文章编号：1005-6734(2007)04-0485-03

MEMS 硅微陀螺仪系统级建模与仿真研究

温佰仟，刘建业，李荣冰
（南京航空航天大学 导航研究中心，南京 210016）

摘要：根据 MEMS 陀螺仪敏感哥式加速度、测量角速度的原理，建立 MEMS 陀螺系统级行为模型是分析 MEMS 陀螺仪内部的驱动、检测和信号解调等行为过程及改进陀螺整个系统的性能的重要方法。根据 MEMS 陀螺的动力学方程及其内部组成，将 MEMS 陀螺分成驱动电路、传感器、信号调理电路等三部分，建立了 MEMS 陀螺系统级模拟行为模型，运用相关检测技术对角速度信号进行了提取，并对模型进行了仿真验证。仿真结果验证了所设计模型的有效性，所建模型可以用于 MEMS 陀螺的特性和性能分析。

关 键 词：微电子机械系统；陀螺；模拟行为模型；相关检测；PSPICE
中图分类号：U666.1 **文献标识码：**A

System-level modeling and simulation on silicon MEMS gyroscope

WEN Bai-qian, LIU Jian-ye, LI Rong-bing
(Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the principle of Coriolis acceleration sensing and the angular rate measurement, the system-level modeling for MEMS gyroscope behavior is an important method to analyze the behavior of its driving, detections and signal-demodulation, and to improve the system performance. According to the dynamics equation and its formation, the MEMS gyroscope is divided into three parts, that is, driving circuit, sensors, and signal demodulation circuit. A system-level analog behavioral model of MEMS gyroscope was established, and the input angular rate signal was extracted by using the method of correlation detection. The simulation results demonstrate the validity of the designed model. The designed model can be used to analyze the characteristics and performance of MEMS gyroscope.

Key words: MEMS; gyroscope; analog behavioral model; correlation detection; PSPICE

MEMS（Micro Electron Mechanical System）陀螺不仅价格低，体积小，重量轻，而且可以与微电子加工的电路实现集成，做到机电一体化。从综合性能看，MEMS陀螺适合应用于汽车工业、惯性导航、计算机、机器人、军事以及消费电子等急需大量小型、廉价陀螺的应用领域[1~3]。但相比机械转子陀螺、激光陀螺等传统的陀螺类型，MEMS陀螺的精度相对偏低，这极大地限制了MEMS陀螺的应用范围。为了分析MEMS陀螺整个系统的工作性能，找到提高整个系统精度的方法，合理建立其等效模型是非常必要的。目前比较常用的方法是建立MEMS陀螺的等效电路模型，但是模型建立过程比较复杂，不易实现MEMS陀螺整个系统的仿真。

PSPICE 是在 PC 机上用于电子电路仿真的工具，其模拟行为模型 ABM（Analog Behavioral Model）是将电压控制电压源和电压控制电流源的定义加以扩充，通过关键字实现一些函数表达的控制。这些函数可用标准数学表达式或拉普拉斯变换式来表示，从而使函数计算和电路计算结合起来。它运用描述电路特性的方式而不需要以真实电路来输入与仿真，如此可大幅精简仿真时间及复杂度[4]。本文根据陀螺的动力学原理及其内部组成，将 MEMS 陀螺分成驱动电路、传感器、信号调理电路等三部分，运用 PSPICE 模拟行为模型分别描述各个部分的功能，使整个建模过程清晰明了，能够反映陀螺仪系统总体的工作过程，体现了陀螺仪系统驱动、检测、信号解调等行为过程。

收稿日期：2007-04-17；**修回日期：**2007-07-20
基金项目：航空科学基金资助项目（04D52030）
作者简介：温佰仟（1979—），男，硕士研究生，主要从事微惯性传感器技术研究，E-mail：wenbaiqian@nuaa.edu.cn
联 系 人：刘建业（1957—），男，教授，博士生导师。 E-mail：ljyac@nuaa.edu.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 MEMS 陀螺动力学模型

MEMS 陀螺简化动力学模型如图 1 所示[5]，它具有驱动振动模态和检测振动模态两个工作模态。这两个模态均可以看作质量块-弹簧-阻尼系统在周期性外力作用下的振动行为。X 方向是陀螺驱动振动的方向，Y 方向是检测振动的方向。当陀螺工作时，质量块在驱动力的作用下沿 X 方向作简谐振动，当系统在 Z 方向有角速度 Ω输入时，质量块将在 Y 方向受哥氏力的作用作简谐振动，振动幅度与驱动模态的振动速度以及角速度Ω成正比。

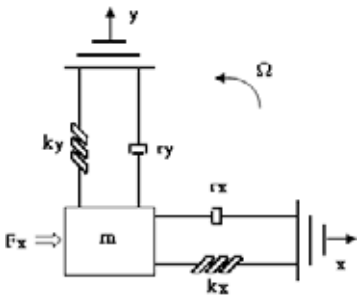


图1 MEMS陀螺动力学模型

Fig.1 Dynamics model of MEMS gyroscope

MEMS 陀螺可以由下面动力学方程描述：

$$m_x\ddot{x}(t)+r_x\dot{x}(t)+k_x x(t)=F_x \tag{1}$$

$$m_y\ddot{y}(t)+r_y\dot{y}(t)+k_y y(t)=-2m_y\Omega\dot{x}(t) \tag{2}$$

其中，$F_x=F_0\sin(\omega_x t)$，F_0 为驱动力的幅值，ω_x 为驱动力的频率，Ω为角速度，m_x、m_y 为驱动质量和检测质量，r_x、r_y 为驱动模态和检测模态的阻尼力系数，k_x、k_y 为驱动模态和检测模态的弹性系数。

2 MEMS 陀螺行为模型建模

2.1 MEMS 陀螺内部功能结构

图 2 是陀螺仪内部电路功能框图，内部电路功能主要由共鸣环、角速度传感器、科里奥利信号通道、角速度输出放大器等几部分组成。

从陀螺仪内部电路功能框图可以看出，陀螺的工作可以看作是接口电路的电学量与陀螺本身机械运动的协同作业过程，在每一个时刻都发生机械参数与电参数的相互转化与影响，因此在对陀螺进行性能研究中，应该能够将这种特征包含进去，实现整个系统的仿真与设计。

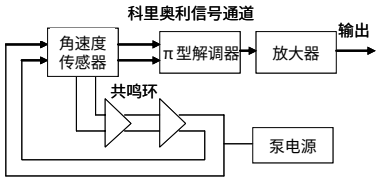


图 2 陀螺仪内部电路功能框图

Fig.2 The functional diagram of gyroscope's internal circuit

2.2 MEMS 陀螺敏感器行为模型

根据 MEMS 陀螺动力学原理及其内部组成，利用 PSPICE 可以建立 MEMS 陀螺各个部分行为模型。陀螺的驱动电路通过一个频率为 2000 Hz 的正弦电压源等效，输入角速度通过一个频率为 10 Hz 的正弦电压源等效。角速度传感器首先简化成质量块-弹簧-阻尼系统，然后根据式（1）（2）可得到陀螺的传递函数为：

$$\frac{X(s)}{F_x(s)}=\frac{1}{m_x s^2+r_x s+k_x} \tag{3}$$

$$\frac{Y(s)}{F_\Omega(s)}=\frac{-1}{m_y s^2+r_y s+k_y} \tag{4}$$

利用两个拉普拉斯环节分别等效 MEMS 陀螺的驱动部分和检测部分，建立 MEMS 陀螺敏感器行为模型如图 3 所示，其相应的响应波形如图 4 所示。

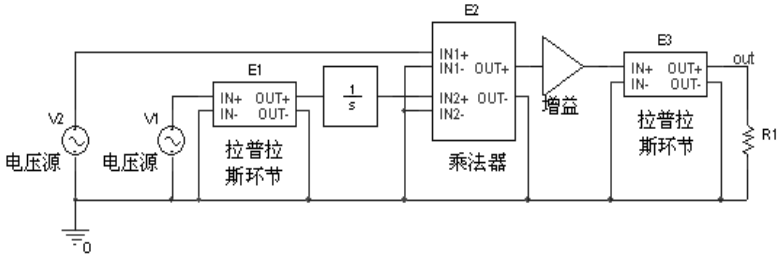


图 3 MEMS 陀螺敏感器行为模型

Fig.3 Behavioral model of MEMS gyroscope's sensor

从图 4 中可以看出，敏感模态的输出位移不仅包含了输入角速度信息，还包含了驱动模态的频率信息。图 4 中的低频曲线是输入的角速度信号，高频曲线是检测方向的角振动位移曲线，可以看出检测振动是由两种抑制载波的双边带调制波合成的波形，其幅度在周期性地缓慢变化。要从振动波形中得到图中低频角速度信号，必须使用同步解调方法对高频波形进行振幅解调。

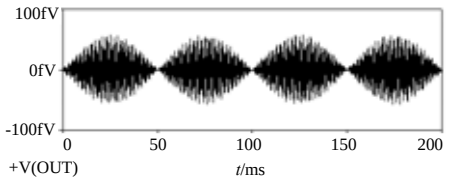


图 4 MEMS 陀螺响应波形

Fig 4 Waveform of MEMS gyroscope's response

2.3 MEMS 陀螺系统行为模型

能否准确检测出系统的输入角速度是 MEMS 陀螺建模成败的关键，因此必须有相应的检测电路对敏感器输出信号进行解调，以模拟 MEMS 陀螺整个系统的工作过程。利用 PSPICE 建立的系统行为模型将 MEMS 陀螺的各个环节紧密结合起来，组成一体化模型，从而实现了整个 MEMS 陀螺的系统模拟。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

MEMS 陀螺输出的电压信号包含哥氏力引起的稳态、暂态输出信号。稳态输出信号包含着角速度信息，但是此信号十分微弱，会被噪声信号淹没，因此研究微弱信号检测对于 MEMS 陀螺十分重要[6]。对于暂态输出信号，通过滤波和结构优化设计完全可以有效抑制其对敏感模态稳态输出信号的影响。

相关检测是一种时域信息的检测方法，主要是对信号和噪声进行相关性分析。相关性分析能从噪声和其它无关信号中找到信号两部分之间或两个信号之间的函数关系，并根据相关性进行检测和提取。本文采用与驱动相同的信号作为参考信号，对输出电压信号进行相关检测；输出电压信号与参考信号经过乘法器后，再经过低通滤波器便可提取角速度信息。

结合前面建立的 MEMS 陀螺敏感结构行为模型，加入信号调理电路部分，科里奥利信号通道通过一个乘法器和一个低通滤波器等效，放大器通过一个增益模块等效。其 MEMS 陀螺系统行为模型如图 5 所示，系统输入角速度与输出信号波形对比曲线如图 6 所示。

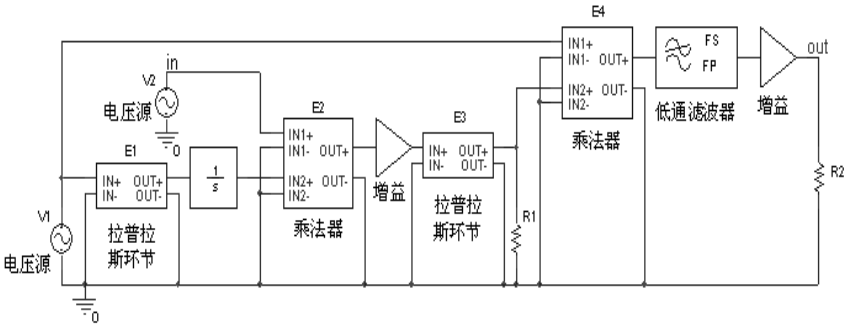


图 5 MEMS 陀螺系统行为模型

Fig.5 The system-level behavioral model of MEMS gyroscope

从图 6 中可以看出，利用相关检测的方法对高频波形进行振幅解调能够提取出角速度信息。为了清楚对两条曲线进行对比，确定陀螺仪的标度因数为 0.652。通过与输入角速度信号相比较，输出信号相位与输入角速度相位一致，输出信号幅度与输入角速度幅度成正比，很好地反映了要测量的角速度信号。由此验证了所设计模型的正确性，所建模型可以用于 MEMS 陀螺的特性和性能分析。

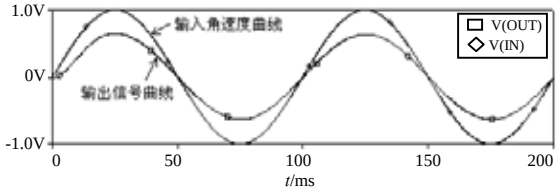


图 6 系统输入角速度与输出信号对比曲线

Fig.6 Comparison output signal with the input angular rate signal of gyroscope

3 结 论

本文根据陀螺的动力学原理及其内部组成，将 MEMS 陀螺分成驱动电路、传感器、信号调理电路等三部分，利用电路模拟工具 PSPICE 建立了 MEMS 陀螺系统级的行为模型，运用相关检测技术对角速度信号进行了提取，并对所建立的模型进行了仿真。仿真结果表明，这种电路仿真的方式适用于 MEMS 陀螺仪建模，可以用于陀螺仪的特性和性能分析；所建立的模型能够阐明 MEMS 陀螺对角速度的测量原理，反映了陀螺的工作过程，体现了陀螺的驱动、检测、信号解调等行为过程。

参考文献（Reference）：

[1] Yazdi N, Ayazi F, Najafi K. Micromachined inertial sensors[C]//Proceedings of the IEEE, 1998, 86(8): 1640-1659.

[2] 李荣冰，刘建业，曾庆化，等. 基于 MEMS 技术的微型惯性导航系统的发展现状[J]. 中国惯性技术学报，2004，12(6).
LI Rong-bing, LIU Jian-ye, ZENG Qing-hua, et al. Evolution of MEMS based micro inertial navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2004, 12(6): 88-94.

[3] 李旭辉. MEMS 发展应用现状[J]. 传感器与微系统，2006，25(5)：7-9.
LI Xu-hui. Status of development and application of MEMS technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(5): 7-9.

[4] Ahra Lee, Hyoungho Ko, Yonghwa Park, et al. Modeling and simulation of the microgyroscope driving loop using SPICE[J]//Journal of Physics: Conference Series 34. International MEMS Conference, Singapore, 2006: 1020-1025.

[5] Levy R, Janiaud D, Le Traon O, et al. A new analog oscillator electronics applied to a piezoelectric vibrating gyro[C]// Frequency Control Symposium and Exposition, 2004. Proceedings of the 2004 IEEE International. 23-27 Aug. 2004: 326-329.

[6] 王莹，孙雨南，秦秉坤，等. 微石英音叉陀螺角速度信号提取方法的研究[J]. 北京理工大学学报，2003，23(2)：241-244.
WANG Ying, SUN Yu-nan, QIN Bing-kun, et al. Extraction of angular rate signal for micro quartz tuning fork gyroscopes[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(2): 241-244

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net