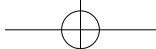


三维建模及应用

段 念 吴明忠 主 编

黄国钦 施炜斌 胡中伟 副主编

清华大学出版社
北 京



内 容 简 介

本书是华侨大学校级规划教材，获华侨大学教材建设基金立项资助。全书内容分为“理论篇”和“实践篇”，共 11 章。“理论篇”除绪论外，主要讲解计算机辅助单元技术、三维几何建模技术和产品三维数字化设计与制造标准体系及基础标准；“实践篇”突出 SOLIDWORKS 2020 软件知识，以机械零件三维建模典型项目展开，采用“图解”风格，多图表，少文字，由浅入深、循序渐进地讲解零件建模、装配体设计、工程图、运动分析、动画及三维建模典型应用等，具有较强的专业性和实用性。

本书可作为高等学校本科非机类、近机类各专业的课程教材，也可供中等职业及高等职业学校的教师和有关的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目 (CIP) 数据

三维建模及应用 / 段念, 吴明忠主编. -- 北京 :
清华大学出版社, 2024. 8. -- ISBN 978-7-302-66740-7
I . TP391.414
中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024YA5590 号

责任编辑：刘远菁
封面设计：常雪影
版式设计：方加青
责任校对：马遥遥
责任印制：宋 林

出版发行：清华大学出版社

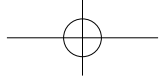
网 址：<https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>
地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084
社 总 机：010-83470000 邮 购：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：三河市东方印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm 印 张：13.25 字 数：291 千字
版 次：2024 年 8 月第 1 版 印 次：2024 年 8 月第 1 次印刷
定 价：59.00 元

产品编号：104297-01

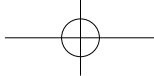


前言

党的二十大报告指出：“坚持把发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国。实施产业基础再造工程和重大技术装备攻关工程，支持专精特新企业发展，推动制造业高端化、智能化、绿色化发展。”可见，“智能化”已经成为我国制造业的重要奋斗目标。

智能制造是基于新一代信息通信技术与先进制造技术的深度融合，贯穿于设计、生产、管理、服务等活动的各个环节，具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能的新生产方式。智能制造对产品数字化建模技术的发展提出了更高的要求。CAD软件作为制造业软件的核心工具之一，已经渗透到制造型企业的研发设计和生产经营管理等环节。企业应用CAD软件的目的已从单纯提升设计效率上升到兼顾设计效率与企业信息化管理的更高层次。在设计软件应用领域，三维建模已逐渐取代二维绘图，成为机械设计师的主要设计工具。企业越来越青睐掌握三维建模技术和机电工程专业知识的人才。

全书内容分为“理论篇”和“实践篇”，共 11 章。“理论篇”除绪论外，主要讲解计算机辅助单元技术、三维几何建模技术和产品三维数字化设计与制造标准体系及基础标准；“实践篇”突出 SOLIDWORKS 2020 软件知识，以机械零件三维建模的典型应用案例为主线，采用“图解”风格，多图表，少文字，由浅入深、循序渐进地讲解零件建模、装配体设计、工程图、运动分析、动画及三维建模典型应用等，具有较强的专业性和实用性。SOLIDWORKS 软件是当前机械设计制造领域流行的一款三维设计软件，其应用涉及汽车制造、机器人、数控机床、通用机械、航空航天、生物医药及高性能医疗器械等众多领域。通过对本书



的学习与训练，读者将对机械设计基础、机械结构等专业知识有更清晰的了解，同时对SOLIDWORKS软件操作技能有较好的掌握。

本书由华侨大学机电及自动化学院教师段念、吴明忠担任主编，黄国钦、施炜斌、胡中伟任副主编。段念负责全书统稿，并承担书中“理论篇”四章内容的编写工作；吴明忠承担“实践篇”第5章、第6章、第9章内容的编写工作；施炜斌承担“实践篇”第10章和第11章内容的编写工作，黄国钦承担“实践篇”第7章内容的编写工作，胡中伟承担“实践篇”第8章内容的编写工作。感谢华侨大学工程图学协会21级和22级机械工程专业李军辉、罗金海、陈泽苒、傅玮、于舒铭和姚佳鹏同学为本书制作了精美的插图。

由于编者水平有限，书中难免有一些不妥之处，恳请各位读者批评、指正。
反馈邮箱：wkservice@vip.163.com。

为更好地服务读者，本书附赠多媒体教学资源、电子课件等，读者扫描下方二维码并填写相关验证信息即可下载。



电子课件



第5~9章案例



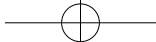
第10章案例



第11章案例

编者

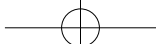
2024年1月20日



目录

理 论 篇

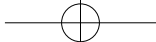
第 1 章 绪论	2	3.2 线框建模技术	24
1.1 产品数字化设计建模技术	2	3.2.1 线框建模的原理	24
1.2 产品的数字化信息定义	3	3.2.2 线框建模的特点	25
1.3 产品的数字化建模技术	8	3.3 曲面建模技术	26
1.4 产品数字化建模的应用	9	3.3.1 曲面建模的原理	26
思考题	10	3.3.2 曲面建模的特点	27
第 2 章 计算机辅助单元技术	11	3.3.3 曲面建模的方法	28
2.1 概述	11	3.4 实体建模技术	28
2.2 计算机辅助设计	11	3.4.1 实体建模的原理	28
2.3 计算机辅助工程	12	3.4.2 实体模型的特点	28
2.4 计算机辅助工艺设计	13	3.4.3 实体生成的方法	28
2.5 计算机辅助制造	14	3.4.4 实体模型的表示方法	30
2.6 计算机辅助设计与制造技术的发展 及应用	14	3.5 特征建模技术	33
2.6.1 计算机辅助设计与制造技术的发展 历程	14	3.5.1 特征建模的概念	33
2.6.2 CAD/CAM系统主要工作流程	18	3.5.2 特征的分类	33
2.6.3 CAD/CAM技术的软件应用	19	3.5.3 基于特征的产品信息模型	35
2.6.4 CAD/CAM技术的发展趋势	20	3.5.4 特征建模的特点	36
思考题	23	3.5.5 特征建模的基本步骤	36
第 3 章 三维几何建模技术	24	思考题	37
3.1 三维几何建模方法概述	24	第 4 章 产品三维数字化设计与制造 标准体系及基础标准	38
		4.1 产品制造信息的表示	38
		4.2 产品模型数据交换标准	39



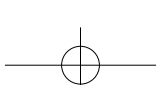
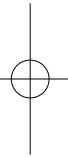
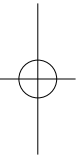
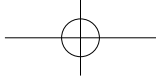
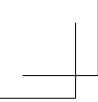
4.2.1 初始图形交换规范(IGES).....	39
4.2.2 产品模型数据交换标准(STEP).....	40
4.2.3 产品数据交换标准存在的不足.....	41
4.3 产品建模技术与工程应用	41
4.3.1 轻量化设计.....	41
4.3.2 衍生式设计.....	42
4.3.3 逆向工程	43
4.3.4 3D打印	45
4.4 产品三维建模数字化设计与制造 标准及工艺标准	46
4.4.1 产品三维建模数字化设计 与制造标准	46
4.4.2 产品三维数字化工艺标准	51
思考题.....	54

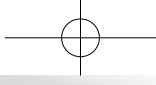
实 践 篇

第 5 章 草图绘制与零件建模	56
5.1 标准件	56
5.1.1 使用标准件库生成螺栓等 螺纹连接件.....	56
5.1.2 使用标准件库生成齿轮.....	57
5.1.3 使用标准件库生成滚动轴承.....	58
5.2 典型四大类零件建模.....	59
5.2.1 丝杠——轴套类零件1.....	59
5.2.2 蜗杆——轴套类零件2.....	64
5.2.3 蜗轮——轮盘类零件	69
5.2.4 踏架——叉架类零件	76
5.2.5 泵体——箱体类零件	84
5.3 曲面建模.....	91
5.4 钣金建模.....	97
上机练习	103
第 6 章 部件三维装配.....	104
6.1 概述	104
6.2 齿轮油泵装配——自下而上.....	105
6.3 虎钳装配——自上而下	115
6.4 虎钳装配——生成爆炸图	121
上机练习	126
第 7 章 运动仿真.....	127
7.1 四杆机构运动仿真	127
7.2 凸轮机构运动仿真	129
7.3 蜗轮蜗杆机构运动仿真	133
7.4 链轮机构运动仿真	135
上机练习	139
第 8 章 工程图.....	140
8.1 零件图——踏架	140
8.2 零件图——箱体	148
8.3 装配图——台虎钳	154
8.4 爆炸表达视图.....	159
上机练习	162
第 9 章 动画展示	163
9.1 爆炸动画.....	163
9.2 切换相机视角.....	165
上机练习	168
第 10 章 3D打印	169
10.1 3D打印技术简介	169
10.2 铝件的3D打印.....	170

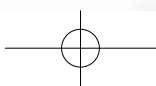


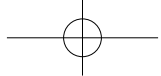
10.3 流向控制装置的打印及打印过程的完善	173	11.2 飞机襟翼机构的运动仿真与支架优化	178
上机练习	177	11.3 摩托车结构部件的拓扑优化	192
第 11 章 轻量化设计	178	上机练习	201
11.1 轻量化设计简介	178	参考文献	202





理 论 篇





第1章

绪论

智能制造是全球制造业发展的大趋势。为巩固在全球制造业中的地位，抢占制造业发展的先机，我国提出了“中国制造2025”，部署全面推进实施制造强国战略。

智能制造是新一代信息技术与先进制造技术的深度融合，贯穿于设计、制造、服务全生命周期的各个环节及相应系统的优化集成，实现制造的数字化、网络化、智能化，不断提升企业的产品质量、效益、服务水平，推动制造业创新、协调、绿色、开放、共享发展。对于智能制造的演进与发展，可以总结、归纳和提炼出三种基本范式，即：数字化制造——第一代智能制造；数字化网络化制造——“互联网+制造”或第二代智能制造；数字化网络化智能化制造——新一代智能制造。智能制造对机械产品设计建模技术的发展提出了更高的要求。

机械产品设计建模是对机械产品的几何结构及其属性进行描述，并在计算机内部构建产品数字化模型的过程。产品设计建模是机械设计与制造技术的核心，是对产品形体及其属性进行描述、处理和表达的过程。

1.1 产品数字化设计建模技术

党的二十大报告指出：“加快发展数字经济，促进数字经济和实体经济深度融合，打造具有国际竞争力的数字产业集群。”因此，在机械产品设计领域，应积极发展数字化设计建模技术。

机械产品数字化设计建模技术是对产品的几何形状及其属性进行数字化描述，用合适的数据结构进行组织和存储，并在计算机内部构建产品数字化模型的过程。

产品数字化模型的建立是对产品进行计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)的必要前提，是实现CAD/CAM一体化及其产品制造过程信息化的核心。产品设计模型不仅使产品设计过程更为直观、方便，还为产品后续的设计和制造过程(如产品物性计算、工程分析、工程图绘制、工艺规程设计、数控加工编程、运动仿真、生产过程管理等)提供了有关产品各类属性的数字化和信息化描述，为保证产品数据的一致性和完整性提供了有力的技术保障。图1-1展示了机械产品设计建模过程。

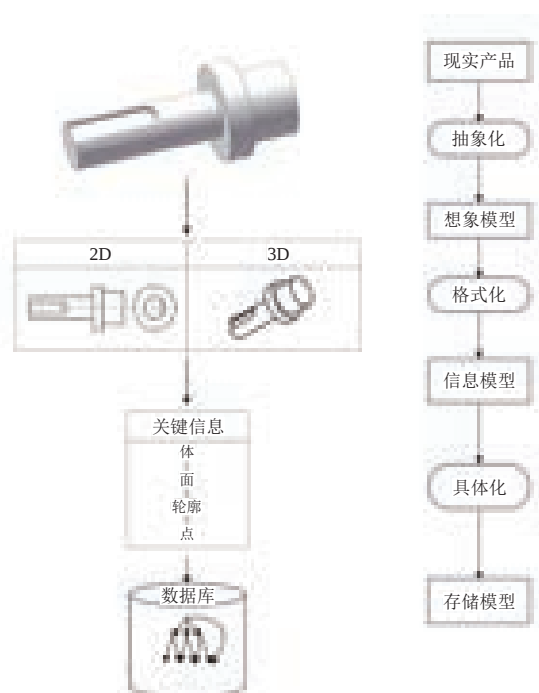


图1-1 机械产品设计建模过程

首先，设计者以二维或三维表示方式对所设计的产品结构进行抽象，得到产品结构的想象模型(该模型能够实现产品应具有的功能)；然后，根据该想象模型将点、线、面、体等几何元素按照一定的拓扑关系和转换算法组合起来，形成所设计产品的信息模型；最后，以给定的数据结构进行存储，从而形成计算机内部的产品数字化存储模型。可见，机械产品的数字化建模过程实质上是对现实产品及其属性的描述、处理和表达的过程。

1.2 产品的数字化信息定义

产品数字化定义用于描述和定义产品全生命周期的数字化过程中所应包含的信息及这些信息之间的相互关系，并使其成为计算机中可实现、可管理和可使用的信息。随着产品数字化定义技术的深入，围绕数字化产品定义数据及其过程的管理与应用技术也随之出现，引起了整个制造业生产管理技术的彻底变革。计算机辅助设计(computer-aided design, CAD)技术起源于美国，它经历了一个由二维设计技术向三维设计技术发展的过程。产品数字化定义技术是基于CAD技术实现的，是CAD的基础及核心。因此，CAD技术的发展和进步也推进了产品数字化定义技术的发展。现在的产品数字化定义已不再仅仅涉及CAD系统，而是面向产品全生命周期的各个环节(从设计、分析、工艺、制造、装配，到维护、销售、服务等)。

1. 产品数字化定义技术的发展历程

产品数字化定义技术经历了从二维到三维模型发展的四个阶段，如图1-2所示。

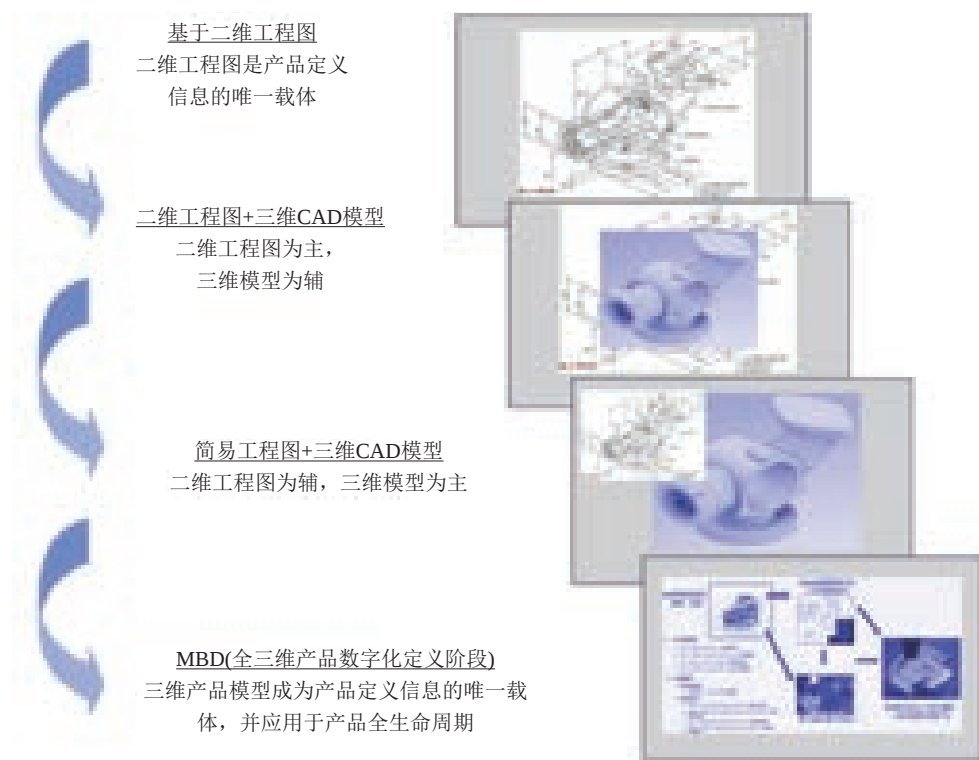
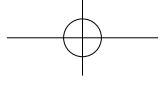


图1-2 产品数字化技术的发展历程

1) 二维工程图阶段

二维工程图阶段先后经历了人工绘制工程图阶段和基于CAD的二维产品数字化定义阶段。最初的产品定义来自工程制图技术。其实，早在新石器时代，中国就已发展出点、线、面、圆的组合等分——几何作图的起源(以仰韶陶器文化的线条为代表)；战国时期，中山王铜版兆域图的制作为图学的形成奠定了基础；《考工记》是古代最早的有关图学的书籍，《周髀算经》代表古代绘图工具在数学测量、绘图画法等方面的突破性发展；宋代是我国古代工程制图发展的全盛时期(等角投影、平行投影等表达建筑器具)，以苏颂的水运仪象台为代表，获世界科技史七项第一。元代以一器一图和文字说明表达零件装配关系和尺寸等，表明中国工程图学发展达到高峰。明代出现了大量极具图学价值的科学技术著作——《鲁班营造正式》《筹海图编》《农政全书》《武备志》《开工天物》《奇器图书》《永乐大典》等；清朝时期，西方文化与科学、技术的输入为工程制图的发展提供助力；新中国成立以后，于1959年批准并颁布第一个国家标准《机械制图》。1975年，法国科学家蒙日系统地提出了以投影几何为主线的画法几何，使得画法几何成为工程图的语法，而工程图则成为工程界图形化产品定义的基本绘图语言。图样规定了需要制造的产品全部信息，也为工程技术人员表达产品设计思想和相互交流提供了平台。工程制图技术通过图样解决了产品结构及制造信息的描述问题，推动了世界范围内的工业进步。但人工直接绘制图样的方式对设计的更改及设计知识的重复利用带来了很多不便，劳动强度也高；同时，图样在管理方面存在很多问题，限制了生产效率的进一步提高。

随着计算机技术的发展,研究人员开发出计算机辅助设计软件系统,产品定义技术由此跨入了数字化时代。产品数字化定义技术改变了依赖图板的传统方式。通过CAD系统用数字化的方式在计算机中精确表达产品信息,使设计的更改与图样的管理工作变得比较方便、简单,解决了产品结构信息的重用问题,并能大大提高设计工作效率,改善工作环境。但是,早期的CAD技术只是提供现实产品结构在不同视图中的平面投影,不能直观反映产品的立体实体结构,因此生产人员有时不能完全正确理解设计意图而生产出废品,最终造成损失。早期CAD技术无法显示产品中不可缺少的曲面造型,对生产工程中引进的新型制造技术与加工方法缺少有效的技术支持。

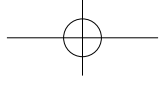
2) 二维工程图&三维CAD模型阶段

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,不能有效表达几何数据间的拓扑关系。由于缺乏形体的表面信息,CAM及CAE均无法实现。进入20世纪70年代,正值飞机和汽车工业的蓬勃发展时期。此间,人们在飞机及汽车制造中遇到了大量的自由曲面相关问题,当时只能采用多截面视图、特征纬线的方式来近似表达所设计的自由曲面。由于三视图方法表达的不完整性,产品设计完成后,制作出来的样品常常与设计者所想象的有很大差异,甚至完全不同。设计者无法保证自己设计的曲面形状能够满足要求,所以经常需要按比例制作油泥模型,并以此作为设计评审或方案比较的依据。既慢且繁的制作过程大大拖延了产品的研发时间,要求更新设计手段的呼声越来越高。法国人Bezier提出了贝塞尔算法,使得人们可以用计算机处理曲线及曲面问题,同时使得法国的达索飞机制造公司的开发者们能在二维绘图系统CAD/CAM的基础上,开发出以表面模型为特点的自由曲面建模方法,进而推出三维曲面造型系统CATIA。它的出现标志着计算机辅助设计技术从单纯模仿工程图纸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,同时使得CAM技术的发展有了现实的基础。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工作方式。

为了满足市场需求,三维建模技术开发成功并迅速在制造行业得到广泛应用。三维设计系统通过建立任意形状的三维实体模型,并将加工型面信息自动转化成数控机床刀具路径控制代码,开始逐渐给各种类型的数控机床输出程序,使设计与制造过程融为一体。然而,在设计系统产生数控程序并把它传送给机床的过程中,只能表达机床刀具在加工过程的轨迹信息,而丢失了很多其他信息(如加工表面精度信息、热处理信息、零件材料信息、加工规范等),使得制造人员仍然需要借助工程图样来建立零件的精确制造准则。因此,出现了三维模型与二维工程图共同表达产品工程设计信息的局面,并一直持续至今。

20世纪80年代初,CAD系统的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,以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。

三维建模技术直接表达了产品真实的三维模型,不需要通过思维的多次转换,因此可



大大提高生产效率,减少歧义产生的可能性,从根本上改变了传统工程设计方法。通过三维产品模型,工程师可以很方便地进行后续设计与制造工作,如部门的模拟装配、总体布置、管路敷设、运动模拟、干涉检查、数控加工编程及模拟、生产操作培训等。因此,它为实现计算机集成制造和在并行工程思想指导下在整个生产环节采用统一的产品信息模型奠定了基础。

3) 简易工程图&三维CAD模型阶段

第三次CAD技术革命——参数化造型技术的出现使得CAD具有了基于特征、全尺寸约束、全数据相关和尺寸驱动设计修改等新功能,从而使三维模型不仅能提供二维图样所不具备的详细形状信息,而且能够通过添加三维的注释提示、注释与形状的数字连接提供尺寸、公差、表面粗糙度等信息。进入20世纪90年代,参数化技术变得成熟起来,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。不过,三维模型数据尚无法表达表面处理方法、热处理方法、材质、结合方式、间隙设置、连接范围、润滑油涂刷范围和颜色、要求符合的规格与标准等信息。另外,基于注释的形状提示、关键部位的放大图和剖视图等,能够更为灵活且合理地传达设计意图。因此,三维模型数据不能表达图样中的所有工艺信息,为了将模具设计与生产、部件加工、部件与产品检验等工序所必需的设计意图包含进来,仅靠三维模型数据是不够的,仍然需要通过简易二维图样提供部分工艺信息。在数字化定义的内容上仍处于三维模型与工程图共存的状态,存在更改产品描述等环节效率低的问题。

4) 全三维产品数字化模型阶段

为了将三维数据模型用作传递设计信息的唯一载体,必须明确数字化定义应用的形式,解决非几何信息的组织、表达与显示问题。CAD技术在20世纪90年代末添加了三维标注的功能,同时美国机械工程师协会开展了系列数字化定义标准的研究,紧接着,波音公司在2004年启动的787项目全面推广了基于模型定义(model-based definition, MBD)技术体系。MBD是一个用集成的三维实体模型来完整表达产品定义信息的方法体系,详细规定了三维实体模型中的产品尺寸、公差的标注规则和工艺信息的表达方法。MBD改变了传统的由三维实体模型来描述几何形状信息以及用二维工程图样来定义尺寸、公差和工艺信息的分步产品数字化定义方法。同时,MBD使三维实体模型成为生产制造过程中的唯一依据,改变了传统的以工程图样为主、以三维实体模型为辅的制造方法。MBD在2003年被美国机械工程师协会批准为机械产品工程模型的定义标准,是以三维实体模型作为唯一制造依据的标准。MBD技术体系也是MBD的应用体系。它明确了产品数字化定义的内容框架,并且确定了产品数字化定义内容的种类和管理形式。此外,它还确定了研制环境的应用功能体系及应用程序体系,使产品的数字化定义能够在脱离图样的情况下进行。这一体系最显著的标志是在三维数据集中定义所有的产品信息,不再需要二维工程图样。MBD技术使得三维产品、工装数据成为所有工作中的唯一制造依据,真正实现了三维数字化、无图样设计制造技术,大大简化了产品设计和制造过程,并缩短了产品研制周期。

我国的MBD全三维数字化设计是从波音公司的转包生产中逐步发展起来的。如今

在我国航空航天工业中，“三维模型下车间”等设计模式正在如火如荼地展开，基于CATIA、UG、Pro/E的全三维设计规范也在不断完善，其应用水平比较高，在飞机、卫星、火箭等典型产品的生产上基本打通了整个数字化设计制造数据链。同时，在大型装配制造业中，南车集团、北车集团等也在高速列车的设计生产中全面推行MBD全三维数字化设计工作。

2. 产品数字化定义信息

产品数字化定义信息主要包括产品结构的几何信息、拓扑信息，以及工艺属性、物理属性等其他非几何信息。

1) 几何信息

几何信息是指产品结构中的点、线、面、体等各几何元素在欧氏空间中的位置和大小。几何信息可用数学表达式进行定量描述，也可用不等式对其边界范围加以限制。几何信息是描述几何形体结构的主体信息。但是，仅使用几何信息还难以准确地确定产品的形体结构，往往会产生形体结构的多义性。如图1-3所示的五个顶点，由于连接方式的不同，所形成的形体也不尽相同。因此，若要描述一个唯一确定的形体结构，除了要提供几何信息之外，还需要补充一定的拓扑信息。

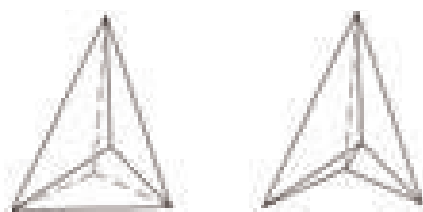


图1-3 形体结构的多义性

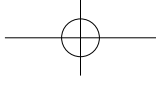
2) 拓扑信息

拓扑信息反映了产品结构中各几何元素的数量及其相互间的连接关系。任何形体都是由点、线、面、体等各种不同的几何元素构成的，各元素之间的连接关系可以是相交、相切、相邻、垂直、平行等。

对于几何元素完全相同的两个形体，若各自的拓扑关系不同，则由这些相同几何元素构造的形体可能完全不同。例如，图1-3中的形体均有五个顶点，由于其顶点连接的拓扑关系不同而形成不同的形体。反之，两个不同形体也可能具有相同的拓扑关系。如图1-4中的两个形体，虽然其大小和形状不一样，但其邻边相互垂直、对边相互平行的拓扑关系是相同的。



图1-4 具有相同拓扑关系的两个形体



3) 非几何信息

非几何信息是指除产品结构的几何信息和拓扑信息之外的信息,包括产品的物理属性和工艺属性等,如产品质量、性能参数、尺寸、公差、表面粗糙度和技术要求等。为了满足CAD/CAM集成的需要,非几何信息的描述和表示在产品建模技术中越来越多元化。

1.3 产品的数字化建模技术

产品三维几何建模是一种通过计算机表示、控制、分析和输出几何实体的技术。三维几何建模技术是计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)系统的理论基础,是采用直观的方法构造产品及零件形状的手段,同时为产品的后续处理(分析、计算和制造等)提供了条件。产品数字化模型的基础是其三维几何模型。真实、完整地表达产品几何形状,使计算机能够准确获取产品数据的所有信息,充分“理解”产品数据的含义,进而获得一定程度的智能化分析、计算能力,是产品三维几何建模技术的主要研究内容。产品几何模型的基本构成要素是空间的点、线、面和体。按照技术发展历程,产品的三维几何建模技术经历了线框、表面、实体和特征建模等多个阶段。

产品三维几何建模技术始于20世纪60年代。在建模技术发展初期,采用顶点和棱边来构建三维形体模型,此类模型被称为线框模型。线框模型结构简单,能够较好地反映物体的形状和方位,且操作简便,占用内存少,但存在不能消隐和生成剖面等不足。20世纪70年代在线框模型的基础上增加了形体表面信息,构建了表面模型,解决了消隐、生成剖面及着色等问题。随着技术的进一步发展,曲面建模技术出现并被用于各种曲面形体的表示、构造和求交运算。线框模型和表面模型均没有体的信息,不允许进行物性计算和分析。到了20世纪70年代末80年代初,实体建模技术被推出,并逐渐发展成熟。实体模型是物体完整的三维几何模型,包含全部几何信息和全部点、线、面、体之间的拓扑信息,因此允许计算物体的质量特性(如重量、惯性矩)、动态特性(如动量、动量矩)和力学特性(如应力、应变),以及进行多物体间的干涉检查,但数据结构复杂,且处理速度慢。线框模型、表面模型和实体模型被统称为产品结构的几何模型,是描述形体几何信息和拓扑信息的数据模型。这三种模型各自具有不同的特点并存在各自的不足,因此目前的机械CAD/CAM系统均保留了这三种几何模型的建模,以满足不同应用场合的使用需要。进入20世纪90年代以后,人们提出了特征建模的概念,即在已有几何模型的基础上增加对产品结构、工艺、材料、精度、性能等特征信息的定义,使描述产品数字化模型的信息更加多元化。特征建模技术的出现和发展是三维几何建模技术发展的一个新的里程碑。

除了上面提及的建模技术之外,近年来推出了参数化建模、同步建模、行为建模、非流行建模等新建模技术,其中有些已在商用的三维建模软件中得到了应用,有些还有待进一步研究和完善。

1.4 产品数字化建模的应用

通常，一个创新产品将经历产品设计、工艺设计、加工装配、试验分析等作业过程，经过反复改进和完善后才能推向市场。传统产品设计过程主要凭借设计者的经验，借助人工设计工具进行，存在着设计效率低、出错率高、可预见性差、修改困难、难以协调等不足，这必然导致产品的开发周期长、设计质量差、开发费用高的不利局面。面对日益激烈的市场竞争形势，采用先进的设计技术和手段，改进产品设计过程，同时提高产品质量，是制造业产品设计开发过程的必然选择。

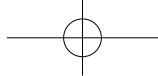
在现代机械制造业中，产品的数字化模型是产品从设计到制造全过程的基础，也为后续计算机辅助设计、计算机辅助工艺设计(computer-aided process planning, CAPP)、计算机辅助工程(computer-aided engineering, CAE)、计算机辅助制造(computer-aided manufacturing, CAM)等计算机辅助单元技术提供了产品数字化信息，是现代计算机辅助设计与制造系统的核心。计算机辅助设计与制造系统的应用是产品数字化建模技术应用的主要表现形式，也成为现代机械制造业不可或缺的一部分，在汽车、轻工、电子和航天等行业中尤为重要。产品数字化模型的计算机辅助应用水平的高低和应用的广泛程度，已经成为衡量一个国家/地区机械制造技术水平高低的重要标志之一，直接影响着国民经济中许多部门的发展。

目前，发达工业国家/地区的企业已广泛使用CAD/CAM系统，我国70%以上的大中型企业也已使用CAD/CAM系统。我国的产品数字化建模技术的研发工作始于20世纪70年代，经过五十多年的研究，发展迅速。许多大型企业，如一汽、二汽等，已建立起比较先进的CAD/CAM系统，其应用水平也达到了国际先进水平。许多中小型企业将产品数字化建模技术应用于后续的计算机辅助应用过程中，以保证产品质量，提高工作效率，进而取得显著的经济效益。但是总体来说，我国在产品数字化建模技术应用的深度和广度方面与国外先进水平相比仍有较大差距。

美国国家科学院的工程技术委员会曾对应用CAD/CAM系统所能得到的效益进行了测算，如表1-1所示。

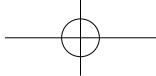
表1-1 应用CAD/CAM系统所能得到的效益

项目	增效(与传统制造相比)
缩短产品上市周期	30%~60%
提高产品质量	2倍~5倍
提高劳动生产率	40%~70%
提高工程能力	3倍~3.5倍
提高设备利用率	2倍~3倍
降低工程设计造价	10%~40%
降低劳动力成本	2%~20%
提高分析问题和解决问题的能力	3倍~35倍



思考题

1. 机械产品数字化设计建模技术发展的基础是什么？
2. 产品数字化定义技术经历了几个发展阶段？各阶段的发展特点是什么？
3. 产品数字化定义信息主要包括哪些？
4. 产品三维几何建模技术的发展历程中出现了哪几种三维模型？
5. 产品数字化模型的应用主要包括哪些技术？



第2章

计算机辅助单元技术

随着计算机技术的发展和應用，制造业中先后出现了计算机辅助设计(CAD)技术、计算机辅助工程(CAE)技术、计算机辅助工艺设计(CAPP)技术、计算机辅助制造(CAM)技术等计算机辅助单元技术。为了实现企业信息资源的共享与集成，在这些单元技术的基础上形成了CAD/CAE/CAPP/CAM集成技术，又称为4C技术，通常简称为CAD/CAM技术，即借助计算机工具从事产品的设计与制造的技术。

2.1 概述

目前，CAD/CAM系统以市场需求分析和产品概念设计为基础，主要用于产品的实体建模、工程分析、工艺规程设计、数控编程和仿真模拟等设计环节，所设计产品的信息流不断地从上一设计环节流向下一设计环节，同时不断伴随着反向的修改反馈信息。随着设计进程的推进，产品信息持续增加并不断完善。

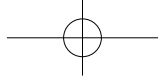
CAD/CAM系统的主要工作流程如下：

- (1) 需求分析及概念设计。
- (2) 计算机辅助设计(CAD)。
- (3) 计算机辅助工程(CAE)。
- (4) 计算机辅助工艺设计(CAPP)。
- (5) 计算机辅助制造(CAM)。
- (6) 虚拟制造(virtual manufacturing, VM)。

2.2 计算机辅助设计

计算机辅助设计(CAD)是指设计人员借助计算机与软件系统工具，在产品设计规范和设计数据库的支撑和约束下，应用自身的知识和经验，从事产品方案构思、总体设计、分析计算、图形处理等设计活动，最终建立产品数据模型并输出产品工程图样和设计文档的过程。CAD系统的功能模型如图2-1所示。

通常，机械CAD系统应具有产品几何建模、计算分析、仿真模拟、工程图样处理等功能。CAD系统作业过程是设计人员在产品概念设计的基础上从事产品的几何造型，建



立产品的数据模型；从产品数据模型中提取相关数据以进行必要的工程分析与计算；根据分析、计算的结果确定是否需要原设计模型进行修改，待设计结果满足要求后编辑全部设计文档并绘制工程图样，最终完成产品设计的全过程。从CAD系统的使用过程可知，CAD技术旨在将产品的物理模型转化为计算机内部的数据模型，以供后续的产品开发活动使用，并作为产品全生命周期的信息流之源。

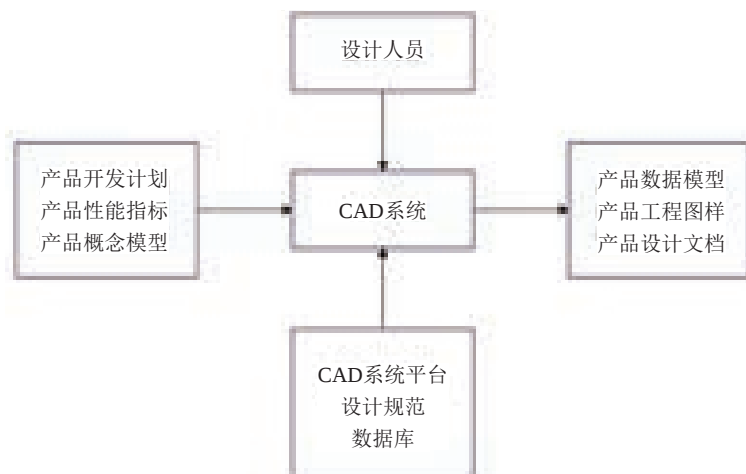


图2-1 CAD系统的功能模型

2.3 计算机辅助工程

计算机辅助工程(CAE)通常是指应用计算机及相关软件系统对产品的性能与安全性进行分析，对其未来的工作状态和运行行为进行仿真模拟，以便及早发现设计中的缺陷，证实所设计产品的功能可用性和性能可靠性。从广义来说，CAE是CAD技术的一个组成部分，是不断优化和完善产品设计模型的活动。CAE系统的功能模型如图2-2所示。

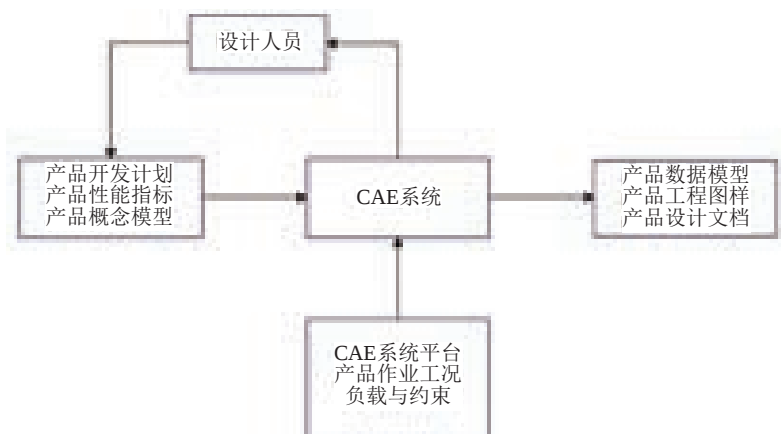


图2-2 CAE系统的功能模型

CAE技术使开发人员在设计阶段就能较好地预测产品的技术性能,即在给定条件下能够对产品结构的静态强度、动态特性、温度场分布等技术参数进行分析、计算。随着计算机技术和数值分析算法的应用与发展,逐步形成了有限元分析法(FEM)、边界元法(BEM)、优化设计、多体动力学等CAE技术。

目前,CAE技术一般用于如下设计环节:

(1) 产品结构分析。应用有限元分析法对产品结构的静/动态特性、热变形、磁场强度等产品结构性能进行分析,包括自动划分有限元网格,建立有限元分析模型,对有限单元进行求解计算,以及输出产品在给定的工况条件下的应力场、应变场和温度场等有限元分析结果。

(2) 优化设计。优化设计是现代产品设计中具有高速度、高性能和良好市场竞争力的技术手段之一。应用优化设计软件工具,通过改变设计参数,使产品的外形结构、体积、质量、强度、动态特性、热稳定性等设计指标达到最优水平。

(3) 仿真模拟。应用产品的实体模型及计算机动画技术,依据产品的实际工况要求对产品的静/动态特性和控制特性等进行仿真实验,以预测产品性能,提前发现设计中的缺陷,以便修改和完善产品设计过程。

通过CAE技术,开发人员可在产品设计阶段就及早了解产品的性能,及时发现产品设计中的缺陷,从而有效避免将设计缺陷带入制造、装配、测试和使用阶段,避免随之造成的经济损失和时间浪费,大大节省产品的开发成本,并缩短产品的开发周期。

2.4 计算机辅助工艺设计

计算机辅助工艺设计(CAPP)是指根据产品设计结果,选择人机交互或自动完成产品加工的方法,以及设计加工工艺的规程。一般认为,CAPP系统主要用于毛坯设计、加工方法选择、工艺路线制定、工序设计、工时定额计算等,其中工序设计包含加工机床和工夹量具的选用、加工余量的分配、切削用量的选择,以及工序图的生成等。CAPP系统的功能模型如图2-3所示。

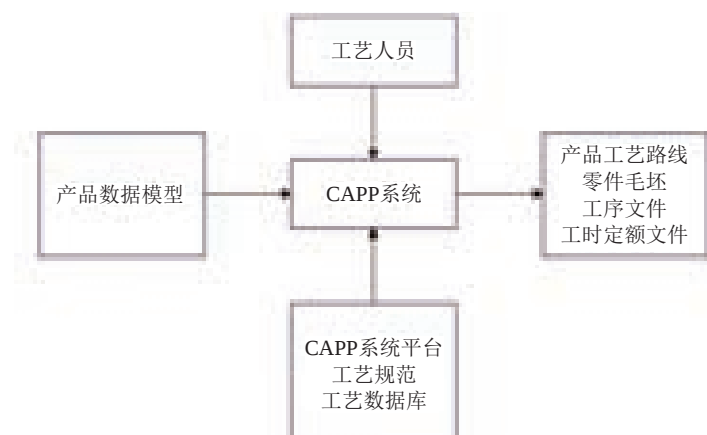
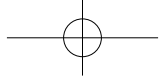


图2-3 CAPP系统的功能模型



2.5 计算机辅助制造

计算机辅助制造(CAM)是指利用计算机辅助完成从毛坯设计到产品制造全过程的直接和间接的各种生产活动,包括工艺准备、生产作业计划制订、物流过程的运行控制、生产管理、质量控制等。其中,工艺准备包括计算机辅助工艺规程设计、计算机辅助工装设计与制造、计算机辅助数控编程、计算机辅助工时定额和材料定额的编制等;物流过程的运行控制包括物料的加工、装配、检验、输送、储存等。

CAM系统的功能模型如图2-4所示,具体而言,CAM系统根据CAD系统提供的产品数据模型和CAPP系统提供的产品工艺路线、工序文件,在CAM系统平台和生产数据库的支持下,生成产品数控(numerical control, NC)加工的NC控制指令。

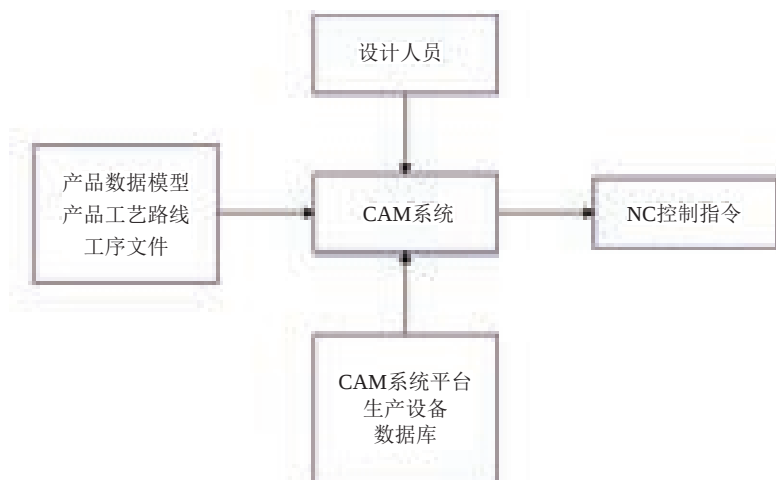


图2-4 CAM系统的功能模型

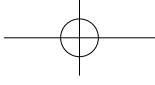
2.6 计算机辅助设计与制造技术的发展及应用

2.6.1 计算机辅助设计与制造技术的发展历程

随着计算机技术的持续进步,计算机辅助设计与制造技术也得到了极大的发展。在计算机辅助设计与制造技术的发展初期,计算机的辅助主要表现在两个方面:一方面是辅助产品设计,用计算机替代手工完成产品图样的生成和显示;另一方面是加工设备的计算机化,出现了数控加工机床、由计算机完全控制的加工中心,以及为数控机床进行信息准备的数控编程技术。一般来说,计算机辅助设计与制造技术的发展分为四个阶段。

1) 第一阶段——技术准备期(1950—1965年)

在产品设计方面,1950年美国麻省理工学院采用阴极射线管(CRT)成功研制了图形显示终端,实现了图形的动态显示,从此结束了计算机只能处理字符数据的历史。20世纪50年代后期出现了光笔,由此开始了交互式绘图。20世纪60年代初,开发了屏幕菜单点击、



功能键操作、光笔定位、图形动态修改等交互绘图技术。

在加工设备方面,1952年数控机床首次研制成功,该机床只需要改变数控程序即可完成不同零件的加工。1955年由麻省理工学院开发的自动编程工具(automatically programmed tools, APT)程序系统,利用APT语言通过对刀具轨迹的描述来实现计算机自动数控加工。

在工艺设计方面,学者斯·帕·米特洛凡诺夫于20世纪50年代对成组技术进行了系统的研究,使专门的学科得以形成。联邦德国的零件分类编码系统和英国的成组生产单元进一步推动了成组技术的发展,使其成为计算机辅助设计与制造技术的基础理论之一。

该阶段还没有形成完整的计算机辅助设计与制造过程的功能,只在相关软/硬件方面提供了实现计算机辅助设计与制造的基础。

2) 第二阶段——基础形成期(1965—1975年)

在产品方面,1963年麻省理工学院的I. E. Sutherland在美国举办的计算机联合大会上宣读题为《人机对话图形通信系统》的博士论文,首次提出了“计算机图形学”等术语。这一研究成果进一步促进了计算机辅助技术的发展。此后,相继出现了一大批计算机辅助设计商品软件。直到20世纪60年代末期,显示技术实现了突破,显示器成本大幅下降,进一步促进了计算机辅助设计产业的形成。20世纪70年代的计算机辅助设计技术仍以二维绘图和三维线框图形系统为主。

在产品加工方面,数控机床与计算机辅助数控程序编制的出现,成为计算机辅助加工的开端。1967年,英国莫林公司首先建立了一套由计算机集中控制的自动化制造系统,该系统被称为“莫林-24”。它包括6台加工中心和1条由计算机控制的自动输送线,并用计算机编制NC程序、作业计划和统计报表。

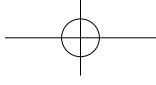
在工业设计方面,1969年,挪威发表了第一个计算机辅助工艺规程生成系统——AUTOPROS。它是根据成组技术原理,利用零件的相似性去检索和修改标准工艺过程的形式而形成相应零件的工艺规程。1976年,美国的CAM-I公司也研制出了自己的计算机辅助工艺规程生成系统。

我国CAD/CAM 技术的研究工作起步于20世纪60年代末,“六五”期间成套引进了CAD/CAM 系统,并不断进行开发和应用。接下来的十年是CAD/CAM技术研究的黄金时代,计算机硬件功能的提高、价格的下降,特别是陆续进入市场的新型图形显示器,成为推动CAD/CAM技术发展的强大力量。

计算机辅助设计与制造技术在该阶段得到了迅猛发展,让计算机辅助人们完成产品整个制造过程中的各个具体工作的设想已基本形成,各种理论和方法得到了初步研究。但该阶段所做工作基本上是探索性的,所开发的系统除了绘制计算机辅助工程图外,基本还没有投入实际使用。

3) 第三阶段——全面发展期(1975—1985年)

产品方面,1973年诞生了第一个实体造型(solid modeling)试验系统,并于1978年推出了第一代实体造型软件。此后的20年中,实体造型技术成为计算机辅助设计与制造技术发展的主流,并走向成熟,出现了一批以三维实体造型为核心的计算机辅助设计软件系



统。在20世纪90年代初发展起来的特征建模技术,以产品模型数据交换标准(standard for the exchange of product model data, STEP)的提出为标志,解决了产品信息在计算机中的表达与存储的异构问题,使计算机辅助产品设计技术在制造领域得到了全面的应用。同时,以STEP为基础的特征表达解决了计算机辅助设计与其他计算机辅助技术间的产品信息开放式传递问题,为整个计算机辅助技术的集成奠定了基础。

产品加工方面,20世纪70年代后期,一方面,数控硬件设备走向成熟,数控机床的数控设备标准化接口形成,数控语言通用格式得以定义,这些都简化了软件的开发。另一方面,由于产品几何造型技术、产品信息建模和信息存储技术,以及数控编程后置处理技术的发展和应用,计算机数控编程与产品设计造型紧密结合,计算机数控编程的实用性得到了很大的提高,解决了“信息孤岛”问题和“再输入”问题。交互式图形编程系统的出现标志着计算机辅助数控编程技术进入成熟阶段。

工业设计方面,从20世纪80年代开始,在以成组技术为基础的派生式计算机辅助工艺规程编制系统继续完善并推广应用的同时,专家、学者们积极探索以智能技术为基础的计算机辅助工艺设计系统。此外,作为工艺设计的分支,毛坯设计、工艺装备设计、工艺过程仿真等计算机辅助技术也得到了发展,为制造过程信息处理的全面计算机化奠定了基础,也为计算机辅助设计与制造过程的集成提出了紧迫的要求。

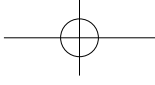
4) 第四阶段——集成应用期(1985—2000年)

从20世纪80年代后期到现在,随着各种计算机辅助设计与制造系统在制造业的应用日益广泛,对各子系统间的集成需求变得十分迫切,因此出现了集成制造的概念和实施技术。在集成制造中,把集成分为三个层面:数据集成、系统集成和过程集成。

与此同时,制造系统理论和计算方法也有了巨大的发展。制造系统理论中,并行工程概念的提出、各种面向设计的方法的建立,以及全生命周期理论的形成,都为计算机辅助设计与制造技术的进一步发展奠定了新的理论基础。在计算方法上,虚拟制造技术的发展为计算机辅助设计与制造提供了良好的仿真平台。知识工程的发展和本体理论的引入,使得各种智能化的方法层出不穷,推动了计算机辅助设计与制造技术向更高的境界发展。

1986年,我国制订了国家高技术研究发展计划(简称“863计划”),将计算机集成制造系统(computer integrated manufacturing system, CIMS)作为自动化领域的主题之一,并于1987年成立自动化领域专家委员会和CIMS主题专家组,建立了国家CIMS工程研究中心和七个单元技术实验室。20世纪90年代,我国在产品计算机辅助设计与制造领域取得了很大的进步。计算机辅助设计和制造软件除了不断地扩展功能外,还基于建模技术、模型技术、数据管理技术、软件技术、智能技术等优化发展。20世纪90年代中期,随着计算机、信息和网络技术的进步,制造业逐步向柔性化、集成化、智能化、网络化方向发展,企业内部、企业之间、区域之间乃至国家之间实现资源共享,异地、协同、虚拟设计和制造开始成为现实。20世纪90年代末,以计算机辅助设计为基础的数字化设计和以计算机辅助制造为基础的数字化制造技术开始拓展到更广阔的领域,在更深的层次上支持产品的开发。

另外,随着制造过程中计算机辅助的加强,制造过程的管理与控制变得更加重要。整



个制造过程成了一个复杂的大系统，其自身过程信息的管控作为制造过程的一部分，与自身信息流是相互作用的。尤其是进入21世纪以来，制造模式发生了显著变化，如网络化/全球化制造、协同制造等新制造模式的诞生，对计算机辅助技术提出了新的要求。

集成应用期的加工过程仿真和加工程序检验系统，为CAD/CAM集成奠定了基础。计算机辅助设计与制造正向智能化、最佳化和集成化等方向发展和延伸。

5) 第五阶段——并行应用期(2000年至今)

进入21世纪以来，随着全球化商品市场的形成，市场竞争更趋激烈。我国产业结构调整、企业改制、技术改造向纵深推进，国家实施西部大开发战略等，都为我国制造业的信息化、网络化进程与CAD/CAM的应用提供了无限广阔的前景和机遇，同时使我国制造业面临着严峻的挑战。为了提高企业市场响应和应变能力，缩短产品生产周期，CAD/CAM技术从传统的面向零件的CAD/CAM集成朝着面向产品并行设计、协同作业环境的方向发展。并行设计是集成的产品设计和开发过程，要求产品开发人员在产品设计阶段就综合考虑产品整个生命周期的所有因素，包括后续的制造、装配、检测和销售等环节，要求产品开发设计一次成功。

面向产品全生命周期的建模技术、基于工程数据库的企业级产品数据管理(product data management, PDM)、由工程工作站或高档微机组成的分布式网络系统，以及支持群体小组协同作业的工作模式等，是自20世纪90年代以来CAD/CAM技术发展过程所研究、探索并逐步得到实际应用的技术领域。

表2-1给出了计算机辅助设计与制造技术发展的各个时期的标志性成果和技术特点。

表2-1 计算机辅助设计与制造技术发展的各个时期的标志性成果和技术特点

技术类型	时期	标志性结果	技术特点
CAD	技术准备期	计算机图形学的诞生；数控机床的应用；成组技术理论的建立	出现交互式绘图、屏幕菜单点击、功能键操作、光笔定位、图形动态修改等在计算机上表示产品几何信息的技术；利用计算机或相关电子控制器件控制机床进行自动加工
	基础形成期	二维绘图CAD软件	CAD软件系统开始出现，以二维绘图和三维线框图形系统为主
	全面发展期	实体造型软件	实体造型系统的出现使得CAD技术有了质的飞跃，实体造型软件得到了大规模应用
	集成应用期	CAD/CAM集成系统	CAD/CAM技术向着一体化和集成化的方向发展
CAM	技术准备期	计算机辅助自动数控编程系统	APT语音通过对刀具轨迹的描述来实现计算机辅助自动数控编程
	基础形成期	计算机集中控制的自动化制造系统	出现柔性制造系统，能够用计算机编制NC程序、作业计划和统计报表
	全面发展期	交互式图形编程系统	出现了交互式图形编程系统，以及加工过程仿真和加工程序检验系统
	集成应用期	CAD/CAM集成系统	CAD/CAM技术向着一体化和集成化的方向发展