

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200202

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

王海宝¹, 王 峥¹, 周娴娣¹, 高 阳¹, 庞振江¹, 刘 洋²

(1. 北京智芯微电子科技有限公司, 北京 100192; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 为了准确测量电力系统中设备关键节点的温度变化, 综合考虑绝缘和电磁兼容要求, 提出一种基于脉冲转换温度传感芯片的电力设备温度监测系统。该系统采用射频识别技术进行通信, 同时采用蒙特卡洛分析法确定了传感器芯片误差修正方法, 并提出误差修正公式。最后, 在开关柜上进行实际测试。结果显示, 本系统可真实反映温度变化, 提升了温度测量精度, 为准确实现电力设备温度监测提供了一种有效方法。

关键词: 脉冲转换法; 射频识别技术; 蒙特卡洛分析法; 电力设备; 温度监测

Temperature monitoring system for distribution network equipment using a pulse conversion temperature sensing method

WANG Haibao¹, WANG Zheng¹, ZHOU Xianzi¹, GAO Yang¹, PANG Zhenjiang¹, LIU Yang²

(1. Beijing Smart-Chip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In order to accurately measure the temperature change of key nodes in a power system, considering the requirements of insulation and electromagnetic compatibility, a temperature monitoring system of power equipment based on a pulse conversion temperature sensor chip is proposed. The system uses radio frequency identification technology for communication. At the same time, the error correction method of the sensor chip is determined by Monte Carlo analysis, and an error correction formula is proposed. Experimental studies are implemented in a switch cabinet to validate the feasibility and effectiveness of the proposed system. The tests show that the system can truly reflect the temperature changes after error correction. As a result, a promising approach is introduced for a temperature monitoring system.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5400-201918145A-0-0-00).

Key words: pulse counting method; radio frequency identification technology; Monte Carlo analysis method; power equipment; temperature monitoring

0 引言

配电网各种设备在应用过程中, 由于器件松动、材料老化、电弧冲击等原因导致电阻增大, 进而导致设备触点温度升高, 极易引起火灾、爆炸、甚至人员伤亡等灾难事故, 如果发生故障, 将势必导致停电而造成巨大的间接经济损失, 严重威胁电网的安全运行^[1]。基于上述问题, 监测配网设备重点位置的温度非常重要。

传统的温度测量方法, 如热电偶测温方法^[2-3]、

示温蜡片测温方法、红外测温技术^[4-5]、光纤测温技术^[6-7]等在电力设备测温任务上表现不佳。如示温蜡片测温方法测量精度低; 红外测温技术安装困难且容易受到粉尘干扰; 光纤测温技术^[8-9]在表面受污后绝缘性降低极易导致短路。基于上述方法的缺陷, 结合配网设备强电磁工作环境的特点, 无线测温技术^[10]得到人们的关注。

近些年, 无源射频识别 (Radio Frequency Identification, RFID) 温度传感芯片^[11-12]被应用于电力设备温度监测中。该芯片采用温度传感器进行温度测量, 并将测量数据以标准超高频 (UHF) 信号形式返回数据接收装置, 通过“温度测量数据”和“RFID 通信技术”的融合, 完成数据存储、发送

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助 (5400-201918145A-0-0-00)

操作^[13-14]。采用该芯片有效降低了测量装置对电力设备绝缘性能的影响, 提升了电力设备状态监测能力, 保证了配电网安全稳定运行^[15-16]。

综上, 采用无源射频识别温度传感芯片作为核心的温度监测方法, 其主要功能为: “温度测量”和“数据通信”^[17-18]。针对该方法中的“数据通信”, 文献^[19]中做出了详细分析, 本文将分析该方法中“温度测量”这一关键问题, 同时还将研究温度芯片传感器的误差来源, 通过蒙特卡洛方法指导温度传感芯片的修正, 并在综合硬件系统误差后, 提出一种有效的误差修正方法, 最终通过实验验证误差修正方法的精确性。

1 脉冲转换温度监测系统

温度传感器芯片的广泛应用, 得益于集成电路技术的飞速发展。温度传感芯片通过 CMOS 集成电路产生与温度信息密切相关的电压、电流或脉冲频率等电路信息^[20-21], 以此反映被测物体的温度数据, 目前应用于无源射频识别温度传感芯片的方法主要有三种, 如表 1 所示。

表 1 温度传感芯片测温方法比较

Table 1 Comparison of temperature sensor chips for temperature measurement

测温方法	功耗/ μW	测温误差/ $^{\circ}\text{C}$
基于 Sigma-Delta ADC 的温度测量方法	10	-0.7~0.9
基于 SAR ADC 的温度测量方法	2.02	-0.69~0.85
基于脉冲转换的温度测量方法	0.119	-0.8~1

通过表 1 可以看出, 基于 ADC 与基于 SAR ADC 的温度测量方法^[22-23]在测量误差上相差不大, 而在功耗上相差较大; 三种方法中, 基于脉冲转换的温度测量方法相对误差最大, 但是功耗却是最低的。本文在充分考虑低功耗的基础上, 选用基于脉冲技术的温度测量方法作为温度测量芯片的测量原理, 同时在采用误差修正后, 可明显降低温度测量偏差, 提升测量精度。

1.1 测温原理

基于脉冲转换的温度测量方法, 是通过获得与温度成正比的时间脉冲信号(T_{pulse})进行温度测量, 通常利用电容充电或者反相器链延时作为前端模拟电路, 通过基准时钟对 T_{pulse} 信号进行计数, 最终将温度信息转换成数字信号。采用此方法设计制作的温度传感器, 芯片面积更小, 功耗更低, 更适用于电力设备本体温度测量, 但是, 基准时钟的稳定性和可靠性会直接影响传感器信号转换的准确性, 同时, 温度变化将会影响基准时钟的运行效果, 因此,

在设计之初, 应当标定温度变化对基准时钟的影响, 以便于在芯片应用时设定温度补偿。该现象也是应用此类温度传感芯片引入误差的来源, 本文后续将对此类误差的修正方法深入探讨。

本节主要介绍测温原理^[13], 图 1 给出了采用该方法的电源电路。

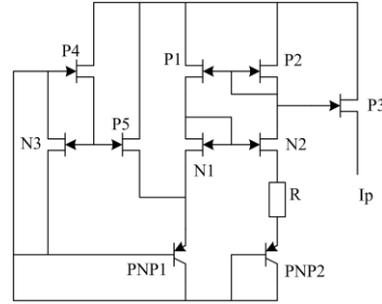


图 1 系统结构框图

Fig. 1 System structure block diagram

N1 与 N2 是完全相同的场效应管, 在使用中, 首先应当保证 N1 和 N2 的源极电压相同, 可表达为

$$V_{n1} = V_{n2} \quad (1)$$

式中, V_{n1} 和 V_{n2} 分别表示两个场效应管的源电极电压。在满足式(1)后, 可使得 N1、N2 两条支路上的电流相等。

$$I_1 = I_2 \quad (2)$$

PNP1 与 PNP2 两个三极管的基极与发射极之间存在电压差, 则电阻 R 上的电压可表达为

$$V_r = V_{e1} - V_{e2} = V_t \times \ln(n) \quad (3)$$

式中, V_{e1} 、 V_{e2} 分别为两个三极管的发射极电压。

根据电流产生热量的热力学原理

$$V_t = \frac{kT}{Q} \quad (4)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; Q 为电量。则式(3)可改写为

$$V_r = \frac{kT}{Q} \ln(n) \quad (5)$$

图 1 中选用 P3 与 P1、P2 相同, 则有输出电流

$$I_p = \frac{kT}{QR} \ln(n) \quad (6)$$

根据等效电压与温度之间的系数关系有:

$$\frac{\partial V_t}{\partial T} = 0.085 \quad (7)$$

式(7)的单位为 mV/K(毫伏/开尔文)。进一步得出输出电流 I_p 与温度的关系为

$$\frac{\partial I_p}{\partial T} = \frac{0.085 \ln(n)}{R} \quad (8)$$

当获得与温度线性相关的电流 I_p 后, 采用振荡电路、迟滞比较器与电容构成脉冲电路, 其中迟滞比较器提供恒定的参考电压, 作为比较器的正端输入电压, 振荡器的反馈连接比较器的输入端, 并通过反相器对电容充电, 充电电压连接迟滞比较器的负输入端。在电容充电达到迟滞比较器阈值时将改变比较器的数字输出值(如“0”变为“1”), 在电容放电至迟滞比较器的低电压时将会再次改变比较器的数字输出值(如“1”变为“0”), 如此反复即会产生脉冲, 而脉冲宽度是随电流的变化而变化的, 即随温度变化而变化。当电容值恒定时有

$$I_p \Delta t = C \Delta V \tag{9}$$

式中: Δt 为电容充放电时间; ΔV 为电容充放电的电压差, 即等于迟滞比较器的正负电压差。

$$\Delta V = V_+ - V_- \tag{10}$$

最终得到振荡器产生的脉冲周期为

$$T_{\text{cycle}} = 2\Delta t = \frac{2C(V_+ - V_-)}{I_p} \tag{11}$$

根据式(11)可看出, 在 C 恒定, 且迟滞比较器电压设定恒定的情况下, 脉冲周期与电流 I_p 成反比, 电流 I_p 越大, 代表充电时间越短, 脉冲也越短, 反之亦然。此即为本文采用的基于脉冲转换的温度测量计数的原理, 根据芯片资料及相关文献资料显示, 采用此种方法的温度传感芯片进行测量时, 该温度传感芯片的误差范围在 $-0.8 \sim 1^\circ\text{C}$ 之间, 具体可追溯至文献[18-19]。

1.2 传感器结构设计

根据上述测温原理, 本文提出了一种新型电力梅花触头用超高频温度传感器结构, 在保证温度传感器测温性能的同时, 不影响梅花触头的原有物理结构和机械接触。如图 2 所示, 在电力梅花触头和抽头上分别安装两套陶瓷基材的背腔偶极子天线。

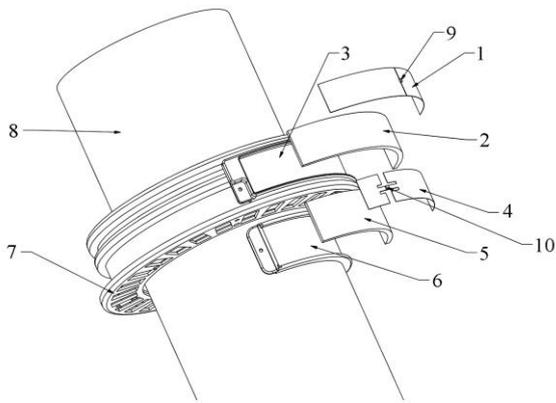


图 2 传感器结构图

Fig. 2 Sensor structure diagram

在图 2 中, 图示 1、2、3、9 构成第一套温度传感器, 4、5、6、10 构成第二套温度传感器。图中 7 为电力梅花动触头结构, 8 为梅花静触头结构。图示 1、4 是宽频偶极子天线, 采用激光镭雕技术将其分别定制在共形陶瓷胚体图 2、5 上。图示 3、6 是铝质背腔结构, 主要用于固定弧形陶瓷胚体, 保证天线能够完美固定在电力梅花动触头和梅花静触头结构上。图示 9、10 是温度传感芯片加载的位置。铝质背腔结构通过固定螺丝或弹簧类的绑扎带, 把整个温度传感器固定在电力梅花触头结构上。

1.3 硬件框架

基于脉冲转换法的温度监测系统硬件包括了温度传感器阵列、接收装置、不同级别的控制器及温度计算预警模块等。温度传感器向接收装置传输的信息中携带温度数据, 接收装置通过 RS232/485 接口将数据送入温度计算模块进行处理, 并通过以太网传输给监控主控制器, 完成温度数据的采集与处理过程, 以此实现监测电力设备本体温度, 进而满足物联网技术在智能电网数据采集、通信和计算处理方面的要求^[24]。具体硬件框架如图 3 所示。

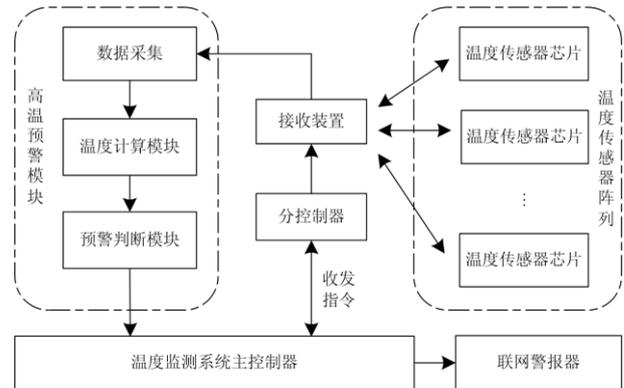


图 3 温度监测系统硬件框架图

Fig. 3 Hardware framework of temperature monitoring system

1.4 软件流程

通过上述讨论, 明确了本文提出的基于脉冲转换温度传感芯片的电力设备温度监测系统的硬件框架后, 为了高效、准确地应用本文提出的温度监测系统, 本系统的主控制器将实现温度监测任务, 其具体工作流程如图 4 所示。

通过流程可以看出, 本系统的核心为判断电力设备关键点是否超过高温预警值, 因此, 本系统的准确、高效工作将为电力设备的温度监测提供坚实的安全保障。

1.5 硬件系统误差

在应用硬件系统进行测量时, 存在不可预测的电气误差及噪声^[25-26]。其中电气误差主要由选取的硬

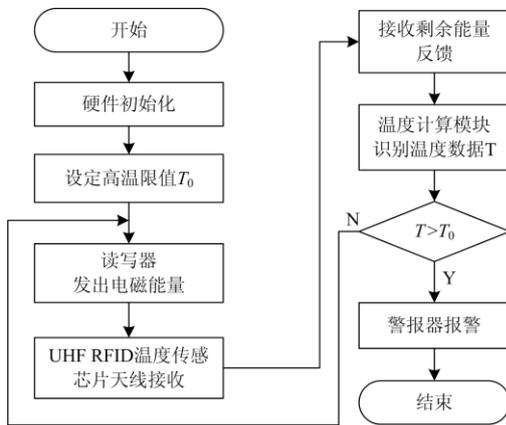


图 4 温度监测系统软件流程图

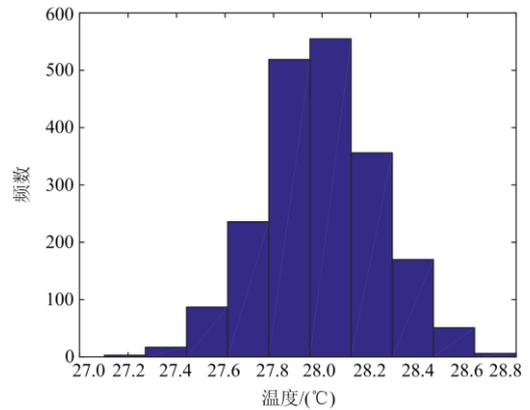
Fig. 4 Software flow chart of temperature monitoring system

件及测量电路造成。针对本测量系统，主要分为：传感器芯片的电气误差与测量电路的电气误差。在具体应用时为了保证测量精度，应当进行测量前期硬件误差标定，确定系统误差范围，以便后续进行误差修正。下文将通过实验寻找测量系统电气误差，并在测量实验中对该误差进行修正。

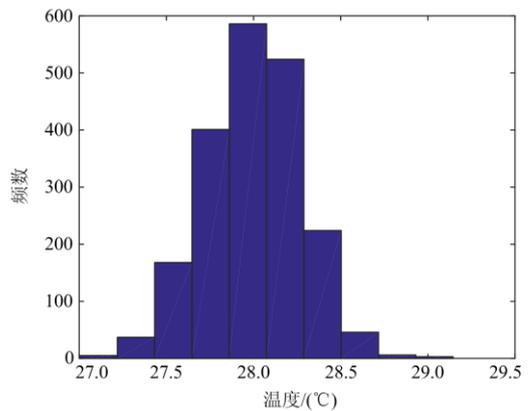
1.6 传感器芯片引入误差分析

根据文献[12]中列举出的温度传感器芯片的测量误差范围，应用蒙特卡洛方法进行仿真分析，利用 Matlab 软件编程实现蒙特卡洛方法对温度传感芯片测量结果进行仿真，并采用 randn 函数生成随机数，假设 28℃ 作为温度数据的数学期望值，代入公式(1)，通过设定不同的标准差寻找芯片的误差修正值。采用 2 000 个样本数据进行仿真，可得到图 5 所示的不同结果。

图 5 中分别显示了在设定不同的标准差的情况下得到的芯片测量数据的误差图，根据拉依达准则 (3σ 准则)，在芯片设计后的达标测试中，相对于期望值，应当使得误差范围在设计范围之内，根据表



(b) $\sigma=0.6$ 仿真结果

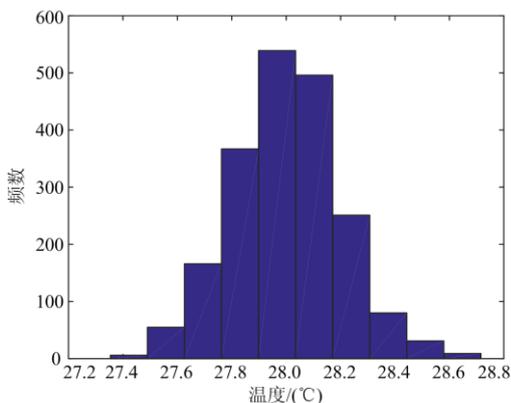


(c) $\sigma=0.7$ 仿真结果

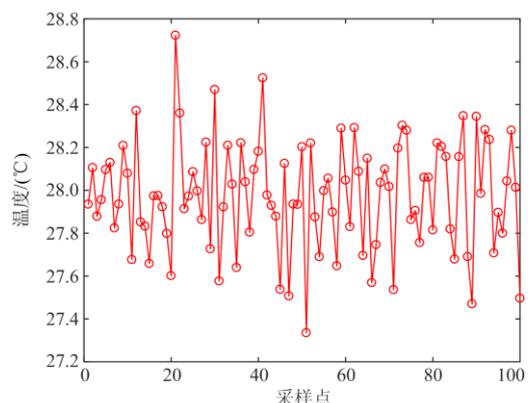
图 5 蒙特卡洛仿真数据分析图

Fig. 5 Monte Carlo simulation data analysis chart

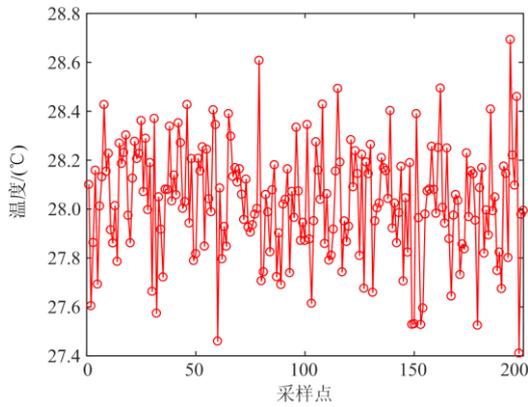
1 给出的误差范围，此温度传感芯片在测量温度时的 3σ 应当大约等于 ± 0.8 ，由此可发现，当标准差设定为 0.6 时，得到芯片温度测量结果的统计数据基本满足拉依达准则，即数值分布在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 中的概率为 0.997 3，具体如图 5(b) 所示。为了进一步验证，本文利用 randn 函数继续生成不同数量的随机数进行仿真，结果如图 6 所示。



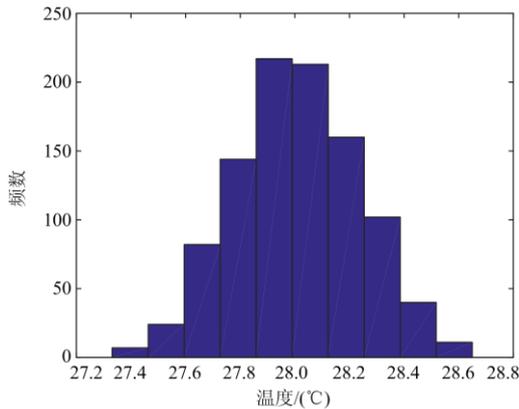
(a) $\sigma=0.5$ 仿真结果



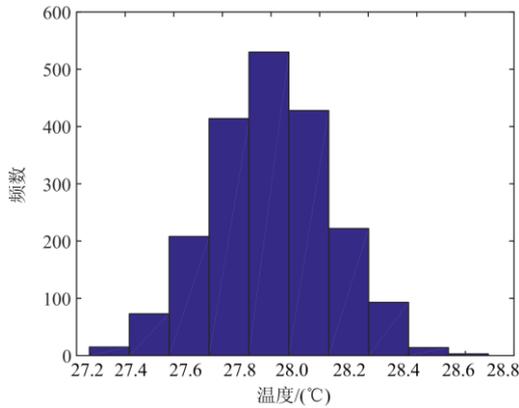
(a) 100个测量数据randn函数仿真结果



(b) 200个测量数据randn函数仿真结果



(c) 100个测量数据蒙特卡洛仿真结果



(d) 200个测量数据蒙特卡洛仿真结果

图 6 芯片引入误差分析图

Fig. 6 Chip introducing error analysis diagram

图6(a)、图6(b)分别为采样100个测量数据、200个测量数据的温度测量结果图，由图看出，温度偏差范围基本在 $\pm 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。图6(c)、图6(d)分别为100个测量数据、200个测量数据的蒙特卡洛分析结果，通过不同范围的频数图像可以看出其分布结果基本符合正态分布，因此可以近似按照芯片测量时相对于期望的标准差为0.6进行后续误差修正。

2 实验验证

由于本文提出的温度测量系统在准确获取温度数据的同时，还需要适应其强电磁场、强电流电压的工作环境。因此，为了验证本文提出的温度测量系统的稳定性和可靠性，本节将对该系统在强电磁工况下的实际应用效果进行测试，实测分别将本系统应用于通电状态的开关柜，已验证本系统的实用性与可靠性。

为了进一步证明本文提出的温度测量系统在其他电力设备应用中的可行性与有效性，本文将该系统应用于 10 kV 开关柜进行测试。具体实验如图 7 所示。



(a) 梅花触头用温度传感器



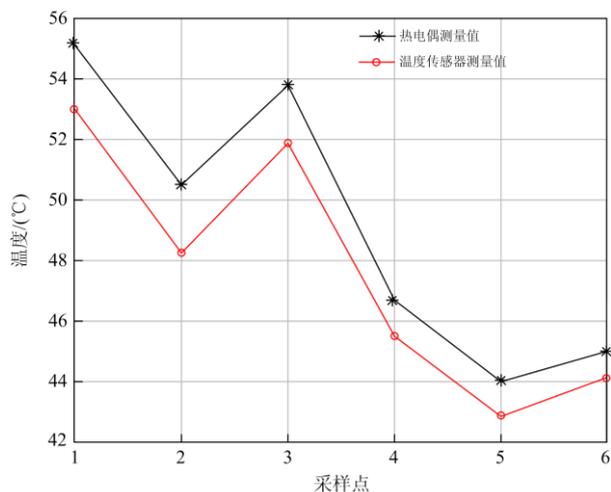
(b) 母排连接处的温度传感器

图 7 温度监测系统开关柜应用实测图

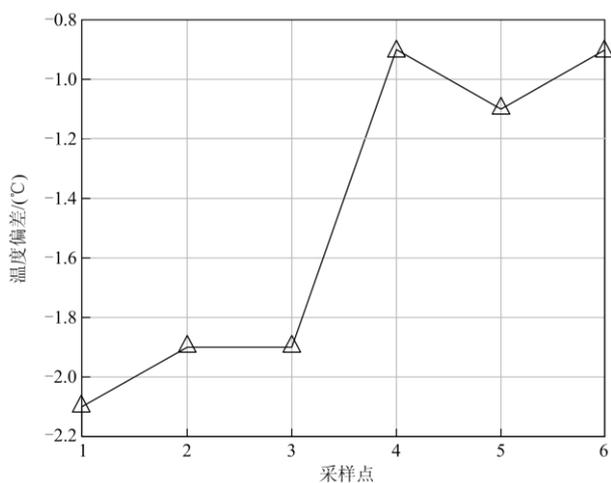
Fig. 7 Application of actual map for switchgear of temperature monitoring system

在验证实验中，将温度传感器固定在开关柜触头及母排处，同时将热电偶安装在与温度标签相同的位置。实验中设定开关柜对地电压 5.8 kV(模拟相

间 10 kV), 设定通过开关柜的电流为 4 kA。实验进行中, 采用热电偶测量的温度值作为参考, 对比温度测量系统测定的温度值, 具体如图 8 所示。



(a) 热电偶和温度传感器测量值对比图



(b) 温度偏差图

图 8 温度监测数据图-开关柜实测

Fig. 8 Temperature monitoring data diagram-switchgear

如图 8 所示, 本文提出的温度监测系统可适应开关柜正常工作工况, 在 4 kA 电流的强电磁环境下, 温度监测系统可迅速识别器件的温度升高, 与同样位置的热电偶测量数据进行对比后, 两者测量的温度数据偏差在 2°C 以内。

3 误差修正

3.1 硬件系统误差修正

本文提出的基于脉冲转换温度传感芯片的电力设备温度监测系统可以应用于强电磁工作环境, 其测量数据与热电偶测量数据及红外测温仪测量数据对比后发现, 本系统测量数据与其他点温测量数据

相比整体偏低, 且温度偏差在 2°C 以内。由于实际应用中一般是高温预警, 温度测量偏低将会导致温度阈值失效, 使得温度监测系统延时危险预警, 如图 9 所示。

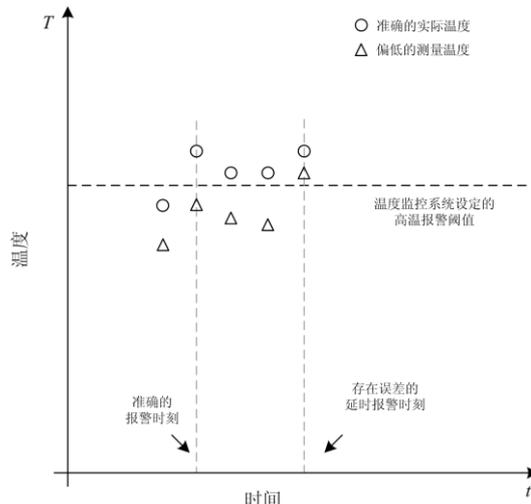


图 9 误差对温度监测准确性的影响

Fig. 9 Effect of error on accuracy of temperature monitoring

因此, 针对温度测量值偏低的问题非常有必要进行误差修正。考虑到温度传感器安装位置及芯片的温度补偿设置等误差来源, 可将其作为系统误差对测量数据进行修正, 如式(12)所示。

$$T = T_c + T_e \quad (12)$$

式中: T 为准确温度值; T_c 为本系统温度测量值; T_e 为系统误差。实际测量时, T_e 通常是一个变化量, 传感器安放位置的不同、发射器距离及角度的不同、温度传感芯片温度补偿设置的不同以及电路中白噪声的差别都有可能影响 T_e 。因此, 在可能的条件下, 应用时应当根据具体测量环境进行误差标定, 确定 T_e 的当前值后, 利用式(12)对测量数据进行误差修正。

3.2 传感器芯片误差修正

通过前文论述, 我们确定了温度传感器芯片的引入误差的偏差范围以及修正方法, 因此, 在上节讨论的误差修正式(12)的基础上, 还应进行进一步改进, 具体可写作式(13)。

$$T = T_c + T_e + T_s \quad (13)$$

式(13)中的 T_s 为传感器芯片引入误差, 在此应当按照 $\sigma=0.6$ 进行误差修正。根据上述误差修正方法, 本节举例对图 8 所示测量结果进行误差修正, 结果分别如图 10 所示。

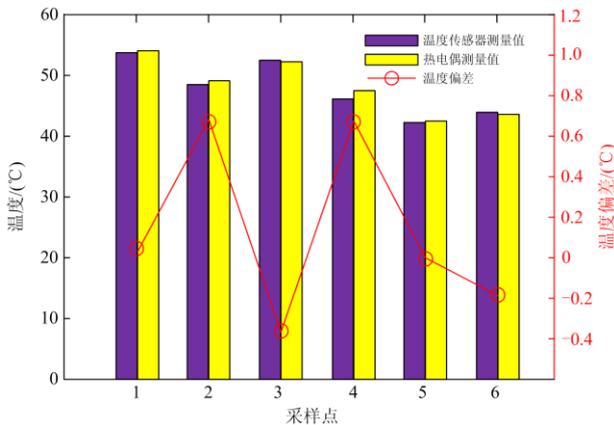


图 10 误差修正后温度数据对比图

Fig. 10 Comparison of temperature data after error correction

根据图 10 可知,应用式(13)对本文提出的温度监测系统进行了误差修正,温度修正值得到明显改善,其与热电偶测量数据偏差显著减小至 $-0.3\sim 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,并且不再始终偏低。因此,误差修正提高了测量精度,在一定程度上改善了温度监测系统预警性能的准确性。

4 结论

本文分析了常规测温方法的缺陷,在研究基于脉冲转换温度测量方法的基础上,提出了一种基于脉冲转换温度传感芯片的电力设备温度监测系统。对误差来源进行分析和分类,针对不同误差来源提出相应的误差修正方法。

通过在开关柜上的应用测试,最终结果表明,基于脉冲转换温度传感芯片的电力设备温度监测系统可应用于强电磁场环境,在误差修正后可真实反映温度变化,为准确实现电力设备高温预警提供了一种有效方法。

参考文献

[1] 车文毅. 半有源超高频射频识别标签芯片的研究与设计[D]. 上海: 复旦大学, 2010.
CHE Wenyi. Analysis and design of semi-passive UHF RFID tag chip[D]. Shanghai: Fudan University, 2010.

[2] IHARA I, YAMADA H, KOSUGI A, et al. New ultrasonic thermometry and its applications to temperature profiling of heated materials[C] // 2011 Fifth International Conference on Sensing Technology, November 28-December 1, 2011, Palmerston North, New Zealand: 60-65.

[3] 常太华, 苏杰, 田亮. 检测技术与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[4] POTYRAILO R A, SURMAN C. A passive radio-frequency

identification (RFID) gas sensor with self-correction against fluctuations of ambient temperature[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 185: 587-593.

[5] 漆灿, 李庆武, 郑云海, 等. 基于智能视觉物联网的变电站红外监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 135-141.
QI Can, LI Qingwu, ZHENG Yunhai, et al. Infrared monitoring system for substation based on intelligent visual internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 135-141.

[6] 汪进锋, 徐晓刚, 李鑫, 等. 光纤传感器在预装式变电站绕组热点温度监测中的应用[J]. 电测与仪表, 2016, 53(21): 115-119.
WANG Jinfeng, XU Xiaogang, LI Xin, et al. Application of fiber optic sensor in the hot spot temperature monitoring of the prefabricated substation windings[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(21): 115-119.

[7] 孙晓雅, 李永倩, 李天, 等. 基于光纤光栅的开关柜温度在线监测系统的设计[J]. 电力系统通信, 2012, 33(5): 6-10.
SUN Xiaoya, LI Yongqian, LI Tian, et al. Design of the switchgear temperature on-line monitoring system based on optical fiber grating[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(5): 6-10.

[8] 甘维兵, 王立新, 张翠. 分布式光纤光栅测温技术在线监测电缆温度[J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 577-581.
GAN Weibing, WANG Lixin, ZHANG Cui. Distributed optical fiber grating technology applied in cable temperature measurement[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(5): 577-581.

[9] 胡建学, 赵俊, 何李松, 等. 基于声表面波技术的高压开关柜温度监测系统[J]. 压电与声光, 2014, 36(2): 214-216.
HU Jianxue, ZHAO Jun, HE Lisong, et al. Temperature monitoring system for switchgear based on surface acoustic wave[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2014, 36(2): 214-216.

[10] 徐乔笙, 谢维成, 江山, 等. 一种监测母线槽温升信号的无线传感器动态采样策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 106-112.
XU Qiaosheng, XIE Weicheng, JIANG Shan, et al. A wireless sensor dynamic sampling strategy for monitoring temperature rise signals of busway[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 106-112.

[11] 王峥, 王鹤, 邓昌晟, 等. 一种基于超高频 RFID 的无线无源压力传感器[J]. 电子应用, 2017, 43(11): 82-85.
WANG Zheng, WANG He, DENG Changsheng, et al. A UHF RFID wireless passive pressure sensor[J]. Electronic Application Technology, 2017, 43(11): 82-85.

- [12] QI Z W, ZHUANG Y Q, LI X M, et al. Full passive UHF RFID tag with an ultra-low power, small area, high resolution temperature sensor suitable for environment monitoring[J]. *Microelectronics Journal*, 2014, 45(1): 126-131.
- [13] 王倩, 毛陆虹, 张欢, 等. 集成于无源 UHF RFID 标签的高分辨率 CMOS 温度传感器[J]. *传感技术学报*, 2012, 25(4): 462-467.
WANG Qian, MAO Luhong, ZHANG Huan, et al. A high-resolution CMOS temperature sensor integrated in passive UHF RFID tag[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25(4): 462-467.
- [14] HIKARI F, HIROAKI O, KEITA N, et al. An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers[J]. *Geothermics*, 2009, 38: 399-406.
- [15] THOMAS S, REYNOLDS M S. QAM backscatter for passive UHF RFID tags[C]// 2010 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2010), April 14-16, 2010, Orlando, FL, USA: 210-214.
- [16] 姚园园. 面向无源超高频 RFID 应用的低功耗温度传感器芯片设计研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
YAO Yuanyuan. Research on the design of the low power consumption of the temperature sensor for passive UHF RFID application[D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
- [17] 周诗伟. 无源 UHF RFID 温度标签研究与设计[D]. 天津: 天津大学, 2013.
ZHOU Shiwei. The research and design of passive UHF RFID tag with temperature sensor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [18] 战金雷, 谢生, 管坤, 等. 集成温度传感器的无源 UHF RFID 标签设计与验证[J]. *传感技术学报*, 2013, 26(12): 1710-1713.
ZHAN Jinlei, XIE Sheng, GUAN Kun, et al. Design and verification of passive UHF RFID tag with integrated temperature sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(12): 1710-1713.
- [19] 李波涛, 张宝英, 赵世坡, 等. UHF RFID 温度标签的研究及其在开关柜温度监测系统中的应用[J]. *电测与仪表*, 2017, 54(4): 117-121.
LI Botao, ZHANG Baoying, ZHAO Shipo, et al. Research on UHF RFID temperature tags its application in switch cabinet temperature monitoring system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(4): 117-121.
- [20] ZHANG Qi, WU Nanjian, ZHOU Shenghua, et al. A novel RFID tag chip with temperature sensor in standard CMOS process[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 30-June 2, Paris, France, 2010: 1109-1112.
- [21] 谢良波. 内置温度传感器超高频射频识别标签芯片关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
XIE Liangbo. Research on the key techniques of UHF RFID tag with embedded temperature sensor[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [22] LAW M K, BERMAK A, LUONG H C. A sub- μ W embedded CMOS temperature sensor for RFID application[J]. *Journal of Semiconductors*, 2014, 35(11): 111-117.
- [23] HAN Y, LI Q, MIN H, et al. A low voltage low power oscillator suitable for RFID transponder[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(4): 755-780.
- [24] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(3): 58-69.
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(3): 58-69.
- [25] 卓浩泽, 唐志涛, 李金瑾, 等. 温度对电子式电流互感器与传统电流互感器输出精度的影响[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(4): 98-102.
ZHUO Haoze, TANG Zhitao, LI Jinjin, et al. Effect of temperature on the output accuracy of electronic current transformer and traditional current transformer[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(4): 98-102.
- [26] 李晓鹏, 袁学庆, 李博, 等. 考虑温度影响的锂电池等效电路建模及研究[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(3): 35-41.
LI Xiaopeng, YUAN Xueqing, LI Bo, et al. Modeling and research of lithium ion battery equivalent circuit based on temperature[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(3): 35-41.

收稿日期: 2020-03-02; 修回日期: 2020-04-23

作者简介:

王海宝(1982—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电力物联网产品研究与应用工作; E-mail: wanghaibao@sgitg.sgcc.com.cn

王 峰(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力物联网智能传感器的研究; E-mail: wangzheng3@sgitg.sgcc.com.cn

周娴婧(1986—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力物联网传感器产品应用工作。E-mail: zhouxianzi@sgitg.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)