

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.02.12

加速度计标度因数的测量不确定度研究

于亚云, 熊磊

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 实际生产过程中加速度计标度因数重复测试结果总有 10^{-5} mA/g 量级误差, 为查找原因, 对加速度计进行重力场静态翻滚四点法试验, 利用加速度计测试系统的原理, 对标度因数进行测试和计算, 通过研究标度因数的测量不确定度, 找到了影响加速度计标度因数的测量误差来源, 证明了重复性测试误差在合理范围内。

关键词: 加速度计; 标度因数; 不确定度

中图分类号: TH824.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2018)02-0047-03

Repeated Test Error Analysis of the Accelerometer Scale Factor

YU Yayun, XIONG Lei

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In the production process, the repeatability test result have a 10^{-5} mA/g error of the accelerometer scale factor, accelerometer's static rolling four-point test is performed. Based on accelerometer test system testing principle, the accelerometer scale factor is tested and calculated, and the measurement uncertainty of scale factor is studied. The measurement error source that affects the accelerometer scale factor is found, and proved that the repeatability error is within a reasonable range.

Key words: accelerometer; scale factor; measurement uncertainty

0 引言

加速度计是惯性导航和制导系统的基本测量元件, 主要用于获取运动载体的速度和位置信息。加速度计的技术指标中, 最核心指标是标度因数 K_1 , K_1 的稳定性将直接影响惯导系统的稳定性, 因此在实际生产过程中, 对 K_1 进行不确定度分析就显得尤为重要^[1]。目前, 国内外对加速度计模型方程系数进行标定误差分析取得了很大进展, 但是对重力场下标度因数重复测试结果的差异分析几乎没有, 本文发现在对加速度计进行重复性测试时, 测试结果总有 10^{-5} mA/g 量级的误差, 为寻找测试误差的来源, 在重力场中, 利用静态翻滚四点法试验来测量加速度计的标度因数^[2], 利用加速度计测试系统的原理和方法, 建立静态数学模型, 对标度因数进行测试和计算, 通过研究标度因数的测量不确定度, 找到测试误差对标度因数的影响。

1 加速度计测试系统构成及原理

加速度计测试系统主要由高精度自动转角位置装置、高低温精密控制系统、水平校准测量系统和高精密数据分析与处理系统等几大模块组成^[3], 测试系统构成如图1所示。工作原理: 由高低温精密控制系统控制加速度计测试场所需要的测试环境, 并与工控

机进行通信; 高精度自动转角位置装置通过改变加速度计输入轴与重力场方向的夹角, 得到加速度计重力场分量; 由水平校准测量系统来测量和校准安装基准面的水平位置; 由高精密数据分析与处理系统对加速度计的输出信号、加速度计输入轴与重力加速度方向的夹角、加速度计的温度值等信号进行采集并控制, 建立静态数学模型, 计算出加速度计的标度因数。

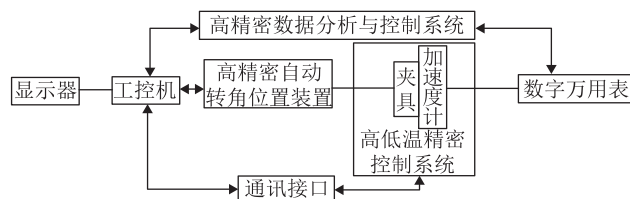


图1 测试系统构成框图

2 标度因数计算方法

将加速度计通过专用夹具安装在自动测试系统上, 加速度计输出信号通过通讯接口由数字万用表测量, 工控机通过接口对数字万用表的测量数据进行采集处理, 建立加速度计的静态数学模型, 并通过分析模型参数得出加速度计标度因数。静态数学模型方程^[4]为

$$A = \frac{E}{K_1 R} = K_0 + a_i + K_2 a_i^2 + \delta_0 a_p - \delta_p a_0 \quad (1)$$

式中: A 为加速度, g ; E 为加速度计输出, mV ; R 为采样电阻, Ω ; a_i 为沿输入基准轴方向的加速度分量, g ; a_p 为沿摆基准轴方向的加速度分量, g ; a_0 为沿输出基准轴方向的加速度分量, g ; K_0 为偏值, g ; K_1 为标度因数, mA/g ; K_2 为二次项系数, g/g^2 ; δ_0 为摆状态安装时安装基准面精度, rad ; δ_p 为门状态安装时安装基准面精度, rad 。

加速度计安装方式为摆态安装, 利用重力场静态

$$E_{0^\circ} = K_0 K_1 R + K_1 a_{0^\circ} \sin \theta_0 R + K_1 K_2 a_{0^\circ}^2 \sin^2 \theta_0 R - K_1 \delta_0 a_{0^\circ} \cos \theta_0 R \quad (3)$$

$$E_{90^\circ} = K_0 K_1 R + K_1 a_{90^\circ} \sin \theta_0 R + K_1 K_2 a_{90^\circ}^2 \cos^2 \theta_0 R - K_1 \delta_0 a_{90^\circ} \sin \theta_0 R \quad (4)$$

$$E_{180^\circ} = K_0 K_1 R - K_1 a_{180^\circ} \sin \theta_0 R + K_1 K_2 a_{180^\circ}^2 \sin^2 \theta_0 R + K_1 \delta_0 a_{180^\circ} \cos \theta_0 R \quad (5)$$

$$E_{270^\circ} = K_0 K_1 R - K_1 a_{270^\circ} \cos \theta_0 R + K_1 K_2 a_{270^\circ}^2 \cos^2 \theta_0 R - K_1 \delta_0 a_{270^\circ} \sin \theta_0 R \quad (6)$$

解方程组得

$$K_1 = \frac{\cos \theta_0 (E_{90^\circ} - E_{270^\circ})}{(a_{90^\circ} - a_{270^\circ}) R} - \frac{\sin \theta_0 (E_{180^\circ} - E_{0^\circ})}{(a_{180^\circ} - a_{0^\circ}) R} \quad (7)$$

3 标度因数测量不确定度的主要来源分析^[5-7]

由式(7)可以看出, K_1 与输入轴和初始水平位置的夹角 θ_0 、加速度计输出值 E 、输入加速度 a 和采样电阻 R 有关, 而 θ_0 , E , a , R 这四个参数也都是由相关仪器设备测量得到, 都具有测量不确定度, 从而导致标度因数测量结果的差异, 因此下面分别讨论这四个物理量的测量不确定度。

3.1 输入轴与初始水平位置夹角的测量不确定度 u_{θ_0}

初始水平位置的测量用 NT-11 型电子水平仪, 日常使用中选择 II 档, 分辨力为 0.001 mm/m (相当于 $0.2''/\text{字}$), 水平仪的读数范围控制在 ± 200 个字以内, 其最大允许示值误差为 $\delta_{\theta_0} = (1 + A \times 2\%) \Delta = 5 \times 10^{-6} \text{ rad}$, 其中 $A = 200$, Δ 为分辨力, 假设服从均匀分布

$$u_{\theta_0} = \frac{\delta_{\theta_0}}{\sqrt{3}} = 2.9 \times 10^{-6} \text{ rad} \quad (8)$$

$$u_{K_1}(\theta_0) = \frac{\partial K_1}{\partial \theta_0} u_{\theta_0} = \left[\frac{-\sin \theta_0 (E_{90^\circ} - E_{270^\circ})}{(a_{90^\circ} - a_{270^\circ}) R} - \frac{\cos \theta_0 (E_{180^\circ} - E_{0^\circ})}{(a_{180^\circ} - a_{0^\circ}) R} \right] u_{\theta_0} \quad (9)$$

3.2 加速度计输出值的测量不确定度 u_E

在重力场试验中, 自动测试系统输出电信号通过通讯接口由数字万用表测量, 数字万用表的精度直接影

翻滚四点法试验进行标度因数测试。设 θ 为加速度计的输入轴与水平面的夹角, 当 θ 为 0° , 90° , 180° , 270° 时, 加速度计输出分别为 E_{0° , E_{90° , E_{180° , E_{270° ; θ_0 为摆态安装方式下初始水平位置角, 则

$$\begin{cases} a_i = g \sin(\theta + \theta_0) \\ a_p = -g \cos(\theta + \theta_0) \\ a_0 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入(1)得

$$E_{0^\circ} = K_0 K_1 R + K_1 a_{0^\circ} \sin \theta_0 R + K_1 K_2 a_{0^\circ}^2 \sin^2 \theta_0 R - K_1 \delta_0 a_{0^\circ} \cos \theta_0 R \quad (3)$$

$$E_{90^\circ} = K_0 K_1 R + K_1 a_{90^\circ} \sin \theta_0 R + K_1 K_2 a_{90^\circ}^2 \cos^2 \theta_0 R - K_1 \delta_0 a_{90^\circ} \sin \theta_0 R \quad (4)$$

$$E_{180^\circ} = K_0 K_1 R - K_1 a_{180^\circ} \sin \theta_0 R + K_1 K_2 a_{180^\circ}^2 \sin^2 \theta_0 R + K_1 \delta_0 a_{180^\circ} \cos \theta_0 R \quad (5)$$

$$E_{270^\circ} = K_0 K_1 R - K_1 a_{270^\circ} \cos \theta_0 R + K_1 K_2 a_{270^\circ}^2 \cos^2 \theta_0 R - K_1 \delta_0 a_{270^\circ} \sin \theta_0 R \quad (6)$$

响标度因数的测量不确定度。采用安捷伦 34401A 数字电压表, 加速度计 $E_{\pm 1g} = 100 \text{ mV}$, 使用 1 V 量程, 根据用户手册计算公式可得其最大允许误差 $\delta_E = 1.1 \times 10^{-5} \text{ V}$, 假设服从均匀分布

$$u_E = \frac{\delta_E}{\sqrt{3}} = 6.4 \times 10^{-6} \text{ V} \quad (10)$$

$$u_{K_1}(E) = \frac{\partial K_1}{\partial E} u_E = \left[\frac{\cos \theta_0}{(a_{90^\circ} - a_{270^\circ}) R} - \frac{\sin \theta_0}{(a_{180^\circ} - a_{0^\circ}) R} \right] u_E \quad (11)$$

3.3 输入加速度测量不确定度 u_a

由于 $a = g \sin \theta$, $u_a(\theta) = \frac{\partial a}{\partial \theta} u_\theta = (g \cos \theta) u_\theta$, 所以输入加速度测量不确定度是由输入轴与水平面夹角测量不确定度引起的。输入轴与水平面夹角 θ 的测量误差 δ_θ 的来源主要有光栅的刻划误差和计数器 ± 1 个脉冲误差。采用 5000 线的圆光栅编码器, 其刻划误差为 $\delta(\phi_1) = 10''$, 假设服从均匀分布, $u(\phi_1) = \frac{\delta(\phi_1)}{\sqrt{3}} = 5.8''$; 计数器的计数误差为 $\delta(\phi_2) = 0.36''$, 假设服从均匀分布, $u(\phi_2) = \frac{\delta(\phi_2)}{\sqrt{3}} = 0.21''$, 输入轴与水平面夹角测量不确定度为

$$u(\theta) = \sqrt{u^2(\phi_1) + u^2(\phi_2)} = 5.8'' = 2.8 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

$$u_a(\theta) = \frac{\partial a}{\partial \theta} u_\theta = (g \cos \theta) u_\theta \quad (12)$$

$$u_{K_1}(a) = \frac{\partial K_1}{\partial a} u_a = - \left[\frac{\cos \theta_0 (E_{90^\circ} - E_{270^\circ})}{(a_{90^\circ} - a_{270^\circ})^2 R} - \frac{\sin \theta_0 (E_{180^\circ} - E_{0^\circ})}{(a_{180^\circ} - a_{0^\circ})^2 R} \right] u_a \quad (13)$$

$$u_{K_1}(\alpha) = \frac{\partial K_1}{\partial a} u_a = \frac{\cos \theta_0 (E_{90^\circ} - E_{270^\circ})}{(a_{90^\circ} - a_{270^\circ})^2 R} (g \cos \theta) u_\theta + \frac{\sin \theta_0 (E_{180^\circ} - E_{0^\circ})}{(a_{180^\circ} - a_{0^\circ})^2 R} (g \cos \theta) u_\theta \quad (14)$$

当 $\theta = 90^\circ$ 或 $\theta = 270^\circ$ 时, $\cos \theta = 0$; 当 $\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 180^\circ$ 时, $\cos \theta = 1$ 。代入式(14), 得

$$u_{K_1}(a) = \frac{\partial K_1}{\partial a} u_a = - \frac{\cos \theta_0 (E_{90^\circ} - E_{270^\circ})}{(a_{90^\circ} - a_{270^\circ})^2 R} u_\theta g + \frac{\sin \theta_0 (E_{180^\circ} - E_{0^\circ})}{(a_{180^\circ} - a_{0^\circ})^2 R} u_\theta g \quad (15)$$

3.4 采样电阻测量不确定度 u_R

加速度计测试系统选用 RX70 型电阻器, 标称值为 $5\ 00\ \Omega$, 用安捷伦 34401A 数字电压表进行测量, 使用 $1\ \text{k}\Omega$ 量程, 试验室温度 $23 \pm 5\ ^\circ\text{C}$, 温度系数为 $15\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$, 根据用户手册计算公式可得其最大允许误差 $\delta_{R1} = 500 \times 0.010\% + 1000 \times 0.001\% = 0.06\ \Omega$, 温度系数引起的误差 $\delta_{R2} = 500 \times 15 \times 10^{-6} \times 5 = 0.0375\ \Omega$, 假设均服从均匀分布 $u_{R1} = \frac{\delta_{R1}}{\sqrt{3}} = 0.035\ \Omega$, $u_{R2} = \frac{\delta_{R2}}{\sqrt{3}} = 0.022\ \Omega$, 则

$$u_R = \sqrt{u_{R1}^2 + u_{R2}^2} = 0.04\ \Omega \quad (16)$$

$$u_{K_1}(R) = \frac{\partial K_1}{\partial R} u_R = - \left[\frac{\cos\theta_0 (E_{90^\circ} - E_{270^\circ})}{(a_{90^\circ} - a_{270^\circ}) R^2} - \frac{\sin\theta_0 (E_{180^\circ} - E_{0^\circ})}{(a_{180^\circ} - a_{0^\circ}) R^2} \right] u_R \quad (17)$$

3.5 标度因数的扩展不确定度

不考虑式(7)中各分量之间的相关性, 可得 K_1 的合成标准不确定度为

$$u_c(K_1) = \sqrt{2u_{K_1}^2(\theta_0) + 4u_{K_1}^2(E) + 4u_{K_1}^2(a) + 2u_{K_1}^2(R)} \quad (18)$$

将式(9), (11), (15), (17)代入式(18), 并且 $\cos\theta_0 = 1$, $\sin\theta_0 = 0$, $E_{0^\circ} = 0\ \text{V}$, $E_{90^\circ} = 0.1\ \text{V}$, $E_{180^\circ} = 0\ \text{V}$, $E_{270^\circ} = -0.1\ \text{V}$, $R = 500\ \Omega$, $a_{0^\circ} = 0\ \text{g}$, $a_{90^\circ} = 1\ \text{g}$, $a_{180^\circ} = 0\ \text{g}$, $a_{270^\circ} = -1\ \text{g}$, 可得 $u_c(K_1) = 2.6 \times 10^{-8}\ \text{A/g}$, 则扩展不确定度为

$$\begin{aligned} u(K_1) &= k u_c(K_1) \\ &= 2 \times 2.6 \times 10^{-8} \\ &= 5.2 \times 10^{-5}\ \text{mA/g} \quad (k=2) \end{aligned}$$

4 试验验证与结论

根据加速度计产品制造与验收规范的要求, 利用上述原理和测试方法对 2 只加速度计(编号分别为 001 和 002)进行 8 次重复性试验, 试验结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 2 只加速度计产品经过 8 次重复试验后, 001 号产品标度因数最大误差为 $K_{1\text{max}(1)} - K_{1\text{min}(1)} = 1.0 \times 10^{-5}\ \text{mA/g}$, 标准差为 $S_{K_1(1)} = 3.0 \times 10^{-6}\ \text{mA/g}$; 002 号产品标度因数最大误差为 $K_{1\text{max}(2)} - K_{1\text{min}(2)} = 1.2 \times 10^{-5}\ \text{mA/g}$, 标准差为 $S_{K_1(2)} = 4.3 \times 10^{-6}\ \text{mA/g}$, 利用标准不确定度 A 类评定方法, 两只产品标准差均小于式(18)求得的扩展不确定度 $5.2 \times 10^{-5}\ \text{mA/g}$, 试验证明对加速度计进行重复性测试后, 标度因数存在 $10^{-5}\ \text{mA/g}$ 量级的误差是在合理范围内, 为以后对加速度计标度因数进行稳定性分析提供了依据。

表 1 标度因数测量结果

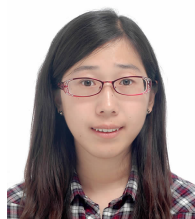
编号	试验次数	加速度计输出/($\text{mV} \cdot \text{g}^{-1}$)				$K_1 / (\text{mV} \cdot \text{g}^{-1})$
		0°	90°	180°	270°	
001	1	0.0601	99.9047	-0.1018	-99.9304	0.199843
	2	0.0547	99.8993	-0.1104	-99.9394	0.199846
	3	0.0530	99.8941	-0.1133	-99.9394	0.199838
	4	0.0544	99.8942	-0.1146	-99.9402	0.199840
	5	0.0589	99.9021	-0.1086	-99.9325	0.199845
	6	0.0566	99.9006	-0.1098	-99.9388	0.199842
	7	0.0603	99.9055	-0.1006	-99.9289	0.199848
	8	0.0572	99.8999	-0.1093	-99.9319	0.199842
002	1	0.0420	99.9456	-0.0480	-99.9427	0.199871
	2	0.0393	99.9383	-0.0495	-99.9389	0.199881
	3	0.0423	99.9310	-0.0533	-99.9386	0.199872
	4	0.0394	99.9314	-0.0534	-99.9375	0.199870
	5	0.0397	99.9395	-0.0529	-99.9402	0.199876
	6	0.0425	99.9452	-0.0501	-99.9435	0.199882
	7	0.0390	99.9351	-0.0526	-99.9408	0.199875
	8	0.0421	99.9299	-0.0492	-99.9398	0.199879

利用加速度计测试系统的原理和方法, 建立了静态数学模型, 通过研究标度因数的测量不确定度, 找到影响标度因数的误差来源主要包括输入轴与初始水平位置夹角、数字电压表、输入加速度和采样电阻四部分, 并且通过试验验证这四部分引起的误差为 $10^{-5}\ \text{mA/g}$ 量级, 能够满足加速度计的使用要求。

参 考 文 献

- [1] 宁菲. 线加速度计标定误差分析及不确定度研究[D]. 四川: 中国工程物理研究院, 2013.
- [2] 王大千, 张英敏. 加速度计 $1\ \text{g}$ 重力场静态翻滚测试与误差分析[J]. 机械与电子, 2009(1): 34-36.
- [3] 刘梅, 李秋萍, 潘成炜. 一种加速度计自动测试系统的设计与应用[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(5): 31-33.
- [4] 殷正和, 李丹东, 王晓东, 等. GJB 1037A-2004 单轴摆式伺服线加速度计试验方法[S]. 2004.
- [5] 屈少波, 吴书朝, 周泽兵. 摆式加速度计零偏测量中安装误差的分析[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(5): 69-72.
- [6] 廖波勇. 石英振梁加速度计性能标定及误差补偿技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [7] 汤莉, 王雷, 孟慧丽, 等. 石英加速度计重力场试验定位基准问题与解决方案[J]. 航天控制, 2013, 31(2): 89-93.

收稿日期: 2017-12-14



于亚云(1987-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事惯性器件测试与研发工作。