

电阻应变计应变传递研究及误差分析

雷一鸣

(上海飞机设计研究院, 上海 200232)

摘要 电阻应变计通过应变过渡区传递应变到敏感栅丝, 而此过渡区的范围大小与所测结构的应变有关, 使得电阻应变计的灵敏系数发生变化, 而非通常测量中使用的常数灵敏系数。讨论了灵敏系数变化对测量结果造成的误差, 并给出了降低此影响的方法。

关键词 电阻应变计 应变过渡区 灵敏系数

中图法分类号 V416.1; **文献标志码** B

电阻应变计(Electric Resistance Strain Gauge)又简称应变片, 自1936年E. Simmons与A. Ruge等人研制出纸基丝式电阻应变计以来, 应变电测技术已广泛地应用于各工程领域的结构应力分析试验中。随后又发展出光弹性方法、云纹法、数字散斑法等多种测量方法, 但电阻应变计由于其安装方便、测量灵敏度高、量程范围大、频率响应快等优点, 仍然是航空结构静力和疲劳试验中首选的测量方式, 尤其是在大型部段以及全机试验中, 电阻应变计更是发挥了重要的作用。例如波音公司在B767飞机的静力试验中, 采用2 000多个应变片和1 000多个应变花。在我国自主设计的喷气支线客机全机试验中, 电阻应变计测量通道接近7 000个。

电阻应变计的广泛应用依赖其测量输出的线性度和稳定性, 即能够如实且稳定地传递和反映被测结构的应变。关注于根据电阻应变测量的结果得到被测结构的真实应变和变形状态, 例如在国产喷气支线客机全机静力试验的近7 000个测量通道的数据中, 如何甄别出稳定有效的数据和存在误差的数据是非常重要的。本文从电阻应变计的应变传递方式的角度阐述电阻应变测量的原理, 分析了测量结果中可能产生误差的原因, 并对测量结果的

处理方式提出了建议。

1 电阻应变计工作原理

电阻应变计是将被测结构的应变变化量转换为电阻变化量的检测元件, 其基本构造如图1所示, 是由敏感栅、基底、黏结剂、覆盖层和引线组成。敏感栅是电阻应变计的工作元件, 将被测结构的变形转换为敏感栅的电阻变化; 基底用于支撑敏感栅, 使其保持一定的几何形状; 黏接剂将敏感栅和基底粘合为一个整体; 覆盖层使敏感栅免受外界温度、湿度、尘埃等侵蚀作用和机械损伤; 引出线将敏感栅的电阻变化以电信号输入到测量仪器。

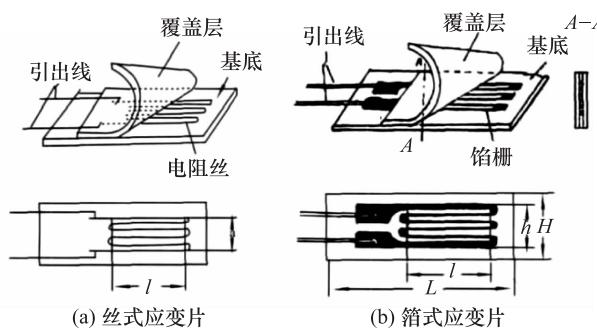


图1 电阻应变计结构示意图

测量时, 电阻应变计安装(通常为粘贴)在被测结构的表面, 被测结构受力变形时, 敏感栅也随之产生相同的应变, 使其电阻值发生变化。用仪器测

2011年8月1日收到, 8月30日修改

作者简介: 雷一鸣(1983—), 男, 清华大学力学硕士, 研究方向: 机身强度设计。E-mail: leiyiming@ comac. cc。

量此电阻值变化即可测量出被测结构表面沿敏感栅轴线方向的应变。通常用金属细丝的模型来说明应变量与电阻变化的关系。金属细丝的电阻 R 与其长度 L 成正比,与截面积 A 成反比:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

式(1)中 ρ 为金属电阻率,当金属细丝与被测结构表面协调变形而伸长时,其电阻值发生变化:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2)$$

Bridgman 定律指出金属电阻率变化与材料密度(体积)改变率有关: $\frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dV}{V}$ 。

式中, V 为金属丝初始体积 $V = AL$, m 为比例系数。

由于泊松效应,金属细丝的伸长引起截面变化: $\frac{dA}{A} = -2\nu \frac{dL}{L}$, $\frac{dV}{V} = (1 - 2\nu) \frac{dL}{L}$, ν 为材料的泊松比,代入式(2)得:

$$\frac{dR}{R} = [1 + 2\nu + m(1 - 2\nu)] \frac{dL}{L} \quad (3)$$

记 $K_0 = \frac{dR/R}{dL/L} = [1 + 2\nu + m(1 - 2\nu)]$ 。由于 ν

和 m 为常数, K_0 也为常数, 表明金属细丝与被测结构表面协调变形时, 其电阻变化与应变变化成正比, 于是测量金属细丝的电阻变化即可以得到被测结构表面的应变值, 电阻应变计就是根据这一原理制成的。 K_0 称为敏感栅丝的灵敏系数, 其常用材料为康铜, $m \approx 1$, 则 $K_0 \approx 2$ 。

用灵敏系数为 K_0 的金属栅丝制成电阻应变计粘贴于被测结构表面, 在应变作用下, 电阻应变计的灵敏系数定义为:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (4)$$

电阻应变计灵敏系数 K 受应变计尺寸、基底材料、工艺和粘贴状态影响, 与敏感栅丝灵敏系数 K_0 存在差别。

通常电阻应变计安装后(多为粘贴)不能取下再用, 只能采取抽样的方法在专门灵敏系数检定装置上测定每批电阻应变计的平均灵敏系数 K 。

灵敏系数检定装置可以产生均匀单向应力状态, 分为拉伸试件和弯曲梁试件两种。由于拉伸试件容易加载偏心且需要较大载荷, 而弯曲梁不需很大加载即可在较大面积区域形成均匀应变分布, 实际应用中一般选用弯曲梁作为灵敏系数检定装置, 具体又包括三种形式^[1]: (1) 等应力悬臂梁; (2) 纯弯曲梁; (3) 刚架梁, 其示意图如图 2 所示。

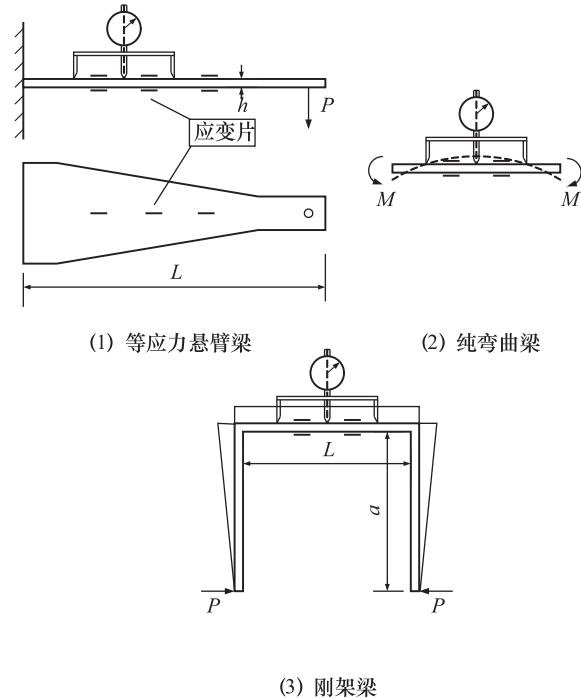


图 2 灵敏系数检定装置示意图

在检定时, 将电阻应变计粘贴在弯曲梁均匀应力区域, 采用三点挠度计测量弯曲梁受弯后的挠度, 根据挠度计算梁表面的理论应变, 一般加载至弯曲梁上下表面产生 $\pm 1000 \mu\text{m}$ 的应变。根据电阻应变仪输出的电阻值变化计算此处贴片的灵敏系数, 取检定样本的平均值作为该批应变计的灵敏系数:

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i/R_i}{\varepsilon_i} \quad (5)$$

2 电阻应变计应变传递原理

电阻应变计灵敏系数 K 与敏感栅丝的灵敏系数 K_0 存在差别, 这主要是因为电阻应变计是借助于

黏结剂将被测结构表面的变形传递到金属栅丝,其传递的过程和最终效果与基底尺寸、敏感栅尺寸、黏结剂性能和制造工艺都有关系。Rohrbach^[2]和Czaika^[3]对丝式应变片的研究表明,在被测结构表面与基底之间,以及基底与敏感栅丝之间存在两个应变过渡区域,如图3所示。

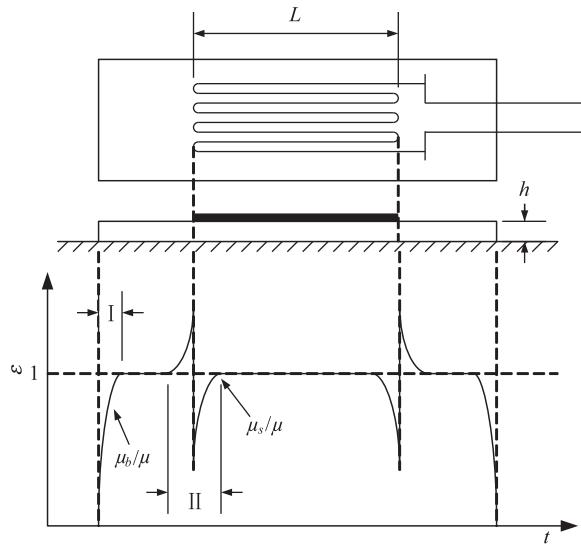


图3 电阻应变计测量状态下应变分布

图3中,区域I为被测结构表面和电阻应变计基底之间传递应变的过渡区, ε 为被测结构表面应变, ε_b 为基底的应变;区域II为基底和敏感栅丝之间传递应变的过渡区, ε_s 为敏感栅丝的应变。

由于以上应变过渡区的存在,在制造电阻应变计的时候通常使基底尺寸远大于敏感栅尺寸,以保证敏感栅丝不受粘贴过渡区的影响,此时电阻应变计的灵敏系数 K 与敏感栅丝的灵敏系数 K_0 有如下关系^[4]:

$$K = K_0 / \left[1 + \frac{4hA}{abL} (1 + \mu_b) \frac{E_s}{E_b} \right] \quad (6)$$

式(6)中: h 为基底和黏结剂层的总厚度;

a 为过渡区的长度;

b 为基底的有效宽度;

A 为敏感栅丝的截面积;

L 为敏感栅丝的栅长;

μ_b 为黏结剂层的泊松比;

E_b 为黏结剂层的弹性模量;

E_s 为敏感栅丝材料的弹性模量。

从式(6)可以看出,由于过渡区的存在,使得电阻应变计的灵敏系数 K 小于金属栅丝的灵敏系数 K_0 。过渡区长度 a 和宽度 b 受敏感栅丝的弹性模量、基底黏结剂层弹性模量和泊松比,以及黏结剂层厚度影响,除此之外,还与被测结构表面的应变水平有关,所测应变越大,过渡区的长度和宽度也越大。

3 电阻应变计测量误差分析

如前所述,通常测量中使用的电阻应变计灵敏系数由式(4)给出,且此值取为 $1000 \mu\text{m}$ 应变时标定的平均值。理想的敏感栅丝材料灵敏系数应不随变形大小发生变化,以使电阻输出结果真实反映被测结构的应变,但由于应变传递过渡区的存在,被测结构的应变大小会对应变计灵敏系数产生影响,故使用敏感栅丝当地的电阻变化和伸长量才能真实地反应电阻应变计的测量输出,即:

$$k_n = \frac{\frac{R_n - R_{n-1}}{R_{n-1}}}{\frac{\Delta L_n}{L_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta L_i}} \quad (7)$$

式(7)中 k_n 为第 n 次变形时的灵敏系数, R_n 为此时测得的应变计电阻值, ΔL_n 为敏感栅丝第 n 次变形时的当地伸长量, L_0 为敏感栅丝初始长度。 k_n 会随被测结构应变 ε 的增加而改变,对于常用的敏感栅丝材料 Ni-Mo₂₅-Al₃,其 k_n 随 ε 的变化如图4所示。

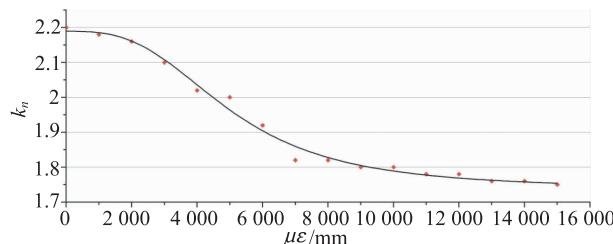


图4 常用金属栅丝应变灵敏系数与变形量的关系

使用该种丝材制造的应变片,在使用电阻应变仪测试和后期的数据处理中采用其标定的灵敏系

数,即 $1\text{ 000 }\mu\text{m}$ 应变值时对应的灵敏系数,为2.18。考虑到真实的灵敏系数 K 会随应变发生变化,使得电阻应变仪输出的测量结果与被测结构的真实状态存在一定偏差,当被测结构应变变化范围较大时,会使得测量数据线性度不够好,与理论计算结果存在偏差等问题。

在国产喷气支线客机的全机静力试验中,位于机翼下壁板长桁上的贴片应变值在 $3\text{ 000 }\mu\text{m}$ 左右,未进入材料的塑性区,且此处结构处于稳定的单向拉伸载荷下,试验全过程未发生失稳现象,但是测量的应变结果出现了线性度较差,与理论结果误差较大的情况,见图5。

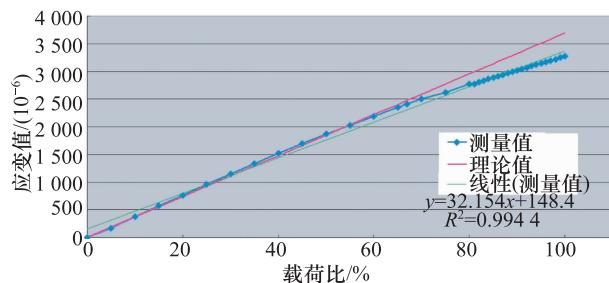


图5 全机试验某贴片测量结果

考虑到测量应变范围较大,电阻应变计的灵敏系数发生了较明显的变化,故使用图4的灵敏系数变化曲线对测量结果进行修正,修正后的结果见图6。

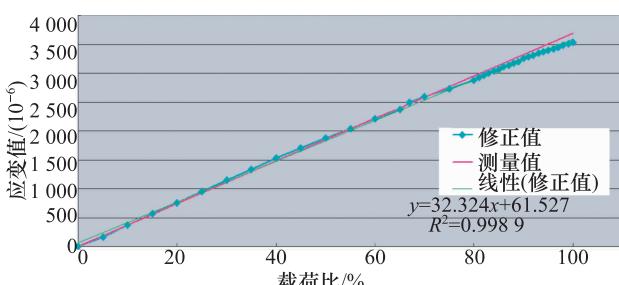


图6 贴片灵敏系数修正结果

原始测量数据和灵敏系数修正后的数据对比见表1。

表1 贴片灵敏系数修正结果对比

| | 原始数据 | 修正数据 |
|-------------------|-------|-------|
| 线性度(R^2) | 0.994 | 0.999 |
| 最大应变(10^{-6}) | 3 275 | 3 534 |
| 理论应变(10^{-6}) | 3 694 | 3 694 |
| 误差(%) | -11.3 | -4.3 |

从表1可以看出,通过对电阻应变计的测量数据进行灵敏系数修正,可以有效的提高测量数据线性度,降低测量误差。

4 结论

电阻应变计通过应变过渡区传递应变到敏感栅丝,而此过渡区的范围大小与所测结构应变相关,使得电阻应变计的灵敏系数发生变化,而非通常测量中使用的常数灵敏系数,这一原因导致了测量结果中存在一定偏差,降低这一偏差可以通过以下方法:

- 1) 提高电阻应变计制造工艺,比如减小敏感栅丝的丝径、降低黏结剂层厚度、提高黏结剂弹性模量,这些都有助于缩小应变过渡区的范围,减缓敏感栅丝端部的应力集中现象,从而减小对应变片灵敏系数的影响;
- 2) 在电阻应变仪中引入灵敏系数—应变的参数变化,而非输入单一的常数灵敏系数;
- 3) 对测量结果进行灵敏系数修正。

参 考 文 献

- 1 张如一,沈观林,李朝弟.应变电测与传感器,清华大学出版社,1999
- 2 Rohrbach C, Lexow J. Miniature force transducers with strain gauges. Measurement, 1986;4(3):93—100
- 3 Mittmann H U, Czaika N, Czichos H. A new device for simultaneous measurement of friction force, normal force and friction coefficient. Wear, 1975;31(1):179—184
- 4 尹福炎.电阻应变片与应变传递原理研究.衡器,2010

Strain Transmit Research and Aberration Analysis of Electric Resistance Strain Gauge

LEI Yi-ming

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200232, P. R. China)

[Abstract] The strain transmits to the sensitive grid through a transition area whose range is related to the test strain, which introduces variations to the sensitivity coefficient of the electric resistance strain gauge instead if a commonly considered constant. The test aberration is analyzed due to the variations of the sensitivity coefficient, and offers some methods to reduce its influence.

[Key words] electric resistance strain gauge strain transition area sensitivity coefficient

(上接第 8095 页)

4 结论

“自动上舵”常见于机械操纵飞机,对正常驾驶飞机和飞行安全都是严重的安全隐患。本文通过对国军标和相关适航条款的分析,分析了“自动上舵”产生的原因,并提出了具有普遍意义的解决措

施。最后通过试飞中“自动上舵”现象的解决,证明了处理“自动上舵”问题措施的正确性。

参 考 文 献

- 1 GJB185—1986 有人驾驶(固定翼)飞机飞行品质. 1987
- 2 中国民用航空总局. 中国航空规章第 25 部《运输类飞机适航标准》. 2001

Research of Aircraft Rudder_lock Flight Test

LIU Xu-hua, GUAN Ai-rui, ZHANG Qiang

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, P. R. China)

[Abstract] The rudder_lock of aircraft is one of the hidden dangers to the flight safety. The requirements of military standards and CCAR 25 and analysis the reason resulting the rudder_lock are firstly introduced. Then the improvements was introduced. At last, the example of rudder_lock in flight test is showed to prove the right of improvement.

[Key words] rudder_lock flight test flight safety