

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2025 年 10 月 第 30 期 (总第 619 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 墨 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：khgsblzz@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 10 月 25 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

稿件凡经本刊采用，如作者无版权特殊声明，即视作该文署名作者同意将该文章著作权中的汇编权、印刷权和电子版（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Contents

科技博览

- 001 基于深度学习的推荐算法研究综述
..... 叶卫根
- 004 无人机三维目标定位系统设计与实现
..... 朱芝靖, 王继红, 胡三宁
- 007 储能变流器电容板过电压失控暂态研究
..... 刁 群
- 010 数据中心 UPS 后备电池发展方向研究
..... 杨亚萍, 唐兰兰, 杨加佳
- 013 多孔有机聚合物催化 CO₂ 转化的研究进展
..... 甘天宇, 廖 旭

智能科技

- 016 PLC 技术在电气工程自动化控制中的应用
..... 韩雷斌
- 019 高低压配电柜实现自动控制的具体举措分析
..... 王金鑫
- 022 电气工程及其自动化供配电系统节能控制措施
..... 林任鑫
- 025 基于人工智能持续优化的新能源场站智慧运维技术
..... 沈加勇
- 028 无人机智能感知技术在城轨低空巡检中的应用研究
..... 邓 超
- 031 多旋翼无人机在复杂环境电力巡线中的运维优化研究
..... 沈佳骅

应用技术

- 034 高速公路机电设备安装及调试技术研究
..... 毛 耀, 刘 婷
- 037 浅埋软弱围岩高速公路隧道施工技术探讨
..... 周亚玉
- 040 数字化时代水利水电工程施工技术探究
..... 孙胜先, 王 耀

目录Contents

043	光伏电站故障诊断与健康评估方法研究	赵强平
046	电力工程施工中的接地技术及故障排查探讨	叶国军
049	电力电气设备安装调试与运行维护技术研究	何志标
052	变电站一次设备故障预测与检修方法分析	徐晓兵
055	Wöhler 指数对有效湍流强度的影响分析——以湖南某山地风电场为例	余少梅, 卿 会, 陈荣荣

科创产业

058	轨道交通数字化建造技术体系与发展路径探究	叶 洋
061	大型地面光伏电站生产运营智能化管理措施探究	魏启刚
064	移动式变电设备在变电站技术改造中的应用分析	朱汉青
067	工程造价全过程管理中的成本控制研究	郎纪江
070	建设项目工程造价全过程管理与控制分析	钱 磊
073	房建住宅项目装饰工程造价的精准估算方法研究	李 欢
076	基于仿真模拟的准IV类水达标工艺优化及运行控制	王剑乔
079	基于振动频谱分析的锅炉风机轴承全生命周期故障预测与安全生产优化	张佳佳

技术管理

082	电力工程电气设备安装与调试的质量控制	黄永玉
085	高层住宅内墙 ALC 板抹灰层防开裂技术研究	左 彬
088	建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施探讨	毕晓鹏
091	公路桥梁养护中常见病害的成因与治理对策分析	施云雷
094	供水管网水力模型在区域供水管理中的应用分析	冯 超
097	BIM 技术在重力墩式码头设计与施工中的应用研究	李 俊, 唐林富, 陈靖松
100	物联网技术在高层消防设备设施维护管理中的应用	吕东强

科学论坛

103	市政路桥设计影响因素分析	彭佩华
106	重型燃气轮机技术现状及发展趋势探析	陈 烨
109	桩基检测中的静载和动载检测研究	周 亮
112	可持续发展理念下的绿色建筑设计策略研究	韩 杰
115	基于城市交通需求的市政道路横断面设计研究	于善斌
118	新能源电站总图布局生态影响最小化设计研究	蔡君嘉良
121	煤基固废在矿区土地复垦中的应用效果与环境风险评价	张 晗
124	沙漠光伏与生态治理构建可持续沙区生态系统的策略与实践	耿振中

基于深度学习的推荐算法研究综述

叶卫根

(赣东学院信息工程学院, 江西 抚州 344100)

摘要 随着深度学习在人工智能各领域取得的突破性成果, 其在个性化推荐领域的应用也吸引了学界的广泛关注, 并成为研究热点。本文概述了传统推荐系统分类, 讨论了深度学习与协同过滤的融合(如基于受限玻尔兹曼机、自编码器的协同过滤及神经矩阵分解模型等)、深度学习与特征交互的推荐模型(如基于注意力网络的因子分解机、乘积神经网络、Wide & Deep 模型等), 并分析了推荐系统未来的研究趋势, 旨在为构建更高效、公平的智能推荐系统提供理论参考。

关键词 个性化推荐; 推荐系统; 深度学习; 特征交互; 协同过滤

基金项目: 江西省教育省厅科学技术青年项目(项目编号: GJJ2203707); 赣东学院院长基金(项目编号: YZJJ 202206)。

中图分类号: TP181; TP391

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.001

0 引言

推荐系统已成为互联网企业的核心工具, 广泛应用于电商、社交媒体、在线教育等领域, 既能提升客户满意度, 又能拉动营收增长。相较传统用户主动搜索, 个性化推荐可过滤低关联信息、减少筛选成本, 还能突破“用户需明确表达需求”限制, 其能依据购买记录、点击频率等行为轨迹, 从海量信息中挖掘契合需求的商品或内容, 既缓解用户决策疲劳, 又助力企业激活长尾商品曝光。随着深度学习在多领域取得成就, 其在个性化推荐领域的应用成为研究热点。深度学习可捕捉用户与物品的非线性复杂关联, 还能从上下文、文本、社交网络等数据源中挖掘深层关联。

1 推荐系统概述

1.1 基于内容的推荐

基于内容的推荐系统通过解析物品与用户的内容特征, 挖掘并推荐符合用户兴趣偏好的物品。其推荐逻辑可拆解为三个核心步骤。一是提取物品属性标签、文本描述等特征, 勾勒“本质属性”以明确物品“是什么”; 二是分析用户个人资料、兴趣标签等, 捕捉“偏好倾向”构建用户画像, 理解用户“喜欢什么”; 三是匹配两者属性, 量化潜在兴趣后推荐物品。

1.2 基于协同过滤的推荐

基于协同过滤的推荐技术是推荐系统经典方案, 核心依托群体智能, 通过分析用户—物品历史交互记录(评分、点击等)挖掘相似性以实现推荐, 成熟方

法包括最近邻居、矩阵分解及深度学习三类。其中, 矩阵分解法在 Netflix Prize 竞赛中表现突出, 其对高维稀疏的用户—物品评分矩阵降维, 得到低维用户、物品特征矩阵, 分别表征用户偏好与物品属性。深度学习推荐法本质仍靠群体智能, 不少早期模型是传统协同过滤的神经网络升级, 如 NeuMF 模型^[1], 将经典矩阵分解的向量点积评分计算, 替换为神经网络多层感知机计算。

1.3 混合推荐

传统的混合推荐系统其基本思路是将基于内容的方法与基于协同过滤的方法进行融合, 以得到更精准的推荐效果。混合推荐系统通常会通过加权式、切换式和特征增强式等方法将多种推荐技术进行综合。当然, 另一种研究思路将混合定义为两种或多种深度神经网络(DNNs)的融合。

2 基于深度学习的推荐

2.1 基于受限玻尔兹曼机的协同过滤

受限玻尔兹曼机(RBM)是无向浅层神经网络, 由可见层、隐藏层及模型参数构成, 神经元仅跨层连接、同层无连接。Ruslan Salakhutdinov、Andriy Mnih 与 Geoffrey Hinton 首次将其应用于推荐领域^[2]。

该模型中神经元可以跨层相互连接, 但同一层内的神经元之间不允许有连接可见层为输入层, 其输入的是单个用户已观测到的数据, 输入层中每个节点为独热编码结构表示物品, 其由用户对该物品的评分转换得到。可见层为输入层, 输入单个用户已观测数据,

节点以独热编码表示物品，未评分物品为缺失值，不参与训练。RBM无传统输出层，需通过“输入用户评分—模型训练—生成推荐”三步实现预测：输入时将评分整理为二元形式（如0表不喜欢、1表喜欢，未评分用-1表示），确定可见层神经元状态；训练用对比散度算法，正向计算隐藏层激活概率、反向重建可见层数据，调整权重以最小化重构误差，让模型通过隐藏层学习潜在特征；生成推荐时，依据隐藏层激活状态反向计算可见层未评分项的激活概率，概率高的即为推荐结果。

何登平等指出上述模型只能处理离散值，为此提出了IRC-RBM模型^[3]。该模型将可见层单元改为实值表示，直接输入用户对项目的原始评分，这简化了数据预处理流程，减少了信息损失，提升了对原始评分数据的建模能力。

2.2 基于自编码器的协同过滤

Suvash Sedhain等人^[4]结合自编码器(AutoEncoder, 简称AE)提出了基于自编码器的协同过滤AutoRec算法。基于用户的AutoRec模型，其主要由输入层、隐藏层与输出层构成。其中，最下面的一层为输入层，表示一个用户对所有物品的评分： $r(i)=(Ri1, Ri2, Ri3, \dots, Rim)$ ；类似的可以将输入层替换为所有用户对某一个物品的评分，这样便得到了基于项目的AutoRec模型。中间一层为隐藏层，且只有一层隐藏层，输入层的高维向量 $r(i)$ 经过隐藏层被压缩为一个低维向量，即信息的编码过程，该向量可以理解为用户在隐藏状态空间的兴趣偏好表示。最上面一层为重构后的评分向量，用于预测目标用户对项目的评分，即信息的解码过程。由于从输入层到隐藏层与从隐藏层到输出层的全连接操作，都可通过对应的非线性激活函数进行编码与解码，该模型能更好地完成非线性建模，捕获复杂的用户项目交互特征。

虹霞黄等人基于AutoRec模型实现就业推荐，通过AutoRec模型对用户—岗位特征数据进行低维特征提取与重构^[5]。

2.3 神经矩阵分解

传统的基于矩阵分解的协同过滤算法，在建模用户与物品的交互关系时，仅通过用户隐向量与物品隐向量的点积运算来捕获二者关联，这种方式对交互模式的刻画较为简单。为此，何向阳等人^[6]基于深度学习框架提出了一种创新的矩阵分解范式，即神经矩阵分解(NeuMF)。

该模型突破了传统点积操作的局限，通过引入多层感知机来提升非线性建模与泛化能力，其由左右两个分支构成：左边的分支是广义矩阵分解(GMF)层，

它是对传统矩阵分解的扩展，通过用户隐向量与物品隐向量的逐元素乘积捕捉线性交互；右边的分支是多层感知机(MLP)层，用于建模用户与物品间的非线性交互。GMF层与MLP层的输出向量会进行拼接，随后通过全连接层和sigmoid激活函数，最终输出目标用户 u 对物品 i 产生交互的概率。

NeuMF模型融合了矩阵分解的线性建模与神经网络的非线性建模能力，适用于处理隐式反馈数据（如点击、购买、收藏等）。这类数据能在一定程度上反映用户对物品的偏好倾向，因此模型在训练时采用交叉熵损失函数，以预测用户对物品产生交互行为的概率。需要特别强调的是，在NeuMF模型中，输入的用户与物品独热编码会先通过嵌入层转换为低维稠密的隐向量；而GMF层和MLP层并不共享这些用户与物品的隐向量。这样的处理能保证模型的灵活性：由于GMF层为线性操作，MLP层为非线性操作，两者对应的用户与物品嵌入向量的维度通常不一致，独立参数可更好地适配各自的建模需求。Liu等人^[7]受NeuMF模型启发提出了一种基于显式—隐式反馈的神经矩阵分解算法，该算法为用户—物品矩阵学习线性和非线性的显式—隐式反馈特征，取得了较多的推荐效果。

3 基于深度学习处理特征交互

3.1 基于注意力网络的因子分解机

Jun Xiao等人指出，传统因子分解机(FM)模型虽能覆盖所有二阶特征组合，却无法区分不同特征交互组合的权重，限制了模型表达与泛化能力。为此，他们提出基于注意力网络的因子分解机(AFM)^[8]。AFM模型含稀疏输入、嵌入表示层、二阶特征交互层、基于注意力的池化层、预测值输出五层。其中，二阶特征交互层每个节点输出 k 维向量，借鉴FM思想但做改进：FM用两特征嵌入向量内积建模交互，此层改为元素积，保留交互信息维度特征，为后续区分重要性提供细粒度基础。

基于注意力的池化层，针对二阶特征交互层输出的 k 维交互向量，通过注意力网络学习各向量权重系数，再聚合加权后的交互向量。该过程既动态区分特征交互重要性，又压缩高维信息为综合特征，有效提升模型对关键交互模式的捕捉能力。崔少国等人^[9]受AFM模型启发，提出多注意力机制融合低高阶特征的神经推荐算法(DeepNRM)，该算法通过因子分解机(FM)提取低阶组合特征、多层前馈神经网络提取高阶组合特征，再借助注意力网络和多头自注意力机制筛选关键特征并按重要性融合。

3.2 基于乘积的神经网络

Yanru Qu 等人^[10]针对多字段分类数据的用户响应预测任务,为更高效地建模特征间交互关系、同时降低多层感知机(MLP)处理高维稀疏数据时的计算成本,提出了基于乘积的神经网络(PNN)。PNN 包含嵌入层、乘积层、全连接隐藏层及输出层,形成从稀疏特征降维、交互捕获到高阶模式挖掘的完整链路。

这里着重介绍一下二阶特征交互层,其由 Z 和 P 部分组成,其中 Z 由特征嵌入层所有特征向量构成,Z 与相应的权重矩阵相乘后得到线性信号 lz ; P 由所有特征向量两两乘积(可为内积或外积)操作的结果组成,P 与相应的权重矩阵相乘后得到二次信号 lp ;最终生成的 lz 、 lp 与偏置向量 $b1$ 将作为输入传到第一层的全连接隐藏层。该模型的核心创新在于,在特征嵌入层与 MLP 层之间增设了二阶特征交互层(乘积层),通过内积或外积运算直接捕获跨字段特征的成对交互信息,避免了传统 MLP 仅依赖“加法”操作难以适配分类数据交互逻辑的问题。

3.3 Wide & Deep 模型

在推荐系统中,模型需同时兼顾记忆性与泛化性,才能实现精准且有多样性的推荐。为此 Google 公司^[11]提出了经典的双塔模型 Wide & Deep,其由左侧的宽度模块与右侧的深度模块构成。Wide & Deep 模型中左侧的宽度模块负责记忆性,通过线性模型处理输入的原始特征和若干交叉特征;右侧的深度模块负责泛化,其输入层为各特征域构成的独热编码,然后通过特征嵌入查找得到对应的特征隐向量,特征隐向量会输入上层的深度神经网络模块完成特征的交互学习;最后宽度模块与深度模块的输出会拼接在一起进行联合学习。

Ruoxi Wang 等人^[12]指出 Wide & Deep 模型的宽度模块部分依赖人工设计交叉特征,需要先验知识和大量人力且难以实现高阶特征交叉,为此提出了 DCN V2 模型,该模型将 Deep & cross 交叉网络的权重向量升级为 2D 全矩阵,实现了对 Deep & cross 的多维度优化,能更好地适应 Web 推荐任务。

4 结束语

本文梳理个性化推荐系统技术演进与核心模型,首先从传统推荐系统分类切入,概括了基于内容、协同过滤及混合推荐的核心原理与差异;然后着重介绍深度学习与协同过滤融合的经典算法,深入剖析了这些算法如何突破传统协同过滤浅层线性局限,捕捉用户—物品复杂非线性关联;接着梳理了基于深度学习处理特征交互完成推荐的经典模型,详细地介绍了如何解决传统

精排人工设计特征成本高、低阶交互建模不足的问题。

当前推荐系统虽进入“多技术融合”阶段,但仍面临冷启动、模型可解释性与准确性平衡等挑战。未来研究将拓展“技术深度”与“应用广度”,如大语言模型融合实现“意图驱动”升级,联邦推荐、多模态推荐等推动系统向更智能、适配复杂场景发展,最终实现兼具多维度优势的个性化服务。

参考文献:

- [1] He X, Liao L, Zhang H, et al. Neural collaborative filtering[C]//Proceedings of the 26th international conference on world wide web, 2017.
- [2] Salakhutdinov R, Mnih A, Hinton G. Restricted Boltzmann machines for collaborative filtering[C]//Proceedings of the 24th international conference on Machine learning, 2007.
- [3] 何登平,张为易,黄浩.基于多源信息聚类 and IRC-RBM 的混合推荐算法[J].计算机工程与科学,2020,42(06):1089-1095.
- [4] Sedhain S, Menon A K, Sanner S, et al. Autorec: Autoencoders meet collaborative filtering[C]//Proceedings of the 24th international conference on World Wide Web, 2015.
- [5] 虹霞黄,军曾,历曾.多算法融合的就业推荐算法研究[J].教育理论与实践,2025,03(20):31-34.
- [6] 同[1].
- [7] Liu H, Wang W, Zhang Y, et al. Neural matrix factorization recommendation for user preference prediction based on explicit and implicit feedback[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022(01): 9593957.
- [8] Xiao J, Ye H, He X, et al. Attentional factorization machines: Learning the weight of feature interactions via attention networks[J]. arXiv preprint arXiv:1708.04617, 2017.
- [9] 崔少国,独潇,杨泽田.多注意力机制融合低高阶特征的神经推荐算法[J].计算机工程与应用,2023,59(08):192-199.
- [10] Qu Y, Cai H, Ren K, et al. Product-based neural networks for user response prediction[C]//2016 IEEE 16th international conference on data mining (ICDM). IEEE, 2016.
- [11] Cheng Heng-Tze, Levent Koc, Jeremiah Harmsen, Tal Shaked, Tushar Chandra, Hrishi Aradhye, Glen Anderson et al. Wide & deep learning for recommender systems[C]//In Proceedings of the 1st workshop on deep learning for recommender systems, 2016.
- [12] Wang R, Shivanna R, Cheng D, et al. Dcn v2: Improved deep & cross network and practical lessons for web-scale learning to rank systems[C]//Proceedings of the web conference 2021, 2021.

无人机三维目标定位系统设计与实现

朱芝靖¹, 王继红^{2*}, 胡三宁²

(1. 郑州科技学院电子与电气工程学院, 河南 郑州 450064;

2. 河南科技大学应用工程学院, 河南 三门峡 472000)

摘要 随着无人机在应急救援、电力巡检、环境监测等领域的广泛应用, 高精度、实时化的三维目标定位成为关键技术需求。本文针对现有无人机定位系统在远距离、复杂环境下存在的硬件负载重、功耗高、环境适应性差等问题, 通过模块化集成与性能优化, 构建集环境感知、数据处理与无线传输于一体的无人机三维目标定位硬件系统, 重点阐述各核心硬件模块的电路设计及参数选型, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 无人机; 三维目标定位; 模块化设计; 低功耗

基金项目: 2023 年河南省科技计划项目 (项目编号: 232102210145)。

中图分类号: TP391.41; V279

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.002

0 引言

无人机产业作为国家战略性新兴产业, 在政策推动与技术迭代的双重驱动下实现快速发展。无人机凭借成本低、机动性强、无人员伤亡风险等优势, 已广泛应用于民用勘测、科学研究等领域。在民用方面, 如地质监测、气象观测、资源勘探和森林防灾防火等工作中价值显著; 在科学研究中, 高校和科研机构也将用于大气研究、核生化污染区取样与监控等任务^[1]。然而, 无人机在执行任务时面临复杂多变的环境与技术挑战, 定位和导航是实现其高效、安全运行的核心技术。在开阔地区, 无人机通常依赖全球定位系统 (GPS) 确定位置和航向, 但在城市峡谷、室内、地下或其他全球导航卫星系统 (GNSS) 信号受限的环境中, GPS 信号丢失或干扰会严重影响定位精度与操作安全^[2]。此外, 无人机拍摄时的倾斜角度及目标物在图像中的位置偏差, 导致二维目标定位无法满足立体位置高精度定位需求, 且人为信号干扰进一步对定位系统提出更高要求。本文针对无人机三维目标定位的技术痛点, 融合机器视觉、图像匹配校正、5G 通信等技术, 构建完整的无人机三维目标定位硬件系统。

1 硬件总体架构

在无人机三维目标定位系统的分层架构中, 机载端是无人机三维目标定位系统的核心前端感知单元, 可直接搭载于小型无人机平台, 其核心职责涵盖环境感知、设备状态监测及数据预处理, 通过多模块协同

工作, 为后续定位解算环节提供高精度数据支撑, 保障定位系统整体性能。

无人机三维目标定位系统机载端采用“异构集成+模块化”架构, 以 STM32H743VGT6 高性能微控制器为核心, 串联图像采集、惯性测量、无线通信与智能电源四大功能模块, 各模块通过标准化接口实现数据交互, 整体架构如图 1 所示。

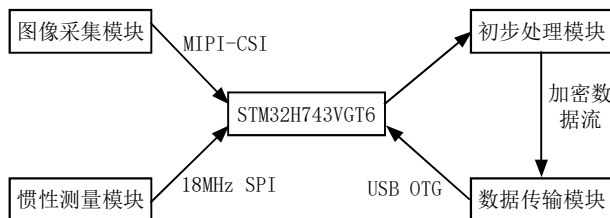


图 1 机载端系统架构图

接口采用工业级标准接口 (如 MIPI-CSI 用于图像传输、SPI 用于 IMU 数据读取、USB OTG 用于 5G 通信), 避免自定义接口导致的兼容性问题, 同时提升数据传输速率 (如 MIPI-CSI 速率达 5Gbps, 满足 2 000 万像素 60fps 图像传输需求)。关键模块 (如电源、通信) 采用冗余设计, 温度敏感部件 (如 IMU、相机镜头) 增加温度补偿电路, 接口处添加 ESD 防护 (± 8 kV 接触放电), 确保在 $-20 \sim +60$ °C 环境下稳定工作。同时, 通过芯片级集成、选用微型元器件、简化外围电路、硬件加速处理与动态功耗调节, 实现各功能模块的高效闭环, 其轻量化与实时性表现完全契合小型无人机的作业需求, 为系统整体定位精度提供前端保障。

*本文通信作者, E-mail: zkdywjh@126.com。

2 核心模块硬件设计与实现

2.1 主控模块

本设计选用 STM32H743VGT6 作为主控芯片, 该芯片可满足图像预处理(高斯滤波、CLAHE 增强)与特征提取(改进 SIFT 算法)的算力需求。在功能覆盖与数据交互层面, 该主控模块通过多类型异构接口的精细化配置, 实现了与各类机载设备的高效适配, 构建起全维度数据采集与传输链路。MIPI-CSI 接口专为机载相机设计, 支持最高 60fps 的 1920×1080 像素图像输入, 这一帧率可确保无人机在 10 m/s 飞行速度下, 每帧图像对应的地面覆盖范围重叠率超 80%, 为后续图像配准与特征匹配提供充足的场景信息; SPI 接口挂载 MPU9250 IMU 与气压计, 100 Hz 的姿态与高度数据采集频率, 可实时补偿无人机飞行中的姿态扰动, 使定位误差减少 15% 以上^[3]; I2C 接口扩展的温湿度传感器与电源监测芯片, 能实时反馈设备工作环境参数, 更可在电源电压波动超过 $\pm 5\%$ 时触发预警; PCIe 接口连接的 5G 模块, 支持最高 50 Mbps 的无线数据上传速率, 将定位结果、关键图像数据在 1 s 内传输至地面端, 满足实时决策需求。

2.2 图像采集模块

图像采集模块是无人机“视觉感知窗口”, 其核心需求是在 500 m 距离内清晰捕捉目标细节、输出高帧率图像、适应宽温环境($-20 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$), 同时满足轻量化与低延迟。图像采集模块选用 1/2.3 英寸 2 000 万像素 CMOS 传感器(KS2A418), 搭配 4 mm 定焦镜头, 视场角 78° , 支持 $-20 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽温工作。传感器通过 MIPI-CSI-2 接口与 STM32H743 直连, 传输速率 5 Gbps, 每帧 12 MB 图像数据无延迟传输, 60 fps 帧率确保动态目标连续捕捉^[4]。该模块可在复杂环境下稳定输出高分辨率、高帧率图像, 为后端改进 SIFT 特征提取算法提供高质量数据源, 满足远距离定位需求。

2.3 惯性测量模块

惯性测量模块(IMU)用于实时获取无人机姿态(俯仰角、横滚角、航向角)与运动参数(加速度、角速度), 为图像特征匹配的运动补偿、定位解算的相机位姿估计提供基础数据, 其核心需求是: 静态零漂小、动态测量精度高(加速度误差, 角速度误差、采样率高^[5])。电路设计针对传感器精度进行优化。SPI 总线串联匹配电阻, 减少信号反射, 保障数据稳定传输; 集成 NTC 热敏电阻(精度 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$), 实时监测传感器温度, 通过 ADC 输入主控后动态修正陀螺仪零漂, $-20 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$

范围内补偿误差 $\leq 0.01^{\circ}/\text{s}$; 电源端并联陶瓷电容与钽电容, 滤除高频与低频噪声, 确保传感器供电稳定。模块采用金属屏蔽壳封装, 减少电磁干扰对测量精度的影响。该 IMU 模块可提供高精度姿态数据, 静态零漂与动态误差均满足设计要求, 能够有效补偿无人机飞行中的姿态扰动(如俯仰角 $\pm 5^{\circ}$ 、航向角 $\pm 10^{\circ}/\text{s}$), 为后端 PnP 定位解算提供可靠的相机位姿基准。

2.4 无线通信模块

无线通信模块是机载端与中继端/地面端的数据“桥梁”, 其核心需求是超视距传输(视距内 $\geq 5\text{ km}$)、低延迟($\leq 100\text{ ms}$)、高稳定性(丢包率 $\leq 1\%$), 同时支持动态调制(根据信道质量切换 BPSK/QPSK/16QAM/64QAM)。此模块电路设计重点提升抗干扰能力。采用 28AWG 双绞差分线连接模块与主控, 长度 $\leq 150\text{ mm}$, 表层包覆接地屏蔽层, 阻抗匹配 $50\text{ }\Omega$, 抑制振动引发的信号串扰; 电源端采用 DC-DC 芯片供电, 并联陶瓷电容与电解电容, 滤除高频纹波^[6]; 集成射频开关 SKY 13352, 实现 5G 与 Wi-Fi 双模切换, 切换时间 $\leq 10\text{ ms}$, 满足不同场景通信需求^[7]。该通信模块可在超视距场景下实现稳定数据传输, 延迟与丢包率均满足设计要求, 能够保障图像特征数据、IMU 数据的实时回传, 为后端定位解算提供及时的数据支撑。

3 系统性能测试

为全面验证无人机三维目标定位系统的性能, 搭建了一套基于 MATLAB 与 Gazebo 的联合仿真平台。该平台以 ROS(Robot Operating System)为通信中枢, 构建全链路验证体系, 实现了从算法设计、功能验证到性能评估的完整测试流程。测试平台采用了高性能的硬件组合, 并通过对计算资源的精细化调度以确保实时性。

系统软件架构以 ROS Noetic 为通信中枢, 无缝连接 Gazebo 11 仿真环境与 MATLAB R2022a 算法平台, 构建了跨平台数据闭环。在 Ubuntu 系统中部署 ROS 主节点, Gazebo 通过插件集成 PX4 无人机模型并发布相机与 IMU 传感器数据话题; MATLAB 则通过 ROS 工具箱订阅这些话题, 将传感器数据转换为内部矩阵格式进行处理, 最终将定位结果打包为 ROS 消息发布回仿真环境, 实现了从传感数据生成到算法结果反馈的自动化联动。

为全面验证算法性能, 仿真平台构建了城市场景、山区地形和农田环境三类异构测试场景, 以模拟真实应用中的遮挡、动态干扰、弱纹理及尺度变化等挑战。同时, 传感器模型引入了逼近真实的噪声特性: 相机添加了高斯噪声与运动模糊, IMU 则配置了精确的噪声

密度与零漂参数，并通过 Gazebo 插件实现误差注入，确保了仿真数据与物理世界数据特性的一致性，为算法测试提供了高逼真度的数据源。

3.1 测试环境与方案

模拟测试环境选取平原、山地、城市三种典型场景，目标距离 200 m、350 m、500 m，风速 0~13.8 m/s(0~6 级)，光照条件涵盖晴天(照度 $\geq 10\,000$ lux)、阴天(1 000~5 000 lux)与黄昏(≤ 500 lux)。测试设备包括本文设计的无人机系统、高精度 RTK(作为真值参考)、风速仪、照度计及数据记录仪。

测试方案分为静态定位、动态跟踪与环境适应性三类：

1. 静态定位：在不同场景设置固定目标，无人机悬停采集图像，解算定位结果，对比 RTK 真值，计算 RMSE。

2. 动态跟踪：无人机沿预设航迹飞行(速度 5 m/s)，跟踪移动目标(速度 2 m/s)，记录定位结果与轨迹偏差。

3. 环境适应性：在不同风速与光照条件下测试，统计定位误差增幅、通信中断率与续航时间变化。

3.2 测试结果分析

1. 静态定位精度。不同场景与距离下静态定位精度测试结果如表 1 所示。在平原场景 500 m 距离下，定位 RMSE 3.2 m，满足 ≤ 5 m 设计要求；山地场景因地形遮挡，误差略增，500 m 时 RMSE 4.5 m；城市场景受建筑多路径干扰，500 m 时 RMSE 4.8 m，仍优于同类系统(误差 10~20 m)。

表 1 不同场景与距离下静态定位精度测试结果

场景类型	本系统 RMSE	大疆 Phantom 4 RTK 典型误差
平原	3.2 m	1 cm+1 ppm
山地	4.5 m	5~8 m
城市	4.8 m	8~10 m

2. 动态跟踪性能。在动态跟踪测试中，无人机飞行速度 5 m/s，目标移动速度 2 m/s，不同距离下轨迹偏差如表 2 所示。500 m 距离内轨迹偏差 ≤ 5.2 m，平均跟踪延迟 0.42 s，满足动态目标监测需求，偏差主要源于图像传输与解算延迟，通过算法优化可进一步降低。

表 2 不同距离下轨迹偏差

目标距离 (m)	轨迹偏差 (m)	跟踪延迟 (s)
200	2.1	0.38
350	3.8	0.40
500	5.2	0.42

3. 环境适应性。环境适应性测试结果如表 3 所示。6 级风力下，定位误差增幅 16%，通信中断率 0.8%，主要因无人机姿态扰动导致图像模糊，通过 IMU 动态补偿可缓解；黄昏低光照条件下，误差增幅 19%，通信无明显影响，可通过图像增强算法提升弱光成像质量；-20℃低温环境下，续航时间 2.1 h，衰减 9%，满足寒冷地区作业需求。

表 3 环境适应性测试结果

环境条件	定位误差增幅 (%)	通信中断率 (%)	续航时间 (h)
5 级无风晴天	0	0	2.3
6 级风晴天	16	0.8	2.3
无风黄昏	19	0	2.3
-20℃无风晴天	12	0	2.1

4 结论

本文设计了一套无人机三维目标定位系统机载端硬件，通过各个模块的协同优化，解决当前民用无人机机载设备高精度与轻量化冲突、复杂环境适应性差、实时性与低功耗失衡三大核心问题，系统通过多场景测试验证，定位精度、续航与环境适应性均优于同类产品，可应用于应急救援、电力巡检等领域。

参考文献：

- [1] 王孟阳,张栋,唐硕等.复杂动态环境下多无人机目标跟踪的分布式协同轨迹规划方法[J].指挥与控制学报,2024,10(02):197-212.
- [2] 吴桐,李湛,郑晓龙等.基于纯方位测量信息的多无人机协同目标跟踪[J].飞控与探测,2024,07(04):17-25.
- [3] 李成.基于相关滤波的无人机目标跟踪的研究与实现[D].深圳:深圳大学,2021.
- [4] 沙苗苗,李宇,李安.改进 Faster R-CNN 的遥感图像多尺度飞机目标检测[J].遥感学报,2022,26(08):1624-1635.
- [5] 高鑫阳.基于无人机视觉信息的移动目标跟踪技术研究[D].北京:北京化工大学,2025.
- [6] 李华耀,钟小勇,杨智能,等.结合孪生网络和 Transformer 的轻量级无人机目标跟踪算法[J].电光与控制,2025,32(06):31-37.
- [7] 刘芳,孙亚楠.基于自适应融合网络的无人机目标跟踪算法[J].航空学报,2022,43(07):366-376.

储能变流器电容板过电压失控暂态研究

刁 群

(新源智储能源发展(北京)有限公司, 北京 102400)

摘 要 在“双碳”背景下, 新能源装机蓬勃发展, 而储能是解决清洁能源对网侧不稳定的规模化核心技术, 对维持电力系统的稳定性和灵活性具有重要作用。全球储能产业加速向多元化、智能化转型, 在可再生能源并网及微电网、电网调峰提效等领域发挥关键作用。然而, 作为储能交直流能源转换关键装置之一的储能变流器, 常发生减负载、跳闸、IGBT 模块损坏电弧拉燃等情况。本文通过对一起典型的储能电站用 2 500 kW 储能变流器故障后的仿真模拟进行分析, 探知故障下暂态的电流、电压波形变化, 对此类故障的共性特征进行深入归纳分类, 并提出早期预警方法和解决方案, 以期为实现储能变流器的安全稳定运行提供有益参考。

关键词 储能变流器; 过电压; 暂态仿真; 预警防范

基金项目: 中国电力 C 类科技项目 (项目编号: ZGDL-KJ-2025-C032)。

中图分类号: TM464; TM712; TM732 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.003

0 引言

储能技术是构建新型电力系统、保障能源安全、实现“双碳”目标的关键。以电化学储能为代表的新型储能具有调节速度快、布置灵活、建设周期短等特点, 在可再生能源并网及微电网、电网调峰提效等中的应用发挥着关键作用。而储能变流器 (以下简称 PCS) 作为电池舱直流电与网侧交流电双向转换的核心部件, 用于控制电池的充电和放电过程, 进行交直流的变换。PCS 在电池储能系统中成本约占比 15% ~ 20%, 是电池储能系统的关键环节, 其可靠性和安全性是制约整个储能系统平稳运行的因素。据统计, 目前在运行储能电站故障中, PCS 故障约占 30%, 其存在故障隐蔽性, 常在故障发生后 IGBT 模块多发生爆燃、炸损, 故障痕迹容易模糊消失, 故障原因较难分析, 本文从 PCS 吸收电容板故障出发, 分析该过程对 PCS 运行的影响, 并针对性地提出解决方案, 从根源上解决此类故障, 从而提高设备可靠性。

2024 年 12 月, 某集团 200 MW · h 储能项目接受调度指令并开始执行满功率放电时, PCS 报“驱动故障、母线电流过流、逆变软件过流”等告警, 工作人员现场检查发现 PCS 功率模块有明显放电痕迹, 模块有拉弧烧焦现象。该事件最终定损, 需要更换 PCS 支路功率模块 3 个, BMS 电池舱高压箱内熔断器、接触器需更换各 18 个, 汇流柜熔断器需更换 1 个, 该事件直接经济损失 20 万元, 连带直接电量损失及电网考核。该次事件最终确定为吸收电容板的焊盘溢锡导致母线之间

的安规绝缘不足, 引发短路放电。该故障隐蔽, 发生时间短, 带来的次生危害性大。因此, 本文通过开展故障模块和同批次产品仿真对比试验, 采集不同阶段电压、电流波形特征进行暂态研究。在此基础上, 从实际工程应用角度出发提出了 PCS 的预警防控策略。

1 实验设置

1.1 试验样品准备

因故障发生后 IGBT 模块发生短时热量聚集及燃弧损伤, 直接故障点不易发现, 分析思路是通过软件和硬件复现故障现场, 对比故障时的波形图, 通过结论法逐一排除非相似项, 最终定位故障原因^[1]。试验准备同批次 IGBT 驱动模块, 模块单体尺寸为 110 × 80 mm, 准备恒定电流和电压源, 其他仪器包括录波器、万用表等。

1.2 故障录波分析

通过故障录波得知, 在 A 时刻发生异常, 保护逻辑动作, PCS 封锁脉冲; 在 B 时刻, B 相与 C 相形成环流, 半母线电压发生抖动, 抖动频率为 100 Hz, 在 125 ms 后的 E 时刻直流母线发生短路, 这时三相发生不控整流, 表象为电池舱高压箱熔断器熔断。

1.3 故障实物分析

从故障的 IGBT 主板看, A 相主要异常点在二极管上, 各 IGBT 管焊点工艺正常, 支撑绝缘子受短路应力影响损坏; B 相 T1 晶圆损坏发黑, T4 与 T6 管 IGBT 内部焦黑损坏, T2 与 T3 管整体损坏, T1 与 T5 管二极管档位测量正常且 D5 二极管档位与正常管相近, D1 二极

管压降偏高,各 IGBT 管焊点工艺正常,支撑绝缘子正常;C 相 T6 二极管异常,T1 晶圆焦黑,D1 阻抗无穷大,T2 与 T3 管整体损坏,T5 二极管压降 0.359 V,各 IGBT 管焊点工艺正常,支撑绝缘子正常。

2 试验结果与分析

通过录波图和故障设备实物测量分析依旧不能确定故障原因,本节进行软件原因分析,并针对内管异常进行逐一测试。

2.1 软件封脉冲驱动时序异常导致内管异常测试

通过软件逻辑模拟因软件类故障导致的封脉冲现象,通过对 T1 驱动电流、T2 驱动电流、T3 驱动电流、逆变电流在放电状态下的波形和故障断点情况分析得出的结论是,模拟 PWM 总使能信号干扰测试下,运行过程中软件误封脉冲不会导致 IGBT 损坏^[2]。

2.2 硬件封脉冲驱动时序异常导致内管异常排查

测试异常封锁后的驱动波形测试,异常封锁(硬件)驱动时,电流电压波形未发生畸变,波形及逻辑均反馈正常,并且 IGBT 未损坏,无异常放电烧焦等痕迹^[3]。

2.3 反向电压尖峰超标导致 IGBT 内管异常排查

通过测试满功率状态下 IGBT 反峰测试,分别对 T1-T6 管反峰下的波形进行录波分析,内外管反峰均在合理范围内(器件要求反峰不超过 1 200 V),内管均未发生暂态过压而击穿损坏的现象。

2.4 双脉冲测试

直流电压 1 450 V 下测试 T1~T6 驱动、反峰、电流、电流上升/下降时间,IGBT 开通/关断时间、损耗,无异常现象(见表 1)。

表 1 双脉冲测试

测试项	驱动上 升沿	驱动下 降沿	反峰	峰值电流
	开通时间	开通延时	关断时间	关断延时
T1	正常	正常	△ 194.4 V/741.6 V	678 A
	1.13 us	0.86 us	0.838 us	0.77 us
T2	正常	正常	△ 291.6 V/734.4 V	636.8 A
	1.23 us	0.86 us	1.8 us	1.53 us
T3	正常	正常	△ 313.2 V/730.8 V	729 A
	0.692 us	0.540 us	2.268 us	1.992 us
T4	正常	正常	△ 270 V/745.2 V	618 A
	1.076 us	0.820 us	1.132 us	1.084 us
T5	正常	正常	△ 208 V/727.2 V	657 A
	1.31 us	0.96 us	1.75 us	1.62 us
T6	正常	正常	△ 97.2 V/734.4 V	627 A
	1.33 us	0.99 us	1.872 us	1.664 us

2.5 驱动参数不合理导致 IGBT 异常排查

软件设计(见图 1)自查,驱动配置、驱动保护、故障封锁逻辑和定值均导入正常,与初始设定值无差异,均未发现异常^[4]。因此,排除驱动参数设置不合理导致的故障情况。

2.6 IGBT 晶圆过温损伤异常排查

该型 IGBT 模块内部发热量最大的 IGBT 芯片或 FWD 芯片正下方的铜底座下温度极致为 125 ℃,通过满载

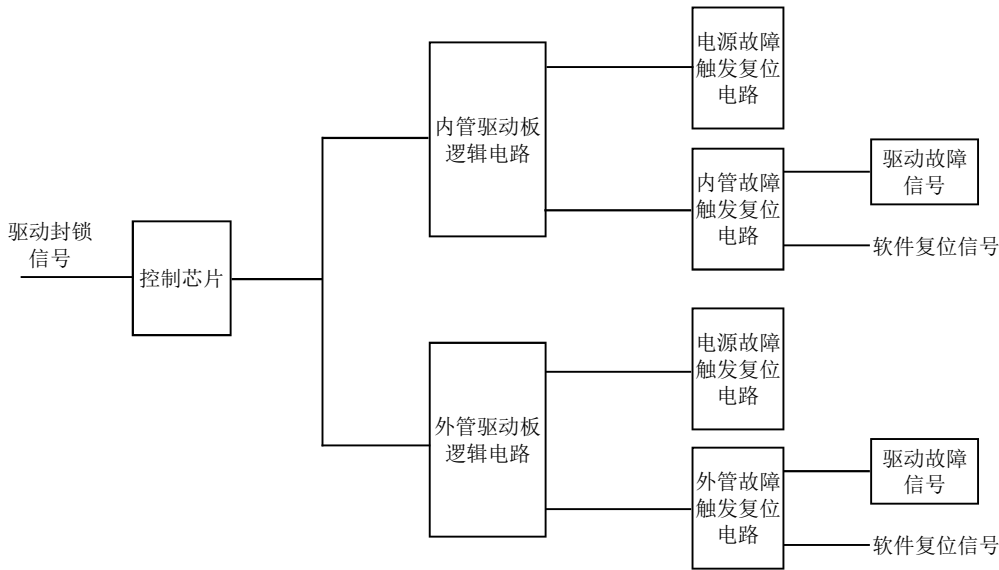


图 1 软件设计图

运行热点测试,主要以温度规格较低的芯片器件为主,经温升测试,规格未超标,温度无异常(见表2)。因此排除 IGBT 晶圆过温损伤导致的故障情况。

表2 温升测试

测试项	叠加温度/℃	规格/℃
内管驱动光耦环温	54.39	/
光耦	51.06	85
驱动光耦	55.93	85
电源芯片	57.12	80
光耦	54.82	85
比较器	56.38	85
环温	45.00	/

2.7 器件温度规格超标导致的 IGBT 驱动电路异常

通过高压 1 500 V 逆变基整流满载试验,验 IGBT 叠加温度至 126.57 ℃,达到允许极值以上温度,驱动电路无异常。

2.8 IGBT 自身异常导致

通过 IGBT 溯源检查,得出 B 相 B-9/12 绝缘失效为芯片破坏后的二次损坏,同批次抽查均为正常。因此第一故障点非 IGBT 本身故障引发,排除 IGBT 本身异常导致。

2.9 对其他板卡进行排查

对 B 相电容板拆开电容后检查发现底部有拉弧痕迹, N 对 BUS-, 对应 T6 和 T4 管位置处,进一步拆解发现有溢锡现象。除 B 相电容板外的其他板卡检查均无异常现象。初步怀疑因 B 相电容板波峰焊溢锡导致绝缘能力降低引发暂态过电压。

3 故障验证

3.1 对 B 相电容板拉弧进行复盘验证

B 相电容板有拉弧痕迹,主要是中点 N 与 BUS- 拉弧,导致在发生异常 A 时刻,负半母线轻微抖动 B 相 T6 管短路后,出现过流,脉冲封锁。在异常录波的 B、D 时刻,通过 T6 管和 T3 管(不排除 T3 管在拉弧过程中同时异常),形成回路,电流互灌,由于电压和电流均被电池吸收,使得中点电压震荡(由仿真看出,当 T6 异常半母线电压上升, T3 异常半母线电压下降,形成震荡),直到母线短路,异常扩散。仿真后的波形能够与现场故障录波吻合对应。异常原因为电容板溢锡导致绝缘

异常,最终引发短路击穿,拉弧导致 IGBT 模块损坏。

3.2 电容板溢锡原因分析

波峰焊是让插件板的焊接面直接与高温液态锡接触达到焊接目的,其高温液态锡保持一个斜面,并由特殊装置使液态锡形成一道道类似波浪的现象,所以叫“波峰焊”,其主要材料是焊锡条^[5]。波峰焊高度正常设置值在 1/4 ~ 3/4 之间,此状态波峰高度为正常,当波峰高度低于 PCB 板厚度 1/4 时,有空焊风险,当波峰高度高于 PCB 板厚度 3/4 时,有溢锡风险。而异常电容 PCB 板厚为 2.0 mm,按照中间值 2/4 的波高预计浸锡高度在 1 mm 左右,实际治具中间下沉部位最大约 1.1 mm, 1+1.1=2.1 mm,理论值浸锡高度达到 105%,超过上限,有概率造成溢锡风险。经过调查,该焊接板供应商其治具存在老化形变,投产工艺采用的是 3 块板拼板过波峰,而工装的形变的最大量在中间,造成溢锡。

4 结论

通过对单次 PCS 故障全过程分析,最终找到故障原因,并结合故障分析结果提出解决方案,措施包括更新制作规范与验收规范,对治具的验收进行要求并记录验收结果;取消治具过波峰焊,改为裸板直接过波峰焊;修订《DIP 首件检验记录表》,使用 X-RAY 检验,确认电容是否有底部溢锡等,通过这些控制措施,从根源上解决此类故障,也为同类型故障迅速查找提供了产业经验,进而提高设备可靠性,降低同类故障发生率。

参考文献:

- [1] 刘牛. 电网侧储能电站变流器 PCS 运行故障分析[J]. 集成电路应用, 2020, 37(03): 56-57.
- [2] 国家标准化管理委员会. 储能变流器检测技术规程(GB/T 34133-2023)[S]. 2023-12-28.
- [3] 刘泽浩, 肖岚. 模块化多电平变流器 IGBT 开路故障诊断与定位方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(04): 1501-1516, 中插 21.
- [4] 陈豪, 白恺, 董建明, 等. 锂电池储能单元状态评估及故障诊断方法研究[C]. 2015 年中国电机工程学会年会, 2015.
- [5] 胡涛, 周信芳, 郑俊彬, 等. 波峰焊引发的 PCBA 翘曲仿真分析及对策[J]. 汽车工艺与材料, 2023(12): 20-25.

数据中心 UPS 后备电池发展方向研究

杨亚萍¹, 唐兰兰¹, 杨加佳²

(1. 施耐德电气(中国有限公司)上海浦东分公司, 上海 201203;

2. 鲁南大数据中心, 山东 枣庄 277100)

摘要 数据中心 UPS 后备电池作为应对数据中心电力中断的关键环节, 正面临功率密度升级、绿色低碳转型与智能化运维三重诉求。本文剖析了当前 UPS 后备电池的核心瓶颈, 从电池材料迭代、系统集成创新、运维技术升级三大维度并结合产业生态预判发展趋势, 提出技术突破、产业协同与标准构建的针对性策略, 以期为中心 UPS 后备电池升级提供实践参考。

关键词 数据中心 UPS 后备电池; 预测性运维; 备电储能协同

中图分类号: TM91

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.004

0 引言

数据中心作为算力基础设施核心载体, 单次供电中断 1 小时造成的直接经济损失可达数百万元人民币。Uptime 调查显示, 约 60%~70% 的数据中心在过去 3 年内经历过至少一次停电。

UPS 系统作为应对供电中断的关键装备, 后备电池性能直接决定其可靠性与经济性。传统阀控式铅酸电池(VRLA)虽主导 UPS 后备电池市场, 但能量密度低、寿命短等缺陷日益凸显; 锂电池虽快速渗透, 却面临成本与安全的双重制约。

与此同时, “双碳”目标推动数据中心能效标准持续收紧。在此背景下, 系统梳理 UPS 后备电池技术现状与瓶颈, 探索创新路径与发展趋势, 对推动数据中心绿色高可靠发展具有重要的现实意义。

1 数据中心 UPS 后备电池应用现状与核心瓶颈

1.1 数据中心 UPS 后备电池应用现状

Global Market Insights 发布的《数据中心电池市场全球预测 2025-2034》呈现“铅酸主导、锂电崛起、多元补充”的格局, 2024 年全球数据中心 UPS 后备电池市场铅酸占 45%, 磷酸铁锂占 42%, 镍镉电池占约 8%, 钠离子电池占约 3%。

表 1 对这几种电池的技术参数做了详细对比, 可见磷酸铁锂电池在多维度具有优势, 钠离子电池发展迅猛, 潜力巨大。

国内数据中心以铅酸为主, 占比 93%, 锂电仅占 7%, 而钠离子电池等新技术占比更少。数据中心电池配置依据应用场景也不尽相同。

Tier III 及以上的数据中心对 UPS 和电池的配置核心目标是实现“并发可维护性”和“容错”, 确保任何单一设备计划内维护或意外故障都不会中断关负载的运行。铅酸因为其前期购置成本低, 技术成熟以及安全性, 仍是首选。

边缘数据中心多部署于户外基站等场景, 面临空间狭小、低温高湿恶劣环境、运维资源有限的三重约束。锂电池因其具备较高的能量密度、循环寿命较长、维护简单等成为边缘数据中心电池的主流。

AIDC 由于搭载大量高性能 GPU, 单机柜功率在向 100 kW 以上迈进。AI 负载呈现周期性、高幅度的波动。AIDC 的 UPS 和电池配置, 核心思路是从传统的“保障不停电”向“高效、智能、弹性能源管理”发展。

1.2 数据中心 UPS 后备电池应用核心瓶颈

1.2.1 能量密度与空间利用的结构性矛盾

VRLA 能量密度较低, 空间占用的背后是承重成本的激增。VRLA 电池的铅极板重量占比超 60%, 1 m² 电池区域的重量可达 1 250 kg, 为满足承重需求, 机房楼板需额外配置钢筋加固。对于老旧机房改造场景, 部分建筑因承重不足甚至无法采用 VRLA 方案。

磷酸铁锂电池虽具备高能量密度, 但早期未能实现“密度—空间”的最优转化。要求必须配套独立消防与散热系统, 如 FM-200 洁净气体灭火系统和强制风冷通道或水冷管路空间, 这些附加设施大幅侵蚀了密度提升带来的空间收益。

1.2.2 全生命周期经济性的双向失衡

VRLA 短寿高耗, 日历寿命 5 年, 需每 4 年更换一次, 在整个 UPS 系统 10 年寿命中, VRLA 维护成本占初始电

表 1 主流电池技术参数对比

技术指标	铅酸电池	磷酸铁锂电池	镍镉电池	钠离子电池
市场份额（2024）	45%	42%	8%	3%
能量密度（Wh/kg）	30 ~ 50	125 ~ 185	50 ~ 80	120 ~ 160
循环寿命（次）	300 ~ 500	> 3 000	> 2 000	3 000 ~ 4 500
初始成本（元 /Wh）	0.75 ~ 0.95	1.5 ~ 2.5	高	比磷酸铁锂低 25% ~ 32%
优势	成本最低、技术成熟、安全	高能量密度、长寿命	极宽温域、高可靠、耐用	低成本、高安全
劣势	能量密度低、寿命短、重金属污染	初始成本高、BMS 要求高	能量密度低、重金属污染、记忆效应	能量密度暂低于铁锂

池投资的 60%，全生命周期运行成本为电池初始投资的 3 倍多，但其残值回收比例高，回收体系完整。

锂电池高投低收，初始成本是 VRLA 的 2 倍左右，而维护成本仅占初始投资的 10%，整个生命周期的成本比铅酸低 39%。但是电池回收体系不完善，上游碳酸锂等原材料价格的显著下行，进一步影响了再生利用的经济性。

1.2.3 智能化管理水平滞后

当前数据中心 UPS 电池管理面临预警准确率低、通讯效率低、精度不足和扩展性不足等问题。

当前电池管理系统（BMS）技术多是依赖电压、温度单点检测和健康度（SOH）经验公式拟合，电池状态检测不准确，故障诊断和预测能力弱。在规模电池组应用场合，单个电池单元与中央控制器直接通信成了瓶颈，通信效率低下。UPS 的充放电控制精度不足，过度充放电会对电池造成不可逆损伤。适应性和扩展性差，目前 BMS 难以满足新型电池技术的要求（如固态电池等）。

BMS 的问题直接影响着电池的运行安全，袁帅等统计了 2017-2024 年全球范围内 90 多起锂离子电池的火灾爆炸事故，发现电池过充、BMS 异常等 5 个风险为引发火灾的高风险因素^[1]。

2 数据中心 UPS 后备电池技术创新方向

2.1 锂电池持续升级，新电池技术不断突破

磷酸铁锂电池作为当前中高端数据中心的核​​心选择，通过“安全—散热—倍率”三维技术升级，实现与数据中心需求的深度适配。（1）电芯级安全屏障构建，采用新的隔膜材料和电解液，提升热失控温度进而提高安全性。2025 年 9 月宁德时代发布 NP3.0 神行 Pro 磷酸铁锂电池采用了三项核心创新：阻燃电解液、陶瓷复合隔膜与正极纳米涂层。这些新材料在提升电

池的热稳定性的同时，改变了电池在极端条件下的反应路径，使其即使发生热失控也不会产生明火或烟雾。

（2）磷酸铁锂电池正摒弃风冷模式，采用新型液冷精准控制电池组温差。如麒麟电池，将液冷板置于电芯侧面甚至电芯之间侧面冷却，换热面积扩大至 4 倍，散热效率和温度均匀性显著提升^[2]。（3）多极耳设计降低电池内阻，减少大电流放电时的极化效应，放电平台更稳定，提升放电倍率。

固态电池凭借高能量密度与高安全性的卓越优势脱颖而出。国内崔光磊团队在正极、电解质、负极三大核心材料上均有突破，使全固态电池能量密度提高至 390 Wh/kg，并实现超万次稳定循环，可以在极宽的温度范围工作。

宁德时代在钠离子电池技术持续突破，2025 年推出的钠新电池能量密度达 175 Wh/kg，-40℃环境下容量保持率高达 90%，循环寿命超 10 000 次，支持 5C 超充，预计 2026 年商业化成本降至 0.25 元 /Wh 以下，将成为北方寒冷地区边缘机房的经济型替代方案。

钒液流电池凭借高安全性、超长寿命和容量可灵活扩展的独特优势，在新型电力系统中扮演着越来越重要的角色。目前钒液流电池的循环寿命超 15 000 次（是磷酸铁锂的 2.3 倍），且充放电过程无固体相变，安全性极高。

2.2 预制化与备储融合架构

2.2.1 电池预制化和模块化

预制化电池柜通过“电池+BMS+液冷+智能配电”的工厂级预集成设计，实现从现场拼凑到模块交付的范式升级。现场仅需通过螺栓进行模块拼接，彻底规避现场接线失误风险。

模块化 N+1 冗余电池架构，通过智能切换开关与主回路并连，提高系统可用性。华为 FusionPower 方

案中单个电池模块故障时,迅速切换至冗余模块,供电中断时间 $<1\text{ ms}$,系统可用性达99.9992%。

预制化电池柜通过集成智能电流分配单元,实现“按需配电”的精准管控。动态配电可防止电池过充、过放,可将电池状态维持在最佳区域以减缓电池容量衰减。一致的功率分配还能改善电池组内的均衡性,避免个别电芯提前老化,从而延长整个电池组的寿命。

2.2.2 备电与储能协同架构

在“双碳”目标与电力市场化改革的双重驱动下,UPS后备电池在保障核心备电需求的前提下,利用剩余容量参与电网互动获利。其运作逻辑为:(1)预留一定容量专门用于电网峰谷调节;(2)建立“BMS+UPS+EMS”三级联动机制,电力管理系统(EMS)实时采集电网电价、电池SOC负载数据,自动生成充放电策略,既规避深度充放电又最大化电价差收益;备电优先级锁定,当电网发生波动或断电时,EMS立即向UPS发送中断储能指令,电池系统立即切换至备电模式,冗余容量瞬间补入主回路,确保负载供电无中断^[3]。

2.3 智能化主动运维管理

随着AI算法、物联网与数字孪生技术的深度渗透,UPS后备电池实现从“事后抢修”到“事前防控”的根本性转变。

AI算法通过分析海量历史数据,构建电池衰减模型,准确预测剩余寿命。同时支持多策略智能充放电,主动延长电池寿命。

AI模型能融合电压、温度、内阻、膨胀力等多维度特征,在潜在故障发生前数十小时甚至数天发出预警,华为的AI BMS系统可实现热失控故障的24小时提前预警,实现“事前防控”。

结合物联网技术,可实现远程诊断和策略下发,大幅提升运维效率,降低非计划停机,实现预测性维护与远程运维。

3 数据中心UPS后备电池未来发展路径

3.1 技术路径:高密度、高可靠、高智能

功率密度持续突破,新材料和卷绕工艺以及液冷技术使电池功率密度持续突破,新的外壳材料进一步减轻重量,提升空间利用价值^[4]。

安全防护体系升级,从“被动防护”转向“主动预警”。通过多维度传感器(温度、电压、电流、漏液、气体)加实时监测算法,关键部件(如BMS、电源接口)采用“1+1”双备份,提高电池系统的安全性。

维护更加智能化,结合AI+IoT技术实现“预测性维护”,通过BMS系统采集的电池SOH、循环次数等数

据,训练算法预测电池寿命,将运维周期从“固定周期”改为“按需维护”,降低运维成本。

3.2 产业生态:协同创新与标准构建

产业生态建设的关键是打破“电池厂商单打独斗”的局面,形成跨领域协作的格局,电池厂商与数据中心运营商、IT设备厂商深度合作,根据数据中心的负载特性(如峰值功率、后备时间)定制电池容量与充放电逻辑以适应不同数据中心的应用。同时电池厂商也会与高校、材料企业合作研发“长寿命电解液”“耐高温隔膜”,提高循环寿命和安全性。

加速标准化推进,制定电池尺寸、接口协议、安全测试(如热失控测试方法)、数据采集格式等统一标准,降低不同厂商产品的兼容性成本。

绿色化深化,推广锂电池、钠电池以减少环境污染,健全电池回收,推进电池回收标准落地^[5]。

4 结论

数据中心UPS后备电池正从“被动备电保障”向“主动能效赋能”转型,呈现“多元技术并存、模块集成、智能运维”的特征。短期(2023-2025年)磷酸铁锂场景优化仍是主流;中期(2025-2030年)固态电池、钠离子电池实现商业化突破;长期(2030年后)形成场景差异化路线——极端环境用钠离子电池、大型数据中心用钒液流电池、高密度场景用固态电池。未来技术层面强化跨学科协同,破解安全与密度瓶颈;产业层面完善回收与标准体系,构建绿色供应链;多方协同推动UPS后备电池系统向高效、安全、绿色、智能化发展,为数据中心算力升级提供支撑。

参考文献:

- [1] 袁帅,崔煜杰,程东浩,等.2017—2024年全球电化学储能电站火灾爆炸事故统计分析[J].储能科学与技术,2025,14(06):2362-2376.
- [2] 宁德时代新能源科技股份有限公司.水冷板组件、水冷系统、电池及其箱体以及用电装置:CN114497826(A)[P].2022-08-26.
- [3] 丁同朝.储能系统在大规模数据中心能源管理中的应用与网络安全[J].储能科学与技术,2025,14(09):3444-3446.
- [4] 刘通,杨瑰婷,毕辉,等.高能量密度与高功率密度兼顾型锂离子电池研究现状与展望[J].储能科学与技术,2025,14(01):54-76.
- [5] 袁榴艳,马文略,刘畅,等.中国锂电池回收利用产业发展形势、问题及建议[J].国际石油经济,2024,32(S1):77-83.

多孔有机聚合物催化 CO₂ 转化的研究进展

甘天宇, 廖 旭

(湖南科技学院化学与生物工程学院, 湖南 永州 425199)

摘 要 为应对全球变暖与环境污染的挑战, 降低大气中的 CO₂ 浓度势在必行。其中, 开发环境友好型策略以捕获 CO₂ 并将其转化为高附加值产物产品是一种可行的策略。在此背景下, 多孔有机聚合物 (POPs) 因其高比表面积、化学稳定性和纳米级孔隙率, 在 CO₂ 选择性吸附和非均相催化 CO₂ 转化领域展现出巨大潜力。本文系统阐述了各类 POPs 的制备方法, 并重点探讨了 POPs 在光 / 电催化 CO₂ 还原及化学转化 CO₂ 过程中面临的挑战与未来的发展趋势, 以期为相关人员提供参考。

关键词 多孔有机聚合物; 非均相催化; 光催化; 电催化; CO₂ 化学转化

基金项目: 超交联离子聚合物表面微环境的调控及其快速催化二氧化碳环加成反应的研究 (湖南省自然科学基金, 2023JJ40298); 吡啶基超交联离子聚合物的制备及其催化 CO₂ 环加成转化的机制研究 (湖南省教育厅优秀青年项目, 24B0759)。

中图分类号: TQ317; X701

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.005

0 引言

工业化石燃料的燃烧导致大气中 CO₂ 浓度显著提升被普遍认为是产生温室效应的主要诱因。通过环境友好途径将 CO₂ 捕获并转化为高附加值产物, 为降低 CO₂ 浓度提供了极具前景的解决方案。然而, 目前催化 CO₂ 转化工艺的发展仍面临巨大挑战, 包括开发具有高 CO₂ 吸附容量与选择性的材料、实现温和条件下 CO₂ 的高效转化、确保高效催化剂的成本效益与可循环性^[1]。基于 POPs 的非均相催化剂因其高比表面积、可调控孔结构、合成多样性、优良理化稳定性以及易于功能化构建金属活性中心等特性, 在 CO₂ 捕获与转化领域展现出独特优势^[2]。目前已被验证的 CO₂ 转化策略包括光 / 电催化还原以及化学转化, 这些方法能够高效地将 CO₂ 转化为甲醇、乙醇、甲酸、一氧化碳、甲烷、环状碳酸酯、羧酸、尿素衍生物和甲酰胺等高附加值化学品 (见图 1)。

本文重点概述了几种用于 CO₂ 催化转化的 POPs 材料的合成方法, 总结了其在 CO₂ 催化转化中的研究进展, 并对该领域当前面临的挑战以及未来发展趋势进行了探讨。

1 多孔有机聚合物的合成

POPs 是由碳、氮、氧等元素构成的有机大分子, 具备制备方法多样、易于功能化、高比表面积、低密度和良好的物理化学稳定性等优势^[3]。

1.1 超交联聚合物 (HCPs)

HCPs 作为一类永久性微孔聚合物材料, 近年来因其合成方法多样、易于功能化、比表面积高、原料成本低廉以及反应条件温和等优势而获得广泛关注。最初, Tsyurupa 和 Davankov 提出的 HCPs 是由聚苯乙烯基前体和交联剂反应制备, 而 Cooper 等人则创新性地使用小型多官能团有机分子作为单体和交联剂, 简化了合成过程。此后, 采用高活性试剂二甲醇缩甲醛和无水 FeCl₃ 催化剂的“针织法”被报道。

1.2 共价有机框架 (COFs)

COFs 是一种新兴的由有机分子组成以共价键连接的结晶性多孔材料。大多数 COFs 是通过溶剂热法合成, 其反应条件高度依赖于组分的溶解性、反应活性及反应的可逆性。反应体系的温度与压力对产物收率、结晶度与孔隙率具有显著影响。机械化学合成法作为一种简单、经济、环保的替代方案, 但在研磨过程中可能导致形貌变化、化学键断裂与重构。此外, 室温合成 COFs 具有显著吸引力, 特别是对于易损结构单元或敏感底物。

1.3 共价三嗪框架 (CTFs)

CTFs 是一种专门利用三嗪成环反应在有机建筑单元之间形成延伸多孔骨架的 COFs。其高氮含量和强共价键使其在非均相催化、气体存储与分离等领域被广泛应用。2008 年, Thomas 课题组首次通过离子热法合

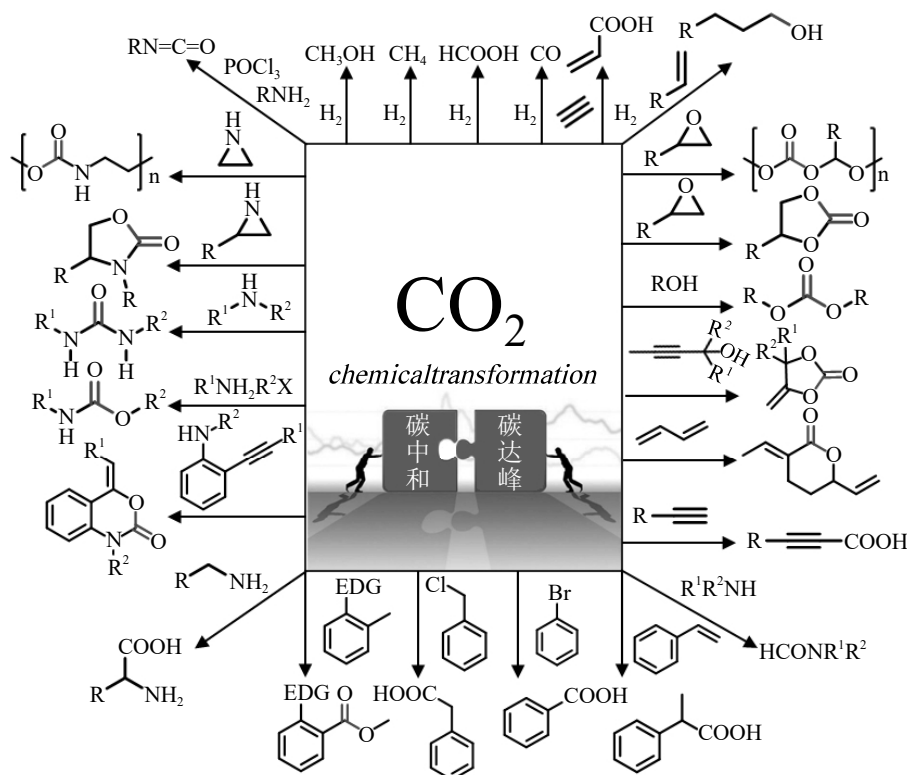


图1 CO_2 作为 C1 组分转化为高附加值能源产品和化学品的典型实例

成了 CTFs。之后 Cooper 团队将该研究推进了一步，成功在微波条件下以三氟甲磺酸为催化剂，在室温环境合成了 CTFs。此外，替代标准三聚反应的硫介导路线也被开发，该方法无需任何额外催化剂或溶剂。

1.4 共轭微孔聚合物 (CMPs)

为引入轻质炔基团，Jiang 等人通过 Sonogashira-Hagihara 交叉偶联反应首次制备了 CMPs。该反应在胺碱存在下，通过钯催化剂和铜助催化剂将卤代芳烃与含炔基单体偶联，但反应需严格的无氧无水条件。其他合成方法包括 Suzuki-Miyaura 交联反应、Yamamoto 偶联法和 Heck 反应（即 Mizoroki-Heck 反应），这些方法各具优缺点，如 Suzuki-Miyaura 反应条件温和，但存在氧敏感性副产物，Yamamoto 偶联法对水敏感，需要在手套箱中操作。

2 光 / 电催化 CO_2 还原

2.1 光催化 CO_2 还原

光催化 CO_2 还原是以太阳能为推动力，从而实现将 CO_2 转化为 C1 至 C4 等高附加值产物。其中，开发具有高活性和选择性的光催化剂是实现高效 CO_2 光还原反应的核心。POPs 由于具有更宽的可见光吸收范围和更高

的比表面积，使得其在将 CO_2 转化为高附加值产物方面展现出卓越的催化活性、选择性和耐久性^[4]。

将具有未填充 d 轨道的贵金属（如铱、铈等）引入 POPs，能更易吸附 CO_2 并在活性位点形成中间体。Xu 等人以 2,6-二氰基吡啶为结构单元合成多孔网络，通过离子热法将铱-羰基配合物固载其上，构建了富氮杂化体系。结果表明，所制备的催化剂在将 CO_2 还原为 CO 方面表现出显著效率，10 小时后体系的光还原 CO 产率高达 $353.05 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。Yang 等人合成了钴活性中心的三嗪基 CMPs，在调节骨架结构后实现了 $1210 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高效率。

无金属 POPs 因其成本效益高、避免金属失活问题而具有广泛的工业应用前景。Guo 等人通过六氯环三磷腈与巴比妥酸缩合制备了掺杂 N、O、P 的多孔聚合物，该聚合物 CO_2 光还原制甲烷展现出了优异的性能，产率为 $22.5 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ，选择性超过 90%。

构建无机半导体与 POPs 的复合材料，是提升光催化效率的有效策略。Dai 等人以聚苯胺、聚吡咯等导电聚合物为修饰剂，对 Bi_2WO_6 中空微球进行改性。所得的复合材料在可见光照射下，表现出将 CO_2 高效转化为甲醇和乙醇的显著活性。

2.2 电催化 CO₂ 还原

电催化 CO₂ 还原为有用化学品是实现环境可持续性与绿色能源利用的重要课题。其中,可以在以下三个方面提高电催化 CO₂ 还原效率:(1)调控催化体系的电子特性;(2)增强对 CO₂ 的亲和能力;(3)改善催化剂与电极的接触效果^[5]。

为最大限度地暴露活性位点,Yaghi 团队在高定向热解石墨表面构建了 COF 膜。研究发现,引入强吸电子基团的 COF-366-F-Co 表现出最优性能,其 CO 生成电流密度高达 65 mA·mg⁻¹。Yao 课题组通过 NaBH₄ 还原亚胺连接的 3D COF-300,制备了胺连接的 COF-300-AR。其生成的氨基甲酸酯中间体可促进银电极上 CO₂ 电化学还原为 CO 的反应,相对于可逆氢电极,在 -0.85 V 电位下该反应的法拉第效率达 80%,且具有高选择性。

CTFs 衍生物在 CO₂ 电还原中表现出优异的选择性与结构可调性。研究表明,含氟的 FN-CTF-400 在 -0.7 V 至 -0.9 V 的宽电位内,对 CH₄ 的法拉第效率高达 99.3%,而高温制备的 FN-CTF-700/900 因结构重构,产物由 CH₄ 转向 CO。通过引入金属活性中心,Co-CTF 与 Ni-CTF 可在较低过电位(-0.5 V 起)下高效催化 CO₂ 至 CO 转化,其中 Ni-CTF 因其低配位结构更利于 COOH* 中间体吸附,在 -0.8 V 时 CO 法拉第效率达 90%。

3 CO₂ 的化学转化

基于咪唑环 C2 氢的特性,咪唑鎓修饰的 COF-IL 可作为高效催化剂用于催化 CO₂ 环加成反应制备环状碳酸酯。通过将 COF-IL 末端烯烃与硫醇功能化壳聚糖进行光诱导硫烯反应可制备复合材料 COF-IL@chitosan,该材料催化产率高达 91%。Thomas 课题组最早报道了一类无金属 CTFs,可在温和条件下催化 CO₂ 环加成反应。高催化活性主要归因于其无定形结构带来的高比表面积、分级孔隙结构及额外介孔。相较于仅含微孔的晶态框架,该结构更有利于活性位点的扩散。

多项研究证明,CMPs 在捕获 CO₂ 并将其转化为环状碳酸酯方面具有广泛应用。含 Salen 配体及配位金属(包括 H、Cr、Zn、Al 和 Co)的 CMPs 能在温和条件下高效吸附 CO₂,进而催化 CO₂ 与环氧化物的环加成反应。基于锌-Salen 的 CMP 转换频率可达 11 600 h⁻¹,铝-卟啉基 CMPs 也能同步实现 CO₂ 捕获与环状碳酸酯转化。

超交联聚合物以其可调的孔道结构、易功能化的特点及稳定的框架,可作为高效、稳定 CO₂ 催化转化的理想平台。Tan 课题组采用新型溶剂“针织”法合成了

一种金属卟啉基微孔有机聚合物(HUST-1-Co),在环境条件下可实现 CO₂ 的高效化学转化。Dou 等人则通过一步“针织”策略合成了 HCP-FePs 催化剂,用于醛与 2,3-二甲基-1,3-丁二烯环加成反应,产率达 87.2%。Islam 等人通过氮掺杂 HCP 负载钨纳米颗粒,催化 N-甲基苯胺与 CO₂ 的甲酰化反应,产率高达 87%。

4 结束语

通过环境友好方式捕获 CO₂ 并将其转化为高附加值产品,为降低大气 CO₂ 浓度及应对气候变化问题提供了更具前景的解决方案。基于 POPs 的非均相催化剂因其独特性质和多样化的制备方法,在 CO₂ 转化领域备受关注。然而,根据现有文献报道,当前 CO₂ 转化条件与工业实际烟气工况之间仍存在差距。烟气中 CO₂ 的分压较低(约 15 bar),温度较高(40~80℃),且常伴随水分存在。此外,烟气中除 CO₂ 外还含有 N₂、NO₂、SO₂ 等组分,这些都会导致催化剂稳定性问题^[6]。未来仍需深入探索如何制备兼具高吸附容量、高催化活性、高稳定性、高选择性、高可回收性及低成本的 POPs 催化剂。以废弃 CO₂ 为原料的催化转化技术能解决这些关键问题,拥有广阔的应用前景,并可能成为可持续发展化工产业的核心支柱。

参考文献:

- [1] Du J, Ouyang H, Tan B E. Porous organic polymers for catalytic conversion of carbon dioxide[J]. Chemistry-An Asian Journal, 2021(16):3833-3850.
- [2] 张政,卢金荣.三嗪基多孔有机聚合物光催化还原 CO₂ 的研究进展[J].化工新型材料,2025(53):33-37.
- [3] Luo D, Li M, Ma Q Y, et al. Porous organic polymers for Li-chemistry-based batteries: functionalities and characterization studies[J]. Chemical Society Reviews, 2022(51): 2917-2938.
- [4] Ji G P, Zhao Y F, Liu Z M. Design of porous organic polymer catalysts for transformation of carbon dioxide[J]. Green Chemical Engineering, 2022(03): 96-110.
- [5] Kong C, Jiang G F, Sheng Y, et al. Progress on Cu-based metal-organic frameworks for high-efficiency electrochemical CO₂ conversion[J]. Chemical Engineering Journal, 2023(460): 141803.
- [6] Song K S, Fritz P W, Coskun A, et al. Porous organic polymers for CO₂ capture, separation and conversion[J]. Chemical Society Reviews, 2022(51): 9831-9852.

PLC 技术在电气工程自动化控制中的应用

韩雷斌

(郑州轨道工程职业学院, 河南 郑州 450100)

摘要 随着科技的不断发展, 电气工程及其自动化控制在工业生产、智能制造等领域扮演着至关重要的角色。传统的电气控制系统存在功能单一、抗干扰能力差、控制效率低下等问题, 难以满足现代工业对高效、稳定、智能化控制的需求。本文通过分析 PLC 技术的多样化功能、良好的抗干扰性能以及高控制效率等特点, 揭示了其在提升电气工程自动化水平、增强系统稳定性和可靠性方面的重要作用。研究结果表明, PLC 技术的引入显著提高了电气工程自动化控制系统的运行效率和灵活性, 为电气工程领域的智能化发展提供了有力支持。

关键词 电气工程; 自动化; 可编程逻辑控制器;

中图分类号: TP273; TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.006

0 引言

随着科技的不断进步, 电气工程及其自动化控制领域在工业生产、能源管理和交通等领域发挥着日益重要的作用。可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 作为一种新型的控制方式, 在工业生产中得到了广泛应用。PLC 技术融合了电子技术、计算机技术和通信技术, 具备多种功能, 具有较强的抗干扰能力和高效的控制效果, 能够适应多样化的生产环境和复杂的工业工艺需求^[1]。然而, 在推广应用过程中, 也出现了管理不善、应用层次较低以及专业人才短缺等问题。为此, 通过加强管理、推动技术创新和开展专业化培训等措施, 对电力系统进行了优化, 为电力系统的可持续发展提供了有力支持。

1 PLC 技术在电气工程及其自动化控制中的应用优势

1.1 具有多样化的功能

PLC 技术在电气工程及其自动化控制中具备显著的应用优势, 其中多样化的功能是核心亮点之一。它集成了逻辑控制、顺序控制、定时控制、计数控制等基础功能, 可轻松实现对电机启停、设备运行状态切换等常规操作的精准管理。同时, 还具备模拟量控制、运动控制、数据处理及通信联网等高级功能, 能适应复杂工业场景下的温度、压力等连续变量调节, 以及机床进给、机器人运动轨迹等精密控制需求。此外, PLC 支持多种编程语言, 如梯形图、指令表、结构化文本等, 方便不同技术背景的工程师进行程序设计 with 调试, 且可通过扩展模块灵活适配各类输入输出设备, 无论是开关量信号还是高速脉冲信号, 都能高效处理,

极大地提升了系统的兼容性和扩展性, 为电气工程自动化控制的多元化需求提供了强有力的技术支撑^[2]。

1.2 具有良好的抗干扰性能

PLC 的卓越抗干扰性能, 得益于其精密的设计和独特的工作原理。在硬件层面, PLC 采用密封式机箱, 内部电路经过特殊屏蔽处理, 能有效抵御电磁辐射、静电等外部干扰源; 同时配备高质量的电源模块和滤波电路, 可抑制电网波动和电压尖峰对系统的影响。在软件方面, PLC 采用循环扫描工作方式, 在一个扫描周期内集中采集输入信号、执行程序并刷新输出, 这种分时处理机制减少了信号间的相互干扰。此外, PLC 还具备故障自诊断和冗余设计功能, 当遭遇突发干扰导致程序异常时, 能迅速检测错误并启动备用程序或报警, 确保系统在恶劣工业环境下依然稳定运行, 为自动化控制的连续性和可靠性提供坚实的保障。

1.3 具有较高的控制效率

PLC 凭借内部灵活的编程能力, 可快速实现逻辑运算、数据处理等多种复杂操作, 大幅提升控制效率。通过预先编写的程序, PLC 能精准控制电气设备的启动、调速、换向等动作, 避免传统继电器控制因触点磨损导致的延迟和故障, 显著提高了控制的响应速度和准确性^[3]。其模块化结构支持根据实际需求灵活扩展, 无论是增加控制点数还是添加特殊功能模块, 都能快速部署, 有效提升系统的整体性能。在电力系统中, PLC 可实时监测电网运行参数, 自动调节电压、分配电能, 实现负荷的动态平衡, 减少能量损耗。同时, 自动化的控制流程降低了人工巡检和操作频率, 极大地节省了人力资源成本, 保障了电网稳定、高效运行,

充分彰显其在电气工程自动化控制中的显著优势。

2 PLC 技术在电气工程及其自动化控制中的应用实例

2.1 系统总体设计

在电气工程及自动化控制中, PLC 技术应用体现在系统总体设计多方面: 用交流接触器控制马达启停, 正反转通过 PLC 软件实现互锁, 减少电触点损耗; 借助移动转换装置和接近开关精确定位可移动部件, 需考虑其抗干扰与抗磨损性; 导轨变速器电机的过载保护装置利用信号逻辑关系防过载, 小型系统中冲切开关提供定位信息, 启动前需测试; 起吊、横行等电机用温度敏感继电器保护, 经中继转换将触点接入 PLC, 实现过负荷保护^[4]。

2.2 电气控制系统的设计

1. 主电路电源配置。电气控制系统主电路选用 380 V 三相交流电源, 为整个系统提供稳定的动力支持。系统由 QF 型自动切换器作为主控核心, 其具备双重功能, 既能在电路正常运行时实现电源的可靠切换, 又能在电路出现异常状况时迅速切断电源, 起到保护和隔离作用, 有效防止故障范围扩大, 确保电气设备及人员安全, 为系统稳定运行奠定基础^[5]。

2. 电机控制机制。交流接触器 KM1-KM8 承担着对电机的精准控制任务。其中, KM1、KM2 控制起吊电机 M1, KM3、KM4 控制横行电机 M2, KM5、KM6 控制走行电机 M3, KM7、KM8 控制自检电机 M4, 通过不同接触器的组合动作, 实现各电机的正反转运行特性, 满足设备在不同工作场景下的运动需求, 保障电气控制系统的多样化功能得以实现。

3. 电机过载保护设计。鉴于电机在实际运行中工作时间长且电流较大, 为避免电机因过载运行而损坏, 电气控制系统专门设置了过载保护措施。通过安装过载保护装置, 实时监测电机的运行电流, 一旦电流超过额定值, 过载保护装置立即动作, 切断电机电源, 防止电机因长时间过载导致绕组发热烧毁, 延长电机使用寿命, 提高系统运行的可靠性。

4. 短路防护设置。系统配置 FU1-FU4 熔断器, 分别对各负荷回路进行短路防护。当某一负荷回路发生短路故障时, 对应的熔断器迅速熔断, 切断故障电路, 避免短路电流对其他电气设备造成损害。同时, FU5、FU6 熔断器分别对 PLC 和 AC 进行保护, 防止短路故障波及核心控制设备, 确保整个电气控制系统在短路情况下仍能维持部分功能运行, 便于故障排查与修复。

5. 系统协同运行。主电路主要负责驱动电机运转,

为设备提供动力, 而 PLC 作为控制系统的核心, 承担自动化监控与报警功能。PLC 实时采集电机及各电气元件的运行状态数据, 通过预设程序进行分析处理, 当检测到异常情况时, 立即触发报警装置, 并可根据故障类型自动采取相应的控制措施, 实现主电路与控制电路的高效协同, 保障电气控制系统安全、稳定、高效运行。

2.3 PLC 控制电路设计

在电镀工艺中, 可编程控制器的线路设计是非常关键的环节。通过软件与硬件的结合, 实现了自动控制和手动控制两种不同的操作方式。该系统分为两大部分, 其中第一部分是软硬件集成部分。

1. 电路设计说明。电镀 PLC I/O 电路图展示电镀车间小型行车电气系统设计: PLC 输入接接近开关等主动元件, 220 V 电压经变压器隔离防短路。继电器 KM9 为启动开关, FR1-FR4 常闭提供电机过热保护。行程开关、接近开关等现场安装, 冲程开关调定位与方向限制。X405 ~ X411 接行程开关频闪开关, 实现工艺预选。COM 端口短接并接 220 V 电源, 启动保护机制, 警报并显负载状态, 电机经继电器供电, 启动时指示灯亮。硬件结构及参数运算的元件列表保障安全高效运行^[6]。

2. 手动程序的分析说明。选择“手动”方式或桌面起始模式转换时, X512 启动, 需重启输出终端完成自动操作。执行升降、左右、前后等手动操作, 只需按下对应人工控制按钮。机器手动操作返回初始位置后, 将手动 / 自动开关切换到“自动”模式并输入工作接口, 程序控制电机上、下、左、右、前、后六个状态。

3. 自检程序及报警程序分析说明。在电镀工序中, 冲程切换至关重要, 但频繁操作可能导致机械式无源转换装置故障, 影响 PLC 信号接收。为预防此类问题, 系统设有自检程序, 仅在开关闭合时识别信号, 并在开机前探测冲程切换状态, 若失败则禁止自动启动^[7]。同时, 自动检测功能可在故障时启动, 确保手动操作时的安全性。对于马达故障, 尽管 PLC 控制逻辑正常, 但机械故障可能导致电机不按指令动作, 此时系统会触发警报并停机。手动模式下, 系统实时监控, 无需额外保护, 电机随按钮操作启动或停止^[8]。报警装置还可在电机启动后遇到限制情况时自动停机, 并在特定时间段内向操作者发出指令, 确保生产安全与效率。

2.4 控制系统软件设计

1. 分步编程架构。控制系统软件采用分步编程模式, 依据状态转移曲线进行设计。将各子系统通过在主程序中添加独立控制模块的方式整合, 以虚线划分

为12个部分,实现功能模块化管理。其中,接近开关通过数字编程实现自检功能,利用点动X002指令对小车进行检查,同时设置定时器T56定时100秒,在检测完成后自动调整车身位置,确保设备运行的准确性与稳定性。

2. 冲程转换装置检测。数字程序对1号冲程转换装置进行严格检测,由M117控制检测流程,一旦发现错误立即触发警报,通过X510可停止报警信号。对于冲程开关的检测,以X503与X405的同步状态为判断依据,若状态正确则启动M101,错误时启动M106并使告警灯Y436闪烁,其余冲程开关也遵循相同的检测逻辑,保障设备冲程转换的可靠性。

3. 报警功能实现。软件第六部分专门负责报警功能,当M106至M110出现故障时,系统立即发出信号报警,定时器T56同样设置为100秒,用于控制报警相关的时间逻辑。该设计能及时反馈系统故障信息,便于操作人员快速定位和处理问题,减少故障对系统运行的影响^[9]。

4. 系统功能完善模块。后续部分涵盖自检测信号生成、主程序启停控制、状态转换指示、电机状态输入等功能模块。通过这些模块的协同工作,确保系统功能全面覆盖运行需求,实现从状态监测到程序控制的全流程管理,保障系统安全、高效运行,提升自动化控制水平。

5. 互斥与状态记录逻辑。在控制系统软件中,Y530和Y531设置为互斥运行,避免功能冲突;另外两条支路用于记录M2和M3中继状态,实时反馈设备关键节点的工作情况。这种逻辑设计确保系统运行的有序性,为故障排查和系统优化提供了准确的数据支持。

6. 电机状态监测与报警。M111至M113与电机涡流传感器状态通过“异或”逻辑运算进行监测,一旦出现状态不一致的情况,立即触发报警信号M114至M115。该机制能及时发现电机运行中的异常,通过报警提示操作人员介入处理,防止故障扩大,保障电机及整个系统的安全运行。

7. 告警消除与故障处理。第十部分程序针对告警处理进行设计,在自动作业模式下,可通过关闭M120消除告警;手动处理时同样具备取消告警的功能。当自动转换器X512开启,故障信号M117可通过X510点动关闭以断开报警;手动开关X511断开时,可经X012和X013操作生成M117假信号,故障解除后自动断开报警,灵活应对不同作业场景下的告警处理需求^[10]。

8. 故障闪烁报警与蜂鸣提示。第十一部分实现故障信号的1秒闪烁报警,并同步触发蜂鸣器鸣响,通

过视觉和听觉双重提示,增强报警信息的辨识度,确保操作人员能第一时间察觉故障,提高故障响应速度,减少设备停机时间。

9. 手动操作与安全防护。第十二部分为手动操作程序,操作人员通过按键启动相应电机,各支路均插入加热防护功能,防止电机因过热损坏。同时,设置六种电机工作模式为互锁状态,确保每次操作仅能执行一种模式,避免误操作引发安全事故,从软件层面为系统运行筑牢安全防线,保障操作的安全性与效率。

3 结束语

通过分析PLC在电气工程及其自动化控制中的优点,可以看出其在提高电力系统自动化程度上的重要作用。研究显示,PLC具备丰富的功能、强大的抗干扰能力和出色的控制效果,已经成为电气工程自动化控制系统中不可或缺的组成部分。从系统总体设计、电气控制系统设计、PLC控制电路设计以及控制系统软件设计等多个方面进行了详细规划和实施,PLC技术显著提升了电气工程自动化控制系统的性能,极大地提高了系统的工作效率和稳定性。这项研究成果为电气工程的智能化和网络化发展提供了新的思路和方法。

参考文献:

- [1] 何梦倩.PLC技术在电气工程及其自动化控制中的应用分析[J].电子测试,2021(14):111-112,115.
- [2] 刘许锋.基于PLC技术在电气工程自动化控制中的应用分析[J].电子测试,2020(12):109-110.
- [3] 鲍日洋.浅析PLC技术在电气工程自动化控制中的应用[J].电子测试,2019(06):128-129,113.
- [4] 张俊.PLC技术在电气工程及其自动化控制中的应用[J].装饰装修天地,2019(20):387.
- [5] 崔潇彬,郭钟仁,冯易,等.PLC技术在电气工程自动化控制中的应用探究[J].2021,18(24):81-83.
- [6] 贺增虎.PLC技术在电气工程及其自动化控制系统中的应用[J].中国信息界,2025(05):32-34.
- [7] 陈显灵.PLC技术在电气工程自动化控制中的应用[J].中国设备工程,2025(09):223-225.
- [8] 刘少航.关于PLC技术在电气工程及其自动化控制中的应用探讨[N].企业家日报,2025-04-28(006).
- [9] 甄宏智,沈明祥,矫建巍,等.PLC技术在电气工程及其自动化控制中的应用[C]//中国机电一体化技术应用协会.第八届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛入选论文集.江苏盛虹石化产业集团有限公司,2025.
- [10] 林国梁.PLC技术在电气工程及其自动化控制中的应用分析[J].广西电业,2025(Z1):32-35.

高低压配电柜实现自动控制的具体举措分析

王金鑫

(浙江中控西子科技有限公司, 浙江 杭州 311401)

摘要 随着电力系统智能化升级, 高低压配电柜作为电能传输的主要设备, 自动化控制水平直接影响供电可靠性。当前部分地区配电柜仍依赖人工操作, 存在故障响应滞后等现象, 这对高低压配电柜实现自动控制目标造成一定的影响。为提升高低压配电柜自动控目标, 确保高低压配电柜系统稳定运行, 本文通过解析低压配电柜实现自动控制作用, 且在分析高低压配电柜自动控制现状的基础上, 深入探讨了高低压配电柜实现自动控制的具体举措, 以期提升设备自动化水平、降低运维成本、保障电力供应安全稳定提供借鉴。

关键词 高低压配电柜; 自动控制; 硬件选型; 软件开发

中图分类号: TM642

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.007

0 引言

电力系统中高低压配电柜是电能传输的重要设备之一, 而通过自动控制技术实现高低压配电柜自动化控制, 能够实时监测高低压配电柜的运行参数、自动处理故障、优化运维流程, 从而提高电力系统运行可靠性和效率, 对保障电力能源供应安全性具有重要意义。不过由于高低压配电柜的电压等级与承载负荷存在差异, 其自动化控制系统要求更强的绝缘监测、故障连锁保护功能, 且需兼容高压设备的延时操作特性。因此, 针对高低压配电柜实现自动控制的策略展开研究, 能够匹配不同电压等级设备的控制需求, 规避因控制策略通用化导致的运维风险, 提升电力系统自动化运行的稳定性。

1 高低压配电柜实现自动控制的作用

1.1 提升供电可靠性

传统高低压配电柜运维主要依赖人工巡检和手动操作模式, 存在显著的响应滞后问题。一旦配电柜出现过载、短路等突发故障时, 技术人员难以及时进入现场解决处理, 这导致停电时间延长、用户体验感下降。而在高低压配电柜采用自动化控制技术后, 系统能够自动化采集电压、电流、温度等参数, 一旦系统监测参数超出规定阈值立即触发保护机制, 自动切断故障电路以防故障范围扩大。同时, 自动控制技术能够降低人员操作失误概率, 防止因为操作失误引发供电故障以提高供电系统连续性、稳定性^[1]。

1.2 降低运维成本

传统高低压配电柜需要组织大量巡检人员进行设备检查和维护, 这导致人力成本、时间成本升高, 也

会存在巡检盲区, 无法精准掌握配电柜运行状态。高低压配电柜采用自动控制技术, 能够实时监测与数据远程传输, 进而实时掌握高低压配电柜远运行参数, 以减少现场巡检频次、降低人工巡检成本。此外, 高低压配电柜自动控制系统能够预测温度异常、部件老化等潜在故障, 以便运维人员采取针对性维护措施降低运行维护成本。

1.3 优化电力资源配置

电力系统中合理分配电力资源是提高能源利用率的关键, 然而以往高低压配电柜并不能及时掌握各回路运行状态, 电力调度只是通过经验进行, 造成有些位置资源分配不均而导致电能浪费严重。自动控制系统能够及时掌握高低压配电柜各回路用电数据, 通过数据分析获取各线路负载变化情况, 再根据电力需求动态化调整电力分配方案以实现电力资源精准调度。同时, 自动控制技术结合用电峰谷差异, 优化配电柜运行模式能够减少电力资源浪费, 从而达到节能减排的目的。

2 高低压配电柜自动控制现状

高低压配电柜自动控制技术在电力领域中得到广泛应用, 然而受到行业发展影响导致不均衡现象比较普遍。城市电网、大型工业企业自动化控制技术相对成熟, 很多高低压配电柜采取远程监控、自动故障诊断与保护功能, 并且利用 PLC、嵌入式系统等模块, 通过安装先进通信技术和高精度传感器装置实现系统运行水平提升。但是有些偏远地区或中小型企业自动化控制技术水平低、普及率不足, 依然采取人工操作方式为主, 只配置简单的监控设备而难以实现保护机制、

自动控制机制的稳定运行。此外,目前自动控制系统存在“数据孤岛”现象,不同厂家设备通信协议不统一造成数据无法互联互通,进而影响整个系统的调度效率。同时,有些高低压配电柜自动控制系统智能化水平较低,故障准确率、处理效率难以有效提升^[2]。

3 高低压配电柜实现自动控制的具体举措

低压配电柜作为电力末端分配关键设备,实现自动控制需围绕参数精准监测、指令高效执行与运维便捷化展开,以下从硬件、软件、通信等方面分析高低压配电柜实现自动控制策略。

3.1 硬件选型优化

1. 控制模块精准选型。高低压配电柜自动控制系统核心控制模块是关键,需要根据实际情况选择适宜核心控制模块型号以满足控制要求。针对10~30 kV的高压配电柜选择性能优越的PLC系统,能够满足多回路控制需求,其具备抗干扰能力强、运算速度快等特点,能够满足复杂控制逻辑运行需求;0.4 kV等低压配电柜使用小型PLC或嵌入式微处理器,能够在低压场景下广泛应用。此外,核心控制模块选型时需要考虑运算主频、I/O点数、内存容量等参数,保证其满足配电柜控制需求。

2. 监测传感器科学选配。高低压配电柜监测传感器能够及时采集配电柜运行数据,保证自动控制系统运行具备准确性。高低压配电柜电压监测时用霍尔电压传感器,如CSM050MG测量范围0~500 V、精度±0.5%,能够掌握电压波动变化情况;电流监测使用RCT-2000型罗氏线圈电流传感器,其测量范围0~2 000 A,频带宽,适配大电流场景;温度监测使用PT100铂电阻传感器,能够满足温度范围-200~650℃、精度±0.1℃监测需求。同时,传感器选择需要满足防潮、防尘、抗电磁干扰的要求,确保数据采集具备较高的精度和准确性^[3]。

3. 执行机构合理选用。高低压配电柜执行机构能够满足指令执行需求,需要考虑到配电柜的开关类型、操作需求选择。断路器使用ZW32-12电动操作机构,其操作力矩120 N·m、分闸时间0.08 s以下,能够实现分合闸控制精度提升;隔离开关选择使用动作速度快的电磁操作机构,在低压场景下快速完成切换。执行机构选型需要分析动作时间、操作力矩、电源适配性等参数,确保执行机构和高低压配电柜匹配以延长使用寿命,能够提高系统可靠性、降低故障发生率。

3.2 软件系统开发完善

1. 开发数据采集与处理模块。高低压配电柜自动控制系统数据采集模块采用Modbus、CAN、RS485等,能够确保控制系统内传感器以及控制模块顺利完成数据交互,确保采集周期控制在100 ms以下达到数据实时性要求。数据处理模块利用滤波算法去除干扰数据,再利用趋势预测、统计分析等功能,将采集后原始数据转变为有用数据。例如:通过采集的电压、电流数据谐波分析能够判定电力质量,而温度参数进行趋势拟合则能分析部件老化风险。同时,数据处理模块能够自动记录数据,再利用专用的数据库使数据预存储时间1年以上,以便后续进行查询和分析^[4]。

2. 设计控制策略与保护逻辑。高低压配电柜控制策略设计需要考虑到其运行特性确定,考虑到配电柜不同故障类型采取适宜的保护逻辑。过电压保护逻辑设定适宜电压阈值,如果监测电压超过阈值10%则立即触发泄压装置;过电流保护装置根据回路设定额定电流阈值,一旦电流超出该电流阈值则立即切断回路;过载保护系统选用阶梯式保护方式,轻度过载发出预警、中度过载则自动分闸。同时,高低压配电柜自动控制系统设置联动控制策略,一旦柜体温度过高立即开启风扇,温度过低则关闭风扇以达到能源节约效果。

3. 开发人机交互界面。高低压电柜设计人机交互界面,保证其具备易用性和实用性,通过Qt开发框架支持Linux系统运行。在人机交互界面中实时显示电压、电流、温度、开关状态等配电柜运行参数,再利用数字、图表等方式显示出来;人机交互界面设置参数设置功能,运维人员可根据系统运行情况进行远程修改控制阈值、保护逻辑等参数;人机交互界面中设置故障报警模块,通过弹窗警示、声光报警等方式发出警报,并显示故障位置、类型以及处置建议。人机交互界面响应时间1 s以内,支持5人以上同时在线操作,确保运维人员能够及时掌握故障问题并采取解决措施^[5]。

3.3 搭建通信架构

1. 构建本地通信网络。高低压配电柜构建本地通信网络实现数据稳定传输,保证数据传输速度达到100 Mbps以上;RS485总线及时进行传感器、执行机构数据传输,传输距离1 200 m以内满足数据分散传输需求。同时,通信系统安装避雷器使用屏蔽电缆等方式,具备较高的抗干扰性与防雷性,确保通信系统稳定性。另外,在本地通信网络建设过程中,对于设备的兼容性需要优先考虑,一般而言,设备兼容性需要满足Modbus、

Profine 等通用工业通信协议的要求,如此方能让不同的品牌的控制器与传感器等基础设备能和配电柜主控单元可无缝对接。而在本地网络设计时,需要在重要的传输节点中设置双链路备份,一旦主链路产生本地网络故障时,就能通过该方式自动切换备用的链路,确保电压、电流、绝缘状态数据传输不受影响。

2. 建立远程通信链路。高低压配电柜自动控制系统建设远程通信链路,结合不同使用场景选择适宜通讯方式。城市区域选用光纤通信提高传输稳定性以及速率,符合大数据量传输需求;偏远地区选择 4G/5G 无线通信具备较高灵活性,也不需要铺设电缆以降低建设成本。通信链路采用加密数据传输技术,利用 SSL/TLS 等加密协议防止数据篡改或窃取^[6]。此外,数据通信系统设置冗余机制,一旦通信链路出现故障立即切换备用线路达到数据连续传输要求。

3. 互联多系统数据。高低压配电柜自动控制系统需要打破数据孤岛,通过互联多系统数据完成运维调度系统的互联。该系统中利用 IEC61850 等标准化通信协议设置统一数据格式,能够满足数据交互使用需求。配电柜运行过程中将运行数据传输到电力调度系统,使电力调度决策有数据依据;配电柜故障信息、设备状态传输到运维系统,由运维人员制定适宜的运维管理计划。

3.4 升级运维管理方式

1. 采用远程实时监控运维。高低压配电柜自动控制系统采用远程实时监控方式,远程监控平台能够利用手机 APP、电脑等多种终端设备进行访问,以便运维人员及时进行监控。如果运维人员发现设备异常则可远程下发控制指令,通过调整运行参数、重启设备等减少现场运维次数。同时,远程监控平台可增设设备运行日志自动归类功能,按“正常运行”“轻微异常”“紧急故障”标签整理记录,方便运维人员回溯问题时快速筛选关键信息。并且支持与备品备件管理系统关联,当监测到部件存在故障风险时,自动提示对应备件库存情况,避免因备件缺失延误维修。

2. 采用故障预警诊断方式。高低压配电柜自动控制系统故障预警诊断功能,通过构建预警模型,利用机器学习算法分析设备运行规律以便掌握故障信息。例如:自动控制系统监测断路器分合闸时间逐渐延长,预警机械部件存在磨损问题;配电柜柜体温度异常且负载无变化,则预警散热系统故障。在系统故障发生后立即分析形成原因并制定运维方案,由运维人员快速进行排查和修复以缩短停电时间^[7]。

3. 实施全生命周期管理。高低压配电柜自动控制系统能够积累设备运行数据,并构建形成全生命周期运维管理体系。该管理体系中记录高低压配电柜设备安装、调试、运行、维护、报废全过程数据,分析设备使用寿命和运行工况关系,进而预测设备报废时间以便制定设备更新计划。同时,通过运行设备运行平台能够时整合设备实时运行电压波动值、电流负载率、绝缘电阻变化等参数,且通过平台功能通过数据建模分析设备性能衰减规律,在一定范围中能够识别易出现故障的部件与运行薄弱点。并且通过获取数据分析的结构进行维护周期的优化,一般来说,类似高负载、高损耗部件的维护方式,可适量的缩短维护间隔;对稳定运行部件则根据实际情况适当地延长维护周期,避免过度维护或维护不足的情况产生。

4 结束语

高低压配电柜作为电力系统的重要组成部分,在智能化技术不断应用下需要进行智能化改造,能够有效提升电力系统的运行效率、降低运维成本、优化资源配置。同时,高低压配电柜实现自动化控制,能够解决数据孤岛、不均衡等问题。而对于高压配电柜而言,它要求更强的绝缘监测、故障连锁保护功能,且需兼容高压设备的延时操作特性不同,故而在往后的研究过程中,需要从硬件选型优化、软件系统开发、通信架构搭建、运维管理升级等方面展开研究,并且积极地引入智能化控制技术、PLC 控制技术等,确保各种自动控制技术能在高低压配电柜运行中发挥应有的作用。

参考文献:

- [1] 吴旭. 高低压配电柜系统实现自动控制策略研究[J]. 数字技术与应用, 2019, 37(03): 3-4.
- [2] 郑婷, 杨杭朴. 高低压配电柜实现自动控制策略探讨[J]. 居舍, 2018(28): 192, 194.
- [3] 史艳影. 高低压配电柜系统自动控制策略研究[J]. 电子世界, 2021(15): 71-72.
- [4] 夏明丽. 高低压配电柜系统实现自动控制策略研究[J]. 通信电源技术, 2020, 37(11): 26-28.
- [5] 姚丽. 地面高低压配电柜智能监控系统的设计与实现[J]. 张江科技评论, 2024(08): 81-83.
- [6] 云水媛, 解子毅. 配电房高低压配电柜的优化选择分析[J]. 数字传媒研究, 2022, 39(07): 46-49.
- [7] 蔡军. 几种常见低压配电柜的特点及应用探讨[J]. 中国设备工程, 2022(05): 100-101.

电气工程及其自动化供配电系统节能控制措施

林任鑫

(广东万润工程股份有限公司, 广东 汕头 515000)

摘要 为了构建电气工程供配电系统的综合节能控制体系, 解决当前工业企业供配电环节能源利用效率低下的普遍性问题。采用能耗分解分析法识别系统各环节损耗特征, 从变压器损耗、线路损耗、照明能耗等关键节点入手, 运用全局优化理论建立多目标节能控制模型, 结合动态平衡原则制定自适应调节策略。研究实施了五项系统性控制措施, 包括变压器负载率动态优化、无功补偿分层配置、配电线路拓扑重构、照明系统智能化改造等, 各项措施相互协同形成节能合力。研究结果表明, 基于全生命周期的节能控制策略能够实现供配电系统的精细化管理, 为推动电力系统绿色转型提供了系统性解决方案。

关键词 电气工程; 自动化; 供配电系统; 节能控制

中图分类号: TM76; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.008

0 引言

供配电系统作为工业企业能源消耗的主要环节, 其能效水平决定了企业的用电成本与碳排放强度, 然而传统供配电系统普遍存在设备选型不当、运行方式粗放、管理手段落后等问题, 导致电能损耗居高不下。随着能源价格持续上涨以及双碳目标的深入推进, 企业面临着降低能耗成本与履行减排责任的双重压力, 供配电系统节能改造已成为提升企业竞争力的必然选择。深入研究供配电系统节能控制措施具有重要的现实意义, 一方面能够为工业企业提供系统性的节能改造方案, 实现能源利用效率的显著提升, 进而降低企业运营成本并增强市场竞争力; 另一方面有助于推动电力行业绿色低碳转型, 减少化石能源消耗和温室气体排放, 为实现国家双碳战略目标贡献技术支撑, 同时也为其他行业的节能减排工作提供可借鉴的实践经验。

1 电气工程及其自动化供配电系统的能耗组成分析

供配电系统能耗组成呈现多层次、多环节的复杂特征, 其中变压器损耗占据主导地位, 约占系统总损耗的40%~60%, 主要表现为铁芯磁滞损耗、涡流损耗以及绕组铜损, 这些损耗随负载率变化呈现非线性特性。输配电线路损耗构成第二大能耗来源, 线路电阻产生的有功损耗与电流平方成正比, 当功率因数低于0.9时无功电流显著增加线路发热损耗。配电设备自身能耗不容忽视, 包括开关柜内部元器件发热、断路器操作机构能耗、互感器励磁损耗等累计可达总能耗的8%~12%。照明系统能耗在商业建筑中占比高达25%~35%, 传统荧光灯镇流器损耗、启动频繁造成的额外能耗都是隐性浪费源。动力设备启动过程产生的冲击电

流不仅增加了瞬时能耗, 还会引起电压波动导致其他设备效率下降。谐波污染造成的附加损耗往往被忽视, 变频器、整流器等非线性负载产生的谐波电流在变压器、电缆中产生额外热损耗, 可使设备损耗增加15%~20%^[1], 具体如表1所示。

2 电气工程及其自动化供配电系统节能控制的原则

2.1 全局优化原则

全局优化原则要求供配电系统节能控制必须从整体能量流动视角出发, 避免局部优化导致的系统性能恶化, 即单个设备能效提升不能以增加其他环节能耗为代价。节能措施实施需要综合考虑变压器负载率、线路损耗、无功补偿容量之间的耦合关系, 例如过度的无功补偿虽然提高了功率因数, 但会造成轻载时电压升高引发变压器励磁电流增加。系统优化还需兼顾时间维度的动态平衡, 峰谷时段的负荷调配不仅要考虑电费成本, 还要评估设备频繁启停带来的寿命损失。跨级协调机制确保高压侧、低压侧的节能策略相互配合, 上级变电站的电压调整需要与下级配电网的无功配置协同, 形成多层次能效提升的叠加效应。

2.2 动态平衡原则

动态平衡原则强调节能控制策略必须适应负荷的实时变化特性, 而非采用固定参数的静态控制模式。供配电系统的负荷呈现日周期、周周期、季节性波动规律, 节能措施需要根据负荷曲线实时调整运行参数, 如变压器在负载率30%~70%区间内效率最高, 控制系统应根据实时负荷投切变压器组合。无功补偿装置的投切容量需要跟踪负荷功率因数的动态变化, 避免过补偿或欠补偿状态的出现。季节性温度变化影响设

表 1 电气工程及其自动化供配电系统能耗组成分析表

能耗来源	占比	主要特征
变压器损耗	40% ~ 60%	铁芯磁滞损耗、涡流损耗、绕组铜损，随负载率变化呈非线性特性
输配电线路损耗	5% ~ 8%	线路电阻有功损耗，与电流平方成正比，功率因数低时损耗增大
配电设备自身能耗	8% ~ 12%	开关柜元器件发热、断路器操作机构、互感器励磁损耗等
照明系统能耗	25% ~ 35%	商业建筑中占比高，荧光灯镇流器损耗、启动频繁额外能耗
动力设备启动冲击	< 1%	冲击电流增加瞬时能耗，引起电压波动影响其他设备效率
谐波附加损耗	15% ~ 20%	变频器、整流器等非线性负载产生谐波，在设备中产生额外热损耗

备散热条件，夏季高温时段需要适当降低变压器负载率防止过热，冬季则可适当提高负载率充分利用设备容量。动态平衡还体现在新能源接入后的功率波动管理，光伏发电的间歇性要求储能系统快速响应以维持供需平衡，确保电能质量稳定。

2.3 经济可行原则

经济可行原则要求节能改造投资回报率必须满足企业财务指标要求，避免盲目追求技术先进性而忽视投资效益。节能措施的选择需要基于全生命周期成本分析，初始投资额、运行维护费用、设备折旧年限共同决定方案的经济性，例如非晶合金变压器虽然初投资高出普通变压器 30% ~ 40%，但空载损耗降低 70% 使其在 5 ~ 7 年内即可回收增量成本。分阶段实施策略能够降低资金压力，优先改造能耗高、节能潜力大的环节，利用节约的电费逐步投入后续改造项目形成良性循环。此外，边际效益递减规律决定了节能投入存在最优区间，功率因数从 0.7 提升至 0.9 的投资效益远高于从 0.9 提升至 0.95，企业应根据自身能耗基准确定合理的节能目标，避免过度投资造成资源浪费^[2]。

3 电气工程及其自动化供配电系统节能控制的措施

3.1 变压器运行方式优化调整

变压器运行方式优化调整需要建立基于实时负荷数据的智能决策系统，根据负荷曲线特征制定差异化运行策略。系统首先采集历史负荷数据建立预测模型，识别日负荷峰谷时段、周末负荷特征以及季节性变化规律，然后设定变压器经济运行区间阈值，一般将负载率控制在 30% ~ 70% 范围内，当负载率低于 30% 时系统判定为轻载状态需要减少运行台数，超过 70% 则启动备用变压器分担负荷。多台变压器容量配置应遵循“大小结合、阶梯配置”原则，例如配置 1 台 1 600 kVA 主变压器承担基础负荷，2 台 800 kVA 变压器作为调节容量，根据负荷变化灵活投切。

此外，温度补偿机制考虑环境温度对变压器负载能力的影响，夏季高温时段将负载率上限下调至 65% 防止过

热，冬季低温时可提升至 75% 充分利用散热条件。变压器投切过程需要配置同期装置确保并列条件满足，包括电压差小于 5%、相位差小于 10 度、频率差小于 0.2 Hz，避免环流冲击。某化工企业原有 4 台 1 250 kVA 变压器全天候运行，平均负载率仅 42%，实施优化后采用“2+2”运行模式，基础负荷由 2 台承担，另外 2 台根据生产计划灵活投切，负载率提升至 58% ~ 68% 区间，变压器损耗降低 31%，年节约电费 126 万元。

3.2 无功补偿容量动态配置

无功补偿容量动态配置要求建立多级补偿体系，根据负荷无功需求实时调整补偿容量，避免过补偿或欠补偿造成的电压波动。补偿系统采用分层架构设计，在 10 kV 母线设置集中补偿装置处理基础无功需求，容量按变压器容量的 20% ~ 30% 配置，在各配电支路设置分散补偿应对局部无功缺额，大功率电机等感性负载就地配置补偿电容器，补偿容量为电机额定功率的 30% ~ 40%。控制器采集母线电压、电流、功率因数等参数，当功率因数低于 0.92 时启动补偿投入程序，高于 0.98 时切除部分电容器组防止过补偿。投切策略采用循环投切方式延长电容器使用寿命，每组电容器累计投入时间自动均衡，避免某组电容器过度使用导致提前老化。谐波环境下的补偿需要配置电抗器抑制谐振，电抗率选择 7% 或 14% 能够有效避开 5 次、7 次谐波放大区域。以某纺织企业为例，织布车间安装大量变频器导致功率因数仅 0.78，谐波含量超标，改造方案采用动态无功补偿装置 SVG 替代传统电容器组，SVG 响应时间小于 10 ms，能够实时跟踪负荷变化连续调节补偿容量，同时具备一定的谐波抑制能力，改造后功率因数稳定在 0.95 ~ 0.97 区间，月均电费降低 8.2 万元，谐波电流总畸变率从 18% 降至 4.5%，设备故障率显著下降^[3]。

3.3 配电线路损耗综合治理

线路损耗治理的本质是降低电流在输电路径中的能量耗散，其控制效果直接影响供配电系统的整体

能效水平。配电网络的拓扑优化是降损的基础性工作,负荷中心需要重新测算以确定最优供电点,采用负荷矩法计算各负荷点到电源点的加权距离,将配电室设置在负荷矩最小位置能够使线路损耗降低20%~30%。导线升级改造遵循全寿命周期成本最优原则,根据负荷增长预测选择导线规格,初期负荷阶段采用铝合金导线满足基本需求,负荷增长后更换为铜芯电缆或增设并行回路分流,避免一次性过度投资。此外,电压等级提升是降低线损的有效途径,将380 V供电升级为660 V或1 140 V能够使电流降低42%~66%,线路损耗相应降低为原来的17%~34%,特别适用于大功率集中负荷区域。接头电阻控制需要从施工工艺入手,电缆终端采用冷缩或热缩技术确保密封性,母线连接面镀锡或镀银处理降低接触电阻,定期紧固检查防止松动发热。运行方式优化则侧重于潮流分布调整,要合理设置联络开关位置实现负荷转供,避免某条线路重载而其他线路轻载的不均衡状态。还可以把智能监测系统部署在关键节点,实时采集电流、电压、温度数据,建立线损分析模型定位高损耗区段,为针对性改造提供数据支撑,形成“监测—分析—改造—验证”的闭环管理机制。

3.4 照明系统能效提升改造

照明系统能效改造需要从光源选型、控制策略、配光设计三个层面系统推进,实现照明质量提升与能耗降低的双重目标。光源升级是改造的核心环节,LED灯具相比传统荧光灯节能60%~70%,但选型时不能单纯追求功率降低,而要根据不同区域的照度标准进行精确计算,办公区域维持300~500 lux照度,走廊过道100~150 lux即可满足需求,避免过度照明造成的能源浪费。智能控制系统的部署需要分区域制定策略,靠窗区域安装光感探测器根据自然光强度自动调节灯具亮度,会议室、仓库等间歇使用场所配置人体感应器实现人来灯亮、人走灯灭的自动控制,开放办公区采用时间控制器设定工作时段照明模式。配光优化重点解决光效利用率低的问题,采用反射率高的灯具反射罩将光线导向工作面,减少向上散射的无效光通量,同时调整灯具安装高度与间距,形成均匀的照度分布避免明暗不均。调光技术的应用需要考虑人眼适应性,采用渐变调光方式避免照度突变引起的不适感,调光范围控制在20%~100%之间保证最低照度需求。某办公楼将2 800套T8荧光灯更换为LED平板灯,配合智能照明控制系统实现分时分区管理,白天充分利用自然采光,夜间根据加班区域局部开启,改造后照明用电量降低65%,灯具维护周期从半年延长至3年^[4]。

3.5 能源管理平台集成应用

能源管理平台集成应用的关键在于打破信息孤岛,实现多源数据的统一采集、分析与决策支持。平台架构采用三层设计,感知层部署智能电表、温度传感器、环境监测仪等设备,每15分钟采集一次电压、电流、功率、功率因数、谐波等参数,数据传输层运用RS485、以太网、无线通信等方式将现场数据汇聚至服务器,应用层提供能耗分析、报表生成、异常报警等功能模块。数据处理引擎对海量数据进行清洗、校验、归一化处理,剔除异常值后存入时序数据库,保证数据质量的可靠性。能耗分析模块采用同比、环比、能效对标等方法挖掘节能潜力,识别能耗异常时段与高耗能设备,生成优化建议供管理人员决策参考。此外,预测算法基于历史数据建立负荷预测模型,结合生产计划、天气预报等外部因素预测未来24小时的用电需求,指导变压器投切、无功补偿等设备的提前调整。报警机制需要设置分级阈值,当功率因数低于0.9、需量超限、电压偏差超过7%时自动推送告警信息至相关人员手机,确保异常情况得到及时处理,形成“监测—分析—优化—验证”的持续改进循环^[5]。

4 结束语

供配电系统节能控制的深入推进需要企业从战略高度重视能源管理工作,将节能指标纳入生产运营的核心考核体系。技术创新将持续推动节能控制向智能化、精细化方向发展,人工智能算法在负荷预测、故障诊断、优化调度等领域的应用将进一步提升系统能效。企业在实施节能改造时应避免盲目追求先进技术,而要根据自身能耗特征选择适宜的控制策略,确保投资效益最大化。未来供配电系统将向能源互联网方向发展,分布式能源、储能技术、需求响应机制的融合应用将重塑传统供配电模式,企业需要提前布局相关技术储备以适应能源转型趋势。

参考文献:

- [1] 陈巍.供配电系统中电气自动化技术的应用[J].中国高科技,2021(19):62-63,95.
- [2] 刘玉博,崔继仁,楚克琦.供配电系统中电气自动化应用[J].中国科技信息,2020(13):50,52.
- [3] 范焱,李亚飞,温子旺.电气自动化技术在电力系统中的应用研究[J].光源与照明,2021(11):120-122.
- [4] 卢海蛟.电气自动化技术在供配电系统中的应用探析[J].中国设备工程,2020(20):212-214.
- [5] 岳周.机械设备电气工程自动化供配电节能控制技术[J].电气技术与经济,2025(08):145-147.

基于人工智能持续优化的 新能源场站智慧运维技术

沈加勇

(南京国电南自新能源工程技术有限公司, 江苏 南京 210032)

摘要 新能源发电经过新一轮跨越式发展, 正走向能源舞台中心, 而新能源数字化程度则成为决定发电企业市场竞争力的主要因素。运维模式被动、运维手段单一、用工成本较高、信息孤岛现象严重、数据质量缺乏保障、决策分析不够深入、决策指令滞后等问题影响传统的新能源企业。因此, 在信息化、智能化、数字化转型不断加快的背景下, 智慧运维系统应运而生。它能够高效实现设备远程监视控制、智能预警诊断、故障定位、健康度管理及运行评估分析, 解决新能源企业的运维问题。本文聚焦数据治理、故障诊断、功率预测三大技术基础, 结合风电场、光伏电站及储能系统实践案例, 阐述智慧运维如何驱动新能源场站降本增效与安全管控升级, 以期为相关人员提供参考。

关键词 新能源场站; 智慧运维; 人工智能; 故障预测; 运行优化

中图分类号: TP273; TM73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.009

0 引言

新能源场站智慧运维依托人工智能与数字孪生技术, 通过多源数据融合构建统一治理与虚拟映射体系, 实现设备状态精准监测与故障早期预警。基于机器学习等算法, 结合边缘计算实时处理, 系统对 SCADA、气象及设备数据进行深度挖掘, 故障诊断准确率超 95%, 功率预测误差控制在 6% 以内。在风电、光伏及储能领域, 智慧运维技术的应用可显著提升叶片结冰预警、组件异常识别及电池健康管理效能, 设备可用率与发电效率可提升 1.5% ~ 3%。面对算法迭代、系统集成与人才短缺等挑战, 需建立闭环优化机制与跨学科培养体系, 推动运维模式向预测性、智慧化转型。

1 新能源场站智慧运维的技术基础与应用框架

1.1 多源数据融合与处理技术

新能源场站智慧运维的核心基础在于对多源异构数据的深度融合与高效处理。风电场与光伏电站日常运行中产生的数据维度广泛、结构多样, 主要包括: SCADA 系统采集的秒级或分钟级机组运行参数如风速、转速、功率、温度、电压、电流、气象站提供的实时及预报气象数据(包括辐照度、风速、风向、温度、湿度)、设备状态监测系统(CMS)的高频振动信号与油液分析数据, 以及历史工单、故障记录与维修报告等文本信息。这些数据具有体量大、时效性强、格式

不统一等特点, 传统方法难以有效整合^[1]。人工智能技术通过构建集数据接入、清洗、对齐、存储与管理于一体的数据治理框架, 为上层智能应用提供支撑。在新能源场站智慧运营的支撑下, 新能源场站能够以“一键接入”的方式快速形成从上到下的集“智、云、网、边、端”于一体的办公构架, 从而使得新能源场站中类型多样化、体量较大的数据信息处于一个较为集中的状态, 并在智慧运营的支撑下完成这些数据内容的快速处理与分析, 使工作人员能够快速找到一段时间内新能源场站的主要问题, 根据问题的轻重缓急, 针对日常工作进行合理规划, 解决日常工作随意性较高、工作安排不合理等问题, 进而达到提高工作效率、增加新能源场站电产量出的目的。具体而言, 采用时间序列对齐技术解决不同采样频率数据间的融合问题; 利用基于统计和聚类的数据清洗算法自动识别并剔除异常值和噪声数据, 实践证明, 此类方法可有效将数据可用率提升至 98% 以上; 进一步通过主成分分析(PCA)、自动特征工程等手段, 从原始数据中提取与设备健康状态和性能衰退强相关的深度特征, 为后续的模式构建提供高质量、高价值的输入^[2]。

1.2 智能诊断与故障预警机制

智能诊断与故障预警是新能源场站智慧运维的核心环节, 其技术基础依赖于机器学习与深度学习算法对海量历史与实时运行数据的深度挖掘。该系统通过

监督学习与无监督学习相结合的技术路径,构建起覆盖主要设备的故障预测与健康管理(PHM)体系。监督学习模型,如支持向量机(SVM)、随机森林以及深度神经网络(DNN),利用已标注的历史故障数据进行训练,能够对常见的、已知的故障模式进行精确分类与诊断,其模型准确率在大量现场应用中可达95%以上。与此同时,无监督学习算法如自编码器(Autoencoder)和聚类分析,则用于探测未知故障或性能的异常衰退。通过学习和记忆设备在正常状态下的多参数运行“数字指纹”,一旦实时数据流与基线模式出现微小偏差,即便所有参数均未超出传统报警阈值,系统也能在故障发生前的数小时乃至数天发出早期预警,将误报率控制在5%以下^[3]。

1.3 运行优化与调度决策支持

人工智能技术在新能源场站运行优化与调度决策中发挥着核心作用,通过构建多目标优化模型,实现对发电策略的精细化动态调整。该系统以超短期及短期功率预测为基础,采用以长短期记忆网络(LSTM)和时序卷积网络(TCN)为核心的深度学习算法,融合高精度数值天气预报(NWP)、实况气象数据及历史功率数据,将功率预测的平均绝对误差优化至6%以内,为参与电网调度提供可靠的数据支撑。在此基础上,系统进一步结合实时电价信号、设备健康状态及电网调度指令,运用强化学习算法动态生成最优的功率控制策略。该策略不仅限于满足电网的功率指令,更能通过协调场内各发电单元的运行状态,在保障设备安全运行的前提下,最大化全场发电效率与经济收益,典型应用可使场站总体效率提升1.5%至3%。

2 人工智能在新能源场站运维中的实践应用

2.1 风电场的智能运维实践

在风电场智慧运维体系中,人工智能技术已深度集成于关键设备的全生命周期状态管理与性能优化。其核心应用集中于三大领域:叶片结冰智能预警、齿轮箱健康状态监测与变桨系统故障诊断。系统以秒级频率实时采集并分析SCADA系统提供的风速、转速、功率、环境温度等运行参数,以及状态监测系统(CMS)采集的振动加速度、温度与油液颗粒计数等高频数据。针对叶片结冰,算法通过监测功率曲线偏差、桨距角动作特性与机舱环境温度的关联性变化,可在结冰厚度影响气动性能的早期阶段发出预警,准确率普遍超过90%。在齿轮箱监测方面,采用基于卷积神经网络(CNN)的振动信号分析技术,能够从复杂的频谱中自动提取与齿面点蚀、断齿等故障对应的特征频率及其边带,

实现故障的精准分类与早期识别,对常见故障的识别准确率可达95%以上。对于变桨系统,则通过分析电机电流、轴承温度与位置反馈信号的时序特征,诊断编码器故障、轴承卡涩或驱动器过热等潜在问题^[4]。

2.2 光伏电站的智能运维应用

光伏电站的智能运维体系核心在于利用人工智能技术实现对发电损失的精准归因与主动优化,应用重点集中于组件清洁度评估、阴影遮挡分析及逆变器集群效率优化。系统首先基于无人机自动巡检平台,搭载红外热成像与可见光双镜头,以每周期的巡检生成高清图像与热斑分布图。通过深度学习目标检测算法自动识别并定位组件表面的积灰、积雪、鸟粪等污垢,以及对由隐裂或PID效应导致的热斑进行精确分割与分类,识别准确率可达95%以上。同时,结合智能组串式逆变器提供的毫秒级支路电流与电压数据,系统利用基于物理的IV曲线智能分析技术,通过比对理论曲线与实测曲线的偏差,量化评估因遮挡、污渍或性能衰减导致的发电损失,定位异常组串,评估精度超过98%。在逆变器层级,人工智能算法持续监测其最大功率点跟踪(MPPT)效能与转换效率,通过动态调整运行电压与功率限值,使逆变器集群始终工作在全局最优状态,从而将系统效率整体提升2%至3%。该体系最终能自动生成精准的清洗、消缺与优化工单,驱动运维活动从被动响应向主动干预转变,有效提升电站发电收益。

2.3 储能系统的协同运维策略

储能系统是新能源场站实现平滑输出、调峰填谷和频率支撑的关键设备,智能化运维依赖于对电池全生命周期数据的精细化管理。人工智能技术通过构建电池数字孪生体,实现对系统运行状态的深度感知与协同控制。核心在于对电池管理系统(BMS)上传的毫秒级数据进行挖掘,包括电压、电流、温度、内阻及充放电循环次数等数百维特征。采用基于长短期记忆网络(LSTM)的时序模型,精准预测电池健康状态(SOH)与剩余使用寿命(RUL),SOH估算误差可控制在2%以内。同时,结合强化学习(RL)算法,动态优化充放电策略:通过实时分析电网调度指令、电价信号及场站发电预测,在满足功率需求的前提下,智能规避深度放电、高倍率充放电等加速老化的工况,将电池循环寿命提升10%至15%。系统还建立早期安全预警机制,通过分析簇间不一致性及温度上升速率等特征,提前识别内短路和热失控风险,预警准确率超过95%。该协同策略最终实现了储能系统在保障安全性与延长寿命的前提下,最大化其参与电网调节的经济价值与可靠性^[5]。

3 智慧运维技术的持续优化路径与挑战

3.1 算法迭代与模型优化

人工智能模型在新能源场站的部署并非一劳永逸,其性能高度依赖于持续的数据输入与算法迭代优化。在实际应用中,初始模型往往面临数据分布偏移、工况变化及设备老化带来的泛化能力挑战。为此,需建立一套完整的模型生命周期管理机制,通过在线学习与增量学习技术,使模型能够利用新产生的运行数据与已验证的故障样本进行动态更新。具体采用基于集成学习与贝叶斯优化的超参数自动调优框架,定期对模型进行再训练,以适配设备性能的缓慢衰退与运行环境的季节性变化,使故障预警模型的平均准确率能够从初期的 85% 左右持续提升至 95% 以上。同时,为应对小样本故障类型的识别难题,引入迁移学习技术,利用预训练的大型模型在源任务上学习的特征表示,快速适配到场站特定的目标任务上,从而在少量标注样本下实现高精度识别,将此类故障的召回率提升超过 20%。此外,模型性能监控体系会持续追踪预测结果与实际情况的偏差,一旦发现模型性能衰减,将自动触发 retraining 流程,形成一个闭环的优化迭代体系,确保智能运维系统长期保持高准确性与可靠性。

3.2 系统集成与平台化建设

智慧运维的有效性依赖于对场站内多源异构系统的深度融合与一体化平台构建。该平台采用基于云边协同的体系架构,通过标准化物联网(IoT)协议与应用程序接口(API)打破 SCADA、CMS、BMS 及气象站等系统间的数据孤岛,实现全量数据的统一接入与治理。在数据层,平台依托时序数据库与关系型数据库构建混合数据湖,每日处理超万亿级数据点,入库延迟控制在秒级以内;同时通过边缘网关对传统场站进行智慧化改造,接入了异构存量系统的实时数据。在平台层,以微服务架构封装数据清洗、特征提取、故障诊断、寿命预测及功率优化等核心算法,通过服务网格实现统一编排与调度,算法服务响应时间低于 200 毫秒。在应用层,构建了集监控、报警、分析、决策与工单管理于一体的可视化系统,支持多场站集中监控与远程策略下发。通过搭建“总部—区域—场站—机动单元”多级协同的集团级智慧运维平台,实现了从传统监控到集约化、智能化运营的体系化升级,并有效支持新旧系统并行与深度融合。

3.3 技术推广与人才培养

智慧运维技术的规模化推广应用面临三重核心挑战:初始投入成本高、技术集成复杂度大以及跨领域

人才储备不足。部署一套完整的智慧运维平台,其软硬件初始投资约占中小型场站总投资的 5%~8%,且需持续投入约占平台价值 15%~20% 的年维护费用用于算法迭代与系统升级。在技术层面,实现人工智能模型与现有 SCADA、CMS 等工业控制系统的无缝集成需攻克多协议适配、数据安全传输与低延迟交互等技术难题,系统集成调试周期通常需要 3~6 个月。最关键的是人才短缺问题:当前行业急需既精通新能源发电技术、熟悉场站设备特性,又掌握机器学习、数据挖掘等人工智能技术的复合型工程师。针对这一瓶颈,需建立系统化的人才培养体系,推动高校开设“新能源科学与工程”与“人工智能”交叉学科,课程设置中数据分析与算法课程占比应不低于 30%;同时企业需与科研机构建立联合实验室,开展在职工程师的专项技能培训,通过 6~12 个月的定向培养,使其掌握数据标注、特征工程、模型调优及结果解析等核心技能,逐步构建起支撑技术落地与持续迭代的专业人才队伍。

4 结束语

人工智能技术深度重塑新能源场站运维范式,从多源数据融合到智能诊断预警,从发电策略优化到储能协同控制,形成“感知—决策—执行”闭环体系。实践表明,该技术使故障识别准确率突破 95%,发电效率提升 1.5%~3%,电池寿命延长 10%~15%。未来需持续优化算法泛化能力,强化云边协同平台建设,并着力培养“新能源+AI”复合型人才。随着技术成本降低与标准体系完善,智慧运维将全面赋能新能源场站向少人化、预测化、集约化转型,为能源革命提供核心支撑。

参考文献:

- [1] 徐雪松. 新能源系统中的数字化运维策略分析[J]. 电子技术, 2025, 54(02): 196-197.
- [2] 谭海龙, 安洪伟. 数字化发展下新能源场站智慧管控平台建设[J]. 智慧中国, 2024(08): 76-77.
- [3] 吕伟周, 王志强, 顾文豪. 浅析新能源场站的数字化、智慧化应用与管理[J]. 中国战略新兴产业, 2024(18): 67-69.
- [4] 陆冰颖, 吴程. 新能源场站智慧运维应用探索[C]//中国智慧城市经济专家委员会. 2023 年智慧城市建设论坛上海分论坛论文集. 江苏省江阴中等专业学校, 2023.
- [5] 金声超, 吴文宝, 封永铭, 等. 新能源场站智慧运维应用探索[J]. 江西电力, 2022, 46(04): 45-47, 51.

无人机智能感知技术在城轨低空巡检中的应用研究

邓 超

(南京轨道交通产业发展有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要 无人机智能感知技术和城市轨道交通低空巡检需求相结合, 给传统巡检模式带来了革命性的改变。智能感知系统借助集成高分辨率视觉传感器、激光雷达、红外热像仪等多种传感设备, 实现对城轨基础设施的全方位自动化监测。多传感器融合技术切实有效提升了缺陷识别的精度, 深度学习算法在轨道设备状态评估中展现出了优异的性能。实验验证的结果明确显示, 智能感知巡检系统在检测准确率、巡检效率以及成本控制等多个方面都优于传统人工巡检方式, 该技术为城轨行业信息化运维提供了新的技术路径。

关键词 无人机; 智能感知; 城市轨道交通; 低空巡检; 多传感器融合

中图分类号: TP391; V279; U231.8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.010

0 引言

城市轨道交通系统属于现代城市重要的公共交通基础设施, 承担着巨大的客运压力, 其安全运营和社会稳定与经济发展直接相关。传统人工巡检方式存在效率低下、成本高昂、安全风险大等诸多问题, 难以满足现代化城轨系统对巡检工作的高标准要求。无人机技术快速发展为城轨巡检提供了新的技术路径, 尤其是智能感知技术日趋成熟让无人机能在复杂低空环境实现精准自主巡检。智能感知技术融合计算机视觉、机器学习、传感器技术等多领域先进成果, 为城轨系统信息化运维管理奠定了坚实的技术基础。

1 无人机智能感知技术概述与城轨巡检需求分析

无人机智能感知技术已经从简单的遥感监测发展到复杂的智能识别, 并形成以计算机视觉、激光雷达、多光谱成像为核心的综合感知体系^[1]。

技术架构从单一传感器朝着多传感器融合方向转变, 算法从传统图像处理向深度学习不断演进, 激光雷达能够实现厘米级精度的三维建模, 卷积神经网络大幅提升了感知系统的智能化水平^[2]。

城轨系统对于巡检工作需求呈现出高频次、高精度且全覆盖的特点, 轨道基础设施包含钢轨、接触网、信号设备等关键部件, 需要进行定期的状态监测与缺陷识别。

多传感器融合技术能够实现不同类型设备缺陷的全面检测, 深度学习算法在处理大量巡检数据方面具备显著优势^[3]。

2 无人机智能感知技术在城轨低空巡检中的应用

2.1 智能感知巡检系统架构应用

智能感知巡检系统采用的是分层架构设计方式, 包含了硬件平台层、数据采集层、信息处理层和应用服务层这四个核心层次, 各层次之间依靠标准化接口来实现数据交互以及功能协同^[4]。图1详细展示了系统的整体架构设计情况, 硬件平台层以多旋翼无人机作为载体, 并且搭载了高分辨率相机、激光雷达、红外热像仪等多种传感设备, 这种采用模块化的架构设计方式能够确保系统拥有良好的可扩展性, 同时也保证了系统具备维护方面的便利性, 这为后续开展技术升级工作奠定了坚实的基础。数据采集层负责实时获取多源异构的感知数据, 建立标准化的信息化数据接口, 采用高速数据链路来确保信息传输的实时性与可靠性。信息处理层集成了图像预处理、特征提取、模式识别、数据融合等核心算法模块, 通过边缘计算与云端计算的协同处理来实现智能分析功能, 应用服务层提供巡检任务规划、缺陷识别报告、维护建议生成等业务功能, 支持与城轨信息化运营管理系统进行无缝对接^[5]。

2.2 多传感器融合技术应用

多传感器融合技术整合视觉激光红外等不同模态感知信息, 显著提升巡检系统对复杂环境适应能力与检测精度, 融合算法采用加权平均方式综合各传感器检测结果, 权重分配基于传感器可靠性评估与环境适应性分析, 实施多层次融合策略有效解决单一传感器

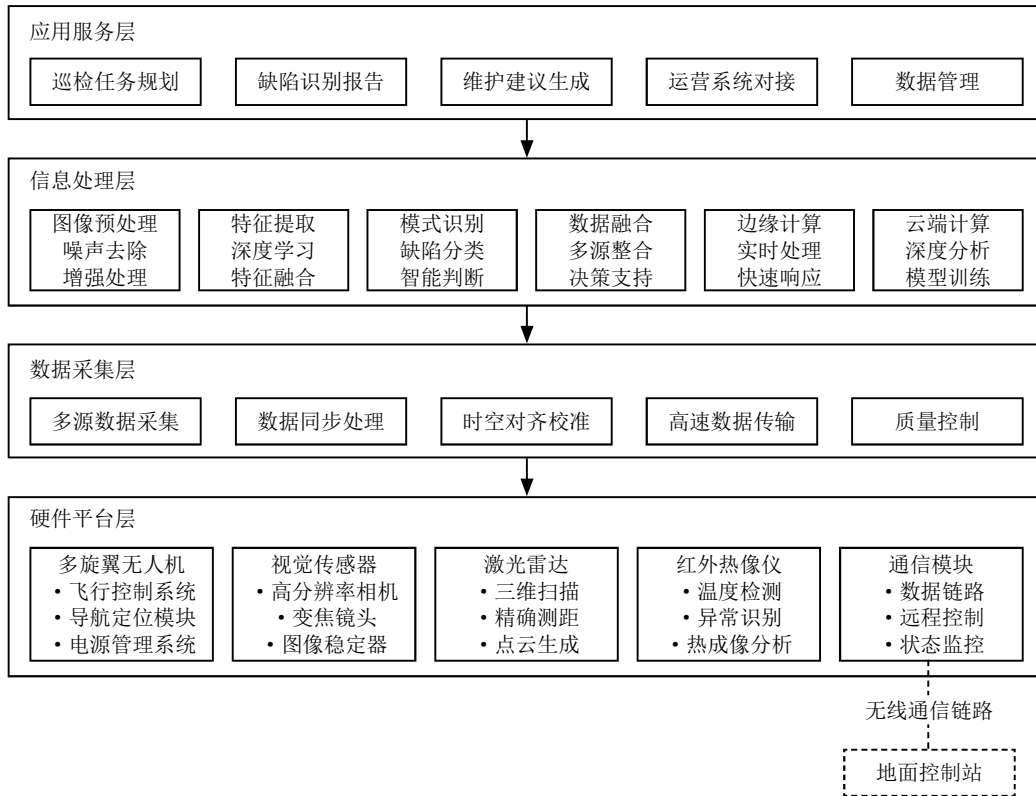


图 1 智能感知巡检系统架构

在特定环境下的局限性问题的，大幅提升系统的鲁棒性与可靠性。数据层融合实现多源数据时空对齐与格式统一，特征层融合提取不同传感器数据互补特征，决策层融合综合多个检测结果形成最终判断。融合精度计算公式为：

$$P_{fusion} = \sum_{i=1}^n w_i \times P_i \times R_i \quad (1)$$

式(1)中， P_{fusion} 为融合后的检测精度(%)， w_i 为第*i*个传感器的权重系数(无量纲)， P_i 为第*i*个传感器的单独检测精度(%)， R_i 为第*i*个传感器在当前环境下的可靠性系数(无量纲)， n 为传感器总数(个)。该公式通过动态权重分配机制确保不同环境条件下传感器数据最优融合效果。

2.3 智能识别算法在巡检中的应用

智能识别算法把深度卷积神经网络当作核心，构建出面向城轨设备缺陷检测的专用模型，实现了对钢轨裂纹、接触网磨损、信号设备异常等多种缺陷类型的自动识别，算法采用端到端的训练方式，通过大量标注数据的学习建立从原始图像到缺陷类别的直接映射关系，引入深度学习模型后系统能自动学习复杂缺陷特征模式，和传统图像处理方法相比在识别精度与

泛化能力上有质的飞跃。网络结构包含特征提取模块、注意力机制模块、分类决策模块，能够有效处理复杂背景下的微小缺陷识别问题，算法在训练过程中采用数据增强技术来扩大样本规模，使用迁移学习方法以加速模型收敛。识别准确率计算公式为：

$$A = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中， A 为识别准确率(%)， TP 为真正例数量(个)， TN 为真负例数量(个)， FP 为假正例数量(个)， FN 为假负例数量(个)。该公式通过混淆矩阵的方式全面评估算法在不同缺陷类型识别中的综合性能表现。

3 系统实验验证与应用效果分析

3.1 实验验证方案设计

实验验证方案从系统性能评估和实用性验证两个维度来展开，构建起涵盖室内模拟环境与实际线路环境的分层测试体系。室内测试环境模拟典型城轨线路场景，其中包括直线段、弯道段、高架段等不同线路类型，还设置标准化缺陷样本用于算法精度验证，测试指标体系包含检测精度、识别速度、系统稳定性、环境适应性四个维度，且每个维度都设定量化的评价

标准与测试方法。实验运用对比测试的方式把智能感知巡检系统与传统人工巡检以及单一传感器巡检做全面比较，测试数据收集采用标准化的数据记录格式以此确保实验结果的客观性与可重复性，实验周期设定成连续三个月且覆盖不同天气条件与光照环境来全面验证系统的工程适用性。

3.2 应用效果测试与分析

应用效果测试的结果明确显示智能感知巡检系统在多项关键指标上都实现了显著提升，该系统的综合性能优势由此得到了充分验证。基于信息化技术的智能感知巡检系统与传统方式对比如表 1 所示，智能感知巡检和传统巡检方式在检测精度、作业效率以及成本投入等方面的差异，相关数据表明智能系统的检测精度达到了 95.8%，相比人工巡检提升了 12.3%，在巡检效率方面，智能系统完成单公里线路巡检的时间为 8.5 分钟，较传统方式缩短了 75%。系统稳定性测试的情况表明在连续运行 180 小时的情况下，故障率能够控制在低于 0.5% 的水平，完全可以满足工程应用方面的要求，环境适应性测试最终验证了系统在不同气象条件当中具备可靠运行的能力。

表 1 智能感知巡检与传统巡检效果对比

评价指标	传统人工巡检	智能感知巡检	提升幅度
检测精度（%）	83.5	95.8	+12.3
单公里巡检时间（分钟）	34.0	8.5	-75.0%
人员需求（人）	6	2	-66.7%
单次巡检成本（元）	2 800	850	-69.6%
缺陷漏检率（%）	8.2	2.1	-74.4%
误报率（%）	12.6	3.8	-69.8%
危险区域适应性	受限	良好	显著改善
夜间作业能力	有限	全天候	全面提升
数据记录完整性	一般	完整	大幅提升

3.3 技术优化与改进方向

技术优化工作主要聚焦于算法精度提升、系统集成度改进以及环境适应性增强这三个方面，其目的是进一步提升智能感知巡检系统的工程实用性。算法优化方向涵盖引入更先进的深度学习架构、优化训练策略以及扩大训练数据集规模等措施，预期能够将识别精度提升到 98% 以上，系统集成度改进重点是开展硬件模块的小型化与轻量化设计，通过采用新型传感器芯片和高效能计算平台，以实现系统重量降低 30%、功耗降低 40% 的目标。表 2 详细地展示了各项技术指标

当前水平与优化目标，给系统改进提供了明确的技术路线图，环境适应性增强措施涵盖开发全天候作业能力、提升电磁干扰抗性、增强恶劣天气适应性等内容，同时完善信息化运维管理平台建设。

表 2 技术优化指标与改进目标对比

技术指标	当前水平	优化目标	改进措施
识别精度（%）	95.8	98.2	深度学习架构升级
系统重量（kg）	12.5	8.8	硬件轻量化设计
功耗（W）	180	108	高效能计算平台
响应速度（ms）	85	50	边缘计算优化
电磁干扰抗性（dB）	35	45	屏蔽技术改进
恶劣天气适应性	中等	优秀	防护等级提升
续航时间（小时）	2.5	4.0	电池技术升级
传感器集成度	分离式	一体化	模块化集成
故障率（%）	0.5	0.2	可靠性设计优化

4 结束语

无人机智能感知技术用于城轨低空巡检的应用研究显示，该技术有广阔的发展前景和实用价值。智能感知系统通过多传感器融合与深度学习算法有机结合，显著提升巡检作业自动化水平和检测精度，有效降低人工成本和安全风险。实验验证，系统在实际应用环境中具备可靠性与稳定性。随着人工智能技术持续进步和传感器性能不断提升，智能感知巡检系统将在算法优化、环境适应性、系统集成度等方面实现进一步突破，为城市轨道交通信息化运维提供更完善的技术支撑，推动城轨行业朝着更高水平信息化与智能化方向发展。

参考文献：

[1] 史龙,孙亮,叶轲,等.低空铁路巡检场景技术研究[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(05):1-8.
[2] 李慧,蔡伯根,傅卫国,等.铁路基础设施低空无人机巡检现状与应对策略[J].铁道通信信号,2025,61(06):1-10.
[3] 李浩,牛洪蛟,李夏洋,等.基于无人机协同编队控制的铁路智能巡检方法[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(02):11-17,70.
[4] 秦勇,张紫城,杨怀志,等.轨道交通基础设施自主无人机智能巡检技术现状与发展趋势[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(02):1-10.
[5] 蔡伯根,李智宇,王剑,等.面向铁路巡检的低空无人机智能感知与精密定位研究[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(01):1-12.

多旋翼无人机在复杂环境电力巡线中的运维优化研究

沈佳骥

(湖北工业大学工程技术学院, 湖北 武汉 430068)

摘要 复杂环境下的电力巡线是保障电网安全的关键,但随着电网规模的不断扩大,传统电力巡线模式逐渐暴露出效率低、风险高、精度不足等问题。基于此,本文结合多旋翼无人机技术特性与电力运维实践,系统分析了传统巡线模式的现存不足及多旋翼无人机在复杂环境电力巡线中的优势,并在此基础上提出了基于多旋翼无人机进行复杂环境电力巡线工作优化的建议,以期为促进复杂环境电力线路智能化运维提供参考。

关键词 多旋翼无人机; 复杂环境; 电力巡线; 运维优化; 应急抢修

中图分类号: TM76; V279

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.011

0 引言

电力线路作为电力能源输送的核心载体,其安全稳定运行直接影响着社会经济发展质量。我国现有电力线路中有 70% 以上的线路处于崇山峻岭及森林等复杂环境中,这无形中给巡线工作带来了严峻的挑战。传统人工巡检需跋山涉水、高空攀爬,不仅效率低下,而且也易发生高空坠落、触电等安全风险^[1]。随着无人机技术与人工智能的深度融合,多旋翼无人机凭借其机动灵活、载荷多样、适应性强等特点,成为破解复杂环境巡线难题的关键手段。鉴于此,本文基于多旋翼无人机针对复杂环境电力巡线工作的优化措施进行研究,对解决当前复杂环境电力巡线工作的不足具有重要的现实意义。

1 复杂环境电力巡线中现存的不足

1.1 人工巡检模式的固有缺陷

在复杂环境中,人工巡线模式面临着效率低、安全风险高、质量不稳定等问题。在山区等区域由于受地形限制,巡检人员时常需要徒步跋涉,日均巡检里程仅 3~5 公里,通常单条线路巡检周期长达 15 天。同时,人工巡线时经常需要进行高空作业等,这样人员的安全风险居高不下。另外,电力线路人工巡检时过于依赖巡检人员的经验,而巡检人员会受疲劳程度、专业能力等因素影响,时常会出现漏检或检修滞后等情况,进而导致因隐患无法及时处置而非计划停电事件频发^[2]。

1.2 传统技术手段存在局限

传统无人机与检测设备存在局限,比如固定翼无人机虽续航较长,但无法实现贴线精细巡检;单传感

器无人机仅能采集可见光图像,难以识别绝缘子内部劣化等隐蔽缺陷,此类缺陷若未及时发现,雨季易引发短路跳闸风险。同时,在数据处理方面,传统模式需人工进行影像筛选及分析,通常单公里线路数据处理耗时超 8 小时,且故障定位误差常达 50 米以上,进而影响电力线路检修效果。此外,由于不同厂商的检测设备存在接口不兼容、数据格式不同等问题,所以也会严重影响输电线巡检工作的效率及质量。

1.3 缺少应急协同响应机制

由于缺少应急协同响应机制,在电力应急处置时,巡检部门、调度部门、抢修部门常常会出现信息传输及沟通滞后的情况,导致复杂环境下的故障抢修常陷入“发现难、定位慢、抢修不及时”的局面。例如:2023 年某地输电铁塔因暴雨发生倒塌,由于缺少应急协同响应机制,巡检部门、调度部门、抢修部门之间未能进行实时沟通,导致抢修队伍耗时 3 天才完成故障点排查及抢修,造成区域停电超 72 小时。

1.4 标准化管理体系的不完善

目前,由于无人机巡检模式应用时间较短,电力企业仍未针对无人机巡检建立全流程操作规范及相关标准,导致无人机巡检质量差异比较大。行业调研显示,不同班组的无人机巡检缺陷识别率差距可达 40%,且部分巡检人员在操作无人机进行线路巡查时未按要求严格控制无人机与线路保持安全距离,从而导致无人机碰撞导线事故时有发生。在设备维护方面,由于缺乏统一的规程,导致无人机日常维护存在滞后、漏检等问题,从而会进一步影响电力巡线效果^[3]。

2 多旋翼无人机在复杂环境电力巡线中的优势

2.1 可提高故障识别精准性

多旋翼无人机通过多维感知硬件与智能算法的深度融合,可有效解决传统巡线中“看不清、判不准、漏检多”的问题,从而有效提高故障识别的精准性。具体来说,多旋翼无人机搭载激光雷达可每秒24万次的频率扫描线路通道,生成密度达200点/ m^2 的三维点云模型,高程精度达4厘米,即便在植被密集区,激光也能穿透枝叶缝隙,精准测算地面灌木与导线的垂直距离,精度可达毫米级。同时,多旋翼无人机搭配红外热成像仪后,能捕捉绝缘子污秽、金具发热等温度异常,测温精度误差控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内,远超传统设备 $\pm 5^\circ\text{C}$ 的误差水平。

2.2 可提高巡线效率

多旋翼无人机通过融合RTK、视觉SLAM技术,可适配各类复杂气象与地形条件,不仅能够抵抗7级风、在 -20°C 至 50°C 环境下稳定续航,而且也可深入山区、丛林等区域或人工无法抵达的区域进行巡航作业。同时,单架次无人机可覆盖5公里线路,日均巡线里程达60公里,较人工可提升12倍以上,从而提高巡线效率,并大幅缩短巡检周期^[4]。

2.3 可降低巡线的安全风险

通过远程操控多旋翼无人机不仅可实现电力线路的非接触式巡检,而且也能替代人工完成90%以上的高空、高危作业,避免巡检人员发生高空坠落、触电等风险。更重要的是,在山火、山洪等特殊危险场景中多旋翼无人机也可代替人工完成线路受损情况勘察,无需人员进入危险环境,从而从源头上有效规避风险,提高电力巡线的安全性。同时,相较于传统人工巡检需直面的多重隐患,多旋翼无人机还可以规避间接安全风险。例如:在林区,无人机可避开野生动物袭击、迷路等潜在危险;在树障巡检中,无需人员攀爬陡坡或穿越荆棘,仅通过空中扫描即可完成数据采集。这种“人员远程操控、设备前线作业”的模式,可实现“零伤亡、高效率”的电力运维目标。

3 基于多旋翼无人机的复杂环境电力巡线工作优化建议

3.1 日常运维优化

1. 构建分级分类作业体系。为提高复杂环境下电力巡线工作的效率,电力企业应根据电力巡线工作的不同阶段构建完善的分级分类作业体系。具体来说,电力企业应根据线路重要性、环境复杂度、缺陷风险度等指标对线路进行分级分类,如线路重要性可按负

荷等级划分为核心骨干线、重要联络线、一般配网线三级;环境复杂度可根据地形坡度($\geq 30^\circ$ 为高风险)、植被密度(≥ 0.8 株/ m^2 为密集区)、气象灾害频率(年均 ≥ 3 次为频发区)等量化指标划分为复杂区、较复杂区、一般区;缺陷风险度可结合辖区内电力线路历史故障数据生成热力图谱,将覆冰高发区、树障密集段等区域用红色标识出来,定为优先级图谱,并进行重点巡检。

同时,针对不同等级的电网线路,电力企业应实施差异化无人机巡检策略。例如:500 kV及以上的线路每月巡检1次,220~330 kV的线路每两月巡检1次,110 kV及以下线路每季度巡检1次;环境复杂的区域可动态化调整巡检周期,如山区峡谷区域可加密巡检至每半月1次、台风路径覆盖区在汛期前增加1次特巡等。并建立季度台账更新制度,以便及时了解电力线路的弧垂、与树木的安全距离、导线损伤等变化^[5]。

2. 完善数据处理与管理架构。采用多旋翼无人机进行电力线路巡检会产生大量数据,这些数据处理与管理质量直接影响着无人机巡检的结果精度。因此,为了提高数据处理及管理的质量,电力企业应边缘端部署轻量化AI引擎,并集成红外图像初筛算法,对绝缘子污秽、金具发热等12类典型缺陷实现精准识别,并压缩有效数据包,减少数据传输负荷,加快数据处理效率。同时,电力企业应对线路巡检建立档案库,并实施“一杆一档+一机一档”档案管理,保证数据真实性和可靠性的同时,提高数据管理质量。在此基础上,电力企业应采用量子密钥对数据进行加密,并设置访问权限,防止电力线路巡检中的地形地貌、线路布局等敏感数据发生泄露。

3. 优化无人机设备管理机制。为保证多旋翼无人机长久保持良好性能,电力企业应全方位提升多旋翼无人机运维效能。

首先,在硬件管理方面,电力企业可对多旋翼无人机设备的接口进行标准化改造,统一采用Type-C接口,实现供电与数据传输一体化,有效解决传统接口兼容性差、连接不稳定等问题。针对无人机电池,电力企业可构建“充电—存储—维护”全流程管理机制,并通过引入智能温控充电技术,在低温环境下自动启动加热模块保持电池活性,同时搭载过载保护防止无人机电池过充、过放,从而延长无人机电池使用寿命。同时,电力企业需要完善无人机设备校准机制,比如激光雷达每3个月在专用的三维标定场对距离测量、角度定位等核心指标进行一次校准;红外热像仪每月开展1次温度标定,确保测温误差控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。

其次,在软件层面,电力企业应在无人机系统中

集成 MAVLink、DroneKit、STAMP 等通信协议,有效解决不同厂商设备之间的兼容性难题,提升无人机系统的数据传输速率和抗干扰能力,并降低系统集成成本。同时,电力企业还可创新实施“三统一”管理模式,即统一修护标准、统一管理流程、统一质量管控,通过建立无人机设备健康档案,运用大数据分析预测无人机设备故障,降低无人机设备故障率的同时,提高设备使用效率。

3.2 应急抢修响应机制优化

3.2.1 建立分级响应体系与备用保障机制

首先,电力企业应针对应急抢修工作构建四级应急响应体系,并明确触发条件与处置标准。例如:I 级响应(重大故障)适用于核心骨干线跳闸、自然灾害导致的多基铁塔倒塌等场景,触发后 15 分钟内调度 3 架以上无人机集群,采用“1 架全景勘测+2 架精细检测”模式,60 分钟内完成故障区域三维建模与原因分析;II 级响应(线路跳闸)针对单条线路故障,30 分钟内通过激光雷达点云比对定位故障点,同步生成含物料清单、作业路径的抢修方案;III 级响应(设备缺陷)用于绝缘子破损、金具松动等隐患,2 小时内完成缺陷尺寸测量与风险等级评估(一般/严重/危急);IV 级响应(隐患预警)针对树障超标、导线轻微覆冰等情况,24 小时内跟踪监测变化趋势,生成预防性处置建议。

其次,电力企业应建立备用保障机制,以此来应对极端场景。例如:针对复杂环境中的通信中断问题,电力企业可采用“5G+北斗短报文”方式进行数据传输,即正常情况下可利用 5G 网络进行数据实时回传,信号中断时则自动切换至北斗系统进行数据传输,保证极端场景下,无人机设备依然可以稳定传输数据^[6]。

3.2.2 构建多主体协同机制

为提高应急抢修响应效率,电力企业应建立跨部门联动平台,整合运维、调度、抢修、物资等部门核心数据,开发“应急一张图”功能,实时显示故障位置、无人机位置、抢修队伍轨迹、物资库存等信息,支持一键下发巡检任务、共享检测数据,打通信息孤岛及沟通屏障,实现指令协同统一。同时,在联动平台中开发启动“自动推送+分级通知”功能,当线路发生故障时,平台可自动将故障信息分别发送运维、调度、抢修、物资等部门,实现多方同步响应,将应急响应时间从原来的 120 分钟缩短至 45 分钟。另外,电力企业还需建立每日晨会、每周会商、每月复盘的常态化沟通机制,解决部门间协同壁垒。

3.2.3 应急处置效果评估与优化机制

首先,电力企业应针对应急抢修工作构建“时效

性—准确性—经济性”三维评估指标体系,实现对应急抢修工作的量化评价。其中时效性指标包括故障定位时间(I 级响应 ≤ 60 分钟、II 级 ≤ 30 分钟)、抢修准备时间(≤ 45 分钟)、恢复供电时间(核心线路 ≤ 4 小时);准确性指标包括故障原因判定准确率($\geq 95\%$)、缺陷尺寸测量误差(≤ 5 mm)、抢修方案适配率($\geq 90\%$);经济性指标包含应急处置直接成本(设备损耗、人员薪酬)、停电损失减少量、资源利用率(无人机日均作业时长 ≥ 6 小时)。通过量化指标评估,可有效优化电力线路应急抢修工作,实现“三快”目标(人员快到、数据快传、照明快亮)。

其次,电力企业应建立“复盘—优化”改进机制。每次应急处置后 72 小时内开展专题复盘,并采用“数据回溯+人员访谈”方式,分析响应延迟、判断失误等问题根源。然后根据具体问题、具体原因采取针对性的优化措施,防止以后再出现类似的情况。

4 结束语

旋翼无人机在复杂环境电力巡线工作中的应用,不仅能够有效解决传统巡线模式的效率低下、安全风险高、应急滞后、受自然因素限制、技术手段局限等问题,而且可以凭借其立体化感知、高效低成本、安全可靠等优势,实现复杂环境全工况作业,提升巡线效率及安全性,并降低运维成本。因此,电力企业应从日常运维及应急抢修响应机制两方面入手,积极探索有效措施,不断完善和优化多旋翼无人机电力巡线模式,提高复杂环境下电力巡线工作的精度与环境适应性,为电力系统长久安全稳定运行提供坚实的保障。未来,随着智能机器人的不断发展及应用,电力企业可探索无人机与巡检机器人的协同运维模式,进一步提升复杂环境下的全域监测能力,进而推动我国电力事业实现更高质量的发展。

参考文献:

- [1] 王明.基于多旋翼无人机固定机巢自动巡检电力线路的控制技术研究[J].电工技术,2022(11):67-69.
- [2] 郭英萃.基于多目标优化的无人机电力巡检调度方法研究[D].天津:中国民航大学,2022.
- [3] 李和丰,王瑞,杨佳彬,等.基于无线充电站的无人机全自动电力巡线研究[J].电力勘测设计,2024(11):61-66.
- [4] 黄浩.基于 5G 无人机在电力线路自动巡线的实现与研究[J].中国宽带,2024,20(09):142-144.
- [5] 兰彬.电力巡检场景中的无人机自主避障控制研究[D].成都:电子科技大学,2025.
- [6] 智宏鑫.复杂环境下巡检无人机最优路径规划方法研究[D].北京:华北电力大学,2024.

高速公路机电设备安装及调试技术研究

毛耀¹, 刘婷^{2*}

(1. 四川路桥交通工程有限公司, 四川 成都 610041;
2. 四川公路桥梁建设集团有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 本研究旨在通过优化高速公路机电设备的安装与调试技术, 提升设备运行效率, 保障高速公路交通系统安全顺畅。研究采用文献分析法, 系统梳理设备安装流程与调试步骤, 并对比不同安装方案以减少误差。研究结果表明, 优化后的流程可显著提高设备运行可靠性, 降低故障率; 结论指出, 企业需科学安排操作、强化安全管理, 且安装人员需持续学习新技术, 以推动高速公路交通系统现代化发展, 从而提高设备运行的稳定性, 保证交通安全。

关键词 高速公路; 机电设备; 安装; 调试技术

中图分类号: U417

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.012

0 引言

高速公路是现代交通的重要组成部分, 其基础设施建设直接影响着交通的安全性。机电设备涵盖交通控制及监控系统等多个方面, 其可以保障高速公路顺利运行。然而, 设备的安装和调试过程是确保其后期能够稳定运行的核心环节, 涉及多方面的技术要求, 任何环节出现问题都可能对设备功能产生影响。

1 注重设备安装选型, 开展功能性测试

在选型过程中, 安装人员要根据高速公路的具体需求来考虑设备的性能要求。高速公路机电设备的种类繁多, 设备选型要考虑到设备的功能, 确保它们在高速公路复杂的交通环境下能够共同协作, 满足整个交通系统的需要。高速公路的机电设备需要在各种复杂的环境条件下正常运行, 包括高温、低温、湿度大、风力强、阳光暴晒以及灰尘多等恶劣条件。因此, 在选择设备时, 必须确保设备具备足够的防护能力。对于交通信号灯, 应该选择那些具备防水、防尘、抗紫外线能力的产品, 以确保其在长期的室外环境中不受损坏。而对于监控设备, 应选择抗干扰能力强的设备, 以确保在信号拥堵或者其他干扰因素下, 依然能够保持清晰的视频图像。随着科技的不断发展, 新的机电设备不断涌现, 许多设备具备更强的智能化和自动化功能^[1]。在选型时, 需要优先考虑那些技术性能更加先进、能够提供更高效管理和监控能力的设备。

智能交通管理系统可以根据路况自动调整交通信

号的变化, 电子收费系统则能够实现无缝自动收费, 减少人工干预, 提高收费效率。选择这些高性能的设备可以有效提升高速公路的管理水平, 同时也为将来的技术升级和扩展提供更多的空间。在选型过程中, 安装人员要综合考虑设备的初期投入、使用寿命以及后期的维护成本。高质量的设备虽然价格较高, 但其稳定性和长寿命能够大幅降低后期维修和更换的频率, 最终降低整个系统的运行成本。而一些低价设备可能在初期具有价格优势, 但由于质量不稳定, 可能导致频繁的故障, 进而增加维修和更换的成本。因此, 在选型时需要对设备的性价比进行全面评估, 以确保选择既符合质量要求, 又能够有效控制预算的设备。在设备选型完成并安装之后, 调试阶段的核心任务是确保设备的功能稳定性, 特别是功能性测试的实施。功能性测试是验证设备是否按照设计要求正常运行的关键步骤。对于高速公路机电设备, 功能性测试不仅限于设备是否能够开启, 还需要检验设备在实际工作环境中的表现。例如: 在测试交通信号灯时, 除了检查信号灯是否能正常显示红、绿、黄等信号外, 还要测试信号切换的时效性和准确性, 确保在高交通流量的情况下信号变化不会发生延迟或错误。而在测试监控摄像头时, 要确保其拍摄角度、图像清晰度以及在不同光照条件下的表现, 尤其是在夜间或恶劣天气下, 摄像头是否依然能正常工作, 并传输清晰图像。对于电子收费系统的测试, 除了验证收费功能的正常外, 还需要确保系统与中央控制系统的数据交互流畅, 防

*本文通信作者, E-mail: 1317522560@qq.com。

止因系统数据传输问题导致的收费错误或交通延误。

2 合理安排安装进度，进行系统联调

合理安排安装进度需要全面考虑项目的整体需求、设备的交付周期、施工资源的配置以及施工过程中可能出现的各种变量。施工进度安排要建立在科学合理的前期调研基础上，充分考虑高速公路的实际情况，包括交通流量以及设备采购和运输时间等因素。施工进度表的编制必须精准，既要保证工程的按时完成，又要避免因进度过于紧张而导致的工期延误。在施工进度的安排中，安装人员要制定详细的施工计划，并对各个阶段的任务进行细化，确保每个施工环节能够在规定的时间内完成^[2]。设备的安装应提前安排好采购和运输的时间，避免因设备延误而影响安装进度。此外，施工现场的协调也十分重要。各个施工环节需要密切配合，确保设备安装、配线、接入等环节能够有序进行，避免因某一环节的延误而影响后续施工任务。对于复杂的设备安装，施工进度安排还需要充分考虑技术人员的技术熟练程度以及安装人员的数量配备，确保每个环节都有足够的技术力量支持。

施工过程中会出现一些不可预见的情况，这时要及时调整施工进度安排，确保不会影响整体项目的完成。安装人员可以设置合理的缓冲期来应对这些潜在的突发情况，如果某些设备的安装遇到困难，可以适当调整其他设备的安装顺序，确保其他部分工作不受影响。系统联调是指将高速公路上所有机电设备的各个子系统进行综合连接，确保其之间能够实现信息的准确传递与协同工作。首先，系统联调需要确保所有设备间的接口连接正确无误。高速公路上的机电设备种类繁多，包括交通信号灯、电子收费系统、监控设备、路况监测系统等，这些设备需要通过通信网络和数据传输系统进行联动。在系统联调过程中，首先需要对所有设备进行测试，确保其基本功能正常运行。测试时要逐一检查设备的接入、连接是否正常，确保各个子系统之间的信号传递通畅，没有出现数据丢失或延迟现象。在高速公路上，设备之间需要进行实时数据交换，以实现交通控制等功能。在系统联调过程中，要对各设备之间的数据传输速度、数据准确性以及设备对指令的响应时间进行测试，确保在高流量或复杂情况下，设备依然能够快速响应，提供准确的信息。

3 确保安装质量，通信信号检测

采购人员需与设备供应商进行充分沟通，确保所有设备的规格、型号与项目需求完全吻合。此外，还需要在设备到达现场后，进行一次严格的检查，确保

设备在运输过程中没有受到损坏，并符合质量要求。确保设备在安装前没有缺陷，是安装质量控制的第一步。安装人员应具备相应的技能，对安装工作有深入了解。设备安装时，必须严格按照设计图纸和设备厂商的操作手册进行，确保每一项操作都按照规定的程序执行。特别是在电气设备的安装过程中，必须确保线路连接牢固可靠，避免因接触不良或连接松动而导致设备的运行不稳定。对于机电设备，特别是高精度的设备，任何细小的偏差都可能导致设备无法正常工作，因此每个环节都需要精确到位。在施工过程中，安装质量的控制不仅仅依赖于技术人员的专业技能，还需要严格的质量监督机制。在安装阶段，应设立专门的质量监督小组，负责全过程的质量监控与检查。质量监督小组需要定期检查设备的安装情况，并对施工质量进行评估，确保安装工作没有出现任何遗漏或疏忽^[3]。

在安装过程中，一旦发现问题，监督小组应及时提出改进措施，确保及时修正，避免问题的积累。在设备的连接和布线环节，要特别注意线路的布局 and 标识，避免出现因线路错接或标识不清晰而影响设备后期的调试与维护。安装时，应尽量避免线路受潮、老化、松动等问题，这些问题都可能导致设备工作时出现故障。对于一些重要的电气设备，还需加装专门的保护装置，以防止设备因外部环境因素受到损害。安装完成后，务必对每个环节进行详细的检查，确保每一项连接都符合标准要求，避免因安装不当导致的设备故障或功能缺失。在施工过程中，合理安排每个施工环节的时间，确保每个环节都有足够的时间进行质量控制，避免因进度过快而导致安装质量的忽视。合理的施工进度安排需要考虑到设备的复杂程度、安装条件和天气等外部因素，确保施工队伍能够在规定的时间内高质量完成各项安装任务。调试过程中要进行信号强度的测试，高速公路上的机电设备常常涉及长距离的信号传输，特别是对于一些远距离安装的设备，其信号可能会受到传输距离、环境干扰等因素的影响。在进行信号检测时，必须使用专业的仪器来测试信号的强度、信噪比、传输速度等指标。在测试过程中，应模拟不同的交通情况确保设备在各种情况下都能稳定地传输数据。此外，对于通信信号的稳定性，还需要在不同的负荷条件下进行测试，确保系统在高流量或复杂环境下仍能保持稳定运行。

4 综合考虑安装环境，进行安全性测试

不同地区的气候特点，都会影响设备的性能。因此，设备的选型和安装必须充分考虑这些因素，确保

设备能够在各种环境下稳定工作。例如：在高温地区，选择的设备应具备较强的散热能力和耐高温特性，而在寒冷地区，则应选用能够承受低温的设备。此外，高速公路的环境中常常伴随着灰尘、沙粒、腐蚀性气体等污染物，这些因素会影响设备的外观和内部构造。因此，设备外壳必须具备一定的防尘、防腐能力，避免在恶劣环境下产生损害。在安装过程中，安装人员还需要考虑高速公路的地理条件。不同地形下的安装环境要求不同的安装方式^[4]。

例如：对于山地或丘陵地区，高速公路的坡度较大，设备的安装需要考虑到坡度对设备结构的影响，确保设备的稳固性。而在平坦的地面上，设备安装时则更多关注的是如何布置线路、减少干扰、提高传输效率。安装人员需要根据现场的具体情况灵活选择设备安装的位置，以减少后期因环境因素带来的问题。为了应对高速公路上复杂多变的环境，安装过程中还需要预见性地设备保护措施。例如：安装人员可以选择符合 IP 等级标准的防护设备，能够有效避免水汽等进入设备内部，保证设备正常运行。安全性测试的核心是验证设备在面对各种可能的风险时，是否能够有效保护系统的安全运行，避免设备故障和潜在危险的发生。在高速公路的机电系统中，设备数量众多，且其应用场景涉及复杂的环境变化，因此必须对每一台设备进行全面的的安全性测试，确保它们在不同情况下都能可靠运行。对于电力驱动的设备，必须进行绝缘电阻、接地电阻等项目的检查，确保设备的电气部分不会因电流过载或接地不良而引发火灾或设备损坏。设备的电源系统应具备过载保护、短路保护等功能，确保在发生异常情况时能够及时切断电源，防止设备损坏或安全事故的发生。此外，对于一些重要的交通信号控制系统和监控设备，还需要进行电磁兼容性测试，确保设备能够抵御外界电磁干扰，保持信号的稳定传输。

5 保障安全管理，性能评估测试

每一位参与安装的工作人员都必须佩戴安全帽、防护眼镜、工作服、手套等必要的安全装备，确保其在作业过程中能够防范可能的安全风险。施工现场的安全防护措施必须到位，特别是在进行高空作业时，应采取必要的安全措施，防止安装人员因疏忽而发生意外。在安装过程中，施工队伍应根据现场的具体情况，合理安排施工时间，避免高峰期车流过于密集时进行施工。在进行电气设备和机械设备的安装时，还应特别注意避免电力设备和信号设备的损坏，因此，施工现场应设置专门的设备保护措施，防止外部因素对设

备造成损害。例如：对于电力线路和电气设备的安装，应加强设备的防护，防止设备因天气变化或外力破坏而导致故障。在施工进度管理方面，应根据项目的复杂程度和各项设备的安装需求，制定合理的施工计划。特别是在大型机电设备的安装过程中，应细化各项任务的时间节点，确保每个环节能够按时、高效地完成。

在施工前，应该对安装人员进行必要的安全培训，提高其安全意识，确保其能够正确执行各项安全管理措施。在施工过程中，必须有专门的安全监督人员进行现场安全检查，确保施工现场符合安全要求。在安装过程中，使用的工具和机械设备应定期检查，确保其完好无损，避免因设备故障而导致安全事故。保障安全管理是调试阶段的重要内容之一，在调试过程中，设备的各项功能和性能需要经过严格的测试，确保其在实际运行中能够满足设计要求并能在不同环境条件下稳定工作^[5]。调试前，工作人员应确保设备的安装质量符合要求，所有线路连接正常，设备在安装过程中没有出现任何损坏。在调试过程中，首先应对设备进行全面检查，确保所有的安全防护装置完好，电力系统接地良好，防护设施完备。调试时，工作人员需要逐项检查设备的各项功能，确保设备在运行时不会出现安全隐患。例如：检查监控系统的信号传输是否稳定，收费系统的电子支付功能是否正常，交通控制系统的应急反应是否迅速等。

6 结束语

在高速公路机电设备安装调试工作中，只有科学合理 地安排每一步操作，才能有效避免潜在风险，确保设备在高速公路的运营中发挥应有的作用。随着技术的不断进步，机电设备的功能将愈加强大，安装与调试技术也将不断更新。安装人员要持续学习最新的技术，更好地应对未来高速公路机电设备安装调试的挑战，进一步推动我国高速公路交通系统的现代化发展。

参考文献：

- [1] 卜思远. 高速公路隧道机电安装施工技术研究[J]. 居业, 2025(01):7-9.
- [2] 刘婷. 高速公路机电设备安装技术和施工管理方法研究[J]. 汽车周刊, 2024(11):177-179.
- [3] 洪少勤. 高速公路机电设备安装技术和施工管理方法[J]. 汽车画刊, 2024(07):247-249.
- [4] 谢小亮. 高速公路机电设备安装的施工管理[J]. 运输经理世界, 2024(19):154-156.
- [5] 郑莉. 高速公路隧道机电设备安装方案与调试分析[J]. 科学技术创新, 2024(12):184-187.

浅埋软弱围岩高速公路隧道施工技术探讨

周亚玉

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘 要 浅埋软弱围岩高速公路隧道施工面临围岩变形快、地质扰动强、支护时效要求高的复杂问题。研究基于围岩支护协同理论, 系统分析精准测量、支护衔接、排水管理及动态监测的关键技术路径, 提出大管棚超前加固、锚喷协同支护、偏压稳定控制及信息化监测反馈的方法, 构建主动防控与动态调节并行的施工体系。研究结果表明, 该体系能有效抑制围岩塑性区扩展, 降低结构变形速率, 提高隧道整体稳定性与施工安全水平。

关键词 浅埋软弱围岩; 高速公路; 隧道施工技术

中图分类号: U455

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.013

0 引言

浅埋软弱围岩隧道在高速公路建设中具有高风险与高复杂度特征, 地层结构松散、地下水丰富、受力分布不均, 使围岩稳定控制成为施工核心议题。现代隧道施工技术正由静态设计转向数据驱动与主动加固并重模式, 强调力学调控与监测反馈的协同作用。针对浅埋段地质非均质性与偏压效应, 构建以预加固、实时监测和结构自适应调节为一体的多维控制体系, 形成稳定可控的隧道施工结构环境。

1 高速公路浅埋软弱围岩隧道施工中的技巧

1.1 精准测量围岩状态, 奠定施工安全基线

精准测量围岩状态是浅埋软弱围岩隧道施工的起点, 也是控制风险的关键环节。测量工作不只关乎断面尺寸的准确性, 更是围岩稳定性与支护参数调整的核心依据。施工团队在测量前需建立三维地质模型, 利用全站仪、高精度激光扫描仪等设备对围岩形态、节理裂隙及地下水发育特征进行连续监测, 确保数据的动态更新。在围岩测量过程中, 常采用收敛变形监测与拱顶沉降测定的组合模式, 分析围岩变形速率和趋势, 从而判断围岩应力释放过程的合理性^[1]。针对浅埋段的高应力集中区, 可布设多点位移计与锚杆应力计, 获取不同深度的变形数据, 实现空间分布的精细化掌控。为保证数据可靠性, 测量基准点应布设在扰动最小的稳定地段, 采取周期性复测校正误差, 形成连续的监测曲线。测量结果需实时反馈至施工指挥系统, 技术人员依据收敛速率曲线和沉降趋势图, 调整爆破参数与支护厚度, 防止围岩应力突变引发局部失稳。科学的测量体系使施工从经验型操作转向数据驱动决策, 为浅埋软弱围岩隧道提供精准的技术支撑。

1.2 优化开挖支护衔接, 提升结构稳定性能

优化开挖支护衔接是浅埋软弱围岩隧道稳定控制的核心环节, 任何支护滞后或参数偏差都会引发围岩应力失衡, 导致结构变形加剧。施工团队在开挖过程中应注重开挖方法、进尺控制与支护时机的有机衔接, 利用短进尺、弱爆破与即时支护的配合, 使围岩在最小扰动中实现力学平衡。开挖断面多采用分步台阶法或三台阶七步法, 以减少暴露面积, 控制围岩卸荷速率, 使应力释放过程更加平顺。支护设计要依据围岩级别与变形特征灵活调整, 形成拱架、锚杆等多层次复合体系, 强化围岩的自稳能力。支护参数控制应强调厚度、密贴度与锚固深度的协调性, 混凝土初喷厚度与钢拱架间距需经监测数据动态修正, 防止结构刚度不足或超支撑引起的应力集中^[2]。衔接阶段还需严格把握初支与二衬的间隔时间, 确保围岩变形趋稳后再实施二次衬砌, 维持结构的整体协调。优化开挖与支护的衔接, 施工过程能在扰动控制、受力均化和结构闭合三方面形成联动效应, 使浅埋软弱围岩隧道在复杂应力场中保持稳定形态。

1.3 强化地表排水管理, 控制地下水渗透风险

强化地表排水管理是浅埋软弱围岩隧道保持稳定结构的重要控制手段, 排水系统的设计与施工直接影响围岩孔隙水压力、渗流路径以及衬砌受力状态。浅埋地段常伴随高含水层或富水断裂带, 地下水在围岩裂隙中形成渗透流, 当排水体系不完善时, 易引起围岩软化、承载力下降与拱脚失稳。排水设计需兼顾地表截排与洞内导排两个层面, 构建纵横结合的分流体系, 使渗流在进入隧道结构前被有效截断^[3]。地表部分设置截水沟与盲沟, 控制汇水范围, 防止雨水集中

渗入围岩；洞内部分利用仰拱排水管、环向盲沟和纵向主排水管形成完整导排网络，保证地下水能迅速排出施工区。排水构筑物施工应重视坡度控制与衔接密封，防止渗漏回流造成二次浸润。为保持系统长期稳定，需结合监测数据动态评估水位变化，利用自动化监测设备实时掌握水流量与孔压分布，必要时调整排水路径或加设反滤层以降低渗透压力。科学的排水管理能在源头削减围岩含水量，缓解结构受力不均，使隧道处于干燥稳定的工作环境中，保证施工安全与衬砌耐久性。

2 浅埋软弱围岩高速公路隧道施工技术

2.1 大管棚超前加固技术实施

大管棚超前加固技术在浅埋软弱围岩隧道施工中承担着支护先导的功能，在开挖前形成受力稳定的加固拱环，使围岩的自稳能力在扰动发生前得到强化。该技术基于地层结构力学与渗流固结理论，利用钢管注浆在洞口及浅埋段建立封闭支护体，实现对开挖面的有效约束，减弱应力集中效应。加固体在空间上形成环向封闭的力学体系，将松散、破碎的围岩转化为具备整体性的承载结构，使初期支护不再单独承担外压，而由钢管拱环与围岩共同分担荷载，提升隧道的稳定性。

该技术的实施应遵循分步设计、精准施工、密封注浆的系统原则。加固结构的形成依赖“拱环效应”，钢管与注浆固结体之间的界面黏结是其发挥承载性能的关键，孔隙率、注浆压力与钢管间距的合理匹配直接决定加固区的力学性能。在浅埋软弱围岩地层中，施工团队应采用梅花形布置方式，钢管规格宜选用 $\Phi 108 \times 6$ mm 热轧无缝管，环向间距控制在 40 cm，以保证支护拱体的连续性。钻孔施工时可采用双钻机对称作业，减少地层扰动，提高成孔精度，钻孔角度保持与路线纵坡 1° 至 3° 的仰角，防止管棚出现下沉偏移。在注浆作业方面，应在拱脚至拱顶方向逐段注入水泥浆，形成由外向内逐步固结的稳定体。注浆压力控制在 0.5 ~ 2.0 MPa 之间，水灰比一般为 1:1，必要时根据地层渗透系数进行局部调整，确保浆液扩散半径达到管间距的 0.6 倍，使注浆体充分饱和。为防止浆液渗漏与孔洞形成，可在钢管前端间隔 20 cm 开设小孔，使浆液在压力作用下均匀扩散，从而提高固结均匀度。

施工过程中应在钻机定位、钻孔方向、钢管接长及密封连接等环节建立全过程控制机制，技术人员应定期检测钻孔偏差与注浆密实度，结合监测数据动态修正施工参数。在洞口浅埋偏压区域，还应在拱部范

围内加设钢筋笼以增强抗弯能力，使加固拱环在地层荷载变化时具备足够稳定性。这种主动加固的手段，让隧道开挖前即可形成坚固的防护屏障，为后续锚喷体系和二衬结构提供稳定的力学基础，实现浅埋软弱围岩段的安全高效施工。

2.2 系统锚杆喷射混凝土协同

锚杆承担主动加固功能，将围岩由松散体转变为整体受力体，改变原有的应力分布模式；喷射混凝土则构建外层承载壳体，形成柔性与刚性并存的支护体系^[4]。这一技术的核心在于利用锚固力与喷层抗压强度的协同效应，使支护结构在早期阶段即具备抗变形能力，从而有效延缓围岩塑性区的扩展。

在实践层面，施工应以均匀受力、快速封闭、精确锚固为主线。锚杆布设宜采用梅花形布置，间距控制在 1.0 ~ 1.2 m 之间，锚固长度应延伸至稳定围岩区域，使应力传递更为充分。钻孔时可选用风动凿岩机配合导向套管，控制孔径与倾角偏差，确保锚杆轴线与围岩主应力方向一致。砂浆灌注阶段需关注稠度与流动性，通常水灰比控制在 0.45 ~ 0.5 之间，灌注完成后立即安装垫板和螺母，使锚杆端部产生预紧力，提升早期支护刚度。喷射混凝土施工应与锚杆安装保持时间衔接，混凝土采用湿喷工艺，喷射厚度宜为 6 ~ 10 cm，骨料粒径不大于 10 mm，以免影响喷射密实度。速凝剂掺量控制在 5% 以内，使混凝土在 5 分钟内初凝，保证早期封闭效果。

为实现锚杆与喷层的协同受力，应在钢拱架、钢筋网片与喷层间形成连续受力通道。喷层表面应保持与围岩贴合，避免产生空鼓，喷射角度保持 90° ，喷嘴距离控制在 0.8 ~ 1.0 m 范围，施工人员应以弧形移动方式均匀覆盖，减少厚度偏差。在偏压段或富水围岩中，应增加防水砂浆层并设反滤排水盲沟，避免渗水削弱黏结性能。监测阶段应持续采集锚杆应力与喷层变形数据，对支护体系的力学状态进行动态评估。这一协同体系，使隧道结构能在塑性阶段形成自稳机制，使浅埋软弱围岩段实现可控变形与稳定支护的双重目标。

2.3 洞口段偏压稳定控制施工

洞口段偏压稳定控制施工是浅埋软弱围岩隧道建设中结构安全的临界环节，偏压地段常因坡面荷载、地形不均或地质构造差异而形成非对称应力场，拱顶与边墙受力不均，易导致局部塌落、偏移和拱脚滑移^[5]。偏压控制的关键在于调整力流、构建对称、强化边支，即利用结构补强与应力引导，使原本紊乱的应力状态恢复平衡。在偏压区形成的塑性区向浅侧发展更为迅

速, 施工措施应以加固、分压、减荷三项为核心目标, 实现结构应力与地层反力的匹配。

洞口段应优先建立刚柔结合的稳定体系, 钢筋混凝土套拱与预加固体共同承担初期荷载。施工团队在开挖前应布设大管棚与小导管组合加固层, 使偏压侧围岩具备足够的抗剪强度, 套拱位置宜向深处延伸 3~5 m 形成稳定过渡带, 混凝土强度等级不低于 C30, 厚度保持在 40 cm 以上, 以增强拱脚约束力。对于偏压侧边墙, 应在结构设计中增加钢拱架密度, 将间距由 1.0 m 缩至 0.5 m, 使支护刚度提高约 40%, 有效抵消不平衡荷载。在仰坡与边坡处理方面, 应在偏压方向设置抗滑桩及锚索框架, 加强土体与岩体的整体性, 防止滑移带贯通。锚索宜采用 $\Phi 25$ mm 高强钢绞线, 间距控制在 1.5 m, 锚固长度延伸至稳定层 1.0 m 以外, 预应力控制在 150~200 kN 之间, 使锚固结构具备主动受力功能。在偏压区地表渗水集中的位置, 应增设截排水沟与防渗帷幕, 降低地下水压力对偏压侧的削弱效应。拱顶支护则需在偏压控制中实现刚度与延性的协调, 施工中可采用钢拱架、喷射混凝土、系统锚杆复合结构, 使拱顶形成半封闭的受力拱环。喷射混凝土厚度保持在 8~10 cm, 速凝剂掺量控制在 4% 以内, 锚杆长度控制在 3 m 以上, 形成稳定的支护界面。

为防止开挖扰动扩大, 应采用短进尺弱爆破控制方法, 每循环进尺不超过 1 m, 爆破参数经现场测振结果实时调整。这种复合技术途径, 使偏压地段的围岩能在有限变形中逐渐实现自稳, 使浅埋隧道洞口段在复杂荷载作用下保持稳定。

2.4 施工监测动态调整技术

施工监测动态调整技术体现了现代隧道工程由经验控制向信息化、数字化管理的转型, 浅埋软弱围岩隧道在开挖过程中处于应力重分布的非线性演化阶段, 任何支护滞后或参数偏差都会引发变形累积与塑性区扩展。动态监测技术的核心在于实时识别围岩应力状态与结构响应, 利用监测数据建立反馈回路, 使支护参数与开挖策略保持动态匹配, 实现从静态设计向自适应控制的跃升。

在具体实施中, 应构建多层次监测体系, 监测点布设应体现代表性与均匀性, 通常在拱顶、拱腰、拱脚及地表同步布控, 间距控制在 5~10 m, 确保数据连续。测量仪器宜采用自动收敛计、光纤应变计与全站仪组合, 数据采集周期可设定为 4 小时一次, 利用无线传输系统实时上传至项目数据中心。工程技术人员依据监测结果绘制变形曲线, 判断围岩状态是否稳定, 当沉降速率超过预警阈值 0.5 mm/d 时, 应立即启

动调整程序, 修正支护参数。在施工控制方面, 动态调整主要体现在进尺长度、支护时间与材料参数三个维度。若监测数据显示围岩变形趋于活跃, 应将进尺由 1.5 m 缩减至 1.0 m, 喷射混凝土厚度增加 2 cm, 并同步加密锚杆布置, 使拱环刚度提高 10%~15%。在注浆加固区, 应依据孔压变化调整注浆压力与扩散半径, 防止过压引起的局部松动。对监测数据波动明显的区段, 技术人员应实施短期密集测量, 增加频率至每 2 小时一次, 以便精确掌握变化趋势。信息化平台在动态调整中发挥核心作用, 建立 BIM+ 物联网监测系统, 可将各监测断面的数据自动汇总, 生成三维可视化模型。项目管理人员可以在终端实时查看隧道变形状态, 依据数据趋势制定调整指令, 实现监控量测与施工控制的同步联动。在洞口偏压区或富水段, 应加设孔隙水压力传感器与钢架应变计, 分析围岩应力重分布规律, 调整开挖顺序与支护厚度, 确保力学平衡稳定。

施工监测动态调整技术的价值在于使隧道结构的稳定判断由经验估测转向数据驱动, 经过实时感知、快速响应和参数修正, 施工团队能在复杂地质条件下维持围岩与支护的最优协调, 使浅埋软弱围岩隧道形成可控、可预测的安全体系。

3 结束语

浅埋软弱围岩高速公路隧道的施工技术体系以精确测量、加固先行、支护优化和信息监测为核心支撑, 实现力学平衡与施工节奏的动态匹配。各环节在统一调控框架下形成闭合反馈链, 使结构受力均化、变形可控、围岩稳定性显著增强。全过程监测与参数修正机制的融入, 使隧道工程在复杂地质条件下保持安全韧性, 确保施工过程的科学化。

参考文献:

- [1] 孙成海. 山区高速公路浅埋软弱围岩隧道沉降变形开裂处治施工技术 [J]. 交通科技与管理, 2024, 05(07): 133-135.
- [2] 李兵兵. 高速公路浅埋软弱围岩隧道施工工艺 [J]. 四川建材, 2023, 49(06): 75-77.
- [3] 姜健, 徐华, 韩富庆, 等. 隧道浅埋段软弱围岩高压旋喷桩地表加固机理及现场试验方案设计 [J]. 公路, 2022, 67(08): 403-409.
- [4] 郑明波. 高速公路浅埋软弱围岩隧道施工技术的实施 [J]. 交通世界, 2021(10): 110-111.
- [5] 马晓文. 高速公路浅埋软弱围岩隧道施工技术 [J]. 工程技术研究, 2021, 06(01): 63-64.

数字化时代水利水电工程施工技术探究

孙胜先, 王 耀

(长江水利水电工程建设(武汉)有限责任公司, 湖北 武汉 430040)

摘 要 在数字化时代, 水利水电工程施工技术正经历深刻变革, BIM、数字孪生、物联网、人工智能等数字化技术深度融合, 推动工程施工向智能化、精细化、高效化方向转变。基于此, 本文聚焦数字化时代, 重点围绕水利水电工程施工展开研究, 首先论述数字化时代对水利水电工程施工的影响, 其次论述水利水电施工中的核心数字化技术, 最后通过理论分析和实践案例, 就数字化时代水利水电工程施工技术进行具体论述, 以为发挥数字化技术优势、不断革新水利水电工程施工技术、提高工程整体施工质量与效率、顺应数字化时代发展进程提供有效参考。

关键词 数字化时代; 水利水电工程; 土石坝; 隧道掘进

中图分类号: TV212

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.014

0 引言

水利水电工程是通过修建大坝、水电站、堤防等水工建筑物, 用于水资源综合开发、利用、调节及保护的工程体系, 具备防洪减灾、水资源调配、农业灌溉保障等核心功能, 在维护社会稳定发展中扮演着重要角色。随着数字化时代的到来, 以 BIM、物联网等为代表的数字化技术被广泛应用在水利水电工程施工中, 通过实时监控工程施工过程, 辅助施工智能决策, 逐步改进工程施工流程, 推动水利水电工程走向智能化发展道路。未来相关部门还需持续加强数字化技术与水利水电工程研究, 结合数字化时代特征科学选择水利水电施工技术, 保障工程整体施工质量, 助力水利事业的创新发展。

1 数字化时代对水利水电工程施工的影响

1.1 施工现场动态监控

在物联网 (IoT)、数字孪生技术的融合运用下, 通过部署传感器网络, 逐步实现对工程现场施工环境、设备状态及人员的动态监控, 及时调整施工方案, 指导水利水电工程顺利施工。例如: 在水利大坝的混凝土浇筑过程中, 通过埋设温度传感器、应变计等技术设施, 用于混凝土内部温升与应力变化的实时感知, 通过 5G 网络将数据传输至云端, 与 AI 算法结合精准预测裂缝风险, 指导冷却水管通水策略的及时调整^[1]。例如: 南水北调工程应用数字孪生技术构建“天空地水工”一体化监测技术, 用于水流动态的实时模拟, 结合实际情况及时优化调水方案, 确保工程安全运行; 在智能挖掘机等施工机械搭载北斗定位、姿态传感器,

用于挖掘参数、铲斗角度等参数, 通过系统平台与设计模型进行对比分析, 自动生成偏差报告, 防止超挖或欠挖。工地入口处部署人脸识别系统, 安全帽内置有 UWB 定位芯片, 辅助人员位置、作业轨迹的实时追踪, 动态监控水利水电施工现场, 及时纠正不合规行为。

1.2 数字建模推动三维孪生

水利水电工程规模庞大, 通过 BIM、GIS (地理信息系统) 的融合运用, 逐步构建覆盖工程设计、施工、运维的全生命周期数字模型, 实现传统水利水电施工从二维图纸到三维孪生的转变。在设计阶段, 根据 BIM 模型内部信息, 对管道碰撞、空间冲突等问题进行自动检测, 如某抽水蓄能站项目在申请该数字技术后, 减少设计变更 30%, 降低返工成本共计 200 万元。施工阶段以 BIM 模型为基础, 将其与进度计划相关联, 自动生成 4D 施工模拟图, 通过地理信息系统平台直观展示水利水电工程中各工序时间与空间的关系, 逐步优化施工组织设计。运维阶段在 BIM 技术和 GIS 系统的配合下, 构建水利水电数字管理平台, 实时映射大坝位移、渗流等关键数据, 与机器学习模型结合预测水利结构寿命, 为预防性维护提供可靠的依据。

2 水利水电工程中的核心数字化技术

2.1 人工智能技术

基于水利水电工程施工中的人工智能技术, 强调从智能决策、质量控制以及安全风险预警三个方面, 为水利水电施工提供技术便利, 具有广阔的技术应用前景。首先, 智能决策支持。AI 算法通过加强历史施工数据分析, 精准预测工程施工中可能出现的突发事

件,如工序交叉、进度延误风险等,结合预测结果自动调整施工计划^[2]。具体来讲,工程施工中借助机器学习模型,综合应用地质、天气等关键数据,不断优化施工方案与顺序,以更好地应对复杂多变的施工环境。其次,质量控制自动化。人工智能作为水利水电施工革新的重要驱动力量,在施工质量管控方面发挥着不可忽视的作用。在人工智能背景下,借助图像识别技术定期对混凝土浇筑、钢筋布置等环节质量问题进行技术检测,准确把握施工实际,其精度明显高于人工检查。如通过构建 AI 系统,可实现对混凝土表面裂缝的自动识别,系统分析裂缝成因,并自动生成修复建议。最后,安全风险预警。依托人工智能平台的视频监控、智能分析等功能,实时监控施工现场,精准识别现场危险行为并快速发出预警信号。

2.2 BIM 技术

BIM 技术通过整合水利水电工程信息,构建虚拟建筑信息模型,真实反映工程内外结构特点,使以往复杂的大坝、电站厂房等结构以直观的形式呈现出来,便于施工人员提前发现管道交叉等设计冲突问题,及时调整施工方案,减少后续变更问题。目前,上海院基于 Solidworks 逐步实现正向参数化设计,与 BIM 模型结合,输入参数后自动更新模型信息和图纸,在提高设计效率的同时,为水利水电施工提供科学指导^[3]。在水利水电施工过程中,结合现有的 BIM 建筑信息模型,综合考虑时间维度,动态化展示施工进度计划,结合现场情况优化资源配置。例如:在混凝土浇筑阶段,根据 BIM 模型设定程序,真实模拟不同施工顺序对工程工期带来的影响,通过模拟试验和对比分析,辅助施工现场制定最优方案。此外,BIM 模型在水利水电工程领域被视为“数字档案”,贯穿在工程设计、施工、运维等关键阶段,为工程施工和后期改建或运维提供数据支持。

2.3 GPS 技术

GPS 技术(全球定位系统)是三维导航定位系统的核心构成,具有强大的定位和导航能力,可以实现全天候的实时定位,凭借其高精度、快测速等优势被广泛应用在各类工程项目中,为水利水电施工带来诸多便利。在 GPS 系统中,主要分为地面监控、用户设备、空间星座三大结构部分,将其应用在水利水电工程施工现场,实时观测工程建设进度,全面搜集施工数据完善信息网,以促进基线精准测量及工程测绘,详细了解水利水电工程的真实情况,为后续项目施工提供可靠的技术保障。为确保技术应用效果,借助 GPS 卫星系统进行施工测绘时,建议将其高度始终保持在

15° 以上,及时清理周围障碍物,以便可以准确取得更多的卫星观测数据,辅助施工决策与方案调整。此外,为更好地满足水利水电工厂内的测绘精度要求,应用 GPS 系统时要求每个测绘时段的 2 次天线高度观测误差不得超出 3 mm,实际计算期间建议参照两次天线高度的平均值,按照相关技术规范严格控制同步环闭合差。

3 数字化时代水利水电工程施工技术探讨

3.1 土石坝施工

土石坝施工是水利水电工程的关键环节,其中涉及填筑、碾压、排水等多道复杂的施工工序。整个施工过程繁琐复杂,需要在数字化技术的辅助下,实时监控关键施工参数,准确把握坝体结构特点和现场地质情况,加强地基处理,结合现场环境变化动态调整施工方案,以保障土石坝施工质量与效率^[4]。在地基处理阶段,借助数字化技术实时监测现场地质变化,准确把握地质特征,及时清除坝基、岸坡周围松动的岩石、草皮、树根等杂物;对于软弱地基进行必要的加固处理,如采用换填法、夯实加固、灌浆等施工方法,保障地基承载力和稳定性满足后续施工标准。在碾压作业环节,在数字化技术的辅助下推行智能碾压操作,具体可将 GPS 定位装置、压力传感器等设施搭载在碾压设备上,以实现施工现场碾压次数、振动频率、行驶速度等关键参数的实时监测,真实反映碾压作业情况。随即将搜集信息向系统平台传递,自动生成碾压质量热力图,借助大数据分析技术判断各碾压环节质量是否达标,并明确标识出未达标的区域,指导后续返工调整。为避免土石坝施工后出现渗流问题,建议在大坝内部埋设渗压计,与数字孪生模型相结合,用于不同水位条件下渗流场变化的动态模拟,这样既可以提前找出潜在渗漏通道,及时调整施工方案,又能有效规避突发性的安全事件,指导排水系统优化。

3.2 隧洞掘进施工

隧洞掘进施工关系重大,其施工方法多样,且施工过程中往往面临着地质条件复杂、方向控制困难等现实问题。而数字化技术的合理应用,有效提升了隧洞掘进环节的施工进度与安全性,具体施工操作期间需根据地质条件、断面大小、工期要求等因素综合选择,针对围岩坚硬、完整且具有较大断面的隧洞,施工现场建议选取全断面开挖法,其施工特点为整个开挖断面一次钻孔爆破,开挖成型后根据现场地质情况全面推进。在这一掘进施工过程中,施工现场还需结合北斗定位与激光导向技术,全面推行北斗导航掘进作业,支持对掘进方向的毫米级控制,减少传统施工模式下

的超挖、掘进精度不准等问题^[5]。例如：某水利项目应用北斗导航掘进方式后，超挖量从最初的 15% 降低至 3%，既减轻了现场人员的作业压力，又有效节约混凝土用量 2 000 m³。需要注意的是，隧道掘进施工过程中存在许多不确定因素，如隧道塌方等，需要在地质雷达等技术的辅助下，实时探测施工区域前方的岩体情况，将所探测数据与 AI 算法相结合，对围岩稳定性进行综合评估，提前预测掘进施工中可能会出现突发事件，然后自动生成支护参数建议，进而减少人工判断误差。

3.3 砌体施工

基于水利水电工程的砌体施工，合理运用物联网、三维激光扫描等数字技术，逐步实现从材料加工到后续质量监测的全流程智能化管控，从源头保障砌体工程施工进度、效率和抗震性能。在砌体施工现场，利用物联网技术对每批石料、水泥等材料执行 RFID 标签管理，用于对材料采购、运输以及存储等各阶段情况的实时跟踪，一旦发现某类材料的强度不足或含泥量超标时，立即通知现场人员退还，避免质量隐患。施工过程中利用三维激光扫描仪，定期对砌体表面数据进行采集与汇总，生成点云模型，然后与前期 BIM 模型中的具体内容进行对比分析，用于其平整度偏差检测与纠正。例如：在水利水电的溢洪道工程中，若激光扫描发现砌体局部凸出超标（达到 12 mm 时），施工现场立刻进行返工处理，及时改进不合格之处，确保可以满足 ≤ 8 mm 的规范要求。为保障砌体施工质量达标，施工现场利用探针式传感器插入砌体缝隙（插入深度应 ≤ 15 mm），根据系统反馈数据来判定砂浆饱满度是否达到相关标准，以保障砌体结构整体稳定可靠。

3.4 混凝土施工

水利水电工程中多采用大体积混凝土，对施工技术要求严格，且混凝土本身往往会因温度变化而出现裂缝问题，数字化技术通过智能装备和数据分析等措施，对混凝土施工过程进行全方位监管，最终实现了温度场的精准调控。在混凝土搅拌阶段，考虑到其原料性能波动大且组成复杂等问题，合理运用数字化技术构建水泥基拌合物流变学模型，研发智能化新拌混凝土工作性监控专家系统，用于对搅拌站及施工现场拌合物质量的实时监控，这样既能保证混凝土拌合质量，又能做到对其从生产到运输的品质一致可控。而在混凝土浇筑阶段，依托物联网监控技术，在浇筑现场部署温度传感器、应变力计等基础设施，方便现场人员对混凝土内部应力与温度变化的实时掌握。例如：在滨海枢纽项目中，将 700 余个智能传感器布设在施

工现场，实时了解混凝土浇筑进度和养护状态，显著降低开裂风险，降低养护成本约 20%。为减少水利混凝土裂缝发生率，施工现场应利用无人机搭载红外热成像仪，定期对混凝土表面进行扫描，了解混凝土内外温度变化情况，精准识别温度异常部位，与建筑数字模型相结合来定位潜在裂缝问题，及时修补保障混凝土结构安全。

3.5 施工安全监控

水利水电工程规模庞大，且所处环境复杂多变，具有较高的安全风险。针对此类情况，施工单位要借助数字化技术，建立健全的水利施工监控体系，及时发现并处理潜在安全风险。对于深基坑、高边坡等危险区域，建议部署智能摄像头，结合人工智能技术的行为识别算法，严格监测施工现场变化，判断现场人员是否存在靠近危险边缘、未系安全带等危险行为，一旦发现将快速发送警报告知管理人员。必要情况下，以 BIM 建筑模型为基础构建性虚拟工地，带领现场人员模拟真实的坍塌、火灾等事故场景，提升应急疏散效率和实战能力，确保水利水电施工顺利进行。

4 结束语

社会在发展，时代在进步，数字化时代的到来推进了社会各行业的革新，为水利水电工程施工带来诸多便利。在数字化时代背景下，水利施工单位应深刻意识到数字化对工程施工带来的积极影响，结合水利水电工程特点，科学选用 BIM、人工智能等数字化技术，不断完善土石坝施工、混凝土施工、隧道掘进施工等施工技术，从多维度出发提高水利水电施工技术水平，为水利事业的健康持续发展助力。

参考文献：

- [1] 梅雄. 数字化时代水利水电工程施工技术的优化分析: 评《水利水电工程 BIM 数字化应用》[J]. 人民黄河, 2024, 46(06): 164.
- [2] 陆宇杰. 现代数字技术在水利工程施工管理中的应用探讨 [J]. 工程建设与设计, 2021(24): 216-218.
- [3] 邓永泰, 黄伟. 浅析水利水电工程施工安全技术及管理 [J]. 长江技术经济, 2024, 08(06): 126-130.
- [4] 历明涛. 水利水电工程施工现场环境保护和污染控制技术研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 05(23): 32-34, 37.
- [5] 邢琴, 周强, 蔡文华. 水利工程施工技术关键点解析 [C]//《中国建筑金属结构》杂志社有限公司. 2024 新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集 (三). 南京明辉建设有限公司, 江苏天赐建设有限公司, 2024.

光伏电站故障诊断与健康评估方法研究

赵强平

(冀衡运检新能源(河北)有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘 要 光伏电站是新能源发展的重要保障, 它的稳定运行和发电效率关系到整个能源系统的效能。本文就光伏电站的运行特点, 系统研究了故障诊断和健康评估的核心方法, 并且对信号特征分析、模型创建、智能算法应用三个部分进行了详细的阐述, 在此基础上提出了多层级诊断与评价体系。研究内容包括健康指标体系构建、退化建模以及基于数据驱动的评估方法, 以期对光伏电站的状态监控、运维决策及寿命预测有所裨益。

关键词 光伏电站; 故障诊断; 健康评估; 智能算法

中图分类号: TM615

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.015

0 引言

伴随全球能源结构的转型以及“双碳”目标推进, 光伏电站在新能源体系当中占据极为关键的地位。但是光伏电站的运行环境比较复杂, 设备长期处于高温、风沙、湿度变化等复杂环境因素的影响下, 导致组件衰减、逆变器故障、系统性能降低等问题经常发生。高效的故障诊断和健康评定技术已经成为保证光伏电站安全, 稳定并高效运转的主要手段, 经过融合多种数据源信息, 并采用智能算法形成模型以及做出状态预测分析后, 对设备运行状况加以识别判定并对其使用寿命予以评估, 为电站的运维决策提供参考, 推进光伏发电向着智能化和可持续方向发展。

1 光伏电站系统构成和故障特征分析

1.1 光伏电站系统构成

光伏电站主要包括光伏组件、汇流装置、逆变系统、升压及输电设备和监控与运维系统等, 如图 1 所示。

光伏组件是光伏发电站的关键部分, 它的质量好坏直接影响发电效果, 并且会受到光强、气温变化以及外界污染物遮挡等自然条件的影响。汇流装置把多个组件串并联后的电流收集起来, 然后传输。需要有良好的电气匹配和过流保护特性。逆变器将组件产生的直流电转换成交流电, 其工作稳定性和转换效率决定了发电站的输出品质。升压设备把电能输进电网, 要有较强的电压调节能力和绝缘能力^[1]。监控系统针对电站的运行参数展开及时收集和数据分析, 做到对功率、温度、电压、电流这些关键指标的监测, 支撑智能运维和状态评判。各个部分相互联系, 任何一个环节性能下降都会造成整体的效率损失以及安全问题, 所以从系统的角度出发去优化以及协调管理就成为光伏电站的研究方向。

1.2 光伏电站故障特征分析

光伏电站在长时间运行过程中会产生各类故障, 其表现出的特性也存在复杂性和时变性。在光伏组件

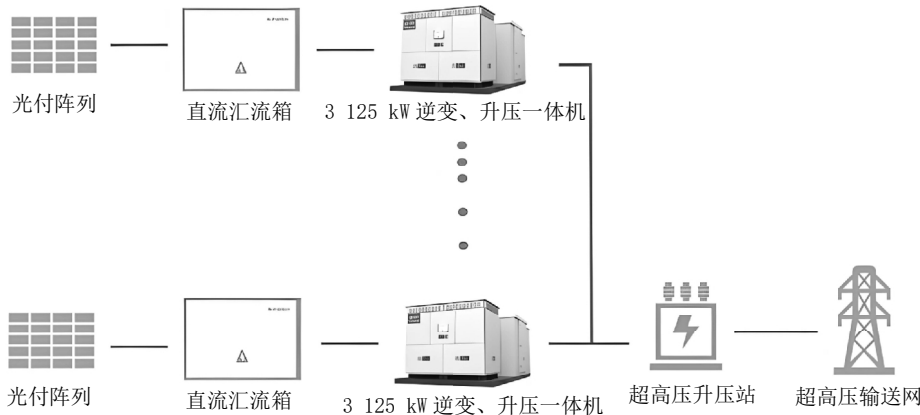


图 1 光伏电站系统

上常见的故障有隐裂、热斑现象、焊点脱落、封装老化以及光衰减等。这些故障的发生会导致输出功率降低、电压波动以及局部温升异常等情况出现。

逆变器故障包含功率模块损坏、控制单元失效、直流侧电压不平衡等现象,并且伴随着频率漂移和谐波畸变^[2]。电缆和汇流装置会发生接触电阻变大、绝缘老化、连接松动等现象,造成能量传输的损失或者安全风险。外部环境的因素如灰尘、鸟粪以及气候的变化会对系统输出的稳定性造成明显的影响。故障的特征一般反映在电压、电流、功率、温度等参数上的动态波动中,体现出非线性、耦合性和随机性特点,要通过多维监控数据和智能算法来加以辨识和提取,达到准确判断出电站工作状况的目的,并提前发出警报。

除了上述提到的组件、逆变器、电缆和汇流装置等故障,设备老化也是一个重要因素,长期运行下的逐渐磨损和环境影响可能导致性能下降。例如:电池板表面的尘土或污垢堆积,可能降低光伏组件的光照吸收效率,导致功率输出下降。因此,故障预测和监控尤其重要,能在早期发现问题并进行及时处理,避免大范围的停机或设备损坏,提高系统的可靠性和运行效率。

2 光伏电站故障诊断方法

2.1 基于信号特征的故障诊断方法

基于信号特征的故障诊断方法属于光伏电站运行监测的传统技术路线,依靠对电压、电流、功率、频率、温度等信号的时域和频域特性进行分析,找出设备运行状态出现异常的情况^[3]。其主要方法是提取出能够反映系统故障的指标,并对这些指标的变化情况利用数学模型来加以判定。

针对光伏组件而言,可以通过输出电流波形、I-V 曲线以及功率曲线的变动来判断是否存在隐裂、热斑或者遮挡等状况。在逆变器方面,则可凭借输出电流畸变率、谐波分布以及直流母线电压波动特征识别出功率模块或控制单元出现故障的情形。

信号处理常用的方法有快速傅里叶变换(FFT)、小波包分解(WPD)、经验模态分解(EMD)等,它们用来把复杂的信号拆解出来,找到里面包含故障的那些特征成分。测量技术发展之后,多传感器融合给特征提取带来了更高的分辨率和准确度,使系统能在较早时察觉到细微的故障。该类方法结构清晰、可解释性好,适合电站日常运行监测和历史数据的分析,在复杂工况下对噪声干扰比较敏感,对于特征选择和阈值设置的要求比较高,因此在智能化光伏系统中常被

用作基础层的诊断方法,与后面的算法模型结合起来提高识别准确性。

2.2 基于模型的故障诊断方法

基于模型的故障诊断方法是以光伏电站的物理或数学模型作为基础,在建立起系统的输入输出关系后,根据实际运行数据以及模型预测值之间的偏差来判断系统当前是否存在故障^[4]。它的理论依据为系统建模和残差分析,在对残差大小、方向以及统计特性进行分析的基础上定位出故障位置,并判断故障类型。

光伏组件一般用单二极管模型或者改进的等效电路模型来表示不同的光照、温度条件下组件的电性能。逆变器模型是根据功率电子控制原理和 PWM 调制特性建立的,用于监测功率变换过程中的故障。典型办法就是卡尔曼滤波法、粒子滤波法、滑模观测器以及基于状态空间的故障估计技术等,这类方法能够将系统内部状态转化为可观测状态,在理论上具有较高的诊断准确率和实时性。其关键是模型精度和参数识别能力,精度高的模型可以很好地将外部扰动与设备故障区分开来,减少误判。

随着计算能力的提高以及数据获取的方便性,模型自适应更新成为一种趋势。当环境条件发生变化时,它能自动调整参数,使诊断模型具有有效性和稳定性,适用于复杂电站系统的准确故障识别。

2.3 基于智能算法的故障诊断方法

基于智能算法的故障诊断依靠人工智能、大数据等技术,使用光伏电站在多维运行中实现自主学习及适应性识别状态。这种办法脱离了对准确物理模型的依赖,依靠算法对数据中潜藏规律的挖掘来实现复杂故障的辨识与归类。

在实际运用当中用到较多的机器学习方法有 SVM、随机森林、K 近邻法以及决策树等,用来建立多类故障分类模型,并且可以有不错的预测能力和可解释性。随着深度学习技术的发展,卷积神经网络(CNN)、长短期记忆网络(LSTM)及自注意力机制已经被广泛应用于光伏故障诊断中,能够在高维信号中自动提取多层次特征表示,并完成故障特征高精度模型的构建。对有明显时序特征的数据,LSTM 可以捕捉到时间上的相关性,有效发现早期的衰退趋势;CNN 在空间特征提取上有着良好的表现,适合用于元件阵列图或者热成像检测中。近几年融合学习多模态诊断,融合电气信号、环境数据和红外图像,形成端到端智能诊断框架,改进对复杂故障的识别能力。此方法具有较高的鲁棒性及自动化水平,在大规模光伏电站智能监测与运维决策场景中很合适。

3 光伏电站健康评估方法

3.1 基于健康指标体系的评估方法

光伏电站健康评估的重点是创建一套科学合理健康的评价标准,以描述整个系统的工作状况。评价标准应该包含组件性能、逆变系统稳定性、环境适应能力以及能量转换效果等方面^[5]。首先应该监测光伏组件输出功率保持率、填充因子、温度系数和 I-V 曲线形态等主要数据,并利用统计学方法来判定其衰退的趋势。逆变器健康状况可以通过电能质量指标、谐波畸变率、功率因数、运行温度稳定性来进行判断,判定电力电子器件的老化情况。环境指标应该考虑辐照强度、温度、湿度、风速和灰尘沉积等因素对外界设备性能的影响,用加权因子模型量化外界条件对系统健康状况的影响效果。确立了指标体系之后就可以使用层次分析法或者模糊综合评价法来计算各个指标的权重,然后构建出综合健康评分模型。数据采集阶段要配备高精度传感器以及远程监测装置,完成重要信息的即时传送与动态刷新。为了使评价结果具有较高的可信度,在对数据异常情况进行识别、纠正的同时,也要采取相应的措施来减少噪声干扰引起的误差。多维度的指标相融合并进行相应的权重调整之后,形成一个综合健康的指数,用来反映光伏发电站的当前工作状况,并作为后续维护和决策时的参考。

3.2 基于退化建模的健康评估方法

退化建模健康评价方法旨在刻画光伏电站关键组件的性能衰减状况,以实现了对设备寿命的估算和运行可靠性评估。

首先,建立光伏组件和逆变器退化模型,光伏组件退化可以采用指数衰减模型、对数线性模型以及考虑物理机理的热失效模型描述功率输出随时间变化的趋势;光伏逆变器退化可采用可靠性统计模型或者状态空间模型等来反映功率半导体器件老化、焊点疲劳和热应力积累效应。其次,在建模时要清除历史运行数据中所含的环境扰动造成的非真实衰退变化,并对其标准化及特征提取。为了提高预测精度,可以使用贝叶斯推断、最小二乘估计来对参数进行识别,并通过滑动窗口的方法不断更新模型的参数,使模型能够适应环境的变化。针对多维特征退化过程可以使用多变量回归或者主成分分析来提取主要退化特征,在寿命预测阶段,可以利用退化模型求解出健康度曲线和剩余使用寿命(RUL),并且可以用置信区间的办法来量化预测的不确定度。为了提高稳定性,可以将退化模型与实时监测数据融合起来,利用加权融合算法对退化模型的输出进行修正,实现持续的健康评估

和趋势预测。这种做法能为光伏电站制定预防性维修计划,优化运营维护时段提供数据支持。

3.3 基于数据驱动的健康评估方法

数据驱动健康评估方法借助大量运行数据与智能算法,挖掘出多维数据特征,对光伏电站的健康状况进行动态评价。构建全站实时数据采集与管理平台,集成组件、逆变器、气象、输电等各环节的监测数据,建立高维特征数据库。对数据进行预处理,如清洗、去噪、标准化和修补缺失值等步骤,在这一阶段之后的模型输入需要稳定。在健康建模的过程中,可以利用机器学习的方法来进行特征选择以及健康状态划分的工作。随机森林被用来辨别关键的影响因子部分,而支持向量回归则是构建健康指数预测模型的一种方式。利用深度学习技术可以获取复杂的非线性特性,卷积神经网络适用于光伏阵列红外图像异常情况的判别,长短期记忆网络具有获得运行数据间时序相关性的能力,实现健康状况的实时判断。模型训练应基于多时段、多工况数据集,通过交叉验证、模型集成以提高泛化性能,用特征重要性或 SHAP 值的方法来增加可解释性,揭示出不同因素对健康状态的影响程度。用健康指数或风险等级来表达系统的状况,并设定分级预警,完成自动预警和状态趋势跟踪。融合边缘计算、云端分析,采用分布式评估架构,可对大规模光伏电站实行智能健康管理和决策优化。

4 结束语

光伏电站的故障诊断与健康评估是实现智能化运维、高效发电的重要环节,未来的相关研究应该在高维数据融合、模型自适应更新及算法可解释性等方面进一步深入,使评估方法向着实时化、自学习方向发展。随着人工智能、物联网和数字孪生技术不断发展,光伏电站的运作管理会越来越精确、可靠且高效,为清洁能源系统持续发展提供强有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 张泽成,张宗旭,王家坤,等.光伏电站智慧型监控管理系统的探索[J].自动化博览,2024,41(08):76-81.
- [2] 隋晓东.光伏电站电气设备运行维护检修方法创新探索[J].电气时代,2024(08):63-65.
- [3] 张锐,马铭遥,马文婷,等.基于数据驱动的山地电站光伏组串融合模型[J].太阳能学报,2024,45(07):517-524.
- [4] 郭峰,郑主平,杨维湘,等.光伏电站发电支路故障点快速定位技术研究[J].价值工程,2024,43(21):115-118.
- [5] 陈翔宇.云计算在分布式光伏电站运营中的应用研究[J].电气技术与经济,2024(07):16-18.

电力工程施工中的接地技术及故障排查探讨

叶国军

(惠州市惠电综合服务有限公司, 广东 惠州 516001)

摘 要 电力工程施工现场的接地系统承担泄放故障电流、稳定参考电位、抑制电磁干扰、保障人身设备安全等核心职能, 策略层面的统筹必须贯穿规划及施工全周期, 方可在多场景保持性能不衰减。本文围绕接地电阻、连接可靠性、均匀性及稳定性四个维度, 提出基于场地电性参数反演的前期勘测路径, 以期为项目策划、运维巡检提供参考。

关键词 电力工程; 接地技术; 故障排查; 接地电阻; 等电位

中图分类号: TM726

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.016

0 引言

在新能源并网比例持续提升、短路容量不断增长、站内电力电子设备密度显著提高的大背景下, 接地系统不再被视作单纯的配套构筑物, 而是承担多目标、多约束的关键基础设施, 其性能直接影响一次设备绝缘配合水平或二次系统抗干扰能力。传统靠经验选型、粗略布置、一次性验收的做法, 难以应对高频扰动、脉冲冲击等复杂因素导致的性能漂移问题, 亦难以在全寿期内维持既定指标。因此, 有必要在策略层面对接地系统开展系统化研究, 构建从场地勘测、施工管控、在线监测到故障闭环处置的完整链条, 同时通过量化指标驱动设计施工运维一体化优化, 以实现风险的前置消减及对异常的快速响应。

1 电力系统安全运行的核心需求

电力系统在发、输、变、配、用各环节依赖稳定接地来构建统一电位参考, 只有在接地网络持续保持低阻、低感、低接触电位抬升三项特征时, 保护动作整定才具备足够选择性, 自动化装置才可在强干扰环境下可靠通信, 人员可接触外露导电部分才不至于形成危险跨步电压^[1]。随着高比例电力电子装置注入, 谐波电流、共模分量、快速脉冲边沿进入站内母线, 若缺乏低阻低感路径, 噪声电流将经控制回路或屏蔽网反向耦合, 诱发误动或拒动。在雷暴强度上升、极端气象频发的形势下, 站区土壤含水率季节波动明显, 接触电压限值核算需要引入温度湿度因子, 才能保证在干季高温低湿极端工况仍满足人身安全阈值^[2]。同时, 城网密集走廊内跨越共地体数量增加, 地电位反击风险上升, 跨接导体连续性、接头耐久性等成为事故预防重点。接地系统处于半埋设状态, 隐蔽性极强,

必须通过周期性电气参数测量、目标化开挖抽检、在线传感辅助判断等手段获取健康状态, 再将数据纳入台账模型, 利用阈值告警及趋势分析实现预知维护。因此, 安全运行的核心需求可概括为三类目标, 即人身触电风险控制、一次二次设备绝缘保护、对外雷电及内部故障电流快速泄放, 同时必须在施工阶段落实质量可追溯, 在运维阶段落实状态可量化且形成端到端闭环。

2 接地系统的关键性能指标

2.1 接地电阻

接地电阻决定故障电流分流能力及电位抬升水平, 设计阶段应基于实测土壤电阻率梯度建立分层模型, 结合目标电阻值采用反演求解确定地极密度、导体截面, 必要时引入化学降阻材料或深井接地体以缩短收敛路径, 但须评估长期溶出影响及补维护成本^[3]。施工阶段需要保证埋深一致、回填介质均匀、焊接或压接处阻值不劣化, 回填前开展分段电阻校核可及早发现虚接漏接, 投运前通过三极法或改进电极布置完成全网测量, 雨季前后各取一次数据建立季节曲线, 长期观察可识别土壤含水率变化导致的波动, 再结合短时冲击试验验证极端工况表现。在城市受限空间, 可通过联合利用基础钢筋、桩基金属构件实现等效扩展, 同时设置绝缘节隔断杂散电流回路, 避免引入外部腐蚀源, 并在满足规范上限的同时留有裕度以适应老化腐蚀造成的缓慢上升。

2.2 连接可靠性

接地网络包含接地体、引下线、设备外壳跨接等多层连接点, 任何一处失效都可能导致电流分配异常或电位不均, 进而放大触电风险或噪声耦合效应。可靠性

构建首先依赖材料及工艺,裸铜、镀铜钢、热镀锌钢需匹配土壤环境,盐雾、酸碱、杂散电流暴露条件不同,选材策略亦应不同,连接方式在焊接、热熔、冷压之间需要根据截面及现场可达性择优,紧固件扭矩采用分级复核制度同时防松措施在振动源附近必须到位。依赖可追溯质量控制,建议编制等电位连接清单,逐点拍照留痕,记录压接模号、焊剂批次、作业人资质,再在隐蔽前完成阻值抽测,以数据化方式固化工艺一致性^[4]。

2.3 稳定性

稳定性是指指标随时间、气候、载流冲击保持可控波动,决定触电电位分布是否平滑、二次系统抗干扰是否稳健^[5]。需在平面布局阶段通过仿真评估支路电流密度,适当增设环形干线或等距辐射支线以改善边界区域电位梯度,设备集中区引下线宜就近汇入,避免长距离单线回流形成热点。稳定性依赖回填介质抗冲刷能力、导体防腐体系耐久性、连接工艺抗热循环能力,可通过在关键节点采用双路径并联、在易积水地段设置排水措施、在腐蚀性强土壤采用复合包覆材料来提升冗余^[6]。运维层面引入代表性测点,建立季节曲线及事件曲线,利用趋势偏离阈值触发现场复核,再根据原因采取局部增设接地极、替换劣化导体等修复动作。

3 典型故障类型及成因分析

3.1 接地电阻超标

接地电阻上升常以保护装置整定裕度被侵蚀、接地电位抬升明显、故障后复位缓慢等迹象出现,其根因多集中在场地电性变化、导体有效截面衰减、连接面状态劣化三类情形。干季长期少雨导致含水率下降,分层土壤在浅层形成高电阻外壳,因此深层导电通道被削弱,原本依赖表层回填介质的地极效果迅速折损。埋设多年的扁钢或圆钢在酸性土壤中发生点蚀,等效长度虽未变化,局部窄化却显著增加纵向阻抗,冲击电流通过时易在薄弱处形成过热印迹,同时连接点若存在压接未到位、焊渣未清理、紧固件防松缺失,微动氧化将以指数方式扩大接触电阻,外加短路故障热循环并且劣化速度进一步加快。施工偏差亦会放大问题,埋深不足导致季节冻胀影响、接地极间距未达设计值导致相互耦合,降阻效果被抵消。

3.2 接触电压 / 跨步电压异常

触电风险指标异常多见于设备集中区、走廊边界区两类位置,现象往往表现为同一短路电流下人体等效路径电压超过限值,或在雷暴后散点测值离散度增

大。造成异常的主因在于电位分布不均,既可能源自地网几何布局导致边缘梯度过陡,也可能源自表面覆盖层失效使人体接触阻抗被低估,若碎石层厚度不足或颗粒级配退化,鞋底等效电阻下降,限值校核需要重新引入接触条件修正。围栏、管廊支架、排水沟金属构件若未按等电位要求汇接,界面处将出现电位突变,人脚跨越时易形成高跨步差,因二次回路屏蔽未就近汇流杂散高频电流会沿意外路径扩散,在弱电设备操作面抬高局部电位。此外,外部系统接地体通过金属管线或基桩形成隐性耦合,故障电流经旁路进入站区,导致设计边界条件被破坏,校核模型失配。

3.3 接地失效

接地失效可分为“功能性失效”及“结构性失效”两个层面,前者指指标仍可测得但已无法满足泄流、限压目标,后者指导体连续性中断或大比例脱网。常见诱因多为市政开挖切断联络带,或新增管线占位等外力破坏,长期腐蚀同样致命,杂散直流叠加氯盐侵蚀会在土壤电位梯度较大的交界面产生阳极溶解,细小裂纹在冲击负荷作用下扩展为断裂。深井接地体若回填材料干缩,电极与围岩脱贴导致等效接触面积骤减,地极近区电场畸变严重。连接件失稳亦会触发级联问题,关键汇点松脱将改变全网电流分配,边缘支路被迫承载更大电流,进一步加快老化。

3.4 外部环境诱因

外界因素对接地系统影响呈长期累积态势,首先气候周期会改变土壤孔隙含水状态,干热季节电阻率抬升,雨季则因饱和渗透形成短时降低,设计裕度不足,指标将在年内呈现波峰波谷交替。冻土条件下表层导电性急剧下降,浅埋导体几乎失效,电流被迫下潜,且沿海或盐碱地带盐雾侵袭加剧腐蚀,裸露过渡区最为敏感,腐蚀速率将远高于内陆站点。城市轨道交通或阴极保护系统引入杂散直流,土壤电位呈定向偏移,地网在某些位置长期处于阳极状态,腐蚀风险倍增。周边建设活动亦会重塑边界条件,新建桩基与地网耦合、地下管廊形成大面积金属回路,外部故障电流可通过隐性路径介入,雷暴强度上升带来更高能量的冲击,材料疲劳加速。

4 电力工程施工中接地关键技术及故障排查优化策略

4.1 接地装置设计的精细化改进

设计阶段应以“可测、可调、可扩展”为目标,通过多深度、多方位电阻率采样建立分层等值模型,

再把目标接地电阻、触电限值两类约束纳入同一优化函数,采用迭代法反算地极密度及截面。站区平面宜设置主环及若干辐射支线,关键建筑周边形成紧凑闭合回路,边界区以加密布置平滑电位梯度,深井电极选用耐腐蚀材料并配套惰性回填,孔壁采用抗干缩工艺,井口设置检修口便于后续复测。考虑到环境不确定性,设计裕度按极端干燥季工况计算,再在雷暴条件下检核冲击电流密度,必要时对连接点配置双路并联以提高抗热循环能力,且对围栏、门禁、桥架等金属构件制定等电位汇接清单,明确引下线路径及汇入位置,减少孤立导体。在电缆系统方面,屏蔽层接地方式采用单端或交替策略由仿真验证后确定,全网预留分段测试点,敷设在线监测传感器通道,为运维期数据化管理打好基础。

4.2 施工工艺的标准化控制

施工质量决定地网初始状态,标准化控制需要从材料、工法、检验三条主线同步推进。材料进场执行批次抽检,导体化学成分、镀层厚度、降阻剂配方均需具有可追溯证据,沟槽成形保持设计埋深并控制回填密实度,回填介质含水率在封闭前复核确保导电性稳定。连接方式按截面选用压接或热熔,压接模号、压痕外观、收口长度逐项验收,热熔部位清渣打磨并加防腐包覆,紧固件施加规定扭矩并设置防松件。深井钻孔、下极、回填按工序见证,隐蔽前开展分段电阻测试及关键节点外观记录,测量环节采用标准布极距离,必要时设置不同方位复测以排除互扰。在靠近振动源或热源位置增设软连接或补强措施,降低热胀冷缩应力,完工验收除常规电气指标外,还应对触电限值进行现场校核,并出具季节性复测计划。

4.3 故障排查的分级、常态化机制

排查体系可划分为基础巡检、重点核查、事件响应三个等级,基础巡检面向全网以周期性低负荷测量为主,内容包含分段电阻、代表性接触电压、围栏连续性,频次依据站点风险画像动态调整。其中重点核查针对高腐蚀区、强耦合区两类敏感区域,采用扩大抽检比例及加密监测点方式,结合红外测温、动态阻抗跟踪识别早期劣化。事件响应用于短路故障、雷暴强袭、外部施工等触发场景,要求在限定时窗内完成临时复测及风险评估,必要时采取临时跨接保持连续性,再制定永久恢复方案。机制运行依赖数字台账,所有测值、影像等形成可追溯链路,通过阈值告警触发工单,再由闭环审核确认整改成效。人员层面设置持证上岗、能力复训制度,确保测试方法、数据判读

保持一致,跨部门协同方面建立周界信息共享渠道,外部施工告知、轨交运维联络纳入固定流程。

4.4 多技术融合的故障定位方法

单一测试往往难以在复杂土层与交错金属体环境中快速定位缺陷,多技术融合可显著缩短停电窗口并提高判断准确度。其中,基础直流电阻测试用于粗粒度筛查异常支路,随后施加低压脉冲开展时域反射,定位断点或高阻连接的距离。在需要识别掩埋深度及回填介质状态时,引入电阻率层析成像,对电流密度分布进行可视化,异常体将在成像上呈现高低阻对比。高频干扰或杂散电流问题,可用可调频注入法叠加小信号,配合磁场传感器进行路径追踪快速判断非预期环路。热成像擅长识别接触面局部发热,适合在带电状态下开展非接触巡检,无人机搭载磁通门或红外载荷可在大型站区完成快速扫描,结合地面测点完成互证,数据层面建立测量信息融合算法,产出置信度评分及处置优先级列表,通过组合拳策略定位将从“经验驱动”转向“数据驱动”,避免反复开挖造成的二次损伤。

5 结束语

接地系统作为电力工程的隐蔽基础设施,其价值体现在事故未发生之前,其风险却在环境波动、负荷变化、材料老化的长期作用中悄然累积。本文依据故障类型梳理成因脉络,提出从设计、施工、排查、定位四个维度协同优化的策略框架,强调以数据化台账统摄全寿命管理,以多源测量支撑快速决策,故障处置将从被动抢修转为主动预防,成本与可靠性之间将获得更稳定的平衡。

参考文献:

- [1] 樊卡,刘继文,卢俊甫.电力系统接地故障选线选段研判中的全数据判定技术应用分析[J].中国设备工程,2025(15):206-208.
- [2] 张弘.电力设备中的电气设备接地技术探析[J].电力设备管理,2025(14):53-55.
- [3] 张紫薇.电力系统中发电厂直流系统接地故障分析与处理[J].电气应用,2025,44(07):90-95.
- [4] 陶建军.电力工程施工现场临时用电及其安全技术应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(19):4-6.
- [5] 李耀坤.电力系统单相接地故障特性及电阻接地保护技术分析[J].电力设备管理,2025(09):32-34.
- [6] 陈功.电力工程中的接地施工控制技术分析[J].集成电路应用,2022,39(12):232-233.

电力电气设备安装调试与运行维护技术研究

何志标

(珠海市恒源电力建设有限公司, 广东 珠海 519000)

摘 要 电力电气设备是电力系统的核心组成部分, 其安装调试质量与运行维护水平直接关系到电力供应的安全性和稳定性。随着智能电网建设的深入推进, 电气设备呈现出技术复杂化、功能集成化的发展趋势, 对安装调试和运行维护提出了更高要求。当前在设备安装调试过程中存在技术规范执行不到位、故障诊断精准度不足等问题, 影响了设备的可靠运行。本文分析了电力电气设备安装调试与运行维护技术的重要意义, 剖析了面临的技术挑战, 并从完善技术规范、构建智能化运维体系、建立预测性维护机制等方面提出优化策略, 以期为提升电力系统运行质量提供参考。

关键词 电力电气设备; 安装调试; 运行维护; 故障诊断; 预测性维护

中图分类号: TM505

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.017

0 引言

电力工业是国民经济的基础产业, 电力电气设备的安全稳定运行关系到经济社会发展全局。随着电力负荷持续增长和用电结构不断优化, 电气设备的技术含量和智能化程度显著提升。然而, 设备安装调试环节的质量管控、运行维护过程的技术保障仍存在薄弱环节, 部分设备因安装调试不规范导致性能参数偏离设计要求, 维护策略滞后造成故障频发, 影响电力系统的供电可靠性。在智能电网建设背景下, 亟须创新安装调试技术手段, 优化运行维护管理模式, 提升设备全寿命周期管理水平。

1 电力电气设备安装调试与运行维护技术的重要性

1.1 电力系统安全、稳定运行的基础保障要求

电力系统稳定运行依赖于设备可靠运行, 设备安装调试质量直接影响设备是否能够达到设计性能指标,

影响电力系统的安全裕度。变压器油温、绕组的温升等参数如果在安装调试阶段没有调整好, 就会埋下设备过热、绝缘老化等安全隐患。断路器的分合闸时间、接触电阻等参数偏差会导致开断故障电流的时机不恰当, 危及电网安全。所以, 严格遵循技术规范实施安装调试, 凭借精密测量和不断校验来保证各项参数合格, 是坚守电力安全底线的关键环节之一^[1]。

同时, 运行维护工作贯穿于设备的整个生命周期中, 在设备日常的巡视与状态监测过程中能够及早发现设备的隐患, 预防性的试验能够及时了解设备的工作状态, 从而能够在故障发生的萌芽阶段就将其予以排除(见图1)。

实践表明, 科学的运行维护能使设备故障率降低30%以上, 有效地提高电力系统运行的安全性和稳定性, 为经济社会发展提供了有力的电力保障。

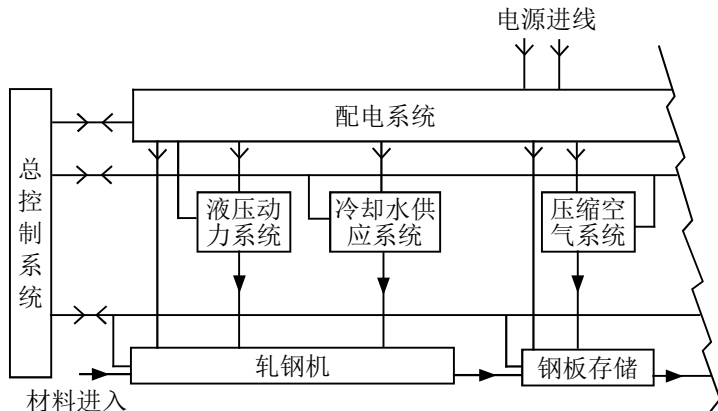


图1 电气控制系统安装概图

1.2 提高设备运转效率、降低运营成本的关键手段

电气设备是否处于良好的运行状态关系到企业的经济效益,良好的安装调试可以使设备在最理想的工况下运行,减少能量的损失,提高系统的运行效率。如变压器空载损耗、负载损耗占电网总损耗的 40% 以上,安装调试改进铁心叠装工艺、调整分接开关位置,可以使变压器损耗减少 5% ~ 8%。

运行维护环节运用红外测温、局部放电检测这些先进手段,可以准确找出设备存在异常发热、绝缘性能变差之类的问题,防止设备带着问题工作影响到它的能效。

科学的维护策略还可以延长设备的使用寿命,减少设备的更换频率和维修成本,传统的定期维护模式存在着“过度维护”和“维护不足”并存的现状。而基于状态的维护与预测性维护可按照设备的实际运行状况去制定维护计划,从而在保证可靠性的情况下尽量减少不必要的维护活动。

1.3 适应智能电网发展、推动技术创新的必然需要

智能电网创建促使电气设备出现了信息化、互动化的新需求,智能变电站采用新型设备如电子式互感器、智能终端等,传统安装调试方法不能满足要求。电子式互感器要有数字接口检测,延时校正等专门调试,智能终端则要完成通信协议设置,逻辑回路核实等繁杂工作,技术人员的水准也受到极大考验。在维护运行方面,智能电网注重设备的实时状态感测和风险预知,需要部署诸多的传感器及观测装置,形成设备状况评价模型和故障预估算法^[2]。运维工作人员不能只了解传统技术,还要能够使用一些大数据、人工智能等内容。同时,新能源并网设备、储能装置等新电力设施大量接入给安装调试及运行维护带来了前所未有的困难。只有不断地更新技术途径,探寻智能化运维模式,才能符合智能电网发展要求,推动电力领域革新,从而对新型电力系统创建起到强有力的技术辅助作用(见图2)。

2 电力电气设备安装调试与运行维护面临的技术挑战

2.1 设备技术复杂化,安装调试难度增大

电力技术发展速度不断加快,使电气设备集中且智能,其内部结构更加繁杂,安装调试所涉及的技术难点也变多。以智能变电站为例,传统的变电站中二次设备比较独立,其安装调试的过程十分清晰,而在智能变电站中采取过程层、间隔层和站控层等网络架构,设备彼此之间经由光纤以及以太网实现联通,要执行网络拓扑配置、通信协议调试,还要进行虚拟回路测试等很多繁杂的工作。通信协议存在许多数据对象与属性设置,只要参数出现差错就会造成保护装置误动。

2.2 运行环境多样,维护标准不统一

电力电气设备所处的地理位置以及气候环境均有所不同,同时设备所处的环境也包括了温度、湿度等多种环境因素,因此对运行维护工作造成了极大的困扰。沿海地区的设备长期处于高盐雾环境中,绝缘子表面容易积聚盐分,形成导电通路引发闪络事故;高海拔地区空气稀薄,设备的绝缘强度和散热能力减弱,要降低容量运行或者做特殊保护措施;北方地区冬天严寒,油浸式变压器油温太低影响设备性能,要增加加热装置;南方地区高温高湿,设备容易产生凝露和霉变。

2.3 故障诊断准确度差,预防性维护效果就会变差

准确的故障诊断是进行有效维修的前提,但是目前故障诊断技术的精确度有待提高,传统的故障诊断主要是靠人工巡检以及定期的试验,存在诊断周期长、准确率低等问题。巡检人员通过“看、听、闻、摸”发现设备异常情况,很大程度上依靠个人经验以及主观判断,对于早期故障和隐藏性的问题辨别能力较为有限。预防性试验可以定量地评估设备性能,但是试验周期很长,不能实时地掌握设备状态,错过故障发展的关键时期^[3]。近些年来线上监测技术得到普遍应

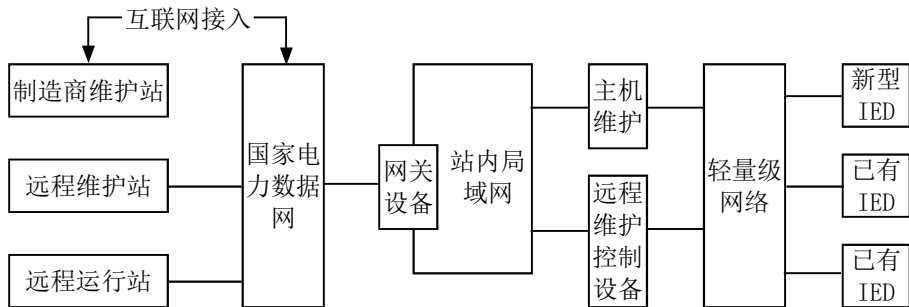


图2 通过远程控制 RMS 技术强化变电运行设备

用,但是监测数据众多,信息利用率不高,误报现象频繁出现等情形也时常发生。

3 电力电气设备安装调试与运行维护技术优化策略

3.1 完善安装调试技术规范,提高工程质量标准

由于设备的技术比较复杂,所以在安装调试过程中就产生了很多问题,应完善安装调试技术规范体系,细化各类设备的安装调试标准和操作流程。组织行业专家和技术骨干,结合新设备、新技术的特点编写详细具体的安装调试作业指导书,将每个工序的技术要求、质量标准和验收办法写清楚。对智能变电站等复杂系统,应制订系统调试方案,将系统调试过程分设备调试、联调联试等步骤进行,并为每一个阶段设定明确的完成标记与质量控制节点。要强化安装调试过程控制,在方案审核、过程监视、质量鉴定的基础上,设立三级质量管理机制。方案审查阶段要开展技术评审,保证调试方案科学合理,过程监督阶段要安排专业监理人员,针对重要工序执行旁站监督,立即纠正不标准操作,质量验收阶段要实行三级验收制度,未经验收合格的设备不得投入运行^[4]。重视安装调试记录与技术资料的完备性,创建设备安装调试档案,将设备参数、试验数据以及调试过程等内容记载下来,为之后的运行提供可靠的依据。

3.2 建立智能化的运维体系,做到准确的故障诊断

要充分利用物联网、大数据、人工智能等现代信息技术来塑造智能化运维体系,从而优化故障诊断的精确度与及时性。健全设备状态监测网络,于重要设备上设置温度、湿度、局部放电等多种传感器,从而实现对设备运行情况的全方位掌握并做到即时搜集,创建统一的数据采集平台,将分散的监测系统加以融合,实现对监测数据的集中管理并完成共享应用^[5]。创建设备状态评判体系依靠大数据分析技术,塑造设备健康度评判模型,结合设备运转数据、缺陷记录等多种信息,针对设备状态展开评判,实现由“定性判断”向“定量评价”的改变。开发智能故障诊断系统,利用机器学习、深度学习等人工智能算法,创建故障特性库和诊断知识库,实现故障自动识别和智能诊断。通过大量学习历史数据,诊断系统可以捕捉到设备出现故障时的微小迹象,并在故障发生之前就给出警报,在故障出现之前提前做好防范措施。而且要推动移动互联网技术在运维工作中的应用,研制移动运维 APP,实现巡检任务的智能派发、缺陷的移动上报、专家的远程诊断,从而提升运维工作的效率。

3.3 构建预测性守护机制,提升设备寿命

要转变传统的“定期维护”和“故障维修”模式,建立基于设备状态及寿命预测的预测性维护机制。要开展设备寿命评估的研究,根据设备材料老化机理、历史运行数据等来建立设备寿命的预测模型,科学评价设备剩余寿命。通过寿命曲线分析,找出设备老化的关键阶段,设备进入劣化加速阶段之前采取有针对性的措施,减缓设备老化进程。根据设备的重要性、运行环境等因素,制定个性化的维护计划,对重要设备、老设备增加维护频次;对新设备、好设备可适当延长维护周期,避免过度维护^[6]。要优化维护资源配置,建立维护管理信息系统,实现维护计划的动态调整和维护资源的统筹安排,根据设备状态评价结果,自动生成维护计划优化维护顺序,合理分配人员、工器具等资源,提高维护效率。此外,还要重视设备寿命延长技术的研究和应用,如变压器油再生处理、绝缘材料修复技术等。通过技术改造和提高设备的性能,延长旧设备的使用年限,减少设备更新投入。

4 结束语

电力电气设备安装调试与运行维护技术是保障电力系统安全稳定运行的基石。面对设备技术复杂化、故障诊断要求精准化等诸多挑战,必须与时俱进,不断创新技术手段和管理模式。在智能电网和新型电力系统建设的大背景下,电力企业要高度重视设备安装调试与运行维护技术的创新发展,加大技术研发投入,加强人才队伍建设,推动信息技术与电力技术深度融合,不断提升设备管理的智能化、精益化水平,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提供坚实的技术支撑,在服务经济社会发展中做出新贡献。

参考文献:

- [1] 周军.高压电气设备安装调试与运行维护[J].上海电气技术,2025,18(02):24-27.
- [2] 李东伟.电气设备安装与调试技术研究[J].新潮电子,2025(12):106-108.
- [3] 张亮.电力系统电气设备安装与调试技术的研究[J].电工技术,2025(S1):61-63.
- [4] 徐邾.电力系统中电气设备安装与调试的技术分析[J].消费电子,2025(09):125-127.
- [5] 夏元红.智能电气设备接地安装调试与运行维护技术研究[J].装备制造技术,2025(01):160-162,178.
- [6] 王海,杨旋,杨辉,等.电力系统电气设备安装与调试技术探析[J].电力设备管理,2025(12):71-73.

变电站一次设备故障预测与检修方法分析

徐晓兵

(国网湖北省电力有限公司黄冈市罗田县供电公司, 湖北 黄冈 438600)

摘 要 在维护电网整体安全方面, 变电站一次设备构成了电力系统发挥决定性作用的重要基石。在实际运行过程中, 受设备自然老化机制和外部环境多重因素叠加影响, 各类潜在故障时有发生。为最大限度降低故障对电网运行的冲击, 需建立精准高效的故障预警和维护体系。本文探讨了变电站一次设备故障预测与检修的重要性, 分析了相关的故障预测方法, 并提出一种变电站一次设备的故障预测与维修方法, 旨在为提升设备的可靠性和电网运行的稳定性提供借鉴。

关键词 电力系统; 变电站; 一次设备; 故障预测; 检修方法

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.018

0 引言

变电站一次设备作为电力系统的一部分, 它的关键装置包括变压器、断路器以及隔离开关等。为了确保电力系统安全稳定运行, 对这些故障隐患设备实现前瞻性预判和适时维护至关重要。构建一套高效的故障预警和检修管理体系, 能有效降低故障对电网的冲击程度。因此, 相关人员需要针对变电站一次设备故障的预测方法加强研究, 通过仪器仪表、在线监测等方式获得数据, 对潜在故障进行预测, 指导检修工作有针对性地开展。

1 变电站一次设备故障预测的重要性分析

变电站一次设备智能一体化程度随着我国经济和科技的不断发展而不断提高, 从而在高压用电的情况下, 能够满足现代人各种用电需要, 对国内电力行业的发展影响是深刻的, 使变电站的工作效率得到提高, 稳定性越来越强。变电站一次设备故障预测, 能够帮助检修人员及时发现电力系统故障问题、消除电力系统运行安全隐患, 同时通过积极探索变电站一次设备故障预测检修, 能够保证电力系统始终处于平稳工作状态。除此以外, 随着变电站一次设备封闭性不断加强, 过去的检修方法难以继续使用, 而故障预测和检修方法是现下最佳的处理方式^[1]。

2 变电站一次设备故障预测的方法

2.1 设备数据整合

2.1.1 辅助仪表

在变电站一次设备体系中, 以变压器、断路器、隔离开关等核心设备为代表, 往往与一系列辅助仪表相配套。这些仪表能够随时对其运行状态进行精准的

反馈与检测。对设备运行故障的判别和判断, 其记录和显示的信息可作为重要依据。如压力表能够实时反映设备内部压力情况, 辅助我们判断是否有过压或欠压的风险; 密度继电器可以监测绝缘介质的密度变化, 以此推断设备的密封性能是否良好; 油温表直接展示了设备关键部位的温度情况, 因为温度异常通常是故障发生的前兆^[2]。

2.1.2 在线监测装置

随着时代快速发展、传感器技术水平越来越高, 如今的电力系统已经具备了强大的实时监测能力。根据变电站一次设备的运行情况, 通过最新的传感网络, 可在线全面实时监控。该技术的应用使一次设备运行参数得到及时的集成和管理, 从而提高了故障预报的针对性。详细来说, 在变电站一次设备在线监测装置中涵盖了监控传感器、计算机中枢、数据库服务器等部分。技术团队按照设备结构与运行特点, 选择变电站一次设备运行中的重点部位和关键环节, 然后在这些位置合理布设传感器装置。

2.1.3 红外监测技术

通常来说, 变电站一次设备在运行时需要承受高电压和大电流的严苛工况。在这种情况下, 设备运行异常或者发生故障, 其内部线路以及各个设备元件易于出现发热状况。而红外技术恰恰能够提供非常有效的手段进行监控。通过红外热成像仪器等设备, 可以直观地针对变电站一次设备运行中的温度变化情况加以实时监督和控制。例如: 假设某个部位的温度上升, 表明该处接触不良、过载; 而温度分布不均表明内部结构有所不足。采用红外监控技术, 在有效预报的同时, 可以对设备运行信息进行实时整合, 及时发现故障隐

患^[3]。这对减少因设备故障而给线路造成的不利影响是有利的,对保证电力系统安全平稳运行是有益的。

2.2 设备故障预测

因为变电站一次设备运行故障受到多种因素影响,通常具有不确定性的特点。这样的不确定性让预测落空具有相当的挑战性。因此,在针对故障进行预测期间,要引入不确定性理论。该理论可以帮助我们对以上整合方式所获取到的数据加以直观分析。为确保设备故障预报准确及时,现特对变电站一次设备运行过程中的隶属度和健康指标两项重要关联参数进行单独设置。其中,定义设备隶属程度为 X ,反映当前设备运行偏离程度相对于正常状态下的运行情况;而设备健康指数则定义为 Y ,它对设备各方面的性能指标进行了综合考虑,是对设备整体健康状况进行量化考核的指标。同时还根据变配电系统内部一次设备运行年限、循环、日常维修状态以及多方面的相关资料对设备故障做出综合判断,对设备的故障进行综合分析。通过对这些因素的综合分析,可以更为准确地把握设备的运行趋势,及时发现潜在故障风险,让故障预测目标得到有效落实。这不仅有助于提高电力系统的可靠性和稳定性,而且在停运损失的情况下,还能为企业节省大量的维护成本。

3 变电站一次设备故障预测与检修方法

3.1 数据采集及预处理技术

实现变电站一次设备故障预报检修的前提条件是准确可靠的监测数据。该研究以变压器、断路器、隔离开关三类变电站一次设备为重点,系统采集了多维度运行指标,包括油中溶解气体、振动、接触电阻等,对设备运行状态进行了全面覆盖。

在资料收集阶段,资料的代表性、完整性等原则都需要严格遵循。对于变压器设备,主要对油中溶解气体的数据进行收集,包括总烃、乙炔、氢气等七种特征气体,以及绕组温度等辅助参数;针对断路器装置,我们重点收集了储能电机工作电流、传动机构的动态电流及分合闸线圈的激励电流等机械特性参数,同时也考虑了开断电流和合闸电阻等电气性能指标。隔离开关的监控主要关注动静触头温度、三相电流的不平衡度等接触状态参数,同时还会综合考虑环境的温湿度变化。

由于原始采集数据有数据缺失或者异常波动的情况,必须要实施有效的数据清洗流程。应针对遗漏数据,以邻期内的数据算术平均数作插值回补;根据相似设备运行规律或关联参数之间的物理关系,对持续时间

较长的空白区域间进行估算和推断^[4]。例如:参考同规格型号变压器历史油中气体数据推算目标设备缺失值,或者基于负载电流曲线反演变压器绕组温度变化趋势。对于离群值的处理,运用孤立森林算法建立异常检测模型,自动识别并剔除因电磁干扰产生的尖峰脉冲以及设备停运期间产生的无效测量值。

在数据标注环节,充分利用设备的历史检修台账信息。将每一项监测数据与其对应的故障事件标签进行匹配,并对其进行监管和学习样本建设。故障标签详细记录了故障发生的具体时间、类型、严重程度等多项属性。依照电力行业规范标准建立故障分类统一编码制度。以变压器绝缘缺陷为例,可分为放电性故障、过热故障、机械损伤三大类,其中放电性故障又细分为特定的表现形式,如局部放电、沿表面的闪络、电晕现象等,其主要表现形式有:经过系统化的数据标注过程,最终形成一套高质量的故障案例库。数据库内包含 10 个主要变电站、3 个涉及主要设备、2 个年度时间跨度监测资料,其中 5 000 例的故障实例和 50 000 例正常运行的样本,数据集规模适中,类别分布均衡,为后续建模提供了坚实的数据基础。

3.2 构建故障预测模型

基于上述准备好的标注数据集,训练用于设备健康状态评估的预测模型。此次选用随机森林算法作为核心算法框架,该算法凭借出色的非线性映射能力和强大的抗噪声干扰特性,在工业设备健康管理领域具有广泛的应用前景。

随机森林属于整合学习范畴,提升整体泛化能力的方法是将多个决策树的预测结果结合在一起。具体而言,即在训练过程中,采用自主抽样法,从原始训练集中随机抽取若干个子样集,对每个子集进行一棵自主训练的决策树。每棵决策树在构建时进一步引入随机性,用于节点分裂的部分特征仅从全部特征中随机选取。这种双重随意性机制,有效防范了单株决策树过于拟合所带来的风险。当进行新样本预测时,将其输入所有已训练好的决策树中,采用投票机制确定最终输出结果。多个决策树的预测结果互相验证,减少了个别判断失误所带来的冲击。

此次研究中的随机森林模型总计有 100 棵决策树,每棵树的最大深度限制为 10 层,叶节点至少包含 5 个样本点。通过网格搜索对超参数组合进行寻优,找到在训练效率与预测精度之间达到平衡的配置方案。

为了增强模型性能,还实施了一系列数据增强技术和特征工程技术。针对类别失衡问题,对少数类样本进行了操作,以增加其数量比例,对训练中缺失的

部分输入特征模拟进行了随机屏蔽,以提高模型的坚固性;利用主要成分分析等方法,排除特征间存在的多个共线性;针对时序型特征,抽取统计量、趋势项、周期性权重等作为新的特征加以表现。

在完成模型训练后,再进行独立测试集上的性能综合测评。实验显示,所提模型在多项评估指标上表现优异,如故障识别精确度达到 95.2%、故障类型分类正确率达到 92.5%、提前 1 个月预测精准度为 93.4%,提前 2 个月预测精准度为 91.7%,提前 3 个月预测精准度为 89.3%。在不同的时间尺度下,故障预测的精准度都较为优秀。

3.3 检修方法优化

差异化的检修计划是根据故障预测结果制定的。传统定期检修模式通常设定固定的检修周期,如年度预防性试验或双年度大修,但这种方式容易导致过度维修或维修不足的问题。为此,本研究提出了以装备实时健康为前提的自适应检修战略:当预测故障概率较高时,为了消除隐患而及时介入检修;相反,为节省成本,检修间隔适当延长。针对不同性质的故障类型和部位特点,匹配相应的专项检查项目,如针对绝缘劣化开展绕组介电强度测试,针对机械磨损实施本体结构探伤检测等。

在实际安排检修任务时,需要综合权衡多种因素:一是由涵盖直接经济损失和社会影响等多个方面的预测概率和潜在后果共同决定的故障风险等级;二是根据其在电网拓扑中所处的位置及承载负荷的大小,按设备的重要程度确定轻重缓急;三是包括人力可用、零部件库存、断电窗口期等因素在内的资源约束。为此构建了多目标优化模型,旨在将故障风险和维修成本最小化,同时满足各种约束条件^[5]。

根据故障预测频率和检修需求紧迫程度,将检修计划分为三个层级,日常应急响应计划针对 24 h 内可能发生的重大突发故障;月度例行检查计划关注未来 1 至 2 个月内逐渐发展的渐进性故障;年度统筹安排则关注全年范围内的系统性检修工作。在计划执行中持续收集反馈信息,用于评估模型预测偏差并动态化调整检修策略,形成闭环管控机制。

4 实验验证与效果分析

为检验所提方法是否有效,此次以某电网公司下属 10 个变电站的真实运行数据开展实证研究。该数据集收录了对三种设备的一年监测记录,分别是变压器、断路器和隔离开关。

数据采集和预处理工作首先要按照 3.1 所述的方

法完成,构建包含 5 000 个样本的故障资料汇编;然后按照 3.2 流程对随机森林预测模型进行训练;最后制定检修计划,并根据 3.3 提出的策略付诸行动。

表 1 显示了故障预测模型在实际应用中的业绩状况。结果显示该模型能够准确捕获大部分潜在故障迹象,尤其对严重故障具有较高的预警准确率,为及时采取干预措施提供了有力支持。

表 1 故障预测模型性能表现

故障等级	预测正确数	预测错误数	准确率
0	3 412	157	95.6%
1	492	98	83.4%
2	187	24	88.6%

在检修策略实施上,对 10 个变电站按故障预测结果制定了 3 级检修计划:周、月、年,对高危重点设备进行优先检修。经过一年的实践应用,相比往年同期数据,这些变电站的设备故障发生率降低了 30%,平均可用率提升了 5%。这一显著提升充分显示了所提出方法在指导变电站一次设备检修工作中的有效性与实用性。

5 结束语

本研究提出了变电站一次设备的故障预测及维修方法,通过综合运用数据分析和机器学习技术,对设备运行数据进行收集和分析,进而构建了故障预测模型,能够准确预测设备故障的风险。在此基础上通过检修方法,优化检修时间和内容。该方法对变电站一次设备故障风险进行准确预测、对检修工作进行准确指导、增强设备可靠性和电网运行稳定性有促进作用。未来,还需要开拓数据源,建立综合的故障数据集,增加故障预测精度,优化机器学习模型,改进检修方法,开发可视化平台,以推动该领域的发展。

参考文献:

- [1] 黄杰. 变电站一次设备运行问题分析及状态检修[J]. 现代工业经济和信息化,2022,12(10):243-244,247.
- [2] 孙文选. 变电一次设备故障检测及检修的探讨[J]. 科技创新与应用,2021,11(26):67-69.
- [3] 张继敏,郑合欢. 变电站设备状态检修方法研究[J]. 办公自动化,2024,29(21):88-90.
- [4] 肖冰. 基于数字孪生技术的变电电气一次设备状态监测与优化设计[J]. 光源与照明,2024(08):189-191.
- [5] 叶咏青,陈竹永,朱明江. 输变电设备状态监测与故障诊断技术分析[J]. 电子技术,2024,53(08):210-211.

Wöhler 指数对有效湍流强度的影响分析

——以湖南某山地风电场为例

余少梅, 卿 会, 陈荣荣

(中国电建集团城市规划设计研究院有限公司, 广东 广州 511455)

摘 要 风电场有效湍流是风力发电领域的关键参数, 是等效恒定值。有效湍流需要通过系统的计算流程才能得以分析出来。其中系统性的流程主要包含测风数据处理、发电量模型搭建及计算。本文通过湖南某山地风电场的有效湍流强度的求解分析, 得知 Wöhler 指数越大, 对应的低风速段的有效湍流强度越大, Wöhler 指数对高风速段影响较小。Wöhler 指数在求解时, 应结合项目实际进行取值, 从而保证有效湍流取值科学合理。

关键词 Wöhler 指数; 有效湍流强度; 湍流风电场

中图分类号: TM614; O357.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.019

0 引言

风电场湍流是风电场内空气流动的无序随机三维速度波动, 由大气边界层自然湍流与风机尾流诱发的湍流叠加作用形成, 对风电场安全、经济及寿命至关重要。它引发的高频随机波动载荷会使风机结构承受反复应力, 造成累积疲劳损伤, 限制风机设计并缩短寿命, 还会导致风速不稳, 引发风机功率输出剧烈波动, 影响风电场输出稳定性、挑战电网电能质量, 同时增加控制系统负担、降低运行效率, 且加剧叶片气动噪声^[1]。

描述湍流常用环境湍流强度与有效湍流强度, 后者是风力发电的关键参数, 经标准湍流强度修正扩展而来, 可更准确预测风机在实际风电场的疲劳载荷, 其准确计算对风电场分析意义重大。本文分析有效湍流强度计算中 Wöhler 指数的影响, 并结合项目实例展开研究。

1 有效湍流强度及计算方法

有效湍流强度的计算过程主要包含以下三个步骤:

(1) 确定输入条件: 包括风速、风向的概率分布; (2) 计算每个风向扇区下的等效湍流强度: 对于每一个风向, 计算下游风机在所有风速下承受的湍流强度; (3) 对所有风向扇区进行加权平均: 将每个风向的等效湍流强度按其发生概率进行加权, 得到最终的有效湍流强度^[2]。

计算有效湍流强度首先要计算表观湍流强度。表观湍流强度计算公式如下:

$$I_{app}(\theta, V_h) = \sqrt{I_{amb}^2 + I_{wake}(\theta, V_h)^2} \quad (1)$$

式(1)中, I_{amb} 为环境湍流强度, I_{wake} 为尾流诱导

湍流强度, 通常可以通过模型计算得出。

得到表观湍流强度后, 再计算等效湍流强度:

$$I_{eq}(\theta) = \left[\frac{\sum_{V_h} p(V_h|\theta) \cdot I_{app}(\theta, V_h)^m}{\sum_{V_h} p(V_h|\theta)} \right]^{1/m} \quad (2)$$

式(2)中, $p(V_h|\theta)$ 为在轮毂高度 h 处, 风向为 θ , 风速为 V_h 的联合概率分布, $I_{app}(\theta, V_h)$ 为表观湍流强度。

得到等效湍流强度后, 再进行有效湍流强度的计算。有效湍流强度的计算公式如下:

$$I_{eff} = \left[\frac{\sum_{\theta} p(\theta) \cdot I_{eq}(\theta)^m}{\sum_{\theta} p(\theta)} \right]^{1/m} \quad (3)$$

式(3)中, $I_{eq}(\theta)$ 为等效湍流强度, $p(\theta)$ 为风向发生的概率。公式中的 m 即为 Wöhler 指数。它对有效湍流强度的计算有着决定性的影响。Wöhler 指数是连接材料疲劳特性与外部环境载荷(湍流)的关键桥梁。 m 值越高, 有效湍流强度就越由最恶劣的载荷工况决定, 这就要求工程师在设计中必须充分考虑极端风况的统计概率, 而不能仅仅依赖平均条件^[3]。

2 有效湍流求解方法与思路

2.1 风电场发电量预测、湍流分析模型

本文采用美迪 WT 软件预测风电场发电量, 该软件依托计算流体力学(CFD)技术, 可精准模拟复杂地形下发电量, 核心流程分四大环节^[4]。(1) 预处理: 载入实测地形图、标准化测风数据及风机特性参数, 同时定义模拟区域与网格参数, 常规设水平、垂直分辨率。

(2) 定向计算: 侧重流场模拟与边界条件设置, 基于预处理数据生成贴合地表的计算网格, 设置大气热稳

定度参数,求解生成风速、风向等流场参数分布。(3)综合模拟:核心是发电量计算,先融合测风数据与流场结果推算全场风能分布,再载入风机坐标模拟尾流损失,最后引入折减系数核算年上网电量。(4)结果输出:输出风谱图、报表及 IEC 文件,为项目评估提供依据。

3.2 Wöhler 指数对有效湍流强度的影响分析

通过搭建的模型,计算 $m=1$ 、 $m=4$ 、 $m=10$ 时的有效湍流强度。选择 $m=1$ 、 $m=4$ 、 $m=10$ 为典型代表,核心源于材料疲劳特性的工程分类与实践便利性,这些数值对应不同疲劳损伤机制与应用场景,是长期试验数据与行业经验的凝练总结。

3 实例分析

3.1 风电场基本设置

湖南某山地风电场共 8 个机位,主导风向为 N、NNW、SSE。

3.2 风电场模型设置

风电场输入标准化测风数据,选 8 台 6.25 MW 风机,模型用东西长 4.5 km、南北跨度 2.3 km 地形图,定向参数设步长 100、最小水平/垂直分辨率 25/4、水平/垂直扩展系数 1.1/1.2、垂直参数 0.7、平滑系数 1,森林冠层用散逸模型以更好地模拟地表植被上方湍流。场区风能模拟结合 1:2 000 数字化地形图与软件 NASADEM30 m 矢量数据布置风机,采用软件自带全球粗糙度数据库。

3.3 风电场模型计算结果

通过设置不同的 Wöhler 指数,并进行有效湍流计算,得到 $m=1$ 、 $m=4$ 、 $m=10$ 时的有效湍流强度曲线^[5],如图 1、图 2、图 3 所示。

对比模拟输出的有效湍流曲线,可见 Wöhler 指数 m 与不同风速段有效湍流强度存在关联规律,且该关联呈显著风速区间差异性^[6]。

针对本项目风资源特性与模拟场景,Wöhler 指数 m 对低风速段($1 \sim 9$ m/s)有效湍流强度影响显著: m 值增大时,低风速段有效湍流强度明显上升。核心原因是低风速段气流易受地形扰动、地表粗糙度变化影响,而 m 值作为反映材料疲劳特性与载荷敏感度的关键参数,其增大使气流载荷波动对湍流状态的作用更突出^[7]。在美迪 WT 软件流场模拟中, m 值增大时,软件对低风速区间气流微尺度运动的计算权重调整,进一步放大湍流强度变化幅度,可能间接影响风机低速工况下的启动稳定性与载荷承受能力。

与之相反, m 对高速风速段(20 m/s 以上)有效湍流强度影响较小。高速风速段气流动能大、惯性大,受外界局部扰动弱,流场更稳定;且美迪 WT 软件在高速风速区间的湍流计算侧重宏观气流规律, m 对载荷敏感度的调节作用被强气流主导效应弱化,故即便 m 值变化,高速风速段有效湍流强度仍维持平稳,无明显波动。

4 结论

本文通过分析有效湍流的计算方法学习了有效湍流的意义及计算过程。通过测风数据处理、WT 数值模型搭建过程分析了解风电场分析处理的过程,并结合

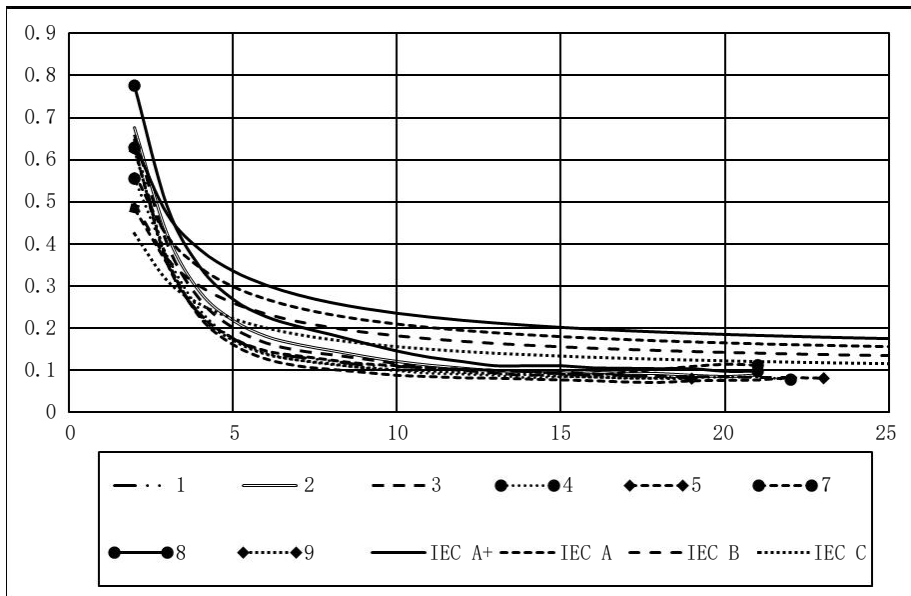
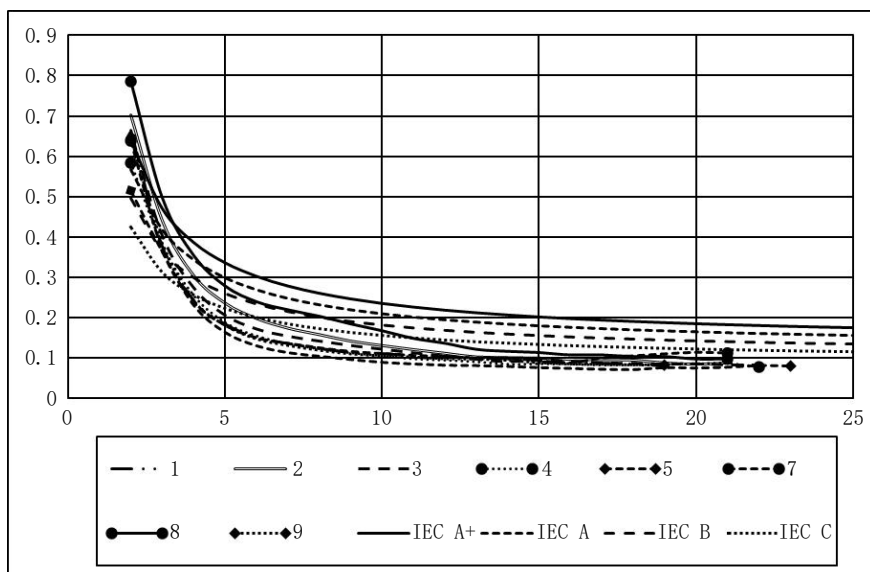
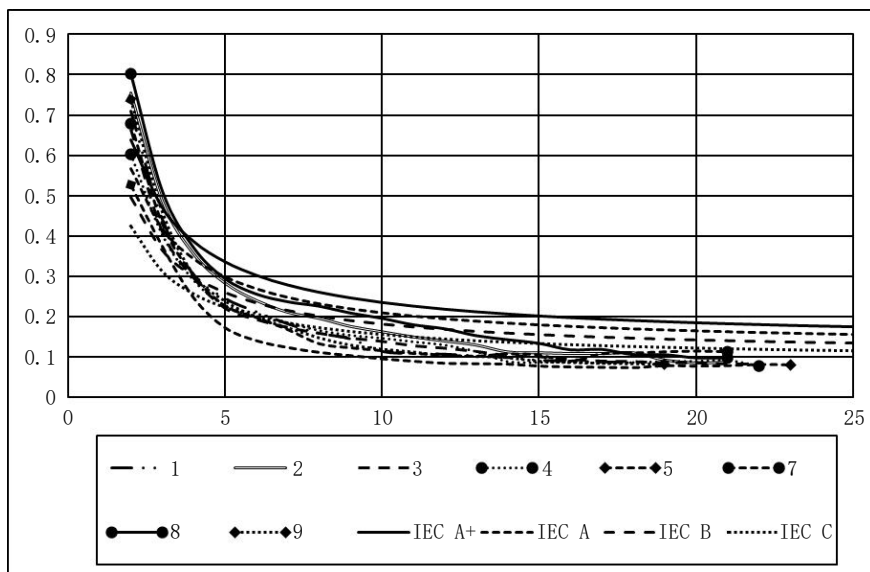


图 1 Wöhler 指数 $m=1$ 时有效湍流曲线与 IEC61400-1-2019 标准曲线对比图

图 2 Wöhler 指数 $m=4$ 时有效湍流曲线与 IEC61400-1-2019 标准曲线对对比图图 3 Wöhler 指数 $m=10$ 时有效湍流曲线与 IEC61400-1-2019 标准曲线对对比图

湖南某山地风电场的实例分析, 得出了初步结论: 对于本例而言, Wöhler 指数 m 越大, 对应的低风速段 ($1 \sim 9 \text{ m/s}$) 的有效湍流强度越大, 相对而言, Wöhler 指数 m 对高风速段 (20 m/s 以上) 影响较小。

参考文献:

- [1] 付剑波, 路永辉, 范守元, 等. 一种高寒山区风电场风能资源评估方法: CN112036663A[P]. 2020-12-04.
- [2] 马晓梅, 王博, 刘永前. 一种基于大气稳定度的风资源评估方法 [J]. 可再生能源, 2020, 38(01): 47-52.
- [3] 20220072-T-604, 风能发电系统风力发电机组塔架和基础设计要求 [S]. 全国风力发电标准化技术委员会, 2022-04-28.
- [4] 乔延辉. 风电场运维效能评价方法与系统开发 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2022.
- [5] 刘崇波, 杨畅. 复杂山地风电场湍流过度矫正分析研究 [J]. 风能, 2025(07): 96-100.
- [6] 杜昊天, 杨奎滨, 王其君. 一种基于数值模拟求解机位点湍流算法 [J]. 东方电气评论, 2023, 37(03): 28-32, 39.
- [7] 朱格家, 张景华. 风电场风资源评估与风电机组疲劳载荷计算评估 [J]. 山东工业技术, 2025(04): 118-127.

轨道交通数字化建造技术体系与发展路径探究

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“交通强国”“新基建”等一系列国家战略的深入推进,我国轨道交通步入了高质量、高效率的发展阶段。在此背景下,传统的建设模式已不能适应现阶段的发展要求,实现数字化转型升级迫在眉睫。本文将从轨道交通数字化建设的内涵与价值出发,阐明其理论研究思路,针对规划设计、施工建设、移交运维三个环节,提出以BIM、GIS、大数据、云计算、数字孪生为技术路径的轨道交通数字化建设相关理论,进行一体化整合,并客观分析了目前工作中存在的技术难点、管理难点及标准难点等问题,提出了完善路径与展望方向,以期对推动我国轨道交通行业的智能升级有所裨益。

关键词 轨道交通; 数字化建造; 建筑信息模型(BIM); 数字孪生; 全生命周期管理

中图分类号: TU17; U215

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.020

0 引言

轨道交通作为城市发展的主动脉和国家综合立体交通网的骨干,其建设规模与复杂程度日益提升。以二维图纸为核心、依靠人工经验管理的传统施工模式难以应对,隧道、高架桥、地下车站等密集交错的工程结构物,复杂的地质条件,繁多的专业接口,往往出现信息传递失真、施工返工、造价超支、安全隐患大等问题。

数字经济正在扑面而来,带给工程建设行业全新的工具和方法。所谓数字建造就是采用现代信息技术,将工程项目全生命的数据进行数字化表达、集成、管理和交换,以此来指导工程项目建设、运行全过程的智能化决策和自动执行的过程。数字建造应用到轨道交通中,并不只是简单的技术叠加,而是对业务流程以及管理模式的一次大变革。本文从数字化建造这一角度出发,分析并展望了数字建造关于轨道交通的应用及前景。

1 轨道交通数字化建造的核心理论框架

轨道交通数字化建造不是单一的技术,它是多个技术融合、全要素覆盖、全过程贯穿、各参与方共融的庞大复杂的系统工程,它的主要构成是“一个核心、两大维度、三个阶段”。

1.1 一个核心

以数据为驱动,数据就是数字建造的“血液”,所有的工作都要围绕着数据的产生、流动、融合和价值发掘而展开。构建数据底座作为数字化转型的核心支撑,对于建筑行业的数字化转型具有至关重要的意义。数据底座通过整合设计、制造、施工、运维等环节的数据,依据统一的数据标准,运用数字化平台和

工具等方法,创建结构化数据,从而打破信息孤岛,实现数据共享。结构化数据的分析能够为决策提供科学依据,优化业务流程。此外,它还能促进创新应用的发展,从而提高行业的竞争力,推动建筑行业向智能化、绿色化、可持续发展的方向迈进,更好地满足市场需求和应对行业挑战。

1.2 两大维度

1. 技术维度:智慧建造数字化平台通过融合数字化设计、数字化制造、数字化施工的过程,实现更加融合、更加智慧、更加高效的建设过程管理。以工程建设过程为主线,以BIM模型为载体、数据为底座、价值为引导,构建时间、空间与逻辑相互关联的智慧建造数字化平台,实现了数据融合,管理协同^[1]。

2. 管理维度:数字化建造的软性灵魂涉及组织架构的调整、业务流程的重构、协同标准的确定、人的能力重塑,同时技术需要与新的模式(IPD集成项目交付等)相结合,发挥出更大的效用。

1.3 三个阶段

数字建造涵盖整个生命周期,贯穿项目的规划设计、施工建造以及移交运维的各个环节,以解决规划设计与施工建造之间的问题。在施工建造与运维移交的过程中存在“数据壁垒”,这导致信息难以互联互通,并影响了“数据壁垒”的有效利用。

2 关键技术体系及其在全生命周期中的应用

2.1 关键技术构成

1. 建筑信息模型(BIM)技术: BIM技术已经成为数字建造的基础,不再是单纯的三维可视化的软件,是包含几何信息以及属性信息的一种参数化数据库,

BIM 技术是所有项目的统一、可计算信息模型。

2. 地理信息系统 (GIS) 技术: 提供宏观的地理空间环境信息, 如地形地貌、已有建筑物、地下管线等。将 BIM 技术和 GIS 技术相结合, 将微观工程实体与宏观地理环境有机结合, 可为线路规划、征地拆迁、环境影响评价等提供支撑。

3. 云计算与大数据技术: 提供一个存储、计算和分析的云平台, 用于海量异构工程数据^[2]; 云计算能够灵活地调配和共享软硬件资源, 大数据能够挖掘出规律性的东西, 能够从海量的数据中预测未来的发展趋势, 发现其中的隐患。

4. 数字孪生技术 (DigitalTwin) 是一种基于各种数据源建立数字化环境, 并能在虚拟空间建立与物理世界实体完全映射、实时交互、虚实同步的模型, 并能应用于施工模拟、安全预警、方案优化、智能运维等方面的数字化建造方式。

2.2 全生命周期应用实践

2.2.1 规划设计阶段

1. 方案模拟与优化: 借助 BIM 技术与 GIS 技术, 在虚拟环境中对线路布局、车站设计及施工方法进行多种方案的比较与可视化模拟, 并分析各方案对周边环境的影响, 挑选最佳方案。

2. 协同设计: 借助统一的 BIM 协同平台, 各专业设计师, 如建筑、结构、机电、轨道和信号等, 可以进行并行设计, 系统会自动进行碰撞检测^[3], 大幅降低设计中的“错误、遗漏、碰撞、缺失”等缺陷。

3. 工程量自动统计: BIM 模型能够自动生成准确的工程量清单, 为概算和预算提供可信的依据, 从而避免人工计算中的误差。

2.2.2 施工建造阶段

1. 数字化施工交底: BIM 技术模型深化实现虚拟

漫游进行可视化交底, 预先发现问题, 预先处理。利用已建立各专业模型, 通过虚拟与仿真等技术实现可视化交底, 提前感受周围环境要素和内部空间净空、施工难点等部位, 对不合理部位在施工前解决, 最大限度地降低项目实施风险。

2. 智慧工地管理: 利用物联网技术整合人员定位系统、设备运行状态实时监控、环境监测 (扬尘、噪声) 和重点危险源 (深基坑等) 预警功能的监控设施来提高项目的安全管理水平^[4]。

3. 预制装配式建筑: 利用高精度的 BIM 模型数据进行构件的详细设计和工厂化预制 (见图 1)。通过二维码、RFID 等技术对构件的生产、运输和吊装全过程进行跟踪, 从而控制装配的精度和质量, 减少现场的湿作业和建筑垃圾的产生^[5]。

4. 进度与成本动态管控: 把 BIM 模型与施工进度计划、成本信息相关联, 可以使得管理人员能够直接对比计划和实际情况, 做到成本消耗动态化管控并及时纠偏。

2.2.3 移交运维阶段

1. 数字化交付: 数字化交付是工程建设中的关键环节, 涵盖项目从设计、施工阶段收集的数据信息 (见图 2)。通过统一的数据标准, 将项目各阶段的数据、文档、模型等信息进行整合、管理和交付, 以便于运维管理, 实现数字孪生和数据分析。同时, 在运维阶段将持续采集运维数据, 实现物理实体与数字实体的比对, 进而通过算法进行仿真分析、决策输出, 反馈至物理实体以优化决策、预测成果, 达到健康、稳定、成本优化的运维目标。

2. 数字孪生运维平台: 运用数字孪生技术建立与真实地铁系统相平行的虚拟镜像, 在平台上进行设备远程诊断、故障模拟推演、应急演练、预防性维护规划等工作, 从“被动检修”转变为“主动预警”。

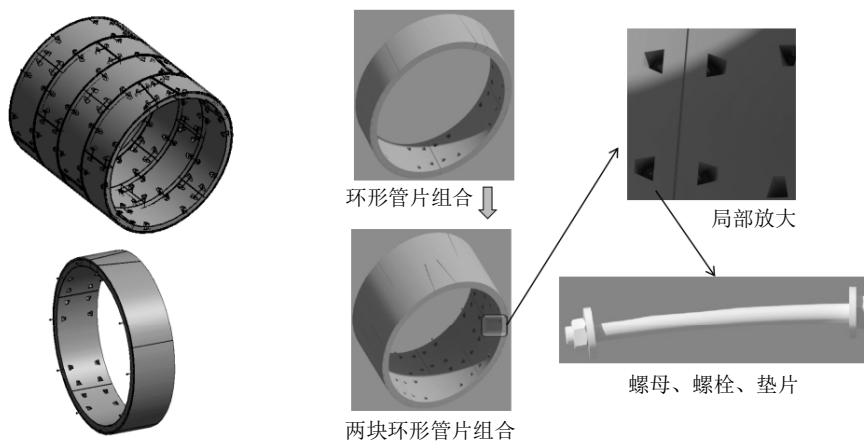


图 1 管片数字化加工示意图

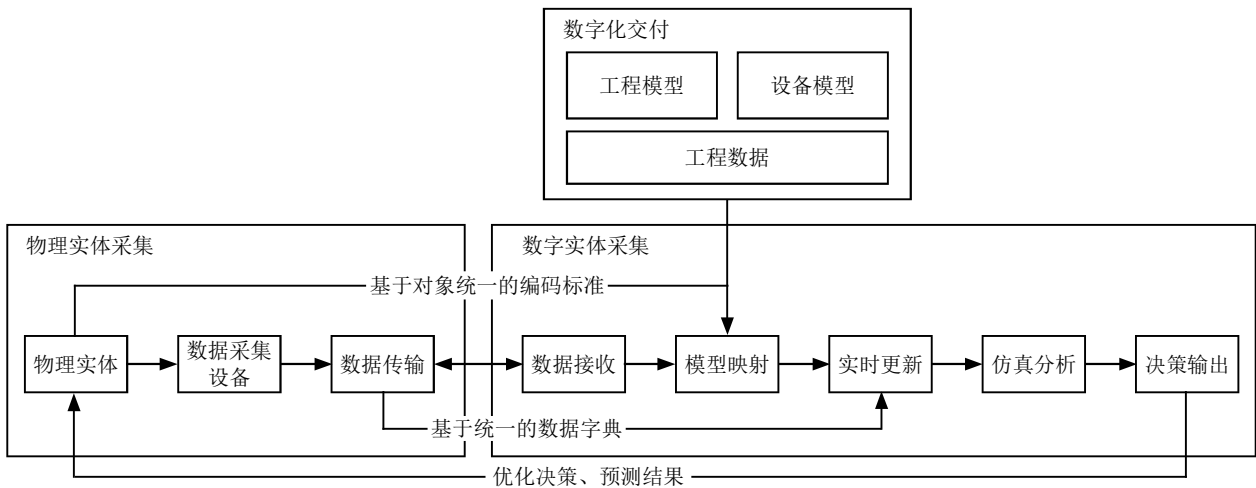


图 2 数字化交付流程示意图

3. 智慧客运服务：借助大数据对客流量进行分析，可以根据不同的情况调整行车组织、制定客流疏导方案，并为乘客提供个性化的出行信息服务。

3 轨道交通数字化建造面临的挑战与对策建议

全面落地轨道交通数字化建设，尽管前景广阔，但面临的挑战仍然很多。

3.1 主要挑战

1. 技术标准与数据互通难题：不同软硬件环境、不同平台、不同参与方所涉及的数据格式、交付的标准各异，容易出现各种“数据孤岛”问题，造成信息无法自由流通的情况。

2. 初始投入成本高昂：软硬件采购、平台搭建、技术培训以及流程改造需要大量的前期投资，这就使得一些中小参建方不愿意去投入这种成本。

3. 复合型人才匮乏：有大量既熟悉土木工程又通晓信息和数据的技术型人才较为稀缺，是目前发展的最大短板。

4. 组织与流程变革阻力：数字化转型会对既有的工作方式和利益格局产生摧毁式的冲击，在工作中存在抵触情绪。

3.2 对策与发展路径建议

1. 强化顶层设计与标准建设：政府、协会和企业要合力制定国家或者行业级 BIM、数据交换等方面的标准，推行数据统一交付标准，使得所有厂商都按照标准来执行。

2. 推行分步实施与效益驱动：激发企业从痛点需求入手，选择见效快的应用点（如碰撞检测、智慧工地等），先尝为快，先试先走，快步快跑，找到效益点，再向全生命周期方向迈进，加速企业转型。

3. 构建产学研用一体化生态：提高复合型人才培养；针对轨道交通应用场景，企业应加强与科技公司合作，研究开发专有方案。

4. 变革项目管理模式：积极探索运用 IPD（集成项目交付）、EPC（工程总承包）等更适宜数字化协同的新的承包模式，在合同上推进各方协同共享数据，协同开展工作。

4 结束语

轨道交通数字化建造技术体系是通过充分结合 BIM、大数据、数字孪生等新一代信息技术和工程建设全过程，在大数据基础上实现数据驱动的模式转变，打造协同工作新模式，推动行业转型升级、实现高质量发展的重要载体和动力源。未来，在人工智能技术更加成熟的过程中，其会更好地运用到方案自动生成、风险智能判别和机器人自动化施工等方面。利用区块链构建可信数据互通的生态环境，使规划设计、建设施工、运营管理等轨道交通与城市发展进一步融合，成为城市智慧有机体，可感知、可分析、可控制。

参考文献：

- [1] 张轩, 黄新文. 基于铁路工程的数字化协同设计平台应用研究 [J]. 铁路标准设计, 2023(10):47-54.
- [2] 王恰时, 青舟, 杨喆. BIM 协同设计管理平台研发与应用 [J]. 高速铁路技术, 2022(02):47-52.
- [3] 李瑞华. 基于 BIM 技术的地铁机电工程数字化建造方法研究 [J]. 工程机械与维修, 2024(02):80-82.
- [4] 黄建城, 徐昆, 董湛波. 智慧工地管理平台系统架构研究与实现 [J]. 建筑经济, 2021(11):25-30.
- [5] 蓝建勋, 曾金亮. 城市轨道交通站数字化装配式装修技术 [J]. 施工技术, 2021(04):30-32.

大型地面光伏电站生产运营 智能化管理措施探究

魏启刚

(盐源蜀道清洁能源有限公司, 四川 凉山 615700)

摘 要 在新能源规模化发展的背景下, 大型地面光伏电站逐渐成为能源结构转型的主要支撑, 其生产运营水平直接影响电网安全及新能源利用率。基于此, 本文围绕管理团队优化组件巡检流程、完善人员排班机制、细化储能充放规则、校准支架调节参数及强化智能预警响应五个方面展开论述, 构建以数据驱动为中心的运维体系, 旨在提出一套系统化的智能化管理路径, 为光伏电站的高效运营及可持续发展提供参考。

关键词 新能源; 光伏电站; 生产运营; 智能化管理

中图分类号: TM615

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.021

0 引言

随着清洁能源战略的不断推进, 大型地面光伏电站在能源供给体系中的作用日益凸显。电站建设规模的持续扩大, 对生产运营环节的数据监控、设备维护及能效调控提出了更高要求, 传统依靠人工的管理方式难以满足高效运营的需求。管理团队应用智能化管理技术, 可以为生产运营提供多重支持, 能够在提升运行效率的同时保证系统安全稳定。借助大数据分析及预测模型, 电站管理从被动反应逐渐转向主动调控, 有助于形成更具前瞻性的运行模式。因此, 探讨大型地面光伏电站生产运营的智能化管理措施, 对提升新能源利用效率及行业高质量发展具有重要意义。

1 大型地面光伏电站生产运营智能化管理的意义

随着电站规模不断扩大, 设备种类及数量明显增加, 传统依靠经验的方式难以及时把握运行状态, 而智能化手段则能让信息传递更加顺畅。管理团队在统一平台上集中采集并处理运行数据, 能够实时呈现设备性能、环境因素及电网负荷情况, 减少信息滞后的风险。借助算法分析, 管理团队既可以及时排除设备隐患, 也能在资源调度上更为精准, 从而保证电站稳定发电。与此同时, 智能化的趋势预测功能帮助管理团队根据历史数据优化决策, 使运维计划更具前瞻性。生产与运营的节奏也因这种精细化管理而更加高效, 能源利用率得到提升, 突发状况的发生率大幅下降。采用这种方式, 有助于管理团队在实时监控中建立对全局的把控力, 还可以在长远规划上具备科学的依据,

从而使光伏电站在智能化转型的背景下保持持续健康的发展动能^[1]。

2 大型地面光伏电站生产运营智能化管理的策略

2.1 优化组件巡检流程, 提升智能排查效率

传统巡检方式依赖人工, 受限于时间精力, 存在遗漏或滞后的问题。管理团队利用传感器网络、无人机巡检及大数据分析等手段, 可以实时监测并采集组件运行状态, 使异常情况能够更早被识别。管理团队在规划时需注重巡检频率的合理分配, 同时强调优化巡检路径设计, 将人工巡查同智能识别系统相结合, 形成互补模式^[2]。同时, 借助算法分析历史数据, 能够预测潜在故障趋势, 从而减少突发故障带来的损失。这种转变使得光伏电站生产运营更具前瞻性, 既有助于降低运维成本, 也可以提升整体发电效率, 真正体现智能化管理的价值。

在具体实践中, 管理团队引入无人机巡检系统改造光伏电站日常运维模式。无人机在预设航线中自动拍摄工件表面图像, 并利用智能识别软件对灰尘积聚、热斑效应或破损情况进行判别, 数分钟内即可完成数千块组件的初步筛查。人工巡检人员则根据系统推送的异常清单, 有针对性地开展现场复核及维护处理, 避免盲目逐块排查的低效方式。管理团队还建立集中数据平台, 将巡检结果同电站运行数据进行比对, 例如结合组件发电功率与红外影像, 分析是否存在遮挡或内部损伤。平台内的历史记录能够形成完整的运行档案, 帮助判断故障发展趋势。为保证管理精度, 团

队将巡检任务划分为日常、月度、季度三级，日常侧重快速筛查，月度着重细化排查，季度则结合数据趋势开展系统性评估。这种层层递进的安排让巡检更加系统化。优化流程后，巡检时间缩短约三分之一，异常排查效率提升近一倍，不仅能够使光伏电站的生产运营更为高效，也可以为智能化管理奠定坚实的基础。

2.2 完善人员排班机制，优化智能运维调度

随着智能化水平的不断提高，人员排班机制的科学性直接影响着运维工作的效率。传统的固定班次无法适应设备运行的实时变化，而智能管理要求管理团队根据电站功率波动、设备运行数据及气象预报动态调整人力资源分配。管理团队引入大数据分析 with 智能排班系统，能够在保持人员工作负荷均衡的前提下，提高检修响应的及时性。与此同时，智能化运维调度不只关注任务分配，还强调跨部门间的信息共享，从而实现人力、设备同系统的高效协同。管理团队在这一过程中需不断优化机制，使排班既符合劳动规范，又能兼顾电站生产运营的灵活性^[3]。

以夏季高温期为例，逆变器及升压站等设备的负荷压力明显增加，故障概率相对提高。管理团队借助系统分析发现，白天高峰时段对运维人员的需求更为集中，因此将日间排班进行适度强化，安排多名技术人员在岗，重点负责设备状态巡查与异常处理。同时，夜间电站功率下降，管理团队则结合历史数据及预测模型，将部分人员调整为远程值守模式，仅保留必要的现场值班，以降低不必要的人工消耗。在调度执行过程中，管理团队结合智能工单系统实现任务的自动分配。若某组组件出现功率下降，系统立即生成检修任务并推送至当班人员的移动终端。管理团队能够实时查看任务完成进度，并根据情况调度人员，确保问题得到快速解决。此外，管理团队还建立交接班数据共享机制，当班人员在交接时上传巡检记录、故障处理情况及未完成事项，接班人员根据系统即时获取相关信息，避免遗漏或重复工作。在长周期运维中，管理团队定期根据数据积累调整排班策略。在风沙天气频发的地区，组件清洗成为重点任务，管理团队结合预测工具确定清洗周期，并提前调配人员及清洁设备，确保光伏电站的发电效率保持稳定。根据这些实践，管理团队不仅可以实现人员利用率的最大化，还能够生产运营中提升智能化水平，使光伏电站在复杂环境下依旧保持高效、安全的运行。

2.3 细化储能充放规则，实现智能电量调控

管理团队在光伏电站生产运营过程中，将智能化思维融入储能系统的运行规则中，能够提升整体电量调控的科学性。光伏发电受气候与时段影响波动明显，若缺乏合理的储能充放安排，电量利用率将受到制约。管理团队细化储能充放规则，将实时电网负荷、气象预测及电价曲线纳入模型计算，形成动态的调度依据。在这种模式下，储能系统不再依赖固定的启停阈值，而是根据生产运营需求或市场信号灵活调整，既能缓解发电侧的波动压力，又能提高供电侧的稳定性。智能化管理的意义在于将多维数据转化为可操作的决策逻辑，使光伏电站在波动环境下依然保持有序运行，进而提升新能源消纳水平，推动资源的高效利用^[4]。

管理团队在大型地面光伏电站的生产运营中，构建以智能化算法为核心的储能管理体系，将未来 24 小时的辐照度预测、电网实时负荷及电价浮动信息整合到调度系统中。白天光照强烈时，储能设备并非立即满功率充电，而是根据预测的峰值时段逐步分配充电速率，以避免短时间内出现储能饱和，影响电量的灵活调度。傍晚，管理团队根据电价高峰与用电需求上升的趋势，逐步释放储能电量，使电网在高负荷下依然保持稳定。这样的充放电策略，不仅可以缓解电网的压力，还可以结合电量在不同时间的转移实现收益优化的目标。在实际操作中，管理团队将智能算法嵌入储能监控终端，实时修正储能电池组的状态参数。当监测到部分电池出现温度升高或容量衰减时，系统会自动调整负荷分配，延长设备使用寿命，保证储能单元的运行安全。同时，团队还建立可视化平台，将每一次充放电过程的数据反馈呈现在管理界面上，使值班人员能够直观掌握储能系统的工作情况，形成“预测—决策—执行—反馈”的闭环管理。借助这种智能化管理，光伏电站在阴雨天依然能保持稳定供电，在晴天又能充分利用电量储备，最终实现能源供给与市场需求的动态平衡。管理团队在光伏电站生产运营中，细化储能充放规则并结合智能化技术，不仅能够提高电量调控的精准性，也可以增强系统对复杂环境的适应力，为新能源的高效利用及电网稳定提供有力支撑。

2.4 校准支架调节参数，确保角度控制精准

支架角度直接决定光伏组件的受光强度，而角度控制的误差会引起电量输出的偏差。引入智能化管理，能够使角度调节由经验判断转向数据驱动，根据气象

数据、光照强度及实时运行参数的动态匹配，形成精准的控制模型。管理团队在策略制定中，既要重视定期校准机制，还需强化传感器同监控系统的融合，让角度调节实现自动识别并修正的目标。这样一来，光伏电站能够在不同季节、不同天气下保持最佳受光状态，从而保障生产运营的稳定性。

管理团队可以先搭建智能监测平台，将光照强度、太阳高度角同组件实时输出电流关联分析，形成角度与发电量的动态对照表。根据历史数据，团队发现单纯依靠人工设定的角度存在固定偏差，部分时间段发电效率未能达到理论水平。针对这一问题，团队引入智能化管理工具，对支架调节参数进行自动化优化。平台接入高精度传感器，每隔十分钟采集一次角度偏移同输出功率的差异，并在后台生成实时修正指令，传输至支架控制端展开微调。经过一个运行周期的验证，发电量可以提升一定幅度，系统稳定性也得以提高。管理团队还可以制定分区管理方案，将光伏电站划分为若干模块，每个模块单独设定角度修正参数。这样既能应对地形差异导致的光照偏差，也能提升整体运营的灵活性。同时，团队安排专门人员定期比对系统数据及人工检测结果，保证智能化管理同人工巡检形成互补。借助这种方式，电站在连续阴雨天气后的光照恢复期，能够迅速恢复到最佳角度，减少因延迟调整带来的电量损失。长远来看，这种精准控制策略不仅能够降低维护成本，还可以延长支架设备的使用寿命，为光伏电站生产运营提供可持续保障。

2.5 优化环境数据分析，强化智能预警响应

电站运行受气象、温度、湿度等因素影响，若缺乏及时监测及科学分析，容易造成设备运行效率下降或安全隐患加剧。通过智能化平台整合多源环境数据，管理团队能够建立动态模型，识别潜在风险并提前作出响应。环境数据不只能反映电站外部条件变化，还能同设备性能参数形成联动，为制定维护计划提供支撑^[5]。强化预警机制，能够使电站在面对突发天气或长期环境变化时保持稳定运行，从而保障发电效率及整体安全水平。

例如：在电站场区布设多类传感器，实时采集风速、光照强度、空气湿度等关键指标，并与电站管理平台进行数据互通。并且借助大数据建模，团队能够分析长期趋势，识别区域因季节性风沙导致组件表面积尘量上升的规律。在这种情况下，平台生成清洗预警，提示管理人员提前安排清洁计划，避免因积尘过

厚影响光伏组件的转换效率。在气象突变场景中，管理团队利用智能预警功能，实现对极端天气的快速响应。当风速超过设定阈值，系统立即下达支架调节指令，自动调整组件角度以减少风荷载影响，降低设备受损风险。同时，平台同步通知值班人员准备防护措施，确保运行安全。在长期运维中，团队还分析不同气象条件下设备的性能偏差，建立起预防性维护模型，若发现湿度升高与接线盒故障率存在相关性，就能提前安排绝缘检查并加固设备。这种智能化管理方式既能够提升光伏电站生产运营的稳定性，还可以降低人工排查及被动维护的成本。管理团队持续优化环境数据分析同智能预警响应的联动，有助于逐步形成数据驱动的运维模式，使电站在复杂环境中保持高效与安全的运行状态。这种经验也能够为后续扩建电站或其他区域的光伏项目提供可复制的管理路径，推动智能化在新能源运营管理中的深入应用。

3 结束语

大型地面光伏电站结合智能化管理，不仅可以让设备运行更加稳定，也能让电量利用更加高效，管理方式从依靠人工逐步转向依靠数据技术，进而形成更加科学的运维模式。这种转变有助于提升电站的整体效益，也可以为新能源的利用创造更大空间。未来，随着人工智能、大数据及物联网等技术不断发展，管理团队将在更大范围内拓展应用智能化管理，为新能源产业的高质量发展及能源结构的持续优化提供坚实的支撑。

参考文献：

- [1] 潘帅,刘华斌,张琦,等.智能化技术在光伏电站施工管理优化中的应用研究[J].工程建设和设计,2025(12):96-98.
- [2] 武朝平,陈子寒,李永昌,等.基于BIM与物联网的智能化光伏电站施工技术研究[J].工程建设和设计,2025(04):91-93.
- [3] 杜勇.智慧工地系统在大型光伏电站建设中的应用分析[J].通讯世界,2024,31(12):130-132.
- [4] 张泽成,张宗旭,王家坤,等.光伏电站智慧型监控管理系统的探索[J].自动化博览,2024,41(08):76-81.
- [5] 高志强,向东,杨培友,等.智能光伏电站开发及运维管理体系的构建与实施[J].化工管理,2023(S1):115-122.

移动式变电设备在变电站技术改造中的应用分析

朱汉青

(广州南方电力技术工程有限公司, 广东 广州 510250)

摘 要 随着我国电力基础设施的老化及供电可靠性要求的提高,传统变电站技术改造项目面临时间紧、任务重、供电连续性要求高的挑战。本文基于广州供电局 110 kV 东镜站技术改造项目实践,探讨移动式变电设备在变电站改造中的应用价值与实施方案。通过分析移动式变电站的模块化设计、快速部署能力及灵活接入特点,结合本项目实施过程中遇到的施工复杂、停电时间有限、运行设备防护等难点,提出了相应的技术对策与管理措施,以期同类项目提供参考。

关键词 移动变电站; 变电站改造; 应急供电; 智能电网; 电力安全保障

中图分类号: TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.022

0 引言

随着我国经济的持续增长,电力需求不断攀升,对变电站供电可靠性的要求也日益提高。现有变电站普遍面临设备更新与技术升级的需求,尤其在广州这类超大型城市,电力负荷高度集中,用户对供电连续性的期望极高。若沿用传统的变电站改造模式,往往需安排长时间停电,将对社会经济运行和用户用电体验造成较大影响。

在此背景下,移动式变电设备作为一种先进的电力应急保障和技术改造手段,逐渐展现出其独特优势。移动变电站是“电力系统突发事件应急预案”的重要组成部分,当发生应急抢救预案时,移动变电站就是保障电力供应的首选^[1]。近年来,移动式变电设备不仅在应急保电中发挥作用,更逐渐应用于变电站技术改造领域,成为实现不间断供电改造的关键技术手段。

1 移动式变电设备的技术特点与应用场景

移动式变电站是包括移动车和移动车上布置的高低电压配电装置、变压器及二次设备等,具有组合灵活、便于运输、安装快捷、施工周期短等特点。110 kV 移动式变电站主要由 110 kV 组合电器车模块、110 kV 主变车模块、10 kV 配电车模块、二次模块等构成,是一种集成了多种电力设备的可移动式电力供应系统^[2]。

1.1 移动式变电设备特点

(1) 高度集成化: 将高压组合电器、主变压器、10 kV 开关柜、综合自动化系统及运输车体五大模块有

机整合,安装于一至多辆半挂车上^[3]。(2) 灵活性与适应性: 110 kV 移动 GIS、移动变压器、移动开关柜都可以像积木一样拆分,可根据不同变电站的特点进行组装,适用于所有 110 kV 变电站改造。(3) 机动性强: 变电车的液压升降和随动转向系统,可有效降低运输高度和减小转弯半径。变电车采用组合式设计,可实现变压器与 HGIS 组合和分离,增强了狭窄和急弯道路的通过性^[4]。(4) 快速部署能力: 整车到达使用现场后,停放稳固,接入现场接地网,现场调试完成后,根据停电计划安排,即可投运使用,大大缩短了变电站改造时间。车载式移动变电站方案如图 1 所示。

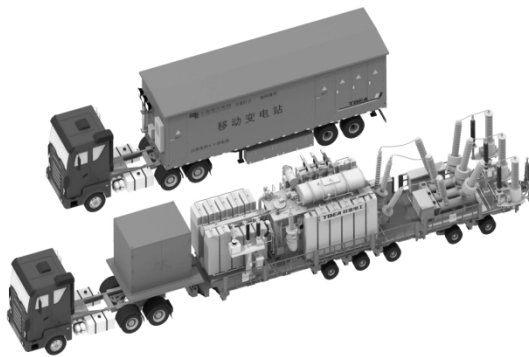


图 1 车载式移动变电站方案

1.2 移动式变电设备在变电站技术改造中的应用场景

(1) 老旧变电站整体改造: 当变电站需要进行全站综合改造,并改造为智能变电站二次设备时,移动

式变电设备可以作为临时过渡电源, 保证本站重要负荷供电。(2) 应急抢修与灾害恢复: 在发生台风、地震、强降雨、雨雪冰冻等自然灾害时, 移动式变电设备可快速恢复供电, 提高电网应急保障能力。(3) 临时供电保障: 用于用电高峰负荷转移、超预期规划临时供电, 重大活动保供电等多种作业场景。(4) 基础设施落后地区快速供电: 高电压等级可移动车载的成套变电设施可帮助基础设施落后、自身工业产品自给率低的国家快速实现电网枢纽节点的从无到有。

在广州供电局 110 kV 东镜站改造项目中, 移动式变电设备的应用正是基于老旧变电站整体改造的需求。本站现有主变 2 台, 容量为 2×63 MVA, 110 kV 侧采用线路变压器组接线, 10 kV 侧采用单母线分段接线。为确保本站重要负荷供电, 本站改造期间采用局移动变 + 移动高压室, 分别对 #1、#2 主变及高压室轮停, 实现了改造期间供电不间断的目标。

2 移动式变电设备在技术改造中的实施难点与对策

尽管移动式变电设备在变电站技术改造中具有显著优势, 但在实际应用过程中仍面临诸多挑战。基于 110 kV 东镜站改造项目实践, 我们识别了以下主要实施难点并提出了相应的解决对策。

2.1 运行设备安全保障挑战

2.2.1 难点分析

在运行变电站内实施改造项目, 施工环境复杂, 施工人员较多, 交叉作业风险高, 必须确保运行设备安全和人员安全。

2.2.2 解决对策

(1) 严格安全隔离措施: 将施工场地用围栏分隔进行封闭施工; 施工时要严格监护保证人身设备安全。加派施工安全监督人员到每一个施工点作安全施工监督。(2) 保持安全距离: 认真落实监护人职责, 施工人员、施工机械、人员、工具及材料与设备带电部分的安全距离 110 kV 大于 1.5 米; 10 kV 大于 0.7 米。严禁施工人员进入任何运行间隔。(3) 完善工作许可制度: 未经运行人员许可及未办理相关工作票禁止进入施工区域。提前办理工作票等手续, 任何工作需得到运行人员批准及办好手续后方可进行。

2.2 设备安装与质量控制难点

2.2.1 难点分析

移动式变电设备涉及多种特殊设备安装, 如 GIS 设备安装要求高, SF₆ 气体处理需要专业技术, 电缆敷设和接头制作质量直接关系到供电可靠性。

2.2.2 解决对策

(1) 严格设备检查: 根据设计和 GIS 说明书, 检查 GIS 型号、规格等是否与设计要求相符。各附件是否齐全, 专用工具及技术资料齐全。SF₆ 气体化验合格。

(2) 专业化施工团队: 由经验丰富的专业人员施工, 准备好 SF₆ 抽真空机、氮气及试验设备、相应的辅助设备、常用材料及工器具等, 并商定好安装方案技术措施。(3) 强化电缆防护措施: 敷设过程中有可能损伤电缆外护层的地段必须采取相应措施, 如增加滑轮、加橡胶垫并指派专人监护。电缆敷设就位后, 应测量外护套绝缘电阻, 在金属套和外护套表面导电层之间以金属套接负极施加直流电压 10 kV, 历时 1 min, 外护套应不击穿, 发现故障及时修复。

2.3 施工时间紧与多专业协调难题

2.3.1 难点分析

主变停电接入移动变工作, 涉及变电、电缆等专业工作, 时间紧任务重。10 kV 负荷转接涉及 14 回负荷转接, 时间短、工作量大, 需要在有限的停电时间内完成大量设备的安装、接线和调试工作。

2.3.2 解决对策

(1) 前期充分准备: 提前做好人员及物资准备, 停电前完成相关停电手续业务办理; 10 kV 转接箱安装; 10 kV 转接箱至移动高压室电缆敷设、电缆头制作及相关试验。(2) 精细化项目管理: 制定科学合理、针对性强、切实可行的具体实施方案, 使用高精度雷电定位系统(我司专利)、新型可扩展移动式工作棚架(我司专利)、施工现场视频在线监控、接入式发电车、设备材料二维码信息溯源等先进技术手段。(3) 加强协调沟通: 与建设单位进行默契配合和沟通, 推进本项目的建设, 协调外单位施工时间及工作计划, 减少工期制约因素。

2.4 施工环境与成品保护挑战

2.4.1 难点分析

变电站内施工空间有限, 设备密集, 对现场的基础设施、消防设施、施工材料、静电地板等需要做好成品保护措施。

2.4.2 解决对策

(1) 全面围蔽施工区域: 施工期间施工区域做好施工围蔽, 禁止外来人员及无关人员进入施工区域; 施工现场进行施工安全围蔽: 在工作地点挂“在此工作”标示牌; 在相邻运行屏柜挂红布及“运行中”标示牌;(2) 加强成品保护: 施工全过程需要对现场的基础设施、

工程造价全过程管理中的成本控制研究

郎纪江

(浙江中兰工程项目管理有限公司, 浙江 金华 321100)

摘 要 随着建筑工程项目规模持续扩大, 工程造价全过程管理中的成本控制成为提升投资效益的关键环节, 传统阶段性管理模式存在信息割裂与管理脱节问题, 无法实现造价的有效控制。本文基于项目全生命周期梳理投资决策、设计、招投标、施工与竣工各阶段成本控制要点, 提出健全管理体系、强化协同机制、完善信息平台、优化评价指标等实施策略, 旨在为构建科学动态且系统的成本控制体系、推动工程造价管理向精细化与智能化发展提供有益参考。

关键词 工程造价; 全过程管理; 成本控制

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.023

0 引言

当下建筑工程项目投资规模持续扩大, 成本控制逐渐成为项目能否成功推进的关键因素。传统阶段性造价管理模式常出现信息孤岛、管理环节衔接断层这类情况, 无法对成本展开有效管控。全过程工程造价管理属于先进管理理念, 它着重在项目立项直至竣工验收的全生命周期里做成本控制, 还依靠系统化管理手段让各阶段成本实现有机衔接。全过程管理模式不仅能提升投资决策的科学性, 还能有效降低项目面临的风险、增强企业在市场中的竞争力, 所以深入研究全过程成本控制机制, 能推动建筑行业高质量发展。

1 工程造价全过程管理概述

1.1 全过程管理的基本概念

在工程项目推进过程中, 全过程造价管理是贯穿全生命周期的系统化管理方式, 它把策划决策、设计、招投标、施工和竣工决算这些阶段串联成有机整体。在项目前期策划环节, 工作人员要精准编制且审核投资估算, 为可行性研究提供支撑依据, 同时协助建设单位合理规划资金使用计划, 从源头把控工程造价。推进至设计环节时, 造价管理人员参与限额设计, 运用价值工程原理优化方案, 保障设计成果兼顾功能与经济性以规避后期变更和成本上升, 同时借助 BIM 技术开展模型碰撞分析, 提前解决问题, 减少施工返工与资源浪费。在招投标环节, 全过程造价管理聚焦编制科学合理的招标文件和工程量清单, 明确合同条款里的计价方式、风险分担等内容, 为项目实施阶段的造价控制筑牢基础。

在施工阶段, 管理内容涵盖工程进度款支付审核、

设计变更与现场签证管理、材料与设备价格控制等方面, 通过施工现场实时监控与数据分析及时发现并解决造价偏差问题, 使工程造价始终处于可控状态。竣工决算环节, 工作人员会全面审核工程结算与竣工决算, 精准核算工程项目实际造价, 再为建设单位出具详细成本分析报告, 以此支撑建设单位后续项目投资决策。全过程造价管理聚焦工程造价量化控制的同时, 也重视项目质量、进度、安全等维度的综合协调与平衡, 通过这些举措实现工程项目整体效益的最大化。

1.2 全过程成本控制核心理念

全过程成本控制核心理念是把成本意识贯穿项目全周期来实现成本优化配置, 项目各参与方需协同合作并实现信息共享。设计阶段需精准定位功能需求、科学估算投资并推进限额设计, 同时运用价值工程优化方案, 从项目源头把控成本。进入招标环节, 需精细编制文件并合理设置控制价, 防范恶意低价与后期超支风险。施工阶段是成本控制的关键环节, 需精细管理成本支出、严格审核进度款支付并严控工程变更, 还可以借助 BIM 等数字化技术监控施工提高资源利用效率, 同时强化采购管理, 选取高性价比供应商。项目实施过程中需建立动态监控机制及时纠偏, 竣工决算环节要全面核算分析、总结经验, 为后续项目提供决策依据, 最终达成全生命周期成本最优目标。

2 工程造价各阶段成本控制要点

2.1 投资决策阶段的成本估算控制

工程造价投资决策阶段需要深入开展市场调研, 收集与项目相关的各类信息, 如材料价格、人工成本、设备费用等, 而市场调研作为成本估算的基础, 准确

的信息能够为后续估算提供支撑。调研范围要足够广泛,覆盖不同供应商、不同品牌的产品价格以及不同地区的人工成本差异;同时结合类似项目的实际数据,运用生产能力指数法、系数估算法等多种估算方法交叉验证。生产能力指数法凭借分析项目规模与成本之间的关系预测项目总投资,系数估算法依据已知项目的成本数据按一定比例推算新项目的成本,多种方法交叉验证能够提升估算的准确性、减少误差。另外,需要建立动态的风险评估与成本预测机制,项目可能面临的市场波动、政策变化、自然因素等风险都会对成本产生影响,全面分析并量化风险、制定相应的风险应对策略且将风险成本纳入投资估算,能够降低项目成本超支的风险。同时,优化设计方案与成本效益分析也很必要,要从技术、经济、环境等多方面综合比较多种设计方案的成本效益,选取既能满足项目功能需求又能实现成本最优的设计方案,这是投资决策阶段成本控制的重要环节。

2.2 设计阶段的限额设计管理

在工程项目设计环节,限额设计作为控制工程造价的关键手段,贯穿方案设计到施工图绘制的全过程。设计单位需要依据投资决策阶段核定的投资估算,将造价限额合理拆分至建筑、结构、机电等各专业及基础、主体、装饰等分部分项工程,同步明确各专业设计目标与成本控制红线,为设计工作划定清晰路径。推进设计工作时,构建完善的限额设计管理制度是实现成本管控的前提,针对设计变更需要执行严控机制,所有变更都要先做成本效益分析再走审批流程,以此保证变更既必要又经济,因为设计变更极易推高项目成本,所以对待变更环节必须审慎考虑。设计部门与造价管理部门要强化沟通协作,定期召开限额设计协调会,第一时间化解设计中浮现的成本矛盾,设计人员和造价管理人员保持紧密配合,能及时察觉并处置设计中的成本隐患。同时建立设计人员经济责任制,将设计质量、成本控制成效和设计人员绩效绑定,激励设计人员主动落实成本控制,依托经济手段激励设计人员,可提升其对成本控制的重视度,在设计阶段实现工程造价有效管控^[1]。

2.3 招投标阶段的造价确定机制

在推进工程项目招投标工作过程中,招标人要结合工程类型、规模等特性,编制详细准确的招标文件,其中包含工程量清单、技术规格、评标办法等核心内容,工程量清单作为招标文件的核心构成,其编制准确性直接关系到投标报价的合理性,科学核定招标控制价,可为招标环节提供清晰的价格锚点。开展评标工作时,

采用综合评估法需要兼顾投标报价与投标人技术实力、企业信誉、过往业绩等维度,从中选出性价比最优的合作方,综合评估法可对投标人综合实力做全面衡量,规避单一以价格为评判标尺的做法,选定更适配的中标主体。同时强化合同管理,要在合同里明确造价调整触发条件与操作办法,如工程变更、材料价格浮动等情况的处置规则都需要清晰约定,防止合同存在漏洞引发争议,合同作为项目实施的法律性依据,条款表述清晰可降低后续履约阶段的纠纷风险。另外,要搭建招投标阶段造价数据库,对过往招投标数据做收集分析,为后续项目造价核定提供参考依据,依托历史数据积累,可为后续项目运作提供珍贵经验与数据支撑,助力造价核定工作,提升科学性与精准度^[2]。

2.4 施工阶段的动态成本监控

施工阶段需构建完善的动态成本监控系统,在施工过程中实时采集并分析人工、材料、机械使用费与措施费等成本数据,再将这些数据与预算成本开展对比分析以迅速发现成本偏差,通过动态监控及时掌握成本变化趋势、发现问题并落实应对举措,通过拟定优化施工方案、合理调配资源、加强施工进度管理等有效成本控制措施纠正偏差,优化方案能提升施工效率并减少非必要支出,合理调配资源可以规避浪费,强化进度管理能降低工期延误引发的成本提升。施工阶段要同步强化施工现场签证管理,针对工程变更与现场签证实施严格审核和管控以保障变更合理性与成本可控性。签证管理作为施工阶段成本控制关键环节,严谨审核能预防不合理成本追加。施工阶段应定期开展成本核算与分析,向项目管理团队输送准确成本信息作为决策依据,精准及时的成本信息能助力团队做出合理决策以高效管控项目成本。

2.5 竣工阶段的最终成本核算

竣工阶段成本核算承担着项目成本全面总结与核算的任务,需要搭建严格的竣工验收制度,针对工程质量、工程量等开展全面检查验收以保障工程契合设计要求与质量标准。工程质量作为项目核心,严谨的验收制度能夯实质量基础,规避质量问题引发的成本追加。编制竣工决算时,依据合同、招投标文件、变更签证等资料对工程造价做详细审核核算,保障决算准确完整,而精准的竣工决算能为项目成本分析提供可靠数据支撑。同时强化与审计部门的协作,接受审计监督并针对审计反馈问题及时整改。审计作为项目成本核算关键环节,能够揪出并修正核算中存在的问题。另外,针对项目成本开展总结分析,提炼成本控制经验教训为后续项目提供参考,借助经验总结能持续优化成本控制方法、提升管控水平^[3]。

3 工程造价全过程管理中的成本控制实施策略

3.1 建立健全成本管理体系

第一,推进成本管理体系建设时,构建全周期责任传导机制是核心环节,要按照决策、设计、招投标、施工、竣工结算等阶段划分成本责任模块,明确各模块牵头部门、协作岗位和责任边界,再将责任清单纳入岗位绩效考核核心指标,形成“阶段责任到岗、具体任务到人”的管理链条。第二,搭建动态标准更新机制需要联合技术、财务、施工等多部门组建标准编制小组,系统梳理各类工程业态的成本构成要素,结合政策调整、技术迭代和市场变化定期开展标准评审与修订,同时建立标准执行反馈通道,收集各阶段标准适配问题后形成优化方案。第三,跨部门协同审议制度的建立要针对重大成本调整事项设立专项审议小组,明确审议启动条件、流程和决策权限,要求涉及成本变动的设计变更、施工方案调整等事项经小组集体审议通过后执行,同时留存审议记录作为成本追溯依据。

3.2 强化各阶段协同配合机制

第一,开展各阶段协同配合机制建设时,前置协同对接平台的搭建要在项目决策阶段落实,组织设计、施工、造价、运维等多方召开协同启动会,明确各阶段信息传递节点、内容和格式要求,制定协同对接时间表与责任清单,保障决策信息精准传递至后续阶段。第二,过程性信息共享机制的建立需要设定各阶段协同对接专员,由专员实时收集本阶段成本相关信息并按标准格式录入共享系统,同时定期组织跨阶段协同会议通报成本控制进展、协调解决衔接问题,形成“信息实时流转、问题即时响应”的工作模式。第三,闭环协同监督机制的构建要引入第三方协同监理角色,对各阶段协同对接情况全过程跟踪,重点核查信息传递的及时性、准确性和责任落实情况,发现协同断层问题及时出具整改通知,督促相关方限期整改并验证整改效果^[4]。

3.3 完善信息化管理平台建设

第一,完善信息化管理平台建设需推动平台模块化重构,围绕成本管理全流程拆解成本估算、预算编制、变更管理、结算审核等核心功能模块,同步开发模块间数据接口以实现各阶段成本信息自动关联与同步更新,保障数据流转的连续性与一致性。第二,构建智能预警功能体系时需基于成本控制逻辑设置动态预警阈值规则,自动识别预算超支风险、变更成本异常等情况,通过系统弹窗、短信通知等方式实时推送预警

信息,同时在系统内嵌入预警处置指引以明确响应流程与责任部门。第三,建立平台安全与运维机制要搭建多层次权限管理体系,依据岗位职责分配数据查看、编辑、审批等权限,定期开展系统安全检测与漏洞修复工作,同时组建专业运维团队负责平台日常维护、功能迭代及用户技术支持,保障平台稳定运行。

3.4 优化成本控制评价指标体系

第一,优化成本控制评价指标体系时要先搭建全维度指标框架,按过程性与结果性指标分类。过程性指标覆盖各阶段预算执行率、变更成本控制率、协同对接及时率等内容。结果性指标包含竣工结算偏差率、总成本节约率等指标,同时补充政策适配性、技术经济性等定性指标,形成“定量+定性”的综合指标体系。第二,建立指标动态校准机制要定期收集指标执行数据与反馈意见,结合项目类型、规模和行业发展变化调整优化指标权重与评价标准,还要邀请技术、造价、管理等领域专家参与校准评审,保障指标的科学与适配性^[5]。第三,完善评价应用机制要将评价结果和成本管理改进方案直接挂钩,针对指标未达标的领域做专项分析,明确问题根源并制定整改措施,还要将评价结果作为部门绩效考核、项目评优及人才评价的依据,强化评价的导向作用。

4 结束语

工程造价全过程管理中的成本控制是现代建筑项目管理的关键组成部分,建立健全全过程成本控制体系能有效提升项目投资效益、降低工程风险。未来BIM技术、大数据等新兴技术深入应用后,全过程成本控制会向更精细化、智能化的方向发展,还要完善相关法规制度、加强行业标准化建设,推动全过程工程造价管理理念在实践中深化,为建筑行业可持续发展提供支撑。

参考文献:

- [1] 吴向军. 建筑工程管理中全过程造价控制策略的优化与实施研究[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(13): 172-174.
- [2] 王晋宏. 建筑工程项目管理中全过程造价控制对策分析[J]. 城市建设, 2025(13): 36-38.
- [3] 周怡. 建筑工程管理中的全过程造价控制探讨[J]. 中国招标, 2025(07): 178-180.
- [4] 金清春. 全过程管理在工业建筑工程管理成本控制中的作用[J]. 中国住宅设施, 2025(05): 206-208.
- [5] 吴倩芸. 建筑工程造价控制在全过程施工管理中的应用实践[J]. 住宅与房地产, 2025(14): 117-119.

建设项目工程造价全过程管理与控制分析

钱磊

(珠海市公共工程建设中心, 广东 珠海 519000)

摘要 在项目管理中,合理有效的工程造价管理,不但能保障项目的顺利推进,还能在很大程度上节省建设成本,提升投资效益。鉴于此,本文对建设项目工程造价全过程管理的定义、特点以及关键部分展开探讨,同时提出对应的管控方法。通过全方位分析工程造价管理的各个环节,更深入地认识其复杂程度,然后采取具有针对性的策略,以期对实现对工程造价的高效管控有所裨益。

关键词 建设项目; 工程造价; 全过程管理

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.024

0 引言

随着我国建设工程项目的持续拓展，建筑企业的数量日益增多。当下，工业现代化的发展态势愈发明显，在建设项目的工程造价管理中，不可局限于传统的经营理念和方式，而应秉持全过程理念，开展动态化的造价管理与控制。

1 建设项目工程造价全过程管理概述

1.1 工程造价管理的概念与意义

工程造价管理指的是借助科学的手段与技术，对建设项目自决策阶段直至竣工阶段整个过程的造价予以精准管理和把控^[1]。这不只关乎项目的经济效益，更是决定项目能否取得成功的关键所在。实施合理的工程造价管控，能够保障项目在预算限定内实现高质量的建设目标，防止资金浪费及超预算现象，进而提升项目的综合效益，使资源配置得到优化，推动建筑行业的可持续发展。

1.2 工程造价全过程管理的特点

工程造价全过程管理具备系统性、全面性、动态性以及可预见性等特点。(1) 系统性即要将工程造价管理当作一个有机整体来看待, 各个环节彼此关联、相互作用, 并展开综合考量, 继而实现最优效果。(2) 全面性反映在其涵盖了项目从决策、设计、施工直至竣工的所有阶段, 涉及项目整个生命周期的每一个环节。(3) 动态性意味着工程造价管理要依据项目的推进情况持续做出调整和优化, 以契合市场的变化以及项目的实际需求。(4) 预见性着重强调借助科学的预测和规划手段, 提前发现并处理潜在的造价风险, 保障项目的顺利开展。

2 建设项目各阶段工程造价管理的关键环节

2.1 投资决策阶段的造价管理

工程建设的起始点是投资决策阶段,这也是对工程造价产生核心影响的阶段。此阶段的造价管理主要包括项目可行性研究以及投资估算两个方面。在开展可行性研究时,需深入剖析建筑工程的整体情况,涉及对施工现场环境的全方位勘查,以及详尽了解地质条件与地下状况等^[2]。只有全面掌握基础资料,才能制定出合理的规划与设计,保证工程的施工材料、机械设备等各项资金投入均控制在预算范围内。可行性研究的深入程度会直接影响投资估算的精准度,进一步影响后续各个阶段的造价控制成效。

投资估算的精准程度与项目资金配置的合理性紧密相连。若估算数值过高,极有可能引发资金的浪费。而估算数值过低,又可能导致后续阶段预算短缺,加大项目建设的难度。因此,在进行投资估算时,要全面考量项目的建设规模、建设标准以及施工用量等指标,同时参考供电供水、征地拆迁等参数,可以运用系数估算法、指标估算法等计算方法,以此保障估算的合理性。精准编制投资估算,能够为项目后续阶段的造价控制提供标准和依据,做到“既不提高估算标准,也不降低估算标准”。

2.2 设计阶段的造价控制

设计阶段的造价控制主要体现在限额设计和价值工程应用、设计审核等方面。

限额设计就是在工程设计阶段就制定出包含总概算的设计方案,作为后续投资限额的参照^[3]。通过分解投资额,把限额具体落实到各部分项工程中。在限额设计中,要科学地设定造价预算目标,强化对工程量、

概算等细节方面的管理,推动造价动态管理项目的精细化划分,以此保障管理质量。限额设计并非一味地追求低成本,而是在确保工程功能和质量的基础上,合理把控投资规模,防止出现过度设计或者设计不足的情况。

价值工程作为一种技术经济方法,借助系统分析,致力于以最低的生命周期成本实现必要功能。在设计环节运用价值工程,能够针对设计方案开展竞选对比与技术经济分析,进而筛选出技术领先、经济合理,既契合功能与工艺需求,又可降低工程造价的技术方案。价值工程分析需着重聚焦建筑与结构方案的选择,凭借一系列具体手段和模型,对设计方案加以优化,提升设计价值。

设计阶段造价控制的另一关键点在于严格把控设计投资审核关。在进行设计会审时,针对在合理质量目标前提下超出投资的设计问题提出工程造价审核建议,保证设计成果契合投资管控目标。与此同时,强化对设计文档的审核力度,保障设计的深入程度与质量,防止因设计缺陷而引发后续的变更及造价攀升。依据《建设项目工程总承包管理规范》,项目的设计管理需涵盖设计规划、执行、管控以及设计收尾等全流程活动,以此确保设计工作依照计划推进并达到预期目的。

2.3 招投标阶段的造价管控

项目最终成本会受到招投标阶段造价管控的直接影响。依据《工程建设项目施工招标投标办法》,工程施工的招投标活动需遵循公开、公平、公正以及诚实信用的原则,以规范化的流程,挑选性价比最优的承包单位^[4]。

评标方法的选择。各类评标方法都有其独特之处,招标人需依据项目的实际情况,挑选最为适宜的评标方法,举例来说,针对技术复杂或者存在特殊需求的项目,可运用综合评估法,全面考量技术标与商务标;而对于通用技术、性能标准并无特殊要求的项目,则可采用经评审的最低投标价法。科学地选择评标办法有助于保证质量,实现造价最优化。

后续合同的签订与履行能否顺利开展,在很大程度上取决于招标文件的编制质量。招标公告或者投标邀请书、投标人须知、合同主要条款、投标文件格式、工程量清单、技术条款、设计图纸、评标标准与方法等,都应包含在招标文件中。在编制招标文件时,必须做到细致且全面,为后续合同的签订提供有力保障,从而确保项目能够顺利推进。

在确定合同计价方式时,需依据项目的特性以及风险分配原则,从固定总价合同、单价合同、成本加酬金合同等不同类型中进行选择。对于设计深度达标、风险可控的项目而言,可选用固定总价合同。而对于

设计深度不够、可能会出现较多变更的项目,可采用单价合同。合理地选择合同计价方式,能够清晰地划分风险承担范围,减少后续可能出现的变更以及争议,从而为造价控制工作创造良好的条件。

2.4 施工阶段的造价管控

要确保工程造价的有效管控,就需要在施工阶段从组织、经济、技术、合同等多个维度采取相应措施。建材管控,在工程造价中,建材所占比例较高,建材价格的起伏会对工程造价产生明显影响,建筑企业应要求采购人员留意材料市场的价格变化状况,在采购环节秉持“货比三家”的原则,优选建筑材料。同时强化库存管理,借助分类存放、高效管理等手段,降低建筑材料的损耗比率,进而削减材料成本。

在建筑工程施工中,常会受到不可抗力因素的干扰,进而引发工程造价的变动。这就要求建筑企业实施严格的管控。变更事宜需先获得相关人员的认可,并签字确认,保证变更的必要性与合理性,使变更管理趋向规范化,规避非必要的成本支出,确保造价控制的稳定性。

在施工阶段的造价管控中,现场签证以及隐蔽工程记录的管理起着至关重要的作用。从过往的实际情况来看,一旦现场签证缺乏严格的流程把控、隐蔽工程记录管理不到位,就极有可能引发各种纠纷和争议,进而给工程造价的有效管控带来不利影响^[5]。所以,一定要保证相关资料完整且准确,以此为后续的工程结算提供坚实可靠的依据。

此外,还需强化进度与造价的协同管理工作。运用赢得值管理法全面考量项目的进度情况与成本绩效,通过对比已完成工作的预算费用、已完成工作的实际费用以及计划预算,能够及时对其中的偏差采取相应的纠正措施。这种集成式的管理方法能够切实防止项目出现进度延误以及成本超支问题,实现进度与成本的协同管控。

2.5 竣工结算阶段的造价管控

在竣工结算阶段,首先是要核查合同的履行状况,查看承包人是否依据招标文件、施工图纸以及招标范围等,完成工程建设,已完成的项目是否已通过竣工验收,是否存在未完成的甩项工作,只有在确定合同约定的工作内容均已完成,并通过验收,才可启动竣工结算工作。

工程量审查。鉴于工程量的计算既繁多又复杂,很容易出现高估多算的现象,审查时应重点关注投资占比较大的分项工程,还有较易产生混淆或者存在漏洞的项目。要以竣工图为依据,结合工程签证、变更

等材料,依照国家规定的计价标准来开展计算工作,要是竣工图没有详细标注变更位置,造价人员就需查阅有关资料,甚至要前往施工现场进行测量与核对,以此保证变更计算的准确性。

对设计变更签证进行审查。设计变更需由原设计单位提供设计变更通知单以及修改后的图纸,并由设计、校审人员签字,且加盖单位公章,同时还要经过建设单位与监理工程师的审查并获得同意。在审查设计变更的过程中,除了要查看变更手续是否完整外,还需注意工程量的计算情况。对于计算存在错误的工程量,要进行相应调整,对于不符合变更要求的部分,则不能纳入结算范围。

对单价套用进行审查,能够有效保障结算的精准度,要核查工程所采用的套用单价,确保其契合该工程的定额标准和合同要求,还要确定是否与工程结算清单中的各分项清单一致,计算单位是否相同,精准掌握定额套用情况,防止出现高套、错套等问题,以保证结算价格的合理性。

在竣工结算环节,还要注意材料价差的调整。通常依据合同的约定,对施工期间材料价格的波动情况予以调整是较为普遍的操作。在进行调整时,必须严格遵循合同列举的调整方式与幅度,防止随意调整或者重复计算。针对合同约定的风险范围外的价格波动,要依照相关规定进行合理调整,确保结算过程的公平性和公正性。

在竣工结算环节开展造价控制工作,是对工程前期各项工作的全面且最终的检验,同时也是实现工程造价预期目标的关键支撑。通过严谨且周全的结算审核流程,能够及时发现并修正前期存在的偏差错误,从而精准地确定工程的实际造价,让整个项目得以顺利推进。

3 建设项目工程造价全过程管理的信息化建设

3.1 信息化建设的重要性

随着信息技术的快速发展,信息化建设已成为工程造价管理的关键趋向。借助信息化建设,能够实现造价数据的即时共享与高效处理,增强造价管理的效能与精准度,信息化建设还有利于强化内部的交流与协作,营造协同作业的良好氛围。所以,强化信息化建设对提高工程造价管理的整体效能具有重大意义。

3.2 造价管理信息系统的功能与特点

在数据收集阶段,系统应具备自动或半自动从各种项目文件、财务报告、市场行情里提取关键造价数据的能力,以此保证数据的全面性和精确性;在存储功能方面,系统需能够安全且有序地存放海量数据,

方便后续的查询与分析。造价管理信息系统还应拥有较强的数据分析能力,可通过对过往数据的挖掘和对比,找出造价变动的规律和趋势,为成本管控和预算制定提供科学的依据。预测功能要求系统能够依据当前市场情况以及项目的推进程度,对后续发展趋势展开合理的预测,从而协助管理者制定更具前瞻性的决策。在系统的设计过程中,易用性要求系统简洁易用,搭配直观的操作流程,最大限度降低使用的难度,保证各个层级的用户都可以迅速熟悉并开始使用,切实提高造价管理团队的整体工作效能。

3.3 信息化在工程造价管理中的应用

凭借先进的数据挖掘和分析手段,造价管理人员能够通过海量数据的表面现象,深度探寻造价数据蕴含的内在价值和规律。通过对历史数据、市场波动、人工成本变化等数据展开综合剖析,精确预估造价走向,为项目的投资估算、成本管控以及决策制定提供坚实的数据保障,大幅增强了造价管理的科学性和前瞻性,信息化还推动了造价管理团队内部沟通与协作模式的变革。在线协作平台的构建,突破了时间和空间的束缚,让项目成员能够及时共享造价信息和文档资料,开展在线研讨和审批工作,极大地提升了工作效率和协同作业水平^[6]。

4 结束语

全过程造价管理作为一种系统化的管理手段,着重于对建设项目展开从投资决策直至竣工结算整个过程的连续且动态化的管控。通过各个阶段之间的有机连接以及系统管理,能够实现对造价的有效管控,防止传统管理模式中出现的衔接不畅与漏洞问题。相关研究显示,综合考量经济、环境以及社会效益的可持续造价管理理念,能够促使工程造价管理朝着更为全面的方向迈进。

参考文献:

- [1] 邵鹿峰.工程造价全过程管理中的成本控制研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)经济管理,2025(03):107-110.
- [2] 王立新.工程造价全过程管理控制要点与优化策略[J].价值工程,2025,44(07):36-39.
- [3] 王飞.工程造价全过程管理的难点及优化策略[J].门窗,2025(14):163-165.
- [4] 何馨.建设项目工程造价全过程管理方法研究[J].散装水泥,2024(01):151-153.
- [5] 袁凯.建设项目工程造价全过程管理与控制[J].中国招标,2023(08):81-83.
- [6] 沈雄.建设项目工程造价全过程管理优化策略分析[J].工程技术研究,2024,09(21):162-164.

房建住宅项目装饰工程造价的精准估算方法研究

李 欢

(赣州律信工程管理有限公司, 江西 赣州 341000)

摘 要 本文系统探讨住宅项目装饰造价的精确估算路径。首先编制完整工程量清单, 为后续测算奠定数据基础; 其次多渠道采集材料价格, 确保信息覆盖充分且数值可靠。人工费测算引入工效系数法, 使劳务成本更贴近现场实际; 机械台班支出则通过自建费用模型逐台班核算。同时, 采用 LEC 风险评估法识别潜在风险并计取对应预留金。由此形成贯穿设计、施工到结算的全过程造价框架。实例验证显示, 该方法可把估算误差稳定在 3.2% 以内, 与传统方法相比精度优势突出, 可为同类住宅装饰工程提供可参考的估算范式。

关键词 房建住宅项目; 装饰工程; 造价; 精准估算; 风险评估法

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.025

0 引言

在房建住宅项目的装饰工程板块, 呈现出几个显著特征: 住宅项目的装饰环节材料品类庞杂, 工序精细且价格波动剧烈, 传统估算手段更新滞后、数据零散, 误差率常高于 15%。赣州市住房和城乡建设局 2023 年数据显示, 62% 的装饰结算超支源于初期估算偏差。为此, 研究以全生命周期成本管理为框架, 搭建“数据驱动+风险量化”的精准估算模型, 并用实例验证其有效性。

1 住宅项目装饰工程造价影响因素概述

住宅项目装饰工程涵盖墙面饰面、地面铺装、吊顶成型及各类装饰构件的深化与落地。由于同时需要满足美学、功能与个性化需求, 装饰工程呈现出高度综合且多元的特征。装饰工程造价通常包括直接费与间接费: 前者为材料、人工、机械等实体支出, 后者则包括管理费及现场临时设施费等间接开销。装饰工程造价并非孤立数字, 市场环境、政策调控与施工周期等多重外部变量都会对其形成牵制, 材料价格起伏是最直接也最敏感的一环。在成本估算阶段, 必须把材料价格波动纳入定量预测与系统分析, 以提高造价结果的可靠度。近年学界与业界开始聚焦“精准估算”。该方法把数据回归与人工智能结合, 既深挖既有资料, 又动态纳入最新市场信号, 由此建立更科学的模型, 为住宅造价给出更贴近实际的预测。现代信息技术的快速发展为装饰工程造价估算注入了新动力。BIM 技术、大数据分析等技术可在设计与施工阶段打通数据壁垒, 实现信息实时共享, 使造价估算的精度与时效同步提

升。以 BIM 技术为例, 其可视化模型不仅呈现空间方案, 还能迅速统计材料用量与对应成本, 为决策提供量化依据^[1]。

2 装饰工程造价的构成要素

2.1 材料成本

首先, 材料种类与价格差异。装饰材料种类丰富, 涵盖了从基础的建筑材料(如水泥、沙子)到高档的装饰材料(如天然大理石、进口木地板)等。不同种类材料的价格差异巨大。其次, 材料损耗率。在装饰工程施工过程中, 材料损耗是不可避免的。例如: 在瓷砖铺贴过程中, 由于切割、边角处理等原因, 会产生一定的损耗。

2.2 人工成本

首先, 工种与技能水平差异。装饰工程涉及多个工种, 如泥瓦工、木工、油漆工等。不同工种的人工成本差异较大, 而且同一工种内, 不同技能水平的工人收费也有很大差别。其次, 地区劳动力市场价格差异。不同地区的劳动力市场价格存在明显差异。在经济发达的一线城市, 如北京、上海、广州等地, 由于生活成本高、劳动力需求大, 装饰工程人工成本普遍较高^[2]。

2.3 设备与机械费用

大功率机械设备, 如吊篮(电动葫芦)、升降平台等; 还有的是采用自备方式完成的, 比如常用的电钻、电锯、空压机等小吨位的小型机器设备。如果由施工企业自行采购则要根据不同的型号来确定价格高低; 如果是从市场或建筑公司租赁, 要考虑它们的日租金

差别。同时也要考虑到在装修施工过程中经常用到的小型机器设备的维修保养费的问题，如电锤、切割机等常用工具在使用过程中由于磨损等原因需要换刀片、磨刀具，甚至电机修理时产生的各种费用问题^[3]。

3 工程概况

以赣州市某住宅楼装饰工程为例，项目总建筑面积约 10.5 万 m²，由 5 栋 19～31 层剪力墙结构住宅及 1 层地下室组成。施工范围按区域与系统细分：公共区域中，入户大堂干挂石材墙面 2 800 m²，电梯厅面砖墙面 5 600 m²；户内墙面统一刷乳胶漆，面积约 8.2 万 m²，地面则铺 38 000 m² 实木复合地板；在功能系统方面，建筑电气（含弱电预埋）、给排水、消防及通风工程全部纳入实施范围。

4 造价估算过程

4.1 工程量清单编制

借助 BIM 技术开展三维建模后，提取得出的工程量数据详情见表 1。

表 1 通过模型提取的工程量数据

分项工程	计算规则	工程量	损耗率
墙面乳胶漆	净面积 × 1.05 (门窗扣除)	86 100 m ²	5%
地面地砖	净面积 × 1.03 (切割损耗)	40 140 m ²	3%
轻钢龙骨吊顶	展开面积 × 1.1 (梯级造型)	32 800 m ²	10%
电气配管	延长米 × 1.02 (弯曲系数)	124 600 m	2%

编制要点说明：（1）门窗洞口面积计算规范：洞口面积应依据现场实测值扣除，弧形墙等异形部位建议用参数化建模算量，以保证精度。（2）吊顶工程量计算标准：平面吊顶与跌级造型吊顶须分开统计，两者均按实际展开面积计量，禁止合并，确保工程量准确。（3）电气工程配管长度计算细则：配管长度应计入预留，出线盒每处留 1.5 m，开关盒每处留 0.3 m，以满足施工合理性与安全要求^[4]。

4.2 材料价格获取体系

1. 数据库。构建“四维价格数据库”，如表 2 所示。
2. 价格修正模型：

$$P_{\text{实际}} = P_{\text{基准}} \times (1 + \alpha_{\text{季节}}) \times (1 + \beta_{\text{批量}}) \times (1 - \gamma_{\text{付款}})$$

其中：α_{季节}：雨季材料涨价系数（3～5 月 + 2.3%）。β_{批量}：5 000 m² 以上采购折扣率（瓷砖类 6%）。γ_{付款}：现金支付优惠率（30 天内付清享 3%）。

表 2 四维价格指标体系

数据源	更新频率	覆盖范围	典型案例
政府信息价	月度	287 类主材	赣州 2023 年 10 月 Φ12 螺纹钢 4 820 元 / 吨
电商平台	实时	12.000 种辅材	1 688 平台立邦乳胶漆 285 元 / 18L
供应商直报	周度	战略合作伙伴	蒙娜丽莎瓷砖 600×600 mm89 元 / 片
中标数据	季度	历史项目	2022 年同类项目电缆单价 45 元 / m

4.3 人工成本估算

1. 计算方式。采用“工效系数法”计算，如表 3 所示。

表 3 人工成本计算方式

工种	基准工日 (m ² / 工日)	地区系数	调整后 工日	单价 (元 / 工日)
泥瓦工	12.5	1.15	14.38	420
油漆工	18.7	1.10	20.57	380
电工	25.3	1.08	27.32	450

2. 计算公式：

$$\text{人工费} = \Sigma (\text{分项工程量} \div \text{调整后工日}) \times \text{单价} \times (1 + 12\% \text{ 管理费})。$$

案例中墙面乳胶漆人工费：

$$86\ 100\ \text{m}^2 \div 20.57\ \text{工日} / \text{m}^2 \times 380\ \text{元} / \text{工日} \times 1.12 = 1\ 834\ 672\ \text{元}。$$

4.4 设备与机械费用计算

1. 计算模型。建立机械台班费用模型：

$$C_{\text{机械}} = (C_{\text{折旧}} + C_{\text{大修}} + C_{\text{经常}}) \div T_{\text{使用}} + C_{\text{动力}} + C_{\text{人工}}$$

2. 典型设备计算示例（塔吊 QTZ63）。通过典型设备进行计算，如表 4 所示。

表 4 典型设备计算示例

费用项	计算参数	金额 (元 / 台班)
折旧费	85 万 ÷ (8 年 × 300 台班)	354.17
大修费	12 万 ÷ (4 次 × 300 台班)	100.00
经常维修费	100 × 1.69 (维修系数)	169.00
动力燃料费	柴油 45 L / 台班 × 8.2 元 / L	369.00
人工费	司机 1 人 × 420 元 / 工日 ÷ 8 小时	52.50
合计	1 044.67	

4.5 风险因素量化

1. LEC 风险评估。采用 LEC 风险评估法设置预留资金，如表 5 所示。

表 5 设置预留资金比例

风险源	L (可能性)	E (暴露)	C (后果)	D=L×E×C	预留比例
材料价格波动	3	6	40	720	8%
施工变更	2	3	100	600	6%
工人技能不足	1	6	15	90	2%
合计					16%

2. 动态调整机制。当钢材价格波动幅度超出 $\pm 5\%$ 这一范围时，必须启用价格调整公式。另外，若因设计变更产生的累计金额超过合同总价的 3%，则需启用备用金。

5 结果与分析

5.1 造价估算结果

通过以上计算，得出该住宅项目装饰工程的估算结果，其中估算值为 35 707 万元，实际值为 35 023 万元，偏差率为 +1.95%。详细估算数据如表 6 所示。

表 6 造价估算结果

费用项	估算值 (万元)	实际值 (万元)	偏差率
分部分项工程	28 462	27 985	+1.71%
措施项目	3 215	3 108	+3.44%
规费	1 874	1 832	+2.30%
税金	2 156	2 098	+2.76%
合计	35 707	35 023	+1.95%

5.2 精准性分析

从误差来源类型来看，主要表现在材料价格、工程量计算、人工效率、机械闲置四个方面。其中，在材料价格层面，其贡献率为 42%，主要控制措施是建立价格预警机制。在工程量计算层面，其贡献率为 28%，主要控制措施是采用 BIM 三维校核。在人工效率层面，其贡献率为 19%，主要控制措施是实施技能培训与工效考核。在机械闲置层面，其贡献率为 11%，主要控制措施为优化施工组织设计。与传统估算方法相比，本研究方法不仅误差率极低，而且数据需求来源更实时、

更多源。本研究的估算平均误差仅为 1.95%，估算周期为 6 天，数据需求则是利用多源实时数据。总体来说，该造价估算方法具有较高的精准性，能够满足项目成本控制的要求^[5]。

6 结论与建议

6.1 研究结论

(1) 引入“工程量清单 + 动态价格库 + 风险量化”的估算框架后，误差率由传统方法的 15% 压缩至 2% 以内，显著提高了造价预测的准确性。(2) BIM 技术的介入显著提高了工程量计算的精度。实测显示，采用 BIM 技术后计算准确率升至 99.2%，比手工方法高出 41%，凸显其在算量环节的优势。(3) 整合多渠道价格数据后，材料成本估算有了更稳固的依据，偏差被压缩在 $\pm 3\%$ 以内，可靠性随之提升。

6.2 实践建议

(1) 为提高企业造价管理水平，建议搭建覆盖企业层级的造价数据库，库内至少收录 50 个历史项目的完整成本信息，为后续估算提供充分参照。(2) 开发一款可自动运行的估算软件已成当务之急，该软件需内置 LEC 风险评估组件，把自动估算与风险判定合二为一，从而同步提升估算速度与结果精度。(3) 价格信息库能否及时刷新，直接决定成本估算的准确性。建议每季度例行更新，并优先跟踪钢材、水泥等大宗材料的行情变化，以便随时修正预算。(4) 全过程造价管理是控制项目成本的关键手段，应在设计、招投标和施工三个阶段分别设定 $\pm 5\%$ 、 $\pm 3\%$ 和 $\pm 2\%$ 的误差控制目标，使成本始终处于受控状态。

参考文献：

- [1] 王佳. 大型住宅项目施工测量与误差分析[J]. 工程技术研究, 2023, 08(01): 77-80.
- [2] 伍瑞斌. 住宅项目工程审计存在的问题及对策[J]. 理财, 2023(12): 79-81.
- [3] 郭聪. 房建施工项目安全管理的难点和对策探究[J]. 四川建材, 2021, 47(03): 228-229.
- [4] 何一军, 张程, 王丹萍. 住宅项目深基坑施工技术研究[J]. 工程建设与设计, 2022(24): 214-216.
- [5] 胡耀峰. 海绵城市在住宅项目的应用[J]. 陶瓷, 2022(09): 186-188.

基于仿真模拟的准Ⅳ类水达标 工艺优化及运行控制

王剑乔

(苏州水星环保工业系统有限公司, 江苏 苏州 215021)

摘 要 针对江苏某污水处理厂工艺进行数学建模,运用历史数据对模型进行了校核验证,使模型达到预测出水指标的功能。利用建立的仿真模型对出水目标从一级A提升至地表准IV类水质的要求进行仿真模拟实验研究:对一期AAO工艺DO进行PI控制,好氧各段的DO设定为1 mg/L时,曝气能耗最低,同时出水水质最优;对原曝气池进行曝气布局的优化模拟,得出AAO+两级AO工艺出水各项指标最优,以期为题标改造方案设计提供有益参考。

关键词 数学建模; Bardenpho 工艺; 优化模拟; 准 IV 类

中图分类号: X703

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.026

0 引言

近年来,太湖流域污水处理厂普遍面临着准 IV 类水提标的巨大挑战,不论是工艺设计方案还是生产运营管理,都带来了比较严峻的考验。在新标准的严格要求下,新工艺的运行控制策略的研究必不可少,在此过程中,如何发挥数学模型的预测功能,既能筛选出最佳的设计方案,又能在运行过程中承担水质预警功能,以便提前对系统做出准确的干预,以保证达标的稳定性,是今后应该关注的重点研究方向^[1-3]。

1 项目背景

江苏某污水处理厂一期工程设计规模 15 万 m³/d, 其中工业废水量占比约 49%。采用传统 AAO 工艺设计, 总 HRT 19.35 h, 其中厌氧 1.73 h、缺氧 5.18 h、好氧 12.44 h。目前出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 的一级 A 标准, 为进一步提升出水水质标准, 扩建二期工程, 规模 15 万 m³/d, 二级处理采用改良型 Bardenpho 工艺, AAOAO 各段 HRT 分别为: 2 h、6 h、8 h、3 h、3 h, 二期目前处于调试阶段, 扩建后 30 万 m³/d 处理量, 后接高效沉淀池 +V 型滤池深度处理, 尾水排放执行地表准 IV 类水质标准。

2 AAO 建模与工艺优化

2.1 工艺建模与校正

运用 WEST 软件作为建模工具,对一期 AAO 工艺进行建模,采用 2019 年 11 月-2020 年 12 月之间的进水量水质数据输入模型进行参数校核,分别对二沉池

模型参数、进水水质组分转换参数和影响较大的部分动力学及化学计量参数进行调整,使得模拟值与实测值相吻合^[4],校正结果见表1, n_{NO_PAO} 反硝化除磷的修正系数,由0.6校正至1,说明系统中反硝化除磷菌在聚磷菌总量中占比较高,系统的反硝化除磷效果很好。 F_{TSS_COD} 由0.75降至0.7,说明进水中颗粒性有机物占比较高, f_{S_A} 和 f_{S_F} 校正结果分别为0.2、0.75,说明溶解性COD中可发酵的有机物占主要成份。

利用已经建立好的工艺现状模型对 2020 年 1 月至 2020 年 8 月的数据进行模拟预测, 验证模拟值与实测值的匹配度。模拟的工艺运行条件与实际运行条件基本一致, 工艺参数设定如下: (1) 好氧区沿程 DO 分别为 1 mg/L、2 mg/L、0.8 mg/L、3 mg/L; (2) 排泥量 $Q_2=3\ 200\ \text{m}^3/\text{d}$; (3) MLSS 控制在 3 500 mg/L 左右。结果显示的 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 模型模拟值与实测值拟合度高, 由此表示该模型具备了预测出水水质的功能。另外, TP 的出水模拟值高于出水实测值, 这是由于实际生产中采用的是同步脱氮除磷工艺, 因此实测出水 T 数据 P 是经过加药后的结果, 与模型未加药模拟结果相比较低。

2.2 工艺控制与优化

2.2.1 D0 的精细化控制模拟

为了研究 PI 控制策略对出水水质的影响,将通过
对好氧分段进行恒定 DO 值的控制,来提升出水氨氮、
总氮的稳定性,同时达到降低鼓风机能耗的目的。将
AAO 工艺的好氧区分为四段,分别对各段的 DO 进行 PI

表 1 模型参数调整

参数	含义	默认值	校正值	单位
v_0	最大理论沉降速率	474	800	m/d
v_{00}	最大实际沉降速率	250	600	m/d
r_P	沉降系数	0.00 286	0.006	m ³ /g
F_{TSS_COD}	TSS 与 COD 间的转换系数	0.75	0.7	/
f_{S_A}	可溶性 COD 中乙酸占有比例	0.4	0.2	/
f_{S_F}	可溶性 COD 中除乙酸外的短链脂肪 酸占有比例	0.55	0.75	/
K_{NO}	硝酸盐半饱和常数	0.5	0.45	g/m ³
b_H	异养菌衰减系数	0.4	0.594	1/d
K_{O_AUT}	自养菌氧的半饱和常数	0.5	0.37	g/m ³
Y_{PO}	贮存单位 PHA 所释放的 PP	0.4	0.2	/
n_{NO_PAO}	聚磷菌的缺氧活性系数	0.6	1	/

控制，比较不同 DO 设定组合下的出水结果的变化。DO 分段控制的设定值组合见表 2，出水 NH₃-N、TN、TP 模拟结果见表 3 所示。

表 2 PI 控制器的好氧各段 DO 设定

组别	DO 设定值 (mg · L ⁻¹)			
	01 池	02 池	03 池	04 池
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	1	2	0.5	2
4	2	1.5	1	0.5

表 3 好氧段不同 DO 控制梯度下的出水模拟平均值对比

组别	01 池	02 池	03 池	04 池
NH ₃ -N (mg · L ⁻¹)	0.15	0.11	0.14	0.14
TN (mg · L ⁻¹)	11.38	12.63	11.65	11.92
TP (mg · L ⁻¹)	1.00	1.20	1.06	1.02

通过出水水质模拟结果可见，好氧区各段在不同 DO 设定值组合下出水氨氮、总氮均能达标，但从综合指标来看，在氨氮稳定达标的基础上，第二组总氮、总磷的浓度比第一、三、四组高，表明市政污水活性污泥处理系统传统的控制方法将全程 DO 浓度控制在 2 mg/L，一定意义上来说并不符合低碳、高效的标准，根据数值模拟结果来看，将沿程 DO 设定值控制在 1 mg/L 时，既能满足出水达标，也能降低风机能耗。

2.2.2 曝气系统的模拟优化

为探索在不增加生物池池容情况下，通过对现有池体的曝气系统改造，以求得总氮最佳去除效果，运用已建立的模型对一期曝气池进行了 Bardenpho、AAO+ 两级 AO、AAO+ 三级 AO 三种曝气改进方案的模拟试验^[5-6]。

表 4 曝气改进方案各段水力停留时间

参数	Bardenpho	AAO+ 两级	AAO+ 三级
		AO	AO
厌氧区	1.73	1.73	1.73
缺氧区 1	5.18	5.18	5.18
好氧区 1	6	4	4
缺氧区 2	2	1	1
好氧区 2	4.44	3	2
缺氧区 3		1	1
好氧区 3		3.44	2
缺氧区 4			1
好氧区 4			1.44

根据对三种试验方案的模拟结果表 5 分析，可以看出相比原 AAO 工艺，三种曝气改进方案的出水总氮的浓度平均下降 2 mg/L 以上，出水 COD_{Cr}、TSS 浓度平均下降 3 mg/L 以上。从单因子分析结果来看，Bardenpho 工艺的出水 TP 最低，AAO+ 三级 AO 的出水 NH₃-N、TN 最低，而综合出水结果最佳的是 AAO+ 两级 AO 工艺。

表 5 三种曝气改造方案模拟的出水平均值对比

工 艺	NH ₃ -N (mg/L)	COD _{Cr} (mg/L)	TP (mg/L)	TSS (mg/L)	TN (mg/L)
原 AAO	0.19	21.48	0.89	11.49	8.98
Bardenpho	0.40	17.76	0.65	8.77	6.40
AAO+ 两级 A0	0.24	17.68	0.81	8.66	6.45
AAO+ 三级 A0	0.13	17.60	0.94	8.57	6.17

3 Bardenpho 工艺调试运行的模拟优化

在一期模型建立完成的基础上,在 WEST 软件平台上构建了二期改良型 Bardenpho 工艺。运用模型对调控方案进行模拟优化,即利用参数多因子正交分析结果的择优,探索使出水水质达到地表准 IV 类水质标准的最佳运行方案,为二期新工艺调试运行达标提供参考。

3.1 碳源投加点的选择

为确保出水总氮可稳定在 10 mg/L 以下,反硝化脱氮过程的控制尤为重要,其中如何选择碳源投加点位是保证反硝化脱氮效果的关键环节^[7]。根据模型模拟分析可知,投加位置不同,对出水水质影响也不尽相同。为筛选出最佳碳源投加点,在模型中分别模拟缺氧一、二段投加碳源后的出水各项水质情况。从模拟结果可以看出,与在一级缺氧段投加碳源相比,在二级缺氧段投加碳源出水总氮降低 1 mg/L,同时氨氮、总磷均更低。因此,在调试及后续运行过程中可以选择在缺氧二段投加碳源。

3.2 工艺参数的多因子调控预案分析

在碳源投加点位设定在二级缺氧段且投加量 $Q_A = 4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的情况下, 设定好氧区沿程 DO 为 1 mg/L , MLSS 为 $3\ 500 \text{ mg/L}$, 考量多参数正交模拟试验结果, 对比各项出水指标平均值^[8-9], 比较 9 组模拟试验可得, 当内回流比为 4, 外回流比 1.1, 剩余污泥流量 $2\ 800 \text{ m}^3/\text{d}$ 时, 综合出水各项指标属最佳, 可作为今后调试运行的参考。

根据以上多因子参数影响分析模拟结果, 当内回流比 $r=4$, 外回流比 $R=1.1$, 剩余污泥排放量 $Q_2=2\ 800\ \text{m}^3/\text{d}$ 时, 动态预测出水氨氮、总氮、总磷浓度变化。从模拟的两百多天数据变化可以看出, 氨氮可以控制在 $3\ \text{mg/L}$ 以下, 总氮均可控制在 $10\ \text{mg/L}$ 以下, 且生物池的总磷浓度基本保持稳定在 $0.6\ \text{mg/L}$ 左右, 生物脱氮除磷效果良好。

4 结论

根据污水厂 AAO 工艺及其运行参数, 利用 WEST 软件建立现状工艺仿真模型; 输入实际进出水数据, 通

过灵敏度分析,校核模型动力学和化学计量学参数,调整了二沉池参数 v_0 、 v_{00} 、 r_P ,进水水质参数 F_{TSS_COD} 、 f_{S_A} 、 f_{S_F} ,动力学参数 K_{NO} 、 b_H 、 K_{O_AUT} 、 Y_{PO} 、 n_{NO_PAO} 。结果显示,经过校验的模型能够较准确地模拟出实际出水水质。

对一期AAO工艺DO进行PI控制,各好氧段的DO设定为1 mg/L时,曝气能耗最低,同时出水水质最优。对原曝气池进行曝气布局的优化模拟,比较Bardenpho、AAO+两级AO、AAO+三级AO三种工艺改进方案,结果表明AAO+两级AO工艺出水各项指标最优。

参考文献:

- [1] 魏忠庆,上官海东,叶均磊,等.基于GPS-X模拟的污水处理厂提标工艺优化[J].中国给水排水,2018,34(19):81-84.
- [2] 曹特特,王林,李咏梅,等.AAO工艺低氧条件下的运行及其模拟[J].环境科学,2018,39(01):219-226.
- [3] 张舒,马小杰.活性污泥模型在准Ⅳ类水城镇污水处理厂设计中的应用研究[J].中国市政工程,2017(02):55-57.
- [4] 郝二成,王如意,胡志荣,等.大型污水处理厂工艺模拟应用实例[J].中国给水排水,2018,34(05):82-87.
- [5] 王延萍.Bardenpho工艺与多级AO工艺对比分析[J].天津建设科技,2019,29(06):41-43.
- [6] 方土,周家中,吴迪,等.长三角地区某污水处理厂准Ⅳ类水提标改造分析[J].中国给水排水,2018,34(17):94-99.
- [7] 崔洪升,刘世德.强化脱氮Bardenpho工艺碳源投加位置及内回流比的确定[J].中国给水排水,2015,31(12):22-24.
- [8] 孙月娣.Bardenpho工艺内回流与碳源投加耦合控制动态模拟[J].中国给水排水,2017,33(23):66-70.
- [9] 张辉,胡志荣,续蕾,等.基于工艺模拟的污水处理厂数字化实例研究[J].中国给水排水,2020,36(01):87-93.

基于振动频谱分析的锅炉风机轴承全生命周期故障预测与安全生产优化

张佳佳

(内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司, 内蒙古 托克托 010206)

摘 要 本研究聚焦锅炉风机轴承全生命周期的故障预测与安全生产优化,旨在提升设备的运行可靠性与安全性,以振动频谱分析为核心技术。随着工业设备的日益复杂化,传统的维护方法已无法满足快速发展的生产需求,因此,采用先进的振动分析技术进行早期故障诊断与预测尤为重要。本文详细阐述了振动频谱分析的基本原理及其在轴承故障诊断中的应用价值;构建了从轴承早期隐性缺陷到严重失效的监测体系,实现对设备状态的动态实时监控;通过分析各阶段的典型故障特征,提出了相应的预测模型,并结合实际生产情况制定了优化的运维策略,以期为相关人员提供参考。

关键词 振动频谱分析; 锅炉风机轴承; 全生命周期; 故障预测; 安全生产

中图分类号: TH165

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.027

0 引言

锅炉作为工业生产的中心设备,它的稳定运行对整个生产过程来说是至关重要的。风机轴承属于关键部件,它的工作情况直接关系到锅炉的性能表现。在恶劣工况、频繁负荷波动等种种因素的影响下,风机轴承很容易出现各种各样的故障情形,这既会造成设备停机检修,又可能会埋下安全隐患。传统的维护手段大多依靠定时查看和人工观察,不过这些办法存在反应迟缓、准确度不够高等问题。而振动频谱分析则是一种较为先进的故障诊断技术,它通过把轴承振动信号进行频域剖析,可以有效地找出潜在的故障特征并提前警报,进而为设备的健康管理体系提供可靠的理论依据和技术支撑。

1 振动频谱分析在锅炉风机轴承故障预测中的理论基础

1.1 振动频谱分析的基本原理

振动频谱分析利用傅里叶变换技术把时域振动信号转换成频域表达形式,从而得到它的频率组成及其幅值分布状况。在锅炉风机轴承工作时,各种故障模式都会导致一定的频率范围内的振动。内圈损伤一般以内圈通过频率为基础出现谐波现象,外圈缺陷一般以外圈通过频率为基准出现谐波特性。利用频谱分析的手段来找到故障特征频率,从而对轴承的运作状况进行科学的判断并做出故障判断。

1.2 轴承故障特征频率的计算方法研究

轴承故障特征频率准确得到是振动频谱分析的要项^[1]。滚动轴承的典型故障特征频率有内圈通过频率、外圈通过频率、滚动体通过频率和保持架通过频率等。这些频率的取得,需联系轴承的几何参数,如节圆直径、滚动体直径以及数量,也要考虑轴承的运行情况,如转速等,还需经过繁杂的数学推导。利用科学计算得出的故障特征频率,可以为后续的频谱分析提供可靠的数值支持,进而改善故障识别精度及稳定性。其中内圈通过频率的计算要关联到转速和滚动体数量,而外圈通过频率还要关联到节圆直径和滚动体直径的比例,保持架通过频率的计算则要考虑内外圈转速的差异。计算时要先校准几何参数的测量精度,以免出现参数误差使频率偏移,同时依据轴承实际运行转速动态调整计算值,保证特征频率和实际故障信号能够精确定位,为故障类型精确判断打下基础。

1.3 锅炉风机轴承的故障类型分析

锅炉风机轴承作为工业设备中重要的零部件,种类多、复杂。故障的种类主要是内圈损坏、外圈损坏、滚动体磨损、保持架坏等。内圈损伤表现为内圈通过频率谐波,外圈损伤表现为外圈通过频率异常信号。滚动体损伤会导致滚动体通过频率信号的增幅,保持架故障会使得振动频谱中出现保持架的相关特征频率。另外,在恶劣工况下,轴承还可能出现疲劳裂纹、腐蚀或过热等状况,这些都可能造成振动信号异常。对

这些故障类型进行分析时，常常使用振动频谱分析技术，通过对信号做频域分解，可显示出不同的故障模式所特有的频率特征，从而完成故障诊断。准确识别各种故障类型的特征频率，并进行及时的检测和预警，是保障锅炉风机轴承高效安全运行的关键^[2]。

2 锅炉风机轴承全生命周期故障特征与预测方法

2.1 轴承早期故障特征及预测研究

锅炉风机轴承在运行初期就会产生一些隐藏的故障，最明显的表现就是微小裂纹或者刚开始就出现的一些早期磨损等故障特征。这种初期缺陷引发的振动信号很小，在复杂的工况条件下很易被环境噪声所遮盖，因此传统的检测方法因为不能对微弱信号进行识别，所以难以及时发现隐患。振动频谱分析技术以信号处理的优势为早期故障诊断提供了有效的途径。通过把时域数据变成频域分布，可以显著加快故障特征信息提取的速度，并且还为实现精确预警提供了有力的理论和操作依据。轴承内圈细微裂纹引发的振动频谱一般会体现出围绕某个频率出现微小谐波分布的特征，这种类型的谐波信号成了开展故障判定的指标，在故障诊断领域具有极为重要的作用，特别是在对于故障进行早期的检测工作当中。如果想对可能的故障做出准确的预测，就要正确设置阈值参数，并使用有效的信号处理技术。阈值的设计要考虑设备的运行状况和环境噪声的特性，既要保证微弱的故障信号能够被提取出来，又不能出现误判的情况。

2.2 轴承中期故障特性及发展趋势预测

锅炉风机轴承随工作时间的增长，开始就存在的隐患在应力及机械磨蚀下会逐步显化。在该时间段内，故障特征频率幅值逐渐增大，波动规律更加明显。在中期故障诊断的过程中振动频谱分析技术具有重要的作用，不仅能够准确识别出故障的具体类型，还能够判断出故障的发展情况。轴承外圈磨损加剧后，外圈通过频率的谐波成分的幅值就明显增大，直接体现出了故障发展的趋势。各阶段频谱图的变化可以通过对比就能清晰明了地反映出故障演变的过程和特征。要量化故障的发展速度，就要建立包含故障特征频率幅值动态变化及阶段相关性的数学模型^[3]。

2.3 轴承后期故障特征及预测研究

锅炉风机轴承在运行后期会出现故障模式逐步恶化的状况，严重的甚至发展为卡涩或者直接失效等现象，这样的结果会导致较大的安全隐患。在这个过程中，振动信号内部存在大量的非线性特点，故障相关频率

分量幅值有明显增加，传统的频谱分析手段无法精准得到这些繁杂的信息。要提高故障诊断的准确性和可靠性，就要采用时域分析技术，用峭度系数、峰值因子等核心参数来综合判断。峭度系数是体现信号冲击特征的重要指标，轴承遭受到严重损伤时，冲击能量增大，这就致使震动信号的峭度数值远远超出正常情况下的范围。峰值因子可以表示出信号峰值与有效值的比例情况，轴承后期出现磨损、剥落等故障的时候，由于局部缺陷造成的脉冲信号加强，峰值因子会有很大改变，加上它们以及其他时刻的数据就能更好地捕捉到故障的发展情况，从而为后期的故障预测提供可靠的依据，降低突然发生故障的风险。

2.4 全生命周期故障预测模型的构建

要达到锅炉风机轴承全生命周期故障的精准预测，需要建立包含早期、中期和后期故障特征的预测模型。该模型应该具备强大的数据融会和学习能力，并能挖掘出各个阶段故障特征之间的内在联系。利用机器学习算法建立预测模型是一个很好的选择，支持向量机、神经网络等^[4]。支持向量机有着很强的非线性分类能力，能够在高维空间找到最佳分类超平面，对故障特征实现精确的分类和预测。神经网络具有自我学习和自我适应的功能，经过大量的历史振动数据的训练和学习，它会自动创建故障特征与轴承运行状态之间的复杂映射关系。建立模型还需要加入轴承的运行环境参数以及维护记录，利用多种数据来源的融合提高模型的泛化能力，并且设定动态更新机制，根据实时采集到的运行数据来更新模型参数，以保证在整个生命周期中对于不同的故障阶段都有准确的预测，从而给出轴承维护的准确时间点。

3 基于故障预测的锅炉风机轴承安全生产优化策略

3.1 维修策略优化

依靠振动频谱分析的故障预测技术，维修策略的优化是保证锅炉风机轴承长时间稳定工作的关键。传统的定期检修方法按照预设的时间区间来执行设备检查，忽视了设备实际的运行情况，所以很容易出现过度或者不足的问题。过度维修不但增加了企业的经营成本，而且会因为常常拆卸机器造成机器损坏；维修不充分又会造成潜伏性故障的积存，增加故障率，甚至造成更大的事故。要优化维修策略就需要采用动态维修机制。动态维修利用对锅炉风机轴承实施即时获取振动信号，结合故障预测模型，就能准确判定设备健康情况。振动频谱分析一旦显示出现有隐患的特征

时,维修的选择就会根据设备的情况而变。例如:在轴承出现早期的故障特征时,可采用在线监测加定时巡查的方法,及时跟进故障的发展情况,不需要提前安排停机保养。当故障发展到中期并且有加重的趋势时,可以提前做好维修物资和人员的准备,以便及时处理。对于严重的故障应该马上停机,不能继续运转。通过这种依据实时数据与故障预测的维修策略,可以明显提高维修的准确性和经济性,保证设备处于最佳运行状态。

3.2 运行参数调整

锅炉风机轴承的工作参数,如转速、负载等都会对设备运行性能及使用寿命产生重要影响。通过对振动频谱分析得到的故障预测结果,能对锅炉风机的运行参数做出科学有效的提升^[5]。合理地改变运行参数,不但可以减小设备的磨损,同时还可以增加轴承的寿命,提高系统的整体可靠性。对早期故障预估的结果,若发现轴承内圈存在微小裂纹或者磨痕之类的情况,可能是轴承一直处在过高的负荷或者过高的转动速度之下,使得这种应力积聚加速了故障进程的发展。在这样的情况下,可以通过降低速度或者减小负载来有效地减缓轴承内圈出现裂纹,从而延长故障发生的时间。这样改变运行参数来减轻轴承负担的方式不仅可以延长轴承使用寿命,还能降低维修成本和减少轴承故障所引起的停机时间损失。同样,在锅炉风机的运行中也会遇到负荷波动这一工况。频繁出现的负荷波动状况会使风机轴承的运行环境变得不稳定,进而加大磨损现象发生的风险。利用振动频谱分析,对运行参数进行实时监测和预测,可以及时调节锅炉风机的负荷波动范围,使其处在轴承可以承受的安全区间内,从而减少过度磨损的情况发生。

3.3 安全监测预警系统优化

要想保证锅炉风机轴承能够安全生产,必须建立完善的安全生产监测预警系统。利用振动频谱分析手段,能够达到锅炉风机轴承持续监控的目的,迅速识别振动信号当中异常的波动现象,尽早察觉隐藏的故障隐患,从而为生产决策提供支撑。这种系统依靠多层次报警手段,按照故障轻重缓急的情况,慢慢加大警报强度,为运维人员提供明确的处理指南。首先安全监测系统可以持续对轴承的运行状态实施监督,收集振动信息并实行频谱分析。通过对信号里包含的频率的即时分析,可以提前检测到有可能出现的故障状况,如轴承内圈或者外圈的小裂缝,还有滚动球的磨

损等情况都可以在这个早期阶段被检测出来。当振动信号有异常时,就会立刻发出初级预警,提醒运维人员要时刻注意设备的状态,并且要定时地进行检查。随着故障不断加重,预警系统会按照分析结果自动升级警报。例如:当故障达到维修程度时,就会有中级预警提示;如果故障达到要停机修理的程度,系统就会发出高级预警。安全监测预警系统具有大数据分析的功能,通过对历史振动数据的深度挖掘,分析出不同的工况下设备的运行状况,为未来的故障预测提供数据支持^[6]。通过多层次的预警系统,在故障发生之前采取相应的措施,防止因为突发性的故障造成的生产安全问题。基于振动频谱分析的安全监测预警系统可以实时地捕捉到设备的故障信息,并且通过多层次的预警可以有效地保证生产的安全,减少事故发生的可能性,提高设备的运行可靠性及安全性。

4 结束语

本研究选取振动频谱分析作为核心技术,围绕锅炉风机轴承展开全生命周期故障预估及安全改良设计。通过详细解释振动频谱分析的根本原理并突出其特点,再深入分析轴承各个运行时期所出现的典型故障特征以及隐藏的风险状况,进而构建对应的故障预警模型。结合科学合理的检修安排、按照标准规范修改工作数据、改进观察警告体制、扩充人员技能训练等措施,能有效改进机器运作的可靠性,减少出现事故的概率,保障工厂生产体系的安全和稳定。

参考文献:

- [1] 李善跃. 基于振动频谱分析的锅炉风机轴承全生命周期健康评估模型[J]. 振动与冲击, 2024, 43(02): 123-130.
- [2] 徐晓彤. 基于振动能量矩的风机轴承早期故障预警方法[J]. 中国电力, 2024, 57(04): 41-46.
- [3] 张志海. 锅炉风机轴承振动频谱与运行参数的关联分析[J]. 动力工程学报, 2025, 45(04): 85-92.
- [4] 杨云, 丁磊, 张昊宇, 等. 改进一维卷积神经网络与双向门控循环单元的轴承故障诊断研究[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(04): 538-545.
- [5] 张小刚, 丁华, 王晓波, 等. 深度残差网络在滚动轴承故障诊断中的研究[J]. 机械设计与制造, 2022, 371(01): 77-80.
- [6] 张延琛. 基于时域特征的风机轴承 PSO-RBF 故障诊断[J]. 现代制造技术与装备, 2022(10): 13-16, 20.

电力工程电气设备安装与调试的质量控制

黄永玉

(珠海市恒源电力建设有限公司, 广东 珠海 519000)

摘要 电力工程电气设备安装与调试质量直接影响电力系统运行安全, 其质量特征体现为系统性、关联性和时效性。当前安装环节存在工艺偏差与材料使用不规范问题, 调试过程面临参数设置偏差与测试方法不当挑战, 质量管控中流程协同不畅与人员职责不清阻碍质量提升。针对上述问题, 本文认为需强化安装工艺标准化管控, 通过编制工艺指导文件、开展人员培训、加强现场检查保证安装质量; 提升调试参数精准性保障, 通过仪器校准、参数复核、模拟运行测试确保参数准确; 优化质量管控流程协同机制, 通过明确责任分工、建立信息共享、加强节点验收实现闭环管理。

关键词 电力工程; 电气设备安装; 电气设备调试; 质量控制; 工艺标准化

中图分类号: TM605

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.028

0 引言

基于电气设备安装与调试的质量控制, 则需要从电气设备运行安全的角度进行控制, 从而提高电气设备的运行稳定性。然而, 当前部分工程中安装工艺规范性不足、调试参数准确性偏差、质量管控流程协同性欠缺等问题仍较为突出, 严重影响电力系统的运行稳定性。本文从电力工程电气设备安装与调试的质量特征出发, 分析当前存在的质量问题, 探讨针对性的质量控制策略, 旨在解决安装与调试中的实际问题, 提升电力工程电气设备安装与调试质量, 为电力基础设施建设提供有力支撑。

1 电力工程电气设备安装与调试的质量特征及重要性

其一, 系统性。电力工程电气设备安装与调试是涵盖设备、线路及配套设施的复杂系统工程, 变压器、开关柜、电缆线路等环节需协同配合, 任何环节的偏差都可能影响整个系统的运行稳定性^[1]。

其二, 关联性。安装精度直接关联调试结果的有效性, 如母线连接螺栓扭矩不足会增大接触电阻, 调试时易出现电压波动或过热; 设备基础固定不牢则可能在调试中引发振动, 导致测量参数偏差。质量控制流程如图1所示。

质量控制是降低后期维护成本的关键。若安装调试存在问题, 如电缆敷设路径不合理导致使用寿命缩短、变压器变比测试误差超标导致能耗增加, 后期需投入大量资金维修或更换, 增加运行成本^[2]。

2 电力工程电气设备安装与调试中的质量问题分析

2.1 安装环节的工艺规范性问题

安装环节工艺偏差是影响电气设备质量的重要因素之一。

其一, 工艺操作不符合规范要求, 如母线连接螺栓扭矩未达到设计值, 会导致接触电阻增大, 运行中因发热引发触头烧蚀, 甚至造成母线短路; 电缆敷设路径未按设计要求避开强磁场或热源, 会导致信号干扰或绝缘层加速老化, 影响通信及供电可靠性; 设备基础固定螺栓松动或混凝土强度未达标, 会使设备运行时产生剧烈振动, 破坏机械结构, 缩短设备使用寿命。

其二, 材料使用不规范, 部分施工单位为降低成本, 采用性能未达设计要求的替代材料, 如用普通电缆替代阻燃电缆, 会降低线路防火性能, 增加火灾风险; 配件型号与设备不匹配, 如断路器操动机构型号不符, 会导致合闸困难或分闸失灵, 影响设备正常操作。

2.2 调试过程的参数准确性问题

调试参数设置与测试方法直接关系到设备运行稳定性。

其一, 参数设置偏差常见于保护装置定值调整、断路器分合闸时间校准及变压器变比测试中: 保护装置定值调整过高, 会导致设备故障时保护拒动, 无法及时切断故障回路; 定值过低则会引发误动, 影响电网正常供电; 断路器分合闸时间偏离设计值, 会导致合闸时电弧无法及时熄灭, 引发触头烧损; 变压器变比测试误差超标, 会导致二次侧电压偏离额定值, 影响下游设备电压适应性。

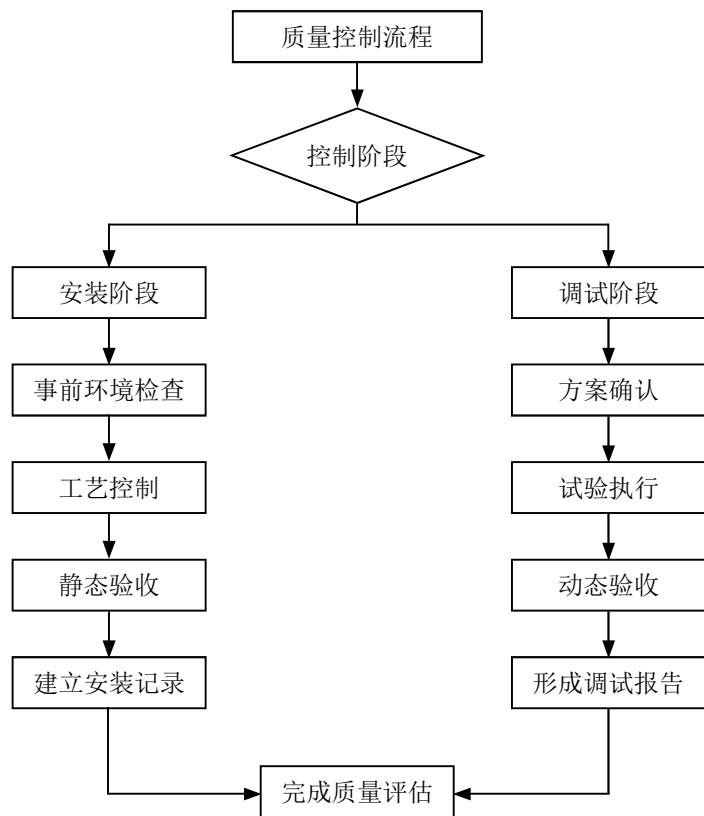


图 1 质量控制流程

其二，测试方法不当，如未按规定进行空载试验，无法准确检测变压器铁芯损耗及励磁电流，隐藏铁芯过热隐患；负载试验时未模拟实际运行负荷，如加载容量不足或功率因数不符，会导致测试结果无法反映设备带载能力，使调试结论偏离实际运行需求^[3]。

2.3 质量管控的流程协同性问题

质量管控流程与人员职责不清严重阻碍质量控制效果。

其一，流程协同不畅，安装与调试部门之间信息传递不及时，如安装部门未向调试部门提供设备基础沉降数据，会导致调试时忽略设备水平度对参数的影响；质量检查节点遗漏，如未对电缆终端头制作、母线搭接面处理等关键环节进行专项验收，会使工艺缺陷流入后续环节，增加后期整改成本；责任分工不明确，安装与调试部门对接口问题（如设备接线正确性）未明确责任主体，会导致出现问题时互相推诿，延误问题解决时间。

其二，人员职责不清，现场监理未全程跟踪母线连接、设备调试等关键环节，无法及时发现工艺偏差或参数错误；施工人员未严格执行三检制度（自检、

互检、专检），如自检时未核对电缆标识，会导致调试时线路识别错误，延误调试进度；专检人员未对调试数据进行复核，会使参数误差未被及时纠正，留下运行隐患。

3 电力工程电气设备安装与调试的质量控制策略

3.1 强化安装工艺的标准化管控

强化安装工艺的标准化管控是保证电气设备安装质量的基础。首先，编制详细的工艺指导文件，针对母线连接、电缆敷设、设备基础固定等关键环节，明确母线连接螺栓扭矩值、电缆敷设曲率半径、设备基础预埋件间距等具体参数，确保施工操作有明确依据。其次，开展施工人员工艺培训，结合安装工艺要点进行理论讲解，通过模拟母线连接、电缆敷设等实操环节考核施工人员技能，提升其对工艺标准的理解与执行能力。最后，加强现场工艺检查，采用旁站监理方式跟踪母线连接、设备基础固定等关键工序的施工过程，定期开展电缆敷设路径、母线接头工艺等专项检查，及时纠正工艺偏差，督促施工人员严格执行工艺标准。对于母线连接、设备基础固定等直接影响设备安全运行的隐蔽性与关键性工序，必须采用“旁站监理”的

方式进行全过程、零距离的跟踪监督。监理人员或质检员需全程在场,不进行任何可能分散注意力的其他工作,聚焦于施工的每一个细节。在母线压接过程中,旁站人员需确认压接模具规格是否正确、压接顺序是否规范、并使用力矩扳手对螺栓型接头的紧固力矩进行逐一抽查,确保达到设计值。在设备基础固定时,则需核查基础钢的平整度、预埋螺栓的垂直度与间距,以及最终设备就位后的水平度与紧固效果,确保设备安装稳固、无应力^[4]。

3.2 提升调试参数的精准性保障

提升调试参数的精准性是保障设备运行稳定性的关键。在对参数进行调试的过程中,其流程如图2所示。

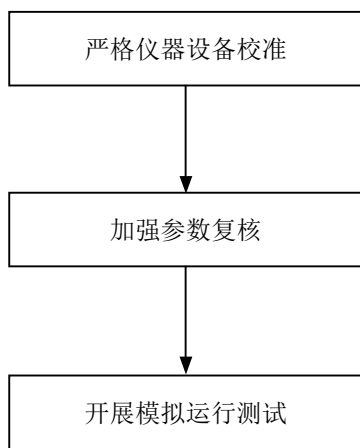


图2 调试流程

其一,严格仪器设备校准,调试前检查测试仪器的有效期,对万用表、继电保护测试仪、变压器变比测试仪等设备进行精度校验,确保仪器精度符合调试要求。在用于关键参数测量前,还需在现场利用标准源或标准件进行快速的精度复核。例如:使用标准电阻箱校验万用表的电阻档位,利用已知变比的标准变压器校验变比测试仪的读数^[5]。此举旨在验证仪器在运输与储存后其精度依然稳定可靠,能够真实反映被测设备的电气特性。

第二,加强参数复核,对保护装置定值、断路器分合闸时间、变压器变比等关键参数,采用双人核对方式确认参数设置的准确性,通过交叉测试方式验证不同测试仪器的测量结果,避免单一仪器或人员操作导致的参数偏差。一人在继电保护装置或断路器控制器的人机界面上进行定值、时间的设置与修改,另一人则同步核对屏幕上显示的参数与纸质单据是否完全一致,确保小数点、单位(如A/kA、ms/s)等细节无误。所有核对无误后,双方需在参数设置记录表上共同签

字确认,实现责任的追溯与共担^[6]。此过程能有效避免因单人操作可能出现的视觉疲劳、注意力不集中或习惯性错误所导致的参数误设。对于同一关键参数,如变压器的变比,应使用两台不同编号、相互独立的变比测试仪进行测量,并对两组测量结果进行比对。

其三,开展模拟运行测试,在调试后期进行空载试验,检查设备在无负载状态下的运行参数是否符合设计要求;进行负载模拟试验,模拟设备带负荷运行状态,验证保护装置动作值、变压器输出电压等参数的合理性,确保调试参数与设备实际运行需求一致。

3.3 优化质量管控的流程协同机制

明确各部门责任分工,制定安装施工、调试、监理等岗位的职责清单,明确安装部门对工艺执行的责任、调试部门对参数准确性的责任、监理部门对质量检查的责任,避免责任模糊。建立信息共享机制,通过每周工程例会传递安装进度、工艺执行情况、调试中发现的问题等信息,采用质量台账记录安装关键环节验收结果、调试参数设置情况,确保安装与调试部门及时获取质量信息。

4 结束语

通过对电力工程电气设备安装与调试质量特征及重要性的分析,揭示了其系统性、关联性和时效性的质量规律;结合当前工程实践,指出安装环节工艺偏差、调试过程参数偏差、质量管控流程协同不足是影响质量的主要问题;提出的强化安装工艺标准化、提升调试参数精准性、优化管控流程协同性等策略,完善了电力工程电气设备安装与调试质量控制的理论框架。从实践层面看,这些策略为施工单位提供了具体的操作指南,有助于减少安装调试中的质量隐患,提升设备运行安全与工程验收合格率。

参考文献:

- [1] 丁富春. 电力系统电气设备安装与调试技术分析[J]. 电气应用, 2025,44(08):94-98.
- [2] 郑合欢. 智能变电站电气设备安装与调试技术要点[J]. 灯与照明, 2025,49(04):200-202.
- [3] 朱成坤. 光伏工程项目电气设备安装与调试技术研究[J]. 电力设备管理, 2025(14):240-242.
- [4] 周军. 高压电气设备安装调试与运行维护[J]. 上海电气技术, 2025,18(02):24-27.
- [5] 李欣雨. 电力工程电气设备调试中局部放电检测新方法[J]. 电力设备管理, 2025(13):215-217.
- [6] 王嘉辉, 刘慧杰. 电力工程变电站一次设备安装与调试探析[J]. 电力设备管理, 2025(08):20-22.

高层住宅内墙 ALC 板抹灰层防开裂技术研究

左 彬

(中国二十二冶集团有限公司, 河北 唐山 063000)

摘 要 在高层住宅工程建设过程中, ALC 板因轻质、环保等优势广泛应用于内墙围护结构。ALC 板抹灰施工需多环节协同防开裂。在高层住宅内墙施工中, 材料特性差异与工艺不当都会引发开裂, 增加质量管控难度。本文结合工程案例, 针对高层住宅内墙 ALC 板抹灰层防开裂技术进行研究, 以期能够通过优化抗裂砂浆、弹性腻子材料选择、改进分层抹灰施工等工艺, 为降低抹灰层开裂率、提升高层住宅内墙施工质量提供借鉴。

关键词 高层住宅; ALC 板; 抹灰层; 防开裂技术

中图分类号: TU767; TU599

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.029

0 引言

随着城镇化的进程加快, 高层住宅已成为城市的主体。蒸压轻质加气混凝土 (ALC) 板因轻质、环保、保温等特点, 广泛应用于内墙围护结构。但其与抹灰层物理性能差异易导致开裂。这不仅影响美观与功能, 增加维修成本, 也制约了其推广。目前行业中对 ALC 板抹灰层开裂主要还是以常规的修补为主, 缺乏系统的防开裂技术体系^[1]。因此, 分析开裂原因并提出合理防开裂技术措施十分必要, 有利于提高高层住宅建筑质量, 提升使用舒适度, 促进建筑行业绿色可持续发展。

1 工程概况

某高层住宅项目的总建筑面积为 73 000 m², 结构为剪力墙结构, 内墙用的是蒸压轻质加气混凝土 (ALC), ALC 板的厚度均为 200 mm, 板长根据户型分割需求设置, 有 2.0~3.0 m。该项目于 2023 年初开始内墙抹灰施工, 按照常规工艺完成第一栋楼 (1# 楼) 的内墙抹灰工作, 在抹灰层的养护过程中以及交房前的验收时发现了多处不同程度的开裂, 影响室内墙面观感质量和后期使用功能。项目团队立刻组成专项小组分析问题并制定了专项防治技术方案, 对后面施工的 5 栋楼采用了相应的防开裂措施, 取得了很好的效果, 控制了抹灰层开裂。

2 ALC 板抹灰层开裂问题分析

ALC 板抹灰层开裂受多因素交织影响, 需从关键维度拆解原因。下文将围绕材料特性差异、施工工艺不合理、结构变形影响三方面, 解析各因素如何引发或加剧开裂问题。

2.1 材料特性差异

ALC 板属于轻质多孔材料, 干密度小 (约 500~600 kg/m³), 吸水性强。抹灰层水泥砂浆干密度大 (约 1 800~2 000 kg/m³)。两种材料的物性差异大, 在抹灰后完全硬化干燥的状态下, ALC 板的干燥收缩率为 0.3~0.5 mm/m, 水泥砂浆的干燥收缩率为 0.8~1.2 mm/m, 当该收缩应力大于抹灰层及 ALC 板间的黏结强度时, 会在界面上产生裂缝, 对于板缝及板和剪力墙交接的这些薄弱部位更明显^[2]。

2.2 施工工艺不合理

在 1# 楼的施工过程中, 存在施工工艺不合理的问题, 主要体现在以下几个方面:

一是 ALC 板安装后, 未清理板间缝隙中遗留的灰尘和杂物, 填缝材料无法与 ALC 板粘贴牢固, 在板缝处出现抹灰层开裂的现象。二是抹灰前未对 ALC 板墙面进行有效的界面处理, 仅采用普通浇水湿润的方式, 未能在 ALC 板表面形成牢固的粘结基层, 使得抹灰层与 ALC 板之间的粘结力不足。三是抹灰分层施工时未遵循“前层砂浆终凝后再抹后层”的规范要求, 存在前层未凝结即连续抹第二层的违规操作, 易导致两层砂浆粘结失效, 引发后期空鼓、开裂。

2.3 结构变形影响

高层住宅在施工过程及使用阶段会受到多种因素的影响产生结构变形, 如建筑物自重、楼面活荷载、温度变化等。该项目采用剪力墙结构, 在施工过程中, 由于剪力墙与 ALC 板的变形特性不同, 剪力墙的刚度较大, 变形量较小, 而 ALC 板的刚度较小, 在荷载作用下易产生一定的变形。这种变形差异会使 ALC 板和剪力墙的交接处发生附加应力。一旦附加应力大于抹灰

层的抗拉强度, 就会造成该处开裂; 同样, 温度的变化使建筑物发生热胀冷缩变形, 由于 ALC 板与抹灰层的线膨胀系数不同 (ALC 板线膨胀系数为 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 水泥砂浆线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$), 在温度作用下二者产生的伸缩量也不同, 进而在界面上产生应力, 导致抹灰层开裂^[3]。

3 高层住宅内墙 ALC 板抹灰层防开裂技术要点

3.1 材料选择与处理技术

3.1.1 ALC 板界面处理材料选择

选用抗裂砂浆作为抹灰层材料, 添加聚丙烯纤维、乙烯—醋酸乙烯酯共聚物 (EVA) 乳胶粉等抗裂组分, 降低干燥收缩率, 提高抗拉强度和柔韧性。试验检测, 抗裂砂浆干燥收缩率可控制在 0.3 mm/m 以下, 抗拉强度达 1.5 MPa 以上, 掺入粉煤灰可改善和易性, 减少温度收缩裂缝。

3.1.2 抹灰材料优化选择

传统的水泥砂浆抹灰层由于收缩率较大, 容易产生开裂现象。因此, 需对抹灰材料进行优化, 采用抗裂砂浆作为抹灰层材料。抗裂砂浆中添加了聚丙烯纤维、乙烯—醋酸乙烯酯共聚物 (EVA) 乳胶粉等抗裂组分, 能够有效降低砂浆的干燥收缩率, 提高砂浆的抗拉强度和柔韧性。通过试验检测, 抗裂砂浆的干燥收缩率可控制在 0.3 mm/m 以下, 抗拉强度达到 1.5 MPa 以上, 相比传统水泥砂浆, 其抗裂性能得到显著提升^[4]。

3.1.3 板缝填充材料选择

选用弹性腻子填充板缝, 这种腻子弹性好、粘接力强, 吸收板缝间产生收缩应力, 避免板缝处抹灰层开裂。要求弹性腻子拉伸粘结强度 $\geq 0.2 \text{ MPa}$, 断裂伸长率 $\geq 150\%$, 满足 ALC 板变形过程中不开裂、不变形、不脱落的需求。此外, 所选弹性腻子需与 ALC 板、抹灰层材质兼容, 避免因材质不相容出现界面剥离。施工前需清理板缝内浮灰、杂物, 保证腻子与板缝壁紧密贴合。

3.2 施工工艺优化技术

3.2.1 ALC 板安装及板缝预处理工艺

ALC 板安装需要根据图纸进行排版, 并根据现场实际情况将墙长调整为接近整数倍的高度, 尽量使用不大于 10 片的板组合完成面层, 使板材间平整无明显色差。板材安装时, 优化板材切割方案, 尽量减少非标板数量, 板材排版应考虑板间的拼缝, 要尽量避开门窗洞口、梁下部等墙面受力集中的部位。板材安装过程中, 板与板之间缝隙必须用专用 ALC 板胶粘剂填塞严密并刷平, 刷胶前先将缝内杂质清干净, 然后将玻

璃纤维布裁好以备随时粘贴。胶体需要搅拌均匀, 用齿形刮板刮匀批于板缝两侧接触面, 注意应保证胶层厚薄一致。板材拼装好后要及时清理挤出的多余的胶体, 并将接缝补平塞严实, 不留空隙, 避免后期水气渗入及受力位移造成开裂。ALC 板安装完毕需静置 24 小时以上, 待胶固后进行下道工序的墙面处理。

3.2.2 墙面界面处理工艺

墙面界面处理是保证 ALC 板和抹灰层之间粘结稳定的措施, 在需抹灰之前全面实施, 以消除 ALC 板的表面特性对粘结的影响。施工过程中先检查 ALC 板墙面上是否遗留有残余油污等物质, 如果这些污渍非常顽固, 仅用清水难以彻底清除, 需采用中性清洁剂配合软毛刷擦拭, 再用清水冲洗干净, 避免杂质影响界面剂与板材的结合^[5]。

1. 干燥状态下, 可直接清水擦洗, 自然晾干; 在潮湿环境下需要利用吹风机的低温风力进行吹干, 使墙面达到一定的干燥程度, 即墙面的表面含水率控制在 10% 以内; 将墙面吹干后, 采用滚涂、喷涂的方法涂刷专用界面剂, 滚涂时应选用短毛滚筒, 沿着同一方向均匀地进行涂抹, 禁止出现来回滚涂导致界面剂堆积; 喷涂时应保证喷枪的压力值在 $0.3 \sim 0.5 \text{ MPa}$, 喷嘴距离墙面距离为 $30 \sim 50 \text{ cm}$, 并且要保证界面剂涂抹均匀。

2. 界面剂涂刷时应控制其厚度为 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 之间, 可通过涂刷次数来调整, 通常情况下分为 $1 \sim 2$ 次涂刷。第一次涂刷干燥后方可进行第二次涂刷, 同时确保不允许出现漏涂及流挂的现象。涂刷完毕后, 需要放置 24 h 以上时间, 期间墙体不应受到外部的污染或是被碰撞, 直到界面剂完全干燥固化成密实的粘接层后, 才能进入下一道工序的抹灰施工。这种施工方法能极大程度上提高抹灰层与 ALC 板之间的粘结强度, 防止抹灰层产生空鼓及开裂等问题。

3.2.3 分层抹灰施工工艺

对于 ALC 板内墙抹灰层出现裂缝问题, 建议使用分层抹灰法施工。在确定分层方式、划分各层功能作用的基础上控制抹灰参数、设置不同抹灰层间的施工间隔, 以此提高抹灰层整体抗裂能力。ALC 板内墙抹灰层采用 2 层抹灰 (面层、底层), 2 层抹灰全部采用抗裂砂浆 (厚度、间隔时间等数据按照规范要求执行)。

1. 底层抹灰是连接抹灰体系和 ALC 板墙面的重要结构, 起到牢固粘结和初步找平的作用。施工前需检查 ALC 板界面剂是否完全干燥固化, 接着抹涂 $5 \sim 7 \text{ mm}$ 厚的抗裂砂浆, 用抹子把砂浆抹均匀, 保证砂浆能大面积地覆盖墙面, 并浸入界面剂产生的孔隙内, 增加

粘结强度,再用 2 m 长的刮尺在墙上交替着来回刮平,反复调整找平次数直至墙面平整度偏差不大于 3 mm,为下一步中层抹灰做好准备。

2. 面层抹灰是决定墙面表面观感和使用功能的结构,主要起到装饰和保护的作用。该层采用厚度为 3~5 mm 的抗裂砂浆,施工是采用细齿抹子抹平压实,抹灰后应立即用抹子搓压墙面,消除抹痕及气泡,使墙面表面平整光滑。同时需严格控制各层施工间隔时间,每层抹灰要在下层砂浆基本凝固后才能开始上层抹灰,如不能确定是否能上层抹灰时,可以间隔一定的时间后再进行上层抹灰施工,以免下层未干就施工造成上层抹灰层由于受下层砂浆收缩力过大发生开裂。

3.2.4 特殊部位加强处理工艺

对于 ALC 板板缝处、板与剪力墙交接处等开裂高发部位,采取加强处理措施。

1. 除板缝用弹性腻子填充外,在抹灰过程中,还要将宽 200 mm 耐碱玻纤网分别固定在板缝两边的墙面上。铺设前要先清理基层表面,同时也要保证墙体基本干燥,并将网格布平整紧贴于基层上,不可有翘曲、褶皱现象,应保持网格布与板缝中线对齐,且要求两边覆盖宽度一致。网格布铺设完成后,然后抹灰,即先铺网后批灰,并对抹好的灰要轻轻压贴密实,确保砂浆和网格布牢固粘合在一起,组成一层完整的抗裂防护层,防止后期板缝因受力变形产生裂缝。

2. ALC 板和剪力墙交接处,施工之前要先将两边基面做好处理。清理 ALC 板和剪力墙交接处的灰尘、粉沫、油污,用干布擦拭好基面,使基面达到清洁无污,如有突起或表面较粗的地方要用细砂纸磨平,使基面平整符合后面施工的要求。随后进行铁丝网铺设作业,选用 400 mm 宽的铁丝网,并且要预先检查铁丝网是否完好无损、无破损、无生锈,不可以使用有破损和锈蚀的网片^[6]。铺设时要让铁丝网居中盖住交接缝中心线,并且让铁丝网两侧各 200 mm 盖住 ALC 板表面,另外一侧 200 mm 盖住剪力墙,铁丝网用射钉枪结合固定钉对铁丝网固定好。在固定铁丝网的时候要注意沿铁丝网长度方向均匀分布固定点,其间距应为 150~200 mm,靠近交接缝两侧的固定点需适当加密,使铁丝网紧紧地贴合两侧基础面,不允许留有褶皱、翘边或松动情况发生,如有褶皱则需要立刻拆下重新固定。铁丝网敷设完毕后即可进行抹灰,抹灰前应检查铁丝网是否牢固,如果移动了需要重新加固,调配好的砂浆要搅拌均匀,控制好稠度。然后用抹子将砂浆均匀地涂在基面上,边抹边按压,保证砂浆全部挤入铁丝网网眼中,确保砂浆与铁丝网、基面粘接严密,不得出现空鼓现象。

抹灰厚度要一致,不能有部分地方太薄或者太厚。

3.3 结构变形控制技术

3.3.1 施工阶段结构变形控制

在施工过程中,要科学合理地确定施工顺序,避免施工荷载集中产生结构过大变形。ALC 板安装、抹灰前要确保剪力墙、楼板等主体结构已完成强度验收,其结构变形也应相对稳定。在楼面施工中,要严格控制楼面施工荷载不超过设计规定值,避免出现楼面超载而致楼板变形,影响 ALC 板稳定性及抹灰层质量。在施工中,要对建筑物的沉降与变形进行检测,按规定定期测定建筑物的沉降量和水平位移值,发现结构变形异常应及时分析原因并采取措施,避免由于结构变形过大使抹灰层开裂。

3.3.2 温度变形控制

为减少温度变化对抹灰层的影响,在建筑物外墙和屋面采取有效的保温隔热措施,降低室内外温度差,减少建筑物因温度变化产生的热胀冷缩变形。在 ALC 板内墙抹灰施工过程中,避免在高温或低温环境下进行施工,当环境温度高于 35℃或低于 5℃时,应采取相应的降温或升温措施,确保抹灰施工在适宜的温度环境下进行。

4 结束语

本研究以某高层住宅项目为案例,通过在项目中的实际应用,有效控制了 ALC 板抹灰层开裂现象的发生,确保了墙面抹灰工程的质量。该防开裂技术方案具有较强的实用性和可操作性,不仅为该项目的顺利竣工提供了技术保障,也为其他类似高层住宅项目内墙 ALC 板抹灰施工提供了宝贵的参考经验。后续应关注 ALC 板抹灰层防止开裂方面技术的研究及开发,结合多方面因素来不断提高技术水平,提升高层住宅建筑工程质量。

参考文献:

- [1] 张元伟,代玉令.墙面抹灰空鼓开裂的预防治理[J].住宅与房地产,2020(30):184-185.
- [2] 巩刚虎.某建筑墙体开裂及地面下陷现状监测及加固技术[J].居舍,2020(08):58.
- [3] 朱金卫,荣皓,邓树密.ALC 条板在安装过程的防开裂措施[J].四川建筑,2023,43(05):242-243.
- [4] 罗宁.高层建筑墙面抹灰空鼓裂缝的质量管控[J].城市开发,2024(12):123-125.
- [5] 陈均辉.关于墙面抹灰工程空鼓的探讨[J].居业,2023(12):68-70.
- [6] 季海斌.浅谈 ALC 轻质隔墙板在装配式钢结构建筑施工中的应用[J].中华建设,2022(11):152-154.

建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施探讨

毕晓鹏

(青岛市胶州市胶北街道办事处, 山东 青岛 266000)

摘要 本文立足于建筑工程技术管理领域,深入剖析其在工程建设全过程中的核心价值与实践意义,系统梳理了建筑工程技术管理六大关键控制要点,包括项目规划设计、材料质量、安全保障、进度把控、人员技术及竣工验收等环节的精细化管理要求,针对当前技术管理实践中存在的问题提出五项优化策略:完善组织管理体系、健全技术管理制度、推进数字信息技术应用、强化全周期风险防控机制、促进多方协同沟通,以期为相关人员提供参考。

关键词 建筑工程; 技术管理; 安全控制; 进度管理控制; 精细化管理

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.030

0 引言

《国家住房和城乡建设事业“十四五”规划纲要》明确提出,要“全面推进建筑业高质量发展,加快建筑工业化、数字化、智能化升级,提高工程质量安全水平”。在此战略背景下,建筑工程技术管理面临新的挑战与机遇。随着建筑规模扩大与工艺复杂度提升,传统粗放式管理模式已难以满足现代建筑工程精细化管理要求,技术管理体系亟待优化升级。国内建筑市场竞争加剧,品质差异化成为企业的核心竞争力,精准高效的技术管理成为赢得市场的关键因素。

1 建筑工程技术管理的意义

建筑工程技术管理作为一项以系统化理论、科学化方法对建设全过程进行整合性管理的专业学科,其涉及的各项具体工作具有多元性质,本质上体现为运用科学合理的管理体系对工程建设各环节实施监管、协调与把控,旨在确保建设活动严格遵循预设方案与规范准则。建筑技术管理贯穿于工程全周期,自初始阶段的设计图纸绘制、审核,延伸至施工实施过程,直至最终验收环节,其重要性不容小觑。这种系统化管理机制保障施工过程的科学规范性,并能及时发现施工偏差,迅速采取纠正措施,消除工程质量隐患。建筑工程技术管理亦致力于资源优化配置,有效规避施工安全事故与质量缺陷,促进项目建设经济效益与社会价值的协同提升。当下市场竞争日趋白热化,精细化技术管理应用能充分彰显建筑企业核心竞争力,提升企业品牌形象,进而扩大市场占有率,巩固行业地位^[1]。

2 建筑工程技术管理中的控制要点

2.1 精确的项目规划与设计控制

建筑工程项目的规划和设计阶段对后期施工进度与最终项目质量具有决定性作用。在规划设计过程中,精准把握市场走向与消费者需求是设计工作的基本前提。设计人员需深入分析市场发展趋势,洞察潜在消费群体偏好,在设计理念层面持续创新,增强方案实用性与创新性,确保设计方向契合市场预期;借助先进设计工具平台实现信息实时共享更新,提升设计团队协作效能,降低信息传递失真率,加快设计流程进度;同时严格执行设计质量管控机制,减少后期变更导致的成本攀升风险,建立多层次设计审核体系,对各环节方案进行反复论证与精益求精,避免设计瑕疵引发后续变动,进而消除不必要支出,为工程如期竣工、预算精准控制奠定坚实的基础^[2]。

2.2 建筑材料质量控制

在我国建筑工程项目的信息化施工管理当中,材料控制管理是确保建筑工程质量的关键,对此,材料全生命周期管理须予以高度关注,从选材、运输至存储各环节均需精细把控,以保障材料性能完好,防止因材料质量缺陷影响工程品质。建筑材料管理体系应立足工程建设实际需求,优选资质信誉卓越的供应商,严把材料采购质量关。材料入场后,宜依据品类特性分区存放,根据材质差异选择适宜存储环境,充分维护材料使用价值。在仓储管理环节中,应制定专项防护措施,避免材料受潮、变质等品质损耗情况,如水泥类材料宜存放于干燥通风的库房内,杜绝湿气侵袭导致结块现象。

2.3 安全控制要点

在中国日渐繁荣的建筑行业当中,建筑工程质量和安全受到人们的格外重视。现阶段的建筑项目各环节均需严密把控安全要素,施工安全作为极具敏感性的领域,要求建筑企业对一线人员安全问题给予高度关注,定期组织安全教育培训课程,强化安全控制理念宣导,提升全员安全责任意识,确保施工建设全过程中切实落实安全管理制度,将其置于项目管理核心位置,消除潜在安全隐患。大型建筑项目中普遍存在多样化施工风险,一旦发生安全事故,现场施工人员首当其冲,生命安全面临严峻威胁,继而对工程进度、施工质量产生深远的负面影响,严重情况下更会损害建筑企业市场形象与社会声誉^[3]。

2.4 进度管理控制

在建筑工程技术管理中,有效的项目进度管理有助于建筑工程按期完成任务目标。科学制定详细的进度规划是基础环节,于施工过程中明确关键节点时间点,为整体施工阶段目标与时间序列构建清晰框架,继而形成精准的进度规划方案。项目实施阶段,动态监测机制应运而生,依据现场实际情况对原有施工规划进行灵活优化调整,规避工期延误与资源短缺等风险对项目整体进度的干扰。先进管理软件的引入为进度管控提供技术支撑,实现对项目现状的实时监管与资源精准配置,推动项目进度平稳推进,有效避免时间与资源浪费现象。

2.5 人员技术管理控制要点

技术人员作为工程的技术骨干,他们的专业水平和能力直接关系到整个工程的质量。加强技术人员学习培养体系建设实为工程管理之要务,可定期组织多元化技术学习活动,如技术讲座或研讨会形式,使技术骨干接触掌握先进技术标准与规范;依据行业发展趋势,精心设计专业技术课程,增强相关人员知识储备深度,适应经济社会变革需求。对于建筑节能等新兴工种,宜集中开展针对性专业培训,提升技术人员实践操作应变能力与解决突发事件的技术水平。完善的技术人员考核机制同样不可或缺,应从日常工作表现、专业技术水准等维度制定科学评价体系,将考核结果与薪酬待遇及职业晋升紧密挂钩,形成激励先进鞭策后进的良性循环。技术交底环节尤应注重方式方法创新,采用直观生动的现场示范、图文并茂的交底资料等表达方式,确保施工人员准确理解掌握技术要点。

2.6 工程竣工阶段控制要点

施工质量检验是保证工程质量的重要环节。需建立健全质量检验制度,实现对施工全流程各工序的精

细化质量控制。工程建设竣工阶段,核心部位及潜在隐患区域尤需重点开展技术交底工作,检测关键构件施工质量是否符合工程建设规范标准。技术交底内容还包括对工程项目质量的全面检测审查,涵盖计划方案、合同文本等相关标准审核,确保工程建设各环节、各方面质量指标达标。工程验收评价作为确认施工竣工质量的核心手段,运用科学高效的评测体系衡量项目整体或部分分项工程的施工质量与完成效果,实质上是一种基于特定工程质量目标的对比测评过程,旨在判断工程质量合格性。测试过程遵循严格规范,以保证评测结果准确公正,如计量环节必须应用专业量具与标准方法进行精确测量与试验,当发现局部质量偏差时,立即通知相关责任方进行整改返工,待复检结果符合标准要求后方可继续下道工序,从而确保整体工程建设符合相关技术规范与质量要求。

3 建筑工程技术管理的优化措施

3.1 完善组织系统

为了保证项目工程建设的顺利进行,建筑企业要完善并提升自身的管理系统,强化管理质量,妥善应对施工过程中各类潜在问题,构建科学完备的管理机制与责任制度体系。责任监管体系的持续优化改进尤为关键,其目的在于及时掌握项目施工动态,全面剖析建设进程中存在的各类问题,做出客观评估,进而增强监管人员的责任意识与紧迫感,促使相关人员切实履行岗位职责,为工程质量安全提供坚实的保障。建筑单位同样需积极引入现代信息技术设备,适当运用微信等社交平台开展精细化管理工作,畅通各职能部门信息交流渠道,有效提升整体管理效能与质量水平,最终实现工程建设全过程的科学管控与资源优化配置,确保项目如期高质量完成^[4]。

3.2 完善技术管理相关制度

在建筑工程施工中,技术管理控制是越来越引起人们关注的问题。对此,建筑工程单位必须建立完善的技术管理制度,提升其管理工作的时效性。在技术管理制度构建过程中,责任制度与考核评价体系具有核心价值,企业需为每个项目配置专职管理人员,确保各项技术管理职责落到实处。强化监督管理机制可考虑组建专业技术监督检查小组,对执行不力或存在错误的相关人员实施评估与惩戒措施,从而保障技术管理活动全面有效执行。技术管理制度设计应兼顾宏观方向与微观细节,对施工操作工艺、流程等环节作出明确规定。图纸审查环节要求严格落实,所有建设参与方必须严格把关施工图纸质量,将发现的问题详实地记录并形成会议纪要,此举既为施工提供精准指

导,亦为后续结算工作奠定基础。项目变更管理办法应覆盖工程变动全过程,此类规范化管理有助于确保工程质量,为后期质量检验与评定工作提供可靠依据,最终实现工程技术管理的科学化与规范化。

3.3 推进信息化与数字化管理

数字化与信息化技术在建筑工程技术管理中的应用可大大提高管理效率,减少或避免工作差错,提高信息公开程度。科学技术发展促使现代化建设项目必须克服传统人工操作模式下信息错误率高、手工录入数据量庞大、工作负荷繁重等一系列弊端。信息化与数字化管理体系引入建筑领域后,实现了数据实时监测与精确分析,使管理流程愈发顺畅高效。信息管理系统在减轻信息传递滞后性与降低错误率方面展现出独特优势。依托专业管理软件或云平台服务,项目各参建方得以即时掌握项目进度信息、资源消耗数据及成本预估等关键指标。这种动态精准的信息共享机制助力问题及时发现与处理,同时显著提升部门间协同效能,消解信息壁垒,加速反应链条。BIM(建筑信息模型)技术引入工程管理领域,其三维可视化优势使工程操作更趋精准高效,通过立体建模实现问题预测、施工方法优化、设计矛盾提前识别,最大限度规避施工失误与返工情况。数字技术亦极大地提升了工程公开性与可追溯性,完善的数字化档案管理体系可确保设计文件、变更历史、检查记录等全程存储与追溯,使每一环节施工情况皆有迹可循,为工程质量与进度管理提供坚实的保障^[5]。

3.4 强化工程风险管理与预防措施

合理的工程项目风险管理可以保证工程项目的成功实施。工程项目本质上涉及繁复工艺流程、多元参建主体及诸多不确定因素,此类特性均可能引发风险事件,故而建立科学完备的全过程风险管理体系尤为必要。风险识别与评价作为基础环节,应于项目伊始从技术、市场、法务、环保等多维度深入剖析,形成系统性风险清单与分级机制,并随实际情况变化持续修订完善,确保其契合项目动态演进过程。项目规划初期即需前瞻性审视潜在风险隐患,制定规避措施与损失控制方案,深入分析风险成因并配套相应应急预案;施工设计阶段则着重构建紧急应对策略,辅以常态化训练演练,逐步提升应急处置能力,强化现场防护机制,优化安全事故响应速度。风险反馈信息通道构建亦是关键一环,确保工程异常状况第一时间传递至管理层,借助信息化与数字化技术实时监控施工现场,将潜在风险显性化,精准聚焦隐患控制,防止问

题累积演变,阻断风险事件恶化趋势,规避更大的经济损失。

3.5 加强各方协作与沟通

建设工程是一项复杂的多主体共同完成的系统性工程,在此期间各相关方需要充分沟通,相互协作。建设单位、设计单位、施工单位及监理单位等责任主体间应构建畅通的沟通协调平台,定期或不定期组织关键人员举行现场工作会议或联合办公会,共同探讨工程进展状况、技术难点及管理问题。在日常工作中,信息共享机制亦不容忽视,各方应将掌握的重要信息及时向合作伙伴通报。设计单位与施工单位需建立紧密联系,针对施工过程中出现的疑难问题提供技术支持,并根据实际情况做出适当的图纸修改与调整;监理单位则应与施工单位保持实时沟通,动态掌握工程质量状况,对发现的质量安全隐患立即督促施工方采取整改措施。健全的多方协作与沟通机制,能有效规避因信息不畅、沟通障碍导致的工期延误、质量缺陷等问题,全面提升建筑工程技术管理效能,确保项目建设平稳有序推进,最终实现预期建设目标与效益。

4 结束语

建筑工程技术管理作为现代建筑业高质量发展的基石,其科学化、系统化的管理理念与方法已成为行业共识。精细化的技术管理在保障工程质量、提升施工安全、优化资源配置、控制项目成本等方面具有不可替代的作用。当前建筑市场竞争日趋激烈,建筑企业将技术管理置于战略高度,方能在复杂多变的市场环境中保持持续竞争优势。技术管理水平已成为衡量建筑企业核心实力的关键指标,亦是企业稳健发展的内在动力源泉。完善的技术管理体系构建,需要建筑行业各主体齐心协力,共同打造精品工程,推进建筑产业转型升级。

参考文献:

- [1] 王丽萍.建筑工程技术管理中的控制要点及优化措施探析[J].城市建设理论研究(电子版),2023,22(17):24-26.
- [2] 潜益芬,余诗泉.建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施分析[J].城市建设理论研究(电子版),2023,15(11):79-81.
- [3] 王永峰.建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施分析[J].城市建设理论研究(电子版),2023,14(08):19-21.
- [4] 卢雪娇,王超.建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施[J].居业,2022,42(06):149-151.
- [5] 王菊霞.建筑工程技术标准管理中的控制要点与优化研究[J].江苏建材,2023,18(05):148-149.

公路桥梁养护中常见病害的成因与治理对策分析

施云雷

(长兴恒通公路工程检测有限公司, 浙江 湖州 313100)

摘要 公路桥梁作为交通基础设施的重要组成部分, 长期使用中难免会出现病害。本文针对传统公路桥梁养护中病害反复、成本高的问题, 结合桥梁结构特性、交通荷载变化与自然环境影响, 系统梳理长期使用中裂缝、铺装层损坏、钢筋锈蚀、支座老化等典型病害的形成机制, 明确荷载超限、材料衰减、环境侵蚀、养护缺失是四大核心诱因。从技术创新与管理优化双视角提出裂缝分级修复、铺装层材料改良、钢筋防腐升级、支座智能化维护等对策, 以期为延长公路桥梁使用寿命、保障通行安全提供可参考的解决方案, 助力公路交通基础设施养护体系不断完善。

关键词 基础设施; 公路桥梁; 裂缝病害; 钢筋锈蚀病害; 养护

中图分类号: U445.71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.031

0 引言

传统公路桥梁养护模式因对病害成因判断表面化、治理措施缺乏系统性, 导致病害反复出现、养护效率低下, 部分桥梁甚至因治理不当引发安全事故。公路桥梁作为连接区域交通、支撑经济发展的重要基础设施, 其使用状态直接关系到交通网络畅通与安全, 而我国公路交通流量持续增长、重载车辆比例上升, 加上长期受温度变化、雨水冲刷、大气腐蚀等自然因素影响, 桥梁运营中逐渐出现各类病害^[1]。因此, 精准识别病害类型、深入分析成因、探索科学对策, 成为提升养护水平、保障基础设施稳定运行的关键任务。

1 公路桥梁养护中常见的病害类型

1.1 裂缝病害

分布于公路桥梁梁板、墩柱、盖梁、桥台等关键结构部位的裂缝是最常见的病害类型, 按形态可分为横向、纵向、斜向与网状四类。横向裂缝呈水平延伸状态, 多处于梁板跨中区域, 宽度通常在 0.1 ~ 0.5 mm, 严重时可贯穿梁板截面; 纵向裂缝沿桥梁长度方向分布于梁板侧面与顶面, 部分会随温度变化出现宽度波动; 斜向裂缝深度较深, 以 45° 左右角度分布于梁板支座附近与墩柱根部; 网状裂缝宽度小但密度大, 呈不规则网状集中在铺装层与梁板表面。

1.2 铺装层损坏病害

铺装层作为承受车辆荷载的表层结构, 其损坏类型包括剥落、坑槽、推移与裂缝。剥落多集中在车道轮迹带与桥面边缘, 表现为铺装层表面材料与基层分离形成脱落区域; 坑槽是铺装层局部材料缺失形成的凹陷, 深度

范围为几厘米至十几厘米; 推移在高温季节表现更突出, 是铺装层沿横向或纵向发生位移变形形成隆起或凹陷。

1.3 钢筋锈蚀病害

发生在桥梁梁板、墩柱、盖梁等钢筋混凝土结构内部的钢筋锈蚀, 按形态可分为均匀锈蚀、局部锈蚀与点蚀。均匀锈蚀的特征是钢筋表面整体覆盖红褐色锈迹, 截面均匀减小; 局部锈蚀表现为钢筋表面局部出现深锈坑, 深度可达钢筋直径的 1/3 ~ 1/2; 点蚀是钢筋表面出现细小且分布集中的锈孔。

1.4 支座老化病害

连接桥梁上下部结构的支座, 其老化类型包括橡胶支座开裂变形、钢板支座锈蚀、滚动支座卡滞。橡胶支座表面会出现不规则裂缝, 部分裂缝贯穿支座厚度, 且伴随压缩变形超标; 钢板支座表面形成锈层, 严重时导致钢板厚度减小、连接螺栓锈蚀卡死^[2]。

2 公路桥梁常见病害的成因分析

2.1 裂缝病害的成因

荷载、温度与收缩、材料与施工三类因素, 共同导致裂缝病害的形成。在荷载因素方面, 重载与超载车辆频繁通行超出桥梁原设计荷载标准, 使梁板受拉区混凝土应力超过抗拉强度, 车辆紧急制动与转向产生的水平力还会诱发剪切应力; 在温度与收缩因素方面, 温度剧烈变化产生的温度应力无法释放, 混凝土硬化时的体积收缩受约束产生收缩应力。

2.2 铺装层损坏的成因

材料选择不当、施工质量缺陷、环境与荷载耦合作用是铺装层损坏的主要成因。材料选择不当体现在

选用的铺装层材料高温稳定性与抗老化性能不足;施工质量缺陷涵盖基层表面清理不彻底、粘结层涂刷不均匀,沥青铺装层压实度不足与摊铺温度过低,以及水泥混凝土铺装层振捣不密实、切缝不及时。

2.3 钢筋锈蚀的成因

混凝土碳化、氯离子侵蚀、混凝土保护层缺陷三类因素,导致钢筋锈蚀的发生。混凝土碳化是空气中二氧化碳渗透到混凝土内部,与水泥水化产物发生反应降低混凝土pH值,破坏钢筋表面钝化膜;氯离子通过混凝土孔隙与裂缝渗透到内部,吸附在钢筋表面破坏钝化膜稳定性。

2.4 支座老化的成因

材料老化、环境侵蚀、养护缺失,与支座老化密切相关。在材料老化方面,橡胶支座的橡胶材料在氧气、臭氧、紫外线作用下分子链断裂,导致弹性与强度下降;在环境侵蚀方面,雨水与湿气渗透到支座内部加速橡胶老化,钢板支座防腐涂层破损后受雨水与二氧化碳侵蚀;在养护缺失方面,支座未定期进行检查、清洁与润滑,杂物侵入导致滚动支座卡滞,橡胶支座长期处于偏压状态、钢板支座螺栓未定期紧固,都会加速支座老化^[3]。

3 公路桥梁常见病害的治理对策

3.1 裂缝病害的治理对策

裂缝病害治理需以病害严重程度为依据划分治理等级,在匹配对应措施的同时兼顾修复效果与经济性平衡。表面封闭法适用于浅层裂缝治理,施工前需完成裂缝表面的彻底清理,使用钢丝刷去除表面附着的灰尘与松散混凝土颗粒,再通过压缩空气将裂缝内部的细小杂物吹净,避免杂质干扰封闭材料与混凝土表面的粘结效果。清理工作完成后,选用环氧树脂砂浆或聚合物水泥浆作为封闭材料,其中聚合物水泥浆的配合比需控制为水泥:聚合物:砂=1:0.2:2,将材料均匀涂抹在裂缝表面,形成厚度2~3mm的封闭层,该封闭层可有效阻断雨水、二氧化碳等侵蚀介质进入裂缝内部。压力注浆法用于中层裂缝治理,第一步开展钻孔作业,沿裂缝走向确定注浆孔位置,孔距控制在150~300mm之间,孔径设置为8~10mm,钻孔深度需达到裂缝深度的三分之二,保证注浆孔能与裂缝有效连通。钻孔完成后,将专用注浆管插入孔内并固定,选用环氧树脂浆液或水泥浆作为注浆材料,其中水泥浆的水灰比需控制在0.4~0.45之间,使用工作压力为0.2~0.5MPa的专用注浆泵进行注浆作业。

结构加固法针对深层裂缝治理,需根据裂缝所在部位与结构形式选择适配的加固方式。对于梁板跨中区域的横向裂缝,可采用粘贴碳纤维布的加固方式,先对裂缝区域的混凝土表面进行打磨处理,打磨后表

面粗糙度需达到Sa2.5级,去除表面浮浆与杂质,再涂刷专用界面剂增强碳纤维布与混凝土的粘结强度。选用抗拉强度不小于3400MPa的碳纤维布,粘贴层数为2至3层,粘贴过程中需保证布面平整且无气泡与褶皱,粘贴完成后用环氧树脂胶对布边进行固定,借助碳纤维布的高强度抗拉性能限制裂缝进一步扩展。

3.2 铺装层损坏的治理对策

铺装层损坏治理需针对不同损坏类型制定专项修复措施,同时注重基层处理质量与修复材料选择,避免修复后短期内再次出现损坏问题。

剥落与坑槽治理需先进行损坏区域的切除作业,使用铣刨机或人工清除损坏的铺装层材料,切除深度需达到稳定基层,通常为5~10cm,确保彻底去除已松动、破损的材料,防止残留损坏部分影响修复质量。切除完成后,用高压水枪冲洗基层表面,清除表面的浮尘、碎屑等杂物,若基层存在松散现象,需喷洒水灰比为0.5的水泥浆进行加固处理,水泥浆需均匀覆盖基层表面,待其固化后提升基层的密实度与强度。基层处理完成且干燥后,涂刷沥青粘结剂作为粘结层,粘结剂用量控制在每平方米0.8~1.0kg,确保铺装层与基层能有效粘结。修复材料选用改性沥青混合料或高强度水泥混凝土,其中改性沥青混合料可选择SBS改性沥青AC-13型,施工时压实温度需控制在160~180℃,压实度需满足设计规范要求。

推移病害治理需结合病害成因制定治理方案,对于高温季节因铺装层材料高温稳定性不足导致的推移变形,可采用铣刨重铺法,铣刨深度控制在5~8cm,将原有的高温稳定性差的铺装层材料彻底清除,更换为橡胶沥青混合料或温拌沥青混合料。其中橡胶沥青混合料的橡胶含量需满足设计要求,具有优良的高温稳定性;温拌沥青混合料的施工温度比普通沥青混合料低30~40℃,能减少高温施工对材料性能的影响。

铺装层裂缝治理采用灌缝法,使用专用开槽机沿裂缝走向开槽,槽宽控制在10~15mm,槽深设置为15~20mm,开槽过程中需保证槽壁平整且与裂缝中心线对齐,避免偏离裂缝导致灌缝不彻底。开槽完成后,使用压缩空气或高压水枪清理槽内的杂物与灰尘,确保槽内干净干燥。选用伸长率满足设计规范的聚氨酯灌缝胶作为灌缝材料,将材料缓慢灌注到槽内,灌注时控制速度避免产生气泡,灌缝胶的灌注高度需高出铺装层表面2~3mm,形成弧形排水面,该形状可有效引导雨水流向桥面排水系统,防止雨水渗入槽内引发二次损坏。

3.3 钢筋锈蚀的治理对策

钢筋锈蚀治理遵循预防为主、修复为辅的原则,通过优化设计方案与加强施工质量控制降低锈蚀风险,

对已发生锈蚀的钢筋采取针对性修复措施,恢复其力学性能^[4]。

预防措施从混凝土保护层设计、材料选择、施工质量控制三个维度开展。混凝土保护层设计需根据桥梁所处环境类别进行调整,对于海洋环境中的桥梁,梁体混凝土保护层厚度需不小于 30 mm,确保保护层能有效隔绝侵蚀介质与钢筋的接触;在材料选择上,选用强度等级不小于 C50、抗渗等级不小于 P8 的高性能混凝土,该类混凝土密实度高且抗渗透能力强,能减少氯离子与二氧化碳的渗透速度,同时在混凝土中添加氨基醇类阻锈剂,阻锈剂掺量需控制在水泥用量的合理范围内,通过抑制钢筋表面的电化学反应减缓锈蚀速度。在施工过程中,严格控制混凝土的水灰比,水灰比不得大于 0.5,采用高频振捣器进行振捣作业,确保混凝土密实,避免因振捣不充分产生内部孔隙;混凝土浇筑完成后,养护时间不少于 14 天,采用覆盖洒水的养护方式,确保混凝土强度稳定发展。

轻微锈蚀修复适用于锈蚀程度较轻的钢筋,修复第一步为混凝土凿除,使用专用工具凿除锈蚀区域的松散混凝土,凿除深度需达到钢筋表面,确保能清晰观察钢筋的锈蚀状态,凿除过程中需避免损伤未锈蚀的混凝土与钢筋。凿除完成后,采用喷砂除锈的方式去除钢筋表面的锈迹,除锈等级需达到 Sa2.5 级,确保钢筋表面露出金属光泽且无残留锈斑。

严重锈蚀修复适用于锈蚀程度较重的钢筋,对于小跨度梁板等小型构件,可采用拆除更换的方式,先将锈蚀严重的构件拆除,清理支座与连接部位的杂物,根据原构件设计参数制作新构件,新构件所用钢筋材质为 HRB400E,钢筋直径需比原钢筋大 2~4 mm,弥补锈蚀导致的截面损失,浇筑高性能混凝土,确保新构件性能优于原构件。

3.4 支座老化的治理对策

支座老化治理需结合支座类型与老化程度,采取修复、更换或维护的差异化措施,确保支座能正常发挥传递荷载与适应结构变形的功能^[5]。

橡胶支座的治理需根据老化程度选择修复或更换方式,对于轻微开裂变形的橡胶支座,采用修复处理,首先使用专用清理工具去除支座表面的灰尘与杂物,对于表面的细小裂缝,选用橡胶修补剂进行填充,填充过程中需确保裂缝被修补剂完全填满且无空隙残留。填充完成后,在支座表面涂刷橡胶保护剂,保护剂能有效隔绝氧气与紫外线,减缓老化速度,保护剂需每 2 年涂刷一次,形成持续防护。同时,检查支座受力状态,若存在偏压现象,通过增设楔形钢板调整支座高程,使支座受力均匀,避免局部应力集中加速老化。对于裂缝贯穿支座厚度或压缩变形超标的橡胶支座,需进

行更换处理,拆除旧支座前需对桥梁上部结构进行临时支撑,确保施工安全,拆除过程中避免损伤支座垫石与上部结构,新支座选用氯丁橡胶支座,其设计使用年限不小于 20 年,安装时需严格控制支座平面位置与高程,平面位置偏差不得大于 5 mm,高程偏差不得大于 2 mm,安装完成后检查支座是否受力均匀,确保无偏压、脱空现象。

钢板支座的治理核心在于除锈与防腐处理,需清除支座表面的锈层,采用喷砂除锈的方式,除锈后表面粗糙度需达到 Sa2.5 级,彻底去除锈迹与氧化皮,避免残留锈蚀继续发展。除锈完成后,涂刷氟碳防腐涂料,涂料干膜厚度需达到 200 μm ,涂刷过程中需分 2 至 3 遍进行,每遍涂刷后需等待涂料固化,确保涂层厚度均匀且无漏涂、流挂现象。对于支座的连接螺栓,需全部更换为 304 材质的不锈钢螺栓,更换前清理螺栓孔内的杂物,更换后均匀涂抹防锈脂,防锈脂能有效防止螺栓与螺母之间的锈蚀卡死。

滚动支座卡滞的治理需通过拆解维护恢复功能,将滚动支座从桥梁结构中拆除,拆除过程中需做好部件编号,避免重新组装时出现位置错乱。拆除后对支座进行拆解,分离滚动部件、轴承与支座本体,使用汽油或专用清洗剂清洗各部件表面的油污与杂物,检查滚动部件与轴承的磨损情况,对于磨损超标的部件进行更换,确保更换部件的规格与原部件一致。

4 结束语

公路桥梁养护中常见病害较为普遍,针对病害成因加以分析并制定具体的治理对策可以有效延长桥梁使用寿命。相关人员需要意识到桥梁病害的治理并非单纯依赖于技术手段,还需在设计阶段充分考虑桥梁的抗病害能力,并加强日常养护检测。随着桥梁养护技术的不断进步,桥梁的使用寿命以及安全性将得到提升。因此,各级交通管理部门需要加强对桥梁病害治理的重视程度,合理安排养护工作,使桥梁工程可以持续服务于社会发展。

参考文献:

- [1] 张宁.公路桥梁常见病害治理及技术状况评定[J].科学技术创新,2022(32):97-100.
- [2] 廖坤.道路桥梁工程的常见病害与治理策略探讨[J].建筑·建材·装饰,2024(03):145-147.
- [3] 王廷祥.高速公路桥梁常见病害及养护措施分析[J].运输经理世界,2024(03):127-129.
- [4] 冀梅花.公路桥梁常见病害及检测处治研究[J].交通世界,2024(11):140-142.
- [5] 杨耀生.既有公路梁式桥抗震性能评估方法研究[D].银川:宁夏大学,2021.

供水管网水力模型在区域供水管理中的应用分析

冯 超

(西安水务(集团)李家河水库管理有限公司, 陕西 西安 710061)

摘 要 随着城市化进程加速, 供水系统运行管理面临日益复杂的挑战。区域供水管理单位作为供水网络的运营主体, 亟须借助水力模型提升管理精细化水平。本文从管理单位实际需求出发, 系统探讨供水管网水力模型在案例区域中的应用路径, 包括模型构建方法及在多场景下的具体实践, 旨在为同类单位提供可借鉴的技术与管理经验, 推动供水系统安全、高效运行。

关键词 区域供水; 管理单位; 供水管网; 水力模型

中图分类号: TU991; TV212

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.032

0 引言

城市供水系统是保障民生与经济发展的重要基础设施, 其运行效率与可靠性直接影响公众生活质量与社会稳定。当前, 随着供水规模扩大与管网结构复杂化, 传统经验型管理方式已难以应对多变的运行工况与突发事件。水力模型作为模拟与分析管网水力状态的重要工具, 已在国内外部分大型水司中得到初步应用, 但在区域供水管理单位中的推广仍面临数据、技术与人才等多重制约。因此, 从管理单位视角系统研究水力模型的应用模式与实施路径, 对提升区域供水系统运行水平具有重要的现实意义。

1 供水管网水力模型在区域供水管理中的案例

1.1 案例概况

案例部门管理 100 平方公里区域, 300 公里供水管道, 应用 GIS、收费管理和远程监控系统实现标准化管理。通过数据更新、交叉核验和系统普查确保数据准确, 设有 22 个流量监测点、40 个压力单元及 500 余台智能水表, 实施全天候监测维护。7 月启动管网水力模型搭建并完成验收, 年内分步推进业务化, 实现管理信息化与精细化升级。

1.2 模型构建

在项目规划之初确定 GIS 系统对接动态数据的关键要素和处理流程, 调研原始数据在各系统的存储现状, 制定数据导出导入模型的操作方案, 初步规范数据格式; 核查水厂、加压站和管网监测点等关键设施与 GIS 数据的对应性, 整理水厂送水泵房与增压站的

工艺图纸; 同步处理 GIS 数据中的拓扑连接故障、相邻节点不一致及用户编码错误; 筛选合适的建模平台, 待基础调研数据采集工作结束后, 基于第一阶段数据整理研制了水力模型测试版, 数据处理系统的配置与运行符合预期, 数据规模及质量达到建模要求, 空间数据库的管道规格及材质参数齐全, 未发现明显差错, 采集时段内监测无间断, 错误条目占比与预估相符, 借助初步建立的水力模型明确了下一阶段任务重点。

基于测试阶段水力模型的评估反馈, 围绕管网监测设备、水厂与增压站等核心设施实施空间坐标与高程测量, 对重点阀门开关位置实施核查, 实现 GIS 系统数据刷新; 为管网监测系统增加流量实时监测与 10 分钟周期数据批量导出能力, 纠正 GIS 数据明显偏差, 完成 GIS 系统水表及消火栓分区属性升级, 根据实测获得的 15.83% 产销差及 12.11% 综合漏损结果, 因管网中消火栓节点的空间分布具有均衡性, 模型架构采用增压站分隔的双片区拓扑结构样式, 将未计量水和漏损水按比例分配至各个消火栓节点, 进行初步整理后, 获取月度完整数据再加以筛选。按照拓扑架构逐步实现 SCADA 数据和营收数据的导入操作, 分三个步骤构建水力模型, 在模型建立时同步完善数据体系。在模型校准环节, 查出 1 组流量数据和 4 组压力数据存在误差, 开展流量计参数校准工作, 同时检查管路配套设施, 发现 1 处阀门未开启, 完成 4 处压力计的硬件维修和高程参数确认。经过精度验证, 模型精度符合《城镇供水管网模型构建与应用技术规程》相关规定。

由于水力模型迭代验证所需时间较长,需对模型开展验证分析,同时进行模型实际应用场景的可行性分析。当前版本水力模型构建过程与 9 月版基本一致,依据整月数据开展筛选与建模流程,并更新了监测系统中新增设备的布点。实施经校核的更新水力模型后,与 9 月版相比,模型精度略高,满足城镇供水管网建模的技术要求^[1]。

1.3 模型应用价值

1.3.1 分析供水管网低压区域的成因并提出相应的改善策略

通过水力模型探究供水管网压力分布规律,明确低压地带出现的原因,为增强供水稳定性提供依据。服务区内识别出数个低压集中地带,其中两个用户密集区需重点监测。两个低压点成因存在明显差异:一处因地形升高和管道沿程水头损失导致,另一处因输水管线延伸过长,水厂远端水头损失增大。企业已将老化管道列为首批技术改造对象,预计可改善水压和稳定性;后者计划实施管道新建工程以实现双线供水,预计能有效提升用水高峰时的水压稳定性。

1.3.2 制定转压站调度优化方案

以降低供电成本和减少漏损为重点,针对服务范围西侧供水情况进行优化。西侧采用转压站加压供水,公共供水管网压力较大,且西侧边界因连通外围管网、用水集中,导致管网末端压力降低。运用水力仿真方法改进转压站调度方式:一是通过阀门节流控制,使外部和内部管网由不同泵房分开供水,实现区域分级加压,先保证外部管网压力,同时控制内部压力;二是分析管网压力临界点对应的出站压力需求,作为调度方案实施依据。利用水力建模既验证关阀决策,又标定最不利节点,使优化分析过程更清晰可靠。

1.3.3 开展管道连通模拟分析

为管控该区域管网压力水平,完成该管道与外部供水网的连接,施工前期采用水力仿真评估管道连通后的流态变化情况。由于管道接口位置超出服务区边界,使用扩大计算域的方法覆盖用水量预测边界。针对外部用户用水数据录入模型困难的情况,使流量边界直接与主枢纽节点关联,将外部流量影响纳入考虑范围,同时避免复杂的数据采集过程。实测值与仿真数据偏差较小,说明水力模型计算结果可靠。

1.3.4 进行关阀操作模拟计算

施工中若需切断管道供水,则需操作阀门关闭。依据管网拓扑结构可明确停水波及范围,基于水力建模对关阀造成的流量变化进行模拟,对比关阀前后的流向与压力差异,为方案选择与用户告知提供参考。

该地块市政管道连接施工过程中,待建管道需与主输水管线实现对接。工程实施需缩小停水影响范围,基于多套关阀方案模拟试验,不同方案的工期长短与降压程度相互制约:有的方案降压效果不佳但工期较长,有些方案实施时间短但影响范围广。需选取对终端用水影响最小的技术途径,确保工程如期完成^[2]。

1.3.5 水力模拟结果与实测数据对比分析

该模型虽经水力校核且合格,但因检测点数量有限,且依赖人工分析,部分管网部件的连接状态或阀门开度可能与实际不符。环状管网的使用会减弱特定水力异常的干扰,降低其可识别性。在系统处于关阀停运等工况时,流体集中程度加大,异常信号会被放大。对比仿真数据与实际测量结果,有助于核查模型准确度及查找问题。就某次供水中断事故而言,多个监测点压力下降幅度明显超出预期,排查后发现是上游某阀门开启度不足,这表明水力模型与管网现状存在差异^[3]。

2 供水管网水力模型的问题及解决对策

2.1 项目进度可能无法完全按计划推进

在水力模型建设前期立项阶段,供水系统运行状态的建模调研多处于基础层面,供水管理团队对模型的认识不足,建模团队的数据掌握程度不高,这为后续工作埋下隐患。特别是 GIS 数据的可靠性、监测数据的完备性与提供便利性,会直接影响水力模型的可靠性。

案例考察发现,因管理辖区面积有限,供水单位技术团队对数据运行状态了解充分,在日常工作中不断强化数据质量,在模型搭建过程中同步完善数据质量(依靠统一软件环境,实现问题分析与修正整合),从而提前实现建模目标,在预定周期内初步建立模型,并完成模型的全面优化。

2.2 数据收集的完整性与准确性有待验证

实现离线建模需监测数据采集频率足够,采样点数量充足且分布均匀。平时供水管理时,专业系统搭建与设备配置主要服务于业务部门,数据采集频度设定、应用匹配和点位配置未协调好,导致采集结果存在偏差。

在此次研究中,基于信息化建设高效推进,数据采集过程问题不大,采取阶段性应对措施:因水厂系统数据库格式限制造成导出功能无法使用,通过备份存储数据开展建模分析;因市政远传监测系统无最小时间间隔的数据导出选项,对其功能进行了优化^[4]。

通过前期开展大用户管理和降漏损实践工作,分阶段推动用户远传水表普及,并配置了分区流量计量

设备,在供水系统薄弱环节设置了密集压力监控点,形成的数据体系有力支撑了水力模型构建。然而部分地段监测装置覆盖不足,影响水力模型验证的可信度。考虑到设备布点与安装周期长,供水管理部门应提前做好工作规划。

2.3 离线模型的更新频率可能无法满足实时需求

此案例采用离线水力建模方法,数据采集与模型训练均需投入时间精力。模型校核完成后,模型数据时间戳与当前存在季度偏差,管网结构的改变以及重点用户用水量的波动会影响模型反映现状的准确度,且时间越久变化越大,已有建模结果的可靠性会递减。若跳过重复校核步骤,可靠性评估就缺乏支撑。该案例虽在项目周期内完成了模型迭代,但项目结束后,因技术力量与人力不足,更新实施始终依赖项目基础。由此案例可知,6月底边界低压供水管网实施了大规模管道衔接工程,随着低压区运行状况的改善,系统整体流量与压力分布格局出现明显调整,与3月的水力模型相比存在较大偏差。

考虑到水力模型全面升级无法快速落地,本研究采用分段更新手段保证模型功能完备:先针对显著的管网变动进行图纸补充,同时完成临近监测点的数据校验;接着针对水厂季节性供水量的差异,全面校准需水量调节系数,使水力模型的水厂水量输出值接近实际测量供水值^[5]。

2.4 向相邻管网的水量输出可能存在波动

与对照区域大用水户的用量相比,输往相邻管网的水量往往更大,对管网水压的影响也更显著。这部分水量受相邻区域水厂和管网运行调控的制约,预测易出现误差,其动态变化量在水力建模时也难以准确量化。若本区域与周边管网形成环状结构,水压变化会沿相邻管网扩散,干扰本区的水力模拟结果。

对于本地大型用户或存在单向供水联系的相邻管网,可通过压力驱动公式推导压力与用水量的对应关系,但公式关键参数需根据工程实际情况确定。若供水系统采用跨区域环状管网,则需额外收集管网外围环状结构的数据,对模型进行水力补充,直至管网实现对外输水开展有效模拟分析,需采用单向水流模式方可实现。

2.5 供水管理单位需加强对模型理论与实操工具的掌握

此问题贯穿水力模型开发与实施全过程。由于供水管理机构的重点工作集中在供水安全及运行保障方面,进行用户服务,缺乏设计院那样充足的技术资源

积累,在建立模型时可能未完全把握理论内涵和实施初衷,导致实施推迟或成效不显著;在模型实际应用阶段,或许难以兼顾全面铺开与精准操作^[6-7]。

在此背景下,供水管理部门需挑选既有责任感又善于不断学习的项目管理人才,与技术过硬的建模团队协作,这是确保模型构建与应用效果的关键。项目开始时制定周密的技术规划,管理人员需深入掌握该模型的理论要点,在建模执行阶段不断深化技术认识,保障项目顺利推进。在开展模型实践时,参照建模单位展示的操作范例,项目团队充分挖掘自身数据与人力优势,依据生产需求探寻模型落地办法,取得显著成效,提升了模型可靠性,实现了模型应用与日常业务的良好融合。

3 结束语

本文从区域供水管理单位的实际业务出发,系统阐述了供水管网水力模型在低压区改善、调度优化、管道连通分析、关阀模拟及数据验证等多个方面的应用价值,体现出模型辅助管理决策的重要作用。同时,指出模型在项目推进、数据质量、更新机制、边界水量波动以及人员专业能力等方面可能存在的问题,并提出了相应的改进对策。未来,随着传感技术、云计算与人工智能的不断进步,水力模型将朝着实时化、智能化与业务深度融合方向发展。区域供水管理单位应积极加强数据基础建设与技术团队培养,推动水力模型由离线辅助向在线决策支撑转变,全面提升供水系统精细化管理水平。

参考文献:

- [1] 康引引,杨坤,刘俊,等.基于阀门隔离区域的供水管网管道故障韧性评价模型[J].净水技术,2023,42(10):131-138.
- [2] 刘升升.城市供水管网改扩建智能优化技术与实践[D].青岛:青岛理工大学,2023.
- [3] 侯建楠,李鑫,陶其育.城市区域供水管网背景漏失控制研究[J].海河水利,2023(01):79-82.
- [4] 陈京钰,冯新,肖诗云.一种基于压力测点报警等级的供水管网泄漏区域识别方法[J].给水排水,2022,58(10):173-179.
- [5] 施焯.基于区域供水实际的供水管网分区及漏损控制[J].净水技术,2021,40(S2):1-5.
- [6] 曹萍萍,陈群力.区域网格化管理在降低供水管网漏损中的应用[J].城镇供水,2021(03):61-65.
- [7] 杨军.城市供水管网漏失信号识别及区域定位方法研究[D].西安:长安大学,2020.

BIM 技术在重力墩式码头设计与施工中的应用研究

李俊¹, 唐林富², 陈靖松³

(1. 北部湾港钦州码头有限公司, 广西 钦州港 535008;

2. 广西壮族自治区交通运输工程质量监测鉴定中心, 广西 南宁 530031;

3. 中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510500)

摘要 本文以钦州港大榄坪港区 4 号、5 号泊位工程一期项目为研究对象, 深入探讨了 BIM (建筑信息模型) 技术在重力墩式码头设计与施工中的应用。研究表明, BIM 技术通过其可视化功能显著降低了沟通成本, 并为项目的精细化管理提供了强有力的技术支持。具体而言, BIM 平台使管理人员能够实时、直观地监控项目现场施工进度, 从而有效提升工作效率。BIM 技术还在解决不同专业领域之间构件冲突方面发挥了重要作用, 有效避免了设计与施工阶段的碰撞问题, 从而减少了返工风险, 节省了施工成本。此外, BIM 模型能够迅速且准确地进行工程量统计, 利用其卓越的特性, 施工进度计划得以清晰可视化模拟, 显著减少了人工统计可能带来的不确定性和误差, 并准确识别潜在风险, 从而实现工程项目的精确控制和高效推进。

关键词 BIM 技术; 重力墩式码头; 钢栈桥设计; 进度管理

中图分类号: TP391; U656.111

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.033

0 引言

建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 指的是一种高科技技术, 它通过三维建筑结构模型实现工程项目的监理、设施运维、物业管理、数据化制造以及系统化工程管理的各项功能^[1]。BIM 技术在多个方面展现出卓越优势: 可视化、协调性、信息关联性、信息一致性、模拟化、信息完备性, 且具备出色的可出图性能^[2]。BIM 技术有效解决了传统三维建模方法在地质模型精细处理方面的局限, 借助先进的三维建模手段, 达成了地质信息的可视化呈现目标, 清晰地描绘了复杂多变的地质环境。该技术通过对地质模型实施精密的三维化处理, 在设计流程中扮演着至关重要的角色, 显著提升了工作精度。鉴于水运工程以其自身发展规模及行业特性, 相较于其他土建工程, 水运工程呈现出更为复杂的特性。港口项目依托水陆交互的运输设施, 设计时须全面分析地质结构、地貌特点及水文数据等关键因素, 同时, 在设计水工建筑物时, 必须细致考虑其结构体系、外形轮廓以及精确尺寸等因素, 这为定型设计带来了相当大的难度。对于地质条件错综复杂的港口工程项目, 传统三维建模技术在实现地质模型高精度的构建上存在限制, 从而给后续的设计环节造成了诸多阻碍。基于 BIM 技术的

工程管理工作, 可在同一个平台上, 将参与项目的建设单位、设计单位、监理单位、施工单位等统合, 共享同一个工程信息模型, 通过 BIM 技术可使项目可视化得以实现, 并进行精细化建设。本文以钦州港大榄坪港区大榄坪作业区 4 号、5 号泊位工程为研究对象, 对 BIM 技术在重力墩式码头设计与施工中的应用进行了研究。

1 工程概况

钦州港大榄坪港区 4 号、5 号泊位工程一期工程拟建设一座高桩+重力式码头, 上部结构包括现浇圆筒盖板、现浇胸墙、现浇肋梁和现浇面层, 整体结构采用 C40 混凝土, 总混凝土量约为 5 084.09 m³。码头的沉箱上方设置预制盖板及现浇 C40 胸墙, 胸墙的顶部标高为 6.37 m, 底部标高为 3.05 m, 每个沉箱上设置一段砗胸墙, 每段胸墙长度为 10.6 m。为了施工上部结构, 采用钢栈桥平台作为施工通道, 钢栈桥与现浇结构的距离约为 17 m。混凝土浇筑采用混凝土罐车与泵车相结合的泵送方式完成。

2 BIM 模型的创建

此工程项目的建模工作包含多个关键组成部分, 具体包括三维地质建模、地表形态的三维重构、场地

回填的动态模拟、港区开挖的详细设计、基础结构的模型构建以及水工建筑物的结构模型化等。本次主要针对施工过程中的基础结构模型和工艺进行模拟和分析。

3 工程应用

3.1 钢栈桥设计

本文工程涉及的引桥和栈桥桩基为灌注桩,因此需要搭建钢栈桥及钢平台作为施工便道及操作平台。拟建的钢栈桥及钢平台设计需满足多种重型设备的通行与作业要求,包括80 t履带吊、混凝土运输车、平板运输车、混凝土泵车、桩机等大型机械的通行。栈桥的设计考虑到全长搭设,起点设在现有陆域接岸现浇支墩处,经过引桥延伸至栈桥及码头方向,总长度约为680 m。其中,栈桥的主通道部分宽度按8 m进行设置。为了避免栈桥及平台底部受高潮位影响,钢栈桥及钢平台的顶标高设定为+7.0 m,并采用透空式平台结构进行搭设,确保其在潮汐变化中具备良好的通行能力和稳定性^[3]。

3.2 4D、5D模拟

在BIM 5D软件中,通过将详细进度计划与模型构件进行关联,能够实现4D施工模拟,进一步优化施工过程中的管理和控制。在4D施工模拟过程中,工程师可以直观地发现潜在隐患和问题,并将这些问题反馈给进度编制软件,以便实时优化施工进度计划。这一过程相较于传统二维图纸,具有更强的直观性和可操作性,能够大大提高施工图的审核效率。尽管工程师通过二维图纸可以发现设计错误,但这一过程通常需要花费大量时间。而通过在BIM系统中建立三维模型,可以迅速且直观地识别设计中的不合理之处。

3.2.1 辅助桩施打

辅助桩通过半挂车从堆放场运至施工现场,并由履带吊吊起,利用振动锤进行打设。水中辅助桩施工定位依赖于导向架,因此,在施打水中辅助桩之前,需要先制作并安装导向架。导向架采用贝雷架制作,总长9 m,纵向由三片贝雷架拼接而成,横向由两片贝雷架拼接并通过花架连接。限位装置使用16#槽钢制作,竖向分别在贝雷架顶部布置两层槽钢,上层布置于上层桁架顶面,下层布置于下层桁架顶面,槽钢槽口朝下与贝雷架焊接连接。焊接完成后的槽钢形成一个内切圆半径为0.35 m的正方形结构。在导向架与已完成的钢便桥贝雷架连接后,形成一悬臂梁。

水中辅助桩的打设过程依托已施工完成的钢便桥作为施工平台,吊车就位后,钢丝绳通过工字钢将吊

车与平台连接,确保其稳固可靠。随后,辅助桩通过平板运输车运输至吊车工作半径范围内,进行接长焊接。吊车将辅助桩吊起,并垂直放置在导向架内。接着,吊机吊起振动锤和夹具,夹住桩体并开始压锤,通过辅助桩和打桩锤的重量将桩压入土层。复测桩位和倾斜度偏差,确保其符合要求后,开始振动下沉。每排辅助桩搭设完成后,导向架拆除,并待下一排辅助桩施工时重新拼接。在吊车就位后,进行定位操作,利用振动锤夹具将辅助桩稳固夹持,精确放置至导向架预设位置^[4]。

3.2.2 安装贝雷梁

贝雷片采用标准型,尺寸为3 m长、1.5 m高。在场地内,贝雷主梁的组装过程始于在铺设了枕木作为支撑的地面上,通过吊车将各个贝雷片逐一吊起,并使用桁架连接销将这些贝雷片依次连接,形成延伸的结构单元。接下来,使用螺栓将竖向和水平支撑架与贝雷主梁连接,从而将整个结构整合为稳固的一体。确保贝雷接头的每一处均有支撑架配置,以保证接头处的稳定性。为了增强梁体的刚度和稳定性,采用了贝雷与支撑架之间的错位接头联结技术。这一技术有效降低了因桁架接头变形可能引发的主梁位移风险,进一步提升了结构的抗变形能力。所有桁架连接处的螺栓和螺帽需要严格按照规定的扭矩标准进行紧固,确保连接牢固。同时,在螺栓和螺帽上涂抹润滑黄油后,桁架销需准确穿插,以保证连接的顺畅和稳固性。贝雷梁安装示意图如图1所示。

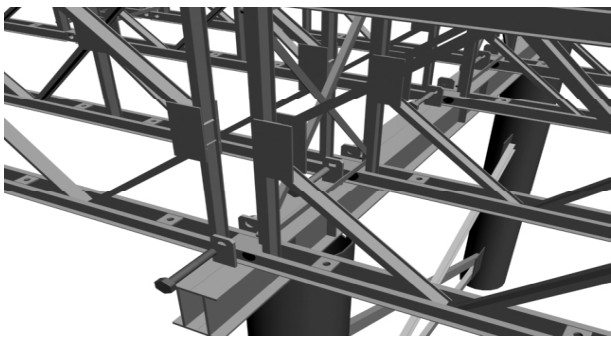


图1 贝雷梁安装示意图

3.2.3 铺设桥面横梁

贝雷梁安装完成后,按照设计要求布置工字钢横梁。通过U型铁件将工字钢与贝雷片牢固连接,确保连接稳定,防止滑移。图2为分配梁安装示意图。

3.2.4 桥面板铺设

工字钢横梁安装完成后,按照设计要求进行桥面板的铺设。图3为面板安装示意图。

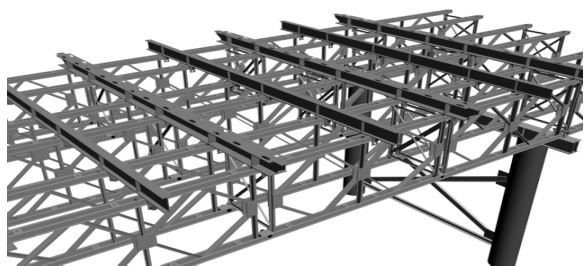


图 2 分配梁安装示意图

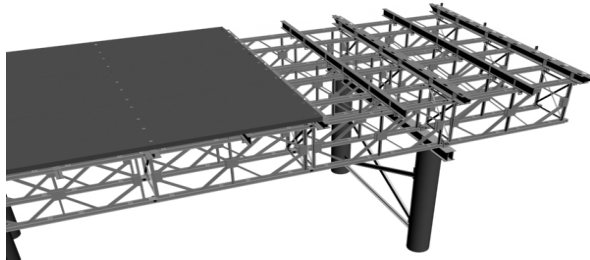


图 3 面板安装示意图

3.2.5 附属设施施工

主跨便桥结构竣工后,随即着手部署附属设施,包括便桥栏杆、照明系统以及安全警示标识等。在栏杆系统的设计上,采用三层防护设计,以增强安全冗余。每隔两米配置一根竖向支撑,支撑穿透桥面钢板,通过精密焊接技术牢固固定于横向分配梁结构上,从而确保栏杆系统的稳固性和可靠性。此外,栏杆上还设有航道警示灯和夜间行走路灯,以提供夜间通行安全保障。

3.2.6 安装桩顶横梁

通过对横梁、架桥机等设备进行建模,完成预制梁架设工艺分析。调试后,架桥机停放于喂梁位,前支腿、中托和后支腿支撑到位。两台起重天车同时就位,准备吊梁。运梁车将预制梁送至起重天车下方,前吊点对准前起重天车,前起重天车吊起梁并前移至后吊点,后起重天车吊起完成整片梁的吊装。吊装完成后,运梁车开出。在梁体移至安装位置后,进行纵向和横向调整,确保与预定落梁位精确对接。调整完成后,收起后支腿,架桥机沿轨道移动至下一梁位,支起后支腿,继续横向架梁作业。完成后,按程序进行过孔,为下一跨梁架设做好准备。

3.3 进度管理

基于详细施工进度计划、三维建筑信息模型,创建 4D 模拟动画。实现 4D 施工模拟的必要条件之一是施工详细进度计划。在 BIM 技术平台中,结合详细的进度计划,利用三维可视化环境展示各个工序的构建过程。该平台能够详细分解各项工序,帮助识别不同工序间的衔接空隙,从空间角度减少工序间的等待时

间,加速整体进度。通过对关键工序进行空间分析,管理人员可以发现进度瓶颈,并采取相应措施,从而提高关键工序的施工效率。通过 BIM 平台,项目管理人员可实时监控施工进度,及时发现、分析并解决问题,提高项目管理的精准度和响应速度。

3.4 提高施工安全管理效率

通过将现场监控系统与 BIM 系统实现信息化对接,能够在 BIM 平台中实时监控施工现场的动态,提供高效便捷的安全生产管理服务。监控探头拍摄的画面可通过 BIM 系统查看,系统能够准确定位现场人员和设备的位置,及时捕捉并记录违章行为。该系统的集成显著提高了施工安全管理的效率。施工人员可通过 BIM 系统即时上传现场的安全质量信息,确保项目管理人员能够实时、准确地发出指令。指令的执行情况可以通过系统进行跟踪和查询,提升了工程管理的透明度和响应速度,从而加强了施工现场的安全管理^[5]。

4 结论

1. BIM 技术的可视化功能能够显著降低沟通成本,为工程项目提供精细化管理的技术支持。通过 BIM 平台,管理人员可以实时监控项目现场的施工进度,从而提升决策效率和施工组织的整体效率。

2. BIM 技术在安全监督和质量检查中的应用,可以有效提升监管效能,及时发现潜在风险,降低施工过程中的安全事故和质量问题的发生率,进而节省相应的管理成本。

3. 利用 BIM 技术的卓越特性,施工进度计划可以进行精准的可视化模拟。这一过程显著减少了传统人工统计中的不确定性和误差,能够提前对进度进行评估,并精确识别潜在风险,从而帮助施工技术人员科学优化施工方案,确保项目按时按质完成。

参考文献:

- [1] 余萌,马向南.基于 BIM 的道路线形设计及安全评价方法探讨[J].城市道桥与防洪,2020(05):43-45.
- [2] 孙建诚,蒋浩鹏,朱双晗.基于 BIM 技术的三维公路模型设计探讨[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(01):30-34.
- [3] 梁涛.BIM 技术在施工现场总平面布置中的应用[J].科学与信息化,2018(04):9-10.
- [4] 曹祎楠.融合 BIM 与 GIS 的三维空间数据可视化研究[D].北京:北京建筑大学,2020.
- [5] 赵彬,谢尚英,何畏.桥梁工程 BIM 2020 年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(S1):228-233.

物联网技术在高层消防设备设施维护管理中的应用

吕东强

(国能朔黄铁路发展有限责任公司综合服务分公司, 河北 沧州 062350)

摘要 随着城市化进程加速, 高层建筑数量激增, 其消防设备设施的维护管理成为保障建筑消防安全的核心环节。传统维护模式较为依赖人工周期性巡检, 存在巡检效率低、隐患发现滞后、数据碎片化、应急响应慢等痛点问题, 难以适配高层建筑垂直空间广、设备分布散、风险等级高的特性。因此, 在今后高层建筑消防设施维护管理中, 需尽可能应用物联网技术, 构建高层消防设备维护管理工作体系。本文在这一需求基础上讨论物联网技术在高层消防设备设施维护管理中的应用方式, 以期为相关人员提供参考。

关键词 物联网技术; 高层建筑; 消防设备; 运维管理

中图分类号: TU998.39

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.034

0 引言

城市化作为现代社会发展的核心趋势, 根据国家统计局 2025 年 1 月 17 日发布的《2024 年国民经济和社会发展统计公报》, 截至 2024 年, 我国城镇化率已经突破 66%, 高层建筑开始走向规模化应用。然而, 高层建筑的物理特性导致消防设备的维护管理面临较大的挑战, 人工开展高层建筑巡检容易导致漏检、误判等问题。同时, 传统维护以定期维修为核心, 缺乏对设备实时状态的监测。物联网技术的成熟与普及, 为改善高层建筑消防设备维护难题提供新的技术路径, 物联网的核心价值在于万物互联与数据驱动, 打破传统维护的时空限制。

1 物联网技术在高层消防设备设施维护管理中的价值

1.1 实时动态监测

在高层建筑消防设备维护期间, 传统人工巡检难以突破时空限制, 经常由于设备分布零散、垂直空间阻碍较多而导致巡检滞后。物联网技术通过部署烟感、温感、水压、电流、电池、电量等多类型智能传感器, 可以实现对消防设备运行状态的全天候、无死角动态监测。例如: 针对自动喷淋系统, 压力传感器可以采集管网的水压数据, 一旦低于安全阈值立刻触发预警。对于火灾探测器, 灵敏度监测传感器可以动态捕捉其响应性能变化, 避免由于设备老化而导致误报或者漏报等问题。同时, 依据低功耗广域网技术, 传感器数

据可以穿透高层建筑的墙体影响, 稳定传输到管理平台, 通过可视化界面直观地呈现出各个楼层、各个设备的实时状态^[1]。

1.2 智能预测运维

传统维护将定期检修作为核心, 存在过度维护或者维护不足的问题, 尤其不适用于高层建筑当中数量庞大、功能关键的消防设备。物联网技术通过数据驱动实现事后维修向预测性维护的转型升级。一方面, 管理平台可以持续积累设备运行数据, 结合大数据分析模型构建设备的健康档案, 从而准确识别设备老化、部件损耗的规律。另一方面, 通过人工智能算法针对数据进行深度挖掘, 可以精准地提前识别到故障风险。例如: 通过分析消防水泵的电流波动趋势, 能够准确判断电机轴承的磨损情况, 提前安排维保人员更换部件。除此之外, 平台可以根据设备重要性、故障影响范围来智能调度资源, 优先处理高风险设备, 避免盲目巡检。这种模式不仅可以减少设备停机时间、降低维护成本, 还可以最大限度避免由于突发故障导致的消防功能失效^[2]。

1.3 应急协同管理

高层建筑火灾具有蔓延速度较快、救援难度较大的特点, 传统应急响应经常由于数据孤岛而导致协同效率降低。消防控制室、维保团队、消防救援机构之间的数据传递速度滞后, 影响救援决策。物联网技术通过打破技术壁垒, 可以构建多方协同的应急协同机制, 一旦设备出现故障, 管理平台就会立即将故障位置、

设备类型、影响范围等信息同步到消防控制室当中,实现一秒级信息收集。同时,平台可以联合建筑内其他的应急设施,根据故障或者火灾的位置,自动调整疏散路线,指导人员及时撤离。除此之外,救援人员抵达现场之前,可以通过平台获取实时设备状态数据,避免由于信息不足而导致救援延误。

2 物联网技术体系在消防设备维护中的架构

2.1 感知层

感知层作为物联网消防设备维护体系的数据入口,核心功能在于实时采集消防设备运行状态、环境参数以及故障信息,将物理设备的隐性状态转化成为可量化的数据,为后续管理提供基础支撑。感知层将多类型智能传感器与执行器作为核心组件,需要针对消防设备特性与高层建筑环境适配设计,在设备监测端,部署烟感传感器、温度传感器、水压传感器、电流传感器,以及电池电量传感器。在控制执行端,配置智能电磁阀、继电器等设备,可以接收上层指令实现故障设备的临时关停或者紧急启动。在使用期间考虑到高层建筑设备分散的传感器可以达到 3~5 年,无需频繁更换电池。另外,外壳具备防火、防潮的设计,适配潮湿的水泵房或高温的配电间环境,确保数据采集的连续性与准确性,避免由于环境因素导致监测中断^[3]。

2.2 网络层

网络层承担数据传输桥梁的功能,主要负责将感知层采集的海量数据安全、稳定传输到平台层,需要解决高层建筑垂直空间阻隔、设备分布分散导致的通信难题。这一层级使用广域网+局域网+边缘节点的混合组网架构模式,根据数据类型与传输需求选择更加合适的技术。对于低带宽、低时延需求的常规状态数据,可以使用 NB-IoT 或者 LoRa 等低功耗广域网技术,其信号穿透力比较强,可以覆盖高层建筑从地下三层到顶楼的全区域,并且单基站可以连接数千个设备,降低组网的成本。对于高带宽、高实时性的应急数据,使用 5G 专网或者 WiFi6 技术,确保数据传输时延控制在 100 ms 之内,满足应急响应需求。同时,在高层建筑每 5~10 层设置边缘计算节点,针对本地数据进行预处理,减少向云端传输的数据量,避免网络拥堵。此外,网络层需要内置数据加密与身份认证机制,使用 SSL/TLS 协议对传输数据加密,避免数据被篡改或者泄密。

2.3 平台层

平台层属于物联网消防维护体系的数据中枢与智能大脑,通过整合数据、算力、算法,实现对消防设

备的数字化管理与智能化分析。平台层核心由数据中台、算力支撑模块、智能算法库三部分共同组成,数据中台主要负责接收网络层传输的异构数据,通过数据清洗、格式转换、关联整合,构建统一的消防设备数据模型。例如:将喷淋系统的水压数据与水泵运行电流数据关联,从而形成设备运行状态画像,建立全生命周期数据库,记录设备安装时间、维护记录、故障历史,方便追溯管理。算力支撑模块使用云计算+边缘计算协同的模式,云端负责存储海量历史数据与复杂的算法运算,边缘节点负责实时数据的快速处理,平衡算力成本与响应速率。智能算法库则是针对消防设备维护场景开发出专属的模型。例如:基于回归分析的设备健康度评估模型,通过分析设备运行参数波动趋势,量化健康分值^[4]。

2.4 应用层

应用层是物联网技术落地的最终载体,面向消防维保人员、消防值班人员、消防救援机构等不同用户,提供场景化、可视化的操作功能,将平台层的智能分析结果转化成为实际管理动作。这一层级使用 Web 端+移动端+大屏端的多终端适配设计方案,针对不同用户需求开发出专属的功能模块。对于维保人员,移动端 APP 提供故障工单管理功能,接收平台推送的故障预警之后,自动生成工单,其中包括故障设备位置、故障类型、处理建议,支持导航到现场,完成维护之后上传照片与记录,闭环工单流程。对于消防人员,Web 端提供设备可视化监控功能,通过 3D 建筑模型直观展示各个楼层消防设备分布,点击设备图标即可查看实时状态、历史维护记录,支持导出设备健康报告,从而辅助制定出年度维保计划。对于消防救援机构,大屏端提供应急协同管理功能,火灾发生之后,实时同步着火层设备状态、人员疏散路线,支持与救援队伍端联动,积极推送现场数据,辅助制定出救援方案^[5]。

3 物联网技术在高层消防设备设施维护管理中的应用

3.1 核心感知对象与技术方案

高层消防设备维护的核心感知对象需要聚焦火灾预警—灭火—疏散全链条关键设备,覆盖火灾探测类、灭火系统类、应急保障类三大类别。火灾探测类将烟感/温感探测器、电气火灾监测器作为核心,需要实时捕捉探测器灵敏度衰减、电路过载等隐患。灭火系统类重点监测自动喷淋管网、消火栓、消防水泵,避免灭火功能失效。应急保障类则是需要针对应急照明、防排烟风机、疏散指示标志等开展监测。在技术方案上,

使用专用传感器+适配设计,针对喷淋管网,使用耐高压、防潮的超声波水压传感器,嵌入管网关键节点。对于火灾探测器,加装灵敏度校准传感器,通过定期发射模拟延误信号探测响应性能,对无源设备使用低功耗蓝牙传感器,续航可达5年以上,适配高层设备分散、难更换电池的场景。同时,传感器外壳使用防火ABS材质,耐受 $-20\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差,确保在高层地下车库、顶楼机房等极端环境下稳定工作。

3.2 数据传输与互联

针对高层建筑垂直空间阻隔多、设备分布零散、数据类型复杂的传输痛点,构建出分类组网+协议适配+边缘预处理的传输体系。底层使用LoRa/NB-IoT低功耗广域网,覆盖地下3层到顶楼全区域,传输常规状态数据,例如水压、电量,单基站可以连接2 000+设备,解决高层信号穿透力不足的问题。中层可以通过5G专网传输高实时性数据,时延控制在50 ms之内,从而满足应急场景的需求。顶层在每10层当中设置1个边缘计算节点,针对本地数据做好过滤、聚合,从而减少向云端传输的数据量,避免网络拥堵。在互联层面,统一使用MQTT物联网通信协议,实现传感器、边缘节点、云端平台的互联互通,解决不同品牌设备的数据格式差异问题。同时,内置SSL/TLS加密传输与设备身份认证机制,每台传感器分配唯一ID,避免数据被篡改或者非法接入,确保从感知端到云端的数据通道安全可靠,适配高层建筑多部门共享数据的需求。

3.3 智能分析与运维管理

依托云端大数据平台与人工智能算法,构建数据驱动+闭环管理的智能运维体系。首先,打造全生命周期数据库,积极整合感知数据、静态数据、运维数据,形成每台设备的健康档案,通过可视化界面更加直观地展示各个楼层设备的状态,例如正常、预警、故障。智能分析环节,可以使用多算法协同,通过回归分析模型计算设备健康度分值,低于60分时自动触发预警。通过LSTM神经网络预测故障,例如基于消防水泵近3个月的电流波动数据,提前10~15天预判电机轴承磨损的风险与影响。通过聚类算法分类设备故障类型,例如电路故障、机械损耗、环境干扰,推送针对性处理建议。在运维管理方面,实现工单的自动流转,平台生成预警工单之后,自动分配到就近维保人员移动端,包括故障设备精确位置、故障原因、所需工具清单。维保人员完成维修之后,上传现场照片与验收记录,工单闭环归档,同时详细更新设备健康档案,形成监测、分析、预警、维护、归档的全流程智能化管理,进一步减少人工巡检工作量与故障处理时间。

3.4 应急协同与指挥支持

针对高层建筑火灾蔓延快、救援难的特点,构建多方联动+数据赋能的应急协同体系。当感知层检测到火灾报警之后,平台将会立即启动应急响应,1秒内同步数据到三大主体当中。物业消防控制室、维保团队、属地消防救援站,彼此分数不同的工作内容,物业消防控制室主要展示着火层位置、火势蔓延趋势,维保团队负责推送故障设备清单,属地消防救援站负责传输建筑结构图纸、着火层消防栓水压、疏散通道占用情况。在指挥支持层面,提供动态数据支撑与帮助,消防救援人员抵达之前,可以通过移动端查看现场数据,例如着火层温度分布、是否有人员被困,提前制定救援路线。救援期间,平台联动建筑内应急设施,例如自动关闭着火层上下层防火门、调整应急广播内容,启动备用消防水泵保障水压。同时,构建应急数据回溯机制,火灾发生之后自动生成应急响应报告,记录报警时间、设备联动情况、救援步骤、数据传输节点,为后续优化应急方案、改进设备布局提供依据,从而形成应急—复盘—优化的闭环模式,提升高层建筑火灾应急指挥的精准性与效率。

4 结束语

物联网技术为高层消防设备设施维护注入了新的活力与支持,这不仅是一种技术手段的革新与优化,也是一种安全理念的升级与提升。在城市化持续推进、高层建筑不断增多的背景下,只有持续深化技术应用、完善管理体系,才可以为高层建筑筑牢坚实的消防安全防线,为人民群众的生命财产安全提供更好的保障,为建设更加安全、更加智能的现代化城市贡献力量。

参考文献:

- [1] 张盛楠.浅析消防监督技术在高层建筑火灾防控中的作用[J].中国减灾,2025(13):48-49.
- [2] 段立超.浅谈高层民用建筑消防安全现状及对策[J].森林防火,2025,43(03):135-139.
- [3] 马超.高层建筑消防安全管理系统设计[J].今日消防,2025,10(04):80-82.
- [4] 罗洪波,张英,王佳宁.基于物联网技术的超高层建筑火灾风险动态评估方法[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2025,47(01):31-37.
- [5] 武彦明.超高层建筑智慧消防给排水系统设计方案研究[J].江西建材,2024(12):213-215.

市政路桥设计影响因素分析

彭佩华

(一方设计集团有限公司, 广东 阳江 529500)

摘要 在市政路桥设计工作中, 对其影响因素加以分析, 不仅可精准把控设计核心要点, 还能为方案制定提供科学依据, 降低施工返工率, 减少运营隐患, 从源头提升整体设计质量与工程适配性, 保证工程质量。基于此, 本文以某市政路桥工程基本情况作为切入点, 简要论述市政路桥设计的影响因素, 并对该工程进行平面设计、纵断面设计、横断面设计、路基设计以及路面设计, 旨在为市政路桥设计工作提供参考。

关键词 市政路桥设计; 使用年限; 交通安全; 技术条件; 城市美观

中图分类号: U412; U442

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.035

0 引言

市政路桥作为我国基础设施建设中的重要内容, 对交通运行和经济发展起到关键作用, 若存在设计质量问题, 不仅会影响交通安全, 还会带来较大的经济损失。路桥工程具有施工工期长、投资数额巨大、施工环境复杂等特点, 为了确保路桥工程的施工质量, 应对设计环节进行科学把控。市政路桥设计工作具有较多影响因素, 一旦缺乏合理设计, 将对路桥工程设计质量造成较大的影响。因此, 设计人员应做好市政路桥设计的影响因素分析工作, 为实际设计工作奠定基础。

1 工程概况

本工程为新建园区纵二路, 地处佛山市三水区白坭镇聚龙湾产业园 C 区, 该道路等级为次干路, 全长 0.622 km, 为双向 4 车道, 红线宽度为 24 m, 汽车行驶速度设置为 40 km/h。设计起点里程桩号为 K0+000, 设计终点里程桩号为 K0+634.303。该施工地点为低纬度区域, 受海洋陆地天气影响, 冬季干燥寒冷, 夏季温暖潮湿。

2 市政路桥设计的影响因素

2.1 使用年限

在市政路桥设计过程中, 使用年限是其中十分关键的影响因素之一。对市政路桥工程而言, 业主会对其使用年限具有特定要求, 但因在使用过程中存在较多影响因素, 如车辆行驶、周边环境等因素, 从而导致其使用年限存在不确定性。因此, 需要设计人员根据其使用年限目标进行分析, 并综合多种因素加以思考, 对市政路桥进行荷载分析, 从而合理选择建筑材料和施工工艺, 才能满足使用年限要求。

2.2 交通安全

在市政路桥设计工作中, 交通安全因素对其具有较大影响。对于市政路桥工程而言, 交通安全工作一直是其基本要求, 也是设计工作的核心考虑因素。因此, 设计人员应对路桥结构的强度进行重点分析, 考虑到路桥工程在使用过程中的各种安全问题, 才能合理进行市政路桥设计, 如施工材料的选择问题、路桥工程的后续维护问题等, 并进行技术上的反复模拟与分析, 验证其设计方案的合理性, 从而确保交通安全^[1]。

2.3 技术条件

技术条件作为市政路桥设计工作中的重要影响因素, 也是工程施工的重要保障, 设计人员应对其进行重点考虑。设计人员不仅需要对路桥工程的荷载系数进行准确计算, 还应对其施工工艺加以控制, 避免出现技术问题, 影响整个路桥工程的稳定性。此外, 设计人员还应对路桥工程的后续维护技术加以考量, 通过维护技术对车辆对路桥工程带来的破坏加以修复, 进而完成局部损坏的修补任务, 保证路桥工程的正常运行。

2.4 城市美观

路桥工程作为城市化建设中的重要组成部分, 其城市美观性对市政路桥设计工作具有较大影响。因此, 设计人员应对市政路桥工程的美观性加以考虑, 合理设计市政路桥工程的整体造型, 确保其与其周边建筑物和生态环境相协调, 能够符合大众的审美要求。设计人员还应对当地的地理环境和人文特点加以考量, 才能进行市政路桥工程的合理化设计, 合理选择市政路桥工程造型和施工材料, 进而完成市政路桥工程设计任务。

3 市政路桥设计分析

对本工程而言,在进行市政路桥设计工作时,设计人员应对工程基本情况加以了解,并全面考虑使用年限、交通安全、技术条件、城市美观等影响因素,从而对其进行设计,具体设计如下。

3.1 平面设计

在平面设计工作中,设计人员应根据《佛山市三水区SS-C-01-07编制单元(白坭镇聚龙湾片区C区)控制性详细规划》内容进行道路线位的设计,对K0+582.039~K0+620.175施工段而言,因其两侧具有一定的红线限制,其转弯半径不满足车速行驶要求,因此,设计人员应对该路段做好减速设计工作,将其车速降低至20 km/h,并在转弯位置设置警示标语,以警示司机小心行驶。对整个工程线路设计而言,设计人员可为其设置双向4车道,在其两侧设置非机动车道和人行道,并设计中央分隔带。其中,机动车道的宽度设计为3.5 m,非机动车道的宽度为2 m,人行道的宽度为2.75 m,中央分隔带的宽度为0.5 m^[2]。

3.2 纵断面设计

在进行纵断面设计时,设计人员应对当地的规划要求加以考虑,并满足《公路工程技术标准》相关要求和《城市道路设计规范》,当坡度代数差高于1%时,设计人员应设置竖曲线,并通过圆弧形曲线设计来确保交通视距合理。设计人员应做好相关数据的准备工作,明确聚龙湾产业园C区地块标高数据,并对地质勘察资料、地下管线资料、平面线形资料加以整合,合理设计地面线,并对里程桩号进行标注。与此同时,设计人员还应应对关键控制点加以标注,如桥梁具体定位、排水节点位置等,为后续施工提供支持。在实际设计工作中,设计人员应从本工程的实际情况出发,可在纵断面处设置2个变坡点,并将纵坡坡度控制在0.3%~0.421%之间。要求最小坡长度为122.54 m,设计凸形曲线的最小半径为9 000 m,设计凹形曲线的最小半径为9 000 m,设置竖形曲线的最小长度为64.949 m,确保所有参数均满足相关规定。在对纵坡进行优化时,设计人员可利用残余变坡法对横断面戴帽结果进行核查,从而进行纵坡的优化调整,使其达到最佳坡度熟知。在纵断面设计过程中,设计人员应注重与横断面设计工作的联动,保证桥隧界限段标高可以平顺进行过度。还应合理预留最小覆土厚度,避免管线综合设计中存在竖向冲突问题。

3.3 横断面设计

在横断面设计过程中,设计人员应遵循《城市道路设计规范》要求,合理设计车道数量和车道宽度,

不仅需要考虑到车辆的外廓尺寸,还应确保车辆之间的横向安全距离,避免出现车辆碰撞问题。在横断面设计工作开始前,设计人员仍然需要做好相关资料的整理与研究,并对桥梁墩柱的具体位置进行标注,明确排水沟渠控制点,并运用Civil 3D建模技术打造数字地面模型,可自动生成横断面模板,为横断面设计工作提供技术支持。在规划红线的范围内对其加以规划设计,不仅要满足基本的交通功能,还应确保其美观性。因此,设计人员可按照双向4车道的标准加以设计,确保红线宽度为24 m。设计人员可将机动车道宽度设计为350 cm,非机动车道宽度设计为200 cm,中央分隔带宽度设计为50 cm,人行道宽度设计为275 cm(包括树池),总共设计宽度为2 400 cm。在横断面设计时,设计人员还应对其路拱横坡加以设计,确保机动车道的坡度为1.5%,将非机动车道和人行道的坡度设置为-1.5%。因该工程的施工路段受到地面空间的限制,因此,设计人员将人行道宽度从2.75 m改成2.0 m,将非机动车道宽度从2 m改成1.75 m^[3]。

3.4 路基设计

在该工程进行路基设计时,设计人员应将工程质量、美观性融入其中,确保路基稳定,以免影响交通行驶安全。与此同时,还应将其与给排水系统衔接设计,确保路基设计满足整体性要求。对于填方路段而言,设计人员应保证路堤高度不超过8 m,边坡率按照1:1.5的比率加以设计,确保现就路基的填土高度控制在2 m以内。当填土高度超过2 m时,设计人员应为其阶梯性台阶,确保其方向坡度为3%。设计人员可将土作为路基填料,要求回填土中禁止出现有机杂质,且保证其粒径不超过50 mm,含水量满足压实需求。在路基压实施工设计时,应满足相关标准,如表1所示。

表1 路基压实施工标准

项目内容	填料最小强度(%)	路面地面以下深度(m)	压实度(%)
填方路基	6	0~0.3	≥94
	4	0.3~0.8	≥92
	3	0.8~1.5	≥92
	2	1.5以下	≥91
零填和挖方路基	6	0~0.8	≥94

在路基填筑设计工作中,为了提高其压实效果,设计人员可在路堤两侧进行超宽填筑50 cm,在填筑工作完成后,当其完全稳定时才能开展边坡清理工作。

在进行摊铺工艺设计时,应采用分层摊铺的方式进行施工。

在进行特殊路基设计时,设计人员应提前对地质勘测报告和柱状地质图进行观看,发现该工程存在淤泥层,软土深度在 10.1~38.0 m 之间,因此,应选择混凝土搅拌桩对其加以处理。

对于普通路基路段而言,设计人员可对软土部分打造复合型地基。设计人员应对施工技术条件、工程造价等因素进行考量,从而进行水泥搅拌桩的设计,要求其桩径为 50 cm,搅拌桩之间距离为 1.5 m,并按照等腰三角形的形状加以布设。在进行施工材料的选择时,主要选取砂石材料作为垫层,要求其垫层厚度为 0.5 m,砂石比例为 8:2。其中,砂材料为中粗砂,石粒径不超过 2 mm,并保证其含泥量控制在 3% 之内。此外,还应保证施工材料中无植物残体、垃圾等杂质,从而确保路基施工质量。在选择水泥材料时,应选取早强型硅酸盐水泥,并在其中添加防腐剂。水泥浆的水灰比应控制在 0.5~0.6 之间,水为饮用水。若使用非饮用水时,应对其标准加以控制。要求非饮用水中的硫酸盐含量不超过 2 700 mg/L,氯离子含量不超过 3 500 mg/L,可溶物含量不超过 1 000 mg/L,不溶物含量不超过 5 000 mg/L,碱含量不超过 1 500 mg/L,pH 值不低于 4.5。设计人员还应应对水泥含量加以控制,要求每米的水泥含量为 60 kg,在养护 28 d 后,要求桩身抗压强度不低于 1.5 MPa,单桩承载力设计数值不低于 125 kN,地基承载力设计值不低于 125 KPa^[4]。

3.5 路面设计

在路面设计过程中,设计人员应对相关影响因素加以考量,并根据工程特点和气象资讯以及水文地理条件的分析进行设计。在对路面进行分析时,设计人员应将行车安全作为第一考虑要素,同时,对其使用寿命和行车舒适性加以考虑,科学进行路面设计。在设计路面结构时,垫层厚度为 18 cm,使用材料为水泥稳定石屑,其强度为 2.0 MPa。底基层厚度为 18 cm,材料为水泥稳定级配碎石,其强度为 3.0 MPa。基层厚度为 18 cm,材料为水泥稳定级配碎石,其强度为 4.0 MPa。透层为乳化沥青材料,封层为 A 级 70 号沥青材料,下面层厚度为 6 cm,为中粒式沥青混凝土,粘层为 PCR 改性乳化沥青材料,其使用量为 0.3~0.6 L/m²。上面层厚度为 4 cm,为细粒式改性沥青混凝土材料。在人行道路面设计时,应使用透水砖作为施工材料,要求其规格为 30×30×60 cm,强度为 40 MPa。粗砂调平层为 3 cm,级配砂砾垫层为 15 cm,透水水泥混凝土基层为 15 cm。

在机动车路面设计时,使用沥青混凝土材料,其中,基质沥青材料为 70 号 A 级道路石油沥青,要求其针入度为 6~7 mm,软化点不低于 47 ℃,溶解度不低于 99.5%,闪点高于 260 ℃,蜡含量不超过 2.2%。机动车道上面层材料为改性沥青,其针入度为 4~6 mm,软化点不低于 60 ℃,溶解度不低于 99%,闪点高于 230 ℃,软化点不超过 2.5 ℃。在细集料的选择时,确保其视密度不小于 2.50 t/m³,固定不低于 12% (大于 0.3 mm 的部分),砂当量不低于 60%,含泥量不超过 3%,亚甲蓝值含量不超过 25 g/kg,棱角性不低于 30 s。在对水泥稳定级配碎石基层集料进行选择时,应使用骨架密实型混合料,要求水稳集料的水泥含量处于 4%~6% 之间。若水泥强度无法达到要求时,应做好级配调整工作。要求基层材料为水泥稳定级配碎石材料,其压实度不低于 97%,抗压强度不低于 4.0 MPa。底基层材料为水泥稳定级配碎石材料,其压实度不低于 97%,抗压强度不低于 3.0 MPa。垫层材料为水泥稳定石屑材料,其压实度不低于 96%,抗压强度不低于 2.0 MPa^[5]。

4 结束语

随着市政路桥工程建设规模不断扩大,人们更加重视工程质量的事前控制。路桥设计工作作为事前质量控制的关键环节,应对其影响因素进行研究,进而有效提高整体设计工作质量。对于市政路桥设计工作而言,使用年限、交通安全、技术条件、城市美观等因素对其设计效果具有较大影响,因此,设计人员应对工程基本情况加以了解,并参考其影响因素加以分析,从而做好平面设计、纵断面设计、横断面设计、路基设计以及路面设计工作,有效提高整体设计质量。

参考文献:

- [1] 张永锋.市政道路桥梁工程施工中地势气候土质影响因素分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(02):25-28.
- [2] 黄友圣.市政道路下穿铁路桥梁安全影响分析[J].铁道勘测与设计,2025(03):70-74.
- [3] 孙大泽.城市道路通行能力评估与市政路桥设计优化[J].智能建筑与智慧城市,2025(05):194-196.
- [4] 刘毅云,姚君,宋建涛.市政路桥施工中影响沥青路面平整度的因素及改善措施探究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(01):13-16.
- [5] 沈呈飞.浅谈影响市政路桥设计的因素分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2019(01):31.

重型燃气轮机技术现状及发展趋势探析

陈 烨

(广东粤电滨海湾能源有限公司, 广东 东莞 523932)

摘 要 本研究系统阐述了重型燃气轮机的技术发展现状及未来发展方向。我国在 F 级重型燃气轮机自主研发领域取得重大突破, 成功实现了从技术引进到自主创新的转型升级。在高温材料、低碳燃烧、智能运维等关键技术领域, 国产燃气轮机性能已逐步接近国际领先水平。未来行业将重点围绕低碳化、智能化、高效化三大发展方向, 其中氢能适配技术、智能运维系统、增材制造工艺等将成为核心技术攻关重点。当前仍需着力突破若干核心部件技术瓶颈, 健全产业链协同创新体系, 以加快推进重型燃气轮机的完全自主化进程。

关键词 重型燃气轮机; 结构创新; 材料升级; 智能控制

中图分类号: TK47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.036

0 引言

重型燃气轮机作为大型发电站和工业动力源的核心设备, 其高效能和可靠性对国家能源安全具有战略意义。它被誉为装备制造业“皇冠上的明珠”, 代表了国家重工业的最高技术水平^[1-2]。随着全球能源转型加速, 燃气轮机凭借清洁高效、灵活调节的优势, 在可再生能源占比提升的电力系统中发挥着不可替代的调峰作用。我国天然气发电量近十年以 9.9% 的年均增速增长, 但在总发电量中占比仅 3.2%, 远低于全球 23% 的平均水平^[3], 未来发展空间巨大。

重型燃气轮机的技术水平和创新能力直接关系到国家的能源安全、装备制造水平和国防实力。长期以来, 全球重型燃气轮机市场被美国通用电气、德国西门子、日本三菱重工等国际巨头垄断。近年来, 我国通过国家科技重大专项实施, 在重型燃气轮机领域实现了从技术引进到自主创新的历史性跨越。2024 年 300 MW 级 F 级重型燃气轮机样机总装下线, 标志着我国成为全球第五个掌握重型燃气轮机完整设计制造技术的国家^[4]。本文系统梳理国内外重型燃气轮机技术现状, 分析关键突破领域, 并展望未来发展趋势。

1 重型燃气轮机技术现状

1.1 全球技术格局

国际重型燃气轮机技术已形成以通用电气、西门子、三菱重工三大巨头为主导的竞争格局, 技术路线呈现高效率、低排放、多燃料兼容的发展趋势(见表 1)。目前, 国际最先进的重型燃气轮机透平进口温度已经高达 1 600 °C, 单循环效率最高可达 44%, 联合循环效率更

是突破 64%, 氮氧化物排放浓度降至 25 mg/Nm³ 以下^[5], 技术特征主要体现在三个方面:

1. 结构创新: GE 的 HA 型燃机采用轴流分级燃烧设计和三维气动设计叶片, 降低排放, 提高气动效率; 西门子 HL 级燃机改进透平内部冷却结构和模块化热障涂层, 提高耐高温性能; 三菱 JAC 系列燃机则通过增强型空冷系统, 将透平工作温度大幅提升。

2. 材料升级: 陶瓷基复合材料(CMC)在燃机透平叶片中的应用成为突破重点, 相比传统镍基合金可承受温度大幅度提高, 降低冷却空气消耗量, 显著提升热效率。

3. 智能控制: 预测性维护系统通过实时监测数千个传感器数据, 结合机器学习算法实现故障预警, 使计划外停机可能性大幅降低, 减少维修成本。

1.2 国产化技术突破

我国重型燃气轮机发展经历了从技术引进到自主创新的艰难历程。通过国家科技重大专项“重型燃气轮机”工程, 构建“小核心、大协作”的创新联合体, 汇聚国内多家企业、科研院所及高校创新力量进行协同攻关, 在多个功率等级实现突破:

1. 能源动力领域: 国家电投 300 MW 级 F 级重型燃气轮机采用 5 万余个零部件, 通过正向设计实现核心技术自主掌控, 技术指标与国际主流同级别机型相当^[6-7]。东方电气 F 级 50 MW 重型燃气轮机 G50 实现 1 300 °C 高温稳定运行, 联合循环一小时发电量超 7 万千瓦时, 较燃煤机组单台年减排 50 万吨碳^[8]。杭汽轮 HGT51F 型拥有完全自主知识产权, 10 余项性能指标达国际先进水平, 热效率超 35%。

表 1 全球领先重型燃气轮机性能对比

制造商	设备型号	联合循环功率 (MW)	联合循环效率 (%)	技术特点	NO _x 排放 (mg/Nm ³)
通用电气	9HA.02	838	64.1	三维气动叶片、轴流分级燃烧	≤ 15
西门子	SGT5-9000HL	880	64	3D 打印叶片、多层防护涂层	≤ 25
三菱重工	M701JAC	650	64	增强空冷系统、超厚 TBC 涂层	≤ 25
安萨尔多	GT36-S5	760	62.6	顺序燃烧技术、一体式焊接转子	≤ 25

2. 舰船动力领域：中船重工 CGT40 (43 MW) 通过严格测试，可满足十万吨级航母动力需求；中国航发“太行 25”实现单台安全运行超 20 000 小时，累计发电超 3.2 亿度，兼具高可靠性与易维护性。

这一系列成就标志着我国已掌握重型燃气轮机的自主设计、制造和试验验证能力，对保障国家能源安全、推动绿色低碳发展、提升高端装备制造水平具有重大战略意义。但需注意的是，我国在单晶叶片制造、高温涂层工艺及高效冷却设计等部分核心技术上，技术成熟度与国外仍有一定差距，透平叶片寿命周期对比国际先进水平也存在一定差别，这亦是我国高端装备制造领域需要突破的重要挑战。

2 关键技术领域进展

2.1 高温材料与先进制造

材料技术突破是提升燃气轮机性能的基础，主要体现在三个层面：

1. 高温合金研发：透平前燃气温度每提高 100 °C，可提高燃气轮机输出功率 20% ~ 25%，同时节省燃料 6% ~ 7%^[9]，因此高温合金的研发，对于提升燃机效率极为重要。重型燃气轮机叶片材料从承温低的铁基、高成本钴基高温合金发展为如今主流的镍基高温合金，通过对强抗热腐蚀定向和单晶高温合金的研制、高温合金材料体系等方向的研究来提高叶片的抗氧化、抗腐蚀以及抗高温性能。

2. 制造工艺创新：增材制造技术实现复杂构件一体化成型，通过 3D 打印生产具有微孔冷却通道的透平叶片，使气动效率有一定提升^[10]；激光选区熔化技术制造 DLN 燃烧器，能够大幅缩短交付周期，降低制造成本。

3. 表面处理技术：热障涂层技术 (TBC) 是在透平叶片表面喷涂热障涂层，从而降低叶片表面温度，提高透平进口温度，增强抗高温氧腐蚀能力，延长服役寿命，是与先进高温结构材料、高效冷却技术并重的燃机透平叶片关键技术。

2.2 低碳燃烧与高效冷却

为适应能源低碳转型需求，燃烧与冷却技术向低排放、高适应性方向发展：

1. 灵活燃料燃烧：干式低氮燃烧系统实现宽区间负荷调节范围，大幅度降低 NO_x 排放；微混合燃烧室通过分布式小火焰结构，解决氢燃料燃烧回火难题，使氢气混烧比例提升至 50%。

2. 先进冷却结构：微尺度冷却技术通过在透平叶片表面布置微米级气膜孔，显著增大换热面积并优化气流组织，使得冷却效率大幅提升；热管冷却系统利用相变传热原理，使叶片前缘温度降低；全覆盖气膜冷却技术通过结合精细冲击冷却设计，在提升冷却均匀性的同时，减少冷却空气消耗，提升整机效率。

2.3 智能运维与系统集成

数字化技术深刻改变燃气轮机运行管理模式：

1. 预测性维护系统：基于深度学习的故障诊断模型通过分析振动频谱、排气温度场等特征参数，实现早期故障识别准确率超 90%。数字孪生技术构建虚拟映射系统，对剩余寿命预测误差小于 5%，使维修成本降低 30%^[11]。

2. 运行优化控制：协同大数据分析结合深度学习算法形成自适应控制系统根据大气条件、电网负荷变化实时调整压气机进气角度及燃料分配，保持最佳燃烧效率区间。结合远程监控平台实现多电站协同调度，极大地减少电网调频指令响应时间。

3 重型燃气轮机技术发展趋势分析

3.1 低碳化与燃料灵活性

1. 低碳化：在全球能源转型和“双碳”目标驱动下，氢能融合技术成为重型燃气轮机发展的行业研发焦点，通用 HA 系列燃机已实现 50% 氢燃能力，并计划于 2030 年达成 100% 全氢燃烧。国内企业也在积极攻关，东方电气 G50 燃机已实现 30% 氢气掺烧，燃烧效率提升 5% 的同时，碳排放减少 30%。通过多级喷射控制火焰速度，

氨气裂解燃烧技术实现零碳发电，三菱正在开发40%氨混燃系统，计划2030年完成示范验证。

2. 碳捕集：通过燃烧后捕集系统捕捉燃机排气中的二氧化碳，通过不断优化碳捕集工艺，逐步降低发电过程中的碳排放量，最终实现净零排放，为绿色能源发展提供关键技术支撑。

3.2 智能化与数字赋能

1. 智慧协同系统：基于人工智能的强化学习算法，统筹电网与可再生能源、储能系统一体化运营需求，整合燃料成本、上网电价等信息，依托大数据分析，优化运行模式，降低运营成本，提升运营效益。

2. 数字孪生应用：将人工智能引入智慧电厂系统集成设计参数、制造数据、运行状态，实现性能衰退精准预测，提升运维效率。通过人工智能建立部件全溯源体系，为设备维保决策提供数据支撑。

3. 远程协同维护：依托高速无线通信技术结合AR辅助维修系统，通过智能眼镜实现云端专家指导现场维修操作，提升现场维修效率。

3.3 高效化与系统创新

1. 增材制造突破：增材制造技术依托数字模拟仿真与人工智能的深度融合，实现复杂三维结构的快速与精密成形，显著加速了产品的验证与研制进程。这一技术不仅革新了制造工艺本身，更驱动了零件设计的系统性变革，实现了结构精简、轻量化、耐用性提升及全生命周期成本的整体优化。

2. 结构材料及涂层优化：结构材料与涂层技术的持续发展，始终是推动现代重型燃气轮机效率与性能稳步提升的核心基石。高温金属合金定向凝固技术和单晶技术水平的提升极大地提高了材料的承温能力，使燃机的透平进气温度有了较大的飞跃。陶瓷基复合材料在高温性能、轻量化、耐腐蚀及力学性能与韧性等方面展现出传统材料难以比拟的综合优势。热障涂层技术的迭代也将使得材料朝着高熔点、低热导率、低弹性模量、低烧结速率和高损伤容限等方向提升^[12]。

3. 新型动力循环：电—氢—电转换系统通过整合电解水制氢与氢能发电技术，有效平抑可再生能源的波动性与间歇性。该系统在新能源富余时利用电能制取绿氢，在电力短缺时则通过氢能发电实现稳定供电，从而增强电网对高比例可再生能源的消纳能力。在燃料电池—燃气轮机混合发电系统中，燃料电池取代了传统燃烧室，构成系统的“前置循环”，直接将化学能高效转化为电能；燃气轮机则利用燃料电池排出的

高温废气进一步做功发电，形成“后置循环”。这种协同配置突破了单一能量转换方式的效率极限，可实现系统整体效率超过70%。

4 结束语

重型燃气轮机技术正经历深刻变革，在材料科学、制造工艺、智能控制等多领域协同突破下，国产重型燃气轮机实现了从技术引进到自主创新的历史性跨越。国产300 MW级F级重型燃气轮机完成正向设计，标志着我国成为全球少数掌握完整重型燃气轮机设计制造技术的国家。面向未来，低碳化、智能化、高效化成为主要发展趋势，氢能应用、智能算法与数字孪生、新型循环等技术将重塑产业格局。当前我国重型燃气轮机产业仍面临材料制备、核心部件、验证体系等方面的挑战，需要积累高性能先进设备的设计、制造经验，重点对低碳燃烧和智能运维、燃气轮机增材制造、结构材料及涂层等领域进行研究，促进研发高性能的重型燃气轮机。重型燃气轮机不仅将继续支撑电力、船舶、工业等关键领域，更将成为全球能源转型的重要推动力，为“双碳”目标实现做出重要贡献。

参考文献：

- [1] 束国刚,余春华,沈国华,等.新时期我国重型燃气轮机发展研究[J].中国工程科学,2022,24(06):184-192.
- [2] 杨巧云.燃气轮机发电技术综述[J].内燃机与配件,2016(12):33-35.
- [3] 朱兴珊,沈学思,李天一,等.“受气”的天然气发电[J].中国石油石化,2025(01):43-46.
- [4] 国内最大功率重型燃气轮机样机在沪总装下线[J].上海质量,2024(03):85.
- [5] 蚁建荣,何宗泽,程芳林,等.H级燃气轮机的发展现状及技术特点分析[J].热能动力工程,2022,37(10):1-15.
- [6] 同[4].
- [7] 同[5].
- [8] 首台国产F级50MW重型燃气轮机首次点火成功[J].电子质量,2023(01):52.
- [9] 胡彬彬,王臻.燃气轮机热端部件用高温合金的研究进展[J].科技与创新,2024(17):107-109.
- [10] 帅三三,李石磊,玄伟东,等.重型燃气轮机涡轮叶片材料及制造技术研究进展[J].热力透平,2022,51(03):161-169.
- [11] 王志涛,郑子惊,张靖凯.基于数字孪生的燃气轮机多维度多领域建模方法的发展[J].航空发动机,2025,51(02):1-9.
- [12] 孔祥林,高进,赵仕志.工业燃气轮机先进技术现状及发展趋势[J].世界石油工业,2024,31(04):120-128.

桩基检测中的静载和动载检测研究

周 亮

(江西金浔有色工程技术有限公司, 江西 九江 332000)

摘 要 随着建设工程规模与复杂程度的不断提高, 科学验证桩基的承载力并严格控制其施工质量, 是工程建设中的核心环节。静载检测与动载检测作为两类具有代表性的桩基检测方法, 分别建立在不同的力学原理与测试技术基础上, 广泛应用于各类桩基工程的质量控制与验收评估中。本文主要探讨两种方法的原理与实施要点, 分析其技术特点与结果之间的互补关系, 以期在实际工程中合理选择与联合运用静载与动载检测方法提供有益参考。

关键词 桩基检测; 静载试验; 动载检测; 承载力

中图分类号: TU413.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.037

0 引言

随着现代工程结构向大荷载、深基础、复杂地质条件方向发展, 对桩基检测技术提出了更高要求。静载检测与动载检测作为两类代表性方法, 分别基于不同的物理原理与工程实践形成各自的技术体系。静载试验通过模拟实际工作状态下的荷载传递过程, 为评估桩基极限承载力与变形特性提供直接依据; 而动载检测则利用应力波在桩身中的传播特性, 实现对桩身质量与缺陷的快速诊断与承载力间接推定。深入理解其技术特点与适用范围, 对提升桩基工程质量控制水平具有重要的现实意义。

1 桩基检测中的静载和动载检测技术原理

1.1 静载试验技术原理

静载试验技术原理基于经典的土力学与结构力学理论, 通过向桩顶施加接近于实际工作状态的竖向或水平荷载, 并精确测量其随时间产生的沉降或位移, 从而直接确定其承载能力与变形特性。该技术应用慢速维持荷载法, 利用液压千斤顶逐级施加载荷, 并由反力系统提供相应反力。每级荷载持续作用, 直至桩顶沉降趋于稳定, 从而充分调动桩侧及桩端阻力。通过绘制 $Q-s$ 曲线和 $s-lgt$ 曲线等, 可明确判断桩的极限承载力、使用状态下的承载能力及变形特性, 为工程设计提供可靠的数据支持。

1.2 动载检测技术原理

动载检测技术原理主要基于应力波在桩身中的传播理论。瞬态冲击力作用于桩顶会激发应力波, 该波动沿桩身传播。在波阻抗变化处或桩底, 应力波会产生上行反射。安装于桩顶的高精度传感器用以记录这些响应, 据此分析桩身是否存在缺陷并推定其承载力。

低应变法利用一维弹性波理论, 通过分析反射波的相位、幅值与到达时间来判断缺陷位置与性质。高应变法则通过求解波动方程, 采用 Case 法或数值拟合分析, 将实测力与速度信号进行匹配, 从而估算桩的侧阻、端阻及模拟静载 $Q-s$ 曲线, 实现对承载力的评估^[1]。

2 桩基检测中的静载检测实施要点

2.1 反力装置设计与验算

反力系统是开展静载试验的关键组成部分, 其主要作用是为千斤顶提供充足、稳定而安全的反向支撑。该系统的设计须按最不利工况考虑, 以保证试验全程具备充分的安全保障。目前常用的反力形式主要采用锚桩横梁和压重平台两种装置。其中, 锚桩反力系统通过工程桩或专门设置的锚桩提供反力。设计时需验算锚桩的抗拔承载力及连接钢筋的强度; 横梁作为传力构件, 需进行抗弯、抗剪及刚度计算, 防止过度变形影响测试精度。压重平台则通过堆载重物提供反力, 其设计关键在于堆载总量不得小于预定最大试验荷载的 1.2 倍, 且平台支墩面积需满足地基承载力的要求, 防止在试验过程中发生地基失稳或显著沉降^[2]。

反力装置的验算是一个系统的安全校核过程。对于锚桩法, 需计算锚桩数量、入土深度、钢筋截面面积, 并评估其在上拔力作用下周围土体的抗剪强度, 确保群锚效应不会导致整体失效。横梁的计算需采用结构力学方法, 在最不利荷载组合下, 其最大挠度应小于跨度的 $1/400$, 以避免对沉降观测产生干扰。对于压重法, 除总重量外, 还需对平台承重结构的强度与稳定性进行复核, 并确保堆载物重心居中、堆放稳固, 留有足够的安全距离, 以防堆载平台在试验过程中发生倾覆或垮塌, 从而保障人员与设备安全。

2.2 加载制度与沉降观测

加载制度与沉降观测是获取准确 $Q-s$ 曲线的关键环节,其执行质量直接决定试验结果的可靠性。加载过程应采用慢速维持荷载法,并严格依照预先确定的荷载等级逐级施加。每级加载量一般取预估极限承载力或最大试验荷载的 $1/10 \sim 1/15$ 。每级荷载施加完毕后,须立即读取并记录沉降初始值,之后按第 5、15、30、45、60 分钟的时间间隔监测沉降变化,超过 1 小时后改为每 30 分钟观测一次,直至沉降趋于稳定。稳定标准一般定义为:连续两次观测中,每小时沉降增量不超过 0.1 mm。只有在当前荷载级达到稳定后,才能进行下一级的加载。

沉降观测需使用高精度、大量程的位移传感器或精密水准仪,其测量精度应优于 0.01 mm。基准梁应独立架设,其支点需远离加载区和承压板的影响范围,以避免随地面一同沉降,确保读数的真实性。观测时需同步记录各测点的沉降值、观测时间以及环境温度,以便进行数据分析与修正。

2.3 终止加载条件与结果判定

终止加载条件是判断试验是否达到目的或桩身已发生破坏的关键准则,是试验安全性与经济性的重要保障。依据规范要求,试验过程中若发生以下任一情况,应立即终止加载:第一,在某一荷载级别下,桩顶沉降量超过前一级沉降量的 5 倍,且累计沉降已超过 40 mm;第二,在某级荷载下,桩顶沉降量达到前一级的 2 倍以上,且持续观测 24 小时后仍未达到稳定状态;第三,荷载-沉降曲线显示为缓变形态,累计沉降量超过 60~80 mm,同时实测承载力显著低于设计预定的极限值;第四,已顺利施加至设计规定的最大试验荷载并保持稳定^[3]。

结果判定是基于完整的测试数据进行的综合分析。测试分析的核心步骤是绘制荷载-沉降($Q-s$)及沉降-时间对数($s-lgt$)曲线。当 $Q-s$ 曲线表现为陡降型时,应以曲线发生急剧转折的起始点之前一级的荷载值,作为其极限承载力。对于缓变形曲线,则需根据沉降标准或采用数学外推方法综合确定极限承载力。此外, $s-lgt$ 曲线簇的形态有助于判断桩端土的性质和桩的破坏模式。

3 桩基检测中的动载检测实施要点

3.1 低应变反射波法的传感器安装与激振控制

传感器安装与激振控制是低应变反射波法获取高质量原始信号的基础,直接决定了桩身完整性判读的

准确性。传感器应选用高性能加速度计或速度计,并垂直安装于桩顶经过打磨的平整面上。安装点需远离钢筋头,通常选择距桩心约 $2/3$ 半径处。安装时必须使用耦合剂,并通过磁座、螺丝或手压等方式确保传感器与桩顶表面紧密粘结,形成足够的附着力,防止在激振过程中产生二次振动或脱离,从而避免引入虚假信号。激振控制旨在产生一个能量适中、频率成分合适且具有良好重复性的脉冲信号。激振通常采用手锤或力棒敲击桩顶,锤头材质和锤重决定了脉冲力的宽度和能量。对于浅部缺陷检测,需选用硬锤头产生高频窄脉冲;对于深部缺陷或长桩检测,则需选用软锤头或重锤产生低频宽脉冲以增强穿透力。敲击点宜选择在桩顶中心,且敲击方向应垂直于桩顶面。

3.2 高应变动力试桩法的锤重选择与信号分析

锤重选择是高应变法成功实施的首要条件,其核心是确保桩土体系产生足够的塑性位移,从而充分激发桩侧阻力和端阻力。锤重的选择并非随意而定,需根据试桩的尺寸、预估极限承载力以及目标位移量进行理论计算。规范要求锤重通常不宜小于单桩预估极限承载力的 1.0% 至 1.5%,以保证桩顶产生的动位移接近静载试验在相同荷载下的沉降量。落锤高度则需根据锤重、桩径及桩土体系刚度进行调节,以获得合适的冲击速度。落锤必须导向良好,保证锤体对中、平稳地自由下落,避免偏心撞击,以防止桩头损坏或测试数据严重失真。信号分析是高应变法的核心技术,其过程是从实测的力与速度时程曲线中提取桩土体系的内在参数。

3.3 声波透射法的声测管布置与数据判读

声测管的预埋布置是声波透射法得以实施的前提,其设计与施工质量决定了检测的范围与可靠性。声测管的选用与安装须满足以下技术要求:一是材质应为金属管,内径须较换能器直径大 20 mm 以上,以保证其导向顺畅。二是布置数量与桩径严格对应:桩径不大于 800 mm 时设 2 根;介于 800 mm 至 2 000 mm 时设 3 根;超过 2 000 mm 时建议设 4 根。三是安装时须严格保证各管在钢筋笼内侧对称、垂直,并绑扎牢固。其核心要求是管路必须保持平行、全桩长通畅且密封不漏水,管底应密封,管顶在灌注前需加盖,防止水泥浆液堵塞管路,从而确保检测探头能到达桩底并获取全桩长数据。数据判读是一个基于声学参数异常的综合诊断过程。检测时,发射与接收换能器在充满清水的声测管中同步升降,测量声时、声幅、声频等参数沿深度的变化。数据分析首先观察声参量-深度曲线的形态^[4]。

4 静载与动载检测技术对比分析

4.1 技术特性对比

静载与动载检测技术在基本原理、设备配置、测试周期及适用目标上存在本质区别，二者构成了互补而非替代的关系。静载试验通过液压千斤顶施加荷载，由反力装置提供平衡，采用慢速维持荷载法，使桩—土体系充分变形直至达到新的平衡状态，从而直接测量荷载与沉降的对应关系。其过程模拟了基础的实际受力状态，结果直观、可靠，被誉为承载力测定的“黄金标准”。然而，其设备笨重、安装复杂、测试周期长、成本高昂且难以进行大范围普查，通常用于为设计提供最终验证或对动载结果进行校准。动载检测则基于应力波理论，通过瞬态冲击在桩顶激发应力波，利用传感器接收反射信号，通过波动理论分析来推断桩身结构完整性和推定承载力。其设备轻便、测试快速、成本较低，适用于大批量桩的快速普查。两种方法的核心技术特性对比如表 1 所示。

表 1 静载检测与动载检测核心技术特性对比

对比维度	静载检测	动载检测
测试原理	直接施加静荷载，测量力与位移的关系（平衡原理）	施加瞬态冲击荷载，分析应力波传播与反射（波动理论）
荷载性质	慢速、维持荷载，使桩土体系充分变形	瞬态、冲击荷载，激发桩体的动力响应
主要提供参数	直接确定极限承载力、工作荷载下的沉降	推定承载力，评价桩身完整性（缺陷位置与性质）
测试周期	长（数天）	短（数分钟至数小时）
设备规模与成本	庞大、复杂、成本高昂	轻便、灵活、成本相对较低
结果可靠性	高，被公认为最直接、可靠的方法，是验证其他方法的基准	承载力结果为间接推定，需静载验证；完整性检测可靠性较高
对桩体的影响	属于破坏性试验（至极限状态），试验后桩通常不可再用	属于非破坏性或低破坏性试验，对桩身基本无影响
适用目标	设计验证、竣工验收、为动载提供标定	施工过程质量控制、大面积普查、缺陷诊断

4.2 检测结果互补性

静载与动载检测结果的互补性主要体现在其对桩基性能评价的不同维度上，二者结合可构建一个从宏观承载力到微观完整性的全面评价体系。静载试验提供了桩基抗压性能的宏观、整体性结论。它精确给出了在设计荷载下的沉降量以及极限承载力值，反映了桩土体系整体的、最终的工作状态。然而，静载试验无法揭示桩身是否存在内部缺陷，也无法解释承载力不足或沉降过大的具体原因^[5]。

动载检测，特别是低应变和高应变法，则提供了桩基结构状态的微观、局部性信息。低应变法能精确探测桩身的连续性，定位缩颈、扩颈、离析、断裂等

缺陷的位置和严重程度，解释了桩身材料本身的质量问题。高应变法在推定承载力的同时，还能通过曲线拟合分析将总阻力划分为侧阻和端阻，从而判断承载力主要来源于桩侧摩阻还是桩端支承，这为分析静载试验结果提供了内在机理层面的解释。因此，动载检测可以诊断“病因”，而静载检测则验证了“症状”的严重程度，二者相辅相成，共同构成了对桩基工程质量的完整诊断报告。

5 结束语

静载试验以其结果直观可靠成为承载力判定的基准，而动载检测则凭借其高效经济的特点在完整性评价与大范围普查中发挥着不可替代的作用。二者并非相互排斥，而是构成强大的技术互补体系。在实际工程中，应根据具体设计要求、地质条件及工程目标，科学地选择与组合这两种方法，建立多层次的桩基质量评估流程，从而为建设工程的安全与耐久性提供坚实的数据支撑与技术保障。

参考文献：

- [1] 张帮伟. 基于静载和动载法的桩基检测分析[J]. 安徽建筑, 2025, 32(09): 150-153.
- [2] 常永浩. 桩基静载检测中桩侧负摩阻力试验研究[J]. 广东土木与建筑, 2025, 32(06): 112-115.
- [3] 朱家俊, 马永平, 浦艳芳. 锚桩反力法静载试验在桩基检测中的应用[J]. 云南水力发电, 2025, 41(04): 73-76.
- [4] 张夏开. 桩基静载检测中存在的问题与对策[J]. 四川水泥, 2023(12): 16-18.
- [5] 韦超林. 桩基静载检测中的常见问题及处理措施[J]. 冶金管理, 2022(23): 73-75.

可持续发展理念下的绿色建筑设计策略研究

韩 杰

(北京大有建筑设计有限公司, 北京 101200)

摘 要 可持续发展理念在建筑设计中的进一步落实, 促进了绿色建筑设计的系统化发展。本文以建筑全生命周期为逻辑主线, 从生态空间布局、节能结构材料及智能系统集成三个方面阐述了绿色建筑设计的核心要求, 剖析了土地资源约束、技术集成繁杂、材料应用局限和运维脱节的实际困境, 有针对性地提出了生态耦合规划、数字化协同设计、绿色建材创新和智能监控管理等综合策略, 以期为绿色建筑设计实践优化和可持续发展提供可行性理论依据和设计路径参考。

关键词 可持续发展理念; 绿色建筑设计; 节能材料; 数字化建模; 生态空间

中图分类号: TU241.199

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.038

0 引言

绿色建筑作为城乡建设可持续转型发展的一个重要枢纽, 核心是用最少的环境负荷来获得尽可能多的社会和生态效益。随着城市化水平的提高, 建筑能耗、碳排放以及资源浪费等问题越来越突出, 这使得绿色设计在建筑领域成为一种必然的趋势。目前绿色建筑设计正由单一的节能转向全生命周期、系统化和智能化, 但是在实际应用中仍然面临着空间生态协调、技术集成和成本平衡的挑战。

1 可持续发展理念下的绿色建筑设计要求

1.1 生态融合导向的建筑空间布局要求

在可持续发展的理念指导下, 绿色建筑的空间布局应以“生态优先, 环境共生等”为核心理念, 强调建筑与自然系统的有机结合。目前国内的绿色建筑设计已经逐渐由单体节能向区域生态协同过渡, 这就需要对规划阶段的场地地形、水文、气候、植被特征进行全面的分析, 利用微气候模拟和生态参数化技术, 对建筑形体、朝向、通风路径等进行最优布局。新一代设计实践一般引入“蓝绿交织”的概念, 把雨水花园, 生态湿地和屋顶绿化整合为一个整体系统, 构成景观、美学和生态功能相结合的综合布局。同时在城市更新及存量建筑改造中要注意生态连通性问题, 尽量避免过度占地及硬质铺装等问题, 使建筑、景观及环境之间具有连续性及可渗透性。

1.2 节能高效导向的结构与材料选择要求

绿色建筑的结构设计应以“节能, 能循环”为核心目标, 以实现建筑的物理性能和结构安全性的双重提升。近几年, 国内的《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378-2019) 已经明确指出, 在选择材料时, 应同时考虑到

整个生命周期的能源消耗和可再生能力。基于这一背景, 结构体系趋于轻量化和装配化设计, 钢结构、装配式混凝土以及竹基复合材料作为新型绿色构件得到了广泛的应用, 从而降低了施工中能源的消耗以及碳排放。与此同时, 建筑围护系统也在向高性能节能迈进, 并通过外墙一体化保温、遮阳构件可调节化和新型低辐射玻璃的应用等手段来动态调控热工性能。目前设计要求中也包含了材料数据库和 BIM 材料追溯系统的建立, 保证了材料选择过程中的可验证和可持续性, 真正实现了绿色建筑由“节能建筑”到“零碳建筑”这一现实层面的转变。

1.3 智能协同导向的建筑系统集成要求

智能化系统深度集成是促进绿色建筑设计向高效能运行方向发展的关键环节。随着“智能建造与建筑工业化协同发展纲要(2023)”的实施, 绿色建筑设计被要求在初期阶段即引入数字孪生与智能控制思维, 实现了建筑设备、环境和用户需求的实时协同。在设计中需要在同一个数据平台上集成暖通、照明、给排水以及可再生能源等系统, 并在物联网基础上建设能耗监测和反馈机制来对系统的运行效率进行动态控制。如利用 AI 算法对空调负荷进行预测和照度的自适应调整, 显著减少了能源浪费。同时, 智能集成需要和安全及健康设计并行不悖, 构建环境感知系统对空气质量、噪声和湿度进行监控, 并在“人类—建筑—环境”之间进行智能交互。

2 可持续发展理念下的绿色建筑设计困境

2.1 土地资源约束下的空间生态协调困境

在城市化高密度的大环境中, 绿色建筑设计正面临着土地紧张和生态空间缺失的双重冲突。大量城市

更新项目主要分布在核心地段或者旧城改造区域内,可供使用的地块面积较小,形态不规整,使得生态空间布局和建筑功能很难产生良性耦合。国内多数城市在规划审批环节仍以容积率与经济指标为核心,生态绿化、雨水回收、生态廊道等空间常被压缩或弱化,形成“绿色概念化,登陆困难”的普遍问题。另外,各地块间生态连通性不强、绿色空间碎片化程度高,弱化了整个生态系统循环效益。

2.2 技术集成复杂化带来的设计实现困境

在建筑系统越来越智能化和多能互补化的背景下,绿色建筑设计技术集成复杂度显著增加。国内的工程实践往往缺少建筑师、结构工程师和机电设计团队的数据协同平台,造成 BIM 模型、能耗分析和施工图设计的脱节,从而影响了设计的精准度和实施效率。再加上绿色建筑中涉及可再生能源系统,智慧管控平台、空气与光环境调节装置等较多,各个子系统整合过程中容易出现接口冲突及能效叠加损耗。有的工程由于技术标准的不一致或者集成验证体系的缺失等原因最终使得设计目标很难充分达成。

2.3 绿色材料应用受限的经济可行性困境

绿色建材虽然在节能减排上有明显的优势,但是它的普及仍然受到成本和供应体系的制约。在国内,绿色建材的价格普遍比传统材料高出 15%~30%,而且生产标准和认证体系还没有完全统一,这导致了市场接受度相对较低。一些中小工程为了控制投资成本,通常会选用低价替代品来弱化建筑的整体节能性能。与此同时,绿色材料运输半径、施工适配性和维护成本等因素在经济评估时也得到了放大,导致设计端虽有环保意愿但难以得到投资方的支持。

2.4 运行维护脱节的全生命周期管理困境

大多数工程都缺少一套能耗动态反馈体系来对建筑节能系统在设计和使用过程中进行动态反馈,运维人员不能准确把握建筑节能系统运行状况,造成后期能效连年衰减。尽管建筑智能系统的配置相当完备,但由于其高昂的维护成本和复杂的操作流程,实际的使用率还不到 60%。另外,设计单位和物业管理间信息交接机制不够完善,BIM 和监控平台数据无法不断更新,使得建筑可持续管理实现困难。

2.5 设计标准多元化下的协调与落地困境

在可持续发展理念全面普及建筑领域的今天,绿色建筑设计面临着标准体系多元化和执行路径不一致的压力。在我国,除了国家标准《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378-2019)之外,各个地区还发布了多种地方性的标准和专门的技术指导,这导致了设计标准的

不统一和评估体系的交叉与重复。如一些地方碳排放核算采用了不同能耗边界或者指标体系,使建筑方案跨区域实施存在技术冲突、审批不相容等现象。

3 可持续发展理念下的绿色建筑设计策略

3.1 优化场地规划,实现生态空间耦合设计

在土地资源紧张和空间生态协调有限的大环境下,绿色建筑设计需要通过优化场地规划来达到生态和建筑深度耦合。建筑师要在方案设计阶段注重“场地响应性设计”等,从地形适应、风向导向、日照优化等方面构建建筑和自然动态平衡。在设计过程中,需要运用生态参数化的手段,通过多变量分析建筑体量、高度、间距、朝向等因素来保证空间布局中自然通风和日照资源得到最大限度的发挥。如对于南北走向的城市街区,可以设置中轴风廊道和通风中庭等,以构成微气候调节通道,同时确保建筑密度;通过屋顶花园、立体绿化和可渗透铺装相结合的复合生态界面实现雨水的自然渗透和循环回用^[1]。建筑师应重视空间的复合化使用,以多层叠合的形式对公共活动区、生态景观及功能空间进行布局,以提高生态效益和空间效率。在场地设计过程中,可以采用三维地理信息平台(3D GIS)来进行环境负荷的可视化分析,并实时比较土壤的保水率、热岛效应指数和绿量平衡,从而实现生态目标的量化和可调节性。最后,场地规划的优化不仅在形态设计上促成了建筑与环境之间的和谐融合,而且在生态过程中构建了一个自我循环的绿色生态系统,使得建筑成为城市生态链中的一个主动调节环节。

3.2 推进数字化建模,强化多系统协同设计

面对技术系统复杂化和设计落地不顺畅等问题,绿色建筑设计需要综合数字化建模和协同集成策略。设计阶段应以 BIM(建筑信息模型)技术为核心,融合能耗模拟、照明仿真、气流计算等数字工具,构建一个覆盖结构、机电、暖通、给排水及可再生能源系统的多维设计平台。采用参数化和算法优化的手段,设计师可以实现虚拟环境下的方案推演和实时能效评估以降低技术冲突和后期返工^[2]。为了解决多系统集成这一复杂难题,设计单位可以通过引入开放式接口标准来实现各个专业模型之间高度兼容和数据共享。如采用 IFC 数据协议对建筑热工模型和机电模型进行互连,并在云端协作平台上完成多个专业的同步编辑和冲突检测以及设计决策动态更新等。同时要建立“设计—核查—优化”三个阶段的数字化闭环流程以保证建筑系统之间能耗耦合关系能够在设计阶段得到准确控制。在施工阶段也可以根据数字孪生模型对节点模拟和施工仿真

实现设计信息到建造环节的无缝传输,增强可执行性。

3.3 完善材料评估体系,推动绿色建材创新

鉴于绿色建材存在经济可行性和推广受限等实际困境,绿色建筑设计要构建科学的材料评估体系,推动创新材料在设计阶段系统地应用。在材料的早期阶段,设计团队需要参与材料全生命周期评估(LCA),并以碳排放、能量消耗系数、持久性和可回收性作为关键指标来建立一个数据库,从而达到对材料环境特性进行量化管理的目的。设计师可以在该数据库基础上进行“材料路径的优化”,即将结构材料碳足迹与制造能耗进行对比分析,优先考虑可再生、低能耗以及可循环利用材料^[3]。如用高性能自保温混凝土和竹基复合板材代替能耗高的陶粒制品、将真空绝热板和纳米隔热涂层引入建筑外围护结构增强节能性能等。创新设计也需要从节点构造层面加以优化,让材料模块化和装配化运用成为一种常态。同时,BIM平台要与绿色建材库相衔接,让设计师可以实时调用模型内材料性能参数及成本分析结果进行“设计就是评价”动态管控。

3.4 建立智能监控平台,延伸建筑全周期管理

鉴于建筑设计和后期运行维护相脱节,绿色建筑策略需要扩展到全生命周期管理层面。设计阶段要预留数字化管理接口并搭建以物联网和大数据分析为核心的智能化监控平台,让建筑具有连续的自感知和自调控能力,并应用于使用阶段。建筑师在设计时需要对传感器的布局方案进行预设,把能耗、空气质量、温湿度以及照明水平等操作参数整合到一个统一的监控体系中,以达到设计意图和实际性能之间闭环对应^[4]。该智能平台利用算法模型学习建筑状态,能够根据利用人流量和季节的变化,如实现照明分区控制和空调负荷的动态平衡等能源调配的自动优化,使绿色设计的价值在运行期内得以不断体现。在设计阶段还应确立建筑数字档案的标准,并确保施工过程中的BIM数据能够无缝集成到运维系统中,以确保设备参数和空间信息具有长期的可追溯性。同时,该智能监控平台也可以对后期的改造提供数据支持,并通过能耗趋势分析对系统老化或者效率降低的节点进行预测,从而达到“预测性维护”的目的。

3.5 构建统一标准体系与设计评估协同机制

针对设计标准多元化所导致的协调困境,在绿色建筑领域中应构建统一标准体系与设计评估协同机制以实现各规范之间兼容互认和动态更新^[5]。首先,在顶层架构方面,可以以行业主管部门为主导、融合国家、地方和行业标准形成分级,模块化标准框架,实现生

态节能、材料高达、智能控制、对健康舒适等核心指标按照权重进行了统一的量化,以避免标准之间的重复和矛盾。基于此,要构建绿色建筑设计评价数据共享平台,并通过统一参数接口及数据编码实现各区域设计模型及碳核算体系的互联。接下来,在项目的设计和实施过程中,可以结合BIM和LCA模型,构建一个“设计—评价—回馈”的完整循环,确保绿色性能指标在模型中能够进行动态的计算和自动的验证。例如:在设计师对建筑体量进行调整或者材料选型等过程中,该系统能够对能耗、碳排放以及舒适度等方面的改变进行即时反馈,从而对多标准融合条件下设计优化起到量化支持作用。同时,业界要建设第三方协同认证机制并引入以数据追溯为核心的在线核查模块,以实现绿色设计全流程动态监管和智能评估^[6]。通过标准体系和技术平台双轨并进可以有效化解绿色建筑设计实施分歧和落地偏差问题,促进标准化、透明化和可持续化,让设计成为绿色建筑实现可持续发展真正的核心动力。

4 结束语

绿色建筑设计体现了可持续发展理念,对建筑领域进行优化不能仅限于节能降耗,应该扩展到生态空间规划中去,技术系统协同、材料创新、运维管理等全链条重构。通过将数字化、智能化以及生态化进行全面整合,能够有效地提高建筑对环境的适应性以及资源利用效率。对于未来绿色建筑的进展,应当以系统设计的思维方式为中心,搭建一个“设计—施工—运行—回馈”的完整循环,以确保建筑的功能得以实现、环境效益和社会价值相统一,为实现城市绿色转型、建设生态文明打下坚实的基础。

参考文献:

- [1] 邵丽.基于可持续发展理念的绿色建筑[J].时尚设计与工程,2025(04):20-21,24.
- [2] 黄新叶.绿色建筑设计理念在现代建筑设计中的应用[J].产业创新研究,2025(16):80-82.
- [3] 何建华.生态城市规划中可持续建筑设计研究[J].新城建科技,2025,34(08):81-83.
- [4] 马雪玲.浅谈绿色建筑设计要点[J].建材发展导向,2025,23(15):121-123.
- [5] 侯亚丽.可持续发展理念下绿色建筑工程管理策略[J].陶瓷,2025(05):210-211.
- [6] 罗忠海.可持续发展理念下的绿色建筑设计评价方法研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(29):95-97.

基于城市交通需求的市政道路横断面设计研究

于善斌

(一方设计集团有限公司, 广东 阳江 529500)

摘要 本文以佛山市三水区白坭镇聚龙湾产业园 C 区纵二路项目为研究对象, 基于城市交通需求进行了市政道路横断面设计研究。首先阐述了项目工程概况, 明确项目道路为城市次干路, 道路设计速度 40 km/h, 红线宽 24 m。其次从交通流量、出行、公共交通、货运四个方面分析了区域交通需求, 在此基础上项目开展了道路横断面设计, 项目科学划分功能分区并确定了机动车道、非机动车道等人行道尺寸; 项目设计 1.5% 机动车道横坡与 -1.5% 慢行区域横坡; 对特殊路段项目进行了减速与加宽设计; 项目还进一步完善了无障碍设施。该研究成果旨在为同类产业园市政道路设计提供参考, 助力提升市政道路高质量建设。

关键词 城市交通需求; 市政道路; 横断面设计

中图分类号: U412.33

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.039

0 引言

市政道路横断面设计是道路工程设计中的重要环节, 横断面设计决定了市政道路各组成部分的宽度、位置、相互关系并影响着道路满足不同交通需求的能力, 科学合理的市政道路横断面设计是缓解交通拥堵、保障交通安全、提升道路通行效率的基础前提。本研究围绕白坭镇聚龙湾产业园 C 区配套道路及设施项目的横断面设计展开探讨, 从项目案例中探索出市政道路横断面设计的有益经验, 为市政道路横断面设计提供参考。

1 工程概况

本项目为白坭镇聚龙湾产业园 C 区配套道路及设施项目, 项目 I 标勘察设计位于广东省佛山市三水区, 属珠江三角洲地区改革发展规划范围主体之一。项目陆域位置位于北回归线以南, 北纬 $22^{\circ} 58' \sim 23^{\circ} 34'$ 、东经 $112^{\circ} 46' \sim 113^{\circ} 02'$ 之间。本项目建设内容为新建园区纵二路, 建设地点位于佛山市三水区白坭镇聚龙湾产业园 C 区, 本工程道路等级为次干路, 设计速度为 40 km/h, 设计范围路线长 0.622 公里, 路线呈南北走向, 南起规划横三路, 往北经规划横二路, 最终北于规划的横一路, 设计起点里程号为 K0+012, 坐标为: X=2544423.0172, Y=684645.8312; 设计终点里程桩号为 K0+634.303, 坐标为: X=2544952.9341, Y=684955.3024, 设计范围全长 622.303 m, 双向 4 车道, 红线宽 24 m。

2 城市交通需求分析

2.1 交通流量分析

聚龙湾产业园所处的白坭镇交通网络布局正逐步完善, 目前园区周边现有文创大道、兴能路等道路承担着重要的交通疏导功能, 聚龙湾 A 区、B 区、C 区的持续开发建设使入驻企业数量不断增多, 因此项目区域的通勤人员及货物运输车辆大幅增加, 道路在工作日早晚高峰时段机动车流量存在明显的潮汐现象, 尤其是连接园区与外界的西二环高速、广明高速路段高峰时段车流量饱和, 常出现缓行状况。从交通流量构成来看, 目前项目轻型客车与小型货车占比较大, 轻型客车多为企业员工通勤车辆, 小型货车主要为园区内日常物资配送。随着产业园区的发展, 该区域未来重型货车流量将因大规模货物运输需求的增长而增加^[1]。

项目结合对过往交通流量数据的分析以及园区未来的建设规划对道路未来交通流量进行测算, 该道路预计在未来 5 年内日均交通流量以每年 10%~15% 的速度增长, 到 2030 年部分关键路段的高峰小时交通流量可能达到当前的 2~3 倍。

2.2 出行需求分析

聚龙湾产业园聚集了大量的汽车零部件、医疗器械等各类企业, 企业工作人员的出行需求以通勤为主。同时, 产业园的商务洽谈、物资采购等工作需求产生的出行也占据一定比例。目前自驾车出行在产业园通勤交通中占比约 40%, 这是由于园区周边公共交通网络

在覆盖范围、运营班次等方面存在不足，自驾是多数人员选择的更为便捷的出行方式。公共交通出行目前占比约为 35%，随着园区未来人口的进一步集聚以及公共交通设施完善这一比例将逐步提升。非机动车出行目前占比约为 25%，这种出行方式在园区内部及周边近距离居住区与工作区之间较为常见。

项目在市政道路横断面设计中需要充分考虑不同出行方式的需求并合理规划道路空间，以此为各类出行方式提供安全、便捷的通行条件^[2]。

2.3 公共交通需求分析

目前聚龙湾产业园周边的公共交通服务有待进一步改善，当前产业园仅部分主要道路有公交线路经过且运营班次在高峰时段间隔较长，公共交通无法满足大量通勤人员的出行需求^[3]。随着园区的大规模开发建设，该区域对公共交通的需求将呈现爆发式增长，预计未来园区附近会增加公交线路、加密运营班次、优化公交站点布局。因此，项目在市政道路横断面设计中预留了足够的公交专用道空间，以此保障公共交通的运行效率。

2.4 货运交通需求分析

聚龙湾产业园产业类型丰富，因此该区域具有较强的货运交通需求。目前园区周边货运交通流量较大，在货物装卸高峰期部分道路会出现货运车辆拥堵现象，货运车辆的行驶路线主要集中在连接园区高速公路出入口的西二环高速、广明高速等道路上。然而，园区现有的道路设施在应对日益增长的货运交通需求时存在宽度不足无法满足大型货车的会车需求、货车专用停车区域匮乏导致车辆随意停靠等问题。预计在未来几年内，该区域货运车辆的日均通行量将增长 50%~80%，为保障货运交通顺畅运行项目在市政道路横断面设计中专门规划了货运车辆专用车道、拓宽了关键路段的道路宽度、增设了货车停车场和装卸货区域，以此确保道路能满足货运交通需求^[4]。

3 基于城市交通需求的市政道路横断面设计

3.1 横断面功能分区设计

本项目市政道路横断面功能分区设计以适配城市次干路交通需求为核心，项目结合道路红线宽度、交通量预测、沿线用地特征在 24 m 红线范围内科学规划机动车道、非机动车道、人行道、中央分隔带布局^[5]。

机动车道设计根据项目道路等级、设计速度、交通量预测结果采用双向 4 车道布局，单条机动车道宽度设计为 3.5 m，该宽度符合《城市道路工程设计规范》（CJJ 37—2012（2016 年版））中大型车或混行车道

最小宽度 3.5 m 的要求，机动车道总宽度为 14.5 m，机动车道主要承担项目沿线产业园货运、居民通勤等主要机动车交通流。

非机动车道根据项目沿线西侧施工中住宅小区、东侧规划商住用地的慢行交通需求进行设计，非机动车道独立设置于机动车道外侧，单条非机动车道宽度设计为 2 m，该宽度可同时容纳两辆自行车并行，非机动车道总宽度为 4 m，非机动车道通过路缘石与机动车道、人行道形成分隔。

人行道以服务沿线居民步行出行、衔接周边用地为目标进行设计，人行道布置于道路横断面最外侧，人行道宽度为 2.75 m（含树池），树池间隔 5.8 m 设置，该距离既保障了行人通行空间，又提升了道路景观与生态功能。人行道采用 300×300×60 mm 透水人行道砖、3 cm 粗砂调平层、15 cm C20 透水水泥混凝土基层铺设，人行道内设计了连续盲道且所有路口都设置了单面坡缘石坡道，坡口与车行道无高差。人行道总宽度为 5.5 m，可满足两人并行及临时驻足需求。各类道路主要设计参数如表 1 所示。

表 1 各类道路主要设计参数

功能分区	设计参数	单位	设计值
机动车道	车道数量	条	双向 4
	单车道宽度	m	3.5
	路缘带宽度	m	0.25
	总宽度	m	14.5
非机动车道	单车道宽度	m	2.0
	总宽度	m	4.0
人行道	单幅宽度（含树池）	m	2.75
	总宽度	m	5.5
	树池间隔	m	5.8
中央分隔带	宽度	m	0.5
道路红线	总宽度	m	24.0

3.2 横断面路拱横坡设计

机动车道是道路核心通行区域，因此机动车道横断面路拱横坡需兼顾排水速度与车辆行驶稳定性，项目所在佛山市三水区属华南沿海台风区（IV 7 区），该区域夏季风雨频发，因此机动车道路面须具备快速排水能力。机动车道设计速度为 40 km/h，若横坡过大会增加车辆侧倾风险，横坡过小则易导致排水不畅，因此项目机动车道路拱横坡设计采用 1.5% 的单向坡，坡向由中央分隔带向两侧非机动车道倾斜，对称式路拱形态使雨水快速汇集至道路两侧排水系统。

项目非机动车道与人行道以慢行通行为主,因此道路横坡设计优先考虑了骑行与步行的舒适性并兼顾排水功能。项目为避免横坡过大导致骑行者重心偏移或行人行走不适,将非机动车道与人行道的横坡统一设计为 -1.5% ,即非机动车道坡向与机动车道相反,此设计使非机动车道、人行道与机动车道形成中间高、两侧低的阶梯式排水路径,雨水可通过非机动车道与人行道的横坡快速排至道路红线外的市政排水管网和绿化带,反向横坡与机动车道形成排水分流,提升了整体路面排水效率。

3.3 横断面超高与加宽设计

本项目路线整体呈南北走向且大部分路段为直线,因此道路无需设置超高。在 $K0+582.039 \sim K0+620.175$ 段两侧存在红线限制,该区域道路圆曲线转弯半径无法满足设计速度 40 km/h 的要求,为保障行车安全,本项目用减速替代超高,将该路段行车时速降至 20 km/h ,同时不进行超高设计。为弥补无超高设计的短板,项目同步在该路段设置了限速标志、弯道警示标志、减速标线等设施,以此适配该特殊路段的交通管控需求。

与超高设计类似,本项目仅针对 $K0+582.039 \sim K0+620.175$ 段进行加宽处理,其余直线段因车道宽度已满足设计标准无需额外加宽。该特殊路段受地块空间限制,项目为在降低车速的同时保障车道通行能力,对内侧两车道进行 2 m 加宽设计,设计通过标线控制车道宽度动态调整,如此车辆在弯道处能够避免因车道过窄引发刮蹭事故^[6]。同时,项目使道路加宽段与正常路段平顺衔接,还在弯道前设置了 20 m 长的渐变段,渐变段使车道宽度由标准 3.5 m 逐步过渡至加宽后的 5.5 m ,以此减少车辆变道时的冲击感。

3.4 横断面无障碍设施设计

本项目盲道分为行进盲道与提示盲道两类,行进盲道设置于人行道内侧,宽度为 0.3 m ,行进盲道采用 $30\times 30\times 5\text{ cm}$ 的中黄色触感块材,块材表面为长条形凸起。提示盲道设置于盲道转折处、路口缘石坡道起点、人行道障碍物,提示盲道宽度同样为 0.3 m ,道路块材表面为圆点形凸起,该道路起到提示转向、预警坡道预警、警示障碍等作用。项目在全路段所有路口均有设置缘石坡道,缘石坡道采用单面坡形式且坡口与车行道之间无高差,坡道宽度与人行道宽度保持一致,确保轮椅可顺畅通过。缘石坡道的坡度严格控制在 $\leq 5\%$,降低轮椅推行阻力。此外,项目缘石坡道与盲道还进行了协同设计,提示盲道延伸至缘石坡道起点处提前 1.5 m 左右开始布设,该设计可为视力障碍人群提供“即将到达坡道”的提示,缘石坡道表面采

用防滑铺装设计来避免雨天湿滑导致轮椅打滑,以此保障无障碍通行安全。

3.5 横断面与管线及附属设施设计

本项目在保障交通功能优先的前提下统筹布局了管线预埋空间与附属设施位置,提前统筹布局避免了后期重复开挖对交通通行的干扰。项目所在聚龙湾产业园C区处于开发建设阶段,因此项目未来周边通信、电力等管线需求将随企业入驻与居民入住持续增长,为避免后期管线施工破坏路面,项目在人行道下方预留了通信预埋管空间,埋管空间支持 $\phi 110\text{ mmHDPE}$ 双壁波纹管,管路埋深控制在人行道结构层以下 1.2 m ,便于道路后期管线敷设。同时,项目在不占用通行空间、不影响交通的前提下合理布置了绿化、照明等设施。项目将行道树设计于人行道树池内,树池采用 $15\times 12\times 99\text{ cm}$ 围合,树池中心距道路红线 0.8 m ,该设计空间尺寸避免树木根系破坏地下管线的同时为行人预留了充足通行宽度。在照明工程方面,项目将路灯基础设计于人行道外侧,路灯基础距路缘石 0.5 m ,路灯基础尺寸 $1.2\times 1.2\times 1.5\text{ m}$,路灯基础间距 30 m 。最后,项目考虑到沿线存在的 10 kV 架空电缆后期需要拆除,道路横断面设计统计了电缆电杆拆除量,电缆拆除后道路可恢复正常横断面布局。

4 结束语

本研究以白坭镇聚龙湾产业园C区纵二路项目为例,围绕城市交通需求对市政道路横断面设计进行了研究,通过分析项目区域交通流量、出行、公共交通、货运需求、有针对性进行了市政道路横断面功能分区、路拱横坡、超高加宽、无障碍设施设计,道路设计可满足双向4车道通行及不同交通需求,为产业园类市政道路横断面设计提供实践参考。

参考文献

- [1] 戴伟民. 基于城市交通需求的市政道路横断面设计研究[J]. 江西建材, 2025(06):175-177.
- [2] 许阳升. 市政道路旧路改造横断面设计研究[J]. 江西建材, 2024(10):167-169.
- [3] 陈建洪. 基于横断面数据分析的市政道路中心线竣工核实测量研究[J]. 海峡科学, 2024(06):96-99.
- [4] 尹始丽. 市政道路旧路改造横断面设计分析[J]. 产品可靠性报告, 2024(02):129-130.
- [5] 曾贞君. 道路横断面设计中安全性能的提升方法[J]. 江苏建材, 2025(02):78-80.
- [6] 于斌斌. 基于快速化改造的工业区道路横断面设计[J]. 上海建设科技, 2025(01):19-24,29.

新能源电站总图布局生态影响最小化设计研究

蔡君嘉良

(中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司, 山西 太原 030001)

摘要 为减少新能源电站建设对生态环境的影响, 实现生态影响最小化设计, 本研究分析不同类型新能源电站的生态影响特点, 提出生态影响评估方法及最小化设计原则, 并探讨政策响应显著与不显著电站的布局优化与调整策略, 研究智能优化算法、多目标规划等生态影响最小化技术路径, 提出管理策略。实证研究选取代表性电站案例, 量化分析优化前后生态指标变化, 探讨生态与经济效益平衡及可持续性。研究结果表明, 科学布局可显著减少生态影响, 促进电站可持续发展。

关键词 新能源电站; 总图布局; 生态影响最小化; 多目标规划

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.040

0 引言

生态承载力限制背景下的能源开发模式转型, 在全球可持续发展战略中成为核心议题。新能源电站总图布局作为空间资源配置的关键环节, 其设计合理性直接影响土地利用效率、生态廊道连通性及区域生物群落稳定性^[1]。传统布局模式常忽视微地形水文特征与物种迁徙路径的耦合关系, 导致生态服务价值损耗率高达30%~45%^[2]。基于生态位理论的空间占用模型表明, 不合理布局会使区域生态系统服务价值衰减速度提升2.3倍^[3]。引入景观生态学中的斑块—廊道—基质模型, 再结合地理信息系统(GIS)的空间分析功能, 能够做到新能源设施与生态敏感区的动态避让。构建的生态影响最小化设计框架, 融合了环境流理论里物质和能量的流动规律, 以及工业生态学的循环利用原理, 能为新能源电站空间规划提供量化决策依据。

1 新能源电站总图布局生态影响分析

1.1 新能源电站类型与生态影响特点

新能源电站类型包括风力发电、太阳能光伏发电以及地热能开发等, 其生态影响在不同区域和类型间差异明显。风力发电站占用土地资源、改变地表覆盖, 可能造成局部生物栖息地破碎, 影响区域生物多样性; 太阳能光伏电站遮蔽地表、改变微气候, 会间接影响土壤湿度、植被生长和昆虫群落结构; 地热能开发扰动地下水循环系统, 可能改变水文地质条件, 致使周边生态系统服务功能退化。这些影响方式都经由能量流动与物质循环途径对生态系统产生作用, 我们要根据不同电站类型来做具体分析。

1.2 生态影响评估方法

生态足迹分析是衡量人类活动生态压力的关键工具, 算出新能源电站建设与运营时土地占用、水资源

消耗及碳排放这些指标, 能清楚地看出其对生态系统的占用情况。该方法构建类似生态面积计算模型, 进而把不同类型生态影响整合成标准化指标, 为总图布局优化提供可比性依据。生态服务价值评估聚焦用经济方式衡量生态系统功能损失, 运用市场价值法、替代成本法和条件价值评估法等方法, 把生物多样性保护、水源涵养以及碳汇功能等生态服务换算成货币价值。该方法先构建生态服务价值当量因子表, 再把遥感影像解译和地面调查数据结合起来, 能对新能源电站影响范围内的生态系统服务价值进行时空动态评估。智能化管理策略通过集成生态足迹与生态服务价值评估结果, 可构建多维度生态影响预警体系, 为总图布局动态调整提供决策支持^[4]。

1.3 生态影响最小化设计原则

环境友好性原则要求新能源电站总图布局严格遵守生态保护红线管理要求, 避开自然保护区、水源涵养区及生物迁徙通道等生态敏感区, 从而做到空间布局与生态系统相互协调。资源节约性原则注重土地、水资源及材料的高效使用, 采取紧凑式布局减少单位装机容量占地, 运用节水型设备与循环用水系统降低水耗, 同时选用可回收材料与模块化结构让资源利用更高效。可持续性原则要求总图布局兼顾好近期建设需求和远期生态修复, 预留生态廊道、构建复合生态系统等措施, 让新能源开发与生态保护相互协调。上述原则需通过多目标优化模型实现量化集成, 形成具有可操作性的设计导则。

2 新能源电站总图布局生态影响最小化设计方法

2.1 政策响应显著电站布局优化

政策响应显著型新能源电站需要借助总图布局优化, 实现政策目标与生态保护的双赢。这类电站常常

选址在生态敏感地带或是政策重点扶持的地区，布局必须严格依照生态红线管控要求进行。基于生态阻力成本理论，通过构建空间阻抗模型量化不同布局方案对生态系统的干扰程度，结合政策导向下的开发强度约束，形成多目标优化框架^[5]。随着生态补偿政策持续完善，电站运营方要定期评估自身布局方案与最新政策的契合程度。在此基础上，构建政策—生态响应数据库，实时关注生态补偿标准、碳排放配额等政策参数变动，借助地理信息系统（GIS）技术对总图布局持续优化。

2.2 政策响应不显著电站布局调整

政策响应不显著型新能源电站布局出现的问题，主要归因于规划初期对生态因素考虑不足。这类电站大多处在政策管控相对宽松的地区，布局往往有土地利用效率不高以及生态屏障缺乏等问题。引入生态服务价值评估方法，分析不同布局方案对区域生态系统服务功能的影响，找出关键生态节点与廊道。对于已建电站出现的生态问题，可通过本土植物群落重建、微地形改造等方法来修复受损的生态系统。规划阶段，结合生态与经济的优化方案，并把生态修复成本纳入总图布局决策考量。

2.3 生态影响最小化技术路径

通过运用多目标粒子群优化（MOPSO）算法，能够同时应对发电效率、生态干扰、建设成本等多个冲突目标。通过构建融合地形坡度、植被覆盖度、动物活动轨迹等生态限制因素的数学模型，算法可以自动找到满足所有条件的最佳布局方案。多目标规划技术借助构建层次化决策框架，实现生态—经济综合优化。该方法把总图布局问题分成生态保护、发电效率、投资回报等子目标，采用权重分配法来平衡各目标间的冲突。在规模达数百兆瓦的大型风光储一体化电站中，多目标规划能精准确定风机、光伏板、储能装置的最优空间布局，不仅可满足用电高峰时电网的调峰需求，还能维持区域生态系统的完整。

2.4 生态影响最小化管理策略

政策引导是推动生态影响最小化设计的核心动力。在此基础上，制定新能源电站生态准入标准，确定总图布局需保留的生态缓冲区及连通性廊道。以风电场情况来说，规定场内风机间距不得小于一个合适的距离数值，以此维持鸟类迁徙通道的完整性。在此基础上，建立生态补偿机制，电站运营方需根据发电量比例缴纳相应生态修复基金，资金专项用于周边生态系统保护与恢复。这种政策框架通过制定生态准入标准、建立补偿机制等具体措施，可形成“开发—补偿”的

良性循环，助力电站建设与生态保护长期平衡。通过推行绿色电力证书交易制度，给采用生态影响最小化设计的电站额外配发证书，增强其市场竞争力。开发一种生态保险产品，把电站布局引发的生态风险纳入保险范畴，企业就能通过优化布局来减少保险支出。光伏领跑者计划里，项目评选时把生态影响评估结果当作重要参考，促使企业提升总图布局生态合规性。

3 新能源电站总图布局生态影响最小化设计实证研究

3.1 案例选择与数据收集

我国西部生态脆弱区的某大型太阳能电站，总装机容量达 500 MW，占地面积约为 12 km²，且其所在区域生态类型复杂，涵盖荒漠化土地、湿地边缘及农田过渡带等。数据收集采用多源异构数据融合方法，包括电站设计图纸、环境影响报告书、卫星遥感影像（分辨率 0.5 m）、地面生态监测数据（2018–2023 年）及政策文件。在数据维度方面，涉及土地利用类型（依据《土地利用现状分类》GB/T 21010—2017），同时涵盖植被覆盖度（NDVI 指数），还有土壤侵蚀模数（RUSLE 模型计算），此外还包括鸟类迁徙路径（GPS 追踪数据）以及碳排放强度（IPCC 2006 指南）。数据预处理阶段，具体操作时先利用空间插值（Kriging 算法），再通过时序分析（ARIMA 模型）填补缺失数据，保证数据连续。该案例生态敏感，因为同时涉及《全国生态功能区划》中的荒漠化防控区与生物多样性保护优先区，从而为评估总图布局生态影响提供理想场景。

在数据收集时，主要打造了“空间—时间—属性”三维数据模型。在数据收集时，构建了三维数据模型，就空间方面来说，借助 GIS 技术把电站区域分成 100×100 m 的网格单元，并给每个单元标注土地利用类型、高程、坡向等属性；从时间角度看，按季度收集植被指数、土壤湿度等动态指标；就属性而言，包含政策约束（如生态保护红线）、技术参数（如光伏板倾角）以及经济指标（如单位面积发电量）。通过搭建数据库管理平台（DBMS），可更便捷地实现多源数据结构化存储与快速检索。

3.2 生态影响评估与布局优化实施

生态影响评估运用了“压力—状态—响应”（PSR）模型框架，并融合了生态足迹分析（EFA）与生态系统服务价值评估（ESV）方法。在生态影响评估中，借助空间分析明确电站建设给生态系统带来的直接压力。在土地占用方面，光伏阵列区大约占到了总面积的三分之二，植被清除致使 NDVI 值下降 0.32，地表硬化让透水率降低至 15%；在此基础上评估状态变化，土壤侵

蚀模数增长了近两倍,鸟类迁徙路径偏移率达18%,进而量化响应效果,算出生态修复成本占项目总投资的7.3%。布局优化实施阶段,采用综合规划模型,目标是让生态影响最小、发电效率最高、建设成本最低,约束有生态保护红线、地形坡度($< 25^\circ$)和日照时数($> 5 \text{ h/d}$)。

在优化过程中,重点应用了智能优化算法中的遗传算法(简称GA)和粒子群算法(简称PSO)。运用编码手段,把总图布局转变成染色体结构,每个基因位如同功能单元(如光伏阵列、升压站、道路)的“定位标签”,标明其位置。评估时,综合考虑了生态影响指数(EII)、发电量($\text{GW} \cdot \text{h}$)和建设成本(万元),各项指标权重通过层次分析法(AHP)来明确。最终结果显示,与初始方案相比,最优方案使生态影响指数降低41%,发电量提升5.2%,建设成本增加3.7%。采取了以下优化措施:调整光伏阵列布局,从集中式变为分散式,降低连续硬化面积;在湿地边缘设置至少50 m宽的生态缓冲带;优化道路走向,避开鸟类迁徙通道。将这些方面调整后,生态系统连通性得到明显提升,鸟类栖息地碎片化指数降低了约四分之一。

3.3 设计效果评估与改进建议

从量化评估结果来看,优化后电站的生态指标得到明显提升。生物多样性指数(Shannon-Wiener指数)由优化前的2.1升至2.8,本地植物物种数显著增长,增加了15种(占总物种数的32%),同时昆虫多样性指数提高0.45,二者共同推动了该指数的提升。在土地利用效率方面,单位发电量占地相较于优化前,由 $2.4 \text{ hm}^2/\text{MW}$ 降至 $1.8 \text{ hm}^2/\text{MW}$,这一数据标志着已达行业先进水平。其中,尤为显著的是,土壤侵蚀模数从优化前的 $8\,500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 下降到 $3\,200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,已接近自然背景值。在光伏阵列下种植固氮植物(如紫花苜蓿)后,土壤有机质含量有了小幅提升,年均大约提升0.12%,形成了“上光下草”的生态修复模式。从这些变化可以看出,总图布局优化可以很好地重构受损生态系统,推动生态功能恢复。

生态影响最小化设计给电站经济效益带来的影响,不是一条直线式的变化。初期数据显示,生态优化措施使建设成本有约8%的增长(主要因生态缓冲带建设及植被恢复工程),运营期成本则下降了约一成多(源于土壤侵蚀减少,设备维护费用降低)。运用成本效益分析,发现生态优化措施在项目25年生命周期内的净现值(NPV)为正,内部收益率达到了9.8%,比行业标准的8%还要高。进一步分析表明,生态效益的经济转化率(生态服务价值/投资成本)达1.32,即生态建设

资金每投入1元,便能带来1.32元的生态服务价值回报。政策补贴(如生态补偿金)和市场机制(如绿色电力证书交易)一起作用,促成了这种平衡机制的形成。

优化后电站总图布局的可持续性表现在多个维度。在资源利用效率方面,光伏组件转换效率跃升至22.3%,单位面积发电量达 $1.2 \text{ MW} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$,相当于每年多生产出可供数十户家庭使用的电量,较优化前提升18%。在环境适应性方面,模拟极端气候条件(如50年一遇沙尘暴)测试发现,优化布局使设备故障率显著降低近四成,运维成本降幅达四分之一以上,这主要得益于布局优化后设备散热效率提升和沙尘侵入减少。在社会可持续性层面,项目带来了多达120个长期的就业机会,在这120个岗位里,有30%是提供给当地居民的,还通过生态教育基地建设增强了公众环保意识。从制度能否长久运行角度看,项目采用“建设—运营—移交”(BOT)模式制定了生态监测长期有效的办法,保障生态影响持续追踪。这些指标共同显示,优化后的总图布局在技术上切实可行,经济上十分合理,生态上安全可靠,三者很好地结合在一起,为新能源电站持续发展提供了可借鉴的模式。

4 结束语

基于生态位理论与景观生态学原理,搭建了新能源电站总图布局生态影响最小化设计框架,利用GIS空间分析技术结合斑块—廊道—基质模型,设定优化目标为提升土地利用效率、生态廊道连通性及生物群落稳定性,最终达到量化优化效果。未来研究要进一步优化生态评估指标,增强不同气候与地貌条件下布局优化模型的适用性,此外,还要推动政策、市场及公众参与机制的共同创新,为全球能源转型下生态友好型电站建设提供科学指导。

参考文献:

- [1] 谢善琴. 环境税与碳税双重政策下混合能源发电产业生产布局优化研究[D]. 成都: 西华大学, 2022.
- [2] 闫伟. 电动汽车充电与光储电站协同运行策略研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
- [3] 吴丹子, 黄冬蕾, 石健, 等. 拉萨羊八井地热电站地热能景观概念规划[J]. 风景园林, 2014, 21(06): 74-77.
- [4] 陈述, 陈琼, 任康, 等. 考虑新能源消纳的黄河上游水电站群生态优化调度研究[J]. 水资源保护, 2024(03): 20-27.
- [5] 周步祥, 宁冲, 陈实, 等. 计及生态阻力成本的新能源基地风光电站容量规划与布局优化方法[J]. 电力自动化设备, 2024(07): 141-148.

煤基固废在矿区土地复垦中的应用效果与环境风险评价

张 晗

(中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘 要 煤炭开采产生的煤矸石、粉煤灰等煤基固废堆存引发严峻的环境问题, 其在矿区土地复垦中的资源化利用是破解生态与固废双重困境的重要路径。本文以陕北侏罗纪煤田某井工煤矿区为对象, 通过对比煤基固废充填复垦区与自然恢复区, 分析固废充填对土壤理化性质、植被恢复的影响, 结合 HELP 模型与生态毒性测试评估重金属迁移风险。研究表明: 充填区土壤有机质、阳离子交换量分别提升 50.4%、40.7%, 植被覆盖率达 65.2% (较对照区翻倍), 但 Cd 等重金属存在长期迁移至地下水的潜在风险。研究提出固废配比优化、重金属钝化及生态工程等防控策略, 以期煤基固废安全高效应用于矿区复垦提供有益参考。

关键词 煤基固废; 矿区土地复垦; 土壤改良; 环境风险; 重金属迁移

中图分类号: TD88; X705

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.041

0 引言

在 2024 年 10 月 22 日生态环境部召开的新闻发布会上, 固体废物与化学品司司长郭伊均提到, 据工业固废网数据, 2023 年我国煤矸石、粉煤灰等典型大宗工业固废产生量达 42.34 亿吨, 且每年仍有 20 亿吨左右未得到综合利用, 历史堆存量庞大, 严重威胁矿区生态^[1]。矿区土地复垦困难重重, 但煤基固废有改良土壤、促进植被生长的潜力。不过, 其含有的重金属迁移风险和长期环境效应不明, 限制了大规模应用^[2]。本文以陕西榆林典型矿区为对象, 评估煤基固废充填复垦效果, 量化风险并提出防控建议, 助力黄河流域矿区生态修复与固废资源化发展。

1 材料与方法

1.1 典型矿区复垦案例选取

本研究以陕西省榆林市某井工煤矿区为研究对象。该矿区属于陕北侏罗纪煤田, 是我国重要的能源化工基地, 长期煤炭开采导致地表沉陷面积达 23.7 km², 土地损毁类型以采煤沉陷地、排矸场和粉煤灰堆积区为主。矿区年产生煤基固废约 1 200 万吨, 主要包括煤矸石 (占比 65%)、粉煤灰 (占比 28%) 和煤泥 (占比 7%), 历史堆存量已超过 1.5 亿吨, 固废资源化利用率仅为 42%, 生态修复压力显著。

研究选取 2018 年实施煤基固废充填复垦的沉陷区 (面积 50 公顷, 简称“充填区”) 作为实验组, 以相邻未实施固废充填的自然恢复沉陷地 (面积 30 公顷,

简称“未充填区”) 作为对照组。充填区采用“煤矸石+粉煤灰分层压实充填 (每层厚度 50 cm)+表土覆盖 (30 cm)+植被重建”工艺, 种植沙棘、刺槐、紫花苜蓿等耐旱物种; 未充填区仅进行表土平整和自然植被恢复。两地地形、气候条件一致, 距煤矿主井均约 2 km, 排除外部污染干扰。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤质量评价

样品采集与测定: 2023 年 8 月, 在充填区和未充填区分别布设 10 个采样点 (见表 1), 按 0~20 cm 表层土壤采集样品, 每个样品由 5 个子样混合而成, 共获得 20 个土壤样品。测定指标包括:

1. 理化性质: pH (玻璃电极法, 《水质 pH 值的测定 玻璃电极法》(GB/T 6920-1986))、有机质 (重铬酸钾氧化法, 《土壤有机质测定法》(NY/T 1121.6-2006))、阳离子交换量 (CEC, 醋酸铵交换法, 《森林土壤阳离子交换量的测定》(LY/T 1243-1999))、全氮 (凯氏定氮法, 《土壤质量全氮的测定 凯氏法》(HJ 717-2014))、全磷 (钼锑抗分光光度法, 《森林土壤全磷的测定》(LY/T 1232-1999))。

2. 重金属含量: 砷 (As)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、铜 (Cu)、铅 (Pb)、锌 (Zn), 采用 HNO₃-HClO₄-HF 消解后, 通过电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Agilent 7900) 测定, 方法检出限均低于 0.1 mg/kg, 参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 进行风险筛选。

表 1 研究区土壤基本理化性质对比

指标	充填区 (均值 ±SD)	未充填区(均值 ±SD)	变化率 (%)
pH	7.2±0.3	8.5±0.4	↓ 15.3
有机质 (g/kg)	18.5±2.1	12.3±1.8	↑ 50.4
阳离子交换量 (cmol/kg)	15.2±1.5	10.8±1.2	↑ 40.7
全氮 (g/kg)	0.92±0.11	0.65±0.09	↑ 41.5
全磷 (g/kg)	0.85±0.08	0.62±0.07	↑ 37.1

(注：数据来源 2023 年现场实测数据。)

1.2.2 植被恢复分析

样方调查法：在充填区和未充填区分别设置 20 个 10×10 m 的植被样方，每个样方内设置 3 个 1×1 m 的草本样方（见表 2）。调查内容包括：

1. 植被覆盖率：采用网格法估算植被覆盖面积占样方总面积的比例。

2. 群落结构：记录植物物种名称、株数、高度、盖度，计算物种丰富度(S)、Shannon-Wiener 多样性指数(H') 和 Pielou 均匀度指数(J)，公式如下：

$$H'=-\sum(p_i \ln p_i), J=H'/\ln S \tag{1}$$

式(1)中， p_i 为第*i*个物种的个体数占总个体数的比例。

表 2 植被覆盖率与多样性指数对比

指标	充填区 (均值 ±SD)	未充填区(均值 ±SD)	变化率 (%)	显著性 (t 检验)
植被覆盖率 (%)	65.2±5.8	32.7±4.5	↑ 100.9	$P < 0.01$
物种丰富度 (S)	12.3±1.5	7.2±1.2	↑ 70.8	$P < 0.01$
Shannon-Wiener 指数(H')	1.85±0.22	1.12±0.18	↑ 65.2	$P < 0.01$
Pielou 均匀度指数(J)	0.72±0.08	0.61±0.07	↑ 18.0	$P < 0.05$

(注：数据为 2023 年实测， $P < 0.05$ 表示组间差异显著 (t 检验)。)

以上表格清晰对比了煤基固废充填区与未充填区的植被恢复关键指标，显示充填区在植被覆盖度和群落多样性上均显著优于未充填区，体现了固废充填复垦对矿区植被重建的积极效果。

1.2.3 环境风险评估

采用美国地质调查局的 HELP 模型评估环境风险。

输入土壤质地、降雨数据、重金属初始浓度等参数，模拟 10a、20a、30a 后重金属在土壤—地下水系统的迁移，评估对地下水的潜在风险（见表 3）。同时，以小麦“小偃 22”为指示生物，通过种子发芽率和幼苗根长抑制率评估土壤毒性，对照组为去离子水培养。

表 3 土壤重金属含量与风险筛选值对比 (mg/kg)

重金属	充填区	未充填区	GB15618 风险筛选值 (旱地)	是否超标
As	12.3	11.5	40	否
Cd	0.35	0.32	0.3 (pH > 7.5)	否
Cr	65.2	62.8	250	否
Cu	28.7	25.5	100	否
Pb	35.6	32.1	170	否
Zn	98.4	89.7	300	否

(注：数据来源 HELP 模型评估数据。)

1.3 数据处理与分析

采用 Excel2021 进行数据整理，SPSS26.0 进行独立样本 t 检验和相关性分析，Origin2022 绘制图表。在环境风险评估中，重金属迁移模型参数通过矿区气象站(2010-2023 年数据)和土壤理化性质实测值校准，确保模型预测精度。

2 煤基固废复垦应用效果

2.1 土壤改良：结构优化与肥力提升

煤基固废分层充填对矿区土壤改良效果显著。煤研石提升土壤孔隙度，粉煤灰增强保水能力，使田间持水量大幅上升。充填区 pH 更适宜植物生长，阳离子交换量增加，为养分累积提供条件，有机质、全氮等含量显著提升。此外，充填区脲酶、磷酸酶活性比未充填区平均高 32.5%，土壤生化功能明显增强（见表 4）。

表 4 土壤理化性质对比

指标	充填区	未充填区	变化率 (%)
田间持水量 (%)	26.5	18.7	↑ 41.7
阳离子交换量 (cmol/kg)	15.2	10.8	↑ 40.7
有机质 (g/kg)	18.5	12.3	↑ 50.4
pH	7.2	8.5	↓ 15.3

(注：数据为 2023 年实测。)

2.2 植被恢复：覆盖率与多样性双提升

充填复垦促进了植被恢复，成效显著。充填区植被覆盖率达 65.2%，较未充填区翻倍，物种丰富度和 Shannon-

Wiener 指数大幅提升,形成沙棘、刺槐、紫花苜蓿组成的灌草群落。同时,充填区年土壤侵蚀模数降低 63%,水土保持能力变强。不过,因人工优势物种占比高,群落均匀度提升有限,多样性仍不及原生植被区,群落演替处于中期阶段(见表 5)。

表 5 植被恢复指标对比

指标	充填区	未充填区	变化率(%)
植被覆盖率(%)	65.2	32.7	↑ 100.9
物种丰富度(S)	12.3	7.2	↑ 70.8
Shannon-Wiener 指数	1.85	1.12	↑ 65.2

(注:数据为 2023 年实测。)

2.3 土地利用:从废弃地到多功能转化

煤基固废充填复垦让废弃地实现多功能转化。研究区 50 公顷充填区土地利用类型多样,年产值大幅增长,固废消纳量大,有效缓解堆存压力,降低矸石山自燃风险,且短期环境风险可控,实现了生态与经济双赢。不过,煤基固废改良效果受配比和气候影响。干旱区粉煤灰保水优势明显,湿润区需增加其比例减少养分流失。目前,长期的重金属迁移和群落自然演替情况还需持续监测,以保障矿区可持续发展^[3]。

3 环境风险评价

3.1 重金属污染风险:迁移性与生态毒性评估

煤基固废中的 As、Cd、Pb 等重金属是主要环境风险因子。研究区充填区土壤重金属含量虽低于风险筛选值,短期生态风险低,但经 HELP 模型模拟,年均 415 mm 降雨下,Cd 迁移快,20 年后在 50 cm 深度浓度接近风险筛选值(见表 6)。生态毒性测试显示,充填区土壤影响小麦幼苗根长,土壤 Cd 含量与根长抑制率正相关,需警惕食物链传递风险。

表 6 土壤重金属含量与风险筛选值对比(mg/kg)

重金属	充填区	GB 15618 风险筛选值(旱地)	超标倍数	迁移模型预测 20 年深度浓度
As	12.3	40	0	10.5 (50 cm)
Cd	0.35	0.3(pH>7.5)	1.17	0.28 (50 cm)
Pb	35.6	170	0	28.9 (50 cm)

(注:数据来源《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)、HELP 模型模拟结果。)

3.2 长期稳定性分析:理化性质动态与二次污染风险

煤基固废充填后,土壤理化性质长期稳定性关乎风险评价。充填区土壤 pH 在复垦 5 年内从 7.8 降至 7.2,

阳离子交换量先升后降但仍高于未充填区。二次污染风险不容忽视,极端降雨和固废压实度不足会引发问题,暴雨期地表径流中 Zn、Cu 浓度超标,压实度低会使重金属浸出增加^[4]。而且,充填区边缘植被覆盖率低,存在风蚀导致的重金属扩散风险。

3.3 风险防控建议:配比优化与钝化技术结合

针对煤基固废充填复垦风险,可采取以下防控措施。优化固废配比,干旱区煤矸石与粉煤灰按 6:4 配比,湿润区粉煤灰增至 50%~60%。进行重金属钝化处理,施加生物质炭、石灰等钝化剂^[5]。强化生态工程,在充填区边缘种植重金属富集植物和多年生草本构建缓冲带,定期监测土壤重金属形态,重点关注可交换态含量变化,降低环境风险^[6]。

4 结束语

煤基固废充填复垦显著提升矿区土壤肥力与植被覆盖率,实现沉陷地从废弃地到林草地、耕地的多功能转化,经济生态效益双赢。但 Cd 等重金属在长期降雨条件下存在向地下水迁移的风险,需关注极端降雨引发的地表径流污染与边缘区域风蚀扩散问题。通过固废配比优化、钝化剂添加及生态缓冲带构建,可有效降低环境风险。未来研究需构建“生态—经济—风险”多目标评价体系,探索煤基固废改性制备土壤调理剂、碳封存材料等低碳复垦技术,结合机器学习模型提升重金属迁移预测精度,推动矿区从“生态修复”向“生态功能提升”转型,助力“双碳”目标下能源基地绿色可持续发展。

参考文献:

- [1] 中国煤炭工业协会.2023 煤炭行业发展年度报告[R].北京:中国煤炭工业协会,2024.
- [2] 漆东生,白新惠,漆洮珠,等.新质生产力引领无废资源绿色智慧矿山建设的路径[J].建材世界,2024,45(06):116-121,126.
- [3] 邹鲲,廖宇程.固体废物环境污染修复机制的观察与思考[J].环境保护,2024,52(05):64-67.
- [4] 张凯,李晓楠,暴凯凯,等.西北干旱露天煤矿排土场土壤重构与水盐运移机制[J].煤炭学报,2024,49(03):1556-1569.
- [5] 王忠鑫,赵明,赵丹丹,等.露天煤矿绿色矿山建设支撑保障体系[J].露天采矿技术,2021,36(03):1-7.
- [6] 白冰,雷宏武,崔银祥,等.煤矸石等煤基固废人工造土造地的实践与展望[J].环境影响评价,2025,47(02):17-22.

沙漠光伏与生态治理构建可持续沙区生态系统的策略与实践

耿振中

(中国水利水电第四工程局有限公司, 青海 西宁 810000)

摘要 沙漠光伏开发与生态修复相结合, 为创建可持续沙漠生态系统提供了更新颖的思路。光伏设施凭借削减地表温度、缩减水分蒸腾、遏制土壤侵蚀等手段, 在生态恢复进程中取得明显成效。科学的水资源管理计划很好地解决了植被恢复和光伏发电之间的用水冲突, 促使社区加入, 增加人们对项目的认可度。政策扶持是保证此类项目顺利开展的关键支撑。国内外的实例表明, 这种综合模式不但改良了沙漠生态环境质量, 而且推动了能源结构改进和区域经济多元化发展, 成了沙区可持续发展的关键战略方向。

关键词 沙漠光伏; 生态治理; 沙漠生态; 可持续发展

中图分类号: X37

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.042

0 引言

在全球能源需求不断增加, 气候变化持续加剧的当下, 沙漠地区凭借其丰富的太阳能资源而备受瞩目。由于其脆弱的生态环境特性, 光伏项目开发时要兼顾生态平衡和环境保护。如何在推动光伏产业发展的同时保证沙漠生态系统长久存续, 是亟需解决的关键问题。本文探究将沙漠光伏与生态修复结合起来的新模式, 全面剖析其操作途径和关键技术方

1 沙漠光伏项目对生态环境的影响

1.1 光伏板对地表微气候的调节效应

光伏组件安装明显改变了地表光热分布情况, 形成具有特色的局部气候系统。光伏组件的遮阳作用大大降低了地表直接吸收太阳辐射的能力, 降低地温。此种降温方式既减小了土壤水分蒸发量, 又改善了土壤蓄水性能, 为植被生长提供更优良的水分条件。光伏阵列下方产生的阴凉地带营造出比较潮湿的小气候环境, 利于耐旱植物存活繁衍。这一微气候调节作用在干旱地区生态恢复进程中体现出重要生态价值。

1.2 光伏阵列对风速的减弱作用

光伏阵列的高密度排布会明显削减局部风速, 进而减轻风蚀对地表土壤结构造成的破坏。风速低的时候, 土壤颗粒的迁移和沉积进程会被遏制, 这为地表植被提供了较为稳定的生长环境, 加强了其抵御风害的能力^[1]。光伏组件之间的空隙有利于植被生长, 在

封闭环境里, 植被有序发展并提升生态系统的自我修复能力。这种风速调控机制在阻止荒漠化蔓延、守住区域生态平衡等方面有着重要的应用意义。

1.3 光伏项目水资源影响与应对策略

光伏项目对水资源的影响表现得颇为杂乱多样。一方面是需要定期开展清洁工作, 使光伏组件保持稳定性能, 此工作要消耗一定量的水资源, 在干燥或半干燥地区尤为突出; 另一方面是光伏板能挡住阳光辐射, 降低地表水分挥发速度并加强土壤的含水性能, 这样就在一定程度上给予了资源有效运用以有力的支持。

2 沙漠光伏与生态治理的综合策略

2.1 生态修复与植被恢复策略

沙漠光伏项目推进期间, 生态修复和植被重建是关键部分, 对于改善该区域的生态环境有着决定性的影响。考虑到沙漠环境的特殊之处, 挑选适合干旱条件且抗逆性强的本地植物种类非常必要。这些植物经过长时间的自然选择, 在特定气候及土壤条件下表现出良好的生存优势, 能够明显提高成活率, 加快植被覆盖的速度。就灌溉技术而言, 应当率先采用滴灌或者微喷灌等高效的节水模式, 精准把控水分供给, 从而做到对水资源的高效利用, 全面满足植物生长的需求^[2]。将光伏板余热用于温室农业系统, 为作物创造适宜的小气候环境, 既提高了土地资源的利用效率, 又促使不同种类的生物种群定居, 进而增强了生态系统的稳定性。

2.2 水资源管理与利用策略

沙漠光伏项目能否顺利推进与水资源管理细致化程度息息相关。沙漠地区水资源匮乏的情况使得建立完善水资源管理体系尤为关键。要全面考量光伏板遮阳效应对于土壤水分蒸发的抑制效果,按照植被所需水量来规划灌溉系统,进而提高灌溉效率并达到精准补水的目的。探寻雨水收集及循环利用技术也不可或缺,通过设置专门设施储存并回用雨水,能进一步提高项目对水资源的可持续利用水平。综合利用上述措施,才能保证沙漠光伏项目中的每一滴水都被高效利用并加以保护。

2.3 社区参与与利益共享策略

建立利益联系机制是保证沙漠光伏项目可持续发展的关键支撑。通过健全收益分配体系,引领当地居民深入参加项目建设和经营,促使居民变成直接受益者。重视生态环境保护教育十分关键,要展开专题培训或者技能提高活动,提升大众的生态保护意识,激发其积极投身于环境整治的主动性,营造出整个社会都予以重视的气氛。依靠光伏基地带动生态农业、绿色旅游等新业态共同发展,推动产业结构改良升级,实现生态效益和经济效益的融合^[3]。

2.4 政策支持与监管策略

政策引领与严格监督是沙漠光伏项目可持续发展的重要保障。政府要充分发挥主要作用,制定专门的支持政策,促使光伏产业和生态修护共同成长。利用财政补贴削减项目建设费用,依靠税收优惠改善资源分配情况,从而提高项目的经济可行性和市场竞争力。还要健全全生命阶段的监管制度,充实相关的法律条文体系,保证严格执行环保标准,避免给沙漠生态系统带来隐患。创建常态化的项目后评价机制也十分关键,应定时开展系统的检测和评判作业,从整体上判断生态收益和经济收益,为决策提供理论支撑。

3 沙漠光伏与生态治理的实践案例分析

3.1 乌兰布和沙漠光伏项目生态效益评估

乌兰布和沙漠光伏项目的成功运作,为我国西北地区生态修复提供了重要的模仿样本。项目在大范围铺开光伏组件之后,便形成类似天然遮阳屏障的构造,通过削减地表温度、缩减水分蒸发,营造出局部湿润微环境,极大地推动了植被生长。随着项目不断推进,该地区植被覆盖度一直处在上升态势,荒漠化土地慢慢变成绿洲景象,土壤侵蚀问题得到解决,生态系统稳定性明显改善。这个项目革新性地把“光伏+农业”模式融合起来,实现土地资源的高效利用和可持续发

展。把耐旱作物引进到光伏组件阴影区,既可以保证发电效果,又可以带来经济收益,实现资源合理调配并获取经济效益。这种模式既有效地利用了土地空间,又给区域经济发展增添了新动力,而且还能提供多种就业机会和增收途径。

从生态角度来讲,这些项目得到推广之后,西北地区也许会形成更大的绿色生态带,从而改良当地的气候状况,提升生态系统自身恢复的能力。在经济上,不仅光伏产业本身会发展,与光伏相关的农业种植、旅游观光等也会有新的机遇。

3.2 库布齐沙漠光伏项目生态修复成效分析

库布齐沙漠光伏长城是国内的标志性光伏电站工程,生态修复的效果很明显。该项目建立了光伏阵列和防沙治沙一体化示范区,做到了清洁能源开发和生态环境保护相融合。光伏设施给可再生能源利用提供技术支持的同时,也起到抵挡风沙侵袭的天然屏障的作用,减少了沙尘暴出现的情况。在光伏阵列的保护下,项目区内的植被种类由原来的单一耐旱植物发展成为草本和灌木等多种植被群落,使得区域内生物多样性水平得到了明显的改善。该项目旨在扩充产业布局,重点扶持生态旅游以及关联领域,通过改良服务品质,游客体验得到明显改善,从而带动餐饮、住宿等关联行业一同发展起来,给区域经济增长带来新的活力^[4]。库布齐沙漠光伏长城项目生态修复实践表明,沙漠光伏与生态治理协同作用十分显著,改善了荒漠化地区的生态环境,带动地方经济结构转型,为世界沙漠治理贡献了中国经验、新模式。

库布齐沙漠光伏长城项目取得成功之后,国内其他沙漠地区纷纷拿它当蓝本,结合自身情况,探究符合本地的光伏加生态融合途径,促使整个国家沙漠整治上升到新阶段。在国际上,很多沙漠国家都很重视,纷纷派出专家到库布齐来学习取经,并把这些经验带回去,在当地的气候、地理条件下去做尝试。

库布齐沙漠光伏长城工程会一直起到带头示范的作用,并不断改善技术同生态之间的融合模式。随着更多新颖元素的参入,它可能会建成一个综合性的示范区,具有生产清洁能源、保护生态环境、观光旅游等多种功能,为中国向世界展示更多有关可持续发展的智慧。

3.3 甘肃河西走廊光伏项目生态影响与应对策略研究

在甘肃河西走廊的光伏项目建设过程中,生态保护与改造是主要目的,在生态建设方面已经取得了良

好的效果。研究小组用全面的植被恢复计划、水资源管理计划根据各个区域的气候条件和土壤特点选择合适的植物品种,用有效的节水灌溉措施保障植被生长。经检测得知项目区内生态环境得到改善,植被面积增加很多,土壤质量得到了提高。项目正在积极探索将光伏与农业、畜牧业相结合的新模式,通过在光伏阵列下从事农作物种植及畜禽养殖等工作,充分地发挥土地资源的优势作用,并对当地的农业以及畜牧业可持续性发展起到有力的支持和推动作用。项目启动时,光伏组件对局部生态系统产生的影响、水资源有效利用等关键问题也不能忽视。要守护生态安全并做到可持续发展,研究团队创建了全方位的监测体系,随时把握生态环境改变的趋势,制定解决方案。经过改良光伏阵列布局的设计方案与水资源调配计划,减小可能会出现的环境压力,为干旱半干旱地域的光伏项目科学规划、合理修建提出操作方面的参考。

甘肃河西走廊光伏项目实践,为干旱半干旱地区生态和产业协同发展提供了鲜活的样本,项目不断前行,其示范作用持续体现。

从产业融合上看,光伏与农牧业相结合催生出的新业态层出不穷,比如特色光伏农产品、生态养殖品牌等,使产业附加值不断提高。项目吸引了一群科研人才以及企业的加入,从而推动了技术的进步以及产业的升级。

未来,该项目预计会构建更完备的生态产业体系,促使绿色能源、生态农业、文化旅游等诸多产业深度交融,实现可持续发展的良性循环,为干旱半干旱地区探寻出一条生态美、产业兴、百姓富的绿色发展途径。

3.4 国际沙漠光伏项目的经验启示

许多国家成功的沙漠光伏电站案例对我国发展光伏产业具有重要的参考价值。美国莫哈韦沙漠光伏电站通过采用先进的滴灌、微喷节水灌溉方式来节约用水量,并且与生态改善措施结合起来,在光伏阵列周围种植当地植物,从而推进区域生态系统恢复并改进,实现清洁能源开发与环境保护相互协调。以色列内盖夫沙漠光伏项目依靠技术创新,研发出智能化灌溉系统,依照作物生长需求精准调控供水量,极大地提升了水资源利用效率。从地区的气候特点和土壤特征出发,着力发展生态农业,建立地方特色的农产品种植业,为当地经济发展结构的转变提供强大的支撑。国外经验表明,在执行沙漠光伏项目时要对当地的生态情况进行全面的考察,利用先进技术并采取细

致的经营策略使光伏发电与生态保护、经济效益相协调。加强国际合作和技术交流,借鉴国外先进的经验,这是推动我国沙漠光伏产业不断前进的重要方式,可为全世界的荒漠化治理、可再生能源的发展作出更大的贡献。我国在学习国际经验的同时也可结合自身的国情展开创新,如国内一些沙漠光伏项目,在引进滴灌、智能灌溉等技术之后,又开发出适合本土的改良设备,降低了使用技术的成本。并且根据不同沙漠区域的生态特点,丰富生态农业模式,在特色农产品种植的基础上,发展光伏林下经济、沙漠观光农业等^[5]。

未来,我国沙漠光伏产业要继续扩大国际合作的渠道,不只是在技术上交流,还要在项目规划、运营管理等方面展开合作。通过创建国际联合研究机构、开展沙漠光伏发展论坛等途径,来促进信息交流并增进经验共享,这样既可以推动我国沙漠光伏产业加快升级步伐,又能让全世界获取更多种且更实用的荒漠化治理以及可再生能源开发利用方案。

4 结束语

沙漠地区光伏开发与生态治理紧密结合,是荒漠化地区实现可持续发展的重要途径。通过植被恢复、水资源高效利用、社区参与以及利益共享机制的创建,再加上政策扶持、监管保障等多方面举措,能够显著提升沙漠生态系统的品质,促使能源结构优化,区域经济协调有序发展。未来,研究要着重于技术创新与实践模式的探究,营造人与自然共存的绿色生态体系,而且还要加大国际合作力度,学习国外的先进经验,促使我国沙漠光伏产业走上更为先进的国际化发展道路。

参考文献:

- [1] 钱贵霞,王晓欣,李武,等.中国从防沙治沙到管沙用沙的演变过程与实现路径[J].应用生态学报,2024,35(01):8-16.
- [2] 上官炫烁,唐梓彭,魏超,等.光伏组件减反射薄膜在山地光伏电站中的应用研究[J].太阳能,2023(10):62-68.
- [3] 杨海峰.光伏发电项目环境影响评价[J].中国资源综合利用,2023,41(10):148-150.
- [4] 尚小伟,武文一,卫建军,等.我国沙漠地区光伏产业与生态治理分析[J].绿色科技,2024,26(04):27-33.
- [5] 夏小童.“林光互补”:库布其沙漠治理的探索[J].四川环境,2022,41(01):175-179.