

# 10 kV 户外开关柜高压触点 无线温度测量系统的设计

崔光照, 刘宾, 邓轩轩, 康冬祎

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**针对户外开关柜高压触点温度测量易受环境影响、精度较低等问题,设计了10 kV 户外开关柜高压触点无线温度测量系统.该系统以无线射频单片机 CC2530F256 为核心部件,利用 ZigBee 网络的自组织性,将温度测量终端节点与手持式协调器节点组网,实现户外开关柜高压触点温度的精确测量和数据的无线传输.实验结果表明,该系统受环境影响较小,且测得的温度数据误差小于 1 ℃,可满足户外开关柜高压触点在线监测的要求.

**关键词:**户外开关柜;高压触点;无线温度测量;接触电阻

**中图分类号:**TM93 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.5/6.023

## Design of 10 kV outdoor switchgear high-voltage contact wireless temperature monitoring system

CUI Guang-zhao, LIU Bin, DENG Xuan-xuan, KANG Dong-yi

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of outdoor switchgear high-voltage contact temperature measurement such as vulnerability to environmental impact and low precision, the 10 kV outdoor switchgear high-voltage contact wireless temperature monitoring system was designed. The system selected the wireless RF MCU CC2530F256 as the core chip, using the self organizing of ZigBee network, through temperature measurement terminal node and handheld coordinator node of the network, realized the outdoor switchgear high-voltage contact temperature data precision measurement and wireless transmission. Experimental results showed that the system was not easy to be affected by the environment, and the measured data error was less than 1 ℃. It could satisfy the requirement of outdoor switchgear high-voltage contact temperature on-line monitoring.

**Key words:** outdoor switchgear; high-voltage contact; wireless temperature monitoring; contact resistance

## 0 引言

随着我国城乡电网的迅速发展,10kV 户外开关柜设备在供电线路中得到广泛应用;作为电力传输系统的枢纽,其承担着线路通断、保护和控制的重

要功能;作为输变电设备的重要组成部分,其正常工作是保证线路可靠供电的前提.

开关柜高压触头过热所导致的热故障可能引发重大的绝缘故障,致使开关柜内部器件烧毁,影响开关柜设备和供电线路的安全运行<sup>[1]</sup>. 开关柜高

收稿日期:2015-06-05

作者简介:崔光照(1957—),男,河南省洛宁县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为智能电器控制技术与系统工程.

压触头的温升主要与线路负荷电流和触头部分接触电阻的增加有关<sup>[2]</sup>,在实际运行中,开关柜出现热故障的主要原因是高压触头部分的接触电阻过大,高压触头温升与接触电阻增加之间易形成恶性循环<sup>[3-4]</sup>.因此,了解开关柜各触点的温度有利于对开关柜的运行状况进行有效诊断.

目前,针对开关柜高压触点温度测量的成套在线监测设备比较多,其数据传输方式主要采用光纤、GPRS网络,但设备运行局限于变电站等小范围内易于组网和网络信号稳定的环境,对于大范围散布式的户外开关柜在线监测仍无法满足要求.户外开关柜高压触点的温度测量仍以人工巡检为主,主要的巡检设备是红外点温仪和红外热像仪,但这两种设备易受环境条件影响,无法实现精确测量.

鉴于此,本文拟以 10 kV 户外开关柜设备为研究对象设计一套无线温度测量系统,以实现开关柜设备高压触点温度的精确测量和温度数据的无线传输显示,从而为散布式户外开关柜设备的巡检提供有效的帮助.

## 1 方案设计

系统主要由手持式温度数据接收显示设备和多个高压触点温度数据采集发送设备组成,结构如图 1 所示.系统温度数据采用无线传输方式,以保证温度数据采集设备和数据接收设备间的高低压电气隔离.系统数据传输网络采用低功耗、自组网能力强的 ZigBee 技术<sup>[5]</sup>.户外开关柜触点容易受到雨雪积尘等影响,为了保证温度测量的准确性,温度测量方式选择接触式测量.开关柜高压触点温度采集发送设备和手持式温度数据接收设备通过自动组网来实现温度数据的网络传输,手持设备对不同分布地点的开关柜高压触点温度进行采集.本文设计的温度测量范围为 0 ~ 125 ℃,误差满足  $\pm 1$  ℃,工作环境温度为 -40 ~ 60 ℃,温度数据有效传输距离为 50 m.每个高压测温触点放置一个温度数据采集发送设备,手持式温度数据接收显示设备与各测温节点在组网允许范围内组网成功后,通过 ZigBee 无线网络对各测温节点的温度测量数据进行接收显示.

## 2 硬件设计

系统硬件设计分为温度测量终端节点和手持式协调器节点,通过终端节点与协调器节点的组网实现开关柜触点温度数据的无线传输.温度测量节点硬件设计框图见图 2,数据接收显示节点硬件设

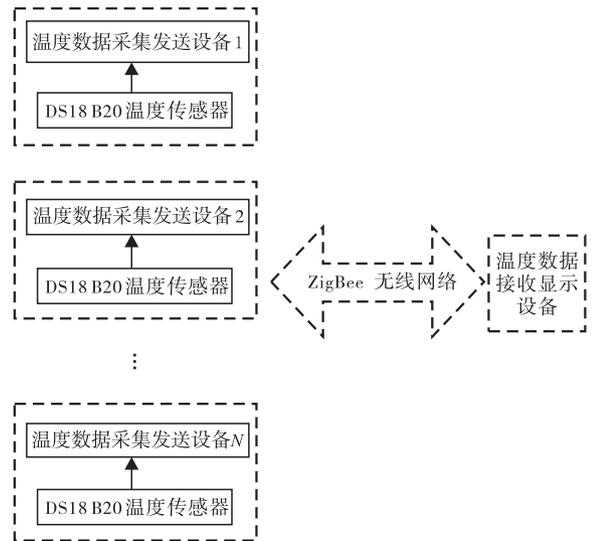


图 1 无线温度测量系统结构图

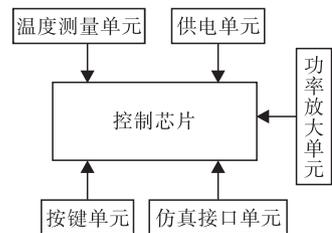


图 2 温度测量节点硬件设计框图

计框图同图 2,只需将温度测量单元改为 OLED (organic light-emitting diode) 显示单元.

### 2.1 单片机

单片机作为设备的核心部件,主要负责信息的采集和处理,该系统选择 TI 公司推出的兼容 8051 内核,同时支持 ZigBee 协议和 IEEE 802.15.4 协议的无线射频单片机 CC2530F256.

### 2.2 温度测量单元

由于开关柜触点存在高电压、大电流,同时温度采集终端节点设备的工作环境也存在强磁场的干扰,在温度测量模块的设计上不仅要考虑温度传感器自身的工作温度范围、温度测量范围、数据采集传输的可靠性,还要考虑解决温度传感器安放时的高压绝缘问题和工作时的抗电磁干扰问题.

**2.2.1 温度传感器的选择** 从温度传感器的测量范围来讲,10 kV 户外开关柜在额定负载电流 1 250 A 的工作条件下,触点温度值在 30 ~ 60 ℃ 范围内,若出现故障,接触电阻增加时触点温度会升高到 100 ℃ 以上.按照电力系统规定,对高压带电设备进行温度测量,测量误差必须满足  $\pm 1$  ℃ 的要求,温度测量范围应在 -40 ~ 120 ℃ 内.从保证数据采集可靠性来讲,要尽量减少开关柜高电压、强磁场

对温度传感器数据采集的干扰. 综合考虑以上因素,系统温度传感器采用 DALLAS 半导体公司推出的单总线 DS18B20 温度传感器,该温度传感器的测温范围为  $-55 \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,传感器数据的读写和命令的写入通过单根数据线进行,结构简单,可靠性较高,能有效降低开关柜电磁环境对温度传感器的影响.

**2.2.2 温度传感器的封装** 温度传感器接触式测量可以最大程度地减少雨雪积尘等因素对测量准确性的影响,保证测量数据的可靠性. 考虑到温度测量触点受强电磁干扰的工作环境,在温度传感器的设计上采用一些抗干扰措施来保证温度传感器的正常运行. 由于 DS18B20 温度传感器本身不具备 10 kV 电压绝缘,在设计上需对其采用绝缘导热封装,综合考虑各性能指标参数,选用高纯刚玉质氧化铝陶瓷. 该材料的热传导率为  $25\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,电气绝缘强度为  $20\text{ kV/mm}$ ,其良好的绝缘性能可以保证温度传感器在 10 kV 高压下的电气安全,其高导热系数可以保证系统测温的灵敏度和测温数据的实时性. 高纯刚玉质氧化铝陶瓷的低吸水率(0%)和高绝缘电阻( $0.08\text{ M}\Omega$ )则可保证温度传感器的工作安全. 为了保证温度数据传输的稳定可靠,DS18B20 温度传感器的数据传输采用 RVV 三芯屏蔽线.

## 2.3 供电单元

设备供电设计采用直流 5 V,CC2530F256 单片机正常工作电压是直流  $2 \sim 3.6\text{ V}$ ,系统设计采用 AMS1117 - 3.3V 芯片进行 DC - DC 变换,得到 3.3 V 工作电压为其供电. 为保障温度测量终端节点供电的持久性和稳定性,终端节点采用 CT 互感线圈进行供电<sup>[5-6]</sup>. 系统设备在组网进行数据传输的稳定工作电流经测量为 75 mA 左右,市面上单节 5 号干电池的电量为  $1\ 500\text{ mA}\cdot\text{h}$ ,手持协调器节点采用 3 节干电池进行供电,从理论上讲,可以供给协调器节点持续工作 60 h 以上,但由于系统功耗较低,手持协调器节点采用干电池进行供电即可保证日常的检修维护工作,且至少 2 a 不用更换电池.

## 2.4 OLED 显示单元

OLED 显示单元主要对网络组建状态、温度传感器工作状态和温度采集终端节点采集到的数据进行显示. OLED 显示屏与传统的 TFT-LCD (thin film transistor liquid crystal display) 薄膜晶体管液晶显示器相比,厚度可以  $< 1\text{ mm}$ ,仅为 LCD 屏幕的  $1/3$ ,更加轻巧. OLED 采用固态机构,没有液体物质,抗震抗摔性能较好,响应时间为 LCD 的  $1/1000$ ,

数据动态显示时不会有拖影的现象. 在低温特性上,  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  依然可以正常工作,这是 LCD 显示屏无法比拟的. OLED 的低温特性可保证设备在极端寒冷的环境下依然能够正常显示被测点温度,它的发光效率更高,且能耗比 LCD 低很多.

## 2.5 功率放大单元

功率放大单元通过对数据信号的放大,提高数据信号发送和接收的强度,保证数据的传输稳定性和距离. 功率放大部分采用 RFX2401C 功率放大芯片,RFX2401C 是一种超集成的射频前端集成电路,整合了 IEEE 802. 15. 4/ZigBee,无线传感器网络,2.4 GHz 的 ISM 频带射频前端功能,配有高效率的功率放大器、低噪声放大器、阻抗匹配网络、谐波过滤器和 CMOS 控制逻辑. RFX2401C 通过巴伦匹配电路与 CC2530F256 芯片连接进行数据发送,设备的天线采用功率大、发射距离远的 SMA 接口 2.4 GHz 的杆状天线.

## 2.6 仿真接口单元

仿真接口单元采用 10 针 JTAG 接口设计,实现温度测量终端节点和手持协调器节点程序的在线仿真、调试和下载,通过连接 SmartRF04EB 下载器进行程序下载.

# 3 软件设计

系统软件部分采用 IAR Embedded Workbench 软件集成开发环境进行开发,IAR Embedded Workbench 编译器完全兼容标准 C 语言,是一款完整的、稳定的且容易使用的专业嵌入式应用开发工具.

## 3.1 测温终端节点程序设计

测温终端节点的工作流程为:当终端设备上电工作后,系统程序进行 I/O 口配置、ZigBee 协议栈、无线接收发射单元、功率放大单元、温度传感器和 OLED 单元等硬件设备的初始化;设备初始化完成之后,进行协调器节点搜索,如果搜索到有协调器节点存在就会自动加入网络;加入网络成功后,系统会接收到协调器节点分配的网络地址,然后开始向协调器节点发送温度传感器测量到的温度数据,温度测量终端节点上的 OLED 屏幕上会显示自身的网络地址和温度传感器测量到的温度值;如果温度测量终端节点没有成功加入网络,那么就会持续进行网络搜索,OLED 屏幕上会显示加入网络失败提示和温度测量点的温度值;如果某个温度测量节点的温度传感器损坏或者温度测量触点温度超过温度传感器最高测量温度值( $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),OLED 屏幕上就会显示该节点传感器损坏的提示. 温度测量终端

节点的 OLED 屏进行温度测量值的显示是为了方便系统的整体调试。

### 3.2 手持协调器节点程序设计

手持协调器节点的工作流程:当协调器设备上电以后开始进行 I/O 口配置、ZigBee 协议栈、无线接收发射单元、功率放大单元和 OLED 单元等硬件设备的初始化。设备初始化完成以后,会进行 ZigBee 网络的组建,搜索终端节点进行网络地址的分配组网。如果组网成功,会进行终端节点温度数据的接收并在 OLED 屏幕上对接收到的各温度测量终端节点的温度采集数据进行显示;如果网络组建失败,OLED 屏幕上会显示终端节点搜索获取失败提示。如果某个温度测量节点设备出现损坏,那么手持协调器节点的 OLED 屏幕上就会出现设备丢失的提示。

## 4 验证结果与分析

系统设计完成以后,采取与红外温枪测温数据对比的方式来检验系统的测温性能,数据见表 1(每组数据为不同时间段 1 min 内测得温度数据的平均值)。

从表 1 可以看出,系统测得的开关柜各触点温度值与红外温枪测得的温度数据值误差均在 1 °C 以内,可满足开关柜触点温度测量精度要求。从网络

构建上来讲,ZigBee 网络比 GPRS 网络设备成本要低<sup>[7]</sup>;对于户外测量条件来讲,信号也更加稳定;从测量方式上来讲,较之红外温枪测量设备,该系统的接触式测量数据更加准确,设备质量轻、成本低、操作简便等优点,也是红外温枪所不能比拟的<sup>[8]</sup>;从系统的应用效果来看,能够对户外开关柜各触点温度进行准确测量,其便携功能为户外设备巡检人员提供了便利,其远距离的数据传输范围不仅可保障巡检人员的人身安全,也节约巡检时间。该系统的使用,能够让巡检人员通过开关柜各触点的实时温度状况了解其工作状况,通过触点温度值这一指标对设备进行很好的预防性诊断。可见,该测量系统可在保证开关柜设备和供电安全上发挥重要作用。

## 5 结论

本文基于无线射频单片机 CC2530F256 设计的 10 kV 户外开关柜高压触点无线温度测量系统,利用 ZigBee 网络的自组网性实现高压触点温度的精确测量和数据的无线传输显示。与传统的红外测温方式进行测量对比,结果表明,该系统受环境影响小,测温误差 < 1 °C,可满足电气测量对精度的要求,同时很好地弥补红外测温易受环境影响等不足。

表 1 系统测温与红外测温对比实验数据表

数据组号	测量方式	A 相断路器	B 相断路器	C 相断路器	A 相隔离开关	B 相隔离开关	C 相隔离开关	温度差值 / °C
1	系统测量	42.3	45.6	41.8	50.3	52.4	49.8	0.75
	红外测量	43.2	44.9	42.7	49.5	51.7	50.3	
2	系统测量	45.3	47.2	46.8	49.7	55.2	49.7	0.73
	红外测量	46.0	46.8	47.5	48.9	54.4	50.6	
3	系统测量	43.9	48.8	47.6	52.8	53.4	50.3	1.10
	红外测量	44.8	47.9	48.3	51.9	55.7	49.4	
4	系统测量	44.1	45.0	46.4	50.9	53.8	51.7	0.95
	红外测量	45.0	44.5	47.2	51.8	52.4	52.9	

### 参考文献:

[1] 王秉政,江建武,赵灵. 高压开关柜接触发热温度场数值计算[J]. 高压电器,2013,49(12):42.  
 [2] 陈平,薛毓强,郭建钊. 大电流母排三维涡流场-温度场耦合分析[J]. 电力科学与技术学报,2009,24(3):68.  
 [3] 刘宗信,张加善. 固定式高低压开关柜中载流节点发热问题的浅析[J]. 吉林电力技术,1995,35(2):57.  
 [4] 潘长明,刘刚,熊炬,等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器,2011,47(7):90.

[5] 王小强,欧阳骏,黄宁淋. ZigBee 无线传感器网络设计与实现[M]. 北京:化学工业出版社,2012:3-15,31-33,134-135,213-216.  
 [6] 杨书杰,张贤跃. 高压侧测量用电源设计[J]. 电力自动化设备,2009,29(12):13.  
 [7] 杨增汪,王宜怀,戴新宇. 基于 ZigBee 和 GPRS 的高压开关柜无线监测系统[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(23):203.  
 [8] 陈宝怡. 红外诊断技术在高压断路器内部发热故障中的应用[J]. 高压电器,2011,47(5):92.