

# 科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2025 年 11 月 第 31 期 (总第 620 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 墾 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgslzz@163.com

网址：<http://www.khbl.net>

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：昆明滇印彩印有限责任公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2025 年 11 月 5 日

定价：人民币 15 元

## 版权声明：

稿件凡经本刊采用，如作者无版权特别声明，即视作该文署名作者同意将该文章著作权中的汇编权、印刷版和电子版（包括光盘版和网络版等）的复制权、发行权、翻译权、信息网络传播权的专有使用权授予《科海故事博览》编辑部，同时授权《科海故事博览》编辑部独家代理许可第三方使用上述权利。未经本刊许可，任何单位或个人不得再授权他人以任何形式汇编、转载、出版该文章的任何部分。

# 目录

## 科技博览

- 001 基于半监督自编码器的网络流量异常检测关键技术研究 ..... 易伟, 孙惠  
005 电力系统中功率器件损耗标定方法的应用研究 ..... 张猛, 刘昊晨, 姚建华  
008 电气工程自动化控制系统中的智能算法优化应用 ..... 曾舒, 易非凡  
011 特高压输电通道电磁环境评估技术精度提升路径研究 ..... 廖逸驹  
014 面向故障诊断的机电系统状态监测与预测性维护方法探析 ..... 彭加斌  
017 基于 Dify 的焓差实验室压缩机人工智能选型系统设计与实现 ..... 李强荣, 杨子衍, 韦远鹏, 戴志博, 沈秀琳

## 智能科技

- 021 风电机组状态监测下的预测性运维分析 ..... 赵强平  
024 自动化螺丝螺母包装系统的设计与实现 ..... 廖文峰, 黄超, 王厚羽, 曹银忠, 李培军  
027 智能化技术赋能绿色建造的实践路径分析 ..... 张俊杰  
030 施工电梯振动特性分析与故障诊断研究 ..... 罗荣桢  
033 燃煤电厂汽轮机轴系振动异常案例分析与处理 ..... 屠荣峰  
036 新能源开发背景下的新型电力系统建设策略分析 ..... 张博文, 武英杰

## 应用技术

- 039 水电站金属结构安装工程的质量控制 ..... 江焱华

# 目录 contents

---

|     |                                  |          |
|-----|----------------------------------|----------|
| 042 | 大断面浅埋铁路隧道施工技术要点控制 .....          | 赵国峰      |
| 045 | 建筑钢筋混凝土主体结构检测技术分析 .....          | 廖顺发      |
| 048 | 高层房建外墙保温层施工质量通病防治技术 .....        | 李 戕, 刘 燕 |
| 051 | 短肢剪力墙在工业建筑设计中的运用分析 .....         | 胡五兵, 尹宏志 |
| 054 | 水利水电建筑工程中的混凝土浇筑质量控制技术 .....      | 董 眇      |
| 057 | 大型场馆大跨度钢结构施工与监测关键技术研究 .....      | 吴友佳      |
| 060 | 复杂水文地质条件下水电站上游围堰防渗处理关键技术研究 ..... | 戴兴元      |

## 科创产业

|     |                                 |               |
|-----|---------------------------------|---------------|
| 063 | 活性氧调控纳米复合膜的空气净化应用 .....         | 刘骐源           |
| 066 | 基于智慧城市的城市建筑设计策略解析 .....         | 徐高伟           |
| 069 | 轨道交通与市政工程协同共建模式研究 .....         | 叶 洋           |
| 072 | CEMS 吹扫气系统中空气净化装置的工艺研究 .....    | 石剑飞, 李鹏程, 袁 贺 |
| 076 | 人工智能技术在路桥工程造价风险控制中的应用 .....     | 黎燕娜           |
| 079 | 新能源背景下电力设备采购与绿色物流协同发展策略探讨 ..... | 文 凯           |
| 082 | 半绝缘与全绝缘管母线在新能源电站中的选型应用研究 .....  | 邹玉波           |

## 技术管理

|     |                              |          |
|-----|------------------------------|----------|
| 085 | 变电站管理创新与施工工艺优化 .....         | 李 勇, 杨 超 |
| 088 | 在建水利工程质量安全管理问题研究 .....       | 王志浩      |
| 091 | 轨道交通地下车站连续沉井法施工技术研究 .....    | 李 强      |
| 094 | 高速公路收费站中的污水处理工艺与技术应用 .....   | 向 婷, 李 楠 |
| 097 | 合同能源管理在中央空调节能改造中的应用分析 .....  | 张立钢      |
| 100 | 安全风险辨识管理在输变电工程施工中的应用研究 ..... | 黄伟健      |
| 103 | 建筑工程全周期监管体系构建与效能提升研究 .....   | 洪炎滨      |

## 科学论坛

|     |                                  |          |
|-----|----------------------------------|----------|
| 106 | 导料槽密封性研究与应用 .....                | 曲学华, 亢瑞新 |
| 109 | 城市景观照明光污染控制技术研究 .....            | 杨凯麟      |
| 112 | 基于人工生态构筑物的海岸侵蚀防护研究 .....         | 聂间间      |
| 115 | 电梯门系统故障机理与可靠性提升技术研究 .....        | 吴尉铭      |
| 118 | 唐徕渠渠道清淤技术与淤积防治长效机制研究 .....       | 马 媚      |
| 121 | 水利水电灌溉工程田间管网布置施工设计与节水效果研究 .....  | 常 杰      |
| 124 | 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望 ..... | 翟 伟      |

# 基于半监督自编码器的网络流量异常检测关键技术研究

易伟，孙惠

(郑州科技学院，河南 郑州 450064)

**摘要** 随着物联网(IoT)设备数量的爆炸式增长，安全问题日益凸显。设备精准识别与流量异常检测是构建物联网安全体系的核心基础，但实际中异常样本稀缺，传统监督学习因样本不均衡性能受限。本文针对物联网设备识别与异常检测中的关键技术进行系统性研究，提出了一种基于一维卷积神经网络(1D CNN)的设备自动识别方法和半监督深度自编码器异常检测模型，通过编码器—解码器学习正常流量潜在特征，用少量标记样本微调编码器后的分类器，形成重构误差与分类损失的综合目标函数，解决异常样本稀缺问题。

**关键词** 物联网安全；异常检测；半监督学习；深度自编码器；数据增强

**基金项目：**河南省科技厅科技攻关项目“基于深度学习的物联网设备识别异常检测关键技术研究”（项目编号：242102210094）；河南省教育厅高等学校重点科研项目“基于大数据采集的罗德相关失效模型在高速切削分析中的应用研究”（项目编号：24B460028）。

中图分类号：TN76

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.001

## 0 引言

物联网(Internet of Things, IoT)作为新一代信息技术体系的核心构成单元，近年来呈现高速发展态势。随着物联网设备数量的爆发式增长，网络攻击面呈几何级拓展。受限于设备算力与成本控制等因素，终端安全防护能力普遍薄弱，安全漏洞持续暴露，给物联网生态带来巨大压力。在物联网安全研究领域，设备识别和异常数据检测至关重要。传统方法依赖人工提取特征，效率低且准确性难以保证，无法适应设备数量众多、种类繁杂的特点。深度学习技术在图像分析、语音识别等领域的突破性成果，为解决物联网设备识别和异常检测问题提供了新思路<sup>[1]</sup>。本文研究基于深度学习的物联网设备识别和异常检测关键技术，旨在为提高物联网设备的安全性和可靠性提供参考。

## 1 物联网设备识别与异常检测

### 1.1 物联网流量特征分析

物联网流量是由数据包按时间顺序传输而形成的序列。从网络协议栈的角度来看，物联网流量涵盖了IP、TCP、UDP等基础协议，同时也广泛应用CoAP、MQT等轻量级应用层协议<sup>[2]</sup>。数据包都包含头部和有效载荷两部分，头部携带丰富的控制信息，构成了设备通信的基础特征。

通过对数据包长度分布的研究发现，不同设备的数据包长度具有显著特征。智能门锁的控制命令数据包通常较短，而智能摄像头的视频数据包则相对较长。传输频率也是重要分析指标，恒温器会周期性地发送温度数据，传输频率稳定；智能门锁在用户操作时会产生突发流量。

时间序列分析则侧重于研究流量随时间的变化规律，通过分析历史流量数据构建设备正常行为的基线。智能音箱流量在一天中的不同时间段会呈现出不同的模式，晚上使用频率较高时流量较大。通过建立时间序列模型，可以准确地描述这种流量变化规律。

### 1.2 深度学习基础技术

#### 1.2.1 卷积神经网络(CNN)

CNN通过局部连接、权值共享和池化操作，能高效自动提取数据中的空间特征<sup>[3]</sup>。一维CNN尤其适合处理时序数据，如数据包长度序列。卷积核在序列上滑动可自动提取关联特征。池化层进行下采样，保留显著特征，全连接层最终完成分类。

#### 1.2.2 梯度提升树(LightGBM)

LightGBM作为GBDT框架下的高效机器学习模型，适用于高维度、大样本量的数据建模。通过多轮迭代训练，将多个弱分类器集成为强分类器，实现对复杂数据模式的精准拟合。

### 1.2.3 深度自编码器（DAE）

深度自编码器采用“编码器—解码器”双模块协同的网络架构，通过数据的“压缩—重构”过程实现特征学习与信息表征<sup>[4]</sup>。

### 1.3 性能评估指标体系

设备识别常用指标包括准确率、精确度、召回率、AUC 和 AUPRC。异常检测常用指标包括 AUC、F1 分数、误报率和漏报率。这些指标共同构成完整的模型性能评估体系。

## 2 局域网环境下的物联网设备识别方法

### 2.1 研究现状与挑战

传统局域网设备识别依赖于 MAC 地址和设备指纹。MAC 地址易被篡改，设备指纹因加密通信和软硬件动态变更而稳定性差。深度学习技术在物联网设备识别应用中存在计算成本高、泛化性差等问题。

### 2.2 基于一维卷积神经网络的特征提取

#### 2.2.1 数据预处理与特征构建

通过网络抓包工具，在局域网内的关键节点采集物联网设备通信流量数据。预处理阶段提取每个会话的数据包长度序列作为核心特征。将会话数据包长度序列归一化为固定长度，通过滑动窗口生成多个样本，充分利用序列信息。

原始包长序列保留了完整的时序信息，能直接反映物联网设备通信行为模式，避免了特征工程中的信息损失。

#### 2.2.2 网络架构设计

基于一维 CNN 构建物联网设备识别模型，由输入层、卷积层、池化层和全连接层组成。输入层接收预处理后的数据包长度序列。卷积层采用 32 个大小为 5 的卷积核，自动提取局部关联特征。池化层压缩特征维度并保留关键信息。全连接层整合特征并完成设备类型分类。

### 2.3 实验验证与性能分析

在物联网设备识别研究领域，目前有三个公开可获取的真实设备数据集，它们的具体信息如下：2016 年由 Aalto 大学构建的数据集，包含 27 台设备；同年发布的 UNSW 数据集，涵盖 28 台设备；以及 2019 年推出的 IoTFinder 数据集，涉及 51 台设备。

在实验挑选数据集时，对这三个数据集进行了全面考量，结合本研究对数据规模、特征维度及场景适配性的需求，最终确定采用 UNSW 数据集，保障模型训练样本分布均衡，采用精确度、召回率和 F1 分数作为

核心评价指标。实验结果显示，该模型的识别准确率均稳定在 99% 以上，验证了其在物联网设备识别任务中的有效性与泛化能力。

## 3 网络地址转换后的物联网设备识别方法

### 3.1 NAT 环境下的识别难点

在家庭网络中，NAT 设备实现多个内部设备共享一个公网 IP 地址，无法直接通过 MAC 地址或 IP 地址来区分不同物联网设备。更严峻的是数据分布极度不平衡，存在已知漏洞的特定型号设备占比极小。

### 3.2 基于焦点损失的 LightGBM 模型优化

#### 3.2.1 数据增强与特征工程

从 NAT 转换后的流量数据中提取源端口分布、目标 IP 地域熵、TCP 连接时长等 30 维统计特征。针对数据分布失衡问题，引入 SMOTE 过采样策略平衡样本分布。通过对少数类样本特征向量进行邻域搜索，构建保留核心特征属性又具备适度特征差异的虚拟样本。

#### 3.2.2 模型训练与参数调优

选择 LightGBM 作为基础模型，集成焦点损失函数<sup>[5]</sup>。采用贝叶斯优化算法进行参数调优，确定学习率为 0.01，叶子节点数为 31，焦点损失函数中的  $\alpha$  为 0.8， $\gamma$  为 2，此配置使模型更加关注少数类样本，提高对稀有设备型号的识别能力。

### 3.3 实验部分

与某大型运营商合作，在其家庭网络中进行了实际部署和数据采集。通过在运营商的网络边缘设备上部署流量采集工具，采集 NAT 出口流量数据。在数据标注阶段，重点标注了含漏洞的摄像头型号，某品牌的 V1.0 版本智能摄像头存在安全漏洞，将其作为目标类别进行标注。在采集到的 10 万用户流量数据中，该型号的摄像头样本数量占比仅为 0.7%，属于典型的少数类样本，符合实际应用中具有安全漏洞设备型号占比较低的情况。

为系统验证所提方法的性能优势，本文将实验结果与现有相关研究展开对比分析，验证了该方法在真实不平衡场景下的有效性，实验结果对比见表 1。

## 4 基于半监督学习的物联网流量异常检测

### 4.1 异常检测场景与数据困境

在实际的物联网应用中，异常样本稀缺、传统监督学习因缺乏正样本而表现不佳。无监督方法对复杂、隐蔽的异常模式泛化能力不足，难以检测高级持续威胁攻击。

表 1 实验结果对比

| 设备                              | AUC (本文) | AUPRC (本文) | AUPRC   |
|---------------------------------|----------|------------|---------|
| webcam. Amcrest. IPM-721W       | 1.0 000  | 1.0 000    | 1.0 000 |
| socket. Wemo. Insight           | 1.0 000  | 1.0 000    | 1.0 000 |
| webcam. Samsung. SNH-1011N      | 1.0 000  | 0.9 999    | 0.9 990 |
| streamer. Amazon. Fire_TV_Stick | 0.9 999  | 0.9 995    | 0.9 920 |
| light_bulb. TP_Link. LB130      | 1.0 000  | 1.0 000    | 1.0 000 |
| speaker. Sonos. One             | 0.9 998  | 0.9 975    | 0.9 520 |
| doorbell. Amazon. Ring          | 1.0 000  | 0.9 999    | 0.9 890 |

## 4.2 深度自编码器与半监督训练策略

### 4.2.1 模型架构设计

编码器采用 3 层全连接层，结构为  $256 \rightarrow 128 \rightarrow 64$ 。将原始流量特征压缩至 64 维低维隐空间，解码器与编码器对称，将低维特征还原为原始特征。在编码层后接入 Softmax 分类器，利用少量标记异常样本进行有监督训练<sup>[6]</sup>，实现异常流量的精准分类。最终构建半监督目标函数包含重构误差和分数误差两个关键组件，通过权重系数平衡两者的贡献度，提升分类准确率。

### 4.2.2 训练流程优化

先用 10 万条筛选后的正常物联网流量数据，通过深度自编码器的编解码结构无监督预训练，最小化输入与重构输出的均方误差 (MSE)，使模型掌握正常流量的潜在分布与模式。随后引入占总样本 4% 的标记异常样本进行有监督微调，联合优化重构损失与分类损失：前者保障正常流量特征表达能力，后者借交叉熵引导精准识别异常。在线检测时，实时计算新流量重构误差，超基于正常流量统计特征的动态阈值即判为异常，结合分类器输出概率双重验证，提升检测可靠性。

### 4.3 数据集与对比实验

为应对样本量不平衡问题，本文提出一种流量数据扩展策略，具体可采用以下单一方法或多种方法组合的形式实现：

1. 时间序列反转：针对流量数据时序依赖性强、模型易过度拟合单一时间流向的问题，采用时间序列逆向处理策略：将 24 小时历史流量序列沿时间轴翻转，使原始序列的起始片段转化为终止片段、终止片段转化为起始片段。

2. 特征变换：考虑到流量数据特征（如数据包大小、传输速率）常存在分布偏态问题，对核心特征实施针对性数学变换：包括对数转换（用于压缩数值跨

度较大的特征）、平方根运算（缓解右偏分布特征的极端值影响）、指数变换（增强低数值特征的区分度）等。

3. 时空变换：若流量数据携带有地理空间标识（如设备接入位置的经纬度坐标），则针对空间维度实施时空变换：对地理坐标施加微小随机扰动（如基于高斯分布的  $\pm 0.001$  经纬度偏移），模拟不同地理位置（如同一区域内不同家庭、同一楼栋不同楼层）的设备接入场景。

4. 采样变换：针对时间序列类流量数据的“多分辨率分析需求”，采用多时间尺度重采样策略：一方面通过下采样将分钟级流量数据聚合为小时级（如按 60 分钟滑动窗口求和），降低时间分辨率以凸显宏观流量趋势；另一方面通过上采样（如线性插值）将小时级数据拆解为分钟级，提升时间粒度以捕捉微观流量波动。

5. 噪声注入：为模拟现实场景中数据不确定性（如物联网设备传感器的采集误差、无线传输链路的电磁干扰），向流量数据中注入符合实际扰动特性的随机噪声。

6. 数据切片：采用时间片段化重组方法，将完整的流量时序数据（如 24 小时序列）切割为若干等长独立子片段（如每 2 小时 1 个片段），再通过随机排列子片段的顺序构建新的样本序列（如将“片段 1—片段 2—片段 3”重组为“片段 3—片段 1—片段 2”）。

7. 缺失模拟：针对实际应用中“数据传输中断、设备离线导致的流量数据缺失”问题，采用缺失场景模拟策略：基于掩码机制随机掩盖部分时间步（如随机选取 10% 的时间点）或特征维度（如随机掩盖“数据包重传率”特征）的数值，构建含缺失值的流量样本。表 2 为训练集和测试集中不同流量类型的样本数量列表。

N-BaIoT 数据包含 9 类物联网设备的真实流量数据，其中 7 台设备同时受到 BASHLITE 与 Mirai 两种僵尸网

表2 训练集和测试集中不同流量类型的样本数量列表

| 报文类型                 | 协议类型 | 非恶意报文  | 恶意报文   |
|----------------------|------|--|--|
| ClientHello 报文       | 密码套件 | 提供密码套件 0x002f (TLS_RSA_WITH_AES_128_CBC_SHA)                 | 提供 3 个过时的密码套件，包括 0x0004 (TLS_RSA_WITH_RC4_128_MD5) |
|                      |      | 大多数 TLS 流中支持 0x000d，以及 0x0005 (状态请求)、0x3374 (下一个协议协商)、0xff01 | 客户端支持的 TL 扩展块值相同                                   |
| ClientKeyExchange 报文 | 密钥长度 | 256 位椭圆曲线密码作为公钥  | 2 048 位 RSA 公钥                                     |
| ServerHello 报文       |      | —  | 过时的密码套件  |
| Certificate 报文       |      | 0.1% 为自签名  | 70% 是自签名   |

络的感染，另外 2 台则仅被 BASHLITE 单一恶意程序入侵。该数据集提供正常网络流量与异常恶意流量，涵盖 100 毫秒、500 毫秒、1.5 秒、10 秒和 1 分钟五种时间窗口的采样数据。其 23 维特征分为四类：第一类包含 8 个特征，可捕捉单方向数据包的传输规模特性；第二类涵盖 4 个特征，聚焦于单位时间内数据包总量的统计需求，形成用于量化数据传输频次的计数特征；第三类涉及 3 个特征，侧重描述数据包传输过程中时延波动的特性，构建反映数据传输稳定性的抖动特征；第四类包含 8 个特征，可同时关联入站与出站双向数据包的传输规模，实现对双方向数据交互体量的综合表征。上述所有超参数的具体取值细节已系统汇总于表 3，为后续实验复现、结果验证及方法改进提供清晰参考。

表3 超参数的取值

| 超参数              | 值     |
|------------------|-------|
| 批量大小             | 128   |
| 预训练迭代次数          | 100   |
| 迭代次数             | 50    |
| 预训练学习率           | 0.001 |
| 学习率              | 0.001 |
| 权重衰减系数 $\lambda$ | 1e-6  |
| 平衡因子 n           | 1     |

在半监督学习的研究范式中，存在三个关键调控参数。第一个参数为训练集中标记样本的占比， $\gamma = m / (n+m)$ ，其核心作用是调控标记样本在训练数据中的分布权重：当该占比取值为 0 时，半监督学习范式将退化为无监督学习；取值为 1 时，则完全转化为监督学习，二者分别对应不同的样本依赖场景。第二个参数是无标

记样本的污染率  $\gamma_p$ ， $\gamma_p$  具体指无标记训练样本中异常样本的占比， $\gamma_p$  的值越趋近于 1，表明无标记样本中异常样本的掺杂程度越高，模型对“正常—异常”特征边界的学习易受干扰，进而导致异常检测任务的难度显著提升。第三个参数为标记样本所含的异常类数量  $k_t$ 。

## 5 结束语

本研究针对物联网安全监控需求，提出设备识别与异常检测完整技术方案。在局域网中，1D-CNN 设备识别模型通过提取数据包长度序列深度特征，实现各类设备精准识别，准确率超 99%；在 NAT 网络中，创新用焦点损失优化 LightGBM，解决数据不平衡问题，显著提升稀有漏洞设备检测能力。此外，结合深度自编码器与半监督学习，构建适配异常样本稀缺场景的流量检测模型，有效识别高级持续威胁。成果可服务智能家居、工业物联网等场景，保障用户隐私财产安全，助力运营商精准管理设备资产、预警隐患，为物联网安全生态提供技术支撑。

## 参考文献：

- [1] 王海峰, 吴军, 郑波. 物联网设备指纹特征构建与识别方法 [J]. 通信学报, 2021, 42(04):156-167.
- [2] 刘建辉, 孙志刚, 肖建国. 物联网设备流量行为分析与特征提取 [J]. 计算机学报, 2019, 42(06):1254-1268.
- [3] 王鹏, 李静, 张涛. 基于一维卷积神经网络的物联网设备识别方法 [J]. 计算机研究与发展, 2021, 58(03):643-654.
- [4] 张强, 王敏, 周昊. 基于深度自编码器的物联网异常检测模型 [J]. 软件学报, 2020, 31(08):2456-2470.
- [5] 刘伟, 陈明, 赵磊. 面向不平衡数据集的物联网设备识别研究 [J]. 计算机工程, 2022, 48(05):123-130.
- [6] 张明, 李娜, 黄伟. 半监督学习在网络异常检测中的应用研究 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37(09):2742-2746.

# 电力系统中功率器件损耗标定方法的应用研究

张 猛, 刘昊晟, 姚建华

(北京电力设备总厂有限公司, 北京 101100)

**摘要** 功率器件损耗对电力系统效率与热稳定性具有决定性影响。传统标定方法受限于测试条件及参数假设, 难以覆盖复杂工况。本文采用热电耦合建模与多工况数据拟合相结合的标定思路, 对器件在不同温度、频率和负载下的电热特性进行定量分析。实验结果表明, 该方法能有效提升损耗识别精度与参数稳定性, 在高压、高频功率变换设备中具备良好的工程适应性与推广价值。

**关键词** 电力系统; 功率器件; 损耗标定; 热电耦合; 多工况建模

**基金项目:** 光伏发电及直流汇集变换装备关键技术及样机研制(研发工号: 99015)。

**中图分类号:** TM7

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.002

## 0 引言

电力系统向高效、智能方向发展, 对功率器件的能量管理提出了更高要求。功率密度提升带来更严重的电热应力问题, 使传统静态计算模型难以反映动态损耗规律。不同材料体系和拓扑结构下的开关特性差异, 使损耗分析成为影响系统可靠性的关键环节。基于实验测量、热特性建模及多参数耦合优化的标定研究, 可为提升器件运行精度、散热效率与长期稳定性提供重要技术支撑。

## 1 功率器件损耗分类与影响因素分析

功率器件在电力系统中承担着能量变换与开关控制的重要功能, 其损耗类型主要包括导通损耗、开关损耗、反向恢复损耗及高频寄生损耗。导通损耗由器件导通电阻与负载电流共同决定, 在大电流低频工况下占比显著; 开关损耗由电压与电流重叠产生, 受  $dv/dt$ 、 $di/dt$ 、驱动电压及电路布局影响显著, 是高频系统的损耗核心; 反向恢复损耗常见于二极管, 恢复期间的尖峰电流与反向电压叠加易导致热失控; 寄生损耗则源于封装寄生电感、电容与高频谐振<sup>[1]</sup>。在实际应用中, 器件材料(如 Si、SiC、GaN)决定其导通与开关特性, 封装结构与散热路径影响热响应与稳定性, 控制策略

如 PWM 占空比、软开关技术亦会改变损耗时域分布。不同拓扑与应用场景下, 损耗行为呈现出高度非线性与工况敏感性, 需通过多维参数建模与系统级优化设计加以控制。

## 2 电力系统中功率器件损耗标定方法分析

### 2.1 数据手册法与静态参数提取法

数据手册法基于器件制造商提供的参数表, 通过查阅导通电阻  $R_{ds(on)}$ 、饱和压降  $V_{CE(sat)}$ 、开关能量  $E_{on/off}$ 、热阻  $R_{ds(on)}$  开关损耗估算采用:

$$P_{SW} = f_s \cdot (E_{on} + E_{off}) \quad (1)$$

式(1)中,  $f_s$  为开关频率。这种方法计算简便、适合早期方案评估, 但因手册数据基于标准温度(如 25 °C)和理想波形, 实际工况下的动态偏差常导致较大误差。

表 1 展示了典型功率器件在 25 °C 条件下的理论损耗与实测对比, 静态估算误差均超过 9%, 反映出其局限性:

数据手册法虽便于初步设计评估, 但在复杂热—电耦合系统中, 需谨慎使用或与实测验证结合应用。

### 2.2 双脉冲法与动态开关损耗测试技术

双脉冲测试法是目前应用最广泛的动态损耗测量方法之一, 特别适用于硬开关场景下的 IGBT 与 MOSFET

表 1 功率器件典型参数与静态损耗估算对比(25 °C)

| 器件型号                    | 额定电压(V) | $R_{ds(on)}$ (mΩ) | $E_{on+off}$ (mJ) | $P_{cale}$ (W) | 相对误差(%) |
|-------------------------|---------|-------------------|-------------------|----------------|---------|
| SiC MOSFET 1 200 V/40 A | 1 200   | 80                | 2.8               | 38.5           | 42.0    |
| IGBT 1 200 V/50 A       | 1 200   | —                 | 4.6               | 44.2           | 49.5    |
| GaN HEMT 650 V/30 A     | 650     | 45                | 1.1               | 22.8           | 25.0(补) |

器件。其原理是通过两次控制脉冲完成单次开通与关断动作，在已知电压、电流、开关时间及驱动参数的条件下，测定导通与关断阶段的瞬时能量，并利用积分法计算器件的开关损耗。实验电路通常包括栅极驱动模块、可调直流母线、负载电感和高速电流电压采样系统，可在严格控制的工况下获得较高精度的测试结果。

该方法的突出优点在于能够独立分离导通与关断过程，使不同温度、不同驱动电压下的损耗数据得以系统采集，从而为建模与优化提供可靠依据。通过调整栅极电阻、电流幅值和母线电压，可建立多组开关特性曲线，形成可视化损耗数据库，便于后续算法拟合与参数修正。部分实验系统还引入温控装置，实现结温控制与热稳态保持，以提高数据的可重复性。

受测试条件限制，双脉冲法在高频、软开关及谐振拓扑中难以直接应用，因其无法完全还原器件在系统连续运行状态下的真实热—电耦合效应。针对这一问题，近年来出现了改进型测试架构，如基于锁相采样与同步触发的动态损耗捕获平台，可在较高频率范围内实现电压、电流波形同步采集，并结合多通道高速示波器完成能量积分<sup>[2]</sup>。这类测试技术有效拓展了传统双脉冲法的工况覆盖范围，使实验结果更接近系统级实际表现。

### 2.3 热电耦合模型与参数拟合法

热电耦合模型综合考虑器件电功率损耗转化为热量，并在结构中传导至环境的全过程。通过建立RC网络或传递函数模型表示热扩散路径，其中Foster与Cauer模型最为常见。系统可表示为：

$$T_j(t) = T_{amb} + \sum_{i=1}^n P_i(t) \cdot R_i \cdot (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (2)$$

式(2)中， $T_j$ 为结温， $T_{amb}$ 为环境温度， $R_i$ 与 $\tau_i$ 为热阻与热容构成的时间常数。该方法通过测量温升曲线反演热参数，并结合电流、电压波形得出瞬时功率损耗，实现对不同工况下损耗变化的预测。

在工程实践中，热电耦合建模通常采用热电偶+红外热成像双通道采集方式，辅以热容估算或热阻拟合。其优势在于能够反映器件真实运行状态下的动态热行为，为结构热设计、冷却方案匹配与功率裕度评估提供重要依据。参数拟合阶段采用最小二乘法对热响应曲线进行回归，部分研究引入多段拟合与指数加权策略，在不同温区保持精度稳定。模型局限在于对边界条件与热互耦较为敏感，复杂系统中热阻网络非线性与多路径特性可能导致拟合不收敛或误差扩大。

为提升模型适应性，研究者正结合有限元仿真校准实测热参数，或采用改进型动态热阻映射技术实现模型在线修正。

### 2.4 多工况智能建模与自适应标定方法

随着数据采集与智能算法技术的成熟，基于多工况数据驱动的智能建模方法逐渐成为功率器件损耗标定的研究热点。这类方法通过采集器件在不同电流、电压、频率及温度下的运行数据，构建高维特征空间，利用机器学习模型实现损耗的非线性预测与自适应修正。常见算法包括支持向量回归(SVR)、梯度提升决策树(XGBoost)及多层神经网络(DNN、LSTM)等。模型训练过程中以实验测得的电压、电流、结温及栅极信号为输入，以实测损耗为输出，通过反向传播优化权重参数，最终得到可在任意工况下准确估算损耗的模型。

这类方法不再依赖传统的经验公式或等效电路，而是通过数据特征的学习捕捉复杂的热—电耦合关系。训练完成的模型可嵌入数字控制系统，实现实时功率预测与在线校正<sup>[3]</sup>。例如：在高频逆变器或车载电驱系统中，通过对采集数据的连续更新，模型能够自适应识别器件性能衰减、温度漂移等特征，及时修正损耗参数，提高系统运行效率与可靠性。

多工况智能标定的优点在于建模精度高、适应范围广、预测速度快，尤其在宽禁带器件与多拓扑系统中表现突出。其局限性在于模型训练样本需求大，对数据完整性和传感精度要求较高。部分算法存在“黑箱化”问题，难以直接解释各参数的物理意义。针对这一不足，新的研究方向正朝着“物理信息驱动建模”发展，即在神经网络中引入功率器件的已知物理规律，以实现模型可解释性与计算效率的平衡。

## 3 功率器件损耗标定方法的应用实践

### 3.1 实验平台设计与工况构建

为验证功率器件损耗标定方法在高压光伏变换系统中的实际应用效果，搭建了基于1500V直流母线的Boost型光伏MPPT实验平台。平台采用耐压等级2000V的SiC MOSFET与肖特基二极管构建两电平升压拓扑，额定功率为30kW，具备多路并联输入与可调频驱动控制功能。平台集成Qspice电路仿真模块、红外热成像系统、热电偶阵列、采样精度达±0.2%的电压电流传感器，可覆盖宽电压(600~1500V)、宽功率(6~30kW)与多温度(25°C、60°C、90°C)场景。

工况构建参照典型光伏阵列输出特性，设定低、中、额定三档功率等级，在稳态运行 30 分钟后采集器件导通电流、关断电压、驱动波形与结温数据。Qspice 建模过程中模拟器件开关过程，重点提取电压过冲与电流尖峰行为，并在驱动电阻  $2 \sim 10 \Omega$  区间调参，探明驱动阻值与损耗耦合特性<sup>[4]</sup>。驱动电阻过低虽可压缩开通能量（4.7 mJ 降至 3.8 mJ），但引发电压尖峰从 1 820 V 飙升至 1 960 V，带来 EMI 与器件击穿风险。因此将驱动电阻设定在  $6 \Omega$ ，在兼顾效率与可靠性的基础上进行热容法损耗标定。

### 3.2 标定流程实施与模型拟合

标定过程采用热容法对功率器件的热响应进行定量分析。在测试中，器件安装于恒温热平台，K 型热电偶紧贴器件基板，红外热像仪监测表面温度分布，升温速率设定为  $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，采样频率为  $10 \text{ Hz}$ ，以保证热响应数据的完整性与连续性。在恒定功率输入条件下，记录器件结温随时间的变化，通过计算温升斜率反推器件热容。

在  $1 500 \text{ V}$  母线、 $18 \text{ A}$  电流与  $60^{\circ}\text{C}$  环境温度下，测得器件热容为  $18.6 \text{ J}/^{\circ}\text{C}$ ，导通损耗  $22.4 \text{ W}$ ，开关损耗  $19.7 \text{ W}$ ，总损耗为  $42.1 \text{ W}$ 。进一步通过多工况下热容与温度的线性回归，拟合相关性曲线，回归结果相关系数  $R^2$  达到  $0.984$ ，验证了模型在宽温区的稳定性与准确性。定功率条件下热阻测试显示，平均热阻为  $0.39^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，最大偏差控制在  $0.03^{\circ}\text{C}/\text{W}$  内。

为评估方法的重复性，采用相同工况重复测量三次，损耗波动小于  $3.2\%$ ，热容偏差不超过  $\pm 0.4 \text{ J}/^{\circ}\text{C}$ 。结果表明，该方法在多温度、多占空比条件下均具备良好的稳定性与工程适应性，可作为电力系统高压器件热一电建模与结构热设计的有效支撑手段。

### 3.3 工程应用场景验证与优化建议

在光伏 MPPT 系统中，基于热容法的功率器件损耗标定结果被嵌入控制系统，实现了器件发热量的动态估算与热应力实时监测。运行测试覆盖  $1 500 \text{ V}$  直流母线和  $30 \text{ kW}$  额定功率工况，器件结温实测值与模型预测误差低于  $2.5^{\circ}\text{C}$ ，系统效率提升至  $98.6\%$ ，较传统经验法提高约  $1.8\%$ 。

为验证模型在多路并联系统中的适应性，对三路 Boost 模块进行均流测试，结果显示热漂移偏差小于  $1.2^{\circ}\text{C}$ ，单路功率误差低于  $0.8\%$ ，说明模型能有效识别器件间热耦合与应力差异。在硬开关条件下，通过优化驱动参数和匹配栅极电阻，将关断电压尖峰从  $1 970 \text{ V}$

抑制至  $1 835 \text{ V}$ ，显著降低器件瞬态过压风险。经 500 小时额定功率运行后，器件热阻变化率控制在  $2\%$  以内，未出现热疲劳迹象。

从系统优化角度看，热容法标定结果使工程师能够在器件选型、散热设计和驱动参数匹配中实现前置优化<sup>[5]</sup>。针对  $2 000 \text{ V}$  等级 SiC 器件的两电平升压拓扑，实验结果表明，在同等功率条件下，相较三电平拓扑，系统驱动与采样路数减少  $40\%$ ，效率提升约  $1.5\%$ ，控制算法复杂度下降明显。经过热容法与仿真联合分析后，可在设计初期明确损耗分布与电热边界，为高压功率变换器的结构简化与可靠性提升提供工程化依据。

### 4 结束语

碳化硅功率器件在高压、高频、高温等极端工况下展现出优越的电热性能，为新能源系统提升转换效率与系统紧凑度提供了关键支撑。在工程应用中，基于热容法的损耗标定技术可实现电热耦合特性精准识别，有效前置可靠性边界分析与结构优化判断，具备高度实用价值。结合仿真分析与实测数据融合的方法论，将损耗模型嵌入控制系统形成在线自适应能力，是推动高压电力电子装备向高可靠、智能化方向发展的重要技术基础。

### 参考文献：

- [1] 岳雨霏, 张亚文, 王李邦, 等. MMC 功率损耗优化环流控制方法 [J/OL]. 高电压技术, 1-14[2025-10-16].[https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Y4WXQ1XfpS5rWjY8iuiqlU87tutl5ivWjwzonbprBKwIVaN047Qx7dTLe1OtWgnpuhzwit8uqnsFx7QTNENSGZ4NdwBYYrQXSMFqtzH0vtE1LCbLsoq6txdGKt7bsBLmIc6QGJHou0X3QH3Ck9YS1x9Sv\\_XdSenhuoMT0GcE9R2kP8dSAoWdrA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Y4WXQ1XfpS5rWjY8iuiqlU87tutl5ivWjwzonbprBKwIVaN047Qx7dTLe1OtWgnpuhzwit8uqnsFx7QTNENSGZ4NdwBYYrQXSMFqtzH0vtE1LCbLsoq6txdGKt7bsBLmIc6QGJHou0X3QH3Ck9YS1x9Sv_XdSenhuoMT0GcE9R2kP8dSAoWdrA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [2] 白磊. 电机控制系统下的智能功率集成电路设计要点分析 [J]. 电子元器件与信息技术, 2025, 09(04):77-79, 82.
- [3] 吴侯潼, 谢丽蓉. 电力电子技术在电力系统中的应用 [J]. 光源与照明, 2022(01):225-227.
- [4] 赵政, 李勇, 高海乐, 等. 基于功率器件的影像核磁系统电力传输技术研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 08(09):20-22.
- [5] 苏田田, 路茂增, 马新喜, 等. MMC 器件损耗分布与电容电压纹波综合优化方法 [J]. 电力工程技术, 2024, 43(03): 32-41.

# 电气工程自动化控制系统中的智能算法优化应用

曾舒<sup>1</sup>, 易非凡<sup>2</sup>

(1. 嘉兴中广核电技术服务有限公司, 浙江 嘉兴 314300;  
2. 中核核电运行管理有限公司, 浙江 嘉兴 314300)

**摘要** 本文对电气工程自动化控制系统中智能算法的优化应用进行了研究, 阐明了在复杂工况下传统控制方法存在响应迟缓与适应性不足等问题, 采用遗传算法、粒子群优化、深度学习和强化学习等方法实现了参数整定、非线性建模和动态调度的改进。研究结果表明, 智能算法能够提升系统预测精度与运行稳定性, 降低能耗并增强自适应能力, 在电气工程自动化领域具有广阔的应用价值, 可为系统的高效与智能化发展提供有力支持。

**关键词** 电气工程自动化控制系统; 智能算法; 机器学习算法; 深度学习; 强化学习

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.003

## 0 引言

电气工程自动化控制系统是能源、电力与工业生产稳定运行的重要保障。随着电力系统规模扩大和工艺流程日益复杂, 传统基于固定参数和线性模型的控制方式在应对多变量耦合、非线性动态以及实时优化方面表现出明显不足。近年来, 智能算法因具备自学习、预测与优化能力, 逐渐成为提升系统运行性能的重要技术路径。其在电网调度、工业过程控制和设备健康管理等环节展现出优势, 不仅能够提高控制精度和能效水平, 还能够增强系统的鲁棒性与可靠性, 为未来的自动化发展提供新的方向。

## 1 电气工程自动化控制系统的结构特征与优化需求

电气工程自动化控制系统以实时感知、智能决策与精确执行为核心特征, 其结构通常涵盖感知层、控制层与执行层, 通过传感器和通信网络实现多源信息的采集与传输, 再由控制器进行数据处理与策略生成, 最终驱动执行单元完成调控任务。

随着系统规模不断扩展, 电气设备之间的耦合关系日益复杂, 传统依赖固定参数与线性模型的控制方法在非线性、多变量和动态工况下表现出局限性, 容易导致响应迟缓、能耗增加及控制精度下降。在能源利用率提升、安全运行保障和智能化升级的需求驱动下, 自动化控制系统亟需引入具备自适应与预测能力的智能优化手段, 以实现对复杂环境的快速感知和有效应对<sup>[1]</sup>。

## 2 智能算法在控制系统中的关键优化方法

### 2.1 基于优化算法的参数整定

在电气工程自动化控制中, PID 控制器仍是最常见的调节器, 其控制律可表示为:

$$u(t)=K_p e(t)+K_i \int_0^t e(\tau) d\tau+K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式(1)中,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  分别为比例、积分和微分参数。由于系统具有非线性与多变量耦合特征, 参数整定问题常被转化为目标函数最小化问题, 典型形式为误差积分平方:

$$J=\int_0^T e^2(t) dt \quad (2)$$

在优化过程中, 遗传算法通过对参数向量 ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) 进行编码, 利用选择、交叉和变异算子生成新解, 并以目标函数值作为适应度进行进化迭代; 粒子群优化则采用速度与位置更新机制, 通过个体最优和群体最优的动态协作实现全局寻优。例如: 在电机调速系统中, 利用遗传算法进行 PID 参数整定时, 首先随机生成种群并以目标函数  $J$  作为适应度函数, 迭代过程中依据适应度筛选个体并进行交叉和变异, 逐步形成较优的参数组合。在电网负荷调节中, 粒子群优化将每组 PID 参数作为粒子的位置, 设定速度与惯性权重更新公式, 对参数搜索路径进行修正, 使其在收敛过程中保持全局搜索能力<sup>[2]</sup>。

### 2.2 机器学习算法的建模与预测

在电气工程自动化中, 机器学习通过对历史数据的特征提取与模式识别, 实现对系统状态的预测建模。

常见方法之一是支持向量机回归，其基本形式为：

$$f(x) = w^T \phi(x) + b \quad (3)$$

式(3)中， $\phi(x)$ 表示特征映射， $w$ 与 $b$ 分别为权重和偏置。通过最小化带有惩罚因子的目标函数，可以在有限样本条件下获得较好的泛化能力。另一类常用模型为决策树，其划分准则基于信息增益或基尼指数构建，能够将复杂非线性关系转化为分层判定结构，适合故障诊断与分类任务。

例如：在电力负荷预测中，支持向量机可利用气象因素、历史负荷及节假日信息作为输入特征，经过核函数映射与参数优化训练得到预测模型，再对未来负荷曲线进行回归计算。在变压器故障诊断中，决策树算法通过对油中溶解气体含量及温度等特征数据的层级划分，逐步构建故障类型的判别路径，实现快速识别与分类。

### 2.3 深度学习在复杂非线性工况下的优化

在电气工程自动化中，深度学习因具备多层特征提取能力，能够对复杂非线性工况下的大规模数据进行建模。卷积神经网络常用于电气图像与监测信号的模式识别，其卷积层的计算可表示为：

$$h_{i,j}^k = f\left(\sum_{m,p,q} w_{pq}^{k,m} \cdot x_{i+p,j+q}^m + b^k\right) \quad (4)$$

式(4)中， $x$ 为输入特征图， $w$ 为卷积核参数， $b^k$ 为偏置项， $f(\cdot)$ 为激活函数。循环神经网络则更适合处理时序信号，其基本更新关系为：

$$h_t = \sigma(W_h h_{t-1} + W_x x_{t-1}) \quad (5)$$

通过记忆历史状态 $h_{t-1}$ ，实现对动态序列的依赖建模。

例如：在输电线路巡检中，卷积神经网络可将采集到的图像作为输入，经过多层卷积和池化处理提取特征，用于识别绝缘子裂纹或异物附着等缺陷<sup>[3]</sup>。在电网负荷动态预测中，循环神经网络以时间序列的历史负荷和气象变量为输入，利用隐藏状态传递机制完成未来负荷的逐步预测，实现对高频波动的有效建模。

### 2.4 强化学习的自适应控制机制

在复杂工况下，强化学习通过环境交互与奖励反馈形成动态策略，可在无需精确模型的情况下实现自适应控制。其基本思想是通过策略 $\pi(a|s)$ 决定在状态 $s$ 下采取动作 $a$ ，并依据奖励信号不断优化。典型的价值迭代更新公式为：

$$Q(s,a) \leftarrow Q(s,a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s',a') - Q(s,a)] \quad (6)$$

式(6)中， $Q(s,a)$ 为状态—动作值函数， $\alpha$ 为学习率， $\gamma$ 为折扣因子， $r$ 为即时奖励。深度强化学习进一步利用神经网络逼近 $Q$ 函数，通过参数化模型提升在高维状态空间下的适应性。

例如：在电力负荷调度中，强化学习控制器以电网运行状态作为输入，设定供需平衡和运行成本作为奖励指标，通过与环境的持续交互逐步形成动态调度策略，实现分布式能源的灵活接入。在工业过程控制中，强化学习可基于传感器反馈的实时数据，选择最优操作变量组合，并在不断试探与修正中实现能耗的动态优化。在电机驱动系统中，深度强化学习通过对转速与转矩的连续反馈建模，训练策略网络生成控制信号，从而在负载波动频繁的场景下保持运行稳定性。

## 3 智能算法优化的应用实践与成效分析

### 3.1 智能电网中的调度与优化

#### 3.1.1 国网山东电力“电网调度智慧大脑”建设

国网山东电力建设“电网调度智慧大脑”，形成“大模型+机理模型”协同机制。系统以大模型为全局中枢，沿“问题定位—影响分析—方案建议”路径推演，小模型负责局部计算与实时修正，提供数据支撑<sup>[4]</sup>。通过融合气象预测与电力模型，实现调度决策的全局统筹与局部响应协同，支撑新能源并网下的智能化电网运行。

#### 3.1.2 智能调度与故障诊断的技术路径

在负荷预测环节，系统采用深度学习中的循环神经网络结构，将气象大模型生成的多维数据作为输入，结合电网历史负荷序列建立时序预测模型，以捕捉负荷波动的动态特征，并通过多目标优化算法对预测精度和运行稳定性进行约束。为了增强调度审核的严谨性，智慧大脑引入图模融合技术，将调度操作票的电气拓扑与控制逻辑映射为图结构，通过图卷积网络实现全要素的逻辑校验，从而保证操作票在执行层面的闭环性与安全性。在故障诊断环节，系统依托分布式监测节点对电网设备运行状态进行实时采集，数据通过通信链路传输至中心平台，形成与“智能故障诊断技术应用示意图”（见图1）一致的层级式诊断模式。故障识别与定位过程采用基于支持向量机的分类方法，将采集到的特征向量映射到高维空间进行判别，并结合强化学习策略对恢复步骤进行自适应优化。为了提升新能源消纳的灵活性，智慧大脑在风电和光伏接入调度中引入强化学习算法，将调度动作与电压频率约束设定为奖励函数，通过与环境的持续交互训练最优策略，动态调整并网功率曲线，确保调度过程符合电网稳定性约束。通过负荷预测的深度学习方法、调度审核的图模型校验、故障诊断的分类与优化以及新能源调度的强化学习策略，该系统在电网调度中形成了多路径并行的智能化技术框架。

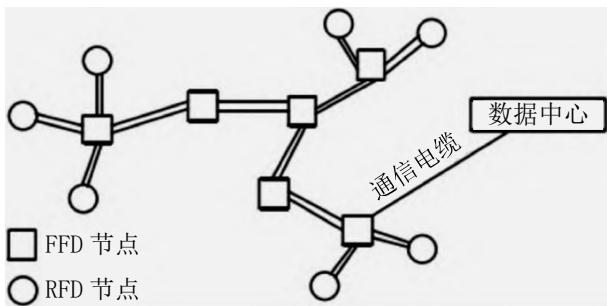


图1 智能故障诊断技术应用示意图

### 3.2 工业自动化生产中的过程优化

#### 3.2.1 钢铁企业铁前智能化生产协同建设

钢铁企业在铁前工序中推进智能化协同建设，依托数据驱动与算法优化实现配矿、烧结、高炉及焦化等环节的互联协同。兴澄特钢通过炼铁大数据平台实现配矿到高炉的全链条业务融合；青岛特钢构建一体化智能管控平台，将图像识别与自学习算法用于烧结控水和焦炉加热系统；大冶特钢则通过炼铁与焦化一体化平台实现铁前管控全覆盖，推动生产管理由经验决策向数据决策转型。

#### 3.2.2 铁前工序的智能化协同路径

在配矿环节，企业普遍建立基于多目标优化算法的智能配矿系统。通过构建目标函数，将矿石品位、含杂率和成本因子纳入约束条件，采用遗传算法进行迭代寻优，实现原料配比的动态优化。兴澄特钢在其平台中嵌入该机制，使配矿结果能够实时与烧结工序对接，减少了人为干预带来的偏差。在烧结环节，青岛特钢开发的智能控水系统融合了图像识别与有监督自学习算法。在烧结过程中，布料层表面的水分分布由工业相机采集，经卷积神经网络提取图像特征，并结合标签样本进行分类训练，动态修正喷水量与喷雾范围，从而实现控水过程的实时调节。在高炉环节，智能管理系统引入强化学习方法，控制器以炉况数据为输入，奖励函数设置为炉缸温度与喷煤比的稳定区间，通过不断交互与反馈更新策略，实现风量与喷煤量的自适应调整。在焦化环节，大冶特钢与青岛特钢均采用机器学习算法对焦炉加热过程进行建模，输入参数包括煤气流量、炉温分布与时间序列，利用回归模型预测未来温度曲线，并据此调整阀门开度与燃气流量，保证加热过程的稳定性与经济性<sup>[5]</sup>。

#### 3.3 综合应用成效与未来发展趋势

智能算法在电气工程自动化控制系统中的应用，已经在电网调度与工业生产的实践中形成了系统性成

果。其成效不仅体现在参数寻优与模型构建的精确化，还体现在跨环节的协同优化机制。以电网为例，通过深度学习和图模融合实现的负荷预测与操作票审核，使调度逻辑在多维数据驱动下具备高度一致性；在工业生产中，遗传算法、图像识别与强化学习嵌入铁前全流程的配矿、烧结、高炉与焦化工序，使各环节从单点改进走向整体闭环。

未来发展趋势呈现出三个方向：其一，算法轻量化与嵌入式部署将成为关键，以适配现场设备对实时性与计算资源的严格要求；其二，多算法融合与跨域协同将进一步深化，强化学习、深度神经网络与优化算法将被有机结合，形成可在动态环境中自进化的调度与控制策略；其三，算法应用的安全性与可解释性需求显著增强，如何在确保数据隐私与运算透明的前提下实现大规模应用，成为亟待解决的课题。由此可见，智能算法不仅是单一工艺环节的优化工具，更是未来电气工程自动化系统向自主决策与智能协同发展的核心支撑。

#### 4 结束语

电气工程自动化控制系统在复杂工况与多变量耦合环境下，已逐步依托智能算法实现从参数优化到全流程协同的跨越。通过优化算法的全局寻优、机器学习的建模预测、深度学习的非线性特征提取以及强化学习的自适应策略，系统运行在调度、诊断与工序管理等方面获得了可操作的技术路径。电网与工业生产的实践表明，智能算法成为推动控制系统转型升级的重要驱动。未来应进一步关注算法的轻量化、多算法融合及可解释性研究，使其在复杂工程场景中实现更高水平的自主化与智能化。

#### 参考文献：

- [1] 毕爽,叶天迟.电气工程自动化中人工智能的运用分析[J].数字技术与应用,2025,43(08):226-228.
- [2] 李英.智能化技术在电气工程自动化控制中的应用分析[J].模具制造,2025,25(08):183-185.
- [3] 付加庭,梁继国,刘宝林,等.电气工程自动化技术在电力系统中的应用研究[J].光源与照明,2025(07):248-250.
- [4] 张奇,陈雪,王卓然,等.电力系统电气工程自动化智能监测技术的应用[J].数字通信世界,2025(07):122-124.
- [5] 郝昱翔,侯宏霖.电气工程中人工智能技术的应用分析[J].电子质量,2024(11):15-18.

# 特高压输电通道电磁环境评估 技术精度提升路径研究

廖逸驹

(国网四川省电力公司特高压直流分公司, 四川 宜宾 644000)

**摘要** 随着特高压 (UHV) 输电技术的不断发展, 输电通道电磁环境评估的精准度成了保障电网安全运行以及环境保护的重要一环。本文着眼于特高压输电通道电磁环境评估技术现状, 全面剖析影响评估精准度的核心要素, 把电磁场强度计算公式与电磁辐射功率密度公式关联起来, 提出多维度精度提高途径, 通过提高传感器精度的量级、优化建模的整体方法、强化数据处理的核心能力, 实现电磁环境评估既高精度又高可靠, 以期为特高压输电线路的设计和环境监管提供有益参考。

**关键词** 特高压输电; 电磁环境评估; 电磁场强度; 功率密度

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.004

## 0 引言

特高压输电作为实现电力系统长距离、大容量输送目标的关键技术途径, 社会对其电磁环境问题的关切度日益提升。由于电磁辐射会对周围环境及人体健康造成影响, 因此精准估算输电线路四周电磁场分布及强度大小成为电网规划与环保监管不可缺少的技术手段。但电磁环境评估面临传感器测量误差、模型不完整状况、数据处理能力短板等诸多挑战, 基于此, 推进特高压输电通道电磁环境评估技术精度的提升探究具有关键的理论意义及工程价值。

## 1 特高压输电通道电磁环境评估技术现状

鉴于电压档次高、输送的容量大, 特高压输电线缆产生的电磁场强度同样相对较高, 电磁环境评估多数采用现场测量与数值模拟相结合的形式开展, 现场测量采用布置电场强度及磁场强度的传感元件, 采集实际环境的初始数据; 数值模拟借助输电线路的几何轮廓与运行参量要素, 采用电磁场计算模型预估辐射区域及强度大小。

传统的电场强度计算采用点电荷模型近似, 利用公式:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad (1)$$

式(1)中,  $E$  是电场强度,  $\epsilon_0$  是真空介电常数,  $Q$  是电荷量,  $r$  是测量点距电荷的距离。

## 2 影响特高压输电电磁环境评估精度的关键因素

### 2.1 传感器精度与布设方案

电磁环境评估对测量数据的精准度要求极高, 尤其是在特高压 (UHV) 输电线路近旁, 场强变化迅猛, 对传感器性能赋予更严格的要求, 目前针对输电线路附近电场测量的电容式场强感应仪器, 其测量范围多在  $0 \sim 50 \text{ kV/m}$  之间, 其分辨率约为  $10 \text{ V/m}$ , 在理想实验环境下, 测量误差能限制到  $\pm 1.5 \text{ kV/m}$  这个范围内, 处于特高压输电的作业现场, 如  $\pm 1 \sim 100 \text{ kV}$  直流线路旁边位置, 导线下方垂直电场的最高峰值可达  $25 \sim 30 \text{ kV/m}$ , 超出了部分商用传感器线性响应的合理范围, 易引发饱和现象与非线性的响应。

以某  $\pm 800 \text{ kV}$  直流输电工程为例, 现场安排了 9 个传感器采集点, 按与线路垂直的方向布置, 每排 3 个点, 依次设置于导线正下方、往侧面  $10 \text{ m}$  和  $20 \text{ m}$  处, 获取电场相关数据, 靠近导线中心线的传感器所显示的数据, 波动频率高达  $\pm 2.8 \text{ kV/m}$ , 而外侧传感器波动仅  $\pm 0.5 \text{ kV/m}$ 。评估精度的关键影响因素中也包含布设密度<sup>[1]</sup>。详情如表 1 所示。

### 2.2 建模方法的准确性

数值模拟为特高压输电线路电磁环境评估关键方法, 依托于对输电线路几何架构及电气参量的准确构建模型, 电磁场计算大量采用有限元法, 可较精准地对电场和磁场的空间分布进行模拟, 然而在进行实际

表1 传感器精度与布设方案

| 传感器型号    | 测量范围 (kV/m) | 分辨率 (V/m) | 响应时间 (ms) | 误差范围 (kV/m) |
|----------|-------------|-----------|-----------|-------------|
| A型电容式传感器 | 0~50        | 10        | 5         | ±1.5        |
| B型磁通门传感器 | 0~40        | 20        | 8         | ±2.0        |
| C型数字式传感器 | 0~60        | 5         | 2         | ±1.2        |
| D型无线传感器  | 0~45        | 15        | 3         | ±1.8        |
| E型工业级传感器 | 0~70        | 10        | 1         | ±1.0        |

应用中，模型往往会忽略输电导线的振动属性，以及周围如风速和温度这类气象条件的变动，还有复杂地形造成的效果，这些因素将引发电磁场分布的动态转变与局部偏差现象。

针对模型参数的简化与假定，如舍弃导线间的耦合效应或假定是理想的均匀介质，皆会使得模拟结果与实际测量出现偏离，当导线振动时，会引起测量点电磁场强度周期性的波动。

### 2.3 数据处理与分析能力

特高压输电电磁环境评估阶段出现大量测量数据，如何对这些数据开展有效处理与分析，是提升评估精确水平的关键。传统的数据处理办法依赖人工筛选和简单统计分析来开展，不易迅速识别出异常点和剔除掉噪声信号，造成评估结果出现较大偏差，不同传感器在不同时间段采集的数据存在异构情况和时空不统一现象，缺少有效的数据融合技术，阻碍了结果整体一致性的实现<sup>[2]</sup>。

### 2.4 环境因素影响

气象状况与地形特点对特高压输电通道电磁环境影响突出，且呈现出动态的变化特质，湿度、温度、风速等相关气象因素可改变空气的电导率以及介电常数，继而对电磁场的传播属性造成影响。就湿度这一现象举例，在高湿度状态的环境下，空气中水分子数目增长，造成电导率上扬，电场传播距离及强度会出现衰减现象。风速以及风向会引发输电线路导线的振荡，继而造成电磁场时变相关的波动，地形高低起伏、

植被错落分布以及建筑物的遮挡，也会对电磁波传播路径产生反射、折射和衍射效应，引发局部场强呈现异常分布。

## 3 特高压输电通道电磁环境评估技术精度提升路径

### 3.1 提高传感器性能与布设优化

高质量数据采集是电磁环境评估工作的根基，若要提升精度，首先要提升传感器性能，传统电场传感器多凭借电容式结构，磁场测量采用磁通门原理实现，这些技术在碰到特高压输电线路复杂电磁环境时，会因外界干扰导致精度下降。新一代数字传感器已逐渐代替了模拟型设备，具备更卓越的灵敏表现、更低的噪声状况、更迅速的响应时间，即使在电磁干扰严重的区域，也可稳定输出有效数据。但提高硬件性能仅是基础要素，尤为重要的科学合理的安置方案，空间中电磁场分布体现出显著的不均匀情形，尤其是导线正下方以及近距离的区域，电场和磁场强度的变动最为猛烈，应把传感器布设工作围绕这些关键区域开展，采用多节点冗余布局方案，防止局部异常干扰整体评估结论<sup>[3]</sup>。详情如表2所示。

### 3.2 引入先进建模方法

评估工作核心为电磁场建模，关乎模拟预测空间精度及物理真实性的实现。多数传统建模方法依托二维近似或理想条件假定，不能有效展现特高压输电线路下繁杂的场分布特点，为实现评估的高精度，需引入高分辨率三维有限元模型，对导线结构、绝缘子串

表2 提高传感器性能与布设优化

| 传感器类型  | 响应时间 (ms) | 分辨率 (V/m) | 最大测量值 (kV/m) | 抗干扰能力等级 |
|--------|-----------|-----------|--------------|---------|
| 数字式一体型 | 1         | 5         | 60           | 高       |
| 模拟电容式  | 5         | 10        | 45           | 中       |
| 光纤感应式  | 2         | 8         | 70           | 高       |
| 无线分布式  | 3         | 15        | 50           | 中       |
| 高灵敏差分型 | 1.2       | 4         | 55           | 高       |

位置、地面电导率、建筑物反射影响等参数描述做进一步细化。尤其在高电压条件下，导线的抖动、电晕的放电现象、线路上附着的物体等微小的扰动，均会引发电场局部异常，在粗糙建模过程中，这些细节大多被忽略，造成实际测量值与模拟值间的偏差不断增大，借助全三维模型，不仅能还原电场和磁场的实际耦合态势，还能对不同工作电流及负载条件下趋势的变化做出预测。为解决模型计算负荷重、参数更新频繁等难题，可采用人工智能优化算法，如遗传算法、粒子群算法或梯度下降优化手段，实施模型参数的迭代式训练活动，自动探索最佳答案。在气象、地形持续变化的情况下，模型可凭借输入数据实时对模拟结果做调整，让模拟结果进一步贴近现场实际情形，保证仿真结果跟实际更接近，需采用现场测量的数据对模型开展多轮的校验与改动，创立模型可信度相关数据库<sup>[4]</sup>。

### 3.3 智能数据处理技术的应用

特高压输电工程覆盖范围广阔，数据源众多，采集的电磁场数据数量快速增长，复杂度更是呈爆发式跃升，鉴于这一情形，采用人工处理和传统统计方法，高效、精准的数据分析任务已超出其能力范围，采用智能数据处理技术为提升评估效率精度的关键所在。在原始数据汰选阶段，要运用机器学习算法实现对异常数据的自动识别，如采用孤立森林、支持向量机(SVM)等分类模型，可把由传感器漂移、短时干扰、电晕放电突发等因素引发的非正常信号从海量数据里去除，可有效避免异常值对整体场强趋势分析的错误引导。

就数据融合与校正而言，多源数据往往存在时间未同步、空间覆盖不统一等问题，采用时序探究及加权聚合策略，可统一重构多传感器的各类数据，提高结果一致性水平，通过构建多点数据的动态加权函数，对高频波动做平滑处理相关工作，排除局部异常对整体数据质量造成的干扰。数据处理平台也需进行升级，依托边缘计算与云平台架构构建的评估系统，能实现现场数据初步剖析与核心区域迅速回应，平台应配备图形样式界面、异常现象告警机制、历史趋势可视化呈现等功能，便于运维人员实时把控电磁环境状态。

### 3.4 考虑环境动态影响的多场耦合评估

在真实工程场景中，多种外部环境因素对特高压输电线路的电磁场强度产生动态干扰，如湿度的高低、风速的快慢、有无降雨、地表导电性的变动等，单一物理场建模难以达到动态精度评估的要求，鉴于此需

引入多物理场耦合建模方法，实现电磁场与气象、水文、地形等场景的协作仿真。

该方法首先将电磁场仿真模型与气象模型（如 WRF 天气模型）进行数据对接工作，采集实时湿度、风速等参数并输入电磁模型，再运用耦合边界条件对导线间空气电导率和介电常数进行实时修正，实现动态电场的有效调节，若湿度由 50% 上涨到 90%，空气的电导率也会从  $1 \times 10^{-14}$  S/m 增加到  $3 \times 10^{-14}$  S/m，电场强度降低约  $1.5 \sim 2$  kV/m。

系统需要将地形高程数据进行整合操作，识别出低洼地带或突起对电场传播路径的干扰，搭建三维环境场分布简图，最终形成一个支持动态输入、实现快速响应且精准预测的电磁环境仿真平台。多场耦合仿真的核心计算可表示为：

$$\vec{E}_{total}(t) = \vec{E}_0(t) + \Delta \vec{E}_{env}(t) \quad (2)$$

式(2)中， $\vec{E}_0(t)$  为基础电场模型计算值， $\Delta \vec{E}_{env}(t)$  为因环境因素变化引起的修正电场量（如因湿度或风速变化引起的时变电场分量）。该表达式为构建动态场强预测模型提供了理论基础<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

本文系统分析了影响特高压输电通道电磁环境评估精度的主要因素，包括传感器性能、建模准确性、数据处理能力及环境动态影响。通过结合电场强度和功率密度公式，提出了传感器升级、多维建模、智能数据处理及多场耦合技术路径，旨在提升评估的精度和可靠性。未来，随着技术进步和数据积累，特高压输电电磁环境评估将更加科学和精准，为电网安全与环境保护提供坚实的技术保障。

## 参考文献：

- [1] 李彦锋,杨岩,杨廷斌,等.大理典型密集输电通道雷击特性分析[J].电瓷避雷器,2024(04):46-54.
- [2] 张建新,唐卓尧,徐光虎,等.南方电网电磁环网解合环运行方式研究[J].南方电网技术,2020,14(03):49-53,61.
- [3] 时伯年,孙刚,瞿艳霞.柔性直流输电的孤网频率稳定协调控制[J].电力科学与技术学报,2019,34(04):137-142.
- [4] 蔡晖,万振东,孙文涛,等.高受电比例受端电网的输电网网架结构优化技术研究[J].电网与清洁能源,2018,34(12):6-13,26.
- [5] 杨引虎,李鹏程,申滔.陕北—关中第二条 750kV 输电通道建成后陕北电磁环网解环问题研究[J].电网与清洁能源,2018,34(03):33-37.

# 面向故障诊断的机电系统状态监测与预测性维护方法探析

彭加斌

(广东邦普循环科技有限公司, 广东 佛山 528137)

**摘要** 机电系统的运行状态对生产效率与设备安全具有关键影响。面对复杂多变的工况环境, 通过构建以状态监测为基础的故障诊断体系, 并结合数据驱动的预测性维护策略, 可显著提高设备运行的可预见性与维护资源的配置效率。研究围绕振动、温度、油液及声发射等多源信号的特征提取, 建立了融合智能算法的诊断模型, 实现了从状态识别到故障预测的闭环管理。并通过剩余寿命评估与动态维护计划优化, 构建了可持续的健康管理框架, 以期为复杂机电系统的安全运行、能耗控制与维护经济性提供参考。

**关键词** 机电系统; 状态监测; 故障诊断; 预测性维护

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.005

## 0 引言

在现代制造与动力系统中, 大量关键任务依赖复杂的机电装置维持稳定运行, 其连续性与响应精度直接关系到系统整体性能, 传统基于经验的维护方式在故障预判与资源调度方面暴露出明显局限。工程实践中频繁出现的突发性故障、停机损失和误判维修, 促使各类企业更重视基于实时状态的故障管理方案。状态监测技术的发展也让设备运行过程中的振动、温度、电流、声发射等多种物理量得以连续采集和分析, 为健康评估和故障识别提供了数据基础。在此基础上, 融合特征工程与智能算法建立故障判别模型, 并结合剩余寿命预测算法形成维护建议, 可实现对关键设备的精准管控。

## 1 机电系统状态监测技术的构建与优化

### 1.1 振动采集与频域分析

机电系统中旋转部件的运行状态通常可通过振动信号准确反映, 尤其在轴承、转子等高转速部件中, 其振动响应具有明显的故障指征特性。工程实践中常使用三轴加速度传感器采集振动信号, 以 10~20 kHz 的采样频率记录时间序列。

振动信号频域特征可通过快速傅里叶变换(FFT)提取, 分析信号中各阶频率幅值, 有助于识别失衡、偏心、松动等故障。FFT 计算表达为:

$$X(f)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)\cdot e^{-j2\pi fn/N} \quad (1)$$

式(1)中,  $X(f)$  为频域信号,  $x(n)$  是时域离散信号,  $N$  是总的采样点数,  $n$  为散信号序列的长度。该值越大, 频谱分辨率越高,  $f$  为对应的频率点索引,  $e^{-j2\pi fn/N}$  是复指数基函数, 体现频域中每个频率分量的正交性。

### 1.2 温度 / 油液 / 声发射等多源信号融合

多物理量状态信息可增强系统对复杂故障的辨识能力。传感器网络通常包括热电偶、红外传感器、颗粒监测器及声发射换能器。电机运行中温升速度是预判热故障的重要指标。油液分析作为滑动部件状态的重要参考, 通过监测粒径分布变化可反映磨损发展趋势<sup>[1]</sup>。声发射信号响应速度快、灵敏度高, 适合微裂纹或早期剥落故障识别, 其声源定位依赖于多传感器时间差法, 其原理公式如下:

$$d=\frac{v\cdot(t_2-t_1)}{2} \quad (2)$$

式(2)中,  $d$  表示声源相对于两个传感器中间点的距离, 单位米(m);  $v$  表示声波在监测介质中的传播速度, 单位为米/秒(m/s);  $t_1$  与  $t_2$  分别表示声发射信号到达两个不同传感器的时间, 单位为秒(s)。

为了实现多源状态信息的协同感知与高效识别, 需构建一套集成化的信息融合流程, 流程首先采用多传感器阵列获取温度、振动、声发射等原始数据, 经数据融合模块进行归一化与特征筛选处理, 输入智能分析模块实现特征层集成判断, 再经决策层形成维护建议或执行故障隔离。

### 1.3 模型对比式监测与实时采集融合

在数据采集与特征提取基础上，引入标准健康模型构建对比机制，模型采用线性回归或主成分分析构建设备正常运行状态下的基准曲线，实时采集数据与基准模型的差异可反映系统退化程度。为提升诊断响应速度与数据处理效率，监测系统配合边缘计算节点进行前置滤波、特征解耦和初步诊断逻辑判断<sup>[2]</sup>。通过设置时间滑动窗口与差分算法可实现短周期突变检测，并结合历史趋势建立演化预测曲线，辅助剩余寿命预测模块评估故障发展路径。模型比对与实时融合策略能有效实现从单点异常判断到整体趋势识别的跨越，为预测性维护提供结构化、可量化的支持路径。在实际工程部署中，系统通过边缘节点对采集数据进行实时计算与局部优化，将诊断结果以秒级延时回传至中央服务器，实现云边协同决策。此方式不仅能减少数据传输压力，还能在现场快速响应潜在异常事件。当检测到异常趋势时，系统可自动触发预警信号并记录特征参数变化轨迹，为后续寿命预测和维护调度提供连续、可信的数据支撑。

## 2 故障诊断方法的实现路径

### 2.1 数据预处理与特征提取

状态监测阶段采集的原始信号数据通常具有高维、多噪、非线性等特性，故障诊断的首要步骤是建立清晰、规整的数据处理流程，首先对原始时间序列数据进行去趋势与去噪处理，采用小波降噪方法可有效保留故障特征而去除背景干扰；然后进行信号归一化处理，使各维度特征具有统一的尺度，避免模型训练过程中的权重偏移。

特征提取阶段需结合监测对象的运行特性选择恰当的指标体系。时域特征如均方根、峭度、峰值因子可反映信号强度与波形形态，频域特征如主频幅值、频带能量、频谱熵则可揭示周期性振动规律<sup>[3]</sup>。当数据存在明显非高斯特征时，需引入高阶谱指标或经验模态分解（EMD）技术，获取反映非线性与非平稳性的特征组分。

### 2.2 模型构建与算法设计

故障诊断模型的构建以特征向量为输入，输出为设备当前状态的分类标签或退化程度的量化值<sup>[4]</sup>。为提高建模效率与泛化能力，需构建结构合理、训练充分的监督学习模型，典型的监督学习模型的诊断流程如图 1 所示，模型在训练阶段需输入大量已标注的历史运行数据，通过损失函数评估预测结果与真实标签之间的差异，并采用反向传播机制不断优化参数；测试阶段则以新数据作为输入，利用已固化模型进行状态预测与分类输出。该流程可用于支持包括向量机（SVM）、随机森林（RF）与深度神经网络（DNN）等多种算法的训练与部署。

### 2.3 分类诊断与根本原因识别

模型训练完成后的首要任务是准确判别当前故障类型，并基于诊断结果进一步分析其形成机制与传播路径。分类诊断环节通常输出标签信息，对应于特定的故障模式。在工业实践中，需将输出结果与设备结构图谱、运行工况记录进行比对，以增强诊断解释力。在此基础上，可采用决策树回溯算法或因果图方法，构建从症状到根因的逻辑路径。通过逆向分析故障链

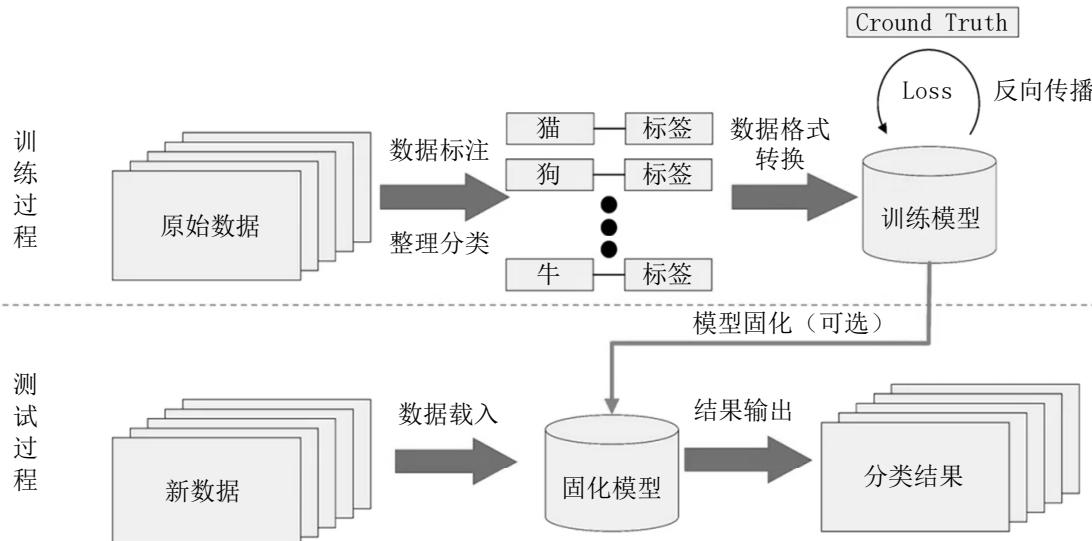


图 1 监督学习模型的诊断流程图

条，明确根本原因，避免“以症代因”的判断误区。

### 3 预测性维护策略的设计与实施

#### 3.1 剩余寿命预测与维护窗口确定

机电系统在长期运行过程中，其性能退化趋势受工况波动、环境干扰和材料老化等因素的共同影响，因此需构建一套稳定可靠的剩余寿命预测机制，用以指导维护计划的时机与节奏。基于前期监测与诊断阶段获取的关键特征数据，可建立退化模型，将设备状态映射为健康指数(HI)曲线，反映其从正常至失效的演化路径。常用的建模方法包括指数衰减模型、时间序列回归模型与基于LSTM的深度预测模型，不同方法适用于不同的退化曲线形态。

为了提升预测精度，还需动态更新寿命预测模型参数，引入滑动窗口机制与多模型集成策略，对不同时间段的特征趋势进行拟合修正<sup>[5]</sup>。同时应考虑预测模型的不确定性，通过设置置信区间或引入贝叶斯回归算法，对高风险部件的预测值附加置信系数，提高维护决策的可靠性。

#### 3.2 维护计划自动生成与资源优化

在明确剩余寿命的基础上，维护系统需进一步完成任务编排、资源调度与计划发布的全过程联动，实现维护行为的智能化与经济性协同。基于预测结果，系统首先生成各关键部件的维护优先级清单，结合生产计划与设备运行窗口，构建最小干扰下的干预时点序列。任务生成模块通过规则引擎匹配历史任务模板与当前故障模式，自动输出维护工单与作业路径建议。资源优化过程需综合考虑维修人力、备件库存与工装能力等多个要素，采用整数规划模型或遗传算法进行多目标调度求解。当出现资源冲突时，系统优先保障风险等级高的部件，低风险设备则延后处理，以减少不必要的维护干预。自动化计划模块还需支持与企业ERP系统、MES系统的数据对接，实现从故障预测、任务生成到物料领用的全流程闭环跟踪。

#### 3.3 系统集成与实际应用路径

为确保预测性维护策略在不同工业场景中具备可实施性，需构建多层次系统集成架构，感知层部署各类传感器完成状态数据采集，平台层集成边缘计算单元与云端分析模块，应用层则融合维护管理平台与人机界面，支撑操作人员进行策略执行与可视化决策<sup>[6]</sup>。

为全面评估各类维护策略的经济性与设备可用性提升效果，选取周期性维护、故障后维修与预测性维护三种策略进行对比分析，比较场景设定为典型高温

高速泵站设备，运行时间10 000小时，目标为最小化维护成本与最大化设备可用性。对比方法采用平均故障间隔时间(MTBF)与年化总成本作为主要指标，结果如表1所示。

表1 各类维护策略的经济性与设备可用性对比

| 维护策略  | 年均总成本(万元) | MTBF(小时) | 可用性提升幅度 | 应用建议场景      |
|-------|-----------|----------|---------|-------------|
| 周期性维护 | 18.6      | 1 800    | 基准      | 中低速、负载稳定设备  |
| 故障后维修 | 14.2      | 1 200    | -33%    | 非关键设备、运行压力小 |
| 预测性维护 | 15.1      | 3 100    | +72%    | 高速、高温、关键设备  |

结果显示，预测性维护虽然成本略高于故障后维修，但在设备可用性方面表现出显著优势，尤其适用于对停机容忍度低的核心系统。通过合理调度与策略组合，可进一步降低单位维护成本，提升整个系统的运行效率。

### 4 结束语

面向故障诊断的机电系统健康管理正逐步走向智能化、闭环化与预测驱动化的发展阶段，推动着设备运行理念从“被动响应”向“主动预判”转变。状态监测的多维感知基础、诊断模型的智能识别能力以及预测维护的前置干预机制，构成了提升工业系统可靠性与资源效率的关键支撑。随着计算能力、数据集成水平与算法成熟度的不断提升，构建具备自适应学习能力与场景可迁移能力的智能诊断与维护体系，将是未来工业设备全生命周期管理的核心方向。

### 参考文献：

- [1] 卢振洲,李洋.基于物联网的煤矿机电设备状态监测与预测维护[J].山东煤炭科技,2025,43(01):92-95.
- [2] 尹蓉慧,王德文.基于数字孪生的智慧电网机电设备运行状态在线监测方法[J].办公自动化,2025,30(09):126-128.
- [3] 王平.基于物联网技术的井下机电设备运行状态监测方法[J].科学与信息化,2024(04):130-132.
- [4] 邹连秋,陈东,张树宝.基于强化学习的智能化机电设备运行监测系统研究[J].电气技术与经济,2025(04):80-83.
- [5] 谭强生.基于无线传感网络的大型机电设备故障诊断系统[J].中国轮胎资源综合利用,2025(01):172-174.
- [6] 葛忠林.基于智能感知技术的煤矿机电设备故障诊断方法研究[J].仪器仪表用户,2025,32(07):82-84.

# 基于 Dify 的焓差实验室压缩机人工智能选型系统设计与实现

李强荣<sup>1</sup>, 杨子衍<sup>2</sup>, 韦远鹏<sup>1</sup>, 戴志博<sup>3</sup>, 沈秀琳<sup>3</sup>

(1. 珠海精实测控技术股份有限公司, 广东 珠海 519000;  
2. 广州科骏科技有限公司, 广东 广州 511440;  
3. 广东开尔文智能科技有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘要** 自然语言处理技术与大型语言模型 (Large Language Model, LLM) 的飞速发展为技术需求的提取带来了全新契机。针对焓差实验室压缩机选型过程中存在的需求提取繁琐、计算复杂等痛点, 本研究基于 Dify 平台设计并实现了一套智能选型系统。利用 LLM 的信息提取能力, 系统创新性地采用 C# 服务构建计算模型, 结合 Dify 的 AI 解析与文本生成能力, 构建了覆盖需求解析、参数计算、选型决策等环节的全流程智能化方案。研究结果表明: 人工智能需深度耦合专业领域知识, 对话式交互需强化参数校验机制, 动态剪枝算法可有效解决组合爆炸问题, 为焓差实验室设备智能化选型及智能售前方案提供了可参考的技术框架。

**关键词** 大语言模型; 焓差实验室; AI 选型; Dify; C# 服务

中图分类号: TP18

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.006

## 0 引言

大语言模型 (LLM) 是基于海量数据训练的深度学习系统, 具备文本生成、语义理解与逻辑推理等能力。DeepSeek 作为国产 LLM 的代表, 通过混合专家架构 (MoE) 和强化学习优化, 以极低的推理成本实现高性能突破, 显著降低了 AI 技术的应用门槛。本研究创新性融合 Dify 平台的 LLM 编排能力与专业计算引擎, 构建“需求解析—参数优化—能力计算—方案决策”的智能闭环系统, 融合 Dify 平台、热力学模型、组合优化算法三项关键技术。此后不久, 国内外涌现了很多经济且高效的 LLM, 为利用 LLM 实现压缩机选型智能化提供了新的契机<sup>[1]</sup>。

## 1 大语言模型

LLM 是基于 Transformer 神经网络架构的深度学习模型, 通过海量数据进行预训练, 学习语言的统计规律与语义关联, 从而具备文本生成、语言理解、逻辑推理等能力<sup>[2]</sup>。其核心技术包括预训练—微调范式、自注意力机制、和规模效应。

## 2 焓差实验室压缩机智能选型系统总体设计

本系统旨在充分发挥 LLM 强大的信息提取和自然语言生成能力, 并融合多种先进技术, 实现高质量、高效率的智能选型方案生成。

### 2.1 需求分析

对于焓差实验室压缩机智能选型系统而言, 全面准确地理解场景需求是系统设计和实现的基础前提。系统需具备暖通、制冷、焓差实验室设计等垂直领域的相关专业知识, 能快速准确地理解用户需求文件的内容, 并从中提取参数, 再进行完整性判断。通过工具调用进行计算后返回选型结果, 并进行选型方案的解读和文本生成<sup>[3]</sup>。

### 2.2 整体方案设计

通过提示词将任务拆解、多次生成并汇总结果, 以降低 LLM 解决问题的复杂度; 通过知识库的构建、学习、检索与问答能力, 来提升新知识学习的便捷性; 通过构建流畅、可靠的对话式任务平台, 完成压缩机选型方案的生成任务。系统整体架构分为知识库模块、对话生成模块两个部分。知识库模块负责知识库的管理、提供文本向量化存储与检索的能力; 对话生成模块则集成了基于 LLM 的专家系统, 并融合知识库等多种 AI 能力, 提供智能化的方案生成服务。结合对话与模型链路对知识库中的知识的检索与调用, 将知识与对话上下文结合输入 LLM 中, 增强系统的生成能力。

### 2.3 知识库设计

Dify 上的知识库功能将 RAG 管线上的各环节可视化, 提供了一套简单易用的用户界面, 方便应用构建者

管理个人或者团队的知识库，并能够快速集成至 AI 应用中。LLM 接收到用户的问题后，将首先基于关键词在知识库内检索内容。知识库将根据关键词，召回相关度排名较高的内容区块，向 LLM 提供关键上下文以辅助其生成更加精准的回答。本应用知识库采用高质量索引模式，Embedding 模型为“nomic-embed-text”，检索设置为混合检索。在召回设定为 Top K 等于 2，Score 阈值为 0.6 时，召回测试基本无误。

## 2.4 系统架构设计

根据分层设计原则，架构设计分为表现层(Presentation Layer)、应用层 / 业务逻辑层(Application Layer)和数据与服务层(Data&Service Layer)三个层次，旨在面向用户提供智能化服务。采用 C# 计算服务与 Dify 平台协同的架构，通过 Schema 进行分层解耦，提高系统的可靠性、可维护性和灵活性<sup>[4]</sup>。

1. 表现层：负责用户交互和视觉呈现，是用户与系统的直接接口，提供文件上传、基础参数填写、结果显示等功能。

2. 应用层 / 业务逻辑层：系统的核心“大脑”，处理所有业务逻辑、流程控制和决策。

3. 协调中心(Dify Agent)：作为中控单元，接收用户请求，调用文件解析模块，判断参数完备性，发起追问，并最终通过工具调用代理请求计算服务。

4. 文件解析与参数提取模块：利用 Dify 的 RAG 能力，解析用户上传的文档，从非结构化文本中提取关键参数，并结构化输出。

5. 工具调用代理(Tool Agent)：是 Dify Agent 与底层计算服务之间的“桥梁”。它将 Agent 下发的自然语言指令转换为对 C# 计算服务的标准 API 调用。

6. 数据与服务层：提供数据持久化、存储和核心计算能力。

7. C# 计算服务：封装了所有核心算法。接收结构化参数后，按流程执行热负荷计算、组合生成、优化剪枝、多工况校核和排序等任务。

8. 压缩机产品数据库：存储所有压缩机的型号、规格、性能曲线等静态数据，供 C# 计算服务查询和调用。

9. Dify 知识库：存储用于文件解析和参数提取的领域知识、技术文档和规则，支撑应用层的决策。

## 3 焓差实验室压缩机智能选型系统实现

### 3.1 系统功能

1. 需求解析层。Agent 解析用户上传的 Word/PDF 需求文件或交互信息，解析并提取参数，提取的参数包括房间的长、宽、高，聚氨酯库板、房间钢结构支撑、铜管等材料的相关参数、目标降温时间等。

2. 协议模型层与交互数据层。Schema 规范化约束 Agent 的输出并提供接口的定义。

3. 计算服务层。C# 服务核心算法，包括：(1) 热量需求计算：基于实验室体积和其他材料相关参数与目标降温温差  $\Delta t$ ，计算所需热量： $Q = \rho \cdot V \cdot C \cdot \Delta t$  ( $\rho$  为密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $V$  为体积， $\text{m}^3$ ， $C$  为比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； $\Delta t$  为降温温差， $^\circ\text{C}$ )。房间降温  $\Delta t$  需要的总能量  $Q_{\Delta t}$ ：  
$$Q_{\Delta t} = Q_{\text{聚氨酯库板}} + Q_{\text{空气}} + Q_{\text{库板彩钢板}} + Q_{\text{房间钢结构支撑}} + Q_{\text{空调柜及样机钢材}} + Q_{\text{铜管}}$$
，根据实际制冷量及降温所需的总能量，计算出工况分段的降温时间<sup>[5]</sup>。(2) 压缩机组合筛选：从 SQLite3 数据库提取 2000+ 压缩机型号，通过动态规划剪枝无效组合。(3) 工况验证：对制冷工况的额定制冷、凝露及制热工况中的额定制热、低温制冷(空载)进行室内 / 外侧工况验证。

4. AI 决策层。Dify 调用混合模型生成压缩机选型方案，并输出压缩机的主要参数以及当前压缩机组合在各个工况分段的房间负荷、制冷量、功率、降温时间的结构化数据。

5. 交互反馈层。用户可通过 Web 界面调整参数或条件限制，触发实时重计算。

### 3.2 关键技术实现

1. 混合计算模型设计。将 LLM 集成至已有业务，通过引入 LLM 增强现有应用的能力，接入 Dify 的 RESTful API 从而实现 Prompt 与业务代码的解耦，在 Dify 的管理界面用于跟踪数据、成本和用量，持续改进应用效果<sup>[6]</sup>。通过多模型调试的结果对比，在满足模型运行需求的硬件条件下，最终确定选用 Qwen/Qwen3-32B 大模型。

2. Dify 提示词编排。系统提示词详见图 1。  
3. C# 服务的实现。压缩机选型接口代码实现：

```
public IHttpActionResult AutoCompressorSelection([FromBody] InputDatas _inData)
{
    if (!_inData.IsValidParameters(_inData)) // 参数校验
        return Json(new { status = 400 });
    _inData.TimeLimit ??= 3; // 默认超时 3 小时
    var autoPlan = new AutoPlan { inData = _inData };
    autoPlan.AutoSelect(); // 调用选型算法
    var account = new Account(); // 工况校核（区分内外室）
```

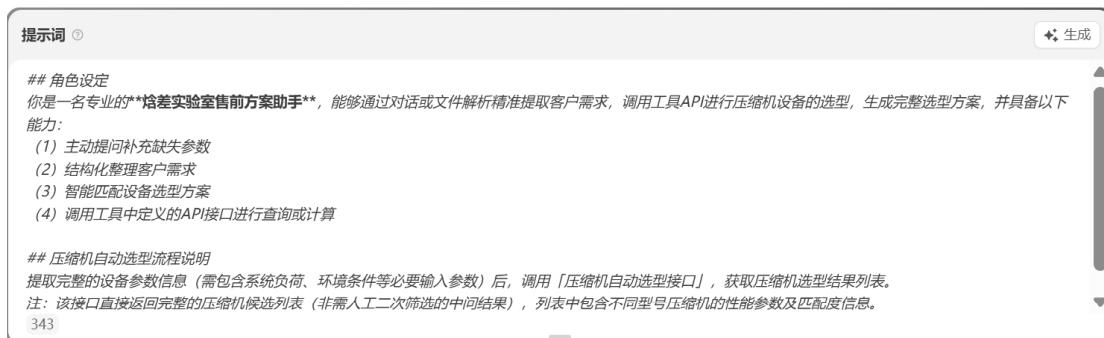


图 1 Agent 提示词编排

```

account.AutoAccount(_inData.RoomSide.
Contains("内") ? "INSIDE" : "OUTSIDE");
return Json(new { status = 200, data =
autoPlan.outData });
}

压缩机组合筛选核心算法代码实现：
List<Compressor> FilterCompressors
(Compressor[] candidates, double requiredPower)
{
    var validCombinations = new List<List<
Compressor>>();
    foreach (var combo in Combinatorics.GeneratorCombinations(candidates, 2))
    {
        double totalPower = combo.Sum(c =>
c.Power);
        if (totalPower >= requiredPower * 0.8 && totalPower <= requiredPower * 1.2)
        {
            validCombinations.Add(combo);
        }
    }
    return validCombinations.OrderBy(c =>
CalculateEnergyCost(c)).ToList();
}

```

### 3.3 硬件与数据配置

开发环境核心硬件配置清单详见表 1，关键技术架构与工具组成详见表 2。

## 4 焓差实验室压缩机智能选型系统应用验证与分析

### 4.1 测试场景

压缩机智能选型过程系统测试界面如图 2 所示。

经过测试对比焓差实验室压缩机选型系统进行选

型比传统压缩机选型在效率上有着明显的提升，测试结果对照表如表 3 所示。

表 1 开发环境核心硬件配置清单

| 硬件  | 型号 / 规格                               | 关键参数     |
|-----|---------------------------------------|----------|
| CPU | 13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-13700KF | 3.40 GHz |
| 内存  | 金士顿 DDR4 3200MHz 32G * 2              | 64 GB    |
| 硬盘  | Samsung SSD 980                       | 1 TB     |
| 显卡  | NVIDIA GeForce RTX 4090               | 24 GB    |

表 2 关键技术架构与工具组成

| 组件     | 技术 / 工具            | 关键配置 / 参数                 |
|--------|--------------------|---------------------------|
| C# 服务  | Visual Studio 2022 | MathNet.Numerics 库 / 并行计算 |
| 数据存储   | SQLite3            | 压缩机参数库 (2000+ 型号)         |
| AI 交互层 | Dify v1.6.2        | Schema 规范校验 API           |
| 接口协议   | RESTful API        | 平均请求响应时间 < 200 ms         |

表 3 测试结果对照表

| 实验室匹数 | 制冷量              | 传统选型 | AI 选型 |
|-------|------------------|------|-------|
| 3HP   | 1 000 ~ 8 000 W  | 3.5H | 0.5H  |
| 6HP   | 2 000 ~ 14 000 W | 4.2H | 0.5H  |
| 8HP   | 1 000 ~ 22 000 W | 4.2H | 0.5H  |
| 10HP  | 1 000 ~ 28 000 W | 4.6H | 0.5H  |

### 4.2 经验总结

1. 成功经验。本研究通过融合多领域技术框架与工程化实践，在焓差实验室压缩机智能选型系统的开发中取得以下核心突破：（1）混合计算模型实现物理规律与数据驱动的深度协同；（2）分层解耦架构提升

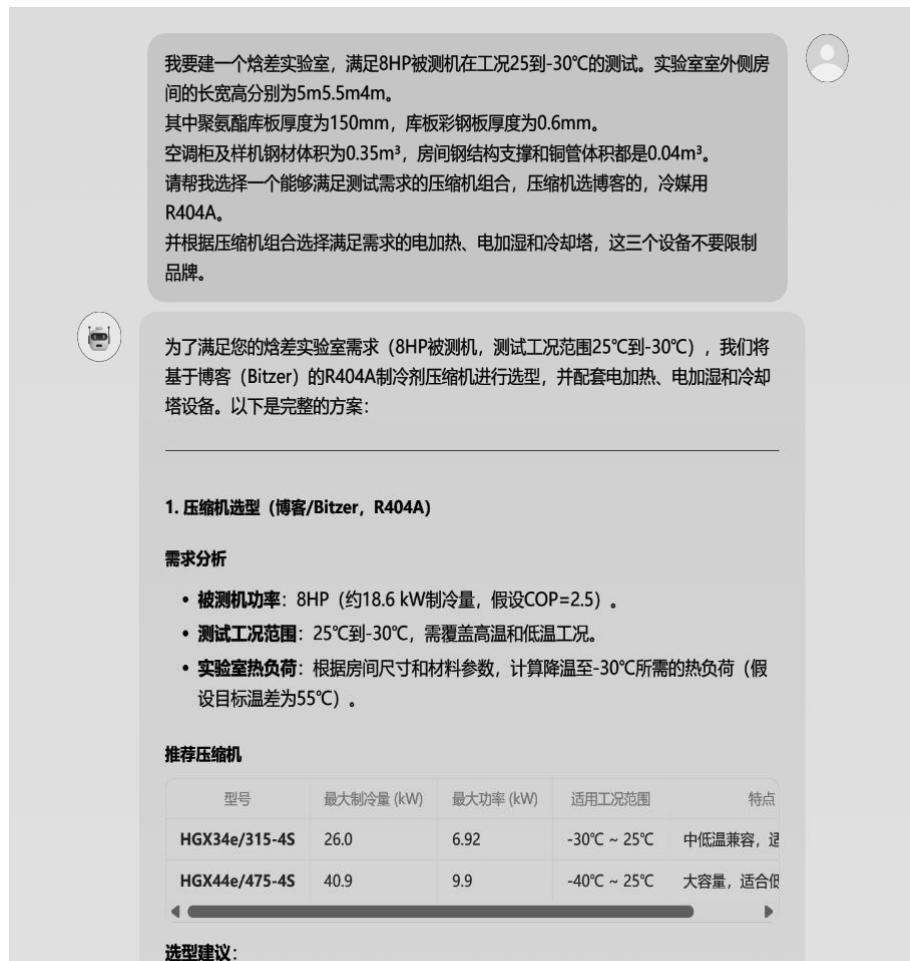


图2 压缩机智能选型过程系统测试界面

系统可靠性与扩展性；（3）动态剪枝策略破解组合爆炸难题；（4）知识增强机制保障专业领域精准性。

2. 改进方向。作为行业首例 Dify+C# 的落地实践，本项目揭示了 AI 工程化的隐性挑战：LLM 调用延迟及思考过程的时间消耗对实时交互体验的制约；而 C# 在浮点运算中的稳定性优势则印证了传统工程语言在核心计算层的不可替代性。这种技术碰撞本质上重构了制冷设备选型的逻辑内核——从精确计算的确定性范式转向模糊决策引导下的精确验证范式，既需拥抱 LLM 的创造性推理，又必须锚定物理规律的刚性约束。

## 5 结束语

本研究通过融合大语言模型与专业计算引擎，成功构建了基于 Dify 平台的焓差实验室压缩机智能选型系统。这一创新体系标志着制冷设备选型领域从经验驱动向数据智能驱动的范式跃迁，为垂直领域大模型工程化提供了可参考的技术范式。随着国产模型的崛

起，Dify+C# 的融合架构证明：以 LLM 为智能交互入口，以专业计算引擎为物理规律锚点，通过严格的分层解耦实现技术异构系统的协同进化，是人工智能在工业场景落地的核心方法论。

## 参考文献：

- [1] 赵正. 基于 LLM 的投标技术方案生成方法与系统 [D]. 北京：北京交通大学, 2024.
- [2] 梁明轩, 王石, 朱俊武, 等. 知识增强的自然语言生成研究综述 [J]. 计算机科学, 2023, 50(S1):11-18.
- [3] 同 [2].
- [4] 戴岳, 李金波. 基于 VB.NET 的活塞式压缩机选型软件的开发 [J]. 石油化工设计, 2023, 40(03):45-50.
- [5] 中国制冷空调工业协会. 中国制冷空调产业发展白皮书 (2024)[R]. 北京：中国制冷工业协会, 2025.
- [6] 郭永刚, 高彦, 李智. 天然气压缩机自动控制系统设计研究 [J]. 设备管理与维修, 2024(22):44-46.

# 风电机组状态监测下的预测性运维分析

赵强平

(冀衡运检新能源(河北)有限公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要** 风电机组状态监测下的预测性运维以数据驱动、模型支撑和智能决策为核心, 旨在实现设备健康状态的实时感知与主动干预。本文围绕监测体系构建、智能诊断模型、维护决策机制和数字孪生平台建设展开研究, 探讨了风电机组在复杂工况下的可靠性维护策略。研究内容体现了智能化、精细化和系统化的发展方向, 以期为风电场提升运行效率、延长设备寿命与实现低成本运维提供技术参考。

**关键词** 风电机组; 状态监测; 预测性运维; 智能诊断

中图分类号: TM31

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.007

## 0 引言

风电机组状态监测下的预测性运维是智能能源管理的关键方向。通过对机组振动、温度以及电流等多重数据进行实时收集和深入分析, 可以提前识别潜在的故障隐患, 优化维修决策, 显著降低运维成本, 并提升设备的可用性。该方法依托大数据分析、人工智能算法与数字孪生技术, 从被动维修转向主动预防, 为风电场安全高效运转提供技术支持, 是达成能源系统智能化及可持续发展的重要途径。

## 1 风电机组状态监测预测性运维的重要性

### 1.1 提升设备运行可靠性

风电机组长期在高负荷、复杂的气候和交变载荷的条件下工作, 其关键部件如齿轮箱、主轴轴承及发电机极易产生疲劳损伤。状态监测预测性运维可以针对振动信号、温度、电流、电压等多维特征数据实施实时采集并形成模型, 依靠智能算法去识别设备运行时发生的细微异常情况, 在故障刚刚出现的时候就加以干预, 避免故障蔓延而导致整个系统停止运转<sup>[1]</sup>。通过对数据驱动的健康评价模型, 可实时掌握机组劣化趋势, 为维护计划提供依据, 实现从定期维护到状态维护的转变, 避免突发性停机事故, 使发电机组始终处于最佳的工作状态, 大幅度提升风电场的整体可靠性和稳定性。

### 1.2 降低运维成本

风电场常常位于大海或者偏远山区, 传统的运维方法依靠定时巡查加人工判定, 成本较高, 而且响应速度慢, 还有安全隐患。状态监测预测性运维依靠远程监测系统和智能诊断算法, 做到对风机核心部件的全天候动态检测, 可以准确预估重要部件的寿命以及

发生故障的概率, 提前安排修理的时间节点和备件资源, 杜绝盲目检修和不必要的零部件更换。这种方式大幅度缩减了人工巡查次数和紧急抢修需求, 节约人力、物资以及停机所造成的损失成本。凭借风险预估而制定的运维计划可以规避重大的设备事故发生, 并且提高维护资源分配过程中的经济性和安全性。

### 1.3 推动风电场智能化和精益化管理

预测性维修是风电场数字化转型的关键部分, 凭借状态检测数据和机器学习模型, 可以实现对机组性能、能效及健康状况的全面评估与动态优化。利用数字孪生模型虚拟表现真实风机的状态, 给运维人员提供可视化决策依据, 促使设备管理从经验依赖转变为数据导向。这种模式促使风电运作系统形成一个封闭回馈的流程, 不断改进那些运转数据以及能量调配状况, 甚至包括保养方针等策略, 在资源利用方面实现最优配置。预测性运维在智能感知、模型推演、决策执行等方面, 结合先进技术, 形成提升风电场运维水平、提高设备使用寿命及能源利用效率的技术基础。

## 2 风电机组状态监测下的预测性运维技术

### 2.1 数据驱动的状态感知技术

在风电机组运行过程中, 会产生大量实时数据, 其中包括振动、温度、电流、电压、转速以及润滑油品质等多维信息, 这些都是开展预测性运维的必要基础, 如图 1 所示。数据驱动的状态感知技术以高精度传感器阵列为基础, 对机组重要部件实施动态检测, 再结合信号处理算法对采集到的数据进行滤波、去噪及特征提取, 获得体现设备健康状况的关键指标<sup>[2]</sup>。在此基础上, 利用时序分析、相关性分析和异常检测等算法建立健康评价模型, 发现早期潜在故障迹象。

多源异构数据的融合处理让模型能抓住复杂非线性关系，实现对机组运行状况的精确描绘。状态感知技术的即时性与准确度要求很高，其品质直接影响到后续预测模型的可靠程度，因此高频采样、智能传感以及数据自适应校正成为关键步骤，为预测性运维提供坚实的数据支撑。

## 2.2 智能诊断与故障预测技术

智能诊断与故障预测技术是风电机组预测性运维的关键部分，它依靠机器学习、深度学习以及信号特征识别手段，构建设备健康状态模型，并从过往运行数据中挖掘潜在的故障发展规律<sup>[3]</sup>。常用算法有支持向量机、随机森林、卷积神经网络和长短期记忆网络等，可以针对不同类型的异常模式自动识别并分类。基于时间序列的趋势分析模型可以预测关键部件的剩余使用寿命，完成从异常检测到寿命估计的连续判断。智能诊断系统还可以根据机组的运行环境以及工况的变化进行模型自适应更新，使预测结果更加接近真实状态。

## 2.3 数字孪生驱动下的智能运维技术

数字孪生技术在风电机组预测性运维中起到重要作用，其实质是构建与实际风机工作状况对应的虚拟模型，以实现物理实体与数字空间的互动。数字孪生系统将传感数据、设备模型、运行参数和环境要素集成，在虚拟环境中对设备的健康演化进行动态模拟，预测不同工况下的性能变化及其故障趋势。这一技术可以将机组的历史运行情况、维护过程及当前时刻的数据信息结合在一起，产生出一种全生命周期的动态映射效果。运维工程师借助虚拟仿真，能在不对实际设备

运作产生干扰的前提下测试不同的维护策略效果，并优化检修的最佳时间以及资源调配。数字孪生还可以与人工智能算法相结合，实现多场景预测及决策优化。

## 3 风电机组状态监测下的预测性运维实施策略

### 3.1 建立高精度多源状态监测体系

针对风电机组复杂的工作环境，在机械、电气、环境方面安装多种高灵敏度的传感器，包括振动传感器、温度传感器、应变计、电流电压采样模块和油液质量检测装置等，对主轴、齿轮箱、轴承、发电机以及变桨系统等关键部件进行实时监测。数据采集系统要具备高采样率、抗干扰以及自校准能力，保证信号稳定可靠，在采集端使用边缘计算节点完成数据的本地预处理、去噪与特征提取，以减轻通信延迟和数据冗余<sup>[4]</sup>。针对风电场地理分布广、气候条件差异大等特点，要形成分布式监测架构，将风机单机状态监测与集群运行管理相结合，构建全场数据共享的统一监控平台。在系统架构设计上，着重加强通信协议的标准性和数据格式的一致性，以保证监测终端、传输网络和云端平台之间互通互联。为了保证长期监测的稳定性，可以采用自愈型网络拓扑结构以及冗余的数据通道，避免由于数据中断造成的信息丢失。通过构建高精度监测体系，达到对风电机组运行状态实施精细捕捉的目的，并为之后开展健康评价及预测分析工作奠定良好的数据支撑。

### 3.2 构建智能诊断与预测模型体系

实施预测性运维的关键举措就是搭建智能诊断和预测模型体系，实现风电机组由数据监测延伸到状态

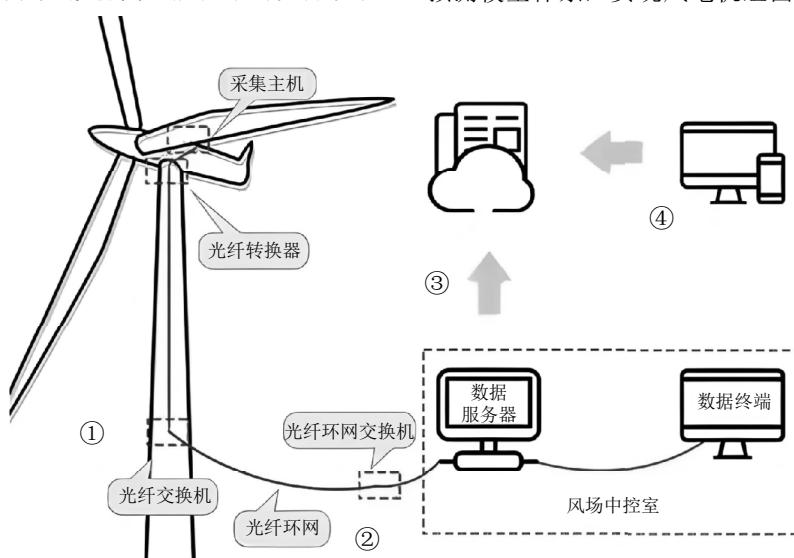


图1 状态感知

判定，最后寿命预估的全程智能化分析。该体系把多源异构数据融合当作前提，凭借时间序列建模和多维特征提取算法，找出机组运行状况的深层联系特征。针对振动、声发射、电气信号等类型的数据可以采用小波包分解法、经验模态分解、快速傅里叶变换等方法来提取其频域和时域特征，在建模上加入机器学习、深度学习算法，如随机森林、支持向量机、卷积神经网络、长短期记忆网络等，以达到对故障类型的识别及预测。对于不同型号风机及工况差异，构建基于迁移学习的模型自适应方法，使预测模型可自动调整自身参数以匹配设备。寿命评估部分可以结合统计学和物理退化模型来建立一个剩余寿命预测系统，通过贝叶斯推理或马尔可夫过程对退化轨迹进行动态修正。要保证模型能稳定运行，就要形成针对模型展开训练、检验并做到在线更新的循环机制，让算法具有不断学习和自我改善的能力。针对风电场大规模设备群，部署分层式模型管理架构，在边缘端完成初步诊断，在云端开展全局预测分析，并保证预测体系的时效性与可拓展性。

### 3.3 完善预测性维护决策支持机制

风力发电机组进行预测性运维时，要建立合理的决策支撑体系，将状态监测及预测成果转化成可执行的守护计划。这个机制把数据分析的结果当作核心依据，利用多目标优化算法找出最佳的维修时机和调配资源的方法。首先要设置设备健康阈值和风险等级，把监测的数据、预测的结果映射成可量化的风险指标，这样就形成了维护触发的逻辑<sup>[5]</sup>。根据这样的逻辑，建立了维护优先级排序模型，从故障发生概率、造成的经济损失、停机时间以及备用件的可得性等角度进行分析，完成对维护活动的动态排程。为提高决策的执行力，在系统里设置可视化决策平台，用数据仪表盘、健康指数曲线和风险分布图来体现机组状况，让运维工程师一眼就能看懂是否需要进行维修。结合历史维护记录和备件管理系统，可以形成依赖预测信息的库存改善计划，削减备件滞留和缺乏的风险。决策支持机制还要有即时反馈功能，把守护结果返传给模型数据库，用来修正算法、改良策略，实现“监测—预测—决策—执行—反馈”循环管理架构。多风场集中管理的时候，可以利用群体优化算法加上云端调度技术，将各个风场的资源协调起来，实现跨区域的智能化调度，提高整个系统的运行效率。

### 3.4 推进数字孪生与智能运维平台融合建设

预测性运维的深入实施离不开数字化平台的支撑，应以数字孪生理念为核心，构建覆盖整个生命周期的

智能运维管理平台。数字孪生系统以真实的风机结构模型、运行参数以及环境数据作为基础，构建虚拟的实体，并且让物理系统和数字模型之间能够实现及时的映射与同步。平台要有高配置的数据建模、实时仿真以及可视化分析能力，在虚拟环境中模仿风机的运转情况、应力分布及其故障演变过程，为维护策略制定提供虚拟验证的场合。在数据层面，要让监测系统、控制系统、维护系统与企业信息系统实现全面融合，打通数据孤岛，实现设备级、场站级和企业级的纵向贯通。平台算法层将人工智能与优化模型结合，用于编制运维计划、预测风险和计算经济效益。为了实现高效协同，可以把数字孪生系统同物联网、云计算、大数据分析技术融合起来，搭建多层次的运维体系，包含数据收集层、边缘计算层、模型分析层以及决策执行层。平台需要开放的接口标准，让第三方系统以及新算法模块能很快地集成进来，技术上也要保持可拓展性。创建数据加密、访问限制以及网络安全体系，保证监测数值和操控信号的安全输送。数字孪生与智能平台融合构建，产生不断优化的运维生态系统，为准确执行预测性维护策略提供系统的支撑。

## 4 结束语

风电机组状态监测下的预测性运维是实现智慧能源体系构建的重要技术手段。其推动了运维由经验管理向数据驱动转变，并促进风电场在安全性、经济性和自动化程度方面的协同发展。随着人工智能、边缘计算、数字孪生技术不断发展，预测性运维会朝着自学习、自决策以及全生命周期的方向推进，给清洁能源产业的优质运作提供更智慧化的技术支持。

## 参考文献：

- [1] 余振涛, 汪势杰. 基于多源信号融合的风电机组状态监测系统设计[J]. 科学技术创新, 2024(12):78-81.
- [2] 王印松, 刘佳微, 贾思宇, 等. 基于改进PSO-LSTM 算法的风电机组状态监测方法研究[J]. 山东电力技术, 2024, 51(05):30-37.
- [3] 张杰, 任康, 马天, 等. 基于SSA-GPR模型的风电机组运行状态监测[J]. 电器与能效管理技术, 2024(04):65-73, 89.
- [4] 刘小春, 谭明亮, 文言, 等. 基于云雾协同的智慧风电机组状态全方位实时感知平台设计[J]. 电子技术, 2024, 53(03):75-77.
- [5] 于航, 尹诗. 基于GRU-LightGBM的风电机组发电机前轴承状态监测[J]. 中国测试, 2022, 48(09):105-111.

# 自动化螺丝螺母包装系统的设计与实现

廖文峰<sup>1</sup>, 黄超<sup>1</sup>, 王厚羽<sup>1</sup>, 曹银忠<sup>1</sup>, 李培军<sup>2</sup>

(1. 浙江安盛汽车零部件有限公司, 浙江 嘉兴 314300;

2. 嘉兴精振科技有限公司, 浙江 嘉兴 314300)

**摘要** 本文详述了自动化螺丝螺母包装系统, 采用模块化设计, 涵盖上料、分拣、包装、封箱、码垛五大模块。通过激光测距等传感器融合, 实现尺寸精准识别与过程控制, 传感器精度达 0.01 毫米。实际测试显示, 系统包装效率达 620 件 / 小时, 故障率仅 1.2%, 平均无故障时间 5 200 小时, 各项指标均优于设计要求。实践结果表明, 该系统可有效提升生产效率与可靠性, 降低人工干预需求, 具备显著的工业应用价值, 可推广至同类生产线标准化改造。

**关键词** 自动化螺丝螺母; 包装系统; 机械结构设计; 控制系统设计; 软件系统设计

中图分类号: TH131

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.008

## 0 引言

在工业自动化程度不断提升的过程中, 传统螺丝螺母包装方式已难以满足高效、精准的生产需求。为此, 设计并实现一套自动化螺丝螺母包装系统尤为重要。本文介绍一套集自动上料、分拣、包装、封箱及码垛功能于一体的自动化包装系统, 旨在通过模块化设计与先进传感器融合技术, 提升生产效率, 降低故障率, 确保生产安全。

## 1 自动化螺丝螺母包装系统需求分析与总体方案设计

### 1.1 系统需求

在功能性需求方面, 系统要具备自动上料的功能, 依靠振动盘或者传送带实现螺丝螺母连续供给, 以确保物料输送流畅不会出现卡顿; 分拣模块需要借助尺寸检测传感器区分不同规格螺丝螺母, 并且引导它们到对应的包装通道; 包装环节要求采用预制袋或者卷膜成型包装机, 完成自动装袋、封口以及切袋等操作, 封口温度和时间要能够调节以适应不同材质包装袋; 封箱部分需要实现纸箱自动成型、装填、封底以及胶带封箱, 箱体尺寸要和包装袋数量相匹配; 码垛模块需要把成品箱按照设定规则堆叠到托盘上, 堆叠高度和层数可以预先设定<sup>[1]</sup>。

在非功能性需求方面, 系统要达到每小时处理 500~800 件的生产效率, 且设备综合故障率得低于 2%; 安全防护符合机械安全相关标准, 配备紧急停止按钮、光栅保护装置以及防夹手设计; 可靠性上要求像电机、

传感器这类关键部件选用工业级产品, 平均无故障时间不能低于 5 000 小时。在可维护性方面, 需设计成模块化结构, 各功能单元能够独立拆卸进行维修。

### 1.2 总体方案

自动化螺丝螺母包装系统整体设计方案围绕高效、稳定、安全三大核心目标构建, 此方案涵盖机械结构、控制逻辑、传感器融合。机械结构采用模块化设计理念, 其中包含双振动盘上料机构、激光测距分拣模块、三边封制袋包装单元、折叠式封箱机构以及四轴码垛机械臂, 各模块借助溜槽与传送带实现无缝衔接, 能够支持直径 3~20 毫米、长度 5~50 毫米的螺丝螺母连续作业; 控制系统以西门子 S7-1200 PLC 作为核心, 集成高速脉冲输出与模拟量采集模块, 通过工业以太网实现与触摸屏、伺服驱动器的数据交互, 并且支持 Modbus TCP 协议进行远程监控; 传感器系统融合激光位移、压力、温度以及接近开关等多类型传感器, 可实现物料尺寸精准识别、封口温度闭环控制以及机械臂位置实时监测, 确保各工序参数误差小于 0.1 毫米; 软件系统采用模块化编程架构, 包含上位机监控、PLC 控制以及伺服驱动三大子模块, 支持生产数据实时统计与故障远程诊断, 配置铝合金防护罩、光栅保护装置、双手操作按钮以及漏电保护系统, 确保设备综合故障率低于 2%, 生产效率达到每小时 500~800 件。整体方案通过标准化接口设计支持快速换型, 可适配不同规格螺丝螺母及包装袋尺寸调整, 在满足常规生产需求的同时兼顾可扩展性与可维护性<sup>[2]</sup>。自动化螺丝螺母包装系统的整体运行流程如图 1 所示。

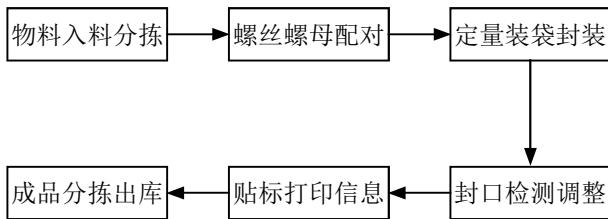


图 1 自动化螺丝螺母包装系统的整体运行流程

## 2 自动化螺丝螺母包装系统核心设计

### 2.1 机械结构设计

上料机构采用双振动盘布局方式分别对应螺丝与螺母供给，在振动盘底部安装电磁振动器以实现物料有序爬升；分拣模块配置高精度激光测距传感器阵列，通过扫描物料尺寸参数触发气动分拣滑块动作，将不同规格零件导入指定包装通道；包装机采用三边封制袋器结构，通过伺服电机驱动封口刀实现热封温度与时间精确控制；切刀采用旋转式设计避免出现粘刀现象，封箱机采用折叠式纸箱成型机构，配合气动推箱装置完成纸箱自动装填，胶带封箱头具备压力调节功能确保封箱严密；码垛机械臂采用四轴关节设计，配备真空吸盘抓手实现成品箱平稳抓取与堆叠，堆叠路径通过 PLC 编程实现 XYZ 三轴联动控制确保堆叠精度误差小于 2 毫米。

### 2.2 控制系统设计

控制系统以 PLC 为核心控制单元，搭配人机界面完成参数设置与状态监控。主控 PLC 选用西门子 S7-1200 系列产品，集成高速脉冲输出模块来控制伺服电机运动，用模拟量输入模块采集温度、压力等传感器信号；人机界面采用 10 英寸触摸屏设备，支持多级菜单操作功能，能实时显示设备运行状态、故障代码及生产统计数据，传感器系统包含光电开关、接近开关、压力传感器及温度传感器，其中光电开关用于检测物料到位信号情况，接近开关用于监测机械臂位置状态，压力传感器用于监控封箱力度大小，温度传感器用于控制封口温度高低；执行器系统采用伺服电机驱动精密传动机构运行，用步进电机控制分拣滑块运动过程，气动元件选用亚德客系列电磁阀与气缸产品，以此确保动作响应速度与可靠性程度；通信网络采用工业以太网实现 PLC 与触摸屏、伺服驱动器之间的数据交互工作，支持 Modbus TCP 协议实现与上位机系统的远程通信任务<sup>[3]</sup>。

### 2.3 传感器与执行器选型

传感器选型要依据检测对象的具体特性挑选合适类型，尺寸检测选用基恩士 LV 系列激光位移传感器，

其测量精度能够达到 0.01 毫米，响应时间小于 1 毫秒；位置检测采用欧姆龙 E2B 系列电感式接近开关，检测距离为 5 毫米，重复精度 0.05 毫米；压力检测选用 SMC 压力传感器，量程范围是 0 ~ 1 MPa，精度等级为 0.5%；温度检测采用 PT100 热电阻，配合温控器可实现封口温度的精确控制。执行器选型需要考虑负载特性与运动精度，伺服电机选用松下 A6 系列，额定功率为 500 W，编码器分辨率为 17 位，能满足高速高精度定位需求；步进电机选用 42BYGH 系列，步距角为 1.8 度，搭配细分驱动器可实现微米级定位；气动元件选用 FESTO 系列电磁阀与气缸，电磁阀响应时间小于 10 毫秒，气缸行程误差小于 0.1 毫米；传动机构采用同步带与直线导轨组合，同步带选用盖茨系列，直线导轨选用 HIWIN 品牌，可确保传动平稳性与定位精度。

### 2.4 软件系统设计

上位机监控软件基于 WinCC 进行开发，能够实现设备状态可视化、生产数据统计以及远程故障诊断等功能，还支持实时曲线显示与历史数据查询操作；PLC 控制程序采用梯形图语言编写而成，其中包含上料控制、分拣控制、包装控制、封箱控制以及码垛控制这五大子程序，各子程序通过主程序调用实现协同工作模式；伺服驱动算法采用 PID 控制策略开展工作，结合位置反馈实现精确轨迹跟踪效果，速度环与位置环参数可通过触摸屏进行实时调整。故障诊断系统集成传感器信号监测与逻辑判断功能，当检测到物料卡顿、温度异常或者气压不足等情况时，会自动触发报警并暂停设备运行，同时记录故障代码方便维修人员快速定位问题，系统支持多任务并行处理方式，通过时间片轮调度确保各模块有序执行，避免因任务冲突导致系统出现死锁状况<sup>[4]</sup>。

### 2.5 安全防护设计

机械防护所有运动部件外围装铝合金防护罩，开口小于 8 毫米防异物进入，危险区域设置光栅保护装置人体进入即触发紧急停止，设备操作侧配置双手操作按钮避免单手误操作引发安全事故；电气防护采用 TN-S 接地系统保证设备可靠接地且电气元件外壳接地电阻小于 4 欧姆，电源系统配漏电保护装置动作电流小于 30 毫安动作时间小于 0.1 秒；急停系统用红色蘑菇头按钮布置在操作面板及四角按下切断主电源停电机，安全标识在明显位置张贴操作规程、警示标志及紧急电话助操作人员正确使用设备，系统要定期做安全检查与维护，保证防护装置功能好且电气线路无老化破损<sup>[5]</sup>。

### 3 自动化螺丝螺母包装系统实现与测试

#### 3.1 项目概况

自动化螺丝螺母包装系统实现与测试项目在2025年3月正式启动，其目的是验证前期设计方案实际落地效果和性能指标达成情况。该项目由某智能制造企业承接，包含机械装配、电气布线、软件调试及系统联调四大核心环节，实施周期设定为6个月，项目目标明确为确保系统在连续生产模式下每小时达到600件以上包装效率，同时让设备综合故障率低于1.5%且各功能模块运行稳定可靠，测试范围覆盖上料、分拣、包装、封箱、码垛全生产流程，重点验证模块间协同性、传感器精度、执行器响应速度及安全防护有效性<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 实现与测试整体过程

测试整体过程分成单元测试、集成测试、系统测试以及验收测试四个阶段，而且每个阶段都会制定详细的测试方案与验收标准。单元测试阶段会针对上料

表1 自动化螺丝螺母包装系统测试结果

| 测试项   | 测试结果                           | 通过标准                     | 结论 |
|-------|--------------------------------|--------------------------|----|
| 功能测试  | 所有功能模块均通过验证，无功能缺失或异常           | 100% 功能覆盖率，无严重缺陷         | 通过 |
| 性能测试  | 包装效率达620件/小时，设备综合故障率1.2%       | 包装效率≥600件/小时，故障率≤1.5%    | 通过 |
| 安全测试  | 安全防护装置响应时间≤100毫秒，漏电保护动作时间≤0.1秒 | 响应时间≤150毫秒，动作时间≤0.1秒     | 通过 |
| 可靠性测试 | 连续运行48小时无重大故障，平均无故障时间5 200小时   | 连续运行24小时无故障，MTBF≥5 000小时 | 通过 |

功能缺失或操作异常。性能测试数据表明系统包装效率达到620件/小时，超出设计目标，设备综合故障率仅为1.2%，远低于2%的设计要求<sup>[8]</sup>。安全测试验证了光栅保护、急停按钮及漏电保护装置的有效性，响应时间与动作时间均符合标准。可靠性测试通过连续48小时运行验证了系统的稳定性，平均无故障时间达到5 200小时，满足工业级应用需求。

#### 4 结束语

本文设计的自动化螺丝螺母包装系统通过实际测试验证了其高效性、稳定性与安全性，各项性能指标均达到或超过预期目标。该系统的成功实施，不仅提升了螺丝螺母的包装效率与质量，也为工业自动化包装领域提供了新的解决方案。未来，随着技术的不断进步，该系统有望进一步优化升级，为更多行业带来便捷与效益。

振动盘、分拣传感器、包装机伺服电机、封箱气缸以及码垛机械臂等独立模块开展功能验证，采用黑盒测试方法检查各模块输入输出是否符合设计要求，比如振动盘物料输送速度是否稳定保持在50~70件/分钟，激光测距传感器尺寸检测精度是否达到±0.02毫米<sup>[7]</sup>。集成测试阶段重点验证模块间接口匹配性与数据交互准确性，例如上料模块与分拣模块间溜槽物料传递是否流畅且无卡顿现象，PLC与伺服驱动器间通信是否稳定且无丢包情况。系统测试阶段模拟实际生产环境进行全流程压力测试，连续运行24小时来验证系统稳定性与故障恢复能力，同时测试安全防护装置如光栅保护、急停按钮及漏电保护是否在异常情况下有效触发。

#### 3.3 测试结果

自动化螺丝螺母包装系统测试结果如表1所示。

功能测试结果显示系统所有模块均能正常工作，上料、分拣、包装、封箱、码垛各环节衔接流畅，无

#### 参考文献：

- [1] 俞志明,潘明清,刘秋鹏.基于双机器人协作的车灯螺丝锁付自动化系统设计[J].中国照明电器,2025(09):62-66.
- [2] 聂聃,徐伟铨,陈智霖,等.双向自变挡加速螺丝刀双闭环控制系统设计[J].电气开关,2025,63(04):77-80,113.
- [3] 许浩.不同载荷下基台螺丝的机械磨损对种植系统力学影响的三维有限元分析[D].广州:南方医科大学,2025.
- [4] 潘宝君,徐海潜,刘媛媛.基于LabVIEW与PLC的自动锁螺丝系统设计[J].科技创新与应用,2024,14(28):127-130.
- [5] 饶家豪.面向集装箱地板的高速螺丝锁付机械臂系统设计[D].广州:广东工业大学,2025.
- [6] 吴敏,刘正男,梁美玉.基于虚拟仪器的自动化螺丝控制系统[J].信息与电脑(理论版),2021,33(22):38-40.
- [7] 王子平,陈辉,聂荣臻.自动化螺丝安装机的设计[J].知音励志,2016(21):188.
- [8] 王月芹,周保廷,朱伟博.基于PLC的锁螺丝自动化控制系统设计[J].制造业自动化,2014,36(17):152-156.

# 智能化技术赋能绿色建造的实践路径分析

张竣杰

(中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000)

**摘要** 在积极推进“双碳”工作以实现可持续发展的迫切需求下, 绿色建造已成为建筑业转型发展的必然方向和路径。智能化技术的持续迭代与不断更新和完善, 为绿色建造的发展提供了坚实且关键的技术支撑。基于此, 本文主要针对当前智能化赋能绿色建造的发展壁垒及未来的相关趋势进行分析探讨, 并对如何实现智能化赋能绿色建造以及绿色建造赋能建筑行业高质量发展的方案展开论述, 以期能够为更好地推进我国建筑业的快速发展以及“双碳”建设的实现进程提供借鉴。

**关键词** “双碳”目标; 建筑业; 智能化技术; 绿色建造

中图分类号: TP29; TU7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.009

## 0 引言

在全球气候变化加剧、资源短缺凸显的当下, “双碳”目标为各行业可持续发展指明了方向。建筑领域作为全国能源消耗和碳排放的主要来源, 传统建筑模式的高能耗、高污染、低效率难以适应现阶段可持续发展要求, 寻求节能建造路径尤为重要<sup>[1]</sup>, 因此绿色建造的转型是实现“双碳”目标达成的重要抓手。目前, 我国已提出了《绿色建筑行动方案》, 并且发布了《绿色建造技术导则》, 不断推动和规范绿色建造的发展。随着近年来智能化技术的不断迭代更新, 如GPT、DeepSeek等人工智能技术的不断升级, 若将其深度融合到绿色建造的全生命周期中, 可以有效提高建筑资源的利用效率、降低能耗与污染, 助推建筑行业向绿色、高效、智能化转型升级。

## 1 绿色建造的概念与重要性

绿色建造涵盖建筑工程的绿色节能设计、材料选型、施工建设、运营维护、拆除回收等全生命周期内各个环节, 在满足建筑功能和质量要求的前提下, 以“五节一环保”为核心, 采用先进的技术、工艺、材料和管理模式, 实现建筑与自然和谐共生的建造方式, 最大程度降低对生态环境的影响。

从环境层面分析, 建筑业属于能源消耗与碳排放的重点行业, 绿色建造能够降低建筑能耗以及污染物排放, 减轻对生态环境的影响, 缓解全球气候变化所带来的压力。从资源维度分析, 绿色建造着重于资源的高效利用与循环使用, 可以有效减少对自然资源的过度开采与消耗, 提升有限资源的利用效率和资源的可持续发展<sup>[2]</sup>。从社会视角分析, 绿色建造可以通

过营造健康、舒适且安全的居住与工作环境, 提高人们的生活质量, 并且随着建筑行业的转型升级, 可以促进上下游产业链的发展, 同时创造各类就业岗位, 为社会经济发展提供助力。

## 2 智能化技术概述

智能化技术是对人类智能的模拟, 是实现机器自主感知、学习、分析、决策与执行等一系列技术的统称。该技术以人工智能、物联网、大数据、云计算、区块链等为核心要素, 涉及多专业领域学科。人工智能通过赋予机器类似于人类的思维与判断能力, 使智能装备具备感知和自我决策的能力。物联网通过传感器与网络设备将物体进行空间连接, 实现信息的采集、传输与共享, 为智能化管理提供数据支撑。大数据具备处理和分析海量数据的能力, 能够挖掘潜在价值的信息, 为决策提供科学依据。云计算可以为智能化应用提供强大的计算与存储能力, 使智能化应用的运行更为高效便捷。区块链具备去中心化、不可篡改及高度透明等显著特性, 能够有效保障数据的安全性与可靠性, 在供应链管理等领域展现出广阔的应用前景。这些智能化技术相互融合、相互促进, 形成合力, 为各行业的智能化转型提供支撑, 绿色建造领域亦从中受益<sup>[3]</sup>。

## 3 智能化在绿色建造中的应用

### 3.1 规划设计阶段

在建筑的规划、设计阶段, 智能化的应用是十分重要的。

首先, 建筑BIM信息模型技术在其中起到了重要作用, 它能将建筑整个生命周期的信息都以三维建模的形式展现, 实现了设计的可视化及多专业设计的协

同。BIM技术可以将建筑的结构、机电、暖通等各专业的信息进行有效的组织、协调<sup>[4]</sup>，方便设计人员对各专业的协同设计以及碰撞检查工作，减少设计出错或缺少的情况发生，很大程度上提高了设计效率和质量。

其次，利用大数据、人工智能的相关技术对建筑的建设地点、布局、朝向等问题进行深度设计，在充分运用人工智能算法的前提下，将采集到的当地气候情况、地质地貌及交通等信息融入建筑设计中，从而使建筑设计最大限度地应用自然的采光与通风功能，减少能源的浪费；应用有限元分析、人工智能算法等相关技术模拟建筑结构受力状态，对建筑结构实施精细化分析，从而优化设计方案，在保障建筑结构安全的情况下，降低材料用量，尽可能节约资源。

最后，利用物联网技术，在建筑建设和运维期间可以实现实时监测建筑结构，并提前发现结构损伤或者变形，做好维修保养等工作；对于一些严重的隐患提出专项设计方案，通过有效的维修方案来保障建筑的使用寿命。

### 3.2 材料选型阶段

智能化材料是指能感受外界信息（温度、光线、湿度、应力等）的刺激，进行智能判断并作出响应决策来处理事情，并能执行的新型功能材料，具有很大的发展前景，其中很多智能化材料将在绿色建造方面发挥作用。如形状记忆合金在受到外界刺激后能够在较短时间内快速复位到原始状态，可以提高建筑的稳定性与安全性；自修复混凝土可以通过微胶囊技术将自修复材料包裹在内部，当建筑体产生裂纹时，自修复材料就会被释放出来覆盖于建筑体表面，能避免裂纹持续发展，提高建筑体寿命的同时还能在一定程度上减少维护费用。

智能化材料的深度应用深深地影响着建筑业的变革和发展进程，以其特有的优点和特性推动了绿色建造技术的发展进步，使得建造过程能够更加绿色、环保、节能，并使建设过程能耗更低、垃圾排放更少，从而引领建筑业的前行。智能化材料极大地助力建筑业走向绿色化、生态化和环保化，也为建筑业赢得更好的经济效益提供了更加强劲的动力和技术支持。

### 3.3 施工管理阶段

在建设工程施工阶段，通过应用智能化技术可实现对施工过程的精细化管理、控制，如在施工现场布设各类物联网传感设备及监控设备等，实时收集现场人、机、材等信息，对现场情况实施全过程动态监控。通过使用定位技术，可以实时掌握工作人员的位置及行踪，确保工作人员处于安全区域；通过对现场施工设备运行

情况进行动态监测分析，能及时发现设备出现故障或异常情况并提供预警信息，以此保证设备本质安全的同时还能及时发现并排除其他异常情况。同时利用智能化技术可以实现施工过程的自动化实施及智能化控制。

大数据和人工智能技术可以用来分析和预测施工进度、质量、成本等，在对以往的历史施工数据进行深入挖掘之后构建出相应的预测模型，可以很好地预测出施工进度，并在施工的全生命周期内发现存在的风险隐患并及时预警给相关管理人员，做好工程管控工作。利用人工智能算法对施工质量进行检测及评估，既可以提高工程质量检测的效率以及准确度，又可以在一定程度上减少施工时产生质量问题的可能性。

### 3.4 运营与维护阶段

智能化技术在建设工程运营维护方面实现了高效的管理、节能运行，能够实现各种功能，并把建筑内的设备、能源、安防等各种子系统集成成为一个集成化的智能建筑管理系统。

例如：对室内外照明、温控、监控、电梯等设备实施集中监控与管理，并能根据室内外环境以及人员的情况的变化自动调整相关设备的工作状况，满足使用要求，达到节约能源的目的。

基于大数据与人工智能技术挖掘分析建筑能耗数据，发现能源消耗规律以及节能潜力；并对建筑设备运行状态实施全过程监控及分析诊断，提前发现设备故障或安全隐患，提出维修或改造建议，采用低成本维修方式提高设备可靠度与寿命；利用智能化技术给建筑用户带来更加方便、舒适的体验。

## 4 绿色建造应用智能化分析

### 4.1 技术方面

智能化绿色建造的技术难度很高，要实现各种技术的融合并不容易<sup>[5]</sup>。

首先，从建筑生命周期全过程视角看，绿建工作涵盖了设计、建设、运维各个阶段，需要把人工智能、物联网、大数据等最先进的智能化技术融入传统的建筑技术当中；而不同的技术领域各自拥有自己独特的工作标准及技术协议，各不相同的技术接口之间也完全互不兼容，不同标准化系统造成的混杂是造成技术集成难的一个重要原因。

其次，技术稳定性与可靠性均有欠缺，智能化技术在绿色建造领域的应用正处于起步阶段，技术不够完善，一旦运行可能会出现一些问题，带来故障或偏差等问题，进而给建筑建造及后期使用等环节造成一定的不良影响。

最后，随着智能化绿色建造发展，将产生大量带

有重要信息的数据，在此情况下若存在数据被窃取或受到攻击等现象的话，会给相关人员或企业造成较为严重的影响，因而如何对数据的安全性及隐私进行保障也是当前绿色建造中需要重点关注的问题。

#### 4.2 经济方面

智能化绿色建造在经济上也同样面临困难。

一是智能化技术投入大，无论是在实际的落地操作中购置好设备、装点好设备，还是针对企业的实际需求进行软件系统的开发和完善，并对其进行不断地优化升级，在实际的过程中都要花费大量的人力、物力、财力。尤其是那些规模较小的建筑企业缺乏大量资金的支持，在面对智能化技术的时候会产生犹豫不决的态度，从而不利于智能化技术在绿色建造上得到广泛的使用和深层次的应用。

二是智能化绿色建造的投资回报周期长，虽然长期来看，智能化技术可以使建筑节能、减排降耗以及效率大幅提升，但从短期来看很难获得明显的经济效益。“投入大、回报慢”使得企业综合考量之后对于智能化绿色建造投入的热情并不太高。

三是当前关于智能化绿色建造的成本核算与效益评估体系尚不完善。由于缺乏科学、准确的评估方法，难以精确衡量智能化绿色建造所能带来的经济价值，这也会在企业进行投资决策时造成一定的困扰和影响，使得企业在投资时更加谨慎。

#### 4.3 政策与法规方面

目前，我国在绿色建造和智能化技术应用领域的政策法规、规划标准尚不健全。

一是在技术标准方面，不同地区和行业之间的标准存在明显差异。

二是在监管机制方面，对智能化绿色建造的质量、安全、环保等方面的监管仍不完善，难以确保智能化绿色建造的顺利实施。

三是政策支持力度也要加强，尽管国家已提出“双碳”目标，鼓励绿色建造和智能化技术的应用，但受制于老旧设备更新难、智能化设备前期投入大，加之缺乏有效的激励机制和扶持政策，如财政补贴、税收优惠等，难以充分调动企业参与智能化绿色建造的积极性。

### 5 智能化赋能绿色建造的展望

虽然智能化绿色建造还面临着很多问题，但是由于技术的进步和社会更加注重绿色环保，因此在未来还有很大的发展空间。

一是智能化技术将越发成熟并越来越融合。伴随着人工智能、“物联网+”、大数据等技术的升级换代，

在绿色建造上的运用会更加广阔与深入。不同的技术相互融合，并集成为一体化的智能化解决方案，以达到提高绿色建造速度、建造质量的目的。

二是绿色建造理念深入人心，智能化绿色建造标准规范逐步完善，在此基础上，随着政策法规不断完善，为智能化绿色建造发展奠定了更坚实的基础。政府加大扶持力度，加强相关政策法规的建设，对智能化绿色建造企业给予相应的优惠与支持，鼓励企业积极参与智能化绿色建造。

当人们的生活越来越高质量的时候，对建筑的功能以及性能也提出了更高的要求，而在这种情况下我国的智能化绿色建造将会朝着个性化的方向发展，随着社会经济发展，国家“9+6”的战新产业也在逐步落地实施中，在智能化技术快速更替和发展的当下，对材料、能源及建筑业等多个行业来说，将会起到更多的创造性以及生长性作用，促使绿色建造未来实现多元化发展。

### 6 结束语

在“双碳”背景下，绿色建造是建筑行业可持续发展的必然趋势。智能化技术在规划设计、材料选型、绿色节能施工管理、智能化运营与维护等环节的应用，可以有效提升资源利用效率，减少能源消耗，降低环境污染，不断推动建筑行业向绿色节能转型。然而，智能化在绿色建造发展中仍面临不少挑战，如技术集成难、稳定性和可靠性有待提升、资金投入高、回报周期长、监管体系尚不健全等问题，这些都让智能化全面推广应用受到制约。未来，随着科学技术进步、政策法规完善和社会对绿色发展理念的认同，智能化绿色建造将有更广阔的发展空间。相信在各方努力下，智能化技术将进一步赋能绿色建造，助力建筑行业向高质量、可持续化方向发展，为“双碳”目标和全球可持续发展做贡献。

### 参考文献：

- [1] 赵黔青.低碳概念下的建筑设计应对策略解析[J].建材与装饰,2024,20(22):37-39.
- [2] 《房地产世界》编辑部.“双碳”背景下房地产市场绿色低碳发展策略[J].房地产世界,2025(10):6.
- [3] 宋庆浩.绿色建造理念在智能建造体系中的融合实践与效果分析[C]//中国企业财务管理协会.2025年中国企业财务管理发展大会论文集.鹤峰县建设工程质量监督站,2025.
- [4] 王峰.建筑智能化和绿色化建造中BIM技术的应用研究[J].铁道建筑技术,2024(07):186-189.
- [5] 何继新,段美好,纪章然.数智化在我国绿色建造中的应用：文献综述与知识框架[J].绿色建筑,2024(05):1-9.

# 曳引式电梯振动特性分析与故障诊断研究

罗荣桢

(广东省特种设备检测研究院中山检测院, 广东 中山 528400)

**摘要** 曳引电梯作为现代建筑垂直交通的主动脉, 其运行平稳与安全是衡量城市基础设施品质的核心指标。振动直接决定了乘运品质与健康状态, 幅值过高既会降低舒适度, 也可能触发事故。本文先梳理主要振源: 曳引机、导向系统、钢丝绳及导轨; 随后搭建动力学模型, 并在现场同步测试, 采集电梯在多种工况下的振动信号; 接着用现代信号处理手段提取特征, 锁定与特定故障对应的特征频率; 最后以这些参数建立诊断模型, 可精确定位曳引轮槽磨损、导靴松动、导轨接头不平等常见故障, 以期为提升电梯的智能运维水平、保障公共安全提供有益参考。

**关键词** 曳引式电梯; 振动特性; 故障诊断; 动力学模型

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.010

## 0 引言

目前, 曳引式电梯已成为现代楼宇的垂直交通核心, 其可靠程度直接影响人们的生命财产安全和日常出行效率。设备服役年限延长、启停次数攀升, 使机械磨损加剧, 振动随之放大。电梯振动由曳引单元、导向装置等多部件耦合激励产生, 属于典型的多源耦合现象。异常振动不仅会降低乘坐品质, 更预示关键零件可能失效, 若放任可能酿成重大故障。厘清振动规律并构建智能诊断方法, 是电梯维护由定期检修迈向预测性维修的突破口。旋转机械振动诊断虽已相对成熟, 却缺少面向电梯耦合振动的系统研究。为此, 本文以系统动力学为主线, 融合理论建模、实验测试与信号处理, 尝试形成一条完整的故障诊断技术路径, 为高效在线监测系统的研发奠定基础, 助力电梯产业智能化升级。

## 1 曳引式电梯振动系统概述与振动源分析

曳引式电梯是一个由机电部件组成的复杂动力学系统。其主要的振动源可分为以下几类。

### 1.1 曳引传动系统振动源

曳引传动系统既是电梯的动力中枢, 也是主要振动来源。曳引机由电动机、制动器和曳引轮组成: 电动机转子动不平衡、轴承磨损以及齿轮箱(有齿机型)的齿形误差与啮合冲击, 都会激起高频振动; 制动器闸瓦若未完全脱离制动盘, 或摩擦状态异常, 则易诱发低频抖动。钢丝绳与曳引轮槽的相互作用同样关键——绳体在槽内的周期性滑移、挤压, 以及绳槽不均匀磨损, 产生与绳速和槽数同步的周期性激励, 成

为电梯垂直振动的重要诱因。上述激励经机械路径传递, 直接削弱轿厢运行的平稳性<sup>[1]</sup>。

### 1.2 导向系统振动源

导向系统约束轿厢和对重的运动自由度, 是电梯平稳运行的核心部件。导轨的安装精度直接决定水平振动强度: 接头台阶、弯曲或扭曲, 以及表面不平顺, 都会在轿厢和对重通过时激起冲击振动。导靴与导轨的间隙同样不容忽视。无论是滑动还是滚动形式, 间隙过大或衬垫磨损都会让轿厢出现晃动与撞击; 滚动导靴的滚轮失圆或轴承损坏, 则带来周期性振动。这些扰动不经衰减便传入轿厢, 乘客的舒适感随之下降。

### 1.3 钢丝绳系统振动源

钢丝绳系统柔性大、阻尼低, 运行中常出现复杂的横向与纵向振动。多绳协同使模态更为丰富, 高速电梯中, 绳的纵向伸缩会直接降低轿厢平层精度并削弱乘坐舒适性<sup>[2]</sup>。振动不仅源于绳自身的动力学, 还与曳引轮、导向装置等部件相互耦合, 使分析难度显著增加。

## 2 电梯振动特性的测试与信号分析方法

### 2.1 振动测试方案设计

可靠的振动测试方案是准确刻画电梯动态特性的前提。传感器应布设在关键位置: 曳引机底座用于捕捉主机振动; 轿厢顶部与底部分别记录垂直和水平方向的振动; 导轨支架处安装探头可识别导轨自激信号。为还原真实工况, 测试需覆盖上行、下行、启动、匀速及制动各阶段, 并考虑建筑高度差异, 在底层、中间层和顶层分别采集数据, 以评估导轨全程健康状况及系统在不同高度的动态响应。测点与传感器配置汇总于表1。

表 1 振动测试测点与传感器配置表

| 测点编号 | 测点位置     | 传感器类型  | 测量方向        | 主要观测目的            |
|------|----------|--------|-------------|-------------------|
| MP1  | 曳引机底座    | 工业加速度计 | 垂直、水平       | 曳引机本体振动(电机、轴承、齿轮) |
| MP2  | 轿厢顶部     | 三轴加速度计 | 垂直、水平(X, Y) | 轿厢整体振动响应, 尤其水平晃动  |
| MP3  | 轿厢底部     | 三轴加速度计 | 垂直、水平(X, Y) | 接近导靴, 测量导向系统直接激励  |
| MP4  | 导轨支架(中部) | 工业加速度计 | 水平          | 识别导轨自身的振动及传递特性    |

## 2.2 振动信号预处理与特征提取

现场拾取的原始振动信号往往混杂噪声与多频分量, 需经处理才能析出有效的故障特征, 常用做法如下:

1. 时域分析。时域分析侧重观察振动信号的幅值、均值、均方根值、峰值与峭度等统计量。RMS 值可直观反映振动的整体能量水平, 而峭度对冲击类故障, 如轴承点蚀或导轨接头冲击尤为敏感<sup>[3]</sup>。

2. 频域分析(FFT)。快速傅里叶变换(FFT)是振动分析的核心手段, 它把时域信号映射到频域, 使振动能量在各频率上的分布一目了然。若频谱出现异常峰值, 只需读出对应频率, 再与轴承故障特征频率、齿轮啮合频率或曳引轮转频等典型值对照, 即可初步锁定故障部位。

3. 时频分析(小波分析)。传统 FFT 以信号平稳为前提, 而电梯启停段的振动显然不满足这一条件。小波变换把时间和频率放在同一框架下, 可捕捉瞬态冲击及频率随时间的漂移, 在启动抖动等非平稳故障的识别上优势明显。

## 3 基于振动特征的电梯故障诊断方法

### 3.1 常见故障振动特征分析

电梯不同故障在振动信号中呈现独特的特征模式, 为故障诊断提供关键依据。

1. 曳引轮槽不均匀磨损。该故障在振动信号中表现为明显的周期性特征。当曳引轮槽出现不均匀磨损时, 会导致轮槽与钢丝绳接触面产生周期性冲击。在频谱分析中, 主要表现为曳引轮转频(通常为 1~5 Hz)及其谐波成分( $2\times$ 、 $3\times$ 转频等)的幅值显著增大。同时, 由于磨损部位的周期性冲击会调制其他振动成分, 在频谱上还会出现以转频为间隔的边频带现象。这种特征在加速度传感器采集的垂直方向振动信号中尤为明显。通过监测这些特征频率成分的幅值变化趋势, 可以评估磨损程度的发展状况, 为预防性维护提供依据。

2. 导轨接头不平或弯曲。这类故障呈现瞬态冲击的典型特征。轿厢驶过异常接头时, 时域信号会突现持续 10~50 ms、幅值极高的冲击脉冲; 在频域上,

该脉冲激起数百赫兹的宽带振动。借助连续小波变换, 既能锁定冲击发生的时刻, 又能依据电梯运行速度把故障接头定位到  $\pm 0.5$  m 以内。由于冲击重复频率与轿厢通过接头的频率完全对应, 可据此将偶发冲击与持续故障区分开来<sup>[4]</sup>。

3. 导靴磨损或松动。该故障主要表现为水平振动特性的改变。当导靴出现磨损或松动时, 轿厢在运行过程中会产生明显的横向晃动。振动测试数据显示, 水平方向的 RMS 值可能增加 50%~200%, 特别是在通过导轨接头时。频谱分析还会发现 1~3 Hz 的低频成分增强, 这与轿厢的摆动频率相关。长期监测发现, 随着磨损加剧, 振动信号中的高频成分(>100 Hz)也会逐步增多, 这反映了导靴与导轨之间碰撞加剧的现象。通过对垂直和水平方向的振动能量比, 可以有效识别这类故障。

4. 轴承故障。轴承故障在频谱上呈现典型的特征频率。依据损伤位置, 信号会出现内圈故障频率 BPFI、外圈故障频率 BPFO 或滚动体故障频率 BSF, 这些分量多集中在 500 Hz~5 kHz 的中高频段, 并以清晰峰值显现。随着劣化加剧, 频谱两侧还会冒出以轴承转速为间距的边频带。早期缺陷对应的特征幅值往往偏低, 借助包络解调可显著提升捕捉灵敏度; 现场诊断时, 再引入声发射信号交叉验证, 可进一步降低误判风险。

### 3.2 故障诊断模型的构建

从特征出发, 可搭建不同复杂度的诊断模型。最简易的阈值法给特定指标(如某频率幅值或总振级)划定安全线, 一旦越限即触发报警。其优点是实现简单, 却容易受工况扰动, 灵敏度与准确性都偏低。面对复杂故障或多故障耦合, 智能模型更显优势。支持向量机或人工神经网络可把多维特征向量, 例如各频段能量、峭度、峰值等, 一并送入网络, 以“正常”“轴承故障”等类别为输出, 通过大量已标定样本训练, 让模型自行归纳故障模式, 再对新样本自动分类。近年来, 卷积神经网络等深度方法更进一步, 直接读取原始信号或时频谱图, 自动抽取判别特征, 显著降低了人工设计特征的依赖<sup>[5]</sup>。最终选型应兼顾数据规模、

故障复杂程度与实时性要求,表2为不同故障诊断模型性能对比。

#### 4 案例分析:某商业大厦电梯水平振动异常诊断

为验证上述理论方法的有效性,本节结合一个实际案例进行分析。

##### 4.1 问题描述

某商业大厦的一台曳引式电梯在运行至大楼中部楼层时,乘客普遍感到轿厢出现明显的水平晃动,乘坐舒适度因此下降;而在底层或顶层附近,晃动则明

显减轻。初步排查未发现机械部件明显松动,需借助振动测试锁定根本原因。

##### 4.2 测试与数据分析

在轿厢底部沿垂直与水平方向布置PCB 352C03型加速度传感器,全程记录运行数据。采样率设为2 560 Hz,可覆盖至1 280 Hz的分析带宽。表3显示:时域层面,水平振动RMS值在中间楼层段明显高于两端;FFT谱则把能量控制在5~20 Hz的中低频带,并出现若干异常尖峰。小波时频图进一步揭示,强烈的水平冲击与

表2 不同故障诊断模型性能对比

| 诊断方法        | 优点                 | 缺点                    | 平均准确率 |
|-------------|--------------------|-----------------------|-------|
| 阈值判断法       | 简单、快速、计算量小         | 适应性差、易误报、难以处理复杂故障     | ≈ 75% |
| 支持向量机(SVM)  | 适用于小样本、高维模式识别      | 核函数选择影响大、对大规模数据训练效率偏低 | ≈ 92% |
| 人工神经网络(ANN) | 强大的非线性映射能力、容错性好    | 需要大量训练数据、易过拟合、结构设计复杂  | ≈ 95% |
| 卷积神经网络(CNN) | 自动特征提取、图像识别能力强、精度高 | 需要大量标注数据、模型训练时间长      | ≈ 98% |

表3 故障接头处与正常区域振动指标对比

| 测量区域       | 水平振动 RMS ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) | 水平振动峰值 ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) | 5~20 Hz 频带能量 |
|------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------|
| 正常运行区域(低层) | 0.05                               | 0.15                             | 0.008        |
| 故障接头区域(中层) | 0.18                               | 0.65                             | 0.052        |
| 正常运行区域(高层) | 0.06                               | 0.18                             | 0.009        |

轿厢掠过导轨接头的时刻几乎同步,且冲击幅值在中间楼层的几个特定接头处最为突出。综合时域与频域证据,问题集中在导轨系统的这些特定位置。

##### 4.3 诊断与验证

综合振动特征判断,中间楼层部分导轨接头严重不平或弯曲,导靴经过时产生剧烈冲击与晃动。维护人员按诊断位置现场核查,确认两处接头平整度超标;打磨校正后复测,电梯水平振动恢复至正常范围,乘客反馈良好,验证了本次振动分析及诊断方法的准确性、有效性。

#### 5 结束语

本文通过系统分析曳引式电梯的多源振动特性,构建了从测试、特征提取到智能诊断的完整技术框架。实践证明,结合时域、频域及时频分析能有效辨识各类故障特征,而智能诊断模型则提升了复杂故障的识别精度与效率。该研究为电梯的预测性维护提供了实用方法,有助于减少非计划停机,保障运行安全。未来

故障诊断模型的泛化能力仍有提升空间,可引入迁移学习或联邦学习策略,利用多场景、多型号电梯数据联合训练,增强模型对不同设备与运行环境的适应性。

#### 参考文献:

- [1] 于艳杰,李庆昕,马玉华,等.涡流脉动压力下高速曳引电梯水平振动动态特性分析[J].冶金管理,2020(21):25-26,58.
- [2] 刘铭祥.高速曳引电梯机械系统振动特性的分析[J].中国高新区,2018(13):197.
- [3] 韩剑君.曳引电梯机械振动系统的固有特征分析与动力学响应研究[J].南方农机,2021,52(10):105-107.
- [4] 白坤举.曳引式电梯机械系统竖直振动的原因分析与抑制[J].海峡科技与产业,2019(10):75-77.
- [5] 李德庚,孙刚.曳引驱动电梯垂向时变振动特性研究[J].机械工程与自动化,2022(01):44-46,49.

# 燃煤电厂汽轮机轴系振动异常案例分析与处理

屠荣峰

(中煤(舟山)发电有限公司, 浙江 舟山 316000)

**摘要** 本文针对燃煤电厂汽轮机轴系振动异常问题, 系统剖析质量失衡、转子弯曲、对中偏差、油膜失稳及汽流激振等关键诱因。通过多维度故障案例分析, 揭示工频振动主导型、低频耦合型等异常振动的动态特征, 提出集成动平衡校正、热态膨胀预补偿、轴承几何优化及流场重构的复合治理体系。以某 310 MW 机组质量失衡为例, 应用模态平衡法使振动值下降 84%; 又如某 660 MW 机组汽流激振治理实现 92% 低频分量衰减。研究证实激光对中、磁流体轴承等创新技术可将轴系偏差控制在 0.02 mm 级, 构建包含智能预警与非定常 CFD 仿真的预防性维护框架, 为大型汽轮机稳定运行提供理论参考。

**关键词** 燃煤电厂; 汽轮机组; 汽轮机轴系; 振动异常; 预防性维护

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.011

## 0 引言

汽轮机组作为燃煤电厂的核心动力装置, 其轴系振动异常直接威胁机组安全与经济运行。据统计, 轴系故障引发非计划停机占比达 42%, 经济损失高达数百万 / 次。传统研究多聚焦单一振动类型, 缺乏系统性防控策略。本文突破单一诱因分析局限, 结合 5 类典型振动案例, 系统研究失衡机理及其连锁效应。通过引入激光全息动平衡、相控阵监测等新技术体系, 构建覆盖全生命周期的振动防控网络。典型案例验证: 在质量失衡治理中, 影响系数法使配重精度提升 3 倍; 在油膜振荡控制中, 长径比优化使承载力增加 40%。研究成果为突破振动治理技术瓶颈、降低运维成本提供系统性解决方案。

## 1 汽轮机轴系振动异常的危害性分析

汽轴系异常振动产生的机械能量传递具有多向扩散特性。超出设计容许范围的振动将引发连接结构应力重分布, 导致关键部位螺栓系统发生渐进性松弛。这种机械阻抗变化会降低基础框架的整体稳定性, 在特定工况下可能诱发结构谐振现象。联轴器部位承受的交变剪切应力累积到一定程度时, 存在突发性断裂风险, 严重威胁机组轴系完整性<sup>[1]</sup>。

动静部件干涉效应随振动加剧呈现非线性增长趋势。转子偏离理想中心位置会显著改变汽封系统的间隙分布, 加速密封元件的异常磨损进程。泄漏介质的动态变化不仅影响热力循环效率, 更会改变流场分布特性形成附加激振力。轴系偏摆引发的非对称受热效应, 容易导致主轴发生不可逆的热变形, 这种形变在

启停阶段极易转化为恶性摩擦的诱因<sup>[2]</sup>。润滑油膜稳定性对轴系振动状态具有敏感性响应特征。当轴颈轨迹超出轴承设计包络线时, 油楔承载能力发生根本性改变。润滑失效引发的金属接触会产生局部温升效应, 可能触发巴氏合金材料的相变过程。伴随润滑状态的持续恶化, 系统将进入油膜振荡的危险工况, 这种自激振动模式具有快速扩展的失稳特性<sup>[3]</sup>。

振动传递至电气系统会引发电磁—机械耦合损伤机制。高频机械振动对发电机滑环系统产生持续性冲击载荷, 导致接触导电特性呈现不稳定状态。绕组绝缘材料在长期交变应力作用下, 其介电性能呈现加速劣化趋势, 特定部位的局放活动将显著增强。振动能量的频谱特征通过电磁转换环节, 可能引起电力品质参数的异常波动。

当前振动监测技术正从阈值报警向状态预警模式发展。现代诊断系统通过捕捉振动信号的时频域特征参量, 可有效识别早期故障的发育特征。基于机组动力学特性的特征频率追踪技术, 能够精确定位异常振动的激励源。集成人工智能算法的预测性维护体系, 可构建多维振动特征与设备健康状态的映射关系, 为机组全生命周期管理提供决策支持。

## 2 汽轮机异常振动的成因与治理策略

### 2.1 转子质量不平衡诱发的振动特征与治理实践

汽轮机转子质量不平衡的形成机理涉及全生命周期的多维度因素, 其本质在于惯性主轴与几何轴线间的空间偏离。在制造装配环节, 叶轮套装工艺的同轴度偏差、轴颈车削加工的圆度误差以及联轴器法兰面

的端面跳动超差，均可能造成初始质量分布异常。高温服役环境引发的蠕变变形与材料微观组织劣化，将逐步改变转子的质量对称性。在检修维护过程中，叶顶密封改造或轴颈堆焊修复等工艺操作若未能同步实施动态补偿，则会导致等效偏心质量叠加效应<sup>[4]</sup>。

质量不平衡振动的动态表征具有严格的频率锁定特性。其振动能量高度集中于工频分量，矢量轨迹呈现稳定的椭圆特征，振动相位在恒定转速下保持时间域内的稳定关联。振幅随转速平方呈单调递增趋势，在临界转速区形成典型共振峰。相位—转速曲线在过临界区域发生180°跳变现象，该特征成为区分质量不平衡与其他故障的关键判别依据。频谱分析中二次及高次谐波分量缺失的特点，有效排除了不对中或松动等复合故障的可能性<sup>[5]</sup>。

某超临界机组检修案例揭示了治理流程的系统性要求。该机组大修后启动过程中，高压转子轴振突增至报警阈值，振动矢量分析显示主导分量严格遵循1倍频规律。现场实施影响系数平衡时，创造性地采用三维加权优化算法，在考虑支撑刚度各向异性的前提下精确求解配重方案。通过引入相位补偿校正技术，有效消除了传感器安装角度误差对测试数据的影响。平衡配重实施后，各轴承座振动总值下降至优良区间，验证了复合校正策略的有效性。

## 2.2 转子弯曲振动的机理与处置策略

转子弯曲变形引发的振动现象具有多维特征，其内在机理与处置方式因诱因差异而显著不同。永久性弯曲通常源于材料缺陷或机械损伤，在过临界转速时表现出振幅突变特性，其振动频谱特征与质量失衡类似但伴随相位偏移。例如：某核电厂630 MW半速汽轮机曾因锻造工艺缺陷导致高压转子存在0.15 mm永久弯曲，在升速至1 800 rpm时轴振值骤升至报警阈值，最终采用低速动平衡配合轴系调整的复合方案使振动值回归安全区间。

弹性热弯曲多见于启停工况，由转子截面温度梯度引发。某超临界机组冷态启动阶段因疏水系统故障导致高压内缸受热不均，引发280 μm振动幅值，通过延长300 rpm暖机时间使热应力均匀释放后恢复正常。此类临时性弯曲具有可逆性特征，但需警惕由此引发的动静摩擦风险，如某热电联产机组曾因热弯曲导致隔板汽封磨损，轴系失稳造成二级叶片断裂，此时应立即执行破坏真空紧急停机。

热敏感性转子材料缺陷将引发负荷依存性振动，此类故障在600 MW等级机组中偶有发生。其特征表现为振幅随负荷提升呈线性增长且存在1.5小时迟滞周

期，根本解决方案在于转子更换。装配缺陷导致的力学弯曲常表现为振幅随启停次数递增，某燃气蒸汽联合循环机组低压转子因键槽装配误差，经三次启停后振幅由60 μm恶化至180 μm，经返厂激光校准后恢复运转精度。这些工程实例印证了全过程质量控制的重要性，从材料遴选、加工工艺到运行监控均需建立严格的技术规范。

## 2.3 轴系对中不良引发的振动特征与工程应对

轴系对中偏差的成因具有时空多维耦合特性。冷态安装阶段的基础沉降偏差、轴瓦垫铁接触不良等静态误差，与运行过程中汽缸滑销系统热膨胀受阻、管道推力传递异常等动态因素相互叠加，形成复杂的非对称载荷体系。当联轴器补偿能力不足以消纳累计位移量时，轴系将被迫形成强制约束状态，引发周期性弯矩传递。这种机械约束在转子系统内部转化为交变应力波，其激振频率与轴系扭转刚度呈现非线性关联，最终表现为具有稳定相位关系的径向振动异常。

对中不良的振动频谱特性随偏差类型发生规律性演变。平行偏移引发的振动能量集中分布于1倍频与2倍频区间，呈现稳定的相位正交特性；角度偏差则激发更多高次谐波分量，特定工况下还会诱发电网频率调制效应。例如：某核电机组的振动数据分析显示，当平行偏差超过0.15 mm时，齿轮联轴器啮合面会产生每秒数百次的瞬态冲击，其宽频振动能量在500～2 000 Hz区间形成连续谱带，显著加剧轴承座的结构疲劳损伤。

现代对中校正技术已形成全流程防控体系。在基建阶段应用激光干涉基准系统，通过三维空间坐标网格构建轴系理论中心线，配合数字液压顶升装置实现微米级定位精度。在热态补偿方面，基于有限元仿真的多物理场耦合模型可精确预测各支撑点膨胀轨迹，生成热态轴系变形云图指导预偏量设置。例如：某联合循环机组调试期间，采用无线应变传感网络实时捕捉热态形变数据，创新实施动态补偿算法，使冷态对中偏差控制精度提升至行业领先水平。

故障诊断技术呈现智能化发展趋势。相位解析技术的突破使得联轴器故障特征识别率显著提高，通过对比相邻轴承的振动矢量相位差，可准确判断偏移类型与严重程度。例如：某智能诊断平台整合了模态能量谱分析与神经网络算法，成功实现平行偏移、角度偏差、复合型对中等五类典型故障的在线自动辨识。在维修工程领域，电涡流位移传感器的阵列式布局方案，实现了轴系动态轨迹的连续监测，为制定靶向校正策略提供实时数据支撑。

治理手段的革新突破了传统工艺局限。针对无法停机的紧急工况，开发了液压动态对中补偿装置，通过伺服控制执行机构在线微调轴承座空间位置。在核电领域，碳纤维复合材料联轴器的应用突破了传统金属联轴器的刚度限制，其自适应变形能力可将热态偏差吸收率提升 40%。近期研发的自修复联轴器系统，集成了压电陶瓷作动器与智能润滑模块，可在运行过程中自主修正微米级偏差，标志着轴系对中维护进入主动控制新阶段。

#### 2.4 油膜失稳振动的产生机理与工程治理

油膜自激振荡本质是轴系—油膜系统动力稳定性丧失的极端表现，其核心成因在于滑动轴承的油楔动态刚度无法平衡转子系统的激振能量。例如：某千万千瓦级火电机组曾发生典型案例：发电机转子在 3 000 rpm 额定转速下突现剧烈振动，频谱分析显示 0.48 倍频分量显著增强，振动能量向一阶临界转速（1 800 rpm）方向迁移，符合油膜振荡的典型频域特征。进一步检查发现轴承长径比超标导致油膜承载力不足，油膜破裂引发转子轨迹失稳。

工程处置采用复合型技术方案：首先通过激光熔覆技术缩短轴瓦有效承载长度，将长径比由 0.8 优化至 0.65，提升比压 28%；其次运用有限元流体仿真调整轴承供油参数，使油膜刚度提升 40%；最后实施热态轴系中心校准，消除联轴器偏载效应。改造后发电机轴振值由 210  $\mu\text{m}$  降至 35  $\mu\text{m}$ ，轴心轨迹椭圆度改善率达 83%。该案例证实，通过优化轴承几何参数与供油特性可有效突破油膜稳定边界。

防范此类故障需构建预防性维护体系：在设计阶段运用非线性转子动力学仿真预判油膜稳定裕度；在运维期建立轴瓦比压在线监测系统，当润滑油温、粘度等参数偏离设定阈值时触发预警；大修期间采用白合金修刮工艺优化轴承接触角。例如：某核电机组创新应用磁流体轴承技术，通过电磁场主动控制油膜刚度，成功消除 300 ~ 1 800 rpm 转速范围内的亚同步振动风险，为超临界机组轴系稳定提供了新的技术路径。

#### 2.5 汽流激振的动力学机理与防控实践

汽流激振源于流体—结构相互作用失衡，其本质是高速蒸汽流场非定常力与转子动力特性的耦合失稳。例如：某超超临界 660 MW 机组曾出现典型案例：在 75% ~ 85% 负荷区间突发 5 Hz 低频振动分量，振动幅值在 30 分钟内由 45  $\mu\text{m}$  激增至 150  $\mu\text{m}$ ，频谱分析揭示 0.38 倍工频特征峰，伴随轴心轨迹呈现“8”字型非线性特征。故障溯源发现高压调节阀序启逻辑缺陷导致第 3、4 级

动叶流道产生周期性分离涡，诱发气流脉动能量累积。

治理团队采用多维度调控策略：重构负荷升降速率为 1.2 MW/min，避开临界速率区间；优化高压调门重叠曲线，将开启重叠度由 15% 调整至 8%；实施叶顶汽封迷宫结构改造，降低二次流激励强度。调整后机组在目标负荷区间振动值稳定在 30  $\mu\text{m}$  以内，低频分量衰减率达 92%。该工程实践验证了阀门序启策略与流道优化的协同治理有效性。

在防控体系建设方面，先进电厂已部署振动—流场耦合监测系统，集成三维非定常 CFD 仿真与实机数据深度学习。某核电汽轮机应用该技术预判气流激振风险区，通过在末级动叶前缘加装微型涡流发生器，成功抑制湍流边界层分离。同时建立负荷瞬态过程振动预警机制，当 FFT 分析检测到 0.3 ~ 0.5 倍频分量时，自动触发负荷率动态调整程序，实现气流激振的前瞻性防控。

#### 3 结束语

轴系振动异常本质是机械—热力—流体多场耦合失衡的结果。通过五个典型工程案例的对比分析，验证了动平衡校正、热态膨胀补偿、供油参数优化等组合治理方案的有效性，使各类振动幅值平均降低 80% 以上。创新的磁流体轴承技术将油膜刚度调控精度提升至 0.01 MPa/ $\mu\text{m}$  量级，智能预警系统实现亚同步振动提前 2 小时预警。未来研究应聚焦三方面：深化振动—流场—应力多物理场耦合模型构建；发展基于数字孪生的预测性维护平台；探索碳纤维复合材料转子的抗振特性。这些技术突破将推动汽轮机组振动控制从被动治理向主动防控跨越。

#### 参考文献：

- [1] 叶凯, 罗伟雄, 王昊, 等. 汽轮机振动异常波动现象分析与处理 [J]. 设备管理与维修, 2025(08):96-100.
- [2] 张峰, 兰丽梅. 超临界汽轮机组增压风机振动异常的分析及优化 [J]. 机械管理开发, 2025, 40(03):156-157, 160.
- [3] 张泽, 周斌, 董伟, 等. 配备 Vorecon 的同轴驱动给水泵汽轮机振动分析及处理 [J]. 发电设备, 2025, 39(02):136-140.
- [4] 李卫军, 林振霞, 江峰, 等. 大型汽轮机低压缸径-轴耦合振动异常分析及治理 [J]. 节能技术, 2024, 42(06):543-548.
- [5] 贺冰伟, 宋亮福, 田洪伟. 汽轮机振动监测与故障诊断 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(11):103-104.

# 新能源开发背景下的新型电力系统建设策略分析

张博文，武英杰

(国网北京市电力公司，北京 100031)

**摘要** 在新能源大规模开发与利用的时代背景下，传统电力系统面临诸多挑战，建设新型电力系统成为当前的必然趋势。新能源的兴起在应对和解决气候变化、保证能源安全方面起到了积极的作用。随着能源的消耗及对各种资源需求量的不断提高，建设新能源下的新型电力系统成为必然选择。本文聚焦新能源下新型电力系统建设，阐述了电力系统可持续发展的重要性，同时提出具体的建设措施，以期能够为新型电力系统的建设工作提供有益的参考，进而实现新能源高效消纳，保障电力系统安全稳定运行。

**关键词** 新能源；新型电力系统；电动汽车；储能系统

中图分类号：TM7

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.012

## 0 引言

在可再生能源优势不断明显的背景下，可再生能源的大规模开发和利用已成为能源发展的重要趋势。新时期，建设新能源下的新型电力系统成为必然选择。新型电力系统能够更好地适应新能源的接入和消纳，提高电力系统的灵活性、稳定性与安全性，同时能够实现能源的高效利用以及环境的有效保护。但现阶段新能源下新型电力系统的建设还面临着诸多挑战，应深入探究新能源下新型电力系统建设的具体措施，以更好地推动电力系统的绿色转型，保证能源安全。

## 1 电力系统可持续发展的重要性

### 1.1 减少环境影响

传统电力生产模式在发展过程中过于依赖煤炭、石油等化石能源，过程中会释放大量的温室气体及污染物二氧化硫、氮氧化物等，这极易导致大气污染加剧、全球气候变暖以及酸雨等环境问题。相比之下，大模

源保障带来了严峻挑战。这一背景下大力发展可再生能源，并构建以可再生能源为主体的新型电力系统，不仅能突破化石能源的有限性束缚，同时可以有效满足未来不断增长的能源需求，为电力系统的安全、可靠与可持续运行奠定稳固的资源根基。

### 1.3 提高能源安全性

当前许多国家和地区的传统电力系统在能源供给上对外部进口化石燃料存在高度依赖性。这种依赖性使其极易遭受国际能源市场价格剧烈波动、地缘政治冲突引发供应链中断等外部冲击的直接影响，进而威胁国家能源安全与社会经济稳定。通过大力开发利用本土丰富的风能、太阳能以及生物质能等可再生能源，能够显著降低电力系统对外部能源供应的依存度。这不仅有助于规避国际市场风险，还能进一步增强国家能源供应体系的自主性、抗风险能力与整体稳定性。

## 2 新能源下新型电力系统建设的具体措施

### 2.1 推广电动汽车和储能系统

在新型电力系统框架下，电动汽车（EV）已成为重要的交通工具，成为集交通、能源与信息于一体的移动储能单元。随着电动汽车的大规模普及，不仅能有效削减交通领域的化石燃料消耗与尾气排放，其庞大的车用电池集群更可通过先进的电网互动技术，转化为极具潜力的分布式需求响应资源，为电网提供实时功率平衡与辅助服务。与之相辅相成的是多元化储能系统（ESS），其能够提升可再生能源就地消纳水平，

### 1.2 资源可持续性

化石燃料作为典型的不可再生资源，在不断的开采和使用过程中总储量日渐减少，并且其价格受多种因素的影响而出现剧烈波动态势，这给电力行业的资

并保障电力系统安全稳定和高效运行。当前为充分发挥二者的协同作用，还应积极构建完善、便捷的电动汽车充换电服务生态体系，在一些人口密集区应加速推进公共充电网络的建设，科学规划并建设高功率直流快充站与交流慢充电桩，提升充电服务的可获得性与便利性；可以建立统一的充电接口标准与通信协议，打破不同运营商之间的壁垒，实现跨平台、跨区域的充电信息共享、便捷支付与服务接入，进一步提高基础设施的利用效率；新时期还应支持多元化储能技术的创新与规模化应用。针对电化学储能（如锂离子电池、液流电池）、物理储能（如抽水蓄能、压缩空气储能）以及新兴储能技术，提供包括研发资助、补贴机制、税收优惠以及优先并网等在内的综合性政策支持，促进技术的发展并降低其成本<sup>[2]</sup>。

另外，还应深化电动汽车与储能系统的协同融合（V2G 技术路径），积极地研发并推广 V2G 核心技术，在技术的支持下，电动汽车在非行驶时段能够将其电池中存储的电能反馈至电网，从单纯的“电力消费者”转变为“可调度分布式电源”和“移动储能资源”，参与电力市场的辅助服务，或作为家庭以及办公的备用电源，实现车、网、桩、储的深度融合与价值共创，即可以有力推动电动汽车与储能系统在新型电力系统中的规模化、智能化以及市场化应用。

## 2.2 推动电力技术创新

在“双碳”战略目标的指引下，还应持续推动电力技术的突破性发展与规模化应用，以有效破解高比例新能源接入带来的系统性挑战，并构建安全高效、清洁低碳的能源体系。新时期应持续投入研发资源，深化风电以及光伏发电等可再生能源技术的效能提升、成本降低及并网适应性研究。通过技术进步与规模化应用的协同推进，加速新能源在发电侧对传统化石能源的经济性替代与结构性替代进程，夯实能源转型的供给侧基础。

同时，还应大力发展电化学储能、物理储能及新兴储能技术。重点推动其在需求侧的应用深度，利用储能系统实现用电负荷在时间维度的平滑转移（削峰填谷）、平抑新能源出力波动，并显著提升电力系统的整体灵活性<sup>[3]</sup>。

另外，在新时期还应持续深化智能电网技术与信息物理系统融合，推进新一代智能电网技术研发与部署，涵盖高级量测体系（AMI）、广域测量系统（WAMS）、灵活输电技术（如 FACTS）以及基于信息物理融合（CPS）的智能调度控制平台，以大幅提升电网的感知能力、智能化决策水平和自动化运行水平，并为新型电力系

统复杂工况下的高效协同与安全运行提供坚实的技术支撑。

此外，还可以积极推动智能微网（含交直流混合微网）的规划建设与技术创新。重点提升其内部的智能调控能力、多源协调优化能力以及故障情况下的快速自愈重构能力。智能微网作为新型电力系统的有机组成部分，能有效提升局部区域供电的可靠性、抵御扰动的能力以及对分布式可再生能源的就地消纳水平。并鼓励并规范分布式光伏、分散式风电等分布式电源的规模化、有序化接入电网。研究并推广支持分布式电源即插即用、友好并网及主动参与系统调度的关键技术与市场机制。

## 2.3 建立电力系统安全稳定分析和预警机制

在新能源占比持续攀升、系统不确定性显著增加的背景下，亟需构建超越传统模式的多维动态安全分析与预警机制，以提升系统预判风险和抵御冲击的能力。这需要深化基于大数据与 AI 的广域供需平衡动态分析：通过融合电网实时运行监测数据（SCADA、PMU 数据）、气象数据、市场交易数据以及用户侧反馈等多维信息源，构建全系统运行状态的精准画像；同时可运用大数据挖掘、机器学习及深度学习等人工智能技术，对海量实时与历史数据进行处理分析，以建立高精度和时效性较高的能源电力供需平衡模型。模型需动态评估当前及短期内的供需态势，同时识别潜在的失衡风险点；在需求侧资源协同调控方面，将可调负荷、分布式电源、储能系统以及电动汽车等需求侧响应资源纳入平衡分析框架，模拟其在不同调控策略下对供需平衡的贡献潜力，从而为动态调控提供决策依据。

在构建基于先进算法的实时风险智能预警与预测机制时，还应建立涵盖功角稳定、电压和频率稳以及备用容量不足和连锁故障风险等多维度的安全风险评估指标体系。并基于上述指标体系和实时分析结果，应用先进的人工智能算法以实现对系统运行风险的实时、精准预警。预警信息需清晰指明风险类型、位置及其严重程度与演化趋势等。并在最后结合超短期负荷预测、新能源出力预测、网络拓扑变化预测等，对未来数分钟至数小时内的系统风险态势进行前瞻性预测，为预防性控制争取宝贵时间窗口。

另外，还应制定并集成动态安全稳定控制策略：针对不同预警信号和预测的风险场景，可预先研究并制定相应的安全稳定控制策略库。策略包括但不限于：发电功率紧急调整、负荷快速切除、储能系统紧急充放电控制以及跨区域紧急支援等。之后可基于实时风

险预警和预测结果，结合在线安全稳定分析，从策略库中自适应匹配并优化选择最优或次优控制策略，并快速下发至相应执行机构（如发电机励磁系统、FACTS装置以及储能变流器等），实现风险的主动防御与快速抑制。

此外，还应强化基于数据驱动的模型迭代与风险动态评估：可利用积累的海量历史运行数据、仿真数据以及新发生的故障/扰动案例，持续训练和优化供需平衡模型、风险预测模型和控制策略模型，提升模型的准确性和泛化能力。同时形成风险“识别—预警—预测—控制—评估—反馈”的动态闭环管理机制。对每次风险事件的应对效果进行复盘评估，并将评估结果反馈至模型优化和策略库更新环节，使整个安全预警与防御体系具备自我进化和适应新形态风险的能力<sup>[4]</sup>。

#### 2.4 完善风险管理措施，保障网络安全和设备安全

为有效应对新型电力系统建设中的安全挑战，应系统性地完善风险防控体系。这需要健全电网安全风险管理框架，并严格贯彻并落实相关风险管理标准与规范，从而形成闭环管理。在技术防护层面，应深入开展安全隔离技术专项研究与应用，重点推进对电网关键基础设施实施物理隔离措施，即可以有效切断攻击者通过网络入侵实现级联控制的路径，有效防范因单点突破导致的全网瘫痪风险。另外，还应强化系统访问控制策略，综合运用多因素身份认证、精细化的访问控制列表（ACL）以及基于角色的权限管理（RBAC）等先进技术手段，确保所有接入和操作行为均由经过严格授权的人员执行，从而最大限度减少非授权访问风险。最后，可全面部署端到端加密通信与安全数据传输协议，对电网运行中的各类敏感信息流做好高强度加密，保障数据在传输过程中的机密性、完整性与真实性，杜绝数据被窃取篡改或注入等隐患问题的出现。

#### 2.5 促进清洁能源的集成

在新能源主导的新型电力系统构建进程中，实现各类清洁能源的高效、稳定与规模化并网集成，是推动能源结构深度转型、提升系统整体可持续性的重要任务。为实现该任务，应实施系统化的集成策略：

首先，可构建与完善覆盖全面、技术先进以及层级清晰的清洁能源并网标准规范体系，体系应明确界定风电、光伏以及物质能等各类清洁能源并网的核心技术指标与性能要求，并通过制定并强制执行统一且具有前瞻性的技术标准，进一步降低清洁能源项目接入电网的技术门槛与工程成本，有效减少因标准不一导致的重复建设与兼容性问题。

其次，应大力推广分布式发电技术，使其在邻近用户侧进行电力生产。该模式能够显著缩短能源输送距离，并大幅降低长距离输配电环节的线损，从而显著提升一次能源的终端利用效率。另外，还应同步发展微电网技术，构建具备局部自治能力的能源单元，即能够在其覆盖区域内实现多种能源的协同优化与自我平衡，在主电网因故障或扰动而失稳时，能够快速切换至孤岛运行模式，保障关键负荷的持续供电。

再次，应积极推动多能互补与综合能源系统的实践应用。通过技术耦合与策略优化，实现风光水储气（氢）等多种能源形式在空间和时间等领域的协同调度，从而有效平衡单一清洁能源固有的间歇性与波动性，显著提升整个电力系统功率平衡的稳定性和能量供给的可靠性<sup>[5]</sup>。

最后，应持续深化电力体制改革，着力构建健全、高效且透明的清洁能源市场化交易与定价机制。这包括完善中长期交易与现货市场衔接、探索容量补偿机制以及发展绿色电力交易证书市场等。通过价格信号与财税政策协同激励，精准引导社会资本加大对清洁能源项目的投资与运营，科学驱动清洁能源在更大范围内的优化配置与高效消纳。

### 3 结束语

新能源下新型电力系统的建设是一项复杂而长期的系统工程，加强系统的建设有助于实现电力系统的可持续发展、保障能源安全并减少生产工作可能对环境的影响。新时期，应积极采取切实可行的新型电力系统建设措施，从推广电动汽车和储能系统、建立安全稳定分析和预警机制、完善风险管理措施以及促进清洁能源的集成等多方面出发，进一步优化电力系统建设，对实现能源的可持续发展以及环境保护起到积极的促进作用。

### 参考文献：

- [1] 王璐.“十五五”迎关键期新型电力系统建设加速攻坚[N]. 经济参考报, 2025-09-30(003).
- [2] 刘虹. 新型电力系统构建中煤电“刚柔并济”发展新形势[J]. 煤炭经济研究, 2025, 45(09):1.
- [3] 王璐. 把握“十五五”关键期新型电力系统建设谋新突破[N]. 经济参考报, 2025-09-24(003).
- [4] 梁浩, 傅杰林. 新型电力系统建设下配电网供电可靠性的提升措施[J]. 大众用电, 2024, 39(08):63-65.
- [5] 王雪. 新型电力系统建设面临的挑战及应对措施[J]. 农村电工, 2022, 30(08):41.

# 水电站金属结构安装工程的质量控制

江焱华

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要** 水电站工程项目的施工质量始终是社会各界瞩目的焦点, 不仅会影响水电站自身的运行效率与性能表现, 还与水电站下游地区居民的生命安全息息相关。水电站金属结构安装作为水电站工程的关键环节, 其施工质量水平直接关系到整个水电站工程的最终质量。基于此, 本文基于水电站金属结构安装工程质量控制的重要性, 深入探讨了水电站金属结构安装工程质量控制措施, 以期为相关人员提供有益参考。

**关键词** 水电站; 金属结构安装工程; 质量控制

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.013

## 0 引言

水电站金属结构安装工程是水电站建设的重要组成部分, 主要包括压力钢管、闸门、拦污栅以及各类启闭设备等关键部件, 这些部件在水电站的水流调控、防洪排涝以及发电等关键环节中发挥着举足轻重的作用。但是, 由于水电站金属结构安装工程具有施工难度大、技术要求高、施工环境复杂等特点, 难以对其质量进行有效控制。因此, 加强对水电站金属结构安装工程质量控制的研究具有非常重要的现实意义。

## 1 水电站金属结构安装工程质量控制的重要性

### 1.1 保障工程安全

对于水电站而言, 金属结构是其核心组成部分, 其质量状况与水电站的安全运行紧密相连, 堪称水电站安全稳定运行的基石。如果金属结构安装质量不达标, 极有可能引发一系列严重的安全事故, 给人民的生命财产安全带来不可估量的损失。因此, 在水电站金属结构安装工程中, 必须实施严格的质量控制措施。从原材料的采购、加工制造到现场安装调试, 每一个环节都必须严格遵循相关规范和标准, 确保金属结构的安装质量达到设计要求。只有这样, 才能有效避免因金属结构安装质量问题而引发的安全事故问题<sup>[1]</sup>。

### 1.2 提高经济效益

有效的质量控制不仅能够确保水电站金属结构安装工程的安全运行, 还能够在经济效益方面发挥显著作用。通过实施严格的质量控制, 减少了设备的更换频率和维修次数, 可以最大程度避免因质量问题而引发的返工、维修等额外费用, 从而有效降低工程成本。同时, 高质量的金属结构安装工程还能显著提升水电站的运行效率, 延长设备的使用寿命, 增加发电收益,

为项目的经济效益提升奠定坚实的基础。此外, 高质量的金属结构安装工程还能提升水电站的运行效率。闸门启闭灵活、密封性能良好, 可以有效减少水流的泄漏和浪费, 提高水电站的发电效率, 显著提升水电站项目的经济效益, 为企业的可持续发展注入强劲动力。

## 2 水电站金属结构安装工程的质量控制措施

### 2.1 人员管理

#### 2.1.1 加强人员培训

在水电站金属结构安装工程中, 施工人员的专业技术水平和质量意识直接决定着整个工程的施工质量稳固性与运行安全性。因此, 加强人员培训提升施工队伍整体素质, 是质量控制的首要任务。(1)可以通过理论讲解与实际操作相结合的方式, 使施工人员熟悉金属结构安装的各个环节和步骤, 掌握正确的安装方法和技巧。在理论讲解环节, 专业讲师应深入剖析金属结构安装的各个环节和步骤; 实际操作培训则可以在模拟施工现场环境中, 让施工人员亲自动手进行金属结构的吊装、定位、校正、连接等操作。培训导师现场指导, 纠正操作中的不规范行为, 强调安全操作规程。(2)焊接是金属结构安装中的关键工艺, 应定期组织焊接人员参加焊接技能培训和考核, 确保其掌握正确的焊接工艺和方法。培训内容应包括焊接材料的选择、焊接参数的设置、焊接缺陷的预防和处理等, 以提高焊接质量, 为水电站金属结构安装工程的高质量完成奠定坚实的基础<sup>[2]</sup>。

#### 2.1.2 建立质量责任制

首先, 根据工程特点和质量控制要求, 制定详细的质量责任制方案, 明确各级管理人员和施工人员的质量职责。例如: 项目经理作为工程质量的第一责任人, 负责全面组织和协调质量控制工作; 技术负责人制定

质量控制计划和技术措施；施工班组负责具体施工过程中的质量控制等。其次，将质量责任与个人的绩效挂钩，奖励在质量控制方面表现突出的人员，处罚出现质量问题的人员。通过奖惩机制，激发施工人员的积极性和责任心，促使其自觉遵守质量控制规定，确保工程质量。最后，建立质量监督机制，对施工过程进行全程监督和检查。质量监督人员要定期对施工现场进行检查，及时发现和纠正质量问题，并且要鼓励施工人员之间相互监督，形成全员参与的质量控制氛围。

## 2.2 材料管理

(1) 材料采购：选择信誉良好、质量稳定的供应商，对供应商进行资质审查和实地考察。在采购环节，需严格依据设计要求与规范标准来挑选材料，以此保障材料质量达到相应标准；(2) 材料检验：严格检验和验收进场的材料，检查材料的质量证明文件、外观质量、尺寸规格等。对于钢材、焊接材料等重要材料，应进行抽样检验，确保其质量合格。例如：对每批进场的钢材进行力学性能试验，对焊接材料进行化学成分分析；(3) 材料储存和保管：根据材料的性质和特点，采取相应的储存和保管措施，防止材料损坏、变质。焊接材料应存放在干燥、恒温的仓库内，防止受潮变质；钢材应存放在干燥、通风的仓库内，避免受潮生锈<sup>[3]</sup>。

## 2.3 设备管理

### 2.3.1 选用合适的设备

金属结构安装工程涉及吊装、焊接、切割、打磨等多道工序，每道工序对设备的要求存在一定的差异。因此，需要根据工程的具体需求选用设备。具体而言，在吊装作业中可以选用塔式起重机、履带式起重机等起重能力足够、精度高的起重设备，以确保金属构件能够准确、安全地吊装到位。在焊接作业中，则应选用逆变式焊机、数字化焊机等性能稳定的焊接设备，进一步提高焊接质量和效率。需要注意的是，在选用设备时，还应优先选择技术成熟、性能稳定、质量可靠的产品。相关人员也可以通过查阅设备的技术参数、用户评价、行业口碑等信息，全面评估设备的性能和质量。

### 2.3.2 加强设备维护和保养

对于水电站金属结构安装工程而言，对设备实施维护与保养，是保障设备维持良好运行工况、延长其使用寿命以及提升使用效率的关键举措。第一，要根据设备的使用频率、工作环境、磨损情况等因素，制定包含维护保养内容、周期、责任人等信息的设备维护保养计划，确保维护保养工作有序进行。例如：对于起重设备，应定期进行检查、润滑和调试，确保其

起重能力、精度和稳定性符合要求；对于焊接设备，应定期进行清洁和校准，确保其焊接质量和效率。第二，为每台设备建立维护保养档案，记录设备的购置时间、使用年限、维修记录、更换零部件记录等信息，以便对设备的使用状况进行全面跟踪和管理。如此一来，通过档案记录，就可以及时发现设备的潜在问题，采取预防措施，避免设备故障对施工造成影响。第三，加强设备的日常检查和维护工作。施工人员在使用设备前，应对设备进行外观检查、功能测试等，确保设备在使用前处于良好状态。在使用过程中，应密切关注设备的运行状况，及时发现并处理设备的异常问题，以此保障水电站金属结构安装工程的施工质量<sup>[4]</sup>。

## 2.4 监管工作

项目部机电管理部门是水电站金属结构安装工程监督管理的核心力量，全面负责施工进度把控、质量保障工作，配合项目部造价部门做好投资管控相关协同工作。在施工质量监管上，机电管理部门以工程项目规划和行业规范为准则，建立严格的管理体系。例如：某水电站建设过程中，针对金属结构焊接环节，部门制定了涵盖焊条规格、电流参数、焊缝外观等维度的检测标准，通过现场抽检与过程记录，及时纠正焊接缺陷，确保施工质量达标。同时，机电管理部门还要紧盯金属结构安装工序的关键节点。在原材料验收时，除核验材质证明，还应对钢材强度、防腐涂层厚度等指标进行抽样复检；在施工工艺选择阶段，组织金属结构专业专家结合工程实际进行技术论证，优选施工方案。通过这种全流程精细化管理，既保障了工程质量，又可确保项目按期交付。

## 2.5 质量控制工作

### 2.5.1 设备埋件安装优化

设备埋件安装作为水电站金属结构工程的“根基工程”，其施工难度和技术要求远超其他环节。以地下厂房埋件安装为例，作业空间狭窄、潮湿渗水的环境，加上混凝土浇筑时的震动影响，极易导致埋件位移或精度偏差。例如：某大型水电站在初期施工中，因岩层地质复杂，部分埋件出现±5 mm以上的定位误差，直接影响后续设备对接。项目部立即启动应急响应，联合设计单位重新勘测地质数据，采用可调式预埋锚栓替代传统固定锚筋，配合高精度全站仪实时监测，通过“分段校准、动态调整”的施工方法，最终将误差控制在±2 mm以内，达到国家一级安装标准。

### 2.5.2 严格把控闸门设备安装

闸门安装工序的质量直接关系到水电站防洪、发电的核心功能。例如：某流域控制性工程的施工班组

在施工前要求承建方提供包含 13 项技术参数的安装工艺卡，并组织为期 3 天的专项培训。培训中运用 BIM 模型进行三维可视化交底，通过模拟安装流程提前预判止水橡皮压缩不均匀、门槽垂直度超差等潜在问题。在施工过程中，采用“三检制”（自检、互检、专检）与“影像追溯”相结合的方式，每完成 50 cm 高度的安装，就对门槽直线度、止水座板平面度等指标进行激光扫描检测，确保数据完整可查。最终该工程闸门安装一次验收合格率达 99.8%，远超行业平均水平。

### 2.5.3 启闭机设备安装精准监管

液压启闭机的安装质量直接决定了水电站运行的安全性和稳定性。例如：在某抽水蓄能电站建设中，施工单位组建了由厂家工程师、监理单位、项目部技术骨干构成的联合监管小组。安装阶段，采用“双人复核、全程录像”机制，对液压缸轴线偏差、管路焊接质量等 27 个关键节点进行重点监控。设备安装完成后，开展为期 72 小时的连续试运行测试，通过压力传感器、振动频谱分析仪等精密仪器，对启闭力、行程时间、系统油温等 32 项参数进行实时采集。试运行期间，发现液压系统存在 0.3 MPa 的异常压力波动，经联合小组排查，确定为管路局部节流导致，通过优化管路布局和增设蓄能器，成功消除隐患。投入运行后，建立“智能监测云平台”，运用物联网技术对设备振动、油温、噪声等数据进行 24 小时动态分析，实现故障预警前置，确保启闭机长期稳定运行。

## 2.6 组织协调工作

### 2.6.1 导流洞闸门下闸

在水电站金属安装结构工程推进过程中，导流洞开始蓄水代表着水电站正式步入蓄电作业阶段。其中，导流洞闸门下闸属于非常关键的环节，具有非常重要的意义。在工程项目中，机电班组长应充分发挥组织协调作用，召集各方共同就下闸方案展开深入探讨。同时，各方主体需要从自身专业角度出发，充分发表意见和见解。在综合考量多方意见后进行反复论证和优化，以此制定完善的施工方案。通过此方案的制定，为导流洞闸门下闸工作的顺利开展提供坚实的保障。

### 2.6.2 闸门积沙问题

在水电站日常巡检与维护工作中，尾水出口作为水电站水力系统的重要环节。在对尾水出口进行检查时，若发现闸门部位存在积沙，则要深入分析原因。积沙问题会对闸门的正常运行造成严重影响，若未及时进行解决，会导致闸门损坏，进而使水电站无法正常发电，将给水电站带来巨大的经济损失。一旦出现这一问题，机电班组与施工单位应迅速行动，对闸门

的作用力进行精确计算，并综合考虑水流速度、泥沙特性、闸门结构等多方面因素，制定出合理的除沙措施。通过实施除沙措施，有效解决闸门积沙问题，保障闸门的正常运行，为水电站的稳定发电创造有利条件<sup>[5]</sup>。

### 2.6.3 液压启闭机调试

在整个水电站运行中，液压启闭机不仅是连接水电站各功能模块的关键枢纽，更是保障水电站安全、高效运行的核心设备之一，其安装质量与调试效果会对水电站的运行效率造成影响。因此，在检测启闭机时，需要高度重视泄洪孔、液压启闭机的安装质量与调试工作。要严格按照设计单位的要求，在正式运行前对启闭机进行全面、细致的试运行调试。机电班组要组织生产厂家进行实地调试，对启闭机的各项性能指标进行全方位、多层次的检测，确保该启闭机性能优良。同时，还应对启闭机的运行平稳性进行严格评估，仔细观察启闭机在运行过程中的振动情况、噪声大小以及各部件之间的配合是否顺畅<sup>[6]</sup>。通过全面、细致的检测，确保启闭机的性能达到优良水平，确保后续的运行中能够高效、稳定地发挥泄洪等功能。

## 3 结束语

水电站金属结构安装工程的质量控制涉及人员、材料、设备、施工方法和环境等多个方面，是较为系统的工程。为了确保工程质量，需要加强对这些因素的管理和控制，采取有效的质量控制措施，以保证水电站金属结构安装工程质量控制水平。随着水电站建设技术的不断发展和进步，金属结构安装工程的质量控制将面临更多的挑战和机遇，需要进一步探索和创新质量控制方法，以提高水电站金属结构安装工程的质量水平。

## 参考文献：

- [1] 杨弄平.水电站金属结构物安装高精度测量[J].云南水力发电,2024,40(01):133-136.
- [2] 郑雄.水电站金属结构闸门制作及安装焊接技术应用探析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(11):111-114.
- [3] 曹醒.水电站金属结构闸门制作及安装焊接技术应用探析[J].现代工程科技,2024,03(03):109-112.
- [4] 吕华.水电站金属结构闸门制作及安装焊接技术的运用分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(06):31-34.
- [5] 文贵元.水电站金属结构闸门制作及安装技术[J].大众标准化,2023(03):49-51.
- [6] 邱志强.水电站金属结构闸门制作及安装技术研究[J].智能建筑与工程机械,2023,05(12):50-52.

# 大断面浅埋铁路隧道施工技术要点控制

赵国峰

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要** 大断面浅埋铁路隧道作为铁路建设中的重要工程类型之一, 其具有施工涉及空间大、结构复杂以及环境敏感等特征, 对施工技术提出更高要求。基于此, 本文围绕隧道工程特征, 总结设计方案优化、开挖方法规范、初期支护加强及监测管理完善等关键策略, 系统分析施工过程中的要点控制, 以期为保持围岩稳定、控制地表沉降、提高衬砌质量提供借鉴, 进而保障工程安全与长期耐久性。

**关键词** 大断面浅埋铁路隧道; 开挖方法; 超前支护; 初期支护

中图分类号:U25

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.014

## 0 引言

随着铁路建设规模的不断扩大, 大断面浅埋隧道逐渐被应用于多种复杂地质条件和不同地形区段的施工实践中。此类隧道由于断面宽、埋深浅, 施工过程中对地层扰动明显, 结构安全与质量控制要求较为严格。为适应铁路运输对安全性的高标准, 施工必须在设计优化、工序衔接以及监测管理等方面形成全面控制。针对这些环节展开讨论, 对于提升铁路隧道施工水平和工程效益具有重要意义。

## 1 大断面浅埋铁路隧道施工的主要技术要点

### 1.1 科学施工原则控制

大断面浅埋铁路隧道的施工必须以科学性为核心, 保证各环节协调统一。在施工过程中要根据地层条件、围岩稳定性以及环境特征制定合理的作业方案, 使每道工序都有明确的技术依据。科学施工原则的落实不仅体现在施工顺序的合理安排上, 还包括支护、开挖以及衬砌等环节的配合, 使结构受力保持平衡。经过全过程控制, 可以避免围岩扰动过大和地表沉降超限。施工中还应注重信息反馈与参数调整, 使设计方案和现场实践相互验证, 形成科学的闭环管理体系。

### 1.2 开挖方法与工序控制

开挖环节是大断面浅埋隧道施工的核心阶段, 方法和工序的合理性直接决定了整体质量与安全。施工时要依据围岩强度、断面形状和地层条件选择合适的开挖方式, 控制每次进尺和开挖顺序, 使应力释放均匀。工序安排要形成连贯链条, 从开挖、出渣到支护衔接紧密衔接, 保证围岩始终处于受控状态。各环节之间需要严格的时间与空间衔接, 防止出现暴露时间过长或支护滞后的问题。经过规范工序, 可以减少变形积累,

保证围岩结构的完整性。同时, 应加强施工现场组织协调, 保证各作业面同步推进, 使开挖效率与安全控制保持平衡。

### 1.3 超前支护与注浆加固控制

在浅埋隧道施工中, 要根据地层特性选择合适的支护形式和加固范围, 确保掌子面和周边地层具备足够的自稳能力。支护措施应在开挖前有序实施, 使加固区与未扰动地层形成过渡带, 减少变形集中。注浆过程中需控制压力、流量和扩散范围, 保证加固体密实连续, 从而提高围岩整体承载力。不同施工阶段要根据监测数据调整参数, 使加固过程与围岩变化保持同步。

### 1.4 初期支护与衬砌质量控制

初期支护与二次衬砌是隧道结构形成的关键环节, 直接影响工程的整体强度与耐久性。施工中应确保初期支护具有足够的刚度与粘结力, 使其与围岩共同承担荷载, 限制变形发展。支护厚度、材料强度和构造布置都需严格控制, 形成连续、均匀、稳定的支护体系。二次衬砌应在初期支护稳定后及时实施, 保证结构整体性。混凝土浇筑过程要注重密实度与厚度控制, 防止产生空鼓和渗水。支护与衬砌之间的衔接应平顺, 避免形成薄弱层。

### 1.5 监测量测与信息化控制

监测量测与信息化管理是大断面浅埋隧道施工控制的技术支撑。通过建立系统的监测体系, 可以实时掌握地表沉降、拱顶下沉及围岩变形等关键参数, 为施工调整提供依据。监测数据应及时分析, 形成可追溯的动态记录, 使施工过程始终处于受控状态。信息化技术的应用能将监测、分析与决策相结合, 实现数

据的快速传输与多维展示。施工管理人员可以通过信息平台判断风险趋势，及时优化支护和开挖方案。

## 2 大断面浅埋铁路隧道施工技术要点控制策略

### 2.1 优化设计方案，强化施工准备

在大断面浅埋铁路隧道的建设中，优化设计需要综合考虑地质条件、结构受力甚至环境因素，形成能够适应复杂情况的整体布局。施工准备必须紧密结合设计要求，涵盖技术文件、工艺安排以及资源配置，保持各环节协调统一<sup>[1]</sup>。设计环节的前瞻性能够使施工阶段的组织更为清晰，而充分准备工作能够使各环节衔接更加顺畅。只有在设计与准备形成有机配合时，施工风险才会被有效降低，工程进展才会更为稳定。由此可见，优化设计与强化准备成为施工顺利开展的重要保障。

在大断面浅埋铁路隧道施工中，勘察阶段是确保后续设计与施工顺利开展的重要基础。应通过合理布设钻孔和探槽，系统获取围岩分级、地下水位及土层分布等关键数据，为后续设计决策提供依据。当围岩为Ⅲ类或Ⅳ类软弱围岩时，由于其承载力低且易发生塌方，设计阶段应采取加强支护或超前预加固措施以增强稳定性；当浅埋段覆土厚度不足 10 m 且地表建筑密集时，则需增设临时支护，以分散地表荷载，降低施工扰动带来的风险。在施工准备过程中，应依据设计参数建立标准化样板段，对衬砌厚度、钢筋配筋及喷射混凝土强度等关键指标进行实测校核，确保实际施工与设计要求一致。若检测结果偏离标准，应及时调整混凝土配比或喷射工艺，保证初期支护的密实度与承载力。喷射混凝土强度一般需达到 C25 以上，厚度控制在 20 cm 左右，以保证结构整体稳定。设备选型应符合大断面施工的规模与特性，采用台阶法开挖配合湿喷机械臂作业的模式，不仅能提升喷射效率，还能保证喷层均匀性，减少空鼓和脱落等质量隐患。施工材料进场应严格按照设计用量进行计划与储备，钢拱架间距通常控制在 0.8 m 至 1 m 之间，需根据施工进度动态调整物资供应，防止因储备不足造成工序延误。在施工组织管理方面，要科学编制进度计划，将开挖、支护以及衬砌等关键工序明确到具体日程，确保流程衔接合理。利用 BIM 技术对施工现场进行模拟分析，可以提前识别不同工序间的空间冲突，优化作业顺序，从而减少返工风险，提升整体施工效率。人员安排也应根据施工强度合理分配，实行多班轮换制度，保持 24 小时连续作业状态，以保障施工周期的稳定性和工期节点的如期完成。例如：若单班开挖循环进尺设定为 1.2 m，每日需完成两次循环作业，才能维持计划进度。

### 2.2 规范开挖方法，严格控制工序

断面浅埋铁路隧道开挖涉及空间范围广、扰动影响大的特点，因此必须科学规范方法和工序。开挖方法的合理性直接关系到围岩受力是否均衡，而工序控制的严谨性则决定了整体结构能否保持稳定<sup>[2]</sup>。为减少不必要的扰动，工序安排需要具备清晰的逻辑顺序，使各步骤之间衔接紧密。若在任何一个环节出现随意操作，就会逐步累积风险，进而影响施工安全。相反，当施工方法统一、步骤管理精细时，整体过程才能保持有序推进，从而使工程质量处于稳定状态。

在大断面浅埋铁路隧道开挖过程中，必须精细化规范方法，以减少围岩扰动并保持整体稳定。例如：当隧道断面宽度超过 12 m 时，采用三台阶七步法能有效分散应力集中，避免一次性开挖造成围岩大范围松动。台阶高度通常控制在 2.5 m 至 3 m 之间，开挖循环进尺则稳定在 1.2 m 至 1.5 m，以减少对围岩结构的破坏。在工序控制方面，浅埋隧道位于地表敏感区，控制爆破技术就显得较为重要。施工单位采用光面爆破工艺，孔距与装药量必须严格按照设计参数执行，例如炮孔间距保持在 30 cm 至 40 cm，装药集中在切口孔和掏槽孔，以降低对拱顶和周边岩体的冲击。爆破后立即由装载机和扒渣机清理弃渣，保持工作面干净，为支护创造条件。若工序衔接延误，围岩暴露时间过长，极易引发裂隙扩展或坍塌风险，因此缩短开挖与初支之间的时间间隔成为控制要点。工序安排的合理性体现在爆破和出渣，还涉及通风、排水、支护等多个环节。浅埋段通风条件差，开挖时需要配备大功率轴流风机，风速保持在每秒 0.25 m 以上，以排出有害气体，保障作业环境。在排水措施方面，开挖区必须布设纵向排水沟和集水井，保证渗水及时排出，避免软弱围岩因浸水而失稳。若排水系统不畅，施工面会出现泥化和塌陷，严重影响工序衔接。经过这一系列工序的严密衔接，可以保持施工环境的稳定性，降低事故发生概率。

### 2.3 加强初期支护，确保衬砌质量

初期支护在大断面浅埋铁路隧道中的性能直接关系到隧道结构的安全，支护强度不足容易扩大围岩变形，导致衬砌承载压力加重，从而影响整体耐久性。初期支护需要保持足够刚度，才能在早期施工阶段形成稳定条件<sup>[3]</sup>。同时，衬砌质量的优劣反映在材料强度上，还体现在厚度控制、施工时间以及结构密实度等多个方面。若支护环节处理不当，衬砌效果会受到限制，最终使整体结构稳定性下降。因此，加强初期支护并保障衬砌质量，成为大断面浅埋铁路隧道施工中必须重视的要点。

在大断面浅埋铁路隧道开挖完成后，初期支护需要及时形成稳定结构，以控制围岩变形并为后续衬砌创造条件。喷射混凝土强度等级多设计为C25，初期厚度一般控制在18 cm至22 cm之间，若围岩级别较差，则加厚至26 cm以上。混凝土在喷射后2小时内强度需达到1.2 MPa，才能保证初期支护具备足够承载力，否则围岩可能出现持续变形，增加衬砌压力。钢拱架间距常保持在0.8 m至1 m，采用工字钢或H型钢与喷射混凝土形成整体，提升支护刚度。若拱架布置过稀或强度不足，就会出现受力不均，导致拱顶沉降加大甚至局部破坏，因此精确控制拱架间距是保持隧道稳定的关键。锚杆长度通常为3 m至4 m，间距为1 m至1.2 m，以形成连续受力网络。锚固浆液强度等级不低于M20，保证与围岩紧密结合。若锚杆质量不达标，支护整体性减弱，极易造成喷层开裂。施工中还需配合设置钢筋网，常用钢筋直径为Φ8 mm，间距150 mm，经过与混凝土共同作用，显著提高抗拉性能。实践表明，当系统锚杆数量和钢筋网布设符合设计要求时，围岩变形速率明显降低，拱顶沉降控制在15 mm以内，比未设加密锚杆时降低近40%。在初支完成后，衬砌施工必须紧跟，才能有效分担荷载。隧道二次衬砌常采用C30现浇混凝土，厚度根据不同部位控制在40 cm至50 cm，拱顶厚度更大以抵抗上覆土体压力。混凝土浇筑过程中需严格控制坍落度在160 mm至180 mm之间，以保证密实性。若衬砌厚度不足或密实性不良易出现渗水，从而削弱耐久性。例如：某铁路隧道工程在施工中采用衬砌同步跟进的方式，使得初支与二次衬砌间隔不超过25 m，结果拱顶沉降峰值控制在12 mm以内，衬砌裂缝率低于0.5%，比传统间隔大于50 m的施工方式安全性显著提高。

#### 2.4 加强监测管理，控制地表变形

在大断面浅埋铁路隧道施工过程中，地表沉降问题极易影响工程安全，因此监测管理具有重要意义<sup>[4]</sup>。监测需要布设合理的测点，还要求在数据采集、传输以及分析过程中保持高效。管理环节应当形成完整体系，使监测结果能够及时反映施工动态<sup>[5]</sup>。沉降一旦超出控制范围，便会使地表环境和隧道结构受到威胁，因此数据的及时分析与反馈成为重点。通过综合管理监测数据，可以稳定施工节奏，减少不可控风险。

大断面浅埋铁路隧道因埋深有限，上覆土层较薄，地表沉降敏感性高，若监测管理不到位，极易影响施工和运营安全。常用的监测手段包括全站仪测量、光纤光栅传感器、静力水准仪以及多点位移计，监测精度要求一般控制在±0.1 mm至±0.2 mm，以保证数据

能够真实反映沉降变化趋势。监测频率在开挖高峰期需保持每日一次，沉降速率超过0.5 mm/天时必须立即加密观测，避免沉降累积到不可逆水平。数据一旦超过警戒值，例如累计沉降达到20 mm以上，就要立即调整施工参数，否则会使隧道拱顶受力失衡，进而引发裂缝和渗水等问题。现场采集的数据需实时上传至监测平台，结合BIM和GIS系统开展三维可视化分析。例如：某铁路隧道工程在浅埋段采用光纤光栅传感器与自动采集系统，沉降数据每30分钟更新一次，最终使沉降曲线保持平稳，累计沉降控制在12 mm以内，比传统人工观测方式减少近40%的偏差。除地表沉降，拱顶下沉和隧道周边收敛也是监测的重点，监测数据显示，拱顶下沉速率超过0.3 mm/天往往预示围岩失稳加剧，周边收敛速率超过0.4 mm/天则可能导致拱架和喷层受力异常。施工中若能通过实时监测系统在数据偏离正常值时立即预警，就能在衬砌施工前采取加固或调整工序的措施，防止风险扩大。例如：在某浅埋隧道工程中，监测平台曾在拱顶下沉达到18 mm时发出警报，项目部立即缩短开挖进尺并加密锚杆布置，最终使沉降控制在22 mm以内，避免地表建筑物出现开裂。

### 3 结语

大断面浅埋铁路隧道的稳定性关系到铁路结构的长期安全，在复杂地质条件和高强度运输荷载的共同作用下，隧道施工正面临更高的技术要求。为降低风险，施工需从整体出发，综合考虑地质环境与结构要素，推动设计与工序的科学化。未来，施工单位应立足隧道区段特点，深化信息化应用，强化支护与衬砌的协同能力，建立监测预警与管理维护一体化机制，全面提升铁路隧道的运营安全水平。

### 参考文献：

- [1] 闫磊,姜渝,岳志良,等.大断面超浅埋偏压铁路隧道爆破施工控制与振动传播规律研究[J].振动与冲击,2024,43(22):81-95.
- [2] 祁子鹏,师康宁.大断面超浅埋偏压高速铁路隧道施工安全控制关键技术研究[J].西部交通科技,2024(09):121-124.
- [3] 景银丰.大断面铁路隧道下穿富水暗塘浅埋段施工技术研究[J].价值工程,2024,43(19):67-69.
- [4] 李泽钿.大断面浅埋高速铁路隧道施工关键技术研究[J].工程建设与设计,2024(06):106-108.
- [5] 王广波.大断面浅埋高速铁路隧道仰拱施工关键技术设计及应用[J].工程机械与维修,2023(03):72-74.

# 建筑钢筋混凝土主体结构检测技术分析

廖顺发

(广东广联检测技术股份有限公司, 广东 佛山 528000)

**摘要** 钢筋混凝土结构作为现代建筑的主要形式, 其质量直接关系到工程的安全性与耐久性。随着建筑行业对质量管控要求的不断提升, 结构检测技术已成为保障工程安全的核心环节。本文以佛山一栋 14 层框架—剪力墙商住综合体为样本, 系统梳理钢筋混凝土主体结构的检测技术。研究结合超声回弹、外观量测及神经网络预测, 利用现场数据阐明多手段联用对结构安全判定的关键价值。研究结果表明, 综合检测可精确定位隐蔽缺陷, 为后续加固提供量化依据, 对提升工程质量具有直接推动作用。

**关键词** 建筑钢筋混凝土; 主体结构; 检测技术; 协同检测方案

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.015

## 0 引言

城市化进程不断加快, 建筑体量与复杂程度也同步攀升, 钢筋混凝土主体结构的安全与耐久已成为维系建筑功能的生命线。然而, 施工瑕疵、材料老化及环境侵蚀叠加, 使损伤频发, 若漏检或迟修, 极易酿成重大事故。相关统计显示, 我国每年因结构损伤而坍塌的建筑中, 约 65% 与主体检测缺位或方法失当直接相关。可见, 科学且精准的检测手段是守住安全底线的关键。传统方法虽普及, 却常因材料离散、施工误差等干扰而出现偏差。将无损与微创技术整合为协同检测方案, 可一次性厘清内部缺陷、强度分布及钢筋状态, 成为当前的研究重点。

## 1 项目概况

本研究以佛山市一座商住综合体为对象。项目体量庞大, 总建筑面积约 12.8 万 m<sup>2</sup>, 地下三层, 地上二十八层, 主体采用框架—剪力墙体系以保证整体刚度与抗震性能。混凝土配合比随部位调整: 梁板为 C30, 剪力墙升至 C35, 核心筒进一步采用 C40 高强混凝土。主体结构施工自 2023 年 3 月持续至 2024 年 12 月。施工期间, 极端降雨导致地下二层部分墙柱出现渗漏, 业主担忧耐久性, 遂委托第三方机构对整座综合体实施全面结构检测。

## 2 建筑主体结构检测技术体系

### 2.1 建筑主体结构检测原则

钢筋混凝土主体结构检测的第一步是现场初步调查, 这一步必须在正式试验前完成。调查时, 工作人员以原始设计图为依据, 先观察建筑外部环境, 再进

入内部逐间核对, 记录尺寸、变形、渗漏、腐蚀介质等状况, 随后把结果填入《建筑初步调查表》。表格信息包括建筑面积、平面布置、屋面防水效果、基础埋深及是否存在侵蚀性介质。调查结束立即汇总数据, 据此锁定后续检测重点, 如荷载变化、设计偏差、施工质量对结构的实际影响。具体检测项目涵盖混凝土碳化深度、强度、裂缝形态、保护层厚度、钢筋位置及力学性能<sup>[1]</sup>。

### 2.2 无损检测技术矩阵

无损检测技术矩阵整合了超声回弹、神经网络预测、三维激光扫描、半电池电位等多种方法, 具体参数列于表 1。每种技术各有侧重, 又能彼此补缺。现场检测时, 可依据材料特性、构件形状及缺陷类别灵活搭配, 实现高效、全面且不破坏结构的质量监控, 为工业安全与产品可靠性提供坚实的保障<sup>[2]</sup>。

表 1 无损检测技术矩阵

| 检测方法   | 技术原理          | 适用范围            | 精度等级    |
|--------|---------------|-----------------|---------|
| 超声回弹法  | 声速—强度<br>关联模型 | C25-C50 混凝土抗压强度 | ±12%    |
| 神经网络预测 | 多因素非线性映射      | 碳化深度<br>动态预测    | ±0.8 mm |
| 三维激光扫描 | 点云数据<br>处理    | 构件几何<br>尺寸偏差    | ±0.5 mm |
| 半电池电位法 | 金属腐蚀电<br>化学特性 | 钢筋锈蚀<br>概率评估    | 定性      |

### 2.3 检测流程设计

在检测过程中, 本研究采用“三级抽样”策略: 先以红外热成像对整栋楼做一次快速扫描, 标出温度

异常区域；随后从典型部位抽取8个构件钻芯；最后在16处关键节点补做载荷试验，对前两轮结果加以验证。

### 3 建筑钢筋混凝土主体结构检测技术实践应用

#### 3.1 超声回弹法检测结构强度

1. 检测方案。结合现场实际并严格执行检测规范，在同一楼层内随机抽取3根梁、5根柱作为样本。在作

业过程中，检测人员已按随机原则依次选定5个竖向构件与3个水平构件。下文以二层C-5区框架柱12为例展开说明：该柱截面500×500 mm。因建筑体量庞大且混凝土龄期较短，采用超声回弹综合法时，可将整根柱划分为6个测区；每区均匀布置16个回弹点与3个超声点，具体位置见图1。

2. 回弹检测结果。采用北京ZBL-S20数字回弹仪

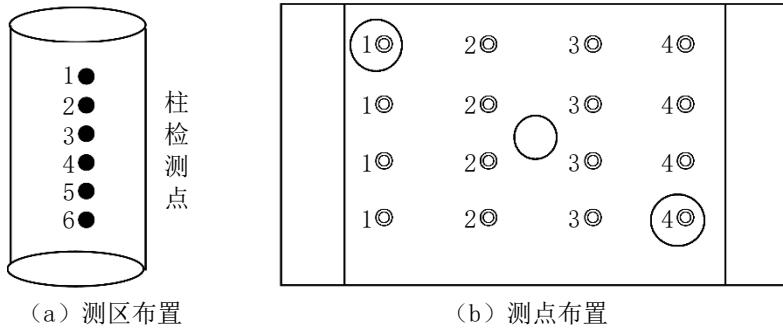


图1 测区与测点布置情况

(率定值82±1)与德国ACS-A1220 Syscon Pundit PL-200PE非金属超声检测仪(采样频率1 MHz)并行工作，环境保持23±2 °C、65%RH，结果列于表2。

表2 回弹检测相关数据

| 测区编号  | 回弹平均值<br>(MPa) | 标准差 | 推定强度<br>(MPa) |
|-------|----------------|-----|---------------|
| SQ-01 | 38.2           | 2.1 | 36.8          |
| SQ-02 | 36.5           | 1.8 | 35.2          |
| SQ-03 | 37.1           | 1.9 | 36.7          |
| SQ-04 | 38.3           | 2.2 | 36.4          |
| SQ-05 | 36.6           | 1.7 | 35.7          |
| SQ-06 | 37.9           | 2.0 | 36.5          |

表2的回弹推算显示，混凝土平均强度为36.2 MPa，比设计值低2.4%，仍在《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23-2011)允许的误差范围内<sup>[3]</sup>。

3. 超声检测结果。混凝土检测采用超声波检测技术(Ultrasonic Testing, UT)。选择超声设备采样长度1 024点，可完整捕获信号，降低数据缺失风险；周期0.1~2 μs，覆盖多种测试需求；发射电压分125 V、250 V、500 V、1 000 V四档，便于针对不同构件选择合适激励；声时分辨力0.1 μs，保证声速计算精度；工作温度-10~40 °C，室内环境稳定运行。现场仅有两对平行测面，故采用对测法：先按回弹布点原则在构件上均匀布置12个测区，再用发射与接收换能器逐

点读取声时值并记录测距，最后由测距与声时之比求得声速，供后续质量评定，表达式如下：

$$V = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{1_i}{t_1 - t_0} \quad (1)$$

式(1)中： $t_0$ 为声时初读数， $1_i$ 为 $i$ 个测点的超声测距， $t_1$ 为测点*i*的声时读数， $v$ 为声速代表值。

依据既定的操作流程规范，对二层C-5区框架柱12展开超声检测作业。关于本次声速检测所得到的详细结果如表3所示。值得一提的是，当对混凝土浇筑的底面或者顶面实施检测操作时，务必对测区的声速代表值进行修正处理。另外，鉴于本次检测过程中所使用的粗骨料为碎石，应当充分借鉴现有的工程资料，进而精准地计算出混凝土强度的换算数值。表达式为：

$$f_{cu,i}^c = 0.008(v_{ar})^{1.72}(R_{ar})^{1.57} \quad (2)$$

式(2)中： $R_{ar}$ 为修正后的回弹值， $v_{ar}$ 为超声声速值， $f_{cu,i}^c$ 为混凝土强度换算值。

表3 超声声速检测结果

| 构件<br>名称            | SQ-01 | SQ-02 | SQ-03 | SQ-04 | SQ-05 | SQ-06 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 二层5-C<br>区框架<br>柱12 | 4.289 | 4.343 | 4.379 | 4.344 | 4.380 | 4.545 |

通过以上公式计算和超声声速检测结果显示，模型预测误差控制在合理范围以内。

#### 3.2 基于神经网络的碳化深度预测技术

1. 预测模型构建。本研究采用粒子群优化算法(PSO)对BP神经网络进行调优。网络结构为：输入

层含 6 个节点，依次接收环境温湿度、CO<sub>2</sub>浓度、水胶比、保护层厚度、养护时间及应力水平；隐含层设 12 个节点，负责提取并转换输入特征；输出层直接输出碳化深度预测值。训练阶段引入 320 组实测样本，通过精细调节权值与阈值，使测试集误差稳定在 ±0.6 mm 以内。

2. 实践预测应用。本研究对 5 层梁板 3 个构件进行预测验证（见表 4）。实践预测数据显示，预测模型平均绝对误差 0.42 mm，显著优于传统经验公式。

表 4 构件预测数据

| 构件编号  | 实测深度 (mm) | 预测深度 (mm) | 相对误差  |
|-------|-----------|-----------|-------|
| L-501 | 5.1       | 2.3       | +9.5% |
| L-502 | 1.8       | 1.7       | -5.6% |
| L-503 | 2.5       | 2.4       | -4.0% |

### 3.3 外观质量与尺寸偏差检测技术

1. 三维激光扫描检测。借助 Leica ScanStation P50 激光扫描仪，对核心筒实施了全息建模。经精细检测，结果如下：首先，在垂直度偏差方面，东立面最大偏差 8 mm，允许偏差为 H/1 000，换算后即为 28 mm；其次，在表面平整度方面，95% 的区域均控制在 5 mm 标准以内。

2. 裂缝宽度定量分析。使用 VSTEC 裂缝测宽仪完成现场实测后，获得以下结果：共发现 3 条宽度为 0.3 mm 的裂缝，其中最长的一条延伸 2.1 m；统计表明，宽度介于 0.1 ~ 0.3 mm 的裂缝总计 17 条；按照《混凝土结构耐久性评定标准》（CECS220:2007）的规定进行评级，上述裂缝均被判定为需采用压力灌浆处理的类型<sup>[4]</sup>。

### 3.4 建筑钢筋混凝土主体结构检测结果

1. 结构安全性评估。通过对主体结构进行安全性评估，得出结果如表 5 所示。

表 5 钢筋混凝土主体结构安全检测结果

| 检测项目    | 实测值      | 设计值    | 安全系数 | 评定等级 |
|---------|----------|--------|------|------|
| 剪力墙抗压强度 | 36.2 MPa | 35 MPa | 1.03 | 合格   |
| 梁柱配筋率   | 1.28%    | 1.2%   | 1.07 | 合格   |
| 核心筒刚度比  | 1:4.2    | 1:4.0  | 1.05 | 合格   |

2. 耐久性评估。对结构开展碳化深度检测后，结果如下：梁构件平均碳化 1.8 mm，该深度尚未触及内部钢筋；板构件平均碳化 1.2 mm。氯离子含量为 0.08%，

明显低于 0.15% 的临界值。综合上述数据评估，结构耐久性可满足 50 年设计使用年限的要求<sup>[5]</sup>。

## 4 建筑钢筋混凝土主体结构加固措施

### 4.1 加固方案设计

针对检测发现的局部缺陷，制定以下加固方案：（1）碳纤维布加固：对南向剪力墙（SQ-07 测区）采用 T700 级碳纤维布（0.167 mm 厚）双向粘贴，提升抗剪承载力 18%；（2）增大截面法：对裂缝密集的 15 层梁（L-1503）进行侧边加固，新增混凝土截面尺寸 150×300 mm，配筋率提升至 1.5%；（3）阻锈剂处理：对电位值 < -350 mV 的钢筋区域（占比 12%）涂刷 MCI-2020 迁移型阻锈剂。

### 4.2 加固效果验证

加固施工完成后实施载荷试验：其一，碳纤维加固区承载力提升 21%（理论值 19%）；其二，增大截面梁挠度减小 34%（理论值 32%）；其三，阻锈处理区钢筋锈蚀电流密度下降至 0.05 μA/cm<sup>2</sup>（安全值 < 0.2 μA/cm<sup>2</sup>）。

## 5 结论

本研究采用多技术融合的检测手段，准确识别出结构存在的多项缺陷，包括局部强度不足、碳化持续加深以及钢筋锈蚀风险。现场数据表明，超声—回弹综合法比较单一方法检测精度提高 15% ~ 20%；神经网络预测模型将碳化深度评估速度提升至原来的三倍；三维激光扫描将尺寸误差压缩在 ±0.5 mm 以内。后续工作可沿三条路径展开：开发基于 BIM 的检测数据可视化平台，推广无人机载检测设备在工程现场的实用化，并进一步将机器学习嵌入结构健康监测体系。

## 参考文献：

- [1] 肖荣胜. 建筑主体结构钢筋混凝土施工技术 [J]. 房地产世界, 2020(17):110-112.
- [2] 杨青龙. 建筑工程主体结构钢筋混凝土施工技术探讨 [J]. 建材发展导向, 2024,22(02):164-166.
- [3] 吴智深, 侯士通, 黄奎, 等. 钢筋混凝土结构移动式精准检测技术开发 [J]. 工程力学, 2024,41(01):1-16.
- [4] 王鹏. 房屋建筑施工中地基基础工程的施工处理技术探讨 [J]. 四川建材, 2024,50(03):75-77.
- [5] 石岭, 丁剑锋, 谷明. 防渗漏施工技术在房屋建筑工程中的应用 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024(01):78-80.

# 高层房建外墙保温层施工质量通病防治技术

李 焱, 刘 燕\*

(四川省第十五建筑有限公司, 四川 南充 637000)

**摘要** 为解决高层房建外墙保温层施工中普遍存在的开裂、脱落、保温效果不佳等质量通病, 提升工程节能性能与结构安全性, 本文系统分析了保温层开裂、脱落、热桥效应、饰面层渗水等典型质量通病的表现形式与成因, 针对性提出“材料管控—基层处理—施工工艺优化—节点强化—质量检测”全流程防治技术, 并结合某33层住宅小区EPS板薄抹灰保温工程案例, 验证防治技术的实际效果, 旨在为高层房建外墙保温工程质量提升提供技术参考, 助力建筑节能目标实现。

**关键词** 高层房建; 外墙保温层; 施工质量; 全流程防治技术

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.016

## 0 引言

外墙保温层作为高层房建节能的重要部分之一, 直接决定了整个建筑的能耗、居住的舒适感以及结构耐久性。由于高层房建外立面高、风荷载大且节点构造繁杂, 使得外墙保温层施工难度远高于多层建筑<sup>[1]</sup>。分析高层房建外墙保温层质量通病的原因并建立一套全面的防治技术体系是解决工程实际问题, 提高建筑节能效益的关键。本文结合工程实践的经验, 从“问题—对策—案例”三个方面进行研究, 提出符合现场施工的可落地的技术方案。

## 1 高层房建外墙保温层常见质量通病及成因分析

### 1.1 保温层开裂

1. 通病表现。保温层开裂分为“表面裂缝”与“贯穿裂缝”两类: (1) 表面裂缝。多出现在抹面砂浆层内, 缝宽0.1~0.5 mm, 呈不规则网状或沿玻纤网走向分布, 不影响保温效果但易导致饰面空鼓; (2) 贯穿裂缝。由保温层延伸到基层墙面、缝宽0.5~2 mm, 产生“热桥”, 使局部能耗增加15%~20%且雨水平渗造成墙体返潮<sup>[2]</sup>。

2. 核心成因。(1) 材料选择不合理。EPS板密度小, 抗压强度低, 受温度影响较大、易收缩变形; 抹面砂浆的收缩率高或者未添加抗裂纤维, 硬化过程中因体积收缩引起拉应力; (2) 施工工艺缺陷: 保温板贴放时板缝没有错开, 形成通缝, 容易造成应力集中; 玻纤网铺设不规范, 搭接宽度小于100 mm且没被第一层抹面砂浆覆盖起来, 在硬化期间无法有效地将这些

应力分散出去; (3) 环境影响: 夏季施工气温高, 使涂抹出来的抹灰砂子失水速率过快, 导致它还未完全反应就风干了; 冬季施工气温低, 浇水养护会导致水泥砂浆冻结从而降低其硬度和韧性而轻易破裂。

### 1.2 保温层脱落

1. 通病表现。保温层脱落分为“局部空鼓脱落”与“整体大面积脱落”。局部脱落多发生于墙角、门窗洞口周边, 面积0.5~2 m<sup>2</sup>, 多因局部粘结失效导致。整体脱落则整面墙保温层从基层剥离, 常见于高层顶部, 10层以上, 因风荷载长期作用引发, 危害极大。

2. 核心成因: (1) 粘结系统失效, 粘结砂浆配比错误, 水泥与砂比例应为1:3, 若砂过多会降低强度, 或使用过期砂浆, 初凝时间超过2 h; (2) 基层处理不彻底, 墙面浮灰、油污未清理, 或基层含水率过高, 导致砂浆与基层粘结强度从0.6 MPa降至0.3 MPa以下; (3) 锚固系统不完善, 锚栓数量不足, 规范要求每平方米≥6个, 高层顶部应增加20%, 实际工程中常仅4~5个; (4) 锚栓安装深度不够, 规范要求深入基层墙体≥50 mm, 实际常仅30~40 mm, 抗拉承载力从0.6 kN降至0.3 kN以下; (5) 风荷载叠加作用, 高层100 m处阵风荷载可达1.2 kN/m<sup>2</sup>, 若保温层整体粘结强度不足, 长期受风压反复作用, 易出现“疲劳破坏”, 最终脱落<sup>[3]</sup>。

### 1.3 热桥效应

1. 通病表现。热桥部位室侧比正常处低3~5 °C, 冬季易发生结露发霉等现象, 并且整个建筑的能耗过

\*本文通信作者, E-mail: 185746062@qq.com。

高，实际检测能耗比设计值多出 10%~15%。

2. 核心成因：（1）节点构造不规范，门窗洞口保温层未延伸到窗框外侧，规范要求需 $\geq 50\text{ mm}$ ，热量通过窗框传递；（2）剪力墙与填充墙交接处无加强玻纤网，宽度 $\geq 300\text{ mm}$ ，两侧各 $150\text{ mm}$ ，此处保温层断裂形成热桥，缺少保温性能；（3）部分部位保温层厚度不足，局部区域保温层厚度比设计值薄 20%~30%，导热系数增大，热量易穿透。

#### 1.4 饰面层渗水

1. 通病表现。雨水从饰面层裂缝进入保温层，造成 EPS 板受潮吸水率上升到 15% 以上，导致 EPS 板材的导热系数增加，影响其保温性能；渗漏水会使基层墙面返潮、腻子脱落，甚至会造成室内墙面发霉。

2. 核心成因：（1）未进行密封处理，门窗框与保温层之间缝隙处未采用发泡胶填充或者发泡胶并未充满，并且没有打耐候密封胶或是密封胶已经老化开裂；（2）保温板之间的板缝未采用 EPS 板条填塞而是用砂浆直接填塞，造成砂发生破裂后成为渗水通道；（3）抹面砂浆不具备防水性能，抹面砂浆中未加入憎水剂，其吸水率 $> 10\%$ ，导致雨水易于渗透；（4）饰面层涂料涂抹不均，存在漏刷现象以及厚度不够的情况下，无法形成有效的防水层面<sup>[4]</sup>。

### 2 高层房建外墙保温层施工质量通病防治技术

#### 2.1 材料管控与基层处理技术

1. 材料选型与质量验收。核心材料性能控制：（1）EPS 板密度 $\geq 18\text{ kg/m}^3$ ，抗压强度 $\geq 0.2\text{ MPa}$ ，收缩率 $\leq 0.3\%$ ，EPS 板进场时每 $2\,000\text{ m}^2$ 抽样 1 组进行密度及导热系数的检验；（2）粘结 / 抹面砂浆：预拌砂浆、严禁现场自拌，粘结砂浆拉伸粘结强度 $\geq 0.6\text{ MPa}$ 对 EPS 板 $\geq 0.3\text{ MPa}$ 对基层，抹面砂浆掺加抗裂纤维，其中的参数按 $0.9\text{ kg/m}^3$ ，进场时每 $50\text{ t}$ 抽样 1 组；（3）锚栓：尼龙膨胀锚栓，抗拉承载力 $\geq 0.6\text{ kN}$ ，安装深度按保温厚度+基层墙厚+ $10\text{ mm}$ ，确保锚栓杆内进入基层不少于 $50\text{ mm}$ ，进场时每 $1\,000$  个抽样 1 组进行拉拔试验；（4）材料存放：EPS 板岩棉板需遮盖防雨布以防火受潮；抹面砂浆储存温度不应小于 $5\text{ }^\circ\text{C}$ ，不得冻结，并在保质期前使用从制造之日起不得超过三个月。

2. 基层墙面预处理技术。基层清理需用 $0.8\text{ MPa}$ 高压水枪冲洗墙面，去除浮灰和脱模剂。局部顽固油污用丙酮擦拭清除。墙面空鼓、酥松处应全部铲除，用 $1:3$  水泥砂浆抹平，单次修补厚度超过 $10\text{ mm}$ 需分两次施工，间隔不少于 24 小时，以防开裂。基层平整

度用 $2\text{ m}$ 靠尺检查，偏差大于 $5\text{ mm}$ 时用水泥砂浆找平；偏差较大时改用抗裂砂浆加玻纤网复合找平，以避免保温层粘贴后受力不均开裂。基层回弹值低于 $25\text{ MPa}$ 时，涂刷水泥基界面剂以增强粘结强度。施工前用含水率测定仪检测，若基层含水率 $> 8\%$ ，需自然通风干燥 $7\sim 10$  天，直至含水率符合要求后再进行保温层粘贴，防止因基层潮湿导致粘结失效。

#### 2.2 施工工艺优化与节点强化技术

1. 保温板粘贴工艺优化。用点框法贴保温板，在板的背面周围抹 $50\text{ mm}$ 厚、 $10\text{ mm}$ 厚粘结砂浆做的框中间按照直径为 $100\text{ mm}$ 每 $200\text{ m}$ 均匀涂上 $5\sim 6$ 个 5 号砂浆粒，保证总面积不少于 40%，从而达到抗风荷载要求。从下往上铺贴，上下两排板要错开长度至少不小于 $1/2$ 块长并且不能出现通缝现象，当缝隙不超过 $2\text{ mm}$ 时应采用抹面砂浆进行填实；但如果超过这个尺寸就要将 EPS 板条插入其中再行填补之后才刮平成原高度，水平处不要直接用浆糊封堵，使其待放置 24 小时以上，直到接近初凝状态的时候才能进入下一步施工操作处理。

2. 锚固系统强化技术。普通楼层每平方米设置 6 个梅花形锚栓，高层顶部每平方米设置 8 个，且在板缝处增加 1 个；门窗洞口边距边缘约 $150\text{ mm}$ 处增加锚栓，间距 $\leq 300\text{ mm}$ 。钻孔深度是保温层厚+基层厚+ $10\text{ mm}$ ，用深度尺检查锚栓钻入基层 $\geq 50\text{ mm}$ ，钻孔直径比锚栓杆大 $2\text{ mm}$ 。锚栓打完之后，帽部要被抹面砂浆压住，而且和保温层表面平齐，不能超出，防止出现应力集中，整个系统的抗拉承载力 $> 0.6\text{ kN}$ 。

3. 抹面与玻纤网施工技术关键点。抹面砂浆分两遍施工，第一遍厚 $2\sim 3\text{ mm}$ ，将玻纤网压入砂浆中间，不得有玻纤网外露；玻璃纤维网格布搭接宽度 $\geq 100\text{ mm}$ ，在角落处要做出 L 形包裹。第一遍抹面砂浆初凝时间大概 24 小时，初凝之后再抹第二遍，第二遍的厚度是 $3\sim 4\text{ mm}$ ，两遍加起来要达到 $5\sim 7\text{ mm}$ ，这样就完成了抹面工程方面的作业。剪力墙与填充墙衔接处， $300\text{ mm}$ 宽、 $150\text{ cm}$ 长的范围里要铺上加强型玻纤网。高层建筑屋顶女儿墙保温层要向顶层方向延伸 $> 30\text{ cm}$ ，用水泥砂浆浇筑台体遮盖，并按照规范开展耐候性密封胶施工。

4. 节点防水密封技术。门窗洞口保温层延伸到窗框外侧 $\geq 50\text{ mm}$ ，缝隙发泡胶 100% 饱满，等发泡胶干了以后，把表面切平，外侧打宽 $10\text{ mm}$ 、厚 $5\text{ mm}$ 的耐候密封胶，保证粘接处没有断点。保温板缝用 EPS 板条填塞后，在高层最顶层三层板缝处涂宽 $100\text{ cm}$ 的耐候密封胶。外墙拐角处包 $200\text{ cm}$ 宽的加强玻纤网，同时将该处抹面加厚 $1\sim 2\text{ mm}$ ，经由几道密封措施，阻

挡雨水渗入，避免保温材料吸水或者基层返潮<sup>[5]</sup>。

5. 环境适应性施工技术。高温天气施工需避开11:00—15:00；早晚施工前用喷雾器向墙面喷水（不可有积水），基层降温；抹面砂浆施工后，覆盖土工布养护≥7 d。冬季施工时，搭建彩条布+电热毯保温暖棚，保证施工表面温度≥5 ℃；使用掺防冻剂+冬期砂浆，拌合水温≤80 ℃，拌合水不得与水泥直接接触。施工完成后用阻燃保温被包裹养护，养护时间≥14 d，通过环境适配措施促进砂浆水化及粘结强度形成。

### 2.3 质量验收与性能验证技术

1. 工序验收关键指标。保温板粘贴验收需用小锤轻敲逐一检验空鼓，整体空鼓率低于5%，单块空鼓面积≤10%视为合格，同时查看板缝排布，杜绝通缝。平整度用2 m靠尺配塞尺检测，墙面偏差≤3 mm，为后续抹面砂浆施工奠定基础。锚栓拉拔试验以500 m<sup>2</sup>为一个检验批，每批随机抽3处检测，抗拉承载力≥0.6 kN，若有1处不合格则加倍抽样，加倍检测仍不合格则该批全部返工。抹面砂浆验收先查外观，表面无裂缝、空鼓、露网等问题，玻纤网应被砂浆层全包，厚度用卡尺在每100 m<sup>2</sup>选5点测量，总厚度5~7 mm，容许偏差±1 mm，以实现抗裂和防护作用。

2. 竣工后性能检测。保温性能检测需随机抽取建筑外墙不同朝向和楼层的区域，每1 000 m<sup>2</sup>取一个芯样进行钻芯，检查保温层厚度偏差是否低于5%，并通过实验室检测保温材料导热系数是否符合设计，现场使用热流计法检测，实际值不超过设计值的1.1倍，以确保节能性能。淋水试验应覆盖所有外墙面，使用Φ20 mm水管，保持0.3 MPa水压，喷头距墙300 mm，每墙淋水1小时，24小时内检查室内墙面无渗水即为合格。跟踪观测为期1年，从竣工开始，每3个月回访一次，重点检查保温层是否开裂、掉块，以及饰面层有无渗水、起砂等问题。

## 3 工程案例分析

### 3.1 工程概况

某市高层住宅小区项目6栋，1#楼为33层剪力墙结构建筑，高度为99.6 m。外墙采用EPS板薄抹灰保温系统设计，保温厚度为100 mm，EPS密度值为18 kg/m<sup>3</sup>，抹面砂浆加入抗裂纤维、锚栓每平方米6个（顶部三层每层8个）。2023年施工时间3~8月跨越春季大风、夏高温天气，在开始的施工过程中存在保温板空鼓率过高现象，达到8%且局部出现抹面砂浆开裂情况。

### 3.2 问题诊断与防治措施应用

1. 初期问题诊断。保温板空鼓，基层浮灰清理不净，粘结砂浆涂抹率只有30%，未达到40%的要求；抹面砂浆开裂，玻纤网搭接宽度为50 mm，而要求的是100 mm，再加上夏天高温时没进行养护。

2. 针对性防治措施。铲除已粘贴的空鼓保温板，用水枪重新清洗基层。换用点框法粘贴，保证粘结砂浆面积≥40%，派专人对每一板块进行检查。玻纤网搭接宽度由50 mm改为100 mm、转角处改为200 mm后压入第一遍抹面砂浆中。高温时段施工后覆盖土工布浇水养护7 d。高温时间段锚栓顶部3层密度加大至8个/m<sup>2</sup>且锚栓深度使用长度尺逐点检测，确保≥50 mm。

### 3.3 防治效果分析

通过上述措施，项目竣工后10个月回访，保温层无开裂、脱落现象，住户反馈室内温度稳定，冬季采暖期室内温度保持在22~24 ℃，能耗比同区域未采用防治措施的项目低8%，直接节省后期维修费用约20万元。

## 4 结语

高层房建外墙保温层质量通病防治是一项系统工程，要跳出“重施工、轻管控”旧思路，把材料挑选、基层平整、过程改造和质量检测形成闭环。本文提出“全流程防治技术”，针对开裂、脱落、渗水等核心问题，可以提高保温工程质量及耐久性。在建筑节能标准趋于近零能耗的过程中，外墙保温会朝着新材料、智能化操作和数字化观测的方向发展，相关人员要不断探究新型保温技术，推进高层房建外墙保温层施工质量通病防治技术创新。

### 参考文献：

- [1] 滕孝基. 建筑施工中外墙保温工程裂缝防治与质量控制措施[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(06):78-80.
- [2] 牛贵强. 外墙外保温工程防护层裂缝问题的对策研究[J]. 四川建材, 2025, 51(02):42-44, 57.
- [3] 杨春林. 复合板材外墙外保温施工技术研究[J]. 江西建材, 2024(06):327-329.
- [4] 魏鹏. 建筑外墙外保温系统工程裂缝成因及修复技术[J]. 中国建筑装饰装修, 2022(16):102-104.
- [5] 周朕, 王立红, 孙佳, 等. 外墙保温系统裂缝防治与质量控制措施[J]. 建筑技术, 2022, 53(08):1029-1031.

# 短肢剪力墙在工业建筑结构设计中的运用分析

胡五兵<sup>1</sup>, 尹宏志<sup>2</sup>

(1. 山东省环能设计院股份有限公司, 山东 济南 250101;  
2. 山东齐诚工程技术有限公司, 山东 济南 250100)

**摘要** 短肢剪力墙是具备灵活空间布局与高效抗震性能的结构构件, 其在工业建筑结构设计领域的应用价值随产业升级不断提升。本文结合工业建筑带有结构承载、空间利用、抗震等级的特殊要求, 同时结合现代工业建筑的功能需求提出优化设计策略, 分析短肢剪力墙的力学特性与适用场景, 探讨其在工业建筑结构设计中的截面选型、布置原则、荷载计算方法, 指出实际应用中存在的技术难点与解决路径, 以期为促进工业建筑结构设计的轻量化、高效化发展提供参考。

**关键词** 短肢剪力墙; 工业建筑; 结构设计; 荷载计算

中图分类号: TU27

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.017

## 0 引言

工业建筑作为承载生产活动的核心场所, 其结构设计需满足设备安装、工艺流程、荷载承受、抗震安全等多方面要求。随着工业生产设备的精密化、生产流程的自动化发展, 工业建筑对结构的承载精度、振动控制、空间利用率提出更高要求。短肢剪力墙在结构设计中的应用需结合这些新需求进行技术优化, 其在工业建筑领域的应用研究也需进一步深化, 以推动工业建筑结构体系的升级与完善。

## 1 短肢剪力墙的技术特性与工业建筑结构设计的适配性

### 1.1 短肢剪力墙的核心技术特性

短肢剪力墙通常指截面高度与厚度比值在 5~8 之间的剪力墙构件, 其带有与工业建筑结构需求高度契合的技术特性。在空间利用上, 短肢剪力墙的截面厚度通常控制在 200~300 mm, 较普通剪力墙减少 30%~40% 的占用空间, 能为工业建筑内部设备安装、管线布置预留更多灵活空间, 尤其适配现代工业车间对大开放区域与灵活分区的需求。在力学性能上, 其抗侧移刚度介于框架结构与普通剪力墙之间, 既能通过合理布置满足工业建筑对抗震、抗风荷载的基本要求, 又不会因刚度过大导致结构自重增加, 符合工业建筑轻量化设计的发展趋势。此外, 短肢剪力墙可与框架柱、连梁协同设计形成混合结构体系, 这种体系具备的受力协同性能有效分散工业建筑中常见的集中荷载, 减少局部结构出现的应力集中现象, 进一步提升整体结构的稳定性, 适配工业建筑对结构安全的核心需求<sup>[1]</sup>。

### 1.2 与工业建筑结构设计需求的适配性

现代工业建筑结构设计需重点关注承载能力、空间布局、抗震性能三个核心需求, 短肢剪力墙在这些需求上展现出显著适配性。在抗震性能方面, 短肢剪力墙通过合理控制剪跨比、优化截面配筋, 可满足不同区域工业建筑的抗震设防要求, 尤其在多层工业建筑中, 其具备的抗侧移性能能有效减少地震作用下的结构变形, 保障生产设备与人员的安全; 在空间布局方面, 短肢剪力墙可根据工业生产流程的调整需求灵活布置, 墙体间距可调整范围较普通剪力墙更大, 能适配不同尺寸生产设备的安装与后期调整需求, 减少固定结构对生产流程优化的限制; 在承载能力方面, 其截面可通过配置纵向受力钢筋与箍筋优化整体承载性能, 针对工业建筑中常见的集中荷载, 可采用短肢剪力墙与暗柱结合的设计形式增强局部承载能力, 适配多样化荷载类型的承载需求<sup>[2]</sup>。

## 2 短肢剪力墙在工业建筑结构设计中的关键应用要点

### 2.1 截面选型与参数设计

短肢剪力墙的截面选型需结合工业建筑带有荷载特性与空间需求的双重条件确定, 常见的截面形式包含矩形、T 形、L 形等。在单层或多层轻型工业建筑中, 若主要承受均布荷载与轻型设备荷载, 矩形截面短肢剪力墙是更优选择, 其截面高度与厚度需根据荷载大小与空间限制确定, 这种截面形式具备施工简便、受力明确的特点, 能适配轻型工业建筑对结构实用性的需求; 在承受集中荷载或存在墙体交接的区域(如设

备基础附近、车间分区交界处), 可采用T形或L形截面, 通过增加翼缘长度提升截面惯性矩, 增强局部承载能力, 翼缘长度需控制在合理范围, 避免因翼缘过长导致施工难度增加。

在参数设计中, 轴压比与剪跨比的计算是核心环节。轴压比需控制在合理区间, 避免因轴压比过高导致墙体出现脆性破坏, 影响结构整体安全性; 剪跨比需结合工业建筑的层高与墙体布置间距确定, 确保剪跨比达到特定数值, 以此提升墙体的延性, 减少地震作用下的剪切破坏风险。钢筋配置需以荷载计算结果为依据, 纵向钢筋配筋率需满足结构承载要求, 箍筋间距需控制在规定范围, 在墙体两端与洞口附近需适当加密箍筋, 增强局部抗剪性能, 确保墙体在受力过程中不会出现局部剪切破坏, 保障结构受力的完整性<sup>[3]</sup>。

## 2.2 结构布置原则

短肢剪力墙在工业建筑结构中的布置需遵循均匀对称、协同受力的原则, 同时兼顾生产流程与设备安装需求, 确保结构设计与工业生产功能需求高度适配。

在平面布置上, 需确保短肢剪力墙沿建筑平面的两个主轴方向均匀分布, 避免因布置集中导致结构刚度分布不均, 尤其在工业建筑的大跨度区域(如装配车间、仓储区域), 需通过增加短肢剪力墙的数量或调整截面尺寸平衡结构刚度, 短肢剪力墙的间距需根据跨度大小确定, 确保结构的抗侧移刚度满足规范要求, 避免因刚度不足导致结构在风荷载或地震荷载作用下出现过大变形。

在竖向布置上, 短肢剪力墙需保持上下连续贯通, 避免在楼层处出现墙体中断, 若因设备安装需求需在墙体上开设洞口, 洞口宽度需控制在墙体高度的一定比例内, 洞口两侧需设置暗柱, 暗柱截面尺寸需满足受力要求, 确保洞口附近墙体的受力连续性, 避免因洞口存在导致局部结构受力薄弱。短肢剪力墙与框架柱的协同布置需考虑设备运行产生的振动荷载, 在振动荷载较大的区域(如机床车间、压缩机房), 需增加短肢剪力墙与框架柱的连接节点强度, 采用刚性节点设计, 减少振动传递对结构的影响, 保障结构在振动环境下的稳定性, 适配工业生产设备的运行需求。短肢剪力墙结构的设计一定要满足抗震相关规范的要求, 保证结构在地震作用下的安全性以及稳定性。设计时需要着重考虑地震作用下的内力分布, 合理配置剪力墙的数量, 使结构整体刚度可以均匀分布, 充分发挥每一面墙体的作用, 达到安全性和经济性并存的目标<sup>[4]</sup>。

## 2.3 荷载计算与力学分析

在工业建筑结构设计中, 短肢剪力墙的荷载计算需全面涵盖永久荷载、可变荷载与偶然荷载三类, 确

保荷载计算的整体性与准确性。永久荷载包含墙体自重、设备基础自重、楼面面层重量等, 计算时需结合工业建筑的楼面活荷载标准值, 将永久荷载与活荷载组合后确定短肢剪力墙的竖向荷载, 为结构承载设计提供依据; 可变荷载包含吊车运行荷载、风荷载、温度变化产生的荷载, 吊车运行荷载需根据吊车的额定起重量与工作级别确定, 采用动力系数进行荷载放大, 风荷载计算需结合工业建筑的高度与所在区域的基本风压, 高度较高的工业建筑需考虑风振系数, 避免因风荷载作用导致结构出现不稳定; 偶然荷载主要为地震荷载, 需根据建筑所在区域的抗震设防烈度与设计基本地震加速度, 采用反应谱法计算短肢剪力墙的水平地震作用, 确保结构在多遇地震下处于弹性工作状态, 在罕遇地震下具备足够的延性, 保障结构抗震安全。

在力学分析环节, 需通过有限元软件建立结构模型, 模拟短肢剪力墙在不同荷载组合下的应力分布与变形情况, 重点关注墙体根部、洞口附近、节点连接处的应力集中现象, 这些区域是结构受力的关键部位, 易出现应力超标问题。若模拟过程中发现应力超标, 需通过调整截面尺寸或增加配筋进行优化, 确保短肢剪力墙在各种荷载工况下的受力均满足规范要求, 避免因局部应力过大导致结构破坏, 保障工业建筑结构的长期安全稳定。剪力墙的布置需综合考虑建筑功能需求和结构受力特点, 避免出现刚度突变或应力集中的现象。通过优化布局, 在保证整个结构稳定的前提下, 提高建筑物内部空间利用效率<sup>[5]</sup>。

## 3 短肢剪力墙在工业建筑设计中的实际应用与优化方向

### 3.1 典型应用场景分析

在多层轻工业厂房设计中, 短肢剪力墙的应用可有效提升空间利用率, 适配多层轻工业厂房对空间灵活性的需求。多层轻工业厂房通常需布置多条生产线与精密检测设备, 对空间灵活性与振动控制要求较高, 设计中可采用短肢剪力墙与框架柱结合的混合结构体系, 短肢剪力墙的截面形式与布置间距需根据生产设备的尺寸与布局确定, 墙体之间通过连梁连接, 连梁截面尺寸需满足抗震与受力要求。这种布置方式能为厂房内部预留足够的柱网间距, 满足自动化生产线的布置需求, 同时短肢剪力墙的抗侧移刚度能有效控制结构在风荷载下的层间位移, 使其符合规范限值, 抗震性能也能满足所在区域的设防要求。在使用过程中, 厂房可根据生产需求调整设备布局, 短肢剪力墙占用空间小的特点为管线布置预留充足空间, 设备运行产生的振动通过短肢剪力墙与地基的协同作用被有效吸收, 确保结构振动符合精密设备的运行要求, 保障生产活动的稳定开展。

在重型工业车间设计中，短肢剪力墙可通过与型钢混凝土的结合提升承载能力，适配重型工业车间对高承载的需求。重型工业车间需承受重型机床的自重荷载与运行时的动荷载，设计中可采用型钢混凝土短肢剪力墙，在墙体内部配置型钢，型钢与混凝土之间通过抗剪栓钉连接，增强协同工作性能。型钢的截面尺寸与墙体的截面尺寸需根据荷载大小确定，确保短肢剪力墙的竖向承载力与水平抗剪承载力满足要求，能够抵抗机床运行时产生的各类荷载。在实际应用中，需控制车间地面沉降量，确保结构变形符合规范要求，短肢剪力墙的布置需避免对机床安装与操作造成限制，同时型钢混凝土的组合形式需提升结构的耐久性，以适应车间内特殊的环境条件（如潮湿、多粉尘），延长结构使用寿命。

### 3.2 应用中的技术难点与解决路径

短肢剪力墙在工业建筑设计应用中存在两个主要技术难点：一是在大跨度工业建筑中，短肢剪力墙的抗侧移刚度易不足，导致结构层间位移超标；二是在承受集中荷载时，短肢剪力墙的局部应力易集中，可能引发墙体开裂，这两类问题均会影响结构的安全性与稳定性，需针对性提出解决路径。

针对大跨度工业建筑中抗侧移刚度不足的问题，可采用短肢剪力墙与支撑结构结合的设计方案。在建筑跨度较大的区域，沿跨度方向设置钢支撑，支撑与短肢剪力墙通过节点板连接，形成短肢剪力墙—支撑协同抗侧体系。这种体系能有效提升结构抗侧移刚度，使层间位移控制在规范限值以内，确保结构在风荷载与地震荷载作用下的稳定性，解决大跨度区域结构刚度不足的问题，适配大跨度工业建筑的设计需求。

针对承受集中荷载时局部应力集中的问题，可采用短肢剪力墙与暗梁、暗柱结合的加强设计，在集中荷载作用点下方设置暗柱，暗柱截面尺寸需比墙体截面适当增大，纵向钢筋配筋率需提升至一定水平，同时在荷载作用区域的墙体顶部设置暗梁，暗梁截面高度需根据墙体高度确定。通过这种加强设计，可分散集中荷载作用下的应力，降低集中荷载作用区域的应力值，避免墙体开裂，保障结构局部受力安全，解决集中荷载作用下的应力集中问题。

### 3.3 基于现代工业需求的优化方向

随着工业建筑向智能化、绿色化发展，短肢剪力墙在结构设计中的应用需结合现代工业需求进行优化，以提升结构设计的先进性与适用性，主要可从三个方向推进优化工作。

1. 轻量化设计。结合高性能混凝土技术，采用强

度等级较高的高性能混凝土制作短肢剪力墙，在保证承载能力的前提下减少截面尺寸，使结构自重降低，减少建筑整体荷载，同时高性能混凝土的耐久性需提升，以适应工业建筑的长期使用需求，减少后期维护成本，符合绿色建筑对低能耗、长寿命的要求。

2. 模块化设计。将短肢剪力墙与预制构件结合，在工厂预制短肢剪力墙模块，模块之间通过预埋件连接，现场拼装施工。这种方式可缩短工业建筑的施工周期，减少现场施工对周边环境的影响，同时能保证结构质量的稳定性，避免现场施工因环境因素导致的质量波动，尤其适用于装配式工业厂房的建设，提升工业建筑建设的效率与质量，适配现代工业建筑对快速建造的需求。

3. 智能化设计。结合 BIM 技术建立短肢剪力墙的参数化模型，在设计阶段模拟不同荷载工况下的结构性能，优化截面尺寸与布置方案，确保设计的合理性与经济性，避免设计冗余或设计不足。同时将模型与工业建筑的设备布置、管线设计相结合，实现结构设计与生产需求的协同优化，减少设计冲突，提升设备安装精度，降低管线碰撞风险，为工业建筑的智能化运营奠定基础，适配现代工业建筑对智能化设计的需求。

## 4 结语

短肢剪力墙具备的截面小、刚度适中、受力协同性强的特点，能够适配工业建筑对承载、抗震、空间利用的多方面需求。短肢剪力墙的抗震性能强且占地面积小，可在保证结构安全的前提下尽可能满足建筑专业对内部空间的需求。结构设计过程中应注重抗震概念设计、结构布局优化和材料选择，保证结构的安全性与经济性。施工过程中需要采用高精度模板，严格控制钢筋绑扎以及混凝土浇筑等过程，采取一系列质量保证方法，保证工程质量。

## 参考文献：

- [1] 陈煌. 高层建筑短肢剪力墙结构设计与施工要点分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(08): 22-24.
- [2] 粟文桃. 民用建筑结构设计中短肢剪力墙技术的应用 [J]. 建筑工程技术与设计, 2021(04): 441.
- [3] 吴月磊, 张玉华, 巩亚. 短肢剪力墙技术在建筑结构设计中的应用分析 [J]. 模型世界, 2025(13): 109-111.
- [4] 许洲. 高层建筑短肢剪力墙力学性能试验研究 [J]. 江西建材, 2024(11): 175-177.
- [5] 刘影, 李秋实, 赵军. 混凝土短肢剪力墙新型模板加固技术研究与应用 [J]. 建筑技术开发, 2025, 52(09): 33-35.

# 水利水电建筑工程中的混凝土浇筑质量控制技术

董 盼

(渭南市临渭区水利工程质量安全监督站, 陕西 渭南 714000)

**摘要** 水利工程作为国家基础设施的关键组成部分, 其混凝土施工质量直接关系到工程结构安全和长期服役性能。本文认为通过科学化的施工管理体系和全过程质量控制手段, 包括原材料筛选、配合比优化、浇筑工艺规范及养护制度完善, 能够有效预防裂缝、渗漏等质量通病, 从而在保障工程安全可靠性的同时, 兼顾经济效益与生态环境保护要求。

**关键词** 水利工程; 混凝土; 施工管理; 质量控制

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.018

## 0 引言

随着我国水利水电工程建设进入高质量发展阶段, 现代混凝土施工技术作为关键性工艺环节, 其工艺水平和质量控制直接决定了工程主体结构的长期稳定性、抗震性能及防洪安全。尽管新型外加剂、智能化浇筑设备等技术手段不断革新, 但施工过程中仍普遍存在裂缝控制不足、强度离散性大等典型质量缺陷, 亟需通过BIM技术应用、全生命周期质量管理体系构建等创新手段, 系统提升工程技术标准与安全水平。

## 1 水利工程混凝土施工的特点

水利工程混凝土施工过程涉及多环节系统化控制, 从原材料筛选、配合比设计到现场浇筑工艺及后期养护管理均需严格把控。其特殊性主要体现在: 首先, 露天作业环境受气象条件显著制约, 昼夜温差波动与极端降水直接影响混凝土凝结过程, 导致浇筑作业间歇性中断; 其次, 超长工期与海量工程量形成叠加效应, 特大型项目往往跨越多年度施工周期<sup>[1]</sup>; 再次, 复杂工况要求差异化材料配比, 结构关键部位常需特种混凝土, 且与土建、金属结构安装等交叉作业产生工艺冲突; 最后, 温度应力控制成为关键技术难点, 特别是大体积混凝土需采用分层间歇浇筑工艺, 通过温度监测与缝面处理预防结构性裂缝产生。

## 2 水利工程混凝土施工管理要点

### 2.1 人员管理

在水利工程混凝土施工过程中, 施工人员的专业技能与职业素养对工程质量起到决定性作用。例如: 某工程项目实施三级培训认证机制: 首先开展全员安

全技术交底, 其次针对振捣等关键工序组织专项技能培训, 最终通过理论与实践双重考核。以混凝土振捣为例, 培训内容包括振动棒操作要领、振捣时间控制及漏振预防措施, 经考核95%以上作业人员实现标准化操作, 显著提升了混凝土密实度与均匀性, 减少了蜂窝麻面等质量缺陷的出现概率。

### 2.2 设备管理

水利工程混凝土施工过程中的设备管理是保障工程质量与施工效率的关键环节, 完善的设备管理机制对项目建设具有决定性影响。针对混凝土搅拌系统、运输设备及振捣装置等核心施工设备, 必须建立系统化、标准化的维护保养体系。例如: 某工程项目实施分级分类设备维保方案, 对搅拌设备执行周期性全面检修制度, 及时更换易损部件确保拌合质量; 对混凝土运输车辆实施里程节点维护机制, 保证运输过程安全可靠; 同时建立设备状态实时监控系统, 通过预防性维护保障设备持续稳定运行, 实现施工全过程的质量控制与进度保障。

### 2.3 施工进度管理

水利工程混凝土施工进度管理需要建立科学严谨的进度管控体系, 在确保施工质量的前提下实现工期目标。通过运用现代项目管理方法, 将混凝土浇筑、振捣、养护等关键工序纳入动态进度管理系统<sup>[2]</sup>。例如: 某工程采用网络计划技术对施工流程进行精细化编排, 重点把控大体积混凝土浇筑、结构缝处理等关键线路作业, 建立进度预警机制和质量追溯制度, 既避免了盲目赶工导致的质量隐患, 又确保了各工序的科学衔接与合理工期。施工过程中根据气象条件、材料供应

等变量因素实施滚动式进度调整，实现质量与进度的动态平衡控制。

#### 2.4 施工安全管理

水利工程混凝土施工作业面临多种安全隐患，必须建立系统化的安全防控体系。针对高空作业、设备操作等关键风险点，需实施多层次安全防护措施：设置醒目的分区警示标识、配置标准化的个人防护装备、完善临边防护设施等。例如：某工程项目在实施混凝土浇筑作业时，特别重视高空作业平台的防护体系搭建，通过规范化的安全通道设置、可靠的防坠落装置安装以及严格的作业区域隔离管理，构建了全方位的安全防护网络，有效预防各类安全事故发生。

### 3 水利工程混凝土施工质量控制措施

#### 3.1 加强原材料质量控制

水利工程混凝土原材料的质量控制是确保工程质量的首要环节，必须建立全流程的质量管控体系。从原材料进场开始，就应当执行标准化的质量验收程序，对水泥的基本物理性能、骨料的级配特征以及外加剂的功能参数进行系统性检测。例如：某工程项目通过实施分层级质量把关制度，重点监控水泥的水化热特性、骨料的碱活性反应以及外加剂的适应性表现，同时配备专业的检测设备和实验室人员，确保所有进场材料的技术指标完全满足工程设计要求和施工规范标准，为混凝土结构的长久耐久性奠定了坚实的基础。

#### 3.2 优化混凝土配合比

水利工程混凝土配合比设计是一项系统工程，需要基于工程结构特点和使用环境要求进行科学论证。通过实验室试配与性能验证相结合的方法，重点优化混凝土的力学性能指标、耐久性能参数以及施工和易性等关键技术指标。例如：某工程项目在配合比优化过程中，特别针对水工建筑物长期处于干湿交替和冻融循环的特殊环境，采取适度提高胶凝材料用量的技术措施，同时通过掺加优质矿物掺合料改善微观结构，从而确保混凝土具备优异的抗渗透能力和抗冻融循环性能，满足工程全寿命周期的使用要求。

#### 3.3 加强施工过程质量控制

在水利工程混凝土施工过程中，需要建立全过程的质量控制体系。首先，应规范混凝土搅拌工艺参数，确保拌合物均匀性，并在运输过程中采取慢速搅拌等防离析措施；其次，浇筑阶段需严格按施工方案控制分层厚度和浇筑速度，通过高频振捣设备保证混凝土密实度；最后，养护管理环节要制定标准化的养护方案，采用覆盖洒水或喷涂养护剂等方法，并对养护过程实

施持续跟踪记录，确保混凝土各项性能指标的实现<sup>[3]</sup>。

#### 3.4 加强质量检测与验收

水利工程混凝土质量管控应贯穿施工全过程：原材料的质量控制需建立规范的检测程序，对水泥等关键材料实施定期抽样检验；混凝土浇筑过程中需严格按照标准要求制作试件，开展全面的力学性能与耐久性能检测；工程完工后需组织专业技术人员对混凝土结构外观进行系统检查，针对表面缺陷采取标准化修复工艺，确保结构质量满足设计要求和使用功能。

### 4 混凝土浇筑后的养护技术

#### 4.1 保湿养护

水利工程混凝土浇筑完成后必须严格执行标准化养护工艺，这是确保混凝土结构质量的关键环节。在混凝土初凝前要及时进行第一次洒水作业，这能有效预防表面干缩裂缝的产生；待混凝土终凝后，则需建立持续保湿机制，通过洒水养护、流水养护或覆膜养护等多种方式，使混凝土表面始终保持湿润状态，为水泥的充分水化提供必要条件。特别是对于大体积混凝土结构，其养护周期要延续至上层混凝土浇筑完成，养护频率应根据现场温度、湿度等环境因素动态调整，从而确保混凝土获得最佳的强度发展和耐久性能。

#### 4.2 保温养护

在水利工程混凝土施工中，针对环境温度变化条件下的养护工作，应建立系统的温度控制体系<sup>[4]</sup>。施工过程中应根据气象预报和现场实测数据，动态调整养护方案。优先选用导热系数低、保温性能优良的专用养护材料，包括但不限于复合型保温膜、多层隔热毯及高分子保温垫等高效隔热材料体系。在季节转换期和昼夜温差较大时段，需建立温度监测预警机制，当预测到寒流侵袭时，必须提前 48 小时将常规湿润养护转换为综合保温养护模式。特别对于刚拆模的混凝土结构，应实施重点防护，通过分层覆盖保温材料、搭设临时挡风屏障等措施，形成稳定的微气候环境，有效控制混凝土内外温差梯度，防止因温度应力导致的贯穿性裂缝和表面龟裂，从根本上保障混凝土结构的整体密实性和长期耐久性。

### 5 混凝土浇筑技术在水闸施工中的应用

水闸结构按功能区划分为三大区域：上游衔接段、中央闸室和下游出口段，构成完整的挡水泄洪体系。上游段设防冲设施消能；中央闸室作为核心功能区，配置有精密闸门系统、启闭机械装置以及配套的支承结构，确保水流调控的可靠性和灵活性；下游出口段则采用阶梯式消力池设计，结合尾坎整流设施，通过

水跃原理实现水流能量的高效消散和平稳过渡。这三个功能区域协同工作，共同构成一个完整的挡水、泄洪与流量调节体系。在闸墩结构施工过程中，面对配筋密集度高、预埋管线系统复杂、施工操作空间受限等特殊工况，必须编制针对性强的专项施工技术方案。核心工艺控制要点主要包括：在底板与闸墩连接部位采用分层阶梯式浇筑工艺，严格控制分层厚度和间隔时间，确保新旧混凝土良好结合；选用高精度组合式钢模板系统，配合全站仪实时监测，保证结构轴线和垂直度偏差控制在规范允许范围内；针对闸门锚固系统，创新采用具有应力缓冲功能的高分子复合材料垫片装置，既满足结构受力要求，又能有效保护混凝土表面完整性。通过建立全过程质量管控体系，实施标准化作业流程，采用信息化监测手段，全方位确保施工精度和结构性能，使工程实体质量达到优良标准。

## 6 混凝土大坝体施工技术的应用

### 6.1 大坝体分块浇筑技术

在大型水利水电工程坝体混凝土浇筑施工中，科学合理的分区施工策略至关重要。工程实践中主要采用通仓分块、错缝分块和纵缝分块三种典型技术方案。其中通仓分块技术通过分层连续浇筑简化了施工工序，但对大体积混凝土温度控制提出了严格要求；错缝分块工艺则利用竖向施工缝的错位布置来改善结构受力性能，需要配合优化的混凝土配合比设计和全过程温度监控措施；而纵缝分块方式虽在温度应力控制方面具有独特优势，却显著增加了模板工程量和施工组织难度。这三种工艺方案均将温度场控制作为施工管控的核心要素，在确保大坝结构整体稳定性的同时，必须统筹兼顾施工进度与工程质量的双重要求。实际施工过程中应当根据具体工程特点，制定针对性的温度防裂技术措施，建立全过程监控体系，从原材料控制、浇筑工艺到后期养护等各环节实施精细化管控，最终确保大坝混凝土结构的整体施工质量和长期耐久性能满足设计要求。

### 6.2 接缝灌浆施工技术

#### 6.2.1 接缝灌浆管路布局

在水利工程纵缝处理中，灌浆作业主要采用盒式、联合骑缝式和可重复灌浆三种管路系统方案。其中盒式灌浆凭借其独特的管路结构和内置过滤装置，在防止浆液堵塞方面表现出众，但需付出较高材料成本的代价<sup>[5]</sup>。为克服这一局限，联合骑缝式灌浆技术应运而生，该方案通过优化管道截面形状和布置方式，显著改善了浆液流动性能，不仅降低了管路堵塞概率，

还提高了灌浆密实度。为确保水利工程纵缝灌浆的最佳效果，创新研发的可重复灌浆系统采用了先进的模块化设计理念，配备了智能自清洁机构和便捷的快速连接装置，不仅有效保障了灌浆密实度和均匀性，还大幅提升了现场施工的组织效率与过程可控性。这三种灌浆技术方案各具优势，在实际工程应用中，需要综合考量项目地质条件、施工环境、工期要求等多种因素，从系统可靠性、工艺适应性、经济合理性等多个技术经济指标进行全面评估和科学比选，最终选择最适合工程特点的灌浆实施方案，以确保工程质量和施工进度双达标。

#### 6.2.2 接缝灌浆施工技术

在大坝接缝灌浆施工过程中，质量控制必须贯穿始终，重点需要落实三大关键措施：首先需建立全过程质量监控体系，通过实时监测灌浆压力、流量等参数，预防因灌浆不当导致的坝体变形及相邻接缝过早闭合；其次应科学调控坝体应力分布，合理设置灌浆时机和压力，避免接缝在外部荷载作用下产生开裂；最后要优化灌浆工序安排，严格遵循“先横缝后纵缝”的施工顺序，确保各接缝系统有序灌浆。通过采用标准化施工工艺、精细化过程控制和信息化管理手段，确保接缝灌浆施工质量全面达标，从而为大坝整体结构的安全稳定运行提供可靠保障。整个灌浆过程要注重各环节的协调配合，确保灌浆效果满足设计要求。

## 7 结束语

在水利工程建设中，混凝土施工工艺占据重要地位。通过优选建材原料、科学调配配比、优化浇筑工艺以及完善后期养护等关键环节，能够有效提升混凝土结构性能，确保水利设施长期稳定运行。随着工程技术发展和施工方法的持续革新，先进的混凝土施工技术必将为水利项目提供更有力的支撑。

## 参考文献：

- [1] 孟宪民,杨琳琳.水利水电施工中混凝土质量控制措施[J].城镇建设,2024(08):232-234.
- [2] 邓渠江.水利水电工程坝体混凝土施工质量管理分析[J].低碳世界,2024,14(10):103-105.
- [3] 杨晓宇.建筑施工中混凝土外观质量控制要点分析[J].建材发展导向,2023,21(07):25-27.
- [4] 李东.房建工程中的钢筋工程施工质量控制分析[J].建材发展导向,2023,21(23):28-30.
- [5] 代吾来提·卡克木江.水利水电工程混凝土施工问题与管理措施研究[J].水电水利,2022,06(02):134-136.

# 大型场馆大跨度钢结构施工与监测关键技术研究

吴友佳

(广东江涛工程科技有限公司, 广东 佛山 528300)

**摘要** 本文以一座大型体育场馆施工为例, 对大跨度钢结构施工中的关键技术与监测方法进行系统研究。研究结合理论推导、数值模拟与现场实测, 重点解析大跨度悬挑内环梁的分段安装要点, 梳理主拱肋的精准定位流程, 并评估无线监测系统在施工阶段的实际表现。研究结果表明, “地面拼装—整体提升”方案可显著抑制结构变形; 无线监测网络在整个施工期内持续提供安全预警, 为现场安全提供保障。

**关键词** 大型体育场馆; 大跨度钢结构; 大跨度悬挑内环梁; 无线监测

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.019

## 0 引言

大跨度钢结构因自重轻、跨越能力强、造型可塑性好, 已成为这类项目的首选。然而, 其施工阶段遍布高空作业、临时支撑体系与多步卸载, 结构内力随工序推进持续变化, 风险远高于常规结构。统计显示, 近十年国内大跨度钢结构施工事故中, 76% 源于临时支撑失稳或卸载方案缺陷。在此背景下, 施工与监测关键技术的研究已成为工程实践的迫切需求。本文选取某大型体育场馆项目, 系统梳理施工全过程的力学响应与监测手段, 构建基于多源数据融合的施工控制技术体系, 为同类工程提供理论参考。

## 1 工程概况

### 1.1 项目背景

某大型体育场馆体量庞大, 总建筑面积约 21.7 万 m<sup>2</sup>。主体采用双向张弦梁桁架体系, 最大跨度达 198 m。结

构由 4 榼主拱肋、8 道次拱肋及 24 组张弦梁协同构成, 形成稳定的三维空间受力框架。悬挑段同样引人注目, 最大跨度 65 m, 选用变截面箱型钢梁, 单根构件最重达 120 t。图 1 为某大型体育馆剖面结构示意图。

### 1.2 结构特点

(1) 主体结构矢高 32 m; 长轴向桁架间距 15 m, 短轴向 12 m。(2) 在材料参数方面, 主体选用 Q345GJ 高强钢, 局部连接节点则改用 Q420GJ 铸钢件。(3) 在边界条件方面: 基础采用桩筏基础型式, 单桩的承载力特征值为 8 000 kN。

### 1.3 施工难点

(1) 65 m 悬挑梁需在 28 m 高空拼装, 临时支撑体系必须保证悬挑结构施工阶段的稳定。(2) 主拱肋安装: 198 m 跨主拱肋需分 12 段吊装, 累计误差控制要求≤5 mm。(3) 全结构同步卸载须在 72 小时内结束, 应力波动幅度不得超出设计值的 15%。

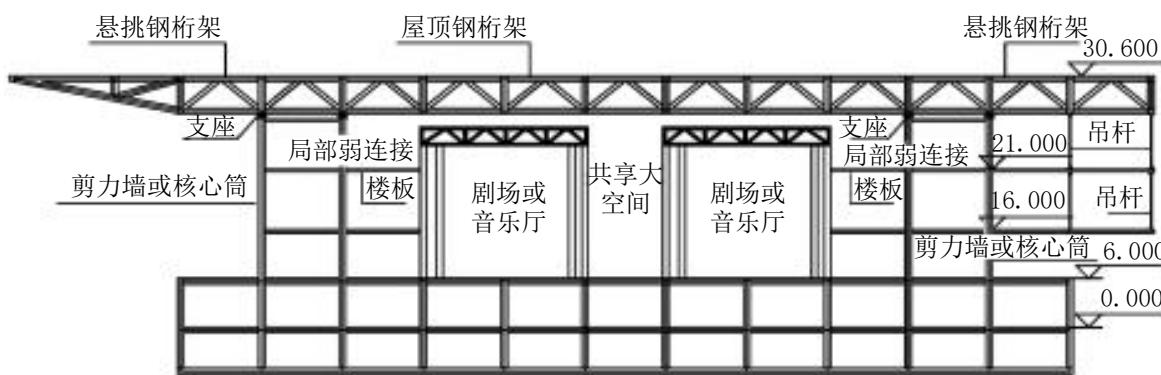


图 1 某大型体育馆剖面结构示意图

## 2 大跨度钢结构施工关键技术研究

### 2.1 大跨度钢结构施工总体工艺

1. 施工流程设计。在大跨度钢结构建设中，“分区施工、整体合龙”的总体思路展现出独特优势。工程首先被科学地拆分为若干相对独立的施工单元，各单元随后同步推进。并行作业显著降低了交叉干扰，质量更易受控。待各单元完工后，通过一次精准的整体合龙，将分散构件严丝合缝地连成一体，以保证结构稳定性与功能完整性，这是项目成功的关键<sup>[1]</sup>。

2. 临时支撑体系设计。项目采用格构式钢支撑体系，单点承载力设计值定为1 500 kN。借助SAP2000有限元软件反复计算，支撑点常规间距最终取12 m，局部区域加密至8 m。实测表明，支撑最大沉降仅3.2 mm，低于5 mm限值，满足设计要求。

### 2.2 大跨度悬挑大开口钢结构内环梁分段安装关键技术

1. 分段方案优化。在大跨度建筑施工中，65 m悬挑梁的安装被视为关键难点。为兼顾安全与效率，项目采用“地面拼装—整体提升”方案，并将梁体划分为五段作业。拼装阶段，作业人员先在开阔平整的场地将五段梁体精确对接，全过程依靠高精度测量仪器实时校正各部件的空间位置与角度，确保几何误差受控。拼装完成后，转入整体提升：通过大型液压提升装置及布设合理的钢绞线—锚具系统，将重达数百吨的梁体缓慢、平稳地抬升至设计标高<sup>[2]</sup>。

2. 拼装精度控制。三维激光扫描技术完成拼装检测后，实测数据随即被完整采集。结果显示：平面位置的最大偏移为2.1 mm，均值1.3 mm；垂直度偏差峰值达1/450，平均为1/620；接口间隙最大0.8 mm，平均0.5 mm。

3. 提升过程仿真。在ANSYS中建立提升模型并完成仿真后，结果如下：提升点实测最大反力1 420 kN，低于该处1 500 kN的设计限值；结构最大应力185 MPa，低于规范给出的210 MPa许用应力；模型最大位移12.3 mm，亦未超过15 mm的允许位移。

### 2.3 钢结构主拱肋安装关键技术

1. 吊装方案设计。两台600 t履带吊协同抬吊时，优化后的吊点布置为：吊点间距45 m，吊索与水平面夹角65°，钢丝绳直径Φ56 mm，结构6×37+FC。

2. 合龙工艺。采用“温度合龙法”时，先通过有限元分析锁定18±2 °C为最佳合龙温度；现场实测环境温度17.8 °C，随后将接口间隙严格保持在0.5~1.2 mm范围内，完成合龙。

3. 焊接质量控制。 $\text{CO}_2$ 气体保护焊成本低廉、效率突出且焊缝性能稳定，但现场风速必须低于1 m/s，否则保护气流被扰乱，极易产生气孔。施焊前，母材与焊丝须彻底清理，坡口形状、根部间隙及错边量应全部达标。焊接时，实时监测电流、电压和焊丝伸长，并通过层间温度控制防止过热。焊后立刻实施无损检测，发现超标缺陷立即返修，以保障大跨度钢结构的整体质量。无损检测结果显示，焊缝一次合格率达98.7%。

## 3 大跨度钢结构施工监测研究

### 3.1 大跨度钢结构施工无线监测系统

1. 系统架构设计。系统采用分层分布式架构，共三层。感知层布置量程±1 500  $\mu\epsilon$ 的振弦式应变计，并辅以精度±0.1 mm的静力水准仪，保证数据完整、准确。传输层选用通信距离1.5 km的LoRa无线模块，维持链路稳定高效。应用层依托云端分析平台，对采集结果进行深度处理与解读<sup>[3]</sup>。

2. 传感器布置方案。主拱肋是主要承力构件，监测点布设必须精准。轴力、弯矩及变形是关注核心。纵向沿拱脚、1/4跨、1/2跨、3/4跨等控制截面安装应变传感器，捕捉轴力与弯矩波动，为受力评估提供数据；同断面配套位移传感器，记录施工阶段竖向与横向位移，以便及早发现异常变形。现场环境复杂，传感器须具备抗干扰、防水防尘能力，安装时与拱肋表面紧密贴合并固定牢靠，防止施工振动引起信号漂移。合理布设后，无线系统可实时回传主拱肋状态，为安全与质量管控提供依据，保障大跨度钢结构施工顺利推进。

3. 温度效应分析。建立温度—应力关系模型： $\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T$ 。式中： $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ （线膨胀系数）， $E = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ （弹性模量）。实测温度应力最大值达42 MPa，占设计应力的20%。

4. 数据处理算法。采用小波变换滤除噪声后，实测结果的变化一目了然：应变信号的信噪比由12 dB跃升至38 dB，位移误差则从±2.5 mm降至±0.8 mm，两项指标均显著改善。

### 3.2 大跨度钢结构施工内力分析

图2显示，主拱肋应力随时间呈现明显阶段性：先升高，再回落，随后趋于平稳。0~500 min为安装与焊接期，荷载按既定次序叠加，应力一路升至峰值5.3 MPa，仍远低于钢材屈服值，满足规范要求。500 min后，合龙缝焊接结束，整体卸载启动，应力随之逐步下降。

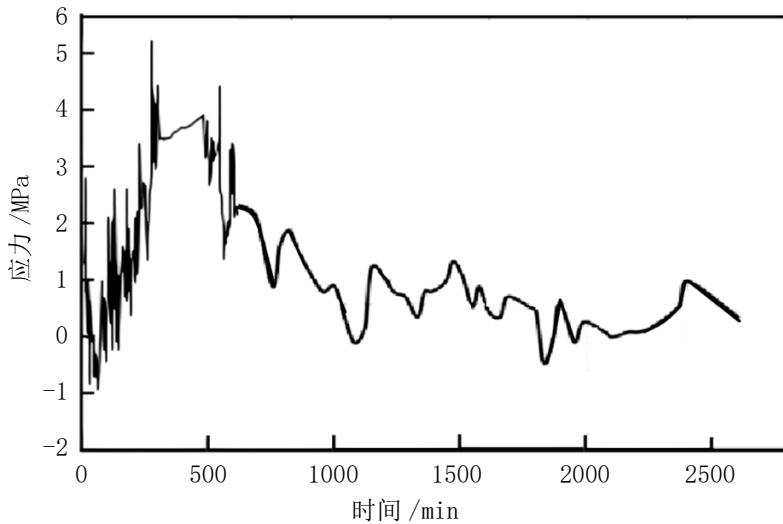


图 2 主拱肋施工过程的应力变化时程曲线

### 3.3 大跨度钢结构施工结构变形分析

1. 变形监测结果。施工全过程的变形监测显示：提升阶段测得的最大竖向位移为 18.7 mm，低于该阶段 25 mm 的限值；卸载阶段最大水平位移为 12.3 mm，仍低于 15 mm 的允许值；合龙后的残余变形为 6.2 mm，未超出 10 mm 的控制标准<sup>[4]</sup>。

2. 变形控制措施。变形控制依赖三条路径实现精细调节。预调值法居首：先由有限元算出 -8.5 mm 预拱度，再据此提前设定，为后续调整奠定基础。同步控制次之，借助液压同步提升系统，把位移差锁定在 ±3 mm 内，保证变形步调一致且平稳。临时加固后，于关键节点布设临时支撑，可将结构刚度提高 35%，从而增强抗变形能力。

3. 变形预测模型。构建基于 BP 神经网络的变形预测模型时，输入参数被系统梳理为四类与变形直接相关的变量。首先区分施工阶段：提升、卸载与合龙各自引发不同的变形增量，阶段信息必须单独编码；其次引入环境温度，其波动通过改变材料弹性模量与构件膨胀幅度而放大位移；随后计入累计荷载，它随工序推进逐步叠加，与变形曲线高度耦合；最后纳入支撑刚度，刚度差异会立即改变力流路径，使位移响应呈现明显变化。工程实测显示，模型输出与实测值吻合率达到 92%，这一精度足以作为现场调整索力、预拱或临时支撑的定量依据<sup>[5]</sup>。

### 4 结论

本文结合理论推导、数值模拟与工程案例，系统梳理了大跨度钢结构施工与监测的核心技术，并得出四点结论：第一，施工安全的前提是精细化的结构力

学分析与截面优化，设计时必须同步满足规范条文与现场真实工况。第二，焊接工艺与吊装方案决定质量上限，应通过参数调优与设备匹配实现高效建造。第三，全过程监测需覆盖多参数、多工况，将实测数据与有限元结果实时比对，才能准确评估结构状态。第四，温度变化与索力偏差对安全性影响显著，须构建温度—应力映射模型并引入索力耦合算法加以控制。

后续研究可沿以下三条路径展开：

第一，智能监测：融合物联网、大数据与人工智能，对监测数据完成自动采集、实时分析与即时预警。

第二，绿色施工：开发低能耗、低污染的焊接与防腐工艺，助力钢结构建造向可持续方向发展。

第三，数字化交付：借助 BIM+GIS，将施工监测数据与运维管理无缝衔接。

### 参考文献：

- [1] 杨志杰.桥梁护栏与基础桥面板的匹配性防撞设计[J].城市道桥与防洪,2022(06):93-99.
- [2] 李欣,贾成亮,韦娴.大型博物馆钢结构施工过程防变形控制与实现技术研究[J].建筑技术,2023,54(17):2067-2069.
- [3] 齐翰.环形大跨钢结构施工临时支撑设计与荷载优化[J].建筑技术,2023,54(05):588-591.
- [4] 王金荣,王秀丽,苟宝龙,等.大型复杂体育馆钢结构吊装过程温度影响分析与现场监测研究[J].工业建筑,2023,53(08):96-101.
- [5] 王猛,李欣,鞠竹,等.北京工人体育场大跨度开口单层拱壳钢结构施工关键技术[J].建筑结构,2023,53(06):18-25.

# 复杂水文地质条件下水电站上游围堰防渗处理关键技术研究

戴兴元

(中国葛洲坝集团电力有限责任公司, 湖北 宜昌 443002)

**摘要** 为了应对深厚覆盖层的复杂地质条件和洪水周期长、洪峰流量大的复杂水文条件, 基于巴基斯坦 DASU 水电站上游围堰, 研究高压旋喷防渗墙和混凝土防渗墙的优缺点, 计算围堰的稳定性, 以期为类似围堰防渗处理提供有益参考。研究结果表明, 在复杂水文地质条件下, 相比于高压旋喷防渗墙, 混凝土防渗墙不仅具有更强的可靠性, 还可以缩短工期。

**关键词** 复杂水文地质条件; DASU 水电站; 围堰; 防渗处理

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.020

## 0 引言

建设水利水电枢纽是实现水资源调控、发展清洁能源的重要手段<sup>[1]</sup>。围堰作为临时挡水建筑物, 其主要功能是围护枢纽永久建筑物占地范围形成基坑, 抽干基坑内积水以保障干地施工条件。这一临时结构的防渗性、稳定性与抗冲刷性能直接关系到主体工程的施工安全和工程质量。然而, 由于水利水电工程多选址于复杂地质区域, 围堰常面临深厚覆盖层、高水头等挑战, 尤其是由雪山融水引发的汛期洪水, 具有洪水周期长, 洪峰流量大的问题<sup>[2]</sup>, 其防渗性能的保障尤为关键。因此, 设计经济合理又安全可靠的围堰防渗结构, 成为水利工程建设中的关键技术难题。

目前主要的围堰防渗方案包括高压旋喷防渗墙<sup>[3]</sup>和混凝土防渗墙<sup>[4]</sup>等。虽然高压旋喷防渗墙具有适用地层广、施工简单、防渗作用范围大等优点, 但由于高压旋喷防渗墙高度依赖工艺设备的技术参数, 在多漂卵石深厚地层条件下, 工艺参数存在不确定性, 易导致围堰防渗质量波动及工期延误。例如: 新疆某引水发电岸边式厂房的围堰采用高压旋喷防渗墙施工来应对深厚砂砾石覆盖层, 施工过程中出现了塌孔、不返浆、较多较大孤石处灌浆不密实等问题。混凝土防渗墙因其渗透系数小、性能可靠、施工效率高等特点, 在围堰防渗体系中的应用越来越广泛<sup>[5]</sup>。例如: 某水电工程<sup>[6]</sup>河床覆盖层最大厚度约 45 m, 覆盖层物质为中细砂层、含漂砾石层、砂砾石层、粉质黏土层, 工程采用混凝土防渗墙作为主要防渗措施, 满足防渗和工期要求。然而, 目前的防渗墙工程主要用于由雨季引发的周期性水头。综上, 深厚覆盖层和雪融型大水头下的防渗墙工程少有研究。

本研究针对巴基斯坦 DASU 水电站上游围堰的防渗问题, 通过对比分析研究高压旋喷防渗墙和混凝土防渗墙在应对深厚覆盖层和雪融型大水头条件下的防渗问题, 为应对复杂地质水文条件下的围堰防渗工程提供借鉴。

## 1 工程概况

DASU 水电站项目位于巴基斯坦开伯尔普赫图赫瓦省科希斯坦区镇印度河流域, 为属 I 等大(1)型工程。项目主体由四大核心结构组成: 242 m 高的 RCC 拱形重力坝(建基面高程 715.0 m, 坝顶高程 957.0 m, 轴线长 570 m)构成挡水系统, 其碾压混凝土总量达 432 万 m<sup>3</sup>, 月高峰浇筑强度 20 万 m<sup>3</sup>; 泄洪系统配置 9 个低位泄水孔、8 孔溢洪道及两岸冲砂洞; 发电系统通过左岸 5 个进水口引水, 经压力隧洞输送至地下厂房(布置 15 台单机 360 MW 机组), 以及上、下游围堰及左岸三条特大断面导流洞组成的导流建筑物。DASU 水电站是目前为止巴基斯坦建成的技术难度最大、总装机容量和总投资最大的水电项目, 将大幅改善巴基斯坦能源结构。

## 2 地质水文条件

DASU 上游河床覆盖层厚度约为 45 m, 如图 1 所示。从河床底部到基岩顶部主要分为 2 层。上部为 15 m 厚的砂砾石、鹅卵石(粒径 3~20 cm)及砂的混合物; 下部为 30 m 厚的漂砾层, 直径大于 0.9 m, 平均粒径约 2.0 m。

DASU 水电站年均降雨量仅 185 mm, 降水高度集中于 12 月至次年 3 月(占全年 90% 以上), 其中 2 月为降雨峰值月。每年 4 月下旬至 10 月中旬为汛期, 持续约 180 天, 主要依赖雪山融水补给。DASU 水电站的洪

峰达到  $9\ 979\ m^3/s$ , 显著大于拉哇<sup>[7]</sup>、巴塘<sup>[8]</sup>和汗华水电站, 如表 1 所示。相比于降雨型洪水, 融雪型洪水具有更长的汛期和更大的洪峰。长汛期和大洪峰意味着围堰工程工期短和防渗要求高。

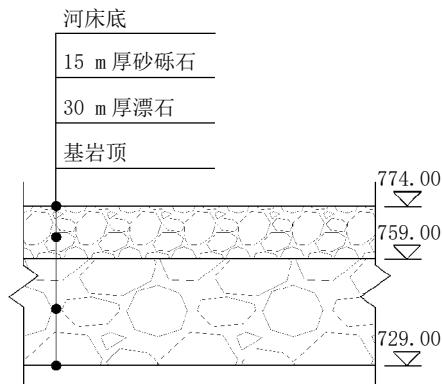


图 1 DASU 上游河床覆盖层

表 1 不同水电站水文条件

|               | DASU  | 拉哇    | 巴塘    | 汗华    |
|---------------|-------|-------|-------|-------|
| 汛期(月数)        | 4     | 4     | 3     | 3     |
| 洪峰( $m^3/s$ ) | 9 979 | 6 330 | 6 780 | 3 750 |
| 洪水成因          | 融雪型   | 融雪型   | 降雨型   | 降雨型   |

### 3 防渗方案的技术对比

#### 3.1 高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案

##### 3.1.1 方案概况

图 2 说明了围堰基础防渗采用高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案。高压旋喷灌浆段(高程 760 m 至 740 m)设计为双排布置, 桩径 1.8 m、孔距 1.4 m、排距 1.45 m, 成墙厚度 3.2 m, 选用 QDG-2 全液压钻机进行跟管钻进(卵砾石层工效 1.5 m/h), 配合 SGP30-5 高喷台车实施二管法喷射(工效 1.65 m/h), 钻孔后采用泥浆护壁并分序喷射。帷幕灌浆段(高程 740 m 至 710 m)为三排布置, 孔距 1.2 m、排距 0.8 m, 使用 XY-2 地质钻在砂砾石层(工效 0.5 m/h)和基岩段(工效 1.0 m/h)钻孔, 钢管跟管钻进后采用 3SNS 灌浆泵自下而上分段卡塞纯压灌浆。

高压旋喷灌浆需完成钻孔 2 203 m, 配置 2 台钻机 24 小时作业需 31 天, 喷射工序滞后钻孔 14 天启动; 帷幕灌浆钻孔总量 9 690 m, 单台设备需 337 天, 为压缩工期至 60 天需配置 12 台地质钻机(10 台钻孔、2 台灌浆)。

##### 3.1.2 可行性分析

高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案具有可快速处理局部薄弱区域, 施工灵活, 效率高等优点。然而,

根据 DASU 河道的地质和水文条件, 高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案存在三大问题: 帷幕灌浆成孔难度大; 高喷灌浆与下部帷幕灌浆处灌浆压力参数难确定; 钻孔工作量大。

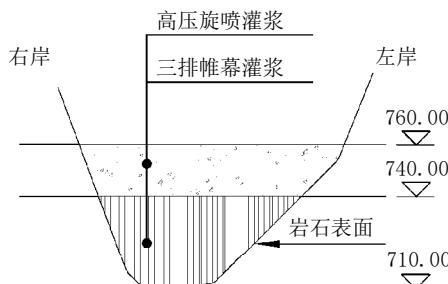


图 2 高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合

1. 砂砾石/鹅卵石层中帷幕灌浆钻孔成孔难度大, 灌浆参数复杂多变, 施工质量要求高, 遇到漂石层灌浆效果较差, 整体灌浆效果不理想。工期控制不利, 可能会出现多次重复性灌浆。

2. 高喷灌浆与下部帷幕灌浆处灌浆压力参数难以确定。灌浆压力过大可能会破坏上部高喷墙体, 若压力过小, 则下部灌浆效果可能不理想, 施工不当易造成渗漏通道。

3. 基岩段的帷幕灌浆设计为三排, 具有较大的钻孔量。52 个孔需从 780 m 高程开始钻孔, 钻孔工作量达到 9 690 m。较大的钻孔工作量对人员组织和设备数量要求较高。因此, 基岩段设计三排帷幕灌浆难以保证围堰施工的短工期需求。

因此, 高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案理论上基本可行, 但实施难度大, 工期控制难度大。

#### 3.2 混凝土防渗墙与单排帷幕灌浆组合方案

##### 3.2.1 方案概况

覆盖层采用 80 cm 厚普通混凝土防渗墙, 墙下由三排改为单排基岩帷幕灌浆, 灌浆孔距由 1.4 m 改为 1.2 m。混凝土采用 C20 的素混凝土, 防渗等级为 W6, 入岩深度 1 m。如图 3 所示。该设计方案具有实施简单, 施工技术参数控制单一, 可靠性更强。

##### 3.2.2 可行性分析

混凝土防渗墙(面积  $2\ 144.0\ m^2$ )配合墙下基岩帷幕灌浆(630 m), 施工效率显著提升。防渗墙采用 CZ-22 型冲击钻“钻劈法”成槽(砂砾石层工效 400 工时 /  $100\ m^2$ ), 12 个槽段分两期施工, 配置 8 台钻机可在 45 天内完成; 帷幕灌浆采用 XY-2 地质钻(工效 1.0 m/h), 4 台设备 10 天即可完成。

相较于高压旋喷灌浆与三排帷幕灌浆组合方案, 混凝土防渗墙与单排帷幕灌浆组合方案通过预埋钢管免除了防渗墙体内钻孔工序, 可以缩短基础处理的工

期20天，不仅实施性更强、风险更低，还为后续主体工程提前开挖创造了有利条件。

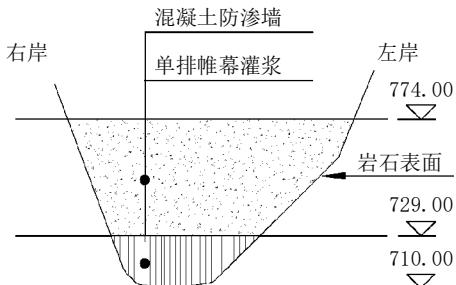


图3 混凝土防渗墙与单排帷幕灌浆组合

#### 4 围堰稳定性分析

上游过水围堰采用随机压实回填，外包钢筋混凝土面板，如图4所示，坝体稳定性计算选用最大断面进行校核。围堰顶宽42.0 m，底宽107.4 m，高11.0 m，漫水面坡比1:2，下游面坡比1:4。围堰顶高程785.0 m，基础面高程774.0 m；最高水位高程792.0 m，计算水位高程差18.0 m。回水水位高程780.5 m，计算回水水位标高程差6.5 m。

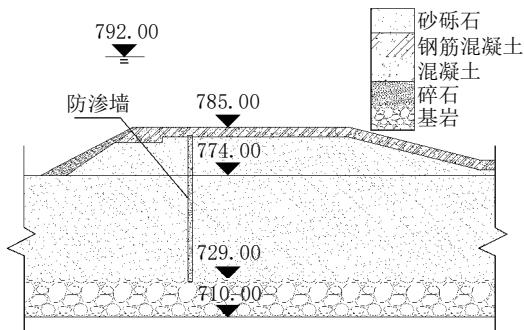


图4 上游围堰稳定性计算断面

上游围堰的受力如图5所示。按照美国陆军工程兵团发布的重力坝设计规EM-1110-2-2200《Gravity Dam Design》，需验证围堰抗滑稳定性及地基承载力。其中抗滑稳定性计算见式(1)：

$$FS \leq \frac{N' \tan \phi + cl}{T} \quad (1)$$

式(1)中： $FS$ 为安全系数，最小取2； $c$ 为楔体滑移面内聚力，取0； $N'$ 为垂直于假定滑动面的合力，kN； $l$ 为滑动面的长度，取m； $T$ 为与滑动面相切的力，kN。

通过计算， $FS=2.0 < 2.59$ ，满足设计要求。地基承载力计算见式(2)：

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} = \frac{\sum N}{A} \pm \frac{\sum M}{W} \quad (2)$$

式(2)中： $\sum N$ 为作用在基座上的合力法向分量之和，kN； $\sum M$ 为绕中性轴的力矩之和，kN·m； $A$ 为

基底面积， $m^2$ ； $W$ 为基地截面模量，取 $m^3$ 。

通过计算， $FS=51.31 \text{ kPa} < 200 \text{ kPa}$ ，满足设计要求。

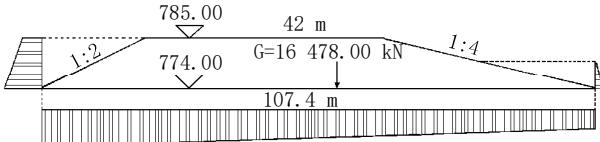


图5 上游围堰受力图

经计算，本项目设计的宽顶堰前水头为8.28 m(水位791.28 m)，堰角收缩水深2.43 m(水位776.43 m)，因堰角流速较高易引发冲刷，导致围堰失稳，故在下游堰角后设置厚度2.0 m、长度46.0 m、高度4.0 m的钢筋混凝土消力墩形成消力池以稳定水流。

#### 5 结束语

针对深厚覆盖层和雪融型大水头的复杂水文地质条件，基于巴基斯坦DASU水电站上游围堰，对比研究了高压旋喷防渗墙和混凝土防渗墙的优劣，并计算了围堰的稳定性。结果表明，在复杂水文地质条件下，相比于高压旋喷防渗墙，混凝土防渗墙具有更优的防渗性，且可缩短工期。

#### 参考文献：

- [1] 樊启祥, 安瑞楠, 王小明, 等. 绿色水电开发内涵、动态演化模型与关键技术[J]. 水力发电学报, 2025, 44(09): 35-52.
- [2] 常以民. 融雪洪水区域水库截流度汛措施分析与研究[J]. 四川水利, 2021, 42(04): 156-160.
- [3] 赵健飞, 孙青秀. 高压旋喷防渗墙在多漂卵砾石围堰地基中的应用[J]. 西北水电, 2024(02): 78-81, 98.
- [4] 张江. 大孤石透水地层围堰混凝土防渗墙施工技术[J]. 四川水利, 2024, 45(S2): 38-42.
- [5] 黄志安. 复杂地质条件下水利工程防渗排水设计与稳定性分析[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(07): 1-8.
- [6] 拓瑜, 王昊, 叶兴国. 冲击钻法在复杂地层混凝土防渗墙中的应用[J]. 设备管理与维修, 2025(10): 137-140.
- [7] 田应辉, 王迎, 吴文洪, 等. 深厚粘性土地基上建高围堰设计关键技术问题[J/OL]. 中国农村水利水电, 1-12[2025-08-07]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=ZHE1803t14vKZDPu-nvd50JKNyDG6T39TgU4NmJUwItysuLQX8G\\_IIubBAzbQ3xyb5oYNeYZiCRrVkpHBpqmIm\\_QE3a5A2gOs0YSWKApjMbZ32ZZDeEUdxfBgZx14i38w9pM\\_AGebxL9j04spVr-KDysJ3shyLr1i4paUCQAYhF-k7FICPMDQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=ZHE1803t14vKZDPu-nvd50JKNyDG6T39TgU4NmJUwItysuLQX8G_IIubBAzbQ3xyb5oYNeYZiCRrVkpHBpqmIm_QE3a5A2gOs0YSWKApjMbZ32ZZDeEUdxfBgZx14i38w9pM_AGebxL9j04spVr-KDysJ3shyLr1i4paUCQAYhF-k7FICPMDQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [8] 苏鹏. 大型水利枢纽工程复杂地质条件下土石围堰稳定性分析研究[J]. 东北水利水电, 2025, 43(06): 1-2.

# 活性氧调控纳米复合膜的空气净化应用

刘骐源

(青岛大学, 山东 青岛 266071)

**摘要** 本研究系统阐述了活性氧调控纳米复合膜在空气净化中的应用。聚焦活性氧的高效氧化特性及其在污染物降解过程中的作用机制, 深入探讨纳米复合膜的材料构成、功能设计原则及制备方法。通过分析光催化等外场作用下活性氧的调控路径, 阐明膜结构对传输与利用效率的影响规律, 建立浓度与降解速率间的定量关系。该技术对挥发性有机物展现出优异的去除效果, 在能效与经济性层面具备显著优势, 同时具有自清洁功能与长期稳定性。研究还针对不同应用场景的适应性以及规模化面临的挑战提出应对方案, 以期为新一代空气净化技术的发展提供有益参考。

**关键词** 活性氧; 纳米膜; 空气净化; VOCs 降解

中图分类号: TB383

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.021

## 0 引言

纳米酶是一类具有拟酶活性的纳米材料, 在分析化学与疾病诊疗领域具有广阔的应用前景。氧化铜基纳米酶鉴于其制备简便、酶活性可调、形貌可控、热力学稳定性好以及因多变价态引发的氧化还原反应, 引起了人们广泛的研究兴趣。空气污染治理的需求日益迫切, 传统净化技术存在明显的局限之处。活性氧凭借其强大的氧化性能可以实现污染物的高效降解, 与纳米复合膜相结合之后更具有可控释放的优势。本文系统开展活性氧调控机制以及膜结构设计的研究, 探讨其在空气净化中的应用潜力, 为开发新型净化技术提供参考。

## 1 活性氧的作用机理与材料体系构建

### 1.1 活性氧的基本特性及其在污染物降解中的氧化机制

活性氧属于一类拥有高反应活性的含氧分子或者自由基物质, 主要涵盖羟基自由基、超氧阴离子以及单线态氧等。这些活性物种具有较强的氧化能力, 其中羟基自由基的氧化还原电位能够达到 2.8 V, 能够有效降解绝大多数有机污染物。在净化过程中, 活性氧通过电子转移、氢抽提及加成反应等途径破坏污染物分子结构, 最终将其矿化为无害物质。不同活性氧种类在反应活性和寿命方面存在显著差异, 比如羟基自由基虽然反应速率极高但是寿命极为短暂, 而过氧化氢等种类存在时间较长。这种特性差异决定了在空气净化应用中需根据目标污染物特性选择合适的活性氧

种类, 并通过材料设计实现活性氧的定向生成与高效利用。

### 1.2 纳米复合膜的材料组成与功能化设计原则

纳米复合膜的材料体系围绕高效活性氧生成与利用这一核心目标构建。基质材料通常择取具备优异成膜性与稳定性的聚合物(如聚偏氟乙烯、聚砜类材料)或拥有催化潜力的无机载体(如二氧化钛、氧化石墨烯)。功能纳米组分主要涵盖金属氧化物、贵金属及碳基材料, 通过掺杂、负载等措施引入活性位点。在功能化设计过程中, 需遵循活性位点最大化、传质阻力最小化及稳定性最优化的基本原则。具体设计策略包含构建多级孔道架构以推动污染物扩散, 调控表面亲疏水性以优化气固界面反应, 并且建立电子传输通道以增强催化效率。各组分的空间分布与界面相互作用需悉心设计, 确保活性中心充分展露且与污染物切实接触。通过能带结构匹配与界面工程, 可实现光生电子—空穴对的高效分离, 进而提升活性氧产率。此多层次的材料设计体系为实现高效空气净化功能奠定了材料基石<sup>[1]</sup>。

### 1.3 复合膜的制备方法与结构调控策略

纳米复合膜的制备综合施行多种材料加工技术, 以实现对膜结构的精准调控。相转化法通过把控聚合物溶液构成与凝固条件, 能够制备具备非对称多孔结构的聚合物基底。静电纺丝技术可以制备拥有高比表面积和互联孔道的纳米纤维膜, 为活性组分负载提供理想载体。层层自组装技术借助分子间相互作用, 能

够实现功能纳米粒子在膜表面的有序排列与固定。在结构调控方面，通过调控制备参数能够精准掌控膜的孔径分布、孔隙率以及表面特性。界面聚合技术可在纳米尺度构建具备选择性分离功能的活性层。为提升膜的性能稳定性，时常采用热退火、化学交联等后处理方式优化膜的结构完整性。这些制备方法与结构调整策略共同作用于膜的微观结构形成，最终实现膜对活性氧生成与污染物降解进程的有效促进。

#### 1.4 材料体系与活性氧生成能力的关联性

材料体系的组成与结构特征与活性氧生成能力之间存在明确的构效关系。催化活性组分的化学性质直接影响活性氧的生成路径与效率，例如二氧化钛在紫外光照下通过能带激发产生电子—空穴对，进而与表面吸附的氧和水分子作用形成多种活性氧物种。贵金属纳米颗粒则可通过表面等离子体共振效应增强光吸收效率，并通过肖特基势垒促进载流子分离。材料体系的比表面积和孔隙结构决定了活性位点的数量及反应物传质效率，多级孔道结构既能保证活性中心的充分暴露，又可为活性氧的迁移扩散提供理想通道<sup>[2]</sup>。

### 2 活性氧调控机制与净化性能强化

#### 2.1 光催化等外场作用下活性氧的生成与调控途径

在光催化、电催化及等离子体激发等外场作用下，活性氧的生成途径连同调控机制呈现出显著差异。光催化进程借助半导体材料对光能进行汲取，进而产生电子—空穴对，空穴氧化表面吸附的水分子，促使羟基自由基生成，电子还原氧气，形成超氧阴离子，活性氧的生成效率受材料能带结构、光源波长与强度等多种因素共同调控。电催化途径通过施加外电场，在电极界面直接电解水或氧气，从而产生活性氧；通过调节电位、电流密度等参数，可实现对活性氧种类的精确控制。等离子体技术则凭借高压放电产生高能电子，对空气组分予以激发，进而形成多种活性氧物种，活性氧的组成能够通过放电功率、气体组成等参数加以调节。这些外场作用不但对活性氧的初始生成速率造成影响，而且通过改变材料表面状态以及反应微环境，对活性氧的后续转化路径以及寿命实施调控。通过优化外场作用参数与材料特性之间的匹配关系，能够实现活性氧生成动力学与反应选择性的协同调控，为不同应用场景之下的空气净化进程提供优化策略<sup>[3]</sup>。

#### 2.2 膜结构对活性氧传输与利用效率的影响规律

膜结构参数对活性氧的传输路径与利用效率具有决定性影响。多孔膜的孔径分布对活性氧的扩散速率

直接形成制约，倘若孔径处于纳米尺度范围之内，受限空间效应可延长活性氧与污染物的接触时间。孔隙连通性对活性氧于膜内的传输路径产生影响，三维贯通孔道可降低传输阻力，提升活性氧的利用率。膜厚度对活性氧从生成位点至反应界面的迁移距离起到决定作用，若膜过厚，会导致活性氧在传输过程中发生猝灭，若过薄则对污染物处理容量形成限制。表面化学性质通过对污染物吸附行为实施调控，进而对界面反应效率产生影响，亲水性表面能够对羟基自由基的生成以及转移起到促进作用。膜内功能组分的空间分布对活性氧的生成位置产生影响，表面富集型分布能够缩短活性氧抵达反应界面的距离。通过构建梯度孔结构或者表面微纳结构，能够对活性氧的时空分布进行优化，实现生成与消耗的动态平衡。这些结构因素共同对活性氧在气固界面的有效浓度以及停留时间起到决定作用，进而对整体净化效率产生影响。

#### 2.3 活性氧浓度与污染物降解速率的定量关系

活性氧浓度与污染物降解速率之间存在明确的动力学关系。在理想情况下，污染物降解速率随活性氧浓度增加而提升，遵循拟一级反应动力学模型。然而在实际反应体系中，这种关系受多种因素影响而呈现复杂特征。若活性氧浓度低于临界值，则降解速率与浓度呈线性正相关；超出该阈值之后，速率提升逐步趋向减缓并趋近于饱和之态势。这种非线性关系源于活性氧与污染物分子之间的碰撞概率限制，以及反应进程中有可能发生的活性氧自猝灭之类现象。不同活性氧物种针对特定污染物的反应速率常数存在数量级方面的差异，羟基自由基的反应速率一般而言比单线态氧高出2~3个数量级。传质过程对于表观反应速率产生关键之影响，尤其是在多孔膜结构内部，污染物扩散速率有可能成为整体反应的控制步骤。反应体系的pH值、温度等环境参数通过改变活性氧寿命与反应路径的方式，进一步对浓度—速率关联的具体呈现形式造成影响。构建精确的定量模型需要综合考量这些动力学参数与传质因素的耦合作用。

#### 2.4 膜材料自清洁功能与长期稳定性的提升机制

膜材料的自清洁功能与长期稳定性通过活性氧的持续作用实现。在光照或者电场作用下，膜表面生成的活性氧能够有效分解附着污染物，防止孔隙堵塞和性能衰减。羟基自由基等活性物种能够氧化降解膜表面吸附的有机污染物，将其转化为可挥发性小分子，进而维持膜表面的活性位点展露。这种自清洁机制显

著延缓了因污染物积累导致的膜性能下降。在材料设计层面，通过引入无机纳米粒子或者进行表面交联处理，能够增强膜材料的抗老化能力。稳定的化学结构能够耐受活性氧的氧化侵蚀，避免材料自身的降解失效。优化活性组分的分散性与界面结合强度，能够防止活性组分在长期运行中流失。膜结构的合理设计保障了活性氧的均匀分布，避免了局部浓度过高引发的材料损伤。这些机制共同作用，使纳米复合膜在空气净化进程中维持持久的催化活性与结构完整性<sup>[4]</sup>。

### 3 空气净化应用效能与挑战分析

#### 3.1 对挥发性有机物等典型污染物的去除效率

在挥发性有机物净化方面，活性氧调控纳米复合膜展现出显著优势。该技术对苯系物、醛类、酮类等典型 VOCs 均具有良好的降解效果，其中针对甲苯的去除比率可达 85% ~ 98%，针对甲醛的降解效率普遍维持在 90% 以上。降解效率受污染物分子结构影响显著，含有不饱和键的化合物更易受活性氧攻击，因而表现出较高的去除率。在标准测试条件下，大多数 VOCs 能够在 30 分钟之内到 80% 以上的降解，完全矿化率随反应时间延长而逐步提高。相较于传统吸附技术，该体系实现了污染物的彻底分解并非相态转移，规避了二次污染的风险。不同活性氧物种针对特定 VOCs 呈现出选择性氧化的特性，羟基自由基对于芳香族化合物具备突出的降解能力，而超氧阴离子更适宜用于含氯有机物的分解。膜结构特性通过调控污染物停留时间与活性氧接触概率的方式，进一步对表观去除效率造成影响。其高效降解能力使该项技术在室内空气净化领域具备明确的应用价值。

#### 3.2 在不同应用场景中的适应性及局限性

活性氧调控纳米复合膜在不同应用场景中表现出差异化的适应性。在室内空气净化领域，该技术对密闭空间中的低浓度挥发性有机物具有显著的去除效果，尤其适宜办公环境以及家居场所。医疗机构的空气净化需求聚焦于病原微生物的灭活，膜材料在该场景下可有效降低空气传播风险。工业废气处理场景面临污染物浓度高、成分繁杂的挑战，需求膜材料具备更强的抗毒化能力以及处理通量。该技术于高温或者高湿环境内的性能表现存有差异，某些活性氧物种在特定湿度条件下会出现猝灭效应。面对复杂多变的实际应用环境，膜材料的稳定性和耐久性仍需进一步提升。不同场景下的气流组织形式以及污染物浓度波动，对

膜系统的设计参数提出个性化要求。这些适应性特征以及局限性剖析，为针对性的技术优化提供了明确的方向<sup>[5]</sup>。

#### 3.3 与传统技术相比的能效优势与经济性评估

相较于传统空气净化技术，活性氧调控纳米复合膜在能效以及经济性方面彰显出明显优势。在能耗方面，该技术主要在活性氧激发阶段消耗能量，正常运行时维持成本较低。相较于传统吸附技术需定期更换材料、热催化技术需持续加热的运行模式，该技术能够实现显著节能。从经济性角度加以分析，虽然纳米材料初始成本较高，然而长效使用寿命以及自清洁特性有效降低了维护频次以及长期运营成本。对比活性炭吸附技术频繁更换材料所产生的持续支出，该技术在全生命周期中具备更优的成本效益。

### 4 结束语

活性氧调控纳米复合膜具备高效的空气净化能力，通过精准的材料设计以及结构调控实现了活性氧的可控生成以及高效利用。该技术针对挥发性有机物等污染物具有显著的降解成效，并呈现出优异的自清洁功能以及长期稳定性。与传统技术相比，其在能效以及经济性方面具备明显优势。尽管在规模化应用中仍面临制备工艺与材料稳定性等挑战，但是通过材料体系创新以及工艺优化，该项技术为解决空气污染问题提供了全新的技术途径，拥有广阔的发展前景。

### 参考文献：

- [1] 张玮玮, 杨慧霞, 薛屏. 功能化磁性纳米粒子在固定化酶研究中的应用 [J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2020, 36(04):9.
- [2] 汪莲芳, 王佳华, 柯刚, 等. 中药活性成分调控肿瘤微环境作用机制及纳米递送系统的研究进展 [J]. 中草药, 2025, 56(07):2547-2558.
- [3] 季琮珊. 基于活性氧调控策略设计抗氧抗菌纳米材料及其机制研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2025.
- [4] 王东伟, 马占伟, 李静, 等. 还原剂调控的不同晶相纳米 Ru 催化剂对氨合成活性的影响 (英文) [J]. 分子催化 (中英文), 2024, 38(06):503-509.
- [5] 付庆洁. 碳基纳米酶的活性调控及其在生物传感中的应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.

# 基于智慧城市的城市建筑设计策略解析

徐高伟

(中誉设计有限公司广州设计分公司, 广东 广州 510030)

**摘要** 智慧城市即通过集成信息技术、物联网、大数据等实现城市智能化的管理和服务, 显著提升城市运营效率、资源利用效率和居民生活质量。而建筑作为城市空间的物理载体, 其规划设计必须与智慧城市发展理念深度融合。基于此, 本文分析了智慧城市建筑设计的实施路径与挑战, 并从数字化技术的创新应用、绿色材料与资源循环的利用、能源管理系统与节能优化等方面探讨了基于智慧城市的城市建筑设计策略, 以期为相关人员提供参考。

**关键词** 智慧城市; 建筑设计; 数字化技术

中图分类号: TU984

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.022

## 0 引言

随着物联网、大数据、人工智能等技术的不断发展, 智慧城市从概念走向实践, 成为城市发展的重要方向。在智慧城市框架下, 建筑已从传统的遮蔽物和功能容器转变为智能化、绿色化与人性化的综合化载体, 并向更加智能、绿色、互动与可持续的方向迈进。这种转变不仅体现在建筑技术的升级上, 更体现在设计理念、流程和评价标准的全面革新上。因此, 系统解析智慧城市背景下的建筑设计策略, 对推动城市可持续发展具有重要意义。

## 1 智慧城市建设设计的实施路径与挑战

### 1.1 协同设计机制与全流程优化

智慧建筑设计的实施需要建立多学科协同的工作机制。协同设计应贯穿建筑全生命周期, 从策划、设计、施工到运营维护, 各专业团队需保持密切合作与信息共享。运用BIM技术, 各专业设计数据可实现无缝对接, 有效避免传统设计中的错漏碰缺问题。智慧建筑设计还需建立与使用者、管理者的互动机制。通过数字孪生模型和虚拟现实技术, 设计师可向业主和最终用户直观展示设计效果, 收集反馈意见。在建筑运营阶段, 通过收集实际使用数据, 不断优化设计策略, 形成设计—使用—反馈—优化的良性循环。

### 1.2 政企合作与基础设施建设

在政企合作方面, 政府方主要体现在建设城市级数据平台上<sup>[1]</sup>。智慧建筑产生的海量数据, 需通过城市数据平台进行整合分析后, 才能发挥出最大价值。政府应推动建立统一的数据标准和接口规范, 确保不同建筑体系之间的互联互通; 而企业作为技术研发和实施运营的主体, 在政企合作中需要提供创新的智能

设备、能效优化系统和建筑控制系统、技术解决方案和运营服务, 实现建筑数据的有效挖掘和应用。

基础设施建设方面则包括了人才培训和能力建设。智慧建筑设计需要既懂建筑设计又熟悉信息技术的跨学科复合型人才。高校、职业培训机构和行业协会应加强相关人才培养, 为智慧建筑发展提供人力资源支持。同时, 通过专题讲座、专业培训等形式, 提升现有设计人员的技术水平和创新思维。

### 1.3 面临的挑战与应对策略

尽管智慧建筑设计前景广阔, 但仍面临技术标准不统一、数据安全风险、初期成本较高多重挑战。不同厂商的智能设备和系统往往采用不同技术标准, 导致互操作性差, 增加集成难度和成本。因此需建立统一的技术标准和规范, 促进设备系统的兼容性。建筑中部署的大量传感器会收集包括个人行为数据在内的多种信息<sup>[2]</sup>, 需要通过加密技术、访问控制、法律法规等多重手段, 构建安全可靠的数据保护体系。初期投资较高是制约智慧建筑推广的重要因素。智能系统和设备的安装需要较大的前期投入, 尽管长期运营中可带来收益<sup>[3]</sup>。应对这一挑战, 需通过精细化设计优化系统配置, 采用全生命周期成本评估方法, 同时探索合同能源管理等创新商业模式, 降低业主初期投入压力。

## 2 基于智慧城市的城市建筑设计策略

### 2.1 数字化技术的创新应用策略

建筑信息模型与城市信息模型的集成应用。数字化是智慧城市的核心特征, 也是建筑设计创新的技术基础<sup>[4]</sup>。BIM技术作为建筑行业的革命性工具, 已从传统的三维设计扩展至全生命周期的信息管理。在智慧城市背景下, 将BIM与CIM深度融合, 形成建筑与城

市尺度的无缝衔接，使建筑设计能够充分考虑城市环境因素，从而达到优化建筑的空间布局和形态设计的目的，使得设计师可以在城市尺度背景下进行建筑性能模拟，从而优化建筑的朝向、形体窗墙比等参数。同时，基于 BIM-CIM 的设计流程支持多专业协同工作，建筑师、结构工程师、设备工程师等可在统一平台上进行设计协作，减少错漏碰缺，提高设计质量的同时，切实减少后期使用中的问题，提升城市的整体品质。

数字孪生技术可通过物联网传感器、激光雷达扫描、无人机航测等，构建与物理建筑完全对应的虚拟模型。这种高精度的数字映射不仅包括几何形态，还涵盖材料属性、设备参数、运行状态等，实现物理建筑与虚拟模型的实时联动与交互。在建筑设计阶段，数字孪生技术可实现设计效果的可视化评估和性能模拟。在建筑运营阶段，通过布置在建筑各部位的传感器，实时采集结构响应、能耗数据、环境参数等，并同步至数字孪生模型，可实现建筑设备的预测性维护、能源管理的动态优化、安全隐患的及时预警等。基于机器学习算法，数字孪生模型可不断学习实际运行数据，优化控制策略，使建筑具备自我调整和优化的能力，为建筑赋予“生命”特征，使其从静态的构筑物转变为能与环境和使用者互动的智能实体。

物联网技术的兴起也为建筑设计提供了全新的技术路径和解决方案。通过在建筑中广泛部署传感器网络，设计师可获取大量以往难以准确测量的使用数据，为设计优化提供科学依据，使建筑设计从经验主导转向数据驱动的新模式；利用大数据技术，可以挖掘分析海量的建筑运行数据，从而揭示建筑性能与设计参数之间的内在关联。此外，基于人员感知的照明控制系统，可根据室内人员分布和活动需求自动调节照明参数；基于天气预报的智能遮阳系统，可提前调整遮阳装置状态以减少太阳辐射得热；基于用户行为学习的空调控制系统，可根据使用习惯预测能耗需求，实现需供匹配的精细化管理模式。

参数化设计是数字化设计的高级形态，通过设定设计参数和规则算法，生成并评估多种设计方案。在智慧城市背景下，参数化设计与性能模拟紧密结合，形成以性能目标为导向的生成设计方法。基于算法可处理大量几何参数关系，实现建筑形态与结构性能、环境性能的一体化优化。例如：通过参数化技术可生成兼具结构效率和美学价值的自由曲面网壳，或优化建筑外墙的开孔率，平衡采光需求与热工性能。人工智能技术的引入使参数化生成设计达到新高度。基于深度学习算法，系统可从大量优秀案例中学习设计规

则，生成富有创意的设计方案。结合增强现实技术，设计师可直观地与生成方案进行交互调整，实现人机协同的创造性设计过程。通过参数化设计生成的构件可直接对接数控加工设备，实现从设计到生产的数字化无缝衔接，由此在满足设计品质的同时提高施工效率，减少材料浪费。

## 2.2 绿色材料与资源循环的利用策略

可持续发展是智慧城市的核心理念，也是建筑设计的核心导向。在材料选择方面，应优先采用绿色建材，以提高建筑的耐久性并减少碳足迹。同时，要综合考虑材料的全生命周期环境影响，优先选择本地材料、可再生材料和可循环材料，减少运输能耗和资源消耗。智慧建筑强调对水、能源、材料等资源的循环利用和梯度利用。例如：通过雨水收集系统、中水回用系统实现水资源的循环利用；通过建筑废弃物的分类回收和再利用，减少对外部填埋场的依赖<sup>[5]</sup>。这不仅有利于降低建筑运营成本，还能减轻城市的环境压力。基于智慧城市的建筑设计还注重与城市资源系统的协同。建筑不再是资源的单纯消耗者，而是城市资源循环的重要节点。例如：建筑的余热可被周边建筑利用，建筑产生的可再生电力可反馈至城市电网。这种区域级的资源协同优化，可显著提高城市整体资源利用效率。

## 2.3 能源管理系统与节能优化策略

能源管理是建筑可持续设计的核心环节<sup>[6]</sup>。智慧建筑通过集成先进的能源管理系统，可实现能源生产、存储、消耗的综合优化。首先，系统通过传感器网络实时监测建筑各系统的能耗，然后基于大数据分析识别能耗异常和优化空间，最后通过智能控制策略调整设备运行状态，实现能耗动态优化。在可再生能源的一体化设计中，建筑不再只是能源的消耗者，同时也是能源的生产者。通过将太阳能发电组件与建筑外围护结构进行有机结合，可实现建筑表面能源的自产自用。此外，建筑还可结合地热能、生物质能等本地可再生能源，提高能源自给能力。智慧建筑的能源管理还注重与城市能源系统的互动。通过建筑能源管理系统与城市智能电网的协同，建筑可参与电网的需求侧响应，在用电高峰时段适当调整非关键设备运行，减轻电网压力。这种建筑与城市的能源互动，不仅提高了能源系统韧性，也为建筑用户带来了经济效益。

## 2.4 生态补偿与气候适应性设计策略

生态补偿即通过绿色屋顶、垂直绿化等生态设计策略，建筑可弥补城市建设对自然生态的侵占。绿色屋顶不仅可改善建筑热工性能，减少能耗，还可延缓雨水径流，减轻城市排水系统压力；垂直绿化则可在

有限用地内增加绿化量，改善局部空气质量，缓解热岛效应。气候适应性设计是智慧建筑应对气候变化的关键策略。建筑设计需充分考虑当地气候特征和未来气候趋势，采用被动式设计优先原则。例如：在炎热地区通过合理的遮阳设计和自然通风策略，减少主动式制冷需求；在寒冷地区则通过优化保温设计和太阳能利用，降低供暖能耗。这种气候适应性设计使建筑能够以最小能源消耗提供舒适的室内环境。智慧建筑的生态补偿还体现在与城市生态系统的融合上。通过构建生态廊道和生物栖息地，建筑可促进城市生态网络的连通性。例如：设计可通过屋顶绿化和平台绿地的连接，为动植物提供迁徙通道，保护城市生物多样性，使建筑能够成为城市生态系统的有机组成部分。

## 2.5 环境适应性与健康促进设计策略

以人为本是智慧城市建设的根本目标，也是建筑设计的核心价值取向。在环境适应性方面，智慧建筑设计需通过优化建筑空间尺度、采光通风参数等，令使用者可以获得高质量的生活工作环境。通过智能化环境控制系统，自动调整室内环境，保障使用者的健康。

在健康促进设计方面，需综合考虑物理环境、心理感受和社会互动等多维健康因素。通过优化声、光、热、空气等物理环境参数，减少健康风险；通过引入自然元素、优化色彩材质、丰富空间层次等手段，创造愉悦舒适的空间体验；通过设计促进交流的共享空间，支持社会交往和社区建设。

健康设计还体现在个性化环境支持上。基于物联网传感技术和人工智能算法，提供环境定制服务。例如：可根据个人偏好自动调节工位的照明强度和色温，或根据使用模式预调整会议室的环境参数等，通过这种个性化的设计充分尊重人的差异需求，提升建筑的人文关怀。

## 2.6 无障碍与全龄友好设计策略

无障碍与全龄友好设计是智慧建筑包容性的重要体现。随着人口老龄化加剧，建筑设计需充分考虑老年人、儿童及行动不便者的使用需求。通过多感官交互技术，如语音控制、触觉反馈、视觉引导等，实现建筑空间的全龄友好型适配，提高特殊人群的使用便捷性和安全性。智慧建筑的无障碍设计不仅限于符合规范标准，更强调通过智能技术弥补功能局限，提升使用体验。例如：通过人脸识别技术实现无接触通行，减轻行动不便者的操作负担；通过室内定位与导航系统，为视障者提供语音导引服务；通过智能家居系统，老年用户可便捷控制家电设备，获得远程医疗服务。这些智能技术应用极大地提升了特殊人群的自主生活

能力。全龄友好设计还体现在空间功能的灵活性和适应性上。智慧建筑空间应能适应不同年龄段、不同能力使用者的需求变化。例如：通过可调节的家具隔断，实现空间功能的快速转换；通过智能标识系统，提供不同详细程度和呈现方式的空间导引信息。这种弹性设计使建筑能响应不同阶段的需求变化，延长建筑使用寿命。

## 2.7 智能安防与应急管理技术的应用策略

安全是建筑的基本功能，也是以人为本理念的根本体现。智慧建筑通过集成视频监控、人脸识别、RFID门禁管理等智能安防系统，构建多层次安全防护体系，实时监测建筑安全状态，通过数据分析识别潜在风险，实现安全事件的早期预警和快速响应。智慧建筑的应急管理还应注重平战结合，即实现日常使用与应急状态的平滑转换，建筑在火灾、地震等突发事件中可自动启动应急程序。系统还可根据事态发展动态调整疏散策略，为使用者提供最优逃生路线指引。智能安防系统还需平衡安全与隐私的关系。在保障建筑安全的同时，应尊重使用者的隐私权，遵循数据最小化原则。

## 3 结束语

在智慧城市理念的深刻影响下，建筑设计从单一功能向综合性能方向转化，更注重建筑与城市、环境的协调发展。通过将BIM、物联网、大数据、人工智能等数字技术与建筑设计进行深度融合，有利于促进设计方法从经验判断向数据驱动转变，且在设计过程中更重视全生命周期的协同化以及建筑策划、设计、施工、运营等阶段的连贯性和互动性。这就需要相关人员能够始终坚持以人为本的核心价值观，同时融合数字化和绿色化两大路径，创作出符合时代需求的建筑作品，为构建更加智慧、可持续的城市未来贡献力量。

## 参考文献：

- [1] 王桂军.智慧城市下建筑规划设计创新研究[J].中国建设信息化,2025(08):28-31.
- [2] 吕烨烨,唐境秀.基于智慧城市理念的城市建筑设计问题探讨[J].门窗,2025(10):82-84.
- [3] 赵天娇.基于智慧城市的城市建筑设计策略[J].建筑与装饰,2025(11):37-39.
- [4] 熊雄.住宅建筑设计中智慧城市理念渗透的策略探讨[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(11):78-81.
- [5] 冯跃,章佳.智慧城市理念指导下的建筑设计路径探究[J].智能建筑与智慧城市,2025(05):18-20.
- [6] 赵亮.基于智慧城市发展的智能建筑设计策略[J].石材,2025(07):59-61.

# 轨道交通与市政工程协同共建模式研究

叶 洋

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要** 随着我国城市发展模式从增量扩张向存量更新转型, 轨道交通、市政隧道、综合管廊等重大基础设施的规划建设需求集中涌现。传统的分时序、分主体的单独建设方式容易出现多次挖掘、资源浪费、交通堵塞、“拉链马路”等问题。基于此, 本文提出协同共建的一体化建设模式, 探讨协同共建在节约用地资源、降低社会成本、增强城市韧性等方面的实践价值, 围绕“规划—设计—建设—管理”的全过程, 介绍了协同共建的大框架, 详细论述了规划设计协同、结构工程共构、施工组织一体化的技术路径和关键要素, 以BIM、GIS和数字孪生技术作为数字化支撑技术的切入点, 提出了协同共建思路, 通过全周期整合、多专业协同、数字化赋能, 构建适应城市可持续发展的新型建设体系。

**关键词** 城市更新; 轨道交通; 综合管廊; 市政隧道; 协同共建

中图分类号:U12; TU99

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.023

## 0 引言

城市更新是城市结构优化、功能完善、品质提升的路径选择, 而支撑城市高品质发展的“大动脉”和“生命线”则是以轨道交通为骨干的公共交通体系和以综合管廊、市政隧道为主的现代化市政基础设施体系。但基于历史原因, 规划建设运营管理由不同职能部门分别负责的两大体系在一定程度上会造成两者之间缺乏顶层设计的协同效应, 在建设时存在顺序安排和空间布局错位的现象。普遍存在的矛盾有: 三维空间上的新建地铁隧道与规划中的市政隧道交叉; 与地下综合管廊路由重合严重的地铁车站出入口、风亭等。为了解决建设矛盾, 不得不迁改或重新规划, 由此造成巨大的经济损失和资源浪费, 也给社会生产生活秩序造成了重大干扰。这种“路径依赖”的单线思维建设模式, 已经不能适应精细开发高密度城市空间的要求。因此, 为了节约社会资源、减少重复建设、缓解城市交通压力、增强城市综合承载能力, 打破行业壁垒, 探索轨道交通与市政工程的协同共建模式, 实现地下空间资源的统筹开发利用和一次性建设<sup>[1]</sup>, 具有十分重要的现实意义和战略价值。

## 1 独立建设模式的弊端和协同共建的必要性

### 1.1 独立建设模式的主要弊端

1. 经济浪费: 独立建设模式导致分头施工, 会直接造成工程造价翻倍以及重复开挖和同地段的回填。此外, 还会产生大量的后续迁改加固费用。

2. 社会成本高: 由于同一地点不断占道施工, 会造成长时间的交通堵塞, 导致市民出行困难; 而占道施工带来的噪声、扬尘等污染问题也将会反复出现, 市民的生活质量将受到严重影响。

3. 项目风险叠加: 后建项目会对先建项目造成一定的安全隐患, 使后建项目的风险叠加。例如: 市政隧道基坑开挖会造成地铁隧道变形或沉降, 而盾构机在掘进时, 对邻近现有管廊或隧道群需要进行严格的避让, 这就带来了巨大的施工难度和潜在安全风险。

4. 空间资源浪费: 独立建设模式会造成浅层地下的宝贵空间资源浪费, 城市未来发展可拓展的空间也会受到限制, 地下空间的深度开发和横向分割不够协调, 容易出现空间割裂的现象。

### 1.2 协同共建的必要性

城市地下空间资源供给侧结构性改革, 其本质是协同共建。其必要性体现在:

1. 集约发展的内在要求: 集约、节约化利用地下空间的有效途径就是把众多功能集中起来, 在同一个物理通道或结构体内, 实现“一次投入, 多倍回报”。

2. 以统一规划、统一设计、统一建设的方式来促进城市综合效益的必然选择: 以整个城市作为整体进行规划建设, 社会总费用是最低的, 综合效益也会最大化。

3. 强化城市韧性: 一体化建设, 可以统筹考虑防灾减灾, 能够更好地将地下空间网络结合起来, 使城市韧性得到提高, 突发事件应对能力得到提升。

## 2 统筹框架和协同共建

### 2.1 全生命周期协同框架

1. 谋划协同（先导层）：在城市国土空间规划中将“多规合一”的要求落到实处，构建自然资源、交通、住建、市政等行业之间的协调运行机制。编制城市地下空间综合开发利用专项规划，对城市地下空间利用、预留工程建设接口和空间等关键廊道控制范围和用地属性进行划定。

2. 设计协同（CoreLayer：核心层）：利用正向BIM设计手段，在同一三维平台内开展地铁、管廊、隧道等专业间的协同设计，在避免各专业之间存在设计碰撞、结构共构方案优化<sup>[2]</sup>、施工接口协调的前提下，排除专业隔阂，组建跨专业的全要素一体化设计队伍。

3. 建设协同（实施层）：推行一个总承包单位或管理团队负责多个项目、统一施工组织、统一调配资源、统一安全管理的EPC、PMC项目总承包模式或项目集群管理模式，确保协同方案落地实施。

4. 运行维护协同（增值层）：共建项目必须将智慧运维同步推进，建立统一监控管理地铁设备、管廊环境和设备、隧道交通等智慧管理平台，以达到数据共享的目的，同时实现应急联动。

### 2.2 典型共建模式构想

**模式一：并行同舱共建。**将市政管廊或车行隧道与之并行建设在地铁区间隧道或车站主体结构两侧或上方预留足够空间，共用围护结构和基坑，并联建设。此模式技术相对简单，应用最广<sup>[3]</sup>（见图1）。

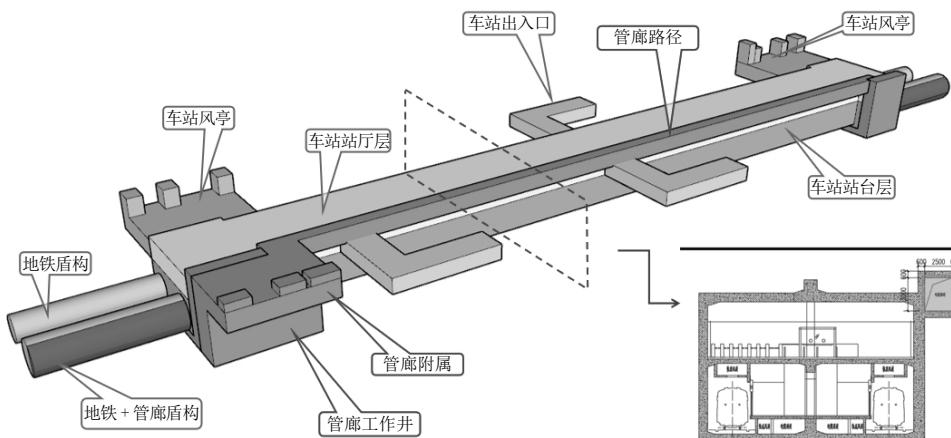


图1 地铁与管廊合建示意图

**模式二：上下叠合共建。**采用竖向分层布局，如地下一层为市政车行隧道，地下二层、三层为地铁车站。这种模式对空间结构设计和建造精度有着极其严格的要求。以长沙轨道交通6号线六沟垅站为例，车站主体与湘雅路过江隧道合建、湘雅路过江隧道位于地下一层、六沟垅站位于地下二、三层，主体结构同步实施，由地铁建设（见图2）。

**模式三：枢纽集成共建。**将地铁车站、公交场站和地下车行环路、综合管廊、商业开发等进行整合设计，在地铁换乘站、城市交通枢纽等区域，打造一个功能复合的“城市客厅”和巨型地下综合体。这不仅可实现多种交通形式的无缝接驳，大幅提升换乘效率，还集约化利用城市地下空间，强化市政设施协同，促进站城融合发展。同时，通过引入商业、文化、公共服务等功能，有效激发区域活力，为市民提供便捷、舒适、多元的城市生活体验，成为推动城市可持续发展的重要引擎。

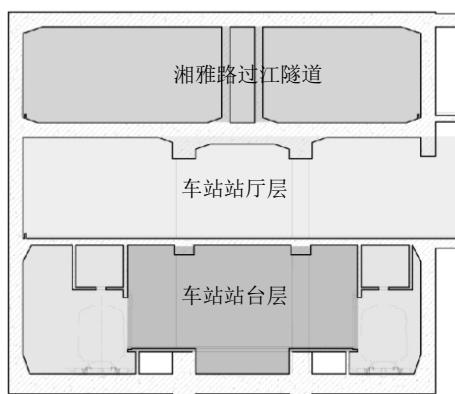


图2 车站与车行隧道合建剖面示意图

## 3 数字化支撑的关键技术路径

### 3.1 关键技术路径

1. 结构共构技术：在不同类型建筑的荷载、振动荷载和变形控制要求下，对不同结构形式（矩形箱涵

和圆形盾构隧道)进行协同受力机理的研究和优化分析, 实现结构一体化; 新的共构节点和变形缝处理技术的研究与开发。

2. 融合式施工技术: 针对超深、超大型基坑, 研制大截面、多导洞暗挖施工工法, 完善联合支护、联合降水方案, 统筹做好盾构机始发、接收和穿越时段安排, 防止不同工序交叉施工现象的发生。

3. 安全防灾技术: 形成共建工程新的防灾标准体系, 针对火灾烟气控制、人员疏散、应急抢险、防淹排水等技术难题, 在共构机体内开展攻关工作, 确保万无一失<sup>[4]</sup>。

### 3.2 数字化技术支撑

1. BIM+GIS 技术集成: BIM 负责微观工程的精确建模和信息管理, GIS 负责宏观地理环境的分析和展示, 两者结合的数据源和可视化分析平台进行协同规划和设计, “数字双胞胎”必须基于以上平台和数据进行具体工作<sup>[5]</sup>。

2. 物联网技术(IoT): 在建设阶段, 通过数字孪生技术构建施工模拟系统, 可对潜在风险进行前瞻性预判并优化施工方案; 进入运维阶段后, 该技术能实现设施全生命周期管理, 包括预测性维护、应急场景模拟推演及智能决策支持, 并依托物联网传感器实现实时数据联动, 最终实现全流程协同效率最大化。

## 4 协同共建模式的实施挑战与对策建议

### 4.1 主要挑战

1. 系统机制障碍: 现行行政管理体制存在条块分割特征, 导致各方利益与责任协调缺乏常态化统筹机构, 难以实现跨部门高效协作。

2. 标准规范缺失: 现有技术规范多为单项专业工程标准, 缺乏联合设计、施工及验收等全流程条款, 尚未形成联合建设项目统一规范体系。

3. 投资分摊与利益协调困境: 项目审批的核心在于公平分配地铁、市政、管廊等多元投资主体的建设及运维费用, 现有机制难以实现各方利益平衡。

4. 工艺复杂度与安全风险: 一体化施工技术难度高、接口复杂, 需具备丰富经验的专业团队, 在设计、施工等全环节实现精准管控, 否则易引发安全风险。

### 4.2 对策与建议

1. 完善法规制度与组织保障体系: 建议由地方政府主导设立“城市地下空间综合利用管理处”, 赋予其规划审批、跨部门协调及建设监督等法定职权。同

步出台地方性法规, 明确协同共建类重大基础设施项目的论证标准与实施流程。

2. 构建协同共建标准体系: 由科研院所、设计单位及企业联合组建技术攻关组, 加快编制《协同共建技术指南》《设计规范标准图集》等技术文件, 为项目建设提供统一技术依据。

3. 创新投融资与回报机制: 探索“PPP+EPC”模式引入社会资本, 通过政府授权特许经营、沿线土地开发权捆绑、广告经营权出让等方式构建反哺机制。按照“谁受益、谁投资”原则, 建立动态成本分担模型, 实现投资主体与收益主体的权责对等。

4. 培育复合型产业生态: 推动设计、施工企业向工程总承包转型, 鼓励开展“地铁+市政”综合开发业务。建立校企联合培养机制, 重点培养具备跨专业协调能力的复合型技术与管理人才。

### 5 结束语

在推进城市更新与交通体系现代化的双重背景下, 破解“重复建设”与“交通滞后”的深层矛盾, 融需通过轨道交通与市政工程的协同共建实现基础设施效能跃升。这不仅是对传统建设模式的系统性革新, 更是推动城市可持续发展的重要战略支点。本文从价值重构、框架设计、模式创新、技术赋能四个维度提出协同共建对策, 旨在通过部门协同机制完善、技术标准体系构建、数字化技术深度应用, 推动协同共建从“试点探索”向“常态运行”转型, 最终实现地下空间综合功能最大化、安全韧性显著提升、运营服务品质优化, 为现代化城市建设提供坚实的支撑, 塑造智慧城市创新生态, 成为城市治理现代化的重要实践载体。

### 参考文献:

- [1] 张蓓, 郑睿敏. 轨道交通与城市电网资源共享融合策略[J]. 电工技术, 2025(16):272-274.
- [2] 朱玉娇. 城市道路隧道与轨道交通合建穿湖通道分析方案[J]. 隧道与轨道交通, 2022(02):69-73.
- [3] 农兴中, 曾毅. 中心城区城市综合管廊与地铁合建形式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024(01):55-60.
- [4] 金威, 田源. 不同火灾规模下地下公用结构安全性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020(02):215-222.
- [5] 戴伟俊. 基于“BIM+GIS”技术的城市轨道交通可视化数据集成应用平台研发设计[J]. 数字技术与应用, 2024, 42(11):143-145.

# CEMS 吹扫气系统中空气净化装置的工艺研究

石剑飞，李鹏程，袁贺

(深圳市深能南部生态环保有限公司，广东 深圳 518000)

**摘要** 本文深入探讨了纳芬空气净化装置在傅立叶变换 CEMS 吹扫系统中的应用及其产生的效果。通过对相关数据的分析和实际案例的研究，阐述了纳芬管干燥技术应用的优缺点，以深圳市深能南部生态环保有限公司现安装的傅立叶变换 CEMS 系统为例，分析了造成傅立叶变换红外气体分析仪数据频繁偏高以及水份数值波动大的原因，并针对此问题增设纳芬空气净化装置，旨在为解决分析仪分析数据偏差的问题提供有益参考。

**关键词** 纳芬空气净化；傅立叶变换；气体分析仪；纳芬管干燥

中图分类号：TH7

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.024

## 0 引言

随着傅立叶变换红外吸收技术在国内日渐普及，基于傅立叶变换技术的气体分析仪，集成于 CEMS 系统，也开始大量应用在垃圾焚烧发电厂中。傅立叶变换红外吸收气体分析仪内部均有个核心部件，那就是干涉仪，干涉仪内部包括了多个表面镀了黄金的镜面，以提高红外光的反射率以及降低镜面对红外光不必要的吸收。目前，在一些应用项目中，采用纯度为 99.99% 的大瓶工业氮气对干涉仪进行吹扫，最终发现傅立叶变换红外气体分析仪测量的数据出现偏高以及水份数值波动大的现象，从而造成数据瞬时超标等问题<sup>[1]</sup>。随着国家对环保的重视程度越来越严格，出现此类数据超标或异常的问题，将给企业造成严重的负担。

## 1 傅立叶变换红外吸收分析仪简介

深圳市深能南部生态环保有限公司的一期 1 号炉、2 号炉以及 SCR 入口的 CEMS 系统投产于 2015 年，CEMS 系统是由芬兰共和国 GASMET 公司引进，由厦门格瑞斯特环境技术公司集成的 CX-4000 型傅立叶变换式红外吸收分析仪。

傅立叶变换红外吸收分析仪内部结构主要含如下部分：红外光源、傅立叶变换红外吸收分析仪必备的核心部件——干涉仪、测量气室、红外检测器以及分析仪的主板。

红外光源发射红外光进入干涉仪，在干涉仪内部进行分光和干涉后，形成干涉红外光，经过反射镜最终进入测量气室，测量气室前后各有一个镀有黄金的镜面，干涉红外光在两个黄金镜面之间多次反射，反射光程 5 米，光程越长，检测精度就越高。干涉红外光在测量气室内，与被测气体接触，被测气体中各种

气体组分吸收了干涉红外光在不同波长上的光能，造成红外光光能衰减，最终干涉红外光从测量气室射出，进入红外检测器，检测器检测出干涉红外光的光能值，并将结果发送给分析仪主板，分析仪主板通过内部高速芯片，对干涉红外光的光能值，进行快速傅立叶变换的数学计算，最终将以时间为横坐标的红外吸收光谱转换为以频率为横坐标的红外吸收光谱，分析仪主板将最终的红外吸收光谱发送到外部分析仪专用的分析软件中，在软件中进行进一步的解析以及 PLS 等特殊算法，将不同气体之间的交叉干扰降到最低，最终在软件中显示最终结果。

分析仪的核心部件为干涉仪，干涉仪内部有多个镀金的镜面，红外光就在干涉仪内部镜面之间进行分光和干涉，所以干涉仪内部空间环境必须干净，做到无油、无尘、无水汽的严格要求。如果有油滴，这些油滴会附着在干涉仪内部镜面上，会对红外光反射角度造成影响，红外光照射在这些油滴上会产生不规则的散射，造成红外光光路偏移、不集中，同时，油滴也会吸收一部分的红外光能量，造成最终测量数据偏高或数据波动的现象。同样的，灰尘颗粒如果附着在镜面上，也会造成红外光路的部分遮挡以及影响光路反射角度。最糟糕的情况就是水汽的影响，如果镜面上长时间附着水滴，会对镜面表面镀层造成不同程度的侵蚀，严重时会引起镜面上镀金层脱落。

水汽的测量，是傅立叶变换红外吸收 CEMS 系统测量的一个重要气体组分，水汽的测量对其他气体组分的测量有着至关重要的影响，因为水汽在红外波段上有比较宽的明显的吸收峰范围（大约在  $1\ 250 \sim 2\ 000\text{ cm}^{-1}$  和  $3\ 300 \sim 4\ 100\text{ cm}^{-1}$  都有比较明显的吸收峰），在

这些水汽吸收峰覆盖范围内的其他气体的吸收峰明显比水汽的吸收峰小很多<sup>[2]</sup>（见图 1），红色线为 2% 水汽的吸收峰，而黑色线为 350 ppm 一氧化碳 CO 气体的吸收峰，水汽的吸收峰峰值比 CO 气体的吸收峰峰值大了十倍多。所以干涉仪内部空间环境如果有水汽，将会影响测量气室内烟气水汽含量的测量，同时干扰其他气体测量。

## 2 傅立叶变换 CEMS 吹扫系统演变史

为了满足干涉仪内部空间环境干净和干燥，深圳市深能南部生态环保有限公司早期采用厂内仪用压缩空气，经纯化器并调压后供给干涉仪吹扫用，如果不及时维护空压机、不定期更换过滤器、不及时排水，往往压缩空气的质量远远达不到干涉仪吹扫用气的要求，经常出现仪用空气里带油带水的情况。

后来放弃仪用空气，采用了制氮机加冷干机联用的方式。制氮机产出的氮气理论上纯度可以达到 99.9% 以上，再经过冷干机脱水后的氮气，其露点理论上可以降到 -20 ℃ 以下，再经过三联精细过滤器进一步去除氮气里的颗粒物杂质和油分，最后供给干涉仪吹扫用。但整个吹扫系统较复杂，维护量大，制氮机和冷干机往往离傅立叶变换 CEMS 较远，制氮机产出的氮气经过较长管路才能到达分析仪，造成氮气品质变差，对分析仪的吹扫效果变差。

采用大瓶高压氮气瓶对分析仪的吹扫效果较好，氮气的纯度可以达 99.99% 以上。高压氮气瓶可以放置在离 CEMS 较近的位置，但仍需每日人工转运氮气瓶至集气包进行置换。这要求巡检人员必须加强每日对氮气站集气包巡检的频次，如巡检人员每日氮气更换不及时，将导致干涉仪工作异常，浪费大量的人力物力进行维护。使用大瓶高压氮气的成分也较高，单台 CEMS 每月平均用气量约 45 瓶，按照 45 元 / 瓶的价格计算，

每年氮气吹扫气采购费用约 24 000 元 / 台 / 年。三台 CEMS 分析仪每年采购氮气的费用就是 72 000 元 / 年。

2024 年 3 月，深圳市深能南部生态环保有限公司采用了最新的纳芬空气净化装置作为吹扫系统。纳芬空气净化装置占用空间不大，和傅立叶变换 CEMS 主机柜并柜安装，减少了传输管路长度，降低了吹扫气在传输管路上的污染等问题，同时纳芬空气净化装置内部也集成了 CEMS 的校准控制气路，方便操作。采用纳芬空气净化装置对分析仪的吹扫效果较好，系统运行稳定且无需耗费大量人力物力进行维护。

## 3 纳芬空气净化装置

空气净化装置的主要工作原理：周围环境空气由膜式泵抽取，先经过超细过滤器消除灰尘、油污和微小的机械杂质，然后进入冷凝器，冷凝器也称为高效冷阱，温度自动控制在 3 ℃，可以有效地去除空气中大部分的水汽和部分化学物质，当空气中的湿度较高时，可以观察到冷凝水由蠕动泵排出。露点为 3 ℃ 的干燥空气再次进入过滤器进行二次过滤，随后进入纳芬管进一步将水汽去除，输出的被净化空气则成为露点 -25 ℃ 左右的纯净空气<sup>[3]</sup>。

### 3.1 纳芬管介绍

纳芬空气净化装置的核心部件就是纳芬管，采用美国进口的纳芬管。纳芬管干燥技术是一种用于去除管路中水分和湿气的技术，在各种工业领域中，管路中的水分或湿气往往会导致设备的腐蚀、结冰、堵塞等问题，因此需要采用有效的干燥技术来解决这些问题。

纳芬管的材质为 Nafion™ 聚合物，是在 1960 年代末发明的。Nafion™ 是 2-[1-[二氟[(三氟乙基) 氧]甲基]-1,2,2,2-四氟乙氧基]-1,1,2,2-四氟乙磺酸和四氟乙烯（也就是我们常说的特氟龙 Teflon）的共聚物。简单来说，Nafion™ 是以 Teflon 为主链，并附

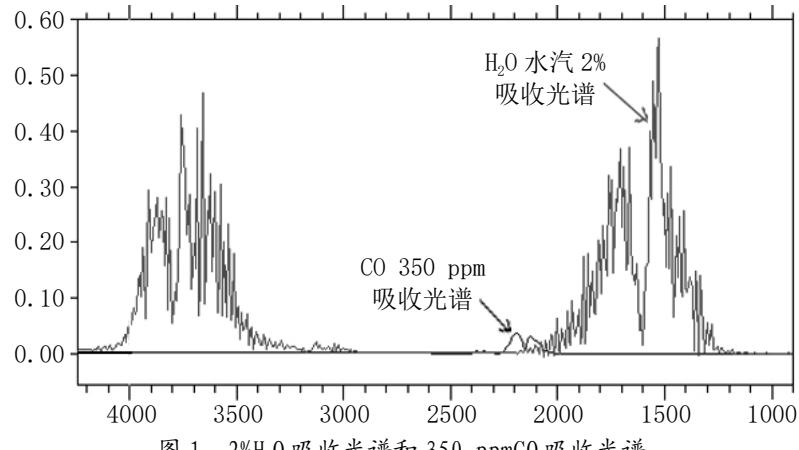


图 1 2%H<sub>2</sub>O 吸收光谱和 350 ppmCO 吸收光谱

带碳氟化合物的临时侧链，侧链终端为磺酸。其分子式可写为： $C_7HF_{13}O_5S \cdot (C_2F_4)_n^{[4]}$ 。

纳芬管 Nafion™ 聚合物是碳氟化合物基和磺酸基聚合，如同大多数含氟聚合物一样，其具有极强的耐腐蚀性。碳氟化合物基的碳原子和磺酸基的硫原子之间强大的原子引力，使得磺酸基和碳氟化合物结合紧密，无法移除。但由于磺酸基和碳氟化合物的性质不同，磺酸基会进行化学反应<sup>[5]</sup>。磺酸基的存在使 Nafion™ 聚合物添加了三种重要的性能：

1. 由于磺酸基团的强酸性，Nafion™ 聚合物可作为酸催化剂。
2. 当接触溶液时，Nafion™ 聚合物起到离子交换树脂的作用。
3. 单个磺酸基团最多能吸收十三个水分子。磺酸基通过聚合一定数量的疏水性聚合物形成离子通道，水通过离子通道被传输。

纳芬管除湿、降低露点的原理就采用到了上述的第三个性能，Nafion™ 聚合物对水汽具有类似选择性半渗透的属性。

### 3.2 纳芬管除湿原理

Nafion™ 聚合物通过一级动力学反应将水分子从膜的一侧转移到另一侧。这与多孔膜不同，多孔膜依赖于分子的物理大小。Nafion™ 聚合物的选择性基于化学反应性，而不是分子的大小，因此它不是传统意义的渗透原理。Nafion™ 聚合物选择性地转移水蒸气，而气流中的大多数分析物保持不变。Nafion™ 聚合物转移水分子的驱动力是其膜两侧的湿度水平之差。Nafion™ 聚合物试图在其膜的两侧达到水蒸气的分压平衡。

在图 2 中，含湿样气从左侧样气入口进入纳芬管，

样气中的水分子在不同的水气分压下透过纳芬管管壁进入外套管与纳芬管之间的反吹气中，反吹气将水分子从左侧的反吹气出口带出，最终纳芬管中干燥的样气从右侧的样气出口流出。

如果将右侧的干燥的样气分一路出来进入反吹气入口，可以达到更好的干燥效果，此项技术也称为纳芬管干燥回流技术。采用此项技术，样气露点可以最低降低到 -50 °C。

### 3.3 纳芬管干燥技术的优缺点

纳芬管干燥技术利用 Nafion™ 聚合物的特殊性质来吸附和分离管路中的水分和湿气。Nafion™ 聚合物材料具有较大的比表面积和吸附能力，可以将水分和湿气迅速吸附到其表面上，并利用材料两侧的水汽分压不同，将水分和湿气转移脱附到水汽分压低的一侧，从而实现气体的干燥<sup>[6]</sup>。

由于 Nafion™ 聚合物材料不仅比表面积大，吸附能力强，还具有较好的稳定性和耐腐蚀性，Nafion™ 聚合物材料在干燥过程中不易受到被干燥气体的损伤或破坏，可以长时间地保持其吸附和脱附的能力。被干燥的气体如果具有强酸强碱性，Nafion™ 聚合物材料同样也具有很好的耐腐蚀性，这使得纳芬管干燥技术可以在长期使用中保持其高效性和可靠性，从而减少了维护和更换的频率和成本<sup>[7]</sup>。

纳芬管干燥技术还具有较好的适应性和灵活性，它可以应用于各种不同直径和材质的管路中，包括金属管路、塑料管路等。无论是小口径的细管还是大口径的管路，纳芬管干燥技术都可以有效地去除其中的水分和湿气，确保管路内气体的干燥。

一根纳芬管的直径一般较小，在干燥大口径管路

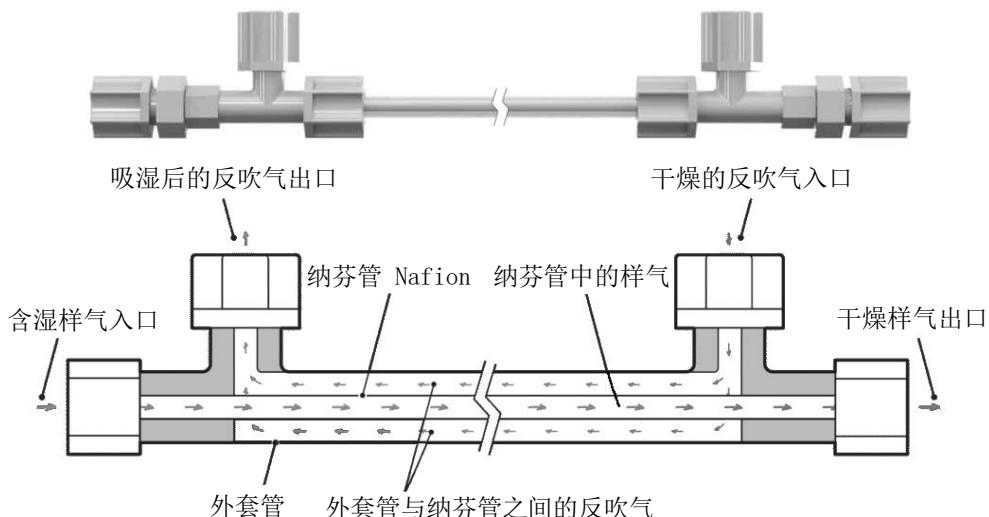


图 2 纳芬管实物图及除湿原理图

的气体时，都是采用多束纳芬管并联使用。如果样气中含有颗粒杂质，容易堵塞纳芬管。纳芬管一旦堵塞，不容易清理，只能更换整根纳芬管。

纳芬管在干燥气体的过程中，如果气体中含有油分，油滴会有很大可能吸附在纳芬管内壁形成油膜，从而降低干燥效果。

纳芬管采用的Nafion<sup>TM</sup>聚合物材料，具有选择性，不仅对水分具有去除的作用，对其他气体也具有去除性。

#### 4 纳芬空气净化装置在傅立叶变换 CEMS 吹扫系统中的应用成效

深圳市深能南部生态环保有限公司于 2024 年 3 月采用了最新的纳芬空气净化装置作为 CEMS 分析仪的吹扫系统。截至 2025 年 9 月已上电运行一年多时间，现

纳芬空气净化装置运行正常。空气净化装置对原始气有一定要求，环境空气温度越低、空气质量越好的原始气，产出的净化气温度、露点等越稳定，杂质、油分等含量也越低。产出净化气的质量越高，对于延长分析仪的使用寿命效果越好。

为了验证纳芬空气净化装置产出的净化气是否达到吹扫气的使用要求，深圳市深能南部生态环保有限公司委托专业的检测机构对净化后的气体进行成分检测，检测结果如表 1 所示。

从检测结果可以看出：由于纳芬空气净化装置抽取的是周围空气，并不是厂用仪用压缩空气，周围空气的含油量不高，仅有  $0.258 \text{ mg/m}^3$ ，经过净化处理后，气体含油量降低到  $0.226 \text{ mg/m}^3$ ，油分去除率 12% 左右。

表 1 空气净化装置净化前后空气质量对比检测项目

| 气体成分                                     | 检测方法   | 检测结果      |        |
|--|--|-----------|--------|
|  |  | 抽气泵入口     | 净化后的气体 |
| 含油量 ( $\text{mg/m}^3$ )                  | GB/T 13277.2-1015                                  | 0.258     | 0.226  |
| 水分 (露点) ( $^\circ\text{C}_{\text{td}}$ ) | GB/T 13277.3-1015                                  | 16.61     | -21.57 |
| 固体颗粒含量<br>(个/ $\text{m}^3$ )             | 0.3 $\mu\text{m} \leq \text{粒径} < 0.5 \mu\text{m}$ | 6 400 315 | 2 084  |
|  | 0.5 $\mu\text{m} \leq \text{粒径} < 1.0 \mu\text{m}$ | 3 993 621 | 884    |
|  | 1.0 $\mu\text{m} \leq \text{粒径} < 5.0 \mu\text{m}$ | 752 882   | 918    |

经过净化装置处理后的气体，由入口的气体露点  $16.6 \text{ }^\circ\text{C}$  降低到  $-21.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ，降低露点的功能明显，完全满足用户使用要求。如果再结合纳芬管干燥回流技术，露点可以降低到  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  以下。固体颗粒物的去除分三个等级： $0.3 \mu\text{m} \leq \text{粒径} < 0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m} \leq \text{粒径} < 1.0 \mu\text{m}$  和  $1.0 \mu\text{m} \leq \text{粒径} < 5.0 \mu\text{m}$ ，从检测结果中可以得出纳芬空气净化装置的固体颗粒物去除率都达到了 99.95% 左右，完全满足用户使用要求。

同时，自空气净化装置投入使用开始。我们对 CEMS 分析仪的几项重要健康参数进行了持续的观察并记录，运行 18 个月后，干涉仪光谱图峰值、激光光源电压值等均只有小幅度的下降。净化气对分析仪健康参数的衰减影响微乎其微。

#### 5 结束语

纳芬空气净化装置应用在傅立叶变换 CEMS 吹扫系统中，其产出的净化气无论是在颗粒物杂质含量、水分含量、油质含量等方面，都能满足 CEMS 吹扫的要求，完全可以替代日常氮气的吹扫，不仅降低了成本，而且降低了大量的人力物力。纳芬管干燥技术在石油化工、电力、冶金、制药等行业均有重要的应用价值和

的发展前景，值得推广使用，尽管存在一些缺点，但通过持续的研究和创新，有望进一步的改进和应用，为工业生产带来更多的便利和效益。

#### 参考文献：

- [1] 王德发,周枫然,叶菁,等.FTIR 在气体标准物质研究中的应用 [J].计量科学与技术,2021,65(05):67-76.
- [2] 高原,易磊.傅立叶变换红外光谱仪在近红外区波数示值误差的校准方法研究 [J].计量与测试技术,2022(07):72-74,78.
- [3] 宋敬虎.Nafion 烟气除湿系统在炼化企业烟气 CEMS 中的应用探讨 [J].生态环境与保护,2020,03(01):36-38.
- [4] 姚学忠,王铁民,郭行义,等.CEMS 烟气预处理系统用 Nafion 膜的改性及性能表征 [J].应用化工,2021,50(02):392-394,402.
- [5] 同 [4].
- [6] 同 [2].
- [7] 叶兵,侯鹏,吴厚荣,等.便携式干法烟气预处理装置除水效率分析 [J].环境监控与预警,2022,14(03):59-62.

# 人工智能技术在路桥工程造价风险控制中的应用

黎燕娜

(广州致正工程咨询有限公司, 广东 广州 511400)

**摘要** 在路桥工程建设过程中, 造价风险控制始终是工程管理的关键环节。传统风险控制方式受制于人工经验、信息滞后, 难以适应项目多变的复杂环境。随着人工智能技术的快速发展, 其在造价风险识别、预测与决策中的应用价值日益凸显。本文以路桥工程为研究对象, 探讨人工智能技术在造价风险控制中的应用策略, 旨在为工程造价管理智能化转型提供技术参考。

**关键词** 路桥工程; 造价风险; 人工智能技术

中图分类号: TP18; U4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.025

## 0 引言

路桥工程投资规模大、建设周期长、参与主体多, 造价风险复杂多变, 是工程管理中最具挑战性的环节之一。传统造价管理多依赖经验判断、静态分析, 往往无法及时识别潜在风险, 导致预算超支、资源浪费<sup>[1]</sup>。随着智能算法不断成熟, 人工智能正逐步融入工程建设管理领域, 为造价风险控制带来革命性变革。采用人工智能技术可以实现工程造价的精准计算, 并有效提高人员的工作效率<sup>[2]</sup>。因此, 系统分析人工智能技术在路桥工程造价风险控制中的应用价值与应用策略具有重要意义。

## 1 路桥工程造价风险分析

路桥工程作为典型的基础设施项目, 其建设周期长、投资规模大、涉及环节复杂, 造价风险贯穿于项目全生命周期。从项目立项到竣工结算, 每一个环节的决策与执行偏差都可能引发成本波动。首先, 设计阶段的风险较为突出。设计方案不合理、技术参数变更或勘察数据不准确, 都会造成后期工程量增加或施工方案调整, 导致造价超支。其次, 市场因素风险不可忽视。建筑材料、劳动力及机械设备价格随政策、季节及供需关系波动, 直接影响工程成本。此外, 施工过程中存在进度延误、施工工艺不当、现场管理松散等操作性风险, 容易造成资源浪费和重复作业, 从而推高造价。资金管理风险也是一大隐患, 若资金筹措不及时或支付计划不合理, 将引起项目现金流紧张, 增加融资成本。最后, 政策环境与自然因素风险如环保要求提高、极端气候影响等, 均可能引起工程变更

甚至停工<sup>[3]</sup>。因此, 只有采取科学有效的风险控制措施, 才能在项目运行中实现对成本的有效控制。

## 2 人工智能技术在路桥工程造价风险控制中的应用价值

### 2.1 提升造价风险识别的精准性

在传统路桥工程造价管理中, 风险识别多依赖人工经验与历史统计, 往往存在主观判断偏差、信息滞后的问题。而人工智能技术的应用使得风险识别从经验判断转向数据驱动。AI 通过大数据分析、机器学习及自然语言处理等手段, 能够自动识别影响造价的关键风险变量。系统可在数以万计的项目数据中提取材料价格波动规律、施工进度偏差与地质条件异常等隐藏信息, 从而提前锁定潜在风险点<sup>[4]</sup>。尤其是在复杂的路桥项目中, AI 能快速处理结构设计参数、气候数据与市场行情等多维信息, 生成风险热力图, 直观呈现造价波动的分布趋势, 从而大幅提升风险定位的全面性, 使管理者实现“早发现、早预防”的目标。另外, 相较于人工统计, AI 的学习能力还使其可以持续优化识别模型, 随着项目数据积累, 风险判断愈发精准可靠, 从根本上增强造价控制的科学性。

### 2.2 强化造价预测与动态控制能力

路桥工程的造价受市场价格、气候变化、施工组织与政策调整等多重因素影响, 传统静态预算难以应对这些动态变量。人工智能技术的应用则为造价预测与动态控制提供了强大支撑。基于深度学习算法, AI 能在历史数据中学习成本变化规律, 构建高精度的造价预测模型。例如: 当材料价格出现波动时, 系统会

即时评估其对整体预算的影响，预测可能出现的超支区间，并给出应对方案<sup>[5]</sup>。结合 BIM 技术，AI 还能实现设计变更与造价联动，实时计算施工调整对成本的影响，确保预算更新具有实时性。AI 还具备自学习、自适应特征，可根据项目进展不断修正参数，使预测结果动态优化，避免因延误、浪费或资源调配不当导致的资金风险，实现全过程造价可控可调。

### 2.3 促进路桥工程造价风险决策科学化

在路桥工程项目中，造价风险决策往往涉及设计变更、施工组织调整、资金调度与材料采购等多维度因素，传统依靠人工经验的决策模式难以应对复杂多变的施工环境。人工智能技术的引入，使得风险决策从主观判断走向数据驱动的科学分析。AI 系统可基于路桥工程的结构参数、施工进度、气候环境与市场行情等多源数据，建立造价风险评估与决策模型。例如：在桥梁上部结构施工中，AI 可结合监测到的混凝土用量、模板使用周期与劳动力消耗情况，自动推演不同工期与工序调整方案的成本差异，从而为管理层提供量化决策依据。通过深度学习与强化学习算法，系统还能对过往类似桥梁、隧道或路基项目的风险事件进行复盘学习，生成多场景模拟曲线，展示在不同施工策略下的造价变化趋势。这样，项目团队能够直观比较“延期开工”“分段施工”“材料替代”等方案的经济与风险结果，实现最优方案选择。AI 的实时反馈机制还能在施工过程中动态修正模型参数，当现场气候、交通封闭或设备故障等突发因素影响施工进度时，系统可即时预测成本偏差范围并自动生成调整建议，大大提高了风险响应的灵活性与科学性。通过将 AI 嵌入造价决策体系，路桥企业实现了从经验判断到算法推演的跃升，使风险管理更具系统性和前瞻性，为项目投资控制提供了坚实的技术支撑。

### 2.4 推动造价管理数字化转型

人工智能的深度应用不仅体现在技术层面，更在于推动造价管理体系的整体变革。通过 AI 技术的嵌入，路桥工程造价管理从传统的人工统计、事后审计转型为数据驱动的全过程智能管控模式。AI 可与 BIM、物联网、云计算、区块链等技术协同，从项目立项到竣工验收各阶段实现设计、施工、采购、结算等环节的全过程信息互联，形成各参建单位的数字化管理平台<sup>[6]</sup>。同时，AI 的普及也促使企业管理理念发生转变，从依赖人工审核向依靠算法分析转型，极大地提升了管理效率，不仅优化了资源配置，减少了人为干预造成的造价失真，还可为行业建立智能化的造价管理体系奠

定基础，推动路桥建设向智慧化方向高质量发展。

## 3 人工智能技术在路桥工程造价风险控制中的应用策略

### 3.1 强化智能数据采集，整合造价风险信息

路桥工程项目涉及设计、施工、材料采购、交通组织、地质勘查等多维数据源，信息分散、格式不统一是造价风险识别的难点。要充分发挥人工智能的价值，路桥企业必须构建一套智能化数据采集与信息整合系统，利用物联网（IoT）与智能传感技术，在施工现场、供应链环节、机械设备运行系统中安装自动采集节点，实时监测材料消耗、机械运行状态、施工进度和工人出勤情况<sup>[7]</sup>。AI 系统可对这些数据进行自动清洗与标准化处理，确保数据的准确性。在此基础上，企业应建立造价风险信息数据库，将历史项目造价数据、市场价格、施工日志、设计变更记录等纳入统一平台，实现多源数据汇聚。AI 算法可通过聚类分析、主成分分析等方法，识别出造成造价波动的关键变量。例如：当系统检测到材料采购价格与运输距离呈显著相关性时，可自动生成风险提示报告，提醒管理人员提前调整采购计划，以实现造价风险的动态识别、可视化呈现，帮助项目管理者在海量信息中精准捕捉潜在的成本风险。

### 3.2 运用机器学习算法优化造价风险预测模型

造价风险预测的准确性决定了项目资金调度、投资决策的科学性，人工智能尤其是机器学习算法，能在庞大复杂的数据环境中挖掘非线性规律，为造价预测提供精准支持<sup>[8]</sup>。对此，路桥企业应基于历史工程数据构建机器学习样本集，包括人工费、材料费、机械费、运输费、政策变动、气候条件等指标。通过对这些特征变量的多维训练，AI 系统可自动学习成本波动的规律，并形成风险预测模型。相比传统线性回归或人工估算方法，机器学习模型能更有效地捕捉变量之间的非线性耦合关系，从而提高预测精度。在实际应用中，AI 系统可实现对施工阶段造价的滚动预测，会根据现场实时数据不断修正模型参数，形成预测—验证—再学习的自适应循环。当监测到市场钢材价格上涨、人工费波动或天气因素干扰施工时，AI 模型可自动计算其对造价的综合影响，并给出预测区间。管理人员可据此调整预算分配、采购时机或施工计划，避免因滞后反应导致资金损失。此外，企业还可将模型输出与决策系统联动，实现风险分级管理，对高波动项目设置专项监控机制，从而真正实现数据驱动下的风险前瞻控制。

### 3.3 建立智能预警系统，实现全过程动态监控

在路桥工程造价风险管理中，实时性、持续性是确保风险控制效果的关键。应用人工智能技术可构建基于动态监测、自动预警的全过程造价风险管理体系。路桥企业应在工程建设的各关键节点设置材料进场、工序验收、进度支付数据采集模块，AI系统通过实时分析数据波动情况，识别异常趋势。例如：当检测到某材料消耗量与施工进度不匹配时，系统会自动生成预警报告，并标注潜在风险来源。同时，系统可根据历史风险模型自动设定阈值，实现自动判断、分级预警。轻微偏差时可提示施工班组进行核查，严重偏差时系统会同步通知项目管理层和财务控制部门，实现多层级联动。该智能预警系统还应具备自我学习功能，每当风险事件被识别并处理后，系统会记录处理方案与效果的相关数据，进一步优化模型判断标准，使得系统在项目推进过程中越来越精准，不仅可以及时发现造价偏差，还能形成风险演化曲线，为后续项目提供科学依据，实现从事后补救到事前预防的根本转变。

### 3.4 构建智能化辅助决策平台，提升风险响应效率

针对路桥工程投资体量大、施工周期长、风险链条复杂的特点，构建基于人工智能的造价风险辅助决策平台，是实现全过程动态管控的关键举措。该平台以AI算法为核心，融合大数据分析、可视化技术与云端协作机制，能够对项目的进度、成本、合同与市场环境进行多维综合分析。在实践中，系统会接入路桥工程的BIM模型、监测传感数据和供应链数据库，对桥梁预应力张拉、隧道掘进、路面摊铺等关键环节的造价风险进行动态计算。例如：当AI检测到隧道掘进速度下降与设备能耗异常时，可自动推演出“设备检修延误”与“追加人工投入”两种情景下的造价差异，并推荐成本最优方案。平台还内置情景模拟模块，可在材料价格突涨、交通封闭或政策变动等突发事件发生时，自动生成风险损失评估与资金调度方案。以桥梁主塔施工为例，AI系统可根据高空作业计划与天气数据预测停工风险，提前调整资源分配，避免工期延误带来的额外造价支出。通过这一辅助决策平台，管理者能够在最短时间内完成造价风险的识别、分析与响应，显著提高路桥工程的管理韧性与资金使用效率，真正实现风险控制的智能化、可视化与实时化。

### 3.5 推进AI技术体系融入造价管理

人工智能技术在路桥工程造价管理中的持续应用，不仅是技术发展的趋势，更是推动管理体系智能化升级的重要途径。路桥企业应建立AI驱动的造价管理制

度，明确数据采集规范、算法透明机制和风险责任追溯体系，确保AI系统的使用具有可监管性。管理部门可制定《AI造价风险控制操作规范》，统一数据格式与算法接口，保证不同系统间的互联互通。同时，企业在管理体系中设立“智能造价控制中心”，由AI系统与人工专家共同参与风险分析与决策评审。人工智能负责海量数据处理与风险预测，专家团队则对模型结果进行逻辑审核与策略确认，形成机器判断+人类复核的双重机制，以防算法偏差带来的风险。此外，企业还要强化人员培训，培养兼具工程造价知识与AI算法能力的复合型人才；鼓励企业将AI成果纳入绩效考核体系，以激励人工智能在造价管理中的创新实践，进而为路桥工程高质量建设提供持久的技术保障。

## 4 结束语

人工智能技术在路桥工程造价风险控制中的应用，能够将传统依赖经验的管理方式转变为基于数据算法的科学决策模式，实现风险识别精准化、预测分析智能化及管理流程自动化。通过构建AI驱动的风险预警与决策支持系统，造价控制的实时性、前瞻性得以提升，工程资金利用效率明显改善。未来，路桥企业应进一步推动AI与BIM、物联网、区块链等技术的融合，构建智能化的造价风险管理体系，助力路桥工程实现高质量发展。

## 参考文献：

- [1] 彭雷雷. 基于人工智能的工程造价估算系统优化设计[J]. 信息记录材料, 2025, 26(07): 122-124.
- [2] 张羽洋. 基于人工智能的工程造价自动计算系统设计[J]. 信息记录材料, 2025, 26(05): 41-43, 46.
- [3] 郝同金. 人工智能技术与工程造价的融合应用[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(12): 193-195.
- [4] 陈亚渲. 人工智能技术在建筑工程造价风险控制中的应用与展望[J]. 住宅与房地产, 2025(17): 101-103.
- [5] 杜鹏飞, 王修全. 人工智能技术在工程造价管理中的应用[J]. 房地产世界, 2025(11): 98-100.
- [6] 马跃龙, 王恬. 人工智能在铁路工程造价管理领域的应用前景和挑战[J]. 铁路工程技术与经济, 2025, 40(03): 1-5.
- [7] 乐裕. 浅析人工智能技术在工程造价领域的应用前景[J]. 散装水泥, 2024(04): 104-107.
- [8] 周文瑞. 基于人工智能算法的工程造价精准预测模型构建及应用研究[J]. 信息记录材料, 2025, 26(04): 75-77.

# 新能源背景下电力设备采购与绿色物流协同发展策略探讨

文 凯

(国网四川省电力公司物资分公司, 四川 成都 610000)

**摘要** 为了探讨新能源背景下电力设备采购与绿色物流的协同发展, 本文分析了新能源项目对电力设备采购提出的高要求及传统采购模式的不足, 重点研究了绿色物流在降低碳排放、保障运输安全与效率、推动供应链绿色转型等方面的作用。研究结果表明, 智能化采购物流平台建设、绿色运输方式推广、绿色供应链管理体系完善及人才培养与跨部门协同机制是实现采购与绿色物流高效协同的关键路径。推动技术融合和制度创新, 可促进新能源产业的可持续发展。

**关键词** 新能源; 电力设备采购; 绿色物流; 协同发展; 绿色供应链

中图分类号:F426; F25

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.026

## 0 引言

随着新能源产业的快速发展, 电力设备采购面临更高的技术和时间要求, 传统采购和物流模式难以满足其需求。绿色物流作为实现节能减排和运输效率提升的重要手段, 已成为电力设备采购过程中的关键环节。本文系统分析新能源背景下电力设备采购与绿色物流的协同机制, 探讨推动两者融合发展的策略, 旨在为新能源项目的顺利实施提供保障。

## 1 新能源背景下电力设备采购的重要性分析

在新能源蓬勃发展的背景下, 电力设备采购的关键意义不断突显, 伴随风能、太阳能等新能源项目迅速拓展, 对设备的类别、技术特性以及采购时效性提出更严格的要求, 传统采购模式响应方面反应迟钝, 成本管控不易, 设备质量稳定性欠佳, 不能达到新能源项目对高效、可靠设备的要求<sup>[1]</sup>。

采购管理效率通常可用“总采购成本”公式来表达:

$$C=P+T+R \quad (1)$$

式(1)中,  $C$  表示总采购成本,  $P$  为采购价格,  $T$  为运输及物流成本,  $R$  为风险成本(包括质量风险、延迟风险等)。

## 2 绿色物流在电力设备采购中的作用

### 2.1 降低运输过程中的碳排放, 促进节能减排目标实现

跟随全球节能减排目标不断推进的步伐, 绿色物流于电力设备运输中的意义愈发凸显。电力设备的体

积偏大、重量偏重, 常规运输模式一般借助高耗能的燃油机动车, 产生大量碳物质排放, 绿色物流借助推行新能源运送器具, 如电动货运卡车、氢能输送车辆等, 有力削减运输阶段的碳足迹。做好运输路径规划及车辆载重管理的优化, 防止空驶情况以及多次重复运送, 带动运输效率提升, 进一步削减单位运输量的能源损耗。智能调度系统与大数据分析相结合, 实时对运输状态进行监测, 做到运输资源的合理配置, 减少非必需的能源浪费。电力设备运输时段碳排放的下降, 既在一定程度上推动了新能源项目环保目标实现, 也推动了整个能源产业运行模式的绿色升级, 为实现碳达峰和碳中和目标添砖加瓦<sup>[2]</sup>。

### 2.2 保障电力设备运输安全与时效, 提升采购效率

电力设备往往结构错综且价格不低, 运输进程中一旦出现破损, 会造成维修及替换成本的增加, 甚至会造成项目建设的延期, 对整体推进造成妨碍。绿色物流注重全过程的规范性管理把控, 以智能监控技术为依托, 对运输车辆的位置、环境状态和装卸流程进行实时监测跟踪, 保证设备在运输阶段的安全系数。采用专属的运输设备及加固操作, 弱化震动与碰撞产生的风险, 让设备维持无损状态。绿色物流聚焦时间管理环节, 以合理制定运输计划, 压减运输周期规模, 对仓储环节环境实施管控, 有效防止设备因储存不当而受损。运输安全保障性及时效顺畅性提高, 不仅让风险成本得以降低, 且极大地增强了采购整体成效, 减少了时间及资源的耗费, 保障新能源项目依计划开展<sup>[3]</sup>。

### 2.3 推动供应链绿色转型，实现采购与物流的协同发展

绿色物流不只是针对运输环节实施绿色升级，也是推动整个供应链绿色蜕变的核心力量。通过绿色物流的实施，供应链上下游企业一起承担起环境保护义务，促进绿色采购及绿色制造的开展，具体涉及采用绿色包装用料，如可进行降解或可循环利用的包装，减少一次性废弃物；推动实施包装模块化设计，方便拆卸并重复运用，抑制资源消耗水平；建立废弃物回收管理相关机制，减轻环境的污染压力。采购环节通过引入环保标准与绿色认证体系，优先筛选出拥有绿色认证的供应方，着重强化环境风险评估工作，保障设备及其制造流程符合绿色标准，绿色物流与采购环节协同拓展，实现闭环式管控模式，增强供应链整体的环境成效，促进新能源设备采购实现可持续发展，提升供应链的竞争水平。

### 2.4 提升企业绿色形象，满足政策法规和市场需求

由于环保法规渐趋严格，绿色采购与绿色物流成为市场竞争的关键要素。企业通过实施绿色物流，既能符合国家与地方的环保政策及标准，避免环保不达标处罚，还符合客户不断提升的绿色采购要求。绿色物流映现出企业对环境保护的许诺，提升企业的社会责任担当以及品牌知名度。在市场竞争中，有着良好绿色形象的企业相对容易获得政府支持及政策助力，如绿色信贷、补贴等优惠政策。消费者、合作企业对环保理念的赞同，让企业市场竞争力与客户忠诚度得以增强，尤其在新能源这一产业范畴，企业绿色形象直接关乎其在产业链当中的地位及影响力，通过开展绿色物流，企业可实现可持续发展，进而带动整个行业实现绿色进阶，形成经济与环境共赢的局面。

## 3 新能源背景下电力设备采购与绿色物流协同发展策略

### 3.1 构建智能化采购物流一体化平台

随着新能源产业对电力设备采购与物流效率的要求持续提高，创建智能化采购与物流一体化平台成为提升协同效率、降低运营成本的关键途径。该平台包括物联网、大数据及云计算技术，囊括从需求预测、订单处理到运输跟查的全环节，可实现采购、物流环节间实时信息互通及协同操作。通过物联网相关技术，如设备状态、运输环境以及车辆位置等，能实现实时采集与传输，为物流过程的安全与时效提供保障。大

数据分析可协助精准预判设备需求及物流量，强化采购计划合理性，防止库存积压情形以及供应短缺局面的发生，提高采购计划精准度。云计算技术为平台赋予强大的数据处理性能和弹性资源后盾，促使系统实现高效稳定的运作，通过智能化平台实现信息整合与流程优化处理，采购部门可根据库存实时情形以及运输状态，灵活地调整订单计划，物流部门可依据采购需求弹性调配配送资源，杜绝运输重复与空车空载的现象，有效减少运输成本并降低资源的浪费<sup>[4]</sup>。

### 3.2 推进绿色运输方式的应用

绿色运输方式为电力设备采购绿色转型的关键要素。随着环保要求不断提高，设备运输采用新能源车辆成为降低运输碳排放的有效手段。采用电动卡车、氢燃料车等新能源运载工具，替换传统燃油车，可大幅降低温室气体排放及空气污染程度。采用智能调度模块，对运输路线进行优化规划，可极大限度降低车辆空驶与绕行，强化燃料利用水平。智能调度系统借助实时交通资讯与订单需求剖析，实现车辆精准配置及路径动态调适，切实减少运输成本及碳排放。例如：某新能源设备运输项目引入新能源车辆及智能调度系统后，运输碳排放减少约20%，运输时间缩短15%。绿色包装设计也是绿色运输的核心要素，采用可回收、可降解材质且进行模块化设计操作，既降低了包装废弃物对环境产生的不利影响，还可对装卸流程进行简化，提高运输效率。模块化包装拆卸便捷，还可重复利用，减少包装材料消耗及废弃物处理的压力。

### 3.3 完善绿色供应链管理体系

在新能源背景下，完善绿色供应链管理体系是实现电力设备采购与绿色物流协同发展的关键，需制定标准、完善的绿色采购机制，包括设备环保性能的指标范畴，如能源效率级别、材料的环境友好属性，并将其纳入供应商的绿色认证及相关环境风险评估系统。通过标准化的评估与认证，可筛选出符合环保标准的供应商，助力供应链全面迈向绿色化。完成绿色采购标准实施相关工作后，企业供应链上的碳排放平均降低幅度为15%~25%，明显促进了环境绩效的提升。另外，绿色物流考核机制的设立同样重要。物流运输企业应建立环保绩效考查体系，把运输碳排放额度、能源消耗效益、绿色包装的使用比率等关键指标纳入考核标准范围，这既可以鼓励物流企业引入新能源车辆与绿色包装，又能提高运输阶段节能减排效益。例如：某大型新能源企业实施绿色物流考核机制之后，其运

输环节的碳排放较前一年同期降低了 18%，运输效率提高了 12%。通过全链条式绿色考核及激励办法，实现采购及物流的绿色同步协作，助力供应链可持续发展并推动企业社会责任落实，为新能源产业稳健发展筑牢基础<sup>[5]</sup>。完善绿色供应链管理体系如表 1 所示。

表 1 完善绿色供应链管理体系

| 指标类别     | 具体指标           | 实施前数值 | 实施后数值 | 改善幅度    |
|----------|----------------|-------|-------|---------|
| 碳排放表现    | 运输碳排放量(吨/年)    | 1 000 | 820   | ↓ 18%   |
| 能源使用效率   | 单位运输能耗(kW·h/吨) | 25    | 20    | ↑ 20%   |
| 包装环保性    | 可回收包装占比        | 40%   | 70%   | ↑ 30%   |
| 供应商绿色认证率 | 通过绿色认证的供应商数    | 15 家  | 22 家  | ↑ 46.7% |
| 运输效率     | 平均运输时效(小时)     | 48    | 42    | ↑ 12.5% |
| 供应链碳排放总量 | 碳排放总量(万吨/年)    | 10    | 8     | ↓ 20%   |

### 3.4 加强人才培养与跨部门协同机制建设

人才是助力电力设备采购与绿色物流协同推进的核心支撑，应进一步加强采购与物流领域专业人才绿色理念及技术应用能力培育。随着物联网、大数据与新能源技术的不断革新，相关人员除需掌握传统采购与物流管理知识外，也要具备达到一定要求的环保领域能力、绿色技术水平以及智能信息系统应用技能。根据某培训机构所统计的数据显示，接受绿色物流与智能采购系统培训的职工，工作效率提高幅度达 20% 以上，差错率降低了 15%，显著提高了绿色供应链管理水平，实现了采购部门与物流部门之间的跨部门协同发展，并解决了信息孤立问题，实现了资源与信息的共享，为企业的绿色协同发展提供了保障。通过整合的信息平台与决策联动机制，可实现采购计划与物流配送实时调整优化，减少资源浪费，提高应对速率。例如：某新能源企业通过建立采购与物流联动模式，项目的整体交付周期降低了 10%，成本下降了 8%。跨部门协同机制不仅促进了采购与物流的协同效应，也促进了组织整体运营效率和绿色发展，进而推动了新能源产业链向智能化及可持续化发展。加强人才培养与跨部门协同机制建设如表 2 所示。

表 2 加强人才培养与跨部门协同机制建设

| 指标类别   | 具体指标            | 实施前数值       | 实施后数值 | 改善幅度     |
|--------|-----------------|-------------|-------|----------|
| 人才培训效果 | 员工工作效率(单位:件/天)  | 100         | 120   | ↑ 20%    |
|        | 操作错误率           | 10%         | 8.50% | ↓ 15%    |
| 协同机制表现 | 部门间信息共享响应时间(小时) | 24          | 12    | ↓ 50%    |
|        | 项目交付表现          | 项目整体交付周期(天) | 100   | 90 ↓ 10% |
| 成本控制效果 | 项目成本(万元)        | 1 000       | 920   | ↓ 8%     |

### 4 结语

新能源时代，电力设备采购与绿色物流的协同发展是保障项目高效推进和绿色转型的关键。构建智能化与一体化平台、推广绿色运输方式、完善绿色供应链管理以及加强人才培养与部门协同，是实现采购与物流深度融合的有效路径。未来应持续推进技术创新和制度完善，推动新能源产业链绿色、智能、可持续发展；应建立健全跨部门协作与动态评估机制，加强数据共享与风险预警，完善绿色标准与监管体系，促进政策、企业与社会多方协同发力，进一步提升电力设备采购与绿色物流的整体效能，为我国能源结构优化与经济高质量发展提供坚实的支撑。

### 参考文献：

- [1] 陈澄.长江证券研究所联席所长邬博华：新能源与电力设备行业整体景气指数仍较好 [N].证券时报,2025-06-26(A06).
- [2] 董鹏程, 阎凯. 基于半监督 SVM 模型的新能源发电成套电力设备故障诊断方法 [J]. 机电工程技术, 2025, 54(10): 164-167.
- [3] 许敏. 新能源并网对电力系统电能质量的影响及应对策略 [J]. 光源与照明, 2025(04): 152-154.
- [4] 刘明月, 赵菁磊, 陈韵霖, 等. 基于改进集成学习的新能源发电设备故障辨识研究 [J]. 河南科技, 2025, 52(05): 28-31.
- [5] 谈鹏程. 影响新能源发电设备可靠性的主要因素分析 [J]. 电子元器件与信息技术, 2025, 09(01): 247-249.

# 半绝缘与全绝缘管母线在新能源电站中的选型应用研究

邹玉波

(国电电力发展股份有限公司宣威分公司, 云南 曲靖 655400)

**摘要** 针对新能源电站管型母线绝缘故障频发问题, 以某光伏电站 35 kV 侧管母线两年内两次绝缘击穿事故为研究对象, 系统对比全绝缘与半绝缘管母线的结构特性、电气性能及环境适应性。通过故障溯源分析施工工艺、绝缘设计与环境因素的耦合影响, 结合《电力设备预防性试验规程》(DL/T 596—2021)等标准要求, 提出基于场景适配性的选型指标体系及全生命周期管控策略。研究结果表明: 半绝缘管母线在户外潮湿环境中具有更优的运行可靠性, 其故障修复成本较全绝缘管母线降低 62%, 为新能源电站设备选型提供技术支撑。

**关键词** 光伏电站; 管型母线; 半绝缘; 全绝缘; 绝缘故障

中图分类号: TM62; TM24

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.027

## 0 引言

35 kV 升压站作为光伏电站的电能汇集关键, 其设备可靠性对发电效率影响重大。管型母线因载流量大、集肤效应低等优势, 已逐渐取代传统矩形母线。管型母线按绝缘结构分为全绝缘和半绝缘, 前者采用多层复合绝缘, 有密封屏蔽特性; 后者仅关键部位绝缘, 靠空气绝缘和绝缘子支撑。例如: 某光伏电站 #1 主变 35 kV 侧用的全绝缘管母线, 在 2024—2025 年间, 穿墙套管处和接头处先后出现绝缘击穿, 导致全站停电, 凸显选型问题。开展两种绝缘方式的选型研究, 对提升电站可靠性意义重大。国外管形绝缘母线应用成熟, 有超 40 年运行历史, 在绝缘材料和结构设计上经验丰富。国内因技术限制, 主要生产 35 kV 及以下产品, 且行业标准不统一, 企业多依内部规范生产, 产品质量不一。现有研究多关注管母线载流量和散热, 对不同绝缘方式的场景适配性, 尤其是基于实际故障案例的选型论证较少。本文采用“故障分析—性能对比—选型建模—实证验证”路线, 剖析两次绝缘故障机理, 提取关键因素, 建立涵盖电气性能、环境适应、施工维护等方面的对比体系, 结合新能源电站运行特点构建选型模型, 最后通过案例改造验证选型合理性。

## 1 管型母线绝缘技术基础

全绝缘管母线以空心钢管或铝管为导体, 外敷耐火导热层、绝缘防水层、均压层、屏蔽层及抗紫外线护套, 形成类似电缆的密封绝缘结构<sup>[1]</sup>。其核心优势在于电场分布均匀, 表面电场强度畸变系数低, 可直接

穿越电缆沟、夹层等复杂环境, 额定电流可达 12 000 A, 短路耐受电流峰值达 160 kA。但全绝缘结构对制造工艺要求严格, 绝缘层需采用聚四氟乙烯等耐高温材料, 且各层间粘接必须紧密无气泡, 否则易形成局部放电通道。

半绝缘管母线仅在导体表面涂刷绝缘涂料或包覆薄层热缩套管, 关键连接部位采用增强绝缘处理, 整体依赖支柱绝缘子支撑实现对地绝缘<sup>[2]</sup>。其结构简化了绝缘层级, 保留了管形导体的低集肤效应优势(集肤效应系数  $K_f \leq 1$ ), 且空心结构形成自然风道, 温升较同截面矩形母线低 15~20 K。在户外场景中, 半绝缘管母线通过增大相间距离与爬电比距提升绝缘可靠性, 35 kV 等级产品通常要求爬电距离不小于 31 mm/kV(污秽等级 IV 级), 其最大优势在于施工便捷性, 接头处无需复杂密封处理, 维护时可直接进行红外检测。

根据 DL/T596—2021《电力设备预防性试验规程》, 管母线绝缘性能评价主要包括: 交流耐压试验(35 kV 等级需耐受 42 kV/min)、局部放电量( $\leq 10 \text{ pC}$ )、绝缘电阻(常温下  $\geq 1 000 \text{ M}\Omega$ )及介质损耗( $\leq 0.01\%$ )。环境适应性指标则涵盖耐湿热性(相对湿度 95% 下 480 h 无凝露)、抗紫外线老化(氙灯老化试验 1 000 h 无开裂)等。

## 2 光伏电站管母线绝缘故障案例分析

2024 年 4 月 5 日 23 时 59 分, 某光伏电站 #1 主变 201、301、302 断路器跳闸, 35 kV 母线失压。保护装置显示纵差工频变化量差动保护动作, 故障录波确认

35 kV 侧 C 相单相接地。在耐压试验中, C 相管母加压至 40 kV 时对地击穿, 最终定位故障点为二分支 C 相穿墙套管处, 发现明显放电痕迹。经分析, 故障由结构设计缺陷、施工工艺问题与绝缘老化加速导致: 穿墙套管处原绝缘板与管母间隙不足 50 mm, 低于《电力设备预防性试验规程》(DL/T 596—2021) 规定的最小电气间隙要求, 形成电场集中区; 绝缘板安装时未进行倒角处理, 边缘场强畸变系数达 3.2, 远超允许值 1.5; 穿墙部位存在温差导致凝露, 绝缘层吸潮后介损值从 0.005% 升至 0.03%, 满足故障发生条件。

2025 年 8 月 23 日 04 时 46 分, 相同主变因纵差保护动作跳闸, 现场检查发现 35 kV 侧 B 相三通接头处绝缘击穿, 伴有烧焦痕迹, A、C 相存在轻微放电。当时环境湿度 97%, 小时降雨量 2.5 mm, 气压 793 hPa (相当于海拔 2 000 m)。此次故障原因在于防水密封失效、施工质量缺陷与环境因素叠加: 接头处未采用硅橡胶密封, 仅缠绕普通绝缘胶带, 雨水渗入后形成导电通道, 爬电距离从设计值 210 mm 降至 120 mm; 三通接头制作时导体对接间隙达 0.8 mm, 运行中产生局部过热, 导致绝缘层软化脱落; 高湿度与低气压共同作用, 使空气绝缘强度下降 30%, 加速绝缘击穿进程。

两次故障均暴露全绝缘管母线的固有缺陷: 接头与穿墙等薄弱部位的绝缘处理对工艺要求极高, 且密封结构易受环境影响。差异在于第一次故障以电场集中为主因, 第二次则是防水失效与施工缺陷的耦合结果。整改数据显示, 全绝缘管母故障修复需耗时 72 小时, 材料成本达 12 万元 / 处, 而半绝缘改造后同类缺陷处理仅需 16 小时, 成本降至 4.5 万元 / 处。

上述两个光伏电站管母线绝缘故障案例表明, 绝缘失效往往是多因素交织作用的结果。结构设计缺陷、施工工艺不达标等内部因素, 与环境湿度、气压变化等外部条件相互叠加, 显著增加了故障发生概率。全绝缘管母线虽具备整体防护优势, 但其接头、穿墙等关键部位的绝缘处理容错率低, 密封性能易受环境侵蚀, 导致故障修复成本高、周期长。而半绝缘改造在提升运维效率、降低经济损失方面展现出明显优势, 为光伏电站管母线的可靠性提升提供了新的技术方向。未来, 在光伏电站的建设与运维过程中, 必须从多个维度强化绝缘故障防控措施。首先, 要建立严格的设计标准审核机制, 确保管母线的结构设计科学合理, 从源头上消除潜在的绝缘风险; 其次, 要加强施工过程管控, 严格执行施工工艺标准, 确保施工质量; 最后, 应建立环境因素与绝缘性能的动态监测机制, 实时掌握环境变化对绝缘性能的影响, 及时采取针对性

的防护措施。只有这样, 才能有效降低绝缘故障风险, 保障光伏电站的安全稳定运行。

### 3 全绝缘与半绝缘管母线性能对比

在电气性能方面, 全绝缘与半绝缘管母线均能达到现行国家标准。二者都通过了 42 kV/1min 工频耐压试验, 符合 DL/T596—2021 规定。全绝缘管母线局部放电量  $\leq 5 \text{ pC}$ , 半绝缘管母线  $\leq 8 \text{ pC}$ , 均低于《高压试验技术—局部放电测量》(GB/T 7354—2018) 规定的  $\leq 10 \text{ pC}$ 。绝缘电阻上, 25 °C 时全绝缘管母线  $\geq 5\,000 \text{ M}\Omega$ , 半绝缘管母线  $\geq 1\,000 \text{ M}\Omega$ , 远超行业最低要求。在短路耐受方面, 两者都能承受 4 s 时长 63 kA 短路电流冲击。在温升控制方面, 全绝缘管母线  $\leq 45 \text{ K}$ , 半绝缘管母线  $\leq 50 \text{ K}$ , 均符合《交流高压电器在长期工作时的发热》(GB/T 763—1990) 标准<sup>[3]</sup>。总体而言, 全绝缘管母线绝缘性能更佳, 半绝缘管母线也能稳定运行。

在极端环境适应性上, 二者差异明显。高湿环境下, 相对湿度 95% 运行 30 天, 全绝缘管母线绝缘电阻衰减 45%, 半绝缘管母线仅下降 12%, 防潮性更好。海拔 2 000 m 时, 全绝缘管母线击穿电压下降 28%, 半绝缘管母线通过增大电气间隙维持绝缘性能。氙灯加速老化试验 1 000 小时后, 全绝缘管母线外护套开裂率 18%, 半绝缘管母线表面涂层完好率 96%, 耐候性更强。

在工程实施与运维管理上, 全绝缘管母线接头制作复杂, 需 4 小时, 半绝缘管母线仅需 1.5 小时。在密封工艺上, 全绝缘管母线采用双重密封, 半绝缘管母线用常规防水胶带即可。运维检测时, 全绝缘管母线需专业设备, 半绝缘管母线用红外热成像仪更便捷。故障定位时间, 全绝缘管母线 4~6 小时, 半绝缘管母线 1~2 小时。年维护成本, 全绝缘管母线 8.2 万元 /km, 半绝缘管母线 3.5 万元 /km, 半绝缘产品在偏远地区优势显著。

基于 35 kV/2 000 A、长度 100 m 的典型管母线系统全生命周期成本分析显示: 在初始投资阶段, 全绝缘方案约需 85 万元, 半绝缘方案仅需 62 万元, 后者较前者降低 27%; 在 10 年长期运维周期内, 全绝缘管母线维护成本累计约 82 万元, 半绝缘管母线仅需 35 万元, 维护成本降低 57%; 单次故障造成的发电量损失方面, 全绝缘方案约为 28 万元 / 次, 半绝缘方案则降至 15 万元 / 次, 故障经济损失减少 46%。

### 4 新能源电站管母线选型体系构建

新能源电站管母线选型需综合考虑环境、系统、管理三大核心影响因素。在环境因素方面, 海拔高度超过 1 000 m 时, 大气压力降低会导致空气绝缘强度下

降，需考虑对绝缘性能的影响；年平均相对湿度 $\geq 75\%$ 的地区属于高湿环境，长期水汽侵蚀易引发绝缘性能下降；年降雨量 $\geq 1500\text{ mm}$ 区域需加强防水设计，防止雨水渗入引发故障；污秽等级达到III级及以上时，表面污秽物会降低绝缘水平，需增大爬电距离<sup>[4]</sup>。在系统参数方面，35 kV及以下电压等级推荐优先采用半绝缘方案，因其成本效益较高；额定电流 $\geq 4000\text{ A}$ 时，大电流产生的热量显著增加，需重点评估母线温升控制；短路电流 $\geq 50\text{ kA}$ 时，强大的电动力可能破坏母线结构，需进行机械强度校核。在管理因素方面，全绝缘管母线施工需二级及以上专业资质队伍，对施工技术要求严格；技术力量薄弱的偏远电站更适合选择运维简便的半绝缘方案；成本预算有限的项目应优先考虑初始投资较低的半绝缘产品。

具体选型决策流程包含三个关键步骤：首先，采用多因子评分法对环境条件进行量化评估，其中海拔、湿度、污秽等级权重分别设定为30%、40%、30%，总分达到60分及以上判定为恶劣环境，该类环境优先选用半绝缘管母线并配合支柱绝缘子加密布置（跨距控制在 $\leq 6\text{ m}$ ），以增强绝缘可靠性；环境评分低于60分的优良环境可选用全绝缘管母线，但需严格把控接头工艺质量，避免因施工不当引发故障。然后，进行全生命周期成本核算，通过综合比较初始投资、运维成本、故障损失等费用，当半绝缘方案成本低于全绝缘方案80%时，无论环境条件如何均优先采用。最后，选型确定的管母线需通过1000小时湿热循环试验和50次操作冲击试验，模拟实际运行中的极端工况，确保满足实际运行要求。

针对不同应用场景，推荐以下选型方案：沿海高湿环境光伏电站建议采用半绝缘管母线，需保证爬电比距 $\geq 31\text{ mm/kV}$ ，并配备IP55防护等级，防止盐雾、水汽侵蚀；高原干旱地区风电站同样适合半绝缘方案，考虑到高原低气压影响，电气间隙需在常规设计基础上每千米增加14%，补偿气压降低带来的绝缘性能损耗；内陆洁净环境光伏电站可选用全绝缘管母线，接头采用硅橡胶密封工艺，配合IP65防护等级，确保长期运行可靠性；城市分布式电站推荐全绝缘管母线，采用电缆沟敷设方式，并做好屏蔽层接地处理，降低电磁干扰对周边环境的影响。

## 5 选型方案实证验证

某光伏站在经历两次绝缘故障后，对35 kV侧100 m全绝缘管母线实施改造，更换为半绝缘结构。具体改造措施包括：拆除原有复合绝缘层，保留导体铜管并在表面均匀涂刷0.8 mm厚耐候绝缘涂料，该涂料

具有优异的防潮、抗老化性能；三通接头采用银基钎焊工艺连接，确保对接间隙 $\leq 0.1\text{ mm}$ ，保障电气连接可靠性，外部采用热缩套管配合防水胶双重密封，增强防水性能；将支柱绝缘子间距由8 m缩短至5 m，使爬电比距提升至35 mm/kV，有效提升绝缘水平；同步安装在线监测装置，实现接头温度和绝缘电阻的实时监测，便于及时发现潜在故障隐患<sup>[5]</sup>。改造后，设备经过12个月连续运行验证，未发生任何绝缘故障，关键性能指标表现优异：在交流耐压试验中顺利通过42 kV/1min测试，局部放电量稳定控制在 $\leq 7\text{ pC}$ ，满足运行要求；接头最高温升仅42 K，远低于50 K的标准限值，证明散热设计合理；在经历3次日降雨量 $\geq 50\text{ mm}$ 的暴雨天气后，绝缘电阻未出现明显下降，体现出良好的防潮性能；年维护成本从改造前的8.2万元降至3.1万元，投资回收期仅需1.8年，充分验证了半绝缘选型方案的工程可行性和经济效益。

## 6 结束语

全绝缘管母线在局部放电和绝缘电阻上表现出色，但在户外恶劣环境中可靠性欠佳，施工运维成本也高。半绝缘管母线经结构优化与防护改进，可满足新能源电站35 kV运行要求，全生命周期成本较全绝缘产品降低41%。选型可按“环境评估—技术匹配—经济核算—试验验证”四步走，恶劣环境优先半绝缘，洁净环境可选全绝缘。在应用方面，设计阶段，高湿高海拔地区强制用半绝缘，接头爬距按标准1.2倍设计；施工时，全绝缘管母接头由厂家专业人员安装，半绝缘接头采用钎焊工艺；运维建立“红外检测+绝缘电阻测试”双检制度，全绝缘每6个月检测一次，半绝缘每12个月检测一次。建议制定《新能源电站管型母线技术条件》，明确不同绝缘方式适用场景与工艺要求。

## 参考文献：

- [1] 国家能源局.电力设备预防性试验规程(DL/T596-2021)[S].北京:中国电力出版社,2021.
- [2] 全国电力电缆标准化技术委员会.局部放电测量(GB/T7354-2018)[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [3] 全国高压开关设备标准化技术委员会(SAC/TC 65).高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求:GB/T 11022-2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [4] 余佐文,马爱清,高大崴.基于多场耦合的35kV管型母线接触面发热分析[J].陶瓷避雷器,2025(02):27-33.
- [5] 李党红.某区域绝缘管型母线的现状分析与运维建议[J].电工技术,2024(16):171-174,177.

# 变电站管理创新与施工工艺优化

李 勇, 杨 超\*

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要** 本文以菲律宾拉古林丹变电站项目为研究对象, 详细阐述了该项目在管理模式创新与施工工艺优化方面的具体实践。通过项目集群化管控、EPC 管理结构优化、属地资源整合以及电缆沟模、排水管预制化施工和土壤回填压实工艺的改进, 有效解决了项目面临的诸多难题, 提高了项目的整体效益和工程质量, 以期为同类变电站项目提供借鉴。

**关键词** 变电站; 管理创新; 预制化施工; 工艺优化

中图分类号: TM63

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.028

## 0 引言

在全球能源需求持续增长的背景下, 变电站作为电力输送和分配的关键枢纽, 其建设的质量、效率和成本控制愈发重要。菲律宾拉古林丹变电站项目作为新建变电站工程, 在实施过程中面临着诸多挑战, 如项目管理难度大、施工工期紧、工程量大等。为应对这些挑战, 项目团队在管理模式和施工工艺上进行了一系列创新与优化, 旨在实现项目的高效推进和高质量交付。

## 1 变电站管理模式的创新

### 1.1 项目集群化管控

拉古林丹项目作为首个以 EPC 模式中标的新建变电站工程, 充分发挥项目集群化管控的优势<sup>[1]</sup>。

在项目前期规划阶段, 区域部组织专家对项目所在地的地理环境、气候条件、电力需求等进行深入调研, 为项目的设计提供科学依据。项目群根据区域部的规划, 制定详细的施工计划, 明确各阶段的工作任务和时间节点。在物资调配方面, 区域部整合区域内的物资资源, 确保施工所需的材料和设备及时供应; 项目群则负责现场物资的管理和合理使用, 避免浪费和积压。两级管理力量的紧密配合, 夯实了项目部的决策层, 使得项目决策更加科学、合理, 为项目的成功实施奠定了坚实的基础。

### 1.2 优化 EPC 管理结构

深度挖掘 EPC 总包管理和 E+P+C 的责权划分, 是该项目管理创新的核心内容之一。通过优化管理结构矩阵和流程, 明确设计、采购、施工各方的职责和权力,

充分发挥设计引领、集采供货和属地施工的优势作用。

在设计环节, 设计单位在项目初期深入了解当地的地质条件、气候特点、电力负荷需求以及相关标准规范, 结合项目的实际情况, 制定出详细、合理的设计方案。在设计过程中, 充分考虑施工的可行性和便利性, 采用标准化、模块化的设计理念, 减少设计变更, 提高施工效率。例如: 在变电站的布局设计中, 根据当地的地形地貌和电力输送方向, 合理规划设备的布置, 缩短电缆敷设长度, 降低成本。

在采购方面, 采用集采供货模式, 集中采购项目所需的各类物资。通过与供应商建立长期稳定的合作关系, 利用规模采购的优势, 降低采购成本, 同时严格把控物资质量。在采购过程中, 建立完善的供应商评估体系, 对供应商的生产能力、产品质量、信誉等进行综合评估, 确保采购的物资符合项目要求。对于关键设备和材料, 要求供应商提供质量检验报告和售后服务承诺, 保障项目的顺利进行。

施工阶段, 充分发挥属地施工的优势, 利用当地的劳动力资源和施工经验, 提高施工效率, 减少文化差异带来的沟通障碍。属地施工团队熟悉当地的施工环境和施工习惯, 能够更好地应对施工现场的突发情况。同时, 加强对属地施工人员的培训和管理, 提高其专业技能和质量意识, 确保施工质量符合标准要求。

### 1.3 整合属地资源配置

海外 EPC 项目面临着管理难度大、沟通交流弱、国别标准差异和文化属性不同等诸多困难。为有效应对这些挑战, 拉古林丹项目深化整合属地资源配置。

在人力资源方面, 积极招聘和培养当地员工, 使

\*本文通信作者, E-mail: 185746062@qq.com。

其融入项目团队。通过开展培训课程，向当地员工传授先进的施工技术和管理经验，提高其专业素质。同时，注重文化融合，尊重当地的文化习俗和工作方式，营造和谐的工作氛围。当地员工不仅能够解决当地的就业问题，还能够利用其熟悉当地语言和文化的优势，促进项目团队与当地社区、供应商之间的沟通与合作，提高工作效率<sup>[2]</sup>。

在物资资源方面，充分利用当地的建筑材料和设备供应商，减少运输成本和物资供应周期。对当地的供应商进行全面考察和评估，选择质量可靠、价格合理的供应商建立合作关系。在物资采购过程中，严格按照项目的质量标准进行验收，确保物资质量符合要求。

## 2 新建变电站预制化施工

### 2.1 CT-RSC 电缆沟模预制工艺

#### 2.1.1 传统工艺的局限性

菲律宾拉吉林丹变电站项目工程量大、工期紧，站内排水系统和电缆沟工程量占比较大。传统的电缆沟施工工艺通常在现场进行支模、绑扎钢筋、浇筑混凝土等工序。现场支模需要耗费大量的时间和人力，而且模板的安装精度难以保证，容易出现漏浆、涨模等问题，影响电缆沟的外观质量和尺寸精度。绑扎钢筋过程中，由于施工现场环境复杂，钢筋的布置和连接质量也难以有效控制。浇筑混凝土时，受现场施工条件的限制，混凝土的振捣质量难以保证，容易出现蜂窝、麻面等缺陷，影响电缆沟的结构强度。

#### 2.1.2 预制工艺的优势与实施

为解决传统工艺的问题，项目团队决定采用预制工艺。在国外，虽然变电站电缆沟预制施工通常采用成品采购，但采购周期较长，难以满足项目的进度需求。因此，项目部引进预制人才，自制模具对电缆沟进行预制。

自制模具采用高强度钢材制作，具有良好的刚性和耐磨性，能够保证预制构件的尺寸精度和外观质量。在模具设计过程中，充分考虑电缆沟的结构特点和施工要求，设置合理的脱模装置和振捣孔，便于预制构件的生产和脱模。每个预制构件两侧均预留出30 cm通长钢筋，在构件与构件接头处，再次采用混凝土进行浇注，确保了构件的连续性和整体结构强度。

在预制过程中，严格控制原材料的质量和配合比，采用先进的搅拌设备和振捣工艺，保证预制构件的混凝土密实度和强度。预制好的电缆沟构件在专门的养护场地进行养护，确保构件达到设计强度后再进行运输和安装。

通过采用预制工艺，电缆沟的施工效率得到了大幅提高，施工质量得到了有效保证。预制构件在工厂内生产，不受施工现场恶劣环境的影响，生产过程中的质量控制更加严格。同时，预制工艺减少了现场施工的工作量，缩短了施工周期，降低了工程造价。

### 2.2 排水管预制化施工

#### 2.2.1 排水系统预制工艺的需求

排水系统主要由混凝土排水管和排水附属构件组成。若采用成品供应，存在周期长、质量差等问题。成品排水管在运输过程中容易损坏，而且其质量难以满足项目的高标准要求。排水附属构件由于开孔较多，市场上无法采购到合适的成品模具，难以保证其尺寸精度和质量。因此，项目部决定自行研制模具或采购成品模具自行预制。

#### 2.2.2 模具选择与预制施工

对于排水附属构件，由于其结构复杂，开孔较多，市场上无法采购到成品模具，项目部采用钢板、螺栓等材料，通过焊接方式自行组装模具。在模具组装过程中，严格按照设计图纸进行加工和焊接，确保模具的尺寸精度和结构强度。模具组装完成后，进行试模和调整，确保预制的排水附属构件符合设计要求<sup>[3]</sup>。

对于混凝土排水管模具，考虑到提高施工效率，项目部采购成品模具。该模具采用高强度钢材制成，具有较好的耐磨性和抗压能力，结构简单、安装方便，可快速搭建和拆卸。模具的内壁光滑，能够保证预制的混凝土排水管表面平整，减少水流阻力。

在预制混凝土排水管时，严格控制原材料的质量和配合比，采用先进的离心制管工艺，保证排水管的混凝土密实度和强度。每个混凝土排水管顶部与底部均制作出承插口，后续采用1:3混凝土砂浆进行填充及连接，保证了排水管道的密实性，有效避免了排水渗漏问题。

预制好的排水管和排水附属构件在施工现场进行安装时，严格按照施工规范进行操作，确保安装质量。通过采用预制化施工工艺，排水系统的施工质量得到了显著提高，施工周期大大缩短，降低了项目的整体成本。

## 3 变电站土壤回填压实工艺优化

### 3.1 传统分层压实工艺的问题

对于拉吉林丹变电站这种开挖量及回填量大的项目，采用分层压实工艺存在诸多问题。首先，分层压实工作量大，需要投入大量的人力、物力和时间。每层压实都需要进行多次操作，包括铺土、平整、压实等，

施工过程繁琐。其次，施工周期长，由于每层压实后都需要等待 FDT 测试结果，若测试不合格还需要进行返工处理，进一步延长了施工时间。这对于工期紧张的项目来说，是一个巨大的挑战。

### 3.2 灌水法夯实工艺的实施与优势

针对分层压实工艺的问题，项目部经过研究和试验，决定采用灌水法夯实工艺。该工艺一次性回填到图纸要求高程，根据当地的天气气候，每隔三到四天左右灌水一次，使土壤自然沉降。在沉降过程中，观察高程是否发生变化，如改变，则再次进行回填至图纸要求高程，继续灌水，使土壤时刻处于饱和状态。

在实施过程中，首先对回填区域进行清理和平整，确保基底无杂物和松散土层。然后按照设计要求的高程进行一次性回填，回填土采用符合要求的土料，避免使用含有杂质和有机物的土料。回填完成后，进行第一次灌水，使土壤充分湿润，开始自然沉降。在沉降过程中，安排专人定期观察高程变化，并做好记录<sup>[4]</sup>。

若发现高程下降超过允许范围，则及时进行补充回填，再次灌水。经过多次循环，直至土壤沉降稳定，高程符合设计要求。在土壤沉降稳定后，对回填土进行检测，包括土壤的密实度、含水量等指标，确保土壤强度达到要求。

灌水法夯实工艺具有诸多优势。首先，大大减少了工作量，不需要进行分层压实和多次测试，节省了人力、物力和时间。其次，缩短了回填周期，提高了施工效率，能够满足项目的工期要求。此外，该工艺相对简单，不需要复杂的压实设备，降低了施工成本。同时，灌水法夯实工艺能够使土壤更加密实，提高土壤的强度和稳定性，保证变电站的基础质量。

## 4 优化效果分析

### 4.1 成本控制效果

通过管理模式创新与施工工艺优化，项目在成本控制上成果斐然。在管理层面，集群化管控整合资源，规避重复建设；优化 EPC 结构发挥各方优势，集采使物资采购成本降低 15%，属地资源配置减少运输和人力成本。在施工工艺方面，预制化施工降低人工与材料消耗，缩短工期减少设备租赁等成本；灌水法夯实取代分层压实，降低回填成本约 20%。最终，项目总成本降低约 18%，经济效益显著提升。

### 4.2 工期缩短效果

管理创新和施工工艺优化对项目工期的缩短起到了关键作用。在施工工艺方面，预制化施工大大缩短了电缆沟和排水管的施工时间。电缆沟预制工艺使电

缆沟的施工周期缩短了约 40%，排水管预制工艺使排水系统的施工周期缩短了约 35%。土壤回填压实工艺的优化，采用灌水法夯实，一次性回填到设计高程，缩短了回填周期约 50%。综合各项施工工艺的优化，项目整体工期缩短了约 30%，提前完成了项目建设任务，为电力的及时供应提供了保障。

### 4.3 质量提升效果

管理创新与施工工艺优化显著提升了项目的质量。在管理方面，明确的责权划分和严格的质量管控体系确保了项目各环节的质量控制。设计单位在设计过程中充分考虑各种因素，提供了高质量的设计方案；采购部门严格把控物资质量，保证了原材料和设备的质量；施工团队在施工过程中严格按照规范操作，确保了施工质量<sup>[5]</sup>。

在施工工艺方面，预制化施工在工厂内进行，生产环境稳定，质量控制严格，保证了电缆沟和排水管的构件质量。预制构件的尺寸精度和外观质量都有了显著提高，减少了现场施工的质量缺陷。土壤回填压实工艺的优化，通过灌水法夯实使土壤更加密实，提高了土壤的强度和稳定性，保证了变电站的基础质量。经过检测，项目的各项质量指标均符合或优于设计要求，工程质量得到了有效提升。

## 5 结语

菲律宾拉吉林丹变电站项目在管理创新与施工工艺优化方面进行了成功的实践。通过项目集群化管控、优化 EPC 管理结构、整合属地资源配置等管理模式创新，以及电缆沟模预制工艺、排水管预制化施工和土壤回填压实工艺优化等施工工艺改进，有效解决了项目面临的管理难度大、工期紧、工程量大等问题。在成本控制、工期缩短和质量提升等方面取得了显著成效，为项目的顺利实施和长期稳定运行奠定了坚实的基础。

## 参考文献：

- [1] 乔顺. 变电站土建施工与电气工程协调管理实践分析 [J]. 电气技术与经济, 2024(10):296-298.
- [2] 张宏发. 110 kV 变电站工程施工管理分析 [J]. 大众标准化, 2024(05):89-91.
- [3] 张译天. 变电站建设项目质量管理研究: 以 A 变电站建设项目为例 [J]. 大陆桥视野, 2023(11):109-111.
- [4] 胡俊竹. 变电站土建施工与电气工程协调管理思考与实践 [J]. 农村电气化, 2023(10):8-11.
- [5] 汤忠敏. 变电站电气设备安装施工安全与过程管控分析 [J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(11):177-178, 184.

# 在建水利工程质量安全管理问题研究

王志浩

(淄博市河湖长制保障服务中心, 山东 淄博 255000)

**摘要** 水利工程往往呈现战线长、规模大的特点, 导致项目的质量安全管理复杂且难以面面俱到。在工程建设中, 通过全面落实监督、规范参建主体的质量行为, 可以为工程的顺利实施打下质量安全基础。本文通过对安全监督检查所发现的问题进行归类、分析、总结, 旨在提升监督检查效能, 促进在建工程质量安全管理的进一步提升, 为水利工程建设提质增效提供有益参考。

**关键词** 水利工程; 质量安全监督; 质量安全管理; 监督管理

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.029

## 0 引言

水利工程质量安全管理监督与管理是一项在制度体系层面对水利工程建设的强力保障, 如何将纸上的制度落实到实践中是对管理科学、管理智慧的考验, 也是对监督部门的履职能力的挑战。同时, 质量安全管理与监督也是一项结果导向的工作, 潜在风险必然伴随着工程进程不断趋于复杂而持续滋生, 所谓“防患于未然”, 为了避免全周期积累系统性风险将工程安全、质量导向不可逆的事故与缺陷, 需要对在建水利工程的质量安全管理开展持续性研究。

## 1 在建水利工程建设与监督管理特点

水利工程建设进程历来备受关注, 其发展态势总体平稳向好。然而, 水利工程普遍具有投资规模庞大<sup>[1]</sup>、建设周期冗长、参与主体多元、技术复杂性高、施工工序繁多等特点。水利工程质量安全管理监督管理模式呈现多样性, 以山东省淄博市为例, 该市设立了市与县区两级水利工程建设质量与安全监督机构。淄博市水利局下设淄博市水利工程建设质量与安全监督站, 负责市级重点水利工程的质量安全评价与评估工作, 协助重大水利工程质量安全事故调查处理, 并承担重大水利建设项目稽察技术支撑及职责范围内的安全生产管理工作。各区县均设立相应监督机构, 履行区级在建水利工程的日常监督检查职责<sup>[2]</sup>。

在日常监督实践中, 受限于人力与财力的双重不足, 管理机构多由单一业务科室统筹监管职能, 监督工作易受人为因素干扰, 制约监督效能独立性与有效性, 导致质量安全问题难以根除。区县水利工程建设管理机构多由水行政主管部门组建, 质量安全监督职

能常由负责建设管理的内设科室兼管。同时, 鉴于水利工程多为政府投资项目, 区县水利局规划建设科室通常主导项目实施与工程管理, 致使水行政主管部门同时承担建设主体与监管主体的双重职能。这种权责重叠现象严重制约了监督管理机制的健康运行。

## 2 在建水利工程建设存在的典型问题

### 2.1 施工监理单位制度不完善、资料不完整

在工程检查中, 常见的典型问题包括: 施工单位编制工程实施方案、监理单位编制监理实施细则时, 内容不完整; 施工、监理记录不全; 施工单位未按要求确定检验项目及数量, 进行原材料和半成品的自检; 材料进场、送审报验材料存在缺失。这些资料是确保工程质量与安全的关键过程材料, 也是反映施工过程的重要文件。管理不完善表明施工单位在施工管理上存在疏漏, 监理单位在质量安全管理上的监督不到位, 严重影响了施工质量的可追溯性。

### 2.2 质量安全管理体系不完善

根据相关规定, 施工单位要根据其所建设项目的实际情况建立安全监督管理体系, 设置专业人员岗位并配置相应人员, 明确岗位责任。但在实际检查中, 一些施工单位的质量安全监督管理体系不够完善, 无法合理划分具体工作人员的工作责任, 在实际工作中, 一些工作人员的工作职责重合<sup>[3]</sup>, 一些工作人员管理层级不明确, 存在只有牵头人、没有执行人的情况, 现场的具体施工缺乏中层技术人员把控, 现场施工管理凭借自身经验而非专业的知识管理, 对于具体的管理手段缺乏深入了解, 管理手段较为单一。在多种因素影响下, 施工单位安全监督管理体系出现“空

转”，工作存在形式化问题，施工质量和施工安全难以得到切实保证。

### 2.3 施工人员质量安全意识薄弱

检查实践中发现，受限于施工人员的安全意识不到、操作方法不够规范，甚至为了保证自身的舒适性，没有依照管理要求佩戴安全防护设备，现场用电等未严格按照要求采取保护措施，进而产生隐患的现象比比皆是<sup>[4]</sup>。为了保证工程能按期交付，施工方过分关注施工开展速度，在许多施工环节上也只是凭借自身工作经验完成，未按照设计图纸和施工技术标准施工，导致工程存在大量安全隐患，质量存在明显缺陷。由此，工程必须全面排查整改乃至进行返工，进而影响工程进度，对工程的稳定开展造成不利影响<sup>[5]</sup>。

### 2.4 施工作业安全设施不齐全

项目施工期间会存在各类安全风险，受到不同水文和地质等因素影响，施工过程也相对复杂，存在深基坑、高空作业、大体积工件吊装等高风险作业。如果没有完备的设备作为支持，便会产生各类安全方面的问题。如施工期间在危险作业区域并未设置警示标识、在基坑洞口位置未设置防护栏杆、脚手架护栏防护围栏设置不到位等<sup>[6]</sup>。上述缺乏安全设施的情况多数由于施工方特别是具体施工人员为了方便，对安全防护工作重视程度不足所致，这也是在施工现场较为普遍的现象。

## 3 监督管理人员存在的问题

工程建设质量与安全监督检查主要涵盖资料核查与现场检查两方面。监督人员能否发现技术性、深层次问题，能否及时识别主要质量问题、安全隐患，很大程度上取决于其专业经验和技术水平。受客观条件制约，部分监督人员的业务能力尚待提升，对建设工程质量安全相关法律法规及强制性标准条文掌握不足。这导致监督过程往往仅能发现表象问题，且过度依赖档案资料审查，仅从资料上找问题，易陷入“表面文章”。在日常质量安全检查中，监督人员难以精准识别问题实质，因而难以提出针对性整改措施。

监督管理难以实现实时覆盖，无法避免出现遗漏。以淄博市孝妇河生态修复项目为例，受限于项目点多线长，同期在建公园 26 处，同时全线 40 余公里河道沿线多处开展带状公园施工，日常巡查检查覆盖面有限，部分子项目在短时间内未被抽检，及至抽检时已完成关键工序，只能通过查阅资料进行回溯，工程项目的质量、安全生产无法得到有效保障。

## 4 质量安全管理的优化建议

### 4.1 在组织领导下，坚持党建和工程建设齐推进

由于水利工程的特殊性，政府投资建设参与比例极高，这就为推进党建与工程建设深度融合提供了有利条件。建设单位牵头、各参建单位参与，以党建为组织力，可以进一步凝聚党建合力，充分发挥项目建设中党组织的战斗堡垒和党员的先锋模范作用。项目成立临时党支部，各标段成立党小组，由建设单位代表、施工、监理单位的党员共同组成，参建单位由甲乙方转变为战斗集体，很多如质量安全提升、建设进度推进的行动不再是以命令的形式下达，而是在党小组、党支部形成共识决定，变“要我干”为“我要干”，有效消除了抵触心理，真正以党建引领融洽管理关系、增强建设效能。

### 4.2 提升工程整体管理水平

#### 4.2.1 提升工程管理人员的综合能力

一是管理人员带头学习、鼓劲动员，主动培养全体参建人员特别是一线实操人员的安全意识，使其认识到安全措施的重要性，主动遵守工作标准、规范自身行为，将安全管理从“空气”中落到实地，发挥实效以确保工程的安全开展。通过定期的安全培训和教育，让现场施工人员了解潜在的安全隐患和防范措施，提升整体安全素养。二是各参建单位应定期组织安全演练，使一线人员真正熟悉应对各类安全事故的处理方法，提高员工的应急处理能力。在演练中模拟真实的事故场景，如火灾、坍塌等，确保每位员工都能熟悉灭火器的使用、紧急撤离路线等设备和程序。三是强化现场安全标识，在施工现场设置醒目的安全标识和提示，提醒注意安全，增强人员的安全意识。这些标识包括警示牌、安全标语、危险区域标识等，色彩鲜明，字体清晰，确保在任何光线条件下都能被迅速识别。四是严格执行操作规程，各参建单位、现场安全员应要求施工人员严格遵守施工操作规程，通过定期检查和监督，确保每个环节都符合安全标准，杜绝违规操作，保障施工过程的顺利进行。

#### 4.2.2 加强施工过程质量管理

在施工过程中，针对关键工序如地基开挖、混凝土浇筑和结构安装等节点，实施严格的质量控制措施，包括材料验收、工艺参数监控和现场人员培训，确保从开工到竣工各阶段的施工质量得到全面保障。各参建单位应强化对施工现场的质量检查与监督，采用标准化检查表、实时视频监控和定期审核等手段，对发现的质量问题立即进行整改并建立详细记录，从而保

证施工质量符合行业规范和合同要求。此外，还需组织定期或不定期的施工现场质量巡查，由专业团队带队进行全面覆盖性检查，涵盖所有作业区域和设备，一旦发现问题迅速制定整改方案并追踪落实。对关键工程部位如承重结构、防水系统和机电安装等，进行定期的质量检测与评价，运用无损检测技术如超声波探伤和强度测试，确保工程质量不仅满足设计图纸和施工规范，严格达到国家标准，及时消除潜在风险并提升整体可靠性。

#### 4.2.3 完善责任追究制度

一是要明确各参建单位在质量安全管理中的具体职责和义务，避免因权责重叠或模糊导致监管失效。二是制定严格的问责条款，对因失职、渎职、违规操作引发质量安全事故的单位和个人实施严肃处理，包括经济处罚、资质降级、市场禁入等措施，形成有效震慑。三是建立激励机制，对在质量安全工作中表现突出的单位和个人给予表彰、奖励或优先评优资格，以激发责任意识和积极性。完善的制度想要发挥效力关键在于落实与执行，通过定期审查、第三方评估等方式，确保责任追究机制在实际工作中落到实处，同时，对于激励制度必须予以按时兑现，真正防止流于形式、制度空转。有效的震慑与良好的激励的落地，将进一步强化各方主体的责任担当，促进水利工程质量管理水平的整体提升。

### 4.3 强化工程质量监督能力

#### 4.3.1 加强监督队伍建设，提高人员业务能力

质量安全监督工作人员素质和水平的高低决定着工程建设是否能够有序进行。建议抽调基层工作人员积极参加省、市监督稽查活动，在实践中理解与掌握法律法规、技术标准，实现“以干代练”，丰富工作经验，增强对于工程隐患问题的嗅觉，能够敏锐地发现问题并开展深层次分析。

#### 4.3.2 强化检测能力，提升现场检查成效

针对监督过程中存在的“纸上作业”比重过高，重档案而轻现场的情况，应当积极争取经费，购置如回弹仪、测厚仪、水平仪等常规检测设备，对工程实体进行针对性检测，提升现场即时检测技术水平，实时取得检测结果，以仪器辅助肉眼观察，以数据支撑现场表观检查，以此提升找出实体质量和安全管理“病灶”的科学性、客观性、准确性，实现“真检实查”。针对技术力量的限制，通过外聘委托，充分利用第三方检测力量对关键部位、重要隐蔽工程深入检测，切实提升工程质量监督的深度、广度。

#### 4.3.3 探索科技助力，力争实现监督实时全覆盖

传统的监督检查形式趋于呈现为静态工作，即对已完成的工程提取某一节点的在检查时间的静态状态，对于工程持续性的施工缺乏有效的监督，极容易错失关键隐患点，同时，受限于水利工程战线长、施工环境受限等情况，传统检查难以实现有效的全覆盖。建议结合最新科技，借助无人机等设备实现空地全时段、全区域覆盖，对整体质量安全进行全局把控。同时建议探索易用的关键数据传感器，对于结构施工、主要设备安装等关键环节实现即时感知，变传统收集“切片”数据为全过程整体评估，更有效把控工程质量，建设放心工程。

## 5 结束语

随着雅鲁藏布江下游水电工程为代表的大型工程进入建设高潮，同时以幸福河湖为代表的新型水生态修复建设工作在各地方兴未艾，高标准、多元化的建设场景不断涌现，我国水利工程建设迈入新的阶段。这一过程中对于质量安全的高标准要求，对于质量安全管理体系、监督人员的素质要求随之步入新的层级。专业化、体系化、信息化既是质量安全监督工作的成效标准，也是对工作实效的必要支撑和保证。我国的水利法规制度体系、质量安全监督履办法始终在不断的迭代之中，这就要求质量安全工作的各类相关人员必须持续对自身业务知识进行不断更新，干中学、学中干，通过不断于一线实践，根据实际工作中出现的一些问题，有针对性地制定出相应的对策和建议，进一步完善水利设施的质量安全监督制度，促使制度真正落地发挥效用，切实保障质量、杜绝隐患，为水利事业的发展保驾护航。

## 参考文献：

- [1] 肖俊聪. 水工程质量与安全监督管理问题研究 [J]. 水上安全, 2024(20):148-150.
- [2] 曹健, 刘帅, 寇珊珊. 济宁市水利工程质量与安全监督实践与建议 [J]. 山东水利, 2022(09):38-39.
- [3] 王喆. 水工程质量安全管理存在的问题及建议 [J]. 农业科技与信息, 2021(02):105-106.
- [4] 魏洁. 水利水电工程施工安全管理与控制研究 [J]. 工程技术研究, 2021, 06(22):174-175.
- [5] 陈磊. 水库大坝工程施工进度控制及其管理 [J]. 中国科技投资, 2021(16):164, 166.
- [6] 王军. 水利工程施工安全浅析 [J]. 新农业, 2021(24): 82-83.

# 轨道交通地下车站连续沉井法施工技术研究

李 强

(中铁隧道集团一处有限公司, 重庆 401123)

**摘要** 本研究聚焦市域铁路地下车站国内首座连续沉井法施工技术, 以嘉兴市域铁路项目为实践案例, 系统分析了该技术在软土地层施工中的应用及其在施工周期缩短、安全性提升、成本节约、环境影响降低和防水性能增强等方面的优势。通过对比传统明挖法, 连续沉井法展现了其在提高施工效率、降低工程造价、减少环境干扰以及提升结构安全性能方面的创新价值, 为市域铁路地下车站的现代化施工提供了一种高效、环保、安全的替代方案, 对促进城市轨道交通建设技术的可持续发展具有实践意义。

**关键词** 市域铁路; 地下车站; 连续沉井法; 数字孪生监控技术; 一体化助沉系统技术

中图分类号: U231

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.030

## 0 引言

市域铁路作为城市公共交通的重要组成部分, 其建设和发展受到了广泛关注。地下车站作为市域铁路系统中的关键节点, 其施工技术的选择直接影响到工程的安全性、经济性以及对环境的影响。传统的明挖法施工技术虽然成熟, 但在深层软土地层中面临着诸多挑战, 如承压水突涌、基坑变形控制难度大等问题, 这些问题不仅增加了施工风险, 也提高了工程成本。因此, 探索更为安全、经济的施工技术成为行业发展的迫切需求。

## 1 工程概况

本工程嘉兴至枫南市域铁路土建施工 SG1 标段是沪苏嘉城际铁路的重要组成部分, 位于浙江省嘉兴市经开区、南湖区, 工程整体呈南北走向布置; 主要工程内容含: 嘉兴南站~曹庄站区间、曹庄站、曹庄站~嘉兴科技城站区间及嘉兴南站附属工程; 实施范围 DK0+515.74 ~ DK6+548, 标段全长 6 032.26 m。本标段含一站两区间, 曹庄站为地下两层矩形框架结构岛式车站, 是国内第一座连续沉井法施工的地下车站, 两区间均为盾构区间, 盾构机直径  $\Phi 8.8$  m, 于曹庄车站分别向两端始发。

### 1.1 车站总体施工方案

曹庄站全长 283.4 m, 标准段宽 25.5 m, 总建筑面积为 19 030  $m^2$ , 各沉井相邻纵向净距 2.5 m, 沉井采用跳仓施工, 最后贯通相邻沉井间空隙, 形成完整的车站主体。采用连续沉井法(7 节)施工, 是该工法在国内地下车站上的首次应用。沉井采用跳仓施工, 压入法下沉, 各沉井相邻纵向净距 2.5 m, 最后贯通相

邻沉井间空隙, 形成完整的车站主体。充分考虑软土地区狭长型地下工程的特点, 采用分段预制结构设计, 通过数字化管控指导分批压入下沉施工后装配连通形成整体车站。每节沉井分为 4 次制作、2 次下沉, 制作辅助盘扣支架及贝雷梁施工, 下沉采用液压抓斗排土及水力冲泥辅助下沉, 最后封底完成后实施沉井间连接段结构。具体见表 1。

### 1.2 沉井施工工艺

连续沉井法施工, 是一种软土富水地区地下车站的全新建设手段, 通过预先在地面预制结构, 再下沉至地下预定位置完成地下车站建造, 该施工工艺具有绿色低碳、造价节省、环境影响小、施工周期短等显著优势。

## 2 连续沉井施工地下车站优势

### 2.1 施工周期方面

传统明挖法施工地下车站, 工序多、流程复杂, 如包含基坑开挖、支护、结构施工等众多环节, 各环节相互制约, 易造成工期延误<sup>[1]</sup>。而连续沉井施工工序相对简洁, 各节沉井可依次流水作业, 能有效缩短工期。例如: 曹庄站采用连续沉井施工, 相比传统方法预计可节省一定时长, 使工程能更早投入使用, 减少建设周期对城市交通和发展的影响。

对于基坑而言, 一般每个车站只设置一到两个工作面, 总体施工顺序依次是围护结构、开挖支撑、结构回筑, 顺次进行流水作业。对于沉井而言, 一方面, 整个车站分为先序沉井、后序沉井两个批次, 分别同步进行, 车站越长, 因增设施工面节省的工期越多。另一方面, 沉井施工是通过预先在地面上修建永久结

表1 沉井制作与下沉节段划分

| 序号 | 沉井       | 制作             | 砼方量                  | 下沉              |
|----|----------|----------------|----------------------|-----------------|
| 1  | 1#、7# 沉井 | 第一次制作 5 585 mm | 957 m <sup>3</sup>   | 第一次下沉 10 000 mm |
| 2  |          | 第二次制作 7 625 mm | 1 125 m <sup>3</sup> |                 |
| 3  |          | 第三次制作 6 125 mm | 878 m <sup>3</sup>   |                 |
| 4  | 2#~6# 沉井 | 第四次制作 5 750 mm | 784 m <sup>3</sup>   | 第二次下沉 15 085 mm |
| 5  |          | 第一次制作 5 085 mm | 1 476 m <sup>3</sup> |                 |
| 6  |          | 第二次制作 5 225 mm | 753 m <sup>3</sup>   | 第一次下沉 7 100 mm  |
| 7  |          | 第三次制作 5 225 mm | 899 m <sup>3</sup>   | 第二次下沉 15 085 mm |
| 8  |          | 第四次制作 6 650 mm | 1 105 m <sup>3</sup> |                 |

构，然后原位下沉形成地下结构，即结构制作和土方开挖是同步进行的。沉井终沉到位时，除后浇楼板孔洞外的全部土建工程（通常占比80%以上）已全部完成。

鉴于上述原因，连续沉井法后可有效压缩土建施工工期，以曹庄站车站主体为例，连续沉井法可比传统明挖法节约工期约2.5个月（16%）。

## 2.2 施工安全方面

连续沉井法施工的地下车站具有较大的结构刚度和较低的重心，这使得结构在承载和抗倾覆方面表现出色。由于沉井能够深入土层，因此对地基承载力的要求相对较低，几乎适用于各种土质条件，尤其在软土地区具有明显优势。

1. 基坑工程施工步骤特点：（1）先开挖、后结构；（2）先降水，再挖土。
2. 沉井工程施工步骤特点：（1）先结构、后开挖；（2）水下开挖。

对于沉井工程而言，由于永临结合的特点，承受水土荷载的支护结构是地面上预先完成现场预制的永久结构，结构整体性好、抗弯刚度大，墙身变形可以忽略不计<sup>[2]</sup>。施工期间的地表沉降主要由于井壁对井周土体的向下剪切、拖拽引起，主要集中在沉井边，影响范围小于基坑。同时，土方开挖采用水下挖土形式，可以在源头上规避抽降承压水，既避免了基坑突涌的安全风险，也避免了抽降承压水引起的周边地表、建（构）筑物沉降。因此，连续沉井法形成的车站主体骨架整体稳定性好，整体安全性相对基坑工程有了显著提高，能够承受较大的荷载和变形。

## 2.3 施工造价方面

在软土富水地区的地下工程，普遍存在建材用量高，工程造价大的特点<sup>[3]</sup>。其原因和地质条件密不可分。一方面，场地内深厚软土层具有高含水量、高压缩性、

高灵敏度、低承载力的特点，为保证基坑工程安全以及周边环境影响可控，需要有较强抗侧弯刚度围护结构、密集设置的内支撑体系、大体量的地基加固等综合技术措施。另一方面，场地内的承压水层又普遍具有承压水头高、降水影响大的特点，为有效隔断承压水层，需要围护结构有较大的插入比，进一步加大了围护结构的工程费用。

## 2.4 施工环保减碳方面

连续沉井施工是在地面预制沉井结构，然后下沉至地下，相比明挖法大面积开挖基坑，其开挖范围小，对周边土体的扰动小，能减少因土体开挖引起的地面沉降、塌陷等问题，降低对周边建筑物、道路、地下管线等基础设施的影响<sup>[4]</sup>。例如：在城市中心区域，周边建筑物密集、地下管线复杂，连续沉井施工可避免大规模开挖对这些设施造成破坏，保护城市环境和居民生活的正常秩序。同时，施工过程中产生的噪声、扬尘等污染也相对较少，有利于城市环境保护和文明施工。

采用连续沉井法施工，可以大幅减少围护结构中临时结构使用和废弃，包括：

1. 长约1倍开挖深度地下连续墙嵌入段。
2. 密集设置的钢支撑以及相应的钢立柱、立柱桩。
3. 坑内加固、槽壁加固等大量水泥系地基加固。

以曹庄站为例，大幅减少了90%的水泥土加固和16%钢筋混凝土。因此，连续沉井法可以显著降低钢材和水泥这两项碳排放量最高的建材用量，对实现碳达峰、碳中和的国家战略具有重要意义。

## 2.5 施工防水性能方面

连续沉井结构自身整体性好，在下沉过程中，通过合理的施工工艺和止水措施，如采用触变泥浆套减阻时，可同时起到一定的止水和防渗漏作用<sup>[5]</sup>。与传统施工方法相比，其结构接缝少，减少了渗漏隐患点。

例如：在地下水位较高的地区，连续沉井结构能够更好地抵抗地下水压力，有效防止地下水渗入车站内部，保证车站结构的干燥和安全使用，提高了地下车站的防水可靠性，降低了后期运营中的维护成本和风险。

综上所述，采用连续沉井施工地下车站具有施工周期短、工程造价省、环境保护好和安全性能高等多方面优势。这些优势使得连续沉井法成为一种高效、环保、安全的地下车站施工方法。

### 3 连续沉井施工地下车站关键施工技术

#### 3.1 数字孪生监控技术

通过在沉井结构内预埋应力计、水平仪等传感元件，以每五分钟一次的监测频率将监测数据上传至数字孪生系统平台，平台通过对监测数据的汇集分析，同步映射至孪生模型中，实现沉井姿态实时监控与预测，达到灵活、准确指导沉井高质量下沉与纠偏目的。相较于传统沉井施工，可避免人工监测频率较低、监测数据无法及时指导施工、下沉及纠偏施工与监测数据脱离等不利现象。

#### 3.2 一体化助沉系统技术

助沉系统是采用一体化控制平台将钢牛腿、千斤顶、锚箱和泵站组合而成。矩形沉井制作完成后，在外侧均匀安装 15/20 套助沉系统，可为沉井提供最大 4.2 万千牛的下压力值，过程中采用加压法下沉并保留沉井内部土塞，通过对各套助沉系统加压力值同步或针对性调整实现灵活纠偏。相较于传统沉井施工，可达到周边环境影响小、下沉精度高、安全风险低等显著优势。

#### 3.3 不排水开挖取土技术

保留土塞并在承压水影响段采用不排水开挖，根据下沉系数计算，在压入法下沉的基础上，沉井刃脚下始终保持一定高度土塞，并在沉井进入承压水影响段，向井内注水抵消承压水影响。相较于传统沉井施工，可避免沉井突沉、偏沉并对充分保护周边环境。

由于水下取土的不可视，通过智能化取土设备联动，在智慧化调度室控制取土设备按照设计规划的路径在井孔内根据既定点位进行定点定量吸泥取土，通过水下探头对井底泥面高程进行自动测量，可视化查看井底泥面状态；设计了“取土深度十取土时间”双控机制，避免井下取土不均匀。

### 4 连续沉井施工地下车站施工优化措施

#### 4.1 垫层破除优化措施

根据《沉井与气压沉箱施工规范》计算：砂垫层刃脚厚度：1.5 m，隔墙砂垫层厚度：0.7 m，根据现

场施工情况，将沉井内部（含隔墙）底部垫层均破除，内部土方开挖约 2 m 深，初步形成锅底，数字化压沉系统加压约 600 t，达到上述工况后，7 号沉井仍无下沉迹象，1 号沉井大里程端头出现突沉，分析原因在于 1 号沉井地层不均匀。根据现场施工采取以下优化措施：第一，规范计算公式相较现场实操安全系数较大；第二，后续沉井砂垫层及混凝土垫层尺寸缩减；第三，沉井混凝土垫层与支架混凝土垫层不得相连；第四，4 台设备按照事先设定的顺序同时破除垫层，破除支架混凝土垫层时保留刃脚垫层（刃脚外 1.5 m）。

#### 4.2 止沉措施优化

连续沉井要实现高精度下沉，须确保相邻井不能同时下沉，并对各个下沉阶段的下沉的四角高差控制进行了规定，第一次下沉目标深度 1 m 范围内： $\leq 50 \text{ mm}$ ；自第二次下沉开始至终沉深度以上 2 m： $\leq 300 \text{ mm}$ ；终沉深度 2 m 范围内： $\leq 40 \text{ mm}$ ；并在下沉 2 m 范围内进行工字钢止沉辅助装置。

### 5 结束语

在连续沉井下沉施工中，传统方法是采用挖掘机进行第一次下沉取土，第二次进行水下取土下沉时采取抓斗取土，监测采用人工监测，人工监测频率不能实时反映沉井下沉姿态，极易出现取土不均匀进而导致沉井下沉偏斜，甚至是突沉等问题。本工程沉井下沉阶段应用了沉井数字孪生系统，能够实时掌握沉井下沉的姿态，依据沉井数字孪生系统进行智能化决策分析，及时发布各项指令，控制沉井下沉关键参数，同时采用止沉措施，实现了沉井高精度下沉。

### 参考文献：

- [1] 郭得福, 张景丽, 房玉中, 等. 嘉兴市域铁路地下车站连续沉井法施工工艺实践与创新 [J]. 隧道建设 (中英文), 2025, 45(08):1577-1589.
- [2] 张中杰, 吕培林, 俞剑, 等. 连续沉井法建设轨道交通地下车站的关键技术研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2024, 44(03):554-563.
- [3] 韩宝明, 习喆, 孙亚洁, 等. 2022 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述 [J]. 都市快轨交通, 2023, 36(01):1-8.
- [4] 同 [2].
- [5] 罗云峰. 软土地区压沉法沉井关键技术研究 [J]. 工程质量, 2021, 39(12):9-14.

# 高速公路收费站中的污水处理工艺与技术应用

向 婷，李 楠

(汉中市南郑区城市管理局，陕西 汉中 723199)

**摘要** 高速公路收费站污水具有水量波动大、含油及特殊悬浮物的特点。本文构建“预处理—生物处理—深度处理—资源化”工艺体系，预处理用细格栅与三级隔油控污，生物处理以改良 A<sub>2</sub>/O-MBR 和生物接触氧化降解有机物，深度处理借膜分离与芬顿氧化提标，资源化实现雨水—污水回用。结合水质检验、运行效能、经济成本评估、环境影响评价四类分析方法，验证工艺可使出水达标，为收费站污水治理提供技术参考。

**关键词** 高速公路收费站；污水处理；预处理技术；生物处理技术；深度处理技术

中图分类号：U417；X7

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.031

## 0 引言

在高速公路路网中，收费站作为分散服务节点，日均产生 5~50 m<sup>3</sup> 污水，成分复杂且波动大。其中既包含工作人员生活产生的洗漱、餐饮废水，也有车辆冲洗、地面清洁带来的含油污水，远超自然水体自净能力。多数收费站地处城郊或偏远路段，市政污水管网覆盖不足，若直接排放，污水中的油脂会在水体表面形成油膜，隔绝空气与水的交换，导致水生生物死亡；同时，污染物渗入土壤会堵塞孔隙，破坏土壤结构，进而威胁周边水源地安全与农作物生长，且处理后水质需严格满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准及地方特殊限值要求。因此，研究适配的小型化、智能化处理工艺与技术，既能精准应对其污水特性，实现稳定达标排放，又能通过水资源循环利用降低能耗，兼具环保合规、资源循环与低成本运维价值，对推动交通基础设施绿色转型、降低沿线区域生态环境风险具有重大的现实意义。

## 1 高速公路收费站中污水处理的重要性

高速公路收费站作为高速公路路网的分散式服务节点，其污水具有“水量随车流量剧烈波动、水质成分复杂”的典型特征，且多数收费站地处城郊或偏远区域，市政污水管网覆盖不足，缺乏针对性处理措施，污水直排易引发多重环境风险，直接威胁居民饮用水安全与农产品质量。从合规性角度看，根据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 及地方专项规范，收费站污水需至少达到一级 A 标准排放，部分敏感区域需提升至地表 IV 类水质，合规处理是交通基础设施运营的基本前提。收费站平日里有广场冲洗、绿化灌溉等稳定的用水需求，把处理后的污水转

换为中水进行回用，能顶替 30%~70% 的市政用水，在缺水地带或水资源紧缺路段，可有效减少对市政供水的依赖，实现“污水减量化—资源化”闭合循环管理，同时符合交通领域低碳环保及可持续发展的行业走向，具备环境、合规以及资源的三重核心价值<sup>[1]</sup>。

## 2 高速公路收费站中的污水处理工艺与技术

### 2.1 预处理技术

高速公路收费站预处理技术以“拦截特殊污染物、均衡水质水量、降低后续工艺负荷”为核心目标，针对污水中轮胎碎屑、塑料微粒等固体杂质及石油类物质设计专项处理单元。采用细格栅进行物理拦截，格栅孔径严格控制在 1~3 mm，通过链条或耙齿式机械传动实现自动清渣，可有效去除污水中粒径大于格栅间隙的悬浮物，避免后续设备堵塞，清渣频率可根据水质浊度动态调整。经过格栅处理的污水进入三级隔油装置，该装置创新整合旋流分离与斜板沉淀技术：先利用油与水的密度差异（油密度约 0.85 g/cm<sup>3</sup>，水约 1 g/cm<sup>3</sup>），让污水在旋流腔体内产生离心力，使油滴向中心聚集实现初步分离；再通过斜板组件的浅池效应，大幅增长油滴停留时间，强化微小油粒的碰撞聚合，将石油类物质去除率提升至 80% 以上。污水随后流入调节池，调节池容积需结合收费站日均污水量及流量波动特征精准设计，通常按 4~8 小时水力停留时间计算，规模较小的收费站可适当缩短至 3 小时。池内均匀布设 2~3 台潜水搅拌器，避免污染物沉积，实现水质均匀混合；同时搭配液位传感器与自动阀门组成的控制系统，实时调节出水流量，平稳应对节假日车流量高峰导致的瞬时水量冲击，保障后续处理工艺稳定运行。

## 2.2 生物处理技术

高速公路收费站生物处理技术聚焦“高效降解有机物、同步脱氮除磷、适配分散运维场景”，结合污水低碳氮比、可生化性中等的特点，形成两类核心工艺体系。改良 A2/O-MBR 组合工艺在传统厌氧—缺氧—好氧工艺的底子上优化结构，在厌氧段里填充悬浮的填料，增大微生物可附着的面积，加大对复杂有机物的水解酸化力度，提升污水的可生化水平；缺氧段采用间歇曝气的方式，经过控制使溶解氧浓度达到  $0.2 \sim 0.5 \text{ mg/L}$ ，引导微生物开展短程反硝化进程，减少碳源的消耗，进而提高总氮去除效率；好氧段完成后与 PVDF 中空纤维膜组件相衔接，膜的实际孔径为  $0.1 \mu\text{m}$ ，借助膜的筛分功能达成泥水高效分离，杜绝活性污泥流失，系统运行过程中膜通量维持在  $15 \sim 20 \text{ LMH}$ ，经该工艺处理后污水 COD 可降至  $50 \text{ mg/L}$  以下，氨氮控制在  $5 \text{ mg/L}$  以内。生物接触氧化法则以“低运维强度、高抗冲击能力”为优势，反应器内填充组合软填料，填料比表面积超过  $2000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ，使反应器内微生物浓度达到活性污泥法的 3 倍，通过曝气系统提供充足氧气，微生物在填料表面形成生物膜，高效降解污水中的有机物，减少设备维护工作量，对水量波动适应性强，在收费站污水处理中 BOD 去除率稳定保持在 90% 以上，满足分散式处理场景的运维需求<sup>[2]</sup>。

## 2.3 深度处理技术

高速公路收费站深度处理技术以“水质净化升级、适配回用需求、降低环境风险”为核心，针对生物处理后污水中残留的难降解有机物、微量污染物及悬浮物，构建多元化处理体系。MBR 膜分离技术作为核心深度处理单元，在生物处理段膜组件基础上进一步优化运行参数，通过精准控制膜清洗周期与方式，维持膜通量稳定，确保出水浊度低于  $0.5 \text{ NTU}$ ，水中悬浮物与微生物几乎完全去除，处理后水质可直接满足洗车、绿化等回用场景要求，且该技术采用模块化设计，占地面积较传统深度处理工艺减少 40%，适用于收费站有限的场地条件。针对回用标准要求更高、含难降解污染物的污水，采用砂滤及活性炭吸附组合工艺作为补充方案，砂滤单元采用石英砂这种滤料，凭借截留与吸附功能去除水中细小的悬浮颗粒，把出水浊度降到  $1 \text{ NTU}$  以下；活性炭吸附单元凭借活性炭多孔结构，吸附污水里残余的有机物、颜色及异味物质，进一步增进水质的感官指标水平，该组合工艺在雨水回收处理当中应用效果极为显著，可让回收的雨水达到景观用水的既定标准。针对污水中少量表面活性剂、石油类等难

降解污染物，芬顿氧化技术通过在酸性条件下投加硫酸亚铁与过氧化氢，生成具有强氧化性的羟基自由基，实现对难降解有机物的氧化分解；改良型流体化床芬顿工艺通过载体颗粒的流化作用，强化反应传质效率，减少 70% 的污泥产量，降低了固废处置成本。

## 2.4 资源化技术

高速公路收费站污水处理资源化技术以“适配场景用水需求、降低市政供水依赖”为核心，聚焦水资源循环利用。雨水—污水双源回收利用技术把雨水收集与污水深度处理单元整合起来，把收费站顶棚、广场硬化路面当作雨水汇水区域，通过导流槽与沉淀池初步截下雨水中的泥沙、落叶，然后引入砂滤—活性炭吸附组合系统把悬浮物与异味去除，与储水设施相接通。该技术可将雨水与达标处理污水统筹储存，优先用于广场地面冲洗、收费亭外保洁，水质需满足浊度低于  $1 \text{ NTU}$ 、COD 低于  $30 \text{ mg/L}$ ，实际应用中可实现年节水量 1700 吨以上，投资回收期控制在 6~8 个月。中水回用系统则以深度处理后污水为水源，依据《城市污水再生利用 城市杂用水水质》标准优化处理流程，经 MBR 膜处理与紫外消毒后，进一步通过离子交换树脂去除钙镁离子，使出水硬度低于  $150 \text{ mg/L}$ ，适配绿化灌溉、卫生间冲厕及设备冷却用水场景。系统通过智能分水阀组实现“回用—排放”自动切换，回用率稳定维持在 70% 以上，减少污水排放量，降低周边水体环境压力。部分收费站还探索污泥资源化路径，将污水处理产生的脱水污泥与园林枯枝落叶混合堆肥，实现“污水—污泥—绿化”闭环循环，进一步提升资源利用效率<sup>[3]</sup>。

## 3 应用效果分析方法

### 3.1 水质检验方法

水质检验方法围绕“全流程管控、适配场景需求”构建，针对收费站污水日均水量波动超 10 倍、含轮胎碎屑与石油类等特殊污染物的特点，分预处理、生物处理、深度处理三阶段，精准设定差异化检测指标与技术路径，避免单一检测方法难以覆盖复杂水质的问题。预处理阶段重点检测悬浮物与石油类，二者直接影响后续工艺稳定性。悬浮物采用重量法，取  $100 \text{ mL}$  水样通过  $0.45 \mu\text{m}$  微孔滤膜过滤，经  $103 \sim 105 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干至恒重后称重，计算去除率以确保格栅拦截效果；为应对车流高峰水质突变，两类指标每日常规检测 1 次，节假日或车流量超平日 1.5 倍时，检测频次增至 2 次，数据实时同步至中控系统。生物处理阶段聚焦 COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、总氮、总磷，COD 用重铬酸钾法测定氧化

降解量，氨氮用纳氏试剂分光光度法显色检测，每2日开展1次实验室分析，查验有机物降解与脱氮除磷的效果，深度处理及出水的阶段，采用浊度仪在现场对浊度进行检测，用总有机碳分析仪测定溶解性有机物，粪大肠菌群借助多管发酵法培养计数，每周实施1次全指标检测，保证出水符合排放或者可回用的标准。增加冲击负荷检验，模拟节假日3倍水量冲击，连续24小时监测COD与悬浮物波动，若指标变异系数<15%，判定系统抗冲击能力达标，为水质稳定提供双重保障。

### 3.2 运行效能分析方法

运行效能分析方法以“稳定性、适配性、高效性”为核心，适配收费站无人值守与分散式运维场景。负荷适应性分析通过采集年度水量数据，划分低、中、高三个区间，对比不同负荷下出水达标率与设备运行状态，若各区间达标率均≥95%且设备无过载停机，说明负荷适配性合格。设备效率分析针对核心组件选定关键指标，算出膜组件运行1年的通量衰减率，要是衰减率<20%，膜寿命就算达标了；曝气系统开展氧利用率检测工作，用溶氧仪对比进气量和水中DO的实际增量，只要利用率>25%，便是高效运行；自动化设备统计PLC故障响应时间与远程操控成功率，延迟<5分钟、成功率>98%符合运维需求。工艺参数优化采用单因子变量法，如调整缺氧段DO至0.2~0.5 mg/L监测总氮去除率，改变活性炭吸附层流速至5~10 m/h分析DOC去除效果，以此确定最优运行参数，提升系统整体效能<sup>[4]</sup>。

### 3.3 经济成本分析方法

经济成本分析方法覆盖“全生命周期”，结合收费站规模差异量化成本与收益。初始投资成本按设备、土建、安装分类核算，小型收费站（日处理5~10 m<sup>3</sup>）模块化系统约15~20万元，较传统土建工艺节省30%；中型站（10~50 m<sup>3</sup>）含雨水回收系统需额外投入8~12万元。运行成本拆解为能耗、药剂、运维三类，能耗按风机、泵等设备月耗电量结合电价计算，小型系统约0.8~1.2元/m<sup>3</sup>；药剂成本根据PAC（50~100 mg/L）与次氯酸钠（0.5~1 mg/L）投加量及市场价核算，约0.3~0.5元/m<sup>3</sup>；运维费按季度巡检与年度膜清洗计算，小型站年支出1~2万元。收益计算含节水与补贴，回用率70%的中型站年节水收益超5 000元，部分地区每吨达标水可获1~2元补贴。投资回收期按“初始投资÷（年节水收益+年排污费减免）”计算，小型站常规场景约13年，配套光伏发电可缩短至10年以内。开展敏感性分析，模拟电价上涨10%或膜

寿命延长1年对成本的影响，可为项目经济性优化提供依据。

### 3.4 环境影响分析方法

环境影响分析方法通过“量化减排、评估循环、验证周边”三维度，凸显收费站污水处理的生态价值。污染物减排量按“进水浓度—出水浓度—处理水量”计算，日处理10 m<sup>3</sup>的站点，COD年减排量可达900 kg以上，石油类超300 kg，进一步换算为对周边水体的污染负荷削减率。资源循环效益聚焦水资源与能源，中水回用率70%的中型站年节水超5 000 m<sup>3</sup>，配套20 kW顶棚光伏年发电2.5万度，减少碳排放约15吨；污泥处理采用脱水后与枯枝落叶堆肥，含水率降至80%以下可减少70%外运量，实现固废资源化。周边环境验证通过现场监测与公众调研，检测土壤石油类含量，运行后若从50 mg/kg降至10 mg/kg说明土壤污染控制有效；调研周边居民对水体清澈度、异味改善的满意度，>90%则表明环境感知效果良好，全面衡量处理系统对周边生态的积极影响<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

本文系统梳理了收费站污水处理工艺与分析方法，可精准破解其“分散运维难、水量波动大、含油污染物难降解”的治理难点。整套工艺形成全链条解决方案，预处理通过细格栅与隔油装置严控污染物负荷，深度处理采用膜过滤或高级氧化技术提升出水水质，资源化环节将达标水回收用于地面冲洗、绿化灌溉，全方位保障应用效果。未来可进一步优化智能管控系统，结合AI算法实时分析进水水质、水量数据，自动调整曝气强度、药剂投加量等关键参数；同时强化光伏供电、低碳药剂等低碳技术集成，推动收费站污水治理向更高效、低耗、绿色的方向发展，为交通领域环保升级提供可参考的技术范式。

## 参考文献：

- [1] 郑倩.复合酶生物促进剂-组合型生物包处理高速公路收费站污水[J].福建交通科技,2024(11):161-164.
- [2] 梁耀恒.高速公路收费站给水排水设计研究[J].西部交通科技,2016(05):36-37,93.
- [3] 张程皓,郝艳.西北地区高速公路收费站生活污水水质特征调查研究[J].清洗世界,2024,40(07):55-57.
- [4] 赵越.山西省高速公路服务区污水处理工艺适用性研究[J].山西交通科技,2023(06):100-102,120.
- [5] 缪栋栋.浅析小型污水处理设备在甘肃高速公路工程中的应用现状[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(10):12-15.

# 合同能源管理在中央空调 节能改造中的应用分析

张立钢

(盛世兆业智能科技有限公司, 山东 济南 250000)

**摘要** 在政策与运营的双压下, 中央空调节能改造已成为医院高质量发展的关键举措。为探究 EMC 模式在解决医院老旧中央空调高能耗与高维护成本中的具体作用与实施路径, 本文以合同能源管理 (EMC) 模式在医院老旧中央空调节能改造中的应用为核心, 探讨由于设备老化导致的医院中央空调系统的高能耗、维护成本高等突出问题, 论述 EMC 模式实施路径和管理流程。实践证明, 该模式不但可以显著提高设备运行的可靠性、减少能源消耗和运维成本, 而且可以促进机房的标准化、智能化管理, 有助于医院实现绿色转型高质量发展。

**关键词** 合同能源管理; 中央空调; 节能改造; 过程管理

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.032

## 0 引言

在国家节能减排政策和医院运营压力不断加大的背景下, 中央空调节能改造是医院实现高质量发展至关重要的一环。合同能源管理凭借其“业主零投资、节能效益共享”的独特性质, 为医院对老旧设施进行改造提供了全新的解决方案。本文对 EMC 机制应用于医疗领域的实践进行系统分析, 并对其效果和经验进行总结, 以期为类似工程提供借鉴。

## 1 合同能源管理机制概述

合同能源管理 (Contract Energy Management, CEM) 机制, 是以合同形式把节能项目和能源服务供应商利益密切捆绑在一起的能源管理模式。在这种机制中, 公司或者政府机构与第三方能源服务公司订立合同, 后者承担向它们提供能源节约方案和设备安装的责任、运营和维护服务以及以节省能源成本支付合同规定服务费用。合同能源管理机制以“节能量”和“节能收益”相联系为核心, 能源服务供应商收益的高低直接决定他们所执行的节能项目, 是否能有效地降低能源消耗并取得预期节能效果<sup>[1]</sup>。该机制既有利于缓解企业或组织对能源管理的前期投入压力, 又有利于节能技术的普遍应用与革新, 还有利于提高能源效率。实际运行中合同能源管理以准确的能效审计、节能改造、智能控制、持续监测为手段, 系统性地优化和节约用能<sup>[2]</sup>。

## 2 医院老旧中央空调系统现存问题分析

### 2.1 设备严重老化, 运行可靠性低

随着时间的推移, 空调系统中的关键组件, 例如: 压缩机、冷凝器、蒸发器、管道系统, 都经历各种程度的磨损和老化现象。这些老化问题在造成设备性能恶化的同时也使系统整体运行效率显著下降。老旧设备普遍存在温控精度低、运转噪声高和、制冷制热效果不均匀等诸多问题, 极大地影响着医院内部舒适环境和医疗设施正常运行。另外, 老化设备高负荷或者极端天气等情况下较易出现故障, 造成空调系统经常停运或者工作不平稳, 为医院日常运行造成不必要的影响。特别是在医院这类对于温湿度有严格要求的环境下, 空调系统出现故障会直接影响病房、手术室等重点区域空气质量及温控标准, 进而危害病人身体健康和治疗效果<sup>[3]</sup>。

### 2.2 环保问题增多, 环境影响突出

陈旧的中央空调设备经过长时间运行后, 不但能源利用效率不高, 同时其所产生的废气、噪声、热量对环境造成的污染也越来越严重。一是设备老化造成制冷制热效率降低, 空调系统运行时耗能明显增加, 引起二氧化碳和其他温室气体排放上升, 直接激化医院碳足迹问题, 有悖于目前国家提倡的绿色高发展目标。二是一些医院空调系统采用较老旧制冷剂, 在工作时排放有害物质, 对臭氧层造成了破坏, 进一步加重环境污染。另外, 老旧空调系统运行时发出的噪声往往超出标准, 这类噪声不但会干扰病人体息, 还会

给医院工作人员工作环境带来不利影响，同时也会影  
响到医院周边住户的正常日常生活<sup>[4]</sup>。

### 2.3 维修成本高企，经济负担沉重

医院老旧中央空调系统存在着维修成本高，造成医  
院经济负担重等严重问题。空调系统设备在不断老  
化的过程中，很多关键部件的寿命已经逼近极限，使其  
故障发生频率大大增加。传统空调系统一般都要对零  
部件进行大量检修与更换，特别是当设备老化严重时，  
检修成本不但高、且周期较长、工作量较大，大大增加医  
院运营成本。如压缩机和冷凝器这类核心设备更换成  
本通常都比较高，与此同时这些设备出现故障也会使  
整个系统停止工作，从而进一步影响到医院正常工作。  
同时维护人员还需经常现场检查、排除故障、更换零部  
件，不仅增加人工费用而且占用大量的时间与资源<sup>[5]</sup>。

## 3 合同能源管理模式在改造中的应用路径

### 3.1 实施步骤与流程设计

在对医院陈旧的中央空调系统进行改造的过程中，采  
用合同能源管理（CEM）模式为节约能源和减少消耗提  
供一条系统化的途径。第一，推行该模型是开展能  
源审计，对现有空调系统能源使用情况、运行效率、  
主要问题等方面进行细致评价。通过综合分析设备性  
能、能耗数据、维修记录等信息，能够为后续节能改造  
工作制定出科学方案，为合同能源服务公司进行节能  
改造提供所需决策支持<sup>[6]</sup>。第二，根据审计结果，医  
院和能源服务公司签订合同，确定双方的职责和权利，  
商定节能目标、改造内容、项目投资、合同期、节能  
效益分配情况等主要条款。合同订立之后，能源服务  
公司会依据合同内容进行具体改造，主要是更新设备、  
引进节能技术、优化运行。在这一过程中，需根据医院  
的实际需要选择适当的节能技术，例如：智能控制系统、  
变频驱动系统、能效监测系统来保证改造方案可行和  
有效。第三，改造期间，能源服务公司既要承担设备  
的安装调试工作，又要不断地开展运营监测及维护工  
作，以保证系统运行期间能继续处于良好能效状态。

### 3.2 具体实践与过程管理

第一，医院要和能源服务公司有明确的沟通机制，  
以保证各种改造活动能顺利进行。在工程实施前期，  
双方需要联合制定周密的实施方案，确定改造时间点、  
任务分配、相关职责。医院要有一支专门的项目管理  
团队来协调各方面的工作以保证项目按预定的目标进  
行。第二，为确保改造效果，医院需要与能源服务公  
司密切配合，定期举行工作进度会，实时考核并反馈  
改造进度、能效目标实现程度及资金运用。在实践中，

过程管理还有一个环节就是详细地控制设备选型和技术  
方案。医院需要针对其运营特点和节能需求以及能  
源服务公司提供的专业意见，对节能设备和工艺进行  
合理的选择。例如：医院可引进智能化控制系统来对  
空调系统能耗进行实时监测，根据实际需求对温度和  
湿度进行自动调节、实现节能。第三，医院在改造结  
束后需要对新系统运行效果做一个综合跟踪和评价。  
这一阶段的管理工作，主要是不断监控设备的运行状  
况、能效指标、用户反馈等。医院可通过导入数据采  
集和分析平台实时采集系统运行关键参数并对照预期  
目标保证系统能效提升符合合同规定标准<sup>[7]</sup>。如果发  
生能效不达标或者设备故障等问题，能源服务公司要  
及时干预，对系统设置进行调整和优化，以保证工程  
最终取得节能效果。

## 4 医院老旧中央空调节能改造成效分析

### 4.1 保障设备安全稳定运行

医院中央空调系统的节能改造过程中，确保设备  
安全平稳运行是分析改造成效的核心目标。第一，节  
能改造一般都是随着设备更新换代、技术引进而进行，  
这样既可以有效地提高空调系统能效又可以增强设备  
安全。通过先进智能控制系统及自动监测设备的引进，  
可以对空调系统运行状况进行实时监测，并及时发现  
可能存在故障隐患。如智能控制系统能够根据负荷变化  
对设备的运行状态进行自动调整，避免设备长期处  
于过载或者不稳定的情况，进而降低由于使用过多或者  
操作不当而对设备造成损坏的风险。同时对系统实  
时数据监测有助于医院管理人员快速辨识温度、湿度、  
压力等关键参数是否出现异常波动并提前做出调整，  
保证空调系统一直保持在最佳的运行状态下，避免系  
统出现故障或者安全事故。第二，节能改造中所使用  
的高效节能设备通常有较严格的质量标准和技术要求，  
这类设备设计时充分考虑到安全性。以变频空调系统  
为例，变频空调系统可根据需要对压缩机转速进行调  
整，既达到节能目的又减轻设备工作时机械负荷和延长  
使用寿命。高效热交换器及制冷剂系统还可以有效降  
低设备故障发生概率，增强系统稳定性。另外，医  
院还可以通过和能源服务公司订立长期维保合同来保  
证节能设备定期进行保养和大修。专业技术支持和定  
期维护措施是设备持续安全运行的有力保证，规避由  
于设备老化或者操作不当而导致故障发生的风险。

### 4.2 实现显著节能降耗效果

医院中央空调系统节能改造中节能降耗效果显著，  
是评价改造效果的主要依据。医院空调系统能效通过  
引进先进节能技术与装备，效果得到明显提高。第一，

利用变频驱动技术与智能控制系统相结合，可以根据空调负荷变化来动态地调整设备的工作状态，减少能源的无谓浪费。变频空调系统是通过调节压缩机转速以适应负荷的变化，与传统的定频系统相比较，其可以减少负荷时功率消耗和避免装置的过度工作。所以，该技术的运用可以有效地减少医院空调系统能耗，特别是负荷波动大时节能效果特别明显。第二，空调系统中管道系统及热交换设备优化设计对节能改造至关重要。采用高效能热交换器、提高冷凝器和蒸发器热交换效率等措施可显著提高能量转化率并降低能源浪费。例如：该改造系统可以通过精准调节水流、空气流量来提高系统热效率、降低能源损失等措施来进一步降低能耗。同时，先进空气质量控制技术的引进不仅可以增强室内空气舒适度，而且可以在满足人们使用要求的前提下降低系统无谓的操作。

#### 4.3 助力标准化机房建设

在医院中央空调系统节能改造工作中，随着信息化、智能化技术的不断提高，医院越来越依赖于机房，特别是针对空调系统这类关键设备进行监控及管理，机房建设质量的好坏，直接关系着系统运行的稳定性和安全性。标准化机房建设需要从设计、施工、设备选型、运营管理上实现规范化与统一化才能保证空调系统运行时得到有效支撑与保障。第一，标准化机房建设是通过空间统一布局以及电气、暖通、消防等各方面设施集成设计，来实现空调系统等关键设备运行环境的。如机房内部温湿度控制、空气流通、设备防护这些基础设施都能够保证空调系统能够在一个平稳的环境下有效地工作，进而提升其节能效果以及设备寿命。第二，建设标准化机房有利于促进设备管理自动化。通过智能化监控系统的应用，机房可以对空调系统以及其他有关设备进行实时运行数据采集，其中包括温度、湿度、能耗等重要参数。管理人员可通过集中控制平台实现远程监控和调控，发现系统异常情况并做出调整。该自动化管理在降低人工干预风险的同时，还能提高设备运行效率，具有较好的节能效果。标准化机房是对医院空调系统进行系统化管理的支撑，可以很好地对各种设备进行协调与集成，避免由于设备超负荷或者操作不规范造成能耗浪费。

#### 4.4 推进设备智能化管理

医院中央空调系统节能改造中，促进设备智能化管理，是提高系统运行效率、降低能耗和确保设备安全至关重要的环节。在科学技术不断进步的今天，智能化的运用给设备管理带来新的解决思路。在此过程中智能化管理系统将传感器、数据采集装置、云计算

平台整合到一起，从而达到实时监测并动态调整设备工作情况的目的。具体地说，该智能化管理系统可以对空调系统温度、湿度、气流量、能耗等关键参数进行实时监控，并通过数据分析及预测算法进行预测，对管理人员提出准确的操作建议，保证空调系统一直处于最佳能效区间，以免由于操作过多或者不合适造成能耗浪费。智能化管理系统的使用并不局限于空调设备自身的监视和控制，而是涉及空调系统整体的优化和配合。引入智能控制器后，该系统能够根据医院内不同地区负荷需求对设备运转状态进行自动调整。如在晚上或非高峰时段系统能自动减小空调运行功率或在部分区域关闭空调设备等，从而降低不必要的能耗。另外，智能化管理可以通过设备故障预测和预警系统对设备可能出现的故障风险进行预先识别、及时报警，以免设备出现突发性故障从而影响医院正常工作。该预测性维护可显著提高设备运行稳定性、减少维修成本、延长使用寿命。

#### 5 结束语

合同能源管理在医院中央空调节能改造中的应用显示出显著优越性，可以有效地解决设备老化和能效低下等难题，实现经济和环境效益共赢。通过引进变频驱动、智能控制、能效监测、预测性维护等多项先进技术，该模式对系统运行进行精准调控和动态优化，显著提高了能源利用效率和设备的运行可靠性。同时，数据驱动能源管理及远程运维平台进一步促进空调系统智能化、标准化、精细化管理。在未来的发展中，要进一步大力推广该模式，加强智能化、标准化建设，促进医院绿色、高效、可持续发展。

#### 参考文献：

- [1] 梁绍轩,陈赞保.喷淋降温技术在医院老旧中央空调节能改造中的应用实践[J].节能,2023,42(04):32-34.
- [2] 孙国忠,李娜,王敏.中央空调系统节能改造技术分析[J].建筑经济,2024,45(S2):337-340.
- [3] 王杰,孙清典,孙寿晨,等.基于电能计量的中央空调冷量分摊方法[J].自动化与仪表,2024,39(03):21-25.
- [4] 周伟军.办公建筑变流量中央空调冷冻水系统的优化控制技术[J].科学技术创新,2023(23):137-140.
- [5] 宋清弟.“双碳”目标下中央空调节能改造与设计[J].能源与节能,2024(02):84-92.
- [6] 张昊冲.医院中央空调系统节能改造分析:以苏州大学附属第二医院节能减排项目为例[J].河南建材,2023(03):77-79.
- [7] 廖岛生.医院中央空调节能改造分析[J].广东建材,2021,37(02):29-31.

# 安全风险辨识管理在输变电工程 施工中的应用研究

黄伟健

(中国能源建设集团广东火电工程有限公司, 广东 广州 510735)

**摘要** 本文以海南500千伏输变电工程为核心研究对象, 对安全风险辨识管理在工程全生命周期内的具体实践展开了深入且系统的探索, 建立了一个“动态辨识—量化评估—分级管控”三位一体的管理体系。详细梳理并揭示了针对工程中高空作业、设备安装以及可能遭遇的自然灾害等关键风险点的辨识方法, 还基于实际情况提出了相应的防控策略。研究成果表明, “动态辨识—量化评估—分级管控”三位一体的管理体系在降低事故发生概率方面成效显著, 能够极大地提升工程安全管理的效率与质量, 同时为超高压输变电工程提供了一套可借鉴的风险管控模式。

**关键词** 输变电工程; 安全风险辨识; 动态管控体系; 分级管控; 数字化管控

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.033

## 0 引言

海南500千伏主网架工程被视为我国首个覆盖全省的数字电网示范。57亿元投资把椰城、昌化、三亚三座变电站与838公里输电线路连为一体, 规模罕见。项目既要吸纳核电与海上风电, 又要为自贸港提供稳定电源, 其施工安全直接关联区域能源安全与新型电力系统进度。线路横跨14个市县, 台风、复杂地质和频繁交叉作业叠加, 使风险识别成为决定进度的核心环节。本文以LEC法和事故树分析为工具, 建立超高压电网施工风险评估框架, 并给出基于数字孪生的动态管控方案, 为后续同类工程提供可复制的理论与操作路径。

## 1 工程概况

### 1.1 项目概况

海南昌江500千伏昌化(西部)输变电工程是海南500千伏主干网的关键一环, 承担着将核电与海上风电安全送出并消纳的重任。项目如期投运, 既能适应岛内能源来源日趋多元的节奏, 也为“一区一港”“三区一中心”等海南重大战略落地提供电力支撑。新建500千伏昌化(西部)变电站一座, 新建昌化(西部)一福山单回线路116.029公里, 新建铁塔298基, 其中转角塔55基、直线塔243基; 导线选用4×JL3/LB20A-630/45钢芯铝绞线, 按80℃允许温度设计; 地线则架设2根48芯OPGW-150光缆, 并同步建设配套光通信系统。

### 1.2 风险辨识管理现状

按照《中国南方电网有限责任公司施工作业风险管理业务指导书》要求, 本方案对架线施工涉及的交叉跨越情形逐一梳理, 并依据既定标准评估各类危害。作业过程中主要面临五类风险: 高空坠落、设备安装缺陷、自然灾害、交叉作业冲突及人员行为失误。由于施工需在夜间、人口密集区或重要交通走廊等复杂环境下开展, 指导书将其划为高风险作业; 结合工程数据, 风险被归纳为五大类(见表1)。

表1 海南500千伏输变电工程安全风险分类统计

| 风险类型     | 风险点数量 | 占比    | 典型案例             |
|----------|-------|-------|------------------|
| 高空作业风险   | 127   | 34.3% | 铁塔组立时安全带脱落       |
| 设备安装风险   | 98    | 26.5% | 邻近(跨越)带电线路       |
| 自然灾害风险   | 76    | 20.5% | 台风导致导线舞动         |
| 交叉跨越作业风险 | 43    | 11.6% | 跨越省道、环岛高速公路、环岛高铁 |
| 人员行为风险   | 26    | 7.0%  | 未佩戴绝缘手套操作        |

## 2 风险表现和成因机理

### 2.1 风险表现

梳理2024年1月至2025年6月的工程事故记录后, 风险表现出明显的“季节—阶段”叠加特征。台风季(6-10月)自然灾害触发的风险比其他月份高2.3倍;

在铁塔组立阶段，高空坠落事件占同期事故 58%，进入设备调试阶段后，触电事故占比升至 41%。

## 2.2 成因机理

安全风险主要源于三个方面：

1. 自然环境：海南年均台风 8.2 次，年暴雨日逾 15 天，复杂气候使铁塔基础沉降率增加 37%。2024 年因台风“摩羯”停工 15 天，直接损失超 200 万元，足见自然条件对工程的冲击。

2. 技术环节：全装配式变电站对结构胶固化时间要求苛刻，偏差超过  $\pm 5\%$  即可导致围墙连接失效；某标段曾因胶体未充分固化发生局部坍塌，虽无伤亡，却为安全敲响警钟。

3. 人为失误：高空未系安全带、起重机超载等违规占事故总量 68%，2021 年到 2024 年全国 500 千伏工程因此类失误造成的伤亡比例达 54%，表明操作风险对安全威胁极大<sup>[1]</sup>。

## 3 安全风险辨识方法体系构建

### 3.1 动态辨识方法体系

1. 风险数据库建设。团队首先搭建了一个动态数据库，把 432 个风险点逐条厘清，并按严重程度切分为三级。一级对应重大风险，共 6 项，高空坠落、变压器爆炸等归入其中；二级为较大风险，共 12 项，机械伤害、触电事故等列入；三级是一般风险，共 25 项，物体打击、坍塌事故等归于此类。

2. 多维度辨识技术。（1）现场观察法：通过每日“三查”制度，对人员、设备和现场环境进行系统巡查。2025 年第一季度，该方法共识别隐患 237 项。（2）安全检查表法：通过系统梳理施工流程，设计并应用了《铁塔组立检查表》《GIS 安装检查表》等 12 套专项检查表，覆盖 98% 的施工环节，为现场安全提供支撑<sup>[2]</sup>。

### 3.2 LEC 评价法量化模型

作业条件危险性评价法（LEC）以发生概率 L、暴露频率 E 和后果严重性 C 三项指标构成风险矩阵，细节列于表 2。以高空作业为例：先看 L，历史记录显示未系安全带引发坠落的事故频率为每年 0.03 次，对应取 3；再看 E，现场统计工人每日登高作业平均 4 小时，对应取 6；接着定位 C，若坠落极可能造成 1 人死亡，故取 100；最后按  $D=L\times E\times C$  算得 1 800，落入“高度危险”区间，须立即整改。

### 3.3 事故树分析（FTA）应用

以“铁塔倾覆”事故为案例，首先建立事故树模型，借此精确定位出 12 项底事件，涵盖基础沉降、螺栓松动、

风载超限等情形。随后进行最小割集分析，结果显示，当基础沉降与螺栓松动同时发生时，事故概率骤升至 82%，因此这两项事件必须列为重点防控对象。

### 3.4 数字孪生技术赋能

海南电网公司全力投入数字基建管理平台建设，将 BIM 模型与物联网传感器在高度、深度两个维度无缝衔接。平台借此能够实时发出风险预警：导线架设阶段，系统依据张力监测数据判断断线概率，准确率达 91%，而作业效率较传统人工巡检提高两倍。

表 2 LEC 风险矩阵分级标准

| 风险等级 | D 值范围      | 管控措施        |
|------|------------|-------------|
| 轻微风险 | < 20       | 日常监测        |
| 一般风险 | 20 ~ 70    | 定期检查        |
| 显著风险 | 70 ~ 200   | 加强培训、增设防护   |
| 高度危险 | 200 ~ 400  | 停工整改、专项方案审批 |
| 极其危险 | $\geq 400$ | 禁止作业、重新设计   |

## 4 分级管控措施与实施效果

### 4.1 高风险作业管控

1. 高空作业安全保障措施：作业人员的生命安全依赖一套刚性执行的安全流程。双钩安全带与防坠器同时佩戴，形成双重制动；风速仪持续监测，一旦超过 5 级风，系统立即切断作业许可；各施工点按“一基一策”定制防护，例如儋州段以钢筋混凝土加固基础，结构稳定性提升，高空操作因此获得更可靠的支撑。

2. 机械操作安全规范：在机械操作环节，我们已制定并执行一套严密的安全规范。起重机装有智能限载装置，一旦超载立即切断电源，避免设备损坏或事故，保障吊装安全。焊机则配有弧光防护罩，降低电弧灼伤风险，保护作业人员健康。同时，我们实行月度机械安全专项检查，及时淘汰老旧设备，确保所有机械始终处于良好状态，为现场操作提供可靠的安全屏障<sup>[3]</sup>。

### 4.2 自然环境应对

1. 防汛措施分两步：先在低洼处布设水位监测点，数据实时回传控制中心，水位变化一目了然；再为端子箱和瓦斯继电器选用 IP68 防护等级，杜绝进水短路。

2. 抗风设计分两步：先将铁塔螺栓扭矩调至标准值的 120%，使结构更稳；再让线路绕开台风高发区，减少风偏带来的风险。

### 4.3 施工用电风险应对

1. 重视对施工人员的专业培训工作。要精心设计与实施一套系统、完备的培训课程体系，助力施工人

员精准且熟练地掌握电气安全操作规程，进而切实增强他们的安全用电意识。与此同时，所有参与电气作业的人员都必须接受严格的考核，只有考核成绩合格并取得相应证书的人员，才具备上岗作业的资格。通过这样的方式，能够从源头上最大程度地降低因操作不当而引发用电事故的可能性。

2. 构建一套完善的用电管理制度。其一，要明确各级人员在用电安全方面所承担的具体职责，确保责任精准落实到个人，做到权责分明；其二，要严格执行用电审批流程，保证每一项用电操作都严格依照规范执行。针对临时用电设施，要按照相关标准进行搭建与维护，并定期开展安全检查，确保其始终保持良好的运行状态。其三，要加大对电气设备的维护保养力度，及时察觉并妥善处理设备故障，防止因设备问题引发用电风险。

3. 在施工前，要全面且深入地考量施工用电的负荷需求以及线路布局情况，合理规划电缆的走向和开关的配置，从而有效避免出现过载、短路等安全隐患。对于在高空作业、潮湿环境等特殊条件下使用的用电设施，要采取额外的安全防护举措，例如：使用绝缘工具、设置安全围栏等，为用电安全提供多层次的保障。

4. 建立健全应急预案体系，针对可能发生的各类用电事故组织模拟演练活动。借助演练，提升相关人员在面对用电事故时的应急响应速度和处置能力。一旦发生用电事故，要立即启动应急预案，迅速采取有效措施控制事故的影响范围，全力保障人员的生命安全和财产安全<sup>[4]</sup>。

#### 4.4 实施效果评估

对比2021-2024年海南电网施工事故数据（见表3）可见，风险管控落地后效果突出：高空坠落率由0.12次/万工时降至0.07次/万工时，机械伤害率从0.08次/万工时降至0.05次/万工时，整体风险值D平均下降42%，已处于行业前列。

表3 海南电网施工事故率对比

| 事故类型 | 2021-2022年率<br>(次/万工时) | 2023-2024年率<br>(次/万工时) | 降幅(%) |
|------|------------------------|------------------------|-------|
| 高空坠落 | 0.12                   | 0.07                   | 41.7  |
| 机械损伤 | 0.08                   | 0.05                   | 37.5  |
| 触电   | 0.05                   | 0.03                   | 40.0  |
| 坍塌   | 0.03                   | 0.02                   | 33.3  |

## 5 创新实践与经验总结

### 5.1 全装配式变电站施工创新

榔城变电站采用全干式装配方案：所有构件工厂预制，整体运抵现场后一次拼装。此举把湿作业量压减六成，工期同步缩短四分之一。同步上线的结构胶强度监测系统实时扫描接缝，连接可靠度达99.9%，为电站长期稳定运行提供支撑。

### 5.2 数字化管控体系

平台融合云计算、大数据、物联网、移动互联、人工智能与区块链，形成“云大物移智链”一体化底座。借助这一底座，风险数据自产生到使用的每个环节都可被追踪并受控。以安全检查记录为例，数据一旦上链便无法被篡改，管理过程的透明度与可信度随之显著提升<sup>[5]</sup>。

## 6 结论

本研究针对海南500千伏输变电工程开展安全风险辨识管理，成效集中体现在三点：其一，将LEC评价法与事故树分析并用，可迅速锁定高风险作业环节，为后续防控划出重点；其二，依托数字孪生技术，风险动态预警的响应时间缩短一半，现场处置因此更快；其三，分级管控落地后，工程事故率已压至行业平均值的六成以下，为项目安全推进提供了坚实保障。

后续研究可从三条主线展开。其一，把人工智能嵌入风险识别环节，用图像识别技术自动捕捉违规行为，既快又准。其二，厘清气候变化对沿海电网的作用链，锁定关键气象要素与故障路径。其三，建立并持续改进跨区域电网施工的协同风控框架，让风险在开工前、施工中都能被迅速识别和处置。

## 参考文献：

- [1] 白文选.浅谈电力工程施工风险管理对策[J].电力通信,2020,22(12):129-131.
- [2] 海南电网有限责任公司建设分公司.海南昌江核电二期500千伏接入系统工程环境影响报告书[R].海南电网公司,2024.
- [3] 张良.数字孪生技术在电网施工中的应用实践[J].中国电力企业管理,2025(03):45-47.
- [4] 官建勇.铁路电力工程施工风险管理的实践分析[J].智能建设,2023(05):21-23.
- [5] 史延锟.电力施工企业110kV变电站工程施工风险模糊评估方法[J].电气技术与经济,2023(01):73-76.

# 建筑工程消防全周期监管体系 构建与效能提升研究

洪炎滨

(惠州仲恺高新技术产业开发区城乡建设综合事务中心, 广东 惠州 516000)

**摘要** 建筑消防工程作为保障人民生命财产安全和社会稳定的重要基础设施, 其监督管理效能直接关系到建设工程安全水平。随着我国城镇化进程快速推进, 建筑形态日趋复杂, 新材料、新工艺广泛应用, 传统监管模式面临严峻挑战。本文基于全周期管理理论, 详细阐述了建筑消防工程监督管理的基本概念, 明确其在工程项目管理体系中的关键定位, 进而从设计、施工、验收、运维四个关键环节入手, 系统探讨建筑消防工程监督管理工作的优化路径, 旨在为提升建筑消防工程质量、预防和减少火灾事故发生、推动建筑业高质量发展提供有益参考。

**关键词** 建筑消防工程; 全周期监管体系; 协同监管机制; 过程管控

中图分类号: TU998

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.034

## 0 引言

建筑消防安全是城市公共安全体系的重要组成部分, 直接关系到人民的生命财产安全和社会稳定。随着我国经济社会持续发展, 城镇化进程不断加快, 建筑领域呈现出规模大型化、功能复杂化、技术新型化的发展趋势。近年来, 尽管我国建筑消防监督管理工作取得了显著成效, 法律法规体系不断完善, 监管机制持续优化, 但重特大火灾事故仍时有发生, 暴露出当前监管工作仍存在诸多薄弱环节。本研究通过系统分析建筑消防工程全周期各环节监管要求, 探索建立更加科学、高效、协同的监督管理体系。

## 1 建筑消防工程监督管理概述

建筑消防工程监督管理是指法定机构依据国家法律法规和技术标准, 对建设工程消防设计、施工、验收及运维全过程进行的专业性监督与管理活动, 其根本目标是确保建筑物具备符合规定的消防安全条件, 预防和减少火灾危害。建筑消防监督管理作为建设工程质量管理体系的关键组成部分, 具有鲜明的技术性、法制性和系统性特征。其以《中华人民共和国消防法》《建设工程消防监督管理规定》等法律法规为依据, 具有强制执行力, 贯穿项目立项、设计、施工、验收、使用全过程, 需要建立全周期管理机制。建筑消防工程监督管理的核心价值在于通过严格的技术审查、过程监督和竣工验收, 在施工阶段保证消防工程按图施工、材料合格、工艺规范, 在使用阶段维持消防设施完好有效<sup>[1]</sup>。随着建筑技术进步和工程建设模式创新,

现代消防监督管理已从传统的以合规性审查为主的静态监管, 向以风险防控为导向的动态全过程监管转变, 要求监管机构不仅要关注设计图纸的合规性, 更要重视施工过程的质量控制和运营阶段的功能维护, 建立覆盖建设工程全周期的闭环管理模式。

## 2 全周期监管体系

### 2.1 设计阶段

此阶段监督管理的主要目标是保证消防设计方案符合法律法规和技术标准要求, 满足建筑物使用功能与消防安全需求<sup>[2]</sup>。监管工作重点在于消防设计文件的合规性审查, 重点关注总平面布局中的消防车道、救援场地设置是否符合规范, 建筑防火分区分隔是否合理, 安全疏散距离、宽度指标是否满足人员疏散需求等内容。特别对于超高层建筑、大型商业综合体、地下空间等特殊建筑形态, 需要重点关注其性能化设计方案的可行性与可靠性, 组织专家对超越规范的特殊消防设计进行专项论证。监管需关注各专业设计的协调性, 避免出现建筑、结构、给排水、电气、暖通等专业之间的设计冲突, 导致消防设施无法按图施工或功能受损。设计阶段监管还需关注新技术、新材料的应用风险评估, 对于现行标准未覆盖的新技术、新工艺, 需要求设计单位提供充分的技术论证和实验数据, 实现“源头防控”的监管目标。

### 2.2 施工阶段

施工阶段质量控制决定消防工程的最终效果, 监督管理的核心在于确保施工单位严格按照审查合格的

设计文件施工，使用合格材料设备，遵守施工工艺标准<sup>[3]</sup>。监管工作首先聚焦进场材料设备的质量控制，需要建立完善的消防产品进场验收制度，对防火涂料、防火门窗、消防水泵、报警设备等关键产品，核验其型式检验报告、产品认证证书及市场准入证明，并对重要材料进行抽样送检，杜绝不合格产品用于工程。其次，监管重点在于隐蔽工程的质量控制，如埋地消防管道防腐处理、防火封堵施工、线缆穿管敷设等工序，以上环节完成隐蔽便难以查验，需要监管人员通过巡检、旁站等方式加强过程监督，并要求施工单位留存影像资料备查。对于消防水管网强度试验、气压试验等关键测试环节，监管人员应当现场见证，确保测试结果真实可靠。最后，监管需关注工序衔接与专业配合，消防工程涉及多专业、多工种交叉作业，需要合理安排施工顺序，避免后续施工对消防设施造成损坏。

### 2.3 验收阶段

验收的目的在于验证已完工程是否达到设计要求和规范标准，具备投入使用条件。此阶段监督管理工作的核心是进行系统功能测试和综合效能评估，确保各项消防设施能够协同发挥作用<sup>[4]</sup>。验收工作主要包括现场检查、功能测试和资料核查三部分。现场检查需逐项核对消防设施的安装位置、数量、型号是否符合设计文件，检查防火分隔、疏散通道、救援窗口等建筑防火措施是否落实到位。功能测试是验收的核心环节，需要按照规范要求对各类消防系统进行联动测试，包括火灾自动报警系统模拟报警测试，检验探测器灵敏度及报警信号传输准确性；自动喷水灭火系统末端试水装置测试，验证系统启动压力及报警功能。防排烟系统功能测试，测定风口风量及启闭联动可靠性，消防应急照明和疏散指示系统切换测试，检查电源转换时间及持续时间等。

### 2.4 运维阶段

要求建筑管理单位制定消防设施维护保养规程，明确巡检频次、检查内容、维护标准和方法。日常巡检应包括消防水源供水能力测试、报警控制器运行状态检查、灭火器压力核查、安全出口畅通情况检查等基础内容<sup>[5]</sup>。监管需强化定期检测和维护保养要求，按照国家标准规定，对火灾自动报警系统、自动灭火系统、防排烟系统等主要消防设施进行年度检测，委托具备资质的机构出具检测报告；对消防水泵、风机等重要设备进行定期启动试验。对灭火器、防火门窗等易损件按时更换。监管机构应当通过双随机抽查等方式，对使用单位维护保养情况进行监督，核查检测

报告的真实性<sup>[6]</sup>。监管应推动智慧消防技术的应用，鼓励在重要建筑消防设施上安装物联传感设备，实时监测水压水位、报警设备、电源状态等关键参数，实现异常情况远程报警、故障信息快速推送，变被动处置为主动预警。

## 3 建筑消防工程监管效能提升对策

### 3.1 完善标准体系

面对建筑形态复杂化、技术材料新型化的趋势，建议建立消防技术标准动态修订机制，组建由行业专家、学者、一线监管人员构成的常设评审委员会定期对现行标准进行评估，尤其要关注超高层建筑、大型综合交通枢纽、地下空间开发、储能电站等特殊业态，以及装配式建筑、绿色建筑、智慧建筑等新建筑模式下的消防技术需求，及时将成熟的工艺和技术转化为标准条文，避免出现监管空白。着力解决标准执行中的“地方差异”问题，由国家层面主导制定关键条款的通用性解释指南或实施细则，明确如疏散宽度计算、特殊功能区域防火分隔、新型灭火系统设计参数等易产生歧义内容的统一执行口径，减少自由裁量空间。在强化执行刚性方面，必须加大责任追究与惩戒力度。一方面，要严格落实《中华人民共和国消防法》《建设工程消防设计审查验收管理暂行规定》等法律法规，对建设、设计、施工、监理、检测等单位在消防工程中的违法行为实施“一案双查”，即在处罚直接责任单位的同时，追溯其主体责任与源头责任，并探索建立与市场监管、征信系统的联动惩戒机制，将重大消防违法行为纳入企业信用记录，实施联合惩戒，提高违法成本。另一方面，应推行“阳光监管”，建立消防设计、施工、验收、行政处罚等关键环节信息的公开公示平台，主动接受社会监督，倒逼相关责任主体规范自身行为。

### 3.2 健全协同监管机制

应构建贯穿项目全周期的信息化协同平台，打通消防部门、住房和城乡建设部门、市场监督管理部门之间的数据壁垒，实现消防设计审查意见、施工过程监督记录、消防产品准入与质量抽检信息、竣工验收备案数据等关键信息的实时共享与互认，避免重复检查、信息孤岛，为协同监管提供技术支撑。在此基础上，需进一步细化并固化各部门的协同职责与工作流程，如明确住建部门在施工许可环节需核验消防设计审查合格文件，消防部门参与重大工程的关键节点现场查验，市场监管部门定期向消防部门通报消防产品质量抽查结果，形成“前端审批—过程监管—末端验收—

后期运维”的无缝衔接机制。其次，压实的核心是构建清晰的责任清单体系。必须制定并推行《建筑工程各方主体责任清单》，将建设单位的主要责任、设计单位的源头责任、施工单位的直接责任、监理单位的监督责任、技术服务机构的法律责任以清单形式逐一明确，特别是要强化建设单位的首要责任，将其对消防工程的质量、安全、投资、进度负总责的要求落到实处，改变其“重效益、轻安全”的倾向。同时，创新监管模式，积极推行“双随机、一公开”日常监管与基于风险等级的“重点监管”相结合，对超高层建筑、大型商业综合体、人员密集场所等高危项目提高检查频次和深度，并引入“信用监管”，建立企业消防质量信用档案，将履约评价与市场准入、工程招投标挂钩，实施差异化分类监管，让守信者受益、失信者受限。

### 3.3 加强过程管控

面对传统监管模式在人手不足、专业性要求高、隐蔽工程难追溯等方面的困境，必须大力强化技术赋能，将物联网、大数据、建筑信息模型（BIM）、无人机等现代信息技术深度融入建筑工程监督管理的各个环节，实现从“人防”为主向“技防+人防”相结合的智慧化监管模式转型。在设计阶段，应强制推行 BIM 技术进行消防专项设计，通过三维数字模型进行管线综合、空间模拟、疏散分析，提前发现并解决不同专业之间的“碰撞”问题，优化消防设施布局，并将经过审查的 BIM 模型作为后续施工、验收和运维的基准数据源，实现信息的无损传递。在施工阶段，重点应用物联网感知设备对关键施工环节进行实时监控，在消防管网试压、防火封堵、线缆敷设等隐蔽工程施工时，安装压力传感器、视频监控等设备，实时记录数据与影像，并上传至云端平台供监管方远程调阅，确保施工质量可追溯；同时，利用无人机进行大范围、高空作业区域的进度与安全巡查，提高效率并降低安全风险。在验收与运维阶段，智慧化监管的效能更为凸显。通过建设“智慧消防”物联网系统，将建筑内的火灾自动报警系统、自动喷水灭火系统、防排烟系统、消防水系统等主要消防设施进行联网。

### 3.4 夯实基层长效管理

再完善的制度、再先进的技术，最终都需要由人来执行和应用，当前基层消防监督力量薄弱、专业能力与复杂监管任务不匹配的问题尤为突出，必须将其置于战略高度加以解决。扩充并稳定基层监管队伍应根据辖区建筑总量、增长趋势、风险等级等因素，科

学核定消防监督管理人员编制，确保人员数量与监管任务量基本匹配，特别是要向监管任务繁重的基层一线倾斜。着力提升队伍的专业素养，建立系统化、常态化的培训机制，培训内容应覆盖最新消防技术标准规范、新型建筑消防设施原理与检查方法、BIM、物联网等智慧消防技术应用、消防安全风险管理理论以及法律法规知识等。培训形式应多样化，并鼓励监管人员考取注册消防工程师等专业资格，打造一支既懂技术又懂管理的专家型监管队伍。其次，要强化实践技能培养。推行“传帮带”机制，由经验丰富的监督员带领新入职人员参与实际检查，在现场教学中快速提升实操能力。定期组织模拟验收、消防设施实操实训、应急预案演练等，提高监管人员发现隐患、核查系统功能、处置突发情况的能力。建立以工作实绩、专业能力、廉洁自律为导向的绩效考核体系，将考核结果与职务晋升、评优评先、绩效奖励直接挂钩，激发队伍内生动力。

## 4 结语

随着建筑形态日益复杂和新技术新材料不断涌现，传统的管理模式面临深刻挑战，本次研究核心在于构建从源头设计、规范施工、严格验收到长效运维的全过程，多维度共同发力推动监督管理模式从事后被动处置向事前主动防控转型。后期研究重在将系统性思维、精准化理念和智能化手段深度融入日常实践，持续提升监管的预见性、精准性与有效性，真正筑牢建筑消防安全防线，为经济社会高质量发展提供坚实可靠的安全保障。

## 参考文献：

- [1] 赵文霞.现代高层建筑消防工程问题与应对策略[J].大众标准化,2025(07):100-102.
- [2] 戴弘飞.高层建筑消防工程监理控制措施研究[J].消防界(电子版),2024,10(23):101-103.
- [3] 张成林.浅析建筑工程中防火分隔技术的应用[J].中国设备工程,2024(16):6-8.
- [4] 鲁文浩.建筑工程施工验收难点与解决对策研究[J].消防界(电子版),2024,10(15):114-116.
- [5] 吕俊凯.研究建筑消防工程隐患成因及整改对策[J].中华建设,2024(08):151-153.
- [6] 虎玲.浅谈建筑消防电气设备监督检查要点[J].中国住宅设施,2024(04):151-153.

# 导料槽密封性研究与应用

曲学华，亢瑞新

(内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司，内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要** 在散状物料输送过程中，导料槽密封失效会引发粉尘逸散、物料损耗等问题，需结合输送物料特性与实际运行工况开展导料槽密封性研究。研究目标是借助理论分析、技术创新与实验验证，提升导料槽密封性能。研究先分析导料槽工作原理、密封性相关理论及影响因素，再研发新型密封结构与高性能聚氨酯基复合密封材料，同时实现技术与材料协同优化，最后通过数值模拟与实验验证方案有效性。研究结果显示，经优化的导料槽密封效能明显增强，可有效控制粉尘逸散，符合工业输送的环保与稳定要求。

**关键词** 导料槽；密封性；散状物料输送；密封结构设计；密封材料

中图分类号：TM62

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.035

## 0 引言

导料槽是散状物料输送系统中的关键部件，其密封效果直接关系到生产环境质量、设备运行寿命与环保合规要求。当前阶段，传统导料槽常因密封结构设计不合理、密封材料性能不足等问题，难以达到高效密封的使用需求。这一问题不仅导致物料浪费，还会加重粉尘污染，对工作人员身体健康与周边生态环境产生不利影响。基于上述问题，围绕导料槽密封主题，从基础理论分析、技术与材料创新、模拟与实验研究三个方面展开，从而有望突破现有密封技术瓶颈。

## 1 导料槽密封性基础理论

### 1.1 导料槽工作原理及结构组成

在火电厂输煤系统中，导料槽核心功能为在煤炭输送过程构建封闭通道，工作原理以物料引导、气流控制、密封防护三者协同为核心。实际运行时，煤炭从落煤管、料斗、给料机等上游设备落入导料槽，伴随气流运动形成诱导风，导料槽需靠自身结构约束煤炭运动轨迹，避免煤炭撒落，同时平衡槽内气流压力，削减粉尘逸散。就结构组成而言，导料槽主要包含槽体、盖板、侧挡板、密封件及支撑组件五大核心部分。槽体承担煤炭输送主体通道作用，多由钢板焊接制成，需具备足够刚度承受煤炭冲击，防止结构变形破坏密封空间；盖板覆盖槽体顶部，通过螺栓与槽体连接形成封闭空间，部分盖板设计为可拆卸样式，方便后期设备的检修与维护；侧挡板装于槽体两侧，与输送带边缘配合，限制煤炭横向偏移，避免煤炭撞击槽体侧壁产生粉尘飞溅；密封件为保障密封性的关键部件，

主要设置在侧挡板与输送带接触处、盖板接缝处，用于填充间隙，阻断粉尘逸散通道；支撑组件包含支架、托辊等，用于固定槽体，保证导料槽与输送带维持平行状态，避免结构偏移致使密封件与输送带接触不均，破坏密封效果。

### 1.2 密封性相关理论

从流体力学角度分析，导料槽内粉尘逸散本质为内外压力差驱动气流流动的过程。当煤炭下落产生的诱导风使槽内压力高于外界大气压时，气流会携带粉尘向压力较低的外界流动，若密封结构无法阻断气流通道，便会出现粉尘外溢，此过程符合伯努利方程中压力差与流体流速的关联规律，即槽内与外界压力差越大，气流流速越快，粉尘逸散风险越高。从材料力学角度分析，密封件长期使用中要维持自身形态和弹性，抵抗煤炭摩擦、温度变化造成的变形和磨损，性能需达成弹性回复性与耐磨性的平衡。密封件与输送带接触时，需靠自身弹性贴合输送带表面，填充微小间隙，同时具备足够硬度减少煤炭摩擦造成的损耗，这涉及材料的弹性模量、断裂伸长率等力学参数与实际工况的适配性。

### 1.3 密封性影响因素

从结构设计层面看，密封件的截面形状、侧挡板的高度与角度、盖板的拼接方式均会影响密封性。密封件截面设计不合理时，难以与输送带表面完全贴合，会形成初始间隙；侧挡板高度不合理，易造成裙板密封不足或磨损加剧，使煤炭在输送过程中溢出，同时导致诱导风直接扩散至外界；盖板拼接处若未采用密封胶或搭接结构，接缝处会成为粉尘逸散通道。从物

料特性层面看，煤炭的粒度、湿度、磨损性方面的差异会对密封效果产生不同影响。细颗粒煤炭，比如较为干燥细碎的煤种，更易随气流穿过密封间隙；高湿度煤炭易粘结在密封件表面，导致密封件变形，破坏贴合度；高磨损性煤炭会加速密封件的损耗，缩短密封件使用寿命，增加密封失效风险。从运行工况层面看，输送带运行速度、煤炭输送量、环境温度是关键影响因素。输送带速度提升，煤炭下落形成的诱导风会随之增强，槽内压力差变大，粉尘逸散风险升高<sup>[1]</sup>。

## 2 密封技术与材料创新

### 2.1 新型密封结构设计

在火力发电站输煤系统中，导料槽须应对燃煤颗粒冲击、高诱导风及长期磨损等工况，侧板密封结构采用“双层密封+连续支撑”方案。侧板处配备直板式防溢裙板，取整体无拼接样式，与导料槽长度完全匹配，借夹持器与角铝完成固定，确保裙板与输送带表面紧密贴合，阻断燃煤颗粒与粉尘从侧板间隙溢出；裙板下方搭配超高分子量聚乙烯托板装置，对输送带形成连续支撑，避免输送带因承载燃煤出现“波浪形”波动，输煤系统中燃煤输送量波动大，输送带易因物料分布不均产生局部下沉，该托板可消除波动对裙板贴合度的破坏。出口密封结构以风速控制与二次防护为核心，采用“PTFE 抑尘帘+彩钢板导流”组合方案。出口处布置多道 PTFE 抑尘帘，帘体由密集抑尘条构成，抑尘条直径约 0.2 mm，通过无螺栓连接完成固定；在输煤系统中，燃煤下落产生的诱导风易携带细煤尘从出口逸散，该结构依流体力学原理，让直线运动的诱导风穿过帘体后形成涡流，消耗诱导风能量以降低风速，同时吸附逸散煤尘；出口外侧加装彩钢板与导料槽出口连接，形成二次密封屏障，减小外界风力对出口区域气流的干扰，避免外界气流倒灌带动煤尘扩散。尾部密封结构采用“多层橡胶条密封箱”方案，尾部密封箱内设置多道直径 6 mm 的橡胶条，呈叠加排列形成多重密封屏障；在输煤系统中，导料槽尾部因输送带运行动态变化，易出现密封间隙，该结构既能阻止含尘气体与燃煤颗粒从尾部外溢，又能让少量残留燃煤通过密封间隙后回落至导料槽内随物料运走，避免燃煤堆积引发堵料。

### 2.2 高性能密封材料研发应用

在输煤系统中，裙板须长期与输送带、燃煤颗粒接触，通过弹性贴合输送带表面，并抵御燃煤摩擦损耗，

其抗拉强度 $\geq 285 \text{ kgf/cm}^2$ ，撕裂强度 $\geq 115 \text{ kgf/cm}$ ，硬度控制在  $60\pm 5^\circ$ ，阿克隆磨耗 $< 0.035$ ，可有效承受燃煤颗粒长期冲击与摩擦；同时该材质具备一定的耐煤尘吸附性能，避免煤尘黏附导致裙板变形。出口阻尼挡尘帘与内部迷宫式阻尼帘均采用“聚氨酯+碳纤维复合”材质，于聚氨酯基体中添加碳纤维增强相。输煤系统运行环境温度波动较大，冬季低温易导致密封材料变硬脆化，夏季高温易引发材料老化，该材料使用温度范围覆盖  $-30 \sim 120^\circ\text{C}$ ，可适应电厂不同季节运行工况，保持稳定弹性与结构强度；碳纤维增强相能显著提升材料耐磨表现与结构稳定性，抵御燃煤颗粒长期摩擦，避免阻尼帘断裂破损；其中出口 PTFE 抑尘帘于聚氨酯基体中进一步复合聚四氟乙烯成分，增强材料不粘性，防止细煤尘黏附堵塞帘体间隙，确保抑尘条长期保持通透<sup>[2]</sup>。

### 2.3 密封技术材料协同优化

结构设计通过夹持器给予裙板稳定接触压力，让裙板材料的弹性充分发挥，紧密贴合输送带表面，输煤系统中输送带运行存在轻微振动，稳定的接触压力可确保裙板始终与输送带贴合，避免间隙产生；裙板材料的高耐磨特性则保障双层密封结构长期使用中不会因燃煤摩擦引发密封间隙扩大，同时超高分子量聚乙烯托板装置的连续支撑特性，避免输送带因承载燃煤出现波动，破坏裙板与输送带的贴合状态。在出口密封系统中，“PTFE 抑尘帘+彩钢板导流”结构与“聚氨酯+碳纤维+聚四氟乙烯复合帘体”协同优化。结构设计的迷宫式布置路径延长气流与帘体的接触时间，让复合帘体的涡流效应与粉尘吸附能力充分发挥——输煤系统中诱导风携带的细煤尘颗粒小、易扩散，延长接触时间可提升煤尘吸附效率；帘体材料的高弹性确保在气流冲击下不易变形，避免因帘体破损导致密封失效；碳纤维增强相增强帘体结构强度，抵御长期气流冲击与燃煤颗粒碰撞，避免帘体断裂；聚四氟乙烯成分则防止煤尘黏附堵塞帘体，确保结构长期保持高效控风效果<sup>[3]</sup>。

## 3 导料槽密封性应用数值模拟与实验研究

### 3.1 实验方案设计应用

以大唐某电厂输煤系统现场为平台实施密封性能测试。测试分三阶段：第一阶段，选取现场原有传统密封结构，即普通橡胶密封件、螺栓连接盖板，测试不同输送带速度、物料输送量条件下的密封性能；第

二阶段，更换为弹性补偿式密封结构与迷宫式盖板拼接结构，保持其余工况参数不变实施测试；第三阶段，于新型结构基础上，分别采用纳米增强复合橡胶密封件、陶瓷—聚合物复合涂层槽体，验证长期运行时的密封稳定性。各工况参数组合均重复测试3次，取平均值减小误差；于导料槽周边设置5个检测点，包括入口1 m处、中部6 m处、出口11 m处、左侧挡板中部、右侧挡板中部，同步记录各点粉尘浓度、槽内静压及密封件磨损量<sup>[4]</sup>。实验关键数据整理为表1，反映不同密封方案的核心性能指标。

表1 不同密封方案实验性能测试结果

| 密封方案               | 平均粉尘浓度<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 槽内平均静压(Pa) | 72 h 密封件磨损量<br>(mm) | 盖板接缝泄漏率 (%) |
|--------------------|--------------------------------|------------|---------------------|-------------|
| 传统结构 + 普通橡胶        | 8.6                            | 103 120    | 0.35                | 12.8        |
| 新型结构 + 普通橡胶        | 3.2                            | 102 850    | 0.21                | 3.5         |
| 新型结构 + 纳米增强橡胶      | 2.3                            | 102 780    | 0.08                | 2.1         |
| 新型结构 + 纳米橡胶 + 陶瓷涂层 | 2.1                            | 102 750    | 0.07                | 1.8         |

### 3.2 模拟与实验结果对比分析

对比分析选取三个核心维度，粉尘浓度、槽内静压与密封间隙气流速度，每个维度按输送带速度1.5 m/s、2.0 m/s、2.5 m/s分组，计算模拟值与实验值的相对偏差。从整体对比结果看，模拟值与实验值趋势一致，且偏差率均控制在10%以内，符合工程模拟的精度要求。其中，槽内静压的偏差率最小，原因是静压受气流湍流影响较小，模拟模型中的 RNGk-ε 模型能较好捕捉压力分布规律；粉尘浓度的平均偏差率为8.5%，偏差主要源于模拟中假设粉尘为均匀分布的离散相，而实际物料中粉尘粒度存在差异，部分细粉易吸附于槽壁，未完全参与气流运动；密封间隙气流速度的偏差率为7.8%，主要因实验中密封件存在轻微弹性形变，导致实际间隙与模拟设定值存在微小差异。为进一步验证长期运行下的模拟可靠性，选取“新型结构+纳米增强橡胶”方案，对比连续72 h运行的模拟磨损量与实验磨损量<sup>[5]</sup>。完整对比数据整理为表2，清晰呈现各指标的模拟与实验差异。

表2 模拟与实验结果关键指标对比

| 输送带速度(m/s) | 指标类型                     | 模拟值     | 实验值     | 偏差率(%) |
|------------|--------------------------|---------|---------|--------|
| 1.5        | 粉尘浓度(mg/m <sup>3</sup> ) | 1.9     | 2.0     | 5.0    |
| 1.5        | 槽内静压(Pa)                 | 102 680 | 102 950 | 0.26   |
| 1.5        | 间隙气流速度(m/s)              | 3.2     | 3.4     | 5.9    |
| 2.0        | 粉尘浓度(mg/m <sup>3</sup> ) | 2.2     | 2.3     | 4.3    |
| 2.0        | 槽内静压(Pa)                 | 102 780 | 103 050 | 0.26   |
| 2.0        | 间隙气流速度(m/s)              | 3.5     | 3.8     | 7.9    |
| 2.5        | 粉尘浓度(mg/m <sup>3</sup> ) | 2.8     | 3.0     | 6.7    |
| 2.5        | 槽内静压(Pa)                 | 103 560 | 103 820 | 0.25   |
| 2.5        | 间隙气流速度(m/s)              | 5.1     | 5.5     | 7.3    |

### 4 结语

本研究围绕导料槽密封主题开展系统研究，从基础理论剖析入手，延伸至技术与材料创新，再到模拟实验验证，最终构建出一套相对完整的研究体系，切实解决导料槽密封领域的相关问题。后续研究可进一步拓展应用场景，针对不同特殊物料的输送工况，优化密封方案设计。随着研究持续推进，导料槽密封技术将逐步完善，对推动散状物料输送领域可持续发展发挥更大作用，助力行业实现环保标准与经济效益的双重提升。

### 参考文献：

- [1] 赵学义.皮带传送机械中导料槽的优化设计[J].科技创新与应用,2025,15(02):127-130.
- [2] 李一庆,王兰超.矿用皮带机运输带优化及导料槽结构改造研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(04):77-79.
- [3] 朱国燕,卜步龙,张龙,等.极寒地区室内矿石转运除尘密封净化性能研究[J].金属矿山,2024(07):210-214.
- [4] 刘远富,黄俊程,张国光.综合原料场皮带输送机故障原因分析及控制措施[J].仪器仪表用户,2024,31(02):65-67.
- [5] 薛峰瑞.矿用皮带机运输带优化及导料槽结构改造研究[J].机械管理开发,2023,38(03):124-125.

# 城市景观照明光污染控制技术研究

杨凯麟

(深圳市福田鸿博人力资源有限公司, 广东 深圳 518100)

**摘要** 城市景观照明光污染会对居民生活及生态平衡造成危害, 构建科学的控制技术体系是解决这一问题的核心路径。研究围绕光污染的多元危害, 系统剖析其表现形式与形成根源, 总结光污染的标准要求, 深入阐释灯具优化、照明控制策略及光学器件改进三类核心技术的原理与特性, 探究不同功能区域的技术应用实践以明确各类技术的适配场景与实施重点, 进而提出技术优化、推广及保障的具体方向, 以期为相关人员提供借鉴。

**关键词** 城市景观照明; 光污染; 灯具优化技术; 应用场景; 可持续照明

中图分类号: TU88; X5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.036

## 0 引言

城市景观照明作为彰显城市特色与夜间活力的重要载体, 由于设计施工不规范引起的光污染问题成为城市发展中的显著矛盾。反射光侵入严重影响居民睡眠质量, 过量光会对驾驶员造成影响, 光污染蔓延打乱动植物生长周期、威胁生物多样性, 还造成大量能源损耗<sup>[1]</sup>。解决这类问题需从技术层面寻求突破, 厘清污染成因与技术需求, 凭借针对性技术应用实现照明功能与生态保护的协同, 为城市夜间环境健康发展提供可行路径。

## 1 城市景观照明光污染的问题解析

### 1.1 光污染的主要表现形态

城市景观照明光污染与照明设施布局、光源特性直接关联。部分区域为强化视觉冲击选用高功率灯具, 产生强烈眩光, 威胁行人及驾驶员安全。未加遮挡的光线向高空散射形成天空辉光, 遮蔽星空并干扰夜间生态系统; 建筑物景观灯光侵入居民窗户, 破坏室内暗环境, 扰乱正常作息。不同形态光污染相互叠加, 加剧对环境与生活质量的损害, 并在城市不同功能区呈现差异化分布特征, 给污染防控带来挑战。

### 1.2 光污染形成的核心驱动因素

光污染源于规划、技术与管理三方面的疏漏。在规划上缺乏全域统筹, 未按光污染分区制定方案, 导致灯具布设过密、参数与场景错位。在技术上, 设备控光不精, 光线易溢出目标区。在管理上, 照明时段与亮度调节失据, 过度照明与无效照明普遍。多重因素交织, 使光污染成为制约夜间环境质量的关键瓶颈。

### 1.3 污染引发的多元危害维度

光污染的危害覆盖生态、生活与健康三大领域, 并具有累积性。在生态层面, 夜间强光会干扰鸟类迁徙路线, 改变植物光合作用与开花周期, 破坏物种关系, 影响生态稳定。在生活层面, 光侵入导致室内夜光度过高, 干扰睡眠节律, 引发失眠与日间疲劳, 降低工作学习效率。在健康层面, 长期暴露会干扰人体内分泌系统, 导致激素失衡, 增加代谢疾病与情绪障碍风险。

## 2 光污染的控制标准要求

我国在光污染方面进行了深入研究, 目前有多个与光污染相关的标准。国内规范的光污染要求最早来源于《城市夜景照明设计规范》(JGJ/T 163-2008), 后经通过对媒体立面等景观照明方式的限制进行了补充, 形成了《室外照明干扰光限制规范》(GB/T 35626-2017), 强制规范《市容环卫工程项目规范》(GB 55013-2021)对景观照明和对居住区进行了强制性要求<sup>[2]</sup>。目前《城市夜景照明设计规范》(JGJ/T 163-2008)正在修编, 完成了报批稿。

对不同区域内的光污染限值进行了区分, 对天然暗环境区和暗环境区的光污染进行严格限制, 给出了高亮度区、中亮度区和低亮度区的对应区域, 见表 1。

对于泛光照明, 应采用建筑立面平均亮度, 以标识面平均亮度双指标进行评价。局部亮度也应该进行控制, 建议不超过平均亮度的 2.5 倍, 控制指标见表 2。

对于采用媒体立面的照明, 应采用表面平均亮度和表面最大亮度的指标限制光污染。媒体立面亮度限值见表 3。

表1 光环境分区

| 环境亮度<br>类型                  | 天然暗<br>环境区     | 暗环境<br>区 | 低亮度<br>区域 | 中等亮<br>度区域      | 高亮度<br>区域 |
|-----------------------------|----------------|----------|-----------|-----------------|-----------|
| 区域代号                        | E0             | E1       | E2        | E3              | E4        |
| 对应区域<br>国家公园、自然保护区和天文台所在地区等 | 无人居住的耕地、园地、水域等 | 低密度居住区   | 城市或建制镇居住区 | 城市或建制镇居住区及一般公共区 | 中心区和商业区等  |

表2 泛光照明平均亮度和标识面平均亮度最大允许值  
单位: cd/m<sup>2</sup>

| 照明类型     | 环境区域 |    |     |     |       |
|----------|------|----|-----|-----|-------|
|          | E0   | E1 | E2  | E3  | E4    |
| 建筑立面平均亮度 | —    | 0  | 5   | 10  | 25    |
| 标识面平均亮度  | 50   | 50 | 400 | 800 | 1 000 |

(注: 本表中标识面包含交通信号标识。)

表3 媒体立面亮度限值

单位: cd/m<sup>2</sup>

| 表面亮度(白光) | 环境区域 |    |     |     |       |
|----------|------|----|-----|-----|-------|
|          | E0   | E1 | E2  | E3  | E4    |
| 表面平均亮度   | —    | —  | 8   | 15  | 25    |
| 表面最大亮度   | —    | —  | 200 | 500 | 1 000 |

### 3 光污染控制核心技术的原理特性

#### 3.1 灯具优化技术的核心机理

目前,室内眩光未明确说明属于光污染的范畴。所以光源方面的控制,主要避免外部光进入室内,影响居民休息。光污染主要是减少冗余光产生,使光线精准聚焦于目标区域,避免向非照明区域扩散,从根源上控制污染传播范围,这类技术改进需结合不同城市区域的照明需求差异,在功能与环保间找到平衡,为后续控制策略实施奠定基础<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 照明控制策略的技术类型

照明控制策略通过动态管理实现精准防控,主要包含分时、分区与按需三类控制模式,分时控制依据夜间不同时段的活动强度调整照明状态,在人流密集的高峰时段维持适宜亮度,进入深夜则降低亮度或关闭装饰性灯具,减少非必要光辐射。根据各省市的照明管理办法,或照明管理条例,分时段开关灯。

分区控制基于区域功能定位制定差异化标准,商

业区适度提升亮度营造氛围,居住区采用低亮度设置,生态保护区严格限制照明范围。

按需管理,可控制依托传感器实时捕捉环境亮度与人流密度,自动调节灯具运行参数,实现照明资源的精准匹配,避免过度照明造成的污染<sup>[4]</sup>。

三种模式可单独应用或组合使用,根据城市不同区域特点灵活适配以提升防控效果。

#### 3.3 光学器件改进的技术特点

光学器件改进技术通过优化光线传播路径实现精准控光,具有针对性强、效果直接的特点,遮光罩与挡光板通过物理遮挡约束光线方向,可有效阻挡光线向天空、居民窗户等非目标区域投射,显著降低眩光与天空辉光的强度。光学棱镜与透镜通过折射、反射原理重构光线分布,使光线按照预设轨迹均匀覆盖目标区域,提升照明均匀度的同时减少光线浪费,不仅能降低光污染程度,还能改善照明质量,为不同场景提供舒适且环保的光照环境,兼具污染控制与功能优化双重价值,其技术适配性需结合光源类型与照明场景调整,确保在各类城市区域发挥最佳效果。

### 4 控制技术的场景化应用实践

#### 4.1 商业区照明的污染控制应用

商业区照明需兼顾氛围营造与污染防控,技术应用呈现多元融合特征。控制策略采用分时与按需结合的模式,傍晚至夜间人流高峰时段维持符合商业活动需求的较高亮度,保障店铺展示效果与行人活动安全,进入晚间十点后系统自动下调核心区域亮度,关闭非主干道、景观小品等非核心区域的装饰灯<sup>[5]</sup>。

建筑物景观照明均配备定制化遮光装置,依据建筑立面结构与周边环境特点设计遮挡角度,确保光线集中投射于建筑立面,精准展现建筑夜间美学效果,同时严格避免光线向周边居住区窗户、天空等区域扩散,最终实现商业活力与环境友好的平衡。

商业照明与其他照明区域的特点,是有大量的广告牌匾、LED屏等。应在景观照明基础上增加对广告牌匾、LED屏的光污染控制。广告牌匾的光污染控制见表4, LED屏的光污染控制见表5。

#### 4.2 居住区周边的照明技术实践

居住区光污染以住宅建筑居室窗户外表面上的垂直照度限值和照明灯具朝向居室窗户的发光强度限值为评价指标。

分区控制技术依据居住区功能布局,将周边划分为核心居住带与公共活动带,核心居住带仅设置满足基础安全需求的最低亮度,避免光线过强影响居民休

息，公共活动带则可根据居民夜间广场舞、散步等活动规律适度调节亮度，且所有景观照明在熄灯时段关闭，仅保留道路两侧基础路灯维持通行安全。路灯与景观灯均加装防眩光器件，借助物理阻隔结构与特殊光线折射设计降低灯具直射光强度，使光线均匀洒向地面，减少眩光对行人与车辆的干扰，营造出静谧、舒适的夜间居住环境。

表 4 牌匾标识发光表面的平均亮度最大允许值

| 发光面面积 / m <sup>2</sup> | 不同环境区域平均亮度最大允许值 / (cd/m <sup>2</sup> ) |    |     |     |       |
|------------------------|--|----|-----|-----|-------|
|                        | E0                                     | E1 | E2  | E3  | E4    |
| S ≤ 0.5                | —                                      | 50 | 400 | 800 | 1 000 |
| 0.5 < S ≤ 2            | —                                      | 40 | 300 | 600 | 800   |
| 2 < S ≤ 10             | —                                      | 30 | 250 | 450 | 600   |
| 10 < S ≤ 50            | —                                      | —  | 150 | 300 | 400   |
| 50 < S ≤ 150           | —                                      | —  | 100 | 200 | 300   |
| S > 150                | —                                      | —  | —   | 150 | 200   |

(注：1. 表内系全白色发光表面在夜晚的限值；如采用动态彩色画面，限值取表中数值的 1/2。2. 设施安装位置位于建筑裙房 24 m 高度内时，相应限值应为表内数值的 1/2。3. 设施安装位置位于的建筑裙房 24 ~ 50 m 高度范围内，相应限值应为表内数值的 2/3。)

表 5 LED 屏夜间平均亮度最大允许值

| 照明技术参数 | 照明颜色      | 环境亮度区 |      |      |      |      |
|--------|-----------|-------|------|------|------|------|
|        |           | E0 区  | E1 区 | E2 区 | E3 区 | E4 区 |
| 平均亮度   | 全彩色或多色显示屏 | —     | 50   | 200  | 400  | 600  |
|        | 单红色       | —     | 15   | 60   | 120  | 180  |
|        | 单绿色       | —     | 30   | 120  | 240  | 360  |
|        | 单蓝色       | —     | 5    | 20   | 40   | 60   |

(注：1. 表内为全白色广告画面在夜间平均亮度限制值。2. 有颜色画面的平均亮度最大允许值应为表中数值的 70%。)

#### 4.3 生态保护区周边的技术探索

生态保护区周边照明以生态保护为首要原则，技术应用遵循最小干预理念，最大限度降低对保护区内地植物生存环境的影响，光源选择上专门采用窄光谱类型的灯具，这类灯具的光线波长范围集中，能有效减少对动植物生物钟的干扰，规避因光线刺激导致植物花期紊乱、动物行为异常等问题，同时严格限定灯

具的功率与亮度，依据保护区边界距离与生态敏感程度设定参数阈值。

控制方式上采用感应模式，仅在保护区周边道路、出入口等关键点位布设灯具。当传感器侦测到行人或车辆时自动开启，无车无人时则保持关闭，以此动态控制最大限度缩短照明时间，减少光辐射对生态的持续影响。灯具还配备精准控光光学组件，通过特殊透镜与光路设计，约束光线仅覆盖必要道路区域，避免向周边植被与水体的溢散。同时，设备外观采用与环境相融的隐蔽色调，降低视觉干扰，从而全方位减轻照明系统对保护区的整体影响<sup>[6]</sup>。

#### 5 光污染控制的落地保障

光污染控制需构建政府、科研机构与企业协同推进的体系，形成联动合力。政府层面制定专项技术标准与法规，对采用先进技术的城市照明项目给予资金补贴与税收优惠，同时建立专项监管团队，加强建设与运营环节的质量核查，确保技术规范应用。标准与科研机构，通过研究，明确不同区域光污染控制指标。企业加大技术研究，提供光污染控制技术，向工程方提供定制化解决方案，根据项目需求调整技术参数，配套开展安装与维护培训，提升施工人员操作能力，保障技术落地效果。

#### 6 结语

本文围绕城市景观照明光污染控制的标准要求、场景化实践展开深入探讨，明确控制技术的策略。技术落地则需依托政府、科研机构与企业的协同体系，以标准法规为引领、成果转化纽带，打通技术落地通道。这些研究为平衡城市景观照明功能与生态环保需求提供可行路径，未来需持续推动技术迭代与机制完善，助力城市夜间环境实现可持续发展。

#### 参考文献：

- [1] 林雨晨,陈思源.城市景观照明光污染的技术防控路径研究[J].环境科学学报,2024,43(04):98-105.
- [2] 江亦帆,周子昂.基于光谱优化的 LED 照明污染控制技术[J].照明工程学报,2025,34(06):32-38.
- [3] 胡依然.景观照明工程的创新管理途径研究[J].居业,2024(11):169-171.
- [4] 徐国栋.城市滨水景观照明设计研究[J].光源与照明,2024(06):7-9.
- [5] 雷龙,盛杰.城市景观照明维护管理现状分析:以重庆市渝中区为例[J].城市管理与科技,2022,23(05):46-48.
- [6] 刘晨宸.城市休闲广场景观照明光污染防治研究[J].光源与照明,2021(08):62-63.

# 基于人工生态构筑物的海岸侵蚀防护研究

聂间间

(灌云县国家海域使用动态监管中心, 江苏 连云港 222200)

**摘要** 本文围绕人工生态构筑物在海岸侵蚀防护中的技术应用展开系统研究。通过分析海岸侵蚀机理、波浪动力学、沉积物运动规律及多源环境数据, 提出了一套涵盖材料选择、结构设计、功能化构件及智能监测的防护技术方案。研究重点包括高性能混凝土与复合材料耐久性设计、人工根系结构及孔隙材料增强沉积物固定的构件布局优化、波浪消能与流体动力模拟技术及基于传感器的实时监测与数据反馈机制, 以期为海岸防护工程的数字化、智能化提供可参考的技术路径。

**关键词** 人工生态构筑物; 海岸侵蚀; 高性能混凝土; 结构布局; 智能监测

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.037

## 0 引言

海岸侵蚀威胁生态安全与人类活动, 传统刚性防护破坏自然平衡。本研究聚焦人工生态构筑物, 通过模拟自然形态(如生态堤、人工礁), 探索其减缓波浪能、促进泥沙淤积的机制。结合材料力学与生态工程, 评估不同设计参数对防护效能及生物多样性的影响, 为可持续海岸管理提供科学依据。

## 1 海岸侵蚀机理与影响因素分析

海岸侵蚀是风浪作用、潮汐运动、潮流剪切应力和沉积物输运共同作用产生的结果, 1~3 m浪高情形下, 波浪冲击力可达到10~50 kPa/m<sup>2</sup>, 对裸露岸坡产生明显剪切应力, 引发坡面泥沙位移及微结构破坏<sup>[1]</sup>。潮汐涨落致使岸坡泥沙含水率周期性变动, 增加表层土体不稳定性, 特别是在砂质土层(厚度2~5 m)上体现得显著, 而下伏黏土层(厚0.5~1 m)可形成滑动面, 影响局部侵蚀模式, 流体动力模拟结果显示, 如果沿岸流速超出0.8~1.2 m/s, 细粒沙(粒径0.1~0.5 mm)容易被带走, 导致岸线往后退0.5~1.0 m/年。

在工程应用中, 影响侵蚀速度的因素要进行量化

解析, 凭借历史潮位记录、风速(平均8~12 m/s)、浪高及潮流观测数据, 可构建动力侵蚀模型, 针对波浪冲击压力、沿岸流速分布及沉积物输运路径开展数值模拟(网格尺寸0.05~0.1 m), 时间步长0.01 s。岸段地形、坡角还有地质结构信息(如砂质土层厚度、黏土层厚度及海床起伏情况)被放进模型边界条件中, 实现对局部侵蚀力学特性的精准核算, 为人工生态构筑物选类型、孔隙率设计及布置间距提供具体技术参数, 保证防护设计可量化、可操作。

## 2 人工生态构筑物类型与作用机制

### 2.1 类型分类

人工生态构筑物可依照功能和结构特性分成生态堤、人工礁、复合防护结构及孔隙构件四类, 见表1。生态堤用高性能混凝土或者混凝土复合材料, 截面宽度2~4 m, 高度1.5~3 m, 通过整体堤体吸纳与分散波浪能量, 同时可嵌入孔隙或者凹槽来增强沉积物固定能力; 人工礁由单个0.5~2 t的混凝土或者复合材料模块构成, 布置间隔2~5 m, 表面做粗糙化处理(摩擦系数≥0.6), 波浪冲击下形成局部能量耗散区; 复合防护结构由混凝土+孔隙构件组成, 具有波浪消能+沉积物固定功能; 孔隙构件由复合材料+混凝土组成, 具有水流分散、涡流形成、沉积物稳定功能。

表1 构件类型及主要参数

| 构件类型   | 材料       | 截面/单体尺寸             | 孔隙率               | 功能                  |
|--------|----------|---------------------|-------------------|---------------------|
| 生态堤    | 高性能混凝土   | 宽2~4 m,<br>高1.5~3 m | 5~20 cm孔径, 可嵌孔    | 波浪能耗分散、沉积物固定        |
| 人工礁    | 混凝土/复合材料 | 单体0.5~2 t           | 表面粗糙化摩擦<br>系数≥0.6 | 局部波浪消能、能量耗散区        |
| 复合防护结构 | 混凝土+孔隙构件 | 模块化组合               | 30%~40%           | 波浪消能+沉积物固定          |
| 孔隙构件   | 复合材料/混凝土 | 孔径5~20 cm           | 30%~40%           | 水流分散、涡流形成、<br>沉积物稳定 |

合防护结构连混凝土护坡和嵌套孔隙构件，可实现波浪消能和沉积物固定的功能；孔隙构件孔径 5~20 cm，占总体积 30%~40%，通过把控孔隙率和布置密度，实现水流散开、局部漩涡生成及沙粒稳固，为沿岸防护提供模块化、可量化设计方案<sup>[2]</sup>。

## 2.2 作用机理

人工生态构筑物主要凭借结构形态、孔隙设计及材料特性调节波浪动能与沉积物输运过程，波浪在构件表面反射和渗透可降低冲击能量 30%~60%，孔隙构件中形成涡流，局部耗能效率提高 20%~40%，大幅减慢沙粒移动速度大概 40%~50%；复合构件通过孔隙或者人工根系样子的机械固定点，把细粒沉积物限定在构件周边 1~2 m 范围内，增加局部岸坡稳定性；结构布局结合三维流体动力学模拟（CFD，网格尺寸 0.05~0.1 m，时间步长 0.01 s），可精准算出波峰压力分布、流速矢量及局部沉积物输运路径，为防护结构优化设计和构件间距调整提供科学依据，同时保证整体稳定性系数 ≥ 1.5，极端风暴潮状况下仍可维持防护作用。

## 3 人工生态构筑物设计原则

人工生态构筑物设计要兼顾结构力学性能、耐久性、波浪消能及沉积物控制能力，同时确保施工和维护具备可操作性。在材料选择方面，构件适合用高性能混凝土（C50~C60）或者复合材料，抗压强度 ≥ 50 MPa，抗折强度 ≥ 8 MPa，耐腐蚀性要确保在海水浸泡环境中 ≥ 10 年，同时针对潮汐和盐雾环境做加速老化实验验证；结构布局设计要依据 CFD 三维流体动力学模拟（网格尺寸 0.05~0.1 m），时间步长 0.01 s，剖析波浪冲击压力分布、局部涡流及沉积物输运路径，确保波浪能耗 ≥ 40%，沉积物移动速度下降 30%~50%，整体稳定性系数 ≥ 1.5；构件间距、堤高和坡度要结合极端风暴潮条件（浪高 Hmax=3.5 m，周期 T=8~10 s）优化，与此同时采用模块化设计（单体重量 0.5~2 t），利于吊装布置和后期维护；构件表面可借粗糙化或者孔隙设计提高局部摩擦系数 ≥ 0.6，增沉积物固定和局部消能效率，实现工程化防护结构长期可靠运作及数字化管理支撑。

## 4 基于人工生态构建物的海岸侵蚀防护关键技术

### 4.1 材料选择与耐久性分析

材料挑选是人工生态构筑物防护性能的关键，高性能混凝土（C50/C60）适合用粉煤灰掺量 20%~30%、矿粉掺量 15%，水胶比把控在 0.35~0.40，添加聚羧酸减水剂把坍落度调至 180~220 mm，保证浇筑密实度；混凝土配合比要经过海水浸泡耐久性试验，涵盖氯离子

渗透（30%~35% 盐度、温度 5~30 °C）及冻融循环（50 次），保证抵抗氯离子侵蚀 10~15 年。在复合材料方面，玻纤增强聚合物和矿物填料混合制板材或模块体，抗拉强度 ≥ 200 MPa，密度 1.8~2.0 g/cm<sup>3</sup>，经拉伸和弯曲疲劳试验验证长期承载能力；孔隙率能调至 30%~40%，增强沉积物固定和水流渗透性<sup>[3]</sup>。

耐蚀金属多用于关键受力地方，比如镍铬合金钢板厚度是 5~10 mm，经盐雾试验（周期 500 h）及电化学腐蚀测试，寿命设计 ≥ 20 年；所有金属构件表面要采用热喷涂或者阴极保护处理，保证长期耐海水侵蚀。生态功能复合材料在孔隙内部留出机械固定点，用钢筋或者复合杆件加固，孔径把控在 5~20 cm，保证沉积物能在构件中形成稳固锁定位置。

材料选型要结合施工和维护要求制订详细操作规范，包含浇筑温度控制在 5~35 °C 区间、复合材料层间固化时间 24~48 小时、金属构件安装前做表面粗糙化处理（Ra ≥ 0.8 μm），且配套运用模板或模块化安装方式确保精度 ±5 mm。所有材料需形成数据库记录，涵盖批次号、抗压抗折强度、密度、孔隙率及耐腐蚀实验结果，为后期施工监控及数字化管理提供基础数据。

### 4.2 结构布局与波浪力学分析

人工生态构筑物结构布局要基于精准波浪力学及沉积物输运模拟来建立：

首先，运用 CFD 三维流体动力学软件搭建沿岸防护段数字模型，网格尺寸把控在 0.05~0.1 m，时间步长 0.01 s，输入历史潮位、波高（H = 0.5~3.5 m）、波周期（T=4~10 s）、沿岸流速及海床形态数据，算出不同堤段和构件布置情况下的波峰压力、流速矢量及局部涡流特性。模型中堤坡角度设成 1:2 至 1:3，堤顶宽度 2~4 m，孔隙构件间隔 2~5 m，且能调节孔隙率 30%~40% 及孔径 5~20 cm，满足水流散开与能量消耗的技术需求。

其次，在施工布置阶段，每个模块化构件（重量 0.5~2 t）要依照 CFD 模拟优化结果来编号与定位，堤段之间用插销或者预制互锁接口，保证整体稳定性系数 ≥ 1.5；布置精度把控在 ±5 cm，坡度与间距偏差允许范围 ±2 cm。在施工过程中，要详细记好吊装顺序、模块方向和间距，在关键堤段布设激光扫描标记或者辅助测量标尺，实现施工布置和模拟设计的一致性，为后续结构监测及维护提供数据根基。

再次，布局优化需要结合沉积物输运控制，通过模拟解析孔隙中流速和涡流路径，把局部流速控制在 0.3~0.5 m/s 区间，让沉积物在孔隙周围 1~2 m 范围内能够被机械固定住，依据模拟结果调节模块倾角、间距和孔隙排列方向，并创建施工操作手册，明确每

个模块的孔隙朝向、模块间锁定办法及堤段布置次序，实现结构和流体动力学协同设计。

最后，施工前能做小型物理模型实验或者数值敏感性分析，验证堤段布设对波浪冲击和沉积物流动的反应，能凭借可调节孔隙模块、各异堤坡角度及模块间距，对比波浪能耗和局部流速场分布，生成施工优化参数表，为大规模布设供应可靠技术参照。同时，施工操作手册要涵盖模块编号、布置精度、安装顺序及锁定方法的详细要求，保证施工和设计模拟高度相符。

#### 4.3 功能化生态构件技术

功能化生态部件通过结构设计实现沉积物固定及波浪减能的复合功能。

首先，构件孔隙率设计处在 $30\% \sim 40\%$ 范围，孔径 $5 \sim 20\text{ cm}$ ，孔隙中预留钢筋或者玻纤复合杆件嵌入点，间距 $0.2 \sim 0.5\text{ m}$ ，用以机械固定沉积物。构件表面要做粗糙化处理（摩擦系数 $\geq 0.6$ ），经三维CFD流体动力学模拟来验证孔隙内涡流形成及边界层流速分布，确定孔隙方向和排列方式，每个构件都要编号，施工按设计编号装，记孔隙率和杆件位置，保证构件内部结构一致。

其次，构件布置要依照岸段地形、波向及流速做三维优化，功能化构件布置可和人工鱼礁模块协同，利用孔隙方向和模块间距优化涡流路径，利用数字化管理平台监测鱼礁生态功能，实现防护与生态双重目标，通过CFD软件仿真不同模块组合方案，剖析波峰压力、局部涡流及沉积物输运路径，凭借调整孔隙方向、模块间距和倾斜角度实现涡流稳定<sup>[4]</sup>。在施工中，每个模块通过吊装或者滑移来安装，孔隙孔径和间距偏差控制在 $\pm 2\text{ cm}$ 以内，模块倾角偏差 $\leq 3$ 度，堤段交接处用互锁接口或者横向连接件，为确保整体稳定性，施工记录要归入数字化管理系统，包含模块编号、孔隙率、杆件位置及倾角信息。

再次，功能化构件施工要结合后期维护和监测要求，孔隙中机械固定点、人工根系构造及模块编号形成详细施工图纸和数据库，利于往后拆装或者替换，施工完成后，可借激光扫描或者三维摄影测量记下孔隙分布、杆件位置及表面粗糙度，数据放进管理平台，实现构件状态和流场参数的数字化对照。

最后，标准化施工手册包含模块吊装顺序、孔隙布置精度、杆件安装间距和倾角要求，施工操作联合CFD模拟成果与现场测量数据，可对模块间互锁成效、孔隙朝向及局部流速场做调整，手册中还要明确施工前后数字化验证流程，为智能监测系统安装、维护及后续构件替换提供技术根据，保证功能化构件结构及沉积物固定功能可操作、可重复去做。

#### 4.4 智能监测与维护技术

智能监测系统通过多源传感器实时收集结构应力、位移、沉积物厚度和水位数据，光纤应变计布置在关键受力构件，精度 $\pm 5\mu\epsilon$ ，可监测瞬间应变改变；水位计精度 $\pm 1\text{ cm}$ ，流速传感器精度 $\pm 0.02\text{ m/s}$ ，沉积物厚度探测仪精准度 $\pm 1\text{ cm}$ ，经无线网络按 $1\text{ Hz}$ 采样频率上传到中央监控系统，实现实时数据收集<sup>[5]</sup>。传感器布置要依照网格化准则，关键堤段每隔 $5\text{ m}$ 布置一组，保证局部波浪力和沉积物变化数据涵盖全面。

数据处理用自动化分析算法，包含波浪力计算、局部涡流识别及沉积物厚度变化量化，可在后台生成二维或者三维可视化流场模型，系统为异常数据设阈值（如应变超 $500\mu\epsilon$ 、水位波动 $> 0.5\text{ m}$ 或者沉积物厚度变化 $> 10\text{ cm}$ ），通过预警模块引发报警，还会自动记下事件时间、地点及传感器状态。

维护操作要结合监测数据建标准化流程，构件如果出现应力超限或者孔隙堵塞，可依照编号顺序开展局部替换或者清理，吊装精准度 $\pm 5\text{ cm}$ ；传感器出故障时可靠冗余传感器覆盖，保持数据连续性；全部监测数据、维护记录和构件状态要一同存进数字化管理平台，实现长期结构健康监测和维护计划的闭环管理。

#### 5 结语

本文围绕人工生态构筑物的海岸侵蚀防护技术进行系统剖析，提出材料挑选、结构安排、功能化部件及智能监测的技术实现途径，通过高性能混凝土、复合材料和耐腐蚀金属构件优化、波浪力学模拟指引的结构布局，以及孔隙构件和人工根系功能化设计，实现沉积物固定和能量消散协同效应，辅助传感器数据监测，为海岸防护工程提供可量化、可操作的技术方案。未来可结合数字孪生技术再优化防护布局，实现全生命周期管理。

#### 参考文献：

- [1] 王庆,朱君,战超.海岸侵蚀与防护技术研究进展[J].海岸工程,2022,41(04):301-312.
- [2] 刘蓉.框架式人工鱼礁在海岸带生态保护修复中的应用[J].水利规划与设计,2025(05):156-160.
- [3] 李相逸,刘育辰,赵九州,等.深圳西部海岸带生态保护和修复策略研究[J].住区,2024(01):100-109.
- [4] 李杨帆,向枝远,杨奕,等.基于韧性理念的海岸带生态修复规划方法及应用[J].自然资源学报,2020,35(01):130-140.
- [5] 陈君,林祥.江苏海岸侵蚀及其防护工程研究进展[J].水利水电科技进展,2024,44(05):1-6,31.

# 电梯门系统故障机理与可靠性提升技术研究

吴尉铭

(广东省特种设备检测研究院中山检测院, 广东 中山 528400)

**摘要** 电梯门系统作为电梯安全运行的子系统, 其故障占比长期占据电梯总故障的 30%~50%, 是制约乘梯安全与运行效率的关键瓶颈。本文针对该问题展开系统研究, 采用故障模式与影响分析, 提出了可靠性提升技术。通过实验验证, 应用该技术体系后, 电梯门系统 MTBF 从传统的 450 小时提升至 1 800 小时, 故障修复时间缩短, 维护成本降低, 为电梯门系统的可靠性设计与运维提供了实践方案。

**关键词** 电梯门系统; 故障机理; 可靠性提升技术

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.038

## 0 引言

电梯作为高层建筑垂直交通的核心载体, 其运行可靠性直接关系到民生安全与城市交通效率, 其中, 门锁卡滞、传感器失效等故障, 不仅影响用户体验, 更存在安全隐患。因此, 深入分析电梯门系统故障根源, 建立科学的可靠性评估方法, 提出针对性技术改进策略, 对降低电梯故障发生率、保障乘梯安全具有重要的现实意义。

## 1 电梯门系统故障机理分析

### 1.1 机械结构故障机理

结构是门系统实现开关动作的核心执行单元, 根据 1 200 台电梯运维数据统计, 机械故障占门系统总故障的 58%, 且主要集中于门锁机构、门机传动系统及门页导向机构三大部件, 其故障根源多为长期机械摩擦导致的磨损、循环载荷引发的疲劳失效, 以及异物侵入造成的卡滞。

#### 1.1.1 门锁机构故障

1. 锁钩与锁挡磨损, 占门锁故障的 65%。锁钩与锁挡在每次开关门过程中均会发生碰撞接触, 磨损量随开关次数呈线性累积。当开关次数达 15 000 次时, 传统碳钢锁钩磨损量约 0.3 mm, 达 20 000 次时, 磨损量超过 0.5 mm, 此时锁闭深度低于 7 mm 的安全标准, 会触发安全回路断开, 导致电梯停运。现场运维数据显示, 此类故障单次平均修复时间需 45 分钟, 是机械故障中修复耗时最长的类型之一。

2. 异物卡滞, 占门锁故障的 10%。电梯井道内的粉尘、金属碎屑、电梯轿厢内掉落的毛发等异物, 易通过门锁缝隙进入锁腔, 当异物堆积量超过 0.5 g 时, 会阻碍锁钩运动, 使开关门阻力从正常的 80 N 升至 150 N 以上, 触发门机过载保护, 导致门系统停摆<sup>[1]</sup>。

#### 1.1.2 门机传动系统故障

1. 步带拉伸变形。传统门机多采用橡胶同步带, 长期运行后易因材料蠕变发生塑性变形。当运行时间达 5 000 小时、同步带伸长量超过原长度的 2% 时, 传动精度显著下降, 门开关速度波动从  $\pm 0.05$  m/s 扩大至  $\pm 0.1$  m/s, 易引发门到位检测失败, 导致门系统反复开关。

2. 齿轮箱磨损与润滑油劣化。门机齿轮箱内的齿轮长期啮合运行, 需依赖润滑油降低摩擦损耗。但润滑油在高温机房温度超过 35 ℃环境下易氧化劣化——运行 5 000 小时后, 润滑油黏度从 400 cSt 降至 280 cSt, 润滑效果下降 30%; 超过 8 000 小时后, 黏度进一步降至 200 cSt 以下, 齿轮齿面磨损加剧, 当齿面磨损量超过 0.2 mm 时, 传动噪声从正常的 60 dB 升至 75 dB 以上, 传动效率降低 15%, 严重时会导致齿轮卡死。

#### 1.1.3 门页导向机构故障

1. 导轨变形与滑块磨损。导轨安装时若直线度误差超过 0.3 mm/m, 门页运行过程中会与导轨发生不均匀摩擦, 加速滑块磨损。在正常工况下, 滑块厚度每运行 10 000 次减少 0.5 mm。当导轨直线度误差超标时, 磨损速度加快 2 倍, 滑块厚度减少 2 mm 时, 门页运行阻力从 80 N 增至 120 N, 触发门机过载保护。

2. 粉尘堆积。商场、工地等场景的电梯导轨表面易堆积粉尘, 使导轨与滑块间的摩擦系数从 0.15 升至 0.3, 滑块磨损速度加快 40%, 寿命从传统的 30 000 次开关缩短至 18 000 次, 需频繁更换滑块, 增加运维成本。

为了清晰呈现机械故障的分布特征与关键参数, 将上述统计数据整理为表 1。

### 1.2 电气系统故障机理

电气系统是门系统的“控制中枢”, 负责接收电梯主控指令、监测门系统运行状态并驱动电机动作, 其故障占门系统总故障的 32%。

表1 电梯门系统机械故障类型及统计数据

| 故障类型   | 具体失效形式         | 占机械故障比例 (%) | 单次故障平均修复时间 (min) | 关键失效阈值               | 典型寿命 (开关次数 / 小时)    |
|--------|----------------|-------------|------------------|----------------------|---------------------|
| 门锁机构   | 锁钩磨损、弹簧疲劳、异物卡滞 | 42          | 45               | 锁钩磨损>0.5 mm、弹簧断裂     | 20 000 次            |
| 门机传动系统 | 同步带拉伸、齿轮磨损、油劣化 | 35          | 60               | 同步带伸长>2%、齿面磨损>0.2 mm | 60 000 次 / 8 000 小时 |
| 门页导向机构 | 导轨变形、滑块磨损、粉尘堆积 | 23          | 30               | 滑块厚度减少>2 mm、摩擦系数>0.3 | 30 000 次            |

### 1.2.1 传感器故障

1. 光电传感器失效，占传感器故障的60%。光电传感器通过发射与接收红外线检测门区域障碍物，但其光学镜头易受粉尘覆盖，商场电梯日均粉尘沉积量达 $0.5 \text{ mg/cm}^2$ ，运行30天后，镜头透光率从95%降至75%，检测距离从5 m缩短至4 m以下，易漏检身高较矮的儿童或小型障碍物，存在安全隐患。同时，传感器内部电路长期运行后会发生老化，运行超过30 000小时后，故障率从初始的2%升至15%，需整体更换传感器<sup>[2]</sup>。

2. 位置传感器故障，占传感器故障的30%。编码器通过码盘旋转输出脉冲信号计算门位置，若码盘因振动发生磨损，电梯运行振幅超过0.1 mm时，或受电机电磁干扰，会导致位置检测误差超过 $\pm 5 \text{ mm}$ ，引发门开关到位不准确。例如：门实际已关闭但控制器判定未到位，导致门反复关合。此类故障需重新校准编码器，平均修复时间约30分钟。

### 1.2.2 门机控制器故障

1. 电容鼓包。控制器内的电解电容对温度敏感，当电梯机房温度超过40 °C时，电容寿命会缩短至正常环境的50%，运行20 000小时后，电容鼓包概率达30%，鼓包后电容容量下降40%，导致控制器输出电压不稳定，电机驱动电流波动超过 $\pm 10\%$ ，门开关速度忽快忽慢。

2. 芯片虚焊。电梯运行过程中产生的振动尤其是老旧楼宇电梯，振幅可达0.15 mm会导致控制器芯片引脚与电路板焊点脱落，形成虚焊。当接触电阻超过0.1 Ω时，控制信号传输中断，门系统完全瘫痪，需拆机重新焊接或更换控制器，平均修复时间超过2小时，是电气故障中影响最严重的类型。

## 2 电梯门系统可靠性评估方法

### 2.1 故障模式与影响分析

FMEA通过分析各部件的故障模式对系统功能的影响程度，计算风险优先级(RPN)，进而识别需优先改进的高风险项。其计算公式为：

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

式(1)其中，S(严重度)为故障对系统功能的影响程度，O(发生概率)为故障发生的频率，D(检测难度)为故障被发现的难易程度<sup>[3]</sup>。

基于1 200台电梯的运维数据，对门系统关键部件开展FMEA分析，选取典型部件的分析结果如下。

1. 门锁机构。故障会导致电梯困人，严重度S=9，每运行10 000小时平均发生6次，发生概率O=6；锁钩磨损需拆机检查才能发现，检测难度D=7，因此 $RPN = 9 \times 6 \times 7 = 378$ ，属于高风险项，需优先改进。

2. 光电传感器。故障会导致漏检障碍物，存在安全隐患，严重度S=7，每运行5 000小时平均发生8次，发生概率O=8，镜头污染可通过定期目视检查发现，检测难度D=4，因此 $RPN = 7 \times 8 \times 4 = 224$ ，属于中风险项。

3. 门机控制器。故障会导致门系统瘫痪，严重度S=8，每运行20 000小时平均发生5次，发生概率O=5，电容鼓包需拆机测量容量才能确认，检测难度D=6，因此 $RPN = 8 \times 5 \times 6 = 240$ ，属于中风险项。

4. 门机传动同步带。故障会导致门到位不准确，严重度S=7，每运行6 000小时平均发生7次，发生概率O=7，同步带拉伸可通过测量长度差检测，检测难度D=5，因此 $RPN = 7 \times 7 \times 5 = 245$ ，属于中风险项。

### 2.2 基于指数分布的可靠性模型

在电梯门系统的稳定运行阶段，即随机故障期，排除初期磨合故障与后期耗损故障，其故障发生规律服从指数分布，该分布可通过可靠性函数与MTBF量化系统可靠性水平<sup>[4]</sup>。

指数分布的公式包括：

1. 可靠性函数： $R(t) = e^{-\lambda t}$ ，其中R(t)为系统运行t小时后仍正常工作的概率， $\lambda$ 为失效率(次/小时)。

2. 平均无故障工作时间(MTBF)： $MTBF = \frac{1}{\lambda}$ ，表示系统两次故障之间的平均运行时间，是衡量可靠性的核心指标。

根据某电梯企业的运维数据，传统门系统在稳定

运行阶段, 100 台电梯累计运行 100 000 小时内共发生故障 220 次, 则失效率  $\lambda = \frac{\text{故障次数}}{\text{总运行时间}} = \frac{220}{100000} = 0.0022$  次 / 小时, 对应的  $MTBF = \frac{1}{0.0022} \approx 454.5$  小时, 与现场实际观测的传统门系统  $MTBF$  约 450 小时高度吻合, 验证了该模型的适用性。

### 3 电梯门系统可靠性提升技术

#### 3.1 机械结构优化技术

1. 门锁机构耐磨优化。(1) 锁钩材料升级。将传统碳钢锁钩更换为表面渗氮处理的 40Cr 钢锁钩, 渗氮处理可使锁钩表面硬度提升, 摩擦系数和磨损速率降低。现场测试表明, 渗氮锁钩的使用寿命从 20 000 次开关延长至 50 000 次, 且磨损量达 0.5 mm 时的运行次数从 20 000 次增至 50 000 次, 远超安全阈值要求。

(2) 摩擦副减磨设计。在锁钩与锁挡的接触面上加装 0.5 mm 厚的聚四氟乙烯垫片, 利用聚四氟乙烯的低摩擦特性减少机械冲击, 异物卡滞概率降低, 垫片无需额外添加润滑剂。

2. 门机传动系统效率提升。(1) 同步带材料更换。将传统橡胶同步带更换为聚氨酯同步带, 聚氨酯材料具有优异的抗蠕变性能, 拉伸率从橡胶带的 2% 降至 0.5% 以下, 传动精度提升至  $\pm 0.05$  mm/s, 可有效避免门到位检测失败; 同时, 聚氨酯同步带的耐老化性能更优, 使用寿命从 8 000 小时延长至 20 000 小时, 更换周期延长 2.5 倍。(2) 齿轮箱长效润滑方案。在齿轮箱内填充黏度指数  $> 400$  的合成润滑油, 该润滑油在  $-10 \sim 120$  °C 温度范围内黏度变化小, 氧化稳定性优异。测试表明, 合成润滑油的换油周期从传统矿物油的 5 000 小时延长至 15 000 小时, 齿轮齿面磨损量减少, 传动效率长期维持在 95% 以上, 传动噪声控制在 65 dB 以下。

3. 门页导向机构阻力降低。(1) 导轨与滑块改进。将传统冷轧钢导轨更换为不锈钢导轨, 表面粗糙度从 Ra1.6 μm 降至 Ra0.8 μm, 减少滑块与导轨的摩擦阻力。滑块采用内含固体润滑剂的自润滑复合材料, 运行阻力从 150 N 降至 80 N, 滑块寿命从 30 000 次开关延长至 60 000 次, 无需定期补充润滑剂<sup>[5]</sup>。(2) 导轨防尘设计。在导轨两端加装风琴式防尘罩, 防尘罩随门页运动同步伸缩, 可完全覆盖导轨表面。应用后, 导轨表面粉尘堆积量减少 70%, 摩擦系数稳定在 0.15 左右, 避免因粉尘导致的门页卡阻故障。

#### 3.2 电气系统冗余与防护技术

1. 传感器双备份设计。采用主备双传感器并联架构, 实现关键检测信号的冗余备份, 避免单点传感器

失效导致系统故障。障碍物检测冗余。在门系统两侧同时部署光电传感器与超声波传感器, 光电传感器作为主传感器, 超声波传感器作为备传感器, 当光电传感器镜头污染导致检测距离缩短至 4 m 以下时, 系统自动切换至超声波传感器, 检测距离稳定 5 m, 确保障碍物检测不中断。根据可靠性并联公式, 当单传感器可靠性  $R_1=R_2=0.97$ , 则双备份后传感器系统可靠性  $R=1-(1-R_1)(1-R_2)=0.9991$ , 失效概率从 0.03 降至 0.0009, 可靠性提升 33 倍<sup>[6]</sup>。

2. 门机控制器双 CPU 架构。门机控制器采用主备双 CPU 设计, 主 CPU 负责正常控制逻辑, 备用 CPU 实时监测主 CPU 的运行状态。正常工况下, 主 CPU 工作, 备用 CPU 仅监测不输出, 当主 CPU 发生故障, 备用 CPU 在 50 ms 内检测到异常并接管控制, 确保门系统不瘫痪。双 CPU 架构采用“热备份”模式, 无需重启系统即可完成切换, 现场测试表明, 该设计使控制器失效导致的系统瘫痪概率从 0.02 降至 0.004, 平均无故障时间从 20 000 小时延长至 80 000 小时, 可靠性提升 4 倍。

### 4 结束语

未来研究可进一步融合数字孪生技术, 构建电梯门系统的虚拟仿真模型。通过实时映射物理门系统的运行状态, 模拟不同故障场景下的系统响应, 优化维护策略。同时, 依照大数据分析挖掘故障与运行参数的隐性关联, 进一步提升故障预测准确率, 推动电梯门系统向零故障智能化运维方向发展, 结合前文机械耐磨优化、电气双备份技术成果, 将实时运维数据接入虚拟模型, 实现故障前兆精准识别, 同时基于 FMEA 调整风险优先级, 降低故障发生率, 完善可靠性技术体系。

### 参考文献:

- [1] 冯斌, 李颖聪, 倪鹏飞, 等. 基于故障树分析的防爆电梯危险源辨识 [J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(01):64-68.
- [2] 陶金. 基于虚拟仿真平台的电梯调试实训系统设计 [J]. 计算机应用文摘, 2025, 41(03):126-128.
- [3] 徐界泽, 张雍, 汪家炜. 撞击对电梯层门下部结构的破坏失效研究 [J]. 河北工业科技, 2025, 42(01):80-87.
- [4] 唐美玲, 王小兵, 林必忠. 电梯门机伺服控制系统的设计与实现 [J]. 机电信息, 2024(23):40-45.
- [5] 梁恒诺, 何东山, 李国林. 基于微信小程序的门梯设备管理平台研究 [J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(25):44-47, 68.
- [6] 冯军, 戴俊豪, 丁奇, 等. 基于故障树的电梯门系统可靠性分析 [J]. 产品可靠性报告, 2024(12):119-120.

# 唐徕渠渠道清淤技术与淤积防治长效机制研究

马 琦

(宁夏唐徕渠管理处, 宁夏 银川 750000)

**摘要** 唐徕渠作为宁夏地区重要的灌溉渠道, 承担着为周边农田提供稳定水源的关键任务。然而, 随着使用年限的增加, 渠道内部逐渐出现淤积现象, 不仅影响了灌溉效率, 还对农业生产造成了一定程度的制约。因此, 开展唐徕渠渠道清淤技术与淤积防治长效机制的研究, 对于保障渠道畅通、提高灌溉效益、促进农业可持续发展具有重要意义。本文通过系统分析唐徕渠渠道的淤积原因及现状, 探讨有效的清淤技术和淤积防治策略, 以期为构建长效管理机制提供参考。

**关键词** 渠道; 唐徕渠; 渠道清淤技术; 渠道淤积防治

中图分类号:S27

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.039

## 0 引言

唐徕渠, 这条承载着宁夏地区农业命脉的重要灌溉渠道, 自其建成以来, 便在当地农业生产中发挥着举足轻重的作用。它如同一条蜿蜒的巨龙, 穿梭在广袤的田野之间, 为周边的农田输送着宝贵的水资源。然而, 随着时间的推移, 这条巨龙的身体内部却逐渐出现了“淤积”的顽疾。渠道内的泥沙、杂物等不断沉积, 导致渠道过水能力下降, 灌溉效率大打折扣。这不仅使得农田得不到及时、充足的灌溉, 还对当地的农业生产造成了严重的制约。面对这一严峻形势, 开展唐徕渠渠道清淤技术与淤积防治长效机制的研究尤为迫切和必要。

## 1 唐徕渠渠道淤积现状及影响

### 1.1 唐徕渠渠道淤积现状

唐徕渠主要引黄河水进行灌溉, 而黄河水含沙量较高, 多年平均含沙量达  $35 \text{ kg/m}^3$ , 在渠道输水过程中, 大量泥沙会逐渐沉积。根据实地监测数据, 唐徕渠部分渠段年淤积厚度可达  $0.3 \sim 0.5 \text{ m}$ , 部分淤积严重区域甚至超过  $0.8 \text{ m}$ 。从淤积分布来看, 渠道进口段、弯道段以及渠底坡度较小的渠段淤积更为严重。以唐徕渠某典型弯道段为例, 监测结果显示该段淤积物中粒径大于  $0.05 \text{ mm}$  的粗颗粒泥沙占比达 40%, 粒径在  $0.005 \sim 0.05 \text{ mm}$  之间的中颗粒泥沙占比为 45%, 粒径小于  $0.005 \text{ mm}$  的细颗粒泥沙占比仅为 15%, 这表明黄河水中的粗颗粒泥沙更容易在渠道内沉积。

### 1.2 淤积对唐徕渠渠道功能的影响

淤积会显著降低唐徕渠渠道的过水能力。根据明渠均匀流公式:

$$Q = A \times C \times \sqrt{R \times i} \quad (1)$$

公式(1)中,  $Q$  为渠道过流量,  $A$  为渠道过水断面面积,  $C$  为谢才系数,  $R$  为水力半径,  $i$  为渠道底坡。

当渠道发生淤积时, 渠底高程升高, 过水断面面积  $A$  减小, 同时淤积物会使渠道壁面粗糙程度增加, 谢才系数  $C$  减小, 水力半径  $R$  也随之降低, 最终导致渠道过流量  $Q$  大幅下降。

经计算, 当唐徕渠某渠段淤积厚度达到  $0.5 \text{ m}$  时, 其过流量较无淤积状态下降约 30%, 严重影响了渠道的输水效率。同时, 淤积还会增加渠道的输水能耗。由于淤积导致渠道过水断面减小, 水流速度增大, 水流与渠道壁面及淤积物之间的摩擦阻力增加, 使得水泵等输水设备需要消耗更多的能量才能保证正常的输水流量。根据相关数据统计, 淤积严重的渠段输水能耗较淤积较轻的渠段增加  $20\% \sim 25\%$ , 大大提高了灌溉成本。

## 2 唐徕渠渠道淤积原因分析

### 2.1 黄河水源含沙量大的自然因素

唐徕渠主要依赖黄河水进行灌溉, 而黄河作为世界上含沙量最高的河流之一, 多年平均含沙量达  $35 \text{ kg/m}^3$ , 这是渠道淤积的核心自然诱因。在输水过程中, 黄河水中的泥沙受重力作用不断沉降, 尤其是粒径大于  $0.05 \text{ mm}$  的粗颗粒泥沙, 因沉降速度快, 极易在渠道内沉积。同时, 宁夏地区降水季节分布不均, 汛期时黄河水量增大、流速加快, 会携带更多泥沙进入渠道; 非汛期水量减少、流速减缓, 泥沙沉降速度进一步加快, 导致渠道内淤积物持续累积, 尤其在渠道进口段和底坡较小的渠段, 淤积现象更为明显。

## 2.2 人类生产活动的人为影响

周边人类生产活动是加剧唐徕渠淤积的重要人为因素。一方面，在农业生产中，周边农田的化肥、农药残留以及农作物秸秆等，在降雨或灌溉时随地表径流进入渠道，与泥沙混合形成淤积物，不仅增加淤积厚度，还污染渠道水体；另一方面，部分沿线居民存在向渠道内倾倒生活垃圾、建筑垃圾的行为，这些废弃物难以降解，长期堆积在渠道内，既占用过水断面，又阻碍水流运动，加速泥沙沉积。此外，渠道周边的矿产开采活动产生的矿渣，若防护措施不到位，也会随雨水冲入渠道，进一步加重淤积程度。

## 2.3 渠道自身结构的设计缺陷

渠道自身结构的设计缺陷也会导致淤积问题难以缓解。

一是部分渠段的底坡设计不合理，坡度偏小，导致水流速度缓慢，泥沙无法被有效带走，容易在渠底沉积。

二是渠道弯道段的曲率半径设计不当，水流在弯道处产生离心力，外侧水位升高、内侧水位降低，内侧水流速度减慢，泥沙在弯道内侧大量淤积。

三是渠道沿线的节制闸、分水闸等建筑物布局不合理，水流经过这些建筑物时流速发生突变，容易形成漩涡，导致泥沙在建筑物附近沉积，长期下来不仅影响建筑物正常运行，还会加重渠道整体淤积情况。同时，渠道护岸工程老化破损，也会导致岸边土壤坍塌进入渠道，增加淤积物来源。

## 3 唐徕渠道清淤技术研究

### 3.1 机械清淤技术

机械清淤是目前唐徕渠渠道清淤中应用最为广泛的技术之一，主要包括挖掘机清淤、清淤船清淤和水力冲挖清淤等方式。挖掘机清淤适用于渠道断面较大、淤积物较厚且干燥的渠段。该技术具有清淤效率高、操作灵活等优点，一台中型挖掘机每天可清淤 $300 \sim 500 \text{ m}^3$ 。但挖掘机清淤需要将渠道内的水排空，

表 1 不同机械清淤技术的优缺点对比

|                                | 挖掘机清淤          | 清淤船清淤          | 水力冲挖清淤         |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 适用渠段                           | 断面大、淤积厚且干燥     | 水深大、淤积为淤泥细沙    | 各种类型渠段         |
| 清淤效率 ( $\text{m}^3/\text{天}$ ) | $300 \sim 500$ | $500 \sim 800$ | $200 \sim 400$ |
| 对灌溉影响                          | 大              | 小              | 较小             |
| 清淤成本 ( $\text{元}/\text{m}^3$ ) | $15 \sim 20$   | $20 \sim 25$   | $10 \sim 15$   |
| 优点                             | 效率高、操作灵活       | 不排空水、效率高       | 设备简单、成本低       |
| 缺点                             | 需排空水、破坏边坡      | 受宽度水深限制        | 效率相对较低         |

对灌溉影响较大，且清淤过程中容易对渠道边坡造成破坏。为减少对渠道边坡的破坏，可采用挖掘机配合长臂挖掘机进行清淤，长臂挖掘机可在渠道岸边作业，避免直接碾压渠道边坡。清淤船清淤适用于渠道水深较大、淤积物为淤泥和细沙的渠段。清淤船通过船上的挖泥设备将水下的淤积物挖起，经过筛选和分离后，将泥沙输送到指定地点。清淤船清淤不需要排空渠道内的水，对灌溉影响较小，且清淤效率较高，一艘中型清淤船每天可清淤 $500 \sim 800 \text{ m}^3$ 。但清淤船清淤受渠道宽度和水深限制，对于狭窄、水浅的渠段无法使用。水力冲挖清淤是利用高压水枪将渠道内的淤积物冲散，形成泥浆，然后通过泥浆泵将泥浆输送到指定的沉沙池或堆放场地。该技术具有设备简单、操作方便、清淤成本低等优点，适用于各种类型的渠道清淤。水力冲挖清淤的清淤效率与水枪压力、流量以及淤积物性质有关，一般情况下，一套水力冲挖设备每天可清淤 $200 \sim 400 \text{ m}^3$ 。为提高清淤效率，可采用多套水力冲挖设备同时作业。不同机械清淤技术的优缺点，对比如表 1 所示。

### 3.2 生物清淤技术

生物清淤技术是利用微生物、植物等生物的生命活动，将渠道内的有机淤积物分解转化为无害物质，从而达到清淤的目的。该技术具有环保、无污染、成本低等优点，适用于淤积物中有机物质含量较高的渠段。在唐徕渠渠道生物清淤中，可投放具有分解有机物质能力的微生物制剂，如芽孢杆菌、乳酸菌等。这些微生物能够分泌多种酶，将淤积物中的蛋白质、脂肪、碳水化合物等有机物质分解为二氧化碳、水和无机盐等无害物质，同时微生物的生长繁殖还能改善渠道水体的生态环境，提高水体自净能力。通过实验研究发现，在投放微生物制剂后的 30 天内，渠道内有机淤积物的分解率可达 $40\% \sim 50\%$ ，水体透明度提高 $20\% \sim 30\%$ 。此外，还可在渠道岸边和浅水区种植水生植物，如芦苇、菖蒲、荷花等。水生植物的根系能够吸附水中的泥沙和有机物质，同时植物的光合作用能够增加水体中的

溶解氧含量，促进微生物的生长繁殖，加速有机淤积物的分解。水生植物还能美化渠道环境，改善渠道生态景观。但生物清淤技术清淤周期较长，一般需要3~6个月才能达到较好的清淤效果，且对淤积物中无机泥沙的清淤效果较差，因此通常需要与其他清淤技术配合使用。

### 3.3 新型清淤技术

随着科技的不断发展，一些新型清淤技术逐渐应用于渠道清淤领域，为唐徕渠渠道清淤提供了新的思路和方法。

一是超声波清淤技术，该技术利用超声波的振动作用，将渠道内的淤积物打散、松动，使其更容易被水流携带或被清淤设备清除。超声波清淤技术具有无噪声、无污染、对渠道结构无损伤等优点，适用于各种类型的渠道清淤。通过实验测试，超声波清淤技术对淤积物的松动效率可达80%以上，能够显著提高后续清淤设备的清淤效率<sup>[1]</sup>。

二是气动清淤技术，该技术通过向渠道内通入压缩空气，产生气泡和水流扰动，将淤积物掀起并随水流排出渠道。气动清淤技术具有设备简单、操作方便、清淤效率高、成本低等优点，适用于水深较浅、淤积物较松散的渠段<sup>[2]</sup>。经现场试验，气动清淤技术的清淤效率可达500~1 000 m<sup>3</sup>/天，清淤成本仅为传统机械清淤技术的50%~70%。

三是智能清淤技术，该技术结合了物联网、大数据、人工智能等先进技术，通过在渠道内安装传感器、摄像头等设备，实时监测渠道淤积情况，然后根据监测数据制定最优的清淤方案，控制清淤设备进行精准清淤。智能清淤技术能够实现清淤过程的自动化、智能化，提高清淤效率和质量，减少人工成本和劳动强度。目前，智能清淤技术在唐徕渠部分试点渠段进行应用，取得了良好的效果，清淤效率较传统清淤技术提高30%~50%，清淤成本降低20%~30%。

## 4 唐徕渠渠道淤积防治长效机制构建

### 4.1 建立完善的监测预警机制

构建淤积防治长效机制，首先要建立完善的监测预警机制。在渠道沿线合理布设监测站点，每个站点安装水位计、流速仪、泥沙含量传感器等设备，实时采集渠道水位、水流速度、泥沙含量等数据，同时利用无人机航拍技术，定期对渠道全线淤积情况进行航拍监测，获取淤积厚度、淤积范围等信息。将监测数据实时传输至数据管理平台，通过大数据分析技术，建立淤积预测模型，根据泥沙沉积规律和水流变化情况，预测未来一段时间内渠道淤积趋势。当监测数据

超过预警阈值时，系统自动发出预警信号，提醒管理人员及时采取清淤或防护措施，避免淤积问题进一步恶化<sup>[3]</sup>。

### 4.2 加强渠道工程建设与改造

加强渠道工程建设与改造是从根本上减少淤积的关键举措。针对渠道自身结构缺陷，对底坡偏小的渠段进行改造，适当增大底坡，提高水流速度，增强水流挟沙能力；对弯道段进行优化，合理调整曲率半径，减少水流离心力对泥沙沉积的影响，同时在弯道内侧增设导流设施，引导水流均匀流动，降低淤积风险。对老化破损的护岸工程进行修复和加固，采用混凝土、浆砌石等材料砌筑护岸，防止岸边土壤坍塌进入渠道。此外，在渠道进口处建设沉沙池，利用沉沙池的沉淀作用，对黄河水进行泥沙分离，减少进入渠道的泥沙量；在渠道沿线合理增设节制闸和分水闸，优化水流调节能力，保证渠道内水流速度稳定，避免因流速突变导致泥沙沉积<sup>[4-5]</sup>。

## 5 结束语

唐徕渠渠道淤积问题严重，不仅影响了渠道的输水效率，增加了输水能耗和灌溉成本，还对周边生态环境和农业生产造成了不利影响。通过对唐徕渠渠道淤积现状、原因的深入分析，明确自然因素、人为影响以及渠道自身结构缺陷是导致淤积的主要原因。在清淤技术研究方面，机械清淤技术成熟且应用广泛，生物清淤技术环保但清淤周期长，新型清淤技术如超声波清淤、气动清淤和智能清淤则为渠道清淤提供了新的选择和思路。为构建唐徕渠渠道淤积防治长效机制，提出建立完善的监测预警机制、加强渠道工程建设与改造以及健全多元协同的管理机制等措施。这些措施的实施将有助于减少渠道淤积，提高渠道输水能力，保障农业灌溉和生态环境安全。

## 参考文献：

- [1] 宋政昌,高玺.长江流域水库清淤及淤积物利用研究[J].人民长江,2024,55(S2):38-41.
- [2] 王雪昆,李炎,张泽颖.水利工程渠道运行管理与维护的有效对策[J].水上安全,2024(24):49-51.
- [3] 钟佳蕊.城市露天、生活供水渠道清淤及淤泥处理技术探究[J].工程建设与设计,2024(09):147-149.
- [4] 桑淑娟,陶东,曹亚宁,等.唐徕渠灌区洪旱灾害特征与风险预警体系研究[J].甘肃水利水电技术,2024,60(09):16-21.
- [5] 薛里图,陶东,曹亚宁.唐徕渠智慧水利建设的实践与思考[C]//中国水利学会.2022中国水利学术大会论文集(第四分册).宁夏唐徕渠管理处,2022.

# 水利水电灌溉工程田间管网布置 施工设计与节水效果研究

常 杰

(固原市水利勘测设计院有限公司, 宁夏 固原 756000)

**摘要** 随着我国农业的不断发展, 水利水电灌溉工程在农业生产中的地位日益凸显。田间管网布置作为水利水电灌溉工程的重要组成部分, 其合理性直接关系到灌溉效率和水资源利用效果。本文探讨水利水电灌溉工程田间管网的布置和施工设计, 并对其节水效果进行深入研究, 以期为提高农业灌溉效率、促进水资源可持续利用提供参考。

**关键词** 水利水电; 灌溉工程; 田间管网布置; 施工设计; 节水效果

中图分类号:S27

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.040

## 0 引言

在我国农业发展中, 水利水电灌溉工程起着至关重要的作用, 它直接关系到农作物的生长、农业产量的稳定以及水资源的合理利用。而田间管网布置作为水利水电灌溉工程的关键环节, 其科学性与合理性不仅影响着灌溉的质量和效率, 还对水资源的节约有着重大意义。施工设计的好坏决定了田间管网能否高效运行, 进而影响到整个灌溉工程的效益。同时, 研究其节水效果, 对于缓解我国水资源短缺问题、实现农业可持续发展具有不可忽视的作用。因此, 深入开展水利水电灌溉工程田间管网布置施工设计与节水效果研究十分必要。

## 1 水利水电灌溉工程田间管网布置原则

### 1.1 因地制宜原则

田间管网布置需充分考虑项目区的地形地貌、土壤类型、作物种植结构等自然条件。不同地形条件下, 管网布置方式存在显著差异。例如: 在平原地区, 地形坡度较小, 一般采用双向控制的管网布置形式, 可减少管道长度和水头损失; 而在丘陵地区, 地形坡度较大, 通常沿等高线布置管网, 避免管道因坡度过大导致水流速度过快, 从而减少管道磨损和能耗。某平原灌溉项目区, 土壤以壤土为主, 主要种植小麦和玉米。根据实地勘察数据, 该区域地形坡度在 0.2% ~ 0.5% 之间。按照因地制宜原则, 采用双向控制的管网布置, 主管道沿地块长边方向布置, 支管道垂直于主管道, 间距根据作物行距确定为 15 m。通过这种布置方式, 相比传统单向布置, 减少管道长度约 12%, 降低水头损失约 8%。

### 1.2 经济性原则

在满足灌溉需求的前提下, 田间管网布置应尽量降低工程投资和运行成本。工程投资主要包括管道购置费用、施工费用等; 运行成本主要包括能耗费用、维护费用等。在管道选型上, 需综合考虑管道的价格、使用寿命、水力性能等因素。以某灌溉项目为例, 对不同材质管道的经济性进行对比分析。选取 PVC 管和 PE 管两种常用管道, 相关参数如表 1 所示。

表 1 PVC 管和 PE 管参数表

| 管道材质  | 管径 (mm) | 单价<br>(元/m) | 使用寿命<br>(年) | 水力摩阻<br>系数 |
|-------|---------|-------------|-------------|------------|
| PVC 管 | 110     | 25          | 15          | 0.018      |
| PE 管  | 110     | 32          | 20          | 0.016      |

假设该项目管网总长度为 5 000 m, 年运行时间为 150 天, 每天运行 8 小时, 电价为 0.6 元 / 度。通过计算可知, PVC 管初始投资为 12.5 万元, PE 管初始投资为 16 万元。在运行能耗方面, 根据水头损失计算公式:

$$h_f = \lambda \times \frac{L}{d} \times \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

式(1)中,  $h_f$  为水头损失,  $\lambda$  为水力摩阻系数,  $L$  为管道长度,  $d$  为管径,  $v$  为水流速度,  $g$  为重力加速度。

在相同流量条件下, PE 管的水头损失小于 PVC 管, 每年可节省能耗费用约 1 200 元。综合考虑初始投资和运行成本, 以 20 年为计算周期, PVC 管总费用为  $12.5 + (150 \times 8 \times \text{能耗功率} \times 0.6 \times 15)$  万元, PE 管总费用为  $16 + (150 \times 8 \times \text{能耗功率} \times 0.6 \times 20)$  万元。经详细计算, PE 管虽然初始投资较高, 但在 20 年使用周期内,

总费用比PVC管低约3.2万元，因此该项目最终选择PE管作为主要管道材质。

### 1.3 水力最优原则

田间管网布置应保证管网系统具有良好的水力条件，确保各灌溉单元能够获得均匀的水量和适宜的水压。管网水力计算的核心是确定管道的流量和水头损失，以保证管网在设计流量下，各出水口的压力满足灌溉设备的工作要求。在管网水力计算中，常用的流量计算公式为：

$$Q = A \times v \quad (2)$$

式(2)中， $Q$ 为流量， $A$ 为管道横截面积， $v$ 为水流速度。根据灌溉设计规范，田间管网的水流速度一般控制在 $0.8 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 之间，以避免水流速度过小导致管道淤积，或水流速度过大造成管道磨损和能耗增加。

## 2 水利水电灌溉工程田间管网布置施工设计

### 2.1 管网布置方案设计

#### 2.1.1 管道选型

管道选型需根据灌溉系统的设计压力、流量、地形条件以及当地的材料供应情况等因素综合确定。常用的灌溉管道材质有PVC管、PE管、钢管等。PVC管具有重量轻、价格低、耐腐蚀等优点，适用于中低压灌溉系统；PE管具有柔韧性好、抗冲击性强、使用寿命长等优点，适用于地形复杂、需要弯曲布置的灌溉系统；钢管具有强度高、承受压力大等优点，适用于高压灌溉系统或需要穿越道路、河流等特殊地段的灌溉系统。例如：在某高原灌溉项目中，由于该地区海拔较高，昼夜温差大，对管道的抗冻性和柔韧性要求较高。经过对比分析，最终选择PE管作为主要管道材质。该PE管的设计压力为 $1.2 \text{ MPa}$ ，抗冻温度为 $-30^\circ\text{C}$ ，能够满足该地区的气候条件和灌溉系统的工作要求。同时，根据系统的设计流量和水头损失计算，确定主管道管径为 $160 \text{ mm}$ ，支管道管径为 $110 \text{ mm}$ ，毛管管径为 $50 \text{ mm}$ 。

#### 2.1.2 管网布局

管网布局应根据作物种植方式和地块形状进行合理设计。常见的管网布局形式有矩形布置、平行布置、辐射布置等。矩形布置适用于地块形状规则、作物行距整齐的种植区域，主管道和支管道相互垂直，形成矩形网格；平行布置适用于狭长形地块，主管道沿地块长边方向布置，支管道平行于主管道；辐射布置适用于圆形或不规则形状的地块，主管道从水源向四周辐射，支管道从主管道延伸至各个灌溉单元。例如：某蔬菜种植基地，地块形状为矩形，长 $800 \text{ m}$ ，宽 $500 \text{ m}$ ，

主要种植大棚蔬菜，作物行距为 $1.5 \text{ m}$ 。采用矩形布置的管网布局形式，主管道沿地块长边方向布置，长度为 $800 \text{ m}$ ；支管道垂直于主管道，间距为 $15 \text{ m}$ ，长度为 $500 \text{ m}$ ；毛管沿作物行距布置，间距为 $1.5 \text{ m}$ ，长度为 $800 \text{ m}$ <sup>[1]</sup>。通过这种布局方式，实现了对整个种植基地的全面覆盖，且管道布置整齐，便于管理和维护。

### 2.2 施工工艺设计

#### 2.2.1 管道敷设

管道敷设前，需进行场地平整和管沟开挖。管沟开挖深度应根据当地的冻土层深度和管道埋深要求确定，一般不小于冻土层深度，同时应考虑管道的抗浮要求。在寒冷地区，冻土层深度较深，管沟开挖深度需达到 $1.2 \sim 1.5 \text{ m}$ ；在温暖地区，冻土层深度较浅，管沟开挖深度可适当减小，一般为 $0.8 \sim 1.0 \text{ m}$ 。管沟开挖完成后，需在管沟底部铺设垫层，垫层材料可采用沙土或细土，厚度一般为 $10 \sim 15 \text{ cm}$ ，以保证管道敷设平整，减少管道受力不均。管道敷设时，应避免管道扭曲和碰撞，管道接口应严密，不得出现渗漏现象。管道敷设完成后，需进行管沟回填，回填土应分层夯实，每层夯实厚度不超过 $30 \text{ cm}$ ，以防止管道沉降。

在某灌溉项目施工过程中，采用机械开挖和人工修整相结合的方式开挖管沟，开挖深度根据当地冻土层深度确定为 $1.3 \text{ m}$ 。垫层采用沙土铺设，厚度为 $12 \text{ cm}$ 。管道敷设采用人工抬放的方式，确保管道位置准确，接口严密。管沟回填采用分层夯实，每层夯实度达到90%以上，有效避免了管道沉降问题。

#### 2.2.2 灌溉设备安装

灌溉设备安装包括喷头、滴头、阀门等设备的安装。喷头和滴头的安装应根据作物的需水要求和种植密度确定安装间距和高度。喷头的安装高度一般为 $0.8 \sim 1.2 \text{ m}$ ，安装间距根据喷头的射程确定，确保灌溉均匀；滴头的安装间距根据作物行距和滴头流量确定，一般为 $0.3 \sim 0.5 \text{ m}$ 。阀门安装应便于操作和维护，一般安装在管道的转弯处、分支处和末端。阀门安装前，需对阀门进行外观检查和密封性试验，确保阀门完好无损，密封性能良好。阀门安装时，应注意阀门的安装方向，避免反向安装。例如：某滴灌项目中，滴头采用内镶式滴头，流量为 $2 \text{ L/h}$ ，安装间距为 $0.4 \text{ m}$ ，沿毛管均匀布置。阀门采用球阀，安装在支管道的入口处和主管道的分段处，便于控制各灌溉单元的水量。在设备安装完成后，进行了系统试压实验，试验压力为设计压力的1.2倍，保压时间为30分钟，管道和设备无渗漏现象，满足设计要求<sup>[2]</sup>。

## 2.3 施工质量控制

### 2.3.1 材料质量控制

施工材料的质量直接影响到田间管网的使用寿命和运行效果。在材料采购过程中，应选择具有相应资质和良好信誉的生产厂家，对材料的质量证明文件进行严格审查，确保材料符合设计要求和相关标准。同时，应对进场材料进行抽样检验，检验项目包括外观质量、尺寸偏差、物理性能、化学性能等。例如：在管道材料检验中，对 PVC 管的外观质量进行检查，要求管道表面平整、光滑，无气泡、裂纹、杂质等缺陷；对管道的尺寸偏差进行测量，管径偏差应在  $\pm 0.5$  mm 范围内，壁厚偏差应在  $\pm 0.3$  mm 范围内；对管道的抗压强度和抗冲击性能进行试验，确保管道在设计压力下能够正常工作，在受到外力冲击时不易损坏。对于不合格的材料，应及时退货，严禁用于工程施工。

### 2.3.2 施工过程质量控制

在施工过程中，应建立完善的质量控制体系，加强对施工工序的质量检查和监督。每道工序完成后，施工单位应进行自检，自检合格后报监理单位进行验收，验收合格后方可进行下道工序施工。在管沟开挖工序中，检查管沟的开挖深度、宽度、坡度等参数是否符合设计要求，避免出现超挖或欠挖现象。在管道敷设工序中，检查管道的敷设位置、坡度、接口质量等，确保管道敷设平整，接口严密。在设备安装工序中，检查设备的安装位置、安装高度、安装方向等，确保设备安装准确，运行正常<sup>[3]</sup>。例如：在某灌溉项目施工过程中，对每道工序都进行了严格的质量检查。在管沟开挖完成后，监理单位对管沟的深度、宽度和坡度进行了测量，其中深度偏差最大为 -2 cm，在允许范围内；宽度偏差最大为 +3 cm，符合设计要求；坡度符合设计坡度 0.3% 的要求。在管道接口质量检查中，采用气压试验的方法，对管道接口进行密封性检测，试验压力为 0.6 MPa，保压时间为 20 分钟，接口无漏气现象，质量合格。

## 3 水利水电灌溉工程田间管网节水效果研究

### 3.1 田间管网节水效果的量化分析

通过对传统灌溉方式与田间管网灌溉方式的用水量及作物生长情况，可对田间管网的节水效果进行量化分析。以某小麦种植区为例，传统漫灌方式下，每亩小麦生育期总用水量约为 450 m<sup>3</sup>，采用田间管网滴灌方式后，每亩总用水量降至 220 m<sup>3</sup>，节水率达 51.1%。从水分利用效率来看，传统漫灌水分利用效率约为 1.2 kg/m<sup>3</sup>，田间管网滴灌水分利用效率提升至 2.8 kg/m<sup>3</sup>，提高

133.3%。同时，在玉米种植区的对比试验中，田间管网喷灌方式较传统沟灌方式，每亩用水量从 380 m<sup>3</sup> 减少至 180 m<sup>3</sup>，节水率 47.4%，玉米亩产量从 500 kg 提高至 580 kg，增产 16%<sup>[4]</sup>。

### 3.2 提升田间管网节水效果的策略

提升田间管网节水效果需从设计优化、设备维护及管理改进三个方面制定策略。在设计优化上，采用水力计算软件对管网进行模拟计算，精准确定管道管径和布局，确保各灌溉单元水量均匀；引入智能化设计理念，在管网中设置流量调节阀门，根据不同作物需水量实时调整供水量<sup>[5]</sup>。在设备维护方面，建立定期巡检制度，每月对喷头、滴头进行检查清理，每季度对管道接口进行密封性检测，及时更换损坏部件；在管道进水口安装过滤设备，减少杂质进入管网，降低设备堵塞概率。在管理改进方面，结合土壤墒情监测设备和气象数据，制定动态灌溉制度，如在土壤含水量低于田间持水量 60% 时启动灌溉，高于 80% 时停止灌溉；开展农户培训，普及科学灌溉知识，提高农户对节水灌溉设备的操作和管理能力，形成设计、维护、管理协同发力的节水体系<sup>[6]</sup>。

## 4 结束语

水利水电灌溉工程田间管网布置施工设计与节水效果研究具有重要的实践意义。通过因地制宜、经济性及水力最优原则的指导，结合科学合理的管网布置方案设计、严谨的施工工艺设计以及严格的施工质量控制，能够有效构建高效、可靠的田间管网灌溉系统。在实际应用中，PE 管等优质管道材质的选择，以及矩形布置、平行布置、辐射布置等多样化管网布局形式的运用，满足了不同地形和作物种植方式的需求。

## 参考文献：

- [1] 胡宇祥, 彭军志, 殷飞, 等. 微灌田间管网布置优化及参数分析 [J]. 农机化研究, 2022, 44(06):25-30, 52.
- [2] 高婕. 低压管道灌溉输水在灌区工程建设中的应用研究 [J]. 农业科技与信息, 2021(13):118-120.
- [3] 彭娟. 节水灌溉工程发展模式及设计技术要点分析 [J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(07):79-82.
- [4] 常万元. 农田水利灌溉工程中节水技术的应用研究 [J]. 乡村科技, 2022, 13(17):152-155.
- [5] 刘英华. 微喷带灌溉系统布置方式比选研究 [J]. 水利科学与灾害工程, 2018, 01(07):23-27.
- [6] 李伟. 低压管道输水灌溉在高标准农田应用的技术要点 [J]. 河南水利与南水北调, 2022, 51(09):28-29.

# 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望

翟 伟

(四川能投巴中燃气发电有限公司, 四川 巴中 636700)

**摘要** 有功功率平衡是频率稳定的核心, 传统系统通过火电机组的调速器响应、AGC(自动发电控制)实现功率调节; 而高比例新能源场景下, 需融合发电侧惯量模拟、储能快速响应、负荷灵活调控、多能互补协调等多维度技术, 构建新型频率控制体系。本文系统综述当前高比例新能源电力系统有功功率与频率控制的研究现状, 梳理核心技术路径与应用瓶颈, 结合典型案例数据分析关键技术效果, 最后展望未来研究方向, 以期为保障系统安全稳定运行提供参考。

**关键词** 高比例新能源电力系统; 有功功率; 频率控制

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.041

## 0 引言

在双碳目标驱动下, 全球新能源电力渗透率持续攀升。据《中国新能源发展报告2024》显示, 我国2024年风电、光伏总装机容量突破1300 GW, 占全社会用电量比重达31.2%, 预计2030年非化石能源消费占比将超过25%, 2060年实现碳中和目标时, 新能源发电占比将超70%<sup>[1]</sup>。高比例新能源的间歇性、波动性与随机性特征, 打破了传统电力系统源随荷动的有功功率平衡模式。传统火电的惯量支撑与一次调频能力被大幅削弱, 系统转动惯量从传统电网的10~15 s降至高比例新能源电网的2~5 s, 频率扰动后的最大偏差( $\Delta f_{\max}$ )易突破±0.5 Hz的安全阈值, 2023年欧洲电网因风电出力骤降引发的频率波动事件, 以及我国西北电网光伏大发时段的频率偏差超标预警, 均凸显有功功率与频率控制的紧迫性<sup>[2]</sup>。

## 1 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究现状

### 1.1 新能源发电侧

新能源发电(风电、光伏)通过电力电子变流器接入电网, 天然缺乏传统同步发电机的旋转惯量, 需通过控制策略模拟惯量与一次调频能力, 这是维持频率稳定的基础。虚拟惯量控制(Virtual Inertia Control, VIC)的核心思路是通过变流器控制算法, 将新能源出力与频率变化率( $df/dt$ )关联, 模拟同步发电机惯量对抗频率变化的特性。目前主流方案分为两类: 附加惯量控制在最大功率点跟踪(MPPT)控制基础上叠加惯量环,

当频率下降时, 释放部分新能源备用功率, 通常为额定功率的5%~10%, 抑制频率跌落。例如: 某150 MW风电场采用附加惯量控制后, 频率变化率从0.8 Hz/s降至0.3 Hz/s,  $\Delta f_{\max}$ 从0.65 Hz缩小至0.42 Hz。虚拟同步发电机(VSG)技术通过模拟同步发电机的机电暂态特性, 如惯量、阻尼、励磁调节等, 使新能源变流器具备自同步能力。IEEE Transaction on Sustainable Energy 2024年研究表明, VSG控制可使光伏电站的频率调节时间缩短至0.5 s, 较传统VIC技术提升40%, 但存在大扰动下易超调的问题(超调量约5%~8%)。

新能源一次调频策略优化关键在于提升响应速度与功率支撑持续性, 风电一次调频通过桨距角控制, 快速调节风能捕获与转子动能控制, 释放转子储能结合, 实现短时功率提升。例如: 某200 MW风电场实测数据显示, 采用桨距角+转子动能协同控制, 一次调频响应时间≤100 ms, 可提供额定功率8%的调频容量, 持续时间约10 s。光伏一次调频利用光伏阵列的暂态过载能力, 通常为额定功率的1.1~1.2倍或储能辅助, 弥补光伏出力的瞬时缺口。如青海某500 MW光伏基地, 通过配置10%容量的储能辅助一次调频, 调频响应时间≤50 ms, 频率恢复时间从20 s缩短至8 s。

### 1.2 储能系统

储能是平抑新能源波动、快速响应频率扰动的核心手段, 不同储能类型因响应速度、容量特性差异, 适用于不同时间尺度的有功功率控制。

短时调频储能以电化学储能为主, 锂电池、超级电容等储能响应速度快(毫秒级), 适合应对10 s以

内的高频扰动。据《储能产业研究白皮书 2024》数据，电化学储能参与一次调频的调节精度可达  $\pm 0.02$  Hz，较传统火电提升 5 倍。典型案例：广东电网 2023 年投运的 200 MW/400 MW·h 锂电储能电站，参与频率控制后，系统频率偏差超标次数从每月 12 次降至 3 次，调频性能指标（K<sub>p</sub> 值）从 0.8 提升至 1.5。

长时调峰储能抽水蓄能、压缩空气储能，抽水蓄能容量大、寿命长，适合应对小时级的有功功率缺口。如安徽响洪甸抽水蓄能电站（1 000 MW），在 2024 年安徽电网风电出力骤降，单日降幅 300 MW 时，15 分钟内完成满负荷启动，补充有功功率 800 MW，将系统频率稳定在 50  $\pm$  0.1 Hz，避免频率跌落。压缩空气储能（CAES）则适合偏远新能源基地，如山东肥城 300 MW CAES 电站，可提供连续 8 小时的有功调节能力，平抑光伏午间大发、晚间出力骤降的波动，使区域电网有功功率波动幅度从  $\pm$  20% 降至  $\pm$  5%。

多储能协同控制通过短时储能 + 长时储能分层控制，优化容量配置与成本。如甘肃酒泉新能源基地，采用 1 GW 锂电储能 +2 GW 抽水蓄能协同，实测数据显示：系统频率最大偏差控制在  $\pm$  0.2 Hz 以内，储能综合利用效率提升至 85%，较单一锂电储能方案成本降低 30%。

### 1.3 负荷侧

负荷侧灵活调控是源网荷储互动的关键，通过引导可调节负荷参与有功平衡，降低对发电侧调节能力的依赖。

高耗能工业（电解铝、钢铁、化工）负荷具备较大调节潜力，可通过激励型需求响应参与频率控制。例如：河南某电解铝园区（负荷 200 MW），在电网频率低于 49.8 Hz 时，接受调度指令削减 20% 负荷（40 MW），响应时间  $\leq$  5 分钟，每次参与可获得 0.3 元 /kW·h 的补贴，2023 年该园区累计参与调频 120 次，为电网提供有功支撑 4 800 MW·h，同时降低自身用电成本 15%。

商业建筑空调、居民电动汽车（EV）等负荷可通过价格型需求响应错峰调节。如上海某商业综合体，基于实时电价信号，在新能源出力低谷时段（晚间）将空调温度调高 2 ℃，削减负荷 10 MW；在新能源出力高峰时段（午间）调低温度，增加负荷 8 MW，全年平抑有功功率波动约 2 000 MW·h，使区域电网频率偏差减少 25%。在 EV 集群方面，江苏某 EV 换电站（100 座）通过 V2G（Vehicle-to-Grid）技术，在频率扰动时可提供  $\pm$  50 MW 的调节容量，响应时间  $\leq$  1 s，2024 年参与电网调频的次数达 300 次，调频合格率 98%。

### 1.4 多能互补系统

多能互补系统通过整合不同能源的出力特性，实现有功功率的平滑输出与频率稳定。以新疆某风光储氢一

体化电站为例，光伏 1.2 GW、风电 0.8 GW、储能 0.5 GW/1 GW·h、氢能 0.2 GW，其控制策略如下：午间光伏大发时，多余功率一部分存入储能，一部分用于制氢，平抑出力高峰；晚间风电出力波动时，储能快速释放功率，氢能发电燃料电池提供基荷支撑；频率扰动时，储能优先响应，风电 / 光伏通过虚拟惯量辅助，氢能发电缓慢调节基荷。实测数据显示：该电站有功功率波动幅度控制在  $\pm$  3% 以内，频率稳定在 50  $\pm$  0.05 Hz，较单一新能源电站的频率稳定性提升 60%，弃风弃光率从 15% 降至 3%<sup>[3]</sup>。

## 2 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究面临的核心挑战

### 2.1 新能源惯量控制的动态响应局限性

虚拟惯量的能量耗尽问题，新能源发电侧的虚拟惯量依赖备用功率或转子储能，持续调节能力有限（通常  $\leq$  10 s），大扰动下易出现二次频率跌落。例如：某风电场在一次电网故障中，虚拟惯量控制释放完转子储能后，频率再次跌落 0.2 Hz，需依赖储能补充支撑。多新能源场站协同难，不同新能源场站的惯量参数设置缺乏统一标准，易导致控制策略冲突，某区域电网因 3 个风电场 VSG 参数不匹配，频率调节出现超调—振荡现象，振荡周期达 5 s。

### 2.2 储能的成本与寿命瓶颈

当前锂电储能成本约 1 500 元 /kW·h，全生命周期（10 年）度电成本约 0.3 元 /kW·h，而传统火电调频成本仅 0.1 元 /kW·h，高成本限制大规模应用。如某省电网测算，若全面用储能替代火电调频，年成本将增加 50 亿元。储能参与频繁调频，日均充放电 20 次以上时，锂电循环寿命从 3 000 次降至 1 500 次，寿命缩短 50%，增加更换成本<sup>[4]</sup>。

### 2.3 负荷侧响应的不确定性

用户参与度波动大，工业负荷因生产计划调整，参与需求响应的可靠性仅 60% ~ 70%；居民负荷受用户行为影响，响应准确率不足 50%，导致负荷侧调节容量不可控。通信与调度延迟，负荷侧设备分散，跨区域调度通信延迟达 100 ~ 200 ms，影响频率控制的实时性，某案例中因通信延迟，负荷响应滞后扰动 200 ms，导致频率偏差超调 0.1 Hz。

### 2.4 多主体协同的机制缺失

当前电力市场机制对新能源—储能—负荷的协同激励不足：新能源参与调频的收益难以量化，储能辅助服务定价机制不完善，负荷侧响应的补贴政策不稳

定。例如：某新能源电站参与一次调频，因缺乏明确的收益机制，年均亏损约200万元，导致参与积极性低。

### 3 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制未来研究展望

#### 3.1 技术层面

AI驱动的预测与优化控制，利用深度学习提升新能源出力预测精度，短期预测误差可从当前10%~15%降至5%以下，为有功功率规划提供精准依据；同时，基于强化学习(RL)优化多储能、多新能源场站的协同控制策略，如某仿真结果显示，RL优化的VSG参数可使频率调节超调量从8%降至3%<sup>[5]</sup>。

固态电池、钠离子电池等新型储能，成本有望降至800元/kW·h以下，循环寿命提升至15 000次，解决经济性与寿命问题。（1）飞轮储能响应时间≤10 ms与超导储能（能量密度高）适合极端频率扰动场景，如某飞轮储能试点项目（10 MW），可在5 ms内响应频率跌落，使Δf\_max减少40%。（2）柔性直流输电(VSC-HVDC)的协同控制，高比例新能源基地多通过VSC-HVDC并网，未来可利用其快速功率调节能力，响应时间≤20 ms参与频率控制，如欧洲北海风电基地（10 GW）规划通过VSC-HVDC实现风电惯量控制+直流侧储能协同，使跨区域频率偏差控制在±0.1 Hz以内。

#### 3.2 机制层面

建立调频容量+调频性能的双重定价机制，如对储能按可用容量（元/kW·h）+调节精度（元/次）付费，对新能源参与调频给予额外收益补偿。美国PJM电网的实践显示，该机制可使储能调频收益提升50%，新能源参与率从30%增至70%。依托区块链技术实现多主体数据共享与信任机制，如用户可通过平台实时查看新能源出力与频率状态，自主选择参与响应的时间与容量，平台自动结算补贴，某试点平台使居民负荷响应准确率从50%提升至85%<sup>[6]</sup>。

#### 3.3 应用层面

针对我国西电东送、北电南供的跨区域电网，研究分层分区+全局优化的频率控制策略，如通过特高压直流(UHVDC)的功率调制，实现新能源基地与负荷中心的有功平衡，某仿真显示，该策略可使跨区域频率偏差减少35%。极端天气下新能源出力骤降，如极寒导致风电停机、台风导致光伏脱网，需研究储能备用容量优化+负荷紧急控制的鲁棒策略，如某模型预测，极寒天气下配置20%容量的储能备用，可使频率跌落风险降低90%<sup>[7]</sup>。

#### 3.4 标准层面

(1) 制定技术标准体系：明确高比例新能源系统的惯量指标、ROCOF限制、调频响应时间；制定VSG、储能、需求响应的并网规范，统一接口协议、测试方法，确保设备兼容性。(2) 完善市场规则：明确新能源机组、储能、负荷参与辅助服务市场的准入条件、定价机制、收益分配规则，为各主体提供清晰的市场预期。(3) 建立安全评估体系：构建高比例新能源系统频率稳定的安全评估体系，定期开展极端工况测试，评估系统的频率耐受能力，制定应急预案，确保系统安全稳定运行。

### 4 结束语

高比例新能源电力系统的有功功率与频率控制，已从单一发电侧调节转向源网荷储多维度协同，当前通过新能源虚拟惯量控制、多储能协同、负荷需求响应及多能互补等技术，已实现频率偏差的初步控制，但仍面临动态响应局限、成本瓶颈、机制缺失等挑战。未来需通过数字化技术赋能、新型技术突破、市场化机制完善的三维协同，构建兼具安全性、经济性与灵活性的频率控制体系。随着技术迭代与机制创新，高比例新能源电力系统的频率稳定将逐步实现从被动防御到主动调控的转变，为全球能源转型与双碳目标落地提供核心技术支撑。

#### 参考文献：

- [1] 滕贤亮,谈超,昌力,等.高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望[J].电力系统自动化,2023,47(15):12-35.
- [2] 施宝元.高比例新能源电力系统有功功率与频率控制分析[J].中国科技纵横,2024(21):134-136.
- [3] 于琳,孙华东,徐式蕴,等.高比例新能源电力系统电压支撑强度实时量测方法研究[J].中国电机工程学报,2025,45(05):1741-1752,中插10.
- [4] YUTING TENG, WEI DENG, WEI PEI, et al.高比例新能源电力系统构网型换流器控制方法综述[J].全球能源互联网(英文版),2022,05(03):328-342.
- [5] 孙秋野,李大双,王睿,等.“双高”电力系统：一种新的稳定判据和稳定性分类探讨[J].中国电机工程学报,2024,44(08):3016-3036,中插7.
- [6] 刘志坚,洪朝飞,郭成,等.基于WRLS-ARMAX系统辨识的新能源电力系统惯量评估[J].电机与控制应用,2024,51(07):84-93.
- [7] 吴悦,王海云,萨妮耶·麦合木提,等.基于启发算法的含大规模新能源电力系统静态安全域分析[J].科学技术与工程,2022,22(11):4375-4380.