

Electrical Measurement Method and Experiment Study on Vibration Amplitude for a Silicon Micro-Structure*

LIU Heng^{1*}, FAN Jiangqi¹, MENG Ruili^{1,2}, LI Hongsheng³, ZHANG Hongqun¹, ZHOU Wu⁴

(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Dean's Office, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

3. Panjin Liaohe Oil Field Huanli Special Vehicle Manufacturing Co., Ltd., Panjin Liaoning 124013, China;

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Drawback of computer aided vision measurement method presents because of the package of the silicon micromachined structure system, that the vibration amplitude accuracy of mechanical system is affected by the interface circuit parameters for electrical measurement. A model for silicon resonant structure with driving combs and sensing parallel plates is constructed and a new electrical measurement is also proposed based on single sideband ration. Experiment result show that the vibration amplitude is 0.25 μm for a resonant micro accelerometer with 20 kHz AC driving voltage. Spectral analysis also showed the presence of vibration amplitude caused by electrical noise, this test method can also be applied to measure the resonant frequency for silicon micro structure.

Key words: silicon micromachined structure; vibration amplitude; single sideband ration; frequency spectrum
EEACC: 6140 doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2013.12.012

一种硅微机械结构振动幅度的电学测量方法及实验研究*

刘恒^{1*}, 范江棋¹, 孟瑞丽^{1,2}, 李宏升³, 张宏群¹, 周吴⁴

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学教务处, 南京 210044;

3. 盘锦辽河油田环利专用车制造有限公司, 辽宁 盘锦 124013; 4. 电子科技大学机械电子工程学院, 成都 610054)

摘要: 针对硅微机械结构振动幅度由于封装难以计算机视觉测量及电学测量中的精度受接口电路参数影响的问题, 在对静电梳齿驱动、平板电容检测的硅微谐振结构进行建模分析后, 提出基于单边带电压比的电学测量振动幅度的方法并分析了测量方法的原理。实验表明研制的某硅微机械谐振加速度计在受迫振动下的振动幅度为 0.25 μm , 频谱分析还表明存在上电噪声引起的振动幅度, 该测试方法还能应用于硅微谐振结构的谐振频率测量, 同时为高品质因数的硅微机械谐振结构的可静电自激驱动提供了依据。

关键词: 硅微机械结构; 振动幅度; 单边带比; 频谱

中图分类号: TN911.71

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)12-1686-05

微机械谐振式传感器是通过检测机械谐振器谐振频率的变化来实现外部物理或化学量的测量, 其特点是稳定性好、精度高, 其突出的优势是直接输出频率信号, 传输过程不易失真, 易与数字电路接口。

为了减小微机械谐振式传感器的功耗及保护微结构不被测量环境中的固体颗粒或液体所损坏, 需要对微机械谐振器进行封装。一般多采取常压或真空封装, 封装的盖板或封帽一般多用塑料、玻璃、金属等材料。在微纳机械谐振式传感器设计及应用

中, 总需要评估测量微纳结构的振动幅度, 振动幅度与谐振频率相互耦合, 太大的振动幅度会导致谐振频率漂移, 难以判断到底谐振频率的变化是由外部信息量还是振动幅度引起^[1-2]。目前, 对微机械结构的幅度检测主要是通过计算机视觉结合干涉条纹来完成的, 通过机械力或静电力等激励微结构振动, 通过检测微纳结构特定位置的对应干涉条纹的移动距离来确定结构的位移^[3-4]。计算机视觉结合干涉条纹的测量方法一般在洁净间完成, 将待测试结构

项目来源: 江苏省自然科学基金项目(BK20131001); 江苏省高校自然科学研究基金项目(13KJB510017); 江苏省气象探测与信息处理重点实验室开放课题项目(KDX1109)

收稿日期: 2013- - 修改日期:

固定在封装基座上,微结构没有盖板或封帽,这主要是由于无论是透明的还是不透明的盖板及封帽,均影响干涉条纹的显示。这样的测量环境要求与目前的微结构封装振动条件不一致,主要表现在品质因数不同,所以基于计算机视觉结合干涉条纹的测试方法难以达到不失真测试要求。

静电激励广泛应用于微结构的驱动中,在驱动微结构谐振时,总是要求品质因数尽可能大,减小驱动功耗,同时在同等静电驱动力下,希望振动的幅度越大,减小信号拾取电路设计的难度,所以目前多采用真空封装。在静电驱动真空封装的微机械谐振式传感器中,微结构总处在谐振状态,需要评估高速振动结构的谐振位移。目前基于电学方法的谐振位移测量主要是通过静电力激励微结构,微结构在静电力作用下做正余弦振动,在振动过程中,检测电容由开始时的静态变换为动态,接口电路将电容转换为电流或电压,通过检测的电流或电压结合相关电学参数来确定微结构谐振幅度。文献[5]介绍了一种动静态微弱电容检测装置,在考虑了驱动端到检测端的同频干扰条件下^[6],通过电荷放大器将电容信号转换为电压信号,再利用高频方波对动静态电容信号进行调制,经过高通滤波器后接着利用同频方波和模拟开关进行解调,后续再经过低通滤波器得到动静态电容对应的电压信号,测量电路见图 1。

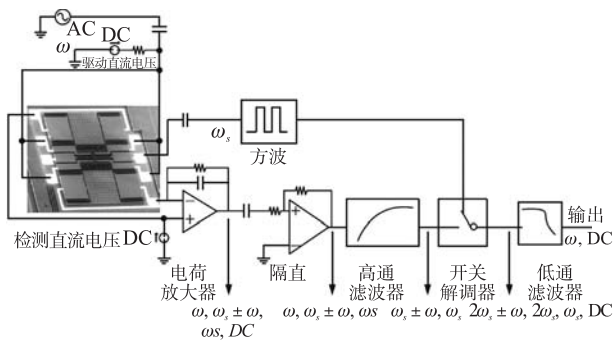


图 1 典型的硅微机械结构振动幅度的电学测量示意图

根据电压信号幅度、接口电路电学参数并结合检测电容微结构的尺寸参数就可以得到微结构的谐振幅度。测试分析发现,谐振幅度的计算受电荷放大器、高通滤波器、低通滤波器及模拟开关等参数的影响,在上电后,模块中的电阻、电容等参数会随温度发生变化,计算结果的准确性需要修正^[7]。

本文首先介绍了一种微机械谐振器的动力学原理,然后提出了一种在同频干扰下的微机械结构振动幅度的电学测量方法,并对方法原理进行了分析;利用设计的静电刚度谐振式微加速度计进行了实验,实验结果确定了在固定驱动力下的微结构的振

动幅度,印证了测量方法的可行性。

1 硅微机械结构振动幅度的电学测量

静电梳齿驱动、平板电容检测的微机械谐振器的原理如图 2 所示,虚线部分为结构层中的固定部分,质量块在 4 个支撑梁的作用下可以左右移动,支撑梁均通过锚点键合在玻璃基座上。

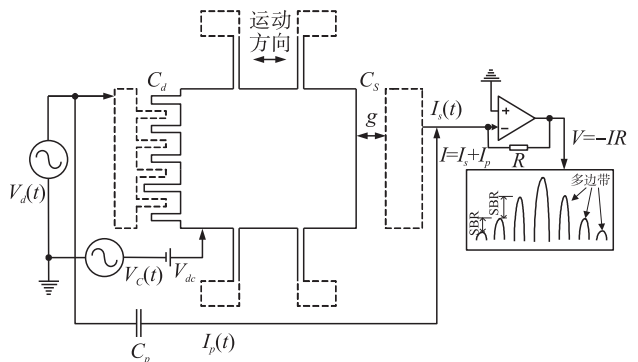


图 2 硅微机械结构振动幅度的电学测量示意图

图 2 中质量块左边附有梳齿对,质量块左边固定的长方体形的单晶硅也附有梳齿对,两组梳齿对相互交叠,形成驱动梳齿电容 C_d 。质量块与右边固定的长方体单晶硅形成平板电容,也为振动检测电容 C_s 。为了让质量块在其支撑梁固有频率点上谐振,驱动电压一般为带偏置的交流电压,质量块左边的长方体单晶硅一般接交流电压 $V_d(t)$,幅值为 V_d ,角频率为 ω_d 。质量块通过金属电极接直流电压 V_{dc} 。整个结构中,还存在左边固定梳齿与右边检测平板之间的耦合电容 C_p ,此电容为寄生电容,在质量块振动过程中,可以忽略 C_p 的变化,将其看成静态电容。为了表征微机械结构的振动幅度,一般多通过检测电容来反推。在接口电路上,通过跨阻放大器将电荷转换为电压。右边检测平板流过的电流 I 包括两部分,一部分来自流检测电容 C_s 对应的电流 $I_s(t)$,另一部分来自耦合电容 C_p 对应的电流 $I_p(t)$ 。由于电流 $I_p(t)$ 的变化频率与驱动电压频率 ω_d 一致,而检测电流 $I_s(t)$ 中也存在振动引起的频率为 ω_d 的电流。这样很难根据跨阻放大器输出的电压 V_0 来判断结构是否处在谐振状态,测试中存在同频干扰问题。所以在质量块上加载高频的正弦波电压 $V_c(t)$,幅值为 V_c ,角频率为 ω_c , $\omega_c \gg \omega_d$ 。当跨阻放大器的电阻为 R ,输出电压 V_0 为:

$$V_0(t) = -R \frac{d}{dt} (V_d(t)C_p + (V_{dc} + V_c(t))C_s) \quad (1)$$

目前多采用对输出电压 V_0 进行高通滤波器,滤除耦合电容对应的电压分量及直流电压 V_{dc} 对应的电压分量,得到电压信号再经过解调,后续经过低通滤波

就得到与检测电容有关的电压信号。在静电驱动力作用下,质量块及其附着的梳齿做正弦周期运动,谐振结构的位移 $x(t)$ 可以表示为: $x(t) = X \sin(\omega_d t)$, X 为振动幅度。这样对应的检测电容 C_s 为:

$$C_s(x(t)) = \frac{\varepsilon A}{g-x(t)} = \frac{\varepsilon A}{g} \left(\frac{1}{1-X/g \sin(\omega_d t)} \right) = C_{sn} \left(\frac{1}{1-x_0 \sin(\omega_d t)} \right) \quad (2)$$

式(2)中, ε 为介电常数, A 为检测电容极板之间的正对面积, g 为检测电容极板等效间距, x_0 为振动幅度比, $x_0 = X/g$ 。测量微结构的振动幅度 X 就需要确定 x_0 和 g 。 g 可以通过流片后的光学测试来确定,关键是如何准确测试 x_0 或 X 。在谐振状态的微纳机械中,为了减少幅度和谐振频率的耦合影响,一般振动幅度 X 相对 g 非常小, $X \ll g$ 。检测电容 $C_s(t)$ 可以表示为:

$$C_s(t) = C_{sn} \sum_{k=0}^{\infty} p_{2k}(x_0) \cos(2k\omega_d t) + C_{sn} \sum_{k=0}^{\infty} p_{2k+1}(x_0) \sin((2k+1)\omega_d t) \quad (3)$$

式(3)中:

$$p_k(x_0) = \frac{2}{\sqrt{1-x_0^2}} \left(\frac{x_0}{1+\sqrt{1-x_0^2}} \right)^k = 2p_0(x_0) \left(\frac{x_0}{1+\sqrt{1-x_0^2}} \right)^k$$

将式(3)代入到式(1)中,输出电压 V_0 中的多带中与 ω_c 相近的频带对应的电压幅度为:

$$V_{\omega_{\pm k}}(x_0) = \frac{1}{2} RC_{sn} V_c (\omega_c \pm k\omega_d) p_k(x_0) \quad (4)$$

式(4)中, $V_{\omega_{\pm k}}(x_0)$ 为频率为 $\omega_c \pm k\omega_d$ 对应的电压幅度, $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm K$ 为整数, k 的绝对值越大,对应 $V_{\omega_{\pm k}}(x_0)$ 的值越小。测量中,由于选择的调制频率 $\omega_c \gg \omega_d$, 所以 $\omega_c \gg |k|\omega_d$ 。式(4)也可以近似简化为:

$$V_{\omega_{\pm k}}(x_0) = \frac{1}{2} RC_{sn} V_c (\omega_c \pm k\omega_d) p_k(x_0) \approx \frac{1}{2} RC_{sn} V_c \omega_c |p_k(x_0)| \quad (5)$$

式(5)表明,多带中,频率为 $\omega_c \pm k\omega_d$ 处对应电压幅度近似成比例于 $|p_k(x_0)|$ 。那么相邻两个单边带电压比也简称为 SBR。归一化后的邻近边带比 $r(x_0)$ 可以表示为:

$$r(x_0) = |p_{k+1}(x_0)| / |p_k(x_0)| = \frac{x_0}{1+\sqrt{1-x_0^2}} \quad (6)$$

式(6)表明,相邻单边带电压比 $r(x_0)$ 与振动幅度比 x_0 有关,与调制电压 V_c 和反馈电阻 R 无关。可以根据 $r(x_0)$ 来求解 x_0 , 对应的关系式为:

$$x_0 = \frac{2r(x_0)}{r(x_0)^2 + 1} \quad (7)$$

根据式(7)可知,只要测得相邻单边带电压比 $r(x_0)$ 就可以确定振动幅度比 x_0 , 而 $x_0 = X/g$, 在测得质量块与检测长方体之间的水平距离 g 和测得相邻单边带电压比 $r(x_0)$ 后,就可以计算得到质量块振动的幅度 X 。

2 硅微机械结构振动幅度测量方法的实验

为了对上述分析的硅微机械结构振动幅度测量方法进行验证,本文利用实验室前期研制的静电刚度谐振式加速度计为测试对象。加速度计敏感结构采用体硅 DRIE 工艺与微键合技术制造,结构材料为浓硼扩散的单晶硅,衬底材料为 7740 玻璃^[8]。为了提高品质因数,采用了金属圆形储能焊真空封装。图 3 为流片后裂片的一个单元加速度计的扫描电镜照片,该加速度计采用静电梳齿驱动,平板电容检测方式,与图 2 分析的模型相一致。

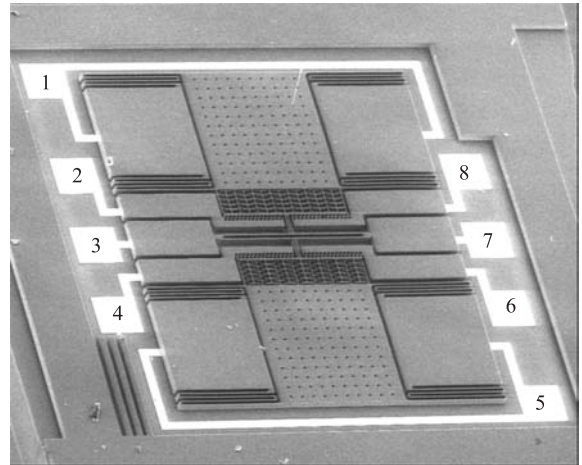


图3 硅微机械谐振式加速度计

根据前一节的理论分析知,要确定某一固定驱动电压下硅微机械结构的振动幅度,需先确定检测电容平板之间的初始间距 g 。根据图 2 分析用的理论模型,在实验中,结合图 3,电极板 1 通过运算放大器虚接信号地,电极板 3 通过直流稳压电源接 +5 V,电极板 2 未接电,微加速度计未封装盖板。本实验利用计算机和光学显微镜获得了加速度计的静态图片,然后利用辅助图形测量工具多次反复测量得到 g 为 3.06 μm ,该结果与设计的 3 μm 间距相接近,测量结果见图 4。

第 2 步是给金属圆形储能焊真空封装的加速度计合适的驱动电压,结合图 3,电极板 1 仍然通过运算放大器虚接信号地,电极板 3 通过直流稳压电源接 +5 V 和 500 kHz 方波,方波由小型可编程器件 LTC1799 和适量电阻来产生,由于本实验加速度计的设计谐振频率为 35 kHz 左右,所以方波频率 ω_c 设为 858.8 kHz,电

极板 2 接幅度为 2 V 频率可变的交流正弦信号,由通用信号发生器产生。在驱动电压频率 ω_d 为 20 kHz 时,图 5 为对应的频谱图, ω_{+1} 、 ω_{+2} 、 ω_{+3} 为方波频率右边对应的单边带, ω_{-1} 、 ω_{-2} 、 ω_{-3} 为方波频率左边对应的单边带,依次相差 20 kHz。左右两边对称的单边带由于随机噪声的影响,幅度并不完全相等。对测试的数据进行分析,以 ω_{+1} 和 ω_{+2} 对应电压计算后得到的 x_0 为 0.08,以 ω_{-1} 和 ω_{-2} 对应电压计算后得到的 x_0 为 0.079,虽然对称频率的单边带电压并不相等,但计算得到的 x_0 相差比较下,在此驱动电压条件下,受迫振动幅度 X 约为 0.245 μm 。

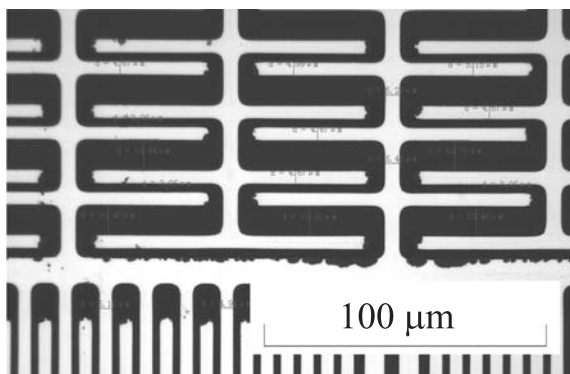


图 4 平板电容间距测量示意图

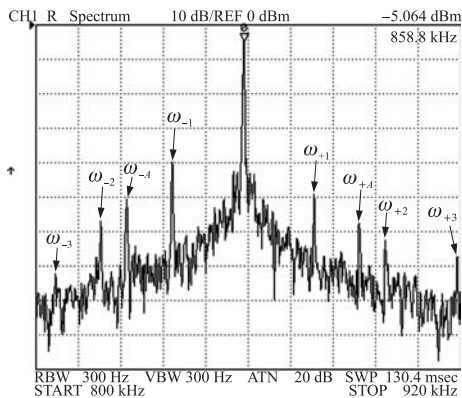


图 5 微加速度计频谱分析图(800 kHz ~ 920 kHz)

图中 RBW 为带宽分辨率,VBW 为视频带宽,ATN 为衰减器,SPW 为扫描时间

分析图 5,频谱图中还存在 ω_{-A} 和 ω_{+A} 的电压信号,对应的频率为 824.1 kHz 和 893.5 kHz,也意味着存在一个频率为 34.7 kHz 的驱动力。对应的输出信号低频谱图见图 6,低频谱不仅存在 20 kHz 的驱动电压信号,还存在 34.7 kHz 的驱动电压信号。分析后发现,由于采用了圆形储能焊真空封装,加速度计品质因数比较大,上电白噪声中频率与谐振一致的噪声产生静电驱动力使得结构发生振动。图 7 是测试得到的加速度计的幅频相应曲线,谐振频率是 34.7 kHz,品质因数为 1 869,验证了上述分析,在后续研究中可以采用静电自激方式来实现高品质因

数微机械结构的振动^[9-11],所以上述实验中得到的振动幅度 X 为 0.25 μm 是由 20 kHz 驱动电压产生的,未考虑噪声电压引起的微结构的振动幅度。

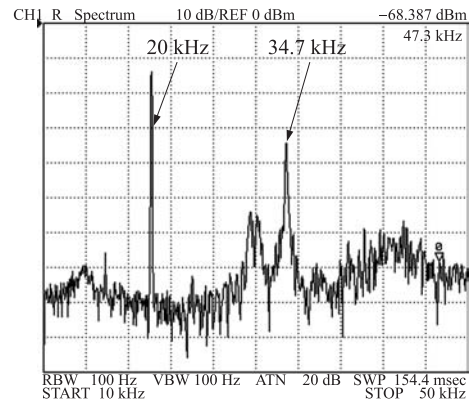


图 6 微加速度计频谱分析图(10 kHz ~ 50 kHz)

图中 RBW 为带宽分辨率,VBW 为视频带宽,ATN 为衰减器,SPW 为扫描时间



图 7 微加速度计测量的幅频曲线

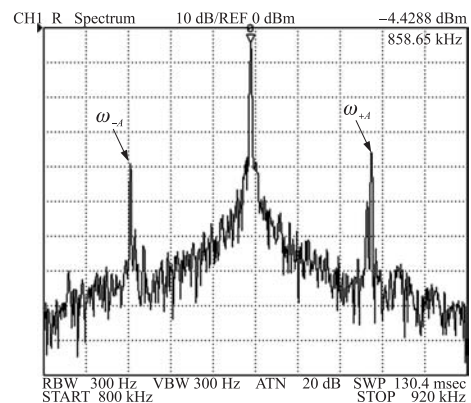


图 8 微加速度计谐振时频谱分析图(800 kHz ~ 920 kHz)

基于单边带比的微结构振动幅度的电学测量不仅可以测量驱动电压下的振动幅度,还可以确定微结构的谐振频率。调节信号发生器的频率,当调制的单边带电压幅度最大时,对应的信号发生器的频率即为微结构的谐振频率^[12],图 8 为上述实验相同驱动电压幅度下的频谱图,在谐振时,对应的电压幅度明显比图 5 中 ω_{-A} 和 ω_{+A} 的电压大,加速度计的谐振频率为 34.7 kHz,与图 7 测试结果一致。

3 结论

硅微机械谐振结构由于封装的需要,计算机视觉和干涉条纹的方法难以完成振动幅度的测试,基于调制解调的方法虽然可以计算获得振动幅度,但结果受高频调制电压的幅度和接口电路参数的影响。本文提出一种基于单边带电压比的电学测振方法并将该方法应用到研制的某硅机械谐振加速度计上,测试得到在受迫振动下,振幅约为 $0.25\ \mu\text{m}$,但高品质因数的加速度计还存在随机噪声引起的振动;本文测量振动幅度的方法还可以拓展为测量硅微机构的谐振频率,对应的加速度计谐振频率为 $34.7\ \text{kHz}$,测量的谐振频率结果与动态扫频测试方法的结果一致,印证了本文方法测量硅微机构的谐振频率的有效性。

参考文献:

- [1] Mestrom R M C, Fey R H B, van Beek J T M, et al. Modelling the Dynamics of a MEMS Resonator; Simulations and Experiments[J]. Sensors and Actuators, A, 2008, 142: 306-315.
- [2] Francesco Braghin, Ferruccio Resta, Elisabetta Leo, et al. Nonlinear Dynamics of Vibrating MEMS[J]. Sensors and Actuators, A, 2007, 134: 98-108.
- [3] 郑翔, 杨福俊, 裘安萍, 等. 双线性振动微陀螺特征频率光学测试和有限元分析[J]. 工程力学, 2009, 26(3): 195-201.
- [4] 钟莹. 微机电系统谐振器面内运动检测的激光多普勒方法[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [5] 刘恒, 刘清倦, 孟瑞丽, 等. 静电刚度谐振微加速度计及其接口电路分析[J]. 传感技术学报, 2011, 24(11): 1556-1560.
- [6] 陈健, 陈德勇, 王军波, 等. 微谐振传感器同频干扰的建模与消除[J]. 测控技术, 2006, 25(8): 5-7.
- [7] Alexander A Trusov, Andrei M Shkel. A Novel Capacitive Detection Scheme with Inherent Self-Calibration[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2007, 16(6): 1324-1333.
- [8] 刘恒, 张凤田, 何晓平, 等. 静电刚度式谐振微加速度计的结构设计和制造[J]. 重庆大学学报. 2011, 34(8): 36-42.
- [9] Sangkyung Sung, Jang Gyu Lee. Development and Test of MEMS Accelerometer with Self-Sustained Oscillation Loop [J]. Sensor and Actuators A, 2003, 109: 1-8.
- [10] Sang Kyung Sung, Chul Hyun, Jang Gyu Lee. Resonant Loop Design and Performance Test for a Torsional Accelerometer with Differential Pickoff [J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2007, 5(1): 35-42.
- [11] 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与数值仿真[J]. 传感技术学报. 2008, 21(8): 1337-1342.
- [12] 刘恒, 孟瑞丽. 非线性微机械谐振器的频率跟踪控制及数值仿真[J]. 传感技术学报, 2012, 25(3): 338-343.



刘 恒(1980-),男,讲师,博士,主要研究方向为微机械惯性传感器结构设计及信号处理,ghost80boy@163.com;



孟瑞丽(1984-),女,硕士研究生,主要研究方向为微机械传感器结构设计。