[文章编号] 1003－4684(2025)01-0007-05

基于卡尔曼滤波的陀螺仪电参数测量系统设计

刘 旭[1]，杨智勇[1]，张道德[1,2]，胡新宇[1]，魏 琼[1]，鲁恩顺[2]
(1 湖北工业大学机械工程学院，湖北 武汉 430068；2 湖北工业大学农业机械工程研究设计院，湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为提高陀螺仪传感器电参数测量值的精度与可靠性，设计一套基于卡尔曼滤波的陀螺仪传感器电参数测量系统。采用 STM32F407 芯片作为上下位机的主控制器，通过无线通讯实现数据交互。下位机使用 AD 转换电路测量陀螺仪传感器的关键电参数；上位机采用 7 吋 LCD 显示屏提供直观的数据展示和触摸按键输入功能。利用卡尔曼滤波算法对测量数据进行误差补偿处理，以提高陀螺仪传感器测得的偏转角度和俯仰角度等多通道电压、电流测量数据的准确性和稳定性。进行测量系统与高精度倾角仪的对比实验，结果表明，该测量系统对陀螺仪传感器的电压、电流、偏转角和俯仰角的最大测量误差分别为 0.07 V、0.18 mA、0.05°和 0.042°，在允许误差范围内。

[关键词] 陀螺仪传感器；卡尔曼滤波；电参数；测量系统
[中图分类号] TP212 [文献标识码] A

陀螺仪传感器是一种用于测量角速度的设备，也被称为角速度传感器。它通过旋转惯性来测量旋转运动。当物体转动时，陀螺仪在重力力矩的作用下产生一个输出信号，微控制器对陀螺仪输出信号进行读取和解码，将之转换成角度数据以便用于控制和导航[1-3]。陀螺仪传感器测量精度可能受到温度、磁场、振动和冲击，以及时间漂移等环境因素的影响，会造成导航错误、控制不稳定等问题，如何提高陀螺仪传感器测量的精度和可靠性成为研究热点[4-6]。

陀螺仪传感器测量系统广泛应用于多种场景。曹鹏勇[7]等设计了一款结合红外线传感器、舵机和陀螺仪的智能巡航小车，该车控制器通过 IIC 通信读取陀螺仪传感器位姿信息，实现了对障碍物的识别、避让，车体转向和车身偏角预判等功能；张聪[8]等使用陀螺仪传感器获取汽车的三维角速度数据，数据经 A/D 转换器处理后可显示车身不同时刻的俯仰角、侧倾角和横摆角等动态参数。长时间使用陀螺仪进行姿态测量会导致积累的漂移误差增加，从而显著降低测量精度，通常需要对测量数据进行误差补偿处理。石炜[9]等通过在系统中加入霍尔传感器矫正模块消除陀螺仪累计漂移误差，以获得较高测量精度；张凯泽[10]等采用自适应滤波器消除信号噪声，实现对不同波高和周期海浪的精确测量；韦昌铭[11]等则使用互补滤波和卡尔曼滤波对传感器数据进行误差修正，其获得的姿态数据经滤波算法后可以得到稳定的平滑数据曲线。系统上下位机通常采用有线传输，数据传输线限制设备使用的灵活性，而无线传输则可以解决使用灵活性问题，陈元枝[12]等设计的位姿传感器数据无线传输系统通过射频模块将数据发送到上位机，采集的数据值与参考值误差较小，且在一定的距离内蓝牙模块数据传输性能可靠。

本文设计的陀螺仪传感器电参数测量系统，融合卡尔曼滤波算法，可实现对陀螺仪传感器偏转角度和俯仰角度等进行精确测量，采用无线通讯方式进行上下位机数据交互。

1 系统硬件设计

1.1 系统结构

陀螺仪传感器电参数测量系统硬件结构包括上位机和下位机两部分，均采用 STM32F407 芯片作为主控制器实现对陀螺仪传感器电参数的测量、处理和显示等功能。下位机通过 AD 转换电路采集陀螺仪传感器的电参数信号，经处理后显示为电压、电流、偏转角度和俯仰角度等数据；上位机接收和显示测量数据，并可通过虚拟触摸按键控制下位机的电压输出。上下位机通过无线通讯模块实现远距离的数据传输。

图 1 展示了测量系统的硬件架构。在下位机部

[收稿日期] 2023－05－11
[基金项目] 国家自然科学基金（51907055）；湖北省教育厅重点项目(D20221404)
[第一作者] 刘 旭(1999－)，男，湖北襄阳人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为机器人技术。

分。硬件配置涵盖了聚合物锂电池、陀螺仪传感器、控制板以及蓝牙无线通讯模块。聚合物锂电池负责为传感器和控制板供电。控制板与陀螺仪传感器通信，以收集位姿信息。通过下位机的 I_{in} 和 V_{in} 接口，系统可测量陀螺仪传感器的电流和电压值。而 V_{out} 接口用于输出电压信号。所有收集到的数据通过蓝牙无线通讯模块发送至上位机。上位机的硬件组成包括显示屏、开关电源、控制板和蓝牙无线通讯模块。蓝牙无线通讯模块的主要功能是接收下位机发送的测量数据。显示屏不仅用于直观展示测量数据，还能实时监控系统的工作状态。

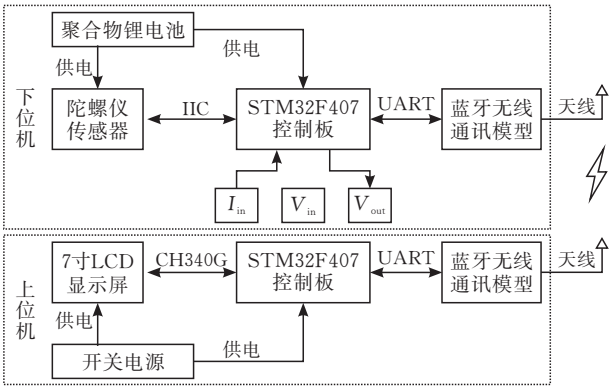


图 1　测量系统硬件结构

1.2　硬件电路

测量系统下位机电路如图 2 所示。微处理器通过 IIC 总线与陀螺仪传感器进行数据传输，使用 8 MHz晶振，可以超频到 168 MHz 来提高 AD 电路采样频率。无线通讯模块采用的是一款具有高稳定性的工业级无线串口模块，采用 LORA 扩频调制，传输距离可达 5000 m，且该模块有指令控制、正常工作和休眠模式三种模式，指令控制模式可以对无线通讯模块进行配置。锂电池采用 5 V 升压锂电池，通过电源供电稳压电路对陀螺仪传感器、控制板和无线通讯模块进行供电。测量系统上位机电路(图 3)包括 7 吋显示屏、控制板和无线通讯模块。其中 7 吋显示屏分辨率为 800×480，采用 3.3 V 或 5 V 供电，可与单片机进行连接使用。

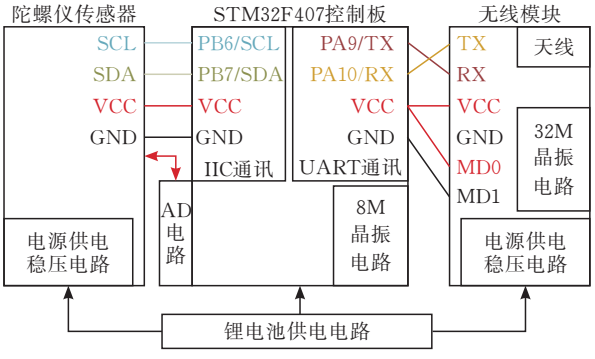


图 2　下位机硬件电路

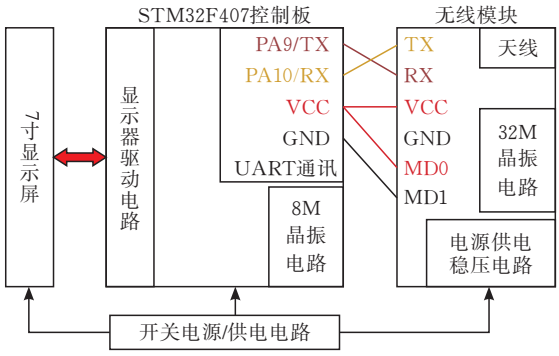


图 3　上位机硬件电路

2　系统软件设计

2.1　通讯协议

为了保证上下位机通讯的稳定性，需要自定义通讯协议，其格式如图 4 所示。该通讯协议为 8 字节结构。

起始字节(START)：作为协议数据帧起始标志，该字节固定为 0x55。当串口接收到 0x55 时，即表示通讯开始。

帧头：位于第 2 字节，上下位机通讯协议的帧头统一设置为 0xaa。

数据长度：第 3 字节，用于指示当前数据包的大小。这一长度由用户自定义。

标识：第 4 字节，用于区分不同类型的数据包。例如：在电压读取模式下，该字节为电压读取标识；在电流读取模式下，此处为电流读取标识。

数据：第 5 字节，包括实际传输的数据内容，如实际电流值、电压值、偏转和俯仰角度等数据。

数据校验：第 6、7 字节，采用 CRC(循环冗余校验)算法来检测数据在传输过程中可能出现的错误。

帧尾：第 8 字节，作为协议数据结束的标志，保留字节为 0xff。

START	帧头	数据长度	标识	数据	数据校验	帧尾
1Byte	1Byte	1Byte	1Byte	1Byte	2Byte	1Byte
0x55	0xaa	自定义	自定义	自定义	CRC校验	0xff

图 4　自定义通信协议格式

下位机遵循自定义通讯协议的规定，将数据精心组织并装入发送缓冲区。将所有需要发送的数据集中于一个缓冲区，并利用发送中断机制将缓冲区的数据发送出去。上位机则通过中断接收数据，提高了数据处理的实时性和系统的响应速度。数据包的解析策略根据协议的复杂度灵活设置。对于简单的协议，如果系统仅处理一些简单的命令，可以直接把数据包的解析过程放入中断处理函数中，一旦收到正确的数据包，即置位相应的标志，在主程序中再对命令进行处理。如果协议稍微复杂，则将接收的

数据存放于缓冲区中,主程序读取数据后进行解析。本系统通过接收中断机制来实现数据接收协议,具体来说,每当系统接收到一次中断(即接收到 1 个字节)时,就会将该数据存储起来,直到收集到一个完整的数据帧。如果接收的数据帧是正确的,系统将设置一个标志位(flag),以便在主程序中进行命令解析。如果数据帧存在错误,就会被系统自动丢弃。

2.2　Kalman 滤波算法设计

卡尔曼滤波是一种高效的动态系统状态估计方法,广泛应用于动态系统的精确状态推断。它结合传感器测量和模型预测,以实现系统状态的精确估计。这种方法适用于跟踪目标、滤除噪声和干扰等应用场景。卡尔曼滤波算法通过将当前时刻的测量值与上一时刻的系统预测值及其相关误差结合起来,通过计算得出当前时刻的最优解,再预测下一时刻的值,这相当于在线性条件下 K 值(卡尔曼增益)动态变化的互补滤波形式。卡尔曼滤波的状态方程

$$X_k = A_{k|k-1} - X_{k-1} + B_{k-1}W_{k-1} \tag{1}$$

观测方程

$$Z_k = H_k X_k + V_k \tag{2}$$

式中:X_k 为 k 时刻的状态变量;$A_{k|k-1}$ 为系统 $k-1$ 时刻到 k 时刻的状态转移矩阵;B_{k-1} 和 W_{k-1} 分别为 $k-1$ 时刻系统的系统噪声矩阵和过程噪声;Z_k、H_k 和 V_k 分别为 k 时刻系统的观测向量值、观测转移矩阵和观测噪声。

卡尔曼滤波算法包括时间更新和观测更新,用于将上一个时刻的状态转移到当前时刻,并根据当前时刻的观测值对状态进行校正,得到最优的估计值。交替进行这两个过程,可以实现对状态的优化估计,达到滤波的目的。图 5 为卡尔曼滤波算法更新流程。

将陀螺仪传感器的角速度 ω 和静态偏移 φ 作为系统的输入值,并建立观测方程

$$\theta_k = \theta_{k-1} + (\varphi_{k-1}W_{k-1})\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中:θ_k 为 k 时刻载体角度值;θ_{k-1} 为 $k-1$ 时刻的陀螺仪输出角度值,φ_{k-1} 为 $k-1$ 时刻陀螺仪的静态漂移,W_{k-1} 为观测噪声。

系统状态下一步预测方程和观测方程分别为:

$$X_k = \begin{bmatrix} 1 & -T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_{k-1} \\ \beta_{\varphi k-1} \end{bmatrix} + \omega T \tag{4}$$

$$Z_k = [1 \quad 0]\, X_k + V_k \tag{5}$$

式中:T 为积分时间;Z_k 为加速度计量测角度;V_k 为系统测量的噪声。

状态更新方程:

$$X_k = X_{k|k-1} + K_k(Z_k - HX_{k|k-1}) \tag{6}$$

协方差矩阵公式:

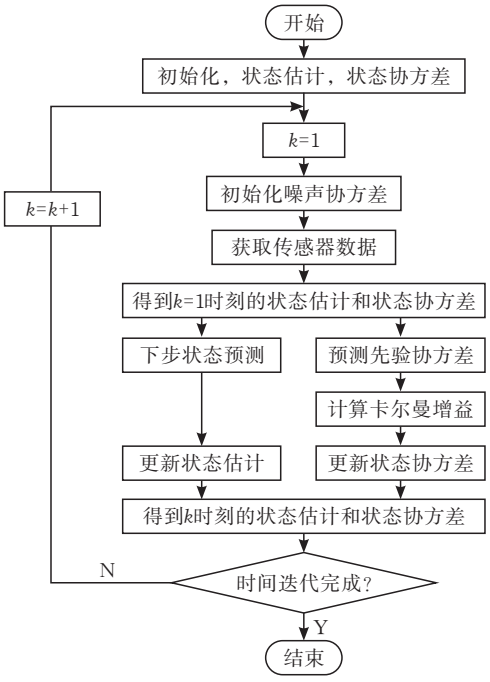


图 5　卡尔曼滤波算法更新流程

$$\boldsymbol{P}_{k|k-1} = AP_{k-1} + A^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q} \tag{7}$$

过程噪声的协方差矩阵:

$$\boldsymbol{Q} = X_k + X_k^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

卡尔曼增益:

$$K_k = P_{k|k-1} + H^{\mathrm{T}}(HP_{k|k-1}\,H^{\mathrm{T}} + R)^{-1} \tag{9}$$

观测噪声的协方差矩阵:

$$\boldsymbol{R} = Z_k Z_k^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

更新协方差:

$$\boldsymbol{P}_k = IP_{k|k-1} - K_k HP_{k|k-1} \tag{11}$$

在陀螺仪传感器电参数测量系统中,卡尔曼滤波算法被应用于电参数的处理和优化电参数。该算法通过模型预测方式对连续性信号进行滤波和预测,有效降低噪声和误差的影响,从而提高了估计精度和系统的可靠性。处理步骤包括建立数学模型、计算最优估计值和状态误差协方差矩阵、更新状态估计值和误差协方差矩阵,以及预测下一时刻的电参数值。

2.3　上位机软件设计

测量系统下位机承担着对陀螺仪传感器电流值和电压值的测量任务。这些数据进行卡尔曼滤波处理后,通过无线模块传输给上位机。上位机作为系统的控制中心,通过无线模块接收下位机发送的电压值、电流值、偏转角度和俯仰角度等关键数据,并在界面上直观显示。上位机显示界面(图 6)部署在 7 吋 LCD 屏上,用户可通过触摸虚拟按键设置下位机电压输出值。在测量参数方面,上位机提供了 5 V和 30 V 两个量程的电压测量选项,电流测量则统一设置为 100 mA 量程。此外,系统还能够显示陀螺仪的偏转角度和俯仰角度数值。

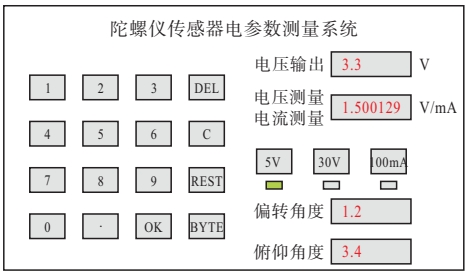
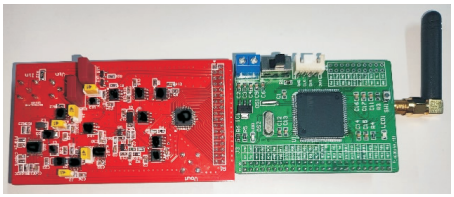


图 6 上位机显示界面

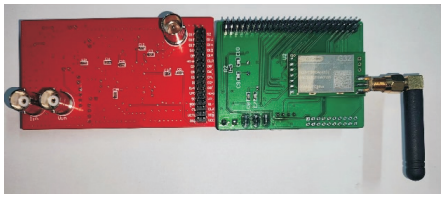
3 实验及结果分析

3.1 实验方法

为了验证陀螺仪传感器电参数测量系统的可靠性，在硬件和软件开发完成之后对其进行实验验证。考虑到陀螺仪传感器在日常使用过程中的实际工况，采用模拟平台控制陀螺仪传感器在三维空间的偏转角度；通过改变控制平台 X 轴和 Y 轴的倾斜度来模拟实际场景的偏转角度和俯仰角度。实验采取对比法，分别使用本设备和高精度专业仪器对陀螺仪数据进行测量。本实验将分为三部分进行：第一部分是上位机设置电压，控制下位机输出相应的电压值；第二部分是下位机在 5 V、30 V、100 mA 3 个不同档位测量陀螺仪传感器的电压和电流等电参数信息，并在上位机界面显示；第三部分是下位机将处理后的偏转角度和俯仰角度信息传输给上位机并在上位机界面上显示。图 7 为下位机实物正反面，图 8 为上位机实物显示界面和硬件电路。

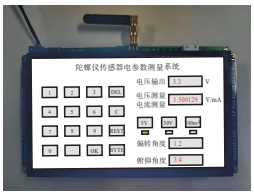


(a)正面

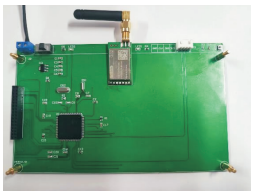


(b)反面

图 7 下位机实物



(a)显示界面



(b)硬件电路

图 8 上位机实物

3.2 实验结果分析

图 9 为设置电压与输出电压对比曲线。通过上位机触摸按键输入设置电压值，在下位机的 Vout 端口测量电压值，共采样 10 次，设置电压范围为 0～5 V。由图 9 可知，设置电压曲线与输出电压曲线重合度较好，误差在 0.05 V 以内，符合精度要求。

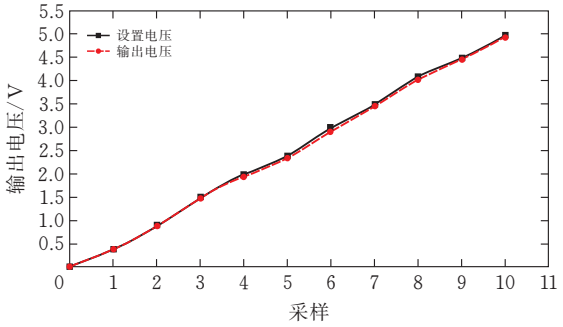
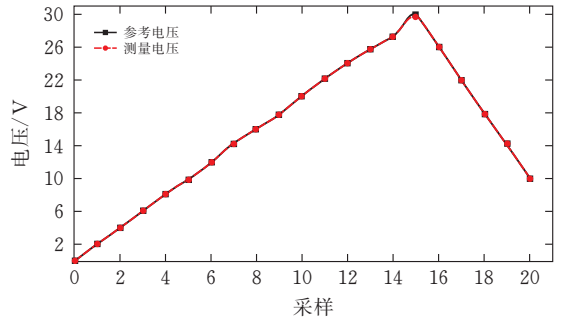
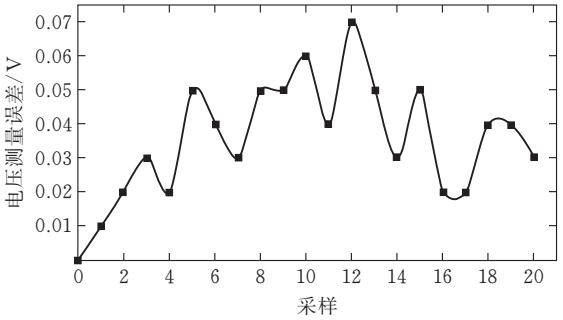


图 9 电压输出对比曲线

分别采用本设备和高精度电压电流仪对陀螺仪传感器的电压和电流进行测量，获得电压和电流的参考值和测量值。图 10 为测量电压对比曲线及电压测量误差曲线。电压测量共采样 20 次，电压为 0～30 V。结合电压测量误差曲线可知，电压测量最大误差值为 0.07 V。



(a)测量对比曲线



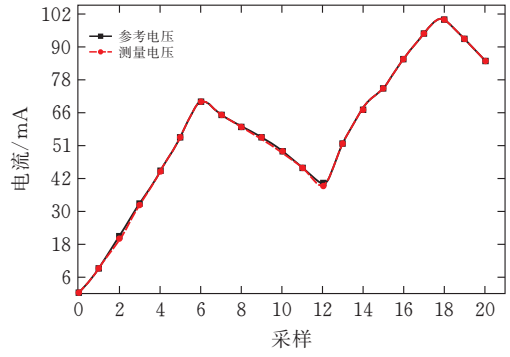
(b)测量误差曲线

图 10 电压测量

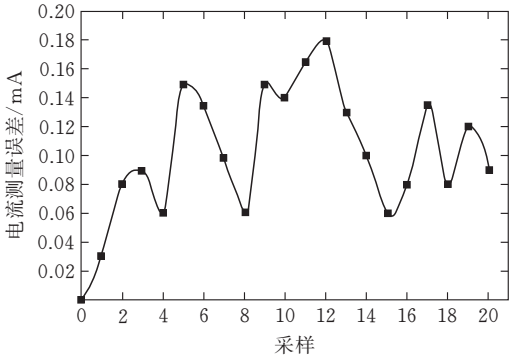
图 11 为测量电流对比曲线及电流测量误差曲线。电流测量共采样 20 次，电流为 0～100 mA。由电流测量误差曲线可知，电流测量最大误差值为 0.18 mA。

图 12 为陀螺仪传感器偏转角与俯仰角对比曲线及误差值曲线。陀螺仪传感器偏转角和俯仰角的

参考值采用高精度倾角仪测得，测量值曲线与参考值曲线重合度较好，其中偏转角最大测量误差为 0.05°，俯仰角最大测量误差为 0.042°。

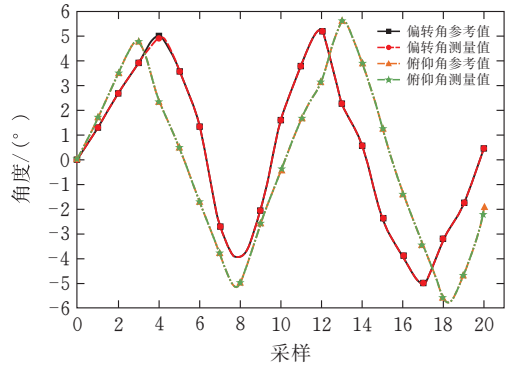


(a)测量电流对比曲线

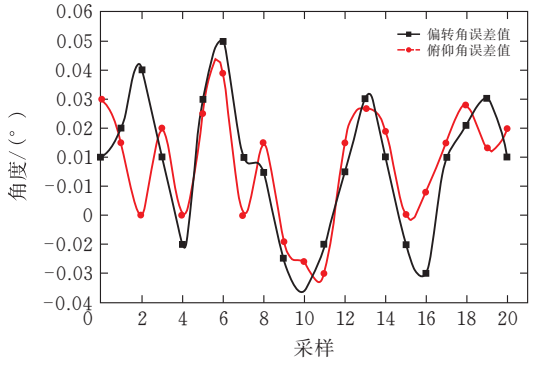


(b)电流测量误差曲线

图 11　电流测量



(a)对比曲线



(b)误差曲线

图 12　偏转角与俯仰角对比曲线及误差曲线

4　结论

为了提高陀螺仪传感器电参数的测量精度，设计了基于 STM32F407 的陀螺仪传感器电参数测量系统(包括上下位机的软硬件部分)。该系统实现了输出电压、测量电压和电流、测量偏转角和俯仰角，以及上位机显示等功能。实验结果表明，该测量系统能够对陀螺仪传感器的电压、电流、偏转角和俯仰角进行精确测量，最大测量误差分别为 0.07 V、0.18 mA、0.05°和 0.042°，显示出较高的测量精度。

[参　考　文　献]

[1] 骆曼箬，李绍良，黄艺明，等. 原子陀螺研究进展及展望[J]. 测控技术：1-10.

[2] 张风雷，柳奎，陆泽晃，等. 大型测地激光陀螺仪研究综述[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2023，51(03)：120-131.

[3] PASSARO V M N，CUCCOVILLO A，VAIANI L，et al. Gyroscope technology and applications：a review in the industrial perspective[J]. Sensors，2017，17(10)：22.

[4] 张强，吴志强，云启凡.基于 MIMU/磁传感器/双天线 RTK 的姿态测量方法研究[J].电子测量与仪器学报，2023，37(05)：230-239.

[5] XIA D Z，YU C，KONG L. The development of micromachined gyroscope structure and circuitry technology[J]. Sensors，2014，14(01)：1394-1473.

[6] FENG R，WANG J，QIAO W，et al. Real-time built-in self-test of mems gyroscope based on quadrature error signal[J]. Micromachines，2021，12(09)：16.

[7] 曹鹏勇，王建文. 基于 STM8S105 的智能车结构及控制系统的研究[J]. 工程设计学报，2020，27(04)：516-523.

[8] 张聪，陈翀，周亭亭. 便携式车身动态姿态检测系统的设计[J]. 测控技术，2016，35(06)：18-20.

[9] 石炜，朱光宇. 基于陀螺仪的方向盘转角传感器[J]. 仪表技术与传感器，2014(09)：6-8.

[10] 张泽凯，梁旗，唐健，等. 基于 MEMS 惯性传感器的波浪测量系统设计与实现[J]. 电子测量技术，2022，45(10)：170-176.

[11] 韦昌铭，王勇军. 基于惯性传感器的姿态实时测量系统设计[J]. 桂林航天工业学院学报，2021，26(03)：265-270.

[12] 陈元枝，孙浩，赵国如. 基于 CC254x 与 STM32 的惯性传感器无线传输系统设计[J]. 传感器与微系统，2016，35(07)：103-106.

(下转第 19 页)