

常规变电站无线测温系统的关键技术问题与解决方案研究

梁兴利

甘肃龙源新能源有限公司

摘要：本文针对智能电网背景下，常规变电站无线测温系统替代传统测温方式的需求，聚焦其核心技术痛点，针对性提出解决方案，研究提升系统稳定性与实用性，未来可融合 AI 预测、边缘计算、新能源供电进一步优化。

关键词：常规变电站；无线测温系统；低功耗

1 绪论

1.1 研究背景与意义

随着电力系统向智能化、自动化方向快速发展，常规变电站作为电力传输与分配的核心枢纽，其设备运行状态的实时监测直接关系到电网安全稳定。变电站内的高压开关、母线接头、变压器套管等关键设备，在长期运行过程中易因接触电阻增大、绝缘老化等问题产生局部过热现象，若未能及时发现，可能引发设备烧毁、停电事故，甚至造成大面积电网瘫痪。传统测温方式（如人工巡检、红外测温）存在实时性差、覆盖范围有限、受环境干扰大等缺陷，难以满足现代电网对设备状态监测的高精度、全天候需求。

无线测温系统凭借无需布线、安装灵活、实时传输等优势，成为解决变电站设备测温难题的重要技术手段。研究常规变电站无线测温系统的关键技术问题与解决方案能提升设备故障预警的准确性和及时性，降低运维成本，具有重要的工程应用价值和学术意义。

1.2 国内外研究现状

在国际领域，欧美国家较早开展无线测温技术研究，如美国 GE 公司开发的基于 ZigBee 协议的变电站测温系统，采用低功耗传感器节点，实现了设备温度的实时采集与远程传输；德国西门子公司则推出了融合蓝牙与 LoRa 技术的测温方案，提升了系统在复杂电磁环境下的抗干扰能力。此外，国际电工委员会（IEC）制定了一系列关于变电站无线监测的标准，为技术应用提供了规范依据。

在国内，随着智能电网建设的推进，无线测温技术研究取得显著进展。国家电网、南方电网等企业联合科研机构，开展了针对变电站高电磁干扰、高湿度环境的无线测温系统研发，如基于 IEEE 802.15.4g 协议的工业级无线测温方案，在传感器低功耗设计、数

据加密传输等方面实现了突破，但相较于国际先进水平，部分核心技术（如高精度传感器芯片、抗干扰通信模块）仍存在依赖进口的问题，系统集成化与智能化程度有待进一步提升。

2 常规变电站无线测温系统概述

2.1 无线测温系统的基本原理

常规变电站无线测温系统基于“温度采集 - 无线传输 - 数据处理 - 状态预警”的核心逻辑实现运行监测。其基本原理如下：

温度采集：在变电站关键设备（如高压开关触头、母线接头）表面或内部安装无线温度传感器，传感器通过内置的温度敏感元件（如铂电阻、热电偶、半导体芯片）将设备温度信号转换为电信号，并经过信号放大、滤波、A/D 转换后，得到数字化的温度数据；

无线传输：传感器节点通过无线通信模块（如 ZigBee、LoRa、蓝牙模块），将数字化温度数据按照预设的通信协议传输至区域汇聚节点（如网关）；汇聚节点对多个传感器的数据进行汇总、缓存后，通过以太网、4G/5G 等方式传输至后台监控中心；

数据处理：后台监控中心采用数据滤波、异常值剔除、趋势分析等算法，对接收的温度数据进行处理，消除环境干扰与测量误差，生成设备温度变化曲线；

状态预警：系统预设设备正常运行的温度阈值，当处理后的温度数据超过阈值或出现异常变化趋势时，监控中心自动发出声光报警、短信通知等预警信号，同时将温度数据与预警信息存储至数据库，为运维人员提供决策支持。

2.2 系统组成与功能

2.2.1 系统组成

常规变电站无线测温系统主要由感知层、传输层、应用层三部分组成，各层功能与核心设备如下：

（1）感知层：核心设备为无线温度传感器，按

安装方式可分为接触式传感器（如贴片式、螺栓式）与非接触式传感器（如红外传感器）；按供电方式可分为电池供电传感器、电磁感应供电传感器、太阳能供电传感器。感知层的核心功能是实现设备温度的高精度采集与数字化转换。

（2）传输层：包括无线通信模块与汇聚节点。无线通信模块支持 ZigBee、LoRa、NB-IoT、蓝牙等通信协议，其中 ZigBee、LoRa 适用于短距离、低功耗、多节点的变电站场景，NB-IoT 适用于需广域覆盖的远程监测场景；汇聚节点通常具备多协议接入能力，可实现不同传感器数据的汇总与协议转换，并通过有线或无线方式与应用层通信。

（3）应用层：由后台监控软件、数据库服务器、显示终端（如监控大屏、运维终端）组成。后台监控软件具备数据接收、处理、存储、分析、预警等功能；数据库服务器用于存储历史温度数据与设备运维记录；显示终端为运维人员提供可视化的温度监测界面，支持设备状态查询、报警信息查看、报表生成等操作。

2.2.2 系统功能

（1）实时监测功能：实现对变电站关键设备温度的 24 小时连续监测，数据更新周期可根据需求设置（如 1 秒 - 5 分钟），确保运维人员实时掌握设备运行状态；

（2）异常预警功能：支持多级阈值预警（如预警值、告警值、紧急告警值），当设备温度异常时，通过多种方式及时通知运维人员，避免事故扩大；

（3）历史查询与分析功能：存储至少 1 年的历史温度数据，支持按设备、时间、温度范围等条件进行查询，并提供温度趋势图、对比分析图等可视化报表，为设备故障诊断与寿命评估提供数据支持；

（4）远程控制功能：部分系统支持远程配置传感器参数（如采样周期、传输频率）、重启汇聚节点等操作，减少现场运维工作量；

（5）联动控制功能：可与变电站自动化系统（如 SCADA 系统）、消防系统联动，当设备温度达到紧急告警值时，自动触发断路器跳闸、消防喷淋启动等应急措施，提升系统的安全性。

3 常规变电站无线测温系统的关键技术问题

3.1 传感器节点能耗与供电问题

传感器节点作为系统感知层的核心，其能耗与供电稳定性直接影响系统的持续运行能力。当前主要存在以下问题：

能耗过高导致续航不足：部分传感器采用传统的采样与传输模式（如固定周期采样、实时数据传输），

即使在设备温度稳定时，仍保持高频率的工作状态，导致能耗过高；此外，传感器内置的通信模块（如蓝牙模块）在数据传输过程中功耗较大，若传输距离较远，还需增大发射功率，进一步缩短电池续航时间。实际应用中，部分电池供电传感器的续航时间仅为 6-12 个月，远低于 1-3 年的运维需求，频繁更换电池不仅增加运维成本，还可能影响设备正常运行。

特殊场景供电困难：在变电站的高压设备（如 110kV 及以上母线）上安装传感器时，由于设备处于高电位状态，无法直接采用有线供电；若采用电磁感应供电（通过电磁感应从设备获取电能），则受设备负荷变化影响较大——当设备负荷较低时，感应电能不足，可能导致传感器断电；而在部分室内变电站或地下变电站中，光照条件较差，太阳能供电方式难以满足需求，进一步限制了传感器的安装范围。

3.2 无线通信稳定性与抗干扰能力

变电站内复杂的电磁环境与空间布局，给无线通信带来了严峻挑战，主要问题包括：

电磁干扰导致通信中断：变电站内的高压变压器、断路器、电抗器等设备在运行过程中会产生强电磁辐射，其频率范围覆盖无线测温系统常用的通信频段（如 ZigBee 的 2.4GHz 频段、LoRa 的 433MHz 频段），可能导致无线信号被干扰、数据传输误码率升高；此外，变电站内的电缆、金属柜体等会对无线信号产生遮挡与反射，形成信号盲区，导致部分传感器节点与汇聚节点之间无法正常通信。

通信协议适配性差：现有无线测温系统多采用单一通信协议（如仅支持 ZigBee 协议），但变电站的空间尺度差异较大——小型变电站的通信距离仅需 100-200 米，而大型变电站的通信距离可能超过 500 米，单一协议难以兼顾短距离低功耗与长距离传输需求；同时，部分协议（如 NB-IoT）对网络覆盖依赖较高，若变电站位于偏远地区，运营商网络信号较弱，将导致数据传输延迟或中断。

4 常规变电站无线测温系统关键技术问题的解决方案

4.1 低功耗设计与能源管理策略

针对传感器节点能耗过高与供电困难问题，从硬件设计、软件优化与能源供应三个维度提出解决方案：

4.1.1 低功耗硬件设计

（1）选用低功耗元器件：传感器采用超低功耗的温度敏感元件（如 TI 公司的 TMP102 芯片，静态电流仅为 $6\mu\text{A}$ ）与通信模块（如 Semtech 公司的 SX1278 LoRa 模块，休眠电流仅为 $0.2\mu\text{A}$ ），降低硬件基础功耗；

（2）优化电路设计：采用唤醒电路与休眠电路

分离设计,传感器在非采样时段进入深度休眠状态,仅保留唤醒模块工作,减少无效能耗;同时,采用高效电源管理芯片(如ADP125),提高电池能量转换效率。

4.1.2 智能化软件优化

(1) 动态采样与传输策略:根据设备温度变化自适应调整采样周期——当设备温度稳定时(如温度波动小于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$),延长采样周期(如从1分钟调整为5分钟);当温度出现异常波动时,自动缩短采样周期并加快数据传输频率,在保证监测精度的同时降低能耗;

(2) 数据压缩与聚合传输:传感器对采集的温度数据进行压缩处理(如采用差分编码算法),减少数据传输量;同时,相邻传感器节点之间实现数据聚合,通过一个节点统一向汇聚节点传输数据,减少通信次数与信道占用,进一步降低整体能耗。

4.2 通信协议优化与抗干扰技术

针对无线通信稳定性差、抗干扰能力弱的问题,从协议优化、抗干扰设计、组网策略三个方面提出解决方案:

4.2.1 多协议融合优化

(1) 开发“LoRa+ZigBee”双模通信模块——在变电站大范围区域(如室外设备区)采用LoRa协议(传输距离可达1-3km,抗干扰能力强),实现长距离数据传输;在设备密集区域(如室内开关柜)采用ZigBee协议(支持多节点组网,功耗低),满足短距离、多节点通信需求;双模模块可根据通信距离与节点密度自动切换协议,兼顾传输效率与功耗;

(2) 引入时间同步机制(如IEEE 1588 PTP协议),对各传感器节点与汇聚节点进行时间校准,避免因时间偏差导致的数据碰撞,提升多节点组网的同步性。

4.2.2 电磁抗干扰设计

(1) 硬件层面:通信模块采用金属屏蔽外壳(如铝镁合金材质),减少外部电磁辐射干扰;选用抗电磁干扰能力强的元器件(如EMC滤波器、屏蔽双绞线),

优化电路布局,降低电路自身的电磁辐射;

(2) 软件层面:采用跳频扩频(FHSS)技术——通信模块在多个预设频段间随机跳频,当某一频段受干扰时,自动切换至无干扰频段,降低信号被截获或干扰的概率;同时,采用前向纠错(FEC)编码算法(如RS编码),对传输数据进行纠错处理,将数据误码率控制在 10^{-6} 以下。

5 结语

本研究围绕常规变电站无线测温系统的关键技术问题展开,通过深入分析传感器节点能耗与供电、无线通信稳定性与抗干扰、测温精度与环境适应性、数据安全与系统可靠性、设备安装与维护便捷性五大核心问题,从硬件设计、软件优化、算法创新、管理模式等多个维度提出了针对性解决方案。

随着智能电网向“源网荷储”协同方向发展,常规变电站无线测温系统仍需在以下方面进一步探索:一是融合人工智能技术(如LSTM神经网络),实现设备温度异常的提前预测(预测精度 $\geq 90\%$);二是开发轻量化边缘计算模块,在传感器节点或汇聚节点实现数据实时处理,减少对后台中心的依赖;三是探索新能源供电技术(如振动发电、射频能量收集),实现传感器的永久续航。未来,通过持续的技术创新与工程实践,无线测温系统将为变电站的安全稳定运行提供更加强有力的技术支撑,推动电力系统向更高效率、更高可靠性的方向发展。

参考文献:

- [1] 马金柱,王丹.联合特钢公司电气接点无线测温系统的应用与实践[J].山西冶金,2024,47(1):216-217+220.
- [2] 桑川川,檀亚凤.基于无线通信的变电站自动测温系统设计[J].电工材料,2023(3):40-42.
- [3] 施金晓,吴秦月.考虑温度预警的变配电站无线测温系统研究[J].光源与照明,2023(2):207-209.
- [4] 洪晓燕.移动箱变关键技术与应用.浙江省,国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司,2023-01-20.