

# 1/4 桥应变测量系统在温度影响下的误差分析

雷音 张伟

(中国特种飞行器研究所 荆门 448035)

**摘要:** 温度变化对应变测量的误差有很大的影响,特别是大规模应变测量广泛采用的 1/4 桥,因无法进行桥路温度补偿,受温度变化的影响更加显著。如果对每个通道使用半桥温度补偿,则操作复杂,成本高,效率低,所以有必要分析温度变化对 1/4 桥路测量误差的影响。通过分析应变测量时普通应变片和温度自补偿应变片的热输出原理,以及导线和应变采集器受温度的影响,最终给出在多通道采集系统上使用 BE 系列普通应变片和温度自补偿应变片时,整个采集系统在温度影响下的测量误差,解决了在结构强度试验中温度变化引起的测量系统误差评定问题,并给出不同温度变化范围内满足 1% 测量误差所需测量应变的理论计算最小值。

**关键词:** 1/4 桥; 误差分析; 应变片; 多通道应变采集器

**中图分类号:** TN609    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 460.4099

## Error analysis of strain measurement system using quarter bridge under the influence of temperature

Lei Yin Zhang Wei

(China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

**Abstract:** The temperature change has a great influence on the error of the strain measurement. Especially, the quarter bridge is widely used for large scale strain measurement, because the bridge temperature compensation can not be carried out, and the influence of temperature change is more significant. If the use of half-bridge temperature compensation for each channel, the operation is complex, high cost, low efficiency, it is necessary to analyze the error of quarter bridge when temperature changes. In this paper, by analyzing the heat output principle of ordinary strain gauges and temperature self-compensating strain gauges for strain measurement, the influence of wires and strain gauges on temperature, then given the error of the whole measurement system under the influence of temperature when using the application of BE series ordinary strain gauges and temperature self-compensation on multi-channel acquisition system. The research solves the problem of error assessment of measurement system caused by temperature change in structural strength test, and determines the minimum value of the measured strain required to meet the 1% measurement error in different temperature range.

**Keywords:** quarter bridge; error analysis; strain gauge; multi-channel acquisition system

## 0 引言

在飞机全机静力试验和疲劳试验中,测量给定载荷下结构表面应变最普遍的方式是使用电阻式应变片<sup>[1-2]</sup>,例如中航工业通用飞机有限公司设计生产的 AG300 飞机在全机静力试验中使用了约 400 个应变片。对这些应变片测试数据进行采集的是多通道应变同步采集器,与传统的扫描式应变测量仪相比,其在进行大规模应变测量时具有通道数多、通道间同步性好、采样频率高等显著优点。

在应变测量中,测量结果收到多种因素的影响,如应变

片的横向效应<sup>[3]</sup>、振动的影响<sup>[4]</sup>、栅丝结构的影响<sup>[5-6]</sup>、温度的影响<sup>[7]</sup>等。其中温度对于测量结果的影响又分为瞬态高温对应变片的影响<sup>[8-9]</sup>、环境温度对应变片漂移的影响<sup>[10]</sup>、高温下栅丝蠕变的影响<sup>[11]</sup>,环境温度对采集设备的影响等。在飞机结构强度试验中使用最广泛的 1/4 桥无法对温度进行桥路补偿,即无法使用粘贴温度补偿片的方式进行补偿,因此,确定环境温度变化对 1/4 桥测量结果误差的影响具有实际的应用价值。本文分别对 BE 系列普通应变片和温度自补偿应变片组成的 1/4 桥应变测试系统的测量误差进行了分析,解决了在结构强度试验中温度变化引起的

测量系统误差评定问题,给出了这两种应变片在满足1%测量误差时所需测量应变的最小值。

## 1 应变测量系统介绍

通常电阻式应变测试仪都是交流供桥载波式,其结构原理如图1所示。应变仪由载波振荡器提供电桥交流电源,主要包括测量电桥、稳压电源、载波振荡器、载波放大器、相敏检波器、低通滤波器和A/D转换器等。其中测量电桥除了基本的应变桥路外,还包括电阻电容组成的平衡调整电路。

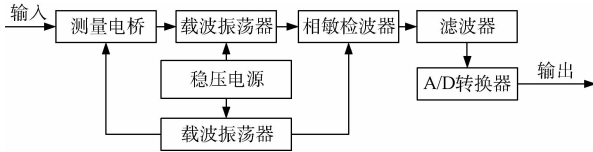


图1 电阻应变仪结构原理

1/4桥测量桥路如图2所示,其中两个桥臂电阻 $R_0$ 是仪器内部阻值为10 k $\Omega$ 的固定电阻,另外一个电阻 $R$ 是根据桥路类型(半桥还是1/4桥)编程可选的,其值有120、350、1 000  $\Omega$ 的及用户自定义几种可选情况,以与试验中所使用的应变片阻值匹配,达到桥路平衡的目的。

由于1/4桥路结构在实际使用中总会出现测量应变片和其他桥臂电阻处于不同温度场中的情况,因此,温度对桥路平衡的影响将变得尤为突出,有必要对这种影响进行深入探讨。此外,还包括连接导线的热影响、应变采集器受环境温度变化的影响等。

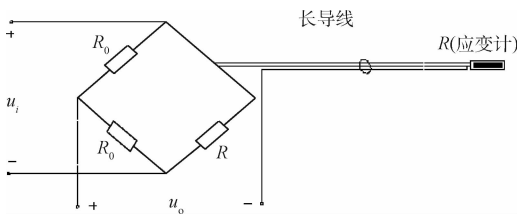


图2 三线制1/4桥接法

## 2 应变片测量系统受温度影响分析

### 2.1 应变片的热输出分析

应变片的输出,不仅与试件(以下简称试件)的应变 $\epsilon$ 有关,而且还与试件所受的温度变化 $T$ 有关。温度变化对应变片的所有性能都有显著的影响,其中最重要的是应变片因温度变化引起的虚假输出,通常称为虚假输出,即热输出<sup>[12-13]</sup>。应变片热输出的大小直接影响电阻式应变片的测量精度。

$$\epsilon_T = [\alpha_R/K + (\alpha_s - \alpha_g)]\Delta T_s \quad (1)$$

式中: $R$ 为应变片电阻, $\epsilon$ 为应变片的应变, $K$ 为应变片的灵敏度系数, $T_s$ 为试件的温度。 $\epsilon_T$ 就是应变片的热输出,

式(1)是应变片热输出的基本表达式。

根据式(1),可以利用应变片的自身特性设计出一种温度自补偿应变片<sup>[14]</sup>,即 $\epsilon_T = 0$ ,则式(1)可以写为:

$$\epsilon_T = [\alpha_R/K + (\alpha_s - \alpha_g)]\Delta T_s = 0 \quad (2)$$

式(2)可改写为:

$$[\alpha_R/K + (\alpha_s - \alpha_g)]\Delta T_s = 0$$

于是有:

$$\alpha_R = K(\alpha_g - \alpha_s) \quad (3)$$

中航电测生产的几种自补偿应变片类型如表1所示,其代码和要求在国标《电阻应变计》GB/T13992-92中都作了明确的规定。

表1 不同材料的线膨胀系数

自补偿代码	材料名称	线膨胀系数/( $m \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )
8	钛合金	$8 \times 10^{-6}$
11	普通钢	$11 \times 10^{-6}$
16	不锈钢、铜合金	$16 \times 10^{-6}$
23	铝合金	$23 \times 10^{-6}$
26	镁合金	$26 \times 10^{-6}$

### 2.2 长导线的影响

对电桥热输出影响的探讨,其前提条件必须是桥路平衡,即 $R_1R_3 = R_2R_4$ (其中 $R_1 = R_2 = R, R_3 = R_4 = R_0$ ),然而,实际使用中应变片都是通过长导线接入测量仪器的,如果不采用三线制接法,长导线的使用势必会对桥路平衡产生影响,如图3的等效电路所示,其中 $r$ 为一根长导线的电阻,此电阻的引入破坏了电桥平衡。为了尽可能消除长导线的影响,实际使用中采用如图2所示带导线补偿的三线制接法<sup>[15]</sup>,其等效电路如图4所示。很明显,三线制接法较理论电桥电路做了如下更改。

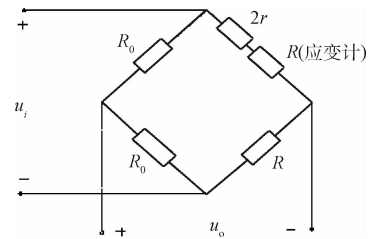


图3 两线制接法等效电路

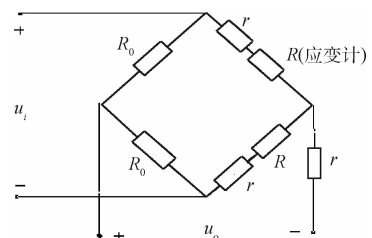


图4 三线制接法等效电路

1)桥路输出端口引入了导线电阻  $r$ 。

2)桥路的第 1,2 桥臂(从应变片开始顺时针编号)的总电阻都包含了等长度导线的电阻  $r$ ,此时,桥路在不受外力的情况下仍然能保持平衡。

对于更改 1),考虑到桥路的输出端将会被接至输入电阻极大(理想情况下无穷大)的仪器仪表类差分放大器,所以电桥可以近似看做开路输出,因此其对电桥的影响可以忽略不计。

更改 2)虽然使桥路在不受外力的情况下保持平衡,然而,当外力作用于电桥时,相对于理想电桥还是会有误差产生,具体分析如下。

假设应变片在外力作用下产生的电阻变化为  $\Delta R = \delta \cdot R(\delta \propto \epsilon, \epsilon$  为测量应变),则应变片总电阻为  $R(1 + \delta)$ 。不考虑导线电阻的理想电桥输出为:

$$u_{01} = \frac{\delta \cdot u_i}{2(\delta + 2)} \approx \frac{u_i}{4} \cdot \delta \quad (4)$$

三线制接法中电桥输出为:

$$u_{02} = \frac{R \cdot \delta \cdot u_i}{4R + 4r + 2R \cdot \delta} \approx \frac{u_i}{4(1 + r/R)} \cdot \delta \quad (5)$$

两者之间的误差为:

$$\Delta = \frac{u_{02} - u_{01}}{u_{10}} = -\frac{2r}{2R + 2r + R \cdot \delta} \approx \frac{1}{1 + R/r} \quad (6)$$

使用标称电阻值大的应变片可以减小长导线引入的误差,此外,由于接入长导线的电阻  $r$  比较小,且处于同一个温度场内,温度变化引起的导线电阻变化可以认为是同步的,所以对电桥的平衡没有影响。

### 2.3 应变采集器受环境温度变化的影响

根据计量标定的结果,多通道应变采集器在使用温度范围内某一个给定温度的测量精度通常为  $\pm 0.2\%$ ,除该测量精度造成的误差外,应变采集器中的放大器和补偿器也会受到温度变化的影响,图 5 给出了某型多通道应变采集器的放大器和偏置温漂指标。

QUARTER-BRIDGE STRAIN MEASUREMENTS				
Excitation	Gain	Range <sup>1</sup>	Gain TC <sup>4</sup>	Offset TC <sup>4</sup>
10 V	100	+30927 $\mu\epsilon$ /-29126 $\mu\epsilon$	$\pm 50$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$	$\pm 4$ $\mu\epsilon$ / $^{\circ}\text{C}$
5 V	100	+63829 $\mu\epsilon$ /-56603 $\mu\epsilon$	$\pm 50$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$	$\pm 4$ $\mu\epsilon$ / $^{\circ}\text{C}$

图 5 某型号多通道应变同步采集器的放大器和偏置温漂指标

以 1/4 桥,5 V 激励,100 倍增益,测量微应变  $\epsilon$  为例,放大器温漂为  $50 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,对应的应变输出为  $\epsilon \times \Delta T_s \times 0.005\%$ ;偏置温漂为  $4 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ ,对应的应变输出为  $4 \times \Delta T_s \mu\epsilon$ ;应变采集器测量最大误差为:

$$Accy_{EX} = \frac{\epsilon \times 0.2\% + \epsilon \times \Delta T_s \times 0.005\% + 4 \times \Delta T_s}{\epsilon} \times 100\% \quad (7)$$

## 3 应变片测量系统在温度变化影响下的测量误差计算

### 3.1 应变片的热输出计算

1)BE 系列应变片热输出计算

根据热输出的计算公式,对普通钢线膨胀系数  $11 \times 10^{-6}(\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$ 在 BE 系列应变片和带温度自补偿的应变片的热输出计算如表 2 所示。

表 2 BE 系列应变片 1  $^{\circ}\text{C}$  变化热输出参数及计算

参数名称	参数值/ $(\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$
20~100 $^{\circ}\text{C}$ 电阻温度系数	$20 \times 10^{-6}$
20~100 $^{\circ}\text{C}$ 线膨胀系数	$14.9 \times 10^{-6}$
43Ni,57Cu 敏感系数	2.00
材料线膨胀系数	$11 \times 10^{-6}$
热输出	$6.1 \times 10^{-6}$

2)温度自补偿应变片热输出计算如表 3 所示。

表 3 温度自补偿应变片 1  $^{\circ}\text{C}$  变化热输出参数及计算

参数名称	参数值/ $(\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$
20~100 $^{\circ}\text{C}$ 电阻温度系数	$8.0 \times 10^{-6}$
20~100 $^{\circ}\text{C}$ 线膨胀系数	$14.9 \times 10^{-6}$
43Ni,57Cu 敏感系数	2.00
材料线膨胀系数	$11 \times 10^{-6}$
热输出	$0.1 \times 10^{-6}$

### 3.2 综合误差

应变测量系统 1/4 桥测量的综合误差由两部分组成:应变片热输出  $\epsilon_T$ 、应变采集器自身的测量误差  $Accy_{EX}$ 。由此可知 BE 系列普通应变片随温度变化的综合误差如下:

$$E_{BE} = \epsilon_T + Accy_{EX} = [\alpha_R/k + (\alpha_s - \alpha_g)]\Delta T_s + (e \times 0.2\% + e \times \Delta T_s \times 0.005\% + 4 \times \Delta T_s) = 6.1\Delta T_s + e \times 0.2\% + e \times \Delta T_s \times 0.005\% + 4 \times \Delta T_s = e \times 0.2\% + e \times \Delta T_s \times 0.005\% + 10.1 \times \Delta T_s \quad (8)$$

温度自补偿应变片随温度变化的综合误差如下:

$$E_{I1} = \epsilon_T + Accy_{EX} = [\alpha_R/k + (\alpha_s - \alpha_g)]\Delta T_s + (e \times 0.2\% + e \times \Delta T_s \times 0.005\% + 4 \times \Delta T_s) = 0.1\Delta T_s + (e \times 0.2\% + e \times \Delta T_s \times 0.005\% + 4 \times \Delta T_s) = e \times 0.2\% + e \times \Delta T_s \times 0.005\% + 4.1 \times \Delta T_s \quad (9)$$

根据式(8)和(9)分别绘制 BE 系列应变片和温度自补偿应变片在最大测量应变为 20 000  $\mu\text{strain}$ ,温度变化范围为 20  $^{\circ}\text{C}$  的综合误差限如图 6、7 所示。可以看出 BE 系列应变片的测量误差是温度自补偿应变片测量误差的 2.4 倍。

一般情况下全天温度变化的大约在  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  左右,因此表 4、5 分别给出了两种应变片在  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  温度变化内满足 1%测量精度下所需测量的最小应变值。

表 4 BE 系列应变片不同温度变化范围满足 1% 测量精度所需测量的最小应变值 ( $\mu\text{strain}$ )

温度变化/ $^{\circ}\text{C}$	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 5$
测量应变范围	$\geq$ 量应变范围	$\geq$ 量应变范围	$\geq$ 量应变范围	$\geq$ 量应变范围	$\geq$ 量应变范围

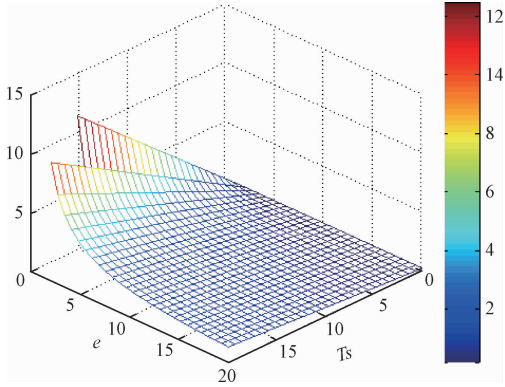


图 6 BE 系列应变片综合误差限

表 5 温度自补偿应变片不同温度变化范围满足 1% 测量精度所需测量的最小应变值 ( $\mu\text{strain}$ )

温度变化/ $^{\circ}\text{C}$	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 5$
测量应变范围	$\geq 516$	$\geq 1\ 038$	$\geq 1\ 567$	$\geq 2\ 103$	$\geq 2\ 645$

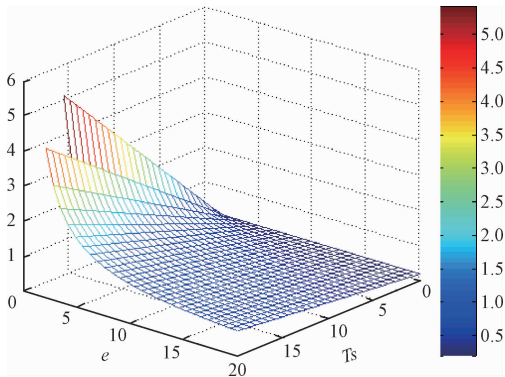


图 7 温度自补偿应变片综合误差限

## 4 结 论

通过本文研究可以解决在结构强度试验中温度变化引起的测量系统误差评定问题,并得出如下结论:

1) 使用 BE 系列应变片在温度变化小于  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  时,测量结果是可以满足 1% 测试精度要求的;

2) 温度变化小于  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  时,使用 BE 系列应变片需要测试应变范围大于  $6\ 500\ \mu\text{strain}$  才能满足测量精度要求,而绝大多数的结构强度试验,测量范围都在  $4\ 000\ \mu\text{strain}$  附近,所以建议使用温度自补偿应变片来进行测试,并且在测试时,要使整个测试系统在通电情况下预热一段时间,使得仪器所处的局部环境趋于稳定;

3) 如果在外场进行测试,建议使用温度自补偿应变片,并尽量将采集仪器放置在环境相对稳定的区域,必要时可以搭建局部小环境来维持局部环境的稳定,以满足 1% 测试误差的要求。

## 参考文献

- [1] 李巧珍,李刚,韩钦泽.电阻应变片的实验与应用[J].实验室研究与探索,2011,30(4):134-137.
- [2] 安刚,王晓鑫,杜振华.应变测量数据在全尺寸飞机结构疲劳试验裂纹检测中的应用[J].强度与环境,2012,39(2):14-19.
- [3] 韩凯,左佳.应变片横向效应对符合材料测量数据影响分析[J].国外电子测量技术,2015,34(3):19-22.
- [4] 李菲,腾召胜,黄强,等.基于梯度变步长 LMS 的电子天平抗震设计[J].仪器仪表学报,2016,37(12):2813-2820.
- [5] 胡挺,王文瑞,尹曰雷,等.高温应变片参数标定系统的设计与实验研究[J].传感技术学报,2015,28(9):1341-1346.
- [6] 胡玉梅,张方建,邵毅敏,等.应变片敏感栅结构参数对测量精度的影响[J].重庆大学学报(自然科学版),2013,36(12):21-27.
- [7] 赵海洋,邱福生.温度对电阻应变片测量精度影响的仿真研究[J].沈阳航空航天大学学报,2015,32(5):32-36.
- [8] 叶迎西.瞬态热载荷下电阻应变片热输出的有限元仿真研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2014.
- [9] 王文瑞,张佳明,聂帅.高温应变接触式测量精度影响因素研究[J].固体火箭技术,2015(3):439-444.
- [10] 黄强,腾召胜,唐亨,等.电子分析天平温度漂移的甲醛融合补偿方法[J].电子测量与仪器学报,2015,29(8):1121-1129.
- [11] 王文瑞,王刚,胡挺,等.高温应变栅丝蠕变对应变测量精度影响与补偿[J].北京科技大学学报,2017,39(1):88-95.
- [12] 刘梓才,喻丹萍,卢琰琰,等.高温应变片热输出测试[J].核动力工程,2011(s1):166-168.
- [13] 不同测试方法下高温应变片热输出分析[C].全国反应堆结构力学会议,2012.
- [14] 尹福炎.电阻应变片的温度自补偿及其它[J].称重知识,2009,38(9):40-53.
- [15] 胡旭,党瑞荣,冯欣宇.飞机结构强度试验中应变变量三线测量法的应用[J].机械工程与自动化,2013(6):112-114.

## 作者简介

雷音,工程师,主要研究方向为通用飞机结构强度试验技术。

E-mail: leiying605@163.com