

## 电力高压触点温度无线监测系统的研发

邢晓敏<sup>1</sup>, 李波<sup>2</sup>, 陈静<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;  
3. 国电蚌埠发电有限公司, 安徽 蚌埠 233411)

**摘要:** 基于电力系统中对高压触点温度测量的实际需求, 研发了一套高压触点温度无线监测系统。该系统由无线温度传感器节点网络、无线遥测网络和监测主机三个部分组成。无线温度传感器节点采用 DS18B20 测量温度, CC2430 单片机读取温度数据并实现 ZigBee 无线通信技术的灵活组网。无线遥测网络是由无线温度监测仪经 CAN 工业总线互联而成。无线温度监测仪作为 ZigBee 子网内的主节点, 负责接收各节点温度数据, 并向监测主机转发。监测主机完成对所有节点温度的显示、判断、存储等工作。系统已在现场投入试运行, 性能良好, 为电力系统的安全运行提供了有力支持。

**关键词:** 高压触点; 无线监测系统; ZigBee 无线通信技术; CAN 工业总线

### Development of wireless monitoring system for power high voltage contacts' temperature

XING Xiao-min<sup>1</sup>, LI Bo<sup>2</sup>, CHEN Jing<sup>3</sup>

(1. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China;  
3. Guodian Bengbu Power Generation Co., Ltd, Bengbu 233411, China)

**Abstract:** According to requirements of measuring high voltage contacts' temperature in power system, a set of high voltage contacts' temperature wireless monitoring system is developed. The system consists of wireless temperature sensor nodes network, wireless telemetering network, and monitoring host computer. The wireless temperature sensor nodes are measured by DS18B20. CC2430 single-chip reads temperature data and the flexible network is realized by ZigBee wireless communication technology. Wireless telemetering network is interconnected by wireless temperature monitor through CAN bus. And the wireless temperature monitor, as the main node of ZigBee subnet, is responsible for receiving nodes' temperature data and transferring data to host monitor computer. Host monitor computer completes the display, estimation, and store of all nodes' temperature. The system is put into operation on site. The performance of the system is good and provides a strong support for the safe operation of the power system.

**Key words:** high voltage contacts; wireless monitoring system; ZigBee wireless communication technology; CAN bus

中图分类号: TP277 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)22-0174-05

## 0 引言

电力系统中存在着众多高压设备触点。在长期运行过程中, 多种原因可导致高压触点间接接触电阻不断增大, 其温度不断升高直至酿成事故<sup>[1]</sup>。因此监测高压触点的温度变化, 实现温度在线监测是非常必要的。电力系统对高压触点温度测量目前尚无统一标准。但一般电力企业的具体要求是能够满足 24 h 室内外全天候工作, 报警温度阈值设定在 70℃ 左右, 温度测量范围在 -40℃~+120℃ 之间, 测量精度控制在 ±5℃ 之内。

目前, 电力系统测温技术的使用已经很普遍。

近期研究较常用的测温方法主要有: 红外测温<sup>[2]</sup>、光纤测温<sup>[3-6]</sup>和无线测温<sup>[7]</sup>。红外测温方法主要是根据物体相对辐射强度与温度之间存在一定的函数关系而制成的, 为非接触式测温。光纤测温方法的原理主要是利用温度能引起光纤光栅布拉格波长的变化而设计的, 是一种直接接触式的测温方法。

本文介绍了一种采用 ZigBee 无线通信技术研究的无线测温系统。该无线测温方式采用电磁波传输信号, 传感器安装在高压设备上, 温度测量准确, 可以彻底解决电气绝缘问题, 且此法不受气候环境和开关柜体结构的影响, 可以测量室内外任何高压带电体有温度事故隐患点的温度, 并对监测点实现

在线监测, 很好地解决了高压触点温度在线监测的问题。

## 1 系统工作原理及整体结构

ZigBee无线网络技术是一种近距离、低复杂度、低数据速率、低功耗、低成本的双向无线通信技术, 其数据传输速率在10~250 kb/s之间, 两个网络节点之间的单跳距离为10~75 m。ZigBee网络具有节点容量大、自动组网、自动路由和自愈功能, 并且工作在2.4 GHz的免执照频段, 其射频发射功率低, 若使用低功耗单片机, 一节高能锂电池足以保证网络节点正常工作3年以上。因此它是实现高压触点无线温度监测系统的理想解决方案。

本系统结构如图1所示, 主要包括三个部分: 监测主机、无线遥测网络、无线温度传感器节点网络。系统底层由安装在母排接头表面、接近开关触头的触臂上或其他温度事故隐患点的无线温度传感器组成 ZigBee 测温网络。这些无线温度传感器节点(以下简称节点)按安装位置就近划分子网, 相邻子网采用不同的信道传输数据(ZigBee协议在2.4 GHz频段提供了16个信道, 足够按蜂窝原理划分子网使用), 这样可以简化网络管理, 提高系统抗干扰能力。每个子网有一个主节点, 即无线温度监测仪(以下简称监测仪)。监测仪负责接收、显示子网内各子节点采集的温度数据、子节点状态, 并判断是否需要发出预警信号。它通过CAN工业总线互相连接, 从而构成无线遥测网络。通过该网络, 监测仪可将每个节点采集的温度数据转发给系统最高层的监测主机, 监测主机也可以通过该网络设置每一个节点、监测仪的工作参数。监测主机的数据库中保存有各节点的关键温度数据, 这些数据可以共享到企业内部网上。

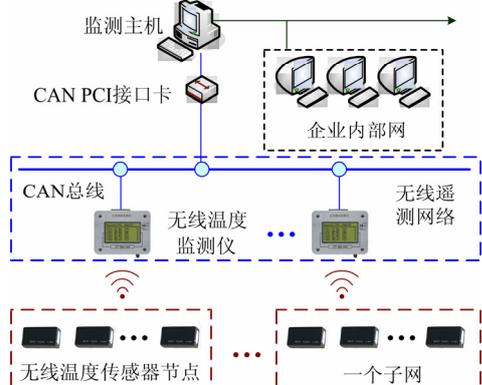


图1 电力高压设备触点温度无线监测系统结构图

Fig.1 Structure diagram of wireless monitoring system for high voltage power facilities' contacts temperature

监测主机与监测仪在线监测各高压触点的运行温度, 当发生超温或温度变化率越限时, 能够及时发出预警信号。

## 2 系统软硬件设计

### 2.1 无线温度传感器节点

节点的具体结构包括温度传感器、单片机、无线收发电路和编码开关等几部分, 如图2所示。

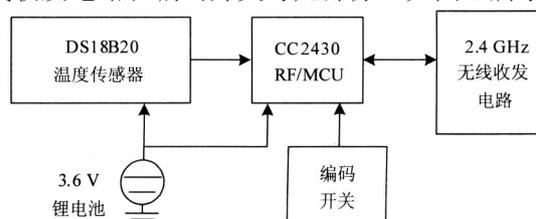


图2 无线温度传感器功能结构图

Fig.2 Functional structure diagram of wireless temperature sensor

温度传感器采用Dallas公司基于单总线的带隙数字式温度传感器DS18B20。它内置一个12位模数转换器, 温度测量范围为 $-55^{\circ}\text{C}\sim+125^{\circ}\text{C}$ , 分辨率达 $0.0625^{\circ}\text{C}$ 。带隙数字式温度传感器是基于带隙结构, PN结增量电压正比于IC绝对温度(PTAT)的感温器件。它的测温精度较高, 但存在着一定的误差。Dallas半导体的精密制造能力可以保证DS18B20在出厂时误差被校正到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内, 满足测量要求。DS18B20可以工作于寄生电源模式, 也可以工作于传统供电模式。不过在 $100^{\circ}\text{C}$ 以上时芯片漏电流加大, 不能保证单总线的正常通信, 所以宜采用传统供电模式(直接由锂电池供电), 这样也同时节省了一个上拉MOSFET。节点休眠时DS18B20耗电仅有 $0.75\mu\text{A}$ 。

单片机采用TI/Chipcon公司的CC2430芯片, 用以实现温度数据读取和无线通信。CC2430是一颗真正的系统芯片(SoC)。该芯片能够提高性能, 并满足以ZigBee为基础的2.4 GHz ISM频段应用, 以及设计中对低成本、低功耗的要求。它内含一个高性能2.4 GHz DSSS(直接序列扩频)射频收发器核心和一颗工业级小巧高效的8051单片机控制器。在节点运行期间, 单片机绝大部分时间都处于休眠状态(进入PM2模式), 默认每隔1 min唤醒一次, 然后启动DS18B20温度转换功能, 读取当前最新温度测量值后经由2.4 GHz射频发送器发送给监测仪。然后再次进入休眠状态, 依次循环。采集温度间隔时间可由监测仪或监测主机设置。节点休眠时CC2430耗电仅有 $0.9\mu\text{A}$ 。CC2430内部集成有温度

传感器，但为了安装方便，还是使用了DS18B20测温。

无线收发电路采用CC2430数据手册推荐的典型电路。考虑到节点工作于高压环境，采用低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)积层片式内置蓝牙天线。该天线体积小，信号辐射强度大。无外置天线可以有效防止在高压环境下产生尖端放电现象。

编码开关用于设置节点的发射频率、发射功率等工作参数，以方便设置相邻子网采用不同信道通信。

节点由3.6 V高能锂电池供电，彻底解决了测量高压设备时的电气绝缘问题。因单片机内置了所需的各种电压调理电路，所以电池可以直接连接CC2430供电引脚。单片机内部还具有监视电池电压的电路，可在电池电压下降到设置的警戒值时发送报警数据给监测仪。试验测定，节点运行于默认状态(每隔1 min唤醒一次)时每天耗电大约0.174 1 mAh，见表1。

表1 无线温度传感器节点性能指标

Tab.1 Performance of wireless temperature sensor

项 目	参 数
温度测量范围 / °C	-55~+125
温度测量精度 / °C	±1
温度测量分辨率 / °C	0.062 5
温度测量周期 / s	15~255
无线传输距离 / m	<100
供电锂电池型号	1/2 AA 3.6 V
默认耗电量 / (mAh/d)	0.174 1
外形尺寸 / mm	58×26×17

为使节点结构更加紧凑，易于安装，设计封装时采用一体化结构，用热缩外套封装，防水防尘。节点的一个侧面设计成感温面，用于检测温度，μSOP封装的DS18B20顶部被涂抹导热硅脂后粘贴到感温面上。安装时将节点感温面与发热点紧密接触，视情况可涂抹导热硅脂，再用高温尼龙扎带将节点固定在被测物体上，可保证温度测量的准确性。

软件上采用TI公司开发的Z-Stack 2006协议栈作为程序模板。节点首先调用DS18B20的驱动函数读取温度(12 bit数据)，然后再调用Z-Stack协议栈应用层数据服务接口，便可将温度数据传输到ZigBee网络主节点(监测仪)。节点发送的无线数据帧格式定义为：开始标志(AAH)；传感器编号(4 Byte)；温度数据(2 Byte)；节点状态(1 Byte)；CRC校验码(1 Byte)；结束标志(55 H)。其中

的节点状态表示节点是否有故障、故障的类型、电池电量等信息。

### 2.2 无线温度监测仪

监测仪的原理如图3所示。其中，单片机、无线收发电路和编码开关的型号与功能都和节点相同。开关电源模块就近采用220 V直流或交流电源供电，经电压调理电路输出5 V和3.3 V浮地直流电源供系统使用。

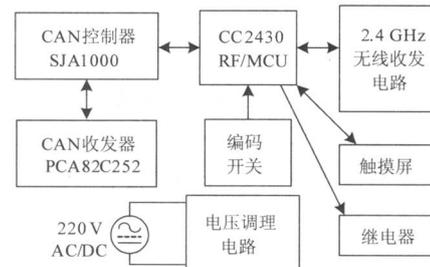


图3 无线温度监测仪原理框图

Fig.3 Principle diagram of wireless temperature monitoring instrument

监测仪选用320×240点阵液晶触摸屏作为人机界面，用以显示各节点温度数据、电池电量等信息，输入运行、报警等参数。监测仪具有报警输出功能，提供一个无源继电器触点输出，常开、常闭触点各一个。系统默认节点报警温度阈值为70 °C，温度变化率阈值为10 °C。若节点温度或温度变化率越限，则报警继电器动作，同时触摸屏对应显示项目闪烁。

监测仪采用NXP半导体公司的CAN总线控制芯片SJA1000和收发器芯片PCA82C252与其他监测仪及监测主机联通，构成CAN工业总线网络。CAN总线较RS485总线更加先进。它在数据链路层就提供了CRC校验功能，配合屏蔽双绞线组成开环网络，再采用符合ISO11519-2标准的收发器芯片PCA82C252，不使用中继器，网络电气长度就可达1 km，其抗干扰性能极强。

监测仪一般安装于开关柜的二次侧柜门上，与所管理子节点组成星形拓扑结构，形成一个子网。为方便网络管理，采用了蜂窝网络结构，相邻子网所用通信频率不同，不相邻子网可以使用相同频率。

在节点控制软件基础上，监测仪的软件增加了触摸屏控制和CAN总线通信部分。触摸屏模块控制较简单，这里不再赘述。监测仪收到节点发送的有效数据后，马上返回一个响应帧给对应节点，然后将温度数据转发到CAN总线网络上。CAN总线协议规定每帧的数据最多为8个字节，因此监测仪转发的数据帧格式定义为：传感器编号(4 Byte)；温度数据(2 Byte)；节点状态(1 Byte)；LRC

校验码 (1 Byte)。其中 LRC 为纵向冗余校验, 即前 7 个字节的异或。若 CAN 总线网络上存在监测主机, 则自动接收这帧数据, 校验无误后, 用于显示、判断、存储等工作, 程序流程如图 4 所示。

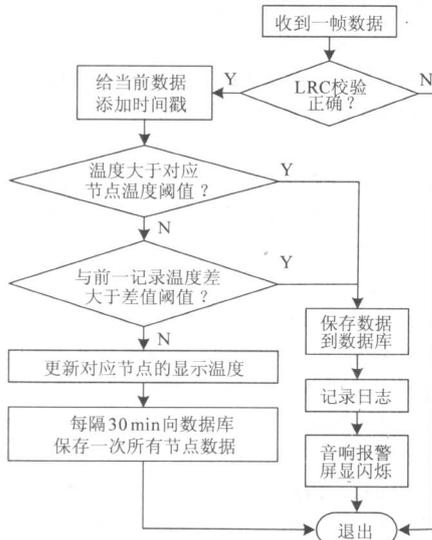


图 4 监测主机接收数据流程图

Fig.4 Flow chart of receiving data by host monitoring computer

### 2.3 监测主机

监控软件安装在具有 PCI CAN 接口卡的 PC 机上, 称为监测主机。其主要功能是通过 CAN 总线网络、ZigBee 无线网络与所有节点进行通信, 读取被监测的高压触点温度数据, 实现对电力高压触点温度在线实时监测的功能。

通过该软件还可以了解每一个节点的当前运行状态、电池电量, 若长时间未收到某一节点的数据, 则可以判定该节点出现了故障。监控软件还具有独立设置每一个节点运行参数、对历史数据的记录和对比较分析、温度超限预警及报警、运行状态全程记录以及给监测仪校时等功能。其软件界面如图 5 所示。

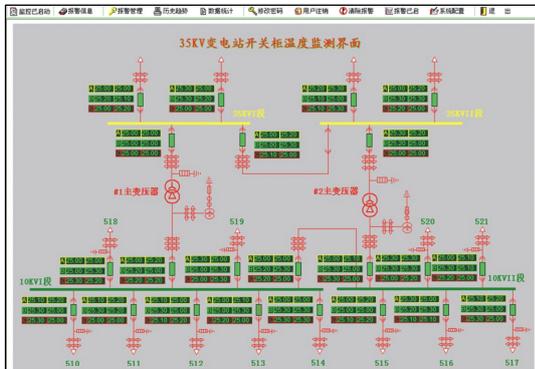


图 5 监控软件主界面

Fig.5 Main interface of monitoring software

### 3 现场应用结果

为检验系统测量温度是否准确, 分别在实验室环境和现场运行环境作了温度测量对比试验, 数据如表 2 所示。在实验室中, 任取一节点, 令其处于连续工作模式, 每隔 3 s 发送一次测量数据, 然后将其感温面浸入水中 (节点有热缩外套保护, 可以防水), 控制水温在 6 °C~85 °C 之间变化, 记录节点传回的温度数据。对比仪器采用 M180988 铂电阻精密数字温度计, 在 -50 °C~+150 °C 范围内该机测量精度高达 ±0.03 °C, 并具有每隔 3 s 打印一次测量数据的功能。对比二者的试验数据发现, 因热缩套有一定的隔热效应, 节点所测温度值与 15 s 之前的 M180988 所测温度值近似, 可确定节点的温度时延为 15 s 左右。

表 2 系统试验数据表

Tab.2 System test data table

	环境/触点测量 温度 / °C	传感器测量温 度 / °C	测量误差 / °C
实验室 测量 数据	6.32	5.91	-0.41
	15.16	14.83	-0.33
	37.01	37.44	0.43
	75.11	75.69	0.58
现场 测量 数据	25.30	24.66	-0.64
	19.88	20.64	0.76
	24.65	25.33	0.68
	21.83	22.19	0.36

在某 35 kV 变电站安装本系统后, 任取一节点做温度测量对比试验, 对比仪器采用美国 Raytek 公司的 ST20XB 便携式红外测温仪, 在常温环境下其测量精度可达 ±1 °C, ST20XB 所测温度与 15 s 后节点所测温度数据作对比。

测量误差的出现有三方面的原因: (1) 传感器 DS18B20 本身就有 ±0.5 °C 测量误差; (2) 与被测物体接触不良造成热传导需要一定时间; (3) 对比仪器本身就有测量误差, 红外测温仪甚至达到 ±1 °C。实验室测定节点测量误差不超过 ±1 °C。

由于现场一般要求高压触点温度小于 70 °C, 温度变化率小于 20 °C/min, 而温度的变化又是缓慢而连续的, 可见本系统最大 ±1 °C 测量误差的测量精度与 15 s 的测量速度都满足现场要求。

本文介绍的电力高压触点无线温度监测系统已在某 35 kV 变电站投入试运行。监测仪每 75 s 读取一次节点温度值, 并通过 CAN 总线发往监测主机。系统在不更换节点电池的前提下, 已经连续正常工

作了6个月,预计可以继续正常工作3~5年。图6为该系统在现场的安装实例图片。

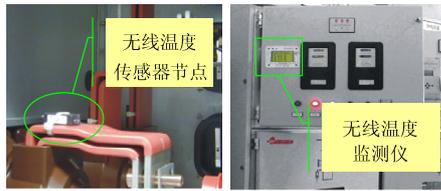


图6 现场应用实例

Fig.6 Application case at worksite

### 4 结语

本文基于 ZigBee 无线通信技术、CAN 总线技术,研发了电力高压触点温度无线监测系统。该系统由 ZigBee 节点测量高压触点温度,上传给主节点(监测仪),再通过 CAN 总线将温度数据发送到监测主机,完全解决了测量高压设备时的绝缘问题,形成了一套可靠性高、测量准确、价格合理、易于安装、易于管理、易于维护的解决方案,为电力系统的安全运行提供了有力支持。

### 参考文献

[1] 刘建胜, 酆达, 张凡. 一种用于变电站高压触点温度在线监测的新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 54-57.  
 LIU Jian-sheng, FENG Da, ZHANG Fan. A novel method for remote on-line temperature detection of substation high-voltage contacts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (4) : 54-57.

[2] 杨武, 王小华, 荣命哲, 等. 基于红外测温技术的高压电力设备温度在线监测传感器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (9) : 113-117.  
 YANG Wu, WANG Xiao-hua, RONG Ming-zhe, et al.

On-line temperature measurements with infrared technology on high voltage device[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (9) : 113-117.

[3] 彭超, 赵健康, 苗付贵. 分布式光纤测温技术在线监测电缆温度[J]. 高电压技术, 2006, 32 (8) : 43-45.  
 PENG Chao, ZHAO Jian-kang, MIAO Fu-gui. Distributed temperature system applied in cable temperature measurement[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (8) : 43-45.

[4] Jones S, Bucea G, Mcalpine A. Condition monitoring system for trans grid 330 kV power cable[C]. //2004 International Conference on Power System Technology-Power Con. Singapore: 2004.

[5] Rogersaj. Distributed optical fiber sensors for the measurement of pressure, strain and temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (9) : 126-131.

[6] Dakin J P, Pratt D J. Fiber-optic distributed temperature measurement: a comparative study of techniques[J]. IEEE Digest, 1986, 74 (10) : 1-4.

[7] 郭宗莲. 基于nRF9E5的高压接点无线测温系统研制[J]. 电力自动化设备, 2008, 23 (12) : 66-68.  
 GUO Zong-lian. Wireless high-voltage contactor temperature measuring system based on nRF9E5[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 23 (12) : 66-68.

收稿日期: 2010-08-19; 修回日期: 2010-09-16

#### 作者简介:

邢晓敏 (1973-), 女, 工学硕士, 讲师, 从事电气设备在线检测与状态维修等研究工作; E-mail: xxmlyt@126.com

李波 (1969-), 女, 工学硕士, 工程师, 主要从事科研管理工作;

陈静 (1975-), 女, 大专, 工程师, 从事电气设备安全运行工作。

(上接第 130 页 continued from page 130)

ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi, LIU Yang. Analysis of optimal load shedding model in reliability evaluation of composite generation and transmission system[J]. Power System Technology, 2004, 28 (10): 34-37.

[14] IEEE reliability test system[R]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1997, 98(6): 2047-2054.

[15] Vestas\_Product\_brochure\_V90\_a\_CH\_LR[EB/OL]. http://www.vestas.com/cn/cn/core-business/product/-v90-2.0mw.aspx.

收稿日期: 2009-11-12; 修回日期: 2010-03-03

#### 作者简介:

姜文 (1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源、电力系统可靠性分析; E-mail: clintonjiang@sjtu.edu.cn

严正 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场、电力系统稳定分析;

杨建林 (1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场、电力系统稳定分析。