

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108029

深海姿态系统的设计与实现

杨磊 李遵伟 尹航 陈波波

(青岛海洋科学与技术国家实验室发展中心 青岛 266237)

摘要:设计了一种基于 MPU9250 九轴数据传感器的深海姿态系统解决深海仪器姿态监测的问题,并进行了实验测试验证。系统采用 STM32F103C8T6 作为主控制芯片,采集 MPU9250 九轴数据,通过软件算法快速解算出当前的实时运动姿态,并利用三轴加速度数据计算出与自然坐标系 Z 轴的倾角。系统设计有存储模块及实时时钟模块,可以实时将设备的运动姿态、倾斜角度实时记录到存储模块中。并且根据深海仪器使用环境要求,结合有限元设计方法,设计深海耐压仓。实验结果表明,该姿态系统可以实现对深海仪器姿态及倾角的检测,精度可达 0.5° ,耐压可达 4 000 m 水深。

关键词: MPU9250 九轴数据传感器;深海姿态系统;姿态;倾角;有限元

中图分类号: TH766 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 420.50

Design and realization of a deep-sea attitude system

Yang Lei Li Zunwei Yin Hang Chen Bobo

(Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: Designs a deep-sea attitude system based on the MPU9250 nine-axis data sensor to solve the problem of deep-sea instrument attitude monitoring, and conducts experimental tests to verify it. The system uses STM32F103 as the main control chip to collect MPU9250 nine-axis data, and quickly calculate the current real-time motion posture through software algorithms. And use the three-axis acceleration data to calculate the inclination angle with the natural coordinate system Z axis. The system is designed with a storage module and a real-time clock module, which can record the movement posture and tilt angle of the equipment in the storage module in real time. And according to the environmental requirements of deep-sea instruments, combined with the finite element design method, design the deep-sea pressure tank. Experimental results show that the attitude system can detect the attitude and inclination of deep-sea instruments with an accuracy of 0.5° , and the pressure resistance can reach a depth of 4 000 meters.

Keywords: MPU9250 nine-axis data sensor; deep sea inclinometer; attitude; inclination; finite element

0 引言

海洋面积占地球表面积的 71%,拥有丰富的资源,近年来,随着科学的发展技术的进步,为了获取更多的资源,人们把目光转向了海洋。在对海底资源与环境的探测中,对仪器设备姿态及倾角的测量有着广泛的应用需求。

深海设备长期工作在深海区域,海底洋流以及其他一些不稳定的深海环境都会对设备的姿态造成影响,进一步会降低海洋观测与探测数据的可靠性与准确性;另外深海低温缺氧环境,海水的腐蚀性极强,对工程材料以及结构的要求比较严格,因此,研究一种姿态系统可以实现对仪器姿态及倾角的监测具有十分重要的意义。

姿态测量技术在陆地领域应用已经非常广泛,但是在

深海领域的应用尚不多见,有学者提出采用 MEMS 传感器实现对目标倾角的高精度测量^[1],但并没有实现对姿态的测量,也无法应用到海洋领域;也有学者提出利用六轴 MEMS 器件计算目标姿态^[2],但并没有对目标倾角进行处理计算,同样无法在海洋领域进行应用。目前尚未具有同时测量姿态和倾角的深海系统。

针对以上问题,本文设计了一款基于 MPU9250 九轴姿态传感器的深海姿态系统,该款姿态系统即可以测量仪器姿态角,也可监测仪器设备偏离自然 Z 轴的倾角,角度测量精度可达 0.5° ,耐压可达 4 000 m 水深,解决了深海仪器姿态和倾角监测的问题,应用前景较为广泛。下面从深海姿态系统的测量原理、硬件、软件、结构、实验测试结果等几个方面逐一进行介绍。

收稿日期:2021-10-09

1 测量原理

MPU9250 九轴数据传感器可以输出三轴加速度、三轴陀螺仪、三轴磁感应强度数据,通过这些信息可以转换成物体姿态信息^[3],即俯仰角、翻滚角和偏航角^[4];其中俯仰角是物体与地平面之间的夹角,当物体向上倾斜时代表为正,向下倾斜时代表为负;翻滚角为物体绕前后轴转动的角度,当物体向右转动时为正,向左转动时为负;偏航角为实际航向与计划航向之间的夹角,当向右偏离计划航向时表示为正,向左偏离计划航向时表示为负^[5]。示意图如图 1~3 所示。

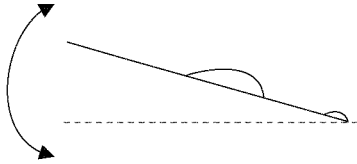


图 1 俯仰角

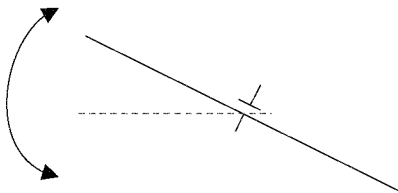


图 2 翻滚角

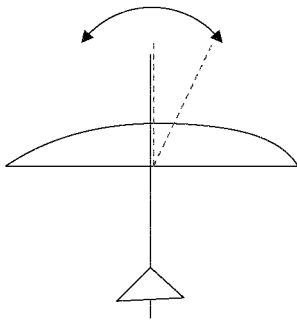


图 3 偏航角

要得到俯仰角、翻滚角和偏航角信息,一般需要利用 MPU9250 的三轴加速度、三轴陀螺仪等原始数据,然后再进行姿态融合的解算^[6],这样不仅复杂,且增加 CPU 的负担。本设计是利用 MPU9250 具有的数字运动传感器(DMP),结合 MPU9250 的嵌入式运动处理库(MPL),可以将 MPU9250 的原始数据处理成四元数,然后根据反三角公式,如式(1)所示,即可计算出俯仰角、翻滚角和偏航角^[7]。

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \arctan \frac{2(wx - yz)}{1 - 2(x^2 + y^2)} \\ \arcsin(2(wy - zx)) \\ \arctan \frac{2(wy + xy)}{1 - 2(y^2 + z^2)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: w, x, y, z 为四元数, α, β, γ 即为偏航角,翻滚角和俯仰角。

另外利用反三角函数关系^[8],如式(2)所示,该姿态系统还可以测量与自然 Z 轴之间的倾斜角度。

$$\varepsilon = \arctan \frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z} \quad (2)$$

式中: ε 为与自然 Z 轴之间的倾斜角度; A_x, A_y, A_z 分别为 X、Y、Z 轴方向的轴向加速度。

2 技术指标

表 1 所示为深海姿态测量系统的技术指标。

表 1 深海姿态测量系统技术指标

参数	指标
产品尺寸	直径:37 mm,长度:220 mm
最大水深	4 000 m
量程	俯仰角: $-180^\circ \sim 180^\circ$; 翻滚角: $-180^\circ \sim 180^\circ$; 偏航角: $0^\circ \sim 360^\circ$; 与自然 Z 轴夹角: $0^\circ \sim 90^\circ$; 精度: $\pm 0.5^\circ$
工作方式	直读、自容
容量	16 G

3 系统设计

3.1 系统总体框图

系统总体框图如图 4 所示,该系统可以分为 5 大模块,主控单元 MCU,姿态模块,实时时钟模块,电源模块以及存储模块。MCU 选用 STM32F103C8T6 单片机,MPU9250 九轴姿态传感器可以提供三轴加速度,三轴磁感应强度,三轴陀螺仪原始数据,其通过 I²C 总线连接到单片机;实时时钟模块选用 DS3231 用来记录系统实时时间,其通过 I²C 总线与单片机相连;存储模块使用的是 TF 卡,通过 SPI 总线与单片机相连,可将时间、姿态角、倾角信息实时记录到 TF 中;电源模块用来给整个系统提供所需要的电压及电流。

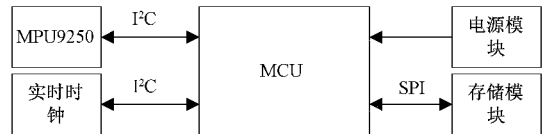


图 4 系统框图

3.2 系统软件设计

深海姿态系统软件工作流程如图 5 所示。

1)程序开始执行后首先进行初始化,包括设置系统时钟、I/O 初始化、串口/I²C/SPI 总线初始化、DS3231 时钟模块初始化,存储模块以及 MPU9250 的初始化,其中 MPU9250 的初始化中包括对 DMP 所用传感器的设置,设

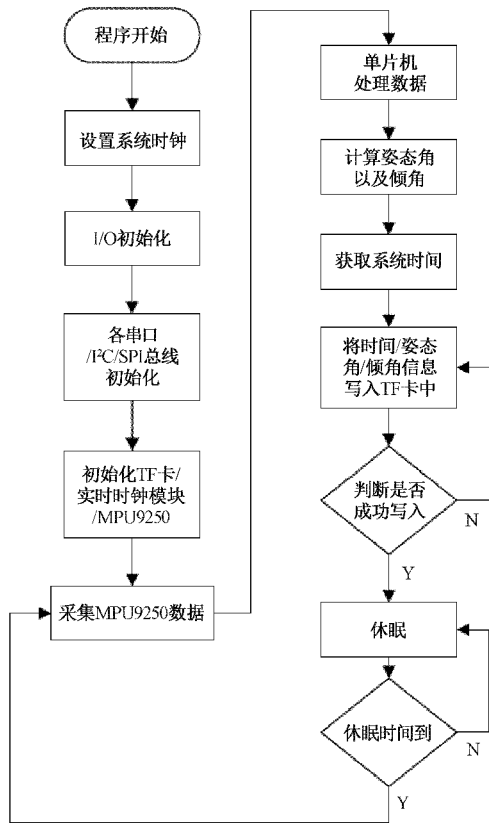


图 5 软件工作流程

置 FIFO、采样率以及初始化 MPL 库。

2)使能 MPU9250 DMP 功能,采集数据,利用 MPL 将数据解算为姿态角以并根据加速度值计算倾角。

3)读取时钟模块时间信息,并按照“年-月-日-时:分:秒,俯仰角,翻滚角,偏航角,倾角”格式将此信息写入到 TF 卡中。

4)数据写入成功后,为了降低功耗,节省电池电量,系统进入休眠,休眠结束后系统自动唤醒,进入新一轮的数据采集工作。

3.3 系统电路设计

主控单元选择 STM32F103C8T6 单片机,STM32F103C8T6 是一款基于 ARM Cortex-M3 内核的 32 位的微控制器^[9],其程序存储器 FLASH 容量是 64 KB, RAM 容量是 20 KB,具有两路 I²C、2 路 SPI 总线,3 路 USART,系统时钟最高可到 72 MHz,完全满足我们的系统设计需求^[10]。

选用 DS3231 作为实时时钟,DS3231 是低成本、高精度 I²C 实时时钟,具有集成的温补晶振和晶体,其可产生秒、分、时、星期、日期、月和年计时,并提供有效期到 2100 年的闰年补偿。

STM32F103 主控、MPU9250、电源模块等核心电路模块如图 6~9 所示。

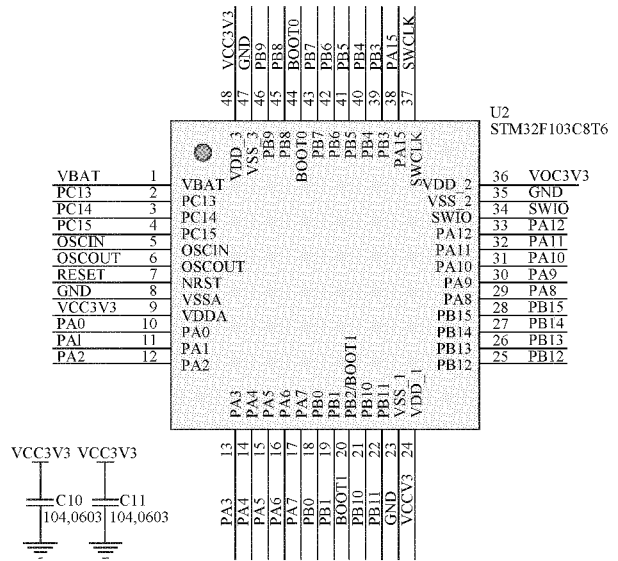


图 6 STM32F103C8T6 主控芯片

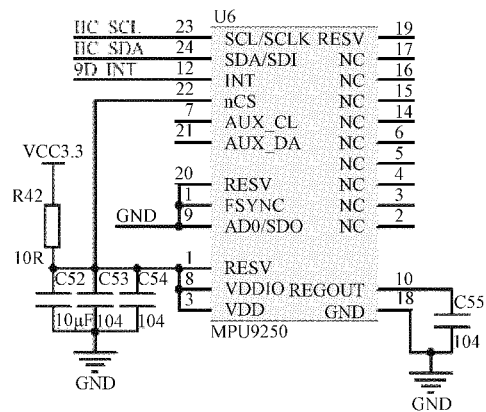


图 7 MPU9250 电路设计

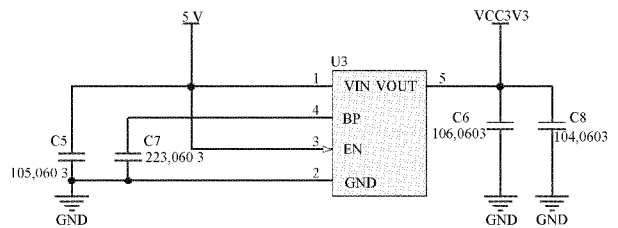


图 8 5 V 转 3.3 V LDO 电路

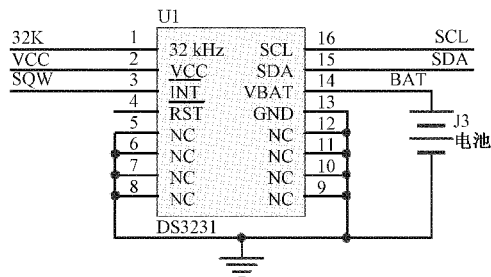


图 9 RTC 电路

3.4 结构设计

外壳的耐压及水密、内部结构的牢固可靠是深海倾角仪测量系统正常工作的前提。如图 10 所示,耐压壳体采用圆柱型,加工简单、空间利用率高、便于器件布置,两端采用 O 型橡胶圈^[11]径向密封,考虑到深海耐压及腐蚀等不利因素,端盖和壳体采用 316L 不锈钢材质^[12];内部电子元器件固定支架使用 ABS 材质 3D 打印成型,分为上下两部分,并通过螺栓连接,整体通过螺栓固定在端盖上。

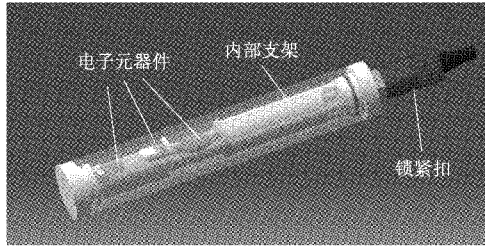


图 10 结构示意图

足够的壳体壁厚是实现 4 000 m 水深耐压的关键,圆柱形耐压壳体^[13]的最小壁厚可根据经验公式计算得到^[14]。其中, p 为最大工作压力,单位为 MPa; D 为耐压壳体的外径,单位为 mm, $[\sigma]$ 许用应力,单位为 MPa。安全系数取 1.5, $[\sigma]$ 许用应力为 179 MPa。316L 不锈钢的主要力学性能如表 2 所示,代入经验式(3)中可得 $t=4.78$ mm,取 t 为 5 mm。

表 2 316L 不锈钢的力学性能

弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	屈服强度/ MPa
206	0.3	7 980	269

$$t = \frac{pD}{2[\sigma] - p} \quad (3)$$

在完成壁厚的经验公式计算后,建立有限元模型,进行强度计算。由于圆柱型外壳是对称结构,为加快计算速度,取实际外壳的 1/8 进行建模计算。为了保证计算精度,将模型划分为 59 462 个四面体网格,然后在端面施加约束,最后在壳体外表面施加 40 MPa 的压力,进行求解计算。如图 11 所示,壳体的最大应力为 175.77 MPa,安全系数为 1.53。

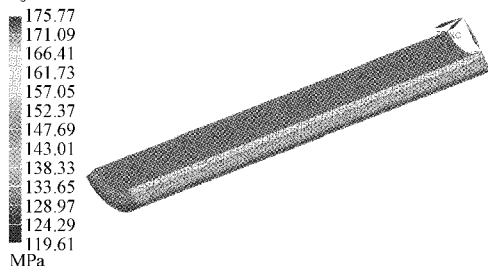


图 11 有限元分析图

在完成主要结构件的加工、制造、装配后,需使用压力测试罐对该深海姿态系统进行打压测试,验证其耐压及水密性能。从 5~40 MPa 分阶段逐步测试,每 5 MPa 作为一个步长。测试过程如图 12 及 13 所示,详细测试结果如表 3 所示,其中目标压力及实时压降单位为 MPa,保压时间单位为 Min。测试结果表明,在目标压力 40.00 MPa 阶段保持 1 h,压降为 0,可见该深海姿态系统可以满足设计的 4 000 m 水深测量指标。



图 12 压力测试容器

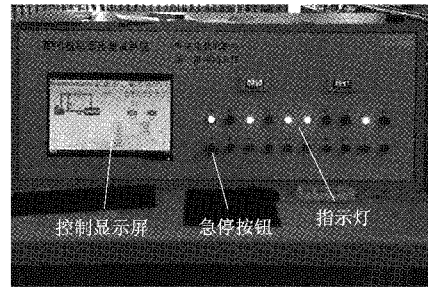


图 13 压力测试系统控制单元

表 3 压力测试结果

分段次数	1	2	3	4
目标压力	5.00	10.00	15.00	20.00
保压时间	3.00	3.00	3.00	3.00
实测压降	0.01	0	0	0.01
分段次数	5	6	7	8
目标压力	25.00	30.00	35.00	40.00
保压时间	3.00	3.00	3.00	60.00
实测压降	0.01	0	0	0

3.5 系统硬件实物图

如图 14 所示,整个深海姿态系统被放置在一个不锈钢圆柱体中,该圆柱体直径为 37 mm,高 220 mm,该圆柱体顶端是一 8 芯水密接插件,可通过该水密接插件头对系统进行

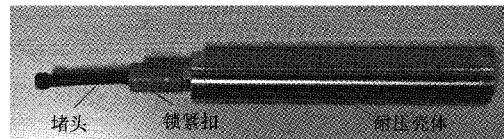


图 14 系统硬件实物图

行固件升级及数据读取;定制水密接插件堵头,当堵头接入后,电源自动接通,系统开始工作,拔下堵头后,系统停止工作。

4 实验结果

使用实验室高精度转台对该深海姿态系统进行姿态角及倾斜角测试^[15],测试平台如图15所示;对姿态角以及偏离自然Z轴倾角的测试方法如下。

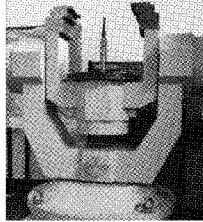


图15 测试平台

姿态角测试方法:将深海姿态系统固定在转台台面上,操纵转台使其在俯仰方向分别偏离初始位置 -180° 、 -90° 、 90° 、 180° ;然后操纵转台使其在翻滚方向分别偏离初始位置 -180° 、 -90° 、 90° 、 180° ;最后操纵转台使其在偏航方向分别偏离初始位置 45° 、 90° 、 180° 、 360° ;记录深海姿态系统所测姿态数据。

偏离自然Z轴倾角测试方法:将深海姿态系统固定在转台台面上,操纵转台使其偏离自然Z轴 0° 、 30° 、 45° 、 90° ,并记录深海姿态系统所测倾角数据。

详细测试结果如表4~7所示,测试结果表明,该深海姿态系统姿态指标可以达到设计的要求,可实现对物体姿态及倾角的测量。

表4 俯仰角测试结果 (°)

设置角度	测量角度	误差
-180	-179.7	0.3
-90	-89.6	0.4
90	90.3	0.3
180	179.7	0.3

表5 翻滚角测试结果 (°)

设置角度	测量角度	误差
-180	-179.6	0.4
-90	-90.4	0.4
90	89.8	0.2
180	179.7	0.3

表6 偏航角测试结果 (°)

设置角度	测量角度	误差
45	45.4	0.4
90	89.7	0.3
180	179.7	0.3
360	359.6	0.4

表7 偏离Z轴测试结果 (°)

设置角度	测量角度	误差
0	0	0
30	30.4	0.4
45	44.7	0.3
90	89.6	0.4

5 结论

为了解决深海仪器设备姿态测量问题,本文采用STM32F103C8T6作为主控制芯片、MPU9250作为姿态传感器,设计了一款深海仪器设备姿态测量系统,在控制器采集到MPU9250加速度计、地磁计、陀螺仪原始数据的基础上,通过软件算法快速解算出当前的实时运动姿态,并利用三轴加速度数据计算出与自然坐标系Z轴的倾角。该系统具有成本低、精度高、小型化、易安装、使用范围广等特点,本文从原理、软件、硬件、结构等方面详细介绍了该深海姿态系统的设计方案。实验结果表明,该系统具有良好的准确性及实用性,具有较为广泛的应用前景。本文中仍有不足之处需要在未来继续进行研究,首先,可以尝试进一步提高该系统测量精度;另外,将系统结构4000m耐压水深提高至全海深范围。

参考文献

- [1] 张波. 基于MEMS传感器的大量程高精度倾角仪设计[D]. 山西:中北大学,2018.
- [2] 景希,高国伟. 基于六轴MEMS器件姿态测量系统[J]. 计算机测量与控制,2021,29(6): 55-59,135.
- [3] 赵嵌嵌. 一种基于MPU9250的四旋翼姿态解算改进算法[J]. 机械工程师,2019(5): 36-39.
- [4] 任晶秋,蒋杨,张广华. AHRS的老人跌倒监测算法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(12):190-196.
- [5] 陆聪,张北伟. 基于STM32三轴云台控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2019,38(9): 75-78.
- [6] 卢艳军,陈雨获,张晓东,等. 基于扩展Kalman滤波的姿态信息融合方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(9): 281-288.
- [7] 彭琰举,宋文学,王晋,等. 基于MPU9250的示教航行姿态研究[J]. 电子设计工程,2018,26(16): 29-34.
- [8] 刘春阳,徐军领,程洪涛,等. MPU9250传感器的姿态检测与数据融合[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2015,36(4): 14-17,22,5.
- [9] 钱松荣,王勇. 基于STM32的桥梁动态监测系统设计[J]. 国外电子测量技术,2019,38(8): 57-62.
- [10] 陈旺才,陈骥,徐君,等. 基于STM32的四旋翼飞行器姿态控制器设计与实现[J]. 电子测量技术,2020,43(19): 165-168.
- [11] 易学平,毛磊. 深海承压舱密封结构设计[J]. 机械,

- 2015,42(3): 3.
- [12] 杨卓懿, 庞永杰. 钛合金深海耐压舱结构设计[J]. 航海工程, 2015(2): 64-66.
- [13] 曾岑, 臧强真, 张鹏, 等. 浅水 ROV 电子舱结构设计及关键力学问题分析[J]. 工程机械, 2020(5): 38-43.
- [14] 陶光勇. 基于有限元的水下多平台应用电子舱结构设计分析[J]. 电子机械工程, 2020, 36(2): 5-8, 13.
- [15] 李月锋, 曹宗伟, 杜沛远. 高精度相机测试转台设计及其精度测试[J]. 测绘技术装备, 2016, 18(3): 84-86, 80.

作者简介

杨磊, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为海洋嵌入式技

术与装备研发等。

E-mail: lyang@qnlm. ac

李遵伟, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为海洋仪器设备结构设计等。

E-mail: zwli@qnlm. ac

尹航, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为海洋仪器软硬件技术研发等。

E-mail: jocyh@126. com

陈波波, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为嵌入式硬件等。

E-mail: bbchen@qnlm. ac