

MEMS 器件的计算机辅助设计与模拟^{*}

COMPUTER-AIDED DESIGN AND SIMULATION FOR MEMS DEVICES

孙克豪^{1,2} 钱劲² 张立宪² 余同希³ 赵亚溥²

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

(2. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

(3. 香港科技大学 机械工程系, 香港九龙清水湾)

SUN Kehao^{1,2} QIAN Jin¹ ZHANG Lixian¹ YU Tongxi³ ZHAO Yapu¹

(1. IAA, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

(3. Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

摘要 概要论述了微电子机械系统的计算机辅助设计和模拟过程, 分析了 MEMS CAD 系统所应具有的主要内容和系统模拟中的关键问题, 讨论了目前经常采用的各种模拟系统的模拟形式和应用范围。并结合静电微马达与微米/纳米镊子实例, 分析了模块化的 CAD 软件结构形式以及所用 MEMS 材料的数据库建立和应用连接, 所提出并采用的开发方式适用于微传感器及微执行器等微系统器件的设计与模拟。

关键词 微电子机械系统 计算机辅助设计 模拟 数据库

Abstract The Computer-Aided Design (CAD) and simulation of micro-electro-mechanical systems is summarized and the primary contents and key problems with the MEMS simulation are also discussed. Various simulating systems are classified according their construction and application range. Combined with the instances of electrostatic micromotor and micro/nano tweezers, the modularized structure of CAD system as well as the establishment and linking with CAD system of the material database of MEMS is analyzed. The presented approach can be extended to the design and simulation of microsensors and microactuators.

Key words Micro-electro-mechanical system (MEMS); Computer-aided design; Simulation; Database

Correspondent: SUN Kehao, E-mail: sunkh@lm.imech.ac.cn, Fax: +86-10-62561284

The funding for this project was provided by a subproject of "973 Project" named MOEMS. Contract (No. G19990331103). And this project was also supported by Microsystem Mechanics Joint Laboratory of IMECH and HKUST.

Manuscript received 20010610, in revised form 20010728.

1 引言

微电子机械系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS), 也称为微系统技术 (MST), 是以批量化的微电子技术为基础, 制造出包括机械、光学、流体运输机构以及其他功能组件的各种微光机电器件, 并使之与集成电路集成在一起, 组成一个可以完成信息获取、处理及执行功能的微系统^[1]。

显然, 微系统是集成化和微型化的极微小器件, 不但体积小、功能强, 性能和可靠性高, 而且功耗和价格都是很低的。

具体来说, 微系统可包含以下几个方面的描述:

- 1) 一种集成微电子器件和微机械器件的系统。
- 2) 系统中的微机械器件与微电子器件在尺度上有相同的量级。
- 3) 微机械器件与微电子器件都是用微加工技术制

造出来的。

- 4) 系统中微机械器件由微电子器件测量或控制。

MEMS 的产品设计包括器件、集成电路、系统和封装等几个方面。其开发过程的分析十分复杂, 包括流体力学、电子、微流体、光学、电磁场等的综合作用。与集成电路和一般机械一样, 采用计算机辅助设计和虚拟现实模拟技术可以极大地提高 MEMS 器件的性能和可靠性, 同时降低开发周期和成本, 并有助于理解微小范围内的力、电、磁、热、机械甚至声等能量之间的相互作用, 优化 MEMS 结构, 并为发明新的 MEMS 器件奠定基础。

但不同的是, 前两者都已有了很成功的商业软件, 而 MEMS CAD 还处在初级发展之中。在电子产品设计方面, EDA (Electronic Design Automation) 软件工具既可以做 IC 设计, 又可以做计算模拟, 如著名的 SPICE, SABER, Simulink 等; 在机械产品领域, MDA (Mechanical

* 20010610 收到初稿, 20010728 收到修改稿。国家重点基础研究发展规划 (973) 项目——“集成微光机电系统研究”子项目资助 (G19990331103)。并受中科院力学所和香港科技大学“微系统力学联合实验室”资助。

Design Automation) 更是已经有了许多技术相当先进的计算机辅助设计、制造和分析等一体化的大型通用软件,如 I-DEAS, UGII, Pro/Engineer 等等。而微电子机械系统的性质和 MEMS 的设计、制造及使用特性决定了它需要一种联结并集成 EDA 与 MDA 这两个领域的设计工具。在某种程度上说,通过计算机的设计造型和包含多物理场耦合效应的计算分析, MEMS 的计算机辅助设计和虚拟现实软件将成为沟通 EDA 与 MDA 之间的“桥梁”。

图 1 显示了 MEMS 器件的设计流程。

MEMS 器件的设计涉及到许多方面的问题,相应地其模拟过程也有不同的层次需求。如掩膜的设计模拟、加工工艺模拟、传感器与执行器的器件级模拟、多能域宏模型的系统级模拟以及包括封装在内的完整系统的模拟。这些模拟需要不同的技术来支持,而且复杂程度也大不相同。图 2 显示了这些模拟过程的层次^[2]。

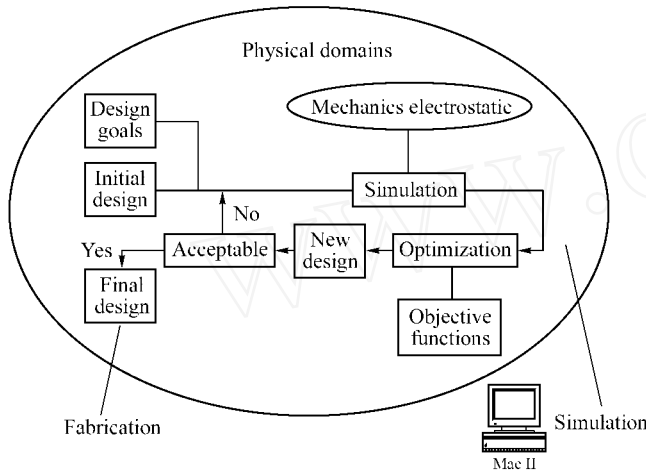


图 1 MEMS 器件的设计流程

Fig. 1 An optimal design methodology for MEMS

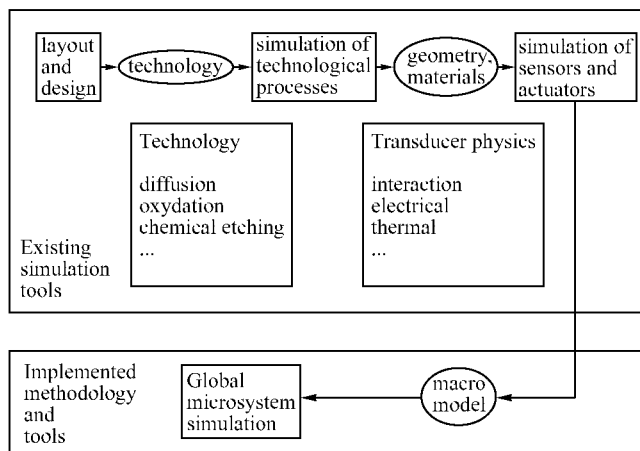


图 2 MEMS 器件的设计模拟层次

Fig. 2 The design and simulation hierarchy of MEMS devices

2 MEMS 器件的设计模拟方法和软件结构

MEMS 的计算机辅助设计系统应为 MEMS 的设计、分析和模拟等提供一个完整的综合软件环境。因为有微机械部件,需要提供三维实体造型工具;因为有

微电子元件,需要有 IC 设计及仿真工具;因为涉及多物理场工作环境,需要有能够对力、热、电、流体等耦合作用的求解器;同时作为联系掩膜、工艺和三维模型的纽带,还需要有结构仿真器;而且由于 MEMS 是一个完整的系统,各种软件工具必须有稳定可靠的接口。如为了使一个电子工程师和一个机械工程师能够协同工作,从三维器件模型中应能抽取用于电子系统模拟(如 SPICE)的数据模型。

即使对微传感器或微执行器的简单器件级的设计与虚拟仿真软件,也不仅要有结构的几何轮廓参数,还要有所用材料相应变化的电子和机械参数,即需要建立典型结构的设计软件包和相应的所需材料的特性数据库,这意味着建立以不同结构为基础的模块化的软件及建立基于 Web 的数据库系统将可能是一个有效的选择方案,从而有利于改善性能并扩展应用范围^[3]。

目前,从应用的角度来看,针对 MEMS 器件的设计模拟方法大致可分为以下四种类型:

类型 1 自主开发整个 MEMS 器件设计制造和分析全过程的模拟系统。

类型 2 在大型有限元软件的基础上增加有关微系统器件设计模拟的模块。

类型 3 针对特定微结构器件的数值模拟,不涉及更多耦合场或封装等内容。

类型 4 将类型 3 与虚拟现实环境相结合,得到一种虚拟设计和模拟的效果。

下面分别介绍这些类型。

2.1 类型 1

这是一种结合已有软件程序包进行微系统设计模拟的方法,典型代表是 Microcosm 公司经过十多年研制的 MEMCAD^[4]。MEMCAD 是微系统领域第一代商品化专用 CAD 软件的代表,至今已发展到 4.8 版。这是一个集成的模块化的系统软件,能够针对微系统的某些功能模块,典型器件或加工工艺在器件级上进行计算机模拟设计,并可实现产品的最后封装设计和模拟^[5,6]。在 MEMCAD 中,既有可用于结构力学有限元分析的 ABAQUS 核心模块,又有可用于静电场边界元结构的 FASTCAP 软件包源程序,以及可用于流体分析、热分析以及磁场分析等的各种成熟的软件模块。

MEMCAD 可完成以下几个方面的设计模拟工作:

1) 创建 包括 MEMS 二维设计编辑器、MEMS 材料特性库、MEMS 工艺描述库及三维造型和网格工具等。

2) 部件模型 包括微系统设计中热、电、力、流体、光等多物理场的耦合求解,部件分析模拟、参数化分析、三维可视化及结果查询等。

3) 系统模型 结合自上而下及自下而上两种 MEMS 设计方法,导入 EDA/IC 设计工具的接口,模拟信号、混合信号及 MEMS 元件的参数分析。具有 MEMS 元件模

板库和机械与混合电子模型单元的 MEMS 系统模拟。

4) 封装 三维封装模型及分析, 三维器件封装的耦合设计和模拟, 高频下封装的 RLC 提取和分析, SPICE 模型抽取及单元库开发等。

图 3 示出了通过 MEMCAD 设计的若干用于微机械结构的各种形式的弹簧。图 4 反映了用于微加速度计中的某型弹簧在各种条件下的变形情况。图 5 则给出了通过 MEMCAD 设计的在微光通讯中应用的扫描微镜。



图 3 MEMS 中的弹簧结构
Fig. 3 The spring structure of MEMS applications

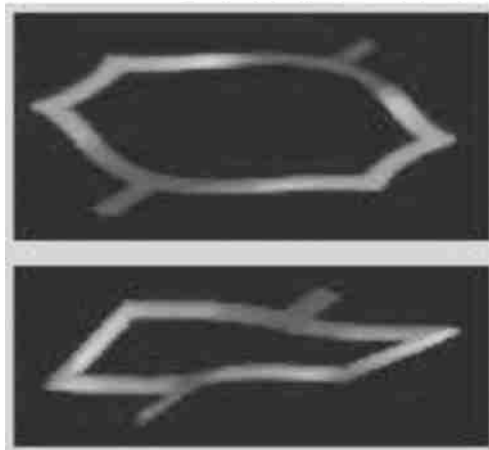


图 4 微加速度计中的弹簧变形情况
Fig. 4 The spring deformation of microaccelerometers

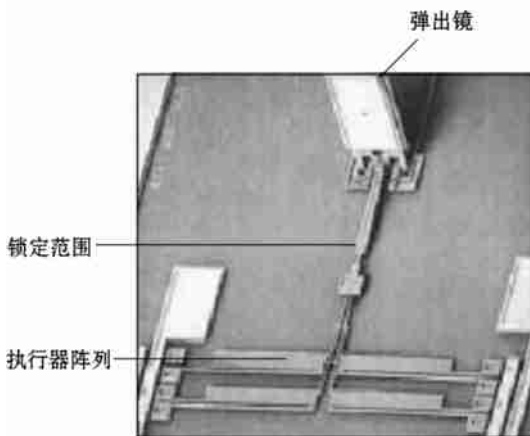


图 5 微光机电系统中的微镜
Fig. 5 The micromirror of optical MEMS

MEMCAD 提供了 MEMS 的设计与分析环境, 如包含了下列一些典型的功能模块: MemHenry 支持完整三维耦合的 MEMS 电磁感应分析、RF 分析等; MemPZR 是基于三维理论模型的精确而灵活的压阻模拟工具; MemETherm 根据焦耳热来分析 MEMS 器件的结构变形, 通过以电压或电流作为边界条件, 求解基于温度的变形; DropSim 则是用于微流体方面的模块。

虽然 MEMCAD 提供了强大的微电子机械系统的设计与模拟功能, 并成为 MEMS CAD 领域的领导者, 但是撇开昂贵的价格不说, MEMS 的 CAD 实际上还有许多关键性的技术问题没有解决, 还不具备实用化的水平, 目前基本上还只是应用在各研究机构中。

这是因为在系统级, 不仅仅因为它是微尺度范围的三维复杂结构, 而且涉及到光学、热学、电子、机械、流体等多个学科领域。这些领域相互作用、相互影响, 每个领域内的参数都需要进行精确的计算, 并进行各能量领域的耦合分析计算, 以便能正确模拟所设计的微系统器件的性能。而在微尺度范围内还存在许多与宏观条件下不同的现象或机理, 这些机理至今还没有能够完全认识清楚, 同时还必须考虑不同的材料特性导致的差异。因此, 在现阶段更多的研究小组或单位都把精力主要放在开发 MEMS 微传感器或微执行器的器件级设计与虚拟仿真上, 仅针对两至三个能量域进行分析计算, 而不是面向整个复杂的系统级的设计和模拟过程。

2.2 类型 2

通过有限元分析 (FEA) 技术来解决微系统的应力、形变、温度分布、电磁场干扰及电学性能等诸多问题是最经常采用的研究方法。近几年功能比较强大的一些有限元软件, 基本上都增加了有关微系统器件设计模拟的模块, 其中比较有效的是美国 ANSYS 公司开发的 ANSYS 软件。

图 6 和图 7 是线性谐振器的有限元模型。

类型 2 取决于有限元软件提供的功能, 而通用软件类的特点决定了这种方法对特殊的微结构器件的多能域耦合是不一定适用的。

2.3 类型 3

这是一种针对特定微结构器件的数值模拟, 这种

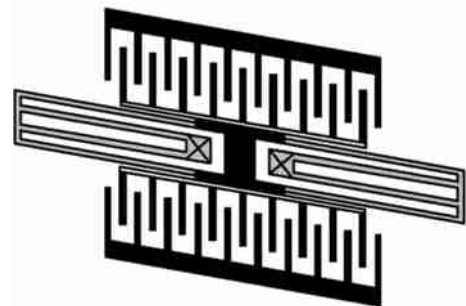


图 6 微电子机械系统线性谐振器
Fig. 6 Linear resonator of MEMS

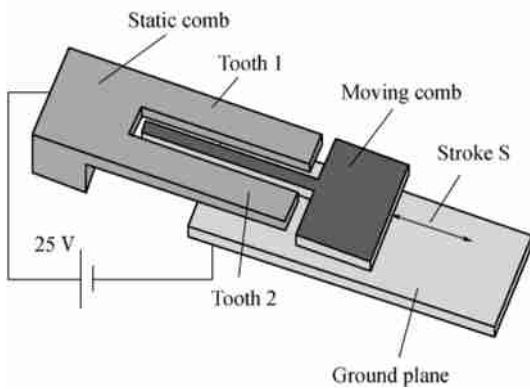


图 7 线性谐振器单齿结构示意图
Fig. 7 The single tooth structure of linear resonator

方法需要将微机械结构的几何参数及材料特性作为输入值,然后分别求解两种甚至更多种的能量域场问题,再把不同能量域耦合起来;一般是利用解析的方法分析计算其静态或动态特性,最后输出其工作过程的静/动力性能曲线,并与实验结果相比较。

应用这种方法的文献非常多^[7~15],如 N. R. Aluru 和 J. White^[7~9]对 MEMS 设计中应用最广泛的静电力致动作用原理的微机械进行了力电耦合分析,强调耦合作用下的三维力电分析的实用性、有效性和强健性。并分别具体讨论了静电场中的表面电荷分布密度与静电力的计算方法和由静电力引起的梁结构变形后的静弹性回复力的计算以及两种场能下的耦合计算过程,提出了求解能量场问题的松弛法与加速松弛法,并通过与基体平行并相连的二维梁的加压情况,给出了具体的计算步骤和不同算法的计算结果。图 8 是加电压后梁与基体表面电荷的分布及梁结构变形的示意。

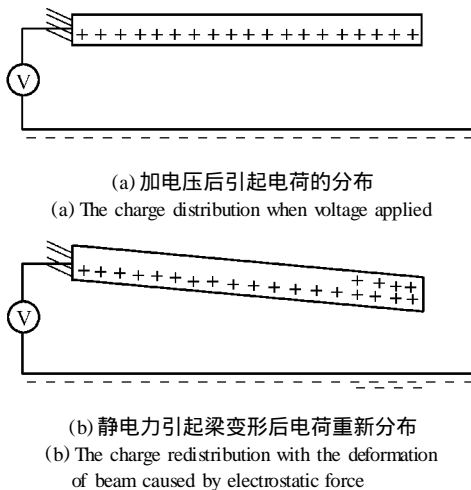


图 8 梁长 500 μm 、宽 50 μm 、厚 14.35 μm 与地间距 1 μm
Fig. 8 A beam with 500 μm length, 50 μm width, 14.35 μm height and 1 μm interval

很显然,该方法需要建立特定结构的数学模型,而且不同的微结构器件其数学模型也不相同。而对于很多微机械器件来说,建立其能正确反映微尺度效应或表面效应的动态模型并不是一件很容易的事。但该方法具有相当大的实用性,可完成通用程序或大型有限

元软件无法解决的特殊问题,虽然只是适用于某一类型的结构器件。

2.4 类型 4

在虚拟现实环境中结合微系统的设计和模拟,可以更加直观地展现微机械器件的运行状态与性能。虚拟环境中三维器件的几何参数或其他参数可以任意调整,甚至可以通过特定的虚拟设备操纵或干涉其运行状态。这种方法的特点是既反映性能特性曲线,以利优化,又显示直观的运动过程,包括微机械结构部件变形过程,以利理解,并可以象操作真实物体那样在虚拟环境中控制器件的各种参数或各部件之间的相互关系,如部件装配等。

我们所开发的 MEMS 器件虚拟设计与模拟程序包括以下几个方面的系统或应用软件与编程工具:

- ® Win95/Win98/WinNT
- ® 3D CAD system
- ® WorldTool Kit Virtual environment
- ® Micro/Nano material database
- ® Visual C++
- ® FEM tools

在所采用的构建软件系统中,WorldTool Kit (WTK) 处于虚拟设计的核心位置。事实上,WTK 是用来虚拟创建高性能实时的、集成 3D 应用的、跨平台软件开发系统,是美国 Engineering Animation Inc. 的 Sense8 产品线中的主导软件,现已发展到 9.0 版。

WTK 软件包是运行在 Windows 或 Win95/NT 平台上的 32 位开发环境,它是一个集成的动态链接库,包括了大部分在虚拟现实中可能用到的元素的类库,并同时允许用户对它们作进一步的扩展。WTK 所提供的库为创建虚拟环境提供了相当大的灵活度。

WTK 的结构基本是面向对象的,所包含的类有“Universe”、“Object”、“Polygon”、“Sensor”、“Viewpoint”、“Light Source”等等。其中 Universe 类代表 WTK 仿真管理器中所有实体的容器,包括各图形对象和其他实体 Lights、Sensors、Viewpoints 等。而 Object 类是可见的和可操作的具体 3D 图形实体,例如可移动的灯、沙发和飞鸟等 3D 图形都是对象。对象不依赖于任何物理规律。对象在虚拟环境是典型的可移动元素,有通过交互才移动的静态对象,也有随着仿真操作而移动的动态对象。

WTK 中提供了面向对象的编程方法,对虚拟环境中的对象建模,同时它还接受来自其他 CAD 软件包的几何形状模型文件。WTK 可读取的通用文件格式包括 Autodesk 3DS 格式、DXF 格式以及 Sense8 的 NFF 格式。

图 9 为虚拟程序用户界面,包含一个主菜单工作区和一个信息输出窗口。图 10 显示一个静电微马达

三维模型以及其结构与电性能参数输入窗口。加载电压、转子半径、绝缘材料与绝缘层厚度、电极扇区角度等都将对力矩输出结果产生影响。



图 9 虚拟程序用户界面
Fig. 9 User interface of virtual application program

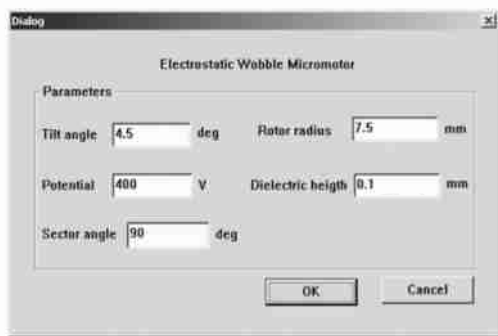


图 10 静电微马达参数输入窗口
Fig. 10 An input window for electrostatic micromotor parameters

静电微马达输出的力矩可由下式计算^[2]

$$M_d = D \left\{ \frac{R}{\cos} + \frac{a}{\cos^2} \ln \left[1 - \frac{R}{a} \cos \right] \right\}^2 \quad (1)$$

$$M_a = D \left\{ 2 \operatorname{atan} \ln \left[1 - \frac{R}{a} \cos \right] - 2 \frac{a}{R} \right\}^2 + D \left\{ \arctan \left[\frac{a+R}{a-R} \right]^{\frac{1}{2}} \tan \left[\frac{2}{2} \frac{4a^2 - 2R^2}{a^2 - R^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \quad (2)$$

其中

$$D = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 V^2}{\sin^2} \quad (3)$$

$$a = R + \frac{d_i}{\sin} \quad (4)$$

式中 M_d 与 M_a 分别为两垂直方向的力矩, α_1 和 α_2 为当前活动电极角位置, R 为转子半径, V 为驱动电压, α 为倾角, d_i 为绝缘层厚度, ϵ_0 为绝缘常数。

由图 11 可以看出,力矩是电极接触点位置与活动电极扇区中心线之间相角的函数。图 12 是取不同的倾角值时,两种力矩输出曲线的比较情况。其实绝缘层厚度与扇极角度的变化都会影响 M_d 与 M_a 的输出特性。

与此类似,其他结构形式的 MEMS 器件如微泵、微

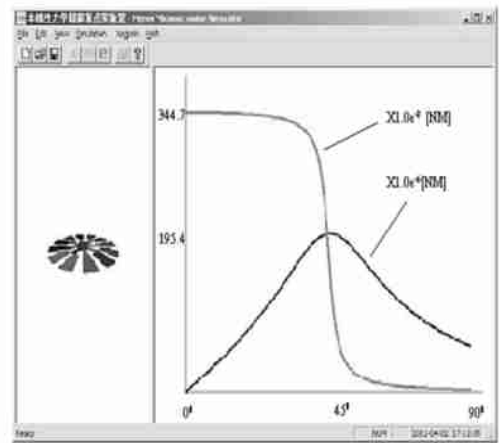


图 11 静电微马达力矩输出曲线
Fig. 11 The torque output curve for electrostatic micromotor

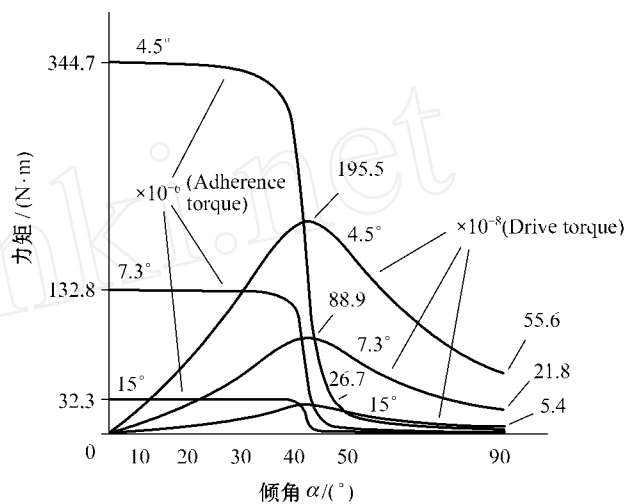


图 12 M_d 与 M_a 随倾角的变化情况
Fig. 12 Drive and adherence torques for different rotor inclination angles

加速度计、微米/纳米镊子、微镜等皆可按其各自的物理机制模块化并集成到统一的程序结构中,通过菜单选择其结构形式,再输入各自所需的模拟运行参数,即可计算出相应的结果,并可与 ANSYS 等大型有限元软件计算的结果相比较^[7]。图 13 显示了微米尺度镊子在加压后两梁间距的变化规律。图 14 表示了该镊子的几何结构^[8]。

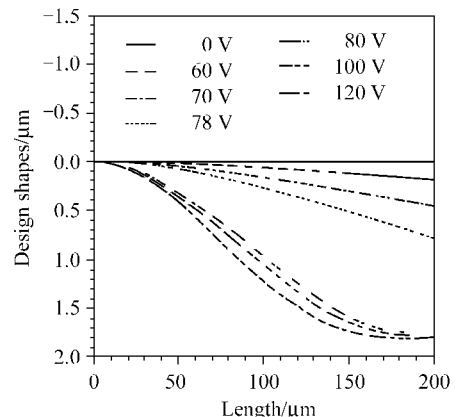


图 13 不同电压下镊子两平行板间距变化曲线
Fig. 13 The variable curve of interval between the two parallel plates of microtweezer with different input potentials

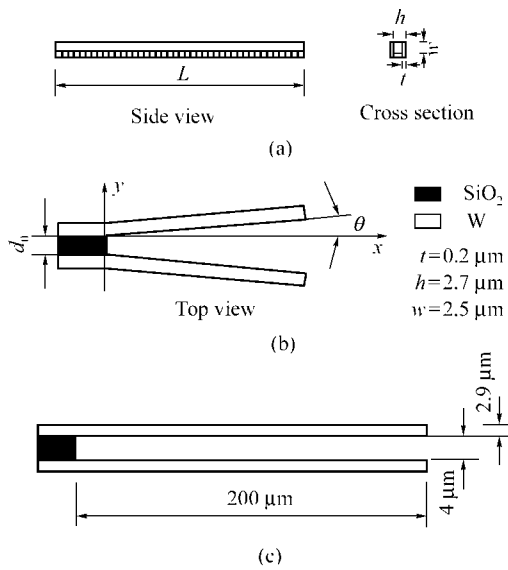


图 14 微/纳米镊子几何结构
Fig. 14 The geometry structure of micro/nano tweezer

3 MEMS 材料的数据库

一般认为,微机电系统的尺度在微米到毫米的量级。微机械结构进入微米尺度,宏观世界的结构知识与法则,如宏观结构力学、流体力学、热学理论等就有些不适用了。例如,宏观机械设计中所使用的材料属性,在微机械中不能使用,宏观条件下的各种材料常数,在微米尺度下也需要重新测量。材料因为晶粒间界等凹痕效应随尺度减小而减轻等原因,材料强度可以提高好几倍,这就是材料的尺度效应;随着尺度减小,与体积对应的表面积增大,增加了接触部分的摩擦阻力,称为表面现象。

由于微尺度效应以及表面现象, MEMS 所用材料有着一些不同的特点。而在微机械设计的各主要步骤中,如概念设计、基本设计、详细设计、计算机辅助设计(CAD)和仿真等,都是离不开 MEMS 材料的。微机械常用的材料如表 1。

表 1 微机械常用材料
Tab.1 General materials for MEMS

材 料	应 用	特 性
聚酰亚胺	结构	软和易弯曲,光波导
Wu	结构	不被腐蚀
Ni, Cu, Au	结构	涂覆,厚结构
石英	作动	各向异性刻蚀,压电
氧化锌	作动	压电性
PZT	作动	压电性强
TiNi	作动	形状记忆合金
GaAs	光学	激光器、发光二极管、探测器
类金刚石薄膜	润滑	耐磨擦和磨损

过去十几年,科学家已做了大量工作来测量微尺度下的材料性质,并得到了许多好的结果,这对研究微尺度下材料的力学性质、电学性质、光学性质和化学性

质等都有很大的帮助。在此基础上,建立一个 MEMS 材料的数据库就成为亟待完成的工作。

为此,我们建立了一个基于 Web 的 MEMS 材料数据库,使其既可以应用于微系统的理论研究时参考,又可以应用于虚拟设计和模拟程序中。该 MEMS 材料数据库包含以下几方面的数据,反映材料的尺度效应,给出数据的测量方法,记录数据的来源(即来自哪些文献),说明数据的测量条件(例如温度)和测定数据的设备。

数据库的开发应用了 Microsoft SQL Server 7.0 作为数据库核心管理支持,用 PowerBuilder 完成开发与数据库连接的应用程序,以实现该数据库的维护功能,如添加、删除、修改等。另外,还使用了 ASP(Active Server Pages)来完成该数据库在网上的可浏览、可查询以及可增删等功能。

图 15 显示了虚拟设计与模拟程序中通过 ODBC 获取 MEMS 材料数据库相应材料数据的功能对话框。数据有材料名称、属性值以及应用条件等。



图 15 通过 ODBC 建立联系的功能对话框
Fig. 15 A function dialog for communication between application and material database through ODBC technique

4 结论

微系统的虚拟设计可实现微系统的快速而有效的开发,降低成本,并省去冗烦的实际测试过程,以在实际制造前观察和评测设计结果。系统可利用 3DS Max 等工具完成几何造型,从所构建的 MEMS 材料特性数据库中获取所需数据,然后在虚拟环境中观察模拟系统动态特性状态,从而既可以更好地理解器件模拟的执行过程,又能优化结构设计。

应该指出,本文所说明的 MEMS 器件设计与虚拟模拟程序虽然构建了虚拟现实环境,但并没有更多的使用虚拟现实设备。虚拟现实技术是 20 世纪末才兴起的一门崭新的综合性信息技术,它融合了数字图像处理、计算机图形学、多媒体技术、传感器技术等多个信息技术分支,从而大大推进了计算机技术的发展。虚拟现实技术具有“3I”特点:即 Immersion——强烈的“身临其境”沉浸感; Interaction——友好亲切的人机交

互性以及 Imagination——发人想像的刺激性。很显然,如果要实现这些特点,还必须要具有多种输入输出设备作为支持,如头盔、数据手套、位置跟踪装置等等,而这些是需要大量投资的。但真正的虚拟现实系统可以实现虚拟设计与实际装配及制造的物理连接,从而贯穿于器件的设计与制造的整个过程。

在实际开发 MEMS CAD 软件时,一个突出的问题是如何构造简化的低阶动力学器件模型(称为 macro-models),该模型应能反映那些通常仅在实验中或完全三维模拟中才能得到的复杂性质。这个问题的实质就是在可接受的误差范围内对模型进行简化,将非稳态耗散系统集成到模拟仿真环境中。

需要这样做的原因是, MEMS 器件涉及可移动的或可变形的微结构部件如静电致动器,它的模拟将涉及静电和机械力等的紧密耦合。电荷的分布和静电力对结构变形的影响必须要同步获得,并贯穿于变形过程始终。由于静电致动力的内在非线性和大变形引起的几何非线性,很显然问题的求解将是高度非线性的。在每一个单纯的能量场中应用快速的数值算法作优化模拟,通过适当的迭代,全过程求解耦合场问题来决定系统的性能虽然很精确,但也将占用大量的计算时间。因此必须要有一个可以及时处理系统动力学问题的方法。构造低阶的宏分析模型来取代耗时的完整三维分析是一个有效的途径。宏模型的详细构造过程可参见文献[16~18]。通过构造低阶的宏模型求解系统级的动力问题来表示每一个能量域,然后把这些模型插入系统级的仿真器。因为宏模型是解析的,所以模拟运行没有重大的计算耗费,同时由于宏模型适应完整的三维模拟,能够为设计要求提供足够的精度。

References

- 1 Fatikow S, Rembold U. *Microsystem technology and microrobotics*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997. 1~108.
- 2 Romanowicz B F. *Methodology for the modeling and simulation of microsystems*. USA: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 3 Sun K H, Zhao Y P. The method of micromechanical design in virtual reality environment. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2000, 1(5): 405~414.
- 4 Senturia S D. CAD for microelectromechanical systems. *Transducers '95*, Stockholm, Sweden, 1995, 2: 5~8.
- 5 Bart S F. CAD for integrated surface-micromachined sensors: Present and future. *Proc. Fifth ACM/SIGDA Physical Design Workshop*, Reston VA, April 15-17, 1996. 72~75.
- 6 Gilbert J R, Osterberg P M, Harris R M, Ouma D O, Cai X, Pfajfer A, White J, Senturia S D. Implementation of a MEMCAD system for electrostatic and mechanical analysis of complex structures from mask descriptions. *Proceedings of MEMS '93*, Ft. Lauderdale, FL, Feb. 1993. 207~212.
- 7 Bart S F, Mehregany M, Tavrow L S, et al. Electric micromotor dynamics. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1992, 39(3): 566~575.
- 8 Shi F, Ramesh P, Mukherjee S. Simulation methods for micro-electromechanical structures (MEMS) with application to a microtweezer. *Computers & Structures*, 1995, 56(5): 769~783.
- 9 Aluru N R, White J. An efficient numerical technique for electromechanical simulation of complicated microelectromechanical structures. *Sensors and Actuators A*, 1997, 58: 1~11.
- 10 Aluru N R, White J. A multilevel newton method for mixed-energy domain simulation of MEMS. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1999, 8(3): 299~308.
- 11 Cai X, Yie H, Osterberg P, Gilbert J, Senturia S, White J A. Relaxation/multipole-accelerated scheme for self-consistent electromechanical analysis of complex 3-D microelectromechanical structures. *Proc. 11th Int. Conf. Computer-Aided Design*, Santa Clara, CA, Nov. 1993. 283~287.
- 12 Andrew Y J L, Hui C Y, Tien N C. Electrostatic model for an asymmetric combdrive. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(1): 126~135.
- 13 Lee J S, Yoshimura S, Yagawa G, Shibaike N. A CAE system for micromachines: its application to electrostatic micro wobble actuator. *Sensors and Actuators A*, 1995, 50: 209~221.
- 14 Cray S, Juma O, Zhang Y. Software tools for designers of sensor and actuator CAE systems. *Proc. 6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '91)*, San Francisco, CA, USA, 24-28 June, 1992. 498~501.
- 15 Schroth A, Blochwitz T, Gerlach G. Simulation of a complex sensor system using coupled simulation programs. *Sensors and Actuators A*, 1996, 54: 632~635.
- 16 Gabbay L D. *Computer aided macromodeling for MEMS* [Ph D thesis]. MIT. June 1998. 12~14.
- 17 Gabbay L D, Mehner J E, Senturia S D. Computer-aided generation of non-linear reduced-order dynamic macromodels——: Non-stress-stiffened case. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(2): 262~269.
- 18 Mehner J E, Gabbay L D, Senturia S D. Computer-aided generation of non-linear reduced-order dynamic macromodels——: Non-stress-stiffened case. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(2): 270~278.

作者简介

孙克豪,男,1965年12月生,黑龙江鸡西人,汉族。南京航空航天大学航空宇航学院副教授。主要从事机械与微机械的 CAD/CAM/CAE 等方面的研究。现为中科院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM)博士后。通讯地址:北京市海淀区中关村路15号LNM,电话:010-62545533-3023, E-mail: sunkh@jonline.com

SUN Kehao, male, born in Heilongjiang Province, in December 1965. He is an associate professor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interests include mechanical CAD/CAM/CAE, as well as MEMS CAD and simulation. He is now a postdoctor at LNM, Institute of Mechanics, CAS.

E-mail: sunkh@lmm.imech.ac.cn or sunkh@jonline.com

钱劲,男,1978年10月生,江西省宜春市人,汉族。中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM)在读研究生,研究方向为微系统力学。E-mail: qianj@lmm.imech.ac.cn

张立宪,男,1978年11月生,河北省保定市人,汉族。中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM)在读研究生,研究方向为微系统力学。E-mail: zhanglx@lmm.imech.ac.cn

余同希,男,1942年生,香港科技大学机械工程系教授,香港九龙清水湾。E-mail: metxyu@ust.hk

赵亚溥,男,1963年8月生,河北晋州人,汉族。中国科学院力学研究所研究员,博士生导师,非线性力学国家重点实验室(LNM)主任,理学博士。主要从事微系统力学和冲击动力学的研究。通讯地址:北京市海淀区中关村路15号LNM,电话:010-62541734,传真:010-62561284, E-mail: yzhao@lmm.imech.ac.cn