

# 基于迭代计算的加速度计标定方法\*

戴邵武 万 龙 徐胜红

(海军航空工程学院控制工程系 烟台 264001)

**摘 要** 在建立三轴加速度计数学模型的基础上,提出了一种新的三轴加速度计的标定算法。加速度计在静止状态下,各敏感轴分量的模值等于当地重力加速度的数值。通过六个不同静态位置加速度计的输出建立标定方程。采用迭代算法对加速度计的标度因子和零偏进行解算。仿真结果表明,算法能够有效标定出加速度计误差参数,并且对较大偏差的初值同样适用,且迭代过程收敛迅速,计算量小,非线性适应性较强,能够拓展标定算法的应用范围。

**关键词** 加速度计; 标定; 迭代法; 参数估计

**中图分类号** TJ765.4 **DOI:**10.3969/j.issn1672-9730.2014.01.018

## Accelerometer Calibration Method Based on Iterative Calculation

DAI Shaowu WAN Long XU Shenghong

(School of Control Engineering, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001)

**Abstract** Based on the design of triaxial accelerometer mathematic model, a new triaxial accelerometer calibration method is presented. When the accelerometer is stationary, the module value of each sensitivity axle is equal to its local gravity. Calibration equation is set through accelerometer outputs of six different stationary place. Iteration calculation is used to estimate gain factors and bias. The simulation result shows that the calibration method can effectively estimate error parameters of accelerometer, and can be applied in calculating the initial value of large deviation. It has advantages, such as small calculation work, strong nonlinear adaptability.

**Key Words** acceleration measurement, calibration, iterative method, parameter estimation

**Class Number** TJ765.4

### 1 引言

捷联惯组标定是进行惯性导航的前提,标定的好坏直接影响惯性导航的精度。加速度计标定可分为分立标定和系统级标定。分立标定直接以加速度计输出为观测量,用最小二乘法标定其系数。系统级标定则是利用导航误差作为观测量,用滤波估计加速度计误差系数<sup>[4]</sup>。标定后的各项参数会随着温度、时间的改变而变化。为提高加速度计的测量精度,必须定期对其各项误差系数标定。传统加速度计的标定采用静态多位置方法,使加速度计旋转至已知的特定角度,根据不同角度下加速度计的输出解算出各项误差<sup>[2~3]</sup>。为了精确地解算出误差系数,旋转至每个位

置相对于转台的角度必须精确测量,一般依靠转台或其他高精度的外部设备得到角度的量测值。标定环境要求较高,在外场环境中难以实现。本文提出一种新的加速度标定计算方法,计算过程简洁精度高。标定过程中应用重力加速度在各坐标轴分量的模值相等的条件结合建立的标定误差模型建立等式,结合加速度计在六个不同位置的输出值采用逐步迭代的方法估计标定误差系数真值。方法的优点在于每个静态位置不需要角位置的精确数值即可完成标定计算。仿真结果表明在迭代赋的初值与真实值偏差很大的情况下,标定误差系数也可以很好的收敛于真值,并且迭代次数少,绝大多数情况下迭代三步即可得到满足精度要求的标定值。

\* 收稿日期:2013 年 7 月 1 日,修回日期:2013 年 8 月 10 日

**作者简介:**戴邵武,男,硕士,教授,研究方向:导航、制导与控制。万龙,男,硕士研究生,研究方向:导航、制导与控制。徐胜红,男,博士,副教授,研究方向:飞行器导航与控制。

## 2 加速度组件的标定误差模型建立与解算过程

计载体坐标系为  $b$  系,转台坐标系为  $p$  系。在加速度组件静止条件下,加速度计各轴分量( $b$  系,用  $A_X, A_Y, A_Z$  表示)与当地重力加速度的关系为

$$A_x^2 + A_y^2 + A_z^2 = 1g^2 \quad (1)$$

加速度计测量误差模型可表示为

$$S_{axis} = G_{axis} A_{axis} + B_{axis} \quad (2)$$

其中  $S_{axis}$  为加速度组件的输出,  $G_{axis}$  为标度因子,是一个  $3 \times 3$  的对角阵  $A_{axis}$  为各轴敏感的加速度分量,  $B_{axis}$  加速度计零偏。式(2)中,  $G_{axis}$  可以分解为有限个对角阵相乘的形式,相应的  $B_{axis}$  可以表示为有限个同样结构的矩阵相加的形式。由此式(2)可以进一步表示为

$$\begin{aligned} S_{axis} &= G_{axis} A_{axis} + B_{axis} = \left( \prod_{i=0}^k \tilde{G}_{axis,i} \right) \hat{A}_{axis,k} + \sum_{i=0}^k \tilde{B}_{axis,i} \\ &= \hat{G}_{axis,k} \hat{A}_{axis,k} + \sum_{i=0}^k \hat{B}_{axis,i} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\tilde{G}_{axis,i}$  与  $\tilde{B}_{axis,i}$  分别表示第  $i$  次循环的计算增益,  $\hat{G}_{axis,k}$  与  $\hat{B}_{axis,k}$  表示第  $k$  步迭代的标度因数和零偏的估计值。根据式(3)的定义可知  $\hat{G}_{axis,k}$  对角元素的值为正实数与  $\hat{B}_{axis,i}$  的值为实数,这样在迭代解算初始值  $\hat{G}_{axis,0}$ 、 $\hat{B}_{axis,0}$  可以分别在任意正实数和实数中选取。迭代计算的目标是计算出加速度计每个轴向每一步  $\hat{G}_{axis,k}$  与  $\hat{B}_{axis,k}$  的数值。

$$\begin{aligned} G_{axis} &= \hat{G}_{axis,k} = \hat{G}_{axis,k-1} \cdot \tilde{G}_{axis,k} \\ B_{axis} &= \hat{B}_{axis,k} = \hat{B}_{axis,k-1} + \tilde{B}_{axis,k} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(3),第  $k-1$  步循环中可以推导出  $\hat{A}_{axis,k-1}$  表达式

$$\hat{A}_{axis,k-1} = (S_{axis} - \hat{B}_{axis,k-1}) \cdot \hat{G}_{axis,k-1}^{-1} \quad (5)$$

记  $\hat{G}_{axis,k-1}$  对角线元素  $\hat{G}_{i,k-1}$  ( $i = X, Y, Z$ ),则式(5)可进一步表示为

$$\hat{A}_{i,k-1} = (S_i - \hat{B}_{i,k-1}) \cdot \hat{G}_{i,k-1}^{-1} \quad (6)$$

标定时加速度计的输出生可量测,由式(6)可计算出加速度计各轴  $k-1$  步标度因子和零偏,加速度组件静止,满足式(1)。若  $\hat{A}_{axis,k-1}$  计算值没有达

到  $A_{axis}$ ,则两者存在误差,记  $(k-1)$  步计算值与真值的误差为  $E_{k-1}$ ,则

$$\begin{aligned} E_{k-1} &= (\hat{A}_{X,k-1})^2 + (\hat{A}_{Y,k-1})^2 + (\hat{A}_{Z,k-1})^2 - 1g^2 \\ &= ((S_X - \hat{B}_{X,k-1}) / \hat{G}_{X,k-1})^2 \\ &\quad + ((S_Y - \hat{B}_{Y,k-1}) / \hat{G}_{Y,k-1})^2 \\ &\quad + ((S_Z - \hat{B}_{Z,k-1}) / \hat{G}_{Z,k-1})^2 - 1g^2 \end{aligned} \quad (7)$$

若式(7)中的每一项都已知则  $E_{k-1}$  可知。将式(1)代入式(7)得

$$\begin{aligned} E_{k-1} &= ((S_X - \hat{B}_{X,k-1}) / \hat{G}_{X,k-1})^2 + ((S_Y - \hat{B}_{Y,k-1}) / \hat{G}_{Y,k-1})^2 \\ &\quad + ((S_Z - \hat{B}_{Z,k-1}) / \hat{G}_{Z,k-1})^2 - (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2) \end{aligned} \quad (8)$$

结合式(3)、式(4)将  $A_i = \hat{A}_{i,k}$  ( $i = X, Y, Z$ ) 代换得

$$\begin{aligned} E_{k-1} &= (1 - 1/\hat{G}_{X,k}^2) \cdot \hat{A}_{X,k-1}^2 \\ &\quad + 2 \cdot \tilde{B}_{X,k} \cdot \hat{A}_{X,k-1} / (\hat{G}_{X,k-1} \cdot \hat{G}_{X,k}^2) \\ &\quad + (1 - 1/\hat{G}_{Y,k}^2) \cdot \hat{A}_{Y,k-1}^2 \\ &\quad + 2 \tilde{B}_{Y,k} \cdot \hat{A}_{Y,k-1} / (\hat{G}_{Y,k-1} \cdot \hat{G}_{Y,k}^2) \\ &\quad + (1 - 1/\hat{G}_{Z,k}^2) \cdot \hat{A}_{Z,k-1}^2 \\ &\quad + 2 \tilde{B}_{Z,k} \cdot \hat{A}_{Z,k-1} / (\hat{G}_{Z,k-1} \cdot \hat{G}_{Z,k}^2) - \epsilon_{k-1} \\ \epsilon_{k-1} &= \tilde{B}_{X,k}^2 / (\hat{G}_{X,k-1} \cdot \hat{G}_{X,k}^2) + \tilde{B}_{Y,k}^2 / (\hat{G}_{Y,k-1} \cdot \hat{G}_{Y,k}^2) \\ &\quad + \tilde{B}_{Z,k}^2 / (\hat{G}_{Z,k-1} \cdot \hat{G}_{Z,k}^2) \end{aligned} \quad (9)$$

从  $\epsilon_{k-1}$  的表达式中看出,式中有 6 个未知数且等式关系是非线性的。但是,当估计值收敛时,  $\tilde{B}_{i,k}$  ( $i = X, Y, Z$ ) 即零偏变化量趋近于零时,  $\epsilon_{k-1}$  在结算过程中可忽略。因此  $E_{k-1}$  表示为

$$\begin{aligned} E_{k-1} &= (1 - 1/\hat{G}_{X,k}^2) \cdot \hat{A}_{X,k-1}^2 + 2 \cdot \tilde{B}_{X,k} \\ &\quad \cdot \hat{A}_{X,k-1} / (\hat{G}_{X,k-1} \cdot \hat{G}_{X,k}^2) + (1 - 1/\hat{G}_{Y,k}^2) \cdot \hat{A}_{Y,k-1}^2 \\ &\quad + 2 \tilde{B}_{Y,k} \cdot \hat{A}_{Y,k-1} / (\hat{G}_{Y,k-1} \cdot \hat{G}_{Y,k}^2) \\ &\quad + (1 - 1/\hat{G}_{Z,k}^2) \cdot \hat{A}_{Z,k-1}^2 \\ &\quad + 2 \tilde{B}_{Z,k} \cdot \hat{A}_{Z,k-1} / (\hat{G}_{Z,k-1} \cdot \hat{G}_{Z,k}^2) \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)是含 6 个未知数的方程,因此最少需要加速度计 6 个不同静态位置的输出值,由此可得解算方程(11)。  $E_{k-1}$  由式(7)可得,  $\hat{A}_{i,k-1}$  由式(6)算得。由于标度因子取正实数,在解算时取正值。当标度因子收敛于常值零偏变化增益为零时,迭代解算过程结束。

$$\begin{bmatrix} E_{k-1}^1 \\ E_{k-1}^2 \\ E_{k-1}^3 \\ E_{k-1}^4 \\ E_{k-1}^5 \\ E_{k-1}^6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\hat{A}_{X,k-1}^1)^2 & (\hat{A}_{Y,k-1}^1)^2 & (\hat{A}_{Z,k-1}^1)^2 & (\hat{A}_{X,k-1}^1) & (\hat{A}_{Y,k-1}^1) & (\hat{A}_{Z,k-1}^1) \\ (\hat{A}_{X,k-1}^2)^2 & (\hat{A}_{Y,k-1}^2)^2 & (\hat{A}_{Z,k-1}^2)^2 & (\hat{A}_{X,k-1}^2) & (\hat{A}_{Y,k-1}^2) & (\hat{A}_{Z,k-1}^2) \\ (\hat{A}_{X,k-1}^3)^2 & (\hat{A}_{Y,k-1}^3)^2 & (\hat{A}_{Z,k-1}^3)^2 & (\hat{A}_{X,k-1}^3) & (\hat{A}_{Y,k-1}^3) & (\hat{A}_{Z,k-1}^3) \\ (\hat{A}_{X,k-1}^4)^2 & (\hat{A}_{Y,k-1}^4)^2 & (\hat{A}_{Z,k-1}^4)^2 & (\hat{A}_{X,k-1}^4) & (\hat{A}_{Y,k-1}^4) & (\hat{A}_{Z,k-1}^4) \\ (\hat{A}_{X,k-1}^5)^2 & (\hat{A}_{Y,k-1}^5)^2 & (\hat{A}_{Z,k-1}^5)^2 & (\hat{A}_{X,k-1}^5) & (\hat{A}_{Y,k-1}^5) & (\hat{A}_{Z,k-1}^5) \\ (\hat{A}_{X,k-1}^6)^2 & (\hat{A}_{Y,k-1}^6)^2 & (\hat{A}_{Z,k-1}^6)^2 & (\hat{A}_{X,k-1}^6) & (\hat{A}_{Y,k-1}^6) & (\hat{A}_{Z,k-1}^6) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 - 1/\hat{G}_{X,k}^2 \\ 1 - 1/\hat{G}_{Y,k}^2 \\ 1 - 1/\hat{G}_{Z,k}^2 \\ 2\tilde{B}_{X,k} / (\hat{G}_{X,k-1} \cdot \hat{G}_{X,k}^2) \\ 2\tilde{B}_{Y,k} / (\hat{G}_{Y,k-1} \cdot \hat{G}_{Y,k}^2) \\ 2\tilde{B}_{Z,k} / (\hat{G}_{Z,k-1} \cdot \hat{G}_{Z,k}^2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 仿真验证

首先,确定待标定加速度组件的真实标度因数、零偏值,加速度计的数据输出值由 Matalb 仿真计算产生<sup>[3]</sup>,实际标定实验中加速度组件六个静态

位置可取任意姿态,考虑到重力环境下对加速度计的充分激励和仿真处理数据方便直观,将加速度组件各轴(X、Y、Z)分别向天向,地向一次,得到一组静态六位置加速度计输出数据。选取有代表性的五组仿真标定结果分析如表 1 所示。

表 1 不同标度因数与零偏值的仿真标定结果

		$G_x(V/ms^2)$	$G_y(V/ms^2)$	$G_z(V/ms^2)$	$B_x(V)$	$B_y(V)$	$B_z(V)$
第 1 组	真值	0.25	700	35	0	0	0
	1 次迭代	0.25000	700.00	32.000	0.00000	0.00000	0.00000
第 2 组	真值	1000	500	600	-100	20	100
	1 次迭代	999.72	499.69	599.86	-100.00	20.00	100.00
	2 次迭代	1000.00	500.00	600.00	-100.00	20.00	100.00
第 3 组	真值	0.001	0.5	0.6	0.5	-0.1	0.3
	1 次迭代	0.010148	5.0804	6.05302	0.50000	-0.010000	0.30000
	2 次迭代	0.01000	0.5000	0.60000	0.50000	-0.10000	0.30000
第 4 组	真值	0.05	300	1.4	11	-1.5	80
	1 次迭代	1.0730	5864.9	27.369	11.000	-1.5000	80.000
	2 次迭代	0.0500	300.00	1.4000	11.00	-1.5000	80.000
第 5 组	真值	0.001	0.002	0.001	-100	100	100
	1 次迭代	15.191	30.189	15.409	-99.155	100.77	100.17
	2 次迭代	0.096219	0.19244	0.096219	-100.00	100.00	100.00
	3 次迭代	0.001000	0.002000	0.001000	-100.00	100.00	100.17

为验证标定解算方法的有效性,标度因数度量范围取值从 0.001~1000,零偏取值度量范围±100,通过多次的仿真计算,从中取出具有代表性的五组数据(表 1);第一组仿真零偏为零;第二组标度因子和零偏相对较大;相对的第三组标度因子和零偏较小;第四组标度因子三个值之间变化幅度大,零偏三个值之间采用同样的取值方法;第五组,考虑标度因子较小而零偏较大的情况。第一组仿真在第一步迭代中就收敛到真值,是由于零偏增益  $\tilde{B}_k(i=X,Y,Z)=0$  因而式(9)误差  $\epsilon_0=0$ ,从而标度因子可以通过式(10)在第一步迭代中精确解算出。2~4 组仿真需要 2 步迭代解算待标定参数全部收敛于真值。第五组仿真由于考虑的情况比较极端,零偏误差值很大,从而  $\epsilon_0$  解算值相对较大,需要更多的步骤进行解算。所有的仿真解算结果都能够准确估计出标度因子和零偏的真值。

4 结语

仿真结果可以证明本文提出的迭代结算方法能准确有效估计出标度因子和零偏的值,计算过程简便易行。标定过程表明,加速度计只需六组静态位置的采样值数据,对加速度相对转台的转角,简化转台调平寻北,器件与平台对准等一系列步骤,使得标定时间缩短,为加速度计在场环境下的标定

提供了新的思路。标定方法对激光陀螺是否适用有待进一步研究;加速度计安装误差系数的标定难度较大,同样是下一步研究的问题。

参考文献

[1] H. J. Lünge, P. H. Veltink. Inclination measurement of humanmovement using a 3-D accelerometer with autocalibration[J]. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.,2004,12(1):112-121.

[2] Z. F. Syed, P. Aggarwal, C. Goodall, et al. A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems[J]. Meas. Sci. Technol.,2007,18(7):1897-1907.

[3] 张红良,武元新,查亚兵,等.高精度惯测组合标定误差分析[J].国防科技大学学报,2010,32(1):142-146.

[4] 肖龙旭,魏诗卉,孙文胜.惯测组合快速高精度标定方法研究[J].宇航学报,2008,29(1):172-177.

[5] 谷宏强,袁亚雄,摆卫兵.捷联惯性测量组合快速位置标定[J].南京理工大学学报,2007,31(6):719-722.

[6] 严敏敬,秦永元.激光捷联惯组的双轴位置转台标定仿真[J].中国惯性技术学报,2007,15(1):123-127.

[7] 陆元九.惯性器件[M].北京:中国宇航出版社,1993.

[8] Zhu G C, Saydy L. An extended Luenberger-like observer and itsapplication to target tracking[C]//AIAA Guidance Navigationand Control Conference and Exhibit, San Francisco, August,2005:15-18.

(下转第 95 页)

过底层支撑环境 RTI 进行交互<sup>[7~8]</sup>,便于功能扩展和代码重用。从功能角度看,整个软件可分为:

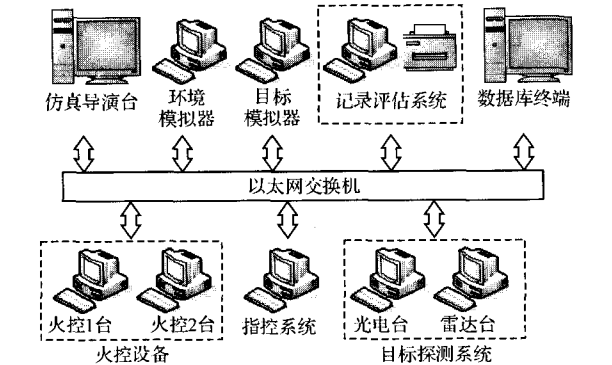


图3 仿真系统硬件结构示意图

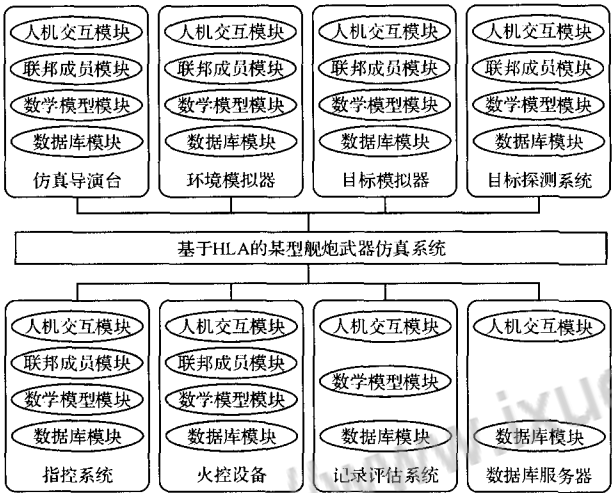


图4 各仿真节点软件模块示意图

- 1) 人机交互模块。根据各子系统的任务要求和状态,进行参数设置和功能选择;对系统信息进行显示,包括海战场态势、敌我相对运动态势、舰炮武器状态信息、表页显示、参数曲线、视景显示等<sup>[9]</sup>。
- 2) 联邦成员模块。运行联邦成员,负责各子系统之间数据的交互以及仿真过程的控制;
- 3) 数学模型模块。包括目标仿真模型,目标运动滤波模型、威胁判断模型、火力分配模型,射击

指挥模型、火控解算模型、在线毁伤效能评估模型等;

- 4) 数据库模块。包括管理数据库等。记录并存储仿真过程中的数据;
- 各仿真节点的软件模块组成如图4所示。

5 结语

本文基于 HLA 思想提出了某型舰炮武器仿真系统的开发方案,对联邦成员进行了设计,明确了系统的功能性需求,界定了仿真环境,给出了较为详细的软硬件实施方案,已经用于指导某型舰炮武器仿真系统的开发。系统完成后,必将推动该型舰炮武器系统的作战使用方法优化研究<sup>[10]</sup>,为部队训练及院校教学提供高水平操作使用平台。

参考文献

[1] 编写组. 地面防空作战模拟[M]. 北京:解放军出版社, 2001,1:105-108.

[2] 刘忠. 现代军用仿真技术基础[M]. 北京:国防工业出版社,2007,8:82-84.

[3] 马野,蔡畅,盖强,等. 计算机仿真及军事应用[M]. 北京:海潮出版社,2010,1:192.

[4] 石教英. 虚拟现实基础及实用算法[M]. 北京:科学出版社,2002,4:3.

[5] 单家元,孟秀云,丁艳. 半实物仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2008,4:5.

[6] 威廉. 谢尔曼. 理解虚拟现实[C]//界面、应用和设计,其他科学(USA),2003:56.

[7] 王珊珊,等. 基于 HLA 的舰载火控系统的仿真研究[J]. 计算机仿真,2005,11:5-7.

[8] 慕晓冬,等. 基于 HLA 和 VR 的导弹武器系统仿真平台设计[J]. 微计算机信息,2007,12:200-201.

[9] 郭齐胜,罗小明,董志明. 装备作战仿真概论[M]. 北京:国防工业出版社,2007,6:120.

[10] 迟刚. HLA 仿真技术综述[J]. 计算机仿真,2004(7): 2.

(上接第 65 页)

[9] 夏家和,秦永元,赵长山. 适用于低精度惯导的非线性对准方法研究[J]. 仪器仪表学报,2009,30(8):1618-1622.

[10] 周卫东,乔相伟,任蕾,等. QUKF 算法及其在 SINS 初始对准中的应用[J]. 仪器仪表学报,2010,31(2):264-269.

[11] 孙枫,孙伟,郭真. 基于 IMU 旋转的捷联惯导系统自动补偿方法[J]. 仪器仪表学报,2009,30(12):2013-2015.

[12] 刘百奇,房建成. 一种改进的 IMU 无定向动静混合高精度标定方法[J]. 仪器仪表学报,2008,29(6): 1250-1254.

论文发表、论文降重、论文润色请扫码



免费论文查重，传递门 >> <http://free.paperyy.com>

阅读此文的还阅读了：

1. [过定位空气静压轴承装配时上/下轴套的调整](#)
2. [基于迭代估计的三轴加速度计温度模型参数外场标定方法](#)
3. [无依托状态加速度计的新型标定方法](#)
4. [脉冲测量雷达卫星标校的实现](#)
5. [基于双轴位置转台的光纤陀螺惯组标定方法](#)
6. [求解动力学问题的分层迭代方法](#)
7. [微惯性测量器件的标定方法研究](#)
8. [加速度计高阶误差模型系数的标定方法](#)
9. [无陀螺系统构型安装误差标定及补偿方案分析](#)
10. [基于迭代计算的加速度计标定方法](#)
11. [线性神经网络在加速度计静态模型标定的应用](#)
12. [叶轮强度计算的迭代法](#)
13. [一种新的无陀螺惯性测量组合标定方法](#)
14. [用于末敏弹稳态扫描参数测量的微惯性测量单元的误差标定](#)
15. [无陀螺系统构型安装误差标定及补偿方案分析](#)