

飞行试验中应变测试误差的一种评估方法

张玉琴 王 真

(中国飞行实验研究院 西安 710089)

摘要: 应变参数是飞行试验中研究飞机载荷强度的必测参数,由于其输出信号为 μV 级信号,易受到测试电缆的影响。通过理论与大量实验数据的分析,研究了不同长度的导线电阻对测试误差的影响,结果表明应变测量结果的相对误差随着电缆长度增加。同时,推导出不同长度电缆引起的应变相对误差公式,与实验结果一致,为飞行试验中应变测试误差的评估提供了一种参考依据。

关键词: 应变测试;相对误差;误差评估

中图分类号: V217+.32 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4020

Evaluation of strain measurement in flight-test

Zhang Yuqin Wang Zhen

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

Abstract: Strain parameters is must to be measured in flight-test. They output microvolt signals, which is prone to influenced by measure cable. With the theory and mass of experimental data analysis, the relationship of the cable resistance and measurement error is researched. The result of experiment shows the relative error is increases as the cable elongates. Then equation of the relative error and cable length is derived, which matches the experimen and provides an evaluation for strain measurement error.

Keywords: strain measurement; relative error; error evaluation

1 引言

应变参数是飞行试验中研究结构强度和载荷的重要参数,为了全面检查飞机在受载情况下结构及附件的承载能力,在飞行试验中需要测试大量的结构应变参数,一架试验机的应变参数有几百甚至上千个,安装在机上各个部位。测量值的精确与否,将影响到试飞结论,甚至飞行安全。由于应变信号的输出为 μV 级的模拟电压信号,测试电缆的导线电阻对输出结果有着一定的影响。李艳等人^[1-3]在该文中讨论过导线电阻对电阻应变片的影响,但未给出具体长度引起的测试误差公式。通过理论和实验分析,研究导线电阻对测试结果的影响,得出其理论公式,为机上应变测试中误差评估提供参考依据。

2 应变参数测试原理

机上应变测量是通过惠斯登直流电桥原理,如图 1 所

示,通过测量应变效应引起的电阻变化量,间接测量应变量^[7-10]。经计算:

$$U_o = \frac{U}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (1)$$

式中: U 为激励桥压, U_o 为输出电压, ΔR 为可变电阻的变化量, R 为其他 3 个固定桥臂的电阻值^[4-6]。

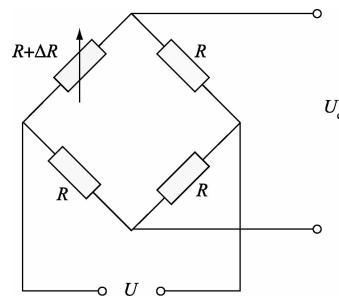


图 1 直流电桥原理

收稿日期:2015-05

根据金属电阻的应变效应,电阻值的变化和应变之间的关系为:

$$\epsilon = \frac{1}{k} \frac{\Delta R}{R} \quad (2)$$

式中: ϵ 为应变变量, k 为金属应变灵敏度,它的取值范围为1.7~3.6^[3],一般值为2,那么应变量和输出电压之间的关系为:

$$U_o = \frac{1}{2} U \epsilon \quad (3)$$

若已知激励桥压,通过测量输出电压,即可根据式(3)得到应变变量。

在机上应变测试系统中,一般采用KAM500采集器的KAD/ADC/109/S1板卡进行采集记录,此板卡为8通道16位A/D转换模块,并为应变电桥提供恒定的激励桥压。

应变片通过机上测试电缆与采集设备相连后,采集板卡提供恒定的激励桥压,同时将输出模拟电压信号 U 。进行数模转换,信号首先经过程控放大器,其具有很高的共模抑制比,并根据软件设置将小信号放大到适于A/D转换的范围;在A/D转换前,信号要经过抗混叠滤波器,完成对信号内高频噪声的滤除;然后以超采样方式通过A/D转换器将模拟信号转换为数字序列,数字序列再经过数字滤波器的变换滤除编程设置的截止频率以上的信号;最后数字序列经过查表编码器将数字编码转换为工程物理量。

3 影响应变测试结果的因素

在飞行试验机载测试中,一般由数据采集器为由应变片组成的惠斯登电桥提供桥压,同时进行数据采集。采集器与应变片之间存在一定长度的测试电缆,有的甚至达几十米之长。测试电缆的导线电阻对输出结果有一定影响,可见测试精度主要受采集器精度、测试电缆、应变片性能的影响。

主要研究电缆对应变测试的影响。通常情况下,激励电缆以及信号输出电缆都是等长度的,等效电路如图2所示。

图中 U , U_o 为采集器端提供的激励桥压和输入端采集电压, U' , U'_o 为应变电桥端实际激励桥压和输出电压。据计算在 $\Delta R = 0 \Omega$,即应变量为 $0 \mu\epsilon$ 时,电桥端实际桥压 U' 为:

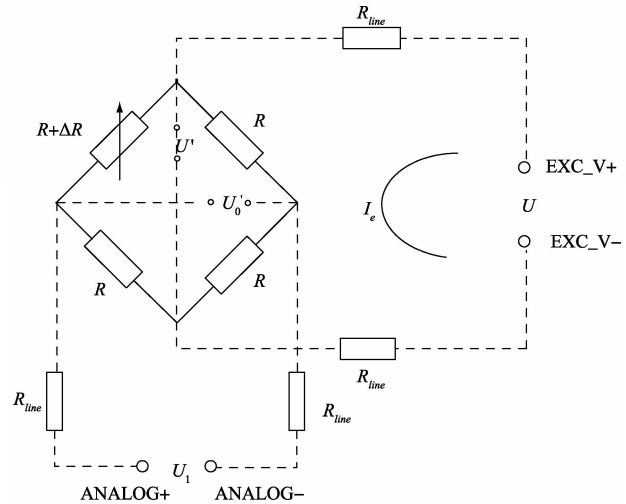


图2 应变电桥测试等效电路

$$U' = U - 2R_{line} I_e \approx \frac{R}{2R_{line} + R} U \quad (4)$$

根据式(3),应变电桥端输出电压:

$$U'_o = \frac{1}{2} U' \epsilon \quad (5)$$

由于采集器输入端ANALOG+、ANALOG-之间输入阻抗达10 MΩ,远大于桥路输出阻抗,所以:

$$U_o \approx U'_o = \frac{1}{2} \cdot \frac{R}{2R_{line} + R} U \epsilon \quad (6)$$

4 实验数据分析

4.1 不同长度测试电缆对应变测试结果的误差分析

实验中,选用固定电阻为350 Ω的VISHY1550A应变模拟仪,选用KAM500采集器KAD/ADC/109/S1板卡,激励桥压设置为±5 V,输入端对±60 mV的差分电压信号进行16位A/D采集,输出范围为0~65 535。测试电缆选用机上使用的FPFQ-250镀银铜线屏蔽电缆,长度分别为1 m、3 m、5 m、7 m、9 m、11 m、24 m,选8组应变变量测试点,分别为-10 000 με、-7 000 με、-5 000 με、-1 000 με、1 000 με、5 000 με、7 000 με、10 000 με,进行了55组样本数据的测试,将第1组样本试验数据如表1所示。

表1 不同长度测试电缆应变测试数据

	10 000 με	7 000 με	5 000 με	1 000 με	-1 000 με	-5 000 με	-7 000 με	-10 000 με
1.0 m	59 956	51 759	46 319	35 439	29 995	19 117	13 677	5 502
3.0 m	59 910	51 747	46 307	35 431	29 989	19 112	13 674	5 508
5.0 m	59 901	51 740	46 304	35 433	29 995	19 123	13 687	5 522
7.0 m	59 883	51 724	46 294	35 432	29 998	19 139	13 704	5 549
9.0 m	59 859	51 708	46 281	35 430	30 002	19 150	13 724	5 576
11.0 m	59 837	51 694	46 272	35 426	30 001	19 154	13 732	5 588
24.0 m	59 762	51 640	46 233	35 420	30 011	19 199	13 792	5 673

对 55 组样本数据,统计不同长度电缆对应变测试结果的误差,每组样本数据的计算方法如下:

1)取各电缆线长 $L_i (i=1, 2, \dots, 7)$, 分别对应 1 m、3 m、5 m、7 m、9 m、11 m、24 m, 测量并记录某应变测试通道在不同应变变量 $X_j (j=1, 2, \dots, 8)$ 下的输出值 Y_{ij} , X_j 分别对应 $-10\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $-7\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $-5\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $-1\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $1\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $5\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $7\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $10\ 000\ \mu\epsilon$;

2)以 1 m 电缆的输出值为基准,计算不同长度电缆相对于其的输出差值 ΔY_{ij} , 其中 $i=2, 3, \dots, 7, j=1, 2, \dots, 8$.

$$\Delta Y_{ij} = Y_{ij} - Y_{1j} \quad (7)$$

3)对每组不同长度电缆下的测试数据进行一次曲线拟合,得到输出值与应变变量之间的关系: $Y_{ij} = m_i X_j + b_i$. 那么以 1 m 电缆为基准,结合式(7),即可计算出相同应变变量下不同长度电缆的应变变量误差 ΔX_{ij} 以及相对误差 σ_{ij} [6-10]:

$$\Delta X_{ij} = (Y_{ij} - Y_{1j})/m_i \quad (8)$$

$$|\sigma_{ij}| = \frac{|\Delta X_{ij}|}{X_j} \quad (9)$$

对第 1 组样本数据按照式(8)计算,结果如表 2 所示。

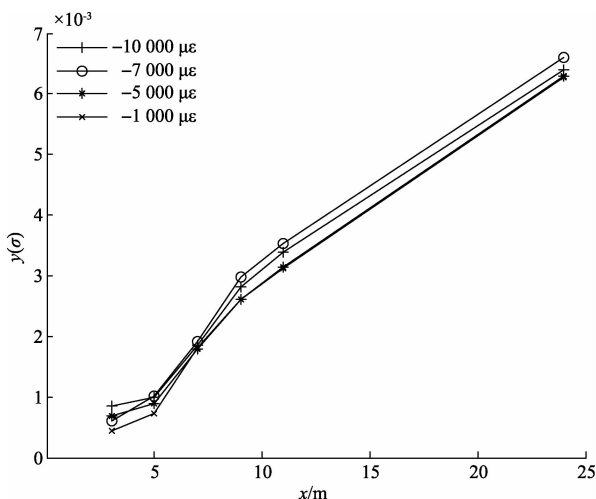
表 2 不同长度电缆下的各应变变量误差以及相对误差

		10 000 $\mu\epsilon$	7 000 $\mu\epsilon$	5 000 $\mu\epsilon$	1 000 $\mu\epsilon$	-1 000 $\mu\epsilon$	-5 000 $\mu\epsilon$	-7 000 $\mu\epsilon$	-10 000 $\mu\epsilon$
3 m	$\Delta X_{2j} (\mu\epsilon)$	-16.91	-4.41	-4.41	-2.94	0.00	0.37	0.00	2.21
	$ \sigma_{2j} $	0.000 69	0.000 63	0.000 88	0.002 94	0.000 00	0.000 07	0.000 00	0.000 22
5 m	$\Delta X_{3j} (\mu\epsilon)$	-20.23	-6.99	-5.52	-2.21	0.00	2.21	3.68	7.36
	$ \sigma_{3j} $	0.002 02	0.001 00	0.001 10	0.002 21	0.000 00	0.000 44	0.000 53	0.000 74
7 m	$\Delta X_{4j} (\mu\epsilon)$	-26.88	-12.89	-9.20	-2.58	1.10	8.10	9.94	17.30
	$ \sigma_{4j} $	0.002 69	0.001 84	0.001 84	0.002 58	0.001 10	0.001 62	0.001 42	0.001 73
9 m	$\Delta X_{5j} (\mu\epsilon)$	-35.74	-18.79	-14.00	-3.32	2.58	12.16	17.32	27.27
	$ \sigma_{5j} $	0.003 57	0.002 68	0.002 80	0.003 32	0.002 58	0.002 43	0.002 47	0.002 73
11 m	$\Delta X_{6j} (\mu\epsilon)$	-43.88	-23.97	-17.33	-4.79	2.21	13.64	20.28	31.71
	$ \sigma_{6j} $	0.004 39	0.003 42	0.003 47	0.004 79	0.002 21	0.002 73	0.002 90	0.003 17
24 m	$\Delta X_{7j} (\mu\epsilon)$	-71.75	-44.01	-31.80	-7.03	5.92	30.33	42.53	63.24
	$ \sigma_{7j} $	0.007 17	0.006 29	0.006 36	0.007 03	0.005 92	0.006 07	0.006 08	0.006 32

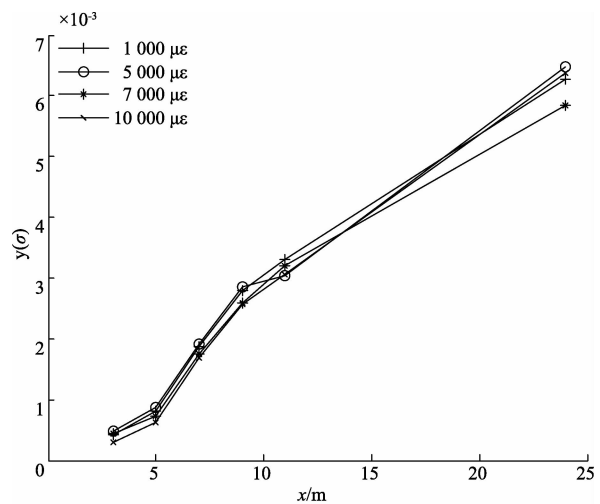
从表 2 中可以看出,在电缆长度一定的情况下,对于不同的应变变量相对误差 σ_{ij} 呈较好一致性。如 3 m 电缆不同的应变点相对误差保持在 1% 以内,24 m 电缆的相对误差保持在 6%~7%。计算平均相对误差 $|\bar{\sigma}_i|$

$$|\bar{\sigma}_i| = \frac{\sum_{j=1}^8 |\sigma_{ij}|}{8}$$

随着电缆长度增加, $|\bar{\sigma}_i|$ 增大且具有规律性。



(a)不同电缆长度在 $-10\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $-7\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $-5\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $-1\ 000\ \mu\epsilon$ 应变变量点的平均相对误差



(b)不同电缆长度在 $10\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $7\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $5\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $1\ 000\ \mu\epsilon$ 应变变量点的平均相对误差

图 3 平均相对误差 $|\bar{\sigma}_i|$ 与电缆长度之间关系曲线

对 N 组样本按上述计算方法进行计算并绘于图 4,为便于观察,分两幅图绘制,其中不同长度的电缆在 $-10\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $-7\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $-5\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $-1\ 000\ \mu\epsilon$ 应变量的平均相对误差见图 3(a),其在 $1\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $5\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $7\ 000\ \mu\epsilon$ 、 $10\ 000\ \mu\epsilon$ 应变量的平均相对误差见图 3(b)。

由图可见,随着电缆长度增加,应变变量相对误差增大。

当电缆长度小于 10 m 时,误差保持在 4% 以内。

4.2 理论误差计算与试验结果的对比分析

试飞中机上应变测试一般采用 FPFQ-250 镀银铜线屏蔽电缆,电缆阻值如表 3 所示。

表 3 FPFQ-250 镀银铜线屏蔽电缆阻值

标称截面/mm ²	0.2	0.3	0.35	0.5
铜线电阻 $R_s/(\Omega/m)$	0.092 0	0.067 5	0.053 7	0.039 2

在本实验中选用 4×0.35 的四绞线,根据式(6),电缆长度为 L_i 时的应变量为:

$$\epsilon_i = \frac{2(2R_s L_i + R)U_0}{RU} \quad (10)$$

根据式(3)可得忽略线长影响时的理论应变量为 ϵ :

$$\epsilon = \frac{2U_0}{U} \quad (11)$$

根据式(10)和式(11),可得不同长度电缆下的应变测试结果的相对误差 $|\sigma'_i|$:

$$|\sigma'_i| = \frac{\epsilon_i - \epsilon}{\epsilon} = \frac{2R_s L_i}{R} \quad (12)$$

式中: R_s 为单位长度的电缆电阻,单位为 Ω/m ; R 为应变电桥的固定电阻,单位为 Ω ; L_i 为电缆长度,单位为 m。

表 3 中的铜线电阻 R_s 为 20℃ 时的标称电阻,而温度也对导线电阻产生影响。根据相关技术指标,温度每升高 1℃,导线电阻增大 0.003 93 Ω/m ,即温漂系数为 0.003 93 $\Omega/m/^\circ C$ 。因此,任意温度 t ℃ 下,不同长度电缆的应变测试结果的相对误差 $|\sigma_i|$ 为:

$$|\sigma_i| = \frac{2R_s(1 + 0.003\ 93(t - 20))L_i}{R} \quad (13)$$

采用和实验中相同的方法,计算不同长度电缆相对 1 m 电缆的相对误差 $|\hat{\sigma}_i|$:

$$|\hat{\sigma}_i| = \frac{\epsilon_i - \epsilon_1}{\epsilon} = \frac{2R_s(L_i - 1)}{R} \quad (14)$$

针对实验中的 55 组样本数据,计算不同长度电缆的平均相对误差 $|\bar{\sigma}_i|$ 的均值,对比式(13)得到的理论误差 $|\hat{\sigma}_i|$,结果如表 4 所示,并绘于图 4。可见理论计算结果与实验结果具有较好的一致性。

表 4 不同长度电缆的相对误差与理论计算误差

	3 m	5 m	7 m	9 m	11 m	24 m
实验误差	0.000 53	0.000 83	0.001 82	0.002 73	0.003 22	0.006 72
理论误差	0.000 61	0.001 03	0.001 84	0.002 45	0.003 07	0.007 06

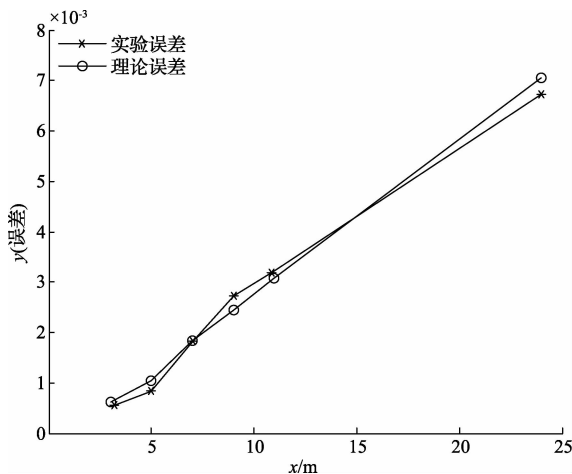


图 4 不同长度电缆的理论误差与实验误差对比

5 结论

通过理论分析与实验,在不同电缆长度下测量应变电桥输出值,大量样本的一致性结果表明电缆长度对测试结果的误差影响;得出了导线电阻与测试误差之间的理论公式,并将其数值与试验结果进行比较,一致性良好,此结论为试飞工程应用中应变测试时由于线电阻引起的误差评估提供参考依据。

参考文献

[1] 李艳,李新娥,裴东兴.应变测量系统误差分析[J].现代电子技术,2008,31(24):181-183.

- [2] 边育生.桥梁挠度测量新方法的探讨[J].铁道工程学报,2008(7):53-56.
- [3] 邓阳春,陈钢,杨笑峰.消除电阻应变片大应变测量计算误差的算法研究[J].实验力学,2008(3):227-233.
- [4] 李巧真,李刚,韩钦泽.电阻应变片的实验与应用[J].2011(4):134-137.
- [5] 郁有文,常健,程继红.传感器原理及工程应用[M].西安:电子工业出版社,2008.
- [6] 西北工业大学概率论与数理统计编写组.概率论与数理统计[M].西安:西北工业大学出版社,2002.
- [7] 李猛,杨钰,毕大圆.飞机结构应变测试系统的设计与实现[J].电子测量技术,2008,31(10):118-121.
- [8] 刘国强,郭勇.基于应变传感器的高精度悬臂梁挠度测量仪[J].仪器仪表学报,2006,27(增刊1):340-341.
- [9] 韩凯,左佳.应变片横向效应对复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.
- [10] 李沂乘.采样计算方法测量交流电压有效值误差分析[J].电子测量与仪器学报,2008,22(增刊1):62-65.

作者简介

张玉琴,1984年出生,硕士研究生,工程师。主要研究方向为飞行试验传感器技术。

王真,1986年出生,硕士研究生,工程师。主要研究方向为飞行试验传感器技术。
E-mail:zyq657@sina.cn