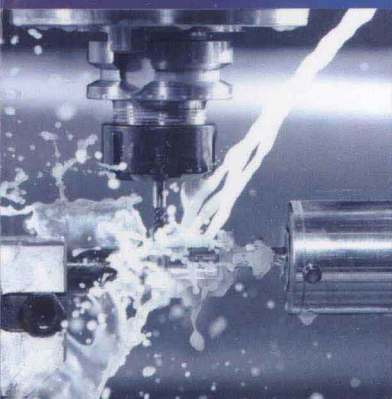




国家级精品教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材



# Mechanical Manufacturing Technology

# 机械制造工艺学

第③版

王先逵 © 主编

清华大学



 **机械工业出版社**  
CHINA MACHINE PRESS

国家级精品教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 机械制造工艺学

第 3 版

主编 王先逵  
参编 张福润 吴博达  
      贾云福 王宛山 张世昌  
主审 王小华 于骏一



机械工业出版社

本书是1995年11月出版的《机械制造工艺学》一书的第3版,是根据近年来机械制造技术的发展,同时保持“机械制造工艺及设备专业教学指导委员会”制订的教学计划和课程教学大纲编写的。全书内容共分七章,即绪论、机械加工工艺规程设计、机床夹具设计、机械加工精度及其控制、机械加工表面质量及其控制、机器装配工艺过程设计、机械制造工艺理论和技术的发展。

作为精品教材,力求精益求精、尽善尽美,在保证基本内容的基础上,为反映现代制造技术的发展,增加了一些新内容;理论联系实际,多用实例、图、表等来表述,贯彻国家新的制图标准,而且每章均有一定数量的习题与思考题,便于学生思考,掌握内容要点。为了方便教师备课,修订、出版了原有教师版课件。

本书主要作为高等院校“机械制造工艺及设备”、“机械制造及其自动化”专业本科教材,也可供职工大学、电视大学、函授大学、业余大学等学生作为教材或参考书,同时也可供从事机械制造业的工程技术人员和自学考试考生参考。

本书第1版曾荣获国家机械工业局1999年科学技术进步奖三等奖,第2版荣获国家级精品教材,并列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械制造工艺学/王先逵主编. —3版. —北京:  
机械工业出版社, 2013. 1  
国家级精品教材  
ISBN 978-7-111-40954-0

I. ①机… II. ①王… III. ①机械制造工艺-高等学校-教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第309271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:刘小慧 责任编辑:王丹凤  
版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟  
封面设计:张静 责任印制:张楠  
北京京丰印刷厂印刷  
2013年6月第3版·第1次印刷  
184mm×260mm·23.75印张·667千字  
标准书号:ISBN 978-7-111-40954-0  
定价:43.00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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

## 第3版前言

《机械制造工艺学》第2版自2007年1月出版以来,在将近5年时间内,共印刷了13次,6万多册,在这期间荣获国家级精品教材,被列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材,并由天津大学编写、制作了配套的教师版课件,受到广大读者欢迎,这是难能可贵和没有想到的事。

时过境迁,制造技术有了飞速的发展,教育改革使教学计划和课程设置都有了较大的变化,教材也要相应进行修订。在这种形势下,机械工业出版社提出了编写《机械制造工艺学》第3版的要求,并对读者进行了调研,整理出读者对第2版的意见,于今年3月份开始,组织了修订工作。值得可贺的是编审者原班人马均健在,不少人还仍在第一线工作,因此修订工作思想统一,进展顺利。

这次修订仍保持第1版原有的基本内容和风格,以机械加工工艺和装配工艺为主线,高标准要求进行编写,力求做到“系”、“实”、“精”、“新”四点。

1. “系”是调整了系统。从总的系统来看可以分为四大部分,第一部分是加工工艺的基本理论和方法,从“绪论”开始,先论述“机械加工工艺规程设计”,对工艺提出全面要求,其后再论述“机床夹具及其设计原理”,在“工艺规程”和“夹具”的基础上论述和分析机械加工质量及其控制问题;第二部分是“机械加工精度及其控制”和“机械加工表面质量及其控制”,这是机械制造工艺的核心理论问题;第三部分是“机器装配工艺过程设计”;第四部分是“机械制造工艺理论和技术的发展”,虽然内容不多,但反映了新工艺和新技术。

2. “实”是加强了实践,理论联系实际。在“机械加工工艺规程设计”一章中增加了典型零件加工工艺规程的制订,在“机械加工精度及其控制”、“机器装配工艺过程设计”等章节中增加了不少实例,以供学生学习时参考。考虑到学生在学习夹具设计时,对看懂一些复杂的二维图困难较大,因此将一些复杂的二维夹具图用三维图表示,则比较形象、清楚。

3. “精”是强调了精品。本书已是国家级精品教材,在此基础上应该精益求精、尽善尽美,因此对全书进行精心的校订,对一些不适当的提法、论述以及文字、图、表上的错误进行了认真的修改,提高了教材的质量。

4. “新”是增强了新意。社会在发展,科学在进步,在全书修订中增加一些新内容,删减一些旧内容是非常必要的。如在“机器装配工艺过程设计”一章中,由于虚拟装配技术发展很快,故对这部分内容做了较大的补充。另外,国家标准也在不断更新,全书贯彻了国家颁布的新标准,如对表面结构的图形符号贯彻了GB/T 131—2006标准。

有关课程研究对象和任务、课程的主要内容、特点和学习方法等均可参考第2版前言。

第3版的课件仍由天津大学张冠伟教授和张世昌教授进行修订,他们还制作了学生版课件及习题答案等,以便于师生教与学。

本版具体章节的编写人员是:第一章和第七章由清华大学王先逵教授编写;第二章由大连理工大学贾云福教授编写;第三章由天津大学张世昌教授编写;第四章由华中科技大学张福润教授编写;第五章由教育部吴博达教授编写;第六章由东北大学王宛山教授编写。全书由清华大学王先逵教授主编,大连理工大学王小华教授和吉林大学于骏一教授主审。两位主审对本书的编写提出了许多宝贵意见,在此谨向他们表示衷心感谢!

由于水平有限,书中难免有错误和不足之处,恳请广大同行和读者批评指正。

## 第2版前言

### 一、课程教材出版背景

《机械制造工艺学》自1995年11月出版以来，已印刷了20次，共9万余册，受到广大读者欢迎，这对编者是一个很大的鼓舞和鞭策。鉴于此，机械工业出版社要求进行修订，在出版社的积极组织下，于2004年7月4日在沈阳东北大学召开了第2版教材修订会议，难能可贵的是参加第1版编写工作的全体编审者都出席了会议，讨论了修订原则，一致认为应保持第1版原有的基本内容和风格，以机械加工工艺和装配工艺为主线，保证教材的先进性、科学性和实用性，并请天津大学机械工程系配作教师版计算机辅助课件。

本书在编写过程中力求贯彻以下基本思想：

1) 近20年来，信息技术的发展推动了制造技术的进步，现代（先进）制造技术成为全世界发展的重点，因此应反映这一时代的变化，使教材具有先进性。

2) 目前，大多数高等工科院校的机械制造专业已将“切削原理和刀具”、“金属切削机床”、“机械制造工艺学”和“机床夹具设计原理”等课程综合为“机械制造原理”或“机械制造基础”等课程，但也有不少院校仍坚持单独开设“机械制造工艺学”课程，因此本书仍保持第1版原有的基本内容和风格，以机械加工工艺和装配工艺为主线，高标准要求进行编写。

3) 保证教材的实用性、科学性。采用分析、归纳的方法，尽量多用图、表来表达叙述性的内容，以培养学生的综合分析能力。

4) 理论联系实际，注意多用典型实例分析，以便于学生牢固掌握基本内容。

5) 每章均有一定数量的习题与思考题，以培养学生的思考能力，掌握每章内容要点和方法。

6) 近年来，名词术语、代（符）号、量和单位等均有变化，本书采用国家新标准。

本书是根据机械制造工艺及设备专业指导委员会所制定的大纲编写的，课程应配有实验、习题、生产实习和课程设计等教学环节，才能有好的教学效果。课程的主要内容包括“机械制造工艺学”和“机床夹具设计原理”两大部分，共分绪论、机械加工精度及其控制、机械加工表面质量及其控制、机械加工工艺规程设计、机器装配工艺过程设计、机床夹具设计、机械制造工艺理论和技术的发展7章。第2版与第1版相比，其基本内容和风格相同，但做了一些改变：

(1) 在体系结构上进行了调整。将原“绪论”变为第一章，更新了机械制造工程学科发展的内容，反映了近年来的发展概况；同时将生产过程、生产类型、工件加工时的定位和基准等工艺基本知识等内容放在这一章，使系统性更好一些。

章节顺序重新进行了安排，将原第一章“机械加工工艺规程设计”安排在第四章；将原第三章“机床夹具设计原理”，安排在第六章，从而使体系上更加符合认知规律。

(2) 近年来，制造技术有了很大的发展，因此在内容上增加了一些新知识、新技术和新观点，如制造永恒性、广义制造论、全面质量控制、数控加工工艺、机器的虚拟装配，以及大规模定制制造、绿色制造、集成电路制造和印制电路板制造等；并加强了表面质量及其控制、计算机辅助夹具设计等内容；同时改进了习题及思考题。

因此在总字数基本不增的情况下，拓宽了“绪论”内容，在有关章节中增加数控机床加工和计算机控制内容；同时在机械制造工艺发展部分中增加了一些实际知识。

(3) 适应现代教学要求，加强习题、思考题等，并由天津大学机械工程系配作教师版计算

机辅助课件,该课件不仅可以帮助教师备课,同时还提供了开放式平台,教师可利用其编制新课件。

本书主要作为普通高等院校机械工程及自动化专业的教材,也可供自学考试、电视大学、业余大学、职工大学等学生作教材或参考书,同时可供从事机械制造业的工程技术人员参考。

参加本书编写的人员有:第一章绪论和第七章机械制造工艺技术的发展由清华大学王先逵教授编写;第二章机械加工精度及其控制由华中科技大学张福润教授编写;第三章机械加工表面质量及其控制由教育部吴博达教授编写;第四章机械加工工艺规程设计由大连理工大学贾云福教授编写;第五章机器装配工艺过程设计由东北大学王宛山教授编写;第六章机床夹具设计由天津大学张世昌教授编写。全书由清华大学王先逵教授主编,大连理工大学王小华教授和吉林大学于骏一教授主审。两位主审对本书的编写提出了许多宝贵意见,在此谨向他们表示衷心感谢!

## 二、课程研究对象和任务

“机械制造工艺学”课程在我国首次于1953年由原苏联专家节门杰夫教授在清华大学正式讲授,经过我国学者多年来的努力,内容不断充实和发展,它已与“金属切削原理”、“金属切削刀具”、“金属切削机床”等课程成为机械制造专业的专业主干课。

“机械制造工艺学”的研究对象是机械产品的制造工艺,包括零件加工和装配两方面,其指导思想是在保证质量的前提下达到高生产率、经济性(包括利润和经济效益)。课程的研究重点是工艺过程,同样也包括零件加工工艺过程和装配工艺过程。工艺是使各种原材料、半成品成为产品的方法和过程。各种机械的制造方法和过程的总称为机械制造工艺。工艺是生产中最活跃的因素,它既是构思和想法,又是实在的方法和手段,并落实在由工件、刀具、机床、夹具所构成的工艺系统中,所以它包含和涉及的范围很广,需要多门学科知识的支持,同时又和生产实际联系十分紧密。

课程的主要任务有以下几点:

- 1) 掌握机械加工和装配方面的基本理论和知识,如零件加工时的定位理论、工艺和装配尺寸链理论、加工精度理论等。
- 2) 了解影响加工质量的各项因素,学会分析、研究加工质量的方法。
- 3) 学会制订零件机械加工工艺过程和部件、产品装配工艺过程的方法。
- 4) 掌握机床夹具设计的基本理论和方法。
- 5) 了解当前制造技术的发展及一些重要的先进制造技术,认识制造技术的作用和重要性。

## 三、课程的主要内容、特点和学习方法

课程的主要内容有:

(1) 加工质量分析 包括机械加工精度和机械加工表面质量两部分。在加工精度部分,分析了影响加工精度的因素、质量的全面控制、加工误差的统计分析及提高加工精度的途径,强调了误差的检测与补偿和加工误差综合分析实例;在表面质量部分,分析了影响表面质量的因素及其控制,阐述了表面改性处理以及防治机械振动的方法等问题。

(2) 零件机械加工工艺过程制订 论述了制订的指导思想、内容、方法和步骤,分析了余量、工艺尺寸链等问题,并阐述了成组技术、数控加工技术和计算机辅助工艺过程设计等先进制造技术内容。同时进行了制订工艺过程的实例分析。

(3) 装配工艺过程设计 论述了装配工艺过程的制订及典型部件装配举例、结构的装配工艺性、装配工艺方法和装配尺寸链、机器人与装配自动化等内容,同时增加了虚拟装配等新技术。

(4) 机床夹具设计原理和方法 加强了成组夹具、随行夹具和计算机辅助夹具设计等内容,以适应当前制造自动化的需求。

(5) 机械制造工艺技术的发展 从精密工程和纳米技术、制造系统自动化的角度论述了现代制造工艺技术、先进制造模式,并增加了集成电路和印制电路板制造技术,扩大了制造工艺的范围。

课程的特点可以归纳为以下几点:

1) “机械制造工艺学”是一门专业课,随着科学技术和经济的发展,课程内容上需要不断地更新和充实。由于制造工艺是非常复杂的,影响因素很多,课程在理论上和体系上正在不断地完善和提高。

2) 课程的实践性很强,与生产实际的联系十分密切,有实践知识才能在学习时理解得比较深入和透彻,因此要注意实践知识的学习和积累。

3) 课程具有工程性,有不少设计方法方面的内容,需要从工程应用的角度去理解和掌握。

4) 掌握课程的内容要有习题、课程设计、实验、实习等各环节的相互配合才能解决,每个环节都是重要的,不可缺少的,各教学环节之间应密切结合和有机联系,形成一个整体。

5) 每一门课程都有先修课程的要求,在学习“机械制造工艺学”时应具备“金属工艺学”、“金工实习”、“互换性与技术测量基础”、“金属切削原理”、“金属切削刀具”、“金属切削机床”等知识。当前教学计划和课程设置变化很大,因此本课程应在“工程训练”和“机械制造基础”等培训和授课后再学习,则可能效果更好些。

在课程的学习方法上应根据个人的情况而定,这里只能提出一些基本方法供参考。

1) 注意掌握基本概念,如工件在加工时的定位、尺寸链的产生、加工精度和加工表面质量等。有些概念的建立是很不容易的。

2) 注意学习一些基本方法,如工艺尺寸链和装配尺寸链的方法、制订零件加工工艺过程和机器装配工艺过程的方法、机床夹具设计方法等,并通过设计等环节来加深理解和掌握。

3) 注意和实际相结合,要向实际学习,积累实际知识。

4) 要重视与课程有关的各教学环节的学习,使之产生相辅相成的效果。

由于水平有限,书中难免有不少错误和不足之处,恳请广大同行和读者批评指正。

编者

# 第1版前言

1992年9月在杭州召开的“机械制造工艺及设备专业教学指导委员会会议”决定，为了适应机械制造业的发展和教学改革的需要，要新编一本《机械制造工艺学》大学本科教材。在这以前，专业教学指导委员会曾对我国近年来高等院校编写的《机械制造工艺学》教材进行了评审，在此基础上决定由清华大学、大连理工大学、天津大学、华中理工大学、吉林工业大学、东北大学承担编写，由清华大学王先逵教授任主编。

本书在编写过程中力求贯彻以下基本思想：

1) 在保证基本内容的基础上，删除一些过时的旧内容，增加新内容，以反映现代制造技术的发展。

2) 尽量多用图、表来表达叙述性的内容，以培养学生的综合分析能力。

3) 理论联系实际，注意多用典型实例分析，以便牢固掌握基本内容。

4) 每章均有一定数量的习题和思考题，以培养学生的思考能力，掌握要点。

5) 贯彻名词术语、代（符）号、量和单位等现行国家标准。

本书是根据专业教学指导委员会所制订的大纲编写的，课堂讲授为66学时，课程应配有实验、习题、生产实习和课程设计等教学环节。由于近年来“机床夹具设计原理”大多放在“机械制造工艺学”中讲授，故仍按此处理，并将工艺与夹具在内容上有机结合起来。

本书主要作为高等院校机械制造工艺及设备专业的教材，也可供自学考试、电视大学、函授大学、业余大学、职工大学等学生作为教材或参考书，同时可供从事机械制造业的工程技术人员参考。

本书由清华大学王先逵主编，参加具体章节的编写人员有：绪论：清华大学王先逵；第一章：大连理工大学贾云福；第二章：天津大学张世昌；第三章：华中理工大学张福润；第四章：吉林工业大学吴博达；第五章：东北大学王宛山；第六章：清华大学王先逵。全书由大连理工大学王小华、吉林工业大学于骏一主审，他们对书稿提出了不少宝贵意见，在此，谨向他们表示衷心感谢。

由于水平有限，书中难免有不少错误和不足之处，恳请读者批评指正。

编者 1995年2月



# 目 录

## 第3版前言

## 第2版前言

## 第1版前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 机械制造工程学科的发展 .....	1
一、制造的永恒性 .....	1
二、广义制造论 .....	3
三、机械制造科学技术的发展 .....	6
第二节 生产过程、工艺过程与工艺系统 .....	6
一、机械产品生产过程 .....	6
二、机械加工工艺过程 .....	7
三、机械加工工艺系统 .....	9
第三节 生产类型与工艺特点 .....	9
一、生产纲领 .....	9
二、生产批量 .....	10
三、生产类型及其工艺特点 .....	10
第四节 工件加工时的定位和基准 .....	11
一、工件的定位 .....	11
二、基准 .....	20
习题与思考题 .....	21
<b>第二章 机械加工工艺规程设计</b> .....	25
第一节 概述 .....	25
一、机械加工工艺规程的作用 .....	25
二、机械加工工艺规程的格式 .....	25
三、机械加工工艺规程的设计原则、 步骤和内容 .....	25
第二节 工艺路线的制订 .....	31
一、定位基准的选择 .....	31
二、加工经济精度与加工方法的选择 .....	34
三、典型表面的加工路线 .....	36
四、工艺顺序的安排 .....	41
五、工序的集中与分散 .....	42
六、加工阶段的划分 .....	42
第三节 加工余量、工序尺寸及公差的确 定 .....	43
一、加工余量的概念 .....	43
二、加工余量的确定 .....	46
三、工序尺寸与公差的确定 .....	47

第四节 工艺尺寸链 .....	48
一、直线尺寸链 .....	48
二、平面尺寸链 .....	56
第五节 时间定额和提高生产率的 工艺途径 .....	58
一、时间定额 .....	58
二、提高生产率的工艺途径 .....	60
第六节 工艺方案的比较与技术经济 指标 .....	63
一、工艺方案的比较 .....	63
二、技术经济指标 .....	65
第七节 实例 .....	65
一、机械加工工艺规程设计实例 .....	65
二、机械加工工艺过程实例分析 .....	73
第八节 数控加工工艺设计 .....	75
一、数控加工的主要特点 .....	75
二、数控加工工序设计 .....	75
三、数控编程简介 .....	76
四、数控加工工序综合举例 .....	80
五、工序安全与程序试运行 .....	82
第九节 成组加工工艺设计 .....	82
一、成组技术的基本原理 .....	82
二、零件的分类编码 .....	82
三、成组工艺 .....	86
第十节 计算机辅助工艺过程设计 .....	90
一、计算机辅助工艺过程设计的基本 方法 .....	90
二、样件法 CAPP .....	91
习题与思考题 .....	94

## 第三章 机床夹具设计 .....

第一节 机床夹具概述 .....	98
一、机床夹具及其组成 .....	98
二、机床夹具的功能 .....	98
三、机床夹具的分类 .....	100
第二节 工件在夹具上的定位 .....	100
一、常用定位方法与定位元件 .....	100
二、定位误差计算 .....	106
第三节 工件的夹紧 .....	110
一、对夹紧装置的要求 .....	110

二、夹紧力的确定 .....	110	三、工艺系统刚度对加工精度的影响 .....	182
三、常用夹紧机构 .....	113	四、机床部件刚度 .....	187
第四节 各类机床夹具 .....	121	五、减小工艺系统受力变形对加工精度影响的措施 .....	189
一、车床与圆磨床夹具 .....	121	六、工件残余应力引起的变形 .....	191
二、钻床夹具和镗床夹具 .....	123	第四节 工艺系统的热变形对加工精度的影响 .....	192
三、铣床夹具 .....	128	一、概述 .....	192
四、加工中心机床夹具 .....	131	二、工件热变形对加工精度的影响 .....	193
第五节 柔性夹具 .....	132	三、刀具热变形对加工精度的影响 .....	195
一、组合夹具 .....	132	四、机床热变形对加工精度的影响 .....	195
二、可调整夹具 .....	137	五、减少工艺系统热变形对加工精度影响的措施 .....	197
三、其他柔性夹具 .....	139	第五节 加工误差的统计分析 .....	199
第六节 机床专用夹具的设计步骤和方法 .....	141	一、加工误差的性质 .....	199
一、专用夹具设计的基本要求 .....	141	二、分布图分析法 .....	200
二、专用夹具设计的一般步骤 .....	141	三、点图分析法 .....	207
三、夹具设计中的几个重要问题 .....	143	四、机床调整尺寸 .....	210
第七节 计算机辅助夹具设计 .....	148	第六节 保证和提高加工精度的途径 .....	212
一、计算机辅助夹具设计系统工作原理 .....	148	一、误差预防技术 .....	212
二、计算机辅助夹具设计系统应用软件设计 .....	148	二、误差补偿技术 .....	214
三、夹具装配体及装配图的转换 .....	152	第七节 加工误差综合分析实例 .....	216
四、计算机辅助夹具设计技术的发展方向 .....	154	习题与思考题 .....	226
习题与思考题 .....	156		
<b>第四章 机械加工精度及其控制</b> .....	160	<b>第五章 机械加工表面质量及其控制</b> .....	229
第一节 概述 .....	160	第一节 加工表面质量及其对零件使用性能的影响 .....	229
一、机械加工精度 .....	160	一、加工表面质量的概念 .....	229
二、影响机械加工精度的原始误差及分类 .....	160	二、加工表面质量对零件使用性能的影响 .....	230
三、误差的敏感方向 .....	162	第二节 影响加工表面的表面粗糙度的工艺因素及其改进措施 .....	232
四、研究加工精度的方法 .....	162	一、切削加工表面的表面粗糙度 .....	232
五、全面质量管理 .....	162	二、磨削加工后的表面粗糙度 .....	233
第二节 工艺系统的几何误差对加工精度的影响 .....	164	三、表面粗糙度和表面微观形貌的测量 .....	235
一、加工原理误差 .....	164	第三节 影响表层金属力学物理性能的工艺因素及其改进措施 .....	240
二、调整误差 .....	164	一、加工表面层的冷作硬化 .....	240
三、机床误差 .....	165	二、表面金属的金相组织变化 .....	242
四、夹具的制造误差与磨损 .....	179	三、表层金属的残余应力 .....	244
五、刀具的制造误差与磨损 .....	180	四、表面强化工艺 .....	249
第三节 工艺系统的受力变形对加工精度的影响 .....	180	第四节 机械加工过程中的振动 .....	252
一、基本概念 .....	180	一、机械加工中的强迫振动 .....	252
二、工艺系统刚度的计算 .....	181		

二、机械加工中的自激振动 .....	253	<b>第七章 机械制造工艺理论和技术的发展</b> .....	311
三、机械加工振动的诊断技术 .....	259	<b>第一节 概述</b> .....	311
四、机械加工振动的防治 .....	263	一、制造工艺的重要性 .....	311
习题与思考题 .....	267	二、现代制造工艺理论和技术的发展 .....	311
<b>第六章 机器装配工艺过程</b>		<b>第二节 机械制造工艺理论</b> .....	312
<b>设计</b> .....	270	一、加工成形机理 .....	312
<b>第一节 概述</b> .....	270	二、精度原理 .....	313
一、机器装配的基本概念 .....	270	三、相似性原理和成组技术 .....	314
二、装配工艺系统图 .....	270	四、工艺决策原理 .....	314
<b>第二节 装配工艺规程的制订</b> .....	271	五、优化原理 .....	316
一、制订装配工艺规程的基本原则及原始资料 .....	272	<b>第三节 现代制造工艺方法</b> .....	316
二、制订装配工艺规程的步骤 .....	272	一、特种加工技术 .....	316
<b>第三节 机器结构的装配工艺性</b> .....	274	二、特种加工方法 .....	317
一、机器结构应能分成独立的装配单元 .....	274	三、快速原型制造 [ Rapid Prototype (Part) Manufacturing—RPM ] 和成形制造 .....	324
二、减少装配时的修配和机械加工 .....	275	四、高速加工和超高速加工 .....	326
三、机器结构应便于装配和拆卸 .....	276	五、精密工程和纳米技术 .....	328
<b>第四节 装配尺寸链</b> .....	277	<b>第四节 制造单元和制造系统</b> .....	340
一、装配精度 .....	277	一、制造单元和制造系统的自动化 .....	340
二、装配尺寸链的建立 .....	278	二、自动生产线 .....	342
三、装配尺寸链的查找方法 .....	279	三、柔性制造系统 .....	343
四、装配尺寸链的计算方法 .....	281	<b>第五节 先进制造模式</b> .....	347
<b>第五节 保证装配精度的装配方法</b> .....	281	一、计算机集成制造系统 .....	347
一、互换装配法 .....	281	二、并行工程 .....	354
二、选择装配法 .....	288	三、精良生产 .....	357
三、修配装配法 .....	291	四、敏捷制造和虚拟制造 .....	357
四、调整装配法 .....	295	五、大规模定制制造 .....	358
<b>第六节 机器装配的自动化</b> .....	298	六、企业集群制造 .....	358
一、自动装配机与装配机器人 .....	298	七、绿色制造 .....	359
二、装配自动线 .....	300	<b>第六节 智能制造技术</b> .....	360
<b>第七节 机器的虚拟装配</b> .....	301	一、智能制造的涵义 .....	360
一、虚拟现实与虚拟装配 .....	301	二、智能制造技术的方法 .....	361
二、虚拟装配的类型 .....	302	三、智能制造的形式 .....	368
三、虚拟装配环境的建立 .....	303	习题与思考题 .....	368
四、虚拟装配的关键技术 .....	304	<b>参考文献</b> .....	370
五、虚拟装配应用系统的实现 .....	305		
习题与思考题 .....	309		

# 第一章 绪 论

## 第一节 机械制造工程学科的发展

### 一、制造的永恒性

#### (一) 机械制造技术的发展

现代制造技术或先进制造技术是20世纪80年代提出来的,但它的工作基础已经历了半个多世纪。最初的制造是靠手工来完成的,以后逐渐用机械代替手工,以达到提高产品质量和生产率的目的,同时也为了解放劳动力和减轻繁重的体力劳动,因此出现了机械制造技术。机械制造技术有两方面的含义:其一是指用机械来加工零件(或工件)的技术,更明确地说是在一种机器上用切削方法来加工,这种机器通常称为机床、工具机或工作母机。另一方面是指制造某种机械的技术,如汽车、涡轮机等。此后,由于在制造方法上有了很大的发展,除用机械方法加工外,还出现了电加工、光学加工、电子加工、化学加工等非机械加工方法,因此,人们把机械制造技术简称之为制造技术。

可以认为:先进制造技术是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术,进行交叉、融合和集成,综合应用于产品全生命周期的制造全过程,包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理等,以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产,快速响应市场的需求。

制造技术是一个永恒的主题,是设想、概念、科学技术物化的基础和手段,是国家经济与国防实力的体现,是国家工业化的关键。制造业的发展和其他行业一样,随着国际、国内形势的变化,有高潮期也有低潮期,有高速期也有低速期,有国际特色也有民族特色,但必须加以重视,而且要持续不断地向前发展。

#### (二) 制造技术的重要性

制造技术的重要性是不言而喻的,它有以下四个方面的意义。

##### 1. 社会发展与制造技术密切相关

现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题,特别是在市场经济繁荣的今天,它更占有十分重要的地位。

人类的发展过程就是一个不断制造的过程,在人类发展的初期,为了生存,制造了石器,以便于狩猎。此后,相继出现了陶器、铜器、铁器和一些简单的机械,如刀、剑、弓、箭等兵器,锅、壶、盆、罐等用具,犁、磨、碾、水车等农用工具,这些工具和用具的制造过程都是简单的,主要围绕生活必需和存亡征战,制造资源、规模和技术水平都非常有限。随着社会的发展,制造技术的范围和规模在不断扩大,技术水平也在不断提高,向文化、艺术、工业发展,出现了纸张、笔墨、活版、石雕、珠宝、钱币、金银饰品等制造技术。到了资本主义社会和社会主义社会,出现了大工业生产,使得人类的物质生活和文明有了很大的提高,对精神和物质有了更高的要求,科学技术有了更快、更新的发展,从而与制造技术的关系就更为密切。蒸汽机制造技术的问世带来了工业革命和大工业生产,内燃机制造技术的出现和发展形成了现代汽车、火车和舰船,喷气涡轮发动机制造技术促进了现代喷气客机和超音速飞机的发展,集成电路制造技术的进步左右了现代计算机的水平,纳米技术的出现开创了微型机械的先河,因此,人类的活动与制造

密切相关，人类活动的水平受到了制造水平的极大约束，宇宙飞船、航天飞机、人造卫星以及空间站等制造技术的出现，使人类的活动走出了地球，走向了太空。

## 2. 制造技术是科学技术物化的基础

从设想到现实，从精神到物质，是靠制造来转化的，制造是科学技术物化的基础，科学技术的发展反过来又提高了制造的水平。信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学，从此制造就以系统这一新概念问世，它由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制，制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科，即制造系统工程学，其体系结构如图 1-1 所示，制造系统是制造技术发展的新里程碑。

协同论（协同学）一词可追溯到古希腊语，意为协同作用的科学，现代协同论是德国斯图加特大学赫尔曼·哈肯教授在 1969 年提出协同学概念，其后若干年出版了《协同学导论》等书，主要内容是探讨了生命系统等复杂系统的运动演化规律，其主要理论有：序参数、役使原理、耗散理论等。现代制造系统是一个复杂系统，在网络环境下所形成的扩展企业在生产制造和管理等方面是一个复杂的闭环系统，需要应用协同论的理论来解决产品开发中所遇到的问题，因此它是制造系统又一个重要的理论基础，是制造模式继集成制造、并行工程后的又一重要发展。

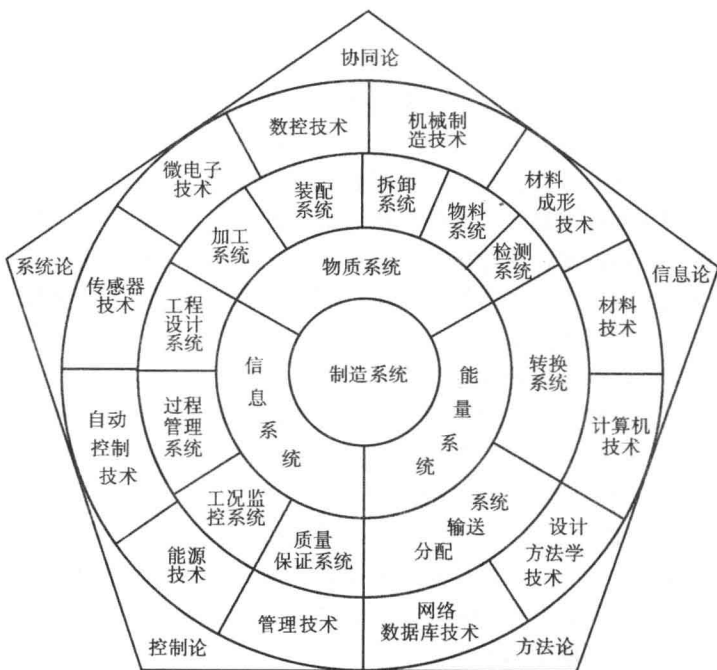


图 1-1 制造系统工程学的体系结构

科学技术的创新和构思需要实践，实践是检验真理的唯一标准，人类对飞行的欲望和需求由来已久，经历了无数的挫折与失败，通过了多次的构思和实验，最后才获得成功。实验就是一种物化手段和方法，生产是一种成熟的物化过程。

## 3. 制造技术是所有工业的支柱

制造技术的涉及面非常广，冶金、建筑、水利、机械、电子、信息、运载、农业等各个行业都要有制造业的支持，如冶金行业需要冶炼、轧制设备，建筑行业需要塔吊、挖掘机和推土机等工程机械，因此，制造业是一个支柱产业，在不同的历史时期有不同的发展重点，但需要制造技术的支持是永恒的。当然，各个行业有其本身的主导技术，如农业需要生产粮、棉等农产品，有很多的农业生产技术，但现代农业就少不了农业机械的支持，制造技术成为其重要组成部分。因此，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术既有共性，又有个性。

## 4. 国力和国防的后盾

一个国家的国力主要体现在政治实力、经济实力、军事实力上，而经济和军事实力与制造技术的关系十分密切，只有在制造上是一个强国，才能在军事上是一个强国，一个国家不能靠外汇

去购买别国的军事装备来保卫自己, 必须有自己的军事工业。有了国力和国防才有国际地位, 才能立足于世界。

第二次世界大战以后, 日本、德国等国家一直重视制造业, 因此, 国力得以很快恢复, 经济实力处于世界前列。从 20 世纪 30 年代开始一直在制造技术上处于领先地位的美国, 由于在 20 世纪 50、60 年代未能重视它而每况愈下。克林顿总统执政后, 迅速把制造技术提到了重要日程上, 决心夺回霸主地位, 其间推行了“计算机集成制造系统”和“21 世纪制造企业战略”, 提出了集成制造、敏捷制造、虚拟制造和并行工程、“两毫米工程”等举措, 促进了先进制造技术的发展, 同时对美国的工业生产和经济复苏产生了重大影响。

## 二、广义制造论

广义制造是 20 世纪制造技术的重要发展。它是在机械制造技术的基础上发展起来的。长期以来, 由于设计与工艺分家, 制造被定位于加工工艺, 这是一种狭义制造的概念, 随着社会发展和科技进步, 需要综合、融合和复合多种技术去研究和解决问题, 特别是集成制造技术的问世, 提出了广义制造的概念, 亦称之为“大制造”的概念, 它体现了制造概念的扩展。

广义制造概念的形成过程主要有以下几方面原因。

### (一) 工艺和设计一体化

它体现了工艺和设计的密切结合, 形成了设计工艺一体化, 设计不仅是指产品设计, 而且包括工艺设计、生产调度设计和质量控制设计等。

人类的制造技术大体上可分为三个阶段, 有三个重要的里程碑。

#### 1. 手工业生产阶段

起初, 制造主要靠工匠的手艺来完成, 加工方法和工具都比较简单, 多靠手工、畜力或极简单的机械, 如凿、劈、锯、碾和磨等来加工, 制造的手段和水平比较低, 为个体和小作坊生产方式; 有简单的图样, 也可能只有构思, 基本是体脑结合, 设计与工艺一体, 技术水平取决于制造经验, 基本上适应了当时人类发展的需求。

#### 2. 大工业生产阶段

由于经济发展和市场需求, 以及科学技术的进步, 制造手段和水平有了很大的提高, 形成了大工业生产方式。

生产发展与社会进步使制造进行了大分工, 首先是设计与工艺分开了, 单元技术急速发展又形成了设计、装配、加工、监测、试验、供销、维修、设备、工具和工装等直接生产部门和间接生产部门, 加工方法丰富多彩, 除传统加工方法, 如车、钻、刨、铣和磨等外, 非传统加工方法, 如电加工、超声波加工、电子束加工、离子束加工、激光束加工均有了很大发展。同时, 出现了以零件为对象的加工流水线和自动生产线, 以部件或产品为对象的装配流水线和自动装配线, 适应了大批大量生产需求。

这一时期从 18 世纪开始至 20 世纪中叶发展很快, 且十分重要, 它奠定了现代制造技术的基础, 对现代工业、农业、国防工业的成长和发展影响深远。由于人类生活水平的不断提高和科学技术日新月异的发展, 产品更新换代的速度不断加快, 因此, 快速响应多品种单件小批生产的市场需求就成为了一个突出矛盾。

#### 3. 虚拟现实工业生产阶段

要快速响应市场需求, 进行高效的单件小批生产, 可借助于信息技术、计算机技术、网络技术, 采用集成制造、并行工程、计算机仿真、虚拟制造、动态联盟、协同制造、电子商务等举措, 将设计与工艺高度结合, 进行计算机辅助设计、计算机辅助工艺设计和数控加工, 使产品在设计阶段就能发现在加工中的问题, 进行协同解决。同时, 可集全世界的制造资源来进行全世界范围内的合作生产, 缩短了上市时间, 提高了产品质量。这一阶段充分体现了体脑高度结合, 对

手工业生产阶段的体脑结合进行了螺旋式的上升和扩展。

虚拟现实工业生产阶段采用强有力的软件,在计算机上进行系统完整的仿真,从而可以避免在生产加工时才能发现的一些问题及其造成的损失。因此,它既是虚拟的,又是现实的。

## (二) 材料成形机理的扩展

在传统制造工艺中,人为地将零件的加工过程分为热加工和冷加工两个阶段,而且是以冷去除加工和热变形加工为主,主要是利用力、热原理。但现在已从加工成形机理来分类,明确地将加工工艺分为去除加工、结合加工和变形加工,材料成形机理的范畴见表 1-1 所示。

表 1-1 材料成形机理的范畴

分类	加工机理	加工方法	
去除加工	力学加工	切削加工、磨削加工、磨粒流加工、磨料喷射加工、液体喷射加工	
	电物理加工	电火花加工、电火花线切割加工、等离子体加工、电子束加工、离子束加工	
	电化学加工	电解加工	
	物理加工	超声波加工、激光加工	
	化学加工	化学铣削、光刻加工	
	复合加工	电解磨削、超声电解磨削、超声电火花电解磨削、化学机械抛光	
结合加工	附着加工	物理加工	物理气相沉积、离子镀
		热物理加工	蒸镀、熔化镀
		化学加工	化学气相沉积、化学镀
		电化学加工	电镀、电铸、刷镀
	注入加工	物理加工	离子注入、离子束外延
		热物理加工	晶体生长、分子束外延、渗碳、掺杂、烧结
		化学加工	渗氮、氧化、活性化学反应
		电化学加工	阳极氧化
连接加工	激光焊接、化学粘接、快速成形制造、卷绕成形制造		
变形加工	冷、热流动加工	锻造、辗锻、轧制、挤压、辊压、液态模锻、粉末冶金	
	粘滞流动加工	金属型铸造、压力铸造、离心铸造、熔模铸造、壳型铸造、低压铸造、负压铸造	
	分子定向加工	液晶定向	

### 1. 去除加工

去除加工又称分离加工,是从工件上去除一部分材料而成形。

### 2. 结合加工

结合加工是利用物理和化学方法将相同材料或不同材料结合 (bonding) 在一起而成形,是一种堆积成形、分层制造方法。

按结合机理和结合强弱又可分为附着 (deposition)、注入 (injection) 和连接 (jointed) 三种。

1) 附着又称沉积,是在工件表面上覆盖一层材料,是一种弱结合,典型的加工方法是镀。

2) 注入又称渗入,是在工件表层上渗入某些元素,与基体材料产生物化反应,以改变工件表层材料的力学性质,是一种强结合,典型的加工方法有渗碳、氧化等。

3) 连接又称接合,是将两种相同或不相同材料通过物化方法连接在一起,可以是强结合,也可以是弱结合,如激光焊接、化学粘接等。

### 3. 变形加工

变形加工又称流动加工,是利用力、热、分子运动等手段使工件产生变形,改变其尺寸、形

状和性能，如锻造、铸造等。

### （三）制造技术的综合性

现代制造技术是一门以机械为主体，交叉融合了光、电、信息、材料、管理等学科的综合体，并与社会科学、文化、艺术等关系密切。

制造技术的综合性首先表现在机、光、电、声、化学、电化学、微电子和计算机等的结合，而不是单纯的机械。

人造金刚石、立方氮化硼、陶瓷、半导体和石材等新材料的问世形成了相应的加工工艺学。

制造与管理已经不可分割，管理和体制密切相关，体制不协调会制约制造技术的发展。

近年来发展起来的工业设计学科是制造技术与美学、艺术相结合的体现。

哲学、经济学、社会学指导科学技术的发展，现代制造技术有质量、生产率、经济性、产品上市时间、环境和服务等多项目标的要求，靠单纯技术是难以实现的。

### （四）制造模式的发展

计算机集成制造技术最早称为计算机综合制造技术，它强调了技术的综合性，认为一个制造系统至少应由设计、工艺和管理三部分组成，体现了“合-分-合”的螺旋上升。因为，长期以来，由于科技、生产的发展，制造越来越复杂，人们已习惯了将复杂事物分解为若干单方面事物来处理，形成了“分工”，这是正确的。但与此同时忽略了各方面事物之间的有机联系，当制造更为复杂时，不考虑这些有机联系就不能解决问题，这时，集成制造的概念应运而生，一时间受到了极大的重视。

计算机集成制造技术是制造技术与信息技术结合的产物，集成制造系统首先强调了信息集成，即计算机辅助设计、计算机辅助制造和计算机辅助管理的集成，集成有多个方面和层次，如功能集成、信息集成、过程集成和学科集成等，总的思想是从相互联系的角度去统一解决问题。

其后在计算机集成制造技术发展的基础上出现了柔性制造、敏捷制造、虚拟制造、网络制造、智能制造和协同制造等多种制造模式，有效地提高了制造技术的水平，扩展了制造技术的领域。“并行工程”、“协同制造”等概念及其技术和方法，强调了在产品全生命周期中能并行有序地协同解决某一环节所发生的问题，即从“点”到“全局”，强调了局部和全面的关系，在解决局部问题时要考虑其对整个系统的影响，而且能够协同解决。

### （五）产品的全生命周期

制造的范畴从过去的设计、加工和装配发展为产品的全生命周期，包括需求分析、设计、加工、销售、使用和报废等，如图 1-2 所示。

### （六）丰富的硬软件工具、平台和支撑环境

长期以来，人们对制造的概念多停留在硬件上，对制造技术来说，主要有各种装备和工艺装备等，现代制造不仅在硬件上有了很大的突破，而且在软件上得到了广泛应用。

现代制造技术应包括硬件和软件两大方面，并且应在丰富的硬软件工具、平台和支撑环境的支持下才能工作。硬软件要相互配

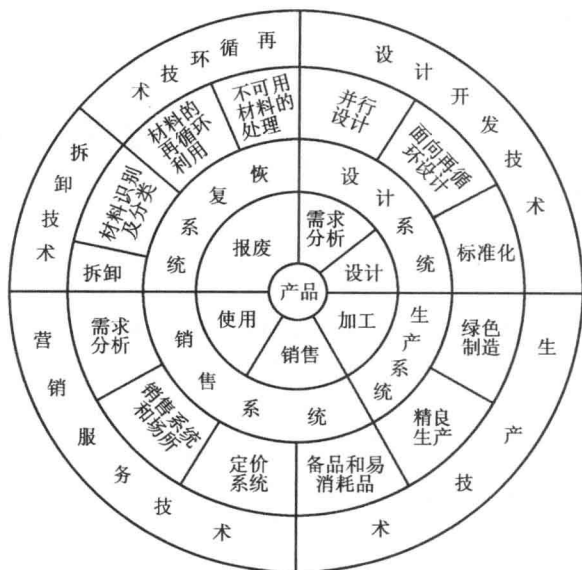


图 1-2 产品生命周期的全过程



合才能发挥作用，而且不可分割，如计算机是现代制造技术中不可缺少的设备，但它必须有相应的操作系统、办公软件和工程应用软件（如计算机辅助设计、计算机辅助制造等）的支持才能投入使用；又如网络，其本身有通信设备、光缆等硬件，但同时也必须有网络协议等软件才能正常运行；再如数控机床，它是由机床本身和数控系统两大部分组成，而数控系统除数控装置等硬件外，必须有程序编制软件才能使机床进行加工。

软件需要专业人员才能开发，单纯的计算机软件开发人员是难以胜任的，因此，除通用软件外，制造技术在其专业技术的基础上，发展了相应的软件技术，并成为制造技术不可分割的组成部分，同时形成了软件产业。

### 三、机械制造科学技术的发展

机械制造科学技术的发展主要沿着“广义制造”或称“大制造”的方向发展，其具体发展方向如图 1-3 所示。当前，发展的重点是创新设计、并行设计、现代成形与改性技术、材料成形过程仿真和优化、高速和超高速加工、精密工程与纳米技术、数控加工技术、集成制造技术、虚拟制造技术、协同制造技术和工业工程等。

当前值得开展的制造技术可结合汽车、运载装置、模具、芯片、微型机械和医疗器械等进行反求工程、高速加工、纳米技术、模块化功能部件、使能技术软件、并行工程和数控系统等研究。

我国已是一个制造大国，世界制造中心将可能要转移到中国，这对我国的制造业是一次机遇和挑战。要形成世界制造中心就必须掌握先进的制造技术，掌握核心技术，要有很高的制造技术水平，才能不受制于人，才能从制造大国走向制造强国。

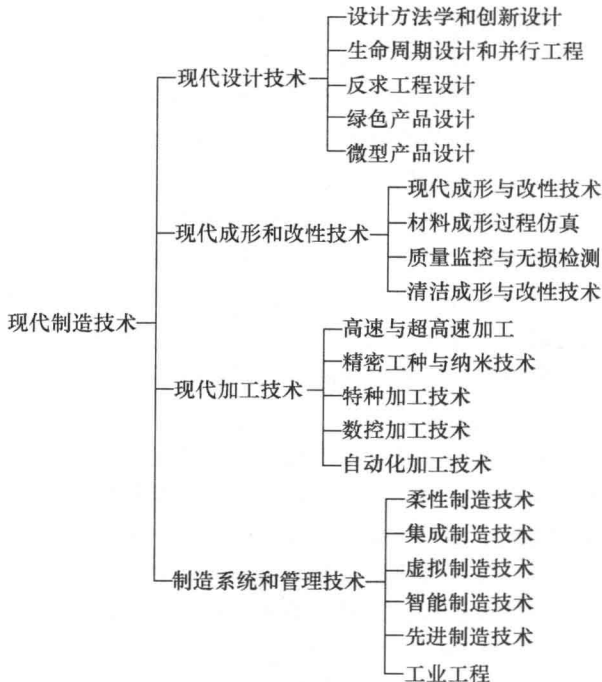


图 1-3 机械制造科学技术的发展方向

## 第二节 生产过程、工艺过程与工艺系统

### 一、机械产品生产过程

机械产品生产过程是指从原材料开始到成品出厂的全部劳动过程，它不仅包括毛坯的制造，零件的机械加工、特种加工和热处理，机器的装配、检验、测试和涂装等主要劳动过程，还包括专用工具、夹具、量具和辅具的制造，机器的包装，工件和成品的储存和运输，加工设备的维修，以及动力（电、压缩空气、液压等）供应等辅助劳动过程。

由于机械产品的主要劳动过程都使被加工对象的尺寸、形状和性能产生了一定的变化，即与生产过程有直接关系，因此称为直接生产过程，亦称为工艺过程。而机械产品的辅助劳动过程虽然未使加工对象产生直接变化，但也是非常必要的，因此称为辅助生产过程。所以，机械产品的生产过程由直接生产过程和辅助生产过程组成。

随着机械产品复杂程度的不同，其生产过程可以由一个车间或一个工厂完成，也可以由多个车间或工厂协作完成。