

高精度工业铂电阻自动检定系统设计与测试

路宗敏¹, 关卫军¹, 李姣姣¹, 路 刚²

(1. 陕西省计量科学研究院, 陕西 西安 710100; 2. 定州恒岳仪器仪表有限公司, 河北 定州 073000)

摘要:为实现高精度工业铂电阻的自动检定, 设计了以吉时利 2010 数表为基础, 基于电势比较法测量电阻原理的检定系统, 基于 .NET 平台使用 C 语言编写了检定软件, 低成本实现高精度工业铂电阻自动检定。利用固定点装置测试了系统的温度测量误差, 最大单次测量误差不超过 10 mK; 经测试, 通道间数据采集差值为 0.5 μV , 扫描开关最大寄生电势为 0.21 μV ; 经验证, 手动检定和自动检定温度误差为 1 mK。因此, 检定系统满足使用要求。

关键词:高精度; 工业铂电阻; 检定系统

中图分类号: TP212

文章编号: 1000-0682(2024)06-0030-04

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.006

Design and test of a high-precision industrial platinum resistance automatic verification system

LU Zongmin¹, GUAN Weijun¹, LI Jiaojiao¹, LU Gang²

(1. Shaanxi Institute of Metrology Science, Shaanxi Xi'an 710100, China;

2. Dingzhou HonYue Instrument CO., LTD., Hebei Dingzhou 073000, China)

Abstract: In order to achieve automatic verification of the high-precision industrial platinum resistance, the economical automatic verification system based on Keithley 2010 is designed with potential comparison method. Based on .NET platform, the verification software is developed in C language. The temperature measurement error of the system is tested using fixed-point devices, the maximum single temperature measurement error does not exceed 10 mK. The test results show that the difference in data between channels is 0.5 μV , and the maximum parasitic potential of the scanning switch is 0.21 μV . The verification results show that the temperature error between manual and automatic verification is 1 mK. Therefore, the automatic verification system meets the requirements.

Keywords: high precision; industrial platinum resistance; verification system

0 引言

铂电阻温度计是基于金属铂的电阻值随着温度变化而变化的原理实现对温度的测量。其优点是测温精度高、稳定性好、测温范围广、便于远距离测量、控制和记录等, 应用非常广泛^[1-3]。随着水域公约的逐步实施, 高精度的铂电阻检定需求量逐渐上升^[4-5]。

工业铂电阻的检定依据是 JJG229-2010《工业铂、铜热电阻》。工业铂电阻检定量, 数据计算过程繁琐。为了提高工作效率、降低人为操作失误, 绝

大多数计量单位和企业计量部门使用热电阻温度自动检定系统^[6-7](以下简称检定系统)。

目前大多数检定系统均采用数表电阻档测量电阻, 由于数表电阻档位基本误差偏大、达到稳定时间长、稳定性差, 因此绝大多数检定系统不能检定 AA 级及以上工业铂电阻。目前普遍的解决办法是用更高准确度等级(八位半)的电测仪表, 这样会追加更高的采购费用以及后续的周期检定费用。针对以上不足, 以吉时利 2010(七位半)数表为基础, 并基于电势比较法测量电阻原理设计了工业铂电阻自动检定系统, 低成本实现了 AA 级工业铂电阻自动检定, 消除了恒流源不稳定造成的随机误差, 同时还可以实现电测仪表自身的系统误差的修正, 并对检定系统进行了验证。

收稿日期: 2024-04-23

第一作者: 路宗敏(1985—), 男, 汉, 甘肃镇原人, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为温度计量。E-mail: 360819020@qq.com

1 系统总体设计方案

1.1 检定系统的总体构成

检定系统设计遵循 90 国际温标和检定规程 JJG 229-2010《工业铂、铜热电阻》。整个检定系统由恒温装置、温度标准器、电阻测量部分、多路扫描开关和计算机软件等单元构成。恒温装置主要有低温恒温槽和恒温油槽,主要提供 0℃ 和 100℃ 恒温场;温度标准器是二等标准铂电阻温度计,测量实际温度;电阻测量部分主要包括吉时利 2010 数字万用表、标准电阻和恒流源;多路扫描开关实现多个通道切换;计算机软件部分主要用于被检信息录入、数据采集和处理、原始记录生成。另外检定系统还用到了水三相点瓶,用于测量二等标准铂电阻水三相点值。

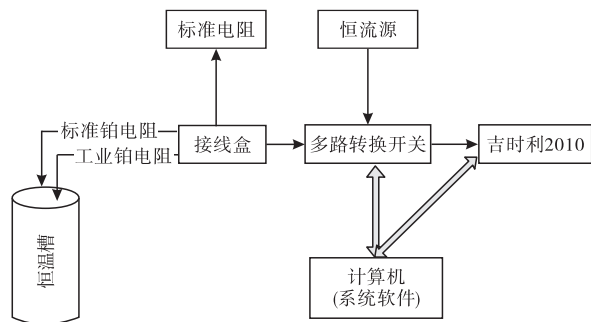


图1 系统总体构成图

1.2 检定系统的工作原理

在软件系统中录入新测得二等标准铂电阻温度计的水三相点值和证书参数值、标准电阻证书值、被检工业铂电阻信息等;将恒温槽设定至检定温度点,并将工业铂电阻和标准铂电阻浸入恒温槽中,并连接至接线盒对应的通道;其次连接数字多用表、标准电阻、计算机和多路转换开关通讯线;完成上述操作后,软件系统不断采集数据,当恒温槽温度波动性达到检定条件时,开始记录数据,并对数据进行计算,最后给出检定结果。

2 系统的硬件构成

系统的硬件主要由二等标准铂电阻温度计、标准电阻、水三相点瓶、吉时利 2010 数字万用表、恒流源、恒温油槽、低温槽、接线盒、多路转换开关和计算机组成。

以二等标准铂电阻温度计作为标准,吉时利 2010 数字万用表配合标准电阻实现对电阻的测量,恒温油槽和低温槽作为温度场设备,恒流源提供稳定的 1 mA 的电流,水三相点装置用于测量二等标准铂电阻水三相点值,多路转换开关、接线盒实现对

标准铂电阻温度计、标准电阻和多支被检热电阻依次测量^[8]。

测量电阻的方法为电势比较法,即使用吉时利 2010 数字万用表的电压档为 100 mV,其准确度为 0.003 7% rdg + 0.000 9% range,分辨率为 10 nV。电势比较法的测量原理是将标准铂电阻、标准电阻 R_s 和被测电阻 R_x 组成串联电路,回路中串接相对稳定的 1 mA 的恒流源,通过吉时利 2010 数字表电压档分别测得标准电阻 R_s 两端的电压 U_s 和被测电阻 R_x 两端的电压 U_x ,根据欧姆定律可以得到:

$$\frac{U_s}{R_s} = \frac{U_x}{R_x} \quad (1)$$

从而得到:

$$R_x = \frac{U_x}{U_s} R_s \quad (2)$$

式中: R_s 为标准电阻(Ω); R_x 为被测电阻(Ω); U_s 为标准电阻两端电压(mV); U_x 为被测电阻两端电压(mV)。

测量过程中依次测得标准铂电阻及各个被测传感器的电阻值,每检测完一个循环,电流换向与多路转换开关校零通道配合使用,从而消除测量回路的寄生杂散热势^[9]。

这种测量电阻的方法一方面可以消除恒流源电流波动造成的测量误差,另一方面可以通过标准电阻修正电测仪表的系统误差。

3 系统的软件设计

该系统软件的设计主要依据检定规程 JJG 229-2010《工业铂、铜热电阻》。软件系统主要包括信息录入、数据采集和处理、原始记录生成。软件是基于 .NET 平台使用 C# 语言编写的 Windows 操作软件,系统软件流程如图 2 所示。

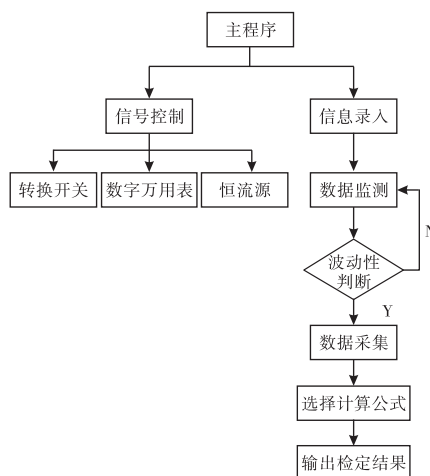


图2 系统软件流程图

软件以 Microsoft SQL Server 数据库为核心,简化了数据库操作的过程。实现标准与被检传感器件的档案化管理,通过专业的 CELL 报表软件制作模板,实现数据查询及统计、报表打印。软件自动化程度高,自适应 RS232 或 485 通讯接口、自诊断设备运行状态、自动优化控制参数(PID 自整定),自动进行数据采集、修正、记录、计算、处理、存储。

对信号的控制主要包括对多通道转换开关的控制、数字万用表的控制和对恒流源的控制。对多通道转换开关的控制主要是控制各个通道的闭合和打开,实现对二等标准铂电阻温度计、标准电阻和多支被检工业铂电阻的依次测量;对数字万用表的控制主要是完成数据的测量和采集;对恒流源的控制主要是稳定提供 1 mA 的电流,并实现电流换向,消除寄生热电势对电阻测量的影响。

在检定之前,将二等标准铂电阻温度计放入预先冻制好的水三相点瓶中,连接系统,测量二等标准铂电阻在水三相点的电阻值 R_{tp} 值,然后将新测量的 R_{tp} 值和证书上的系数值代入系统;在系统中输入标准电阻实测值和被检工业铂电阻信息。检定过程中软件实时监测恒温槽温度波动度,当温度波动度和检定点偏差满足要求时,开始数据的采集和处理,直至最后输出检定结果,生成原始记录。系统检定过程中温场实际温度偏离检定点过多,或者某个传感器件接线脱落或短接,软件自动弹出提示窗口,待确认处理完故障后自动恢复检定工作。检定过程中软件逐次自动处理数据及保存,以防工作中突然停电或其它故障原因造成数据丢失。

4 系统的测试验证

对检定系统测量的准确性、重复性、寄生电势和通道一致性进行了测试,并采用 CRT6000 电桥用手动检定的方式验证了检定结果。

4.1 固定点测试

为了验证整套系统测温的准确性和重复性,在水三相点、锡凝固点进行了测试。水三相点装置和锡凝固点装置是分度标准铂电阻温度计的标准设备,具有非常高的准确性、稳定性和复现性,因此可以用来验证自动检定系统^[10]。重复性的计算采用贝塞尔公式。

4.1.1 水三相点测试

水三相点复现的温度值为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[11]。将冻制完成后的水三相点瓶放置在保存装置中,保持冰套能自由转动。将二等标准铂电阻温度计放入水三相

点瓶保存装置中预冷 30 分钟,然后再将二等标准铂电阻温度计插入水三相点瓶中,将引线接入自动检定系统。当标准铂电阻温度计达到热平衡后,开始读取 10 组数据。测试结果如图 3 所示,平均值为 $0.012\text{ }^{\circ}\text{C}$,误差为 $+0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大值为 $0.016\text{ }^{\circ}\text{C}$,最小值为 $0.006\text{ }^{\circ}\text{C}$,重复性为 $0.003\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

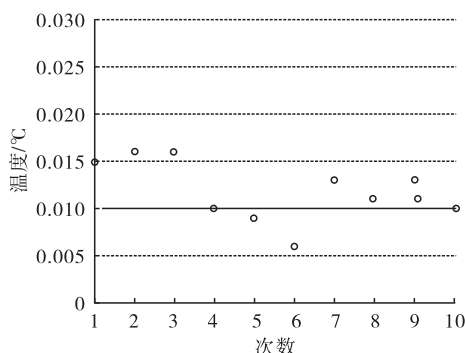


图3 水三相点测量值

4.1.2 锡凝固点测试

锡凝固点复现的温度值为 $231.928\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[11]。将退火炉温度设置为 $231\text{ }^{\circ}\text{C}$,然后将二等标准铂电阻温度计插入退火炉预热。预热完成后将其插入已复现好的锡凝固点炉中,将引线接入自动检定系统。当标准铂电阻温度计达到热平衡后,开始读取 10 组数据。测试结果如图 4,平均值为 $231.928\text{ }^{\circ}\text{C}$,误差为 $0.000\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大值为 $231.937\text{ }^{\circ}\text{C}$,最小值为 $231.922\text{ }^{\circ}\text{C}$,重复性为 $0.004\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

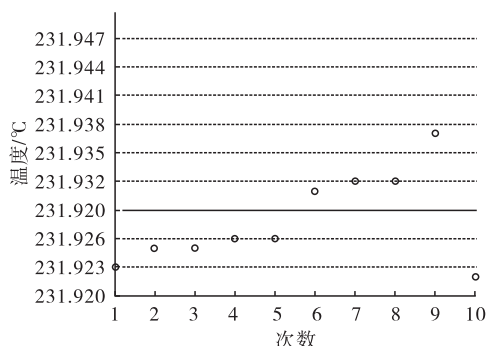


图4 锡凝固点测量值

固定点测试结果显示,温度误差非常小,远小于检定规程 JJG 229—2010《工业铂、铜热电阻》AA 级铂电阻允许误差的三分之一,重复性也很小。

4.2 通道一致性测试

通道一致性测试是为了确保不同通道对同一值测试结果的一致性。通道一致性测试采用输入模拟信号的方法。将扫描开关输入同名端分别采用直径为 1 mm 的单芯铜导线短接后与 0.02 级标准信号源连接,反复测量三次,取平均值作为各通道测量

值,测量结果如图5所示。

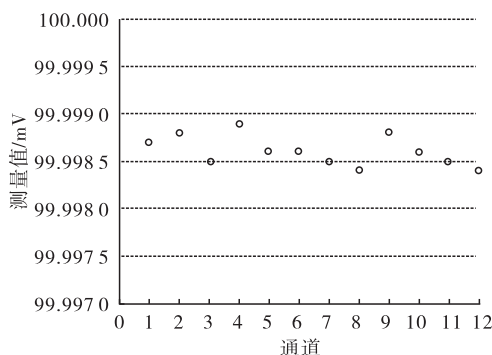


图5 通道一致性测试

取各通道的最大差值作为最终结果,测试结果为 $0.5 \mu\text{V}$ 。JJF 1098—2003《热电偶、热电阻自动测量系统校准规范》中规定通道间数据采集差值小于等于 $2 \mu\text{V}$,满足要求。

4.3 扫描开关寄生电势测试

将扫描开关输入端用直径为 1 mm 的单芯铜导线短接,然后将输出端用相同铜导线短接后接入吉时利 2010 数字万用表输入端。测量时,将吉时利 2010 数字万用表清零,并剪断扫描开关输出端的短路导线,依次切换扫描开关通道进行测量,记录绝对值最大的电势,反复测量 3 次,取最大值作为该通道的寄生电势值,测试结果如图 6 所示,扫描开关最大寄生电势为 $0.21 \mu\text{V}$ 。规范 JJF 1098—2003《热电偶、热电阻自动测量系统校准规范》中规定扫描开关寄生电势小于等于 $0.4 \mu\text{V}$,满足要求。

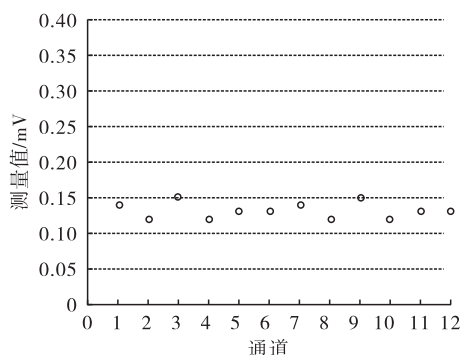


图6 通道寄生电势测试

4.4 检定结果验证

为了验证检定系统检定结果可靠性,选用更高准确度等级的 CRT6000 电桥作为电测设备,采用相同的二等标准铂电阻和恒温槽,按照检定规程 JJG 229—2010《工业铂、铜热电阻》进行手动检定和自动检定,检定结果如表 1 所示。

表1 检定结果

检定方式	R_0/Ω	R_{100}/Ω
手动	99.996 6	138.493 9
自动	99.996 7	138.493 8

由表 1 可知,手动检定和自动检定差值为 $0.1 \text{ m}\Omega$,引起的温度误差约为 0.001°C ,因此自动检定系统检定结果是可靠的。

5 结束语

以吉时利 2010(七位半)数表为基础,并基于电势比较法测量电阻原理设计了工业铂电阻自动检定系统,使用 C 语言编写了检定软件,可同时实现对 10 支铂电阻进行检定,低成本实现了高精度工业铂电阻自动检定。测试实验结果证明检定系统的温度测量误差、重复性、通道一致性和寄生电势满足检定精密铂电阻的要求,通过采用更高准确度等级的电测设备手动检定,验证了检定系统检定结果的可靠性。系统的整体设计达到了预期目标,符合规程规范要求,成本低廉,具有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 金志军,张哲,赵磊,等. 工业铂电阻温度计使用 ITS-90 温标分度方法的可行性分析[J]. 计量学报,2010,31(6A):222-224.
- [2] 楼导,邵一轶,单纯利,等. 工业热电阻温度计远程校准系统[J]. 仪表技术与传感器,2013(12):52-54.
- [3] 王冰,唐胜武,刘慧. 基于 LabVIEW 的铂电阻器自动测试系统[J]. 传感器与微系统,2012,31(12):124-129.
- [4] 吕阳,刘莉娜,郑良广,等. 高精度铂电阻温度采集系统设计与实现[J]. 传感技术学报,2020,33(5):774-778.
- [5] 宋成君,王洋洋,陈宝成,等. 用于海水温度测量的高精度温度传感器设计[J]. 传感器与微系统,2020,39(8):107-109.
- [6] 贾桂华. 热电偶、热电阻自动检定系统中的设计与实现[J]. 宇航计测技术,2007,27(4):30-34.
- [7] 韩志鑫,冯锦,赵茜. 工业铂热电阻检定方法研究综述[J]. 中国测试,2019,45(8):25-32.
- [8] 工业铂、铜热电阻:JJG 229—2010[S]. 北京:中国计量出版社,2010.
- [9] 张瑜,张升伟. 基于铂电阻传感器的高精度温度检测系统设计[J]. 传感技术学报,2010,23(3):311-314.
- [10] 廖艳,赵晶,孙建平,等. 国家温度副基准钢凝固点与国家基准的比对评述[J]. 中国测试,2020,46(8):22-27.
- [11] 标准铂电阻温度计:JJG 160—2007[S]. 北京:中国计量出版社,2007.