

专著 西北工业大学
出版资助项目
ZIZHU XIANGMU

ZHUANZHU

泛结构化微机电系统集成设计方法

苑伟政 常洪龙 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

西北工业大学出版基金资助项目

泛结构化微机电系统 集成设计方法

苑伟政 常洪龙 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书提出和建立了泛结构化微机电系统集成设计方法,系统性地论述了其理论体系和关键技术。本方法是在对当前微机电系统集成设计工具的体系结构、基础理论、关键技术及发展趋势等方面进行归纳和总结的基础上,提出的一种新的方法和理论,是对当前通用的微机电系统结构化设计方法的重要发展和提高。依据本方法实现了国产微机电系统集成设计工具(MEMS Garden),并结合大量典型和复杂MEMS器件实例验证了本方法和设计工具的实用性和先进性。

本书可供微机电系统相关学科的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

泛结构化微机电系统集成设计方法/苑伟政,常洪龙著. —西安:西北工业大学出版社,2010.3

ISBN 978-7-5612-2758-9

I. ①泛… II. ①苑…②常… III. ①微机电—系统设计 IV. ①TM380.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 044820 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:14.125

字 数:305 千字

版 次:2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

定 价:30.00 元

前 言

WUJIANZHUAN

微机电系统(MEMS)被公认为是一项战略高新技术。微机电系统除了用于航空航天等尖端行业外,也正在悄悄地改变人类的生活。从保障行车安全的胎压传感器、安全气囊系统中的加速度计,到进入人体内进行药物定点释放的微型药丸,微机电系统正在提高着人类的生活质量。

设计是创新的核心。中国是一个制造大国,正在向设计大国进行转变。“工欲善其事,必先利其器”。然而,微机电系统发展至今,仍无相关的著作对其理论体系和设计方法进行系统的总结和归纳。作者对微机电系统的设计方法、理论,以及工具技术进行了长时间的研究和积累。本书就是在这些研究基础上,对微机电系统的设计方法的特点和理论体系进行了系统的归纳和总结,提出和建立了泛结构化的微机电系统集成设计方法。

微机电系统是用源自微电子工艺的微细加工工艺所制作的微型机械系统。因此,长期以来微机电系统的设计基本上都更多地借鉴了微电子的设计方法和设计工具,典型的有结构化设计方法。而微机电系统的设计本质上是一种复杂精密机械的设计,尽管对微电子制造工艺有很强的依赖性,但却不适于用微电子的设计方法来设计。因此,泛结构化微机电系统集成设计方法特别强调微机电系统的柔性设计、创成设计和三维设计。它不是对原有的微机电系统结构化设计方法的否定,而是在此基础上的发展和提高。

本书的成果是在国家高技术研究计划(“863”计划)、国家自然科学基金等多年的支持下完成的,在此向有关委员会表示感谢。实验室的许多研究生做了大量重要的研究工作,也为本书的内容提供了帮助,在此向霍鹏飞、李伟剑、徐景辉、谢建兵、张亚飞、闫子健、张承亮、秦子明、刘莹、谢志雄、郝星、焦文龙、腾云以及其他没有列出名字但付出辛勤劳动的同学们表示感谢。

最后须要特别指出的是,微机电系统涉及的领域非常广泛,笔者因学科知识面有限,在论述该方法的时候,主要采用了机电领域的例子,对于生物、流体微机电系统的论述较少。因此,所提出的泛结构化微机电系统集成设计方法在这些领域可能有所欠缺,敬请读者谅解和不吝指教。

著 者

2009 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 微机电系统简介	1
1.2 微机电系统设计工具及设计方法简介	2
1.3 结构化 MEMS 设计方法及面临的挑战	3
1.4 泛结构化 MEMS 集成设计方法的提出	5
1.5 小结	5
参考文献	5
第 2 章 泛结构化 MEMS 集成设计方法的理论体系	7
2.1 引言	7
2.2 集成设计体系	7
2.3 分层设计体系	9
2.4 柔性设计体系	12
2.5 创成设计体系	13
2.6 三维设计体系	14
2.7 小结	15
参考文献	15
第 3 章 分层设计体系及实现技术	16
3.1 引言	16
3.2 系统级设计	16
3.3 器件级设计	37
3.4 工艺级设计	49
3.5 小结	64
参考文献	64

第 4 章 柔性设计体系及实现技术	66
4.1 引言	66
4.2 系统级网表到工艺级二维版图的转换方法	66
4.3 系统级网表到器件级三维实体的转换方法	71
4.4 器件级三维实体到工艺级二维版图的转换方法	72
4.5 器件级到系统级的宏建模转换方法	81
4.6 工艺级二维版图到器件级三维实体的转换方法	81
4.7 工艺级二维版图到系统级模型的转换方法	84
4.8 小结	88
第 5 章 创成设计体系及实现技术	89
5.1 引言	89
5.2 系统级创成式设计	89
5.3 器件级创成式设计	110
5.4 工艺级创成式设计	112
5.5 小结	113
参考文献	113
第 6 章 宏建模方法及应用	114
6.1 引言	114
6.2 模型降阶的数学描述	114
6.3 线性 MEMS 系统宏建模方法	116
6.4 几何非线性 MEMS 系统宏建模方法	128
6.5 多域耦合 MEMS 宏建模方法	133
6.6 参数化模型降阶方法	140
6.7 宏建模方法的应用	147
6.8 小结	179
参考文献	179
第 7 章 三维设计体系及实现技术	183
7.1 引言	183
7.2 系统级的三维设计	183
7.3 器件级的三维设计	184
7.4 工艺级的三维设计	185

7.5 小结	187
参考文献	187
第 8 章 集成设计体系及实现技术	188
8.1 引言	188
8.2 集成设计工具的架构	188
8.3 集成设计环境的实现	190
8.4 小结	194
第 9 章 设计工具应用及器件设计实例	195
9.1 引言	195
9.2 平面解耦式 z 轴陀螺	195
9.3 音叉电容式微机械陀螺	200
9.4 平面单轴加速度计	205
9.5 z 轴加速度计	209
9.6 微型压力传感器	215
9.7 小结	218

第1章 绪 论

1.1 微机电系统简介

微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)主要是指通过半导体工艺或其他微细加工工艺制造的微型机械。其英文缩写 MEMS 恰到好处地反映了其主要技术特点。MEMS 一词中的第一个字母“M”,即 Micro,代表这一技术是微型的。MEMS 中典型结构的特征尺寸在微米量级,随着尺寸的缩小,显然会降低 MEMS 系统的功耗,增大其谐振频率,进而提高可靠性等。因此,可以说微型化是 MEMS 技术的一个最显著的特征。如此微小的结构当前仍主要通过硅基半导体工艺来进行实现,这也使得 MEMS 一般都具有批量化生产的优点。而目前快速发展的非硅工艺,如准分子激光、飞秒激光、电火花加工等手段也可以实现 MEMS 技术的微型化,并开始在 MEMS 领域中占据越来越重要的地位。MEMS 中第二个字母“E”,即 Electro,表明微机电系统是与“电”密不可分的。一方面, MEMS 主要是以微型的传感器或执行器为主,那么对微弱电信号的拾取与调理必然是不可缺少的。另一方面,这个“E”也在某一程度上代表了这项技术是缘于微电子行业的。第三个字母“M”代表了结构、力学等与机械相关的东西。最后一个字母“S”代表了 MEMS 是一个相对完整的系统或子系统,具备一定的功能,并且该系统还往往可以在硅片上进行机械结构与控制电路的单片集成。

像微电子技术一样, MEMS 技术也是一项使能性技术(Enabling Technology),加上 MEMS 器件本身所具有的微型化、低功耗、高集成度等优点,其已经在航空、航天、汽车、医疗器械、消费电子等诸多领域都找到了很好的结合点。目前,全世界已经有超过 130 种的 MEMS 器件^[1],其中打印机喷头、微加速度计、微陀螺、微麦克风和数字微镜均已经实现了大规模的批量生产,销售额每年超过 80 亿美元(见图 1-1)。根据 Yole 公司的市场预测,仅基于硅 MEMS 技术的 MEMS 市场在 2010 年就将超过 100 亿美元。

MEMS 的工艺技术在最近十年也有了长足的进步,多种标准化的 MEMS 工艺已出现并服务于 MEMS 产品的制造。在 2003 年全球已有超过 368 家的单位具备 MEMS 的加工能力^[1],2008 年包括台积电(台湾积体电路制造股份有限公司)在内的 24 家公司提供 MEMS Foundry 服务,其年收入已超过 5 亿 6 千万美元,并以 20%~30%的年增长率在发展^[2]。MEMS 工艺能力的提升将促使更多的设计人员专注于 MEMS 器件的设计,也将促使产业分工逐渐清晰和合理,这些都非常有助于 MEMS 产业的发展。

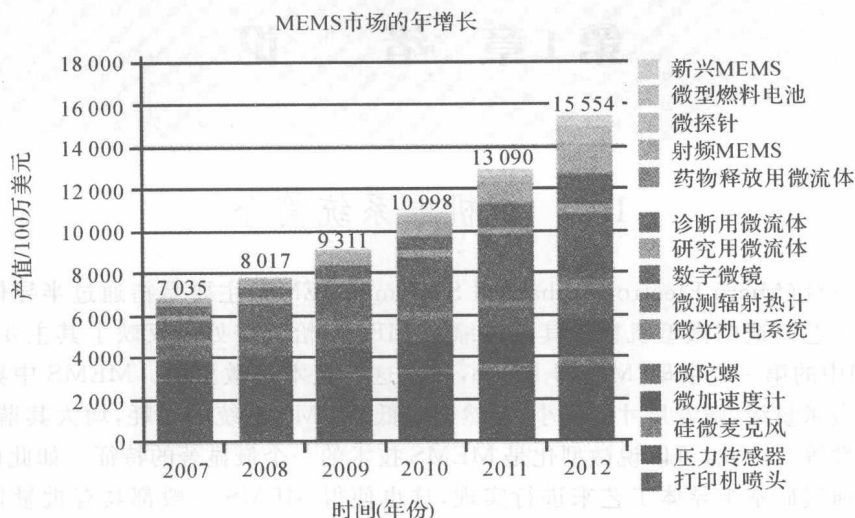


图 1-1 Yole 公司预测的 MEMS 市场增速图

1.2 微机电系统设计工具及设计方法简介

工欲善其事,必先利其器。当代的科技发展史告诉我们,专用的计算机辅助设计工具(CAD)对于一个行业的发展往往起到了巨大的倍增器效应,微电子设计工具(EDA)对微电子行业发展的推动作用即是一个典型的案例。EDA 工具的出现直接导致了微电子行业设计与加工分离的产业特征,大大促进了微电子产业的发展和壮大。当前,仅 EDA 行业每年的市场总额都在 40 亿美元以上。

对于符合 MEMS 产业特点设计工具(MEMS CAD)的追求是 MEMS 业界一个长期的奋斗目标。当前,全世界已有几十种 MEMS 设计工具^[3-19]。一般可将这些设计工具分成两大类。第一类是集成化设计工具,为 MEMS 用户提供了从系统行为建模与仿真到器件物理分析,再到版图设计和工艺建模仿真等全过程的设计解决方案,典型的有 CoventorWare^[3], Intellisuite^[4]和法国的 MEMS Pro^[5],中国的 MEMS Garden^[6]等。第二类是 MEMS 特定功能模块的设计工具,其针对 MEMS 设计过程中某一阶段的设计需求而开发,并不提供整套解决方案。典型的设计工具包括 MEMS 系统级建模与仿真软件 Nodas^[7], Sugar^[8]等;多物理场耦合建模与仿真软件 Comosol^[9], Ansys Multiphysics^[10]等;工艺版图编辑软件 L-Edit^[11], LA-SI^[12]等;宏建模软件 AutoMM^[13], ROM^[14], Mor4Ansys^[15]等;工艺模拟软件 ACES^[16], Simode^[17], SEGS^[18]等。这些分散的软件模块已经有很多集成在第一类集成设计工具里。

在这两类设计工具里,集成设计工具提供了完备的 MEMS 建模与仿真解决方案,符合

MEMS 产业化对专用设计工具的需求,同时各种先进的设计方法及设计理念也主要体现在该类设计工具中。本书将着重讨论用于构建 MEMS 集成设计工具的设计方法及关键技术。

纵览当前的 MEMS 集成设计工具,分析其结构特点,可以发现其基本构成主要包括三部分。第一部分就是各种各样的仿真模型库,这一部分是来自对 MEMS 器件开发经验的总结,是 MEMS 设计工具的“功能器官”。第二部分是仿真支撑平台,主要是系统级、器件级和工艺级仿真支撑平台,来对所建立的各种仿真模型进行求解,堪称 MEMS 设计工具的“骨架”。这三个仿真支撑平台分别由电路仿真平台、结构的有限元仿真平台和工艺版图编辑平台来承担。而第三部分就是 MEMS 设计方法。系统的 MEMS 设计方法及其理论体系是构建 MEMS 集成设计工具的理论基础,堪称 MEMS 设计工具的“灵魂”。其除了直接服务于 MEMS 集成设计工具的开发外,还对指导、促进以及规范 MEMS 产品的开发起着重要的作用。当前应用最为广泛的 MEMS 设计方法是源自微电子行业的结构化 MEMS 设计方法。

1.3 结构化 MEMS 设计方法及面临的挑战

从 20 世纪 70 年代开始,结构化设计方法在微电子行业得到了非常成功的应用^[19]。到 20 世纪 90 年代,人们开始探索该方法在机械系统中的应用,并认为 MEMS 系统最有可能采用结构化设计方法^[19]。而到了 1995 年,美国国家自然科学基金委员会在加州理工大学(Caltech)组织召开的“Structured Design Method for MEMS”研讨会上正式提出了 MEMS 的结构化设计方法^[19]。这种结构化设计方法借鉴了微电子设计(EDA)的成功经验,强调类似于 EDA 的分层次自顶向下(Top-Down)设计,如图 1-2 所示。这种自顶向下的结构化设计方法从系统的整体功能入手进行设计,强调 MEMS 的系统级设计,然后逐级进行设计综合,直至生成 MEMS 加工用的版图。该方法被认为有望显著提高 MEMS 的设计效率,甚至可以产生类似于微电子设计那样的设计与加工分离。当前,国际上几乎所有的 MEMS 集成设计工具均基于此方法进行开发。

但 MEMS 技术的发展速度很快,特别是进入 21 世纪后 MEMS 技术更是得到了迅猛的发展。MEMS 技术的高速发展也给 MEMS 结构化设计方法及设计工具带来了很大的冲击和挑战。

首先在设计流程上,结构化设计方法强调一种自顶向下的设计流程。这固然符合结构化设计的思想,并且这种设计流程已经在微电子设计领域取得了巨大的成功,但 MEMS 毕竟不同于微电子,再复杂的微电子电路也可用晶体管、电阻、电容、电感等几种简单的元器件来表示,而对于功能、原理、形式、工艺都复杂多变的 MEMS 器件来说,其很难像微电子那样用几种简单的组件来表征任意复杂的 MEMS 结构。因此,完全照搬微电子的设计方案,并用这一种自顶向下的流程来统一所有 MEMS 器件的设计,显然并不科学。

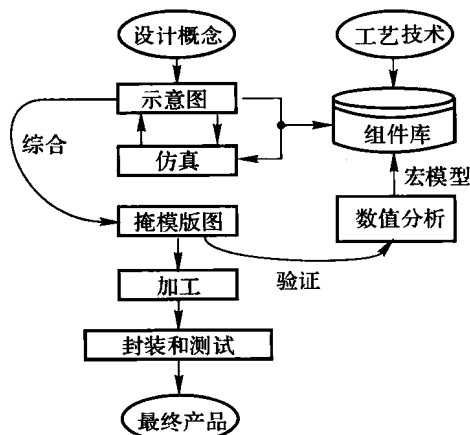


图 1-2 Top-Down 设计方法流程图

以典型的电容式微机械陀螺和电容式微型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→工艺级的自顶向下设计流程，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的计算，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，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，并开发了一些不同设计层级之间数据自动传递的接口，以方便用户能从任一模块开始并完成设计^[1,20-21]。

其次，对于 MEMS 创新设计的支持力度不足也是现有集成设计工具所面临的挑战之一。在结构化设计方法中，MEMS 的方案设计基本上均依赖于组件模型库。例如，Carnegie Mellon 大学的 G. K. Fedder 等在 20 世纪 90 年代末建立了节点分析法 NODAS，主要思想是将 MEMS 系统级建模转化为组件模型的网络集合形式。CoventorWare 拥有机电类、流体类、光学类等大量的组件模型，并且组件库仍然在不断扩充之中。可以说，可重用的组件库技术大大降低了用户的设计难度，提高了建模效率。但是，组件基本上都是来源于已有设计方案，用户基于这些组件模型只能进行局部参数修改或组合式变换，无法进行新结构或新部件设计。如用户在设计和验证新型方案时会用到的变截面弹性梁，就很难在现有软件的常规组件模型中得到支持。因此，加强对创新设计能力的支持是 MEMS 设计方法的一个必然趋势。

1.4 泛结构化 MEMS 集成设计方法的提出

通过前文的分析可以发现, MEMS 毕竟不同于微电子。尽管 MEMS 可以用微电子的工艺来加工,但却不能完全照搬微电子的设计方法来设计,这是因为 MEMS 本质上仍是一种机械结构或者系统,其更多地具有机械设计的特点。因此,笔者结合 MEMS 的特点,针对当前结构化 MEMS 设计方法所面临的挑战,提出了泛结构化 MEMS 集成设计方法。

须要强调的是,泛结构化 MEMS 集成设计方法不是对结构化 MEMS 设计方法的否定,而是在此基础上的一种发展和提高。其仍保留了结构化设计方法的分层体系,但主要在设计流程的柔性上、创新设计的支持上以及三维可视化设计上进行了发展和提高,更加符合 MEMS 的多样性、复杂性和三维机械设计的本质特征。因此,笔者使用了一个“泛”字来描述这种设计方法,来与传统的结构化设计方法进行区别。

本书将着重论述泛结构化设计方法的理论体系及关键技术,并结合具体的器件设计实例来说明该方法的正确性和有效性。

1.5 小 结

拥有国产 MEMS 设计工具是国内 MEMS 业界长期以来的一个梦想。如果说国产系统级、器件级和工艺级的仿真支撑平台为 MEMS 设计工具提供了“骨架”,功能各异的 MEMS 仿真模型库为 MEMS 设计工具提供了“功能器官”的话,那么泛结构化的 MEMS 集成设计方法将为国产 MEMS 设计工具注入“灵魂”,为指导国产 MEMS 设计工具的开发提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] Allen J J. Micro Electro Mechanical System Design [M]. London: Taylor & Francis, 2005.
- [2] Walko J. Analyst Sees Strong Growth for MEMS Foundries [EB/OL]. [2008-12-14]. <http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=208403094>.
- [3] Coventor Inc. MEMS+IC Design: Integrating MEMS and IC Software [EB/OL]. [2008-12-30]. <http://www.coventor.com/pdfs/MEMSPlus-Datasheet.pdf>.
- [4] Intellisense Inc. A Collaborative Living Design Environment [EB/OL]. [2008-12-30]. <http://www.intellisensesoftware.com/intellisuite/Isuite-Overview.html>.
- [5] SoftMEMS LLC. MEMS Pro v6.0 [EB/OL]. [2008-12-30]. http://www.softmems.com/mems_pro.html.
- [6] 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, 2009, 44(11): 39-46.
- [7] Carnegie Mellon University. Nodal Design of Actuators and Sensors: Nodas v1.4 [EB/OL].

- [2008 - 12 - 30]. http://www.ece.cmu.edu/~mems/projects/memsyn/nodasv1_4.
- [8] UC Berkley. SUGAR: CAD for MEMS [EB/OL]. [2008 - 12 - 30]. <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/programs/sugar.html>.
- [9] COMSOL AB. MEMS Module Overview [EB/OL]. [2008 - 12 - 30]. <http://www.comsol.com/products/mems>.
- [10] Ansys Inc. Simulation Solutions for the Microsystem Design Industry [EB/OL]. [2008 - 12 - 30]. <http://www.ansys.com/assets/brochures/mems-industry.pdf>.
- [11] Tanner Research, Inc. L-edit for Physical Design [EB/OL]. [2008 - 12 - 30]. http://www.tannereda.com/images/pdfs/Datasheets/DS_LEdit.pdf.
- [12] Boyce D E. What Is LASI [EB/OL]. [2008 - 12 - 30]. <http://lasihome.com/index.htm>.
- [13] Swart N R, Bart S F, Zaman M H, et al. AutoMM: Automatic Generation of Dynamic Macromodels for MEMS Devices [C]//Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Heidelberg: IEEE, 1998:178 - 183.
- [14] Ostergaard D, Gyimesi M. Finite Element Based Reduced Order Modeling of Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) [EB/OL]. [2008 - 12 - 30]. http://www.ansys.com/industries/mems/mems-downloads/msm00_ansys_romfin.pdf.
- [15] Rudnyi E B. Automatic Compact Modelling for MEMS: Applications, Methods and Tools [EB/OL]. [2008 - 12 - 30]. <http://modelreduction.com/doc/teaching/eurosime>.
- [16] University of Illinois. PC-Based Three-Dimensional Etch Simulator Speeds Microelectromechanical System (MEMS) Design [EB/OL]. [2008 - 12 - 20]. <http://www.otm.illinois.edu/sites/www.otm.illinois.edu/files/T99042-095.pdf>.
- [17] Amtec GmbH. QSimode Cross-section Simulation of Orientation Dependent Etching [EB/OL]. [2008 - 12 - 30]. http://www.amtec-chemnitz.de/fileadmin/user_upload/Simode2003.1.pdf.
- [18] California Institute of Technology. Structured Design Methods for MEMS [EB/OL]. [2008 - 12 - 30]. http://design.caltech.edu/Research/MEMS/segs_movie.html.
- [19] Andonsson E K. Structured Design Methods for MEMS Final Report [EB/OL]. [2008 - 12 - 30]. http://www.design.caltech.edu/NSF_MEMS_Workshop/nsfmems.pdf.
- [20] Lorenz G, Chevreuse S R. System and Method for Three-dimensional Visualization and Post-processing of a System Model: US, 7263674 [P]. 2005 - 06 - 23.
- [21] Lorenz G, Chevreuse S R, Kennedy C J. System and Method for Automatic Mesh Generation from a System-level MEMS Design: US, 7131105 [P]. 2005 - 03 - 24.

第2章 泛结构化 MEMS 集成设计方法的理论体系

2.1 引言

结构化设计方法的理论体系尚没有文献对其系统地阐述过,本章将在对当前 MEMS 设计工具及设计方法的特征进行归纳总结的基础上,系统地阐述泛结构化 MEMS 集成设计方法的理论体系。在本书中,泛结构化 MEMS 集成设计方法的理论体系主要分为集成设计体系、分层设计体系、柔性设计体系、创成设计体系和三维设计体系等五个体系。这五个设计体系相互关联、相辅相成完成复杂的 MEMS 设计任务,并起到提高设计效率的目的。

2.2 集成设计体系

微机电系统的设计过程包括 MEMS 器件的机械结构设计、接口电路设计、系统行为建模与仿真、工艺过程建模与仿真等环节,还须要考虑产品的加工制造、封装和测试等环节对设计的影响,是一个包含了机械、电子、光、流体和生物等诸多学科内容的多学科交叉设计过程。如何综合考虑这些影响因素进行高效的 MEMS 设计,是 MEMS 设计方法须要解决的关键所在。

集成设计(Integrated Design)是以并行工程(Concurrent Engineering)、快速原型设计(Rapid Prototyping)等先进的设计制造理念为指导,对设计过程所涉及的各个环节进行综合考虑,并通过先进的技术方法以达到最优设计的设计理论。其目的在于充分发挥设计过程的潜力,服务和面向产品的研制与生产过程,得到低的生产与开发成本、短的研制与生产周期、高的产品质量、高的生产稳定性的优良设计。集成设计的思想已广泛用于微电子设计和机械工程领域,并产生了良好的效益。而微机电系统这种多设计环节、多影响因素、多学科交叉的设计特点也决定其比较适合集成设计。

微机电系统的集成设计适应了 MEMS 的特点与特殊要求,即将不同学科以及产品全生命周期的要素,如制造、封装、测试等综合考虑在内,对产品进行综合设计与分析,使 MEMS 设计变得更加科学和系统化,这对减少制造过程的重复和浪费,缩短开发周期和提高设计与生产质量具有重要意义。当前所有的 MEMS 设计工具都或多或少地应用该方法对设计工具进行了组织和构建。因此,构建微机电系统设计工具首先要做的就是集成,泛结构化 MEMS 集成设计方法的基础也是其集成设计体系。

微机电系统的集成设计包含三个方面的集成。第一个集成是对 MEMS 产品全生命周期中各要素的集成设计,主要包括设计、制造、封装、测试等环节。一方面,各环节对 MEMS 设计

工具提出设计需求。如制造环节提出的工艺测试结构或对工艺过程进行三维可视化检查功能,封装环节对传感器工作气压、温度、应力等所带来的变化等,均须被考虑进 MEMS 的设计工具中。另一方面,对其组件模型、网表数据、行为仿真结果、实体模型、网格化模型、物理仿真结果、工艺文件、版图文件等产品的中间过渡和最终形式进行组织管理(见图 2-1)。对这些产品形式以标准格式的文件形式存储,便于和第三方仿真软件的兼容,是一种较好的管理方式。

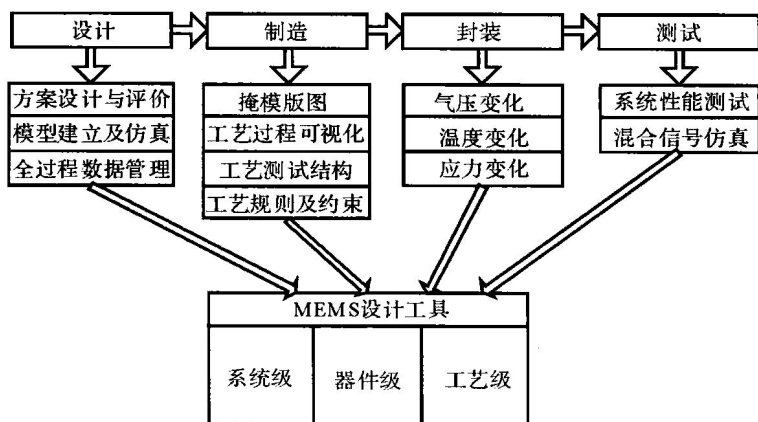


图 2-1 MEMS 设计工具对产品全生命周期内各要素的集成示意图

第二个集成是对其功能模块的集成设计,主要包括承担能量转换作用的微机械结构和接口电路的集成设计,但通常还须要包括空气阻尼、残余应力、温度等外界影响因素在内进行集成设计(见图 2-2)。这是因为,只有考虑了这些非理想因素的设计才是最接近实际情况的一种设计,才具有更大的应用价值。在泛结构化 MEMS 集成设计方法里,这种集成设计主要通过结合宏模型在内的系统级设计来完成。

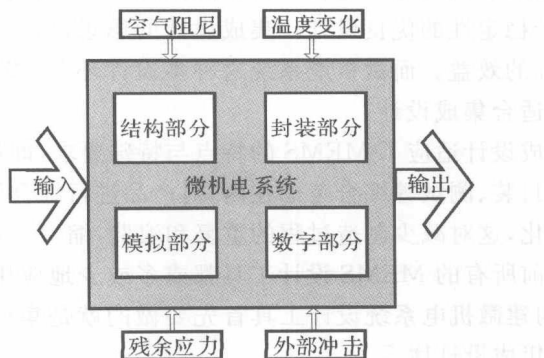


图 2-2 MEMS 设计工具对于不同功能模块的集成示意图

第三个集成是在构建微机电系统设计工具时对于不同学科领域设计方法和设计工具的集成(见图 2-3)。构建 MEMS 设计工具时,没有必要从零开始开发所涉及的每个学科领域中的软件模块。从机械、电子这些学科领域中直接借用一些设计方法或仿真工具既可以减轻设计工具开发的工作量,同时也为来自这些学科领域的设计人员提供了一个更为熟悉的软件使用环境。现有 MEMS 设计工具都或多或少集成了许多第三方的设计工具,这种集成也正好符合 MEMS 多学科交叉的特点。

可见,这三个不同方面的集成可最大程度地兼顾到 MEMS 设计多学科交叉、多影响因素的特点,是 MEMS 集成设计工具实施的关键基础。

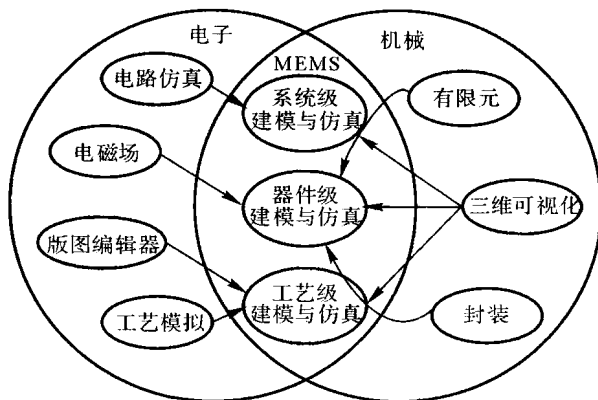


图 2-3 MEMS 设计工具对不同学科工具的集成示意图

2.3 分层设计体系

微机电系统的设计是一个多因素、多学科交叉的复杂过程。为完成复杂的设计任务,一般采用分层设计体系来保障微机电系统设计任务的逐层合理分解,这种分层设计体系也是 MEMS 结构化设计方法所强调的。著名的 MEMS CAD 研究学者,MIT 的 Stephen Senturia 教授将 MEMS 的设计过程分为四个层级的设计,即工艺级、物理级、器件级和系统级(见图 2-4)^[1]。其中,工艺级进行工艺过程的物理和几何模拟,以及工艺优化综合等;物理级进行器件的三维物理仿真;器件级进行基于宏模型的系统仿真;系统级进行基于集总参数网络模型的系统行为仿真。这种分级体系为目前广大的 MEMS 设计工具所采用,但在本书所论述的泛结构化 MEMS 集成设计方法中却有所改进。

在泛结构化 MEMS 集成设计方法中,将微机电系统的设计分成三个设计层级,即系统级、器件级和工艺级(见图 2-5)。其中,系统级是基于常微分方程模型的行为建模与仿真,相当于原有四级体系中的系统级和器件级综合。原有四级体系中的器件级的主要任务是进行宏模型的提取以及基于宏模型的仿真,实际上宏模型的提取可以作为物理级到系统级转换的一个

连接接口,而基于宏模型的行为仿真完全可以和基于集总参数网络的系统级仿真集成到一起。因此,可将原有四级体系中的器件级和系统级进行合并,并统一称之为系统级。

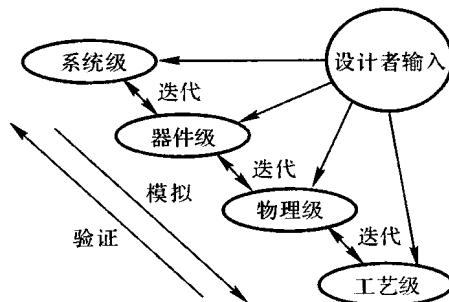


图 2-4 Stephen 教授所提出的 MEMS CAD 四级分层体系示意图

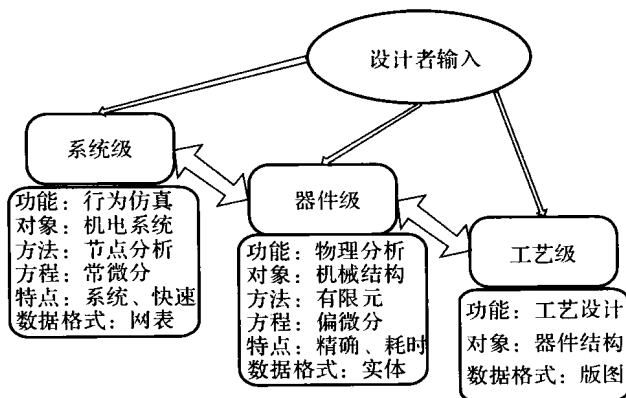


图 2-5 MEMS 设计的三级分层体系示意图

在三级分层体系中的器件级是基于偏微分方程模型的物理行为建模与仿真,相当于原有四级体系中的物理级。但这里没有采用物理级这一说法,原因主要在于想通过该命名方法来与包含器件结构和电路在内的系统仿真相区别。系统级研究的对象是包含了器件结构与接口电路在内的系统,而器件级的研究对象则主要是器件的机械结构部分。因此,在泛结构化 MEMS 集成设计方法中,将这一基于有限元方法的物理行为分析层级称为器件级。

三级体系中的工艺级是基于器件结构版图和工艺过程的建模与仿真,除此之外还包括工艺流程的优化、材料属性数据的查询与编辑等功能,和原有四级体系中的工艺级所承担的任务相当。

这样,在泛结构化 MEMS 集成设计方法中,通过三级分层体系的设置,不但使得分级更为合理,更重要的是为 MEMS 器件的任意流程设计奠定了基础。