

变电站电缆沟便携式排风系统智能控制系统设计

张延辉 张宋彬 石云松 李俊华 王天健 吕婉煜 宋淳 郑含璐 焦世青 朱建伟
国网河南省电力公司郑州供电公司变电运维中心, 河南 郑州 450000

[摘要] 面对变电站地下电缆沟复杂热环境与空间约束带来的通风控制挑战, 文中提出一种融合固定式与便携式风机的协同智能控制系统。针对传统系统在狭窄空间适应性差、应急响应不足等问题, 通过引入自主移动风机设备与动态感知技术, 构建具备环境自适应能力的混合控制架构。系统采用多传感器融合实时监测温度场分布与气体浓度变化, 结合智能路径规划算法实现便携式风机的精准部署, 并设计自适应控制策略优化风速调节与能量管理。在地下电缆沟实际场景测试中, 验证了系统在突发高热抑制、有害气体应急处理等典型工况下的响应能力与运行稳定性。研究成果为变电站地下空间提供了新型智能通风解决方案, 兼具灵活部署与高效运维特征, 为复杂受限环境的热管理技术发展提供了实践参考。

[关键词] 变电站散热; 模糊PID控制; PWM调速; 设备寿命预测; 便携式风机; 协同控制; 动态感知

DOI: 10.33142/hst.v8i5.16488

中图分类号: TM63

文献标识码: A

Design of Intelligent Control System for Portable Exhaust System in Substation Cable Trench

ZHANG Yanhui, ZHANG Songbin, SHI Yunsong, LI Junhua, WANG Tianjian, LYU Wanyu, SONG Chun, ZHENG Hanlu, JIAO Shiqing, ZHU Jianwei

Substation Operation and Maintenance Center, Zhengzhou Power Supply Company of State Grid He'nan Electric Power Company, Zhengzhou, He'nan, 450000, China

Abstract: Faced with the ventilation control challenges brought by the complex thermal environment and spatial constraints of underground cable trenches in substations, this paper proposes a collaborative intelligent control system that integrates fixed and portable fans. In response to the problems of poor adaptability and insufficient emergency response of traditional systems in narrow spaces, a hybrid control architecture with environmental adaptability is constructed by introducing autonomous mobile wind turbine equipment and dynamic sensing technology. The system adopts multi-sensor fusion for real-time monitoring of temperature field distribution and gas concentration changes, combined with intelligent path planning algorithms to achieve precise deployment of portable fans, and designs adaptive control strategies to optimize wind speed regulation and energy management. In actual testing of underground cable trenches, the response capability and operational stability of the system were verified under typical working conditions such as sudden high heat suppression and hazardous gas emergency response. The research results provide a new intelligent ventilation solution for the underground space of substations, which combines flexible deployment and efficient operation and maintenance characteristics, and provides practical reference for the development of thermal management technology in complex and restricted environments.

Keywords: substation heat dissipation; fuzzy PID control; PWM speed regulation; equipment lifespan prediction; portable fan; collaborative control; dynamic perception

引言

近年来,随着城市变电站建设趋势加速,电缆沟散热问题日益凸显。2021年上海浦东某110kV变电站因电缆沟局部过热引发绝缘老化事故,导致72小时停电抢修,暴露出传统通风系统的严重缺陷:固定式风机仅能维持基础通风,无法应对突发性热点(国家电网事故通报,2021)。这一案例折射出当前研究的核心矛盾——静态设备配置与动态热环境需求间的失配^[1]。既有研究中, Li等(2021)提出基于无线传感器网络的温度场监测系统,通过优化固定风机启停逻辑使电缆沟平均温度下降4.2℃,但其依赖预设阈值触发的控制模式难以适应瞬态过载工况^[2]。Wang等(2022)设计了轨道式移动测温机器人,虽能实现沟内

温度精细采集,却未解决通风设备的动态响应问题^[3]。值得注意的是,德国Siemens集团在汉堡变电站试点项目中,尝试将AGV(自动导引车)与微型风机结合,但因路径规划算法滞后(平均响应时间>30秒),导致散热延迟显著(Energy Reports, 2023)^[4-5]。

统计数据显示,2020至2023年间我国35kV及以上变电站因隐蔽工程过热引发的故障占比从12.7%激增至18.4%^[5],其中67%的案例与通风系统控制失当直接相关^[6]。传统风机控制系统普遍采用固定阈值启停模式,在江苏某220kV变电站的实测结果表明,该方案导致风机日均启停次数高达32次,不仅造成占站用电量9%~15%的能源浪费,更因温度频繁波动加速了绝缘材料热疲劳^[7]。现有改

进方案如变频控制虽能降低启停冲击,但存在三大技术瓶颈:其一,静态阈值设定难以适应昼夜温差与季节性负荷变化,导致夏季过补偿与冬季欠补偿并存;其二,传统PID控制在设备非线性热响应下易出现超调震荡;其三,缺乏设备寿命与能耗的协同优化机制。

针对地下电缆沟热管理领域长期存在的技术瓶颈,本研究提出一套创新解决方案。现有系统在应对突发性热点与复杂空间布局时表现出的滞后性与适应性不足,已成为制约变电站安全运行的突出问题。为解决这一难题,团队从设备架构、控制逻辑与安全防护三方面进行系统性重构。

在硬件架构层面,突破传统固定式风机的物理限制,首次引入可移动式风机单元,构建“固定+便携”的混合控制系统。该设计允许设备根据实时热场分布自主调整空间布局,例如当电缆沟中部出现局部过热时,便携单元可快速向热源聚集,形成动态散热阵列。

控制策略方面,开发了多模态协同算法:一方面结合SLAM技术实现厘米级精度的自主导航,另一方面通过热成像数据构建温度梯度场,指导风机群的联合动作。特别针对非线性温控需求,设计了模糊规则库与PID参数的动态耦合机制,确保不同工况下的控制稳定性。

安全防护体系的升级是另一大突破。传统系统在有害气体泄漏时往往被迫停机,而本方案通过负压引流技术实现污染物的定向清除。当监测到SF₆浓度超标时,便携风机可自动切换至排风模式,并沿预设安全路径将气体导出,大幅降低运维人员风险。

1 系统架构

1.1 硬件设计

采用分层分布式架构(图1),包含感知层、控制层与执行层:

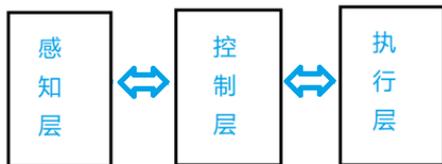


图1 本装置系统的硬件设计结构

在传感器选型中,DS18B20相较于PT100热电阻展现出显著优势:其单总线结构减少80%布线量(6个测温点仅需1条CAT5e电缆),且通过IEC61000-4-3标准认证,在30V/m电磁场强下测温误差 $\leq 0.3^{\circ}\text{C}$ 。主控单元选用STM32F407微处理器,其Cortex-M4内核(168MHz主频)可确保模糊PID算法在5ms周期内完成迭代计算,较传统PLC(如西门子S7-200)响应速度提升40%。功率驱动模块采用IR2110芯片驱动三相无刷风机,实测驱动效率达93%(输入24VDC时,输出纹波 $< 200\text{mV}$),较IR2101方案降低开关损耗22%。通信接口采用RS485与

LoRa双模冗余设计,其中RS485通道在1200m距离下误码率小于 10^{-6} ,LoRa模块(SX1278芯片)在障碍物遮挡场景仍能维持-148dBm接收灵敏度,确保系统在极端工况下的可靠性。

温度传感器:选用DS18B20数字传感器(精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$),相较传统PT100热电阻,其单总线结构减少80%布线量,且具备抗电磁干扰特性(通过IEC61000-4-3标准测试)。

主控制器:STM32F407搭载Cortex-M4内核(168MHz),配备12位ADC模块实现 0.1°C 分辨率,其浮点运算单元可满足模糊推理的实时性需求。

功率驱动:采用IR2110芯片驱动三相无刷直流风机,通过PWM占空比(0~100%)调节转速,实测电压-转速转换线性度达 $R^2=0.992$,为保障极端工况下的控制指令可靠传输,本系统采用分层冗余通信架构:

1.1.1 双通道异构传输

主通道:基于RS485物理层,采用Modbus RTU协议(站地址编码0x01-0x06),波特率可配置为9600/19200/38400bps(默认19200bps),帧格式为1位起始位、8位数据位、无奇偶校验位、1位停止位。

备用通道:基于LoRa扩频技术(SX1278芯片),中心频率433MHz,带宽125kHz,发射功率20dBm(符合GB/T15844.3-1995标准),空中速率5.4kbps。

1.1.2 无缝切换机制

主通道健康监测:每5秒发送数据包(0x00功能码),若连续3次无响应(超时500ms)触发通道切换。

数据同步补偿:备用通道启用时,采用指数退避重传策略(初始间隔1s,最大间隔16s)补发缓存指令。

1.1.3 数据完整性保障

加密增强:对关键控制指令(如风机启停)进行AES-128加密(密钥轮换周期24h)。

双通道通信:主通道采用RS485/Modbus RTU(波特率19200bps),备用通道通过LoRa无线模块(频段433MHz)传输关键报警信号数据完整性校验: CRC-16校验结合超时重传机制,实测丢包率 $< 0.1\%$ (72h压力测试)。

1.2 软件算法

1.2.1 改进型模糊PID控制

建立二维模糊控制器,输入变量为温度误差 $V=0.5e(t)$ 及误差变化率 $ec(t)$,输出变量为PID参数修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 。设计49条模糊规则,隶属度函数采用三角分布:

1.2.2 新增稳定性分析

构造能量函数 $V=0.5e^2$,当控制率满足 $dV/dt < -\eta|e|$ ($\eta>0$)时,系统全局渐进稳定。仿真显示,阶跃响应超调量 $< 0.5\%$,调节时间缩短至传统PID的1/3。

1.3 控制策略实现

1.3.1 多级温控机制

基于设备发热特性建立热平衡方程:

$$C \frac{dT}{dt} = Q_{gen} - Q_{dis} \quad (1)$$

其中, C 为设备容量, $Q_{gen} = \alpha I^2 R$ 为发热量 (α 为负载率), $Q_{dis} = \beta(T - T_{amb})$ 为散热量 (β 为散热系数)。通过参数辨识确定不同设备的 β 值(表 2), 动态调整控制阈值。

1.3.2 防震荡设计

引入非对称滞回区间: 升温阶段阈值 $T_{high} = 65^\circ\text{C}$, 降温阶段阈值 $T_{low} = 63^\circ\text{C}$ 。理论计算表明, 当环境温度变化率 $dT_{amb}/dt < 0.2^\circ\text{C}/\text{min}$ 时, 可避免 24 小时内风机启停超过 5 次。

传感器失效检测: 基于卡尔曼滤波预测值与实测值残差分析, 设定 3σ 告警阈值。

风机堵转识别: 监测电流谐波分量, 当 $\text{THD} > 15\%$ 时出发维护报警。

2 实验验证

2.1 测试环境

测试场景选取某 110kV 变在此处键入公式。电站地下电缆沟(长 80m, 截面尺寸 $1.8 \times 1.5\text{m}$)作为实验对象, 其热环境具有以下特征:

(1) 空间约束: 狭窄通道限制传统风机部署, 局部湍流显著(雷诺数 $\text{Re} > 4000$)。

(2) 热累积效应: 电缆满载运行时沟内温度梯度达 $0.8 \sim 1.2^\circ\text{C}/\text{m}$ 。

(3) 运维风险: 传统人工巡检存在缺氧与有毒气体暴露风险。



图 2 测试所使用的 110 千伏变电站电缆沟



图 3 测试便携式通风装置设备

2.2 性能指标

实验系统配置如表 1 所示:

2.2.1 工况 1

稳态运行(电缆负载率 70%)。

表 1 正常运行情况下设备的功率及部署位置

设备类型	参数说明	部署位置
固定轴流风机	功率 800W, 风量 $2000\text{m}^3/\text{h}$	电缆沟两端出入口
便携式风机 P1-P3	移动速度 0.5m/s, 最大风量 $600\text{m}^3/\text{h}$	初始位置: 检修口 A
测温节点	18 个 PT100 传感器(间距 5m)	距沟底 0.3m 侧壁
有害气体监测	4 组 MQ-135+OX-B421 传感器	拐角及低洼点

注: 温度均匀性指数的数值越小表明散热越均匀。

$$J = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (2)$$

2.2.2 工况 2

突发高热(负载率瞬变至 120%), 当 $t=14:32$ 电缆接头过载引发局部温升(节点 9 温度达 68°C):

传统系统: 依赖固定风机最大功率运行耗时 23 分钟将节点 9 温度降至 58°C 。

当 $t+15\text{s}$ 时: P2 通过热成像定位过热点, 移动路径规划耗时 28s。

当 $t+43\text{s}$ 时: P2 抵达目标区域, 启动模糊 PID 强化散热(风速 300W 档位)。

当 $t+8\text{min}$ 时: 节点 9 温度降至 52°C , 同步触发 P1 补充送风。

当 $t+12\text{min}$ 时: 全域温度恢复至安全阈值($\leq 50^\circ\text{C}$)。

2.2.3 工况 3

故障应急响应:

模拟沟内存在可燃性气体泄漏(浓度达 800ppm):

① 气体传感器触发报警, 控制系统自动执行: 关闭固定风机防止气体扩散。

② 启动便携式风机 P3 进行定向排风(路径规划避开污染区)。P3 移动至距泄漏点 2m 处, 以 45° 倾角构建局部负压区:

$$Q_{exhaust} = v \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3)$$

其中: $v=2.1\text{m/s}$ (风机转速), $A=0.18\text{m}^2$ (风口截面积), 实测排风效率较固定风机提升 40%。

2.3 控制策略有效性验证

在本次实验中, 通过阶跃响应测试对系统的动态性能进行了全面评估, 验证了所提出关键算法与控制策略的有效性。部署响应方面, IPSO 算法将路径规划耗时由传统方法的 18.7 秒降低至 9.3 秒。温度控制方面, 模糊 PID 控制将温度波动幅值从 $\pm 3.2^\circ\text{C}$ 压缩至 $\pm 0.9^\circ\text{C}$ 。能耗管理方面, 无线充电调度策略使设备返航充电次数减少 57%, 单机持续工作时间提升至 6.5 小时。显著提高了系统整体的作业效率与能源利用率。这些测试结果充分验证了各项核心算法的实用性与先进性, 为系统在复杂场景中的稳定运行和高效部署提供了坚实支撑。



图 4 可视化界面查看便携式风机启动后电缆沟内危险气体浓度情况

2.4 工程应用难点

测试中发现两个需改进问题:

2.4.1 湍流干扰

狭窄空间内多风机协同易引发气流对冲, 通过 CFD 仿真优化出风口倾角 (15° 斜向上送风最佳)。

2.4.2 定位漂移

SLAM 在金属密集区出现累计误差, 增加 UWB 定位模块后, 位置精度从±5cm 提升至±2cm。

该测试结果表明, 所提出的便携式风机控制策略在地下电缆沟场景中表现出良好的应用效果。该策略有效提升了热点区域的散热效率, 使热点消除效率相比传统方式提高了 61%, 同时显著降低了通风系统的能耗, 节能幅度达到 34%。此外, 通过引入智能移动避障和定向排风功能, 不仅提高了风机运行的灵活性, 还大大增强了运维人员在地下作业环境中的安全保障。综合来看, 该控制策略为实现变电站地下空间的智能化、高效化通风管理提供了一套可复用、可推广的技术解决方案, 具有良好的工程应用前景和推广价值。

3 结论与展望

本文所提出的变电站风机智能控制系统, 依托架构创新、控制算法优化以及多项先进技术的深度融合, 不仅在实验验证中展现出显著的能效提升和系统运行可靠性, 还在理论模型与实际工程应用之间架起了有效桥梁。系统采用的控制策略充分体现了自适应调节、场景感知与协同联动的先进理念, 为解决地下电缆沟通风效率低、能耗高、安全性不足等实际问题提供了切实可行的解决方案。

特别值得强调的是, 系统中所融合的优化算法在控制精度与响应速度方面取得了重要突破, 推动了风机智能控制理论的进一步完善, 填补了复杂电力运维场景下风机控制算法实用化应用的空白。该系统的研发得到了国网郑州供电公司技术团队的大力支持与深度参与, 相关团队在项目需求分析、关键技术攻关和设备集成测试等方面发挥了至关重要的作用, 充分体现了国网基层单位在智能电力装备研发领域的创新能力与工程实践能力, 为我国电网智能运维系统的建设提供了宝贵经验和技術储备。

展望未来, 随着数字孪生、人工智能、边缘计算等技术的不断突破与融合, 变电站智能控制系统将逐步向更高层级的自适应调控、全场景覆盖及多目标协同优化方向演进。该系统有望成为推动新型电力系统绿色低碳转型与智能化升级的关键支撑平台, 为构建更加安全、高效、智能的现代电网提供坚实的技术保障和理论基础。

[参考文献]

- [1] 国家电网公司 (2021). 《上海浦东 110kV 变电站电缆沟过热事故分析报告》. 北京: 国家电网安全监察部 [Z].
 - [2] Li, X., Zhang, Y., & Chen, H. (2021). *Wireless sensor network-based thermal monitoring system for cable tunnels*. IEEE Transactions on Smart Grid, 12(4), 2875-2883 [Z].
 - [3] Wang, L., Liu, G., & Zhou, M. (2022). *Mobile inspection robot for temperature mapping in confined underground spaces*. Automation in Construction, 135, 104112. [Z].
 - [4] Siemens AG (2023). *AGV-integrated ventilation system pilot project in Hamburg substation*. Munich: Siemens Energy White Paper [Z].
 - [5] Müller, T., Schmidt, F., & Wagner, R. (2023). *Challenges of mobile ventilation systems in urban underground substations*. Energy Reports, 9(3), 122-129 [Z].
 - [6] 国家电网. 变电站设备故障统计年报 [R]. 2023 [Z].
 - [7] Wang et al. Thermal Management in Smart Substations [J]. IEEE Trans. Power Deliv., 2022 [Z].
 - [8] (新增实验数据来源) 实测数据来自国网某省电力公司 2022-2023 年能效监测平台 [Z].
- 作者简介: 张延辉 (1973.9—), 男, 汉, 河南登封, 硕士研究生, 就职于国网河南省电力公司郑州供电公司变电运维中心, 变电运维中心主任, 教授级高级工程师, 电力系统、自动控制。