

Closed-Loop Topologies for Electrostatic Drive Resonant Pressure Sensor

WANG Yuzhao, YUAN Weizheng*, REN Sen, QIAO Dayong

(Micro and Nano Electromechanical System Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Closed-loop topology plays an important role in sustaining reliable oscillation for resonant pressure sensor. A hybrid model of a typical MEMS resonant pressure sensor, which is driven by electrostatic force and sensed by capacitance changes, was constructed to research the influence of closed loop topology. Four closed-loop topologies including self-oscillation, automatic gain controller, Phase-Locked Loop and self-oscillation with automatic gain controller, were employed in the hybrid model. Using a mixed signal simulation platform, performance simulation and comparison among different topologies was implemented in terms of startup capability, automatic frequency tracking performance, shock immunity and frequency stability. The results show that PLL loop has the best overall performance.

Key words: MEMS; resonant pressure sensor; closed-loop topology; frequency tracking; PLL

EEACC: 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.07.008

静电驱动 MEMS 谐振式压力传感器闭环拓扑研究

王玉朝, 苑伟政*, 任 森, 乔大勇

(西北工业大学微/纳米系统陕西省重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 谐振式压力传感器闭环拓扑结构对保持机械谐振器振荡的稳定性和可靠性起着重要作用。针对一种典型结构的静电驱动电容检测 MEMS 谐振式压力传感器, 在分析工作原理的基础上, 构建了其混合信号模型。基于该模型搭建了自激振荡、自动增益控制、锁相环和带 AGC 的自激振荡四种闭环拓扑结构。在混合信号仿真平台下, 对四种拓扑结构在起振状况、自动频率跟踪特性、抗冲击性和频率稳定性四个方面进行了仿真比较。结果表明, 锁相环闭环拓扑结构表现出较好的综合性能。

关键词: MEMS; 谐振式压力传感器; 闭环拓扑; 频率跟踪; PLL

中图分类号: TP212.1; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)07-0970-06

谐振式压力传感器广泛应用于航空大气数据计算、大气数据校准、大气测量和制作气压计、高度计等国防和民用领域, 它是利用机械谐振器把被测压力转换为频率信号的一类传感器。当被测压力发生变化时, 谐振器的固有谐振频率随之改变, 通过相应的测量电路, 就可得到与被测压力成一定关系的电信号。机械谐振原理与 MEMS 微细加工技术结合而制造的 MEMS 谐振式压力传感器不但具有传统谐振式传感器高精度、高分辨率、高抗干扰能力、适于长距离传输、能直接与数字设备相连接的优点, 而且具有体积小、重量轻、结构紧凑、功耗低等 MEMS 传感器特有的优势。目前已有多家国外公司进行谐振式压力传感器的研究。GE Druck 公司研制的静电激励电容检测硅谐振式压力传感器, 其最新结构采用干法刻蚀和键合工艺制造, 在测压范围为 0 ~ 2

Bar 量程内, 综合误差小于 $\pm 40 \times 10^{-6} / FS^{[1]}$ 。日本横河电机研制了一种采用复杂表面加工工艺的电磁激励谐振式压力传感器。该压力传感器在压力膜表面制作一个“H”形双桥谐振梁进行差分检测, 精度达到 0.01%^[2-3]。目前国内也有多家单位开展了 MEMS 谐振式压力传感器的研究, 取得了一定的阶段性成果^[4-7], 但对谐振式压力传感器的一些关键理论与技术问题, 比如传感器闭环子系统的优化设计等仍需进一步深入研究^[8]。

MEMS 谐振式压力传感器包括芯体和电路两部分, 其中驱动电路是电路的核心模块。而闭环驱动电路对保持机械谐振器振荡的稳定性和可靠性起着重要作用^[9-10]。从系统的角度对芯体结构和驱动电路进行抽象, 研究不同拓扑结构对闭环系统振荡的影响, 对于闭环拓扑选型具有积极的指导意义。

本文针对一种典型结构的静电驱动 MEMS 谐振式压力传感器结构^[11-12],在阐明该 MEMS 谐振式压力传感器工作原理的基础上,同时考虑到支撑梁刚度的非线性特征,建立了 MEMS 谐振式压力传感器的模型。为保持谐振式压力传感器谐振振幅和频率的稳定,自动跟踪谐振频率变化,构建了自激振荡(Self-Oscillation)、自动增益控制(AGC)、锁相环(PLL)和带 AGC 的自激振荡(简称为 SO with AGC)四种闭环拓扑结构,并在混合信号仿真平台 Saber 下,对四种拓扑结构在起振状况、自动频率跟踪特性、抗冲击性和频率稳定性四个方面进行了分析比较。

1 MEMS 谐振式压力传感器工作原理

1.1 传感器结构与压力变谐效应

该 MEMS 谐振式压力传感器是基于差分静电驱动,差分电容检测原理而工作的,其结构示意图如图 1 所示。当外界压力作用在方形受压膜片时,引起受压膜片的变形,从而带动之上的锚点 E、F 向外侧移动,进而增加了其上的谐振器应力,而应力引起谐振器的刚度改变,进而改变谐振频率。该 MEMS 谐振式压力传感器就是利用这种压力变谐效应而工作的。

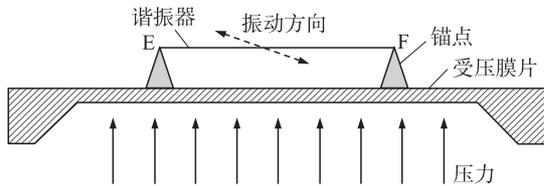


图 1 MEMS 谐振式压力传感器芯体结构示意图

压力传感器的谐振器结构如图 2 所示。图 2 中所示 B、D 电极连接两路电压信号,产生差分推拉静电驱动力;A、C 电极构成差分驱动反馈电极,连接 I/V 转换电路,检测差分电容变化。谐振质量块通过四根支撑梁被锚点 E、F 悬挂起来。

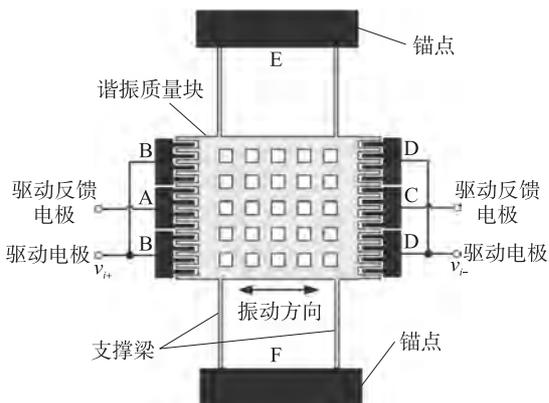


图 2 谐振器结构简图

受压方形膜片边长和厚度分别为 $2a$ 、 h 。考虑小变形情况,在外界压力 P 作用下方形膜片在点 (x, y) 的挠度解析公式为^[13]:

$$\omega(x, y) = \frac{49Pa^4}{2304D} \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right]^2 \left[1 - \left(\frac{y}{a} \right)^2 \right]^2 \quad (1)$$

式(1)中, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$, 为抗弯刚度, E 为材料的杨氏模量, ν 为泊松比。坐标系原点位于方形膜片的中心, x 、 y 方向为沿方形膜片的相邻边长方向。确定锚点 E、F 位于 $(1/2a, 0)$ 、 $(-1/2a, 0)$ 的位置。

根据文献[12],谐振频率与内应力 T 的关系可表示为:

$$\omega_0 \cong \sqrt{\frac{24}{5L^3} \left[\frac{10EI + TL^2/4}{M_I + 13M_B/35} \right]} \quad (2)$$

其中 L 为梁的长度, I 为梁的惯性矩, M_I 和 M_B 分别为谐振质量块和支撑梁的质量。

1.2 静电驱动与电容检测

施加在差分驱动电极 B、D 上的静电驱动信号是同直流偏置电压下两路反向的交流信号 v_{i+} 和 v_{i-} , 他们可表示为式(3)、式(4)。该两路信号对谐振质量块施行推挽静电驱动。

$$v_{i+} = V_{dc} + V_{ac} \sin \omega t \quad (3)$$

$$v_{i-} = V_{dc} - V_{ac} \sin \omega t \quad (4)$$

谐振质量块所受静电驱动力可表示为^[14]:

$$F(t) = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x} v_{i+}^2 - \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x} v_{i-}^2 \quad (5)$$

将(3)(4)两式代入(5)式可得

$$F(t) = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x} 4V_{dc} V_{ac} \sin \omega t \quad (6)$$

考虑到变化的电容为叉指梳齿间电容,又指梳齿结构及具体参数符号如图 3 所示,其中 h 为叉指梳齿的厚度, d 为叉指梳齿的间隙, L_0 为平衡状态重叠梳齿的长度。

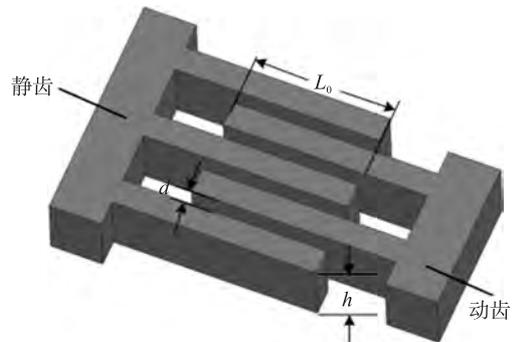


图 3 叉指梳齿结构简图

根据图 3 中所表示的参数,可得^[15]

$$\partial C / \partial x \cong N \epsilon_0 h / d \quad (7)$$

其中 N 为梳齿间隙数目, ε_0 为真空的介电常数。从而

$$F(t) = 2 \frac{N\varepsilon_0 h}{d} V_{dc} V_{ac} \sin\omega t \quad (8)$$

该驱动力信号是具有单一频率 ω 的正弦信号, 消除了单边驱动二倍频信号的影响^[16]。

考虑到谐振器的对称性, 忽略刚度的二次项, 假定悬吊谐振器的非线性弹性系数是位移的三次函数^[12], 可表述为 $kx + \beta x^3$, 其中 x 是谐振质量块从平衡位置发生的位移, β 为三阶弹性系数。则谐振器动态性能的非线性方程可表述如下:

$$x'' + \frac{1}{Q}\omega_0 x' + \omega_0^2 x + \frac{\beta}{M}x^3 = \frac{F(t)}{M} \quad (9)$$

式(9)中 M 是悬吊谐振器的惯性质量, x 是谐振质量块从平衡位置发生的位移, 谐振质量块 M 被式(8)所示的具有单一频率 ω 的静电力 $F(t)$ 驱动。 ω_0 是式(2)所示的谐振频率, 其值随着输入压力 P 的大小而改变。 Q 为品质因数。式(9)是达芬方程, 可以通过迭代获得方程的解。

根据 MEMS 谐振式压力传感器的工作原理, 利用 MAST 语言构建基于混合信号仿真平台 Saber 下的模型, 主要结构参数如表 1 所示, 充分利用 Saber 自带的迭代算法来求解式(9)所示的达芬方程。

表 1 MEMS 谐振式压力传感器主要参数

参数	数值大小
E	130 GPa
ν	0.22
M	2.057×10^{-8} kg
β	1×10^{10} N/m
Q	300
h	30 μm
d	2 μm
L_0	10 μm
a	1 058 μm

2 闭环拓扑结构

根据电容式微机械陀螺的驱动电路可知, 闭环拓扑结构对保持微机械谐振器的幅值和频率稳定, 自动跟踪谐振频率变化具有十分重要的作用^[17]。针对该 MEMS 谐振式压力传感器芯体的模型, 构建自激振荡、自动增益控制、锁相环和带

AGC 的自激振荡四种闭环拓扑结构, 其结构框图分别如图 4(a)~4(d) 所示。

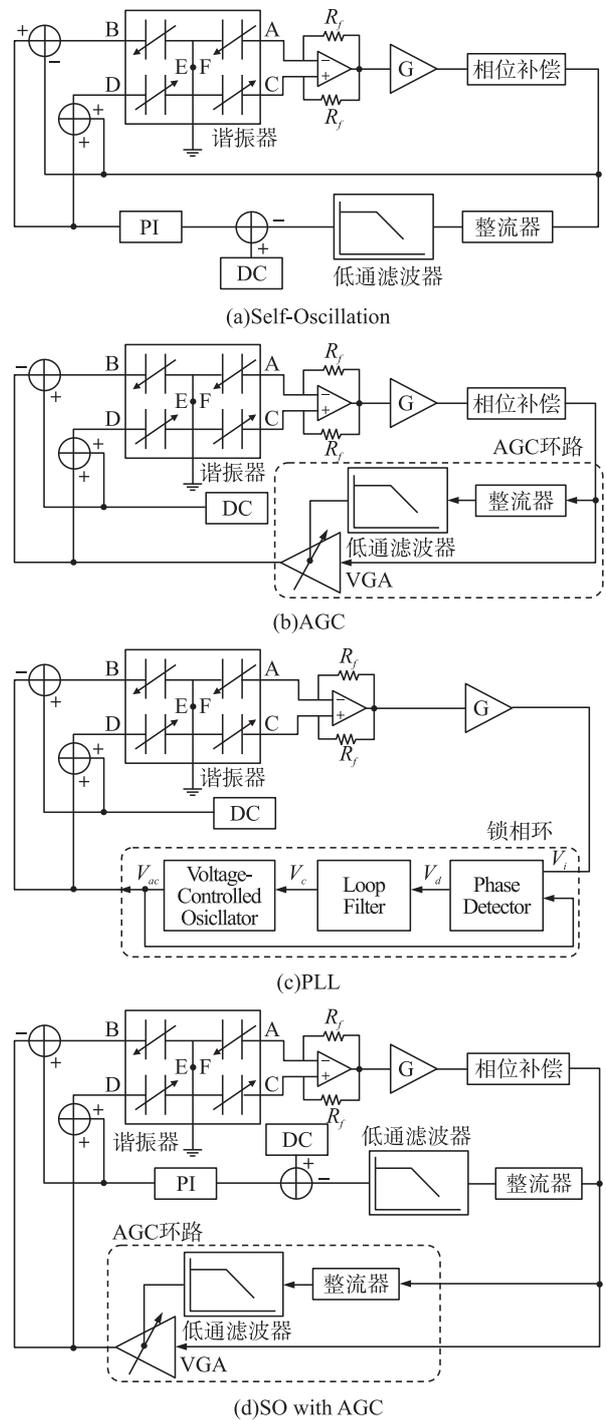


图 4 闭环拓扑结构

自激振荡闭环(图 4(a)所示)是通过调节驱动静电力的直流分量 V_{dc} 来构成反馈闭环。当谐振质量块 E/F(E、F 为锚点, 与谐振质量块电气短路连接)与驱动反馈电极 A、C 间电容有扰动变化时, 前置的跨阻放大器将变化的电流信号转换为电压信号, 并且经过增益 G 和相位补偿后, 分为两路。一路直接经过整流和低通滤波, 与固定直流电压 DC

做减法运算后,再经过一级 PI(比例-积分)校正,与另一路交流信号分别作加减运算构成差分驱动信号,反馈后加到驱动电极 B、D 上。其中的整流器采用精密全波整流电路^[18]。

自动增益控制环路(图 4(b)所示)是通过控制驱动静电力的交流分量 V_{ac} 来构成反馈闭环。该环路的前置电路与自激振荡环路相同。相位补偿的输出通过整流和低通滤波后变为直流信号,该直流信号控制同为相位补偿后级的可变增益放大器(Variable Gain Amplifier, VGA)的放大倍数,来实现自动增益控制。其中选择的自动增益控制环路为 AD603 双级联结构^[19],如图 5 所示。

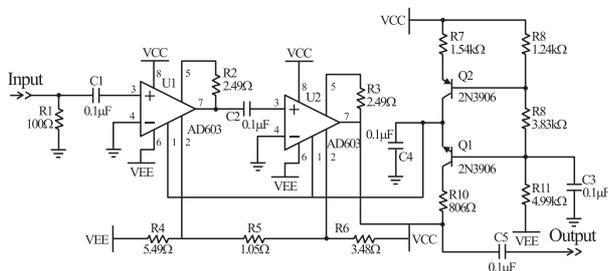


图 5 AD603 自动增益控制环路

锁相环路(图 4(c)所示)是通过锁定相位实现闭环谐振的。当谐振器处于谐振状态时,驱动信号和驱动模态位移信号存在 90° 的相位差,通过 PLL 可以锁定该相差,从而实现谐振^[20]。锁相环由鉴相器、环路滤波器和压控振荡器(VCO)构成。鉴相器由乘法器实现,用来鉴别输入信号 V_i 与输出信号 V_{ac} 之间的相位差,并输出误差电压 V_d 。 V_d 中的噪声和干扰成分被低通性质的环路滤波器滤除,形成压控振荡器的控制电压 V_c 。环路滤波器选用无源滞后-超前滤波器。 V_c 作用于压控振荡器的结果是把它输出振荡频率 f_{ac} 拉向环路输入信号频率 f_i ,当二者相等时,环路被锁定。VCO 的特性可表示为:

$$\omega(t) = \omega_0 + K \cdot V_c(t) \quad (10)$$

其中 K 是 VCO 的灵敏度, ω_0 是 $V_c = 0$ 时的自由振荡频率。

带 AGC 的自激振荡环路(图 4(d)所示),它是一种混合闭环拓扑结构,可视为在自激振荡环路的交流通路多加一级 AGC 环路构成。AGC 环路的具体电路如图 5 所示。

3 闭环拓扑仿真

根据静电驱动 MEMS 谐振式压力传感器的工作原理,构建混合信号模型,并在 Saber 平台下,搭建四种闭环拓扑结构,对四种拓扑结构在起振状况、

自动频率跟踪特性、抗冲击性和频率稳定性四个方面进行分析和比较^[14]。

3.1 起振状况

在 Saber 平台下进行瞬态分析,仿真时间设置为 Time Step $1 \mu\text{s}$, Min Time Step $0.5 \mu\text{s}$, End time 90 m。仿真四种闭环拓扑的起振状况,其起振的时域波形如图 6 所示。

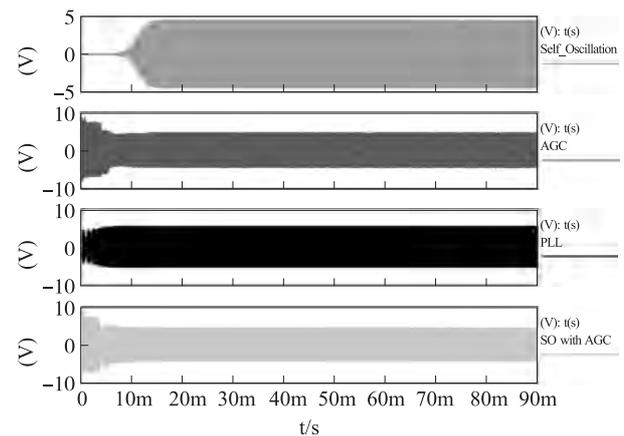


图 6 四种拓扑结构起振状况比较

从图中可以看出,四种拓扑结构都能实现有效起振。但是,锁相环路起振最快,自动增益控制环路 and 带 AGC 的自激振荡环路其次,自激振荡环路最慢。

3.2 自动频率跟踪特性

在 10 kPa、55 kPa、100 kPa、145 kPa 和 190 kPa 五个离散压力点作用下,对四种闭环拓扑分别进行静态仿真,皆能如图 6 所示实现起振。测定其谐振频率与压力关系如图 7 所示。从图 7 中可以看到,四种拓扑结构中只有带 AGC 的自激振荡环路在输入压力为 10 kPa 时,偏离理论值较大,其它都能保证环路的谐振频率对应输入的压力,并且跟理论值基本吻合。

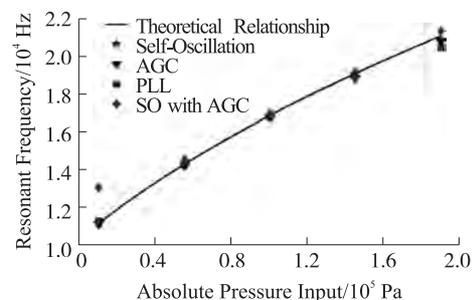


图 7 MEMS 谐振式压力传感器输入与输出关系图

进一步对连续变化的压力信号作为 MEMS 谐振式压力传感器的输入进行连续时间动态仿真。仿真结果曲线如图 8 所示。从图中可得,四种拓扑结构都能实现谐振频率自动跟踪输入压力的变化。

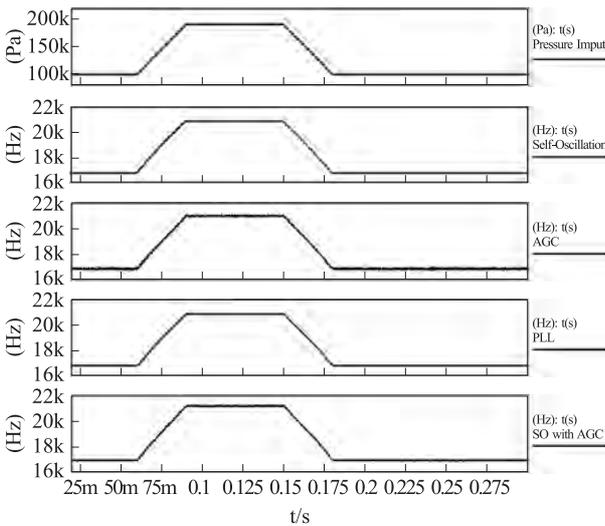


图 8 MEMS 谐振式压力传感器方波响应

3.3 抗冲击性

用瞬时静电力来模拟冲击信号,对四种拓扑结构进行瞬时冲击模拟。在相同的瞬时冲击信号作用下,四种拓扑的频率曲线如图 9 所示。从图 9 中可以得到,自激振荡环路、自动增益控制环路和带 AGC 的自激振荡环路频率的最大相对变化量分别为 17.47%、24.37% 和 22.24%;而锁相环路频率的最大相对变化仅为 9.41%,表现出更好的抗冲击性。另一方面,锁相环路受冲击后,频率在稳定值上下震荡,需要较长的时间(约 7.2 ms)才能恢复到稳定状态,而前三种闭环拓扑会即时恢复到稳定状态。因此在冲击后的自恢复方面,自激振荡环路、自动增益控制环路和带 AGC 的自激振荡环路比锁相环表现出更好的快速恢复特性。

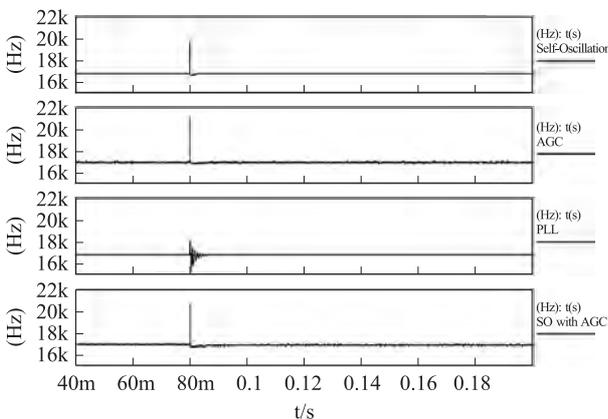


图 9 MEMS 谐振式压力传感器瞬时冲击响应比较

3.4 频率稳定性

MEMS 谐振式压力传感器最终的输出信号是频率信号,在固定的输入压力下,谐振频率的稳定性直接决定了传感器最终输出的稳定性。对 10 kPa、55 kPa、100 kPa、145 kPa 和 190 kPa 五个离散的输入压

力进行闭环仿真,在时间为 40 ms ~ 300 ms 谐振式压力传感器稳定谐振的时间段内,计算谐振频率的标准方差,做柱状图比较如图 10 所示。

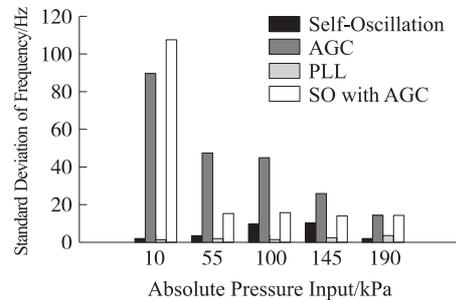


图 10 谐振频率标准方差柱状图

从图 10 中可得,AGC 环路和带 AGC 的自激振荡环路频率的标准差都大于 12.99,两者的标准差在每一个压力点都属于最大的前两位,表明频率离散化最大,表现出最差的频率稳定性。自激振荡环路频率的标准差在 1.7259 ~ 10.025 之间,相对比较稳定。锁相环路频率的标准差保持小于 3.068,表现出最好的频率稳定性。

4 结论

四种拓扑结构在起振状况、自动频率跟踪特性、抗冲击性和频率稳定性四方面的仿真结果表明,四种拓扑结构表现出不同的特性。MEMS 谐振式压力传感器可根据不同的应用需求选择合适的闭环拓扑。如果要求具有一定的抗冲击性,并且特别要求自恢复快,可以选择自激振荡闭环拓扑;如果对冲击后的恢复速度没有特别要求,锁相环闭环拓扑非常合适。综合考虑四个方面,锁相环闭环拓扑表现出更好的整体性能。该结果对于谐振式压力传感器闭环拓扑结构的选型具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Kinnell P K, Craddock R. Advances in Silicon Resonant Pressure Transducers[J]. Procedia Chemistry, 2009, 1(1): 104-107.
- [2] MASAYOSHI ESASHI, SUSUMU SUGIYAMA, KYOICHI IKEDA, et al. Vacuum-Sealed Silicon Micromachined Pressure Sensors[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(8): 1627-1639.
- [3] Kinji Harada, Kyoichi Ikeda, Hideki Kuwayama, et al. Various Applications of Resonant Pressure Sensor Chip Based on 3-D Micromachining[J]. Sensors and Actuators, 1999, 73(3): 261-266.
- [4] 杨川, 郭灿. MEMS 氮化钛谐振式压力传感器研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(1): 36-38.
- [5] 史晓晶, 陈德勇, 王军波, 等. 一种新型微机械谐振式压力传感器研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(6): 790-793.
- [6] 汤章阳, 樊尚春, 蔡晨光. 硅谐振式压力传感器静态特性测试

- [J]. 计测技术,2009,29(B09):3-4,13.
- [7] 任森,苑伟政,邓进军.一种硅微谐振式压力传感器的敏感膜片设计[J].传感技术学报,2006,19(05B):1855-1858,1862.
- [8] 樊尚春.热激励谐振式硅微结构压力传感器[J].科学技术与工程,2004,4(5):426-429.
- [9] 刘猛,王军波,李玉欣,等.电磁激励谐振式 MEMS 压力传感器闭环控制研究[J].传感技术学报,2010,23(8):1066-1069.
- [10] Ranran Yi, Bangcheng Han, Wei Sheng. Design on the Driving Mode of MEMS Vibratory Gyroscope [C]//C Xiong et al. Eds. ICIRA 2008, Part II, LNAI 5315, 2008. 232-239.
- [11] Christopher J Welham, Julian W Gardne, John Greenwood. A Laterally Driven Micromachined Resonant Pressure Sensor [C]//The 8th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators, and Eurosensors IX. Stockholm, Sweden: Institute of Electrical & Electronics Engineer (July 1995), 1995. 586-589.
- [12] Christopher J Welham, Julian W Gardner, John Greenwood. A Laterally Driven Micromachined Resonant Pressure Sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1996, 52(1-3): 86-91.
- [13] Minhang Bao. Analysis and Design Principles of MEMS Devices [M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Ltd, 2005. 98, 103-104.
- [14] 李锦明.高信噪比电容式微机械陀螺的研究[D]:[博士学位论文],太原:中北大学,2005.
- [15] Wen-Teng Chang, Christian Zorman. Electrical Characterization of Microelectromechanical Silicon Carbide Resonators [J]. Sensors, 2008, 8(9): 5759-5774.
- [16] 蒋庆华.音叉电容式微机械陀螺接口电路设计研究[D]:[硕士学位论文].西安:西北工业大学机电学院,2004.
- [17] 许宜申,王寿荣,盛平,等.微机械振动陀螺仪闭环驱动电路分析与设计[J].测控技术,2006,25(10):68-70.
- [18] 崔金强.高性能硅微陀螺电路设计与优化[D]:[硕士学位论文].西安:西北工业大学机电学院,2008.
- [19] Analog Devices, Inc. Low Noise, 90 MHz Variable Gain Amplifier AD603 datasheet, 2007.
- [20] 蒋庆华,苑伟政,常洪龙,等.一种改进的振动式微机械陀螺驱动电路[J].传感技术学报,2008,21(3):536-538.



王玉朝(1985-),男,山东人,西北工业大学微/纳米系统实验室硕士研究生,主要研究方向为 MEMS 谐振式压力传感器,tinghx@163.com



苑伟政(1962-),男,西北工业大学教授,博士生导师,西北工业大学微/纳米系统实验室(陕西省重点实验室)主任,mems@nwpu.edu.cn。