

基于 Kalman 滤波和六位置法的加速度计标定补偿

刘 宇,季廷洪,向高林,张 欣,龚 爽,宁莉莎

(重庆邮电大学 光电信息感测与传输技术重庆市重点实验室,重庆 400065)

摘 要:加速度计的零偏、刻度因子、安装误差都会影响加速度计的精度。以微机械系统(MEMS)加速度计为实验对象,采用卡尔曼(Kalman)滤波对实验数据进行滤波,结合六位置法得到 MEMS 加速度计的零偏、刻度因子、安装误差与 MEMS 加速度计测量值的关系,最终获得基于 Kalman 滤波和六位置法的 MEMS 加速度计标定补偿数学模型。通过实验测试表明,补偿后 MEMS 加速度计的输出值更接近标准值,且加速度计解算俯仰角($-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$)的绝对误差由补偿前的 1° 经补偿后减小为 0.34° 。验证了该标定补偿算法的可行性,对提高 MEMS 加速度计测量精度有较好的理论和工程应用价值。

关键词:卡尔曼(Kalman)滤波;六位置法;微机械系统(MEMS)加速度计;安装误差;标定

中图分类号:V241.62+2;TN384

文献标识码:A

Calibration and Compensation for Accelerometer Based on Kalman Filter and a Six-position Method

LIU Yu, JI Tinghong, XIANG Gaolin, ZHANG Xin, GONG Shuang, NING Lisha

(Chongqing Municipal Level Key Lab. of Photoelectronic Information Sensing and Transmitting Technology,

Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The bias, scale factor, installation error of accelerometer will affect its accuracy. Taking MEMS accelerometer as the experimental object, using the Kalman filtering to filter the experimental data, and combining with the six-position method, the relationship between the MEMS accelerometer bias, scale factor, installation error and the MEMS accelerometer measured data has been obtained. Finally, the calibration and compensation model of MEMS accelerometer based on Kalman filtering and the six-position method has been established in this work. The experimental tests show that the output values of the MEMS accelerometer after compensating is closer to the standard ones, and the absolute error of the calculated pitch range of $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ is reduced from 1° before compensating to 0.34° after compensating. The feasibility of the calibration compensation algorithm is verified, it has good theoretical and engineering application value in improving the MEMS accelerometer measurement precision.

Key words: Kalman filtering; six position method; Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) accelerometer; installation error; calibration

0 引言

微机械系统(MEMS)惯性器件因其体积小,质量轻,功耗低,可大批量生产,成本低及可靠性高等一系列传统传感器所没有的优点,被广泛应用于航空、航天、航海、气象、地质、汽车工业、工业监控、机器人及消费类电子产品等领域^[1]。MEMS 加速度计作为惯性测量单元的核心器件之一,其精度影响其应用范围,而 MEMS 加速度计的零偏、刻度因子和安装误差是影响 MEMS 加速度计精度的主要误

差,因此,必须建立相关的误差模型,对误差进行实时补偿和修正^[2-3]。

实验室自主研发的惯性测量单元(IMU)姿态仪中 MEMS 加速度计的误差包括安装误差(即非正交误差)、零偏和刻度因子的误差。通常误差建模与标定方法有两种,即

1) 在各个温度段下建立误差模型,误差模型包括加速度计的零偏、刻度因子、非正交误差项,在每个温度区间利用六位置法对 MEMS 加速度计进行

收稿日期:2015-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175535),MEMS 振动传感与微姿态组合测井技术国际联合研究中心科技平台与基地建设基金资助项目(cstc2014gjhz0038)

作者简介:刘宇(1972-),男,重庆市人,教授,硕士生导师,主要从事惯性导航技术研究。E-mail:liuyu@cqupt.edu.cn。

标定补偿^[4]。

2) 在全温下只建立一个统一的误差模型^[5]。文献[6]中提到的建模方法,一共有 21 个参数,需要进行 21 次完整的标定实验,实验繁琐、冗余,计算量大,不便于工程应用。本文考虑到工程应用的条件,结合 Kalman 滤波和六位置法对 MEMS 加速度计进行标定补偿,并将误差模型移植进 IMU 姿态仪里进行应用和验证。实验结果表明,基于 Kalman 滤波和六位置法的 MEMS 加速度计标定补偿效果较好,且原理简单,易实现,精度较高。

1 原理方法

1.1 Kalman 滤波原理

Kalman 滤波是一个在误差协方差最小准则下的最优估计方法^[7],计算量小,实时性高,能利用实际的运动参数不断修正未来运动状态的估计值,提高估计精度的同时,兼顾实时性和稳定性^[8]。Kalman 滤波器的状态方程和测量方程为

$$\mathbf{X}_{i+1} = \mathbf{A}\mathbf{X}_i + \mathbf{W}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{Z}_i = \mathbf{H}\mathbf{X}_i + \mathbf{V}_i \quad (2)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{H}$ 为测量矩阵; $\mathbf{W}$, $\mathbf{V}$ 分别为状态和测量的噪声矩阵,它们是互不相关的正态白噪声,其方差分别为 $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$ 。状态向量预测方程为

$$\hat{\mathbf{X}}_{i|i-1} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}_i \quad (3)$$

状态向量协方差矩阵预测为

$$\mathbf{P}_{i|i-1} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{i-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (4)$$

状态向量更新方程为

$$\hat{\mathbf{X}}_i = \hat{\mathbf{X}}_{i|i-1} + \mathbf{K}_i(\mathbf{Z}_i - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}_{i|i-1}) \quad (5)$$

状态向量协方差更新方程为

$$\mathbf{P}_i = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i\mathbf{H})\mathbf{P}_{i|i-1} \quad (6)$$

Kalman 增益矩阵为

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{P}_{i|i-1}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}_{i|i-1}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (7)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}_{i|i-1}$ 为预测状态; $\hat{\mathbf{X}}_i$ 为状态估计; $\mathbf{P}_{i|i-1}$ 为预测误差协方差; $\mathbf{P}_i$ 为估计误差协方差。

1.2 六位置法的原理

分析 MEMS 加速度计误差后,可得 MEMS-IMU 中 MEMS 加速度计的误差模型^[9]为

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ax} & S_{ax1} & S_{ax2} \\ S_{ay1} & K_{ay} & S_{ay2} \\ S_{az1} & S_{az2} & K_{az} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{ax3} & 0 & 0 \\ 0 & S_{ay3} & 0 \\ 0 & 0 & S_{az3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x^2 \\ a_y^2 \\ a_z^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: A_x, A_y, A_z 为 MEMS 加速度计的实际测量值; a_{x0}, a_{y0}, a_{z0} 为 MEMS 加速度计的零偏; $S_{axi}, S_{ayi}, S_{azi} (i=1,2)$ 为 MEMS 加速度计安装误差系数; K_{ax}, K_{ay}, K_{az} 为 MEMS 加速度计的刻度因子; $S_{ax3}, S_{ay3}, S_{az3}$ 为 MEMS 加速度计二次有关的误差系数,鉴于工程应用中二次误差对加速度计精度影响较小,本文不考虑二次误差。因此, MEMS 加速度计输出值的误差模型可写为

$$\begin{bmatrix} A_x - a_{x0} \\ A_y - a_{y0} \\ A_z - a_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ax} & S_{ax1} & S_{ax2} \\ S_{ay1} & K_{ay} & S_{ay2} \\ S_{az1} & S_{az2} & K_{az} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.2.1 MEMS 加速度计的六位置标定方案

MEMS 加速度计被用来感测载体的线运动,是构成惯性系统的核心器件,其精度和性能决定了惯性系统的精度和性能^[10]。目前, MEMS 加速度计没有统一的测试标准。但根据 MEMS 加速度计工作原理,选取 GJB 1037-90《单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载体上所使用的线加速度计^[11]。本文在得到基于 MEMS-IMU 姿态仪中 MEMS 加速度计的误差模型方程后,通过对多位置标定 MEMS 加速度计的误差模型系数进行辨识。由于不同的加速度计采用不同的位置取向,如挠性加速度计采用 12 点翻滚测试法。本文根据 MEMS 加速度计误差补偿模型位置系数的个数,采用六位置法对 MEMS 加速度计误差模型系数进行辨识,分别为地东南、天西南、西地南、东天南、南西地、东北天^[12]。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 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	地	东	南	1	0	0
2	天	西	南	-1	0	0
3	西	地	南	0	1	0
4	东	天	南	0	-1	0
5	南	西	地	0	0	1
6	东	北	天	0	0	-1

MEMS 加速度计位置标定过程为

1) 先将 MEMS-IMU 姿态仪要测试的轴向与转台的中心轴线垂直安装。

2) 接通 MEMS-IMU 姿态仪的电源,预热一定时间。

3) 将转台转到第1个位置(见表1),设置一定采样间隔时间和采样次数,对采样后3个轴的测量值进行Kalman滤波,对滤波后的值取平均作为该位置MEMS加速度计的输出值。

4) 重复步骤3)得到表1中第2个位置到第6个位置的MEMS加速度计的输出值。

x 轴MEMS加速度计的输出为

$$\begin{cases} A_{x1} = a_{x0} + K_{ax} \\ A_{x2} = a_{x0} - K_{ax} \\ A_{x3} = a_{x0} + S_{ax1} \\ A_{x4} = a_{x0} - S_{ax1} \\ A_{x5} = a_{x0} + S_{ax2} \\ A_{x6} = a_{x0} - S_{ax2} \end{cases} \quad (10)$$

y 轴MEMS加速度计的输出为

$$\begin{cases} A_{y1} = a_{y0} + S_{ay1} \\ A_{y2} = a_{y0} - S_{ay1} \\ A_{y3} = a_{y0} + K_{ay} \\ A_{y4} = a_{y0} - K_{ay} \\ A_{y5} = a_{y0} + S_{ay2} \\ A_{y6} = a_{y0} - S_{ay2} \end{cases} \quad (11)$$

z 轴MEMS加速度计的输出为

$$\begin{cases} A_{z1} = a_{z0} + S_{az1} \\ A_{z2} = a_{z0} - S_{az1} \\ A_{z3} = a_{z0} + S_{az2} \\ A_{z4} = a_{z0} - S_{az2} \\ A_{z5} = a_{z0} + K_{az} \\ A_{z6} = a_{z0} - K_{az} \end{cases} \quad (12)$$

由式(10)可得 x 轴MEMS加速度计的模型的相应系数为

$$\begin{cases} a_{x0} = \frac{A_{x1} + A_{x2} + A_{x3} + A_{x4} + A_{x5} - A_{x6}}{6} \\ K_{ax} = \frac{A_{x1} - A_{x2}}{2} \\ S_{ax1} = \frac{A_{x3} - A_{x4}}{2} \\ S_{ax2} = \frac{A_{x5} - A_{x6}}{2} \end{cases} \quad (13)$$

由式(11)可得 y 轴MEMS加速度计的模型的相应系数为

$$\begin{cases} a_{y0} = \frac{A_{y1} + A_{y2} + A_{y3} + A_{y4} + A_{y5} + A_{y6}}{6} \\ S_{ay1} = \frac{A_{y1} - A_{y2}}{2} \\ K_{ay} = \frac{A_{y3} - A_{y4}}{2} \\ S_{ay2} = \frac{A_{y5} - A_{y6}}{2} \end{cases} \quad (14)$$

由式(12)可得 z 轴MEMS加速度计的模型的相应系数为

$$\begin{cases} a_{z0} = \frac{A_{z1} + A_{z2} + A_{z3} + A_{z4} + A_{z5} + A_{z6}}{6} \\ S_{az1} = \frac{A_{z1} - A_{z2}}{2} \\ S_{az2} = \frac{A_{z3} - A_{z4}}{2} \\ K_{az} = \frac{A_{z5} - A_{z6}}{2} \end{cases} \quad (15)$$

1.2.2 标定系数的计算

由于MEMS加速度计输出值受随机噪声影响严重,为了确保误差模型的准确性,在计算标定系数前,需对MEMS加速度计的测量值进行Kalman滤波。本文对6个位置的MEMS加速度计分别采集足够多数据测量值,并进行滤波,滤波前、后对比图如图1所示。

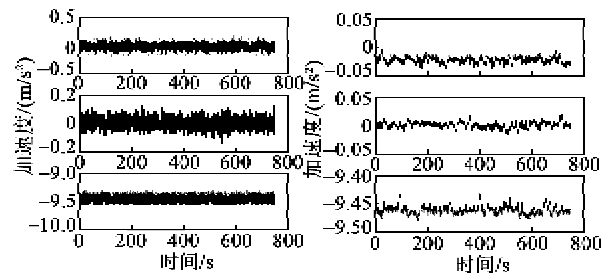


图1 Kalman滤波前、后对比图

分别对MEMS加速度计滤波后的测量值取平均作为MEMS-IMU姿态仪中MEMS加速度计 x 、 y 、 z 轴的输出值,结果如表2所示。

表2 加速度计六位置三轴输出值

位置	x 轴输出/ g	y 轴输出/ g	z 轴输出/ g
1	0.955 841 929 0	0.009 778 639	-0.020 565 512 0
2	-0.955 911 159 0	0.007 170 030	-0.021 445 518 3
3	0.011 354 678 8	0.951 289 618	-0.028 840 524 6
4	-0.006 522 433 8	-0.951 358 108	-0.015 581 278 3
5	-0.006 250 665 7	0.012 955 603	0.966 831 956 0
6	-0.008 373 394 8	-0.000 824 260	-0.966 423 795 0

由式(13)~(15)可得到基于 MEMS-IMU 姿态仪的 x 、 y 、 z 轴的 MEMS 加速度计的零偏和标定系数如表 3 所示。

表 3 加速度计的零偏和标定系数

敏感轴	零偏/ g	比例系数
x	$a_{x0} = -0.001\ 543\ 5$	$K_{ax} = 0.955\ 876\ 5$
		$S_{ax1} = 0.008\ 938\ 5$
		$S_{ax2} = 0.001\ 061\ 3$
y	$a_{y0} = 0.004\ 835\ 2$	$K_{ay} = 0.951\ 323\ 8$
		$S_{ay1} = 0.001\ 304\ 3$
		$S_{ay2} = 0.006\ 889\ 9$
z	$a_{z0} = -0.014\ 337\ 4$	$K_{az} = 0.966\ 627\ 8$
		$S_{az1} = 0.000\ 440\ 0$
		$S_{az2} = -0.006\ 629\ 6$

MEMS-IMU 的加速度计误差模型为

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ax} & S_{ax1} & S_{ax2} \\ S_{ay1} & K_{ay} & S_{ay2} \\ S_{az1} & S_{az2} & K_{az} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_x - a_{x0} \\ A_y - a_{y0} \\ A_z - a_{z0} \end{bmatrix} \quad (16)$$

将表 3 的各系数代入式(16)即可得出加速度计的输出值。

2 结果和讨论

2.1 实验仪器

2.1.1 MEMS-IMU

MEMS-IMU 为实验室自主研制的基于 MEMS 传感器的姿态仪,它集成 3 轴 MEMS 加速度计、3 轴 MEMS 陀螺仪、3 轴磁力计和 1 个气压计。

2.1.2 双轴电动转台

实验借助北京航空精密机械研究所生产的 902E-1 双轴电动转台,它可以为姿态仪提供输入角速度,转台速率精度为 $1 \times 10^{-3} (\pm 0.01 (^{\circ})/s \sim \pm 100 (^{\circ})/s)$,如图 2 所示。将 MEMS 加速度计的

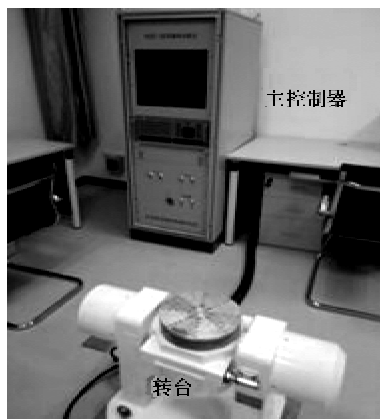


图 2 902E-1 型双轴电动转台

3 个敏感轴分别向上向下垂直于双轴电动转台平面。

2.1.3 数据采集软件

数据采集软件为自己开发的调试工具,用来采集并保存数据,如图 3 所示。

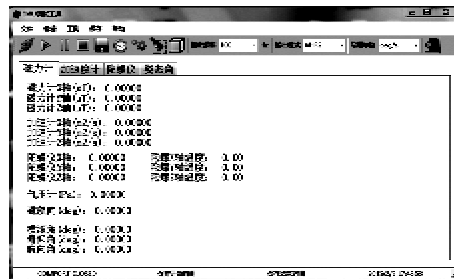


图 3 数据采集界面

2.2 处理流程

为了验证上述标定补偿模型的有效性,通过用式(16)对 MEMS 加速度计的测量值进行处理。流程图如图 4 所示。

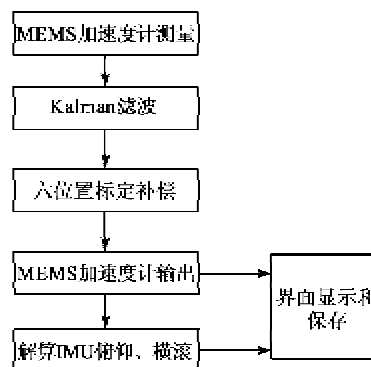


图 4 加速度计处理流程图

2.3 实验结果分析

将 MEMS 加速度计的 z 轴敏感轴向上垂直放在双轴电动转台上,用数据采集软件采集若干数据,把数据代入 MEMS 加速度计的误差模型,将所得结果与标定补偿前的数据进行比较,图 5 为六位置法标定补偿后的 MEMS 加速度计数据。

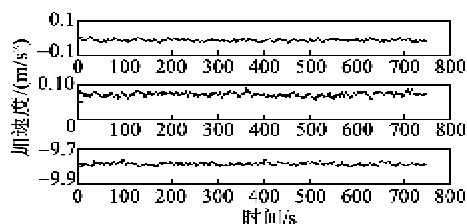


图 5 标定补偿后的加速度计数据

MEMS 加速度计 z 敏感轴垂直转台平面向上补偿前、后的加速度计输出值如表 4 所示。

表 4 补偿前后加速度计输出值

敏感轴	补偿前加速度计输出	补偿后加速度计输出
x	-0.082 1	-0.014 0
y	0.058 1	0.070 9
z	-9.471 0	-9.787 8

由表 4 可知,补偿后的加速度计输出值更接近标准值,且效果较明显。

加速度计输出值可解算 MEMS-IMU 姿态仪的俯仰角和横滚角,因此,可以用来验证 MEMS 加速度计的标定补偿效果。以俯仰角为例,在俯仰角为 $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 范围内,用转台控制姿态仪的俯仰角依次为 $-80^{\circ}, -60^{\circ}, -40^{\circ}, \dots, 80^{\circ}$,用 MEMS 加速度计补偿前、后的输出值分别计算姿态仪的俯仰角,结果如表 5 所示。

表 5 补偿前、后俯仰角误差

转台输入/ ($^{\circ}$)	补偿前 输出/($^{\circ}$)	补偿后 输出/($^{\circ}$)	补偿前绝对 误差/($^{\circ}$)	补偿后绝对 误差/($^{\circ}$)
-80	-78.85	-79.48	1.15	0.35
-60	-58.47	-59.85	1.53	0.25
-40	-38.90	-40.32	1.10	0.32
-20	-19.85	-20.20	0.15	0.25
0	0.38	0.48	0.38	0.43
20	20.30	20.50	0.30	0.41
40	38.70	39.67	1.30	0.33
60	58.54	59.67	1.16	0.33
80	78.38	79.68	1.62	0.32

由表 5 可知,MEMS 加速度计补偿后解算的俯仰角与实际转台输入角度更接近,在俯仰角为 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的范围内,平均绝对误差为 0.34° ,而补偿前 MEMS 加速度计解算的俯仰角的平均绝对误差约为 1° ,验证了标定补偿模型的可行性和有效性。

3 结束语

MEMS 加速度计的安装误差、零偏和刻度因子是影响测量精度的主要因素,论文在对 MEMS 加速度计进行大量实验的基础上,结合 Kalman 滤波和六位置法对 MEMS 加速度计误差模型进行补偿标定。论文的创新点在于分别对 6 个位置的加速度数据取平均值前进行 Kalman 滤波,减小噪声对测量值的影响,再与六位置法相结合对 MEMS 加速度计进行标定补偿。通过实验数据分析可知,补偿后 MEMS 加速度计的输出值更接近标准值,在俯仰角为 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内,加速度计解算的俯仰角绝对

误差由补偿前的 1° 减小到补偿后的 0.34° 。本方法原理简单,易实现,精度较高,对提高 MEMS 加速度计测量精度有较好的理论和工程应用价值。

参考文献:

- [1] 王淑华. MEMS 传感器现状及应用[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(8): 516-522.
WANG Shuhua. Current status and applications of MEMS sensors[J]. MEMS and Sensors, 2011, 48(8): 516-522.
- [2] SKOG I, HÄNDEL P. Calibration of a MEMS inertial measurement unit [C]//S. 1; XVII IMEKO World Congress, 2006: 1-6.
- [3] FANG B, CHOU W, DING L. An optimal calibration method for a MEMS inertial measurement unit[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11: 314-319.
- [4] 陆辰, 李荣冰, 刘建业, 等. 微型航姿系统中三轴 MEMS 加速度计组合误差建模方法[J]. 测试技术学报, 2011, 25(1): 29-34.
LU Chen, LI Rongbing, LIU Jianye, et al. Combined error mode ling for 3D-MEMS accelerometer in MIMU [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2011, 25(1): 29-34.
- [5] AGGARW P, SYED Z, NIU X J, et al. Cost-effective-ness testing and calibration of low cost MEMS sensors for integrated positioning, navigation and mapping systems [C]//Munich, Germany: Proceedings of XXIII FIG (International Federation of Surveyors) Congress, 2006: 1-9.
- [6] 许德新, 何昆鹏, 梁海波. MEMS 惯性测量组件的温度误差补偿模型研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(5): 607-613.
XU Dexin, HE Kunpeng, LIANG Haibo. Compensating for non-linear errors caused by temperature changes in MEMS inertial measurement units[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(5): 607-613.
- [7] 罗霄. 基于卡尔曼滤波的 DMC 算法在 CSTR 中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2012(7): 55-60.
LUO Xiao. Kalman filter based dynamic matrix control and its application in CSTR[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2012(7): 55-60.
- [8] FROSIO I, PEDERSINI F, BORGHESE N A. Auto calibration of MEMS accelerometers[M]//New York; Advanced Mechatronics and MEMS Devices Springer, 2013: 53-88.

(下转第 110 页)