



普通高等教育“十五”国家级规划教材



面向21世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century



普通高等教育“九五”国家级重点教材

机械制造技术基础

第2版

西安交通大学

卢秉恒 主 编
洪 军 副主编
赵万华





普通高等教育“十五”国家级规划教材

08474	知识创新学	刘助柏
15107	机械原理与机械设计(上、下册)	张策
0	机械设计基础	李秀珍
07154	机械制造技术基础	卢秉恒
13114	机械制造技术基础	于骏一
07046	机械基础 第2版	范思冲
07085	CAD/CAM技术 第2版	宁汝新
0	数控技术	杨有君
0	数控技术	易红
0	工程测试技术	康宜华
07128	液压与气压传动 第3版	左健民
07148	机械制造装备设计 第2版	冯辛安
06869	自动化制造系统 第2版	张根保
06868	特种加工 第4版	刘晋春
12261	先进制造技术	王隆太
06866	机械设计学 第3版	黄靖远
06871	液压元件与系统 第2版	李壮云
13689	机电一体化系统设计	赵松年
13919	机械CAD	程晓民
06865	工业设计概论 第2版	程能林
<hr/>		
06882	机械工程材料 第2版	沈莲
07931	材料成形技术基础 第2版	陈金德
08177	机床数控技术	李郝林
07734	互换性与测量技术基础 第2版	王伯平
07611	液压与气压传动 第2版	王积伟
0	液压与气压传动 第2版	王积伟
07597	机械工程测量与试验技术	黄长艺
04673	机械工程测试技术基础 第2版	黄长艺
0	机械工程测试技术基础 第3版	熊诗波
07924	(机械)控制工程基础 第2版	王益群
06850	机床电气控制 第3版	王炳实
09939	电气控制技术(基础) 第3版	齐占庆
07152	机械创新设计 第2版	张春林
06459	机械优化设计 第3版	孙靖民
03098	机械系统设计 第2版	朱龙根
03748	机构设计 第3版	曹惟庆
06491	液压控制系统 第2版	王春行
07091	机电一体化系统设计	谢存禧
07610	现代机械产品创新分析与设计	赵松年
06870	流体力学 第2版	罗惕乾
07155	精密与超精密加工技术	袁哲俊
0	精密工程与纳米加工技术	王先逵
04422	机械工业企业管理 第3版	王久征
05039	机械工程英语 第2版	陈统坚
07872	机电产品市场营销学	李元元
07920	现代质量工程	张根保
10803	先进制造技术(英文版)	唐一平

赵汝嘉

章宏甲

洪迈生

2005

ISBN 7-111-07154-9



9 787111 071549 >

定价：25.00元

地址：北京市百万庄大街22号 邮政编码：100037
联系电话：(010) 68326294 网址：<http://www.cmpbook.com>
E-mail：online@cmpbook.com

TH16/95=2

2005

面向 21 世纪课程教材
普通高等教育“九五”国家级重点教材
普通高等教育“十五”国家级规划教材

机械制造技术基础

第 2 版

主 编 卢秉恒
副主编 赵万华 洪军
参 编 李涤尘 丁玉成 唐一平 金涛
主 审 陈人亨

机械工业出版社

本书是“十五”国家级规划教材，也是“九五”国家级重点教材。本教材在第1版基础上进行了修订，内容包括：加工方法，机床、刀具、夹具，制造质量分析与控制，工艺规程设计以及快速成形、高速加工、微细制造等先进制造技术。全书以系统的观点构筑机械制造技术基础的知识体系，从加工方法的认识认识到工艺系统的构成以及加工过程的设计和质量控制，最后介绍了典型的先进制造技术。内容系统性强，编排精练完整。

本书可作为普通高校机械工程及自动化专业主干技术基础课教材，也可供工业工程、管理工程和工业设计等有关专业本科生和研究生作为教学参考书，亦可为制造企业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造技术基础/卢秉恒主编. —2版. —北京:
机械工业出版社, 2005.5
面向21世纪课程教材. 普通高等教育“九五”国家级重点教材.
普通高等教育“十五”国家级规划教材
ISBN 7-111-07154-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 022197 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: 高文龙 版式设计: 冉晓华 责任校对: 吴美英
封面设计: 张静 责任印制: 洪汉军
北京京丰印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行
2005 年 5 月第 2 版 · 第 1 次印刷
787mm × 1092mm^{1/16} · 18 印张 · 440 千字
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) 68326294
封面无防伪标均为盗版

第 2 版前言

《机械制造技术基础》是一本改革力度大的教材，涵盖了过去课程体系中的机床概论、切削原理与刀具、机床夹具原理、机械制造工艺学等课程的内容，于 1999 年出版后，至今经历了 5 年的教学实践，得到了很多兄弟院校的大力支持，提出了许多宝贵意见和建议，5 年里部分院校也编写了多本《机械制造技术基础》教材。

本次修订是在总结 5 年实践经验的基础上，参照其他版本的同类教材，汲取了使用该教材院校提出的建设性意见，根据全国高等工业学校教学指导委员会机械制造教学指导小组审议通过的教学大纲修订而成。在内容编排和体系构成上进行了较大的调整，遵循了学生认识机械制造技术的认知规律，首先是加工方法，然后是实现加工方法的工艺系统的构成，包括机床、刀具、切削原理以及夹具等章节，进而介绍了工艺规程的设计、制造质量的控制，最后给出了 3 种先进的制造技术。教材的内容选择是在继承原有教材的基础上，力求精练，所选内容均可在课堂中讲授，带 * 号的小字印刷部分供学生课外自学，也可以课堂讲授。学时仍按照 60 学时左右设计，讲授时可根据学时的多少进行删减。

本次修订由卢秉恒教授任主编，赵万华教授、洪军副教授任副主编。第一、第七章卢秉恒教授编写，绪论、第二、第四、第六章由赵万华教授编写，第三、第五章由洪军副教授编写，李涤尘教授、丁玉成教授、唐一平教授，金涛博士也参加了部分章节的材料收集、内容删减等工作。全书由卢秉恒教授统稿。西安交通大学陈人亨教授对全书进行了审定，西安理工大学黄玉美教授、西北工业大学苑伟政教授对内容的选择提出了很多建设性的意见。在此表示衷心的感谢！

本书充分借鉴了顾崇銜教授等编著的教材《机械制造工艺学》在此作者表达对我国机械工程科研和教育的老前辈——顾崇銜教授崇高的敬意，谨以此书敬献给导师顾崇銜教授。

修订过程中，由于编者水平有限，疏漏之处在所难免，恳请使用本书的广大师生、读者及同仁多提宝贵意见，以求改进。

编者

2004.10.20

前 言

本教材为“机械工程及自动化”专业重点改革教材，属“九五”规划国家级重点教材，是机械工程及自动化专业的主干技术基础课教材。本书考虑了原机械制造专业部分课程（如机械制造工艺学、金属切削原理与刀具、机床夹具、金属工艺学、机床概论等）的基本内容及先进制造技术的发展，结合国内外同行教改实践及科研成果编写而成。

本书教授前，希望学生已经过金属工艺学的实践环节。本书第六章的内容可供师生选用，也可采用专家教授开设系列讲座的方式进行教学，以求通过研讨使学生了解制造技术的新进展。本书按 60 个课内学时编写。

高校师生对制造类课程的改革呼声已久，不少院校都作了很多尝试。尽管如此，由于本书改革力度大，编者经验不足，对本书内容的取舍、繁简深浅的把握很难准确，论述中也可能有谬误之处。恳切希望使用本书的广大师生、读者多提宝贵意见，以求改进。

本书由卢秉恒教授任主编，于骏一、张福润教授任副主编。第一章、第六章以卢秉恒教授为主编写第二章由华中理工大学熊良山、张福润教授编写，第三章由西安交通大学毛世民博士编写，第四章、第五章分别由吉林工业大学包善斐、于骏一两位教授编写。第六章的编写中梁正和、王平、李宝明、赵万华、洪军等博士也参加了工作。全书由华中理工大学师汉民教授主审、西安交通大学陈人亨教授协助审定。全书编写工作中一直得到西安交通大学顾崇銜教授的全面指导，吴序堂、沈允文、黄玉美等教授提出了许多宝贵意见。本书的编写得到华中理工大学杨叔子院士的大力支持。对以上所有给予我们支持的先生们，特致以衷心的感谢。

编著者

1999.5

目 录

第2版前言

前言

绪论	1	*第五节 各类机床夹具	113
第一章 机械加工方法	4	*第六节 现代机床夹具	121
第一节 零件的成形方法	4	第七节 机床夹具设计的基本步骤	127
第二节 机械加工方法	5	思考与练习题	129
思考与练习题	13	参考文献	130
参考文献	14	第五章 机械制造质量分析与控制	131
第二章 金属切削原理与刀具	15	第一节 机械加工精度	132
第一节 刀具的结构	15	第二节 工艺过程的统计分析	156
第二节 刀具材料	27	第三节 机械加工表面质量	170
第三节 金属切削过程及其物理现象	30	*第四节 机械加工过程中的振动	177
第四节 切削力与切削功率	34	思考与练习题	186
第五节 切削热和切削温度	38	参考文献	188
第六节 刀具磨损与刀具寿命	43	第六章 工艺规程设计	190
第七节 切削用量的选择及工件材料加工性	46	第一节 概述	190
思考与练习题	49	第二节 机械加工工艺规程设计	195
参考文献	50	第三节 加工余量与工序尺寸	206
第三章 金属切削机床	51	第四节 工艺尺寸链	209
第一节 概述	51	第五节 机械加工工艺的技术经济性分析	217
第二节 金属切削机床部件	57	第六节 机器装配工艺规程设计	222
*第三节 常见的金属切削机床	75	第七节 机械产品设计的工艺性评价	233
思考与练习题	85	思考与练习题	239
参考文献	85	参考文献	241
第四章 机床夹具原理与设计	86	第七章 先进制造技术	242
第一节 机床夹具概述	86	第一节 快速成形制造技术	242
第二节 工件在夹具中的定位	91	第二节 高速切削	251
第三节 定位误差分析	103	第三节 微机械及其微细加工技术	259
第四节 工件在夹具中的夹紧	106	思考与练习题	277
		参考文献	278



结 论

一、制造业与制造技术

制造业是一个国家的支柱产业，也是反映一个国家经济实力的重要标志，是为国家创造财富的重要产业。据统计，20世纪90年代20个工业化国家制造业所创造的财富占国民生产总值（GDP）的比例平均为22.15%。

制造技术支持着制造业的健康发展，先进的制造技术能使一个国家的制造业乃至国民经济处于有竞争力的地位。忽视制造技术的发展，就会导致经济发展走入歧途。当今信息技术的发展，使传统的制造业革新了它原来的面目，但这决不是削弱了它的重要地位，这一点为不少国家经济发展的历史所证明。如美国近年来的发展情况即是一例。第二次世界大战以来，美国一直是制造业大国，但在20世纪70年代到80年代之间，一度受到所谓制造业已成为“夕阳工业”的思潮影响，结果使美国在汽车、家电的生产方面受到了日本的有力挑战，丧失了许多市场，导致了90年代初的经济衰退。这一严重局面引起了美国决策层重新审视自己的产业政策，先后制定实施了一系列振兴制造业的计划，并特别地将1994年确定为美国的先进制造技术年，制造技术成为美国当年财政重点扶植的唯一领域。这些措施，使先进制造技术在美国得到长足的发展，其结果促进了美国经济的全面复苏，夺回了许多原先失去的市场。

新中国成立以来，我国的制造技术与制造业得到了长足的发展，一个自立的机械工业体系基本形成。改革开放十多年来，开放与引进在一定程度上促进了我国制造业的发展及制造技术的提高。但与工业发达国家相比，我们还存在着十分明显的差距。由于管理、技术、投入不足等许多方面的因素，有些差距还有加大的趋势。我们已进入信息社会，经济的全球化和贸易的自由化使国际经济竞争愈演愈烈，就某种意义上来说，这是一场没有硝烟的战争，我国制造业正承受着国际市场的巨大压力。如果定义出口额与进口额之比为名义竞争力，工业发达国家机械产品名义竞争力一般为1，我国1990年为0.466，1993年为0.376，1994年为0.28。机械产品进出口贸易逆差高达242亿美元/年。为了达到国家目标，即使我国机械

产品名义竞争力达到 0.8, 我们还要付出艰辛的努力, 也需要大批有志于制造业的莘莘学子的投入与献身。我国现在已经是制造大国, 要想成为制造强国, 还有很长的路要走。目前在尖端设备的制造、大型装备的制造方面我国还主要依赖进口。如制造集成电路的光刻设备、600MW 以上的大型发电机组等, 我国还主要依赖于进口。

制造从远古时代就形成了一套技术。蒸汽机与电力的革命使其发生了很大变化, 形成了基于大批量生产的制造技术。同样, 现代电子技术、计算机技术、信息技术也使传统的制造技术有了飞跃的发展及革命性变化。制造技术已从单工序的研究发展到制造系统的研究。

制造系统是指覆盖全部产品生命周期的制造活动所形成的系统, 即设计、制造、装配、市场乃至回收的全过程。在这一全过程中, 所存在的物质流(主要指由毛坯到产品的有形物质的流动)、信息流(主要指生产活动的设计、规划、调度与控制)及资金流(包括了成本管理、利润规划及费用流动等)构成了整个制造系统。

CNC 技术、加工中心、高速加工、微纳制造、FMS、CIMS 等一系列制造自动化技术的发展适应了多品种、小批量的生产模式。CAD/CAM 一体化、快速成形技术、并行工程、虚拟制造缩短了产品开发周期。精益生产、敏捷制造、动态联盟等生产模式则把制造技术的目标聚焦到市场和效益上。同样, 为了人类的明天, 可持续发展的制造策略也逐渐成为技术专家和企业家关注的重要问题, 这些内容形成了先进制造技术的主题。制造技术不再仅仅是以力学、切削理论为主要基础的一门学科, 而是涉及了机械科学、系统科学、信息科学和管理科学的一门综合学科。虽然, 我们使用的理论工具有了变化, 但其目的仍是研究如何最优地由原材料获取产品, 以使企业得到良好的经济效益和社会效益。

二、本课程的内容与学习要求

本课程主要介绍了机械产品的生产过程及生产活动的组织、机械加工过程及其系统。包括了金属切削过程及其基本规律, 机床、刀具、夹具的基本知识, 机械加工和装配工艺规程的设计, 机械加工中精度及表面质量的概念及其控制方法, 典型的制造技术等。

制造实际上不仅局限于机械制造, 也应包括汽车、电子、仪器仪表、医疗器械、轻工乃至信息产业产品的制造。本书为了使学生既有较强的机械制造技术的知识基础, 又有较强的就业适应能力, 拟以机械制造为主, 将部分内容拓宽至适应其它制造业, 即向大制造内容扩展。这一扩展主要是为了扩展学生视野, 增强其就业适应能力。

单个工序、单台设备构成了制造活动的一个单元, 制造活动的完成往往需要一个完整的系统。当今的工程技术人员不仅应该掌握有关单个工序及其优化的知识, 而且应该掌握整个制造系统的规划设计, 选择优化和运作监控的基本知识, 以便能在宏观和全局上对生产活动组织有清楚的认识, 更有利于完成一个制造工程师的工作。

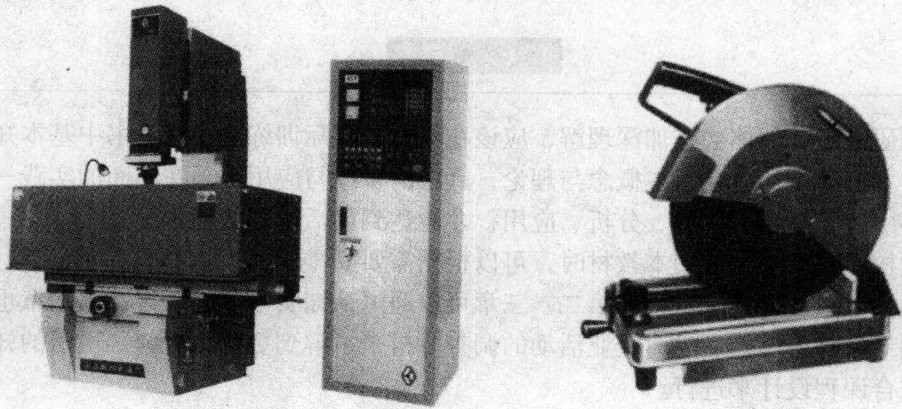
通过本课程学习, 要求学生能对制造活动有一个总体的、全貌的了解与把握, 能掌握金属切削过程的基本规律, 掌握机械加工的基本知识, 能选择加工方法与机床、刀具、夹具及加工参数, 具备制订工艺规程的能力和掌握机械加工精度和表面质量分析的基本理论和基本知识, 初步具备分析解决现场工艺问题的能力。了解当今先进制造技术的发展概况, 初步具备对制造单元以及制造系统选择决策的能力。

三、本课程的学习方法

金属切削理论和机械制造工艺知识具有很强的实践性, 因此, 学习本书时必须重视实践环节, 仅通过课堂上听教师的讲授或自己自学教材是远远不够的, 必须通过实验、现场实习

以及工厂调研来更好地体会、加深理解，应该在不断的实际训练中加深对书中基本知识的理解与应用。本书给出的仅是基本概念与理论，真正的掌握与应用必须在不断的实践—理论—实践的循环中善于总结、思考、分析、应用，才能达到灵活运用的地步。

各类学校不同专业在应用本教材时，可以根据需要安排学时。本书的有些章节，也可以采取课堂教授以外的方式进行，如第二、三章可以通过认知实习了解掌握；第七章也可以通过邀请有关专家开讲座，通过对企业活动的调查分析来了解到更宽、更新、更活的知识；第五章可以结合课程设计来进行。



第一章

机械加工方法

第一节 零件的成形方法

机器或设备中的零件要完成一定的功能，首先必须具备一定的形状。这些形状都要通过各种成形方法来完成。

按照在由原材料或毛坯制造成为零件的过程中，质量 m 的变化，可分为 $\Delta m < 0$ ， $\Delta m = 0$ ， $\Delta m > 0$ 3 种类型，不同类型采用不同的工艺方法。

$\Delta m < 0$ ，传统的切削加工方法，包括磨料磨削、特种加工等，在制造过程中通过材料逐渐被切除而获得需要的几何形状。

$\Delta m = 0$ ，铸造、锻造及模具成形（注塑、冲压等）工艺中，在成形前后，材料主要是发生形状变化，而质量基本不变。

$\Delta m > 0$ ，20 世纪 80 年代出现的快速成形（Rapid Prototyping）技术，在成形中通过材料累加获得所需形状，这种制造方法又称为材料累加法（Material Incess Manufacturing）。

一、 $\Delta m < 0$ 的制造过程

$\Delta m < 0$ 主要指切削加工，这是本书重点讲述的内容。切削加工是通过刀具和工件之间的相对运动及相互力的作用实现的。工件往往通过夹具安装在机床上，机床带动刀具或工件或两者同时进行运动。切削过程中，有力、热、变形、振动、磨损等现象发生。这些运动的综合决定了零件最终获得的几何形状及表面质量。如何正确选择机床、刀具、夹具、加工方法及切削用量是本课程的重要内容。

对于加工精度及表面粗糙度要求特别高的零件，要采取精加工及超精加工工艺。精加工及超精加工的尺寸精度往往达到亚微米乃至纳米（nm）级。这些工艺在航空航天、计算机产品等领域有着广泛的应用。

特种加工是指利用电或化学等方法完成材料去除成形的方法，这些方法主要适合于加工

超硬度、易碎等常规加工方法难加工の場合。三束包括激光束、电子束、离子束的加工在微细加工中有特殊的作用，还有高压水射流等加工方法。以上内容，另有教科书可资参考。

二、 $\Delta m = 0$ 的制造过程

$\Delta m = 0$ 的工艺内容主要由材料成形课程研究。此处值得注意的是，统计数据表明，机电产品 40% ~ 50% 的零件是由模具成形的，因此模具的作用是显而易见的。模具可分为注射模、压铸模、锻模、冲裁模、拉伸模、吹塑模等等。在我国模具是一个薄弱环节。模具制造精度一般要求较高，其生产往往是单件生产方式。模具的设计要用到 CAD、CAE 等一系列技术，是一个技术密集型的产业。

三、 $\Delta m > 0$ 的制造过程

20 世纪 80 年代出现的材料累加法制造 (MIM) 工艺中，成形后与成形前相比 $\Delta m > 0$ ，零件是逐渐生长出来的。在 $\Delta m > 0$ 的制造过程中，通过材料逐渐累加成形，这一工艺方法的长处是可以成形任意复杂形状的零件，而无需刀、夹具等生产准备活动。这一工艺又称 RP 技术 (Rapid Prototyping)。快速制造出来的原型可作为设计评估、投标或展示的样件。RP 技术与快速精铸技术 (Quick Casting) 及快速模具制造技术 (Rapid Tooling) 等相结合，又可以为小批量或大批量生产服务，因而 RP 技术已成为加速新产品开发及实现并行工程的有效技术。一些工业发达国家 (如美、日等) 已经全面应用这一技术来提高制造业的竞争能力。

RP 技术已形成了几种成熟方法，进入了商品化阶段。目前商业化的设备主要有光固化法/SL 法 (Stereolithography)、叠层制造法/LOM 法 (Lamited Object Manufacturing)、激光选区烧结/SLS 法 (Selective Laser Sinering)、熔积法/FDM 法 (Fused Daposition Modeling)。此外，目前正在研究的方法还有三维打印法、漏板固化法等工艺，这些工艺各自特点不同，各有不同的适用场合。该部分内容将在第七章详细介绍。

第二节 机械加工方法

采用机械加工方法获得零件的形状，是通过机床利用刀具将毛坯上多余的材料切除来获得的。根据机床运动的不同、刀具的不同，可分为不同的加工方法，主要有：车削、铣削、磨削、钻镗削及特种加工等。本节对这些主要方法进行简要介绍。

一、车削

如图 1-1 所示，车削方法的特点是工件旋转，形成主切削运动，因此车削加工后形成的面主要是回转表面，也可加工工件的端面。通过刀具相对工件实现不同的进给运动，可以获得不同的工件形状。当刀具沿平行工件旋转轴线运动时，就形成内、外圆柱面；当刀具沿与轴线相交的斜线运动时，就形成锥面。在仿形车床或数控车床上，可以控制刀具沿着一条曲线进给，则形成一个特定的旋转曲面。采用成形车刀，横向进给时，也可加工出旋转曲面来。车削还可以加工螺纹面、端面及偏心轴等。车削加工精度一般为 IT8 ~ IT7，表面粗糙度为 $R_a 6.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 。精车时，可达 IT6 ~ IT5，表面粗糙度可达 $R_a 0.4 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。车削的生产率较高，切削过程比较平稳，刀具较简单。

二、铣削

如图 1-2 所示，铣削的主切削运动是刀具的旋转运动，工件本身不动，而是装夹在机床的工作台上完成进给运动。铣削刀具较复杂，一般为多刃刀具。不同的铣削方法，铣刀完成

切削的切削不同,卧铣时,平面的形成是由铣刀的外圆面上的切削刃形成的;立铣时,平面是由铣刀的端面刃形成的。提高铣刀的转速可以获得较高的切削速度,因此生产率较高。但由于铣刀刀齿的切入、切出,形成冲击,切削过程容易产生振动,因而限制了表面质量的提高。这种冲击,也加剧了刀具的磨损和破损,往往导致硬质合金刀片的碎裂。铣削时,铣刀在切离工件的一段时间内,可以得到一定冷却,因此散热条件较好。

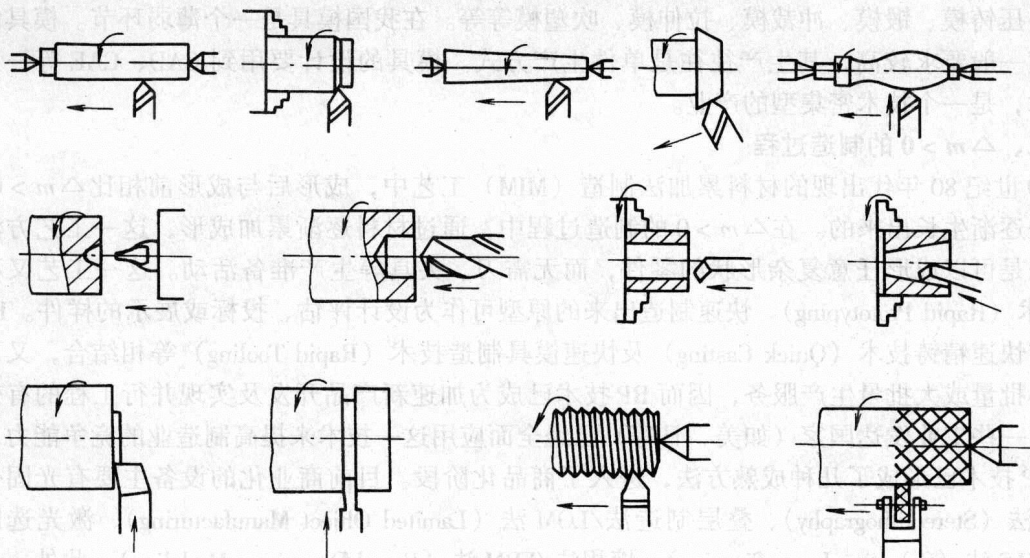


图 1-1 车床加工的典型工序

按照铣削时主运动速度方向与工件进给方向的不同,又分为顺铣和逆铣,如图 1-3 所示。

顺铣时,铣削力的水平分力与工件的进给方向相同,而工作台进给丝杠与固定螺母之间一般又有间隙存在,因此切削力容易引起工件和工作台一起向前窜动,使进给量突然增大,容易引起打刀。逆铣则可以避免这一现象,因此,生产中多采用逆铣。在铣削铸件或锻件等表面较硬的工件时,顺铣时铣刀齿首先接触工件的硬皮,加剧了铣刀的磨损;逆铣则无这一缺点。但逆铣时,切削厚度从零开始逐渐增大,因而切削刃开始经历了一段在切削硬化的已加工表面上挤压滑行的阶段,也会加速刀具的磨损。同时,逆铣时,铣削力具有将工件上抬的趋势,也易引起振动,这是逆铣的不利之处。

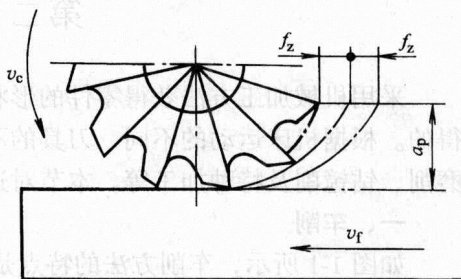


图 1-2 铣削加工

铣削的加工精度一般可达 $IT_8 \sim IT_7$, 表面粗糙度为 $R_a 6.3 \sim 1.6 \mu m$ 。普通铣削一般能加工平面或槽面等,用成形铣刀也可以加工出特定的曲面,如铣削齿轮等。数控铣床可通过数控系统控制几个轴按一定关系联动,铣出复杂曲面来,这时刀具一般采用球头铣刀。数控铣床在加工模具的模芯和型腔,叶轮机械的叶片等形状复杂的工件时,应用非常广泛的,因而得到了很快的发展。

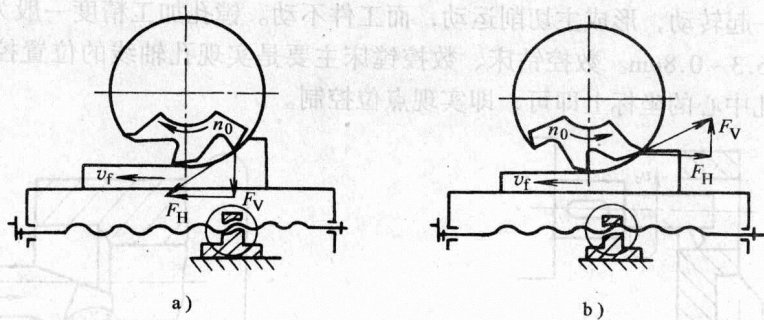


图 1-3 顺铣和逆铣

a) 顺铣 b) 逆铣

三、刨削

刨削时, 刀具的往复直线运动为切削主运动, 如图 1-4 所示。因此, 刨削速度不可能太高, 故生产率较低。刨削比铣削平稳, 其加工精度一般可达 $\text{IT}8 \sim \text{IT}7$, 表面粗糙度为 $R_a 6.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$, 精刨平面度可达 $0.02/1000$, 表面粗糙度为 $R_a 0.8 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 。牛头刨床一般只用于单件生产, 加工中小型工件; 龙门刨床主要用来加工大型工件, 加工精度和生产率都高于牛头刨床。

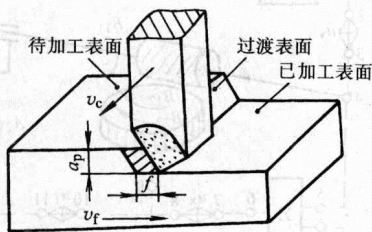


图 1-4 刨削加工

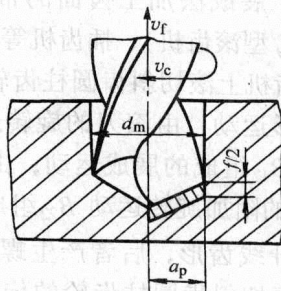


图 1-5 钻削加工

插床实际上可以看作立式的牛头刨床, 主要用来加工键槽等内表面。插齿机的插刀与转动的工件形成展成运动, 可加工出渐开线齿轮的齿面。

四、钻削与镗削

在钻床上, 用旋转的钻头钻削孔是孔加工最常用的方法, 钻头的旋转运动为主切削运动, 如图 1-5 所示。钻削的加工精度较低, 一般只能达到 $\text{IT}10$, 表面粗糙度一般为 $R_a 12.5 \sim 6.3 \mu\text{m}$ 。在单件、小批生产中, 中小型工件上较大的孔 ($D < 50\text{mm}$), 常用立式钻床加工; 大中型工件上的孔, 用摇臂钻床加工。精度高、表面质量要求高的小孔, 在钻削后常常采用扩孔和铰孔来进行半精加工和精加工。扩孔采用扩孔钻头, 铰孔采用铰刀进行加工。铰削加工精度一般为 $\text{IT}9 \sim \text{IT}6$, 表面粗糙度为 $R_a 1.6 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 。扩孔、铰孔时, 扩孔钻和铰刀均在原底孔的基础上进行加工, 因此无法提高孔轴线的位置精度以及直线度。而镗孔时, 镗孔后的轴线是以镗杆的回转轴心决定的, 因此可以校正原底孔轴线的位置精度。镗孔可在镗床上或车床上进行, 如图 1-6 和图 1-7 所示。在镗床上镗孔时, 镗刀与车刀基本相同, 不同之处

是镗刀随镗杆一起转动，形成主切削运动，而工件不动。镗孔加工精度一般为 IT9 ~ IT7，表面粗糙度为 $R_a 6.3 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。数控钻床、数控镗床主要是实现孔轴线的位置控制，因此只要控制刀具移到孔中心的坐标上即可，即实现点位控制。

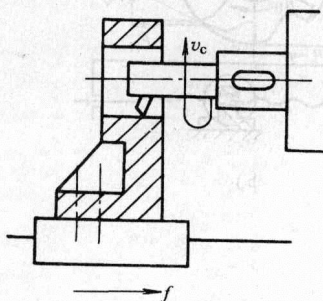


图 1-6 镗床镗孔

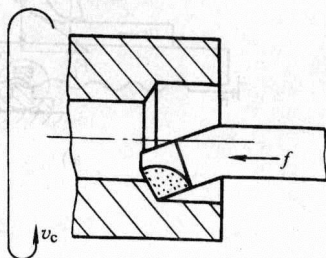


图 1-7 车床镗孔

五、齿面加工

齿轮齿面的加工运动较复杂，根据形成齿面的方法不同，可分为两大类：成形法和展成法（又称范成法）。成形法加工齿面所使用的机床一般为普通铣床，刀具为成形铣刀，需要两个简单成形运动：刀具的旋转运动 B_{11} （主切削运动）和直线移动 A_{21} （进给运动）（如图 1-8 所示）。展成法加工齿面的常用机床有滚齿机（如 Y3150E 型滚齿机）、插齿机等。

在滚齿机上滚切斜齿圆柱齿轮时，一般需要两个复合成形运动：由滚刀的旋转运动 B_{11} 和工件的旋转运动 B_{12} 组成的展成运动；由刀架的轴向移动 A_{21} 和工件的附加旋转运动 B_{22} 组成的差动运动。前者产生渐开线齿形，后者产生螺旋线齿长。图 1-8 为滚齿机滚切斜齿圆柱齿轮的传动原理图，共由 4 条传动链组成：速度传动链“电动机-1-2- u_v -3-4”，即主运动传动链，使滚刀获得一定速度和方向的运动；展成传动链“4-5- Σ -6-7- u_x -8-9”，产生展成运动并保证滚刀与工件之间的严格运动关系（滚刀转过一个齿，工件转过一个齿）；轴向进给传动链“9-10- u_f -11-12”，使刀架获得轴向进给运动；差动传动链“12-13- u_y -14-15- Σ -6-7- u_x -8-9”，保证差动运动的严格运动关系（刀架移动一个导程，工件附加转 1 转）。4 条传动链中，速度传动链和轴向进给传动链为外联系传动链。滚切直齿圆柱齿轮时，不需要差动运动。滚切蜗轮的传动原理与滚切圆柱齿轮时相似。

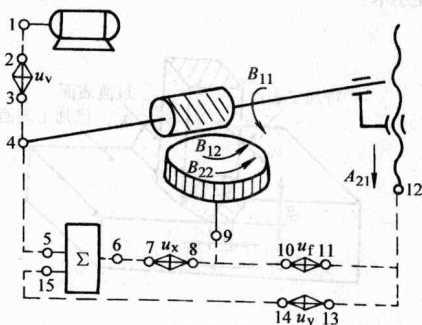


图 1-8 滚切斜齿圆柱齿轮的传动原理

图 1-9 所示为 Y3150E 型滚齿机的外形图。立柱 2 固定在床身 1 上，刀架溜板 3 可沿立柱上的导轨作轴向进给运动。滚刀安装在刀杆 4 上，可随刀架体 5 倾斜一定的角度（滚刀安装角），以使用不同旋向和螺旋升角的滚刀加工不同的工件。加工时，工件固定在工作台 9 的心轴 7 上，可沿床身导轨作径向进给运动或调整径向位置。

六、复杂曲面加工

三维曲面的切削加工，主要采用仿形铣和数控铣的方法或特种加工方法（见本节八）。

仿形铣必须有原型作为靠模，加工中球头仿形头始终以一定压力接触原型曲面，仿形头的运动变换为电感量，信号经过放大控制铣床三个轴的运动，形成刀头沿曲面运动的轨迹。铣刀多采用与仿形头等半径的球头铣刀。

原型一般可采用工件样件、手工制作或快速成形方法制造。仿形加工的误差取决于原型精度、靠模压力、切削用量及曲面本身的复杂程度。

数控技术的出现为曲面加工提供了更有效的方法。在数控铣床或加工中心上加工时，曲面是通过球头铣刀逐点按曲面坐标值加工而成。在编制数控程序时，要考虑刀具半径补偿，因为数控系统控制的是球头铣刀球心位置轨迹，而成形面是球头铣刀切削刃运动的包络面。曲面加工数控程序的编制，一般情况下，可由 CAD/CAM 集成软件包（大型商用 CAD 软件都有 CAM 模块）自动生成，特殊情况下，还要二次开发。采用加工中心加工复杂曲面的优点是：加工中心上有刀库，配备几十把刀具，对曲面的粗、精加工，凹曲面的不同曲率半径的要求，都可选到合适的刀具。同时，在一次装夹中，可完成各主要表面及辅助表面如孔、螺纹、槽等的加工，有利于保证各加工表面的相对位置精度。

七、磨削

磨削以砂轮或其它磨具对工件进行加工，如图 1-10 所示。其主运动是砂轮的旋转运动。砂轮上的每个磨粒都可以看成一个微小刀齿，砂轮的磨削过程，实际上是磨粒对工件表面的切削、刻削和滑擦三种作用的综合效应。磨削中，磨粒本身也会由尖锐逐渐磨钝，使切削能力变差，切削力变大。当切削力超过粘结剂强度时，磨钝的磨粒会脱落，露出一层新的磨粒，这就是砂轮的“自锐性”。但切屑和碎磨粒仍会阻塞砂轮，因而，磨削一定时间后，需用金刚石车刀等对砂轮进行修整。

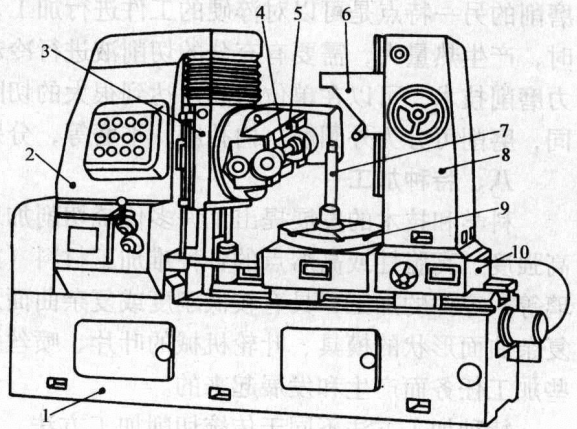


图 1-9 Y3150E 型滚齿机

- 1—床身 2—立柱 3—刀架溜板 4—刀杆 5—刀架体
6—支架 7—心轴 8—后立柱 9—工作台 10—床鞍

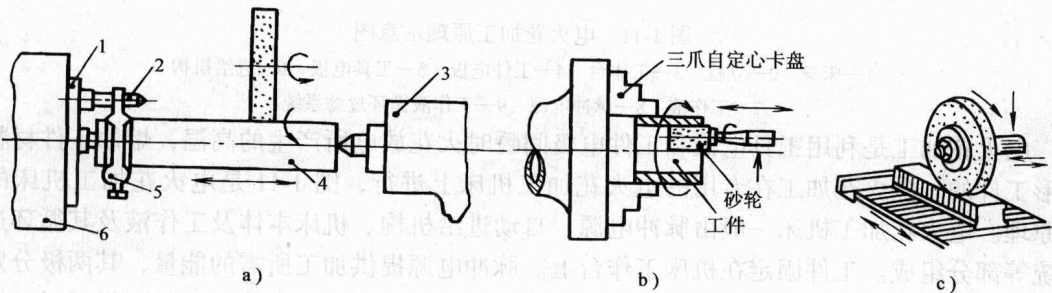


图 1-10 磨削加工

- a) 磨外圆 b) 磨内孔 c) 磨平面

- 1—拨盘 2—拨销 3—尾架 4—工件 5—鸡心夹头 6—头架

磨削时，由于切削刃很多，所以加工时平稳、精度高，表面粗糙度小。磨床是精加工机

床,磨削精度可达IT6~IT4,表面粗糙度可达 $R_a1.25\sim0.01\mu\text{m}$,甚至可达 $R_a0.1\sim0.008\mu\text{m}$ 。磨削的另一特点是可以对淬硬的工件进行加工,因此,磨削往往作为最终加工工序。但磨削时,产生热量大,需要有充分的切削液进行冷却,否则会产生磨削烧伤,降低表面质量。强力磨削技术,可以在单位时间内达到很大的切除量,因而可以一次完成粗精加工。按功能不同,磨削可分为外圆磨、内孔磨、平磨等,分别用于外圆面、内孔及平面的加工。

八、特种加工

科学和技术的发展提出了许多传统切削加工方法难以完成的加工任务,如具有高硬度、高强度、高脆性或高熔点的各种难加工材料(如硬质合金、钛合金、淬火工具钢、陶瓷、玻璃等)零件的加工,具有较低刚度或复杂曲面形状的特殊零件(如薄壁件、弹性元件、具有复杂曲面形状的模具、叶轮机械的叶片、喷丝头等)的加工等。特种加工方法正是为完成这些加工任务而产生和发展起来的。

特种加工方法不同于传统切削加工方法,它是利用化学、物理(电、声、光、热、磁)或电化学方法对工件材料进行去除的一系列加工方法的总称。这些加工方法包括:化学加工(CHM)、电化学加工(ECM)、电化学机械加工(ECMM)、电火花加工(EDM)、电接触加工(RHM)、超声波加工(USM)、激光束加工(LBM)、离子束加工(IBM)、电子束加工(EBM)、等离子体加工(PAM)、电液加工(EHM)、磨料流加工(AFM)、磨料喷射加工(AJM)、液体喷射加工(HDM)及各类复合加工等。

1. 电火花加工

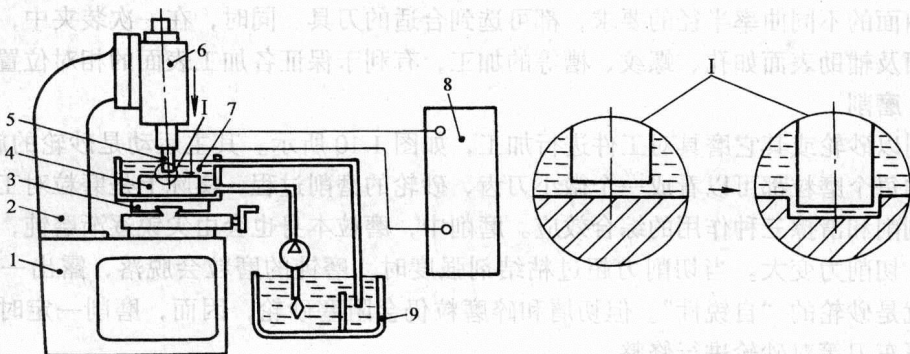


图 1-11 电火花加工原理示意图

1—床身 2—立柱 3—工作台 4—工件电极 5—工具电极 6—进给机构

7—工作液 8—脉冲电源 9—工作液循环过滤系统

电火花加工是利用工具电极和工件电极间瞬时火花放电所产生的高温,熔蚀工件材料来成形工件的。电火花加工在专用的电火花加工机床上进行,图 1-11 是电火花加工机床的工作原理。电火花加工机床一般由脉冲电源、自动进给机构、机床本体及工作液及其循环过滤系统等部分组成。工件固定在机床工作台上。脉冲电源提供加工所需的能量,其两极分别接在工具电极与工件上。当工具电极与工件在进给机构的驱动下在工作液中相互靠近时,极间电压击穿间隙而产生火花放电,释放大量的热,工件表层吸收热量后达到很高的温度(10000°C 以上),其局部材料因熔化甚至气化而被蚀除下来,形成一个微小的凹坑。工作液循环过滤系统强迫清洁的工作液以一定的压力通过工具电极与工件之间的间隙,及时排除电蚀产物,并将电蚀产物从工作液中过滤出去。多次放电的结果,工件表面产生大量凹坑。工