

文章编号 1004-924X(2010)10-2206-06

MEMS 器件与电路共同仿真原型系统

苑伟政,牛昊彬,常洪龙,马炳和

(西北工业大学 陕西省微/纳米系统重点实验室,陕西 西安 710072)

摘要:为了预测 MEMS 器件与电路组成的完整 MEMS 系统的行为,建立了一个支持 MEMS 器件与电路共同仿真的原型系统。首先,根据 MEMS 系统级仿真与模拟电路仿真的共同特性,提出了 MEMS 器件与电路共同仿真的原理和方法,并依托国产电路仿真平台 Zeni VLG 建立了共同仿真原型系统的框架结构;然后,分别根据修正节点分析方法和模拟电路行为级建模方法开发了该共同仿真原型系统所必需的两个参数化模型库。通过一个跷跷板式微加速度计分别与其开环电路和闭环带载波电路的共同仿真对原型系统和模型库进行了测试,与国外商业软件 Saber 对比,开环仿真结果相对误差为 2.1%,表明提出的原型系统能够有效进行 MEMS 器件与电路共同仿真,并且具有较高的精度。

关键词:微机电系统;接口电路;共同仿真;加速度计

中图分类号: TN710; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101810.2206

Co-simulation of MEMS and circuits in Zeni VLG

YUAN Wei-zheng, NIU Hao-bin, CHANG Hong-long, MA Bing-he

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

Abstract: To predict the behaviors of the whole Micro-electro-mechanical System (MEMS) including MEMS devices and circuits, a prototype system for co-simulating MEMS devices and circuits was established. Firstly, the common characteristics of MEMS system-level simulation and analog circuit simulation were studied, and the principle and the method of co-simulating MEMS devices and circuits were presented. Based on the circuit simulation platform Zeni VLG, the frame of the prototype system was established. Then, two parametric model libraries which were essential for the prototype system were also established, respectively, according to the modified nodal analysis method and analog circuit behavioral modeling method. A seesaw accelerometer with an open-loop circuit and a closed-loop circuit was used to verify the system and the models. By comparing to the commercial software SaberTM, obtained results indicate that the relative error is 2.1% in the open-loop simulation. The simulation results show that the prototype system could handle co-simulations of MEMS devices and circuits effectively, and has a high accuracy.

Key words: Micro-electro-mechanical System (MEMS); interface circuit; co-simulation; accelerometer

收稿日期:2010-03-08;修订日期:2010-04-05.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA04Z347, No. 2009AA04Z320)

1 引言

目前,业内对微机电系统(MEMS)没有严格的定义^[1],本文中 MEMS 器件指 MEMS 微结构,电路特指模拟接口电路。MEMS 系统级仿真是 MEMS CAD 的核心模块之一,对提高 MEMS 的设计效率和降低设计成本有着重要的作用。基于可重用 IP(Intellectual Property)库的建模方法是当前 MEMS 系统级仿真的主要途径之一^[1,3],相比有限元、边界元分析方法,它具有模型可以通过参数化重复使用且仿真更为高效的优点。在该方法中, MEMS 器件和电路被分解成不同的功能组件,建立这些功能组件的参数化模型,再通过拓扑连接形成网络就可以表征 MEMS^[3,4]。MEMS 是将器件和接口电路集于一体的微系统,然而当前大多的 MEMS 系统级设计只进行 MEMS 器件仿真或者仅包含少许的前置接口电路,这种仿真无法对 MEMS 器件与电路组成的完整系统的真实行为进行预测。为了预测整个系统的行为,需要执行 MEMS 器件和电路共同仿真。目前针对该领域的研究并不多见,国外如 UC Berkeley 的研究人员建立了一个支持简化 MEMS 系统仿真的平台,该仿真平台将 MEMS 器件与电路系统简化后仿真,比如它将加速度计简化成输入的二阶积分系统,与真实的 MEMS 有一定差距^[4];国内西北工业大学的常洪龙、张亚飞等将 MEMS 器件宏模型技术与电路仿真相结合,实现了一个微机械陀螺与电路的共同仿真,但该方法不易参数化^[6]。

本文将 MEMS 系统级仿真与模拟电路仿真相结合,研究了 MEMS 器件与电路共同仿真方法,依托国产电路仿真平台 Zeni VLG 建立了 MEMS 器件与电路共同仿真原型系统和支撑该系统的两个参数化模型库。仿真实验表明,该原型系统能够有效地进行典型 MEMS 器件与电路系统的共同仿真,并具有较高的精度。

2 共同仿真原理和原型系统

2.1 共同仿真原理

MEMS 系统级仿真的本质为模拟系统求解,其组件行为方程一般为低阶常微分方程^[3-4],而模

拟电路系统仿真同样为模拟系统求解,其系统行为方程的一般形式,如式(1)^[7],同样为低阶常微分方程。

$$\dot{q}(V(t)) + i(V(t)) + U(t) = 0, \quad (1)$$

其中, $V(t)$ 为节点电压、 i 为从电阻流入节点的电流, q 为从电容流入节点的电荷, $U(t)$ 为独立电流源。由上式可见, MEMS 系统级仿真与模拟电路仿真本质相同,因此混合调用两类模型进行系统建模和仿真是可行的。

2.2 共同仿真原型系统

根据共同仿真原理,建立混合模型建模的共同仿真原型系统如图 1。该原型系统以 MEMS 系统级模型库和模拟电路行为级模型库为基础,系统建模和求解采用的是北京中电华大电子设计有限责任公司的电路设计平台 Zeni VLG。本文建立了该平台的两个支撑模型库,为了便于求解器综合,模型编码都采用了硬件描述语言(Hardware Description Language, HDL) Verilog-A。

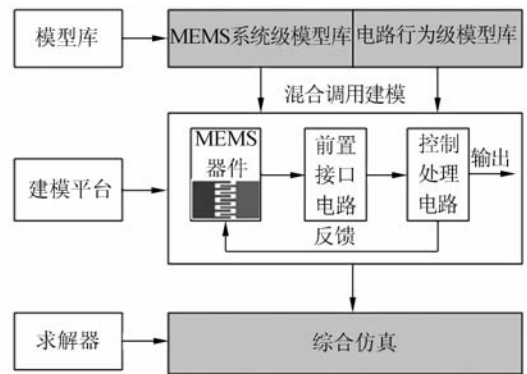


图 1 共同仿真原型系统

Fig. 1 Co-simulation prototype system

3 共同仿真模型库

3.1 MEMS 系统级模型库

根据修正节点分析法与普其米尼斯基结构矩阵分析理论,将结构组件的物理行为向特定的节点等效,便可以通过有限的常微分方程来表征组件的物理行为^[3-4]。MEMS 结构组件主要有锚点、梁、质量平板等惯性组件和静电极板、梳齿等结构静电耦合组件,本文结合线性弹性梁(图 2)简要说明建模过程,详细建模过程可参考文献^[4]。

首先,假定线性弹性梁的各种形变均在线性

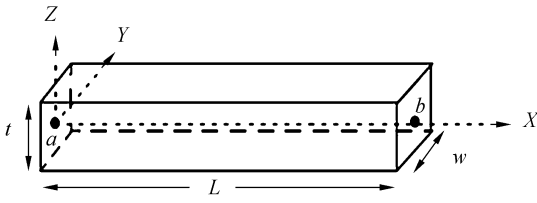


图 2 线性弹性梁模型

Fig. 2 Linear elastic beam model

范围内,且不同形变间不发生耦合。悬臂梁在局部坐标系中的行为方程为:

$$[M][\ddot{x}] + [B][\dot{x}] + [K][x] = [F], \quad (2)$$

其中: x, \dot{x}, \ddot{x} 分别为局部位移、速度、加速度, $[M]$ 为质量矩阵, $[B]$ 为阻尼矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, $[F]$ 为集中载荷。

根据材料力学,求解各矩阵,即可获得悬臂梁在局部坐标系下的物理行为方程。另外,在 MEMS 中,悬臂梁有时作为导电线,类似电阻建模,建立其电学行为方程。为了统一求解,将局部坐标系下的行为方程转换到总体坐标系,并采用 Verilog-A HDL 进行编码,便得到线性弹性梁的系统级参数化模型。

同理,可参考文献[3-4]建立其他 MEMS 系统级模型。

3.2 模拟电路行为级模型库

MEMS 器件在外部激励作用下的形变通过电极板等结构静电耦合组件转换成电学信号,经前置接口电路检测,并由后续电路完成信号处理和反馈。这里电路模型采用了行为级模型,其具有仿真效率高的优点,非常适于系统快速验证^[8-9]。常用的模拟电路组件有电阻、电容、放大器、滤波器等,这里以一般通用运算放大器的建模过程说明如下。

运算放大器是模拟电路中最常见的组件之一。根据模拟电路行为级建模方法^[9],首先选定建模指标,这里主要考虑其开环增益、通频带、电压转换率等。根据典型通用运算放大器的三级结构,构造其电路结构模型如图 3:输入级由一个加载到输入阻抗 r_{in} 上的双端差分输入实现,中间级由一个控制电压源与 RC 组成的串联闭环环路组成,其中控制电压源的乘积系数 Gain 对开环增益进行建模,转换率建模通过电容 C_c 的充放电积分特性来实现,而通频带建模则由控制电压源的拉

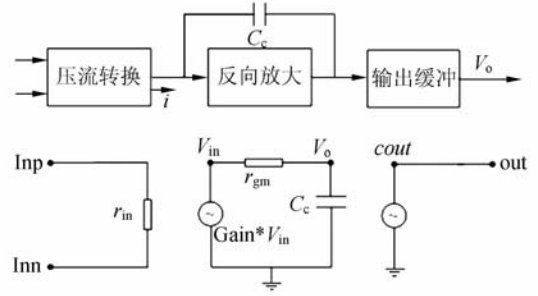


图 3 运算放大器模型

Fig. 3 Model of operational amplifier model

氏函数和 RC 电路的传递函数的乘积实现;输出级建模由电容分压控制的电压源实现。根据上述结构模型可得式(3):

$$\begin{cases} I_{(Inp, Inn)} = V_{(Inp, Inn)} / r_{in} \\ V_{(in)} = Laplace_nd(Gain \times V_{(Inp, Inn)}, [1], [1, 5.0 \times 10^{-7}]) \\ I_{V_{in}, V_o} = V_{(V_{in}, V_o)} / r_{gm} \\ I_{(V_o)} = ddt(C_c \times V_{(V_o)}) \\ V_{(out)} = V_{(V_o)} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $Laplace_nd()$, $ddt()$ 分别为 Verilog-A HDL 的拉氏函数和时间微分函数。

采用 Verilog-A HDL 对式(3)进行编码,即可获得其参数化行为级模型。

同理,建立其他模拟电路组件的行为级模型。

4 算例测试

为了对建立的共同仿真原型系统和模型库进行测试,本文完成了一个跷跷板式微加速度计分别与其开环电路和闭环带载波电路的共同仿真。

图4是该加速度计的结构示意图,它由左右

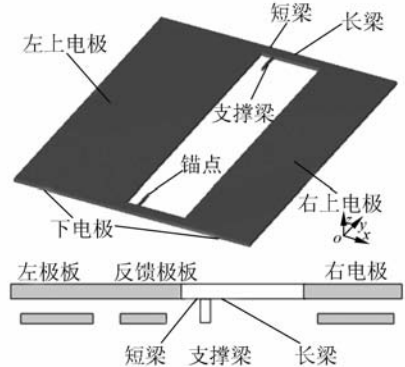


图 4 跷跷板加速度计示意图

Fig. 4 Schematic of seesaw accelerometer

两对电极、支撑梁和锚点组成,当外界输入 Z 向的加速度时,由于两侧电极质量不同,加速度计结构将绕 Y 轴扭转,形成差动电容。图 5 是该加速度计的开环电路和闭环带载波电路的示意图^[10]。其中,电容极板间的微小电容检测采用了反向电荷放大的检测方案,比例放大模块为反向比例电压放大,为了将与载波调制在一起的外部加速度信号提取出来,这里低通滤波采用的是理想二阶低通滤波器。

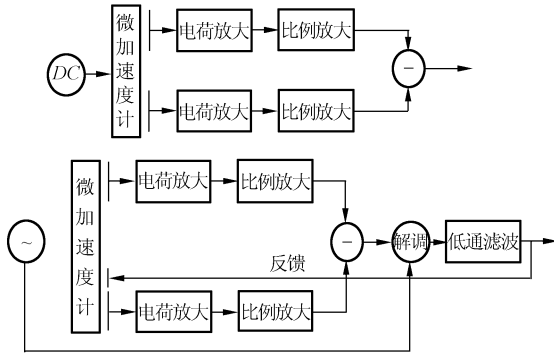


图 5 开环电路(上)和闭环电路(下)

Fig. 5 Open-loop circuit (top) and closed-loop circuit (bottom)

混合调用建立的两类模型,在原型系统中分别建立该加速度计与开环电路和闭环带载波电路的系统模型,如图 6 和图 7(以下简称开环系统和闭环系统),各组件的设计参数及材料属性见表 1 (电路参数未具体列出)。根据表 2 的设置分别对两系统执行瞬态仿真,开环系统仿真结果如图 8,闭环系统仿真结果如图 9。

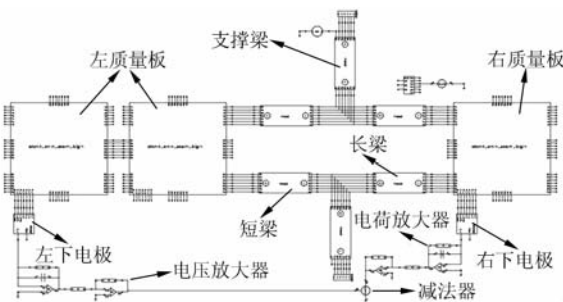


图 6 开环系统系统建模

Fig. 6 Schematic of open-loop system

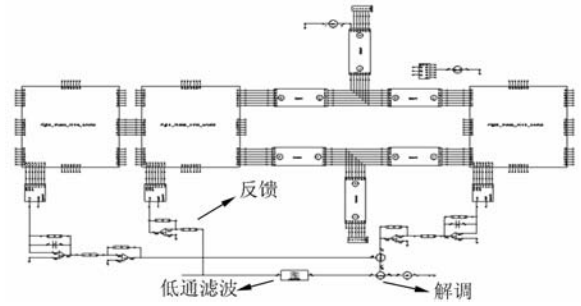


图 7 闭环系统系统建模

Fig. 7 Schematic of closed-loop system

表 1 设计参数

Tab. 1 Design parameters

组件名	参数
长梁/ μm	$L=400, w=400, t=60$
短梁/ μm	$L=100, w=100, t=60$
支撑梁/ μm	$L=240, w=12, t=60$
左极板/ μm	$L=2500, w=900, t=60$
右极板/ μm	$L=2500, w=600, t=60$
下电极/ μm	$L=2500, w=400, gap=3$
反馈电极/ μm	$L=2500, w=200, gap=3$
材料属性	$E=130 \text{ GPa}, \lambda=0.22, \rho=2\ 330 \text{ kg/m}^3$

表 2 仿真设置

Tab. 2 Simulation settings

参数设置	开环	闭环带载波
激励加速度/ (m/s^2)	$8 \sin(20\pi t)$	$8 \sin(20\pi t)$
驱动或载波/V	5	$5 \sin(40\ 000\pi t)$
仿真时间/ms	400	600
步长设置/ μs	2 500	2.5-5

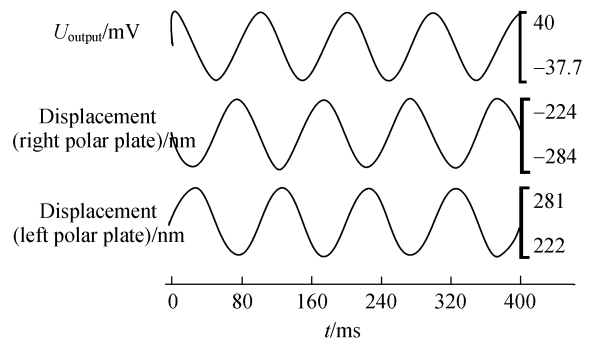


图 8 开环系统仿真结果

Fig. 8 Simulation results of open-loop system

为了验证仿真结果的正确性,在国外商业软件 Saber 平台中对上述开环系统进行仿真,仿真

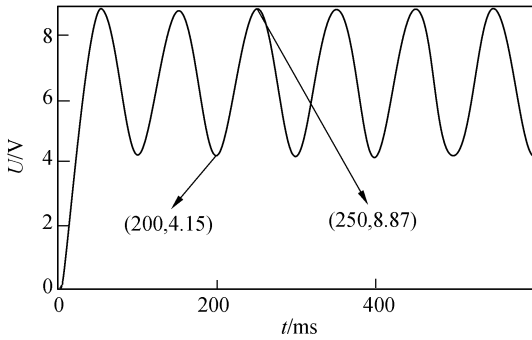


图 9 闭环系统仿真结果

Fig. 9 Simulation results of closed-loop system

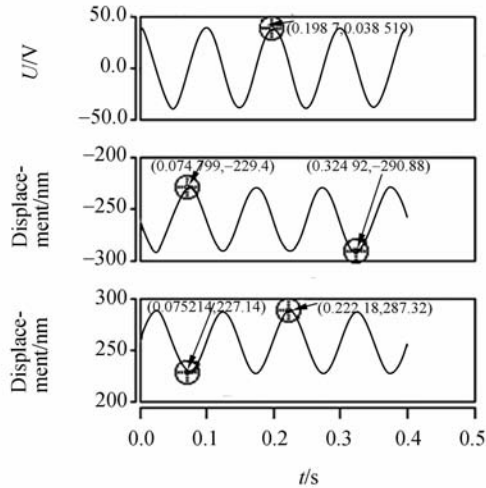


图 10 Saber 中开环系统仿真结果

Fig. 10 Simulation results of open-loop system in Saber

结果如图 10, 减法器最终输出电压幅值为 38.51 mV, 而 Zeni VLG 中减法器最终输出为 37.7 mV, 相差 0.81 mV, 相对误差约 2.1%; 另外对比两极板中心端口 Z 向的位移, 相对误差均在 3% 之内。

此外, 该原型系统和模型库还被成功地应用于诸如三明治式微加速度计、Z 轴微机械陀螺等典型 MEMS 系统的仿真中, 表明该仿真原型系统具有普适性。

5 结 论

为了预测 MEMS 器件与电路组成的完整 MEMS 系统行为, 从而为设计者提供更为全面和更切合实际的设计参考, 本文建立了一个支持 MEMS 器件与电路共同仿真的原型系统及该原型系统所必需的 MEMS 系统级参数化模型库和模拟电路行为级参数化模型库。算例测试结果表明, 所建立的原型系统和模型库能有效进行 MEMS 器件与电路共同仿真; 开环系统仿真电压输出相对误差为 2.1%, 表明该原型系统和模型库具有较高的精度。然而, 该原型系统还存在不足, 当仿真包含有较高频率信号的 MEMS 与电路系统时, 仿真效率有待提高。

参考文献:

[1] 周兆英, 王晓浩, 叶雄英, 等. 微型机电系统[J]. 中国机械工程, 2002, 11(1): 163-167.
ZHOU ZH Y, WANG X H, YE X Y, *et al.*. Microelectromechanical Systems[J]. *China Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 11(1): 163-167. (in Chinese)

[2] 谭宜勇, 卢桂章, 赵新, 等. 基于 IP 数据库的 MEMS 设计系统[J]. 传感技术学报, 2008, 21(2): 357-360.
TAN Y Y, LU G ZH, ZHAO X, *et al.*. IP Library-based MEMS design system[J]. *Chinese Journal*

of Sensors and Actuators, 2008, 21(2): 357-360. (in Chinese)

[3] 霍鹏飞. 微机电系统的多端口组件网络方法系统级建模[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
HUO P F. *A Methodology of Multi-port-element Network for MEMS System-level Modeling* [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)

[4] QI J. *Modeling and Simulation for Design of Suspended MEMS* [D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2003.

[5] CHRISTOPHER B, EDWARD L, LIU X J, *et al.*. Heterogeneous Concurrent Modeling and Design in Java

(Volume1: Introduction to Ptolemy II)[R]. *California: University of California at Berkeley*, 2007.

- [6] CHANG H L, ZHANG Y F, XIE J B, *et al.*. Integrated behavior simulation and verification for a MEMS vibratory gyroscope using parametric model order reduction [J]. *Journal of MEMS Systems*, 2010, 19(2): 282-293.
- [7] KUNDERT K S. *The Designer's Guide to Spice & Spectra* [M]. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [8] 朱樟明, 张春朋, 杨银堂, 等. 基于 Verilog-A 的模拟电路行为模型与仿真[J]. *电子器件*, 2003, 26(4): 396-399.
- ZHU ZH M, ZHANG CH P, YANG Y T, *et al.*.

Behavioral model and simulation of analog circuits using verilog-A [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2003, 26(4): 396-399. (in Chinese)

- [9] Dan Fitz, Patrick Ira Miller. *Analog Behavioral Modeling with the Verilog-A Language* [M]. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [10] 赵常德, 陈旻, 徐力. 微机械加速度计及电容检测电路的设计[J]. *中国惯性技术学报*, 1999, 7(1): 32-35.
- ZHAO CH D, CHEN M, XU L. Design of micro-mechanical accelerometer and capacitive sensing circuits [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 1999, 7(1): 32-35. (in Chinese)

作者简介:



牛昊彬 (1986—), 男, 安徽阜阳人, 主要从事微机电系统设计 (MEMS CAD) 技术方面的研究。E-mail: nhb1986@gmail.com



常洪龙 (1977—), 男, 河南人, 博士, 副教授, 2005 年于西北工业大学获得博士学位, 主要从 MEMS CAD 技术及微惯性技术方面的研究。E-mail: changhl@nwpu.edu.cn



马炳和 (1972—), 男, 河北辛集人, 博士, 副教授, 现任西北工业大学微系统工程系主任, 主要从事航空应用微系统、MEMS 设计与建模方面的研究。E-mail: mabh@nwpu.edu.cn

导师简介:



苑伟政 (1961—), 男, 山东掖县人, 博士, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 1982 于沈阳航空工业学院获得学士学位, 1986 于西北工业大学获得硕士学位, 1995 于法国国立高等微技术与机械学院 (ENSMM) 获得博士学位, 现任西北工业大学微/纳米系统实验室主任, 主要从事微机电系统, 精密制造技术方面的研究。E-mail: yuanwz@nwpu.edu.cn