

注：国家自然科学基金资助项目 (NO.61271047; NO.61571053)

北京市属高校创新能力提升计划项目 (NO.TJSHG20130720026)

摘要：为了使姿态测量得到更为广泛的应用，应用 MPU-6050 惯性测量模块设计了一款运动体姿态角度测量系统。硬件设计主要包括微处理器控制模块、惯性测量模块、串口通信模块等；软件设计主要介绍了姿态解算的原理、四元数姿态解算算法，以及系统软件工作流程等；系统微处理器模块选用 STM32F103C8T6，采用 RS232 接口与 PC 机进行交互通信并通过三轴转台进行系统测试。测试结果表明，系统对运动体姿态角度的检测具有较好的测量效果，测量角度较为准确，适用于大多数运动体姿态的测量，系统性价比较高，性能稳定性较好，具有较高的实用价值。

关键词：姿态角；惯性传感器；四元数；姿态解算；三轴转台

中图分类号：V448.22 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2016)07-0007-06

收稿日期：2016-05-25

# 基于 MEMS 的运动体姿态角度测量系统设计 与 实现

徐万芝<sup>1</sup> 高国伟<sup>1</sup> 潘宏生<sup>2</sup> 杨寰<sup>3</sup> 毛瑞燕<sup>1</sup>

1. 北京信息科技大学传感器重点实验室，北京 100192；

2. 北京国科舰航传感技术有限公司，北京 100101

3. 北京机械设备研究所物资供应室，北京 100039

## 一、引言

随着我国工业技术的不断发展，姿态测量广泛应用于各个领域，无论是定位、定向，还是导航都离不开姿态测量。运动体姿态测量系统是提供运动体三轴的角速率、俯仰角和横滚角信息的装置，是运动体实现姿态控制的前提，它不仅可以为运动体姿态控制系统提供三维姿态信息，也可以为数据记录器提供运动体的三维姿态信息以备事后分析。

随着微电子技术的发展而出现的微电子机械系统 (MEMS) 具有尺寸小、重量轻、成本低、功耗小和动态范围宽等优点，被广泛应用于测量领域<sup>[1,2]</sup>。本文应用 MEMS 技术，设计出一种成本低、性能好、功耗低的运动体姿态测量系统，能较好的实现运动体姿态角度的测量。

## 二、系统总体设计

系统基本的结构框图如图 1 所示。本文选用六轴运动处理组件，包含了三个单轴的加速度计和三个单轴的陀螺仪，加速度计测量运动体在坐标系统中独立三轴的加速度信号，而陀螺仪检测运动体相对于导航坐标系的角速度信号，从而测量运动体在三维空间中

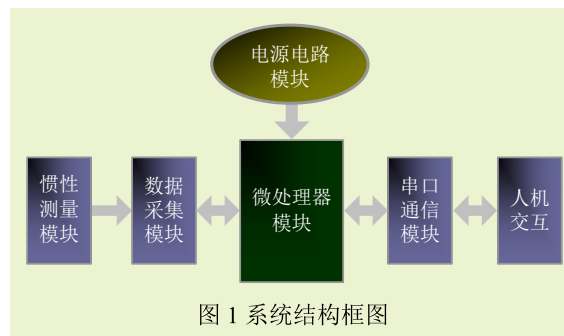


图 1 系统结构框图

的角速度和加速度。本文的设计思路是通过惯性测量模块测量运动体的加速度和角速度信号，再经微处理器模块进行姿态解算，进而得出运动体的姿态信息，最后通过串口通信模块将数据传输到上位机，得到实时且可视化的姿态信息。

### 三、系统硬件设计

#### 1、微处理器模块

本系统微处理器模块选用 STM32F103C8T6，这是意法半导体公司生产的 ARM 32 位的 Cortex™-M3 CPU，工作频率最高可达 72MHz，内置高速存储器，拥有 64K 字节的闪存和 20K 字节的 SRAM，丰富的增强 I/O 端口和连接到两条 APB 总线的外设，工作电压范围在 2.0~3.6V，具有高速性、低成本、高性价比等优点。STM32F103C8T6 的最小系统如图 2 所示。

#### 2、惯性测量模块

惯性测量模块是姿态测量系统的重要组成部分，本系统所选用的是硬件为 MPU-6050 模块。MPU-6050 是一个可直接使用的模块，整合了 MPU-6050 芯片、供电电路及其端口电路，测量精准且性价比比较高。MPU-6050 芯片设有 3 个 16 位模拟 - 数字转换器，用于数字化陀螺仪和加速度计输出。用户可对陀螺仪和加速度计进行编程控制，陀螺仪满量程测量范围为 ±250、±500、±1000 与 ±2000°/s，加速度计满量程测量范围为 ±2g、±4g、±8g 与 ±16g，对于快速和慢速运动可进行精确跟踪。模块实物及端口电路如图 3 所示。

MPU-6050 芯片是全球首例整合性六轴运动处理传感器，它消除了组合陀螺仪与加速度计时存在轴间差的问题，使封装空间得到了大量减少，消除了加速度计与

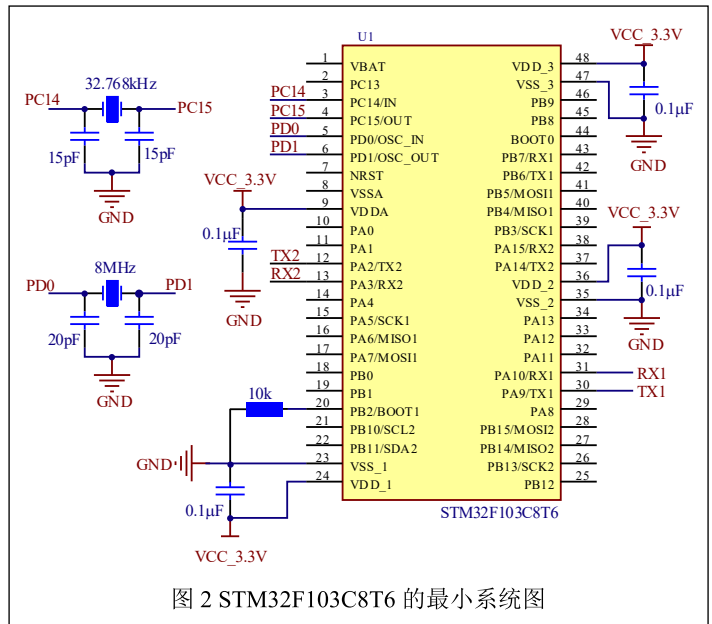


图 2 STM32F103C8T6 的最小系统图

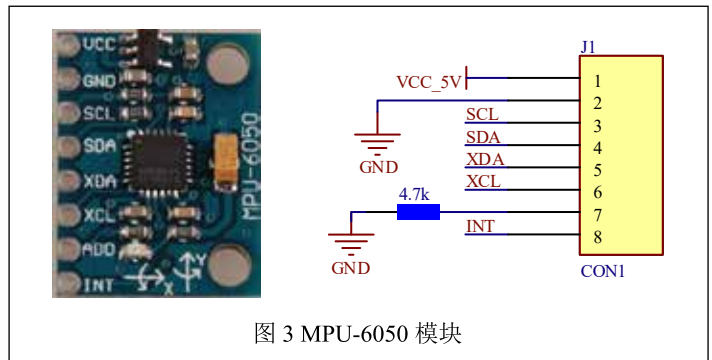


图 3 MPU-6050 模块

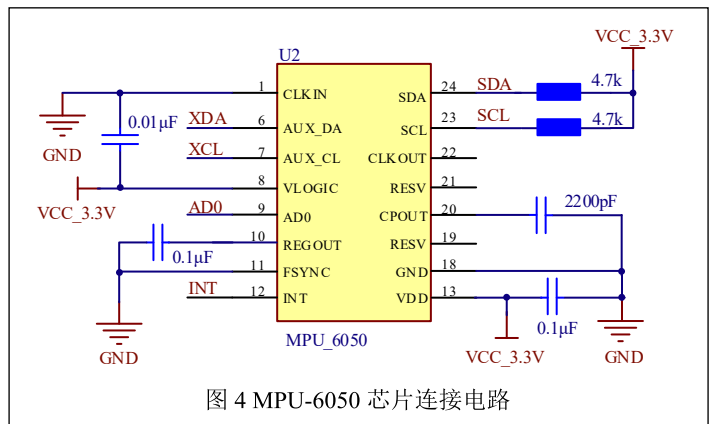


图 4 MPU-6050 芯片连接电路

陀螺仪的轴间敏感度，降低了人为设定产生的影响与传感器的漂移。内含数字运动处理 (DMP: Digital Motion Processing) 引擎，可减少复杂的融合演算数据、传感器同步化、姿势感应等的负荷。MPU-6050 芯片连接电路如图 4 所示。



由于描述刚体旋转的四元数是规范化四元数，即有  $\lambda^2 + P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 = 1$ ，则式 (5) 可写成：

$$C_M^E = \begin{bmatrix} 1-2(P_2^2 + P_3^2) & 2(P_1P_2 - \lambda P_3) & 2(P_1P_3 + \lambda P_2) \\ 2(P_1P_2 + \lambda P_3) & 1-2(P_1^2 + P_3^2) & 2(P_2P_3 - \lambda P_1) \\ 2(P_1P_3 - \lambda P_2) & 2(P_2P_3 + \lambda P_1) & 1-2(P_1^2 + P_2^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中，坐标变换矩阵  $C_M^E$  即为运动体的姿态矩阵。

设运动体的航向角为  $\Psi$ ，俯仰角为  $\theta$ ，横滚角为  $\gamma$ ，选取导航坐标系为地理坐标系，地理坐标系可由三次基本旋转得到运动体的机体坐标系，其坐标变换矩阵为：

$$C_E^M = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \psi + \sin \gamma \sin \psi \sin \theta & -\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \theta & -\sin \gamma \cos \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \gamma \cos \psi - \cos \gamma \sin \psi \sin \theta & -\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \theta & \cos \gamma \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{记 } C_M^E = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}, \text{ 由于 } E \text{ 坐标系到 } M \text{ 坐标系的旋转过程中,}$$

坐标系始终保持直角坐标系，所以  $C_E^M$  为正交矩阵，则有：

$$C_E^M = (C_M^E)^T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{21} & T_{31} \\ T_{12} & T_{22} & T_{32} \\ T_{13} & T_{23} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过式 (7) 和式 (8) 可得：

$$\begin{cases} \theta = \sin^{-1} T_{32} \\ \gamma = \tan^{-1} \left( -\frac{T_{31}}{T_{33}} \right) \\ \psi = \tan^{-1} \left( \frac{T_{12}}{T_{22}} \right) \end{cases} \quad (9)$$

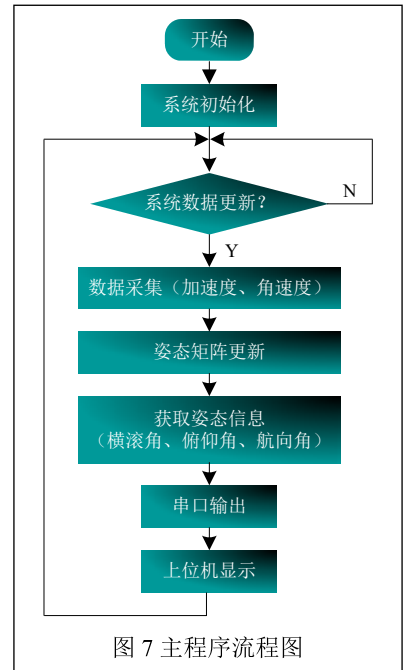
通过上述分析可知：若表征坐标系变换的旋转四元数以确定，则按式 (6) 可计算出姿态矩阵，再按式 (9) 即可确定出运动体的航向角、俯仰角和横滚角<sup>[4-7]</sup>。

## 2、系统主程序设计

系统软件设计的主程序流程图如图 7 所示。首先进行的是系统初始化，主要任务有确定运动体的初始信息，如初始位置、初始速度等；数学平台的初始对准，以确定姿态矩阵的初始值；惯性器件的初始校准，对 MPU-6050 的各标度因数进行标定。然后进行姿态矩阵的更新计算，以提供运动体姿态以及计算姿态参数时的必要数据，这是算法中最重要的部分。最后进行姿态计算，以获取个姿态参数，并对获得的参数进行提取验证。

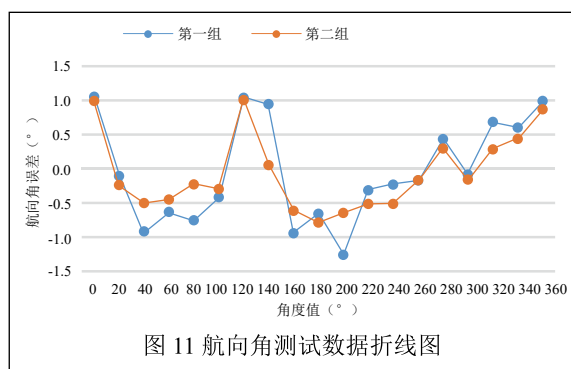
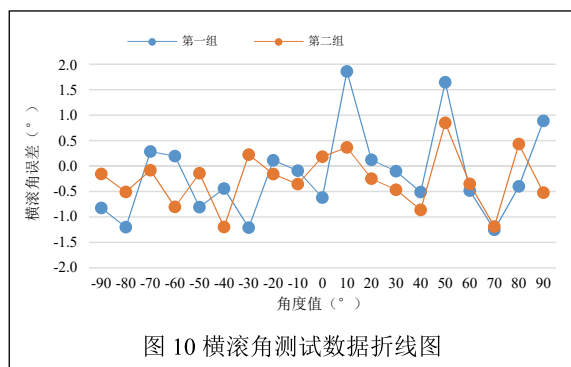
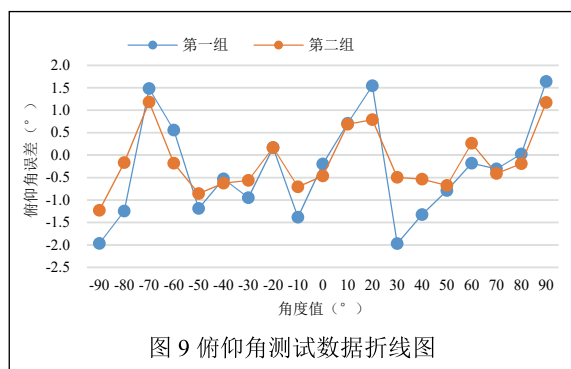
## 五、测试结果及分析

本系统的测试过程是通过 SGT320E 型三轴转台来完成的，如图 8 所示，它是 U—O—O 结构，即台体由 U 形外框、O 形中框以及 O 形内框组成，三轴均可连续无限旋转，既可单轴旋转也可多轴旋转，它可以精确地提供系统在工作期间可能经受



的各种形式的角运动模式。当转台采用本机控制方式时,三轴均具有速率模式、位置模式和正弦摆动模式,通过串口仿真控制转台以设定的方式转动,可为待测系统提供更为复杂的仿真测试环境。

本系统的测试方法为设定三轴转台的旋转速率为 $10^{\circ}/s$ 和 $20^{\circ}/s$ 对系统分别进行两次测量,得到两组测量数据,测量过程中各方向角单独测量,其他方向角置零位。俯仰角和横滚角的测量范围都是 $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ ,每 $10^{\circ}$ 一测,航向角的测量范围是 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ ,每 $20^{\circ}$ 一测。经过测量得到俯仰角,横滚角,航向角的测量数据,各角度误差如图9、图10、图11所示,其中测量数据



中第一组转台旋转速率为 $10^{\circ}/s$ ,第二组转台旋转速率为 $20^{\circ}/s$ 。

通过测量数据可知,系统俯仰角测量的角度误差基本保持在 $\pm 2^{\circ}$ 以内,横滚角测量的角度误差除个别点以外基本保持在 $\pm 1.5^{\circ}$ 以内,航向角测量的角度误差则较好地保持在 $\pm 1.5^{\circ}$ 以内,且在转台不同的转动速率下,转动速率对系统的测量有一定影响,但测量误差基本都保持在一定的误差范围内。可见,系统对运动体姿态角度的检测具有较好的测量效果,系统设计可行。

## 六、结束语

本文应用惯性传感器模块 MPU-6050,设计了一款高性价比、高稳定性、低功耗的运动体姿态角度测量系统,可实时测量显示运动体各姿态角的角度。实验结果显示,该系统测量角度较为准确,在各姿态角的测量过程中,最大测量误差不超过 $2^{\circ}$ ,且系统测量稳定性较高,达到了系统设计的测量目的。

## 参考文献

- [1] 苑艳华,李四海,南江.基于卡尔曼滤波器的航姿系统测姿算法研究[J].传感技术学报,2011,24(12):1718-1722.
- [2] 朱荣,周兆英.基于MEMS的姿态测量系统[J].测控技术,2002,21(10):6-8.
- [3] 张荣辉,贾宏光,陈涛,张跃.基于四元数法的捷联式惯性导航系统的姿态解算[J].光学精密工程,2008,16(10):1963-1970.
- [4] 邓正隆.惯性技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006:147-177.
- [5] 秦永元.惯性导航[M].北京:科学出版社,2006:287-317.
- [6] 高钟毓.惯性导航系统技术[M].北京:清华大学出版社,2012:347-400.
- [7] 袁书明,杨晓东,程建华.导航系统应用数学分析方法[M].北京:国防工业出版社,2013:1-47.

## Design and implementation of a MEMS-based attitude angle measuring system for moving objects

XU Wan-zhi<sup>1</sup>, GAO Guo-wei<sup>1</sup>, PAN Hong-sheng<sup>2</sup>, YANG Huan<sup>3</sup>, MAO Rui-yan<sup>1</sup>

(1.Key laboratory of sensor, Beijing Information Science

*and Technology University, Beijing 100192 China; 2. Beijing GKsens Sensing Technology Co., Ltd. Beijing 100101, China; 3. Material supply room, Beijing Machinery Institute, Beijing 100039, China)*

Abstract: In order to make attitude measurement used widely, a MPU-6050 inertial measuring module is applied to design an attitude angle measuring system for moving objects. Hardware is designed, including a microprocessor control module, inertial measurement module, serial communication module and so on; The software-related design work is introduced too, such as the principle of attitude calculation, quaternion attitude algorithm, workflow of software and so on. The system uses STM32F103C8T6 as microprocessor module, RS232 interface to communicate with PC and three-axis turntable system to complete system test. Test results show that: the system has better results in detecting attitude angles of moving objects with more high accuracy, and is suitable of attitude measurement of most of moving objects. The system has high practical value as its high quality-value ratio for money and good performance stability

Keywords: attitude angle; inertial sensor; Quaternion algorithm; attitude algorithm; three-axis turntable

#### 作者简介

徐万芝, 北京信息科技大学传感器重点实验室, 硕士研究生, 主要从事传感技术、检测技术及自动化装置的研究。

通讯地址: 北京市朝阳区北四环中路 35 号北京信息科技大学

邮编: 100101

邮箱: xuwanzhiyy@163.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, 主要从事倾角传感器设计与开发、自动检测技术方面的研究。

潘宏生, 北京国科舰航传感技术有限公司, 工程师, 硕士, 主要从事倾角传感器设计与开发。

杨寰, 北京机械设备研究所物资供应室, 工程师, 主要从事检测技术方面的研究。

毛瑞燕, 北京信息科技大学传感器重点实验室, 硕士研究生, 主要检测技术及自动化装置的研究。