

文章编号 1004-924X(2002)06-0626-06

# 微机械系统建模与仿真技术研究

季国顺,张永康

(江苏大学 机械工程学院,江苏 镇江 212013)

**摘要:**简要分析了微电子机械系统建模仿真的原因,指出了微电子机械建模仿真需要克服的四个方面技术难题,即尺度效应、开发快速的表面力计算方法、多物理场耦合分析、宏模型的建立,为微电子机械系统的建模仿真指明了研究方向。详细分析了微电子机械系统建模仿真的技术关键,多物理场耦合计算的理论方法和器件及系统宏观模型的建立,介绍了用于 MEMS 系统级模拟仿真的宏模型建立的几种方法,最后结合硬件描述语言 VHDL-AMS 提出了建立微电子机械系统模型实现系统级模拟的方法。

**关键词:**微电子机械系统;物理场耦合;建模与仿真;宏模型

**中图分类号:** TH128 **文献标识码:** A

## 1 引言

从系统的特征尺寸上,人们将微机械分成 1mm ~ 10mm 的小型机械, 1 $\mu$ m ~ 1mm 的微型机械,以及 1nm ~ 1 $\mu$ m 的纳米机械<sup>[1]</sup>,其在航空航天、生物工程、医疗、通讯、光学上有巨大的应用前景而受到各国研究机构及政府部门的高度重视,被认为 21 世纪可以带来新技术革命的技术。目前, MEMS 的研究正从基础研究阶段逐步进入产品研制开发与实用阶段,但是在微机械系统研究领域, CAD 工具的发展水平远远落后于前沿研究的步伐<sup>[2]</sup>。目前,大多数微电子机械系统都是用与其功能差不多但不能准确预测其执行情况的分析工具来辅助设计,因此,微电子机械系统的设计通常采用试验排出错误的方法进行,这往往需要多次反复的试验才能最终确定满足一个特定环境的运行设备。对开发商业产品来说,这种落后的设计方法、长的设计周期以及制造微电子机械系统原型机的高昂费用导致了一种效率极为低下、不切实际的开发情况,因此迫切需要用于微电子机械系统设计的先进模拟工具和模型建立工具。

## 2 MEMS 建模与仿真

MEMS 的建模与仿真就是用计算机模仿实

际的微电子机械系统及其工作环境,使设计者能够在相应系统未制造前就可以对其原型的性能进行仿真和模拟以减低 MEMS 产品的设计开发时间。许多商业机构和大学已经认识到 MEMS 建模与仿真的重要性,纷纷投入大量的人力物力进行这方面的研究工作,并已经取得了令人瞩目的成果。目前已经开发了一些商用 MEMS 软件如 MIT/Microcosm 公司的 MEMCAD、IntelliSense 公司的 IntelliCAD、瑞士联邦工学院的 TCAD、密歇根大学的 CAEMEMS 等。一般可以认为微电子机械系统的 CAD 结构如图 1<sup>[3]</sup>所示。

但是微电子系统不是传统机械或电子系统简单的几何缩小。当系统/器件尺寸达到微米甚至纳米尺度后会产生许多新的物理现象。因此 MEMS 建模仿真与传统的宏观尺寸机械或电子系统的建模与仿真上存在很大差别。其涉及的范围相当广泛,主要有:掩模设计与模拟、制造工艺模拟、器件性能模拟、材料特性模拟与检测、电子封装模拟、系统级模拟等。进行 MEMS 建模分析时会遇到许多新的问题,归纳起来主要有以下四个方面难题:

(1) 尺度效应 微电子机械系统的尺度效应表现在两个方面:材料性能的尺度效应和物理规律的尺度效应。材料尺度效应 材料尺寸小到一定程度时,其尺度效应就会表现出来,出现了与宏

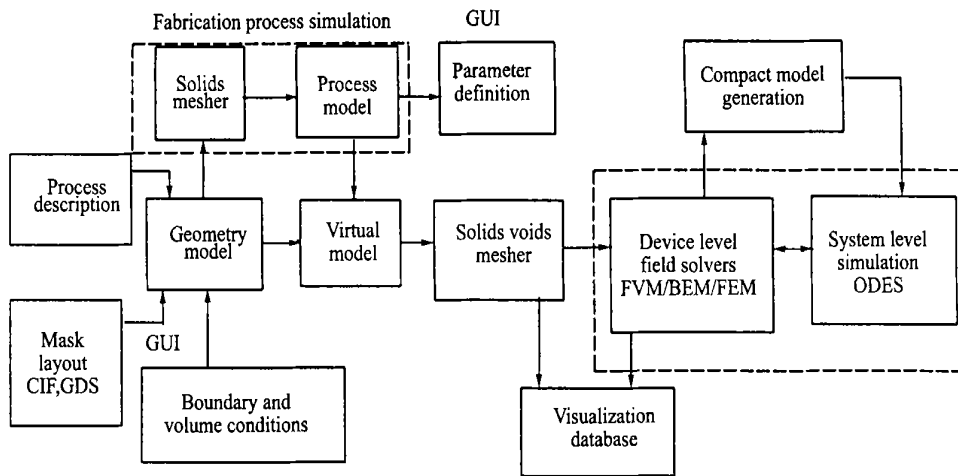


图 1 MEMS 设计的 CAD 结构和设计流程图

Fig. 1 CAD architecture and design flow diagram for MEMS design.

观材料截然不同的性能。此外,由于 MEMS 器件的制备方法与宏观零件不同,也引起了材料性能的差异,如抗拉强度、断裂韧性、残余应力等均有变化。再则, MEMS 的多物理场耦合特性也使得描述材料性能参数变得困难。因此 MEMS 的材料和大尺寸器件材料即使在构成成分上相同,也应认为它们是完全不同的材料。特别是,微电子机械系统的材料通常是三明治式的复合结构,因而在建模仿真时如何确定材料特性的具体参数将是相当关键,文献[4]中引入了折合的概念,将多层微机械结构折合微单层结构,这样方便了计算机模拟时对材料特性的提取。物理规律的尺度效应随着尺寸减小出现在了宏观状态下不显著、可以被忽略的现象而在微观状态下成为占主导地位的现象,如宏观状态下的静电力、表面张力、电磁力等常常被忽略,而在微观状态下却常常成为微结构的驱动力。

(2) 开发快速的计算表面作用力算法 微结构表面作用力产生于 MEMS 产品复杂的几何形状和柔性的三维结构同外部场或流体相互作用。由于大多数微机械结构的性能产生于机械结构压力、静电场力、磁场力和流体吸引力之间的相互作用,因此需要开发有效的 MEMS 表面作用力域求解器,目前常用边界元法求解,但快速解法仍需研究。

(3) 多物理场耦合分析 MEMS 技术的最显著特点是多学科交叉渗透,涉及微机械学、微电子

学、微光学、微材料力学等,一般的微电子机械系统至少包含两个物理场甚至更多物理场,各种物理场,如热、光、流体、电磁、机械力等相互作用,使得 MEMS 的分析变得十分复杂,可以说多物理场耦合分析是 MEMS 建模仿真面临的核心问题。

(4) 宏模型的建立 非线性宏建模 (nonlinear macromodeling) 或非线性缩减模型 (nonlinear order reduction model 或 reduced model 或 compact model) 的建立,因为对于微电子机械产品,我们最终关注的是所设计的装置植入复杂系统的功能,因此设计人员需要准确的动态模型,其要允许在各种输入激励和工作情形下,比如说将其插入到一反馈回路中,快速的系统性能模拟。在微电子机械系统中运用传统的建模方法直接对三维结构模拟将包含成千上万个耦合在一起的自由度,这样的完全非线性直接动态模拟需要很大的计算量,往往难以实现。从另一方面讲 MEMS 设计人员往往倾向于考虑只有几个自由度的系统简化模型,这种模型的自由度要同原模型的尺寸、材料特性等可以修改的参数密切相关。

本文接下来的几部分主要讨论多物理场耦合分析、非线性宏模型的建立及如何进行系统级 (system-level) 仿真。

### 3 多物理场耦合分析

微电子机械系统 (MEMS) 中在微米尺度上至

少包含两种物理场的耦合,有的甚至含有更多物理场的耦合,其范围涉及到机械、电子、光学、热学、材料等学术领域,多物理场的耦合实际上是微电子机械系统计算机辅助设计与模拟的技术关键。关于多物理场的耦合计算,国内外有许多研究机构对此作了研究,提出了许多计算方法<sup>[5-10]</sup>,但是诸多方法基本来源于两种方法:松弛法和牛顿迭代法。

对于  $n$  个物理场耦合问题其行为可以用  $m$  个矢量组成的非线性方程组<sup>[11]</sup>来表示:

$$R_i(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n) = 0, \quad (1)$$

式(1)中  $R_i$  是第  $i$  个能量域中的残量方程,对于  $x_j$   $i$  表示与第  $i$  个能量域中未知量相耦合的其它能量域的未知量。在松弛迭代法中,一次迭代时,分别在各自的能量域中求得相应域中未知量的结果,再将结果同已知量(或未知量的假设值)一起代入下一个求解器,直到所有结果均达到各自域中的收敛精度为止。牛顿迭代法是一次求解所有的  $n$  个耦合方程,然后修正所得结果再进行迭代直到所得结果达到各自域内的收敛精度。两种方法相比较而言,松弛法使用分立的求解器,编程方便,但是在遇到强耦合作用时常常会出现不收敛的情况,牛顿法的特点是收敛速度快,但该方法程序编制不方便,特别是该方法中需要求解雅可比矩阵,而该矩阵中非对角项,即不同能量场之间的耦合项的微分常常不易显式表示。在此值得注意的是我国也有人提出了耦合场计算的一种新的快速算法<sup>[9]</sup>。

## 4 宏模型的建立

系统宏模型(macromodel)对于 MEMS 的系统级模拟非常关键,这种宏模型又称为缩聚模型(compact model)或简化模型(reduced model, reduction model)这种宏模型在 MEMS 的设计过程中起如下几方面的作用<sup>[11]</sup>:设计人员可以利用宏模型探讨设计空间,比如利用宏模型在器件/系统的尺度及材料性能发生改变时可以方便地预测系统的行为特性。基于这点考虑需要具有最小自由度数目本质上是集总模型(lumped model)的解析模型。在系统级模拟器中宏模型将代表 MEMS 器件,从这点来看宏模型必须是动态的,必须足够简单以容许在合理的时间内在各种激励

下进行成百上千次模拟。由于通常情况下 MEMS 器件是包含多重能量域的转换器,宏模型必须能够正确解释能量守恒(准静态特性)及能量耗散(动态特性)。最后,也是最重要的宏模型必须符合在感兴趣的设计空间上更为详细的数值模拟结果。同时必须建立在合理设计的测试结构上所做的实验仔细比较的近似基础上。令人遗憾的是目前达到上述所有这些要求的模型还依赖于手工,而没有能够实现自动宏模型的建立,这在很大程度上妨碍了 MEMS 器件的系统级模拟。下面重点讨论有关准静态宏模型和动态宏模型的建立问题。

### 4.1 准静态宏模型

准静态宏模型<sup>[11]</sup>的建立,这方面美国的麻省理工学院的 Senturia S. D., Aluru N., White J. 等人取得较为成功的经验<sup>[11-13]</sup>,由于该问题相对简单且在实际应用中一般局限在对微电子机械结构材料性能的静电偏转法测试上,在这里仅简略介绍其建立的一般程序<sup>[11]</sup>:(1)选择一个与期望模型近似的理想化结构。(2)通过求解控制方程(一般是偏微分方程)或用瑞利-里兹能量最小原理(基于泛函变分,求泛函极值)建立理想化问题的解析模型。(3)确定一组无量纲的数值常数其在解的解析表达式中可变。(4)在感兴趣的设计空间进行期望模型的网格化数值模拟,调整宏模型中无量纲的数值参量使其与数值模拟结果相一致。

### 4.2 动态宏模型的建立

动态宏模型的建立要比准静态宏模型的建立更具有挑战性同时也应该看到动态宏模型较准静态宏模型具有更广泛的研究和应用价值,正因为如此对动态宏模型的建立引起了许多研究机构的兴趣<sup>[14-21]</sup>。

1998 年美国麻省理工学院的 Wang, Frank 及 White, Jacob 等人应用 Arnoldi 法提出对于线性系统自动建立宏模型的方法<sup>[16]</sup>,在此基础上 Chen, Jinghong 及其导师 Kang, Sung-Mo 于 2000 年将 Arnoldi 法与泰勒级数展开相结合用于对二阶非线性系统建立宏模型<sup>[17]</sup>,对于更强烈的耦合作用和更高阶的非线性系统他们于 2001 年提出基于弧长的 Karhunen-Loeve 分解法<sup>[18]</sup>2001 年 Chen, Jinghon 等人提出对于光通信中有广泛应用前景的微光扫描器建立宏模型的方法<sup>[19]</sup>。

Liang Y C 提出基础神经网络求取系统基函数的模型缩减方法<sup>[20]</sup>。

这些 MEMS 器件的宏模型必须满足如下要求<sup>[22]</sup> (1) 只有少量的自由度; (2) 最好是解析表达式, 以使设计者能够了解参数改变带来的效应; (3) 依器件不同的几何边界和材料特性而做相应的变化; (4) 体现器件的准静态特性及其动态特性; (5) 表达方式简单, 是一个等效电路或是一组常微分方程和代数方程; (6) 符合器件的 3D 模拟结果。目前还没有一种通用的方法由器件模拟的结果直接得出行为的宏模型来进行系统级模拟。

用等效电路法建立宏模型一种建立宏模型的方法是等效电路法, 该方法在文献[23]中也被称为节点分析法。这种方法是基于电路和机械系统的相似性, 通过寻找一个等效电路, 使此电路仿真和表征器件特性的一组常微分方程相同。再利用模拟电路求解工具 SPICE 求解。但是等效电路存在如下的缺陷<sup>[24]</sup>: 当使用受控源对非线性元件建模时将引入伪能量源 (spurious energy sources)。通常所有元件在工作点 (偏置点) 附近线性变化, 这使得该种模型仅能用于小信号分析。该方法使得等效元件的选取仅限于 SPICE 元件库。寻找等效电路常常较为困难。

用现代硬件描述语言 VHDL-AMS 辅助建模用 VHDL-AMS 建立 MEMS 器件的宏模型是基于键图理论<sup>[22]</sup> (bond graph theory), 该理论是一个处理不同能量范畴系统之间相互作用的有利理论工具, 我们提出基于 VHDL-AMS 建立微系统的系统级模型如图 2 所示。

先根据不同的能量域将微机械系统划分成相应的子系统, 分别建立各子系统的宏模型, 在此基础上用支持模拟混合信号的硬件描述语言 VHDL-AMS 建立系统的宏模型, 将其植入系统电路中实现整个系统模拟。

## 5 结论

目前, MEMS 的建模与仿真技术的发展还很不成熟, 耦合场分析、自动等效宏模型的建立、材料特性数据库的建立等相关的基础理论问题仍未

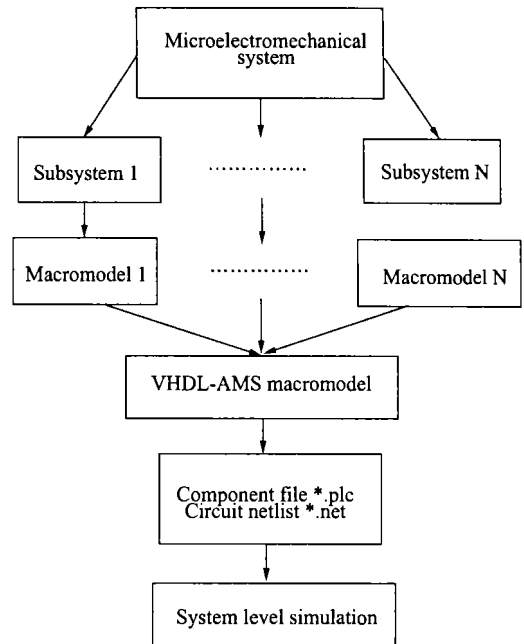


图 2 微电子机械系统模拟框图

Fig. 2 Block diagram of MEMS simulation.

得到根本解决, 随着现代计算技术发展及对 MEMS 需求的迅速增长, MEMS 建模与仿真技术研究也将不断深入。我们认为, 今后对 MEMS 的建模与仿真技术的研究应该加强以下几个方面: (1) 对 MEMS 材料特性数据库的建立, 特别是在微观尺度上表征微电子机械系统中广泛存在的三明治式结构的材料特性及其相关数据库在系统建模时的求取。(2) 开发快速而有效的多物理场耦合单一求解器。(3) 寻找具有普遍意义的宏模型的快速、自动的建立方法, 特别是对于具有耗散结构系统宏模型的建立。(4) 因微电子机械系统最终将植入到系统芯片上, 故而加强系统级模拟方法的研究更具有现实意义。(5) 开发微电子机械系统的电子封装及简便有效的器件及系统性能测试技术, 材料界面结合强度检测 (激光检测)。(6) 随着网络技术的飞速发展, 研究微电子机械系统的网络化分布式制造, 对于优化资源不失为一种好的制造方法。

## 参考文献:

- [1] 李路明,王立鼎. MEMS 的研究的新进展 - - 微型系统及其发展应用的研究[J]. 光学 精密工程,1997,5(1):67-73.
- [2] 陈愚,钟先信,黎凯. 微系统 CAD 的研究现状及展望[J]. 光学 精密工程,1999,7(6):1-5.
- [3] Andrzej P. Integrated multidisciplinary CAD/ CAE environment for micro-electro-mechanical systems (MEMS) [J]. *SPIE*, 1999,3680(I):432-439.
- [4] 李炳乾. MEMS 谐振器件及其相关理论研究[D]. 西安交通大学,2001.
- [5] Cai X, Yie H, Osterberg P, et al. Relaxation/ multipole-accelerated scheme for self-consistent electromechanical analysis of complex 3-D micromechanical structures [A]. *Proceedings of the 1993 IEEE/ ACM International Conference on Computer-Aided Design* [C], 1993, 283-286.
- [6] Aluru N R, White J. Efficient numerical technique for electromechanical simulation of complicated microelectromechanical structures[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1997, 58(1):1-11.
- [7] Aluru N R, White J. Multi-level Newton method for static and fundamentak frequency analysis of electromechanical systems[A]. *International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, SISPAD* [C]. 1997, 125-128.
- [8] Aluru N R, White J. Coupled numerical technique for self-consistent of micro-electro-mechanical-systems[A]. *American Society of Mechanical Engineers* [C], Dynamic Systems and Control Division, 1996, 59:275-280.
- [9] 高行山,林胜勇. 加速松弛法及其在静电-力耦合问题仿真分析中的应用[J]. 机械强度,2001,23(4):500-502.
- [10] Urahama K. Convergence properties of waveform relaxation-newton method[J]. *Fundamental Electronic Science*, 1989, 72(8):108-115.
- [11] Senturia S D, Aluru N, White J. Simulating the behavior of MEMS device:Computational method and needs[J]. *IEEE Computational Science and Engineering*, 1997, 4(1):30-43.
- [12] Pan J Y, Lin P, Maseeh F, et al. Verification of FEM analysis of load-deflection method for measuring mechanical properties of thin films[J]. *IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, 1990, 70-74.
- [13] Osterberg P M, Senturia S D. M-TEST:a test chip for MEMS Material property measurement using electrostaticly actuated test structures[J]. *Journal of a Microelectromechanical systems*, 1997, 6(2):107-118.
- [14] Xu L, Darling R B, Lauritzen P O. Compact modeling of bistable electrostatic actuators[A]. 1999 *International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems* [C]. 1999, 289-292.
- [15] Swart N R, Bart S F, Zaman M H, et al. AutoMM: Automatic generation of dynamic macromodels for MEMS devices [A]. *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* [C]. 1998, 178-183.
- [16] Wang F, White J. Automatic model order reduction of a microdevice using the Arnoldi approach[J]. *American Society of Mechanical Engineer, Dynamic Systems and Control Division*, 1998, 66:527-530.
- [17] Chen J H, Kang S M. Algorithm for automatic model-order reduction of nonlinear MEMS devices[A]. *Proceedings IEEE International Symposium on Circuits and Systems* [C], 2000, II-445-II-448.
- [18] Chen J H, Kang S M. Model-order reduction of nonlinear MEMS devices through arclength-based Karhunen-Loeve decomposition[J]. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2001, 3:457-460.
- [19] Chen J H, Kang S M. Dynamic macromodeling of MEMS mirror devices[A]. *Technical Digest - International Electron Devices Meeting* [C], 2001, 925-928.
- [20] Liang Y C, Lin W Z, Lee H P, et al. A neural-network-based method of model reduction for the dynamic simulation of MEMS[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2001, 11(3):226-233.
- [21] Gabbay L D. *Computer aided Macromodeling for MEMS* [M]. USA:MIT, PhD Thesis, 1998.
- [22] 孟为民,李伟化,黄庆安. MEMS 的设计方法与系统模拟[J]. 传感器技术, 2001, 20(10):57-60.
- [23] 孙道恒,黄元庆,郑炜,等. MEMS 系统级仿真建模理论与方法的研究[J]. 厦门大学学报. 40(2):297-302.
- [24] VHDL1076-1k1. htm/ # intro [EB/ OL]. <http://www.vhdl-ams.com/microcosm/>.

## Study of the technology of modeling and simulation of MEMS

J I Guo-shun ,ZHANG Yong-kang

( *Mechanical School of Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China* )

**Abstract :** This paper analyzes the reason for modeling and simulation of MEMS briefly. There are four difficulties i. e. ,microscale effect ,fast algorithms of surface force ,multiple physics fields coupling algorithms , and development of macromodel of MEMS or microdevice in modeling and simulation of MEMS. Their key technologies are analyzed in detail. Several current methodologies of system-level modeling and simulation of MEMS are introduced. The method of modeling MEMS with the aid of VHDL-AMS is finally proposed.

**Key words :** MEMS ;physic field coupling ;modeling and simulation ;macromodel

**作者简介:**季国顺(1973-) ,男 ,江苏建湖人 ,江苏大学硕士生 ,助理工程师 ,现从事激光加工 ,MEMS 建模仿真技术研究 ;  
张永康(1963-) ,男 ,江苏张家港人 ,南京大学理学博士后 ,江苏大学博士生导师。