硅谐振式压力微传感器闭环系统

李海娟 周浩敏

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 硅谐振压力微传感器在自激振荡回路中采取电阻热激励、电阻拾振时得到的信号, 由于有用信号本身的量级小, 因而含有严重的同频干扰信号 (耦合激励信号), 信噪比 SNR (Signal Noise Ratio) 仅为 10^{-3} 数量级. 为了提高信噪比, 滤除同频干扰, 多级放大之后的处理中将锁相环 PLL (Phase2Locked Loop) 工作原理和分频技术相结合, 由锁相环输出作为传感器的激励和鉴相相关信号, 搭建硅谐振压力微传感器闭环自激振荡回路. 结果表明: 采用锁相分频技术的微传感器闭环系统能可靠运行, 信噪比低的问题得到了很好解决.

关 键 词: 传感器; 闭环控制系统; 锁相环; 谐振式

中图分类号: TP 221

文献标识码: A 文 章 编 号: 100125965 (2005) 0320331205

Closed2loop system of silicon resonant pressure micro2sensor

Li Haijuan Zhou Haomin

(School of Instrument Science and Opto2electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: When the silicon resonant pressure micro2sensor works in the self2oscillation close2loop system with thermal2excited and resistor detected, its output has a problem of dreadfully weak signal of micro2sensor. SNR (signal noise ratio) is as low as 10^{-3}, for the system used frequency2equaled signal to excite micro2sensor to get its syntony, as well caused the damaging coupling disturbance. PLL (phase2locked loop) principle and frequency2di2vided technique were used to design the double closed2loop control circuit of micro2sensor to avoid those. Micro2sen2sor worked in the outside loop and PLL made the inside loop. The frequency output of micro2sensor had frequency2equaled exciting signal and duple frequency true signal, after multilevel power amplification multiplied duple fre2quency output of PLL to achieve frequency dividing, adjusting the system state parameters made closed2loop avail2able and phase locking. Results show that the closed2loop system of micro2sensor works effectively based PLL princi2ple and frequency2divided technique and the low SNR gets developed.

Key words: sensors; closed loop control systems; phase locked loops; resonant

航空用传感器对体积、重量、精度和可靠性的要求格外严格. 硅谐振式微传感器以其突出的优势 (精度和稳定性高出硅压阻式和硅电容式微传感器一个数量级), 格外受到航空航天领域的重视. 例如 Lucas 公司、Schlumberger 航空传感器分公司、Druck 公司等都在研制这种传感器在航空上的应用, 以取代体积相对较大且加工困难的谐振筒式压力传感器[1, 2].

目前对硅谐振式微传感器检测方法的研究, 国内外都取得了一些实用成果. 资料表明, 主要采用的方法有: 混沌法、小波分析、自适应滤波[3]、基于单片机和 DSP 的检测方法[4, 5]等. 本文以自主研制的电阻热激励、压敏电阻拾振的硅谐振式压力微传感器为例, 着重讨论实现其闭环

收稿日期: 2003208227

基金项目: 航天科学基金资助项目 (03B51049)

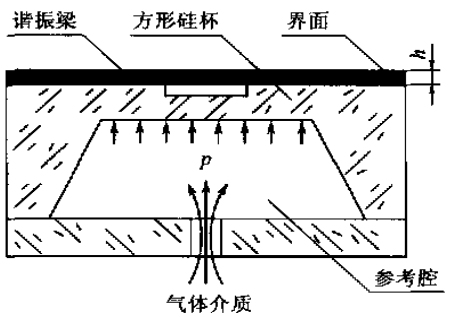
作者简介: 李海娟 (1979-), 女, 广东韶关人, 硕士生, luckxiami@263. net.

系统的关键技术及其具体实现问题.

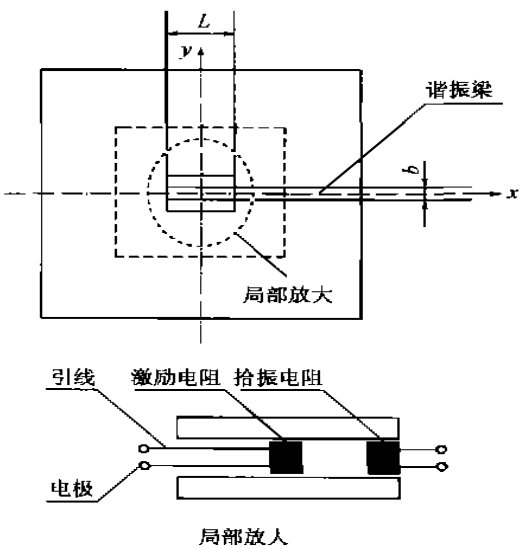
1 硅谐振式微传感器的特性研究

1.1 开环测试结果分析

图 1 所示为硅谐振式压力微传感器的敏感结构, 其样件参数见表 1. 敏感元件采用二次敏感原理: 由方形硅杯敏感被测压力 p, 将其转换为谐振梁所受轴向应力 R_x, R_x 改变谐振梁的固有频率 X_n, 测出 X_n 就可知道 p. 这样, 将对压力的测量转换为对谐振频率的测量. 激励电阻和拾振电阻则采用微机电系统 MEMS (Micro Electrical Mechanical System) 半导体工艺分别做在谐振梁的中央和一端 (见图 1b 的局部放大).



a 纵截面



b 顶视图

图 1 硅谐振压力微传感器的敏感结构

表 1 谐振器样件参数

硅谐振梁			方形硅杯/Lm	激励电阻 R_x/8	拾振电阻 R_s/8	参考腔压力/Pa
L/mm	b/Lm	H/Lm				
2000	150	25	6000@4000@300	215	232	10^{-1}

所谓开环测试, 就是用激励2响应的方法从外部测试微结构敏感元件的主要机电参数, 包括谐振梁的固有频率、拾振电阻输出信号的量级、激励信号波形及合适的输入范围等, 为闭环自激系统的设计提供重要依据. 可采用多种方法进行开环测试. 图 2 是借助锁相放大器[6]来完成的开环测试. 其中 v_x 为激励电压, V_{ss}为供桥电压.

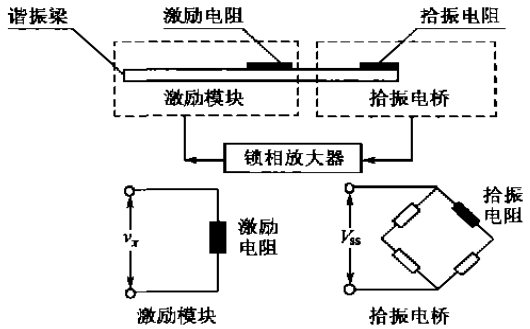


图 2 锁相放大器开环测试图

表 2 给出微传感器的开环测试结果. 其中, P_x 为激励功率; f_c 为谐振频率; Q 为敏感元件的品质因数; $U 为锁相放大器检测出的有用信号的最大值.

表 2 微传感器开环测试结果

激振/拾振条件		实验结果			
v_x/V	V_{ss}/V	P_x/mW	f_c/kHz	Q	$U/LV
015	10	016	321631	10000	115

由测试结果知, 硅谐振压力微传感器与传统的传感器相比较, 具有微功率和微弱信号的特点. 这些显著的微尺度效应将直接导致闭环系统研究面临的几个难题:

1) 严格控制激励功率: 以防止 / 过激励0 或 / 欠激励0 现象的发生;

2) 同频干扰严重: 受硅梁尺寸的限制, 分别置于硅梁中央和一端的激励、拾振电阻之间的间距相当小, 则激励和拾振回路间的电耦合难以避免. 理论和实验分析[7]表明, 分布电容的量级可达 10 pF 左右. 由于这一分布电容的存在, 相对较强的激励信号, 将通过电容直接耦合到拾振回路上, 与梁的谐振频率为同一频率, 是 / 同频干扰0, 使得激励信号与谐振频率的信号两者真伪难辨. 再加上有用的谐振信号相当弱, 带来信号处理技术上的困难;

3) 信噪比极低: 将拾振电阻输出信号 v_s (t) 经过放大后在示波器上观测, 换算后得到 v_s (t) 的峰值约为 10mV, 是有用信号幅值 (约 1.5 LV) 的 1000 倍, 说明信噪比极低.

1. 2　电阻热激励方式下输入与输出信号间的频率关系

图3 为电阻激励、电阻拾振的硅谐振式压力微传感器的激励2拾振电路原理框图, 其中 I_s 为一恒流源强度. 以下就两种激励情况分别讨论.

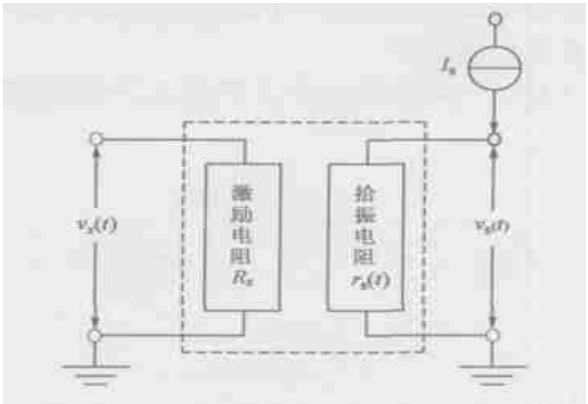


图 3　激励2拾振电路原理框图

1) 若激励信号是频率为 f_x 的纯交流信号(直流分量为零), 则有用输出信号应该是频率为 $f_s = 2f_x$ 的信号 (以下简称倍频信号). 分析如下:

¹ 激励电压: $v_x(t) = V_x\cos(\omega_x t + \varphi_x)$

º 激励电压在激励电阻上产生的瞬时热功率: $p_x(t) = v_x^2(t)/R_x = P_{xDC} + p_{xAC}(t)$. 其中, $P_{xDC} = \frac{1}{2}V_x^2/R_x$ 为直流分量; $p_{xAC}(t) = \frac{1}{2}V_x^2\cos 2(\omega_x t + \varphi_x)/R_x$ 为交流分量

» 谐振梁产生频率为 $f_s = 2f_x$ 的振动 (P_{xDC} 产生恒定热应力, $p_{xAC}(t)$ 产生振动)

¼ 拾振电阻产生频率为 $f_s = 2f_x$ 的应变

½ 拾振电阻阻值为时间函数: $r_s(t) = R_s\cos(\omega_s t + \varphi_s)$, 其中 $\omega_s = 2\omega_x$

¾ 拾振电阻两端电压为时间函数: $v_s(t) = I_s r_s(t) = V_s\cos(\omega_s t + \varphi_s)$, 其中 $V_s = I_s R_s$

以上公式中, $\omega_x = 2\pi f_x$, $\omega_s = 2\pi f_s$. 显然, $v_s(t)$ 是 $v_x(t)$ 的 2 倍频信号.

2) 若激励信号是频率为 f_x 的偏置正弦信号(一个正弦信号与一个直流信号的叠加, 且该直流信号的幅度远大于正弦信号的峰值), 则有用输出信号应该是频率为 $f_s = f_x$ 的信号 (以下简称同频信号). 分析与上类似[8].

在两种激励方式下, 干扰均与激励信号同频(即所谓的同频干扰). 但在纯交流激励下, 有用信号频率是激励信号频率 (等同于干扰信号频率) 的2 倍. 所以采取纯交流的激励方式可将有用信号从干扰中区分出来. 但用这种工作方式构成闭环, $v_s(t)$ 不能直接反馈到激励电阻上, 必须对 $v_s(t)$ 进行二分频后, 再送回梁的激励电阻上作为激励信号, 才能构成闭环自激电路.

2　闭环自激电路的确定与实现

2. 1　产生闭环自激的条件

按照闭环系统自激振荡理论, 为了在某一频率点上产生连续的等幅振动, 该闭环系统必须满足幅、相平衡条件, 即闭环的环路增益大于 1 且总相移为 2P 的整数倍. 所以必须在谐振器的外面配以反馈网络, 使传感器在测量的满量程内对变化的频率 f_c 都能保持等幅稳定的自激振荡, 从而达到通过测频实现测压的目的.

对于电热激励/电阻拾振的硅谐振压力微传感器, 信号由激励电阻传递到拾振电阻的相移为 P/2[9], 则与谐振器一起构成闭环回路的正反馈网络的相移应为 (- P/2), 这样才能满足闭环的相位条件.

2. 2　/锁相环技术0 方案的提出

对于图3 所示的硅谐振式压力微传感器输出的拾振信号 $v_s(t)$, 应首先对其进行放大滤波. 为了减小系统的噪声带宽, 选择合适的带通滤波器至关重要. 这里需要考虑以下几个特点:

1) 通带带宽

对于纯交流电压激励, 有用信号的频率为 $2f_x$, 可能出现的较强干扰是 f_x, 要求该带通滤波器的性能指标为

中心频率: $2f_x$

通带上边界频率: $2f_x - \$f$

通带下边界频率: $2f_x + \$f$

其中, $\$f = k\#f_x$, 0115< k< 1

2) 滤波器的品质因数 Q 值

为了减少谐波分量对微弱有用信号的影响, 带通滤波器的 Q 值要尽可能高些.

3) 在带通范围内的相位变化

总的原则要小, 以免造成信号失真, 闭环自激不可靠, 这就要求电路中的级数不宜过多, 电路尽可能简单.

4) 最关键的一点, 是必须能提取出有用的微弱信号.

要同时解决上述微弱信号检测和带通滤波器的要求, 一般的无源、有源滤波器是不行的. 经分析研究决定, 应用锁相环技术.

由于锁相环 PLL (Phase2Locked Loop) 本质上是一个相位负反馈的自动控制系统, 所以它具有跟踪性能[10, 11]. 从带通滤波器的角度来看, 锁相环相当于一个中心频率可跟踪目标信号频率而变的窄带通滤波器, 即没有必要为目标信号的频率漂移而对其通带宽度预留出指定的裕量, 并可以充分抑制绝大部分噪声和干扰, 是一个非常适合实现硅谐振压力微传感器闭环自激工作的技术手段.

2. 3 系统的总体方案设计

本方案的硅谐振式压力微传感器闭环自激系统由谐振器、前置放大、锁相环以及激励电路等环节组成. 其总体框图如图 4 所示.



图 4 微传感器闭环自激系统框图

其中锁相环由鉴相器 (PD)、低通滤波器 (LF) 和压控振荡器 (VCO) 3 部分组成. PD 具有乘法器的功能, 将两路输入信号相乘; LF 用以滤除高频噪声; VCO 根据 LF 输出直流电压的大小来控制输出波形的频率.

2. 4 / 锁相+ 分频0 技术的实现

由 1. 2 节的分析知道, 在纯交流激励下, 拾振信号频率为激励信号频率的 2 倍, 也就是说, 在回路内信号流的频率并不完全相同. 所以在设计闭环系统的各模块时, 要使某一环节能实现分频.

在仔细研究了锁相环的组成及工作原理之后发现: 根据环路锁定时 PD 两输入端频率相等的原则[12], 若输入信号的频率为 f_1, 且在 VCO 输出与 PD 之间的反馈支路上接入倍频器 (2 倍频), 则在 VCO 的输出端可得到频率为 $f_1/2$ 的输出信号[9]. 图 5 为锁相分频方案原理图.

倍频器由乘法器与高通滤波器组成, 设 VCO 输出信号为

$$v_o(t) = V_o\cos[X_0 t + H_0(t)] \quad (1)$$

通过乘法器后的信号为

$$s(t) = v_o(t) \# v_o(t) = \frac{V_o^2}{2}[\cos 2(X_0 t + H_0(t)) + 1] \quad (2)$$

s (t) 通过高通滤波器后, 直流信号被滤除, 最后得到的是 2 倍频信号.



图 5 锁相分频器

这样, 锁相分频设计方案的总体框图如图 6 所示.

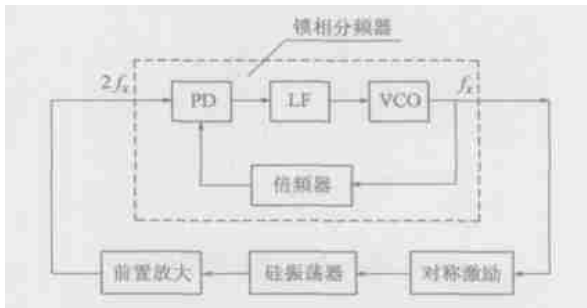


图 6 锁相分频设计方案的总体框图

在电路的具体实现上, 因为没有找到满足要求的单片集成锁相环, 所以 PD, LF 和 VCO 分别选用集成模拟乘法器 AD534, 有源 RC 比例积分滤波器和 MAX038 芯片实现. 倍频器可选用 AD534 与 RC 高通滤波器搭建组成. 至于前置放大模块, 则由拾振电桥 (如图 2 所示) 和多级 OP27 放大器组成. 双端对称激励模块可采用 2 块完全相同的 AD844 芯片对称组建而成.

3 实验结果

先调整好反馈电路的各参数, 然后将谐振器与反馈电路连接在一起组成微传感器, 并在室温条件下进行闭环自激实验. 图 7 所示为不施加压力时前置放大模块输出波形 (上) 及 VCO 输出

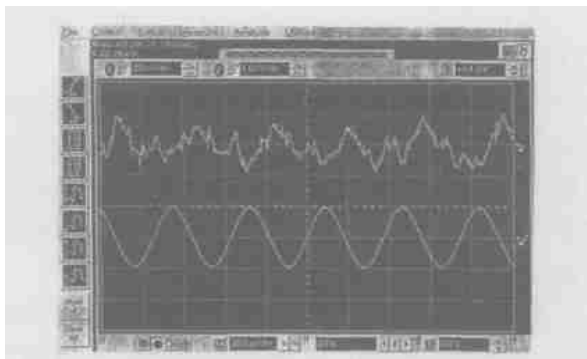


图 7 前置放大模块输出波形 (上) 及 VCO 输出正弦信号 (下)

正弦信号 (下). 图 8 所示为在 0~ 300 kPa 的测试范围内的压力2频率对应关系.

闭环实验测得不施加压力时微传感器的基本谐振频率为 32. 708 kHz, 与开环测试的结果 (32. 631 kHz) 接近. 表明采用锁相分频技术能够使硅谐振压力微传感器闭环系统可靠自激. 但用作测试的微传感器样件在谐振点附近频率稳定性较差, 分辨力低, 这需要依靠后续的加工工艺来改进提高.

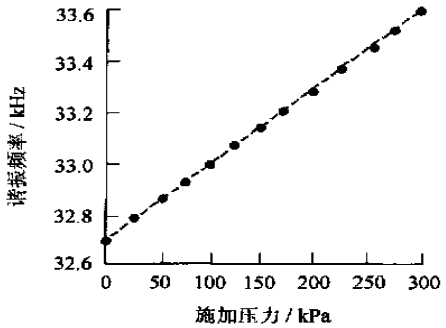


图 8　硅谐振式压力微传感器的压力2频率对应关系

参考文献 (References)

[1] 刘广玉. 要重视微传感器的发展和研制 [J]. 仪器仪表学报, 1997, 18 (10): 5~ 9
Liu Guangyu. To pay attention to the research and development of micro2sensors [J]. Journal of Apparatus and Meter, 1997, 18 (10): 5~ 9 (in Chinese)

[2] John Greenwood, Troy Wray. High accuracy pressure measurement with silicon resonant sensor [J]. Sensors and Actuators, 1993, A (37, 38): 82~ 85

[3] Sayed A H, Kailath T. A state space approach to a adaptive RLS filtering [J]. Signal Processing Magazine, 1994, 11 (3): 18~ 60

[4] Almaida T M, Piedade M S. High performance analog and digital PLL design [J]. Circuits and Systems, 1999, 4: 394~ 397

[5] Obote S, Sumi Y, Syoubu K, et al. Dual loop dsp2pll with wide frequency acquisition range and fast frequency acquisition [J]. Circuits and Systems, 1998, 4: 393~ 396

[6] 高泽溪. 现代通信与电子系统实验 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996. 26
Gao Zexi. Communications and electronic system experiments in modern times [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1996. 26 (in Chinese)

[7] Rebwar M A. Mechanisms of optical activation of micro2mechanical resonators [J]. Sensors and Actuators, 1992, A (33): 229~ 236

[8] 邢维巍. 硅谐振微传感器频率特性测试系统的研制 [D]. 北京: 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 1999
Xing Weiwei. Development of silicon resonant micro sensor frequency characteristic testing system [D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999 (in Chinese)

[9] 王　权. 硅谐振压力微传感器闭环系统的研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2000
Wang Quan. Research on silicon resonant microsensor feedback system [D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000 (in Chinese)

[10] 圭法川. 锁相与频率合成 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988
Gui Fachuan. Phase2locked loops and frequency composed [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988 (in Chinese)

[11] 张冠百. 锁相与频率合成 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1995
Zhang Guanbai. Phase2locked loops and frequency composed [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1995 (in Chinese)

[12] 陈世伟. 锁相环路原理及应用 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990
Chen Shiwei. Principle and application of phase2locked loops [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1995 (in Chinese)