



北京理工大学“明精计划”学术丛书

精密制造 工学基础

Fundamentals of Precision
Manufacturing Engineering

王西彬 焦 黎 周天丰 编著



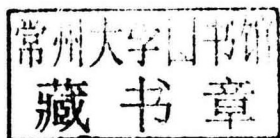
北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京理工大学“明精计划”学术丛书

精密制造工学基础

王西彬 焦 黎 周天丰 编著



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本教材面向“明精计划”机械工程学科培养新体系,以制造精度、效率、性能的概念和实现方法为主线,在本科生阶段建立关于零件精度、几何形状制造、材料去除加工原理、制造装备、工艺误差、检测与控制方法、工艺设计和生产规划的基础知识体系。课程以先期机械设计、几何规范学、工程材料等基础课程中的精度、误差、材料性能等概念为基础,以零件几何形状与机械物理性能获得为重点,以加工质量为切入点,重点整合目前在机械制造工程学、机械制造装备基础、检测与控制等专业课程中的成形方法、加工原理、误差分析、精度检测、制造工艺、数控装备设计的相关内容,围绕先进制造的内涵和发展趋势,重点强调本专业专门基础知识的系统化,突出基础实验研究和学术性内容含量。本教材适于机械工程及自动化专业学生和从事机械制造技术工作的人员学习参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

精密制造工学基础 / 王西彬, 焦黎, 周天丰编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2018.1
ISBN 978-7-5682-5042-9

I. ①精… II. ①王… ②焦… ③周… III. ①机械制造工艺—教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 311399 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 20

字 数 / 478 千字

版 次 / 2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 66.00 元

责任编辑 / 杜春英

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

制造是最基本的工业生产方式，而精密制造则是其核心技术，涉及众多的学科领域。进入 21 世纪，精密制造能力成为全球科技、经济、国防和社会进步的核心竞争力，发展日新月异。2015 年我国发布了《中国制造 2025》规划，发展制造技术已列为国家的强国战略。

长期以来，围绕机械工程及自动化的专业教育，形成了成套的关于制造技术的工学教材体系。制造的目的是以现代工业生产的模式获得具有几何形状精度和性能质量要求的零件和机器，因而制造专业教育也是按照这一目的编写成包含各种知识要点的教材。本书从本科生、硕士生、博士生培养过程专业知识学习的特点出发，在分析传统教材体系的基础上，结合最新的科技成果，试图按照贯通式、研究型教育的思路编写教材内容。本书面向本科生阶段专业教育的需要，以零件几何形状与机械物理性能获得为重点，以制造精度、效率、表面质量为切入点，合理整合目前在机械制造工程学、机械制造装备设计、数控技术、测试检测与控制、计算机辅助设计与制造课程中的成形方法、加工原理、误差分析、精度检测、工艺设计、加工装备设计与控制的相关内容，与之相配设置了 9 个专业实验，形成以基本知识、研究型基础实验为特征的精密制造工学基础教材。

全书分为概论、精密制造工艺基础、加工成形的的基本方法、机械制造装备及设计、数字化精密制造基础、精密制造装备的运动控制基础 6 章。由北京理工大学制造工程系王西彬、焦黎、周天丰统筹编著，颜培、张发平、卢继平、刘长猛、刘检华、丁晓宇、刘少丽、胡耀光、郝娟、金鑫、周世圆参与编著。其中第 1 章由王西彬、颜培执笔，第 2 章由焦黎、张发平执笔，第 3 章由周天丰执笔，第 4 章由卢继平、刘长猛执笔，第 5 章由刘检华、丁晓宇、刘少丽、胡耀光执笔，第 6 章由郝娟、金鑫、周世圆执笔。全书由焦黎统稿，由孙厚芳教授审校。

本书是应教育教学改革和专业发展需求编著，感谢学校领导和徐特立学院的支持与帮助。对编著者来说，本书主要内容虽然已经在徐特立实验班上讲授三届，但终觉精密制造涉及内容众多、满眼珠玉、取舍难断，错误与遗漏难免，尚有不少需要改进的地方，敬请读者和同行师生不吝指正。

作者

目 录

CONTENTS

第 1 章 概论	001
1.1 精密制造的内涵、概念和现状	001
1.2 机械零件几何形状及其表面的精密制造	002
1.2.1 几何形状的精密制造	002
1.2.2 加工表面质量	004
1.2.3 国际制造工艺的研究现状	004
1.3 精密/超精密加工技术及其支撑环境	005
1.4 课程目标与内容安排	006
第 2 章 精密制造工艺基础	008
2.1 加工质量的概念	008
2.1.1 机械加工精度和表面质量的概念	008
2.1.2 加工精度的获得方法	010
2.1.3 表面质量对零件使用性能的影响	013
2.2 加工误差的规律及产生因素	014
2.2.1 加工误差的影响因素及分类	014
2.2.2 工艺系统的几何误差（加工前）——造成切削运动几何轨迹误差的因素	015
2.2.3 加工过程中物理因素引起的加工误差	022
2.2.4 加工后引起的加工误差	036
2.2.5 机械加工中的振动	039
2.2.6 数控编程对加工精度的影响	047
2.2.7 介观切削中尺度效应对加工精度的影响	049
2.3 工艺系统与加工过程误差的统计规律与控制	053
2.3.1 工艺系统及其误差分析	053
2.3.2 加工总误差的分析计算	053
2.3.3 加工误差统计方法	055
2.3.4 加工误差综合分析与控制方法——机床调整	066
2.4 精密加工的工艺设计	067
2.4.1 机械加工工艺规程	067
2.4.2 零件图和零件毛坯的确定	069

2.4.3	定位基准的选择	071
2.4.4	工艺路线的拟定	073
2.4.5	加工余量	076
2.4.6	尺寸链	078
2.4.7	三维工艺设计	084
第3章	加工成型的基本方法	096
3.1	加工方法的原理、工具和特点	096
3.1.1	机械加工工艺方法及原理	096
3.1.2	机械加工工艺及工具	100
3.1.3	机械加工工艺特点与加工方法选择	114
3.2	精密成形加工方法及模具设计	117
3.2.1	精密成形加工方法及原理	117
3.2.2	模具设计与制造	120
3.3	精密特种加工的原理、工具和特点	122
3.3.1	精密电火花加工和电解加工	122
3.3.2	激光、电子束和离子束等高能束流加工	128
3.3.3	超声加工和超声辅助加工	133
3.3.4	水射流加工和磨料喷射加工	136
3.4	精密/超精密加工的主要工艺	139
3.4.1	精密/超精密加工的概念、方法和特点	139
3.4.2	精密/超精密光整加工	140
3.4.3	微细/微纳米加工原理	147
3.5	3D打印原理及应用	149
3.5.1	3D打印原理及其特点	150
3.5.2	3D打印工艺	162
3.5.3	3D打印技术的应用	167
第4章	机械制造装备及设计	173
4.1	金属切削机床	173
4.1.1	机床分类	173
4.1.2	车床	174
4.1.3	磨床	176
4.1.4	铣床	180
4.1.5	数控机床结构	181
4.1.6	数控机床传动	184
4.2	机床典型部件设计	186
4.2.1	主轴部件设计	186
4.2.2	导轨设计	192

4.3 夹具设计	198
4.3.1 夹具的分类与组成	198
4.3.2 夹具定位机构设计	200
4.3.3 定位误差的分析与计算	203
4.3.4 夹具夹紧机构设计	205
4.3.5 专用夹具设计	207
4.3.6 零点快速定位夹具系统	208
4.4 金属增材制造装备设计	209
4.4.1 金属增材制造原理	209
4.4.2 铺粉式激光选区熔化装备	209
4.4.3 送丝式电弧增材制造装备	210
4.5 工业机器人	211
4.5.1 概述	211
4.5.2 工业机器人的分类	212
4.5.3 工业机器人的组成	213
第5章 数字化精密制造基础	215
5.1 面向制造的产品数字化建模技术	215
5.1.1 产品数字化建模	216
5.1.2 面向加工与装配的建模	218
5.2 制造过程中的有限元仿真	221
5.2.1 有限元方法的基本原理	222
5.2.2 有限元分析过程	222
5.2.3 制造过程中有限元方法的应用	230
5.3 计算机辅助数控编程	231
5.3.1 工件数字化造型与数控编程基础	231
5.3.2 自动编程语言编程技术	235
5.3.3 图形交互式自动编程技术	238
5.3.4 数控程序的检验与仿真	241
5.4 数字化装配技术	242
5.4.1 数字化装配技术的内涵	242
5.4.2 数字化装配技术的分类	243
5.4.3 数字化装配工艺仿真与优化	244
5.5 数字化车间的生产管理	251
5.5.1 数字化车间的基本内涵与构成	251
5.5.2 基于物联网的数字化车间软件系统规划	253
5.5.3 数字化车间的生产计划与控制	255

第 6 章 精密制造装备的运动控制基础	262
6.1 运动控制原理	262
6.2 插补	264
6.2.1 概述	264
6.2.2 逐点比较插补	265
6.2.3 数字积分插补	272
6.2.4 数据采样插补	276
6.2.5 插补前的数据预处理	279
6.3 位置控制系统	281
6.3.1 开环/闭环位置控制系统	281
6.3.2 稳定性及过渡过程指标分析	283
6.3.3 PID 控制器原理	286
6.4 伺服驱动系统	287
6.4.1 步进电动机伺服系统	288
6.4.2 直流电动机伺服系统	290
6.4.3 交流电动机伺服系统	293
6.5 常用位置检测元件	295
6.5.1 旋转变压器	296
6.5.2 光电编码器	299
6.5.3 磁栅传感器	301
6.5.4 光栅传感器	302
6.6 测量与误差补偿	303
6.6.1 精密测量技术	304
6.6.2 误差补偿技术	309
参考文献	311

第1章

概 论

1.1 精密制造的内涵、概念和现状

把设计思路由图纸信息通过一系列技术生产活动变为产品零件的过程就是制造。人类的制造历史可以追溯到石器时代。“制造”一词由来已久，南朝梁简文帝的《大法颂》中就提到：“垂拱南面，克己岩廊，权舆教义，制造衣裳。”宋代吴曾的《能改斋漫录·记事一》中有：“徽宗崇宁四年，岁次乙酉，制造九鼎。”清代王韬的《平贼议》中提到：“中国要当设局立厂，如法制造。”工业化的制造始于18世纪中叶，即第一次工业革命时。关于制造的历史作用，毛泽东在《贺新郎·读史》一词中写道：“人猿相揖别，只几个石头磨过，小儿时节。铜铁炉中翻火焰，为问何时猜得？不过几千寒热。人世难逢开口笑，上疆场彼此弯弓月。流遍了，郊原血。一篇读罢头飞雪，但记得斑斑点点，几行陈迹。五帝三皇神圣事，骗了无涯过客，有多少风流人物？盗跖庄蹻流誉后，更陈王奋起挥黄钺。歌未竟，东方白。”可见制造对于人类发展、社会进步、战争与和平的重大推动作用。

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、工业品与生活消费品的行业。制造业是现代社会国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。工业化发达国家大约1/4的人口从事制造业，70%~80%的物质财富来自制造业。

根据在生产中使用的物质形态，制造业可划分为离散制造业和流程制造业。制造业包括产品设计、原料采购、制造、仓储运输、订单处理、批发经营和零售环节。在主要从事产品制造的企业（单位）中，还包括为产品销售而进行的机械与设备的组装与安装活动。制造业一般有消费品制造业、轻工业品制造业和重工业品制造业，民用产品制造业、军工产品制造业以及传统制造业、现代制造业之分。社会的发展与进步，永远离不开制造业，特别是机械制造业。它为国民经济各部门提供生产装备与技术，是社会财富和生活资料的来源，更是国防现代化的基础与保障。

自2010年，我国制造业的总值超过美国成为世界制造第一大国，占全球的19.8%。但与世界先进技术相比，我国制造业仍然大而不强，在自主创新能力、资源利用率、质量效益，特别是在精密制造关键技术等方面还有较大的差距。

精密制造的对象是机器、部件和零件。零件是加工获得的最基本的结构单元。零件是由工程材料制成的，具有一定的几何形状，在机器中要完成确定的功能。因此，零件的设计和加工制造要求达到一定的几何精度和性能指标。历史上制造的最初目的是加工出一定几何形状的生产工具，那时候具有一定的形状就会具备一定的功能，如形状锋锐的刀具、连续稳定

滚动的圆形车轮等。

精密制造技术主要包括精密制造工艺、精密制造装备以及制造过程的控制与检测。一方面,对于企业,精密制造是保障产品质量的核心制造技术,是产品经济效益的倍增器;另一方面,精密制造技术是现代高科技产业和科学技术的发展基础,是现代高技术战争的重要支撑技术。随着航空航天、高精密度仪器仪表、惯性制导平台、光学和激光、新能源动力、武器装备等技术的迅速发展和多领域的广泛应用,对各种高精度复杂结构、光学零件、高精度曲面的加工和装备需求日益迫切。

在现今的科学技术条件下,超精密加工的尺寸精度、形状精度在 $10\text{ nm}\sim 1\text{ }\mu\text{m}$,表面粗糙度小于 10 nm ,机床定位精度的分辨率和重复性高于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,微细加工正在向纳米级尺度发展。按照加工特征尺度的范围,精密加工可分为宏观、介观和微纳观三个区域,如图 1-1 所示。各个区域采用的技术方法和加工理论各不相同。

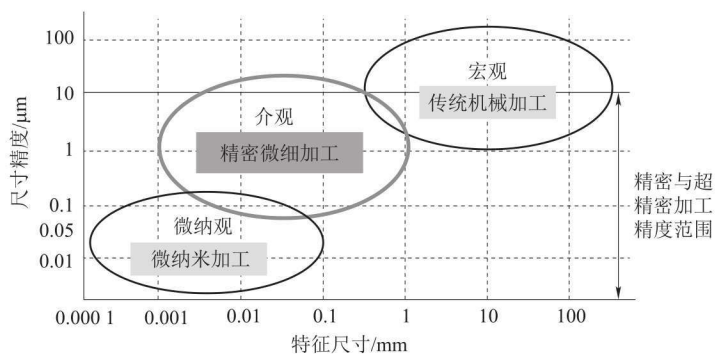


图 1-1 精密加工特征尺度

1.2 机械零件几何形状及其表面的精密制造

1.2.1 几何形状的精密制造

机械产品是由若干符合加工质量要求的机械零件组成的,而制造的目的就是通过加工获得一定几何形状的零件。要想把材料或毛坯制造成具有一定形状、尺寸和精度的零件,需要了解零件的几何成形方法,选择合适的机床、刀具和夹具,设计合理的工艺路线,采用正确的装夹方法。

零件的几何形状都是由一些基本表面构成的,包括平面、圆柱面、圆锥面、球面以及各种复杂成形表面,如螺纹表面、渐开线齿面和自由曲面等。通过加工制造获得的这些表面就是工程表面,这些表面不同于解析几何中纯粹的欧几里得表面,它们具有尺寸大小分布、形状偏差、各种形式的材料微观结构和不确定的几何特征,因为现实工程中不存在没有直径的点、线和没有厚度的面。

在机器上加工的零件,其几何形状是通过理想的点、线、面要素的运动形成的,如车削圆柱表面是由车床上车刀刀尖的直线运动和工件的回转运动合成的。不同的加工运动,不同的切削刃形状,形成几何形线的方式不同,零件表面的成形方法也不同。几何表面的成形方

法可归纳为轨迹法、成形法、相切法、展成法和约束生长法 5 种, 其中前 4 种如图 1-2 所示。

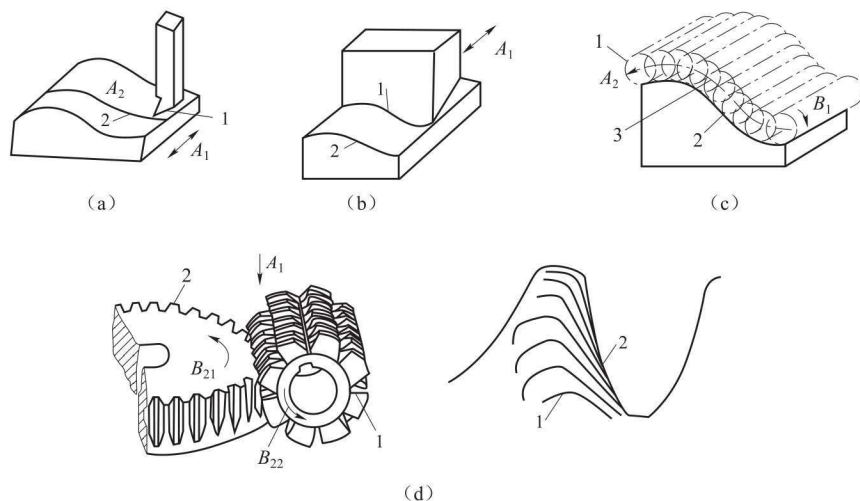


图 1-2 几何表面的成形方法

(a) 轨迹法; (b) 成形法; (c) 相切法; (d) 展成法

1—刀具; 2—工件; 3—刀具中心轨迹

轨迹法: 利用刀具做一定规律的轨迹运动对工件进行加工的方法。切削刃与被加工表面为点接触, 发生线为接触点的轨迹线。

成形法: 利用成形刀具对工件进行加工的方法。切削刃的形状和长度与所需形成的发生线完全吻合, 工件做回转运动形成导线, 最终也获得回转曲面。

相切法: 利用刀具边旋转边做轨迹运动对工件进行加工的方法。切削刃做回转运动, 同时刀具轴线沿着发生线的等距线做轨迹运动, 切削点运动轨迹的包络线就是所需的发生线。为了用相切法得到发生线, 需要两个成形运动, 即刀具的旋转运动和刀具中心按一定规律的运动。

展成法: 利用刀具和工件做展成切削运动进行加工的方法。加工时, 刀具与工件按确定的运动关系做相对运动, 切削刃与被加工表面相切, 切削刃各瞬时位置的包络线就是所需的发生线。

约束生长法: 其一是近十年发展起来的三维成形方法, 或增材制造方法, 即将设计的三维几何体模型, 通过切片表达为二维点线面, 控制打印点按照二维点线面运动逐层增长为最终的零部件, 这种方法可以制造各种内外不同结构的复杂零部件; 其二是应用生物工程方法在约束支架上或遮掩图形控制下的生物生长方法, 可以制造特殊的结构体。

工业生产中获得零件加工表面的主要机械工艺方法有: 切削、磨削、研磨、抛光、滚压和精密塑性成形等。按达到的精度等级, 把工艺过程分为粗加工、半精加工、精加工和超精密加工。在工艺过程中, 影响精度的主要因素有制造基础装备的精度水平及其变化, 加工过程的力、温度和界面电磁响应, 等等。

除机械工艺方法外, 生产中应用较广泛的工艺方法还有电火花加工、电解加工、激光束加工和离子束加工。不同的方法各有特点, 适合于不同材料和形状结构的加工需求。

这些精密制造加工方法由于造型原理本身的误差、加工变形和相互位置关系的变化, 实际加工成形的几何形状、尺寸位置和表面结构产生各种尺度范围的几何误差和机械物理性能

的变化。精密制造工艺的目标之一就是控制这个误差，使之处于设计规定的范围之内。目前较为先进的制造装备是数控机床及其数字化加工工艺。而数字化的原理是基于笛卡儿坐标和欧氏几何原理，即认为几何体上的任何一点可以由一组三维数据表达，而这组数据必然在空间几何体上有一个确定的位置，因此按照设计的几何坐标就可以加工出任意的几何结构零件。1938年麻省理工学院的香龙提出数控点概念，1952年帕森斯与麻省理工学院合作研制出第一台数控加工机床，被认为是现代工业社会划时代的重大事件。现今的数字化加工设备体系完整、种类众多，在社会生产中发挥着生产母机的重大基础与不可替代的作用。

1.2.2 加工表面质量

精密制造的另一个目标是获得稳定的质量及其可靠性，而精密加工的表面质量是零件、部件和整部机器质量的基础，主要包括加工表面层的几何特性和机械物理性能，即表面粗糙度、表面波度，加工表面层塑性变形引起的表面加工硬化，加工温度引起的表面层显微组织结构变化及表面层残余应力。

零件的失效破坏一般是从表面层开始的，因而产品的性能尤其是可靠性、耐磨性等，很大程度上取决于其主要零件的加工表面质量，特别是表面裂纹引起的疲劳断裂，是严重影响国防装备发展的主要因素之一。目前我国工业高端装备的许多关键基础件仍然依赖进口，其主要原因是国内的加工质量不高也不稳定。例如在所有的机械故障中，齿轮失效占60%，而疲劳断齿故障占有齿轮失效的32.8%；又如火箭弹/地对空导弹的复杂曲面的端面产生裂纹，影响内腔变壁厚过渡区的性能，导致导引头失效。

研究表明，在交变载荷作用下，零件表面的波纹、划痕和微观裂纹等缺陷容易引起应力集中而产生扩展疲劳裂纹，导致零件疲劳损坏；若加工纹理方向和相对运动方向垂直，疲劳强度明显降低；表面残余压应力能部分抵消外力产生的拉应力，起到阻碍疲劳裂纹扩展和新裂纹产生的作用，能提高零件的疲劳强度；若表面层有残余拉应力，且与外力施加的拉应力方向一致，会助长疲劳裂纹的扩展，从而使疲劳强度降低；而表面冷作硬化有助于提高零件的疲劳强度，这是因为硬化层能阻止已有裂纹的扩大和新疲劳裂纹的产生。因此，减小表面粗糙度，控制加工纹理和残余应力，可提高疲劳强度。

加工表面质量还会影响零部件的配合性质。形成间隙配合时，若表面粗糙度过大，将引起配合件初期磨损量增大，使配合间隙变大，导致配合性质变化，从而使运动不稳定或使气压、液压系统的泄漏量增大；形成过盈配合时，若表面粗糙度过大，则实际过盈量将减小，降低连接强度，影响配合的可靠性。

1.2.3 国际制造工艺的研究现状

德国弗劳恩霍夫研究所（Fraunhofer-Gesellschaft）是欧洲最大的应用科学研究机构，其6个研究领域中的“Production and Supply of Services”主要面向先进制造技术，长期致力于先进制造技术及工艺过程，重点是加工效率、精度与表面质量的研究。德国卡尔斯鲁厄理工大学（KIT）制造技术研究所（WBK）在高速加工与抗疲劳制造方面有较为深入的研究。

美国用近二十年的时间研究解决关键零部件抗疲劳制造的关键技术，围绕加工表面完整性对零件抗疲劳性能的影响规律，控制加工、装配残余应力的工艺方法，形成了质量工艺和形性耦合制造的理论方法。美国国家标准学会（ANSI）综合大量研究成果，形成表面

完整性的第一部标准：“American National Standard on Surface Integrity”（ANSI B211.1，1986）。

国际生产工程学会（CIRP）2011 年设立一个新机构——表面完整性分会（SI），SI 技术成为近五年全球的新热点，装备质量与竞争的制高点。CIRP SI 会议已连续召开两届（2012 年德国、2014 年英国），第三届在美国夏洛特召开。欧洲提出零件加工表面完整性参数标准体系，如表 1-1 所示。关于表面完整性的加工质量指标要求已体现在各类零件的设计图纸中。

表 1-1 加工表面完整性参数标准体系

Minimum SI data set	Standard SI data set	Extended SI data set
Surface finish Macrostructure (10×or less) Macrocracks Macrocrack indications Microstructure Microcracks Plastic deformation Phase transformation Intergranular attack Pits, tears, laps, protrusions Built-up edge Melted and re-deposited layers Selective etching Microhardness	Minimum SI data set Fatigue test (screening) Stress corrosion test Residual stress and distortion	Standard SI data set Fatigue test (extended to obtain design data) Additional mechanical tests Tensile Stress rapture Creep Other specific tests (e.g., bearing performance, sliding friction evaluation, sealing properties of surface)

1.3 精密/超精密加工技术及其支撑环境

精密/超精密加工的技术门类较多，适用于不同产品、材料的加工要求，涉及制造工艺、数控机床结构设计、工装夹具设计、切削原理与刀具、机械系统控制、检测与监控、生产过程规划与管理等多门学科。精密/超精密加工技术和对应的加工对象与特点如图 1-3 所示。生产中常用的是以精密切削、磨削为代表的减材加工技术，近十年以 3D 打印为代表的增材制造技术得到迅速发展，部分已应用于产品的快速研制。基于各种能场的增减材复合加工技术是未来发展的方向。

超精密加工必须在达到一定要求和具备特殊性能的场地、设备、环境等条件下进行，才能获得稳定满意的精度和表面质量，通常称这些条件为超精密加工的支撑环境，主要包括温度、湿度、光照、静电、粉尘、气流、振动和设备等环境要求。总体归为超净室的物理环境和超精设备环境。工业化的超精密加工，如惯导陀螺、光学陀螺、伺服液压元件、精密运动机构的超精密研磨抛光，微细结构的准 LIGA 加工，微火工品的加工，现场加工零件多、生热多、切除总量多、产生粉尘多、设备多、安全隐患多。因此，一般要求支撑环境满足以下条件：

- （1）使环境温度、湿度对设备和加工质量的影响控制到最小。
要获得 0.01 μm 尺寸精度，需控温精度达到 0.01 ℃以内。湿度将会影响加工表面的洁净度。
- （2）使超静室达到一定指标以减少灰尘对表面粗糙度的影响。

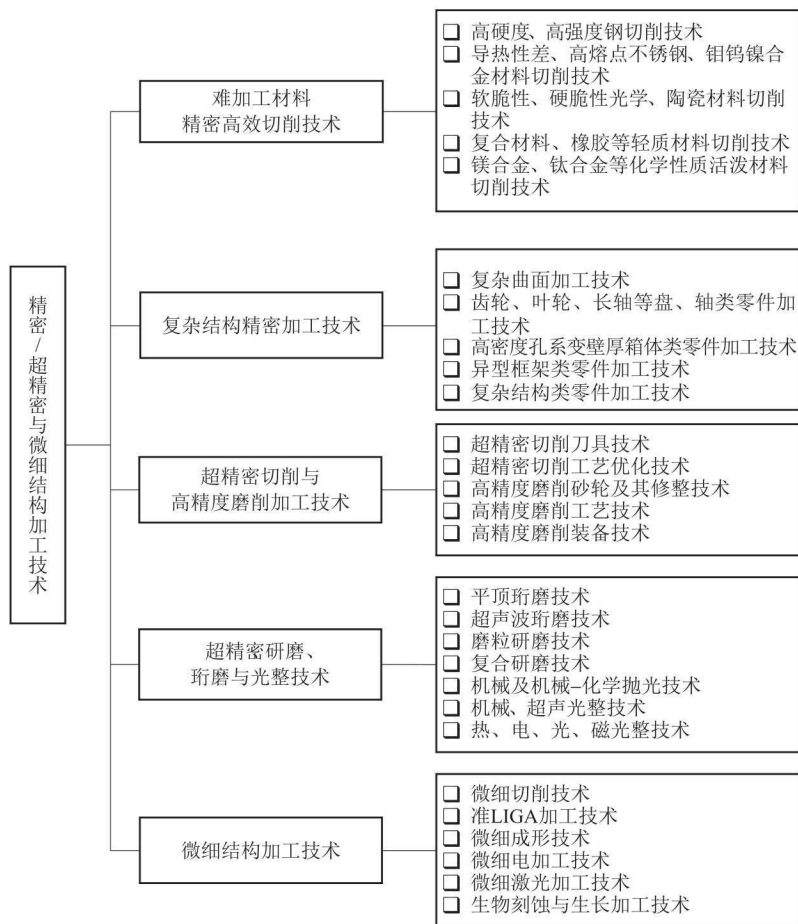


图 1-3 精密/超精密加工技术体系

超精密研磨时，研磨剂颗粒小至 $100 \text{ \AA}^{\text{①}}$ ，是灰尘颗粒的几十分之一至几百分之一。因此要通过控制洁净度，减少粉尘对加工过程和加工表面质量的不良作用。用于工业化生产的超净室的技术关键是对加工过程和设备控制问题，如机床用防尘罩隔离，通入洁净空气。

(3) 采取有效的防振减振措施。

振动对加工表面的几何精度、纹理有至关重要的影响。这种振动包括来自机床自身的振动和来自外界（包括地基传来）的振动。对于机床本身的振动，通过布局设计、结构优化、运动部件的运动精度和动态稳定性设计、减振材料和减振环节及精密制造来解决。对于外界传来的振动，特别是低频振动，采用隔振气垫（空气弹簧隔振），能有效隔离高于 2 Hz 的低频振动，隔振效率达 $80\% \sim 90\%$ 。

1.4 课程目标与内容安排

“精密制造工学基础”课程是机械工程专业按照本科、硕士、博士三阶段知识教育贯通设

^① $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ 。

设计的思路，在本科阶段设置的专业核心基础课。目标是，通过对制造核心内涵和方法的学习，建立关于零件精度、几何形状制造、材料去除加工原理、制造基础装备、加工误差、检测与控制方法、工艺设计、生产规划的基础知识体系。该课程的设置以先期学习的机械设计、公差与配合、工程材料等基础课程中的精度、误差、材料性能等知识为基础，以获得零件几何形状与机械物理性能为重点，以制造精度、效率、表面质量为切入点，围绕先进制造的内涵和发展趋势，重点强调本专业的专门基础知识的系统化，突出基础实验和学术性内容。课程的贯通设计如图 1-4 所示。

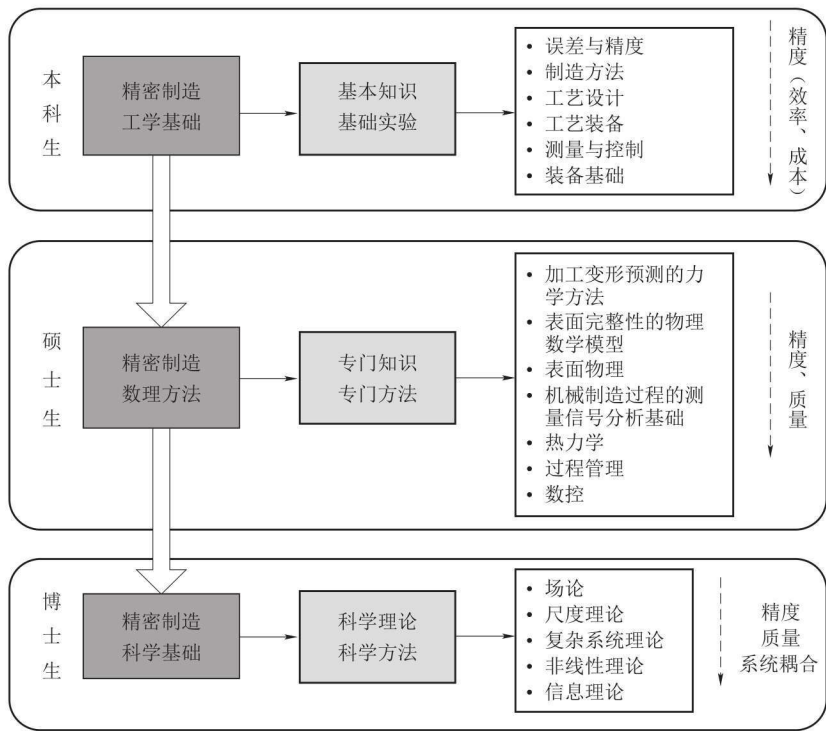


图 1-4 课程的贯通设计

本科阶段的课程内容包括精密制造工艺基础、加工成形的的基本方法、机械制造装备及设计、数字化精密制造基础、精密制造装备运动控制基础。围绕课程内容，结合所进行的科学研究，开设加工精度统计分析、切削力与切削温度分析、电火花成形加工、精密加工、增材制造、基于激光干涉仪的机床精度测量与分析、零件受力变形的有限元仿真分析、典型零件数控加工程序设计、典型产品的虚拟装配、数控编程与插补原理、DSP 电机控制综合实验等 10 个课程实验，以增强学生的实践认识和专业实验能力。

第2章

精密制造工艺基础

2.1 加工质量的概念

2.1.1 机械加工精度和表面质量的概念

零件的加工质量是保证机械产品质量的基础，包含两部分内容：一部分是零件宏观方面的几何参数，即加工精度；另一部分是零件微观几何方面和物理－机械方面的参数，即表面质量。

1. 加工精度与加工误差

加工精度是指零件经加工后的尺寸、几何形状以及各表面相互位置等参数的实际值与理想值相符合的程度，而它们之间的偏离程度则为加工误差。两者的概念是相关联的，即精度越高，误差越小；反之，精度越低，误差就越大。

零件的几何参数包括尺寸、几何形状和相互位置三个方面，故加工精度包括尺寸精度、几何形状精度和相互位置精度。

尺寸精度：限制加工表面与其基准间尺寸误差不超过一定的范围。

几何形状精度：限制加工表面宏观几何形状误差，如圆度、圆柱度、平面度和直线度等的公差值。

相互位置精度：限制加工表面与其基准间的相互位置误差，如平行度、垂直度、同轴度和位置度等。

2. 加工表面质量

任何机械加工所得的表面，不可能是理想的光滑表面，总是存在一定的微观几何形状偏差。机械加工表面质量是指机械加工后零件表面层的几何结构，以及受加工影响表面层金属与基体金属性质产生变化的情况，即加工后零件表面的粗糙程度和表面层物理－机械性能（指表面硬度和残余应力等）的变化。

1) 表面的几何形状（或表面形貌）

加工后的表面形貌描述零件外表层的三维几何形状，即它的起伏不平状态与理想的光滑表面有偏差。其偏差可分为宏观表面几何形状误差和微观表面几何形状误差（即粗糙度），介于两者之间的为波度。这种表面起伏不平的状态，一般以波距 S 和波高 H 的比值加以区分。若 $S/H > 1\,000$ ，为几何形状误差；若 $S/H = 50 \sim 1\,000$ ，则称为表面波度；若 $S/H < 50$ ，则称为表面粗糙度。一般宏观几何形状属于加工精度研究的范围；波度是由工艺系统的振动形成的；而表面粗糙度是完成切削运动后刀刃在被加工表面上形成的峰谷不平的痕迹。

表面粗糙度在不同截面(二维)内是有区别的,如图2-1所示。纵向表面粗糙度是在切削过程的主运动方向上形成的,而横向表面粗糙度是在横向进给运动中形成的。一般车削表面粗糙度根据后者来评定其粗糙度等级。

2) 表面层的物理-机械性能

表面层的材料在加工时会产生物理、机械以及化学性质的变化。图2-2(a)所示为加工表面层沿深度的变化。最外层是吸附层,主要有氧化膜或其他化合物,并吸收、渗进了气体粒子。中间层为压缩层,是加工过程中由切削力造成的表面塑性变形区,厚度在几十至几百微米内,随加工方法的不同而变化。压缩层的上部为纤维层,是由被加工材料与刀具间的摩擦力造成的。另外,切削热也会使表面层产生各种变化,如淬火、回火同样使材料产生相变以及晶粒大小的变化等。所以表面层的物理-机械性能不同于基体,它主要包括以下几个方面。

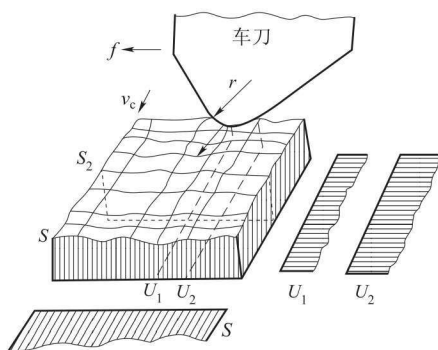


图 2-1 纵向和横向的表面粗糙度

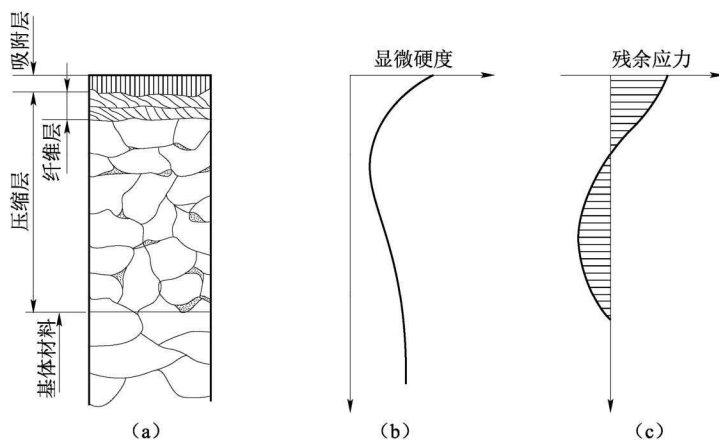


图 2-2 加工表面层沿深度的性能变化

(1) 表面层表面冷作硬化。

工件在机械加工过程中,表面层金属产生强烈的塑性变形,使表面层的强度和硬度提高,这种现象称为表面冷作硬化,如图2-2(b)所示,常用冷硬层深度 h_y 或硬化程度 N 来衡量,即

$$N = \frac{H - H_0}{H_0} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中, H 为加工后表面层的显微硬度; H_0 为原材料的显微硬度。

(2) 表面层内残余应力。

在切削或磨削加工过程中,由于切削变形和切削热的影响,加工表面层会产生残余应力,其大小、方向及分布情况如图2-2(c)所示。残余应力状态(拉应力或压应力)和大小对零件的使用性能有很大影响。