

DOI: 10.3901/JME.2008.11.039

支持任意流程的微机电系统设计工具*

常洪龙 苑伟政

(西北工业大学微/纳米系统实验室 西安 710072)

摘要: 论述了微机电系统设计工具的发展概况,并针对微机电系统的多样性对设计工具的需求提出了一种可支持任意流程的微机电系统设计工具架构。该架构以系统级行为建模与仿真、器件级物理建模与仿真和工艺级版图设计与工艺仿真三个设计层级为主干,但特别地提出以六个数据自动传递接口来连接任意两个设计层级。这样,三个设计层级通过六个数据自动传递接口构成一个设计闭环,使得用户可以从任意一个设计层级开始设计,并完成设计循环,提供了在设计流程上的最大柔性。以网表、标准格式的实体模型和版图文件分别作为这三个层级设计数据的出入口,并设计了相应的信息提取算法及程序,实现了任意两个级别之间的数据自动传递,从而可以支持在该架构下的全部六种设计流程。所进行的设计实例表明,基于该工具可以针对不同的微机电系统器件选择最优的设计路线,是对当前通用微机电系统结构化设计方法的发展和提高,可显著提高设计效率。

关键词: 微机电系统 设计工具 流程 接口 宏建模 结构化设计方法

中图分类号: TP311.56

Micro Electro-mechanical System Design Tool with Flexible Design Flows

CHANG Honglong YUAN Weizheng

(Micro and Nano Electromechanical System Laboratory,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: One Micro electro-mechanical system (MEMS) design tool with flexible design flows is presented, which makes it possible that the MEMS designers are able to choose the most suitable design flow for their specific devices. The maximal flexibility in choosing the design flow meets the requirements of various MEMS devices and improves the current structured design method which emphasizes one unified top-down design flow. The design tool is divided into three levels and interconnected by six interfaces. The three levels are lumped-element model based system level, finite element analysis based device level and process level, which covers nearly all modeling and simulation functions for MEMS design. The six interfaces are proposed to automatically transmit the design data between every two levels, thus the maximal six design flows can be realized. The interfaces take the net list, solid model and layout file in standard format as the data inlet and outlet for the system, device and process level respectively. The realization of these interfaces are presented and verified by design examples, which also proves that the enough flexibility in the design flow can really increase the design efficiency.

Key words: Micro electro-mechanical system (MEMS) Design tool Flexible flow Interface Macromodeling
Structured design method

0 前言

微机电系统(Micro electro-mechanical system, MEMS)技术是一项战略性高新技术,具有多学科交叉、跨尺度设计等特点。其设计工具 MEMS CAD 对于解决 MEMS 设计难题、提高 MEMS 产品的设

计效率、保障产品质量、形成 MEMS 设计产业和推进 MEMS 技术产业化具有重要作用。世界各主要国家都纷纷开展了 MEMS CAD 的研究工作^[1]。这些 MEMS 设计工具的研究大致可以分为三类。第一类是集成设计工具的研制,为 MEMS 用户提供了从系统行为建模与仿真、器件物理分析和版图设计与工艺仿真等全套的设计解决方案,典型的例子有美国的 CoventorWare, Intellisuite 和法国的 MEMS Pro 等。第二类是一些传统的工程软件开发商纷纷针对

* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2006AA04Z306)资助项目。
20071204 收到初稿, 20080710 收到修改稿

MEMS 这一新兴领域开发一些仿真模块,典型的有 ANSYS 中的静电—结构耦合分析模块和模型降阶模块, CFD 中的流场分析模块以及 HFSS 中的电磁分析模块等。第三类是一些研究机构,主要是大学,针对 MEMS 建模与仿真的需求新开发的一些建模与仿真工具,典型地包括 Nodas、Sugar 等行为仿真软件以及 ACES、Simode 等单步工艺模拟软件,这些小的软件模块现在已有很多被集成在第一类集成设计环境里。在这三类设计工具中,第一种集成设计工具的研究因为提供了全套的 MEMS 建模与仿真解决方案,也符合 MEMS 产业不断扩大发展的需要,所以本文讨论的 MEMS 设计工具主要指这类集成设计工具。

在集成化的设计工具中,一般情况下都包含系统级、器件级和工艺级三个设计层级,这也是由 MEMS 的多学科交叉特性所决定的。其中系统级主要是基于阶数较低的集中参数模型进行 MEMS 器件的系统行为仿真或者器件机械结构与接口电路的混合信号快速行为仿真,通常采用的方法有基于硬件描述语言的多端口组件网络方法和等效电路法等。器件级主要基于有限元或边界元方法对 MEMS 的静电—结构、压电、流场等许多情形下的物理场进行数值计算与分析。工艺级主要是进行 MEMS 的版图设计和工艺过程仿真。这三个设计层级基本包含了 MEMS 设计与建模的全部功能模块,但通常要完成一个 MEMS 产品的设计,这三个层级的设计与仿真都需要进行。因此,这三个层级在设计仿真进行时的先后次序,就决定了 MEMS 设计工具的流程。

MEMS 设计工具中的设计流程是 MEMS 设计方法中设计思想的主要体现,对于构建符合 MEMS 特点、能有效提高设计效率的 MEMS 设计工具有重要的意义。MEMS 经过二十年左右的发展,设计工具的内容自然是增加了,而设计工具的流程也经历了较大的变化。本文将对 MEMS 设计工具在流程上的发展过程进行分析和总结,并在此基础上提出支持任意流程的 MEMS 设计工具并对其关键实现技术进行研究。

1 MEMS 设计工具在流程上的演变

由于 MEMS 技术和微电子技术都采用了类似的半导体加工工艺,同时微电子技术的巨大成功很大程度上得益于电子设计自动化(Electronic design automation, EDA)工具的广泛应用,因此, MEMS 的设计工具研发长期以来都借鉴了 EDA 的一些做

法。正因为如此,最早的 MEMS 设计工具都是自底向上的设计。后来又随着 EDA 中自顶向下设计技术做到了器件设计与加工的分离,使整个微电子设计行业取得了巨大成功, MEMS 设计工具也开始追求自顶向下的设计。

1995 年美国国家自然科学基金委员会专门组织召开了 MEMS 结构化设计方法的研讨会^[1]。其中 FEDDER 教授所建议的结构化 MEMS 设计流程强调自顶向下的设计,同时又有自底向上的验证,相对完美地实现了 MEMS 与微电子集成电路的设计结合,实现也相对简单,已在许多商业软件中应用^[2-3]。但随着 MEMS 技术应用领域的不断扩大,各种新结构、新原理的 MEMS 器件也不断出现。这一方面充实了 MEMS CAD 中各种可重用的知识产权库,但另一方面也对固有的 MEMS CAD 架构和设计流程形成了冲击。

在设计流程上,无论是最初的自底向上设计方法,还是现在主流的自顶向下设计方法,都试图通过一种设计流程来统一所有 MEMS 器件的设计。这固然符合结构化设计的思想,即通过一种标准来规范 MEMS 设计,进而提高设计效率。但对于功能、原理、形式、工艺都各异的 MEMS 器件来说,这种强行的统一未必能取得预想中的效率提高^[4-5]。以典型的电容式微机械陀螺和电容式压力传感器为例进行对比说明。对于微陀螺,基于集总参数模型的系统级设计既可以快速得到一般设计所需的模态、拉入电压等设计指标,还可以与接口电路一起构成闭环系统进行系统行为仿真,因此,其设计流程可以是系统级→工艺级即可,并非一定要进行基于有限元的器件级设计;但对于微压力传感器而言,仅仅依靠基于集总参数模型的系统级设计就很难完成压力分布等所需的计算指标,此时就离不开基于有限元的器件级设计,从器件级设计入手更为有效,因此其设计流程可以为器件级→系统级→工艺级。可见, MEMS CAD 的设计流程应该提供足够的灵活性来满足 MEMS 器件多样化带来的个性化设计需求,这样相比于单一的设计流程反而能提高 MEMS 的设计效率。事实上,现有的商业化 MEMS CAD 工具已经意识到这个问题,如 CoventorWare 已在每个设计模块上都提供了设计入口,并开发了一些接口,以方便用户能从任一模块开始并完成设计^[6-7]。但目前,还没有商业化的软件具有足够多的接口来让用户任意选择流程来完成整个设计循环。

通过以上分析可以看出:单一固化的设计流程不利于提高 MEMS 器件的设计效率。因此,需要在流程灵活性有所改进,才能开发出符合当前 MEMS

发展需要的工具系统。

2 任意流程的设计工具架构

如图 1 所示，作者所提出的支持任意流程设计的 MEMS 设计工具架构像其他商用软件一样，包含了系统级、器件级和工艺级三个层级，这三个层级包含了 MEMS 建模与仿真的主要模块。不同之处在于其提供了六个接口用于任意两个层级之间的数据自动传递，这也是在这种三级架构中所能提供的最多接口数。通过这六个接口用户不必拘泥于某种固定流程的限制，从任意一个层级开始设计，选择必要的设计环节，并完成整个设计循环，从而达到以任意流程进行设计的目的，最终使得效率得到提高。

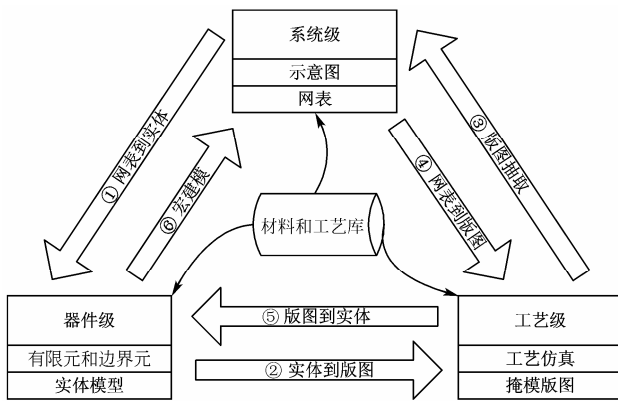


图 1 具有六个数据自动传递接口的 MEMS 设计工具架构

基于该架构，选择每个层级的仿真支撑平台，对这六个接口进行实现，加上必要的设计仿真知识产权库支持，即可构建一个完整的 MEMS 设计工具。论文将集中讨论六个接口的实现技术，以达到任意流程设计的目的。

3 六个接口的设计及实现

接口被定义为任意两个层级之间的数据自动传递。因此选择每个层级数据的最佳表示形式是实现接口的第一步。在这里，网表、实体模型和掩模版图被分别选为每个层级的最佳数据表示形式。下面将逐一讨论各接口的具体实现方法。

3.1 系统级到器件级实体和工艺级版图

从系统级分别到器件级和工艺级的两个接口是实现当前主流的自顶向下设计方法的关键。在论文里，系统级采用硬件描述语言描述的梁、质量平板、梳齿电容等各种多端口三维组件来描述 MEMS 器件的结构组成及行为模型。这样，MEMS 器件的

尺寸、位置和工艺信息最终会反映在系统级网表里。图 2 是从网表直接生成实体模型和版图的算法流程图。其中，实体模型生成的详细流程图如图 3 所示，版图的生成过程也类似。

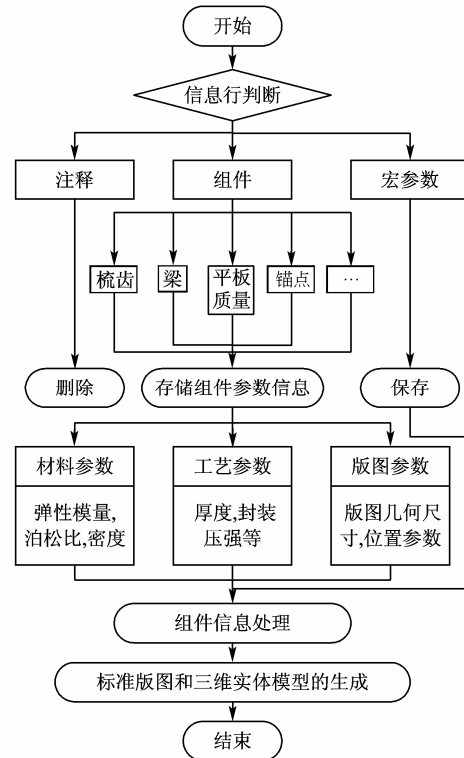


图 2 从网表直接生成实体模型和版图的算法流程图

3.2 器件级实体模型到工艺级二维版图

根据 MEMS 器件的实体模型直接生成相应的加工用的版图一直是业界长期以来追求的一个技术目标^[1, 5, 8-9]。这是因为基于实体模型的设计和优化更直观，并且在完成相应的优化设计后直接生成加工用的版图，显然更能加快设计速度，提高效率。

作者提供了一种基于标准文件传递的转换方法。实体模型以标准格式 Sat 存储，版图文件以 CIF 格式存储。从实体文件中提取几何、拓扑和属性信息的算法流程如图 4 所示。

3.3 宏建模

从器件级到系统级这个接口不仅仅是数据几何信息或工艺信息的一个传递，还是一个模型精确度和阶数的一个跃变。其从复杂的、准确的高阶模型降低到一个相对简单的、也能反映系统主要物理特性的低阶模型。这种转换，尽管损失了一定的精度，但却能带来更好的仿真速度。这个过程，更多的称为宏建模。

关于宏建模的实现已经有很多方法，并已经成

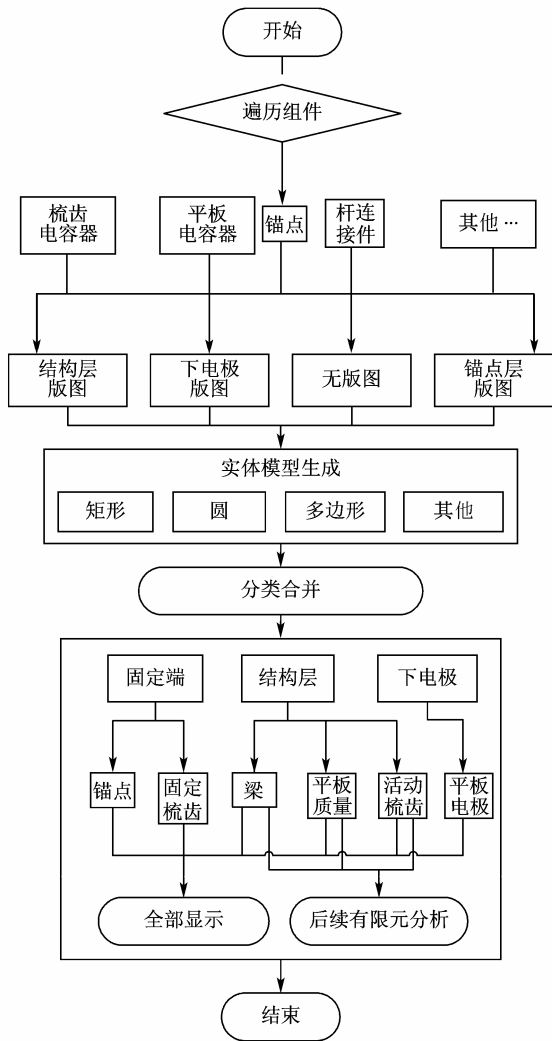


图 3 实体模型生成的详细流程图

功用于一些工具系统中^[10-11]。降阶过程是通过 Arnoldi 算法来实现的，其高阶模型来自于器件级的有限元分析结果，其低阶模型自动插入到系统级多端口三维组件库中。其技术实现的流程如图 5 所示。

3.4 工艺级版图到系统级

从工艺级版图到系统级这个接口不同于宏建模的模型阶数变化，在实际的设计实践中也用的较少。但在某些特殊情况下，该接口对设计人员也是很有帮助的^[12-13]。

版图到系统级的转换实现过程如图 6 所示，其中关键在于对版图中的几何图形进行特征识别，并与系统级多端口三维组件库中的组件相对应，识别的过程如图 7 所示。

3.5 版图到三维实体

在这六个接口里面，从版图到三维实体模型是最早被实现，并已广泛应用的一个接口^[14-15]。作者实现这个接口的方法如图 8 所示，版图文件和工艺是输入，生成的三维实体图形文件既可以用于器件

级的有限元分析，也可作为工艺的可视化显示。

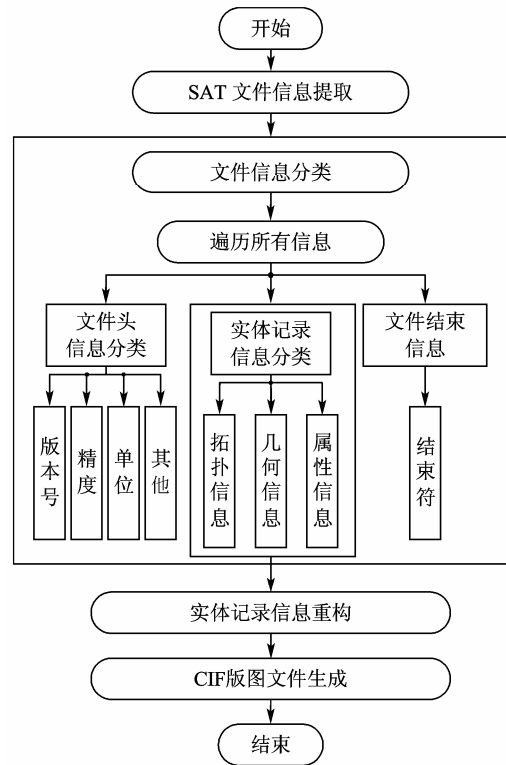


图 4 从实体模型生成二维版图的算法流程图

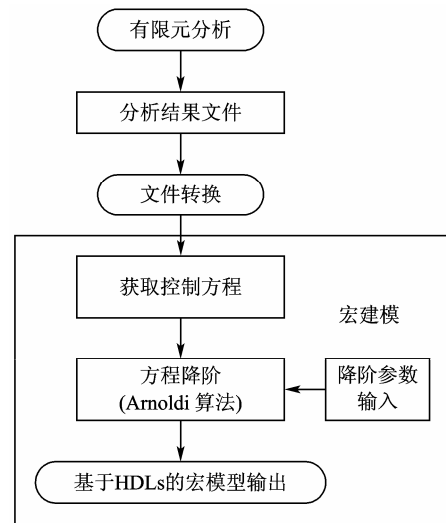


图 5 基于有限元分析的宏建模流程图

4 器件设计实例

为验证任意流程设计方法对于提高 MEMS 设计效率的有效性，结合典型 MEMS 器件的设计实例进行设计流程的选择与比较来进行说明。

4.1 理想高效的自顶向下设计流程

长期以来，被认为是 MEMS 最理想的一种设计流程就是：从系统级设计开始，再经过器件级的优化，最后进行工艺级的版图设计^[1,5]。这种流程对于

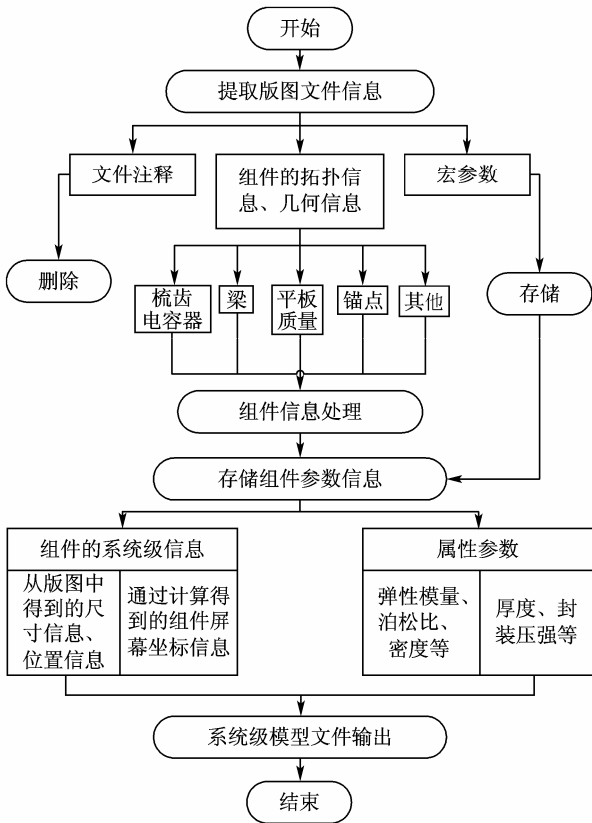


图 6 版图到系统级的转换流程图

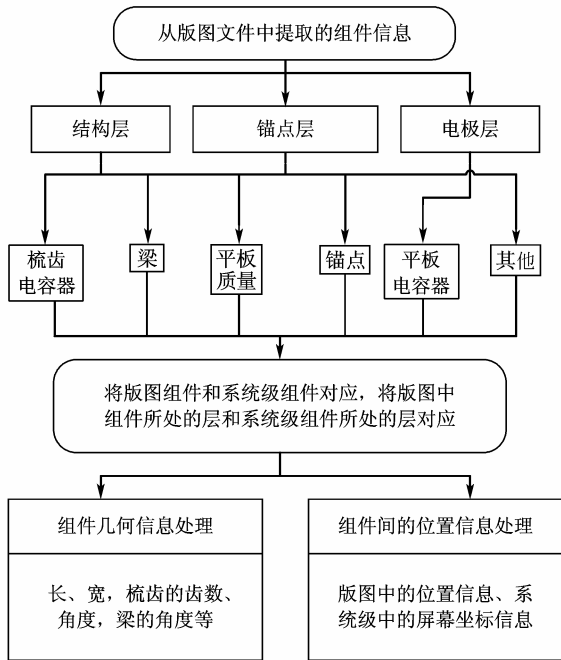


图 7 版图特征识别的算法流程图

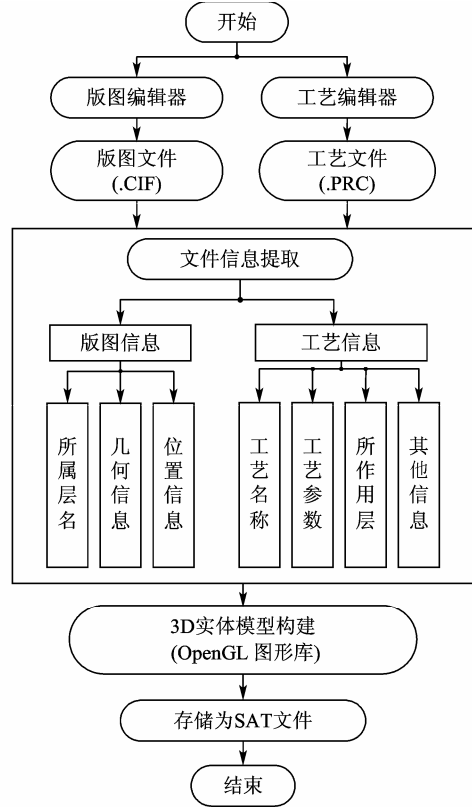


图 8 版图和工艺合成生成实体模型的算法流程图

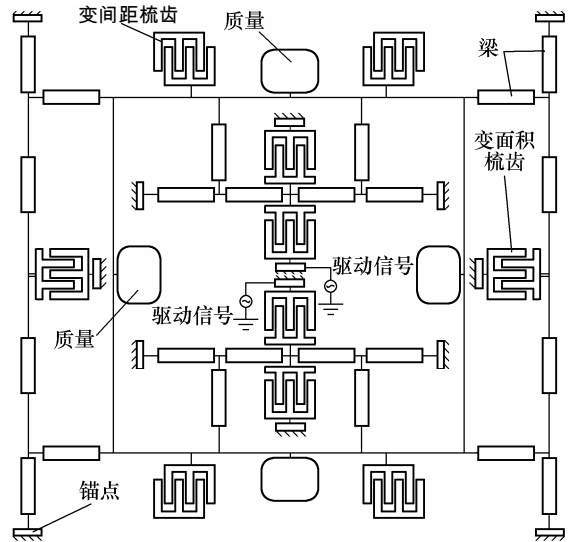


图 9 陀螺的敏感结构系统级模型示意图

其设计过程如下：首先利用系统级的多端口三维组件库，如梁、刚性质量平板、定齿偏置电容梳齿电容器等组件快速搭建如图 9 所示的系统级模型，基于此模型可进行各种行为仿真分析，基本可确定传感器的结构参数等。然后利用系统级到器件级实体的接口可以生成如图 10 所示的实体模型用于进一步的有限元分析来验证，如提取电容进行耦合场分析或模态分析等。在物理分析与验证完毕后，即可直接通过器件级实体模型到工艺级二维版图的接口自动生成加工所用的掩模版图(图 11)。这个版

现在一些常规的 MEMS 器件，如图 9~11 所示的电容式微机械陀螺，可以减少设计迭代的次数进而提高设计效率，确实是比较合适的一个设计流程。该流程即 MEMS 结构化设计方法中强调的自顶向下设计流程，被认为是一种非常高效的设计流程。

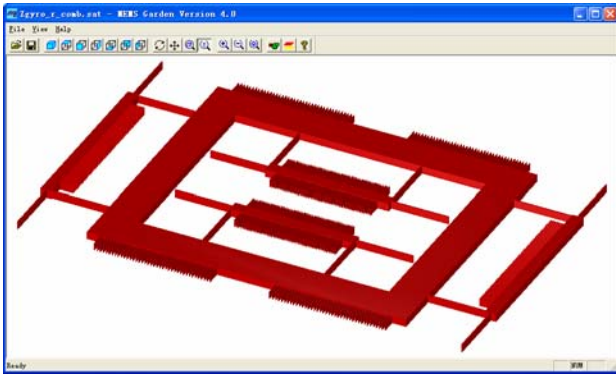


图 10 陀螺可动结构部分的实体模型

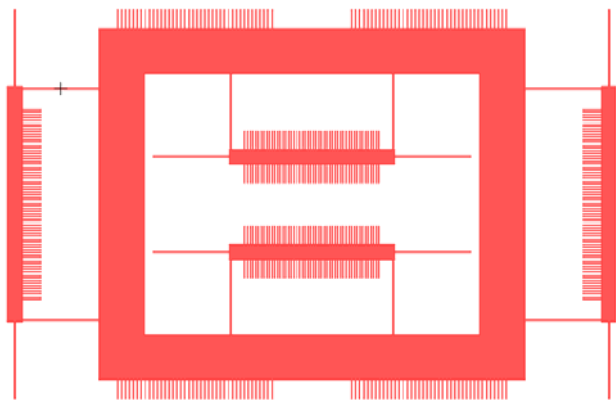


图 11 根据实体模型直接得到的版图

图反映了器件的结构层几何信息, 结合具体的工艺规范进一步的编辑, 并增加其他层上的版图信息, 即可用于加工。可以看到该流程自系统设计开始, 一步一步进行分解, 在系统级优化设计之后, 后续的设计环节基本不需再反复迭代, 通过所设计的几个接口即可将设计数据自动传递用于不同层级的仿真分析, 有效提高了设计效率。

4.2 可支持创新的自底向上设计流程

在第 4.1 节所描述的自顶向下设计流程之所以能够提高效率, 关键在于系统级所提供的快速方案设计功能。系统级设计的关键在于那些可重用的参数化组件, 对于常规的 MEMS 器件来说, 其组件很容易从可重用的组件库中找到并用于快速搭建系统。但是如果器件的某些结构比较特殊, 在系统级组件库里找不到相应的组件或者模型比较复杂的时候, 这种基于组件的系统级建模与仿真就会无法进行或仿真时间过长而无法收敛。并且这种情况在用户进行创新型开发的时候经常出现。此时, 结构化设计方法所强调的自顶向下设计流程就不太适合了。在这种非常规、复杂结构情况下, 利用宏建模技术来提取复杂或非常规结构的宏模型, 进而进行系统级仿真就可以解决这一问题。相应的设计流程即自底向上设计流程。

如图 12 所示的微加速度计, 其采用了多次折叠的梁来支撑惯性质量, 目的是在有限的版图面积内增加系统的柔性。如果在系统级仿真环境里用单根梁组件来搭建折叠梁的系统级模型时, 就会导致建模与仿真的时间均非常长。针对这种情况, 就可以采用如图 12~16 的工艺级→器件级→宏建模→系统级的自底向上设计流程来进行。首先结合工艺流程设计加速度计的版图, 进行工艺级设计。设计参数如表 1 所示。然后利用版图到三维实体的接口生成如图 13 所示的实体模型用于器件级的有限元分析。利用有限元分析得到的刚度矩阵和质量矩阵, 即可利用图 14 所示的宏建模过程生成折叠梁的宏模型。在该过程中, 基于 Arnoldi 算法的降阶模块实现了高阶模型到低阶模型的转换, 然后将该低阶模型转换成可以插入系统级仿真求解器中。图 15 为基于折叠梁宏模型的加速度计系统级模型, 可以看到, 复杂的折叠梁被等效为一根梁, 基于该模型即可进行系统的行为仿真。图 16 是加速度计在方波输入下和正弦输入下的时域仿真波形图。

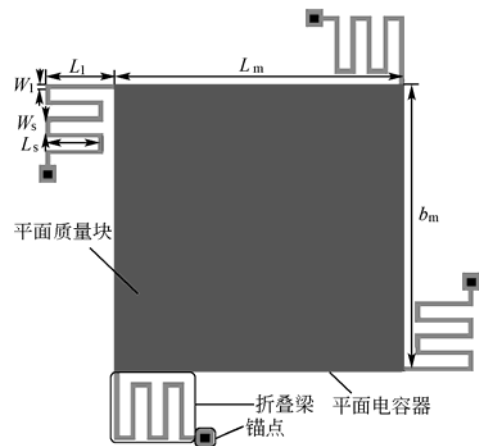


图 12 加速度计的版图

表 1 加速度计的设计参数与材料属性

参数名称	取值	参数名称	取值
平板质量长 $L_m/\mu\text{m}$	500	弹性模量 E/GPa	130
平板质量宽 $b_m/\mu\text{m}$	500	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 330
细折叠梁长 $L_l/\mu\text{m}$	120	间隙 $g/\mu\text{m}$	2
细折叠梁宽 $b_l/\mu\text{m}$	8	泊松比 μ	0.3
粗折叠梁长 $L_s/\mu\text{m}$	100	粗折叠梁宽 $b_s/\mu\text{m}$	20

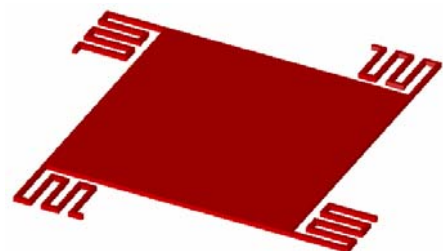


图 13 根据版图生成的加速度计的三维实体

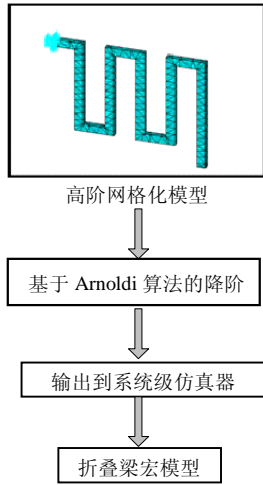


图 14 折叠梁的宏建模过程

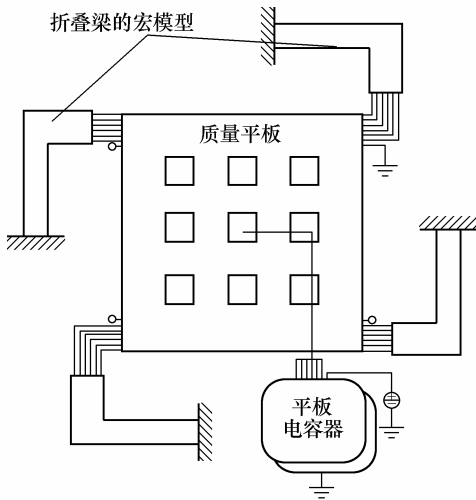


图 15 基于折叠梁宏模型的加速度计系统级模型

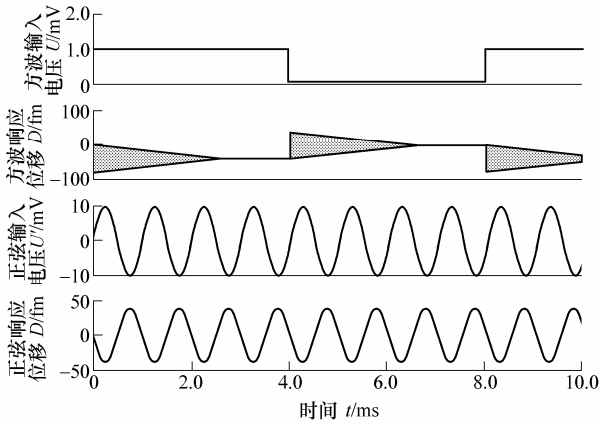


图 16 加速度计的时域仿真波形图

在这种自底向上的设计流程中，最关键的技术环节就在于从器件级到系统级的宏建模接口。它是将高阶模型转换成低阶模型来提高仿真速度，而同时又不损失太多的精度。通过表 2 中所列出的在频域分析、时域分析和拉入电压计算三种情况的分析对比，可以看出这种基于宏模型的仿真结果与基于

有限元模型的仿真结果相比，相对误差小于 2%，而速度至少可以提高了 10 倍。

表 2 宏模型与有限元模型的分析结果比较

参数	有限元法的结果	宏模型方法的结果
模态频率 f/kHz	36.654	36.020
拉入电压 U_m/V	21.35	21.07
时域仿真消耗时间 t/s	1.080	92

5 结论

(1) 设计流程的单一性并不符合 MEMS 器件复杂性和多样性的特点，并不有利于 MEMS 设计效率的提高。

(2) 支持任意流程的 MEMS 设计方法符合 MEMS 的本质特点，可有效提高 MEMS 设计人员在流程上选择的灵活性，是对当前通用的结构化设计方法的一个发展和提高。

参 考 文 献

- [1] ANTONSSON E. Structured design methods for MEMS final report [EB/OL]. (1996-10-15)[2007-10-1]. http://www.design.caltech.edu/NSF_MEMS_Workshop/nsfmems.pdf.
- [2] FEDDER G. Top-down design of MEMS[C]//International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, San Diego, CA, USA, 2000: 7-10.
- [3] SENTURIA S. CAD challenges for microsensors, microactuators, and microsystems [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(8): 1 611-1 626.
- [4] ZAMAN M, BART S, GILBERT J. An environment for design and modeling electro-mechanical micro-systems [J]. Journal of modeling and simulation of Microsystems, 1999, 1(1): 65-76.
- [5] TANG W. Overview of microelectromechanical systems and design processes[C]//Proceedings of Design Automation Conference, CA, USA, 1997: 670-673.
- [6] LORENZ G, REMY Chevreuse. System and method for three-dimensional visualization and post-processing of a system model: USA, 7263674[P]. 2005-06-09.
- [7] LORENZ G, REMY Chevreuse, KENNEDY C. System and method for automatic mesh generation from a system-level MEMS design [P]. USA, 7131105[P]. 2006-10-31.
- [8] ANANTHAKRISHNAN V. Part-to-Art: basis for a systematic geometry design tool for surface micromachined MEMS [D]. USA: University of Toledo, 2000.

- [9] LANG M, DAVID D, GLESNER M. Automatic transfer of parametric FEM models into CAD layout formats for top-down design of microsystems[C]//European Design & Test Conferences, Paris, France, 1997: 200-204.
- [10] 闫子健, 苑伟政, 吕湘连, 等. 基于 Krylov 子空间投影法的 MEMS 宏建模方法[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1 319-1 322.
- YAN Zijian, YUAN Weizheng, LÜ Xianglian, et al. MEMS macromodeling based on Krylov subspace projection method[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19 (5): 1 319-1 322.
- [11] GOLUB G, LOAN C, Matrix computations [M]. USA: Johns Hopkins University Press, 1996.
- [12] BAIDYA B, GUPTA S, MUKERHEJEE T. MEMS component extraction[C]// International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Puerto Rico, USA, 1999: 143-146.
- [13] BAIDYA B, GUPTA S, MUKHERJEE T. An extraction-based verification methodology for MEMS [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11(1): 2-11.
- [14] OSTERBERG P, SENTURIA S. MemBuilder : an automated 3D solid model construction program for microelectromechanical structures [J]. Sensors & Actuators Tech., 1995(2): 21-24.
- [15] DEVOE D, GREEN S, JUMP J. Automated solid model extraction for MEMS visualization[C]//First International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Santa Clara, USA, 1998: 292-297.
-
- 作者简介: 常洪龙, 男, 1977 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为微机电系统设计技术和微惯性技术。
E-mail: changhl@nwpu.edu.cn
- 苑伟政, 男, 1961 年出生, 教授, 博士研究生导师, 长江学者特聘教授。主要研究方向为微机电系统的设计技术、微型传感器和执行器等。
E-mail: yuanwz@nwpu.edu.cn