第 32 卷第 5 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 32, No. 5
2011 年 10 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Oct. 2011

文章编号：1008-1542(2011)05-0446-05

基于 nRF24LE1 的高压开关柜动静触头无线温度监测系统设计

智兆华[1]，刘文学[1]，李文朝[2]，耿晓娟[2]

(1. 河北科技大学机械电子工程学院，河北石家庄　050018；2. 石家庄博发科技有限公司技术部，河北石家庄　050054)

摘　要：介绍了利用 nRF24LE1 无线收发芯片，实现对高压开关柜触头的温度监控，其测温终端直接安装在高压带电部分，实现等电位工作，实测温度通过无线方式传输给监测主机，解决了高压绝缘问题；整套监测系统由温度监测终端、监测主机和系统 PC 机构成，实现了高压触头温度的实时监测，保证了电力高压开关的可靠运行。

关键词：nRF24LE1；高压开关柜；温度监测；低功耗

中图分类号：TM83；TP274　　**文献标志码**：A

Design of wireless temperature monitoring system of high voltage switchgear contact based on nRF24LE1

ZHI Zhao-hua[1], LIU Wen-xue[1], LI Wen-chao[2], GENG Xiao-juan[2]

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China; 2. Department of Technology, Shijiazhuang Bofa Science and Technology Company Limited, Shijiazhuang Hebei 050054, China)

Abstract: nRF24LE1 wireless transceiver chip is used to monitor the temperature of high voltage switchgear contacts. The high temperature terminal is installed directly on the live part of the HV workplace. The measured temperature is wirelessly transmitted to the monitoring host, which solves the problem of high voltage insulation. The complete monitoring system consists of temperature monitoring terminal, monitoring host and PC. The design achieves real-time monitoring of high temperature contact and ensures reliable operation of high-voltage power switch.

Key words: nRF24LE1; high voltage switchgear; temperature monitoring; low power consumption

在配电系统中，开关柜中触头的温度是开关连接质量的重要指标。随着使用年限的增加，触头由于氧化、磨损、变形或接触松懈等原因会导致接触电阻增大，进而导致温度升高，特别是在高温和高负荷期间。过度发热会影响供电的可靠性，严重的会导致触头烧熔事故的发生，因此在配电系统中，对连接触头等关键部位进行温度监测，可提前发现安全隐患，及时采取相应处理措施，提高供电可靠性。

1　系统设计方案

高压开关柜有固定式(XGN 系列)和移动式(KYN 系列)2 大系列，固定式高压开关柜其内部的开关固

收稿日期：2011-02-22；修回日期：2011-06-30；责任编辑：陈书欣
作者简介：智兆华(1970-)，男，河北元氏人，讲师，主要从事自动化控制方面的研究。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

定在开关柜内部，检修不方便；移动式开关柜内部的开关可以由手炳丝杠移出柜体，便于检修，但是增加了一个连接环节（动静触头），动触头与开关连接，静触头与出线铜排连接，外有护套保护，图 1 是实际开关柜中动静触头安装使用的几组照片。温度的监测点是动静触头，其外面有一个环氧树脂护套，空间狭小。

1—动静触头；2—动静触头连接；3—动触头与开关连接；4—外护套

图 1　动静触头几组照片

Fig. 1　Static and dynamic contact groups of photos

温度测量有接触式和非接触式 2 种，对高压带电体进行直接接触测量会有一定的电击危险[1]。高压设备非接触测温一般采用光纤和无线 2 种方式[2]，光纤测温需要将光纤引到被检测点，安装比较繁琐，同时，整套设备价格也相对昂贵，根据开关柜内部的实际结构，本设计采用接触测量、无线数据传输的方法，测温探头与监测主机分离，图 2 是系统整体框图。

整个监测系统主要由 3 部分组成：测温终端、监测主机和监测 PC 机。测温终端主要由 nRF24LE1 及温度传感器构成，它根据设定的测温频率进行温度采集，并将数据通过无线方式传输给监测主机，监测主机就地显示温度且通过 RS485 总线与 PC 机交换信息，将数据存档。

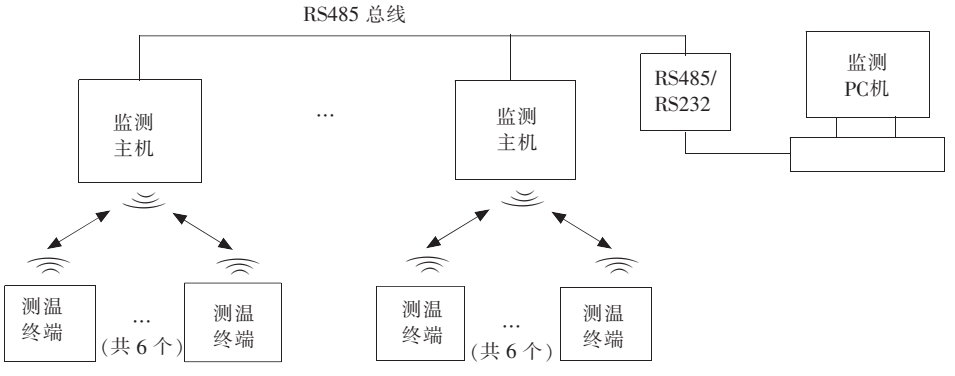

图 2　系统整体框图

Fig. 2　Overall system block diagram

2　测温终端的硬件设计

测温终端直接安装在被检测点，要求体积小、功耗低，具有无线传输功能，是整个测温系统关键部分，对测温终端而言，终端体积是硬性指标，必须能够安装在护套与动静触头之间缝隙内，供电模式、无线传输电路和测温电路的复杂程度都会影响终端体积的大小[3]。本系统采用 Nordic 公司生产的 nRF24LE1 作为主控芯片，外接少量器件便可满足设计要求，图 3 是测温终端的硬件原理框图。

2.1　主控及外围部分

主控部分就是一片 nRF24LE1 芯片，nRF24LE1 是集成了 nRF24L01＋2.4 GHz 无线收发器（空中速率为 250 kb/s，1 Mb/s 和 2 Mb/s）和快速微控制器的智能芯片，16 KB 程序存储器（片内 Flash），1 KB 数据存储器（片内 RAM）；1 KB 非易失数据存储器，及 6—12 位模数转换器，适应从微功耗到高效的多种运行模式，它是一款嵌入了 2.4 GHz 高性能无线收发器的增强型 51 单片机，集成多种外围设备，采用超低功耗技术，工作电压为 3.3～5.5 V，体积小，功耗低，休眠状态下功耗为 3 μA，非常适用于无线测温应用。

2.2　温度检测部分

对于触头的温度而言，更高精度的温度测量意义不大，注重的是小电流、低功耗，±2 ℃的误差完全可以起到预警作用，因此，本设计采用的是日本产 103AP-2 热敏电阻作为温度传感器，采样范围为－60～150 ℃，低端温度误差为±0.5 ℃，高端温度误差为±0.7 ℃，使用主控芯片内部的模数转换部件实现温度采集功能（图 4）。图 4 中 P1.3 在平时为低电平，整个测温电路不消耗任何功率，在测温时段 P1.3 输出高电平给测温电路供电。特别注意的是 nRF24LE1 内部 A/D 转换器的线性输入范围，R4 用于保证在温度采样范围内

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

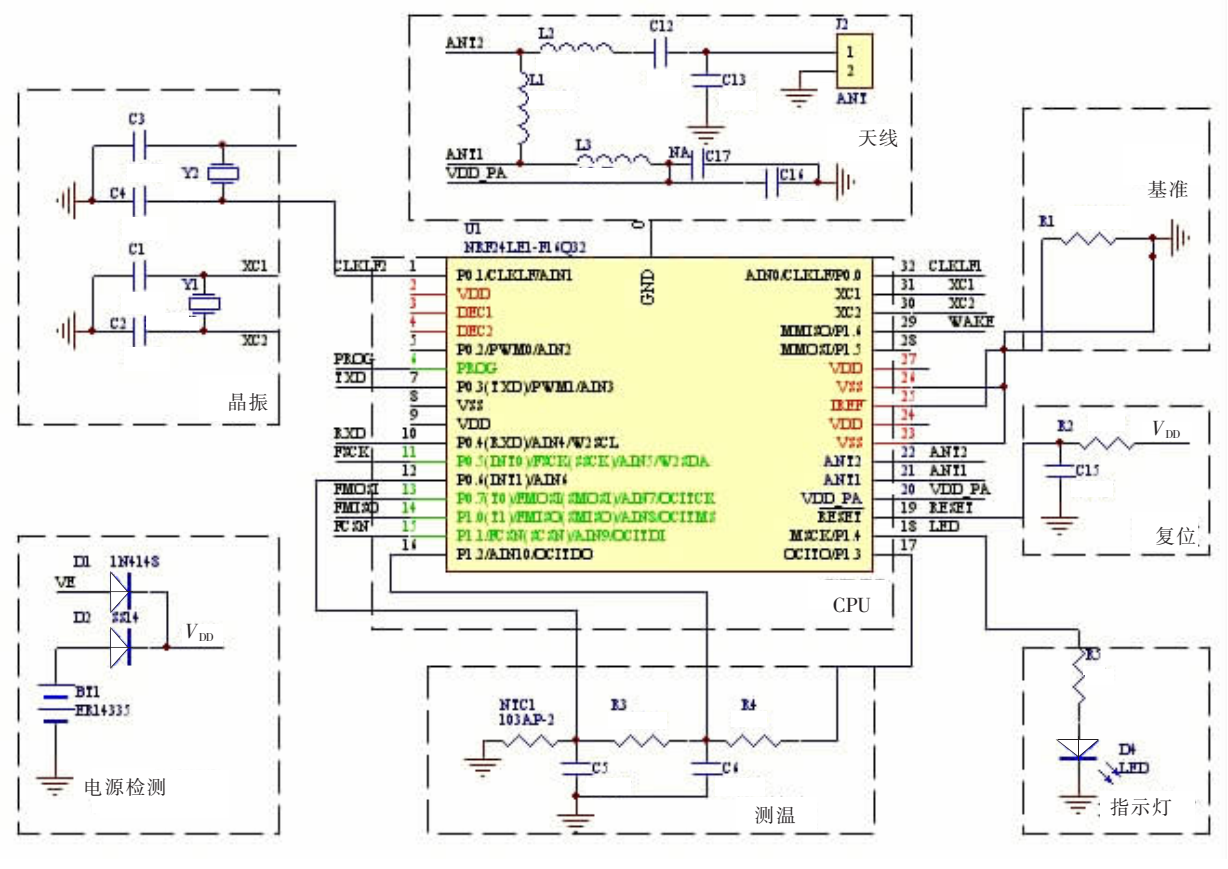

图3 终端测温原理图

Fig. 3 Terminal temperature measurement diagram

AIN10和AIN6的输入电压均位于A/D转换器的线性输入范围。系统使用AIN10和AIN6的比例关系计算热敏电阻的阻值，避免R4和I/O口导通电阻对NTC计算值的影响，然后将电阻值分段线性计算温度值。

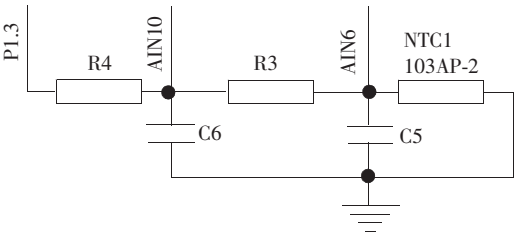

图4 温度采样局部原理图

Fig. 4 Schematic of local temperature sampling

2.3 供电电池选择及电池检测部分

根据设计需要，测温终端必须能在－20～80 ℃环境下工作，现行无线终端设备的供电方式一般有太阳能电池供电、电流互感器供电、电池供电等[4-5]。太阳能电池体积大，而且一般用于室外太阳充足的地方，不适宜在开关柜内使用；电流互感器供电方式只适用于线路电流达到一定值时使用，更小的电流终端将无法工作；得益于现在集成芯片工艺的改进，低功耗芯片大面积出现，使电池供电成为可能，电池供电的工作时间毕竟有限，采用电池供电必须对整机功耗要有精确的计算。

整个终端模块的功耗是本次设计的重要指标之一，终端模块的功耗与无线传输的速率、收发数据包的长度及温度采样周期有关，必须经过精确的计算，其主要功耗在3个阶段：休眠、测温和无线发送。本例设计参数：温度采样周期可以设定在2 s以上；无线数据速率250 kb/s；地址为3个字节，CRC为1个字节，自动ACK；发送数据包长度为5个字节；ACK数据包长度为3个字节。在此参数下，其各阶段的工作电流、持续时间及计算功耗如下。

1）功耗计算，见表1。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　功耗计算

Tab. 1　Power consumption calculate

工作状态	工作电流/mA	工作时间/ms	计算功耗/(mA·h)	4 s 内的总功耗/(mA·h)
温度采集	1	4	1.11×10^{-6}	
无线发送接收	11	1	3.06×10^{-6}	8.61×10^{-6}
休眠	0.004	3 995	4.44×10^{-6}	

注:工作电流及工作时间为测试值,功耗为计算值,采样周期为 4 s。

2)电池等效容量计算

根据选择电池放电容量与放电电流关系曲线获得的数据列于表 2。

在环境温度为 72 ℃时,按各电流时的容量及功耗百分比计算的等效容量为

1.11÷8.61×1.52 A·h+3.06÷8.61×1.36 A·h+4.44÷8.61×1.08 A·h=1.24 A·h。

表 2　等效容量计算

Tab. 2　Equivalent capccity culculation

A·h

温度/℃	电流/mA		
	1	11	0.004
−30	1.35	0.67	1.37
0	1.5	1.02	1.35
20	1.55	1.25	1.15
72	1.52	1.36	1.08

3)工作时间计算

在环境温度为 72 ℃,采样周期为 4 s 时的工作时间为

1.24 A·h÷8.61×10^{-6} mA·h×(4 s÷1 h)=160 020 h=18.2 a

不同温度和采样周期下的电池等效容量及使用年限见表 3。

表 3　不同温度和采样周期下的电池等效容量及使用年限

Tab. 3　Calculation of the capacity of lithium batteries

使用温度/℃	项目	采样周期/s								
		1	2	3	4	6	8	10	13	16
−30	等效容量/(A·h)	0.96	1.03	1.08	1.12	1.17	1.2	1.23	1.25	1.27
	工作年限/a	5.77	10.25	13.73	16.49	20.57	23.41	25.51	27.78	29.40
0	等效容量/(A·h)	1.19	1.22	1.24	1.25	1.27	1.29	1.29	1.3	1.31
	工作年限/a	7.16	12.1	15.71	18.46	22.36	24.99	26.89	28.91	30.33
20	等效容量/(A·h)	1.29	1.27	1.25	1.24	1.22	1.21	1.2	1.19	1.18
	工作年限/a	7.77	12.59	15.87	18.23	21.42	23.47	24.9	26.37	27.39
72	等效容量/(A·h)	1.34	1.29	1.26	1.24	1.2	1.18	1.17	1.15	1.14
	工作年限/a	8.03	12.82	15.99	18.22	21.16	23.00	24.25	25.53	26.39

本设计采用高容量一次,其基本参数如下。

1) 标称电压:3.6 V;2) 工作温度:−55～85 ℃;3) 容量:1 600 mA·h,年自放电率小于 1%,储存期为 10 a 以上;4) 安全性能好,电池在存储、运输、使用过程中不会爆炸。

电力部门要求工作时间不小于 5 a,通过以上计算,选用 ER14335 锂亚硫酰氯电池作为供电电源完全满足设计要求。为更好地保证电池供电部分可靠安全运行,在测温终端内部,设计有电池电压检测部分,nRF24LE1 本身含有一路电池监测电路,直接采样供电电压,可以把电池电压与温度采样值一起发送至监测主机,当电池电压低于设定值时,声光报警,可提醒维护人员及时更换。

3　监测主机设计

监测主机具有人机处理接口,负责显示、处理、统计测温终端上报数据,设定无线采集参数,并具有 RS485 接口,与监测 PC 机相连接,见图 5。

4　软件框架设计

nRF24LE1 有 6 路数据管道,使它非常适宜构建 6∶1 星型网络,而且硬件支持在回复 ACK 时附加数据包,使测温终端在上报数据时可以获得监测主机的回复,该回复可以为命令、数据或状态。系统使用该特性构建双

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

向传输协议，大大减少了软件的协议开销。

监测主机和配对的6个终端为1组，使用相同的设置，如上报周期、频道等。系统使用唯一的组地址用于区别各组，测温终端还附加有终端地址用于区分该组中的各终端。测温终端以设定的时间间隔上报温度数据，在连续8次未收到主机的回复时认为测温主机未开启，会以更长的时间间隔上报数据，以节省功耗，当通信成功时会恢复为设定的上报时间间隔。测温主机根据设定的上报时间间隔和测温终端上报情况统计无线数据传输的成功率及最大上报间隔以进行无线通信的评估；当测温终端连续两次通信失败后会以某一固定无线频道上报数据一次，该功能用于频道设置，防止测温主机和测温终端频道不一致时无法设置。

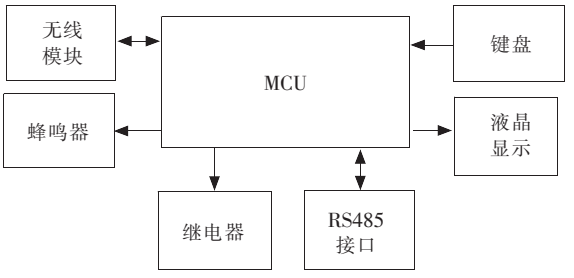

图5 监测主机结构框图

Fig. 5 Block diagram of monitoring the host

5 整机调试

图6是检测主机、测温终端及实际安装位置的实物图片。调试过程分3步：温度的标定、无线数据传输和上位机通信。

1)温度标定方法

由于采用高精度热敏电阻，整个温度采集是根据热敏电阻的阻值经查表换算得出的，对热敏电阻的要求很高，本次设计应用的103AP-2型号热敏电阻的稳定性、精度都非常好，其对终端采样温度的标定就变换为对采样阻值的标定：根据热敏电阻的阻值-温度对应表，查取高、中、低3种温度下的电阻值，用3个标准电阻代替，检测终端模块的采样精度。

图6 测温终端及实际安装位置实物图片

Fig. 6 Temperature physical location of the terminal and the actual installation pictures

2)无线传输及上位机通信

无线传输主要检测误码率和通信距离，实际测试中，将终端采集模块和监测主机放置不同的位置，相距12 m，将上位机和监测主机通过RS485连接，连续检测1 h，计算误码率。经检测实验，12 m处误码率小于0.1%，通信正常。

6 结 语

高压开关作为电力系统的重要设备，其安全可靠运行是保证电网良好工作的前提，本文设计的无线温度监测系统结构简单，性能可靠，采用无线传输解决了高低压隔离问题，通过RS485接口与PC主机相连接，系统扩展灵活，在线实时监测高压开关触头的温度，经过一年多的实际运行，工作稳定，有效保障了电力系统的正常运行。

参考文献：

[1] 钱祥忠. 高压开关柜内接头温度在线监测系统的设计[J]. 仪表技术与传感器(Instrument Technique and Sensor)，2007(2)：73-75.

[2] 时 斌. 光纤传感器在高压设备在线测温系统中的应用[J]. 高电压技术(High Voltage Engineering)，2007，33(8)：169-173.

[3] 李 力. 基于RF微功率芯片的测温系统设计[J]. 现代电子技术(Modern Electronics Technique)，2010，324(13)：117-119.

[4] 徐 明，阳宪惠. 高压开关触头温度无线监测系统[J]. 电子技术应用(Application of Electronic Technique)，2009(4)：98-101.

[5] 李曙英，周根元. 基于无线的高压母线温度监测系统的设计[J]. 微计算机信息(Microcomputer Information)，2008，11(2)：148-150.

[6] 朱金钧，杨奎河，宋 强，等. 一种新型的计算机温度检测系统[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology)，2002，23(1)：54-59.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net