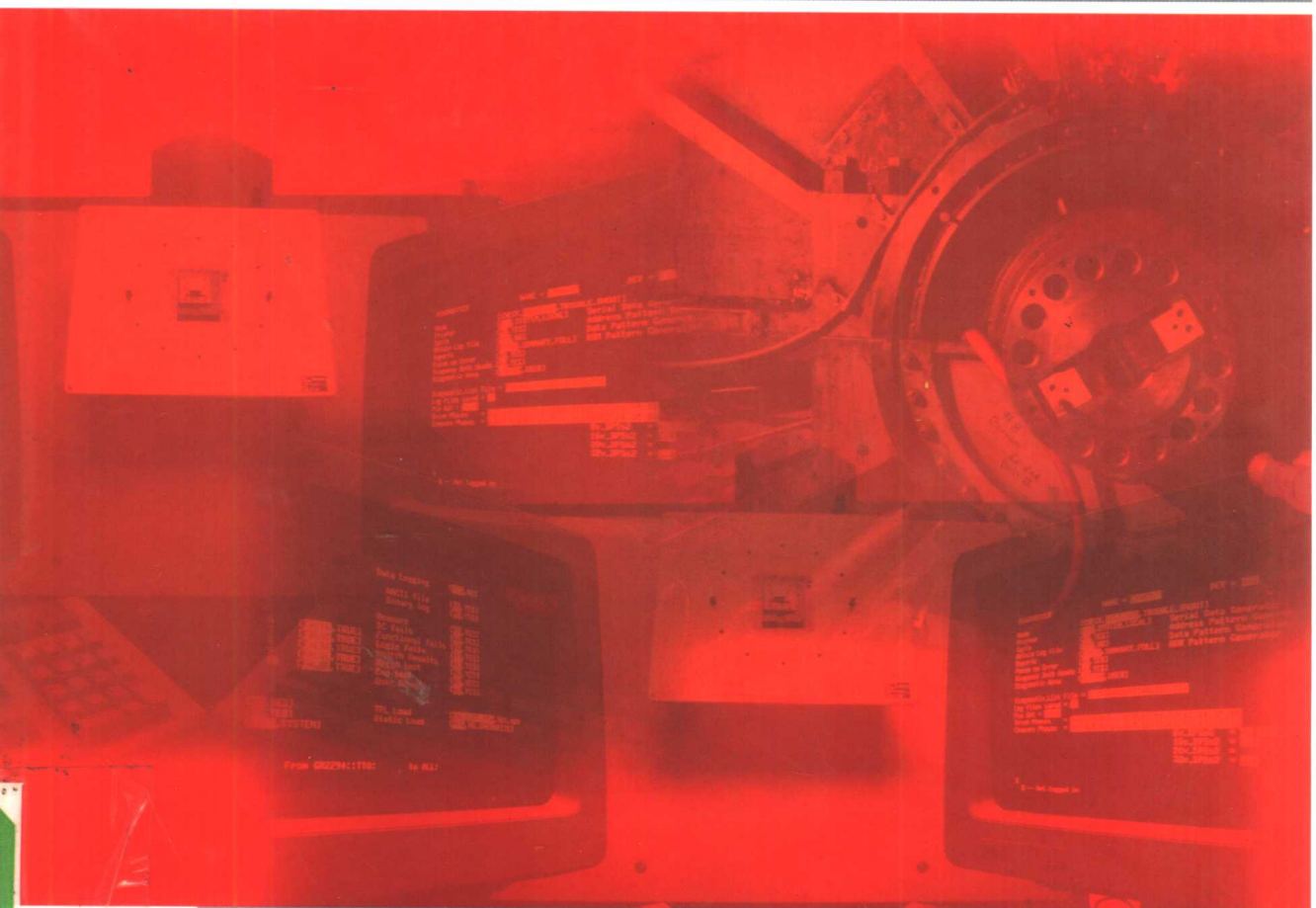


机械 CAD/CAM 技术、 应用与开发

王贤坤 主编

王贤坤 陈淑梅 陈亮 编



机械工业出版社
China Machine Press

机械 CAD/CAM 技术、 应用与开发

王贤坤 主编

王贤坤 陈淑梅 陈亮 编



机械工业出版社

源于 20 世纪 50 年代的 CAD、CAM 技术现已发展成为一个新型的高新技术产业。CAD/CAM 技术的应用越加深入与广泛。本着系统性、先进性、实用性以及可仿性相结合的原则,本书系统地介绍了机械 CAD/CAM 技术基础知识及其应用实例与开发方法等。全书分为四篇。第一篇介绍机械 CAD、CAE 技术等方面的基础知识;第二篇介绍机械 CAM 技术的基础知识,包括 CAPP 技术原理、NC 编程、CAQ 以及 CAD/CAM 集成技术等;第三篇介绍机械 CAD/CAM 技术的工程应用,包括, CAD/CAM 系统规划、选型以及应用实例;第四篇介绍机械 CAD/CAM 应用软件开发技术,包括软件工程方法与开发模型、软件技术及其应用、CAD/CAM 软件开发环境与开发工具的选择以及编程实例。

本书可作为从事机电产品设计制造的工程技术人员以及管理干部的继续教育,机械 CAD/CAM 技术的初级用户,大专院校的高年级的机类本专科学生、研究生的教学用书,也可作为机械 CAD/CAM 高级用户和机械 CAD/CAM 软件开发人员的学习用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械 CAD/CAM 技术、应用与开发/王贤坤主编. —北京:

机械工业出版社, 2000. 11

ISBN 7-111-08566-3

I. 机… II. 王… III. ①机械设计: 计算机辅助设计②
机械制造: 计算机辅助制造 IV. ①TH122②TH164

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 76902 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 钱飒飒 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张莉娟

封面设计: 方 芬 责任印制: 郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 2 月第 1 版·第 2 次印刷

1000mm×1400mmB5·11.5 印张·443 千字

3 001—6 000 册

定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

源于 20 世纪 50 年代的机械 CAD/CAM 技术已发展为一种高新技术产业,并得到迅速发展。该技术的广泛应用,给一切设计/制造领域带来了革命性的变化。因而被评为 20 世纪最杰出工程技术成就之一的高技术。在 21 世纪,其影响仍是深远的。机械 CAD/CAM 技术的研究、开发、推广应用水平已是衡量一个国家的科技现代化和工业现代化的重要标志之一。

机械 CAD 应用工程、CIMS 应用工程的意义不仅在于使 CAD、CIMS 技术在企业中得到推广普及,更重要的是它已经成为推动我国制造业信息化的一条有效途径。为此,我国党和国家的领导人十分重视机械 CAD/CAM 技术的发展与应用。1991 年 4 月,江泽民主席对应用 CAD 技术的意义作了十分精辟的论述:“计算机辅助设计推动了几乎一切领域的革命……”。1992 年,经国务院批准,由国家科委牵头成立了全国 CAD 应用工程协调领导小组,开始在全国组织实施 CAD 应用工程。《1999~2000 年我国 CAD 应用工程发展纲要》的制定,对加速我国机械 CAD/CAM 技术应用的发展具有深远的影响。目前,机械 CAD/CAM 技术的推广应用已成燎原之势。面对进入 WTO 所带来的挑战与机遇,企业对机械 CAD/CAM 技术是企业技术创新、开拓市场中不可缺少的技术手段、先进制造技术与系统的核心技术的认识更加深刻,而且对该技术的引进、消化和应用开发以及相应的人才的需求也更加迫切。因此,机械 CAD/CAM 已是工科类学生和工程技术人员需要掌握的一门技术。

在机械 CAD/CAM 技术研究、开发与推广应用过程中,需要各种人才,他们对机械 CAD/CAM 技术知识掌握的深度、广度是不一样的。为了满足他们的不同需要,本书对机械 CAD/CAM 技术在知识体系上做了调整,即采用模块化组织该技术知识,以便于在教与学中组织与取舍。

随着机械 CAD/CAM 技术的不断发展,其内延和内涵也在不断变化,本书力争做到系统性、完整性、先进性和实用性。

书中第一篇至第三篇的内容适合初级学员、接受继续教育和机械 CAD/CAM 技术培训的人员,包括大专以上的机类专业和近机类专业技术人员和管理干部,学时可设为 50~55 学时;大学本科高年级学生、研究生要掌握全书内容,需要 60~65 学时;而机械 CAD/CAM 软件系统集成与开发人员、企业和科研院所的机械 CAD/CAM 高级用户,需要掌握第一篇、第二篇和第四篇的内容,一般需要 50~55 学时。掌握全书知识需要具备如下预备知识:计算机辅助绘图、计算机程序语

言、机械设计、有限元方法、机械制造工艺学等机类专业基础知识与专业知识等。

本书共四篇十六章。第一篇、第二篇介绍机械 CAD 和 CAM 技术基础知识；第三篇介绍机械 CAD/CAM 技术的应用工程；第四篇介绍机械 CAD/CAM 技术的开发技术与方法。其中，王贤坤编写第一篇、第二篇和第四篇中的第十三章、第十四章及附录，陈淑梅编写第三篇，陈亮编写第四篇的第十五章和第十六章。王贤坤担任主编，负责全书的统稿。

本书中，引用了参考文献中的内容，值此对这些被引用的文献作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限和时间仓促，书中不足之处，敬请读者批评指正。

作者

2000 年 7 月

目 录

前言

第一篇 机械 CAD 技术 (机械 CAD/CAM 技术基础知识之一)

第一章 CAD 技术概述	1
第一节 传统的机械产品设计过程	1
第二节 机械产品 CAD 过程	2
第三节 CAD 技术的发展过程	5
第二章 图形处理 机械产品建模技术及其支撑系统	11
第一节 二维图形变换	11
第二节 三维图形变换	16
第三节 参数化设计原理	25
第四节 几何造型与特征建模技术	35
第三章 计算机辅助工程设计分析	46
第一节 动态设计技术与有限元分析	46
第二节 优化设计方法	54
第三节 可靠性设计方法	59
第四节 计算机仿真技术	62
第四章 CAD 技术的发展趋势	66
第一节 集成化	66
第二节 面向先进制造技术的 CAD 技术的发展	66
第三节 智能化	67
第四节 并行工程	68
第五节 网络化	69
第六节 虚拟设计技术	69

第二篇 机械 CAM 技术 (机械 CAD/CAM 技术基础知识之二)

第五章 CAM 技术概述	71
第一节 机械制造系统概念及其组成	71
第二节 计算机控制制造系统的层次结构	72
第三节 机械制造系统自动化的变化与发展	73
第四节 计算机辅助制造的范畴与应用	75
第六章 计算机辅助工艺过程设计	77

第一节	概述	77
第二节	变异式 CAPP 系统	80
第三节	创成式 CAPP 系统	86
第四节	交互式 CAPP 系统	91
第五节	半创成式 CAPP 系统	93
第六节	智能化 CAPP 系统	94
第七节	计算机辅助夹具设计	99
第八节	计算机辅助装配工艺设计	103
第七章	数控加工编程方法	114
第一节	数控加工编程步骤与内容	114
第二节	手工编程方法	128
第三节	计算机数控自动编程方法	132
第四节	数控图形编程方法	139
第八章	计算机辅助生产管理系统	142
第一节	概述	142
第二节	计算机辅助生产管理系统构成、信息类型及数学模型	144
第三节	制造资源计划 MRP I	147
第九章	计算机辅助质量系统	158
第一节	自动化的质量系统对企业的战略作用	158
第二节	计算机辅助质量系统结构	159
第三节	计算机辅助质量系统的软硬件环境	165
第四节	基于客户机/服务器的计算机辅助质量系统简介	166
第五节	CAQIS 应用子系统简介	168
第六节	集成质量系统及其发展	170
第十章	机械 CAD/CAPP/CAM 系统集成技术	173
第一节	CAD/CAPP/CAM 集成技术概述	173
第二节	CAD/CAPP/CAM 集成数据管理	176
第三节	产品数据交换标准	183
第四节	CAD/CAPP/CAM 集成系统示例	189
第五节	基于 PDM 技术的集成方案	195

第三篇 CAD/CAM 技术的应用

第十一章	CAD/CAM 技术应用规划	197
第一节	CAD/CAM 一体化集成系统总体规划	197
第二节	CAD/CAM 支撑系统的选择	199
第三节	机械 CAD/CAM 的计算机网络环境	206
第十二章	CAD/CAM 技术应用实例	211
第一节	CAD/CAM 技术在各工业部门中的应用情况	211

第二节 CAD/CAM 技术在各工业部门中的应用实例	213
----------------------------------	-----

第四篇 机械 CAD/CAM 软件开发技术

第十三章 CAD/CAM 应用软件工程方法、开发模型与软件技术	254
第一节 机械 CAD/CAM 软件工程方法	254
第二节 机械 CAD/CAM 软件开发模型	272
第三节 CAD/CAM 软件技术原理概述	275
第十四章 机械 CAD/CAM 软件开发环境与工具的建立	279
第一节 机械 CAD/CAM 软件的二次开发的必要性	279
第二节 机械 CAD/CAM 软件的二次开发目标与内容	280
第三节 机械 CAD/CAM 软件的二次开发策略与方法	282
第四节 CAD/CAM 软件开发环境和工具选择	286
第五节 冲模 CAD 软件开发平台简介	289
第十五章 数据结构、数据库的设计与实现	292
第一节 三维几何造型中的数据结构	292
第二节 数据库的设计与实现	295
第三节 CAD/CAM 中设计资料的数据处理技术	303
第四节 应用接口设计	314
第十六章 CAD 系统开发应用实例	331
第一节 圆柱齿轮减速器的可靠性优化设计	331
第二节 基于特征参数化的齿轮减速器的设计	335
附录 A 基于软件工程的 CAD/CAM 应用软件组织与文档规范	342
附录 B 几个主要 CAD/CAM 软件的二次开发接口	347
附录 C 参数化造型技术与变量化造型技术比较	351
参考文献	356

第一篇 机械 CAD 技术（机械 CAD/CAM 技术基础知识之一）

第一章 CAD 技术概述

第一节 传统的机械产品设计过程

图 1-1 所示为传统的机械产品设计过程。其特点是：

(1) 它的每一个环节都是依靠设计者用手工方式来完成。从本质上来说，大都是凭借设计者直接的或间接的经验知识，通过类比分析法或经验公式来确定设计方案。对于特别重要的设计或计算工作量不太大的设计，有时也可对拟定的几个方案进行计算对比与选择。方案选定后按机械零件的设计方法设计零件或按标准选用零件，最后绘出整机及部件的装配图和零件工作图，编写技术文件，从而完成整机设计。

(2) 应用传统的机械设计方法，设计者的绝大部分时间和精力都耗费在装配图和零部件工作图的绘制（绘图工作约占设计时间的 70% 左右）上，因而对整机全局的问题难于进行深入的研究，对于一些困难而费时的分析计算，常常只得用作图法或类比定值等粗糙的方法，因此具有极大的局限性。这主要表现在：

1) 方案的拟定在很大程度上取决于设计者的个人经验，即使同时拟定了少数几个方案，也难以获得最优方案。

2) 在分析计算工作中，由于受人工计算条件的限制，只能采用静态的或近似方法而难以按动态的或精确的方法计算，计算结果未能完全反映零部件的真正工作状态，影响了设计质量。

(3) 设计工作周期长，效率低。

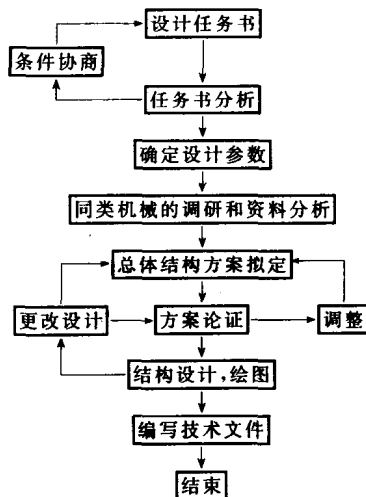


图 1-1 传统的机械设计过程

第二节 机械产品 CAD 过程

一、基本概念

CAD 是其英文名“Computer Aided Design”的首写字母的缩写，其中文名为“计算机辅助设计”。顾名思义，它是一种利用计算机辅助设计人员进行快速、高效、高质、低设计成本、方便地完成产品设计任务的现代设计技术。

CAD 技术思想起源于 20 世纪 50 年代末，美国麻省理工学院 SUTHERLAND 博士的研究工作。40 年来，CAD 技术已发展成为以“计算机技术”和“计算机图形学”为技术基础，并融合各工程学科知识（即各应用领域中的设计理论与方法）的一种高新技术。

二、CAD 技术原理

CAD 技术是通过计算机和 CAD 软件对设计“产品”进行分析、计算与仿真、产品结构和性能的调整与优化以及绘图，把设计人员所具有的最佳特性（创造性思维、形象思维与经验知识、综合判断与分析的能力）同计算机的强大记忆与检索信息能力，大量信息的高速精确计算与处理能力、易于修改设计、工作状态稳定且不疲劳的特性结合起来，从而大大提高了设计速度与效率，提高了设计质量，降低了设计成本。这里的“产品”一词，是指各行业中一切需要设计的对象，如航空/航天飞行器，汽车等地上行走的交通工具，机械与电子产品，水利水电工程、土木工程、建筑与城市规划工程，家具产品，服装产品，甚至是化学药品的分子结构等等。

三、CAD 系统的组成

一般来说，一个 CAD 系统由如下几部分组成：

(1) CAD 硬环境 计算机，计算机的外围设备 (I/O 设备)，有的还有网络通信环境等。

(2) CAD 软环境 操作系统，各种标准和支撑软件，有的还有网络通信软件等；

(3) CAD 软件 帮助设计人员去完成各种设计任务的计算机应用软件；

(4) 设计人员 与 CAD 系统的软硬件一起组成的能协同完成设计任务的人机系统。

四、机械产品 CAD 过程模型、功能与特点

1. 机械产品 CAD 过程模型 图 1-2 表示机械产品 CAD 过程模型，虚线以上为人工设计过程（见图中细实线部分），虚线以下为 CAD 方法（见粗实线部分）。

2. CAD 技术的功能与特点 20 世纪 90 年代的 CAD 技术与传统的手工设计手段【（笔+图板+笔擦+三角板+丁字尺+计算器等绘图和计算工具）】相比，具

有如下独有的功能与特点：

(1) 产品方案设计 设计人员接到产品开发任务书或用户的产品订单后，CAD 技术可以帮助设计人员进行产品的结构布局方案决策与优选。

(2) 产品/工程的结构设计与分析 设计人员在完成产品方案设计后，CAD 技术可以帮助设计人员进行产品结构及其组成部分的几何模型（二维或立体）设计与分析；可以进行手工无法进行的复杂计算及数据的整理与表达；并可以在计算机中便捷地进行产品结构的立体（三维）几何外形的设计与修改。工程技术人员能从多角度直观地观察产品结构的外部形态和颜色是否合理与美观。

(3) 产品的性能分析与仿真 设计人员在完成产品的结构设计和分析后，CAD 技术可以帮助设计人员进行产品结构工作过程/运动过程的仿真观察，对产品的性能进行计算分析，并将计算结果以直观的图形再现在设计人员面前，以便判断是否满足用户的要求，同时还提出修改意义。这些工作靠手工是无法进行的。

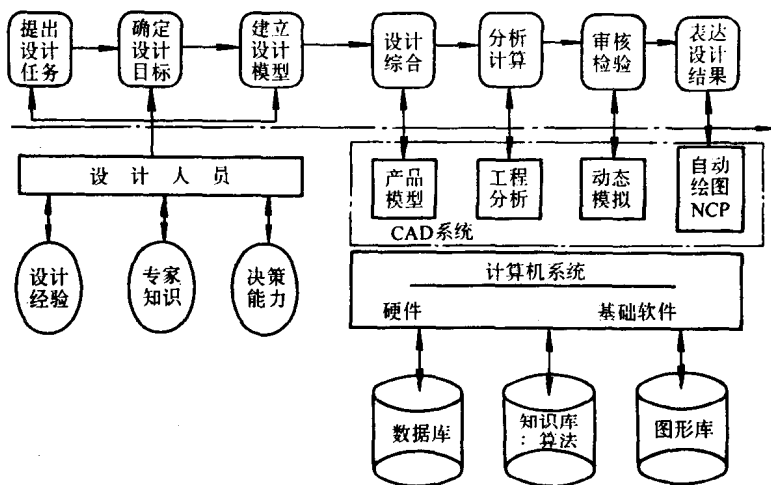


图 1-2 CAD 过程模型

(4) 对产品结构的可装配性的检查 设计人员在完成产品结构中的各组成部分设计后，可在计算机里将产品的各部分在计算机里进行模拟装配，以便观察产品设计的正确性和装配干涉等可装配性的检查。因而可保证产品各组成部分生产出来后的第一次装配成功。而这些工作是传统的手工设计手段所无法预先完成的。

(5) 自动生成产品的设计文档资料 设计人员通过CAD技术可以快速生成精确美观的产品设计文档资料，如产品的各组成部分（零部件）的工程图样、产品装配图图样。产品越复杂，越能显示CAD技术在完成这项工作的优点。并且，企业可以将所设计的产品数据样品（虚拟产品）资料通过国际互联网（Internet）送给世界各地的用户面前，进一步，还可以进行电子贸易等商务活动。同时，企业

还可以将所设计的虚拟产品的数据送向世界各地，实现动态联盟快速开发新产品的目的。而这些工作对传统手工设计手段而言，则难以有效实现。

(6) 设计文档的管理及产品数控 (NC) 加工仿真 设计人员完成产品上述各步骤的任务后，可以生成产品的数控加工指令 (NC) 文件，并在计算机里进行加工仿真，以检查产品的可加工性（例如是否会产生过切、干涉等现象）以及加工刀具轨迹的生成，从而保证实际加工时的一次加工成功。

随着 CAD 技术的发展，其功能还更加强大，对设计人员的帮助更大。它可以将产品的信息直接送到计算机辅助制造系统 (CAM)，并将部分信息送到计算机信息管理系统 (MIS) 等。

五、CAD 技术的应用效果

与不用 CAD 技术的传统手工设计相比，应用 CAD 技术，一般可以获得如下几方面的效益：

(1) 可量化的效益（表 1-1）

1) 缩短产品的设计周期。

2) 节省劳动力，提高工作效率。

3) 提高产品的设计质量，即一次性成功率提高、废品率下降，提高了产品的可靠性与寿命。

4) 降低产品的设计成本。

表 1-1 应用 CAD 技术的预期效果

指标项目	预期指标 (%)	指标项目	预期指标 (%)
节省劳动力	88.5	改进产品质量	39
节省时间	76	降低成本	23
促进标准化	52		

(2) 不可量化的效益

1) 有利于拓宽市场与国际接轨，可实现计算机网上商品贸易。

2) 提高产品的开发能力和与其他企业的合作能力。

3) 提高企业的技术创新和市场竞争能力。

4) 提高企业对市场的敏捷性（快速反映能力）。

六、应用 CAD 技术的必要性

(1) 企业要想提高产品开发能力和市场竞争能力以及扩大市场份额，则需要 CAD 技术的支持。由于 CAD 技术具有上述的优点，使得企业有能力快速地设计出更复杂、更精密，性能价格比更高的精品上市。这一点对于用与不用 CAD 技术，其效果是显然的。同时，企业要参与更大范围内的市场竞争，不用 CAD 技术是无法争得更大的市场份额，并且也无法中标。使用 CAD 技术有利于设计人员的创造

性能力的提高与发挥。

(2) 提高产品质量需要 CAD 技术的支持。不用 CAD 技术, 仅靠手工和计算机进行设计计算是无法设计出高质量的产品的, 尤其是设计中的许多复杂计算, 如有限元计算分析、产品的结构和性能的优化计算等, 应用 CAD 技术, 将可大大提高产品的设计效率。

(3) 企业内部结构优化和企业间的合作需要 CAD 技术的支持。由于 CAD 技术可以提高设计效率、节省劳力、使设计文档资料进行计算机化管理, 因而可以精减设计部门调整与优化管理的内部运行机制。同时, 与其他企业进行联合开发产品也需要 CAD 技术的支持。

(4) 企业的可持续发展需要 CAD 技术的支持。实践证明, 在瞬息变化的市场竞争中, 如果企业没有不断地开发和生产新产品, 企业是很难生存的, 更谈不上发展。因此, 在知识经济时代, 企业为了生存和可持续发展, 必须引入先进的设计技术, 必须提高企业的技术创新能力, 只有这样, 才能多快好省地、源源不断地向市场提供高附加值的产品, 使企业处于不败之地。

(5) CAD 技术是企业应用任何先进制造模式与技术系统所不可跨越的核心技术。因为任何产品都需要经过设计这个环节, 即使是反求工程 (仿制生产产品或称逆工程) 中, 也需要设计, 即不存在不设计的生产模式, 因此, CAD 技术是任何先进制造模式与技术系统 (FMS、CIMS、AMS 等) 所不可跨越的核心技术环节。

第三节 CAD 技术的发展过程

CAD 技术的纵向发展概况, 如图 1-3 所示。

一、第一次 CAD 技术革命——曲面造型系统

20 世纪 60 年代出现的三维 CAD 系统只是极为简单的线框式系统。这种初期的线框造型系统只能表达基本的几何信息, 不能有效表达几体数据间的拓扑关系。由于缺乏形体的表面信息, CAE 及 CAM 均无法实现。进入 20 世纪 70 年代, 飞机和汽车工业中遇到了大量的自由曲面问题, 随着法国人提出了贝赛尔算法, 使人们用计算机处理由线及曲面问题变得可行, 同时也使得法国达索飞机制造公司的开发者们, 能在二维绘图系统 CADAM 的基础上, 开发出以表面模型为特点的自由曲面建模方法, 推出了三维曲面造型系统 CATIA。它的出现, 标志着计算机辅助设计技术以单纯模仿工程图样的三视图模式中解放出来, 首次实现以计算机完整描述产品零件的主要信息, 同时也使得 CAD 技术的开发有了现实的基础。曲面造型系统 CATIA 为人类带来了第一次 CAD 技术革命, 改变了以往只能借助油泥模型来近似表达曲面的落后的工作方式。此时的 CAD 技术价格极其昂贵 (也许

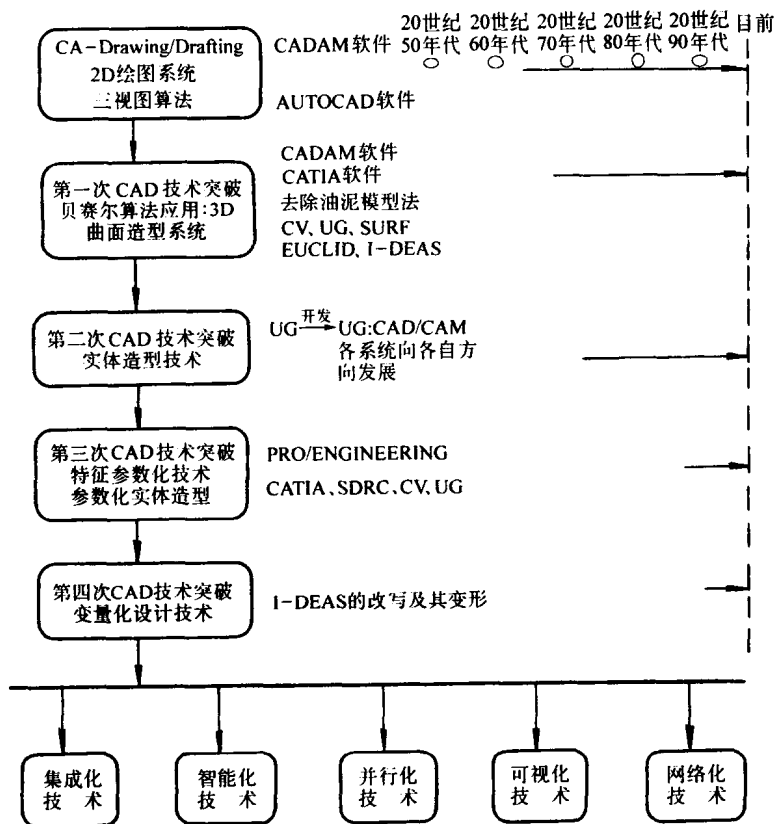


图 1-3 源于 20 世纪 50 年代末的 CAD 技术的发展

还有人记得,曾几何时,在国内租用一套 CATIA 的年租金即需 15~20 万美元),而且软件商品化程度低,开发者本身就是 CAD 用户,彼此之间技术保密。只有少数几家受到国家财政支持的军火商,在 20 世纪 70 年代冷战时期才有条件独立开发或依托某厂商发展 CAD 技术。例如: CADA 由美国洛克希德 (Lockheed) 公司开发; CALMA 由美国通用电气 (GE) 公司开发; CV 由美国波音 (GE) 公司开发; I-DEAS 由美国国家航空及宇航局 (NASA) 开发; UG 由美国麦道 (MD) 公司开发; CATIA 由法国达索 (Dassault) 公司开发。这时的 CAD 技术主要应用在军用工业。但受此项技术的吸引,一些民用主干工业,也开始摸索开发一些曲面系统,如: SURF 由大众汽车公司开发; PDGS 由福特汽车公司开发; EUCLID 由雷诺汽车公司开发; 另外还有丰田、通用汽车公司等也开发了自己的 CAD 系统。汽车工业开始大量采用 CAD 技术。

二、第二次 CAD 技术革命——实体造型技术

20 世纪 80 年代初, CAD 系统价格依然令一般企业望而却步,这使得 CAD 技

术无法拥有更广阔的市场。为使自己的产品更具特色，在有限的市场中获得更大的市场份额，以 CV、SDRC、UG 为代表的系统开始朝各自的发展方向前进。20 世纪 70 年代末到 20 世纪 80 年代初，由于计算机技术的大跨步前进，CAE、CAM 技术也开始有了较大发展。SDRC 公司在当时星球大战计划的背景下，由美国宇航局支持及合作，开发出许多专用分析模块，用以降低巨大的太空实验费用，同时在 CAD 技术方面也进行了许多开拓：UG 则着重在曲面技术的基础上发展 CAM 技术，用以满足麦道飞机零部件的加工需求；CV 和 CALMA 则将主要精力都放在 CAD 市场份额的争夺上。有了表面模型，CAM 的问题可以基本解决。但由于表面模型技术只能表达形体的表面信息，难以准确表达零件的其他特性，如质量、重心、惯性矩等，对 CAE 十分不利，最大的问题在于分析的前处理特别困难。基于对于 CAD/CAE 一体化技术发展的探索，SDRC 公司于 1979 年发布了世界上第一个完全基于实体造型技术的大型 CAD/CAE 软件——I-DEAS。由于实体造型技术能够精确表达零件的全部属性，在理论上有助于统一 CAD、CAE、CAM 的模型表达，给设计带来了惊人的方便。它代表着未来 CAD 技术的发展方向。实体造型技术的普及应用标志着 CAD 发展史上的第二次技术革命。CV 公司最先在曲面算法上取得突破，计算速度提高较大。由于 CV 提出了集成各种软件，为企业提供全方位解决方案的思路，并采取了将软件的运动平台向价格较低的小型机转移等有利措施，成为 CAD 领域的领导者。

三、第三次 CAD 技术革命——参数化技术

正当实体造型技术逐渐普及之时，CAD 技术的研究又有了重大进展。如果说在此之前的造型技术都属于约束自由造型的话，进入 20 世纪 80 年代中期，CV 公司提出了一种比无约束自由造型更新颖、更好的算法——参数化实体造型方法，该算法主要具有以下特点：基于特征、全尺寸约束、全数据相关、尺寸驱动设计修改。当时的参数化技术方案还处于一种发展的初级阶段，很多技术难点有待于攻克。由于参数化技术核心算法与以往的系统有本质差别，若采用参数化技术，必须将全部软件重新改写，投资及开发工作量必然很大。当时 CAD 技术主要应用在航空和汽车工业，这些工业中自由曲面的需求量非常大，参数化技术还不能提供解决自由曲面的有效工具（如实体曲面问题等），更何况当时 CV 的软件在市场上几乎呈供不应求之势，于是 CV 公司内部否决了参数化技术方案。策划参数技术的这些人在新思想无法实现时集体离开了 CV 公司，另成立了一个参数技术公司（Parametric Technology Corp. PTC），开始研制命名为 Por/ENGINEERR 的参数化软件。

20 世纪 80 年代末，计算机技术迅猛发展，硬件成本大幅度下降，CAD 技术的硬件平台成本从二十几万美元一下子降到只需几万美元，一个更加广阔的 CAD 市场完全展开，很多中小型企业也开始有能力使用 CAD 技术。由于他们设计的工

作量并不大,零件形状也不复杂,更重要的是他们无钱投资大型高档软件,因此他们很自然地把目光投向了中低档的 Pro/ENGINEER 软件。了解 CAD 市场的人都知道,它的分布几乎呈金字塔型。在高端的三维系统与低端的二维绘图软件之间事实上存在一个非常大的中档市场。PTC 在起家之初即瞄准这个充满潜力的市场,并获得了巨大的成功。进入 20 世纪 90 年代,参数化技术变得比较成熟起来,充分体现出其在许多通用件、零部件设计上存在的简便易行的优势。踌躇满志的 PTC 先行挤占低端的 AutoCAD 市场,致使在几乎所有的 CAD 公司营业额都呈上升趋势的情况下,Autodesk 公司营业额却增长缓慢,市场排名连续下挫;继而 PTC 又试图进入高端 CAD 市场,与 CATIA、SDRC、CV、UG 等群雄在汽车及飞机制造业市场逐鹿。目前,PTC 在 CAD 市场份额排名上已名列前茅。可以认为,参数化技术的应用主导了 CAD 发展史上的第三次技术革命。

四、第四次 CAD 技术革命——变量化技术

参数化技术的成功应用,使它在 20 世纪 90 年代前后几乎成为 CAD 业界的标准,但是技术理论上的认可并非意味着实践上的可行性。由于 CATIA、CV、UG、EUCLIDF 都在原来的非参数化模型基础上开发或集成了许多其他应用软件,包括 CAM、PIPINGT 和 CAD 接口等,在 CAD 方面也做了许多应用模块开发;重新开发一套完全参数化的造型系统困难很大,因为这样做意味着必须将软件全部重新改写,何况他们在参数化技术上并没有完全解决好所有问题。因此他们采用的参数化系统基本上都是在原有模型技术的基础上进行局部、小块的修补。考虑到这种“参数化”的不完整性以及需要很长的过渡时期,CV、CATIA、UG 在推出自己的参数化技术后,均宣传自己是采用复合建模技术,并强调复合建模技术优越性。这种把线框模型、曲面模型及实体模型叠加在一起的复合建模技术,并非完全基于实体,只是“主模型”技术的“雏形”,难以全面应用参数化技术。由于参数化技术和非参数化技术内核本质不同,用参数化技术造型后进入非参数化系统还要进行内部转换极易导致数据丢失或其他不利条件。这样的系统由于其在参数化技术的和非参数化技术上不具备优势,系统整体竞争力自然不高,只能依靠某些实用性模块上的特殊能力来增强竞争力。可是 30 年的 CAD 软件技术发展也给了我们这样一点启示:决定软件先进性及生命力的主要因素是软件基础技术,而非特定的应用技术。

1990 年以前 SDRC 公司已经摸索了几年参数化技术,当时也面临同样的抉择:要么它同样采用逐步修补方式,继续将其 I-DEAS 软件“参数化”下去,这样做风险小但必然导致产品的综合竞争力不高;要么就是全部改写。积数年对参数化技术的研究经验以及对工程设计过程的深刻理解,SDRC 的开发人员发现了参数化技术尚有许多不足之处。首先,“全尺寸约束”这一硬性规定就干扰和制约着设计者创造力及想象力的发挥。全尺寸约束,即设计者在设计初期及全过程中,必

须将形状和尺寸联合起来考虑，并且通过尺寸约束来控制形状，通过尺寸的改变来驱动形状的改变，一切以尺寸（即所谓的“参数”）为出发点。一旦所设计的零件形状过于复杂，面对满屏幕的尺寸，如何改变这些尺寸以达到所需要的形状就很不直观；再者，如在设计中关键形体的拓扑关系发生改变，失去了某些约束特征也会造成系统数据混乱。

事实上，全约束是对设计者的一种硬性规定。“一定要全约束吗？”“一定要以尺寸为设计的先决条件吗？”“欠约束能否将设计正确进行下去？”沿着这个思路，在对现有各种造型技术进行了充分的分析和比较以后，一个更新颖大胆的设想产生了。他们以参数化技术为蓝本，提出了一种比参数化技术更为先进的实体造型技术——变量化技术，作为今后的开发。SDRC 的决策者们权衡利弊，同意了这个方案，决定在公司效益正好之时，抓住机遇，从根本上解决问题，免留后患。于是，从 1990 到 1993 年，历经三年时间，投资一亿多美元，将软件全部重新改写，于 1993 年推出全新体系结构的 I-DEAS Master Series 软件。在早期出现的大型 CAD 软件中，这是唯一一家在 20 世纪 90 年代将软件彻底重写的厂家。众所周知，已知全参数的方程组去顺序求解比较容易。但在欠约束的情况下，方程联立求解的数学处理和软件实现的难度是可想而知的。SDRC 攻克的这些难题，并就此形成了整套独特的变量化造型理论和软件实现的难度是可想而知的。SDRC 攻克了这些难题，并就此形成了一整套独特的变量化造型理论及软件开发方法。

变量化技术既保持了参数化技术的原有优点，同时又克服了它的不足之处。它的成功应用为 CAD 技术的发展提供了更大的空间和机遇。无疑，变量化技术成就了 SDRC，也驱动了 CAD 发展的第四次技术革命。

总结约 40 年的 CAD 技术的发展历史，各阶段的主要技术特点为：

20 世纪 60 年代——二维、三维线框造型；

20 世纪 70 年代——自由曲面造型；

20 世纪 80 年代中期至今——基于约束的实体造型。

目前流行的 CAD 技术基础理论主要是以 Pro/E 为代表的参数化造型理论和以 SDRC/I-DEAS 为代表的变量化造型理论两大流派，它们都属于基于约束的实体造型技术。只有这两种理论是在近十年产生并且赢得了广泛的认同的。在这两种理论之前，基本上是以表面及线框造型技术为代表的无约束自由造型技术。与基于约束造型理论曾同期并存的技术流派还有：起源于英国的基于图表的造型 APPLICON 的自由度分析造型，基于 AI 的约束满意算法造型等。由于这些技术流派未能在造型效率、实用性及商业化上取得突破，因此一直未能在业界得到实质性的应用，不能算作主流技术。

五、CAD 在我国的发展

国内的高等院校和科研院所在 CAD 支撑和应用软件的开发上担任极其重要