

# 微系统 CAD 的研究现状及展望

陈 愚 钟先信 黎 凯 肖沙里

(重庆大学光电技术及系统开放实验室微系统研究中心 重庆 400044)

**摘 要** 在微系统的研究和设计中,计算机辅助设计软件工具的开发是一个非常重要的研究领域。讨论了微系统CAD的系统模型层次,介绍了一些重要的CAD项目的研究现状,并指出了微系统专用CAD研究中存在的两个关键问题。

**关键词** 微系统 CAD 模型层次

**中图分类号** TP391.72 **文献标识码** A

## 1 前 言

微系统(MS: Microsystems 或 MEMS)是在微电子、微机械和微光学等基础上,把传感器、执行器和信号处理单元等集成在一起的工程系统,也是一个信息系统。自80年代末微系统的研究热兴起以来,其结构设计、制造工艺、材料特性等方面的研究已获得长足的进展。微系统的整体结构日趋复杂,传统的单一设计方法已无法对整个系统进行设计 and 对其性能进行模拟分析,计算机辅助设计(CAD: Computer Aided Design)已是MS研究的重要手段。但是,在MS研究领域, CAD 工具的发展水平远远落后于前沿研究的步伐。

随着微系统技术的发展,在自动化、工业、通信、虚拟现实以及视频技术等领域中,已经有许多微器件研制成功,有越来越多的商品化产品问世。根据弗吉尼亚洲 System Planning 公司的预计,到2000年全球微系统市场可达139亿美元。产品的多样化及国际市场上日趋激烈的竞争,使得对计算机辅助工程(CAE: Computer Aided Engineer)和CAD工具的要求日益迫切。

## 2 MS CAD 技术研究现状

自1987年在东京举行的 Transducer '87年会上 S. D. Senturia 提出对MS-CAD进行研究的必要性以来,一些国家投入人力物力作了大量的研究工作,取得了令人瞩目的成果。下面,

我们首先要讨论在微系统 CAD 研究领域中的关键问题——建立用于微系统的 CAD 的恰当的框架,模拟仿真的系统级建模,然后讨论当前微系统 CAD 领域研究的两个主要软件结构设计方案:

“一体化”和“捆绑式”系统结构。

## 2.1 模型层次

图 1 所示为微系统 CAD 工具软件的整体模型,分三个层次。底层为基本元件级,目的是对一些构成微系统的基本微元件、微结构的特性进行辅助设计和性能仿真分析。顶层为系统级模块,它的实现需要系统底层的各个模块的支持,包含了微电子、微机械和微光学的 CAD 模块等。

在最简单的情况下,系统级模型表现为各个元件单元模块构成的网络。这些元件单元就相当于电子线路中的元器件。从更加普遍的意义上讲,它们可以表示为一小组成对的普通的微分等式,在时域中可以很容易地被积分。这些模拟中都牵涉到多个自由度。图 2 所示为基本元件级的构成,将其分成了工序、材料和结构三个部分。然而,在实际应用中每个微器件都得连接到一个完整的系统中去。

为了在更高的设计级上得到有效应用,理想的系统级模型应该满足以下要求:

- 只需要有限个自由度;
- 对模拟仿真的计算范围进行了界定,能够正确描述取极值时的系统状况;
- 模型与尺寸和材料性质之间的关系正确;
- 准静态和动态特性都得到描述;
- 可以进行解析重现,使设计者无须在基本元件级上重新进行计算就能够得知改变设计参数对最终设计结果的影响;
- 该模型应服从热力学各定理,能量守恒系统遵守热力学第一定理,而能量不守恒系统则遵守热力学第二定理;

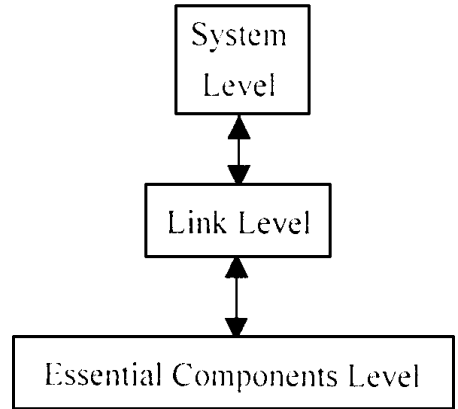


Fig. 1 Levels of CAD system

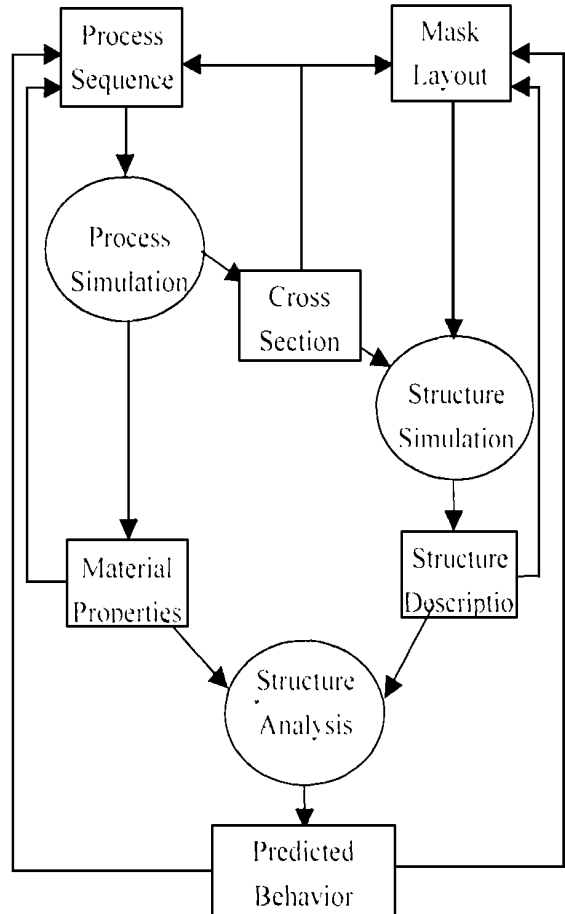


Fig. 2 Essential structure of component level

· 与通过实验和现有的 3D 模拟工具所得到的结果相比较,模型应准确可靠、符合实际。

## 2.2 微系统 CAD 研究现状

在微系统 CAD 领域中,当前主要有两个软件结构设计方法:“一体化”和“捆绑式”系统结构。一体化 CAD 系统研究的目的是实现一个设计工具软件,将多个方面的处理集成到单个处理器中;捆绑式的软件结构则是将多个不同的用户级软件包捆绑在一起成为一个“超级”工具软件。另一个替代方案是由 Michigan 大学开发的 CAEMS 系统,采用了另一种完全不同的方法:一旦选定基本结构类型,比如平面压力传感器,就建立起该结构的优化设计专用模块。

### 2.2.1 一体化 MS CAD

沿着一体化这个思路进行研究,并取得一定成果的代表有美国 Carnegie-Mellon 大学(CMU)和 Stanford 大学。

CMU 的 NODAS v1.4 是一个参数化的元件库,能够由用户定义参数生成 MS 系统的物理结构。SABER 节点模拟器在对表面微机械加工微系统器件进行模拟时可使用它。这个库包含了各种梁、平面结构、支撑结构、静电梳状马达(垂直方向和水平方向)和静电间隙等基本微结构。这些基本结构可以组合起来,以构成器件或是系统。在基本结构模型的设计中已经考虑了电气特性,所以电子和机电特性的模拟分析可以同时进行。在设计时,NODAS 将布局位置计算与性能模拟分离开来进行处理。用户首先使用结构符号绘制出图形,通过一套静态模型计算确定每个元件的位置。然后再利用一套动态模型根据元件性能来生成新的图形,在这些模型中,NODAS 自动确定布局位置和静态元件参数。这种办法减少了各套模型的节点和变量,大大提高了整体的模拟仿真速度,同时又让用户采用抽象符号进行布局,从而避免布局时发生位置错误。

CMU 有许多合作伙伴,其中麻省理工大学(MIT)致力于“形状合成”的工作,目的是允许用户直接操作 MS 单元结构,Pennsylvania 大学则与 MIT 一道进行形状优化方面的研究。

Stanford 的 MS-CAD 项目的研究目标是一个完全一体化的、基于 FEM 模型的处理软件,能够建立起微系统器件性能和与加工过程相关的模型。这就要求不仅要能够考虑到物理学和材料特性,而且还必须考虑工艺过程的影响。目前,系统集成的首要任务是研制并测试一些关键器件,建立基本数据库。

SOLIDIS 公司所采取的也是这个基本思路,可是在处理某些问题时 SOLIDIS 还是提供了与其它处理器进行捆绑的接口。

### 2.2.2 捆绑式 MS CAD

MIT 和 Microcosm 公司合作研制的 MEMCAD 和 IntelliSense 公司的 IntelliCAD 所采用的系统结构就是将多个模拟工具捆绑组合,各自分别对应着特定应用领域的处理内容。

在 MEMCAD3.1 版中,允许用户从布局数据库出发,建立 3-D 模型,调用力学、电子、机电、热力学等分析软件包对设计的微器件性能进行分析,并将结果生成三维视图。在该版本中,还新增加了绝缘材料特性、残留应力分析以及各向异性材料特性分析等功能。

同时,与电子辅助设计 CAD 集成也是一个重要研究方向,主要目标是将现有的集成电路 CAD 工具在三个领域中扩展:物理结构设计、分析和性能设计。在结构设计方面,Tanner 研究所将在其 L-Edit 布局设计器中加入一个模型生成器,用于生成所设计的微系统芯片结构外观的 3D 视图。在分析方面,则是希望实现将不同领域的边界元分析和有限元分析综合起来的跨

领域分析工具,接收从设计视图传递来的各个参数,能够对静电学、热力学和磁力学等领域的设计参数进行综合分析。在性能设计方面的研究目标是开发一个性能模型设计器,增强原有的 TSpice 工具的功能,使其能够处理机械、热力学以及磁力学变量,将其发展为一个性能模拟器;同时也要强化其图形编辑器的功能使之能处理非电的结构。1999 年 4 月, Tanner 推出了最新的商品化微系统设计专用 CAD 软件 MEMS Pro<sup>TM</sup> 2.0 版。

### 3 主要问题及展望

以 MEMCAD 为代表的第一代商品化微系统专用 CAD 软件,能够针对微系统中的某些功能模块、典型器件或加工工艺在物理级上进行计算机模拟仿真。但是,总体来看还远未达到汽车、电子、航天 CAD 那样完全实用化的水平,还存在一些关键技术未能解决。

在系统级,不仅仅是因为它是微型条件下的三维复杂结构,而且涉及到光学、电子、机械、流体等多个学科领域。每个领域内的参数都需要进行精确的估算,以便能正确模拟所设计微器件的性能。尺度范围的微型化导致了许多在宏观条件下不会发生的现象,还必须考虑不同的材料特性导致的差异。在物理级,各种各样的微器件模拟的核心问题就是耦合能量领域的模拟。微器件在被虚拟为传感器件时,就涉及到热能、机械能、电能等多领域的能量。例如,一个准静态(即非振荡)的加速度传感器能够测量属于弹性力学、惯性力学、静电学和流体力学(阻尼)的能量,而且这些能量还是耦合在一起的。惯性质量块的运动在带来弹性恢复力的同时,也对电容板的位置发生改变,还改变了空气膜的边界从而带来了流体反应力。特别是,除非是位移量特别小,这些能量耦合基本上都是非线性的。因此模拟软件的设计就面临巨大的困难:需求解同时满足四个微分方程的解,其中弹性力学、静电力学和流体力学等三个方程与空间分布有关,就是偏微分方程,而且有可能存在大的位移量和一些很大的固有非线性。

因此,在现有的未解决的难点中,最为引人注目的是两个方面的内容。第一个方面是,如何将分立的不同领域的 CAD 功能模块连接起来,以有效地实现系统级模拟仿真;第二个方面是,如何在可接受的误差范围内对模型进行简化,将不守恒能量系统集成到模拟仿真环境中。在下一步的工作中,研究重点将是着重解决好系统级仿真的实现和不守恒能量的模拟问题,研究目标将是能够在系统级实现内容完善、性能可靠、符合实际、用户界面友好的完全商品化的实用的软件工具。

### 4 结 束 语

微系统 CAD 的研究在过去的十余年中取得了一定的成果,对微系统的科研、产品开发起到了推动作用。同时,微系统的快速发展也加快了 CAD 进步的步伐。两者相互促进,形成了一个良性循环的机制。可以预见,微系统 CAD 的研究将会为整个微系统产业带来巨大的推动力。

## 参 考 文 献

- 1 Senturia Stephen D. Simulation and design of microsystems: a 10- year perspective. Sensors and Actuators A, 1998, 67: 1 ~ 7
- 2 Osterberg P M, Senturia S D. M-TEST: a test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures. J Microelectromeching System, 1997, 6: 107 ~ 118
- 3 www.darpa.mil
- 4 www.ece.cmu.edu/~mems
- 5 www.tanner.com
- 6 www.memcad.com

**Research Achievement on MS CAD**

CHEN Yu, ZHONG Xian-Xin, LI Kai, XIAO Sha-Li

(Open Lab. for Opto-electronic Tech. & Sys. Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract**

The development of CAD tool used in the research and design of microsystems is very important. The modeling levels of a CAD system is discussed in this paper, the research situation of several CAD program at present is introduced, and also two essential problems existing in this research area are pointed out.

**Key words:** Microsystems, CAD, Modeling level

陈 愚 男, 1973 年 4 月出生, 重庆大学光电工程学院精密仪器及机械专业博士研究生。