

应变片横向效应对复合材料测量数据影响分析

韩 凯 左 佳

(中国飞机强度研究所全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室 西安 710065)

摘 要: 由于应变片具有横向效应,在平面应力场的测量中会带来一些误差,特别是针对各向异性的复合材料,必须对测量结果进行修正。采用了一种修正方法对试验测量数据进行了修正,通过测量值和修正值的对比分析,得到了应变片横向效应对复合材料应变数据准确性的影响,以及数据无需修正的范围。试验结果表明:随着电阻应变测量值绝对值的增大,因电阻应变片横向效应引起的误差值所占比率会降低;当复合材料应变绝对值大于 $200\mu\epsilon$ 时,横向效应引起的误差值所占比例降低到2%以下,可以忽略其对测量数据的影响。

关键词: 电阻应变片;横向效应;复合材料;应变数据

中图分类号: TM930.115 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

Impact analysis of transverse-sensitivity effects on strain gages to measurement data of composite materials

Han Kai Zuo Jia

(Aircraft Strength Research Institute Aviation Technology, Key Laboratory of Full Scale Aircraft Structure Static and Fatigue Test, Xi'an 710065, China)

Abstract: Due to the transverse-sensitivity effect of strain gages, the measurement in the biaxial stress field will have some errors which are especially for orthotropic-composite materials, and the measurement results must be amended. In this paper, a modified method is used for measurement data. Through comparative analysis between measuring data with modifying data, we can achieve the influence of the transverse-sensitivity effect of strain gages on the measurement results and ignored extents of unmodified data. The test results show that with the increase of absolute data for strain measurement, the error rate will be reduced; when the absolute data is out of $200\mu\epsilon$, the error rate will be below 2%, so the influence of the transverse-sensitivity effect to measuring data on composite materials structure can be ignored.

Keywords: resistance strain gages; transverse-sensitivity effect; composite materials; strain

1 引言

复合材料作为一种由两种或两种以上材料独立物理相通过复合工艺组合而成的新型材料,在航空领域的应用越来越广泛^[1]。在现代飞机结构静力/疲劳试验中,复合材料制造的飞机部件强度测试结果的准确与否,直接影响飞机结构安全性的评估结果^[2-3],因此对于由复合材料构成的飞机部件的应变测试技术的研究显得越来越重要。应变是材料与结构的重要物理特性,最能反映结构局部特性,可以预知局部荷载的状态,对了解结构特性,保障结构安全具有重要意义^[4-6]。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,目前仍是航空结构静力和疲劳试验中首选的测量方式^[7-8]。但是由于应变片具有横向效应,针对各向异性的复合材料会带来一定程度的影响,必须对结果进行修正,采用了一种修正方法对测量数据进行了修正,通过对考虑横向效应影响前后的应变数据进行对比,分析误差对测量数据的影响程度,给出强度试验中可以忽略的影响因素,以及数据无需修正的范围。

2 横向效应原理

横向效应指的是金属应变片由于敏感栅的两端为半圆弧形的横栅,测量应变时,构件的轴向应变 ϵ 使敏

收稿日期:2014-11

感栅电阻发生变化,其横向应变 ϵ_r 也将使敏感栅半圆弧部分的电阻发生变化(除了 ϵ 起作用外),应变片的这种既受轴向应变影响,又受横向应变影响而引起电阻变化的现象^[9]。图1为应变片敏感栅半圆弧部分的形状。沿轴向应变为 ϵ ,沿横向应变为 ϵ_r 。这种影响由许多因素引起,如应变片的格栅几何尺寸、制造工艺和基底绝缘材料等。

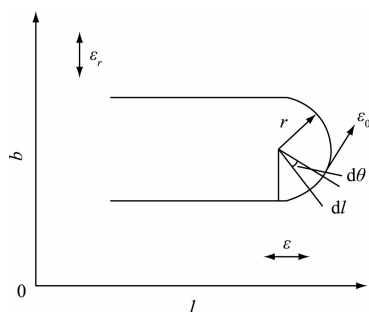


图1 应变片敏感栅半圆弧部分

当一个应变片处于应变场时,其阻值变化与应变关系式如下^[10]:

$$\frac{\Delta R}{R} = F_a \epsilon_a + F_t \epsilon_t \quad (1)$$

式中: ΔR 为应变片阻值的变化量, R 为应变片阻值, ϵ_a 为平行于应变片主轴的应变, ϵ_t 为垂直于应变片主轴的应变, F_a 为轴向系数, F_t 为横向系数。

应变片的横向系数(K_t)定义为:

$$K_t = \frac{F_t}{F_a} \quad (2)$$

K_t 值是应变片生产厂家提供的应变片校准参数之一,其值范围一般为 $-0.05 \sim 0.05$ 。

由此,式(1)可写为:

$$\Delta \frac{R}{R} = F_a (\epsilon_a + K_t + \epsilon_t) \quad (3)$$

引进泊松系数($\epsilon_t = -\gamma_0 \epsilon_a$),则式(3)可写为:

$$\Delta \frac{R}{R} = F_a \epsilon_a (1 - K_t + \gamma_0) \quad (4)$$

式中: γ_0 为泊松比,其值通常为0.3。

最终,如果忽略横向效应时,由式(4)可求出应变片的测量值。

然而,若考虑横向效应,式(4)是不可行的,必须进行修正。假设两个方向的测量应变分别为 ϵ_{mx} 和 ϵ_{my} ,则 x, y 方向真实应变分别为:

$$\epsilon_x = \frac{(1 - k_t r_o)(\epsilon_{mx} - k_t \epsilon_{my})}{1 - k_t^2} \quad (5)$$

$$\epsilon_y = \frac{(1 - k_t r_o)(\epsilon_{my} - k_t \epsilon_{mx})}{1 - k_t^2} \quad (6)$$

一般在已知主应变方向的前提下,采用单应变片即可测量得到主应变的大小,但是在全尺寸强度飞机试验中,由于试验件为整架飞机,很多贴片位置构件形状复杂,主应变方向不容易判定。在此情况下,要

在测量点粘贴3个应变片组成的应变花才能测出主应变的数值和方向。而 45° 应变花包括3个成 45° 分布的应变片,是最常见的如图2所示。当应变花中每个应变片的横向系数不为0时,所测的3个应变值都存在误差,导致由它们计算得到的主应变和主应力都存在误差。

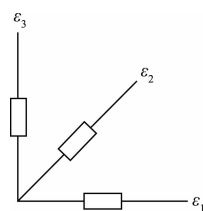


图2 45° 应变花示意

下面给出 45° 应变花测得的3个应变值的修正公式^[11]:

$$\tilde{\epsilon}_1 = \frac{(1 - K_t r_o)(\epsilon_1 - K_t \epsilon_3)}{1 - K_t^2} \quad (7)$$

$$\tilde{\epsilon}_2 = \frac{(1 - K_t r_o)(\epsilon_2 - K_t(\epsilon_1 + \epsilon_3 - \epsilon_2))}{1 - K_t^2} \quad (8)$$

$$\tilde{\epsilon}_3 = \frac{(1 - K_t r_o)(\epsilon_3 - K_t \epsilon_1)}{1 - K_t^2} \quad (9)$$

式中: $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 为应变花的测量值, $\tilde{\epsilon}_1, \tilde{\epsilon}_2, \tilde{\epsilon}_3$ 为应变花的修正值,利用此式通过验证试验对误差的大小进行估算。若横向效应产生的误差较大时,应对测量的结果进行修正。

3 试验方案

3.1 试验件设计

设计加工了标准复合材料试验件:试验件长625 mm,宽150 mm,厚1 mm。试验件如图3所示,图为粘贴完胶布带的试验件,试验件两端为粘贴好的胶布带。

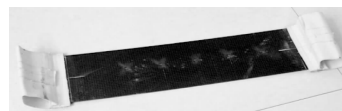


图3 复合材料试验件

3.2 应变片布置

本次试验采用的应变片为中航工业电测仪器股份有限公司制造的BE120-4CA应变片,其常温电测性能如表1所示。

表1 应变片参数

应变片型号	BE120-4CA
电阻值/ Ω	120.0 $\pm$ 0.1%
灵敏系数	2.20 $\pm$ 1%
泊松比	0.33
横向效应系数	0.017

按照不同角度进行应变片粘贴,应变花中的1号片分别与拉力方向沿逆时针方向偏差角度为: 0° 、 5° 、 10° 、 20° 和 30° ,每种角度沿拉力方向粘贴3个丛片,共15个丛片,合计45个单片。坐标系定义和贴片模型见图5,实际布片实物如图4所示。



图4 应变片粘贴实物

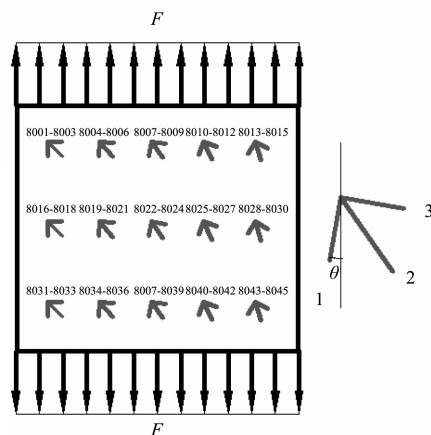


图5 试验件加载示意图及实物

3.3 试验加载设置

本试验为拉向加载试验,拉向加载分为10级加载,每级25 kg,图5为拉向加载的实物图,图中试件上端固定,下端使用每级25 kg的配重进行加载,使试件处于自由状态,利用配重的重力作用使试件受到拉伸载荷。

4 试验结果及分析

将3次试验中,每级载荷下的应变数据,进行对比。3次测量数据曲线一致性好,随着载荷逐级变化,应变数据线性良好,表明试验设计合理,加载准确,测量数据真实可靠。表2为部分应变数据重复性比较,图6和7为部分应变数据曲线。

表2 部分应变数据重复性比较

序号	应变片编号	测量次数	0级	1级	2级	3级	4级	5级	6级	7级	8级	9级	10级
1	8001	第1次	0	34	66	95	122	153	183	212	240	271	299
2	8001	第2次	0	37	65	92	121	149	177	206	236	264	293
3	8001	第3次	0	36	65	93	121	148	177	205	233	262	292
4	8004	第1次	0	36	71	101	131	161	192	222	254	284	313
5	8004	第2次	0	39	70	98	127	156	186	216	247	277	308
6	8004	第3次	0	40	71	99	128	157	188	218	247	277	308
7	8007	第1次	0	34	66	94	122	147	175	204	234	261	289
8	8007	第2次	0	37	65	92	118	144	173	201	230	257	284
9	8007	第3次	0	37	65	91	117	144	173	200	226	256	283
10	8010	第1次	0	31	57	80	101	119	141	164	189	211	232
11	8010	第2次	0	33	56	77	96	117	140	164	187	209	231
12	8010	第3次	0	31	56	77	95	117	140	162	183	207	227
13	8013	第1次	0	27	50	68	87	100	119	138	160	178	196
14	8013	第2次	0	31	51	68	83	100	119	140	159	178	196
15	8013	第3次	0	28	48	66	80	99	119	138	156	175	192

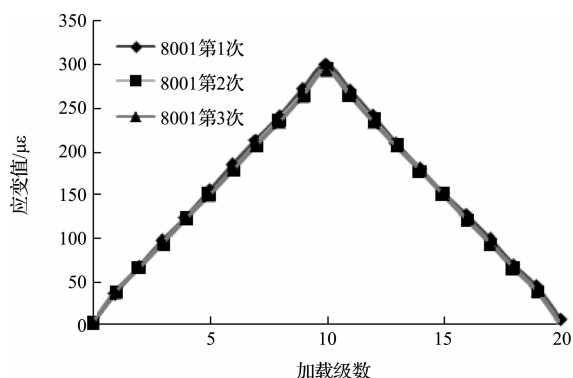


图6 应变数据-载荷曲线

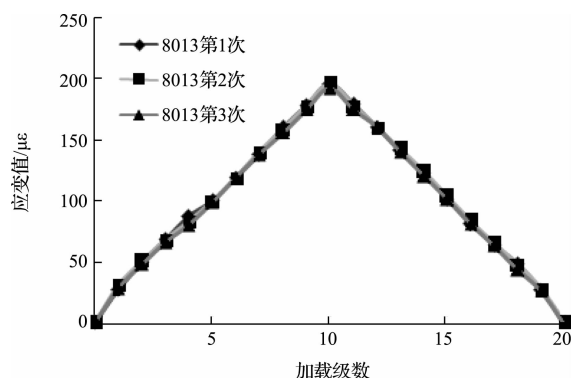


图7 应变数据-载荷曲线

将试验中所测 10 级载荷下的应变值按上式进行修正,求出误差率,误差率=(测量值-修正值)/修正值 $\times$ 100%。如表 3 所示图 8 为应变值与误差率的关系图,从图 8 可以得出如下结论:

1)随着应变测量值绝对值的增大,因横向效应引起的误差值所占比例降低。

2)所测部位应变测量值为拉应变时,受横向效应影响很小,当拉应变值大于 $100\mu\epsilon$ 时,误差率已降到 1%。

3)所测部位应变测量值为压应变时,当应变值在 $-100\mu\epsilon\sim 0\mu\epsilon$ 时,受横向效应影响很大,误差率在 5%以上;当应变值在 $-200\mu\epsilon\sim -100\mu\epsilon$ 时,平均误差率在 3%;当应变值小于 $-200\mu\epsilon$ 时,横向效应引起的误差值所占比例降低到 2%以下,由此引起的误差可以忽略。

4)综上所述,在全尺寸飞机静强度试验中,当复合材料应变绝对值大于 $200\mu\epsilon$ 时,因横向效应引起的误差值所占比例降低到 2%以下,可以忽略无需进行修正,如表 3 所示。

表 3 部分应变测量值、修正值和误差率

序号	编号	应变值	修正值	误差率(%)
1	8018	-173	-177.6	-3
2	8021	-159	-163.7	-3
3	8033	-147	-151.8	-3
4	8039	-130	-134.3	-3
5	8012	-73	-76.5	-5
6	8015	-29	-32.1	-10
7	8045	-22	-25.3	-13
8	8017	67	65.2	3
9	8005	110	108.5	1
10	8023	133	131.3	1
11	8043	192	191.0	1
12	8041	209	208.9	0
13	8010	231	231.0	0
14	8014	254	254.2	0
15	8040	289	289.7	0

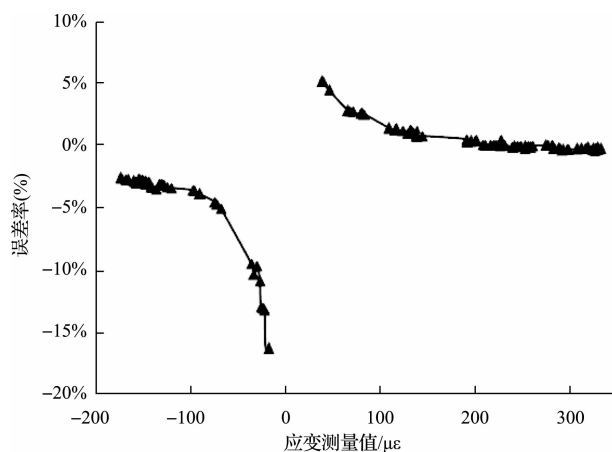


图 8 应变测量值与误差率关系

5 结 论

针对电阻应变片横向效应对复合材料测量数据影响这一问题展开了试验研究。结果表明,电阻应变片横向效应对复合材料应变数据准确性有一定影响;随着应变测量值绝对值的增大,因电阻应变片横向效应引起的误差值所占比例降低;全尺寸飞机静强度试验中,当复合材料应变绝对值大于 $200\mu\epsilon$ 时,因横向效应引起的误差值所占比例降低到 2%以下,可以忽略影响无需修正。

参 考 文 献

- [1] 孙虎,周丽. 基于分形维数的复合材料结构损伤成像[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 401-407.
- [2] ZUO J, CHEN G, WANG G. Research on strain gauge protecting-process to measurement data accuracy of composite material structure [C]. Advance Material Research, 2014: 42-47.
- [3] 左佳, 张建锋. 基于 Delphi 的试验测量信息管理系统设计 [J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(12): 60-66.
- [4] 李巧真, 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.
- [5] 沈观林. 应变电测与传感技术的新发展应用[J]. 中国测试, 2011, 37(2): 87-91.
- [6] 段成丽, 蒋亚东, 魏鸿雁, 等. 光栅式大应变传感器结构设计及特性研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6): 504-508.
- [7] 尹福炎. 电阻应变片与应变传递原理研究 [J]. 衡器, 2010, 39(2): 1-8.
- [8] 雷一鸣. 电阻应变计应变传递研究及误差分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(32): 8096-99.
- [9] Vishay Micro-Measurements TN505. Strain Gage Selection-Criteria, Procedures, Recommendations [S].
- [10] Vishay Micro Measurements TN509. Errors Due to Transverse Sensitivity in Strain Gages [S].
- [11] 易晖, 张卫. 应变片横向效应对应变测量的影响与修正[J]. 直升机技术, 2011(166): 60-63.

作 者 简 介

韩凯, 1985 年出生, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为全尺寸飞机结构静力/疲劳试验的数据采集与分析。

E-mail: hank03@qq.com