

摘要：应变天平弹性体材料与电阻应变计材料的温度系数不同，导致天平惠斯通电桥天平零点温度输出。针对天平温度零点输出，从补偿材料和补偿方式两个方面开展补偿修正研究，采用圆铜漆包线、镍材（镍丝和补偿电阻应变片）、镍铬丝等材料展开大量补偿试验，结果表明试验达到预期目标 $0.05\mu\text{V}/\text{V}/^\circ\text{C}$ ，该研究适用于惠斯通桥路补偿。

关键词：应变天平；零点温度漂移；补偿材料；补偿方法

中图分类号：TP212.6 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2016)07-0014-04

收稿日期：2016-06-03

应变天平零点温度漂移补偿研究

李纯 李琦 姚程炜 于常安

中国空气动力研究与发展中心，四川绵阳 621000

一、引言

风洞天平是风洞测力试验最基础、最重要的测量设备，风洞天平技术发展一直被世界各国空气动力学研究机构所重视^[1]。当前，中国空气动力研究与发展中心肩负着以大型军/民用运输机为代表的重点型号研制需求的巨大挑战。发展风洞天平研制技术，能有效提升武器研制效率、质量和降低研制风险，提升风洞测力试验能力和水平已成为基地抢抓机遇，迎接挑战的必然选择。

风洞天平测力元件由弹性梁与电阻应变片构成，弹性梁在感受被测量时将产生变形，其表面产生应变。粘贴在弹性梁表面的电阻应变片将发生形变，电阻应变片上的电阻值也随之变化，电阻的变化与弹性梁的变形保持一定的线性关系，进而通过相应的二次仪表系统即可测得弹性梁的变形，即为天平输出信号^[2-3]。由于天平材料和电阻应变计的敏感栅材料温度系数、线胀系数不同，组桥引线长度不一致等综合因素，导致天平组成电桥后相邻臂总体温度系数有一定差异，实验过程中，当温度变化时，相邻桥臂电阻变化量不同，从而使电桥产生不平衡，即产生了零点温度漂移，影响天平输出精度。因此，需要对天平进行零点温度补偿，尤其是在温度环境变化较大的风洞试验中，对天平零

点温度补偿要求更高^[4-6]。

二、天平零点温度补偿研究内容与目标

通过高精度常规应变天平温度效应试验，包括天平温度试验设备研制、天平零点输出温度补偿技术研究等内容，将天平温度效应修正水平提高到 $0.05\mu\text{V}/\text{V}/^\circ\text{C}$ 内，从而有利推动我国风洞应变天平测量不确定度的提高。结合天平设计、应变计粘贴、天平校准的共同改进，实现风洞常规应变天平整体不确定度水平控制在 0.1% 以内，达到或接近国际先进水平。

三、零点温度补偿试验设备

1、高低温试验箱

高低温试验箱主要用于天平温度灵敏度硬件补偿试验和天平综合温度补偿试验以及天平性能测试。具备温度控制能力和五个分量砝码加载能力，可实现六分量综合加载。设备主要技术参数：工作温度范围 $-50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ ；温度波动度 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ；温度梯度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ；砝码加载能力 2000N。

2、高精度多通道数据采集设备

主要用于天平信号采集以及多点温度测量及数据分析处理，具备信号调理、数据采集、数据传输、软

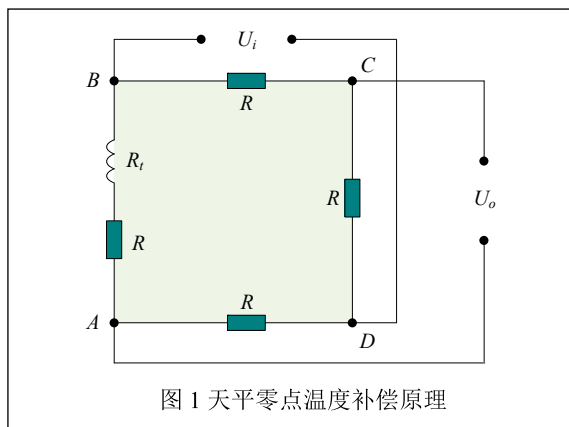


图1 天平零点温度补偿原理

件分析与处理及显示等功能。信号采集包括 8 通道高精度天平信号采集，采集精度 0.01%；16 点温度信号采集，分辨率 0.05℃。

四、天平零点温度效应及硬件补偿研究

应变天平在空载状态下，当接入供桥电压后，天平每一个通道有一定的毫伏信号输出，即为天平输出零点输出信号。零点输出受环境温度影响随环境温度变化而变化，这就是应变天平的零点温度漂移。引起零点温度漂移的主要是应变天平与电阻应变计的敏感栅材料温度系数、线膨胀系数、组桥引线长度不同等因素综合作用，导致天平桥路相邻臂总体温度系数有一定差异，当温度变化时，相邻臂电阻变化量不同，从而使惠斯通电桥产生不平衡，即产生了零点温度漂移^[7]。

1、天平零点温度漂移补偿^[8-9]

与测力传感器一样，应变天平零点温度漂移补偿通常是在采用温度自补偿应变计的基础上，采用在桥路中串联电阻的方法进行硬件温度补偿。

在理论计算的基础上，通过试验方法不断调整补偿电阻阻值，降低零点温漂，减小温度对零点输出的影响。补偿电阻通常采用温度系数较大的镍丝、细铜丝等绕制，也可以选用特定阻值的镍材质箔式应变计进行补偿。补偿原理如图 1 所示。

惠斯通全桥电路，零点温度漂移补偿电阻计算公式为：

$$R_t = \frac{4 \cdot \Delta U \cdot R}{1000 \cdot U_o \cdot (\partial_m - \partial_g) \cdot \Delta t} \quad (1)$$

式中： ΔU —信号输出，mV；

R —桥臂电阻， Ω ；

U_o —供桥电压，V；

Δt —温度变化， $^{\circ}\text{C}$ ；

R_t —补偿电阻， Ω ；

∂_m —补偿丝电阻温度系数， $1/^{\circ}\text{C}$ ；

∂_g —应变计电阻温度系数， $1/^{\circ}\text{C}$ 。

2、天平零点温度漂移补偿试验^[10-11]

试验中主要选用了 $\phi 0.06\text{mm}$ 圆铜漆包线、 $\phi 0.1\text{mm}$ 镍丝、 $\phi 0.1\text{mm}$ 镍铬丝、镍箔补偿电阻应变计完成零点温度漂移补偿实验。

补偿过程中，针对常用的常温应变计和中温应变计补偿进行研究，常温应变计温度补偿温度为 $-10^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ ，按照 20°C 一个梯度的温度变化；中温应变计补偿温度为 $-30^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ ，按照 30°C 一个梯度的温度变化。补偿计算为两点补偿法，采用圆铜漆包线和镍丝完成常温应变计补偿研究，镍铬丝和镍箔补偿电阻应变计完成中温应变计补偿研究。见表 1、表 2 列出温度补偿前后温度效应，图 2、图 3 为补偿前后实验数据变化曲线。

表 1 补偿前天平零点温度效应 单位：V/V/℃

通道	漆包线	镍丝	镍铬丝	应变计
1	0.240	0.510	0.097	0.116
2	0.168	0.705	0.033	0.019
3	0.438	0.475	0.715	0.144
4	0.008	0.393	0.031	-
5	0.195	0.190	0.208	-
6	0.083	0.075	0.052	-
7	0.048	-	-	-
8	0.650	-	-	-

表 2 补偿后天平零点温度效应 单位：V/V/℃

通道	漆包线	镍丝	镍铬丝	应变计
1	0.048	0.053	0.016	0.041
2	0.048	0.048	0.016	0.016
3	0.040	0.040	0.047	0.012
4	0.018	0.020	0.033	-
5	0.043	0.038	0.039	-
6	0.045	0.035	0.016	-
7	0.015	-	-	-
8	0.053	-	-	-

3、补偿电阻接入方式研究

图 1 给出惠斯通桥路零点补偿原理图中，通常情况下，补偿电阻 R_t 接入桥臂 AB 之间和接入对臂 CD 之间对电桥输出产生的影响是一样的，试验中采用补偿电阻互换桥臂和分桥臂补偿，验证其补偿效果。

实验对象选用性能较为稳定的单分量传感器。使用同一批次的细铜丝，并且相同的长度组成惠斯通电桥，测量其温度输出信号（见表 3 初始输出）。将初始试验测量得到 ΔU 代入公式（1）计算出补偿电阻丝 R_t 长度 L 。验证补偿丝 L 引入桥臂 AB 和 CD 的输出，并验证补偿丝 $L/2$ 对称补偿至 AB 和 CD 之间的输出。测试数据见表 3。

表 3 传感器补偿测试数据 单位：mV

温度 (°C)	-30	120
初始输出	0.125	0.361
补偿桥臂 AB	-0.359	-0.356
补偿桥臂 CD	-0.358	-0.354
对称补偿	-0.359	-0.355

通过试验验证，在保证补偿电阻阻值的前提下，补偿丝接入桥臂 AB 与对桥臂 CD，还是均分接入对桥臂，对结果没有影响，引起的温度效应基本相同。但温度对补偿丝的直接作用，补偿丝的长度决定了温度带来的影响，图 4 所示，紫色代表单桥臂补偿曲线，蓝色代表对称补偿曲线。从曲线可以看出，单桥臂补偿数据波动较对称补偿数据波动大，实际补偿过程中，采取对称补偿的方式效果更好。

五、结论

通过一系列的实验结果表明，天平零点温度漂移补偿，采用上述四种方法均能达到补偿目标，各有优缺点：

1、镍丝和镍铬丝焊接难度大，在空间狭小的应力梁上，操作更加不方便，使用镍丝或镍铬丝补偿，更容易出现虚焊或者焊接不牢，影响天平正常工作。

2、使用应变计补偿，最大的优点在于应变片能与天平体通过粘贴方式紧密结合，温度随天平体变化而

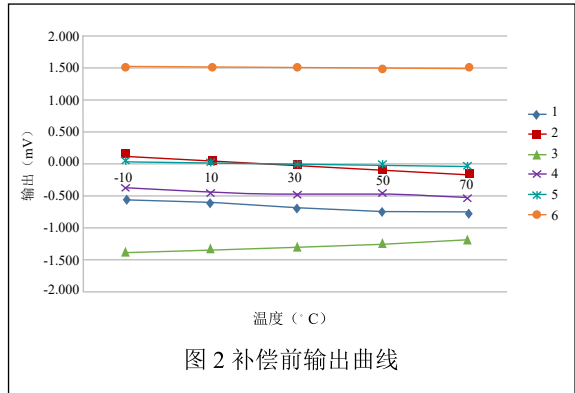


图 2 补偿前输出曲线

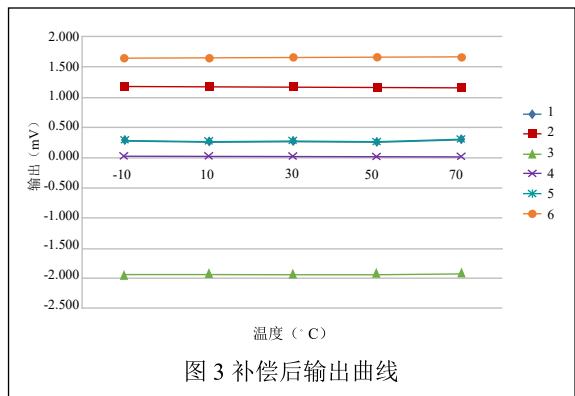


图 3 补偿后输出曲线

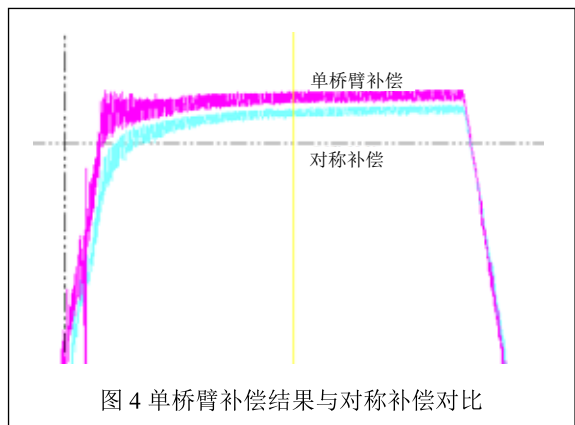


图 4 单桥臂补偿结果与对称补偿对比

变化，能够达到很好的补偿效果。在实际补偿过程中，由于补偿公式所取的是近似值，一次补偿基本不能达到最终目的，应变计需要进行电阻调节，甚至重贴。应变计补偿可适用于大型号天平。

3、圆铜漆包线方便焊接和裁剪，通过胶黏剂将补偿丝贴合在天平体表面，天平体温度的变化和补偿丝温度变化基本保持一致，通常情况下选用圆铜丝补偿天平灵敏度漂移即可。

参考文献

- [1] 贺德馨. 风洞天平 [M]. 北京: 国防工业出版社. 2001.
- [2] 施涌潮, 梁福平, 牛春晖. 传感器检测技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [3] Ulbrich U. Combined load diagram for a wind tunnel strain-gage balance[R]. AIAA2010-4203.
- [4] Bergmann R. An experimental comparison of different load tables for balance calibration [R]. AIAA2010-4544.
- [5] 李绪国等. 小尺寸应变天平设计方法研究 [J]. 实验流体力学, 2013, 27 (4):78-82.
- [6] 王玉花, 孙良, 郑粤蓉. 高超声速风洞大轴向力中温天平的研制 [J]. 实验流体力学, 2006, 20 (1):86-90.
- [7] 徐景波. 应变式负荷传感器补偿方法研究 [J]. 传感器技术. 2005, 24(5):13-15
- [8] Tao-Yi et al. Precision balance method for cupped wave gyro based on cup-bottom trimming. Chinese journal of mechanical engineering[J]. 2012,(1):63-70
- [9] 刘正卿. 称重传感器电路补偿机理及补偿电阻计算 [J]. 衡器. 2014, 43(1):23-29.
- [10] 王彬, 杨鹏, 邵震. 传感器零点温度补偿方法的分析与探讨 [J]. 衡器, 2002, 31(1):18-20.
- [11] 张志通. 电阻应变传感器的补偿技术 [J]. 北华航天工业学院学报, 2009, 19(1):21-24.

Study of temperature drift compensation in strain gauge balance

LI Chun, LI Qi, YAO Cheng-wei, YU Chang-an

(China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The difference between the material temperature coefficient of elastic beam and that of resistance strain gauge should lead to the zero drift of Wheatstone bridge of the strain gauge balance. Aiming at the zero temperature output of the balance, the research on the compensation is carried out from two perspectives of compensation material and compensation method. A lot of experiments are completed with many materials, such as round-copper enameled wire, Ni (nickel wire and compensation resistance strain gauge), Ni-Cr wire and so on. Test results achieve the desired goal. The study can be used in some compensation for Wheatstone bridge of strain.

Keywords: strain gauge balance; zero temperature drift; compensation material; compensation method

作者简介

李纯, 中国空气动力研究与发展中心, 工程师, 研究方向为传感器及电子线路。

邮寄地址: 四川省绵阳市二环路南段6号14号信箱406分箱

邮编: 621000

邮箱: lc11139@126.com

李琦, 中国空气动力研究与发展中心, 工程师, 研究方向为测控技术。

姚程炜, 中国空气动力研究与发展中心, 工程师, 研究方向为传感器技术。

于常安, 中国空气动力研究与发展中心, 工程师, 研究方向为结构设计。