

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.06.07

一种绕线式高温温度传感器的实现

陈丽艳

(太原航空仪表有限公司 山西 太原 030400)

摘要: 一般的线绕式铂电阻温度传感器都是将铂丝缠绕在陶瓷骨架或塑料骨架上,难以同时满足高温测试和耐振动冲击机械环境的要求。本文试制了一种耐高温,绝缘性好,测温精度高,可靠性强,分度号满足BA2(22A)型铂电阻的特殊的双通道温度传感器。它的骨架采用不锈钢为基体材料,经过耐高温绝缘材料进行处理后,将直径为0.04mm的高纯度铂丝采用四线并绕的方式绕制于骨架上。铂丝几乎紧贴在不锈钢骨架表面,与一般轴向热电阻相比,更能正确和迅速地反映被测介质的实际温度。它可以同时输出两组相同的电阻信号供使用,具有响应速度快、双裕度等特点。

关键词: 温度传感器;双裕度绕线式铂电阻;四线并绕;四线制测试

中图分类号: TB94

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)06-0028-04

Realization of a Wire-wound High Temperature Sensor

CHEN Liyan

(AVIC Taiyuan Aero-Instruments Co., Taiyuan 030400, China)

Abstract: A common wire-wound platinum resistance temperature sensor wraps platinum wires around the ceramic or plastic skeleton and cannot meet the requirements of high temperature test and vibration resistance. In this paper, a special platinum resistance dual-channel temperature sensor with high temperature resistance, good insulation, high temperature measurement accuracy and high reliability has been trial-produced and its scale mark can satisfy BA2. It adopts stainless steel skeleton as matrix material, and high temperature resistant insulating material is wrapped on the skeleton. After that, four high-purity platinum wires with the diameter of 0.04 mm are bound on the skeleton in a parallel way. The platinum wires almost cling to the surface of the stainless steel skeleton, which can reflect the actual temperature of the measured medium more accurately and rapidly than the general axial thermal resistor. The sensor can output two groups of the same resistance signal for use at the same time with agile response and dual redundant.

Key words: temperature sensor; dual-redundant wire-wound platinum resistance; four-wire winding; four-wire test

0 引言

金属铂电阻温度系数大,感应灵敏,电阻率高;电阻值与温度基本呈线性关系;在测温范围内,物理化学性能稳定,长期复现性好,测量精度高。但铂在高温下易受还原性介质的污染,使铂丝变脆并改变电阻与温度之间的线性关系,因此使用时应装在保护套管中。

本文阐述一种线绕式双裕度铂电阻温度传感器的制造工艺。与普通铂热电阻相比,具有采用四线并绕的无感绕线方式达到双裕度输出,分度系数满足BA2(22A)型铂电阻要求,绝缘性能好,同时这些特点也大

大增加了其研制和工艺制作的难度。

1 工作原理及特点分析

1.1 工作原理

温度传感器感受介质温度,当被测介质的温度发生变化时,传感器快速感应介质温度的变化并将其转化为电阻阻值的变化输出。铂热电阻型元件的电阻-温度特性公式如式(1)所示:

$$R_t = R_0 \left(1 + \alpha \left(T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right)^3 \right) \quad (1)$$

式中: R_0 为 0℃ 时的电阻值, Ω ; R_t 为 t ℃ 时的电阻值, Ω ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; α 为温度系数; δ 为水沸点系数; β 为氧沸点系数。其中, δ 、 β 为常数; α 取决于电阻体中铂的纯度。

收稿日期: 2017-09-28

作者简介: 陈丽艳(1984-),女,工程师,主要从事传感器方面研究工作。

1.2 特点

该温度传感器工作可靠、环境适应性强，重复性好。且具有以下特点：

- 1) 采用不锈钢作为骨架，具有响应快速、抗振能力强等优点。
- 2) 采用双裕度设计：两支传感器同时测温。
- 3) 测温范围宽：-60~300℃内均能正常工作。
- 4) 精度高：温度 t 在测量温度范围内任一点时，电阻对应成温度值，再与温度 t 比较，其差值不大于公式(2)计算的允许误差值。

$$\Delta t = \pm(0.5 + 5 \times 10^{-3} t) ^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中： Δt 为温度误差，℃； t 为环境温度真值的绝对值，℃。

2 工艺设计研究

2.1 工艺设计方案

2.1.1 骨架选取

骨架采用 0.3 mm 厚的薄壁不锈钢管，能有效加快传感器的响应速度，材料选用航空耐热不锈钢材料 0Cr18Ni9。该钢是奥氏体不锈钢，具有良好的加工成形性能、抗氧化性能和很强的耐腐蚀性能、抗振性能且导热性好^[1]。最重要是该钢在固溶状态下无磁性。这样在绕制铂丝之后不会形成磁芯，避免产生电感。

2.1.2 工艺设计

经计算分析，分度系数满足 BA2(22A)型铂电阻的电阻比需满足 R_{100}/R_0 为 1.391。铂丝直径选为 0.04 mm，绕制时相邻两根铂丝之间有一定的间隙，中心距约为 0.15 mm，绕线机导程设置为 0.6 mm/圈。结构示意图见图 1。

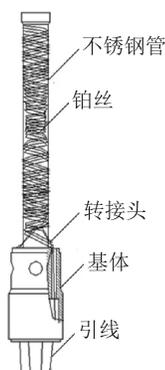


图 1 电阻体结构示意图

其详细制作流程如下：骨架绝缘-铂丝缠绕-初步固定铂丝-铂电阻调零-转接引线-固定转接部位。具体步骤为：

1) 骨架绝缘处理

将不锈钢管表面用膨胀系数较小的高温绝缘漆进行处理。

涂覆层需满足以下条件：

- a. 涂覆层在经受 -60℃ ~ 300℃ 的高低温条件时能保证传感器正常工作；
- b. 涂覆层满足耐绝缘强度和抗电强度要求；
- c. 涂覆层膨胀系数要求尽量小，并且在使用温度范围内需与不锈钢骨架的膨胀系数相近。这样一是为了避免在绕制铂丝后经受高低温环境试验而造成铂丝断裂，二是防止涂覆层在高低温交变时由于热胀冷缩而脱落。

2) 绕丝

电阻丝各种不同的绕线方式示意图如图 2~4 所示。本试验采用两组四线并绕，并且各线之间相互绝缘（两组双线四根丝之间不能相互接触）的方式。这种绕线设计方式可以有效避免传感器在通电测试时产生电感。因为双线缠绕时，每相邻的两条线的电磁感应方向是相反的，相互抵消，所有相邻的双线都互相抵消。所以双线缠绕的线圈不会产生电感。

设计时将两组铂丝对折后，同时均匀地间绕在骨架上。因为铂丝直径很细易断，通过手工缠绕的难度很大。只能通过绕线机进行绕制，一般的绕线机仅能实现单线单绕，如电位计绕线，而实现单线双绕的难度很大，实现四线并绕难度更大。通过屡次试验，绕制后的电阻体如图 5 所示。在显微镜下，测量了试验件的任意两组绕组。测量结果见图 6。

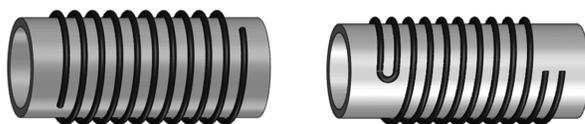


图 2 单线单绕

图 3 单线双绕

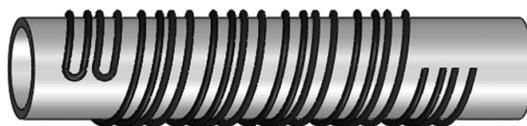


图 4 四线并绕

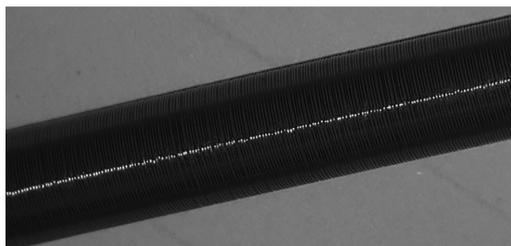
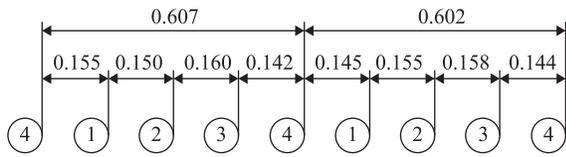


图 5 四线并绕图片



注：1，2，3，4为四根电阻丝的编号。

图6 测量结果图

从测量结果可以得出：试验件实现了“四线并绕”的绕制方式，完全能够满足测温组件的绕制要求。

3) 电阻调零

由一定材料制成的横截面均匀的导体，如果长度为 L ，横截面积为 S ，则这段导体的电阻为：

$$R = \rho L / S \quad (3)$$

式中： ρ 为物质的电阻率， $\Omega \cdot m$ ，铂在 $20^\circ C$ 时的电阻率为 $1.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m^{[2]}$ ； L 为长度， m ； S 为导体截面积， m^2 。

此设计要求在 $0^\circ C$ 时的电阻为 100Ω ，根据精度要求计算出输出电阻范围为 $99.8 \sim 100.2\Omega$ ，已知铂丝的直径为 $0.04mm$ ，根据公式(3)计算出所需铂丝的长度范围。截取相应长度的铂丝，并预留一段(约 $12mm$)以备调整阻值时使用。然后将铂丝绕制于骨架上放入冰点槽中进行微调，直至测试的电阻满足产品要求。

铂丝直径为 $\phi 0.04 mm$ ，长约 $1276 mm$ ，为满足测温精度的要求，铂丝长度需控制在 $\pm 1.2 mm$ 内。因铂丝直径细且易断，铂丝的转接主要靠手工焊接操作，稍有疏忽就容易折断铂丝或导致焊接位置不满足要求。

4) 引线

电阻丝引线连接：将过渡紫铜片一端弯折后夹紧铂丝并进行点焊，另一端与高温导线进行银焊处理后引出，最后在转接处用耐高温的尼龙线缠绕固定保护。铂丝与高温导线的转接采用高温熔焊的方式。由于铂丝直径太细，非常容易折断，常规引线连接软钎焊无法满足高温要求，而高温钎焊容易使电阻丝熔断，因此引线工艺技术非常关键，决定最终产品可靠性。

3 测试验证

3.1 测试系统的组成

热电阻测温系统一般由热电阻、连接导线和显示仪表等组成。测试系统主要包括以下几个部分：

恒温容器部分：包含精度为 $0.01^\circ C$ 的不同温度的可控恒温槽及二等标准温度计。水沸点槽插孔之间的最大温差不得大于 $0.01^\circ C$ ，油恒温槽工作区域内的垂直温差不得大于 $0.02^\circ C$ ；水平温差不得大于 $0.01^\circ C$ 。

信号检测部分：Hp34401A 数字三用表。

检定时，通过热电阻的电流应不大于 $1mA$ 。

3.2 测试方法

为了使测试数据精准，采用四线制方式进行测试，这样能有效消除测试引线的内阻带来的误差影响。测试步骤如下：

1) 在产品的每个接线柱末端接出二根导线，然后按四线制进行接线测量。按图7所示连接产品与各测量工具。

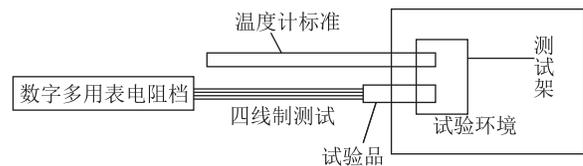


图7 性能检测连接图

2) $t^\circ C$ 电阻值 $R(t^\circ C)$ 的测量

将标准温度计和被检产品插入恒温槽的均温区内，按表1中规定的测试温度和对应的测试设备进行试验。待温度计显示稳定后(1 min 内温度变化不得大于 $0.1^\circ C$)，观察产品输出电阻，待输出电阻稳定(1 min 内电阻变化不得大于 0.01Ω)后记录温度计显示温度值，并按下列顺序记录产品输出的电阻值。

被检 1 → 被检 2

↓
换向

被检 1 ← 被检 2

如此完成一个读数循环，被测产品每次测量不得少于三个循环，取其平均值进行计算。

测试系统见图7。



图8 测试系统

3.3 精度测试

根据要求，测试时的输出信号应满足以下条件。检定温度点为 $300^\circ C$ 、 $185^\circ C$ 、 $100^\circ C$ 、 $-55^\circ C$ 、 $0^\circ C$ 、 $25^\circ C$ 时，每个温度点检定结果应符合表1中允许范围的要求。

表 1 测量精度

测试温度/℃	输出电阻/Ω	
	标准值	允许范围
300	213.79	213.07~214.51
185	171.42	170.88~171.95
100	139.10	138.72~139.49
-55	77.99	77.67~78.3
0	100	99.8~100.2
25	109.88	109.61~110.12

对一个试验批次的 6 只产品进行性能检测，测试数据见表 2。

表 2 不同温度下的输出电阻测试数据 Ω

编号	300℃	185℃	100℃	-55℃	0℃	25℃	
001	1 通道	213.792	171.641	139.176	78.279	100.128	110.043
	2 通道	213.762	171.560	139.119	78.249	100.086	109.997
002	1 通道	213.900	171.399	139.025	78.219	100.050	109.959
	2 通道	213.870	171.534	139.135	78.277	100.123	110.042
003	1 通道	213.702	171.517	139.011	78.143	99.945	109.842
	2 通道	214.141	171.606	139.080	78.160	99.976	109.887
004	1 通道	214.345	171.611	139.069	78.137	99.926	109.835
	2 通道	214.229	171.686	139.127	78.158	99.957	109.872
005	1 通道	213.812	171.828	139.178	78.170	99.979	109.893
	2 通道	213.902	171.750	139.141	78.165	99.964	109.870
006	1 通道	214.050	171.794	139.23	78.229	100.064	109.986
	2 通道	214.063	171.796	139.226	78.233	100.067	109.986

通过以上数据可以看出，本批次的 6 只产品，均满足精度指标要求。而且通过计算可以得出，在高温、常温、低温条件下，试验品的输出电阻基本呈线性关系；且两个通道在不同温度下的输出基本一致。具体情况如图 8 所示。

分析以上数据得知，铂热电阻的电阻-温度关系如下：

对于-70~0℃的温度范围

$$R(t) = R(0^\circ\text{C}) \cdot [1 + At + Bt^2 + C(t - 100^\circ\text{C})t^3] \quad (3)$$

对于 0~300℃的温度范围

$$R(t) = R(0^\circ\text{C}) (1 + At + Bt^2) \quad (4)$$

式中： $R(t)$ 为温度为 t 时铂热电阻的电阻值，Ω； t 为温度，℃； $R(0^\circ\text{C})$ 为在温度为 0℃时铂热电阻的电阻值，

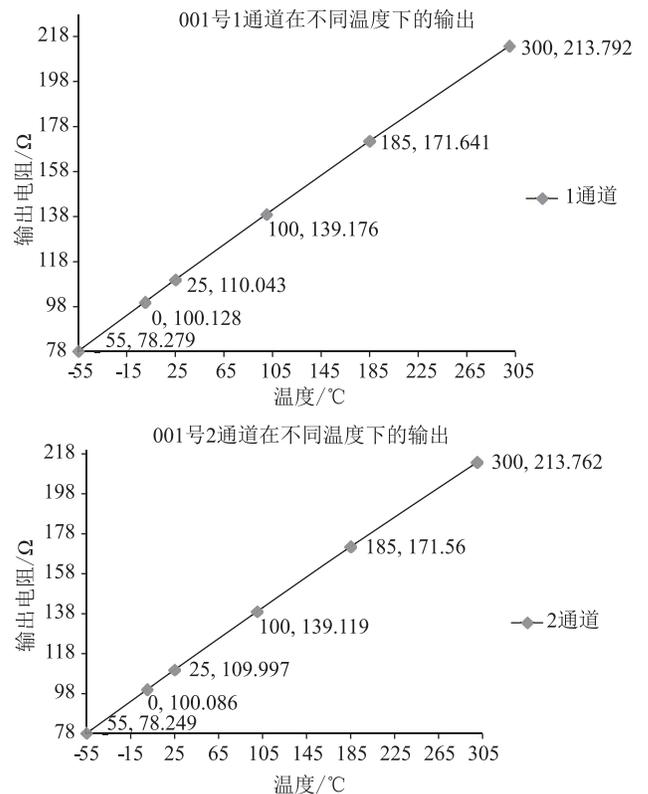


图 9 001 号在不同温度下的输出信号对比

Ω； A, B, C 为常数，其值分别为 $3.96847 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ， $-5.847 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ ， $-4.22 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$ [3]。

3.4 测试结论

通过常温、高温以及低温的性能测试，能够满足预设的温度传感器输出信号的要求；且产品性能稳定，已达到了较高精度的水平。

4 结论

通过前文设计及试验验证，该温度传感器能达到 0.5℃的精度技术指标要求，且稳定性高，抗振性能好，可以广泛应用于航空、工业上油液、空气等各类介质中，进行准确实时的测温。在此过程中，先后遇到了不少技术、工艺上的问题，但经过反复的验证试验，现已经得到解决。

参考文献

- [1] 罗培令, 李凤霄. 中国航空材料手册. 第 2 版, 第 1 卷, 结构钢不锈钢[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 554.
- [2] 谌立新, 杨梅, 卢邦洪. GB/T 5977-1999 中华人民共和国国家标准电阻温度计用铂丝[S]. 1999: 206.
- [3] 单成祥. 传感器的理论与设计基础及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 391.