

[输电线路]

基于物联网技术的输电线路监测与智能预警系统设计

文/郑琛 陈斌 姚茜嫒 郑健睿 吴郑河
国网浙江省电力有限公司温州供电公司

详细介绍基于物联网技术的输电线路监测与智能预警系统的设计。围绕系统总体设计进行介绍，详细阐述系统架构、数据通信设计要素。在硬件选型与布置、软件功能模块划分以及通信协议的选择上，设计以实用性和高效性为核心。深入探讨监测与预警系统，包括环境监测、设备状态监测以及智能预警系统。环境监测考虑温度、湿度、风速风向和导线振动等多个参数，设备状态监测则关注绝缘子、金具腐蚀和线路热像。智能预警系统设计方面，利用先进的数据分析算法，提供多层级的预警机制。

输电线路作为电力系统的重要组成部分，其运行状态直接关系到电力系统的安全稳定运行。随着物联网技术的发展，实现输电线路的实时监测与智能预警成为可能。在设计一套基于物联网技术的监测与预警系统时，需考虑系统的实时性、可靠性与经济性，确保能够有效地预防和减轻事故的发生。同时，随着可再生能源的广泛应用，对输电线路运行提出了更高的要求，也为监测系统的设计带来了新的挑战。本文围绕一个综合监测与智能预警系统的设计过程展开分析，通过精确的数据采集、高效的信息传输、精细的能量管理以及先进的数据处理算法，提高输电线路的监控效率和预警准确性。

传感器等，负责原始数据的采集。网络层负责数据的传输，使用了高效的无线通信技术确保数据传输的稳定性。处理层为数据中心服务器，使用高速处理器和大容量存储，负责数据的存储、处理和分析。应用层提供用户交互界面，实现数据可视化和智能预警推送。

(2) 硬件选型与布置

硬件选型着重于性能与稳定性，以及能耗的优化。传感器采用工业级标准，具有较高的准确度和抗干扰能力，具体见表1。此外还需注意，布置硬件时，应重点考量监测点分布和环境条件，确保全面覆盖且易于维护。

表1 硬件选型与布置

设备类别	型号	数量	主要性能指标	预计功耗/W
温湿度传感器	THM-900	10	温度准确度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，湿度准确度 $\pm 3\%$	0.1
振动传感器	VBS-2000	8	频率响应 $0.5 \sim 2\,000\text{ Hz}$	0.2
数据中心服务器	DCS-X7	1	64核处理器，128 TB 存储	500
无线通信模块	WCM-5G	10	5G连接，99.999%可靠性	1

基于物联网技术的输电线路监测与智能预警系统总体设计

1. 系统架构设计

(1) 系统分层结构

本系统采用分层架构设计，确保数据处理和功能部署的灵活性。架构自下而上分为物理层、网络层、处理层和应用层四个主要层次^[1]。物理层包含各类监测终端和传感器，如温湿度传感器和振动传

(3) 软件功能模块划分

软件功能模块划分为数据采集模块、数据传输模块、数据处理模块、预警决策模块和用户交互模块。数据采集模块负责从传感器收集数据，并进行初步的格式化。数据传输模块使用加密技术保证传输过程的安全性。数据处理模块运用大数据分析技术，对收集来的数据进行处理和存储。预警决策模块基于机器学习算法，分析数据趋势预测潜在风险。用户交互模块提供直观的数据展示和预警信息推送，使用户能够及时作出响应^[2]。

2. 数据通信设计

(1) 通信协议选择

在通信协议的选择方面，本系统采用了MQTT（Message Queuing Telemetry Transport）协议和CoAP（Constrained Application Protocol）协议作为主要的数据传输协议。MQTT是基于发布/订阅模式的轻量级消息传输协议，适合带宽较低的远程通信环境，而CoAP是专为低功耗设备设计的Web传输协议。两种协议的特性见表2。

表2 两种协议特性

协议	传输模式	消息格式	QoS支持级别	安全性	适用场景
MQTT	发布/订阅	二进制	0~2级	TLS/SSL	大规模设备网络
CoAP	请求/响应	简易二进制	无	DTLS	带宽受限环境

(2) 数据传输安全性设计

为确保数据传输的安全性，系统采取了多项措施。首先，所有传输的数据都通过TLS/SSL进行加密，确保数据在传输过程中不被窃取或篡改^[3]。此外，对于关键信息采用了基于证书的双向认证机制，增加了安全验证的层次。具体的数据传输安全设计关键参数见表3。

表3 数据传输安全设计关键参数

安全机制	加密标准	认证方法	密钥长度	续期周期
TLS/SSL	AES-256	X.509证书	256位	每年
DTLS	AES-128	PSK	128位	每6个月

3. 异常情况通信恢复机制

本系统还设计了性能良好的通信恢复机制以应对可能的通信异常情况。当检测到连接中断时，设备将启用本地缓存，暂存数据，同时尝试按照预设的间隔进行重连。如果重连失败，系统将启动备用

通信通道，即通过备用的4G LTE模块建立连接。有关“重新连接”的策略见表4。

表4 异常情况下通信重连策略

异常情况	重连间隔	本地缓存时长	备用通道	切换策略
连接中断	1 min	最大24 h	4G LTE	连续3次失败后切换
通讯延迟	立即	不适用	4G LTE	延迟超过5 s切换

基于物联网技术的输电线路监测与智能预警系统功能设计

1. 环境监测设计

(1) 温度监测设计

首先围绕环境监测功能模块的子功能之一——环境温度监测功能进行设计时，需要做好下列工作。

1) 传感器选型。选用高准确度的工业级温度传感器，如PT100或热电偶传感器，具有在极端气候条件下工作的能力，且能够承受输电线路周围的高电磁干扰。

2) 安装位置与方法。传感器将沿输电线路均匀布置，特别是在连接器和转换接头处，因为这些位置更容易发生故障。安装时利用绝缘夹具将传感器固定于输电线旁，确保传感器表面与输电线表面距离保持一致，以获得准确测量。

3) 数据采集频率与准确度。数据采集频率设置为每分钟一次，实时监控温度变化。温度监测的准确度需达到 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可及时反映输电线路中潜在的过热问题。

(2) 湿度监测设计

湿度监测使用相对湿度传感器，例如基于电容式的湿度传感器，这类传感器对温度变化不敏感，适合室外环境。湿度传感器与温度传感器并排安装，以便同时监测温度和湿度的变化。由于湿度对输电线路的腐蚀和导电性有重要影响，监测准确度需控制在 $\pm 3\%\text{RH}$ 内，确保及时检测到可能导致绝缘性能下降的高湿环境^[4]。

(3) 风速风向监测设计

风速风向传感器，如风速仪和风向标安装在输电塔的高处，直接暴露于风流，获取准确数据。风速风向数据对于评估风对输电线的影响和潜在的断线风险至关重要。监测频率通常设定为每10 min一

次，足以跟踪和记录风速和风向的快速变化。

(4) 导线振动监测设计

导线振动监测主要使用加速度计和位移传感器。传感器应紧密安装在易受风振影响的输电线端。振动数据不仅能够指示导线的动态行为，还能反映输电线可能的疲劳损伤。振动监测的数据采集频率应高达每秒几十次，捕捉到快速振动事件，同时保证振动监测的准确度在毫米级别，确保系统可靠地检测并预警潜在的结构问题。

2. 设备状态监测设计

设备状态监测子模块是该系统的第二个功能性子模块，主要针对绝缘子的状态、金属物质是否受到腐蚀及输电线路温度情况进行监测。

(1) 绝缘子状态监测

在线监测系统采用高电阻测量技术，检测绝缘子表面的渗漏电流和电阻变化，发现表面污染或损坏迹象。监测系统包括高阻抗和漏电流传感器，安装于关键绝缘子位置。实时监测及记录绝缘子表面污染程度和漏电流大小，数据采集频率建议至少为每小时一次。

(2) 金具腐蚀监测

电化学传感器应用于金具表面，监测腐蚀电位和电流，评估腐蚀速率。传感器需安装于易受腐蚀的金具部位，确保与金具材料的良好接触。监测数据至少每日采集一次，及时发现腐蚀加速趋势。

(3) 输电线路热像监测

红外热像摄像机安装于输电塔上，连续扫描线路，记录不同部位的温度分布情况。该技术无接触远程检测线路温度，及时识别过载、接触不良或设备损坏引起的热点。热像摄像机分辨率需足够识别细微温度变化，监测频率根据线路运行条件与历史故障数据设定，一般为每15~30 min自动扫描一次。

综合以上监测功能，输电线路监测与智能预警系统能够精确跟踪关键设备健康状况，为运维决策提供数据支持，必要时触发预警机制，提升输电线路的运行可靠性与安全水平。

3. 智能预警系统设计

智能预警系统核心在于对采集到的监测数据进行及时而精确的分析与处理，确保预警的准确性与及时性。首先做好数据分析与处理工作，在此基础上编制预警机制。

(1) 数据分析与处理算法设计

1) 故障诊断算法。故障诊断算法的设计依赖于多源数据融合与模式识别技术。首先，算法整合来自绝缘子、金具腐蚀和热像监测的多维度数据。然后，利用机器学习中的分类算法，如支持向量机（SVM）、随机森林和深度学习网络等，对数据特征进行学习与分类，实现对异常状态的识别。算法在处理过程中需实现自我学习和适应，持续优化诊断准确率。

2) 预测模型构建。预测模型的构建旨在基于历史与实时数据，预测输电线路潜在的故障与性能下降。构建模型时，常用时间序列分析、回归分析以及机器学习中的神经网络等方法。预测模型通过分析历史数据中的故障模式与环境因素影响，训练出能够对未来状态做出预测的模型。此模型需具备自适应学习能力，对新的数据进行学习并不断调整预测策略。

(2) 预警机制设计

1) 预警等级划分。本智能预警系统的特点之一是需要自动识别危险事件的严重程度，给出具有较强“指导作用”的预警信息。其中，预警等级划分是根据监测数据分析结果和潜在风险的紧迫性来设定的。通常，预警等级分为普通、关注、紧急和危险四个层次，每个层次对应不同的响应措施。普通级别可能仅需要记录下出现的轻微异常，并进行定期检查；关注级别则需要运维团队进一步分析；紧急状态表明部分组件需要尽快处理；而危险级别则意味着系统部件已经或即将出现严重故障，需要立即采取行动。各级别预警的参数阈值均需通过大量历史数据分析得出，确保预警的准确性。

2) 预警信号输出设计。预警信号输出设计负责将预警信息以直观、快速识别的方式传达给运维团队。设计中包括多种通信手段，如短信、电子邮件、移动应用推送或自动化的系统界面弹窗。此外，对于不同等级的预警，应设计不同的信号输出方案。比如紧急和危险等级的预警可能需要通过声音或者光信号立即引起注意，而较低等级的预警则可以记录在系统日志中，供日常检查时参考。预警系统还应允许运维人员快速反馈，确认预警信息的接收和处置情况，保证预警机制的闭环管理。

(下转第124页)

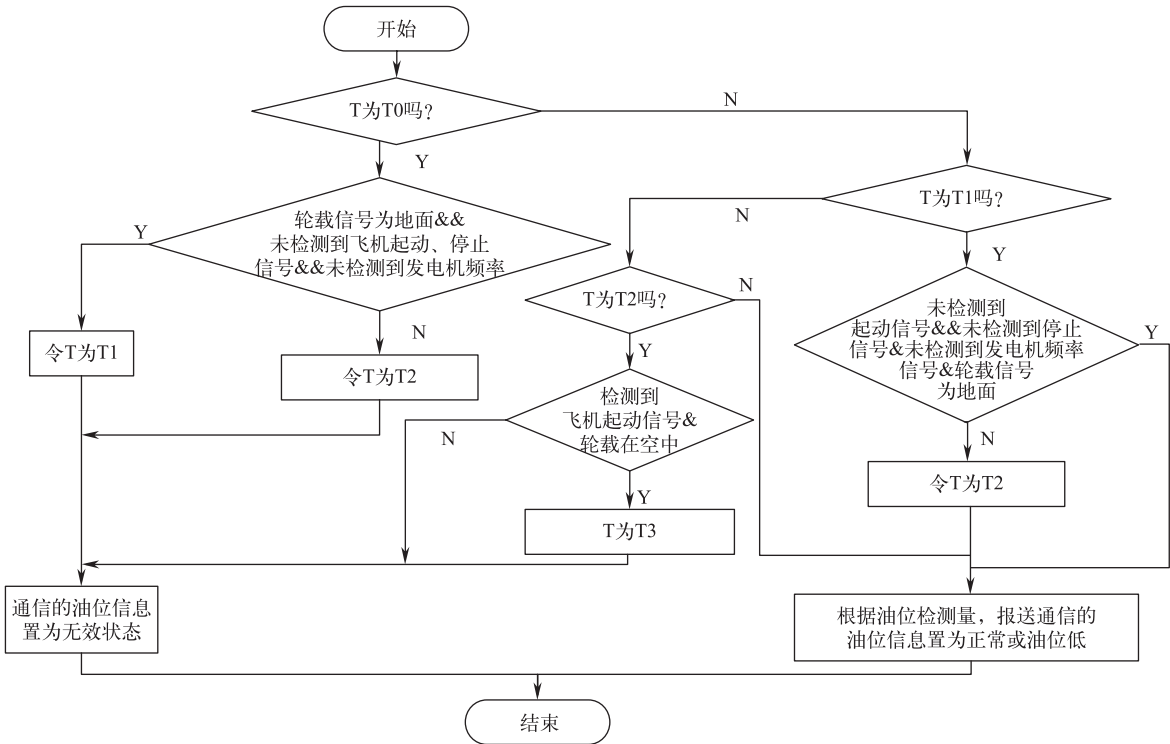


图3 油量信息检测流程图

[2] 卫建华, 齐攀, 刘琪等. 基于 DSP 的油量传感器检测装置的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2017, 40 (12) : 171-175.

[3] 夏永平, 王明. 油浸式电流互感器油位监测系统[J]. 电子技术与软件工程, 2019(17): 225-226.

[4] 高朝辉, 张晓斌, 吴小华. 基于MATLAB的无人机直流电源系统数字仿真[J]系统仿真学报, 2003, 15(4): 564-567.

(上接第 101 页)

结束语

通过技术性的深入分析和设计, 本文展示了一套基于物联网技术的输电线路监测与智能预警系统。总体来说, 系统设计充分考虑实际工程需求, 确保监测数据的准确性和预警响应的时效性。通过实时监测环境与设备状态, 并结合智能预警系统, 该设计极大地提升输电线路的安全管理水平。结合图表和公式对系统设计进行详细阐释, 为实际应用提供了坚实的理论与技术支持。未来, 随着物联网、人工智能以及大数据技术的不断进步, 监测与预警系统将趋向更高的自动化和智能化水平, 进一步优化能源管理, 降低维护成本, 为输电线路的安全、高效以及绿色运行做出更大的贡献。EA

(收稿日期: 2024-03-21)

参考文献

[1] 丁楠楠. 输电线路防外力破坏智能监测与预警系统及关键算法研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.

[2] 李勃. 输电线路防外力破坏智能监测及预警系统设计[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2021.

[3] 舒山. 基于物联网技术的智能电网高压输电线路在线监测系统[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019.

[4] 张泽宁, 孟令军, 夏丽霞, 等. 基于Web安全的输电线路分布式故障监测与智能诊断系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(3): 135-139.