

变电站 10kV 开关柜运行环境监控系统设计

陈伟凡¹ 陈晓亮² 高伟¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350116;
2. 国网福建连江县供电公司, 福州 350500)

摘要 针对变电站 10kV 开关柜内部的防火泥封堵情况和温湿度等运行环境难以实时掌握和控制, 存在安全隐患的问题, 设计了一套变电站 10kV 开关柜运行环境监控系统。该系统的网络架构基于无线传感器网络和以太网混合而成。各个监控终端通过无线传感器网络与通信管理机进行信息交互, 通信管理机通过以太网与上位机软件进行通信。本文结合变电站 10kV 开关柜内特殊的运行环境阐述了该系统的软硬件设计、无线传感器参数配置、上位机软件设计等。

关键词: 变电站; 开关柜; 无线传感器网络; 温湿度监控; 防火泥

Design of Monitoring System for Operating Environment in Substation 10kV Breaker Cabinet

Chen Weifan¹ Chen Xiaoliang² Gao Wei¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116;
2. Fujian Lianjiang Electric Power Supply Co., Ltd, Fuzhou 350500)

Abstract It is difficult to acquire and control real-timely the situation of fire clay blocking, temperature, and humidity in substation 10kV breaker cabinet. To decline the risks of this situation, a monitoring system for substation 10kV breaker cabinet is designed. The network architecture of this system is composed with wireless sensor network and Ethernet. Every monitoring terminal device has an information exchange with communication manager via wireless sensor network. And Ethernet is used to communicate with host computer for communication manager. In this paper, not only the design of hardware and software but also parameter configuration of wireless sensor are introduced in detail, related to the special operating environment of substation 10kV breaker cabinet.

Keywords: substation; breaker cabinet; wireless sensor network; temperature and humidity monitoring; fire clay

在无人值守变电站中, 运行人员无法对 10kV 开关柜内部的防火泥封堵情况、温湿度情况进行实时的掌握和控制, 在极端的条件下, 可能发生防火泥封堵脱落、电缆接头温度骤升、柜内空气湿度骤升, 此时若不及时采取有效的措施来监护, 容易导致 10kV 开关柜的安全运行失常^[1,2]。如因防火泥脱落, 小动物钻入 10kV 开关柜可能引起相间或接地短路, 造成电力事故; 对于潮湿地区的变电站, 虽然目前每台开关柜都配有加热器驱潮, 但是运行人员在远方无法获知加热器的运行状态和柜内湿度情况, 存在引发事故的隐患。因此, 针对变电站 10kV 开关柜内部的防火泥封堵情况、温湿度情况无法实

时掌握和控制的现状, 研制了一套具备实时监测变电站 10kV 开关柜防火泥封堵情况、温湿度情况及能智能防潮的系统, 即变电站 10kV 开关柜安全运行智能监护系统。

1 系统总体设计

本套系统由五个部分组成: 防火泥封堵监测终端、无线测温终端、智能除湿监控终端、通信管理机及上位机平台软件, 如图 1 所示。防火泥封堵监测终端、无线测温终端、智能除湿监控终端与通信管理机之间采用基于 ZigBee 协议栈的无线传感器网络进行通信, 为 2.4GHz Mesh 网络^[3], 接口电路

为 XBee 模块。通信管理机与上位机平台采用以太网通信，接口电路为 RJ45 模块，链路层通信协议为 TCP。

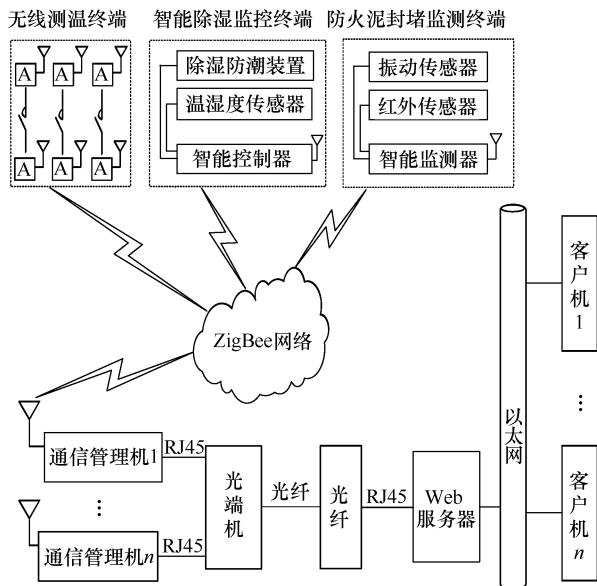


图 1 系统构成框图

其中，防火泥封堵监测终端用于监测动物入侵和防火泥破坏情况，一旦有异常情况立即通过 ZigBee 无线通信网络上报给通信管理机。无线测温终端通过将数字式测温元件附着在开关触头的发热位置，以热传导感知发热点的温度，定时采集发热点的温度数据并上报给通信管理机。智能除湿监控终端可实时监测开关柜内的温湿度情况，根据传感器的信息，通过凝露算法智能控制加热器、排气扇和半导体制冷装置进行驱潮，破坏发生凝露的条件；与此同时，控制终端可将当前的温湿度值、露点值、除湿设备的运行状态通过 2.4GHz ZigBee 无线网络实时传输给通信管理机直到上位机监控平台，也可以远程接收上位机监控平台下发的命令。通信管理机承担数据中转和规约转换的角色，通过 ZigBee 模块从控制终端的接收数据并向其发送控制命令，采用以太网通信方式向上位机软件平台的应用服务器主动上传监测的工作环境和状态信息数据、向 web 服务器接收和发送命令。上位机平台软件包括应用服务器、数据库服务器和本地客户机：应用服务器主动接收通信管理机发送的监测数据，并保存到数据库服务器；数据库服务器用于保存参数信息、实时数据、历史数据；本地客户机通过应用服务器呈现参数数据、实时数据、历史数据和向应用服务器发送接收监控命令。

2 终端设备设计

2.1 防火泥封堵监测终端设计

防火泥封堵监测终端主要由红外热释电感应模块、振动传感器模块、通信模块、控制模块和电源模块五个部分组成，如图 2 所示。CPU 通过 CCP 捕捉模块采集红外热释电传感器的信息，用以判断是否有小动物穿过，同时 CPU 通过 I/O 端口采集植入防火泥的振动传感器的信息，判断防火泥位置状态。结合两者得出防火泥封堵状态，若防火泥封堵出现异常则 CPU 通过 ZigBee 无线通信模块将报警信息上传通信管理机，进而告知上位机，通过上位机通知运行人员及时检修防火泥，以保证设备安全可靠运行。

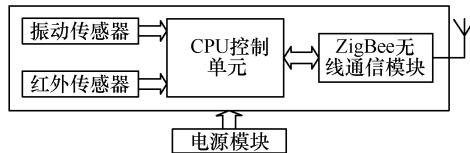


图 2 防火泥封堵监测终端

热释电传感器对温度敏感，当入侵物体温度与环境温度有差别时，则有 ΔT 输出。在本设计中红外热释电传感器选择 GH-718，其采用 PIR 热释电传感器、菲涅尔光学透镜设计，工作电压为 DC 4.5~20V，静态功耗 50 μ A，感应距离 7m，感应角度 110°。振动传感器选用 MMA7455L，其为 XYZ 三轴低 g 加速传感器，2.4~3.6V 低压操作；分辨率最高达到 64LSB/g；可耐高强度冲击达 5000g。选择 Microchip 公司的 20 引脚 8 位 CMOS 闪存单片机 PIC16F690 作为 CPU，待机状态下电流为 50nA，空闲状态可进入超低功耗休眠模式，工作温度范围为 -40°C ~ 125°C；选用低频晶振（4MHz），进一步降低功耗；超低功耗唤醒，高灌/拉电流能力并且具有超低功耗的节能休眠模式。ZigBee 模块采用 digi 公司的 XBee 模块，通过串口通信与 CPU 通信，采用基于 IEEE 802.15.4 标准的 ZigBee 协议，网架结构采用 Mesh 架构，ZigBee 通信采用免费的 2.4GHz 信道，模块配置成 Router 方式，不休眠，采用 3.3V 直流供电。该终端的供电电源取自 220V 交流电压，经过 YAW3S05T (AC/DC) 电源转换模块将 220V 交流电压降为 5V 的直流电压供给人体红外感应模块使用；同时，通过 SPX1117-3.3 电源模块进一步将 5V 直流电源降为 3.3V，供给 CPU、ZigBee 等模块使用。

防火泥封堵监测终端程序由初始化、振动数据采集、热释电传感器状态监测以及数据主动上报三

个部分组成。初始化主要完成 I/O 口设置、EEPROM 数据读取、中断设置、定时器设置以及振动模块配置、自检等工作。由于 PIC16F690 单片机自带 EEPROM 模块，故将监测终端的地址以及振动模块加速度监测阈值保存在 EEPROM 中，可以在烧写的时候写入，也可以通过通信进行修改。振动模块配置主要是启动时对测量量程以及精度的选择，并判断是否接入，如果未接入或者断线，进行报警。为防止刚上电时候的振动，CPU 在上电静置 1 分钟后，启动振动传感器，每隔 100ms 采集一次振动数据，根据自适应抗干扰过滤算法，判断防火泥是否发生脱落，并生成 SOE 事件报警。为了防止干扰信号引起误报，根据防火泥脱落的特点，若振动越限持续时间达到阈值（可设，默认 2s），方认为是可靠的报警信号，并生成 SOE 事件报警。当红外感应区域被入侵后，红外传感器会向 CPU 发送报警状态，当状态持续时间达到阈值，同样认为是可靠的报警信号，并生成 SOE 事件报警。CPU 每隔 30s 通过 ZigBee 模块向上位机上报一次终端的状态，终端有三种状态：正常、入侵、脱落，若终端发生后两种状态，立刻作为 SOE 事件上报。

2.2 无线测温终端设计

无线测温传感器主要安装在开关柜的触头上，定时测量触头的温度并主动上传。工作原理很简单，CPU 通过 I²C 接口与温度传感器进行数据交换，实现温度信息的采集。然后 CPU 再将采集而来的数据信息进行一系列条件判定以及按照规约设计处理，最后通过 UART 串行通信接口将数据发送给 ZigBee 模块。由于工作环境特殊，取电不便，采用电池供电方案，因此在软硬件的设计上，都要最大程度的降低功耗，元器件均需选择能够在高温场合下以及低功耗模式下工作的器件^[4]。

采用 TI 公司生产的 TMP102 数字式温度传感器，其具有体积极小、低功耗等特性。TMP102 采用 SOT563 封装，高度只有 0.6mm；最大工作电流只有 10μA，休眠电流只有 1μA。选择 8 位单片机 PIC16F1823 作为 CPU，待机状态下电流为 20nA，空闲状态可进入超低功耗休眠模式，工作温度范围为 -40℃~125℃。单片机工作于外部晶振模式可使工作功耗最小，也能提供精确度更高的时基，选用低频晶振（4MHz）。ZigBee 无线模块通过串口与 CPU 进行通信，配置为终端，可休眠。CPU 通过拉高或拉低 SLEEP_RQ 引脚电平即可控制 XBee 是否

进入休眠状态，休眠时 XBee 最大工作电流仅为 1μA。采用 TLH4902 TADIRAN 电池供电，高低温特性好，工作温度范围 -55℃~85℃，一般寿命长达 20 年。

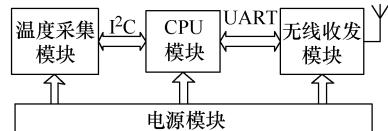


图 3 测温终端系统框图

无线测温终端软件设计包括检测温度、发送温度数据和低功耗的管理等方面。考虑到一般环境下发热点的温度变化并不明显，为降低测温传感器的功耗，设计软件时采用温度数据短周期采集，长周期主动发送数据以及轮循休眠等方法。图 4 为无线测温传感器主要工作流程图。CPU 每隔 15s 采集两次温度值，并将两次温度值进行校验，验证数据的有效性。TMP102 转换温度需耗时 26ms，因此为降低功耗，在其转换温度期间令 CPU 进入休眠状态 26ms。将终端地址保存在 EEPROM 之中，并且只在 CPU 初始化时读取，存入到数据区以供使用，避免频繁读取 EEPROM 而增大功耗。将当前读取的有效温度值与上一次保存的温度值进行比较，若温差超过一定阀值，直接上传数据，否则每隔 5min 发送一次数据。采用得当的方法延长发送间隔，可提高电池的使用寿命。当温度超过上限值 75℃时，进入预警状态，直接上传温度数据，累计 3 次以后，转为每隔 5min 发送一次数据；当温度再次下降低于 73℃时，解除预警状态。正常工作时，无线数据收

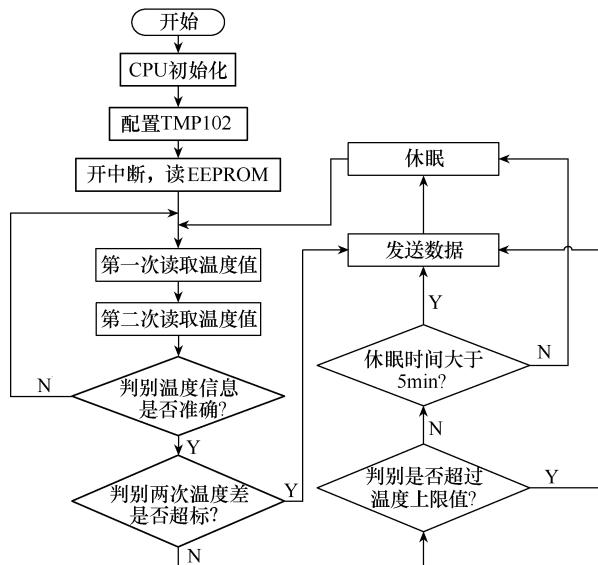


图 4 无线测温传感器工作流程图

发模块处于休眠状态。只当需要发送数据时，通过拉低引脚电平唤醒 XBee 模块，数据发送完成后在拉高电平休眠 XBee 模块。在软件休眠之前，把所有空闲的 I/O 口配置为输入，还要保持使用中的 I/O 口的电平状态与相连接的器件相一致，避免引脚上出现电流流动，降低模块的功耗。

2.3 智能除湿监控终端设计

智能除湿监控终端采用分体设计方式，由控制模块和驱潮模块组成(如图 5 所示)。控制模块包括：电源转换模块、温湿度采集模块、微处理器模块、继电器输出模块、开关量采集模块、通信模块组成^[5]。电源转换模块将 220V 交流电源转换成直流 12V、直流 5V、直流 3.3V 输出，供给其他模块使用。温湿度采集模块可以采集温湿度数据，并转换为数字信号输出。微处理器用于控制温湿散热片、温湿度的采集，信息处理，控制命令的处理，并管理其他模块。继电器输出模块根据微处理器模块发出的指令，控制制冷装置和加热装置的工作。开关量采集模块可以通过门限开关采集柜门状态，或通过空开辅助模块采集空开的状态。通信模块主要负责将电信号转换为无线电波信号，实现信息的无线传输。驱潮模块由加热控温装置和制冷除湿装置组成。

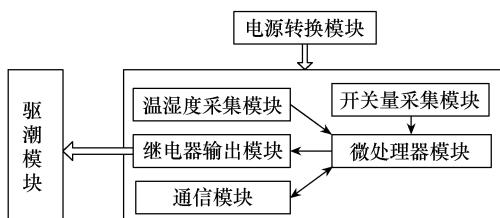


图 5 智能除湿监控结构终端图

MCU 采用 Microchip 公司 16 位 PIC24FJ64G-004，主要功能特性如下：最多 26 个可用外设引脚；2 个 I²C 模块；2 个 UART 模块；5 个带可编程预分频器的 16 位定时器/计数器；4 个外部中断源。电源转换模块的 220V 转 12V 部分采用台湾明纬的开关电源模块 RPS-75-12，输出电流范围为 0~6.3A，纹波和噪声是：100mV_{p-p}，电压精度是±2.0%，输入电压范围是交流 90~264V 或直流 70~127V。温湿度传感器采用 Sensirio 公司的 SHT11，其集成度高，功能全面，体积小，并且具有超快的响应速度、抗干扰能力强、性价比高的优点；温度采集范围：-40℃~120℃，精度：25℃时±0.5℃，0~40℃时±0.9℃；湿度采集范围：0~100%RH，精度：±3.5%RH；传感器通过数据线 DATA 和时钟线 SCK

传输数据。开关量以无源或有源的输入信号形式，经 PC817 光电隔离后，输入 MCU。无线通信模块配置成 Router 方式，不休眠。驱潮模块中的加热控温装置延用了端子箱内已有加热板，供电电压 220V。因其加热快、除湿效果不明显，故用于端子箱内环境温度的控制。制冷除湿装置是半导体制冷除湿器，由两组风扇、两组导热金属块、半导体制冷片以及接水盘组成；为了提高凝露控制过程的动态性能，采用闭环控制的 BUCK 电路实时调整除湿器的输出功率。

无线温湿度调节控制器作为端子箱防潮控温的核心，由温湿度采集与处理模块、ZigBee 通信模块、红外通信模块和控制策略模块组成。主流程如图 6 所示。

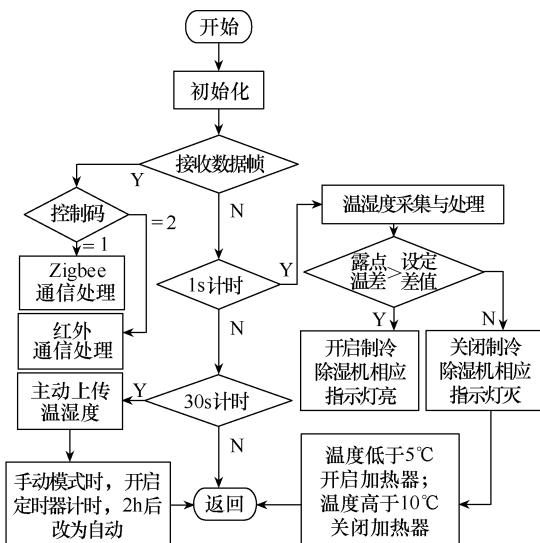


图 6 控制器主流程图

CPU 每隔 1s 采集温湿度值并进行判断处理；每隔 30s 通过无线通信模块上传温湿度值、露点值、除湿设备的运行状态等数据；CPU 在接收到数据帧时根据控制码判断由 ZigBee 通信处理或红外模块处理，红外模块支持红外手持设备就近读取终端数据。控制终端通过两种方法来决定是否启动除湿防潮设备进行除湿和控温。第一种：根据温度和相对湿度而计算出露点值，以露点值和当前温度的差值作为除湿机的起动条件；根据温度与预设阈值作比较来自动起停加热器达到控制箱内温度的目的。第二种，通过远方监控平台强制起动，除湿设备运行时间通过远方监控平台的软件窗口下发，时间到后恢复到原来状态。以上两种方法组成了对除湿防潮设备较为完善的控制手段。

3 通信管理机设计

通信管理机是基于 RCM6760 模块的嵌入式系统，功能是通信管理及规约转换。硬件结构可分为系统和接口两个部分。系统部分是通信管理机的核心硬件，主要包括 CPU、存储器、复位及其外围电路。CPU 选用 RCM6760，具有体积小，内置时钟芯片，多串口，外设丰富等优点，适合于规约转换器这种多串口多任务的嵌入式系统，此外，该模块的编译环境已经移植好 μC/OS-II，可较大地缩短项目开发周期。RCM6760 模块板载 1MB Flash S29AL008D，作为程序存储器；板载 4MB Serial Flash AT45DB041B，作为数据存储器，存储内容包括：历史故障信息、全部通信规约和串行通信接口的设置参数。通信管理机的接口电路包括以太网模块、ZigBee 模块等。其中，ZigBee 模块采用 XBee PRO 模块，配置为网络协调者，负责网络的建立与维护^[6]。

通信管理机的软件设计部分按功能将任务划分为定时管理、以太网通信、数据解析和 ZigBee 通信任务^[7]。各任务间的关系如图 7 所示。

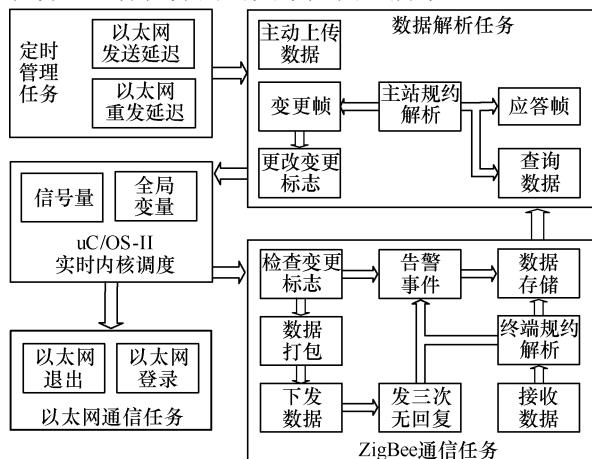


图 7 通信管理机任务

定时管理任务主要负责计时和延迟，包括以太网重发延迟、以太网发送延迟和心跳包发送延迟功能，主动上传数据和心跳包上传时间间隔分别默认为 5min 和 2min。数据解析任务主要负责与主站服务器间的数据交换，操作的对象为全局变量、以太网发送缓冲区和以太网接收缓冲区，物理层按照以太网协议进行数据传输，协议层根据主站规约进行解析和打包。ZigBee 通信任务负责与各个终端数据交换，通信协议为底层终端的串口通信协议，ZigBee 通信任务的操作对象为全局变量、ZigBee 数据接收

缓冲区和 ZigBee 数据发送缓冲区，如图 7 所示。ZigBee 通信任务分为下发数据和接收数据两部分。下发数据又分为两类：第一类为下发的查询任务；第二类为变更任务，该部分变更内容包括阈值设置、手自动设置和启停控制。

在通信规约方面，本设计采用统一的帧格式，具体说明见表 1。其中地址域代表终端设备的地址，命令码包含设置终端参数、读取终端数据、终端报警、通信应答等功能。利用校验和与应答机制来应对通信出错的情况，提高通信的稳定性和准确性。正常通信时，接收方收到正确数据，校验一致，则会向发送方回传应答信号；当通信发生错误时，即校验不通过，则数据发送方无法在预设时限内收到对方的应答信号，因此需延时重发。

表 1 帧格式说明

数据	长度	说明
68H	1	起始码
L	2	长度
A	2	地址域
C	1	命令码
DATA	N	数据单元
TIME	7	时间标签
CS	1	校验和
16H	1	结束码

4 上位机软件设计

变电站 10kV 开关柜安全运行智能监护系统由系统管理、台账信息建立与维护、开关柜监控、历史数据呈现、SOE 事件管理及系统帮助等六个模块组成^[8]。其中，系统管理模块包括用户管理、角色管理、模块管理、部门管理等功能，为系统提供灵活的权限配置，及可靠的安全性；台帐信息建立与维护模块可以进行建立、维护、更改和查询系统、通信管理机、电压等级和开关柜设备信息等功能；开关柜监控模块实时显示当前开关柜的温湿度和运行状态等数据并能够通过 Web 控制开关柜的工作模式及工作状态；历史数据模块能查看开关柜监控的历史信息，提供历史数据报表生成及打印功能和开关柜历史数据对比曲线图；SOE 事件模块用于查看各类设备数据异常情况，确认数据异常并填写原因；系统帮助模块提供系统使用说明。

(下转第 97 页)