

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.07.015

基于射频技术的开关柜无源无线温度测量系统

李诗勇¹, 谢荣斌¹, 靳斌¹, 陈实¹, 刘波¹, 梅家葆²,
田星辰², 李江涛²

(1. 贵州电网有限责任公司贵阳供电局, 贵阳 550000; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 配电开关柜安全运行对保障供电可靠性至关重要, 配电开关设备的温度监测是前期状态判断和故障后期诊断的重要手段。文中研制了一套基于射频技术的开关柜无源无线温度测量系统, 用于配电设备温度状态监测, 通过无源无线的方式减少传感设备供电寿命问题、引线爬电问题及布线安装问题。对系统中传感器设备的传感、通讯、封装相关技术进行研究, 对系统运行的工作流程进行设计。对系统进行实际运行环境测试和性能及功能测试, 测试结果显示本系统适用于开关柜的温度监测, 对智能配电网传感节点的智能化、无线化和自取能、自组网有着推动意义。

关键词: 配电开关柜; 温度传感; 无线传输; 射频技术; 无源设备

Passive Wireless Temperature Measurement System for Switchgear Cabinet Based on Radio Frequency Technology

LI Shiyong¹, XIE Rongbin¹, JIN Bin¹, CHEN Shi¹, LIU Bo¹, MEI Jiabao², TIAN Xingchen², LI Jiangtao²

(1. Guizhou Power Grid Corporation Guiyang Power Supply Bureau, Guiyang 550000, China; 2. State Key Laboratory for Electrical Insulation of Electric Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The safe operation of distribution switchgear cabinet is very important to ensure the reliability of power supply. The temperature monitoring of distribution switchgear cabinet is an important means to judge the fault in the early stage and diagnose the fault in the late stage. In this paper, a kind of passive wireless temperature measurement system for switchgear cabinet based on RF technology is developed, which is used for temperature state monitoring of distribution equipment. Such issues as power supply life of sensing equipment can be reduced through the passive wireless method. Moreover, such related technology as the sensing, communication and packaging technology of the sensor equipment in the system is studied and the working flow of the system operation is also design. The actual operating environment test and performance as well as function test of the system are carried out. The test results show that the system is suitable for the temperature monitoring of the switchgear cabinet and has a certain promotion significance for the intelligent and wireless sensing nodes of the smart distribution network, as well as the self-generating energy and the self-organizing network.

Key words: distribution switchgear cabinet; temperature sensing; wireless transmission; radio frequency technology; passive device

0 引言

随着电力系统的发展和智能电网进程的推进, 配电网因为直接服务用户的基础地位, 配电设备状态监测对于保证电网的安全运行有着极其重要的

意义。在配电设备中, 配电开关柜作为保证系统安全运行的重要运行设备, 承担电力线路开断和闭合的工作任务, 是保证电力负荷输送、倒换、及时将故障隔离和问题设备切除的重要设备。在配电系统中, 配电开关柜的安全运行是决定能否安全稳定运

收稿日期: 2023-11-20; 修回日期: 2024-01-31

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZKJXM2019127)。

Project Supported by China Southern Power Grid Co., Ltd. Science and Technology Project(GZKJXM2019127).

行的关键因素。如果配电开关设备出现异常工况,会出现过热、局放、弧光等多种问题,造成用户负荷的异常,影响用户的正常用电,破坏供电部门的整体运行,造成重大的经济损失和不良的社会影响。因此保证配电开关柜的安全运行是配电运维中的一项极其重要的内容^[1~4]。

在配电系统对配电设备的运维中,定期检修、按期更换和在线监测都是保证配电开关柜安全运行的可靠措施。其中,在线监测是面向运行过程的安全措施,在3种方式中时效性和稳定性较高。对于配电开关柜的运行监测,首先要关注开关柜的物理结构条件,配电开关设备采用全封闭结构,造成较差的热量释放环境,散热条件有限;其次在运行过程中,因为设备内部结构的老化、劣化,开关柜的触头、母排、接头位置接触电阻增大,在大电流的作用下局部发热量增加,在热量积攒的情况下,会形成严重的过热工况^[5~10]。因此,在多种状态监测中,配电开关设备的温度监测是一种前期状态判断和故障后期诊断的重要手段。

目前,应用较广的比较成熟的配电开关柜的温度监测方式有:示温蜡片、光纤测温方法、红外测温方法、数字式测温方法等几种测温方法^[11]。

示温蜡片测温方法应用时间较久,是一种定性判断温度状态的粗略诊断方法。工作原理是示温蜡片布置在容易发热的温度部位,当温度达到一定的限值时,示温蜡片的外形和颜色会发生相应的变化,通过观察示温蜡片的颜色及外形即可定性判断监测部位是否超过温度限值。目前,示温蜡片存在的问题主要是定性判断不适合目前智能化、高精度的运行环境,需要依赖人工经验和巡检,难以及时有效的判断开关柜的温度状态^[12~14]。

光纤测温方法是通过光纤进行状态感知和信号传输的监测方法,目前多用于变压器绕组及较短线路的温度监测的应用环境,主要分为光纤直接测温 and 光纤光栅测温^[15]。作为传统测温方法的补充,光纤测温方法的原理根据后向散射原理可以分为基于瑞利散射、基于拉曼散射和基于布里渊散射^[16]。目前最为成熟的光纤测温方法是基于拉曼散射的分布式光纤测温系统。通过光纤的光时域反射原理和后向拉曼散热温度效应,根据光纤分子的热振动和光子能量转换后的比例,进而得到测量点的温度。光纤测温的优势在于较强的抗干扰能力、安全性和耐腐蚀性较高、灵敏度和精度较高^[17]。但是,光纤在应用于开关柜的狭小环境下,不可避免的弯折扭曲会对信号的传输造成一定的影响;脏污环境会对光纤的精

度和稳定性造成较大的影响,导致测量结果可靠性降低;同时,由于光纤测温需要通过光纤光缆进行光信号传输,在运行状态下,增加了爬电危险,可能破坏一二次侧的电压隔离,带来一定的安全隐患^[18]。

红外测温方法依据黑体辐射原理,通过检测物体表面的对外热辐射量,将不同热量差进行运算、处理和判断,进而得出热像和温度之间的换算,得到测量物体的相应温度。应用于开关柜的红外探头和热成像仪能够较好地测量可视范围内的温度,进而提供对开关柜内温度的判断依据,目前红外相关的应用和示范较多^[19]。但是,根据现场实践的发现,红外测温方法在存在遮挡物的情况下,温度测量的效果出现较大影响,导致不能对温度进行有效测量和判断^[20]。

数字式温度测量方法是在模拟式温度测量的基础上发展而来,传统数字式温度传感器通过高、低温度系数晶振在温度影响下产生脉冲信号进行计数,在温度寄存器中进行脉冲次数的累加,累加结束时温度寄存器中即为所测温度,此种方法需要进行补偿和修正测温过程中的非线性问题^[21~23]。随着数字式温度传感器的发展,温度传感器的尺寸、能耗、精度不断提高,目前温度芯片已发展到片上集成的CMOS(互补金属氧化物半导体)温度传感器阶段,在保证灵敏度和测温范围的前提下,利用集成电路工艺将温度感知元件和基本外围电路集成在同一芯片上。相比传统温度传感器的优点有:体积更小、功耗更低、输出特性好^[24]。

基于数字式温度传感器的无源无线测温方法在CMOS工艺实现的基础上分为:SAW(声表面波)测温方法和RFID(射频识别)测温方法^[25]。无线传输是指通过电磁波进行信号的传输,无需电力信号线的布线,避免一二次连接造成的高低压电气连接和相应的爬电问题。无源供能是指通过自取能的方式进行传感设备的供能,不设置内部电源,不通过二次侧取电,采用电磁波的无线供能。无源无线测温方法是以数字式测温方法为基础发展而来,无线通讯为数字式测温方法的数据传输和信号传递提供无需有线连接的解决方案,无源供能的方式下,数字式测温方法无需内部电源和有线取电,减少了电池寿命问题、爬电问题和一二次高低压连接的问题^[23]。目前,随着无线测温的发展,将电能传输和信号传递结合,将两者都融入无线测温方法的范畴。将数字式测温方法进行改善,达到无线传输、无源功能的新型测温方法。其中,SAW测温方法由于频段识别个数限制、互相干扰、信号衰减等问题,仍需对抗干扰

措施和频段细分拓宽进行研究改善。无线测温方法通过无线传输的方式,可以很好地避免开关柜测温时出现的高、低压侧连接问题,解决一二次侧高压绝缘问题。但是此种方法需要解决一次侧测温终端的供电问题以及数据传输过程的抗干扰问题^[26-30]。

针对目前配电系统的测温需求,对测温精度、供电方式、可靠程度、信号传输、安装难易等因素进行综合考虑,数字式无线测温技术具有测量范围大、准确度高、不影响设备运行、在线实时监测的优点。基于对目前在线测温技术的分析,结合实际的应用环境和成本的考虑,文中采用RFID无源无线测温技术对高压开关柜进行在线测温,搭建针对开关柜环境的无源无线测温系统,对系统的软硬件部分进行设计,对开关柜温度状态进行实时监测。

1 无源无线测温技术研究

1.1 无源无线测温系统工作原理

RFID无源无线测温技术是一种结合无线射频识别技术和温度传感技术的新型测量方法。RFID技术通过无线电信号进行数据传输和信息识别,通过射频识别阅读器进行射频信号发射和接收,对被测终端进行自动识别,在温度传感标签获得电磁波能量,温度传感标签进行相应工作后,进行反向信号传输,工作原理见图1。

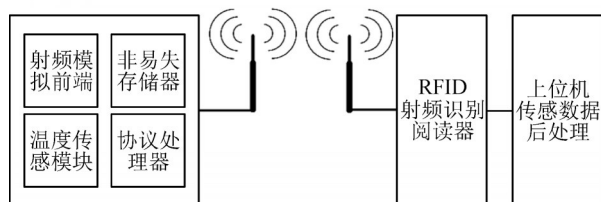


图1 RFID射频工作过程

Fig. 1 The working process of RFID system

传统RFID应用于简单的信息识别,不涉及状态感知,随着CMOS低功耗温度传感器的发展,RFID技术结合传感技术的集成芯片成为一种温度测量的新型方式。一般RFID系统由4部分组成:温度传感标签、射频识别阅读器、天线和上位机。RFID无源无线测温系统中,温度传感标签为嵌入温度传感器的无源超高频射频元件,是RFID系统中的负责测量、处理及传输温度状态数据的测量终端。温度传感标签由4部分组成:射频模拟前端、非易失性存储器、协议处理器和温度传感器。

射频模拟前端是温度传感标签对外接口,通过连接相应频段的天线,将芯片与射频识别阅读器之间信号转换调制并进行传输,同时为温度传感标签

芯片内部提供所需的模拟信号。射频模拟前端电路由超高频段整流器、ASK解调器、背射调制器、振荡器、复位器以及偏置电路组成。

非易失性存储器是保证工作稳定性的存储设备,用于进行芯片工作过程信息的存储和固定数据资料的本地保存。非易失性存储器可以实现多次编程的擦除录入功能,在需要进行信息更改时可以通过编程进行芯片必要信息的变动,例如温度传感标签编号及用户信息。

温度传感器采用CMOS设计,通过将温度信息的非电参量进行转换变为方便处理和存储的数字电信号。温度传感器采用CMOS设计技术,通过结合衬底PNP管的温度测量和开关电容电路的模数转换,达到低功耗、高精度的温度传感终端。无源芯片通过无线能量传输进行整个芯片的工作供电,温度传感部分的低功耗对于传感器无源设计至关重要。

协议处理器是进行数据通讯传输的核心部分,通过对通信协议的翻译解释,按照协议的标准规范进行芯片的操作运行。协议处理器对温度传感器数据准确表示、非易失性存储器的及时存储和射频模拟前端的工作规范有着重要的作用,使无源温度传感标签能够兼容EPC C1 G2国际标准。

1.2 RFID系统搭建

系统组成根据功能,基于RFID的开关柜温度实时监测系统的设计与实现主要包括监测节点的RFID模块、MCU模块、LoRa模块和上位机数据系统,见图2。

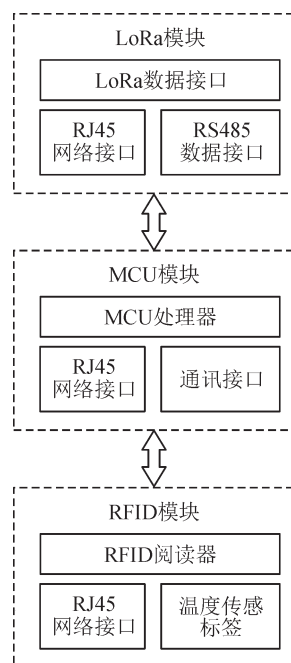


图2 基于RFID的开关柜温度实时监测系统

Fig. 2 Real-time temperature monitoring system of switchgear based on RFID

RFID模块功能为采集终端数据、数据上下行传输、指令控制发送。RFID模块包括温度传感标签、天线及RFID射频识别阅读器。温度传感标签的设计保证满足EPC C1 G2国际标准的情况下,RFID系统的设计主要是对天线的设计及RFID射频识别阅读器模块的设计。在应用于电力设备中的温度传感标签,布置位置和安装方式不确定的情况下,天线采取方向性较好且抗干扰性能高的圆极化天线。圆极化天线可以较好地解决电磁波在传播过程中因多次折反射产生的极化方向偏转问题,避免极化失配导致的信号丢失问题。圆极化天线对于安装位置和调试布置的需求相较线极化天线有着更好的性能,圆极化天线与线极化天线的差异见图3。根据图3得出,圆极化天线产生电磁波为圆周形电磁波,比较横纵方向的线极化电磁波,圆极化电磁波方向性更好,不是对单一方向的电磁波接收和传输,并且对接收端天线的布置位置和安装方式的要求更宽松。

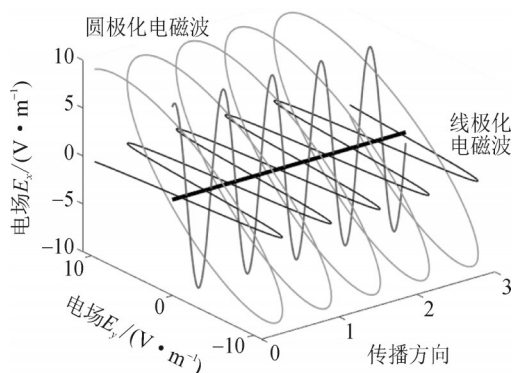


图3 圆极化天线与线极化天线的差异

Fig. 3 Difference between circularly polarized antenna and linearly polarized antenna

MCU模块为整个系统控制核心,通过连接通讯模块和RFID模块,进行数据处理、存储、状态评估,在状态评估后,出现超温过热的情况和预设值的范围内时,MCU模块调动LoRa模块,唤醒LoRa模块。MCU模块通过模块功能设计统一串口数据格式,采用系统的数据传输交流进行统一,实现各个模块之间的功能配合,通过MCU模块连接RFID模块和LoRa模块,采用控制系统安排传输时序和工作状态。数据接口采用UART接口,比特率采用1 200~115 200 bps,模块与MCU连接通过TTL电平串口进行数据传输通讯,通过引脚,低电平触发发送数据到串口。

通过LoRa模块进行数据上下行传输,利用星形和点对点的方式,进行RFID系统的自组网和数据的有效远程传输,采用LoRa模块进行系统的数据

传输,采用网关配合,提高远程传输距离;LoRa模块通过天线进行电磁波发送,采用SMA天线,封装采用DIP封装方式,包括发射状态、接收状态和休眠状态;LoRa模块接受MCU模块控制后,进入传输模式,通过透传及点对点传输模式,向上位机进行无线数据传输;上位机在接收到LoRa上行数据后,进行数据处理并进行状态异常预警。

RFID模块、MCU模块和LoRa模块共同组成基于RFID的开关柜温度实时监测系统。通过模块化设计,以MCU模块沟通RFID模块和通讯模块。通过LoRa模块实现无线自组网,实现低功耗、远距离传输,克服RFID难以应用于布线困难、跨度大距离远的应用环境。

2 无源无线测温系统硬件设计

2.1 温度传感标签感知及功率传输

温度传感标签通过射频模拟前端、非易失性存储器、协议处理器和温度传感器进行电力设备的温度感知及传输,是无源无线测温系统的测温终端,是决定温度测量可靠性和稳定性的关键因素。在设计无源无线测温系统中,温度传感标签采用满足EPC C1 G2的温度芯片并进行封装设计。

温度传感标签工作的两个关键因素为测温精度和传输功率。测温精度的影响因素为CMOS温度芯片的PNP结构下的电热效应和数模转换模块的精度,通过选取高精度的CMOS芯片可以较好地实现温度传感标签测温的效果。

根据Friis方程,芯片的总接收功率包含理想接收能量 P_r 、功率传输效率 τ 和极化匹配系数 ρ 。理想接收能量是指理想条件下射频识别阅读器和温度传感标签理论传输的最大功率,理想接收能量和传输距离的平方成反比,见式(1)

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (1)$$

式(1)中: P_t 为射频识别阅读器的发射功率; G_t 为射频识别阅读器天线的增益; G_r 为温度传感标签天线的增益; λ 为信号传输的电磁波长。电磁波频率为915 MHz, λ 为0.33 m,射频识别阅读器的发射功率通常为10 W,为满足标签启动功率1 W和读取距离要求10 m, G_t 取8 dBi, G_r 取6 dBi。

功率传输效率 τ 是接收功率和加载功率之间的比值,反应温度传感标签读取效率的指标,温度传感标签的读取距离和功率传输直接取决于天线和芯片的阻抗匹配程度。根据Friis方程,可以得到

$$\tau = \frac{P_L}{P_{\text{Friis}}} = \frac{4R_{\text{clsp}}R_A}{|Z_{\text{clsp}} + Z_A|} \leq 1 \quad (2)$$

式(2)中: $Z_{\text{clsp}} = R_{\text{clsp}} + jX_{\text{clsp}}$; $Z_A = R_A + jX_A$; Z_{clsp} 、 Z_A 分别为芯片、天线阻抗值; R_{clsp} 、 X_{clsp} 、 R_A 、 X_A 分别为芯片电阻值、电抗值、天线电阻值、电抗值。其中,电阻值匹配取值满足功率传输效率 τ 为0.5~0.8之间。

极化匹配系数 ρ 是反应射频识别阅读器天线和温度传感标签天线的极化方向不同的指标。极化方向不同的情况下,能量传输会发生相应的减少,当极化失配达到最大时,能量传输极小,严重影响传输效果。为了达到较好的极化匹配效果,采用圆极化天线更为合理有效。

结合理想接收能量 P_r 、功率传输效率 τ 和极化匹配系数 ρ ,芯片最终接收功率表示为

$$P_r = \rho\tau \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (3)$$

根据上述分析,温度传感标签对外接口采用阻抗匹配的右旋圆极化天线的天线设计,并且采用6 dBi增益的天线设计,最大限度增加功率传输效率,温度芯片天线设计见图4。



图4 温度芯片天线设计

Fig. 4 Temperature chip antenna design

2.2 温度传感标签抗金属封装设计

在保证温度传感标签的测温精度和传输功率的基础上,需要考虑温度传感标签应用于配电设备的有效性。在配电网环境中处于大量金属环境,金属对于电磁波的吸收作用和涡流效应会严重影响温度传感标签的功率传输,最后影响无源无线测温系统的效果。因此,需要对温度传感标签采用抗金属设计。

抗金属性的方法主要有:增加天线和金属距离、金属电磁波叠加效应、金属表面电磁波二次发射。

增加天线和金属距离方法可以使温度传感标签利用涡流产生的磁力线。温度传感标签在紧贴金属表面时,磁力线平行于金属表面,并不能使温度传感标签切割磁力线来获取能量,导致传感器不能正常工作。当距离一段距离,在远离金属表面产生弯曲不平行表面的磁力线,可以提供温度传感标签足够的能量。此种方法经过验证,能够提高温度传感标签的能量获取,但是相应的需要提高温度传感标签的体积和降低天线的带宽,不能有效解决金

属表面对天线距离的影响。

金属电磁波叠加效应是指射频识别阅读器发射的电磁波作为入射信号,在金属反射后,会产生相位相反的电磁波信号,这两种信号会相互叠加,见图5。在不进行处理的条件下,两者信号完全反相,导致信号叠加后相互抵消。当天线和金属表面距离一段距离时,入射电磁波和反射电磁波的相位差相应产生变化。通过不断调整距离,可以得到入射电磁波和发射电磁波正向叠加的增强效果。根据实验,天线距离金属表面 $\lambda/4$ 的情况下增强效果最好,天线距离金属表面 $\lambda/2$ 的情况下削弱效果最强,此时温度传感标签的读写效果最差。基于此分析和实验,温度传感标签和金属表面距离 $\lambda/4$ 时,电磁场能量叠加最强,温度传感标签的信号传输效果最好。针对915 MHz的温度传感标签, λ 为0.328 m, $\lambda/4$ 为81 mm,不适合配电应用环境,并且难以实现小型化、低成本的要求。

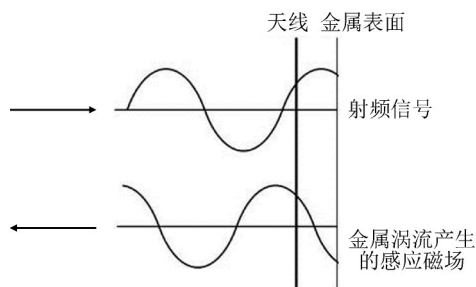


图5 金属电磁波叠加效应

Fig. 5 Electromagnetic superposition effect of metal

金属表面电磁波二次发射是指在金属表面和天线之间加入额外金属层,达到电场相位和原始相位增加的效果。通过插入不同厚度金属层进行实验测试,进行测试,分别不加入和加入1、2、3 mm薄铁片进行测试,测试结果见图6。

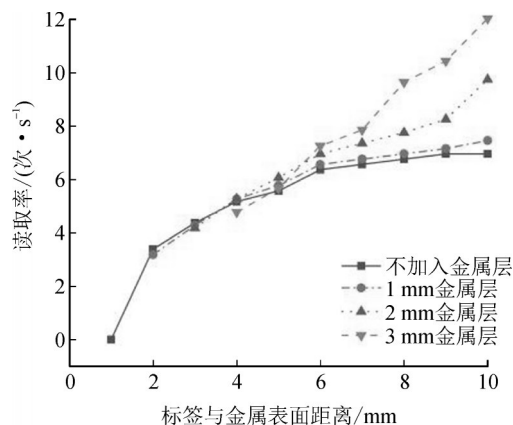


图6 金属表面电磁波二次发射对比

Fig. 6 Comparison of electromagnetic wave secondary emission on metal surface

在不加入金属层的情况下,金属和温度传感标

签距离增加,读取效果更好,符合 Friis 方程及传输功率的推导结论。随着金属和温度传感标签距离的增加,读取率显著逐渐提高。

在加入不同厚度的金属层的情况下,随着金属层厚度增加,反射效果逐步提高,金属表面电磁波的二次发射的增强效果更加显著,在 10 mm 距离处,读取率为不加金属层的 2 倍。

根据对通过温度传感标签的封装设计及天线匹配,得到适用于配电设备的无源无线的温度传感标签。温度传感标签采用测温芯片、中间介质层、金属层叠加结构,外部通过耐高温陶瓷进行封装,达到机械强度加固增强的作用,最终设计结构见图 7。

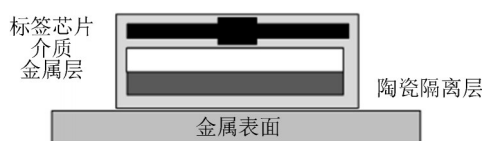


图7 利用金属二次发射的抗金属封装设计

Fig. 7 Metal resistant package design using metal secondary emission

根据计算和实验测量,对于抗金属封装设计中,中间介质层选用厚度为 3 mm 的纸介质,进行金属层和温度传感标签芯片的隔离和距离调整。金属层选择加入 3 mm 的金属铁片,进行电磁波的二次发射。

2.3 系统控制及供电模块设计

在温度传感标签的感知传输和抗金属设计满足足够精度的基础上,射频识别阅读器的硬件设计的匹配可以使整个无源无线温度测量系统更加高效可靠。根据开关柜温度实时监测系统中 RFID 系统功能划分,硬件设计包括 MCU 模块、RFID 模块设计及 LoRa 模块。其中 MCU 模块主要负责系统的控制及供电,保证系统的上下行功能有序进行。

MCU 模块主要包含单片机模块及供电模块,通过配合 IO 接口可以扩展不同功能。本系统中单片机模块采用意法半导体公司的 ATM32F1 系列芯片,通过连接通讯模块和 RFID 模块,进行数据处理、存储、状态评估。芯片内核为 ARM Cortex-M3 32 位的精简语言指令计算机内核,主频为 24 MHz,工作频率为 72 MHz。整个芯片具有 80 个增强 IO 端口以及 5 个连接串口,其中通信接口包含 I²C 接口、USB 接口、SPI 接口等丰富的通用统一接口,可以为 MCU 模块开发提供充足开发接口条件。

供电模块采用 SY8120 系列电源芯片和 TPS5450 高输出电流 PWM 转换器共同实现整个系统的供电工作。TPS5450 内部为低功耗、低输入电阻、N 沟道 MOSFET,内部包含高性能电压误差放大

器,可以实现列出功能,保证在瞬态条件下提供电压调节精度。通过欠压锁定电路,防止启动直到输入电压达到 5.5 V。慢启动电路可以有效限制浪涌电流,在满足供电的要求的情况下,兼顾电磁兼容的浪涌保护。TPS5450 能够实现宽输入电压 5.5 V 至 36 V,最高电路 5 A 输出电流,通过小型耐热增强型 8 引脚封装保障热稳定性。

对于直流小电流低压供电的需求,采用 SY8120 系列电源芯片,通过同步降压提供 2 A 负载的 DC-DC 转换电源。在宽输入范围的环境下,可以系统 4.2~18 V 的运行电压。采用及时 PWM 框架满足快速瞬态响应,进而实现高压降应用环境下的高速高效能量转换。SY8120 可以实现输出电压 4.5~18 V 使能控制,便于开断操作;输出电流最大 2 A,实现逐周期电流限制保护,为内部电路提供充足有效的直流供电。

2.4 通讯模块设计

无源无线测温系统包含上下行通讯,RFID 模块实现温度传感标签和射频识别阅读器通讯的功能模块,通过射频识别阅读器芯片连接右旋圆极化天线,进行温度传感标签数据的收发。LoRa 模块实现数据上行,连接上位机和射频识别阅读器,并且通过有线实现数据连接的双保险通讯措施。

RFID 模块中主要包含射频识别阅读器模块和天线。射频识别阅读器采用 Impinj 系列射频识别阅读器芯片,实现与温度传感标签的能量传输、数据采集和指令发送。Impinj 芯片通讯协议采用 EPC C1 G2 标准协议,工作频率在 840~960 MHz,内部共有 64 引脚,功耗为 1 W,集成射频通信的离散元件,降低射频电路的分散性,在保证接收灵敏的基础上极大简化集成开发的难度,在软件上,芯片采用防碰撞算法,通过碰撞时隙的处理,极大降低温度传感标签识别时间,使温度传感标签识别度和温度传感标签读取率更好适应配网设备的应用环境。

LoRa 模块采用 E22 系列芯片,芯片提供了多种调制方式,具备两种配电方式,低压差稳压器(LDO)以及高效率降压 DC-DC 转换器,在 DC-DC 方式的前提下,接收电流极低,实现低功耗和高传输率的平衡。E22 芯片工作频段为 410~493 MHz,发射功率为 22 dBm,接收灵敏度为 -147 dBm,通过 SPI 通讯接口,与 MCU 模块进行连接,通过软件设计,实现数据上下行传输,利用星形和点对点的方式,进行 RFID 系统的自组网和数据的有效远程传输。

3 无源无线测温系统软件设计

单片机工作流程系统开机后,进行系统初始化,实现3个模块的默认配置。在初始化后,MCU进行任务判断,当检测到有检测任务时,MCU进入工作状态。MCU发送指令给RFID模块,唤醒模块,使模块进入工作状态。RFID模块在接收到MCU控制指令后,进行温度读取指令的发送,下行发送电子温度传感标签的温度读取指令。RFID电子温度传感标签在接收到RFID模块指令后,进行数据采集,通过射频能量收集电路收集的能量,触发温度传感电路、数模转换电路、数据存储芯片,在执行完数据采集后,上行返回数据。RFID模块接收温度传感标签数据,并进行解码,传输给MCU模块。MCU模块进行数据处理、存储、状态评估,在状态评估后,出现超温过热的情况和预设值的范围内时,MCU模块调动LoRa模块,唤醒LoRa模块。LoRa模块进入传输模式,通过透传模式、点对点传输模式,向上位机进行无线数据传输。上位机在接收到LoRa上行数据后,进行下一步数据处理,关键重要高价值数据的存储,并进行状态异常预警,最远可以达到3 500 m的异常状态预警,系统工作流程见图8。

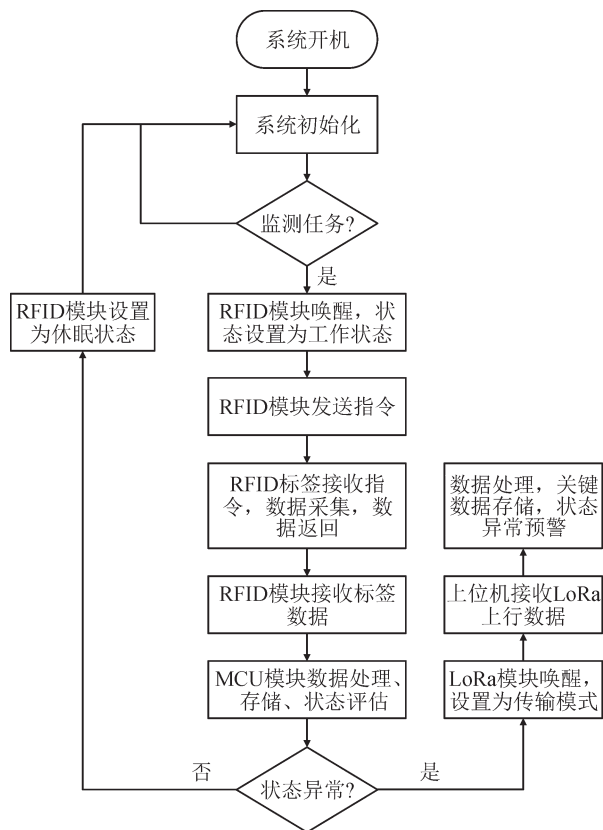


图8 单片机工作流程

Fig. 8 Working process of RFID software system

4 实验验证

4.1 无源无线温度测量系统测试

在配网10 kV环网柜中对无源无线温度测量系统的实际应用效果进行测试,将传感器布置在开关柜内,将成套的无源无线温度测量系统的数据采集设备布置在开关柜外,进行数据传输、指令发送等功能测试,效果良好,见图9。



图9 无源无线温度测量系统

Fig. 9 Passive wireless temperature measurement system

配电开关柜类型为HXGN-10环网柜,对环网柜测温重点集中在电缆出线端,对电缆室内三相进行温度测量。布局传感器的安装方式为扎带式,布置位置分别布置在电缆室的三相肘型接头。

4.2 计量测试及加速老化试验

根据国标GB/T 28473.2—2012、JJF 1059.1—2012测量不确定度评定与表示进行温度传感标签精度计量。在高温湿热设备实验装置中对传感器进行热加速老化试验,试验验证传感器可以有效工作35年以上。

在符合计量标准的温度数据采集仪中进行温度传感标签精度计量,测试结果见表1,在0~120℃温度范围内,进行标准示值和温度传感标签示值对比测试,最大误差示值为0.09℃,传感器精度在0.1℃以内。

5 结语

对温度传感标签感知及功率传输方法进行设计,实现温度传感标签的抗金属设计。对系统的控制系统的软硬件进行设计,搭建了基于射频技术的开关柜无源无线温度测量系统。

表1 温度传感计量测试结果

Table 1 Temperature sensor measurement test results °C

校准 定点	标准 示值	温度传感 标签示值	示值 误差	不确 定度
0	0.00	-0.25	0.25	0.45
10	9.99	10.00	-0.01	0.45
20	19.98	20.00	-0.02	0.45
30	29.99	29.99	0.00	0.45
40	39.94	39.85	0.09	0.45
50	49.99	49.98	0.01	0.45
60	59.93	59.88	0.05	0.45
70	69.99	69.98	0.01	0.45
80	79.88	79.90	-0.02	0.45
90	89.98	90.00	-0.02	0.45
100	99.99	99.90	0.09	0.45
110	109.99	110.01	-0.02	0.45
120	119.98	119.99	-0.01	0.45

对系统进行测量精度、测温范围及加速老化试验,测量精度在 ± 0.1 °C,测温范围在0~120 °C,持续工作寿命为35年以上,能够很好适应配电设备的使用寿命。

将基于射频技术的开关柜无源无线温度测量系统应用于开关柜,可以较好实现开关柜内的无源无线温度测量。通过无源的方式,避免温度传感器电池寿命对监测传感的影响;通过无线的方式,解决传感器及采集设备线路布置困难、有线设备爬电危险的问题。基于射频技术的开关柜无源无线温度测量系统对智能配电网的传感节点的智能化、无线化和自取能、自组网有着一定的推进意义。

参考文献:

- [1] 陈 强,李庆民,丛浩熹,等. 高压开关设备触头温度监测技术研究进展[J]. 高压电器,2015,51(9):146-153.
CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. Advancement of temperature monitoring techniques for HV switchgear contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9):146-153.
- [2] LYU Lijun, GAO Kai, HUANG Hua, et al. State detection of switch cabinet based on multi-sensor information fusion [C]//2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). New Orleans:IEEE, 2019: 1-6.
- [3] 张青山,段建东,叶 兵,等. 基于ZigBee的开关柜触头温度在线监测预警系统[J]. 高压电器,2015,51(4):29-35.
ZHANG Qingshan, DUAN Jiandong, YE Bing, et al. Online temperature monitoring/warning system based on ZigBee for switchgear contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4):29-35.
- [4] 郭志伟,徐子涛,刘 波,等. 基于最优特征量选取的开关柜故障判别方法研究[J]. 电测与仪表,2023,60(8):85-91.
GUO Zhiwei, XU Zitao, LIU Bo, et al. Research on switch-gear fault judgment method based on optimal feature quantity selection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8):85-91.
- [5] 熊 兰,徐敏捷,杨子康,等. 高压开关柜电缆室温度场分析及在线监测系统构建[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):153-157.
XIONG Lan, XU Minjie, YANG Zikang, et al. Thermal field analysis for cable room of high-voltage switchgear and design of online monitoring system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 153-157.
- [6] 李小博,黄新波,陈绍英,等. 基于ZigBee网络的智能变电站设备温度综合监测系统[J]. 高压电器,2011,47(8):18-21.
LI Xiaobo, HUANG Xinbo, CHEN Shaoying, et al. ZigBee network-based intelligent substation temperature monitoring system[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8):18-21.
- [7] TANG Nian, XU Hongyu, BAI Xiaofeng, et al. Analysis of thermal characteristics of switch cabinet with multi-physics field coupling method[C]//2020 IEEE 66th Holm Conference on Electrical Contacts and Intensive Course (HLM). San Antonio:IEEE, 2020:28-34.
- [8] 赵法强,黄洪松,胡 琴,等. 输配电设备发热故障温度指示技术研究综述[J]. 电测与仪表,2022,59(5):14-22.
ZHAO Faqiang, HUANG Hongsong, HU Qin, et al. A review of temperature indication technology for heating failure of power transmission and distribution equipment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 14-22.
- [9] 刘东超,陈志刚,崔龙飞. 基于物联网的环网柜在线监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(20):60-67.
LIU Dongchao, CHEN Zhigang, CUI Longfei. Online monitoring technology of a ring network cabinet based on the internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20):60-67.
- [10] 张 凯,原 军,药 炜,等. 电力电缆运行温度场变化及在线监测技术研究[J]. 电测与仪表,2023,60(5):103-108.
ZHANG Kai, YUAN Jun, YAO Wei, et al. Research on temperature field change and on-line monitoring technology of power cable operation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5):103-108.
- [11] 刘四军,韩 威,张海星,等. 高压开关柜温度流体场仿真及散热优化研究[J]. 高压电器,2020,56(10):63-69.
LIU Sijun, HAN Wei, ZHANG Haixing, et al. Research on temperature fluid field simulation and heat dissipation optimization of high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10):63-69.

- [12] FJELD E, RONDEEL W, KRISTIN SØNSTEBY G, et al. Contact resistance and temperature rise of cable connections in cable distribution cabinets[C]//2020 IEEE 66th Holm Conference on Electrical Contacts and Intensive Course (HLM). San Antonio:IEEE, 2020: 110-114.
- [13] 李江涛, 孙 义, 李擎宇. 大电流开关柜梅花触头热缺陷评估算法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 124-129.
LI Jiangtao, SUN Yi, LI Qingyu. Research on thermal defect evaluation algorithm for quanta contacts in high current switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 124-129.
- [14] LI Jiangtao, SUN Yi, DONG Ning, et al. A novel contact temperature calculation algorithm in distribution switchgears for condition assessment[J]. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(2): 279-287.
- [15] 付欢球, 黄 华, 董玉明. 光纤测温技术在高阻抗电力变压器中的应用实例分析[J]. 变压器, 2022, 59(9): 64-70.
FU Huanqiu, HUANG Hua, DONG Yuming. Application analysis of optical fiber temperature measurement technology in high-impedance power transformer[J]. Transformer, 2022, 59(9): 64-70.
- [16] WANG W, TANG W, YANG C, et al. Compensation method for high voltage switchgear temperature measuring system with dual surface acoustic wave chip[C]//2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). China: IEEE, 2020: 244-247.
- [17] 邓世杰. 中置式开关柜的无线测温方法[J]. 高压电器, 2010, 46(11): 99-102.
DENG Shijie. Wireless real-time temperature monitoring method for mid-set switch cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11): 99-102.
- [18] FJELD E, RONDEEL W G J, ATTAR E, et al. Estimate the temperature rise of medium voltage metal enclosed switchgear by simplified heat transfer calculations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 853-860.
- [19] 周立伟, 邵美才, 贾海沅, 等. 10 kV 开关柜无源无线环形测温传感器的研制[J]. 电气应用, 2019, 38(5): 61-66.
ZHOU Liwei, SHAO Meicai, JIA Haiyuan, et al. Development of a 10 kV switch cabinet passive wireless ring type temperature sensor[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(5): 61-66.
- [20] LI Ying, WU Ji, WANG Zengbin, et al. Design and manufacturing of a wireless temperature monitoring system for gas insulated switchgear[C]//2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Spain: IEEE, 2021: 684-689.
- [21] 张志锋, 缪希仁, 江 灏. 基于面阵测温的高压开关柜温度状态监测系统研究[J]. 电器与能效管理技术, 2021(3): 51-56.
ZHANG Zhifeng, MIAO Xiren, JIANG Hao. Research on temperature monitoring system of high voltage switchgear based on area array temperature measurement[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(3): 51-56.
- [22] SUN Qizhen, XUE Yiwei, DANG Weijun, et al. Analysis of temperature distribution characteristics of fuses under different arrangement of ring network cabinet based on multi-physical field coupling[C]//2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG). China: IEEE, 2019: 140-147.
- [23] 吴传奇, 陈 隽, 刘 帆, 等. 高压开关柜触头测温传感器性能检测平台的设计和应用[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 96-101.
WU Chuanqi, CHEN Juan, LIU Fan, et al. Design and practice for temperature measurement sensor performance testing platform of high voltage switchgear contact[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 96-101.
- [24] YAN Yuan, SHAN Guanhua. Research of on-line monitoring system based on modbus for multi-state quantity monitoring of high voltage switchgear[C]//2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEC). China: IEEE, 2019: 94-98.
- [25] 周小艺, ANDLE J, 王啸峰, 等. 声表面波(SAW)传感器断路器触臂安装方式可行性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 72-79.
ZHOU Xiaoyi, ANDLE J, WANG Xiaofeng, et al. Feasibility study on installation method of surface acoustic wave(SAW) sensor circuit breaker contact arm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 72-79.
- [26] 陈模盛, 李敬兆. 基于LPWAN多源信息融合的高压开关柜智能监测与故障诊断系统[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 98-103.
CHEN Mosheng, LI Jingzhao. High-voltage switchgear intelligent monitoring and fault diagnosis system based on LPWAN multi-source information fusion[J]. Smart Power, 2020, 48(8): 98-103.
- [27] 王海宝, 王 峥, 周娴姊, 等. 基于脉冲转换温度传感方法的电力设备温度监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 180-187.
WANG Haibao, WANG Zheng, ZHOU Xianzi, et al. Temperature monitoring system for distribution network equipment using a pulse conversion temperature sensing method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 180-187.
- [28] 任双赞, 薛建议, 吴 昊, 等. 基于电磁-温湿度耦合的三维开关柜温湿度分布仿真研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(9): 81-85.
REN Shuangzan, XUE Jianyi, WU Hao, et al. Simulation

- study on three dimensional switchgear temperature & humidity distribution based on electromagnetic-temperature-humidity coupling calculation[J]. Smart Power, 2019, 47(9):81-85.
- [29] 苏 毅, 谢植飏, 李 路, 等. 基于多物理场耦合的空气型开关柜发热故障温升仿真分析[J]. 高压电器, 2020, 56(11):1-7.
- SU Yi, XIE Zhibiao, LI Lu, et al. Temperature rise simulation analysis of air switchgear heating fault based on coupling of multi-physical field[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11):1-7.
- [30] 黄新波, 薛智鹏, 田 毅, 等. 高压开关柜热故障预警策略及其应用[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7):181-187.
- HUANG Xinbo, XUE Zhipeng, TIAN Yi, et al. Early thermal fault warning strategy of high voltage switch cabinet and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7):181-187.
- 李诗勇(1973—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为绝缘技术研究。
- 谢荣斌(1970—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为高电压技术。
- 靳 斌(1979—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电气试验与安全监管。
- 陈 实(1976—), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向为高电压技术。
- 刘 波(19—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为高电压技术。
- 梅家葆(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备状态感知。
- 田星辰(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备状态感知。
- 李江涛(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为脉冲功率技术、电力系统电磁暂态分析及过电压防护、电力设备状态感知技术(E-mail:lijiangtao@xjtu.edu.cn)。
- (上接第 113 页)
- FU Zhong, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Assessment method of arcing contacts erosion condition of circuit breakers used for large capacity capacitor banks[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20):5668-5677.
- [23] 傅 中, 陈维江, 李志兵, 等. 电容器组用SF₆断路器弧触头关合磨损特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(9):2953-2962.
- FU Zhong, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Wear behavior of arcing contacts in SF₆ circuit breakers used for capacitor banks[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9):2953-2962.
- 丁 璨(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事高压开关电器的实验、仿真及理论计算(E-mail:dingcan@ctgu.edu.cn)。
- 袁 召(1985—), 男, 博士, 教授, 主要从事高压断路器的设计与仿真优化(E-mail:hustyuanzhao@qq.com)。