

## A Novel Closed-Loop Drive Circuit for the Micromachined Gyroscope

MO Bing, LIU Xiao-wei\*, TAN Xiao-yun, DING Xue-wei, DONG Chang-chun

(MEMS Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract :** The closed-loop drive circuit is widely used in high performance micromachined gyroscopes. Most of the closed-loop drive circuit consists of an A GC module to control the amplitude of the output signal. But the A GC module may restrict the linear operational range of the whole circuit and limit the amplitude of the output signal, so that deteriorates sensitivity and stability of the gyroscope system. The equivalent model of the closed-loop drive system is investigated, based on this, a novel closed-loop drive circuit is presented. In this circuit, a comparator is used to instead of the A GC circuit, which overcomes the disadvantages of limited linear operational range and limited output signal amplitude.

**Key words :** micromachined gyroscope; closed-loop; equivalent model

EEACC :2570D; 1205

## 微机械陀螺闭环驱动电路的新方法

莫 冰, 刘晓为\*, 谭晓昀, 丁学伟, 董长春

(哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 哈尔滨 150001)

**摘 要 :** 闭环驱动方式是当前高性能微机械陀螺的主流驱动方式, 大部分的闭环驱动电路采用了自动增益控制模块以稳定输出信号的幅度, 但是, 采用 A GC 模块会限制电路的线性工作范围, 而且输出摆幅有限, 因此制约了微机械陀螺系统的灵敏度和稳定性。基于以上不足, 在建立微机械陀螺系统等效电路模型的基础上, 提出一种新颖的解决方案, 采用比较器代替 A GC 模块, 实现对陀螺输出信号幅度的控制, 这种方案不仅电路结构更为简单, 而且增大了整体电路的线性工作范围, 能够始终输出满量程的驱动信号。

**关键词 :** 微机械陀螺; 闭环驱动; 等效电路模型

中图分类号 : TN492

文献标识码 : A

文章编号 : 1004-1699(2008)03-0525-04

闭环驱动方式是当前高性能微机械陀螺的主流驱动方式<sup>[1-6]</sup>, 大部分的闭环驱动电路采用了 A GC(自动增益控制)模块以稳定输出信号的幅度<sup>[7-8]</sup>, 但是, 采用 A GC 模块会限制电路的线性工作范围, 而且输出摆幅有限, 因此制约了微机械陀螺系统的灵敏度和稳定性。微机械陀螺结构在设计时, 驱动方向的品质因数  $Q$  值一般都在 100 以上, 因此, 采用方波信号来驱动微机械陀螺的效果与采用相同频率的正弦波基本一致。基于这个特点, 本文在分析闭环驱动系统工作原理并建立系统等效电路模型的基础上, 提出了一种改进型闭环驱动电路方案, 采用一个比较器代替 A GC 电路, 克服了上述缺点。

### 1 微机械陀螺闭环驱动系统工作原理

图 1 是一个采用闭环静电驱动、电容检测方式的微机械陀螺结构图,  $X$  方向为微机械陀螺的驱动方向, 此方向包含两组电极, 第一组是驱动电极, 通过它给质量块提供静电驱动力, 使微机械陀螺在驱动方向振动。第二组电极是驱动敏感电极, 通过它可得到与质量块振动同频率的电流信号, 用以提供给接口电路, 实现闭环驱动。

图 1 中, 若左右驱动电极与质量块之间的电压差分别是  $V_{dc} + V_{ac} \sin t$  和  $V_{dc} - V_{ac} \sin t$ , 则质量块在  $X$  方向受到的合力  $F_{tot}$  与  $V_{ac} \sin t$  成正比, 即:

$$F_{tot} = F_0 \cdot V_{ac} \sin t \quad (1)$$

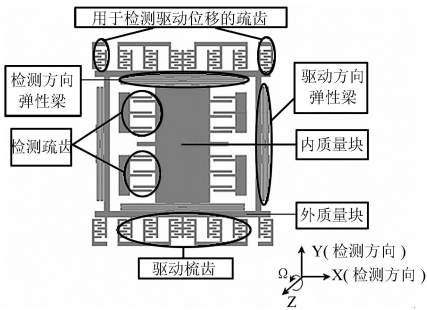


图 1 闭环驱动微机械结构框图

其中,  $F_0$  为比例系数, 其值与微机械陀螺的结构参数有关, 一旦结构设计完毕,  $F_0$  的值为一常数。

此时, 在  $X$  方向的动力学方程为:

$$M_d \frac{d^2 x}{dt^2} + d \frac{dx}{dt} + K_d \cdot x = F_{tot} \tag{2}$$

将方程 (1) 代入方程 (2), 求解微分方程, 并只考虑解中稳定项得:

$$x(t) = \frac{F_0 \cdot V_{ac} \sin(\omega t + \varphi)}{M_d \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_d^2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2M_d \omega_d}\right)^2}} \tag{3}$$

其中  $\omega_d = \sqrt{K_d/M_d}$ , 表示驱动模式的固有频率,  $Q = M_d \omega_d / d$ , 表示陀螺在驱动方向的品质因数,  $\varphi = \arctan \frac{2d\omega}{2 - \omega^2}$ 。

图 1 中,  $x$  方向有两组固定电极, 一组是驱动电极, 另外一组是驱动敏感电极, 这组电极的活动极板与驱动电极的活动极板通过质量块连接在一起, 因此运动方式完全相同。由于活动极板在  $x$  方向变化导致驱动敏感电容大小发生变化, 若此时驱动敏感电容两端存在直流电压  $V_p$ , 则驱动敏感固定电极就有敏感电流流入或流出, 且此电流与  $\frac{dx}{dt}$  成正比, 其比例系数为  $K$  与微机械陀螺的结构参数有关, 一旦结构设计完毕,  $K$  值为一常数, 即:

$$i = K \frac{dx}{dt} \tag{4}$$

闭环驱动电路检测驱动敏感电极中的电流, 将其转换成电压并放大, 然后加载在驱动电极上使陀螺在驱动方向振动。

2 微机械陀螺闭环驱动系统等效电路

将式 (2) 两边对时间  $t$  求导, 并令  $v_x = \frac{dx}{dt}$ , 表示质量块在  $X$  方向的瞬时振动速度, 得到:

$$M_d \frac{d^2 v_x}{dt^2} + d \frac{dv_x}{dt} + K_d \cdot v_x = \frac{dF_{tot}}{dt} \tag{5}$$

方程 (5) 可以采用图 2 的电路来等效。根据基尔霍夫定理, 图 2 的方程为:

$$C \frac{d^2 V_1}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{dV_1}{dt} + \frac{1}{L} V_1 = \frac{dI_1}{dt} \tag{6}$$

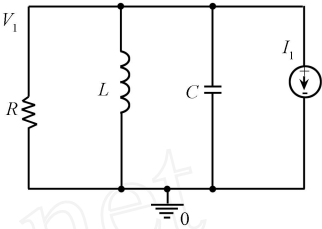


图 2 微机械陀螺驱动模式等效电路模型

根据表 1 的对应关系, 建立了微机械陀螺驱动模式的等效电路模型。

表 1 陀螺动力学模型与电路模型的等效关系

动力学模型参数	电学模型参数
质量 $M_d$	电容 $C$
阻尼力系数 $d$	电阻的倒数 $1/R$
弹性系数 $K_d$	电感的倒数 $1/L$
驱动力 $F_{tot}$	电流源 $I_1$
$X$ 方向振动速度 $v_x$	电压 $V_1$

在式 (4) 中, 电流  $i$  与  $\frac{dx}{dt}$  成正比, 比例系数是  $K$ 。

$\frac{dx}{dt}$  就是质量块在  $X$  方向的瞬时速度, 即式 (5) 中的  $v_x$ , 在等效电路图 2 中是电压  $V_1$ 。因此, 电流  $i$  可以通过一个由  $V_1$  电压控制的压控电流源实现, 比例系数是  $K$ 。

在式 (1) 中, 质量块受到的合力  $F_{tot}$  与驱动电路产生的交流电压  $V_{ac} \sin t$  成正比, 比例系数是  $F_0$ 。在图 2 中, 我们用电流  $I_1$  来等效质量块在驱动方向受到的合力  $F_{tot}$ , 因此, 在整体系统建模时, 图 2 中的电流源应该是一个压控电流源, 其受电路输出交流电压  $V_{ac} \sin t$  的控制, 比例系数是  $F_0$ 。

图 3 是微机械陀螺闭环驱动系统的整体模型,

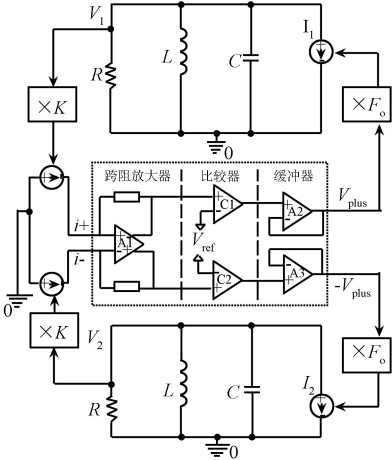


图 3 采用比较器的闭环驱动系统等效电路模型  
因为闭环驱动电路的输入信号是两个反向交流电

流,输出信号是两个反向交流电压,因此使用了两个完全一致的结构等效模型。虚线框里为本文介绍的闭环驱动电路框图,其中  $A_1$  为全差分运算放大器,  $C_1$  和  $C_2$  为比较器,  $A_2$  和  $A_3$  为运算放大器。

### 3 高 $Q$ 值微机械陀螺闭环驱动电路的新方法原理

传统的闭环驱动电路普遍采用 AGC 模块实现对输出交流电压幅度的控制,但是由于 AGC 模块的线性工作范围有限,因此整体电路的工作范围较小。此外,为了保证 AGC 模块正常工作,设计时电路的输出电压通常都不会设计成电源电压允许的最大值,因此限制了系统的灵敏度。

若采用比较器代替 AGC 模块来实现对交流电压幅度的控制,因为比较器不是线性工作的,所以不会限制电路系统的工作范围。此外,无论输入信号幅度多大,比较器始终输出一个与输入信号频率相同的方波信号,且方波的峰峰值是电源电压达到了最大值。

采用方波信号驱动微机械陀螺结构,要求陀螺结构在驱动方向有较高的  $Q$  值,下面从理论进行分析。

一个频率是  $\omega$ ,幅值是  $V_{pp}$  的方波信号  $V_{plus}$  可以进行傅立叶展开如下:

$$V_{plus} = \frac{4}{\pi} V_{pp} \left[ \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + \dots \right]$$

(7)

由于是闭环驱动,因此方波的基频  $\omega = \omega_d$ ,将 (7) 式代入 (3) 式,假设  $Q$  值为 100,并令  $C_3 = 4V_{pp} F_0 / M \omega_d^2$ ,得到:

$$x(t) = 100 \cdot C_3 \sin(\omega_d t + \varphi_1) + \frac{1}{24} \cdot C_3 \sin(3 \omega_d t + \varphi_2) + \frac{1}{120} \cdot C_3 \sin(5 \omega_d t + \varphi_3) + \dots$$

(8)

由 (8) 式可见,当  $Q = 100$  时,方波的三次谐波分量的幅值只有基波分量的  $1/2400$ ,而五次谐波分量的幅值只有基波分量的  $1/12000$ 。可见,此时方波中的基波对  $x(t)$  起绝对作用,其他高次谐波对  $x(t)$  中的作用可以忽略不计。通常微机械陀螺在驱动方向的  $Q$  值都在 100 以上,因此图 3 的方法普遍适用。

图 3 中,若取  $C = 1\text{ nF}$ ,  $L = 0.1\text{ H}$ ,  $R = 1\text{ M}\Omega$ , 则有  $\omega_d = 1/\sqrt{LC} = 10000\text{ (rad/s)}$ ,  $Q = R\sqrt{C/L} = 100$ ,  $f = \omega_d/2\pi = 1592\text{ (Hz)}$ ,图 4 是此时图 3 电路的仿真结果,可以看出驱动信号是方波信号,而电压  $V_1$  的波形仍然是正弦波,这意味着即使采用方波

驱动,微机械陀螺在驱动方向的瞬时位移仍是正弦变化的。图 3 中,如果  $C$  从  $1\text{ nF}$  变化到  $100\text{ nF}$ ,则  $\omega_d$  从 10000 变化到 100000。即使  $\omega_d$  变化得这么大,驱动信号的峰峰值基本不改变,始终等于电源电压,仿真结果如图 5。由于  $\omega_d$  发生变化时,驱动电压的峰值始终稳定且保持在最大值,由公式 (1) 可以知道,采用图 3 的闭环驱动电路,驱动力  $F_{tot}$  的峰值始终稳定且保持在电源电压允许的最大值。

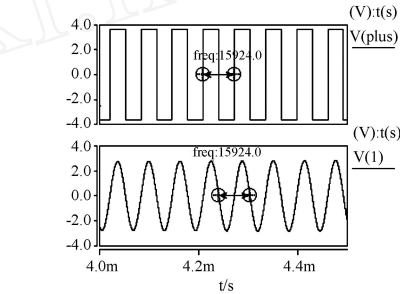


图 4  $Q$  为 100 时图 3 的仿真结果

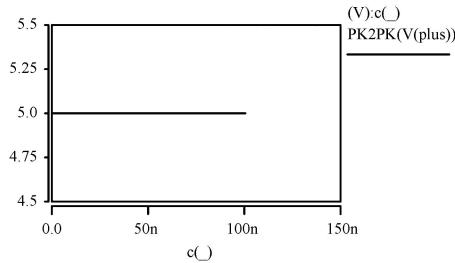


图 5 驱动模式固有频率变化时驱动信号峰峰值的仿真结果

### 4 结论

本文介绍了一种新颖的微机械陀螺闭环驱动方式,对于驱动方向  $Q$  值在 100 以上的陀螺结构普遍适用。此方法采用比较器代替通常微机械陀螺闭环驱动电路中的 AGC 模块来控制输出信号的幅度。克服了采用 AGC 模块电路线性工作范围较小,输出摆幅有限的缺点。当微机械陀螺驱动模式固有频率变化时,此电路能够始终输出满量程的方波驱动信号。

#### 参考文献:

[1] Acar C, Painter C C, Schofield A R, et al. Robust Micromachined Gyroscopes for Automotive Applications [C]// 2005 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show-NSTI Nanotech 2005 Technical Proceedings. Anaheim, United States, 2005: 375-378.

[2] Ko H, Park S, Choi B, Park Y, et al. Intelligent Digital 3-axis IMU for Automotive and Robotic Applications[C]// 2005 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show-NSTI Nanotech 2005 Technical Proceedings. Anaheim, United States, 2005: 431-434.

[3] Huster A, Frew E W, Rock S M. Relative Position Estimation for AUVs by Fusing Bearing and Inertial Rate Sensor

- Measurements[C]// Proceedings of the Oceans 2002 Conference. Biloxi, United States, 2002: 1857-1864.
- [4] Leland R P, Lipkin Y, Highsmith A. Adaptive Oscillator Control for a Vibrational Gyroscope[C]// Proceedings of the American Control Conference. Denver, United States, 2003: 3347-3352.
- [5] Leland R P. Adaptive Control of a MEMS Gyroscope Using Lyapunov Methods[J]. Control System Technology. 2006, 14(2): 278-283.
- [6] Leland R P. Lyapunov Based Adaptive Control of a MEMS Gyroscope[C]// Proceedings of the American Control Conference. Anchorage, United States, 2002: 3765-3770.
- [7] Yang Bo, Su Yan, Zhou Bailing. New Closed-loop Driving Circuit of Silicon Micromachined Vibratory Gyroscope[J]. Chinese Journal of Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics. 2005, 22(2): 150-154.
- [8] Aaltonen L, Saukoski M, Halonen K. Fully Integrated Charge Pump for High Voltage Excitation of Bulk Micromachined Gyroscope[C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS. Kobe, Japan, 2005: 5381-5384.



莫冰(1981-),男,博士,主要研究领域为微机械惯性传感器信号处理电路, mobing @hit.edu.cn



刘晓为(1955-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为 MEMS 系统,传感器与执行器及集成电路, lxw @hit.edu.cn