

数字化设计制造 仿真与模拟

上册

王华侨 张 颖 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

数字化设计制造仿真与模拟

上 册

王华侨 张 颖 费久灿 等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书是作者以数字化设计与仿真优化技术、数字化制造与模拟技术应用为主要对象,在从事多年工作经验的基础上,在结合工程产品数字化设计、数字化制造应用需求的条件下,通过不断应用、总结、研究开发编写而成的。

本书(上、下册)共分9章,第1~5章为上册,以数字化设计与仿真应用为主要对象,重点在产品外观设计、产品逆向工程应用与经验、产品结构优化设计、有限元分析应用基础与经验技巧、计算流体力学分析应用方面进行了讲解。书中不仅提供了相关的理论基础与实际工程应用指导经验,同时以大量的实例进行了说明,如座椅逆向工程设计、大型回转壳体灵敏度设计、梁体振动分析、大型回转壳体结构力学综合性能分析、飞行器与船舶推进流体力学分析实例应用等。

第6~9章为下册,重点介绍了复合材料制品优化设计与分析、产品数字化模具设计与制造、数控加工编程与仿真模拟等先进的数字化制造技术的应用。书中提供的实际应用实例对提高复合材料制品设计与优化、数字化模具设计与制造、塑性成形模拟优化工艺、数控加工技术应用水平等先进数字化制造、模拟仿真技术的应用水平有非常实用的工程指导意义。

本书理论丰富,信息量大,覆盖面广,且实用性强,工程应用价值高。

本书可供产品设计人员,机械制造、材料加工工艺人员学习参考,也可供高等院校机械制造工艺与装备、机械设计与自动化、材料加工工程、工程力学、工业设计、高分子复合材料等专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字化设计制造仿真与模拟.上册/王华侨等编著. —北京:机械工业出版社,2010.9

ISBN 978-7-111-31395-3

I. ①数… II. ①王… III. ①数字技术—应用—机械设计②数字技术—应用—机械制造工艺 IV. ①TH122②TH164

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第144580号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张秀恩 责任编辑:舒雯

版式设计:张世琴 责任校对:张媛

封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2010年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm·22印张·543千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-31395-3

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务 编辑热线:(010)88379770

社服务中心:(010)88361066 网络服务

销售一部:(010)68326294 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010)68993821 封面无防伪标均为盗版

前言

本书是作者们在从事多年产品设计开发、模具设计制造、机械加工与成型技术应用与开发的经验基础上，在结合工程需要的前提下，通过不断应用、总结与开发而编写的。本书在选材内容、实例分析、理论基础、技术发展等方面都做了精心的编排，介绍了一定理论基础与技术信息，突出了数字化设计、制造仿真的应用与发展的同时，兼顾了数字化设计技术、数字化制造仿真方面的实例应用。书中提供的实例可有效地指导读者进行数字化设计与仿真、数字化制造与仿真相关方面的工程应用，并且兼顾了数字化设计、制造仿真与协同技术应用的系统性和实用性。

全书（上、下册）共分9章，各章除包括了基本理论、工程应用实例、优化分析算例操作外，书中提供了大量的工程设计制造必备的实用信息，包括各种设计工具平台、各种优化分析软件、技术发展趋势、制造工艺信息、成功案例的介绍等。各章除介绍理论基础内容外，都安排了相关实例练习的形式进行了讲解，同时将工程应用的实际经验也安排了相关小节进行了介绍。

本书前五章（上册）以数字化设计与仿真应用为主要对象，重点在产品外观设计、产品逆向工程应用与经验、产品结构优化设计、有限元分析应用基础与经验技巧、计算流体力学分析应用方面进行了讲解。书中不仅提供了相关的理论基础与实际工程应用指导经验，同时以大量的实例进行了说明，如座椅逆向工程设计、大型回转壳体灵敏度设计、梁体振动分析、大型回转壳体结构力学综合性能分析、飞行器与船舶推进流体力学分析实例应用等。

本书后四章（下册）以产品制造工艺仿真与优化为对象，分别介绍了复合材料制品成型工艺与优化设计、塑性成形数字化模具设计、塑性成形模拟与工艺仿真优化、数控机床加工与仿真模拟等数字化制造仿真模拟方面的核心内容。书中提供的实际应用实例对于提高复合材料制品设计与优化、数字化模具设计与制造、塑性成形模拟优化工艺、数控加工技术应用水平等先进数字化制造、模拟仿真技术的应用水平非常有实用的工程指导意义。

在复合材料产品设计方面，除基本的成型工艺外，重点对复合材料弹翼、复合材料气瓶、复合材料发动机罩的设计优化、制造模拟的实例应用进行了讲解。在介绍注塑模具、冲压模具、铸造模具的高效设计基础与应用实例的同时，重点介绍了注塑成型模拟、板料拉深成形模拟、产品铸造仿真模拟等模拟仿真与工艺方面的实际经验。在数控加工方面，重点以数控机床加工编程与加工运动与动力学仿真、薄壁件数控加工变形模拟与控制、数控机床雕刻加工与模具铣削编程实例应用为主要对象进行了讲解，还对数控加工金属切削的仿真模拟应用的研究进展进行了介绍。

本书由王华侨、张颖组织编著，余书平主审。吴国君、费久灿、王德跃、皮利军、李玉丰、高勋朝、耿巍麟等参加了编写。在编写的过程中，从事一线工作的高级技师王建国、段振贵、李军云、李明武、薛亚、陆志奇、孟祥国等人也为本书的出版提供了大量一线资料。本书是在中国航天科工集团第九研究院许建明研究员、孙焕军研究员、余书平研究员指导下，华中科技大学博士生导师李志刚教授、李德群教授、陈吉红教授、李建军教授、王耕耘

教授、王华昌老师等专家教授帮助下完成出版的。在此对给予本书帮助的人员表示感谢。

本书在编写的过程中,得到了中国航天科工集团第九研究院设计所、中国航天科工集团第九研究院红阳机械厂、北京航空制造工程研究所(北京625所)、华中科技大学、哈尔滨工程大学、武汉理工大学、西门子UGS公司、Msc. Software公司、ANSYS公司、达索系统集团公司、FARO中国分公司、北京通力有限公司、山东新明玻璃钢制品有限公司、宁波能海模塑有限公司、徐州徐航压铸有限公司、中船重工江津增压器厂等单位同仁的大力帮助和支持,在此表示深深的感谢。

本书理论丰富,信息量大,覆盖面广,且实用性强,工程应用价值高,作为产品设计人员、工程技术人员、技能人员、生产管理人员的学习教材是非常合适的。对于机械制造、材料加工、复合材料制品的工艺人员也是价值含量非常高的学习用书。对于从事数字化设计制造仿真与协同的科研开发人员、企业管理人员也可以提供较好的帮助指导作用。本书既可作为高等院校机械制造工艺与装备、机械设计与自动化、材料加工工程、工程力学、工业设计、高分子复合材料等专业类本专科、研究生的教学参考用书和应用教材,也可作为工程人员、成人教育、职业教育的培训教材。由于作者水平有限,对书中存在的错误和不足之处,恳请广大读者和专家批评指正。

目 录

前言

第 1 章 数字化设计、制造、仿真模拟

基础 1

1.1 数字化设计基础 1

1.1.1 工程数据库 2

1.1.2 参数化技术 3

1.1.3 装配设计技术 3

1.1.4 建模技术 4

1.2 数字化制造技术 6

1.3 企业数字化制造与工艺的核心 10

1.3.1 数字化工艺技术 10

1.3.2 企业数字化协同的核心 11

1.3.3 CATIA 企业数字化工程领域的

应用 19

1.4 CATIA 数字化轿车工程应用 23

1.5 产品数字化管理方案 28

1.5.1 产品数据管理 PDM 28

1.5.2 企业资源管理 ERP 29

1.5.3 产品生命周期管理 PLM 与 ERP

的区别 29

1.5.4 产品生命周期管理 PLM 数字化

平台功能 30

1.5.5 基于 PLM 的产品数字化设计制

造仿真平台 32

第 2 章 外观设计与逆向工程 41

2.1 产品外观设计平台 41

2.1.1 CATIA 自由曲面外观设计 42

2.1.2 AliasStudio 43

2.1.3 网格细分曲面外观设计平台

系列 45

2.1.4 雕塑曲面外观设计 ArtCAM 47

2.2 CATIA 外观设计实例 51

2.3 产品逆向工程设计概述 58

2.3.1 逆向工程概论 58

2.3.2 逆向工程的设备 60

2.3.3 点数据处理与曲面建构软件 61

2.3.4 快速原型 63

2.3.5 逆向工程应用方法 66

2.4 Geomagic 逆向工程应用实例 70

2.4.1 Geomagic Studio 简介 70

2.4.2 使用 Geomagic 进行逆向工程

应用 71

2.5 Imageware 逆向工程应用实例 87

2.5.1 Imageware 功能介绍 87

2.5.2 应用实例：车灯测量与曲面建

构逆向工程应用 90

2.5.3 应用实例：高尔夫木杆球头逆

向工程应用实例 94

2.6 逆向工程应用经验 103

2.6.1 Imageware 逆向工程应用经验

与实例 103

2.6.2 艇身逆向工程应用经验 112

第 3 章 数字化设计 CAE 应用基础 118

3.1 CAE 应用优势及其发展趋势 118

3.1.1 CAE 软件应用的优势 118

3.1.2 有限元优化设计分析流程 126

3.1.3 有限元软件平台的发展趋势 128

3.2 现代设计 CAE 应用核心基础 130

3.2.1 设计的组成 130

3.2.2 CAE 系统的构成 132

3.2.3 产品研制和 CAE 系统的关系 135

3.2.4 CAE 分析的目的和模型 137

3.2.5 工程 CAE 有限元分析常用的

类型 145

3.3 有限元分析基本技巧 154

3.4 复杂几何模型的网格划分 166

3.4.1 有限元网格的划分基本方法 166

3.4.2 网格质量的评估 169

3.4.3 装配结构中单元的协调 169

3.4.4 常用单元的选用原则 170

3.4.5 SMC 汽车覆盖件网格划分	170	4.5.1 发动机跳动与包络分析	230
3.4.6 基于 8 叉树算法的四面体网格 划分基本原理	171	4.5.2 高速发动机构成与装配	236
3.4.7 大型网格肋壳体有限元网格划 分实例	173	4.6 流体力学 CFD 优化设计分析 ...	245
3.5 典型 CAE 软件平台	173	4.6.1 空气动力学分析实例应用	245
3.5.1 MSC. Software 公司的 MSC. Patran	173	4.6.2 船舶螺旋桨 CFD 计算模拟	255
3.5.2 机构动力学仿真平台 MSC. ADAMS	176	4.6.3 船舶阻力与功率计算	258
3.5.3 ANSYS 公司系列软件平台	177	第 5 章 CAE 优化分析综合实例	
第 4 章 结构、机构装配设计与流体 分析	190	练习	262
4.1 钢架与框架结构设计优化	192	5.1 杯成型拉伸模拟分析实例 练习	262
4.2 船体结构与强度数字化设计 优化	196	5.2 刚柔复合多体机构动力学 分析	288
4.2.1 CATIA 船体结构设计	196	5.2.1 ALGOR 机构动力学分析	289
4.2.2 船体结构强度计算分析	200	5.2.2 MSC. ADAMS 曲柄机构动力 学分析	298
4.3 回转壳体结构灵敏度与协同 设计	203	5.3 机构与结构热固耦合模拟 分析	306
4.3.1 回转壳体灵敏度设计	203	5.4 CFD 应用经验与实例练习	313
4.3.2 回转壳体协同设计	209	5.4.1 流体力学的应用优势	313
4.4 舱体及梁体的稳定性与动力 学分析	221	5.4.2 应用经验	315
4.4.1 圆柱壳体轴压稳定性分析	221	5.4.3 ANSYS_CFX 实例练习	319
4.4.2 组合舱体的强度与模态分析	223	5.5 人机工程学及其设计实例	337
4.5 发动机装配与包络分析	230	5.5.1 人机工程学基础	337
		5.5.2 人机工程设计 UG NX 实例 练习	339
		参考文献	344

第1章 数字化设计、制造、仿真模拟基础

本章主要内容：

- 数字化设计基础
- 数字化制造技术
- 企业数字化制造与工艺的核心
- CATIA 数字化轿车工程应用
- 产品数字化管理方案

本章重点介绍了数字化设计制造仿真协同的基础，包括数字化设计基础、数字化制造基础、企业数字化制造与工艺的核心以及成功的案例介绍。重点强调了产品数字化设计、制造、仿真过程中涉及的设计、工艺、人员、设备等信息之间的传递与共享。

1.1 数字化设计基础

产品设计是从需求出发寻求设计解（产品）的过程，包括产品概念设计、详细设计、工艺设计、NC 代码等。产品设计的核心问题是创新设计、设计自动化和可持续发展的产品设计。产品创新是为达到企业经营目标，创造具有市场竞争优势商品的过程。设计自动化技术则是基于产品设计基本理论而发展的产品设计过程自动化系统技术。可持续发展的产品设计是指在产品及其全生命周期设计中，充分考虑资源 and 环境影响的设计。

现代设计技术涉及现代产品设计方法、计算机辅助设计与制造、产品可靠性设计、设计试验技术、优化设计与多学科仿真。现代设计所采用的功能包括 TOP-DOWN 自顶向下的装配设计、基于专家系统的功能设计、产品结构灵敏度等优化设计、结构有限元分析、机构运动仿真分析、并行设计与制造、数字化工艺设计仿真优化等。

现代设计方法论包括：优化设计、智能设计、并行设计、虚拟设计、仿生设计、可靠性设计、模块化设计、反求设计等。设计过程包括设计过程的组织与管理、设计过程建模、设计过程信息的传递与共享、异地设计过程的组织与管理等。设计的对象包括三维通用设计、重大专用产品设计、工业造型设计等。

支持产品设计的环境与工具要求具备：支持产品设计全过程的 CAD 系统（分析、优化设计、造型……）、支持产品并行设计的 CAD 系统、支持产品异地协同设计的 CAD 系统、支持产品高速制造加工的 CAM 系统、支持产品结构优化设计的 CAE 系统、支持产品设计过程管理的 PDM 系统（此系统实现集成化产品协同设计过程建模和管理）、支持产品快速创新的集成化产品协同设计系统，基于知识的 CAD/CAE/CAPP/CAQ 集成技术与支持产品数字化设计集成平台、网络化协同设计系统、产品虚拟设计系统、面向产品参数设计、结构

设计、拓扑设计、优化设计、动态设计、有限元分析与仿真的三维 CAD/CAM/CAE/PDM 集成平台。

产品数字化设计 CAD 系统的关键核心技术包括：图形显示、消隐、渲染技术；图层、颜色、线型、动态效果；空间几何图形的表达与编辑（如空间曲线、曲面、实体几何图形的表示；图形编辑、裁剪、求交、延伸、布尔运算；参数化、变量化驱动及其完整约束和非完全约束、几何约束与尺寸约束；共享数据库技术；几何数据存储；几何数据转换技术等。

设计方法中的自顶向下（Top Down），设计、装配设计（Assembly Design）与关联设计等也是数字化设计 CAD 系统的核心之一。现代设计方法的发展趋势是基于专家的设计系统，如钣金零件设计模块（Sheet Metal）、焊接设计（Weld Assistant）、注塑模具设计（Mold Cavity）、铸造模具设计（Cast Cavity）、冲压模具设计、齿轮模块设计、钢架框架设计、船体线形设计等。

产品数字化仿真与模拟 CAE 中有限元法，其关键核心技术包括：有限元数值模拟和数值求解中的微分、积分、矩阵、物理求解中的变分原理、弹塑性力学基本方程、线性与非线性求解方法的应用；有限元模拟流程中几何图形建模、单元网格划分中的节点位移与应变单元、总体刚度矩阵、自由网格与映射网格划分方法；物理模型建立过程中的材料特性、材料类型、弹性模量、伸长率等；载荷工况的实施与后处理求解及表达方式等。

基于有限元方法的优化设计分析对象如结构静力分析、动力学分析、非线性分析、疲劳分析、热力学分析、电磁场分析、流体力学分析、结构反求优化设计、热固流的耦合分析、机构运动仿真分析、刚柔复合多体机构动力学仿真分析等，成为现代设计优化过程中的必要手段。

产品数字化制造 CAM 中的关键核心技术包括：刀具轨迹的生成方式、等距线、等距面、曲面交线、投影技术、空间动力学曲面构造；刀具轨迹仿真加工；刀位轨迹数据信息存储；机床系统识别与后置处理；文件传输等。产品数字化设计、制造、仿真与模拟所需的 CAD/CAE/CAM 技术，是随着计算机技术的发展而发展的，工业设计与制造中与 CAD 有关的参数化技术、建模技术、装配技术以及人工智能技术等应用越来越重要。下面对支撑 CAD/CAE/CAM 运行的核心，如工程数据库、参数化技术、装配技术、建模技术等内容进行简要讲解。

1.1.1 工程数据库

工程数据库是随着 CAD/CAM/CAE/CAPP 集成化软件系统的发展而发展的，这种集成化系统的所有功能模块的信息都是在一个统一的工程数据库下进行管理的。由于工程应用领域对数据管理的要求与传统应用领域有很大的区别，使得工程数据库管理系统的功能需求有所不同，一般情况下，它应满足以下功能要求。

1) 支持复杂对象及其语义关系的描述与处理，复杂对象和存在于复杂对象之间语义关系的复杂性是工程的特点之一。

2) 支持文字、图形、图像、动画等多媒体数据的管理。

3) 是动态数据库，不仅能对静态数据建模，而且能对动态数据建模，允许动态地对数据库进行修改、更新与扩充。

4) 支持约束的定义与维护，工程对象往往都是具有一定约束的设计对象，要能提供定

义约束的能力,支持约束的传播,在设计过程中可实时修改对象的约束。

- 5) 支持快速查询,有良好的数据查询接口功能。
- 6) 支持不同设计版本的存储与管理,支持多方案设计和回溯的功能。
- 7) 适用于工程背景的事务管理功能,不仅支持短事务的管理,而且支持长周期的管理。
- 8) 系统具有客户单 Client/server 服务器的模式,具有分布计算的能力。

1.1.2 参数化技术

参数化设计是随着约束的概念引入 CAD 技术而出现的,常采用尺寸驱动的形式来实现。是指对零件上各种特征施加各种约束形式,各个特征的几何形状与尺寸大小用变量的方式来表示,这个变量不仅可以是常数,而且可以是某种代数式。如果定义某个特征的变量发生了改变,则零件的这个特征的几何形状或尺寸大小将随着参数的改变而改变,随之刷新该特征及其相关联的各个特征,而不需要再重新绘图设计。参数化设计技术为初始设计、产品模型的修改、系列零件族的生成、多方案比较等提供了强大的手段。参数分为尺寸约束参数和几何约束参数两种。

尺寸约束是确定几何元素的大小及彼此间相对位置的约束,是可变的,如长、宽、高、半径、夹角等。几何约束是指几何元素拓扑结构的约束,是不可变的,如垂直、平行、相切、同心等约束。对约束的基本要求有:①约束的一致性:能够检查不一致的约束,如过约束或欠约束。②约束求解的可靠性:约束求解必须是稳定的,对于一致的约束能给出一致的解。③约束定义的交互性:允许在设计过程中增加、修改和删除约束。

参数化设计的方法主要有程序参数化设计和交互参数化设计两种模式。程序参数化设计是以图形的坐标值为变量,用一组参数确定图形的尺寸关系,根据图形顶点的连接关系,可方便地确定变量和尺寸约束参数之间的数学关系。其实质是把图形信息记录在程序中,用一组变量定义尺寸约束参数,用赋值语句表达图形变量和尺寸约束参数的关系式,并调用一系列的绘图命令绘制图形。这种方法的程序编制量大,柔性差,直观性不好,仅在早期的 CAD 系统中运用。

交互参数化 CAD 设计无需考虑设计细节尽快地画出零件草图,经过对草图的反复修改得到所需的设计,而且还可改变约束参数来更新设计,实现的方法有几何推理法、作图规则匹配法、变量几何法等。变量几何法概念清楚,适应能力强,许多造型系统还是采用这种方法,各国学者都在努力改进此种方法。

1.1.3 装配设计技术

装配设计的主要发展趋势是由图表达的拓扑结构向树型表达的层次结构发展。装配信息建模的核心问题是,如何在计算机中表达和存储装配体组成部件之间的相互关系。这种相互关系包括相互位置关系、配合与连接关系等。装配建模在过去主要集中在对装配体的几何及拓扑关系的表达上,但在装配体间及装配过程中的装配关系信息、装配关系约束及装配设计信息表达都很缺乏,而这些对装配设计、装配设计分析尤其是支持基于装配的自顶向下设计模式是非常重要和有效的。

自顶向下的装配建模可以实现零件设计与装配设计的集成,并强调对产品设计功能要求

的传播和满足。其中的装配模型采用基于广义环图树的装配模型,既考虑到装配设计过程中的层次关系,又能处理装配体各部分之间的几何配合图的关系。同时,为支持自顶向下的设计思想,在装配设计过程中反映产品功能要求信息,在装配模型中引入了设计变量约束的概念。例如在建立注射模标准模架库的过程中,可采用变量装配设计的方法。变量装配设计是通过概念设计把用户对产品的功能要求、设计意图转化为各个设计阶段都能理解和操作的设计变量和设计变量约束,各个设计阶段的装配设计和零件设计都在此设计变量和设计变量约束的指导和控制下完成。

变量装配设计将概念设计产生的设计变量和设计变量约束记录、表达、传播并解决冲突以满足设计要求,使各阶段的零件设计在产品功能 and 设计意图的基础上进行,所有的工作都是在产品功能约束下进行和完成的。装配技术是按照设计要求,将合格的零部件集成于一体,形成具有一定功能的产品工艺技术。装配技术涉及装配工艺规划、装配操作、装配工装、装配调整和装配检测等技术。近年来,基于柔性工装的数字化预装配和可视化装配技术有了很大的发展。

数字化预装配是指根据产品设计、结构分析、工艺计划或工装设计等技术需求,在计算机上对新产品对象进行预先装配的模拟过程。凡参与数字化预装配的零部件都需设计成三维实体模型,用于检查零部件在装配过程中有无干涉现象,对接面适配情况以及各种设计集成状态。它可减少传统的实物试装过程,并对装配过程和路线进行优化,显著提高产品装配质量,缩短装配周期和降低装配成本。

可视化装配是指利用计算机、多媒体和虚拟现实等技术,为解决装配工艺的科学决策和生产现场工艺文档的直观显示而提供的一种新方法和新技术。可视化装配技术涉及产品三维建模、装配路径规划、装配过程干涉检验、人机工程分析、装配工装使用、装配现场环境建立、装配精度预分析和机构运动仿真等技术。它不仅可在产品研发阶段为设计、工艺人员提供对装配工艺进行实时分析和验证的工具,同时也可在产品装调时为现场操作者提供可视化装配工艺文档的显示。

1.1.4 建模技术

产品数字化设计 CAD 技术的核心是几何形体的构造,即通常所说的几何建模。几何建模是采用一套合适的数据结构来描述三维物体的几何形状,形成供计算机识别和处理的信息数据模型,该模型包含了三维物体的几何信息和拓扑信息。几何信息构成几何实体中各几何元素在欧氏空间中的位置和大小,可以用数学式加上边界条件来描述;拓扑信息构成几何实体中各几何元素的数目和它们的连接关系。在 CAD 技术的发展过程中,几何形体的构造由简单到复杂,所包含的信息也由简单到丰富。到目前为止,建模技术主要有线框模型、表面模型、实体模型和特征建模等方法。

(1) 曲面造型 曲面造型是计算机辅助几何设计和计算机图形学的一项重要内容,主要研究在计算机图像系统的环境下对曲面的表示、设计、显示和分析。它起源于汽车、飞机、船舶、叶轮等的外形放样工艺,由孔斯、贝赛尔等大师于 20 世纪 60 年代奠定其理论基础。如今经过四十多年的发展,曲面造型现在已形成了以有理 B 样条曲面参数化特征设计和隐式代数曲面表示这两类方法为主体,以插值、拟合、逼近三种手段为骨架的几何理论体系。

随着计算机图形显示对于真实性、实时性和交互性要求的日益增强,几何设计对象向着多样性、特殊性和拓扑结构复杂性靠拢这一趋势的日益明显;随着图形工业和制造业迈向一体化、集成化和网络化步伐的日益加快,激光测距扫描等三维数据采样技术和硬件设备的日益完善,曲面造型近几年得到了长足的发展。这主要表现在研究领域的急剧扩展和表示方法的开拓创新。从研究领域来看,曲面造型技术已从传统的研究曲面表达、曲面求交和曲面拼接,扩充到曲面变形、曲面重建、曲面简化、曲面转换和曲面等距性等方面。

常见的曲面造型方法有基于物理模型的曲面造型方法、基于偏微分方程的曲面造型、基于流体力学的曲面造型、网格细分法曲面造型等方法。从表示方法来看,以网格细分(Sub-division)为特征的离散造型与传统的连续造型相比,离散造型有后来居上的创新之势。这种曲面造型方法在生动逼真的特征动画和雕塑曲面的设计加工中如鱼得水,得到了高度的运用。工业外观造型设计中的多数软件平台如3Dmax、Maya、SoftImage等多采用网格细分的方法进行曲面造型,将在第2章相关章节简要介绍。

(2) 特征造型 线框、表面和实体模型只是提供了三维形体的几何信息和拓扑信息,这是低层次的信息,随着计算机集成制造系统的发展,要求CAD系统除了满足自身信息的完备性外,还必须为计算机辅助工艺规划系统(CAPP)、计算机辅助制造系统(CAM)等提供反映设计人员设计意图的非几何信息,如材料、公差等,以满足产品生命周期的全过程。特征造型正是在这种情况下出现的,它是实现CAD/CAE/CAM/CAPP高度集成的基础。

不同的应用有不同的特征定义,但特征的以下特点已获得公认:具有一定的几何形体,是产品信息的携带者,具有工程意义,具有严格的性质。不同的特征定义又导致了不同的特征分类,考虑到实际应用背景和实现上的方便性,常采用如下的分类:

1) 形状特征:携带某些工程信息的几何形体,又分为体特征,过渡特征和分布特征。

① 体特征:反映形体的增加(如凸台)或减少(如孔、槽等)。

② 过渡特征:表达一个形体的各表面分离或结合的性质,如倒角、倒圆等。

③ 分布特征:表达一组相同的形状特征,如阵列孔、齿轮的齿廓等。

2) 精度特征:在工程设计和加工中使用的形位公差、尺寸公差、表面粗糙度等非几何信息,还包括检测特征。

3) 材料特征:规定材料的类型、强度、力学与物理性能、热处理方式与条件等信息。

4) 装配特征:包括装配体中各零件的位置关系、公差配合、功能关系、动力学关系等。

5) 分析特征:有关工程分析方面的特征,如有限元分析中的梁、板、壳等特征。

早期的特征造型系统一般采用特征交互定义的方式来实现,即在传统的实体造型系统中加入特征定义系统,通过交互的定义操作将高层的特征信息附加到已有的几何模型上。这种方式实现简单,但设计效率低,操作繁琐。随后出现了特征自动识别系统,即首先在传统实体造型系统中生成零部件的几何模型,然后通过一个针对特定领域的特征自动识别系统从几何模型中将所需的特征识别出来,这种方式自动化程度高,但特征自动识别是一个复杂的匹配过程,对于复杂零件的识别过程需花费大量时间,而且还不能保证识别出所有的特征。

为了克服前两种方法的缺陷,又出现了特征的自动重构,即在纯几何模型与特征模型之中引入与特定应用无关的元特征,即形状特征。该方法首先构造出零件的形状特征模型,随后根据不同的应用场合,形状特征模型被解释为更高层次的应用特征模型。这种方式效率

高,易扩充,但由于在构造形状特征模型中,面对用户的是缺乏实际含义的形状特征与操作,缺少更高层次的设计概念及操作支持,因而还不能很好地应用于实际设计工作。

基于特征的造型系统是目前特征造型系统最好的实现方式,这种方式通过支持具有特定应用含义的特征为用户提供了高层次的符合工程设计过程的设计概念和方法,大幅度提高了用户设计效率和质量,同时也避免了特征的自动识别与重构,而且在设计过程中还可方便地进行设计特征的合法性检查、特征相关性检查以及组织更复杂的特征。特征造型方法与前一代的几何造型方法相比较,有以下特点和作用:

1) 过去的 CAD 技术从二维绘图起步,经历了三维线框、曲面和实体造型发展阶段,都是着眼于完善产品的几何描述能力;而特征造型则是着眼于更好地表达产品完整的技术和生产管理信息,为建立产品的集成信息模型服务。它的目的,是用计算机可以理解和处理的统一产品模型替代传统的产品设计和施工成套图样以及技术文档,使得一个工程项目或机电产品的设计和准备各环节可以并行展开,信息流畅通。

2) 它使产品设计工作在更高的层次上进行,设计人员的操作对象不再是原始的线条和体素,而是产品的功能要素,像螺纹孔、定位孔、键槽等。特征的引用直接体现设计意图,使得建立的产品模型容易为别人理解和组织生产,设计的图样更容易修改。设计人员可以将更多的精力用在创造性构思上。

3) 它有助于加强产品设计、分析、工艺准备、加工、检验各部门间的联系,更好地将产品的设计意图贯彻到各个后续环节并且及时得到后者的意见反馈,为开发新一代的基于统一产品信息模型的 CAD/CAPP/CAM 集成系统创造前提。

4) 它有助于推动行业内的产品设计和工艺方法的规范化、标准化和系列化,使得在产品设计中及早考虑制造要求,保证产品结构有更好的工艺性。

5) 它将推动各行业实践经验的归纳总结,从中提炼更多规律性知识,以丰富各领域专家的规则库和知识库,促进智能 CAD 系统和智能制造系统的逐步实现。

总之,特征是产品信息的集合,它不仅具有按一定拓扑关系组成的特定形状,且反映特定的工程语义,适宜在设计、分析和制造中使用。我们应该将特征理解为一个专业术语,它兼有形状和功能两种属性,从它的名称和语义足以联想其特定几何形状、拓扑关系、典型功能、绘图表示方法、制造技术和公差要求。基于特征造型的自由直接建模技术是特征造型的一个新的亮点,对于提高设计效率和设计的重用性具有重要的意义,这些方面的内容,有兴趣的读者可以体验一下 UG NX 软件的和 CATIA 软件点拉拖放式的直接建模造型设计功能。

1.2 数字化制造技术

客户化、小批量、多品种、快速交货的生产要求不断增加,各种新技术的涌现和应用更加剧了市场的快速变化。制造行业的竞争是柔性和响应速度的竞争,以适应全球市场的动态变化。制造业的形势表现在全球化、数字化、网络化、集成化、并行化、虚拟化。数字化设计、制造、仿真协同是企业的发展基础,现代制造的自动化与信息化技术关注的是协同产品设计、制造与测量集成系统、网络化高性能加工技术与应用系统、复杂设备运行的协同服务支持、虚拟现实技术与数字化工厂。

数字化技术一般是指以计算机硬件、软件、接口、协议和网络为技术手段,以信息的离

散化表述、传递、处理、存储、执行和集成等信息科学理论及方法为基础的集成技术。该技术适用领域非常广泛，易于与其他专业技术融合形成各种数字化专业技术。在现代制造业中，以制造工程科学为理论，将制造技术与数字化技术相结合的数字化制造技术，已成为先进制造技术的核心，具有广泛的应用和发展前景。其核心内容包括：数字化理论与技术基础、数字化基础环境、数字化产品开发与技术、数字化制造系统与生产过程运行管理技术、管理技术与数字化技术应用评估等等。

现代模具、模型的设计与制造技术的应用与发展，对产品设计及优化分析已起着十分重要的作用。如液态金属铸造、固态金属冲压、锻造和塑料注塑过程中的凝固与成形、塑性流动的数值模拟方面，数字化仿真 CAE 已发挥着重要的作用。如利用 Moldflow 进行注塑流动过程模拟来优化注塑模具的设计和制品的设计；使用 Dynaform 进行大型覆盖件冲压成形过程模拟来解决裂纹、回弹和模具优化设计问题；使用 Procast 对铸造产品进行凝固、充型等过程模拟来优化铸造的工艺参数和模具设计；使用 UG NX 配合 Vericut 模拟数控机床加工、使用 Msc. Patran 联合 RTM 软件对复合材料制品进行优化设计与工艺仿真等，这些内容将在后面的章节中进行详细介绍。

工艺技术是将产品设计图样和技术要求物化为实际产品的一门工程技术，是制造技术的核心，是科学技术生产力的重要组成部分。经过长期的努力，国防科技工业已形成了门类比较齐全、技术水平先进的关键工艺技术体系及先进制造技术平台，如图 1-1 所示。

先进制造技术包含精密高效钣金成形技术、金属塑性成形设计优化的方法与稳健设计、优质高效焊接技术、复合材料结构制造技术、高速高效超精密复合加工技术、现代特种加工工艺、快速模具制造技术等。主要应用在航空航天、兵器、核工业、汽车工业、机电装备等行业，这些先进的数字化制造、仿真技术的应用，对于提高整个国家的工业水平起着举足轻重的作用。常用先进的数字化制造技术基本上包含如下几个方面的内容。

1. 数控加工工艺与高速切削技术

数控加工工艺是伴随数控机床的出现、应用与发展而形成的一种现代加工方法和过程，它具有高效、精密和柔性等特点。高速数控切削是指被加工材料在切削速度达到或超过某一域限值，切削力、温度、磨损明显优于传统切削速度的数控切削加工技术，其包含高速主轴、高速切削机床结构、高速切削编程、高速切削工具系统等关键技术。目前高速切削在航空、航天、兵器、模具、汽车等行业中均得到了广泛应用。详细内容将在本书第 9 章进行相关方面的内容讲解。

2. 精密、超精密与微细加工技术

加工精度在 $1 \sim 0.1 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度 Ra 在 $0.1 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 的精密、超精密与微细加工技术：其主要加工方法包括精密机械加工和精密特种加工。精密加工技术在工业领域应用非常广泛，主要加工对象有精密传动件、精密构件、精密光学器件、精密制导、精密传感器件及空间飞行器的姿控部件等。这些加工所采用的手段除了传统的机械加工外，还涉及高能束加工等特种加工技术以及相应的检测技术和环境控制技术等。

3. 金属精密塑性成形技术

精密成形是指成形件达到无余量或少余量、高精度的成形技术。与普通成形相比，成形精度高，形状和尺寸更接近于成品件，成形后不需或只需少量加工，同时还具有更好的组织结构、性能及表面质量。精密成形包括如压力铸造、半固态金属铸造、锻造、钣金成形、超

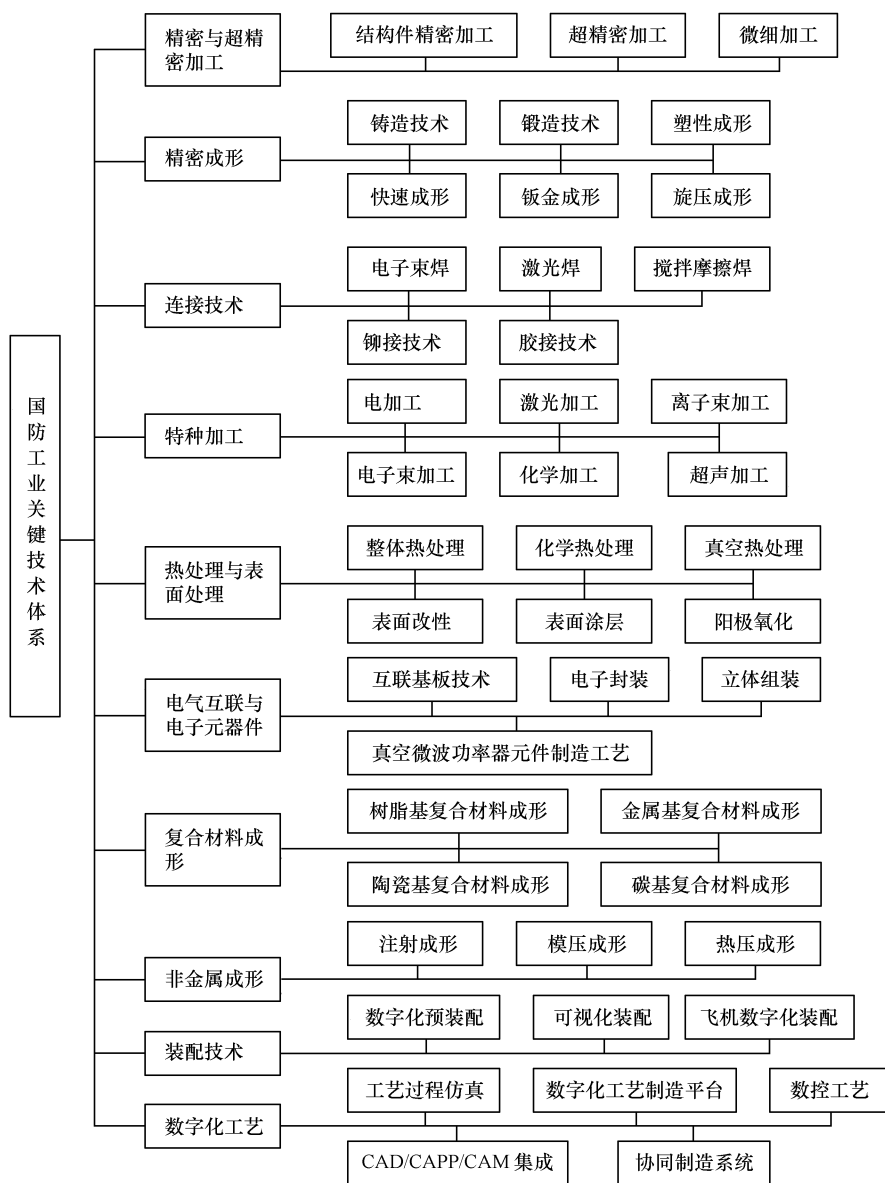


图 1-1 关键技术体系

塑性成形、超塑性成形与扩散连接、旋压成形等系列成形技术。这些金属塑性成形的工艺及其手段，大多在塑性成形模拟 CAE 分析的指导下进行，从而有效地提高工艺水平，优化工艺参数，节省制造成本。详细内容将在本书第 7 章和第 8 章的相关章节进行讲解其应用。

4. 先进连接技术

连接技术是指通过机械连接、胶接、焊接等技术手段将两个或两个以上分离的工件结合成一体工艺方法。连接技术应用范围极广，在航空、航天领域以中薄铝、钛合金构件的焊接、钎接以及非金属材料的胶接为特点；船舶、兵器行业以厚实、高强构件的焊接为特色；军工电子以电子器件、组件的钎焊为特色。先进的电子束焊、激光焊、搅拌摩擦焊等焊接技术也同样有效的利用了 CAE 技术进行焊接仿真，不仅提高了焊接强度、同时控制了焊缝的

质量和产品的变形。

5. 特种加工技术

特种加工技术是指不直接利用机械能，不依靠切削力来对工件进行尺寸或表面加工，而是利用电、热、光、声和化学等其他能量进行工件加工的方法。其特点是工具与工件之间不存在显著的机械切削力和接触。加工用的工具硬度可以低于材料的硬度。特种加工技术主要分为电加工、高能束流加工和其他特种加工三大类。这些特种加工技术也同时利用了 CAM 技术和 CAE 技术，加快了其在工程中的应用。

6. 非金属材料成形技术

非金属材料成形与加工技术一般是指高分子材料和无机非金属材料的成形与加工技术，其中高分子材料包括塑料、橡胶、纤维和胶粘剂等，无机非金属材料包括陶瓷、玻璃和水泥等。工程塑料常用的注射成形、模压成形、热压成形等工艺方法。从产品 CAD 设计、模具制造 CAM、成形工艺 CAE 分析等一系列过程，都采用了先进的数字化设计、制造、仿真的手段。

7. 复合材料成形技术

复合材料是指由两种或两种以上具有不同物理、化学性质的材料以一定方式复合形成的材料。复合材料在融合其单质组分优势特性的同时，可以产生单质材料所不具备的全新性能。通常分为树脂基、陶瓷基、碳基和金属基四大类。复合材料替代金属材料已成为航空、航天飞行器减重的主要技术途径，也是实现航天器防热、高温透波、高温承载的结构与功能的保障，其成形工艺水平、性能高低以及用量在很大程度上代表了飞行器的先进性水平。

常用的复合材料成形方法有树脂基复合材料成形、树脂膜转移成形、缠绕成形、金属基复合材料成形、陶瓷基复合材料成形等。由于复合材料制品的特点是，材料和制品是同时设计出来的，产品质量的好坏直接取决于材料的设计、力学性能的分析等，因此 CAD/CAE 在复合材料制品设计中占据着非常重要的作用。复合材料制品的优化设计与工艺仿真的实例工程应用将在第 6 章进行详细讲解。

8. 数字化检测技术

数字化检测和检验是以多种先进的传感技术为基础，且易于同计算机系统结合。在合适的软件支持下，这类自动化检测和检验系统可以自动地完成数据采集、处理、特征提取和识别，以及多种分析与计算。在线检测是指检测器具、装置或检测工作站在空间上集成在制造系统中，制造过程与检测过程没有滞后，其检测结果可以用来影响下一个产品的制造，对它进行修正和补偿，或用分类器进行分类。

三坐标测量机是一种典型的数控测量装置，是将被测产品置于直角三坐标系中，进行尺寸及形位误差测量的装置。测量方法可采用接触式或非接触式，通过与 CAD/CAM 系统集成，可在三维 CAD 模型上进行测量编辑前实现仿真。三坐标测量机广泛应用于航空航天、汽车模具、机械电子等行业，已成为制造企业不可缺少的检测手段之一。

上述这些先进的数字化设计制造与仿真技术的应用，如注塑模具设计与成形模拟技术、压铸成形模具设计与铸造仿真、板料冲压成形模拟、复合材料制品设计与优化、数控机床加工仿真与模拟等内容将在后面的相关章节进行简要的介绍。

1.3 企业数字化制造与工艺的核心

在经济全球化的今天,对于制造企业而言,如何利用数字化技术提高其制造工艺和产品质量水平,提高制造效率是非常重要的,下面重点讲解数字化制造工艺技术及数字化协同技术的核心内容。

1.3.1 数字化工艺技术

数字化工艺技术是将计算机技术和数字化技术应用于制造工艺过程所形成的新技术和新方法的总称,包括计算机辅助工艺过程设计、工艺参数优化设计、数控加工编程、加工和成形过程仿真、数字化工装设计、工艺装备数字化控制以及工艺知识库和数据库的建立等。

1) 数字化工艺准备:数字化工艺准备是指利用计算机技术和数字化技术辅助工艺人员进行工艺准备的新技术,重点是计算机辅助工艺过程设计和计算机辅助工装设计等。

2) 计算机辅助工艺设计:计算机辅助工艺过程设计(CAPP)是利用计算机技术对零件的工艺路线、工序等进行自动规划设计的过程,主要包括确定工艺方法和顺序,确定加工设备和工艺装备,确定工艺参数和工时定额计算,以及工艺信息文件输出等。它是衔接CAD和CAM的重要环节,按工作原理可分为:派生式CAPP、创成式CAPP和综合式CAPP等。

3) 制造工艺过程仿真:工艺过程仿真是利用数字化技术对工艺过程进行试验研究和预测的一门综合性技术。一般分为切削过程、成形过程和装配过程仿真。切削过程仿真包括刀位轨迹和运动过程干涉检测等运动学仿真,以及对切削加工特性各加工精度进行预测的动态仿真。成形过程仿真可以预测金属流动规律,如位移场、速度场、应力应变场和温度场的分布以及缺陷的产生和演化过程。工艺过程仿真对优化工艺过程和工艺参数,提高产品制造质量具有重要意义。

4) 数字化工艺制造平台:数字化工艺制造平台是将数字化技术应用于工艺过程和生产运行的业务活动中,形成一个整体运行的统一信息化环境。数字化工艺制造平台一般具备支撑系统集成的计算机网络和数据库环境,包括PDM、ERP等的信息化企业管理系统等。

5) 数控加工工艺:数控加工工艺是伴随着数控机床的出现和发展而形成的现代加工方法和过程,具有高效、精密和柔性的特点。它是依据一定的数控系统将零件的技术要求、工艺参数及其他数据编写成零件加工程序,控制机床按照NC数控程序完成指定的加工内容。

6) CAD/CAPP/CAM集成:CAD/CAPP/CAM集成是将产品设计与制造紧密结合,实现产品设计、工程分析、工艺过程规划和制造加工等环节数据的有效集成,其关键是信息的交换、共享、关联和更新。依据信息交换方式和共享程度的不同,可采用基于专用数据接口的集成、基于标准数据格式文件的集成、基于统一产品模型和数据库的集成、基于产品数控管理和基于知识的集成。

7) 工艺信息资源共享:工艺信息资源包括机加、锻造、焊接、热处理、表面处理、装配和调试等专业工艺技术、工艺装备、工艺文件和工艺管理等信息,是企业生产管理的基本依据。工艺信息资源共享是通过数据库技术和通信技术,实现企业内外工艺信息资源的共享,提高企业生产管理水平。

8) 协同制造系统:协同制造系统是通过网络和人工智能技术,将分布在各地的制造工