

注：国家自然科学基金资助项目（NO.61571053）

摘要：微惯性姿态测量系统机械精度不高、系统误差和随机误差干扰多样和传统标定计算复杂。针对这些问题，提出一种新型微惯性姿态测量系统误差标定的方法。通过对姿态测量系统的不同微惯性器件进行分析，有针对性的建立系统误差补偿模型。再设置实验转台给定系统不同速率及角度，最后利用最小二乘法、六位置标定法分别进行系统误差参数求解，经解算标定出零位漂移、刻度因子误差和安装误差角。最后通过标定前后对比测试实验，证明了该方法原理简单、易于实现，能较好地补偿微惯性姿态测量系统的系统误差，提高姿态测量精度。

关键词：微惯性姿态测量系统；系统误差模型；标定补偿

中图分类号：U666.1

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2019)04-0018-06

收稿日期：2019-03-26

一种新型微惯性姿态测量系统的系统误差补偿及标定方法

褚晓楠 高国伟

北京信息科技大学传感器重点实验室，北京 100101

一、引言

常见的微惯性姿态测量器件由三轴陀螺仪和三轴加速度计组合而成。但 MEMS 惯性器件的精度较低，误差来源较多^[1]。若想提高系统测量的精度，那么就必须对使用的微惯性器件的误差源有所了解。微惯性器件的误差可以分为两类：一类是系统误差，一类是随机误差。系统误差包括敏感轴的安装误差、标度系数误差和常值误差等，它有规律可循并可用确定性的函数关系来描述。随机误差由随机干扰因素引发，通常包括白噪声、随机游走、速率斜坡、零偏不稳误差、量化噪声等误差项，还受内部结构、制造工艺、所处环境和工作条件的严重影响^[2]，它无法用确定的函数关系来表述。

大多数对于姿态测量系统的研究都锁定在对随机误差进行建模滤波优化，对系统误差的研究仅从系统整体进行简单的建模补偿。经分析，系统误差为惯性姿态测量输出误差的主要误差源对系统精度影响较大。误差补偿是提高捷联惯导系统导航精度的有效途径，

而误差标定则是误差补偿的前提^[3]。因此，本研究通过分析微惯性器件的系统误差源，并且根据不同传感器特性有针对性地对系统误差建立适当的系统误差补偿模型，并进行实验标定。传统标定实验，人工参与操作步骤多，易造成人为误差或者失误，标定效率低下，不适宜产品批量化生产^[4]。

二、微惯性器件系统误差分析

微惯性器件系统误差通常有以下几种：

1、由于安装不当引起的误差

将微惯性器件安装在角度测量系统中时，由于测量系统中的电路板的加工工艺有局限性，因此不能够确定微惯性器件的敏感轴的设计方向与实际方向重合。即理论上需要正交安装的微惯性器件，而在实际上并非完全正交。如图 1 安装误差角示意图， $OXYZ$ 坐标系为基准参考坐标系， $OG_xG_yG_z$ 为惯性器件输入敏感轴坐标系，它们之间的夹角 $\lambda_{ij}(i, j=x, y, z)$ 为安装误差角，规定逆时针旋转为正。且由于微惯性器件的安装位置

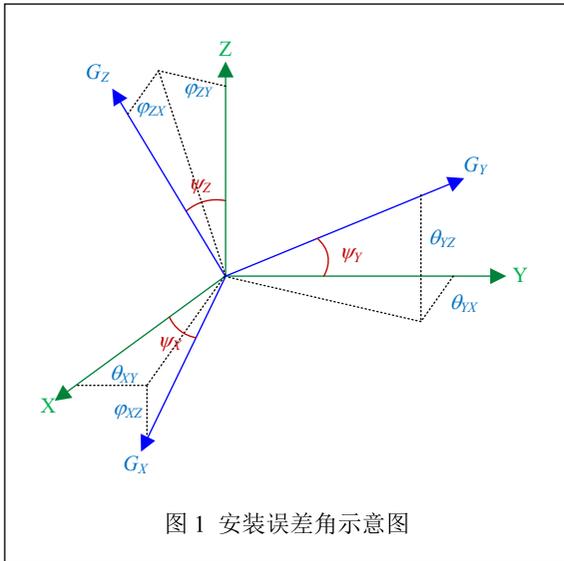


图1 安装误差角示意图

是固定的，其产生的安装误差也是确定的，所以通过相应的微惯性器件标定与误差补偿方法相结合，便可以对此种系统误差进行修正。

2、标度系数误差激励的角速度误差

由于测定标度系数时外界温度、电磁干扰、振动等环境与实际使用环境有所差异，会使得微惯性器件在实际测量中的标度系数与预存储的数据不同，这将导致微惯性器件输出值与实际值不同。

3、零偏误差

当输入的角速度或者加速度为零时微惯性器件的输出不为零，这就是零偏误差。由于每个器件工艺具有独特性，它们的零偏误差都具有个体性和差异性，所以在对它们进行标定和补偿时要分别建模处理。

三、微惯性器误差补偿模型

1、加速度计系统误差建模

根据加速度计的物理特性，我们建立包含标度因数、零偏、安装误差以及二次项误差的加速度计系统误差数学模型，如下：

$$\begin{cases} A_x = a_{x0} + K_{yx}a_y + K_{zx}a_z + K_{xx}a_x^2 + S_x a_x \\ A_y = a_{y0} + K_{zy}a_x + K_{zy}a_z + K_{yy}a_y^2 + S_y a_y \\ A_z = a_{z0} + K_{zz}a_y + K_{zx}a_x + K_{zz}a_z^2 + S_z a_z \end{cases} \quad (1)$$

转化为矩阵形式即：

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_x & K_{yx} & K_{zx} \\ K_{xy} & S_y & K_{zy} \\ K_{xx} & K_{yz} & S_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x^2 \\ a_y^2 \\ a_z^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中， A —加速度计输出值；

a_0 —加速度计漂移；

S —标定因数；

K —加速度计安装误差系数；

K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} —二次项影响误差系数；

a —加速度计的输入值，且单位皆为 g ，即 m/s^2 ，在实际应用的标定中一般不考虑高阶误差。因此，加速度计的输出值的系统误差模型为：

$$\begin{bmatrix} A_x - a_{x0} \\ A_y - a_{y0} \\ A_z - a_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & K_{ax1} & K_{ax2} \\ K_{ay1} & S_y & K_{ay2} \\ K_{ax1} & K_{az2} & S_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中， A —加速度计输出值；

a_0 —加速度计漂移；

S —标定因数；

K —加速度计安装误差系数；

a —加速度计的输入值，且单位皆为 g ，即 m/s^2 。

2、陀螺仪系统误差建模

根据陀螺仪的物理特性建立包含零偏、安装误差、标度因数误差的陀螺仪系统误差数学模型，由于MEMS陀螺仪固定常值漂移和安装误差的影响，精度比较差，每小时达到几十度每秒的漂移^[5]，因此标定时不考虑交叉二次项对模型的影响，系统误差模型如下：

$$\begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{x0} \\ g_{y0} \\ g_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{kx} & K_{zy} & K_{xz} \\ K_{yz} & S_{ky} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & S_{kz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中， w —陀螺仪输出值；

g_0 —陀螺仪漂移；

S_k —标定因数；

K —陀螺仪安装误差系数；

g —陀螺仪的输入值，模型的输入和输出都为转速，且单位均为 $^\circ/s$ 。

四、微惯性器的标定补偿

1、加速度计标定补偿

在微惯性姿态测量系统中加速度计传感器主要负责进行姿态角的初始校准，因此其输出精度很大程度上影响了测量系统的精度。目前对加速度计进行标定的方法主要采用多位置标定法对系统误差模型的参数进行求解。而传统的校准法存在计算量大，操作复杂不易实现等缺陷^[6]。本研究根据改进的系统误差模型，采用六位置标定法进行求参，六个位置选择为：地东南、西地南、天西南、东天南、南西地和东北天。表1为坐标轴对应朝向与理论加速度值对照表。

预先将姿态测量仪固定在实验转台的平面上，将转台轴与目标测试轴平行，依次按照上表位置进行实时数据采样，将实验数据进行均值处理使数据更接近每个位置的真实值。

以X轴为例来推导，根据加速度计系统误差模型和坐标轴姿态对应表可得式(5)：

$$\begin{cases} A_{x1} = a_{x0} + S_x \\ A_{x2} = a_{x0} - S_x \\ A_{x3} = a_{x0} + K_{ax1} \\ A_{x4} = a_{x0} - K_{ax1} \\ A_{x5} = a_{x0} + K_{ax2} \\ A_{x6} = a_{x0} - K_{ax2} \end{cases} \quad (5)$$

由上式可推出对应X轴的输出参数：

$$\begin{cases} a_{x0} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 A_{xi} \\ K_{ax1} = \frac{A_{x3} - A_{x4}}{2} \\ K_{ax2} = \frac{A_{x5} - A_{x6}}{2} \\ S_x = \frac{A_{x1} - A_{x2}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

同理可推出Y轴和Z轴对应的输出参数：

$$\begin{cases} a_{y0} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 A_{yi} \\ K_{ay1} = \frac{A_{y3} - A_{y4}}{2} \\ K_{ay2} = \frac{A_{y5} - A_{y6}}{2} \\ S_y = \frac{A_{y1} - A_{y2}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_{z0} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 A_{zi} \\ K_{az1} = \frac{A_{z3} - A_{z4}}{2} \\ K_{az2} = \frac{A_{z5} - A_{z6}}{2} \\ S_z = \frac{A_{z1} - A_{z2}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

我们将转台工作速率设定为0°/s~300°/s，且20°/s为一个转速点，对加速度计进行六位置的测试实验。分别标定加速度计三个轴的误差，在标定其中一个轴时，保持另外两个轴不动，记录数据并处理。

通过对各个位置的数据进行采样滤波平均后得到三个轴的实际输出数据，见表2。

代入式(6)、(7)、(8)可得加速度计的系统误差校正模型的零偏参数和标定参数相应的参数，将参数带入加速度计标定误差模型可得：

$$\begin{bmatrix} A_x - 0.0016435 \\ A_y - 0.0048352 \\ A_z - 0.0143374 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9929 & -0.0012 & 0.0014 \\ -0.0029 & 1.0001 & -0.0024 \\ 0.00032 & 0.0056 & 0.9917 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

表1 坐标轴加速度值对照表

位置	坐标轴对应朝向			理论加速度值(g)		
	X轴	Y轴	Z轴	X轴	Y轴	Z轴
1	地	东	南	1	0	0
2	西	地	南	0	1	0
3	天	西	南	-1	0	0
4	东	天	南	0	-1	0
5	南	西	地	0	0	1
6	东	北	天	0	0	-1

表2 三轴加速度计六位置输出平均值

位置	X轴(g)	Y轴(g)	Z轴(g)
1	0.9131929	0.0067655	-0.0214544
2	-0.9545113	0.0072911	-0.0203467
3	0.01143898	0.9437829	-0.02345138
4	-0.0054311	-0.94238749	-0.0173291
5	-0.00527184	0.01328789	0.95732134
6	-0.00398721	-0.0008321	-0.97625482

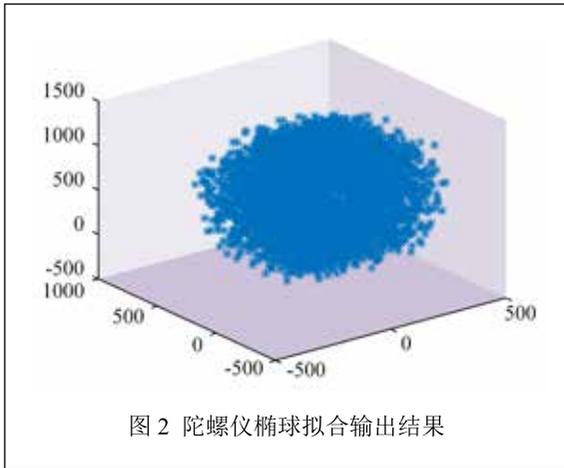


图2 陀螺仪椭球拟合输出结果

2、陀螺仪标定补偿

对于正交的三轴惯性测量组合物体，这种安装方法恰好能实现六个位置的测试。我们将转台工作速率设定为 $0^\circ/\text{s}\sim 300^\circ/\text{s}$ ，且 $20^\circ/\text{s}$ 为一个转速点。分别标定陀螺仪三个轴的误差，在标定其中一个轴时，保持另外两个轴不动，使转台绕标定的轴以一定角速率旋转，记录数据，并利用 Matlab 软件对不同旋转调制方案进行建模与仿真，依据仿真结果确定适用于本系统的最优旋转调制方案^[7]。

以 X 轴为例，将转台的输入值 (x, y, z) 和陀螺仪的输出值 (w_x, w_y, w_z) 带入误差数学模型公式(4)中，可得到关于 $K_{xx}, K_{yy}, K_{xz}, g_{0x}$ 的 n 个方程。有最小二乘法公式：

$$K=(R^T R)^{-1} R^T W$$

通过 Matlab 拟合求解出 X 轴的标度因数 K_{xx} 、两个安装误差耦合系数 K_{yy} 、 K_{xz} 以及零位漂移误差 g_{0x} 。同理，可分别求出 Y 轴和 Z 轴的误差系数矩阵的参数。图 2 为陀螺仪椭球拟

合输出结果，可以观察到陀螺仪的测量输出轨迹基本都在椭球面上，说明求误差参数用的最小二乘法已是最优状态。

将所得的 12 个参数带入陀螺仪标定误差模型可得：

$$\begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.728 \\ 19.327 \\ 1.983 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.0231 & 0.009 & 0.0026 \\ -0.003 & 0.0201 & 0.001 \\ 1.698 & 1.873 & 0.374 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

五、标定补偿前后对比实验

为了验证加速度计标定误差模型的补偿效果，将加速度计的标定参数带入 MPU9250 后，通过实验室转台进行标定补偿测试实验。实验数据如图 3 所示。

通过对比测量实验结果，经过标定补偿后的加速度计的输出值更加准确，X 轴在标定补偿后误差方差降低 89.8%；Y 轴在标定补偿后误差方差降低 128.3%；Z 轴在标定补偿后误差方差降低 73.4%。对加速度计的系统误差的建模补偿有显著效果，基本排

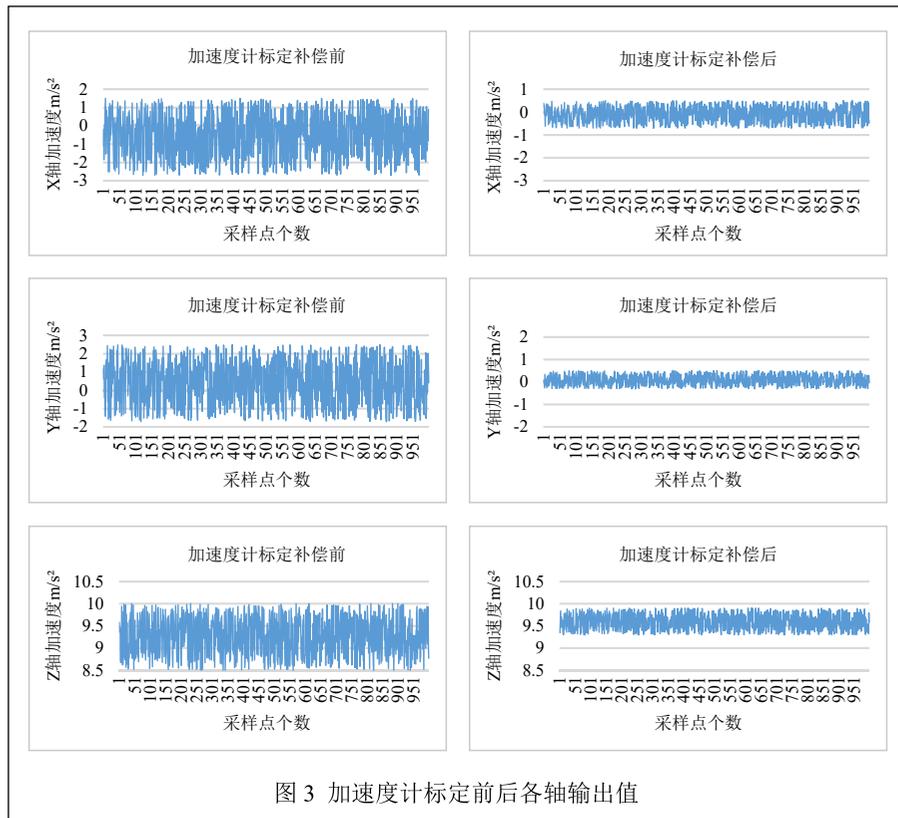


图3 加速度计标定前后各轴输出值

除了系统误差对加速度计的影响。

为了验证本误差模型对陀螺仪的标定效果，我们将上述陀螺仪系统误差模型函数更新到控制器，并通过实验验证标定的准确性。我们以 Y 轴为例，设定转台以 60°/s 作为给定输入转速，对陀螺仪各轴向上的实际测量输出进行验证。相应的加速度计标定前后各轴的测量输出数据如图 4 所示。

通过实验数据分析可知，标定前 X、Z 轴有明显的零位漂移，测量误差分别为 0.96°/s 和 3.8°/s，经过系统误差模型补偿标定后，X、Z 零位漂移得到改善，测量误差分别为 0.43°/s 和 1.2°/s；Y 轴作为给定 60°/s 输入值在标定前陀螺仪测量值范围在 56.3°/s~59.7°/s，标定后测量值明显波动较小在 59.4°~60.4° 之间。由此可见陀螺仪的系统误差模型对陀螺仪的标定补偿达到预期效果，使得陀螺仪的系统误差得到有效补偿。

六、结论

本文所介绍的微惯性姿态测量系统误差标定的方法，将陀螺仪和加速度计分别建立系统误差补偿模型，通过最小二乘法和六位置标定法有效地求解出模型参数。最后通过标定前后测试对比实验，证明标定补偿方法的有效性，从而得到更精准可靠的姿态角度。

参考文献

[1] 李荣冰, 刘建业, 孙永荣. MEMS-IMU 构型设计及惯性器件安装误差标定方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(5): 526-529, 563.
 [2] 何昆鹏, 曾建辉, 梁海波, 等. 微型导航系统中的陀螺漂移在线型标定及补偿方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(1): 62-68.

[3] 黄苹. 捷联惯导系统标定技术研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2005.
 [4] 宋丽君, 秦永元. MEMS 陀螺仪的一种实用标定法 [J]. 压电与声光, 2010, 32(3): 372-374, 378.
 [5] 李泽民, 段凤阳, 李赞平. 基于 MEMS 传感器的数字式航姿系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2012, (6): 94-96, 100.
 [6] 李勇, 刘文怡, 李杰, 等. 基于椭球拟合的三轴磁传感器误差补偿方法 [J]. 传感技术学报, 2012, 25(7): 917-920.
 [7] 陈曦. 基于 MEMS 惯性传感器的高精度姿态测量关键技术研究 [D]. 浙江大学, 2014.

A New System Error Compensation and Calibration Method for Microinertial Attitude Measurement System

CHU Xiao-nan, GAO Guo-wei

(Beijing Sensor Key Laboratory, Beijing Information

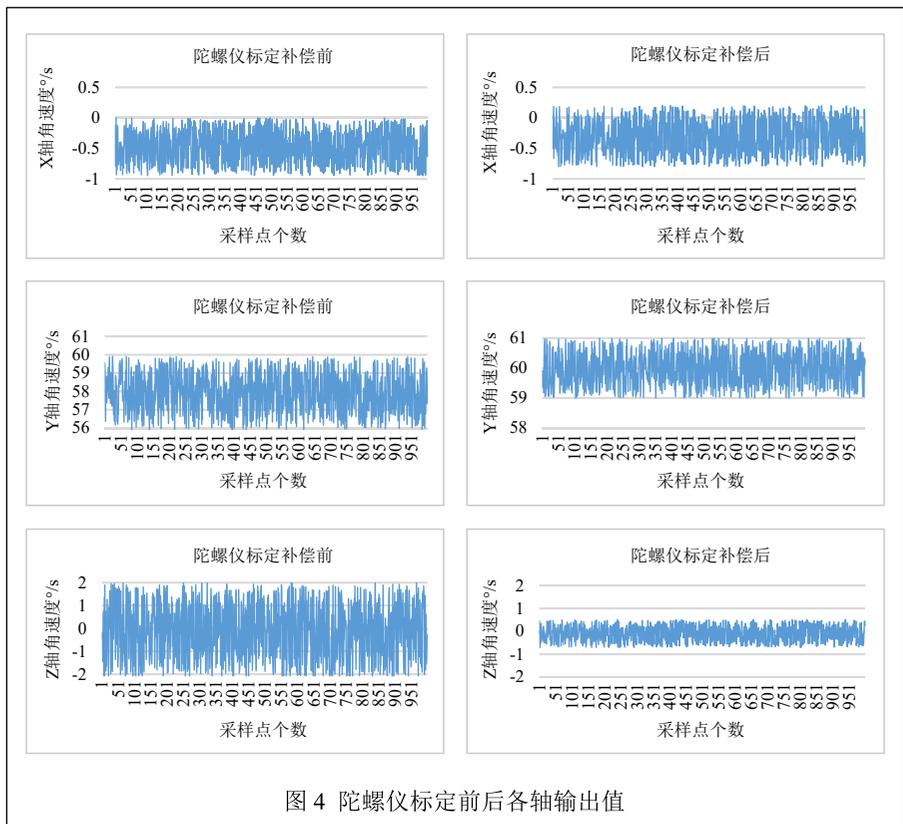


图 4 陀螺仪标定前后各轴输出值

Science & Technology University, Beijing 100101, China)

Abstract: The micro-inertial attitude measuring system has low mechanical precision, systematic error and random error interference, and traditional calibration calculation is complicated. Aiming at these problems, a new method for error calibration of micro inertial attitude measuring system is proposed. By analyzing the different micro-inertial devices of the attitude measuring system, a systematic error compensation model is established. Then the system are given different speeds and angles by setting the experimental turntable. Finally, the system error parameters are solved by the least squares method and the six-position calibration method. The zero drift, the scale factor error and the installation error angle are calibrated by the solution. Finally, through the comparison test before

and after calibration, it is proved that the method is simple and easy to implement, and can better compensate the systematic error of the micro inertial attitude measuring system and improve the attitude measuring accuracy.

Key words: micro inertial attitude measuring system; systematic error model; calibration compensation

作者简介

褚晓楠: 北京信息科技大学传感器重点实验室, 硕士, 研究方向为传感器应用。

通信地址: 北京市北京信息科技大学健翔桥

邮编: 100101

邮箱: 591284715@qq.com

高国伟: 北京信息科技大学传感器重点实验室, 研究员, 博士, 研究方向为新型传感器及系统。