

[物联网技术]

基于物联网技术的户外智能防水电能计量箱运行状态监测方法

文/刘洪敏 韩光 刘壮 张振勇 刘葵星
国网河南省电力公司滑县供电公司

提出一种基于物联网技术的户外智能防水电能计量箱运行状态监测方法。通过多源数据检测模块全面采集电能计量箱的环境与运行参数；基于数据特征构建了异常数据滤波与处理机制，有效提升数据可靠性，并对异常数据进行处理。实验结果表明，该方法能够快速响应复杂环境变化，及时发现异常状态，显著降低设备故障率，从而提高系统的运维效率与安全性。

随着全球能源需求的持续增长和智慧城市建设的推进，电能计量设备在电力系统中的应用愈发广泛，特别是在户外场景中，如居民小区、工业园区和偏远地区。然而，户外环境与室内环境相比更加复杂，高温、潮湿和雨雪侵蚀等问题使得电能计量箱容易出现设备故障，进而影响电力数据的准确性和传输稳定性^[1]。同时，也增加维护成本，给电网的安全稳定运行带来了挑战。物联网技术的快速发展为电能计量箱的智能化改造提供全新的解决思路。通过集成传感器、无线通信模块和云平台，物联网技术可以实时采集设备的运行数据，如箱体内部的温湿度、电压、电流和功率等关键参数，并实现远程传输与分析。同时，物联网技术支持多源数据的融合与处理，可通过数据挖掘与机器学习模型，动态预测设备的运行状态，提前识别异常情况并采取维护措施^[2-3]。基于此，本文以户外智能防水电能计量箱为研究对象，提出一种基于物联网技术的运行状态监测方法，并通过实验验证监测效果。

户外智能防水电能计量箱运行数据采集

计量箱内置的多源数据采集系统采用模块化设计，传感器模块配备高准确度传感器阵列，满足多

类型参数的实时采集需求。数据处理模块通过嵌入式微处理器对原始数据进行滤波与格式化处理。无线通信模块支持NB-IoT或LoRa等低功耗无线通信技术，实现数据的远程传输。设计冗余传感器，关键参数采用双传感器配置，防止单点失效。通过传感器防水、防尘处理，确保其在恶劣环境下的长期稳定运行。根据运行状态调节采样频率，提高数据采集效率，节省系统功耗。

户外环境复杂多变，电能计量箱的运行状态受多种因素影响。为全面掌握设备的运行情况，多源数据检测主要针对箱体内部参数和箱体外部参数进行检测。通过集成多种传感器，计量箱可以实时采集涉及设备运行和外部环境的多维度数据。

箱体内部参数主要有电流与电压数据和温湿度数据。通过电流互感器和电压传感器获取电流与电压数据，即

$$I(t) = \frac{V(t)}{R} \quad (1)$$

式中， $I(t)$ 为实时电流； $V(t)$ 为实时电压； R 为负载阻抗。

通过温湿度传感器检测箱内温度 T_{in} 和相对湿度 H_{in} ，以评估箱内的热稳定性^[4]。

箱体外部参数主要有环境温湿度和降雨与水侵情况。记录外部环境的温度 T_{out} 和湿度 H_{out} ，便于分析外界条件对设备运行的影响。利用水侵传感器监测箱体的密封性，水侵量表示为

$$W(t) = \int_{t_0}^t Q_{in} dt \quad (2)$$

式中， $W(t)$ 为累计水侵量； Q_{in} 为单位时间内的水侵流量。

1. 数据运行状态分类

对采集到的多源数据进行分类，将设备的运行状态划分为正常状态、警告状态和故障状态，为及时响应和维护提供依据^[5]。

首先对电气参数进行分类，计算电压偏差 V_{dev} ，衡量当前电压 $V(t)$ 偏离额定电压 V_{rated} 的程度，电压偏差计算公式为

$$V_{dev} = \frac{|V(t) - V_{rated}|}{V_{rated}} \times 100\% \quad (3)$$

若 $V_{dev} < \Delta V_{threshold}$ ，则视为正常；若 V_{dev} 超出阈值，进入警告或故障状态。

同时分析电流信号的波动情况，判断是否出现短路或过载。采用滑动窗口计算电流的均方差为

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2} \quad (4)$$

式中， I_i 为窗口内的电流数据； $\bar{I}$ 为窗口平均值。若 σ_I 超过设定阈值，标记为异常。

然后对环境参数进行分类，通过实时监测箱内温度 T_{in} 和湿度 H_{in} 的变化趋势，利用时间序列分析模型判断是否达到预警或故障状态，例如

$$T_{trend}(t) = \frac{dT_{in}(t)}{dt} \quad (5)$$

若 $T_{trend}(t)$ 在短时间内剧烈变化，且超出设定范围，则判断为异常状态^[6]。

最后分析水侵状态，利用水侵量 $W(t)$ 的累积值作为判断依据，若 $W(t) > W_{threshold}$ ，则判定为故障状态。

利用采集到的多源数据构建分类模型。分类模型以参数特征 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为输入，以状态类别 $Y \in \{\text{Normal}, \text{Warning}, \text{Fault}\}$ 为输出

$$P(Y|X) = \frac{P(X|Y)P(Y)}{P(X)} \quad (6)$$

式中， $P(Y|X)$ 为状态分类的概率分布，通过训练数据优化模型参数。

通过数据可视化工具，将分类结果呈现为图表或仪表盘，直观反映设备运行状态；同时，利用物联网通信模块将分类结果发送至运维人员，实现快速响应与处理。

户外智能防水电能计量箱运行异常值处理

1. 基于物联网技术的异常数据滤波

由于户外环境复杂，传感器采集的数据会受到电磁噪声、温度波动和信号丢失等外界干扰，从而导致数据出现异常值。因此本文基于物联网技术进行滤波方法，有效剔除异常值，确保后续分析和预测的准确性^[7]。

在数据采集过程中，异常数据类型见表1。

表1 异常数据类型

类型	具体表现
突变值	短时间内数据跳变，例如电流或电压瞬间异常增大或减小
漂移值	数据在较长时间内逐步偏离正常范围，例如温湿度长期缓慢升高或降低
缺失值	由于传感器故障或信号丢失导致的数据空缺

利用物联网平台实时采集与处理数据，通过云端服务器执行滤波算法，确保滤波结果的快速反馈。本文同时结合移动平均滤波、卡尔曼滤波和机器学习滤波对异常值进行处理。

针对短期波动数据，本文采用移动平均滤波，通过平滑数据序列来减弱噪声。计算过程为

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=i-n+1}^i x_j \quad (7)$$

式中， $\bar{x}_i$ 为平滑后的数据值； x_i 为时间序列中的原始数据； n 为窗口大小。

利用卡尔曼滤波动态估计数据的真实值，提高多维数据融合效果。其状态更新公式为

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k (z_k - H\hat{x}_{k-1}) \quad (8)$$

式中， $\hat{x}_k$ 为当前状态估计； $\hat{x}_{k-1}$ 为卡尔曼增益，定义为

$$K_k = \frac{P_{k-1}H^T}{HP_{k-1}H^T + R} \quad (9)$$

式中， z_k 为观测值； H 为观测矩阵； P_{k-1} 为预测误差协方差； R 为测量噪声协方差。

通过孤立森林计算样本的隔离深度，从而判定数据是否异常，公式为

$$h(x) = \sum_{i=1}^l \frac{\text{PathLength}(x_i)}{n} \quad (10)$$

当 $h(x)$ 超过设定阈值时，判定 x 为异常数据。

2. 异常数据处理

在完成异常值检测和滤波后，需要对识别出的异常数据进行进一步分析和处理，以最大程度恢复数据的真实性并确保监测与预测模型的准确性。采用插值法对于突变值（如电压或电流的瞬时尖峰）进行修复，根据前后数据的趋势，通过线性插值填补异常值，即

$$x_t = x_{t-1} + \frac{x_{t+1} - x_{t-1}}{2} \tag{11}$$

式中， x_{t-1} 和 x_{t+1} 是突变值前后的正常数据点。

使用时间序列预测模型预测异常值所在时刻的合理数据值，即

$$x_t = f(x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-n}) \tag{12}$$

式中， f 为预测函数，基于历史数据构建。

在异常值中，漂移值处理较为困难，本文采用回归方法对漂移值进行趋势校正，构建趋势回归模型为

$$y_t = \alpha t + \beta + \epsilon$$

式中， t 为时间； α 和 β 为回归系数； ϵ 是噪声项^[8]。

利用实时数据更新回归模型的参数，计算漂移值的校正值为

$$x_t^{\text{corrected}} = x_t - (\alpha t + \beta) \tag{13}$$

由于传感器故障或数据传输丢失导致缺失值，本文使用数据序列的均值替代缺失值，即

$$x_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{14}$$

利用物联网技术对每个异常点打上标记，并通过实时通信模块发送告警信息至监控中心或维护人员。

实验研究

为了验证本文提出的基于物联网技术的户外智能防水电能计量箱运行状态监测方法的实际应用效果，设定对比实验，选用传统监测方法和本文监测方法进行实验对比。设定实验设备为：户外智能防水电能计量箱 2 台、STM32）嵌入式微控制器、电流、电压、温湿度、振动、故障检测传感器、通信模块（LoRa/Wi-Fi）、数据采集与处理终端及服务器端搭载的监测系统。同时比较本文监测方法与传统监测方法，得到的数据采集率实验结果如图1所示。

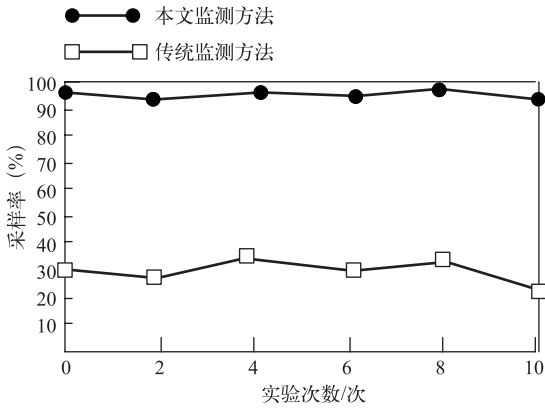


图1 数据采集率实验结果

根据图1可知，在10次实验中，本文提出的监测方法采样率在90%以上，而传统监测方法的采样率在20%~30%之间。这一差异表明，本文方法在数据采集的全面性和稳定性上具有显著优势。本文方法利用物联网传感器和通信技术，实现对电能计量箱运行状态的实时、多维度采集，避免传统方法中因单一采集源导致的遗漏。通过设计异常数据滤波与修正算法，减少噪声数据的影响，提升有效数据的比例。采用低延迟、高可靠性的通信协议，保证数据在复杂环境下的高效传输。而传统监测方法由于依赖人工记录或简单的监控手段，容易受到环境因素和设备性能的影响，导致采样率较低，且难以满足实时性和全面性的要求。

响应时间见表2。

表2 响应时间实验结果

实验次数	传统监测方法响应时间/ms	本文监测方法响应时间/ms
1	450	120
2	470	110
3	460	115
4	480	130
5	455	125
6	475	118
7	465	122
8	490	128
9	460	119
10	470	125

根据表2所示实验数据可知，传统监测方法的平均响应时间约为468 ms，而本文提出的监测方法平均响应时间为 121 ms，响应速度提升约74%。本文方法利用高性能的通信协议，实现低延迟的数据传输，相较于传统依赖人工记录或低效硬件采集的方

式大幅度提升响应速度。

异常检测准确率结果如图2所示。可知，本文提出的基于物联网技术的户外智能防水电能计量箱运行状态监测方法的异常检测准确率，明显高于传统监测方法。

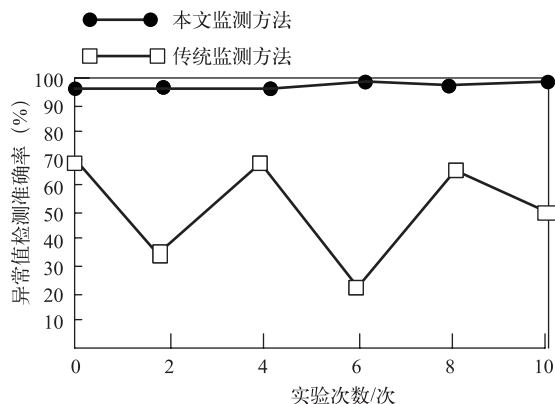


图2 异常检测准确率实验结果

综上所述，本文提出的基于物联网技术的监测方法显著缩短响应时间，提高采样率和异常数据检测率，有助于快速发现电能计量箱运行中的异常问题。这一结果不仅体现物联网技术在监测效率上的优势，也验证本文方法的实际应用价值，为进一步推广提供技术支持。

结束语

本文提出一种基于物联网技术的户外智能防水电能计量箱运行状态监测方法，通过多源数据检测模块和异常数据处理机制的结合，显著提升系统的采集率和响应速度，同时增强数据的可靠性和准确性。实验结果表明，该方法在复杂环境下表现出良好的适应性，能够快速发现异常状态，降低设备故障率，提升系统运行的安全性与运维效率。未来的

研究可以进一步结合人工智能技术，优化异常检测算法，并拓展该方法在其他类型智能设备运行状态监测中的应用，以全面提升智慧能源管理的水平。

EA

(收稿日期：2025-05-07)

参考文献

- [1] 陈德富, 刘小湖, 周旭文, 等. 基于LoRa自组网的电能采集系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(3): 235-240.
- [2] 刘宇鹏, 雷少波, 樊浩研, 等. 基于深度强化学习的无线多址接入方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(8): 10-16.
- [3] 何道远, 潘韦, 王志刚, 等. 基于防盗算法的多功能智能电力计量系统[J]. 现代电子技术, 2024, 47(12): 177-181.
- [4] 臧宝志, 郭亮, 张志, 等. 基于雾计算的电能计量箱物联网电子控制锁设计[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(2): 187-191.
- [5] 陈锐彬, 叶成彬, 李安娜, 等. 一种物联网型的电能监控排插[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2022, 22(2): 18-21, 26.
- [6] 张银建, 田亚南. 基于NB-IoT以及ADE9078的智能数字远传三相电表设计[J]. 自动化仪表, 2019, 40(7): 47-49, 53.
- [7] 刘春雨, 罗群, 顾强, 等. 智能配电网电能计量设备的运行状态监测终端研究[J]. 中国测试, 2020, 46(7): 68-74.
- [8] 黄国兵, 王嘉浩, 黄凯, 等. 一种电力关口物联网终端的费率电量处理系统[J]. 计算机与现代化, 2020(5): 106-110, 126.

