

文章编号 1004-924X(2015)09-2540-06

基于带通 $\Sigma\Delta$ 调制器的硅微机械陀螺力反馈闭环检测

吴志强^{1*}, 杨亮², 夏国明¹, 苏岩¹

- (1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094;
2. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北石家庄 050051)

摘要: 为了提高硅微机械陀螺(SMG)的性能, 研究了一种基于四阶机电结合带通 $\Sigma\Delta$ 调制器(SDM)的硅微机械陀螺力反馈闭环检测方法。基于谐振器级联谐振前馈(CRFF)结构设计了该方法的仿真模型, 并利用商用软件 SD TOOLS 计算了环路参数。采用 MATLAB/SIMULINK 对设计结果进行了行为级仿真, 结果表明, 1 Hz 条件下环路的信噪比达到了 109.2 dB, 符合设计预期。在此基础上, 以现场可编程门阵列(FPGA)为数字处理核心搭建了硅微机械陀螺数字化测控电路并进行了性能测试。结果表明, 采用带通 SDM 闭环检测技术和数字化闭环驱动技术后, 硅微机械陀螺的 Allan 方差零偏不稳定性约为 $1.15(^{\circ})/h$, 角度随机游走约为 $7.74 \times 10^{-2} (^{\circ})/\sqrt{h}$, 且信噪比参数满足了设计目标。得到的结果证明了设计方法的正确性; 显示提出的带通 SDM 力反馈闭环检测方法有助于提高 SMG 的性能, 拓展其应用领域。

关键词: 硅微机械陀螺; 力反馈闭环检测; Sigma Delta($\Sigma\Delta$)调制器; Allan 方差

中图分类号: U666.1; TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152309.2540

Force feedback close-loop detection of silicon micromachined gyroscope based on bandpass sigma delta modulator

Wu Zhi-qiang¹, YANG Liang², XIA Guo-ming¹, Su Yan¹

- (1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
 2. The 13th Research Institute, China Electronic Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)
- * Corresponding author, E-mail: wuzhiqiang@njust.edu.cn

Abstract: To enhance the performance of a silicon micromachined gyroscope, a force feedback close-loop detection method based on a fourth-order electromechanical bandpass Sigma Delta modulator (SDM) was researched. A simulation model was established based on Cascade Resonant Feed Forward (CRFF) structure of a resonator. Meanwhile, the loop parameters were calculated with the commercial software SD TOOLS. Then behavioral simulations were carried out with MATLAB/SIMULINK to test the results. The results suggest that the Signal to Noise Ratio(SNR) of the loop achieves 109.2 dB at the bandpass of 1 Hz, which meets the previous expectation. A force feedback close-loop detection system for the silicon micromachined gyroscope was designed by using a Field Programming Gate Array(FPGA) as the processing core, and the properties of gyroscope were tested. Experiments indicate that based on this detecting method and digital close-loop driving technology,

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-04-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61301214)

the zero bias instability of the gyroscope achieves $1.15(^{\circ})/h$, and the Angle Random Walk (ARW) is around $7.74 \times 10^{-2} (^{\circ})/\sqrt{h}$. Meanwhile, the Signal and Noise Ratio (SNR) meets the designed specifications. These results verify the validity of the detecting technique. The method is conducive to improving the performance of the SMGs and extending their application fields.

Key words: silicon micromachined gyroscope; force feedback close-loop detection; Sigma Delta (Σ - Δ) modulator; Allan variance

1 引言

Sigam Delta 调制 (SDM) 技术因其出色的噪声整形能力被广泛应用于高精度模/数转换和数/模转换等领域。1990年, Widge Henrion 首次将 SDM 应用于硅微机械加速度计的力反馈闭环检测环路中^[1], 提高了加速度传感器的零偏稳定性、线性度并使传感器具备了准数字输出的能力。由于此力反馈检测环路中由机械结构充当了部分积分器的作用, 因此被称为机电结合 SDM。1996年, Edder 和 Howe^[2] 提出机电结合低通 SDM 在硅微机械陀螺中的应用。之后的十几年里, 人们纷纷对机电结合 SDM 在硅微机械陀螺中的应用进行了更为深入的研究^[3-5], 但这些研究大多采用低通 SDM。而对于硅微机械陀螺, 虽然其基频频率通常在 kHz 以上, 但其输出信号为窄带调幅信号, 且敏感模态往往具备较高的机械品质因数, 其机械带宽通常只有几赫兹, 因此将敏感模态作为谐振器引入力反馈环路中构成带通 SDM, 将获得更好的噪声整形效果^[7-8]。另外, 根据已经成熟的 SD 模数转换理论^[9-10], 在同样的信噪比 (SNR) 要求下, 带通 SDM 可以以更低的过采样比和更低的阶数来实现。更低的过采样比意味着更低的采样频率, 从而可以降低系统的功耗; 更低的阶数意味着系统更容易设计且更稳定, 因此基于机电结合带通 SDM 的力反馈闭环检测技术是实现高性能硅微陀螺的必然选择。同时采用闭环检测方案可极大地改善硅微陀螺仪的鲁棒性, 并降低其零偏和标度因数温度系数^[21-22]。

本文以课题组自主研制的硅微机械陀螺结构为对象, 研究了基于四阶机电结合带通 SDM 的力反馈闭环检测技术。该研究借鉴传统 SD 调制器的设计经验, 首先确定了环路结构形式, 构建了仿真模型, 计算了环路参数, 最后通过仿真和实验验证了方法的正确性。

2 闭环检测方案及其仿真模型

2.1 基于 SDM 的闭环检测方案

硅微机械陀螺仪结构如图 1 所示, 由可动激励梳齿、固定激励梳齿、可动检测梳齿、固定检测梳齿、支撑梁以及基座等组成。这里针对该结构的敏感模态开展力反馈闭环检测方法的研究。

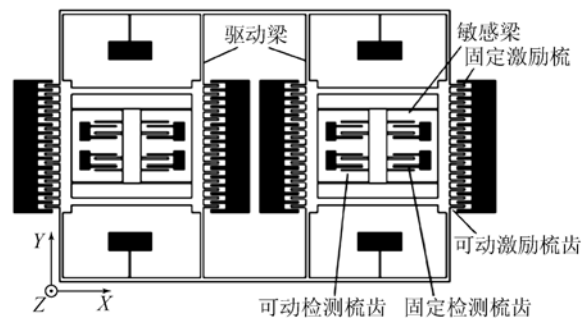


图 1 硅微陀螺结构示意图

Fig. 1 Sketch of silicon micro gyroscope

硅微机械陀螺敏感模态闭环检测最常用的电压反馈形式有两种, 分别为正弦波电压反馈形式和脉冲密度电压反馈形式。采用脉冲密度电压反馈时, 陀螺敏感模态的静电负刚度与输入角速率无关, 有利于提高闭环检测的稳定性^[15], 因此选择脉冲密度反馈形式, 其检测方案原理如图 2 所示。

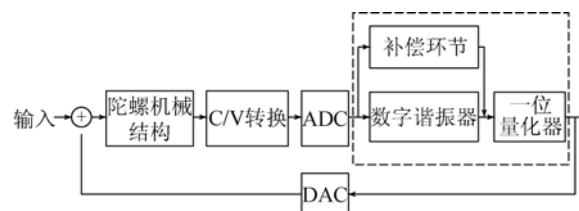


图 2 闭环检测方案原理框图

Fig. 2 Block diagram of close-loop detection system

图 2 采用模数混合离散时间 SDM 闭环检测方法,前馈通道由陀螺机械结构、SMG 的电容/电压(C/V)转换电路、模数转换器(ADC)、数字谐振器、补偿环节和 1 bit 量化器等组成。与连续时间 SDM 闭环检测方法采用电阻、电容、电感等元器件构成前馈通道中的谐振器不同,本方案可以采用可编程逻辑单元(FPGA)实现图 2 虚线框中的功能,因此对加工误差造成的陀螺结构参数差异可以进行检测电路参数的实时调整,有利于 SMG 测控电路的批量化和专用集成电路(ASIC)化。

2.2 环路结构与仿真模型

机电结合 SDM 设计的难点在于环路结构形式确定和环路参数获取,首先确定环路结构形式。SDM 的环路结构形式根据转换级数目的可以分为单环结构和级联结构^[12],因为级联 SDM 对第一级的转移函数要求比较高,对模拟和数字电路失配比较灵敏,且用于陀螺闭环检测 SDM 的阶数一般较低,所以选用单环结构。谐振器级联多路反馈(CRFB)和谐振器级联多路前馈(CRFF)

是带通 SDM 常用的两种单环结构^[13]。相对于 CRFB 结构,CRFF 结构只有 1 个反馈路径,且只反馈到最前端的信号输入端,这种结构可以方便地通过调整反馈脉冲的高电平来改变系统的动态范围。另外在具体电路设计时,与 CRFB 结构相比 CRFF 只需要 1 个高速的加法器,而 CRFB 结构由于每一级积分器都有一个反馈 DAC,不仅增加了系统的功耗而且增加了数字驱动信号的驱动负担,同时增加了系统的时延^[14]。综合考虑,CRFF 结构更易进行电路的设计,且具有更低的功耗和较高的稳定性。最终选用 CRFF 结构来实现闭环检测系统。

图 3 所示为采用 CRFF 结构设计的硅微机械陀螺力反馈闭环检测 MATLAB/SIMULINK 仿真模型。其中, k_{CV} 为 C/V 转换电路的增益, k_{VF} 为驱动电压到驱动力的转换系数,右框中为二阶电学谐振器,它与二阶的敏感模态一起构成了四阶机电结合 SDM, e_q 为 ADC 及一位量化器的量化噪声之和。

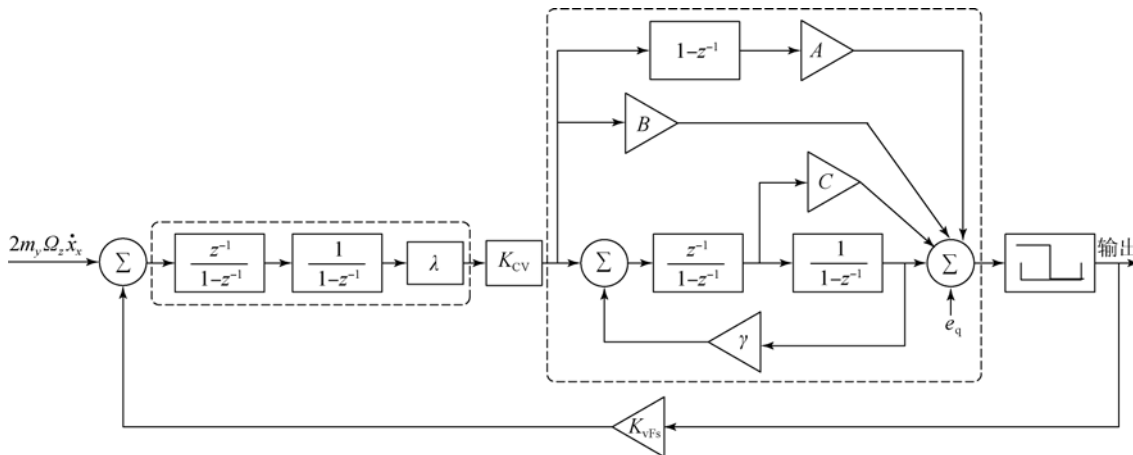


图 3 四阶机电结合带通 SDM 检测闭环仿真模型

Fig. 3 Simulation model of close-loop detection method based on 4th order electro-mechanic SDM

图 3 中,左侧虚线框内为 SMG 敏感模态的 z 域传递函数,其中 λ 与陀螺结构参数有关,对于图 1 所示结构, $\lambda=0.625$ 。图 3 所示环路的信号传

递函数(STF)和量化噪声传递函数(NTF)可以表示为:

$$STF = \frac{\lambda K_{CV} z^{-1} \{ [1 + C(1 - z^{-1}) z^{-1}] + [B + A(1 - z^{-1})] [(1 - z^{-1})^2 + rz^{-1}] \}}{(1 - z^{-1})^2 [(1 - z^{-1})^2 + rz^{-1}] + \lambda K_{CV} K_{VFs} z^{-1} \{ [1 + C(1 - z^{-1}) z^{-1}] + [B + A(1 - z^{-1})] [(1 - z^{-1})^2 + rz^{-1}] \}},$$

$$NTF = \frac{(1 - z^{-1})^2 [(1 - z^{-1})^2 + rz^{-1}]}{(1 - z^{-1})^2 [(1 - z^{-1})^2 + rz^{-1}] + \lambda K_{CV} K_{VFs} z^{-1} \{ [1 + C(1 - z^{-1}) z^{-1}] + [B + A(1 - z^{-1})] [(1 - z^{-1})^2 + rz^{-1}] \}}.$$

3 环路参数获取与结果仿真

对于图 3 所示的四阶带通 SDM,需要确定的参数主要为电学谐振器中的未知参数 A、B、C 和 γ 。尽管对带通 SDM 进行完整理论分析还存在一定的难度,但对其进行初始设计的方法已经较为成熟。目前 SDM 的设计已有商用软件 SD TOOLS^[17] 来实现,其只需要输入阶数和过采样比,就可以快速地得到环路滤波器的参数,还能快速地对所设计的 SDM 进行分析,提高了 SDM 的设计效率。

由 SD TOOLS 设计工具可知,在进行参数设计之前需要确定 SDM 所需的阶数和过采样比。以阈值 $0.002(^{\circ})/s$,量程 $\pm 200(^{\circ})/s$ 作为陀螺的设计参数,因为陀螺的输出噪声决定了其阈值,所以有:

$$SNR_{\min} = 20\log\left(\frac{200}{0.002}\right) = 100.0 \text{ dB} \quad (2)$$

考虑到实际电路中还会存在其他噪声源,预留适当的裕度以保证设计的可靠性,这里 SDM 环路信噪比设计目标确定为大于 105 dB。根据文献[12-13]的方法选择系统的过采样比为 128,相比与低通 SDM 结构,在同样阶数情况下,该方案将采样频率降低了约 4 000 倍。根据式(1)所示的环路噪声传递函数,采用 SD TOOLS 工具可以求得图 3 所示仿真模型中的未知参数,如表 1 所示。

表 1 图 3 中未知参数的计算值

Tab. 1 Results of unknown parameters in Fig. 3

参数	A	B	C	Γ
参数值	0.523 5	0.132 2	0.018 6	0.000 4

加工误差造成的陀螺结构参数的差异会反应到表 1 所示的环路参数上,本方案只需修订 FPGA 相应的参数值,有利于实现陀螺测控电路的批量化。将计算得到的参数代入环路 STF 和 NTF 的表达式,并在 MATLAB/SIMULINK 中对设计的带通 SDM 闭环进行行为级仿真。图 4 所示为 $200(^{\circ})/s$ 角速率输入时 1 bit 脉冲密度流的功率谱密度。

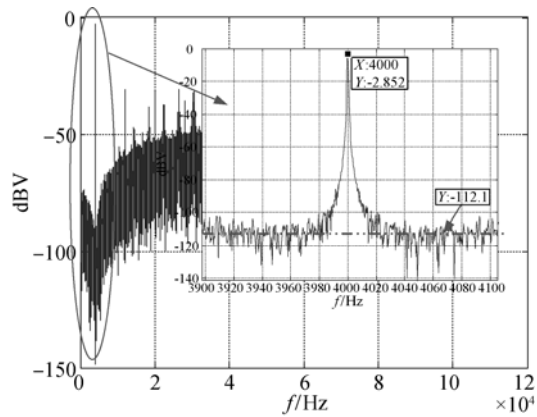


图 4 $200(^{\circ})/s$ 仿真输入时的 1 bit 反馈脉冲功率谱密度
Fig. 4 Power spectral density of 1 bit feedback pulse flow at input angular velocity of $200(^{\circ})/s$

由图 4 可以看出,当有角速度输入时,角速度信号被驱动模态的振动速度所调制,从而在驱动频率处出现了一个峰值;如图 4 中的放大图所示,1 Hz 条件下,1 bit 反馈脉冲的信噪比达到了 109.2 dB,满足设计要求,验证了参数获取方法的正确性。

4 实验验证

根据图 2 所示的原理框图,构建了以 FPGA 为核心的机电结合 SDM 检测闭环电路,并配合具有增益补偿功能的数字化驱动闭环电路^[16]和相敏解调算法等,组成了数字化硅微陀螺仪测控电路,如图 5 所示。该测控电路由两层电路板构成,上层包括硅微陀螺结构、C/V 转换电路、ADC 和 DAC 等,下层包括 FPGA 和存储器等。

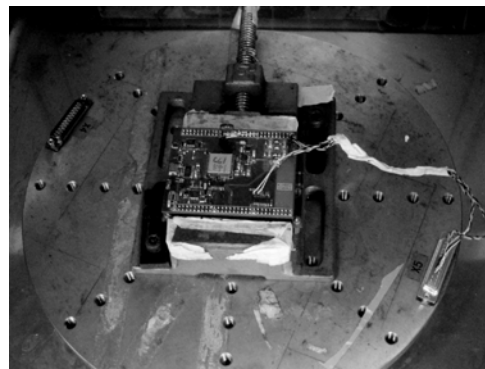


图 5 数字化硅微陀螺仪测控电路
Fig. 5 Physical diagram of digital measurement and control circuit of SMG

依据 IEEE 的硅微机械陀螺测试标准^[18]对陀螺的误差性能进行测试。如图 5 所示,将数字化陀螺测控系统固定在转台上,转台静止,以 400 Hz 的采样频率对陀螺输出进行采集,采集时间为 1 h,对采集到的信号 1 s 平均后进行 Allan 方差分析,结果如图 6 所示。

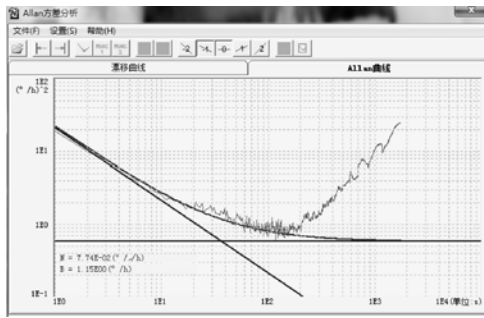


图 6 零偏 Allan 方差分析

Fig. 6 Allan variance analysis of zero bias signal

由图 6 可知,数字陀螺的零偏不稳定性达到了 $1.15(^{\circ})/h$,角度随机游走达到 $7.74 \times 10^{-2} (^{\circ})/\sqrt{h}$ 。在硅微陀螺仪中零偏不稳定性主要取决于其输出的温度漂移,出色的零偏不稳定性指标得益于闭环 SDM 检测方案降低了硅微陀螺仪的温度系数。角度随机游走主要由电路噪声和量化噪声决定^[19],根据角度随机游走可以估计噪声功率谱密度约为 $60 \times 7.74 \times 10^{-2} \approx 4.6 (^{\circ})/h \cdot \sqrt{Hz^{-1}}$ 。量程 $200(^{\circ})/s$, 1 Hz 条件下的信噪比为:

$$SNR = 20 \log \left(\frac{200 \times 3600}{4.6} \right) = 103.9 \text{ dB.} \quad (3)$$

参考文献:

- [1] HENRION W, DISANZA L, LP M, *et al.*. Wide dynamic range direct accelerometer [C]. *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, 1990. 4th Technical Digest., IEEE, 1990:153-157.
- [2] FEDDER G K, HOWE R T. Multimode digital control of a suspended polysilicon microstructure [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1996, 5(4):283-297.
- [3] PETKOV V P. *High-order sigma delta interface for micromachined inertial sensors* [D]. California: University of California, Berkeley, 2004.
- [4] OBOE R, ANTONELLO R, LASALANDRA E, *et al.*. Control of a z-axis MEMS vibrational gyroscope [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(4):364-370.
- [5] NEUL R, GOMEZ U M, KEHR K, *et al.*. Micromachined angular rate sensors for automotive applications [J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2007, 7(2):302-309.
- [6] PETKOV V P, BOSER B E. A fourth-order $\Sigma\Delta$ interface for micromachined inertial sensors [C]. *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig. Tech. Papers*, 2004:320-321.
- [7] DONG Y, KRAFT M, HEDENSTIERNA N, *et al.*. Microgyroscope control system using a high-order band-pass continuous-time sigma-delta modulator [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 145:299-305.

该值比仿真值略小,原因是仿真时仅考虑了 ADC 和 1 bit 量化器的量化噪声,忽略了部分电路噪声和表头噪声。但总的来说,采用数字化闭环驱动和闭环检测技术后,信噪比达到了 100 dB 的设计目标,且性能明显优于当前的消费类硅微机械陀螺,因此采用带通 SDM 力反馈闭环检测方法可以提高 SMG 的性能,拓展其应用领域。同时该方法可适用于所有电容式硅微陀螺仪。

5 结 论

本文针对硅微机械陀螺设计了四阶机电结合带通 SDM 闭环检测电路。围绕信噪比这一指标参数展开设计,根据陀螺阈值和量程等设计参数并预留 5% 裕度后得到 SDM 环路信噪比设计目标要大于 105 dB。采用 CRFF 结构搭建了四阶机电结合的带通 SDM 力反馈闭环检测 SIMLINK 仿真模型,并利用 SD TOOLS 计算了环路参数。行为级仿真结果表明 1 Hz 条件下,环路的信噪比达到了 109.2 dB,满足预期的设计指标。最后以 FPGA 为数字处理核心搭建了硅微陀螺数字化测控平台,并进行了性能验证。结果表明,采用数字化闭环驱动和闭环检测技术后,SMG 的信噪比为 103.9 dB,达到了设计目标要求,证明了设计方法的正确性。

- [8] NORTHEMANN T, MAURER M, ROMBACH S, *et al.*. A digital interface for gyroscopes controlling the primary and secondary mode using bandpass sigma-delta modulation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 162(2):388-393.
- [9] NORSWORTHY S R, SCHREIER R, TEMES G C. *Delta-sigma Data Converters: Theory, Design, and Simulation* [M]. New York:IEEE press, 1997.
- [10] SCHREIER R, TEMES G C. *Understanding Delta-sigma Data Converters* [M]. New Jersey:IEEE press, 2005.
- [11] DING H T, YANG Z C, WANG Z F, *et al.*. MEMS gyroscope control system using a band-pass continuous-time sigma-delta modulator[J]. *Science China Information Sciences*, 2013, 56(10):1-10.
- [12] 程剑平. 带通 $\Sigma\Delta$ 调制器的研究和设计[D]. 南京:东南大学,2006.
CHENG J P. *Study and design of bandpass sigma delta modulator* [D]. Nanjing:Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [13] 曾博. Sigma-Delta 调制器的研究和设计[D]. 成都:电子科技大学,2010.
ZENG B. *Research and design of the Sigma-Delta modulator* [D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [14] 杨亮. 硅微机械陀螺数字化测控技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
YANG L. *Research on digital measurement and control technology of silicon micro-machined gyroscope* [D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [15] 杨亮, 苏岩, 袁安萍, 等. 脉冲密度反馈对力平衡微机械陀螺的影响[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8):2087-2094.
YANG L, SU Y, QIU A P, *et al.*. Effect of pulse density feedback on force balance micro machined gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8):2087-2094. (in Chinese)
- [16] 杨亮, 苏岩, 袁安萍, 等. 具有增益补偿功能的微机械陀螺数字化驱动闭环[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1):109-116.
YANG L, SU Y, QIU A P, *et al.*. Digital drive closed-loop with gain compensation for micro-machined gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):109-116. (in Chinese)
- [17] SCHREIER R. The Delta-Sigma Toolbox 6. 0 [CP]. 2004.
- [18] GYROS V. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros. 2004.
- [19] 邹学锋, 卢新艳. 基于 Allan 方差的 MEMS 陀螺仪性能评价方法[J]. 微纳电子技术, 2010, 47(8):490-493.
ZOU X F, LU X Y. Estimate method of MEMS gyroscope performance based on Allan variance [J]. *MEMS Device & Technology*, 2010, 47(8):490-493. (in Chinese)
- [20] 赵阳, 袁安萍, 施芹, 等. 微机械陀螺检测接口建模及前置放大器优化[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7):1734-1740.
ZHAO Y, QIU A P, SHI Q, *et al.*. Modeling of sensing interface for micromachined gyroscope and its front-end optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7):1734-1740. (in Chinese)
- [21] SONMEZOGLU S, ALPER S E, AKIN T. An automatically mode-matched MEMS gyroscope with wide and tunable bandwidth [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(2):284-297.
- [22] CUI J, GUO Z, ZHAO Q, *et al.*. Force rebalance controller synthesis for a micromachined vibratory gyroscope based on sensitivity margin specifications [J]. *Journal of microelectromechanical Systems*, 2011, 20(6):1382-1394.

作者简介:



吴志强(1982—),男,山东泰安人,博士,讲师,2006年、2012年于西北工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事 MEMS 惯性传感技术、惯导系统等方面的研究。E-mail:wuzhiqiang@njjust.edu.cn



杨亮(1985—),男,河南三门峡人,博士,工程师,2008年、2014年于南京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事 MEMS 惯性传感技术研究。E-mail:memsyangliang@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)