

基于三维特征的微机电系统器件结构设计方法

张长富^{1,2}, 蒋庄德¹, 卢德江¹, 任泰安¹, 王久洪¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安工业大学机电工程学院, 710032, 西安)

摘要: 提出了一种表面硅微器件结构设计方法, 解决了目前微机电系统(MEMS)结构设计中直观性差、工艺难度大等问题。该方法将三维特征建模的设计思想运用到 MEMS 设计中, 在建立三维特征库的基础上实现了器件结构的快速直观设计。通过三维设计软件 SolidWorks 的用户接口开发的应用程序不仅实现了从器件结构中自动提取掩模版和工艺流程, 而且消除了人工设计掩模版和工艺流程的繁琐过程。应用实例表明, 与传统的通过掩模版设计 MEMS 器件结构的方法相比, 该方法简洁、高效, 更符合设计者所看即所得的思维方式。同时, SolidWorks 软件作为开发 MEMS 辅助设计工具的基础平台, 可以省去开发几何造型模块的任务, 从而为新一代 MEMS 辅助设计工具的开发提供了新的思路。

关键词: 三维特征; 微机电系统; SolidWorks

中图分类号: TP391.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)05-0571-05

Design for Micro-Electro-Mechanical Systems Devices Based on Three-Dimensional Features

Zhang Changfu^{1,2}, Jiang Zhuangde¹, Lu Dejiang¹, Ren Taian¹, Wang Jiuhong¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: To improve straightforwardness and reduce process complexity of micro-electro-mechanical systems (MEMS) design, a new design scheme is proposed for surface micromachined device. Based on the established three-dimensional features, the solid geometric models of MEMS devices were constructed efficiently with SolidWorks. Simultaneously, the mask layouts and process flow were automatically generated with the developed program based on the application programming interfaces of SolidWorks. A practical example shows that this method enables to design MEMS geometric models efficiently in a straightforward environment without tedious fabrication process. And SolidWorks serving as the basic development platform greatly reduces complexity of developing MEMS CAD tools.

Keywords: three dimensional feature; micro-electro-mechanical system; SolidWorks

微机电系统(MEMS)是一个新兴的科学领域, 被视为本世纪重要的核心科技。该技术以其微型化、智能化、多功能、高集成度和适于大批量生产等众多优点, 已成为许多国家研究的热点。然而, 在 MEMS 技术的发展中, 还存在着设计方法落后于加工工艺

的现象^[1], 这在很大程度上制约了 MEMS 的进一步发展, 而改变这种状况的根本途径是研究适合于 MEMS 自身特点的设计方法, 并开发相应的设计工具。

目前, 虽有一些专业的 MEMS 设计工具面世,

但是多数工具都采用直接设计二维掩膜版图和工艺流程来仿真 MEMS 器件的三维结构,再验证其功能的方法,这是一种典型的掩膜版-结构-功能的设计方法,极不直观,工艺要求很高,也不符合设计者所看即所得的习惯. MEMS 器件最理想的设计流程是功能-结构-掩膜版^[2],即从器件的功能要求出发,快速设计出它的三维结构,然后从结构中提取出掩膜版,这种先设计结构再自动提取掩膜版的方法已逐渐被视为下一代 MEMS 设计工具的指导思想^[2-5]. 文献[5]研究了一种基于该思想的利用二维截面特征设计 MEMS 器件的工具,但直观性差且不能对器件进行整体有限元分析. Venkatarman 等人^[4]提出了从 MEMS 几何模型和给定的工艺数据中自动生成掩膜版的方法,但工艺性要求却很高. 针对目前 MEMS 设计方法中存在的这些问题,本文研究并验证了采用三维特征进行 MEMS 器件三维结构设计,进而自动提取掩膜版和工艺流程的方法.

1 原理和结构

采用三维特征设计 MEMS 器件,可以帮助设计者快速直观地描述出器件的形状,一方面有助于设计者从整体的角度去把握器件的结构,另一方面便于在设计过程的较早阶段进行有限元分析以发现结构性能方面的问题,确保后续设计阶段的正常进行. 本文方法的总体流程框图如图 1 所示.

本文方法含有 3 个重要的阶段(三维结构设计、与有限元分析阶段、掩膜版图与工艺流程提取阶段、工艺仿真验证阶段)和 2 个支撑数据库(三维特征数据库和材料数据库). 在进行结构设计以前,需要设计出常用的三维特征并将其存放在已建好的三维用

户特征库中,另外还需建立一个材料数据库来保存常用材料的信息. 在分析了 MEMS 器件的功能需求之后,设计者可以方便地从特征库中找出需要的特征来进行 MEMS 器件结构的快速设计,此时得到的结构还比较粗略,还需要采用有限元等方法对其进行性能分析,根据分析的结果对该结构进行相应的形状修改,然后从修改后的三维结构中自动提取掩膜版和工艺流程. 最后,采用工艺仿真模块来验证提取的掩膜版和工艺流程是否正确和合理,即利用掩膜版文件的几何信息和工艺流程文件中的工艺信息仿真出三维结构模型. 如果该仿真模型与设计的结构在形状上相同或者非常相近,则认为所提取的掩膜版和工艺流程是正确的,否则就将其排除或进行必要的修改.

器件三维结构的设计是整个方法的一个重要环节,也是后续环节的基础. 由于传统三维设计工具具有强大的三维设计能力,而且技术非常成熟,因此完全可以应用到对 MEMS 器件的设计中^[6]. 文献[7]将 Matlab 软件应用到 MEMS 设计中,利用 Mat3d toolkit 的三维功能,并结合工艺仿真出了 MEMS 器件的三维结构,而本文将 SolidWorks 软件作为设计 MEMS 器件三维结构的基础平台,利用其提供的用户编程接口(API)开发出相应的功能模块,便可以实现 MEMS 器件的结构设计. 可以采用系统功能分析工具 IDEF0 对整个系统的功能和需求进行分析,如图 2 所示,图中对文中所述 3 个阶段中包含的 4 个环节进行了详细的功能和需求分析,图中每个矩形框的上方表示该环节的约束,下方表示支撑条件,左边和右边分别表示信息输入和输出.

2 方法的几个关键环节

2.1 三维特征库和材料数据库的建立

从图 2 中可以看出,三维特征库和材料数据库是 2 个重要的支撑数据库,分别存有设计所需的三维特征模型和材料信息.

由于目前 MEMS 器件的设计还主要是通过直接设计二维掩膜版进行的,机械领域中常用的三维设计思想并未运用到 MEMS 设计中,因此还需要建立适合 MEMS 设计的三维特征库. 在传统的机械设计中,标准件会经常被用到,在 MEMS 器件的结构设计中,也有一些特征会被经常使用到,如图 3 所示,为了便于管理和使用这些特征,应将其保存到特征库中. 另外,根据实际需要,还需为设计者提供三维特征修改、添加和删除功能.

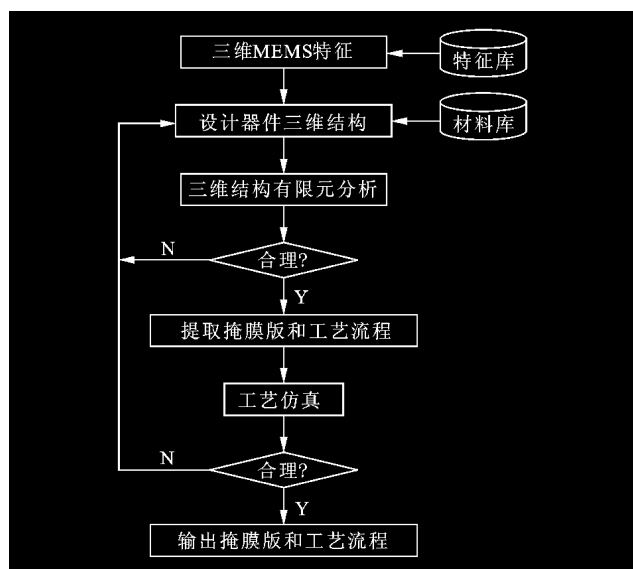


图 1 本文方法的总体流程框图

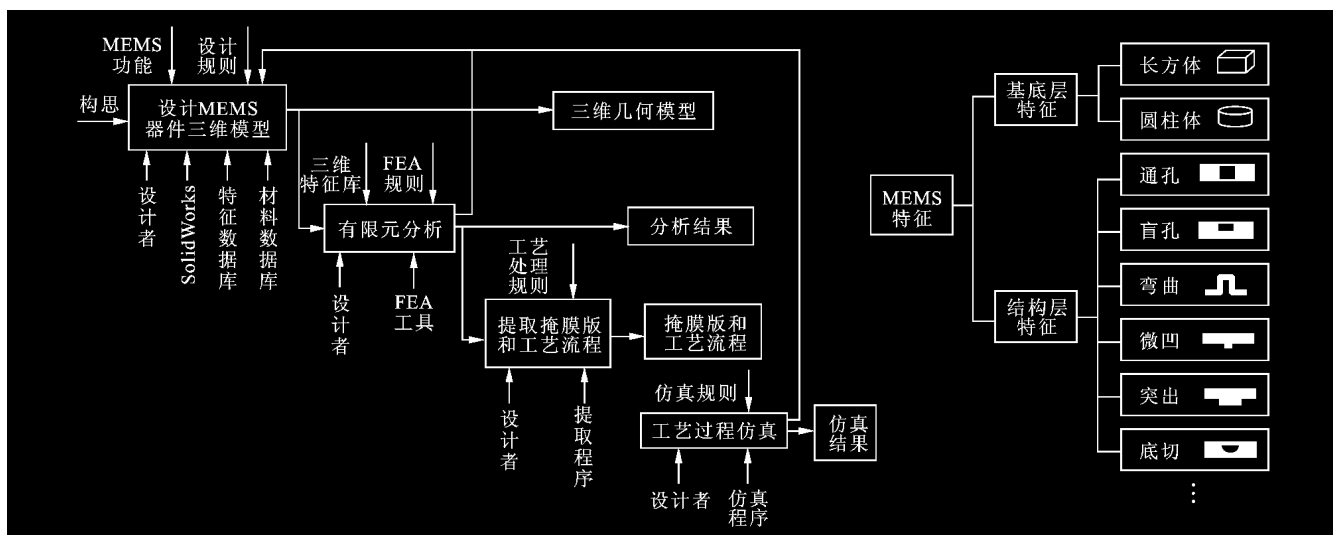


图2 系统的 IDEF0 分析图

图3 表面工艺中常用的三维特征

采用表面硅工艺加工 MEMS 器件时,会经常使用到如硅、二氧化硅、氮化硅、碳化硅和磷硅玻璃等材料,由于工艺流程是从三维结构自动提取而成,而材料信息又是工艺流程中的一项重要信息,因此设计时需要为三维结构的每一个工艺层选择材料。为了方便设计者使用和管理材料,建立了材料数据库,保存了材料的名称及其特性值,材料名称供用户设计过程中选择,材料特性值则作为选择材料的参考依据。

2.2 结构设计和性能分析

根据 MEMS 器件的功能要求,设计者从特征库中选取合适的特征来进行 MEMS 器件的结构设计,设计过程以工艺层为单位自底向上逐层进行。在牺牲层表面硅微加工中,通常有基底层、结构层、牺牲层和金属层等工艺层。金属层可以按照结构层处理,而牺牲层最终会被刻蚀掉,所以结构设计时不需要设计该层。通过对器件的基底层、结构层和金属层的设计,便可以构建出三维结构,其方法如下。

(1)选择特征设计基底层结构,并为其选取材料,在表面硅工艺中,基底层通常呈长方体或圆柱体形状。

(2)在已经设计好的工艺层上设计新的工艺层,并为其选择材料。设计时,同一个工艺层可能含多个三维特征,并且这些特征还可能不在同一个水平层上,只要它们是采用同一个工艺步骤生成且材料相同,就认为是在同一个工艺层上。设计这种工艺层时,设计者需要根据各工艺层特征的位置关系来确定它们之间的约束关系。

(3)重复(2),直到完成所有工艺层的设计。

(4)结构设计完成之后,需要对设计信息进行保存,除需保存几何信息、拓扑信息外,还需保存每个工艺层的材料信息。

对设计好的器件结构,需要采用有限元方法进行机械性能方面的分析,并根据分析结果对三维结构进行修正,然后再分析,直到满足性能要求为止。这样就可以在设计过程的较早阶段,发现器件机械性能方面存在的问题,比传统方法在完成掩模版设计、工艺流程设计、三维结构仿真等几个环节之后再进行分析更符合实际,并且还能减少设计循环次数,从而提高了设计效率。

2.3 掩膜及工艺流程的自动提取

与直接设计得到掩模版和工艺流程的传统方法不同,本文提出的方法是从三维结构中自动提取掩模版和工艺流程,旨在使设计过程更符合设计者的思维习惯,并降低对设计者的工艺要求,具体过程如下。

(1)判断识别出 MEMS 器件三维结构的工艺层数,并区分出基底层、牺牲层、结构层和金属层。利用器件的三维结构在 z 方向上的截面变化,结合材料的不同可以判别出不同的工艺层。例如,在 $z=z_i$ 处出现了截面形状的变化,则可以根据与该处紧邻的上下部分的材料是否相同来判断出它们是一个工艺层还是 2 个工艺层,并根据基底层、牺牲层、结构层和金属层各自的结构特点和材料属性,将它们区分开。例如,某一个工艺层位于底层,则可以断定它属于基底层。在截面形状不同的 3 个相邻层结构中(见图 4),如果中间层(特征 2)的截面较小,并且它的材料和顶层(特征 3)材料相同,则说明中间层和上层

属于同一个工艺层,另外还可以推断出该工艺层是在牺牲层被刻蚀掉一个小孔后沉积而形成的(小孔形状为特征2的截面形状),进而可推断出该结构层的下面应该有一个牺牲层(真正的中间层,厚度为特征2的高度),底层则是由特征1构成的工艺层。

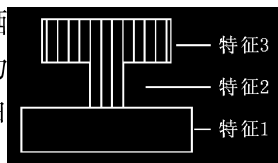


图4 典型三层结构的截面图

(2)分析出每个工艺层的组成特征。工艺层的组成特征可能有多个,在 z 方向上也可能相互错层,如果这些特征之间是一体的且材料相同,很显然它们属于同一个工艺层。如果各特征不是连成一体的,则需要结合它们在几何结构中的拓扑位置和材料名称来综合判断它们是否属于同一个工艺层。

(3)找出牺牲层、结构层和金属层被刻蚀的区域,进而确定掩膜版的形状。在实际加工中,牺牲层和结构层的工艺步骤是非常相似的,不同的是牺牲层最终会被刻蚀掉,因此在提取掩膜版时,对牺牲层和结构层可以采用相同的方法。当提取某个牺牲层、结构层和金属层的掩膜版时,可先根据它的横截面形状判断出被刻蚀掉的区域,再根据极性即可推断出掩膜版的形状。

(4)生成工艺流程。当确定了刻蚀某个工艺层所需的掩膜版形状后,该层的刻蚀工艺信息就比较容易得到,但除了刻蚀的工艺信息外,还需要得到沉积的工艺信息。在提取某个工艺层沉积的工艺信息时,应结合该层的结构特点和它下面工艺层的上表面结构来进行综合分析,以判断出沉积的类型和厚度等信息。例如,某一个工艺层的上下表面是平整的,而它下面工艺层的上表面有凹坑,则说明该工艺层是采用盖板式沉积形成的,沉积厚度即为该工艺层的厚度。如果某个工艺层的上表面是平整的,下表面有凸起有凹槽,则说明该结构层是采用平面沉积形成的,沉积厚度由结构来确定。如果某个工艺层的上表面和下表面结构相似,且各处的厚度一致,则说明该结构层是采用保型沉积形成的,沉积厚度由该工艺层的厚度确定。工艺信息中的材料名称由工艺层的材料名称来确定。

(5)输出掩膜版图文件和工艺流程文件。

2.4 工艺仿真实验

由于掩膜版和工艺流程的提取过程受到多个因素的影响,因此得到的方案可能会有多个。这些方案中有的可行,有的不可行,为了找出合适的方案,需要对提取的方案进行验证。为此,可将掩膜版和工艺

流程进行工艺仿真,即利用掩膜版图文件中的几何信息和工艺流程文件中的工艺信息(含厚度信息)仿真出三维结构模型,如图5所示。

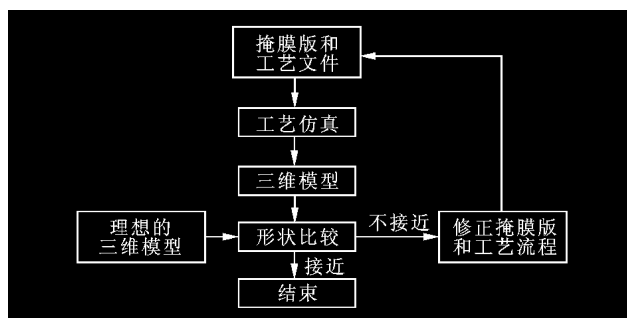
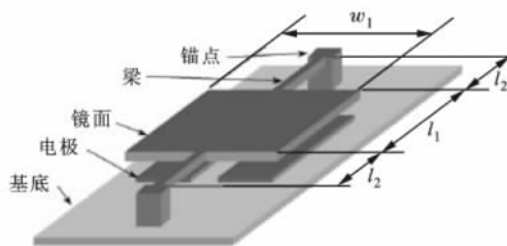


图5 工艺仿真流程图

工艺仿真时,遵循自底向上逐层进行的原则,以工艺流程为主线,从工艺流程文件中提取出工艺步骤的名称、厚度(沉积厚度或刻蚀厚度)、工艺类型(沉积类型或刻蚀类型)等重要信息。如果是掩蔽刻蚀,还需要提取出相应掩膜版图的几何信息,根据这些信息仿真出三维结构模型,如果该模型与采用特征设计的三维结构在形状上相同和非常相近,则可以认为提取的掩膜版和工艺流程是可行方案,否则便排除该方案或者对其进行必要的修改。

3 方法的实现

在 SolidWorks 环境下,设计了常用的三维特征并将其存到特征库中,选用库中的特征设计了微镜的结构,并为每个工艺层选择了材料,利用 SolidWorks 软件提供的用户接口函数开发了提取功能模块,实现了掩膜版和工艺流程的自动提取。提取功能模块的开发方法参见文献[8],微镜的结构见图6,尺寸见表1。其中,表中的 l 、 w 、 t 分别表示长度、宽度和厚度, h_1 为2个电极的间距, h_2 为电极上表面和镜面下表面的距离。将提取的掩膜版文件和工艺流程文件的信息进行整理,得到的关键工艺步骤(含掩膜版)如表2所示。经工艺仿真,证实了提取的掩膜版和工艺流程的正确性。



l_1 :镜面长度; l_2 :梁的长度; w_1 :镜面宽度

图6 微镜的结构图

表1 微镜的主要结构尺寸

μm

电极			锚点			梁			镜面			h_1	h_2
l_1	w_1	t_1	l_2	w_2	t_2	l_3	w_3	t_3	l_4	w_4	t_4		
100	39	1	5	5	4.5	100	1.55	1.5	100	100	1.5	6	2.75

表2 微镜的掩膜版和关键工艺步骤

工艺步骤	材料	工艺层	沉积类型	厚度/ μm	刻蚀深度/ μm	掩膜版	极性
基底	硅	基底层		300.0			
沉积	多晶硅	电极层	平面型	1.0			
刻蚀	多晶硅	电极层			1.0		阳
沉积	聚酰亚胺	牺牲层	平面型	3.0			
刻蚀	聚酰亚胺	牺牲层			3.0		阴
沉积	多晶硅	镜面层	平面型	4.5			
刻蚀	多晶硅	镜面层			1.5		阳
刻蚀	聚酰亚胺	牺牲层					

4 结 论

(1) 本文提出了利用三维特征设计 MEMS 器件结构的方法,该方法采用了功能-结构-掩膜版的设计模式,使设计过程更加符合设计人员的思维习惯。

(2) 实现了掩膜版和工艺流程的自动提取,省去了目前人工设计掩膜版和工艺流程的繁琐过程,降低了设计 MEMS 器件结构的工艺难度。

(3) 通过 SolidWorks 软件的 API 接口开发了应用程序,验证了设计方法的可行性,同时也证实了具有用户接口的三维设计软件可以用来进行 MEMS 器件的结构设计.它只需开发相应的用户程序就能将现有软件的三维设计能力应用到 MEMS 器件的结构设计中,因此极大地减轻了开发 MEMS 器件辅助设计工具时在几何造型方面的工作量.本文方法为新一代 MEMS 器件辅助设计工具的开发提供了新的思路。

参考文献:

[1] 常洪龙. 基于“Top-Down”的 MEMS 集成设计方法及关键技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学机电学院, 2002.

[2] Antonsson E K. Structured design methods for MEMS [C]//Structured Design Methods for MEMS Final Report. Pasadena, USA: California Institute of Technology, 1996: 53-57.

[3] Devoe D L, Green S B, Jump J M. Automated solid model extraction for MEMS visualization [C]// Proc Int Conf on Modeling and Simulation of Microsystems, Sensors and Actuators. Santa Clara, USA: IEEE Press, 1998: 292-297.

[4] Venkataraman V, Sarma R, Ananthasuresh G K. Part-to-art: basis for a systematic geometric design tool for surface micromachined MEMS [C]//Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference. Baltimore, USA: ASME, 2000: 11-14.

[5] Gao Feng, Sarma R. A declarative feature-based cross sectional design tool for surface micromachined MEMS [C]// Proceedings of the ASME Design Automation Conference. Pittsburgh, USA: ASME, 2001: 550-560.

[6] Li Jianhua, Liu Yusheng, Gao Shuming. Mask synthesis and verification based on geometric model for surface micro-machined MEMS [J]. Journal of Zhejiang University, 2005, 6A (9): 1007-1010.

[7] Lo N R, Pister K S J. 3D MEMS design via Matlab interactive plots [C]//Proceedings of the 2000 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems. California, USA: NSTI, 2000: 696-699.

[8] Zhang Changfu, Jiang Zhuangde, Lu Dejiang, et al. 3D MEMS design method via SolidWorks [C]//Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Orlando, USA: IEEE, 2006: 747-751.

(编辑 管咏梅)