A 3D Solid Modeling Oriented MEMS Design Approach*

TENG Yun, YUAN Weizheng, CHANG Honglong*

(*Micro and Nano Electromechanical System Laboratory of Northwestern Polytechnic University, Xi' an* 710072, *China*)

Abstract: Driven by the "What You See Is What You Get" design concept, this paper presents a 3D solid modeling oriented MEMS design approach which ensures a design flow from 3D solid model to system-level model and process layout. In this design flow, the 3D solid model is firstly constructed, after FEA simulation, the system-level model can be obtained via component mapping and macro-model extraction, also obtained is the layout through automatic layout conversion. This design approach enhances the design efficiency, and the consistency and accuracy of model data can be assured.

Key words: MEMS; 3D solid modeling; design approach

EEACC: 2575 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.03.008

面向三维实体建模的 MEMS 设计方法*

滕 云, 苑伟政*, 常洪龙

(西北工业大学陕西省微纳米系统重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 根据"所见即所得"的设计理念, 提出了一种面向三维实体建模的 MEMS 设计方法, 实现了从三维实体到系统级模型或工艺版图的设计流程, 使设计者可以首先直接建立器件的三维实体模型, 在完成有限元分析后, 可以通过组件映射和宏模型提取的方式获得系统级模型, 再通过自动版图转换得到相应的工艺版图。此设计方法可以提高设计效率, 并且保证了模型数据在各个设计层级之间传递时的一致性和精确性。

关键词: MEMS, 三维实体建模, 设计方法

中图分类号: TP391.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2011)03-0350-04

MEMS 起源于 IC, 但 MEMS 有诸多与 IC 不同之处, 其中之一便是三维机械结构。事实上, 三维结构在很大程度上决定了 MEMS 器件的功能。在设计方面, MEMS 的三维实体结构主要用于进行有限元分析, 例如结构的模态分析和多能量域耦合分析等。传统的 MEMS 设计中, 设计者首先绘制器件版图, 再将绘制好的版图结合一定的工艺条件生成三维实体模型, 这种设计方法被称为 Bottom-Up 方法, 随着 MEMS 设计技术的发展, 此设计方法暴露出了诸多缺点, 随后出现的 Top-Down 方法则首先关注系统的总体性能, 即将三维结构模型与电路进行联合仿真, 再将整个系统逐次细分为若干个子系统(模块), 当各个子系统均达到设计要求后, 最后生成器件版图。后来逐渐形成了分为系统级、器件级和工艺级的结构化的设计方法[1-2], 该方法将器件的三维结构看作是由不同的标准化组件所搭建而成; Yang Liu 等人也提出了"function to 3D shape to mask"设计流程[3], 即从系统功能出发, 再进行三维设计, 最后得到版图。目前, 对 MEMS 器件的机械部分设计多采用通用的 CAD 软件进行 MEMS 器件的三维设计, 如 Autocad, Solidworks 等, 但是 MEMS 器件在制造技术等方面的特殊性导致其在设计方法上与传统的机械设计存在差异。以往的 MEMS 设计方法过多的继承了 IC 的设计方法, 不能充分体现"所见即所得"的现代设计理念, 使机械背景的设计人员难以掌握设计过程, 限制了其应用的广泛性。国际上, 一些商业化的 MEMS 设计软件已经开始提供 MEMS 专用的的三维设计模块, 其中具有代表性的是美国 Coventor 公司的 MEMS+软件。西北工业大学提出了系统级、器件级与工艺级之间任意流程

项目来源: 国家高技术研究发展计划项目(2009AA04Z320)
收稿日期: 2010-09-02 **修改日期**: 2010-10-26

的泛结构化设计方法[4],并建立了集成设计工具(MEMS Garden),其中面向三维实体建模的 MEMS 设计方法是其中重要的环节之一,本文拟就其中的三维设计技术开展讨论。

1　面向三维实体建模的设计流程

在面向三维实体建模的 MEMS 设计方法中,设计者首先建立器件结构的三维实体模型,建模方法包括体元建模和参数化建模,如图 1 所示。建立好的实体模型可以直接用于有限元分析。对于系统级仿真过程,将三维实体模型分成两类结构,一类是可以实现参数化的标准组件,如梳齿、质量平板等,这类组件可与相应的系统级组件共享模型库,再通过组件映射的方式得到此类三维结构所对应的系统级模型,进而对其进行系统级设计;另一类是相对复杂或者不规则的三维结构,这类组件要么没有与之所对应的系统级组件,要么由于模型复杂而影响系统级仿真效率,故可通过宏模型(Macro-model)提取的方法以获得这类结构的降阶数学模型之后,再导入到系统级设计中[5-6]。MEMS 器件的设计最终是要得到用于加工的工艺版图,根据 MEMS 加工工艺的特性,通过平面投影的方式从三维结构中提取平面信息从而自动生成器件的工艺版图[4],这样一方面提高了设计者的效率,另一方面可以提高设计的精确性,并保证了三维实体结构和工艺版图的一致性。

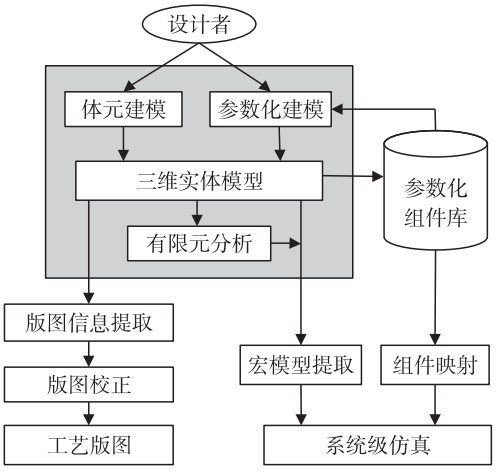

图 1　面向三维实体维建模的 MEMS 设计流程

2　基于体元的三维实体建模方法

对 MEMS 器件的直接三维建模采用基于体元(Primitive)布尔运算的构造实体几何(CSG)方法[3]。在计算机图形学领域,体元表示可以由解析数学表达式决定的基本几何体,如长方体、圆柱体和球体等,如图 2 所示。这些几何体通过若干参数变量来进行描述,比如圆柱体可以用底圆圆心坐标、底圆半径和高来表示。为了满足 MEMS 设计的专用性要求,还提供了额外的适用于 MEMS 建模的体元结构,比如任意角度折叠梁等。

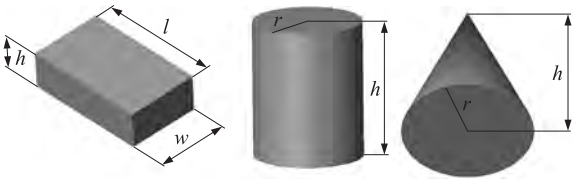

图 2　用于建模的体元

建立好的若干体元用以搭建一定功能的器件模型,通过三维布尔运算可以完成复杂三维结构的建模。通过布尔运算中的并、交和差运算,两个体元可以生成新的三维结构,此方法即称为构造实体几何法,同样,所生成的三维结构又可以参与下一步的布尔运算操作,依此类推,若干步骤的布尔运算便形成了一种数据结构—— CSG 树,该数据结构以二叉树的形式记录了三维实体由基本体元到复杂模型的构造过程。

以图 3 中微谐振器的部分结构为例,此结构由一个含阻尼孔的质量平板、四个折叠梁和四个锚点组成,其中质量平板和锚点由长方体体元表示。质量平板由一个相对较大的长方体与 100 个小的长方体通过布尔差运算生成,支撑结构由折叠梁和表示锚点的长方体通过布尔并运算生成,质量平板与 4 个支撑结构再进行布尔并运算后生成最终器件结构。体元建模的优点在于多数复杂结构均可以通过简单的体元几何体搭建而成,同时由于体元本身由参数变量控制,使得体元建模可以非常方便地实现计算机程序化。

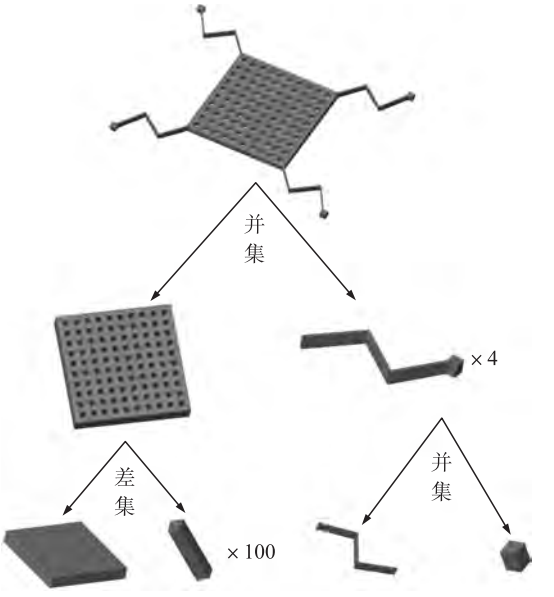

图 3　由体元建模所生成的 CSG 树

3 共享系统级组件库的参数化建模

参数化组件起初被用于结构化的 MEMS 设计过程的系统级仿真中[7-8],包括质量平板、梳齿和梁等。通过添加足够的几何参数,利用三维造型引擎,便可以创建这些组件的三维实体模型[9],例如,创建梁结构的三维实体模型需要提供梁的长度、宽度和高度,而事实上,系统级组件库中的梁组件已经包含了这些参数。如图 4 所示,一个梳齿的三维模型由诸多参数控制生成。

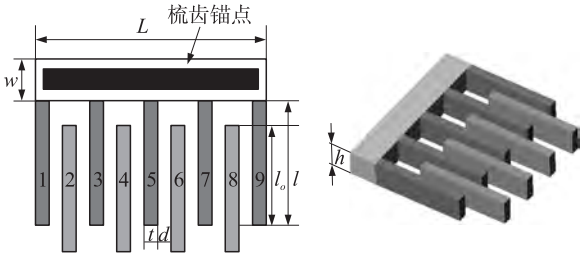

图 4 梳齿的参数化建模

参数化组件由硬件描述语言进行建模[7-8,10],如 VHDL 或 Verilog-A 等,这易于进行组件的整体修改,并且通过使组件的三维模型与系统级模型共享模型数据库,可以完成系统级设计和器件级设计的无缝集成,即对于建立好的系统级模型,可以通过参数化的三维建模方法直接生成该系统级模型所对应的三维实体,反之亦然,这样便可以显著的提高设计者的工作效率和设计的精确性。

如图 5 所示,由于模型库共享,器件的系统级模型与三维实体模型存在一一对应的关系,也即存在映射关系,系统级模型与三维实体模型的相互转换称为组件映射。参数化组件的三维实体在程序实现上与体元建模所生成的三维结构共享相同的数据结构,故可对它们施加相同的建模操作,因此可以将参数化组件建模与体元建模相结合,图 6 所示为含内孔的微谐振器,其驱动梳齿由参数化的建模方式生成, 而其它结构采用与图 3 相同的 CSG 方法生成。

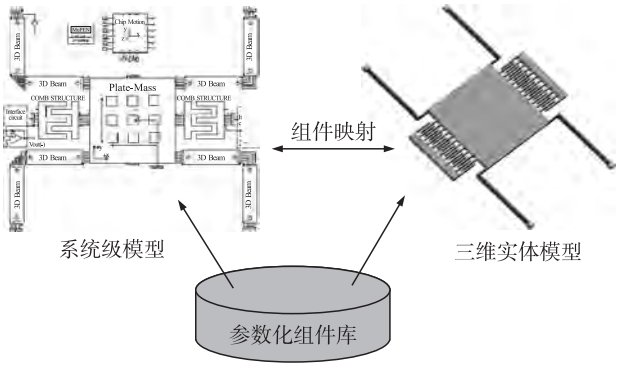

图 5 系统模型和三维实体模型共享组件库

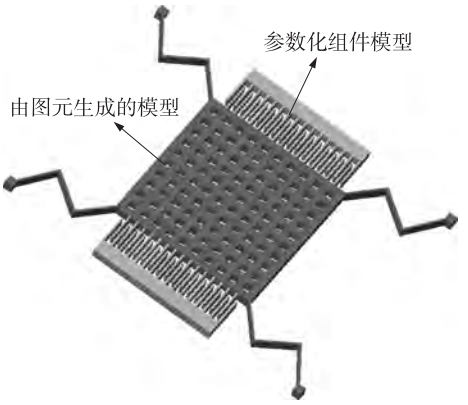

图 6 参数化组件建模与图元建模相结合

4 由三维实体自动生成工艺版图

如前所述,MEMS 设计最终目的是为了获得满足设计者要求的工艺版图,在面向三维实体建模的设计方法中,通过数据转换接口可自动生成三维实体所对应的工艺版图[11-12],从而提高设计效率,并且保证了三维结构和版图数据的一致性。MEMS 器件的版图可以看成是器件的三维结构平面在 Z 轴方向(垂直于硅片表面方向)的投影。MEMS 器件版图大多为矩形、多边形和圆弧形,其中矩形可以看作特殊的多边形,而圆弧形可以通过直线逼近的方式转换为多边形,故将所有 MEMS 版图以统一的多边形对待,这样有利于简化版图生成算法。对于三维实体模型,首先通过判定平面法向量的方式提取出垂直于 Z 轴的平面,只有法向量平行于 Z 轴方向的平面才被处理,其它平面将被忽略,再提取该平面的各个顶点,将这些顶点首尾相连形成多边形版图,对于多层结构的器件,需要记录各平面的 Z 轴坐标,通过比较各平面 Z 轴坐标的大小以确定工艺版图的分层信息。图 7 所示为多层 Z 轴陀螺由三维实体模型自动生成工艺版图。

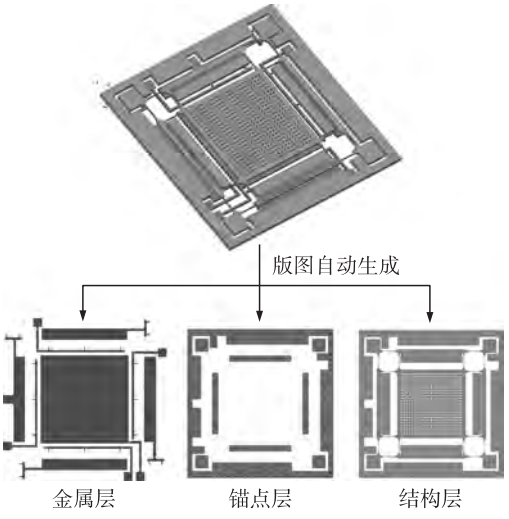

图 7 由三维实体自动生成的微谐振器版图

5　结论

本文提出了一种面向三维实体建模的 MEMS 设计方法,该设计方法有别于传统的以版图绘制开始的 MEMS 设计流程,允许设计者首先建立器件的三维实体模型,实现了“所见即所得”的设计目标。建模方法包括体元建模和参数化建模,对于建立好的三维实体模型,通过宏模型提取或组件映射的方式可以导入到系统级进行仿真;通过平面投影的方式可以自动生成三维实体所对应的工艺版图。在该设计方法中,设计者并不需要单独建立系统级模型或者绘制工艺版图,故设计效率得到了显著提高,同时由于各个层级之间的模型数据由计算机程序自动进行传递,因此模型数据的一致性和精确性得到了保证。

参考文献:

[1] Tamal Mukherjee, Gary K Fedder. Structured Design of Microelectromechanical Systems[C]. //Proc of the 34th Annual Conference on Design Automation(DAC'97). Piscataway: IEEE Press, 1997: 680-685.

[2] Gilbert J R. Integrating CAD Tools for MEMS Design[J]. Computer, 1998, 31(4): 99-101.

[3] Liu Y, Jiang P Y. 3D-Feature-Based Structure Design for Silicon Fabrication of Micro Devices[J]. Microsystem Technologies, 2007, (7): 701-704.

[4] 苑伟政,常洪龙. 泛结构化微机电系统集成设计方法[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010. 53-168.

[5] Chang HL, XU J H. One MEMS Design Tool with Maximal Six Design Flows[J]. Microsystem Technologies, 2008, 14(6), 775-785.

[6] 关乐,褚金奎. 面向 MEMS 系统级仿真的宏模型研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(15):4561-4567.

[7] 殷刚毅. MEMS 器件 IP 库及系统应用[J]. 传感技术学报,2005,18(4):886-889.

[8] 谭宜勇,卢桂章. 基于 IP 数据库的 MEMS 设计系统[J]. 传感技术学报,2008,21(2):357-360.

[9] 徐景辉,苑伟政. 基于 ACIS 的 MEMS 工艺几何仿真的关键算法[J]. 压电与声光,2007,29(1):96-99.

[10] 孟为民,李伟华. MEMS 的设计方法与系统模拟[J]. 传感器技术,2001,20(10):57-60.

[11] 常洪龙,苑伟政. 支持任意流程的微机电系统设计工具[J]. 机械工程学报,2008,44(11):39-46.

[12] 徐景辉,苑伟政. 一种从器件三维实体到工艺版图的 MEMS CAD 技术[J]. 中国机械工程,2008,19(1):80-84.

滕　云(1986-),男,重庆人,西北工业大学微/纳米系统实验室硕士研究生,主要研究方向为 MEMS 集成设计技术,davenkin@163.com;

苑伟政(1962-),男,西北工业大学教授,博士生导师,西北工业大学微/纳米系统实验室(陕西省重点实验室)主任,mems@nwpu.edu.cn。