基于模糊理论的加速度计标度因数稳定性分析

黄小凯 陈云霞 张叔农 康 锐

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 运用模糊理论描述了影响加速度计标度因数稳定性诸多因素的不确定性问题,针对其中的磁钢磁感应强度和石英摆片热膨胀系数两类稳定性影响因素,给出了其三角模糊数区间,并通过该型加速度计的磁-结构耦合 ANSYS 分析求出了在模糊参数不同组合下的仿真输出,根据仿真输出结果获得了标度因数模糊稳定区间,给出了加速度计标度因数稳定性分析流程及实例. 分析说明了基于模糊理论的稳定性分析方法可以为加速度计加速稳定试验截止条件提供依据,对提高加速度计标度因数长期稳定性水平具有重要意义.

关 键 词: 石英挠性加速度计; 稳定性; 三角模糊数; 磁-结构耦合分析; 加速稳定判据

中图分类号: V 241.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0133-05

Stability analysis on scale factor of accelerometer based on fuzzy theory

Huang Xiaokai Chen Yunxia Zhang Shunong Kang Rui

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Fuzzy theory was used to analyze the scale factor stability of accelerometer, since many affected factors of scale factor of accelerometer emerged some uncertainty nature, which can be describe by fuzzy theory. Specifically, triangular fuzzy numbers was used to derive the changing interval of magnetic flux density and thermal expansion coefficient of quartz material, which is the dominant affected factors for scale factor stability, according to the different combination of triangular fuzzy numbers results, ANSYS magnetic-structure coupling simulation was introduced to get the different accelerometer simulation output, and then obtained the scale factor fuzzy stability interval, which was applied to the analysis of scale factor stable condition in the accelerometer accelerated stability test and the conclusion was properly. The conclusion illustrate that fuzzy theory analysis of scale factor stability can provide appropriately condition in the accelerometer accelerated stability test, for neither waste the cost of the test nor inadequate for the result, the conclusion also have great significance to the improvement of accuracy level for the long-term stability of accelerometer scale factor.

Key words: accelerometer; stability; triangular fuzzy numbers; magnetic-structure coupling simulation; accelerated stability criterion

石英挠性加速度计是惯性导航系统中不可或缺的关键惯性器件,用来测量载体的线加速度,通过对线加速度进行两次积分获得载体的运动轨迹(载体的速度和距离). 加速度计在贮存过程中不可避免地受到环境应力作用(如温度、振动的时间累积应力作用),使得生产、加工过程中存在的残余应力及装配应力逐步释放,这些释放使得石英挠性加速度计输入和输出传递函数中本应为常值的零偏和标度因数随时间而发生漂移,导致石英挠性加速度计的实际测量值并不等于理想输出,严重影响了惯性导航系统的导航精度.

零偏和标度因数随时间漂移的特性用稳定性来描述,且国内外很多文献对加速度计稳定性影响机理进行了大量分析,给出了稳定性水平评估

收稿日期: 2010-09-19; **网络出版时间**: 2012-01-06 15:11; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20120106.1511.013

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120106.1511.013.html

作者简介: 黄小凯(1986 -),男,湖南益阳人,硕士生,huangxiaokai1986@126.com.

方法. 文献[1]通过分析加速度计理想输出曲线和实际曲线误差,综合归纳了加速度计的稳定误差类型;文献[2]从结构设计、残余应力等方面探索了引起加速度计参数漂移的原因;GJB1037A-2004[3]从统计分析角度给出了工程上通用的石英挠性加速度计稳定性水平计算公式及其试验测量方法. 但对于加速度计稳定化处理试验中零偏和标度因数需满足的稳定条件,即零偏和标度因数从不稳定到稳定的判定方法,目前尚缺乏有效研究.

标度因数稳定性因其影响机理简单、规律易分析,可作为加速度计稳定性分析的切入点. 本文基于模糊理论思想,通过对影响加速度计标度因数稳定性因素进行不确定分析,采用三角模糊数对其中的磁钢磁感应强度和石英摆片热膨胀系数稳定性影响因素进行了模糊化分析,且给出了其三角模糊数区间,根据分析结果应用 ANSYS 有限元软件对模糊参数进行了加速度计磁-结构耦合分析,给出了加速度计标度因数稳定性变化范围,从而为加速度计加速稳定试验截止条件的制定提供了依据. 本文的研究方法和结论对进一步探索加速度计标度因数加速稳定的机理和提高长期贮存条件下加速度计标度因数的长期稳定精度水平具有重要意义.

1 漂移影响因素模糊分析

标度因数的稳定性会直接影响到加速度计的测量精度,生产过程中尽量采用性能稳定的材料和采取误差补偿措施,但仍然不能保证加速度计的高精度要求,其主要原因是加速度计在装配、贮存过程中存在很多不确定性因素,如装配应力的不均匀会导致材料属性发生不确定变化,贮存温度的微小波动也会导致许多与热有关的材料参数发生不确定性变化. 通过设计适当的产品层次稳定化处理试验可以将这种不确定性变化缩小到允许的范围之内,但现有工艺条件下无法监测上述不确定性变化的时序信息,从而无法确定稳定化处理试验的条件(如试验截止时间等).

模糊理论认为参数的"稳定"存在波动,参数在其稳定值附近波动虽然精度会下降,但仍能满足稳定性要求,精确限定参数值会产生不应有的信息损失. 三角模糊数常用于代表包含真值的区间,用三角模糊数描述一模糊事件时,可将参数值限制在一个可接受的范围内[4],因此本文可采用三角模糊数方法将不确定性因素对永磁材料磁感应强度和石英摆片热膨胀系数的影响约束在一区间内,在此范围内变化加速度计标度因数的稳定性均能满足要求,并可用稳定区间判断稳定化处理试验中标度因数进入稳定所需的试验条件.

三角模糊数如图 1 所示.

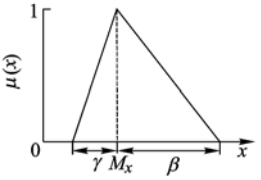

图 1 三角模糊数

图 1 中 $\mu(x) \in [0,1]$ 在模糊理论中称为对 x 的隶属度,参数 x 越靠近 M_x(稳定均值)隶属度越大,用 γ,β 表示参数 x 偏离稳定均值的波动程度,则三角模糊数稳定区间可表示为

$$x = [M_x - \gamma, M_x + \beta] \tag{1}$$

式中,$\gamma = \lambda_1 x$;$\beta = \lambda_2 x$. $\lambda_1, \lambda_2 \in [0,1]$,且由 x 的模糊性、不确定性决定,且使 x 的波动在模糊区间内,通常可取 $\lambda_1 = \lambda_2$.

1.1 磁感应强度模糊处理

磁钢磁感应强度的稳定性可用剩磁和磁感矫顽力的波动程度表示,当磁体从 t_0 时刻到 t 时刻、温度从 T_0 变化到 T 时,磁体剩磁从 $B_r(t_0,T_0)$ 变化到 $B_r(t,T)$,其变化率[5]可用下式表示:

$$\alpha_{B_r} = -\frac{B_r(t_0,T_0) - B_r(t,T)}{B_r(t_0,T_0) \times (t - t_0)} \times 100\% \tag{2}$$

根据式(2)推导原理,同理可得磁感矫顽力 H_{cb} 的变化率可表示为

$$\beta_{H_{cb}} = -\frac{H_{cb}(t_0,T_0) - H_{cb}(t,T)}{H_{cb}(t_0,T_0) \times (t - t_0)} \times 100\% \tag{3}$$

常温下石英挠性加速度计磁钢所用的 Sm_2Co_{17} 永磁材料中参数的剩磁和矫顽力单点稳定值分别为 $B_r = 0.77$ T 和 $H_{cb} = 540$ kA/m[6],且剩磁、矫顽力温度系数分别为 -0.0004 和 -0.00035/℃[7],结合加速度计贮存温度为 $-5 \sim 45$℃[3],可得在贮存条件下剩磁和矫顽力的波动大小分别为 $(45+5) \times 0.04\% = 2\%$ 和 $(45+5) \times 0.035\% = 1.75\%$.

根据加速度计精度特点和三角模糊数原理可得:在剩磁中取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 2\%$ 和在矫顽力中取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.75\%$ 时,各模糊稳定区间为

$$B_r = [M_{B_r} - \gamma, M_{B_r} + \beta] = [0.77 - 0.77 \times 2\%, 0.77 + 0.77 \times 2\%] = [0.7546, 0.7854] \tag{4}$$

$$H_{cb} = [M_{H_{cb}} - \gamma, M_{H_{cb}} + \beta] = [540 - 540 \times 1.75\%, 540 + 540 \times 1.75\%] = [530.55, 549.45] \tag{5}$$

1.2　热膨胀系数模糊处理

加速度计中石英摆片的性能稳定性可用热膨胀系数的变化来表示,根据文献[8]中石英玻璃温度系数随温度的变化规律,可得在贮存温度为 $-5\sim45$℃范围内,石英玻璃的热膨胀系数插值计算变化范围为 $3.84\times10^{-7}\sim4.56\times10^{-7}$,即石英玻璃热膨胀系数的模糊稳定区间为

$$a=[3.84\times10^{-7},4.56\times10^{-7}] \tag{6}$$

2　模糊参数磁-结构耦合仿真

由于无法得到模糊参数与加速度计标度因数的解析表达式,所以采用 ANSYS 中的磁-结构耦合仿真来得到在模糊参数影响下加速度计标度因数的变化范围.

ANSYS 磁-结构耦合仿真过程描述如下:在 $+1g$ 和 $-1g$ 加速度条件下分别输入剩磁、磁感矫顽力、内禀矫顽力和热膨胀系数模糊稳定区间上、下边界值,和各部件的材料属性值(如密度、弹性模量、泊松比、相对导磁率和退磁曲线等),施加全局温度 $T=20$℃(常温),将伺服电路部分的传递关系(式(7)所示)加载到 ANSYS 有限元仿真中,通过耦合分析计算初始时刻(电流为 I_0)时的石英摆片位移 L_1,把位移 L_1 代入伺服电路公式得反馈电流 I_1,将 I_1 作为新的电流载荷再次进行耦合分析得到位移 L_2,重复以上过程直到惯性力矩与电磁力矩达到平衡时仿真结束,记录此时的反馈电流即为加速度计输出电流,将输出电流乘以采样电阻后得到加速度计的输出电压.

伺服电路部分的传递关系式[9-11]如下:

$$U=K_\theta K_{\mathrm{d}}K_{\mathrm{I}}K_{\mathrm{g}}\Delta\theta\times R \tag{7}$$

将各级传递系数展开如下:

$$\left.\begin{aligned}K_\theta&=\frac{\Delta C}{\Delta\theta}\\K_{\mathrm{d}}&=\frac{\Delta I_{\mathrm{d}}}{\Delta C}=f_0(V_{\mathrm{T}}-2V_{\mathrm{be}})\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

$$\left.\begin{aligned}K_{\mathrm{I}}(s)&=\frac{R(C_1+C_2)s+1}{C_1s(RC_2s+1)}\\K_{\mathrm{g}}(s)&=\frac{K_1K_2}{1+K_1K_2K_3K_4}\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

$$\Delta\theta\approx\sin\Delta\theta=\frac{\delta}{L}$$

式中,ΔI 为输出电压;$\Delta\theta$ 为摆偏角;ΔC 为电容差值;f_0 为基准三角波的频率;V_{T} 为基准三角波电压峰值;V_{be} 为晶体管的基-射结正向压降;C_1,C_2 为电容值;R 为电阻值;s 为拉普拉斯变量;K_1,K_2,K_3,K_4 为跨导补偿放大器中的放大及变换系数;δ 为石英摆片位移,由于是闭环情况,$\Delta\theta$ 应该是很小的值,所以有 $\Delta\theta\approx\sin\Delta\theta$. 根据石英挠性加速度计生产设计指标,合理选取各参数,可得 $K_\theta=3.29\times10^4$ pF/rad,$K_{\mathrm{d}}=2.3\times10^6$ A/pF,$K_{\mathrm{I}}=4.76\times10^2$ V/A,$K_{\mathrm{g}}=1.02$ A/V,$R=1$ kΩ,则 $U/\Delta\theta=3.67\times10^4$ V/rad.

结合石英挠性加速度计设计参数,确定各部件尺寸并建立几何模型、网格划分、约束和求解,得到石英挠性加速度计在 $+1g$ 和 $-1g$ 加速度条件下,式(4)~式(6)中各影响因素模糊稳定区间上、下限组合下的磁-结构耦合仿真输出电压如表 1 所示.

表 1　加速度计磁-结构耦合仿真结果

输入环境条件	模糊变量组合 $(B_{\mathrm{r}},H_{\mathrm{cb}},\alpha)$	仿真输出电压/V
$+1g$,25℃	下限 $(0.7546,530.55,3.84\times10^{-7})$	2.2050503
	上限 $(0.7854,549.45,4.56\times10^{-7})$	2.2050558
$-1g$,25℃	下限 $(0.7546,530.55,3.84\times10^{-7})$	−2.2050507
	上限 $(0.7854,549.45,4.56\times10^{-7})$	−2.2050552

由表 1 可知,在磁钢磁感应强度和石英摆片热膨胀系数三角模糊数处理下,通过 ANSYS 磁-结构耦合有限元仿真分析,得到的石英挠性加速度计输出电压变化范围为

$$\left.\begin{aligned}U_{+1g}&\in[2.2050503,2.2050558]\\U_{-1g}&\in[-2.2050552,-2.2050507]\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

将式(10)代入石英挠性加速度计标度因计算公式 $K_{\mathrm{I}}=(U_{+1g}-U_{-1g})/(2g)$ 中可得

$$2.2050505=(U_{+1g}^{\min}-U_{-1g}^{\max})/(2g)\leqslant K_{\mathrm{I}}\leqslant(U_{+1g}^{\max}-U_{-1g}^{\min})/(2g)=2.2050555 \tag{11}$$

式(11)即为加速度计标度因数稳定性变化范围,如果某石英挠性加速度计的标度因数始终在上述范围内变化,则说明加速度计产品层次的稳定化处理试验已将不确定性因素对磁钢磁感应强度和石英摆片热膨胀系数的影响限制在标度因数稳定性要求允许范围内.

3　加速度计标度因数稳定判定

由上面的分析可知,对于正在进行加速稳定试验的石英挠性加速度计产品,可以用式(11)中的稳定区间来判定标度因数进入稳定区间所需的试验条件(如所需试验循环数、试验时间等),其判定分析流程和具体步骤如图 2 所示.

具体操作步骤如下:

1) 数据有效性分析. 在对标度因数试验数据进行稳定判定以前,需要进行试验数据的有效性

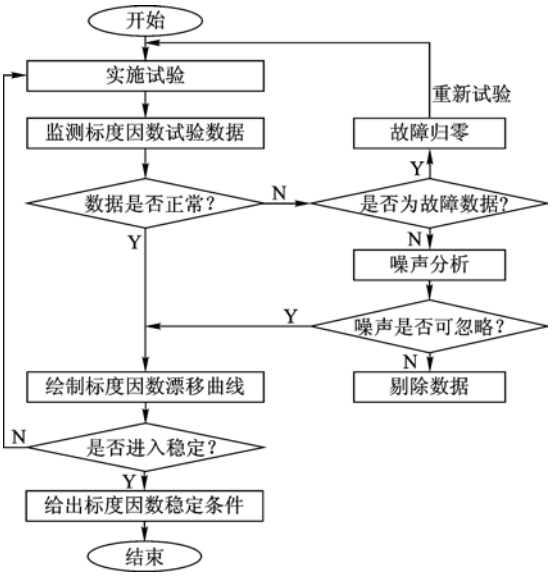

图 2 标度因数稳定分析流程

分析,分析判断数据变化是否参杂测量噪声太大导致的数据异常波动信息和故障使数据异常波动信息,数据的有效性分析可以通过移动极差控制图来判断.

移动极差控制理论认为参数的漂移过程是一个有稳态规律的变化过程,这种变化过程可用质量控制图进行分析,例如:如果在参数的漂移过程中出现故障数据或试验测试误差太大,均会使数据跳出移动极差控制带,这时需要分析异常数据(必要时需要剔除此数据),若测量数据均分布在极差均值附近且在控制线内,则说明试验数据是有效的.

移动极差控制理论的控制界限[12]定义如下:

$$\left.\begin{aligned} M_{\mathrm{R}} &= \sum R_j/K \\ U_{\mathrm{CL}} &= D_4\bar{R} \\ L_{\mathrm{CL}} &= D_3\bar{R} \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

其中,R_j 表示移动极差;σ_{R} 为移动极差的标准偏差;M_{R} 表示极差均值;U_{CL} 和 L_{CL} 分别表示控制上限和下限;$D_4 = 1 + 3\sigma_R/\bar{R}$;$D_3 = 1 - 3\sigma_{\mathrm{R}}/\bar{R}$.

2) 标度因数稳定判定. 在上述数据有效性分析结果基础上,分析异常数据后绘制标度因数变化曲线图,并与式(11)中给出的标度因数稳定性水平上下极限比较分析,判定标度因数开始进入稳定区域的试验条件(如试验循环数、试验时间等).

4 实例验证分析

工程上为研究某石英挠性加速度计参数稳定化过程,进行了温度 + 振动(120℃恒温和随机振动)综合循环加速稳定试验[3],本文选取 3 个样本各 37 组标度因数试验数据为研究对象,来验证基于模糊理论的加速度计标度因数稳定性分析方法的正确性. 下面以第 1 个样本为例详细介绍其分析流程,其 37 个试验循环标度因数测量数据如表 2 所示.

表 2 稳定化处理试验中标度因数测量数据

循环数	标度因数/(V·g^{-1})	循环数	标度因数/(V·g^{-1})
1	2.205 058 0	20	2.205 053 2
2	2.205 057 1	21	2.205 052 0
3	2.205 056 1	22	2.205 052 9
4	2.205 055 4	23	2.205 053 1
5	2.205 054 4	24	2.205 051 7
6	2.205 054 0	25	2.205 052 0
7	2.205 051 8	26	2.205 051 8
8	2.205 052 1	27	2.205 051 5
9	2.205 052 2	28	2.205 051 0
10	2.205 052 3	29	2.205 051 2
11	2.205 052 0	30	2.205 051 8
12	2.205 052 2	31	2.205 052 6
13	2.205 052 5	32	2.205 052 3
14	2.205 052 5	33	2.205 051 3
15	2.205 054 6	34	2.205 051 3
16	2.205 054 2	35	2.205 051 8
17	2.205 054 3	36	2.205 055 4
18	2.205 054 1	37	2.205 053 8
19	2.205 054 3		

1) 数据有效性分析. 根据式(12)定义,得到表 2 数据的移动极差控制图如图 3 所示.

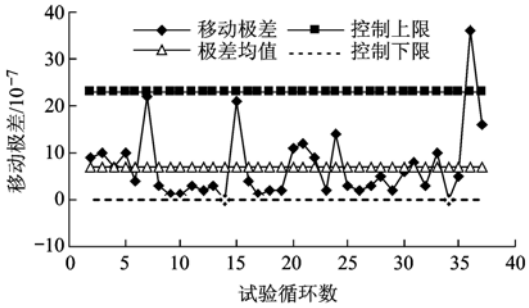

图 3 标度因数移动极差控制图

从图 3 中可知第 36 个数据异常,经承制方、军方和第三方评审后认为产品没有故障(第 37 个数据正常),而是由于在高应力长时间作用条件下,加速度计内部器件(如胶粘接剂)发生材料蠕变或退化,导致标度因数的波动程度变大,参数逐步由稳定变得不稳定(工程上称为参数退化),而此次试验目的是研究加速度计加速稳定条件(参数稳定和参数退化机理不同),所以试验结束,且第 36 个数据不剔除.

2) 标度因数稳定性判定. 根据上述数据有效性分析结果,绘制标度因数变化和稳定判据上、下限值曲线,如图 4 所示.

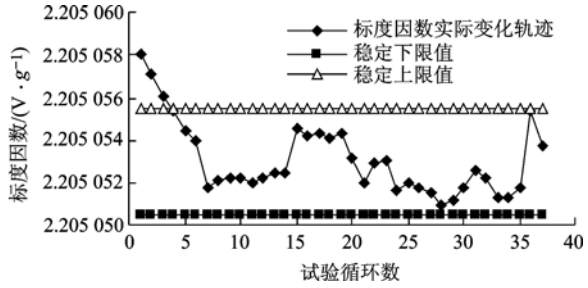

图 4　标度因数实际轨迹图

从图 4 可看出,经过 4 个试验循环后第 1 个样本石英挠性加速度计标度因数开始进入稳定,且此后测量的标度因数数据均满足稳定性要求.

同理,可得第 2,3 个样本进入稳定所需的循环数分别为 6 和 5,由于样本的分散性,从而使得试验结果出现偏差,这与工程实际情况相符,且在工程上一般取各样本数据计算的试验循环平均数 (4 +6 +5)/3 =5 为依据,所以在以后批次产品的稳定化处理试验中只需要进行 5 个试验循环,节省了大量试验成本.

5　结　论

1) 提出了标度因数影响因素不确定性的三角模糊数描述方法;

2) 采用磁-结构耦合有限元仿真得到了不确定性因素影响下加速度计标度因数的输出变化范围;

3) 给出了石英挠性加速度计标度因数加速稳定试验的稳定界限,运用该判据可以监测和判定标度因数的稳定状态;

4) 利用石英挠性加速度计稳定化处理试验测量数据进行了实例验证分析.

本文的研究结论对于明确石英挠性加速度计稳定化处理试验所需试验条件、合理分配试验成本具有实用价值,同时对进一步研究长期贮存条件下加速度计标度因数的长期稳定精度水平具有重要的理论意义.

参考文献 (References)

[1] Biezad D J. Integrated navigation and guidance system[M]. America:the Aerospace Press,2006:48 -100

[2] 孙玉声,戴莲瑾,于奎,等. 石英挠性加速度计参数计算与误差项分析[J]. 振动与动态测试,1984(3):13 -22
Sun Yunsheng,Dai Lianjin Yu Kui,et al. Quartz accelerometers calculation and analysis of the error [J]. Vibration and Dynamic Testing,1984(3):13 -22(in Chinese)

[3] GJB1037A-2004　单轴摆式伺服线加速度计试验方法[S]
GJB1037A-2004　Test methods for single-axis pendulous servo linear accelerometers[S](in Chinese)

[4] 张洪才,陈举华,黄克正,等. 基于模糊理论的不精确可靠性数据的使用[J]. 机械设计,2003,20(11):28 -30
Zhang Hongcai,Chen Juhua,Huang Kezheng,et al. Imprecise reliability based on fuzzy theory the use of data[J]. Mechanical Design,2003,20(11):28 -30(in Chinese)

[5] 王瑜,董鹏斌,张百成. NdFeB 磁体热稳定性及磁通不可逆损失的评估[J]. 金属功能材料,2006,13(5):26 -30
Wang Yu,Dong Pengbin,Zhang Baicheng. Assessment of NdFeB magnet thermal stability and irreversible loss of flux [J]. Metallic Functional Materials,2006,13(5):26 -30(in Chinese)

[6] 刘国征,夏宁,赵明静,等. 永磁材料长期稳定性研究进展[J]. 稀土,2010,31(2):40 -44
Liu Guozheng,Xia Ning,Zhao Mingjing,et al. Advances in long-term stability of permanent magnetic materials[J]. Rare Earths,2010,31(2):40 -44(in Chinese)

[7] Liu Jinfang,Walmer M. Designing with high performance rare earth permanent magnets [C]//Proc of the 18th Int. Workshop on High Performance Magnets and Their Applications. France:Annecy,2004:630 -636

[8] 王玉芬,刘连城. 石英玻璃 SiO_2[M]. 北京:化学工业出版社,2007:126 -127
Wang Yufen,Liu Liancheng. Quartz glass SiO_2 [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2007:126 -127 (in Chinese)

[9] 陈锦杜,于永泰. 液浮摆式加速度计的精密离心机试验[C]//加速度计文集. 北京:航空工业出版社,2005:335 -356
Chen Jindu,Yu Yongtai. Liquid floated accelerometer precision centrifuge tests[C]//Corpus of Accelerometer. Beijing:Aviation Industrial Press,2005:335 -356(in Chinese)

[10] 厉章钦. 高精度加速度计试验中的输入误差和输出测量误差[C]//加速度计文集. 北京:航空工业出版社,2005:227 -234
Li Zhangqin. High-precision accelerometer test input error and output measurement errors[C]//Corpus of Accelerometer. Beijing:Aviation Industrial Press,2005:227 -234(in Chinese)

[11] 陈俊东. NJ2 挠性加速度计 10G 离心试验数据处理[C]//上海仪表厂. 加速度计文集. 北京:航空工业出版社,2005:235 -253
Chen Jundong. NJ2 10G accelerometer centrifuge test data [C]//Shanghai Instrument Factory. Corpus of Accelerometer. Beijing:Aviation Industrial Press,2005:235 -253 (in Chinese)

[12] 张公绪. 新编质量管理学[M]. 北京:高等教育出版社,1997:85 -100
Zhang Gongxu. New quality management[M]. Beijing:Higher Education Press,1997:85 -100(in Chinese)

(编　辑:赵海容)