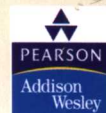
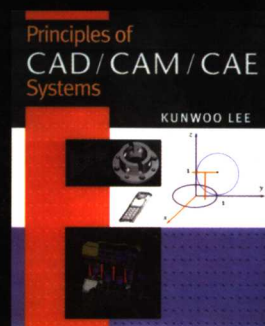


高等学校教材系列



CAD/CAM/CAE 系统原理

Principles of
CAD/CAM/CAE Systems



[韩] Kunwoo Lee 著

袁清珂 张湘伟 等译

殷国富 曹岩 朱虎 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

高等学校教材系列

CAD/CAM/CAE 系统原理

Principles of CAD/CAM/CAE Systems

[韩] Kunwoo Lee 著

袁清珂 张湘伟 等译

殷国富 曹岩 朱虎 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从计算机辅助技术服务于产品整个生命周期与开发全过程的角度,按照七个知识模块的体系结构,全面系统地介绍了CAD/CAM/CAE系统的基本概念、基本原理、实现方法和系统开发与集成技术。主要内容包括CAD/CAM/CAE系统的基本概念和软硬件组成、图形库与图形编程基本知识、计算机辅助绘图系统、实体建模系统、非流形建模系统、三维建模的基本原理、曲线的表示与处理、曲面的表示与处理、有限元建模与分析、优化设计、数字控制、CAD与CAM的集成、数据交换标准STEP等,以及反映CAD/CAM/CAE领域最新成果的快速原型制造和虚拟工程。

本书可作为研究生和高年级本科生学习“计算机辅助设计和制造”的教材,也可供从事产品设计、计算机辅助设计、计算机辅助制造等领域的科研人员和工程技术人员参考使用。

Simplified Chinese edition Copyright © 2006 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Principles of CAD/CAM/CAE Systems, ISBN: 0201380366 by Kunwoo Lee. Copyright © 1999. All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Addison-Wesley.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2005-6589

图书在版编目(CIP)数据

CAD/CAM/CAE系统原理/(韩)李建雨著;袁清珂等译.-北京:电子工业出版社,2006.6
(高等学校教材系列)

书名原文:Principles of CAD/CAM/CAE Systems

ISBN 7-121-02504-3

I. C... II. ①李... ②袁... III. ①计算机辅助设计-高等学校-教材 ②计算机辅助制造-高等学校-教材 ③计算机辅助分析-高等学校-教材 IV. TP391.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第036827号

责任编辑:谭海平 余 义

印 刷:北京天宇星印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:30.75 字数:760千字

印 次:2006年6月第1次印刷

定 价:49.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

译者序

翻译出版本书的初衷源于双语教学的需要,后来发现我国从 20 世纪 80 年代开始基本上没有出版过 CAD/CAM 领域的英文翻译版图书,于是更坚定了我出版该英文教材中文版的想法。

随着计算能力的显著提高以及软件在设计和制造过程中的广泛应用, CAD/CAM/CAE 系统不再仅仅是产品设计的工具,也不再仅仅是传统意义上的 CAD, CAM, CAE 的简单集成,而具有更为广泛的含义。CAD/CAM/CAE 系统已经成为产品集成开发平台的代名词,其功能在不断扩展,逐渐覆盖了产品整个生命周期,服务于产品开发的全过程,包括产品的设计、产品的数字化校核与验证、产品的生命周期管理,成为了提高企业市场响应速度和产品竞争力的重要保障。

本书体系结构可以分为七个知识模块。一、CAD/CAM/CAE 系统的基本概念和基础知识,分别在第 1 章、第 2 章、第 3 章中介绍;二、CAD/CAM/CAE 系统的基本原理,分别在第 4 章和第 5 章中介绍;三、CAD/CAM/CAE 系统的数学实现方法与计算机图形学基础知识,分别在第 6 章和第 7 章中介绍;四、CAD/CAM/CAE 系统中产品校核与验证及优化设计的原理与实现方法,分别在第 8 章和第 9 章中介绍;五、CAD/CAM/CAE 系统中计算机辅助工艺设计与辅助制造的基本原理与实现方法,分别在第 10 章和第 11 章中介绍;六、CAD/CAM/CAE 系统最新发展的技术与系统,分别在第 12 章和第 13 章中介绍;七、CAD/CAM/CAE 系统的数据交换标准与系统集成,分别在第 10 章和第 14 章中介绍。本书具有以下主要特点:

1. 体系结构科学合理,内容全面系统。围绕七大知识模块,从产品集成开发平台的角度,围绕“设计—校核验证—制造”三个环节系统地介绍了 CAD/CAM/CAE 系统的概念、原理、技术和方法。

2. 内容新颖、条理清晰、说理透彻。本书既包括了传统 CAD/CAM/CAE 系统中的有关知识,也包括了 CAD/CAM/CAE 领域最新发展的研究成果,如快速原型制造、虚拟工程等。每一章中的知识介绍由浅入深、逐步深入,各章节之间有过渡衔接。

3. 图文并茂、实例丰富、习题准确。本书在论述过程中,提供了大量的图表、程序代码,以使知识内容的表述更加简明扼要。同时,在每一章中还提供了大量的应用实例,以加深对理论知识的理解。结合每章习题的练习,可以进一步提高运用所学知识解决问题的能力。

本书可作为研究生和高年级本科学生学习“计算机辅助设计与制造”、“产品开发设计与开发”等有关课程的教材,也可供从事产品设计、计算机辅助设计、计算机辅助制造等领域的科研人员和工程技术人员参考使用。

本书英文原版教材已被世界上许多著名大学用做本科生和研究生教材,如 University of Washington, Washington State University, University of Michigan, Arizona State University, University of Maryland, Louisiana State University, Simon Fraser University, University of Regina, McMaster University, University of South Australian, Letterkenny Institute of

Technology, University of the Aegean 等。

本书是在研究生和本科生双语教学的基础上逐渐完成的。第1章至第6章由袁清珂译,第7章由冯桑译,第8章由骆少明译,第9章由唐文艳译,第10章由王海燕译,第11章由马平译,第12章至第14章和附录由张湘伟译。吕文阁、成思源、熊汉伟、高健、张晓伟、吕惠卿等分别校对并修改了第一稿的有关章节;赵斌、陈伟国、罗小美、夏博、张维、谢养等研究生参与了部分章节的翻译及文字整理和插图绘制工作。全书由袁清珂和张湘伟负责通稿校订,并通读一、二、三稿,最终修改定稿。

本书由殷国富、曹岩、朱虎担任审校,他们通读了第一稿、第二稿,提出了许多宝贵的意见和建议,在此向他们表示衷心的感谢。

作者还要感谢韩国首尔国立大学 Kunwoo Lee 教授、马彦昭博士、刘淼博士、吴芳英博士、Sungchan Kim 博士以及韩国首尔国立大学 Computer Aided Design & Analysis 国家重点实验室,感谢他们在本书翻译和审校过程中提供的大力支持和帮助!最后,作者真诚地感谢所有为本书翻译、审校、出版做出贡献的各位专家、教授、学者、编辑及朋友们。

由于时间仓促和水平的限制,书中错误在所难免,欢迎各位专家、同仁批评指正。若发现书中错误或不妥之处,烦请告知,译者将不胜感激!译者联系方式为 qkyuan@163.com。

袁清珂

2005 年 12 月于韩国首尔国立大学

前 言

目前,随着计算能力的显著变化以及软件在设计和生产中的广泛应用,工程人员不再只是用 CAD/CAM/CAE 系统进行示范,而是更多地把它应用到日常工作中。国际竞争一方面正在逐渐降低熟练劳动的可用性,另一方面又在不断加强对生产质量的重视,这样的国际竞争也同样迫使生产厂家利用 CAD/CAM/CAE 系统,使其设计和生产过程实现自动化。因此,工程技术学校的教师正经受着一种新的压力,即转变与设计相关课程的授课方法,以使学生们能够使用 CAD/CAM/CAE 系统,并掌握其在基本原理方面的知识。

本书的目的是为了说明 CAD/CAM/CAE 系统的基本原理和概念,而不是就某个特定系统的应用进行解释说明。一些人认为教会学生如何利用现有的系统,甚至是某个具体通用的系统就足够了,因为将要成为工程技术人员的学生将是这种系统的使用者而不是开发者。然而,为了能够有效地利用现有的软件,同时针对自动化设计创建有用的宏或程序,使用者不但要了解计算环境,还要知道底层的系统原理。只有具备了这些基本的原理知识,学生们才能在特定的环境下很快地掌握某个具体的系统,并充分地利用它,使它发挥最大的能效。此外,和 CAD/CAM/CAE 系统一起提供的那些具有代表性的手册和文献,在假定用户具备充分的理论背景的前提下,往往倾向于把重点放在用户界面和句法上。若一个用户不具备这样的知识背景,则他对系统文件中术语的理解和系统错误的处理就会非常困难。

本书主要写的是机械工程中的 CAD/CAM/CAE 系统,但是关于计算机图形方面的内容也同样会引起其他领域工程人员的兴趣。本书可以作为高年级本科生和研究生一年级课程的教材,它仅仅要求学生具备编程、微积分、矩阵和矢量代数的知识,而不一定要有预先的 CAD/CAM/CAE 系统知识。这样,复杂的数学术语和解释就可以保持到最少,而与之相关的问题则会尽可能地以直观的方式来说明。因此,若某些章节放在以后再讲解,则这本书可以用来作为低年级课程的教材,而对于那些想对 CAD/CAM/CAE 系统有个概括性了解的工程技术人员来说,本书也可以作为参考书。

在写此书的过程中,笔者的目标是用适当的数据(图例)和实例来阐明基本概念,而又不涉及太多的细节内容。笔者曾经看过一些教科书,虽然在这些书中对太多细节问题进行了详细的说明,但是却没有把他们的观点表达清楚。这种对于细节的过分依赖会使整本书变得很厚,从而使学生们不能有效地使用它。对于细节问题,笔者建议学生们参考本书最后的参考文献部分,这些参考文献的选择就有这样的目的。这里尽可能只推荐与每一个问题有直接关系的原文;这样就可以使参考文献的数量保持最少。某些教科书推荐了太多的参考文献,使得学生们不堪重负。

第 1 章介绍了 CAD/CAM/CAE 系统在产品周期中的作用。在这一章中也给出了 CAD/CAM/CAE 系统的定义,通过实例说明了这些系统在设计 and 生产过程中的应用。实例研究阐明了后续章节中所解释的那些基本原理是如何在使用 CAD/CAM/CAE 系统进行新设计和生产中发挥作用的。第 2 章回顾了组成 CAD/CAM/CAE 系统可用的硬件和软件。随着新的硬件和

软件的不断出现,教师们应该更新这些章节的内容。本章可供阅读之用,而不用深入地讲解。

第3章介绍了不管用何种图库进行图形编程都要用到的所有概念,而不局限于某个特定的图库。但本书采用了 OpenGL 图库来编写示例图形程序,因为无论是在工作站中还是在个人计算机中,OpenGL 图库都被当做是实际的标准库。对于任何一个对计算机图形感兴趣的人来说,本章基本上可以当做一个很好的介绍性章节。第4章回顾了大部分计算机绘图系统提供的基本命令,与第3章相同的是,这一章针对产品文档介绍了一般性概念和功能,它们适用于大部分计算机绘图系统。但是,本章所应用的示例命令都是 AutoCAD 中的命令,因为 AutoCAD 是目前最流行的绘图系统;某个具体系统的使用方法可以通过实验课掌握,以作为本课程的补充。

第5章介绍了几何造型系统的基本原理,也介绍了一种非流形造型系统,这是一个新兴的几何造型领域。对于学生来说某些内容太深,本书将其在附录中列出来以供专业人员参考。对于那些只对使用几何造型系统感兴趣的人来说,这些内容可以忽略。第6章、第7章涵盖了曲线和曲面的表示及处理方法。这些内容为几何造型甚至计算机辅助绘图系统奠定了数学基础。在能够满足大多数学生使用要求的同时,笔者已尽可能地压缩了曲线和曲面类型的内容。为了不使学生们迷惑,笔者已经把这些复杂的数学推导从正文移到了附录,并且已尽最大可能从工程技术人员的角度,而不是从数学研究者的角度解释了这些数学概念。

第8章介绍了 CAE 系统,阐述了有限元分析程序是如何生成的,以及有限元分析程序所必需的信息是如何从 CAD 系统所生成的几何模型中获得的,回顾了各种有限元自动生成方法。第9章回顾了最优化的各种技术,详细介绍了新兴的各种最优化技术,如模拟退火算法和遗传算法。一个有限元分析和最优化相结合的实例就是相当新的结构优化概念。结构优化可以用于零件最初的概念设计,以确保它具有所期望的承载能力。

第10章介绍了作为 CAD/CAM 集成的关键技术,各种工艺过程的设计方法和软件,还介绍了成组技术的概念。成组技术能够实现零件编码,这也是自动工艺过程设计的先决条件。第11章描述了当一个部件的形状被 CAD 系统定义且加工方法被确定之后,如何针对数控机床编制数控加工程序。第12章介绍了一种新兴的制造技术,即快速原型,它被看做是计算机辅助制造的另一个方向。与在数控机床上进行的生产不同,在不需要复杂的工艺过程设计的情况下,这种技术可以直接利用 CAD 模型生成一个零件。实际上,这种技术第一次完全实现了自动化的 CAD/CAM。第13章介绍了另一种新兴技术,即虚拟工程。在这种方法中,几何造型系统、计算机图形学、CAE 和 CAM 系统都被用于产品的开发过程中。

第14章叙述了几种标准数据文件格式,这些数据文件格式允许不同的系统进行通信,它们对 CAD/CAM/CAE 系统的集成是不可缺少的。

本书的每一章都以一系列的问题或编程任务结束,这样做的目的是为了加深学生对本书内容的理解,其中一些题目要求学生采用自己的系统。在这种情况下,这些系统的文件可以当做本书内容的补充来使用。

像前面提到的那样,本书可以用做水平较低的本科生课程的教材。若是这样,附录部分的内容就可以忽略,因为这部分是从系统开发者的角度来讲的。相反,笔者建议把重点放在与 CAD/CAM/CAE 系统应用相关的工程上,这些工程包括实体建模、相应图纸的绘制、设计结果的有限元评估,以及用数控铣床或其他快速成型机(如激光快速成型机)生成相应的原

型。若本书用于研究生的高级几何造型课程，则第 1 章、第 2 章、第 4 章以及第 14 章可以当做阅读任务，并且读者需要重视附录中的内容。

笔者非常感谢审阅者提出的意见和建议，这些建议毫无疑问提高了本书的质量。在此，笔者非常感谢麻省理工学院的 David C. Gossard 教授，在此书的规划过程中，David C. Gossard 教授给予了非常重要的建议。同时，也要感谢 Kyung Ho Cho 教授、Young IL Kim 教授、Jongwon Kim 教授、Woncheol Choi 博士、Ha-Yong Shin 博士、Suk Ju Kim 先生和 Jin Pyung Chung 先生，感谢他们在最优化、虚拟工程、工艺过程设计、标准数据文件方面提供的相关材料。最后，感谢我的学生，特别是 Junghoon Hur 和 Inhaeng Cho，感谢他们帮助笔者整理了本书的手稿和插图。

目 录

第 1 章 CAD/CAM/CAE 系统导论	1
1.1 概述	1
1.2 CAD, CAM 和 CAE 的定义	4
1.3 通过数据库集成设计和制造——情景描述	6
1.4 用 CAD/CAM/CAE 系统进行产品开发——应用实例	8
习题	11
第 2 章 CAD/CAM/CAE 系统的组成	13
2.1 硬件组成部分	13
2.2 硬件配置	19
2.3 软件组成	20
2.4 基于 Windows 的 CAD 系统	23
习题	25
第 3 章 图形编程的基本概念	26
3.1 图形库	26
3.2 坐标系	27
3.3 窗口与视区	32
3.4 基本输出实体	35
3.5 图形输入	39
3.6 显示列表	40
3.7 变换矩阵	41
3.8 隐藏线和隐藏面的消隐	50
3.9 渲染	54
3.10 图形用户界面	59
3.11 X 窗口系统	60
习题	61
第 4 章 计算机辅助绘图系统	64
4.1 绘图设置	64
4.2 基本的绘图功能	67
4.3 标注功能	70
4.4 实用功能	71
4.5 图形文件的兼容性	73

习题	74
第 5 章 几何建模系统	80
5.1 线框建模系统	80
5.2 表面建模系统	81
5.3 实体建模系统	82
5.4 非流形建模系统	111
5.5 装配建模	113
5.6 基于 Web 的建模	117
习题	117
第 6 章 曲线的表示与处理	120
6.1 曲线方程的类型	120
6.2 圆锥曲线	121
6.3 Hermite 曲线	124
6.4 Bezier 曲线	126
6.5 B 样条曲线	131
6.6 非均匀有理 B 样条曲线	139
6.7 插值曲线	144
6.8 曲线的求交	149
习题	150
第 7 章 曲面的表示与处理	153
7.1 曲面方程的类型	153
7.2 双线性曲面	153
7.3 COON 曲面	154
7.4 双三次曲面	156
7.5 Bezier 曲面	158
7.6 B 样条曲面	162
7.7 NURBS 曲面	164
7.8 插值曲面	168
7.9 曲面的求交	170
习题	171
第 8 章 有限元建模与分析	174
8.1 有限元分析概述	174
8.2 有限元方法的表达式	176
8.3 有限元建模	187
8.4 网格自动生成	189

8.5 应用实例	201
习题	206
第 9 章 优化设计	209
9.1 优化问题的数学描述	209
9.2 约束条件的处理	210
9.3 搜索方法	214
9.4 模拟退火	216
9.5 遗传算法	222
9.6 结构优化	227
习题	232
第 10 章 CAD 和 CAM 的集成	233
10.1 离散零件生产循环	233
10.2 工艺设计	234
10.3 计算机辅助工艺设计系统	241
10.4 成组技术	244
10.5 产品数据管理系统	253
习题	254
第 11 章 数字控制	257
11.1 概述	257
11.2 数控机床的硬件配置	258
11.3 数控系统的分类	259
11.4 NC, CNC 和 DNC	259
11.5 零件编程的基本概念	261
11.6 手工编程	266
11.7 计算机辅助零件编程	270
11.8 由 CAD 数据库的零件编程	284
习题	301
第 12 章 快速原型制造	305
12.1 概述	305
12.2 RP&M 过程	306
12.3 RP&M 的应用	316
12.4 光固化成型过程	329
12.5 RP&M 的软件技术	341
习题	346

第 13 章 虚拟工程	348
13.1 虚拟工程的定义	348
13.2 虚拟工程的组成部分	349
13.3 虚拟工程的应用	352
13.4 相关技术	354
13.5 虚拟设计的工业应用	355
13.6 软件产品	357
13.7 硬件产品	361
13.8 虚拟工程的研究课题及挑战	364
习题	365
第 14 章 不同系统之间的通信标准	366
14.1 产品定义数据的交换方法	366
14.2 初始图形交换规范	367
14.3 绘图交换格式	372
14.4 产品数据交换标准	372
习题	375
附录 A 半边数据结构的实现	376
附录 B 翼边数据结构的实现	378
附录 C 欧拉运算符	380
附录 D 实现布尔操作的算法	391
附录 E 非流形建模系统的数据结构和拓扑操作	396
附录 F de-Casteljau 算法	402
附录 G 用 Cox-de Boor 方法求 B 样条曲线	404
附录 H B 样条曲线的合成	408
附录 I B 样条微分方程的证明	410
附录 J NURBS 曲面求交的 Peng 方法	413
附录 K 由控制微分方程建立 FEA 系统方程	416
附录 L 基于 Windows 的 CAD 系统比较	420
参考文献	424
索引	434

第 1 章 CAD/CAM/CAE 系统导论

1.1 概述

工业企业必须不断开发出具有高质量 (Quality, Q)、低成本 (Cost, C)、上市快 (Delivery, D) 的新产品, 才能在国际竞争中生存和发展。因此, 他们借助于计算机强大的存储能力、快速的处理速度和交互式界面友好的图形能力, 实现复杂的、离散的工程设计或生产任务的自动化和集成化开发, 以缩短产品开发的周期和降低生产的成本。计算机辅助设计 (Computer-Aided Design, CAD)、计算机辅助制造 (Computer-Aided Manufacturing, CAM) 和计算机辅助工程 (Computer-Aided Engineering, CAE) 就是在产品周期中实现这一目的的技术。为了理解 CAD, CAM 和 CAE 在生产中所起的作用, 我们需要先看一看在产品设计和制造过程中必须完成的各种活动和功能, 所有这些活动和功能构成了一个产品周期。这里, 采用 Zeid[1991]对产品周期进行描述, 我们只进行了稍微的修改, 如图 1.1 所示。

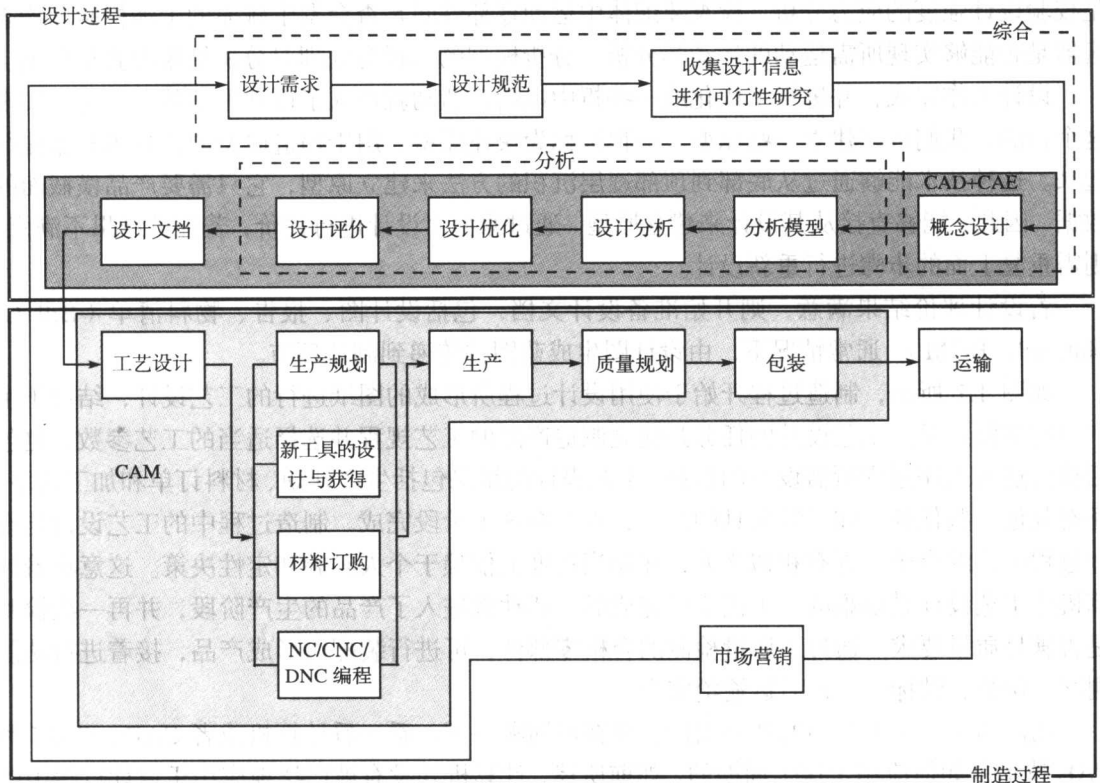


图 1.1 产品周期

在图 1.1 中, 正如实线框所示, 产品周期由两个主要过程构成: 设计过程和制造过程。

通常,设计过程开始于由市场部门确定的客户需求,结束于产品的完整描述,这种描述通常是工程图纸的形式。制造过程开始于产品设计规范,结束于实际产品的运输出厂。

设计过程包含的活动大致可以分为两类:综合和分析。如图 1.1 所示,最初的设计活动(例如,市场需求的识别、设计细节的陈述、用所收集的有关设计信息进行可行性研究和概念化设计等)都属于综合子过程中的不同部分,也就是说,综合子过程的结果是对预期产品的概念设计,其形式是一个设计草图或布局图,用以表示产品各组成部分之间的关系。在产品周期阶段,要确定产品的主要功能和制造该产品所需的主要资金投入。在综合子过程,所产生和处理的大多数信息都是定性的,因此,难以用计算机系统进行处理。

概念设计完成后,活动就进入了分析子过程,这时,我们需要对设计进行分析和优化。因为分析子过程使用的是模型而不是设计本身来进行分析,所以,要进入分析子过程,首先要推导并建立分析模型。尽管工程领域计算机系统的功能发展迅速,且有很多选择,但是在可以预见的将来,抽象的分析模型仍然是需要的。我们可以通过删除设计中不必要的细节、减少维数、识别并使用对称等方法建立分析模型。例如,减少维数意味着可以用一个具有厚度属性的等价面来表示一块薄片材料,或者可以用一条具有截面属性的线来表示一块细长板。在几何形状和载荷上具有对称性的物体,通常考虑模型的一部分,用这一部分进行分析。事实上,当在初等力学课程中分析一种结构时,读者已经自然而然地对这样一个抽象过程进行了实践。回想一下就可知道,我们在进行确切分析之前都是从画结构简图开始的。典型分析是校验设计强度的应力分析、检查装配体中运动零部件间是否会发生碰撞的干涉检验和检查机器是否能够实现所需运动的运动学分析。分析模型的选择与处理对分析结果有直接影响。

设计工作完成,并进行了优化或一些折中以后,活动就进入了设计评估阶段。为了实现这个目的,我们可以建立一些原型。一种被称为快速原型、用于构造原型的新技术开始流行起来。这种技术能够通过从底部到顶部逐层沉积的方法来建立原型,它只需要产品横截面的数据,因此,能够直接从其设计来建立原型。通过原型对设计进行评价,若评价结果不满意,则需重复上面的步骤进行重新设计。

若设计评价结果满意,则开始准备设计文档,包括设计图、报告、物料清单(Bill Of Material, BOM)。通常情况下,由设计图生成蓝图并传递到制造环节。

如图 1.1 所示,制造过程开始于使用设计过程所形成的图纸进行的工艺设计,结束于生产出的实际产品。工艺设计的任务是建立制造产品的工艺规程并选择适当的工艺参数,也包括执行这些工序过程所需设备的选择。工艺设计的结果包括生产计划、材料订单和加工程序。还有其他一些任务,如工装夹具的设计,也要在这个阶段完成。制造过程中的工艺设计与设计过程中的综合子过程有相似之处,在相当程度上依赖于个人经验和定性决策。这意味着计算机化工艺设计是困难的。工艺设计完成后,活动就进入了产品的生产阶段,并再一次检测是否满足质量要求。通过了质量检测的合格零部件,可进行装配以形成产品,接着进行功能测试、包装、贴标签,最后运输给客户。

我们描述了一个典型的产品周期,现在可回顾一下,看一看计算机或者 CAD, CAM 和 CAE 技术是如何应用于这个周期的。如前所述,计算机并没有被广泛地应用于设计过程中的综合分析阶段,这是因为计算机不能很好地处理定性信息。然而,在综合子过程中,设计人员可以使用商品化数据库来收集用于可行性研究的相关设计信息和产品目录信息。

因为计算机还不是一个在智能化创造性过程中功能很强的工具,因此,很难想像如何将计算机应用于产品设计的概念化阶段。计算机可以有效地通过自然法则生成各种概念设计,从而对这一阶段做出贡献。计算机辅助绘图或几何建模的参数建模功能或宏编程功能对这项任务是有用的,这些软件包就是典型的 CAD 软件。读者可以将一个几何建模系统想像为一个二维绘图系统的三维等价系统,也就是说,它是一个软件包,在这个软件包中,操作处理的是三维形状而不是二维图形。我们将在第4章讨论计算机辅助绘图、在第5章讨论几何建模的有关内容。

计算机可以在设计过程的分析子过程中大显身手。事实上,已有许多应用于应力分析、干涉检验和运动学分析的软件包,这些软件包都可以归类为 CAE。应用这些软件包面临的一个问题是必须提供分析模型。若分析模型能够自动地从概念设计中导出,这就不再成为一个问题。但是,正如前面所解释的,分析模型不同于概念设计,是在概念设计中消除一些不必要的细节或者通过减少维数来获得的。消除信息或减少维数的程度依赖于分析的类型和所期望的精度,因此,自动地进行这一抽象过程是困难的,通常情况是单独建立分析模型。普遍的做法是通过使用计算机辅助绘图系统或几何建模系统,有时也使用嵌入在分析软件包中的建模功能,来建立一个设计的抽象模型。分析软件包通常用相互连接的网格的集合来表达感兴趣的结构,这些网格将问题划分为计算机便于处理的不同部分。若所使用的分析软件包具有网络自动划分功能,则我们只需要创建抽象边界形状,否则,用户就必须通过交互的方式生成网格,或通过使用适当的软件自动生成网格。生成网格的活动被称为有限元建模。有限元建模也包括确定边界条件和外部载荷。

分析子过程可以嵌入到优化设计的优化迭代过程中,寻找最优解的各种算法已被开发出来,而且许多最优化程序也已经商品化。可以认为,最优化程序是 CAD 软件的一个组成部分,但是,单独处理优化过程会更自然一些。

计算机的使用也使设计评价变得更加容易。若需要一个原型来评价设计,我们可以使用软件包自动生成驱动快速原型机的程序,再用该程序驱动快速原型机,生成一个给定设计的物理原型。这些软件包归类为 CAM 软件。当然,要制作原型的形状首先应以数据的形式存在,对应形状的数据是由几何建模系统生成的。现有的快速原型技术将在第12章中介绍。尽管可以通过快速原型技术很方便地制作原型,但是,若我们能够使用虚拟原型,那就更好了。虚拟原型通常也称之为数字样机,它也可以提供同样有价值的信息。

随着数字样机分析工具功能的增强,通过数字样机得到的分析结果与通过实物原型得到的实验结果具有同样的精确度。数字样机会代替实物原型进行实验。因为虚拟现实技术^①可以使我们通过数字样机得到与实物原型同样的感觉,所以这种趋势是明显增加的。建立数字样机的活动被称为虚拟原型建模。虚拟原型可以用特定的几何建模系统来生成。虚拟原型建模的详细介绍将在第13章中进行。

设计过程的最后一个阶段是编写设计文档。在这个阶段,计算机辅助绘图系统是一个非常有用的工具,计算机绘图系统的文件处理功能也允许系统化地存储和导出设计文档。

计算机技术也应用于制造过程。制造过程包括工艺设计、新工具的设计与采购、材料的

^① 虚拟现实是一项让图形看起来像实物的技术。该项技术能够使操作者像操作实物一样操作图形。

订购、数控 (Numerical Control, NC) 编程、质量控制、包装等一系列活动, 如图 1.1 所示。所有用于这些活动的计算机技术都归类为 CAM。例如, 用于工艺设计工作的计算机辅助工艺设计 (Computer-Aided Process Planning, CAPP) 软件就是 CAM 软件的一种。正如前面提到的, 工艺设计难以自动完成, 所以 100%自动化的 CAPP 软件现在还没有。但是, 现在有许多通过生成数控程序来驱动数控机床的优秀软件包。若一个形体的数据已存在于计算机中, 这类机床就可以加工出这个给定的形体, 这类似于驱动快速原型机。数控编程将在第 11 章中介绍。此外, 用于机器人搬运零部件或从事制造活动的编程软件包、用于检测产品的坐标测量机的编程软件包也属于 CAM 软件。

到目前为止, 读者应该对如何将计算机技术应用于产品周期中, 以及 CAD/CAM/CAE 可以使哪些工作变得容易有了一定的认识, 在下一节中我们将定义这些技术。

1.2 CAD, CAM 和 CAE 的定义

正如上一节所描述的, 计算机辅助设计 (CAD) 是在产品开发过程中使用计算机系统辅助产品创建、修改、分析和优化的有关技术[Groover 和 Zimmers 1984]。这样, 任何嵌入了计算机图形学的计算机程序和在设计过程中使工程设计变得容易的应用程序, 都归类为 CAD 软件。换言之, CAD 工具包括了从创建形体的几何建模工具到诸如分析、优化应用程序的所有工具[Zeid 1991]。目前可以使用的典型工具包括公差分析、质量属性计算、有限元建模和分析结果的可视化。CAD 最基本的功能是定义设计的几何形状, 这里所说的设计可以是机械零件、建筑结构、电子电路和建筑平面布局等的设计, 这是因为设计的几何形状是产品周期中后续各项工作的基础。计算机辅助绘图系统和几何建模系统典型地应用于这一目的, 这也是为什么这些系统被称为 CAD 软件的原因。此外, 这些系统所建立的几何模型是执行后续 CAE 和 CAM 中其他功能的基础, 这是 CAD 最大的优点之一, 因为它可以节省重新定义几何形状所需的大量时间, 也可以减少因此而造成的出错概率。因此, 我们说计算机辅助绘图系统和几何建模系统是 CAD 中最重要的组成部分。

计算机辅助制造 (CAM) 技术是将计算机系统直接或间接地应用于计划、管理和控制生产作业的有关技术。CAM 最成熟的应用领域之一是数字控制, 或简称为 NC, 这种技术是使用可编程的指令来控制机床, 进行磨削、切割、冲压、成型、车削等作业, 将原材料加工成零件。目前, 计算机使用基于 CAD 数据库中的几何数据、加上由操作人员提供的有关信息, 可以生成大量的数控指令。CAM 的研究集中于最小化操作人员的交互工作。

CAM 另一个重要作用是机器人编程, 使机器人可以在加工单元内进行作业, 为数控机床选择刀具、定位工件等。这些机器人可以独立地完成诸如焊接、装配或在车间内搬运设备或零件的任务。

实现工艺设计自动化也是计算机自动化的一个目标, 当工件从车间的一个工作站运送到另一个工作站时, 工艺设计已经为它制定了从开始到结束所需的详细生产步骤。如前面所述, 完全彻底的工艺制定自动化是不可能实现的, 然而若一个零件的工艺已经制定的话就可以自动生成与这个零件相似的工艺。将相似零件归为一类的成组技术, 可以实现这个目的。若这些零件有诸如沟槽、斜面、孔等常见制造特征, 就可以把它们归为不同的类。因此, 为了能够自动地检索到具有相似特征的零件, CAD 数据库中必须包含这些特征信息, 基于特征的建

模技术或特征识别技术可以完成上述任务。基于特征的建模和特征识别将在第5章中介绍, 成组技术将在第10章中介绍。

此外, 计算机还可以用来决定什么时间订购原材料和零件, 以及订购多少以完成生产计划, 称之为物料需求计划 (Material Requirements Planning, MRP)。计算机也可以用来监视车间中机器的工作状态, 并给它们发出适当的指令。

计算机辅助工程 (CAE) 是使用计算机系统来分析 CAD 几何模型, 允许设计者模拟并研究产品的行为, 以便进行改进和优化产品设计。有许多用于分析工作的 CAE 工具可供选择, 例如, 运动学程序可用来确定机构中的运动路径和连杆速度, 大位移动力学分析程序可用来确定诸如汽车这样复杂装配体中的载荷和位移, 逻辑时序和验证软件可用来模拟电子电路的运行。

最为广泛应用的计算机辅助分析是有限元方法 (Finite Element Method, FEM)。这种方法被用来确定应力、变形、热传递、磁场分布、流体流动和其他方法无能为力的连续域问题。在有限元分析中, 用一些相互连接的单元构成分析模型来表示结构, 这些单元把问题划分成了计算机容易处理的不同部分。

如前面所述, 有限元方法需要一个适当抽象的抽象模型, 而不是产品几何模型本身。这个抽象模型不同于产品几何模型, 抽象模型是通过消除几何模型中一些不必要的细节或通过减少维数而得到的。例如, 当一个厚度很薄的三维实体转换为分析模型时, 它就变成了一个二维的壳体模型 [Armstrong 1994]。因此, 为了应用有限元方法需要交互地或自动地生成一个抽象模型。一旦抽象模型生成, 将用抽象模型来生成有限单元网格。能够构建抽象模型、并且生成有限单元网格的软件工具称之为预处理器或前处理器。在对每一个有限单元网格进行分析之后, 计算机集成分析结果, 并进行可视化显示。例如, 应力大的区域可以用红色显示。这种可视化显示的软件工具称之为后处理器。有限元分析方法将在第8章中介绍。

有许多优化设计软件工具可供选择。尽管优化设计软件属于 CAE 工具, 但是, 它们通常单独列为一类。可以将优化设计和分析工具集成, 以自动地确定设计形状 [Bendsoe, 1992]。在这些方法中, 先假定原始设计形状是一个简单的形状, 如一个由不同密度的小单元组成的二维矩形, 然后执行优化程序计算满足应力约束条件下这些密度的最佳值, 以达到一定的优化目标。优化目标通常是重量最小的。对于基于密度的最优化来说, 产品最优化形状可以通过消除低密度单元来获得。最优化技术将在第9章中介绍。

设计分析和最优化的优点是, 它可以使工程师在进入到期时、费钱的制造和测试物理原型之前, 了解产品将是如何工作的, 以及发现产品设计中的缺陷。因为产品研发过程的后期阶段, 工程成本是呈指数增长的, 所以, 早期使用 CAE 分析进行改进和优化, 可以大大减少整个产品开发过程的时间和费用。

由此可见, CAD, CAM 和 CAE 是自动完成产品周期中指定任务, 并使工作更有效的技术。因为这些系统是独立开发的, 所以没有充分认识到将产品周期中设计和制造活动集成起来的需求。为了解决这一问题, 提出了一种称为计算机集成制造 (Computer Integrated Manufacturing, CIM) 的新技术。CIM 的目标是把一个个单独的自动化孤岛集成为一个连续平滑运行的高效系统。CIM 通过使用计算机数据库使整个企业高效运行, 并且对财务、报表、运输和其他管理功都有很大的影响, 是对 CAD, CAM 和 CAE 工程设计和生产功能的补充。通常情况下 CIM 被认为是经营哲理, 而不是计算机系统。本书不对 CIM 这方面的内容进行阐述。