

文章编号 1004-924X(2014)06-1500-07

硅微谐振式加速度计驱动电路参数优化

赵 健, 苏 岩, 赵 阳, 夏国明*

(南京理工大学 MEMS 惯性技术研究中心, 江苏 南京 210094)

摘要:将遗传算法与低频模型相结合,提出了一种快捷的驱动电路设计方法,用于提高低功耗硅微谐振式加速度计模拟驱动电路的瞬态性能,并缩短设计周期。该方法通过对闭环驱动电路模型进行高低频解耦,提取闭环驱动电路的低频模型;将提取的低频模型与遗传算法相结合,给出完整的优化方法,得到了满足各项实际约束的最优电路参数。针对某型硅微谐振式加速度计,建立了 SIMULINK 低频仿真模型,根据实际情况制定了约束条件。应用该方法求出了系统启动速度最快的 PI 控制器的参数,并对其进行了实验验证。起振实验结果表明,采用优化参数可使超调量小于 50%,相位误差小于 5°,1%调节时间从优化前的 0.42 s 减少到优化后的 0.19 s,实验与仿真误差小于 5%。得到的结果证明提出的方法正确有效,具有可实施性。

关键词:硅微谐振式加速度计;闭环驱动;遗传算法;非线性系统

中图分类号:TH824.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142206.1500

Parameter optimization of drive circuit in silicon resonant accelerometer

ZHAO Jian, SU Yan, ZHAO Yang, XIA Guo-ming*

(MEMS Inertial Technology Research Center, Nanjing University
of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: xiaguoming@njust.edu.cn

Abstract: A fast design method for the drive circuit was proposed by combining Genetic Algorithm (GA) with a low frequency model to improve the transient performance of analog drive circuit for a low-power Silicon Resonant Accelerometer(SRA) and to shorten its design cycle. The method decoupled the closed drive circuit model in high and low frequencies to extract a low-frequency model from drive close-loop circuits. Combined the low-frequency model with the GA, an optimization method was proposed to optimize the circuit parameters for meeting the different actual restraints. A simulation model was established in SIMULINK based on one type of micro silicon resonant accelerometer, and the optimal parameters of PI controller with a most start-up speed were obtained under constraint conditions. Finally, a start-up experiment was performed to testify the simulation results. It shows that the start-up time is shorten from previous 0.42 s to 0.19 s and the over-shoot and phase error are less than 50% and 5°, respectively. The difference between the simulation and experiment is less than 5%, which falls within the acceptable range. It proves that the optimization method is correct and effective.

Key words: silicon resonant accelerometer; closed loop driving; genetic algorithm; nonlinear system

收稿日期:2013-11-21;修订日期:2014-01-09.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA040402)

1 引 言

硅微谐振式加速度计是以微机械加工工艺为基础制作的 MEMS 惯性器件,具有量程大,分辨率高、稳定性好、体积小、重量轻等特点,且输出为频率信号,便于检测和数字化系统集成。因此许多科研机构都致力于该技术的研究。Honeywell 公司的 SA500 谐振式加速度计零偏稳定性和分辨率分别为 4mg 和 50μg。韩国首尔大学研制的基于混合微加工技术的硅微谐振式加速度计 Allan 方差下的零偏稳定性也已达到 5.2μg^[1]。

闭环驱动电路是硅微谐振式加速度计的重要组成部分,它不仅制约着加速度计的瞬态性能,而且电路中的噪声还直接影响加速度计输出频率的稳定性。目前基于数字式闭环驱动,人们提出了许多新的控制方法^[2],但由于数字式闭环驱动会带来量化噪声,同时会产生很大的功耗,因此模拟驱动电路仍然占据主要地位,在硅微振动式陀螺仪^[3]与硅微谐振式加速度计中被广泛应用。

硅微谐振式加速度计的瞬态性能决定系统的快速反应能力。由于硅微谐振式加速度计的驱动电路包含若干强弱非线性环节,且目标函数往往包含瞬态、稳态等多方面目标的组合,很难从理论上求出其最优参数。传统的做法如文献^[4-5]是对系统进行大量仿真,从中选取相对优化的参数,但这样耗费大量时间,并且无法针对已知性能指标快速地给出设计参数。这一类问题通常可以用遗传算法求出最优参数,但由于硅微谐振式加速度计选频网络具有很高的品质因数,且谐振频率很高,因此瞬态仿真的计算量非常大,遗传算法无法直接应用。本文考虑到文献^[6-9]提取的低频模型具有运算量小的特点,故将其与遗传算法相结合,提出了一种快捷的设计方法,并进行了实验验证。验证实验证明该方法正确有效,具有可实施性。

2 驱动电路低频模型

2.1 低频模型的建立

硅微谐振器闭环驱动电路的原理如图 1 所示。其中 K_{amp} 为前置放大器增益, K_{abs} 为幅值提取环节的增益。 $K_{F/V}$ 和 $K_{V/C}$ 分别为驱动和检测

接口的增益。 $H_{LPF}(s)$ 与 $H_{PI}(s)$ 分别为低通滤波器和 PI 控制器传递函数^[4]。

工作时,结构驱动方向的振动速度通过接口电容实现 V/C(电容-电压)转换,变为电压信号 V_{ds} 。由于结构本身是一个 Q 值高达 60 000 的选频网络,只有谐振频率附近极窄带宽内的信号才能通过,故 V_{ds} 可以看做是幅值缓慢变化的中频正弦信号,因此可以将其认为是由幅值和频率均固定的载波信号 V_m 和低频包络线信号 V_f 混频组成,如图 1 所示,前者保持环路 360° 的相位条件,与谐振器和前置放大器构成自激振荡环。后者与自动增益控制(AGC)环路生成控制信号 V_c ,共同维持环路幅值等于参考电压设定的常量,从而保证谐振器稳幅度振动。

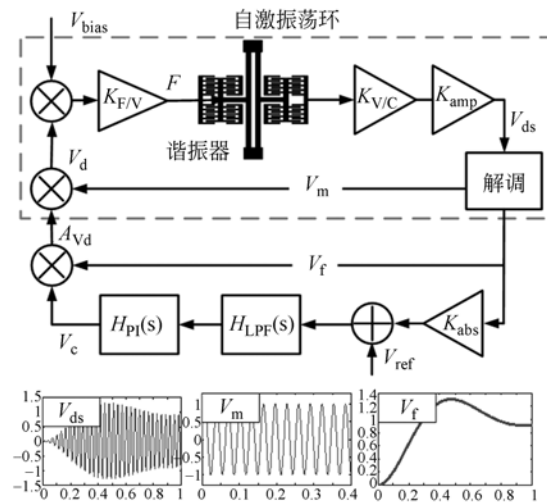


图 1 SRA 闭环驱动电路框图

Fig. 1 Block diagram of SRA close-loop drive circuit

仅关心驱动信号幅值的响应,则虚线框内的子系统可视为单输入单输出环节来进行简化^[10]。假定载波信号频率等于谐振器固有频率,输入结构的驱动力 $F(t)$ 可写为:

$$F(t) = K_{F/V} A_{Vd}(t) = K_{F/V} V_d(t) V_m \sin(\omega_0 t), \quad (1)$$

其中: V_d 为驱动电压, A_{Vd} 为驱动电压幅值, ω_0 为谐振梁工作模式的固有频率。 V_d 相对于载波是个缓慢变化的量,可近似展开为:

$$V_d(t) \approx \sum_{n=0}^l A_n \sin(n\omega_m t), \text{ 其中 } l\omega_m \ll \omega_0, \quad (2)$$

而 ω_m 为傅里叶展开的基频。由于 ω_0 为定值,可将调制后的信号 A_{Vd} 在其中心频率处展开,相应的第 n 次谐波分量为:

$$A_{Vd-n}(t) = \frac{A_n}{2} [\sin(n\omega_m t + \omega_0(t)) + \sin(n\omega_m t - \omega_0(t))]. \quad (3)$$

当微谐振器正常工作时,设计的振幅范围可以确保其近似线性振动,结构部分可以认为是一个典型的质量-刚度-阻尼二阶系统,其传递函数为:

$$H(s) = \frac{1}{k} \frac{s}{s/\omega_0^2 + s/\omega_0 Q + 1}. \quad (4)$$

将式(3)中的任意一个正弦谐波频率带入(4)中,并忽略高阶小项,可以得到该二阶系统的复数响应为:

$$H[j(n\omega_m \pm \omega_0)] = \frac{Q}{k} \frac{j\omega_0^2}{\mp 2Q(n\omega_m) + j\omega_0}. \quad (5)$$

该响应中,与谐振中心频率 ω_0 距离为 $n\omega_m$ 的谐波的增益与相移分别为:

$$G(n\omega_m) = \frac{Q\omega_0/k}{\sqrt{(2Qn\omega_m/\omega_0)^2 + 1}}, \quad (6)$$

$$\phi(n\omega_m) = \arctan(2Qn\omega_m/\omega_0). \quad (7)$$

增益和相移对于任意谐波都具有相同的表达式。因此综合式(1)、(6)和(7)可写出 A_{Vd} 到 V_f 的传递函数为:

$$V_f(s) = K_{F/V} K_{V/C} K_{amp} K_{abs} \frac{\omega_0^2}{2ks + \omega_0/2Q} A_{Vd}(s). \quad (8)$$

若只关心信号幅值变化,当被调制的驱动信号通过一个二阶系统时可近似等效为该信号的幅值通过一个一阶系统。提取的结构部分低频等效传递函数^[10]为:

$$H_{equ}(s) = \frac{\omega_0^2}{2ks + \omega_0/2Q}. \quad (9)$$

至此完成了驱动环节中频信号与低频信号的解耦,得到了系统的非线性低频模型,如图 2 所示。

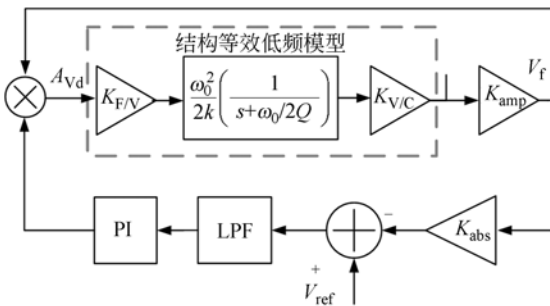


图 2 驱动电路低频模型
Fig. 2 Low-frequency model of drive circuit

2.2 参数的获取与仿真

进行闭环系统仿真前,需精确得到式(9)中等效低频模型各参数值。其中等效刚度 k 与谐振频率 ω_0 可分别通过仿真与直接测试得到。品质因数 Q 通过 Ring-Down 法^[11]测试,即通过采集系统自由振荡的振幅衰减速度来估计谐振梁的品质因数。图 3 和图 4 分别为测试用加速度计(其型号及性能参数见表 3)的单侧谐振器采用 Ring-Down 法采集到的信号衰减过程。其中,图 3 表示实际测量包含 25 kHz 载波的完整衰减信号。图 4 为提取的衰减信号幅值,拟合得到该谐振器结构的品质因数 Q 为 62 000。

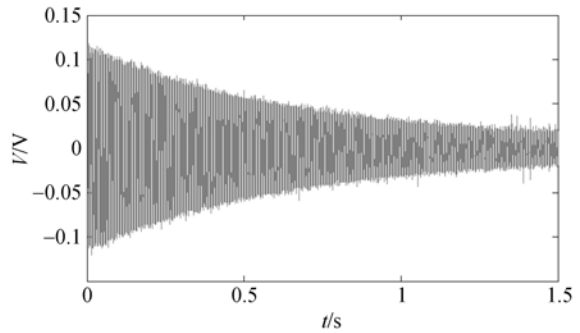


图 3 信号衰减过程的电压瞬态值
Fig. 3 Transient values during signal attenuation

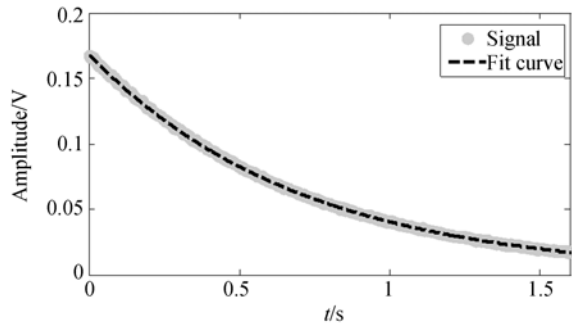


图 4 信号衰减过程的电压幅值
Fig. 4 Amplitudes during signal attenuation

图 5 所示为低频模型和完整模型的阶跃响应对比结果。通过比较可知,低频模型能够准确反映完整模型的电压幅值的变化。由于完整模型中,幅度变化被调制在高频载波信号中(大于 20 kHz),对它进行精确的仿真所需要的步长必须足够小,而经过解耦的低频模型,它仍然可以从包络线瞬态变化反映系统的启动过程,同时,采用低频模型大大缩短了仿真时间,使模型嵌入智能优化算法进行参数搜索变得可行。

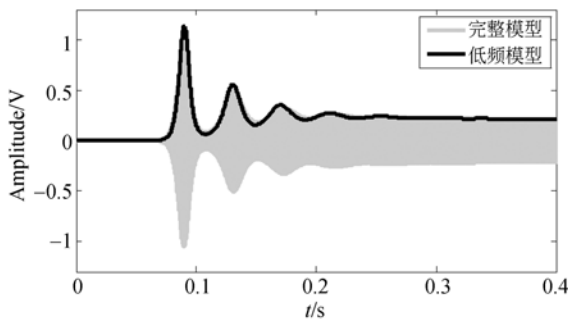


图 5 不同模型阶跃响应对比

Fig. 5 Step responses of different models

3 遗传算法程序设计

由于驱动闭环系统具有非线性,故对系统响应求出解析表达式并求解其最优参数非常困难。考虑到 Simulink 环境能够方便精确地求解非线性系统响应,且遗传算法在求解复杂的优化问题上具有很强的适应性,因此可以将两者结合起来取系统在规定目标函数下的最优化参数。

优化程序在计算目标函数(适应值)前调用 Simulink 模型进行数值仿真,得到非线性系统的响应,在此基础上计算出目标函数。过程如图 6 所示。

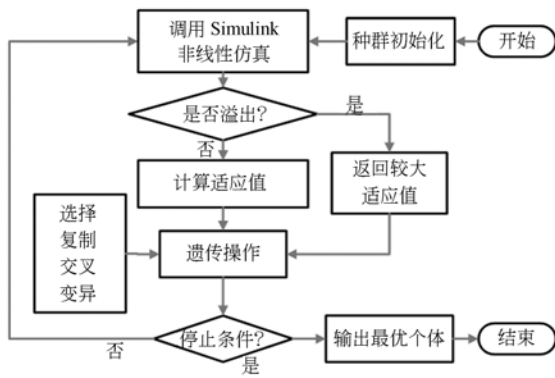


图 6 算法流程图

Fig. 6 Flow chart of algorithm

由于加速度计的振动幅度和检测电压幅度在电路设计前都已经确定,因此需要设计的参数为 PI 控制器参数 K_P 、 K_I , 和低通滤波器参数 τ 。

为了提高驱动电路的瞬态性能,须合理制定目标函数,对于硅微谐振式加速度计,启动时间 t_u 是优化的主要目标函数:

$$B_1 = t_u. \quad (10)$$

而在减小启动时间的过程中,还要保证其余几项指标,首先是超调量指标,过大的超调量会导致启动过程中微谐振梁的振幅过大,超出其安全振幅,以至于降低传感器的寿命。规定其超调量 (P. O.) 不宜超过 50%, 则该目标函数为:

$$B_2 = \begin{cases} P. O., P. O. \geq 50 \\ 0, P. O. < 50 \end{cases}. \quad (11)$$

其次,自动增益控制中,常使用一阶滤波器来限制全波整流产生的二倍频纹波^[4-5]。但是,如果参数设计不合理,滤波残余的二倍频信号仍然很大,会在后续的乘法器中与主震荡信号混叠,产生正交误差,引起环路相移,进而使工作点偏移谐振器的固有频率,降低其性能。在参数设计时,需要将相移 θ_{ext} 限制在很小的范围内, θ_{ext} 可以由自动增益控制的传递函数和稳态工作点^[6] 推导得到,其表达式为:

$$\theta_{ext} = \arctan \left[\frac{\beta V_f^*}{V_c^*} \right], \quad (12)$$

其中: β 为自动增益控制系统参数决定的常量, V_f^* 与 V_c^* 分别为 V_f 与 V_c 的稳态值,分别正比于驱动信号中的同相分量和正交分量。而规定 θ_{ext} 小于 5° , 则目标函数为:

$$B_3 = \begin{cases} 0, \theta_{ext} < 5 \\ 1, \theta_{ext} \geq 5 \end{cases}. \quad (13)$$

最后,需要考虑元器件的约束, K_P 、 K_I 、 τ 都必须取在电阻电容允许的范围之内,若超出此范围则采用惩罚机制,则令目标函数取一个极大的值:

$$B_4 = \begin{cases} 0, [K_P \quad K_I \quad \tau] \in C \\ 1, [K_P \quad K_I \quad \tau] \notin C \end{cases}, \quad (14)$$

其中: C 为电阻电容等元器件能够实现的参数的集合。

最终目标函数为四项子目标函数的加权和, ξ 为权向量,求解时后三项子目标函数的权重必须足够大,使得最优解不会落在其惩罚区间内:

$$B = \sum_{i=1}^4 \xi_i B_i. \quad (15)$$

4 仿真分析

在 Simulink 中建立驱动非线性模型,如图 7 所示。模型中的可变增益控制 (VGA) 环节需要引入一个微小初值,使其偏离零平衡点^[5-6] 才能使

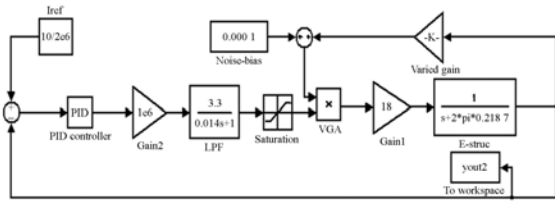


图 7 Simulink 低频仿真模型

Fig. 7 Low-frequency model in Matlab/Simulink

系统正常起振。另外考虑到电路供电电压等实际情况,在系统中加入饱和环节。表 1 所示为仿真中结构的主要参数。

表 1 MEMS 谐振器主要参数

Tab. 1 Parameters of MEMS resonator

m/kg	$\omega_0/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	Q
4.2×10^{-9}	$2\pi \times 26\ 900$	6.2×10^4

求解时取种群大小为 30,交叉概率 0.9,变异概率 1%,对目标函数最优化程序重复计算 3 次,得到目标函数 B 的优化过程如图 8 所示,经过 50 代进化,性能指标均收敛到 0.182 s 附近,证明进化代数是足够的。程序最终给出的优化参数为

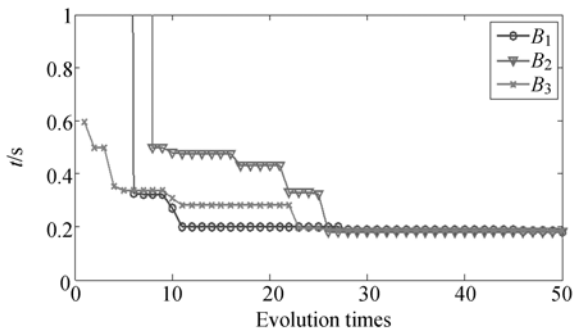


图 8 性能指标优化过程

Fig. 8 Optimization procedure

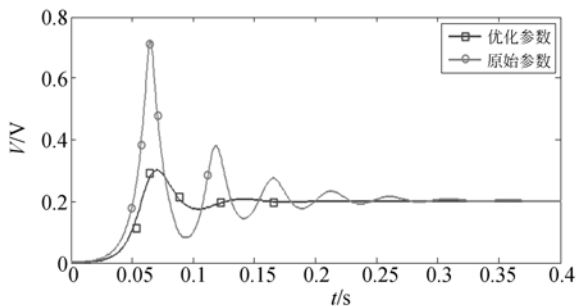


图 9 优化前后瞬态响应对比

Fig. 9 Step responses of before and after optimizations

$K_P=0.34, K_I=0.42, \tau=0.014$ 。图 9 通过仿真对比了优化前后参数对应的系统启动过程。

从仿真结果可见优化后的参数符合制定的约束条件,并且与原始参数相比,系统的启动时间缩短,获得了预期的效果,证明目标函数的选取是正确的。表 2 所示为优化前后参数的具体性能指标。

表 2 优化前后参数及性能对比

Tab. 2 Comparison between different parameters

	原始参数	优化参数
K_P	1	0.34
K_I	10	0.42
τ	0.091	0.014
超调量/%	610	50
启动时间/s	0.42	0.18

5 实验与测试

实验用传感器为本课题组设计的 SOI-II 型硅微谐振式加速度计,其主要性能指标如表 3 所示^[12]。

表 3 SOI-II 型硅微谐振式加速度计主要性能指标

Tab. 3 Main performance of SOI type II SRA

性能指标	数值
工作频率/kHz	27
量程/g	± 50
灵敏度/(Hz · g ⁻¹)	90
零偏稳定性/mg	0.8
零偏重复性/mg	0.3
阈值/ μg	170

根据实验要求设计了 PI 控制器与其余环节分离的测试电路,对优化前后参数进行测试,电路板如图 10 所示。

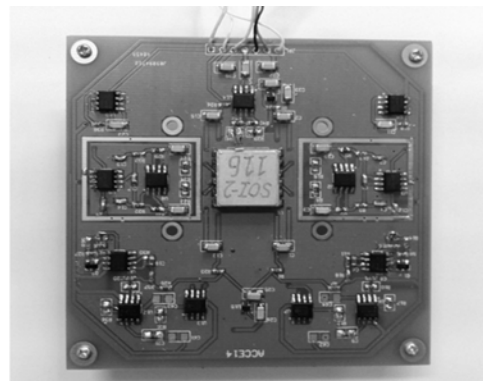


图 10 测试电路

Fig. 10 Circuits on PCB for testing

使用 NI 高速采集卡 USB6366 对上电前后的驱动检测信号以采样率 100 kHz 进行采集,得到优化前后参数启动过程驱动检测电压变化情况,

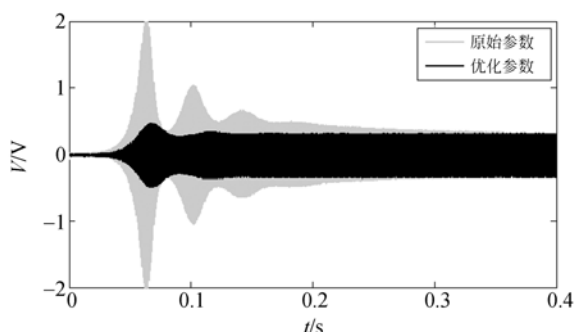


图 11 启动过程的驱动检测电压瞬时值

Fig. 11 Transient voltages during start-up

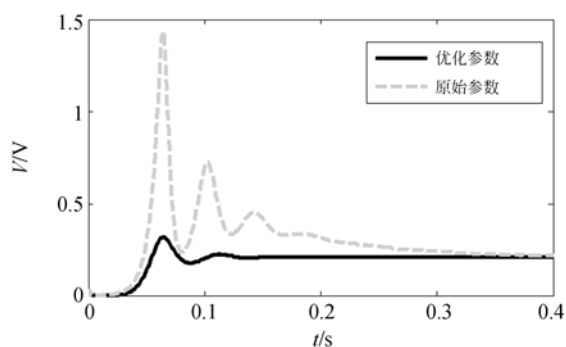


图 12 启动过程的驱动检测电压幅值

Fig. 12 Amplitude during start-up

参考文献:

- [1] SEOK S, KIM H, CHUN H. An inertial-grade laterally-driven MEMS Differential Resonant Accelerometer [C]. *IEEE Sensors Conference, Vienna*, 2004: 654-657.
- [2] 夏国明,杨波,王寿荣. 硅微机械陀螺自激驱动数字化技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 635-640.
XIA G M, YANG B, WANG SH R. Digital self-oscillation driving technology for silicon micro machined gyroscopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 635-640. (in Chinese)
- [3] 贾方秀,袁安萍,施芹,等. 硅微振动陀螺仪设计与性能测试[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1272-1281.
JIA F X, QIU A P, SHI Q, *et al.*. Design and experiment of micro machined vibratory gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1272-1281. (in Chinese)
- [4] 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): 1337-1342. (in Chinese)
- [5] CUI J, CHI X Z, DING H T, *et al.*. Transient response and stability of the AGC-PI closed-loop controlled MEMS vibratory gyroscopes [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(12): 1-17.
- [6] ROBERT T M. Mode localization induced by a nonlinear control loop [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2001,

图 11 所示为启动过程中高速采集卡实际测量的驱动检测电压,图 12 所示为启动过程中驱动检测电压的幅值。

对实验结果进行分析可知,参数优化后系统的 1% 调节时间约为 0.19 s,与仿真结果的误差小于 5%,相比于优化前的 0.42 s 有了明显的改善。超调量也被限制在约束条件规定的 50% 以内。其次,经过测量,由 AGC 环路产生的相位误差也被控制在了 5° 以内。可以看出经过优化的参数使得系统在满足设计要求的前提下,瞬态性能有了很明显的提升。

6 结 论

本文利用遗传算法对硅微谐振式加速度计闭环驱动电路的 PI 控制器参数进行了最优设计。通过遗传算法与低频模型结合,降低了求解过程的计算量,使得优化方法得以实现。实验结果表明,采用优化参数可使超调量小于 50%,相位误差小于 5%。最后,针对某型硅微谐振式加速度计,以启动时间作为目标进行了最优化求解,得到了满足约束条件的最优参数。证明了提出的方法正确有效,具有可实施性。

- 25; 221-236.
- [7] ROBERT P L. Adaptive control of a MEMS gyroscope using lyapunov methods[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(2): 278-283.
- [8] WOON T S. Design and performance test of a MEMS vibratory gyroscope with a novel AGC force rebalance control [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(10):1939-1948.
- [9] ROBERT P L. Adaptive mode tuning for vibrational gyroscope [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(2):242-247.
- [10] AALTONEN L, HALONEN K A I. An analog drive loop for a capacitive MEMS gyroscope[J]. *Analog Integr Circ Sig Process* 2010, 63(3): 465-476.
- [11] CLAUDIA C, ALBERTO C. A high sensitivity uniaxial resonant accelerometer[C]. // 2010 *IEEE 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. Hong Kong, 2010: 260-263.
- [12] 石然, 袁安萍, 苏岩. 硅微谐振式加速度计的实现及性能测试[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(12): 2583-2589.
- SHI R, QIU A P, SU Y. Implementation and experiments of micromechanical differential silicon resonant accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12):2583-2589. (in Chinese)

作者简介:



赵 健(1989—),男,陕西汉中,博士研究生,2011年于南京理工大学获得学士学位,主要从事 MEMS 传感器读出电路方面的研究。E-mail: elfevil007@126.com

导师简介:



苏 岩(1967—),男,江苏苏州人,教授,博士生导师,1996年、2001年于东南大学分别获得硕士、博士学位,主要从事 MEMS 传感技术方面的研究。E-mail: suyan@mail.njust.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)