

A Study on Static Calibration of a Monolithic Triaxial Linear Accelerometer

QIAN Peng-an^{1,2,3}, WU Zhong-cheng¹, GE Yu¹, GE Yun-jian¹

- (1. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China;
3. School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The calibration of the triaxial linear accelerometers is difficult and non-standard. Based on the study of an E type structure monolithic 3-D linear accelerometer, the paper analyses the structure and the characteristic matrix of the sensor, discusses the procedure of the static calibration in the gravity field, deduces a mathematics model detailed, and gives the experiment result.

Key words: calibration; triaxial accelerometer; monolithic; characteristic matrix

一体化三轴线加速度计静态标定方法的研究

钱朋安^{1,2,3}, 吴仲城¹, 戈瑜¹, 葛运建¹

- (1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 合肥 230031;
2. 中国科技大学自动化系, 合肥 230026;
3. 合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘要: 三维线加速度计标定及性能测试较为困难,且国内外尚无测试标准。针对此,结合所研制的基于厚膜技术 E 型一体化三维线性加速度传感器与相关研究工作,在分析传感器结构、性能及特性输出矩阵的基础上,就重力场中实现静态标定等进行理论推导,并详细推导出标定的数学模型,给出测试结果。

关键词: 标定; 三轴加速度计; 一体化; 特性矩阵

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2005)01-0086-04

加速度作为描述物体运动状态的一个重要物理量,被广泛应用于社会生产实践的诸多方面,如航空航天、军事、医疗、体育与文化艺术、机械工程等。而对加速度信号的获取主要是通过相应的加速度传感器来实现的。早期的加速度传感器只能实现单维的线加速度或角加速度的测量;随着传感技术、半导体技术、计算机技术等发展,能实现多维加速度测量的传感器、尤其是各种三维线加速度计已见诸报端并趋于成熟,其性能也有了很大提高。

另一方面,由于三维线加速度计结构上的特殊性等,使得对其标定及性能测试较为困难;且关于这方面的研究报道很少。而至今,国内外仍未建立统一的三维线加速度计标定测试标准。从仅有的几

篇文献上看,仍主要借助于单维线加速度计的标定方法,在对测试设备进行相关的改进后,在重力场中,通过翻滚试验、离心机试验或振动试验等方法来实现对三维线加速度计标定。如文献[1]借助一个精密的直角标定架,实现振动台在 x, y, z 三个方向的激振,进而采用比对法对一种三维组合压组式低频加速度传感器进行了标定。文献[2]介绍了一种国外对三轴加速度计组传感器实现标定的方法,其将传感器安装在一精密的双轴转台系统上,测试结果相当精确。前者要求有精密直角架,并能被准确地安装在振动台上;后者的转台系统非常精密与复杂,加速度计的安装也很复杂。

本文结合近年来,中国科学院合肥智能机械研

收稿日期: 2004-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(60176027);“十五”国家 863 基金项目(2002AA423200)。

作者简介: 钱朋安(1966-)男,博士研究生,教师,研究领域为传感器技术,信息获取与处理, lipingqian@sohu.com。

研究所机器人传感器实验室研制成功的一种基于厚膜技术 E 型一体化三维线加速度传感器及相关研究工作, 从加速度计结构、性能及特性矩阵分析着手, 就其在重力场中进行静态标定的原理方法、标定的数学模型等进行理论推导与实验研究, 为后续三维加速度计动态性能分析、为三维加速度计乃至更多维加速度计的标定、测试提供分析方法与理论依据。

1 E 型三维加速度传感器结构与原理^[3]

此 E 型三维加速度传感器采用特殊的组桥方式来实现对三维加速度信息的检测。

基本结构: 传感器由外壳(陶瓷基体与之固接

在一起)、谐振质量块、采用厚膜技术烧结在陶瓷基体上的敏感单元 3 个部分构成, 其侧视图形状类似 E 字母, 如图 1(a) 所示。其敏感单元共 12 个分成 3 组; 其中有两组互相垂直, 用来检测 x、y 轴向加速度, 第三组与此两组相交成 45 度, 用来检测对 z 轴向加速度, 如图 1(b) 所示。

加速度信号获取原理: 将传感器固定于被测对象, 则当测试对象沿 z 向存在加速运动时, 由于质量块保持惯性, 而使得陶瓷基片受力发生变形, 导致 z 向敏感单元所组成的惠斯通电桥有输出, 变形图见图 1(c)。其沿 x 向存在加速运动时, 陶瓷基片也会受力发生变形, 并导致 x 向有输出; 由于 y 与 x 向具有一定对称性, y 向的情况类似于 x 向, 见图 1(d)。

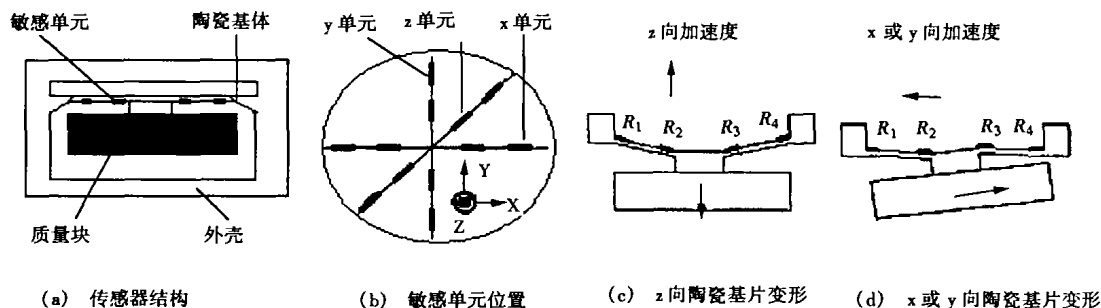


图 1 三轴加速度传感器结构与原理图

2 传感器特性矩阵

对于具有上述加速度与电阻变化关系的三组应变片, 文献[4]还证明了通过特殊的组桥方式, 在应变片处于理想位置时, 每个轴向的加速度只对该轴向的桥路输出电压产生影响。即当 x 或 y 轴向具有加速度时, z 轴向桥路没有输出; 同样, 当 z 轴向具有加速度时, x 和 y 轴向桥路没有输出, 因此可以通过各轴向桥路的输出直接得到加速度的大小。进一步地文献[5]对这种加速度传感器的弹性体进行了相应的应力应变有限元分析。其根据传感器的量程, 即加速度载荷 5 g, 分别计算弹性体结构在各个工况下的位移、应变和应力值。考虑到应变式传感器的电桥输出电压变化与应变成线性关系, 计算结果中对粘贴应变片(敏感单元)的敏感部分即弹性膜片表面的应变加以分析, 得到弹性体的应力应变与加速度载荷的线性关系和可以消除 x、y、z 轴向间的维间耦合的结论。

实际应用中, 由于工艺等一些因素, 在标定和使用时仍然需要考虑到维间耦合, 但可将其看作为

线性的, 故可通过实验来获得其影响系数及传感器输入加速度 a 与输出量数字量 v 间关系, 即:

$$v = K \cdot a \quad (1)$$

式中 $a = [a_x, a_y, a_z]^T$, 是由 3 个对应于传感器坐标系的加速度分量组成的列向量。而 $v = [v_x, v_y, v_z]^T$, 是由 3 个直流电桥输出组成的列向量。在测量范围内, 由输入 a 和弹性体(应力应变)之间保持的线性关系、粘贴在弹性体上的应变片电阻值变化与应变间的线性关系、及惠斯通直流电桥输出 v 与应变片电阻值变化的线性关系, 可将 K 看作为一个 3 阶常系数矩阵, 表示为:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中非对角线上的系数表示为维间耦合大小。

3 传感器标定

3.1 标定

标定是指在明确了输入/输出变换对应关系的前提下, 利用某种或标准的器具对传感器进行标度

的一种过程。对于此加速度传感器,就是要获得矩阵 K 中各个元素值 $K_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$, 这要先给传感器施加 3 个线性独立的线加速度向量, 并读取 3 个对应的读数列向量。由这 3 个加速度向量构成一个 3×3 加速度矩阵 A , 3 个对应的读数列向量构成一个 3×3 读数矩阵 V , 进而(1)式可写成式(3):

$$V = K \cdot A \quad (3)$$

在笛卡儿坐标系中, 当将质量块作为刚体来考虑, 选择其质心为坐标原点, 则沿单一轴方向施加的单位线加速度 $[1 \ 0 \ 0]^T$, $[0 \ 1 \ 0]^T$, $[0 \ 0 \ 1]^T$ 是互相线性独立的, 以其作输入, 组成加速度矩阵 A , 由相应读数输出组成矩阵 V , 根据相关的矩阵运算求解^[6]和式(3), 可求得系数矩阵 K 及其逆矩阵 K^{-1} (解耦矩阵), 得式(4) 完成传感器标定。

$$a = K^{-1} \cdot v \quad (4)$$

3.2 重力场中静态标定

据公式(3), 要对此加速度计进行标定, 获得矩阵 K 中各个元素值 $K_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$, 必须要先给加速度计施加 3 个线性独立的线加速度向量, 并读取 3 个对应的读数列向量。

根据实验室现有条件, 将加速度计安装在带分度头的单轴转盘上, 其轴处于水平位置。首先使加速度计的 x 轴与此转轴一致如图 2(a)所示, 则重力加速度矢量 \vec{g} 在 $yo z$ 面内, 其与 y 轴夹角 β 可有分度头获得, 旋转转台时, 测量输入:

$a_1 = [0 \ g \cdot \cos\beta \ g \cdot \sin\beta]^T$, 测量输出为:

$$v_1 = [v_{1x} \ v_{1y} \ v_{1z}]。$$

其次当加速度计的 y 轴与转轴一致, 见图 2(b), 即 \vec{g} 在 zox 面内, 与 z 轴夹角 γ , 则在旋转转台过程中有: 输入 $a_2 = [g \cdot \sin\gamma \ 0 \ g \cdot \cos\gamma]^T$, 输出 $v_2 = [v_{2x} \ v_{2y} \ v_{2z}]$ 。而加速度计的 z 轴与转轴一致, 见图 2(c), 即 \vec{g} 在 xoy 面内, 与 x 轴夹角 α , 则在旋转转台过程中有:

输入 $a_3 = [g \cdot \cos\alpha \ g \cdot \sin\alpha \ 0]^T$,

输出 $v_3 = [v_{3x} \ v_{3y} \ v_{3z}]$ 。

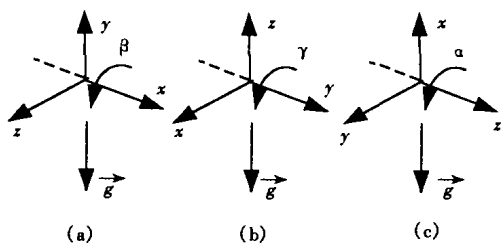


图 2 加速度计安装方式

依据矩阵运算, 将此三种加速度输入及测量输

出值代入式(3)得:

$$\begin{bmatrix} v_{1x} & v_{2x} & v_{3x} \\ v_{1y} & v_{2y} & v_{3y} \\ v_{1z} & v_{2z} & v_{3z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & g \sin\gamma & g \cos\alpha \\ g \cos\beta & 0 & g \sin\alpha \\ g \sin\beta & g \cos\gamma & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中, α, β, γ 角度变化范围是 $0 \sim 180^\circ$ 。

根据矩阵运算理论, 要计算

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & g \sin\gamma & g \cos\alpha \\ g \cos\beta & 0 & g \sin\alpha \\ g \sin\beta & g \cos\gamma & 0 \end{bmatrix} \text{ 必须是满秩的, 即可}$$

逆, 其三阶行列式的值不能等于零:

$$A = \begin{vmatrix} 0 & g \sin\gamma & g \cos\alpha \\ g \cos\beta & 0 & g \sin\alpha \\ g \sin\beta & g \cos\gamma & 0 \end{vmatrix}$$

$$= g^3 \cos\alpha \cos\beta \cos\gamma + g^3 \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma \neq 0 \quad (6)$$

从分析中, 较明显发现, 三个角度 α, β, γ 在取到 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 特殊值时, 会出现行列式值等于零的情况。如 α, β, γ 对应取 $0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$ 时, $A = 0$ 。

为此, 在标定时必须避开这些取值方式, 这里进一步简划取值为 $\alpha = \beta = \gamma$ 较为有实际价值, 当然仍应避开 135° 取值, 因为 $\alpha = \beta = \gamma = 135^\circ$ 时, $A = 0$ 。在标定过程中, 依据分度头刻度可读取 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 时的实验数据, 完成 $\pm g$ 范围传感器的标定。

考虑这些因素后, 可以求得系数矩阵 K :

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} v_{1x} & v_{2x} & v_{3x} \\ v_{1y} & v_{2y} & v_{3y} \\ v_{1z} & v_{2z} & v_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & g \sin\gamma & g \cos\alpha \\ g \cos\beta & 0 & g \sin\alpha \\ g \sin\beta & g \cos\gamma & 0 \end{bmatrix}^{-1} \quad (7)$$

和解耦矩阵 K^{-1} , 得到式(4)传感器的关系特性。

4 实验结果

根据图 2 的三种安装方式旋转加速度计, 由 V, A 的数据, 经运算、处理得所设计的某传感器解

$$\text{耦矩阵: } K^{-1} = \begin{bmatrix} -1.624 & -0.008 & +0.139 \\ +0.090 & +1.974 & +0.065 \\ -0.306 & -0.149 & -2.663 \end{bmatrix}, \text{ 各}$$

系数的单位为 $10^{-3}g$ /数字量单位。

即传感器的特性为:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.624 & -0.008 & +0.139 \\ +0.090 & +1.974 & +0.065 \\ -0.306 & -0.149 & -2.663 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

在实验中, 实现了三维加速度计的静态标定。但其动态性能及相关动态解耦、误差分析等, 仍有待作更深入的研究。

参考文献:

[1] 孙宝元, 牛志明, 韩庚琳等. 三维组合压阻式低频加速度传感器的研制与标定[J]. 大连理工大学学报,

1992, 32(5): 545 - 549.

[2] 苗凤海译(5th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation System). 三轴加速度计组的试验方法和装置[J]. 惯导与仪表, 1999, 1: 8 - 15.

[3] 吴仲城, 戈瑜, 虞承端. 基于厚膜技术 E 型三维加速度传感器的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2001, 9: 3 - 5.

[4] 吴仲城. 多维力传感器设计及信号分析方法研究[D]. 博士学位论文, 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2001.5.

[5] 孟明, 葛运建, 吴仲城等. 一种新型多维加速度传感器弹性体设计与仿真分析[J]. 传感技术学报, 2003, 4: 379 - 383.

[6] 同济大学数学教研室. 工程数学 线性代数(第三版)[M]. 高等教育出版社, 1999 年 6 月.

(上接第 85 页)

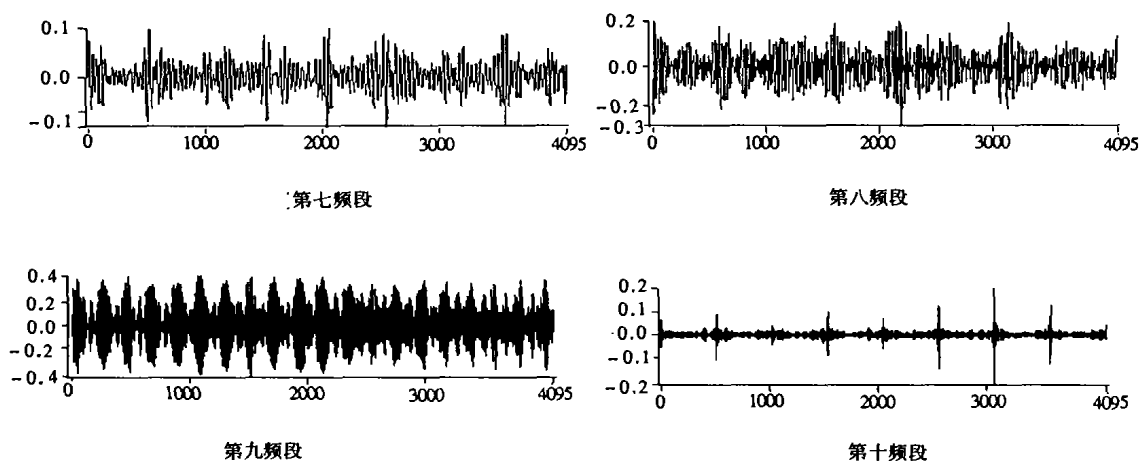


图 8 频段重构信号

4 结束语

小波变换是分析非线性、非平稳信号时频局部化特性的有力工具。作者根据不同系统要求选择不同小波变换, 采用谐波小波变换的方法, 有效地去除高、低频干扰信号, 提取旋转机械转子不平衡量振动信号。并结合先进的虚拟仪器技术, 成功研制出基于虚拟仪器的动平衡测试仪。经多次测试实验, 所测得的误差大大减少, 且系统稳定, 在转为 2 500 r/min 时, 对 5 kg 转子进行动平衡实验, 最小可达残余不平衡量 $\leq 0.1g \text{ mm/kg}$, 一次减低率 $\geq 90\%$, 相角误差 $\leq 2^\circ$, 取得良好的结果。

参考文献:

[1] Newland D E. Harmonic Wavelet Analysis[J]. Proceeding of the Royal Society of London, 1993, 443(10): 203 ~ 205.

[2] 何正嘉等. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

[3] Newland D E. Wavelet Analysis of Vibration (Part 1, 2) [J]. Journal of Vibration & Acoustic, 1994(116): 409 ~ 416.

[4] 天津大学等. 机械原理[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.

[5] 刘君华. 虚拟仪器编程语言 LabWindows/CVI 教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.