

基于边缘计算的配电房监测系统研究

邵长英¹ 郭元新² 曹昌昌³

SHAO Changying GUO Yuanxin CAO Changchang

摘要

随着国家电网的发展,越来越多的配电房需要进行数据采集和维护。针对配电房数据采集量大,数据采集不及时等问题,文章提出了一种基于边缘计算的智能监测方法。通过在配电房部署边缘处理节点,采集实时数据并进行故障检测,发生故障时形成警告信息上报到云端。该方法既减少了数据传输的带宽,也提高了配电房检测的实时性和配电房故障检测的准确率,为电网智能化提供了新的解决方案,并为配电房精准维护提供了技术支持。

关键词

边缘计算;配电房检测;故障检测

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.04.008

0 引言

随着智能电网的发展,电网和物联网之间的配合变得更加紧密,配电房作为电力分配的核心节点,配电房的健康运行事关电网的安全^[1]。因此其运行状态的实时监测与智能化管理成为保障供电可靠性的关键。但配电房地域分布松散,简单的人工巡查需要较大的人力而且不能实时监控配电房的运行状态^[2]。

一些文献中提到了一种基于物联网的实时监控系统,这种方式保证了实时性^[3],但面对大量的配电房需要采集时,会增加云端服务器压力,因此云端建设成本较高。另外一些文献提出的采集方案尽管增加了本地控制功能^[4],但需要人工决策,缺乏故障的自动监测。综合分析,目前传统的集中式监测模式存在数据传输延迟高、网络带宽压力大、数据泄漏等问题,难以满足配电房对实时性、安全性和自主决策的需求。在此背景下,边缘计算技术凭借其低时延、高可靠、数据本地化处理等优势,为配电房状态检测提供了创新解决方案^[5]。

针对现有配电房监测的弊端,提出了一种基于边缘计算的监测系统。该系统将部分数据分析和数据计算分布到本地。进而降低云端服务器的压力。另外本地边缘网关通过对数据的分析判断出当前配电房的运行状态是否健康^[6],当出现故障时,以事件上报的方式将关键信息上报给云端。以便维护人员更加准确地了解配电房的运行状态并及时进行维护。

1 基于边缘计算的配电房监测系统总体设计

该系统通过温度传感器、振动传感器、电流电压互感器、水位传感器采集相应的数据。采集的数据通过无线网络汇集到边缘网关计算中心进行处理。边缘计算中心根据采集的数据判断当前配电房是否出现运行异常,电路是否出现故障。并将判断结果通过无线网络上传到云端。以便维护人员及时进行维护。

1.1 总体设计

基于边缘计算的配电房监测系统按照模块化模式进行设计,该系统由数据采集模块、边缘网关模块、无线网络模块组成。数据采集模块负责前端数据采集,并将数据通过无线 ZigBee 网络传输到边缘网关中。边缘网关模块负责数据的处理,分析当前的数据是否存在异常并将分析结果进行本地存储。如果数据存在异常边缘网关会通过无线通信模块将数据传输到云端。无线网络模块主要负责和采集模块建立连接获取传感器采取的数据,同时也负责和云端建立连接上报本地分析的异常事件。系统整体架构图如图 1 所示。

在该系统中边缘网关是整个系统的关键处理单元,边缘网关负责通信管理的同时也负责数据采集和数据处理。针对边缘网关的功能该系统采用了常见的 STM32F407 芯片作为处理芯片。该芯片的主频高达 168 MHz 主频配合 DSP(数字信号处理器)和 FPU(浮点运算单元)指令可以快速地完成任务处理。另外该芯片拥有丰富的外设接口,基本满足了边缘网关的需求。边缘网关的基本硬件架构如图 2 所示。

1. 山东佳来设计咨询集团有限公司 山东济南 250100
2. 积成电子股份有限公司 山东济南 250100
3. 美华建筑设计有限公司山东第一分公司 山东济南 250100

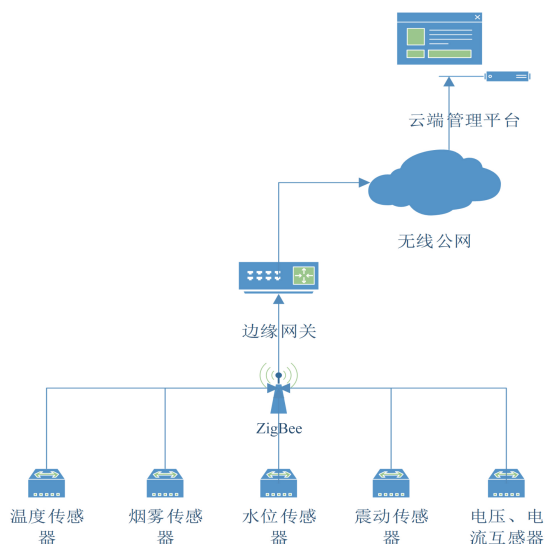


图1 系统整体架构图

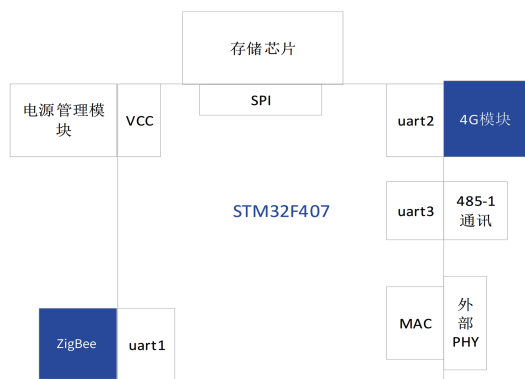


图2 边缘网关的基本硬件架构

1.2 系统软件设计

系统按照模块化进行软件设计，整个系统划分为数据采集模块、数据处理模块、通信管理模块、存储管理模块。

数据采集模块主要负责采集温度传感器、振动传感器、电压、电流互感器、水位传感器、烟感器的数据。模块每隔 T_1 时间会通过ZigBee网络向各个传感器发送数据采集请求，传感器收到采集请求后向边缘网关模块发送实时数据。同时模块为了采集电量数据会通过485总线采集配电房总表的电量数据，以便监测电量是否异常。

数据处理模块是核心模块，负责系统数据的预处理与配电房状态的判断。为了保证数据的准确性，采集到的数据先进行数据值异常处理，通过异常处理剔除异常值。然后对数据进行平滑去噪。处理完毕的数据再作为配电房监控的数据进行状态预判。当温度超过阈值时，数据处理模块会产生温度过高警报并上报云端。当振动数据的振幅超过阈值后会产生配电柜故障警告并上报云端。另外采集的烟感数据会作为火警的判断标准，水位传感器采集的水位数据将用来判断是否配电房浸水。采集的三相电压、电流则会用来判断当前配

电房是否出现失压、失流、过载、三相不平衡等故障^[7]。

针对异常数据的识别本文采用了Z分数法。该方法以时间 T_2 为计算周期，该周期内包含多个采集数据点。该算法通过式(1)计算出Z分数。并设置Z分数的阈值为 $\pm q$ 。如果Z分数不在这个范围内则认为是异常值并剔除掉。用公式表示为：

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

式中： μ 表示周期内的平均值； σ 表示标准差。

数据平滑采用的是移动平均滤波(moving average filtering)算法。该算法选择固定长度为 N 的数据作为窗口，通过依次向前滑动来计算窗口内样本的平均值来进行滤波。每个位置滤波后的输出 x_i 通过公式计算为：

$$x_i = \frac{y_i + y_{i-1} + \dots + y_{i-N+1}}{N} \quad (2)$$

系统针对采集的数据做了分区存储。不同传感器采集后上传的数据会存储在不同的缓存中以便进行数据模块进行故障分析，防止数据混存导致故障识别出现误判。

判断失压、失流、过载、过压等故障时，数据处理模块会获取对应缓存中的电压、电流数据，当数据超过或低于阈值时进入故障识别阶段。此时并不会认为配电房发生故障，只有当故障识别阶段持续时间 T_2 时才会产生对应的故障并保存相关故障信息。增加持续时间的判断大大降低了故障误判率^[8]。

针对配电房火警的判断不再单纯地依靠烟雾传感器的数据，系统通过将烟雾传感器和温度传感器结合进行综合判断。当烟雾传感器产生烟雾信号时，数据处理模块会获取各个温度传感器的温度数据，并计算时间 T_3 周期内的温度变化率。当变化率超过阈值时则认为火警产生。变化率的计算公式为：

$$f = \frac{F_{t_2} - F_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中： F_{t_2} 代表 t_2 时刻的温度； F_{t_1} 代表 t_1 时刻的温度。

为了判断配电房中配电柜是否出现故障，系统使用振动传感器获取配电柜的振动的加速度、振动振幅、振动频率、振动速度，将获取的数据作为特征向量和采集到的样板数据进行匹配^[9]。当特征向量和模板的相似度符合阈值时，则认为当前配电柜处于模板代表的状态^[10]。

为了提高匹配精确度，系统采用了改进型动态时间调整(dynamic time warping, DTW)算法^[11]。该算法是基于动态规划思想之上的算法。该算法会构建两个模板之间的距离矩阵，在距离矩阵中寻找最小的最优路径。因为距离矩阵中包含特征向量和模板向量不同元素的距离，因此DTW算法可以很好地处理时域上不同长度模板之间的匹配。并且可以很好地衡量时间序列上模板的相似性。因此它十分适合进行故

障判断^[12]。

系统会采集正常情况下的配电柜振动情况，获取该状态下的振动加速度、振动速度、振动频率、振幅。因为振动加速度、振动速度、振动频率、振幅包含了纲量和无量纲，在进行模板提取之前需要进行数据归一化。归一化会对原始数据进行等比例缩放。将原始数据转换为介于某一特定范围的数据，从而消除量纲和数量级影响，改变变量在分析中的权重来解决不同度量的问题。将正常情况下采集的数据归一化后，形成正常情况下的模板向量 Q ，除此之外也采集特定故障情况下的数据作为故障模板 P 。 P 、 Q 向量构成了模式匹配中的模板矩阵，用公式表示为：

$$\begin{bmatrix} Q_a & P_a \\ Q_v & P_v \\ Q_f & P_f \\ Q_A & P_A \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： a 、 v 、 f 、 A 分别代表振动的加速度、振动速度、振动频率、振幅归一化后的数据。

通过振动传感器获得的振动加速度、振动速度、振动频率、振幅数据进行归一化处理后形成特征向量 T 。特征向量 T 会和模板矩阵中的 Q 、 P 分别进行计算，并得到各自的距离矩阵。距离矩阵中每个点的距离使用欧几里得距离方式进行计算^[13]，该距离的计算量适中，符合当前嵌入式系统的计算需求。用公式表示为：

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5)$$

通过计算欧几里得距离得到一个 (m, n) 的累计代价矩阵 D 。通过在代价矩阵 D 中寻找一条最优路径 W ^[14]，该路径反映了当前特征向量和模板的匹配程度。其中 W 可以表示为：

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_k) \quad (6)$$

式中： w_k 表示特征向量 T 和模板向量元素之间的欧几里得距离。当整个路径中累计距离最小时，反映了特征向量和模板向量之间的相似度最高。

而整个代价矩阵中最优路径的计算公式为：

$$Md = \min(D(i-1, j), D(i, j-1), D(i-1, j-1)) \quad (7)$$

$$D(i, j) = \text{Dist}(i, j) + Md \quad (8)$$

式中： $D(i, j)$ 表示累计距离； $\text{Dist}(i, j)$ 表示 (i, j) 之间的欧几里得距离^[15]。通过使用该公式进行迭代计算后，最终会得到最小累计距离。当该距离小于一定阈值时，则认为和模板匹配成功。

通信管理模块主要负责边缘网关和云端连接的管理。当边缘网关通过数据分析发现异常数据或者监测到故障发生时，会将数据通过 4G 通信模块向云端推送关键数据以及预测的配电房故障事件。

边缘网关和云端进行数据通信时，使用了国内现有的

DL/T 698.45 面向对象通信协议。该协议在用电采集系统内使用广泛。并且该协议具有良好的灵活性和通用性，支持数据加密通信。该协议中通过特定的 OAD（对象属性描述符）代表特定告警事件或者特定的数据项。不同的 OAD 组合形成一个 APDU（应用层数据单元）。APDU 和帧头以及帧尾组成一个完整的 698 协议帧。具体的帧格式如图 3 所示。

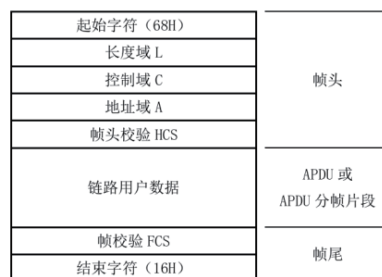


图 3 698 协议帧格式

边缘网关和云平台建立连接时，遵从 DL/T 698.45 面向对象通信协议的链接协议。边缘网关作为客户端与云端通过 TCP/IP 协议建立连接。建立链接后使用 698.45 协议的预连接数据项和主站建立预连接。该过程主要负责和云端服务器协商发送过程中需要配置的最大帧长度等数据。预连接成功后则会进行应用连接，而后进行数据交换。具体过程如图 4 所示。

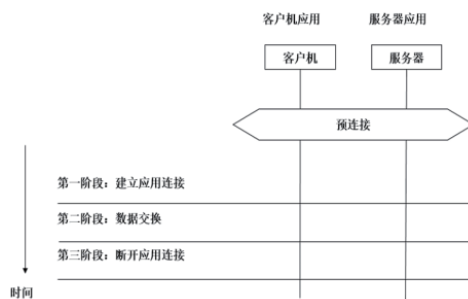


图 4 698 协议连接流程

设备可实现云端实时召测。程序中采用 Flash（闪存存储器）磨损均衡算法，该算法通过数据均匀地分布在 Flash 中，消除对 Flash 中某一区块的多次读写来延长 Flash 使用寿命。为了保证数据的有效性，存储管理还对关键数据以及配置信息增加了校验算法，通过校验保证数据的一致性。

2 系统测试与实验验证

数据处理在整个系统中具有很重要的地位，为了更好地观测数据滤波的效果，论文中通过使用 MATLAB 对滤波算法进行了仿真，仿真结果如图 5 所示。通过图片可以很好的观测到滤波算法的有效性。针对一些异常数据，该算法也能正常地进行检测并将异常数据进行剔除，针对异常数据的处理，同样进行了 MATLAB 仿真模拟，模拟结果如图 6 所示。通过模拟结果可以看到算法能够有效剔除异常数据且剔除后的结果不会失真。

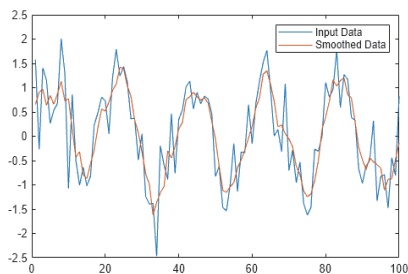


图5 滤波算法仿真对比图

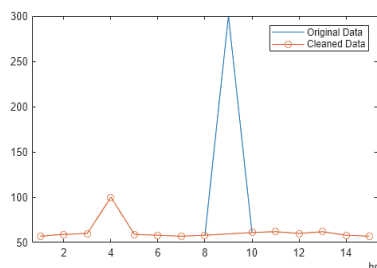


图6 滤波算法异常数据剔除仿真对比图

针对该系统的可用性以及功能的完整性。本文设计了模拟实验,其中针对水位浸水监测和烟雾监测以及高温预警的识别率高达99%。针对过流、过压、失压等故障的判读率高达96%。针对配电柜振动故障的识别率为94.5%。具体统计如表1所示。

表1 实验准确率统计表

故障	模拟次数	准确率/%
浸水监测	30	99.5
烟雾监测	20	99.2
高温预警	30	99.3
振动故障	20	94.5
过流	50	94.3
过压	50	96.1
失压	50	95.3

通过分析实验结果表明,本文提出的基于边缘计算的配电房监测系统能够实时地进行数据分析并准确地判断当前配电房是否出现数据异常。证实了边缘计算可以在一定的情况下分担云端计算并提供智能的分析,因此边缘计算在智能电网建设中为电网的安全运行提供了可靠的技术支撑。

3 结语

本文设计的基于边缘网关的配电房监测系统能够实时监测配电房的运行数据并通过边缘计算对数据进行分析,判断配电房是否存在异常情况,这不仅降低了云端服务器的运行压力也对配电房的维护起到了关键的作用。该系统通过优化监测系统的架构、采用高效的数据分析算法为配电房状态监测提供了有力的支撑。因此系统的广泛应用对于降低维护成本提高电网的稳定性有着重要的意义。

另外针对配电柜故障检测方面需要进一步优化,因为

DTW 算法计算量稍大,占用的处理器资源比较多,在一定程度上会增加整体系统的功耗,实时性也会受到影响。因此下一步需要针对该算法进行优化,提高运算效率,降低资源占用率。

参考文献:

- [1] 任浩,陈伟,李圆智.基于边缘计算的智能电网实时网络安全监测技术研究[J].信息记录材料,2025,26(4):141-143.
- [2] 魏雪川,尔晨希,王晨茜.配电室安全风险动态监测和预警系统应用[J].农村电工,2024,32(12):38-39.
- [3] 梁颖锐.基于物联网的智能配电系统实时监控研究[J].中国宽带,2024,20(9):97-99.
- [4] 蒋振铨.配电室智能监控系统的设计与实践探索[J].居业,2020(12):21-22.
- [5] 桂顺生,王世涛,须伟平.基于边缘计算的电网主设备状态实时监测方法[J].集成电路与嵌入式系统,2024,24(6):18-23.
- [6] 周金萍.基于物联网的智能配电室综合监控系统研究[J].河南科技,2021,40(6):47-49.
- [7] 张明泽,栾文鹏,艾欣,等.基于边缘计算的低压配电网健康状态评价方法[J].电测与仪表,2024,61(5):91-97.
- [8] 李爱锋.基于物联网技术的配电室智能监控系统研发[J].中国新技术新产品,2020(15):23-24.
- [9] 李振,王楠,周喜超,等.基于电流平衡和电压 DTW 距离的户变户相识别[J].电子设计工程,2025,33(18):35-39.
- [10] 曹政,张海彬.一种基于 MD-DTW 的声纳目标即时识别装置[J].微处理机,2025,46(5):45-50.
- [11] 姚宁.面向高维数据监测的火电厂事故预测技术研究[J].自动化与仪表,2025,40(6):99-102.
- [12] 赵宇冲,刘建设,陈静.基于动态时间弯曲算法的船舶电池系统异常检测研究[J].船电技术,2025,45(7):91-95.
- [13] 张艳,史晨辉,苏美红,等.基于邻域形状的时间序列相似性度量[J].计算机工程与设计,2025,46(6):1578-1585.
- [14] 李蓉,胡可馨.基于 DTW 算法的翻译机器人错误自动化校正控制系统设计[J].电子设计工程,2025,33(11):81-85.
- [15] 张艳.基于动态时间规整算法的改进研究及应用[D].贵阳:贵州师范大学,2025.

【作者简介】

邵长英(1989—),女,山东济南人,本科,中级工程师,研究方向:电力设计、配电设计。

郭元新(1990—),男,山东临沂人,硕士,软件设计师,研究方向:嵌入式系统、电力采集方向的软件开发。

曹昌昌(1990—),女,山东济南人,本科,中级工程师,研究方向:电力设计、配电设计。

(收稿日期:2025-09-04 修回日期:2026-04-08)