

# 第1章 绪 论

## 1.1 加工与加工技术

### 1. 传统加工

传统加工指主要依靠人工操作，利用机械力完成的零部件加工方法，包括成形加工和切削加工。成形加工在此不做比较，主要比较切削加工。

切削加工是指利用机械力，采用切削刀具切除工件余量的方法。它的主要加工方法有车削、刨削、磨削、钻削、镗削及齿形加工等。车削主要用于加工各种回转表面，如外圆（含外旋转槽）、内圆（含内旋转槽）、端面（含台肩端面和切断）、锥面、螺纹表面和滚花面等；铣削主要用于加工各种平面、沟槽齿轮、凸轮等成形面及轮廓表面等；刨削主要用于加工平面、沟槽和直线形成曲面等；磨削主要是通过砂轮磨平面、外圆、内圆使其达到高的加工精度和低的表面粗糙度；钻削是用钻头在实体材料上加工出孔的方法；镗削是扩大已有孔孔径的方法；齿形加工是加工齿轮齿面的方法，包括铣齿、滚齿、插齿等。

### 2. 现代加工

现代加工也称“非传统加工”或“特种加工”，泛指利用电能、热能、光能、电化学能、化学能、声能及特殊机械能等能量达到去除或增加材料的加工方法，从而实现材料被去除、变形、改变性能或被镀覆等。因此，现代加工是指那些不属于传统加工工艺范畴的加工方法，它不同于使用刀具、磨具等直接利用机械能切除多余材料的传统加工方法。

现代加工是近几十年发展起来的新工艺，是对传统加工工艺方法的重要补充与发展，目前仍在继续研究开发和改进。它是直接利用光能、热能、声能、化学能和电学能，有时也结合机械能对工件进行加工的方法。

### 3. 加工技术与现代加工技术

制造业的基础和核心是制造技术，它由设计技术、加工工艺技术、基础设施及其支撑技术组成。其中，加工工艺技术又是制造技术的核心，它由各种加工方法及其制造过程所决定。所谓加工技术，是指采用某种工具（包括刀具）或能量流通过变形、去除、连接、改性或增加材料等方式将工件材料制成满足一定设计要求的半成品或成品过程技术的总称。加工的目的是获得一定的表面几何形状，并具有一定的几何精度，有时还必须保证加工后的表面（或表面层）满足一定的力学、光学、组织、成分等物理方面的要求，尤其在航空航天、国防等特殊领域更是如此。现代加工技术则是指满足“高速、高效、精密、微细、自动化、绿色化”特征中一种以上特征的加工技术。

## 1.2 现代加工技术的产生及发展

传统的机械加工已有很久的历史，它对人类的生产和物质文明起到了极大的推动作用。例如，18世纪70年代发明了蒸汽机，但由于难以制造出高精度的汽缸而无法推广应用。直到制造出汽缸镗床，解决了汽缸的加工工艺，才使蒸汽机获得了广泛应用，引起了世界性的第一次产业革命。

现代加工技术是20世纪40年代发展起来的，由于材料科学、高新技术的发展和激烈的市场竞争、发展尖端国防及科学研究的需要，不仅新产品更新换代日益加快，而且产品要求具有很高的强度重量比和性能价格比，并正朝着高速度、高精度、高可靠性、高耐腐蚀、高温高压、大功率、尺寸大小两极分化的方向发展，各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现。如果加工工艺技术没有相应的改进，对这些零件的加工靠单纯提高强度的方法，不仅使总的加工成本增加，而且有时根本无法加工。在美国工件材料强度对国家标准机加工费用的影响如图1-1所示。鉴于这一问题的严重性，1960年著名切削家莫詹特（Merchant）强调机械加工方法需要更新概念。于是人们开始探索采用除机械能以外的电能、化学能、声能、光能、磁能等进行加工的方法。这些加工方法，在某种定义上来说，即不使用普通刀具来切削工件材料，而是直接利用能量进行加工。为区别现有的金属切削加工技术，称之为“现代加工技术”或“特种加工技术”。它们与一般机械加工的不同点是：

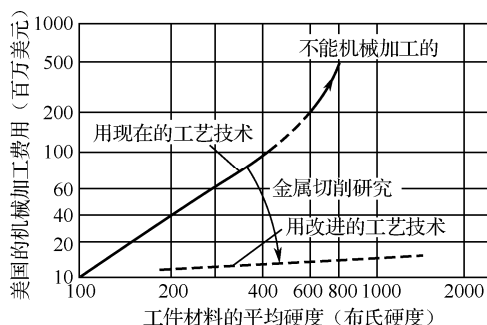


图 1-1 在美国工件材料强度对国家标准机加工费用的影响

- (1) 切除材料的能量不单纯是靠机械能，还可以用其他形式的能量。
- (2) 可以有工具，但工具材料的硬度可低于工件材料的硬度；也可以无工具。
- (3) 在加工过程中，工具和工件之间不存在显著的机械切削力。

## 1.3 现代加工技术的特点

现代加工方法由于不使用普通刀具来切削工件材料，而是直接利用能量进行加工，与传统的机械加工方法相比具有以下特点：

(1) 不用机械能，与加工对象的机械性能无关，有些加工方法，如激光加工、电火花加工、等离子加工、电化学加工等，是利用热能、化学能、电化学能等进行加工。这些加工方法与工件的硬度、强度等机械性能无关，故可以加工各种硬、软、脆、热敏、耐腐蚀、高熔

点、高强度、特殊性能的金属和非金属材料。

(2) 非接触加工, 不一定需要工具, 有的虽使用工具, 但与工件不接触, 所以工件不承受大的作用力, 因而对工具和工件的强度、硬度和刚度均没有严格的要求, 故使刚性极低的元件及弹性元件得以加工, 并且工具硬度可低于工件硬度。

(3) 微细加工, 工件表面质量高, 有些特种加工(如超声波、电化学、水喷射、磨料流等)的加工过程都是微细进行的, 故不仅可加工尺寸微小的孔或狭缝, 还能获得高精度、极低粗糙度的加工表面。

(4) 不存在加工过程中的机械应变或大面积的热应变, 可获得较低的表面粗糙度, 其热应力、残余应力、冷作硬化等均比较小, 尺寸稳定性好。

(5) 两种或两种以上的不同类型的能量可相互结合形成新的复合加工技术, 其综合加工效果明显, 且便于推广应用。

(6) 对简化加工工艺、变革新产品的设计及零件结构工艺性等具有积极的影响。

(7) 但非传统加工方法的材料去除速度一般低于传统的机械加工方法, 这也是目前常规方法仍占主导地位的主要原因。

## 1.4 现代加工技术的地位及分类

### 1.4.1 现代加工技术的地位

一方面, 人类社会在发展中不断发明新的产品、新的材料, 对加工技术不断提出新的需求, 促成了新的加工原理和方法不断诞生及成长, 使得加工技术生机勃勃、持续发展。尤其是人类社会进入 20 世纪以后, 现代数学、系统论、控制论、信息论等理论和学科的创建与发展, 新材料技术、数控技术、自动化技术、微电子技术的诞生和发展, 从根本上改变了加工技术的手工、低效的传统面貌, 使之迈向自动、高效的现代化技术体系。另一方面, 加工技术的发展, 新的加工方法不断涌现, 在效率、精度、成本等诸多方面都在难以想象的程度上拓展了人类开发和制造新产品的能力。今天, 人们依托先进的加工技术, 以前所未有的速度更新现有的产品, 不断创造新的产品, 从而极大地丰富了人类社会的物质生活, 有力地推动了科学技术的整体发展, 加快了人类认识自我和外部世界的进程。

在 20 世纪中叶的美国, 曾经有很多学者鼓吹他们已进入“后工业化社会”, 认为制造业是“夕阳工业”, 主张经济的重心应由制造业转向信息、生物等高科技产业和第三产业, 结果导致美国在经济上竞争力明显下降, 许多产品的质量和性能落后于日本、德国等其他发达国家。到 20 世纪 80 年代, 美国政府开始意识到了问题的严重性, 于是在 1988 年投资开展了大规模“21 世纪制造企业战略”研究, 提出了“先进制造技术”(Advanced Manufacturing Technology, AMT) 的发展目标, 制订并实施了“先进制造技术计划”和“制造技术中心计划”。1991 年, 在美国白宫科学技术政策办公室发表的“美国国家关键技术”报告中, 重新确立了制造业在国民经济中的地位。

在我国, 人们已经逐渐认识到, 其他学科和工业的快速发展往往是以制造技术的不断发展为前提的这样一个事实。如在半导体制造领域, 随着加工技术的进步, 在单位面积上可以制造出的电子元件数量成百上千倍地增长, 集成电路芯片的集成度越来越高, 使得计算机以

及其他电子产品的体积不断减小，而性能却不断提高。我国航空航天、国防等某些特殊领域，加工制造技术常常成为瓶颈，产品在性能设计上虽然和工业先进国家相比相差不大，但是“做不好”的现象时有发生。我国民用产品的加工制造水平和工业发达国家相比，仍有很大的差距。如今，制造科学在世界上已广泛被认为是与信息科学、材料科学、生物科学并列的当今时代的四大支柱学科之一。

### 1.4.2 现代加工技术的分类

现代加工技术按加工机理和采用的能源不同可分为：

(1) 机械过程。利用机械力使材料产生剪切、断裂，以便去除材料，如超声波加工、水射流加工、磨料射流加工等。

(2) 热学过程。通过电、光、化学能等产生瞬时高温，熔化并去除材料，如电火花加工、高能束加工、热力去毛刺等。

(3) 电化学过程。利用电能转换为化学能对材料进行加工，如电解加工、电铸加工（金属离子沉积）等。

(4) 化学过程。利用化学溶剂对材料的腐蚀、溶解去除材料，如化学蚀刻、化学铣削等。

(5) 复合过程。利用机械、热、化学、电化学等的复合作用去除材料。常见方法有机械-化学复合（如机械化学抛光、电解磨削、电解珩磨等）、机械-热能复合（如加热切削、低温切削等）、热能-化学能复合（如电解电火花加工等），以及其他复合过程（如超声振动切削、超声电解磨削、磁力抛光等）。

## 1.5 现代加工技术的发展趋势

### 1. 追求更高的加工精度

获得更高的加工精度一直是加工技术孜孜不倦追求的目标。200多年前，在工业革命时代，去除加工技术的大家族中仅有普通切削加工，其加工精度最高约为1mm；而进入21世纪，在工业发达国家，即使对于大批量生产的普通零件，其加工精度也可达到1 $\mu$ m。200年间，普通加工精度提高了约三个数量级，而精密加工精度已达到10nm的水准，更是提高了约五个数量级。现代加工技术之所以致力于提高加工精度，其主要目的在于：

(1) 提高产品的性能和质量，提高其稳定性和可靠性。

例如，飞机发动机转子叶片的加工误差从60 $\mu$ m降至12 $\mu$ m，加工表面粗糙度由Ra 0.5 $\mu$ m减小到Ra 0.2 $\mu$ m，发动机的压缩效率即可从89%提高到94%。又如，美国民兵III型洲际导弹系统的陀螺仪精度为0.03°~0.05°/h，命中精度的圆概率误差为500m；而MX战略导弹的陀螺仪精度提高了一个数量级，命中精度的圆概率误差即减小到50~150m。

(2) 促进产品的小型化。

例如，将传动齿轮的齿形及齿距误差从3~6 $\mu$ m降至1 $\mu$ m，齿轮箱单位重量所能传递的扭矩即可提高近一倍，从而使齿轮箱的尺寸大大缩小。又如，IBM公司开发的磁盘，其记忆密度由1957年的300b/cm<sup>2</sup>，提高到1982年的2540000b/cm<sup>2</sup>，提高了近一万倍，这在很大程度上应归功于磁盘基片加工精度的提高和表面粗糙度的减小。

(3) 增强零件的互换性, 提高装配生产率, 促进自动化装配的应用, 推动自动化生产等。

自动化装配是提高装配生产率和装配质量的重要手段。自动化装配的前提是零件必须完全互换, 这就要求严格控制零件的加工公差, 从而导致对零件的加工精度要求极高, 精密加工使之成为可能。

(4) 为高新技术的发展提供基础和手段。

导弹命中率精度由惯性仪的精度决定。而惯性仪是超精密加工的产品, 1kg 重的陀螺转子, 其质量中心偏离其对称轴 0.5nm, 将会引起 100m 的射程误差和 50m 的轨道误差。

## 2. 以高速实现高品质、高效率加工

航空和航天工业、轿车工业的迅猛发展, 集成电路制造等电子工业的日新月异, 都迫切要求实现高效率生产, 而实现高效率生产首先应实现高效率加工。目前, 由于高速主轴技术、直线电机技术、高速控制技术及刀具技术的发展和进步, 以加工的高速化实现加工的高品质、高效率已成为切削加工技术发展的重要特征。

在飞机制造业中, 为了降低飞机机身重量, 提高飞机的速度、机敏性, 以及载重能力等性能, 目前广泛采用整体结构代替传统的组装结构。飞机机身、机翼中的框、梁等大型零件采用一块整体毛坯件直接去除多余的部分, “掏空”而成。因此, 加工余量非常大, 最多时需要去除毛坯 95%以上的部分。同时, 加工结构也非常复杂, 加工变形问题突出。所以, 不仅对加工效率要求非常高, 而且对切削力、切削温度的要求也很苛刻。目前, 为保证在获得高品质的同时获得足够高的加工效率, 已广泛采用高速切削加工技术, 且加工速度越来越高。例如, 美国 Cincinnati 公司以往用于飞机制造的铣床主轴转速为 15000r/min, 现在已经提高到了 40000r/min, 功率从 22kW 提高到了 40kW。该公司现在已将铣床主轴转速提高到了 60000r/min, 功率提高到了 80kW。铣床采用直线电机, 工作行程进给速度最大可达 60m/min, 空行程快速则达到 100m/min, 加速度达  $2\text{m/s}^2$ 。由于采用高速电主轴和高速直线电机进给, 使得加工时间减少了 50%。高速铣削加工还成功用于典型薄壁零件——雷达天线的生产制造中, 较好地解决了薄壁加工容易变形的难题。

汽车工业也是高速加工技术应用的一个重要领域, 目前很多汽车制造商已采用高速加工中心代替多轴组合机床, 不仅可以保证加工质量, 提高加工效率, 而且还可以提高产品生产的柔性, 有利于产品的更新换代。

高速切削加工技术另一个应用得比较成功的领域是模具制造业, 尤其是塑料模具制造业, 其所有的先进企业均已采用高速铣削加工技术。同时, 直线电机技术在电加工机床上也开始应用, 从而大大提高了电加工效率, 有力地推动了模具加工技术的发展。

加工速度正在向更快的方向发展。目前正在研制的高速切削加工中心, 其主轴转速已达 300000r/min, 直线进给速度可达 200m/min。随着高速切削机床技术、高速刀具技术的发展, 以及人们对高速切削机理认识的不断加深, 高速切削加工技术的应用一定会越来越广泛。

## 3. 微细与纳米加工快速发展

从集成电路的诞生算起, 微细加工技术的历史还不到半个世纪, 可是微细加工技术的发展却表现出了惊人的速度。它的发展不仅使集成电路的集成度越来越高, 使得微电脑的功能越来越强大, 而且满足了人们对许多工业产品功能集成化和外形小型化的不断需求。目前生

产的便携式录音机的机械和电路所占空间容积仅为 20 世纪 60 年代产品的 1%；光通信机器中激光二极管所需非球面透镜的尺寸仅为 0.1~1mm，其模具制造必须采用微细加工技术。此外，进入人体的医疗机械和微管道自动检测装置等都需要微型的齿轮、电机、传感器和控制电路，它们的加工制造已逐渐成为现实。

微细加工技术的发展促进了微型机械的系统化，从而催生了微机电系统（Micro Electro Mechanical System, MEMS）技术。在传感器制造中采用 MEMS 技术，将传感器和电路蚀刻在一起，不仅大大减小了其体积，而且可以大幅度降低加工成本。如汽车安全气囊中的传感器制造，采用 MEMS 技术后可将其成本降低到原来的 40%。

微细加工技术由于其加工对象尺度小到微米级，所加工的尺寸公差及形位公差小至数十纳米，表面粗糙度则低达纳米级，所以它往往兼具微小和超精密加工的特征，与纳米加工正在逐渐融合。

今天，人们已在实验室实现了单个原子的搬迁和排列，批量生产的集成电路其线宽也已突破 100nm。另外，纳米材料制备技术不断成熟，纳米进给工作台已形成批量生产能力，纳米切削机床已经诞生。这些技术的发展不仅极大地丰富了纳米加工技术的内涵，而且为纳米加工技术的发展提供了良好的基础。随着现代加工技术的进步，微细加工和纳米加工技术有着广阔的发展前景。

#### 4. 追求加工智能化

随着自动化技术、现代控制技术、计算机技术及人工智能技术的发展，智能化技术在制造中的应用越来越受到学术界和企业界的重视，智能制造技术与系统的研究已在世界范围内展开。智能加工技术的概念就是在这样的大背景下诞生的。

智能加工技术（Intelligent Machining Technology, IMT）借助先进的检测、加工设备及仿真手段，实现对加工过程的建模、仿真、预测，以及对加工系统的监测与控制，同时集成现有的加工知识，使得加工系统能根据实时工况自动优选加工参数，调整自身状态，获得最优的加工性能与最佳的加工质效。智能加工技术的基本特征可以概括如下：

（1）基于人工知识系统，部分代替人决策，自动产生零部件的加工方案和初步的加工参数。

（2）具有根据外部传感信号的变化，实时监测加工过程的能力。

（3）具有根据工件形状变化实时优化和调整加工参数，使加工系统始终处于最优工作状态的能力。

（4）根据对加工状态的监测，能对机床故障进行自我诊断、自我排除、自我修复等。

（5）能为操作人员提供人机一体化的智能交互界面。

（6）具有加工经验的自我积累能力，通过加工过程的延续，不断获取加工知识，丰富原有的知识系统。

目前，真正的智能加工系统还没有建立起来，但是由于机床熟练操作人员在世界范围内的缺乏及工业对加工技术提出越来越高的要求，因此，提高加工的智能化水平势在必行，加工智能化是现代加工技术发展的必然趋势。

## 5. 更加注重加工的绿色化

加工技术与很多其他科学技术一样，具有“双面刃”特性：一方面极大地提高了人类大量生产物质产品的能力，从而丰富了人类的物质生活；另一方面，却由于大量生产，加快了人类向大自然索取资源的速度，又由于产品更新换代的快节奏，从而加快了人类向自然界排放“工业垃圾”的步伐。另外，在加工过程中，也会产生对人体有害的气体和噪声。例如，在切削加工中冷却液的雾化、汽化，电加工中电解液、电镀液的分解、蒸发，激光加工中有毒气体的产生，还有各种加工噪声等都对操作者和环境造成危害。在加工结束后，还有废液、废渣的排放等环境问题。

绿色加工技术的概念已经随着绿色制造理念的提出而出现，在产品加工过程中，它追求采用先进的少、无污染的加工工艺方法，并尽可能地节省资源。其主要特征表现为节能、低耗和无废排放。

节能是指在加工过程中尽量降低能量损耗。如在切削加工中，可以通过降低切削力来降低切削功率消耗；在一般的去除加工中，应尽量降低去除单位体积材料所需的能量，即材料去除比能。低耗是指在生产过程中通过简化工艺系统组成，节省原材料的消耗。可以通过优化毛坯加工技术、优化下料技术，以及采用少、无屑加工技术，干式加工技术，新型特种加工技术，再制造技术等方法降低材料消耗。另外，应努力实现“无废”加工，即采用先进的加工方法或采取某些特殊措施，使生产过程中产生的废液、废气、废渣、噪声等对环境和操作者有影响或危害的物质尽可能减少或完全消除。

现代加工技术必须注重绿色环保，这样才能实现可持续发展，才能最终实现人与自然的真正和谐。随着科学技术的发展和人类社会的进步，加工技术的绿色化已经成为必然的要求和趋势。

## 复习思考题

1. 什么是加工技术？什么是现代加工技术？
2. 为什么要发展现代加工技术？
3. 简述现代加工技术的特点。
4. 简述现代加工技术的地位及分类。
5. 简述现代加工技术的发展趋势。