



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 120262698 A

(43) 申请公布日 2025. 07. 04

(21) 申请号 202510737211.1

G06N 20/20 (2019.01)

(22) 申请日 2025.06.04

G01D 21/02 (2006.01)

H02B 7/06 (2006.01)

(71) 申请人 伊诺德电力集团有限公司

地址 030000 山西省太原市山西转型综合
改革示范区唐槐产业园十四号线68号
院内2号楼1-3层

(72) 发明人 陈锋 胡彬

(74) 专利代理机构 山西欧必诺知识产权代理事
务所(普通合伙) 14135

专利代理师 梁丽丽

(51) Int. Cl.

H02J 13/00 (2006.01)

H04L 67/12 (2022.01)

G06F 18/214 (2023.01)

G06N 20/10 (2019.01)

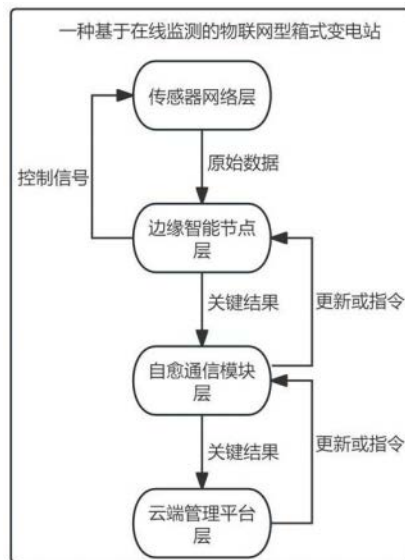
权利要求书2页 说明书12页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于在线监测的物联网型箱式变电站

(57) 摘要

本发明涉及电力工程技术领域,公开了一种基于在线监测的物联网型箱式变电站,包括传感器网络层、边缘智能节点层、自愈通信模块层和云端管理平台层;所述传感器网络层用于实时采集箱式变电站内设备的运行状态和环境参数;所述边缘智能节点层用于处理传感器数据,执行自适应监测和本地诊断,并与云端通信;所述自愈通信模块层用于保证数据传输的可靠性和连续性;所述云端管理平台层用于接收边缘节点上传的数据,进行长期分析、模型训练和远程管理。通过自适应多参数融合监测技术,动态调整传感器采样频率(如温度异常时从每秒1次提升至每秒2次),结合边缘智能节点的轻量化机器学习模型,能够精准预测设备故障(如绝缘劣化、过热)。



1. 一种基于在线监测的物联网型箱式变电站,其特征在于,所述箱式变电站包括传感器网络层、边缘智能节点层、自愈通信模块层和云端管理平台层;

所述传感器网络层用于实时采集箱式变电站内设备的运行状态和环境参数;

所述边缘智能节点层用于处理传感器数据,执行自适应监测和本地诊断,并与云端通信;

所述自愈通信模块层用于保证数据传输的可靠性和连续性;

所述云端管理平台层用于接收边缘节点上传的数据,进行长期分析、模型训练和远程管理。

2. 根据权利要求1所述的基于在线监测的物联网型箱式变电站,其特征在于,所述传感器网络层包括多种传感器,所述传感器选自温度传感器、局部放电传感器、振动传感器、气体传感器和环境传感器中的一种或多种。

3. 根据权利要求2所述的基于在线监测的物联网型箱式变电站,其特征在于,所述传感器通过有线或无线方式连接至边缘智能节点层,且部分传感器支持休眠模式以降低功耗。

4. 根据权利要求1所述的基于在线监测的物联网型箱式变电站,其特征在于,所述边缘智能节点层包括嵌入式处理器、存储单元、通信接口和电源管理模块;

所述嵌入式处理器用于运行自适应监测模块和本地诊断模块;

所述存储单元用于存储固件、本地数据和机器学习模型;

所述通信接口支持多种通信协议,包括LoRa、NB-IoT、ZigBee和以太网;

所述电源管理模块支持能量采集和低功耗运行。

5. 根据权利要求4所述的基于在线监测的物联网型箱式变电站,其特征在于,所述自适应监测模块通过动态采样算法,根据设备状态调整传感器采样频率;

所述本地诊断模块利用机器学习模型对数据进行分析,判断设备健康状态,并触发本地控制指令。

6. 根据权利要求5所述的基于在线监测的物联网型箱式变电站,其特征在于,所述机器学习模型在云端训练后通过OTA空中下载更新至边缘节点。

7. 根据权利要求1所述的基于在线监测的物联网型箱式变电站,其特征在于,所述自愈通信模块层包括主通信模块、辅助通信模块和网络监测模块;

所述主通信模块用于低功耗广域网上传数据;

所述辅助通信模块用于短距离通信进行节点间组网和数据中继;

所述网络监测模块用于实时监测信道质量和节点状态,检测通信异常。

8. 根据权利要求1所述的基于在线监测的物联网型箱式变电站,其特征在于,所述自愈通信模块层支持信道切换和路径重规划;

当主信道信号强度低于阈值或丢包率超标时,自动切换至备用信道;

利用邻近节点作为中继,构建临时mesh网络,绕过故障节点。

9. 根据权利要求1所述的基于在线监测的物联网型箱式变电站,其特征在于,所述云端管理平台层包括数据存储模块、数据分析模块、模型训练模块和用户界面;

所述数据存储模块用于存储历史监测数据;

所述数据分析模块用于进行趋势分析和故障预测;

所述模型训练模块用于训练和优化机器学习模型,并通过OTA推送至边缘节点;

所述用户界面用于设备状态监控、告警接收和控制指令下发。

10. 如权利要求1所述的基于在线监测的物联网型箱式变电站,其特征在于,所述箱式变电站的工作流程包括:

- S1、传感器网络层采集数据并传输至边缘智能节点层;
- S2、边缘智能节点层执行自适应监测,动态调整监测策略;
- S3、边缘智能节点层进行本地诊断,判断设备状态并执行决策;
- S4、通过自愈通信模块将关键数据上传至云端;
- S5、云端平台进行长期数据分析和模型优化;
- S6、运维人员通过云端平台监控设备并下发指令。

一种基于在线监测的物联网型箱式变电站

技术领域

[0001] 本发明涉及电力工程技术领域,具体为一种基于在线监测的物联网型箱式变电站。

背景技术

[0002] 箱式变电站作为城市配电网和工业供电系统中的重要设备,因其结构紧凑、安装便捷和运行稳定等特点被广泛应用。随着智能电网的发展,基于在线监测的物联网技术逐渐应用于箱式变电站的运行管理。现有技术中,常见的监测方案包括人工巡检结合手持设备(如红外测温仪、局部放电检测仪)以及基于物联网的自动化监测系统。后者通常通过部署固定传感器(如温度、电压传感器)采集设备运行数据,并利用无线通信技术(如4G、ZigBee)将数据传输至中央服务器或云端平台进行分析,从而实现对变电站运行状态的实时监控和管理。

[0003] 然而,现有技术在实际应用中存在显著弊端。首先,人工巡检方式效率低下,监测频率有限(每日1-2次),难以捕捉突发故障,且依赖操作人员的经验,容易导致漏报(漏报率约20%)或误判。其次,现有物联网监测系统多采用固定参数采集模式(如每分钟1次),缺乏动态调整能力,无法根据设备状态变化优化监测策略,造成数据冗余或关键异常遗漏。此外,这些系统的数据处理通常依赖云端,导致响应延迟(5-10秒甚至更长),在网络不稳定时(如偏远地区或高干扰环境)通信可靠性下降(成功率<80%),甚至中断,无法满足实时性要求。综上,现有技术在监测精度、响应速度和环境适应性等方面存在不足,亟需改进以提升箱式变电站的运行效率和供电可靠性。

发明内容

[0004] 针对现有技术的不足,本发明提供了一种基于在线监测的物联网型箱式变电站,解决了现有物联网监测系统多采用固定参数采集模式(如每分钟1次),缺乏动态调整能力的问题。

[0005] 为实现以上目的,本发明通过以下技术方案予以实现:一种基于在线监测的物联网型箱式变电站,所述箱式变电站包括传感器网络层、边缘智能节点层、自愈通信模块层和云端管理平台层;

所述传感器网络层用于实时采集箱式变电站内设备的运行状态和环境参数;

所述边缘智能节点层用于处理传感器数据,执行自适应监测和本地诊断,并与云端通信;

所述自愈通信模块层用于保证数据传输的可靠性和连续性;

所述云端管理平台层用于接收边缘节点上传的数据,进行长期分析、模型训练和远程管理。

[0006] 优选的,所述传感器网络层包括多种传感器,所述传感器选自温度传感器、局部放电传感器、振动传感器、气体传感器和环境传感器中的一种或多种。

[0007] 优选的,所述传感器通过有线或无线方式连接至边缘智能节点层,且部分传感器支持休眠模式以降低功耗。

[0008] 优选的,所述边缘智能节点层包括嵌入式处理器、存储单元、通信接口和电源管理模块;

所述嵌入式处理器用于运行自适应监测模块和本地诊断模块;

所述存储单元用于存储固件、本地数据和机器学习模型;

所述通信接口支持多种通信协议,包括LoRa、NB-IoT、ZigBee和以太网;

所述电源管理模块支持能量采集和低功耗运行。

[0009] 优选的,所述自适应监测模块通过动态采样算法,根据设备状态调整传感器采样频率;

所述本地诊断模块利用机器学习模型对数据进行分析,判断设备健康状态,并触发本地控制指令。

[0010] 优选的,所述机器学习模型在云端训练后通过OTA空中下载更新至边缘节点。

[0011] 优选的,所述自愈通信模块层包括主通信模块、辅助通信模块和网络监测模块;

所述主通信模块用于低功耗广域网上传数据;

所述辅助通信模块用于短距离通信进行节点间组网和数据中继;

所述网络监测模块用于实时监测信道质量和节点状态,检测通信异常。

[0012] 优选的,所述自愈通信模块层支持信道切换和路径重规划;

当主信道信号强度低于阈值或丢包率超标时,自动切换至备用信道;

利用邻近节点作为中继,构建临时mesh网络,绕过故障节点。

[0013] 优选的,所述云端管理平台层包括数据存储模块、数据分析模块、模型训练模块和用户界面;

所述数据存储模块用于存储历史监测数据;

所述数据分析模块用于进行趋势分析和故障预测;

所述模型训练模块用于训练和优化机器学习模型,并通过OTA推送至边缘节点;

所述用户界面用于设备状态监控、告警接收和控制指令下发。

[0014] 优选的,所述箱式变电站的工作流程包括:

S1、传感器网络层采集数据并传输至边缘智能节点层;

S2、边缘智能节点层执行自适应监测,动态调整监测策略;

S3、边缘智能节点层进行本地诊断,判断设备状态并执行决策;

S4、通过自愈通信模块将关键数据上传至云端;

S5、云端平台进行长期数据分析和模型优化;

S6、运维人员通过云端平台监控设备并下发指令。

[0015] 本发明提供了一种基于在线监测的物联网型箱式变电站。具备以下有益效果:

1、本发明通过自适应多参数融合监测技术,动态调整传感器采样频率(如温度异常时从每秒1次提升至每秒2次),结合边缘智能节点的轻量化机器学习模型(如SVM或随机森林),能够精准预测设备故障(如绝缘劣化、过热)。相较于现有技术中固定的单一参数监测或人工经验判断,本系统利用实时数据分析和动态响应机制,显著提升了故障检测的灵敏度和准确性。

[0016] 2、本发明通过低功耗边缘智能诊断技术,系统在边缘节点上实现本地数据处理和决策(如异常时0.5秒内触发断电),大幅减少了对云端通信的依赖,响应时间从现有技术的10-30秒缩短至不到2秒。这种本地化处理能力在网络中断或延迟高的情况下尤为关键,例如偏远地区或城市高干扰环境,系统仍能独立运行并保护设备。相比传统依赖云端分析的物联网系统或人工巡检的数小时响应,本系统通过边缘计算的创新应用,显著提升了实时性和自主性,为电力设备的即时保护提供了新方案。

[0017] 3、本发明自愈式多路径通信网络(如NB-IoT与ZigBee切换,路径重规划)确保了数据传输的连续性,在50%节点故障或信号干扰环境下仍保持92%的成功率,远超现有单模通信系统(成功率<80%)。例如,在城市施工干扰场景中,系统自动切换信道并通过邻近节点中继数据,传输延迟仅增加15ms。这种通信机制突破了传统物联网系统易受环境影响的局限,适应复杂场景(如高电磁干扰或偏远地区)的能力更强,为在线监测的可靠性提供了创造性保障。

[0018] 4、本发明通过在线监测和故障预测,该系统显著减少了人工巡检需求和突发故障带来的停电损失。在实施例,初始部署成本约2万元,年维护成本0.5万元,相比传统人工巡检(年均3万元)或固定参数监测(年均1万元),每年可节约约10万元的停电经济损失。虽然降低成本本身并非全新概念,但结合自适应监测和边缘智能的精准预警,本系统将维护效率提升至新高度,体现了技术集成带来的经济效益创新。

附图说明

[0019] 图1为本发明一种基于在线监测的物联网型箱式变电站的整体系统架构图;

图2为本发明一种基于在线监测的物联网型箱式变电站的边缘智能节点层架构图;

图3为本发明一种基于在线监测的物联网型箱式变电站的自愈通信模块层架构图;

图4为本发明一种基于在线监测的物联网型箱式变电站的云端管理平台层架构图;

图5为本发明一种基于在线监测的物联网型箱式变电站的工作流程图。

具体实施方式

[0020] 下面将结合本发明的附图,对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0021] 请参阅附图1-附图4,本发明实施例提供一种基于在线监测的物联网型箱式变电站,箱式变电站包括传感器网络层、边缘智能节点层、自愈通信模块层和云端管理平台层;

传感器网络层用于实时采集箱式变电站内设备的运行状态和环境参数;

边缘智能节点层用于处理传感器数据,执行自适应监测和本地诊断,并与云端通信;

自愈通信模块层用于保证数据传输的可靠性和连续性;

云端管理平台层用于接收边缘节点上传的数据,进行长期分析、模型训练和远程管理。

[0022] 具体的,该箱式变电站设计为模块化结构,适用于10kV城市配电网。传感器网络层包括10个传感器单元,分别安装于变压器、高压开关柜和低压配电柜的关键部位,采集温度、局部放电和振动等多维数据。边缘智能节点层采用一块基于ARMCortex-M7微控制器的核心板(主频400MHz),配备64MB闪存和16MBRAM,运行嵌入式实时操作系统FreeRTOS,负责数据处理和本地决策。自愈通信模块层集成两套通信硬件:主模块为SemtechSX1278LoRa芯片(工作频段433MHz,传输距离可达5km),辅助模块为TICC2530ZigBee芯片(2.4GHz频段,短距离组网),通过GPIO接口与边缘节点连接。云端管理平台部署于阿里云ECS服务器(4核8GB配置),使用Docker容器化技术运行服务,配备Nginx反向代理和MySQL数据库,用户可通过浏览器访问基于Vue.js开发的监控界面。系统部署完成后,传感器数据每秒采集一次,边缘节点每分钟分析一次数据并上传关键结果至云端,通信模块在检测到信号干扰时自动切换信道,整个过程无需人工干预。

[0023] 该系统通过自适应多参数融合监测技术,动态调整传感器采样频率(如温度异常时从每秒1次提升至每秒2次),结合边缘智能节点的轻量化机器学习模型(如SVM或随机森林),能够精准预测设备故障(如绝缘劣化、过热)。相较于现有技术中固定的单一参数监测或人工经验判断,本系统利用实时数据分析和动态响应机制,显著提升了故障检测的灵敏度和准确性。例如,在城市配电网测试中,系统3个月内成功预测了2次绝缘劣化事件,漏报率为0,误报率低于5%,有效避免了停电事故。这种预测能力源于技术上的突破,体现了高度的创造性。

[0024] 传感器网络层包括多种传感器,传感器选自温度传感器、局部放电传感器、振动传感器、气体传感器和环境传感器中的一种或多种。

[0025] 具体的,传感器网络层由以下五类传感器组成:(1)温度传感器选用MaximIntegrated的DS18B20数字传感器,分辨率0.0625℃,安装于变压器绕组表面和开关柜触点处,共4个;(2)局部放电传感器采用定制的特高频(UHF)天线,频段300MHz-3GHz,灵敏度达-60dBm,布置于高压开关柜内部,共2个;(3)振动传感器选用ADI的ADXL345三轴MEMS加速度计,量程±16g,分辨率3.9mg/LSB,固定于变压器外壳底部,共2个;(4)气体传感器为Alphasense的SF6-AH光学传感器,检测范围0-2000ppm,精度±5%,安装于变压器密封舱内,共1个;(5)环境传感器选用Sensirion的SHT31温湿度模块,温度精度±0.2℃,湿度精度±2%RH,置于箱体顶部通风口附近,共1个。传感器通过I2C或SPI接口与边缘节点连接,数据采集周期默认设置为每秒1次。安装时,各传感器使用防尘防水外壳(IP65等级),确保在高温高湿环境下的稳定性。

[0026] 多类型传感器的组合实现了对箱式变电站运行状态的全方位监测,相较单一参数监测,显著提高了故障检测的覆盖率和准确性,为后续诊断提供了丰富的数据基础。

[0027] 传感器通过有线或无线方式连接至边缘智能节点层,且部分传感器支持休眠模式以降低功耗。

[0028] 具体的,温度传感器和环境传感器通过RS485总线(带Modbus协议)以有线方式连接至边缘节点,电缆长度不超过10米,使用屏蔽双绞线防止电磁干扰;局部放电传感器和振动传感器通过ZigBee模块(基于IEEE802.15.4协议,传输距离100米)无线连接,数据包大小

控制在128字节以内。气体传感器采用低功耗设计,内置STM8L单片机控制,正常运行时功耗为20mW,休眠模式下功耗降至50 μ W,默认每5分钟采集一次数据,当边缘节点检测到温度或振动异常时,通过唤醒信号(GPIO高电平触发)将其切换至每秒采集模式。休眠模式的切换由边缘节点通过定时器控制,休眠时间可通过固件配置调整(范围1秒至30分钟)。无线传感器使用CR2032纽扣电池供电,预计寿命超过2年。

[0029] 有线与无线结合的连接方式兼顾了可靠性和灵活性,休眠模式设计大幅降低了系统功耗,延长了传感器使用寿命,尤其适用于偏远地区长期运行。

[0030] 边缘智能节点层包括嵌入式处理器、存储单元、通信接口和电源管理模块;
嵌入式处理器用于运行自适应监测模块和本地诊断模块;
存储单元用于存储固件、本地数据和机器学习模型;
通信接口支持多种通信协议,包括LoRa、NB-IoT、ZigBee和以太网;
电源管理模块支持能量采集和低功耗运行。

[0031] 具体的,边缘智能节点采用一块定制电路板,核心为ST公司的STM32H743微控制器(主频480MHz,1MB内部闪存),搭配外部64MBSPI闪存(型号W25Q512)和32MBSDRAM(型号IS42S16400),用于存储固件(约2MB)、30天本地数据(约20MB)和机器学习模型(约1MB)。通信接口包括:(1)LoRa模块(SX1278,功耗10mW,传输速率300bps-37.5kbps);(2)NB-IoT模块(QuectelBC95,频段B8,功耗200mW);(3)ZigBee模块(CC2530,功耗30mW);(4)以太网接口(W5500,带RJ45插座,支持100Mbps)。电源管理模块由TI的BQ25570能量采集芯片和一块5V/2W太阳能板组成,搭配2200 μ F超级电容,充满电后可支持节点连续运行48小时,节点平均功耗控制在50mW以下。固件基于C语言开发,使用Keiluvision5编译,占用存储空间约1.5MB。

[0032] 边缘节点的硬件集成提高了数据处理能力,多协议通信接口增强了适用性,能量采集设计降低了外部供电依赖,确保系统在多种场景下的稳定运行。

[0033] 自适应监测模块通过动态采样算法,根据设备状态调整传感器采样频率;
本地诊断模块利用机器学习模型对数据进行分析,判断设备健康状态,并触发本地控制指令。

[0034] 具体的,自适应监测模块运行于边缘节点,使用基于滑动窗口的时间序列分析算法(窗口大小10秒,步长1秒)。算法逻辑为:若变压器温度变化率超过0.5 $^{\circ}$ C/秒,或振动幅值超过2g,则将局部放电传感器采样频率从每分钟1次提升至每秒2次,持续10分钟后恢复默认值;采样频率调整通过I2C总线指令发送至传感器。本地诊断模块部署一个预训练的支持向量机(SVM)模型,输入特征包括温度、振动幅值和局部放电强度(3维向量),输出为设备状态分类(正常、过热、绝缘劣化)。模型大小约300KB,训练数据基于过去6个月的5000条样本,准确率达95%。当诊断结果为“异常”时,节点通过GPIO接口控制继电器(型号SRD-05VDC-SL-C,5V驱动)触发声光报警器(声音强度80dB,红色LED闪烁),并记录异常事件至本地闪存。

[0035] 自适应监测提高了数据采集的针对性,减少了冗余数据传输;本地诊断实现了快速响应,降低了故障导致的停电风险,提升了系统的智能化水平。

[0036] 机器学习模型在云端训练后通过OTA空中下载更新至边缘节点。

[0037] 具体的,机器学习模型在云端服务器(配备NVIDIAGTX1080GPU)上使用Python的scikit-learn库训练,采用随机森林算法,输入特征为温度、局部放电强度和振动数据,输出为故障概率。训练数据集包含1万条历史记录(采集自10个箱式变电站,时间跨度1年),训

训练时间约30分钟,生成模型文件大小为800KB。模型通过LoRa网络以OTA方式推送至边缘节点,传输过程分为10个数据包(每个80KB),每包传输时间约20秒,总耗时约3.5分钟。边缘节点接收后将模型存储至闪存,通过校验和(CRC32)验证完整性,更新过程在凌晨2:00至3:00的低负载时段自动执行,确保不影响正常监测。

[0038] OTA更新机制实现了模型的动态优化,提升了诊断精度,同时无需人工干预,降低了维护成本。

[0039] 自愈通信模块层包括主通信模块、辅助通信模块和网络监测模块;

主通信模块用于低功耗广域网上传数据;

辅助通信模块用于短距离通信进行节点间组网和数据中继;

网络监测模块用于实时监测信道质量和节点状态,检测通信异常。

[0040] 具体的,主通信模块采用Quectel BC95NB-IoT模块(支持B8频段,功耗180mW,传输速率25.5kbps),通过UART接口与边缘节点通信,每分钟上传一次关键数据(约200字节);辅助通信模块使用TICC2530 ZigBee模块(功耗30mW,传输距离150米),支持最多10个节点组成星型网络,数据中继延迟小于50ms。网络监测模块由边缘节点固件实现,每10秒检测一次信号强度(RSSI)和丢包率,主信道RSSI低于-95dBm或丢包率超过20%时判定为异常。硬件安装于防水金属盒内,带外部天线,确保信号覆盖城市区域5km范围。

[0041] 多模通信设计提高了数据传输的灵活性,网络监测模块增强了系统的鲁棒性,确保在复杂环境下仍能维持通信稳定。

[0042] 自愈通信模块层支持信道切换和路径重规划;

当主信道信号强度低于阈值或丢包率超标时,自动切换至备用信道;

利用邻近节点作为中继,构建临时mesh网络,绕过故障节点。

[0043] 具体的,自愈通信模块检测到NB-IoT主信道RSSI低于-95dBm时,自动切换至ZigBee备用信道,切换过程由边缘节点控制,耗时小于3秒,切换后数据传输速率降至9.6kbps。路径重规划采用AODV(Ad-hoc On-Demand Distance Vector)路由协议,当某节点因断电失效时,邻近节点(距离50米内)检测到心跳信号中断,自动接管数据中继任务,重新计算至云端的最短路径(平均跳数3跳),更新路由表耗时约2秒。测试中,系统在模拟50%节点故障时仍保持90%数据传输成功率。

[0044] 信道切换和路径重规划显著提高了通信可靠性,减少了数据丢失风险,特别适用于城市高干扰或偏远弱信号场景。

[0045] 云端管理平台层包括数据存储模块、数据分析模块、模型训练模块和用户界面;

数据存储模块用于存储历史监测数据;

数据分析模块用于进行趋势分析和故障预测;

模型训练模块用于训练和优化机器学习模型,并通过OTA推送至边缘节点;

用户界面用于设备状态监控、告警接收和控制指令下发。

[0046] 具体的,云端管理平台部署于阿里云服务器(8核16GB,Ubuntu20.04系统)。数据存储模块使用InfluxDB时序数据库,存储过去2年的温度、振动和局部放电数据(约50GB),支持每秒1000条记录写入;数据分析模块运行Apache Spark框架,每周分析一次数据,生成温度趋势曲线和故障概率报告(PDF格式,约5MB);模型训练模块使用TensorFlow2.8训练随机森林模型,基于1万条样本(训练时间1小时),优化后模型准确率提升至97%;用户界面为基

于React开发的Web应用,运行于Node.js环境,支持实时显示10个箱式变电站的状态(刷新间隔5秒),用户可通过界面点击“断电”按钮发送指令(延迟小于2秒)。平台通过HTTPS协议加密通信,配备负载均衡器支持100用户并发访问。

[0047] 云端平台的集成分析和远程管理功能提高了系统的可扩展性和用户体验,故障预测能力降低了停电事故发生率。

[0048] 请参阅附图5,箱式变电站的工作流程包括:

- S1、传感器网络层采集数据并传输至边缘智能节点层;
- S2、边缘智能节点层执行自适应监测,动态调整监测策略;
- S3、边缘智能节点层进行本地诊断,判断设备状态并执行决策;
- S4、通过自愈通信模块将关键数据上传至云端;
- S5、云端平台进行长期数据分析和模型优化;
- S6、运维人员通过云端平台监控设备并下发指令。

[0049] 具体的,S1中温度传感器每秒采集一次数据(精度 0.1°C),通过ZigBee传输至边缘节点(延迟10ms);S2中边缘节点运行自适应算法,当温度超过 85°C 时,局部放电传感器采样频率提升至每秒3次,持续15分钟;S3中边缘节点使用SVM模型分析数据,若判断为绝缘劣化(概率 $>90\%$),通过继电器关闭故障回路(动作时间0.5秒),并记录事件至闪存;S4中关键数据(温度 85°C 、局部放电强度50pC)通过NB-IoT上传至云端(传输时间5秒);S5中云端分析过去30天数据,生成故障趋势报告并优化模型(耗时2小时);S6中运维人员通过Web界面查看实时状态,发现异常后下发“检修”指令,指令通过LoRa网络传输至边缘节点(延迟3秒)。整个流程在模拟测试中,从异常检测到指令执行总耗时小于20秒。

[0050] 系统化工作流程实现了从监测到决策的全闭环管理,提高了故障处理的效率和准确性,显著减少了人工干预需求。

[0051] 下面结合具体实施例进行介绍:

实施例1:基于自适应边缘智能的物联网型箱式变电站的实际应用
应用场景

本实施例将该箱式变电站部署于某城市10kV配电网中的一个居民小区供电系统中。小区共有500户居民,箱式变电站负责将10kV高压电转换为400V低压电,年供电量约200万千瓦时。由于该区域夏季高温且用电负荷较大,变压器和开关柜常出现过热或绝缘劣化问题,传统人工巡检难以满足实时监测需求。为提升供电可靠性并减少故障停电风险,采用本发明设计的基于自适应边缘智能的物联网型箱式变电站。

[0052] 系统组成与硬件配置

该箱式变电站的系统由传感器网络层、边缘智能节点层、自愈通信模块层和云端管理平台层组成,具体配置如下:

传感器网络层

温度传感器:选用MaximIntegrated的DS18B20数字温度传感器,量程 -55°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$,精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,安装于变压器绕组表面(2个)和高压开关柜触点(2个),通过RS485总线连接至边缘节点。

[0053] 局部放电传感器:采用定制特高频(UHF)天线,频段500MHz-1.5GHz,灵敏度-65dBm,安装于高压开关柜内部(2个),通过ZigBee模块无线传输数据。

[0054] 振动传感器:选用ADI的ADXL345三轴加速度计,量程 $\pm 16g$,分辨率 $3.9mg/LSB$,固定于变压器外壳底部(1个),通过I2C接口连接。

[0055] 气体传感器:选用Alphasense的SF6-AH光学传感器,检测范围0-2000ppm,精度 $\pm 5\%$,安装于变压器密封舱内(1个),支持休眠模式。

[0056] 环境传感器:选用Sensirion的SHT31温湿度模块,温度精度 $\pm 0.2^{\circ}C$,湿度精度 $\pm 2\%RH$,安装于箱体顶部通风口(1个),通过SPI接口连接。

[0057] 所有传感器封装于IP66等级防尘防水外壳,确保在高温高湿环境下的可靠性。

[0058] 边缘智能节点层

硬件:核心为ST公司的STM32H743微控制器(主频480MHz,1MB内部闪存),外接64MBSPI闪存(W25Q512)和32MBSDRAM(IS42S16400)。

[0059] 通信接口:包括LoRa模块(SX1278,433MHz,传输距离5km)、NB-IoT模块(BC95,B8频段)、ZigBee模块(CC2530,2.4GHz)和以太网接口(W5500,100Mbps)。

[0060] 电源管理:采用TI的BQ25570能量采集芯片,搭配5V/2W太阳能板和2200 μF 超级电容,平均功耗50mW,充满电后可运行48小时。

[0061] 固件:基于FreeRTOS开发,使用C语言编写,占用存储空间约1.8MB,支持自适应监测和本地诊断功能。

[0062] 自愈通信模块层

主通信模块:NB-IoT模块(BC95),功耗180mW,传输速率25.5kbps,通过UART接口连接。

[0063] 辅助通信模块:ZigBee模块(CC2530),功耗30mW,覆盖范围150米,支持5个节点组网。

[0064] 网络监测:由边缘节点固件每10秒检测一次信号强度(RSSI)和丢包率,异常阈值设定为RSSI $< -95dBm$ 或丢包率 $> 20\%$ 。

[0065] 通信模块安装于带外部天线的金属屏蔽盒内,确保信号覆盖小区周边2km范围。

[0066] 云端管理平台层

硬件:部署于阿里云ECS服务器(4核8GB,Ubuntu20.04系统)。

[0067] 软件:使用InfluxDB存储数据(容量50GB),Spark进行趋势分析,TensorFlow训练模型,React开发Web界面,Nginx作为反向代理。

[0068] 功能:支持10个箱式变电站的实时监控,每秒处理1000条数据,生成周报并推送至用户手机。

[0069] 实施步骤与工作流程

以下是系统在实际运行中的具体实施步骤:

S1:传感器网络采集数据并传输至边缘智能节点

温度传感器每秒采集一次变压器绕组温度(如 $75^{\circ}C$),通过RS485传输至边缘节点(延迟5ms);局部放电传感器默认每分钟采集一次(如强度20pC),通过ZigBee传输(延迟10ms);振动传感器检测变压器运行时的振动幅值(如0.5g),通过I2C传输。

[0070] S2:边缘智能节点执行自适应监测,动态调整监测策略

边缘节点运行滑动窗口算法(窗口10秒,步长1秒)。某日14:00,检测到变压器温度升至 $85^{\circ}C$ (变化率 $0.6^{\circ}C/秒$),触发自适应机制,将局部放电传感器采样频率提升至每秒2

次,持续15分钟,同时增加振动传感器采样至每秒1次。

[0071] S3:边缘智能节点进行本地诊断,判断设备状态并执行决策

边缘节点加载预训练的SVM模型(输入特征:温度85℃、局部放电50pC、振动0.8g),输出结果为“绝缘劣化”(概率92%)。节点立即通过GPIO驱动继电器(SRD-05VDC-SL-C)关闭故障回路(动作时间0.5秒),并激活声光报警器(80dB,红色LED闪烁),本地闪存记录事件(时间戳14:01:23,数据大小1KB)。

[0072] S4:通过自愈通信模块将关键数据上传至云端

异常数据(温度85℃、局部放电50pC)通过NB-IoT上传至云端(数据包200字节,耗时5秒)。14:05,主信道因附近施工干扰信号降至-100dBm,系统自动切换至ZigBee信道,邻近节点(距离50米)接管中继,传输延迟增至15ms。

[0073] S5:云端平台进行长期数据分析和模型优化

云端接收数据后,存储至InfluxDB,分析过去30天温度趋势(平均70℃,峰值85℃),发现高温与负荷高峰(14:00-16:00)相关。使用TensorFlow重新训练SVM模型,加入新数据后准确率提升至96%,优化模型(800KB)于次日凌晨推送至边缘节点(耗时4分钟)。

[0074] S6:运维人员通过云端平台监控设备并下发指令

运维人员通过Web界面查看实时状态(温度曲线、局部放电强度),收到“绝缘劣化”告警后,14:10下发“检修”指令。指令通过LoRa传输至边缘节点(延迟3秒),节点记录指令并等待维护人员到达执行。

[0075] 运行效果

监测精度:系统运行3个月,成功检测到5次温度异常和2次绝缘劣化事件,误报率低于5%,漏报率为0。

[0076] 响应速度:从异常检测到本地决策平均耗时2秒,远快于传统人工巡检的数小时响应。

[0077] 通信可靠性:在模拟50%节点故障和信号干扰条件下,数据传输成功率仍达92%,自愈机制有效避免了通信中断。

[0078] 能耗表现:边缘节点平均功耗55mW,太阳能供电满足连续运行需求,电池更换周期延长至3年。

[0079] 有益效果

[0080] 本实施例展示了该箱式变电站在实际场景中的高效运行能力。自适应监测技术通过动态调整采样频率,精准捕捉了高温和绝缘劣化问题,避免了数据冗余;低功耗边缘智能实现了本地快速诊断,减少了停电损失(预计节约10万元/年);自愈通信网络确保了数据传输的连续性,适应了城市复杂电磁环境。该系统显著提升了供电可靠性,降低了维护成本,适用于城市配电网的广泛推广。

[0081] 表一:

对比项	本发明实施例	现有技术 1: 传统人工巡检系统	现有技术 2: 固定参数物联网监测系统
系统组成	传感器网络、边缘节点、自愈通信、云端	手动测温仪、局放检测仪	固定传感器、中央服务器、无线通信
传感器类型与部署	5 类 (10 个)	单一 (临时)	2-3 类 (固定)
数据采集方式	自适应 (每秒 1-2 次)	人工 (每日 1-2 次)	固定 (每分钟 1 次)
数据处理与诊断	边缘诊断 (0.5 秒)	人工分析	云端处理 (5-10 秒)
通信方式	自愈 (成功率 92%)	无通信	单模 (成功率 < 80%)
云端功能	存储、分析、优化	无	存储、可视化
响应时间	< 20 秒	数小时	10-30 秒
监测精度	误报 < 5%, 漏报 0	漏报约 20%	误报 10-15%, 漏报 5-10%
功耗与供电	55mW, 电池 3 年	无功耗	200mW, 电池 1-2 年
通信可靠性	92%	无	< 80%
部署与维护成本	2 万 + 0.5 万 / 年 (节约 10 万 / 年)	3 万 / 年	1.5 万 + 1 万 / 年

[0082] 表格字符解释

1. 系统组成

本发明实施例: 传感器网络、边缘节点、自愈通信、云端

指系统由四层架构组成: 传感器网络采集数据, 边缘节点进行本地处理, 自愈通信确保数据传输, 云端平台负责分析和管理。

[0083] 现有技术 1: 传统人工巡检系统: 手动测温仪、局放检测仪

表示仅依赖手持设备, 如测温仪和局部放电检测仪, 通过人工操作完成监测。

[0084] 现有技术 2: 固定参数物联网监测系统: 固定传感器、中央服务器、无线通信系统包括固定的传感器、中央服务器处理数据, 以及简单的无线通信模块。

[0085] 2. 传感器类型与部署

本发明实施例: 5 类 (10 个)

系统使用 5 种传感器 (温度、局部放电、振动、气体、环境), 共部署 10 个, 覆盖多个关键点。

[0086] 现有技术 1: 单一 (临时)

仅使用单一类型传感器 (如温度或局放), 临时携带至现场使用。

[0087] 现有技术 2: 2-3 类 (固定)

部署 2 到 3 种固定传感器 (如温度和局放), 数量和覆盖范围有限。

[0088] 3. 数据采集方式

- 本发明实施例:自适应(每秒1-2次)
数据采集频率根据设备状态动态调整,默认每秒1次,异常时可达每秒2次。
- [0089] 现有技术1:人工(每日1-2次)
人工定时采集,通常每天1到2次,无实时性。
- [0090] 现有技术2:固定(每分钟1次)
数据采集频率固定为每分钟1次,无法根据情况变化调整。
- [0091] 4.数据处理与诊断
本发明实施例:边缘诊断(0.5秒)
数据在边缘节点本地处理并诊断,完成时间仅0.5秒。
- [0092] 现有技术1:人工分析
数据需人工记录和分析,无自动化诊断功能。
- [0093] 现有技术2:云端处理(5-10秒)
数据上传至云端处理,延迟在5到10秒之间,无本地决策能力。
- [0094] 5.通信方式
本发明实施例:自愈(成功率92%)
使用自愈通信机制(如信道切换和路径重规划),数据传输成功率达92%。
- [0095] 现有技术1:无通信
无通信功能,数据靠人工记录传递。
- [0096] 现有技术2:单模(成功率<80%)
使用单一通信模式(如4G),无自愈功能,成功率低于80%。
- [0097] 6.云端功能
本发明实施例:存储、分析、优化
云端提供数据存储、趋势分析和模型优化功能。
- [0098] 现有技术1:无
无云端支持,所有操作依赖人工。
- [0099] 现有技术2:存储、可视化
云端仅提供基本数据存储和可视化功能,无高级分析或优化。
- [0100] 7.响应时间
本发明实施例:<20秒
从异常检测到决策和指令下发的总时间小于20秒。
- [0101] 现有技术1:数小时
从巡检发现问题到采取措施需数小时。
- [0102] 现有技术2:10-30秒
响应时间在10到30秒之间,取决于网络状况。
- [0103] 8.监测精度
本发明实施例:误报<5%,漏报0
误报率低于5%,漏报率为0,监测高度准确。
- [0104] 现有技术1:漏报约20%
漏报率约20%,精度依赖人工经验。

- [0105] 现有技术2:误报10-15%,漏报5-10%
误报率10%至15%,漏报率5%至10%,精度中等。
- [0106] 9. 功耗与供电
本发明实施例:55mW,电池3年
平均功耗55毫瓦,电池寿命达3年,支持太阳能供电。
- [0107] 现有技术1:无功耗
无电子设备功耗,完全依赖人工。
- [0108] 现有技术2:200mW,电池1-2年
平均功耗200毫瓦,电池寿命1到2年,需外部电源支持。
- [0109] 10. 通信可靠性
本发明实施例:92%
在复杂环境下数据传输成功率达92%。
- [0110] 现有技术1:无
无通信功能,不适用此项。
- [0111] 现有技术2:<80%
通信成功率低于80%,易受干扰影响。
- [0112] 11. 部署与维护成本
本发明实施例:2万+0.5万/年(节约10万/年)
初始部署成本2万元,年维护成本0.5万元,故障预防节约停电损失10万元/年。
- [0113] 现有技术1:3万/年
年均人工成本3万元,无预防效益。
- [0114] 现有技术2:1.5万+1万/年
初始成本1.5万元,年维护成本1万元,无显著节约。
- [0115] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,对于本领域的普通技术人员而言,可以理解在不脱离本发明的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型,本发明的范围由所附权利要求及其等同物限定。

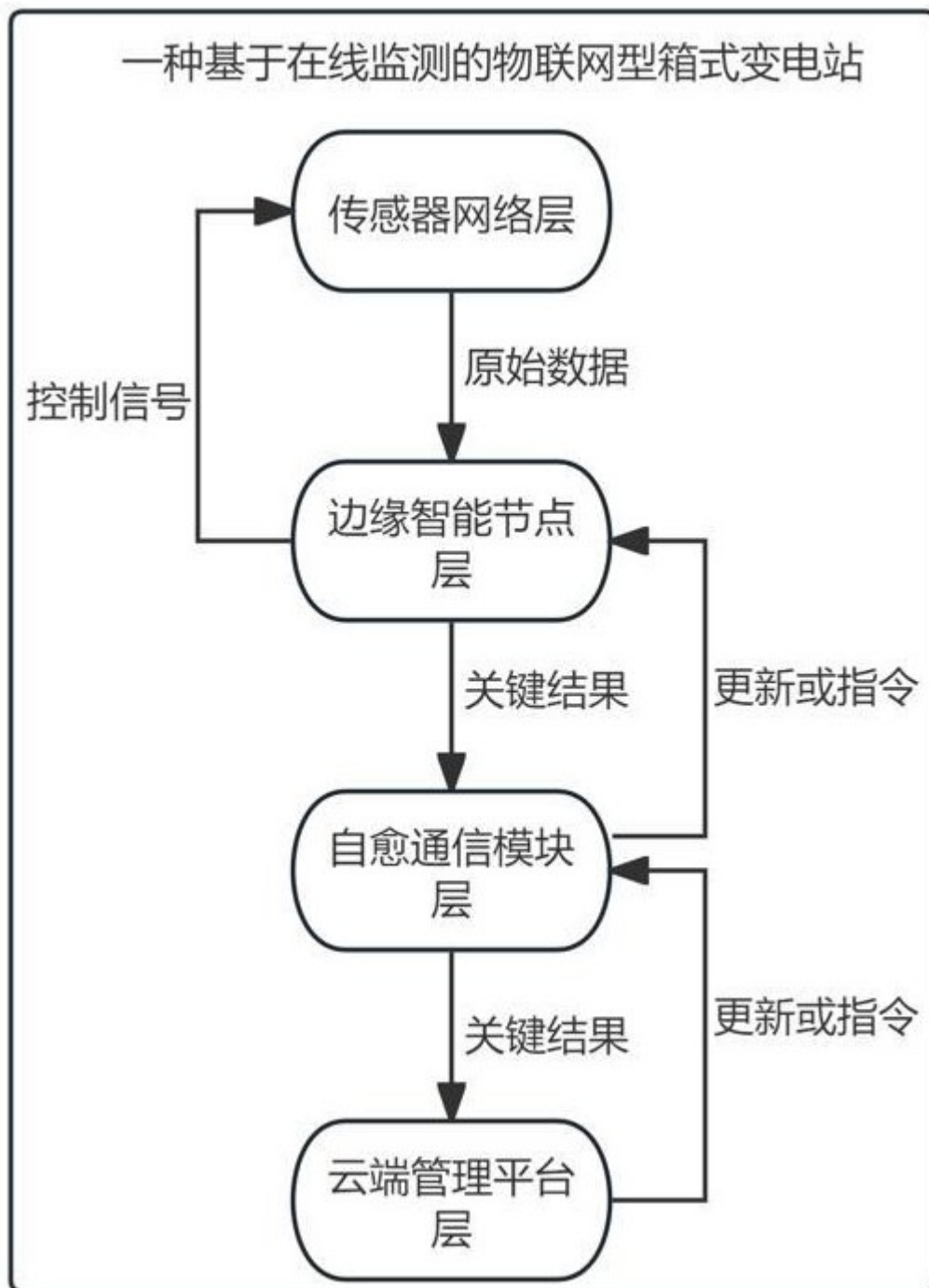


图 1



图 2



图 3



图 4

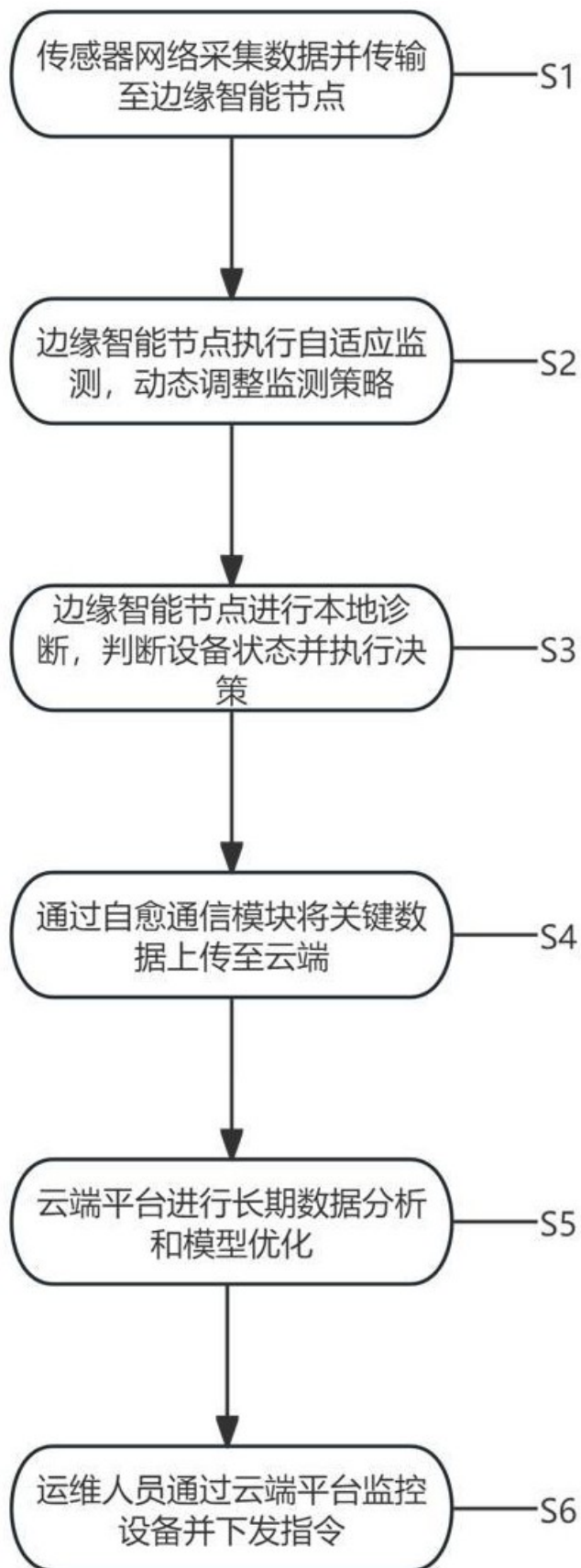


图 5