

文章编号 1004-924X(2011)03-0635-06

硅微机械陀螺自激驱动数字化技术

夏国明, 杨波, 王寿荣

(东南大学微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要: 为了进一步增强硅微机械陀螺仪驱动模态的控制精度与稳定性, 提出了一种基于自激振荡原理, 以现场可编程门阵列(FPGA)为主要数字信号处理平台的驱动电路。以陀螺仪驱动模态特性为出发点, 分析了自激振荡原理对驱动电路的要求。分析并建立了驱动相位控制与驱动幅度控制模型, 实现了频率测量-补偿算法控制驱动环路相位, PID控制算法控制环路幅度。实验结果表明, 常温下驱动幅度控制精度达到 1.5×10^{-5} , 并且能跟踪驱动模态谐振频率。由于采用了数字电路使得驱动幅度温度系数由原来模拟电路方案的 $7.69 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 降低到 $1.183 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。相比传统模拟电路控制方案, 本方案具有驱动精度高, 温度适应性好的优点。

关键词: 硅微机械陀螺; 自激驱动; 闭环控制; 数字化电路; 现场可编程门阵列

中图分类号: U666.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111903.0635

Digital self-oscillation driving technology for silicon micro machined gyroscopes

XIA Guo-ming, YANG Bo, WANG Shou-rong

(Key Laboratory of Micro Inertial Sensors and Advanced Navigation Technology, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To further improve the performance and stability of the primary mode for a Silicon Micro Machined gyroscope, a new driving circuit based on the self-oscillation principle and controlled by Field Programming Gate Array(FPGA) digital signal processing was proposed. Based on the characters of the digital signal processing and the principle of self-oscillation, the models for the loop phase control and oscillation amplitude control were designed and analyzed, then the control methods in which the loop phase was controlled by 'frequency measure and adjust program' and the signal amplitude was controlled by 'PID control program' were presented. Experimental results indicate that the precision of the oscillation amplitude is up to 1.5×10^{-5} , and the driving frequency can follow the change of the primary mode resonant frequency. In addition, by introducing the digital signal control system, the thermal sensitivity of oscillation amplitude has improved from $7.69 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ to $1.183 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Compared with an analog circuit, this system has more precision amplitude and better temperature adaptation.

Key words: silicon micro machined gyroscope; self-oscillation driving; closed loop control; digital circuit; Field Programming Gate Array(FPGA)

收稿日期: 2010-03-12; 修订日期: 2010-05-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60974116); 航空科学基金资助项目(No. 20090869007); 新教师基金资助项目(No. 200802861063); 船舶工业国防预研基金资助项目(No. 6922001045)

1 引言

硅微机械陀螺仪具有体积小、重量轻、成本低、易于批量生产等突出优点,已成为目前该领域的重要研究方向^[1]。近年来,随着研究不断深入,其灵敏度和输出信号噪声水平已经得到很大提高,目前迫切需要解决的问题是如何提高性能稳定性与温度适应性。

驱动电路是硅微机械陀螺仪重要的测控电路,它可使陀螺驱动梳齿保持稳定振动,并为检测电路提供解调参考信号。针对东南大学真空封装微机械表头,采用自激驱动原理实现闭环驱动已经有了很多研究^[2-3],但以往自激驱动电路均基于模拟电路实现,其缺点十分明显,如分立元件数量多,可靠性较差;元件参数易受温度,老化等因素影响,长期测量漂移量较多,不易使用一些先进控制算法等。近期的工作实践表明,尽可能多地采用数字电路取代模拟电路可以避免这些缺点。

目前美国 Jet Propulsion (JPL)^[4]、瑞典 IMEGO AB 公司^[5]、比利时根特大学^[6]和国内清华大学^[7]都针对各自微机械结构提出了数字化测控电路方案。其中美国 JPL 和瑞典 IMEGO AB 数字闭环驱动方案都是基于自激驱动原理,JPL 测控电路特点是测控电路可以与 PC 机相连实时提取陀螺电路中各个关键数据,有利于发现影响陀螺性能的各种因素;IMEGO AB 的特点是在模拟接口芯片上采用 sigma-delta 技术调制输出信号,使得信号不会在传输过程中有损失。比利时根特大学和清华大学的方案都是基于锁相环技术,清华大学方案中还采用了 LMSD 解调算法代替乘法器,进一步提高了信号信噪比。

东南大学研制的双线振动硅微机械陀螺表头采用真空金属封装,驱动模态品质因数(Q 值)典型值在 5 000~10 000。针对这个陀螺表头,本文提出了一种基于自激振荡原理以现场可编程门阵列(FPGA)为主要数字信号处理平台的新型数字驱动电路。

2 电路基本原理

2.1 自激振荡驱动电路原理

自激振荡驱动电路本质上是一个正反馈闭环

系统,工作原理与正弦波振荡电路类似,如图 1 所示。它没有输入信号,是一个带选频网络的正反馈放大电路^[8]。

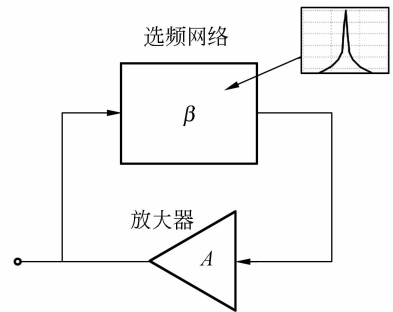


图 1 自激振荡基本原理图^[9]

Fig. 1 Block diagram of self-oscillation

自激振荡电路起振条件是选频网络选择的信号在环路中的增益大于 1,相位差为 0° 或 360° ($n \times 360^\circ, n=1,2,3, \dots$)。满足这个条件时环路中信号振幅会逐渐增大直至饱和,因此需要有自动增益控制电路(AGC 电路)来控制环路增益,当环路增益调节到等于 1 时,信号幅度保持稳定。

2.2 数字化自激振荡驱动电路实现方案

数字化自激驱动电路主要由电容/电压转换电路,放大电路和数字信号处理模块组成,如图 2 所示。数字信号处理模块主要包括模数转换器(ADC),数模转换器(DAC)和 FPGA。电容电压转换电路将驱动梳齿微小电容变化量转换成电压变化量,它与陀螺仪驱动模态微机械结构组成了对环路电压信号的选频网络。由于陀螺仪驱动模态品质因数(Q 值)很高,采用真空封装陀螺仪表头 Q 值典型值为 10 000,使得这个选频网络有很好的选频特性。放大电路将微小的驱动检测信号放大成为可供 ADC 采集的信号。FPGA 负责信

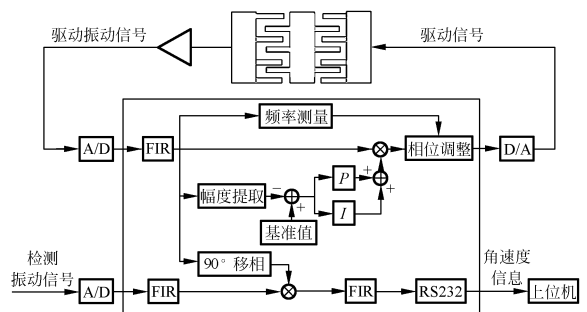


图 2 FPGA 数字控制系统结构图

Fig. 2 Block diagram for FPGA digital control system

号处理,调节反馈信号相位和增益完成对自激驱动的控制。DAC电路将FPGA输出的数字驱动信号转换成模拟驱动信号并加到陀螺驱动电极上,完成对陀螺的驱动。

2.2.1 数字驱动信号之间的关系

当陀螺处于谐振状态时,设驱动电压为 $V_d \sin(\omega t)$,那么驱动力为 $F_d \sin(\omega t)$,陀螺梳齿驱动位移为 $S_d \sin(\omega t - \pi/2)$,驱动梳齿电容变化规律为 $\Delta C \sin(\omega t - \pi/2)$ 。电容电压转换电路输出的驱动检测电压为 $A \sin(\omega t - \pi/2 + \varphi)$, φ 是电容电压转换电路产生的额外相移,它与电容电压转换电路设计有关,在本电路中,它是一个定值,约为 $6^\circ \sim 7^\circ$ 。上面提到的 V_d 正比于 F_d ; S_d 正比于 ΔC 与检测电压的幅值 A ,因此通过控制驱动 A 就可以控制驱动位移。

2.2.2 驱动相位控制

当陀螺处于谐振时,输入驱动信号与输出驱动检测信号相位差是 $-90^\circ + \varphi$ 。为了保证闭环环路相位差为 $n360^\circ (n=1,2,3\cdots)$,包括ADC,DAC在内的FPGA数字信号处理系统输入输出信号相位差应为 $-270^\circ - \varphi + n360^\circ, n=1,2,3\cdots$ 。

在FPGA中相位调节是通过延时来实现的,设FPGA工作时钟频率为 clk ,最小延时时间就是 $1/\text{clk}$;对信号最小相位调节是 $(\omega/2\pi \text{clk}) \times 360^\circ$, ω 是输入信号角频率。时钟频率越高,相位调节也就越精确。

驱动检测模拟信号经ADC转换成数字信号,进行数字信号滤波等处理以及经DAC转换成模拟信号都有延时,ADC和DAC芯片内部存在FIR滤波器,FPGA中滤波器只使用了FIR滤波器,对于不同频率的输入信号与输出信号,其相位差满足线性关系^[10]。当确定FPGA以及ADC,DAC工作时钟后,数字系统对信号的延迟时间 t 是一定的。对于不同频率的模拟信号来说,FPGA数字系统对输入信号的相移可以表示成:

$$\theta = \frac{t}{1/f} \times 360^\circ = t f \times 360^\circ, \quad (1)$$

$$\alpha = 360^\circ - \theta = (1 - t f) \times 360^\circ, \quad (2)$$

式中 θ 为输入信号与输出信号相位差, t 为FPGA数字处理系统所有延时之和, f 为输入信号频率。经测量,输入频率每变化1Hz,FPGA系统对它的相移变化约 1° 。

陀螺驱动谐振频率会随温度变化而变化,实验测试表明,由 -40°C 到 $+60^\circ\text{C}$ 陀螺驱动谐振频率会变化十几个赫兹;因此在温度变化情况下FPGA相位最多变化十几个赫兹,不能满足环路相移 360° 的要求。为了补偿这个相移,需要在FPGA增加移相补偿环节。方法是通过等精度测频算法测量出驱动信号频率 f ,因为延时 t 是一个已知常值,因此可以算出因为输入信号频率变化而导致的相位变化 θ 。在数字环路中加入移相环节,调节相位 α 就可以补偿由于使用FIR滤波器造成的相位偏移,使得对不同频率的输入输出信号相位差保持不变,从而保证驱动信号与驱动检测信号具有恒定相位差。

2.2.3 驱动幅度控制模型

陀螺仪驱动梳齿动力学微分方程可以写成:

$$\ddot{x}(t) + \frac{\omega_x}{Q_x} \dot{x}(t) + \omega_x^2(t) = \frac{K_{v/F} V_d}{m_x}, \quad (3)$$

其中, ω_x 为驱动谐振角频率, Q_x 为驱动模态品质因数, $K_{v/F}$ 为力矩器系数, V_d 为驱动电压, m_x 为驱动模态等效质量。

设 $\frac{K_{v/F} V_d}{m_d} = F_d \sin(\omega_d t)$, ω_d 为驱动电压角频率,则求解微分方程得:

$$x(t) = K_1 e^{-\frac{\omega_x}{2Q_x} t} \cos(\sqrt{1-1/4Q_x^2} \omega_x t) + K_2 \sin(\omega_d t + \varphi) + K_3 e^{-\frac{\omega_x}{2Q_x} t} \sin(\sqrt{1-1/4Q_x^2} \omega_x t), \quad (4)$$

其中

$$K_1 = \frac{F_d \omega_x \omega_d / m_x Q_x}{(\omega_x^2 - \omega_d^2)^2 + \omega_x^2 \omega_d^2 / Q_x^2}, \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{F_d / m_x}{\sqrt{(\omega_x^2 - \omega_d^2)^2 + \omega_x^2 \omega_d^2 / Q_x^2}}, \quad (6)$$

$$K_3 = \frac{F_d \omega_d (\omega_x^2 / Q_x^2 + \omega_d^2 - \omega_x^2) / m_x}{\omega_x \sqrt{1-1/4Q_x^2} [(\omega_x^2 - \omega_d^2)^2 + \omega_x^2 \omega_d^2 / Q_x^2]}. \quad (7)$$

当 $\omega_d = \omega_x$ 时,陀螺处于理想谐振状态,则 $\varphi = -90^\circ, K_1 = K_2$ 。带入 $\omega_d = \omega_x = 3\,000 \times 2 \times \pi$; $Q = 10\,000$;可知 $K_1, K_2 \gg K_3$ 。

则有

$$x(t) \approx \frac{F_d Q_x}{\omega_x \omega_d m_x} (1 - e^{-\frac{\omega_x}{2Q_x} t}) \sin(\omega_x t - 90^\circ), \quad (8)$$

当施加幅度恒定,且为陀螺谐振频率的驱动力时,陀螺振动幅度为:

$$A_x = \frac{F_d Q_x}{\omega_x \omega_d m_x} (1 - e^{-\frac{\omega_x}{2Q_x} t}), \quad (9)$$

则可知陀螺幅度变化规律与一阶惯性环节阶跃响应是相同的,因此驱动幅度传递函数为:

$$G_A(s) = \frac{F_d Q_x}{\omega_x \omega_d m_x} \frac{1}{2Q_x s / \omega_x + 1} \quad (10)$$

一阶惯性环节用 PID 控制就可以达到较好效果,幅度控制原理如图 4 所示。陀螺仪振动幅度信号(注:这个信号并不是陀螺振动信号,而是振动幅度信号)经模数转换器 ADC 离散化构成数字信号,它与振动幅度给定值相比较生成 PID 控制信号,再和自身相乘,构成一个 AGC 控制环路。通过合适选取 PID 参数可以得到较好的控制效果。将表 1 参数带入图 3 中可以得到系统起振时的仿真结果,经 MATLAB 仿真显示启动到稳定时间为 1.5 s,控制超调量小于 5%。

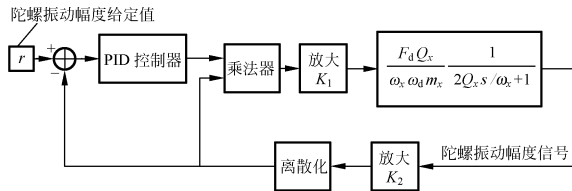


图 3 自激驱动电路幅度控制原理图

Fig. 3 Block diagram for amplitude control of self-oscillation

表 1 驱动幅度控制仿真关键参数

Tab. 1 Key parameters for amplitude control

Q_x	$\omega_x / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\omega_d / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	r / V	k_p	k_i	k_d
10 000	6 000	6 000	2.5	10	2.2	0.01

FPGA 实现这个方案时,采用了整流滤波算法提取输入信号幅度,通过 PID 控制实现了幅度控制,启动稳定时间与超调量与仿真结果保持一致。

3 实验与测试

硅微机械陀螺仪闭环驱动电路的性能指标主要从两个方面来衡量,一方面是驱动相位稳定程度,驱动相位是指驱动力与驱动位移之间的相位关系,它会直接影响陀螺仪检测模式的解调相位,进而影响陀螺零偏稳定性。驱动相位的稳定性表

现在驱动频率跟踪驱动模式谐振频率的能力,当驱动频率等于驱动模式谐振频率时这个相位等于 90° ;另一方面是保持微机械结构驱动模式振动幅度的稳定程度,主要通过对驱动检测信号幅度稳定性来进行测试;

该电路配合东南大学自主设计的真空封装表头对这两方面性能进行了 $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 的变温度测试与常温测试,测试结果如下。

(1) $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 下驱动频率变化测试

如图 5 所示,驱动频率可以跟踪驱动模式谐振频率的变化,它们都与温度变化呈线性的关系。其中驱动频率随温度变化规律可拟合为:

$$f_d = 3\,736.65 - 0.126t \quad (11)$$

驱动模式谐振频率可以拟合为:

$$f_{\text{dresonat}} = 3\,736.51 - 0.123t \quad (12)$$

其中 t 为温度,单位为 $^\circ\text{C}$ 。它们之间的偏差产生原因主要是电容电压转换电路的相位会随温度而变化,具体的机理和补偿方法需要进一步深入的研究。

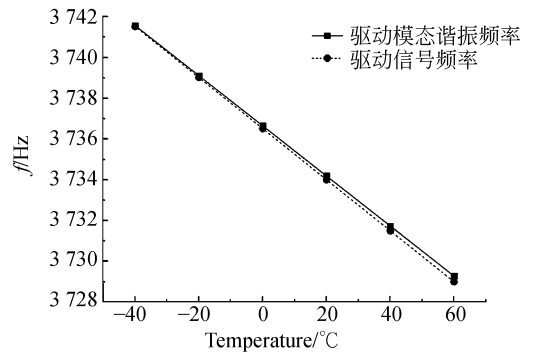


图 4 驱动信号频率与驱动模式谐振频率随温度变化曲线

Fig. 4 Changing curves of driving frequency and driving mode resonant frequency with temperature

(2) 常温下从启动到 80 min 驱动信号频率变化测试如图 5 所示,常温下启动 20 min 后驱动频率达到稳定,这是由于电路开始工作后产生的热量使陀螺微机械芯片温度升高,根据驱动模式谐振频率与温度的关系可以推算出陀螺芯片温度升高约 2°C 。

(3) $-40 \sim +60^\circ\text{C}$ 下驱动检测信号测试及其与模拟控制电路驱动检测信号对比。

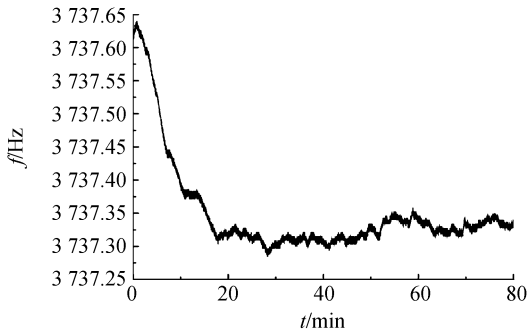


图5 从启动到80 min陀螺驱动信号频率漂移曲线

Fig. 5 Driving frequency drift from start up to 80 min

如图6所示,在 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变温条件下,数字化电路驱动幅度变化也远小于传统模拟电路的变化,由模拟电路方案的 $7.69\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 降低到 $1.183\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。

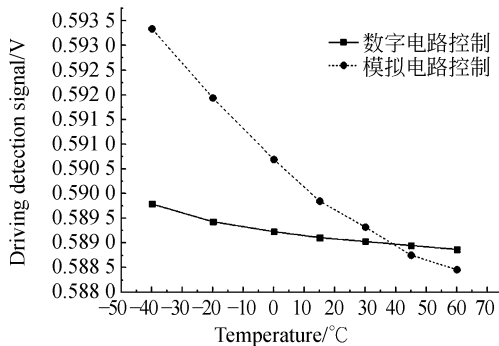


图6 数字和模拟方式控制的幅度随温度变化曲线

Fig. 6 Comparison of digital and analog controls in different temperatures

(4) 常温下驱动检测信号稳定性测试

如图7所示,驱动检测电压从启动开始就保持稳定,驱动幅度控制精度达到 1.5×10^{-5} 。

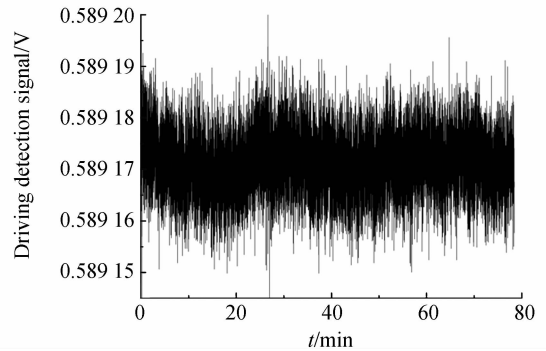


图7 从启动到80 min陀螺驱动信号幅度漂移曲线

Fig. 7 Driving amplitude drift from start up to 80 min

4 结 论

本文提出了一种基于自激振荡原理,以FPGA数字信号处理实现控制的驱动电路,实验证明该数字驱动电路取得了较好的驱动效果。驱动频率能跟踪谐振频率的变化,常温幅度控制精度达到 1.5×10^{-5} ,并且在 $-40\sim+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,驱动幅度温度系数由原来的 $7.69\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 降低到 $1.183\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。另外FPGA的高度集成性可以使得陀螺整个测控电路的平台通过软件方式得到整合,进一步提高了系统集成度,缩小了电路体积、提高了可靠性。未来通过对陀螺表头进一步研究,可以在现有平台上设计出更好的控制方式,使得硅微机械陀螺性能得到更大提高。

measurement and control technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2007. (in Chinese)

[3] 王展飞,鲁文高,李峰,等. MEMS 振动陀螺闭环自激驱动的理论分析及数值仿真[J]. 传感技术学报, 2008, 21(8): 1337-1342.

WANG ZH F, LU W G, LI F, *et al.*. Theoretical analysis and numerical simulation of closed-loop self-oscillation system for MEMS vibratory gyroscopes [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(8): 1338-1342. (in Chinese)

[4] KEYMEULEN D, PEAY C, FOOR D, *et al.*. Control of MEMS disc resonance gyroscope using a FPGA plat-

参考文献:

[1] 刘危,解旭辉,李圣怡. 微机械惯性传感器的技术现状及展望[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 425-431.

LIU W, XIE X H, LI SH Y. Present state and perspectives of micromachined inertial sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 425-431. (in Chinese)

[2] 杨波. 硅微陀螺仪测控技术研究[D]. 南京:东南大学, 2007.

YANG B. *Research on silicon micro-gyroscope*

- form[C]. 2008 *IEEE Aerospace Conference*, 2008:1-8.
- [5] RAMAN J, CRETU E, ROMBOUTS P, *et al.*. A closed-loop digitally controlled MEMS gyroscope with unconstrained sigma-delta force-feedback[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(3):297-305.
- [6] MIKKO S. *System and circuit design for a capacitive MEMS gyroscope* [D]. Helsinki University of Technology, Faculty of Electronics, Communications and Automation, Department of Micro and Nanosciences, 2008.
- [7] 周文闻, 张嵘, 周斌, 等. 基于 SOPC 的单轴陀螺驱动环路设计[J]. *中国惯性技术学报*, 2009, 17(1): 67-70.
ZHOU W W, ZHANG R, ZHOU B. Drive loop design of single axis gyroscope based on SOPC[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, 17(1):67-70. (in Chinese)
- [8] 张琪伟. 双线振动硅微陀螺仪数字化测控技术研究[D]. 南京:东南大学, 2009.
ZHANG Q W. *Research on detecting and control technology of linear vibratory silicon micro-mechanical gyroscope* [D] Nanjing: Southeast University, 2009. (in Chinese)
- [9] 稻叶保. 振荡电路的设计与应用[M]. 北京:科学出版社, 2007.
INABA TAMOSTU. *Oscillation Circuit Design and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [10] M'CLOSKEY. Integrated low power digital gyro control electronics: United States, US6915215B2 [P]. 2005-07-05.

作者简介:



夏国明(1983—),男,河北冀州人,博士研究生,2006年于东南大学获得学士学位,主要从事硅微机械陀螺测控技术方面的研究。E-mail: xgmseu@gmail.com



杨波(1979—),男,湖北潜江人,博士,讲师,2007年于东南大学获得博士学位,主要从事微型机电系统理论及应用(微纳米技术)的研究。E-mail: yangbo20022002@163.com

导师简介:



王寿荣(1946—),男,江苏兴化人,教授,博士生导师,1970年、1982年于原南京工学院(现东南大学)分别获得学士、硕士学位,1984~1986作为访问学者赴美国康奈尔大学(Cornell University)进修,主要从事惯性技术、微机电系统、精密仪器及机械等领域的教学与科研工作。E-mail: srwang@seu.edu.cn