

# MEMS 加速度计的六位置测试法

宋丽君, 秦永元

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 主要介绍了 MEMS 加速度计的六位置测试法, 根据 MEMS 加速度计输出数学模型详细推导了如何得到 MEMS 加速度计的输出数学模型中的刻度因数、零偏以及安装误差, 并在得到其标定系数后将其封装在 C 函数中进行了验证实验。通过实验数据分析可知, MEMS 加速度计的六位置测试法原理简单、易于实现, 且精度较高。这种标定法所得到的 MEMS 加速度计输出能够比较准确地反映其输出, 而且 MEMS 加速度计的线性度有所改善。

**关键词:** MEMS 加速度计; 六位置测试法; 刻度因数; 安装误差; 线性度

**中图分类号:** V241    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-8829(2009)07-0011-03

## Six-Position Testing of MEMS Accelerometer

SONG Li-jun, QIN Yong-yuan

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A six-position testing method of MEMS accelerometer is introduced mainly. According to the error model of MEMS accelerometer the scale factor of MEMS accelerometer, bias of MEMS accelerometer and error on installation of MEMS accelerometer are derived. When the user gets these parameters, the user should pack the function of the concrete mathematics model in C code. By analyzing the results of examination, the six-position testing method of MEMS accelerometer is simple on principle, easy to realize and high in precision as long as the user gets the error model of MEMS accelerometer. And the scale factor nonlinearity is improved by the error model of MEMS accelerometer.

**Key words:** MEMS accelerometer; six-position testing; scale factors; error of installation; nonlinearity

微机械电子系统 (MEMS, micro electro mechanical systems), 是在微电子技术基础上结合精密机械技术发展起来的一个新的科学技术领域。微机械电子系统是指可以批量制作的, 集微型机械、微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路, 直至接口、通信和电源等于一体的微型系统。微机械电子系统和微型制造技术的发展推动了微惯性器件和微惯性测量单元技术的发展, 导致新一代陀螺仪和加速度计的产生。其中, 用硅材料制作微惯性器件不仅使传统的惯性器件实现微型化, 而且由于硅的微加工技术与集成工艺技术的相容性, 可以将敏感器件与处理电路完全集成在一个硅片上, 从而能实现真正意义上的机电一体化<sup>[1]</sup>。

以硅为基体材料实现的惯性传感器称为硅微机械惯性传感器, 而由硅微机械惯性传感器所组成的惯性仪表称为硅微机械惯性仪表。与传统的惯性仪表相比, 硅微机械惯性仪表具有体积小、重量轻、成本低、可靠性好、功耗低、测量范围大、易于数字化和智能化等特点。目前, 硅微机械惯性传感器中的微机械加速度计的性能指标已可以和传统的加速度计相媲美。

## 1 MEMS 加速度计的数学模型

加速度计精度的高低直接影响到它的应用范围, 所以要扩大加速度计的应用范围, 就必须提高其工作精度。要提高加速度计的精度, 要从多方面考虑影响其精度的因素, 首当其冲考虑的是建立 MEMS 加速度计的数学模型以提高 MEMS 加速度计的线性度<sup>[2]</sup>。

分析 MEMS 加速度计误差的形成原因<sup>[3-5]</sup>, 可得基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统中 MEMS 加速度计的误差模型方程为

收稿日期: 2009-02-23

作者简介: 宋丽君 (1978—), 女, 陕西省西安市人, 博士研究生, 主要研究方向为导航技术; 秦永元 (1946—), 男, 江苏常熟人, 教授, 博士生导师, 长期从事惯性导航和组合导航系统、最优估计理论、数字信号处理及 GPS 信号处理研究。

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{ax} & K_{ax1} & K_{ax2} \\ K_{ay1} & S_{ay} & K_{ay2} \\ K_{az1} & K_{az2} & S_{az} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ax3} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ay3} & 0 \\ 0 & 0 & K_{az3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x^2 \\ a_y^2 \\ a_z^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $A_x, A_y, A_z$  为 MEMS 加速度计的实际测量值, 单位为  $g$ ;  $a_{x0}, a_{y0}, a_{z0}$  为 MEMS 加速度计的零偏, 单位为  $g$ ;  $K_{ax1}, K_{ay1}, K_{az1}$  为 MEMS 加速度计安装误差系数;  $K_{ax3}, K_{ay3}, K_{az3}$  为 MEMS 加速度计二次方有关的误差系数, 单位为  $g^{-1}$ ;  $S_{ax}, S_{ay}, S_{az}$  为 MEMS 加速度计的刻度因数。

## 2 MEMS 加速度计的六位置标定

### 2.1 MEMS 加速度计的六位置取向

在得到基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统中 MEMS 加速度计的误差模型方程后, 可以通过位置标定 MEMS 加速度计的误差模型系数的辨识。目前加速度计误差模型系数的辨识主要采用多位置法, 根据不同的加速度计采用不同的位置取向, 例如挠性加速度计采用的 12 点翻滚测试法。本研究根据 MEMS 加速度计的误差模型的未知系数的个数采用六位置法对 MEMS 加速度计的误差模型系数的辨识, 它们分别为: 东天南、东北天、地东南、南西地、天西南、西地南。表 1 为 MEMS 加速度计的六位置取向与各轴的重力加速度。

表 1 MEMS 加速度计的六位置取向与各轴的重力加速度

位置	坐标轴取向			重力加速度/ $g$		
	X 轴	Y 轴	Z 轴	X 轴	Y 轴	Z 轴
1	东	天	南	0	-1	0
2	东	北	天	0	0	-1
3	地	东	南	1	0	0
4	西	地	南	0	1	0
5	天	西	南	-1	0	0
6	南	西	地	0	0	1

### 2.2 MEMS 加速度计的六位置标定

MEMS 陀螺仪是用来感测载体的角速度信息, 而 MEMS 加速度计用来感测载体的线运动, 两者都是构成惯性系统的核心器件, 其精度高低和性能优劣基本上决定了惯性系统的精度和性能<sup>[6,7]</sup>。目前, 不但 MEMS 陀螺仪没有统一的测试标准, MEMS 加速度计也没有统一的测试标准, 但是根据 MEMS 加速度计的工作原理等方面, 选取 GJB 1037-90《单轴摆式伺服线加速度计试验方法》作为测试标准, 该规范适用于航空、航天、航海等领域中各类运载体上所使用的线加速度计。

将基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统固定安装在位置转台台面上, 测量 3 个轴向 MEMS 加速度计的输出值。

MEMS 加速度位置标定过程如下:

(1) 先将基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统要测试的轴向与位置转台的中心轴线垂直安装。

(2) 接通基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统的电源, 根据不同型号的 MEMS 加速度计的启动时间预热一定的时间。

(3) 将转台转到第一个位置, 设置一定采样间隔时间及采样次数, 求得 3 个轴向 MEMS 加速度计该位置时 MEMS 加速度计输出的平均值作为处于该位置时的 MEMS 加速度计的输出值。

(4) 重复第(3)步测量第 2 个位置到第 6 个位置的 MEMS 加速度计的输出值。

由式(1)可得 X 轴、Y 轴和 Z 轴的 MEMS 加速度计在 6 个位置的输出分别为:

X 轴 MEMS 加速度计的输出为:

$$\begin{aligned} A_{x1} &= a_{x0} - K_{ax1}, A_{x2} = a_{x0} - K_{ax2}, A_{x3} = a_{x0} + K_{ax3} + S_{ax}, \\ A_{x4} &= a_{x0} + K_{ax1}, A_{x5} = a_{x0} + K_{ax3} - S_{ax}, A_{x6} = a_{x0} + K_{ax2} \end{aligned} \quad (2)$$

Y 轴 MEMS 加速度计的输出为:

$$\begin{aligned} A_{y1} &= a_{y0} + K_{ay3} - S_{ay}, A_{y2} = a_{y0} - K_{ay2}, A_{y3} = a_{y0} + K_{ay1} \\ A_{y4} &= a_{y0} + K_{ay3} + S_{ay}, A_{y5} = a_{y0} - K_{ay1}, A_{y6} = a_{y0} + K_{ay2} \end{aligned} \quad (3)$$

Z 轴 MEMS 加速度计的输出为:

$$\begin{aligned} A_{z1} &= a_{z0} - K_{az2}, A_{z2} = a_{z0} + K_{az3} - S_{az}, A_{z3} = a_{z0} + K_{az1}, \\ A_{z4} &= a_{z0} + K_{az2}, A_{z5} = a_{z0} - K_{az1}, A_{z6} = a_{z0} + K_{az3} + S_{az} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(2)可得 X 轴 MEMS 加速度计的模型的相应系数为:

$$\begin{aligned} a_{x0} &= \frac{A_{x1} + A_{x2} + A_{x4} + A_{x6}}{4}, S_{ax} = \frac{A_{x3} - A_{x5}}{2}, K_{ax1} = \frac{A_{x4} - A_{x1}}{2}, \\ K_{ax2} &= \frac{A_{x6} - A_{x2}}{2}, K_{ax3} = \frac{-A_{x1} - A_{x2} + 2A_{x3} - A_{x4} + 2A_{x5} - A_{x6}}{4} \end{aligned}$$

由式(3)可得 Y 轴 MEMS 加速度计的模型的相应系数为:

$$\begin{aligned} a_{y0} &= \frac{A_{y2} + A_{y3} + A_{y5} + A_{y6}}{4}, S_{ay} = \frac{A_{y4} - A_{y1}}{2}, K_{ay1} = \frac{A_{y3} - A_{y5}}{2}, \\ K_{ay2} &= \frac{A_{y6} - A_{y2}}{2}, K_{ay3} = \frac{2A_{y1} - A_{y2} - A_{y3} + 2A_{y4} - A_{y5} - A_{y6}}{4} \end{aligned}$$

由式(4)可得 Z 轴 MEMS 加速度计的模型的相应系数为:

$$\begin{aligned} a_{z0} &= \frac{A_{z1} + A_{z3} + A_{z4} + A_{z5}}{4}, S_{az} = \frac{A_{z6} - A_{z2}}{2}, K_{az1} = \frac{A_{z3} - A_{z5}}{2}, \\ K_{az2} &= \frac{A_{z4} - A_{z1}}{2}, K_{az3} = \frac{-A_{z1} + 2A_{z2} - A_{z3} - A_{z4} - A_{z5} + 2A_{z6}}{4} \end{aligned}$$

### 2.3 MEMS 加速度计六位置标定系数的计算

通过 MEMS 加速度计的位置标定实验就可以将基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统中的 MEMS 加速度计输出数学模型中的各项系数分离出来, 即可求出 MEMS 加速度计的刻度因数、零偏、安装误差等。表 2 是六位置标定中基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统的 X 轴、Y 轴、Z 轴 MEMS 加速度计的输出数

据表。

表2 六位置标定中3个轴向 MEMS 加速度计的输出值

位置	X 轴重力加速度/g	Y 轴重力加速度/g	Z 轴重力加速度/g
1	0.007 055 6	-1.002 908 508	-0.001 607 945
2	-0.009 357 6	-0.005 817 015 8	-1.000 803 973
3	0.996 472 18	0.006 436 241 2	0.001 513 362
4	-0.007 579 7	1.003 011	0.003 215 892
5	-0.996 472 2	0.007 318 172	0.002 705 132
6	0.006 737 47	-0.005 985 89	1.000 799 727

由式(2)、式(3)、式(4)可得基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统的 X 轴、Y 轴、Z 轴的 MEMS

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.000\ 786\ 057\ 5 \\ 0.000\ 487\ 876\ 85 \\ 0.001\ 456\ 610\ 25 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.996\ 472\ 19 & -0.007\ 317\ 65 & 0.008\ 047\ 535 \\ -0.000\ 440\ 965\ 4 & 1.002\ 908\ 508 & -0.000\ 084\ 437\ 1 \\ -0.000\ 595\ 885 & 0.002\ 411\ 918\ 5 & 1.000\ 801\ 85 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.000\ 786\ 047\ 5 & 0 & 0 \\ 0 & -0.000\ 436\ 645\ 85 & 0 \\ 0 & 0 & -0.001\ 458\ 733\ 25 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x^2 \\ a_y^2 \\ a_z^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 3 标定实验数据分析

建立了系统中 MEMS 加速度计的数学模型后,将系统具体的数学模型的 C 语言代码封装在一个函数内,然后再进行 MEMS 加速度计零漂数据采集,以便验证该数学模型是否可以准确地反映加速度计的输出特性。

MEMS 加速度计漂移测试过程如下:

(1) 先将基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统要测试的轴向与端齿台的中心轴线垂直安装。

(2) 接通基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统,根据不同型号的启动时间预热一定的时间。设置一定采样间隔时间及采样次数,对 MEMS 加速度计的输量进行采样。记录所测轴向的 MEMS 加速度计

加速度计的零偏、刻度因数与安装误差系数分别为:

$$\begin{aligned} a_{x0} &= -0.000\ 786\ 057\ 5, S_{ax} = 0.996\ 472\ 19, \\ K_{ax1} &= -0.007\ 317\ 65, K_{ax2} = 0.008\ 047\ 535, \\ K_{ax3} &= 0.000\ 786\ 047\ 5, a_{y0} = 0.000\ 487\ 876\ 85, \\ S_{ay} &= 1.002\ 908\ 508, K_{ay1} = -0.000\ 440\ 965\ 4, \\ K_{ay2} &= -0.000\ 084\ 437\ 1, K_{ay3} = -0.000\ 436\ 645\ 85, \\ a_{z0} &= 0.001\ 456\ 610\ 25, S_{az} = 1.000\ 801\ 85, \\ K_{az1} &= -0.000\ 595\ 885, K_{az2} = 0.002\ 411\ 918\ 5, \\ K_{az3} &= -0.001\ 458\ 733\ 25. \end{aligned}$$

则基于 DSP 的某 MEMS 陀螺捷联惯导系统的 MEMS 加速度计的模型可写为:

在各个位置的输出值。

(3) 将 MEMS 加速度计及与采样有关的仪器断电,在室温中冷却一定的时间。

(4) 重复(1)~(3)步骤规定的次数,最少为4次。图1为 MEMS 加速度计零偏测试数据图。

测得的 X 轴 MEMS 加速度计零偏稳定性为 0.000 819 g, Y 轴 MEMS 加速度计零偏稳定性 0.000 407 g, Z 轴 MEMS 加速度计零偏稳定性为 0.000 271 g。

表3为 X、Y、Z 3个轴向的 MEMS 加速度计在没有加入数学模型和加入数学模型后的线性度比较。

实验结果表明得到的 MEMS 加速度计输出数学模型能够比较准确地反映其输出,而且 MEMS 加速度计的线性度有所改善。但是由于测试条件的限制,±5 g 的 MEMS 加速度计只能测量其在 ±g 内的非线性。

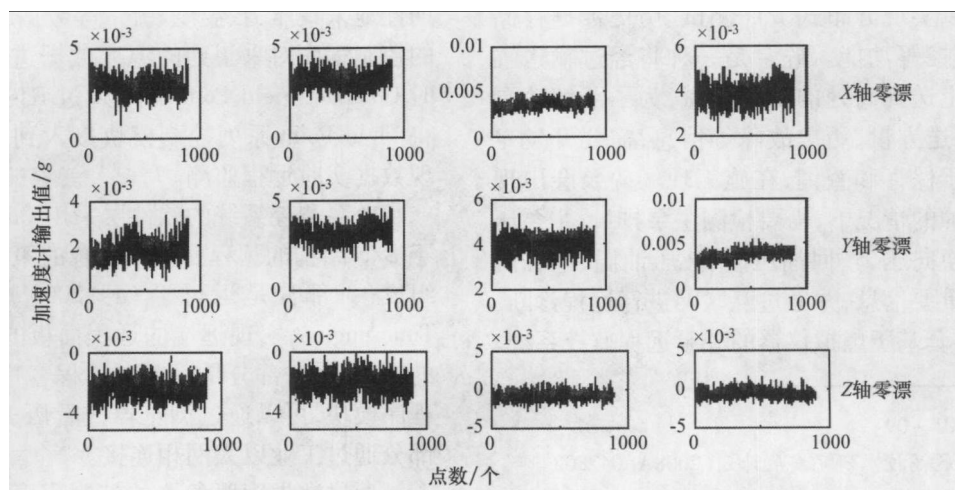


图1 X 轴、Y 轴、Z 轴 MEMS 加速度计 4 次零漂数据采集图

(下转第 17 页)

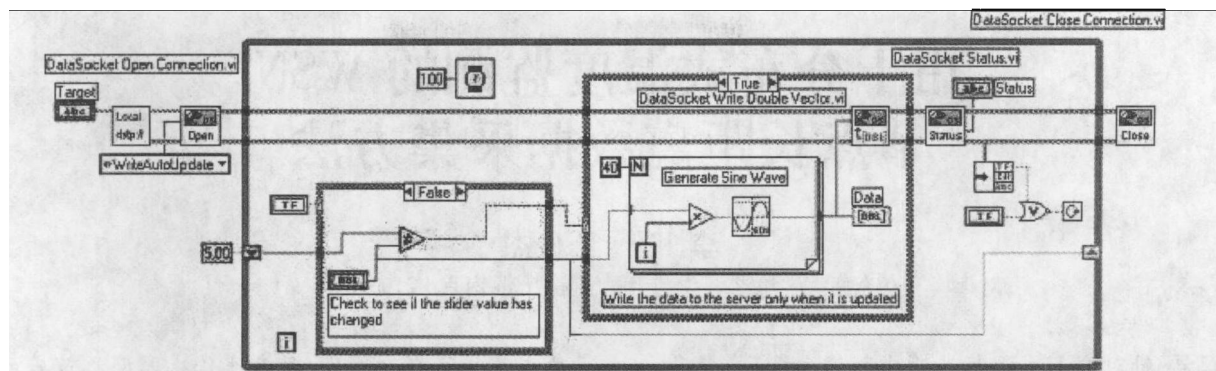


图4 服务器端子程序框图

最后,需要对主程序和子程序模块进行测试。在子程序模块的测试过程中,首先利用自底向上的方法对调用的仪器驱动程序动态链接库所包括的功能函数进行驱动测试,当每一个调用返回均正确后,将这些调用命令集成到界面设计的模块中去。对于主程序模块的测试,则采用自顶向下的方法,将模拟工作状态的程序作为正常工作状态的测试残桩,由于模拟工作状态时不需调用下层的仪器驱动程序函数,测试成功后再由主程序往下依次进行各个子程序的集成测试。采用这样的测试方法容易将不同的错误隔离,查错能力强。

### 3 结束语

利用 NI 公司的 LabVIEW 软硬件开发了砼泵虚拟测试系统,经过实车调试,实现了检测数据实时显示、多人同时异地监测的功能,同时实现了数据库访问和检测数据的远程发布功能。远程虚拟仪器是虚拟仪器

在网络领域的拓展,除了具备虚拟仪器的全部优点外,它的主要优势还在于不受地域、环境的限制。基于网络技术组建的远程虚拟仪器系统,可以使信号采集、传输和处理一体化,不但可以共享许多昂贵的硬件资源,而且还便于扩展测试和控制系统、提高测试效率,所以应用面极为广泛。实际运行情况表明,该检测系统具有测量精度高、实时性好、性能可靠、使用方便等优点,具备实用化和工业化的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 王承,何志伟. 基于虚拟仪器的网络化自动测试系统的构架及实现[J]. 电子技术应用,2001,(11):58-59.
- [2] 杨乐平,李海涛,赵勇. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [3] National Instruments Corporation. LabVIEW User Manual [Z]. 2002.

□

(上接第 13 页)

表3 3个轴向的 MEMS 加速度计的线性度比较

	X 轴/%	Y 轴/%	Z 轴/%
没有加入数学模型的线性度	0.462 54	0.241 155	0.315 206
加入数学模型的线性度	0.249 225	0.124 43	0.248 125

### 4 结束语

以上介绍的 MEMS 加速度计的六位置标定法能够标定出捷联惯导系统中 MEMS 加速度计的零偏、刻度因子和安装误差。从工程应用角度考虑,只要准确建立 MEMS 加速度计的数学模型就可以进行六位置标定,这种方法原理简单,易于实现,且精度较高。但是,这种标定方法并没有对 MEMS 加速度计的一些随机漂移进行补偿,因此,如果要继续提高捷联惯导系统的精度,还需要在 MEMS 加速度计的噪声处理上做进一步的工作。

#### 参考文献:

- [1] Cui Zheng. Overview of worldwide MEMS industry and mar-

ket[J]. Micronanoelectronic Technology,2003,40(7).

- [2] Wang Mei, Wang Yongquan, Zhang Yanhua. Adaptive filter for a miniature MEMS based attitude and heading reference system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series),2006,13(5).
- [3] Bian Chao, Xu Yuanyuan, Sun Hongguang. A micro amperometric immunosensor based on MEMS[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2006,(11).
- [4] Zhang Xueren, Tong Yan Tee, Luan Jingen. Comprehensive warpage analysis of stacked die MEMS package in accelerometer application[J]. Electronics and Packaging,2006,6(2).
- [5] Hane K. Silicon optical MEMS: optical components and sensors[J]. Optics and Precision Engineering,2002,10(6).
- [6] Xu Jianmao, Zhang Haipeng, Sun Junzhong. Periodic error compensation for quartz MEMS gyroscope drift of INS[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2007,20(2):539-545.
- [7] Walchko K J. Low cost inertial navigation: learning to integrate noise and find your way[D]. University of Florida, 2002.

□