

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.04.05

加速度计稳定性测试的补偿技术

何懿才, 李晓婷

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了加速度计稳定性的测量装置及方法。由于环境因素可以对稳定性测试产生影响, 因此对加速度计的工作温度、基础水平倾角的影响进行了分析。通过研究加速度计温度误差模型, 确定了建模方法。在稳定性试验中, 使用高精度铂热电阻测量加速度计的工作温度, 对加速度计的模型方程系数和输出进行温度补偿; 使用地震前兆倾斜仪监测基础水平倾角变化, 对加速度计零位输出进行补偿。

关键词: 计量学; 稳定性测量; 补偿技术; 温度模型; 加速度计

中图分类号: TB931

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)04-0020-04

Compensating Techniques for Stability Testing of Accelerometers

HE Yicai, LI Xiaoting

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

Abstract: This paper introduces the measuring device and method for stability testing of accelerometers, and studies and establishes the temperature error model of accelerometers by analyzing the effects of environment factors, including operating temperature of the accelerometer and foundation horizontal inclination, on stability test of accelerometers. In the stability test, the high precision platinum thermal resistance is used to measure the operating temperature, and the earthquake precursory inclinometer is used to monitor foundation horizontal inclination. The measured operating temperature compensates for the coefficients of the model equation and outputs of the accelerometer. The measured foundation horizontal inclination compensates the zero output of the accelerometer.

Key words: metrology; stability test; compensating techniques; temperature model; linear accelerometers

0 引言

加速度计稳定性试验是衡量加速度计稳态精度的重要指标, 试验目的是测定其连续工作期间输出值的变化, 测试项目包括静态模型方程系数(偏值、标度因数等)、0 g/1 g 的稳定性。随着惯导系统精度的不断提高, 对惯导加速度计的技术指标要求也越来越高, 如要求加速度计的偏值(0 g)稳定性为 1×10^{-5} g、标度因数(± 1 g)稳定性为 1×10^{-5} g。本文在现有技术基础上, 开展高精度加速度计稳定性测试技术的研究, 分析环境因素对稳定性测试的影响, 通过精密监测, 把其中的常值和有规律的影响因素分离出来, 并予以补偿^[1], 以提高稳定性的测试精度。

1 测量方法及测量装置组成

加速度计稳定性的测试主要在重力场进行, 这是加速度计标定的基本方法。0 g/1 g 稳定性测试, 只须使加速度计的输入轴处于稳定的水平或垂直状态, 即输入加速度为 0 g/1 g, 通电稳定后, 在规定的测试时间内, 每等间隔时间进行输出测试, 测试值的标准偏差即是 0 g/1 g 的稳定性。静态模型方程系数稳定性测试, 则需利用高精度重力场分度装置, 按加速度计输出 E 与沿输入轴、摆轴、输出轴的加速度 a_i , a_p , a_o 的模型方程为

$$E = K_1(K_0 + a_i + K_2 a_i^2 + \delta_o a_p - \delta_p a_o) \quad (1)$$

在规定的测试时间内, 每等间隔时间进行重力场静态多点试验, 分别测量出标度因数 K_1 、偏值 K_0 、二阶非线性系数 K_2 、安装误差(δ_p , δ_o)等模型系数, 用最小二乘法对各次测试的系数分别进行线性拟合, 回归标准偏差即是该系数的稳定性。

稳定性试验期间, 理论上要求加速度计的输入量保持稳定和环境条件保持一致, 测试的结果才能真实

收稿日期: 2017-07-10

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(J052011C001)

作者简介: 何懿才(1964-), 男, 高级工程师, 研究方向为惯性计量技术。

反映加速度计的性能，输入量的准确度由测量装置保证，环境影响因素包括工作温度、振动、基础倾角等^[2]。为此，在实际测量过程中，增加了环境影响因素的控制与监测，将被测加速度计置于封闭的温度控制系统中，并对它的工作温度实时监测；在测量装置的隔振基础上，对基础的水平倾角实时监测。加速度计稳定性测量装置主要由安装在隔振基础上的重力场分度台、加速度计温度控制与测量系统、基础水平倾角监测系统、数据采集及处理系统等几部分组成，测量原理如图 1 所示。

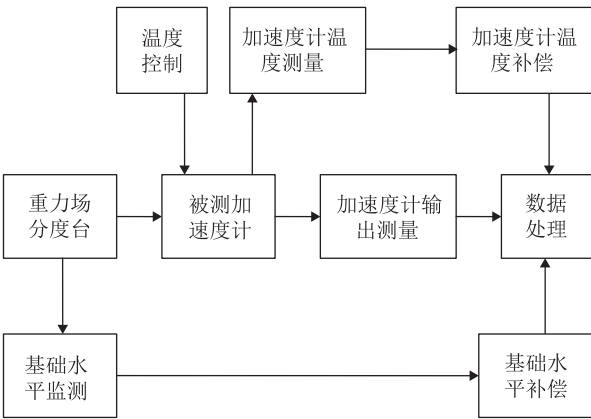


图 1 加速度计稳定性测量原理

重力场分度台选用 0.2"的水平轴多齿分度台；温度控制采用半导体恒温技术，具有温控精度高、热惯性小，无媒介、振动噪音，适合长期连续工作等优点；工作温度测量采用铂热电阻，测温误差为 0.1℃；基础水平倾角测量采用地震前兆倾斜仪，测量误差为 0.1"。

2 加速度计工作温度的影响及补偿技术

2.1 加速度计静态温度误差模型

在测试过程中，温度是影响加速度计测试精度的主要误差源之一，而造成加速度计工作温度变化的主要因素是外部工作环境温度的变化和力矩电流的自热效应。稳定性试验的电流相对稳定，且不存在大的电流变化，自热效应的影响不大，主要影响因素是环境温度的变化。

高精度伺服加速度计主要由挠性摆组件、信号放大器、力矩器等组成，当载体受到加速度时，其检测质量受到惯性力矩，信号传感器检测到此位移并将它转变成电信号，经电路放大，最后变成直流电流回力矩器线圈。此时的线圈处于磁钢的恒磁场中，所产生

的电磁力矩与惯性力矩相平衡，使检测质量近似返回原位，构成闭环反馈系统，可见流经力矩器的反馈电流就是输入加速度的度量。温度的变化会使加速度计的材料物理参数及电参数发生变化，尤其是力矩器的磁场强度和力矩线圈长度的变化，即包含温度误差因子，表现为模型系数含有温度的高阶非线性项。当加速度计的输入稳定时，输出信号会随着温度的变化而变化，即使通过硬件温度补偿，标度因数的温度系数仍然为 10⁻⁵量级。文献[3]~[5]研究加速度计的温度补偿方法，提高了加速度计的使用精度。

加速度计的工作温度由温控装置控制，对测试系统而言，仅靠提高控温精度是不够的，因为控温精度的提高受多方面的条件限制，如精密轴系的导热、控温对象的运动致使密封不严等。在加速度计稳定性测试时，实际工作温度不可避免地会在小范围内波动，从而影响测试结果。因此，必须研究温度误差的软件补偿技术。稳定性测试在定温下进行，工作温度不存在大的梯度、大的变化率，仅需考虑加速度计的静态温度模型，不需考虑它的动态温度模型。校准被测加速度计温度模型的方法：在设定的一系列试验温度点 T_i ，采用静态多点（如四点）试验，分别测量加速度计的模型系数，得到一系列温度的模型系数对 $(T_i, K_{0i}, K_{1i}, K_{2i}, \delta_{pi}, \delta_{oi})$ 。加速度计(JN-06 A12124)的温度校准结果数据如表 1 所示。

表 1 加速度计各工作温度的模型系数

温度/℃	K_0/g	$K_1/(V \cdot g^{-1})$	$K_2/(g \cdot g^{-2})$	$\Delta_p/(')$
30	0.0046556	1.3260063	-4.5×10^{-6}	2.62
35	0.0048833	1.3262007	3.3×10^{-6}	2.43
40	0.0051247	1.3263910	-4.8×10^{-6}	2.27
45	0.0053858	1.3265542	-9.1×10^{-7}	2.11
50	0.0056442	1.3267168	-6.1×10^{-8}	2.01
55	0.0059211	1.3268626	3.8×10^{-6}	1.92
60	0.0062091	1.3269803	5.0×10^{-6}	1.86
65	0.0065180	1.3270820	1.5×10^{-6}	1.82

采用最小二乘法，拟合加速度计各模型系数的温度模型。温度误差模型为

$$K(T) = k_0 + k_1 T + k_2 T^2 + k_3 T^3 + \cdots \tag{2}$$

式中： $k_0, k_1, k_2 \cdots$ 为温度系数。为了分析温度模型的适当性，分别建立各系数的二阶、三阶、四阶温度模型，如表 2~5 所示。

表 2 标度因数 K_1 的温度模型

温度模型	温度系数					标准偏差
	$k_0/(V \cdot g^{-1})$	$k_1/[V \cdot (g \cdot ^\circ C)^{-1}]$	$k_2/[V \cdot (g \cdot ^\circ C^2)^{-1}]$	$k_3/[V \cdot (g \cdot ^\circ C^3)^{-1}]$	$k_4/[V \cdot (g \cdot ^\circ C^4)^{-1}]$	
二阶模型	1.324489	5.99×10^{-5}	-3.07×10^{-7}	/	/	6.0×10^{-6}
三阶模型	1.324831	3.67×10^{-5}	2.02×10^{-7}	-3.6×10^{-9}	/	5.8×10^{-6}
四阶模型	1.323964	1.16×10^{-4}	-2.43×10^{-6}	3.44×10^{-8}	-2×10^{-10}	8.3×10^{-6}

表 3 偏值 K_0 的温度模型

温度模型	温度系数					标准偏差
	k_0/g	$k_1/[g \cdot (g^2 \cdot ^\circ C)^{-1}]$	$k_1/[g \cdot (g^2 \cdot ^\circ C^2)^{-1}]$	$k_1/[g \cdot (g^2 \cdot ^\circ C^3)^{-1}]$	$k_1/[g \cdot (g^2 \cdot ^\circ C^4)^{-1}]$	
二阶模型	0.003554	2.97×10^{-5}	2.46×10^{-7}	/	/	3.9×10^{-8}
三阶模型	0.003552	2.98×10^{-5}	2.42×10^{-7}	0	/	3.7×10^{-6}
四阶模型	0.003556	2.94×10^{-5}	2.56×10^{-7}	-2×10^{-10}	0	1.4×10^{-5}

表 4 二阶非线性系数 K_2 的温度模型

温度模型	温度系数					标准偏差
	$k_0/g \cdot g^2$	$k_1/[g \cdot (g^2 \cdot ^\circ C)^{-1}]$	$k_2/[g \cdot (g^2 \cdot ^\circ C^2)^{-1}]$	$k_3/[g \cdot (g^2 \cdot ^\circ C^3)^{-1}]$	$k_3/[g \cdot (g^2 \cdot ^\circ C^4)^{-1}]$	
二阶模型	-1.06×10^{-5}	2.89×10^{-7}	-1.1×10^{-9}	/	/	2.9×10^{-6}
三阶模型	4.56×10^{-5}	-3.54×10^{-6}	8.26×10^{-8}	-6×10^{-10}	/	3.3×10^{-6}
四阶模型	-8.18×10^{-4}	7.52×10^{-5}	-2.54×10^{-6}	3.72×10^{-8}	-2×10^{-10}	6.1×10^{-6}

表 5 安装误差 δ_p 的温度模型

温度模型	温度系数					标准偏差
	$k_0/(^{\circ})$	$k_1/[(^{\circ}) \cdot ^\circ C^{-1}]$	$k_2/[(^{\circ}) \cdot ^\circ C^{-2}]$	$k_3/[(^{\circ}) \cdot ^\circ C^{-3}]$	$k_4/[(^{\circ}) \cdot ^\circ C^{-4}]$	
二阶模型	4.30	-0.0716	5.16×10^{-4}	/	/	4.4×10^{-3}
三阶模型	4.27	-0.070	4.81×10^{-4}	2.46×10^{-7}	/	4.4×10^{-3}
四阶模型	3.44	0.0058	-2.04×10^{-3}	3.66×10^{-5}	-1.9×10^{-7}	4.0×10^{-3}

加速度计温度补偿的准确度取决于它的温度模型的准确度，从结果比较，偏值、标度因数、安装误差的二阶温度模型有更小的标准偏差，对该加速度计作温度补偿宜采用二阶模型。从二阶温度模型的结果分析，如果工作温度为 50℃，当变化 1℃ 时，加速度计的偏值误差为 54.3 μg，标度因数的相对误差为 2.2×10^{-5} ，安装误差的误差为 -1.2″（相当于 -6 μg），二阶非线性系数的误差为 0.18 μg/g²（相当于 1 g 输入时的误差为 0.18 μg）。

2.3 加速度计温度补偿应用

为实现加速度计模型系数及输出的温度补偿，在稳定性试验期间，应同步测量加速度计的输出及其实

际工作温度，依据加速度计的温度模型，对测试结果

进行修正。如参考工作温度为 T_0 ，温度偏差为 ΔT ，由式(2)得到加速度计各模型系数的修正值为

$$\Delta K = (k_1 + 2k_2T_0 + 3k_3T_{02} + \cdots)\Delta T \tag{3}$$

分别计算出标度因数的修正值 ΔK_1 ，偏值的修正值 ΔK_0 ，二阶非线性系数的修正值 ΔK_2 ，安装误差的修正值 $\Delta \delta_p$ ， $\Delta \delta_o$ ，再由式(1)得到加速度计输出的修正值为

$$\Delta E = E \cdot \frac{\Delta K_1}{K_1} + K_1(\Delta K_0 + \Delta K_2a_i^2 + \Delta \delta_o a_p - \Delta \delta_p a_o) \tag{4}$$

加速度计(JN-06 A12124)在 60℃ 的 1 g 长期稳定性试验，历时 41 天。其工作温度曲线如图 2 所示，加速度计温度补偿前后的输出曲线如图 3 所示。经过温度补偿，加速度计的 1 g 稳定性由 1.43×10^{-5} g 提高到 6.6×10^{-6} g，提升效果明显。

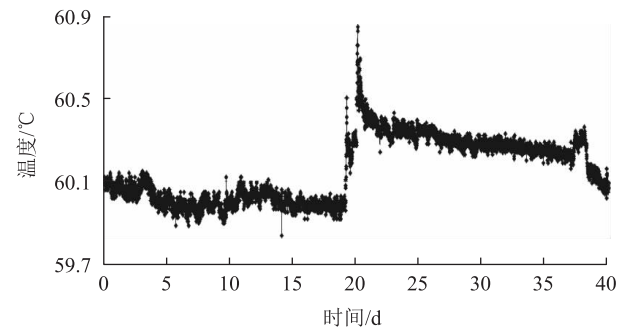


图2 加速度计的工作温度

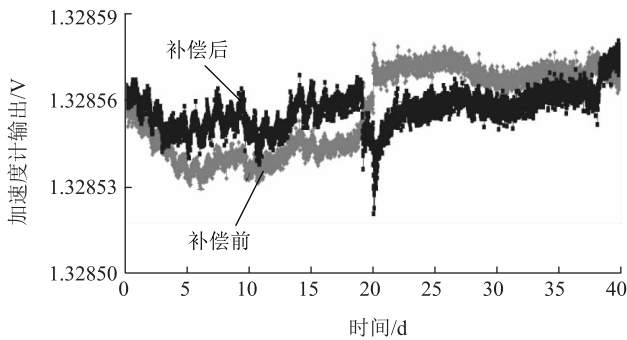


图3 加速度计输出的温度补偿

3 基础水平倾角的影响及补偿技术

基础水平倾角的变化直接造成测量装置初始零位角的变化，由于加速度计重力场试验是通过改变它的输入轴与重力加速度方向的夹角，从而改变它在基准轴方向上的输入加速度。在加速度计重力场试验中，各测点都是相对铅锤矢量这一基准设置的，对高精度的校准测试，基础的微运动产生仪表基准轴的矢量变化，其影响大小与测试项目有关。0 g 稳定性试验，直接引起加速度计输入量的变化，如果倾角变化 1°，输入量则变化 5 μg。安装误差是由加速度计绕水平轴翻转 180°的两个零位差得到，倾角变化 1°，安装误差则会引入 2°的误差。偏值是由加速度计绕水平轴翻转 180°的两个零位和得到，可消除初始零位角的影响，水平倾角的变化影响可忽略。对标度因数、1 g 稳定性试验，测试状态对角位置微小变化不灵敏，其影响亦可忽略。

基础水平倾角与装置的安装地点有很大的关系，如装置基础与实验室厂房建筑直接相连，每天受环境温度的变化，导致结构倾斜的变化，随着离地表高度的不同，倾斜幅度不同。另外，地球所受引潮力，使固体地壳发生“潮汐”现象，通常表现为地壳的水平倾角呈每天周期性变化，其大小随地点、方向的不同存在差异。因此，为减少环境、人为因素的影响，本测

量装置安装在地表下的基岩上。

为实现加速度计输出的基础水平倾角补偿，在 0 g 稳定性试验期间，应同步测量加速度计的输 出 及 基 础 水平倾角 φ，与其初值 φ₀ 比较后，计算出测量装置零位的补偿值及加速度计输出的修正值为

$$\Delta E = K_1 \sin(\varphi - \varphi_0) \tag{5}$$

加速度计(SNJ-1 03)在常温下一天的 0 g 稳定性试验，其基础水平倾角变化 0.45°，变化曲线如图 4 所示，加速度计基础水平倾角补偿前后的输出曲线如图 5。经过基础水平倾角补偿，加速度计的 0 g 稳定性由 1.6 μg 提高到 1.3 μg。

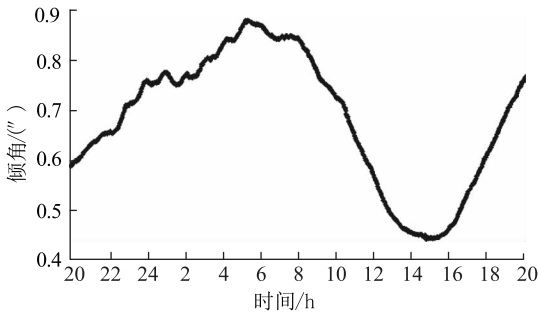


图4 基础水平倾角

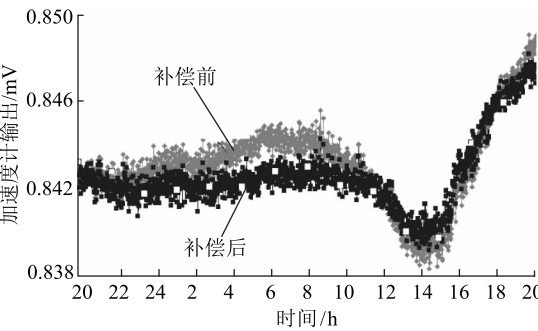


图5 加速度计输出的基础水平倾角补偿

4 结论

通过建立高精度加速度计模型系数的温度误差模型，根据实际工作温度，实现了加速度计模型系数及输出的温度补偿，显著地提高了加速度计稳定性的测试结果。

基础水平倾角的变化影响测量装置的零位，通过基础水平倾角的监测，实现了加速度计输出的基础水平倾角补偿，提高了加速度计 0 g 稳定性的测试结果。

参 考 文 献

[1] 捷联惯性导航技术：第 2 版[M]. 张天光，王秀萍，王丽 (下转第 52 页)

表 4 1.5 级 150 V 直流电压表试验结果						
序号	标准值 /V	仪表示值 /V	识别值 /V	识别误差 /V	仪表误差 /V	最大允许 误差/V
1	51.3	50.0	50.14	0.14	-1.16	±2.25
2	101.2	100.0	99.875	-0.125	-1.33	
3	151.1	150.0	149.864	-0.136	-1.24	

表 5 1.5 级 2.5 MPa 压力表试验结果						
序号	标准值 /MPa	仪表示值 /MPa	识别值 /MPa	识别误差 /MPa	仪表误差 /MPa	最大允许 误差/MPa
1	0	0.0	0.002	0.002	0.00	±0.04
2	0.48	0.5	0.497	-0.003	0.02	
3	1.01	1.0	0.999	-0.001	-0.01	
4	1.47	1.5	1.503	0.003	0.03	
5	2.01	2.0	1.998	-0.002	-0.01	
6	2.48	2.5	2.498	-0.002	0.02	

表 6 2.5 级 10 MPa 压力表试验结果						
序号	标准值 /MPa	仪表示值 /MPa	识别值 /MPa	识别误差 /MPa	仪表误差 /MPa	最大允许 误差/MPa
1	0	0.0	0.012	0.012	0.012	±0.25
2	2.12	2.0	1.99	-0.010	-0.13	
3	3.83	4.0	3.986	-0.014	0.16	
4	6.13	6.0	6.013	0.013	-0.12	
5	8.13	8.0	7.987	-0.013	-0.14	
6	9.88	10.0	9.989	-0.011	0.11	

由表 3 至表 6 可见,识别系统能够对 4 块指针式仪表正确识别,且被测仪表的识别误差远小于仪表最大允许误差。可见,本系统指针式仪表的识别技术是可行的。理想情况下,识别系统的识别误差可以比人工读数的误差小得多,且读数更加稳定,不受人工读

数和视觉疲劳的影响。因此,可用于船用指针式仪表的状态监测,自动记录数据,乃至指针式仪表检定校准过程中的示值自动读取。

4 结论

仪表自动识别技术是提高指针式仪表自动测试水平的有效方法。本文研究了指针式仪表识别的问题,将识别进程划分为刻度识别、指针识别和仪表类型识别等独立进程,并运用中心投影法和图集分类等方法确定了仪表的刻度、指针位置和仪表类别,计算出了指针式仪表的示值,最后通过试验和误差分析验证了识别算法的有效性,达到了预期结果。该方法不仅可用于船舶指针式仪表的实时监测,也可用于指针式仪表的原位检定和校准,特别对检定校准耗时较长的指针式仪表,可明显提高检定校准的效率。

参 考 文 献

[1] 邓雅,方涛,翟彦斌,等.以 GPU 为核心的机器视觉仪表检测系统[J].微计算机信息,2011,27(2):82-84.

[2] 乔杨,徐熙平,卢常丽,等.机器视觉远距离目标尺寸自动标定测量系统研究[J].兵工学报,2012,33(6):759-763.

[3] 吴静静,尤丽华.基于计算机视觉的计量仪表自动检测系统[J].煤矿机械,2006,27(12):136-138.

[4] 王红平,曹国华,苏成志,等.数字图像处理技术在计量仪表检定中的应用[J].长春理工大学学报(自然科学版),2004,27(3):13-15.

[5] 赵书涛,李宝树,贾秀芳,等.基于计算机视觉的电测仪表自动识别方法的研究[J].仪器仪表学报,2004,25(S1):606-607.

[6] 李宁,汪仁煌,刘孝峰,等.基于机器视觉的温度测量系统的设计及应用[J].计算机与现代化,2012(9):57-60.

[7] 黄颖怡,汪仁煌,岳利军.机器视觉仪表识别方法的研究进展[J].自动化仪表,2009,30(8):58-60.

[8] 李栋,杨志家.基于机器视觉的指针仪表识读方法[J].仪表技术与传感器,2012(10):31-33.

(上接第 23 页)

霞,等译.北京:国防工业出版社,2010.

[2] 何铁春,周世勤.惯性导航加速度计[M].北京:国防工业出版社,1983.

[3] 过润秋,郑晓东,王成.加速度计静态温度模型辨识及温度补偿方法研究[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2007,34(3):438-442.

[4] 郎琳,陈建国,吴美平.石英挠性加速度计温度误差建模与补偿技术研究[J].导航与控制,2009,8(2):46-51.

[5] 翁海娜,胡小毛,裴志,等.一种新的加速度计温度误差补偿方法[J].中国惯性技术学报,2009,17(4):479-482.