

文章编号 1004-924X(2013)10-2566-08

# 悬浮转子式微陀螺的反电动势转速检测

翁 睿<sup>1</sup>, 张海峰<sup>1\*</sup>, 刘晓为<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**根据液浮转子式微陀螺闭环驱动系统对转子转速测量的需求,提出了一种适用于悬浮转子式微陀螺的反电动势转速检测方法。根据楞次定律,永磁转子在附有检测线圈的定子中转动时,会切割磁感线感应出反电动势。对反电动势信号进行分析,即可测得转子的转速。由于检测线圈与驱动线圈共用定子铁芯,这种检测方法在降低定子结构复杂度的同时,也引入了矩形波驱动信号带来的毛刺干扰。干扰信号经过模拟低通滤波器衰减后,通过模数转换器转换为数字信号。该信号通过单片机上运行的过零检测算法处理后,即可得到当前转子的转速。测试结果表明,该转速检测系统在刷新率为 4 Hz、转速达到 5 000 r/min 以上时,测量值的相对误差在 0.3% 以内,其非线性误差为 0.41%,能够满足对悬浮转子式微陀螺转速进行检测的要求。

**关键词:**微陀螺;悬浮转子;转速测量;反电动势;嵌入式算法

**中图分类号:** TB934 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2566

## Back EMF speed detection of suspended rotor micro gyroscope

WENG Rui<sup>1</sup>, ZHANG Hai-feng<sup>1\*</sup>, LIU Xiao-wei<sup>1,2</sup>

(1. MEMS Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structures Manufacturing  
of the Ministry of Education, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: moonzhf@163.com

**Abstract:** On the basis of requirements of the closed-loop driving system in a liquid suspended rotor gyroscope for measurement of rotor speeds, a Back-electromotive Force (EMF) rotating speed detection method is proposed for the suspended rotor gyroscope. As induction coils work on Lenz's law, the rotating speed of rotor can be measured by detecting the back-EMF generated by a permanent magnetism (p-m) rotor. Because the detecting coil and driving coil share the same stator core, this method reduces the complexity of the stator, but also introduces a burr interference from the driving rectangular wave. The interference signal is then attenuated by an analog low-pass filter and sampled by an A/D converter. Finally, the rotating speed of rotor can be calculated automatically by using a Micro-controller Unit (MCU) and the zero crossing detection algorithm. The test results show that the relative

收稿日期: 2013-05-23; 修订日期: 2013-07-03.

基金项目: 国家重大科学研究计划资助项目 (No. 2012CB934104); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61071037); 哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目 (No. HIT.NSRIF.2014040)

error of detected value can be within 0.3%, and the nonlinear error is 0.41% when a refresh frequency is 4 Hz and the rotating speed reaches 5 000 r/min. The performance meets the requirement of rotating speed detection.

**Key words:** micro gyroscope; suspended rotor; rotating speed measurement; back Electromotive Force (EMF); embedded algorithm

## 1 引 言

非硅工艺的微机械陀螺凭借其小体积、高精度和低成本等优势,被广泛应用于航海、航空、航天和惯性制导武器等众多领域<sup>[1]</sup>。为了提高陀螺系统的性能和可靠性,SatCon 和 Tokimec 等公司都选择了使用悬浮转子技术来制作微陀螺<sup>[2]</sup>。对于悬浮转子式微陀螺,转速的稳定性对系统性能有着显著的影响。为了实现陀螺转子的闭环驱动,驱动系统必须能够实时检测转子的转速。

目前常见的基于 MEMS 工艺的转子式微陀螺主要采用电容检测和电感检测的方法,如日本 Tokimec 公司 2002 年研制的环形转子式微陀螺,是通过差动电容来实现转速检测的<sup>[3]</sup>;电子科技大学 2007 年研制的磁悬浮转子式微陀螺采用了电感检测的方法来确定转子的转速<sup>[4]</sup>。采用微马达驱动的转子式陀螺的转速检测手段较多<sup>[5]</sup>,如中北大学与北京航空航天大学共同提出的利用磁阻传感器检测转速的方法<sup>[6]</sup>和长春光机所提出的利用光脉冲频率差检测转速的方法<sup>[7]</sup>等。这些检测方法有的检测算法较为复杂,需要更强的处理器作支撑;有的需要在腔体侧壁或转子上制作相应的敏感结构,加工工艺较为复杂,且不利于在转子表面生成纳米超疏结构。

本文针对液浮转子微陀螺的实际情况,提出了一种基于反电动势的转速检测方法,其具有结构简单、线性度高、稳定可靠的优点。采用固定在定子上的检测线圈来收集转子旋转所产生的交变磁场信号,并转换为电信号。通过模拟电路滤波、整形,再经过 A/D 转换器转换为数字型号,数字信号进入单片机,通过软件施密特触发算法,计算出转子的转速值。该方法不需要改变定子的结构,且检测线圈可以与驱动线圈共用定子铁芯,只需对定子结构进行轻微改动,就能够同时获得理

想的检测精度、快速的响应时间和高可靠性。

## 2 液浮陀螺的结构和工作原理

### 2.1 液浮转子式微陀螺的结构

液浮转子式微陀螺的驱动系统结构如图 1 所示,其由机械结构、驱动功率级组件、反电动势信号整形滤波电路、A/D 转换器、单片机(Micro-Controller Unit, MCU)和其他周边设备构成。机械结构部分由转子、腔体、定子铁芯和驱动与检测线圈等部分构成;驱动功率级部分由集成化 H 桥芯片构成;反电动势信号整形滤波电路由二阶无源 RC 滤波器构成;A/D 转换器和单片机部分直接采用内置高速 A/D 转换器的 STC12C5A60S2 增强型单片机。

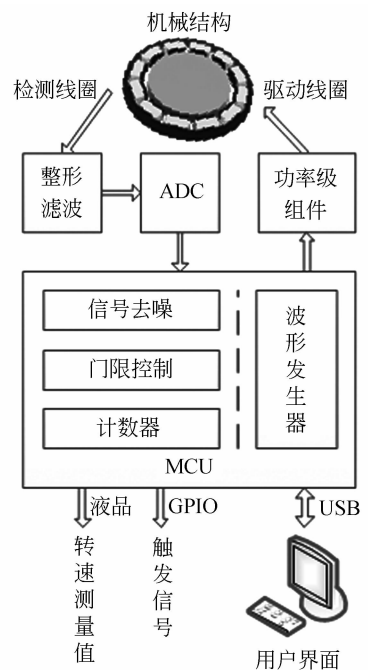


图 1 液浮转子式陀螺的驱动系统

Fig. 1 Driving system of liquid-suspended rotor gyroscope

整套液浮转子式微陀螺的驱动和检测系统是一个以增强型单片机为核心的嵌入式系统,能够大大提高陀螺控制系统的灵活性和可操控性<sup>[8-10]</sup>。该系统不但可以驱动液浮转子式微陀螺,还可以通过液晶显示屏和计算机上运行的上位机程序实时显示当前的转速信息。同时,还可以通过上位机程序的操作界面来方便的对液浮转子式微陀螺系统进行控制。

液浮转子式微陀螺的机械结构如图 2 所示。包括中空永磁转子、充满浮液的密闭腔体、带有电容检测电极的腔体上下盖板、定子铁芯和线圈等。转子的密度与浮液相当,通过液浮技术悬浮在腔体中。液浮技术利用浮液产生的浮力来平衡转子自身的重力并提供适当的阻尼。该技术能够显著减小转子和腔体之间的摩擦阻力矩<sup>[11]</sup>。

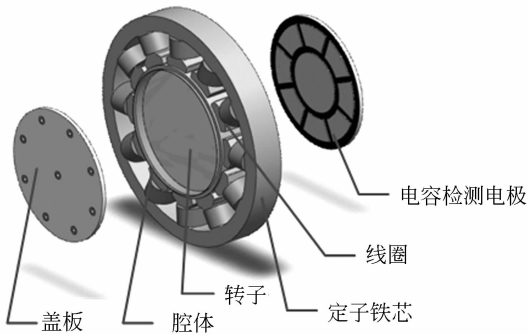


图 2 液浮转子式陀螺的机械结构

Fig. 2 Mechanical structure of liquid-suspended rotor gyroscope

由图 2 可知,液浮转子式微陀螺的定子由圆形硅钢片铁芯和铁芯上均匀分布的 12 组线圈构成。这 12 组线圈均包含驱动线圈,而其中有两组沿直径方向相对线圈同时包含驱动线圈和反电动势检测线圈。在本系统中,铁芯不但起到传导磁场的作用,同时也作为支架支撑着中间的腔体。

## 2.2 反电动势转速检测的原理

当驱动线圈被驱动信号激励时,会将逐拍旋转的驱动电流转化为旋转的驱动磁场,带动中空永磁转子在腔体中旋转。与此同时,高速旋转的永磁转子也会在检测线圈中产生旋转的磁场。根据楞次定律,穿过线圈内部的变化磁场会在线圈中产生感生反电动势,感生反电动势在线圈中产

生的附加磁场沿阻碍原磁场发生变化的方向<sup>[12-13]</sup>。由此可见,反电动势信号的幅度主要与永磁转子的转动角速度有关,当永磁转子的转动角速度达到一定值时,即可通过检测反电动势信号的过零点对转子的实时转速进行测量。

采用 6 相 12 线圈结构,各组线圈的排列顺序和相互之间的连接关系如图 3 所示。其中,每一对直径两侧的驱动线圈均为反向串联,构成 6 相驱动线圈,记为图中标注的 A、B、C、D、E、F 6 相。反电动势检测线圈与 A 相驱动线圈共用定子铁芯,不需要修改定子结构,也不需要改变驱动线圈的位置,可以最大限度地保持整个定子结构的对称性。

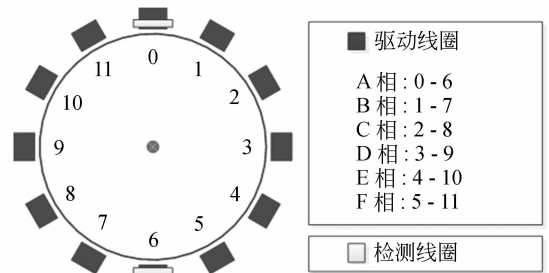


图 3 定子线圈的连接关系示意图

Fig. 3 Connection among the stator coils

当永磁转子以角速度  $\omega$  转动时,其在反电动势检测线圈中产生的磁感应强度  $B$  的瞬时值为:

$$B = B_m \cdot \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

其中:  $B_m$  是磁感应强度的最大值,即转子磁极正对 A 相线圈的情况;  $\omega$  是转子转动的角速度;  $\varphi$  是转子转动时的初始相位。

根据法拉第电磁感应定律,当穿过线圈截面的磁通量发生变化时,线圈两端产生的感生电势为:

$$E = N \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta t}, \quad (2)$$

其中:  $N$  为线圈的匝数,  $\frac{\Delta \phi}{\Delta t}$  为通过线圈截面的磁通量变化率。

式(2)中的  $\phi$  可以表示为线圈内部的磁感应强度和线圈截面积的外积,即:

$$\phi = B \times S, \quad (3)$$

其中: $S$  是线圈的截面积。

将式(3)代入式(2),可以得到:

$$E = N \cdot \frac{\Delta(B \times S)}{\Delta t} = N \cdot \frac{S \times \Delta B + B \times \Delta S}{\Delta t} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,由于磁通量  $\phi$  可以拆分成  $S \times \Delta B$  和  $B \times \Delta S$  两部分,感应电动势也同样可以分为如下两个部分:

(1) 变生电动势:由式(4)中含  $S \times \Delta B$  的一项来表示,描述的是线圈大小不变,而磁感应强度发生改变而产生的感应电动势。本系统中需要检测的就是这一类感应电动势。

(2) 动生电动势:由式(4)中含  $B \times \Delta S$  的一项来表示,描述的是磁感应强度不变,而线圈截面积发生变化而产生的感应电动势。由于线圈的大小是固定的,  $\Delta S = 0$ , 故这一部分是不存在的。

于是,式(4)可简化为:

$$E = N \cdot \frac{S \times \Delta B}{\Delta t} = NS \times \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (5)$$

将式(1)代入式(5),可以得到:

$$E = NS \cdot \frac{\Delta[B_m \cdot \cos(\omega t + \varphi)]}{\Delta t} = -NSB_m \omega \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

由于线圈匝数  $N$ 、线圈截面积  $S$  和转子在反电动势检测线圈中所能产生的最大磁感应强度  $B_m$  均为定值,可以予以合并。于是定义一个比例常数  $k = -NSB_m$ , 则式(6)可以进一步简化为:

$$E = k\omega \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,要测量永磁转子的转速,可以通过检测其产生的反电动势信号的幅度或周期来实现。由于系统存在驱动信号的干扰,小信号幅度检测的误差较大,故采用检测反电动势信号的周期来实现转速检测。

### 2.3 反电动势信号整形和转速判决算法

反电动势整形工作由嵌入式软件算法实现,这部分的输入输出波形如图 4 所示。

反电动势检测线圈与 A 相驱动线圈共用铁芯,在 A 相驱动线圈中电流的跳变点处,会有严重的毛刺干扰。从图 4 中可以看出,反电动势检测线圈检测到的反电动势信号经过 RC 低通滤波网络后,仍然有相当明显的毛刺现象。通过一种带滞回特性的嵌入式过零检测算法,很好的解决了从带严重毛刺的低频信号中提取基波周期的问

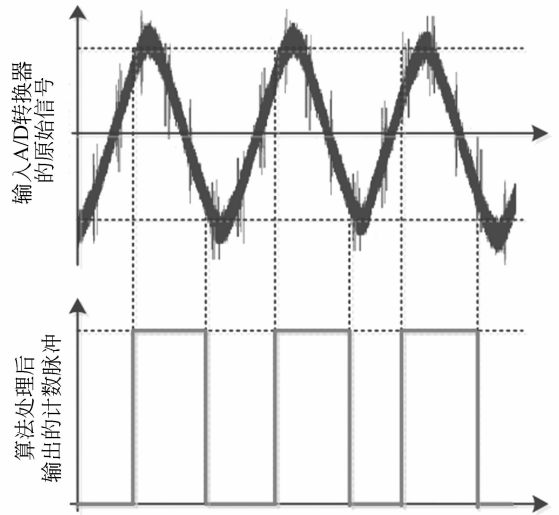


图 4 反电动势信号的整形

Fig. 4 Shaping of back-EMF signal

题。从图 1 中可以看出,单片机中对反电动势检测信号进行处理的环节包括信号去噪、门限检测和计数器等 3 个部分。经过 RC 滤波器的反电动势检测信号进入单片机的 A/D 转换器转换为数字信号。信号去噪环节采用均值滤波的方法进一步削弱毛刺和其他随机噪声。由于单片机的 A/D 转换器采样频率高达 300 kHz, 而反电动势转速检测信号频率在 200 Hz 以下, 故均值滤波不会影响采样精度。门限检测算法用于从带有干扰的信号中恢复出过零点信号。从图 4 可以看出, A/D 转换器采集到的数字信号与上下两个门限值进行比较, 并控制计数脉冲的边沿。由于使用了具有滞回特性的算法, 配合较高的检测阈值, 可以过滤掉原始信号中几乎全部的毛刺, 得到规整的计数脉冲。虽然该计数脉冲与输入信号实际的过零点位置有一定的延时, 但脉冲频率与输入信号完全一致, 可以满足转速检测的需求。计数器用于统计计数周期  $\Delta T$  时间内, 输入信号过零点的个数, 统计完成后, 通过如下公式求得当前转速:

$$R_{cnt} = 60 \times \frac{n_{cnt}}{\Delta T} \quad (8)$$

其中:  $R_{cnt}$  表示转速测量值,  $n_{cnt}$  表示计数周期内的计数脉冲个数。

检测到的转速信号可以直接从驱动系统的液晶屏上显示, 也可以通过 USB 电缆传输到计算机的上位机软件上, 并可以记录转速的变化过程, 供后续的数据分析时使用。

### 3 系统的测试和结果分析

陀螺驱动和检测系统如图 5 所示。整个系统由永磁转子、定子铁芯、驱动线圈、反电动势检测线圈和相关的控制电路构成。其中定子铁芯直径为 16.5 mm, 转子直径为 15 mm, 腔体壁厚为 0.4 mm。测试时, 在系统中加入数显光电转速计检测转子的实际转速, 并通过示波器观察滤波处理后的反电动势检测信号。

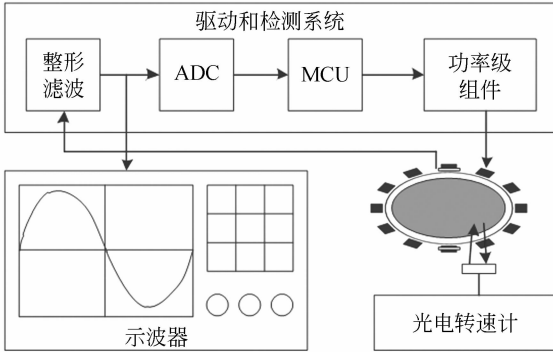


图 5 陀螺驱动和检测系统框图

Fig. 5 Block chart of gyro driving and detecting system

测试前, 首先通过 Ansoft 软件对反电动势波形进行数值仿真<sup>[14]</sup>。结果显示, 反电动势检测线圈输出信号为正弦信号, 其幅度随着转速的增大而线性增大。当转子的转速为  $6\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 反电动势检测信号的峰峰值约为 66 mV。可见转速的提高既有利于反电动势信号的采集和检测, 又有利于陀螺本体对哥氏力的检测。

测试时通过上位机软件设定转速为  $1\,000\sim 8\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 记录不同转速下的反电动势信号幅度和转速测量值, 测试结果分别如图 6、图 7 和表 1 所示。

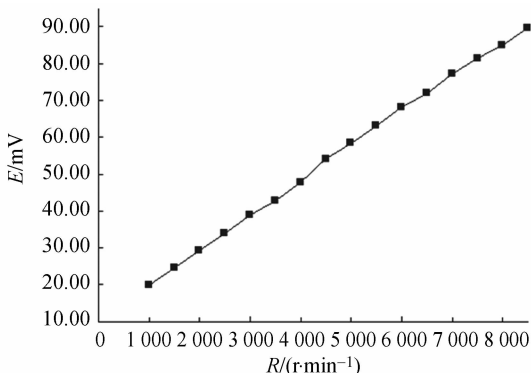


图 6 反电动势检测信号幅度与转速的关系

Fig. 6 Amplitude of back-EMF signal vs rotating speed

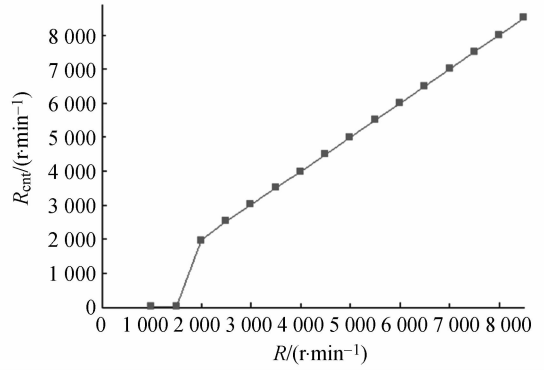


图 7 转速测量值与实际转速的关系

Fig. 7 Measured rotating speed vs real rotating speed

从图 6 中可以看出, 反电动势信号的幅值与转速成正比, 当转速达到  $2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  以上时, 反电动势信号幅度即可达到 30 mV 左右, 满足信号采集电路对信号幅度的要求。此时, 转速检测系统进入正常工作状态, 通过分析反电动势信号的波形来获得较为准确的转速值。

从表 1 中可以看出, 当转速很低的时候, 由于反电动势信号微弱, 无法达到检测程序中设定的门限, 故转速测量值很小, 如表中的前两项数据。随着设定转速的提高, 反电动势信号的幅度和频率也随之提高。当信号幅值达到检测程序的门限时, MCU 中的信号整形和判决算法即可发挥作用, 输出的转速值可反应实际转速的变化。

舍弃前两次由于转速过低而得到的错误测量结果, 对其余的测量结果进一步分析。可以看出, 在较低转速时的测量结果偏差较大, 这是由于反电动势信号幅值较低, 易受驱动信号干扰的缘故。当转速逐渐提高时, 转速误差的绝对值随之减小。同时, 转速值的提高进一步加速了相对误差的减小过程。

本系统的刷新频率设定为 4 Hz, 对转速值测量的分辨率为  $15\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。当转速为  $6\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 反电动势检测线圈输出的信号约为 65 mV, 与仿真值 66 mV 相符。从下位机液晶屏和上位机显示都可以看到, 转速的测量值是  $5\,985\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 测量值相对误差仅为  $-0.25\%$ 。舍去无意义的前两次测量结果后, 其余测量数据的线性度为:

$$\delta = \frac{\Delta Y_{\text{max}}}{Y} \times 100\% = \frac{35}{8\,500} \times 100\% = 0.41\% \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 当转速达到  $2\,000\text{ r}\cdot$

$\text{min}^{-1}$ 以上时,系统的测量精度和线性度非常好,能够满足整套系统对转速测量精度的要求。

为了进一步改善反电动势转速检测系统的性能,后续可以采取以下措施对系统进行优化:(1)

优化检测线圈的结构,提高输出信号的信噪比;(2)寻找更好的轻量级数字信号处理算法,在保证系统实时性的前提下,提高信号整形和判决过程的灵敏度和可靠性。

表1 反电动势检测系统测试结果

Tab.1 Test results of back-EMF detection system

测量次数	设定转速 $R/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	反电动势信号频率 $f/\text{Hz}$	反电动势信号幅度 $E/\text{mV}$	转速测量值 $R_{\text{cm}}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	转速误差 $/( \text{r} \cdot \text{min}^{-1} )$	转速相对误差 $\%$
1	1 000	16.8	19.88	15	-985	-98.50
2	1 500	25.0	24.54	15	-1485	-99.00
3	2 000	33.2	29.31	1 965	-35	-1.75
4	2 500	41.8	33.94	2 520	20	0.80
5	3 000	50.0	38.91	3 015	15	0.50
6	3 500	58.4	42.77	3 510	10	0.29
7	4 000	66.6	47.82	3 990	-10	-0.25
8	4 500	74.8	54.20	4 515	15	0.33
9	5 000	83.2	58.36	4 995	-5	-0.10
10	5 500	91.8	63.13	5 505	5	0.09
11	6 000	100.2	68.21	5 985	-15	-0.25
12	6 500	108.2	71.89	6 495	-5	-0.08
13	7 000	116.8	77.22	7 005	5	0.07
14	7 500	125.0	81.48	7 500	0	0.00
15	8 000	133.4	85.04	7 995	-5	-0.06
16	8 500	141.6	89.74	8 505	5	0.06

## 4 结 论

本文根据液浮转子式微陀螺闭环驱动系统对转子转速测量的需求,提出了一种利用永磁转子旋转产生的反电动势来检测转速的方法,并以带有滞回特性的过零检测算法为基础,设计了一套

基于反电动势原理的转速检测系统。该系统具有机械结构简单,测量结果稳定,线性度高等特点。

测试结果表明,当刷新频率为4 Hz,转子的转速为 $5\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上时,测量结果的相对误差可以控制在 $\pm 0.3\%$ 以内,测量结果线性度为 $0.41\%$ ,能够满足液浮转子式微陀螺对转速检测的要求,并为今后相关领域的研究提供一定的参考。

## 参考文献:

- [1] 关冉,张卫平,陈文元,等. 石英微机械陀螺的研究进展[J]. 微纳电子技术,2012,49(3): 174-180.  
GUAN R, ZHANG W P, CHEN W Y, *et al.*. Research development of quartz micromachined gyroscope [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2012, 49(3):174-180. (in Chinese)
- [2] 张卫平,陈文元,赵小林,等. 悬浮转子式微陀螺技术关键、创新设计和最新进展[J]. 功能材料与器件

学报,2008,14(3): 721-728.

ZHANG W P, CHEN W Y, ZHAO X L, *et al.*. Key technology, innovation design and current development of micro gyroscope with levitation rotor [J]. *Journal of functional materials and devices*, 2008,14(3): 721-728. (in Chinese)

- [3] 崔峰,苏宇锋,张卫平,等. 经典悬浮转子微陀螺及其关键技术[J]. 中国惯性技术学报,2005,13(6): 61-67.

CUI F, SU Y F, ZHANG W P, *et al.*. Micro gy-

- roscope based on electrostatically levitated rotor and its key techniques [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2005, 13(6): 61-67. (in Chinese)
- [4] 戴玉琴. 磁悬浮微陀螺的设计及驱动软件研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.  
DAI Y Q. *The Research of Magnetic Suspension Gyroscope Design and Driving Software* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [5] 胡少轶. 无刷直流电机无位置传感器控制系统研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2012.  
HU SH Y. *The Research of Sensorless Brushless DC Motor System* [D]. Dalian: Dalian maritime university, 2012. (in Chinese)
- [6] 王常江, 李锦明, 马游春. 一种磁阻传感器转速测量系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2013, 21(2): 327-329.  
WANG CH J, LI J M, MA Y CH. A rotational speed measurement system design based on magneto-resistive sensor [J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(2): 327-329. (in Chinese)
- [7] 郭文龙. 基于频率差法的低转速测量系统的研究与设计 [D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2011.  
GUO W L. *Study and Design of the Rotational Speed Measurement System Based on Difference of the Frequency* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2011. (in Chinese)
- [8] 林育生, 吴永明, 杨国忠. 嵌入式系统技术在舰船导航设备中的应用 [J]. *舰船电子工程*, 2013, 33(1): 68-75.  
LIN Y SH, WU Y M, YANG G ZH. Application of embedded system technology on shipboard navigation equipments [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2013, 33(1): 68-75. (in Chinese)
- [9] 马建设, 李合银, 程雪岷, 等. 嵌入式自动聚焦摄像模组控制系统的设计 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2222-2228.  
MA J SH, LI H Y, CHENG X M, *et al.*. Control system for embedded auto-focusing camera module [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 222-2228. (in Chinese)
- [10] 林嵩. 多路电机控制系统的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.  
LIN S. *Design of Multipath Motor Controlling System* [D]. Chengdu: University of electronic science and technology of China, 2011. (in Chinese)
- [11] 黄业绪. 高精度液浮陀螺系统的设计研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.  
HUANG Y X. *High Precision Liquid Floating Gyro System Design Research* [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)
- [12] 王丽华. ANSYS 软件在永磁同步发电机电磁场分析中的应用 [J]. *计量与测试技术*, 2012, 39(8): 39-40.  
WANG L H. Application of the software ANSYS in electromagnetic field analysis of permanent magnet synchronous generator [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2012, 39(8): 39-40. (in Chinese)
- [13] 孙韶春, 石庚辰. 旋转式微发电机的设计与制造 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1306-1312.  
SUN S CH, SHI G CH. Design and fabrication of micro rotational generators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1306-1312. (in Chinese)
- [14] 李周清. 基于 Ansoft 的永磁同步电机建模与仿真 [J]. *机电工程技术*, 2012, 41(4): 35-39.  
LI ZH Q. Modeling and simulation of permanent-magnet synchronous motor based on ansoft [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2012, 41(4): 35-39. (in Chinese)

## 作者简介:



翁 睿(1986—),男,黑龙江大庆人,博士研究生,2009年、2011年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微纳惯性器件和无线传感器网络方面的研究。E-mail: hit00@126.com



张海峰(1978—),男,新疆沙湾人,博士后,讲师,2005年于空军工程大学获得硕士学位,2009年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微纳惯性器件、无线传感器网络和微流控芯片方面的研究。E-mail: moonzhf@163.com

## 导师简介:



刘晓为(1955—)男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1982年、1988年、2003年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事 ASIC 接口电路、MEMS 传感器、微能源、生物芯片和无线传感器网络技术方面的研究。E-mail: lxw@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)