

·信号与信息处理·

## 无驱动结构硅微机械陀螺的信号处理

徐国文

(海军某军事代表室, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 微机械陀螺因其微型化、低成本等优点, 广泛用于微系统的姿态稳定与控制系统。研究了无驱动结构硅微机械陀螺的信号处理技术。通过硬件电路和软件算法及补偿技术, 将旋转载体的滚动、俯仰和偏航的三维姿态角速度信号同时提取并输出。该陀螺可用于旋转载体的姿态测量和控制技术领域。

**关键词:** 无驱动; 硅微机械; 陀螺; 传感器

中图分类号: V241.5; TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)03-0053-04

## Signal Processing for Non-driven Silicon Micromachining Gyro

Xu Guo-wen

(Navy Military Representative Office, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** The micro-scale and low cost micromachining gyro is widely used in the attitude stabilization and control system of Microsystems. The signal processing technology for the non-driven silicon micromachining gyro is studied. The signal for 3D attitude angular velocity of the roll, pitch and yaw of the rotating carrier is extracted and output by hardware circuits, software algorithm and compensation technique. The gyro is used in the attitude measurement and control technology fields of the rotating carrier.

**Key words:** non-driven; silicon micromachining; gyro; sensor

众所周知, 不同原理结构的陀螺种类繁多, 这些陀螺都有不同的用途, 但他们都有体积大、成本高等几乎不可克服的缺点。近年来发展起来的微机械陀螺有微型化、低成本等其他陀螺难于媲美的优点, 广泛用于微系统的姿态稳定与控制系统<sup>[1-2]</sup>。微机械陀螺可分为有驱动结构和无驱动结构两类。前者由驱动部分和敏感部分组成, 相对于后者结构设计制作较复杂、成本高。无驱动结构硅微机械陀螺利用旋转体自身的旋转作为驱动力, 陀螺自身没有驱动部分, 因此, 结构设计制作简单, 成本低。

无驱动结构硅微机械陀螺可用于旋转载体的姿态修正, 其特点是能同时敏感载体的旋转、俯仰和偏航角速度, 即该陀螺一个具有相当于3个互相垂直安装的一般角速度陀螺的功能。

### 1 工作原理

无驱动结构硅微机械陀螺安装在旋转体的对称中心, 它由两块陶瓷片和一块硅片构成三明治结构。其结构原理图如图1所示, 陶瓷电极极板和单晶硅摆构成电容式敏感元件, 其结构如图2所示, 在陀螺单晶硅摆上建立坐标系  $O-XYZ$ , 用  $\dot{\varphi}$  表示旋转体的旋转角速度,  $\dot{\alpha}$  表示单晶硅摆绕弹性扭转支撑柱摆动的相对角速度,  $\Omega$  表示被测角速度。由刚体转动动力学可得单晶硅摆绕  $Y$  轴转动运动方程为

$$B\ddot{\alpha} + D\dot{\alpha} + [(C-A)\dot{\varphi}^2 + K_T]\alpha = (C+B-A)\dot{\varphi}\Omega\sin\varphi t \quad (1)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为单晶硅摆对应于  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的转动惯量;  $D$  为单晶硅摆偏转时受到的空气阻尼因子;

收稿日期: 2011-05-09

作者简介: 徐国文(1970-), 男, 辽宁鞍山人, 工程师, 主要从事电子、光电陀螺等方面的研究工作。

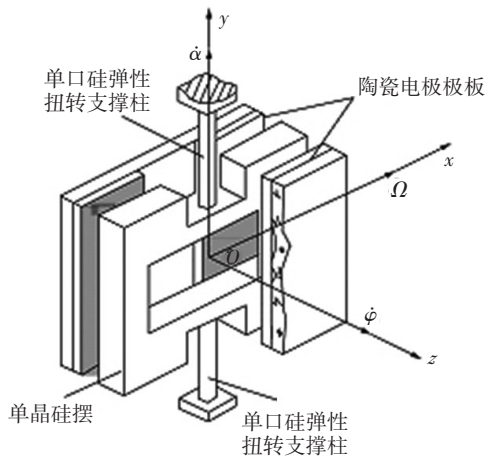


图1 无驱动结构硅微机械陀螺的结构原理

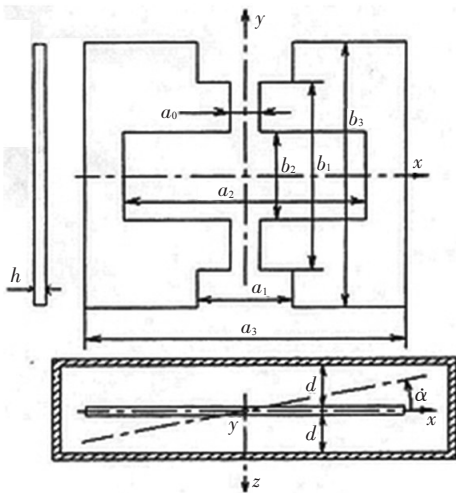


图2 敏感结构示意图

$K_T$ 为单晶硅弹性扭转支撑柱的扭转刚度系数。

方程(1)的稳态解可得该陀螺的角振动幅度为

$$\alpha = \frac{(C+B-A)\dot{\varphi}}{\sqrt{[(C-B-A)\dot{\varphi}^2 + K_T]^2 + (D\dot{\varphi})^2}} \Omega \sin(\dot{\varphi}t - \beta) \quad (2)$$

式中,  $\beta$ 为输出信号的相位滞后。

由式(2)可知,单晶硅质量块发生偏转的角振动频率等于载体旋转角速度 $\dot{\varphi}$ ,角振动幅度 $\alpha$ 与载体俯仰和偏航角速度 $\Omega$ 存在比例关系。以上分析可知,通过结构设计可使输出信号稳定,但输出信号 $\alpha$ 的幅值仍与载体的旋转角速度 $\dot{\varphi}$ 有关,可以通过测量单晶硅质量块角振动信号频率得到载体旋转角速度 $\dot{\varphi}$ ;通过角振动信号 $\alpha$ 的幅值解算出载体俯仰或偏航角速度 $\Omega$ ,也可通过 $\dot{\varphi}$ 控制放大电路增益,使 $\alpha$ 的幅值与 $\Omega$ 保持线性变化,通过测量 $\alpha$ 的幅值直接得到载体俯仰或偏航角速度 $\Omega$ 。式(2)中的相位

滞后 $\beta$ 可以通过调整陀螺敏感轴安装角度的方法补偿。所以,该陀螺在技术上能实现同时检测载体的旋转、俯仰和偏航角速度<sup>[3]</sup>。

在输入角振动条件下,该陀螺的输出波形如图3所示。该信号中含有载体运动的三维姿态角速度信息,可以通过测量其频率得到载体滚动角速度,通过测量其幅值和相位得到载体俯仰或偏航角速度和方向。

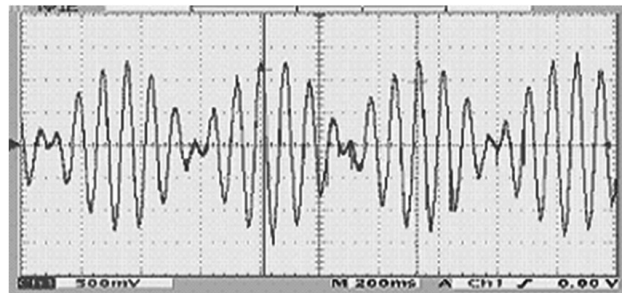


图3 输入为谐波角速度时偏航或俯仰角速度的波形

## 2 检测电路与信号处理

微机械陀螺信号可用图4所示的电路进行检测。单晶硅摆以角速率 $\dot{\varphi}$ 旋转时,偏转角 $\alpha$ 的变化将导致单晶硅摆和陶瓷电极极板构成的4个电容器 $C_1, C_2, C_3, C_4$ 发生变化。将电容变化信号转换成电压信号之后经放大,可以得到幅值 $\alpha$ 与被测角速度 $\Omega$ 相关的电压信号。敏感载体旋转和俯仰角速度的微机械陀螺的电容变化率较小,容易受分布电容影响,因此,信号处理采用交流电桥作接口的变换电路,将电容式敏感元件作交流电容电桥的工作臂,电桥供电电源为等幅高频稳定的交流电压。当工作电容发生变化时,在电桥输出端可获得受工作电容变化调制的调幅波信号输出,调幅波信号放大、解调后,获得低频信号输出。

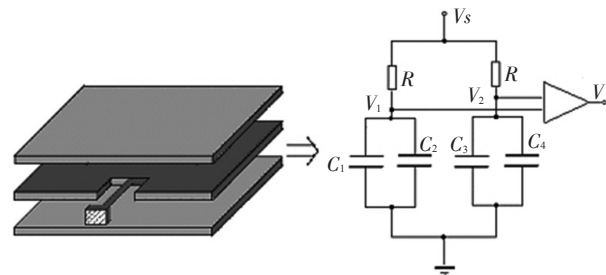


图4 电容敏感检测电路

信号处理电路原理如图5所示,包括电源稳压

器、基准电压源、方波发生电路、电容电桥、差分放大电路、带通滤波电路、低通滤波电路、程控增益放大电路、相位修正电路、极性选择开关电路和单片机电路等。

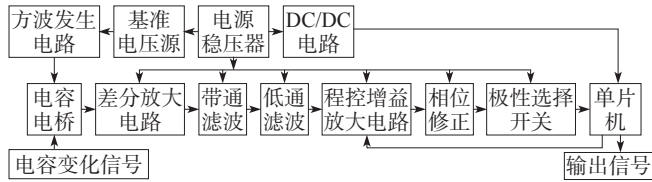


图5 信号处理电路原理框图

单片机信号处理电路对采样信号进行零位-温度补偿、灵敏度-温度补偿、相位补偿和非线性补偿,再由RS232接口或RS485接口将信号以数字方式输出,其原理框图如图6所示。

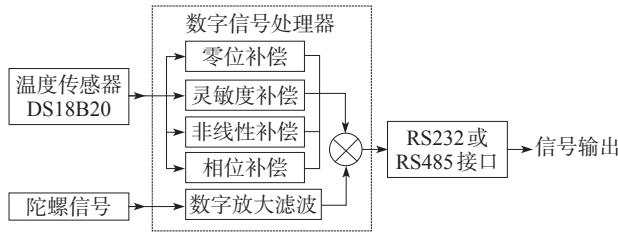


图6 信号处理原理框图(单片机部分)

单片机采用TI公司的MSC1214Y3,是功能集成度极高的混合讯号组件,包含8051微控制器和闪存的高精度ADC和DAC,内建高分辨率 $\Delta$ - $\Sigma$ 模拟数字转换器、两组16位数字模拟转换器、8信道多任务器、烧断侦测(burn-out detect)电流源、可选的缓冲式输入、offset DAC、可程序增益放大器、温度传感器、电压参考、8位微控制器以及由闪存组成的程序和数据存储器。同时,为了提高温度补偿的精度,选用DALLAS公司的DS18B20数字单总线温度传感器作为检测环境温度变化的器件,该器件的测量温度范围为 $-55\sim +125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在 $-10\sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 3 软件算法和补偿技术

单片机数字补偿是指利用单片机系统对传感器的敏感信号进行模/数转换后,利用数字系统进行实时处理,建立数字处理算法,从而实现数字化补偿。在对传感器进行补偿时,首先在各温度点下对敏感元件的零位输出电压和灵敏度进行采样,并用

多项式拟合曲线公式计算各温度点下的零位补偿值和灵敏度补偿值,建立零位-温度参数表和灵敏度-温度参数表。之后,测试敏感元件输出值,并建立线性度补偿参数表。在传感器工作过程中,定时对温度传感器的输出进行采样,得到温度数据,在2个参数表中查找并获得对应于该温度点的零位电压补偿值和灵敏度补偿值,从而进行零位-温度补偿和灵敏度-温度补偿,再将补偿后的输出值,查找线性度补偿参数表并获得线性补偿值,并进行线性补偿和相位计算,即可得到最终的输出值。单片机软件补偿原理图见图7。

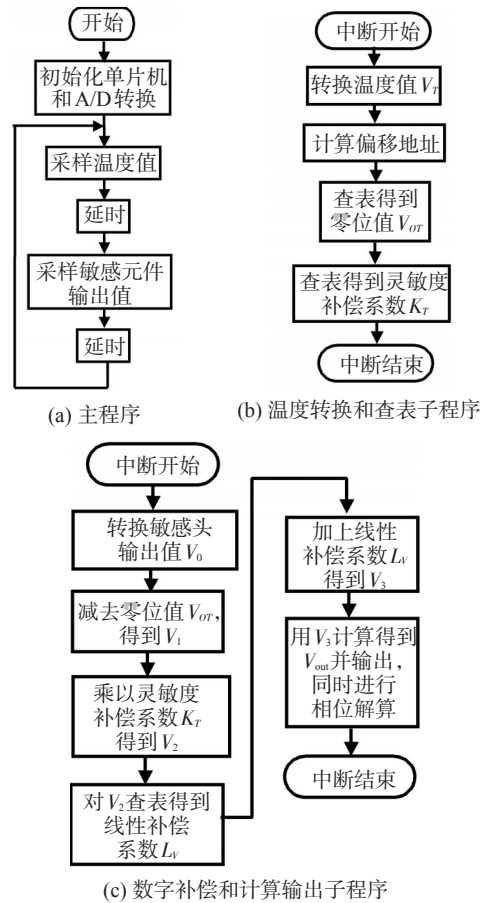


图7 数字补偿程序流程图

通过实验测试,无驱动结构硅微机械陀螺达到的性能指标如表1所示。

### 4 结束语

采用MEMS微机械加工制作工艺制作无驱动结构硅微机械陀螺的敏感元件,根据其敏感机理和信号

表1 无驱动结构硅微机械陀螺达到的性能指标

性能参数	达到指标
滚动角速度/(r/s)	1~40
俯仰和偏航角速度/(°/s)	500
分辨率/(°/s)	≤0.001
非线性度/(FS)	≤1%
零位漂移/(°/s/h)	≤0.01
工作温度/(°C)	-40~85
外形尺寸/mm	≤22×22×5
质量/g	≤8

输出特性,可以通过硬件电路和软件算法及补偿技术,将载体的滚动、俯仰和偏航的三维姿态角速度信号同时提取出来,经过处理后输出给系统以实现旋转载体在运动过程中的姿态检测和控制。已经研制成功CJS-DR-WB01型硅微机械陀螺,图8是实用产品的照片。该陀螺具有结构简单、可靠性高、抗震能力强、响应时间短、成本低等特点,可广泛用于石油钻井(钻头)、汽车(轮胎)的姿态检测与控制系统。

### 参考文献

- [1] 鲍敏杭. 微机械陀螺进展[J]. 世界产品与技术, 2000, 20(10): 20-22.
- (上接第27页)
- [33] Shou Q, Jiang Q, Guo Q. The closed-form solution for the 2D Poisson equation with a rectangular boundary[J]. J. Phys. A, 2009, 42(20): 205202-7.
- [34] Shou Q, Liang Y B, Jiang Q, et al. Boundary force exerted on spatial solitons in cylindrical strongly nonlocal media[J]. Opt. Lett., 2009, 34(22): 3523-3525.
- [35] Hu W, Zhang T, Guo Q. Nonlocality-controlled interaction of spatial solitons in nematic liquid crystals[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(7): 071111-3.
- [36] Courtial J, Dholakia K, Allen L, et al. Gaussian beams with very high orbital angular momentum[J]. Opt. Commun., 1997, 144: 210-213.
- [37] Zhao Y Q, Edgar J S, Jeffries G D M, et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion in a strongly focused optical beam[J]. Phys. Rev. Lett., 2007, 99(7): 073901-4.
- [38] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. Opt. Commun., 1993, 96: 123-132.
- [2] 李新刚,袁建平. 微机械陀螺的发展现状[J]. 力学进展, 2003, 33(3): 289-301.
- [3] Zhang Fuxue. THE STRUCTURE PRINCIPLE OF SILICON MICROMACHINED GYROSCOPE DRIVEN BY THE ROTATING CARRIER[J]. International Journal of Information Acquisition, 2005, 2(3): 203-216.
- [4] 傅建国,王孝通,李博,等. MEMS陀螺随机误差模型研究[J]. 传感器技术, 2005, 24(3): 75-77.
- [5] 张智永,范大棚,李凯,等. 微机电陀螺零点漂移数据滤波方法的研究[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(4): 69-71.
- [6] 陈永,焦继伟,王惠泉,等. 大气下工作的微机械陀螺的设计及其噪声特性[J]. 半导体学报, 2005, 26(1): 148-152.
- [39] Rotschild C, Saraf M, Barak A, et al. Frontiers in Optics, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2008), paper FME2.
- [40] Kartashov Y Y, Vysloukh V A, Torner L. Soliton spiraling in optically induced rotating Bessel lattices[J]. Opt. Lett., 2005, 30(6): 637-639.
- [41] Jarutis V, Matijosius A, Trapani P D, et al. Spiraling zero-order Bessel beam[J]. Opt. Lett., 2009, 34: 2129-2131.
- [42] Paterson L, MacDonald M P, Volke-Sepulveda K, et al. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures [J]. Science, 2002, 296(5570): 1101-1103.
- [43] Paterson C, Smith R. Helicon waves: propagation-invariant waves in a rotating coordinate system[J]. Opt. Commun., 1996, 124(1-2): 131-140.
- [44] Paakkonen P, Lautanen J, Honkanen M, et al. Rotating optical fields: experimental demonstration with diffractive optics[J]. J. Mod. Opt., 1998, 45: 2355-2369.
- [45] Anastassiou C, Pigier C, Segev M, et al. Self-trapping of bright rings[J]. Opt. Lett., 2001, 26(12): 911-913.

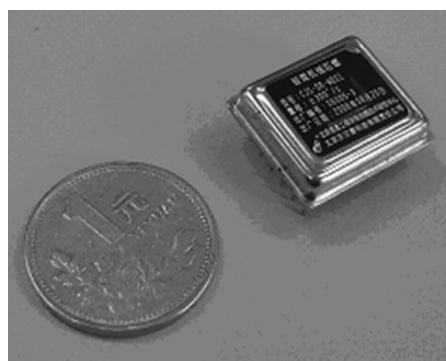


图8 硅微机械陀螺照片