

加速度计标度因数测试结果差异性分析*

赵君轍¹, 欧阳恒², 张朋好¹, 尉飞艳¹

(1 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2 中国兵器工业第203研究所, 西安 710065)

摘要:为查找某型号加速度计标度因数复测结果与出厂结果相差 $0.1\mu A/g$ 左右的原因,文中从加速度计标度因数的测试和计算方法入手,结合加速度计自动测试系统的组成和测试原理,对标度因数的测量不确定度进行了评定,得出测试设备自身的测量不确定度是导致测试结果差异性的结论。

关键词:加速度计;标度因数;测量不确定度

中图分类号:TJ765.231 文献标志码:A

The Analysis on Accelerometer Scale Factor Test Result Difference

ZHAO Junzhe¹, OUYANG Heng², ZHANG Penghao¹, WEI Feiyan¹

(1 Changcheng Institute of Metrology and Measurement, AVIC, Beijing 100095, China;

2 No. 203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to find the reason why $0.1\mu A/g$ difference occurs between the a accelerometer's scale factor survey results and the delivery result, this article begins with the accelerometer scale factor test and calculation method, combined with automatic test system composition and testing principle, the scale factor uncertainty was evaluated. The conclusion is measurement uncertainty of the testing device itself causes different test result.

Keywords: accelerometer; scale factor; measurement uncertainty

0 引言

标度因数是加速度计最重要的技术指标之一,它的稳定性将直接影响导航与制导精度的稳定性。因此,主机单位在加速度计装弹前要对标度因数进行复测,同时将测试的结果与出厂验收时的数据进行对比,以判断其稳定性。为某型号导弹研制的加速度计在批产的过程中,验收合格产品在主机单位用同厂家同型号的加速度计自动测试设备对标度因数复测时,复测结果与出厂结果总会相差 $0.1\mu A/g$ 左右。为查找原因,文中从加速度计标度因数的测试和计算方法入手,结合加速度计自动测试系统的组成和测试原理,对标度因数的测量不确定度进行了评定,找出了测试结果差异性的原因。

1 标度因数的测试与计算方法

1.1 标度因数的测试方法

标度因数的测试采用加速度计自动测试系统进行,加速度计自动测试系统主要由角位置测量与控制

系统、初始水平位置测量系统、温度测量与控制系统及数据采集系统4部分组成^[1-2],具体见图1。具体测试方法是:由温度测量与控制系统控制加速度计到设定试验温度;由角度测量与控制系统控制角位置,利用重力加速度分量作为加速度计的输入,在重力场中对加速度计进行四点法翻滚试验,得到加速度计的标度因数测量值。

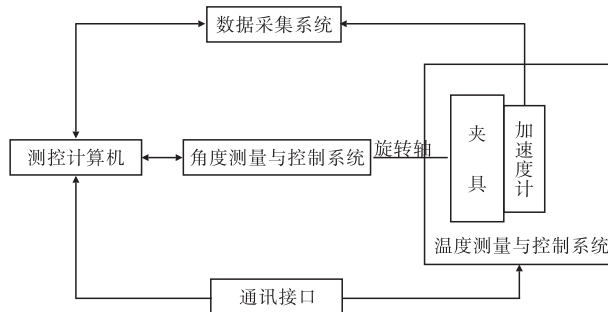


图1 加速度计自动测试系统组成

1.2 标度因数的计算方法

加速度计标度因数的计算方法采用国军标^[3]中四点法表达式,其具体计算公式为:

* 收稿日期:2012-08-11

作者简介:赵君轍(1977-),男,辽宁大连人,高级工程师,研究方向:惯性器件的设计开发,惯性器件与惯性测试设备校准方法研究。

$$K_1 = \frac{E_{90^\circ} - E_{270^\circ}}{R \cdot (a_{90^\circ} - a_{270^\circ})} \quad (1)$$

式中： K_1 为标度因数(mA/g)； a_{90° 为加速度计在分度位置 90° 即 $+1g$ 的输入加速度(g)； a_{270° 为加速度计在分度位置 270° 即 $-1g$ 的输入加速度(g)； E_{90° 为加速度计在分度位置 90° 即 $+1g$ 的输出(mV)； E_{270° 为加速度计在分度位置 270° 即 $-1g$ 的输出(mV)； R 为被测加速度计输出信号采样电阻(Ω)。

2 标度因数的测量不确定度评定^[4-5]

根据式(1)可知, K_1 的测量不确定度的来源包括 3 个部分:加速度计 $\pm 1g$ 输出信号的测量不确定度 $u(E_{\pm 1g})$ 、采样电阻的测量不确定度 $u(R)$ 和 $\pm 1g$ 输入加速度测量不确定度 $u(a_{\pm 1g})$ 。

2.1 加速度计输入加速度引入的标准不确定度 $u(a)$

加速度计自动测试系统中,当角度测量与控制系统的旋转轴与水平面的夹角调整到 $\pm 1'$ 以内,它产生的加速度可按下式简化:

$$a = g \cdot \sin(\Theta) \quad (2)$$

式中, Θ 为加速度计的输入轴与水平面的夹角。

从式(2) 可以看出影响输入加速度测量不确定度的分量有:重力加速度的测量不确定度和加速度计的输入轴与水平面夹角测量不确定度。重力加速度可通过专业部门测量,测量精度达到 $10^{-8}m/s^2$ 量级,因此,重力加速度的测量不确定度可忽略。加速度计的输入轴与水平面夹角 Θ 的测量不确定度 $u(\Theta)$ 包括 3 个部分:角度测量与控制系统的分度角 θ 的测量不确定度 $u(\theta)$ 、初始水平位置角 θ_0 的测量不确定度 $u(\theta_0)$ 、安装夹具的失准角 δ_θ 的测量不确定度 $u(\delta_\theta)$ 。

2.1.1 分度角 θ 引入的标准不确定度 $u(\theta)$

通过对角度测量与控制系统的检定,测量的极限误差: $\pm 3''$,再考虑角位置控制误差($\pm 2.88''$)和测角分辨力(取半个字: $\pm 0.18''$) 的因素,则角度测量与控制系统的最大误差为:

$$\Delta(\theta) = \sqrt{(3'')^2 + (2.88'')^2 + (0.18'')^2} = 4.2'' = 2.0 \times 10^{-5} \text{ rad} \quad (3)$$

假设其服从均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$,则:

$$u(\theta) = \frac{\Delta(\theta)}{\sqrt{3}} = 1.2 \times 10^{-5} \text{ rad} \quad (4)$$

2.1.2 初始水平位置角 θ_0 引入的标准不确定度 $u(\theta_0)$

初始水平位置的测量用 SDS-11 型电子水平仪,它的示值准确度为 $(1 + \frac{A}{50})$, A 为读数,测量结果为电

子水平仪相差 180° 两个位置示值差的一半,使用 II 档,读数范围控制在 ± 100 以内,读数极限误差为:

$$\Delta(\theta_0) = \pm 3 \times 0.2''$$

假设其服从均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$,则:

$$u(\theta_0) = \frac{|\Delta(\theta_0)|}{\sqrt{3}} = 1.7 \times 10^{-6} \text{ rad} \quad (5)$$

2.1.3 失准角 δ_θ 引入的标准不确定度 $u(\delta_\theta)$

安装夹具失准角 δ_θ 主要影响因素是夹具的平面度。安装夹具的长度为 150mm,平面度为 $5\mu m$ 。安装夹具选用低温度膨胀系数金属材料制造,其温度系数为 $2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。假设夹具随着工作温度均匀膨胀,夹具工作温度差不大于 2°C (温箱均匀度),温度差造成的最大变化量为:

$$150\text{mm} \times 2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 2^\circ\text{C} = 0.6\mu m$$

安装夹具的平面度最大为:

$$\sqrt{5^2 + 0.6^2} \mu m = 5.04\mu m。$$

安装夹具最大失准角为:

$$\Delta(\delta_\theta) = \frac{5.04\mu m}{150\text{mm}} = 3.4 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

假设其服从均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$,则:

$$u(\delta_\theta) = \frac{|\Delta(\delta_\theta)|}{\sqrt{3}} = 2.0 \times 10^{-5} \text{ rad} \quad (6)$$

2.1.4 输入轴与水平面夹角 Θ 引入的标准不确定度 $u(\Theta)$

角度测量与控制系统的分度角、初始水平位置角、安装夹具的失准角,相互独立。

$$u(\Theta) = \sqrt{u^2(\theta) + u^2(\theta_0) + u^2(\delta_\theta)} = 2.4 \times 10^{-5} \text{ rad} \quad (7)$$

2.1.5 输入加速度引入的标准不确定度

$$u(a) = \left| \frac{\partial a}{\partial \Theta} \right| \cdot u(\Theta) = g \cdot |\cos(\Theta)| \cdot u(\Theta) = |\cos(\Theta)| \times 2.4 \times 10^{-5} g \quad (8)$$

当 $\Theta = 90^\circ$ (或 270°),即输入加速度为 $+1g$ (或 $-1g$) 时, $u(a_{\pm 1g}) \approx 0g$ 。

2.2 输出信号引入的标准不确定度 $u(E_{\pm 1g})$

加速度计输出信号为直流电压信号,通过 Keithley 7011-S 通道扫描开关,由 Keithley 2001 数字电压表测量。加速度计 $\pm 1g$ 输出信号为 0.16V。Keithley 2001 数字电压表使用 200mV 量程,按其说明书,其最大测量误差为:

$$(0.16 \times 37 + 0.2 \times 6) \times 10^{-6} = 7.12 \times 10^{-6} \text{ V}$$

通道扫描开关 Keithley 7011-S 的接触电压小于 $1.5\mu V$,加速度计 $\pm 1g$ 输出信号测量的最大误差为:

参考文献:

[1] 高希光,宋迎东,孙志刚. 陶瓷基复合材料高精度宏细观统一本构模型研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(9): 1617 - 1622.

[2] 宋玉普. 多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2002.

[3] 邵军超,刘越. 颗粒增强金属基复合材料力学行为有限元模拟研究现状[J]. 材料导报, 2007, 21(9): 111 - 115.

[4] 宋卫东,王静,刘海燕. 颗粒增强复合材料真实结构有限元建模[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(6): 501 - 505.

[5] 赵玖玲. 复合固体推进剂力学损伤与细观损伤演化过程数值模拟[D]. 西安:第二炮兵工程学院, 2010.

[6] 侯善芹,刘书田. 颗粒增强复合材料弹性性能统计特征分析[J]. 科学技术与工程, 2008, 18(15): 4078 - 4082.

[7] 姜芳,宁建国. 有界面脱粘时颗粒增强金属基复合材料的弹塑性性能分析[J]. 材料工程, 2006(21): 366 - 373.

[8] Brassart L, Inglis H M, Delannay L, et al. An extended Mori-Tanaka method homogenization scheme for finite strain modeling of debonding in particle-reinforced elastomers[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(3): 611 - 616.

[9] 魏高峰,冯伟,高洪芬. 基于位移插值的 Voronoi 单元有限元方法[J]. 应用力学学报, 2008, 25(2): 342 - 346.

(上接第 168 页)

$$\Delta(E_{\pm 1g}) = \frac{\sqrt{(7.12 \times 10^{-6})^2 + (1.5 \times 10^{-6})^2}}{7.3 \times 10^{-6} V} = \quad (9)$$

假设其服从均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$, 则加速度计 $\pm 1g$ 输出信号的测量不确定度:

$$u(E_{\pm 1g}) = \frac{\Delta(E_{\pm 1g})}{\sqrt{3}} = 4.2 \times 10^{-6} V \quad (10)$$

2.3 采样电阻引入的标准不确定度 $u(R)$

采样电阻的测量不确定度包括电阻阻值的测量不确定度和电阻温度系数引入的测量不确定度。设备工作环境温度范围在 $(20^\circ C \pm 5^\circ C)$, 所选采样电阻标称值为 500Ω , 用 Keithley 数字电压表 2001 进行 4 线电阻测量。

2.3.1 电阻阻值引入的标准不确定度

2001 数字电压表使用 $2k\Omega$ 量程, 按其说明书中的计算公式, Keithley 2001 的最大测量误差为:

$$(500 \times 50 + 2000 \times 4) \times 10^{-6} = 0.033\Omega$$

假设其服从均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u(R_s) = \frac{0.033}{\sqrt{3}} = 0.019\Omega \quad (11)$$

2.3.2 电阻温度系数引入的标准不确定度

实际使用中, 采样电阻的温度系数: $3 \times 10^{-5} ^\circ C^{-1}$, 设备工作环境温度差最大 $5^\circ C$, 假设均匀分布, 则电阻温度系数引入的采样电阻测量不确定度为:

$$u(R_T) = \frac{500 \times 3 \times 10^{-5} \times 5}{\sqrt{3}} = 0.043\Omega \quad (12)$$

采样电阻的测量不确定度:

$$u(R) = \sqrt{u^2(R_s) + u^2(R_T)} = 0.047\Omega \quad (13)$$

2.4 标度因数 K_1 的合成标准不确定度 $u_c(K_1)$

根据式(1)可以得到各参数的传递系数分别为:

$$c_{E_{\pm 1g}} = \frac{1}{R \cdot (a_{90^\circ} - a_{270^\circ})} \quad (14)$$

$$c_R = - \frac{E_{90^\circ} - E_{270^\circ}}{R^2 \cdot (a_{90^\circ} - a_{270^\circ})} \quad (15)$$

$$c_{a_{\pm 1g}} = - \frac{E_{90^\circ} - E_{270^\circ}}{R \cdot (a_{90^\circ} - a_{270^\circ})^2} \quad (16)$$

由式(8)、式(10)、式(13) ~ 式(16) 及 $a_{90^\circ} = 1g, a_{270^\circ} = -1g, E_{90^\circ} = 0.16V, E_{270^\circ} = -0.16V, R = 500\Omega$, 则标度因数的合成标准不确定度为:

$$u_c(K_1) = \sqrt{2 \cdot (c_{E_{\pm 1g}} \cdot u(E_{\pm 1g}))^2 + (c_R \cdot u(R))^2 + 2 \cdot (c_{a_{\pm 1g}} \cdot u(a_{\pm 1g}))^2} = 5.7 \times 10^{-5} mA/g \quad (17)$$

2.5 标度因数 K_1 的扩展不确定度 $U(K_1)$

取包含因子 $k = 2$, 则加速度计标度因数的扩展不确定度为:

$$U(K_1) = k \cdot u_c(K_1) = 1.1 \times 10^{-4} mA/g, (k = 2) \quad (18)$$

3 结论

文中从加速度计标度因数的测试和计算方法入手, 结合加速度计自动测试系统的组成和测试原理, 得到了加速度计标度因数的测量不确定度为 $0.11\mu A/g$, 找出了标度因数复测结果与出厂验收结果差异性的原因是由测试设备引起的。

参考文献:

[1] 董雪明. 加速度计自动测试系统[J]. 计测技术, 2000, 20(2): 19 - 21.

[2] 徐永. 加速度计自动测试系统研制总结报告[R]. 中航工业计量所, 2004.

[3] GJB 1037A - 2004 单轴摆式伺服线加速度计试验方法[S].

[4] 沙定国, 刘智敏. 测量不确定度的表示方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.

[5] 李宗扬. 计量技术基础[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.