

基于GMR传感器的小体积二维电子罗盘设计*

时劭华¹, 钱正洪^{1*}, 白 茹¹, 龚天平², 孙宇澄¹

(1. 杭州电子科技大学 磁电子中心, 浙江 杭州 310018;

2. 东方微磁科技有限责任公司, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 针对二维电子罗盘存在的体积、精度较难平衡等问题,对二维电子罗盘展开了研究。通过对硬件与算法的优化设计,提出了一种较为实用的解决方案。硬件上采用新型的二维GMR传感器感测磁场,使用C8051F350单片机自带的 Δ - Σ A/D模块进行了信号调理,有效减少了信号调理器件,使用了针对GMR传感器优化的算法,在无干扰下可保证其具有较好的辨别精度,在有外部干扰的环境中,通过旋转校准,依然可以保证较高的精度。同时,将校准数据IAP到单片机Flash中,即使系统掉电也可以保证数据不丢失。经国防科技工业弱磁一级计量站的测试,其测试结果表明,该设备在无干扰情况下精度可达 $\pm 2^\circ$,在强干扰下精度依然较高,具有较强的工程实用价值。

关键词: GMR传感器;二维罗盘;抗干扰

中图分类号: TP212.9; TH85^{+.2} **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)06-0650-04

Design of miniature electronic compass based on GMR sensor

SHI Shao-hua¹, QIAN Zheng-hong¹, BAI Ru¹, GONG Tian-ping², SUN Yu-cheng¹

(1. Center for Integrated Spintronic Devices(CISD), Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. SpinIC Co. Ltd., Yichang 443003, China)

Abstract: Aiming at miniaturizing 2-axis electronic compass while maintaining its accuracy, a miniature 2-axis electronic compass based on giant magnetoresistance (GMR) was investigated and realized by optimizing the hardware and arithmetic. In hardware, the novel GMR was chosen to measure magnetic field, and a Δ - Σ A/D converter which is already incorporated into the MCU (C8051F350) was selected to condition the output of GMR sensors. The designed compass is with a compact size, and can be calibrated to eliminate magnetic interference making it suitable for embedded applications. The accuracy of the electronic compass was measured to be $\pm 2^\circ$ without magnetic interference. Even with the presence of magnetic interference, a relatively good accuracy is still achievable if a proper calibration is done. The results indicate that this electronic compass can be applied in many engineering applications.

Key words: giant magnetoresistance(GMR) sensors; two-axis compass; anti-interferences

0 引 言

电子罗盘是现代传感器技术、模拟数字技术结合的产物。相比于传统的机械罗盘,电子罗盘具有精度高、抗干扰能力强、易与电子产品结合等诸多优势,目前已被广泛应用在各个领域^[1-3]。

磁敏传感器是电子罗盘的核心,常用的传感器有霍尔器件、磁通门和AMR^[4-7]。霍尔器件由于精度不

高、灵敏度较差,使用较少。磁通门精度高,但是体积大、响应速度慢、后端调理电路复杂,无法推广使用。AMR已成功应用在手机等集成电子罗盘的场合,但是AMR传感器需要复位电路偏转磁矩保证精度,设计复杂、电路功耗较大。GMR属于新型磁阻类传感器,与AMR相比有磁阻变化率大、响应速度快、功耗低等优势,而且无需磁带复位消除电路。

本研究主要探讨了基于GMR传感器的小体积二

收稿日期:2011-12-09

基金项目:浙江省重大科技专项资助项目(2011C11047)

作者简介:时劭华(1987-),山东单县人,主要从事GMR传感器应用开发方面的研究。E-mail:shishaohua2005@163.com

通信联系人:钱正洪,男,教授。E-mail:zqian@hdu.edu.cn

维电子罗盘设计。

1 自旋阀 GMR 传感器特性

本研究采用杭州电子科技大学磁电子中心自研制的二维自旋阀 GMR 传感器 SAS022 作为电子罗盘的敏感元件,保证精度的同时降低成本,提高罗盘的工程实用性。该器件由两个自旋阀传感器按相互垂直的方式封装在一起形成。两个自旋阀传感器为惠斯通电桥结构,由 4 个自旋阀电阻组成,其中两个电阻被软磁材料屏蔽,另外两个电阻可在外磁场的作用下发生变化从而使电桥失衡,形成输出^[8-10]。

经测试,SAS022 的输出曲线如图 1、图 2 所示。

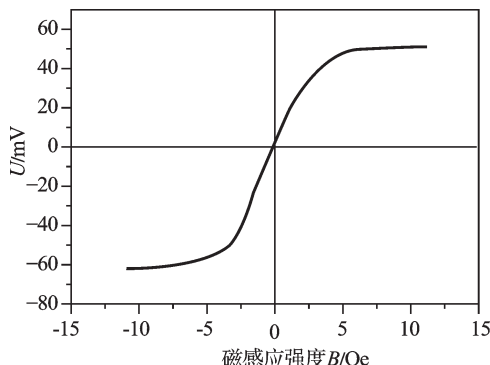


图1 SAS022 自旋阀传感器在-10 Oe~+10 Oe 的响应曲线

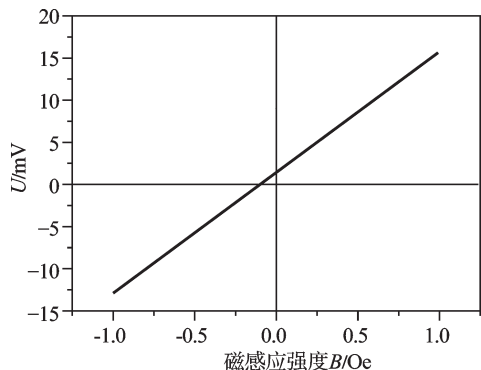


图2 SAS022 自旋阀传感器在-1 Oe~+1 Oe 的响应曲线

在-10 Oe~+10 Oe 范围内,传感器的灵敏度为 3.67 mV/V/Oe,磁滞为 0.3%;在-1 Oe~+1 Oe 范围内,传感器的灵敏度为 3.67 mV/V/Oe,磁滞为 0.27%,非线性度为 0.37%。地磁场磁感应强度在 0.6 Oe 以内,SAS022 在 ± 1 Oe 内线性度较好,可满足通用电子罗盘对传感器的要求。

2 系统硬件设计与模块配置

电子罗盘硬件构架图如图 3 所示,由 C8051F350 单片机、LP2980-3.0 线性稳压、SP3220 串口转换芯片和二维 GMR 传感器组成。

2.1 Δ - Σ A/D

SAS022 是惠斯通电桥结构,在地磁级别输出信号

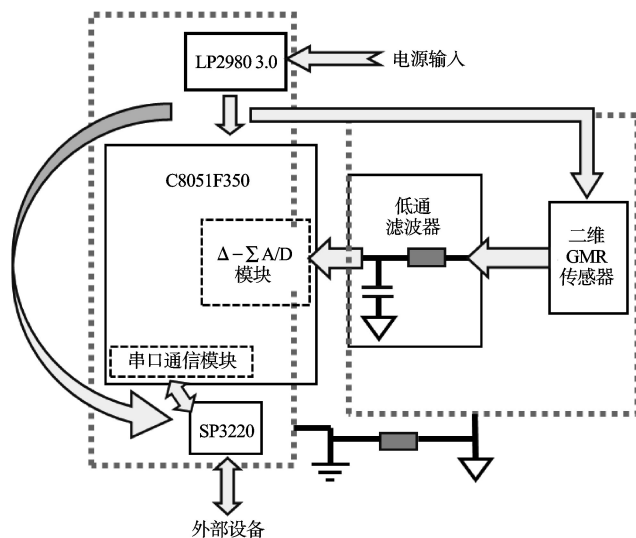


图3 硬件方框图

的共模电压为 $V_{cc}/2$ 、差模电压为 ± 6 mV。模拟调理电路需要抑制共模信号放大差模信号,并且进行滤波。常用的放大差分信号方法有差分接法和仪表放大器。该设计选用单片机内部自带的 Δ - Σ A/D 进行信号放大、数字滤波处理。相比以上两种方案,不仅可以减少器件数量,减小罗盘体积,还可以省去数字滤波器设计,减少单片机的代码量,提高运行效率。

Δ - Σ A/D 模块内部自带一个最大 128 倍的 PGA。该设计将其配置为差分放大模式,放大 128 倍。由于这个 PGA 通过开关电容实现信号放大,具有很好的共模抑制比^[11]。

4 次过采样可以提高 1 bit 有效分辨率,采样 2^{2N} 次可以达到 N bit 的有效分辨率。 Δ - Σ A/D 使用过采样技术,结合积分器将量化噪声从低频移到高频,可以保证低于 2^{2N} 次采样而得到 N bit 的分辨率。

输出端的数字滤波器具有抽取、加权平均和滤波功能。抽取和加权平均可以提高有效分辨率;数字低通滤波器将高频噪声滤除。

该设计将 Δ - Σ A/D 的采样时钟设为 3.062 5 MHz。 Δ - Σ A/D 内部将 128 次采样数据作为一次转换数据(设为 A),进行抽取平均和数字滤波。抽取比设为 1 920, Δ - Σ A/D 对 1 920 组数据 A 经行滤波、加权平均得到一个有效转换数据。抽取比越高则转换结果的有效分辨率越高,但是转换的输出速率会降低。同时抽取比也会影响后端数字滤波器的截止频率。C8051F350 内部自带的 Δ - Σ A/D 模块集成了一个 3 阶梳状滤波器,其幅频响应为:

$$|H(f)| = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot f \cdot De}{MDCLK}\right)}{De \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot f}{MDCLK}\right)} \right|^3 \quad (1)$$

式中: De —抽取比 1 920; $MDCLK$ —数据 A 的转换率, $MDCLK = 3.062\ 5\ \text{MHz} / 128 = 23.925\ \text{kHz}$ 。

经过计算可见,在 50 Hz 附近有一个衰减点,可以有效滤除工频干扰。数字滤波器由 Δ - Σ A/D 内部模块完成,可以有效减少代码量。

2.2 电源设计

电源选用 SOT-23 封装的低压差线性稳压芯片 LP2980-3.0,最大输入电压 16 V,当输出电流在 10 mA 以内,最小压差可以低至 100 mV。由实测可得该罗盘工作电流为 5 mA,假设当输入电压为 16 V 时,LP2980-3.0 为保证散热,最大的外部环境温度为:

$$T_{A(\text{MAX})} = T_{J(\text{MAX})} - P \cdot \theta_{JA} = 110.7\ ^\circ\text{C} \quad (2)$$

SOT-23 封装的 $\theta_{JA} = 220\ ^\circ\text{C/W}$; LP2980-3.0 最大工作温度 $T_{J(\text{MAX})} = 125\ ^\circ\text{C}$; 当输入电压为 16 V 时,最大功耗 $P = 0.065\ \text{W}$ 。由以上公式得出, SOT-23 封装 LP2980-3.0 可以工作在外部最大温度 $110.7\ ^\circ\text{C}$ 的环境中。

2.3 电子罗盘通信

该罗盘与电脑通过 RS232 协议通信。单片机是 CMOS 电平,电脑是 RS232 电平,本研究使用 SP3220 进行电平转换。

根据不同的应用,本研究还可以将通信协议设置成 SPI、I²C 等协议。单片机 I/O 口支持 5 V 输入,可以配置成漏极开路加上拉电阻连接 5 V,满足 TTL 电平通信条件。

2.4 硬件优化

本研究在传感器输出端和 A/D 之间加入 RC 低通滤波器防止频谱混叠。但是 RC 时间常数会影响 A/D 增益、失调误差和线性度^[12],经试验,电阻选用 100 Ω ,电容选用 0.1 μF ,在保证模/数转换精度的同时滤除带宽外噪音。

电源芯片为系统提供 3 V 电压,本研究将其分割为模拟电源和数字电源,对其各自所属器件单独供电。

PCB 布板时,本研究将模拟地与数字地分割,使用 0 Ω 电阻在一点连接^[13],防止高频数字电流灌入模拟地^[14-15],影响模拟器件性能。

3 测量原理

该罗盘算法针对 GMR 传感器的特性进行优化。由于传感器在两个灵敏轴方向上灵敏度会有细微的误差,首先需要校准这个误差。罗盘第一次校准时,本研究将罗盘放置非铁磁性物体上旋转。发送校准指令“X”或“x”旋转 360°;再发送校准指令“Y”或“y”旋转 360°。单片机测出两个传感器模数转换结果,最大值和最小值设为: V_{xh} 、 V_{xl} 、 V_{yh} 、 V_{yl} (示意图如图 4 所示^[16])。

本研究发送指令“K”或“k”,单片机计算出两个传感器输出信号范围,设为 V_{rx} 和 V_{ry} :

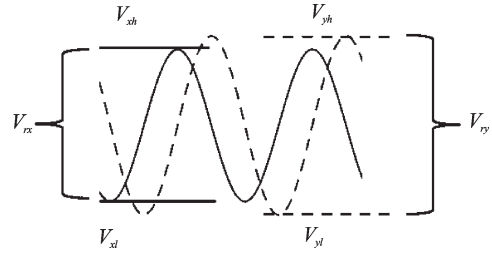


图4 最大值、最小值示意图

$$\begin{cases} V_{rx} = V_{xh} - V_{xl} \\ V_{ry} = V_{yh} - V_{yl} \end{cases} \quad (3)$$

并求出比例因子 k :

$$k = \frac{V_{rx}}{V_{ry}} \quad (4)$$

本研究将系数 k IAP 到单片机 Flash 中。由于放置非铁磁物体上旋转,没有软磁干扰, k 较为精确。比例系数 k 只需进行一次校准,如果需要再次校准,要确保旋转电子罗盘的载体是非铁磁性物质。

传感器本身会有失调电压;应用中,电子罗盘可能会受到外部硬磁干扰^[17]而产生失调电压。这样需计算出电子罗盘实际中点值以校准失调电压。在实际应用环境中,本研究发送两个校准指令,然后分别旋转电子罗盘一周。本研究发送结束指令“E”或“e”,单片机求出中点(示意图如图 5 所示)并 IAP 到 Flash 中,设中点为 (X_m, Y_m) :

$$\begin{cases} X_m = \frac{V_{xh} - V_{xl}}{2} + V_{xl} \\ Y_m = \frac{V_{yh} - V_{yl}}{2} + V_{yl} \end{cases} \quad (5)$$

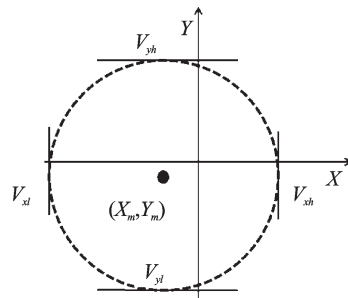


图5 受硬磁干扰后传感器输出

本研究通过求出中点坐标可以很好地校准硬磁干扰,即使在软磁干扰下,中点坐标也较为准确。如果罗盘周围有铁磁物体或则载体是铁磁物体。只要它们之间的相对位置保持不变,罗盘旋转 360°,其输出曲线是一个 180° 旋转对称。当罗盘旋转 180° 时,假设罗盘静止,相当于磁场方向改变了 180°。由于罗盘周围铁磁物体相对静止,罗盘处的磁场也只是被反向 180°,而磁感应强度大小不变,使用这种方法求出的中点也较为精确。

设电子罗盘方向角为 β :

$$\cos \beta = \frac{V_x - X_m}{\sqrt{(V_y - Y_m)^2 \cdot k^2 + (V_x - X_m)^2}} \Rightarrow$$

$$\beta = \begin{cases} \arccos \frac{V_x - X_m}{\sqrt{(V_y - Y_m)^2 \cdot k^2 + (V_x - X_m)^2}} \\ (V_y > Y_m) \\ \arccos \frac{X_m - V_x}{\sqrt{(V_y - Y_m)^2 \cdot k^2 + (V_x - X_m)^2}} + 180^\circ \\ (V_y < Y_m) \end{cases} \quad (6)$$

经过反余弦求出的 β 即为方向角。

4 实验与结果分析

本研究研制的罗盘在国防弱磁科技工业一级测量站测试。在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内每 30° 测试一次;测试在3种条件下电子罗盘的输出结果。在测试前,本研究首先将比例系数 k 进行校准。

第1步:无干扰情况下校准,测试输出。

第2步:在电子罗盘附近放置一个铁磁物体,保持这个铁磁物体与罗盘相对静止,测试输出。

第3步:在第2步测试的基础上,保持罗盘与干扰物体位置不变,发送校准指令,旋转校准以后发送结束指令。校准环境干扰,再测试。

测试数据如表1所示。根据表1中数据可以看出,硬磁物体对磁场会产生很大的扰动,使电子罗盘输出产生很大偏差。

表1 测试数据

测试角度/($^\circ$)	无干扰测试	加干扰测试	加干扰校准测试
0	0	315.2	0
30	30.1	330.4	28.2
60	58.5	338.5	54.6
90	88.7	326.5	83.2
120	117.8	243.8	112.3
150	148	231.8	144
180	177.9	239.3	188.4
210	208.5	251.1	211.7
240	239.6	264	241.8
270	270.9	277.1	270.4
300	301.3	290	299.1
330	330.4	303.3	329.8
360	0	315.2	0.2

电子罗盘无干扰时有很高的精度;在有干扰的情况下可对环境干扰进行校准,保证较高的精度。表1偏差计算结果如图6所示,无干扰时,电子罗盘的精度可达 $+1.3^\circ \sim -2.2^\circ$;在受到外部强硬磁干扰时,经校准的精度为 $+8.4^\circ \sim -7.7^\circ$ 。

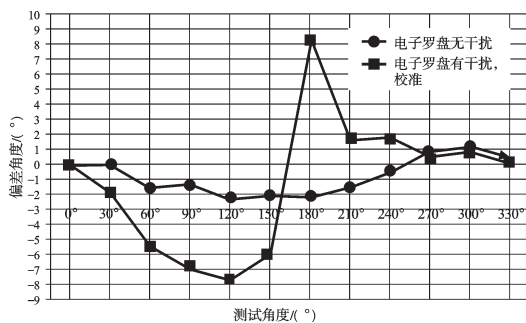


图6 无干扰和受干扰校准后输出

该罗盘(其实物图如图7所示)采用二维GMR传感器,自带 $\Delta-\Sigma A/D$ 模块的高性能模拟外设单片机C8051F350,具有系统小、性能好、应用性好等优势。

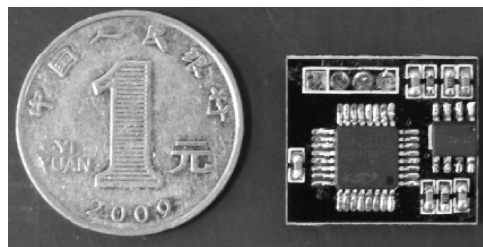


图7 罗盘实物图

5 结束语

该罗盘使用了新型GMR传感器和较为新颖的调理电路,在保证罗盘精度的同时有效减小了罗盘体积,更适合嵌入到各种设备中。

电子罗盘的辨向功能可应用到多个领域之中,例如风向仪及使用对径极化磁铁的旋转编码器、角度传感器等。

致谢

该论文的研究工作得到浙江省教育厅“磁性材料和器件”高校创新团队、浙江省重点科技创新团队子项目“车辆检测用传感器及应用”和浙江省重大科技专项重点工业项目(计划编号2011C11047)的资助。

参考文献(References):

- [1] 王运红. 水下机器人导航系统的设计与实验研究[D]. 上海:上海交通大学空天科技研究院,2008.
- [2] 张燕. 移动机器人组合自主定向系统的研究及应用[D]. 南京:东南大学仪器科学工程系,2009.
- [3] CARUSO M J, BRATLAND T, SMITH C H. A New Perspective on Magnetic Field Sensing[Z]. Sensors,1998.
- [4] 蔡建旺. 磁电子学器件应用原理[J]. 物理学进展,2006,26(2):180-227.
- [5] CARUSO M J. Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems[C]//Position Location and Navigation Symposium IEEE 2000. San Diego:[s.n.],2000:177-184.

(下转第673页)

示。

图6表明:CAN总线单个扩展帧传输时间为141 μs ,其中位填充的位数 $N=13$,则根据式(1)可得理论值 $C_m=141 \mu\text{s}$,与实际所测得的时间数据相符合。图7表明:RS485总线数据传输时间为184.4 μs ,与理论值170 μs 存在一定的误差。经分析,误差主要来源于RS485总线两字节数据传输之间存在的1 μs 左右的延时。由图6和图7波形得到的数据与发送数据相符合,同时总线数据传输时间都小于移过每一针时间 T ,符合圆纬机实时性的控制要求。

本研究以圆纬机23 r/min的转速连续编织48 h作为测试条件,对系统的稳定性和可靠性进行测验。采用CAN总线监测仪和RS485总线监测仪实时捕获总线数据,监测结果表明,总线上发送和接收的数据正确,气阀和密度电机准确地按指令动作,编织动作正常,系统运行稳定可靠。

6 结束语

双总线架构圆纬机编织机构单元通过CAN总线和RS485总线,以总线多节点的方式传输数据,保证了各个模块间通讯的稳定性和可靠性。以双总线多节点方式进行各个控制单元间的数据通信,相对于单一总线而言,双总线中每一总线的节点数量减少,减短了传输线的长度,降低了总线负载,提高了通讯速度,进而提高整个系统的实时性和抗干扰能力。

现场调试证明,圆纬机编织机构可以准确快速地接收数据,完成编织过程,满足圆纬机控制系统高实时性、高稳定性和高可靠性的要求。

参考文献(References):

- [1] 汤文宏. 2010中国国际纺织机械展览会暨ITMA亚洲展览会针织机械述评[J]. 针织工业, 2010(8): 1-8.
- [2] 孙磊, 李平舟. 智能测控系统中的RS485总线和CAN总线[J]. 电子科技, 2009, 22(9): 46-48.
- [3] 杜洪亮, 张培仁, 王亮, 等. CAN总线远程传输可靠性的设计方法和实现[J]. 电子技术, 2009(3): 1-3.
- [4] 李乐, 郑宾, 秦建斌. 全双工RS485总线发送机制的研究[J]. 中国仪器仪表, 2008(2): 41-43.
- [5] 李兵. RS-485总线传输系统的一些关键技术[J]. 湖南第一师范学报, 2004, 4(4): 104-115.
- [6] 袁远, 李红信. CAN网络实时性分析及改进[J]. 电子设计工程, 2010, 18(6): 110-112.
- [7] 田静, 黄亚楼, 王立文, 等. CAN总线固定优先级调度算法的应用[J]. 计算机工程, 2006, 32(23): 94-96.
- [8] TINDELL K, BURNS A, WELLINGS A. Calculating controller area network (CAN) message response times [J]. **Real-Time Systems**, 1995, 3(8): 1163-1169.
- [9] 李佳, 朱元, 田光宇. CAN与TTCAN通信延迟时间的分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(2): 261-265.
- [10] 周建章, 赵颖. 基于RS-485主从通信协议的改进[J]. 电子质量, 2011(1): 23-25.

[编辑: 张翔]

(上接第653页)

- [6] 宋丽梅. 磁阻式电子罗盘的软件集成设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学理学院, 2007.
- [7] 李希胜, 王家鑫, 汤程, 等. 高精度磁电子罗盘研制[J]. 传感器技术学报, 2006, 19(6): 2441-2444.
- [8] 钱正洪, 白茹, 黄春奎, 等. 先进磁电子材料和器件[J]. 仪表技术与传感器, 2009(21): 96-101.
- [9] 钱正洪, 杨昌茂, 白茹, 等. 集成磁电子器件研究[J]. 计算机与数字工程, 2010, 38(9): 59-61.
- [10] 汤玉林, 李俊文, 翟光杰. 利用GMR效应的电子指南针[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(3): 342-345.
- [11] BAKER B. A Baker's Dozen: Real Analog Solutions for Digital Designers [M]. Boston: Newnes, 2005.
- [12] SILICON LABORATORIES INC.. C8051F35x Delta Sigma ADC User's Guide[Z]. LABORATORIES INC., 2005.
- [13] INTERSIL CORPORATION. Instrumentation Amplifier Application Note[Z]. INTERSIL CORPORATION, 2009.
- [14] 经纬, 魏丽丽, 王力. PCB地平面的分割[J]. 印制电路信息, 2007, 3: 39-43.
- [15] 任建峰. 电子设备PCB组件的动态特性研究[J]. 机电工程技术, 2010, 39(2): 101-105.
- [16] LI Xi-sheng, KANG Rui-qing, SHU Xiong-ying. Tilt-Induced-Error Compensation for 2-Axis Magnetic Compass with 2-Axis Accelerometer [C]//World Congress on Computer Science and Information Engineering. Los Angeles/ Anaheim: [s.n.], 2009: 122-125.
- [17] FANG Jian-cheng, SUN Hong-wei, CAO Juan-juan. A Novel Calibration Method of Magnetic Compass Based on Ellipsoid Fitting[J]. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2011, 60(6): 2053-2061.

[编辑: 李辉]