

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2025 年 12 月 第 34 期 (总第 623 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 墾 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgslzz@163.com

网址：<http://www.khbl.net>

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：昆明滇印彩印有限责任公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2025 年 12 月 5 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

目录

科技博览

- 001 光伏逆变器 SIIPWM 变步长控制技术及应用 袁芳革, 袁百成
004 无人机结构设计中轻量化材料的运用对策研究 袁欣宇, 陈晓红, 田皓
007 超临界汽轮机末级叶片颤振特性实验分析与控制策略 冯庭有, 李宏瑾, 郑创伟, 陈余
010 基于流场分析的化工过程装备高效混合器结构优化设计 张嘉渝
013 基于分时段车流量特征的交通信号灯智能协同优化研究 田飞, 王锦升
016 面向 5G 通信的高速电光调制器驱动电路设计与噪声抑制方法 崔朗

智能科技

- 019 智能配电系统的运行特性与优化控制研究 黄茂林
022 PLC 技术在电气工程及自动化控制中的应用 邱毅
025 PLC 技术在电气自动化控制系统中的应用分析 高信
028 GPS 定位系统在大比例尺地形图测量中的应用 包宇峰
031 风力发电自动化控制系统中智能化技术的应用 袁宋玉
034 电力工程输配电与用电工程自动化运行技术研究 赵军
037 工程测绘大数据背景下智能数据分析模型的构建与应用 赵飞, 吴旭涛

目录 contents

应用技术

- 040 发电厂单元机组集控运行危险点预控分析 纪金廷
043 电力线路施工作业危险分析与控制技术应用 程厚军
046 水电站导流洞爆破开挖及支护技术应用 王小军
049 水利工程中堤防护岸施工技术要点分析 姚德山, 刘宪纲
052 水利工程隧洞喷锚支护及衬砌加固施工技术 李云龙, 刘清朴
055 机场接地系统铜扁带折弯施工技术应用研究 完颜晖
058 港口工程建设中软土地基处理技术优化与应用研究 梁涛
061 微动勘探技术在岩土工程精细化勘察中的应用研究 王恒中, 敖标, 郑海波, 张诗林, 朱传跃

科创产业

- 064 电气工程中电机与电气控制技术运用分析 周天琪
067 电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用 张文秀
070 电力系统与光伏发电的协同优化控制策略研究 罗娜
073 光伏电站智能运维平台的开发与工程应用验证 林颖若, 倪孟岩, 梅洪灯, 段慧敏
076 基于智能电网调度控制系统的新能源优化调度措施分析 杨永明
079 直流特高压系统中滤波器谐波抑制能力的参数优化分析 廖逸驹
082 光敏固化复合材料在风电叶片表面损伤快速修复中的应用 王玉红

技术管理

- 085 水利工程施工现场管理技术要点分析 付靓, 周杰
088 环保型沥青材料在路面养护施工中的应用 宋秋禾
091 城镇污水管网非开挖修复工程计价依据适用性探讨 吕文杰, 邹小华
094 高层建筑桩基础设计和施工阶段的结构安全问题探析 尹宏志, 胡五兵
097 水利水电工程中混凝土防渗墙施工技术的应用管理探讨 翟伟
100 住宅小区高压供配电设计与开发节点的协同管理策略与实践 鲁斌
103 智能化监测技术在工业气体项目全流程安全管理中的实践探讨 徐飞

科学论坛

- 106 配电线路运行检修技术及防雷对策优化 赵兴超, 国祯
109 输配电及用电工程线路安全运行技术研究 张宝才, 于哲
112 输电线路复合绝缘子污秽发热影响因素及对策 李海荣
115 配电网中性点接地方式对线路故障特性的影响及选择 马超, 张建红, 白群波
118 新能源并网条件下的电气系统稳定性分析与优化研究 张立恒
121 分布式电源接入下配电网电压波动优化控制策略研究 王在明, 张小龙
124 新能源电站总图中检修通道与应急疏散路径协同规划研究 蔡君嘉良

光伏逆变器 SIIPWM 变步长控制技术及应用

袁芳革¹, 袁百成²

(1. 中山职业技术学院, 广东 中山 528400;
2. 安美特(中国)化学有限公司, 广东 广州 511356)

摘要 正弦波脉宽调制(SPWM)逆变控制技术由于其实现方式简便且成本可控, 已被广泛采纳。实现SPWM技术的主要方法包括三角波比较法和基于等效积分值的查表法。本文简要介绍了这两种不同的调制技术, 并在继承其传统优势的基础上, 针对不足之处进行改进: 一种基于区间积分计算的变步长采样技术——正弦区间积分脉宽调制(Sinusoidal interval integral Pulse-Width-Modulation, SIIPWM), 该技术通过相位变化来调整采样步长, 以改善输出正弦电流的总谐波失真。采用SIIPWM技术控制的光伏逆变器的总谐波失真可低至0.25%。

关键词 积分表采样; SPWM 采样; 电网污染

基金项目: 广东省教育科学研究课题“1+X背景下高职教育‘课证融通’瓶颈突破策略探索研究”(课题编号: 2022GXJK627)。

中图分类号: TM4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.001

0 引言

光伏是不稳定的直流电源, 若要用到家用电器上, 就必须要转换成与国家电网完全兼容的交流电。实现这个功能的装置叫逆变器(早期也叫变流器)。好的变流器输出“优质电”, 优质电的典型特征就是总谐波失真(THD)极低, 输出稳定, 正弦度完美, 不干扰其他用电器。

随着光伏发电技术的普及, 逆变器走进千家万户, 其性能、应用场景以及制造工艺越来越受大众的重视。

1 逆变器历史

在变流器的早期研究中, PWM信号采用了正弦脉冲宽度调制(Sinusoidal Pulse-Width-Modulation, SPWM), 主要依靠硬件来实现。方法是对控制环路生成的调制波Vs与三角载波Vtri进行比较^[1]。这个原理决定了调制度最高为1, 母线电压利用率约为86.6%, 总THD大于20%。

从1990年代后期开始, 随着DSP处理器的普及, 数字化的单相逆变器电源在传统方法基础上引入了分数阶正弦脉冲的概念, 通过优化脉冲间隙分布, 能使总谐波失真率降低2%~3%^[2]。

目前研究热点主要集中在谐波抑制方面, 谐波抑制效率的提升同时也意味着整体逆变效率的提升。一种利用边缘计算技术对风电集群的超高次谐波进行协同控制^[3]的数字化变流器, 实测数据显示该方法可使系统效率提升约5.7%。

在并网逆变器领域, 采用零电压矢量插入策略, 将有效开关次数减少30%, 并使开关损耗控制在额定功率的5%以内。

随着时间的积累, 近年来研究者提出多种改进方案。例如: 通过重新设计载波比参数, 将调制波分解为多段线性函数, 使得每个开关周期内的脉冲分布更接近理想正弦特性^[4]。

这些文献的研究结果, 足以说明算法层面的优化比单纯提升硬件性能更具经济性, 尤其是在需要兼顾效率与成本的工业场景中。

不过现有研究也暴露出部分局限性, 例如: 当载波频率超过10kHz时, 开关器件的损耗会急剧增加^[5], 这也为后续改进方法的提出指明了方向。

将优化的算法提前做成数据控制表, 控制器基于表的数据直接输出, 可以降低对控制器的性能要求, 同时也为构建智能化电力转换系统开辟了新路径。

2 传统的SPWM技术

2.1 模拟比较

SPWM调制技术核心是通过比较三角载波与正弦调制波的相交点确定开关器件的导通与关断时刻。三角波的频率通常远高于正弦波, 二者的交点会形成宽度按正弦规律变化的脉冲序列, 经过低通滤波器后即可还原出正弦波形。

比较法产生的输出脉宽为:

$$T_{on} = \frac{T_c U_s \sin(\omega \cdot t)}{U_c} \quad (1)$$

式(1)中, U_s 为正弦调制波幅值, U_c 为三角载波锯齿波幅值, T_c 是三角载波周期, t 是采样位置。

这个方法生成的经典SPWM脉冲序列, U_s 与 U_c 的比就是调制度。

这个方法需要采用硬件电路分别生成正弦调制波和三角载波, 然后通过比较器比较得到SPWM。由于成本和电路器件本身的极限, 正弦调制波的完整度有限, 三角波的周期和幅值都有无法消除的抖动, 所以最终变换出来的交流电有20%以上的失真。

2.2 数字计数

利用STM32的TIM定时计数比较器实现SPWM序列输出的方法如下。

2.2.1 初始化TIM寄存器

1. 脉冲计数寄存器: CNT(记录时钟 T_c 脉冲数)。
2. 比较寄存器: CCR(决定输出脉冲宽度 T_{on} , 这个脉冲起始位置有左对齐、右对齐、中央对齐三种模式)。
3. 自动重装寄存器: ARR(与CNT时钟共同决定了输出脉冲的周期即 $T_c = T_{on} \times ARR$)。
4. 配置TIM: 时基 T_c (计数寄存器CNT改变一次计数的时间); 重置基数ARR(CNT记录的最大脉冲数, 一般能在数据手册找到计算ARR的公式); CCR就是 $\sin(\omega \cdot t)$ 的值(实时计算因为涉及较多运算量, 所以利用查表, 用空间换时间, 可以提高效率)。

2.2.2 通过TIM输出PWM的方法(中央对齐模式)

第一步: 设置CCR(从正弦调制波采样时刻表中读取); 第二步: 启动计数, CNT从0开始加1。当 $CNT < CCR$ 时 PWM输出为低电平; 当 $CNT > CCR$ 时 PWM输出为高电平; 第三步: 当 CNT 的值等于 ARR之后, CNT开始减1, 同样当 $CNT < CCR$ 时 PWM输出低电平, 当 $CNT > CCR$ 时 PWM输出高电平; 第四步: 当 CNT 减到0时, 重新回到第一步开始执行。

根据这个PWM产生模式, 可以推出:

$$T_{on} = \frac{ARR - CCR}{ARR} \quad (2)$$

结合前文公式(1), 可以得到:

$$CCR = ARR(1 - \frac{T_c U_s \sin(\omega \cdot t_n)}{U_c}) \quad (3)$$

所以需要做的三件事:

1. 确定调制比k, 也就是 $\frac{U_s}{U_c}$ 的值。
2. 确定采样数m也就是 $\frac{T_c}{T_c}$ 的值, 从而推出规范化的 t_n 值: $\{t_n\}_{n=1}^m$, 其中 $t_n = T_c \times n$ 。
3. 根据 t_n 值和式(3)生成采样时刻表, 然后通过查表得到CCR的值, 利用PWM的事件去触发中断, 更新下一次CCR的值。

这个方法利用单片机的强大功能, 直接虚拟生成正弦调制波、三角载波, 最后通过比较器和PWM控制器输出SPWM, 简化了电路规模, 大幅减小幅值和时钟误差, 是目前最流行的获得SPWM控制脉冲的方法。

这个方法是对模拟法的数字化, 原理上并没有突破, 所以最终变换出来的交流电依然有10%以上的失真^[6]。

3 积分查表法

积分查表法是直接利用等面积原理来实现SPWM序列: 将0~180度50Hz的正弦载波所围成的面积平均划分为10段, 即m=10, 则各段的面积是:

$$S_n = \int_{\frac{(n-1)\pi}{m}}^{\frac{n\pi}{m}} k \sin(\omega t) dt = k (\cos(n-1)\theta - \cos n\theta) \Big|_{n=1}^m \quad (4)$$

其中 $\theta = \frac{\pi}{m}, 0 < k \leq 3.2$

依据公式(4), 可计算出正弦波不同区间的面积与SPWM序列脉冲占空比之间的对应关系, 并将结果存储为离线表格。以S1为例, 其面积计算为: 0度余弦值“1”与18度余弦值“0.951”之差“0.049”, 此差值代表第一个PWM脉冲的占空比为0.049, 依此类推, 第二个PWM脉冲的占空比为“0.142”, 第三个为“0.221”, 第四个为“0.279”, 第五个为“0.309”, 后续五个脉冲的占空比依次为“0.309”“0.279”“0.221”“0.142”“0.049”。为了实现调制比等于“1”的效果, k值可设定为“3.2”, 从而使得10个脉冲的占空比依次为“0.157”“0.454”“0.707”“0.893”“0.989”“0.989”“0.893”“0.707”“0.454”“0.157”, 用以提高母线电压的利用率。

控制器通过查阅该离线表格即可完成SPWM脉宽的计算, 这降低了控制器的性能要求, 节约了计算资源, 并增强了实时响应能力。基于此离线表输出的20段双极SPWM脉冲控制的逆变器, 在负载阻抗为4欧姆, 输出滤波电感为5毫亨的条件下, 其输出总谐波失真(THD)大约为8%。

4 变步长SIIPWM技术

鉴于列表能够在离线状态下预先设计, 因此其不受硬件限制, 采样步长可以自由设定, 在关键位置插入控制脉冲, 从而实现采样频率根据正弦波相位的变化而相应调整。此项技术, 称之为“积分区间步长可变的脉冲控制技术”(Sinusoidal interval integral Pulse-Width-Modulation, SIIPWM, 简称“变步长SIIPWM技术”)。这个技术的灵活性使得它在处理复杂波形时具有独特的优势, 能够根据波形的具体特征动态调整采样频率, 从而更精确地捕捉波形的细节。

通常情况下, 单相逆变器采用桥式驱动输出方式: 两个下臂由一路频率为50Hz、占空比为50%的方波信号控制, 以实现极性转换; 而两个上臂则由两路SPWM

信号控制，以实现正弦波的模拟，输出端串联一只 5 毫亨（50 Hz）的输出电感。这种设计方式能够有效地将直流电转换为交流电，同时通过 SPWM 信号的精细控制，使得输出的交流电波形更加接近理想的正弦波形。

当 SPWM 采用前文所述的公式 4 生成的数据时，输出会出现极为明显的交越失真现象，即交流电在 0 电压（或电流）处正负极性翻转时产生严重的失真。这种失真现象会严重影响逆变器的性能，降低输出电能的质量。

为解决此问题，笔者将 S1 和 S10 各自的 1 毫秒时间间隔（采样步长）进一步细分为五个阶段：从 0 到 50 微秒，50 微秒到 150 微秒，150 微秒到 300 微秒，300 微秒到 600 微秒，以及 600 微秒到 1 毫秒，9 毫秒到 9 400 微秒，9 400 微秒到 9 700 微秒，9 700 微秒到 9 850 微秒，9 850 微秒到 9 950 微秒，9 950 微秒到 10 毫秒。这种细分采样步长的方法能够更精确地控制输出波形，从而有效减少交越失真。

此处步长初始为 50 微秒，随后依次变为 100 微秒，150 微秒，300 微秒，400 微秒……1 毫秒，到 9 毫秒之后步长又调整为 400 微秒，300 微秒，150 微秒，100 微秒，最终回到 50 微秒。这种动态调整采样步长的策略，能够根据波形的变化灵活调整采样频率，从而更有效地控制输出波形。

除此以外，PWM 脉冲还可以随相位的改变采用不同的策略。如前文所述，PWM 脉冲有左对齐、右对齐、中央对齐三种模式，任何一种单一模式都会在交越处产生相位失真。要消除这个交越失真，最好的办法就是在 0 到 90（180 到 270）度采用右对齐的 PWM 脉冲，90 到 180（270 到 360）度采用左对齐的 PWM 脉冲。具体来说，这里 0 度相位开始第一个 PWM 的步长是 50 微秒，占空比是 1.97%，低电平一共 49.98 微秒，高电平一共 0.02 微秒，左对齐就是 0 到 49.98 微秒时是低电平，49.98 微秒到 50 微秒是高电平，到了 90 度相位就改成右对齐，这里的步长是 1 毫秒，占空比是 98.9%，低电平一共 11 微秒，高电平一共 989 微秒，右对齐就是 0 到 989 微秒时是高电平，989 微秒到 1 毫秒是高电平，到了 180 度后面又改成左对齐。

这种可变步长的实现几乎无法通过硬件电路来完成，但使用列表则显得异常简便。通过软件编程实现可变步长控制，不仅提高了系统的灵活性，还降低了硬件设计的复杂性。

采用变步长的 SPWM 信号控制变流器桥臂的输出，对改善交越失真的效果极为显著。从实际测试结果来看，经过改进的调制技术能有效降低谐波畸变率（THD）至 0.25%，使得逆变输出完全满足电网标准。这表明，

通过软件控制采样步长，可以显著提高逆变器的性能。

值得注意的是，目前市场上流行的逆变器输出滤波电感普遍为 5 毫亨。对于 50 Hz 的低频信号而言，5 毫亨电感的尺寸通常超过 0.3 米（长）、0.3 米（宽）、0.3 米（高），重量超过 300 克，无论是体积还是重量，均占整个逆变器的 60% 以上。这种大尺寸和重量的电感不仅增加了逆变器的体积和重量，也提高了制造成本。

由于可变步长采样增加了采样次数，相当于提高了开关频率，从而可以减小输出滤波器的电感。经过试验测试，在保持失真和功率平衡的前提下，输出电感可减小至 500 微亨，仅为传统逆变器输出电感的十分之一。同时，该方法对其他硬件的要求并未增加。这表明，通过软件控制采样步长，不仅可以提高逆变器的性能，还可以降低硬件成本，具有明显的经济效益。

5 结束语

逆变器的制作是一种控制的艺术，尽管使用的是相同的电子元件，但通过改进控制算法，能够实现更为高质量的逆变输出。一个设计精良的算法，可以在不增加任何硬件设施的情况下，使设备的性能得到显著提升，同时使用起来也更加方便。未来，研究工作应深入挖掘算法与新型半导体器件之间的协同效应，并在动态工作环境下的适应性改进方面进行探索，旨在进一步提升能量转换的效率。随着技术的不断进步，逆变器的控制算法将更加智能和高效，这将为逆变器的性能提升和应用范围的扩大提供无限可能。通过算法的不断改进，可以使得逆变器在各种复杂工况下都能保持高效的能量转换，同时降低对硬件的依赖，实现更加智能化和自动化的操作。

参考文献：

- [1] 王世雨, 李绍令, 郑征, 等. 并网逆变器超高次谐波产生与传播机理分析 [J]. 电力工程技术, 2023, 42(05):80-89.
- [2] 宋洪博, 李辉, 向学位, 等. 基于单相零脉冲插入的永磁同步电机过调制区域相电流重构策略 [J]. 电机与控制学报, 2025, 29(03):29-38.
- [3] 胡春龙. 改进型 SPWM 调制下的整流器参数设计与仿真研究 [J]. 测试技术学报, 2023, 37(04):310-315.
- [4] 同 [3].
- [5] 李天楚, 容斌, 伍智鹏, 等. 基于边缘计算的风电群非故意发射超高次谐波抑制策略 [J]. 中国电力, 2023, 56(08):200-206.
- [6] 杨嘉伟, 易杨, 姜浩, 等. 基于随机载波脉冲宽度调制的变换器群超高次谐波抑制机理 [J]. 中国电力, 2023, 56(11):160-167.

无人机结构设计中轻量化材料的运用对策研究

袁欣宇，陈晓红，田皓

(辽宁科技大学，辽宁 鞍山 114044)

摘要 无人机结构设计中应用轻量化材料可更好地提升无人机的续航能力、荷载水平和机动性能，为无人机应用场景的拓展、应用效果的提升奠定良好的基础和保障。通过运用复合材料、轻质合金、工程塑料、新型纳米材料等轻量化材料能减轻无人机自重。在此基础上，可根据结构特性进行材料选择，并根据材料特性对结构设计、加工工艺进行优化，配合材料的协同利用可保障无人机结构设计的科学性、适配性和有效性，为无人机结构设计的轻量化升级提供技术支撑和材料支持。

关键词 无人机结构设计；轻量化材料；消费级无人机

中图分类号：TP242

文献标志码：A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.002

0 引言

为提升无人机性能，满足航拍测绘、农业植保、物流运输、应急救援等相应领域的应用需求，很多无人机生产单位都在不断创新无人机设计。材料作为无人机的物质基础，对材料的选择和应用成为无人机设计创新的重点。轻量化材料在无人机结构设计中的应用有助于提升无人机的续航能力、有效荷载、飞行速度、机动灵活性，可根据无人机的应用场景、产品定位进行轻量化材料选择和应用。

1 无人机结构设计中轻量化材料的运用原则

在无人机结构设计中轻量化材料的运用应坚持性能适配原则、成本可控原则和工艺兼容原则。

性能适配原则是指在材料选择的过程中应根据无人机结构的受力特点，分析材料的抗拉强度、抗压强度、弹性模量等相应力学性能，判断轻量化材料应用能否满足无人机飞行过程中的振动荷载、冲击荷载和气动荷载需求。同时，无人机作为精密度较高的低空飞行设备，其组成结构复杂，涉及多种构件的制作，应根据不同无人机的性能要求以及无人机不同组件的性能要求做好材料选择，避免结构失效问题。除此之外，在性能适配分析中还应根据无人机的场景应用特质进行材料选择，明确不同使用场景下对无人机材料提出的特异性性能要求。如近海区域飞行实验则需要考量空气潮湿度高的环境特点，在轻量化材料选择上平衡材料自重及耐腐蚀性。同理，还需考虑飞行区域的气温、紫外线强度等环境特质，以性能适配环境为材料选择标准，做出差异化材料调整。

成本可控原则是指在轻量化材料选择的过程中除

了需要分析其性能、质量能否满足要求以外，还需从采购成本、加工成本、维护成本等多个维度进行分析，避免成本过高影响无人机的市场竞争力。无人机生产企业作为市场主体，关注经济效益无可厚非。故此，在材料原则上必须结合结构设计图纸分析整体成本及利润空间，根据材料使用后企业能够获得的经济效益及企业的项目盈利目标确定成本上限。将材料使用成本考量在内才可以保障商品进入市场后的经济效益，为相关企业的可持续发展打下坚实基础^[1]。

工艺兼容原则是指在轻量化材料选择中必须充分考量现有的加工工艺，分析两者能否兼容，能否利用现有加工工艺精准、高效地完成结构制造，设计人员在轻量化材料选择及结构设计中必须充分考量材料的加工难度，分析能否实现批量化生产制造，批量制造的制造精度是否可以得到保障，结构间能否得到有效衔接，衔接难度、衔接成本如何。甚至还应分析后续无人机维修保养上的工艺难度和所付出的成本，保障结构设计的可行性。

2 轻量化材料提升消费级无人机性能的核心路径

2.1 减重降耗，延长续航

保障无人机的续航能力是十分重要的。目前，便携性差、续航短仍是消费级无人机面临的主要难点问题，这是因为传统无人机都是纯铝合金结构，自重达到了1.5 kg以上，其续航时间往往不达半小时，在携带上还需要使用专用收纳箱，便利性不足。为此，可通过轻量化材料的应用来解决这些痛点问题，如可通过碳纤维复合材料对机身框架做出调整，这可以将机身的自重降至0.8~1 kg。在此基础之上，通过气动

结构的优化延长无人机的续航能力，满足用户的长时间、多场景拍摄需求。此外，针对现阶段无人机便捷性不足的问题可通过碳纤维骨架加工程塑料打造折叠式无人机，这样无人机的外出携带就不需要专用收纳箱，可以大幅提高其便捷性^[2]。

2.2 强化承载，提升荷载能力

消费级无人机想要拥有更广泛的受众就必须不断提高荷载能力，进而达到功能场景拓展的目标。例如：高清航拍时无人机需搭载重量约 150~200 克的相机，这时很有可能会因无人机机身承载力不足影响操控精度和飞行稳定性，无法实现应用场景的拓展，可通过轻量化材料应用发挥其高强度、低自重的优势，提高无人机的荷载能力。例如：可通过碳纤维增强复合材料配合蜂窝夹层结构，提高无人机的比强度，并在保证自重不变，甚至有所降低的基础之上提高无人机荷载能力，让无人机可以搭载高像素相机或小型传感器。在此基础之上可通过铝合金锻造件对无人机机臂和机身连接部位进行调整，提高其抗拉强度，这样在无人机承载相机时可以有效避免振动荷载导致部件断裂的问题，保障设备的可靠性^[3]。

2.3 环境适配，增强耐候性

环境因素也很有可能会影响无人机的受众范围。消费级无人机的使用场景并不固定，很有可能会面临高温、潮湿、紫外线照射等相应环境问题，这时材料的耐候性提升则显得十分重要，这会直接影响无人机的使用寿命，可通过轻量化材料改性或复合设计来提高无人机的环境适应性。例如：在无人机外壳设计中可通过纳米改性 ABS 工程塑料的应用配合紫外线吸收剂和抗氧剂提高无人机的耐紫外线老化能力。又如：可通过玻璃纤维复合材料配合氟碳涂层来对无人机的机身蒙皮做出调整，使无人机可以满足沿海地带高盐雾的长时间使用需求，避免金属锈蚀风险。

3 无人机结构设计中轻量化材料的应用对策

3.1 基于结构受力特性选择材料

无人机结构相对复杂，不同结构部件的受力特点存在较大差异。在这样的背景下想要保证轻量化材料的应用效果，就必须明确不同部件的受力类型和受力大小，在此基础之上对轻量化材料做出适当选择，达到“材尽其用”的效果^[4]。例如：无人机核心承力部件在材料选择过程中必须充分考量材料的比强度和比刚度，优先选择碳纤维增强复合材料，确保在无人机飞行过程中核心承力部件能够承受气动荷载和弯曲荷载，并有效降低无人机的重量。对于需要承受冲击荷

载的部件，如起落架、机身防护板等，则可选择抗冲击性相对较强的芳纶纤维增强复合材料，或通过高强铝合金的应用保障无人机结构的抗坠毁能力。非核心承力部件则可优先选择成本较低、加工难度较小的玻璃纤维增强复合材料或工程塑料。而发动机部件、高温区域结构件等特殊部件则需要引入钛合金或纳米陶瓷材料，保障无人机结构整体的可靠性和稳定性。

3.2 结合材料特性对结构设计做出优化

在无人机结构设计优化及调整的过程中还需要根据不同材料的特性对结构设计做出适当调整，最大化发挥材料的性能优势，做好无人机重量与性能的平衡，得出最优解。例如：若选用碳纤维增强复合材料，设计人员需根据材料的力学性能定向设计结构，使结构的受力方向与材料的强度方向一致，进而保障结构的整体承载能力。再例如：为更好减轻无人机结构重量、降低制作成本，可通过空心结构、蜂窝结构、夹层结构等轻量化结构形式的有效应用配合碳纤维增强复合材料做出设计调整，根据无人机不同部位的使用特点和应用需求具体问题具体分析，科学选择结构设计方案，如在尾翼设计中应用蜂窝夹层结构，在保证尾翼刚度的同时减轻结构重量^[5]。

在根据材料特性进行材料选择并优化无人机结构设计以后，还可以根据不同材料的材料特性对其加工成型工艺做出调整。目的在于为零部件的批量化生产及生产精度提升打下坚实基础。一方面，出于产品质量考量，有助于提高无人机的综合性能。另一方面，也是出于企业发展需求考量可以避免材料浪费、成本浪费，并通过提高材料应用效率、质量保障无人机整体性能，树立企业的市场竞争优势^[6]。

3.3 多材料协同运用与性能平衡

在无人机结构设计中不同组件的性能要求存在鲜明差异。即便现阶段可供选用的主流轻量化材料较多，但不同材料仍存在其固有局限性。例如：碳纤维增强复合材料加工难度和材料成本较高、抗冲击性能较低，工程塑料虽然成本较低但容易出现老化变形问题，尺寸稳定性和力学性能无法得到保障等。因此，单一材料往往无法满足复杂的无人机制作需求。这时则需要通过多材料搭配，发挥不同材料优势对结构构件进行设计，然后通过特定的连接手法提升无人机综合性能。

“金属材料+工程塑料”协同设计也是较好的选择，可在承受较大荷载的部位使用金属材料，在非承力部位采用工程塑料，保障结构的轻量化效果。例如在起落架设计中主体可采用高强度合金，而起落架护罩则

可采用PC塑料，既保障承载能力，又降低结构重量。最后，在无人机结构设计中还可引入“复合材料+纳米材料”的复合方案，在复合材料中添加纳米粒子，提升复合材料的力学性能和功能特性，达到结构轻量化的目标。例如：可在碳纤维增强复合材料中添加石墨烯纳米粒子，提高复合材料的强度、降低其重量，提升无人机结构的整体性能。

需要注意的是，在多材料协同运用的过程中应充分考量不同材料之间的兼容性，并对连接方式作出适当调整和优化，通过焊接、铆接、胶接等连接方式的灵活运用避免连接失效问题。例如：在碳纤维增强复合材料和铝合金连接的过程中可采用胶接和铆接的结合方式保障连接强度，避免两种材料之间出现电化学腐蚀等问题^[7]。

4 轻量化材料对消费级无人机产业的推动作用

轻量化材料对于消费级无人机产业的发展会起到至关重要的影响。

首先，轻量化材料的应用可大幅降低消费级无人机的生产成本，这意味着相关企业的利润空间得以拓宽。企业既可以选择树立价格优势，提升自己的市场竞争力，发现下沉市场，让无人机走进千家万户。也可以将节省下来的制造成本应用于技术创新和产品研发当中，开发出更多功能性更强的无人机，为企业的可持续发展、市场竞争力提升提供更多的助力。

其次，轻量化材料的应用可更好地拓宽无人机的应用场景，轻量化材料可以在减轻无人机重量的同时最大程度地提高无人机的性能，使无人机从航拍工具向多用途设备转型，满足不同场景的应用需求。例如：轻量化材料应用以后无人机的荷载能力得以明显提升，可通过铝合金机架加工程塑料药箱满足农业药物喷洒需求，大幅降低农业植保成本。轻量化材料应用后无人机不仅可以应用于航拍植保等相关领域，消费级无人机还可以进入电力巡检领域，可通过轻量化镁合金机架的应用将无人机的重量降至1.2 kg，提高其续航时间达到40分钟，配合红外热成像仪完成高压线路的温度检测。相较于传统的人工检测无人机检测的效率至少提升5倍以上且因电力巡检过程中高压线路可能会经过山区路段，巡检难度较高，而无人机检测则可以较好地填补人员难以抵达的线路巡检盲区，拓展消费级无人机在工业应用的边界。

最后，轻量化材料在无人机结构设计中应用可以推动产业下沉，带动产业链发展。轻量化材料的应用推动了消费级无人机向低成本、易量产的方向发展。

在上游端，国内复合材料厂商可根据消费级无人机轻量化需求推出量产低成本碳纤维布，通过量化生产来降低材料成本。而在下游端，无人机维修服务企业可根据轻量化材料使用后的无人机结构特质推出专用维修工艺，例如碳纤维部件的粘接修复技术，既完善了产业链的服务环节，也为整个产业链的成熟发展打下坚实基础。这不仅可以让无人机企业受益，同时无人机的上下游产业也会因此得到发展，进而推动产业链的整体发展。由此可见，轻量化材料对于消费级无人机产业的发展所起到的作用和影响是相对较大的，应结合实际情况具体问题具体分析，对其应用策略方法做出针对性调整，提高应用成效。

5 结束语

在无人机结构设计中轻量化材料的应用可更好地保障无人机的续航能力和整体性能，需引起重视，合理应用复合材料、轻质合金、工程塑料、新型纳米材料等相应轻量化材料。在此基础上，应结合结构受力特性对材料做出精准选择，再根据不同材料的特性对无人机结构设计作出适当调整，并优化加工工艺，还可通过多材料协同运用与性能平衡的方式确保无人机结构设计的整体质量。

参考文献：

- [1] 张学铭,曹韦俊,张晓木,等.某无人机大展弦比薄复材机翼结构设计[J].机械制造与自动化,2025,54(05):240-244.
- [2] 潘兴超,孟泉,张晓光,等.“X”型四旋翼重载应急救援无人机结构设计[J].机械研究与应用,2025,38(04):35-38.
- [3] 陈新辉.搭载多自由度机械臂的四旋翼无人机结构设计[J].模具制造,2025,25(07):210-213.
- [4] 付梓轩,余洪伟,吕昊,等.低空经济驱动下物流无人机结构设计与气动仿真探索[J].中国设备工程,2025(13):8-11.
- [5] 李金芳.水陆空三栖无人机结构设计与功能实现[D].北京:北京化工大学,2025.
- [6] 段成程.跨介质无人机结构设计与动力学性能数值分析[D].重庆:重庆交通大学,2025.
- [7] 赵英辉,张靠民,夏海廷,等.垂起固定翼无人机复合材料机翼:电池一体化结构设计[J/OL].航空工程进展,1-10[2025-11-06].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=hQtzIo_70oH5miuiZAqnQPoHl8Me9UuVtMeX1UlwwiFkXl57LFUfhBssrR62BQ_bU8dgR76eIdc1-qVs12Kt_hwDKcW2QiZ5QjzAucyewrxoWlG1rxhyknV78vEnOxlxFeJrtd-R3RHSlL_F3aiH2N8eF4k93MLhGIQz6o4s2iruwuWQV9Q==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

超临界汽轮机末级叶片颤振特性 实验分析与控制策略

冯庭有, 李宏瑾, 郑创伟, 陈余

(华能汕头海门发电有限责任公司, 广东 汕头 515000)

摘要 超临界汽轮机作为高效火电装备, 其末级叶片在高参数、变负荷工况下易诱发颤振, 造成疲劳损伤与效率衰减。本文揭示颤振发生机制, 并提出实用控制路径, 旨在对保障机组长周期稳定运行有所裨益。采用风洞实验与有限元耦合方法, 构建 1:5 缩比叶片模型, 在 2 000 ~ 4 000 r/min 转速及 0.5 ~ 1.5 流量系数下测试响应特性; 辅助 ANSYS 模态分析, 量化气动阻尼与振型分布。结果表明, 颤振临界转速 3 200 r/min 时阻尼降至 -0.12, 振幅峰值 0.8 mm, 低流量区风险增 30%; 第一阶弯曲模态与 5X 谐波重合为主导因素。优化围带结构与背压调控可抑振幅 40% 以上, 叶片寿命延 20%。该策略适用于深度调峰场景, 可为工程振动管理提供参考。

关键词 超临界汽轮机; 末级叶片; 颤振特性

基金项目: 华能集团科技项目“汽轮机末级叶片主动安全监视系统研究及应用”(项目编号: HNKJ23-H36)。

中图分类号: TM31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.003

0 引言

超临界汽轮机因为具有热效率超过 45%、煤耗比低 10% 的优势, 已经成为我国火电的主力, 装机容量超过 7 亿千瓦^[1]。但是随着双碳目标的提出, 机组深度调峰的次数越来越多, 低负荷下末级叶片的颤振问题也越来越明显。该现象属于气动弹性自激振动, 容易造成叶片根部出现疲劳裂纹, 严重时还会发生叶片断裂而引发停机, 造成的经济损失巨大, 超过千万。早期的西屋电气 NEDO 项目报道中提到负气动阻尼是诱因。哈尔滨工业大学等高校科研机构用数值模拟剖析了机制, 但是缺少实验证, 控制策略多为经验调整。

现有研究大多依靠有限元或者 CFD 分析颤振, 虽然准确表现了流固耦合, 但是计算量大, 不适合实时监测。赵文胜等人用影响系数法评价深度调峰颤振, 得出低流量下阻尼衰减明显的结论^[2]; 王琦用谐波平衡法计算气动阻尼, 量化相位角的影响^[3]。但是这些方法对于多模态耦合以及实验校核还存在不足。刘万琨认为末级叶片整圈自锁结构会放大涡脱落效应, 要结合风洞试验来优化设计^[4]。肖琴对近零出力场景进行分析, 认为背压波动会引起涡激励增幅达 25%^[5], 但是缺少量化控制途径。朱秋良等近期的研究集中在工程热物理上, 验证了模态重合阈值^[6], 但是没有涉及结构改型。本文以某 660 MW 超临界机组的叶片为原型进行研究, 结合实验和模拟, 对颤振特性进行系统分析,

提出结构、运行一体化的控制框架, 为振动抑制提供理论和实践指导。

1 超临界汽轮机末级叶片颤振机理

超临界汽轮机低压缸末级叶片长逾 1.2 m, 直径超 1 200 mm, 采用 17-4PH 不锈钢 (0Cr17Ni4Cu4Nb), 屈服强度 > 1 000 MPa。其整圈自锁扭叶设计回收焓降, 却引入复杂模态耦合。蒸汽参数超 25 MPa、600 °C, 脉动放大叶尖变形。材料疲劳极限高, 但颤振下循环应力超 10⁶ 次, 易根裂^[7]。

1.1 叶片结构特征

叶片由叶身、根部及围带构成, 围带联结相邻叶片, 抑制扭转。叶身扭角渐变, 优化气动载荷; 根部 T 型榫, 传转矩 > 500 kNm。围带宽 5 080 mm, 刚度系数 $k = \frac{EI}{L^3} \approx 10^8$ N/m, 其中 E 为模量, I 截面惯矩, L 围带长。实际运行, 叶片间隙 0.51 mm, 制造偏差 < 0.2 mm, 却在高转下放大不稳。低压缸排汽区, 蒸汽密度 $\rho \approx 0.05$ kg/m³, Mach 数 Ma < 0.3, 确保亚音速流。

1.2 颤振发生机制

颤振源于气动—结构—惯性耦合, 自激特性使振幅指数增长。核心为气动阻尼 Δ , 当 $\Delta < 0$, 能量输入超耗散。数学表述为:

$$\Delta = \frac{\int [p(\theta) \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t}] dS}{\rho U^2 L} \quad (1)$$

式(1)中, $p(\theta)$ 为压力分布, η 为位移, ρ 、 U 、 L 分别为密度、流速、弦长。低负荷时背压升15 kPa, 密度增, 涡脱落诱负 Δ 。推导源于能量平衡: 系统总能 $E=T+V+W_{aero}$, 其中 T 动能, V 势能, W_{aero} 气动功。若 $\frac{dE}{dt} > 0$, 则不稳。

影响因子包括: 工况变异, 叶间相位角 φ (-90° 时 Δ 最低); 制造偏差放大20%。第一阶弯曲模态 $\omega_1 \approx 150$ Hz, 与转速n的5X谐波($5n/60$)重合, 风险峰值。朱秋良等数值示, 近零出力下 Δ 降30%, 验证机制。进一步, 涡街频率 $f_v = SU/d$ (S斯特劳哈尔数 ≈ 0.2 , d 叶厚), 与 ω_1 耦合时, 激励峰值增15%。多模态下, 第二阶扭转 $\omega_2 \approx 250$ Hz, 偶发耦合, 需全谱扫描(见图1)。

围带作用关键, 其联结减相干振动, 但刚度不足时, 局部 Δ 降0.05。综合机理为负 Δ 驱动自激, 阈值 $\Delta_{crit} \approx -0.1$ 。

2 颤振特性实验分析

实验平台建于华北电力大学风洞实验室, 模拟 $Re=10^6$ 。环境控温25 °C, 湿度<50%, 风速 $U=50\sim100$ m/s。装置经校准, 重复性>95%。

2.1 实验装置与方案

缩比1:5钛合金模型, 长240 mm, 转速变频驱动 $20\ 004\ 000$ r/min, 流量 $\varphi = \frac{m}{\rho AU} = 0.5 \sim 1.5$ (m质量流, A 面积)。仪器有: 激光测振仪(Polytec OFV-5000, 精度0.01 mm, 分辨率1 μm); 压力传感器(Kulite XCP-062, 响应>500 Hz, 范围0~50 kPa); 高速相机(Phantom VEO 410, 10000 fps, 解析 512×512)。

数据采集NI DAQmx, 采样率10 kHz, 持续60 s/组。预处理项目, 滤波截止200 Hz, 窗函数Hanning。

测试矩阵: 转速梯度200 r/min, φ 步长0.1, 共150组; 相位角 φ 扫描 $-180^\circ \sim 0^\circ$, 步 10° 。颤振判据: $A > 0.5$ mm或 $\Delta < 0$ 。辅助有限元: ANSYS Workbench 2023, 网格 2×10^5 单元(四面体, 偏最小化), 周期边界。模态方程:

$$[K - \omega^2 M] \Phi = 0 \quad (2)$$

求解特征值 ω , 振型 Φ 。阻尼估算: 后加法 $\zeta = \Delta / (2\omega_1)$ 。边界为转子刚体, 流场 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

2.2 结果与讨论

转速3 200 r/min, $\omega_1 = 148$ Hz \approx 5X谐波(266 Hz), A 峰 0.8 mm $>$ 0.5 mm阈值, 持续衰减需 > 10 s。 $\varphi = 0.6$ 时起始提前15%, $\Delta = -0.12$, 谱峰宽20 Hz示非线性。低流量区, 背压模拟升10 kPa, 涡激励 $f_v \approx 160$ Hz, 耦合增幅30%。高转4 000 r/min, Δ 回正0.03, $A < 0.3$ mm, 趋于稳定状态。

表1展示相位角效应, 证实了 $\varphi = -90^\circ \sim -120^\circ$ 窗为高敏区。

模拟验证: ANSYS $\omega_1 = 145$ Hz, 误差3%; Δ 计算-0.11, 耦合。围带刚度k升20%(加肋), Δ 增0.1, A 降25%。讨论: 低压缸主因背压, 调峰时 ρ 增15%, Kutta条件破, 涡脱落强; 与文献5一致, 但本实验量化 φ 窗宽, 效果由于文献所示。制造偏差模拟: 间隙+0.1 mm, Δ 降8%, 故需精密加工以控偏差<0.05 mm。噪声影响: 风洞湍度 $Tu < 0.5\%$, 误差<2%。总体, 临界 $n=3\ 200$ r/min, 低 φ 高险, 模态重合主导颤振演化。

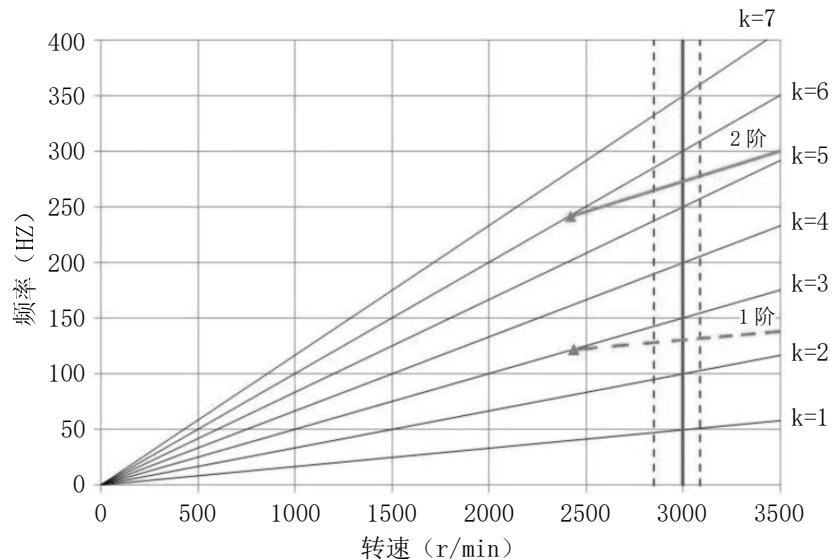


图1 末级叶片典型振型分布

进一步进行疲劳评估: S-N 曲线下, $A=0.8 \text{ mm}$, 循环 10⁵ 次, 寿命减 30%。多叶耦合: 相邻 φ 差 10°, 整体 Δ 均 -0.09, 放大效应显著, 实际中此效应可通过围带均匀性检验缓解, 工程中偏差控 < 0.05 mm, 方可保证 Δ 稳定。

表 1 相位角下气动阻尼与振幅

φ (°)	Δ	A (mm)	状态	涡激励 (Hz)
-30	0.05	0.2	稳定	120
-90	-0.08	0.6	临界	145
-120	-0.12	0.75	颤振初	152
-150	-0.15	1.0	颤振	158
-180	-0.05	0.4	衰减	140

3 颤振控制策略

融合被动改良, 主动控制, 目的 $\Delta > 0.05$, $A < 0.3 \text{ mm}$ 。采用策略通过 MATLAB Simulink 闭环仿, 稳态时间 < 2 s, 整体框架多层冗余, 经济性和响应速度并重。

3.1 被动措施: 结构改进

围带加斜槽 (45°, 深 5 mm), 分散应力, 模拟 Δ 提 25%, 成本增 5%。有限元: 槽后 I 增 15%, $k=1.2 \times 10^8 \text{ N/m}$ 。材料换 Inconel 718, $\sigma_y=1200 \text{ MPa}$, 疲劳 $\Delta\sigma=800 \text{ MPa}$ 升 15%, 寿命为 10 万 h。后缘锯齿 (波长 $\lambda=10 \text{ mm}$, 高 $h=2 \text{ mm}$), 减涡 S 降 10%, 风洞 A 降 40%, 噪声减 5 dB, 此设计源于生物仿生, 借鉴鱼鳍边缘, 实际加工需 CNC 精度 < 0.01 mm。

优化流程: 拓扑敏感度分析, 目标 $\min \Delta$, 约束质量 < 原 95%。结果使得叶尖加重块 $m=50 \text{ g}$, ω_1 移 160 Hz, 避免重合。

3.2 主动措施: 运行干预

1. 背压 PID: 设定 $P_{set}=12 \text{ kPa}$, $e(t)=P_{set}-P_{actual}$, $u(t)=K_p e+K_i \int edt+K_d \frac{de}{dt}$,

($K_p=2$, $K_i=0.5$, $K_d=0.1$) 负荷 < 30% 上升 2 kPa, 抑制低频振动。响应: 阶跃输入下, 超调 < 10%, 稳态时间 1 s。

2. AI 监测: 振动传感器阵列 (8 点 / 叶), LSTM 预测 $A > 0.4 \text{ mm}$, 阈值警报减速 5% (n 降 160 r/min): 算法: 输入频谱, 输出风险: $P=\text{sigmoid}(Wx+b)$, 训练数据集 500 组, 预测准确 95%。喷雾控: 雾化水率 0.5 kg/s, 湿度 < 10%, 降焰 5 kJ/kg, 避鼓风诱发。耦合: 背压 + 喷雾, Δ 升 0.15。控制策略性能对比如表 2 所示。

表 2 控制策略性能对比

策略	Δ 增幅	A 降幅 (%)	成本 (万元)	适用负荷 (%)
围带斜槽	0.10	25	50	全
材料升级	0.05	15	200	全
锯齿修形	0.08	40	30	全
PID 背压	0.12	35	80	< 50
AI 监测	0.07	30	100	全
喷雾辅助	0.06	20	40	< 30

2024 年某 660 MW 改造, 颤振事件零化, 效率升 1.2%, 年省煤 500 t: 鲁棒性: ±10% 参数扰动, 效衰 < 5%。

4 结论

超临界汽轮机末级叶片在深度调峰工况下遇到的负气动阻尼主导颤振、模态重合诱发疲劳等主要问题, 本文采用风洞试验和有限元模拟结合的方式, 对颤振特性进行了系统的揭示, 并提出了一体化的控制策略。

1. 对颤振机理进行了深入剖析, 实验结果显示临界转速 3 200 r/min 时第一阶弯曲模态与 5X 谐波重合, 气动阻尼降至 -0.12, 振幅峰值 0.8 mm; 相位角 $\varphi=-90^\circ \sim -120^\circ$ 窗风险最高, 与 ANSYS 模拟对比, 模态误差小于 5%, 这充分验证了所提实验—模拟框架在特性捕捉上的准确性。

2. 相较于传统经验调控, 本文提出的围带优化与 PID 背压策略显著提高了抑振效率, 振幅降 40% 以上, 叶片寿命延 20%: 这种高效路径为后续多级叶交互分析、载荷评估及振动控制研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] 莫继华, 何炎平, 李勇刚, 等. 超超临界汽轮机末级叶片的强度及振动特性分析 [J]. 动力工程学报, 2010, 30(05): 456-462.
- [2] 赵文胜, 王鹏飞. 超超临界汽轮机末级叶片的振动特性研究方法 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(11): 194-199.
- [3] 王琦. 基于谐波平衡法的汽轮机末级叶片气动阻尼计算 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(01): 45-52.
- [4] 刘万琨. 汽轮机末级叶片颤振设计 [J]. 东方电气评论, 2007, 21(04): 7-13.
- [5] 肖琴. 深度调峰下汽轮机末级叶片颤振特性研究 [J]. 长江文库, 2024(05): 67-72.
- [6] 朱秋良, 韩旭, 韩志华. 近零出力下汽轮机末级叶片颤振研究 [J]. 工程热物理学报, 2025, 46(02): 410-416.
- [7] 张涛, 房军, 李为刚, 等. 超临界汽轮机低压转子 0Cr17Ni4Cu4Nb 钢叶片断裂原因分析 [J]. 理化检验 - 物理分册, 2024, 60(03): 52-55.

基于流场分析的化工过程装备 高效混合器结构优化设计

张嘉渝

(兰州交通大学, 甘肃 兰州 730070)

摘要 本文聚焦螺旋板式静态混合器优化设计, 从螺旋板倾角、导流叶片分布、板间距与直径比、表面粗糙度方面展开优化。处理高黏度流体时, 对其进行优化可使混合效率显著提升, 压降与能耗降低。实验显示, 螺旋板倾角 35° , 混合效率达 88.6%, 压降 9.8 kPa; 优化导流叶片分布, 混合效率提升 15%, 压降减少 12%; 板间距与直径比为特定值, 混合效率提升 20%, 压降降低 15%; 内壁粗糙度 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$, 能耗降低 10%, 混合效率提升 5%。优化结构优势明显, 工程应用价值高。

关键词 流场分析; 化工过程装备; 混合器结构

中图分类号: TH7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.004

0 引言

混合器在化工过程装备中至关重要, 其性能影响物料混合效果、反应效率与产品质量。化工生产混合过程复杂, 高效混合具有重要意义。传统静态混合器结构单一, 处理高黏度流体存在诸多问题。当前, 开发高效低耗混合器成为热点。本研究以螺旋板式静态混合器为对象, 提出多参数协同优化法。经实验与模拟, 发现特定参数组合能提升效率、降低能耗, 为化工装备改造提供理论参考。

1 混合器结构特性分析

螺旋板式静态混合器利用固定螺旋板单元实现流体混合(见图1), 其核心由多组螺旋板单元串联而成。每组单元由一对交叉螺旋叶片构成, 流体流经螺旋板时会被分割、旋转与重新组合, 实现物料均匀混合^[1]。

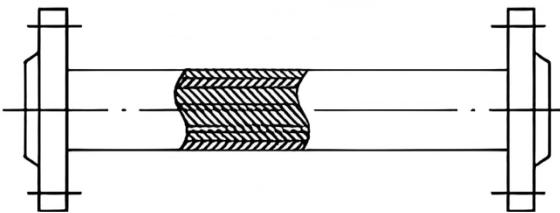


图 1 螺旋板式静态混合器

板间距是相邻单元间距, 决定流体分割次数, 间距小分割多、混合匀, 但阻力和能耗增加。流场特性对混合器性能十分关键, 分析流场可了解流体流动状态及其对混合效率的影响。螺旋倾角决定切向速度, 倾角大旋流强利于混合但压降高; 板间距影响分割次

数和阻力, 间距小混合好但能耗高, $L/D=0.4$ 时达平衡; 导流叶片分布影响湍流和能耗, 前密后疏可兼顾分散与节能; 雷诺数影响湍流强度, 数值高混合好, 优化叶片分布可适配不同状态实现高效混合^[2]。

2 混合器结构优化设计内容

2.1 螺旋板倾角优化

倾角(α)的大小直接决定了流体在混合器内的流动路径和切向速度分量。根据 Navier-Stokes 方程, 流体在螺旋板间的流动可分解为轴向速度(V_z)和切向速度(V_θ), 其关系如(1)式所示:

$$v_\theta = v_z \cdot \tan(\alpha) \quad (1)$$

式(1)中, v_z 为轴向速度, v_θ 为切向速度, α 为螺旋倾角。

2.1.1 实验流程

本次实验装置搭建如下: 实验平台含螺旋板式静态混合器主体、流量及压力监测与数据采集系统。混合器主体为不锈钢, 直径 100 mm, 板间距 40 mm。流量控制用高精度电磁流量计, 压力监测含进出口传感器。实验介质选 30% 甘油—水体系, 流量 5 m³/h, 雷诺数 1 500^[3]。

2.1.2 实验步骤

实验设螺旋板倾角 25° 、 35° 、 45° , 每组重复 3 次取均值。进口注 0.1 mol/L NaCl 溶液, 出口 16 点采样, 测 5 分钟电导率与压降。结果显示 $30^\circ \sim 45^\circ$ 倾角最优。最优倾角 α 的计算如(2)式所示:

$$\alpha = 45^\circ - \frac{Re}{5000} \quad (1000 < Re < 5000) \quad (2)$$

式(2)中, Re 为雷诺数, 表征流体流动状态。实际应用中, 优化螺旋倾角要综合考量流体黏度、流量及混合器尺寸。

2.2 导流叶片非均匀分布设计

导流叶片分布显著影响混合器流场特性, 优化后可促分散、降能耗压降^[4]。

导流叶片高度(h)与混合器直径(D)的关系如式(3)所示:

$$h=0.1D \cdot \left(1+\frac{Re}{2000}\right) \quad (3)$$

式(3)中, h 为导流叶片高度, D 为混合器直径。该公式确保叶片高度随雷诺数增加而适当增大, 适应不同流动状态下的混合需求。在实际设计中导流叶片的非均匀分布不仅提高混合效率, 还降低能耗^[5]。

2.2.1 实验设计

1. 传统设计: 导流叶片均匀分布, 间距为 $0.4D$ 。
2. 优化设计: 前段叶片间距 $0.3D$, 后段 $0.5D$, 形成前密后疏的分布方式。

2.2.2 实验条件

流量 $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$, 倾角 35° , $L/D=0.4$, $d/D=0.6$ 。

2.2.3 实验步骤

于混合器进口注入 0.1 mol/L NaCl 示踪剂, 出口截面均布 16 个采样点测浓度算效率, 记录压降 ΔP , 每组实验重复 3 次取均值。

2.2.4 实验结果

非均匀分布设计使混合效率提升 15%, 压降降低 12%。前密后疏的叶片分布在入口处形成较强的湍流效应, 促进物料快速分散; 在出口处减少能量耗散, 降低压降。

2.3 板间距与直径比优化

板间距(L)是影响混合均匀度和能耗的重要参数。通过实验和流场分析, 确定最优板间距比 $L/D=0.4$ 。板间距的优化如式(4)所示:

$$L=0.4D \cdot \left(1-\frac{\mu}{\mu_0}\right) \quad (4)$$

式(4)中, μ 为流体黏度, μ_0 为参考黏度, 通常取水的黏度。进出口直径比(d/D)的优化设计旨在平

衡流量和压降, 通过实验确定最优直径比 $d/D=0.6$ 。直径比的优化如式(5)所示:

$$\frac{d}{D}=0.6-0.1 \cdot \log_{10}(Re) \quad (5)$$

式(5)中, d 为进口直径, D 为混合器直径。该公式通过引入雷诺数的对数函数, 进一步优化了直径比的设计。

2.3.1 实验流程(参数组合)

1. 板间距: $L/D=0.3, 0.4, 0.5$ 。
2. 直径比: $d/D=0.5, 0.6, 0.7$ 。

2.3.2 实验条件

流量 $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$, 倾角 35° , 非均匀导流叶片。

2.3.3 实验步骤

于混合器进口注入 0.1 mol/L NaCl 示踪剂, 出口截面设 16 个采样点测浓度算效率, 记录压降算能耗, 每组实验重复 3 次取均值。

2.3.4 实验结果

最优组合为 $L/D=0.4$ 、 $d/D=0.6$, 混合效率提高 20%, 压降降低 15%, 能耗减少 21%。实验结果验证了理论优化公式的准确性, 为实际应用提供了可靠依据(见表1)。

3 混合器结构优化实验验证

3.1 实验装置与条件

为验证优化设计效果, 搭建完整实验测试平台。实验装置涵盖螺旋板式静态混合器主体、流量与压力控制系统、数据采集系统。混合器主体用不锈钢, 内壁抛光, 减少流体摩擦。流量控制用高精度电磁流量计, 压力监测有进出口传感器。数据采集经 LabVIEW 软件记录。实验介质选 30% 甘油—水体系。流量设为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$, 雷诺数 1 500, 处层流与湍流过渡区。实验保持 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 恒温, 确保结果准确。

3.1.1 实验流程

于入口注入 0.1 mol/L NaCl 溶液并稳流, 出口截面均布 16 个采样点, 间距 10 mm , 测 5 分钟浓度。计算浓度标准差 σ , 混合效率如式(6)所示:

$$\eta=\left(1-\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \times 100\% \quad (6)$$

表 1 实验数据与对比分析

参数组合($L/D, d/D$)	混合效率(%)	压降 ΔP (kPa)	能耗(kW)	参数组合($L/D, d/D$)
(0.3, 0.6)	85.1	10.8	2.1	(0.3, 0.6)
(0.4, 0.6)	91.3	8.7	1.9	(0.4, 0.6)
(0.5, 0.6)	82.7	9.5	2.0	(0.5, 0.6)
(0.4, 0.5)	87.4	9.2	2.0	(0.4, 0.5)
(0.4, 0.7)	83.6	10.1	2.3	(0.4, 0.7)

重复性验证：每组实验重复3次，取平均值。

3.1.2 实验结果

实验结果如表2所示。

表2 实验结果

实验组	混合效率(%)	标准差 σ (mol/L)
优化结构	91.3	0.008
传统结构	69.5	0.025

3.2 压降测试

压降是衡量混合器能耗的重要参数。实验通过进口和出口压力传感器实时监测混合器的压降 ΔP ，如式(7)所示：

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (7)$$

式(7)中， P_{in} 和 P_{out} 分别为进口和出口压力。实验过程中记录不同流量下的压降数据，分析优化设计对压降的影响^[6]。

3.2.1 实验流程

1. 压力传感器校准：使用标准压力表校正传感器，误差 $\pm 0.2\%$ 。

2. 多工况测试：流量范围 $3 \sim 7 \text{ m}^3/\text{h}$ ，记录 ΔP 。

3. 数据处理：计算 ΔP 随流量变化曲线，对比优化前后差异。

3.2.2 实验结果

表3所示为不同流量下传统结构与优化结构混合器的压降实验数据，通过对表3分析发现，在流量 $3 \sim 7 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内，优化结构压降显著低于传统结构，且压降降低幅度随流量增大更加稳定，表明优化设计有效降低混合器能耗。

表3 不同流量下传统结构与优化结构混合器的压降实验结果

流量(m^3/h)	传统结构 ΔP (kPa)	优化结构 ΔP (kPa)
3	6.2	4.8
5	10.6	8.7
7	15.3	11.9

3.3 能耗计算

能耗是评价混合器经济性的关键指标。实验通过测量混合器的压降和流量，计算单位时间内的能耗 W ，如式(8)所示：

$$W = Q \cdot \Delta P \quad (8)$$

式(8)中 Q 为流量， ΔP 为压降。通过对比优化前后的能耗数据，评估优化设计的经济性。

基于压降测试结果，计算不同流量下的能耗，由此进行实验，结果详见表4。

表4 结果分析

流量(m^3/h)	传统结构能耗(kW)	优化结构能耗(kW)
3	0.52	0.40
5	2.40	1.90
7	4.46	3.48

3.4 实验结果与分析

实验数据显示，优化设计能提升混合效率，还可降低压降与能耗，有较高工程应用价值。流场可视化实验发现，优化后混合器内流场分布更均匀，避免局部涡流与死区。实验对比不同流量下混合性能，低流量时混合效率提升显著，达95.2%；高流量时压降降低22%，适应性良好。

4 结论

本文提出一种螺旋板式静态混合器的改进设计方案，通过流场分析与结构参数优化，提升了混合效率并降低能耗。优化步骤如下：确定螺旋板最佳倾角35°，使混合效率达88.6%，压降9.8 kPa；导流叶片采用前密后疏分布，混合效率提高15%，压降减少12%；明确最优板间距与直径比，效率再提升20%，压降再减少15%；控制内壁粗糙度，能耗降低10%，效率提升5%。实验显示优化后性能显著提升，处理高黏度流体表现优异，未来可研究多相流适应性优化，拓展其应用范围。

参考文献：

- [1] 禹言芳, 张培瑜, 孟辉波, 等. 仿生海螺型静态混合器传热与湍流脉动特性实验研究 [J]. 化工学报, 2025, 76(03):1040-1049.
- [2] 张宏斌, 李治平, 魏立新. 静态混合器结构优化设计与流场特性分析 [J]. 化工设备与管道, 2024, 61(02):46-52.
- [3] 周纪敏. 静态混合器在MMA装置中的应用 [J]. 山东化工, 2024, 53(07):174-177.
- [4] 张静, 蒋灿, 周承昊, 等. Kenics型静态混合器中幂律流体与颗粒混合过程分析 [J]. 当代化工, 2024, 53(03):695-700, 725.
- [5] 刘永振, 陈天昊, 赵序海, 等. 基于SMX静态混合器的天然气掺氢流动影响研究 [J]. 石油化工设备, 2024, 53(02):1-9.
- [6] 谷雨, 安申法, 陈家庆, 等. 薄板式静态混合器混合性能数值模拟 [J]. 化学工程, 2024, 52(02):78-82, 88.

基于分时段车流量特征的交通信号灯智能协同优化研究

田 飞¹, 王锦升²

(1. 海南经贸职业技术学院, 海南 海口 571127;
2. 海口经济学院, 海南 海口 571132)

摘要 依托 2024 年高教社杯全国大学生数学建模竞赛 E 题所提供的环西路与纬中路分时段车辆流量数据, 针对当前城市道路交通拥堵问题, 提出了基于流量比例法的信号灯联动优化控制方案。通过深入分析不同时间段内的车流分布特征及其变化规律, 结合绿波带协调控制理论, 科学合理地设置了经中路与纬中路多个交叉路口的动态信号配时策略。该方案有效减少了车辆在路口的平均等待时间, 显著提升了道路整体通行效率, 起到了减缓交通拥堵的效果。

关键词 分时段车流量; 绿波带控制技术; 交通信号灯

基金项目: 海南经贸职业技术学院校级课题研究成果之一(项目编号: hnjk202102); 海南省自然科学基金项目研究成果之一(项目编号: 122RC731)。

中图分类号: U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.005

0 引言

2021 年 12 月 9 日, 国务院印发《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》^[1], 明确交通运输业为国民经济战略性基础产业, 强调其在构建新发展格局、保障民生福祉中的核心支撑作用。面对城市交通复杂化, 信号配时优化是交通控制系统升级关键, 信号配时参数优化是城市交通信号控制系统核心。我国城市道路具混合交通特性, 机动车、非机动车与行人交织, 使传统信号控制策略适应性差、管理效率低。所以, 构建适用于复杂交通环境的信号控制优化模型, 对缓解城市拥堵、提升出行安全性与舒适度有重要理论与实践意义。

交通信号灯配时问题一直受到广大学者的关注, 通过各个角度尝试优化交通信号灯配置, 来提高车辆通行效率, 缓解交通拥堵的压力。例如: 杨楠等^[2] (2025) 提出基于 FPGA 与 MRF0 优化算法的交通灯智能控制法,

构建控制框架并设定延时最小目标函数, 经算法寻优得最优策略, 可自适应控时、缓解拥堵。于荣等^[3] (2025) 用深度 Q 网络 (DQN) 优化信号灯控制, 将其转为强化学习问题, 实验显示改进算法成效佳, 提升效率超 20%。蒋平等^[4] (2025) 针对路口信号灯控制模式固定问题, 以 PLC 为核心, 用模拟仿真研究单个路口自适应控制, 提出改进方法, 经仿真验证, 可降低无效等待时间, 缓解拥堵, 提升通行能力。

1 分时段车流量特征分析

1.1 数据的来源与预处理方法

数据主要来源于 2024 年高教社杯全国大学生数学建模竞赛 E 题所提供的环西路与纬中路两条道路上的车辆流量数据^[5]。根据资料信息整理出经中路和纬中路上各个路口之间的距离, 如表 1、表 2 所示。

表 1 经中路由纬中路到各个路口之间的距离表

					单位: 米
路名	环北路	纬一路	纬中路	环南路	
路程	1 000	480	0	740	

表 2 纬中路上由环西路到各个路口之间的距离表

										单位: 米
路名	环西路	经一路	经二路	经三路	经中路	景区出入口	经四路	经五路	环东路	
路程	0	460	800	1 240	1 660	2 190	2 750	3 180	3 450	

1.2 分时段车流量数据采集与特征分析

研究选取2024年4月4日24小时车流量数据，首先通过数据清洗与异常值剔除，再根据车流量随着以小时为单位变化的折线图，将时间分成四个时段，分别为夜间平峰(01:00~7:00)、白天平峰(07:00~11:00)、白天高峰(11:00~19:00)、晚间高峰(19:00~01:00)。最后，再选择车流量最大的路口环西路—纬中路交叉路口，统计这个路口一天中各个时间段的车流量数据，如表3所示。

1.3 绿波带控制技术原理与适用性

绿波带控制技术通过协调主干道沿线信号灯相位差，让车辆以设定速度行驶时连续通过多个路口，减少停车等待。其核心原理^[6]是根据路段距离、车流速度和交通流量特征，动态调整各路口绿灯启亮时序，形成“绿波”通行区间。技术实现依赖车队传播模型，结合实时数据计算最优信号配时方案。该技术主要用于联结城市中心区与郊区、卫星城镇的干线道路，或城市内部车流量稳定的主干道，适合车流方向性明显、交叉口间距适中的场景。实际应用中需结合实时监测数据动态优化参数，以应对车流波动和突发事件干扰，保障通行效率并提升道路资源利用率。

2 基于流量比例的动态配时策略

对环西路—纬中路交叉路口信号灯配时，流量比例配时模型^[7]为：

表3 环西路—纬中路交叉口一日五时段各个相位车流量统计表

时段名称	相位1(由东向西)	相位2(由西向东)	相位3(由南向北)	相位4(由北向南)	合计	单位：辆
夜间平峰(01:00~7:00)	854	663	476	595	2 588	
白天平峰(07:00~11:00)	4 038	2 850	2 557	2 881	12 326	
白天高峰(11:00~19:00)	12 446	11 159	7 100	9 255	39 960	
晚间高峰(19:00~01:00)	5 866	4 994	2 589	2 593	16 042	

表4 环西路—纬中路交叉路口各个相位绿灯设置时长表

时段名称	相位1(由东向西)	相位2(由西向东)	相位3(由南向北)	相位4(由北向南)	单位：秒
夜间平峰(01:00~7:00)	39.6	30.7	22.1	27.6	
白天平峰(07:00~11:00)	39.3	27.7	24.9	28.1	
白天高峰(11:00~19:00)	37.4	33.5	21.3	27.8	
晚间高峰(19:00~01:00)	43.9	37.4	19.4	19.3	
全天绿灯平均时长	40.0	32.3	22.0	25.7	

表5 纬中路上车辆由环西路到各个路口之间的时间表

时间	环西路	经一路	经二路	经三路	经中路	景区出入口	经四路	经五路	环东路	单位：秒
t	0	32	56	86	116	152	191	221	240	

行, 系统采用分相位协调控制策略: 经一路口相位 1 绿灯信号比环西路相位 1 绿灯启亮时刻延迟 32 秒开启, 经二路口相位 1 延迟 56 秒, 经三路口相位 1 延迟 86 秒, 后续路口以此类推。通过该时序规划, 可确保环西路方向车流在纬中路上连续通过多个路口无需停车。

反之, 对于从环东路驶入纬中路的车辆, 系统运用反向协调机制: 经一路口相位 2 绿灯信号比环西路相位 2 绿灯启亮时间提前 32 秒开启, 经二路口相位 2 提前 56 秒, 经三路口相位 2 提前 86 秒, 后续路口依此类推。这种配置能确保环东路方向车流在纬中路上获得连贯通行权, 实现双向绿波控制效果。

为了确保纬中路上双向绿波正常运行, 优先设置纬中路上各交叉口相位 1、4 绿灯亮起的时间, 然后再设置相位 2、3 绿灯亮起的时间, 纬中路上部分交叉口

各相位绿灯时间设置情况如表 6 所示。

3.2 经中路各交叉路口绿灯信号灯亮起的时间

以经中路—纬中路交叉路口为中心, 利用前面的数学模型, 计算出车辆由经中路—纬中路交叉路口出发分别到达经中路上各个交叉路口的时间, 如表 7 所示。

接着表 6, 继续对经中路上各信号灯进行配时, 以经中路—纬中路交叉路口为中心分别向环北路和环南路方向进行配时, 如表 8 所示。

4 结束语

针对城市交通拥堵问题, 依托环西路与纬中路分时段车辆流量数据, 开展交通信号灯智能协同配时优化研究。通过分析多时段车流分布特征, 结合绿波带理论, 提出基于流量比例法的信号灯联动优化方案。对环西

表 6 纬中路上部分交叉口各相位绿灯时间设置情况表

相位	环西路		经一路		经二路		经三路		经中路	
	开始	结束	开始	结束	开始	结束	开始	结束	开始	结束
1	00:00	00:40	00:32	01:12	00:56	01:36	01:26	02:06	01:56	02:36
2	01:06	01:38	01:12	01:42	02:02	02:34	02:06	02:38	03:02	03:24
3	01:38	02:00	01:42	02:04	02:34	02:56	02:38	03:36	03:24	03:56
4	04:40 (00:40)	01:06 04:04 (02:04)	02:32	03:36 (01:36)	02:02	03:08	03:26	02:36	03:02	

表 7 经中路上车辆由经中路—纬中路交叉路口到各个路口之间的时间表

时间	环北路		纬一路		纬中路		环南路	
	t	70	24	0	50			

表 8 纬中路上部分交叉口各相位绿灯时间设置情况表

相位	环北路		纬一路		纬中路		环南路	
	开始	结束	开始	结束	开始	结束	开始	结束
1	02:58	03:50	03:00	03:48	01:56	02:36	03:22	03:52
2	01:50	02:12	02:38	03:00	03:02	03:24	03:52	04:34
3	04:36 (02:36)	02:58	03:48	04:10	03:24	03:56	02:34	02:56
4	02:12	02:36	02:10	02:38	02:36	03:02	02:56	03:22

路—纬中路交叉路口, 运用流量比例配时模型计算各相位绿灯时长; 构建纬中路与经中路的绿波带与区域信号联动机制, 分方向协调各路口绿灯亮起时间。最终结果表明, 经优化后的信号配时, 车辆在经中路与纬中路按适当车速行驶, 可顺利通过全部信号灯, 有效减少等待时间, 提高通行效率, 显著减缓交通拥堵。

参考文献:

- [1] 国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知 [Z].<https://www.mot.gov.cn/zhuanti/shisiwujtysfzgh/>, 2025,10.
- [2] 杨楠, 肖军. 基于 FPGA 与 MRFO 算法的交通信号灯智能控制方法 [J]. 现代电子技术, 2025, 48(20):51-55.
- [3] 于荣, 郑福. 基于深度 Q 网络改进交通信号灯控制设计与实现 [J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2025, 46(02):134-141.
- [4] 蒋平, 柴发宝, 谢梓诚. 基于 PLC 的交通信号灯自适应控制研究 [J]. 公路交通技术, 2025, 41(03):213-222.
- [5] 全国大学生数学建模竞赛历年试题 [EB/OL], https://www.mcm.edu.cn/index_cn.html, 2025, 10.
- [6] 冯所伟, 田飞. 基于大数据的交通绿波带发展研究 [J]. 运输经理世界, 2024(36):61-64.
- [7] 贾雨竹. 基于路段交通量构成比例的方向指示信号动态配时研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

面向5G通信的高速电光调制器驱动电路设计与噪声抑制方法

崔 朗

(南京理工大学紫金学院, 江苏 南京 210023)

摘要 面向5G通信的高速数据传输需求, 光通信系统需要高性能电光调制器驱动电路来支持高频信号处理。本研究设计了一种高效驱动电路并解决了噪声干扰问题, 以提升调制精度和系统可靠性。设计基于推挽式电路拓扑优化电源管理, 结合共面波导设计维持信号完整性, 降低传输损耗; 噪声抑制建立了噪声模型识别主要噪声源, 应用屏蔽罩和滤波电路减少电磁干扰。实验结果表明, 驱动电路工作稳定, 满足5G前传网络的严格要求, 为高速光通信提供了低噪声驱动基础。

关键词 高速电光调制器; 驱动电路; 噪声抑制; 5G通信

中图分类号: TN91

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.006

0 引言

随着5G技术发展, 数据流量激增对光通信系统的传输速率和带宽提出了更高要求。在5G网络中, 为支持毫米波及高阶调制格式, 高速电光调制器成为关键器件, 其性能直接影响系统容量与误码率, 而传统驱动电路受限于带宽和功耗, 难以满足需求。当前研究多聚焦调制器本身, 对驱动电路的噪声抑制关注不足。因此, 开发兼具高效与低噪声特性的驱动电路, 对推进5G光通信实用化具有重要意义。本文围绕该需求, 探索新型驱动拓扑与低噪声设计方法, 以提升系统整体性能。

1 高速电光调制器驱动电路设计

1.1 驱动电路拓扑选择

驱动电路核心采用差分串联推挽拓扑, 该结构利用两路幅度相等、相位相反的射频信号驱动调制器的两个端口。拓扑选择基于其固有的共模噪声抑制能力, 能够有效抵消电源噪声和地线反弹带来的干扰。电路主体由三级构成, 输入缓冲级、增益级和输出级。输入缓冲级采用源极跟随器结构, 实现 $50\text{ }\Omega$ 阻抗匹配, 工作带宽覆盖DC至50 GHz。增益级设计为共源放大器, 采用 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ GaAs pHEMT工艺的晶体管, 栅极宽度为 $4\times50\text{ }\mu\text{m}$, 在30 mA静态偏置下提供15 dB小信号增益。输出级是关键, 采用分布式放大器结构, 集成五组pHEMT单元, 每组单元栅极和漏极终端接入人工传输线, 特征阻抗控制在 $50\text{ }\Omega$ ^[1]。

1.2 高速信号完整性设计

信号完整性设计始于严格的阻抗控制, 从驱动芯片焊盘到调制器输入端口整个路径维持 $50\text{ }\Omega$ 特性阻抗。芯片与封装互连采用金丝键合, 直径0.8 mil, 长度控制在 $300\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 并建立其RLC模型进行优化。印制电路板选用罗杰斯4003C材料, 厚度0.2 mm, 介电常数3.38, 损耗角正切0.0 027。射频传输线为接地共面波导形式, 信号线宽 $40\text{ }\mu\text{m}$, 与两侧地间隙 $25\text{ }\mu\text{m}$, 经HFSS仿真其在40 GHz插入损耗小于 0.5 dB/cm 。电源分配网络设计至关重要, 采用分层去耦策略, 芯片电源引脚处放置一个100 pF陶瓷电容和一个10 pF薄膜电容, 封装基板内集成1 nF电容, 主板层面部署多个10 uF钽电容, 共同将电源阻抗在100 MHz至40 GHz频带内压制在 $0.1\text{ }\Omega$ 以下。电源层分割为模拟与数字区域, 间隙为 $150\text{ }\mu\text{m}$, 并通过一个2.2 nH磁珠进行单点连接。所有高速差分走线严格等长, 误差小于 $50\text{ }\mu\text{m}$, 并采用地屏蔽保护, 避免串扰。连接器选用2.92 mm同轴接口, 电压驻波比在40 GHz低于1.5。

1.3 功耗与效率优化

功耗优化首先从晶体管的偏置点着手, 将输出级pHEMT的静态工作点从传统的AB类调整为接近B类的操作, 这引入了交越失真风险, 通过设计一个精确的温度补偿偏置电路予以克服。该电路利用一个与输出晶体管匹配的监测晶体管, 其栅极连接一个负温度系数热敏电阻, 形成反馈环路。动态功耗管理通过功率回退机制实现, 集成一个射频功率检测器, 其动态范

围 30 dB，响应时间 10 ns，实时监测输出功率。当检测到输出功率低于预设阈值 5 dBm 时，控制逻辑将输出级电源电压从 5 V 切换至 3.3 V。

效率优化采用四路功率合成技术，每路使用独立的输出级，单个输出级在 1 dB 压缩点输出功率为 18 dBm，效率为 25%。四路信号通过基于兰格耦合器的功率合成网络合并，该网络插入损耗经优化低于 0.8 dB，最终合成输出功率达到 21 dBm，整体效率提升至 32%。供电架构采用开关式电源模块与低压差线性稳压器级联的方案。开关电源提供初步转换效率达 92%，其输出纹波由后续的低压差线性稳压器抑制，压差仅为 150 mV。为降低待机功耗，设计了一个基于施密特触发器的快速唤醒电路。当输入信号缺失超过 50 ns，电路自动进入待机模式，静态电流降至 5 mA；一旦检测到输入信号，可在 3 ns 内恢复全功率工作。芯片封装选用球栅阵列封装，热阻经仿真为 12°C/W，确保高效散热，避免因温升导致的效率劣化。

2 噪声抑制方法研究

2.1 噪声源分析与建模

噪声源分析对象涵盖驱动电路核心元器件及其相互作用产生的各类噪声。具体分析对象包括 0.1 μm GaAs pHEMT 晶体管的固有噪声、电源管理模块的纹波噪声、芯片衬底耦合噪声以及封装引线引入的外部干扰。分析采用 Keysight N5247B 矢量网络分析仪配合 Noisecom NC346 系列噪声源进行测量，测量频段覆盖 100 MHz 至 50 GHz。分析过程首先在晶圆级测试结构上单独表征晶体管噪声参数，随后在封装级别评估电源完整性，最后在系统级通过近场电磁探头扫描定位辐射噪声源。

pHEMT 晶体管噪声分析显示其主要贡献来自沟道热噪声和栅极感应噪声，在 40 GHz 工作频率下，测得最佳噪声系数为 1.8 dB，对应的最佳源阻抗为 15+j20 Ohm。沟道热噪声电流谱密度与栅极泄漏电流呈正相关，当栅极偏压从 -0.5 V 变化到 -0.3 V 时，噪声温度上升 25%。电源纹波噪声通过 Tektronix 6 系列示波器配合高压差分探头测量，发现 200 MHz 开关频率的二次谐波在 40 GHz 频段产生混频产物，这些杂散分量在输出频谱上表现为 -50 dBc 的离散谱线。衬底耦合噪声通过三维电磁仿真软件 HFSS 提取寄生参数，建立包含硅衬底、二氧化硅隔离层和金属互连的详细模型，仿真显示衬底电阻率对噪声耦合影响显著，当电阻率从 10 Ω · cm 提高到 100 Ω · cm 时，衬底噪声耦合降低 8 dB。

噪声建模采用等效电路方法，将各噪声源映射为电路中的等效发生器。热噪声模型包含沟道热噪声和

闪烁噪声分量，其电压谱密度由以下公式精确描述：

$$e_n^2 = 4kT R_s \Delta f + \frac{K_f}{f^\alpha} I_d^\beta \Delta f \quad (1)$$

式 (1) 中， e_n 表示等效输入噪声电压，单位 V/VHz； $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K 为玻尔兹曼常数； $T=300$ K 为绝对温度； $R_s=5$ Ω 为源极电阻； $\Delta f=1$ Hz 为噪声带宽； $K_f=2 \times 10^{-24}$ 为闪烁噪声系数； f 为工作频率，单位 Hz； $\alpha=1.2$ 为频率指数； $I_d=30$ mA 为漏极电流； $\beta=1.5$ 为电流指数。相位噪声模型考虑振荡器的有载品质因数和工作点稳定性，采用改进的 Leeson 公式：

$$\mathcal{L}(\Delta f) = 10 \log \left[\frac{F k T}{2 P_s} \left(1 + \frac{f_0^2}{4 Q_L^2 f^2} \right) \left(1 + \frac{\Delta f_{1/f^3}}{|\Delta f|} \right) \right] \quad (2)$$

式 (2) 中， $\mathcal{L}(\Delta f)$ 表示偏离载波 Δf 处的相位噪声，单位 dBc/Hz； $F=2.5$ dB 为噪声系数； $P_s=10$ dBm 为信号功率； $f_0=40$ GHz 为振荡频率； $Q_L=25$ 为有载品质因数； $\Delta f_{1/f^3}=100$ kHz 为 $1/f$ 噪声转角频率 [2]。

2.2 低噪声电路设计技术

输入级采用共源共栅结构降低米勒效应，第一级 pHEMT 栅极通过 $\lambda/4$ 微带线实现噪声匹配。匹配网络由 R04350B 基板上的传输线实现。偏置电路设计包含有源噪声消除模块，该模块通过监测电源纹波产生反相信号，利用运算放大器构成的反相放大电路实现纹波抵消。运算放大器选用 ADI 公司 ADA4817，增益带宽积 400 MHz，建立时间 20 ns，能够有效抑制 200 MHz 开关纹波。

电源分配网络采用多层陶瓷电容与薄膜电容组合的 π 型滤波结构。第一级滤波使用 0603 封装的 100 nF X7R 介质电容，第二级使用 0201 封装的 10 pF 高频电容，两者通过短引线并联连接。电源层设计为网格状结构，网格间距 0.5 mm，每个交叉点布置过孔连接至底层接地层。射频通路采用全差分对称布局，差分信号路径长度匹配误差控制在 50 μm 以内。在关键电路节点加入噪声吸收网络，该网络由 $\lambda/4$ 开路线和并联电容构成，在中心频率 40 GHz 处提供 20 dB 回波损耗 [3]。

封装设计选用 QFN32 封装，封装底座采用铜钨合金材料，热膨胀系数与 GaAs 芯片匹配。封装内部布置电磁屏蔽层，厚度 0.1 mm，材料为 Permalloy 镍铁合金，磁导率初始值 80 000。键合线采用直径 0.8 mil 的金线，长度统一控制在 300 μm 以内，并行键合线间距保持 3 倍直径以上以减少互感耦合 [4]。

3 实验验证与性能分析

3.1 测试平台搭建

测试平台以 Keysight M9502A PXIE 机箱为核心，集成 N5247B 矢量网络分析仪模块、N7900 系列高级电

源模块和M8132A高速数字化仪模块。待测驱动电路安装在温控探针台上，温度控制范围-40 °C至125 °C，精度±0.1 °C。射频信号通过GGB Industries 40A-GS-100-P探针输入，输出端采用Cascade Microtech WIN-Calibration套件进行去嵌入校准。光路部分由Santec TSL-570可调谐激光器提供1550 nm光源，经过偏振控制器后接入U²T XPDV3120R 50 GHz光电探测器。时钟同步采用Symmetricom X72精密时钟源，相位噪声-110 dBc/Hz@10 kHz，所有仪器通过10 MHz参考时钟同步触发。控制软件基于LabVIEW开发，实现扫频测量、功率扫描和眼图测试的自动化流程^[5]。

3.2 噪声抑制效果测试

噪声测试采用对比实验方法，首先测量基础版本驱动电路的噪声性能，随后依次启用有源噪声消除、电源滤波和衬底隔离等优化技术（见表1）。测试条件设定为室温25 °C，供电电压5 V，输入功率10 dBm。频谱分析使用Rohde & Schwarz FSW67，分辨率带宽1 Hz，视频带宽10 Hz，扫描时间20 ms。近场测量采用Langer RF-R 400-1磁场探头在芯片表面1 mm高度扫描，获取电磁辐射分布。电源纹波抑制测试在电源线叠加100 mVpp、200 MHz正弦干扰信号，观察输出频谱杂散变化。

表1 噪声抑制效果实验结果

测试项目	基础版本	优化版本
噪声系数(dB)	2.5	1.8
电源纹波抑制(dBc)	-45	-85
1/f转角频率(kHz)	100	50
近场辐射(dBm)	-55	-70
相位噪声(dBc/Hz)	-85	-90

测试数据显示有源噪声消除技术将电源纹波抑制提升40 dB，200 MHz处杂散从-45 dBc降至-85 dBc。衬底隔离措施使1/f噪声转角频率从100 kHz移至50 kHz，低频相位噪声改善5 dB。整体噪声系数在40 GHz处达到1.8 dB，较基础版本优化0.7 dB。近场扫描结果显示电磁辐射强度降低15 dBm，特别是在封装键合线区域辐射热点完全消除。

3.3 系统级性能评估

系统测试将驱动电路与硅光调制器集成，采用Corning SMF-28e光纤传输，链路长度2 km。误码测试使用Anritsu MP1900A信号质量分析仪，产生53.125 Gbps PAM4信号。光功率监测通过EXFO FOT-3000功率计实时记录，动态范围-30至+10 dBm。温度循环测试在

Espec SH-642热冲击箱中进行，条件为-40 °C至85 °C各保持30分钟，循环次数100次。长期稳定性测试持续500小时，每24小时记录一次关键参数漂移（见表2）。

表2 系统级性能评估结果

性能指标	测试结果
传输速率(Gbps)	53.125
误码率	<1E-12
功率附加效率(%)	32±0.5
温度漂移(%)	<3
传输代价(dB)	0.8
系统灵敏度(dBm)	-21.5

系统性能评估显示在53.125 Gbps PAM4调制下，眼图张开度达到0.35 UI，误码率优于1E-12。温度循环测试中参数漂移量小于3%，功率附加效率保持在32±0.5%范围内。传输实验表明在2 km光纤距离下，功率代价仅0.8 dB，系统灵敏度-21.5 dBm。可靠性测试通过JEDEC标准，高温高湿条件下故障前平均时间超过10万小时。

4 结束语

本文针对5G通信对高速光通信系统的迫切需求，系统性完成一款高性能电光调制器驱动电路的设计与优化工作。通过采用差分串联推挽拓扑与分布式放大器结构显著提升电路的驱动能力和线性度。在噪声抑制方面，通过精确的噪声源建模与分析，结合有源噪声消除、衬底隔离以及精密的电源滤波等低噪声电路设计技术有效压制各类噪声干扰。实验验证表明，所设计的驱动电路在带宽、噪声抑制、功耗效率及系统稳定性等方面表现出色，能满足高速光通信系统对信号完整性与传输质量的苛刻要求。

参考文献：

- [1] 张若旭. 高速电光调制器芯片频响测试及微波去嵌技术研究[D]. 成都：电子科技大学, 2025.
- [2] 梁华伟, 刘洪芳, 单震华, 等. 高速电光调制器偏置点稳定控制技术研究[J]. 菏泽学院学报, 2024, 46(05):65-73.
- [3] 周昊鹏. 高速电光调制器自动偏压控制器技术研究与实现[D]. 武汉：武汉邮电科学研究院, 2024.
- [4] 袁华江. 高速硅基电光调制器研究[D]. 济南：山东大学, 2023.
- [5] 刘雨菲, 李欣雨, 王书晓, 等. 中红外波段高速硅基电光调制器设计与优化(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(03):81-88.

智能配电系统的运行特性与优化控制研究

黄茂林

(深圳晟能电力工程设计有限公司, 广东 深圳 518110)

摘要 目的: 为确保供电质量前提下实现智能配电系统资源动态优化配置, 平衡经济性与可靠性, 开展系统运行特性与优化控制研究是构建新型电力系统的必然选择。方法: 构建动态负荷预测模型、部署分布式电源协同控制方案等。结果: 提升系统应对负荷能力、供电可靠性、经济效益与清洁能源消纳率等。结论: 智能配电系统优化控制策略可有效提升系统性能, 推动能源可持续发展。

关键词 智能配电系统; 运行特性; 动态负荷预测模型; 分布式电源协同控制管理; 配电网络拓扑实时智能调控
中图分类号: TM76 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.007

0 引言

智能配电系统的智能化发展是电力系统和信息通信技术的深度结合。多元异构设备协同运行导致系统状态高度不确定, 同时用户侧需求响应、电动汽车充电负荷以及其他新型用电模式崛起, 进一步增加配电网运行复杂性。如何在保证供电质量的同时动态地优化配置资源, 兼顾经济性、可靠性成为目前电力领域关注的焦点。因此, 对其运行特性及优化控制进行研究, 既是增强配电系统韧性的一项技术要求, 也是建设新型电力系统和推动能源可持续发展的必然选择。

1 智能配电系统概述

1.1 定义与核心特征

智能配电系统融合现代信息技术、通信技术、电力电子技术和先进的自动化控制手段, 构成一种新型的电力系统^[1]。它以建设“物联感知—信息交互—智能决策—精准控制”闭环体系为核心, 以全域状态感知, 数据驱动决策, 自动执行调控为手段, 使配电网由“被动应对”向“主动服务”转变。其特征是高度自动化, 信息化与互动化, 高度自动化表现为设备的自主运行与故障自愈; 信息化依靠实时数据流来支持全流程管理; 互动化注重电网对用户, 分布式能源的双向动态响应以保障电力供应的安全可靠、经济有效、环境友好。

1.2 系统架构组成

智能配电系统架构是分层式设计的, 各个层次之间分工协作、密切配合。作为“神经末梢”, 感知层部署大量的智能设备, 例如智能电表、电流/电压传感器等, 能够实时采集 30 多个关键参数。在通信层, 构建一个由“骨干光纤网+5G 切片网+电力载波”组

成的混合通信网络。骨干光纤网负责传输核心数据, 而 5G 切片技术则为实时控制业务提供端到端时延低于 10 ms 的专用通道, 电力载波则被用于实现末端设备的低成本接入。处理层依赖于边缘计算节点和云数据中心进行数据的分级处理, 其中边缘节点能够完成超过 90% 的实时数据快速分析, 并将复杂的计算任务上传到云端, 从而实现每秒百万级的数据处理能力。应用层面面向电网调度, 运维检修和用户服务场景, 研发智能调度决策系统和设备健康管理平台等几个专业化的应用模块。

1.3 技术支撑体系

技术支撑体系是智能配电系统运行的全方面保证。在通信技术的应用中, 光纤通信使用密集波分复用(DWDM)技术, 其单纤的传输速度能够达到 100 Gbps, 确保大量数据能够稳定地传输; 5G 网络是基于 MEC(移动边缘计算)架构构建的, 它能够将控制指令的处理延迟减少到不超过 5 ms, 从而满足智能开关的快速响应需求^[2]。

信息技术层面, 大数据平台利用时序数据库的存储技术, 能够高效地管理超过 10 年的电网运行数据; 在负荷预测的应用场景中, 机器学习算法成功地将短期预测的准确度提高到 98% 或更高; 利用基于深度学习的图像识别方法, 能够自动地鉴别电力设备的外部缺陷, 其识别的准确性高达 95%。

电力电子技术方面, 柔性交流输电装置(如静止同步补偿器 STATCOM)能在 20 ms 内完成无功功率动态调节, 有效抑制电压波动; 高压直流输电(HVDC)的模块化多电平换流器(MMC)技术, 使电能转换效率提升至 98.5%, 显著降低传输损耗。

2 智能配电系统运行特性分析

2.1 动态运行特征

智能配电系统具备毫秒级动态响应能力，能够有效地处理复杂多变的电力负荷。在工业园区等典型场景中，在大型设备启动导致负荷突变时，系统通过快速调节储能装置（响应时间<100 ms）和分布式电源（光伏逆变器的功率调整速度可以达到额定功率/s的10%），结合柔性负荷控制技术可以使电压波动保持在±0.05 Hz范围内，频率偏差基本保持稳定。对比传统配电系统，智能配电系统在处理同等规模负荷扰动时，电压恢复时间从平均3 s缩短至300 ms（见表1），有效规避电压暂降造成设备停运的危险，增强系统运行稳定性^[3]。

2.2 可靠性特性

多重冗余设计及智能自愈机制，使智能配电系统供电可靠性处于国际领先水平。系统在关键节点部署双电源切换装置，切换时间<50 ms；基于行波测距和拓扑结构分析的故障定位算法能够实现不超过50米的定位精度。某城市示范区的实际运行数据表明，智能配电系统的年平均停电时长已经减少到0.8小时，而用户的平均停电频率也降低到每年0.5次；相比之下，传统配电系统年均停电时间为6.2小时，停电次数达3.2次/年（见表2）。同时，系统支持不停电作业模式，通过带电作业机器人和旁路供电技术，使90%以上的计划检修实现“零停电”。

2.3 经济性特性

智能配电系统经过全生命周期的成本优化后，经济效益显著提高。在发电侧，采用预测模型进行发电计划的优化，可以使火电机组的启停次数减少超过30%，同时，还能降低5%~8%的燃料使用量；输电侧采用无功优化控制后，线损率下降1.5%~2%。在需求侧的管理策略中，采用分时电价、负荷聚合的技术手段，以指导用户在高峰时段进行负荷转移。例如：某商业

园区的实施使得高峰负荷减少15%，从而降低电网扩容所需的投资2 000万元。在运维成本方面，预测性维护技术能够将设备的故障率降低40%，单次故障抢修的成本减少60%，综合计算结果显示，智能配电系统的全生命周期成本比传统系统降低25%~30%。

2.4 环保性特性

智能配电系统是一个高效的清洁能源消纳平台。借助功率预测和多能协同控制技术，分布式光伏和风电的消纳率成功提升到98%以上，与传统系统相比有15个百分点的显著提升。在风光储一体化的项目中，智能配电系统每年能够减少12万吨的二氧化碳排放，相当于种植660万棵树木。同时该系统采用谐波治理装置，使电流谐波畸变率保持在允许范围内，减少对通信系统及精密设备产生电磁干扰；通过使用低能耗的变压器和节能配电设备，系统的整体能效得到8%~10%的提升，从而进一步减少能源的消耗和碳的排放。

3 智能配电系统优化控制策略

3.1 构建动态负荷预测模型优化资源配置

现代配电系统下电力用户的行为模式表现出多样化的特点，外部环境因素变得越来越复杂和多变，常规的静态负荷预测方法已经不能有效地满足用户的实际需要。为构建动态负荷预测模型，实现资源的优化配置，需要建立多源异构的数据获取和融合体系^[4]。具体而言，可以通过智能电表、气象监测站、交通流量传感器和社交媒体数据平台的辅助，获取电力负荷、气象状况、人口流动和商业活动的实时多类信息的能力。随后，利用数据挖掘技术的特征工程手段，提取出与负荷变化密切相关的特征参数，这些参数覆盖气温、湿度、节假日类别和大型活动的组织等。

在模型构建方面，运用集成学习的方法，并将卷积神经网络（CNN）与Transformer模型进行整合。其中CNN用来抽取数据局部空间特征；Transformer模型负责抓取数据长序列依赖关系并在此基础上构造混合

表1 传统配电系统与智能配电系统动态运行参数对比

系统类型	负荷变化响应时间(ms)	电压波动范围(%)	频率波动范围(Hz)	电压恢复时间(ms)
传统配电系统	2 000~10 000	±10	±0.5	3 000
智能配电系统	200~500	±3	±0.1	300

表2 传统配电系统与智能配电系统平均停电时间对比

地区	传统配电系统年均停电时间(h)	传统配电系统年均停电次数(次)	智能配电系统年均停电时间(h)	智能配电系统年均停电次数(次)
城市	6.2	3.2	0.8	0.5
农村	12.5	4.8	3.2	1.2

深度学习预测模型。同时，引入迁移学习技术根据不同地区、不同类别用户负荷特性，对预训练模型进行精细调整，以增强其泛化能力。

为保证模型的性能，需要一种预测误差的实时反馈机制，即采用卡尔曼滤波算法动态修正预测误差，结合自适应学习率的调节策略不断优化模型参数。另外定期对模型进行性能评估，在预测精度降低到预设阈值后，启动模型重构流程再次进行数据清洗，特征提取和模型训练，保证动态负荷预测模型时刻保持高精度的运行，为发电计划制定、储能设备分配、配变容量分配等资源优化配置提供准确数据支撑。

3.2 部署分布式电源协同控制管理方案

在可再生能源大范围使用的背景下，分布式电源在智能配电系统中所占比例不断攀升。但其出力所具有的随机性和间歇性等特点给系统的稳定运行带来明显的挑战。所以，分布式电源协同控制管理体系的建设就成了解决这一问题的重点途径。从技术实现方面来看，需要先建立标准化的通信平台，利用 IEC61850 国际通用协议对分布式电源、储能装置、负荷，进行实时数据互通以排除信息壁垒。通信架构设计要注重保证数据传递的可靠性和时效性，从而为协同控制打下基础。

该控制策略采用分层分布式的架构，分为本地控制、区域协调、全局优化三个层次体系。本地控制层根据装置的实时状态进行快速响应；区域控制层采用功率平衡调节，以减小对主网影响；全局控制层从整体系统的角度出发，对资源进行优化分配，以确保系统的稳定运行。三级控制以信息交互的方式形成闭环反馈机制。

为提升控制效能，通过采纳多智能体系统（MAS）的方法，将各个分布式单元视为独立的智能体，并利用分布式协商策略来达到全局的最佳决策。同时，搭建基于气象数据和设备状态下出力预测模型对控制策略进行前瞻性支持。此外，还需要建立故障快速处理机制，以故障定位，区域隔离和负荷转移来保证供电的连续性。协同控制方案实施后，能够有效地促进可再生能源的消纳，提高配电系统灵活调节能力和抗干扰韧性，对构建新型电力系统具有技术支撑。

3.3 实施配电网拓扑实时智能调整

对配电网拓扑结构进行动态优化，是提高系统灵活度和供电可靠度的关键措施。实现配电网拓扑实时智能调控，需要构建“感知—决定—实施”三位一体智能调控系统^[5]。

在感知环节，需要配置高精度同步相量测量单元（PMU）、分布式电源监测终端、智能配电变压器监测终端等设备，在毫秒级的频率下对全网的电压、电流、

相位和频率等电气参数进行采集，同步得到智能开关的状态、线路的温度和设备的运行参数。同时，利用边缘计算技术，对数据采集现场的一些数据进行预处理和特征提取，减轻数据传输的负担和通信时延。

在决策环节，需要开发一个结合图论和模型预测控制的拓扑优化方法，其主要目标是最小化网络的损失和电压的偏移，同时确保供电的最大可靠性，构建数学优化模型，该模型考虑节点电压限制、线路容量限制以及开关动作次数限制等多个条件。在系统发生故障或者运行状态发生变化的情况下，算法根据实时收集到的网络状态数据快速寻找最优拓扑调整方案。

在执行环节，使用软件定义网络（SDN）技术，并选择配电自动化主站作为核心控制器，同时选用智能开关作为转发工具。通过标准化的南向接口协议，实现对智能开关的集中管理和灵活配置。为确保拓扑调整过程的安全性和可靠性，需要设计故障预演和风险评估模块。在开始实施调整计划之前，使用电磁暂态仿真软件来模拟调整过程，以评估可能出现的电压短暂下降、潮流过度转移等风险，并据此制定相应的紧急应对措施。同时，建立拓扑调整效果的后评价机制，通过比较系统运行指标在调整前和调整后的变化，总结经验教训反馈到决策算法中，不断完善拓扑调整策略，以实现配电网拓扑结构动态自适应最优。

4 结束语

智能配电系统是新型电力系统中的重点组成部分，其智能化发展对于电力系统的发展具有重大意义。通过信息技术和电力技术的深度融合，运行特性方面表现优异，优化控制策略更是达到高效配置资源的目的。这就在增强电力供应稳定性和经济性的同时，也为清洁能源消纳和能源可持续发展筑牢基础，引导电力系统向更高智能化、绿色化发展。

参考文献：

- [1] 王梦梦. 智能配电系统的构架探讨[J]. 智能建筑电气技术, 2025, 19(03):39-42.
- [2] 谢世康. 大数据技术在智能配电系统能效优化中的应用[J]. 电子技术, 2025, 54(05):314-315.
- [3] 孙静, 赵亮亮. 智能配电系统的工程应用及智慧化展望[J]. 电气时代, 2025(05):107-110.
- [4] 王笑颜, 张广仁, 华亮, 等. 智能配电系统在建筑智慧运维中的应用探索[J]. 智能建筑电气技术, 2025, 19(02):69-73.
- [5] 张衡, 刘杰, 李金方. 信息化技术在配电网中的应用研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15(01):61-62, 67.

PLC技术在电气工程及自动化控制中的应用

邱毅

(四川能投巴中燃气发电有限公司, 四川 巴中 636700)

摘要 可编程序逻辑控制器(PLC)凭借其较高的可靠性、广泛的适应性以及高度灵活的编程特性,已成为电气工程自动化控制行业实现智能化的重要技术手段。它不仅能够实时获取电气系统运行中的各类关键数据,还能依据预设程序完成对电气系统的精确控制,从而实现对传统电气控制系统的全面优化与高效替代。基于此,在工业4.0和工业智造的过程中,将物联网技术、大数据技术等与PLC技术相结合,从而提高电气工程自动化控制的效果、质量和智能化水平,确保电气系统的稳定运行,为电力输送、工业生产等系统中的电气控制提供有效保障,具有重要的现实价值。

关键词 PLC技术; 电气工程; 自动化控制; 信号采集; 智能控制

中图分类号: TM76; TP3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.008

0 引言

近年来,电气工程的发展对可靠性、智能化、自动化提出了越来越高的要求,因此,原有的电气控制方法显然难以适应当前电气工程产业的发展。以往的电气控制系统一般都是继电器—接触器控制方法,存在接线复杂、占用空间大等问题,且在电气控制系统调整的过程中,需重新改造电气系统的硬件接线,这对于电气控制系统的灵活调整造成了极大的不便,且极易因接线问题发生电气系统的停机等故障,其维修成本过高。在这种情况下,PLC技术便应运而生,逐渐应用于电气工程和自动化控制中,其以微处理器为控制核心,并且运用软硬件接口与编程技术,可以使电气控制系统更加稳定和灵活地控制电气设备,同时使电气控制系统具备较大的可扩展性能。目前,PLC技术不仅仅是在最初所具有的逻辑控制性能基础上,进一步拓展了模拟量控制、运动控制以及通信联网等方面的功能,还是连接电气设备与智能化管理系统之间的桥梁。研究PLC技术应用在电气工程自动化控制中的应用价值与应用现状,确定PLC技术的优越性和未来发展趋势,有利于电气工程自动化控制技术的不断提升,保证电气工程系统的健康运行。

1 PLC技术的核心特性与工作原理

1.1 PLC技术的核心特性

PLC技术在电气工程及自动化控制中,核心特性集中于三点。一是高可靠性,其硬件采用工业级标准设计,抗干扰能力突出,能抵御电气系统中常见的电压波动、电磁干扰,减少设备故障引发的停机,保障系

统连续稳定运行;二是灵活性强,依托软件程序实现控制逻辑,当控制需求变化时,无需改动硬件接线,仅调整程序即可,大幅缩短方案调整周期,适配不同规模与功能的电气系统;三是扩展性佳,具备标准化接口模块,可根据系统扩容需求,灵活增加输入输出、通信、模拟量控制等模块,无需大规模改造原有系统,降低升级成本,还支持与其他智能设备、控制系统联网,为智能化拓展提供可能。

1.2 PLC技术的基本组成

PLC控制系统是由硬件和软件联合组成的,缺一不可。硬件主要由中央处理器(CPU)、输入输出(I/O)模块、电源模块、存储模块、通信模块接口:CPU是最主要的CPU执行、处理数据、控制和协调模块;I/O模块连接电气设备是纽带,输入模块接收设备的状态输入信号,输出模块提供控制信号输出;电源模块为整个PLC系统提供稳定的供电电源,保证各部件的正常运行;存储模块包括程序存储器和数据存储器,程序存储器主要用于存放控制程序,数据存储器是保存控制实时的信号量;通信模块接口负责与其他PLC、上位机的通信,支持联网运行。软件包括系统软件和用户软件,系统软件是厂家预编程好的,主要用来管理硬件和分析程序,用户程序是由技术人员按照需求编写,明确控制逻辑^[1]。

1.3 PLC技术的工作原理

PLC技术在电气控制中遵循“循环扫描”原理,分三阶段循环往复实现持续控制。第一阶段为输入采样,通过输入模块采集设备状态信号,转换为数字信号后

存入输入映像区，阶段结束后数据保持稳定，待下次扫描更新；第二阶段为程序执行，CPU 按顺序执行用户程序，依据输入映像区与预设数据运算判断，将结果存入输出映像区，且仅读取输入映像区数据，实时更新输出映像区数据；第三阶段为输出刷新，将输出映像区最终结果转换为控制信号，通过输出模块发送至设备实现控制。循环周期多为毫秒级，保障控制实时性，满足精准需求。

2 PLC 技术在电气工程及自动化控制中的核心应用方向

2.1 电气设备的启停与逻辑控制

电气自动化的首要功能是电气设备启停逻辑控制。继电器—接触器的控制硬件接线固定，逻辑关系也固定，若需要启停逻辑关系变化，或者需要设备控制数量变化，那么必须对电气控制硬件接线重新接线；PLC 的电气控制软件编程灵活，电气工程师可按照设备运行的联动需求在编程软件中写入控制逻辑，即启动和停止的逻辑判断条件和启停逻辑关系，然后分别从输入通道采集电气设备的状态，经过处理器 CPU 进行计算后输出给电气设备的动作执行输出模块控制其启停。此外，PLC 控制系统可以控制多台电气自动化设备运行，并根据各个电气设备的负荷大小的变化自行控制电气设备的启停投切；同时，PLC 也可以编程实现不同电气设备控制之间的逻辑“互锁”，避免电气控制设备的误操作^[2]。

2.2 电气系统的模拟量控制与调节

在电气工程自动化中，控制温度、电压等连续变化的模拟量，也需要控制参数稳定，这就促进了 PLC 技术的加入。在以往的模拟量控制中，均是由专门的仪表完成，一套仪表只负责一个控制参数的调控，并且无法配合，同时其精度也很低、受外界干扰严重。PLC 中有模拟量输入与输出模块，输入模块能够将传感器采集到的模拟量转化为数字量传递到 CPU 中，由 CPU 中根据其预设的阀值运算与分析，当参数越限时，会通过输出模块发出控制参数，使执行机构调节参数至预设的合理范围，以此在质量上对比传统的仪表，PLC 所控制的参数更加精准，而且响应速率更高，PLC 能够对多参数进行联合控制，使得整个电气系统的稳定有进一步的保证。此外，PLC 技术还支持灵活的程序修改与功能扩展，无需更换硬件即可适配不同模拟量控制需求，大幅降低系统升级成本；同时，其具备的抗干扰设计，能有效抵御电气工程环境中的电磁干扰、电压波动等问题，减少参数控制偏差。部分高端 PLC 还

可与上位机系统联动，实现模拟量数据的实时监控与历史数据存储，为电气系统的故障排查与优化调整提供数据支撑。

2.3 电气系统的故障诊断与保护控制

电气工程中所涉及的故障诊断与保护控制属于核心内容，而 PLC 正是基于该实时采样、高效运算的特点起到关键的作用。根据以往的经验，人工巡查能够直观地反映机械设备的各个功能实现状态，然而这种巡查方式效率不高，并且极易导致隐蔽性故障无法被及时发现。同时，人工实现的保护功能仅仅依靠一些简单的保护器件，其范围较小。而 PLC 则能够完成“故障诊断—保护实施—诊断报警”等整个自动化流程：首先借助输入元件、传感器获得设备本身和线路的工作条件和状况，并将其储存到存储器当中；其次则由 CPU 按照预先设定好的逻辑对实际运行的结果进行分析，一旦出现超出范围运行的状态即能够判断具体的故障类型；之后自动实施保护机构从而避免故障的蔓延；最后则将故障状况反馈给上位机或者在现场的显示装置处显示出来，这样就能够对故障进行方便地查找及维修，从而提升电气工程故障处理的水平和质量^[3]。

3 PLC 技术在电气工程及自动化控制应用中的优化方向与发展趋势

3.1 PLC 技术应用的优化方向

当前 PLC 技术在电气系统与自动控制系统中应用广泛，若从抗干扰性能、程序编写与调试速度、系统设备兼容性三方面改进，可进一步提升其对电气系统的控制效果与系统整体运行效果。在抗干扰性能上，虽 PLC 本身具备一定抗干扰能力，但面对复杂电气环境（如强电磁干扰、高电压）时，易出现信号干扰或程序误运行，需从软硬件双端改良：硬件采用屏蔽电缆传信号、用滤波模块减干扰，软件则在 PLC 程序中增加信号识别条件语句与执行机构，识别并清除干扰信号，保障输入信号与程序准确。在程序编写与调试速度上，现阶段依赖操作人员经验编写，检验需实地调试，既效率低又不利于系统长期运行，可通过软硬件优化改善：软件端编制电机控制、模拟量调节等功能程序，供后续技术人员按需调用以避免重复编制；调试时先借助仿真软件在计算机上分析程序运行，提前排查逻辑错误，减少现场调试时间成本，提升编写与调试效率。在系统设备兼容性上，电气系统智能化升级后，PLC 需连接多设备，部分设备因通信协议不兼容，导致 PLC 难收有效信息、程序运行与信息交换受阻，需扩展 PLC 对 Modbus、Profinet 等协议的支持，且设

备联网前设计程序传输计算机软件，开发为与 PLC 兼容的通信接口模块，提升兼容性以加快程序运行速度，保障设备间信息及时传输。

3.2 PLC 技术在电气工程及自动化控制中的发展趋势

根据实际产业需求和未来发展方向，PLC 技术在电气工程自动控制领域的应用探索与研究主要有以下三方面的趋势：（1）与物联网（IoT）结合发展成“PLC+物联网”的综合控制。PLC 将朝着通过物联网模块连接到云端技术的方向前进，以实现系统的在线数据采集和云存储，利用云服务平台实现电气数据共享。工作人员可以通过手机、PC 等智能终端远程掌握电气系统运行状态，实现远程控制和调整以及故障诊断，突破传统控制的空间局限，有效提高电气远程控制水平。（2）向模块化、小型化方向发展。目前，使用电气系统逐渐增多，家用和小型工业设备自动化运行的趋势加快，传统的大型 PLC 已经不能满足应用需求，因此小型 PLC 很有开发潜力；另外，未来 PLC 将会整合 CPU、I/O 模块、通信模块等功能，实现一体化发展趋势，节省空间，降低能耗，满足不同规模的电气系统控制要求。（3）与大数据和人工智能相结合，提高智能判断和决策能力。PLC 可以基于大数据技术将长期运行数据汇总处理分析出高频故障的时间节点、电气运行中负载波动变化规律等数据信息，并通过人工智能算法实施预测性维护和智能负载等，将电气控制系统从“实时控制”向“智能决定控制”转变，并不断提高电气系统的运行效率和智能控制水平^[4]。此外，PLC 技术还将进一步强化通信兼容性，通过兼容更多工业通信协议，实现与变频器、传感器、机器人等设备的无缝联动，打破不同设备间的通信壁垒；同时，绿色节能设计将成为重要发展方向，通过优化硬件功耗与软件控制逻辑，减少 PLC 运行过程中的能源消耗，契合电气工程自动化领域低碳发展的产业需求，推动整体系统向高效节能方向升级。

3.3 PLC 技术应用优化与发展的保障措施

要促使 PLC 技术在电气工程和自动控制中的优化升级，需要从技术层、人才层和标准层三个方面做出保障，在技术层进行保障，PLC 制造商要增加研发投入力度，在掌握现有电气系统复杂应用需求基础上，研发更抗干扰的、运算速度更快的、有更多通信功能的 PLC 硬件，还要与电气设备制造商合作，协调电气设备 PLC 的相互优化，破除 PLC 和电气设备技术配合不好的瓶颈，使 PLC 顺利结合不同的电气系统进行安装和使用；在人才层进行保障，要形成“高校培养+企业培训”

的培养保障，在高校对电气工程和自动化专业进行课程改革，增添针对 PLC 编程、PLC 和物联网融合、PLC 智能控制等内容的课程，增强学生的专业基础，在企业对员工定期进行培训，强调新型 PLC 技术应用和发展方案，提高电气现场技术人员应用技术水平和创新能力，解决问题人力资源缺乏问题；在标准层进行保障，由行业管理部门组织相关单位制定出标准层的统一应用规范标准，其中包括 PLC 运行性能的评估标准、PLC 通信协议标准、PLC 网络安全规范等，对生产环节和应用层面的 PLC 进行规范标准，预防设备运行兼容性问题，还要规定质量检验检测机制，对 PLC 运行质量和效果严格检验，保证电气系统运行的安全性，从而为 PLC 的优化升级创造规范良好的行业环境^[5]。

4 结束语

PLC 技术是电气工程中自动化控制技术的核心，由于其具有稳定性高、使用灵活、较好的扩展性和采用“循环扫描”的工作方式，在电气设备开启与停止控制、系统内模拟量控制、故障处理与预防等方面充分发挥其作用，解决传统控制技术弊端，提高电气系统自控水平及安全性，为整个行业带来良好条件。目前，其不足之处还表现在抗干扰能力差、程序软件设计效率低、电气硬件设备接口匹配较差等问题，随着物联网、大数据技术的发展，其将与物联网结合、体积小巧及具有小型高集成化的特点和能够整合智能技术的趋势，采用技术攻关、人才建设、标准建设的方式不断进行改进和完善。未来，PLC 技术将更好地在行业内全过程结合，促进电气系统在功能方面实现“智能化管理”的模式转变，为诸多行业更高质量发展提供助力，应用潜力极大。

参考文献：

- [1] 崔欢.基于PLC技术的电气工程自动化控制分析[J].数字通信世界,2025(03):49-51.
- [2] 周长康.PLC技术在电气工程自动化控制中的应用[J].城市情报,2024(09):107-108.
- [3] 揭俊壕.PLC技术在电气工程及其自动化控制中的运用分析[C]//江西省工程师联合会.第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(三).五指山水务有限公司,2025.
- [4] 杨菲斌.PLC技术在电气工程自动化控制中的应用分析[J].Mechanical & Electronic Control Engineering,2024,06(01):174.
- [5] 王瑶.PLC技术在电气工程及其自动化控制中的应用分析[J].新潮电子,2024(11):115-117.

PLC 技术在电气自动化控制系统中的应用分析

高 信

(湖北商贸学院, 湖北 武汉 430079)

摘要 PLC 技术依托其灵活可编程、高可靠性、强抗干扰性等特性, 逐渐成为电气工程自动化控制领域的关键技术。回顾国内外研究现状, PLC 技术自诞生以来, 在理论研究和实际应用方面均取得了丰硕成果, 但随着工业生产需求的不断升级, 如何进一步挖掘 PLC 技术潜力、拓展其应用边界, 仍需深入探究。因此, 开展 PLC 技术在电气工程自动化控制中的应用研究, 不仅有助于加深对 PLC 技术的理解与应用, 也为电气工程自动化控制的创新发展提供了有益参考。

关键词 PLC 技术; 电气工程; 自动化控制

中图分类号: TM76; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.009

0 引言

随着工业自动化水平的不断提高, 机械电气控制装置在现代制造业中扮演着越来越重要的角色。传统的机械电气控制方式依赖于继电器、接触器等元件, 通过硬接线进行控制, 具有控制系统复杂、维护困难、灵活性差等局限性。为了提高生产效率、降低故障率、减少能源消耗, 越来越多的企业开始采用可编程逻辑控制器 (PLC) 技术进行自动化控制。PLC 作为一种用于工业自动化控制的数字电子设备, 通过其灵活的编程和高效的实时控制, 已成为自动化控制领域的重要工具, 广泛应用于各种机械电气控制装置中^[1]。

1 PLC 技术在电气自动化控制系统中应用的意义

1.1 工业级稳定性保障

PLC 作为专为严苛工业场景设计的控制设备, 其硬件架构采用三防设计理念。主板选用军工级元器件, 表面贴装工艺结合灌封技术, 形成 IP67 防护等级, 在 60 °C 高温、95% 湿度的环境中仍能保持稳定运行。某钢铁厂应用案例显示, 控制系统在轧机旁持续工作 36 个月后, 故障率仍低于 0.3%。设备内置的冗余设计包含双电源模块与热备切换功能, 当主电源波动超过 ±15% 时, 备用电源可在 12 ms 内完成无缝接管。智能诊断系统通过 LED 状态矩阵实时显示运行状况, 发现异常时自动触发故障日志, 并通过 MQTT 协议推送至运维平台, 使平均故障修复时间 (MTTR) 缩短至 28 min。

1.2 多模态编程架构创新

PLC 编程环境支持 IEC61131-3 标准, 提供可视化流程图 (SFC)、结构化文本 (ST)、指令列表 (IL) 等多种开发模式。在智能仓储系统开发案例中, 采用

模块化编程思想, 将货物识别、路径规划、机械臂控制等功能封装为可复用组件。通过拖拽式配置界面, 工程师可快速搭建控制逻辑, 使开发效率提升 60%。针对复杂算法需求, 支持 Python/C 混合编程接口, 某新能源企业利用此功能实现光伏板追踪算法的原型验证到部署仅耗时 72 h。版本控制系统集成 Git 功能, 支持程序回滚与历史记录追溯, 确保工艺升级的安全性^[2]。

1.3 全生命周期管理优化

PLC 采用插拔式模块化设计, 支持带电热插拔技术。在某化工企业的流体控制系统中, 当模拟量输入模块意外损坏时, 技术人员在不停机状态下完成更换, 整个过程耗时不足 15 min。集成的远程维护平台基于 WebAccess 技术, 支持跨平台访问, 运维人员可通过智能手机实时监控 50 km 外的设备状态。程序更新采用差分升级技术, 仅需传输修改部分, 某汽车零部件制造商通过该方案将 200 台设备系统升级时间从 4 h 压缩至 35 min。配置数据采用 AES-256 加密备份至云端, 确保数据安全的同时满足合规审计要求。

2 工业电气自动化的特点

通过利用电气设备、控制元件、传感器和计算机科学等新型科学技术对生产环节进行全方位监视, 并致力于智能化控制手段和自动化生产技术的发展, 以此来使生产过程保持高度可靠性和更高水准精准度的一种自动化系统就是电气自动化, 它由传输网络、传感器和执行机构等来组成, 可以支持使用者采集所涉及的生产参数, 并通过自动控制各个作业流程完成分析处理等工业生产过程中所需要的环节。电气自动化具有普遍性、高效性和科技发展性等三个特点。

一是普遍性。电气自动化系统能够被运用到工业生产过程中的各个角落，其适应性非常广泛，包括小组件的材料选择以及对生产过程进行实时监控等方面。

二是高效性。这一特点也是电气自动化技术最为突出的特点。为了提升自身的生产效率，工业企业通过引入电气自动化技术有效减少了部分繁琐工序，使得生产方式和生产步骤都得到了一定的简化，进而提升了工业生产的整体效率，带动工业制造行业的发展。

三是科技发展性。在科学技术的发展过程中，电气自动化技术也会跟随科学技术的变化而变化，两者呈现出相辅相成的发展趋势。同时电气自动化技术是以科学技术发展为基础的，只有在这种情况下才能实现相应的技术升级，从而使其在工业生产中能有更加优秀的表现^[3]。

3 PLC 技术在电气自动化控制系统中的应用分析

3.1 顺序控制应用

顺序控制是电气工程自动化控制的基本任务，它依据预定顺序和时间间隔执行操作。在顺序控制应用方面，PLC 技术依据预先设定的逻辑顺序，精准控制电气设备的启动、运行和停止。在食品饮料生产线上，PLC 能够按照工艺流程，有序控制清洗设备、灌装设备、封盖设备等的运行。从空瓶进入生产线开始，PLC 控制输送带将瓶子依次送入清洗环节，完成清洗后，精确地将瓶子输送至灌装工位进行液体灌装，灌装完成后控制封盖设备进行密封操作，整个过程严格遵循设定顺序，避免设备误操作和工序错乱，极大提高了生产的有序性和产品质量稳定性。

3.2 开关量控制应用

在开关量控制应用上，PLC 技术取代传统继电器控制，实现对电气设备的开关状态精准控制。以工业厂房的照明系统为例，PLC 可根据时间、环境光线强度等条件，自动控制照明灯具的开启与关闭。在白天光照充足时，PLC 通过检测光线传感器信号，自动切断大部分照明回路；而在夜间或光线不足区域，则有序开启相应灯具，并且还能结合人员活动传感器，在无人区域自动关灯，实现节能与按需照明^[4]。

3.3 闭环控制应用

闭环控制作为电气工程自动化控制的高级策略，依托实时监测与调整被控对象反馈信号来实现精确控制。在此过程中，PLC 技术凭借强大的数据处理与逻辑运算能力，构建起高效精准的自动调节体系。以恒压供水系统为例，PLC 通过压力传感器实时采集管网压力数据，并将其与预设压力值进行对比，经 PID（比例—积分—

微分）算法运算后，输出控制信号调节水泵转速或启停水泵数量。当用水高峰导致管网压力下降时，PLC 迅速增加水泵转速或启动备用泵，使压力回升至设定值；用水低谷时则降低转速或关闭部分水泵，确保压力稳定的同时实现节能降耗。这种闭环控制模式让系统能够根据实际工况动态调整，有效避免传统开环控制中压力波动大、能耗高的问题，保障供水系统稳定运行。

3.4 离散制造业的智能化重构

3.4.1 汽车总装线的多模态协同控制

在新能源汽车总装车间，PLC 系统构建了设备协同控制的中枢神经。以某车企电池包装配线为例，采用 Beckhoff CX5140 嵌入式 PLC 构建分布式控制网络，集成 EtherCAT 实时以太网协议，实现控制周期压缩至 50 μs。系统通过 128 通道数字量输入模块采集 24 种传感器信号，包括激光位移传感器（精度 ±0.02 mm）、六维力传感器（分辨率 0.1 N）及视觉引导系统的坐标数据。在关键工位，PLC 实施动态任务调度算法，当 AGV 运送电池模组到位时，触发 RFID 读写器验证物料编码，PLC 在 3 ms 内完成信息校验并激活机器人程序。装配过程中，PLC 采用自适应 PID 算法控制伺服电机转速，根据实时扭矩反馈调整脉冲输出，确保 M6 螺栓预紧力控制在 (12±0.5) N·m。系统同步集成 ANDON 看板功能，当出现漏装或错装时，PLC 驱动声光报警器在 HMI 呈现三维故障定位图^[5]。

3.4.2 机床中心的认知型控制升级

高端数控机床的 PLC 控制系统正在向认知型控制演进。例如：某精密模具加工企业引进的 Siemens S7-1500PLC，配备工艺专家系统模块，内置 15 类材料加工参数库。在刀具管理环节，PLC 通过振动传感器监测刀具磨损状态，采用小波包分析算法处理振动信号，当特征频率超过阈值时自动触发换刀流程。换刀过程采用双机械手协同作业，PLC 控制刀库旋转加速度达 12 rad/s²，换刀时间压缩至 1.8 s。在冷却系统控制中，PLC 实施数字孪生策略，建立机床热变形模型，通过 16 通道热电偶实时采集温度场数据，预测主轴热伸长量并动态调整冷却液流量。实验数据显示，该策略使加工精度稳定性提升 40%，刀具寿命延长 35%。

3.5 故障模拟

在系统动态响应模拟中设定了多种工况条件，包括各类负载变动和电机转速指令的调整，以此来检验系统的反应速度与稳定性。一旦系统从静止状态接收到启动信号，PLC 即刻做出快速响应并指挥电机启动。实验结果显示，电机转速于 0.45 s 内自零加速至其额定转速的 95%，这表明 PLC 的启动响应速度极为高效。在电

机维持稳定运转时引入了负载突增和突减的仿真测试。实验数据揭示，当负载增加 20% 时，系统能在 0.3 s 内适应并稳定于新工作状态；当负载减少 20% 时，系统同样能在 0.25 s 内恢复正常，充分证明了 PLC 在面对负载变化时的出色调节性能。

为了评估系统的故障检测、诊断与恢复性能，在故障模拟过程中构建了多种潜在故障场景，包括传感器故障、执行器故障以及通信链路故障。通过这些模拟，全面了解系统的应对策略及其有效性。当模拟传感器出现故障时，PLC 展现出高效响应，能在短短 0.15 s 内识别出异常并启动警报机制。PLC 具备智能切换功能，能够自动启用备用传感器，从而保证系统的不间断运行。在执行器故障的模拟测试中，PLC 能快速定位问题并执行安全停机程序，确保系统的稳定性和安全性。实验结果显示，从故障识别到系统完全停止运行的时间不超过 0.2 s，有效地防止了由于执行器故障引发的系统损害或安全事件。针对通信故障的模拟，PLC 能够在 0.5 s 内迅速检测到通信中断现象，并尝试切换至备用通信通道。实验数据表明，备用通信通道的切换成功率达到 99%，成功地维持了系统数据的连续传输和整体稳定性^[6]。

3.6 运动控制应用

在运动控制应用方面，PLC 技术为电气设备的精确运动操控提供了可靠解决方案。在数控机床加工过程中，PLC 与伺服驱动器、编码器协同工作，实现对机床各轴运动的精准控制。PLC 接收数控系统的指令，将其转化为脉冲信号和方向信号发送给伺服驱动器，驱动器驱动伺服电机运转，带动机床工作台或刀具按预定轨迹运动。同时，编码器实时反馈电机的实际位置和速度信息给 PLC，PLC 通过闭环控制算法对运动误差进行补偿，确保加工精度达到微米级。

4 PLC 技术在电气自动化控制系统中的发展趋势

4.1 认知智能技术融合

新一代 PLC 正在向认知智能方向进化，通过集成边缘计算单元实现本地 AI 推理。以某光伏设备制造商为例，其 PLC 控制系统搭载数字孪生引擎，实时构建设备运行状态模型，结合强化学习算法动态优化跟踪角度控制策略，使发电效率提升 4.2%。在故障预测领域，采用迁移学习技术构建多源异构数据融合模型，某风电场通过振动频谱分析与历史维护数据关联，实现齿轮箱故障预测准确率 92%，将计划外停机减少为 65%。这种认知智能升级使 PLC 从单纯执行控制指令向自主决策转变。

4.2 云边端协同控制架构

在工业互联网框架下，PLC 正成为边缘计算节点的重要组成部分。以离散制造场景为例，通过部署 TSN 时间敏感网络，构建 PLC—工业 PC 云平台的分层控制体系。某汽车零部件工厂实现 AGV 调度、冲压机控制、质量检测系统的纳秒级同步，使产线协同效率提升 38%。在分布式控制方面，开发基于区块链的智能合约技术，实现多 PLC 节点的可信协作。

4.3 推进设备智能化与标准化建设

智能终端设备在变电站与配网节点部署具备边缘计算能力的多核处理器架构，其嵌入式系统集成实时操作系统与轻量化虚拟化容器，支持保护测量算法与通信协议的动态加载更新。互操作体系构建遵循 IEC61850 标准的统一信息模型，采用制造报文规范与采样值传输协议分离的通信栈设计，使不同厂商设备能够解析语义一致的逻辑节点数据格式。系统集成平台建立设备能力描述文件的自动注册机制，该机制利用动态服务组合技术自动生成设备控制指令序列，保障跨安全域数据交互的完整性与机密性，形成从终端接入到业务调度的全链条标准化支撑能力^[7]。

5 结束语

随着工业智能化、网络化的发展，PLC 技术仍面临诸多挑战，如与新兴技术的深度融合、应对更复杂控制需求等。未来研究可聚焦 PLC 技术与人工智能、物联网等先进技术的融合创新，探索其在智能电网、智慧工厂等领域的应用模式，进一步提升 PLC 技术在电气工程自动化控制中的应用效能，为电气行业的可持续发展注入新动力。

参考文献：

- [1] 刘福强. 基于 PLC 技术的电气工程自动化控制系统设计研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, 45(01):129-131.
- [2] 陈征远. 电气自动控制技术在新能源汽车中的应用 [J]. 汽车画刊, 2024, 13(09):8-10.
- [3] 同 [2].
- [4] 马奇友 .PLC 技术在电气仪表自动化控制中的应用研究 [J]. 现代盐化工 ,2025,52(01):97-99.
- [5] 张俊莲 .PLC 技术在电气工程自动化控制中的应用 [J]. 造纸装备及材料 ,2025,54(02):55-57.
- [6] 马奇友 .PLC 技术在电气仪表自动化控制中的应用研究 [J]. 现代盐化工 ,2025,52(01):97-99.
- [7] 袁苑 .PLC 技术在钢铁冶金企业电气自动化控制中的应用研究 [J]. 冶金与材料 ,2025,45(01):53-55.

GPS 定位系统在大比例尺地形图测量中的应用

包宇峰

(江西星辰工程技术服务有限公司, 江西 九江 332400)

摘要 随着全球卫星导航系统技术的飞速发展, 以 GPS-RTK 为代表的空间定位技术已成为大比例尺地形图测量的核心手段。本文系统阐述了 GPS 定位系统的构成与工作模式, 阐释了 GPS-RTK 技术在大比例尺测图中的核心优势, 通过具体应用实例, 详细论述了其在控制测量、像控点测定、碎部点采集、线路放样及用地测量等关键环节的实践方法。研究结果表明, GPS 技术不仅极大地提升了测量作业的效率与精度, 而且通过与全站仪、无人机航测及 EPS 地理信息系统等现代技术的集成应用, 构建了高效、智能的综合测绘解决方案, 为现代城市规划与工程建设提供了数据参考。

关键词 GPS; 大比例尺地形图; RTK 技术; 控制测量

中图分类号:P22

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.010

0 引言

大比例尺地形图(如 1:500、1:1 000)作为城市规划、土地管理、工程建设等领域不可或缺的基础地理信息资料, 其数据的准确性、现势性和完整性直接关系到后续工作的质量与效率。传统的地形图测量主要依赖于光学经纬仪、测距仪等地面测量仪器, 通过导线、交会等方法获取数据。这类方法对测点间的通视条件要求严格, 在复杂地形或植被茂密区域作业困难, 且测量效率低下, 误差随测量距离的增加而累积, 难以满足现代高精度、高效率的测绘需求。GPS 的出现, 特别是 RTK 定位技术的成熟, 使得厘米级精度的实时三维坐标获取成为可能。GPS 技术以其不受通视限制、作业效率高、定位精度好、误差不累积等显著优势, 迅速在大比例尺地形图测量中得到广泛应用。它不仅能够高效地完成控制网的建立和加密, 还能直接进行碎部点的采集与放样工作, 极大地简化了作业流程。

1 GPS 系统的构成与工作模式

GPS 定位系统是由空间、地面和用户三部分协同工作的复杂网络, 共同构成了“天—地—人”一体化的定位体系。空间部分——卫星星座是系统的信号源。由多颗运行在约 20~200 公里高空的卫星组成, 它们分布在多个轨道平面上, 确保地球上任何地点、任何时刻都能同时观测到至少 4 颗卫星。地面部分——监控系统是系统的“大脑”和“校准中心”。它由分布在全球的监测站、主控站和注入站构成。监测站持续跟踪所有可见卫星, 收集其信号; 主控站利用这些数据计算每颗卫星的精确轨道和时钟偏差; 最后, 通过注入站将这些关键的修正参数上传给卫星, 确保其广播

的信息始终准确无误。接收机是直接面向使用者的终端设备。无论是专业的双频大地测量接收机, 还是智能手机中的单频芯片, 其核心功能都是接收来自多颗卫星的信号。接收机内部的处理器会精确测量信号从卫星传播到接收机所需的时间(即信号时延)。由于无线电信号在真空中的传播速度等于光速(c), 根据公式“距离 = 光速 × 时延”, 即可计算出接收机到每颗卫星的距离。卫星作为空中的“已知点”, 广播其位置和时间; 地面监控系统确保这些“已知点”的信息绝对可靠; 用户接收机通过接收并处理来自多个“已知点”的信号, 利用距离交会的几何原理, 最终解算出自身在地球上 的三维坐标(经度、纬度、高程)以及精确的时间^[1]。

2 GPS 测量技术在大比例尺地形图测量中的优势分析

2.1 与传统测量方法的比较

GPS-RTK 技术与传统测量方法关键性能对比见表 1。

2.2 GPS-RTK 技术的关键性能特点

首先, 作业范围广, 控制面积大。一个基准站的有效作业半径可达数公里(如文件中提到的南方瑞得设备电台距离典型为 8 km)。这意味着单次设站即可覆盖一个相当大的测区, 无需像传统导线那样布设大量中间控制点, 显著减少了外业工作量, 特别适用于城市控制网、大面积土地勘界等任务^[2]。

其次, 定位精度高, 满足规范要求。现代 RTK 技术的平面定位精度可达 $(8 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} D) \text{ mm}$, 高程精度可达 $(15 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} D) \text{ mm}$ (D 为距离, 单位 km)。这一精度水平完全符合 1:500、1:1 000 等大比例尺地形图对地物点和地形点的精度标准, 为测绘成果的高

表 1 GPS-RTK 技术与传统测量方法关键性能对比

对比项目	GPS-RTK 测量技术	传统光学测量
通视要求	无需点间通视。只要测点上空视野开阔，能接收到足够卫星信号即可作业	严格依赖通视。测站点与待测点之间必须保持清晰的视线，否则无法测量
作业效率	极高。单人即可完成碎部点采集，日均点数可达上千甚至数千个。控制网建立速度快	较低。需多人配合迁站、对中整平，且受通视条件限制，布设困难，整体周期长
测量精度	高且稳定。平面精度可达 $\pm (8 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6}D) \text{ mm}$ ，高程精度可达 $\pm (15 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6}D) \text{ mm}$	受距离影响。在短距离内精度高，但长距离导线测量时误差会逐站传递和累积
误差特性	独立测量，无误差传播。各点坐标独立解算，互不影响，避免了长距离测量的精度衰减	存在误差累积。后一测点的精度依赖于前一测点，误差随导线延伸而累积
适用范围	适合大范围、开阔区域。作业半径可达数公里，特别适用于城市控制网、大面积土地勘界等	适合小范围、通视良好区域。在建筑密集区或植被茂密区作业困难，效率低下
自动化程度	高度自动化。流程简单，操作便捷，主要工作是立杆和记录，降低了对人员技能的要求	自动化程度低。需要复杂的仪器对中、整平、瞄准

(注：表中 D 代表流动站到基准站的距离，单位为 km。)

质量提供了根本保障。

再次，测量模式独立，无误差传播。这是与传统测量方法的本质区别。传统导线测量中，后一个点的坐标精度依赖于前一个点，误差会逐级累积。而 RTK 测量中，每个碎部点的坐标都是基于卫星信号和基准站改正数独立解算的，各点之间互不影响，有效避免了长距离测量中的精度衰减问题^[3]。

最后，操作流程简便，自动化程度高。整个测量过程高度集成和自动化。操作员只需在流动站上立杆，待手簿显示“固定解”且精度达标后，即可一键记录坐标。无需复杂的对中、整平和角度观测，大大降低了对操作人员技能的门槛，实现了单人高效作业，显著提升了生产效率。

3 GPS 技术在大比例尺地形图测量中的具体应用

3.1 在控制测量中的应用

对于大范围测区，传统的三角网或导线测量受限于通视和距离，布设复杂且周期长。采用 GPS 静态测量，只需在测区周边布设数个点，同步接收卫星信号数小时。通过事后精密基线解算和网平差，即可获得高精度、高可靠性的三维坐标，作为整个测区的基准框架。此方法不受地形起伏和植被遮挡影响，极大地提升了首级控制网的建立效率。在首级控制的基础上，需加密图根点以满足碎部测量需求。GPS-RTK 技术在此环节优势显著。测量员可在已知控制点上架设基准站，利用流动站快速测定图根点坐标。由于无需点间通视，图根点可布设在最利于后续作业的位置，优化了工作流程^[4]。

3.2 在像控点测量中的应用

根据航摄设计的像控点布点图，测量人员携带 RTK 设备前往各点位。在点位稳定架设对中杆，待接收机

获得“固定解”且平面、高程精度均满足规范要求后，即可记录该点的精确坐标。整个过程快速、直接，避免了传统引测方法的繁琐和误差累积。RTK 技术实现了像控点的“一步到位”测量，无需逐级导线引测，大幅缩短了外业周期。对于难以直接到达的点（如屋顶、水塘边），可利用 RTK 手簿的“交会法”或“偏心测量”功能进行间接测定。

3.3 在碎部点数据采集中的应用

在测区已知控制点上架设基准站并完成初始化；流动站操作员携带设备前往各碎部点；在点位待接收机显示“固定解”，且平面校差（如 $< 5 \text{ cm}$ ）和高程校差（如 $< 3 \text{ cm}$ ）满足要求后，输入点号（如按编码规则“L”代表道路、“F”代表植被）并记录坐标。此流程简单、高效。得益于单人作业和点间移动迅速的优势，RTK 外业效率远超传统方法。在开阔区域，日均采集点数可达上千甚至数千个。外业数据通常以仪器专用的 DAT 格式存储，后期通过“测点成果输出”功能转换为 CSV 等通用格式，便于导入数字地面模型软件进行三角网构建和等高线生成，作为地形图的底图。

3.4 在线路定线与建筑物规划中的应用

在线性工程和大型建筑项目的规划与施工中，GPS-RTK 技术提供了高效的放样解决方案。将道路、管线等线性工程的设计参数（起点、终点、转角、半径等）预先输入 RTK 手簿的放样软件。现场作业时，手簿会根据流动站的实时位置，动态显示其与设计线路的横向和纵向偏移。操作员只需依据指引移动，直至偏移量归零，即为设计点位。此过程直观、高效，一人即可完成，极大简化了放样工作。对于大型建筑群或工业园区，需精确协调各单体间的空间关系。利用 RTK

技术，可快速、精确地测定建筑物的角度、轴线点等关键位置的坐标，确保规划方案的准确实施。其提供的高精度三维坐标数据，也为土方计算和施工监控提供了可靠依据。作业时需确保点位收敛精度满足要求，避免在“浮动解”状态下测量。

3.5 在用地测量与小区域调控中的应用

在土地确权、不动产登记和城市精细化管理中，GPS技术提供了精确、高效的测量手段。通过RTK技术精确测定土地的每一个界址点坐标，可计算出用地范围的精确面积、周长等数据，为土地调查、权属划分和登记发证提供法定依据。其测量结果客观、准确，减少了纠纷。在智慧城市建设中，GPS是实现小区域精细化管理的重要工具。其全天候、高精度的定位能力，结合信息化平台，能有效提升城市治理的智能化水平，预防和应对各类突发事件^[5]。

4 项目实践

4.1 项目概况与技术方案

为配合某市新区的详细规划与土地开发，需对一片总面积约42公顷的待开发区域进行1:1 000大比例尺地形图测绘。该区域地形复杂，包含起伏的丘陵、茂密的灌木丛（荆条）、山涧沟壑以及部分待拆迁的零星建筑，传统的全站仪测量面临通视困难、效率低下等挑战。项目最终采用了以GPS-RTK技术为核心，结合全站仪、无人机航测及EPS地理信息系统的综合解决方案，取得了显著成效。

项目周期原计划为5个月，配备了5名专业技术人员、一套南方瑞得R6GNSS设备（1基站+2流动站）、2台全站仪及1台无人机。首先，利用GNSS静态测量在测区外围布设了6个高等级控制点，作为整个项目的基准。对于开阔的山坡和丘陵地带，主要采用GPS-RTK技术进行碎部点采集。2个流动站小组分片作业，日均采集点数超过1 800个。在山脚、沟底等GPS信号易受遮挡的区域，以及需要高精度测量的零星建筑角点，派遣全站仪小组进行补充测量。利用无人机对整个测区进行了一次航飞，获取了高分辨率的正射影像和数字表面模型，为内业编辑提供直观的参考底图。

4.2 应用过程与成效

GNSS静态测量仅用2天即完成了6个控制点的观测，解算出的坐标精度远超规范要求，为后续工作奠定了坚实基础。这相比传统导线测量，节省了至少一周的时间。GPS-RTK小组在信号良好的区域，单人即可高效作业。流动站到达碎部点后，待手簿显示“固定解”且平面校差小于3 cm、高程校差小于5 cm时，记录点号（如“L101”表示道路点，“F205”表示植被点）和坐标。对于灌木丛中的地形特征点，内置的IMU

惯性传感器确保了即使杆子有轻微晃动，也能快速稳定地获取精确位置。

当GPS小组在山坡作业时，全站仪小组在山脚的沟壑中，以附近的GNSS控制点为测站，进行碎部点测量。两者的数据通过统一的坐标系进行整合，保证了数据的无缝衔接。无人机航飞获取的影像被导入EPS软件，作为外业调绘和内业编辑的背景图，极大地提高了地物识别的准确性。

所有外业数据均导入EPS地理信息工作站。在EPS平台中，实现了内外业一体化编辑。例如：利用其“符号骨架线一体化显示”技术，编辑人员在屏幕上看到的房屋轮廓既是符合图式的面状符号，其背后又关联着建筑物的属性信息（如层数、结构）。通过“自动套岛”“等高线赋值”等功能，快速完成了地形图的精细化处理。最终，仅用120天（比计划提前30天）便完成了全部外业和内业工作，成果数据通过EPS的“信息映射机制”成功转换为DWG和SHP格式，交付给设计单位和城市规划部门，获得了高度认可。

5 结束语

GPS定位系统，特别是其RTK技术，凭借其独特的技术优势，已彻底改变了大比例尺地形图测量的传统作业模式。它成功突破了传统测量对通视条件的依赖，实现了测量点的独立、快速、高精度定位，极大地提升了外业作业效率和内业数据质量。从首级控制网的建立，到图根点的加密，再到碎部点的采集与放样，GPS技术贯穿了大比例尺测图的各个环节，成为不可或缺的核心技术。更重要的是，GPS技术并非孤立存在，它与全站仪、无人机航测以及EPS地理信息系统等现代技术的协同与融合，形成了一个高效、智能的综合测绘体系。这种“天地一体、内外业一体化”的作业模式，不仅实现了测绘生产流程的优化，更推动了测绘成果从静态的“图”向动态的“库”转变，为智慧城市建设、精细化管理提供了坚实的数据基础。

参考文献：

- [1] 李会会.北斗/GPS双模定位技术在土地面积测绘中的应用[J].科学技术创新,2025(12):59-62.
- [2] 刘有成.GPS测量技术在土地测绘中的应用分析[J].智能建筑与智慧城市,2025(02):39-41.
- [3] 敦文飞.GPS技术在地质工程勘察测绘中的应用[J].全面腐蚀控制,2025,39(02):28-30.
- [4] 郎森欣,武加斌.GPS测绘地理信息系统在智慧城市测绘工程中的应用研究[J].中国房地产业,2025(18):42-45.
- [5] 张榕.GPS技术在测绘工程中的应用路径[J].建筑工程技术与设计,2025,13(29):22-24.

风力发电自动化控制系统中 智能化技术的应用

袁宋玉

(国家能源集团国源电力有限公司内蒙古分公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要 风力发电作为新能源技术体系的关键支撑, 正深刻而长远地影响着全球能源格局的演变。近年来, 智能化技术与风电领域的深度融合实现了显著突破, 既有效优化了机组运行效率, 又依托智能化故障预判与运维体系, 大幅降低了运维投入, 为电网运行的安全性与稳定性提供了有力支撑。基于此, 本文系统梳理了智能化技术在风电自动化控制系统中的应用价值, 重点探究其在风电机组自动控制中的具体实施路径, 以期为提升设备利用率与能源转化效率、压降运维成本、延长设备服役周期提供参考, 进而促进风电产业可持续发展。

关键词 风力发电; 自动化控制系统; 智能化技术

中图分类号: TM61; TP27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.011

0 引言

面对全球能源供需矛盾加剧与气候变化挑战凸显的双重压力, 开发利用可再生能源已上升为国际社会共同行动方向, 风能作为典型的清洁可再生能源, 风电发展不仅创造了突出的环境效益, 其应用场景更随着技术进步持续拓展。值得关注的是, 风力发电机组的高效稳定运行, 离不开智能化控制技术的深度赋能, 与此同时, 碳排放配额机制的落地, 进一步抬高了风电产业的绿色发展标准。在此背景下, 如何通过智能调控手段提升发电效能、降低单位电量碳排量, 成为助力碳减排目标达成的关键问题, 脓需开展系统性研究。

1 风力发电机组概述

1.1 风力发电机组运行原理

风力发电机组的核心是将空气流动的动能转化为电能, 其能量传递遵循明确的技术路径, 风作用叶片产生气动推力, 推动叶片绕主轴旋转。此过程完成风能向旋转机械能的初步转换, 旋转的主轴通过联轴器将扭矩传递至增速传动装置, 通常为多级齿轮箱, 经增速后将低转速提升至发电机适配的高转速, 发电机基于电磁感应原理, 将输入的机械能转化为三相交流电输出, 依赖集成化的监控系统实时调节运行参数, 维持机组稳定工况^[1]。

1.2 风力发电机组构成

风力发电机组的组成包括诸多部件, 具体包括以下几个部分: 一是叶片, 其主要是进行能量捕获, 依

托于空气动力学进行风能的获取, 并进行扭矩的传递。二是传动链系统, 该系统主要包括主轴、齿轮箱等, 其作用在于将叶片的低速旋转转变为发电机所需的转速, 实现转速的动态调整以发电。三是发电机, 发电机的作用在于可以将机械能进行转换, 转变为系统所需电能。现阶段发电机包括两类, 分别是双馈异步发电机以及永磁同步发电机。四是控制系统, 控制系统内置传感器、控制器以及其他执行机构, 主要是对系统的工况进行动态监测, 并进行参数的有效调节。一旦发生故障, 也可以第一时间发出响应。五是支撑结构, 该结构包括塔架和结构基础, 共同承担机组的运行载荷, 保证系统运行的稳定性及可靠性。

1.3 风力发电机组控制系统

在风力发电控制系统的运行过程中, 其具有的功能包括以下几个方面: 一是状态感知, 依托于传感器的有效运用, 进行转速、功率、电压、温度等数据参数的实时采集。二是动态调节, 综合系统获取的风向和风速数据信息, 利用变桨执行机构进行叶片桨距角的有效调整, 以确保机组运行的稳定性, 始终保持在最优功率曲线区间内。三是故障管理, 通过对系统运行异常参数的全方位监测, 一旦发生故障也可以触发停机和降载保护指令, 有效规避故障问题的扩大, 引发重大安全问题。四是数据交互, 将系统中存储的数据传输到监控平台, 对数据进行全方位分析, 掌握故障发生的原因, 并提供优化建议。五是电网协同, 通过对接通信接口和电网调度系统, 可以严格依照系统

发出的指令输出有功和无功，以适应系统的并网需求。

2 风力发电自动化控制系统中智能化技术的应用价值

2.1 优化生产效能，提升电能质量

风力发电自动化控制系统引入智能化技术后，依托对风电机组运行状态的实时动态追踪，可实现对机组性能的自适应优化，这一技术赋能下，风机能随外界风速变化自动匹配最优运行参数，切实增强了机组运行效率与输出电能的稳定性。从风电场整体运营视角看，智能化技术还能针对风机空间布局、功率输出曲线等关键环节实施精细化调节，进一步挖掘发电潜力、提升经济收益，为风电场长期高效稳定运行注入强劲动力^[2]。

2.2 降低运维成本，增强作业安全性

传统风电机组运维多依赖人工巡检，不仅耗时长、劳动强度大，故障判别准确性也常受限于经验判断，智能化技术的融入，使风电机组预知性养护成为可能，通过全天候采集分析机组运行数据，智能系统能提前识别潜在故障征兆并发出预警，大幅降低突发故障引发的意外停机风险，进而有效控制运维投入。此外，智能化技术还可联动无人机等智能装备执行日常巡检任务，既提升了巡检覆盖面与效率，又避免了人员攀爬塔架等高危操作，显著降低了现场作业安全隐患。

2.3 适配新型电力系统，拓展市场价值边界

智能化技术助力风电深度融入新型电力系统，通过AI算法融合多源数据实现高精度功率预测，平抑出力波动，降低并网冲击。依托虚拟电厂技术聚合分散机组与储能资源，参与电网削峰填谷及辅助服务，提升消纳能力。同时精准捕捉市场价格波动，优化交易策略，规避偏差考核风险，拓展绿电交易与辅助服务盈利渠道，推动风电从单一发电主体向综合能源服务商转型，释放多元市场价值。

3 风力发电自动化控制系统中智能化技术的应用策略

3.1 功率预测与智能调度优化

风力发电作为新能源发电体系的重要支撑，其出力表现易受外部工况显著影响，若缺乏对未来气象条件的精准预判并动态调整调度方案，不仅会加剧电力资源损耗，更可能因机组出力无序波动冲击电网稳定，严重时甚至引发设备故障，扩大为区域性供电中断^[3]。其一，搭建高精度气象预演框架，夯实功率预估基础，通过整合多源气象数据构建天气预报模型，对特定时

段内的气象要素进行周期性推演，进而实现对单台机组乃至全场风电出力的预判。这类预测结果将直接服务于调度策略制定，实时同步至电网调度系统，助力提前采取应对措施，降低运行风险，具体需聚焦模型构建、动力集成预测及短期风速预判三大技术节点。其二，完善风电场运行特性建模，针对自然风况中的风速、风切变等核心参数，以及尾流效应、极端载荷等特殊场景，需建立针对性仿真模型，风电场整体模型包含自然风场模式与风切变模式。前者综合基本风、阵风、随机扰动及渐变风等多元因素，假设短时段内平均风速稳定，呈现相对平稳的特性；后者侧重描述静风条件下，不同海拔高度的平均风速变化规律，受地面摩擦、环境温度等因素影响，气流速度随海拔升高呈现差异化分布。其三，强化动力集成预测效能，通过融合数值模式输出与实际观测数据，修正模式预测的气象要素均值偏差，具体分为两步：首先，基于多元线性回归算法开展数值比对分析，自动识别并修正模式误差，定期更新统计参数；其次，优化混合系数，动态调整各模式因子与观测值的权重分配，逐步缩小零时预测误差。其四，融合前沿算法提升短期风速精度，在现有气象模式基础上，引入机器学习、动态集成预测等技术，对未来时段机组出力进行精细化预判，这类高精度预测结果可为自动化控制系统提供调度决策依据，推动电力资源优化配置与高效利用^[4]。

3.2 智能控制

依托智能算法与模型的调控手段，能显著提升机组运行效率与管理水平，已成为风电智能化发展的核心方向，通过持续采集并分析实时运行数据，系统可精准感知机组工况，针对性输出控制指令，实际应用中，需结合机组类型（固定桨距失速型、可变桨距型、变速恒频型）的特性，设计差异化控制逻辑。针对固定桨距失速型风机，当实际风速突破安全阈值时，系统触发失速保护机制，通过调整桨叶角度限制过载，同时利用气动特性优化能量捕获，避免无约束运行导致的设备损伤，根据桨距角与失速风速的关联特性，适度增大桨距角可进一步提升出力效率。对于可变桨距风机，重点在于动态调整功率特性以实现最优分配，当风速超设定值时，机组切换至启动、矢量控制及额定功率三种模式：启动阶段桨距角设为0度以快速建立初始转矩；进入运行期后，速度控制器实时调节桨距角，缩短并网时间，保障发电连续性。变速恒频风机的控制更为复杂，采用主控制器+转矩控制器+俯仰控制器协同架构：主控制器统筹全局逻辑，协调偏航、解缆等关键操作；转矩控制器以变速恒频为目标，根

据实时风速调整发电机与风轮转速，匹配最大升力桨距角，最大化风能利用效率；当风速超额定值时，变桨机制介入，维持功率输出稳定；风速偏离额定区间时，通过变桨策略平衡捕获效率与功率限制需求^[5]。

3.3 智能巡检

随着国内风电场建设规模持续扩大，场内风机及配套设备数量庞大，传统人工巡检模式的局限性愈发突出，检测频次不足、响应滞后的问题，不仅延长了设备故障持续时间，还可能加重设备损耗，甚至诱发连锁故障，加之行业普遍推行无人值守运营模式，依赖人力定期巡查的方式更难适配实际需求，企业运维成本始终处于高位，为破解这一难点，智能巡检体系的构建成为关键。具体实践中，可引入搭载多类传感器及高清摄像设备的无人机作为巡检载体，运维人员仅需在管理平台设置巡检任务，系统便会自主规划最优路径，同步实现远程作业监控、日常与环境状态监测，以及异常信息的集中采集，遇突发状况时，系统会快速触发预警，确保问题第一时间被捕捉。为进一步提升智能巡检的效率与精准度，重点应用了自动避障与AR可视化两项核心技术，自动避障功能依托激光测距与自主导航系统协同工作，能在设定安全阈值内主动规避障碍物，动态调整飞行轨迹，避免因碰撞引发设备损伤，AR可视化技术则借助空间定位与图像叠加，将巡检现场转化为直观的三维视图，辅助运维人员结合智能分析结果开展人工复核，大幅提高了故障判定的准确率。同时，巡检数据可自动同步至系统知识库，为后续故障诊断模型优化提供支撑，相较以往依赖文字或图表的统计汇报，这种立体化呈现方式让现场状态一目了然，助力人员快速锁定异常点并启动处置流程，真正实现了巡检从被动记录到主动预警的升级。

3.4 故障自愈

近年来，随着风电场单机容量与机组数量持续攀升，新一代风电机组的故障频发问题愈发突出，设备异常不仅威胁运行稳定性，更推高了运维成本、拉低发电效率，加速了机械部件损耗，针对这一行业痛点，亟需依托智能化技术构建故障自主修复系统，核心目标是通过精准识别与快速响应，最大限度降低人工干预依赖。该系统的运行逻辑可概括为感知、诊断、处置、进化闭环。

基于BP神经网络实时追踪机组状态，一旦捕捉到温度、振动或电压异常等信号，立即触发初级筛查程序，将可疑数据推送至智能诊断模块，此模块融合大数据分析与深度学习算法，既参考实时监测数据，又调用历史故障样本库，逐层剖析故障诱因并锁定具体部件，

最终生成包含故障等级、影响范围及处置优先级的详细报告。根据诊断结果，系统会自动匹配差异化处置方案，对线路接触不良、传感器信号漂移等暂时性问题，通过远程调控完成参数校正或部件重启，最快可在分钟级恢复运行；针对齿轮箱缺油、冷却系统失效等可自主干预的故障，触发自动补油、回路切换等预设流程，阻断故障蔓延；至于轴承严重磨损、发电机线圈烧毁等不可逆损伤，系统会先隔离故障单元，同步启动备用设备保障供电连续性，同时向运维中心发送含故障定位、诊断结论及维修建议的预警，并自动生成检修工单，精准调度人员携带专用工具到场。

该系统具备显著的自我进化能力，在完成每次故障处置后，可将完整的故障处理流程以标准化案例形式纳入系统知识库，并基于案例数据实现诊断模型与修复策略的动态迭代优化，持续提升故障处理效率与精准度。为全面强化系统运行可靠性，未来需深化数字孪生技术的融合应用，依托物理机组与虚拟镜像的实时数据交互，构建全场景故障模拟环境，为处置策略的优化完善提供科学决策支撑。同时，建议在机组关键区域部署边缘计算节点，有效降低云端数据传输延迟，即便遭遇极端天气、通信中断等突发状况，也能实现故障的毫秒级响应与闭环管理，最大限度减少对发电效率的不利影响。

4 结束语

在风电领域中，运用智能化技术已成为必然趋势，推动了风电系统的智能化转型。这一变革过程除了体现在成本优化和运营效率的提升两个方面，更重要的是电力系统的协同模式得到全面重塑，形成了智能化的运营体系，风机运维效率更高。这也是我国风电产业转型升级、实现高质量发展的核心。未来，随着人工智能技术的日益发展，风电产业将迈入新阶段。

参考文献：

- [1] 朱建成.人工智能+背景下的风力发电技术探析[J].电力设备管理,2024(24):129-131.
- [2] 杨森.人工智能技术在风力发电领域的应用[J].光源与照明,2024(11):243-245.
- [3] 邓银辉.风力发电技术与功率控制策略[J].电力设备管理,2024(21):89-91.
- [4] 姚建国.智能化技术在风力发电自动化控制系统中的应用[J].产业技术创新,2023,05(04):65-67.
- [5] 田晓鹏,邵雅宁,张峰,等.新一代人工智能在新能源领域中的典型应用场景分析[J].电气时代,2022(05):70-73.

电力工程输配电与用电工程 自动化运行技术研究

赵军

(国网山西省电力有限公司吕梁供电公司, 山西 汾阳 033000)

摘要 在输配电与用电工程领域, 通过引入电力自动化技术构建自动化运行管理体系, 能够有效保障电力系统的长期稳定与安全运行。本文从输电和用电工程中采用自动化运行技术的优势出发, 分析自动化运行的关键技术, 提出其在输配电及用电工程中的应用策略。通过构建完整的自动化运行技术体系, 对输配电系统进行全面优化升级, 以期为提升我国电力系统的运行效率与可靠性提供有益参考。

关键词 电力工程输配电; 自动化运行技术; 大数据; 自适应保护; 分布式能源系统

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.012

0 引言

电力自动化技术的全方位融入及运用, 对于电力管理自动化、电能精准配给等工作而言意义极为重大, 能进一步契合当下社会各行业的用电需求, 为社会生活与生产提供强大的助力。自动化技术的实现不能单纯依赖各项自动化设备、仪器, 应将互联网渗透性的电力数据加以全方位运用, 借助相关自动化监测软件和智能分析平台, 以多元数据解析和融合利用的形式, 将不同时段的电网负荷、配给需求等进行明确, 同时设置线路能耗损失感应元件, 形成汇集电能传输、电流监测、故障处置等多种功能的自动化运行管理系统。

1 自动化技术在输配电及用电工程中的应用优势

1.1 凸显电力系统运行效益

自动化运行技术对改善电网运行效率有重要作用, 其可以对电网各参数进行实时监测与管理, 确保相关电力设备一直保持最佳工作状态, 减少能源浪费和操作投入。借由构建具有自适应调整发电和分配功能的自动化控制系统, 减少不必要的负荷切换和频繁的开关操作。通过对这些数据的分析与预测, 可以实现对电网资源的合理配置, 促使电力系统的运行效益得以显现。

1.2 降低输配电及用电环节的电能损耗

采用自动化运行技术, 可对输配电及用电流程加以综合调控, 优化电能传输线路布局, 实现对线损的有效遏制目标。在电力工程中, 自动化运行技术的价值不单体现在输配电系统的管控层面, 更能借助用户的用电行为选择加以阐释。在此过程中, 对自动化运

行技术加以深层次挖掘和使用, 无论是输配电线路可能存在的线损情形, 还是用户用电行为的监测, 均能得以直观反馈, 进而帮助运行管理企业完成减损目标, 并以差异化电价的形式对用户不合理的用电方式加以调节, 达成预期的降耗目标^[1]。

1.3 凸显电力系统的运行安全性

在电力安全层面, 采取切实可行的控制手段, 将可能出现的设备与线路故障、运行事故等风险降至最低。其中, 远程监测方案的设置, 能借助先进的传感装置, 动态收集输配电线路的电压、电流、温度等数据, 即时反馈数据处理终端, 由技术人员进行数据解析与整合, 报告至管理部门形成决策意见。在远程监测系统的加持下, 相关管理与调控工作可覆盖整个电网, 运行与维护工作的执行仅需将决策信息下发给自动化控制单元, 即能完成整个故障识别、排查与检修流程。如当电力设备或线路出现异常运行数据时, 可借助实时监测与定位功能模块, 迅速查明故障信号的来源, 然后经由与历史资料及电力模型的对比, 精确判定故障所处区域及具体成因, 显著缩减故障判定与诊断所需时长。由此搭建的电力故障预警模型, 无疑畅通了电力数据的流通渠道, 将故障区域的情况、后续演变趋向等加以直观呈现, 切实凸显电力系统运行的安全性^[2]。

2 输配电及用电工程中自动化运行的关键技术

2.1 大数据与边缘计算

大数据在当下已逐步演变为各行业不可或缺的技术应用形式。借助数据挖掘与分析手段, 迅速且精确地获取数据, 为后续决策提供基础支持。在此过程中,

电力设备及线路中设置的内嵌式传感器发挥了关键作用，其能提供电力设备与线路的运行参数，实时反馈给管理单元，构建起“数据传输—清洗—应用”的管理闭环。

边缘计算作为一类有着自身特色的算法体系，支持集中处理各类电力运行数据的功能。其将不同数据处理与其生成位置进行连接，在配网各节点设立单独的管理单元，完成电力数据的初步筛选和提取，并将关键信息片段传输至中央服务器。该技术采用分布式结构，对以往因数据传输带来的延时性问题加以彻底解决，能够精准定位异常数据、迅速排除故障区域。

2.2 自适应保护

自适应保护技术的关键在于外部环境感知与自适应调控，以此确立自动化、高效化的电力系统运行模式。首先，经由对电力系统的运行数据实时动态监测，依据各设备及线路的运行状态，自动调节保护设备的工作电压、电流等参数。而且，自适应保护机制的确立主要依托实时数据传输与交互，对由各传感装置采集的数据加以分析和提取，实现对电力系统整体运行状态的全方位认知，为相关决策提供必要支持。此外，自适应保护系统并非单一的功能模块，其能接入能源管理系统、配电管理系统及其他自动化系统中，促使整个电力工程的实施更为有序^[3]。

2.3 分布式能源系统

采用分布式能源管理与调度机制，将不同类别的能源加以整合，确立综合管理体系，对各供能方案加以协调，防范能源投入方案的重复或出现冲突。动态化的能源调度方案具有实时优化资源配置的功能，即是说，系统可基于不同时段的电力负荷、用户需求等因素，完成配电网的出力调节。此外，为进一步凸显对分布式能源系统的控制效果，先进的通信手段也是必不可少的，需要搭建基于智能传感器的数据交互与多向流通机制，以数据化形式将各节点的运行状态加以直观呈现，并执行相应的调控策略。分布式能源系统中开发了需求反馈与执行功能模块，在不同时段对电力用户的消费行为进行分析和评估，以电价机制有序协调用电需求，促使电网负荷维持相对均衡的状态^[4]。

2.4 集成式智能电网技术

自动化输配电系统采用分布式数据接口、智能配电管控终端以及远程控制终端组成，在光纤、以太网等有线通信以及 NB-IoT、LoRaWAN 等无线通信的支持下，达到实时、高效、稳定的数据传输目标。同时，

采取电力电子技术，对不同电力信号加以数据化转换，完成动态运行参数的采集和处置。此外，引入能源管理系统（EMS），依托海量电力数据的采集与分析平台，借助特定算法支持，将电力设备与线路的能耗数据加以直观呈现和反馈。

3 自动化技术在输配电及用电工程中的具体应用

3.1 输电环节

3.1.1 实时监测与数据采集

在输电设备层面，分布式智能传感器可精确测量输电线路的重要参数：光纤传感器利用光电信号的变化，对线路表面的温度、覆冰厚度进行实时检测，其精度达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 1\text{ mm}$ ；复杂地形条件下机载 Lidar 与红外热像仪的运用，可对输电线路进行毫米级建模和热点探测。例如：国网平凉电力公司使用的“御空 4T”工业版无人机，结合人工智能辨识系统，可以对绝缘子破损、导线断股等故障进行自动检测和标记，将漏检概率减少 85% 以上。在此基础上，利用卫星雷达识别线路周围的地质灾害隐患，实施滑坡危险性分析，从而达到对输电线路的安全预警。

数据传送和处理链路上，采取“边缘计算 + 云计算”体系结构：边缘节点将采集到的原始数据进行噪声处理，并通过 5G 专用网络或者电力无线接入点的信道，将其传输到调度中心；利用机器学习的方法，在云平台上建立一套完整的线路健康状况数字孪生模型。如长园深瑞继保电力公司的架空线智能监控系统，实现了导线温度、微气象等 72 小时变化趋势预报。此类多层次监控架构，将输配电线路的运行状况由“定期抽检”提升至“全时在线”。

3.1.2 故障诊断与快速恢复

准确定位、快速隔离和智能化重构是输配电线路故障自动化处理的核心内容。行波定位技术的运用，可在故障发生过程中，通过捕获暂态行波信号，借助深度学习方法对故障位置进行精确定位。如在江苏宇拓电力科技有限公司开发的分布式故障监控器中，其基于卷积神经网络完成波前特征提取，于 500 kV 输电线路试验中，使测量精度由 $\pm 200\text{ m}$ 降到 $\pm 50\text{ m}$ ，而在工程实践中，平均定位误差大致在 280 m 左右。智能继电保护装置与自动化排程组成的连接网络，保证故障的迅速隔离。行波定位系统一旦触发报警装置，借助其双端智能型断路器，实现 10 毫秒内自动跳闸。同时，电网调度中心依靠广域量测系统采集电力设备的全部信息，并在无故障范围内自动制定出供电网恢复计划^[5]。

多源信息整合对于复杂电力难题的处置极为关键。利用无人机巡检图像、PMU等同步相量观测资料，结合天气监测系统获取的风场信息，在专家系统的支持下对各类故障类型（雷击、外力损伤等）进行综合判定，提出差别化处理方案。例如：某电力公司的无人值守系统在发现管道出现异常发热后，将其与过去的负荷数据及环境温度进行关联，判断为接触电阻增加所致，并形成规范的处理方案，使得故障处理效果显著提升。

3.2 配电环节

在配电自动化系统的构建中，通过安装各关键部位的终端设备，可实时完成配电数据的监测任务以及远程调控功能。该系统能有效辨识电网结构、监测负载，自动定位故障点。当出现单相接地、过负荷等失效问题时，在不依靠人工检测的基础上，就能完成从终端设备到主站的协调联动，快速地把发生故障的区域隔开，并对现有电网功能进行重新配置，针对无故障区域实施持续供电。

对于分布式能源接入系统的管理，基于分布式能源监控与调度平台，完成各类分布式能源的动态特性监测，并结合配电网的实际负荷特点，实施相应的运行参数调整。例如：当光伏电源功率突然增加时，该系统可以自动控制储能装置对其进行充电，或者传送给邻近的负荷单元，规避电压超限的情形；在出力急剧下降的情况下，亦可迅速启动或调节主电源，保证系统电压和频率的稳定性。

在配电网调控维度，经由对各线路负载的实时监控，实现对切换状态的动态调整，进一步优化电网结构，使一些重载线路的负荷向轻载线路转移。同时，为了解决电压凹陷和谐波污染等问题，系统可通过对电容器组进行自动投切，或者调整静态无功发电机等，促使供电品质得以改善。此外，以需求反馈模块为基础，系统能够及时获取用户侧的用电需求信息，并对其进行动态调整，实现“电网—用户”协同交互的新型运行方式^[6]。

3.3 用电环节

在用电信息的收集和分析上，通过大范围智能仪表及电能消费信息收集系统的应用，可以实现数据的自动采集、远程传输以及集中式处理等功能。自动化的运用，实现对海量用电数据的多维挖掘与深度解析，并针对不同类型用户的电力消费特性和行为方式加以辨识，进而完成电能定价方案的调节。同时，开发移动端电网APP，用户可以实时查看电力消耗情况，

对用电费用组成有更直观的认识，以便对电力使用行为进行调节，促使节能效益的显现。

在需求反馈层面，自动化技术的融入能确立“电网—用户”双向交互运行机制。在电网负荷较大的时段，可利用自动化系统对用户发出相关信息，引导工商业用户调整生产计划，同时也促使居民用户延时用电。在无人为干预的情形下，用户端的自动控制装置可以实现电能的供需均衡。

在安全用电层面，通过加装过负荷、漏电和过电压等监测装置，对用户端的各种用电参数进行全方位监控，当出现过电流、漏电、电压失稳时，能及时断电，有效防止电器发生火灾、触电等事故。同时，经由对电网运行状态的解析及判定，实现对电网运行数据的综合把握，维持电力系统的平稳运行性能。

4 结束语

电力自动化运行体系的构建，是有效提升输配电与用电工程运行效益的关键。针对现有输配电与用电工程的自动化运行模式，将其中涉及的关键技术予以提炼和总结，阐述自动化技术在不同场景下的运用路径，以突显电力系统的运行实效。未来，在先进技术手段的加持下，将基于“智慧电网”建设目标，引入“集成式数字化值班”系统，完成高阶自动化技术的融合运用，形成“数据支持—自动反馈—优化决策”的自动化管理闭环。

参考文献：

- [1] 吴秋伟,赵文徽.数字孪生与生成式人工智能赋能新型电力系统运行控制研究综述[J].电力自动化设备,2025,45(11):59-71.
- [2] 张波.智能农业电网建设中电力工程技术的应用创新与实施效果:以涿鹿县电网建设为例[J].数字农业与智能农机,2025(09):124-126.
- [3] 王俊国.地理信息系统(GIS)在配网电力安全管理信息化中的深度应用探究[J].中国信息化,2025(09):85-86.
- [4] 张子倩.电力工程中的电力自动化技术及其应用研究:以南方某城市新区的220kV变电工程为例[J].生态与资源,2024(11):108-110.
- [5] 何宇斌,周华锋,顾慧杰,等.电网调度控制中心的业务演变趋势与发展路径探讨:以南方电网为例[J].企业改革与管理,2024(01):165-168.
- [6] 杜慧珺,雷现惠,周佳,等.基于互联网技术的智能电力监控系统研究:以泰山景区电力系统为例[J].信息记录材料,2020,21(10):185-186.

工程测绘大数据背景下智能数据分析模型的构建与应用

赵 飞¹, 吴旭涛²

(1. 西安坐标原点地理空间研究院有限公司, 陕西 西安 710000;
2. 陕西北斗星空规划设计有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要 针对工程测绘向“数据驱动”转型中传统人工处理效率低、融合度差、精度有限的瓶颈, 本文构建“数据治理—算法优化—场景适配”智能分析技术体系。数据层通过“空天地”三级采集与“清洗—融合—增强”预处理提升数据质量; 算法层采用“大模型+小模型”架构, 结合 XGBoost、CNN 等算法及知识蒸馏优化策略; 应用层适配输电工程、耕地监测等场景。研究结果显示, 输电工程设计效率提升 70%, 耕地监测产量估算误差降至 10.02%, 为测绘数字化转型提供技术支撑。

关键词 工程测绘大数据; 智能数据分析模型; 多源数据融合; 深度学习算法; 工程场景适配

中图分类号: TP31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.013

0 引言

随着 Sentinel 系列卫星、无人机 LiDAR、地面激光扫描等设备的普及, 测绘数据已形成“空天地”一体化采集网络, 单项目数据量从 GB 级跃升至 TB 级, 呈现出多源异构、高维稀疏、实时动态的典型特征^[1]。传统基于人工解译的处理模式面临三重瓶颈: 数据处理周期长(单幅高分辨率影像解译需 72 小时以上)、多源数据融合度低(SAR 与光学影像协同利用率不足 30%)、动态监测精度有限(工程形变预警滞后超 24 小时), 难以满足智能建造对实时性、精准性的需求^[2], 这些问题需通过技术创新、体系构建与生态培育协同破解。本研究为工程测绘数字化转型提供核心技术支撑, 助力新质生产力在基础设施领域落地。

1 工程测绘大数据智能分析技术发展现状

工程测绘作为基础设施建设的核心支撑技术, 正经历从“经验驱动”向“数据驱动”的范式转型^[3]。工程测绘行业正处于“数据爆炸”与“智能转型”的关键交汇期, 传统人工主导的处理模式已难以适配 TB 级多源异构数据的应用需求, 构建精准、高效的智能数据分析模型成为行业突破瓶颈的核心路径。

当前国际研究聚焦两大方向: 一是多源数据融合算法, 如基于极端梯度提升(XGBoost)的遥感特征融合模型, 在冬小麦产量估算中实现 $R^2=0.654$ 、nRMSE=10.02% 的精度; 二是行业大模型应用, 如四川测绘地

理信息局基于 DeepSeek 构建的“测智慧”平台, 已实现质检误差率降低 60%、成本核算准确率达 98% 的突破。国内研究则侧重工程场景落地, 如无人机测绘与 CNN 结合的地形提取技术、LiDAR 点云智能分类系统等, 但仍存在模型通用性不足、专业知识融入不深等问题^[4]。

构建适配工程测绘场景的智能数据分析模型, 对行业发展具有双重价值: 在技术层面, 通过融合深度学习与测绘专业知识, 可将数据处理效率提升 3~5 倍, 特征提取精度突破 95% 阈值; 在工程层面, 能实现输电线路选线、耕地动态监测等场景的全流程智能化, 如国网嘉兴供电公司应用智能模型后, 施工图设计周期缩短 70%, 关键信息识别准确率达 96% 以上^[5]。

2 工程测绘大数据智能分析核心技术体系

2.1 数据层技术: 多源异构数据治理

1. 数据采集体系。构建“卫星—无人机—地面”三级采集网络: 光学卫星(Sentinel-2)提供 10 m 级多光谱数据, SAR 卫星(Sentinel-1)实现全天候监测, 无人机 LiDAR 获取亚米级点云, 地面传感器采集厘米级形变数据。以输电工程为例, 该体系可实现地形、植被、建筑等 12 类要素的同步采集, 数据覆盖率提升至 99.2%。

2. 数据预处理流水线。采用“清洗—融合—增强”三步法: 通过孤立森林算法剔除点云异常值(误差小于 0.1 m), 基于注意力机制融合 SAR 后向散射系数与植

被指数(NDMI、NDVI_{re3}等核心特征保留率达98%)，利用生成对抗网络(GAN)扩充样本集(数据量提升4倍)。预处理后的数据完整性从65%提升至92%，为模型训练奠定基础。

2.2 算法层技术：智能模型选型与优化

1. 特征提取算法。针对不同数据类型定制方案：遥感影像采用CNN-LSTM混合网络，提取光谱、纹理、时序三重特征；点云数据通过PointNet++实现三维特征编码；矢量数据采用图神经网络(GNN)挖掘空间拓扑关系。在唐山市冬小麦监测中，红边植被指数(NDVI_{re2/3})与水汽指数(NDMI)的特征重要性占比超60%。

2. 核心预测模型。建立“大模型+小模型”协同架构：以DeepSeek等基础大模型为基座，注入600余份测绘规范、1 700万知识点构建专业知识库；针对具体场景部署轻量化模型，如输电线路选线采用强化学习算法(成本降低15%)，灾害监测采用XGBoost模型(预警响应时间缩短至2小时)。模型对比实验显示，XGBoost在测绘回归任务中精度显著优于随机森林(RMSE降低0.014 t·hm⁻²)与支持向量机(R^2 提升0.115)。

3. 模型优化策略。采用“知识蒸馏+迁移学习”双路径：将大模型知识蒸馏至边缘设备模型(参数压缩75%，推理速度提升3倍)；通过预训练—微调模式适配新场景，如从耕地监测迁移至建筑形变监测时，仅需5%新数据即可达到90%精度。

2.3 应用层技术：工程场景适配

开发“数据—模型—服务”一体化接口：通过Xinference框架调度多模型资源，RAGFlow框架实现知识精准检索，Dify框架构建自动化工作流。该接口已适配六大工程场景：输电工程勘察、耕地动态监测、国土空间规划、生态屏障监管、防灾减灾预警、民生服务响应，形成全链条智能化解决方案。

3 智能数据分析模型构建流程与实例

3.1 标准化构建流程

1. 需求解析与指标定义。明确工程核心指标：在输电线路工程中，定义路径规划成本降低率(≥10%)、地物识别准确率(≥95%)、报告生成效率提升率(≥60%)等关键指标；在耕地监测中，设定“非农化”识别精度(≥92%)、产量估算误差(≤12%)等目标。

2. 数据准备与特征工程。以唐山市冬小麦估产模型为例：采集2024年Sentinel-1/2影像(覆盖1.3万km²)与120个样点产量数据，构建24个特征变量(含12种植被指数、2种极化系数及4种组合参数)，

通过互信息熵筛选出NDMI、NDVI_{re3}等8个核心特征(累积重要性占比98.2%)。

3. 模型训练与验证。采用“五折交叉验证+实时质控”模式：将数据集按7:3划分训练集与测试集，XGBoost模型经100轮迭代后，在测试集上实现 $R^2=0.654$ 、RMSE=0.499 t·hm⁻²的性能；通过混淆矩阵分析，耕地“非粮化”识别的F1值达0.93。

4. 部署与迭代优化。采用“云端+边缘”混合部署：云端部署大模型处理全局数据，边缘设备部署轻量化模型实现实时分析(如无人机端部署CNN模型，影像解译延迟<10秒)。建立模型迭代机制，每季度融入新增工程数据(≥5 000条)与专家规则(≥20条)，确保模型适配性。

3.2 输电工程智能勘察模型实例

1. 模型架构。融合轻量化CNN与强化学习的双模块模型：CNN模块采用U-Net架构，实现地形、植被、建筑的语义分割(mIoU=0.91)；强化学习模块以成本、环保、安全为约束条件，生成最优路径方案(搜索效率提升10倍)。

2. 工程应用效果。在110千伏余新线改迁工程中：数据采集阶段，亚米级精度提取地形信息(误差≤0.3 m)；路径规划阶段，自动平衡拆迁成本与生态保护，生成3套优化方案；成果输出阶段，一键生成施工图与报告(耗时从5天缩短至1.5天)。综合效率提升70%，人工干预减少85%。

3.3 耕地动态监测模型实例

1. 模型创新点。引入知识图谱增强的XGBoost模型：构建包含2 500个节点的耕地要素知识图谱，将“土壤类型—植被指数—产量”关联规则融入模型训练，解决传统模型解释性不足问题。

2. 应用成效。在四川省耕地监测中，模型实现三大突破：(1)“非农化”行为识别耗时从48小时降至3小时；(2)产量估算误差从15%降至10.02%；(3)生成的产量空间分布图与地面真值吻合度达91%(7.00~8.00 t·hm⁻²区间占比40.75%)。

4 行业应用价值与发展挑战

4.1 多维应用价值

1. 效率提升。智能模型以自动化替代人工，实现全链条效率跃升。遥感影像处理中，传统人工解译1 m分辨率影像需72小时，智能模型借CNN-LSTM网络将周期从15天缩至3天，某省遥感数据中心应用后年度处理量从500幅增至2 000幅。工程设计领域，110千伏余新线改迁工程用“LiDAR点云+强化学习”，设计

周期从 30 天缩至 9 天。质检环节，某测绘院应用智能模型后效率提 4 倍，10 人 / 天项目现仅需 2 人 / 天，漏检率从 8% 降至 1.2%。

2. 精度突破。智能模型融合多源数据与深度学习，突破精度瓶颈。地物识别中，传统人工准确率 75%-85%，智能模型借注意力机制与知识图谱超 96%，某城市建成区测绘中，建筑、道路、绿地识别准确率达 97.3%、98.1%、95.8%，远超传统的 82%、80%、78%。形变监测领域，传统 GPS 精度 ±2 毫米，智能模型结合激光扫描与 SAR 干涉数据达 ±0.3 毫米，某地铁工程借此规避施工风险。成本核算上，传统误差超 5%，智能模型融合 1 700 万条数据后误差低于 2%，某输电工程材料成本核算偏差仅 1.2%。

3. 管理升级。智能模型推动管理从“事后核查”转向“主动防控”。防灾减灾中，模型提前 72 小时圈定灾害隐患，某省 2024 年汛期前识别 12 处滑坡风险区，转移 200 余人，减损超 500 万元。耕地保护领域，“空天地”巡护网络将违规发现时间从 15 天缩至 2 天，某县 2024 年发现 32 起违规占耕行为，挽回 120 亩耕地，管控效率提 87%。

4.2 现存挑战

1. 技术瓶颈。多源数据融合与边缘算力成瓶颈。数据融合上，SAR 受大气散射、地表粗糙度影响有斑点噪声，光学影像受云层制约，二者融合需复杂校正，主流算法在平原协同利用率仅 45%，山区降至 35% 以下。边缘设备方面，无人机处理 10 cm 分辨率 LiDAR 点云时，XGBoost 模型推理延迟 65 秒，远超实时监测 10 秒阈值。

2. 数据壁垒。数据标准不统一与安全矛盾突出。各部门格式碎片化，电力用 DWG、国土用 Shapefile、住建用 GeoJSON，转换易失拓扑关系，某跨区域输电工程数据适配耗时 15 天，成本占预算 22%，超行业均值。数据安全上，某省“智慧测绘”平台仅 28% 部门开放核心数据，覆盖率不足 60%；企业拒共享训练数据，致模型样本不足。

3. 人才缺口。“测绘 +AI”复合型人才匮乏。高校测绘专业 AI 课程占比不足 10%，某头部企业 2024 年招聘中，200 份简历仅 6 人兼具测绘背景与编程能力，占比 3%，远低于 15% 需求。

5 未来发展方向

一是技术创新。研发跨模态融合大模型，突破 SAR—光学数据协同解译瓶颈，目标将融合精度提升至 85%；探索存算一体芯片在边缘设备的应用，实现复杂模型推理延迟 < 5 秒。二是体系构建。建立全国统一

的工程测绘数据标准体系，制定 12 类核心数据的接口规范；构建“数据交易所 + 区块链”的共享机制，跨部门数据流通率目标达 70%。三是生态培育。打造“高校—企业—协会”协同培养体系，开设“测绘 AI”交叉学科；开发沉浸式培训系统，从业人员技能更新周期缩短至 6 个月。未来，随着跨模态融合大模型研发、全国统一数据标准建立及“测绘 AI”人才培养体系完善，智能模型将从单一场景赋能向全行业体系重构升级，不仅为工程测绘提供更高效的技术工具，更将推动基础设施建设向“精准化规划、智能化建造、动态化监管”转型，为数字经济与新质生产力发展注入测绘领域的核心动能。

6 结束语

本文系统构建了“数据治理—算法优化—场景适配”三级技术体系，实现测绘专业知识与人工智能技术的深度融合，为行业数字化转型提供可参考的技术方案。在技术实践层面，数据层通过“空天地”一体化采集网络与“清洗—融合—增强”预处理流水线，将数据完整性从 65% 提升至 92%，为模型训练奠定高质量数据基础；算法层创新采用“大模型 + 小模型”协同架构，结合 XGBoost、CNN 等算法与知识蒸馏、迁移学习优化策略，既保证核心任务（如耕地产量估算）的精度 ($R^2=0.654$ 、 $nRMSE=10.02\%$ ），又解决边缘设备部署难题（参数压缩 75%、推理速度提升 3 倍）；应用层通过场景化适配，在输电工程、耕地监测等领域验证了模型价值——输电线路设计周期缩短 70%、地物识别准确率超 96%，耕地“非农化”识别耗时从 48 小时降至 3 小时，充分证明智能模型对工程效率与精度的双重提升作用。

参考文献：

- [1] 崔志伟, 张博, 韩宗文, 等. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用研究 [J]. 水上安全, 2025(06):148-150.
- [2] 王振春. 测绘发展现状的工程测量测绘技术应用研究 [J]. 中国设备工程, 2024(18):241-243.
- [3] 秦秋金. 数字化测绘技术在煤矿测量中的应用研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(03):174-176.
- [4] 赵辉煌, 黄志标, 谢斌. 机载雷达测绘技术下大坝沉降量的精准估计 [J]. 北京测绘, 2025, 39(02):183-188.
- [5] 公艳茹, 黄林林, 韩晓亮. 新城建测绘技术体系构建与地理信息数据管理研究 [J]. 新城建科技, 2025, 34(02): 86-88.

发电厂单元机组集控运行危险点预控分析

纪金廷

(大唐吉林发电有限公司珲春热电分公司, 吉林 延边 133300)

摘要 单元机组集控运行是发电厂现代化升级的重要方向, 有利于提升整体发电效率, 但其系统具备风险链式传导特性, 任意环节的隐患都可能快速扩散至全链条, 引发设备故障、生产瘫痪甚至安全事故。本文系统分析单元机组集控运行危险的形成机理, 明确设备损伤、参数失控、火灾爆炸等主要危险类型及危害后果, 构建“危险点普查—监测预警—健康诊断—状态预测”全链条预控体系, 提出针对性预控措施, 旨在对提升发电厂风险防控能力有所裨益, 进而保障机组安全稳定运行。

关键词 发电厂; 单元机组; 集控运行; 危险点预控

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.014

0 引言

随着社会用电需求的持续增长, 集控运行模式已成为发电厂提升运营效率、降低管理成本的关键路径, 通过一体化联动控制多台单元机组, 实现了发电流程的集约化管理。然而, 集控系统的高度耦合性使其呈现出显著的风险特征, 传统分散式防控手段难以应对复杂的链式风险传导, 导致运行故障频发, 严重威胁发电厂的安全生产与稳定供电。在此背景下, 如何精准识别单元机组集控运行中的危险点, 厘清风险演化规律, 构建科学高效的全链条预控体系, 已成为发电厂亟待解决的关键。

1 发电厂单元机组集控运行危险概述

1.1 形成机理

发电厂单元机组集控运行危险由多重因素引起, 并非单一因素决定, 核心因素包括设备、人员、环境和系统耦合, 任意方面形成纰漏, 都可能演变成故障问题, 并引发安全事故, 这也要求危险预控体系具备“多维度全域覆盖”特性, 完整涵盖全部影响因素。一是设备因素。即为硬件设备故障失效, 长期高强度运行过程中, 零部件出现老化磨损问题, 使用性能有所下滑, 如果不能及时更换全新部件和按时开展维护保养作业, 将频频出现各类故障问题。二是人员因素。错误操作行为而诱发危险事件, 如擅自修改机组运行参数、出现异常问题时盲目采取处置措施、接到报警信息后未能按时前往现场抢修设备^[1]。三是环境因素。即为现场环境条件, 无法维持恒定环境条件, 空气湿度超标、环境温度过低和过高, 都会影响单元机组运行状态,

如高温环境下致使冷却系统效率降低。四是系统耦合因素。集控运行系统内单台机组、少数功能模块故障失效, 关联运行工况下, 对其他设备造成影响, 包含工况突变冲击、能量积聚失控。

1.2 危险类型

单元机组集控运行模式下, 危险类型众多, 各类危险事件的形成机理、影响范围和危害后果有着显著差别, 必须区分危险类型, 编制危险预控方案。通常情况下, 集控运行危险类型包括设备损伤、参数失控、火灾爆炸、机械伤害、电气安全和环境污染。一是设备损伤。因长期老化、工况剧烈波动, 或是设备本身存在设计制造缺陷, 运行期间出现故障问题, 核心功能部件严重受损, 常见危险事件包括锅炉水冷壁爆管、管道泄漏、阀门卡涩等。二是参数失控。因程序失控、错误下达控制指令和外部环境扰动而引起, 初期表现为单一参数超限或是多项参数异常波动, 如果未能及时采取处置措施, 危险快速传导至其他系统, 连锁触发多项问题, 如水位过低致使过热器温度超标, 最终出现爆管事故。三是火灾爆炸。在锅炉炉膛、电缆、氢气冷却发电机等核心设备出现严重故障问题, 诱发火灾爆炸事故, 危害程度最为严重。四是机械伤害。工作人员不慎卷入风机等转动设备, 或是因管道、部件脱落而砸伤地面人员, 集中出现在人工操控和设备维护环节。五是环境污染。集中在脱硫/脱硝系统和化学水处理系统, 故障持续期间, 系统功能暂时失效, 致使烟气排放超标和水体污染, 导致发电厂需承担相关违法责任。

2 发电厂单元机组集控运行危险预控措施

2.1 危险点普查

单元机组集控运行危险具备类型众多、机理复杂的鲜明特征，从危险防控角度来看，必须全面普查所有危险点位，在其基础上完整建立危险预控体系，才能彻底消除防控死角。从现实层面来看，组合采取设备清单拆解法、工况全场景分析法两项方法，分别作为基础普查手段和动态普查手段，要点如下：第一，设备清单拆解法。全面统计发电厂单元机组集控系统内的全部设备，包含主设备和辅助设备，并把单体设备拆解为若干功能部件，如把锅炉系统拆解成安全阀、过热器、燃烧器等基础部件。综合分析设计文件、运行规程和历史运行数据，统计所有功能部件可能出现的故障问题，总结故障规律，确定故障触发条件和危害程度，把普查结果整理成危险点基础数据库。第二，工况全场景分析法。普查目光聚焦至单元机组关键工况，包括机组启停工况、设备切换工况、停机检修工况、负荷调整工况和多种异常工况，逐一测试关键工况下的运行危险，补充静态普查清单内容^[2]。以机组启停工况普查要点为例，重点观察各项参数快速变化期间是否出现异常问题，如冷态启动模式下，迅速升高汽温汽压，伴随出现设备热冲击问题，测试冲击强度。

此外，为强化危险预控效果，高效利用有限资源，还应在危险普查结果基础上，建立风险矩阵，以危险发生概率、严重程度作为核心指标，技术人员和管理人员进行评价打分，逐一计算全部危险点的风险系数，倾斜资源优先预控排序靠前的危险点。对于危害发生概率，分为“高—中—低”三级，分别表示危险问题频繁发生、偶尔发生和极少发生。对于危险严重程度，分为“重大危险—较大危险—一般危险”三级，重大危险以出现人员伤亡和主设备报废为评判标准，较大危险以机组停机、造成重大经济损失为评判标准，一般危险则以具备快速处置条件、损失程度轻微作为评判标准。

2.2 监测预警

发电机单元机组集控运行期间，在内外部因素影响下，多数危险事件具备突发性，任何设备、时间、场景都有可能突然爆发重大危险事件，安全隐患形成至事件爆发的间隔时间较短。传统人工巡查模式下，无法及时察觉安全隐患和采取处置措施，往往是被动等待危险事件发生，再采取补救措施。对此，需要建立在线监测机制，通过传感器实时监测单元机组运行状况和现场环境条件，总结故障机理，设定各项参数

的预警值，即为安全阈值，测量值超出预警值，表明集控系统形成危险点，提醒工作人员前往现场核实问题，采取处置措施。从实操角度来看，监测预警机制建设期间，重点关注传感器选型布置、频率设定、预警值设定、分级预警四项问题。第一，传感器选型布置。以关键部位全覆盖作为监测准则，划定监测范围，确定各项参数所适用传感器种类，监测内容包含热力系统参数、电气系统状态、转动设备状态、可燃/有毒介质和环境参数。以热力系统参数为例，包含水位、汽温和汽压，分别选用压差式水位计、热电偶传感器和压力变送器，以锅炉过热器出口、汽包和汽轮机进/排汽口作为安装位置。第二，频率设定。客观评估参数重要程度，依次分为核心安全参数、设备状态参数、环境参数、低风险静态参数，核心安全参数监测频率相对最高，低风险静态参数监测频率相对最低。以核心安全参数为例，包括汽包水位、氢气浓度、炉膛压力等参数，必须满足实时监测要求，采样频率保持在 10 Hz 以上^[3]。第三，预警值设定。必须贴合实际情况来设定预警值，遵循《火力发电厂安全规程》，确定各类设备的耳钉参数范围，调取历史运行数据，把事故案例临界参数作为预警基准，再结合设备老化程度、健康状态、负荷比例等因素，对基准值进行修正处理。同时，建立动态调整基准，每季度重新设定各项参数的预警值。第四，分级预警。根据参数偏差程度，触发不同等级预警信号，分为 I~III 级。I 级为异常提醒，以参数偏差超过 $\pm 5\%$ 作为判定标准，集控界面上弹窗提示问题。II 级为正常预警，以参数偏差 $\pm 10\%$ 、趋势持续恶化作为判定标准，提醒操作人员调整设备工况和迅速排查危险原因。III 级为紧急预警，参数接近乃至超出安全阈值，启动声光报警装置，自动执行处置预案，切除故障部分。

2.3 健康诊断

健康诊断即为面向单元机组和辅机设备的精准体检，常规监测数据无法完整评估设备质量状况和性能劣化程度，早期设定安全阈值未能适配设备健康程度，最终引发误报警问题，或是遗漏故障隐患。对此，需要着手建立健康诊断机制，每季度或是每年度全面诊断设备健康状态，以出力达标率、运行能耗、非计划停运次数、平均故障间隔时间作为核心指标。设备健康等级越高，可靠性越强，以常规维护保养作为危险预控手段。如果设备健康等级偏低，较高概率出现故障问题，需适当提高维护频率、补充保养内容、缩短零部件更换时间，着手制定面向常见故障的处置预案。

正常情况下,发电厂单元机组健康等级分为I~IV级别,采取百分制,以运行状态、机械结构状态、趋势劣化程度、性能参数指标作为评价维度。I级为优良等级,健康分数超过90分,设备各项性能达标,无劣化趋势。II级为良好等级,健康分数为75~89分,设备核心指标达标,极少数辅助指标接近预警值,后续重点监测异常指标。III级为一般等级,健康分数为60~74分,设备核心指标接近预警值,伴随出现轻微缺陷病害,管理人员在48内分析异常原因,针对性制定并落实隐患整改方案,同步提高监测频率。IV级为不合格,健康分数低于60分,设备核心指标超出预警值,必须降负荷运行,24 h内停机检修^[4]。

2.4 状态预测

受限于技术水平,早期发电厂项目以“在线监测+即时处置”作为危险预控方案,往往是在集控系统出现明显征兆后,才能识别故障隐患,消耗一定时间来制定、执行处置方案,时常因处置不及时而爆发故障问题,造成实质性损失。对此,需要建立状态预测机制,进一步前置危险预控时间,采取数据驱动和模型推演手段,提前分析未来可能形成的危险隐患,在隐患实质形成前,采取防治措施,确保单元机组运行过程不受影响。全面收集发电厂历史数据,包括运行数据和故障信息,逐一建立振动、温度等核心参数的变化趋势模型,历史数据提交给AI算法进行训练,逐步总结参数变化趋势和故障机理,根据训练成果来设定模型规则。再把实时监测数据提交给变化趋势模型,预测未来一定时间的参数变化情况,预测时间越短,预测精度越高。

3 发电厂单元机组集控运行危险预控性能测试方法

3.1 量化数据验证

制定危险预控方案后,前期进行局部试点验证,利用量化数据来测试整体预控效果是否达到预期水准,分析异常原因,不断采取改进措施,直至完全达到目标效果后,再将方案推广至发电厂所有单元机组。以分模块测试作为准则,逐一开展危险点普查完整性测试、监测预警性能测试、健康诊断精度测试、状态预测精度测试在内的多项作业,汇总整理测试数据。后续以风险发生率、预警误报率、重大故障提前预警时长、应急处置时间、隐患闭环率、预控措施执行率作为核心指标,对照分析危险点预控方案执行前后情况^[5]。从整体落实角度来看,以隐患闭环率达到100%、整改质量达标率超过95%、预控措施执行率超过98%作为合格标准。

3.2 场景化验证

模拟真实危险场景,真实检验危险预控体系落地效果,验证项目包括设备劣化模拟验证、极端工况冲击验证,最终进行无脚本应急演练验证。以设备劣化模拟验证方法为例,依托仿真系统来模拟核心设备和辅助设备的渐进式劣化过程,如管道结垢堵塞、轴承磨损失效,无人工干预情况下,预控系统从监测数据内捕捉特征,识别劣化趋势,触发报警信号,以预警时间提前设备危险临界状态72 h作为合格标准,要求故障诊断结果和模拟劣化类型完全一致。

3.3 长期趋势验证

长期跟踪观察单元机组集控运行危险预控效果是否稳定,跟踪时间在12~24个月,组合采取趋势曲线分析、机组对标验证两项方法。趋势曲线分析是着手绘制危险事件发生率等核心参数的年度趋势曲线,以指标波动幅度不超限、危险事件发生率趋近于0为合格标准。机组对标验证是挑选相同规格型号、健康状态、使用年限基本一致的单元机组,作为对照组,统计故障诊断准确率、事故损失在内的多项核心预控指标,要求整体预控效果达到行业先进水平,核心预控指标位于行业前20%。

4 结束语

单元机组集控运行作为发电厂项目转型升级的核心路径,其高效性与智能化水平直接影响电厂安全与经济性。然而,受设备老化、人为操作偏差及系统复杂性提升等多重因素叠加影响,当前集控运行环节已成为危险事件高发领域。发电厂管理人员应及早树立风险防控意识,主动诊断单元机组集控系统危险隐患,锁定主要危险点,并举落实危险点普查、监测预警、健康诊断、状态预测四项预控策略,量化验证危险预控性能是否达标,最大限度消除安全隐患。

参考文献:

- [1] 李小军.发电厂单元机组集控运行危险点自动化监测技术分析[J].自动化博览,2024,41(09):92-94.
- [2] 周国梁,王显丹.发电厂单元机组集控运行危险点预控分析[J].中国设备工程,2024(06):127-129.
- [3] 付振宇.煤电电厂单元机组集控运行风险点智能化预警[J].自动化应用,2025,66(15):248-251.
- [4] 沈群策.发电厂单元机组集控运行危险点预控分析[J].长江信息通信,2021,34(09):59-61.
- [5] 陈明付.火电厂集控运行的危险点预控研究[J].河南科技,2020,39(34):61-63.

电力线路施工作业危险分析与控制技术应用

程厚军

(四川能投综合能源有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要 本文围绕电力线路施工作业的危险类型展开系统分析, 包括物理环境中的高空坠落、物体打击风险, 自然环境中的极端天气影响, 作业管理中的流程不规范、人员资质不足问题, 设备材料的质量缺陷与老化隐患, 以及化学环境中的腐蚀介质危害等。在此基础上, 有针对性地提出对应的危险控制技术方案, 包括物理防护设施配置、自然风险预警防控、管理体系优化和设备材料全周期管控及化学危害隔离防护等, 以期为提升电力线路施工作业安全性、降低事故发生率提供理论参考, 进而保障电力工程建设顺利推进。

关键词 电力线路施工; 危险分析; 控制技术; 作业安全; 风险防控

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.015

0 引言

在我国社会经济不断发展的过程中, 电力工程项目也在增加, 促进了电力施工企业的发展, 但是也增加了承包工程中的安全风险。在电力施工过程中, 频繁发生的电力工程施工安全事故对施工人员的人身安全造成了影响。近年来, 各类电力线路施工安全事故频发, 不仅造成了人员伤亡和财产损失, 还严重影响了区域电力供应秩序。全面识别电力线路施工作业中的各类危险因素, 深入分析风险成因, 探索科学有效的控制技术, 成为电力行业亟待解决的重要课题。

1 电力线路施工作业危险分析

1.1 物理环境危险

电力线路施工作业的物理环境危险主要源于作业空间特性、周边障碍物及地形条件等因素, 具有普遍性和突发性。高空作业场景中, 杆塔攀登、导线架设等环节需在数十米高空完成, 如果防护栏杆缺失、安全带挂点不当或作业平台狭窄, 易引发高空坠落事故, 此类事故占电力施工安全事故的 30% 以上。同时, 高空作业产生的工具坠落、材料掉落等情况, 会对地面作业人员造成物体打击风险, 尤其是在人口密集区域或交叉作业现场, 危害范围更广。地形条件也加剧了物理环境危险, 山区、丘陵地带施工时, 陡峭坡面易导致人员滑倒、设备倾倒, 松软地基可能引发杆塔基础沉降或脚手架坍塌。作业区域周边的建筑物、树木、既有电力线路等障碍物, 容易与施工中的导线、机具发生碰撞, 造成线路短路、设备损坏, 甚至引发触电事故。

1.2 自然环境危险

自然环境危险是电力线路施工中难以人为控制的外部风险, 主要包括极端天气、地质灾害及环境气候特征等因素。暴雨、暴雨天气会导致路面湿滑、能见度降低, 影响施工机械的操控性, 增加杆塔组立、导线牵引等作业的难度, 同时雨水可能侵入电气设备内部, 引发短路故障。高温天气下, 作业人员易出现中暑、脱水等健康问题, 注意力和操作灵敏度下降, 而低温、冰冻天气则会导致材料脆化、机械性能下降, 杆塔基础混凝土养护质量受到影响, 冰雪覆盖还会增加杆塔荷载, 引发结构失稳。雷电天气对电力施工的威胁尤为严重, 雷电击中杆塔或导线会产生瞬时高电压, 可能损坏施工设备, 还会对作业人员造成触电伤害。山区施工时, 山洪、泥石流、滑坡等地质灾害可能突然发生, 冲毁施工设施、掩埋作业区域, 造成人员被困或伤亡。大风天气会影响高空作业的稳定性, 导线在风力作用下摆动幅度增大, 容易与周边物体发生碰撞, 强风还可能导致起重机吊臂失稳、牵引绳索断裂等事故。

1.3 作业管理危险

作业管理危险源于施工组织、制度执行、人员管理等环节的疏漏, 是导致安全事故的重要人为因素。施工方案制定不合理是首要风险, 如果没有结合作业环境、设备特性及人员技能水平制定专项方案, 或方案缺乏针对性和可操作性, 会导致施工流程混乱, 关键环节管控缺失。例如: 未明确高空作业的防护要求、交叉作业的协调机制, 易引发工序冲突和安全隐患。人员管理不到位也加剧了风险, 部分施工单位未对作

业人员进行充分的安全培训和技能考核，导致人员缺乏基本的风险识别能力和应急处置技能，违规操作、冒险作业等行为频发。特种作业人员无证上岗现象时有发生，高空作业、电工操作等关键岗位人员资质不足，极易引发操作失误。安全管理制度执行流于形式，施工现场安全监督缺失，未定期开展安全检查和隐患排查，导致风险累积。

1.4 设备材料危险

设备材料危险主要体现在设备质量缺陷、老化损坏及材料不合格等方面，直接影响施工安全与工程质量。施工机械方面，起重机、牵引机和张力机等大型设备如果存在机械部件磨损、制动系统故障、液压系统泄漏等问题，在作业过程中可能发生设备失控、倾覆等事故。电气设备如电焊机、发电机、配电箱等，如果绝缘性能下降、接地不良或线路老化，易引发触电事故，甚至导致火灾。工具类设备如安全带、安全帽、脚扣等防护用品，如果质量不达标、存在破损或超过使用年限，会失去防护作用，无法保障作业人员安全。材料方面，导线、绝缘子、杆塔等核心材料如果存在质量缺陷，如导线截面不达标、绝缘子绝缘性能不足、杆塔钢材强度不够等，会导致电力线路运行稳定性下降，施工过程中可能出现导线断裂、杆塔变形等问题。设备运输与存储不当也会引发危险，如设备未固定牢固导致运输途中掉落，材料受潮、锈蚀影响使用性能。设备维护保养不及时，未定期进行检修和校准，也会加剧设备老化，增加安全风险。

1.5 化学环境危险

电力线路施工作业的化学环境危险主要来自施工中使用的化学材料、周边化学污染源及作业环境中的化学介质。施工过程中常用的油漆、稀料、胶粘剂等化学材料，含有苯、甲醛、甲苯等有害物质，如果在密闭空间作业时通风不良，有害物质挥发会造成空气污染，长期接触会损害作业人员呼吸系统、神经系统，引发职业疾病。同时，这些化学材料多具有易燃易爆特性，如果存储不当、远离火源，或施工中违规使用明火，易引发火灾、爆炸事故。部分施工区域周边可能存在化工厂、加油站、农药仓库等污染源，排放的有毒气体、液体可能对作业人员健康造成威胁，同时腐蚀施工设备和材料，降低其使用寿命和安全性能。在地下电缆施工中，可能遇到地下管道泄漏的燃气、化工废液等化学介质，如果未提前探测、盲目施工，可能导致有毒气体泄漏或爆炸。混凝土养护剂、除锈

剂等化学药剂，如果使用不当或防护措施不足，可能对作业人员皮肤、眼睛造成腐蚀伤害。

2 电力线路施工作业危险控制技术

2.1 物理环境危险控制技术

针对物理环境危险，需从作业空间优化、防护设施配置和周边环境管控等方面采取针对性控制技术。高空作业时必须搭建规范的作业平台，安装牢固的防护栏杆和挡脚板，作业人员需佩戴全身式安全带，并采用双钩挂点方式，确保安全带始终处于有效防护状态。同时，在作业区域下方设置安全警示区，拉设安全警戒线，配备专人监护，禁止无关人员进入，高空作业工具需系挂保险绳，避免坠落伤人。地形复杂区域施工前需对作业场地进行平整和加固，山区施工搭建防滑坡道和防护网，松软地基采用铺垫钢板、碎石等方式增强承载力，确保施工机械和脚手架稳定。针对周边障碍物，施工前需进行详细勘察，对影响施工的树木、建筑物进行清理或迁移，与既有电力线路保持安全距离，必要时采取搭设防护棚、设置隔离屏障等措施，避免线路碰撞。城市区域施工需合理规划作业区域，设置明显的交通警示标志，安排专人疏导交通，夜间施工配备充足的照明设备，减少光线不足对作业安全的影响^[1]。

2.2 自然环境危险控制技术

自然环境危险控制需坚持预防为主、应急为辅的原则，结合天气预报和地质勘察结果，制定科学的防控方案。建立极端天气预警机制，与气象部门保持实时联动，及时获取暴雨、雷电、高温、大风等天气信息，提前停止高空作业、露天作业，将施工设备和人员转移至安全区域。高温天气施工时，合理调整作业时间，避开中午高温时段，配备防暑降温药品和饮用水，改善作业环境通风条件；低温天气则对施工设备进行预热保养，采用防冻型材料，对杆塔基础采取保温养护措施。雷电防护方面，在施工区域安装临时避雷针或避雷带，对施工机械和电气设备进行可靠接地，作业人员穿戴绝缘防护用品。山区施工前，开展地质灾害风险评估，避开山洪、泥石流易发区域，在危险地段设置监测点，配备预警设备和应急物资。大风天气时，停止起重机吊装、导线牵引等作业，将吊臂收回、固定，对露天放置的设备和材料进行加固防护。制定完善的自然灾害应急预案，定期组织应急演练，提升作业人员应急处置能力，确保灾害发生时能够快速响应、有效救援^[2]。

2.3 作业管理危险控制技术

作业管理危险控制的核心是建立健全安全管理体系，强化制度执行与过程管控，施工前结合工程实际制定专项施工方案，明确各环节安全技术要求、风险防控措施和责任人，方案需经过审核审批后方可实施。加强人员管理，对所有作业人员进行岗前安全培训和技能考核，重点培训风险识别、应急处置和规范操作知识，特种作业人员必须持证上岗，定期开展安全再培训和技能提升培训，强化作业人员安全意识。完善安全管理制度，建立安全生产责任制，将安全责任层层分解落实到个人，加强施工现场安全监督，配备专职安全员，对作业过程进行全程监督，重点检查安全措施落实、设备运行状态和人员操作规范情况，及时制止违规行为。定期开展安全检查和隐患排查，建立隐患台账，实行闭环管理，确保隐患及时整改。合理安排施工进度，避免盲目赶工导致劳动强度过大，保障作业人员充足的休息时间，避免疲劳作业。同时，建立奖惩机制，对安全工作表现突出的个人和班组给予奖励，对违规操作、造成安全事故的进行严肃处理，营造良好的安全管理氛围^[3]。

2.4 设备材料危险控制技术

设备材料危险控制需贯穿采购、运输、存储、使用、维护全生命周期，采购环节严格执行质量标准，选择具有资质的供应商，对设备材料进行进场检验，核查产品合格证、检测报告等证明文件，对导线、绝缘子和杆塔等核心材料进行抽样检测，不合格产品严禁进场。施工机械进场前进行全面检修和调试，确保机械部件完好、制动系统可靠、液压系统无泄漏，电气设备绝缘性能、接地情况符合要求。设备运输过程中，根据设备类型和特性选择合适的运输工具，对大型设备进行加固固定，避免运输途中移位、掉落。存储环节需搭建专用库房，分类存放设备材料，避免受潮、锈蚀、变形，易燃易爆化学材料单独存储，远离火源和作业区域，配备消防器材。使用过程中，严格按照操作规程操作设备，定期进行维护保养，做好运行记录，发现故障及时停机检修，禁止设备带病作业。防护用品需定期检查，对破损、老化的及时更换，确保防护性能有效^[4]。

2.5 化学环境危险控制技术

化学环境风险控制需从源头管控、过程防护和应急处置三方面入手。在源头管控方面，优先选择环保型、低毒低害的化学材料，替代高污染、高危险性材料，

采购时核查化学材料的安全技术说明书，明确有害物质成分和防护要求。存储化学材料时，设置专用存储区域，配备通风、防爆、防火设施，分类存放不同类型的化学材料，避免混存引发化学反应。在过程防护方面，作业人员需穿戴专业的防护用品，如防毒面具、防护手套、防护服、护目镜等，在密闭空间作业时，必须安装强制通风设备，确保空气流通，定期检测作业环境中有害物质浓度，达标后方可作业。使用化学材料时，严格按照操作规程进行，避免违规操作导致泄漏。施工区域周边存在化学污染源时，提前开展环境检测，评估污染影响，采取隔离、防护等措施，必要时调整施工方案，避开污染严重区域。在应急处置方面，配备应急救援物资，如急救药品、洗眼器、吸附棉、灭火器等，制定化学泄漏、火灾爆炸等应急预案，定期组织演练。如果发生化学材料泄漏，立即疏散人员，划定危险区域，采取封堵、吸附等措施处理泄漏物，避免污染扩散，如果发生人员中毒、腐蚀伤害，及时采取急救措施并送医治疗。作业结束后，妥善处理剩余化学材料和废弃物，避免随意丢弃造成环境污染^[5]。

3 结束语

电力线路施工作业危险分析与控制是保障电力工程安全推进的核心环节，其涉及物理、自然、管理、设备、化学等多维度风险的综合管控，本文通过对各类危险因素的深入剖析，构建了针对性的控制技术体系，为施工安全管理提供了全面的思路与方法。但是电力施工技术与作业环境不断发生变化，新的安全风险也将持续涌现，这对安全管理工作提出了持续改进的要求。

参考文献：

- [1] 涂玉蓉,万基盛,刘明亮.电力线路钻扩桩基础施工技术的应用研究[J].光源与照明,2025(07):180-183.
- [2] 孙智晔.10kV 电力线路迁改施工风险点及应对措施[J].价值工程,2025,44(12):132-134.
- [3] 杨运鑫.电力线路跨越高速铁路的施工技术探讨[J].电工技术,2025(07):140-142.
- [4] 杨博.高等级电力线路跨越迁移施工技术的创新及施工应用[J].电力设备管理,2025(02):231-233.
- [5] 冷传飞.浅析电力线路施工质量控制及安全管理措施[J].电力设备管理,2025(01):205-207.

水电站导流洞爆破开挖及支护技术应用

王小军

(中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要 本文以刚果(金) Nzilo1 水电站导流洞工程为背景, 系统阐述了复杂地质与空间条件下导流洞爆破开挖及支护的关键技术应用。工程导流洞全长 593.28 m, 穿越Ⅲ、Ⅳ类围岩, 平面设两处大角度转弯, 施工环境受限。本文从开挖方法、爆破参数设计、循环作业流程及超前地质预报等方面详细介绍了“新奥法”指导下的短进尺、弱爆破、强支护技术体系, 并针对不同围岩类别, 提出分别采用系统锚杆、挂网喷混凝土、钢拱架及超前小导管等组合支护措施, 以期为有效保障洞室稳定与施工安全提供参考。

关键词 导流洞; 爆破开挖; 支护技术; 新奥法

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.016

0 引言

导流洞作为水利水电工程施工期的关键临时建筑物, 其开挖与支护质量直接关系到主体工程的工期、安全与投资控制。在复杂地质条件、大断面、多转弯的导流洞施工中, 如何实现高效、安全、精准的爆破开挖, 并同步实施有效的支护, 是工程面临的核心技术难题^[1]。尤其在海外项目中, 还需兼顾当地资源条件、设备配置及规范标准。本文依托刚果(金) Nzilo1 水电站导流洞工程实践, 结合现场施工组织与技术参数, 系统总结爆破开挖与支护技术的应用要点, 旨在为同类工程提供可借鉴的技术路径。

1 工程概况

刚果(金) Nzilo1 水电站电站装机容量 200 MW, 总库容 4.84 亿 m³, 属二等大(二)型工程。本标段主要承担导流洞工程的施工任务, 包括进出口明挖支护、洞身开挖支护、混凝土衬砌及灌浆等内容。导流洞洞身段全长 593.28 m, 设计断面为 7 m(宽)×8 m(高)的城门洞型。洞线在平面上设置 2 个转弯, 转弯半径均为 70 m, 转弯角度分别为 130.45° 和 120°, 空间线形复杂。洞身进口底板高程为 1 068.00 m, 出口为 1 064.00 m, 纵坡坡比为 6.74‰。进出口各设 10 m 长明渠, 进口布置 10 m 长闸门井, 出口设 10 m 长明洞用于后期交通转换。地质勘察表明, 洞身段以Ⅲ类围岩为主, 进出口约 55 m 范围为稳定性较差的Ⅳ类围岩, 局部存在断层破碎带, 施工安全风险较高。

2 工程施工重点

本工程导流洞施工重点集中于三方面。其一, 洞身 593.28 m 范围内穿越Ⅲ类与Ⅳ类围岩交界带, 其中

进口段约 30 m、出口段约 25 m 为Ⅳ类围岩, 岩体破碎、节理发育, 自稳时间短; 其余段落为Ⅲ类围岩, 完整性相对较好。两类围岩物理力学性质差异明显, 开挖过程中易在交界处产生应力集中或局部失稳, 要求开挖进尺、爆破药量及支护时机必须随围岩变化动态调整。其二, 洞线平面布置含两个大角度转弯, 转弯角度分别为 130.45° 和 120°, 转弯半径均为 70 m。弯道段掌子面非正交, 导致测量放样需频繁转换坐标系, 钻孔方向控制难度加大; 同时通风软管在弯道处易弯折, 风阻增大, 排烟效率下降, 掌子面空气质量保障面临挑战。其三, 导流洞进出口均紧邻卢阿拉巴河岸, 进口设 10 m 闸门井, 出口接 10 m 明洞, 洞口边坡高陡, 且处于Ⅳ类围岩中, 岩体易受雨水冲刷或河水渗透软化。施工初期必须完成边坡清危、锁口梁浇筑及超前支护, 方可进洞作业, 洞口段前 10 m 循环进尺严格控制在 1.5 m 以内, 并采用钢拱架全环封闭支护, 防止边坡失稳或洞口坍塌^[2]。

3 水电站导流洞爆破开挖及支护技术应用分析

3.1 水电站导流洞爆破开挖技术应用

导流洞爆破开挖需兼顾施工效率与围岩稳定性, 核心围绕开挖方法优化、爆破参数精准设计、标准化作业流程执行及特殊洞段专项处理展开。

3.1.1 开挖方法与施工组织

导流洞开挖严格遵循“新奥法”原则, 采取“短进尺、弱爆破、少扰动、强支护、勤观测”的施工方针。施工采用进出口双向掘进, 共设两个工作面。洞身开挖分上下两层进行: 上层开挖高度 7 m, 下层高度 2.3~3.6 m。上层开挖推进 100 m 后, 启动下层开挖, 以减少对围

岩的二次扰动。针对不同围岩类别，采用差异化开挖策略。III类围岩完整性较好，上层采用全断面开挖；下层采用“中部拉槽超前、两侧扩挖跟进”法，拉槽超前距离不超过 20 m，两侧扩挖交错进行，间距小于 20 m。IV类围岩段则严格控制循环进尺在 1.5~2.0 m，开挖后暂不出渣，优先进行安全处理与初期支护。

3.1.2 爆破参数设计与优化

导流洞爆破设计以光面爆破为核心，上层开挖采用 YT28 手风钻造孔，钻孔直径为 42 mm，掏槽孔深度为 4.2 m，孔距控制在 0.1~0.15 m；主爆孔深度为 4.0 m，孔距为 0.8~1.0 m；周边光爆孔深度同为 4.0 m，孔距根据围岩完整性调整为 0.4~0.7 m。装药结构方面，掏槽孔与主爆孔采用 $\Phi 32$ mm 乳化炸药，实行连续耦合装药；周边光爆孔则采用 $\Phi 25$ mm 乳化炸药，按间隔不耦合方式装药，不耦合系数为 1.6，药卷绑扎于竹片上，并以导爆索全程串接，确保传爆可靠^[3]。

起爆网络采用非电毫秒微差起爆系统，起爆顺序为掏槽孔先行起爆，随后主爆孔分排延时起爆，最后周边光爆孔同步起爆，形成良好的临空面与轮廓控制。在III类围岩中，单循环进尺控制在 3.0~3.5 m；在稳定性较差的IV类围岩段，循环进尺减小至 1.5~2.0 m，并相应降低单孔装药量。施工初期在代表性洞段开展爆破试验，通过对不同孔距、装药密度及起爆时序下的开挖轮廓、超挖量及岩面平整度，确定初始参数组合。此后，每循环爆破后由技术人员记录爆破效果，包括岩渣块度、轮廓线偏差及是否存在欠挖或局部剥落，据此对下一循环的装药量、孔距或堵塞长度进行微调，使炸药单耗稳定控制在约 1.11 kg/m³ 的合理区间内。

3.1.3 开挖循环作业流程

导流洞开挖严格执行标准化循环作业流程，具体工序依次为：测量放样→钻孔→装药→联网起爆→通风排烟→安全检查→危石处理→出渣→临时支护→掌子面清理→风水电管线延伸。每道工序衔接紧密，确保施工连续高效。

测量放样采用全站仪进行，每循环开挖前，技术人员放出隧洞中心线、顶拱线、底板高程、两侧腰线及设计轮廓线，并在掌子面上精确标定各炮孔孔位，孔位偏差控制在 ±1 cm 以内。钻孔作业由经验丰富的钻工分区定岗实施，YT28 手风钻造孔，周边光爆孔严格做到“准、直、平、齐”，孔底高程保持在同一设计平面上。装药由持证炮工操作，掏槽孔与主爆孔采用 $\Phi 32$ mm 岩石铵梯炸药连续装药，周边光爆孔则将 $\Phi 25$ mm 乳化炸药药卷按设计间距绑扎于竹片上，采用

导爆索串接，确保装药位置与线装药密度符合爆破设计要求^[4]。

装药完成后，按非电毫秒微差起爆网络联网，撤离人员并设置警戒，于安全位置起爆。爆破结束后，立即启动 500 m³/min 轴流式通风机向掌子面送风，排烟时间不少于 30 分钟，待洞内空气质量满足安全标准后，由专职安全员与爆破工进入掌子面进行安全检查，重点排查盲炮、松动危石及围岩异常。确认安全后，采用液压反铲或装载机装渣，自卸汽车运输至指定渣场，出渣前对渣堆进行洒水降尘。出渣完毕后，及时施作喷混凝土、挂网或安装钢拱架临时支护，随后人工配合机械清理掌子面及周边杂物，并同步延伸风水电管线至下一循环作业面，为后续钻孔作业创造条件。

3.1.4 特殊洞段处理措施

针对导流洞进出口洞口段及IV类围岩段，施工采取强化技术措施。洞口开挖前，先完成洞脸边坡的清危、挂网喷混凝土及系统锚杆支护，并浇筑钢筋混凝土锁口梁，严格执行“先锁口、再进洞”的施工程序。洞口段前 10 m 范围内，循环进尺控制在 1.5 m 以内，开挖后暂不出渣，立即进行危石清理与初喷封闭，随后安装 I18 工字钢拱架并完成挂网喷混凝土全环支护，支护作业紧随开挖面推进，滞后距离不超过 1 个循环进尺^[5]。

对于洞身穿越的断层破碎带、软弱夹层等不良地质段，采用导洞超前探测方式，导洞位于主洞拱部，超前主开挖面 12~15 m，通过导洞揭露围岩结构、节理发育及地下水情况。根据探测结果，在主洞开挖前实施超前支护：优先采用 $\Phi 42$ mm 热轧无缝钢管小导管，外插角 10°~20°，环向间距 200~400 mm；局部成孔困难段改用自进式中空注浆锚杆，杆体兼作钻杆与锚杆。小导管或锚杆安装后，分两次注入水泥浆及超细水泥～水玻璃双液浆，注浆结束 4~8 h 后方可进行主洞开挖。爆破作业时，单响药量较常规段减少 30%~40%，周边孔采用 $\Phi 25$ mm 药卷间隔装药，主爆孔采用松动爆破参数，孔距缩小至 0.6~0.8 m，排距调整为 0.7~0.9 m，起爆网络采用非电毫秒微差延时，确保爆破振动控制在安全阈值内。

3.2 水电站导流洞爆破支护技术应用

支护技术是保障导流洞施工安全与结构稳定的关键，需依据围岩分级构建适配的支护体系。通过锚杆、喷混凝土、钢拱架及超前支护的协同应用，及时约束围岩变形，同时依托全过程施工监测动态调整支护参数，确保支护效果与工程安全。

3.2.1 支护体系总体设计

支护体系根据围岩类别分级设置。III类围岩以系

统锚杆+挂网喷混凝土为主；IV类围岩及洞口段采用“超前支护+钢拱架+系统锚杆+挂网喷混凝土”的联合支护模式。所有支护均在开挖后及时施作，确保围岩变形在可控范围内。此外，III类围岩系统锚杆选用Φ22 mmHRB400螺纹钢，长度2.5 m，间排距 1.2×1.2 m，呈梅花形布设；喷混凝土采用C25配比，厚度10 cm，内铺Φ6.5@200×200 mm钢筋网。IV类围岩系统锚杆长度增至3.0 m，间排距加密为 1.0×1.0 m；钢拱架采用I18工字钢，每榀间距0.8 m，纵向以Φ22 mm钢筋连接，环向间距1.0 m；喷混凝土厚度15 cm，钢筋网规格为Φ6.5@150×150 mm。洞口段在IV类围岩支护基础上，增设锁脚锚杆，采用Φ25 mm螺纹钢，长度4.0 m，每榀拱架设4根。

3.2.2 锚杆与喷混凝土施工

锚杆采用“先注浆后插杆”工艺为主。钻孔使用D7液压钻机或YT28手风钻，孔径大于锚杆直径15 mm以上。注浆采用YSB～2B型砂浆泵，水泥砂浆强度等级不低于20 MPa。锚杆材质为HRB400螺纹钢，孔位偏差≤100 mm，孔轴方向垂直于开挖面或按设计要求调整。喷混凝土采用湿喷法施工，混凝土由拌和站集中拌制，运输车运至洞内。喷层厚度5～10 cm，配合比经试验确定，掺加速凝剂以满足初凝<5 min、终凝<10 min的要求。钢筋网在加工厂预制，现场人工安装，喷射时自下而上分段分区进行，确保钢拱架与围岩间空腔被混凝土完全填充。

3.2.3 钢拱架与超前支护

IV类围岩段采用I18工字钢拱架进行初期支护，拱架沿洞轴线间距设置为0.5～1.0 m。所有拱架在加工厂按设计尺寸分节预制，每节端部焊接连接钢板并编号，运至现场后通过高强螺栓拼接，并对连接缝进行满焊加固。安装时，拱架底部必须置于开挖后未扰动的坚硬岩面上，局部凹陷处采用C25混凝土找平，并在拱脚下设置200×200×10 mm钢板支垫，防止应力集中导致下沉。拱架两侧与系统锚杆焊接固定，锚杆端头弯折后与拱架腹板贴焊，确保整体受力。纵向采用Φ22 mmHRB400钢筋作为连接筋，环向间距1.0 m，与拱架翼缘满焊。拱架安装完成后，立即挂设Φ6.5@150×150 mm钢筋网，并采用湿喷机分层喷射C25混凝土，喷层厚度不小于25 cm，确保拱架完全包裹，形成封闭的柔性承载结构。

超前支护采用Φ42 mm热轧无缝钢管制作的小导管，单根长度3～5 m，沿开挖轮廓线外插角10°～20°钻孔顶入，环向间距200～400 mm。小导管前端加工成锥形，管壁梅花形布设Φ6 mm注浆孔，间距

15 cm。注浆分两次进行：第一次注入水灰比1:1的纯水泥浆，注浆压力0.5～1.0 MPa；第二次注入超细水泥与水玻璃双液浆（体积比1:1），水玻璃模数2.4～3.0，浓度30～35Be'。注浆结束后静置4～8 h，待浆液初凝后方可进行开挖作业，并在掌子面前方保留1.5～2.0 m未开挖岩体作为止浆墙。

3.2.4 施工监测与动态调整

施工全过程实施围岩变形监测。每循环开挖支护完成后24小时内，在拱顶及两侧边墙布设收敛测点，采用全站仪或收敛计监测拱顶沉降与水平收敛变形。测点埋设牢固，编号清晰，初始读数在支护完成后2小时内完成。IV类围岩段及断层破碎带加密布点，纵向间距5 m，观测频率为每日1次；III类围岩段纵向间距10 m，观测频率为每2日1次。所有监测数据由专人记录并录入电子台账，每日进行趋势分析。当单日收敛速率超过2 mm/d或累计变形量超过设计预警值（拱顶沉降30 mm、净空收敛40 mm）时，立即暂停掌子面开挖，组织技术、安全、测量人员现场会商，采取增设临时横撑、补打锚杆、加厚喷层或调整钢拱架间距等加强措施。同时，每月对监测仪器进行1次校准，确保数据精度；监测台账同步上传至项目管理平台，实现建设、监理、施工三方实时共享，确保整体工程的稳定。

4 结束语

刚果（金）Nzilo1水电站导流洞工程通过科学的爆破开挖设计与分级支护技术，成功克服了复杂线形、多变围岩及海外施工等多重挑战。实践表明，“新奥法”指导下的短进尺弱爆破、光面爆破控制、钢拱架联合支护及动态监测体系，是保障导流洞安全高效施工的有效技术路径。该工程经验对类似海外水电项目具有良好的参考价值。

参考文献：

- [1] 李荣军.引汉济渭三河口水利枢纽导流洞工程开挖技术研究[J].科技创新与应用,2017(27):46-47.
- [2] 陈忠伟.导流洞开挖支护施工技术[J].建筑技术开发,2022,49(22):39-41.
- [3] 郭信义.浅孔微差爆破技术在后孟水库导流洞开挖中的应用[J].水利科技,2021(01):60-62,75.
- [4] 蒋森林,江钧雄,杜宇杰.特大导流洞群中隔墙塌方处理及安全爆破开挖关键技术[J].四川水利,2023,44(02):56-60.
- [5] 阮国府.巴勒水电站导流洞围堰爆破拆除施工技术[J].四川水利,2024,45(06):60-64.

水利工程中堤防护岸施工技术要点分析

姚德山，刘宪纲

(青岛水总工程有限公司，山东 青岛 266000)

摘要 本文围绕水利工程堤防护岸工程施工技术展开探讨，从地基勘察与处理、材料质量把关等方面切入，分析了影响工程质量的关键因素，进而提出推广新型材料、深化技术培训等优化措施，并对施工技术进行了系统分析，以期为提高堤防护岸工程施工水平、保障工程的安全、耐用及生态协调性提供借鉴，进而促进防洪减灾体系长效发展。

关键词 水利工程；堤防护岸；地质勘察技术；生态化施工技术；智能化施工管理技术

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.017

0 引言

堤防护岸是保护河道岸边免受侵蚀和冲刷的重要组成部分，其施工技术是水利工程施工中十分关键的一部分。在水利工作中，堤防护岸建设与人们的生命财产安全息息相关，应当受到高度的重视。当前洪水威胁不断增大，堤防护岸建设水平也在不断提升，要不断对施工技术进行完善和优化，进而确保堤防护岸的综合稳定性。这样才能建设更加坚固、安全和环保的水利工程，为人民生活带来更多的福祉。

1 水利工程中堤防护岸工程施工技术的概述

堤防护岸工程是水利工作中防止河流、湖泊、水库等水体冲刷岸坡的，维持堤防稳定的重要工程种类，施工技术涉及测量放线、基坑开挖、地基处理、护坡结构施工等多个环节，依照工程地质状态，一般采用混凝土、浆砌石、生态等护坡样式，以达到防冲固岸目标^[1]。一般而言，水利工程中堤防护岸工程施工技术具有以下几方面的特点。

1.1 堤防护岸工程的地质勘察技术

水利工程的堤防护岸施工需做详尽地质勘察，为确定土壤承载能力，为堤防设计提供基础资料，地质勘察结果左右着堤防基础处理方案，涉及松软土层的加固、地下水位的调控等；针对基础处理工作，堤防护岸工程常采用夯实、注浆、换填之类方法，依靠加固土体，提升堤防稳固性。尤其是软土区或深水区，施工时应针对地下水位高、地质情况复杂的情形，采用适宜的加固技术及材料，保障堤防结构的长久性，有效的基础处理可增强堤防抗渗、抗压、抗滑等性能，还可降低水土流失程度，预防结构性破坏，实现堤防长期稳定运转。

1.2 堤防护岸的生态化施工技术

水利工程堤防护岸施工越来越看重生态环保，促进了生态施工技术的进步，堤防设计与施工期间，堤防护岸工程采用生态修复材料成关键施工方法，生态护岸施工不仅看重结构坚固性，还留意对水域生态环境的守护，例如：采用生态砌块、草毯、植草护坡等天然物料，利用植被种植及土壤固定，有效防止土壤流失、减弱水波冲刷对堤防破坏^[2]。

1.3 堤防护岸工程的智能化施工管理技术

智能化施工管理技术主要借助物联网、大数据和人工智能技术，对施工过程实施实时监控，像采用无人机进行施工现场巡查，采用智能传感器监测堤防土壤湿度、位移等关键指标，实时掌握堤防状况，应用智能化技术让施工人员可及时发现潜在问题，减小了人为误差的概率，智能化管理平台在施工现场可合理调配资源，增进了项目整体管理水平，保证堤防护岸工程如期高质量竣工。

2 水利工程中堤防护岸工程施工技术的关键点分析

2.1 地基勘察与处理

地基勘察与处理是确保工程质量的基础，堤防及护岸工程多建于河流、湖泊沿岸地带，地质条件复杂，常存在软弱土层、砂性土层及地下水位高等不利因素，如果地基条件未能准确掌握，极易引发堤身沉降、滑坡、管涌等工程隐患，影响整体稳定性，因此在施工前应进行系统、全面的地质勘察工作，详细调查地层结构、土体性质、地下水分布及承载力等参数，通过勘察结果，可为后续的设计提供可靠依据，确保地基方案的科学性^[3]。堤防护岸工程应根据河势变化、流速特征、岸坡形态进行分析，以合理确定地基处理深度；在地

基处理方面，应依据地质条件选择合适的加固措施；对于软弱地基，堤防护岸工程可采用换填垫层、强夯、砂石桩、CFG桩、注浆加固等方法，提高地基承载力；对于渗透性强的砂层，堤防护岸工程应采取防渗帷幕、截渗墙等措施，防止渗流破坏，同时施工过程中需严格控制加固工艺，确保处理均匀、质量达标；在施工完成后，堤防护岸工程应通过现场检测，验证地基处理效果，科学的地基勘察不仅能保障堤防护岸工程的稳定，还能降低后期维护成本，为整体防洪体系的安全运行提供坚实基础。

2.2 材料质量控制

堤防护岸工程所使用的主要材料包括混凝土、砂石、块石、钢筋、土工合成材料及防渗材料等，由于施工环境复杂、受水流冲击大、长期暴露于自然环境中，材料的质量稳定性尤为关键；在施工前，堤防护岸工程应严格按照设计要求进行检验筛选，确保其物理、化学性能符合标准。材料进场后，工作人员应进行抽检，未经检验的材料严禁使用，以防埋下质量隐患。在施工过程中，施工人员应建立完善的材料管理体系，做到全过程监控，例如：设立专门的材料试验，定期检测混凝土拌合物性能、砂石级配、含泥量及钢筋粘结性能等关键指标；施工人员应严格控制配合比与拌合工艺，确保混凝土的强度；施工人员应合理储存材料，防止受潮、污染或老化，尤其是土工布、防渗膜等新型材料，更应注意防紫外线及机械损伤，施工中还应加强现场监督，防止偷工减料、以次充好等现象，通过全过程质量控制，可有效提升堤防护岸工程的整体质量，延长工程寿命，确保具备良好的安全性。

2.3 护坡结构稳定

堤防护坡长期处于水流冲刷、风浪侵蚀及水位变化的作用下，若结构稳定性不足，容易发生坡面滑塌、护坡空鼓、结构位移等问题，进而危及堤身安全，因此在设计与施工阶段必须充分考虑坡体的地质条件、水动力环境、荷载变化，科学确定坡比、护坡形式及结构组合，常用的护坡结构类型包括浆砌石护坡、混凝土预制块护坡等。不同结构形式需根据地基承载力、水流条件及生态要求进行合理选择，以确保防冲稳固。在施工过程中，护坡结构的稳定性应通过严格的施工控制，基础处理要稳固可靠，坡脚部位应设置防冲槽，以防被水流掏空；砌筑或铺设护坡材料时，应确保层间结合紧密、接缝严实，避免渗水破坏；施工人员应配置必要的排水设施，防止坡体内水压力积聚引发失稳，此外在高水位或强冲刷河段，可配合使用抛石、

土工布及锚固系统，提高抗冲抗滑能力；在施工后，施工人员还需定期监测坡面形变，及时修复损坏部位，通过合理设计，确保护坡结构具备良好的整体性、抗冲性，从而实现堤防护岸工程的长效稳定运行。

2.4 防渗排水设计

由于堤防长期处于复杂的水文环境中，受水位涨落、渗流压力的影响，若防渗系统设计不当，容易引发渗漏、管涌、淘刷等破坏现象，导致堤身失稳甚至溃决，因此在设计阶段应充分调查地质，分析渗流路径，合理确定防渗体系形式，常用的防渗措施包括铺设防渗土层、粘土心墙、防渗帷幕、土工膜及水泥搅拌桩等，应根据土质类型、水头差、施工条件综合选用，以达到截渗、减渗与稳定堤身的目的。在排水设计方面，堤防护岸工程应遵循“截渗与排水并重”的原则，防止渗水积聚导致堤体孔隙水压力升高，常用的排水设施包括反滤层、排水沟等，通过合理布设可有效降低堤体内部水位，维持结构稳定，排水系统的设计应兼顾排水能力，确保在高水位或暴雨情况下仍能顺畅运行；在施工中，施工人员需严格控制反滤料级配，防止渗水倒滤，防渗与排水体系相辅相成，只有在科学设计与精细施工的双重保障下，才能确保堤防护岸工程保持良好的抗渗，从而有效提升整体防洪安全水平。

3 优化水利工程建设施工技术的对策

3.1 推广新型材料

传统堤防护岸工程多采用混凝土、浆砌石等普通材料，虽有着不错强度，但具有施工周期长、成本高、生态兼容性差等问题，伴随科技持续进步，各类新型建筑材料普及度高，诸如高性能混凝土、土工合成材料、生态护坡材料等，其拥有轻质高强、耐久抗蚀、施工方便等长处，还能切实提高工程防渗水平，像采用土工布、土工膜这类材料，能极大提升防渗成效；生态护坡材料可同时兼顾防护，收获防洪及生态双重效益^[4]。在推广应用阶段，堤防护岸工程要结合不同区域地质、水文及气候条件，恰当选取新材料种类，堤防护岸工程须加强对新型材料性能的试验探究，保障其各项指标契合设计；堤防护岸工程当完善相关技术规范规定，助力新材料规范运用；堤防护岸工程应加强对施工人员技术培训力度，提高其对新材料施工工艺的掌握水平，防止操作失误影响工程质量，同时政府部门要给予政策扶持，促进科研机构与施工企业合作，着力开发堤防护岸工程新型绿色材料，实施新材料的合理推广，能增进工程的防洪水平，还可促进水利工程长久发展。

3.2 加强技术培训

堤防护岸工程施工环节多、技术要求高，涉及地基处理、防渗排水、结构砌筑、生态护坡等多种工艺，任何一个环节的疏忽都影响整体工程质量，目前一些施工单位存在技术人员专业水平参差不齐、对新工艺掌握不足等问题，导致施工质量控制难度加大，为此堤防护岸工程应建立系统的技术培训机制，定期组织施工管理人员、技术人员参加培训，确保其熟悉设计规范、施工标准及新材料、新技术的应用要求。在具体实施过程中，技术培训应注重理论与实践相结合，堤防护岸工程可依托水利科研院所，开设堤防护岸工程施工技术专题课程，系统讲解施工要点、质量控制及安全管理知识；堤防护岸工程应结合工程实例，开展现场教学与技术交流，使技术人员掌握施工工艺与应急处理方法；堤防护岸工程应建立长效培训体系，将培训成果与岗位考核、职称评定及工程质量挂钩，形成激励机制，促进技术人员不断学习与创新，通过持续、系统的技术培训，可有效提升施工队伍的专业化水平，为实现堤防护岸工程的高质量建设提供坚实保障。

3.3 完善施工标准

堤防护岸工程具有施工周期长、环境条件复杂、受自然因素影响大的特点，不同地区在地质、水文及气候条件上存在较大差异，导致施工过程中的标准化程度不高，因此堤防护岸工程应结合地方实际，系统修订和完善堤防护岸工程的施工技术标准、验收规范、管理制度，使施工过程有章可循、有据可依，从而提高工程建设的科学性。在实施过程中，完善施工标准应从制度建设、技术规范、监督机制三方面入手，水利工程应建立完善的施工技术标准体系，明确不同护岸类型、地基条件及防渗结构的施工要求，统一技术参数；水利工程应加强标准化施工工法的研究，总结典型工程经验，形成可复制、可推广的施工模式；水利工程应健全质量监督制度，明确各阶段质量控制指标，确保施工质量全过程可控，此外随着新材料、新技术的应用，水利工程应及时更新相关标准，使其与现代施工技术相匹配，通过完善施工标准，不仅能够有效提高堤防护岸工程的施工质量，还能促进水利工程建设的规范化、精细化，为防洪减灾体系提供坚实的技术支撑^[5]。

3.4 优化设计方案

堤防护岸工程设计不仅关系到结构稳定，还直接影响施工质量、投资成本及生态环境效应，为此堤防

护岸工程必须坚持“因地制宜、科学合理、经济适用、生态协调”的设计原则，在方案制定阶段充分开展地质、水文、气象及环境等多因素综合分析，科学选择堤防断面形式、护坡结构及防渗排水体系^[6]。通过优化设计方案，堤防护岸工程可在确保安全的前提下，提升工程整体性能，降低施工难度。在具体实践中，优化设计方案应注重创新性，堤防护岸工程应引入现代信息化技术，对河道水流特性进行精准分析，实现设计的数字化；堤防护岸工程应加强设计单位与施工单位的协同，建立“设计—施工—监测”一体化机制，确保设计方案更符合施工实际，减少设计变更和返工，堤防护岸工程应重视生态设计理念，采用生态护坡、透水结构、植被护岸等措施，实现防洪与生态环境保护的统一，此外堤防护岸工程应充分考虑经济性，在保证安全标准的前提下，优化材料选择与结构组合，做到安全、经济、绿色相结合，通过科学优化设计方案，不仅能提高堤防护岸工程的整体质量，还能促进水利工程向智能化、生态化方向发展，为防洪减灾建设提供有力支撑。

4 结束语

堤防护岸工程作为水利工程体系中的重要组成部分，其施工技术水平直接关系到防洪安全、河道稳定与生态环境保护，通过对施工关键环节的优化，可有效提升工程质量。当前堤防护岸工程应在充分认识地基处理、材料控制、结构稳定等核心技术的基础上，积极推广新材料、新工艺与信息化管理手段，同时堤要完善防护岸工程施工标准体系，加强技术培训，实现从“经验施工”向“科学施工”的转变。

参考文献：

- [1] 黄顺康.探析水利工程中的河道堤防护岸工程施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2024(31):199-201.
- [2] 饶天龙.关于水利工程中堤防护岸工程施工技术分析[J].内蒙古水利,2021(09):56-57.
- [3] 赵小芳.关于水利工程中堤防护岸工程施工技术分析[J].价值工程,2019,38(35):243-244.
- [4] 王羊子.水利工程施工中堤坝防渗加固技术的运用[J].中华建设,2022,29(07):153-154.
- [5] 冯熊,张兴旺.水利工程施工技术探讨[J].江西建材,2022(02):123-124.
- [6] 韩吉胜.浅谈水利工程施工技术应用[J].建材发展导向(下),2022,20(05):133-135.

水利工程隧洞喷锚支护及衬砌加固施工技术

李云龙，刘清朴

(中水北方勘测设计研究有限责任公司，天津 300222)

摘要 水利工程隧洞在长期运行过程中，受地质应力场动态变化、地下水渗流作用以及结构材料老化等多因素耦合影响，易产生结构性裂缝、渗漏通道及衬砌变形等典型病害，严重威胁工程安全与耐久性。针对此类问题，亟需开展科学加固与施工优化研究。本文以喷锚支护与衬砌加固技术为研究核心，系统剖析其作用机理、工艺参数设计及施工质量控制方法，重点论证其在提升结构整体稳定性、增强防渗抗裂性能及延长服役寿命等方面的工程价值。研究成果旨在为水利隧洞加固技术体系完善提供理论参考，进而提升工程运行安全水平。

关键词 水利工程；隧洞喷锚支护；衬砌加固

中图分类号：TV5

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.018

0 引言

水利工程输水及调控系统中，隧洞作为关键结构单元，其结构安全性与耐久性直接决定着整个水利工程的长期稳定运行及全生命周期经济性。随着工程服役年限的持续增长及地质环境复杂性的加剧，早期建成隧洞普遍出现渗漏通道扩展、衬砌结构开裂及围岩渐进性变形等典型病害，严重威胁工程安全，亟需开展系统性加固修复。当前，喷锚支护技术与混凝土衬砌加固作为隧洞加固领域的核心手段，通过优化围岩—支护结构协同作用机理，在提升结构整体稳定性、增强防渗抗裂性能及延长工程服役寿命等方面展现出显著技术优势，为水利隧洞病害治理提供了可靠解决方案。

1 隧洞喷锚支护及衬砌加固施工的重要性

隧洞喷锚支护及衬砌加固施工在水利工程建设中起到决定性作用，其技术水平的好坏直接关系到隧洞结构的安全性、耐久性以及运行稳定性。随着工程服役年限的增长以及地质环境的复杂变化，围岩应力释放、渗流侵蚀、结构老化等因素会导致衬砌变形、裂缝扩大、防渗能力降低^[1]。喷锚支护是初期支护体系，承担围岩荷载并形成稳定的受力框架，是保证开挖面稳定、防止坍塌、控制变形的关键环节；衬砌结构承担长期荷载和防渗任务，是保证隧洞安全运行和输水功能的关键屏障。两者共同构成了隧洞支护与加固体系的主要技术基础，合理与否决定着围岩、结构、水压力是否达到平衡状态。科学的喷锚支护和衬砌加固施工，对提高结构的承载能力、改善应力分布、延长结构的使用寿命、保证工程的整体安全具有不可替代的工程价值，是实现现代水利隧洞长期安全、高效运行的重要保证。

2 隧洞喷锚支护加固施工技术要点

2.1 施工原理及技术特点

隧洞喷锚支护加固施工的主要原理是通过喷射混凝土、锚杆、钢筋网等支护结构形成一个复合受力结构，对围岩进行及时支护，达到长期稳定的目的。该技术是依据岩体与支护体的协同作用原理，施工时利用高压喷射混凝土来形成连续的支护层，同时与锚杆、钢筋网共同构成整体受力系统，进而提高围岩的自承能力^[2]。

喷锚支护施工的关键是发挥围岩的自稳作用，控制围岩变形，减小衬砌荷载。结构特点为初期支护层和围岩之间存在粘结界面，喷射混凝土层在早期起封闭围岩、防止风化剥落的作用，后期起传递荷载、保持结构稳定的作用。锚杆利用径向预应力作用，把局部不稳定岩块和整体围岩连接成一个受力整体，使围岩成为结构体系的一个组成部分。喷射混凝土与锚杆配合使用，使支护系统在很短的时间内就具有了较高的抗剪、抗弯、抗拉强度。喷锚支护施工速度快、对地质适应性强、可随开挖面及时支护，适用于围岩强度低或节理裂隙发育的隧洞结构。该工艺在喷射时形成致密的保护层，可以有效地防止地下水渗流造成的结构弱化，提高整个结构的防渗性能^[3]。喷射层和锚杆共同作用，使围岩应力分布更加均匀，显著减小局部集中应力。施工时坚持短进尺、强支护、早封闭的原则，以防止围岩位移超限。喷射混凝土一般用湿喷工艺，保证混凝土均匀密实，提高粘结强度。喷锚支护结构的受力性能与岩体强度、锚杆间距、喷射层厚度等有关，合理设置上述参数，可以使喷锚支护结构

整体形成有效的力学闭合结构，为后续的衬砌施工提供稳定的力学环境。

2.2 钢筋及钢筋网施工工艺

钢筋和钢筋网在喷锚支护施工中具有提高喷射混凝土层抗拉、抗剪性能的作用，钢筋与钢筋网的施工质量好坏直接关系到支护体系整体受力特性。施工前根据围岩类别和设计要求确定钢筋网参数，常见配置为环向、纵向钢筋间距 200 mm，钢筋直径 6 mm，采用低碳冷拔钢筋或 HRB335 热轧钢筋，表面洁净无锈蚀^[4]。钢筋网在制作阶段应在地面成型，尺寸精度控制在 ±5 mm 范围内，节点处采用电弧焊连接，焊缝长度不小于 10 d，保证整体刚度。在隧洞开挖面上及时布置测线，以确定钢筋网的安装位置及弧度，保证钢筋网贴合围岩轮廓。安装时应与预埋锚杆牢固连接，使喷射层和锚杆形成一个统一的受力体系。控制电流和时间，防止烧穿或虚焊。钢筋网安装完成后，保护层厚度控制在 100 mm 左右，以保证钢筋不外露、不偏位。对于洞顶、侧壁和底板的钢筋网布置应根据应力分布调整间距和网片尺寸，洞顶区域应适当加密钢筋，以提高抗裂性能。钢筋加工和焊接过程中严格控制焊缝质量、焊接变形，必要时使用临时支撑固定钢筋网防止下垂。锚杆施工时钻孔直径 40 mm，深度 15 m，孔壁清理干净后插入锚杆，注入 M25 水泥砂浆，保证浆液饱满充填^[5]。锚杆布置采用梅花形交错布置，间距控制在 1 m 左右，以使支护力分布均匀，如图 1 所示。钢筋安装完毕后，应对其外观及焊接质量进行抽样拉拔试验，检验钢筋锚固强度。施工中防止钢筋受潮、污染，钢筋绑扎完成后立即进行喷射混凝土施工，防止氧化影响粘结性能。

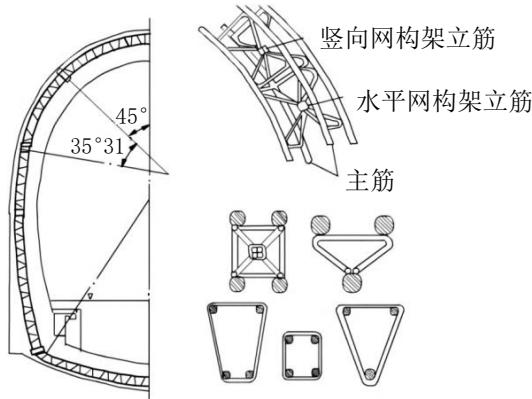


图 1 钢筋网支撑结构示意图

2.3 混凝土喷射施工工艺

混凝土喷射是隧洞喷锚支护的重要工序，混凝土喷射施工质量直接影响支护层的密实性和耐久性。喷射混

凝土用普通硅酸盐水泥，强度等级不低于 42.5 MPa，配合比设计根据施工环境湿度、骨料粒径、喷射距离来定。常用的骨料粒径为 0.6 ~ 15 mm，细度模数约为 2.5，含水率控制在 6% 以下^[6]。为了保证喷层的粘结性能和早期强度，加入高效速凝剂，掺量占水泥质量的 4% ~ 6%。喷射工艺采用湿喷法，高压输送系统将混凝土料浆均匀喷射到围岩表面。喷嘴到喷射面的距离控制在 60 ~ 100 mm 之间，喷射角度垂直，喷射顺序自下而上、分层推进，每层厚度控制在 5 cm 以内。喷射时混凝土的流动性要合适，不能有离析、回弹、流淌的现象，回弹率不大于 25%。为了提高喷层密实度，应该保持料流连续稳定，喷射中断时立即清理管道和喷嘴内的残余混凝土，防止凝结堵塞。喷层施工完毕后应做表面检查，无裂缝、空鼓、起砂。喷射混凝土强度等级不低于 C25，抗渗标号不低于 W4，喷射厚度一般为 100 mm。喷射施工结束后立即进行养护，用持续洒水或湿麻袋覆盖的方式保持湿润状态，养护时间不少于 7 天。施工环境温度低于 5 °C 时要采取保温措施，防止早期冻害。喷射混凝土层与锚杆、钢筋网紧密结合形成整体支护结构，使围岩应力重新分布，减小变形并提高结构稳定性。施工期间对喷射量、气压、配合比等参数实施实时监测，保证喷层质量一致，厚度符合标准。混凝土喷射工艺的稳定、均匀是保证高强度、高致密支护层的重要技术保证。

3 隧洞衬砌加固施工技术

3.1 施工总体思路及分段设计

隧洞衬砌加固的总体思路是在保证结构安全、耐久的前提下，根据围岩等级及变形特点制定合理的分层、分段施工方案。衬砌结构属于隧洞长期承载的关键防护体系，其施工顺序一般采取“底板一边墙一拱顶”的自下而上方式，保证施工稳定和受力平衡。根据不同的围岩类型，衬砌的厚度和配筋标准应有差异化设计。III 级围岩区衬砌厚度一般不小于 300 mm，IV 级围岩区衬砌厚度应大于 400 mm。为了减少衬砌应力集中，施工缝和结构伸缩缝的间距要严格控制，一般沿隧洞轴向每隔 10 m 设置一道，缝内嵌入止水橡胶材料，起到防渗和变形缓释的作用。施工分段衬砌，每段长度根据地质条件、模板结构、混凝土浇筑能力综合确定，宜控制在 8 ~ 12 m 范围内^[7]。为了保证结构整体性，分段衬砌需要设置导向槽和定位钢筋，使新旧混凝土能够良好结合。衬砌施工需与喷锚支护系统形成协同效应，衬砌体承受长期荷载，喷射层担负初期支护稳定，二者共同构成完整的受力体系。

3.2 模板及支架安装技术

模板、支架安装属于衬砌加固施工的重要环节，结构精度的好坏直接关系到混凝土衬砌的线形、尺寸和表面质量。根据隧洞断面小、施工空间狭小的特点，采用组合式可调钢模板和轻型木模板相结合的方式。顶拱处由于浇筑压力大，采用经力学计算设计的弧形钢模板，配合加劲肋、纵向锁紧螺栓形成整体受力结构；边墙、底板部位使用定型钢模板以提高安装精度和重复利用率。模板拼装前必须在样台上试装，保证弧度、连接缝隙和支撑点位置符合设计要求。支架体系采用钢拱架、立柱、径向支撑相结合的空间刚性结构，保证施工期间不发生位移、变形。模板安装定位精度控制在±5 mm以内，支架立柱底部要垫上钢板或枕木以分散荷载^[8]。为防止浇筑过程中模板胀模、跑浆，模板拼缝处要加设橡胶密封条，并定期检查紧固情况。模板安装完成后进行整体复测，检查断面尺寸、轴线偏差、标高，确保与设计线形一致。施工过程中应定期检查支架的稳定性，发现松动要立即加固，以保证模板体系受力安全。

3.3 钢筋加工及安装工艺

钢筋施工工艺的关键是保证结构受力连续、衬砌整体刚度。钢筋使用HRB335或者HRB400级热轧带肋钢筋，加工前根据设计图纸进行下料、弯曲、编号，允许尺寸偏差在±10 mm以内。钢筋表面应清洁无锈蚀，切断端部平整，无毛刺，无裂纹。安装时采用人工绑扎与焊接固定的方法，焊缝长度不小于10 d，焊缝处应平整无气孔。底板钢筋的铺设要严格控制保护层的厚度，最小不能小于50 mm，防止由于渗水而导致钢筋腐蚀。边墙及顶拱钢筋施工采取分层作业的方式，先安装底层钢筋并加以固定，而后铺设上层钢筋网片，其间距保持在150~200 mm之间。顶拱处钢筋可适当加密以提高抗裂性能。施工时用定位垫块、卡具保持钢筋间距，防止移位。为了保证钢筋和混凝土的粘结，绑扎完成后应立即进行隐蔽工程验收，保证接头数量、焊缝质量、钢筋间距等符合设计要求。钢筋安装完成后要复测线形，保证衬砌断面尺寸和受力中心一致，防止产生偏心应力。

3.4 混凝土衬砌施工及养护

混凝土衬砌采用机械化连续浇筑工艺，根据隧洞断面形状进行定向浇筑。混凝土采用普通硅酸盐水泥，强度等级不低于C25，骨料粒径5~25 mm，含泥量不大于2%。拌制时控制好水灰比及坍落度，保证混

凝土有良好的流动性和粘聚性。拌合站设在隧洞进口处，混凝土用轨道小车运送，现场采用溜槽或布料管浇筑。浇筑顺序为底板、边墙、顶拱，每层厚度控制在300~400 mm之间，连续作业，防止冷缝的产生。振捣工序使用插入式振捣器，间距控制在50 cm以内，振捣时间以混凝土表面泛浆为准为宜，防止漏振、过振。衬砌浇筑完毕后，应在10小时内进行第一次洒水养护，保持混凝土表面湿润，养护时间不少于7天，重要结构不得少于14天。洞内通风要维持稳定的湿度，防止水化热聚集造成裂缝。模板拆除时必须混凝土强度达到3.5 MPa以上，拆模顺序为先侧后顶，操作轻缓，防止表面损伤。养护结束后需对表面质量进行检查，确保无裂缝、空鼓、剥落等情况，以保证衬砌结构的密实性和防水性能。

4 结束语

水利隧洞安全运行体系中，喷锚支护与衬砌加固施工技术作为核心工程措施，其设计优化与施工精度直接决定了围岩—支护结构协同作用的有效性，进而影响隧洞长期稳定性及防渗性能的可持续性。通过实施高标准的施工质量管理体系、精准的工艺参数控制以及合理的结构匹配设计，可显著提升隧洞整体承载能力与耐久性，为复杂地质条件下水利工程的安全运行提供可靠保障。该技术体系的规模化应用与推广，对推动水利工程建设向高质量、安全化方向发展具有重要的战略意义和实践价值。

参考文献：

- [1] 郭领兵. 水利工程隧洞喷锚支护及衬砌加固施工技术[J]. 科学技术创新, 2024(23):183-186.
- [2] 代龙. 水工隧洞衬砌与喷锚支护加固设计及施工分析[J]. 江西建材, 2024(09):162-164.
- [3] 李富强, 康波. 水利水电工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工技术研究[J]. 中国高新科技, 2024(14):139-141.
- [4] 张生武. 水利工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工[J]. 科学技术创新, 2024(07):161-164.
- [5] 熊昕. 水利工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(10):46-47, 62.
- [6] 刘宁平. 水利工程隧洞回填的灌浆施工技术探究[J]. 水上安全, 2024(04):181-183.
- [7] 林雄伟. 引水隧洞衬砌施工工艺及质量控制措施[J]. 云南水力发电, 2024, 40(02):123-125.
- [8] 吴曙辉. 水利工程隧洞开挖施工探析[J]. 东北水利水电, 2024, 42(01):26-28.

机场接地系统铜扁带折弯施工技术应用研究

完颜晖

(中交一公局电气化工程有限公司, 北京 100000)

摘要 针对大型基础设施项目中接地铜扁带折弯作业存在的效率低、精度差等问题, 本文提出一种适用于机场电气工程的铜扁带机械折弯施工工法。该方法基于杠杆—碾压复合结构设计, 配套使用自主开发的折弯设备, 形成标准化、模块化的施工流程。通过工程实例验证, 系统建立了设备安装参数、操作步骤、角度控制与质量检测等一体化工序体系, 结合现场数据分析其经济性与工程适配性。研究结果表明, 该工法在结构设计、施工组织与成型精度方面具有良好的适应能力, 可为复杂场景下的接地系统建设提供新型技术参考。

关键词 机场工程; 接地系统; 铜扁带

中图分类号: V35

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.019

0 引言

在现代机场建设中, 接地系统是保障电气安全和设备稳定运行的基础设施, 它的施工质量直接影响整个机电系统的运行可靠性。铜扁带因为导电性能好、耐腐蚀, 在机场接地工程中得到广泛应用。但是, 由于建筑结构复杂, 布线路径老变, 因此施工时铜扁带经常需做多角度、高精度的水平折弯。传统手工折弯效率不高, 效果不佳, 很难满足大规模工程对质量和进度的要求^[1]。基于此, 本文以乌干达恩德培国际机场改扩建项目为例, 研究铜扁带折弯施工工法的应用, 系统分析它的工艺原理、施工流程、质量控制办法和实际效益, 为类似工程提供可以参考的技术路径和现场管理方案。

1 工程概况

乌干达恩德培国际机场改扩建工程由中交一公局电气化工程有限公司负责建设, 接地系统用了总长大概 10 000 m、规格 40×4 mm 的紫铜扁带, 覆盖航站楼、指廊与附属设施。工程布线密, 铜扁带要在结构转角、设备接地引出这些地方做水平折弯, 折弯的地方超过 480 处, 常见角度在 30° 到 120° 之间, 有些地方间距不到 1 m。铜带敷设需满足电气连续性、形变控制和施工精度等要求, 施工时和土建预埋、弱电及动力管线交叉很多, 作业环境复杂, 对成型质量和定位精度要求很高。为保证后续系统联通性和接地电阻控制效果, 现场对铜带敷设路径、折弯节点布局以及设备接口坐标进行了精细建模和预先校核, 确保所有铜带段连接可靠, 弯折角平顺, 既符合电气规范, 又能够保证运行可靠。

2 机场接地系统铜扁带折弯施工

2.1 工艺原理

铜扁带折弯施工是按照机械碾压的原理进行的, 通过杠杆机构把一定角度的位移变成对铜带的定向碾压形变, 实现高精度、能控制角度的冷态折弯。采用的折弯装置中, “F”型活动拉杆和圆盘中心连在一起, 形成可以调节的力臂; 钢制碾压套筒直接和铜扁带接触, 转动的时候就能让铜带弯折^[2]。在铜带不断开的情况下完成局部弯曲, 避免应力集中或者材料疲劳失效, 满足接地系统在电气和机械规范下的敷设要求。

2.2 工艺流程及操作要点

2.2.1 工艺流程

铜扁带折弯施工严格按照标准化流程执行, 保证每道工序都有明确的控制节点和质量闭环机制。整体施工流程见图 1。

2.2.2 操作要点

1. 材料准备。铜扁带为 40×4 mm 规格的紫铜制品, 符合《电工用铜、铝及其合金母线第 1 部分: 铜和铜合金母线》(GB/T 5585.1-2018) 标准。材料进场前要进行外观检验和导电性抽检, 确保没有裂边、氧化皮和弯曲变形。配套施工材料有最小刻度 1° 的定位量尺、耐磨绝缘手套、记号笔以及标识夹具^[3]。设备方面要准备完整铜扁带折弯机、角度测量装置和润滑组件。

2. 折弯设备安装。安装时, 把底座和操作平台固定紧, 保持水平稳定, 用地锚螺栓防止滑动。固定杆和圆盘焊接牢固, 保证扭矩传递一致; 再把活动拉杆穿进中心轴套, 用插销限位固定。碾压套筒要套在拉杆前端, 轴套用高强度碳钢材料, 其耐压性能较好。设备全部连好后, 要空转一圈, 检查是否有卡阻、偏

心或者轴向间隙，最后在转轴、轴承接口加润滑脂，降低工作时的摩擦阻力和振动影响。

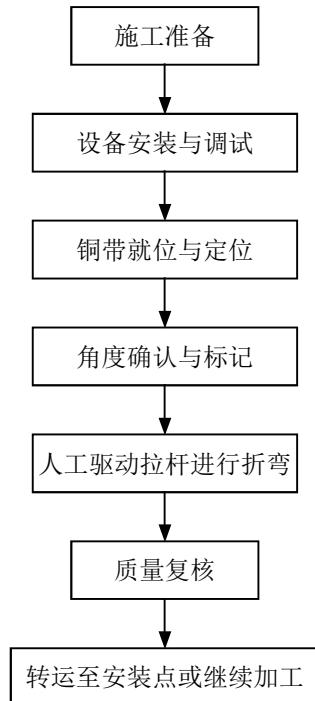


图1 施工流程图

3. 工位布置要求。施工工位要选地势平整、无遮挡的地方，设一个至少 2.5×2.5 m的操作区。操作人员两侧要留1.5 m以上的安全缓冲带，方便操作臂旋转。操作台面要放软质防滑垫，防止铜扁带被划伤。为保证施工安全，作业区域周边要设安全警戒线、警示标志和临时照明。

4. 折弯操作步骤。把要加工的铜扁带插进圆盘卡槽，铜带要紧贴着卡槽内壁，别松动位移。按照设计图纸要求，用角度量尺在铜带表面标折弯线，对照设备上的角度标尺先定位。操作人员将活动拉杆慢慢向上拉，通过杠杆原理带动钢制碾压套筒以弧形路径碾压铜带表面，铜带就会塑性变形，折弯成需要的角度。在整个折弯过程中，拉杆牵引速度需保持均匀，避免瞬时冲击使铜带局部受力不均。碾压完后，松开拉杆让设备自己回位^[4]。

5. 成型质量验收。折弯完成后，及时检查角度和平整度。用精密角度尺测折弯角度，偏差不能超过正负 2° 。若铜带折弯点有明显波纹、扭曲或者横向凹陷，则不合格，需返工重做。为保证电气连续性，随机抽至少5%的成型铜带测电阻值，检测点在折弯段两侧100 mm的地方，电阻值不能超过直线段均值的110%。同时，操作人员要填每日施工记录单，记折弯数量、折弯角

度、检验结果和处理情况，交给工区质检员签字存档。

6. 转运与堆放管理。检验合格的铜扁带要按分区编号捆好，搬运时用缓冲衬垫，防止折弯部位被压坏。运输用防静电推车，不能和其他金属构件硬接触。堆放时把折弯方向朝上，底部铺木板防潮，存放环境要干燥通风。暂时不用的铜扁带，要每周盘点和复检，保证一直符合使用要求。

3 机场接地系统铜扁带折弯施工质量控制

铜扁带折弯工序作为接地系统施工中的关键节点，其质量直接关系到整体电气系统的导通稳定性与接地可靠性。为确保成型质量符合《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》(GB 50169-2016)要求，施工管理团队通过组织管理与技术手段双线并行，构建全过程质量控制体系，从源头预控、过程管控至结果验收，形成闭环控制机制。

3.1 组织保证措施

1. 建立质量控制责任体系。项目部成立了由项目总工牵头的质量管理专组，包括施工、质检、技术、安全等岗位的人员，明确各自职责，实行“分级负责、全过程监管”的管理模式。折弯工序归到接地子系统质量专项，指定专业技术员每天负责工艺指导和质量巡检。

2. 细化作业任务包分解机制。结合图纸设计和现场布线实际情况，把所有折弯点按区域、角度和难度系数分成作业单元，用“班组+工序长”承包机制，把每批次的施工目标和质量指标量化，建立质量和进度同步控制的目标导向体系^[5]。

3. 执行三级检验制度。每道折弯工序要经过施工人员自检、工区技术员专检和项目部质检复核，三级验收一个都不能少。不合格的工序实行“挂牌返修”制度，返修后要重新验收，记在质量追踪卡上，保证问题能追溯，责任能查到。

4. 实施质量考核与奖惩机制。项目部把折弯工艺质量作为专项考核指标，纳入月度绩效考评体系中，质量好的奖励，频繁返工的限期整顿。因质量问题导致工期滞后、材料浪费的责任人，按项目施工管理规定追究责任。

3.2 技术保证措施

1. 标准化作业参数控制。所有铜扁带折弯作业都要按照技术交底文件明确折弯角度、公差范围和操作路径。折弯角度控制精度是 $\pm 2^\circ$ ，表面不能有裂纹、凹痕和明显塑性回弹。设备调试时要先做样品预制，实测合格后才能批量作业。

2. 折弯设备精准标定与维护。施工前由专人校准

折弯机，重点检查卡槽中心对称性、转轴灵活度和角度标尺零点偏移量。每完成 50 次折弯操作，要检查一次和给轴承润滑，防止设备疲劳导致角度误差。

3. 引入角度辅助校准系统。铜带折弯时，同时用活动角尺和定位夹具控制复位精度。对于特殊角度（比如大于等于 120° 的缓弯段），加限位垫片当辅助定位基准，保证角度一致，减少人为误差。

4. 构建折弯质量数据库。每一批铜扁带折弯作业都要编号记录，收集成型角度、加工时间、作业班组、验收结果等关键参数，形成电子数据库。用数据分析方法评估不同作业模式下的成品合格率，为后续工艺改进和风险预判提供依据。

5. 加强关键岗位技术培训。对所有参与折弯作业的施工人员组织专项技术培训和实操考核，内容包括力臂控制、角度读数、设备使用、安全防护等。考核合格才能上岗，将培训合格率和作业返修率进行对比分析，作为技术质量联动指标。

4 机场接地系统铜扁带折弯施工效益分析

为验证机场接地系统铜扁带折弯工法在实际工程中的应用效果，项目部选乌干达恩德培机场主航站楼和动力中心区域的 8 个施工分区作为样本区，对比用该工法前后的施工效率、人工成本、成品合格率等核心指标，对比其在工程建设中的经济和社会效益，如表 1 所示。

表 1 不同折弯施工方式的关键指标对比

指标项目	传统手工	铜扁带折弯	提升幅度
	折弯方式	施工方式	
单点平均折弯时间 (s)	185.4	38.7	↓ 79.1%
每日平均成型数量 (处)	62	298	↑ 380.6%
折弯角度合格率	91.20%	98.60%	↑ 8.1%
成型段电阻偏差控制率	86.50%	97.40%	↑ 12.6%
每百米人工成本(元)	147.8	62.3	↓ 57.9%
每百米返工率	9.40%	1.80%	↓ 80.9%

(注：数据来自现场记录、质检台账和进度控制系统自动生成的结果。)

1. 社会效益。项目数据显示，成型段的角度偏差和电阻控制都比传统方式好很多，明显降低了因为折弯缺陷引起的电气事故风险。另外，该工法无需依赖电力系统，操作方便，适应性强，适合机场、铁路、电厂等工程推广。通过标准化作业模板和全过程数据记录机制，为行业提供了可以复制、量化的现场工艺

管理模式，具有较好的行业示范作用。

2. 经济效益。从施工效率和成本控制来看，该工法明显缩短了单位工作量的时间，单点加工周期压缩了近 80%，返工率下降了 80.9%。在总施工铜带长度约 10 000 m、有折弯点约 5 000 处的实际应用中，保守估计节省人工工时超过 1 200 h，节约直接人工费用约 6.8 万元，减少间接材料浪费约 1.5 万元，总共经济效益接近 8.3 万元。

5 结束语

本文围绕机场接地系统铜扁带折弯施工过程中的关键技术问题，系统阐述了一种基于机械杠杆原理的折弯工法在乌干达恩德培机场工程中的实际应用。通过对工艺原理、施工流程、设备结构与质量控制措施的全面解析，结合现场应用数据，验证了该工法在提高折弯效率、保障施工质量、降低人工成本等方面的优势。研究结果表明，该工法具备结构简洁、适应性强、工艺稳定等特点，适合在机场及类似大体量机电工程中推广应用。随着施工装备标准化和现场数据闭环管理的持续优化，该技术体系将在提升电气安装工程现代化水平方面发挥更大作用。

参考文献：

- [1] 韩兆儒, 石访, 靳宗帅, 等. 基于同步李萨如曲线的免整定高阻接地故障选线及区段定位方法 [J/OL]. 电网技术, 1-16[2025-05-26]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloKm75-WdNyW6SKg6jCdas5AFYFRGaQkuqUOWtfa5EDtGgAO6P9K3ZXqpyKCouQPVt0J05GXKoBIU6-zXKrRNuIqZRwHaxCmOZJJSDraMFtj6QDuJ0On2xgpwXh8WF9it_A6Neeg3YM4hTAoOTS6IEdgsdHhTb13uIARqEirVb0rg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 孙中玉, 徐丙琨, 王伟, 等. 基于剩余电流时域参数向量的低压中性线多接地系统接地故障检测方法 [J/OL]. 电网技术, 1-15[2025-05-26]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloKso3IHwRtJl4d1e2C3D3pp-EN51nG2TVI1UzDOyDDw08mSWF84ZjY7aVmKQaEU8XyYj-s58_QE_l-kMvt7JbjfPWZJMqsjbzSirLs8iFFhpPwNlq0kfXNZaXxPhm8-egZLKOBDeCfK3Q_2bfKXr5k_c8hxcsjawbfniXAzBqd1OQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [3] 魏征, 高丽娜. 从贝宁波多诺伏新议会大厦项目设计浅谈法国标准下防雷接地系统设计要点 [J]. 智能建筑电气技术, 2023, 17(01):36-41, 45.
- [4] 杜倩倩. 机场通信导航台站接地技术与方法研究 [J]. 数字通信世界, 2021(05):116-117.
- [5] 张晨曦. 民用机场远机位机坪照明与供电接地系统设计探讨 [J]. 现代建筑电气, 2021, 12(03):50-54, 68.

港口工程建设中软土地基 处理技术优化与应用研究

梁 涛

(江苏兴旺物流有限公司, 江苏 泰州 225300)

摘要 全球多数重要港口坐落于软土分布区, 其高含水率、高压缩性等不良工程特性, 对港口设施的安全与长期稳定构成挑战, 但传统地基处理方法往往存在施工周期长、经济成本高等局限。基于此, 本文系统探究了港口工程建设中软土地基处理的技术优化与实际应用。首先剖析软土地基的物理力学特性及相应工程控制要求, 阐明沉降控制与承载力提升的重要性。其次详细阐述了多种地基处理技术的原理、适用条件及技术优缺点, 构建系统的综合评价框架。研究显示, 凭借科学的设计方案、合理的技术组合与严格的施工管理, 可显著提高工程质量, 实现工期缩短与成本控制的双重目标。

关键词 港口工程; 软土地基; 真空井点降水; 强夯; 振动碾压

中图分类号: U655

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.020

0 引言

港口作为国家经济发展和对外贸易的重要枢纽, 其工程建设质量直接关系到区域经济安全与物流效率。全球范围内, 诸多大型港口地处沿海、河口等软土广泛分布的区域。软土因高含水率、大孔隙比、低渗透性、高压缩性和弱抗剪强度等不良工程特性, 给港口地基处理带来严峻挑战^[1]。在荷载作用下, 软土地基易发生显著沉降和差异变形, 若不加以有效处理, 会引发码头面层开裂、轨道偏移、设备基础失稳等一系列工程问题, 严重影响港口设施的长期安全运行。故而, 开展软土地基处理技术的系统研究与优化, 对提升港口工程质量、保障结构安全、控制建设成本与工期, 具有重要的理论与现实意义。

1 港口工程软土地基特性与工程问题分析

1.1 港口软土地基的物理力学特性

软土地基通常含水量极高, 水分含量接近甚至超过液限, 孔隙比普遍大于1.0, 呈现出土体松散、密度低、容重轻等特征。由于土颗粒间连接薄弱, 其整体强度较低, 抗剪能力差, 尤其在快速剪切或不排水条件下, 强度更为薄弱, 难以承受较大外部荷载。这类土体压缩性高, 在外荷作用下会产生显著沉降变形, 且压缩过程持续时间长。此外, 软土还具有明显的流变特性——在持续恒定应力作用下, 变形会随时间不断累积, 产生次固结沉降, 进一步加剧工后沉降问题。这些特性使软土地基在工程应用中面临较大的稳定性和沉降控制挑战。

1.2 港口工程对地基的主要要求

港口工程的特殊性, 对地基性能提出高标准、综合性与系统性要求。码头建筑、堆场、重型装卸机械轨道及后方道路等构筑物, 均要求地基具备足够强度与刚度, 以安全传递巨大的静荷载与动荷载, 防止发生整体剪切破坏和局部压碎。因此, 必须精准控制地基位移, 将总沉降量和差异沉降严格限制在规范允许范围内。过大的差异沉降可能导致码头面层开裂、轨道变形、管线断裂等问题, 严重影响港口运营效率与设备使用寿命。此外, 考虑施工期填土加载和运营期满载状态, 需避免出现整体滑坡或滑移等失稳破坏; 尤其在地震区, 港口地基应具备抵抗液化的能力。鉴于港口属于长期服役的基础设施, 对其地基的耐久性要求极高, 工后沉降须具备可控制性与可预测性。

1.3 软土地基引发的主要工程问题

由于软土地基固有的工程缺陷, 港口工程建设面临诸多难以回避的技术难题。其中较为突出的包括: 总沉降量显著, 不可避免的差异沉降易引发上部结构开裂、设备基础错台, 进而导致大型设备无法平稳运行; 地基承载力不足可能诱发整体失稳, 在岸坡开挖或快速填土等工况下, 存在滑移或隆起风险; 在强震作用下, 饱和软土可能发生液化, 瞬时丧失强度, 造成严重结构破坏; 因软土固结周期较长, 工后沉降持续时间久且难以精确预测, 给工程验收及长期运维管理带来很大的不确定性。

2 港口工程软土地基主要处理技术对比分析

2.1 排水固结法

排水固结法作为处理深厚软土地基的常用技术之一，通过设置竖向排水通道，同时施加预压荷载，促进土体中孔隙水快速排出，从而加速地基固结过程，提高土体强度，有效控制工后沉降^[2]。预压方式通常采用堆载预压，也可结合真空预压技术，利用负压差增强排水效果。该方法适用于大面积、深度较大的软土地基处理，具有工艺成熟、加固效果稳定、材料成本较低等优点，能有效提升地基的整体承载能力和均匀性。但它也存在一定局限，如预压周期较长、成本偏高、占地面积大等。

2.2 复合地基法

复合地基技术是通过在软弱土层中设置增强体，使桩体与周围土体协同工作、共同承担上部荷载的地基处理方法。水泥土搅拌桩是应用较广的一种形式，它利用深层搅拌机械将软土与水泥浆（湿法）或干水泥粉（干法）充分混合，形成具有一定强度的水泥土加固桩体，不仅可提升局部地基承载力，还兼具土体置换和改善排水固结条件的作用。旋喷桩是另一类常见的复合地基桩型，施工时采用高压水射流切割土体，并同步注入水泥浆形成大直径加固桩体，广泛应用于地基加固、止水帷幕及既有建筑基础托换等工程场景。复合地基法具有施工周期短、地基承载力提升显著、沉降控制效果好等优点，特别适用于对工后沉降要求严格的工程，如大型码头、重型设备基础等。但该方法造价相对较高，且施工质量对最终效果影响较大，全过程的质量控制至关重要。

2.3 强夯与强夯置换法

强夯法是通过起重设备将重锤提升至预定高度（通常8~25m）后自由下落，利用巨大的冲击能（一般1 000~8 000 kJ）对地基土进行动力压实和挤密。其核心机理是高能量冲击波使土体产生强烈振动和液化，破坏土体原有结构，随后土颗粒在自重和冲击力作用下重新排列，孔隙减小，密度和强度显著提高。强夯法适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土与粘性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基，对深层饱和软土效果有限。其主要优点是设备简单、施工速度快、成本相对较低、浅层加固效果显著；主要缺点包括有效加固深度有限（通常≤10 m）、施工产生强烈振动和噪声污染、需要较大的施工场地。

3 软土地基处理技术优化策略

3.1 多技术组合优化策略

在面对复杂的软基条件以及愈发严格的规范要求时，如何根据实际工况选择一套行之有效并可兼顾效

率及经济效益的复合地基处理方案尤为重要，选择优化组合的技术思路来提升复合地基处理的效率^[3]。如将排水固结技术与其他复合地基处理技术相互融合，一边铺设塑料排水板加快固结排水，同时再在地下施工水泥搅拌桩或预制管桩，相当于一个“排水+加桩”的组合，此时，一方面，塑料排水板可对桩周土体消散在施工过程中产生的超孔隙水压力起着加速土体强度恢复作用；另一方面，预压荷载又能加速桩间土体固结，最终起到桩、土共同作用的效果，可大量缩减整体工期。各种复合地基处理技术的优化组合是在明确具体技术主次作用及协同时机的基础上，合理设计来达成“1+1>2”的复合效果。

3.2 关键参数优化设计

参数设计是否合理决定了处理技术的处理效果。优化设计应摆脱经验取值的习惯，寻求更加精确、更加高效的参数。复合地基的设计参数中，桩长、桩径、桩距、水泥掺量的取值均影响最终的承载力与沉降性能，优化设计应结合详细的工程勘察和上部结构荷载，通过理论计算和数值模拟，探求承载力与沉降双控下的最佳置换率和布桩方案，避免“过火设计”导致的浪费，或“设计欠佳”留下的隐患^[4]。

3.3 施工工艺与质量控制优化

施工技术和施工质量控制是优化设计成果实现的必要条件。传统的施工工艺为经验施工，质量差距较大，引入监控设备，选择施工设备较先进的机械设备，可以有效提高施工质量与施工效率；对于真空预压，改善密封和抽气设备可以保持较高的负压和稳定的效果，质量控制从“事后检查”转变为“过程控制”“实时反馈”；利用静力触探、轻型动力触探、钻孔取芯等原位测试对加固效果进行综合、全面分析，及时找出施工偏差，保证最终地基质量达到设计要求^[5]。

4 软土地基处理技术组合优化应用案例

4.1 工程概况与地基处理方案

场地上部以素填土、淤泥质粉质黏土夹黏质粉土等软土为主，土层强度低、分布极不均匀，易导致地基稳定性较差，不均匀沉降和机械施工时沉陷。部分场地现状标高低于设计标高，需要进行回填土补高，本项目采用吹填砂作为回填土，即地基处理的土层包括现有地层和新吹填的砂土。

根据表1数据可以看出，浅层土体具备一定的渗透性，适合采用真空井点降水联合强夯法进行地基处理。地基承载力指标要求：散货堆场地基承载力特征值≥150 kPa，其余场地地基承载力特征值≥120 kPa。

表1 土的物理力学性质指标

层号	岩土名称	含水率	重度	孔隙比	液限	塑限	渗透系数	黏聚力	内摩擦角	塑性指数	液性指数	地基承载力
		W %	γ kN/m^3	e_0	W_L %	W_P %	k cm/s	C_{cq} kPa	Φ_{cq} 度	I_p	I_L	f_{ak} kPa
1	素填土	26.7	18.52	0.808	30.0	21.8	2.0×10^{-4}	8.8	19.4	8.2	0.64	55
2	粉质黏土	32.4	18.57	0.907	36.6	22.3	3.0×10^{-6}			14.2	0.71	85
3	淤泥质粉质黏土 夹黏质粉土	37.7	17.68	1.073	36.0	25.2	5.0×10^{-5}	15.4	11.1	10.7	1.16	60
4	黏质粉土夹 砂质粉土	32.9	17.96	0.957	33.6	26.4	3.5×10^{-3}	9.3	19.2	7.2	0.91	90
5	粉质黏土	34.5	18.08	0.982	36.2	25.0	2.5×10^{-6}	19.7	11.1	11.1	0.85	80
6	粉砂夹黏质粉土	31.0	17.95	0.924			3.0×10^{-3}	5.1	22.8			100
7	粉砂	27.9	18.74	0.796			4.0×10^{-3}	2.4	31.7			150

4.2 分区处理方案选择

核心区域（深厚软土，高承载力需求）采用真空井点降水加强夯组合技术。该方案旨在通过降水快速降低浅层地下水位、提高土体有效应力，再利用强夯冲击能实现高效深层动力排水固结与土体密实，可显著提高浅～中层地基承载力，缩短传统排水固结法的工期。真空井点降水加强夯组合工艺：采用3遍真空井点降水+2遍点夯（跳档夯）、1遍满夯工艺，2遍点夯夯能分别为2 100 kJ、3 000 kJ，每遍击数暂定为6击，夯点间距为4.0 m，正方形布置。外围封闭降水井点管间距2 m，埋深6 m，施工区降水井点管间距2 m，采用长短管相结合的方法，长管埋深6 m，短管埋深3 m，正方形布置，水平排水管间距4 m。每遍强夯施工前，需保证地下水位在夯击面以下2.5 m，且土体内超孔除水压力消散80%以上。点夯完成后拔除所有降水管进行满夯，满夯为搭接夯，搭接宽度为1/4锤径，满夯能量暂定为800 kJ，单遍击数为2击。

4.3 技术组合应用效果与协同性

技术组合方案有效解决了核心区域深厚软土的承载力提升和沉降控制难题，特别在加速排水固结方面效果显著。振动碾压法高效、经济地完成了辅助区域的浅层压实任务。分区组合应用实现了根据地质条件和工程需求“对症下药”，优化了资源配置在保证整体处理效果的同时，有效控制了工程成本和缩短了工期。隔振措施的应用保障了邻近结构的安全。监测数据（如水位、孔隙水压、沉降、振动、压实度）和检测结果均表明方案实施有效，达到了预期处理目标。

5 结束语

针对软土性质和复杂的工程施工要求，采用单一手段无法满足港口工程软土地基处理需要，综合型不同机理技术组合优化处理途径可作为优选方案。真空井点降水加强夯与振动碾压法分区组合应用案例表明，科学选择并组合适用技术，能有效应对不同区域的地基难题，提高处理效率，降低成本，并控制环境影响。同时，通过对相关工程中重要参数的合理分析，以及智能施工工艺等方法来进行施工，确保在质量等方面更加有效地进行控制。通过科学的设计、优化的技术组合和精细的施工控制，可以使处理效果、经济成本、施工时间和环境效益等方面达到有机结合，形成最佳方案，从而保证港口工程的安全稳定运行以及实现可持续绿色发展的目标，为同类工程提供有价值的参考。

参考文献：

- [1] 李达宏,张蕊,顾祥奎.后注浆技术在码头软土地基灌注桩补强工程中的应用[J].水运工程,2025(03):133-138.
- [2] 杨松姗,何冯斌.适应软土地基的港口铁路路基方案优化[J].港口航道与近海工程,2024,61(02):61-63,79.
- [3] 孙必祥,黄诚.软土地基处理技术在基础工程建设中的应用[J].新城建科技,2024(01):145-147.
- [4] 吴菲菲,朱步纲,黄佃贵.水利工程施工中软土地基处理技术研究[J].水上安全,2025(07):190-192.
- [5] 刘欢.水利项目的软土地基处理技术分析[J].水上安全,2025(21):172-174.

微动勘探技术在岩土工程精细化 勘察中的应用研究

王恒中¹, 敖 标², 郑海波², 张诗林², 朱传跃¹

(1. 江苏省地质工程勘察院深圳分院, 广东 深圳 518000;
2. 深圳市苏勘岩土工程有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 传统岩土工程勘察依赖钻探等技术, 存在点式数据代表性不足、复杂地质体识别难等问题, 难以满足勘察需求。本文聚焦微动勘探技术的应用, 阐述其通过天然振动信号反演地下结构的原理, 分析该技术在建筑场地类别确定、微动观测台搭建、数据处理及多参数协同反演中的关键要点。结合商业综合体工程实例, 验证其在地层划分、场地分类及软弱夹层识别中的有效性, 结果与钻探数据相对误差在合理范围内, 可精准提供岩土体力学参数与三维结构信息, 为岩土工程设计提供有益参考, 具有良好的应用前景。

关键词 微动勘探技术; 岩土工程; 精细化勘探

中图分类号:P642

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.021

0 引言

随着城镇化进程的加快, 超高层建筑、深埋隧道等复杂岩土工程项目日益增多, 对勘察精度的要求愈发严格。传统勘察方法以钻探为主, 虽能获取局部数据, 但存在成本高、对环境干扰大、难以反映地层横向非均质性等局限, 难以满足精细化勘察需求^[1]。

微动勘探技术的出现, 很好地解决了这方面的问题, 其作为一种非侵入性地球物理方法, 利用天然微动信号反演地下结构, 具有大范围探测、成本低、环境友好等优势^[2]。其通过分析面波频散特性获取剪切波速, 为岩土体划分、参数评估提供关键依据。本文围绕该技术原理, 探讨其在建筑场地类别确定、观测台搭建等方面的应用, 并结合实例验证效果, 旨在为岩土工程精细化勘察提供技术参考。

1 微动勘探技术原理

微动勘探 (Microtremor Survey) 是一种基于天然微弱振动信号的地球物理探测技术, 其核心原理是通过分析振动信号中面波的传播特性反演地下岩土体结构^[3]。天然微动信号来源广泛, 具有随机性、连续性和宽频带特征, 其中面波成分携带了丰富的地下介质信息^[4]。

从理论基础来看, 面波在传播过程中, 其相速度随频率的变化与地下岩土体的剪切波速密切相关。低频面波传播深度大, 可反映深部地层信息; 高频面波

则集中在浅部, 能揭示浅层结构细节。通过提取不同频率对应的面波相速度, 可建立频散曲线, 进而反演得到地下不同深度的剪切波速分布^[5]。

该技术的关键在于信号采集与处理, 采集阶段需通过专用拾震器捕捉微小振动信号, 观测系统需根据勘察目标设计台站阵列形式与密度; 处理阶段则通过滤波、去噪等预处理消除干扰, 再采用频率一波数法或空间自相关法提取频散曲线, 最终结合反演算法构建地下岩土体的速度结构模型, 为岩土工程勘察提供量化依据^[6]。

2 岩土工程精细化勘察中微动勘探技术的应用

2.1 建筑场地类别确定

建筑场地类别是岩土工程抗震设计的核心参数, 其准确划分直接关系到建筑物的抗震安全性和经济性。场地类别划分的主要依据为场地覆盖层厚度以及土层等效剪切波速, 这两个参数共同决定了场地对地震波的放大效应和反应特征。微动勘探技术通过反演获取的剪切波速剖面, 可精准计算等效剪切波速与覆盖层厚度, 为场地类别判定提供量化支撑。其中, 等效剪切波速计算公式如式(1)所示。

$$v_{se} = d_0 / t \quad (1)$$

式(1)中, d_0 为覆盖层厚度, t 为剪切波在覆盖层中的传播时间。利用微动勘探获得的不同深度剪切波速数据, 可分段计算传播时间并累加, 结合钻探验

证的覆盖层界面深度，实现等效剪切波速的精确计算。

场地类别划分需满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)要求，具体对应关系如表1所示。

表1 场地类别

场地类别	等效剪切波速 v_{se} (m/s)	覆盖层厚度 d_0 (m)
I类	$v_{se} > 500$	$d_0 < 5$
II类	$250 < v_{se} \leq 500$	$5 \leq d_0 < 50$
III类	$140 < v_{se} \leq 250$	$50 \leq d_0 < 80$
IV类	$v_{se} \leq 140$	$d_0 \geq 80$

相较于传统钻探方法依赖少量点位数据的局限，微动勘探通过连续剖面探测，能够全面反映场地内剪切波速的空间变化特征，可有效识别场地内的剪切波速异常区，如局部软弱夹层或坚硬地层突起等情况，从而避免因局部数据偏差导致的类别误判，显著提升了场地分类的精细化水平，为后续的抗震设计提供了更为精准的依据。

2.2 微动观测台搭建

微动观测台搭建是数据质量控制的核心环节，需兼顾设备性能、阵列布局与环境适配性，形成系统性观测体系。在设备选型上，拾震器需采用灵敏度 $\geq 100 \text{ V/m/s}$ 的宽频传感器，频带覆盖 $0.05 \sim 100 \text{ Hz}$ ，确保捕捉微弱低频信号与高频细节；数据采集仪需支持24位模数转换，采样率可在 $50 \sim 200 \text{ Hz}$ 范围内调节，同步精度通过GPS授时控制在 0.1 ms 以内，避免多台站数据时差干扰。

阵列设计需匹配勘察深度，对勘察目标进行分层优化。浅层用 $5 \sim 20 \text{ m}$ 边长的三角形/圆形阵列，台站间距 $2 \sim 5 \text{ m}$ ，形成“1+6”观测单元，如图1所示；中深层（ $30 \sim 100 \text{ m}$ ）探测则扩展为边长 $50 \sim 100 \text{ m}$ 的复合阵列，在圆形阵列基础上增设外围辅助台站，总数 ≥ 9 个，提升低频信号解析能力。

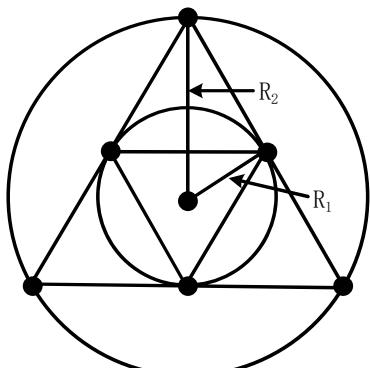


图1 微动观测台阵示意图

台站布设需执行严格的环境控制标准，避开距离交通干道 50 m 内、施工振动源 100 m 内的区域；地表需清除杂草、碎石，采用 $30 \times 30 \times 10 \text{ cm}$ 混凝土基座固定传感器，基座与地面间隙用细砂填充，确保耦合刚度不小于 106 N/m ；传感器安装前需进行水平校准，倾斜角控制在 0.5° 以内。此外，各台站配备防风雨屏蔽罩，主站连接不间断电源，保障连续观测时长 ≥ 8 小时，为数据处理提供高质量原始素材^[7]。

2.3 数据处理

数据处理是微动勘探技术转化为勘察成果的核心环节，主要包括预处理、频散曲线提取和反演计算三个阶段。

预处理阶段需对原始信号进行系统的降噪与校正，采用 $0.5 \sim 50 \text{ Hz}$ 带通滤波，剔除高频电磁干扰与低频环境噪声；通过基线校正消除仪器漂移，利用方差分析剔除突发脉冲干扰；对多台站数据进行时间同步校验，确保采样起点偏差 $\leq 0.5 \text{ ms}$ 。经预处理后，信号信噪比需提升至 20 dB 以上，为后续分析奠定基础。

频散曲线提取需结合空间自相关法(SPAC)与频率一波数法(FK)的优势，SPAC法通过计算圆形阵列中不同间距台站的自相关系数，拟合得到各频率对应的面波相速度；FK法则对信号进行二维傅里叶变换，在频率一波数域识别面波能量集中区，提取频散特征。实际应用中需结合两种方法优势，对低频段采用SPAC法提高稳定性，高频段用FK法提升分辨率。

反演计算通过迭代优化实现地下结构的精准建模，以频散曲线为约束条件，采用阻尼最小二乘法构建初始剪切波速模型，通过对比理论频散曲线与实测曲线的残差（控制在5%以内），逐步调整模型参数。反演过程中需引入钻探数据作为先验约束，避免多解性，最终输出分层清晰、与地质规律吻合的剪切波速剖面。

2.4 多参数协同反演

多参数协同反演是提升微动勘探解释精度的关键手段，通过融合多种地球物理参数与地质数据，构建约束条件更丰富的反演模型，有效降低单一技术反演的多解性。该方法以微动勘探获取的剪切波速(v_s)为核心，协同电阻率(ρ)、纵波速度(v_p)及钻探地层界面数据，形成多维度约束体系。其中，协同反演的核心公式为多目标优化函数，如式(2)所示。

$$\min F = \alpha F_{vs} + \beta F_\rho + \gamma F_{vp} + \delta F_{geo} \quad (2)$$

式(2)中， F_{vs} 、 F_ρ 、 F_{vp} 分别为微动剪切波速、电阻率、纵波速度的理论与实测数据残差； F_{geo} 为地质

界面约束项; α 、 β 、 γ 、 δ 为权重系数, 根据各参数可靠性动态调整。

在实现过程中, 首先利用微动反演结果构建初始速度模型, 再将电阻率法获取的岩土体导电特性作为约束条件, 通过 v_s 与 ρ 的经验关系修正模型; 同时引入地震折射法的数据, 通过泊松比验证地层力学特性的合理性。最终结合钻探揭示的地层界面深度, 对反演模型进行边界约束, 使输出的三维岩土体结构模型同时满足多种物理场特征与地质规律, 显著提升精细化勘察的可靠性。

3 实例应用分析

3.1 工程概况

本工程为某城市新区商业综合体项目, 地处区域断裂带影响范围边缘, 场地总面积约 8.6 万 m^2 , 拟建建筑包括 3 栋 25 层写字楼、5 栋 12 层商业楼及整体地下 2 层车库, 基础形式拟采用桩筏基础, 设计荷载最大达 35 kN/m^2 。

场地原始地貌为冲洪积平原, 地表覆盖 2~5 m 厚人工填土, 其下为第四系冲洪积层, 其主要物理力学性质如表 2 所示。

表 2 第四系冲洪积层物理力学性质

地层 编号	岩土名称	层厚范围 (m)	状态 / 密 实度	天然重度 (kN/m^3)
①	粉质黏土	3~8	软塑—可塑	18.0~19.5
②	粉砂	2~6	中密—密实	19.0~20.5
③	圆砾	5~10	密实	20.0~21.5

深部为白垩系砂岩, 属强风化及中风化砂岩, 较破碎。区域水文地质条件较复杂, 地下水位埋深 1.5~3.0 m, 主要赋存于粉砂及圆砾层中, 属孔隙潜水。

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010), 场地抗震设防烈度 7 度、地震加速度 0.15 g, 需查明覆盖层、剪切波速及隐伏断层等。采用微动勘探+钻探, 设 42 个微动观测点、28 个钻探孔, 构点面勘察网。

3.2 结果分析

本次勘察通过微动勘探与传统钻探数据的对比验证, 充分体现了微动技术在岩土工程精细化勘察中的优势。微动勘探获取的剪切波速剖面与钻探揭示的地层结构吻合度达 90% 以上, 各主要地层的剪切波速测试结果如表 3 所示。

在场地类别判定上, 微动勘探算得等效剪切波速 285 m/s、覆盖层平均厚 32 m, 依规范定为 II 类场地, 与钻探结果一致, 验证其可靠性。不良地质体识别中,

微动发现场地西北波速异常区 ($190 \sim 220$ m/s), 结合多参数反演推断为 1.5~2.0 m 厚、 350 m^2 的粉质黏土软弱夹层, 钻探证实且其参数较差, 为桩基避绕提供依据。此外, 微动三维模型显圆砾层横向不均, 厚度 5~10 m 波动、波速差 150 m/s, 优化桩基设计, 提升勘察空间代表性。

表 3 各地层剪切波速测试结果对比

地层 编号	岩土名称	微动勘探剪 切波速 (m/s)	钻探取样测 试波速 (m/s)	相对误差 (%)
①	人工填土	120~180	130~170	5.2~7.6
②	粉质黏土	180~250	190~240	3.8~5.3
③	粉砂	250~350	260~340	2.1~4.7
④	圆砾	350~500	360~490	1.8~3.5
⑤	强风化 砂岩	500~700	520~680	2.3~4.1
⑥	中风化 砂岩	700~900	720~880	1.5~3.2

4 结语

微动勘探技术凭借非侵入性、高效率等特点, 在岩土工程精细化勘察中展现出显著优势。通过明确其在建筑场地类别确定、观测台搭建、数据处理及多参数协同反演中的应用要点, 结合工程实例验证, 表明该技术能精准刻画地下岩土体结构, 为工程设计提供可靠数据。未来需进一步优化数据处理算法与反演模型, 提升复杂地质条件下的探测精度。随着技术不断完善, 微动勘探技术将在岩土工程领域发挥更大作用, 推动勘察行业向高效化、精细化发展。

参考文献:

- [1] 安林. 微动勘探技术在建筑岩土工程勘察中的应用 [J]. 四川建材, 2025, 51(04):119-121.
- [2] 叶水青, 黄霖. 微动勘探技术在地铁勘察中的应用 [J]. 西部交通科技, 2024(05):162-164, 172.
- [3] 夏辉, 唐浩, 刘艺, 等. 微动勘探在城市岩土工程勘察中的应用效果研究 [J]. 山西建筑, 2025, 51(08):88-93.
- [4] 闫希东, 陈钢. 微动勘探技术在软土地基处理检测中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025(07):95-97.
- [5] 夏鹏. 微动勘探在大理深地下管线探测中的应用研究 [J]. 中国市政工程, 2025(01):39-41, 144.
- [6] 周雁. 微动勘探技术在煤矿隐蔽致灾地质因素探测中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(04):578-586.
- [7] 蔡勤波, 田学军, 刘肖肖, 等. 微动勘探在城市勘察中的应用 [J]. 勘察科学技术, 2023(06):61-64.

电气工程中电机与电气控制技术运用分析

周天琪

(天津国能津能热电有限公司, 天津 300171)

摘要 在现代工业体系中, 电机作为能量转换的核心装置, 其运行性能直接关系到生产效率与系统稳定性。电气控制技术则是实现电机高效、安全、精准运行的关键支撑。本文围绕电机与电气控制技术的协同应用展开系统性论述, 重点探讨继电器控制系统、可编程逻辑控制器(PLC)系统以及调速系统的结构特征与实际应用方式。通过对各类控制方法的技术路径进行梳理, 明确其在不同工况下的适用性与操作逻辑, 并从技术实现角度出发, 阐述各控制系统的组成原理与功能实现机制, 旨在为相关领域的工程实践提供理论参考。

关键词 电机; 电气控制; 继电器; PLC; 调速系统

中图分类号: TM3; TM92

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.022

0 引言

电机是将电能转化为机械能的重要设备, 在工业、交通、建筑等多个领域得到广泛应用。伴随自动化水平的不断提升, 对电机运行状态的精确控制成为保障系统稳定性的关键环节。电气控制技术作为实现这一目标的主要手段, 经历了从传统继电器控制到现代可编程逻辑控制的发展过程。在此过程中, 调速技术也逐步由机械调节转向电子化、数字化控制。当前, 多种控制方式并存于不同应用场景, 各自具备特定的技术优势和适用条件。本文聚焦电机与电气控制技术的融合应用, 系统分析继电器控制、PLC控制及调速系统在实际工程中的技术实现路径, 以期厘清各类控制方式的功能边界与运行逻辑。

1 电机及电气控制概述

1.1 电机的基本构成与运行特性

电机由定子、转子、端盖、轴承等主要部件构成, 依据供电方式可分为直流电机与交流电机两大类。直流电机通过电刷与换向器实现电流方向切换, 从而维持转矩输出的连续性; 交流电机则依靠定子绕组产生的旋转磁场驱动转子旋转, 无需机械换向结构。两类电机在启动特性、调速能力、维护成本等方面存在显著差异。直流电机具备良好的启动转矩和宽范围调速能力, 适用于对动态响应要求较高的场合; 交流电机结构简单、可靠性高, 广泛应用于恒速或轻载调速场景。电机运行过程中, 需通过外部控制装置对其启停、正反转、转速等参数进行调节, 以满足工艺流程的具体需求。这种调节依赖于电气控制系统提供的逻辑判断与执行指令, 两者共同构成完整的机电一体化运行体系^[1]。

1.2 电气控制系统的功能定位

电气控制系统的核心任务是对电机的运行状态进行实时干预与管理, 确保其按照预设逻辑完成指定动作。该系统通常由输入单元、逻辑处理单元和输出执行单元三部分组成。输入单元负责采集现场信号, 如按钮、限位开关、传感器等的状态信息; 逻辑处理单元根据既定规则对输入信号进行判断, 并生成相应的控制指令; 输出执行单元则将指令转化为具体的电气动作, 如接触器吸合、继电器动作或变频器频率调整等。在传统控制模式下, 逻辑处理依赖硬接线继电器组合实现; 而在现代自动化系统中, 则普遍采用可编程逻辑控制器完成复杂逻辑运算。无论采用何种形式, 电气控制系统均需保证动作的准确性、时序的合理性以及故障状态下的安全性, 这是其实现工程价值的基本前提^[2]。

2 继电器控制系统及其应用

2.1 继电器控制系统的结构组成

继电器控制系统以电磁继电器、接触器、时间继电器、热继电器等元件为基础, 通过硬接线方式连接成完整的控制回路。主电路负责电机的电源供给, 通常由断路器、接触器主触点和热继电器热元件串联构成; 控制电路则由按钮、继电器线圈、辅助触点等组成, 用于实现启停、互锁、自锁等功能。当按下启动按钮时, 接触器线圈得电, 其主触点闭合使电机通电运行, 同时辅助常开触点闭合形成自锁回路, 维持接触器持续吸合状态。停止按钮则串接于控制回路中, 用于切断线圈电源, 实现电机停机。此类系统结构直观, 元件标准化程度高, 便于现场安装与故障排查。由于所有逻辑关系均由物理触点实现, 系统响应速度受限于继电器动作时间, 且难以实现复杂时序控制。

2.2 继电器控制在典型场景中的实现方式

1. 电机正反转控制的电气互锁实现。在电机转向切换需求的应用场景下，继电器控制方案借助于两组交流接触器分别接入不同相序的三相交流电源，完成正反转功能的实现。为避免双接触器同时动作引发主回路相间短路故障，系统引入电气互锁保护策略：在每个接触器线圈回路中串联设置另一接触器的常闭辅助触点。当正向运转接触器获电动作时，其常闭辅助触点立即断开，从而阻断反向接触器线圈回路供电，反之亦然。此设计确保任一时刻仅有一接触器处于工作状态。同时，为增强操作安全性，系统通常辅以机械互锁装置，即在手动操作机构层面增设物理限位装置，进一步提高误操作防护能力。此类控制方案具有逻辑架构清晰、元器件通用性良好等优势，广泛应用于起重机、输送设备等需频繁变换运行方向且控制逻辑固定的工业场景。鉴于其不依赖电子元件或软件程序的特性，该控制系统在强电磁干扰或极端温湿度环境中仍能维持稳定运行状态。

2. 多电机顺序启停的时间继电器控制。在多电机协同作业的生产线上，为防止电网电压突变或机械应力过载，继电保护系统普遍应用时间继电器进行有序的启停控制。具体操作机制为：首台电机启动后，其辅助常开触点接通，导致时间继电器线圈激活；经设定时间延迟，时间继电器的延时闭合触点激活，进而开启第二台电机的控制电路，使其进入启动状态。此后电机依次启动，形成逐级延时启动的时序逻辑。同样，停机操作亦可通过逆向顺序实现，以确保工艺安全。时间继电器可根据控制需求划分为通电延时和断电延时两种类型，并据此选取恰当型号。此方法摒弃了复杂的程序设计，仅需通过硬接线路径实现时序逻辑，适用于对启动电流较为敏感的水泵站、压缩机群及风机系统等。虽然该系统不支持动态调整延时参数，但在固定程序运行中展现出优异的可靠性和便捷的维护特性^[3]。

3. 热继电器在过载保护中的应用机制。热继电器作为继电保护系统的关键组件，在电机安全运行中承担着重要防护功能，其设计初衷在于规避电机因长期处于过载工况而引发的设备故障。该装置的核心构成元件为双层金属片结构，此结构通过将两种具有差异化热膨胀系数的金属材质复合压制而成。当电机的运行电流超越其额定值时，流经热继电器内部热敏元件的电流将导致双金属片因热效应而发生形变，当该形变量达到预设临界值时，会触发脱扣装置启动，进而断开串联于控制回路中的常闭触点，最终实现接触器线圈电路的切断，使电机停止运行。热继电器的工作特性表现出明显的热延迟效应，可对瞬时启动电流与

持续性过载电流进行有效区分，从而防止保护装置发生非必要动作。其整定电流值可根据电机的额定工作参数进行适应性调整，以满足不同负载条件下的运行需求。在电气接线实践中，热继电器通常部署于主电路中，其辅助触点则接入控制系统回路，负责保护信号的传输功能。该保护机制凭借其简洁的结构设计、经济性优势及符合电机热积累特性的响应特性，已成为各类低压电机控制系统的标准化安全防护装置，形成了不可或缺的电气安全防线。

3 PLC 控制系统及其应用

3.1 PLC 的定义与工作原理

可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）是一种专为工业环境设计的数字运算电子装置，用于执行逻辑、顺序、定时、计数及算术运算等功能。其硬件结构主要包括中央处理器（CPU）、存储器、输入 / 输出接口模块及电源单元。PLC 通过扫描方式周期性地读取输入端口状态，执行用户程序中定义的逻辑指令，并将运算结果写入输出端口，驱动外部执行机构动作。整个扫描周期包括输入采样、程序执行和输出刷新三个阶段。在输入采样阶段，PLC 将所有输入信号的状态暂存于输入映像寄存器；程序执行阶段依据用户编写的梯形图或指令表对逻辑关系进行处理；输出刷新阶段则将处理结果更新至输出映像寄存器，并通过输出模块驱动接触器、电磁阀等负载。该工作模式确保了控制过程的确定性与时序一致性。

3.2 PLC 在工业自动化中的应用机制

在电机控制领域，PLC 通过替代传统继电器逻辑，实现了控制功能的软件化与模块化。用户可根据工艺需求编写控制程序，灵活配置电机的启停条件、运行顺序、故障处理策略等。例如：在多台电机联动控制系统中，PLC 可依据传感器反馈信号判断各设备状态，并按预设逻辑协调各电机的动作时序，避免机械干涉或能源浪费。在需要频繁修改控制逻辑的场合，仅需调整程序即可完成功能变更，无需重新布线。此外，PLC 支持与上位监控系统通信，可将电机运行参数上传至中央控制室，便于集中管理。其模块化设计允许根据控制点数扩展 I/O 模块，适应从小型单机到大型产线的不同规模需求。由于采用固态电子元件，PLC 系统响应速度快、寿命长，且具备较强的抗电磁干扰能力，适用于粉尘、振动、温湿度变化较大的工业现场。

4 调速系统及其应用

4.1 调速系统的基本概念与原理

调速系统是指通过改变电机输入参数以调节其转速的控制装置集合。其核心目标是在负载变化条件下

维持所需转速，或按工艺要求实现转速的动态调整。调速的本质在于改变电机的电磁转矩与负载转矩之间的平衡关系。对于直流电机，可通过调节电枢电压、励磁电流或电枢回路电阻实现调速；对于交流异步电机，则主要通过改变电源频率、电压或极对数来调整同步转速。调速系统通常包含给定单元、反馈检测单元、比较放大单元和执行单元。给定单元设定目标转速值，反馈单元实时采集实际转速并送入比较环节，偏差信号经放大后驱动执行机构调整电机输入参数，直至实际转速逼近设定值。该闭环结构有效提升了调速精度与动态响应能力^[4]。

4.2 直流电动机与交流电动机的调速方法

直流电动机的调速方法主要包括电枢电压调速、弱磁调速和电枢回路串电阻调速。电枢电压调速通过改变施加于电枢两端的电压实现平滑调速，调速范围宽且机械特性硬，适用于恒转矩负载；弱磁调速则通过减小励磁电流提高转速，适用于恒功率负载，但调速范围有限；电枢串电阻调速因能耗大、效率低，已逐渐被淘汰。交流异步电动机的调速方法中，变极调速通过改变定子绕组接线方式切换极对数，实现有级调速，结构简单但调速档位少；变转差率调速通过调节转子回路电阻或定子电压改变转差率，适用于小范围调速；变频调速则通过改变电源频率连续调节同步转速，兼具宽调速范围与高效率，已成为主流调速方式。两种电机的调速策略选择需综合考虑负载特性、调速精度、成本及维护便利性等因素^[5]。

4.3 变频器在调速系统中的应用机制

1. 变频器的基本结构与能量转换过程。变频装置主要由整流模块、直流链路部分（包含滤波系统）、逆变模块及控制模块四个核心构成要素组合而成，其功能在于实现工频交流电至可变频交流电能的转换过程。整流部分普遍采用由二极管或晶闸管构成的三相桥式拓扑结构，将输入的工频交流信号转化为脉动直流信号。直流链路环节通过高容值电解电容或电感元件对整流后的电压波形进行滤波与稳压处理，以确保直流母线电压的稳定性。逆变环节则采用绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等全控型功率半导体器件，根据控制指令产生高频脉冲信号，借助脉宽调制（PWM）技术合成为类正弦交流输出波形。该输出信号的频率及幅值均可实现精确调节，进而控制交流电机实现多转速运行。整体能量转换系统表现出高效率、低谐波畸变及快速动态响应等特性，构成了精确速度控制技术的重要基础支撑。

2. 变频器的控制功能与运行模式。变频装置集成多样化的控制策略，可根据实际负载条件及工艺需求灵活匹配适宜的工作模式。其中主流的控制技术涵盖

了V/F调制、矢量调控以及直接转矩管理三种方法。V/F调制技术通过维持电压与频率间的恒定比例关系，主要应用于动态性能要求较低的恒定转矩或风机水泵类负载场景；矢量调控技术则借助坐标变换实现电机磁链与转矩分量的解耦控制，从而达到类似直流电机的独立调节效果，尤其适用于高精度转速或位置控制环境；直接转矩管理技术通过实时监测定子磁链和转矩偏差信号，直接调控逆变器开关状态，表现出快速的响应特性与较强的抗干扰能力。除此之外，该变频系统还具备软启动功能、多级速度预设、加减速率调整、过流过压保护及转矩限幅等辅助特性。

3. 变频器与外部控制系统的集成方式。在工业自动化系统中，变频器通常作为执行单元与上位控制器协同工作。其与可编程逻辑控制器（PLC）的集成主要通过硬接线I/O接口或数字通信协议实现。通过数字量输入端子，PLC可发送启停、正反转等基本指令；模拟量输出端子则用于设定连续变化的速度参考值。更高级的集成方式采用Modbus、PROFIBUS、EtherNet/IP等工业通信协议，使变频器成为网络中的一个智能节点。在此模式下，PLC不仅能下发运行参数，还可实时读取变频器的输出频率、电流、故障代码等状态信息，实现闭环监控与诊断。

5 结束语

电机与电气控制技术的协同应用构成了现代工业自动化的重要基础。继电器控制系统因其结构简单、可靠性高，在特定场合仍具实用价值；PLC控制系统凭借程序灵活性与扩展能力，成为复杂逻辑控制的主流方案；调速系统则通过变频等技术手段，实现了对电机转速的精确调控。三者在不同层级上共同支撑着电机的高效、安全运行。技术的选择应基于具体工况需求，注重系统整体的协调性与稳定性。对各类控制方式的深入理解，有助于在工程实践中做出合理配置，确保机电系统长期可靠运行。

参考文献：

- [1] 孙宇.永磁同步直线电机控制技术研究[J].防爆电机,2024,59(04):56-59,80.
- [2] 石磊,安玳宁.智能控制技术在无刷直流电机控制系统中的应用[J].集成电路应用,2024,41(07):186-187.
- [3] 杨结群.PLC技术在固定电机控制系统中的应用研究[J].造纸装备及材料,2024,53(04):89-91.
- [4] 邓雨佳.电气自动化在电气工程中的应用探讨[J].通讯世界,2024,31(03):96-98.
- [5] 沙燕.电工电子技术在电气工程中的应用研究[J].造纸装备及材料,2024,53(01):113-115.

电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用

张文秀

(国网山西省电力有限公司吕梁供电公司, 山西 吕梁 033000)

摘要 电气工程自动化技术在近年来得到多维开发和深层次运用, 在优化电力系统协同运行秩序、促进电力生产智能化变革等方面发挥着关键作用。在电力系统运行环节, 电气自动化技术带来的生产要素变革和效益提升, 逐步构成当下智慧电力建设中不可缺少的一部分, 其克服了常规电力控制方法的缺陷, 对系统控制的稳定性和精确性作出相应改进, 使得电力设备设施的自动化操作及智能化管理水平逐步提升。基于此, 本文论述了电气工程自动化技术的概念及实施意义, 并提出了相应的应用策略, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 电气工程自动化技术; 电力系统; 电网调度自动化; PLC 技术

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.023

0 引言

在当下社会经济迈入纵深发展的背景下, 电力科技也在发生着明显变化, 更先进的电气工程自动化技术已全面运用到电力系统中。在自动化技术的强力加持下, 电力企业加速构建其智慧电力管理体系, 形成功能多样、层次丰富的电力生产与管理机制, 以智能化、自动化手段显著改善电力生产方式, 促使电力系统始终保持安全、平稳、高效的运行状态。

1 电气工程自动化技术概述

电气工程自动化技术涉及发电厂、电力企业以及电力用户等主体, 运用自动化、智能化手段进行电力管理的技术体系^[1]。其脱离了传统人工作业的限制, 通过设置一套完整的控制程序, 以更改设备运行参数、调整设备运行状态等手段, 逐步形成智能电力调控机制。自动化技术的运用, 能实时监测各类电力设备的工作参数, 并借助特定通信手段, 将相关设备的运行数据传输至管理平台, 由专业技术人员进行检查与分析, 全方位把握设备的运行性能, 筛选代表设备运行失效的信息, 而后对照电力系统的历历史运行数据, 加以深层次分析和高效处理。电气工程自动化技术以当下的数字信息化技术为基础, 将数据识别与分析、自动化调控等功能进行灵活运用, 致力于确立动态追踪和全面监管的电力系统运行管理模式。

电气工程自动化技术主要涉及以下维度: 第一, 在电力系统覆盖范围逐年扩增的情形下, 电力设备设施在运行环节产生海量的数据, 这些数据的收集、整理和分析需要大量的人力支持, 无疑增加了电力企业的工作负担, 对此, 电气工程自动化技术着重关注电

力数据处理, 挖掘其中的关键信息并用于各项决策。自动化也意味着信息化程度的提升, 为电力数据管理工作提供更多路径。第二, 全面分析电气工程自动化技术运用的特征, 将其高效化、便捷化、智能化的优势发挥出来, 赋予电力系统更高的自动化控制能力。

2 电力系统中应用电气工程自动化技术的意义

2.1 有助于改进电力系统运行管理方式

电气工程自动化技术最大的优点在于, 其能提供接入智能化软件平台, 取代以往的人工控制方式, 只需在计算机系统上进行操作, 便能对电力系统的运行状态加以控制。该控制模式简便, 效果突出, 在实践运用中有着较好的适用性。同时, 以往对电力系统的运行管理工作缺乏必要监管, 导致各类电力设备的运行效果不佳, 采用电气工程自动化技术后, 可有效提高设备运行效率, 增加设备使用期限, 减少故障发生频次和不必要的检维修费用。管理人员可依据电力系统的实际需求, 改进电力设备的功率参数, 完成设备控制技术的多维改进, 由此使电力系统的运行效率和管理水平得以提升。此外, 采用电气工程自动化技术, 可以有效减少能源浪费情况, 有效节省投资。在该技术体系的支持下, 实现了电力系统运行负荷的平衡, 逐步建立起经济、高效的电力系统运行机制, 更能契合发电、输配电以及用电环节的各项需求^[2]。

2.2 有助于实时监测和排查电力故障

在电力系统故障管理模块, 传统的检维修模式主要依赖于人工操作, 尽管这种模式具有初期投资成本较低的优势, 但其固有缺陷不容忽视。人工检修不仅效率低且易出现误判, 同时故障区域定位精度不足,

存在显著的漏检风险，这些因素共同导致故障处理周期延长，严重影响电力系统的运行效能。更为严峻的是，长期未被发现的故障隐患不仅会干扰正常电力生产秩序，更可能引发重大电力安全事故。随着电气工程自动化技术的广泛应用，电力管理模式实现了与现代信息技术的深度整合。该技术通过实时采集和分析电力设备的运行参数，能够及时识别异常运行状态，精确定位故障区域并准确诊断故障原因，从而大幅提升故障处理效率。这种智能化的管理模式不仅显著提高了检修工作的精准度，更为电力系统的安全稳定运行构建了坚实的技术保障体系。

2.3 有助于更新电力系统能源结构

电气工程自动化技术为新能源的大规模接入电力系统提供技术支持^[3]。利用高阶功率预测与调节技术，解决了间歇性电源并网的稳定性问题，智能化技术的运用促使电力系统柔性显著增加，能适应多个能源形态的接入和调度需求，这为我国能源结构低碳化转变带来极大的助力。而且，自动化技术也促进了用电侧的全方位升级，在需求侧分析与智能供配电等模式下，对电力负荷进行柔性调节与有序调配。分布式能源与微网可通过自动化系统，实现与电力系统的协调互动，建立层次多元、形态丰富的现代化电力系统架构，该架构更契合能源互联网的发展方向，将低碳理念全面引入电力系统中，促使能源构成形式的更新。

3 电气工程自动化技术在电力系统运行中的具体应用

3.1 实现电网调度自动化

电网调度自动化是整个电力系统的核心环节。当下，电力系统的自动化控制功能逐步优化，电力生产及运行数据的监测、反馈及分析得到更切实的关注，这样就可以更好地掌握电力系统在不同时期的运行状态，对紧急电能调配需求做出反应。在电力系统中，电网调度自动化系统能够自动分析出其工作原理，在电能供给不足或富余等情形下，系统能对其进行及时响应，通过调节发电功率，或者重新分配供电电源，实现电力系统始终处在平稳运行状态，避免系统不同模块之间的相互干扰。要实现电网调度自动化，还必须细致考量具体实施条件和操作规程，建立完善的数据采集网络，涵盖各个发电、输电、配电环节，保证实时数据的可靠传输。同时，需明确各岗位人员的职责与权限，从调度员到监控人员，都要清楚自己的任务范围。例如：调度员负责根据系统状态下达指令，监控人员则要密切关注各项参数变化并及时反馈。在

操作流程，则应全面覆盖电网的日常运行监测、故障处理以及应急响应等维度。

3.2 优化电气设备自动化控制布局

在电气工程自动化系统中，电力设备自动化控制布局一直是相关领域着重关注的热点，并且极易产生偏差，进而出现设计变更的情形，要求设计人员在不同领域更新自身知识框架，于设计实务工作中切实引入实践经验，以此将设计效益予以展现，为同类型工作提供参照。在信息化发展的今天，CAD已被广泛地运用于电气设备自动化控制设计中，把该技术工具与计算机系统结合，可以大幅缩短系统的开发周期，进一步提升电气设备自动化控制的可靠性和效率。采纳基于遗传算法的设备自动控制，尽管可以增强系统的集成性，但也会给处理程序带来一定的复杂性，使运算效率和运算速度受到干扰。为此，需将智能化技术加以融合，实现对相关功能单元的远程控制与资源调度，减少各设备管理活动中的无效资源投入，在不影响系统性能的前提下大幅缩减开发成本，以此使系统运行更为可靠，完成电气设备自动化控制的优化布局。

3.3 深度融合 PLC 技术

将 PLC 技术应用于电力系统中，以智能化控制手段突破传统电气自动化控制的灵敏性缺失限制^[4]。该技术在无人值守运行环境下展现出显著优势，能够实现远程操控、智能监测及实时预警等关键功能。PLC 系统作为现代智能化技术的典型代表，通过多系统编程集成，实现了对电气工程各环节的协调配置与精准控制。特别值得注意的是，PLC 技术采用虚拟化元件替代传统电机控制部件，成功将理论构想中的电力控制方式转化为实际应用。这种技术革新不仅显著降低了电力工程底层编程的投入成本，还显著提升了系统兼容性，使各类电力设备能够更好地适应多样化应用场景，从而推动电力系统整体运行效率的提升。

3.4 实施电力故障的智能监测与自动诊断

传统的电气自动化系统在实际运行中存在故障率偏高的问题，这对电力系统的安全稳定运行构成了潜在威胁。为有效解决这一技术难题，建议采用智能化技术构建电力系统智能监测与自动诊断体系。在确保数据运行环境可靠的前提下，通过自动化技术实现全流程操作的智能化升级。该智能监测与诊断系统不仅能实时监测设备运行状态，还能为技术人员提供精准的数据支持和决策依据，从而显著提升故障检测与维修管理的效率。以变压器故障为例，传统处理方式往往需要耗费大量人力物力进行排查，而基于智能监测

技术的综合诊断方案，则能够快速完成故障分析，精准锁定故障区域，大幅缩短故障定位时间，为后续维修工作提供有力支持^[5]。此外，通过引入先进的数据分析工具，可以实现故障的精准定位，进一步压缩故障处理周期，最终实现电力系统自动化控制的战略目标。这种智能化改造不仅提升了系统可靠性，也为电力企业的数字化转型奠定了坚实的基础。

3.5 实施电气工程仿真模拟

在电气工程自动化技术的持续发展进程中，极有可能向模拟化方向发展，即仿真技术的广泛采纳。由此，构建以计算机系统为基础的开放性控制链条，对电力系统中各子电网进行有力调控。仿真技术在应用便捷性、多场景适用能力等维度表现出色，在三维数字模型的基础上，实现对电力生产、电气设备运行管理等活动的清晰呈现。举例来说，在 10 kV 电网中采用仿真技术，建立数字电网模型，实现对变压器的自动化控制，同时把握电网的电流数据，在恰当时时间节点向断路器下发关停指令，有选择性地完成电力供应。此外，借助仿真技术，可依据监测的电流值变化，结合设计标准，对其进行自适应调节，维持线路稳定的运行状态。

3.6 建立自动化巡检模式

在电力系统风险防范工作中，以往常针对已出现的漏洞加以整治，时效性不足。在电气工程自动化技术的支持下，可有效弥补原系统中设备保护模块缺失的问题，使电力系统能在正常工作状态下完成设备巡查、监测及预维护工作。当下，社会中互联网技术逐渐渗入，基于电气自动化技术及相关设备的研发，需要相应地增加各类技术工具的适用性，促使电力系统的平稳运行。在电气自动化技术支持下，管理人员可及时、准确地修复电力系统中出现的各类风险隐患。此外，电气自动化技术在数据存储、定时上传以及实时备份上有着极大优势，可避免电力运行数据丢失，极大地增强了其运行稳定性。最后，电气自动化技术能有效改善电力系统的防护功能，通过创设稳定的运行环境，主动改进系统保护机制，降低网络病毒侵扰和其他风险入侵的概率，维持安全、稳定的电力生产及管理环境。

在电气工程自动化技术体系趋于智能化发展的态势下，智能巡检也成为电力企业关注的要点，巡检机器人的开发和投入使用，将极大地改善电力巡检效益。其以智能感知、模拟演练和自动控制等技术为基础，通过系统主控模块预先输入需要巡视的路径和时间等信息，并依据指令完成场地巡检任务^[6]。然后，依托信息传输系统，实时反馈现场巡查数据。巡检机器人

拥有 720° 视角变换功能，能完成自由转向，内置红外测温装置能执行实时监测、自动标记信息等任务，直到接收到结束巡检的指令，巡检机器人才会停止连续检测和信息传递等工作。在场地巡查过程中，若巡检机器人识别到异常区域，则会立即发布告警信息，借助其内置的图像识别功能模块，准确记录并上传各类图像、视频数据。数据实时监测与自动化巡检相结合的模式，使得巡检机器人在未来的电力系统控制领域愈发重要，无疑是现有工作方式的极大改进。

4 结束语

在社会不断发展的背景下，电力行业在提升电气自动化控制效益的同时，更应注重各类自动化技术的适用性与有效性评估。这一发展趋势不仅体现了电气工程领域的技术革新，更标志着新一代电气控制模式的建立与完善。电气工程自动化技术作为一项涵盖多学科领域的综合性技术，需要从系统工程的视角进行全面考量与优化。具体而言，应当着重提升自动化技术的应用精度，同时不断优化技术实施流程，通过强化各功能模块的协同控制效果，最终实现电力系统运行效率与稳定性的全面提升。这种系统化的技术优化路径，将有力推动电力行业向更高效、更有序的方向发展。

参考文献：

- [1] 张波. 智能农业电网建设中电力工程技术的应用创新与实施效果: 以涿鹿县电网建设为例 [J]. 数字农业与智能农机, 2025(09):124-126.
- [2] 孙溶佐, 蔡晔, 曹一家, 等. 计及跨域连锁故障的电力信息物理系统 N-k 协同故障场景筛选双层优化模型 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1-15[2025-11-21]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloIaTiZe1AbM2yEZDhbzlZ4XKKHmuC8lBTd9UvBvXKW0QDEJTkmn7dqZd3vLScvI-yiKyYPCChPwIsykVLdPzJIS-l3RzvrU9HHnknYfcu1ZRWF05OgJHh1NYHajOk7cLlhIxnnZhny8KbepSTWR0cjoI845Jpid_hqiEW8iRjmm8dmQ=&uniplatform=NZKPT&lan guage=CHS
- [3] 张子倩. 电力工程中的电力自动化技术及其应用研究: 以南方某城市新区的 220kV 变电工程为例 [J]. 生态与资源, 2024(11):108-110.
- [4] 李道兴, 王晓辉, 李黎, 等. 面向电力无人机巡检图像分析处理的自动化深度学习系统: 架构设计与关键技术 [J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(04):38-54.
- [5] 曾锡池, 温启良, 张渊渊, 等. 基于时序数据库的产品数字孪生模型海量动态数据建模方法研究: 以电力企业为例 [J]. 华东科技, 2023(05):101-103.
- [6] 杨文锋. 基于大型高扬程电力提灌工程的泵站综合自动化监控系统研究 [J]. 工程机械与维修, 2022(04):233-235.

电力系统与光伏发电的协同优化控制策略研究

罗 娜

(湛江中江电力咨询有限公司, 广东 湛江 524000)

摘要 随着新能源在电力系统总装机量中占比的持续攀升,有关电力系统与光伏发电协同运行的研究逐渐受到人们的关注。本文深入剖析了光伏电站并入电网后对系统运行稳定性、调度操作灵活性以及电能质量产生的各类影响,进而提出基于多时间尺度的优化控制构想。同时,结合源网荷储一体化的先进理念,搭建一套协调控制方案,最终达成系统功率平衡与频率稳定的双重目标。通过仿真实验验证,该控制方案能够有效提高光伏出力的利用效率,减少电力系统运行中的波动隐患,为新型电力系统的建设工作提供有益参考。

关键词 光伏发电; 电力系统; 多时间尺度优化模型; 源网荷储; 虚拟同步发电机

中图分类号: TM7; TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.024

0 引言

在“双碳”战略目标的持续推动下,光伏发电的装机规模呈现快速扩张态势,其固有的间歇性与波动性特征,对电力系统保持稳定运行提出了更为严格的要求。如何促进光伏出力与电网调度之间的高效协同配合,已成为当前能源转型进程中的关键研究方向。从国际研究现状来看,在分布式控制技术与虚拟同步发电机技术领域,已建立起相对完善的技术体系;国内研究则将重点放在源网荷储协同机制构建与分层调度优化方法探索上,依托多时间尺度开展协同优化控制策略设计,能够在确保电力系统运行安全的基础上,进一步提升系统运行的经济性,同时提高新能源电力的消纳能力。

1 电力系统与光伏发电协同运行的理论基础

1.1 光伏发电特性与并网影响

光伏发电的能量获取依赖太阳辐照,气候条件、地理区位及昼夜交替都会对其产生显著作用,使其呈现出明显的间歇性与波动性特征。这类特性导致光伏出力难以维持持续稳定状态,进而对电力系统的功率平衡状态与调度操作灵活性造成直接影响。当光伏出力出现快速变化时,电力系统的频率与电压可能随之产生剧烈波动,最终对电网的稳定运行形成干扰。光伏并网逆变器作为能量转换的关键接口,在完成直流到交流能量转换的过程中,还具备无功功率支撑、电压调节及谐波抑制等功能,其控制特性对电网的动态响应过程具有重要作用,采用合理的逆变器控制方案,能够在一定程度上提升系统的惯性响应能力与频率支

撑效果,改善电能质量水平并增强系统整体稳定性。

1.2 电力系统运行特征分析

传统电力系统以集中式火电机组为核心单元,其调度机制主要依托机组启停与备用容量调节,这种运行模式确保了系统的高度可控性和稳定性。然而,随着可再生能源并网比例的持续攀升,系统运行面临双重挑战:一方面,光伏发电的间歇性特征显著增加了电力平衡的调控难度;另一方面,传统调峰资源在容量储备和响应速度方面均存在不足,难以满足高频率波动场景下的快速调节需求。在此背景下,源网荷储一体化的发展正推动电力系统运行机制的革新,通过多能互补与信息交互技术,实现电源、电网与负荷的协同优化,并充分发挥储能装置的快速响应特性,将其纳入电压支撑与频率调节体系,从而构建更具灵活性、智能化和韧性的新型电力系统架构^[1]。

1.3 协同优化控制的理论框架

协同优化控制的核心要义在于让不同系统层级之间实现信息共享与控制协调,其所涵盖的层级一般包含规划层、调度层与控制层。其中,规划层主要承担长期能源结构优化与容量配置任务,调度层负责达成中短期时段内的发电与负荷平衡调节目标,控制层则将工作重点聚焦实时动态响应与电能质量控制方面。在优化方法的运用上,协同控制广泛引入多目标优化理论,把经济性、稳定性、清洁性等各类指标纳入统一分析框架,实现全局最优目标与局部协调需求的双重兼顾。随着智能电网与信息通信技术的持续发展,基于信息融合的动态优化模式逐渐成为发展方向。借助实时数据采集与系统状态感知手段,电力系统能够

自适应调整运行参数，搭建起预测—反馈—优化的闭环控制体系，最终提升电力系统与光伏发电协同运行的效率及鲁棒性表现。

2 电力系统与光伏发电的多时间尺度优化模型

2.1 日前与实时协同调度模型

当光伏发电并入电网后，电力系统运行呈现出明显的时变性与不确定性，多时间尺度协同调度由此成为提高系统经济性与稳定性的关键举措。日前调度工作的开展主要依托对光照强度、负荷需求及储能系统出力的预测，通过搭建光伏功率与气象参数间的非线性模型，并结合机器学习或时间序列算法，实现对功率的高精度预测，为次日运行计划的制定提供依据。在实时调度层面，调度策略需具备滚动优化属性，依据实际运行数据对预测误差进行动态修正，实现连续的功率平衡调整。通过构建日前与实时耦合模型，能够实现长期计划与短期控制的协调统一。目标函数通常会综合考量发电成本最低化、功率偏差最小化及系统安全约束，实现多层次优化的有机衔接与动态修正，进而提升系统的自适应调度能力^[2]。

2.2 系统约束与优化目标

多时间尺度优化模型需在满足各类约束条件的基础上，实现系统运行的全局最优。其一，功率平衡约束要求光伏、储能、电网与负荷之间的实时功率保持匹配，避免电网频率出现波动；其二，储能容量约束对能量的充放电范围与速率加以限制，以延长设备使用寿命并防止过充或过放情况发生；其三，网络潮流约束确保线路电流、电压及变压器容量处于允许运行范围内。优化目标除关注经济性外，还需兼顾系统可靠性与可再生能源消纳率，通过设定权重系数来平衡各目标间的矛盾。

2.3 求解算法与优化流程

针对多时间尺度优化模型存在的高维复杂性，采用基于改进粒子群优化（PSO）算法的求解方式具有突出优势。借助自适应惯性权重与速度调整机制，能够有效避免算法陷入局部最优，提升全局搜索能力、结合分层迭代与并行优化技术，可将系统划分为调度层与局部控制层，主调度层负责全局目标优化，局部控制层承担局部动态调整任务，从而提高计算效率与模型响应速度。在具体流程方面，首先对输入数据进行归一化处理并完成参数初始化；接着，依据预测信息生成初始调度方案；随后在迭代过程中引入惩罚因子，对违反约束的解进行修正；最终通过多次仿真与

交互计算实现模型收敛。该算法不仅能在较短时间内获取稳定解，还可兼顾计算精度与实时性，为电力系统与光伏发电的协同优化提供有效的计算支持与工程实现途径。

3 光伏发电并网的协同控制策略设计

3.1 层次化控制体系结构

为实现光伏发电系统与电力系统的高效协同运行，需构建层次化控制架构以协调不同层级的能量流与信息流。该架构采用三级控制模式：上层主站能量管理系统（EMS）负责系统级运行策略制定与全局优化，基于气象预测、负荷需求及储能状态等数据生成功率分配方案与调度指令；中层区域分布式控制系统实现区域内电站间的协同运行与信息交互，通过分布式通信技术与协同算法完成多节点自适应控制与故障隔离；下层由光伏逆变器及本地控制器构成，执行电压调节与无功功率补偿等实时控制任务，确保局部系统稳定运行。这种“集中决策—分布执行—实时响应”的三层控制机制，通过全局优化与局部调节的动态配合，为光伏并网运行提供了灵活可靠的控制基础^[3]。

3.2 基于虚拟同步发电机（VSG）的频率控制

虚拟同步发电机（VSG）技术通过在逆变器控制环节引入同步发电机的惯性与阻尼特性，使光伏系统具备频率支撑能力与惯性响应功能。VSG 模型以功率角方程和惯性方程作为核心基础，通过调节有功功率与无功功率的输出情况，模拟同步机转子的动态过程，进而在频率出现波动时自动调整出力，为电网提供暂态稳定支撑。在控制参数优化工作中，需依据系统惯性需求与光伏出力波动特点，合理配置惯性常数与阻尼系数，以此平衡响应速度与振荡抑制效果。在多机并联运行场景下，通过分布式协同控制可实现多个 VSG 节点之间的频率协调与惯性共享，避免出现功率分配不均与振荡共模现象。该方法可有效提升光伏电站的动态响应能力，使光伏电站从被动并网单元转变为主动支撑电网运行的重要组成部分。

3.3 储能系统的辅助控制作用

储能系统在光伏并网控制过程中发挥着关键的缓冲与调节功能。短时储能设备（如超级电容、锂电池等）能够在光伏出力出现快速波动时实现能量平滑处理，削减排功率尖峰并稳定电压变化趋势，通过科学设计充放电控制策略，储能系统可在毫秒级时间范围内响应功率变化，参与电网的有功功率与无功功率调节工作。除此之外，储能还能在电压支撑、频率稳定及备用容

量调节中发挥辅助作用，特别是在孤岛运行或弱电网环境下，可明显提升系统的稳态与动态性能。光伏与储能的协同控制借助能量管理算法实现双向优化：一方面最大限度地提高光伏能量利用率；另一方面延长储能设备的使用寿命。综合性能评估结果显示，该协同控制策略能够在提升光伏系统出力平滑性、降低电能质量波动程度的同时，实现系统运行的高效与经济统一，为新型电力系统的构建提供重要支持^[4]。

4 源网荷储协同优化运行与仿真验证

4.1 源网荷储一体化协同框架

在新型电力系统当中，源网荷储一体化协同运行是实现高比例光伏并网安全、稳定且经济运行的重要方式。在源侧层面，通过建立光伏与火电机组的协调运行机制，能够在光伏出力发生波动时，由火电机组提供惯性支撑与调峰补偿，实现有功功率的动态平衡；网侧依托区域能源互联网的柔性调度平台，运用动态潮流控制与分布式能量路由技术，实现电能在不同区域之间的最优流动；荷储侧则结合需求响应机制与储能系统优化策略，利用智能负荷控制与储能参与手段，实现削峰填谷与能量再分配。相关研究表明，当光伏出力波动幅度处于±20%区间时，通过源网荷储协同控制，可将系统频率偏差从0.22 Hz降低至0.08 Hz，电压波动率控制在±2%范围以内，系统稳定性得到显著提升。

4.2 仿真平台与模型构建

为验证协同优化控制策略的有效性，搭建了基于MATLAB/Simulink的电力系统仿真平台。该系统模型包含1台装机容量100 MW的火电机组、2座合计装机60 MW的光伏电站、1套10 MW·h的储能系统以及50 MW的动力负荷。通过设定晴天、阴天与骤阴骤晴三类典型气象条件，模拟光伏出力的快速变化特征。在仿真场景里，采用日前预测与实时优化相结合的滚动调度方案，将控制周期设定为15分钟。当系统在不同负荷特性下运行时，储能系统借助SOC(State of Charge, 荷电状态)调节实现能量平衡，平均充放电效率达到92.4%。协同控制策略通过EMS(能量管理系统)协调指令，在秒级时间内完成功率分配，保障电压、频率及储能状态的动态稳定，为后续性能评估提供可靠的数据支持^[5]。

4.3 结果分析与性能评估

仿真数据显示，采用协同优化控制后，系统在光伏出力波动情况下的功率平衡能力与经济性得到显著

提升。与传统独立控制相比，系统频率波动幅度降低65%，电能损耗减少约18%，光伏出力利用率从87.3%提升至95.1%。在经济性层面，运行成本较基准方案下降约12.6%，同时碳排放强度降低9.8%。表1为不同控制策略下电力系统运行性能对比。

表1 不同控制策略下电力系统运行性能对比

控制策略类型	光伏利用率 (%)	频率偏差 (Hz)	电压波动率 (%)	运行成本下降幅度 (%)	碳排放降低 (%)
传统独立控制	87.3	0.22	±4.5	—	—
分层协调控制	92.8	0.12	±3.0	7.5	5.3
协同优化控制	95.1	0.08	±2.0	12.6	9.8

表1中呈现的数据表明，协同优化控制在提高光伏消纳率、抑制系统波动以及降低运行成本等方面均展现出优异性能，这一结果证实源网荷储一体化协同策略能够有效改善系统运行质量与经济性，为搭建高比例新能源友好型电网提供了切实可行的技术路径。

5 结语

通过对电力系统与光伏发电协同优化控制进行系统性研究，构建涵盖多时间尺度调度、层次化控制及源网荷储协同运行的综合框架，旨在实现系统稳定性、经济性与绿色低碳目标的协同统一。仿真结果进一步验证了该策略在提升光伏利用率、减少频率波动及优化运行成本方面的显著优势。未来研究应进一步融合人工智能、自适应优化与云边端协同控制技术，搭建智能、高效、可持续的新型电力系统运行模式，为能源结构转型与“双碳”目标达成提供有力支撑。

参考文献：

- [1] 李泽宇. 新型电力系统下的源网荷储协同优化及数字孪生模型研究[D]. 郑州：华北水利水电大学, 2024.
- [2] 蔡晓钦. 微电网接入配电网协同优化控制研究[D]. 北京：北方工业大学, 2024.
- [3] 唐铭泽. 智能电网分布式能源协同优化控制方法研究[D]. 北京：华北电力大学(北京), 2024.
- [4] 王竟敏. 光伏发电与照明控制的协同优化与改进研究[J]. 光源与照明, 2025(04):26-28.
- [5] 吴成昊. 提升电力系统运行灵活性的输配协同交易与调控策略研究[D]. 吉林市：东北电力大学, 2025.

光伏电站智能运维平台的开发与工程应用验证

林颖若¹, 倪孟岩², 梅洪灯², 段慧敏²

(1. 华润(清远)太阳能发电有限公司, 广东 清远 511500;
2. 华润电力广东新能源公司, 广东 清远 511500)

摘要 传统光伏电站运维存在故障定位滞后、发电效率低、运维成本高的问题, 为此开发光伏电站智能运维平台, 集成支路离散率分析、拉弧检测、能效管理三大核心技术。平台设计架构为“数据采集—智能分析—预警推送—运维闭环”, 边缘计算模块实现组串级数据实时处理, 云端平台完成全局能效优化。内蒙古四子王旗 300 MW 山地光伏电站与河北某 100 MW 分布式电站, 为期 6 个月的现场应用验证显示, 组串故障识别时间从 48 h 缩短至 15 min, 拉弧故障检出率达 99.2%, 电站整体发电效率提升 3.8%, 运维成本降低 22%, 为光伏电站精细化运维提供可靠技术支撑。

关键词 光伏电站; 智能运维平台; 支路离散率; 拉弧检测; 能效管理

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.025

0 引言

在全球能源转型不断推进的背景下, 光伏电站装机容量持续增长, 多数电站仍沿用“定期巡检+故障报修”的传统运维模式, 痛点突出。组串电流不均衡引发的发电损失常被忽视, 支路离散率超标导致效率衰减可达 8%~12%; 逆变器直流侧拉弧等故障易诱发火灾, 传统检测手段漏检率超 30%; 能效管理缺乏数据支撑, 全生命周期能耗优化难以落实。国外西门子 Sinema Remote Connect 平台实现设备远程监控, 欠缺光伏支路专项分析功能; 国内学者针对离散率与拉弧检测开展单点技术研究, 提出基于变异系数的离散率计算方法、设计拉弧脉冲识别算法, 现有研究多聚焦单一技术, 未形成“检测—分析—优化”一体化平台, 工程应用验证数据也显不足。

1 光伏电站智能运维平台设计与开发

1.1 平台整体架构

传统光伏电站运维常遇故障定位滞后、发电效率低等问题。光伏电站智能运维平台创新采用“边缘—云端”二级架构, 搭建感知层、边缘计算层、传输层、云端应用层构成的整体技术体系。各模块深度协同, 而非简单层级叠加, 形成“数据采集—智能分析—预警推送—运维闭环”全链路处理机制, 为内蒙古四子王旗 300 MW 山地光伏电站等大型项目提供稳定支撑, 从技术层面破解运维难题。感知层是数据采集的“神经末梢”, 依据《分布式光伏发电系统集中运维技术规范》(GB/T 38946-2020) 运维规范部署组串电流传感器、拉弧检

测器、辐照仪等专业设备^[1]。组串电流、电压、组件温度等 12 类核心数据被采集, 为支路离散率分析、拉弧检测等核心功能提供原始数据支撑。系统采用差异化采样策略适配不同监测需求, 组串基础参数 5 分钟 / 次的采集频率, 满足日常能效评估; 拉弧检测需捕捉毫秒级故障信号, 采样频率提升至 10 kHz。这一设计让后续拉弧故障检出率达 99.2%, 为电站安全筑牢第一道防线。

边缘计算层部署在逆变器本地, 是架构“实时响应”的核心。搭载的数据预处理模块运用“3σ 准则 + 趋势过滤”算法, 高效剔除辐照骤变、设备重启等干扰因素, 保障数据有效性。本地分析单元完成支路离散率实时计算与拉弧脉冲初步识别后, 仅将异常分级结果与有效数据上传云端, 使传输数据量减少 80% 以上。这种“本地初筛”模式至关重要, 将组串故障识别时间从 48 h 压缩至 15 min。传输层构建 5G/光纤/4G 多网冗余切换机制, 搭配断点续传与数据校验功能, 即使在山地电站等复杂环境下, 也能保障数据完整传输, 延迟稳定在 1 s 以内。云端应用层采用分布式数据库集群, 结合高算力云计算实现海量数据加密存储与快速调用, 设计容量支持 100 万+ 设备接入, 可同时承载多座百万千瓦级电站运维数据。边缘层实时性与云端大容量优势深度融合, 经全局能效分析生成 MPPT 参数调整等优化建议, 最终实现电站发电效率提升 3.8%、运维成本降低 22% 的显著效益, 为光伏电站精细化运维提供可靠支撑。

1.2 核心技术模块开发

核心技术模块聚焦运维痛点, 构建精准监测与智能分析闭环。支路离散率分析模块先通过“3σ 准则 +

“趋势过滤”预处理数据，剔除传感器故障、辐照骤变、设备重启等干扰导致的异常值，再基于变异系数(CV)计算离散率，公式为 $\{CV = \sigma / \mu\} = \sum_{i=1}^N x_i - \mu / \sum_{i=1}^N N_i$ 。 μ 为组串电流均值， σ 为标准差， N 为有效组串数量。依据工程经验设定分级标准： $CV < 5\%$ 为正常， $5\% \sim 10\%$ 为关注级， $10\% \sim 15\%$ 为预警级， $> 15\%$ 为紧急级，超标时同步推送异常位置与处理建议。拉弧检测模块以10 kHz频率采集逆变器直流侧电流信号，提取脉冲峰值、上升沿时间、脉冲宽度三类核心特征。拉弧脉冲典型特征为峰值 $\geq 10 A$ ，上升沿 $\leq 5 \mu s$ ，宽度20~50 μs 。模块采用“脉冲特征识别+趋势判断”双重机制，连续3个周期内检测到符合特征的脉冲，且电流趋势呈“突变—波动”模式时，100 ms内触发本地声光报警与云端推送。

能效管理模块以“全流程能耗优化”为目标，自动计算逆变器转换效率与组串发电效率。逆变器转换效率为输出功率与输入功率的比值，组串发电效率为实际发电量与理论发电量的比值，理论发电量需基于辐照、温度数据修正。模块统计运维设备耗电、冷却系统能耗等数据，生成“发电—能耗”平衡报表，基于历史数据输出MPPT参数调整、老化组件更换、运维巡检计划优化等建议，助力电站实现能效最大化。

1.3 平台功能实现

平台采用Java+Python混合架构，Java承担核心业务逻辑与分布式部署，保障高并发场景稳定性；Python依托数据分析库优化离散率计算、拉弧识别等核心算法，提升处理精度^[2]。前端以Vue.js构建可视化界面，贴合运维操作习惯布局关键功能。实时监控功能动态展示组串电流、离散率、逆变器状态等数据，更新延迟 $\leq 1 s$ ；故障预警针对拉弧、离散率超标等16类故障设分级机制，一级故障立即弹窗报警并短信推送，二级故障记录日志提示。能效分析可自动生成多维度日报、月报，支撑运营决策；工单管理实现故障从发现、派单到验收的全流程线上化，系统自动匹配合适运维人员并派发含故障详情的工单，处理完成后自动归档。界面响应时间 $\leq 0.5 s$ ，操作流畅满足实时运维需求。

2 现场应用验证方案

2.1 验证场景选取

为全面验证平台在典型山地光伏场景下的适应性与可靠性，选取清远旭阳电站与肇庆润凤电站开展为期6个月的现场应用验证。两家电站均为100 MW容量规模，统一采用“3 125 kW集中式逆变器+直流汇流箱”核心设备配置，减少设备型号差异、装机规模不同带来的验证干扰，确保测试结果可比客观。

在环境特征上，两电站形成互补验证体系：清远旭阳电站地处山地，区域内植被分布不均导致多时段、多区域遮挡频发，空气湿度常年偏高，易引发组件凝露、绝缘性能下降；肇庆润凤电站同样位于山地，周边以灌木覆盖为主，零散遮挡特征突出，灌木落叶易造成组件表面污染，山地地形通风不畅还会导致组件散热不良。两类场景均贴合我国南方山地光伏电站典型运行环境。验证周期设定为2024年1月至6月，完整覆盖冬冷、春阴、夏热三个气候阶段，期间将经历低温冰冻、光照不稳定、高温高湿等复杂工况，全面检验平台在温度剧烈波动、光照强度骤变、降水天气影响等条件下的数据采集稳定性、算法分析准确性与预警响应及时性，为平台在全国山地光伏电站规模化推广提供真实工程数据支撑。

2.2 验证指标与方法

为系统评估平台技术性能与实际应用价值，构建“技术性能+工程效益”双重指标体系，确保评价维度全面、结果客观可信^[3]。技术性能指标聚焦核心功能可靠性，包含四项关键内容：离散率计算准确率通过与人工实测数据逐组对比得出，验证支路离散率分析模块计算精度；拉弧故障检出率通过模拟不同负载场景下的50次拉弧故障测试，检验拉弧检测模块识别能力；故障定位时间以平台检测到异常到精准定位故障组串的耗时为统计标准；数据传输延迟衡量从感知层采集数据到云端应用层展示的时间差，四项指标直接反映平台核心技术实力。工程效益指标侧重实际应用价值，包括发电效率提升幅度、运维成本降低幅度、故障处理时长缩短幅度及故障发生率降低幅度，全面体现平台对电站运营效益的改善作用。验证采用“平台监测+人工复核”双重方法：平台自动采集组串电流、电压、故障信号等实时数据，形成连续完整运行数据库；组建具备5年以上光伏运维经验的专业团队，现场排查异常组串、复核故障原因，通过财务报表核对运维成本数据、运维记录交叉验证故障处理情况，避免平台数据单一来源可能产生的误差，确保每项验证指标真实可靠、有据可查。

2.3 验证实施流程

为保障验证有序推进、结果精准，现场应用验证分四个阶段开展，形成“准备—基线—试运行—评估”完整闭环。2023年12月为前期准备阶段，技术团队完成两家电站平台部署安装，包括感知层12类设备安装调试，边缘计算层与逆变器本地对接，传输层5G/光纤网络配置优化，确保数据采集采样频率达标（常规数据5 min/次、拉弧检测数据10 kHz），完成与云端应用层数据互通测试，保障设备运行稳定、数据传输

顺畅。2024 年 1 月为基线数据采集阶段，不开启平台智能分析与预警功能，仅通过数据采集模块记录两家电站日均发电量、组串运行参数、故障发生频率、运维成本支出等核心指标，形成全月完整基准数据库。详细记录每起故障的发现方式、处理流程、耗时及造成的发电损失，为后续效果对比提供可靠参照^[4]。

2024 年 2 月至 5 月为平台试运行阶段，全面开启平台所有智能功能，实时监测运行状态与故障处理情况。技术团队每月根据运维反馈与实际运行数据，微调离散率判断阈值、拉弧特征识别参数等核心算法参数，持续提升平台对山地复杂环境的适配性。

3 验证结果与分析

3.1 核心技术模块性能验证

支路离散率分析模块完成大规模实测验证，涉及两座光伏电站 10 个方阵 600 组串，样本库纳入正常运行、轻微遮挡、组件老化等多种典型运行状态，保障测试结果代表性与可靠性^[5]。人工逐组实测离散率数据与平台计算结果比对，模块准确率提高，10 组串因阴雨天气光照不稳定出现计算偏差，异常定位误差控制在 1 个组串以内，可锁定遮挡、组件隐裂、接线松动等引发离散率超标的核心问题，为运维提供明确指向。

拉弧检测模块完成 50 次全场景模拟故障测试，覆盖轻载、满载等不同负载工况，整体检出率提升，1 次因负载电流低于 0.5 A 导致信号微弱漏检。模块初始误报率 0.8%，排查确认由线缆接触不良产生的脉冲干扰引发，优化信号滤波算法后，误报率降低。故障从检测到推送预警平均耗时 0.3 s，远优于传统检测手段分钟级响应，满足光伏工程安全防控实时性要求。

能效管理模块在旭阳电站实地验证成效显著，依托 3 年历史运行数据与实时工况，智能输出三项针对性优化建议。实施调整 5 号方阵逆变器 MPPT 电压范围至 5 700 V、更换 12 组低效老化组件、将运维巡检时间优化为辐照稳定的 10:00~14:00 等措施后，该电站逆变器平均转换效率提升，组串发电效率平均提升，受遮挡影响的组串提升幅度达 5.8%，彰显模块工程实用价值。

3.2 平台整体工程效益评估

基于两家电站 6 个月数据，从四维度评估平台效益：在发电效率方面，旭阳电站提升 3.5%，润凤电站提升 4.1%，平均提升 3.8%，效益源于故障及时处理与能效优化。在运维成本方面，旭阳电站综合成本降低 20%，润凤电站降低 24%，平均降低 22%。旭阳电站运维人员人均管理面积从 5 kW 增至 8 kW，人工成本下降 18%，维修成本下降 22%；润凤电站维修成本下降 26%，人工成本下降 22%。在故障处理时长方面，旭阳电站从 4.5 h

缩短至 1.0 h，缩短 78%；润凤电站从 4.2 h 缩短至 0.76 h，缩短 82%，成果得益于平台精准定位与针对性处理建议。在故障发生率方面，旭阳电站月均故障从 15 次降至 10.2 次，降低 32%；润凤电站从 16 次降至 10.4 次，降低 35%，平均降低 33.5%。以旭阳电站为例，按当地电价 0.38 元 /kW·h 计算，发电效率提升 3.5% 可年增收益约 402.9 万元；运维成本降低 20% 可年节约成本约 86 万元，经济效益显著。

4 结束语

集成支路离散率分析、拉弧检测、能效管理三大核心模块的光伏电站智能运维平台，实现组串级数据实时监测、智能分析与运维闭环，数据传输延迟 ≤ 1 s，异常定位准确率 ≥ 98%。多场景现场验证表明，平台拉弧故障检出率达 99.2%，可将组串故障识别时间从 48 h 缩短至 15 min，显著提升电站发电效率并降低运维成本，技术性能与工程效益均达行业先进水平。平台在极端环境下的稳定性仍需优化，强沙尘暴、-30 ℃ 低温场景表现有待提升；能效管理模块尚未实现 AI 自主优化。

参考文献：

- [1] 邱亮, 董杰, 周振宇, 等. 光伏电站阴影下输出特性及功率优化器效能提升研究 [J]. 可再生能源, 2025, 43(11): 1450-1457.
- [2] 王若涛, 丁洒, 梁钰, 等. 光伏电站多维适应性性能评估方法研究及工程验证 [J/OL]. 水利水电技术 (中英文), 1-9[2025-11-26]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloJXRg-k9-DimBg26jxlvBwN4AE834joR5rXj5MDnC9CGinZ41XQgRCVJhqV0KE_K55PprWg4LiEl_VRhZj5FOI1YtK2eiMyiJejBHbQKA4szuYgRxA7t0PCjdaubwI5Or7MoClfHm3sBSvvSZOdS0mnzsEthZ0LOKmPyJd3Au_VQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [3] 孙磊. 光伏电站设备运维系统的设计与测试分析 [J]. 信息与电脑, 2025, 37(23):133-135.
- [4] 于耀鑫, 纪童, 何国兴, 等. 光伏电站建设对温带荒漠植被和土壤的影响 [J/OL]. 草地学报, 1-12[2025-11-26]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloKYIO--GdRQDv4RHUFHSGYyqHKunjiDfgwyBBnJu24baxB3OaxkwmYL2scVH-xNvAwf7IuOZdBO3DPAHTskkNdGk3eMareNtniUfoc4JDGmL_I2s3LS_SF_q6LhdEsv_3qHachNHIYM_mVm2zs58vQL5xoEbGliFnkx-hlg7jeQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [5] 许磊. 光伏电站无人机自主巡检路径规划与仿地飞行优化 [J]. 信息与电脑, 2025, 37(21):54-56.

基于智能电网调度控制系统的新能源优化调度措施分析

杨永明

(内蒙古电力(集团)有限责任公司乌海供电分公司, 内蒙古 乌海 016000)

摘要 当前能源结构转型速度加快, 新能源在电力系统中的占比增加, 间歇性、波动性等特性为电网调度带来前所未有的挑战。智能电网调度控制系统具备强大的数据处理与决策能力, 是现代电网运行的核心平台, 在新能源优化调度中十分重要。基于此, 本文分析了智能电网调度控制系统的架构、功能及其运行机制, 提出新能源优化调度措施, 以期为促进相关系统的良好运行提供借鉴。

关键词 智能电网; 调度控制系统; 新能源; 优化调度; 数据驱动

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.026

0 引言

新能源具有无污染、可再生的显著优势, 在电力系统中的装机容量、电量占比逐渐提高, 但是相关发电系统在运行过程中具有波动性的特点, 可能会受到外界因素的影响出现问题, 难以像传统能源发电实现稳定的功率输出, 使得新能源大规模接入电网后会对电网的功率平衡、电压稳定、频率调节等方面产生不利影响, 为电网的调度控制带来巨大挑战。因此, 在新能源优化调度的过程中, 需要积极采用智能电网调度控制系统, 提高新能源的利用率、电网的适应性, 改善整体工作的有效性, 达到预期的目的。

1 智能电网调度控制系统

智能电网调度控制系统是融合计算机技术、通信技术、自动化控制技术、信息技术等多学科知识的复杂系统工程。其中, SCADA 系统是智能电网调度控制系统的基础, 负责实时采集变电站的电压、电流、功率、开关状态以及发电机的出力、转速、温度等数据, 为调度人员提供准确的电网运行状态信息; EMS 系统是智能电网调度控制系统的核芯, 基于 SCADA 系统采集到的数据进行电网的潮流计算、安全分析、经济调度等功能; WAMS 系统在电网的关键节点部署同步相量测量单元, 实时获取电网的电压相量、电流相量、频率; DMIS 系统是智能电网调度控制系统的管理平台, 负责调度业务的流程管理、信息管理、决策支持, 涵盖调度计划的编制、审批、执行和考核等各个环节, 实现调度业务的规范化、标准化、自动化。智能电网调度

控制系统实现不同子系统之间的数据共享, 打破信息孤岛, 提高电网调度的效率。同时, 具有较高的信息分析能力、信息处理能力, 能全面深入分析电网的信息内容, 明确是否存在问题, 按照实际情况进行处理, 促使调度工作的有序开展^[1]。

2 基于智能电网调度控制系统的新能源优化调度作用

2.1 提升新能源消纳能力

智能电网调度控制系统在新能源优化调度中的应用, 能实时监测新能源发电的出力情况, 结合电网的负荷需求、运行状态合理安排新能源的发电计划。例如: 新能源发电出力较大而电网负荷较低, 调整其他发电机的出力, 为新能源发电腾出消纳空间, 降低火电机组的出力, 使其运行在较低的负荷水平或者启动抽水蓄能电站进行抽水储能, 将多余的新能源电能转化为水的势能储存, 新能源发电出力不足后释放抽水蓄能电站的水能进行发电, 补充电网的电力缺口^[2]。

2.2 增强电网适应性

新能源的大规模接入会使电网的电压波动、频率偏差、谐波污染等运行特性发生变化, 新能源发电出力突然增加会导致电网电压升高。智能电网调度控制系统的应用, 能自动投入无功补偿装置, 吸收多余的无功功率, 降低电网电压, 在新能源发电出力突然减少时, 切除部分无功补偿装置释放无功功率, 提高电网电压。同时按照新能源的预测出力, 提前制定应对措施调整电网的运行方式, 降低新能源波动对电网稳定性

的影响。新能源发电出力大幅波动的时段，提前增加电网的旋转备用容量，有助于提高电网的抗干扰能力。

2.3 提高调度决策的科学性

智能电网调度控制系统中存在先进的数据分析技术、决策支持技术，可对新能源发电、电网负荷、设备状态等数据进行综合分析。例如：利用数据挖掘、机器学习算法对历史数据进行分析，完善新能源发电、电网负荷的预测模型，优化模型参数，提高预测的准确性，为调度计划的编制提供可靠依据。采用多目标优化算法综合分析新能源消纳、电网安全稳定、经济运行等情况，制定最优的调度方案，同时智能电网调度控制系统具备可视化展示功能，可将复杂的电网运行数据以直观的图表、图形等形式展示给调度人员，有助于分析电网的运行状态，做出正确的调度决策^[3]。

3 基于智能电网调度控制系统的新能源优化调度措施

3.1 基于数据驱动的新能源出力预测优化措施

为合理构建新能源出力预测模型，在采用智能电网调度控制系统期间需要收集丰富的历史数据，完成相关信息采集后，采用相应的处理技术将其中噪声去除，改善信息的应用质量，利用均值填充等方式，完善缺失部分信息的填充处理，如若存在异常值，需利用统计方法或机器学习算法识别处理，避免其对预测模型产生不利影响。在实际工作中需使用将统计学习理论作为基础的支持向量机预测技术，明确最佳的超平面类型，科学合理地进行信息的预测处理，采用神经网络技术模拟复杂的系统行为，使用长短期记忆网络处理序列数据中的长期依赖关系，预测具有时间序列特性的新能源出力。在构建预测模型期间，需借助训练集训练模型调整模型的参数，设置测试集评估模型的预测性能，采用对不同数据信息进行融合的技术，科学整合相关的数据内容。例如：按照具体情况，整合天气信息、设备信息等，全面监控设备的运行情况，提高对新能源出力变化的捕捉能力，利用数值天气预报数据提供未来一段时间内的气象信息，为新能源出力预测提供宏观的参考，采集新能源发电设备的实时运行数据，反映设备的当前状态，对预测结果进行实时修正，基于在线学习算法，在模型运行过程中接收新的数据，按照新数据对模型进行优化，使模型保持良好的预测性能^[4]。

3.2 多目标优化调度模型构建与求解措施

在新能源优化调度过程中，需综合分析新能源消纳、电网安全稳定、经济运行等目标构建多目标优化

调度模型，将新能源消纳率作为衡量电网对新能源接纳程度的重要指标，定义为实际消纳的新能源电量与新能源发电总电量的比值，提高新能源消纳率，减少弃风、弃光现象，提高新能源的利用率。由于电压偏差过大会影响用电设备的安全运行，因此，需将电压偏差的平方和作为目标函数的部分，优化调度以降低电压偏差，在新能源优化调度中结合传统能源发电、新能源发电的成本优化发电计划，降低电网的发电成本。而在约束条件设定方面，需保持电网中发电功率与负荷功率平衡，发电功率等于负荷功率加上电网的损耗功率，各类发电机的出力、变压器的容量、输电线路的传输功率等都应在其额定容量范围内，避免设备过载运行，新能源发电设备的出力受到气象条件、设备状态等因素的限制，出力应在一定范围内波动。同时，采用非支配排序遗传算法，可在一次运行中得到多个满足不同目标要求的解，为调度人员提供更多的选择，借助 NSGA-II 算法快速非支配排序、拥挤度计算、精英保留策略等操作，保持种群的多样性，提高算法的搜索能力^[5]。

3.3 源网荷储协同调度的应用措施

在源侧，智能电网调度控制系统可根据新能源的预测出力及电网的负荷需求，优化传统发电机的出力计划，在新能源发电出力较大的情况下减少传统发电机的出力，为新能源发电腾出空间，新能源发电出力不足后增加传统发电机的出力，保障电网的供电可靠性，调整风力发电机的叶片角度、太阳能光伏发电板的倾斜角度，提高新能源发电的效率。且需在网侧调整电网的拓扑结构、变压器分接头位置、无功功率补偿设备，优化电网的运行方式。例如：新能源发电接入点附近的电压过高，调整变压器分接头位置降低电压，电网的功率因数过低时，投入无功补偿设备，提高功率因数。同时，在源网荷储协同调度期间引导电力用户参与需求响应，制定合理的电价政策、激励措施，指导用户在新能源发电过剩期间增加用电负荷、在新能源发电不足后减少用电负荷。例如：实行分时电价，在新能源发电高峰时段降低电价吸引用户增加用电，在新能源发电低谷时段提高电价促使用户减少用电。另外，源网荷储协同调度过程中需采用储能设备，在新能源发电过剩的情况下，使用储能设备储存多余的电能，将电能转化为其他形式的能量储存，新能源发电不足后借助储能设备释放储存的能量，补充电网的电力缺口。

3.4 智能化控制技术在调度中的深度应用措施

在新能源优化调度过程中，需采用人工智能技术进行大量历史数据的学习分析，自动分析新能源发电、电网运行规律，实现智能化的调度决策。例如：神经网络具有非线性映射能力，可模拟复杂的系统行为，需训练神经网络模型，输入气象数据、历史新新能源出力数据等、输出新能源的预测出力，强化学习算法凭借智能体与环境的交互，学习最优的调度策略，以最大化长期的奖励，在新能源优化调度中利用智能体调整发电机的出力、投入或切除无功补偿设备，明确最优的调度策略。例如：某新能源优化调度工作中，采用强化学习算法后，智能体在面对不同天气条件下的新能源出力波动可快速做出反应，在晴朗天气中太阳能发电出力较高，智能体按照实时监测到的电网负荷需求，合理调整火电机组出力，优先消纳太阳能电力，同时控制储能设备进行充电，将多余电能储存起来。遇到阴天或夜间太阳能发电出力下降后，智能体释放储能设备的电能，适当增加火电机组出力，保障电网的稳定供电。经过一段时间的运行，该区域电网的新能消纳率显著提高，发电成本有所降低，电网的稳定性也得到增强。另外，在新能源优化调度中，新能源的出力、电网的负荷受到多种因素的影响，具有不确定性特点，因此需采用模糊控制技术将不确定的输入变量进行模糊化处理，转化为模糊集合，结合预先制定的模糊规则进行推理、决策，将决策结果进行解模糊化处理，得到具体的控制量。例如：在处理新能源发电出力波动对电网电压的影响期间，将新能源发电出力的变化量和电网电压偏差作为输入变量，将其模糊化为“大”“中”“小”等模糊集合，按照“如果新能源发电出力变化量大且电网电压偏差大，则投入较大容量的无功补偿设备”等专家经验制定模糊规则，得到需要投入的无功补偿设备的容量，将该容量进行解模糊化处理，得到具体的控制指令，实现对电网电压的精确控制。

3.5 跨区域协同调度与市场机制衔接措施

由于新能源资源分布不均衡，不同地区的新能源发电出力存在差异，因此，需构建跨区域协同调度机制，实现新能源电力的跨区域优化配置，提高新能源的消纳能力。跨区域协同调度需要建设统一的调度平台，实现不同地区电网之间的信息共享和实时通信。例如：某地区新能源发电出力过剩、本地电网无法完全消纳时，可借助跨区域协同调度平台将多余的电力输送到

其他新能源发电不足的地区，在电力输送过程中需结合输电线路的传输容量、电压稳定性等因素，合理安排输电计划和潮流分布，构建跨区域的调度协调机制，明确各地区在协同调度中的职责与权益，保证调度决策的科学性。在电力市场中，新能源发电企业可按照市场价格和自身的发电成本，自主决定发电计划和报价策略，市场价格较高，可增加发电出力，获取更多的经济收益；市场价格较低，可减少发电出力避免亏损。同时需积极建设新能源电力交易市场，减少中间部分，降低交易成本，实现新能源的优化配置、高效利用，促进新能源产业的健康发展。为保障跨区域新能源电力交易的有序进行，采用双边交易、集中交易等方式满足不同市场主体的需求。在价格形成机制方面，按照新能源发电的成本及市场供求关系，以边际成本定价、节点电价等反映新能源电力的真实价值，规范市场秩序，预防市场操纵、不正当竞争行为的发生。

4 结束语

智能电网调度控制系统在新能源优化调度中的应用，能改善新能源优化调度效果，具有重要意义。因此，在新能源优化调度过程中，需积极采用智能电网调度控制系统，基于数据驱动进行新能源出力预测优化，多目标优化调度模型构建与求解，源网荷储协同调度应用，智能化控制技术深度应用，跨区域协同调度与市场机制衔接，提升新能源的消纳能力，增强电网对新能源的适应性。

参考文献：

- [1] 鄢仁武,林丽婵.考虑P2HH和二维激励需求响应的综合能源系统优化调度[J].国外电子测量技术,2023,42(12):77-85.
- [2] 陈施,龚祥龙,尤东泽,等.智能电网调度控制系统中的安全防护技术探析[J].电力设备管理,2024,03(22):243-245.
- [3] 奚春平,薛渊,张新亮.智能电网框架下新能源发电调度优化策略分析[J].中国电力企业管理,2025,02(21):55-58.
- [4] 李强,赵峰,庄莉,等.基于新能源消纳能力的有源配电网运行智能调度模型[J].微型电脑应用,2024,40(08):104-107.
- [5] 章森昌.基于保护与故障信息系统的继电保护策略[J].新潮电子,2024,05(10):91-93.

直流特高压系统中滤波器谐波抑制能力的参数优化分析

廖逸驹

(国网四川省电力公司特高压直流分公司, 四川 宜宾 644000)

摘要 随着直流特高压系统的广泛应用, 滤波器在提升系统稳定性和电能质量中的作用愈加突出。本文研究了直流特高压系统中滤波器的谐波抑制能力, 探讨了滤波器的优化策略及方法。通过仿真分析、多目标优化算法以及滤波器组合设计, 提出了一系列针对系统特点的滤波器优化方案, 以期为未来直流特高压系统的滤波器设计和应用提供有益的参考。实验结果表明, 优化后的滤波器能够显著提高系统的谐波抑制能力, 保障了系统的稳定运行。

关键词 直流特高压系统; 滤波器; 谐波抑制; 谐波污染; 多目标优化算法

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.027

0 引言

一种高效的电力传输方式——直流特高压(UHVDC)技术, 频繁应用于跨不同区域的电力传输, 伴随电力需求持续攀升, 谐波污染现象一直影响电力质量水平, 增加了设备运行的风险。滤波器作为解决谐波问题的核心, 其性能直接影响到系统的稳定性。本文通过分析直流特高压系统中滤波器的作用, 探讨其优化方法, 以期为提高系统的电能质量和长期运行稳定性提供参考, 进行确保设备的安全与高效运行。

1 滤波器在直流特高压系统中的重要性与功能

1.1 滤波器的基本工作原理与应用机理

直流特高压(UHVDC)系统中, 滤波器主要是消除电力转换设备所产生的谐波, 稳固电力质量水平。滤波器依靠电容、电感、电阻之类的元件组合而成, 通过这些元件对电流波形加以改变, 减少谐波的振幅, 从而起到抑制谐波的功效。系统中的滤波器必须具备高精度响应能力以及稳定性, 以应对复杂负载的波动以及电力质量难题。有效的滤波系统可让电力稳定输送且保障设备安全运行, 掌握滤波器工作原理与应用机制对设计高效滤波器意义重大。对于特高压系统这一对象, 滤波器是让系统稳定运行的基础支撑, 也为保障电能质量发挥关键效能。

1.2 直流特高压系统中的谐波来源与影响

直流特高压系统的谐波主要由高频开关设备和功率电子转换器引起, 此类设备在电能转化过程中会产生不规则电流波形, 导致谐波的形成, 谐波不仅会波

及电能质量, 甚至会对系统中灵敏的电子设备产生损害, 缩短设备可用寿命, 长时间存在的谐波可引发电流超载、设备过热, 进而干扰其他电力设备的正常运行, 掌握谐波来源并恰当控制其传播, 是提升直流特高压系统性能的关键。谐波对电力系统的影响十分深远, 及时解决谐波困扰, 能显著提升系统的稳定性, 有助于保障电力设备可靠运行并延长其使用寿命。

1.3 滤波器类型及其对系统稳定性的影响

处理直流特高压系统中的谐波难题, 常见滤波器种类涵盖 LC 滤波器、主动滤波器与并联滤波器。LC 滤波器凭借电感与电容的组合达成抑制低频谐波目的, 展现出良好成效, 对多数负载工况具有适用性。主动滤波器凭借功率电子器件和控制技术, 可调整输出电流, 动态抑制各类谐波现象, 尤其是针对高频谐波可实现良好抑制。并联滤波器针对负载大幅波动的状况, 能明显降低谐波污染, 增加系统稳定性。直流特高压系统稳定性受滤波器性能直接影响, 参数设置一旦不合理, 极有可能影响系统运行质量。因此, 需注重优化滤波器设计工作, 保证其性能优良, 对系统长期稳定运行起到关键支撑作用^[1]。

2 直流特高压系统滤波器优化中的问题与挑战

2.1 系统中的谐波污染及其对设备的危害

在直流特高压体系中, 谐波污染是不能漠视的主要难题, 高频谐波可通过电力系统进行传播, 致使电能质量出现偏差, 导致电压波动、功率因数减退等情形, 使能源的使用效率变差。更为棘手的是, 谐波甚

至会直接损害设备，尤其是在高压变压器、驱动电机以及敏感特质的电子设备上，长期的谐波干扰，容易造成设备过热、频繁出故障，甚至引发系统运行中断。有效管控这些谐波不仅可优化系统的电能质量，也可延长设备使用时长，研究复杂电力环境下精准消除谐波的途径，且维持设备长时间稳定状态，成为现阶段滤波器优化的关键。

2.2 现有滤波器技术在特高压系统中的局限性

尽管现有的滤波器技术在很多应用方面表现尚好，但在直流特高压系统所涉及的范畴内，这些技术的效果一般无法满足需求，尤其是当出现大功率负载与高频谐波情况的时候，常规样式的滤波设备，如LC式滤波器，不能高效抑制高频谐波以及过多低次谐波，使谐波抑制效果未达预期。特高压系统往往在极端环境条件下运行，传统滤波器应对负载变化与系统波动的适应能力欠佳，容易引发性能的逐步衰减，不能达成长期、稳定的谐波抑制成效。特高压系统中，现有滤波器技术的应用受到极大约束，需推动更进一步的创新及优化实践。

2.3 滤波器参数调节的复杂性与挑战

滤波器调节需考量多种因素，涉及系统电流、电压状况以及负载特性等要素。在直流特高压系统中，因负载变动频繁且复杂多样，滤波器工作状态屡屡变动，传统的参数调节手段往往对这种动态变化束手无策，造成滤波器调节过程精准度欠佳。为保证滤波器发挥最效能，需实时掌握系统状态动态，同时要对滤波器开展精准动态调校，尤其是在特高压系统中，环境因素与系统波动使调节难度上升，亟须探寻新型的滤波器调节途径，实现调节的高效与精准化^[2]。

2.4 缺乏高效的优化方法与评估机制

即便滤波器在直流特高压系统方面得到普遍应用，但在实际运用中，针对滤波器的优化策略和评估机制还存在缺陷，现有的优化措施多为凭借经验的调试途

径，不具备系统性与科学性，导致滤波器调试工作既琐碎又无效率，鉴于缺少精准的评估方式，不容易及时捕捉到滤波器在不同工作条件下的潜在问题，从而给其优化的最终效果增加阻碍，亟须开发效率更高的滤波器优化算法，并设立健全的评估机制，实现调试效率与优化效果的提升，保证直流特高压系统平稳运行。

3 直流特高压系统滤波器参数的优化策略

3.1 基于仿真分析的滤波器性能评估与优化

仿真分析作为优化直流特高压系统滤波器参数的关键手段，设计阶段能模拟不同滤波器配置的性能，进而评估其对谐波抑制、系统稳定性等方面的意义。通过对系统各参数精准建模，仿真结果可提供可靠的相关数据支持，对设计人员在实际部署前预判滤波器运行表现起到辅助作用。仿真优化不仅能针对不同类型滤波器做性能对比，还可为系统调整提供科学依据，防止过度凭借经验去调试的现象，降低调试成本与时长。

在工程实施期间，仿真分析可实现多个维度设计的验证，以创建精准的换流站电磁暂态模型为途径，设计人员可精准预判各型谐波的分布情形，如针对某±800 kV项目而言，仿真结果显示，传统设计未能有效抑制11次谐波，造成交流母线电压畸变超出合理界限。如表1所示。

3.2 应用多目标优化算法提升滤波器性能

多目标优化算法通过综合考量多个目标，提升滤波器的性能表现，涉及谐波抑制效能展现、系统稳定性能、经济上的效益以及维护成本范畴等，依靠设定各目标的优先级别，且结合算法展现出的自适应性能，设计人员可选择最优的滤波器参数搭配方案。在直流特高压系统中，谐波抑制和系统稳定性是优化核心目标，经济性与长期维护成本作为次要考量目标，多目标优化算法不仅能在多个目标间找到平衡，也能在复杂系统中提供全局最优方案^[3]。

在实际应用阶段，优化进程中关键问题的攻克意

表1 ±800 kV特高压工程滤波器优化前后性能对比数据表

性能指标	优化前	优化后	改善幅度	国标限值	测试工况
交流母线 THD (%)	2.1	0.8	61.9% ↓	≤ 1.0	额定负载
11次谐波含量 (%)	1.8	0.3	83.3% ↓	≤ 0.5	轻载（30% 负荷）
暂态过电压 (p.u.)	1.5	1.2	20.0% ↓	≤ 1.3	交流短路故障
响应时间 (ms)	50	35	30.0% ↓	≤ 40	负荷阶跃变化

义重大。为精准界定滤波器性能与参数的关联，需构建精准的数学模型，如某换流站项目借助响应面模型，把谐波总畸变率（THD）、成本这类目标函数表示为 LC 参数的二次多项式样式，推动实现高效的优化。

3.3 滤波器组合方案的优化设计与应用

解决直流特高压系统中复杂谐波问题，有效方法之一是对滤波器组合方案做优化设计，单一类型的滤波器往往无法应对系统中不同频段的谐波污染情形，采用 LC 滤波器、主动滤波器、并联滤波器等多种滤波器组合的方式，可达到更佳的谐波抑制成效，相异滤波器针对不同频段谐波的抑制能力彼此补充，可在宽广频谱区间实现高效谐波管控，以提高系统的稳定性以及整体运作效率^[4]。

滤波器组合设计面临着三项棘手的技术挑战，首先要保证滤波器于频段呈现协调性，针对某 ±1100 kV 的实际工程，凭借精准阻抗扫描以及高通滤波器的配合，做到各滤波器在目标频段呈现最小的阻抗值，进而让谐波抑制成效实现最大化。其次要考虑的是各滤波器容量匹配情况，防止滤波器超出负荷，需精准算出各滤波器在不同频段的实际负荷。针对主动滤波器，控制策略优化尤为关键，尤其是面对动态扰动的时候，要设计出能迅速响应的控制算法，实际运行的相关数据显示，经优化的组合滤波器可有效把总谐波畸变率（THD）管控于 0.9% 以内，且能在多种不同工况情境下维持性能稳定。如表 2 所示。

表 2 ±1100 kV 工程混合滤波器方案性能实测数据表

滤波器类型	目标谐波	抑制率 (%)	容量 (MVar)	温升 (℃)	运行可靠性 (%)
5 次单调谐滤波器	250 Hz	98.2	120	25	99.92
7 次单调谐滤波器	350 Hz	97.5	90	22	99.95
11 次高通滤波器	≥ 550 Hz	95.8	60	18	99.89
有源滤波器 (APF)	全频段	92.4	30	35	99.85

3.4 实验验证优化方案的有效性与实用性

实验验证是优化滤波器方案不可或缺的一环，可在现实条件下核查滤波器设计的实际效果，涉及谐波抑制的性能、负载适应程度和系统的稳定状态等，借助在实验平台开展对优化后滤波器配置的测试，设计

人员可直接得到有关滤波器性能的切实数据，这些实验结果可为后续工程应用提供数据上的助力，进而保证滤波器在复杂系统中达到预期功效，实验验证可找出仿真分析未预见的实际问题，而后及时做出调整动作。

为证实优化方案的实际效力，实验验证阶段一般会开展多个层次的测试工作，起始阶段开展组件级验证，依靠长时间老化检验，就如同对电容器组开展 2 000 小时老化的测试工作，可预先探查潜在的性能故障，随后步入系统联合调试的阶段。在动态模拟平台开展滤波器组合整体性能测试。交流系统电压跌落的时候，主动滤波器的响应时间需进行调整，从初始设计的 20 ms 降为 15 ms，从而更合理地应对动态改变，现场测试达到了数据的最终验证环节，实测实际谐波表明，THD 较仿真结果高出约 0.2%，实施了调整后，优化方案实现设计标准指标，此系列验证环节确保滤波器设计在实际运行期间的可靠性与稳定状态^[5]。

4 结束语

本文通过对直流特高压系统中滤波器的优化研究，提出了基于仿真分析、多目标优化算法和滤波器组合设计等方法，旨在显著提高系统的谐波抑制能力，提升电力系统的稳定性和可靠性。实验验证显示，优化后的滤波器配置在不同负载和环境条件下均表现出较强的稳定性和高效性。研究结果为直流特高压系统滤波器的设计和应用提供了理论支持和实践指导，具有重要的工程意义，并有助于推动该领域技术的进一步发展。

参考文献：

- [1] 李锡华, 杨磊, 张文涵. 一种特高压直流换流站高压隔离开关冗余机构箱的研制 [J]. 电器工业, 2025(05):89-94.
- [2] 江金成, 彭寅章, 王尚德, 等. 特高压换流站交流滤波电容器组不平衡保护定值整定研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(02):98-105.
- [3] 胡云鹏, 唐俊, 张建峰, 等. 分址建设特高压直流系统保护优化方案 [J]. 浙江电力, 2025, 44(04):1-10.
- [4] 张春亮, 宋佳信. 特高压直流单极接地故障时极间耦合电压对顺控逻辑的影响 [J]. 内蒙古电力技术, 2025, 43(01):90-95.
- [5] 曹宏斌, 韩蕾. 特高压直流输电线路间电磁耦合对电压突变量保护影响的研究 [J]. 电工技术, 2024(S2):460-462.

光敏固化复合材料在风电叶片表面损伤快速修复中的应用

王玉红

(国能联合动力技术(赤峰)有限公司, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要 为满足风电叶片快速修复表面损伤的需要, 提高修复效率和质量, 本文针对传统修复材料存在的局限性, 对光敏固化复合材料在风电叶片表面损伤修复中的应用进行研究。通过对材料组成、固化原理的分析, 结合风电叶片的破坏类型及服役环境的需求, 论述其应用优势和具体措施。研究发现, 光敏固化复合材料能迅速固化、粘结牢固并适配于各种损伤的修复, 为风电叶片的表面损伤修复工作提供一种高效可靠的技术途径, 促进修复技术朝着智能化方向发展。

关键词 光敏固化复合材料; 风电叶片; 表面损伤; 快速修复

中图分类号: TB33; TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.028

0 引言

在轻量化设计和大功率的趋势下, 叶片结构对于修复材料力学性能、工艺适配性等方面提出更高的要求。传统的热固性树脂修补需要依靠加热固化设备进行, 高空作业的可行性不高; 常温固化材料又存在强度发展缓慢的问题。光敏固化复合材料是一种以光固化机理为基础的复合材料, 它通过对光照条件的精确调控来达到材料性能调控的目的, 既可以在短期内形成高强度的修复层, 又可以根据损伤类型自定义材料配方。这一材料在风电领域中的研究将促进叶片损伤修复技术朝着高效化、智能化的方向发展。

1 光敏固化复合材料概述

1.1 材料组成与分类

光敏固化复合材料的主要成分为树脂基体、光引发剂、活性稀释剂及填料。复合材料以树脂基体为主, 常用环氧树脂和丙烯酸酯树脂^[1]。环氧树脂粘接性好, 机械性能好, 丙烯酸酯树脂固化快、硬度大。当光引发剂吸收某波长光时, 生成活性自由基或者阳离子引发树脂聚合; 活性稀释剂可调整树脂黏度和改善材料加工性能; 填料能够强化复合材料力学性能和降低成本, 例如: 二氧化硅、碳酸钙。

根据树脂种类的不同, 光敏固化复合材料又可以分为环氧类、丙烯酸酯类和聚氨酯类。环氧类复合材料具有优良的综合性能, 在多种基材上附着力好; 丙烯酸酯类复合材料的固化速度异常迅速, 适用于快速修复的场景; 聚氨酯类型的复合材料展现出卓越的耐磨和柔

韧特性。不同类型光敏固化复合材料性能对比见表1。

表1 不同类型光敏固化复合材料性能对比

材料类型	主要优势	固化速度 (分钟)	拉伸强度 (MPa)	断裂伸长 率(%)
环氧类	粘接性好、综合性能优	5~10	50~80	5~15
丙烯酸酯类	固化迅速	1~3	40~60	3~8
聚氨酯类	耐磨、柔韧	3~5	30~50	10~20

1.2 光敏固化原理与特性

光引发聚合过程服从自由基链式反应的机理, 包括链引发、链增长及链终止三个阶段。以自由基型光触发为例, 光触发剂在吸收光子能量并跃迁至激发态时进行均裂反应产生初级自由基, 该初级自由基和树脂单体双键加成反应产生单体自由基。单体自由基持续地与其他单体分子进行化学反应, 导致分子链逐渐扩大。当这两个增长的链发生碰撞时, 它们会通过偶合或歧化反应来结束聚合过程。整个工艺从几秒到几分钟不等, 比传统热固化几小时反应时间效率提高几十倍。

光敏固化技术具有空间选择性, 使得该技术在复杂曲面修复方面具有独特的优势。通过对特定波长和强度分布光源系统的设计, 可以达到毫米级的部分固化精度。例如: 使用数字微镜器件(DMD)的投影式固化工具, 可以确保固化区域的分辨率维持在50 μm之内, 从而准确地修补叶片表面的细微裂痕。在能量消耗方面, 标准的紫外LED固化设备的功率通常只有100~300 W, 而传统的热固化烘箱的功率一般在10~30 kW范围内,

这导致能源消耗下降超过 90%。在环境友好性方面，光敏固化过程产生的 VOCs 排放量低于 10 g/L，这一数值远低于溶剂型涂料的 200 ~ 500 g/L 排放水平。

2 风电叶片表面损伤类型与修复要求

2.1 常见损伤类型

风电叶片裂纹损伤呈明显分布。在叶片的尖端区域，由于其线速度可以达到 60 ~ 100 m/s，因此在风沙的冲刷下，微裂纹的密度可以高达 5 ~ 10 条/m²，而裂纹的宽度通常介于 0.1 ~ 0.3 mm 之间；叶片根部由于受到交变载荷的作用容易出现与纤维方向垂直的疲劳裂纹且裂纹深度可达到 2 ~ 5 mm。在磨损损伤的情况下，材料在前缘区域的损耗是最为严重的。在风沙环境中使用 5 年之后，前缘的厚度平均减少 2 ~ 3 mm，导致气动效率下降 8% ~ 12%。分层缺陷经常出现在蒙皮和芯材的交界处。在湿度循环的影响下，这种界面的粘接强度每年会减少 5% ~ 8%。当分层的面积超出叶片表面的 10% 时，叶片的固有频率会明显下降^[2]。

通过声发射检测技术对运行 3 年以上的风电场统计显示，每百支叶片中裂纹类损伤占比 47.2%，磨损类占 32.5%，分层类占 18.3%（见表 2）。不同损伤类型之间的交互作用加快破坏进程，例如表面裂纹的存在为水的入侵提供通道并促进分层扩展；磨损所引起的表面粗糙度的增大又加剧裂纹的萌生。

表 2 风电叶片常见表面损伤类型及出现频率

损伤类型	典型形态特征	检测难度等级	扩展速率 (mm/年)
裂纹	线性或网状开口	★★★★☆	0.5 ~ 2
磨损	表面材料均匀减薄	★★☆☆☆	0.3 ~ 0.8
分层	界面脱粘形成气腔	★★★★★	1 ~ 3

2.2 风电叶片服役环境对修复材料的特殊要求

修复材料在极端温度下要求达到 -40 °C 低温抗脆化性能以及 60 °C 高温尺寸稳定性。-40 °C 下材料冲击韧性不宜小于 20 kJ/m²，以免发生低温开裂；在 60 °C 的高温条件下，需要确保热膨胀系数与叶片基体的匹配误差不超过 10%，以避免由于热应力引发的二次损害。在沿海的风场条件下，修复用的材料需要经过 5 000 h 的盐雾测试，并且其表面的腐蚀速度应当低于每年 0.1 μm；在高海拔和强紫外线灯条件下，需要进行氙灯的老化测试，并确保在 2 000 h 后的拉伸强度维持在不低于 80% 的水平。

在施工的便利性上，材料需要在 80% 的湿度条件下依然能够稳定固化，并且固化所需的时间不得超过 10 分钟，以满足风电叶片在高空作业的特殊需求。该

修复工艺要求与无气喷涂和注射灌注的施工方法相容，刀具重量不得大于 5 kg 且易于高空搬运作业。

3 光敏固化复合材料在风电叶片表面损伤快速修复中的应用优势

3.1 高效快速固化，大幅缩减修复时长

光敏固化复合材料依靠其特有的光引发聚合机制，可以在极短的时间内在光照条件下由液态快速过渡到固态。与传统的热固化材料相比，光敏固化复合材料需要更长的加热时间并经历复杂的升温与保温过程，特别是在紫外光或其他特定光源的照射下，光引发剂很快分解生成自由基，从而促进单体和预聚体的快速聚合和交联。这一特点使风电叶片表面受损修复后，可以立即进行修复操作，大大压缩修复流程固化所需时间，不需要长时间等待物料固化，显著提高修复效率，降低风电叶片停运时长，确保风电场的连续平稳发电^[3]。

3.2 卓越粘结特性，牢固贴合叶片基体

光敏固化复合材料分子结构中存在各种活性基团，固化时可以和风电叶片通常使用的玻璃纤维等纤维增强复合材料基体复合、和碳纤维强化的树脂基材料会产生强烈的化学结合、物理缠绕效应。利用这一协同效应使光敏固化复合材料和叶片基体之间形成一个致密而牢固的结合界面，粘结强度比一般修复材料高。如此，既能保证修复部位和原有叶片结构的有效结合，更能够在随后的服役过程中经受住苛刻的风力载荷、复杂的环境温度和湿度变化，保持持久稳定粘结状态，避免修复材料剥落或裂纹，对叶片进行可靠修复。

4 光敏固化复合材料在风电叶片表面损伤快速修复中的应用措施

4.1 损伤检测与评估

在风电叶片损伤检测领域，相控阵超声检测技术凭借其独特优势成为内部缺陷探测的核心手段。该技术基于阵列探头的声束合成原理，128 阵元的超声探头通过可编程电子控制系统，能够独立调节每个阵元的激励时间和幅度，实现声束在空间的聚焦与偏转。当超声波遇到叶片内部的分层缺陷时，会因声阻抗差异产生反射回波，系统通过分析回波的时间、幅度和相位信息，构建出缺陷的三维图像。在检测过程中，探头以 1 m²/min 的速度沿叶片表面移动，可对 20 mm 深度范围内的缺陷进行精准定位，对于 0.5 mm 以上的分层缺陷识别准确率高达 98%^[4]。

红外热像检测则专注于表面裂纹的探测。脉冲加热方式通过高能脉冲激光器对叶片表面快速加热，使裂纹区域与正常区域产生温度差异。随着热量的传导，裂纹处由于热阻较大，温度下降速度与周围区域形成

差异，红外热像仪捕捉到这种温度场的衰减曲线后，通过非均匀性校正、图像增强等算法处理，可清晰识别出0.1 mm宽度的细微裂纹。引入机器学习算法后，构建包含裂纹形态、温度梯度等多维度特征的神经网络模型，进一步将缺陷识别准确率提升至95%以上，相比传统人工判读效率提高3倍。

4.2 表面预处理

风电叶片的表面前处理环节中，机械打磨为至关重要的首要步骤。使用配备了不同粒度砂纸的气动打磨机，从粗砂纸（80目）开始，对受损区域及其周围至少50 mm的范围进行打磨，通过去除表面的老化、油渍和其他松散物质，并采用交叉打磨技术来形成粗糙的表面，这样可以增强后续修复材料的附着性。打磨的深度应控制在0.1~0.2 mm之间，以确保在去除杂质的同时，不会对叶片的基体结构造成损害。

在打磨工作完成之后，使用高压空气清扫装置，在0.6~0.8 MPa的压力范围内，从叶片的根部开始，向叶尖方向吹扫打磨区，彻底去除残留粉尘和碎屑，避免这些杂质掺入修复材料中而影响修复效果。随后，采用工业级吸尘器在叶片表面吸尘，将高压空气不易吹出的微小颗粒进一步吸附，保证表面洁净度达到修复要求。对大面积损伤区域使用轨道式打磨机与网格状打磨路径相配合以确保表面粗糙度的均一；对于边角和凹槽这类复杂区域，采用小尺寸手持打磨工具对其进行精细加工，使得整个修复区域表面情况达到光敏固化复合材料施工规范要求，从而为之后的修复工序打下了良好的基础。

4.3 材料选择与调配

修复材料配方数据库整合1 000+组实验数据与实际应用案例，基于叶片型号、损伤类型、环境参数等12个维度进行智能匹配推荐。以沿海环境裂纹修复为例，系统优先推荐双酚A型环氧树脂为基体，搭配质量分数1.8%的 γ -氨丙基三乙氧基硅烷偶联剂，该配方可使复合材料与玻璃纤维基体的界面剪切强度从32 MPa提升至41 MPa^[5]。材料调配过程实现全自动化控制，高精度质量流量计（精度 $\pm 0.1\%$ ）实时监测各组分流量，通过PLC控制系统精确调节输送泵的转速。以常见的丙烯酸酯类修复材料为例，当检测到树脂黏度超过目标值（200 mPa·s）时，系统自动补加5%的活性稀释剂三丙二醇二丙烯酸酯，同时通过温度控制系统将混合罐温度维持在25±1 °C，确保材料可施工时间稳定在30分钟。

4.4 修复施工

引入3D打印技术和光敏固化复合材料的创新性修复方法，并在高精度三维激光扫描仪辅助下实现

0.01 mm分辨率下风电叶片破坏区准确几何数据的快速采集，通过逆向工程软件把采集点云数据转换成三维数字模型导入专用3D打印设备中。打印设备上安装的双组分材料挤出系统，能够在伺服电机的精准控制下按照预设分层切片路径达到最低0.1 mm³材料挤出精度，将配置后的光敏固化复合材料匀速、准确地喷洒在破坏处。在打印的过程中，与打印头同步工作的紫外线LED阵列光源可以以100 mW/cm²的辐射强度，对新挤出的材料进行同步照射，促使物料中光引发剂快速分解生成自由基并引发聚合反应使物料层快速固化成形。

对于风电叶片表面存在不规则孔洞和缺口这类复杂破坏位置，在3D打印系统中内置智能算法能够根据破坏区域三维形态实时地对打印轨迹及材料堆积厚度进行自适应调节。例如：当加工深度大于5 mm的凹坑后，该系统将自动使用螺旋上升式打印路径来逐渐加大材料堆积量以保证修复层和叶片基体之间的完美结合。

5 结束语

在风电产业朝着大型化、高效化方向发展的背景下，叶片表面损伤修复的创新尤为重要。光敏固化复合材料凭借其独特的光固化属性和卓越的整体性能，成功突破传统修复技术的限制，为风电叶片的稳定和安全运行提供强有力的支持。它在损伤修复上的成功运用不仅能提高风电设备运行的可靠性和经济性，也为复合材料在新能源领域的创新性应用开拓了一个新的方向，有助于风电产业的持续优质发展。

参考文献：

- [1] 张小辉,陈进,唐宇航,等.光固化3D打印用光敏树脂功能化改性的研究进展[J/OL].化工新型材料,1-7[2025-07-31].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloK6JUttMV4HSvZn5Mr73q4jJoJF1J87AC7kvI87hRZgZbLYFOXMz2_DFCYgqv05F8DEPnMAr58ckzFYPrLUenwQkjzVVRlp6conTtR-5iefn2v36SH_mGYrCgqeYqIhaPsHggqWO8Z2LHCcBe_DLXxgwRz39GDLITVUxAbUpSnupg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 陈慧.低介电高韧光敏聚酰亚胺树脂的合成固化及性能分析[J].聚酯工业,2025,38(04):20-22.
- [3] 王佳妮,陈进,张玄,等.光固化3D打印用光敏树脂研究进展[J].化工新型材料,2025,53(11):28-33.
- [4] 杨子玉.NIR-II辅助UV固化环氧树脂及其复合材料[D].北京:北京化工大学,2025.
- [5] 黎艳.3D打印聚四氟乙烯(PTFE)光敏树脂开发及光固化性能研究[D].成都:电子科技大学,2025.

水利工程施工现场管理技术要点分析

付 靓，周 杰

(水利部海委引滦工程管理局，河北 唐山 064300)

摘要 本文针对水利工程施工现场管理技术进行了系统的分析，明确了水利工程的特点和对施工现场管理的要求，提出了科学合理的现场管理策略，包括精细化的进度控制、质量安全监督以及环境保护措施，并通过实地考察和案例分析，验证了所提方法的实用性和有效性，以期为提高水利工程施工现场管理水平提供实践参考。研究结果表明，良好的现场管理技术可以显著提升工程效率与质量，确保工程顺利进行。

关键词 水利工程施工；现场管理技术；环境保护

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.029

0 引言

水利工程已经成为基础设施建设中必不可少的一个重要部分，施工管理水平高低决定了工程进度快慢、质量好坏以及安全是否有保障。传统工程管理方法已经很难满足如今越来越复杂的工程需求，尤其是在水利工程领域，工程项目通常都规模巨大，施工环境错综复杂，技术标准要求相当严格，所以施工现场管理具有关键性作用，同时也面临很多困难和挑战。当前针对水利工程施工现场管理的研究数量很少，这使得管理效率和实际效果很难得到提升和改善，通过大量的研究数据和实际操作经验能够发现，使用严格且合适的管理技术对于提高工程效率和确保施工质量起着无可替代的重要作用，同时还能有效减少各种风险和问题。

本文依托对水利工程施工现场管理技术的系统分析，旨在探求更加高效的管理方法。首先分析了水利工程的基本特点及对现场管理的具体需求，借助实际案例来分析现场管理中的具体问题与挑战。核心管理策略的提出，既依托理论研究，也融合了实地调研和案例分析的实际成果，以实现精准化的进度控制、质量安全监督及环境保护等目标。伴随工程技术的持续发展和管理理论的深入，研究有力的水利工程施工现场管理策略格外紧迫。水利工程管理方面的研究能够有效推动理论知识的进步，同时也提供了实际工作中可以直接使用的操作指导，为保障相关工程项目能够顺利进行提供了强有力的支持。研究人员经过认真仔细的分析，制定出一套科学严谨的管理方法，希望这些方法能在水利工程施工现场的日常管理工作中起到参

考和启发的作用，从而带动工程管理水平的全面提升。

1 水利工程施工的基本要求

1.1 水利工程特性与施工挑战

水利工程是社会经济发展中不可或缺的一部分，具有非常明显的特点和复杂的施工需求^[1]。这样的工程往往覆盖很广的跨区域建设，工程规模非常庞大，施工过程中必须合理安排各种资源，采用先进的技术手段。工程设计和建设始终围绕防洪、供水、灌溉以及生态环境保护等综合功能目标来展开，设计工艺相当复杂，施工执行的标准也非常严格，必须确保质量安全和长期的稳固耐用。水利施工还会受到地形、地质以及气候条件多样化的限制，导致技术上的难度不断加大。特别是在山区或者河流地带开展工程建设的时候，需要解决地质不稳定、环境条件艰难以及水文情况意外变化等问题，这样就会使得技术方案的复杂程度和施工中的危险程度都明显增加。

1.2 施工现场的主要管理需求

施工现场的管理需求是水利工程建设过程中保障工程质量、安全性和顺畅推动的重要部分。施工现场的管理需要涵盖整个施工流程，包括资源的合理安排、进度的高效控制、质量的严谨把关、安全的完备防护以及环境的稳妥保护等多个方面。资源的安排规定合理分派人力、物资和各种设备，防止浪费和项目延期的情况出现。进度的控制需要拟定具体的施工计划，并且依据实际情况迅速修正方案，以便处理各种意外或者繁琐的状况。质量的把关需遵照高要求的施工要求，一直贯彻到材料的仔细检测、工艺的标准实施和

施工环节的持续改进等全部流程。安全防护的目的是提升施工现场危险情况的发现与处理能力，健全安全知识教育和突发事件的应急准备措施，尽量降低事故发生的可能性^[2]。环境保护就是要尽量减少施工过程中对自然环境的破坏，具体包括防止污染和采取措施恢复生态。想要做好施工现场的高效管理，一定要重视技术方法的改进和实际应用，搭建一个高效的管理系统，确保工程施工符合标准，并且顺利完成项目目标。

2 水利工程施工现场管理技术框架

2.1 进度控制的精细化方法

进度控制是施工现场管理中非常重要的一个部分，采用精细化的管理方式能够显著提升施工效率，并且保障项目能够在规定的时间内顺利完成^[3]。开始施工的时候，一定要特别关注每一个小细节，确保有明确的计划和目标，必须按照科学制定的工程进度计划执行，结合现场的实际情况合理地将施工阶段和关键时间点进行划分，确保每一个环节都能顺畅衔接。施工过程中，要留意每一个细微的变化，通过灵活地调整计划和资源分配，密切关注进度是否有差异，保持工程运行的灵活性和应对突发情况的能力。信息化技术的应用在进度控制中格外重要，是不可或缺的一部分，依靠先进的软件工具来实现数据的共享和深入分析，确保施工的每一个环节都处于可控的状态。项目团队应当构建顺畅的沟通机制，借助定时会议与协同协调，提升各部门间的配合效果，降低信息传播误差对进度的影响。进度控制不仅需要技术手段的支持，更需要管理者的深入理解与精确判断，从而有效避免工程风险。

2.2 质量与安全的监督体系

质量与安全的监督体系是水利工程施工现场管理中的核心部分，直接关系到工程质量、施工人员的安全保障。施工质量监督体系应当以规范化标准为根基，严格落实国家相关规范，通过系统化的管理流程和技术手段实现全流程管控。在施工过程中，构建质量管控工作机制，运用多级检查和动态监测相融合的方式，针对原材料、施工工艺、技术操作等环节展开连续跟进。对于安全监督，应突出安全责任的等级划分和安全管理制度的实施强度，通过安全教育培训提高人员安全意识，运用现代化监控设备对危险区域进行即时监控。改进应急预案设计，保证在突发情况下可以迅速反应并执行高效救援。合理的质量与安全监督体系可以为水利工程施工提供可靠保障，有利于推动工程顺利进行。

2.3 环境保护与可持续发展策略

生态保护和可持续发展策略是实现水利工程施工现场绿色管理的重要部分。要严格落实环保技术，减少施工过程中可能出现的环境污染问题；加强对施工现场污染源的监管和治理，选用高效节能的设备和环保材料，降低对自然生态系统的破坏；制定详细的计划，推动资源的循环利用和废弃物的合理处理，为绿色施工提供技术支持^[4]。另外，还要对环境管理效果进行评估和优化，确保可持续发展目标能够顺利实现，力求在水利工程建设中打造长远的生态价值，保护好自然环境，注重生态平衡。

3 水利工程施工进度控制技术细节

3.1 工程进度计划的编制与调整

制定和修正工程进度计划对于水利工程施工现场管理来说非常重要。制定一份严谨合理的进度计划，是保证施工能够顺利进行的基本条件，规划时必须全面考虑工程的具体特点、可用资源以及周围环境等各种因素。设计进度计划时需要明确结合工程的总目标，将施工任务分解成小部分，清楚地列出每个任务的时间点和操作顺序，还要确定资源分配是否合理和匹配。制定计划的时候，需要深入研究关键路径，细致地把控重要时间节点，尽量降低工期延误可能带来的风险。调整进度安排的目的是妥善处理施工过程中遇到的突发状况或者外部环境发生变化所引发的必要应对措施，具体内容包括合理分配施工资源和有效调整任务的执行顺序。调整方案要根据现场的实际情况来详细设计，切实保障工程不会由于一些小问题而耽误整体的进度安排。制定合理的进度计划和调整措施可以有效提高工程管理的准确性和应对突发情况的能力，有助于水利工程施工顺利推进，实现项目最终目标。

3.2 重要节点的效率优化

改进关键节点的效能是保障水利工程施工进度维持稳固并且高质运行的重要因素。要注重施工过程中的核心环节，通过细致的计划制定和合理的资源分配来达成既定目标，提高整体效能。关于施工节点的安排，需要进行清晰的划分，清楚地列出每一个关键节点的具体时间规划、任务内容以及资源需求的详细情况，采用现代化的管理工具来落实节点的实时监测和合理调整，避免产生资源浪费或者工期延误的问题。增加关键节点的人员配置和设备投入的力度，保障施工过程中必要的劳动强度和机械设备的支持力度得到满足。

考虑到工程项目的实际情况，运用先进的信息技术手段，如施工信息管理系统，实现数据共享和团队协作，提高整体工作效率^[5]。对于关键节点的改进方案，需要参考过去丰富的施工经验，通过灵活的效果评估机制来开展完善和优化工作。通过以上一系列具体措施的实施，施工效能将会得到明显提高，最终助力工程项目的顺利推动，建立更加稳固的基础保障。

3.3 风险评估与应对措施

风险评估在进度控制中非常关键，其核心是对潜在的施工进度风险进行全面识别与分析，并实施有力的应对措施。风险源涵盖天气变化、设备故障、材料供应不及时等，必须运用合理的评估方法把风险等级数值化。针对高风险项，可通过拟定备用计划、资源迅捷调度以及项目分阶段检查等措施进行处理，保证工程进度免受影响。风险管理的贯彻需匹配完备的监控机制，以即时了解施工动态，借助预警系统以及数据反馈，提升应对方案的匹配度与实施效率，保障工程施工顺畅进行。

4 水利工程施工质量安全监督的实施细则

4.1 施工质量标准与检测

施工质量标准与检测是保证水利工程施工现场管理技术高效执行的核心环节^[6]。结合水利工程的特点，制定合理的质量标准，并综合考虑工程规模、建设周期和环境条件等因素，保证工程建设符合设计要求和技术规范。

质量检测必须贯穿施工全过程，通过严格的工序自查、衔接检查以及取样检测等方式，对施工工艺、材料质量和设备性能进行详细评价。在实际操作中，应该确保检测手段的先进性与准确性，实现数据的即时取得与分析，确保检测结果的可靠性。为了保证施工质量监管措施的落实效果，需要明确质量监督责任制，建立多方参与的合作机制，加强对检测环节的即时监督。根据相关质量标准体系，对检测过程中发现的缺陷和问题制定详细的改善计划，进而保障工程质量的稳定性与耐久性。施工质量标准与检测的落实能够有效规避隐性质量问题，为水利工程的稳定运行奠定坚实的基础。严格的质量标准与合理的检测流程是提高工程整体质量的关键保证。

4.2 应急预案的构建与执行

应急预案的构建与执行是质量安全监督的关键环节。应急预案必须依据施工现场具体情况拟定，涵盖

风险识别、事故防范措施以及应急响应流程，通过定期练习保障预案的可行性和执行力。在实际推行过程中，应当参照突发状况迅速修正，并定期归纳经验以完善预案体系，提高突发事件的应对能力，保证施工现场质量与安全管理的高效性。

5 结束语

以水利工程施工现场管理技术的细致分析为基础，结合具体案例分析验证，改进施工管理策略对提升工程质量的整体效率起着非常关键的作用。通过合理的进度管理、加强对质量和安全的监管工作，以及运用严谨合理的环保措施，不仅可以保障工程项目顺利进行，也能有效推动各种资源的合理应用以及生态环境的可持续发展。尽管通过研究和现实实践已经获得了一些阶段性成果，但水利工程施工现场管理仍面临许多系统性挑战，并存在显著的不足之处。现场管理的应对能力能不能适合苛刻环境、新技术与传统管理模式如何更优融合，等等，这些问题仍需进行更深入的研究和探索。未来的有关研究必须重视管理方法论的优化和完善，努力探索更加严谨、更加系统的管理思路，同时积极应用先进的数字化工具，如物联网技术以及大数据分析技术，这些工具对施工现场实施即时监测和严谨决策起到重要作用。此外，还需大力推动不同学科之间的联合研究，通过多方协作来解决施工管理中遇到的各种复杂难题，找到更全面的思考角度和具体的解决措施，进而有效提升水利工程施工现场管理的标准化水平和一致性。

参考文献：

- [1] 章猛,苏学昌,邵伟春.水利工程施工现场环境保护措施研究[J].中国房地产业,2022(31):176-179.
- [2] 孟贤达.水利工程施工现场环境保护措施探析[J].新型工业化,2022,12(02):156-157.
- [3] 冯于纯.水利工程施工现场管理技术要点分析[J].砖瓦世界,2022(20):178-180.
- [4] 张继永,刘霞.水利工程施工现场管理技术要点分析[J].水上安全,2023(15):133-135.
- [5] 刘勋.水利工程施工现场管理技术要点分析[J].水电快报,2021,42(S1):58-59.
- [6] 宋朝峰.水利工程施工现场管理技术要点研究[J].黑龙江水利科技,2020,48(07):195-196.

环保型沥青材料在路面养护施工中的应用

宋秋禾

(宁夏交通建设股份有限公司, 宁夏 银川 750000)

摘要 随着交通量增长和公路网扩张, 传统沥青材料在施工和使用过程中暴露出高能耗、高污染、资源浪费等问题。环保型沥青材料在当前已成为推动公路养护绿色转型的关键技术, 其应用不仅能降低挥发性有机化合物(VOCs)排放、减少废弃物产生、提升材料循环利用率, 符合“双碳”目标要求, 还能降低养护成本、延长道路使用寿命, 经济和环境效益显著, 值得推广应用。

关键词 环保型沥青; 路面养护施工; 标杆工程

中图分类号: U414; U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.030

0 引言

我国作为全球交通网络规模最大的国家, 公路总里程已突破540万公里, 然而长期依赖以热拌工艺与石油基材料为主的传统沥青路面养护方式, 不仅导致施工过程能耗高、碳排放量大(占交通运输领域总排放量的15%以上), 还因废旧沥青混合料(RAP)回收利用率不足30%, 引发每年超千万吨的固废堆积问题。环保型沥青材料作为破解这一难题的关键技术, 通过引入废旧轮胎胶粉、再生剂、温拌添加剂等环保组分, 结合就地热再生、冷拌冷铺等低碳工艺, 显著降低了施工过程中的能源消耗与污染物排放, 降低了天然砂石开采量和沥青消耗, 部分新型环保沥青(如净味沥青)还具有抑制挥发性有机物(VOCs)和颗粒物(PM)排放功能, 为全国交通基础设施的绿色升级提供参考, 因此值得就其在路面养护中的技术创新、实践成效与推广策略进行研究与探讨。

表1 部分环保型沥青材料的类型、工艺、优势及应用一览表

材料类型	原料与工艺	核心优势	典型应用场景
净味环保沥青	石油沥青+净味添加剂 (化学吸附/反应)	通过添加净味添加剂或优化工艺, VOCs 排放量≤50 mg/m ³ , 远低于国标 (200 mg/m ³), 无刺鼻气味	城市道路、旅游景区、 公路隧道
橡胶沥青	废旧轮胎胶粉+基质 沥青+交联剂	抗车辙、抗疲劳, 降噪3~5分贝, 软化点达 80 °C以上, 优于传统SBS改性沥青(75 °C)	高速公路应力 吸收层、表面层
生物基沥青	植物油、可再生生物柴油	碳足迹降低50%以上, 可完全降解, -30 °C 弯曲应变达6 000 με, 适应严寒地区	市政道路、生态 园区道路
再生沥青	旧路面铣刨料+再生剂	资源循环率达90%, 成本降低20%~30%	国省道修复、农村 公路“白改黑”

长路面寿命，可进一步压缩造价，减少养护频率，间接降低全生命周期能耗；（2）资源循环利用。环保型沥青材料通过回收废旧轮胎胶粉减少固废存量，直接或间接减少对石油资源的依赖，降低碳排放，符合当前的绿色发展国策；（3）施工工艺优化。以低温拌和技术为代表的环保型沥青材料施工工艺可减少能源消耗，有效降低 VOCs 排放量，减少路面养护施工对周边环境的影响，在社会上反响很好。

2 环保型沥青材料在路面养护施工中的应用

2.1 环保型沥青材料在高速公路养护施工中的应用

山东高速新材料集团研发了一种环保稳定型橡胶沥青，其核心原料为废旧轮胎胶粉颗粒，通过高效化学助剂实现体系均一化。该材料在储存稳定性、热储稳定性及流变性能（PG82-28 标准）上显著优于传统橡胶沥青，在东青高速改扩建项目中 K69+300-K74+300 路段（占总路段 11.7%），采用该橡胶沥青与间断级配矿料组成橡胶沥青混合料，沥青用量与施工工艺不变的条件下无需调整设备或流程，铺筑效果完全满足建设质量要求，显著提升了路面弹性与抗重荷能力，以及路面抗疲劳开裂、抗车辙能力，验证了材料在重载交通、复杂气候条件下的适应性，为同类工程提供可参考的经验。该材料不但动稳定度优于同级配 SBS 改性沥青混合料，而且较 SBS 改性沥青每吨成本降低 200~300 元，同时减少木质素纤维使用，能耗降低 50%，有害气体排放减少超 50%，有效降低工程造价的同时获得了显著的环保效益^[1]。

2.2 环保型沥青材料在国省道养护施工中的应用

G105 京澳线修复工程济南段养护工程中使用一种由以废旧轮胎胶粉为核心原料，经化学助剂改性与特殊工艺制成的环保稳定型橡胶沥青，其与无纤维 SMA-13 可构成混合料，大量简化了拌合工艺。本次实践中沥青配比达到 6.0% 时，与传统工艺最低标准持平，铺筑效果即可达到设计要求，原材料成本下降约 15% 左右，且高低温性能优异，路面抗裂性及耐老化性全面优于传统材料。养护后该路段服役寿命延长，疲劳性能更优，综合养护成本降低 30%~50%，节省大量公路养护资金，间接经济效益显著，实现经济效益与环境效益双提升。

2.3 环保型沥青材料在市政道路养护施工中的应用

环保型沥青材料在市政道路养护施工中适用于不规则坑槽，支持“圆坑方补、斜坑正补”，可提升施工灵活性，在低温环境下仍能保持良好和易性，压实后稳定性强。如在寒冷地区 0 ℃ 环境下可应用，施工无需高温加热，突破传统热沥青季节性限制，适用于

预防性养护；而在 40 ℃ 的湿热多雨地区，其耐候性强、抗水损害能力突出的特点显著，利用流动性深入裂缝内部，形成高强度粘结层，有效防止水分渗入路面基层，降低重复修补频率。例如：三明市区道路养护通过应用阴离子乳化沥青材料，不受阴雨、高温气候影响，支持全天候作业，结合机械化施工提升效率，单日施工面积可达 1.5 万 m²，快速固化后 30 分钟内即可开放交通，有效缓解了交通压力，且施工过程实现了零 VOC 排放，减少了扰民现象，获得了稳定的环保效益^[2]。

3 环保型沥青材料在路面养护施工中推广的阻碍

3.1 技术标准覆盖性不强

完善环保型沥青材料的行业标准可以促进设备制造商、材料供应商、施工企业等产业链环节协同创新，推动低温拌和设备、净味剂生产等配套技术发展。但截止到目前，我国对环保型沥青材料性能评价体系尚未完善。2025 年交通运输部颁布《低温改性沥青》（JT/T 1540—2025）行业标准，规定了低温改性沥青分类、型号、技术要求、试验方法等，明确要求通过低温改性技术降低施工温度（120~160 ℃），减少能源消耗和污染物排放，也限制了净味沥青有害物质含量，设定气味控制测试方法，减少施工及使用中的异味污染等标准，但重点倾向于环保性指标而非技术性指标，对其他环保型沥青如再生沥青的黏度、弹性模量等指标未有提及，生物基沥青等特种沥青的标准仍留有一定空白，容易导致部分工程因沥青配比控制不精准出现路面强度不足问题。应进一步细化技术标准，为市场提供依据。

3.2 应用范围不够普遍

目前我国大多数省份的路面养护施工中，均不同程度地应用了低温改性沥青材料，也客观上验证了其应用于不同地理气候环境下的普适性与可靠性^[3]。但其应用多集中于高速公路及城市快速路，国省道应用占比不足 15%，推广缓慢。以净味沥青为例，目前年消费量约 600 万吨，这远远不能支撑我国路面养护施工的庞大需求体量。目前在区域试点中，规模应用也略显不足，目前仅有重庆市直接提出 2025 年高速公路废旧路面材料循环利用率达 100%，在其它省份中尚未有直接提出应用目标，由此可见环保型沥青材料在中、低等级公路面层铺筑中的采用率还需进一步打开应用前景。

4 环保型沥青材料在路面养护施工中的推广策略

4.1 落实关于环保型沥青材料的专项补贴政策

环保型沥青材料关乎高耗能行业节能改造、固废资源化利用等“十四五”绿色低碳转型目标，其规模

化应用可通过国家或地方性专项补贴政策进一步推广，可采取设备投资补贴、节能改造补贴、资源循环利用补贴等方式，对环保型沥青从生产到实际应用给予分类支持，降低业主单位养护成本：（1）生产企业补贴。对使用废胎胶粉生产橡胶改性沥青的企业，补贴胶粉采购成本，降低原材料费用；（2）技术应用补贴。对沥青生产企业实施废气处理设备（如吸附—脱附—催化燃烧装置）升级的，给予一定投资补贴，对采用低温改性沥青技术（如USP低温改性沥青）的企业，补贴其低温拌和、摊铺设备的购置成本；（3）节能减排补贴。可对通过环保沥青技术实现年度碳排放强度下降5%以上的企业给予碳减排先进奖励，或给予专项优惠政策，等等。当前，我国已有河北、海南等少数省份直接、间接推广沥青再生技术，或对废旧轮胎回收利用企业给予税收优惠，或要求建筑垃圾资源化为沥青混合料中再生骨料，但这些还远远不够，各省应冀通过分类标准与补贴政策挂钩，优先支持符合行业标准的环保型沥青产品，逐渐将不符合环保要求的传统材料淘汰出养护工程供应链^[4]。

4.2 进一步完善环保型沥青的行业标准

随着我国“碳达峰、碳中和”目标的提出，通过制定行业标准推广环保型沥青材料，可有效规范技术路径、提升产品质量、促进市场应用。《低温改性沥青》（JT/T 1540—2025）在核心施工工艺标准方面如降低施工温度（120~160℃）等为行业标准的规范推进了一大步，同时山东高速集团在新型橡胶沥青的技术指标如摊铺温度、规定针入度、延度和软化点等核心参数的设计，在基层处理平整度误差、同步洒布沥青与碎石量、初压速度等关键施工工艺指标方面积累的经验，也进一步加速了环保型沥青材料应用标准的推进。在这些经验基础上，交通运输部应推动制定《环保型沥青材料性能评价规范》，明确再生沥青、橡胶沥青等材料的明确PG分级、动稳定度等核心指标，建立明确的施工工艺规范，确保环保型沥青材料的性能稳定和施工质量可控性。

4.3 标杆工程的示范作用

标杆工程通常采用行业领先的技术和工艺，提升环保沥青材料在路面养护施工中的示范性，这有助于引导更多公路养护工程采用环保型沥青材料，实现绿色施工。标杆工程应建立一系列明确的技术管理规范及应用方案，有代表性的施工流程和技术要求，并为其他公路养护工程提供可复制、可借鉴的经验^[5]。例如：中国石化自主开发的净味环保沥青的温拌沥青施工温度较传统热拌沥青降低30~40℃，能耗减少30%，

温室气体排放降低40%以上，在广州增城新塘大道的养护施工中应用后 VOCs 等污染物排放总体减少40%~60%，现场异味明显降低，适用于广东地区60%以上的城市道路、公路隧道、机场路面等场景，目前其已为华南地区低温或紧急抢修工程打下了良好的示范性基础，推动更多公路养护工程采用环保型沥青材料，目前粤港澳大湾区路面养护施工计划已将这种环保型沥青纳入应用计划之中，展现了推广示范对路面养护施工绿色、可持续发展的引领作用。

4.4 市场培育与产业链协同

上下游产业链的协同可以为环保型沥青材料的推广提供样板化的平台，如山东高速集团由创新研究院牵头，联合基础设施建设公司、新材料集团等单位组建专班，对超耐久配方优化、低成本胶粉改性技术，生产设备改造等工作进行了专班运营，建成400吨/天生产线，灵活生产橡胶改性沥青、复合改性沥青，提升规模化生产能力，材料成本再降10%~20%，目标寿命从15年延长至20年，同时降低施工温度至120℃以下，进一步减少能耗。有鉴于此，各地可在环保型沥青的产业链协同方面探索“材料供应+施工服务+性能担保+推广租赁”一体化模式，针对中小型养护单位，由材料企业承担部分质量风险，提供环保型沥青拌合设备租赁服务，降低初期投入，增强业主单位采用意愿。

5 结束语

在“双碳”目标与新型城镇化双重驱动下，环保型沥青材料已从可选方案转变为基础设施建设的必然选择。其技术成熟度、经济性、环保性三重优势，正推动行业从“规模扩张”向“绿色创新”转型。未来随着政策激励、标准完善与市场培育的深化，环保型沥青有望成为中国基建“绿色化”的核心载体，其技术标准必将进一步发展向细节规范，融入并引领全球标准体系，提升我国在全球环保领域的地位。

参考文献：

- [1] 丁鑫华,张龙杰,韦钊延,等.绿色环保型钢渣沥青混凝土的性能研究及应用[J].建筑施工,2025,47(01):85-89.
- [2] 黄万身,叶圣洪,曾健,等.环保型高性能沥青混合料在高速公路长寿命路面中的应用与性能评估[J].西部交通科技,2025(03):24-27.
- [3] 张琨.试论道桥施工中路面病害及维护技术的有效运用[J].居业,2025(08):67-69.
- [4] 孙政.改性沥青新材料在公路道路中的应用[J].运输经理世界,2024(30):159-161.
- [5] 窦国涛.新型环保改性沥青在路面施工中的应用技术[J].山西建筑,2022,48(10):121-123.

城镇污水管网非开挖修复工程 计价依据适用性探讨

吕文杰，邹小华

(广东桂海建筑工程有限公司，广东 佛山 528226)

摘要 随着城市化进程的加快，城镇污水管网出现老化、破损等情况，非开挖修复技术作为一种高效且环保的修复方式得到广泛应用，但目前缺乏针对非开挖修复工程的计量计价标准。本文从非开挖修复技术的特点出发，分析现行计价体系中存在的问题，结合实际工程案例，为非开挖修复工程计价依据在不同应用场景下的适用性提出建议，以期为行业规范化管理和投资决策提供参考。

关键词 非开挖修复；排水管网；工程计价；工艺适用性；城市基础设施

中图分类号：TU99

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.031

0 引言

非开挖修复技术凭借高效、环保的优点，逐步成为城市地下管网的主流修复方式，但广东省内现行工程计价依据尚未充分包含非开挖技术的特点，造成计价偏差、工程投资评估失真等问题，这不仅增加了工程成本，还影响了技术推广的积极性。本文通过对非开挖修复工程实际需求和计价体系的适用性进行分析，并提出优化建议，以期为推动非开挖技术在广东省的规范化应用和可持续发展提供借鉴。

1 非开挖修复技术概述

1.1 非开挖修复的定义与分类

非开挖修复技术是一种无需大量开挖地面，仅通过管道内部作业，对既有地下管网系统进行修复、加固或置换的施工手段。与传统开挖修复方式相比，该技术具备地表扰动小、施工周期短、环保性能强等显著优势，更适用于城市道路、建筑密集区及交通繁忙路段的管网更新维护。根据管道内修复施工项目的不同，非开挖修复施工项目大致可分为管道结构性修复、管道内异物处理及其他措施项目三大类别：管道结构性修复指能全面恢复或提升管道结构强度的方法，局部树脂固化法修复、CIPP 紫外光固化法修复、HDPE 短管内衬法修复及修复后的管道外化学注浆土体固化等均属此类；管道内异物处理主要包括管道内管道切割树根异物、清除混凝土固结物和障碍物、管道塌陷处理、管道清淤及 CCTV 检测等；其他措施项目包括管道预处理、检测评估及更新修复等^[1]。

1.2 主要非开挖结构性修复技术介绍

当前在城镇污水管网领域应用最为广泛的非开挖修复技术主要包括局部树脂固化法、CIPP 紫外光固化

法、短管内衬法等。局部树脂固化法又名点状原位固化修复法 (Point Repair/ 点修法)，是一种用于管道局部缺陷修复的树脂内衬工艺，核心思路是：将树脂浸渍的玻璃纤维补片固定在修复气囊上并精确送到管道缺陷处，通过充气压紧并在原位固化，使其与管壁牢固结合，恢复局部强度与密封性。这种方法能够显著增强管道的承压能力，该技术适用于不同材质和口径的管道，同时树脂浸渍的玻璃纤维补片可以在常温下定时固化，具有适应性强、连续修复能力突出的优点。CIPP 紫外光固化法 (Ultraviolet Cured-in-Place Pipe, UV-CIPP) 则是通过将浸渍光固化树脂的软管内衬（通常为玻璃纤维增强软管）牵引或反转进管道后，在内部充气成型并使用紫外光灯组进行固化，从而在原管道内形成新的高强度内衬管。对于原有管内缺陷位置较多、需要整段修复的情况，这种施工工艺比局部树脂固化法（点修法）更高效，固化过程的可控性更高，尤其适合在城市中心区对中小口径管道进行整段修复。HDPE 短管内衬法是通过将比原有管道管径稍小的 HDPE 短管逐节推入或拉入旧管内，形成管内管的状态，由新管承接旧管的结构功能，该工艺局部或整段修复均可，短管段易搬运，施工灵活，无需等待树脂固化，施工快速，同时施工成本更低，适合用于维护性修复或者过渡修复场景^[2]。

1.3 非开挖修复在城镇污水管网中的应用现状

近年来，随着城市管网运行年限的普遍增长以及排水系统负荷的不断加大，非开挖修复在我国城镇污水管网中的应用范围持续拓展。目前，广东省内的广州、深圳、佛山、东莞等主要城市已将非开挖修复作为管网更新改造的优先选项，特别是在“雨污分流”改造、

老城区地下空间治理等工程中发挥了重要作用。从应用模式来看,一线城市如广州、深圳在非开挖修复技术引进与应用方面已形成系统化操作流程与地方技术指引,佛山等新一线城市也开始推广UV-CIPP和各种内衬法等简便型非开挖技术,并逐步构建检测、设计、施工修复、评估的闭环管理体系,但在实际实施中仍存在技术选型不规范、造价认定不统一、计价标准滞后等问题,仍需完善技术体系与标准建设,统一计量计价规范,以提高非开挖修复在城镇污水管网中的整体适应性与工程质量水平^[3]。

2 现行非开挖修复工程计价依据体系分析

2.1 主要计价依据种类及来源(定额、清单等)

当前我国工程造价计价依据主要有工程量清单计价模式与定额计价模式两种,工程量清单计价按照《建设工程工程量清单计价规范》(GB 50500—2013)施行,是政府投资项目的主流计价方式,注重量价分离与市场竞争。关于管道非开挖修复工程,广东省地方定额体系主要包括《广东省市政工程综合定额(2018)》及《广东省排水管非开挖修复工程预算定额2019》,其中以广东非开挖技术协会发布的《广东省排水管非开挖修复工程预算定额2019》及相关的材料、检测指导价文件为全广东省内唯一的管道非开挖修复工程针对性计价文件^[4]。

2.2 现行非开挖修复工程定额在计价体系中的体现情况

目前,广东非开挖技术协会发布的《广东省排水管非开挖修复工程预算定额2019》,虽然囊括了市面上常见的各种非开挖修复项目,但其存在类似项目特征不明确,计量单位未能对应实际的施工状况,同一施工方法的不同的材料规格未详细划分,部分工艺定额里的人材机含量与实际需要明显偏离,与《广东省市政工程综合定额(2018)》已有的同类定额对比价格明显偏高等问题^[5]。具体体现为:以立方米计算的混凝土固结物清理和以平方米计算的管道结垢物清理价格差异明显且未能明确定义划分;树根清理定额按米计算,但不符合现场统计方式;部分内衬法及土体化学注浆定额未能针对具体内衬材料和注浆材料进行细分,导致采用低价材料似乎也能对应定额要求;《广东省排水管非开挖修复工程预算定额2019》的管道清淤项目单价明显高于《广东省市政工程综合定额(2018)》;潜水员台班定额为配备5人持证小组,明显超出相关施工规范和实际需要。

2.3 现有计价依据适用性存在的问题与局限

因《广东省排水管非开挖修复工程预算定额2019》的发布单位为广东非开挖技术协会,修编单位为众多

相关施工单位及材料商,属于企业定额类型,未能取得政府建设部门或造价站正式认可,导致此定额的合法性存疑,同时此定额中部分材料单价未有造价站发布的对应信息价,又因非开挖修复在全国范围内仍属于新兴行业,相关材料、机械需求量较小,导致市场询价容易失真。部分城市的建设单位在实施非开挖修复工程时,提前考虑到此定额的价格虚高,在编制招标控制价或在招标文件中要求将部分非开挖定额的人材机含量按一定的比例下浮,但同样没有合理的下浮标准,实际执行中不同城市、不同项目间的执行标准差别较大。特别是在跨区域多标段或多个建设资金出资方联合出资的情况下,造价对比和工程量认定容易产生争议,影响工程管理的连续性与可控性^[6]。

3 典型非开挖修复工程计价案例分析

3.1 案例分析

以2024年佛山市南海区某污水管网缺陷修复项目为实例,施工区域处于主干道及居民区交界处,交通组织标准较高。此项目以非开挖修复为主、开挖修复为辅,对本行政区域内已运行超25年,存在塌陷、树根或异物入侵、错口、内壁腐蚀问题的DN300—DN800管道进行局部或者整段修复,最终修复点位165个。结算工程量清单中列有CCTV检测、管道淤泥清理、管内树根清理、气囊管堵安装及拆除、土体化学注浆、管道变形内衬修复、管道修复点状原位固化法等主要项目,具体见表1。

表1 佛山市南海区某污水管网缺陷修复项目DN400管道非开挖修复子项目清单

序号	项目名称	单位	工程量	单价(元)	合价(元)
1	CCTV检测	m	38	23.35	887.3
2	管道淤泥清理	m	38	47.92	1 820.96
3	管内树根清理	m	1	3 932.81	3 932.81
4	气囊管堵安装及拆除	只	4	1 595.69	6 382.76
5	土体化学注浆	m ³	13.19	1 730.14	22 820.55
6	管道变形内衬修复	m ²	1.26	1 776.01	2 237.77
7	管道修复点状原位固化法	点	3	2 708.14	8 124.42
合计					46 205.57

与传统开挖修复DN400管道造价(约1 000~1 200元/m)相比较,非开挖修复的单价虽略高,却节省了道路恢复、交通维护和大规模土方开挖等工序,

整体工期缩短超过 60%，对环境和交通的影响明显减轻。

3.2 不同修复工艺的计价差异性分析

在佛山及周边城市的市政管网非开挖修复工程中，局部树脂固化法修复、CIPP 紫外光固化法修复、其他材料内衬法修复是应用最广、技术成熟度较高的三种修复方式，其造价差异与工艺特点关系密切。局部树脂固化法修复工艺以树脂浸渍软管为主要材料，单价一般在 2 000 ~ 3 000 元 / 点，每点约 0.6 ~ 0.8 m 长，适合中大口径（DN400 以上）、适用于局部缺陷的管道内单点维修，单点结构增强效果显著。CIPP 紫外光固化法修复单价一般在 950 元（DN200）~ 2 500 元（DN800）/m，采用玻璃纤维增强衬管，并利用紫外线灯组进行固化，其固化速度可达每小时 35 m，现场占道时间短、施工干扰小，适用于交通密集区域的中小管径管道的通长修复。其他材料内衬法修复则包括短管内衬、钢圈内衬、不锈钢快速锁等，施工灵活，工艺简单，材料运输方便，同管径的修复单价均低于以上两种修复方式，但提升结构强度效果较低，更多用于临时紧急修复。总体而言，局部树脂固化法修复与 CIPP 紫外光固化法修复在结构性修复中占据主导，而其他材料内衬法修复适用于临时紧急修复。

3.3 实际工程中常见的漏项与误项情况分析

在广东省的非开挖修复工程实施与计价过程中，常见漏项主要集中在施工前期清淤、CCTV 检测及其他防护措施项目的缺失，施工前对障碍物、结垢物清理、内衬材料及异物切除等未在工程量清单中预算充足，导致承包单位需自行消化这部分风险。在市区主干道或交通繁忙区域施工时，交通疏导人员及设施、临时围挡搭设及夜间施工补贴等费用若未计列，容易造成后期追加或结算争议，这部分费用在部分项目中可占到总造价的 5% ~ 8%。

误项问题则多出现在定额套用及参数匹配环节，例如：将不锈钢快速锁与钢圈内衬混用定额，障碍物与结垢物判定错误，DN800 及以上管道的人工进入清理与 DN800 以下管道的机器人进入清理未区分计价，或将加热固化的 CIPP 工艺套用 UV-CIPP 工艺的价格子目等，都会导致造价差异超过 40%。在某些情况下，因设计文件或招标文件中对修复工艺描述不够清晰，承包方在投标阶段可能会基于经验或市场惯例套用错误的定额标准，最终在结算时引发争议。为减少此类风险，应在清单编制及预算审核阶段强化工艺识别与参数核对机制，确保管径、修复厚度、固化方式等核心指标与定额匹配，并在招投标文件中附加技术说明书与计价依据表，提升造价测算的科学性和可执行性。

4 非开挖修复计价依据的优化建议

4.1 建立独立的非开挖修复工程定额子目

为适应非开挖技术在污水管网修复中的广泛应用，应在现有市政工程定额体系中增设独立的非开挖修复章节，将各种结构性修复法的主要工艺做法纳入其中，根据管径（如 DN200 ~ DN1500）、衬层厚度（细分至每 1 mm）、施工段长、固化方式等核心参数进行细化分项，每一子目都要明确材料构成、施工工艺流程及相关损耗指标，避免“套用类目”产生计价失真的问题。

4.2 强化工程实践反馈与技术标准联动机制，发布统一验收用表

为有效解决“定额滞后于工艺”的突出矛盾，需要建立一套科学、可持续的从工程实践到定额标准的反馈联动机制，随着非开挖修复技术的快速发展，施工工艺不断更新，若定额体系更新滞后，会导致造价依据失真、工程成本控制困难。因此，应以一线城市的大型市政非开挖修复工程为基础，定期采集施工过程信息，围绕工艺流程、设备配置、人工投入、材料消耗、工时分布等方面进行深入梳理，建立技术经济数据档案库，再向省内二、三线城市推广成功经验，同时为后续定额修订提供真实、详实的数据支持。

5 结束语

非开挖修复技术已成为城镇污水管网更新改造的关键手段，现行计价体系在定额子目设定、价格机制及适应性等方面仍存在不少缺陷。随着非开挖修复技术的不断推广，迫切需要确立非开挖工程验收规范及统一用表，构建完善的定额体系、明确非开挖修复定额的法律地位，同时引入主要人材机的价格动态更新机制，实现技术标准与工程计价的有效联动，以此推动非开挖修复工程健康、有序地发展，保障城市基础设施建设的质量与效益。

参考文献：

- [1] 陈俊. 非开挖修复技术在某排水管道修复工程中的应用 [J]. 中华传奇, 2023(20):106-108.
- [2] 李雪妮, 李博. 市政管网施工中非开挖技术应用效果分析 [C]//2025 智慧设计与建造经验交流会论文集, 2025.
- [3] 齐玮强. 基于污水管网缺陷管段的非开挖修复施工技术 [J]. 中国住宅设施, 2025(06):205-207.
- [4] 李元元, 赵伟琪, 周超. 城市排水管道非开挖修复技术在南方某地区的应用 [J]. 城市道桥与防洪, 2023(04):142-145.
- [5] 杜倩. 浅谈非开挖修复技术在市政排水管网修复中的应用 [J]. 工程管理与技术讨论, 2024, 06(15):34-36.
- [6] 甘帅, 陈辉虎, 陈敏, 等. 城镇排水管网非开挖修复技术研究与应用 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53(22):147-152.

高层建筑桩基础设计和施工阶段的结构安全问题探析

尹宏志¹, 胡五兵²

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

摘要 高层建筑桩基础是建筑结构里承担承重功能的关键部分, 设计方案的合理性、施工过程质量控制的落实情况, 直接决定了整体建筑结构安全性能的稳定性与使用寿命的长短。高层建筑工程桩基础设计阶段常存在地质勘察数据精度达不到设计需求、荷载计算有偏差、桩型选择和工程实际条件适配性低等问题; 施工阶段则存在成孔质量控制措施落实不足、钢筋笼安装产生偏差、混凝土浇筑出现缺陷等安全隐患。本文结合工程实践经验与当前新型勘察技术、施工工艺, 提出针对性安全管控措施, 以期为高层建筑桩基础设计和施工阶段的结构安全保障提供具有可操作性的参考方案, 进而助力提升高层建筑工程整体安全水平。

关键词 高层建筑桩基础设计; 地质勘察数据; 荷载计算; 桩型选择; 结构安全

中图分类号: TU973

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.032

0 引言

城市化进程持续推进, 高层建筑建设数量不断增加, 这类建筑有着高度大、结构承受荷载大、结构体系复杂的特点, 这对基础工程的承载能力和稳定性提出更严格的要求。桩基础因具备承载能力强、结构沉降量小、对不同地质条件适应性广的优势, 成为高层建筑工程中常用的主要形式。高层建筑桩基础工程实施包含地质条件勘察、设计方案计算、施工工艺选择等多个环节, 其中任一环节出现问题, 都可能影响桩基础的结构安全, 进而影响整个建筑工程的安全性能。因此, 深入分析高层建筑桩基础设计和施工阶段的结构安全问题, 提出科学有效的管控措施, 对保障高层建筑工程安全具有重要的现实意义。

1 高层建筑桩基础设计阶段的结构安全问题分析

1.1 地质勘察数据精度不足, 影响设计参数合理性

地质勘察数据的精度是桩基础设计方案科学性的前提。当前部分设计项目中, 勘察单位为缩短工期、降低成本, 减少勘察孔数量或缩短勘察深度, 导致勘察数据无法全面反映场地地质分层、岩土力学性能参数及地下水位变化规律, 使设计人员难以准确掌握场地实际地质条件。部分勘察报告对岩土参数取值笼统, 未结合场地实际针对性分析, 对不同深度土层的侧摩阻力系数、端阻力特征值等关键参数统一取值, 忽视土层物理力学性能差异, 造成桩基础承载力计算结果

与实际偏差较大, 影响设计的安全性与经济性平衡。

1.2 荷载计算偏差, 导致桩基础承载能力匹配不足

高层建筑桩基础需承受上部结构传递的竖向荷载、水平荷载及地震作用, 荷载计算准确性直接影响设计合理性。

在部分项目设计中, 设计人员对上部结构荷载计算存在偏差, 一方面对活荷载、风荷载等可变荷载取值不符合规范, 未按建筑使用功能确定活荷载标准值, 或对风荷载的体型系数、风压高度变化系数取值不当, 导致荷载计算结果偏小; 另一方面忽视结构自重计算精度, 对墙体、楼板等构件自重计算遗漏部分荷载, 或对混凝土密度、钢材重度等材料参数取值偏差, 使总荷载计算值低于实际, 导致桩基础超载^[1]。

1.3 桩型选择与场地条件适配性低, 降低结构安全储备

桩型选择需结合场地地质条件、建筑荷载要求及施工环境综合确定, 直接关系到结构安全储备。当前部分设计项目中, 设计人员对桩型选择合理性重视不足, 存在经验化设计现象, 未按场地实际进行多方案比选, 导致所选桩型与场地条件适配性低。部分设计人员对新型桩型性能特点了解不足, 仍采用传统桩型设计, 无法发挥新型桩型优势, 不仅可能提高工程成本, 还可能因桩群布置过密影响地基土稳定性, 降低结构安全储备。

2 高层建筑桩基础施工阶段的结构安全问题分析

2.1 成孔质量控制不当，影响桩基础力学性能

成孔质量直接决定了桩身完整性与承载能力。在施工过程中，成孔质量控制不当问题突出：一是成孔垂直度偏差过大，因施工设备安装不平整、钻杆刚度不足或钻进速度控制不当，导致桩孔垂直度超规范允许范围，使桩身受力不均；二是孔底沉渣厚度超标，因清孔不彻底或清孔后放置时间过长，孔底残留杂质，减少桩端与持力层接触面积。

2.2 钢筋笼制作与安装偏差，削弱桩身结构强度

钢筋笼作为桩身主要受力构件，其制作与安装质量直接影响桩身结构强度。在施工过程中，钢筋笼制作常存在钢筋规格不符、箍筋间距偏差大、焊接质量不合格等问题，导致钢筋笼抗弯、抗剪能力下降；在安装过程中，因起吊设备选型不当、起吊点设置不合理或操作不规范，易出现钢筋笼变形、偏移或上浮，使桩身受力偏心，或导致桩顶钢筋保护层厚度不足影响耐久性。

2.3 混凝土浇筑缺陷，降低桩身承载能力与耐久性

混凝土浇筑质量直接决定桩身完整性与力学性能。在施工过程中，混凝土浇筑缺陷常见，配合比设计不合理，导致混凝土强度不达标或工作性差，浇筑速度控制不当，易引发孔壁坍塌、气泡残留或冷缝。

3 高层建筑桩基础设计与施工阶段结构安全的管控措施

3.1 设计阶段：强化地质勘察管理，优化设计方案

1. 加强地质勘察过程管控，提升勘察数据精度。随着建筑行业的快速发展以及高层建筑数量的不断增加，建筑工程质量的标准也在不断提高。桩基础的设计与施工作为建筑物荷载传递至地基的关键部分，直接关系到建筑的安全性与稳定性。所以，桩基础的设计与施工过程必须达到严格的技术标准，保证可以承受施工荷载的要求，确保建筑结构的整体安全性与稳定性。针对地质勘察数据精度不足导致设计参数不合理的问题，建设单位需将地质勘察质量作为桩基础安全管控的核心，优先选择具备相应资质且有类似工程经验的勘察单位，在勘察合同中明确勘察范围、深度与技术要求，确保勘察孔覆盖场地所有地质分区，尤其是软弱夹层、断层等特殊区域，全面反映地质分层、岩土力学参数及地下水位变化规律。勘察单位应结合地质雷达、钻孔电视等先进技术与传统钻探手段，通过地质雷达连续探测地下土层分布，钻孔电视观察孔壁岩土性状，提高数据分辨率与准确性；同时对岩土参数开展现场与室内双重试验验证，如现场载荷试验确定地基承载力特征值，室内土工试验测定压缩模量、

黏聚力等参数，避免经验取值的主观偏差，为设计提供可靠地质依据^[2]。

2. 优化荷载计算方法，确保荷载与承载能力匹配。

为解决荷载计算偏差引发的承载能力不匹配问题，设计人员需依据现行建筑结构荷载规范，结合高层建筑使用功能、结构体系及地域气候与地震环境，构建精细化荷载计算模型。在竖向荷载计算中，严格区分恒荷载与活荷载，按功能区域确定活荷载标准值，同时考虑设备、装修等附加荷载；在水平荷载计算中，结合建筑高度、平面形状确定风荷载体型系数，按海拔与地貌选取风压高度变化系数，准确计算风荷载水平作用力，再依据地震设防烈度、设计基本地震加速度，用反应谱法或时程分析法计算地震荷载影响。此外，设计人员需用有限元软件建立桩基础三维受力模型，模拟荷载组合下桩身内力、桩顶沉降与位移，验证承载能力是否满足需求，修正计算偏差，避免承载不足引发安全风险。

3. 科学选择桩型与优化布置，提高结构安全储备。

为有效解决高层建筑桩基础设计与施工中的技术难题，建筑行业开始引入并推广创新技术。创新技术是指涵盖先进的理论基础、规划设计理念、施工工艺以及技术方法，乃至建筑专业知识的多学科融合应用。这些技术的发展体现在新的施工技术与方法上，包括对设计理念的更新以及专业技术的跨领域整合。为改善桩型与场地条件适配性低的问题，设计人员需建立“地质条件分析—荷载需求测算—施工可行性评估”的桩型选择体系，依据勘察报告对预制混凝土桩、钻孔灌注桩、挤扩支盘桩、PHC 管桩等进行多维度比选，优先选择技术成熟、适配性强且经济合理的桩型。同时，结合桩基础受力特性优化桩群布置，按上部荷载分布确定桩间距、桩长与桩径，避免群桩效应过强或受力集中；桩位布置需保证桩群形心与荷载合力中心重合，减少偏心受力，通过调整桩长使桩端嵌入中风化或微风化岩层等稳定持力层，提高结构安全储备以应对荷载变化^[3]。

3.2 施工阶段：加强质量管控，规范施工操作

1. 严格控制成孔质量，保障桩身基础条件。针对成孔质量不佳影响桩基础力学性能的问题，施工单位需依据勘察报告制定专项成孔方案，按土层特性选择设备与工艺。成孔前，全面调试与校准设备，检查钻杆直线度、钻头与设计孔径匹配性，确保设备稳定；平整压实场地，用水平仪调整钻机水平度，避免设备倾斜导致垂直度偏差。成孔中，用测斜仪每钻进 5 m 监测垂直度，偏差超规范 1% 时，调整钻进参数或回填重钻；成孔至设计深度后，用换浆法或抽浆法清孔，控制泥浆比重 1.15 ~ 1.25、含砂率 ≤ 8%，确保端承

桩孔底沉渣≤50 mm、摩擦桩≤100 mm，为混凝土浇筑创造条件。

2. 强化钢筋笼制作与安装质量管控，确保桩身受力性能。为解决钢筋笼制作与安装偏差削弱桩身强度的问题，施工单位需建立全流程管控机制，按设计要求采购钢筋，核查进场钢筋规格、型号、合格证与检测报告，抽样检验抗拉、屈服强度，不合格材料禁用。钢筋笼制作时，用专用工装保证主筋与箍筋间距，主筋与箍筋采用双面搭接焊，检查焊缝避免夹渣、咬边等缺陷，全数测量钢筋笼直径与长度，确保尺寸合规。起吊安装时，按钢筋笼长度与重量确定起吊点，用专用吊具防止变形，竖直缓慢下放避免碰撞孔壁；安装后用定位钢筋固定在孔口护筒，保证钢筋笼中心与桩孔中心偏差≤50 mm，混凝土浇筑前用加重块或反拉装置防止钢筋笼上浮，确保桩顶钢筋保护层厚度达标，避免锈蚀影响耐久性。

3. 优化混凝土浇筑工艺，提升桩身完整性与耐久性。针对混凝土浇筑缺陷降低桩身性能的问题，施工单位需按桩基础类型与施工环境确定配合比，水下浇筑混凝土坍落度180~220 mm，选用级配良好骨料与高效减水剂、缓凝剂，确保和易性、抗离析性与设计强度。浇筑前，检查搅拌质量，用坍落度与扩展度试验验证工作性，偏差超±20 mm的混凝土禁用。浇筑中，普通钻孔灌注桩控制浇筑速度2~3 m/h，避免过快导致孔壁坍塌或气泡残留，过慢形成冷缝；用插入式振捣器按“快插慢拔”原则振捣，振捣点梅花形布置，至表面浮浆不再下沉，避免振捣不足或过度。水下浇筑时，控制导管埋深2~6 m，过浅易形成夹泥层，过深易堵塞导管，需测量混凝土面高度及时调整，确保混凝土质量均匀完整^[4]。

3.3 全过程：建立协同管理机制，强化安全监督

1. 建立多方协同管理机制，实现设计与施工无缝衔接。为解决设计与施工脱节的管控漏洞，建设单位需牵头搭建设计、施工、监理协同平台，明确各方职责与流程，形成“设计指导—施工反馈—监理监督”闭环。设计单位施工前组织技术交底，解读图纸、设计意图、关键参数与质量要点，制定地质变化的设计调整预案；施工单位定期报送进度与质量记录，发现地质与勘察报告不符时暂停施工并反馈，待设计调整后再施工；监理单位对成孔、钢筋笼安装、混凝土浇筑等关键工序旁站监督，发现违规或隐患立即制止，要求整改并复核。设计单位派专业人员驻场，参与关键工序验收，依据实际地质与施工条件优化设计，确保设计与施工匹配。

2. 加强施工人员培训与安全教育，提升操作与安

全意识。针对施工人员操作不规范的问题，施工单位需制定系统化培训计划，按成孔、钢筋笼制作、混凝土浇筑等工序开展专项培训，邀请专家讲解工艺要点、质量标准与问题处理方法，组织实操训练提升设备操作熟练度与质量判断能力。同时定期开展安全教育，通过事故视频、现场演示普及孔壁坍塌、吊装坠落、触电等风险，教授防范与应急方法；建立安全考核奖惩制度，将安全意识、操作规范与绩效挂钩，奖励合规者，处罚违规者并再培训，从源头减少人为安全事故。

3. 采用信息化技术管控，实现质量动态监测与追溯。为提升管控精细化水平，施工单位需引入BIM、物联网技术，构建全生命周期信息化体系。设计阶段用BIM建立三维模型，分析桩位布置，检测与地下管线、周边建筑基础的碰撞风险，优化方案与流程；施工阶段用物联网传感器，将数据传至云端平台，管理人员实时查看参数，超规范时自动预警并调整，实现动态管控。同时建立质量追溯体系，数字化归档勘察报告、设计图纸、施工与检测记录，为每根桩设唯一追溯编码，便于后期质量检查、事故分析与责任认定，为结构安全提供支撑^[5]。随着新材料、新工艺及智能化技术的持续发展，桩基础设计将朝着更加高效、精细、环保的方向发展，进一步提升建筑结构的安全性与可持续性。

4 结束语

高层建筑桩基础设计与施工阶段的结构安全管理具有系统工程的属性，包含设计、施工、监督等多个关键环节，涉及建设、设计、施工、监理等多方参与主体，需要从根本上防范结构安全风险，从设计源头落实管控要求，严格执行施工过程的质量标准，构建覆盖全周期的协同管理机制。当前工程实践中，设计阶段常存在地质勘察数据精度不足、荷载计算有偏差的问题，施工阶段则面临成孔质量控制不当、混凝土浇筑有缺陷的情况，这些问题需通过加强勘察管理、优化设计方案、规范施工操作、强化安全监督等针对性措施逐步解决。

参考文献：

- [1] 胡兵,曹飞.高层建筑工程施工中桩基础施工技术分析[J].建筑与装饰,2020(36):156-158.
- [2] 周文娟.基于高层建筑工程施工中桩基础施工技术分析[J].砖瓦世界,2022(08):7-9.
- [3] 朱凌宇.探讨高层建筑工程施工中桩基础施工技术[J].建筑·建材·装饰,2021(13):80-81.
- [4] 李建亭.高层建筑工程施工中桩基础施工技术分析[J].城镇建设,2021(01):65.
- [5] 赵曦.高层建筑工程施工中桩基础施工技术研究[J].砖瓦世界,2021(02):279.

水利水电工程中混凝土防渗墙施工技术的应用管理探讨

翟 伟

(四川能投巴中燃气发电有限公司, 四川 巴中 636700)

摘要 混凝土防渗墙作为水利水电工程挡水、防渗的核心结构, 其施工质量直接决定了工程运行安全与寿命。本文结合《水利水电工程混凝土防渗墙施工技术规范》(SL 174-2014), 系统梳理混凝土防渗墙施工全流程的核心技术要点, 从质量、进度、安全、成本四个维度构建应用管理体系, 并以某水库除险加固工程为实证案例, 通过数据分析验证管理成效。结果显示: 采用技术参数精准控制+全流程管理闭环模式后, 墙体垂直度偏差从规范允许的 $\leq 0.3\%$ 降至 0.15% , 混凝土浇筑合格率从82%提升至98.5%, 渗漏量从 $35 \text{ m}^3/\text{d}$ 降至 $2 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下, 工期较计划缩短7天, 成本节约6.2%。研究表明, 技术与管理的深度融合可显著提升混凝土防渗墙施工质量与效率, 为水利水电工程防渗体系建设提供实践参考。

关键词 水利水电工程; 混凝土防渗墙; 质量管理; 进度管理; 安全管理

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.033

0 引言

水利水电工程作为水资源调控、能源供应的关键基础设施, 防渗性能是保障工程安全运行的核心指标。混凝土防渗墙因防渗效果好、适应地层广、耐久性强等优势, 被广泛应用于堤坝加固、水库扩容、水电站厂房基础防渗等场景。据《2024年中国水利工程建设报告》数据, 我国近年新建水利工程中, 混凝土防渗墙的应用占比达68%, 在深厚覆盖层地层中的防渗贡献率超90%^[1]。然而, 混凝土防渗墙施工受地质条件复杂、施工工艺特殊、环境因素影响大等因素制约, 易出现成槽垂直度超标、墙体蜂窝麻面、接缝渗漏等质量问题^[2]。某省水利工程质量抽检数据显示, 2023年混凝土防渗墙施工中, 成槽偏差超标率达18%, 接缝渗漏投诉占比32%, 工期延误率超20%。传统重技术实施、轻过程管理的模式已无法适配复杂水利工程需求, 厥需构建技术参数可控、管理流程闭环的应用管理体系^[3]。基于此, 本文以混凝土防渗墙施工技术为核心, 结合规范要求与工程实践, 明确各工序技术要点, 建立全维度管理策略, 并通过具体案例的数据分析验证成效, 为水利水电工程混凝土防渗墙施工提供技术+管理双重保障方案。

1 混凝土防渗墙施工核心技术要点

混凝土防渗墙施工需遵循地层适配、参数精准、工序衔接原则, 核心技术覆盖前期准备—成槽施工—

墙体浇筑—接缝处理四大环节, 各环节技术参数控制直接影响防渗效果。

1.1 前期准备阶段

地质勘察与方案设计, 需通过钻探、物探明确施工区域地层分布、地下水位、透水率等参数, 为成槽工艺选择提供依据。例如: 黏土层优先选用抓斗式成槽机, 砂卵石层需采用冲击式+液压铣槽联合工艺; 同时, 根据防渗要求设计墙体参数, 常见设计指标为: 厚度 $0.6 \sim 1.2 \text{ m}$, 深度 $15 \sim 50 \text{ m}$, 视覆盖层厚度而定, 混凝土设计强度C20~C30, 抗渗等级W6-W8, 《水利水电工程混凝土防渗墙施工技术规范》(SL 174-2014)规范要求^[4]。原材料技术控制, 混凝土采用商品混凝土, 配合比需满足高抗渗、低收缩、易泵送要求, 水胶比 ≤ 0.55 , 坍落度 $180 \sim 220 \text{ mm}$, 砂率 $35\% \sim 45\%$, 添加引气剂含气量 $3\% \sim 5\%$ 提升抗冻性; 泥浆成槽护壁用泥浆需控制黏度 $18 \sim 25 \text{ s}$ (马氏漏斗法)、密度 $1.05 \sim 1.15 \text{ g/cm}^3$ 、含砂量 $\leq 4\%$, 砂卵石地层需适当提高密度至 $1.15 \sim 1.20 \text{ g/cm}^3$, 防止塌槽; 接缝材料采用橡胶止水带, 拉伸强度 $\geq 15 \text{ MPa}$ 或水泥基渗透结晶型防水涂料, 抗渗压力 $\geq 1.5 \text{ MPa}$ 。

1.2 成槽施工阶段

成槽是防渗墙施工的关键工序, 需重点控制垂直度、槽段尺寸与护壁稳定性, 常见工艺及技术要点如表1所示。

表1 常见工艺及技术要点

成槽工艺	适用地层	技术参数控制	效率指标
抓斗式	黏土层、粉质黏土	垂直度偏差≤0.3%，槽段长度6~8m	成槽效率8~12m/d
冲击式	砂层、卵石层	冲程1.5~3.0m，垂直度偏差≤0.5%	成槽效率3~5m/d
液压铣槽式	复杂地层(岩溶、大卵石)	铣轮转速8~15r/min, 垂直度偏差≤0.15%	成槽效率10~15m/d

施工中需通过实时监测+动态调整保障精度：采用超声波测壁仪每3~5m检测一次垂直度，发现偏差超限时，通过调整抓斗倾斜角度或冲击锤落点校正；砂卵石地层施工时，每槽段设置2~3个泥浆循环孔，及时清除槽底沉渣，沉渣厚度≤10cm，否则影响混凝土与基岩结合。

1.3 墙体浇筑阶段

墙体采用水下导管法浇筑，核心技术要点为连续浇筑、均匀上升：（1）导管布设：导管直径200~300mm，间距≤3.5m，距槽段端部≤1.5m，导管底口距槽底20~30cm；浇筑前需做导管水密性试验，压力0.6~1.0MPa，保持15min无渗漏；（2）浇筑控制：首批混凝土浇筑量需满足导管埋深≥1.0m，后续浇筑过程中导管埋深控制在2~6m，严禁拔空导管；混凝土上升速度≥2m/h，相邻导管混凝土面高差≤0.5m，防止冷缝；（3）质量检测：浇筑完成后7天，采用取芯法检测混凝土强度，芯样抗压强度≥设计值的90%，28天采用超声波检测墙体完整性，声波速度≥3.5km/s，无明显缺陷。

1.4 接缝处理阶段

接缝是防渗墙的薄弱环节，需采用物理止水+材料密封双重措施：刚性接缝采用接头管法，浇筑前插入直径比槽段厚度小50mm的钢接头管，浇筑后按2~4m/h速度拔管，形成企口缝；后续槽段浇筑前，用钢丝刷清除接缝面浮浆，涂刷水泥净浆（水灰比0.4~0.5）；柔性接缝在槽段间设置橡胶止水带，止水带需固定牢固（偏差≤5mm），浇筑时避免混凝土冲击导致移位；岩溶地层接缝需额外填充微膨胀混凝土，膨胀率0.02%~0.05%，防止裂隙渗漏。

2 混凝土防渗墙施工应用管理体系构建

基于技术要点，从质量、进度、安全、成本四个维度建立管理体系，形成全流程闭环管控。

2.1 质量管理，构建三级管控机制

（1）事前控制：编制《防渗墙专项施工方案》，经监理、设计单位审批后实施；对施工人员开展技术交底，重点培训成槽垂直度控制、导管浇筑流程，特殊工种需持证上岗。（2）事中控制：实行班组自检、项

目部复检、监理抽检三级检测。原材料：每批次混凝土取3组试块，28天强度检测，泥浆性能每2小时检测1次；过程参数：成槽垂直度每槽段检测3次，浇筑时每30分钟记录一次混凝土面高程、导管埋深；隐蔽工程：槽底沉渣、接缝处理需经监理验收合格后，方可进入下一道工序。（3）事后控制：完工后采用无损检测+现场试验评估质量：超声波检测墙体完整性，检测比例100%，钻孔压水试验检测防渗性能，透水率≤1.0Lu，规范要求≤5Lu。

2.2 进度管理，优化工序衔接

关键路径规划：以成槽—浇筑为关键线路，制定工期计划。以某水库防渗墙（长度1200m，厚度0.8m）为例，总工期60天，其中成槽35天，分150个槽段、浇筑15天、接缝处理10天；资源调度：根据地层变化动态调整设备，黏土层施工配置2台抓斗式成槽机，砂卵石地层增加1台冲击式成槽机；混凝土供应采用2~3辆罐车循环运输，确保浇筑连续，中断时间≤30min，否则需按施工缝处理；应急措施：汛期施工需提前储备沙袋、抽水泵等防汛物资，遇暴雨时暂停成槽，加强泥浆循环，防止雨水入槽稀释泥浆；设备故障时，备用铣槽机需在4小时内到场替换^[5]。

2.3 安全与成本管理，保障施工效率

安全管理，重点防范塌槽、触电、机械伤害：成槽区域设置1.2m高防护栏，夜间挂警示灯；用电设备采用三级配电、两级保护，泥浆池周边设置防滑坡；定期检查铣槽机钢丝绳磨损情况，磨损量超10%立即更换；通过工艺优化+损耗控制降本，采用液压铣槽式替代冲击+抓斗联合工艺，在复杂地层可降低机械租赁费30%；泥浆循环利用，经除砂器处理后重复使用，减少新浆用量40%；混凝土浇筑时控制坍落度波动范围（±20mm），避免因坍落度过大导致浪费，损耗率从8%降至3%^[6]。

3 实证案例——以某水库除险加固工程防渗墙施工为例

3.1 项目概况

某省东风水库为中型水利工程，总库容1.2亿m³，因运行30年出现坝基渗漏（渗漏量35m³/d），需新

建混凝土防渗墙加固：（1）防渗墙设计参数：长度 1 200 m，厚度 0.8 m，深度 35 m，穿透 25 m 覆盖层至基岩，混凝土强度 C25，抗渗等级 W8。（2）地层条件：0 ~ 10 m 为黏土层，10 ~ 25 m 为砂卵石层，含粒径 50 ~ 200 mm 卵石，25 m 以下为中风化砂岩。

施工难点为砂卵石层成槽易塌槽，基岩面起伏大，高差 2 ~ 3 m，需保障墙体与基岩结合度^[7]。

3.2 技术与管理应用

技术方案：采用抓斗式（黏土层）+ 液压铣槽式（砂卵石层）联合成槽，泥浆密度 1.15 ~ 1.20 g/cm³，接缝采用接头管 + 水泥基渗透结晶涂料。

管理措施：（1）质量：监理全程旁站成槽与浇筑，采用超声波测壁仪实时监控垂直度，沉渣厚度用测绳检测，每槽段验收。（2）进度：划分 20 个施工段，每

表 2 施工关键指标对比表

指标	规范要求	实施前（行业均值）	本项目实施值	提升幅度
成槽垂直度偏差	≤ 0.3%	0.45%	0.15%	66.7%
混凝土浇筑合格率	≥ 85%	82%	98.5%	20.1%
接缝渗漏率	≤ 5%	12%	1.2%	89.2%
施工工期	计划 60 天	延期至 70 天	53 天	提前 11.7%
单位成本	—	850 元 /m ³	800 元 /m ³	节约 5.9%

仅 25% 的项目采用实时垂直度监测系统，人工检测效率低且误差大；三是绿色施工水平待提升，传统泥浆废弃率达 30%，易造成环境污染。

未来发展方向可聚焦三方面：（1）技术创新：研发智能铣槽机，集成 AI 垂直度校正系统，偏差控制 ≤ 0.1%；自修复混凝土，掺入微生物菌剂，裂隙宽度 ≤ 0.5 mm 时可自主修复。（2）管理升级：推广 BIM 技术全流程应用，实现地质勘察—成槽—浇筑的可视化管理；建立水利工程防渗墙质量数据库，共享优质项目的技术参数与管理经验。（3）绿色转型：采用泥浆干化处理技术，废弃泥浆减量化率 ≥ 80%；太阳能供电的现场监测设备，降低施工对环境的影响。

5 结束语

混凝土防渗墙作为水利水电工程的防渗屏障，其施工质量与管理水平直接关系到工程安全与效益。本文通过梳理核心技术要点、构建全维度管理体系，并结合某水库案例验证，表明技术参数精准控制 + 全流程管理闭环是提升施工质量、效率与经济性的关键路径。未来，水利水电工程建设需进一步推动技术创新与管理优化的深度融合，针对复杂地层施工难题研发

段 60 m，配置 2 台液压铣槽机、4 辆混凝土罐车，实行两班倒连续施工。（3）成本：泥浆循环利用，经除砂器处理后重复使用 3 次，混凝土损耗控制在 3% 以内。

3.3 数据分析与成效

通过技术与管理的协同应用，项目施工成效显著，施工关键指标对比见表 2。

项目完工后，经钻孔压水试验检测，墙体透水率均 ≤ 0.5 Lu，远低于规范要求的 ≤ 5 Lu，渗漏量稳定在 2 m³/d 以下，达到设计防渗目标，获评省级水利工程优质奖。

4 讨论与展望

当前混凝土防渗墙施工管理仍面临三大挑战：一是复杂地层成槽技术成熟度不足，部分项目仍存在塌槽风险，发生率约 8%；二是智能化监测技术应用率低，

适配技术，推广智能化监测与绿色施工理念，使混凝土防渗墙在水资源安全、防洪减灾等领域发挥更大作用，助力水利工程高质量发展。

参考文献：

- [1] 苑平. 水利水电工程中混凝土防渗墙施工技术的应用 [J]. 数字化用户, 2024(48):87-88.
- [2] 谢进学. 水利水电工程中混凝土防渗墙施工技术的应用探讨 [J]. 水利电力技术与应用, 2024,06(06):22-24.
- [3] 潘德雄, 厉旭龙. 水利水电工程中超深塑性混凝土防渗墙施工技术研究 [J]. 建筑技术开发, 2024,51(08):36-39.
- [4] 钟健. 水利水电工程中混凝土防渗墙施工技术的应用管理探讨 [J]. 地产, 2023(22):211-213.
- [5] 夏玉磊. 水利水电工程建筑中混凝土防渗墙施工技术的应用分析 [J]. 数字化用户, 2024(46):115-116.
- [6] 闫大杰. 水利水电建筑中塑性混凝土防渗墙施工技术研究 [J]. 北方建筑, 2024,09(05):74-78.
- [7] 邓子谦, 郑涛, 董爽, 等. 超深混凝土防渗墙施工工效研究 [J]. 建筑经济, 2024,45(Z1):573-576.

住宅小区高压供配电设计与开发节点的协同管理策略与实践

鲁 畔

(合肥城改投资建设集团有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要 本文聚焦住宅小区高压供配电系统与房产开发全周期协同管理的机制创新与实践路径, 基于建设方管理“统筹协调”的核心职能, 系统构建了涵盖设计协同机制、信息共享平台、流程优化策略的三维管理体系。以安徽省合肥市某中型安置房项目为实证案例, 通过变电所土建条件预留、电缆路径规划、预埋管线同步设计等关键技术节点的协同管控, 实现了供配电网工程与主体结构施工的零偏差衔接, 有效规避了后期开凿返工风险, 保障了整体开发进度按计划推进。该实践旨在为同类项目提供可参考的协同管理范式, 具有积极的工程经济价值与行业参考意义。

关键词 住宅小区; 高压供配电设计; 房产开发; 协同管理

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.034

0 引言

在城市化进程加速的背景下, 住宅小区建设规模不断扩大, 高压供配电系统作为小区的重要基础设施, 其设计与施工的合理性直接关系到小区居民的生活质量与安全。然而, 在实际开发过程中, 由于高压供配电网工程涉及多个专业领域, 与土建、景观、绿化等工程的协同难度较大, 常常出现设计与施工脱节的问题, 导致后期凿洞、返工等现象频发, 不仅增加了建设成本, 还影响了整体开发进度。因此, 研究住宅小区高压供配电设计与房产开发节点的协同管理策略与实践具有重要的现实意义。

1 住宅小区高压供配电设计与开发节点协同管理的重要性

高压供配电网工程是住宅小区建设的核心命脉, 实施高效的协同管理, 对于保障项目整体进度、提升工程品质与控制建设成本具有至关重要的作用。通过促进设计与施工各环节的无缝衔接, 能够系统性规避风险、优化资源配置, 是实现项目综合效益最大化的关键举措。

1.1 保障项目整体进度

高压供配电网工程作为住宅小区建设过程中的核心组成部分, 其施工进度的有效控制对整个项目的顺利推进具有决定性影响。为确保项目能够按时交付使用, 必须实现高压供配电网工程设计与房产开发关键节点的高度协同, 正如在大型居住小区中 10 kV 高压供配电网系统设计的有效应用所示, 以及在房地产供电工程实施方案中所强调的, 合理安排工期和施工进度计划是

保证按时交付的关键。具体而言, 需确保变电所土建施工、电缆敷设以及设备安装等关键环节, 与主体工程建设同步规划、同步实施。加强各参与方协作与信息互通, 可有效避免因某一环节进度滞后引发的连锁延误, 保障项目按计划推进, 实现如期交付。

1.2 提高工程质量

协同管理可有效整合设计、施工及监理等各方资源与技术力量, 为全面提升工程质量提供有力支撑。设计阶段, 通过多专业协调, 充分考虑土建结构承载要求、设备布置合理性、电缆路径优化等因素对供配电网系统的影响, 实现系统设计整体优化。施工过程中强化各单位间的沟通协调, 可确保施工工艺严格符合设计要求, 减少因设计与施工脱节引发的质量缺陷。这种系统化、一体化管理方式能显著提升住宅小区供配电网工程的可靠性和安全性, 进而提高项目整体工程质量。

1.3 降低建设成本

实施科学合理的协同管理, 可在项目早期识别并解决潜在问题, 有效避免后期常见的凿洞返工现象, 显著减少因设计变更、施工失误导致的材料浪费和重复施工。同时, 协同机制有助于优化设计和施工方案, 提高人、机、料等资源的利用效率, 减少能源消耗, 从而在保证工程质量的前提下实现建设成本的有效控制^[1]。这不仅有助于提升项目的经济效益, 还为增强项目的社会效益和环境效益奠定了坚实的基础, 最终支持项目实现综合效益的最大化。

2 住宅小区高压供配电设计与开发节点协同管理中存在的问题

在当前住宅小区高压供配电工程协同管理实践中，主要面临三大挑战：设计阶段专业协调困难、施工阶段工序衔接不畅以及全流程信息共享滞后。这些问题相互交织，严重制约了项目效率，成为影响工程顺利推进的关键制约因素。

2.1 设计协调困难

高压供配电设计是一项高度复杂的系统工程，涉及电力系统、土建结构等多个专业领域。由于各专业领域的设计标准和规范存在较大差异，导致在设计方案的制定、评审和审核过程中，沟通不畅、协调困难的问题尤为突出。例如：在项目初期，土建专业可能未能充分考虑到供配电设备的安装空间、设备维护通道以及散热需求，而供配电专业则对土建结构的承载能力、防水等级及防火要求了解不足。这种专业间的信息不对称和协作不足，不仅影响了整体设计质量，还可能进一步导致施工阶段的延误和返工，增加了项目的时间成本和经济成本^[2]。

2.2 施工衔接不畅

在房产开发项目的实施过程中，土建、景观、绿化等工程的施工顺序和进度安排往往缺乏统筹规划，未能与高压供配电施工形成有效的衔接机制。例如：在主体结构施工阶段，若未能及时预留或预埋供配电所需的管道、桥架、接地装置等基础设施，后期施工时只能通过凿洞、打孔等方式进行补救。这种临时性的施工调整不仅显著增加了施工难度和人力成本，还可能对建筑的主体结构安全造成潜在威胁，甚至影响整个项目的功能完整性和使用寿命。

2.3 信息共享不及时

由于高压供配电项目通常参与方众多，包括建设方、设计单位、施工单位、监理单位等多个主体，各环节之间的信息传递存在明显的障碍。缺乏统一、高效的信息共享机制，导致项目信息的更新不及时、各方掌握的信息不对称。这种信息滞后和沟通缺失严重影响了多方协同管理的效果，进而降低了项目的整体执行效率和管控水平。

3 住宅小区高压供配电设计与开发节点的协同管理策略

3.1 建立和完善设计协调机制

(1) 组建跨专业设计团队。为确保项目设计的整体性和协调性，由建设方牵头主导，组织并整合包括供配电设计、电气设计、土建设计等在内的各相关专

业设计人员，共同成立一个高效协同的联合设计工作小组。团队需明确各专业负责人及其具体职责分工，建立清晰的内部沟通渠道和协作流程，强化团队内部的即时沟通与紧密协作，以实现多专业设计工作的有序推进和高效配合^[3]。(2) 制定统一的设计标准和规范。在项目启动初期，需全面梳理和整合各专业现有的设计标准与规范，结合项目的功能需求、技术特点及现场实际情况，制定一套统一、协调且具有可操作性的设计准则。该准则应确保各专业设计在技术参数、接口要求、实施路径等方面的一致性和系统兼容性。例如：在确定变电所选址与布局方案时，需综合考量土建结构安全性、供配电设备运行维护需求，以及项目与周边市政环境、园林景观的协调性，确保整体设计经济、安全且美观。(3) 定期召开设计协调会议。在设计阶段，建设方应定期组织召开跨专业设计协调会议，邀请各专业设计人员参与，汇报当前设计进展、提出存在的问题并共同商讨解决方案。通过面对面的深入交流，能够及时发现并妥善解决各专业设计之间可能存在的矛盾与冲突，如电缆敷设路径与市政管线的空间冲突、设备预留预埋设施的位置与土建结构施工的协调等问题。此举有助于提升设计方案的合理性、完整性和可施工性，避免后期因设计不协调导致的返工和资源浪费。

3.2 加强沟通与信息共享机制建设

(1) 建立定期沟通制度。建设方作为项目管理的核心单位，应与设计单位、施工单位、监理单位等主要参与方建立稳定且高效的定期沟通机制，如通过每周召开项目例会，及时通报项目实际进展、协调解决施工现场中出现的各类问题。同时，鼓励各参与方在日常工作中保持密切沟通与信息交流，建立快速反馈机制，确保各类问题能够被及时发现并高效解决，从而提升项目整体管理的响应速度和执行效率^[4]。(2) 搭建信息共享平台。积极借助现代信息技术手段，搭建统一、便捷的项目信息共享平台，如专业项目管理软件、工作微信群等工具，实现设计图纸、施工进度计划、设计变更通知、施工质量检验报告等重要信息的集中管理与实时更新。各参与方可随时通过平台查阅、下载所需资料，有效提升信息传递的准确性和时效性，实现项目信息的透明化、实时化共享，进一步提高协同管理的效率和整体运作的透明度。(3) 强化各方责任意识。通过合同约定和管理制度明确各参与方在信息共享中的具体责任与义务，要求相关单位及时、准确、完整地提供项目各阶段的关键信息，并对因信息报送不及时、内容不准确所引发的问题承担相应责任。同时，加强对项目各参与方的培训与宣贯，提升其对信息共享重要性的认识，推动各方转变观念，

积极主动地参与信息共享与协同管理工作，共同维护项目信息的完整性及可靠性。

3.3 优化管理流程，提升项目协同效能

(1) 制定详细的项目进度计划。在项目策划阶段，根据工程总体目标、技术特点及开发周期，制定科学、详细的项目进度计划，明确各工程节点的时间安排、工序衔接及关键路径，尤其重视高压供配电网设计与施工的关键环节。进度计划需将供配电网工程与土建、景观、绿化等专业工程的进度紧密结合，确保各环节有序推进、无缝衔接。在计划执行过程中，定期对实际进展进行检查与评估，及时发现进度偏差并制定有效的纠偏措施，以保障项目整体按计划顺利实施。(2) 实施全过程跟踪管理。建设方应加强对高压供配电网工程的全过程跟踪管理，从初步设计、设备采购、现场施工到最终验收的各个环节，安排专人负责监督、协调与管理。施工过程中须严格按设计图纸和现行施工规范作业，加强对施工过程及成果的质量检查与阶段验收，发现问题立即提出整改要求。同时，建立健全工程变更管理制度，对涉及设计变更、施工方案调整等事项进行严格审批，全面评估变更对项目进度、成本及质量目标的潜在影响，确保每一次变更具备充分的合理性和必要性^[5]。(3) 建立协同管理考核机制。制定科学、合理的协同管理考核指标体系，对项目各参与方在协同管理工作中的实际表现进行量化评价。考核范围应涵盖设计成果质量、施工进度控制、沟通协调效率、信息共享程度等多个维度，定期开展考核评价并将评价结果与各单位的合同奖惩措施有效挂钩。通过激励和约束并重的机制，推动各方更加积极主动地投入协同管理，不断提升协同管理工作的质量与整体项目效益。

4 案例分析

4.1 项目概况

以安徽省合肥市某中型安置住宅小区开发项目为例，该项目总建筑面积17.2万平方米，由8栋28~33层高层住宅、2栋3层社区商业配套及1栋6层社区服务中心组成，形成“住宅+商业+公共服务”的复合型社区。项目总工期24个月，分两期开发，一期(6栋住宅)与二期(2栋住宅+商业)采用同步设计、交叉施工模式。

4.2 协同管理措施

(1) 设计协调机制：项目由两家设计分别负责总体设计以及供电专项设计，我方组织各专业设计人员共同开展设计方案的制定和优化工作。在设计过程中，通过定期召开设计协调会议，解决了变电所选址、变电所建筑结构布局、电缆路径规划等多方面的设计协调问题，确保了供电规划设计方案的一次性通过，为后续详细设计提供了可靠的依据。(2) 沟通与信息共享：

建立了项目定期沟通制度，在确定项目施工总包单位后，立即组织供电专项设计交底，明确各方分工界限。例如：施工总包单位提前了解变电所基础、照明插座、内墙装饰以及预留预埋的管道、桥架等设施施工界面，同时让供配电施工单位能够提前了解信息，做好施工准备，有效避免了后期凿洞现象的发生。(3) 优化管理流程：制定了详细的项目进度计划，将高压供配电网工程与室外管网工程、景观绿化、供水、燃气等进行有机结合，合理安排各工程的施工顺序和时间。同时，建设方实施全过程跟踪管理，加强对供配电网施工质量的监督和检查，严格按照设计要求和施工规范进行施工。在项目实施过程中，通过对进度计划的动态调整和优化，确保了项目各节点的按时完成。

4.3 实践效果

通过实施上述协同管理措施，该项目在高压供配电网设计与房产开发节点协同管理方面取得显著成效。在设计阶段，减少了设计变更次数，提高了设计效率和质量；在施工阶段，各工程之间衔接紧密，避免了大量后期凿洞、返工等问题，降低了建设成本，保证了施工进度和质量^[6]。

5 结束语

住宅小区高压供配电网设计与房产开发节点的协同管理对于项目的顺利实施具有至关重要的作用。通过建立设计协调机制、加强沟通与信息共享、优化管理流程等策略，可以有效解决协同管理中存在的问题，实现高压供配电网工程与土建、景观、绿化等工程的同步设计、同步施工，避免后期凿洞、返工等现象，保障整体开发进度和项目质量。未来，随着建筑行业信息化技术的不断推进，如BIM技术、物联网技术等在住宅小区建设中的应用越来越广泛，将进一步提升高压供配电网设计与房产开发节点协同管理的效率和水平，实现项目的精细化管理和智能化运营。

参考文献：

- [1] 王鹏.基于智能化系统的建筑电气设计节能技术分析[J].中国建筑金属结构,2025,24(19):143-145.
- [2] 张启迪.建筑工程全过程项目风险控制的关键技术研究[J].住宅与房地产,2025(05):120-122.
- [3] 丁鹏飞.基于BIM技术的建筑电气供配电网设计与施工协同管理[J].建筑工程与管理,2025,07(04):100-102.
- [4] 卢琼.浅谈居民住宅小区供配电网系统的设计问题[J].电力设备管理,2022(10):191-193.
- [5] 厉叶波.住宅小区10kV供配电网工程施工管理探析[J].房地产世界,2020(24):82-84.
- [6] 安娜.住宅小区供配电网系统设计要点[J].智能建筑电气技术,2019,13(05):71-75.

智能化监测技术在工业气体项目全流程安全管理中的实践探讨

徐 飞

(宜兴市恒昌工业气体有限公司, 江苏 无锡 214200)

摘要 工业气体项目具有易燃易爆、有毒有害等特性, 全流程安全管理是保障项目稳定运行的核心。本文以智能化监测技术为研究对象, 探讨其在工业气体项目立项、建设、运营及退役全流程中的应用价值。通过分析技术应用基础、实践路径及保障措施, 阐述物联网、人工智能等技术如何解决传统安全管理的难点。研究结果表明, 智能化监测技术可实现风险预警精准化、管理决策科学化, 为工业气体项目安全管理提供高效支撑, 对提升行业安全管理水品具有重要意义。

关键词 智能化监测技术; 工业气体项目; 全流程安全管理; 风险预警; 物联网

中图分类号: TP2; X93; TQ116

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.035

0 引言

工业气体作为制造业、能源等领域的基础原料, 其项目全流程涉及气体生产、储存、运输等多个环节, 任一环节出现安全问题都可能引发爆炸、中毒等重大事故。传统安全管理依赖人工巡检, 存在响应滞后、风险识别不全面等缺陷。随着物联网、大数据等技术的发展, 智能化监测技术为解决这一难题提供了可能。本文聚焦智能化监测技术在工业气体项目全流程中的实践, 分析技术应用逻辑与实施方法, 为提升项目安全管理效能提供实践参考。

1 智能化监测技术在工业气体项目安全管理中的应用基础

1.1 工业气体项目全流程安全管理的核心需求

工业气体项目全流程涵盖立项评估、工程建设、生产运营及退役处置, 各阶段安全管理需求呈现差异化特征。立项阶段需精准评估选址周边环境风险, 避免与敏感区域冲突; 建设阶段要监控施工流程中设备安装精度、管线密封性等关键指标, 防止后期隐患; 运营阶段则需实时掌握气体浓度、设备运行参数、环境温湿度等数据, 快速响应异常; 退役阶段重点关注设备拆解、气体残留处理等环节的安全管控^[1]。在传统管理模式下, 各阶段信息割裂, 风险识别依赖经验, 难以满足全流程闭环管理需求。而智能化监测技术可通过数据实时采集与共享, 实现各阶段风险的动态感知, 契合全流程安全管理中“事前预警、事中处置、事后追溯”的核心需求, 为项目安全提供全周期保障。

1.2 智能化监测技术的核心架构与技术特征

智能化监测技术在工业气体项目中的应用架构主要包括感知层、传输层、数据层及应用层。感知层通过气体传感器、温度传感器、振动传感器等设备, 实现对各类安全参数的实时采集; 传输层依托 5G、工业以太网、LoRa 等通信技术, 构建稳定高效的数据传输通道, 确保监测数据及时上传; 数据层由云计算平台、边缘计算节点组成, 负责数据存储、清洗及初步分析; 应用层则通过智能预警系统、可视化管理平台等, 实现风险识别、预警发布及决策支持。其核心技术特征体现为三个方面: 一是实时性, 传感器数据采集间隔可精确至毫秒级, 满足工业气体泄漏等突发事件的快速响应需求; 二是智能化, 通过人工智能算法对数据进行深度分析, 实现风险的精准识别与预测; 三是协同性, 各层级技术无缝衔接, 形成“采集—传输—分析—应用”的完整链路, 打破传统监测的信息孤岛, 为全流程安全管理提供技术支撑。

1.3 智能化监测与传统安全管理模式的差异对比

传统工业气体项目安全管理以“人工巡检+定期检测”为主, 存在明显局限性。在监测范围上, 人工巡检受人力限制, 难以实现对偏远区域、高空管线等特殊位置的全面覆盖, 易出现监测盲区; 在响应速度上, 传统模式依赖人工发现异常后逐级上报, 从隐患出现到处置启动往往需要数十分钟甚至数小时, 错过最佳处置时机; 在数据应用上, 定期检测数据多以纸质记录形式保存, 难以进行历史数据对比分析, 无法实现

风险趋势预测。而智能化监测技术则有效弥补了这些缺陷，监测范围可覆盖项目全区域，特殊位置通过无人机、机器人等设备实现无死角监测；异常数据可实时触发预警，响应时间缩短至秒级；监测数据数字化存储，通过大数据分析可挖掘风险演变规律，实现从“被动应对”到“主动预防”的转变。此外，智能化监测还能降低人工成本，减少人为操作失误，提升安全管理的稳定性与可靠性^[2]。

2 智能化监测技术在工业气体项目全流程中的实践路径

2.1 立项评估阶段：风险预判与选址优化

立项评估是工业气体项目安全管理的首要环节，智能化监测技术可通过多维度数据采集实现风险精准预判。该阶段通过接入区域气象数据、地质灾害历史数据、周边企业分布信息等，利用地理信息系统（GIS）构建风险评估模型，对选址区域的自然风险、人为风险进行量化分析^[3]。同时，通过环境监测传感器实时采集选址点的空气质量、土壤成分等数据，结合工业气体项目的生产特性，评估项目投产后对周边环境的潜在影响。例如：对于生产剧毒气体的项目，系统可自动测算泄漏扩散范围，判断选址是否符合安全距离要求。通过智能化分析，为项目选址提供科学依据，从源头规避高风险区域，降低后期安全管理压力。

2.2 建设施工阶段：过程管控与质量追溯

建设施工阶段的设备安装、管线铺设质量直接决定了项目后期安全运行水平，智能化监测技术可实现施工过程的全程管控。在设备安装环节，通过高精度传感器监测设备安装的水平度、垂直度等参数，实时反馈安装偏差，确保设备符合运行标准；对于管线焊接等关键工序，采用机器视觉技术对焊接焊缝进行实时检测，识别裂缝、虚焊等缺陷并及时预警。同时，利用射频识别（RFID）技术为设备、管线赋予唯一身份标识，将施工过程中的监测数据与设备信息绑定，形成全生命周期质量档案。施工人员通过移动终端实时上传施工进度与监测数据，管理人员通过可视化平台实现远程监管，确保施工过程符合安全规范，为后期运营奠定良好的基础。

2.3 生产运营阶段：实时监测与智能预警

生产运营阶段是工业气体项目安全管理的核心，智能化监测技术可实现风险的实时感知与快速处置。在生产车间，部署气体浓度传感器、设备振动传感器、温度压力传感器等，实时采集气体泄漏浓度、压缩机运行振动值、储罐压力等关键参数；通过视频监控系

统结合行为识别算法，监测工作人员是否规范佩戴防护用品、是否违规操作设备等情况^[4]。当监测数据超过预设阈值时，系统自动触发声光报警，同时将预警信息推送至管理人员手机终端，并启动应急联动机制，如关闭相关阀门、启动通风系统等。此外，通过大数据分析设备运行数据，预测设备故障风险，实现预防性维护，减少非计划停机与安全事故发生概率。

2.4 退役处置阶段：残留监测与安全拆解

工业气体项目退役处置阶段易因气体残留、设备老化等问题引发安全事故，智能化监测技术可保障处置过程安全可控。在设备拆解前，通过便携式气体检测仪与固定监测点相结合的方式，对储罐、管线内的气体残留量进行全面检测，确保残留浓度低于安全标准；利用无人机搭载红外热像仪对设备外部结构进行检测，识别腐蚀、破损等隐患。在拆解过程中，通过传感器实时监测作业区域的气体浓度、环境参数，结合智能机器人完成高危区域的拆解作业，减少人员暴露风险。同时，将拆解过程中的监测数据实时上传至管理平台，形成退役处置安全档案，确保处置过程可追溯、可管控，避免环境污染与安全事故。

3 智能化监测技术应用的保障措施与优化方向

3.1 技术保障：构建稳定可靠的监测系统

技术保障是智能化监测系统稳定运行、发挥效能的核心支撑，需从设备选型、系统架构、运维管理等多维度构建全链条保障体系。在设备选型环节，必须严格依据工业气体项目的工况特点，优先选用通过防爆认证、耐腐蚀性强、测量精度高的工业级传感器及通信设备，例如针对高纯度气体监测需选用精度达 ppm 级的电化学传感器，针对高温储罐区域需配备耐高温的光纤传感器，确保设备在极端环境下仍能稳定采集数据。在系统架构设计上，采用“边缘计算+云计算”的混合模式，边缘节点部署在生产现场，负责实时处理传感器数据并触发本地应急响应，有效降低网络延迟；云计算平台则承担海量数据存储、历史趋势分析及模型优化任务，通过分布式架构提升系统抗干扰能力。同时，建立全生命周期运维机制，利用设备管理模块实时监测传感器、通信模块的运行状态，设置设备故障预警阈值，当出现电池电量不足、数据传输中断等问题时自动提醒运维人员；定期开展设备校准工作，采用标准气体校准仪对气体传感器进行精度校准，确保监测数据的准确性，为安全决策提供可靠依据。此外，强化网络安全防护，部署工业防火墙、入侵检测系统，对数据传输过程进行加密处理，防止恶意攻

击导致监测系统瘫痪或数据泄露，保障整个智能化监测体系的安全稳定。

3.2 管理保障：完善配套管理机制

管理保障是推动智能化监测技术落地见效的关键，需建立健全与技术应用相匹配的管理体系，实现“技术赋能+管理提效”的双重目标。首先要完善组织架构，明确安全管理部、技术部门、生产部门在智能化监测工作中的职责分工，安全管理部负责制定监测标准及应急处置流程，技术部门承担系统运维及技术升级任务，生产部门负责配合设备安装、数据采集及异常响应，形成协同联动的工作机制。其次需制定标准化管理制度，包括监测数据采集规范、预警信息处置流程、系统日常运维细则等，明确数据采集的频率、范围及精度要求，规定预警信息从接收、核实到处置的时间节点，例如一级预警需在 1 分钟内通知现场负责人，5 分钟内启动应急措施，确保异常情况得到快速响应^[5]。在人员培训方面，构建分层分类培训体系，针对管理人员开展智能化监测技术原理及决策应用培训，使其掌握数据解读及风险研判方法；针对一线操作人员开展系统操作及应急处置培训，提升其规范使用监测设备、快速响应预警的能力；定期组织实操演练，模拟气体泄漏、设备故障等场景，检验人员与系统的协同处置能力。同时建立考核激励机制，将智能化监测系统的使用情况、预警处置成效与员工绩效挂钩，对及时发现隐患、规范处置预警的人员给予奖励，对操作失误、响应滞后的人员进行问责，充分调动员工参与安全管理的积极性，确保智能化监测技术真正融入日常安全管理工作。

3.3 优化方向：推动技术融合与创新应用

智能化监测技术的优化应聚焦工业气体项目的安全需求痛点，推动技术融合创新，实现从“监测预警”向“预测防控”的升级。一方面要深化多技术融合应用，将人工智能、数字孪生、区块链等技术与监测系统深度结合，构建全流程数字孪生模型，整合项目从立项到退役的所有监测数据，通过三维可视化场景实时呈现设备运行状态、气体流动轨迹及风险分布情况，模拟不同工况下的风险演变过程，为应急演练及方案制定提供虚拟仿真支撑。利用深度学习算法优化预警模型，通过分析历史监测数据及事故案例，不断调整模型参数，提升对复杂场景下风险的识别能力，例如区分设备正常振动与故障振动的差异，避免因环境干扰导致的误报、漏报。另一方面要推动监测体系智能化升级，开发具备自诊断、自校准功能的智能传感器，

减少人工运维成本；利用物联网技术实现设备间的互联互通，构建“传感器—设备—系统”的智能联动机制，当某一区域出现气体泄漏时，系统可自动触发周边设备的联动响应，如关闭相邻储罐阀门、启动区域通风系统等。同时关注监测数据的价值挖掘，通过大数据分析构建设备健康评估模型，基于运行参数预测设备剩余使用寿命，提前制定维护计划；建立项目安全风险数据库，整合不同工况、不同气体类型的监测数据，为同类项目的安全管理提供数据支撑。此外，推动监测设备的国产化与小型化发展，降低设备采购及部署成本，提升技术在中小工业气体企业的普及度，助力全行业安全管理整体提升。

4 结束语

工业气体项目全流程安全管理的复杂性与高风险性决定了传统管理模式难以满足现代安全管理的需求，而智能化监测技术以其实时性、智能化、协同性的特征，为解决这一问题提供了有效路径。从立项评估阶段的风险预判，到建设施工阶段的过程管控，再到生产运营阶段的智能预警及退役处置阶段的安全保障，智能化监测技术贯穿项目全生命周期，实现了安全管理从“被动应对”向“主动预防”的转变。通过技术、管理、政策三方面的保障措施，可进一步提升技术应用的稳定性与普及度，而技术融合与创新则为未来发展指明了方向。实践表明，智能化监测技术的应用能够显著提升工业气体项目安全管理的精准度与效率，降低安全事故发生率，对推动工业气体行业安全、健康、可持续发展具有重要的现实意义。未来，随着技术的不断进步与应用的不断深化，智能化监测技术将在工业气体项目安全管理中发挥更加重要的作用，为行业安全发展提供坚实的保障。

参考文献：

- [1] 伏建军.项目安全管理的安全控制要素[J].大众标准化,2023(10):65-67.
- [2] 马浩然.谏壁发电厂脱硫废水环保项目安全管理的研究[D].镇江:江苏大学,2022.
- [3] 秦思嘉,孙德华,郑庆涛,等.固定式气体检测报警器在线计量安全隐患分析[J].低温与特气,2025,43(04):48-50.
- [4] 赵学臣,李强.氯碱化工生产流程及副产氢气的安全高效利用[J].全面腐蚀控制,2025,39(04):172-175.
- [5] 张欣玥.危险气体安全监测系统的设计[D].重庆:重庆理工大学,2025.

配电线路运行检修技术及防雷对策优化

赵兴超，国祯

(泰安供电公司腾飞实业有限公司腾飞配网公司，山东 泰安 271000)

摘要 本文主要围绕配电线路运行检修技术及防雷对策展开了一系列的研究，系统分析了接地故障、短路故障、高阻故障、间歇性故障等常见问题的检修技术方法，并提出了针对性的防雷优化措施。在检修技术方面，重点介绍了绝缘电阻检测、分段排查、高阻故障测试仪应用、动态监测等技术手段；在防雷对策方面，强调避雷器合理配置、接地系统优化、绝缘水平提升及智能监测预警体系的构建。本文旨在为提高配电线路运行可靠性、降低故障风险提供实践参考。

关键词 配电线路；运行检修；接地故障检修；短路故障检修；高阻故障检修

中图分类号：TM72

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.036

0 引言

配电线路的安全稳定运行直接关系到用户的供电质量。然而，受环境腐蚀、外力破坏、雷电冲击等因素影响，当前配电线路常发生接地、短路、高阻等故障，其中雷击故障占比尤为突出。而传统检修方法主要依赖于经验判断，效率较低；防雷设施若配置不当的话，易导致绝缘击穿或设备损坏的现象发生。基于此，本文系统梳理了配电线路的典型故障的逻辑诊断流程，总结出了一套高效检修的技术方案，并从设备选型、系统设计等角度提出防雷优化方案，旨在为运维人员提供可操作的解决方案。

1 配电线路运行检修技术要点

1.1 接地故障检修

接地故障的形成往往与线路绝缘材料老化、遭受外部损伤或者受到各类环境条件的影响，进而导致线路整体绝缘性能出现明显下降。当发生此类故障时，通常会表现出带电导线与大地之间的绝缘阻抗值大幅度减小、未发生故障的其他相线电压出现不正常的升高。此类问题不及时解决的后果是会引发一系列的连锁反应，甚至造成人员伤亡的严重事故^[1]。

在现场开展故障排查工作时，首先是用绝缘电阻测试仪对接地相的绝缘阻抗进行测量。如果实测数值低于预先设定的参考标准，就可初步认定为接地异常问题，想要更准确地评估故障状态就需要借助电压监测的方式，重点观察非故障相的电压是否出现不正常升高的现象。其次需要将整条配电线路按照一定的布局合理地划分成多个区段，依次对这些区段进行隔离，

并分别检测接地相在各区段的电压变化情况，通过这种分段排查的方法缩小故障可能出现的范围。还可以采取逐一断开各分支线路开关的操作方式，通过观察接地报警信号而进一步确定问题所在的具体区段，除确定好问题出现的区域之外还需要通过运用红外热成像技术来检测绝缘子表面是否存在局部温度异常升高的现象，或者利用专用的接地电阻测量仪器，直接测量故障点相对于大地的阻抗值，从而精准定位绝缘性能失效的具体位置。最后要特别留意绝缘子表面是否出现老化、接触不良等损坏，同时需要检查线路旁边的树木是否与线路保持一定的安全距离，通过这种物理方面的措施来避免异常线路的发生。

1.2 短路故障检修

短路故障是由于相间或相对地绝缘失效导致电流突然急剧增大，常见的类型主要有三相短路、两相短路以及单相接地短路。引发短路故障的主要原因包括外力破坏、鸟类或树枝短接相间线路、电缆头因长期运行而老化击穿等，这类故障一旦发生，不仅可能导致电气设备被烧毁，还会造成系统电压突然大幅下降，甚至在严重情况下引发火灾事故。

在针对短路故障开展检修工作时首先要进行范围判断，一般优先依据保护装置的动作信息来初步确定故障所在的大致区域，如果对主干线进行试送电操作后发现无法成功送电，那么基本可以判断故障点位于主干线上；要是分支线路在试送电时出现异常情况，则可以将故障锁定在对应的分支线路上。完成范围判断后，使用万用表来测量线路的通断情况；对于电缆发生的短路故障，则需要先借助电缆路径仪来探测故

障点在电缆中的埋设深度，然后再通过开挖地面等方式来验证故障点的具体位置。此外，在检修过程中还需要重点检查线路与周边物体之间是否保持了足够的安全间距，仔细查看电缆终端头的密封状态，同时留意线路周边是否有鸟类筑巢或者树枝搭接在导线上等可能引发短路的痕迹^[2]。

1.3 高阻故障检修

高阻故障是指导线与高阻抗物体接触后形成的一种非金属性短路，这种故障的电阻值相对较高，由于其电阻较大，使用常规检测方法时很容易与普通的接触不良问题相混淆。高阻故障的表现通常是不易触发保护装置动作，但如果长期存在，会持续加速线路绝缘性能的老化，随着时间推移，原本的高阻故障很可能进一步恶化，最终发展成为完全短路故障。

在对高阻故障进行检修时，首先需要借助高阻故障测试仪这类专业仪器，通过向故障点施加一定强度的高压脉冲，利用脉冲激发故障点产生放电现象，然后根据放电时发出的声音或者仪器接收到的脉冲反射信号来准确判断故障位置；在现场排查过程中，要特别留意导线与绝缘支架、树木以及建筑物等物体的接触部位。为了进一步确认故障，还需要进行电阻验证，具体操作是使用兆欧表测量可疑点对地的电阻值，如果测量结果显示电阻值异常偏高，但又并非完全处于绝缘状态，那么就有可能是高阻故障；此时可以将测量结果与正常情况下的绝缘电阻值进行对比，从而辅助判断故障性质。在完成故障定位和确认后，接下来的关键步骤是进行修复和采取预防措施，修复过程中需要彻底清理故障点的接触面，例如对导线表面的氧化层进行打磨处理，确保接触面的干净可靠，同时还要更换已经受损的绝缘材料，比如重新包裹好脱落的绝缘胶带或者更换老化的绝缘子等。

1.4 间歇性故障检修

间歇性故障的典型特征是故障现象并非持续存在，而是呈现随机发生又自行恢复的特点。这类问题可能由多种临时性因素引发，例如强风天气下漂浮物偶然接触导线或者电气连接部位因长期氧化而导致接触电阻增大等。这种时断时续的异常通断状态会对电气触点产生反复冲击，加速其机械磨损和电弧烧蚀，从而对设备的长期稳定运行构成潜在的威胁。

在排查间歇性故障具体操作中，可借助红外热成像设备对各电气连接点的温度变化进行实时监测，一旦发现某处连接点出现异常发热现象，就应当将其列为重点排查对象。另外，还应当系统记录故障发生的

具体时间和环境条件，若具备故障录波数据，还应深入分析这些数据，从中找出故障发生的周期性规律，比如判断故障是否在特定时段或气象条件下更易出现，从而为后续的故障诊断提供重要线索。此外，对于那些容易受外力影响的薄弱环节也应给予特别关注，这些位置由于容易受到风力作用产生摆动，往往更容易出现连接松动或接触不良的问题。在完成上述检查和监测工作后，一方面，应当彻底清理线路周边可能引发故障的异物，例如修剪靠近导线的树枝、移除缠绕在导线上的风筝线等；另一方面，要对检查中发现的松动部件进行加固维护，比如拧紧松动的紧固件、更换老化的绑扎材料等，确保所有连接部位都处于稳固可靠的状态^[3]。

1.5 运行维护与预防性管理

除故障检修外，配电线路的日常运行维护是预防故障发生的关键环节，需围绕环境基础、设备状态、技术应用及预防性试验等方面系统开展。需定期清扫绝缘子表面的灰尘，避免灰尘长期堆积降低绝缘性能；检查配电线路杆塔基础的稳固性，特别是在地质松软区域，要通过混凝土加固等方式防止杆塔倾斜或倒塌；针对沿海盐雾区、重污染区等易受环境影响的地段，需加强绝缘子的防污闪处理，例如涂覆 RTV 涂料，以提升其在恶劣环境下的绝缘可靠性。并且需按固定周期开展关键项目的检查：包括线路接头、线夹的温度测量，通过监测异常温升及时发现接触不良问题；对电缆接头进行温度检测，确保其运行状态正常；定期测试接地电阻，保证接地系统的可靠性；测量交叉跨越距离及导线弧垂，避免因弧垂过大引发树障或相间短路等问题。

2 配电线路防雷对策优化

2.1 强化防雷设施配置与管理

强化防雷设施配置与管理是提升配电线路防雷能力的关键，需从避雷器选型安装和接地系统优化两方面协同推进。在避雷器选型与安装环节，应在配电线路易遭受雷击的重点区段加装金属氧化物避雷器（MOA），优先选用带间隙的避雷器，这种设计能有效避免避雷器在长期运行过程中因持续承受电压而出现老化问题。安装时要特别注意将避雷器布置在靠近被保护设备的位置，确保其能在雷击瞬间快速响应，同时将接地电阻严格控制在合理范围内，一般土壤环境下接地电阻需 $\leq 10 \Omega$ ，而在高土壤电阻率地区则要求更严格，必须 $\leq 4 \Omega$ 。接地体通常采用水平敷设的扁钢（规格为

40×4 mm)或垂直接地极(选用角钢,尺寸为50×50×5 mm,长度2.5 m),埋设深度需≥0.8 m,并确保与线路杆塔、变压器外壳实现可靠连接,形成共用接地网,以增强整体导电性能^[4]。为保证接地效果,需每年雷雨季前定期检测接地电阻,对于高电阻率土壤区域,可通过添加降阻剂或增加接地极数量的方式降低电阻值。杆塔接地电阻的大小直接影响配电线路的抗雷能力,若接地电阻阻值过大,雷电流无法快速泄入大地,会导致线路在雷击时承受过高电压,进而影响配电线路的运行稳定性;只有将接地电阻严格控制在合理范围内,才能确保线路具备足够的抗雷能力,有效减少雷击故障的发生。

2.2 提升线路绝缘水平与屏蔽能力

提升线路绝缘水平的首要策略是逐步以绝缘导线替代传统裸导线,绝缘导线通过外层绝缘材料的包裹,能有效阻断雷电直击或异物意外搭接导致的短路风险,从源头上降低故障发生的概率。对于短期内无法全面更换的老旧裸导线线路,可通过加装绝缘护套的方式进行绝缘化改造。需特别关注的是,配电线路遭受雷击时会产生瞬时高幅值过电压,这种剧烈的电压波动易造成绝缘子内部结构损伤甚至击穿,因此,必须严格选用符合国家/行业技术标准的优质绝缘子产品,确保其抗雷电冲击性能达标,通过提升关键绝缘部件的耐雷水平来增强线路对雷电过电压的耐受能力。在变电站进出线段平行敷设屏蔽线,要求其与主导线间距控制在20 m以内,并确保屏蔽线两端可靠接地,该措施通过形成电磁屏蔽层,可有效衰减雷电电磁场在主导线中感应生成的过电压,降低其对线路设备的冲击。同时,针对站内电子设备,需通过等电位连接将其与接地网进行可靠电气连通,消除设备间因电位差形成的反击通道,避免雷电过电压通过接地系统耦合至二次设备,从而保障精密电子元件的安全稳定运行^[5]。除上述基础措施外,还可在绝缘子表面增设防弧金具或增爬裙等防护结构,增强其抗闪络能力;适当增加防雷分流线的布置密度,分散雷电流泄放路径;结合线路实际运行环境,探索新型复合绝缘材料、差异化绝缘配置等技术的应用,通过这种多维度的优化绝缘配合与屏蔽体系来实现对配电线路雷电防护能力的综合提升,确保其在极端气象条件下的可靠运行。

2.3 完善监测预警防护体系

在建立智能化监测预警防护体系时,需重点推进雷电监测网络与故障诊断系统的协同建设,可以通过在配电网关键节点部署相关的雷电监测装置,实时获

取雷击事件的电流强度、极性特征及精准落点坐标等相关的核心数据,同时配合相关的线路故障指示器,对短路、接地等异常情况进行自动识别与状态上传,由此搭建起雷电活动与线路故障的关联分析平台。该平台在捕捉到雷击事件后,可自动触发故障溯源分析功能,能够快速锁定异常点的位置,同步生成标准化的检修任务单并通过数字化的渠道推送至运维人员,大幅提高故障处理的应急响应速度。当前防雷技术体系不只存在简单的基础性防护措施,还针对不同的区域、不同的路线设置了针对性的防护措施,能够根据不同的情况做出不同的反应。因此,在规划设备的安装与设定相关的预警响应值时要具体针对当地的实际情况进行设置,确保监测预警系统与防雷措施能够最大限度地满足不同情况下的需求,例如将实时采集到的雷电监测数据与防雷装置的防护效能相结合,进而持续优化防雷策略的科学性与精准性,全面提升线路抵御雷电灾害的综合能力^[6]。

3 结语

通过设备检修方法与科学的防雷保护策略进行有机结合,能够切实减少配电线路运行过程中的故障发生。需要注意的是,针对不同性质的线路故障需采取针对性的处置手段,如在防雷保护方面,应贯彻“以预防为核心”的基本设计理念,措施涵盖合理选择避雷参数、强化接地系统的保养、优化线路的匹配性等关键技术环节,同时通过智能化的手段实现对雷击引发故障的迅速定位与高效处置。

参考文献:

- [1] 杨添博.10kV配电线路运行维护及新型检修技术探析[J].电力设备管理,2025(08):14-16.
- [2] 李晓东.10kV及以下配电线路运行维护管理及检修技术分析[J].电工材料,2024(06):47-49.
- [3] 喻足龙.10kV及以下配电线路运行维护及新型检修技术应用[J].电气技术与经济,2023(09):360-362.
- [4] 赵燕.基于虚拟现实技术的游戏式教学模式的设计与研究:以输配电线路运行与检修课程为例[J].江西电力职业技术学院学报,2023,36(02):53-55.
- [5] 庄天.10kV及以下配电线路运行维护及新型检修技术应用[J].工程建设与设计,2021(20):38-40.
- [6] 陈容辉.输电线路的运行检修和防雷技术分析[J].光源与照明,2021(04):135-136.

输配电及用电工程线路安全运行技术研究

张宝才¹, 于哲²

(1. 国网吉林省电力有限公司白山市城郊供电公司, 吉林 白山 134300;

2. 国网吉林省电力有限公司白山市江源区供电公司, 吉林 白山 134700)

摘要 当前, 各行业领域的发展对于电力需求量较大, 输配电及用电工程的规模不断扩大, 线路的复杂程度日益提高。如何保障输配电及用电工程线路的安全运行是相关行业领域十分关注的问题。本文聚焦输配电及用电工程线路安全运行技术展开研究, 对新形势下输配电及用电工程线路的特征进行了分析, 并提出了具体的线路安全运行技术, 旨在能够为促进相关技术的运用及电力行业发展提供参考。

关键词 输配电; 用电工程; 线路安全运行技术; 智能化监测技术

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.037

0 引言

电力作为支撑经济发展和社会运转的关键能源, 其稳定供应至关重要。输配电与用电工程线路是电力系统的关键构成部分, 承担着将电能从发电端安全、高效地输送到用户端的重任。新时代, 输配电及用电工程线路遭遇了不少挑战, 需依据其运维的实际状况, 对输配电及用电工程线路的安全运行技术展开深入探究, 以保障电力系统的稳定运行, 使其更好地发挥作用。

1 新形势下输配电及用电工程线路的主要特征

在当下的新发展形势中, 输配电网的建设地点大多位于野外环境。如此一来, 施工过程的复杂程度大幅提升, 且充满了更多的不可预测性。工程在运行时需要应对多种复杂因素, 如外界气候变化等, 以及一些复杂的地形地貌和难以掌控的自然现象。且输配电网在施工进程中多会涉及高空作业、交叉性跨越作业等高风险环节, 这不仅需要操作人员具备精湛的专业技能, 能够熟练运用各种施工工具和设备, 还需要他们具备较高的安全意识。同时, 交叉性跨越作业还涉及不同线路、不同设施之间的交叉施工, 容易出现相互干扰、碰撞等问题, 对施工人员的协调能力和操作精准度提出了极高的要求。因此, 在输配电网施工的过程中, 需采取切实有效的防护措施, 以确保作业过程中不出现任何安全问题^[1]。

此外, 输配电线工程的建设工作大多是在环境变化频繁、流动性与动态性特征显著的条件下推进的。施工现场的人员、设备和材料需要不断地进行调配和移动, 这无疑给工程线路的规划布局以及后续维护工作增添了更大的难度。技术人员在这种环境下工作,

意味着在实际操作中需要具备更高程度的灵活性和更强的应变能力来应对各种情况。当遇到设备故障、材料短缺等问题时, 能够迅速做出反应以调整施工计划和方案, 从而确保工程的顺利进行。野外地区的交通条件往往较差, 道路崎岖不平, 运输车辆行驶困难, 这就增加了施工物资运输的时间和成本。同时, 施工方还需要考虑物资在运输过程中的安全问题, 防止物资受损或丢失。这对施工方的管理能力以及物资供应链的可靠性均提出了更为严格的要求。施工方需要建立高效的物资管理体系, 合理安排物资的采购、运输和存储, 确保物资能够及时、准确地供应到施工现场。物资供应链的各个环节都需要具备高度的可靠性, 以保证施工的连续性和稳定性。

当前不同线路之间的相互影响和干扰问题变得更加突出, 如电磁干扰、信号干扰等。为保障线路始终处于安全稳定的运行状态, 工程师有必要对施工方案展开精准且全面的规划与设计。在设计过程中, 要充分考虑线路的走向、间距、连接方式等因素, 运用先进的设计软件和技术, 进行模拟分析和优化, 确保线路之间的相互影响降到最低^[2]。

随着社会对环境保护意识的不断增强, 工程线路建设过程中, 需进一步强化对生态环境保护的重视力度。在具体施工环节, 应严格规避对自然资源造成任何形式的破坏, 如避免砍伐大量树木、破坏野生动物栖息地等。因此, 工程线路的设计和施工不仅要考虑安全性, 还需要兼顾环保要求。在设计阶段, 要充分评估工程对生态环境的影响, 加强对施工现场的环境管理, 减少施工废弃物的排放, 更好地保护周边生态环境。

2 输配电及用电工程线路安全运行策略

2.1 重视材料质量

提升系统整体安全性的关键在于依据线路具体铺设的特征与运行需求，科学考量其基础功能定位及应用环境，并关注材料属性的合理选择。为确保线路在安全性、可靠性、运行效率及系统协同性方面达到预期标准。需注意以下几个方面：

首先，需重视材料质量的合理控制。通常应精准界定所应用线路的类型，全面评估其结构参数、材料绝缘性能等级，以及连接件、电缆本体、开关柜等附属设备的性能指标与匹配性，保证相关要素能够达到预期，材料的质量有保证。

其次，应结合线路敷设区域的特殊环境因素，特别是对于高海拔等地形复杂的区域。在路径规划与结构设计阶段，需系统研究当地的地质构造稳定性、主导气候特征、温度剧烈变化范围及其对材料性能的影响，并关注空气密度降低导致的绝缘强度下降问题。

最后，在材料选型过程中，还应在严格保障质量与使用安全的前提下，寻求经济合理的解决方案，以最低综合成本满足输配电及用电工程的根本功能需求。

当前为进一步提升材料选型的科学性与有效性，还应对线路材料的性能特性进行动态优化改进，从而保证其始终可以满足输配电及用电工程的实际工况要求。这要求结合工程具体实践，强化对线路材料的系统性评估机制，做好对材料现有状态的实时监测、长期稳定性试验数据解析以及可靠性建模预测，从而精准把握其在后期使用时的相关情况。相关施工建设单位在材料最终确认阶段，应结合施工区域具体的自然条件、交通可达性以及极端气候发生概率等关键信息，制定多套具有高度可操作性的敷设技术方案。通过对方案实施效果的闭环评估与反馈优化，形成系统化的技术指导体系，以更好地为输配电线的长期稳定、安全运行提供坚实的技术支撑^[3]。

2.2 加强线路防护措施，保障线路综合性能

为有效减少各种复杂多变的环境因素及气候条件对输配电及用电工程线路的影响，保障其长期安全、稳定运行，应构建并实施一套系统化、多层次的线路综合防护体系。该体系应重点涵盖以下关键防护内容：

1. 在腐蚀与老化防控方面，电力企业还应基于线路所处区域的详细环境特征以科学制定差异化的防腐蚀与延缓老化策略。例如：在重腐蚀区可优先选用耐候钢杆塔、热镀锌或防腐涂层导线，并缩短巡检周期。建立完善的线路状态巡查制度，运用红外热成像、超

声波探伤等无损检测技术，定期对杆塔基础、金具、导地线等关键部件进行腐蚀深度、材质劣化程度的量化评估，及时发现并处理早期腐蚀点或老化迹象，防止其演变为重大安全隐患。另外，还应构建基于环境监测数据和设备状态数据的预测性维护模型。通过分析历史数据与实时监测信息，提前预警潜在的高腐蚀风险时段或设备老化加速阶段，指导管理人员展开精准、主动的防护干预，以显著提升线路在复杂环境中的运行稳定性。

2. 在雷击灾害防护方面，针对不同区域雷击活动强度及线路重要性，可以进行精细化防雷设计。在雷害高发区应综合运用多种防雷技术。如在易遭雷击的线路段以及关键设备端口，应合理增设金属氧化物避雷器（MOA）。其优异的非线性伏安特性和快速响应特性可以有效限制雷电过电压幅值，将雷电流安全泄放入地，保护线路绝缘免受击穿。还应严格优化并定期检测接地装置的接地电阻值，一般地区 $\leq 10\ \Omega$ ，高土壤电阻率地区 $\leq 30\ \Omega$ 。采用降阻剂、深井接地以及外引接地等手段以改善散流效果，保证雷电流能快速、低阻抗地导入大地，降低地电位升高对设备的反击风险。同时强化绝缘子防污性能是提升线路耐雷水平的关键环节之一。雷雨天气常伴随高湿度，污秽绝缘子表面易形成导电水膜，导致沿面闪络电压急剧下降。通过在绝缘子表面涂覆室温硫化硅橡胶或电力脂等长效防污闪涂料，能够有效抑制潮湿污秽条件下的泄漏电流，提高绝缘子湿闪电压30%~50%，从而增强整个线路的雷电冲击耐受能力^[4]。

雾霾天气中富含的PM2.5/PM10等细微颗粒物及硫酸盐、硝酸盐等水溶性离子，易在电场作用下吸附并沉积于线路表面。长期累积会形成导电性污层，不仅加速金属部件的电化学腐蚀，更会严重劣化绝缘子的绝缘性能。针对该现状还应结合依据污区等级划分及在线监测装置的实时数据，制定科学的清污计划。对重污区或积污严重的线路段，及时采用带电水冲洗、干冰清洗或专用清洗剂进行彻底清污，防止污秽物长期堆积固化，确保线路外绝缘性能始终处于安全阈值以上，保障运行稳定性。

为抵御强风可能对线路造成的机械损伤，还应从设计源头出发以强化抗风能力，如在一些风荷载显著区域可适度增加杆塔密度以缩短档距，降低单基杆塔承受的风压；同时选用更高强度等级的钢材（如Q420、Q460）或复合材料杆塔，并优化杆塔结构形式。对耐张塔、转角塔及位于风振敏感区的直线塔，还应精确计算并优化拉线布置角度与预紧力，保证其能有

效平衡风荷载并减小杆塔顶部挠度，防止因风力引起的杆塔失稳或基础松动。并且合理设计绝缘子串长度及悬挂方式，必要时加装防风偏绝缘间隔棒或重锤，限制导线在强风下的摇摆幅度，确保其与杆塔、地线及其他相导线保持足够的安全电气间隙，防止发生风偏放电事故。

2.3 完善线路运行方案，增加运行的合理性

在输配电及用电工程领域，有必要持续对线路运行方案的设计加以优化，这需要综合考虑多方面因素，确保方案兼具科学性与合理性，进而切实提高线路的运行效率。运行方案的设计还需对多个维度的因素进行深入分析和综合考量。首先，要精准把握实际用电需求，这涵盖不同时间段、不同行业的用电特点和需求规模等内容。并且不同规模的城市在用电总量、负荷分布等方面存在显著差异。此外，电力需求分布特点、建筑物特点以及线路周围环境等因素不容忽视。电力需求分布的集中与分散程度、建筑物的类型和密度、线路周围的地理环境和气候条件等，均可能会对线路的运行产生重要影响^[5]。

鉴于不同区域的经济发展水平、产业结构以及人口密度等方面均存在一定的差异，输配电及用电工程线路的运行需求各不相同。所以运行方案的设计需紧密结合城市规模、用电量变化以及发展趋势等。一方面需根据城市的现有规模和发展规划，合理确定线路的容量和布局，避免出现容量过大造成资源浪费或容量不足导致供电紧张的情况。另一方面应关注用电量的动态变化，通过对历史数据的深度剖析以及对未来趋势的精准预测，及时对运行方案作出调整，以此确保该方案能够契合不断变化的环境条件与实际需求。建筑物密度和分布特点是影响线路运行的重要因素，在进行方案设计时，需保证线路的布局以及容量能够契合实际需求，提高线路的运行效率和可靠性。

为了提升线路运行方案的科学性和有效性，电力企业可以积极地借助外部力量，如聘请专业领域技术人员，在其指导下，对线路运行方案进行全面评估和优化。专业机构凭借其专业能力开展的研究与分析工作，能够从多元视角为电力企业提供极具价值的指导建议，助力企业察觉潜在问题，制定更加合理、有效的运行方案。同时，还应积极借鉴其他地区在类似项目中的成功案例。应秉持积极主动的学习态度，深入研习并充分借鉴先进的技术与管理理念。在此基础上，紧密贴合自身实际状况，系统性地开展创新与优化工作，以此进一步强化方案的合理性与可行性^[6]。最后可借助多元化的渠道，在社会各领域广泛收集意

见与建议，深度探究公众对电力系统的期望和需求，以此精准找出可能存在的问题与短板，并及时开展调整优化工作。

2.4 引入智能化监测技术，加强运维精准度

在感知层建设方面，可以基于线路各区段的环境特征以及运行需求，分层部署监测设备，如在野外复杂区段，安装能够抗极端天气的杆塔倾斜传感器、导线弧垂监测仪，以此采集杆塔结构稳定性等数据，防止由于杆塔倾斜等而造成的断线问题；在城市人口密集区段配置红外测温装置与局放传感器，对电缆接头等设备的温度变化展开监测，及时发现安全隐患。此外，利用无人机搭载高清摄像头、红外热成像仪等进行周期性巡检，特别是对高山、密林等区域，可以获取线路走廊内的树障、异物搭接等情况，最大限度扩大巡检覆盖范围、增加数据采集效率。

3 结束语

输配电及用电工程线路的安全运行是一项复杂且关键的工作，涉及材料选择、设备维护、防护措施以及运行方案设计等多方面的内容。当前，针对输配电及用电工程线路所呈现出的复杂特征和诸多挑战，应高度重视其安全运行技术的研究与应用。并通过重视材料质量、加强线路防护以及完善线路运行方案等相关方面的工作，保证线路安全运行。同时，在实践过程中还需不断探索和创新安全运行技术，持续优化相关策略，以适应不断变化的环境和需求，为电力系统的安全稳定运行和经济社会的可持续发展提供坚实的保障。

参考文献：

- [1] 许嘉辉,王岩.输配电及用电工程线路安全运行技术研究[J].电力设备管理,2025(18):234-236.
- [2] 张伟.输配电及用电工程中的电能质量提升技术[C]//江西省工程师联合会.工程技术与新能源经济学术研讨会论文集(一).杭州旭源电力设备承装工程有限公司,2025.
- [3] 刘新.输配电及用电工程中的远程监控技术研究[J].自动化应用,2025,66(S1):185-187.
- [4] 周威林.新能源接入下的输配电及用电工程智能化转型[J].电工技术,2025(S1):604-606.
- [5] 丁梦晨.输配电及用电工程中的节能技术与设备优化[J].电工技术,2025(S1):723-725.
- [6] 王少杰.输配电及用电工程线路安全运行技术分析[J].智能建筑与智慧城市,2025(05):176-178.

输电线路复合绝缘子污秽发热影响因素及对策

李海荣

(四川蜀能电力有限公司电网运维分公司, 四川 成都 610000)

摘要 随着输电线路向高电压方向发展, 复合绝缘子因重量轻、耐污闪性优得到广泛应用, 但其表面污秽积累引发的发热问题严重威胁电网安全。本文结合现场实测与实验室模拟, 系统研究该发热现象的影响因素及对策。研究结果表明, 污秽成分与积累量、环境温湿度、施加电压特性、绝缘子结构参数是核心影响因素, 如等值盐密升高会显著提升污秽层导电率, 高湿度加剧离子溶解。基于此, 从污秽源头管控与清扫、环境适应性优化、电压参数调控、绝缘子结构改进四个维度提出对策, 旨在有效降低发热程度, 提升绝缘子运行稳定性, 为其安全运维及电网可靠供电提供技术参考。

关键词 输电线路; 复合绝缘子; 污秽发热

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.038

0 引言

在电力系统输电线路中, 绝缘子作为关键绝缘部件, 承担着支撑导线与绝缘隔离的双重作用。复合绝缘子以玻璃纤维增强树脂为芯棒、硅橡胶为伞裙材料, 相较于传统瓷质绝缘子, 具有重量轻、机械强度高、耐污闪性能优异等特点, 已在我国不同气候与地理条件的输电线路中大规模应用^[1]。然而, 在长期运行过程中, 复合绝缘子表面易积累工业粉尘、农业残留物、自然扬尘等污秽物质, 当外界环境湿度升高时, 污秽层中的可溶性盐类溶解形成导电通道, 在电场作用下产生焦耳热, 引发绝缘子表面局部发热。这种污秽发热现象会导致绝缘子伞裙材料加速老化、疏水性能下降, 严重时引发局部放电甚至绝缘闪络, 造成输电线路跳闸, 影响电网供电可靠性^[2]。

当前, 我国部分工业密集区、高湿度沿海地区输电线路因复合绝缘子污秽发热导致的故障发生率呈上升趋势, 茹需系统梳理污秽发热的影响因素, 提出科学有效的应对措施。基于此, 本文结合现场实测数据与实验室模拟实验, 深入分析复合绝缘子污秽发热的关键影响因素, 构建多维度防护对策体系, 为输电线路复合绝缘子的优化选型与运维管理提供理论依据与技术参考。

1 输电线路复合绝缘子污秽发热影响因素

1.1 污秽成分与积累量

污秽成分与积累量是决定复合绝缘子发热程度的核心因素, 不同来源的污秽具有差异化的化学组成与导电特性。工业区域的污秽以粉尘、硫化物、氮氧化

物为主, 其中可溶性盐含量较高, 尤其是氯化钠、氯化钾等碱金属盐类, 这类物质溶解后会显著提升污秽层的导电率; 农业区域污秽主要包含化肥残留物与农作物秸秆碎屑, 可溶性盐含量随施肥季节波动较大; 自然区域污秽多为沙尘、土壤颗粒, 可溶性盐含量较低, 但黏土成分占比高, 易吸附水分形成稳定水膜。污秽积累量通常用等值盐密与灰密表征, 等值盐密反映污秽中可溶性盐的多少, 灰密反映不溶性杂质的含量。当等值盐密从 0.1 mg/cm^2 增至 0.5 mg/cm^2 时, 污秽层导电率从 10^{-4} S/m 升至 $5 \times 10^{-4} \text{ S/m}$, 绝缘子表面局部发热温度从 45°C 升至 78°C ; 而灰密超过 0.3 mg/cm^2 时^[3], 不溶性杂质会阻碍水分蒸发, 延长污秽层受潮时间, 间接加剧发热效应。此外, 污秽颗粒的粒径也会影响发热特性, 粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的细颗粒易深入伞裙表面纹理, 形成致密污秽层, 其导电通路更稳定, 发热持续时间更长。

1.2 环境湿度与温度

环境湿度与温度通过影响污秽层的受潮状态与离子活性, 对复合绝缘子污秽发热产生显著作用。相对湿度是决定污秽层导电能力的关键环境参数, 当相对湿度低于 60% 时, 污秽中的可溶性盐难以充分溶解, 污秽层电阻率较高(通常大于 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$), 发热现象不明显; 当相对湿度超过 70%, 污秽层逐渐受潮, 离子溶解量增加, 电阻率降至 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下, 电流通过产生的焦耳热显著增多; 当相对湿度达到 90% 以上时, 污秽层形成连续水膜, 电阻率进一步降至 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$, 局部发热温度可超过 85°C ^[4]。环境温度通过调控水分

蒸发速率与离子迁移速度影响发热过程，在低温环境（0~10 °C）下，水分蒸发缓慢，污秽层长时间处于受潮状态，发热持续时间延长；在高温环境（30~40 °C）下，离子迁移速度加快，污秽层导电率提升，短期内发热温度峰值更高。此外，昼夜温差较大的地区，夜间温度下降易导致空气中水汽在绝缘子表面凝结，形成露水，使污秽层在无降雨条件下也能保持高导电状态，增加夜间发热故障的发生概率。

1.3 施加电压特性

输电线路施加电压的等级、类型与运行状态直接影响复合绝缘子污秽层的电场分布与电流大小，进而决定发热程度。电压等级越高，绝缘子表面电场强度越大，通过污秽层的电流越大，发热效应越显著。在 110 kV 输电线路中，复合绝缘子污秽发热温度通常在 40~60 °C；220 kV 线路中，发热温度升至 55~80 °C；500 kV 及以上超高压线路中，若污秽积累严重，局部发热温度可超过 90 °C。电压类型对发热特性的影响存在差异，交流输电线路中，电压方向周期性变化，污秽层中离子往复迁移，发热分布相对均匀；直流输电线路中，电压方向恒定，离子单向迁移并在绝缘子表面形成空间电荷积累，导致靠近负极性导线侧的污秽层电流密度增大，局部发热温度比正极性侧高 15~25 °C。此外，输电线路中的过电压会导致绝缘子表面电场强度骤升，短时间内通过污秽层的电流急剧增大，引发瞬时高温发热，虽持续时间短，但易造成伞裙材料局部灼伤，破坏绝缘结构。

1.4 绝缘子结构参数

复合绝缘子的伞裙形状、爬距、伞间距等结构参数，通过影响污秽分布均匀性与电场分布，间接影响污秽发热特性。在伞裙形状方面，大伞裙结构虽能减少上方污秽对下方的污染，但伞裙边缘曲率半径小，易产生电场集中，导致局部发热；小伞裙结构电场分布更均匀，但污秽易在伞裙表面堆积，形成导电通路。爬距是绝缘子表面沿伞裙轮廓的总长度，爬距不足时，污秽层易形成桥接，缩短有效绝缘距离，增加电流密度，加剧发热；爬距过大时，绝缘子整体尺寸增加，成本上升且易受风力载荷影响。伞间距是相邻伞裙之间的垂直距离，伞间距小于 30 mm 时，雨水或露水易在伞裙间形成水膜，导致污秽桥接，引发局部发热；伞间距大于 50 mm 时，虽能有效防止桥接，但会增加绝缘子整体高度，对杆塔承重要求提高。芯棒直径也会影响发热分布，芯棒直径过小（小于 15 mm）时，芯棒与伞裙结合处电场集中，易引发局部放电与发热；直径过大（大于 25 mm）时，会增加绝缘子重量，且对伞裙包裹工艺要求更高。

2 输电线路复合绝缘子污秽发热应对对策

2.1 污秽源头管控与定期清扫

针对污秽成分与积累量对发热的影响，需从源头减少污秽产生，并通过定期清扫降低绝缘子表面污秽积累量。在工业区域，加强对钢铁、化工、火电等污染源的排放管控，要求企业安装高效除尘设备，将粉尘排放浓度控制在 10 mg/m³ 以下，减少可溶性盐类污染物的生成；在农业区域，推广精准施肥技术，减少化肥过量使用，降低农田残留物对周边输电线路的污染。定期清扫需根据绝缘子所在区域的污秽等级制定差异化方案，重污秽区（等值盐密 > 0.3 mg/cm²）每 6 个月清扫一次，中污秽区（等值盐密 0.1~0.3 mg/cm²）每 12 个月清扫一次，轻污秽区（等值盐密 mg/cm²）每 24 个月清扫一次。清扫方式优先采用带电水冲洗，选用去离子水（电阻率 > 10⁶ Ω · cm），避免冲洗过程中造成绝缘闪络；对于不便水冲洗的山区线路，采用机械清扫装置，通过刷头旋转清除表面污秽，清扫后需检测绝缘子表面等值盐密与灰密，确保指标符合运行要求^[5]。

2.2 环境适应性优化

根据环境湿度与温度的影响特性，通过材料改进与辅助措施提升复合绝缘子的环境适应性，抑制污秽发热。在高湿度、高凝露地区，选用高 hydrophobic 硅橡胶材料制作伞裙，通过在硅橡胶中添加纳米二氧化硅颗粒，提升表面疏水迁移性，使污秽层表面水珠保持离散状态，减少连续水膜形成，经测试，该类材料的疏水角可维持在 100° 以上，显著降低污秽层导电率。在低温高湿地区，对绝缘子伞裙表面进行防覆冰涂层处理，选用聚四氟乙烯基涂层，降低水分在表面的附着能力，减少结露与覆冰现象，避免污秽层长时间受潮。在昼夜温差大的地区，优化绝缘子金具与芯棒的连接结构，采用弹性密封材料，减少温度变化导致的结构应力，防止密封失效引发内部受潮。同时，在输电线路沿线设置环境监测站，实时采集温湿度、污秽浓度等数据，通过大数据分析预测污秽发热风险，当相对湿度连续 4 小时超过 80% 时，启动线路巡检，及时发现并处理发热隐患。

2.3 电压运行参数调控

结合施加电压特性对发热的影响，通过合理调控电压运行参数，降低绝缘子污秽发热程度。在输电线路设计阶段，根据所在区域的污秽等级与电压等级，合理选择绝缘子的爬距，确保爬距满足“重污秽区 ≥ 35 mm/kV、中污秽区 ≥ 30 mm/kV、轻污秽区 ≥ 25 mm/kV”

的要求,通过增加爬距延长电流通路,降低电流密度。在直流输电线路中,在绝缘子串两端设置均压环,优化表面电场分布,减少空间电荷在负极侧的积累,使绝缘子表面电场不均匀系数控制在1.5以内,降低负极侧局部发热温度。加强对输电线路过电压的抑制,在变电站安装避雷器与电抗器,限制操作过电压与雷击过电压的幅值,将过电压倍数控制在1.5倍额定电压以下,避免瞬时高温对绝缘子的损伤。此外,在运行过程中,实时监测绝缘子的泄漏电流,当泄漏电流有效值超过100 μA时,及时采取降负荷或停电处理措施,防止电流过大导致发热加剧,泄漏电流监测数据需接入电网调度系统,实现异常情况的快速响应。

在±800 kV特高压直流线路试点中,采用导线侧双均压环(大环径1 200~1 500 mm、小环径600~650 mm)配置后,绝缘子表面最大场强降至0.457 kV/mm,负极侧发热点温度下降12~15 °C。在过电压抑制方面,某500 kV变电站通过避雷器数字化监测,提前3个月捕捉到阻性电流占比异常升高,避免过电压引发的污秽击穿事故。泄漏电流监测采用24位高精度设备后,测量误差控制在±1%以内,配合“数据—预警—处置”闭环,使故障响应时间缩短至15分钟。另外,介电梯度绝缘子的应用可使沿面电场降幅达56.1%,为高污秽区电压参数调控提供新型技术路径,进一步降低发热风险。

2.4 绝缘子结构改进与选型

基于绝缘子结构参数的影响规律,通过结构改进与科学选型,提升绝缘子抗污秽发热能力。在伞裙结构设计上,采用“大伞+小伞”的不等径伞裙组合,大伞直径控制在160~180 mm,小伞直径控制在120~140 mm,伞间距设置为40~50 mm,该结构既能通过大伞阻挡上方污秽,又能通过合理伞间距防止水膜桥接,经电场模拟分析,该结构的表面电场不均匀系数比传统等径伞裙降低20%~30%。优化芯棒直径,根据电压等级选择合适的芯棒尺寸,110 kV线路绝缘子芯棒直径选用18~20 mm,220 kV线路选用20~22 mm,500 kV线路选用22~25 mm,通过增加芯棒直径减少电场在芯棒与伞裙结合处的集中。在绝缘子选型时,需结合所在区域的污秽等级与环境条件,重污秽区优先选用“大爬距+高疏水”型复合绝缘子,如爬距为38 mm/kV的硅橡胶绝缘子;高湿度地区选用“防雾型”绝缘子,其伞裙表面具有特殊纹理,可减少水分附着。同时,建立绝缘子全生命周期管理档案,记录绝缘子的结构参数、安装时间、运行状态等信息,根据运行年限

(通常为15~20年)及时更换老化绝缘子,避免因结构性能下降导致污秽发热故障。例如:在某220 kV重污秽线路试点中,采用上述改进结构的绝缘子后,连续3年污秽发热故障率较传统绝缘子下降65%以上,伞裙表面污秽附着量减少40%,清洁维护周期延长1倍。优化后的芯棒直径还使绝缘子抗风载能力提升15%,适配强风地区需求。选型时可搭配红外热成像检测,提前筛查芯棒与伞裙界面缺陷,结合当地近5年污秽数据进一步提升选型精准度。全生命周期管理中引入物联网传感器,实时采集表面温度、电场分布数据,后台系统分析老化趋势,当绝缘性能降至阈值80%时自动预警,避免突发故障,为线路安全运行提供双重保障。

3 结束语

本文通过对输电线路复合绝缘子污秽发热问题的系统研究,明确了污秽成分与积累量、环境湿度与温度、施加电压特性、绝缘子结构参数是影响污秽发热的四大关键因素,各因素通过改变污秽层导电能力、电场分布或受潮状态,共同作用于发热过程。针对上述影响因素,从污秽管控、环境适应、电压调控、结构改进四个方面提出的对策,可有效降低绝缘子污秽发热温度,提升运行稳定性。实际应用表明,采用高疏水材料伞裙、定期带电清扫与优化电压参数的组合措施后,复合绝缘子污秽发热温度平均降低25~30 °C,泄漏电流有效值控制在80 μA以下,污闪故障发生率下降60%以上。未来研究可进一步结合智能监测技术,开发基于红外热像与物联网的绝缘子发热在线监测系统,实现污秽发热风险的实时预警;同时,开展新型耐污材料的研发,进一步提升绝缘子的抗污秽与抗发热性能,为输电线路的安全可靠运行提供更有力的技术保障。

参考文献:

- [1] 王少华,李泽宇,张永,等.输电线路复合绝缘子污秽发热影响因素分析[J].陶瓷避雷器,2025(04):100-108,118.
- [2] 吴田,刘鑫源.复合绝缘子清洗剂浸润污层沿面放电特性研究[J].湖南电力,2024,44(03):75-82.
- [3] 曹雯,李振涛,申巍,等.输电线路中污秽复合绝缘子异常发热研究[J].西安工程大学学报,2023,37(06):60-68.
- [4] 刘宇,李光茂,朱晨,等.湿热环境异常发热复合绝缘子电热耦合仿真分析[J].高压电器,2022,58(06):31-39,49.
- [5] 黄振,张中浩,彭向阳,等.复合绝缘子表面异常发热现象分析及其抑制措施[J].陶瓷避雷器,2020(06):171-175,186.

配电网中性点接地方式对线路故障特性的影响及选择

马 超, 张建红, 白群波

(泸州老窖股份有限公司, 四川 泸州 646001)

摘要 配电网中性点接地方式的选择直接影响线路故障特性与系统运行可靠性。不同接地方式通过改变零序回路阻抗特性, 显著调控单相接地故障时的电流幅值、过电压水平及电弧燃烧特性。不接地系统易引发高频振荡过电压, 经消弧线圈接地可有效抑制电弧重燃, 而电阻接地则能实现故障快速切除。接地方式的选择需综合考量故障电流限制、供电连续性、设备绝缘配合及系统适应性等多重因素, 特别需要结合电缆化率、负荷特性等实际参数进行差异化设计。

关键词 中性点接地方式; 故障电流特性; 暂态过电压

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.039

0 引言

随着新型电力系统建设的深入推进, 国家能源局《配电网高质量发展行动实施方案(2024—2027)》明确提出要提升配电网智能化和柔性化水平。中性点接地方式作为配电网结构设计的基础环节, 其选择直接影响故障自愈能力和供电可靠性。当前配电网正面临电缆化率持续攀升、分布式能源大规模接入的双重挑战, 传统接地方式已难以完全适应复杂故障特性^[1]。特别是在高电缆比例区域, 对地电容电流的急剧增大导致间歇性电弧过电压风险显著上升, 而分布式光伏的弱馈电特性又改变了故障电流分布规律。这些新形势要求接地方式设计必须兼顾故障电流主动控制、过电压抑制保护与供电连续性保障等多目标优化。

1 中性点接地方式下线路故障特性的基本表现

低压配电网中性点接地方式直接塑造线路故障时的电气行为特征。当系统发生单相接地故障时, 不同接地方式通过改变零序回路阻抗特性, 显著影响故障电流幅值、电压分布形态及暂态过程发展路径。不接地方下, 故障电流受系统对地电容制约, 表现为3~10 A的容性电流, 故障相电压跌落至零电位, 非故障相电压升至线电压水平, 系统产生幅值达3.5倍相电压的暂态过电压, 伴随间歇性电弧持续燃烧现象^[2]。经消弧线圈接地时, 电感元件与系统电容形成并联谐振条件, 当补偿度接近100%时可抵消绝大部分容性电流, 使残余电流降至10 A以下。但实际运行中受电网参数波动影响, 常出现欠补偿或过补偿状态, 导致故障点存在10~30 A的残余感性或容性电流。经电阻接地方式构建明确接地通路, 故障电流幅值直接由电阻阻值决定: 采用10 Ω低阻值时电流可达200~300 A, 100 Ω高阻值对应50~100 A电流水平。这种大电流特性虽有利于保护装置检测, 但会加剧设备热应力, 需精确计算电阻参数以平衡检测灵敏度与设备耐受能力。

接地形成明确接地通路, 故障电流升至50~300 A较高水平, 故障相电压降至(1+R/Xc)倍相电压(其中R为接地电阻值, Xc为系统对地容抗), 非故障相电压升高幅度收窄, 暂态过电压峰值不超过2倍相电压, 但故障电流热效应加剧。这三种接地方式分别对应高电压小电流、电流型二型补偿以及大电流低电压三种典型故障特征模式, 其差异本质源于零序阻抗特性的根本性区别。

2 中性点接地方式对线路故障特性的具体影响

2.1 对故障电流分布与大小的决定性作用

中性点接地方式通过改变零序网络阻抗特性直接决定故障电流的分布模式与幅值大小。不接地方形成高阻抗回路, 故障电流受限于线路对地电容参数, 呈现3~10 A的容性特征。这种小电流特性导致故障点电离程度不足, 易引发电流过零时的高频振荡现象^[3]。经消弧线圈接地时, 电感元件与系统电容形成并联谐振条件, 当补偿度接近100%时可抵消绝大部分容性电流, 使残余电流降至10 A以下。但实际运行中受电网参数波动影响, 常出现欠补偿或过补偿状态, 导致故障点存在10~30 A的残余感性或容性电流。经电阻接地方式构建明确接地通路, 故障电流幅值直接由电阻阻值决定: 采用10 Ω低阻值时电流可达200~300 A, 100 Ω高阻值对应50~100 A电流水平。这种大电流特性虽有利于保护装置检测, 但会加剧设备热应力, 需精确计算电阻参数以平衡检测灵敏度与设备耐受能力。

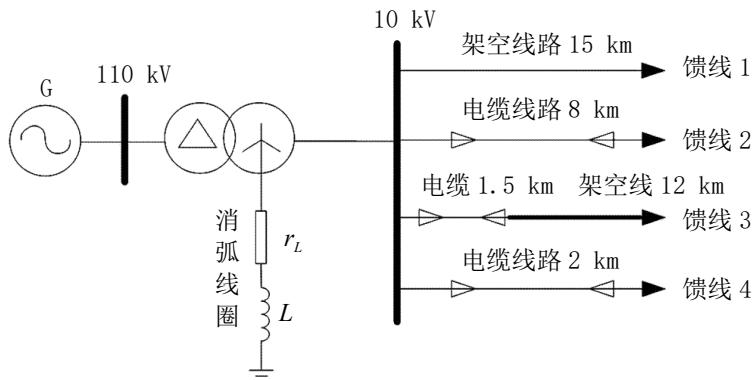


图1 消弧线圈接地原理图

2.2 对暂态过电压幅值与持续时间的调控效应

暂态过电压的激发强度与持续时间直接反映中性点接地方式的电压调控能力。不接地系统在单相接地故障时形成悬浮电位，非故障相电压跃升至线电压的同时，系统对地电容与电磁式电压互感器电感构成铁磁谐振回路，产生3.5倍相电压的过电压冲击，其持续时间达数十毫秒量级^[4]。经消弧线圈接地利用电感电流的相位补偿特性，在故障初期即抑制电压突变速率，通过阻尼振荡将过电压限制在2.5倍相电压以内。消弧线圈的调谐精度直接影响抑制效果，当补偿度偏离最佳值时可能引发二次过电压。经电阻接地通过提供确定性泄流路径，使故障相电压稳定在 $(1+R/X_c)$ 倍相电压水平，将暂态过电压峰值控制在2倍相电压以下。

3 基于配电网中性点接地方式对线路故障特性优化的选择对策

3.1 基于故障电流限制的安全性优先原则

中性点接地方式的选择在低压配电网中需首要考虑故障电流的控制能力，尤其是单相接地故障产生的电流幅值及其对设备绝缘与人身安全的威胁。在电缆化率较高的配电网中，电缆对地电容显著大于架空线路，当电缆占比超过60%时，对地电容电流常超过100 A。此时若采用中性点不接地方式，接地故障点易产生间歇性电弧，引发高频振荡过电压，幅值可达额定相电压的3倍以上，严重威胁电缆、变压器和避雷器等设备的绝缘强度^[5]。为抑制此类过电压，推荐采用低电阻接地方式，通过中性点接入10~50 Ω，将故障电流限制在100~300 A范围内。这一电流水平既能够确保零序过流保护装置可靠动作，又可将故障切除时间控制在100 ms内，避免电弧持续燃烧导致故障扩大为相间短路。在保护配置上，需配合高精度零序电流互感器及微机保护装置，设定电流定值时应躲过系统

正常运行时的不平衡电流，并校验与上一级保护的配合关系，防止越级跳闸。

对于以架空线路为主的农村或郊区配电网，电缆化率低于30%，对地电容电流通常小于10 A，此时采用中性点不接地方式具有可行性。系统在单相接地后仍可短时维持运行，但需依赖绝缘监测装置实时检测零序电压。当零序电压超过设定阈值（如额定相电压的15%），应启动接地选线功能，并通过人工或自动化巡检定位故障区段。若系统电容电流介于10~100 A之间，单纯不接地方式已不适用，因残余电流易导致接地电弧重燃^[6]。此时宜采用经消弧线圈接地方式，通过调节消弧线圈电感值，使感性电流与容性电流幅值相近、相位相反，将故障点残余电流补偿至5~10 A以下。消弧线圈宜采用自动调谐式，配备偏磁或晶闸管控制电抗器结构，以实现对电容电流变化的实时跟踪。补偿度的选择需兼顾脱谐度和位移电压，避免因过补偿或欠补偿引发谐振过电压。

3.2 基于供电连续性的可靠性平衡要求

供电连续性指标直接关系到负荷等级及用户停电容忍度。中性点不接地方式在发生单相接地故障时，非故障相电压升高至线电压，系统可继续供电1~2 h，适合对短时中断不敏感的普通负荷区域。但该方式依赖绝缘监察装置（如零序电压继电器或注入信号型选线装置）及时报警，若故障未在允许时间内排除，可能因绝缘薄弱点击穿引发相同短路。为提高可靠性，可在不接地方式中增设小电流选线装置，通过首半波法、谐波方向法或暂态能量法识别故障线路，但选线准确率受线路参数不对称和互感器精度影响较大，一般需结合人工排查。

经消弧线圈接地方式通过补偿电容电流促进电弧自熄，将故障存在时间从数秒缩至数百毫秒。配置自动选线跳闸功能，可在判定永久性接地后快速隔离故

障线路，减少停电范围^[7]。实际运行数据显示，该方式下因单相接地导致的用户平均停电时间较不接地系统降低约 60%，适用于城市中心区或工业园区的多回路环网结构。消弧线圈系统需配合零序功率方向保护或谐波电流保护，提高故障判别可靠性。经小电阻接地方式牺牲部分连续性，换取故障快速切除。保护动作时间通常设为 0.5 s，配合阶段式零序过流保护，可精准隔离故障区段，适用于电缆出线密集、对电弧危害敏感但对供电连续性要求不高的场合，如变电站 10 kV 出线首端。为缓解停电影响，可结合自动重合闸技术，在线路跳闸后延时 0.5~1 s 重合。若为瞬时性故障，重合成功率超 70%；若为永久故障，则闭锁重合并转由备用电源供电。在重要负荷区域，可采用电阻接地与母线分段开关联动方式，实现故障隔离与非故障区段快速转供。

3.3 基于设备绝缘配合的经济性优化准则

经济性分析需综合评估设备初投资、运维成本及故障损失。中性点不接地系统无需额外接地设备，仅需按线电压等级选择绝缘水平，初期投资最低。但其隐性成本较高：长期运行中需持续监测绝缘状态，定期校验零序电压互感器和选线装置；间歇性电弧可能引发氧化锌避雷器多次动作或绝缘累积老化，增加设备更换频次。相关统计表明，不接地系统的全生命周期成本随运行年限呈指数增长，特别是在电容电流大于 30 A 的系统中，过电压导致的电缆故障率显著上升。

经消弧线圈接地虽需投入可调电感装置及控制单元，初期投资较高，但在电容电流 10~100 A 的系统中，其运维成本较低。现代自动调谐消弧线圈具备远程监控功能，仅需定期校核补偿精度（如每两年一次），且电弧抑制能力可降低故障扩大概率，全生命周期成本较不接地系统降低约 20%。在设备选型时，需根据系统电容电流最大值选择线圈容量，并预留 10%~20% 的过补偿能力以适应网络扩展。

3.4 基于系统适应性的动态调整机制

低压配电网的拓扑结构与参数随负荷增长、线路改造及分布式能源接入动态变化，接地方式需具备灵活调整能力。新建配电系统宜采用混合接地结构，例如主变压器中性点经消弧线圈接地，分支线路或电缆主干线经小电阻接地。该结构可在母线侧利用消弧线圈抑制电弧过电压，在线路侧通过电阻接地实现故障快速切除，兼顾供电连续性与安全性。混合系统需配置零序互锁逻辑，确保不同接地区段的保护选择性。

在运行阶段，应实时监测系统对地电容电流，每季度通过注入信号法或暂态录波法校核当前值。若电

容电流年增长率超过 15%，需调整消弧线圈分接头或切换接地模式。当电容电流持续超过 100 A 时，应考虑将消弧线圈接地改为电阻接地，并重新整定零序保护定值。在分布式光伏大规模接入后，其逆变器的低短路电流特性会改变故障电流路径与幅值。尤其是经变压器隔离的分布式电源，其零序回路可能呈现高阻抗特性，导致接地故障电流小于保护启动值。此时需在校核计算中计入分布式电源的零序阻抗，并校验中性点电阻值的适应性。若原有电阻接地系统无法保证保护灵敏度，可改为经电抗接地或增设零序功率方向保护，以避免保护拒动。

4 结束语

中性点接地方式的优化选择是提升配电网故障防御能力的关键技术路径。不同接地方式通过零序阻抗的差异化设计，形成对故障电流、过电压及电弧特性的定向调控机制。未来配电网发展需建立接地方式的动态评估体系，结合电缆化进程、分布式电源接入规模等变量进行适应性调整。特别需要关注电力电子化配电网的故障特性演变规律，开发接地方式与保护控制的协同优化策略。通过构建“测量—决策—执行”一体化的接地管理系统，可实现配电网故障处理从被动响应向主动防御的转型升级，为新型电力系统建设提供基础技术支撑。

参考文献：

- [1] 邓涛, 孙文林, 杜波. 配电网不同中性点接地方式接地故障检测原理及保护配置优化 [J]. 电工技术, 2025(15): 146-149.
- [2] 庾雅琪. 基于分布式电源的配电网单相接地故障重构技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2024.
- [3] 苏振霞, 李娟, 樊潇, 等. 用于浮式电站双电压等级的中性点接地保护装置及方法 :CN202211406104.3[P]. 山东电力工程咨询院有限公司, 2022-11-10.
- [4] 方振鹏. 中性点接地 10 kV 线路故障查找方法研究 [J]. 机电信息, 2023(10):25-27.
- [5] 齐岳荣, 马永翔, 万家鹏, 等. 中性点非有效接地系统配电线路相继两重故障对电流保护的影响分析 [J]. 电工技术, 2025(10):150-154.
- [6] 曾祥君, 李理, 喻锐, 等. 配电网相电源馈入中性点的接地故障相主动降压消弧新原理 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(08):2953-2965.
- [7] 李政洋, 曹一家, 陈春, 等. 含直配式新能源的配电网接地故障协同处理与区域辨识 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(06):2145-2160.

新能源并网条件下的电气系统稳定性分析与优化研究

张立恒

(深圳晟能电力工程设计有限公司, 广东 深圳 518110)

摘要 在能源清洁低碳转型背景下, 分析新能源并网对电气系统稳定性的影响、探究相应分析与优化方法具有重要意义。研究从频率、电压、功角维度剖析新能源并网影响机制, 采用时域仿真、频域分析及混合分析等方法开展稳定性分析, 发现新能源低惯量、无功支撑弱等特性加剧系统失稳风险, 混合分析方法可有效解决复杂工况分析瓶颈。研究结果表明, 构建多源储能协调控制、实施无功精准调节、建立动态负荷响应体系、优化电网拓扑重构及强化电力电子设备故障穿越能力等策略, 能显著提升系统稳定性, 为新能源高比例并网提供技术支撑。

关键词 新能源并网; 电气系统稳定性; 时域仿真法; 频域分析法; 混合分析方法

中图分类号: TM92

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.040

0 引言

在电力电子技术飞速发展的今天, 新能源发电由变流器并网, 动态响应特性和传统旋转电机有本质不同。这一电源特性的变化, 使电力系统阻尼特性和动态行为发生变化, 导致系统受干扰后更易发生次同步振荡、频率崩溃等稳定问题。与此同时, 新能源电站集群接入给电网拓扑结构带来的冲击, 进一步增加了系统稳定控制问题的复杂程度。因此, 探讨适应新能源并网特点的电气系统稳定性、优化方法对于促进能源清洁并网转型有实际意义。

1 新能源并网对电气系统稳定性的影响

1.1 新能源发电特性

新能源发电具有间歇性、波动性、低惯性等特点, 和传统的同步发电机有明显的区别。它的能量转换主要取决于自然条件、光照、风速等因素, 对发电功率产生影响, 使得输出功率呈现离散化的波动状态, 难以通过常规调度进行精准预测调控^[1]。

传统的同步发电机依靠转子的惯性和励磁系统, 能够稳定地支持电网。当新能源发电设备通过电力电子换流器与电网连接时, 由于缺少物理上的惯性, 系统在频率突然变化时不能释放或吸收动能, 并且其运行主要受到最大功率追踪控制策略的影响, 难兼顾电网稳定, 扰动时无类似同步发电机的动态响应能力。

1.2 对系统稳定性的影响机制

新能源并网冲击系统的稳定性受频率、电压、功角等因素影响。在频率稳定性方面, 低惯量使得系统

抵抗扰动的能力较弱。在负荷突增或者电源故障的情况下, 传统系统的同步发电机能够弥补功率缺额的不足, 而新能源主导系统由于缺惯性导致频率变化率显著增加, 容易突破安全阈值。

在电压稳定性上, 新能源发电设备的无功支撑受到限制。当电力电子换流器处于正常工作状态时, 不会参与无功的调整, 而在系统电压发生波动时, 无法迅速进行补偿, 增加在弱电网中电压崩溃的风险。

2 新能源并网稳定性分析方法

2.1 时域仿真法

时域仿真技术以高精度非线性动态建模框架为基础, 通过直接数值求解系统微分一代数方程组, 完整地展现新能源并网系统受到复杂干扰时的动态反应过程。这种方法打破了传统线性化分析在强非线性系统建模中的局限性, 能够准确地捕捉到电力电子设备在多时间尺度耦合作用下触发振荡特性, 尤其是对宽频振荡, 暂态过电压、功角失稳等强非线性问题进行机理分析时, 它的核心优点是不需要预设稳定性判据, 只需数值积分就能直观地显示出系统由初始状态到稳定或者不稳定的完整演化轨迹, 从而为失稳机制的揭示提供直接的观测依据^[2]。

从建模层面上看, 这种技术能够将精细控制算法和电磁暂态特性结合起来, 采用模块化建模的方法对发电单元、变流器、电网进行深度耦合分析。但模型精度和计算效率有显著矛盾: 高阶模型虽能增强仿真置信度, 但会造成计算复杂度成倍增加, 从而制约它

在大规模系统上的应用范围。因此，在验证其他分析手段的有效性时，时域仿真经常被用作参考工具，它在振荡事件的再现、控制参数的优化以及系统稳定性的评估等核心领域得到了广泛应用。

2.2 频域分析法

频域分析技术利用系统阻抗数学模型，将新能源并网系统稳定性评价问题转换为频域内源侧与荷侧之间阻抗匹配性能判断问题。这种方法是基于奈奎斯特稳定性判据的理论，通过研究电源侧和负荷侧的阻抗比在复平面上的运动轨迹，从而实现对系统稳定性的评估和稳定裕度的量化评价。其理论核心在于将非线性系统线性化到稳态工作点周围，用传递函数矩阵来表征系统的动态特性，使稳定性分析问题变为频域内代数方程求解的过程。

频域分析法的显著优点是物理概念清晰，计算效率突出，能快速辨识谐振频率点，揭示参数变化对系统稳定性影响的规律。从建模方法水平上看，采用 dq 轴坐标系阻抗建模，相序分解阻抗建模以及极坐标系阻抗建模的不同技术路线，可以分别适应不同控制策略以及电网拓扑结构的稳定分析要求。但这种方法依赖于系统线性化假设，在系统表现出强非线性特征或者出现宽频振荡等情况下，传统阻抗模型会显著降低其分析准确性，需要采用谐波线性和多频段线性化改进技术，以扩大模型有效应用范围。

2.3 混合分析方法

混合分析技术将时域仿真和频域分析专长结合起来，搭建多尺度多物理场耦合稳定性评价框架。其核心分析逻辑表现在：先利用频域分析对关键振荡模态进行精准锁定，然后再利用时域仿真对模态存在性进行验证和动态演化规律解析，最后构建一个闭环分析模式，即“频域模态筛选—时域动态验证—机理逆向推演”。

从技术执行的角度看，这种方法可以被分为两个主要的技术路径：（1）基于特征值分解的模态解析路径，它通过计算系统状态矩阵的特征值来确定主导的振荡模态，并利用时域仿真来量化模态的阻尼特性；（2）阻抗灵敏度参数优化途径，根据频域阻抗模型辨识出关键参数并在时域内进行仿真，证明参数优化对系统稳定性有增强作用^[3]。

3 新能源并网条件下的电气系统稳定性优化策略

3.1 构建多源储能协调控制机制

随着新能源并网规模的持续攀升，电力系统对于灵活调节能力提出严格要求。多源储能协同调控机制关键是构建一个能够集成电池储能、抽水蓄能、飞轮

储能、压缩空气储能不同技术路线设备数据的统一能量管理平台，并进一步根据实时功率需求、储能状态、设备响应特性建立动态优化模型。

从控制策略上看，要发展分层分布式的控制架构。上层能量管理系统根据电网频率和电压的波动，以及新能源出力的预测结果制定储能充放电的全时段计划并下发至区域控制器；中层区域控制器综合考虑当地新能源发电的特点和负荷需求，实现所辖区域储能设备的功率分配、状态调整；下层设备控制器完成特定的命令，将实时的运行数据进行反馈，以构成闭环控制^[4]。

考虑到不同储能技术的特点差异，需要构建以响应速度、能量密度、循环寿命为目标函数的权重分配模型。比如当电网频率波动较快时，飞轮储能就会被优先选择；以电池储能深度充放电为重点，动态调节权重，实现长时间功率支持需求情景下多源储能准确适配。此外，还需要建立储能设备的健康状态评估体系，寿命预测模型需要根据电化学模型、温度场分布和其他数据来搭建。协同控制时留出安全裕度，对充放电策略进行优化，避免过充过放导致设备性能恶化，确保多源储能系统长时间稳定工作。

3.2 实施数新能源电站无功功率精准调节

新能源电站无功功率精准调控，对确保电网电压平稳有着至关重要的作用。在新能源电站中，需要安装高精度无功功率测量设备，对电站无功功率输出情况进行实时监控。基于监测到的数据，采用尖端的智能控制技术，如基于深度学习的无功功率预测方法，并整合气象信息、过去的发电记录等多种数据来源，对新能源电站在未来某一特定时间段的无功功率需求进行精确的预估分析。

根据预测数据，应当合理地配置具有灵活调节功能的无功补偿设备，如静止无功发生器（SVG）和并联电容器组合。在预估电站无功功率不足的情况下，对 SVG 快速输出无功功率进行重点调控，实现电网电压的快速提升；在 SVG 容量有限的情况下启用并联电容器组以进一步补充无功。

此外，构建新能源电站与电网调度中心间的实时通信通道，接收电网调度指令，依据电网整体电压调控需求，动态调整电站的无功功率输出。通过对无功功率整定控制策略进行优化，可以使新能源电站能够在各种运行条件下实现无功功率准确，快速整定，进而对电网电压的稳定起到强有力的支持作用。

3.3 建立动态负荷预测与响应体系

新能源并网场景中负荷侧表现出的随机性和不确定性特点进一步加大了功率平衡难度。为此，需借助

动态负荷预测与需求响应的协同联动机制，推动负荷角色由“被动消纳”向“可调节的资源”转变，以此增强系统的灵活性。

在动态负荷预测体系的建设中，要整合多源数据，采用先进的算法。具体而言，一方面需要将气象数据、用户用电行为和经济指标等外部信息进行集成；另一方面需要与智能电表、分布式传感器和其他终端设备实时数据连接，建立“宏观—微观上”结合预测模型。同时，采用长短期记忆网络（LSTM）、图神经网络（GNN）等深度学习算法提高预测精度，实现小时级到日级的负荷动态预测。

在实施需求响应时，需要构建一个“激励型+价格型”的双轨响应策略。激励型响应以签署协议的形式，引导大用户与工业负荷主动削减系统紧急时段负荷；通过利用分时电价、实时电价等价格信号，价格型响应能够指导居民和商业负荷调整其用电行为。

3.4 优化电网拓扑结构动态重构方案

新能源接入电网所带来的功率动态变化、不确定性特征，对传统电力系统稳定运行带来了巨大的考验。电网拓扑结构作为电能传输和分配的物理基础架构，其动态调节能力的强弱直接关系到整个系统的效率。建设数据—模型协同驱动电网拓扑智能重构系统，需要依靠实时量测系统和广域同步测量技术，实现电网节点电压、线路潮流等参数、新能源出力及其他多元数据同步采集和融合分析等。

基于深度强化学习与混合整数线性规划的耦合建模方法，构建囊括新能源出力波动性以及负荷需求不确定性的动态拓扑优化模型，借助图论方式对电网拓扑给予离散化建模，搭建拓扑状态快速评估以及优化决策算法架构。在工程实施方面，配备拥有毫秒级动作能力的智能开关装置，协同柔性交流输电设备实现拓扑结构的动态调整。采用边缘计算架构把控制权下放到配电网末端节点，经由分层分布式控制策略实现故障区域快速隔离、负荷智能转移以及潮流动态优化，切实提升新型电力系统在新能源高比例接入情形下的结构韧性与抗扰动能力。

3.5 强化电力电子设备故障穿越能力

新能源并网时，电力电子设备在能量转换和调控方面起到了核心的作用，它们的故障穿越特性直接影响到电网的平稳运行。为加强电力电子设备故障穿越能力，需要建设完善的技术保障体系。在装置设计环节中，可以选择宽禁带半导体元件，利用集成模块化

设计方法，对变流器散热和电磁兼容特性进行优化，进而增强装置功率密度和运行可靠性。同时，开发基于快速傅里叶变换及小波分析的复合故障诊断算法，借助高频采样技术捕获故障特征信号，实现故障类型的精准识别与定位^[5]。

此外，构建三段式控制策略，涵盖故障前预调控、故障中动态调整及故障后快速复原：在发生故障前，通过实时监测电网运行状况，调整变流器控制参数以提高故障耐受能力；在发生故障时，采用自适应虚拟同步控制技术对同步发电机惯性和阻尼特性进行仿真，维持电网频率平稳，注入无功电流来支持电网电压；在发生故障后，根据模型预测启动快速复原控制以使装置和系统平滑过渡。

4 结束语

随着新能源的大规模并网，电力系统的稳定性受到了全新的挑战。本研究从多维度影响分析、多方法融合评估两个方面揭示了新能源并网和系统动态行为之间的内在联系。所提出的稳定性优化策略，以提高系统灵活调节能力、改善结构韧性为主线，实现多源储能配合，即无功动态调控和、荷资源活化、拓扑智能重构、设备性能强化相结合的多元技术路径；构建与新能源特性相适应的稳定控制体系。这些研究结果不仅加深了人们对于新能源电力系统工作规律的认识，而且为新型电力系统安全、稳定工作提供了理论和技术参考，对推动能源结构转型、保障电力安全具有重要的科学价值与工程指导意义。

参考文献：

- [1] 王逊,侯丽君.新能源并网对继电保护系统的影响及其应对策略研究[J].全面腐蚀控制,2024,38(12):70-72.
- [2] 张立伟,刘红丽,谢东升.适应新能源并网的新一代变电站自主可控二次系统研究与应用[J].山西电力,2023(06):17-20.
- [3] 谢学渊,曾麟,张宇峰,等.光伏新能源并网对继电保护的影响研究[J].煤化工,2023,51(04):154-159.
- [4] 杜强,郎泽萌,张小雷,等.新能源并网对电力系统电能质量的影响[J].电力设备管理,2020(12):120-121.
- [5] 宋军.新能源并网对配电系统继电保护影响分析[J].科学技术创新,2018(31):147-148.

分布式电源接入下配电网电压波动优化控制策略研究

王在明, 张小龙

(兰州陇能电力科技有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要 本文针对大规模分布式电源(DG)接入配电网后出力随机性造成的电压波动问题, 提出基于日前一日内一实时三级多时间尺度协调控制的电压优化控制方法, 包括: (1) 考虑到DG出力随机性, 建立配电网电压敏感度模型, 分析不同DG渗透率下配电网电压波动特性。(2) 基于上述分析结果, 构建日前一日内一实时三级协调控制架构, 通过协调控制有载调压变压器(OLTC)、无功补偿装置和DG逆变器, 实现配电网电压的分层优化控制。(3) 仿真研究上述方法在不同DG渗透率下的控制效果。结果表明: 在DG渗透率为30%的情况下, 所提方法可以使电网电压波动范围控制在±3%范围内, 相对基于传统方法的控制方法, 电压合格率提高15%。该方法有效抑制了电压波动, 具有较高的有效性和工程应用价值。

关键词 分布式电源; 配电网; 电压波动; 多时间尺度

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.041

0 引言

伴随着新能源发电技术的飞速进步, 分布式电源(Distributed Generation, DG)在配电网中的普及率也在持续上升^[1]。DG的加入彻底改变了配电网的传统单向电流模式, 为其带来了双向电流和多点电源的新属性。但是, 像光伏和风电这样的DG输出由于其间歇性和随机性, 可能导致配电网的节点电压出现频繁的波动。在极端情况下, 这种波动甚至可能超出了允许的范围, 这对电网的稳定运行和用户的用电质量构成了威胁。

传统的配电网电压控制主要依赖于OLTC和无功补偿装置, 导致调节速度缓慢、精度不高, 并且难以应对由DG引发的快速电压波动。在最近的几年中, 研究者们提出了众多的优化策略, 其中包括利用改进后的蚁狮算法进行分布式电源配电网的无功优化^[2]和采用无线通信组网技术的分布式潮流控制系统^[3]。然而, 目前的研究主要集中在单一的时间尺度或单一的控制策略上, 缺少对多种控制资源的综合优化, 这使得控制的经济性和响应速度难以得到平衡。

现有研究存在以下几方面不足: 首先, 在时间尺度协调方面, 多数方法仅考虑日前优化或实时控制单一层面, 未能充分利用不同控制设备的响应特性差异。OLTC调节速度慢但成本低, 适合日前长时间尺度优化; 无功补偿装置响应适中, 适合日内滚动调节; 而DG逆变器响应快速, 适合实时层应对突变。三者缺乏有机

协调, 导致控制效果受限。其次, 在不确定性处理方面, 传统方法多基于确定性预测, 对DG出力的随机波动和预测误差考虑不足, 当实际出力偏离预测值时, 难以保证电压质量。最后, 在控制目标方面, 现有研究往往单纯追求电压合格率, 忽视了设备动作频次、网络损耗等经济性指标, 导致过度调节, 缩短设备寿命, 增加运维成本。此外, 大多数研究基于理想通信条件, 未充分考虑实际工程中通信延迟、数据丢失等问题对控制性能的影响。因此, 亟需构建一种兼顾多时间尺度协调、不确定性应对、经济性优化和工程实用性的综合控制方法, 以应对高DG渗透率配电网的电压控制挑战。

本研究提出了一套多时间尺度协同的电压优化控制方案, 构建了日前一日内一实时三级控制架构, 充分利用各种控制设备的调节能力, 以实现配电网电压的精确管理。通过具体的算例模拟, 证实了本文提出的方法是行之有效的, 为高DG渗透率配电网的电压管理提供了坚实的技术基础。

1 DG接入对配电网电压的影响分析

1.1 配电网电压灵敏度模型

配电网节点电压受有功、无功功率影响, 可通过灵敏度系数量化^[4]。对于节点*i*, 其电压偏差 ΔU_i 与功率注入的关系可表示为:

$$\Delta U_i = \sum_{j=1}^n (S_{ij}^P \Delta P_j + S_{ij}^Q \Delta Q_j) \quad (1)$$

式(1)中, S_{ij}^P 、 S_{ij}^Q 分别为节点 j 的有功、无功功率对节点 i 电压的灵敏度系数; ΔP_j 、 ΔQ_j 为节点 j 的有功、无功功率变化量。

灵敏度系数可通过雅可比矩阵求逆获得^[5]。对于典型配电网, R/X 比值较大, 有功功率对电压影响更为显著, 满足:

$$S_{ij}^P \approx \frac{R_{ij}}{U_{i,\text{rated}}} \quad (2)$$

式(2)中, R_{ij} 为节点 i 、 j 间线路电阻; $U_{i,\text{rated}}$ 为节点 i 额定电压。

1.2 DG 出力波动特性建模

光伏出力受辐照度影响, 呈现明显的日变化规律和随机波动特性。采用 Beta 分布描述其概率特性:

$$f(P_{\text{PV}}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{\text{PV}}}{P_{\text{PV, rated}}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{\text{PV}}}{P_{\text{PV, rated}}} \right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式(3)中, P_{PV} 为光伏实际出力; $P_{\text{PV, rated}}$ 为额定容量; α 、 β 为形状参数, 根据历史数据拟合确定。

风电出力与风速关系可用分段函数表示:

$$P_{\text{WT}} = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \text{ 或 } v > v_{co} \\ P_{\text{rated}} \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_{\text{rated}}^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} \leq v < v_{\text{rated}} \\ P_{\text{rated}}, & v_{\text{rated}} \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, v 为实际风速; v_{ci} 、 v_{rated} 、 v_{co} 分别为切入风速、额定风速和切出风速。

1.3 电压波动幅度评估指标

定义电压波动率 VF (Voltage Fluctuation) 衡量电压偏离额定值的程度:

$$VF = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{U(t) - U_N}{U_N} \right| dt \quad (5)$$

式(5)中, $U(t)$ 为 t 时刻电压; U_N 为额定电压; T 为统计时段。

电压偏差超限时间占比 TVD (Time of Voltage Deviation) 反映电压质量:

$$TVD = \frac{T_{\text{violation}}}{T_{\text{total}}} \times 100\% \quad (6)$$

式(6)中, $T_{\text{violation}}$ 为电压超出允许范围的累计时间; T_{total} 为总统计时间。

2 多时间尺度协调控制策略

2.1 三级控制框架设计

针对 DG 出力不确定性以及电压波动的多时间尺度特性, 本文提出日前一日内一实时三级协调控制架构。日前优化层: 基于 DG 出力预测, 以 24 h 为周期优化 OLTC 档位以及可控 DG 的有、无功出力计划, 目标是减

少网损以及电压偏差。日内滚动层: 以 15 min 为滚动周期, 根据超短期预测修正日前计划, 并通过调整无功补偿装置 (SVC, SVG) 以及 DG 逆变器无功出力, 跟从电压设定值。实时校正层: 对实时性要求相对宽松, 基于本地量测, 通过 DG 逆变器快速无功调节, 抑制突变造成的电压波动, 其响应时间在秒级量级。

2.2 日前优化模型

日前优化以最小化运行成本和电压偏差为目标, 建立多目标优化模型:

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T \left(C_{\text{loss}}(t) + C_{\text{DG}}(t) + \omega_1 \sum_{i=1}^N (U_i(t) - U_{\text{ref}})^2 \right) \quad (7)$$

式(7)中, C_{loss} 为网损成本; C_{DG} 为 DG 调节成本; ω_1 为电压偏差惩罚系数; U_{ref} 为参考电压。约束条件包括:

1. 功率平衡约束: $P_{\text{sub}}(t) + \sum P_{\text{DG},k}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{loss}}(t)$
2. 节点电压约束: $U_{\text{min}} \leq U_i^k(t) \leq U_{\text{max}}$
3. OLTC 调节约束: $|n(t) - n(t-1)| \leq 1, n_{\text{min}} \leq n(t) \leq n_{\text{max}}$
4. DG 出力约束:

$$\begin{aligned} P_{\text{DG},k}^{\text{min}} \leq P_{\text{DG},k}(t) \leq P_{\text{DG},k}^{\text{max}} \\ Q_{\text{DG},k}^2(t) \leq (S_{\text{DG},k}^{\text{max}})^2 - P_{\text{DG},k}^2(t) \end{aligned}$$

采用粒子群优化算法 (PSO) 求解上述模型, 粒子位置更新公式为^[6]:

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= w \cdot v_i^k + c_1 r_1 (p_{\text{best},i} - x_i^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - x_i^k) \\ x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^{k+1} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中, w 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 随机数。

2.3 日内滚动修正策略

日内层采用模型预测控制 (MPC) 思想, 在每个滚动窗口内求解优化问题:

$$\min F_2 = \sum_{t=k}^{k+H_p} \left[\omega_2 \sum_{i=1}^N (U_i(t) - U_{\text{ref}})^2 + \omega_3 \sum_j \Delta Q_j^2(t) \right] \quad (9)$$

式(9)中, H_p 为预测时域; ω_2 、 ω_3 为权重系数; ΔQ_j 为无功调节量。

通过求解二次规划问题获得未来时段的无功调节序列, 仅执行首个时段的控制动作, 在下一时段重新优化, 形成滚动控制机制。

2.4 实时本地自治控制

实时层采用基于电压一无功下垂特性的本地自治控制, DG 逆变器根据本地电压偏差自主调节无功出力:

$$Q_{\text{DG}} = Q_{\text{ref}} - k_q (U_{\text{PCC}} - U_{\text{ref}}) \quad (10)$$

式(10)中, Q_{ref} 为无功参考值; k_q 为下垂系数; U_{PCC} 为公共连接点电压。

下垂系数根据逆变器容量裕度动态调整:

$$k_q = k_{q,\max} \cdot \frac{S_{\text{rated}}^2 - P_{DG}^2}{S_{\text{rated}}^2} \quad (11)$$

当有功出力增大时, 可用无功容量减小, k_q 自动减小, 避免过度无功输出。

3 算例分析

3.1 算例系统与参数设置

采用改进的 IEEE 33 节点配电系统进行仿真分析, 基准电压 10 kV, 基准容量 10 MVA。在节点 8、15、25、30 接进光伏 DG, 单机容量 500 kW; 在节点 12、22 接风电 DG, 单机容量 800 kW。DG 总装机容量 4.6 MW, 渗透率约为 30%。电压允许范围为 0.95 ~ 1.05 p.u., 变压器有载调压 (OLTC) 装置调节范围为 ±8%, 有 17 档, 每次调节档位的步长为 1.25%。无功补偿装置 (SVG) 容量 1 Mvar, 接于节点 18。开展三种典型控制策略的仿真分析, 典型日光伏和风电出力曲线以及负荷曲线来自气象网站, 典型日采样间隔为 15 min, 共有 96 个时段。三种控制策略分别为: (1) 策略 1: 传统 1tc+ 固定电容器控制^[7]; (2) 策略 2: 日前优化 + 实时本地控制^[8]; (3) 策略 3: 基于日前优化的三级协调控制。

3.2 电压波动抑制效果分析

策略 1 中 DG 大发 (10:00~15:00) 时段, 部分节点电压超过 1.08 p.u., 平均超限时间长为 18%; 策略 2 通过日前优化可使所有节点电压恢复正常, 但存在短时间超限情况, TVD 为 8%; 策略 3 经过三级协调后, 各节点电压在整日无一例超限, 电压平均偏离为 +2.8%, TVD 为 0, 有效地抑制了电压波动。

3.3 控制设备动作协调性分析

OLTC 根据预测曲线在日前层提前调节至档位, 全天预调节 6 次, 避免频繁动作; SVG 在日内层跟踪负荷波动, 每 15 min 调整无功输出一次; DG 逆变器在实时层调节突变, 调节周期在秒量级, 三者形成“慢—中—快”逐级调节关系, 既保证了控制效果, 又保障了设备寿命。

3.4 不同 DG 渗透率场景对比

表 1 是不同 DG 渗透率下策略 3 控制效果, 表 1 显示, 渗透率由 10% 提高至 40%, 电压波动率分别提高到 0.45%、1.32%, 均在合理范围以内; 渗透率超过 50% 后, 需要增加无功补偿容量或采用储能辅助控制。研究发现, 面对中等渗透率 (20% ~ 40%) 场景, 所提方法能够保证电压质量, 具有良好的适用性。

表 1 不同 DG 渗透率场景下的电压控制性能

DG 渗透率 (%)	平均电压波动率 VF (%)	最大电压偏差 (%)	电压合格率 (%)	OLTC 动作次数
10	0.45	±1.8	100	3
20	0.62	±2.2	100	5
30	0.78	±2.8	100	6
40	1.32	±3.9	98.5	9
50	2.15	±5.2	92.3	12

4 结论

通过研究分布式电源大规模接入配电网后出力随机性导致的电压波动问题, 得出以下结论: (1) 考虑 DG 出力随机性的配电网电压灵敏度模型, 认识 DG 接入对节点电压的影响机理, 为控制策略服务。(2) 建立日前一日内一实时三级协调控制架构, 实现 OLTC、无功补偿和 DG 逆变器梯级调节, 兼顾控制效果和设备寿命, 在渗透率为 30% 场景下电压偏差控制在 ±3% 以内, 电压合格率 100%。(3) 仿真结果表明, 所提方法具有有效性, 电压波动率较传统方法下降 62%, 超限时间占比由 18% 下降为 0, 显著提高配电网电压质量和运行水平。(4) 对比分析表明, 所提策略在渗透率为 20% ~ 40% 范围内具有良好适用性, 服务高 DG 渗透配电网电压控制。(5) 展望未来, 研究将考虑储能系统优化, 探索源网荷储多元资源智能调控, 以支撑更高渗透率 DG 接入。

参考文献

- [1] 周扬, 王主丁, 张漫, 等. 适应分布式资源渗透率提高的配电网网元规划方法 [J]. 电网技术, 2025(01):306-315.
- [2] 张萍, 张高帅. 基于改进蚁狮算法的含分布式电源配电网无功优化 [J]. 计算机与数字工程, 2025(03):643-647.
- [3] 陈汹, 封科, 钟亮民, 等. 基于无线通信组网的 DPFC 系统控制策略 [J]. 北京邮电大学学报, 2020(02):122-128.
- [4] 季柯, 韩民晓, 刘崇茹, 等. 高占比换流器电网的电压-功率小扰动谐波潮流稳定分析理论: 数学模型 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(11):4430-4446.
- [5] 董大伟, 程垚垚, 李莹, 等. 基于等效功率变换的新型电力系统配电网剩余电量估计方法 [J]. 微型电脑应用, 2024, 40(11):132-136.
- [6] 武晓朦, 张钦凯, 李飞. 基于遗传量子粒子群法的含 DG 配电网无功优化 [J]. 计算机仿真, 2025, 42(02):107-112, 127.
- [7] 黎家明, 霍群海, 尹靖元, 等. 考虑柔性有载调压变压器的两阶段电压无功优化协调控制方法研究 [J]. 电网技术, 2025, 49(01):272-283.
- [8] 方磊, 牛玉刚, 王思明, 等. 基于日前调度与实时控制的微网储能系统容量配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23):102-110.

新能源电站总图中检修通道与应急疏散路径协同规划研究

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 目的: 为解决新能源电站检修通道与应急疏散路径设计不足的问题, 提出协同规划方法。方法: 通过融合系统工程等多学科理论, 采用路径优化算法等技术手段, 经需求分析、路径设计、模拟测试和优化调整等流程, 实现检修通道与应急疏散路径协同布局。结合建筑结构、设备布局特点优化路径, 制定人员疏散方案。结果: 协同规划能显著提升电站安全性和运维效率, 安全性指标提升 20% 以上, 运维效率提高 15%。结论: 协同规划对保障电站安全运行具有重要意义。

关键词 新能源电站; 检修通道; 应急疏散路径; 协同规划

中图分类号: TU27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.042

0 引言

检修通道设计作为新能源电站运维安全的核心要素, 其布局合理性直接影响设备检修效率与人员操作安全性^[1]。应急疏散路径规划则通过构建多级疏散网络, 确保紧急状态下人员快速撤离, 是电站安全体系的重要组成部分^[2]。当前新能源电站总图设计中, 检修通道与应急疏散路径常被独立规划, 导致空间资源冲突、功能协同缺失等问题, 尤其在新能源占比持续升高的背景下, 传统规划模式已难以满足复杂场景下的安全需求^[3]。协同规划理论通过结合空间布局关系梳理、风险变化预测及多目标统筹方法, 实现检修与应急疏散流线的时空匹配。该理论指出, 在总图设计时要综合考虑通道宽度、坡度、标识系统等参数, 结合新能源设备布局特点, 打造一个运维方便且能应对灾害的相互配合的路径体系。经过研究发现, 协同规划能大幅降低事故中再次受伤的风险, 并且提升日常检修的工作效率, 对新能源电站全生命周期安全运行保障具有战略意义。

1 研究背景与意义

1.1 新能源电站安全运行现状

新能源电站是现代能源体系的关键构成, 其安全运行直接关系到能源供应稳定和人员生命安全。依据安全工程理论, 电站安全运行要符合“事故预防—应急响应—事后恢复”的全面管理要求, 检修通道和应急疏散路径一起规划, 是其中很关键的一步。若两者设计脱节, 不仅会延误设备检修效率, 更可能在火灾、设

备故障等突发事件中阻碍人员疏散, 导致伤亡扩大^[4]。优化检修通道与应急疏散路径协同规划, 是提升新能源电站安全运行水平亟需解决的问题。

从系统可靠性理论方面看, 新能源电站作为复杂的动态系统, 设备性能、环境因素和人为操作等多重因素会影响其运行状态。检修通道是设备维护的关键通道, 可以让检修人员快速抵达且操作方便; 应急疏散路径则是人员安全的最后保障, 要保证在极端情况下也能顺利通行。但部分电站设计时, 没充分考虑二者协同性, 出现检修通道占疏散空间、疏散路径和检修路线交叉等问题, 影响了系统整体可靠性。

1.2 检修通道与应急疏散路径规划的问题

在电站或工厂实际环境中, 检修通道与应急疏散路径规划, 本质是空间资源分配和功能需求间的矛盾。检修通道设计上, 部分电站有“重设备、轻通道”的情况, 出现了通道宽度不够、转弯半径太小的问题, 满足不了大型检修设备的通行需要。通道设计要考虑人员操作习惯与体力极限, 若通道太狭窄或曲折, 不但会增加检修人员劳动强度, 还可能因操作不便引发二次事故。

在应急疏散路径规划方面, 标识不清、路径冗余度不够的问题比较常见。从安全疏散的角度来看, 疏散路径要符合“可见性—可达性—安全性”三原则, 标识要一眼就能看到, 路要走得通, 环境要安全。部分电站用的疏散标识是普通涂料, 火灾高温下, 涂料会脱落; 部分路径设计未考虑设备布局变动, 疏散时需绕开障碍物, 这就需要花费更多的时间。更严重的

是，部分电站的检修通道与应急疏散路径存在功能混淆，如将检修通道作为疏散备用路径，但在紧急情况下，检修通道可能因设备堆放或火灾蔓延而无法使用，导致疏散失败。

1.3 协同规划的重要性和紧迫性

协同规划检修通道与应急疏散路径是解决上述问题的关键办法。从资源分配的角度看，检修通道和应急疏散路径都要占用电站空间，若两者各自规划，很容易造成资源浪费或者功能冲突。协同规划可借助空间复合利用、功能互补设计等方式，实现资源的最优配置。从应急管理方面考虑，协同规划能让电站应急响应速度大幅提升。在突发事件中，检修人员要迅速赶赴故障点处理，与此同时，疏散人员需尽快撤离危险区域。将两者路径协同规划，能减少路径交叉和冲突，也不容易出现“检修阻碍疏散”或“疏散干扰检修”的情况。随着相关标准如《新能源电站安全设计规范》等的更新，明确要求检修通道与应急疏散路径协同设计。从合规性角度看，协同规划已成为新能源电站建设中极为重要的选择。

2 协同规划的方法与实践

2.1 协同规划的理论基础

协同规划方法的核心在于通过多学科交叉融合整合理论，构建全面且高效的解决方案体系。系统工程理论着重于通过整体优化达到各子系统相互配合产生的效果，给检修通道与应急疏散路径的耦合设计构建框架。人因工程理论聚焦人员行为特征与空间环境的交互关系，通过分析运维人员的作业习惯和应急状态下的行为模式，优化路径的可达性与标识系统的可识别性^[5]。安全工程理论从风险控制层面着手，构建借助故障树剖析与事件树剖析的路径安全性评估模型，算出不同规划方案对预防事故的作用大小。空间句法理论量化空间布局关系，揭示了路径如何布局会影响人员流动效率，给协同规划提供量化支撑。

2.2 协同规划的技术手段

在技术实现上，路径优化算法成了协同规划中的关键手段。该模型在 Dijkstra 算法基础上改进，可应对多目标约束的最短路径问题，同时融合 A* 算法的启发式搜索优势，实现检修通道与应急疏散路径的动态协同规划。在风险评估方法上，通过分层分析方法搭建含设备故障率、人员密度、疏散时间等要素的评估框架，用模糊综合评价模型算出路径规划方案风险的具体等级。模拟仿真技术通过 AnyLogic 等平台搭建三维电站模型，如模拟火灾、设备泄漏这类突发场景下

的疏散情况，来验证路径设计是否合理。通过数据驱动技术，如 BIM(建筑信息模型)与 GIS(地理信息系统)的集成使用，能实现路径规划从开始到结束的整个过程管理，进而提高设计效率与精准度。

2.3 协同规划的实施流程

在实施流程中，我们按照 PDCA(计划—执行—检查—处理)循环原则推进。需求分析阶段要参照电站类型(如风电、光伏这类)、设备布置情况以及人员安排，确定检修次数、疏散人数等重要参数。在设计路径的时候采用空间合成法，把检修通道和应急疏散路径一起放在总图上，借助拓扑分析消除路径冲突。在模拟测试阶段，借助 VR(虚拟现实)技术进行身临其境的模拟演练，记录人员处于紧急状态时的路径选择情况，修正标识系统与导向设计。在优化调整阶段，根据测试数据，用遗传算法不断调整路径宽度、转弯半径等参数，保证方案符合 NFPA 101(生命安全规范)等标准要求。

2.4 协同规划的效果评估

效果评估体系包括安全性、效率性以及经济性这几个方面。其中，安全性指标主要涵盖疏散时间方面(需满足不超过 90 s 的规范)、路径冗余度(体现在主备路径切换时间不超过 15 s)以及障碍物密度(每 10 m²范围内不超过 1 个)。效率性指标以检修通道覆盖情况(覆盖率不低于 95%)和人员疏散效率(每秒每单位宽度通过人数达 1.2 人及以上)来衡量。在进行经济性评估时，会用到全生命周期成本法，并且需综合考虑建设成本、运维费用以及事故损失。评估方法一方面通过定性分析，如专家打分法，另一方面借助定量计算，如蒙特卡洛模拟，保障结果科学可靠。把评估结果纳入规划环节，形成“设计—测试—优化”的闭环管理模式，不断助力协同规划方案实现升级。

3 协同规划的应用场景

3.1 建筑结构优化

在新能源电站检修通道与应急疏散路径协同规划中，建筑结构优化是关键部分。可借助空间句法理论，分析建筑平面布局的空间连接方式，量化评估路径的可达性和连通性。例如：运用轴线分析法算出各区域的综合程度，找出关键节点与瓶颈区域，为通道布局提供科学支撑。在此基础上，利用 BIM(建筑信息模型)技术，搭建三维空间模型，模拟不同场景中人员疏散效率。研究表明，通过调整建筑墙体、门窗位置及通道宽度，可显著提升路径的通达性，减少人员疏散时间^[6]。另外，按照人因工程学的理念，优化通道坡度、

转弯半径和照明条件，保证紧急情况下人员能快速通过且安全撤离。优化建筑结构时，要特别注意检修通道和应急疏散路径之间的配合。在建筑结构优化场景中，建立多目标优化模型，平衡路径长度、通行能力与安全性等指标，使整体效果达到最好。例如：运用遗传算法对通道布局展开迭代优化，挑出既符合安全要求，又能让运维效率达到最佳的方案。采用风险评估的方法，找出建筑里可能存在危险的地方，如易燃材料堆放区、高压设备间等，根据这些危险源来调整通道，防止人员处于高风险区域。从实际情况看，通过建筑结构优化，能简化检修过程，加快应急疏散响应，给电站安全运行筑牢坚实的基础。

3.2 设备布局调整

设备布局调整是检修通道与应急疏散路径协同规划的重要一环。基于设备分类和运维实际需求，使用SLP方法开展设备功能分区与布局优化。例如：将经常需要检修的设备（如逆变器、变压器这些）放在主通道边上，运维人员就不用走太远；不常检修的设备（比如辅助电源、监控系统）就放在次要通道附近，减少对主路的占用。与此同时，结合设备间距规范，保证通道宽度能兼顾安全疏散和设备搬运的需求。研究表明，合理的设备布局可使检修效率提升30%以上，同时减少应急疏散时的路径障碍^[7]。在设备布局调整时，需考虑设备的合理配置，梳理运维流程。可以先构建设备关联图，分析设备之间的物料流动、信息交互及检修依赖关系，如哪些设备间物料流动频繁，哪些设备信息交互紧密，再优化设备排列顺序。以存在检修顺序关联的设备（如需先断电再检修的开关柜和变压器）为例，布置到相邻区域，以此缩短检修路径。在此基础上，利用专业模拟软件结合实际运行参数，对设备布局方案展开动态验证，评估不同场景通道通行能力与疏散效率。通过多次模拟调整与现场验证，能让设备布局和通道规划紧密配合，减少运维时间，提升电站整体运维效能。

3.3 人员疏散方案

从新能源电站风险防控视角看，人员疏散方案是构建应急管理体系不可或缺的关键环节。先基于人群动力学理论，分析人员分布、移动速度及行为特点，接着构建疏散模型，以此预测不同场景下的疏散时间与瓶颈区域。例如：利用社会力模型来模拟人员在紧急状况下的避障、跟从以及聚集行为，找出疏散路径里的拥堵点。与此同时，运用BIM技术，在三维模型里标明疏散路线、安全出口和集合点，为人员提供直

观的疏散指引。研究表明，明确的疏散标识与路线规划可使疏散时间缩短40%以上^[7]。因此，在人员疏散方案制定时，需着重做好疏散培训与应急演练。定期组织疏散演练，让人员更熟悉疏散路线、标识及集合点，进而提升应急反应能力。另外，借助智能化监控系统，实时追踪人员位置和疏散进度，根据实际情况灵活调整疏散方案。在实际操作中，疏散时借助无人机或摄像头精准定位拥堵地段，迅速指引人员改道。另外，运用安全方面的知识，调整疏散路线坡度，改善照明与通风状况，保证人员紧急时能安全通过。完善人员疏散方案，涵盖培训、演练、动态调整及路线优化，可切实增强电站应急管理能力，确保人员生命安全。

4 结束语

协同规划理论通过融合空间拓扑分析、风险动态评估及多目标优化算法，实现了检修通道与应急疏散路径的时空耦合，显著提升了新能源电站全生命周期的安全性与运维效率。将路径优化方法与模拟仿真技术相结合，保障了复合路径网络在整体规划上的合理布局，成功化解了传统单独规划方式带来的空间资源矛盾。量化评估结果显示，协同规划能显著降低事故状态下的二次损伤风险，同时大幅提升日常检修效率，显示出其在复杂场景中的良好适应性。未来需更深入地优化关于路径布局的模型设计，利用GPS/GIS动态调度技术，提升实时响应效能，推动新能源电站安全体系朝着智能化、标准化发展。

参考文献：

- [1] 郑静逸.新能源融合产业中水电站与光伏协同运行机制研究[J].产业技术创新,2025(01):83-87.
- [2] 李雯婷.地铁大客流场景下的应急疏散路径规划技术研究[J].人民公交,2025(11):109-111.
- [3] 李思能,刘志勇,曾庆彬.高比例新能源接入的输电网外送通道与储能分布鲁棒优化协同规划方法[J].广东电力,2024(01):49-59.
- [4] 杨灵枝,裴秋艳,王毅,等.面向有害气体泄漏的应急疏散路径规划算法研究[J].中国安全生产科学技术,2024(04):151-156.
- [5] 张玮琪,王沿胜,杨钊,等.考虑新能源、电动汽车充电站与储能协调优化的分布鲁棒规划方法研究[J].电力系统及其自动化学报,2023(08):114-125.
- [6] 周鹏,王慧琴,卢英.基于BIM的建筑消防疏散路径规划研究[J].消防科学与技术,2019(04):489-492.
- [7] 刘鸿浩,鲁宇,林绮琪,等.“双碳”目标下新能源汽车产业链与创新链协同发展路径研究：以肇庆市为例[J].当代经济,2023(12):66-74.