程领先,东北地区相对迟缓;电竞玩家、智能家居用户等高端群体迁移意愿强烈,普通家庭因需求轻量、价格敏感等因素迁移动力不足。

FTTR 用户迁移的核心难度体现在四方面:技术上,老旧小区与已装修家庭布线难度大、实施成本高;需求上,理论性能与实际体验落差大,高资费与普通用户需求不匹配;认知上,用户技术认知不足,隐形光纤耐用性认知偏差及合约不透明引发抵触情绪。

促进 FTTR 用户迁移需针对性实施四大策略:优化技术方案与成本结构,降低部署难度与使用费用;精准匹配用户需求实施场景化营销,构建“网络+应用”生态闭环;提升服务透明度与装维质量,建立风险兜底机制;强化政策引导,实施区域差异化发展策略。

### 5.2 未来展望

未来,5G 与 FTTR 融合深化,FTTR 将升级为“家庭数字中枢”,支撑智能家居生态,打通设备互联链路,实现远程精准管控,助力家居智能化升级。未来研究可聚焦 FTTR 与边缘计算、AI 组网协同,依托边缘计算降时延,通过 AI 组网优化配置,为智慧家庭提供丰富解决方案,匹配多元数字化需求。

市场推广层面,随技术成熟与成本下行,运营商需加大推广力度,通过多元促销、优质服务及场景合作提升用户认知;深化与房企、智能家居厂商联动,推动 FTTR 规模化落地,构建良性产业生态。尽管当前面临用户迁移等挑战,FTTR 未来有望主导家庭网络市场,输出高速稳定智能的网络服务,驱动家庭数字化升级。

### 参考文献

- [1] 中国通信标准化协会. YD/T 3817-2020 基于 10G PON 的光纤到房间 (FTTR) 系统技术要求 [S]. 2020.
- [2] 中国信息通信研究院. 中国 FTTR 白皮书 (2022 年版) [R]. 2022.
- [3] 徐慧,王峰,李爽. FTTR 在家庭网络中的应用探讨 [J]. 电信工程技术与标准化, 2021.
- [4] 2025 年前 11 个月通信业经济运行情况. 2025.

# Research on Online Monitoring Technology of Smart Grid Transmission Lines

Jing Lin

State Grid Intelligent Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

## Abstract

With the accelerated development of the global energy internet, smart grids have become the core infrastructure for ensuring energy security and promoting clean energy integration. As the “arteries” of the power grid, transmission lines directly impact power supply reliability. Traditional manual inspection methods suffer from inefficiency, extensive blind spots, and delayed responses, failing to meet the real-time and precision requirements of smart grids. In this context, online monitoring technologies based on IoT, big data, and AI have emerged as a critical pathway to overcome these challenges. By dynamically monitoring operational parameters and proactively warning of potential faults, these technologies can significantly reduce unplanned outages and support the evolution of power grids toward intelligent capabilities including “self-awareness, self-diagnosis, and self-decision-making.” This paper first elaborates on the technical framework of online monitoring for smart grid transmission lines, then analyzes core technologies from multiple perspectives, followed by detailed discussions on system architecture design and optimization. Finally, it summarizes technical application challenges and countermeasures, aiming to provide valuable references for related research.

## Keywords

Smart grid; Transmission line; Online monitoring technology

# 智能电网输电线路的在线监测技术研究

林静

国网智能科技股份有限公司, 中国 · 山东 济南 250000

## 摘 要

随着全球能源互联网加速建设, 智能电网已成为保障能源安全、推动清洁能源消纳的核心基础设施。输电线路作为电网的“动脉”, 其运行状态直接影响供电可靠性。传统人工巡检模式存在效率低、覆盖盲区多、响应滞后等问题, 难以满足智能电网对实时性、精准性的要求。在此背景下, 基于物联网、大数据与人工智能的在线监测技术成为突破瓶颈的关键路径。通过动态感知线路运行参数、提前预警潜在故障, 可显著降低非计划停电风险, 支撑电网向“自感知、自诊断、自决策”的智能化方向演进。本文先是详细阐述了智能电网输电线路在线监测技术体系, 随后从多方面具体分析了输电线路在线监测的核心技术, 紧接着具体阐述了在线监测系统的架构设计与优化, 最后总结了相关技术应用挑战与对策, 以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

## 关键词

智能电网; 输电线路; 在线监测技术

## 1 引言

智能电网的规模化发展使输电线路面临更复杂的运行环境(如极端天气、高比例新能源接入), 其故障率较传统电网上升 15%-20%。据统计, 我国每年因线路故障导致的经济损失超百亿元, 其中 70% 可通过提前干预避免。现有监测技术存在三大短板: 一是传感器精度受环境干扰显著; 二是数据传输延迟导致预警滞后; 三是状态评估依赖人工经验, 误判率高达 18%。本文以提升监测系统“感知-传输-决策”全链条效能为目标, 研究多技术融合的在线监测方法,

重点解决复杂场景下的数据可靠采集、实时处理与智能分析问题, 为输电线路运维模式转型提供理论依据。

## 2 智能电网输电线路在线监测技术体系

### 2.1 监测对象与核心参数

输电线路运行状态受电气、机械、环境三方面因素共同制约, 需通过多维度参数监测实现故障精准溯源与风险量化评估。电气参数监测方面, 电流/电压监测利用电流互感器(CT)与电压互感器(PT)实时采集线路负载数据, 结合谐波分析技术识别过载、短路等异常工况, 当电流突增超额定值 20% 时触发过载预警, 防止导线过热老化<sup>[1]</sup>; 绝缘子泄漏电流监测则通过高精度传感器捕捉表面电流变化, 结合湿度数据构建泄漏电流-污秽度模型, 当电流超 500  $\mu$ A

【作者简介】林静(1987-), 女, 中国山东菏泽人, 本科, 工程师, 从事电力工程技术方向研究。



阈值时判定积污严重,需及时清扫或更换以避免闪络。机械参数监测中,导线张力与弧垂监测采用张力传感器或图像识别技术动态跟踪受力状态,张力超设计值 80% 或弧垂偏差超  $\pm 5\%$  时预警断股、杆塔变形风险;杆塔倾斜监测通过倾角传感器或北斗/GPS 定位实时监测倾斜角度,铁塔超  $3^\circ$ 、水泥杆超  $1.5^\circ$  时定位故障杆塔并评估倒塔风险。环境参数监测部署温湿度、风速、雨量等传感器构建微气象网络,风速超 25m/s 时预测导线舞动,覆冰达 15mm 时触发融冰装置;同时整合雷电定位与地质传感器,实时获取雷击位置、地震加速度等数据,为防雷设计与抗震加固提供科学依据。

## 2.2 关键技术组成

在线监测技术的实现依赖传感器、通信、计算、决策等多环节协同创新,其技术体系可分为四层:传感器技术通过多类型融合实现高精度感知,光纤传感基于布里渊/拉曼散射原理支持温度、应变等参数的 50km 长距离分布式监测,无线传感网络(WSN)采用 LoRa、NB-IoT 技术构建自组网节点,在山区等复杂地形替代有线传感器以降低布线成本,多传感器融合则通过数据级、特征级算法整合电气、机械、环境数据,例如结合导线张力与风速数据可精准区分自然松弛与断股异常;数据采集与传输技术采用边缘计算架构,在靠近传感器的边缘节点部署轻量化模块,实现数据预处理与本地决策,如实时识别绝缘子泄漏电流突变并仅上传异常数据,同时优化 5G/LoRa 通信协议,通过时分多址技术提升长距离、低功耗场景下的通信可靠性;数据处理与分析技术依托大数据挖掘构建历史数据库,分析覆冰与温湿度的关联性以优化融冰策略,并利用 CNN、LSTM 等深度学习模型实现故障自动识别与剩余寿命预测,实验显示诊断准确率超 92%;状态评估与决策支持技术通过层次分析法生成 0-100 分健康指数,低于 60 分时标记为“亚健康”,同时结合蒙特卡洛模拟生成分级预警信息,红色预警触发时自动推送抢修工单至最近班组,形成“感知-传输-分析-决策”的完整闭环。

## 3 输电线路在线监测的核心技术分析

### 3.1 传感器技术深度解析

输电线路监测中,传感器技术选型需综合考量环境适应性、监测精度与成本。耐候性方面,光纤传感基于布里渊散射原理,可实现 50km 长距离分布式监测,抗电磁干扰强,适用于高压线路;无线传感网络(WSN)采用 LoRa、NB-IoT 技术,能在偏远山区或复杂地形部署,降低布线成本<sup>[2]</sup>。精度上,多传感器融合技术通过数据级、特征级或决策级算法整合多源数据,如结合导线张力与风速数据,可精准区分自然松弛与异常断股,故障诊断准确率超 92%。成本上,无线传感器网络通过自组网节点降低成本,而高精度光纤传感器虽成本较高,但适用于关键节点长期监测。分布式架构通过部署多个监测单元实现全面覆盖,具备高可靠性、强扩展性和强实时性;集中式架构依赖中心处理单元,适用于小

范围、高精度场景,但存在单点故障风险且扩展性受限。

### 3.2 数据传输与通信协议优化

输电线路在线监测中,数据传输与通信协议优化需兼顾技术选型与安全保障。通信技术方面,电力线载波通信(PLC)依托现有电力线路实现低成本传输,但易受电网噪声干扰,适用于短距离、低速率场景;无线专网中,LoRa 以长距离、低功耗特性覆盖偏远地区温湿度监测,5G 则满足低延迟、高带宽需求,如视频监控,其中基于 LoRa 的分层方案可降低节点功耗 62.2%、缩短延迟 62.5%;卫星通信作为补充手段,覆盖无地面网络区域,但成本较高。数据压缩环节采用边缘计算架构,在传感器节点完成数据预处理,如滤波、压缩,仅上传绝缘子泄漏电流突变等异常数据,有效降低云端传输压力与带宽需求;数据加密则通过防火墙、入侵检测系统及 AES、RSA 等加密技术构建安全防线,例如某系统采用端到端加密传输,确保监测数据的完整性与机密性,防止网络攻击与数据泄露。

### 3.3 智能算法在状态评估中的应用

智能算法在输电线路状态评估中应用广泛且成效显著。基于机器学习的故障模式识别里,卷积神经网络(CNN)擅长处理图像,能借杆塔倾斜图像自动识别故障,准确率超 92%,可区分导线断股、绝缘子污秽等异常;长短期记忆网络(LSTM)则用于分析时序数据,如某系统利用其分析历史数据,提前预测覆冰厚度与温湿度关联性以优化融冰策略。数字孪生技术通过实时采集导线张力等数据构建模型,模拟不同工况动态行为,还能对比仿真与实际数据动态调整控制策略。多源数据融合的决策模型构建中,采用多种算法整合多源数据提升一致性,再基于融合数据构建健康指数模型,生成分级预警信息,为运维资源优先调配提供有力指导。

## 4 在线监测系统的架构设计与优化

### 4.1 系统总体架构

在线监测系统采用分层设计理念,由感知层、网络层、平台层与应用层构成。感知层是数据源头,部署了温度、湿度、电流等各类传感器,能精准采集输电线路的运行参数与环境信息<sup>[3]</sup>。网络层承担数据传输任务,综合运用电力线载波通信、无线专网(如 LoRa、5G)以及卫星通信等技术,保障数据稳定高效地传输至平台层。平台层作为核心枢纽,对海量数据进行汇聚、处理与分析,挖掘数据潜在价值。应用层基于平台层处理结果,为用户提供直观便捷的操作界面,可实现故障预警、状态评估、运维决策等功能。此外,系统还采用模块化与标准化接口设计。模块化设计把系统划分成数据采集、处理、通信等多个功能独立模块,便于开发、维护与升级;标准化接口设计则让不同模块能无缝对接,提高了系统的兼容性与扩展性,降低了系统集成成本。

### 4.2 关键模块功能实现

在线监测系统的关键模块功能实现各有侧重。数据采集模块为保证准确性与可靠性采用冗余设计,既部署多个同

类型传感器对同一参数采集,经比对校验剔除异常数据提升质量;又用不同原理传感器采集关键参数,如同时用光学与电学传感器测绝缘子污秽程度,一种故障时另一种仍能工作,保障数据连续性。边缘计算节点部署在靠近数据源处,能初步处理分析数据,减轻云平台压力。在输电线路沿线依长度、密度等确定节点数量与位置,关键区域如杆塔、变电站部署多个形成冗余提高容错能力,实时处理数据后仅上传关键数据,降低传输量、提高响应速度。云平台采用分布式存储技术,将海量数据存于多个节点,提高可靠性与扩展性,还运用压缩与加密技术保障安全,并提供丰富可视化工具图表,让用户直观查看线路状态与故障信息,便于运维决策。

### 4.3 系统可靠性保障机制

在线监测系统有着完善的可靠性保障机制。在抗干扰设计上,该系统需应对电磁干扰和极端天气等干扰因素。于电磁兼容方面,运用屏蔽、滤波、接地等技术降低电磁干扰对传感器和通信设备的影响,像给传感器外壳用金属屏蔽材料,在通信线路加滤波器,保障设备在强电磁环境下正常工作<sup>[4]</sup>。针对极端天气,选用具备良好耐候性的传感器与设备,如防水、防尘、防腐蚀的传感器,能在高温、低温、暴雨、大风等恶劣天气下稳定运行。此外,系统具备自诊断与自恢复功能。自诊断功能可实时监测自身运行状态,自动检测诊断硬件故障、软件异常等问题,检测到故障就及时发出警报通知运维人员。自恢复功能则针对软故障,如软件死机、通信中断等,能自动重启或重新连接,像边缘计算节点软件故障时自动重启软件、初始化参数,减少停机时间,提高系统可靠性与可用性。

## 5 技术应用挑战与对策

### 5.1 主要挑战分析

输电线路在线监测系统技术应用面临诸多挑战。一是复杂环境下的传感器稳定性问题,其处于高山、丛林等多样地理区域,高温会使电子元件性能下降、测量误差增大甚至损坏,低温会改变材料物理性质影响精度;强电磁干扰会干扰信号传输致数据失真;风雨侵蚀、盐雾腐蚀会加速外壳及内部结构损坏,影响数据可靠性与稳定性。二是海量数据的实时处理压力,随着在线监测系统广泛应用,传感器数量与数据量剧增,采集频率也提高,传统集中式数据处理因服务器计算负担重,易出现处理延迟,影响故障预警与快速响应,

威胁电网安全。三是跨部门数据共享与隐私保护矛盾,输电线路监测涉及多部门,数据共享意义重大,但各部门数据含用户隐私与商业机密,泄露会带来严重损失,如何保障安全隐私下有效共享数据亟待解决。

### 5.2 针对性解决方案

为解决输电线路在线监测系统面临的问题,有系列针对性方案。针对复杂环境影响传感器稳定性,材料上选耐温、抗电磁干扰材料,如高温陶瓷做外壳,特殊电磁屏蔽材料包裹;封装工艺采用密封技术,用防水胶密封接口缝隙,对环境要求高的传感器用双重封装,还涂覆防尘涂层。应对海量数据实时处理压力,采用分布式计算,在输电线路沿线布局边缘计算节点,对数据进行预处理,提取关键信息上传云平台;同时部署轻量化模型,用模型压缩和量化技术优化,降低计算复杂度和存储需求,实现数据实时处理分析。对于跨部门数据共享与隐私保护矛盾,构建基于区块链的数据共享平台,数据加密存储,用智能合约明确使用权限和规则,利用区块链不可篡改特性保证数据真实完整,实现安全共享。

## 6 结语

总的来说,本文聚焦智能电网输电线路在线监测技术展开全面研究,成功构建起涵盖监测对象、关键技术等方面的完整技术体系。对传感器、数据传输、智能算法等核心技术进行了深度剖析,设计出分层架构的在线监测系统,并针对性地提出可靠性保障机制。同时,针对技术应用过程中面临的复杂环境影响传感器稳定性、海量数据处理压力大、跨部门数据共享与隐私保护矛盾等挑战,给出了切实可行的解决方案。展望未来,在物联网、人工智能等技术不断进步的推动下,在线监测技术将朝着更高精度、更智能化的方向大步前行,传感器性能与智能算法持续优化,跨部门数据共享机制日益完善,助力输电线路运维工作更加高效、安全。

### 参考文献

- [1] 田智多.基于智能电网技术的输电线路状态监测及故障诊断[J].大众用电,2025,40(04):65-66.
- [2] 李夯,张宇东.在线监测技术在智能电网输电线路中的应用[J].光源与照明,2024,(11):69-71.
- [3] 银得.智能电网输电线路中的在线监测技术应用[J].中华建设,2024,(05):169-171.
- [4] 董威佐.智能电网输电线路的在线监测技术[J].江西电力职业技术学院学报,2022,35(08):4-6.

# On-line Monitoring Method of Transmission Line Sag

Sheng Xu

State Grid Intelligent Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

## Abstract

Transmission line sag, a critical parameter for assessing conductor performance, can directly cause insufficient conductor-to-ground clearance, mechanical stress exceeding limits, and even severe incidents like conductor dancing or line breaks. Traditional manual inspections and offline measurements suffer from inefficiency, poor real-time performance, and data lag, failing to meet smart grid requirements for condition awareness and proactive maintenance. With advancements in IoT, AI, and multi-source data fusion technologies, online sag monitoring has emerged as a research hotspot. This paper first analyzes the formation mechanisms and influencing factors of transmission line sag, then details the classification and principles of online monitoring methods, followed by key technical challenges and solutions. Finally, it presents typical application scenarios and case studies to provide valuable references for related research.

## Keywords

Transmission line; Line sag; Online monitoring method

# 输电线路弧垂在线监测方法

徐晟

国网智能科技股份有限公司, 中国 · 山东 济南 250000

## 摘要

输电线路弧垂是衡量导线运行状态的核心参数, 其异常变化会直接导致导线对地距离不足、机械应力超限, 甚至引发舞动、断线等严重事故。传统人工巡检与离线测量方法存在效率低、实时性差、数据滞后等问题, 难以满足智能电网对状态感知与主动运维的需求。随着物联网、人工智能及多源数据融合技术的发展, 输电线路弧垂在线监测技术逐渐成为研究热点。本文先是详细分析了输电线路弧垂形成机理与影响因素, 随后具体阐述了弧垂在线监测方法分类与原理, 紧接着提出了关键技术挑战与解决方案, 最后举出了典型应用场景并进行了案例分析, 以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

## 关键词

输电线路; 线路弧垂; 在线监测方法

## 1 引言

输电线路作为电力传输的“动脉”, 其运行状态直接影响电网的安全性与经济性。弧垂作为导线力学特性的直观体现, 是衡量线路安全裕度的重要指标: 弧垂过大可能导致导线对地距离不足, 引发触电或山火风险; 弧垂过小则会使导线应力超限, 加速机械疲劳甚至断裂。传统人工巡检与离线测量方法依赖周期性检修, 难以实时捕捉弧垂动态变化, 尤其在极端天气或重载工况下易造成监测盲区。随着智能电网建设的推进, 在线监测技术通过实时感知导线状态, 为运维决策提供数据支撑, 已成为行业研究焦点。然而, 现有方法在环境适应性、成本效益、数据融合等方面仍存在不足。本文旨在系统梳理输电线路弧垂在线监测技术的研究进展, 分析关键挑战, 并提出未来发展方向。

【作者简介】徐晟(1992-), 男, 中国山东烟台人, 本科, 助理工程师, 从事电力工程技术方向研究。

## 2 输电线路弧垂形成机理与影响因素分析

### 2.1 弧垂的力学模型

弧垂的力学模型是描述导线空间形态与受力关系的基础, 常用悬链线方程与抛物线近似模型, 二者适用条件与精度差异明显。悬链线方程基于导线为均匀柔性索的假设, 考虑自重沿弧长均匀分布, 其数学表达式为  $y=wT_0(\cosh(T_0wx)-\cosh(2T_0wx_0))$ , 精度高, 适用于大跨度、高弧垂场景, 但计算复杂需数值求解<sup>[1]</sup>; 抛物线近似模型在弧垂与跨距之比 ( $f/L < 0.1$ ) 时, 将悬链线简化为  $y=L24fx(L-x)$ , 计算简便, 多用于中小跨度线路估算, 极端工况下误差显著。弧垂与张力、温度、风偏、覆冰等参数的耦合关系可通过力学平衡推导: 弧垂与水平张力成反比; 温度升高时, 导线热膨胀使弧垂增大; 风载荷引发风偏并改变张力分布; 覆冰增加导线质量, 导致弧垂显著增加。

### 2.2 关键影响因素

弧垂的动态变化是环境、导线特性与运行工况共同作



用的结果。环境因素中,温度升高使导线热膨胀、弧垂增大,高温下弧垂超限易引发事故;风速通过风载荷引起风偏并改变振动特性,强风可能导致局部弧垂瞬时超标;日照使导线温度升高产生附加弧垂,其升幅受日照强度与导线吸热系数影响;覆冰增加导线质量与风阻,显著增大弧垂,厚覆冰还可能引发断线或倒塔。导线自身特性方面,材料弹性模量与线膨胀系数决定力学响应,高弹性模量材料弧垂小但抗疲劳性可能降低;截面积影响重力载荷与电流承载能力,大截面积导线自重、弧垂显著,但电阻小、发热量低;弹性模量越大,导线伸长量越小、弧垂越小,但需更高张力调整。运行工况中,负载电流通过焦耳热导致温度升高与弧垂增大,机械张力则是调控弧垂的直接手段,但需平衡安全与经济性。

### 3 弧垂在线监测方法分类与原理

#### 3.1 基于传感器的直接监测法

基于传感器的直接监测法包含多种技术手段。张力传感器法通过测量导线张力变化反推弧垂,因导线张力与弧垂呈反比,温度升高或负载增加使弧垂增大时张力减小,传感器(如应变式、压磁式)装在杆塔或绝缘子串,实时采集数据并结合力学模型计算弧垂,其优点是直接反映导线力学状态、精度高(误差通常小于 $\pm 5\%$ ),适用于大跨度线路,但安装需停电作业、成本高,长期运行可能因材料疲劳或环境腐蚀致误差累积<sup>[2]</sup>;倾角传感器法利用杆塔倾角或导线悬挂点角度变化计算弧垂,通过“固体摆”式或MEMS加速度计传感器测量垂直倾角,结合几何关系推导,优点是安装简便、响应快、适合动态监测,缺点是对安装角度精度要求高,风偏或杆塔振动会引入干扰,需配合风速仪修正;激光测距法通过激光反射时间或相位差测导线对地距离间接算弧垂,激光测距仪装在杆塔底部,优点是精度高(可达毫米级)、昼夜可作业、适用复杂地形,缺点是需定期清洁镜面,雨雾天气影响测量,远距离测量需配合棱镜增加成本。

#### 3.2 基于图像处理的间接监测法

基于图像处理的间接监测法主要有两种方式。一是可见光/红外图像法,其原理是借助摄像头采集导线图像,进而提取弧垂轮廓特征。可见光图像凭借导线与背景(如蓝天)的对比度来呈现,红外图像则依靠导线温度差异(如负载电流引发的发热)强化轮廓识别,再结合图像分割与边缘检测算法(像Canny算子),提取导线最低点坐标以计算弧垂。此方法适用于杆塔间距小、导线清晰的场景,例如城市配电线路。二是深度学习应用,其原理是利用卷积神经网络(CNN)自动识别导线弧垂,通过含不同弧垂状态导线图像的训练数据集优化模型参数,达成端到端测量。像YOLO系列算法能实时检测导线位置,U-Net等语义分割模型可精准提取弧垂轮廓,其优势在于适应复杂背景(如植被遮挡),抗干扰能力出色,测量效率极高,能达到帧级处理速度。

#### 3.3 基于力学模型的数值计算法

基于力学模型的数值计算法包含有限元分析法与状态估计法。有限元分析法通过建立导线三维有限元模型来模拟弧垂变化,将导线离散成单元结构,输入材料参数(如弹性模量、线膨胀系数)、环境条件(如温度、风速)及张力数据,求解平衡方程得出导线形态。像ANSYS或COMSOL软件,能模拟导线在覆冰或大风等极端工况下的弧垂动态响应,此方法适用于新线路设计验证或极端工况预测。状态估计法则是结合SCADA数据与参数辨识算法实时推算弧垂,采集导线张力、温度、风速等实时数据,利用状态估计模型(如扩展卡尔曼滤波)修正参数并动态计算弧垂,还能利用特定公式通过导线温度估算弧垂。其优势显著,无需额外安装传感器,成本大幅降低,尤其适用于已有线路的智能化改造,为线路运行维护提供了经济高效的解决方案。

#### 3.4 多源数据融合监测法

多源数据融合监测法为提升弧垂监测精度提供了创新思路。其核心在于传感器+图像+气象数据的融合框架设计,该设计整合张力传感器、激光测距仪、摄像头及气象站的数据,借助数据融合算法,如贝叶斯网络或D-S证据理论,来提高弧垂监测的可靠性。当张力传感器数据与图像识别结果出现冲突时,能结合风速等气象数据,判断是否因风偏等因素导致误差,有效弥补了单一数据源的局限性,大大提升了监测的鲁棒性。此外,还有数据同化与误差补偿策略,利用卡尔曼滤波或粒子滤波算法,对多源数据进行动态修正。比如将张力传感器测量值作为观测值,有限元模型预测值作为状态值,通过滤波算法减小模型误差与传感器噪声。实际应用效果显著,在某500kV线路中,融合监测法使弧垂测量误差从 $\pm 15\text{cm}$ 降低至 $\pm 5\text{cm}$ ,有力保障了线路运行的安全性。

### 4 关键技术挑战与解决方案

#### 4.1 环境干扰问题

环境干扰是影响输电线路弧垂监测精度的关键因素,主要包括温度、风速和覆冰三方面。温度方面,导线热胀冷缩效应显著,如某500kV线路夏季高温时弧垂增1.2米,冬季覆冰时减0.8米。对此可采用实时温度补偿,集成高精度温度传感器并结合材料热膨胀系数,通过公式动态修正弧垂值,还可针对不同温度区间分段建模以提高精度,试验显示误差可从 $\pm 15\text{cm}$ 降至 $\pm 5\text{cm}$ 。风速方面,强风会使导线舞动偏移,如风速超15m/s时摆动幅度超1米,可通过建立风速-弧垂耦合模型,引入动态修正系数调整计算值,还能融合多传感器数据用卡尔曼滤波算法降低干扰,某系统应用后风偏误差从 $\pm 0.8$ 米降至 $\pm 0.3$ 米。覆冰方面,不均匀覆冰会引发“双峰型”弧垂,可通过图像识别或激光测距监测覆冰厚度,结合密度计算附加荷载,再用非均匀荷载模型模拟应力分布,某案例中误差从17%降至5%。

## 4.2 数据传输与实时性

在偏远地区,无线通信技术对保障输电线路弧垂监测的数据传输与实时性至关重要<sup>[3]</sup>。LoRa 技术适用于偏远山区、无人区等无公网覆盖区域,它具备远距离传输优势,空旷地带可达 10km,城市环境 1 - 2km,某农田监测项目甚至实现 20km 覆盖;其低功耗特性使节点电池寿命达 3 - 5 年,利于长期部署;且抗干扰强,误码率低于  $10^{-6}$ 。实际应用中,在导线安装 LoRa 节点可实现智能巡检,某电网公司部署后巡检效率提升 60%,结合传感器还能用于灾害预警,响应时间小于 1 秒。而 5G 技术适用于城市配电网等需高实时性的场景,高速率峰值达 10Gbps,低延迟端到端小于 10ms。如 5G + AR 眼镜可辅助 AR 巡检,缩短故障处理时间 40%;杆塔部署 5G 边缘服务器进行边缘计算,能减少云端负载,降低带宽需求。

## 4.3 算法优化与计算效率

在输电线路弧垂监测中,算法优化与计算效率提升至关重要,轻量化模型设计是关键。边缘计算通过将算法部署在杆塔端的边缘设备,如 NVIDIA Jetson 系列,实现本地化实时处理,减少数据传输延迟。其优化方法多样,模型剪枝可移除 CNN 中冗余卷积层,让参数量减少 80%,推理速度提升 3 倍;量化压缩能把 FP32 参数转为 INT8,使模型体积缩小 75%,且精度损失小于 1%。像 YOLOv8 - tiny 在边缘设备上能实现导线弧垂检测,帧率达 30FPS;U - Net Lite 经深度可分离卷积优化,语义分割速度提升 5 倍。此外,模型压缩可降低资源消耗,知识蒸馏用大模型指导小模型训练,精度损失小;联邦学习能让多杆塔设备协同训练,保护隐私,某项目借此使模型准确率提升 15%。

## 4.4 标准化与兼容性

在输电线路弧垂监测系统建设中,标准化与兼容性是保障系统高效运行的关键。接口标准化方面,采用 IEC 61850 通信协议定义弧垂监测数据对象模型,统一数据格式为 JSON 或 XML,涵盖时间戳、弧垂值等关键字段,某电网公司借此实现 10 种设备数据互通。硬件兼容性上,传感器接口支持 4 - 20mA、RS485 等多种协议,能兼容现有张力、倾角传感器;设计标准化安装支架适配不同杆塔类型,某产品模块化设计使安装时间减少 60%。软件兼容性层面,提供 RESTful API 接口,支持与 PMS、SCADA 等系统对接,某监测平台实现与 10 个第三方系统数据共享;采用插件化架构,支持自定义算法插件,某系统通过插件机制实现覆冰预测、风偏预警等高级功能,提升系统灵活性与扩展性。

## 5 典型应用场景与案例分析

### 5.1 大跨越输电线路监测

大跨越输电线路多跨越峡谷、河流或山区,档距大、

弧垂变化显著,易受地形、温度、风速影响,非均布荷载效应突出。如西南山区某 500kV 线路,档距中段形成“冰瘤”,冰厚达设计值 160%,风切变引发导线舞动,最大弧垂逼近安全限值,传统模型计算与实际偏差 17%,引发对地闪络。为此需动态调整策略:基于多物理场耦合建模,同步处理空气动力学、热 - 流体及结构力学问题,用有限元分析模拟局部应力,修正弧垂值;通过实时监测与反馈控制,采集风速、覆冰厚度等数据,结合边缘计算设备调整计算值,某案例误差从 17% 降至 5%;再根据地形设置分级调整阈值,迎风坡覆冰重区段弧垂增量超 20% 时,自动触发调节装置或报警。

### 5.2 智能电网中的协同监测

智能电网构建“空 - 天 - 地”一体化监测体系,无人机与机器人的协同应用突破了传统人工巡检的时空局限。无人机通过搭载激光雷达生成三维点云模型,可精确计算弧垂值,如福建南平供电公司结合电力北斗技术,实现无信号区域监测;在灾害期间,无人机还能悬停关键区段,回传弧垂变化画面,为预警提供关键依据。机器人则通过搭载传感器实现接触式测量,如国网通辽供电公司的智能机器人可沿导线采集数据;超限时,机器人可携带修复装置执行任务,乌海超高压供电公司通过无人机配合机器人带电检修,大幅缩短抢修时间。数据融合方面,边缘 - 云端协同结合卡尔曼滤波算法降低干扰,提升测量精度;任务闭环管理则自动生成任务清单,调度设备检修,南平供电公司实现全流程自动化后,巡检效率提升 6-8 倍。

## 6 结语

总的来说,本文系统梳理了输电线路弧垂在线监测技术,涵盖形成机理、监测方法、关键挑战及典型应用。现有方法在精度、实时性、环境适应性等方面取得进展,但仍有提升空间。未来,随着物联网、人工智能、多源数据融合等技术的深入发展,弧垂在线监测将朝着更高精度、更强实时性、更好环境适应性的方向迈进。同时,标准化与兼容性建设将进一步完善,推动监测系统的大规模应用与集成。此外,探索新型传感器材料、优化算法模型、加强跨学科融合,将为输电线路弧垂在线监测提供更坚实的技术支撑,助力智能电网的安全稳定运行与高效运维。

### 参考文献

- [1] 刘锋,张振,宋强,等.基于无人机巡检的高压输电线路弧垂检测方法[J].微型电脑应用,2025,41(08):273-277.
- [2] 王孔森,孙旭日,盛戈倬,等.架空输电线路导线弧垂在线监测误差分析及方法比较[J].高压电器,2014,50(04):27-34.
- [3] 谢志武.高压输电线路在线监测技术研究[J].中国电力教育,2013,(11):180-181.

# Application of Intelligent Reactive Power Compensation Technology in Power Automation

Heying Zhang

State Grid Intelligent Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

## Abstract

With the rapid development of global energy transition and power automation technologies, the scale of power grids continues to expand, the proportion of renewable energy keeps increasing, and power quality issues have become increasingly prominent. Reactive power, as a key factor affecting grid efficiency and stability, has an increasingly urgent need for dynamic compensation. Traditional reactive power compensation technologies, due to their lagging response, low compensation accuracy, and lack of intelligence, struggle to meet the modern power system's requirements for real-time performance, flexibility, and reliability. Against this backdrop, intelligent reactive power compensation technology based on power electronic devices and smart algorithms has emerged as a crucial approach to improving power quality, reducing grid losses, and supporting renewable energy integration. This paper first elaborates on the theoretical foundations of intelligent reactive power compensation technology, then analyzes its critical role in power automation, and finally examines its application scenarios, aiming to provide valuable references for related research.

## Keywords

Intelligent reactive power compensation technology; Power automation; Application scenarios

## 智能无功补偿技术在电力自动化中的应用

张鹤赢

国网智能科技股份有限公司, 中国 · 山东 济南 250000

## 摘 要

随着全球能源转型与电力自动化技术的快速发展, 电网规模不断扩大, 新能源占比持续提升, 电能质量问题日益凸显。无功功率作为影响电网效率与稳定性的关键因素, 其动态补偿需求愈发迫切。传统无功补偿技术因响应滞后、补偿精度低、缺乏智能化等缺陷, 难以满足现代电力系统对实时性、灵活性与可靠性的要求。在此背景下, 基于电力电子器件与智能算法的智能无功补偿技术应运而生, 成为提升电能质量、降低电网损耗、支撑新能源消纳的重要手段。本文先是详细阐述了智能无功补偿技术理论基础, 随后具体分析了智能无功补偿技术在电力自动化中的关键作用, 最后具体分析了智能无功补偿技术的应用场景, 以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

## 关键词

智能无功补偿技术; 电力自动化; 应用场景

## 1 引言

在“双碳”目标与能源转型的驱动下, 电力自动化系统需同时满足高比例新能源接入、高密度负荷供应与高可靠性运行的多重需求。无功功率作为交流电网中不可或缺的组成部分, 其不合理分布会导致电压波动、线损增加及设备损耗加剧, 甚至引发系统崩溃风险。传统无功补偿装置(如并联电容器、SVC)因采用固定补偿或开环控制策略, 难以适应动态负荷与间歇性新能源的快速变化。近年来, 以静止同步补偿器(SVG)、级联H桥结构为代表的智能无功补偿技术, 通过集成智能算法与实时监测模块, 实现了无功功率

的精准、快速补偿, 成为解决现代电网复杂问题的有效途径。本文从技术原理、应用价值与发展趋势三方面展开论述, 为电力自动化领域的技术选型与策略制定提供参考。

## 2 智能无功补偿技术理论基础

### 2.1 无功功率的基本概念

无功功率(Reactive Power)是交流电力系统中电感、电容等储能元件周期性能量交换产生的功率分量, 单位为乏(Var), 虽不直接消耗能量, 却是维持电压稳定、保障设备正常运行的关键——电动机需其建立磁场, 变压器需其变换电压, 输电线路需其补偿电抗以减少电压降。若系统无功不足, 电压下降会导致设备效率降低甚至损坏; 若过剩, 则可能引发电压过高威胁绝缘安全。电压稳定性与无功功率密切相关, 根据电路理论, 电压降落公式( $\Delta U=(PR+QX)/U$ )

【作者简介】张鹤赢(1990-), 男, 中国山东枣庄人, 本科, 工程师, 从事电力工程技术方向研究。



表明,无功功率  $Q$  的波动会显著影响电压质量:  $Q$  增大时电压降落增加,末端电压下降;反之则电压升高。功率因数 ( $\cos \phi$ ) 作为衡量无功占比的指标,定义为有功功率与视在功率 ( $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ) 的比值,低功率因数会增加线路损耗与设备容量需求,降低经济性,因此无功补偿的核心目标是通过调节  $Q$  维持电压稳定并提升功率因数。

## 2.2 传统无功补偿技术分析

传统无功补偿技术中,并联电容器组通过电容容性无功输出抵消感性无功,原理简单、成本低,但固定补偿方式无法跟踪负荷动态变化,易出现过补或欠补,且电容投切时冲击电流影响设备寿命<sup>[1]</sup>;同步调相机作为运行于过励或欠励状态的同步电动机,虽补偿能力强、稳定性高,但响应速度慢(秒级)、运行损耗大(约1.5%~3%额定容量),还需配套励磁系统,维护复杂; SVC 以晶闸管为核心实现动态补偿,响应速度达毫秒级,却存在固定补偿特性依赖电容配置、谐波干扰需额外滤波、控制滞后易振荡等局限。总体而言,传统技术或因机械响应慢,或因谐波与控制问题,难以满足现代电网对实时性、灵活性与电能质量的高要求。

## 2.3 智能无功补偿技术的核心原理

智能无功补偿技术以电力电子器件为核心实现动态补偿,其中 SVG (STATCOM) 采用电压源换流器,通过直流侧电容储能与逆变器生成同相位补偿电流,具备毫秒级响应速度、宽范围补偿能力(可同时发出/吸收感性/容性无功)、多电平拓扑抑制谐波及紧凑型设计(占地仅为 SVC 的1/3~1/2)等优势。智能控制算法进一步优化性能:模糊控制将专家经验转化为规则库以应对非线性问题,神经网络通过数据训练预测负荷变化以减少超调,专家系统集成运行规则实现故障自诊断与自适应保护。装置通过 CT/PT 实时采集电压、电流等参数,结合算法计算补偿量并驱动电力电子器件调整输出,部分装置还联动上级调度系统,在新能源场站中可自动跟踪风电/光伏波动,支撑电网电压稳定。

# 3 智能无功补偿技术在电力自动化中的关键作用

## 3.1 提升电能质量

智能无功补偿技术凭借对电网参数的实时监测与动态补偿策略调整,成为提升电能质量的核心手段。在电压稳定控制上,其毫秒级响应特性可精准应对负荷突变:当工业电机启动产生冲击电流或新能源发电出力骤降时, SVG (静止同步补偿器) 能瞬间输出感性或容性无功功率<sup>[2]</sup>,将电压波动范围严格控制在  $\pm 2\%$  以内,有效抑制电压闪变现象,保障敏感设备稳定运行。针对电网谐波污染问题,该技术通过多电平拓扑结构与 PWM 调制技术的协同作用,使设备自身谐波畸变率降至1%以下,同时通过补偿基波无功功率间接优化功率因数,使系统功率因数稳定维持在0.95以上。这一过程不仅减少了无功电流在电网中的无效流动,降低了线

路损耗,更显著提升了变压器、电动机等用电设备的运行效率,为电力系统的经济高效运行提供了坚实支撑。

## 3.2 降低电网损耗

智能无功补偿技术通过精准调控无功功率分布,为电力系统带来显著的降损增效成果。在输电环节, SVG (静止同步补偿器) 可实时感知负荷需求并就地提供无功支撑,避免无功电流在长距离线路中无效流动,使线损率大幅降低20%~40%。以110kV输电线路为例,通过动态补偿可将线路电流削减15%,年节约电能损耗可达数十万度,相当于减少数千吨标准煤消耗。在设备运行层面,该技术通过提升功率因数优化关键设备效率:变压器因无需预留额外容量,负载率提升10%~15%,单位容量输送能力显著增强;发电机定子电流中的无功分量减少后,铜损降低5%~8%,设备发热量与机械应力同步下降,既延长了设备使用寿命,又降低了运维成本。这种从输电网络到发电设备的全链条优化,使电力系统整体运行效率提升5%~10%,为能源清洁低碳转型提供了重要技术支撑。

## 3.3 增强系统稳定性

智能无功补偿技术作为电网稳定运行的“缓冲器”,凭借其卓越的动态响应特性,为电力系统筑牢安全防线。当遭遇短路故障或新能源出力骤减等突发状况时, SVG (静止同步补偿器) 可在10毫秒内输出峰值补偿电流<sup>[3]</sup>,精准支撑关键节点电压,有效遏制电压崩溃风险,确保电网在极端工况下仍能维持稳定运行。面对新能源大规模接入带来的间歇性出力挑战,该技术通过自适应控制策略实现精准治理:针对风电功率的随机波动, SVG 融合风速预测模型提前预调补偿容量,平滑功率曲线;对于光伏发电的昼夜出力差异,则采用分时段补偿策略,确保电网电压全天候稳定。实验数据印证了其显著成效——配备智能补偿装置的新能源场站,并网点电压波动范围缩减60%,系统抗干扰能力提升近一倍,为高比例新能源电力系统的安全运行提供了关键技术支撑。

## 3.4 实现智能化管理

智能无功补偿技术通过深度融入电力自动化体系,全面推动电网管理模式向智能化跃迁。该技术设备严格遵循 IEC 61850 标准,与 SCADA 系统实现无缝数据交互,每秒实时上传电压、电流、谐波畸变率等20余项核心参数,为调度中心构建起全维度监测网络。依托大数据分析平台,机器学习算法可基于历史数据精准预测负荷变化趋势,自动生成 SVG (静止同步补偿器) 的动态补偿策略,在用电高峰来临前提前调整输出容量,将人工干预频率降低70%以上。其远程运维模块支持设备状态自诊断与参数云端修改,使单次巡检时间从4小时缩短至30分钟,运维效率提升超50%。在区域电网层面,多台 SVG 通过 EMS 系统形成协同控制网络,实现无功功率的跨区域优化分配,既保障了电压稳定率达99.9%,又将线损率控制在3%以内,达成经济性与安全性的动态最优平衡。

## 4 智能无功补偿技术的应用场景分析

### 4.1 工业配电系统

在工业领域,电弧炉、轧机等冲击性负荷的频繁启停,常引发电网电压剧烈波动,造成设备停机甚至损坏等严重后果。而智能无功补偿技术凭借 SVG (静止同步补偿器) 的毫秒级响应特性,能实时精准跟踪负荷变化,动态输出感性或容性无功功率,将电压波动范围牢牢控制在  $\pm 2\%$  以内。以钢铁企业电弧炉冶炼为例,SVG 可有效抑制电压闪变,让焊接质量稳定性大幅提升 30%。对于大型工厂复杂的多电平补偿需求,采用级联 H 桥结构的 SVG,运用多电平拓扑技术,不仅把谐波畸变率降至 1% 以下,还具备大容量补偿能力,单台补偿容量可达 100Mvar 以上,充分满足石化、冶金等行业对电能质量的严苛标准。

### 4.2 新能源发电领域

新能源场站里,风电、光伏发电的间歇性出力特性,极易致使并网点电压超出规定限值,给电网稳定运行带来挑战。智能无功补偿技术凭借双模式控制策略达成精准调节:在风电场中,SVG 与风速预测模型深度融合,提前预判并调整补偿量。一旦风速突增使出力大幅跃升,SVG 能在 10ms 内迅速输出容性无功,有力支撑电压稳定。在光伏电站,采用分时段补偿策略,白天满发时吸收过剩无功,避免电压过高;夜间低载时补偿感性无功,防止电压过低,使电压波动率大幅降低 60%。对于分布式发电系统,多台 SVG 借助虚拟同步机技术实现协调控制,在微电网中构建起无功功率共享机制,既提升了新能源的消纳能力,又增强了系统抵御干扰的稳定性。

### 4.3 城市配电网升级

在智能台区建设进程中,智能无功补偿装置与 AMI (高级计量架构) 实现了深度融合。该装置能够实时精准监测变压器出口的各项参数,并依据这些数据自动生成科学合理的补偿策略。以居民区配变过载情况为例,当负载率攀升至 120% 时,SVG (静止同步补偿器) 会迅速优先补偿无功功率,将负载率有效降至 90%,同时使线损率降低 25%。在需求响应场景中,装置可根据 DR (需求响应) 信号灵活调整补偿模式:用电高峰时段,减少无功输出以降低线路电流,缓解供电压力;用电低谷时段,增加补偿提升功率因数,优化

电能使用效率,达成源网荷的互动优化。某城市开展的试点项目表明,采用智能补偿策略后,台区综合线损从 8.2% 大幅降至 5.1%,年节约电费超百万元。

### 4.4 轨道交通与数据中心

在轨道交通牵引供电系统里,列车频繁启停会引发谐波与无功冲击,进而造成电压畸变,影响供电质量。而智能 SVG 运用 LCL 滤波与有源阻尼技术<sup>[4]</sup>,可将谐波含量严格控制在 3% 以内,同时借助能量回馈单元,把列车制动产生的能量回收再利用,节能率高达 15%。在数据中心场景中,高密度 IT 负载对电能质量要求极高,模块化 SVG 采用分布式部署方式,实现分区精准补偿,能将电压暂降持续时间从 100ms 大幅缩短至 20ms,有力保障服务器稳定不间断运行。以某超算中心的应用案例来看,智能补偿系统成效显著,使 UPS (不间断电源) 放电频率降低 80%,年运维成本直接减少 300 万元,极大提升了数据中心的经济性与可靠性。

## 5 结语

综上所述,智能无功补偿技术凭借电力电子器件与智能算法的优势,有效解决了传统技术响应滞后等难题,在提升电能质量、降低电网损耗、增强系统稳定性以及实现智能化管理等方面成效斐然,因而被广泛应用于工业、新能源、城市配电网等多个领域。展望未来,智能无功补偿技术将不断优化升级,多目标协同控制与模块化标准化设计将助力其进一步降低成本、提升性能。随着深度学习、边缘计算等智能算法的深度融合,补偿装置将朝着全数字化、智能化方向迈进。此外,该技术还将与能源互联网、虚拟电厂深度融合,成为构建新型电力系统的关键支撑力量,为能源转型和电力自动化发展提供源源不断的强大动力。

### 参考文献

- [1] 贺子凝.智能无功补偿技术在电力自动化中的应用研究[J].科技创新与生产力,2025,46(11):147-149.
- [2] 陈星宇.无功补偿技术在电力电气自动化中的应用[J].光源与照明,2025,(03):203-205.
- [3] 刘娜.电力系统自动化中智能无功补偿技术应用实践[J].电力设备管理,2024,(17):138-140.
- [4] 陈群.电力自动化中智能无功补偿技术的应用探讨[J].光源与照明,2023,(01):204-206.

# Safety Monitoring and Fault Early Warning Technology for Complex Petroleum Drilling Equipment

Xiaolong Liu

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

## Abstract

With China's rapid economic growth in recent years, the demand for petroleum across various sectors has surged, leading to a continuous increase in domestic oil production. This has raised the bar for the performance of petroleum drilling equipment. Professional drilling equipment is indispensable for oil extraction, and any malfunction in such equipment would inevitably impact production output. Therefore, it is crucial to implement rigorous maintenance and management protocols, ensuring the equipment operates efficiently and reliably. By adopting comprehensive measures, we can maintain optimal performance, enhance operational safety, and ultimately boost oil extraction efficiency.

## Keywords

oil extraction; drilling equipment; safety maintenance; safety management

# 复杂地层石油钻井设备安全监测与故障预警技术

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

近年来, 中国经济快速发展, 各领域对于石油的需求大幅上涨, 中国的石油开采量也不断上升, 而这对于石油钻井设备的使用提出了更高的要求。石油开采离不开专业的石油钻井设备, 一旦石油钻井设备发生故障, 必然会影响石油开采量, 因此应做好石油钻井设备的维护和管理, 从多方面严格落实有效的维护和管理措施, 使其处于良好运行状态, 确保石油钻井设备的安全性和稳定性, 提高石油开采效率。

## 关键词

石油开采; 钻井设备; 安全维护; 安全管理

## 1 引言

能源作为工业重要的基石之一, 是工业发展不可或缺的要素, 石油是能源体系的主体, 在勘探开发过程中相对困难, 而钻井设备是钻井工作的主要载体, 若钻井设备的安全出现故障将直接影响到整个施工进度以及人员安全, 但目前传统钻井作业主要依赖于人工的巡检以及定期的维护, 这种具有被动性的事后弥补方式无法及时应对复杂的地层动态变化所带来的各类风险问题, 由此本文根据复杂地层的特点, 从失效机理出发, 对钻井设备实行全链条的技术分析, 并归纳出了关键技术的应用障碍与优化道路, 以期对于提高复杂地层钻井设备的安全管理水平做出一定的贡献。

## 2 复杂地层环境特性及对钻井设备的风险作用机制

### 2.1 复杂地层的典型环境特征

随着全球能源勘探工作不断向深层开展, 复杂的地层成为油气开发的主要地区, 在钻井工程的运行当中, 环境特性对于工程是否安全运行有着重要的作用。复杂的地层构造, 不同层次的岩层混杂分布都会对钻井工程产生重要影响, 在钻井作业的过程当中, 通常会面临温度和压力的同向递增, 一旦钻入超过 3000m 的地层以后, 温度将随着深度的增加而呈直线递增, 平均地温梯度为  $2 \sim 5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , 有的深井井底温度已远远大于  $200^{\circ}\text{C}$ 、甚至超过  $300^{\circ}\text{C}$ , 远超出常规作业钻机所能承受的温度极限。同时温度也会影响到金属材料本身的力学性能。地层压力大也是钻井工程的重要难题, 孔隙压力一般大于  $70\text{MPa}$ , 有些超深井压力甚至可以达到  $100\text{MPa}$ , 会持续作用在钻杆、井口装置等部位, 会使钻杆及其他焊接部位受到极大的考验, 导致整个钻井系统结

【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。



构强度不足。

并且在复杂地层中存在大量的硫化氢、二氧化碳等酸性气体以及高矿化度的地层水,当硫化氢与金属接触时会产生电化学腐蚀和氢脆现象,使钻杆、套管的韧度降低,在交变应力的作用下易发生裂纹。二氧化碳溶于钻井液后生成碳酸,会使钻井液液流经过的泥浆泵、钻头等部分产生均匀腐蚀,使其壁厚逐渐减薄,在遇到井下高压环境时,有可能会突然失效。

## 2.2 钻井设备的风险响应与失效机理

风险响应机制是每个企业管理中必备的管理措施,钻井设备需要与风险控制挂钩,将风险控制融入进风险管理之中,通过风险控制,进一步提升钻井的使用效率和功能。钻井设备除了要面对复杂的地形条件,还需要面临设备故障的问题。在钻井的过程当中,设备的更新和维护也间接影响着作业安全,复杂地层环境会对钻井设备产生“直接作用+间接耦合”方式的影响,钻杆在高扭矩、高弯曲应力的作用下产生疲劳裂纹,裂纹在复杂地层的扩展速率会比在常规环境的要快2~3倍,钻头在非均质地层中的磨损相比正常地层严重,使用寿命缩短40%以上。井口防喷器橡胶密封件由于受到高温以及H<sub>2</sub>S腐蚀老化加剧,密封失效几率大幅上升,导致井控的风险大大提高。动力系统故障,钻井泵使用含有高于5%砂的钻井液工作时,叶轮的磨损率要比正常情况下高出3倍左右,导致流量下降和压力波动大,柴油发电机组高温散热不良,致使柴油机缸体过热导致功率衰减甚至停机。控制系统异常,井下传感器受高温高压的影响零点发生漂移,测量误差达到10%以上。液压系统受钻井液污染发生阀组卡滞,导致钻压、转速等控制参数无法达到预设值。

## 3 复杂地层钻井设备安全监测技术体系构建

### 3.1 多维度感知网络布局

石油钻井设备维护和管理是一项非常专业且重要的工作,其需要相关部门成立专门的维护管理和监督机构,需要基于标准规范的石油钻井设备管理制度,配合相关奖励和惩罚措施,开展高效的钻井设备维护和管理。但是当前很多石油开采企业都缺少健全的管理制度,而石油钻井作业从前期准备工作、开展钻井作业到完成钻井工艺,整个石油钻井过程往往需要较长的时间,这对于石油钻井设备维护和管理提出了更高的要求。同时,有些企业不重视石油钻井设备的维护和管理,在实际工作中缺乏责任心,相关维护和管理措施落实不到位,使得很多石油钻井设备往往得不到有效的维护和管理,造成石油钻井设备带故障运行,埋下严重的安全隐患。为满足多场景复杂地层作业过程中,钻井设备状态和环境参数全面感知的需求,采用耐温200℃、耐压140MPa的传感器,光纤光栅传感器,植入钻杆本体来实时监测钻杆应变、温度及扭矩情况和微机电系统,采集、传输至井上电脑

端集中监控并预警。通过集成于钻头和BHA上采集钻压、转速、振动加速度、井眼轨迹参数,将电化学传感器置入井底短节内实测H<sub>2</sub>S浓度(量程0~2000ppm)及钻井液pH值,以预警是否出现腐蚀隐患。注重关键设备工作状态,采集钻井泵、绞车、转盘等旋转部位振动信号的压电式加速度传感器,判定轴承的磨损程度和齿轮的啮合情况。用红外热像仪、热电偶测量电机绕组、轴承座、液压油箱的温度,在线铁谱仪监测润滑油中大于等于5μm的磨粒浓度及黏度变化情况,分析评估出设备的磨损程度。进行环境与井况监测层,关联地层环境与设备状态,包括井口压力传感器、钻井液性能传感器及可燃气体探测器,实现“设备-环境”耦合分析。

### 3.2 数据传输与预处理技术

随着技术的提升,数字化技术逐渐应用到企业的各个模块之中,复杂地层监测的数据是“海量、异构、高噪声”的数据,所以必须要有效传输以及预处理才能保证数据的质量。构建数据传输架构,利用“井下无线+地面有线”的方式,井下数据通过MWD随钻测量系统泥浆脉冲或者电磁传输上行,速率为10kbps。地面数据经过工业以太网、5G边缘计算节点传送到高速以太网上,时延小于毫秒级,保证实时性。基于振动信号、扭矩信号等信号利用db4小波基,分解六层的小波阈值去噪算法,把信噪比提高到了大于40dB。进行数据对齐,基于时间戳的同步和插值方法解决井下及地面数据时空差(小于±1s)。运用主成分分析(PCA)和独立成分分析(ICA),把500余种监测参数降低到20~30个关键特征,减少计算量。

## 4 复杂地层钻井设备故障预警技术与模型构建

### 4.1 基于机理与数据融合的预警模型

为了应对复杂地层,需要进一步对于钻井设备进行安全检测和故障预警,根据钻井设备的情况进行混合模型分析,通过力学与故障物理理论来建设失效阈值模型,钻杆疲劳寿命模型 $\sigma$ -N-v公式中将应力幅值 $\sigma$ 、循环次数N及腐蚀速率v相乘,得到的乘积反映腐蚀条件下强度损耗劣化程度。利用公式计算出剩余寿命,并在实际运行条件下估算其工作时间,在达到某一目标值后自动报警。建立数据驱动模型,利用机器学习算法挖掘数据和故障之间的映射关系。应用孤立森林算法对正常运行数据进行训练,将偏离正常运行模式的状态判定为异常状态,达到未知故障预警的效果,准确率大于等于92%。使用随机森林(RF)及梯度提升树(GBDT),利用历史故障数据进行训练,以达到故障类型、故障严重程度分类的目的,F1-score达0.85。使用了长短期记忆网络,将输入时序监测数据作为输入参数,对于寿命预测的均方根误差小于等于5%,辅助决策维修。

### 4.2 分级预警与动态阈值调整

在钻井设备安全监测和故障管理当中,风险控制是整个安全体系的重要环节,做好风险防控与预警能够降低钻井

设备的故障发生率,便于工作人员及时处理故障设备,在实际中钻井设备需要进行分级预警和动态调整,以便能够更好地满足安全检测和故障预警的需求,结合复杂地层风险的不同程度动态发展,设置四级预警体系和动态调整阈值。进行预警阈值设定。动态调整机制基于 Q-learning 算法和强化学习方法,根据实时地层参数、设备状态参数作为校正输入,实时自动调整阈值修正量。在高于 150℃ 的地层中,将电机温度报警阈值下浮 10%。破碎带钻进时,适当提高振动预警阈值设定值,使预警提前 5~10 min 触发。以声光报警、终端推送到手机 App、设备联动等方式实现感知-决策-执行闭环,响应时间不超过 30s。

## 5 应用瓶颈与优化策略

### 5.1 现存技术瓶颈

现如今钻井设备极端环境适应性不足,在超过 200℃ 高温和大于 100MPa 的压力环境下的井下传感器容易损坏失灵,使用寿命不到 100h,无法满足深井测井的需求。并且设备数据孤岛现象,不同的设备厂家的检测系统协议不统一,共享率小于 30%,多源异构数据无法实现融合分析。设备误报率较高,复杂地层引起的强烈干扰使预警的误报率高达 15%~20%,降低了现场工作人员的信任度。边缘计算能力有限,钻井平台算力资源有限,不能支持过于复杂的模型实现运行。目前,安全管理模式僵化,存在过多地使用固化程序以及层层审批的过程,应对突发事件应变缺乏灵活性,突发安全情况需要层层上报,这样往往会延误处置时间,并且联动技防设备和相关规章制度的措施较少,大多都是散落的技术设备,并且不能形成联动分析数据,因而也不能发挥风险预警的作用,

### 5.2 优化策略

钻井设备需要依托先进技术,进行传感器技术升级,根据需要建立钻井设备监测数据接口标准,实现不同系统的数据互通互用,共享率大于 80%,建设云上数据中台,汇聚各井场数据并进行分析汇总。应用自适应滤波算法利用地层干扰特征库,提升钻井设备的使用效率,将误报率控制到 5% 以下,不断完善预警逻辑。整合大数据模式,将实时预警简单分析部署到平台边缘节点,复杂模型训练和全局优化在云端,使用 5G 切片技术保证数据传输的带宽与时延。另

外,模型不断向“轻量化、可解释性”发展,解决数据隐私及算力不足的问题,钻井过程中预警系统与钻井设备深度融合,实现预测性维护+自适应控制的智能闭环。依靠不断创新的技术攻克复杂地层钻机设备故障等多等难题,在钻进的施工过程中,利用高科技的监测仪器,可以判定地层的高压变动情况,当出现特殊情况的时候,工作人员可以手动完成输入工作的指令,这样便会马上提供高密度钻井液,以满足工作泵的运转需求,最终可以减少一半以上的复杂地层钻井设备故障发生概率,为中国安全开采能源提供有力的技术支撑。目前钻井设备技术人员参差不齐,应当进一步完善相关的福利保障制度,向保安人员提供合理的报酬及社会保障,以福利吸引并留住人才,打造科学合理的绩效考评体系,用考评激励人员奋发向前,针对人员工作表现好的方面进行肯定和奖励,对于存在问题的则应当做好督促和改正工作。绩效考核结果应该与工资待遇、职务晋升紧密相关,充分调动人员工作的积极性、主动性的有效方式。同时考核也要具有公信力。

## 6 结语

中国的石油钻井设备在保养及维护上经常产生问题的根本原因是技术水平的相对落后和自主研发过程的缺失,因此,各石油企业应在提高设备保养及维护水平的基础上,进一步向前探索,以提高设备使用效率为途径,促进石油钻井设备的维护及保养更加便捷、有效。随着修井作业标准的提升,钻井设备安全管理需以“评价先行、风险导向、防控结合”为原则,通过构建科学的评价体系、精准识别风险因素、实施技术与管理协同控制,可有效降低完整性失效概率。未来,随着人工智能、数字孪生等技术的发展,钻井设备风险控制将实现“预测性维护”,为油气田安全开发提供更智能、更高效的保障。

### 参考文献

- [1] 徐威.关于石油钻井设备的维护与管理探讨[J].化工设计通信, 2016(4):30+51.
- [2] 张云,尚庆录,王志军,谭贺文.石油钻井设备的维护与管理[J].经营管理者, 2015(22):351.
- [3] 陈蛟.如何做好石油钻井机械设备的管理与维护[J].民营科技, 2015(9):100.

# Construction and Application of Quality Control System for Microbial Indicator Testing in Cosmetics

Dongli Hu

Hubei Suizhou Public Inspection and Testing Center, Suizhou, Hubei, 441300, China

## Abstract

Cosmetics, as daily-use consumer products that come into direct contact with human skin and mucous membranes, their hygiene and safety directly affect the health rights of consumers. Microbial contamination is one of the main risk factors affecting the safety of cosmetics. Establishing a scientific and comprehensive quality control system for microbial indicator testing is a key measure to ensure the accuracy and reliability of test results and avoid product safety risks. This paper aims to deeply explore the construction path and application strategies of the quality control system for microbial indicator testing in cosmetics, providing strong support for improving the quality of cosmetic microbial testing and ensuring the health of consumers. It also discusses the practical value and optimization direction of the system based on actual application scenarios, offering theoretical references and practical guidance for cosmetics manufacturers and inspection and testing institutions to enhance the quality of microbial testing.

## Keywords

Cosmetics; Microbial indicators; Inspection and testing; Quality control system; Full-process management

# 化妆品中微生物指标检验的质量控制体系构建与应用

胡冬立

湖北省随州市公共检验检测中心, 中国 · 湖北 随州 441300

## 摘要

化妆品作为直接接触人体皮肤、黏膜的日用消费品,其卫生安全直接关系到消费者的健康权益。微生物污染是影响化妆品安全的主要风险因素之一,构建科学、完善的微生物指标检验质量控制体系,是保障检验结果准确性、可靠性,规避产品安全风险的关键举措。本文旨在深入探讨化妆品微生物指标检验质量控制体系的构建路径与应用策略,为提升化妆品微生物检验质量、保障消费者健康提供有力支撑,并结合实际应用场景探讨体系的实践价值与优化方向,为化妆品生产企业、检验检测机构提升微生物检验质量提供理论参考与实践指导。

## 关键词

化妆品; 微生物指标; 检验检测; 质量控制体系; 全流程管控

## 1 引言

随着居民生活水平的提升与美妆消费需求的升级,化妆品市场规模持续扩大,产品种类日益丰富。但与此同时,化妆品卫生安全问题也愈发受到社会关注。微生物指标检验是评估化妆品卫生安全的核心手段,检验结果的准确性直接决定了产品质量判定的科学性。因此,依据《化妆品安全技术规范》等相关标准要求,构建覆盖检验全流程的质量控制体系,实现对检验各环节的标准化、规范化管控,已成为化妆品行业高质量发展的必然要求。

## 2 化妆品中微生物指标检验质量控制体系构建的核心要素

### 2.1 检验前质量控制要素

#### 2.1.1 人员资质与培训

检验人员是检验工作的核心主体,其专业能力直接影响检验结果的准确性。质量控制体系需明确检验人员的资质要求,如具备相关专业大专及以上学历、持有检验从业资格证书等。同时,建立常态化培训机制,定期开展微生物检验技术、标准规范、质量控制知识等方面的培训,并通过考核评估确保培训效果,提升检验人员的专业素养与操作技能。

#### 2.1.2 设备校准与维护

微生物检验涉及的设备种类较多,如高压蒸汽灭菌器、生物安全柜、培养箱、显微镜、菌落计数器等,这些设备的性能稳定性直接影响检验结果。体系需建立完善的设备管理档案,明确设备采购、验收、校准、维护、报废等全生命周

【作者简介】胡冬立(1980),女,中国湖北随州人,本科,工程师,从事食品药品化妆品研究。



期管理流程。对于关键设备,需按照相关标准要求定期进行校准,确保设备精度符合检验要求;日常使用过程中,需做好设备运行记录、维护保养记录,及时发现并解决设备故障,避免因设备问题导致检验结果偏差。

### 2.1.3 试剂与耗材管理

微生物检验所用的培养基、试剂、耗材(如培养皿、移液管、无菌水等)的质量直接关系到检验结果的可靠性。体系需规范试剂与耗材的采购渠道,选择具备合法资质的供应商,并对采购的试剂与耗材进行严格验收,核查产品合格证、检验报告等相关资料。同时,建立试剂与耗材的储存管理规范,根据其特性(如避光、冷藏、冷冻等)分类储存,冷藏试剂储存温度控制在 $2-8^{\circ}\text{C}$ ,冷冻试剂储存温度 $\leq -20^{\circ}\text{C}$ ,温湿度监控频次每2小时1次,监控数据达标率100%;对于培养基等需制备的试剂,严格按照标准操作流程进行制备、灭菌、无菌检验,无菌检验合格率100%,确保其符合检验要求<sup>[1]</sup>。

### 2.1.4 样品采集与保存

样品是检验工作的对象,样品的代表性、完整性与稳定性直接影响检验结果的科学性。体系需明确样品采集的原则、方法与流程,确保采集的样品具有代表性,覆盖生产企业80%以上的生产批次、所有规格型号及关键生产环节。采集过程中,严格遵守无菌操作要求,样品二次污染率控制在0.5%以下;同时,做好样品标识,清晰标注样品名称、批号、采集日期、采集人、检验项目等信息,标识准确率100%。样品保存需根据产品特性与检验要求选择合适的保存条件,普通化妆品冷藏( $2-8^{\circ}\text{C}$ )保存,特殊功效化妆品冷冻( $\leq -20^{\circ}\text{C}$ )保存,且在规定的保存期限内完成检验(冷藏样品7天内、冷冻样品30天内),样品在检验前的质量稳定率达98.5%。

## 2.2 检验中质量控制要素

### 2.2.1 检验方法选择与验证

检验方法的科学性与适用性是确保检验结果准确的关键。体系需明确检验方法的选择原则,优先采用《化妆品安全技术规范》等国家标准、行业标准规定的方法;对于采用非标准方法的,需按照相关要求进行方法验证,验证内容包括精密度、准确度、检出限、定量限等,确保方法符合检验要求。同时,需规范检验方法的操作流程,制定详细的作业指导书,明确各操作步骤的技术要求与注意事项,避免因操作不规范导致检验结果偏差。

### 2.2.2 无菌操作控制

微生物检验过程中,无菌操作是避免样品污染、确保检验结果真实的核心要求。体系需明确无菌操作的范围与要求,如检验人员需穿戴无菌工作服、口罩、手套等防护用品,在生物安全柜内进行样品处理、接种等操作;对检验所用的器具、培养基等进行严格灭菌,确保灭菌效果;定期对无菌操作环境进行无菌检验,及时发现并消除污染隐患。

### 2.2.3 培养条件控制

微生物的生长繁殖依赖于特定的培养条件,如温度、湿度、培养时间、气体环境等,培养条件的稳定性直接影响菌落的生长与计数。体系需明确不同微生物指标的培养条件要求:细菌总数培养温度控制在 $36\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、培养时间 $48\pm 2$ 小时,霉菌和酵母菌总数培养温度 $28\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、培养时间 $72\pm 2$ 小时,致病菌(如金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌等)培养温度 $36\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、培养时间24-48小时;对培养箱、恒温恒湿箱等设备的温度、湿度进行实时监控,温度波动幅度 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ ,湿度波动幅度 $\leq 5\%$ ,培养条件达标率99.8%;严格控制培养时间,避免因培养时间不足或过长导致检验结果偏差<sup>[2]</sup>。

### 2.2.4 过程质量核查

为及时发现检验过程中的问题,体系需建立过程质量核查机制。在检验过程中,可通过设置空白对照、阳性对照、平行样等方式进行质量核查。空白对照用于检验试剂、耗材、设备等是否存在污染;阳性对照用于验证检验方法的有效性;平行样用于评估检验结果的精密度。对于核查过程中发现的异常情况,需及时分析原因并采取纠正措施,确保检验过程的规范性与可靠性。

## 2.3 检验后质量控制要素

### 2.3.1 数据处理与审核

检验数据的处理与审核是保障检验结果准确的重要环节。体系需规范数据处理的方法与流程,明确数据记录、计算、修约等要求,确保数据处理的规范性与准确性。同时,建立严格的数据分析制度,检验人员需对检验数据进行初步审核,核查数据的完整性、合理性;审核人员需对检验数据进行复核,确保数据无误差、无遗漏。对于异常数据,需及时分析原因,必要时重新进行检验,严禁随意篡改数据。

### 2.3.2 检验报告编制与发放

检验报告是检验结果的最终体现,其规范性与准确性直接影响报告的使用价值。体系需明确检验报告的编制要求,确保报告内容完整、信息准确,涵盖样品信息、检验项目、检验方法、检验结果、判定依据、检验日期、检验人员、审核人员等关键信息。同时,建立检验报告的审核与发放流程,检验报告需经审核人员审核、授权签字人批准后才能发放;发放过程中,需做好报告发放记录,确保报告传递的安全性与可追溯性。

### 2.3.3 样品留存与处置

样品留存是为了便于后续复检、核查与追溯,体系需明确样品留存的要求,如留存样品的数量、留存期限、留存条件等。留存样品需与检验样品同步采集、同步标识,按照规定的条件储存,确保留存样品的稳定性。检验工作完成后,对于留存期满的样品,需按照相关环保要求进行无害化处置,做好处置记录,避免对环境造成污染<sup>[3]</sup>。

### 3 化妆品中微生物指标检验质量控制体系的构建流程

#### 3.1 明确体系构建目标与依据

首先,需明确质量控制体系的构建目标,即通过体系化管控,确保化妆品微生物指标检验结果准确、可靠,提升检验工作的标准化、规范化水平,保障消费者健康与行业有序发展。同时,以《中华人民共和国化妆品监督管理条例》《化妆品安全技术规范》《检验检测机构资质认定评审准则》等相关法律法规、标准规范为依据,确保体系构建的合法性与科学性。

#### 3.2 梳理检验流程与识别风险点

全面梳理化妆品微生物指标检验的全流程,包括检验前的人员准备、设备校准、试剂采购与制备、样品采集与保存,检验中的样品处理、接种、培养、计数,检验后的数据分析、报告编制与发放、样品留存与处置等环节。结合各环节的工作特点,识别可能影响检验质量的风险点,如人员操作失误、设备精度不足、试剂污染、样品污染、培养条件不稳定、数据篡改等,并对风险点进行评估,明确风险等级与控制重点。

#### 3.3 制定体系文件与规范操作流程

依据风险识别与评估结果,制定完善的体系文件,包括质量手册、程序文件、作业指导书、记录表格等。质量手册是体系的核心文件,明确体系的构建目标、适用范围、组织架构、职责分工等;程序文件规范检验全流程的管理流程,如人员管理程序、设备管理程序、试剂耗材管理程序、样品管理程序、检验方法管理程序、数据管理程序等;作业指导书明确各具体检验环节的操作步骤、技术要求、注意事项等;记录表格用于规范相关信息的记录,确保检验过程可追溯。

#### 3.4 搭建体系运行保障机制

建立健全组织保障机制,明确各部门与人员的职责分工,确保体系运行过程中各项工作有人负责、有人监督。建立资源保障机制,合理配置人员、设备、试剂、场地等资源,确保满足检验工作与体系运行的需求。

#### 3.5 开展体系试运行与优化完善

在体系文件制定完成与保障机制搭建完善后,开展体系试运行工作。在试运行过程中,全面记录体系运行的相关信息,收集检验人员、审核人员、客户等相关方的反馈意见,评估体系运行的效果<sup>[4]</sup>。

### 4 化妆品中微生物指标检验质量控制体系的应用实践

#### 4.1 在化妆品生产企业的应用

化妆品生产企业将质量控制体系应用于原材料检验、过程检验与成品检验全链条,可有效提升产品质量安全水平。在原材料检验环节,通过体系化管控,严格核查原材料

的微生物指标,杜绝污染原材料进入生产环节;在过程检验环节,对生产过程中的半成品进行微生物检验,及时发现生产过程中的污染隐患,调整生产工艺与卫生管理措施;在成品检验环节,按照体系要求对成品进行严格检验,确保成品微生物指标符合标准要求后再出厂销售。

#### 4.2 在检验检测机构的应用

检验检测机构作为第三方检验机构,其检验结果的公信力直接依赖于质量控制体系的有效运行。在实际检验工作中,通过开展空白对照、阳性对照、平行样检验等过程质量控制措施,有效降低了检验误差,提升了检验结果的准确性。该机构的检验报告被监管部门、企业及消费者广泛认可,业务量逐年增长,行业影响力不断提升。

#### 4.3 在监管工作中的应用

监管部门将质量控制体系的运行情况作为对化妆品生产企业与检验检测机构监管的重要内容,通过监督检查企业与机构的体系运行情况,评估其检验工作的规范性与检验结果的可靠性。

#### 4.4 效果评价

化妆品中微生物指标检验质量控制体系的全链条应用成效显著,在生产企业端,有效降低了各环节微生物污染风险,减少生产损耗并提升产品合格率,增强了企业市场竞争力;在检验检测机构端,通过系列质量控制措施提升了检验结果的准确性与公信力,助力机构扩大行业影响力;在监管端,为监管工作提供明确依据,提升监管效率与针对性,防范不合格产品流入市场;综合来看,该体系推动了行业整体质量管理水平升级,遏制劣质产品流通,为消费者健康权益提供保障,增强了消费者对化妆品市场的信心。

### 5 结语

化妆品中微生物指标检验质量控制体系的构建与应用,是保障化妆品卫生安全、规范行业发展秩序、提升检验机构公信力的关键举措。该体系的构建需贯穿检验前、检验中、检验后全流程,涵盖人员、设备、试剂、样品、环境、方法、数据等多个核心要素。在实际应用中,质量控制体系在化妆品生产企业、检验检测机构与监管工作中均发挥了重要作用,有效提升了化妆品微生物检验质量与行业卫生安全水平。

#### 参考文献

- [1] 张明君,李小燕,闫明俞. 2023年新疆化妆品监督抽检微生物检验结果分析[J].质量安全与检验检测,2025,35(03):26-29.
- [2] 王涛,李雪玲,农浚,等. 中和剂对化妆品微生物指标检测结果的影响[J].广东化工,2022,49(20):210-211+195.
- [3] 牟建平,滕宝霞,贺晓文,等. 眼部化妆品中有机汞含量与微生物检出的相关性[J].香料香精化妆品,2022,(03):61-65.
- [4] 王维亚,吴珊珊,林智超,等. 面膜类化妆品微生物检验方法适用性考察[J].云南化工,2019,46(12):103-104.

# Design and Application Research of an Intelligent Anchor Plate Installation Device

Zhiqiang Gu

Hebei Yida United Machinery Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

## Abstract

Aiming at the problems of low efficiency, difficult quality control and high labor intensity in the traditional manual installation of anchor plates in fields such as nuclear power and large-scale construction, an intelligent anchor plate installation device integrating steel bar support, automatic clamping, precise tightening, quality inspection and qualified marking is designed. The device consists of an installation frame, a supporting mechanism, a clamping mechanism, a tightening mechanism, a spraying mechanism, a hydraulic drive mechanism and an electronic control mechanism. Through mechanical structure optimization and electro-hydraulic coordinated control, the whole process of anchor plate installation is automated and intelligentized. Experimental verification shows that the device is adaptable to various specifications of nuclear power steel bars, the tightening torque error of the anchor plate is  $\leq \pm 3\%$ , and the time consumed for a single set of installation is reduced by more than 60% compared with the manual method. It significantly reduces labor intensity while ensuring the stability of installation quality, providing efficient and reliable technical equipment support for steel bar connection construction.

## Keywords

Anchor Plate; Intelligent Installation; Steel Bar Connection; Electro-hydraulic Control; Torque Detection

# 智能化锚固板安装设备的设计与应用研究

谷志强

河北易达核联机械制造有限公司, 中国·河北 石家庄 050000

## 摘 要

针对核电、大型建筑等领域锚固板传统人工安装方式存在的效率低、质量控制难、劳动强度大等问题,设计一种集钢筋支撑、自动夹紧、精准拧紧、质量检测与合格标记于一体的智能化锚固板安装设备。该设备由安装机架、支撑机构、夹紧机构、拧紧机构、喷涂机构、液压驱动机构和电控机构组成,通过机械结构优化与电液协同控制,实现锚固板安装全过程的自动化与智能化。实验验证表明,设备可适配多种规格核电钢筋,锚固板拧紧扭矩误差 $\leq \pm 3\%$ ,单套安装耗时较人工方式缩短60%以上,显著降低劳动强度的同时保障安装质量稳定性,为钢筋连接施工提供高效可靠的技术装备支持。

## 关键词

锚固板; 智能化安装; 钢筋连接; 电液控制; 扭矩检测

## 1 引言

在核电工程、超高层建筑等对结构安全性要求极高的领域,锚固板作为钢筋连接的核心受力部件,其安装质量直接决定结构整体承载能力与耐久性<sup>[1]</sup>。当前锚固板安装多采用人工操作模式,需配备专人固定钢筋、拧紧锚固板及扭矩检验,存在以下突出问题:一是工序繁琐,人工需求量大,安装效率低下,难以满足大规模施工进度要求;二是人工拧紧扭矩控制精度差,易出现过拧或欠拧现象,质量隐患突出;三是作业人员需长期保持半蹲姿态,劳动强度大,且存在扳

手腕手伤人等安全风险;四是现场作业分散,质检人员无法实现全过程监督,质量追溯难度大<sup>[2-3]</sup>。

为解决上述问题,本文基于机械设计、液压传动与自动控制技术,研发一种智能化锚固板安装设备,通过集成自动支撑、定心夹紧、精准拧紧、实时检测与自动标记功能,实现锚固板安装的高效化、精准化与智能化,为建筑工程钢筋连接施工提供技术革新方案。

## 2 设备总体结构设计

智能化锚固板安装设备采用模块化设计理念,整体由安装机架、前支撑机构、浮动支撑机构、夹紧机构、拧紧机构、喷涂机构、液压驱动机构和电控机构八大核心部分组成,设备总体结构如图1所示。各机构沿钢筋输送方向依次布置,前支撑机构与浮动支撑机构协同实现钢筋稳定支撑,夹紧机

【作者简介】谷志强(1984-),男,中国河北石家庄人,本科,高级工程师,从事钢筋连接技术及配套加工设备的研发设计研究。



构保证钢筋定心固定，拧紧机构完成锚固板精准拧紧，喷涂机构对合格产品进行标记，液压驱动机构为各执行部件提供动力，电控机构实现全流程协同控制。

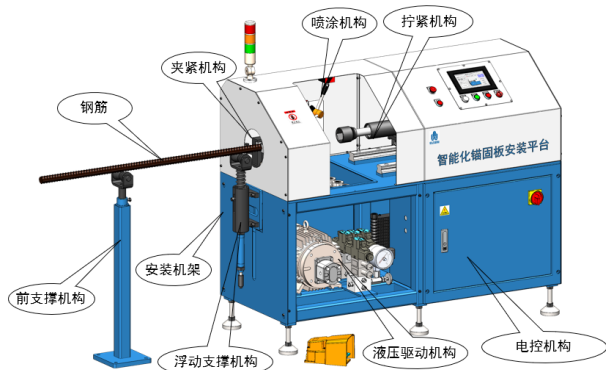


图 1

## 2.1 支撑机构

支撑机构包括前支撑机构与浮动支撑机构，沿钢筋输送方向依次布置，共同实现待安装钢筋的稳定承托。前支撑机构采用中空立柱与前V型支撑轮组合结构，通过螺栓组件调节支撑高度，适配不同规格钢筋，调节到位后锁紧固定，确保支撑稳定性。浮动支撑机构由支撑套筒、升降液压缸、后支撑轮架、后V型支撑轮及弹簧组成，升降液压缸作为动力部件驱动支撑高度自动调节，弹簧可吸收钢筋放置时的冲击力，避免丝头硬接触损伤。两者协同工作，可覆盖常用核电钢筋规格，无需拆卸更换支撑部件，适配效率显著提升。

## 2.2 夹紧机构

夹紧机构固定于安装机架中部，采用对称式定心夹紧结构。机构包括夹紧底座、导向杆、驱动丝杆、液压马达、右夹紧板与左夹紧板，驱动丝杆设有两段旋向相反的螺纹，分别与左右夹紧板螺纹连接，且夹紧板滑动套设于导向杆上。左右夹紧板相对内侧面设有V型夹紧槽，槽口相对布置，确保钢筋定心夹紧。液压马达通过链条驱动驱动丝杆转动，带动左右夹紧板沿导向杆相对或反向移动，实现钢筋的夹紧与松开。液压控制回路上设置压力传感器，实时监测管路压力，当达到预设夹紧力时，电控机构控制电磁阀切换至保压状态，低于预设值时自动补压，避免钢筋变形或夹紧松动。

## 2.3 拧紧机构

拧紧机构为设备核心执行部件，由伺服电机、减速机、扭矩传感器、伸缩轴、内六方套头、拧紧底座、滑轨及推动液压缸组成。滑轨沿钢筋输送方向布置，拧紧底座通过滑块与滑轨滑动连接，推动液压缸驱动拧紧底座往复移动，适配锚固板预套与拧紧位置。伺服电机经减速机与伸缩轴连接，伸缩轴采用可轴向伸缩的花键轴，前端固定内六方套头，与锚固板外六方结构间隙配合，六面接触避免拧紧时啃伤锚固板表面。扭矩传感器通过非接触式感应检测伸缩轴扭矩值，实时反馈至电控机构，控制伺服电机启停，确保锚固板拧紧

至预设扭矩。

## 2.4 喷涂机构

喷涂机构邻近拧紧机构设置，由储料罐、气动喷涂阀、喷嘴及固定支架组成。固定支架将喷嘴固定于安装机架上，喷嘴对准锚固板外圆面，喷射方向与钢筋轴线垂直。储料罐通过管路与气动喷涂阀连接，气动喷涂阀与电控机构电连接，当锚固板拧紧合格后，电控机构控制气动喷涂阀开启，喷嘴向锚固板外圆喷涂合格标记，实现质量可视化标识。

## 2.5 液压驱动机构

液压驱动机构包括液压站与三条独立液压控制回路，分别对应控制浮动支撑机构的升降动力部件、夹紧机构的开合动力部件及拧紧机构的移动动力部件。每条回路均设有进油管路、回油管路及电控电磁阀，电磁阀与电控机构电连接，通过独立控制电磁阀通断，实现各机构动作的精准控制，为设备运行提供稳定可靠的液压动力。

## 2.6 电控机构

电控机构由触摸屏、脚踏开关及电控单元组成，作为设备的控制核心。触摸屏用于选择钢筋规格、自定义输入夹紧力参数与扭矩合格阈值，同时实时显示安装过程中的扭矩值、机构动作状态及合格判定结果；脚踏开关用于触发夹紧与拧紧动作，操作便捷；电控单元分别与液压驱动机构的电磁阀、拧紧机构的伺服电机及扭矩传感器、喷涂机构的气动喷涂阀电连接，接收操作指令与检测信号，控制各机构按预设逻辑协同动作，同时记录每一次安装的关键参数，便于质量追溯。

## 3 设备工作流程

智能化锚固板安装设备的工作流程如下：

**设备调试：**手动调节前支撑机构高度，使其适配待安装钢筋轴线；通过触摸屏输入钢筋规格参数，电控单元自动控制浮动支撑机构的升降液压缸动作，调节后V型支撑轮高度，使钢筋轴线与夹紧机构、拧紧机构中心对齐。

**钢筋定位：**将钢筋沿进料方向输送，直至钢筋丝头端部抵住拧紧机构的内六方套头，完成定位。

**钢筋夹紧：**踩下脚踏开关触发夹紧动作，液压马达驱动驱动丝杆转动，左右夹紧板相对移动实现钢筋定心夹紧；压力传感器检测到夹紧压力达到预设值后，反馈信号至电控单元，夹紧机构进入保压状态。

**锚固板预套：**电控单元控制拧紧机构的推动液压缸动作，带动拧紧底座后退，留出预套空间，人工将锚固板预套于钢筋丝头并初步啮合。

**精准拧紧：**推动液压缸驱动拧紧底座前进，内六方套头套合锚固板外六方；伺服电机启动，经减速机、伸缩轴驱动锚固板转动拧紧，扭矩传感器实时检测扭矩值；当扭矩达到预设合格阈值时，伺服电机停止，推动液压缸驱动拧紧底座退回原始位置。

合格标记：电控单元判定锚固板拧紧合格后，控制喷涂机构启动，喷嘴向锚固板外圆喷涂合格标记。

工序完成：喷涂完成后，夹紧机构松开钢筋，浮动支撑机构下降解除承托，人工将安装完成的钢筋沿出料方向撤出，完成一次安装循环。

## 4 性能测试与应用效果

### 4.1 测试条件

选取核电工程常用的  $\Phi 25\text{mm}$ 、 $\Phi 32\text{mm}$ 、 $\Phi 40\text{mm}$  三种规格钢筋，配套对应规格锚固板，对设备进行性能测试，测试指标包括适配性、拧紧扭矩精度、安装效率及操作安全性。

### 4.2 测试结果

适配性：设备通过前支撑机构的螺栓调节与浮动支撑机构的自动升降调节，可稳定支撑三种规格钢筋，支撑过程中钢筋无偏移、晃动现象，适配性良好。

拧紧扭矩精度：设定各规格钢筋对应的锚固板拧紧扭矩阈值，测试结果显示，扭矩检测误差  $\leq \pm 3\%$ ，满足核电工程对锚固板安装的精度要求。

安装效率：单套锚固板人工安装平均耗时约 4.5min，设备安装平均耗时约 1.8min，效率提升 60% 以上，且可连续作业，大幅缩短施工周期。

操作安全性：设备采用护罩防护，操作过程无需人工直接接触拧紧部件，脚踏开关触发动作，避免了扳手脱手伤人等安全风险；操作人员站立作业，劳动强度显著降低。

### 4.3 应用效果

该设备已在某核电工程施工现场投入试用图 2，累计完成 12000 余套锚固板安装作业。应用结果表明，设备运行稳定可靠，安装质量一致性好，未出现扭矩不合格、锚固板损伤等问题；单名操作人员即可完成全部作业流程，相比传统人工安装方式减少 2-3 名作业人员，施工成本降低 40% 以上；设备操作简单，操作人员经短期培训即可上岗，大幅降低了对专业技能的依赖。



图 2

## 5 结语

本文设计的智能化锚固板安装设备通过集成机械结构、液压驱动与自动控制技术，实现了锚固板安装全过程的自动化与智能化，解决了传统人工安装方式存在的效率低、质量差、劳动强度大等问题。设备具有以下核心优势：

适配性强，可覆盖常用核电钢筋规格，无需频繁更换部件；

拧紧精度高，扭矩误差  $\leq \pm 3\%$ ，保障安装质量稳定性；

自动化程度高，集成支撑、夹紧、拧紧、检测、标记功能，减少人工干预；

操作便捷安全，劳动强度低，施工成本显著降低。

该设备的研发与应用为建筑工程钢筋连接施工提供了新的技术方案，尤其适用于核电、大型建筑等对锚固板安装质量要求严苛的场景，具有广阔的推广应用前景。后续可进一步优化设备结构，增加钢筋、锚固板自动输送功能，实现全流程无人化作业，提升设备的智能化水平与施工效率。

## 参考文献

- [1] GB 50204-2015, 混凝土结构工程施工质量验收规范[S].
- [2] 李明, 王强. 钢筋锚固板连接技术在核电工程中的应用[J]. 施工技术, 2020, 49(12): 89-92.
- [3] 张华, 刘敏. 锚固板安装工艺优化与质量控制[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1689-1692.

# Innovative Application of Optical Signal modulation and Demodulation Technology in Optical fiber Communication systems

Jiaqiang Wang

Shanghai Jianli Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200070, China

## Abstract

As an important component of information infrastructure, the technical system of optical fiber communication systems has been continuously evolving over the past two decades along with the expansion of network scale and changes in business forms. Optical signal modulation and demodulation technology directly determines the transmission efficiency, stability and engineering adaptability of optical fiber links, and is a key technical link supporting the continuous upgrading of backbone networks, metropolitan area networks and access networks. Based on the practical experience of optical fiber communication engineering construction in China, in terms of system architecture, equipment selection and operation and maintenance, more practical application requirements for modulation and demodulation technology have been put forward. This article discusses the basic composition of optical fiber communication systems and the principles of optical signal modulation and demodulation. On this basis, it focuses on analyzing several innovative application practices of modulation and demodulation technologies in China's optical fiber communication systems.

## Keywords

Fiber optic communication system; Optical signal; Modulation; Demodulation; Technology; Innovative applications

# 光纤通信系统中光信号调制解调技术的创新应用

王家强

上海建灏建设集团有限公司, 中国 · 上海 200070

## 摘 要

光纤通信系统作为信息基础设施的重要组成部分,其技术体系在近二十年中伴随网络规模扩展和业务形态变化不断演进。光信号调制与解调技术直接决定了光纤链路的传输效率、稳定性与工程适配能力,是支撑骨干网、城域网及接入网持续升级的关键技术环节。结合中国光纤通信工程建设实践,在系统架构、设备选型及运行维护等方面,对调制解调技术提出了更贴合实际工况的应用需求。本文围绕光纤通信系统的基本构成与光信号调制解调原理展开论述,在此基础上重点分析中国光纤通信系统中调制与解调技术的若干创新应用做法。

## 关键词

光纤通信系统; 光信号; 调制; 解调; 技术; 创新应用

## 1 引言

光信号调制与解调技术在高速光纤通信系统中的应用,不仅关系到数据传输速率的提升,还涉及通信系统的稳定性和可靠性<sup>[1]</sup>。有鉴于此,文章通过查阅相关文献资料以及结合自身实践情况下就光纤通信系统中光信号调制解调技术的创新应用展开探讨。通过对具体技术应用要点的系统梳理,总结其工程实现路径,并对相关技术发展进行归纳性概括。

## 2 光纤通信系统概述

光纤通信系统是一种以光为载体并利用光波在光导纤

维中传输信息的通信技术体系,其基本含义是将电信号通过光发射机中的光源(如半导体激光器)和调制器进行调制,使电信号编码至光载波上,然后通过高纯度玻璃光纤作为传输介质沿着纤芯全内反射传播,最后在光接收机处由光电检测器将微弱的光信号转换回电信号并经过放大、解调等处理恢复成原始信息,在传输过程中可能采用中继器或光纤放大器补偿损耗与波形失真。此类系统在通信骨干网、城域网及接入网中大规模部署,是支撑互联网、移动通信及行业专网的关键基础设施,具备带宽大、衰减低、抗电磁干扰强等工程特点。系统结构包括光发射端、传输链路和接收端三部分,常见调制方式有强度调制直接检测(IM/DD)和更高阶的相位或幅度调制以提升频谱效率;在高性能应用中还结合波分复用(WDM)等复用技术提高单纤传输容量。在国家“网

【作者简介】王家强(1982-),男,中国安徽合肥人,本科,中级职称,从事电子信息工程研究。



络强国”战略下推动光纤宽带及城际干线光通信技术持续演进，向更高比特率、更长传输距离及更高集成度方向发展。

### 3 光纤通信系统中光信号调制解调技术的创新应用

#### 3.1 基于多级强度映射的光信号调制应用

基于多级强度映射的光信号调制在城域光纤通信系统中的工程应用，主要围绕发射端光强精细控制、链路适配设计、接收判决匹配及长期运行稳定性展开。在发射端，采用强度调制与直接检测体系，通过对激光器输出功率进行多档位分级，将多比特电信号映射为若干离散光强等级，调制器驱动电路需结合激光器阈值特性与线性区间，对偏置电流和调制电压进行联合标定，确保各级光强在实际输出中具备可重复性与区分度。针对城域光纤链路衰减不均与节点跨度差异的特点，在多级强度设计阶段需引入链路预算参数，对光强级间隔进行定量分配，使接收端在典型衰减条件下仍可保持充分判决裕量。系统运行中，通过在发射模块内部布置光功率监测单元，实时采集输出光强变化，并联动驱动电路完成动态修正，以抑制温度漂移和器件老化对映射关系的影响。接收端采用多门限判决结构，根据光电转换后的电压分布设置自适应判决区间，使不同光强等级在噪声干扰下仍能被准确区分，并配合误码监测结果对门限位置进行周期性校正。在工程实施中，还需针对调制器非线性引入预校准机制，通过实验测试获得电光响应曲线，并在驱动端实施补偿控制，以保证多级强度映射在长期运行中的一致性与稳定性。

#### 3.2 面向长距离传输的相位稳定调制技术应用

面向骨干光纤通信系统跨区域、跨省级长距离传输场景，相位稳定调制技术在工程实践中逐步形成可复制的应用路径，其核心在于通过相位域承载信息以削弱光功率波动对系统性能的约束。在发送端实现中，工程上普遍采用窄线宽外腔激光器配合相位调制器构成稳定光源模块，通过对激光器驱动电流与腔长进行协同控制，降低固有相位噪声对调制精度的影响，并在调制链路中引入偏置点闭环校准单元，确保相位调制深度在长期运行条件下保持一致。在长距离光纤链路中，环境温度变化与机械应力会引发相位随机漂移，因此在系统设计阶段同步配置光纤链路温度感知与相位补偿机制，利用前向参考信号与回传相位信息构建跟踪回路，对慢变相位偏移进行实时修正，从而减轻外界扰动对调制状态的累积影响。在接收端解调环节，工程应用中通常结合相干检测结构与数字相位恢复算法，通过对载波相位进行连续估计与锁定，提高长距离传输条件下的相位判决可靠性，并避免因相位跳变导致误码突增<sup>[2]</sup>。在设备选型与系统集成过程中，运营级工程往往依据实际光纤段衰减特性和色散分布，对相位调制格式与符号速率进行针对性匹配，同时在开通调试阶段依托链路测试数据对相位噪声容限、跟踪带宽及补偿参数进行多轮校正，使调制方式能够适应不同线路区段的传

输条件并保持稳定运行。

#### 3.3 适配接入网场景的简化调制技术应用

在光纤接入网建设实践中，面向大规模用户密集接入与设备快速部署需求，简化型光信号调制技术逐步形成以工程可实施性为导向的应用体系，其核心在于对传统调制结构进行功能收敛与参数压缩，通过降低调制自由度来减少发送端电路规模与调试复杂度。在具体工程实现中，发送端通常采用幅度或相位变化规则明确、调制阶数受控的调制方式，并结合接入网链路长度短、光功率预算有限的特点，对调制深度进行工程化约束，使光源输出在保证误码性能稳定的前提下避免过度非线性工作，从而提高器件一致性与批量生产适应性。针对接入网中用户分布差异明显的问题，调制速率配置以端口级为单位进行分层设计，在主干分光节点保持统一速率设定，在用户侧接入端依据业务承载需求进行适度下调，以降低光模块功耗并延长设备运行周期。在现场运维层面，简化调制技术通过减少参数联动关系，使调制状态调整可在不改变硬件结构的条件下完成，技术人员可依据光功率监测与误码反馈对调制幅度进行微调，从而实现快速恢复链路稳定性。结合接入网业务负载随时间波动的运行特征，系统在运行过程中可依据用户在线状态与业务类型变化，对调制配置进行周期性修正，使光信号传输状态始终维持在可控区间内，并避免频繁切换带来的系统扰动。在多地工程应用中，该类简化调制方案已形成与接入网建设节奏相匹配的技术路径，其设计思路充分体现了在复杂网络环境下对可靠性、可维护性与工程适应性的综合权衡。

#### 3.4 基于自适应判决的光信号解调应用

光纤通信系统中，基于自适应判决的光信号解调应用主要围绕相干接收结构中的判决策略动态调整展开。实际项目中，在光电探测与模数转换完成后，接收端首先依据采样信号的幅度分布与相位离散特性进行初始统计分析，通过计算星座点能量集中度与相位偏移均值确定当前信号的噪声水平，并据此在判决模块中引入可调判决阈值，而非固定门限方式<sup>[3]</sup>。该方法在中长距离传输场景中可有效适配光纤损耗与放大噪声变化。随后，在符号判决过程中，自适应判决逻辑结合前级载波相位恢复结果，对I、Q两路信号分别建立动态判决区间，当检测到相位抖动或幅度漂移时，判决区间随之线性修正，以保证判决边界始终与实际星座分布保持一致。在偏振相关失真存在的情况下，自适应判决通常与判决反馈均衡结构协同工作，通过利用已判决符号对残余码间串扰进行反向补偿，使判决输入信号的聚类特性得到改善。该过程中，判决结果并非直接输出，而是作为均衡参数更新的重要参考量，实现解调与均衡的闭环协同。此外，在多种调制格式并存的系统中，自适应判决模块可根据符号统计特征自动调整判决映射关系，使解调过程在调制格式切换时保持连续性。上述做法在高速干线与城域网光纤通信系统中已形成较为成熟的技术应用路径。

### 3.5 面向多信道系统的并行解调技术应用

骨干光纤通信系统的多信道传输架构中,面向多波长并行承载特征的光信号解调环节,在实践中逐步形成了以并行解调为核心的接收处理模式,其技术实现并非简单复制单通道解调结构,而是围绕多信道并行接入、同步处理与稳定判决进行系统化重构。在接收端结构设计中,通常依据光层信道规划方案,将不同波长信号在光电转换后分别映射至独立解调单元,各解调通道在模拟前端即完成带宽匹配与通带约束,通过定制化电滤波参数抑制相邻信道泄漏引起的串扰分量,避免进入数字域后形成不可逆的判决偏差。在多通道并行运行条件下,普遍引入统一时钟参考与分布式相位对齐机制,对各解调链路的采样时刻进行精细标定,使符号边界保持一致,从而降低由路径延迟差异引发的相位旋转与幅度漂移问题。针对基于正交频分复用(OFDM)等多载波调制方案的并行解调技术,实际应用中将WDM与相干光OFDM集成,并在解调端通过FFT并行子载波分离处理,每个子载波对应一个并行解调通路,通过循环前缀去除、频域均衡与相位补偿的协同处理,实现多载波信号的并行解调与误码率控制,此外为抑制光纤非线性与通道间干扰,采用频域数字均衡与交织解调策略在各并行通路间共享信道估计信息,有效降低了跨通道干扰的影响并提高了系统整体吞吐率<sup>[4]</sup>。在大规模并行解调应用中,为降低通道间非线性影响与提升信噪比,可在并行DSP架构中引入以RNN等机器学习模型为基础的多通道均衡模块,通过并行处理单元同时对相邻WDM通道的信号进行联合均衡和误差反馈更新,该方法在实验验证中表明相较于单通道补偿策略可显著提升多通道系统的误码性能并降低整体计算复杂度,从而在并行解调结构中实现更高效的多信道性能优化。

### 3.6 适用于现场维护的解调参数可视化应用

在光纤通信系统现场运行与维护实践中,围绕光信号解调过程构建面向维护人员的参数可视化应用,是近年来解调技术工程化落地的重要创新方向。该类应用以接收端光电转换及后续解调链路为基础,在不改变原有光传输结构的前提下,对解调过程中形成的关键物理与统计参数进行现场可视化处理。具体做法上,首先在光接收模块输出端同步提取

幅度、电噪声、电信号抖动及误码统计等基础解调参数,通过本地高速采样单元进行实时汇聚,并在维护终端中以时间序列曲线和稳定区间标识方式直观呈现,使维护人员能够直接观察信号稳定性变化。随后,在解调处理单元内部对判决门限、采样相位偏移及信号失真度等参数进行并行计算,并通过图形界面以叠加标记形式映射至解调波形显示界面,实现解调状态与参数变化的同步展示,避免传统文本参数解读带来的理解偏差。在此基础上,引入多参数关联显示机制,将误码率变化与接收光功率、噪声幅度等参数进行同屏联动展示,当某一参数出现异常波动时,其关联参数同步高亮,便于现场快速判断异常来源。针对复杂现场环境,还可通过分段记录解调参数变化轨迹,在可视化界面中形成可回溯的运行曲线,用于对瞬态干扰或间歇性衰减问题进行分析<sup>[5]</sup>。同时,结合现场常见故障特征,在可视化系统中预设解调参数阈值区间,当参数超出合理范围时,通过图形颜色变化或区段标注方式进行提示,而非直接给出结论性判断,从而保持维护决策的技术可控性。

## 4 结语

综上所述,光信号调制解调技术作为光纤通信系统性能发挥的重要基础,其应用效果直接影响整个光纤通信系统的运行质量。对此,上文基于研究与实践出发,首先就光纤通信系统内涵展开论述,随后重点围绕其光信号调制与解调技术的创新应用提出一些看法,期望能够为推动中国光纤通信高质量发展提供助力。

## 参考文献

- [1] 刘翠,薛鹏.高速光纤通信系统中的信号调制与解调技术[J].电声技术, 2023(11).
- [2] 苏忠翰.光通信系统新型收发架构高性能调制解调技术研究[D].北京邮电大学,2023.
- [3] 林建辉、王炳轩、孙杰.船岸连接系统光通信数据调制解调设计与实现[J].船舶工程, 2020(S01):4.
- [4] 胡少华.高速光纤通信系统不同信号损伤下的性能增强技术研究[D].电子科技大学,2022.
- [5] 李辉.光纤通信中光信号传输性能优化研究[J].工程管理与技术探讨, 2024, 6(8):184-186.

# Construction and Practice Verification of a Three-Dimensional Collaborative Model of New Energy Centralized Photovoltaics + Safety Management + Ecological Environmental Protection

Yonghui Wu

Guizhou Qianxinan Jinyuan New Energy Co., Ltd., Xingyi, Guizhou, 562400, China

## Abstract

Against the backdrop of the “double carbon” strategy, as a core part of the new energy industry tree, the progress of large-development of centralized photovoltaics encounters two major challenges: safe navigation and ecological protection. In the traditional development paradigm, the pioneering work, safety control, and ecological protection of photovoltaics are often presented as fragmented and separated, acting as shackles and handcuffs for the high-quality development of the industry. Based on the of practical application, this article proposes a three-dimensional collaborative operation model of centralized photovoltaics safety governance work ecological environment protection. It deeply explores the core threads and key node content of the model establishment, and uses typical project practice cases to verify the feasibility and practical value of the model, providing a roadmap for centralized photovoltaic industry to reach safe ports, green grasslands, and sustainable development.

## Keywords

Centralized Photovoltaics; Safety Management; Ecological Environmental Protection; Three-Dimensional Collaboration; Model Construction

## 新能源集中式光伏 + 安全管理 + 生态环保三维协同模式构建与实践验证

吴永辉

贵州黔西南金元新能源有限公司, 中国 · 贵州 兴义 562400

## 摘 要

“双碳”战略车轮推动的背景层面,集中式光伏作为新能源产业大树的核心根系部分,其规模化发展进程遭遇安全航行与生态守护的双重激流险滩。传统发展范式当中,集中式光伏的开拓作业、安全关卡把控与生态环境保护多呈现断裂分割姿态,成为产业高品质发展的枷锁镣铐。本文站立在实践大地的视角方位,提出集中式光伏+安全治理工作+生态环境保卫的三维协同运转模型,深入挖掘模型搭建的核心脉络逻辑与关键节点内容,借助典型项目的实践实验案例,验证模型的可行程度与实用价值,为集中式光伏产业抵达安全港湾、绿色草原、可持续发展的远方,提供实际操作的路线地图。

## 关键词

集中式光伏; 安全管理; 生态环保; 三维协同; 模式构建

## 1 引言

能源结构的蜕变转型是开启“双碳”目标宝库的核心钥匙,集中式光伏依靠规模化的电力生产优势,在新能源产业的棋盘上占据关键坐标点位。然而在真实的发展进程里,集中式光伏项目普遍遭遇双重对峙矛盾:一方面,项目的覆盖版图广阔,设备在露天舞台运行,受自然环境季风与人为操作双手的影响巨大,安全风险的防控城墙面临突出压力;

另一方面,项目大多把地址选在山地脊梁等生态敏感的地域圈层,施工建造与运营操作的过程容易引发植被毛发的破坏、水土流失的肌肤创伤等生态病症问题<sup>[1]</sup>。目前,多数项目将光伏的开拓作业、安全管理事务与生态环境保护工作视为各自为政的独立环节,缺少系统全局的协同配合机制,造成安全隐患的阴云和生态风险的迷雾相互叠加笼罩。鉴于此种状况,搭建“集中式光伏装置+安全治理事项+生态环境保卫工作”的三维协同运转模型,达成三者的有机化学融合、彼此能量赋予,成为冲破产业发展瓶颈关卡的关键密钥。本文把目光聚焦在模型搭建的核心重点部位,结合实践中的案例标本开展验证分析工作,为产业的高品质发展提供理论天空的星光与实践大地的基石。

【作者简介】吴永辉(1996-),男,中国云南丽江人,本科,助理工程师,从事风电光伏发电安全及生态环保管理研究。



## 2 三维协同模型搭建的核心脉络逻辑

### 2.1 协同合作的指引方向：从断裂管控到系统整合

传统的集中式光伏项目开拓作业中，光伏的建设工作侧重于发电效率的提升，安全管理工作把目光聚焦在事故的预防壁垒上，生态环境保护大多是被动响应的合规行为，三者缺乏统一的规划蓝图与协同的联动齿轮。三维协同模型以“开拓作业与保护工作并重、安全盾牌与效益果实统一”作为核心的指引旗帜，打破环节之间的壁垒城墙，将安全管理的要求与生态环境保护的命令贯穿插入到光伏项目的规划图纸、施工建设、运营操作的全生命周期河流当中。在规划设计的阶段，同步开展安全风险的评估丈量与生态影响的论证研讨工作；在施工建设的阶段，统筹安排落实安全防护的措施开架与生态保护的方案图纸；在运营操作的阶段，建立安全状态与生态环境的协同监测网络机制，实现三者的目标航向一致、措施行动同步、效益成果同享<sup>[2]</sup>。

### 2.2 核心地位的支撑力量：技术创新火炬与机制保障堡垒的双重驱动

三维协同模型的落地生根需要依靠技术创新的火炬照明与机制保障的堡垒守护双重支撑力量。技术层面之中，以智能监测以及绿色施工这类技术革新形式，达成安全风险和生态状况的精确管控举动；机制层面之上，构建跨部门协同管理体系、责任追溯机制与绩效评价体系架构，清晰界定各主体于光伏开发、安全管理、生态环保范畴里的职责界限范围，保障协同举措落地产生效果。与此同时，以全生命周期理念作为引领旗帜，将协同要求嵌入项目各个环节内部，造就“规划存在协同情况、施工持有管控措施、运营具备监测手段、验收拥有评估机制”的完整闭环形态<sup>[3]</sup>。

## 3 三维协同模式的核心构建内容信息

### 3.1 规划阶段过程：三维统筹布局状况

规划环节情形是达成三维协同的基础条件，需要打破“重视发电工作、轻视安全事宜、弱化环保事项”的传统思维模式，开展系统性统筹布局工作。于选址环节期间，结合区域生态承载能力实施生态敏感性评估工作，优先挑选荒地生态承载力较为强大且土地利用效率较低的区域范围，避开生态保护区核心区域地域；同步开展安全风险普查活动，排查极端天气、地质灾害等潜在安全隐患问题，合理规划光伏阵列布局与设备安装位置场所。在方案设计环节之内，把安全防护标准和生态保护要求融入光伏系统设计工作，比如借助优化光伏支架高度匹配地表植被发展情况，运用模块化设计方便后期安全运维操作；同步设计安全监测与生态监测一体化系统体系，实现数据共享和协同预警功能<sup>[4]</sup>。

### 3.2 施工阶段时期：安全与生态协同管控事宜

施工阶段是安全风险和生态破坏的高发时期，需要建立协同管控机制，统筹落实安全与生态保护措施办法。在安全管理层面，推行标准化施工流程程序，对高空作业、临时

用电等高危环节实施全程监护工作，配备智能安全监测设备实时监测作业环境与设备状态情况，及时排查安全隐患问题。在生态保护方面领域，采用绿色施工技术减少环境扰动影响，例如针对山地光伏项目运用微型机械点状开挖方式，避免大面积植被破坏现象。同时之时，建立施工人员协同培训机制，把安全操作规范和生态保护要求纳入岗前培训内容，确保施工人员同步落实安全与生态责任义务。

### 3.3 运营阶段：全周期协同监测与运维工作

运营阶段的核心要点是建立安全与生态协同监测运维体系系统，实现风险早预警、问题早处置的目标要求。在监测体系构建层面，整合安全监测与生态监测设备装置，通过物联网、大数据技术实现数据实时采集与共享功能，监测内容包含设备运行状态、极端天气预警、植被覆盖状况、土壤与水质变化等方面，建立协同预警机制体制，当监测数据超出阈值时同步触发安全与生态应急响应行动。在运维管理架构当中，执行“安全运维融合生态养护”的协同运作范式，运维工作成员于设备巡检的流程之内同步施行生态情形的排查事务，及时完成光伏板周边杂物的清理作业以防备火灾风险事件，同时进行植被发展状态与水土保持设施的维护工作；定时开展安全因素与生态要素的协同演练活动，提升应急状况的处置能力和水平，确保在突发情形之下既能够保障人员群体与设备装置的安全态势，又可以将生态层面的影响程度降至最大下限。

### 3.4 验收程序与评估环节：协同效能的评价机制

构建三维结构的协同绩效评价体系架构，把光伏发电的效率指标、安全事故的发生概率、生态恢复的实际效果等多项指标纳入验收评估的范畴领域。验收环节过程中不仅要核查光伏系统的发电性能状况与安全设施的达标情形，还需要评估生态保护措施的落实成效，重点审核植被恢复的比率数据、水土流失的控制效果等具体指标。运营周期之内定时开展协同绩效的评估工作，结合监测获取的数据信息优化运维方案内容，针对安全管理工作与生态保护措施的有效性实施动态化的调整操作，构建“评估分析—优化改进—提升强化”的持续改进运行机制。

## 4 三维协同模式的实践验证状况

### 4.1 山地光伏复合项目的实践案例

在山地集中式光伏项目当中，借助实践三维协同模式理念，达成了光伏电站安全高效运转、生态环境保护工作与电力稳定输出情况的有机融合形态。于规划时期之内，项目把地址选定在坡度处于适中状态、光照条件呈现良好情形的山地丘陵区域地带，同时开展地质灾害安全评估工作与生态系统承载力分析事项，科学地设计光伏阵列间距状况与支架高度情况，将原有植被带进行保留动作，造就“光伏阵列—生态间隔”交错分布格局。在建设时间段里，运用轻型模块化组件和人工搬运相互结合的途径方式，降低大型机械针对

山地表土以及植被产生的破坏影响；针对坡面施工工程设置分级防护网结构与截排水系统装置，有效地防范水土流失问题；对高空组串安装作业、电缆敷设操作等危险作业活动实施全程旁站监护举措，并且配备气象监测设备仪器实时预警大风现象、暴雨状况等恶劣天气情形。在运营时期以内，组建“光伏运维+生态管护”一体化班组组织，运维人员当开展设备巡检工作、故障排查任务的同时，承担周边植被抚育工作、排水沟清理事项等方面的工作内容；依靠智慧平台系统实时监测辐照度数值、设备运行状态情况以及边坡稳定性状况，实现安全风险与生态风险的联动预警机制。项目投入运行以来维持安全零事故记录，区域林草覆盖度呈现稳步提升趋势，形成了“板上进行发电、板下开展保育”的山地光伏复合发展模式形态。

## 4.2 茶光互补山地光伏项目的实践案例

处于江南茶区范围的山地光伏项目工程，依靠三维协同模式体系，有效地应对了山地施工安全风险程度高、茶园生态保护要求严厉的双重挑战状况。规划时期紧密结合茶园地形起伏特征表现与茶树喜散射光的习性特点，合理地确定光伏支架离地高度情况与阵列间距状况，保障茶树光合作用的需求条件；同时开展滑坡灾害、泥石流灾害等地质灾害隐患排查工作，规划检修通道线路与生态排水设施结构。施工时期全面采用小型器械和人工配合的作业模式方式，推行桩基点状开挖工艺，避免对茶园土壤结构造成压实破坏后果；在坡坎区域位置布设生态袋结构、植草沟设施等护坡固土措施手段，并且设立醒目的安全警示标识标记与临边防护设施装置，实施专职安全员全程巡查监护制度。运营时期构建茶园生态环境与光伏运行状态协同监测体系架构，对茶树生长态势表现、冠层光照分布情况以及光伏组串运行参数数据进行动态监测操作；运维团队统筹开展光伏板清洗工作与茶园修剪作业、施肥处理等农艺作业活动，在保障电站安全稳定运行状态的同时情形下，促进茶叶产量数值与品质水平提升进程，实现“茶光相互促进、景效达成合一”的局面状况。

## 4.3 林光互补山地光伏项目的实践案例

西南山区范围的林光互补光伏项目工程，运用三维协同模式体系，妥善地处理了电站建设运营工作与森林生态系统保护事宜之间的关系关联。规划前期阶段深入调研区域林木分布状况、土壤条件情况与降雨特点表现，采用高支架结构、宽行距尺度的设计方案内容，为林下草本植被恢复进程

留出空间范围，并且系统评估森林火险等级、雷击风险等安全风险因素，合理地布局防火隔离带结构与防雷接地网络体系。施工过程中严格控制作业范围，利用索道运输设备，减少林木砍伐与地表开挖；同步实施林下灌草修复与表土保护，并对林区施工临时道路进行生态化处理。运营阶段建立“电力设备—森林环境”一体化监测平台，实时采集光伏设备运行数据、林区温湿度及火险等级信息，实现安全与生态双重预警。运维工作融合光伏设备维护与林木抚育管理，定期清理电站周边易燃物，修剪影响设备的枝条，既保障了电站长期可靠运行，又促进了林地生态功能的持续恢复，探索出山地森林地区光伏开发的可持续路径<sup>[5]</sup>。

## 5 结语

集中式光伏、安全管理以及生态环保的三维协同模式，冲破了传统发展模式里各个环节相互割裂的障碍，通过规划统筹、施工协同、运营监测以及绩效评估的全生命周期管控方式，实现了光伏开发、安全保障和生态保护的有机融合态势。实践验证结果显示，该模式能够有效地降低项目的安全风险，减少生态方面的扰动影响，提升项目的综合效益，为集中式光伏产业的高质量发展提供了可行的路径选择。在未来，随着技术创新的不断深入推进，三维协同模式将会朝着智能化和精准化的方向进行升级。通过引入人工智能、数字孪生等技术手段，构建全流程数字化的协同管理平台，实现对安全风险和生态状况的精准预判以及智能处置；与此同时，需要进一步完善协同管理机制，强化政策引导和标准支撑的作用，推动该协同模式在更多的光伏项目当中得到推广和应用，助力新能源产业实现安全、绿色、可持续发展目标，为“双碳”目标的达成提供有力的保障支持。

## 参考文献

- [1] 张学, 何国庆, 韦统振, 裴玮. 面向沙戈荒源网荷储一体化基地的主力电源型光储变流器研究综述[J]. 高电压技术, 1-15.
- [2] 潘熙. 基于组合神经网络的新能源场站集中式功率预测研究[J]. 电子设计工程, 2025, 33 (23): 77-81+88.
- [3] 刘岩, 王冬, 马凯琳, 柳乐怡. 基于改进模型预测控制的新能源电力系统AGC控制策略[J]. 能源与环保, 2025, 47 (11): 315-324.
- [4] 张天宝, 常俊松. “双碳”背景下荒漠集中式光伏绿色施工综合评价及对策[J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (29): 12466-12475.
- [5] 王森, 刘毅, 王吉超, 任乃祺, 由梓默, 史立志. 集中式光伏电站的运维研究[J]. 太阳能, 2025, (09): 80-87.

# Analysis of Measures to Strengthen Metrological Verification Work in the New Era

Yanlin Liu

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

## Abstract

Precise measurement, as an important cornerstone supporting high-quality economic and social development, has become a key link in the national quality infrastructure, playing an irreplaceable role in maintaining market order and promoting technological innovation. As a legal technical activity to ensure the accuracy and reliability of measurement results, metrological verification has achieved significant results by effectively integrating it into modern quality management systems.

## Keywords

metrological verification; New era; Quality supervision; technical standard

## 新时期加强计量检定工作的措施分析

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

精准计量作为支撑经济社会高质量发展的重要基石, 当前已成为国家质量基础设施的关键环节, 对于维护市场秩序和促进科技创新发挥着不可替代的作用。计量检定作为确保测量结果准确可靠的法定技术活动, 将其有效融入现代化质量管理体系中, 已经取得显著成效。然而在实施计量检定工作过程中, 仍存在技术标准滞后、人员素质参差不齐等问题, 在开展检定工作前, 需充分评估现状, 进行系统规划, 将科学管理理念贯穿全过程, 这样才能提升检定效能, 推动计量事业健康发展。本文立足于新时代背景, 主要就计量检定工作面临的问题进行深入剖析, 并提出针对性解决策略, 以供参考。

## 关键词

计量检定; 新时期; 质量监管; 技术标准

## 1 引言

随着国家质量强国战略深入推进, 计量工作的基础性地位日益凸显, 实现计量精准化、规范化管理成为当务之急。由于计量数据是经济活动和科学研究的重要依据, 实现计量数据的准确可靠将进一步提升产品质量和科技创新水平。对于市场监管领域, 由于计量失准可能导致交易纠纷和安全隐患, 构建完善的计量检定体系能提升市场监管效能, 同时保障消费者权益, 使市场主体在公平竞争环境中健康发展。现阶段, 国家对计量工作提出了更高要求。技术更新迅速, 致使计量标准滞后、设备陈旧、人员短缺、管理粗放等现象普遍存在, 引发数据失真、贸易纠纷、安全隐患等问题, 影响市场秩序。当前, 部分计量机构的管理理念陈旧, 缺乏创新意识, 存在技术落后或制度缺失。而计量检定作为质量基础设施的核心环节, 其水平直接关系到产品质量和安全。因此,

探索科学高效、切实可行的计量检定措施, 基于现代化管理理念, 对提升计量工作质量和保障经济社会健康发展具有重要现实价值。

## 2 加强计量检定工作的重要意义

### 2.1 提升计量数据准确性

市场经济活动的顺利开展需要精准可靠的计量数据, 对产品质量控制和交易公平性要求高。对于各类计量器具的准确性验证, 在传统检定过程中需要大量人力、物力和时间投入, 同时会消耗较多资源。但在现代计量技术的支持下, 将智能化检定方法应用于计量工作全流程, 通过自动化系统进行数据采集与分析, 减少人为误差, 进而显著提升计量结果的准确性和可靠性。

### 2.2 提升市场监管效能

在市场监管体系中, 计量检定需要覆盖广泛领域, 因此工作量巨大。而在智能化计量系统的支持下, 只需要设定合理参数, 其余数据采集、分析和报告生成由系统自动完成, 这使检定效率与传统方式相比出现质的飞跃, 进而大幅提高

【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。



市场监管的覆盖面和时效性。计量检定作为市场监管的技术支撑，其工作效能就是市场秩序稳定的重要保障。

## 2.3 有助于促进科技创新发展

目前，计量技术已经融入国家科技创新体系的核心环节，将先进计量技术引入科研和产业领域，能有效支撑科技成果转化，通过精准测量支持研发过程实现技术突破，保障科技创新过程中数据的准确可靠。计量检定作为连接基础研究与产业应用的桥梁，既是科学发现与技术应用的纽带，同时也是创新成果转化为现实生产力的关键环节。

## 3 计量检定工作中存在的主要问题

### 3.1 重视程度不足

由于部分管理者对计量工作的基础性认识不足，行业整体并未形成对计量价值的充分认同，不同地区和领域的重视程度差异明显。目前，部分企业对计量检定工作敷衍应付，忽视计量对产品质量的决定性影响，甚至错误认为计量检定属于可有可无的辅助工作，影响企业质量管理的整体水平，在生产经营中不需要严格遵循计量规范，这种认知偏差严重阻碍计量技术应用。另外，部分计量机构的管理制度缺少与国际标准接轨的前瞻性设计，使计量工作在使用先进检定技术时缺少制度保障。落后的计量管理理念，会导致计量工作在质量管理体系建设中的作用被严重弱化。

### 3.2 技术水平有待提高

计量检定是科学理论与工程技术结合的系统工程，属于专业技术领域，其中涉及传感器技术、数据处理算法等，以及人工智能、物联网等新兴技术应用，技术门槛较高。计量检定想要达到国际先进水平，必须持续更新技术装备。目前，基层计量机构设备更新普遍滞后，检定技术手段不够先进，导致检定精度不足，影响结果可靠性。计量人员在完成基础检定后，往往只关注数据记录和简单分析，缺乏对检定数据的深度挖掘，这在数字化转型背景下又形成了新的技术瓶颈<sup>[1]</sup>。在实际检定工作中，计量人员存在专业知识更新不及时的问题，对于新型计量器具的检定方法掌握不足，且缺乏系统培训，没有建立持续学习机制，理论知识和实践能力脱节，这对计量检定工作的科学性和权威性造成不利影响。

### 3.3 管理机制不够完善

计量工作与质量管理体系存在衔接不畅，在计量实施过程中，许多问题难以及时发现，对计量数据应用和质量控制效果产生负面影响。对于复杂的计量检定工作，需要建立全过程管理机制，如果管理环节缺失，被忽视的细节问题会出现连锁反应，数据偏差、结果失真等系列问题，会给市场监管带来潜在风险。

## 4 加强计量检定工作的有效策略

### 4.1 强化计量意识与理念更新

计量工作需要科学的管理理念支撑，计量体系建设应以国家战略需求为导向，从顶层设计层面统筹规划，才能实

现可持续发展。在实际工作中，计量部门要认识到计量工作对经济高质量发展的战略意义，明确自身职责定位，形成系统思维、创新意识，在计量服务模式上实现转型升级，更有针对性地满足社会需求。计量机构应根据行业发展的实际需求，调整服务重点，因此，计量部门在制定发展规划时，应采取差异化策略，客观分析行业特点、市场需求等要素的内在联系，做好基础服务与高端服务的合理配置，明确不同阶段的发展目标，结合区域经济发展特点，保障计量服务的精准性和适应性<sup>[2]</sup>。在计量服务创新过程中，既要关注技术升级，也要注重服务模式创新，这样才能满足多元化需求，充分响应经济社会发展对计量工作的期待。

### 4.2 提升技术装备水平

计量检定工作的技术进步需要多方协同，各相关部门之间应加强合作，即便面临资金限制，在关键领域也应优先保障。技术部门和业务部门需要密切配合，做好技术研发与应用推广的衔接工作，最大限度避免技术应用不当导致的负面后果。如果技术应用出现问题，就要及时调整。计量机构还应加强技术评估和设备维护，定期开展技术能力验证，确保检定结果准确可靠，同时要关注技术发展趋势，避免设备陈旧、方法落后，保持技术先进性，确保检定过程科学规范，结果准确可信。例如：计量检定工作要实现高质量发展，不仅需要更新硬件设备，还需要优化软件系统，同时完善技术标准，如果某个环节的技术指标或方法标准不符合要求，则应组织专家进行技术论证并及时调整，各相关部门应建立协同机制进行技术攻关<sup>[3]</sup>。计量技术水平决定计量工作的整体质量，保障计量技术先进性是计量事业发展的核心。目前，计量工作正处于转型升级阶段，技术革新需要系统规划，基层机构则要夯实基础，进而形成上下联动的技术创新体系，全面提升计量检定能力。

### 4.3 在关键领域实施创新检定方法

在数字化转型影响下，计量检定工作面临新的发展机遇，有助于构建现代化计量体系，利用大数据和人工智能技术。计量技术的持续发展，将进一步拓展计量服务的应用场景，计量机构可借助云计算、物联网等先进技术，能对海量计量数据进行智能分析，保证计量检定结果具有更高准确度，更好地满足复杂场景需求。例如：智能电表的检定需要动态监测，通过在线监测和远程校准相结合的方式。对于新型计量器具的检定，在研发过程中引入的计量特性验证实现了精准控制和质量保障，同时提升了产品可靠性。对计量数据深度分析，计量工作是质量提升的重要支撑。对计量工作流程，机构应建立科学的评价机制，注重实效评估。计量检定工作的创新发展前景广阔，让计量机构通过技术融合形成核心竞争力、服务品牌。让计量人员借助数据分析、人工智能、远程监控等技术手段。实现精准计量、高效服务、智能监管效果，为经济社会高质量发展奠定技术基础。在信息化技术支持下，将计量数据价值充分挖掘，通过智能分析进行

趋势预测,发现潜在问题,最终实现计量工作的科学化、精细化管理。

#### 4.4 加强人员培训与能力建设

无论技术设备多么先进还是方法多么科学,人才始终是核心所在,计量机构应该重视人才培养,为计量事业发展提供智力支持,并对专业能力持续提升,进行科学引导。针对计量人员的专业能力提升是计量工作质量保障的关键,计量工作只有持续提升人员素质,才能确保服务质量。计量部门要重视培训工作,通过系统化培训解决人员的知识盲点,做好理论学习与实践操作的有机结合,互相促进提升,通过考核机制对人员能力进行动态评估,保障计量队伍的专业素质持续提升。例如:从行业发展现状来看,计量人员的专业素养提升,这也促进了计量技术的创新发展,从而推动计量工作整体水平提高。针对计量人员能力差异问题,可以建立分层培训体系,并设置考核标准,进一步完善能力评价机制,对不同岗位人员进行针对性能力培养。总之,计量人才建设一定要系统规划,从知识结构、技能水平、职业素养等维度,加大培养力度,确保计量人才队伍建设取得实效。在日常工作中,计量机构也要注重经验积累,加快知识更新速度,在技术变革中,进一步提升计量工作的适应能力。伴随着计量技术的不断发展,计量人员的专业能力也能够持续提升,计量服务质量得到保障,计量工作价值充分体现,从而推动计量事业高质量发展。

#### 4.5 建立健全监督评价机制

对于计量工作,应该建立全过程监督机制,在明确工作标准后,再去评估计量检定工作的实际效果,保障检定质量,开展常态化的质量评价工作,保障计量检定结果的公信力,这既是质量保障的需要,也是提升服务效能的途径。计量机构要保障检定过程的规范性,加强质量控制和结果审核,进而确保检定结果的权威性。例如:在实际工作场景下,某计量机构通过建立质量追溯系统,采用区块链技术等手段,实现检定过程可追溯,基于全程监控机制,达到了质量提升目标。同时,计量评价机制也要与时俱进,推动了检定方法创新,提升了工作效率,在实际应用中,体现了机构的专业能力。不仅完善了计量检定工作的质量保障体系,机构的服务能力也体现出现代化管理水平。在计量工作的质量保障当中,可以实施过程监控和结果评估,做好质量评价与持续改进,进而提升计量工作的整体效能,实现服务价值的

最大化。计量工作应结合传统方法与现代技术。计量机构,计量工作在服务过程中,同时应以客户需求为导向的服务理念。计量工作与服务质量。计量工作,计量方法、服务流程与客户满意度并重,通过标准化流程或个性化服务。计量工作并持续优化。

#### 4.6 推进信息化与智能化建设

计量工作需要系统的信息化支撑,计量体系建设需从数字化转型为切入点进行整体规划。计量工作并持续优化。改变传统计量工作模式,设立智能计量中心,计量工作不再是简单的数据记录,而是数据分析、决策支持、质量预警等多功能集成。整合计量数据资源,组织跨部门协作平台,深度挖掘数据价值,实现计量工作智能化转型。深化计量技术与信息技术融合。建立计量大数据平台,不再局限于单一功能,而是数据分析、质量评估、风险预警等多功能集成。计量机构应对计量数据进行深度分析,为行业提供专业咨询服务,计量机构可与科研机构合作。将计量数据与行业需求对接,实现价值转化。制定计量信息化标准,明确技术路线,构建统一的计量信息生态系统。设置基于实际需求的智能化应用场景,确保计量工作与数字化转型同步发展。计量人员必须持续学习,具备数据分析与技术应用能力。

### 5 结语

计量工作想要实现高质量发展,就必须适应新时代要求。计量水平直接决定市场秩序的稳定程度,随着经济社会不断发展,计量机构一定要做好计量技术创新与服务升级工作,逐步完善计量工作的标准化体系,尽可能减少计量失准现象出现,降低市场交易风险,助力经济社会高质量发展的目标实现。计量机构应通过技术创新、服务优化等措施,为经济社会发展提供强有力的计量支撑。实现精准计量,能提升产品质量,也是产业转型升级的重要保障,确保市场交易公平,促进计量工作整体水平不断提升。

#### 参考文献

- [1] 赵巍,薛谭.医疗器械计量检定工作中的困境及对策探究[J].中国医疗器械信息, 2024, 30(3):148-150.
- [2] 张熙.行政事业单位内部审计人员专业能力探究[J].市场周刊, 2024, 37(14):158-162.
- [3] 孙文斐,胡涵,张岳.结构光扫描仪的测量原理及其检定研究[J].中国质量监管, 2024(9):76-77.