第 42 卷 第 4 期
2021 年 4 月

仪 器 仪 表 学 报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 42 No. 4
Apr. 2021

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107538

考虑横向灵敏度的三轴加速度传感器标定方法研究*

张顺星,周 吴,卢 鹏,于慧君,彭 倍
(电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731)

摘 要:横向灵敏度是单轴加速度传感器的重要指标之一,它直接影响到三轴加速度传感器的标定模型与测量精度。本论文以三轴 MEMS 加速度传感器为研究对象,在传统的标定模型中引入了导致测量耦合的横向灵敏度误差,建立了一种新的三轴加速度传感器标定模型,该模型将传感器的横向灵敏度以对称矩阵的形式引入现有的标定公式,构建了包含零位偏差、标度因数误差、非正交安装误差及横向灵敏度的标定函数表达式。最后利用十二位置标定法采集了三轴加速度传感器的原始测量数据,通过极大似然参数估计算法解算新的标定模型完成标定。结果表明,与常用标定数学模型相比,本数学模型的补偿误差均值与方差更小,补偿后数据精度更高且稳定性更好,本研究成果对提升三轴 MEMS 加速度传感器精度有十分重要的指导意义,因此具有较高的理论研究和工程应用价值。

关键词: 三轴 MEMS 加速度传感器;误差分析;横向灵敏度;标定
中图分类号: TH89 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460

Research on the calibration method of triaxial acceleration sensor with transverse sensitivity

Zhang Shunxing, Zhou Wu, Lu Peng, Yu Huijun, Peng Bei
(*School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

Abstract: Transverse sensitivity of the single-axis accelerometer is one of the most important performance metrics, which has significant influence on the calibration model and accuracy. In this study, a novel model considering the transverse sensitivity is proposed to calibrate the three-axis micro-electro-mechanical systems (MEMS) acceleration sensors. The transverse sensitivity of the model is introduced into the calibration equation as a symmetric matrix. The established calibration function includes zero deviation, scale factor error, non-orthogonal installation error and transverse sensitivity. Finally, the 12-position calibration method is utilized to collect experimental data. The maximum likelihood parameter estimation algorithm is used to solve the calibration model to achieve sensor calibration. Experimental results show that the compensation error of the calibration mathematical model is smaller in terms of mean values and variance than current calibration mathematical model. The accuracy after compensation is higher and the stability is better, which show positive effectiveness on improving the accuracy of MEMS three-axis acceleration sensor. This study has important theoretical significance and engineering application value.

Keywords: three-axis MEMS accelerometer; error analysis; transverse sensitivity; calibration

0 引 言

三轴 MEMS 加速度传感器作为惯性测量单元的核心器件之一,广泛应用于精密位移检测与物体运动识别系统中[1-2]。传感器性能的优劣程度直接决定了惯性导航系统的导航精度,由于加工制造和运输等因素的影响,加速度传感器的实际性能与理论值之间存在一定的偏差,导致测量结果存在误差。现有的减小测量误差的方法主要包括两方面:一方面提升加速度传感器制造精度和运输过程的质量控制;另一方面则是对加速度传感器进行后期的标定补偿[3]。前者在实践操作中受到了制造精度

收稿日期:2021-02-25 Received Date: 2021-02-25
*基金项目:国家自然科学基金(52075082)、四川省科技厅区域创新合作项目(2020YFQ0017)资助

极限制约的问题且成本较高,同时,结构和工艺的改进将使加速度传感器变得更为复杂,给生产、装配、调试等诸多环节带来不便[4-5]。因此,通过对三轴 MEMS 加速度传感器的误差来源进行分析来建立合适的测量系统误差模型,然后利用误差标定与补偿技术来提高其使应用精度更具有现实意义与实用价值。

传感器标定精度取决于传感器标定数学模型精度及基于标定模型的标定路径设计和标定数据处理方法[6]。根据误差产生机制不同,三轴 MEMS 加速度传感器误差主要分为零位偏差、标度系数误差、安装误差及单轴横向灵敏度等。王鑫等[7]提出了一种空间联合标定方法标定了三轴 MEMS 加速度传感器的比例因子与零偏。李魁等[8]建立了传统的考虑加速度传感器零位偏差、标度系数误差、安装误差的数学模型,从优化标定路径设计的角度提出了一种自标定旋转方案设计方法,完成加速度传感器标定精度的提高。闫文吉等[9]从优化标定数据处理方法角度入手,提出了一种基于二元插值算法的异频分步在线补偿方法,实现了传感器标定精度的提高。本文从优化传感器标定数学模型的角度,建立一个考虑三轴 MEMS 加速度传感器零位偏差、标度系数误差、安装误差与单轴横向灵敏度的误差模型,并使用十二位置法进行了标定,结果表明,使用本文的数学模型进行标定的结果比传统数学模型的补偿误差均值与方差更小,补偿后数据精度更高且稳定性更好。实现了三轴 MEMS 加速度传感器标定精度的提高。

1 误差模型建立

在建立三轴 MEMS 加速度传感器误差模型时,考虑加速度传感器的不同误差来源,可得到不同的加速度计误差数学模型。

1.1 零偏与标度因数

当仅考虑加速度传感器零位误差与标度因数[10]误差时,三轴 MEMS 加速度传感器的标定模型可表示为:

$$\begin{cases} D_x = S_x M_x + B_x \\ D_y = S_y M_y + B_y \\ D_z = S_z M_z + B_z \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix}_N = \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}_N + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中:D_x, D_y, D_z 为传感器各轴测量值;M_x, M_y, M_z 为传感器各轴加速度输入值;B_x, B_y, B_z 为传感器各轴零位误差值;S_x, S_y, S_z 为传感器各轴标度因数。

1.2 非正交安装误差

当加速度传感器安装到被测对象上时,敏感轴与运动载体的坐标轴通常不能完全重合而形成非正交安装误差,如图 1 所示,其中 x_s, y_s, z_s 为三轴加速度传感器的敏感轴,x_b, y_b, z_b 为运动载体坐标系的坐标轴,$\theta_{ij}(i, j = x, y, z)$ 表示加速度传感器第 i 敏感轴围绕载体第 j 坐标轴的旋转角度。

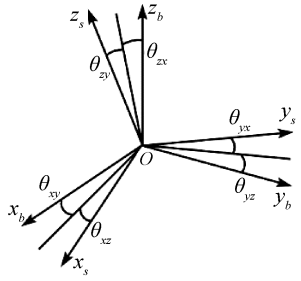


图 1 非正交误差成因示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the causes of non-orthogonal errors

当引入传感器非正交安装误差[11]时,三轴 MEMS 加速度传感器的标定模型可表示为:

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix}_N = \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_{xy}\cos\theta_{xz} & -\cos\theta_{yx}\sin\theta_{yz} & \cos\theta_{zx}\sin\theta_{zy} \\ \cos\theta_{xy}\sin\theta_{xz} & \cos\theta_{yx}\cos\theta_{yz} & -\cos\theta_{zy}\sin\theta_{zx} \\ -\cos\theta_{xz}\sin\theta_{xy} & \cos\theta_{yz}\sin\theta_{yx} & \cos\theta_{zx}\cos\theta_{zy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}_N + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \tag{3}$$

式中:θ_{ij} 的值较小,通常趋近于 0,设 $\theta_y = \theta_z = \theta_x$,$\theta_{xy} = \theta_{zy} = \theta_z$,$\theta_{xz} = \theta_{yz} = \theta_z$,则式(3)可写为:

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix}_N = \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & 1 & -\theta_x \\ -\theta_y & \theta_x & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}_N + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix}_N = \begin{pmatrix} S_x & -S_x\theta_z & S_x\theta_y \\ S_y\theta_z & S_y & -S_y\theta_x \\ -S_z\theta_y & S_z\theta_x & S_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}_N + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \tag{5}$$

式(5)表达式是当前最常用的三轴 MEMS 加速度传感器标定模型。然而在实际设计、制造、封装及元件材料等因素的影响下,加速度传感器的最大电信号灵敏轴与其主轴方向不重合,在横向加速度的作用下加速度计会有一定的输出,该输出与横向加速度的比称为加速度计

横向灵敏度。当加速度传感器用于三轴测量时,横向灵敏度对测量精度具有不可忽略的影响。

1.3　横向灵敏度

目前三轴 MEMS 加速度传感器的误差模型通常仅考虑加速度计零位、标度因数误差与非正交安装误差等因素,当引入横向灵敏度误差[12]时,三轴 MEMS 加速度传感器的标定模型则表示为:

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix}_N = \begin{pmatrix} S_x & S_{Txy} & S_{Txz} \\ S_{Tyx} & S_y & S_{Tyz} \\ S_{Tzx} & S_{Tzy} & S_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & 1 & -\theta_x \\ -\theta_y & \theta_x & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}_N + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix}_N = \begin{pmatrix} S_x + S_{Txy}\theta_z - S_{Txz}\theta_y & -S_x\theta_z + S_{Txy} + S_{Txz}\theta_x & S_x\theta_y - S_{Txy}\theta_x + S_{Txz} \\ S_{Tyx} + S_y\theta_z - S_{Tyz}\theta_y & -S_{Tyx}\theta_z + S_y + S_{Txz}\theta_x & S_{Tyx}\theta_y - S_y\theta_x + S_{Tyz} \\ S_{Tzx} + S_{Tzy}\theta_z - S_z\theta_y & -S_{Tzx}\theta_z + S_{Tzy} + S_z\theta_x & S_{Tyx}\theta_y - S_{Tzy}\theta_x + S_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}_N + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow D_x &= S_xM_x + S_{Txy}\theta_zM_x - S_{Txz}\theta_yM_x - S_x\theta_zM_y + S_{Txy}M_y + S_{Txz}\theta_xM_y + S_x\theta_yM_z - S_{Txy}\theta_xM_z + S_{Txz}M_z + B_x \\ \Rightarrow D_y &= S_{Tyx}M_x + S_y\theta_zM_x - S_{Tyz}\theta_yM_x - S_{Tyx}\theta_zM_y + S_yM_y + S_{Tyz}\theta_xM_y + S_{Tyx}\theta_yM_z - S_y\theta_xM_z + S_{Tyz}M_z + B_y \\ \Rightarrow D_z &= S_{Tzx}M_x + S_{Tzy}\theta_zM_x - S_z\theta_yM_x - S_{Tzx}\theta_zM_y + S_{Tzy}M_y + S_z\theta_xM_y + S_{Tyx}\theta_yM_z - S_{Tzy}\theta_xM_z + S_zM_z + B_z \end{aligned} \tag{8}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix}_N = \begin{pmatrix} S_x & S_{Txy}\theta_z & -S_{Txz}\theta_y & -S_x\theta_z & S_{Txy} & S_{Txz}\theta_x & S_x\theta_y & -S_{Txy}\theta_x & S_{Txz} \\ S_{Tyx} & S_y\theta_z & -S_{Tyz}\theta_y & -S_{Tyx}\theta_z & S_y & S_{Txz}\theta_x & S_{Tyx}\theta_y & -S_y\theta_x & S_{Tyz} \\ S_{Tzx} & S_{Tzy}\theta & -S_z\theta_y & -S_{Tzx}\theta_z & S_{Tzy} & S_z\theta_x & S_{Tyx}\theta_y & -S_{Tzy}\theta_x & S_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_x \\ M_x \\ M_x \\ M_y \\ M_y \\ M_y \\ M_z \\ M_z \\ M_z \end{pmatrix}_N + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \tag{9}$$

式中:$S_{Tij}(i=x,y,z;j=x,y,z)$为三轴加速度传感器 i 轴对应 j 轴的横向灵敏度。

2　误差模型解算

2.1　标定方案及步骤

三轴 MEMS 加速度传感器的标定常是在重力场下采用基于重力的多位置翻滚标定法,常用的有 6 位置[13]、12 位置[14]、及 24 位置[15]标定等,根据确定位置的理论输入加速度和传感器的实测值来解算加速度传感器误差模型矩阵中的未知量。

为完成三轴加速度传感器的标定实验,并且保证其标定实验数据有可信价值,所选择的测量仪器和设备精度等级应当与被标定传感器精度要求相适应(一般所用测量仪器和设备的精度至少要比被标定传感器的精度高一个量级)[16],基于本实验室硬件条件,本文使用中科赛凌科技公司生产的带温箱单轴速率位置转台进行标定实验,该转台具有高精度速率伺服和定位、重复性好、速率范围宽、分辨率高、动态响应快、温度调节范围宽、升降温度速度快等特点,高度适配于本文进行标定实验内容。其技术指标如表 1 所示。

表 1　转台技术指标

Table 1　Technical index of turntable

转台技术指标			
负载重量	20 kg	速率范围	0.000 01°/s~300°/s
负载尺寸	ϕ320×250 mm		0.01%(1°脉冲)
位置精度	±2″	速率精度	0.001%(10°脉冲)
回转精度	±1	及平稳性	0.000 1%(360°脉冲)
角加速度	300°/s^2	通信方式	RS232

采用十二位置标定法对三轴 MEMS 加速度传感器进行数据采集,并按表 2 所示角度设置传感器各敏感轴位置方向。整个标定试验采用 LIS3DH 三轴 MEMS 加速度传感器,整体实验操作平台如图 2 所示。

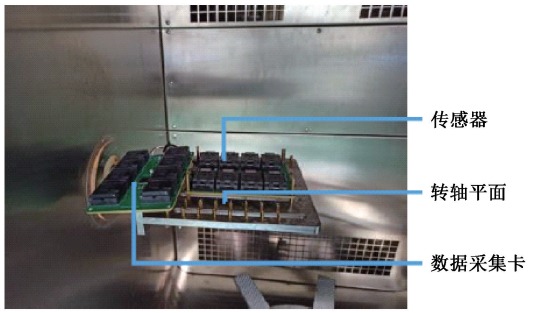
具体标定实验流程如下:

1)将三轴加速度传感器安装于转台台面,保持加速度计敏感轴 z 轴垂直于转台台面,x、y 轴与转台台面平行;

2)系统加电,待加速度传感器输出稳定 5 min 后,设置转台运行,使三轴加速度传感器各敏感轴轴向如表 2 所示,各敏感轴的输入重力加速度如表 2 所示;

3)转台运行期间,采集电路实时对加速度传感器各轴输出数据进行采集,每个位置点静止采集 30 s;

(a) 实验操作平台1
(a) Experimental operation platform part1



(b) 实验操作平台2
(b) Experimental operation platform part2

图 2 实验操作平台

Fig. 2 Experimental operation platform

表 2 多位置取向与对应输入重力加速度值

Table 2 Multi-position orientation and corresponding input gravitational acceleration value

位置	敏感轴取向/(°)			输入加速度值/g		
	x 轴	y 轴	z 轴	x 轴	y 轴	z 轴
1	0	0	90	0	0	1
2	0	0	−90	0	0	−1
3	90	0	0	1	0	0
4	−90	0	0	−1	0	0
5	0	90	0	0	1	0
6	0	−90	0	0	−1	0
7	15	0	75	0.258 8	0	0.965 9
8	30	0	60	0.5	0	0.866 0
9	45	0	45	0.707 1	0	0.700 1
10	60	0	30	0.866 0	0	0.5
11	75	0	15	0.965 9	0	0.258 8
12	0	15	75	0	0.258 8	0.965 9

4)读取 3 个通道加速度传感器的输出值,根据不同位置点加速度传感器输出值计算加速度传感器零位、标度因数、安装误差系数和横向灵敏度等参数。

2.2 误差模型求解

本文使用极大似然参数估计法[17]算法解算该误差模型。设加速度传感器读数的随机噪声服从方差为 σ^2 的零均值高斯过程,则每一个三轴加速度传感器输出 D_n 的概率密度函数也服从高斯分布,根据极大似然估计理论,获得概率密度函数 $f(D)$ 的似然函数 $L(\theta)$,分析似然函数 $L(\theta)$,获得最优化目标函数;加速度测量值的概率密度函数 $f(D_n)$:

$$f(D_n)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{\|D_n-KM-B\|^2}{2\sigma^2}\right] \tag{10}$$

式中:σ 是随机噪声的标准差,根据极大似然估计理论,连续型随机变量的似然函数是:

$$L(\theta)=\prod_{n=1}^{N}f(D_n) \tag{11}$$

极大似然估计的思想是计算适当的 θ 值使得似然函数最大,即求:

$$\max_{\theta}L(\theta)=\left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right)^{N}\exp\times\left[\sum_{n=1}^{N}-\frac{\|D_n-KM-B\|^2}{2\sigma^2}\right] \tag{12}$$

等价于求 $\sum_{n=1}^{N}-\frac{\|D_n-KM-B\|^2}{2\sigma^2}$ 的最小值,忽略常数项 $2\sigma^2$,极大似然问题表示为:

$$\min_{\theta}\sum_{n=1}^{N}\|D_n-KM_n-B\|^2=\min_{\theta}\sum_{n=1}^{N}\|E_n\|^2 \tag{13}$$

$$\text{s.t}\ \|M_n\|^2=1,n=1,\cdots,N$$

将最小化目标函数改写为式(14):

$$f(\theta)=\sum_{n=1}^{N}\|D_n-KM_n-B\|^2+\lambda_n(\|M_n\|^2-1) \tag{14}$$

式中:λ_n 表示拉格朗日乘子,用以约束标定值的 M_n 二范数,估计值为:$\theta=[vec^{\mathrm{T}}(K)B^{\mathrm{T}}M_n^{\mathrm{T}}\lambda_1\cdots\lambda_n]^{\mathrm{T}}$

使用牛顿迭代法求解 θ,采用简易六位置静态标定方法确定迭代初值,$\lambda_n=0$;牛顿迭代法公式为:

$$\theta^{i+1}=\theta^{i}-[\nabla^2 f(\theta^{i})]^{-1}\nabla f(\theta^{i}) \tag{15}$$

以极大似然估计算法分别求解式(5)与(9)所建立数学模型,求得其误差参数矩阵如表 3、表 4 所示,其中表 3 为传统模型(未考虑横向灵敏度)所求得误差参数,表 4 为本文模型(考虑横向灵敏度)所求得误差参数。

表 3 传统模型标定参数

Table 3 Calibration parameters of traditional models

标度因数			安装偏转角/(°)			零偏误差/g		
S_x	S_y	S_z	θ_x	θ_y	θ_z	B_x	B_y	B_z
1.033 3	1.062 6	1.078 4	0.036 0	0.017 6	0.034 2	−0.038 9	−0.063 7	−0.054 9

表 4　本文模型标定参数

Table 4　Calibration parameters of the proposed model

标度因数			安装偏转角/(°)			零偏误差/g			横向灵敏度/%					
S_x	S_y	S_z	θ_x	θ_y	θ_z	B_x	B_y	B_z	S_{Txy}	S_{Txz}	S_{Tyx}	S_{Tyz}	S_{Tzx}	S_{Tzy}
1.032 6	1.054 9	1.016 1	0.038 4	0.018 5	0.038 4	−0.038 9	−0.063 7	−0.054 9	0.02	0.02	0.07	0.06	0.05	0.06

3　补偿结果及分析

为验证本文所述标定方法的优劣,需要进行标定补偿误差分析。取标定过程中采集的测量加速度值和最终求得的误差参数矩阵,计算加速度传感器受到的理论输入值,与实际输入值进行对比,分析补偿后的误差范围或均值。误差越小,说明该种方法计算得出的标度因数矩阵补偿能力越好[18-19]。

3.1　传统模型误差求解

使用式(5)的标定误差模型,即未考虑三轴加速度传感器横向灵敏度,可得到三轴加速度传感器测量值与加速度实际值函数关系:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_x & -S_x\theta_z & S_x\theta_y \\ S_y\theta_z & S_y & -S_y\theta_x \\ -S_z\theta_y & S_z\theta_x & S_z \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} D_x & B_x \\ D_y & -B_y \\ D_z & B_z \end{pmatrix} \tag{16}$$

将 50 组采样点输入、输出加速度数据与表 3 所得标定参数代入式(16),计算加速度传感器的输出补偿值,与实际输入值进行对比,计算其绝对误差值,做出三轴加速度传感器各轴补偿前误差值与补偿后误差值对比结果如图 3 所示。

3.2　本文模型误差求解

考虑三轴加速度传感器横向灵敏度的标定误差模型如式(9)所示,为补偿加速度输出值,将式(7)变形可得到三轴加速度传感器测量值与加速度实际值函数关系:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}_N = \begin{pmatrix} S_x+S_{Txy}\theta_z-S_{Txz}\theta_y & -S_x\theta_z+S_{Txy}+S_{Txz}\theta_x & S_x\theta_y-S_{Txy}\theta_x+S_{Txz} \\ S_{Tyx}+S_y\theta_z-S_{Tyz}\theta_y & -S_{Tyx}\theta_z+S_y+S_{Tyz}\theta_x & S_{Tyx}\theta_y-S_y\theta_x+S_{Tyz} \\ S_{Tzx}+S_{Tzy}\theta_z-S_z\theta_y & -S_{Tzx}\theta_z+S_{Tzy}+S_z\theta_x & S_{Tyx}\theta_y-S_{Tzy}\theta_x+S_z \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} D_x & B_x \\ D_y & -B_y \\ D_z & B_z \end{pmatrix}_N \tag{17}$$

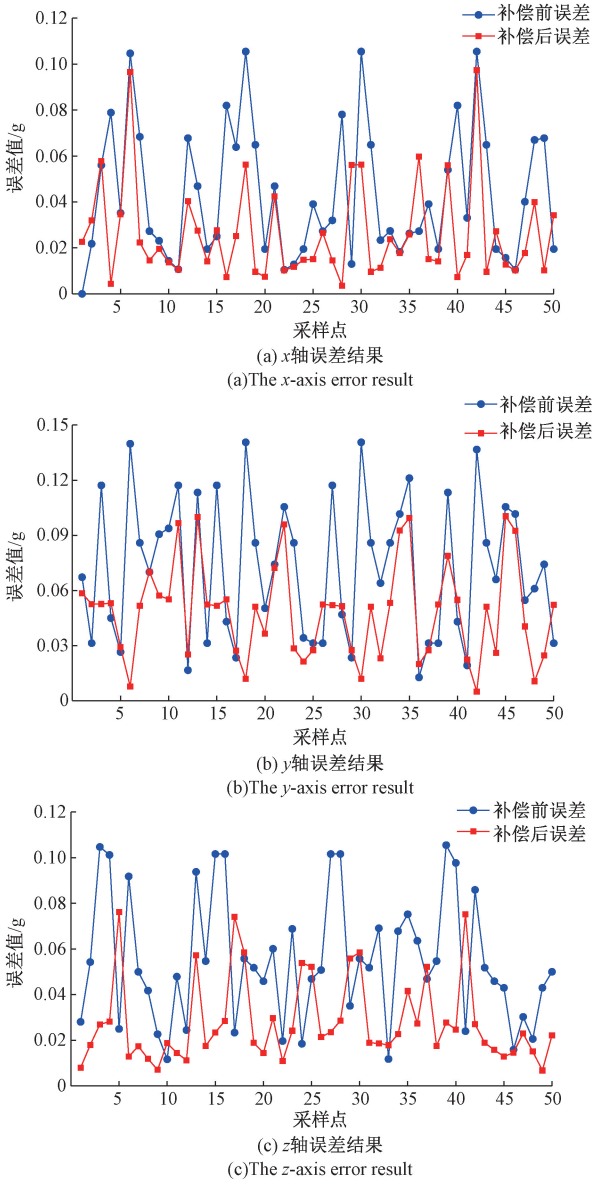


图 3　传统模型误差结果

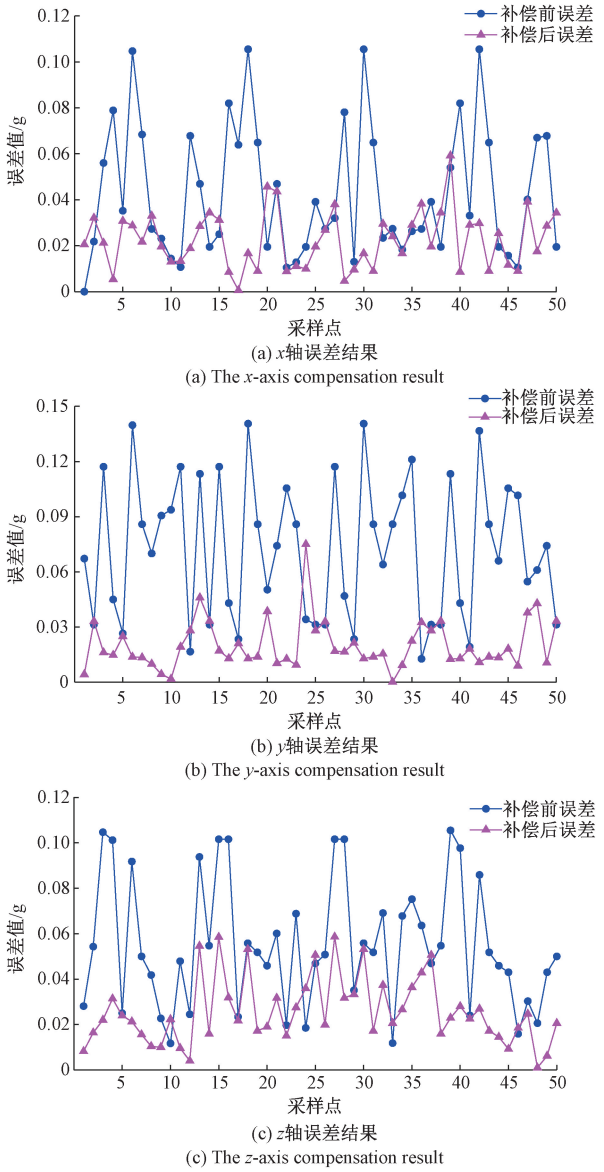
Fig. 3　The error results of traditional models

将同样的 50 组采样点输入、输出加速度数据与表 4 所得标定参数代入上式,计算加速度传感器的输出补偿值,与实际输入值进行对比,计算其绝对误差值。补偿前误差值与补偿后对比结果如图 4 所示。

表 5 误差结果分析

Table 5 Analysis of error results

	补偿前误差			传统模型补偿误差			本文模型补偿误差		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
均值/g	0.042 9	0.072 5	0.054 9	0.029 7	0.044 9	0.028 1	0.022 4	0.020 0	0.025 7
方差/g^2	0.000 8	0.001 2	0.001 1	0.000 7	0.000 6	0.000 5	0.000 1	0.000 2	0.000 2



(a) x轴误差结果

(a) The x-axis compensation result

(b) y轴误差结果

(b) The y-axis compensation result

(c) z轴误差结果

(c) The z-axis compensation result

图 4 本文模型误差结果

Fig. 4 The error results of the proposed model

3.3 误差结果分析

基于图 3 与 4 的数据结果,表 5 给出了两种模型标定下补偿误差的均值与方差。从表 5 可以看出,与传统标定数学模型相比,本文所提出标定数学模型有效地降低了加速度传感器测量误差的均值与方差。x 轴误差均值从 0.042 9 g 降至 0.022 4 g,方差从 0.000 8 g^2降至 0.000 1 g^2, y 轴误差均值从 0.072 5 g 降至 0.020 0 g,方差从 0.001 2 g^2 降至 0.000 2 g^2, z 轴误差均值从 0.054 9 g 降至 0.025 7 g, 方差从 0.001 1 g^2 降至 0.000 2 g^2。

4 结 论

目前标定三轴 MEMS 加速度传感器时通常仅考虑了加计零偏,标度因数误差与非正交安装误差等。本文在分析三轴加速度传感器的误差类型后,将加速度传感器的横向灵敏度也作为一项误差因素进行分析,建立了一种新的误差模型并完成加速度传感器标定与补偿。实验结果表明,本文所设计的标定数学模型的补偿后误差与常用标定数学模型相比,均值与方差更小,补偿后加速度数据精度更高且稳定性更好。本文从优化标定数学模型的角度,完成了三轴 MEMS 加速度计标定精度的提高。

参考文献

[1] 张德福, 葛川, 李显凌, 等. 高精度位移传感器线性度标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 982-988.
ZHANG D F, GE CH, LI X L, et al. Linearity calibration method of the high-precision displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 982-988.

[2] 易敏, 邢飞, 孙婷, 等. 高精度星敏感器标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2154-2160.
YI M, XING F, SUN T, et al. Research on calibration method of high precision star sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2154-2160.

[3] 周山, 刘利平, 高建宇,等. 三维力传感器静态解耦方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 181-187.
ZHOU SH, LIU L P, GAO J Y, et al. Research on static decoupling method of three-dimensional force sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 181-187.

[4] 彭鹏, 彭倍, 周吴, 等. 粘胶材料参数对微加速度计零位温度漂移的影响研究[J]. 仪表技术与传感器, 2018(9): 8-11.
PENG P, PENG B, ZHOU W, et al. Investigation of material properties of die attach adhesive on thermal bias drift of MEMS accelerometer [J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2018(9): 8-11.

[5] ZHOU W, HE J B, YU H J, et al. Analytical study of temperature coefficients of bulk MEMS capacitive accelerometers operating in closed-loop mode [J]. Sensors and Actuators, A. Physical, 2019, 290: 239-247.

[6] 彭孝东, 张铁民, 李继宇, 等. 三轴数字 MEMS 加速度计现场标定方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2014, 34(3): 544-548+595.
PENG X D, ZHANG T M, LI J Y, et al. Field calibration method of three-axis digital MEMS accelerometer[J]. Vibration. Test and Diagnosis, 2014, 34(3): 544-548+595.

[7] 王鑫, 李伟, 曾子铭, 等. 热像仪-RGB 相机-IMU 传感器的空间联合标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 216-225.
WANG X, LI W, ZENG Z M, et al. Spatial calibration of thermal imager-RGB camera-IMU sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 216-225.

[8] 李魁, 高鹏宇. 混合式惯导系统自标定技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 9-17.
LI K, GAO P Y. Research on self-calibration technique for hybrid inertial navigation system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 9-17.

[9] 闫文吉, 陈红亮, 陈洪敏, 等. 硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6):59-65.
YAN W J, CEHN H L, CHEN H M, et al. Research on on-line compensation method for the measurement error of silicon piezoresistive pressure sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6):59-65.

[10] PAPAFOTIS K, SOTIRIADIS P P. A unified methodology for magnetic and inertial sensors calibration and alignment [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(18): 8241-8251.

[11] 刘一鸣, 李杰, 刘秀锋, 等. 一种加速度计的标定补偿方法研究[J]. 传感技术学报, 2016, 29(12): 1846-1852.
LIU Y M, LI J, LIU X F, et al. Study on an accelerometer calibration compensation method [J]. Journal of Transducer Technology, 2016, 29(12): 1846-1852.

[12] FONG W T, ONG S K, NEE A Y C. Methods for in-field user calibration of an inertial measurement unit without external equipment [J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(8):1-11.

[13] 石玺文, 李杰, 胡陈君, 等. MEMS 三轴加速度计 6 位置标定方法的研究[J]. 电子器件, 2016, 39(2): 403-406.
SHI X W, LI J, HU CH J, et al. Research on 6-position calibration method of MEMS three-axis accelerometer[J]. Electronic Devices, 2016, 39(2): 403-406.

[14] 刘艳霞, 方建军, 石岗. 基于改进极限学习机的三轴加速度计误差补偿算法[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(7): 138-141.
LIU Y X, FANG J J, SHI G. Three-axis accelerometer error compensation algorithm based on improved extreme learning machine[J]. Sensors and Microsystems, 2019, 38(7): 138-141.

[15] YE L, GUO Y, DO L, et al. A fast-converge, real-time auto-calibration algorithm for triaxial accelerometer[J]. Measurement Science & Technology, 2019, 30(6): 065010-1-065010-11.

[16] 陈剑, 孙金海, 李金海, 等. 惯性系统中加速度计标定方法研究[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(8): 130-133.
CHEN J, SUN J H, LI J H, et al. The research of calibration method of accelerator in inertial navigation system [J]. Microelectronics& Computer, 2012, 29(8): 130-133.

[17] 陆欣, 刘忠, 张宏欣, 等. 三轴 MEMS 加速度计的最大似然校正算法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(5): 185-191.
LU X, LIU ZH, ZHANG H X, et al. Maximum likelihood calibration for MEMS triaxial accelerometer [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(5): 185-191.

[18] 朱嘉齐, 章家岩, 冯旭刚. 柔性臂测量机的圆光栅偏心参数标定算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8):1-7.
ZHU J Q, ZHANG J Y, FENG X G. Calibration algorithm for circular grating eccentricity parameters of flexible arm measuring machine[J]. Journal of Electronic

Measurement and Instrumentation, 2019,33(8):1-7.

[19] GHAFFARI A, KHODAYARI A, NOSOUDI S, et al. Calibration of a micro-electro mechanical system-based accelerometer for vehicle navigation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(2), DOI: 10.1177/0954406218757809.

作者简介

张顺星,2018 年于电子科技大学获得学士学位,现为电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为 MEMS 加速度传感器标定与补偿。

E-mail: 201822040529@std.uestc.edu.cn

Zhang Shunxing received his B. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2018. He is currently a master student at University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include calibration and compensation of MEMS acceleration sensor.

周吴(通信作者),分别在 2005 年和 2010 年于西南交通大学获得学士学位和博士学位,现为电子科技大学副教授、博士研究生导师,主要研究方向为微系统设计、微传感器与执行器和微系统封装。

E-mail: zhouwu916@uestc.edu.cn

Zhou Wu (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Southwest Jiaotong University in 2005 and 2010, respectively. He is currently an associate professor and a Ph. D. supervisor at University of Electronic Science and Technology of China. His research interests include micro system design, micro sensor and actuator and micro system packaging.