

Design and Testing Analysis of Double Closed Loop Vacuum Silicon Microgyroscope *

XIA Duzhu, ZHOU Bai-ling*, WANG Shou-rong

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The quality factor of Silicon Microgyroscope sealed with CAN metal package in this paper working under the air pressure of 10 Pa is near 3000. Self oscillating and closed loop methods are adopted in measure and control circuit. Single side driving and sensing methods are used to simplify the whole circuit. Two channel decomposition and reconstruction closed loops are applied. The testing results demonstrate that the useful and quadrate signal will not interact because of their phase decoupling. Under the condition of the scale factor of 10 mV/(9 S^{-1}), the zero bias stability attains 60 h with linearity coefficient of 400 ppm and simulated bandwidth of 150 Hz, which has been improved two orders of magnitude better than that under the condition of atmospheric pressure.

Key words: silicon microgyroscope; self oscillating; double closed loop; scale factor; zero bias stability
EEACC:7632;2575

双闭环真空硅微陀螺仪设计及性能测试分析 *

夏敦柱, 周百令*, 王寿荣

(东南大学 仪器科学与工程学院, 南京 210096)

摘要: 所设计的硅微陀螺仪工作在 10 Pa, 品质因素达到 3000, 采用 CAN 金属壳封装形式, 测控线路采用闭环自激驱动, 力反馈式闭环检测方式。驱动采用单边驱动单边检测, 尽量使线路简化; 检测采用双重分解和重构回路。测试结果表明: 有用信号和正交信号实现很好的相位解耦, 互不影响。在实现标度因素 10 mV/(9 S^{-1}) 的情况下, 零偏稳定性已达到了 60 h; 线性度已达到了 400 ppm; 带宽仿真达到 150 Hz; 这较以前设计的空气下闭环开检方式下的硅微陀螺性能提高了近 2 个数量级。

关键词: 硅微陀螺仪; 自激驱动; 双闭环检测; 标度因素; 零偏稳定性

中图分类号: O318.2

文献标识码: A **文章编号:** 1004-1699(2008)02-0241-03

硅微机械陀螺仪是一种重要的惯性传感器, 用它实现的惯性仪表正愈来愈广泛地应用于航天测控和车载导航系统中^[1-3]。目前国内许多科研院所设计的陀螺均工作在大气环境下。显然, 这限制了传感器的机械灵敏度及系统精度, 相反对检测电路却提出了更高的要求, 而且国内的硅片级真空封装工艺尚未起步, 这需要探索一条新的封装方法, 保证硅微陀螺仪工作在高机械灵敏度状态。开环检测可以简化检测线路的设计, 这对测控线路集成化、小型化非常有利, 且基本可以满足低精度硅微陀螺仪性能指标要求, 因此该方式已成功用在国外硅微陀螺仪的产品上。为了保证开环检测时有一定的测量带宽, 且系统不出现谐振峰, 要求两模态必须保证一定的频差, 这将会限

制检测模态品质因数大小, 也就是限制了系统整体的机械灵敏度, 这造成接口线路的信噪比较低, 实现的陀螺仪精度一般较低; 同时开环检测还受到检测位移与检测电容间非线性的影响, 测量范围较小; 另外陀螺仪应用场合复杂, 经常受到冲击、过载、振动等各种扰动影响, 开环检测将无法保证硅微陀螺仪输出稳定性和可靠性。总之, 为了提高系统精度和应用可靠性, 硅微陀螺仪须采用闭环驱动、闭环检测方式。

1 硅微陀螺仪闭环检测方案

由于硅微陀螺的输出信号成分复杂, 但基本可以分解成相互正交的两部分^[4]: 正交通道和哥氏通道。正交通道主要包含正交耦合信号和部分位移耦

基金项目: “八六三”国家高科技研究发展计划资助项目(2002AA812038)

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2007-12-30

合信号;哥氏通道主要包含哥氏信号和部分位移耦合信号。对于变间距检测的硅微陀螺,位移耦合信号相对正交耦合信号较小,因此干扰信号和哥氏信号可以实现很好的分离。但对变面积检测的硅微陀

螺恰恰相反,正交耦合信号相对位移耦合信号较小,因此干扰信号和哥氏信号只能通过调相解调实现正交分离。上述两种陀螺仪采用的双通道闭环检测方案如图1所示。

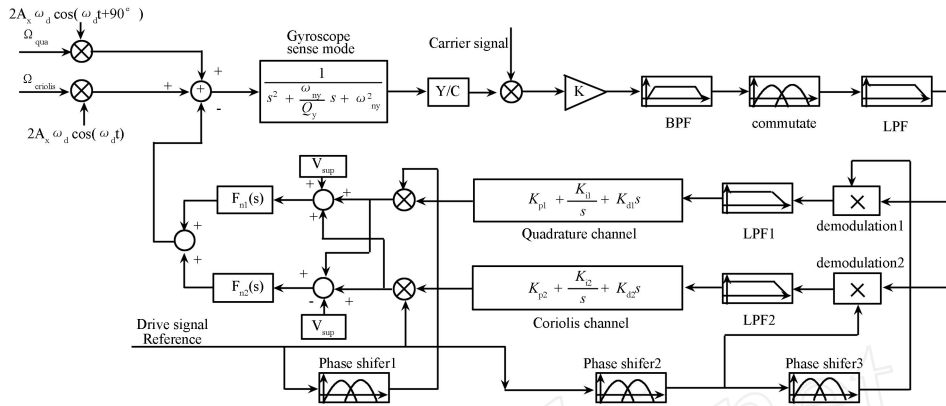


图1 双通道闭环控制基本功能框图

2 系统带宽校正仿真

如图2所示为简化的哥氏信号闭环检测原理框图^[5]。

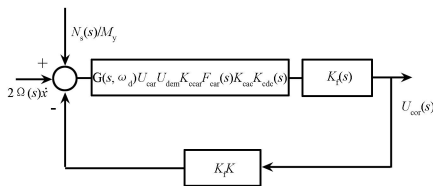


图2 简化的哥氏信号闭环检测原理框图

其中, $2 \Omega(s)x$ 表示哥氏加速度; $N_s(s)/M_y$ 为等效输入角速率噪声; $K_f K$ 表示力矩器和可调反馈增益;

$G(s, d) U_{car} U_{dem} K_{cor} F_{cac}(s) K_{cac} K_{cdc}(s)$ 表示前向通道; $G_f(s)$ 表示校正环节。实际上,正交通道和哥氏通道实现的双闭环检测控制原理是一致的。因为它们处理的信号都是同频的,不同的只是相位和变化规律不同。这两种通道的闭环控制本质上是交流反馈型随动系统。控制的效果是使硅微陀螺仪在敏感方向始终保持受力平衡,即位移近似为零。与典型的随动系统不同,两个通道都需要进行解调和调制从而实现快速闭环控制。由于两通道正交解耦,互不干扰,可以对两通道分别进行闭环控制性能分析,对有用信号的哥氏通道而言,闭环控制情况下,陀螺的闭环传递函数为

$$G_c(s) = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s) K_f G_f(s)} = \frac{\frac{K_{y-v} U_{car} U_{dem} K_{cor} F_{cac}(s) K_{cac} K_{cdc}(s)}{s^2 + \frac{m}{Q_y} s + \frac{2}{n_y}} (K_p + \frac{K_p}{T_i} \cdot \frac{1}{s} + K_p s)}{1 + \frac{K_{y-v} U_{car} U_{dem} K_{cor} F_{cac}(s) K_{cac} K_{cdc}(s)}{s^2 + \frac{m}{Q_y} s + \frac{2}{n_y}} K_f (K_p + \frac{K_p}{T_i} \cdot \frac{1}{s} + K_p s)}$$

很显然,闭环后的陀螺传递函数是一个高阶系统,可以通过仿真计算。校正环节与系统带宽关系如表1所示,仿真结果如图3所示。

表1 校正环节与系统带宽关系

校正环节	$\frac{0.002s^2 + 0.5s + 1}{s}$	$\frac{0.0015s^2 + 2s + 1}{s}$	$\frac{0.0025s^2 + 3s + 1}{s}$	$\frac{0.005s^2 + 3s + 2}{s}$
K_p	0.5	2	3	3
$T_i(s)$	0.5	2	0.3	1.5
(s)	0.004	0.0075	0.0025	0.0025
仿真带宽 (Hz)	60	99.8	146	205

由表1可知,改变校正环节的传递函数,即改变PID参数中的比例系数 K_p 、积分时间常数 T_i 、微分时间常数 对陀螺闭环系统的带宽都有一定的影响。从图3可见,不同校正环节作用下各闭环系统的带宽发生明显改变,同时系统的波特图反映出

的幅值裕度和相位裕度也发生相应变化,因此在校正环节的设计中,不但满足系统带宽要求,同时也要考虑系统的稳定性。在本图中所设计的闭环系统都是稳定可靠的,它们的相位裕度都大于 45° ,幅值裕度也在 30 dB 以上。

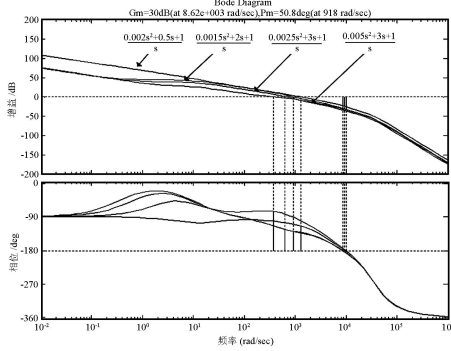


图 3 校正环节与系统带宽关系仿真图

3 实验

硅微陀螺仪工作在 10 Pa,品质因素达到 3000,采用 CAN 金属壳封装形式,测控线路采用闭环自激驱动,力反馈式闭环检测方式。驱动采用单边驱动单边检测,尽量使线路简化;检测采用双重分解和重构回路。测试结果表明:有用信号和正交信号实现了很好的相位解耦,互不影响。在实现标度因素 10 mV/(°S⁻¹)的情况下,零偏稳定性已达到了 60 h;线性度已达到了 400 ppm;带宽仿真达到 150 Hz。图 4 为真空封装和测试平台,图 5~6 分别是标度因

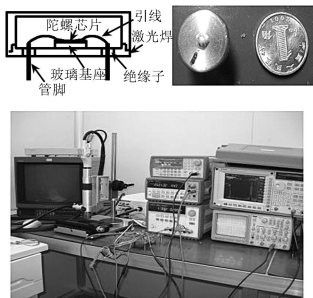


图 4 真空封装和测试平台

素和零偏稳定性测试结果。

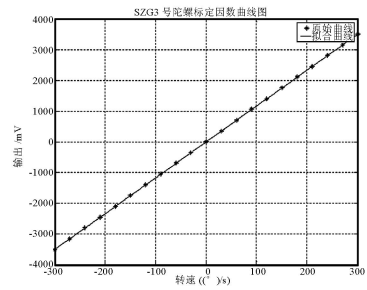


图 5 标度因素测试结果

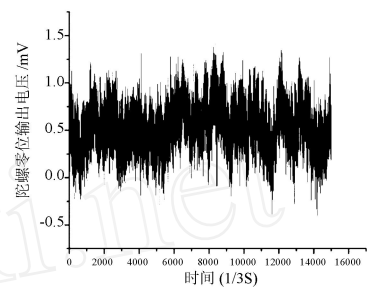
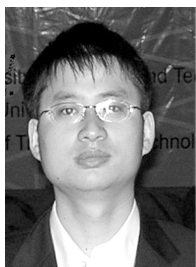


图 6 零偏稳定性测试

参考文献:

- [1] 王寿荣, 硅微型惯性器件理论及应用[M]. 南京:东南大学出版社,2000.
- [2] 曾辉,周百令,苏岩,夏敦柱,微机械陀螺仪检测反馈控制系统研究[J]. 传感器技术, 2005, 25(6):32-34.
- [3] 李万玉,阮爱武,罗晋生,冯培德,硅微机械陀螺接口检测技术的研究[J]. 微电子学,1999, 29(5):344-346.
- [4] P. W. LOVEDAY AND C. A. ROGERS, The Influence Of Control System Design ON The Performance OF Vibratory Gyroscopes [J]. Journal of Sound and vibration 2002, 255(3):417-432.
- [5] Tang, William Chi-Keung, Electrostatic Comb Drive for Oesnant and Actuator Applications[D]. University of California at Berkeley, November 1990.



夏敦柱(1978-),男,博士研究生,研究方向为微惯性传感器信号检测与处理、微惯性导航、制导与控制等,xiadz_1999@163.com。



周百令(1939-),男,教授,博士生导师,从事微惯性技术与测控技术、微惯性导航、制导与控制等方面的研究,zhou-bailing@seu.edu.cn。



王寿荣(1946-),男,教授,博士生导师,东南大学仪器科学与工程学院微惯性系统与器件学术带头人,从事微惯性技术与测控技术方面的研究,srwang@seu.edu.cn。