DOI: 10.13382/j.jemi.B2104605

一种适用于高量程加速度计的标定方法研究*

张泽宇 李 杰 胡陈君 原小乔 纪志敏
(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘 要:针对传统重力场标定方法的输入激励只能在±1g之间,无法满足高量程加速度计在满量程内标定需求的问题,提出了一种适用于高量程加速度计标定方法。首先,分析了标定原理与误差来源并建立了加速度计误差补偿模型,其次,设计了适用于高量程加速度计的十二位置标定方案并推导出标定参量计算方法,最后,通过精密离心机进行试验验证了标定方案的可行性,并进行数据处理验证标定参量的有效性。结果表明,该标定方法可行有效,相对于传统重力场标定方法补偿精度更高,为工程应用提供了一定的理论依据。

关键词: 高量程加速度计;离心机;标定;误差补偿
中图分类号: TH89 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460

Calibration method for high range accelerometer

Zhang Zeyu Li Jie Hu Chenjun Yuan Xiaoqiao Ji Zhimin
(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem that the input excitation of the traditional gravity field calibration method can only be within ±1g, which cannot meet the calibration requirements of the high-range accelerometer in the full range, a calibration method suitable for the high-range accelerometer is proposed. First of all, analyzed the calibration principle and error sources and the accelerometer error compensation model was established, secondly, designed the twelve position calibration scheme that is suitable for high range accelerometer and calculation method for the calibration parameters is deduced, finally, through the precision centrifuge experiments, verified the feasibility of calibration scheme, the validity of the calibration parameters was verified by data processing. The results show that the calibration method is feasible and effective, and the compensation accuracy is higher than the traditional gravity field calibration method, which provides a certain theoretical basis for engineering application.

Keywords: high range accelerometer; centrifuge; calibration; error compensation

0 引 言

微机电系统(MEMS)加速度计由于体积小、质量轻、成本低、可大批量生产等诸多优点,已经广泛应用与航空航天、武器系统以及各种民用领域,是导航制导部件的核心器件,有着广阔的前景[1-3]。MEMS 加速度计的性能优劣直接决定了导航的精度[4-5]。而标定精度是影响加速度计使用精度的主要因素之一,因此,对加速度计进行标定来提高其精度是非常有必要的[6]。

常规炮弹制导化改造过程中,为了解决普通炮弹射程有限的问题,往往进行增程射击。由于被测弹体安装了增程发动机,导致弹体在运行过程中会在轴向产生一段时间的高过载,此时就需要采用一个高量程的加速度计对高过载进行精确的测量。这就要求对高量程加速度计进行有效的标定,保证弹道测量的精度。对于加速度计的标定,石玺文等[7]采用六位置法,简单快速但精度较低;孟卫锋等[8]采用十六位置法详细标定出 51 个误差参

收稿日期: 2021-08-05 Received Date: 2021-08-05
*基金项目:国家自然科学基金(61973280)项目资助

数但方法复杂;翁浚等[9]采用对称位置法标定安装角误差;孙佳等[10]采用六面体夹具 24 位置法,可以不借助转台进行标定但算法复杂。以上方法均在重力场下进行位置翻转,标定时加速度计只能敏感到+1g~-1g 范围内的加速度。对于 30g、50g 等高量程的加速度计,只给予+1g~-1g 的输入加速度,不能充分激励高量程加速度计的误差,无法有效测量到传感器的非线性特性。为了提高标定的精度,本文在标定原理分析的基础上,构建了误差补偿模型,设计了标定方案,通过精密离心机提供均匀分布于加速度计满量程内的高 g 输入,对高量程加速度计进行标定与误差补偿,从而提高加速度计的标定精度。

1 标定原理分析

通常,三轴加速度传感器由两两正交的三个单轴加速度计组成,其误差主要包括系统误差和随机误差,而系统误差约占总误差的 90%以上。标定可以通过补偿系统误差来有效地提高系统精度[11]。

1.1 安装误差定义

三轴加速度传感器理论上是沿着载体坐标系的三个轴安装,保证加速度计的输出轴与载体坐标系的轴重合。但是在实际过程中由于安装误差的存在,加速度计输出轴与载体坐标系的轴并不会完全重合,会存在一定的偏差[12]。设安装坐标系为 g 系,由于安装误差的存在,g 系为非正交坐标系。载体坐标系为 b 系,为正交坐标系。由于安装坐标系与载体坐标系之间存在一定的偏差,如图 1 所示。导致载体在运动过程中 3 个加速度计的敏感轴会相互影响,产生交叉耦合误差[13]。通过标定可以求解出任意两个加速度计之间的交叉耦合误差系数并加以补偿。

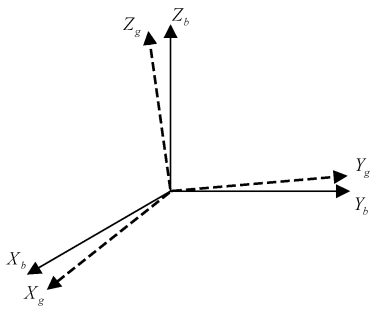


图 1 安装坐标系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of installation coordinate system

1.2 加速度计误差补偿模型的建立

加速度计的通用数学模型可表示为:

$$y = g(x) + \varepsilon \tag{1}$$

式中:x 为加速度计理论输入值;y 为加速度计实际输出值;$g(x)$ 为系统误差函数;ε 为随机误差。

将式中 $g(x)$ 按泰勒级数展开为:

$$g(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{g^{(n)}(x_0)}{n!}(x - x_0)^n = g(x_0) + g'(x_0)(x - x_0) + \frac{g''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \cdots + \frac{g^{(n)}(x_0)}{n!}(x - x_0)^n + \cdots \tag{2}$$

式(2)可以简写为以下形式:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + \varepsilon \tag{3}$$

式中:a_0、a_1 为一阶误差;a_2 为二阶误差;ε 为随机误差。

加速度计的误差来源于零偏、标度因数、交叉耦合误差、随机误差等,通过试验验证,二阶及以上的高阶非线性误差相对于一阶误差来说量级很小,故忽略高次项误差[14],方程可以表示为一次函数模型:

$$y = a_0 + a_1 x \tag{4}$$

由于安装误差的存在,3 个加速度计并不完全正交,每个加速度计除敏感其自身加速度外,还会敏感到其他加速度计的带来的耦合项[15],则三轴加速度传感器的输出电压模型可以表示为:

$$\begin{cases} a_x \cdot k_{xx} + a_y \cdot k_{yx} + a_z \cdot k_{zx} + U_{0x} = U_x \\ a_x \cdot k_{xy} + a_y \cdot k_{yy} + a_z \cdot k_{zy} + U_{0y} = U_y \\ a_x \cdot k_{xz} + a_y \cdot k_{yz} + a_z \cdot k_{zz} + U_{0z} = U_z \end{cases} \tag{5}$$

其中,$k_{ij}(i,j=x,y,z,i \neq j)$ 表示 i 轴运动时对 j 轴的影响,即 i 轴对 j 轴产生的交叉耦合系数;k_{xx}、k_{yy}、k_{zz} 分别为 3 个主轴的标度因数。

式(5)可以改写为矩阵形式,如式(6)所示。

$$\boldsymbol{A}_g \cdot \boldsymbol{A} + \boldsymbol{U}_0 = \boldsymbol{U} \tag{6}$$

其中,$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$,$\boldsymbol{A}_g = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{yx} & k_{zx} \\ k_{xy} & k_{yy} & k_{zy} \\ k_{xz} & k_{yz} & k_{zz} \end{bmatrix}$,$\boldsymbol{U}_0 = \begin{bmatrix} U_{0x} \\ U_{0y} \\ U_{0z} \end{bmatrix}$,$\boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}$,$\boldsymbol{A}$ 为三轴加速度传感器输入加速度,$\boldsymbol{A}_g$ 为标度因数矩阵,$\boldsymbol{U}_0$ 为三轴加速度传感器零偏电压,$\boldsymbol{U}$ 为三轴加速度传感器输出电压。

对矩阵进行移项处理即可得出被测加速度的误差补偿模型:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{yx} & k_{zx} \\ k_{xy} & k_y & k_{zy} \\ k_{xz} & k_{yz} & k_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_x - U_{0x} \\ U_y - U_{0y} \\ U_z - U_{0z} \end{bmatrix} \tag{7}$$

2　标定方案设计

2.1　标定位置编排

根据所建立的误差模型以及三轴加速度传感器的输入激励需要覆盖 $-30g \sim +30g$ 的范围。故设计基于离心机的十二位置排布法进行标定。具体安装位置如图 2 所示。

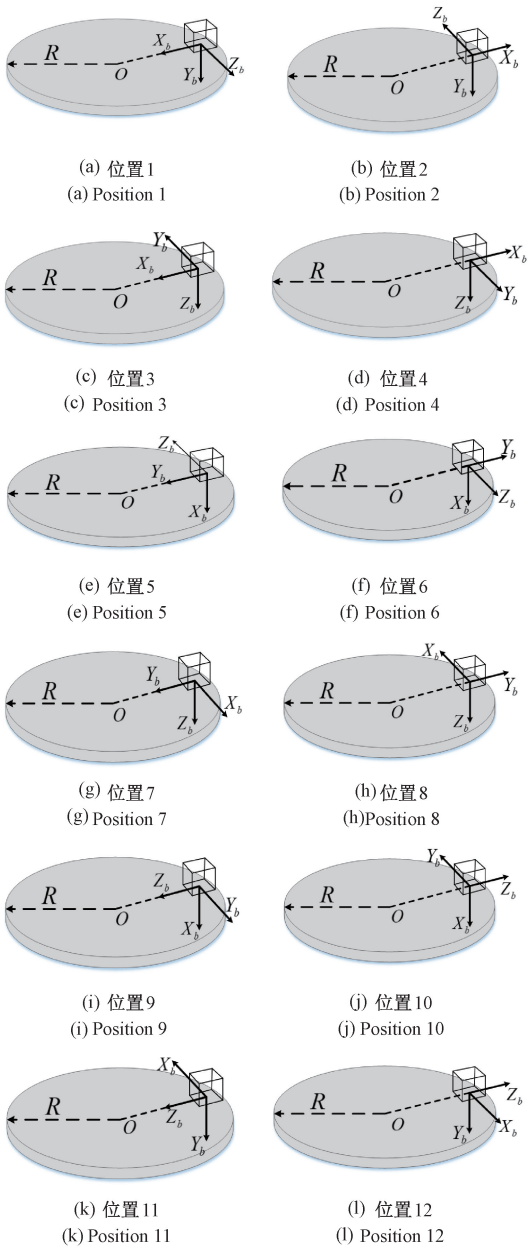


图 2　离心机十二位置排布示意图

Fig. 2　Schematic diagram of centrifuge 12 position arrangement

首先，位置 1 与位置 2 将三轴加速度传感器 X 轴沿着离心半径方向安装，作为敏感离心机输入激励的主动轴，Y 轴正向指向地，Z 轴指向离心机切向方向。由于离心机以固定的角速率旋转产生的向心加速度永远指向圆心，故要使 X 轴加速度计敏感到正向与负向的加速度就需要改变安装位置，其中，位置 1 的 X 轴正向沿半径方向指向圆心，敏感到的是正向加速度，位置 2 的 X 轴负向沿半径方向指向圆心，敏感到的是负向加速度。其次，位置 3 与位置 4 依然将三轴加速度传感器 X 轴沿着离心半径方向安装，而 Z 轴正向指向地，Y 轴指向离心机切向方向。位置 1 到位置 4 可以标定出 X 轴的标度因数以及 X 轴作为主动轴时对 Y 轴和 Z 轴产生的交叉耦合误差系数。同理，当 Y 轴作为敏感离心机输入激励的主动轴时，安装位置按位置 5 到位置 8 排布，可以标定出 Y 轴的标度因数以及 Y 轴作为主动轴时对 X 轴和 Z 轴产生的交叉耦合误差系数；当 Z 轴作为敏感离心机输入激励的主动轴时，安装位置按位置 9 到位置 12 排布，可以标定出 Z 轴的标度因数以及 Z 轴作为主动轴时对 X 轴和 Z 轴产生的交叉耦合误差系数。

2.2　标定组态设置与实际输入激励计算

三轴加速度传感器的 3 个轴量程均为 $\pm 30g$，本文设置 7 个组态为离心机输入设定值，分别为 $30g$、$20g$、$10g$、$0g$、$-10g$、$-20g$、$-30g$。

但是由于离心机输入设定值是以安装位置中心进行测算的。而三轴加速度传感器按照十二位置安装时，3 个加速度计并非均处于安装位置中心，会产生一定的偏移，故实际标定时应根据加速度计安装偏移量，计算出实际输入激励。

离心机产生的向心加速度的计算公式如下所示：

$$a = w^2 r \tag{8}$$

式中：a 为向心加速度；w 为角速率；r 为离心半径。

离心机设定恒定加速度时，其旋转角速率也是一个定值，此时加速度计的实际输入激励只会受到离心半径的影响，而由于安装偏移量的存在，不同安装位置会有不同的离心半径，不同离心半径所对应实际输入激励如表 1 所示。

2.3　标定参量公式推导

当 X 轴加速度计为主动轴敏感离心机输入激励，Y 轴加速度计敏感 $-1g$ 时，X、Y 轴加速度计实际输出电压表示为：

$$\begin{cases} U_x = k_{xx} \cdot a_x + k_{yx} \cdot (-1) + U_{0x} \\ U_y = k_{xy} \cdot a_x + k_{yy} \cdot (-1) + U_{0y} \end{cases} \tag{9}$$

当 X 轴加速度计为主动轴敏感离心机输入激励，Z 轴加速度计敏感 $-1g$ 时，X、Z 轴加速度计实际输出电压表示为：

$$\begin{cases} U_x = k_{xx} \cdot a_x + k_{zx} \cdot (-1) + U_{0x} \\ U_z = k_{xz} \cdot a_x + k_{zz} \cdot (-1) + U_{0z} \end{cases} \tag{10}$$

表 1 离心机设定值与实际输入激励对应关系

Table 1 Centrifuge set value and the actual input excitation corresponding relationship

离心机设定值/g	实际离心半径/m	输入角速率/(rad·s^{-1})	实际输入激励/g
30	0.463	587.82	27.78
30	0.537	587.82	32.22
30	0.506	587.82	30.36
30	0.494	587.82	29.64
20	0.463	391.88	18.52
20	0.537	391.88	21.48
20	0.506	391.88	20.24
20	0.494	391.88	19.76
10	0.463	195.94	9.26
10	0.537	195.94	10.74
10	0.506	195.94	10.12
10	0.494	195.94	9.88

当 Y 轴加速度计为主动轴敏感离心机输入激励，X 轴加速度计敏感 $-1g$ 时，X、Y 轴加速度计实际输出电压表示为：

$$\begin{cases} U_x = k_{yx} \cdot a_y + k_{xx} \cdot (-1) + U_{0x} \\ U_y = k_{yy} \cdot a_y + k_{xy} \cdot (-1) + U_{0y} \end{cases} \tag{11}$$

当 Y 轴加速度计为主动轴敏感离心机输入激励，Z 轴加速度计敏感 $-1g$ 时，Y、Z 轴加速度计实际输出电压表示为：

$$\begin{cases} U_y = k_{yy} \cdot a_y + k_{zy} \cdot (-1) + U_{0y} \\ U_z = k_{yz} \cdot a_y + k_{zz} \cdot (-1) + U_{0z} \end{cases} \tag{12}$$

当 Z 轴加速度计为主动轴敏感离心机输入激励，X 轴加速度计敏感 $-1g$ 时，X、Z 轴加速度计实际输出电压表示为：

$$\begin{cases} U_x = k_{zx} \cdot a_z + k_{xx} \cdot (-1) + U_{0x} \\ U_z = k_{zz} \cdot a_z + k_{xz} \cdot (-1) + U_{0z} \end{cases} \tag{13}$$

当 Z 轴加速度计为主动轴敏感离心机输入激励，Y 轴加速度计敏感 $-1g$ 时，Y、Z 轴加速度计实际输出电压表示为：

$$\begin{cases} U_y = k_{zy} \cdot a_z + k_{yy} \cdot (-1) + U_{0y} \\ U_z = k_{zz} \cdot a_z + k_{yz} \cdot (-1) + U_{0z} \end{cases} \tag{14}$$

式中：a_x 为 X 轴离心机输入加速度；a_y 为 Y 轴离心机输入加速度；a_z 为 Z 轴离心机输入加速度；U_x 为 X 轴加速度计输出电压；U_y 为 Y 轴加速度计输出电压；U_z 为 Z 轴加速度计输出电压；U_{0x} 为 X 轴加速度计零位电压；U_{0y} 为 Y 轴加速度计零位电压；U_{0z} 为 Z 轴加速度计零位电压。

式(9)~(14)的 12 个方程可以简写为：

$$\begin{cases} y = k_1 x + b_1 \\ y = k_2 x + b_2 \end{cases} \quad \begin{cases} y = k_3 x + b_3 \\ y = k_4 x + b_4 \end{cases} \quad \begin{cases} y = k_5 x + b_5 \\ y = k_6 x + b_6 \end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases} y = k_7 x + b_7 \\ y = k_8 x + b_8 \end{cases} \quad \begin{cases} y = k_9 x + b_9 \\ y = k_{10} x + b_{10} \end{cases} \quad \begin{cases} y = k_{11} x + b_{11} \\ y = k_{12} x + b_{12} \end{cases} \tag{16}$$

式中：y 可代表三轴加速度传感器输入加速度；x 可代表输出电压值。输入加速度与输出电压值均为已知量，将 12 个输出电压方程按照一次函数形式做最小二乘拟合，可以得出各个方程参数 k 和 b。

从而得出标度因数与交叉耦合系数如下所示：

$$\begin{cases} k_{xx} = (k_1 + k_3)/2 \\ k_{xy} = k_2 \\ k_{xz} = k_4 \end{cases} \tag{17}$$

$$\begin{cases} k_{yx} = k_5 \\ k_{yy} = (k_6 + k_7)/2 \\ k_{yz} = k_8 \end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases} k_{zx} = k_9 \\ k_{zy} = k_{11} \\ k_{zz} = (k_{10} + k_{12})/2 \end{cases} \tag{19}$$

零偏电压如下所示：

$$\begin{cases} U_{0x} = \dfrac{(b_1 + k_5) + (b_3 + k_9) + [b_5 + (k_1 + k_3)/2] + [b_9 + (k_1 + k_3)/2]}{4} \\ U_{0y} = \dfrac{(b_6 + k_2) + (b_7 + k_{11}) + [b_2 + (k_6 + k_7)/2] + [b_{11} + (k_6 + k_7)/2]}{4} \\ U_{0z} = \dfrac{(b_{10} + k_4) + (b_{12} + k_8) + [b_4 + (k_{10} + k_{12})/2] + [b_8 + (k_{10} + k_{12})/2]}{4} \end{cases} \tag{20}$$

3 试验验证分析

为了验证标定方案的可行性以及标定参量计算的有效性，按照第 2 节设计的十二位置排布法进行标定试验，如图 3 所示。

试验具体步骤如下：

1）三轴加速度传感器和采集设备按照十二个位置排布法依次安装在离心机工装台面上；

2）三轴加速度传感器上电，主动轴的输入组态依次设定为 $30g$、$20g$、$10g$、$0g$、$-10g$、$-20g$、$-30g$。

3）试验结束后，三轴加速度传感器下电并进行数据读取。

将读取的数据按 3 个轴进行初步分离处理后，结合

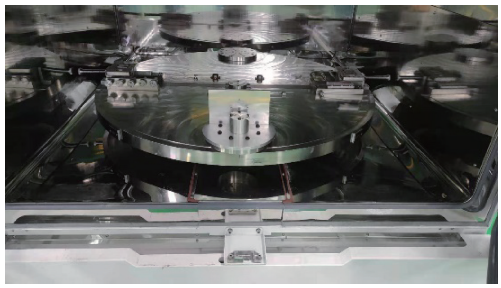


图 3　离心机试验验证

Fig. 3　Centrifuge test verification

2.3 节推导出的标定参量计算方法，对试验数据进行标定与补偿处理，求解出所有的标定参量如表 2 所示。

表 2　离心机标定参量

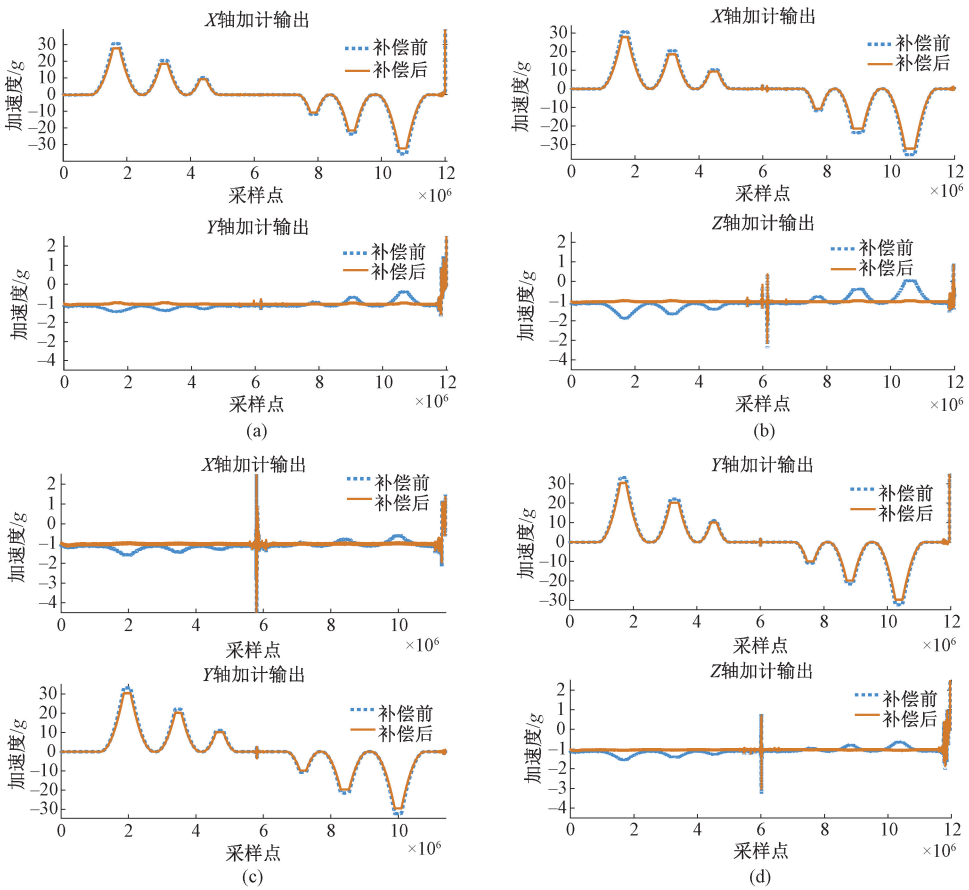
Table 2　Calibration parameters of centrifuge

零偏/V	标度因数/(V/g)	交叉耦合系数/(V/g)
$U_{0x}=2.447\ 73$	$k_{xx}=0.022\ 02$	$k_{yx}=-0.000\ 32$，$k_{zx}=-0.000\ 13$
$U_{0y}=2.503\ 04$	$k_{yy}=0.043\ 65$	$k_{xy}=-0.000\ 69$，$k_{zy}=0.000\ 48$
$U_{0z}=2.487\ 19$	$k_{zz}=0.043\ 67$	$k_{xz}=-0.001\ 27$，$k_{yz}=-0.000\ 59$

同时为了验证误差模型的准确性，通过试验结果计算了二阶非线性误差参数，三个轴的二阶非线性误差参数分别为 0.000 001 0、0.000 003 9、0.000 000 57 V/g，而由表 2 所示，一阶误差参数为 0.022 02、0.043 65、0.043 67 V/g，二阶误差参数与一阶误差参数相差 4～5 个量级，对于该 MEMS 加速度计而言，远远小于其测试精度，故在该误差模型中可以忽略二级及以上高阶误差的影响。

将试验结果中的三轴加速度传感器输出电压及求解出的标定参量代入式(7)所示的误差补偿模型即可得到标定补偿后的被测加速度。标定补偿前后的效果对比如图 4 所示。图中，中心位置的曲线波动是由于试验过程中对被测传感器进行拆卸与安装时产生的振动造成的，不影响试验数据的分析处理。

为了验证离心机标定高量程加速度计的效果是否优于传统转台重力场标定效果，需要将同样的三轴加速度传感器安装于高精度转台上，用传统的重力场翻滚法对该三轴加速度传感器进行标定，对试验数据进行分析处理，求解出所有的标定参量如表 3 所示。



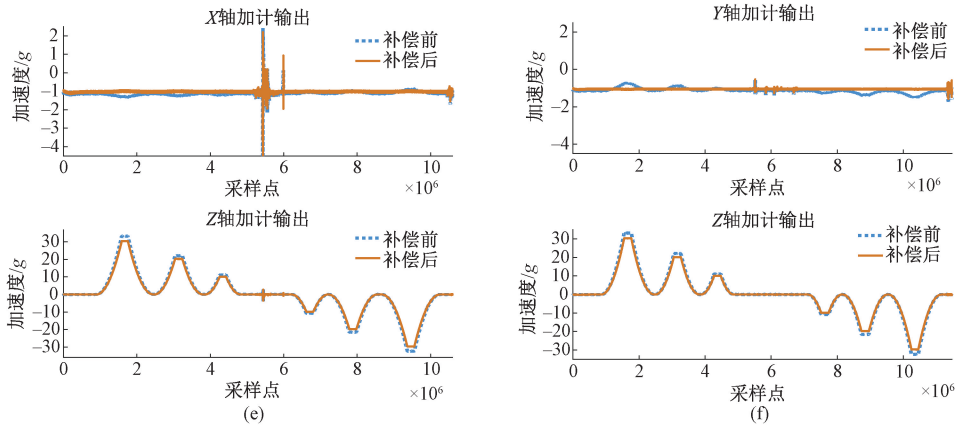


图 4 离心机标定补偿前后对比

Fig. 4 Comparison of centrifuge calibration and compensation before and after

表 3 重力场标定参量

Table 3 Calibration parameters of gravity field

零偏/V	标度因数/(V/g)	交叉耦合系数/(V/g)
U_{0x} = 2.447 41	k_{xx} = 0.021 95	k_{yx} = −0.000 29, k_{zx} = −0.000 56
U_{0y} = 2.498 29	k_{yy} = 0.043 49	k_{xy} = −0.000 61, k_{zy} = 0.000 74
U_{0z} = 2.484 23	k_{zz} = 0.043 47	k_{xz} = −0.000 40, k_{yz} = −0.000 75

将重力场标定得出的标定参量和试验结果中的各轴输出电压代入式(7)所示的误差补偿模型计算出对应的补偿结果。将两种标定方法的补偿结果进行数据处理,分别计算其补偿后的绝对精度并进行对比分析如表 4 所示。

表 4 两种标定方法补偿后绝对精度对比

Table 4 Calibration parameters of gravity field (*g*)

实际输入激励		重力场标定补偿后绝对精度	离心机标定补偿后绝对精度
X 轴	27.78	0.123	0.021
	18.52	0.074	0.002
	9.26	0.023	0.014
	−10.74	0.025	0.005
	−21.48	0.034	0.004
	−32.22	0.058	0.005
Y 轴	30.36	0.280	0.009
	20.24	0.178	0.037
	10.12	0.117	0.046
	−9.88	0.062	0.019
	−19.76	0.051	0.001
	−29.64	0.030	0.008
Z 轴	30.36	0.196	0.001
	20.24	0.139	0.011
	10.12	0.094	0.015
	−9.88	0.029	0.001
	−19.76	0.013	0.003
	−29.64	0.086	0.035

通过对比表 4 可以看出,对于高量程加速度计,用离心机十二位置排布法标定后误差更小。数据表明,该标定方法切实可行,在标定高量程加速度计时标定效果优于传统的重力场翻滚法,进一步提高了传感器标定精度,适用于弹用高量程加速度计的标定,提高其精度,从而有效地提高弹道测量的精度,有较强的工程应用价值。

4 结 论

加速度计在用于弹道测量等惯性导航系统时,都需要对其进行标定与补偿。针对于高量程加速度计的标定,本文对标定方法进行了讨论,设计了一种适用于高量程加速度计的十二位置标定方案并通过试验验证了方案的可行性与结果的有效性。此方法可以较为准确地标定出高量程三轴加速度传感器的零偏与标度因数矩阵等标定参量,且补偿后结果可以满足试验室目前对于高量程加速度计的标定需求,具有工程应用价值,也对高量程加速度计的标定方法研究有一定的参考价值。

参考文献

[1] 牛艳芳,李龙. 多传感器微惯性测量单元标定技术研究[J]. 导航定位与授时,2019,6(1):123-128.
NIU Y F, LI L. Calibration technology of multi-sensor micro-inertial measurement unit [J]. Navigation, Positioning and Timing, 2019,6(1):123-128.

[2] 王勇刚,周俊萍,李永江,等. 基于惯性定位定向的高铁轨检仪研究[J]. 导航与控制, 2018, 17(2): 79-84,66.
WANG Y G, ZHOU J P, LI Y J, et al. Research on high speed track detector based on inertial positioning and orientation [J]. Navigation and Control, 17(2): 79-84+66.

[3] 王雪梅,刘震,倪文波. 基于 MEMS 传感器的手臂运动测量和识别方法[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(6):1-5.
WANG X M, LIU ZH, NI W B. Measurement and recognition

method of arm motion based on MEMS sensor [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(6): 1-5.

[4] 赵剡,张少辰,胡涛. 惯性测量组件离心机标定及误差分析方法[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(4): 414-420.
ZHAO Y, ZHANG SH CH, HU T. Calibration and error analysis method of inertial measurement unit centrifuge [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(4): 414-420.

[5] 刘宇,余跃,路永乐,等. MEMS 加速度计混合误差标定补偿方案[J]. 压电与声光, 2018, 40(4): 589-593.
LIU Y, YU Y, LU Y L, et al. Hybrid error calibration compensation scheme for MEMS accelerometer [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2018, 40(4): 589-593.

[6] 孙闯,任顺清,王振桓. 加速度计在精密离心机上的标定方法与误差分析[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(1): 121-128.
SUN CH, REN SH Q, WANG ZH H. Calibration method and error analysis of accelerometer in precision centrifuge [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2019, 27(1): 121-128.

[7] 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 position calibration method of MEMS triaxial accelerometer 6 [J]. Electronic Devices, 2016, 39(2): 403-406.

[8] 孟卫锋,袁爱红,贾天龙,等. 高精度惯性平台十六位置自标定方案[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(2): 150-155.
MENG W F, YUAN AI H, JIA T L, et al. 16-position self-calibration scheme of high precision inertial platform [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(2): 150-155.

[9] 翁浚,陈学忠,刘芸. 基于双轴转台的寻北仪标定方案设计及验证[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 31-36.
WENG J, CHEN X ZH, LIU Y. Design and verification of north finder calibration scheme based on biaxial turntable [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 31-36.

[10] 孙佳,邹靖,胡桐. 基于 24 位置的 MEMS 惯性传感器快速标定方法[J]. 压电与声光, 2019, 41(3): 440-444.
SUN J, ZOU J, HU T. Fast Calibration method of MEMS inertial Sensor based on 24 position [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2019, 41(03): 440-444.

[11] PARK B S, HAN K J, LEE S W, et al. Analysis of compensation for a g-sensitivity scale-factor error for a MEMS vibratory gyroscope [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, DOI: 10.1088/0960-1317/25/11/115006.

[12] 张顺星,周吴,卢鹏,等. 考虑横向灵敏度的三轴加速度传感器标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 33-40.
ZHANG SH X, ZHOU W, LU P, et al. Research on calibration method of triaxial acceleration sensor considering transverse sensitivity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 33-40.

[13] 韩洪祥,傅军. MIMU 高精度快速转停标定方法[J]. 传感技术学报, 2019, 32(9): 1359-1365.
HAN H X, FU J. High precision and fast stop-over calibration method for MIMU [J]. Journal of Sensor Technology, 2019, 32(9): 1359-1365.

[14] YE L, STEVEN W S. Experimental design and its posterior efficiency for the calibration of wearable sensors [J]. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, 2015, DOI: 10.4236/jilsa.2015.71002.

[15] 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.

作者简介

张泽宇,2017 年于中北大学获得学士学位,现为中北大学硕士硕士研究生,主要研究方向为微惯性技术与数据采集存储。
E-mail: 1037521805@qq.com

Zhang Zeyu received his B. Sc. degree from North University of China in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at North University of China. His main research interests include microinertia technology and data acquisition and storage.

李杰,1999 年于华北工学院获得学士学位,2002 年于华北工学院获得硕士学位,2005 年于北京理工大学获得博士学位,现为中北大学教授,主要研究方向为捷联惯性导航、组合导航和智能信息处理。
E-mail: Lijie@nuc.edu.cn

Li Jie received his B. Sc. degree from North University of China in 1999, M. Sc. degreefrom North University of China in 2002, and Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2005. Now he is a professor at North University of China. His main research interests include strapdown inertial navigation, integrated navigation, and intelligent information processing.