

高等院校机械工程类“十三五”系列规划教材

数字化设计与制造

技术及应用

徐雷 殷鸣 殷国富 编著

SHUZHUA SHEJI YU ZHIZAO
JISHU JI YINGYONG



四川大学出版社

高等院校机械工程类“十三五”系列规划教材

数字化设计与制造

技术及应用

徐雷 殷鸣 殷国富 编著

SHUZHUA SHEJI YU ZHIZAO
JISHU JI YINGYONG



四川大学出版社

前 言

以新一代信息技术与制造业深度融合发展为主要特征的产业变革在全球范围内孕育兴起，数字化、网络化、智能化日益成为制造业发展的主要趋势。为了打造具有国际竞争力的制造业，我国在 2015 年印发《中国制造 2025》，实施“中国制造 2025”战略规划，智能制造是其主攻方向，而数字化设计与制造则是实施智能制造的一种关键共性技术和支撑系统。

数字化设计与制造（Digital Design and Manufacturing）技术是指采用数字化方式，利用计算机软硬件及网络环境，以提高产品开发质量和效率为目标的相关设计制造方法和软件系统有机集成的产品开发技术。该技术的发展和应用使传统的产品设计方法与生产模式发生了深刻的变化，对制造业的生产模式和人才知识结构等产生了重大的影响。经过 20 世纪 70 年代以来的应用发展，数字化设计与制造系统已形成规模庞大的产业集群，促进了制造业产品设计与制造迈向数字化、智能化、虚拟化和全球化的新时代。目前，数字化设计与制造技术被广泛应用于机械、电子、汽车、模具、航空航天、交通运输、工程建设、军工等各个领域，它的研究与应用水平已成为衡量一个国家技术发展和工业现代化的重要标志之一。

毫无疑问，数字化设计与制造技术已经成为产品设计制造工作中不可缺少的工具，是机械工程学科领域的一门重要专业必修课程。对于 21 世纪的工程技术人员来说，学习和掌握数字化设计与制造技术原理及其相应软件系统的应用方法是十分重要的。因此，及时、系统地反映数字化设计与制造原理、最新技术与典型软件系统应用方法，满足当前数字化设计与制造技术研究、教学和推广应用的需要，是我们编写本书的基本出发点。

数字化设计与制造技术课程教学的主要任务有三个方面：一是使学生学习数字化设计与制造技术的基本原理和应用方法；二是使学生学习和掌握数字化设计与制造技术中的关键共性技术；三是通过对数字化设计与制造典型软件系统的学习和初步应用，培养学生的数字化设计与制造技术系统工程化应用意识。为此，本书编写的指导思想是：以数字化设计与制造技术的共性理论为基础，以工程应用为背景，注意突出内容的新颖性和实用性，在论述数字化设计与制造技术的基本原理、关键技术和应用方法的基础上，结合常用数字化设计与制造软件系统应用介绍，学习数字造型、性能分析仿真、数字化制造、虚拟产品开发、增材制造与逆向工程所涉及的数字化设计与制造技术和软件系统，并通过数字化设计与制造技术软件系统的应用，较为完整地理解和掌握数字化设计与制造技术。

本书体系结构与内容安排如下：

第 1 章在介绍智能制造概念的基础上，分析数字化设计与制造的基本内涵、技术关

键和发展概况，学习了解数字化设计与制造技术的特点和发展趋势。

第2章从数字化产品开发过程入手，探讨数字化设计与制造系统的理论基础，重点讨论数字化设计与制造技术的功能和内涵、参数化造型技术、计算机图形处理技术以及产品数据交换标准与接口技术等。

第3章从机械产品设计制造环境的要求出发，讨论几何造型的理论基础、几何造型方法、实体造型方法、曲线曲面造型方法等数字化造型的理论基础与技术方法。

第4章介绍特征的概念、分类及特征造型的特点，并结合目前常用的基于特征的数字化造型软件，详细论述了从草图设计、零件造型、装配造型到生成工程图的基于特征的数字化造型过程。

第5章介绍数字化仿真分析技术与应用，重点是数字化仿真的基本方法和理论，结合 ANSYS 软件论述了有限元分析的基本原理和分析步骤、数字样机技术和 CAE 应用实例。

第6章着重论述数字化制造中的关键技术，包括计算机辅助工艺设计技术、数控加工技术、数控编程技术、数控加工仿真技术，介绍常用的数控系统及数控加工仿真实例。

第7章从虚拟产品开发过程入手，介绍了虚拟现实的概念、组成结构、发展及分类，重点探讨虚拟现实中的关键技术，包括硬件组成及开发工具，并结合工程实际探讨虚拟现实技术在产品设计与制造中的应用。

第8章论述逆向工程的概念及逆向工程技术的应用，重点介绍了逆向工程中的数据采集技术和数据处理技术，并以燃气轮机叶片为例，详细介绍了反求过程中检测平台搭建、数据采集及处理的详细步骤。

第9章介绍增材制造的技术原理、增材制造典型工艺技术、增材制造中的数据处理、增材制造的应用领域以及增材制造技术面临的挑战与发展趋势。

第10章在讨论智能制造模式发展背景的基础上，介绍智能制造的概念和内涵，分析智能制造的关键技术，讨论数字化工厂和智能工厂等实施智能制造的新模式，分析智能制造的发展趋势。

本书由四川大学机械工程学院徐雷副教授、殷鸣副教授和殷国富教授编著。其中，第1、10章由殷国富教授编写，第2、3、4、5、7章由徐雷副教授编写，第6、8、9章由殷鸣副教授编写，徐雷副教授负责全书文字统稿工作。本书在编写过程中参考了作者近年来参与和承担国家工信部智能制造新模式应用项目和四川省智能制造专项计划、四川省科技支撑计划、四川省省级财政智能制造专项等相关课题的工作成果，同时参考了国内外许多专家学者的文献资料，四川大学研究生院学术学位研究生教材建设项目以及示范性专业学位研究生实践基地建设项目为本书的出版提供了资助，四川大学出版社的编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动，谨此致谢。由于数字化设计与制造技术内容十分丰富，技术日新月异，书中内容难以全面反映这一技术领域的全貌，不妥之处在所难免，诚请批评指正。

作者
2019年5月

目 录

第 1 章 数字化设计与制造技术概述	(1)
1.1 制造业发展概况	(1)
1.2 “中国制造 2025” 战略规划	(2)
1.3 数字化设计与制造技术概况	(4)
1.4 数字化设计与制造的内涵与体系	(6)
1.4.1 数字化设计技术	(7)
1.4.2 数字化分析技术	(9)
1.4.3 数字化工艺技术	(10)
1.4.4 数字化制造技术	(11)
1.4.5 CAD/CAM 集成技术	(12)
1.4.6 产品数据管理技术	(13)
1.4.7 产品生命周期管理技术	(13)
1.5 CAD/CAM 系统概况	(13)
1.5.1 CAD/CAM 系统的硬件设备	(14)
1.5.2 CAD/CAM 系统的软件体系结构	(15)
1.5.3 常用 CAD/CAM 软件系统	(16)
1.6 数字化设计技术发展历程	(19)
1.6.1 制造业市场竞争的发展概况	(19)
1.6.2 数字化设计与制造技术的发展历程	(19)
1.7 数字化设计与制造技术的发展趋势	(23)
第 2 章 数字化设计与制造基础技术	(26)
2.1 数字化产品开发技术	(26)
2.1.1 数字化产品开发过程	(26)
2.1.2 数字化设计与制造系统的内涵	(27)
2.2 数字化设计与制造系统的功能	(29)
2.3 参数化造型技术	(32)
2.3.1 尺寸驱动系统	(33)
2.3.2 变量设计系统	(35)
2.3.3 尺寸驱动系统与变量设计系统的比较	(36)
2.4 计算机图形处理技术	(37)
2.4.1 图形的概念	(37)

2.4.2	图形系统与图形系统标准	(38)
2.4.3	图形变换与处理	(41)
2.5	产品数据交换标准与接口技术	(45)
2.5.1	标准接口	(46)
2.5.2	业界接口	(48)
2.5.3	单一的专用接口	(49)
2.5.4	CAD 软件数据交换的实现	(49)
第 3 章	产品数字化造型理论基础	(51)
3.1	产品模型与造型技术的基本概念	(51)
3.1.1	产品模型	(51)
3.1.2	几何造型技术	(52)
3.2	三维几何造型的理论基础	(52)
3.2.1	形体的定义	(52)
3.2.2	形体的几何信息和拓扑信息	(53)
3.2.3	正则形体	(53)
3.2.4	型体	(55)
3.2.5	布尔运算	(55)
3.3	几何造型方法	(56)
3.3.1	线框模型	(56)
3.3.2	表面模型	(57)
3.3.3	实体模型	(59)
3.4	实体造型方法	(60)
3.4.1	构造实体几何法	(60)
3.4.2	边界表示法	(61)
3.4.3	单元分解法	(62)
3.5	曲线描述基本原理	(65)
3.5.1	造型空间与参数空间坐标系统	(65)
3.5.2	曲线的数学描述方法	(65)
3.5.3	几何设计的基本概念	(66)
3.6	曲线设计	(66)
3.6.1	Bezier 曲线	(67)
3.6.2	B 样条曲线	(69)
3.7	曲面设计	(72)
第 4 章	参数化特征造型技术	(74)
4.1	特征造型	(74)
4.1.1	特征的定义	(74)
4.1.2	特征的分类	(75)
4.1.3	特征造型的特点	(76)

4.1.4	特征造型的基本方法	(76)
4.2	草图绘制	(78)
4.2.1	轮廓	(78)
4.2.2	轮廓的草绘	(79)
4.2.3	草图实体	(79)
4.2.4	草图的定义	(80)
4.2.5	草图绘制工具	(81)
4.2.6	参考几何体	(81)
4.2.7	草图设计中的动态导航技术	(83)
4.2.8	草图绘制的一般技巧	(83)
4.3	实体特征	(84)
4.3.1	基本特征	(84)
4.3.2	设计特征	(86)
4.3.3	特征阵列	(88)
4.3.4	特征复制	(88)
4.4	曲面造型	(88)
4.4.1	曲面生成	(89)
4.4.2	曲面编辑	(91)
4.4.3	利用曲面特征建立实体模型	(92)
4.5	装配造型	(92)
4.5.1	装配造型的基本概念	(92)
4.5.2	装配过程	(93)
4.5.3	在装配模式下建立零部件	(94)
4.5.4	装配造型的修改及装配信息	(95)
4.5.5	装配模型的场景模式	(96)
4.5.6	建立产品模型	(96)
4.6	生成工程图	(97)
4.6.1	环境设置	(97)
4.6.2	二维视图	(99)
4.6.3	尺寸及符号标注	(102)
第5章	产品数字化仿真技术	(104)
5.1	仿真概述	(104)
5.2	数字化仿真的基本步骤	(105)
5.3	数字化仿真软件的构成、现状与发展趋势	(105)
5.3.1	数字化仿真软件的基本结构与功能	(106)
5.3.2	数字化仿真软件的现状	(108)
5.3.3	数字化仿真软件的发展趋势	(109)
5.3.4	ANSYS 软件	(111)

5.4	有限元分析原理与方法	(114)
5.4.1	有限元法的基本原理与分析方法	(114)
5.4.2	有限元分析中的离散化处理	(116)
5.4.3	单元分析	(119)
5.4.4	后置处理	(121)
5.5	CAE 的应用	(121)
5.5.1	卡门涡街的数值模拟	(121)
5.5.2	应用结果与分析	(124)
5.6	数字样机技术	(127)
5.6.1	数字化功能样机	(127)
5.6.2	数字化多学科设计优化	(128)
5.7	数字化仿真实例	(131)
5.7.1	汽车碰撞、空气动力、NVH 多学科设计优化	(131)
5.7.2	汽车多学科协同优化流程	(131)
5.7.3	汽车车身系统仿真	(132)
第 6 章	数字化制造技术	(135)
6.1	计算机辅助工艺设计	(135)
6.1.1	计算机辅助工艺设计技术概况	(135)
6.1.2	CAPP 系统中的工艺决策与工序设计	(143)
6.1.3	CAPP 的工艺数据库技术	(150)
6.1.4	CAPP 系统的流程管理与安全模型	(153)
6.1.5	CAPP 系统开发与应用实例	(155)
6.1.6	面向远程协同工艺设计的 CAPP 系统	(159)
6.2	数控加工技术	(161)
6.3	数控编程技术	(161)
6.3.1	数控机床的组成与工作原理	(161)
6.3.2	数控机床的坐标系统	(162)
6.3.3	NC 编程	(164)
6.3.4	APT 语言系统	(173)
6.4	常见的 NC 系统	(179)
6.4.1	数控系统的分类	(179)
6.4.2	CNC	(180)
6.4.3	DNC	(181)
6.4.4	STEP—NC	(182)
6.4.5	FMC	(184)
6.4.6	FMS	(184)
6.5	数控加工过程仿真	(185)
6.5.1	数控加工仿真系统的主要类型	(185)

6.5.2	基于 UG 和 VERICUT 的数控加工仿真技术	(186)
6.6	FANUC 数控系统简介	(187)
6.7	SIEMENS 数控系统简介	(190)
6.7.1	SINUMERIK 802D	(190)
6.7.2	SINUMERIK 810D	(191)
6.7.3	SINUMERIK 840D	(191)
6.8	EdgeCAM 智能数控编程系统	(192)
6.8.1	适用加工范围	(192)
6.8.2	EdgeCAM 智能数控编程系统的特点	(193)
第 7 章	虚拟现实技术	(198)
7.1	虚拟产品开发	(198)
7.2	虚拟现实概述	(199)
7.2.1	虚拟现实的概念	(199)
7.2.2	虚拟现实技术的发展	(200)
7.2.3	虚拟环境的结构及实现的关键技术	(200)
7.2.4	虚拟现实系统分类	(202)
7.2.5	增强现实系统	(203)
7.3	虚拟现实系统常见硬件设备	(204)
7.3.1	环境生成设备	(204)
7.3.2	跟踪技术	(204)
7.3.3	感知设备	(205)
7.3.4	基于自然方式的人机交互设备	(206)
7.4	常见的虚拟产品开发工具	(207)
7.4.1	Cult3D	(207)
7.4.2	Vega Prime	(208)
7.4.3	Unity3D	(209)
7.4.4	VRML	(210)
7.5	虚拟现实技术在数字化设计与制造中的应用	(212)
7.5.1	虚拟现实技术与虚拟设计	(212)
7.5.2	虚拟现实技术与虚拟装配	(212)
7.5.3	虚拟现实技术与虚拟产品	(213)
7.5.4	飞机部件装配生产线的虚拟仿真	(213)
7.6	产品虚拟原型技术	(214)
7.6.1	物理原型、数字原型与虚拟原型的概念	(214)
7.6.2	虚拟原型开发方法的特点	(216)
7.6.3	虚拟产品开发的意义	(216)
7.6.4	建立虚拟原型的主要步骤	(217)
7.7	ADAMS 软件介绍及应用	(217)

7.7.1	ADAMS 模块介绍	(218)
7.7.2	实例应用	(223)
第 8 章	逆向工程技术	(227)
8.1	逆向工程概述	(227)
8.1.1	逆向工程的概念	(227)
8.1.2	逆向工程与正向工程的区别	(228)
8.1.3	逆向工程技术的应用	(229)
8.1.4	逆向工程技术的发展趋势	(231)
8.2	数据采集技术	(232)
8.2.1	数据采集方法分类	(232)
8.2.2	接触式数据采集技术	(234)
8.2.3	非接触式数据采集技术	(237)
8.3	测量数据处理技术	(244)
8.3.1	数据预处理	(244)
8.3.2	多视数据的对齐和统一	(247)
8.3.3	数据分割	(249)
8.4	三维 CAD 模型重构	(250)
8.4.1	复杂自由曲面 CAD 模型重构技术	(250)
8.4.2	基于整个形体的实物反求 CAD 模型重构	(253)
8.4.3	模型精度评价及原始设计参数还原	(254)
8.5	基于三维光学扫描和 Geomagic Studio 的逆向工程实例	(256)
8.5.1	光学检测平台搭建	(257)
8.5.2	数据采集	(258)
8.5.3	Geomagic Studio 概述	(259)
8.5.4	点阶段的数据处理	(259)
8.5.5	多边形阶段的处理	(261)
8.5.6	形状阶段的处理	(263)
第 9 章	增材制造 (3D 打印) 技术	(264)
9.1	增材制造的技术原理	(264)
9.1.1	增材制造的概念与内涵	(265)
9.1.2	增材制造技术的发展历程	(265)
9.1.3	增材制造的基本工艺过程	(266)
9.1.4	增材制造技术的特点	(267)
9.2	增材制造的典型工艺技术	(268)
9.2.1	光固化成型	(268)
9.2.2	叠层实体制造	(270)
9.2.3	熔融沉积成型	(272)
9.2.4	选区激光烧结/熔化	(273)

9.2.5	送粉式激光融覆成型	(274)
9.2.6	黏结剂喷射成型	(276)
9.3	增材制造中的数据处理	(277)
9.3.1	数据格式	(278)
9.3.2	切片处理	(280)
9.3.3	扫描路径规划	(282)
9.3.4	添加支撑	(283)
9.3.5	成型方向	(284)
9.4	增材制造的应用领域	(284)
9.5	增材制造技术面临的挑战与发展趋势	(286)
9.5.1	问题和挑战	(286)
9.5.2	发展趋势	(287)
第10章	智能制造新模式及其应用	(289)
10.1	智能制造模式的发展背景	(289)
10.2	智能制造的基本概念	(291)
10.2.1	智能和智能系统	(291)
10.2.2	智能制造的定义	(291)
10.2.3	智能制造的内涵	(292)
10.2.4	智能制造技术	(292)
10.2.5	智能制造系统	(293)
10.3	智能制造的关键技术	(293)
10.4	智能制造新模式	(295)
10.5	数字化工厂与智能工厂	(295)
10.5.1	数字化工厂	(295)
10.5.2	智能工厂	(296)
10.6	精密高效传动件智能制造实例	(298)
参考文献	(305)

第 1 章 数字化设计与制造技术概述

以新一代信息技术与制造业深度融合发展为主要特征的产业变革在全球范围内孕育兴起，数字化、网络化、智能化日益成为制造业发展的主要趋势。为了打造具有国际竞争力的制造业，我国在 2015 年印发《中国制造 2025》，实施“中国制造 2025”战略规划，智能制造是其主攻方向，而数字化设计与制造则是实施智能制造的关键共性技术。本章在介绍智能制造概念的基础上，分析数字化设计与制造的基本内涵、技术关键和发展概况，学习了解数字化设计与制造技术的特点和发展趋势。

1.1 制造业发展概况

制造是指对原材料进行加工或再加工，以及对零部件进行装配的过程。通常，按照生产方式连续性的不同，制造分为流程制造与离散制造。制造业是指对制造资源（物料、能源、设备、工具、资金、技术、信息和人力等），按照市场要求，通过制造过程，转化为可供人们使用和利用的大型工具、工业品及生活消费产品的行业。

1. 发展制造业的意义

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基，在国民经济中发挥主要作用。18 世纪中叶开启工业文明以来，世界强国的兴衰史和中华民族的奋斗史一再证明，没有强大的制造业，就没有国家和民族的强盛。目前，中国凭借巨大的制造业总量成为名副其实的“世界工厂”。我国制造业在取得巨大成绩的同时，也面临着诸多亟待解决的问题，迫切需要实现由“制造业大国”向“制造业强国”的转变，实现制造业产业的转型升级。

2. 制造业格局面临的变化

在新一轮科技革命和产业变革中，国际产业分工格局正在重塑，全球制造业格局面临重大调整。新一代信息技术与制造业深度融合，正在引发影响深远的产业变革，形成新的生产方式、产业形态、商业模式和经济增长点。目前，世界工业大国都在加大科技创新力度，重点方向表现在以下几个方面：

一是推动增材制造（3D 打印）、移动互联网、云计算、大数据、生物工程、新能源、新材料等领域取得新突破。

二是推动基于信息物理系统的智能装备、智能工厂等智能制造方式发生变革。

三是发展网络众包、协同设计、大规模个性化定制、精准供应链管理、全生命周期管理、电子商务等新型产业价值链体系。

四是研发智能机床、智能家电、智能汽车等智能终端产品，不断拓展制造业新领

域。

3. 制造业变革的主要特征和面临的挑战

随着全球经济一体化进程的加快以及新一代信息技术的迅猛发展，全球正在兴起新一轮工业革命。现代制造业变革的主要特征表现在以下几方面：生产方式上，呈现出数字化、网络化、智能化、个性化、本地化、绿色化等特征；分工方式上，呈现出服务化、专业化、产品链一体化、产业链分工细分化等特征；产业组织方式上，呈现出网络化、平台化、扁平化的特点；商业模式上，将从以厂商为中心转向以消费者为中心，体验和个性成为制造业竞争力的重要体现和利润的重要来源。

伴随新一轮工业革命的发展，现代制造企业面临以下挑战：产品技术创新加强，智能化程度提高，生命周期缩短；全球市场竞争加剧和快速响应市场需求，交货期成为重要竞争因素；用户需求个性化，多品种、变批量生产比例增大，大规模、个性化定制生产正在形成。

4. 我国制造业创新发展迎来重大机遇

新中国成立尤其是改革开放以来，我国制造业持续快速发展，建成了门类齐全、独立完整的产业体系，成为支撑我国经济社会发展的重要基石和促进世界经济发展的重要力量。持续的技术创新，提高了我国制造业的综合竞争力。载人航天、载人深潜、大型飞机、北斗卫星导航、超级计算机、高铁装备、百万千瓦级发电装备、万米深海石油勘探设备等一批重大技术装备取得突破，形成了若干具有国际竞争力的优势产业和骨干企业，有力推动了工业化和现代化进程，显著增强了综合国力。

但我国仍处于工业化进程中，与世界先进水平相比，我国制造业仍然大而不强，关键核心技术与高端装备对外依存度高，以企业为主体的制造业创新体系不完善，在自主创新能力、资源利用效率、产业结构水平、信息化程度、质量效益等方面差距明显，转型升级和跨越发展的任务紧迫而艰巨。

1.2 “中国制造 2025” 战略规划

1. 实施“中国制造 2025” 战略规划

为赢得新一轮的世界竞争，加速我国制造业转型升级、提质增效，实现从“制造大国”向“制造强国”的转变，2015年5月19日，国务院正式印发《中国制造 2025》，这是我国实施制造强国战略的第一个十年行动纲领，也是我国建设制造强国的纲领性文件。《中国制造 2025》提出了未来制造业发展的目标、重点领域、主要任务和战略支撑，有利于指导中国制造业探索新的发展思路和路径。

《中国制造 2025》的总体思路是坚持走中国特色新型工业化道路，以促进制造业创新发展为主题，以提质增效为中心，以信息技术与制造技术深度融合的数字化、网络化、智能化制造为主线，以推进智能制造为主攻方向，提高产品创新设计能力，完善制造业技术创新体系，强化工业基础能力，提高综合集成水平，促进产业转型升级，培育有中国特色的制造文化，实现制造业由大变强的历史跨越。

未来十年，我国制造业发展的着力点不在于追求更高的增速，而是要按照“创新驱动

动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”的总体要求，着力提升发展的质量和效益。

2. 智能制造的内涵

2016年12月8日，工业和信息化部发布的《智能制造发展规划（2016—2020年）》给出了一个比较全面的智能制造描述性定义：智能制造是基于新一代信息通信技术与先进制造技术深度融合，贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节，具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能的新型生产方式。

《智能制造发展规划（2016—2020年）》提出的智能制造发展指导思想：牢固树立创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念，全面落实《中国制造2025》和推进供给侧结构性改革部署，将发展智能制造作为长期坚持的战略任务，分类分层指导，分行业、分步骤持续推进，“十三五”期间同步实施数字化制造普及、智能化制造示范引领，以构建新型制造体系为目标，以实施智能制造工程为重要抓手，着力提升关键技术装备安全可控能力，着力增强基础支撑能力，着力提升集成应用水平，着力探索培育新模式，着力营造良好发展环境，为培育经济增长新动能、打造我国制造业竞争新优势、建设制造强国奠定扎实的基础。

智能制造包括三个方面的内容：一是研发一批智能化产品；二是将信息技术应用于制造业生产经营管理的全过程，使生产和管理过程实现智能化；三是在微观企业层面实现信息的充分交流和共享，建立工业互联网或物联网。实施智能制造的重点任务体现在智能产品、智能装备、智能制造及智能生产模式等方面。智能制造具有以智能工厂为载体，以关键制造环节智能化为核心，以端到端数据流为基础，以网络互联为支撑等特征。推动智能制造，能够有效缩短产品研制周期，提高生产效率和产品质量，降低运营成本和资源能源消耗，并促进基于互联网的众创、众包、众筹等新业态、新模式的孕育发展。实施智能制造的目的是实现整个制造业价值链的智能化和创新，是信息化与数字化深度融合的进一步提升。

3. 数字化工厂

数字化车间是智能制造新模式的一种具体实现形式。数字化工厂（Digitalized Factory）是一种全新的制造模式，是利用产品三维数字模型来定义和优化产品的制造过程，向制造作业所有环节的各类操作者提供数字化的制造指令和作业指导信息；在制造作业中，操作者也用数字化的手段和装置向上层业务过程反馈数字化的作业状态信息。

数字化工厂简化了制造全生命周期中信息传递的转换过程，使制造过程的效率和效能最大化。数字化工厂前所未有地将制造的全过程，包括思维的、作业的、物流的浪费降到最低程度，是全新的生产方式。

4. 数字化设计与制造是智能制造的关键技术

智能制造是信息化、数字化等发展到一定程度后逐步形成的产物，数字化设计与制造则是关键的技术基础。

智能制造的核心：在制造企业中全面推行数字化设计与制造技术，通过在产品全生命周期中的各个环节普及与深化计算机辅助技术、系统及集成技术的应用，使企业的设

计、制造、管理技术水平全面提升，促进传统产业在各个方面技术更新，使企业在持续动态多变、不可预测的全球性市场竞争环境中生存发展，并不断地扩大其竞争优势。

未来数字化制造技术将向着智能化的方向发展。数字化是手段，要实现智能设计、智能工艺、智能加工、智能装配、智能管理等产品研制的各个环节，提高设计制造管理全过程的质量和效率。

5. 传统设计与制造和数字化设计与制造的比较

信息技术与计算机技术的发展促进了当代世界制造技术的发展，先进制造技术大部分是信息技术与计算机技术在制造领域的应用。制造企业信息化与数字化的目的是改造与提高传统的制造技术，为企业提供更先进制造技术，满足产品创新和管理创新的信息化需求。

数字化的生产方式正在从根本上动摇传统制造业的基础，催生了一场制造业的技术革命。产品信息的描述和在制造各个环节之间的传递，从 2D 平面图形向 3D 数字模式转换，是人类制造工程历史上的一次重大革命，有利于预先精确定义、模拟和优化，加快传统制造向智能制造演进的速度。传统设计与制造和数字化设计与制造在信息处理方式和效果方面的比较如图 1.1 所示。传统制造企业应用数字化设计与制造技术有利于企业的转型升级。

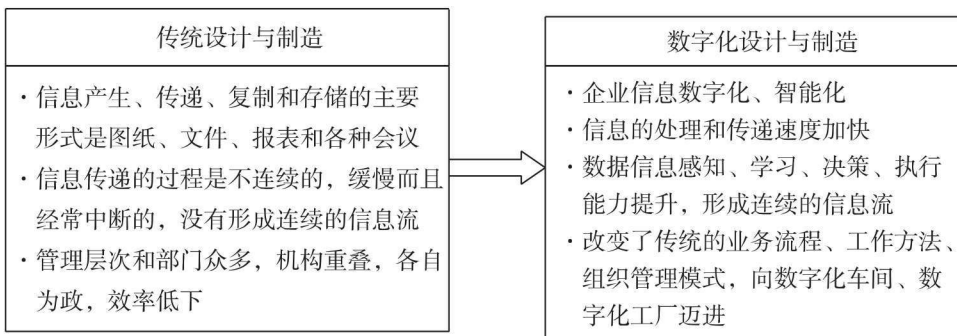


图 1.1 传统设计与制造向数字化设计与制造的转变

1.3 数字化设计与制造技术概况

数字化设计与制造技术是指采用数字化方式，利用计算机软硬件及网络环境，以提高产品开发质量和效率为目标的相关设计制造方法和软件系统有机集成的产品开发技术，即在网络和计算机辅助下，通过产品数据模型，全面模拟产品的设计、分析、装配、制造等过程。数字化设计与制造技术不仅贯穿于企业生产的全过程，而且涉及企业的设备布置、物流物料、生产计划、成本分析等多个方面。与传统产品开发手段相比，它强调计算机、数字化信息、网络技术以及智能算法在产品开发中的作用。

数字化设计与制造技术的应用可以提高企业产品开发能力，缩短产品研制周期，降低开发成本，实现最佳设计目标和企业间的协作，使企业能在最短时间内组织全球范围的设计制造资源开发出新产品，提高企业的竞争能力。

1. 数字化技术

随着计算机技术、信息技术和网络技术的发展，数字化思维（离散思维）方式成为当今人类分析工程问题的主要手段。

数字化是利用数字技术对传统的技术内容和体系进行改造的进程。数字化的核心是离散化，其本质是将连续的物理现象，模糊的不确定现象，设计制造过程的物理量和伴随制造过程而出现和产生的几何量，设计制造环境，个人的知识、经验和能力离散化，进而实现数字化。

数字化技术就是以计算机硬/软件、周边设备、协议和网络为基础的信息离散化表述、定量、感知、传递、存储、处理、控制、联网的集成技术。其用于制造业可包括数字化设计与制造技术和数字化产品两部分。将数字化技术用于支持产品全生命周期的制造活动和企业的全局优化运作就是数字化制造技术；将数字化技术注入工业产品就形成了数字化产品。

数字化技术的发展深刻地改变了制造业，极大地增强了人类处理和利用信息的能力，已经成为现代生产力发展的主导因素。它不但在改变着人类的经济生活，而且以其强大的渗透力进入社会生活的方方面面。可以认为，数字化技术的应用程度已经成为衡量一个国家或地区的国际竞争力、现代化程度、经济成长能力的重要标志。

2. 数字化设计与制造产生的背景

在计算机技术出现之前，机械产品的设计与加工一直都采取图纸设计和手工加工的方式，这种传统的 product 设计与制造方式使得产品在质量上完全依赖于产品设计人员与加工人员的专业技术水平，生产数量则完全依赖于产品加工人员的熟练程度。随着工业社会的不断发展，人们对机械产品的质量提出了更高的要求，同时数量上的需求也在不断增长。为了适应社会对机械产品在质量与数量上的需求，同时也为了能进一步降低机械产品的生产成本，人们在努力寻求一种全新的机械产品设计与加工方式。20 世纪四五十年代以来计算机技术的出现及其发展，特别是计算机图形学的出现，让人们看到了变革传统机械产品设计与生产方式的曙光。于是，数字化设计与制造方式应运而生，人们逐步将机械产品的设计与加工任务交给计算机来处理，使得机械产品的设计周期缩短，产品质量与数量基本摆脱了对于设计与加工人员的依赖，并降低了产品的生产成本。

3. 数字化研发

数字化研发是指在产品的设计与制造过程中充分利用数字化技术，实现数据/信息的快速流动和各个阶段的无缝连接，从根本上解决传统产品设计制造过程中不同阶段间转换时数据/信息失真的问题。传统的企业数据/信息处理方式有企业资源管理 (Enterprise Resource Planning, ERP)、产品数据管理 (Product Data Management, PDM) 等，这些方式在一定程度上实现了对产品设计与制造数据/信息的处理，帮助企业统一了数据/信息传递的格式，提高了企业的设计制造效率。但是这些方式都存在一些不足，如数据/信息的格式不统一，不同应用场合有不同的标准；应用范围受到限制，大部分都局限于特定的企业或研究所内部使用；范围较窄，多是集中在某些特定的行业中。这些缺点决定了上述处理方式并不能满足目前对于制造业底层信息资源数字化的需求。

数字化研发设计工具和平台是数字化研发的一个重要方向，也是解决制造业信息数字化的重要手段。数字化研发设计工具平台的核心是底层的数据和信息的数字化，而这些数据和信息被不同的平台和工具分割为不同类型、不同用途的碎片，分散在各个平台和应用场景中，无法得到充分的整合和使用。数字化研发设计工具和平台以“集成设计”为核心，综合集成设计过程、工具、方法、规范、知识和数据等，提供面向设计仿真人员的综合集成的“设计仿真环境”，可以贯穿多个研发阶段、多专业部门和多学科领域的协同研发流程，控制产品研发的业务过程，传递数据。数字化研发设计工具和平台以各种专业软件工具为分析设计手段，以工程数据库为支撑，以项目、流程管理为过程控制机制，以模板为知识固化方式，进行各专业设计分析的集成和协调，从而实现数字化研发设计。

4. 数字化设计与制造的特点

波音 777 的设计与制造是国际上公认的数字化设计与制造的典范，实现了更好、更快、更符合要求制造出创新产品，达到了缩短研发周期 40% 以上的目标。波音 787 是国际上最先进的科技产品之一，其最重要的一个特点是采用的复合材料超过了 50%，并且广泛采用了数字化设计与制造技术，实现了数字化设计、数字化制造、数字化研发、数字化全生命周期，把数字化设计与制造发展到了新的高度。大量的产品研发实例表明，数字化设计与制造的主要特点有以下几个方面：

(1) 减少设计过程中实物模型的制造。传统设计在产品研制中需经过反复多次的“样机生产、样机测试、修改设计”，这不仅耗费物力、财力，而且使产品研制周期延长。数字化设计则在制造物理样机之前，针对数字化模型进行仿真分析与测试，可排除某些设计的不合理性。

(2) 基于虚拟样机技术的计算机仿真分析可以反复进行产品各种性能的分析测试，在真实物理系统建立之前预测其行为效果，从而可以从不同结构或不同参数的模型结果比较中选择最佳模型。对于机械产品的研制来说，计算机仿真能够提高产品质量，缩短产品开发周期，降低产品开发成本，完成复杂产品的操作和使用训练。

(3) 易于实现设计的并行化和网络化。相对于传统设计过程的串行化，数字化设计可以让一项设计工作由多个设计队伍在不同的地域分头并行设计、共同装配，进行网络化协同作业，这在提高产品设计质量与速度方面具有重要的意义。

(4) 数字化制造可精确地预测和评价产品的可制造性、加工时间、制造周期、生产成本、零件的加工质量、产品质量和制造系统运行性能、零件和产品的可制造性分析、生产规划与工艺规划的评价与确认、敏捷企业和分散化网络生产系统中合作伙伴的选择、生产过程和制造系统设计与优化。

1.4 数字化设计与制造的内涵与体系

数字化设计与制造是一个较大的技术范畴，通常包括数字化设计、数字化工艺、数字化制造、数字化管理以及数字化资源等技术内容，如图 1.2 所示。