

文章编号:1672-6413(2013)06-0112-03

飞机结构强度试验中应变测量三线测量法的应用

胡旭, 党瑞荣, 冯欣宇

(西安石油大学, 陕西 西安 710065)

摘要: 全尺寸飞机结构的静力和疲劳试验中, 应变数据作为最主要的试验数据, 其精确度直接影响到飞机结构的应力应变分析以及与理论计算的对比分析。给出了应变测量电桥三线测量法的理论依据, 并通过计算对比分析了二线测量法与三线测量法的精度差异。

关键词: 全尺寸飞机结构; 强度试验; 应变测量; 三线测量法

中图分类号: V216.1: TM938.4 **文献标识码:** A

0 引言

应变测量和数据采集已经大规模应用于飞机结构强度试验及其材料试验, 除基本的静力、疲劳测试外, 还可进行温度、湿度等环境测量。全尺寸飞机结构静力试验是通过对试验件施加应力得到的应变数据来分析飞机结构是否达到设计强度。疲劳试验是通过对应变数据分析, 估算机体出现裂纹的部位及材料产生疲劳的时间等数据, 为飞机使用安全及进场检修提供试验数据参考。

本文针对飞机强度试验中大量使用的电阻式应变计, 论述了三线测量法具有更高精度的理论依据, 并通过实际计算对比说明了此种测量方法的优越性。

1 电阻式应变计的原理

试验件表面应力改变, 贴于其表面的应变计的阻值相应会有微小变化。为测量方便, 需要把应变计的电阻变化通过应变电桥(惠斯登电桥)转换成电压(或电流)信号。如图1所示, 设输入电压恒定, B点和D点间开路, 所以电流 $I_{1,2}$ 、 $I_{3,4}$ 分别为:

$$I_{1,2} = \frac{E}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

$$I_{3,4} = \frac{E}{R_3 + R_4} \quad (2)$$

其中: E 为桥压。

电阻 R_1 、 R_4 上的压降分别为:

$$u_{AB} = \frac{ER_1}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

$$u_{AD} = \frac{ER_4}{R_3 + R_4} \quad (4)$$

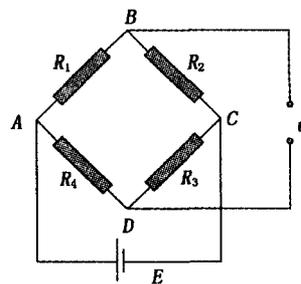


图1 惠斯登电桥

由于 $u_{AB} = u_A - u_B$, $u_B = u_A - u_{AB}$, $u_{AD} = u_A - u_D$, $u_D = u_A - u_{AD}$ 。因此 $u_{DB} = u_D - u_B = (\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4})E$, 可写为:

$$u = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot E \quad (5)$$

电桥处于平衡状态时, $u = 0$, 则 $R_1 R_3 = R_2 R_4$, 所以 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 时电桥平衡。如果电桥各臂阻值分别有变化 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 , 则电桥的输出电压为:

$$u = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \cdot E \quad (6)$$

令 $R_2/R_1 = r$, 略去 $\Delta R/R$ 的二次项, 且将 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 代入式(6), 可得:

$$u = \frac{rE}{(1+r)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \cdot [1 +$$

$$\frac{r}{1+r} \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) + \frac{1}{1+r} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)]^{-1} \dots (7)$$

常用电桥连接方式有3种,如图2所示。图2(a)为1/4桥,桥路中只接一个应变计;图2(b)为半桥,桥路中接两个应变计;图2(c)为全桥,4个桥臂全接应变计。

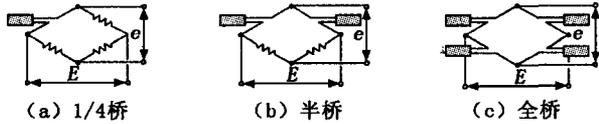


图2 常用电桥连接方式

通常设计时往往取相邻桥臂的电阻相等,即 $R_1 = R_2 = R', R_3 = R_4 = R''$, 而 $R' \neq R''$ 。由于 $r=1$, 则得:

$$u = \frac{E}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right]^{-1} \dots (8)$$

式(8)就是桥压恒定时, u 与桥臂电阻变化率之间的关系。为了使这种关系呈线性, 则令 $C = \left[1 + \frac{2}{\Delta R_1/R_1 + \Delta R_2/R_2 + \Delta R_3/R_3 + \Delta R_4/R_4} \right]^{-1}$, 则 $1-C = \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right]^{-1}$ 。故有:

$$u = \frac{E}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \cdot (1-C) \dots (9)$$

令 $u = u_1 - u_2$, 则 $u_1 = \frac{E}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right]$, $u_2 = Cu_1$ 。

若略去 u_2 , 则引入非线性误差, 此相对误差为:

$$e = \left| \frac{u_1 - u}{u} \right| = \left| \frac{C}{1-C} \right| = \left| \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right| \dots (10)$$

式(10)中阻值变化量可正可负, 考虑到测量应变的正负, 因为在试验件上贴应变计时, 一般会使得电桥相邻桥臂的阻值增量异号, 相对桥臂的阻值增量同号。式(10)中各项抵消, 使 e 很小, u_1 很大。当只有一个桥臂(如 R_1) 接入应变计, 而其他三臂阻值不变, 即 $\Delta R_1 \neq 0, \Delta R_2 = 0, \Delta R_3 = 0, \Delta R_4 = 0$ 时, 得:

$$e = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{1}{2} K \epsilon \dots (11)$$

其中: K 为应变计灵敏系数; ϵ 为应变计测量范围。

常用 120Ω 应变计灵敏系数 $K \approx 2$, 则 $e \approx \epsilon$, 可见略去电桥输出电压中的非线性部分所引起的相对误差值与被测应变值大小相当。

所以在一定范围内计算电桥的输出电压时, 只保

留线性部分是能保证精度的。因此在允许的非线性误差范围内, 得:

$$u = \frac{E}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \dots (12)$$

全桥接入相同的应变计时, 得:

$$u = \frac{1}{4} KE(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \dots (13)$$

综上, 如图2所示, 惠斯登桥常用的3种应变计接法有不一样的电压输出表达式, 具体如下:

(1) 1/4 桥: $u = \frac{1}{4} KE \cdot \epsilon_1$ 。

(2) 半桥: $u = \frac{1}{4} KE \cdot (\epsilon_1 - \epsilon_2)$ 。

(3) 全桥: $u = \frac{1}{4} KE \cdot (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)$ 。

2 电阻式应变计产生测量误差的主要因素

应变测量精度受很多因素影响, 测量系统由应变计、导线、测量仪器3部分组成, 在分析测量误差时必须全部加以考虑, 但主要的误差有应变计零点漂移、应变计横向效应、应变计灵敏系数和应变计的热输出。

3 1/4 桥的二线制接法

图3为1/4桥二线制接法。其中 R_{L1}, R_{L2} 为导线电阻, 理想情况下电桥输出不受导线电阻的影响, 但实际应用中, 由于试验件的尺寸、结构原因往往和测量仪器相距较远, 应变计连线较长, 导线电阻会引起大的误差。若导线电阻为 r_1 , 即 $R_{L1} = R_{L2} = r_1$ 。这时桥臂的阻值变化不是 $\Delta R/R$, 而是 $\Delta R/(R+2r_1)$ 。导线电阻改变了灵敏度系数 K 值, 设新的灵敏度系数为 K' , 则有:

$$\frac{\Delta R}{R+2r_1} = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{1+2r_1/R} = \frac{1}{1+2r_1/R} K \epsilon = K' \epsilon \dots (14)$$

得 $K' = \frac{1}{1+2r_1/R} K \approx (1-2r_1/R) K$ 。

因此导线带来的相对误差为:

$$\frac{K' - K}{K} = -\frac{2r_1}{R} \dots (15)$$

4 1/4 桥三线制接法

综上所述, 二线接法的弊端就是桥臂阻值会受导线电阻的影响, 使应变计灵敏系数降低, 热输出增加, 电桥零点漂移加剧。因此在实际使用中往往采用三线接法来降低测量导线电阻所引起的误差, 如图4所示。

三线制接法中将电阻为 R_{L1} 与 R_{L2} 的两根导线分配到了不同的桥臂中去, R_{L1} 与 R_G 在同一桥臂, R_{L2} 与 R_4 在同一桥臂, R_{L3} 不在任何一个桥臂中因此不会对电桥平衡造成影响。由于电桥输出紧接放大电路, 且

放大电路内阻很大,因此 R_{L3} 对桥压压降的影响很小,可以忽略。

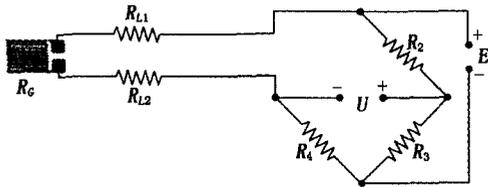


图3 1/4桥二线制接法

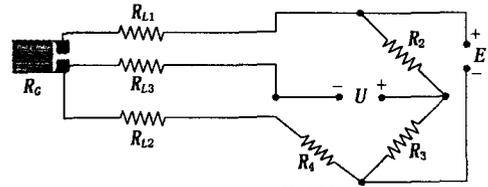


图4 1/4桥三线制接法

我们可以通过计算来对比电桥二线制接法和三线制接法的测量效果。假定应变计电阻为 120Ω , 灵敏系数 $K=2$, 导线单位电阻为 $0.6 \Omega/m$, 应变计连接线长 $10 m$ 。

4.1 二线制接法

首先计算零点漂移。由于 $\Delta R = 0.6 \Omega/m \times 10 m = 6 \Omega$ 。则：

$$\epsilon = \frac{\Delta R/R}{K} = 25\ 000 \times 10^{-6}。$$

即应变计在初始状态下就产生了 $25\ 000$ 微应变的零点漂移。

假定导线线芯是铜的,铜的温度系数 α 为 $0.003\ 93/^\circ C$,温度每变化 $10^\circ C$,每 1Ω 电阻变化为： $\Delta R = R \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1 \times 0.003\ 93 \times 10 = 0.039\ 3 \Omega$ 。则：

$$\epsilon = \frac{\Delta R/R}{K} = \frac{0.039\ 3/120}{2} \approx 164 \times 10^{-6}。$$

所以,应变计的温漂为 164 微应变。

4.2 三线制接法

由式(13)可知,电桥输出为 $\frac{U}{E} = \frac{K}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 -$

$\epsilon_4)$,且电阻 $R_2 = R_3, R_G = R_4$ 。

首先还是计算零点漂移,其他条件不变,连接法改为三线制,如图4所示,则 R_G, R_4 所在桥臂的电阻改变量均为 $0.6 \times 10 = 6 \Omega$,所以它们的零点漂移量都为：

$$\epsilon_1 = \epsilon_4 = \frac{\Delta R/R}{K} = 25\ 000 \times 10^{-6}。$$

由式(13)可知总的电桥输出为： $\frac{U}{E} = \frac{K}{4} (25\ 000 - 25\ 000) = 0$,可见,三线接法可以消除导线电阻带来的零点漂移。

再来看温漂,同样当温度变化 $10^\circ C$ 时,每 1Ω 阻值变化为：

$$\Delta R = R \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1 \times 0.003\ 93 \times 10 = 0.039\ 3 \Omega。$$

则：

$$\epsilon = \frac{\Delta R/R}{K} = \frac{0.039\ 3/120}{2} \approx 164 \times 10^{-6}。$$

温漂为： $\frac{U}{E} = \frac{K}{4} (164 - 164) = 0$,可见,三线接法也

可以消除导线电阻对温漂的影响。

5 结语

经以上计算分析,电桥的三线制接法对减小过长导线对应变数据测量的影响有很显著的效果,因此在飞机强度试验中得到了广泛的应用。

参考文献：

- [1] 沈观林. 电阻应变计及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1983.
- [2] Window A L. Strain gauge technology[DB/OL]. 德国:斯普林格出版社,1993.
- [3] Hannah R L, Reed S E. Strain gage users' handbook [DB/OL]. 德国:斯普林格出版社,1992.
- [4] 徐顺飞. 静态应变测量的误差分析[J]. 直升机技术,2010(1):47-51.
- [5] 冯欣宇. 基于 LM3S9B96 的静态应变数据采集器[D]. 太原:太原理工大学,2012:15-17.

Three-wire Strain Gage Measurement Used in Aircraft Structure Strength Test

HU Xu, DANG Rui-rong, FENG Xin-yu

(Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Strain data is the most important test data during full-scale static and fatigue tests of aircrafts. The accuracy of test data directly affects the stress-strain analysis of aircraft structures and the comparative analysis with theoretical calculations. This paper introduces the theoretical basis for three-wire Wheatstone bridge strain gage measurement, and analyzes the accuracy differences between two-wire and three-wire strain gage measurement by calculation.

Key words: full-size aircraft structure; strength test; strain test; three-wire strain gage measurement