

智能制造技术基础

说明

本提纲由智造钱2201 李祎航 编写。可用于 机械制造技术基础（MACH400501）；智能制造技术基础（MACH404001）；智能制造工艺与装备（MACH405801）课程的复习。

CH 1 零件成形原理、工艺及装备

本章介绍了零件的基本要求，三种成形原理，每种成形原理都发展了多种具体的工艺方法和设备。每种工艺都有其优缺点，零件的材料、几何特征、精度等决定其适合于哪种成形工艺。介绍了复合成形工艺，阐述了零件成形工艺及设备的基本要求。

1.1 零件成形的基本要求

1. 零件装配到机器中其性能要求很多：
 1. 力学性能
 2. 热学性能
 3. 电学性能
 4. 化学性能
 5. 光学性能
2. 机械装备零件关心的力学性能居多：硬度/强度/应力等
 1. 材料本身的性能
 2. 形状
 3. 表面及表层

1.1.1 零件材料：连续介质/非连续介质

1. 金属材料：碳钢、钛合金、高温镍基合金等
2. 非金属材料：塑料、陶瓷、树脂等
3. 复合材料：金属基复合材料、非金属基复合材料

1.1.2 材料构造

按照材料宏观组织和孔隙状态的不同可分为：

1. 致密状构造：该构造完全没有或基本没有孔隙
2. 多孔状构造：具有较多的孔隙，孔隙直径较大
3. 异质材料：运用先进的材料制备技术将不同性质的材料组分优化组合而成的新材料

1.1.3 零件几何特征及分类：

1. 分类:

1. 回转类: 回转特征, 车削工艺
2. 箱体类: 孔特征和大平面特征, 钻、镗、铣工艺
3. 支架类: 支承结构, 铣、注塑等工艺
4. 曲面类: 曲面特征, 表面质量高, 需要比常规零件加工多两个自由度
5. 薄壁类: 厚度薄、刚度差, 材成形的冲压工艺

2. 考虑因素:

1. 成形质量
2. 成形效率
3. 成形成本

1.1.4 零件成形质量要求

1. 加工精度: 零件加工后的几何参数(尺寸、形状和位置)与理想零件的几何参数的符合程度。
 1. 尺寸精度: 基本尺寸、公差
 2. 形状精度: 圆度、圆柱度、平面度、直线度等
 3. 位置精度: 平行度、垂直度、倾斜度、同轴度、位置度、圆跳动等
2. 表面质量:
 1. 表面几何特征: 1) 粗糙度; 2) 波度
 2. 表层物理性能: 1) 加工冷作硬化; 2) 金相组织变化; 3) 残余应力
 3. 视觉缺陷: 1) 小于粗造度; 2) 齿轮加工中的鬼阶

1.2 三种成形原理及工艺方法

1. 零件的形状可以通过不同的成形原理实现, 每种原理都有多种工艺方法, 就有相应的设备
2. 按照由原材料或毛坯到零件成形过程中, 质量 m 的变化, 可分为 $\Delta m > 0$, $\Delta m = 0$, $\Delta m < 0$ 三种类型。
 1. 增材成形: $\Delta m > 0$, 通过材料累加, 获得不同形状
 2. 等材成形: $\Delta m = 0$, 材料基本不变, 靠外力等改变形状
 3. 减材成形: $\Delta m < 0$, 通过去除材料, 获得不同形状

1.2.1 增材成形原理及典型工艺和装备 $\Delta m > 0$

增材制造, 俗称3D打印, 通过材料的逐渐累加, 获得需要的形状

1. 步骤:

1. 把零件离散成面、线、点质量单元
2. 逆向进行材料有序堆积——堆积过程中材料单元粘接/熔化凝固在一起

2. 工艺:

1. 光固化立体成形(SL)
 1. 材料: 液态光敏树脂

2. 特点：精度较高、表面质量较好；头部朝下，底部朝上
 3. 应用：形状特别复杂（如空心零件）和特别精细（如工艺品、首饰等）的零件。
2. 熔融沉积成形 (FDM)
1. 材料：热固性塑料PLA, ABS
 2. 特点：精度和表面质量一般，效率较高
 3. 应用：小型设备用于教育、创客；大型设备用于汽车、无人机
3. 选区激光烧结成形 (SLS)
1. 材料：塑料、蜡、砂、金属粉末
 2. 特点：效率高、精度较高
 3. 应用：塑料样件、铸造砂型、金属零件
4. 激光近净成形—激光工程化净成形 (laser engineered net shaping LENS)
1. 材料：金属粉末
 2. 特点：效率高、精度不高
 3. 应用：金属零件（功能零件）
5. 电子束选择性熔化成形
1. 材料：金属粉末
 2. 特点：效率高、精度不高
 3. 应用：金属零件（功能零件）
6. 电弧喷涂成形
1. 材料：金属丝材
 2. 应用：涂层处理
 3. 特点：需有基模，喷涂一层金属
7. 熔焊增材制造
1. 材料：金属丝材
 2. 应用：大型零件时效率高
 3. 特点：效率高，精度受限
3. 增材制造技术优点
1. 可以成型任意复杂形状的零件，而无需刀、夹具，但需要激光等热源熔化金属
 2. 快速制造出来的原型可供设计评估、投标或展示
 3. 与快速精铸技术及快速模具制造技术等相结合，又可以为小批量或大批量生产服务
 4. 已成为加速新产品开发的有效技术

1.2.2 等材成形原理及典型工艺和设备 $\Delta m=0$

在成形前后，材料主要是发生形状变化，而质量、体积基本不变。

1. 模具成形：
 1. 铸造：
 1. 分类：砂型铸造、金属型铸造、熔模铸造
 2. 特点：

1. 金属熔炼、注入模具、冷却凝固成形
2. 利用金属流动性制造复杂零件：内腔
3. 可使用各类金属：铜、铁、铝等
4. 6000年历史
5. 控制质量稳定
6. 冷却速度对质量有影响

2. 压力成形：

1. 分类：

1. 锻造：自由锻造、模型锻造、胎模锻造
2. 冲压：模压、辊压等

2. 特点：

1. 固体金属在外力作用
2. 模具内金属产生变形
3. 需要加热
4. 提高金属力学性能

2. 无模具成形

1. 特点：

1. 替代有模具成形，柔性大
2. 成本低
3. 曲率半径大的相对简单零件
4. 板料零件

2. 无模具多点成形

1. 离散模具曲面
2. 多个加载单元
3. 数字控制可改变单元位置即曲率
4. 适用于高速列车车头、船舶等

3. 数字化渐进成形

1. 三维分解为二维断面层
2. 工具头沿二维等高线塑性变形
3. 每次下压量要合理
4. 需三轴运行设备

4. 喷丸成形

1. 高速弹丸撞击工件表面致塑性变形
2. 激光喷丸
3. 适用于飞机机翼整体壁板

1.2.3 减材成形原理及典型工艺和装备 $\Delta m < 0$

1.2.3.1 切削减材成形

1. 特点：

1. 刀具和工件之间的相互力的作用实现材料去除
2. 刀具和工件二者相对运动，获得零件的形状
3. 根据刀具和运动不同可分为：刨、车、铣、钻、镗、磨等

2. 如何确定具体切削加工方法？

1. 工件几何形状
2. 精度、效率、成本
3. 工厂现有条件

3. 刨削：

1. 运动构成：刀具的往复直线运动为切削主运动
2. 特点：刨削速度不可能太高，生产率较低，平稳，适合单件小批量工件加工。
3. 加工精度：IT8 ~ IT7, Ra=3.2 ~ 1.6μm
4. 刨床：1) 牛头刨床：单件生产，加工中小型工件；2) 龙门刨床：加工大型工件，精度和效率高于牛头刨床；3) 插床：立式牛头刨床，加工键槽等内表面

4. 车削：

1. 运动构成：工件旋转主运动，刀具进给
2. 加工精度：一般为IT8 ~ IT7，表面粗糙度为Ra=6.3 ~ 1.6μm。精车可达IT6 ~ IT5，粗糙度可达Ra=0.4 ~ 0.1μm

3. 车床：

1. 按主轴轴线方向分：1) 卧式车床；2) 立式车床：**适用于大被加工件**；
2. 按刀架数量分：1) 单刀架车床；2) 双刀架（塔）车床；3) 单双主轴；4) 带动力铣头车床

5. 铣削：

1. 运动构成：刀具的旋转运动为主运动，工件本身不动，由机床的工作台完成进给运动。
2. 加工特点：生产率较高，散热条件较好；切削过程易产生振动，刀具磨损和破损较严重。

3. 切削刃部位：

1. 侧铣：平面由铣刀侧刃形成
2. 端铣：平面由铣刀端面刃形成

4. 铣削方向：

1. 顺铣：铣削力的水平分力与工件的进给方向相同
 1. 易引起工件和工作台向前窜动，使进给量突然增大，容易引起打刀
 2. 刀具首先接触工件的硬皮，加剧刀具磨损
2. 逆铣：铣削力的水平分力与工件的进给方向相反，避免顺铣时可能产生的向前窜动
 1. 铣削时刀刃要在已发生加工硬化的加工表面上挤压滑行，加速刀具的磨损
 2. 易将工件上抬

5. 铣床：立式铣床；卧式铣床；龙门铣床；三轴铣床；五轴铣床

6. 钻削：

- 运动构成：钻头的旋转运动为主切削运动
- 加工精度：较低，IT13~11，Ra=12.5-0.8μm
- 加工特点：排屑困难，切削温度高
- 钻孔方式：钻头旋转，工件不动（钻/镗床）；钻头不动，工件旋转（车床）
- 扩孔和铰孔：可提高精度，IT9~8，Ra=1.6-0.4μm
 - 扩孔：在已钻出的底孔上利用扩孔钻进一步加工，扩大孔径，提高孔的质量。
 - 铰孔：孔的精加工方法，切削、刮削、挤压、摩擦的结果。
- 钻床：台式钻床（小孔）；立式钻床（较大孔）；摇臂钻床（大工件孔）

7. 镗削：

- 运动构成：
 - 镗床：镗刀随镗杆转动，形成主切削运动，而工件不动。
 - 车床：工件旋转，形成主切削运动，而车刀不动。
- 镗床加工精度：IT10~8，Ra=3.2-0.8μm
- 镗削工艺特点：
 - 镗杆深入内孔，镗刀半封闭状态下工作
 - 镗杆悬臂外伸，刚性较差，易变形和振动
 - 镗孔工艺范围广，只需调整镗刀径向尺寸
 - 可实现精密孔系加工
- 镗孔的三种方式
 - 车床镗孔：工件回转，刀具进给
 - 镗床镗孔：刀具回转，工件进给
 - 镗床镗孔：工件不动，刀具回转并进给
- 镗床：卧式镗床；立式镗床

8. 齿轮加工：

- 运动构成：主运动是滚刀的旋转运动、插齿刀直线运动
- 特有运动**：展成运动；差动（斜齿轮加工）
- 齿轮加工种类：滚齿；插齿；剃齿；车齿；磨齿；珩齿

1.2.3.2 其他减材成形：物理、化学方法——特种加工

三束：激光加工；电子束加工；离子束加工

化学/电化学：电火花加工；电解加工

介质：超声波；高压水；磁性流体

1. 激光束加工：

- 原理：激光光斑；高能量密度；高的温度；急剧熔化；熔化的物质爆炸式地喷射去除
- 优点：
 - 不需要加工工具
 - 几乎对任何难加工的金属和非金属材料都可以加工
 - 非接触加工，工件无受力变形
 - 激光打孔、切割的速度很高，加工部位周围的材料几乎不受切削热的影响

5. 工件热变形很小
3. 应用场合
 1. 激光焊接/熔敷
 2. 激光切割
 3. 激光打孔
2. 电子束加工：在真空条件下，利用聚焦后能量密度极高的电子束，以极高的速度冲击到工件表面的极小位置上，在极短的时间内能量转化为热量，使工件熔化。
3. 离子束加工：在真空条件下，将离子源产生的离子束经过加速聚焦，撞击工件表面，由于离子的质量比电子大很多，因此获得更大的机械能，而不是靠热量来加工。
4. 化学、电化学减材成形：利用化学溶蚀、电解溶蚀、电火花电极放电去除材料

1.3 复合成形工艺

1. 同种原理不同工艺复合：1) 车铣复合；2) 铣车复合；3) 车磨复合
2. 两种成形原理的复合：1) 增减材复合工艺；2) 增减和等材复合
3. 多任务复合：1) 与热处理复合；2) 与表面强化等复合

1.4 成形工艺及设备的一般性要求

质量、效率、成本总是矛盾的，解决矛盾是工艺及设备发展的动力

1. 质量要求
2. 效率要求
3. 成本要求
4. 绿色环保要求
5. 人机友好要求

CH 2 切削运动、刀具与切削原理

本章着重介绍了金属切削过程中的基本知识点。从切削运动入手，引出了刀具的结构和材料特性，阐述了切削的变形过程，重点分析了切削过程中的力/热现象，介绍了切屑和已加工表面的微观组织，以及在宏观上带来的刀具磨损问题，最后介绍了提高表面质量的磨削加工工艺

2.1 切削运动

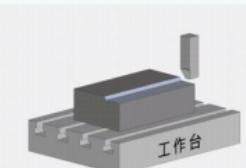
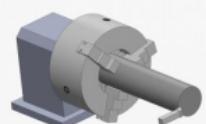
2.1.1 切削运动的定义

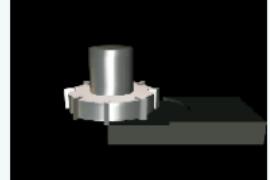
也称表面成形运动，是刀具与工件间的相对运动。

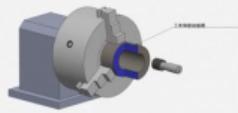
2.1.2 两种切削运动

1. 类型

- 主运动**: 刀具相对于工件实现切削的基本运动。它是切下切屑所需的最基本运动，速度最高，消耗功率最大，只有一个。
- 进给运动**: 刀具相对工件连续进行材料切除，从而加工出各类形状表面所需的运动，可以一个或几个。
- 根据不同的切削运动，定义不同的切削方法，从而决定了刀具的基本形状以及相应的设备

单齿加工	刨 削	车 削
主运动	刀具直线运动	工件回转运动
进给运动	刀具或工件的横向进给	刀具进给（轴向、径向）
表面特征	平面、直槽、键槽	回转面
运动原理		

多齿加工	钻 削	镗 削	铣 削
主运动	刀具回转运动	刀具回转运动	刀具回转运动
进给运动	刀具轴向进给	刀具或工件轴向进给	刀具或工件轴向进给
表面特征	孔	孔	平面，曲面，槽
运动原理		 	

	磨 削	齿轮加工
主运动	砂轮回转运动	刀具回转运动
进给运动	砂轮或工件的横向进给	工件回转、轴向进给
表面特征	外圆面、内孔、平面	齿形
运动原理		

3. 实现形式：

- 简单表面的实现形式：简单刀具+简单运动
- 复杂表面的实现形式：简单刀具+复杂运动；复杂刀具+简单运动；复杂刀具+复杂运动

2.1.3 切削过程的表征

1. 切削过程三表面：

1. 已加工表面
 2. 过渡表面 (正在加工表面)
 3. 待加工表面
2. 切削用量三要素

1. 切削速度 v : 单位时间内工件和刀具沿主运动方向的相对位移

$$\text{主运动为往复直线运动: } v = \frac{2Ln_r}{1000 \times 60} (\text{m/s})$$

$$\text{主运动为旋转运动: } v = \frac{\pi d_w n}{1000 \times 60} (\text{m/s})$$

2. 进给量 f : 在主运动每转一转或每一行程时(或单位时间内), 刀具与工件之间沿 **进给运动方向** 的相对位移;

$$\text{刨、车、镗等单齿刀具: } v_f = nf$$

$$\text{铣、钻、铰等多齿刀具: } f_z = f/z$$

其中: n : 主运动转速; z : 刀具齿数; f_z : 每齿进给量

3. 切削深度 (背吃刀量) a_p : 待加工表面与已加工表面之间的垂直距离

3. 切削层

1. 工件上正被切削刃切削的一层金属, 亦即相邻两个加工表面之间的一层金属;
2. 切削层的大小反映了切削刃所受载荷的大小, 直接影响到加工质量、生产率和刀具的磨损等
3. 切削层三要素:

$$A_c = bh = a_p f$$

1. 切削宽度 b : 沿主切削刃方向度量的切削层尺寸
2. 切削厚度 h : 两相邻加工表面间的垂直距离
3. 切削面积 A_c : 切削层垂直与切削速度截面内的面积

2.2 刀具结构

2.2.1 刀具设计总体原则:

1. 刀具包括刀头和刀体(杆)两部分
2. 刀头形状总体原则: 根据切削运动进行设计:
 1. 主运动方向有切削刃
 2. 进给方向也需有切削刃
 3. 非切削部分摩擦力小
 4. 利于排屑
 5. 切削刃有一定强度

2.2.2 刀具切削部分

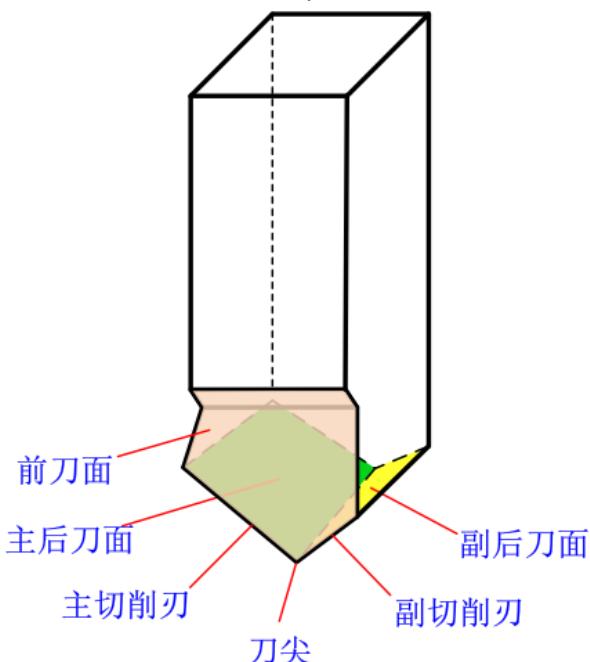
1. 切削刃的形成过程 (以刨削为例) :

1. 考虑前角太大
2. 考虑摩擦力太大
3. 考虑切削宽度太大

2. 切削刃组成:

1. 刨削:

1. 前刀面 (前面): 刀具上与切屑接触并相互作用的表面。
2. 主后刀面 (主后面): 刀具上与工件过渡表面接触并相互作用的表面。
3. 副后刀面 (副后面): 刀具上与工件已加工表面接触并相互作用的表面
4. 主切削刃: 前刀面与主后刀面的交线, 它完成主要的切削工作。
5. 副切削刃: 前刀面与副后刀面的交线, 它配合主切削刃完成切削工作, 并最终形成已加工表面。
6. 刀尖: 连接主切削刃和副切削刃的一段刀刃, 它可以是小的直线段或圆弧。

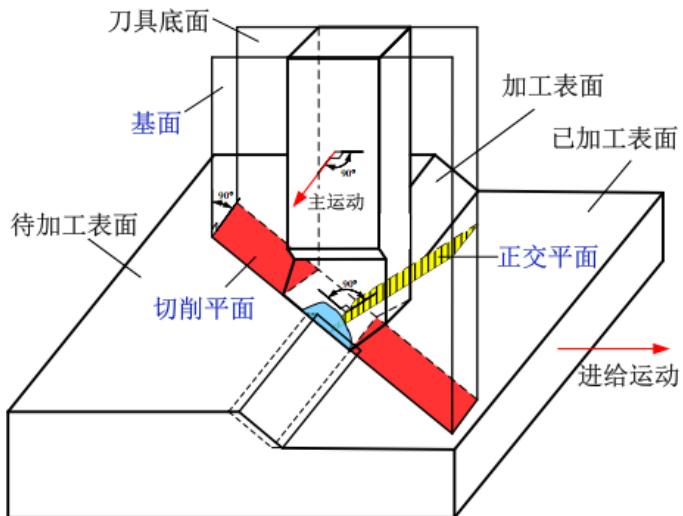


2. 其他刀具的切削刃组成

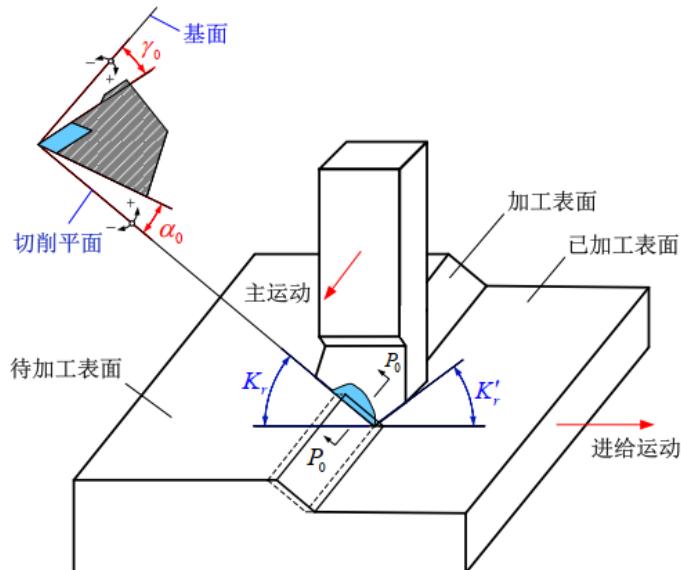
1. 车刀: 切削部分的形状与刨刀相同, 在实际切削时相当于把刨削的工件卷起来就形成了车削工艺。
2. 钻头: 可看作是两把一正一反并在一起的刨刀, 因而有两个主切削刃, 两个副切削刃, 还增加了一个横刃。
3. 铣刀: 可看作由多把刨刀组合而成的复合刀具, 其每一个刀齿相当于一把刨刀。

3. 刀具角度参考平面

1. 基面 P_r : 与切削速度方向相垂直的平面。
2. 切削平面 P_s : 与工件加工表面相切的平面; 与 P_r 垂直并与主切削刃相切
3. 正交平面 P_o : 通过主切削刃上某一点并与主切削刃在基面上的投影相垂直的平面; 同时垂直 P_r 和 P_s 的平面。



4. 标注角度



1. 前角 α_0 : 在正交平面内测量的前刀面与基面之间的夹角，前角表示前刀面的倾斜程度，有正负之分
2. 后角 γ_0 : 在正交平面内测量的主后刀面与切削平面之间的夹角，后角表示主后刀面的倾斜程度
3. 主偏角 κ_r : 在基面内测量的主切削刃在基面上的投影与进给运动方向的夹角，主偏角一般为正值
4. 副偏角 κ_r' : 在基面内测量的副切削刃在基面上的投影与进给运动反方向的夹角，副偏角一般为正值
5. 刃倾角 λ_s : 在切削平面内测量的主切削刃与基面之间的夹角，起到控制切屑流出方向的作用。
 1. 当主切削刃呈水平时， $\lambda_s = 0$
 2. 当刀尖为主切削刃上最低点时， $\lambda_s < 0$
 3. 当刀尖为主切削刃上最高点时， $\lambda_s > 0$

5. 工作角度:

1. 产生原因: 在实际的切削加工中，切削平面、基面和正交平面位置会发生变化。
2. 定义: 以切削过程中实际的切削平面、基面和正交平面为参考平面所确定的刀具角度称为刀具的工作角度，又称实际角度。

3. 影响因素：刀具安装位置和进给运动

1. 安装位置的影响：

1. 刨刀：当刨刀刀杆的纵向轴线与进给方向不垂直时，将会引起工作主偏角 K_r 和工作副偏角 K'_r 的变化。
2. 车刀：刀尖高于工件轴线：工作前角变大，工作后角变小；刀尖低于工件轴线：工作前角变小，工作后角变大

2. 进给运动的影响：

1. 车削时由于进给运动的存在，使车外圆及车螺纹的加工表面实际上是一个螺旋面，实际的切削平面和基面都要偏转一个附加的螺旋升角，使车刀的工作前角增大，工作后角减小。
2. 一般车削时，进给量比工件直径小很多，故螺旋升角很小，它对车刀工作角度影响不大，可忽略不计。
3. 车端面或切断时，加工表面是阿基米德螺旋面
4. 在车端面、切断和车外圆进给量(或加工螺纹的导程)较大时，则应考虑螺旋升角的影响。

2.3 刀具种类

2.3.1 刀具分类

1. 按加工方式和具体用途：可分为车刀、孔加工刀具、铣刀、拉刀、螺纹刀具、齿轮刀具、磨具等类型
2. 按结构形式：可分为整体刀具、镶嵌刀具、机夹刀具和复合刀具等
3. 按是否标准化：可分为标准刀具和非标准刀具

2.3.2 常用刀具

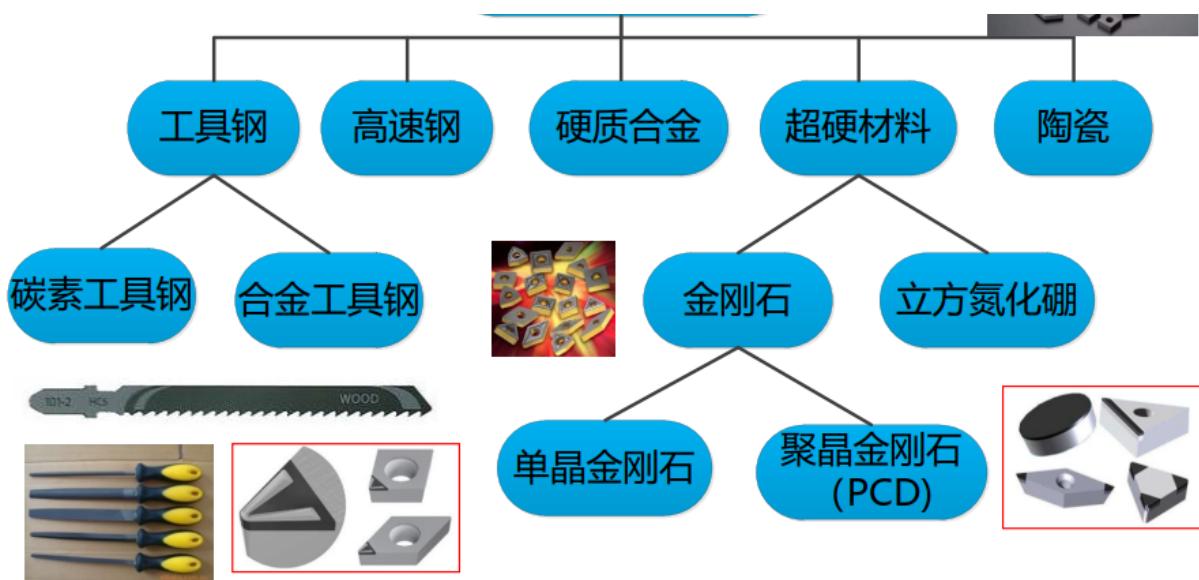
1. 刨刀：为了避免刨刀刀杆在切削力作用下产生弯曲变形，通常使用弯头刨刀
2. 车刀：可以在车床上加工外圆、端平面、螺纹、内孔，也可用于切槽和切断等。
3. 铣刀：一种应用广泛的多刃回转刀具。铣削的生产率一般较高，加工表面粗糙度值较大。
 1. 平面铣刀：圆柱平面铣刀、端铣刀(面铣刀)
 2. 沟槽铣刀：立铣刀、三面刃铣刀、锯片铣刀、T型槽铣刀和角度铣刀
 3. 成形铣刀：加工成形表面，如凸半圆和凹半圆铣刀。
4. 孔加工刀具
 1. 从实体材料上加工出孔的刀具：麻花钻、中心钻、深孔钻
 2. 对已有孔进行再加工用的刀具：扩孔钻、铰刀、镗刀
5. 拉刀：一种加工精度和切削效率都比较高的多齿刀具，可加工各种内、外表面。
6. 齿轮刀具：用于加工齿轮齿形，按刀具的工作原理，分为成形齿轮刀具和展成齿轮刀具。
 1. 成形齿轮刀具：盘形齿轮铣刀、指形齿轮铣刀等
 2. 展成齿轮刀具：插齿刀、剃齿刀、滚刀

2.4 刀具材料

2.4.1 刀具材料应具备的性能

1. 高的硬度：刀具材料的硬度必须高于工件的硬度
2. 高的耐磨性：一般情况下，刀具材料硬度越高，耐磨性越好
3. 高的耐热性：指刀具在高温下仍能保持硬度、强度、韧性和耐磨性的能力
4. 足够的强度和韧性：只有具备足够的强度和韧性，刀具才能承受切削力和切削时产生的振动，以防脆性断裂和崩刃
5. 良好的工艺性：如切削性能、磨削性能、焊接性能及热处理性能等
6. 良好的热物理性能和耐热冲击性能：要求刀具的导热性要好，不会因受到大的热冲击，产生刀具内部裂纹而导致刀具断裂

2.4.2 常用刀具材料



2.4.3 新型刀具材料

3. 新型刀具材料

刀具材料	特点	适用场合
工具钢	耐热性差	锯条，锉刀
高速钢	耐热性较高	麻花钻、铣刀
硬质合金	耐热性高，许用切削速度高	各种刀具
金刚石PCD	具有很高的硬度和耐磨性，摩擦系数小，热稳定性差，不能超800℃	多用在有色金属及合金加工，不宜用来加工钢铁件
立方氮化硼PCBN	硬度和耐磨性高，热稳定性高，化学稳定性高，导热性好，摩擦系数低	适合难加工材料的切削加工，如淬硬钢、高合金耐磨铸铁、高温合金
陶瓷	硬度高，化学性能稳定，耐氧化，但强度低、韧性差	高速切削加工的精加工阶段

2.4.4 涂层刀具材料

1. 目的：表面硬度提高，从而提高加工效率和刀具寿命
2. 化学气相沉积（CVD）：该技术主要是利用含有薄膜元素的一种或几种气相化合物或单质、在衬底表面上进行化学反应生成薄膜的方法
3. 物理气相沉积（PVD）：在真空条件下，采用物理方法，将固体或液体表面气化成气态原子、分子或部分电离成离子，并通过低压气体过程，在基体表面沉积具有某种特殊功能的薄膜的技术。
4. 涂层材料：
 1. 单一材料：TiC、TiN、Al₂O₃；
 2. 复合涂层：TiCN、TiAlN、TiAlN多元、超薄、超多层涂层与TiC、TiN、Al₂O₃等涂层的复合

2.5 金属材料的切削变形过程

2.5.1 直角切削和斜角切削

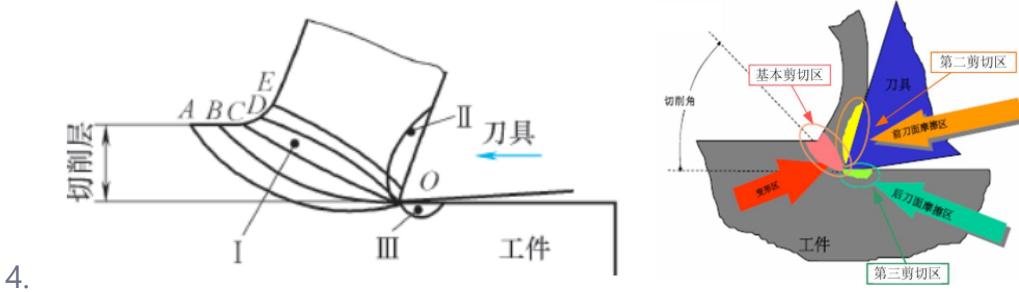
1. 实际最常见的切削形式多为三维斜角切削，切削刃与切削速度方向不垂直，而是存在刃倾角
2. 直角切削也称正交切削，是指刀具主切削刃的刃倾角 $\lambda_s=0$ ，且主切削刃与切削速度方向成直角的切削。
3. 直角切削由于其变形过程简单，是用于分析切削区域内力热状态变化的主要方式。

2.5.2 材料的剪切-滑移-断裂过程

1. 工件受到刀具挤压后，切削层金属在初始滑移面OA以左发生弹性变形。在OA面上，应力达到材料的屈服强度，则发生塑性变形，产生滑移现象。
2. 随着刀具的连续移动，原来处于始滑移面上的金属不断向刀具靠拢，应力和变形也逐渐加大。在终滑移面OE上，应力和变形达到最大值。
3. 越过OE面，切削层金属将脱离工件基体，沿着前刀面流出而形成切屑。

2.5.3 切削变形区

1. 第一变形区I：从OA线到OE线内的区域，伴随沿滑移线的剪切变形以及随之产生的加工硬化。在一般切削速度范围内，该变形区的宽度仅为0.2~0.02mm，所以可用剪切面来表示。剪切面和切削速度方向的夹角称为剪切角，以 ϕ 表示。
2. 第二变形区II：切屑与前刀面磨擦的区域，切削底层靠近前刀面处纤维化，流动速度减缓，切削弯曲，切削与刀具接触温度升高。
3. 第三变形区III：工件已加工表面与后刀面接触的区域，存在纤维化与加工硬化，变形较密集。



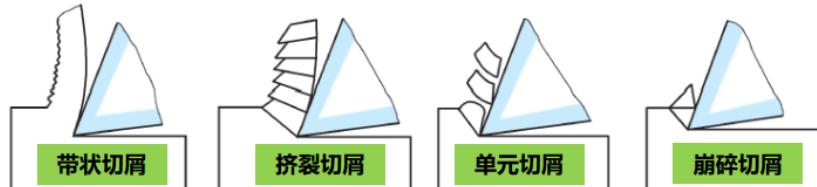
2.5.4 变形程度的表示方法

1. 剪切角 ϕ 的大小和切削力的大小有直接关系。对于同一材料，相同刀具，切削同样大小的切削层，当切削速度高时， ϕ 较大，剪切面积变小，切削较省力，说明剪切角的大小可以用来衡量切削过程的变形程度。
2. 通过“变形系数”来表示变形程度：
 1. 厚度变形系数 $\xi_a = \frac{h_c}{h}$ ：切屑厚度与切削层厚度之比
 2. 长度变形系数 $\xi_l = \frac{l_c}{l_c}$ ：切削层长度与切屑长度之比
 3. 切削前后宽度不变，体积不变，故：

$$\xi_a = \xi_l = \xi = \frac{h_c}{h} = \frac{OM \cdot \sin(90 - \phi + \alpha)}{OM \cdot \sin \phi} = \frac{\cos(\phi - \alpha)}{\sin \phi}$$

2.5.5 切屑形态

5. 切屑形态



切削类型	切削条件	特征
带状切屑	切削速度较高，切削厚度较小，刀具前角较大	内表面光滑，外表面毛茸
挤裂切屑	切削速度较低，切削厚度较大，刀具前角较小	内表面有裂纹，外表面呈锯齿形
单元切屑	进一步减小刀具前角，降低切削速度	整个单元被切离
崩碎切屑	加工硬脆材料，切削厚度较大	形状不规则，表面凸凹不平

切屑形态影响因素
 工件材料（即材料本构）
切削速度与进给量（即切削参数）
刀具前角（即刀具结构）

锯齿化程度表示方法：带状型和挤裂型切屑而言，不同切削状态下产生的锯齿状切屑形态也存在显著差别，通常用锯齿化程度表示： $G_s = \frac{H-h}{H}$

2.6 切削力

2.6.1 切削力的产生

1. 产生：刀具切入工件，使工件材料发生变形并形成切屑所需的力量

1. 克服被加工材料对塑性变形的抗力
 2. 克服刀具和工件对弹性变形的抗力
 3. 克服切屑对前刀面摩擦力和刀具后刀面对过渡表面与已加工表面之间摩擦力
2. 分解：

1. 主切削力 F_x ：

1. 方向与过渡表面相切并与基面垂直；
2. 是计算刀具强度，确定机床主运动主轴功率和扭矩所必需的。

2. 进给力 F_y ：

1. 处于基面内并与走刀方向相反的力；
2. 用于设计走刀机构，计算刀具进给功率。

3. 吃刀力 F_z ：

1. 处于基面内并与工件表面垂直的力；
2. 确定与工件加工精度有关的工件挠度，工件在切削过程中产生的振动往往与之有关

4. 切削功率： $P_m = F_x \cdot v \times 10^{-3}$ ；电动机功率： $P_E \geq \frac{P_m}{\eta}$

5. 合力： $F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$

3. 影响：

1. 引起刀具和工件变形
2. 引起工艺系统共振/颤振
3. 引起刀具磨损，甚至破损和断刀
4. 降低零件加工质量
5. 铣削等多齿切削中，频率成分复杂，产生颤振的一大原因

2.6.2 切削力的计算

2.6.2.1 解析计算法

基本变形区和摩擦变形区的力集中在切屑上，而加工表面变形区的力集中在已加工表面上，因此分为两个部分进行计算

1. 基本变形区和摩擦变形区

1. 切屑上的受力分析：切屑受到刀具前刀面对其作用力 F_C 和工件在剪切面上对其作用力 F_C' ，二者相互平衡，并能分解为：

1. F_C' 沿水平和竖直方向可分解为 F_{tc} 和 F_{fc}
 2. F_C' 沿剪切面和垂直剪切面方向可分解为 F_s 和 F_n
 3. F_C 沿刀具前刀面和垂直刀具前刀面方向可分解为 F_μ 和 F_v
- 摩擦角 β 会直接影响刀具进给方向的切向力和法向力，若忽略后刀面的摩擦力，有

$$\tan(\beta - \alpha) = \frac{F_{fc}}{F_{tc}}; \quad \tan \beta = \frac{F_{fc} + F_{tc} \tan \alpha}{F_{tc} - F_{fc} \tan \alpha}$$

2. 剪切角与摩擦角的关系：两个公式的计算结果和实验结果在定性上是一致的，但在定量上则有差别，麦钱特公式的计算值偏大，而李和谢弗公式的计算值偏小。 α 为刀具前角。

1. 最大剪应力原则（李和谢弗公式）： $\phi = \frac{\pi}{4} - (\beta - \alpha)$

2. 最小能量原则（麦钱特公式）： $\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\beta - \alpha)$

3. 切削力表达式：

$$F_{tc} = bhK_{tc}; \quad F_{fc} = bhK_{fc}$$

$$K_{tc} = \frac{\tau_s \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)}; \quad K_{fc} = \frac{\tau_s \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)}$$

2. 已加工表面变形区

$$F_{te} = \sigma_f V_B b = K_{te} b; \quad F_{fe} = \mu \sigma_f V_B b = K_{fe} b$$

3. 总切削力：

$$F_t = F_{tc} + F_{te}; \quad F_f = F_{fc} + F_{fe}$$

4. 二维直角切削力计算公式的推广：

1. 三维直角切削
2. 直刃铣削
3. 螺旋刃铣削

2.6.2.2 数值法

1. 基本思想：将一个连续实体分割成大小不一的有限个区域，将不同区域划分成相同或不同的单元，再按照一定的逻辑方式将离散的单元连接起来。单元可以选择相同或不同的形状，如三角形或四边形，划分单元的目的是将形状复杂的实体表达出来，再根据实际情况构造出来的变形协调方程综合求解。

2. 本构模型：材料在切削过程发生怎样的变形行为取决于它的本构模型，即材料的应力-应变曲线，分为弹性本构、塑性本构和失效损伤本构。

1. 弹性变形：主要出现在刀具对材料的初始加载，或对某些弹性、脆性材料（如橡胶、生物组织、玻璃等）的切削中，通过胡克定律进行描述

$$\sigma = E \varepsilon$$

2. 塑性变形：金属切削过程中材料的主要变形方式，存在于刀具工件发生接触至切屑和表面形成的完整过程中。通过塑性本构进行描述，即材料发生屈服以后所表现出的应力-应变的非线性关系。

1. Johnson-Cook模型：能够反映应变硬化、应变速率硬化和温度软化效应；在静态、准静态、中应变率($=0.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$)加载条件下，JC模型能较好地拟合其本构关系，但在高应变率($=1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$)下，钛合金材料高速变形可视为绝热过程，其内部绝热温升成为影响本构关系的重要因素，而温度升高降低了应变、应变速率的强化作用，反过来强化作用的减弱又减缓了温度的上升，三者互相影响。因此，须对Johnson-Cook 模型进行修正以描述温度、应变、应变速率

三者的相互影响。

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\varepsilon}^{pl})][1 + C \ln \frac{\bar{\varepsilon}^{pl}}{\varepsilon_0}][1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m]$$

应变硬化 应变率硬化 热软化

2. 失效本构模型：材料在塑性变形之后发生失效开始到完全失效时的应力-应变关系

$$\bar{\varepsilon}_f^{pl} = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{\sigma_p}{\bar{\sigma}})][1 + D_4 \ln(\frac{\bar{\varepsilon}^{pl}}{\varepsilon_0})][1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r}]$$

应力三轴度 应变率 温度

3. 切削的有限元分析过程

1. 一般过程：

1. 结构离散化：
2. 单元分析：力-位移关系；传热关系；变分原理；分片差值
3. 形成总体方程：组装总体刚度阵；组装载荷阵；引入约束条件
4. 方程求解：数值积分
5. 输出结果：应力、应变场、切削力、切削热

2. 切削的有限元分析过程

1. 刀具向前运动一小步：产生初始力。刀具嵌入工件实体内部，根据刀具-工件接触的力学属性，两者之间将产生作用力
2. 刀具向前运动一小步：数值迭代计算。
 1. 该作用力使工件发生初始变形
 2. 变形引起之前的嵌入区减小，导致力减小
 3. 小的力又产生新的小变形，引起嵌入区增大，进而力又增大
 4. 如此反复，最终达到力和变形之间的平衡
3. 刚度矩阵更新：如果单元发生变形，则根据变形后的几何形状计算新的单元刚度矩阵，再代入迭代计算过程
4. 材料断裂：如果单元受力满足材料断裂准则，则工件材料被切开，即相邻单元分离，形成切屑和已加工表面
5. 刀具再不断向前运动一小步：重复上述第（1~4）步，至刀具完成全部的切削运动。
6. 最终输出：切屑和已加工表面切削力、应力和应变

4. 切削的有限元软件应用

1. 建立几何网格模型
2. 加载边界与约束条件
3. 切削仿真的后处理与分析
4. 仿真结果查看与数据处理

2.6.2.3 经验公式法

1. 车削

$$F_i = g(a_p, f, v) = C_{F_i} \times K_{F_i} \times a_p^{x_{F_i}} \times f^{y_{F_i}} \times v^{n_{F_i}}$$

1. C_{F_i} : 不同刀具和工件材料、加工形式的影响
 2. K_{F_i} : 不同刀具几何参数的影响
 3. 系数大小: $x_{F_i} > y_{F_i} > n_{F_i}, i = x, y, z$
 4. 切削力影响因素: $a_p > f > v$: 切深>进给量>切削速度
2. 铣削: 铣削是多刃切削, 每个刀齿都承受主切削力 (切向力) F_t , 径向力 F_r 和轴向力 F_a

$$F = F' = \sqrt{F_t^2 + F_r^2 + F_a^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

2.6.3 切削力的测量

1. 直接测量法——测力仪
 1. 原理: 利用切削力作用在测力仪弹性元件上所产生的变形, 或作用在压电晶体上产生的电荷经过转换处理后, 测出切削力。
 2. 类型: 电阻应变片式测力仪和压电测力仪
 3. 压电式测力仪是一种比较理想的测力传感器, 具有灵敏度高、固有频率高、受力变形小等优点
 4. 切削力测量系统一般包括: 测力计 (测力传感器) 、数据采集系统和计算机
2. 间接测量法—测定机床功率, 再计算切削力
 1. 用功率表测出机床电机在切削过程中所消耗的功率 P_E 后, 计算出切削功率 P_m 。
 2. 只能粗略估算切削力的大小, 不够精确。

2.7 切削热

2.7.1 切削热的产生

1. 切削热来源
 1. 被切削的金属发生弹性和塑性变形而耗功
 2. 切屑与前刀面产生的摩擦
 3. 后刀面与过渡表面产生的摩擦
2. 切削热影响
 1. 切削时所消耗的能量, 有98% ~ 99%转换为热能, 可近似认为所消耗的能量全部转换为热。
 2. 大量的切削热使得切削温度升高, 直接影响刀具前刀面上的摩擦系数、积屑瘤的形成和消退、刀具的磨损、工件加工精度和已加工表面质量等
3. 发热量比例
 1. 切削塑性材料: 变形和摩擦都比较大, 发热较多。切削速度提高时, 切屑变形减小, 塑性变形产生的热量降低, 而摩擦产生热量的增高。
 2. 切削脆性材料: 后刀面上摩擦产生的热量百分比增大。

- 对磨损量较小的刀具，后刀面与工件的摩擦较小，可将后刀面的摩擦功所转化的热量忽略不计，则切削时所做的功 $P_m = F_z v$

2.7.2 切削热和切削温度的计算

1. 切削温度：

- 切削温度一般指前刀面与切屑接触区域的平均温度。
- 前刀面的平均温度可近似地认为是剪切面的平均温度和前刀面与切屑接触面摩擦温度之和。

2. 切削热经验公式：

- 剪切面的平均温度可通过剪切力和剪切速度做功的角度解析推导出
- 前刀面与切屑接触面摩擦温度同样可通过摩擦力与切屑速度做功的角度解析推导出。

$$H_m = F_z v = C_{F_z} K_{F_z} a_p v^{0.85} f^{0.75}$$

3. 切削深度 a_p 对切削热的影响最大，切削速度 v 的影响次之，进给量 f 的影响最小

3. 切削温度经验公式：

- 主要受切削用量、刀具几何参数、工件材料、刀具磨损、切削液影响

$$\theta = C_\theta v^{z_\theta} f^{y_\theta} a_p^{x_\theta}$$

2. 切削温度的影响： $v > f > a_p$

2.7.3 切削温度的影响因素与控制

1. 切削参数

- 切削热： $a_p > v > f$
- 切削温度： $v > f > a_p$
- 切削力： $a_p > f > v$

2. 工件材料：工件导热系数越低，传导出去的热量越少，传给刀具的热量增加。例如切削钛合金，因为它的导热系数只有碳素钢的1/3~1/4，切削产生的热量不易传出，切削温度因而随之增高，刀具就容易磨损。

3. 刀具材料的导热系数：刀具导热系数较高，切削热易从刀具方面导出，有利于提高刀具寿命。

4. 刀具角度：

- 前角加大，变形和摩擦减小，因而切削热少。
- 前角不能过大，否则刀头部分散热体积减小，不利于切削温度的降低。
- 主偏角减小将使刀刃工作长度增加，散热条件改善，使切削温度降低。

5. 刀具磨损：在后刀面的磨损值达到一定数值后，对切削温度的影响增大；切削速度愈高，影响就愈显著。

6. 切屑与刀具接触时间：切屑与刀具接触时间的长短，也影响刀具的切削温度。

- 钻/镗削：切屑形成后仍与刀具及工件相接触，切削热再次传给工件和刀具，使切削温度升高。

2. 外圆车削：切屑形成后迅速脱离车刀，故热量传给刀具不多。

7. 切屑控制：

1. “不可接受”的切屑：拉伤工件的已加工表面，造成刀具早期破损
2. 切屑控制：控制切屑的卷曲、流出与折断，使形成“可接受”的良好屑形。
3. 实际生产控制措施：在前刀面上磨制出断屑槽或使用压块式断屑器。

8. 切削液（冷却、润滑、洗涤、防锈）

1. 类型：水溶液，乳化液，切削油

1. 水溶液：在水中加入一定量的防锈剂，冷却性能好，润滑性能差，呈透明状，常在磨削中使用。
2. 乳化液：将乳化油用水稀释而成，呈乳白色，常加入一定量的乳化剂。具有良好的冷却和清洗性能，一定的润滑性能，适用于粗加工及磨削。
3. 切削油：主要是矿物油，润滑性能好，但冷却性能差，常用于精加工。

2. 导热性能：油类切削液不如乳化液，乳化液不如水基切削液。如果用乳化液来代替油类切削液，加工生产率可提高50% ~ 100%。

3. 选择原则（加工阶段）

1. 粗加工时，主要要求冷却，也希望降低一些切削力及切削功率，一般应选用冷却作用较好的切削液，如低浓度的乳化液等。
2. 精加工时，主要希望提高工件的表面质量和减少刀具磨损，一般应选用润滑作用较好的切削液，如高浓度的乳化液或切削油等。

4. 喷射方式影响

9. 新型冷却方式：

1. 低温冷却：液氮冷却：利用液氮使工件、刀具或切削区处于低温冷却状态进行切削加工的方法
2. 微量润滑：准干式切削方法，它将压缩空气与少量的润滑剂混合雾化后，形成微米级气雾，然后喷向切削区，对刀具与切屑和刀具与工件的接触界面进行润滑；润滑液用量非常少，一般为0.03~0.2L/h，而一台典型的加工中心在进行湿切削时，切削液用量高达20~100L/min。

2.7.4 切削温度的测量

1. 热电偶法：当刀具-工件接近并受热时，因表层电子溢出而产生溢出电动势，并在刀具-工件的接触界面间形成电位差(即热电势)。根据热电势的大小来测定受热状态及温度变化情况。分为自然热电偶法和人工热电偶法。
2. 薄膜热电偶法：薄膜热电偶与丝式热电偶电极形状不同，采用了微米级厚度薄膜式电极，能达到微秒级响应时间。
 1. 片状：片状将两个厚度为3-6 μm 电极通过真空蒸镀法沉积到绝缘基底
 2. 针状：一个电极做成针状，将另一个热电极蒸镀沉积到针状电极表面并用涂层进行绝缘
3. 光/热辐射法：刀具、切屑和工件材料受热时都会产生一定强度的光、热辐射，且辐射强度随温度升高而加大。（非接触式测量）

2.8 切削区材料的微观组织特性

2.8.1 切削区微观组织的演化

1. 工件受刀具剪切/挤压：切削作用会导致切削区材料微观组织发生改变（晶粒尺寸变小、位错密度增加、孪晶生成等等）。这些微观组织会改变已加工表面的力学性能。
2. 微观组织的表征方法：对材料的微观组织进行表征首先需要制备金相样品，一个合格的金相试样需要经过 **镶嵌、研磨、抛光、腐蚀** 四个步骤。

2.8.2 切屑的微观组织

1. 切屑包含了切削过程中的两大塑性变形区域：剪切变形区和前刀面区域
 1. $V=250\text{m/min}$ ：受到严重塑性变形的作用，柱状纳米晶在剪切带内生成；
 2. $V=375\text{m/min}$ ：虽然晶粒尺寸仍未纳米级，但是晶粒形状呈现为等轴晶，表明此时再结晶开始发生，而观察到的等轴纳米晶极大可能属于刚再结晶形成的晶核；
 3. $V=500\text{m/min}$ ：剪切带的演化程度达到最高值，此时晶粒生长显著，晶粒尺寸明显增大。

2.8.3 已加工表面的微观组织

1. 已加工表面成形时经历了材料与后刀面的挤压和摩擦，同样存在严重的塑性变形区域。
2. 已加工表面的组织和状态对零件的服役性能（抗疲劳、抗腐蚀、耐磨性等）起着决定性的作用。
3. 高速切削时，很多金属材料的表面变质层最上方会产生“白层”：
 1. 它是一种表面硬度远高于基体硬度的白色超细晶粒层，厚度 $10\text{-}50\mu\text{m}$ ，硬度 $800\text{-}1200\text{HV}$ ；
 2. 在较高切削温度、较大温度变化率和塑性变形产生的热力耦合作用下的结果，白层有较高脆性易形成裂纹引起早期剥落失效或成为疲劳源，大大降低结构件的疲劳极限
4. 已加工表面的TEM表征：随着切削速度的提高已加工表面出现孪晶，表明晶粒的细化机制出现转变
5. 已加工表面形成与切屑形成的关联：
 1. 已加工表面的几何形貌波动以及晶粒细化层的周期性波动和切削过程中的锯齿状切屑成形密不可分。
 2. 第一阶段为剪切带形成，第二阶段为剪切带滑移，两个阶段存在导致了切削力的周期性波动，最终导致了加工表面的几何轮廓存在周期性波动。

2.9 刀具磨损、寿命及状态监测

2.9.1 刀具磨损现象

1. 刀具磨损机理

1. 硬质点划痕：碳化物、氮化物等硬质点以及积屑瘤在刀具表面划出深沟，属于机械磨损
 2. 冷焊粘结：切屑与前刀面的高压力和高温度，使切屑底面与前刀面发生冷焊粘结
 3. 扩散磨损：刀具材料和工件材料的化学元素相互扩散，使二者化学成份发生改变，削弱刀具性能；
 4. 化学磨损：刀具材料与周围介质起化学反应，形成硬度较低的化合物。常发生在较高的切削速度条件下。
2. 磨损带来的问题：刀具磨损后，加工精度降低，表面粗糙度增大，切削力增大、切削温度升高，甚至产生振动，不能继续正常切削。
3. 特点：**磨损是连续的、逐渐的**
4. 磨损原因：低温区—机械磨损，高温区—热、化学磨损
5. 磨损的形态：
1. 前刀面磨损：切削塑性材料时，如果切削速度和切削厚度较大，由于切屑与前刀面完全是新鲜表面，相互接触和摩擦，化学活性很高，接触面又有很高的压力和温度，有80%以上是实际接触，空气或切削液渗入比较困难，因此在前刀面上形成月牙洼磨损。使刀刃强度降低，易导致刀刃破损。
 2. 后刀面磨损：新鲜加工表面与刀具后刀面接触，相互摩擦，引起后刀面磨损。后刀面与工件表面的接触压力很大，存在着弹性和塑性变形，二者是小面积接触。切削铸铁和以较小的切削厚度切削塑性材料时，主要发生这种磨损，后刀面磨损带往往不均匀。
 3. 边界磨损：切削钢料时，常在主切削刃靠近工件外表皮处以及副切削刃靠近刀尖处的后刀面上，磨出较深的沟纹。此两处分别是在主、副切削刃与工件待加工或已加工表面接触的地方。
6. 刀具磨损过程的三个阶段：
1. 初期磨损阶段：由于新刃磨的刀具后面存在粗糙不平之处以及显微裂纹、氧化或脱碳层等缺陷，而且切削刃较锋利，刀具后面与加工表面接触面积较小，压应力较大，所以这一阶段的磨损较快，一般磨损量达0.05-0.1mm
 2. 正常磨损阶段：这个阶段的磨损比较缓慢均匀，磨损量随时间延长而近似成比例增加。
 3. 急剧磨损阶段。当磨损带宽度增加到一定限度后，加工表面粗糙度值增大，切削力与切削温度均迅速升高，磨损速度增加很快。应当避免达到这个阶段。
7. 磨钝标准：刀具磨损到一定限度就不能继续使用，这个磨损限度称为磨钝标准。
1. ISO标准：规定以1/2背吃刀量处后刀面上测定的磨损带宽度VB作为刀具磨钝标准。
 2. 工程现象判断
 1. 粗加工：观察加工表面是否出现亮带，切屑的颜色和形状的变化，是否振动和不正常的声音等。
 2. 精加工：观察加工表面粗糙度变化，测量加工零件的形状与尺寸精度等。

2.9.2 刀具寿命及影响因素

1. 刀具寿命：一把新刀（或重新刃磨过的刀具）从开始使用直至达到磨钝标准所经历的实际切削时间。

2. 刀具总寿命：对于可重磨刀具，刀具寿命指的是刀具两次刃磨之间所经历的实际切削时间，而对其从第一次投入使用直至完全报废（经刃磨后亦不可再用）时所经历的实际切削时间。
3. 与切削三要素的关系：切削速度对刀具寿命的影响最大，其次是进给量，背吃刀量最小，这与三者对切削温度的影响顺序完全一致。这也反映出切削温度对刀具磨损和刀具寿命有着最重要的影响

$$T = \frac{C}{v^x \cdot f^y \cdot a_p^z}$$

1. 耐热性愈低的刀具材料，斜率应该愈小，切削速度对刀具寿命影响愈大；
2. 陶瓷耐热性高，因而陶瓷刀具的寿命曲线斜率比硬质合金和高速钢的都大

2.9.3 刀具破损

1. 刀具破损：刀具在一定的切削条件下，如经受不住强大的应力，就可能发生突然损坏，提前失去切削能力，称为刀具破损。
2. 破损可认为是一种非正常的磨损，是一个突发过程，刹那间使刀具失效。磨损是一个比较缓慢的逐渐发展的刀具表面损伤过程。
3. 破损分脆性破损和塑性破损两种。硬质合金和陶瓷刀具切削时，在机械和热冲击作用下，常发生脆性破损。脆性破损又分为崩刃、碎断、剥落和裂纹破损。

2.9.4 刀具磨损状态检测

1. 必要性：自动化、无人值守情况
2. 难点：无法在线实时监测到前后刀面的磨破損状态
3. 直接监测：即直接观察刀具状态，确认刀具是否破损。其中最典型的方法是摄像法，是一种离线方法。
4. 间接监测：利用与刀具破损相关的其它物理量或物理现象，间接判断刀具是否已经破损或是否有即将破损的先兆。结合大数据、多数据融合方法、智能方法。这样的方法有测力法、测振法、测主电机电流法和测声发射法等。

2.10 磨削加工方法

1. 单刃/多刃刀具加工的不足：受大体积切屑影响，可达的加工表面粗糙度有限
2. 磨削机理：
 1. 磨削过程：与铣削相比，磨粒刀口钝，形状不规则，分布不均匀。
 1. **突出且比较锋利的磨粒**：切入工件较深，切削厚度较大，起切削作用。
 2. **比较钝且突出高度较小的磨粒**：切不下切屑，只起刻划作用，在工件表面上挤压出微细的沟槽，使金属向两边塑性流动，造成沟槽的两边微微隆起。
 3. **更钝且隐藏在其它磨粒下面的磨粒**：只稍微滑擦着工件表面，起抛光作用。
 4. 即使参加切削的磨粒在刚进入磨削区时，也先经过滑擦和刻划阶段，然后再进行切削。
 2. **磨削：切削、刻划、抛光作用的综合过程**

3. 自锐性

1. 磨粒在磨去工件材料的同时，自己的棱角也逐渐被磨平，形成一平面。磨粒磨钝后，磨削力也随之增大、致使磨粒破碎或脱落，重新露出锋利的刃口，此特性称为“自锐性”。
2. 自锐性使磨削在一定时间内能正常进行，但超过一定工作时间后，应进行人工修整，以免磨削力增大引起振动、噪声及损伤工件表面质量。
4. 砂轮修整：用金刚石修整砂轮相当于在砂轮工作表面上车出一道螺纹，修整导程和切深愈小，修出的砂轮就愈是光滑，磨削刃的等高性也愈好，因而磨出的工件表面粗糙度也就愈小。

3. 磨削工具：

1. 磨削：“超多齿/超密齿”加工方法，机理去除和工艺均不同
2. 砂轮：固结磨具的三要素——磨粒、结合剂和气孔
3. 磨粒：天然磨粒和人造磨粒（棕刚玉、人造金刚石、立方氮化硼）
4. 粘结剂：将磨粒粘合起来的材料，决定砂轮强度、耐冲击性、耐磨性和耐热性，有陶瓷、树脂、橡胶和金属等多种
5. 根据磨粒所占砂轮体积的百分比，定义组织状态：紧密、中等、疏松。磨粒所占比例越大，砂轮越紧密；反之，磨粒比例越小，砂轮越疏松。
6. 磨粒形貌：
 1. 每个磨粒为微小的铣刀
 2. 磨粒具有较大的负前角，尖端均有钝圆半径
 3. 磨粒尖端在砂轮上的分布（轴向和径向）是随机的（方向、高低以及排布间距）
 4. 砂轮的形貌决定于磨料种类、粒度大小、组织形态以及砂轮的“修整”状态
7. 砂轮硬度：用表面上磨粒和粘合剂粘贴的牢固程度来表示。硬度软，表示砂轮的磨粒容易脱落，硬度硬，表示磨粒较难脱落。
8. 砂轮的硬度和磨料的硬度是两个不同的概念。同一种磨料可以做成不同硬度的砂轮，取决于结合剂的性能、数量以及砂轮制造的工艺。
9. 选择砂轮硬度的一般原则
 1. 加工软金属：为了使磨料不致过早脱落，则选用硬砂轮。
 2. 加工硬金属：为了能及时的使磨钝的磨粒脱落，从而露出具有尖锐棱角的新磨粒（即自锐性），选用软砂轮。
 3. 精磨：为了保证磨削精度和粗糙度，应选用稍硬的砂轮。
 4. 工件材料：导热性差，易产生烧伤和裂纹时（如磨硬质合金等），选用软砂轮。
4. 磨削运动：砂轮和工件在相对运动关系上的不同组合，就可以形成各种不同的磨削加工方法，外圆磨削，内圆磨削，平面磨削、无心磨削、螺纹磨削、齿轮磨削和非圆磨削
5. 光整加工方法
 1. 超精加工：
 1. 用细粒度的磨条以一定压力压在旋转的工件表面上，并在轴向作往复振荡进行微量切除的光整加工方法；
 2. 常用于加工内外圆柱、画锥面和滚动轴承套圈的沟道；

3. 超精加工后表面粗糙度可达 $R_a < 0.0012 \mu\text{m}$ 。

2. 珩磨：

1. 珩磨头带有若干块细粒度的磨条靠机械或液压作用涨紧和施加一定压力在工件表面上，并相对工件作旋转与往复运动，在表面形成由螺旋线交叉而成的网状纹路。

2. 主要用于内孔光整加工，孔径可自 $\Phi 8 \sim 1200\text{mm}$ ，长径比 $L/D \geq 10$ 。

3. 研磨：

1. 将研磨剂涂敷(干式)或浇注(湿式)在研具与工件间，工件与夹具在一定压力下作不断变更方向的相对运动，在磨粒的作用下逐步刮擦并微量切除工件表面的很薄的金属层。

2. 此种方法可适用于各种表面的加工，粗糙度可达 $R_a > 0.01 \sim 0.16 \mu\text{m}$ ，精度可达5级以上。

4. 抛光：

1. 利用布轮、布盘等软的研具涂上抛光膏抛光工件的表面，靠抛光膏的机械刮擦和化学作用去掉表面粗糙度的峰顶，使表面获得光泽镜面；

2. 抛光时一般去不掉余量，所以不能提高工件的精度甚至还会损坏原有精度。经抛光的表面能减小残余拉应力值。

CH 3 数控机床及其性能

1. 数控机床：工作母机、工业母机、制造业母机

2. 切削减材成形的母机：切削运动去除材料，获得零件形状及性能

3. 机床：完成切削运动之设备

4. 运动：直线运动、回转运动、任意轨迹运动

3.1 典型机床的构型及其运动

机床发展历程：从机床构型来讲，发展至今五花八门同一类机床，构型也千差万别。

零件几何特征：被加工对象结构所决定！

3.1.1 车床构型

1. 加工零件特征：回转类/内外圆柱面/端面

2. 主运动：零件旋转

3. 进给运动：刀具相对零件沿轴向和径向的进给

4. 分类：立车；卧车：斜床身 / 平床身；立式车床 / 倒立车床

3.1.2 铣床构型：

1. 零件特征：平面/非平面/自由曲面

2. 主运动：刀具旋转

3. 进给运动：刀具相对于零件的进给

4. 分类：三轴、四轴、五轴

3.1.3 镗床构型

1. 加工面几何特征：内孔表面（有底孔，无底孔需钻削）
2. 主运动：刀具旋转
3. 进给运动：刀具相对于零件的直线运动

3.1.4 钻床构型

1. 工件特征：无底孔工件上面孔的加工
2. 主运动：刀具旋转
3. 进给运动：刀具沿孔轴线方向的直线运动
4. 分类：台式、立式、摇臂

3.1.5 刨床构型

1. 加工面特征：平面/槽/异形槽
2. 主运动：刀具沿平面长度方向的直线运动
3. 进给运动：刀具沿平面宽度方向的间歇直线运动
4. 分类：牛头刨床、龙门刨床

3.1.6 复合机床构型

1. 零件特征：主要特征+少量其它特征，如车削回转面+少量铣削面
2. 所需运动：除完成主要特征加工，需动力头完成铣削

3.2 机床运动的实现方法

1. 实现运动：动力源+中间传递机构+执行端
2. 运动的基本参数：位移/速度/加速度
3. 机床上的运动：直线运动回转运动

3.2.1 动力源：

1. 普通交直流电动机：
 1. 用于普通机床；
 2. 转速固定，需要机械结构进行变速和换向
2. 步进电机：
 1. 用于精度要求不高的数控机床；
 2. 可以通过电压、脉冲等自动变速和换向
3. 直驱电机：
 1. 用于高速高精度数控机床

2. 直接驱动负载；取消了中间传动环节；高速、高精度、高刚度、响应快
4. 液压站：
 1. 精密磨床
 2. 为静压/动静压主轴轴承和进给轴提供动力

3.2.2 传动部件

1. 功能：将电机输出旋转运动转换成直线运动或回转运动
2. 目的：改变运动方向；改变速度；改变功率
3. 直线运动：

传动部件	典型中间传递机构	用途及特点
丝杠螺母		将电机旋转运动转换为工作台直线运动，传动精度高
齿轮齿条		将电机旋转运动转换为工作台直线运动，传动扭矩大，用于大型、重型机床传动
曲柄滑块		将电机旋转运动转换为刀具直线往复运动，用于牛头刨床
零传动		无传动件，动态特性好，可实现高速传动

4. 回转运动：

传动部件	典型传动部件结构图	用途及特点
皮带		带的类型有平带、三角带、多楔带及同步齿形带等，运动平稳，适宜高速传动。
平行轴齿轮		将主动轴的旋转运动转换为从动轴旋转运动，并起到减速和提高转矩的作用。
相交轴齿轮		将主动轴的旋转运动转换为从动轴旋转运动，并能够改变旋转运动的方向
蜗轮蜗杆		将主动轴的旋转运动转换为从动轴旋转运动，并能够改变旋转运动的方向
零传动		没有带、齿轮、蜗轮蜗杆等传动环节易于实现高速高精传动。

3.2.3 支撑及导向部件

- 直线运动：导轨/沿直线运动1+5：两个平动、扭摆、俯仰、翻滚

支承部件		用途和特点
滚动导轨	滚珠式	导轨为点接触，承载力较低、刚度较低，用于小载荷场合
	滚柱式	导轨为线接触，承载能力较高，可以用于大载荷
普通滑动导轨		承载力大，用于重载导向场合
静压动静压滑动导轨	三角形	导向精度高，用于精密导向场合
	燕尾形	具有抗倾覆能力
静压动静压滑动导轨		导向精度高，阻尼大，用于超精密机床

- 回转运动：轴承/绕固定轴线回转1+3：径向跳动、轴向跳动、角度摆动

支承部件		用途和特点
滚动轴承	角接触球轴承	角接触球轴承为点接触，适用于高转速
	圆柱/圆锥滚子轴承	圆柱/圆锥滚子轴承为线接触，适用于重载
液体/气体静压/动静压轴承	径向轴承	轴承为液体/气体润滑状态，提供径向支承，液体静压/动静压轴承适用于精密重载场合，气体静压/动静压适用于精密轻载场合
	推力轴承	提供轴向支承
磁浮轴承		适用于轻载高转速

3.2.4 机床基础件

- 作用：保证各个运动轴的空间位姿关系
- 基础件材料：铸铁、大理石、钢板焊接结构
- 性能要求：1) 热稳定性；2) 强度；3) 刚度；4) 抗振性/阻尼；5) 重量/成本
- 典型的基座件结构形式：基座件又称机床大件，是指床身、立柱、横梁、底座等搭建，相互固定连接成机床的基础和框架。机床上其他零件可以固定在支撑件上，或者在工作时在支撑件的导轨上运动

3.3 机床的运动控制

1. 机床的核心：切削运动
2. 刀具-工件运动轨迹的复杂程度——成形复杂表面（轨迹法）
3. 数控机床：多轴联动（2轴、3轴、4轴、5轴）
4. 机床运动的改变由动力源即电机技术的发展而改变

3.3.1 电机技术发展与机床运动实现

1. 传统交流感应电机
 1. 只能输出一个速度
 2. 扭矩与功率的关系： $T = 9550 \frac{P}{n_0}$
 3. 改变速度、扭矩只能通过机械传动装置，如变速箱
 4. 靠机械传动有级变速、方向，精度、效率受到制约；多个运动的联动很困难！
2. 伺服电机与驱动器
 1. 电机尾部装有编码器：1) 速度可控制；2) 方向可控制；3) 功率可控制；4) 旋转角度可控制/控制位移

$$T_{me} = \frac{P_f}{\omega_{rm}} = P_{rt}[N_{co} \phi_{pk} i_{rq} + i_{rd} i_{rq} (L_{rd} - L_{rq})]$$

2. 工作基本原理：永磁同步电机；尾部编码盘测量转角和速度；典型的三环PID控制

3.3.2 单轴运动精度控制

1. 单轴运动是多轴联动的基础，多轴联动是指多个轴同步联动
2. 单轴运动的精度也是联动精度的基础

3.3.2.1 单轴运动的定位/重复定位精度

1. 概念：
 1. 直线轴：运动到某位置的准确度
 2. 回转轴：回转到某角度的准确度
 3. 国家标准GB/T17421.2—2016有规定
 4. 测量：激光干涉仪测量，直接给出结果；某一点静止后进行读数？实际加工时处于运动状态
2. 精度：
 1. 第*i*点第*j*次测量位置偏差： $X_{ij} = P_{ij} - P_i$; $X_{ij} \uparrow \downarrow$
 2. 某一位置单向平均位置偏差： $\overline{X_i} \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij} \uparrow$; $\overline{X_i} \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij} \downarrow$
 3. 某一位置双向平均位置偏差： $\overline{X_i} = \frac{\overline{X_i} \uparrow + \overline{X_i} \downarrow}{2}$
 4. 某一位置*i*反向差值及轴线反向差值： $B_i = \overline{X_i} \uparrow - \overline{X_i} \downarrow$
 5. 全行程反向差值及轴线反向差值： $B = \max[|B_i|]$

6. 某一位置Pi的n次单向位置偏差标准不确定度的估算值:

$$S_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} \uparrow - \bar{X}_i \uparrow)^2}; \quad S_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} \downarrow - \bar{X}_i \downarrow)^2}$$

7. 某一位置 i 的单向重复定位精度及双向重复定位精度:

$$R_i \uparrow = 4S_i \uparrow; \quad R_i \downarrow = 4S_i \downarrow; \quad R_i = \max[2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + |B_i|, R_i \uparrow, R_i \downarrow]$$

8. 全行程双向重复定位精度: $R \uparrow = \max[R_i \uparrow]; R \downarrow = \max[R_i \downarrow]; R = \max[R_i]$

9. 轴线单向定位系统偏差:

$$E \uparrow = \max[\bar{X}_i \uparrow] - \min[\bar{X}_i \uparrow]; \quad E \downarrow = \max[\bar{X}_i \downarrow] - \min[\bar{X}_i \downarrow]$$

10. 轴线双向定位系统偏差:

$$E = \max[\bar{X}_i \uparrow, \bar{X}_i \downarrow] - \min[\bar{X}_i \uparrow, \bar{X}_i \downarrow]$$

11. 轴线单向定位精度:

$$A \uparrow = \max[\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow] - \min[\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow]; \quad A \downarrow = \max[\bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow] - \min[\bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow]$$

12. 轴线双向定位精度:

$$A = \max[\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow, \bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow] - \min[\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow, \bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow]$$

3.3.2.2 机械系统动力学方程与响应—进给系统控制精度机电集成建模与保证措施

1. 如何实现运动位置的控制

1. 典型机电系统
2. 三环控制: 开环; 半闭环; 全闭环
3. 进给轴采用全闭环控制——光栅尺
4. 实际测量时的读数为静止后的位置偏差, 不能代表实际加工过程的位置偏差

2. 模型构建: 忽略电机转子机械部分将所有固连运动部件看作一个整体, 则所有运动部件等效到电机转子上。

1. C_d 、 C_s 、 C_r 分别为滑块、丝杠、减速器的粘滞摩擦力系数, 机械系统的动力学方程为:

$$\tau = \frac{md}{2\pi i} \ddot{\theta} + \left(\frac{C_d}{2\pi i} + \frac{C_s}{i} + C_r \right)$$

2. 电机产生扭矩:

$$I_q \phi n = T; \quad U_q = \frac{Lq}{R} \frac{dIq}{dt} + RI_q$$

3. 通过控制电压，即控制电流，从而可以控制电机输出扭矩。电压采取PID控制：

$$U_q = K_p(e) + K_i \int e + K_d \frac{de}{dt}$$

4. 电—机联合建模：做拉氏变换，构建速度闭环系统模型：输入为速度指令；速度控制后，控制了位移。

3. 保证和提高定位精度、重复定位精度的措施

1. 实际直线轴的控制

2. 机械系统存在非理想性：

1. 存在摩擦

2. 换向的惯性

3. 非同位等

3. 电机的输出也不是理想的

1. 非线性

2. 死区

3. 谐波

4. 需要精确的模型及先进的控制算法

3.3.3 联动运动实现及控制

3.3.3.1 多轴联动的必要性

1. 单轴机床仅有直线和回转运动（摆轴）

2. 复杂轨迹（曲线、曲面）需要联动

1. 车削两轴联动可车出复杂回转面

2. 铣削两轴联动可铣出复杂的柱面（涡旋盘）

3. 杂曲面需要多轴联动

3.3.3.2 联动轨迹的获取

1. 多数机床是串联结构

2. 只有直线轴和回转轴

3. 以铣削柱面（涡轮盘）为例

1. 正交直线轴无法走出曲线轨迹

2. X、Y同步联动可走出直线轨迹

3. 要想走出曲线轨迹，必须先离散曲线为折线

4. 两轴同步联动可走出折线

5. 通过密化离散点数，多边形可逼近曲线

6. 存在原理误差

4. 用弓高误差表示逼近的程度：

1. 用线段AB近似代替圆弧AB

2. 弓高 $CD = h = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{AB}{2}\right)^2}$
3. h 越小，线段 AB 越逼近圆弧 AB
4. h 的大小与曲率有关系，曲率大的地方，需减小 h ，以减小误差，提高逼近的精度

3.3.3.3 联动的运动学分解

1. 两轴联动可实现平面上任意曲线轨迹
2. 复杂曲面轨迹就需要多轴联动——五轴
 1. 需要考虑避免干涉、过切、欠切等
 2. 用刀刃的空间包络面逼近设计曲面，求解出五个轴的运动——较困难，需数学知识
3. 刀具刃形+运动=曲面（残留高度约束）
 1. 刀具刃形设计的基础
 2. 已知刀具求运动；已知运动求刀具刃形
4. X、Y位移相同，速度不同，合成轨迹不同
 1. 位移同步，速度协调
 2. V_t 是合成速度
 3. 不断变化，存在加速度

$$v_x = v_t \cos \theta; \quad v_y = v_t \sin \theta$$

3.3.3.4 联动运动的动力学合成——联动轨迹的精度保证

1. 多轴的同步
 1. 单轴存在位置偏差（跟随误差）静态测量：系统性和随机性
 2. 实际运动时呈现动力学特性：摩擦、惯性、各类扰动等
2. 速度协调（协同）
 1. 以控制周期内位移同步为基础
 2. 以加速度等为约束的速度规划
 3. 考虑圆弧及拐点的速度变化

3.3.3.5 多轴联动轨迹精度控制措施——联动过程中的动力学问题

1. 多轴联动时，除了要求位移同步、速度协同控制，还有其它动态特性问题，引起瞬态误差
 1. 各轴摩擦、惯性不一致等问题
 1. 减小摩擦，轻量化等
 2. 建模：前馈控制补偿摩擦、惯性力振动抑制
 3. 各轴伺服特性协同控制刀尖点 Y 轴驱动 Y 轴
 2. 非同位问题
 1. 提高中间环节刚度
 2. 合理的速度、加速度规划，减小加速度影响
 3. 指令滤波避免自激励引起机械结构共振

4. 建模：以刀尖点为目标提出控制策略
5. 各轴协同控制

3.4 机床主轴精度

3.4.1 机床主轴的功能及分类

1. 功能：带动刀具或工件回转形成机床切削运动的主运动，承受切削力和驱动力等载荷，最终完成零件表面的加工；
2. 性能：回转运动精度以及精度保持性、静/动刚度、高速回转的动平衡、残余动不平衡值、电主轴系统的温升值、长时间运行可靠性等
3. 分类：
 1. 按照传动形式来分
 1. 机械主轴：主要是在电机与旋转轴之间有变速机构，目的是改变主轴转速或增大扭矩，因此其主轴部件包括主轴转轴（转子）、轴承和传动部件等
 2. 电主轴：将电机置于主轴部件内部，通过伺服控制系统，使主轴获得所需的工作速度和扭矩等
 2. 按照机床类型来分
 1. 车床用主轴：是夹持被加工零件进行回转运动的，要求具备高转速、高精度、高刚度、低速大扭矩特性（往往增加一级传动来获取大扭矩）；
 2. 其它类主轴：比如铣床用主轴、镗床用主轴、磨削用主轴、雕铣用主轴、钻削用主轴等。
 3. 按照安装方式来分
 1. 立式主轴：常用于三轴加工中心和转摆台式五轴加工中心；
 2. 卧式主轴：常用于镗床上；
 3. 立卧转换主轴：根据工作时状态的不同而转换。

3.4.2 主轴的主要性能指标及保证方法

1. 性能指标：
 1. 回转精度；
 2. 静/动刚度、固有频率、动不平衡及振动幅值；
 3. 温升和热变形；
 4. 密封
2. 回转精度的保证方法：
 1. 主轴轴承的精度
 2. 轴承与主轴和基座之间的装配关系
 1. 前后轴承孔、轴径的圆度；
 2. 轴承孔及轴径的同轴度；
 3. 轴承内外圈的同心度；
 4. 轴承滚珠或滚柱的均匀度。

3. 系统刚度的保证方法:

1. 转子本身的刚度;

2. 轴承的刚度:

1. 轴承配置形式: 前1后1、前2后1、前2后2、前4后2等

2. 轴承预紧载荷及方式: 恒位置预紧、恒力预紧和变力预紧

4. 主轴精度和刚度在冷热状态下的差异

1. 冷态下装配 (保证服役态下精度、刚度)

2. 服役态下主轴和轴承有温升;

3. 难点:

1. 精确计算出有温升后的变形量;

2. 静态装配时要把温升导致的变形量预留出来, 即设计考虑温度影响的轴承配合公差。

5. 其他性能要求及其保证措施:

1. 主轴动平衡

1. 在线动平衡: 直接在线动平衡、间接在线动平衡和混合在线动平衡

2. 通用动平衡: 挠性转子动平衡和刚性转子动平衡

2. 主轴润滑及冷却:

1. 循环式润滑系统: 油气润滑、喷注润滑

2. 强制循环冷却

3.4.3 主轴性能的测量

1. 主轴回转精度测量方法:

1. 传统测量方法 (静态测量方法)

2. 非接触式测量方法 (动态测量方法)

2. 主轴回转精度测量结果:

1. 径向误差

2. 轴向误差

3. 倾斜误差

4. 同步误差

5. 异步误差

3.5 机床几何精度

3.5.1 机床几何精度与几何误差

1. 几何精度: 某些理想的直线或回转运动以及它们之间的理想位姿精度称为机床的几何精度。

2. 几何误差: 不理想情况下的偏差称为机床的几何误差

3. 运动轴的几何误差项:

1. 6项: 6个自由度

2. 1项：沿运动方向移动或者沿回转轴线转动（定位精度/重复定位精度）；
3. 直线轴的5项几何误差 / 回转轴的3项几何误差
4. 各轴线的空间位姿误差：两个轴线间垂直度
4. 直线轴的5项几何误差：以工作台和沿 X 轴运动直线轴为例，沿 Y 方向和 Z 方向的直线度误差： δ_{yx} 和 δ_{zx} ；绕 X、Y 和 Z 方向的转动角度误差： ε_{xx} （滚转误差）、 ε_{yx} （偏摆误差）和 ε_{zx} （扭摆俯仰误差）
5. 回转轴的3项几何误差：径向跳动；轴向窜动；角度摆动

3.5.2 重力与温度对位姿误差的影响

1. 重力影响分析
 1. 立式机床立柱受主轴箱的重力向前倾覆：立柱的前倾引起 Z 轴运动方向与 XY 轴位姿精度的变化，主轴箱和滑块自身刚度不足引起变形而导致的主轴轴线与 Z 轴运动方向在 YOZ 平面内的不平行误差。
 2. 反复刮研立柱装配基面
 3. 几何精度的主动设计
2. 热影响分析
 1. 环境温度的影响
 2. 局部发热的影响
 3. 三项位姿精度（垂直度）
 4. 热机
 5. 几何精度主动设计：保证机床工作达到热稳态时的精度，关键是准确计算机床在受到重力与热综合作用下其变形量：
 1. 热源发热量
 2. 对流换热
 3. 导热微分方程
 4. 受热伸长
 5. 有限元方法

3.5.3 机床几何精度测试：

使用平尺或平板、角尺和指示器、球杆仪、多光束激光干涉仪进行几何精度测试

3.6 机床动态性能

1. 载荷：切削力等与时间和频率相关的动态载荷
2. 对加工过程的影响：
 1. 结构强迫振动（共振）
 2. 切削稳定性
 3. 运动精度
3. 影响因素：质量、刚度和阻尼
 1. 结构件：结构形式和材料种类

2. 结合部：结构型式、加工精度、装配工艺和预载荷
3. 运行状态：进给轴的位置、速度、加速度
4. 对工件精度的影响：粗糙度、波纹度

3.6.1 动态性能是机床性能的关键指标

1. 机床运行过程的激励源（载荷谱）
 1. 主轴高速回转件的离心力：来源于制造、装配导致的偏心和支撑轴承系统的刚度
 2. 移动部件换向冲击导致的惯性力：频繁换向过程中的加速度变化
 3. 伺服电机非线性因素导致的谐波力：伺服驱动和电机结构的非线性因素
 4. 多齿刀具断续切削导致的切削力：多齿刀具刀刃切削状态的变化
 5. 机床附件的动态激励载荷：液压系统、冷却系统和配电柜等装置中的回转部件
2. 机床动态性能的指标要求
 1. 固有频率：由系统本身的参数决定，与外界激励载荷、初始条件等均无关
 2. 振型：以某阶固有频率自由振动时机床各处的振动形态
 3. 频响函数：机床的动态响应与激励载荷的比值
 4. 动刚度：激励载荷与机床的动态响应的比值
 5. 振幅：激励载荷下机床振动响应的波动范围

3.6.2 机床动态性能分析的基础理论

1. 动力学基本概念
 1. 动力学方程： $M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F$
 2. 固有频率及振型： $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$
 3. 阻尼比： $\frac{C}{M} = 2\zeta\omega_n$
 4. 频率响应函数： $H(\omega) = \frac{1}{-M\omega^2 + jC\omega + K}$
 5. 动刚度（机械阻抗）： $Z(\omega) = \frac{1}{H(\omega)}$
2. 机床动态性能分析方法
 1. 机床的动力学建模简化
 1. 假设：
 1. 主要的刚度和阻尼来自于结构件间的结合部
 2. 主轴箱、立柱、床身等结构件为刚体
 3. 忽略地脚的影响
 2. 等效动力学模型：12自由度刚体动力学模型
 1. 刚体质量块：①立柱、②主轴箱、③床身
 2. 移动结合部：Z轴导轨、滚珠丝杠副和轴承
 3. 固定结合部：床身-立柱螺钉结合部
 2. 主轴箱和立柱等效质量矩阵计算：采取质量影响系数法进行计算
 3. 主轴箱等效刚度矩阵计算
 4. 立柱等效刚度矩阵计算

5. 主轴箱和立柱等效阻尼矩阵计算

1. 阻尼的作用

1. 振动过程中系统耗散能量的能力

2. 阻尼的类型

1. 材料阻尼：与材料内位错运动、塑性滑移有关，用损耗因子表示

2. 粘性阻尼：与速度成正比，如流体粘滞阻力，用阻尼系数表示

3. 摩擦阻尼：与库伦摩擦相关，方向与运动速度相反，用摩擦系数、正压力表示

3. 阻尼矩阵的比例阻尼简化形式： $C + \alpha M + \beta K$

6. 整机动力学方程建立：

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{Bmatrix} + C \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

1. 自由度： $q_i = \{u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}, \theta_{ix}, \theta_{iy}, \theta_{iz}\}$, ($i = 1, 2$)

2. 外载荷： $F_i = [F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}, M_{ix}, M_{iy}, M_{iz}]^T$, ($i = 1, 2$)

3. 阻尼矩阵： $C = \alpha M + \beta K$

7. 动特性参数求解：(振动力学方法)

1. 特征方程求出各阶固有频率和主振型

2. 正则化

3. 求各阶响应

4. 振型叠加法

3. 机床动态性能主动设计的意义

1. 设计阶段机床结构布局主动设计调整响应敏感方向

1. 结构件布局：组成结构件的外形尺寸、空间位置及其相对约束关系

2. 设计阶段敏感预测和调整雷区以避免共振

1. 结构件质量和刚度：材料、筋板布置和外形尺寸

2. 结合部刚度：类型、加工精度和装配工艺

3. 设计阶段增加阻尼减小响应幅值

1. 结构件阻尼：高阻尼材料

2. 结合部阻尼：涂层、油膜等

4. 使用阶段在确定工艺参数时应避开共振区

1. 通过切削工艺参数改变切削力等载荷的大小、频率、方向和作用点

3.6.3 机床动态性能的测试

1. 测试的目的

1. 利用实验的方法，通过采集机械系统的激励载荷和振动信号识别出机床的模态参数，为动态性指标参数辨识、动力学理论模型验证、结构动力特性的优化设计、工作状态评估和故障诊断等提供依据。

2. 模态参数：模态频率；模态刚度；模态质量；模态振型；模态阻尼；频响函数

2. 测试原理：动态性能参数获取方法主要有频域法和时域法，其中利用频响函数矩阵的频域法是使用最广泛的方法
3. 测试仪器及组成：动态性能测试系统由激励装置，位移/速度/加速度传感器，信号分析仪和数据处理系统等四部分组成
4. 测试方法
 1. 试验模态分析(Experimental Modal Analysis, EMA)——力锤或激振器激励的模态试验
 2. 运行模态分析(Operational Modal Analysis, OMA)——通过测量机械系统运行中的响应数据来获取结构的模态参数
5. 测试数据处理与分析
 1. 目的：获得固有频率、振型、频响函数等动态性能参数
 2. 测试方法：锤击法，单点激励多点拾振

3.7 机床可靠性

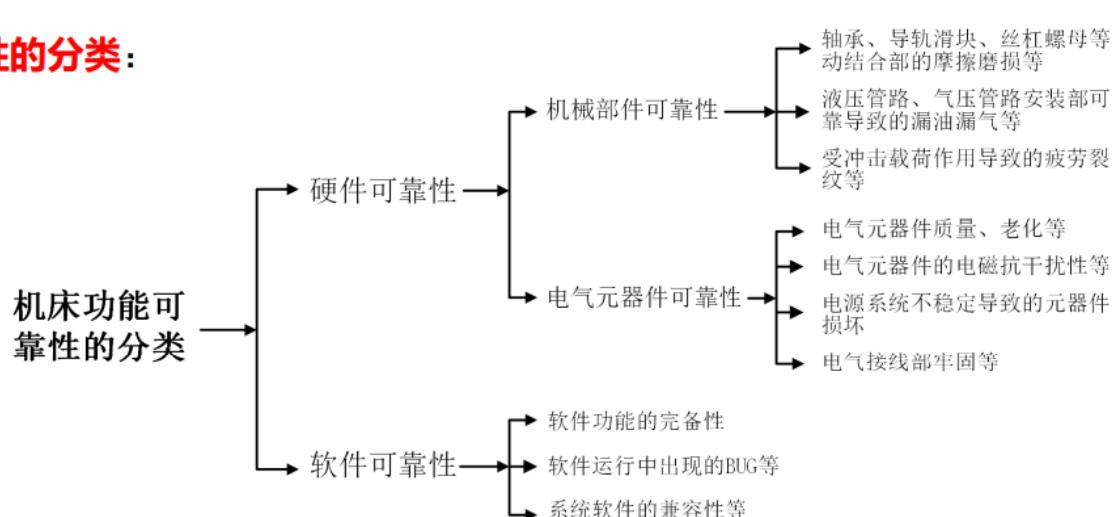
3.7.1 机床可靠性内容

1. 精度：保证使用时的精度，而不是在装配时检验的精度
2. 精度稳定性：当温度回复到检测温度时，检测的各项精度指标又基本回到原来的数值
3. 精度保持性：指机床长期保持其原始精度的能力
4. 可靠性：指产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能/性能的能力
 1. 规定条件：
 1. 环境条件：气候环境、机械环境、电磁环境、生物和化学环境等
 2. 动力条件：电源和流体源
 3. 负载条件：负载大小
 4. 使用和维护条件：是否按照规定使用、是否定期维护
 2. 规定时间：一般情况下随着数控机床运行时间的增加，机床可靠性会逐渐降低。
 3. 规定功能/性能：一般指由用户提出的指标和要求。

3.7.2 可靠性的分类及指标

1. 可靠性的分类：

可靠的分类：



2. 可靠性的指标：是表示和衡量产品可靠性的各种数量指标的统称。

1. 平均无故障间隔时间：Mean Time Between Failures， MTBF

1. 是指产品从一次故障到下一次故障的平均时间，单位一般为“小时”；

2. 或者说，它是指可修复产品在相邻两次故障之间工作时间的数学期望值，可用无故障工作时间的数学期望来表示：

$$MTBF = \bar{t} = E(T) = \int_0^{\infty} f(t)dt$$

3. MTBF代表机床的“可用性”，已成为评估机床可靠性的一个重要质量指标

2. 平均修复时间：Mean Time To Repair， MTTR：

1. 是从发现故障到机床恢复规定性能所需修复时间的平均值

2. 是维修领域常见的关键绩效指标

3. 它是维修时间 T_0 的数学期望 $E(T_0)$ ：

$$MTTR = \bar{\tau} = E(T_0) = \int_0^{\infty} \tau m(\tau)d\tau$$

4. $m(\tau)$ 是维修密度函数

3. 精度保持时间：kT：

1. 是数控机床在两班工作制和遵守使用规则的条件下，其精度保持性在机床精度标准规定的范围内的时间

3.7.3 提升机床可靠性的基本途径

提升途径：可以通过机床的技术层面、管理层面去保证数控机床的可靠性

1. 可靠性设计：产品性能；产品可靠性；产品费用等

2. 制造可靠性：

1. 外购件的质量与可靠性控制：在已有元件可靠性的基础上，提高系统的可靠性；保证系统可靠性前提下，合理分配可靠度，降低对元件可靠要求

2. 加工一致性控制：选配、装配、互换

3. 可靠性驱动装配：装配环境造成的机床故障占总故障40%

3. 可靠性试验：可靠性试验是对机床的可靠性进行调查、分析和评价的一种手段，其目的是发现在设计、材料、制造、装配工艺方面的各种缺陷，为改善机床的性能，提高可靠性水平，减少维修及保障费用提供科学依据

4. 可靠性管理：据国产数控机床可靠性差除了技术水平差外，很大原因在于管理技术落后

1. 人员素质

2. 工作随意性

3. 缺乏成熟可靠性管理标准（包括设计标准、试验标准、管理标准等）

4. 系统可靠性管理体系

5. 运行可靠性：

1. 机床由于运行因素引起的故障占总故障数20%；

2. 机床的安装调试；

3. 机床的运行环境、维护保养和维修；
4. 加工条件控制等；
5. 按照管制规定使用数控机床；

CH 4 机床夹具原理与设计

4.1 机床夹具的基本概念

4.1.1 工件装夹的必要性

1. 如何做到工件在机床上进行加工：装夹 = 定位 + 夹紧
 1. 按划线或直接找正，然后夹紧
 2. 直接用夹具实现定位、夹紧
2. 定位：确定工件在机床上或夹具中占有准确加工位置的过程
3. 夹紧：在工件定位后用外力将其固定，使其在加工过程中保持定位位置不变

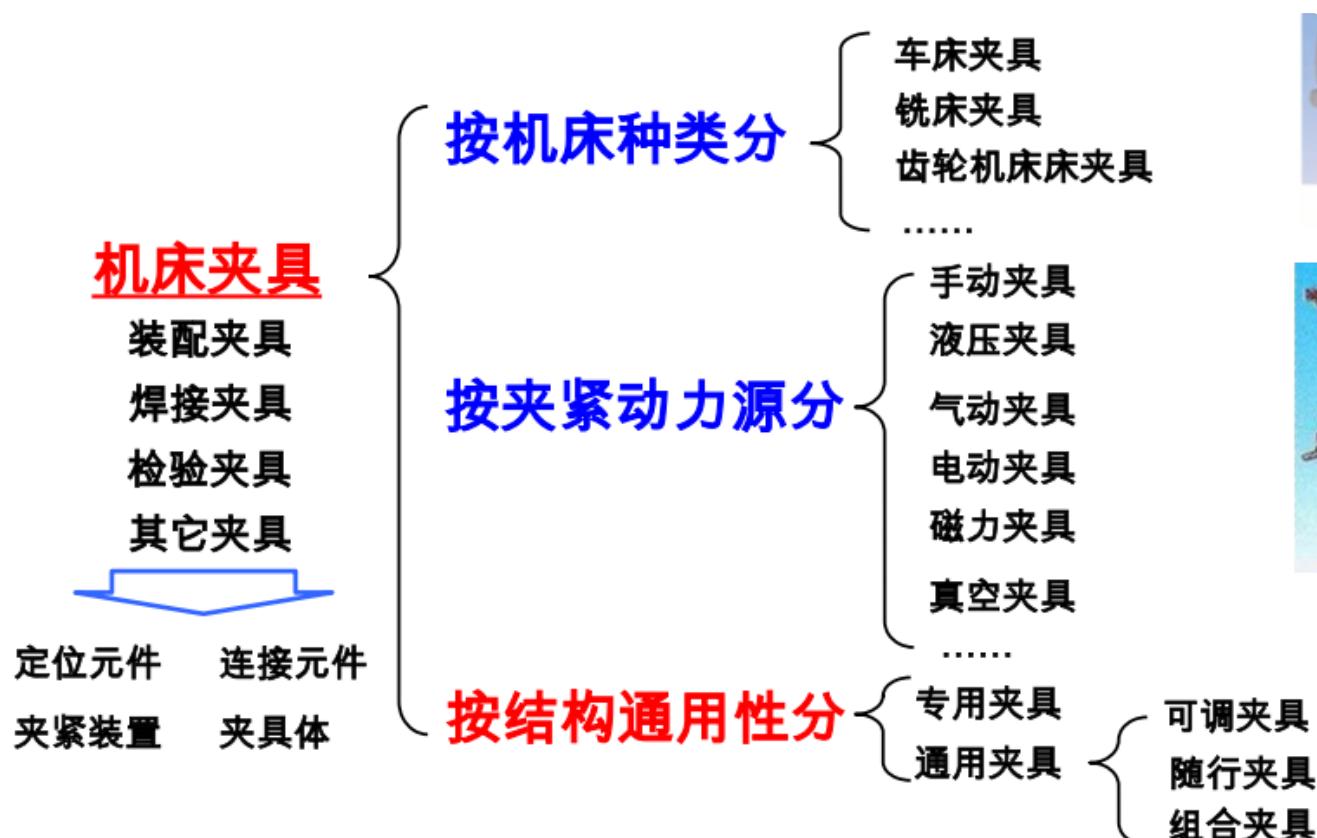
4.1.2 工件装夹的方式

1. 用找正法装夹工件
 1. 直接找正：把工件直接放在机床工作台或四爪卡盘、虎钳上，根据工件的一个或几个表面用划针或指示表找正工件准确位置后再进行夹紧
 2. 划线找正：先按加工要求进行加工面位置的划线工序，然后再按划出的线痕进行找正实现装夹
 3. 测头找正：数控机床上配置，自动更新刀补
2. 何为夹具？
 1. 机床配有的—种辅助装置
 2. 保证工件——刀具占有正确位置
 3. 在加工过程中保证：需要力夹紧
 4. 如常见的虎钳、三爪卡盘等
 5. 普通机床和数控机床都需要，但要求不同
3. 夹具装夹工件特点：
 1. 效率高，成本低
 2. 易保证重复精度
 3. 减轻劳动强度，对工人技术要求低
 4. 扩大机床使用范围
4. 适用范围：广泛用于大批量生产，中批生产及单件小批生产
5. 夹具的功能与作用：
 1. 定位：工件——夹具——机床
 2. 夹紧：工件在夹具上被夹紧，夹具在机床上被夹紧
6. 夹具的组成：
 1. 定位元件

2. 夹紧装置
 3. 对刀、导引元件
 4. 其它分度装置
 5. 连接元件
 6. 夹具体
7. 传统夹具与数控夹具的功能
1. 传统的专用夹具具有定位、夹紧、导向和对刀四种功能
 2. 数控机床上一般都配备有接触式测头、刀具预调仪及对刀部件等设备。数控机床上由程序控制准确的定位精度，可实现夹具中的刀具导向功能。因此数控加工中的夹具一般不需要导向和对刀功能，只要求具有定位和夹紧功能，就能满足使用要求，这样可简化夹具的结构。
 3. 数控加工具有工序集中的特点，在工件的一次装夹中既要进行切削力很大的粗加工，又要进行达到工件最终精度要求的精加工，因此夹具的刚度和夹紧力都要满足大切削力的要求。
 4. 为适应数控加工的高效率，数控加工夹具应尽可能使用气动、液压、电动等自动夹紧装置快速夹紧，以缩短辅助时间
- ### 4.1.3 夹具的工作原理
1. 位置精度的保证
 2. 尺寸精度的保证
 3. 调整法：预先用样板或标准件调整好机床、夹具、刀具和工件的准确相对位置，以保证工件的尺寸精度。所以加工时，不用试切，尺寸自动获得，并在一批零件加工过程中保持不变。
 4. 夹具工作原理要点
 1. 保证工件在夹具中占有正确的加工位置
 2. 保证夹具对于机床应先保证有准确的相对位置
 3. 保证刀具相对有关的定位元件的定位工作面有准确位置
 5. 传统铣床夹具的工作原理
 1. 须保证 4 个尺寸精度：a、b、c、h，2 个位置精度：槽底面对基准 A 的平行度、槽侧面对基准 B 的平行度
 2. 位置精度的实现：工件在夹具中、夹具在机床上的“横平竖直”
 6. 数控铣削加工夹具的工作原理
 1. 数控加工时，保证尺寸精度的方法均为自动控制法，即根据机床控制其进给轴的坐标位置来保证尺寸精度。
 2. 以同一零件为例，数控铣床上，刀具相对工件的位置完全是靠机床的坐标来控制和实现的，因此，工件、夹具、刀具都必须统一在机床的坐标系中有确定的坐标值。
 7. 数控铣削加工夹具的相关概念
 1. 机床原点：数控机床固定的基准位置，机床生产厂商设置并确定，用于建立机床运动部件坐标的初始点。

2. 机床参考点：机床生产厂商用行程开关设定的固定物理位置，用于对运动部件位置检查、控制、定位的基准点。
3. 机床坐标系：以机床原点为坐标原点建立的坐标系，其坐标轴及方向按有关标准确定。
4. 工件坐标系：用于确定工件上各几何要素位置而建立的坐标系。
5. 工件原点：工件坐标系上的原点，可设在工件上，夹具制造精度较高时也可设在夹具上，该状态下更换工件无需改变坐标。
6. 刀位点：刀具上用于确定刀具坐标位置的基准点。
7. 对刀：数控加工前，操作工人确定刀具与工件之间相对位置关系的过程。
 1. 刀具半径补偿：解决数控加工时刀位点和切削点不一致的问题。
 2. 刀具长度补偿：解决刀具磨损、更换等过程引起的刀具长度变化导致刀位点变化的问题。
8. 编程坐标系：根据工件图样及加工工艺要求，以工件图样上的某一点为坐标原点所确定的坐标系，一般供编程使用，无需考虑工件在机床上的实际装夹位置。
9. 夹具坐标系：以机床上的某一个固定点为坐标原点，用于确定夹具在机床中的相对位置（同时也确定夹具各定位元件在夹具中的相对位置）而建立的坐标系。（简单工件加工时，无须建立夹具坐标系，与工件共用工件坐标系即可。复杂工件加工时，往往需要建立独立的夹具坐标系）

4.1.4 夹具的种类



4.2 工件在夹具中的定位及夹具在机床上的定位

4.2.1 基准的概念

1. 基准：尺寸、位置度均需有基准
 1. 设计基准
 2. 工艺基准：定位基准、测量基准、装配基准、调刀基准
2. 可以作为基准的特征：
 1. 点、线、面
 2. 不一定具体存在，如轴线、对称面等
 3. 常用具体表面：平面、内外圆柱面（轴线）

4.2.2 六点定位原理

1. 任何刚性工件在空间直角坐标系中都具有六个自由度，即沿三个坐标轴的移动自由度和绕三个坐标轴的转动自由度
2. “六点定位原理”注意事项
 1. 定位就是限制自由度，用定位支承点来限制工件的自由度。
 2. 定位支承点限制工件自由度应理解为定位支承点与工件定位基准面始终保持紧贴接触
 3. 一个定位支承点仅限制一个自由度，一个工件仅有六个自由度，所设置的定位支承点数目，不应超过六个
 4. 定位支承点是由定位元件抽象而来的，应用时总是通过具体的定位元件体现。
 5. 分析定位支承点的作用时，不考虑力的影响，工件的某一自由度被限制，是指工件在这一方向上有确定的位置，并非指工件在受到外力时不能运动。
3. 支撑
 1. 自位支承：支承本身的位置能自动适应工件定位基准面位置变化，多用于基准面位置变化较大时的平面定位情况，或者解除过定位时应用。一个定位支承点，限制一个自由度。
 2. 辅助支承：可调并能锁紧，不限制自由度，不起定位作用，仅提高工件刚性，减小加工过程中工件的变形。无论采用哪一种方式，都应注意辅助支承不起定位作用，即不应限制工件的自由度，同时更不能破坏基本支承对工件的定位，因此，辅助支承的结构都是可调并能锁紧的。
4. 工件定位过程中的几个重要概念
 1. 完全定位与不完全定位
 1. 完全定位：工件的六个自由度完全被限制的定位
 2. 不完全定位：按加工要求，允许有一个或几个自由度不被限制的定位。不完全定位是合理的定位方式，在实际生产中，工件被限制的自由度数一般不少于三个
 2. 欠定位与过定位
 1. 欠定位：按工序的加工要求，工件应该限制的自由度而未予限制的定位。欠定位是绝对不允许的
 2. 过定位：工件的同一自由度被二个或二个以上的支承点重复限制的定位。可能造成工件的定位误差，或者造成部分工件装不进夹具的情况。过定位不是绝对不允许，要由具体情况决定

4.2.3 组合定位分析

1. 实际加工过程中，工件往往是以几个表面同时定位的，称为“组合表面定位”。
2. 定位元件在单独定位某定位面时原起限制工件移动自由度的作用可能会转化成限制工件转动自由度的作用。一旦转化后，该定位元件就不再起原来限制工件移动自由度的作用了。
3. 常见组合定位形式及其分析
 1. 卡盘 - 顶尖定位及其过定位
 1. 过定位的消除：顶尖顶紧力适当；适当增加顶尖和中心孔的配合间隙
 2. 双顶尖定位及其过定位
 1. 过定位的消除：活动尾顶尖
 3. 面两销定位及其过定位
 1. 过定位的消除：将圆柱销改为削边销

4.2.4 夹具在机床上的定位

1. 零点定位系统
 1. 由来：加工时需要确定工件零点，但零件往往不会一直保持不动，需从一个工序到另一个，一台机床到另一台机床，这就需要重新找正零点，增加很多辅助工作
 2. 原理：属于常锁机构，通气打开，断气锁死。当给系统通液压或者气压时，压力会通过活塞压缩下面的弹簧，钢珠会往两侧散开，这时公接头就可取出。当把动力源切断时，弹簧会往上顶活塞，活塞把钢珠向中间收，从而夹紧钢珠。
2. 多点柔性定位系统
 1. 针对曲面薄壁零件，且种类繁多、精度要求高等特点，如飞机蒙皮钣金件，需要多点柔性定位夹紧系统

4.3 工件在夹具中的夹紧

4.3.1 夹紧的基本概念

1. 夹紧的目的
 1. 防止工件在切削力、重力、惯性力或离心力等作用而发生位移或振动。
 2. 实现工件的夹紧是靠夹具上设计的夹紧装置来完成的。
 3. 机械加工中所使用的夹具一般都必须有夹紧装置，在大型工件上钻小孔时，可不单独设计夹紧装置，而靠工件自身的重力克服钻削力。
2. 夹紧装置的组成
 1. 力源装置
 2. 中间传力机构
 3. 夹紧元件
3. 夹紧装置的基本要求
 1. 夹紧时不能破坏工件在夹具中占有正确位置
 2. 夹紧力要适当
 3. 操作方便，夹压迅速、省力

4. 结构紧凑简单，结构工艺性良好，尽量使用标准件
4. 夹紧力的确定原则：力的三要素，即方向、作用点、大小方面考虑。
 1. 确定夹紧力方向的原则
 1. 夹紧力的方向应朝向主要定位基面，当工件由几个表面组合定位时，在各方向都应施加夹紧力；
 2. 应使定位基面与定位元件接触良好，保证工件定位准确可靠。
 3. 理想的夹紧力的方向应尽量与工件受到的切削力、重力等的方向一致，以减小夹紧力；
 4. 夹紧力的方向应与工件刚度最大的方向一致，以减小工件变形。特别注意夹紧薄壁工件。
 2. 确定夹紧力作用点的原则
 1. 夹紧力的作用点应正对支承元件或位于支承元件所形成的支承面内，以保证夹紧最稳定；
 2. 夹紧力作用点应位于工件刚性较好的部位
 3. 确定夹紧力大小的原则
 1. 夹紧力的大小可根据切削力、工件重力的大小、方向和相互位置关系具体计算。
 2. 为安全起见，计算出的夹紧力应乘以安全系数 K，故实际夹紧力一般比理论计算值大 2 ~ 3 倍。
 3. 进行夹紧力计算时，通常将夹具和工件看作一刚性系统，以简化计算；
 4. 根据工件在切削力、夹紧力（重型工件要考虑重力，高速时要考虑惯性力）作用下处于静力平衡，列出静力平衡方程式，即可算出理论夹紧力；
 5. 一般来说，手动夹紧时不必算出夹紧力的确切值，只有机动夹紧时，才进行夹紧力计算，以便决定动力部件（如气缸、液压缸直径等）的尺寸。

4.3.2 夹紧的基本方式及其适用场合

夹紧机构是夹紧装置的重要组成部分，因为无论采用何种动力源装置，都必须通过夹紧机构将原始力转化为夹紧力。

1. 斜楔夹紧：斜楔夹紧机构是利用斜面来夹紧工件的，它是夹紧最基本的形式。
 1. 特点
 1. 结构简单，升程小，扩力倍数不算大，操作情况不理想，但与机动装置联合应用较广。
 2. 增大行程和增大夹紧力使斜楔自锁是矛盾的，因此，选斜楔角时必须考虑这两方面因素，如果两者都要求很严，可将斜楔做成两个升角，前一段大升角用于加大工作行程，后一段小升角用于工件的加紧并自锁
 2. 斜楔夹紧的受力分析： $F_Q = \frac{F_P}{\tan \varphi_1 + \tan(\alpha + \varphi_2)}$
 3. 斜楔夹角的自锁条件： $\alpha \leq \varphi_1 + \varphi_2$
2. 螺旋夹紧：螺旋夹紧机构在生产中使用极为普遍。其结构简单，夹紧行程大，特别是它具有自锁性能和增力大两大特点。
 1. 分类：

1. 单个螺栓夹紧机构
 2. 螺旋压板夹紧机构
2. 特点：
1. 结构简单，可靠，在夹具中得到广泛应用
 2. 夹紧力比斜楔夹紧力大，螺旋夹紧行程不受限制，所以在手动夹紧中应用极广
 3. 螺旋夹紧动作慢，辅助时间长，效率低
 4. 在实际生产中，螺旋压板组合夹紧比单螺旋夹紧用的更为普遍
3. 偏心夹紧：偏心夹紧机构是由偏心件作为夹紧元件，直接夹紧或与其它元件组合实现对工件的夹紧。
1. 分类：常用的偏心件有圆偏心和偏心轴偏心两种。
 2. 特点：夹紧力小，自锁性能不是很好，且夹紧行程小，故多用于切削力小，无振动，工件尺寸公差不大的场合，是一种快速夹紧机构。

4.3.3 自动夹紧装置

1. 气动夹紧
 1. 单作用气缸：夹紧靠气压顶紧，松开由弹簧推回，用于夹紧行程较短的情况。活塞在压缩空气作用下产生的原始推动力。
 2. 双作用气缸：活塞的双向移动均由压缩空气驱动，用于行程较大或往复均需动力推动的情况
2. 液压夹紧系统
 1. 优点：
 1. 工作压力高，传动力大，不需增力机构，夹具结构简单；
 2. 油液不可压缩，夹紧刚性大，工作平稳，夹紧可靠；
 3. 噪声小，劳动条件好。
 4. 适用于重力切削或加工大型工件时的多处夹紧。
 2. 缺点：对密封性能要求高，需要一套压力油供应系统，为单一夹具设置此系统不经济
3. 气 - 液压组合夹紧：
 1. 优点：增压器输出的油压比输入的气压增大，这是它的主要优点。
 2. 缺点：行程小。因油液容积不变，故活塞的行程 相应的活塞、活塞杆面积成反比
4. 真空夹紧：对于一些薄壁零件、大型薄板零件、形状特殊和刚性较差零件或非磁性材料的薄片类零件的加工，使用一般夹紧装置装夹很难控制其变形量，进而影响加工质量和效率。在这种情况下，通常采用真空（吸附）夹紧。

4.3.4 自动夹紧装置的工程应用

1. 自动卡盘：也称为动力卡盘，通过气动、液压或电动等（三种）驱动方式替代人工手动夹紧，结合卡盘的自定心功能，能同时快速、高效地进行定位与夹紧
2. 液压自动夹紧的工程应用：转向助力泵

4.4 工件装夹过程中的误差及其传递

1. 限制的准确程度用定位误差来衡量，其大小决定了定位方案是否可行
2. 夹具引起的总误差不能超过该道工序加工允差的 $1/3$ ，而定位误差不能超过夹具误差的 $1/3$
3. 定位误差不仅限于尺寸，位置度也会产生定位误差

4.4.1 工件的定位误差以及夹具在机床上的定位误差

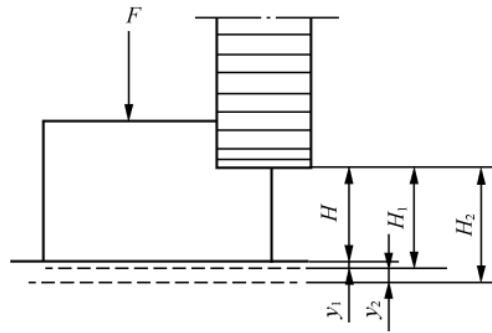
1. 定位误差：设计基准在工序尺寸方向上的最大位置变动量。它是夹具误差的一个重要组成部分
2. 传统机床加工过程定位误差产生的原因：当夹具在机床上的定位精度达到要求时，如果工件在夹具中定位不准确，将会使设计基准在加工尺寸方向上产生偏移，从而产生定位误差。
 1. 定位基准与设计基准不重合产生基准不重合误差。
 2. 定位元件制造不准确引起的定位副制造不准确误差。
3. 数控加工中的装夹误差：
 1. 数控加工中无需设置夹具的调刀基准，通过对刀操作直接获得工件在机床坐标系中的位置（工件原点偏置），用自动控制法获得工件的加工精度。
 2. 基准不重合误差可通过工艺尺寸换算的方式在数控编程过程中扣除。
 3. 夹具在机床上的坐标位置需通过手工控制机床坐标对刀或利用机床上的测头来确定，从而引起误差。
 4. 该误差会影响刀具到达编程坐标原点的精度，导致工件的某一基准位置产生偏移，而工件其他点、线、面之间的相互精度不会受到这一误差的影响
 5. **数控夹具设计分析仅需考虑夹紧误差，而不存在夹具定位误差的影响**

4.4.2 夹紧误差

1. 夹紧误差的影响
 1. 工件在夹具中、夹具在机床上夹紧过程中产生的误差，对于单个工件，因为定位、夹紧产生的误差为这两方面误差的综合。
 2. 工件的定位、夹紧误差在加工过程中不断产生、传递和积累，从而影响工件的加工精度
2. 夹紧误差的类型
 1. 从误差表现形式来分：静态误差、动态误差，静态误差包括夹具的制造误差及工件在夹具中、夹具在机床中的定位与夹紧引起变形的稳态部分。
 2. 从误差性质来分：常值系统性误差（定位、夹紧的静态误差），变值性系统误差（定位、夹紧的动态误差），随机性误差（呈现随机性的动态误差）。

3. 夹紧误差示意

- H 为工件的加工尺寸，当施加夹紧力 F 后，工件将产生变形，设实际的加工尺寸为 H_1 ，则工件的变形量 $y_1 = H_1 - H$ 就是夹紧误差
- 若夹紧误差方向与加工误差方向互相垂直，则夹紧误差造成的加工误差始终为零
- 若夹紧力 F 是变化的，夹紧力最小时引起的夹紧误差不妨仍设为 y_1 ，夹紧力最大时引起的夹紧误差为 y_2 ，则称 $T_c = y_2 - y_1$ 为夹紧精度



4. 影响夹紧误差的因素：设工件—夹具系统的刚度为 K ，工件的刚度为 K_w ，夹具刚度为 K_c ，工件的定位基准面与夹具定位元件的结合部刚度为 K_{j1} ，夹具与机床连接部分的结合部刚度为 K_{j2} ，则

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_w} + \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_{j1}} + \frac{1}{K_{j2}}$$

若夹紧力为 F ，则工件的夹紧误差为： $y = \frac{F}{K}$ 。若夹紧误差 y 是恒定的或有确定性变化规律的，则其属于系统性误差，否则夹紧误差属于随机性误差。

1. 夹紧力对夹紧误差的影响

1. 夹紧力大小的影响：夹紧力越大，夹紧变形越大，夹紧力的确定应符合最小化原则。夹紧力的变化直接影响夹紧精度，从而影响工件加工精度。
2. 采用手动夹紧时，经常出现夹紧力的波动，且产生的夹紧误差是随机性的；当采用自动夹紧时，基本上可以保证夹紧力的稳定，其产生的夹紧误差是系统性误差。
3. 夹紧点数量的影响：增加夹紧点数量，即采用多点夹紧的方式，可有效减小夹紧误差。
4. 夹紧力施加顺序的影响：夹紧点数量较多时，夹紧力施加顺序的不同会导致夹紧误差的不同，对形状复杂、刚性较差的工件尤为显著。

2. 工件 - 夹具系统刚度对夹紧误差的影响

1. 工件 - 夹具系统刚度越大，夹紧误差越小。工件刚度由工件材料、几何尺寸与结构决定。
2. 工件总加工余量不大时，可忽略其几何尺寸改变引起的刚度变化。
3. 工件 - 夹具系统结合部刚度对工件 - 夹具系统刚度影响很大，不能忽略。
4. 夹具中定位元件、夹紧机构和连接元件刚度对其刚度也有显著影响。

4.4.3 夹具的制造误差

1. 夹具定位元件的加工误差和装配误差
2. 夹具与机床连接元件的制造误差
3. 夹具的制造误差应小于工序保证公差的 1/3

4.5 自动化夹具及自动上下料系统

现代夹具的发展方向：

1. 标准化：有利于夹具的商品化生产，有利于缩短生产准备周期，降低生产总成本
2. 精密化：例如用于精密分度的多齿盘，分度精度可达 $\pm 0.1''$ ；用于高精度三爪自定心卡盘，定心精度为 $5\mu\text{m}$
3. 高效化：自动化夹具、高速化夹具和具有夹紧力装置的夹具等。例如，在铣床上使用电动虎钳装夹工件，效率可提高 5 倍左右；在车床上使用高速三爪自定心卡盘，可保证卡爪在试验转速为 9000r/min 的条件下仍能牢固地夹紧工件。
4. 柔性化：组合夹具、通用可调夹具、成组夹具、模块化夹具、数控夹具
5. 智能化：夹具的驱动从液、气朝向机电一体发展，集成夹紧力控制和补偿，动态监测，实时反馈更多的数据给机床

4.5.1 托盘夹具

1. 一种间接输送方式，工件可以在托盘上直接手动装夹，也可以先在夹具上手动装夹，连同夹具一起安装在托盘上。
2. 托盘上的夹具既可以是专用夹具，也可以是通用夹具。
3. 夹具的形式既可以是多工位的夹具，也可以是同一托盘上放置不同夹具，实现机外的离线装夹。

4.5.2 加工自动化与自动上下料系统

1. 自动上下料系统的组成

1. 工件传输装置：
 1. 地面固定传输线：包括滚轮式、链条式等形式，适用于具有良好输送基面工件传输，柔性较差
 2. AGV 小车：具有装卸自动化、充电快捷、使用方便、占地面积小等优点，按导航方式可分为电磁感应导航式、激光导航式、视觉导航式等，按结构可分为叉车式和托盘式等
 3. 衔架机器人 / 机械手：工件被机械手夹持，沿轨道移动
2. 上下料机器人 / 机器手
 1. 工业机器人 / 机械手具有自动化程度高、定位 / 重复定位精度高（微米级）以及响应快速等优点，在自动上下料系统中应用广泛
 2. 按照安装形式不同分为（基座）固定式和移动式两类
 3. 抓取工件方式：
 1. 机器人 / 机械手夹持工件 + 自动定位、夹紧，适合于形状比较规则的工件
 2. 机器人 / 机械手夹持托盘 + 夹具 + 工件，适合于形状不规则的工件，或者在一个托盘中几个相同的工件（在几副相同的夹具中）或几个不同的工件（在几副不同的夹具中）的上下料
3. 控制系统：
 1. 控制终端：主要采用触摸屏作为控制终端，对工件传输装置以及上下料机器人 / 机械手的运动状态进行检测和控制，与主控制器进行信号交换。

2. PLC 控制系统：通过输入输出接口的配置，接收来自终端的控制信号、各种运行信号，与数控机床进行交互，并将这些动作时序信号经 PLC 编程及逻辑解算转换成执行信号，输出到执行部件。
 3. 位置检测与控制系统：由接近开关和位置（速度）传感器组成，对上下料系统运动部件位置检测，对整个上下料过程进行监控。
2. 自动上下料机械手应用示例
1. 采用托盘夹具可以一次装夹多个相同的工件，也可以是不同的工件；托盘夹具和机械手的手爪均采用零点定位器，可以使自动上下料系统具有很高的柔性，因而在单机（数控机床、加工中心）以及自动线上应用越来越广泛。
 2. 自动夹具示例：动力车床卡盘、混合动力卡盘、夹具塔、自动液压夹具
 3. 液压卡钳夹具示例：适用于细长类零件，如飞机长桁零件
 4. 智能夹具：将光纤位置传感器直接植入定位元件之中，从而可以在加工过程中较为精确地测量到工件位置的变化情况，从而对加工精度进行有效地分析
3. 自动上下料与零件传输
1. 上下料：适用于生产线的上下料、工件翻转、工件转序等
 2. 零件传输：适用于产线的工序间传递和存储

CH 5 切削加工工艺过程设计

5.1 切削加工工艺过程设计内涵

5.1.1 生产过程、制造过程、加工过程、装配过程与工艺过程

1. 生产过程：将原材料转变为成品的全过程
2. 制造过程：加工过程 + 装配过程
3. 工艺过程：生产过程中凡是改变生产对象的形状、尺寸、位置和性质等，使其成为成品或半成品的过程
 1. 分类：铸造、锻造、冲压、焊接、机械加工、热处理、装配等工艺过程。
 2. 机械制造工艺过程：零件的机械加工工艺过程和机器的装配工艺过程的总和。
 3. 工艺规程：把合理工艺过程的有关内容写成工艺文件的形式，用以指导生产，这些工艺文件即称工艺规程
4. 机械加工工艺过程：用机床、刀具和夹具，把毛坯加工成合格零件的过程

5.1.2 工序、工步和工作行程

1. 工序：一个（或一组）工人，在一台机床（或一个工作地点），对同一工件（或同时对几个工件）所连续完成的那一部分工艺过程
 1. **按零件装卡定位方式划分工序：**由于每个零件结构形状不同，各加工表面的技术要求也有所不同，故加工时，其定位方式则各有差异。一般加工外形时，以内形定位；加工内形时又以外形定位。因而可根据定位方式的不同来划分工序。
 2. **按粗、精加工划分工序：**根据零件的加工精度、刚度和变形等因素来划分工序时，可按粗、精加工分开的原则来划分工序，即先粗加工再精加工。此时可用不同的机

床或不同的刀具进行加工。通常在一次安装中，不允许将零件某一部分表面加工完毕后，再加工零件的其他表面。

3. **按所用刀具划分工序**：为了减少换刀次数，压缩空程时间，减少不必要的定位误差，可按刀具集中工序的方法加工零件，即在一次装夹中，尽可能用同一把刀具加工出可能加工的所有部位，然后再换另一把刀加工其他部位。在专用数控机床和加工中心中常采用这种方法。
2. 工艺路线：制订工艺过程中，仅列出主要工序名称及其加工顺序的简略工艺过程
3. 工步：在加工表面不变、加工工具不变、切削用量不变的条件下所连续完成的那部分工序
4. 工作行程：也叫走刀，是加工工具在加工表面上加工一次所完成的工步
5. 工位：采用转/移位夹具、回转工作台上加工时，工件在机床上一次装夹后，要在若干位置依次进行加工。工件在机床上所占据的每一个位置上所完成的那一部分工序就称为工位。

5.1.3 装夹与工位

1. 装夹：分为定位和夹紧两部分，由夹具完成
2. 工位：工件在机床上占据每个位置所完成的相应工序

5.1.4 生产类型与加工工艺过程的特点

1. 生产类型
 1. 生产类型的划分依据是产品或零件的年生产纲领
 2. 产品的年生产纲领就是产品的年生产量
$$N = Q \cdot n \cdot (1 + a)(1 + b)$$
3. N ：零件的年产纲领（件/年）； Q ：产品的年产量（台/年）； n ：每台产品中该零件的数量（件/台）； a ：备品率（%）； b ：废品率（%）
2. 按年生产纲领划分生产类型
 1. **单件生产**：单个地生产不同结构和不同尺寸的产品，并且很少重复；
 2. **批量生产**：分批地制造相同的产品，制造过程有一定的重复性。每批制造的相同产品的数量称为批量。根据批量大小，可分为：小批生产、中批生产和大批生产
 3. **大批量生产**：产品数量很大，大多数工作地点经常重复地进行某一个零件的某一工序的加工。
3. 不同生产类型的工艺过程特点
 1. **单件小批生产**：只要制订一个简单的工艺路线
 2. **大批量生产**：应该制订一个详细的工艺规程，详细给出各种工艺参数
4. 产品生产的组织方式
 1. **生产全部零部件、组装机器**：
 1. 优点：容易进行技术积累，形成核心技术
 2. 缺点：市场适应性差，固定资产利用率低
 2. **生产一部分关键的零部件，其余由其它企业供应**：
 1. 优点：专注于关键零部件的开发和制造，具有持续核心技术、市场优势

2. 缺点：配套的零部件质量依赖于供应商
3. **完全不生产零部件，只负责设计及销售：**
 1. 优点：固定投入少，市场适应性好，转产容易
 2. 缺点：没有核心技术和工艺

5.1.5 工艺过程的设计原则及原始资料

1. 总体原则
 1. 保证机器零件的加工或装配质量，达到设计图纸规定的各项技术要求
 2. 应使工艺过程具有较高的生产率，使产品尽快投放市场
 3. 设法降低制造成本
 4. 注意减轻工人的劳动强度，保证生产安全
2. 原始资料：
 1. 产品装配图、零件图
 2. 产品验收质量标准
 3. 产品的年生产纲领
 4. 毛坯材料与毛坯生产条件
 5. 制造厂的生产条件
 6. 设计手册和有关标准

5.2 设计工艺过程的步骤及需要解决的主要问题

5.2.1 设计工艺过程的步骤

1. 分析研究产品的装配图和零件图
 1. 熟悉产品的性能、用途、工作条件，明确各零件的相互装配位置及其作用，了解及研究各项技术条件制订的依据，找出其主要技术要求和关键技术问题
 2. 对装配图和零件图进行工艺审查
 1. 图纸上规定的各项技术指标、技术条件是否合理
 2. 零件的结构工艺性是否合理
 3. 图纸上是否缺少必要的尺寸、视图或技术条件
 3. **零件的结构工艺性：**零件的结构工艺性是指所设计的零件在满足使用要求的前提下，制造的可行性和经济性
 1. 判断零件结构工艺性优劣的标准：1) 能否便于加工；2) 能否用经济的方法加工
 2. 评价零件结构工艺性需注意的几个方面：1) 零件表面的加工量及加工成本的大小；2) 不同生产类型和加工条件对结构工艺性的要求也不相同
2. 确定毛坯
 1. 审查毛坯的材料选择及制造方法是否合适，从工艺的角度对毛坯制造提出要求：装夹、加工余量、结构工艺性

2. 根据生产纲领和毛坯的具体加工条件来解决毛坯的制造和成本之间的矛盾：质量、加工劳动量、材料利用率、成本
 3. 充分注意到利用新工艺、新技术、新材料的可能性。如：进近成形
3. 拟定工艺路线，确定定位基面
 1. 确定加工方法
 2. 安排加工顺序
 3. 确定定位夹紧方法
 4. 安排热处理、检验及其他辅助工序（去毛刺、倒角等）
 4. 确定各工序所采用的设备
 5. 确定各工序所采用的刀、夹、量具和辅助工具
 6. 确定各主要工序的技术要求及检验方法
 7. 确定各工序的加工余量，计算工序尺寸和公差
 8. 确定切削用量
 9. 确定工时定额
 10. 技术经济分析
 11. 填写工艺文件

5.2.2 设计工艺过程需要解决的主要问题

1. 定位基准选择

1. 三个基准：

1. **粗基准**：第一道工序，只能使用毛坯的某个表面作为定位基准，称为粗基准（粗基面或毛基面）
2. **精基准**：以后工序，可采用已加工过的表面作为定位基面，称为精基准（精基面或光基面）
3. **辅助基准**：工件上没有能作为定位基面的恰当表面，需在工件上专门加工出定位基面，称为辅助基面

2. 三个问题：

1. 用哪一个表面作为加工时的精基面，才有利于经济合理地达到零件的加工精度要求？
2. 为加工出上述精基面，应采用哪一个表面作为粗基面？
3. 是否有个别工序为了特殊的加工要求，需要采用第二个精基面？

3. 两个要求：

1. 各加工表面有足够的加工余量；
2. 定位基面应有足够大的接触面积和分布面积。

4. 粗基准的选取原则：**选取粗基面的目的和重点是保证各加工表面有足够的余量，使不加工表面与加工表面间的尺寸、位置满足要求**

1. **合理控制加工余量的原则**：如果必须首先保证工件某重要表面的余量均匀，就应该选择该表面作为粗基面
2. **保证工件上加工表面与不加工表面之间的位置精度要求的原则**：应以不加工表面作为粗基面；

3. **便于装夹的原则**: 为使工件定位稳定、夹紧可靠, 所选粗基准面应尽可能平整、光洁, 不允许有锻造飞边、铸造浇冒口切痕、分型面等;
4. **粗基准一般不能重复使用的原则**: 同一尺寸方向上的粗基准通常只允许使用一次。是指毛坯面作为主要定位基准不能重复使用, 作为第二、第三定位基准仍可使用。
5. 精基准的选取原则: **选取精基准的目的和重点是减少误差, 提高定位精度**
 1. **基准重合原则**: 尽可能选用设计基准作为定位基准
 2. **统一基准原则**: 应尽可能选用统一的定位基准加工各表面, 以保证各表面间的位置精度, 简化夹具设计
 3. **互为基准原则**: 两个加工表面位置精度要求高、加工余量较小时, 可采用两个表面互为基准、反复加工
 4. **自为基准原则**: 当表面的精加工工序要求加工余量小而均匀, 以保证加工质量和提高生产率, 这时就以加工面本身作为精基准

2. 加工方法的选择

1. 根据每个加工表面的技术要求, 确定加工方法及分几次加工;
2. 考虑被加工材料的性质;
3. 考虑到生产类型, 即要考虑生产率和经济性的问题;
4. 考虑本厂(或本车间)的现有设备情况及技术条件。

3. 加工阶段的划分

1. 三个阶段

1. 粗加工阶段: 在这一阶段要切除较大的加工余量, 主要问题是如何获得高的生产率;
2. 半精加工阶段: 在这一阶段应为主要表面的精加工作好准备, 并完成一些次要表面的加工, 一般在热处理之前进行;
3. 精加工阶段: 保证各主要表面达到图纸规定的质量要求;
4. 光整加工阶段: 对于精度要求很高、表面粗糙度值要求很小($\leq IT6$, $Ra \leq 0.32\mu m$) 的零件, 还要有专门的光整加工阶段。

2. 划分加工阶段的原因:

1. 零件的加工质量要求
2. 合理使用机床设备
3. 在机械加工工序中插入必要的热处理工序, 使热处理发挥充分的效果

3. 划分加工阶段带来的有利条件:

1. 粗加工各表面后可及早发现毛坯的缺陷并得到及时处理
2. 精加工表面的工序安排在最后, 可保护这些表面少受损伤或不受损伤

5.3 加工顺序的制定准则

5.3.1 制定加工顺序的基本原则

1. 切削加工工序

1. **先基准后其它**: 先加工定位基准面, 再加工其它表面

2. **先面后孔**: 一个零件, 如箱体类零件, 其上有平面时, 总是先进行平面加工再进行其他面的加工, 这样主要也是为了基准的确定。对于轴类零件, 因其没有重要的平面, 根据先基准后其他原则, 先加工出中心孔。
 3. **先主后次**: 先安排主要表面的加工, 后安排次要表面的加工
 4. **先粗后精**: 先安排粗加工, 中间安排半精加工, 最后安排精加工和光整加工
2. 热处理工序
1. **预备热处理**: 安排在切削加工之前, 以改善切削性能、消除毛坯制造时的内应力为主要目的;
 2. **去除内应力处理**: 安排在粗加工之后, 精加工之前。
 3. **最终热处理**: 安排在半精加工以后和磨削加工之前, 主要用于提高材料的强度和硬度;
3. 辅助工序
1. 检验工序—主要的辅助工序, 它是保证产品质量的重要措施。
 2. 在下列情况下, 还需安排单独的检验工序:
 1. 粗加工阶段结束之后
 2. 重要工序之后
 3. 零件从一个车间转到另一个车间时
 4. 特种性能(磁力探伤、密封性等)检验之前
 5. 零件全部加工结束之后

5.3.2 考虑内应力释放的加工顺序安排原则

1. **残余应力**: 当外部载荷去除后, 仍残存在工件内部的应力。
 1. 形成原因:
 1. 材料内部的不均匀塑性变形产生的残余应力
 2. 材料内部的不均匀温度场分布产生的残余应力
 3. 材料内部金相组织变化产生的残余应力
 2. 测量方法
 1. 有损检测法: 盲孔法、裂纹柔度法、剥层法
 2. 无损检测法: X射线衍射法、磁测法、超声法
2. **残余内应力**: 毛坯制造中产生的内应力
 1. 在铸、锻、焊、热处理等加工过程中, 由于各部分冷热收缩不均匀以及金相组织转变的体积变化, 使毛坯内部产生了相当大的内应力。
 2. 毛坯的结构愈复杂, 各部分的厚度愈不均匀, 散热的条件相差愈大, 则在毛坯内部产生的内应力也愈大。
 3. 有内应力的毛坯暂时处于相对平衡的状态, 在短时期内还看不出有什么变动。但在切削去某些表面部分后, 就打破了这种平衡, 内应力重新分布, 零件就明显地出现了变形。
3. **过优化加工顺序减小残余应力的影响**:
 1. **等高逐层递减的模式均匀化去除材料**: 应力可以得到充分释放, 减少最终变形。
 1. 单面多腔结构: 通过跳跃式加工来减小变形

2. 双面特征结构：通过双面对称加工减小变形
2. **基于应力水平分区域加工**：先加工低应力、应力变化较小的区域，再加工高应力、应力变化剧烈区域。
3. **预设应力释放槽**：
 1. 开槽后内部残余应力的平衡状态被打破，整体构件的初始残余应力由于开槽而释放，宏观表现为翘曲变形
 2. 在开槽毛坯背面进行加工，加工时背面残余应力释放，引起的变形将会抵消之前开槽引起的变形，降低整体构件内部的残余应力水平，最终减小构件的变形。

5.4 加工路线的指定准则

5.4.1 走刀路线的确定原则

1. 保证产品质量，应将保证工件的加工精度和表面粗糙度要求放在首位。
2. 在保证工件加工质量的前提下，应力求走刀路线最短，并尽量减少空行程时间，提高加工效率。
3. 在满足工件加工质量、生产效率等条件下，尽量简化数学处理的数值计算工作量，以简化编程工作。

5.4.2 加工路线的确定方法

1. 保证零件的加工精度和表面粗糙度
 1. 合理的切入切出点
 2. 最终轮廓一次连续走刀完成
 3. 考虑机床联动精度的加工路径
2. 寻求最短加工路线，减少刀具空行程，提高加工效率
 1. 巧用起刀点
 2. 巧排空行程路线：对于位置精度要求较高的孔系加工，特别要注意孔的加工顺序安排，安排不当时，有可能将坐标轴的反向间隙带入，直接影响位置精度。
3. 简化编程原则
 1. 对曲率变化不大和精度要求不高的曲面粗加工
 2. 对曲率变化较大和精度要求较高的曲面精加工，常用三轴联动插补的行切法加工
 3. 对于叶轮螺旋桨这样的零件，因其叶片形状复杂，刀具容易与相邻表面发生干涉，常用五轴联动加工

5.5 加工参数的制定准则

5.5.1 如何进行工艺过程设计

1. 工艺过程设计
 1. 目的：优质、高效、低成本

2. 约束：加工精度、成本
3. 变量：加工顺序、加工路径、加工参数
4. 优化内容：
 1. 表面粗糙度：切削振动（受 **加工参数** 影响）
 2. 尺寸精度：刀具和工件受力变形
 3. 位置和形状轮廓精度：多轴联动误差（受 **加工路径** 影响）；内应力引起的变形（受 **加工顺序** 影响）
5. 优化方法：
 1. 黄金分割法，梯度下降法
 2. 启发式算法：遗传算法、粒子群法
 3. 随机搜索法
2. 将“多目标”转化成“单目标+多约束”：在满足加工精度和成本要求的前提下实现加工效率最大化
3. 加工效率：材料去除率：单位时间内的材料切除体积
 1. 刨削： $f_{MRR} = a_c a_w f_v / 1000$
 2. 车削： $f_{MRR} = \frac{v}{2000} \left(\frac{(dm/2+a_c)^2}{dm/2} - \frac{dm}{2} \right) \times a_w$
 3. 铣削： $f_{MRR} = N_t f_t n a_c a_w / 1000$
4. 增大加工参数可以提高效率，但其又受到约束的制约

5.5.2 加工参数选取的切削静力学准则

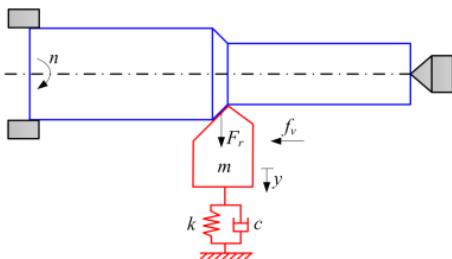
工艺系统受力变形对尺寸精度的影响

1. 细长轴工件的受力变形
2. 工艺系统的受力变形
 1. 工件受力变形，产生尺寸误差；
 2. 工艺系统刚度随受力点位置发生变化；
 3. 不同受力点位置处误差不相同
3. **均衡工艺系统的受力**：车削外圆零件时，为减小径向力引起的变形，采用前后双刀架“对刀”切削，可使径向切削力相互抵消。

5.5.3 加工参数选取的切削动力学准则

1. 约束为强迫振动：振动力学方法

■ 约束：强迫振动



✓ 切削动力学方程:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_r(t)$$

✓ S域变换:

$$ms^2y(s) + csy(s) + ky(s) = F_r(s)$$

✓ S域传递函数:

$$H_{y/F_r}(s) = \frac{y(s)}{F_r(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k}$$

✓ 频域传递函数:

$$\begin{aligned} H_{y/F_r}(i\omega) &= \frac{y(i\omega)}{F_r(i\omega)} = \frac{1}{m(i\omega)^2 + ci\omega + k} \\ &= \frac{1}{-m\omega^2 + ci\omega + k} \end{aligned}$$

2. 约束为自激振动:

1. 是一种由系统本身产生的激励所维持的非线性振动，激励力来源于系统本身的运动，而不是外在施加的
2. 力影响振动，振动影响实际切削参数，进而又影响力

5.6 数控加工工艺过程

5.6.1 数控加工程序的编制——手工编制G代码

1. 分析零件图纸及制定加工工艺

1. 安排工序时，尽量将同一把刀具加工的内容集中完成，以节省换刀的时间。
2. 用相同定位与装夹方式的工序也尽可能连续进行，以减少重复定位次数。
3. 在确定加工顺序时，一般遵循基准先行（首先加工在后续工序中要作为基准的表面）、先主后次（优先加工对尺寸、位置精度要求较高的表面）、先粗后精（按各表面统一粗加工、精加工的顺序进行，而非把某个表面的粗精加工都完成后再去加工其他表面）、先面后孔（先加工平面再加工孔，这样有利于提高孔的位置精度，并避免产生孔口毛刺）、先内后外（内外表面都需要加工时，由于内表面的加工更为困难，先进行内、外表面的粗加工，后进行内、外表面的精加工）、保证刚性（先安排对工件刚性破坏较小的工序）的原则。

2. 刀轨计算

1. 规划刀具运动轨迹时，应合理规划走刀路线，选择最短的安全路线到达各个加工部位，以减少刀具的无效加工时间。
2. 切入切出时，要注意进刀、退刀方向与零件外轮廓相切，防止在零件表面留下凹坑。
3. 在规划路径时，一般遵循先近后远的原则，即先加工离起刀点近的部位的加工，后安排离得远的部位的加工，以减少刀具的空行程。
4. 在规划孔系加工路径时，需要注意进给系统的反向间隙，尽量使有位置精度要求的孔系中每个孔加工前刀具运动方向一致。

3. 加工程序编制

1. 根据刀位数据编写G代码，并根据工艺需要加入M代码辅助加工。

2. 不同的数控系统，其数控加工程序的格式并不一定相同。这就要求手工编程的人员充分熟悉所使用的机床的功能、指令、程序格式。
3. 粗加工时，为提高加工效率，在机床刚度允许的情况下应选择较大的切深。对于精度和表面质量要求高的情况，应选择较小的切深，并为后续的工序留出足够的余量。
4. 进给速率根据零件的表面质量要求选取。对于表面粗糙度要求低的零件可选择较大的进给速率。在接近轮廓拐角处，可逐渐降低进给速率；切出拐角后逐渐增加进给速率，以获得更好的轮廓加工质量。

5.6.2 数控加工工艺过程仿真

加工过程仿真的意义：几何和运动学仿真，检查加工过程是否干涉、过切、欠切

1. **数控加工程序编制：**手工编程通常耗时长且容易出现错误，对于形状复杂的零件，手工编程就具有一定难度，此时更适宜采用自动编程。以UG为例对NAS件进行自动编程。
2. **NAS件加工工艺仿真：**数控加工程序生成后，用仿真软件(如VERICUT)进行加工过程的仿真，可检验加工过程中是否存在干涉、碰撞等问题，以提高零件的试切成功率，减少废品，同时还可以对程序进行优化，提高生产效率，提升零件表面质量。
 1. **调用仿真用的机床环境：**由于NAS试件是三轴机床检测试件，因此需要构造一个具有X、Y、Z三个直线轴的数控机床模型。
 2. **调用仿真用的控制系统：**确定好数控机床后，还需要确定机床控制系统，常用数控系统有FANUC、Siemens、华中数控等。
 3. **调用或创建仿真用的毛坯和工装夹具：**
 1. 在较大的毛坯中间铣出来NAS试件，这样就可以通过螺钉压板对毛坯周边进行装夹；
 2. 选用能包住NAS件的较小的毛坯，沿周边铣出凸台，再用螺钉压板进行装夹。
 3. 现场用的较多的是第一种。创建好夹具后，依据NAS件尺寸大小创建毛坯。
 4. **调用或创建仿真用的刀具库：**在导航器内单击加工刀具并选择对应的刀具，再对装夹点等参数进行设置。
 5. **调用仿真用的数控程序：**在项目树中选择“数控程序”，在配置程序窗口中点击“添加NC程序文件”按钮，在弹出窗口中选择上节通过UG自动编程生成的G代码。
 6. **加工过程仿真：**所有参数设置完成后，单击重置模型并进行仿真。

5.6.3 形成工艺文件

1. 工艺规程：采用数控机床加工零件时所运用的各种方法和技术手段的总和即数控加工工艺，把工艺过程的各项内容归纳写成文件形式
2. 工艺文件尚无统一的格式，并且同一种工艺文件由于来源不同，它的内容也可能大同小异

5.7 加工工艺过程质量检测、监测与分析

5.7.1 质量检测/监测的目的

- 在线实时监测：**通过对监测数据的处理、分析，正确地诊断出导致超差或不合格的原因，然后通过在线实时调整，从而保证后续的加工能达到合格。
- 加工后的检测：**通过数据的处理，同样要分析产生超差或不合格的原因，然后通过对切削加工工艺系统的重新调整，保证加工时不出现超差品或少出现超差品。

5.7.2 质量数据采集

- 手动检测及数据采集**
 - 游标卡尺、千分表、百分表、塞规量规
 - 测量一个数据后，由测量人员人工记录
- 自动检测及数据采集**
 - 气动量仪、电感测量仪、激光测量仪
 - 从检测仪器设备的RS232串口中采集数据
 - 从检测设备的PLC中获取数据
 - 与其他系统建立接口读取数据，如MES系统
- 检测内容：**
 - 尺寸/形状/位置精度
 - 外观/表面检测
 - 密封性检测
 - 缺陷检测
 - 电流信号
 - 振动信号

5.7.3 质量数据分析方法

5.7.3.1 点图法

- 要点：**按加工的先后顺序作出尺寸的变化图，以暴露整个加工过程中误差变化的全貌。
- 具体方法：**按工件的加工顺序定期测量工件的尺寸，以其序号为横坐标，以量得的尺寸为纵坐标，则可得到如图所示的点图。
- 工艺的稳定性：**从数理统计的原理来说，一个过程(工序)的质量参数的总体分布，其平均值 \bar{x} 和均方根差 σ 在整个过程(工序)中若能保持不变，则称工艺是稳定的。
 - 为验证工艺的稳定性，需要应用 \bar{x}_i 和 R_i 两张点图。 \bar{x}_i 是将一批工件依照加工顺序分成 m 个为一组、第 i 组的平均值，共 K 组； R_i 是第 i 组数值的极差 ($x_{\max} - x_{\min}$)。两张图常常合在一起应用，通称为 $\bar{x} - R$ 图。
 - 在 $\bar{x} - R$ 图上分别画出中心线和控制线，控制线就是用来判断工艺是否稳定的界限线。

$$\bar{x} \text{图的中心线 : } \bar{\bar{x}} = \sum_{i=1}^K \frac{\bar{x}_i}{K}$$

$$R \text{图的中心线 : } \bar{R} = \sum_{i=1}^K \frac{R_i}{K}$$

$$\bar{x} \text{图的上控制界限 : } UCL = \bar{\bar{x}} + A\bar{R}$$

$$\bar{x} \text{图的下控制界限 : } LCL = \bar{\bar{x}} - A\bar{R}$$

$$\bar{R} \text{图的上控制界限 : } UCL = D\bar{R}$$

$$\bar{R} \text{图的下控制界限 : } LCL = 0$$

4. 控制图异常识别

正 常 波 动	异 常 波 动
1. 没有点子超出控制线 2. 大部分点子在中线上下波动，小部分在控制线附近 3. 点子没有明显的规律性	1. 有点子超出控制线 2. 点子密集在中线上下附近 3. 点子密集在控制线附近 4. 连续 7 点以上出现在中线一侧 5. 连续 11 点中有 10 点出现在中线一侧 6. 连续 14 点中有 12 点以上出现在中线一侧 7. 连续 17 点中有 14 点以上出现在中线一侧 8. 连续 20 点中有 16 点以上出现在中线一侧 9. 点子有上升或下降倾向 10. 点子有周期性波动

1. 只有随机的波动，属正常波动，这表明工艺过程是稳定的；
2. 异常波动，这表明工艺过程是不稳定的。一旦出现异常波动，就要及时寻找原因，使这种不稳定的趋势得到消除

5. 点图法特点：

1. 所采用的样本为顺序小样本
2. 能在工艺过程进行中及时提供主动控制的资料
3. 计算简单

5.7.3.2 分布曲线法

1. 基础概念

1. 尺寸分散：抽查件数为 n 。测量时发现它们的尺寸是各不相同的，这种现象称之为尺寸分散。
2. 分散原因：分散范围中心与公差带中心不重合
3. 改善：设法将分散中心调整到与公差范围中心重合
 1. 减小系统性误差：对前者可以把砂轮和导轮间的距离调整得小一些；
 2. 减小随机性误差：对后者就不是调整方法可以解决的，这时就要全力去找出随机性误差过大的原因。
3. 尺寸分散过大是由于毛坯误差复映造成的，根据复映系数随着磨削次数增加而递减的原理，可以增加一次贯穿磨削，这样做当然要增加费用，降低生产率。
4. 冷挤压新工艺：使毛坯误差大大降低，可从根本上解决这个问题

4. 两种曲线：

1. 实际分布曲线：在绘制一批工件的尺寸分布图时，若所取的工件数量增加而尺寸间隔取得很小时，则作出的折线图就非常接近光滑的曲线，这就是所谓实际

分布曲线。

2. 理论分布曲线：概率论中随机变量分布的典型的概率密度曲线称为“理论分布曲线”。如正态分布、均匀（平顶）分布、瑞利分布（偏态分布）等。

5. 正态分布曲线：

1. 特点：

1. 钟形，中间高，两边低。表示尺寸靠近分散中心的工件占大部分，远离分散中心的是极少数。
 2. 工件尺寸大于 \bar{x} 和小于 \bar{x} 的同间距范围内的频率是相等的。
 3. 表示正态分布曲线形状的参数是 σ
 4. σ 越大，曲线越平坦，尺寸越分散，加工精度越低； σ 越小，曲线越陡峭，尺寸越集中，加工精度越高
2. 6σ 的大小代表了某一种加工方法在规定的条件下(毛坯余量、切削用量、正常的机床、夹具、刀具等)所能达到的加工精度。所以在一般情况下应该使公差带的宽度 T 和均方根误差 σ 之间具有下列关系：

$$T \geq 6\sigma$$

3. 正态分布曲线还常用来进行工艺能力(工序能力)的计算。所谓工艺能力是用工艺能力系数 C_p 来表示的，它是公差范围和实际加工误差之比，即：

$$C_p = \frac{T}{6\sigma}$$

6. 其他分布曲线：在机械加工或装配中，工件实际尺寸（误差）的分布并不是正态分布

1. 两次调整下加工的零件尺寸分布曲线
2. 砂轮磨损下加工的零件分布曲线
3. 几何误差分布曲线

2. 系统误差的计算：

$$\Delta_{\text{系统}} = |\text{公差范围中心} - \text{分散范围中心}|$$

3. 批量加工过程的合格品率和不合格品率的计算：

$$\text{合格率} = F\left(\frac{x_{\max} - \bar{x}}{\sigma}\right) + F\left(\frac{|x_{\min} - \bar{x}|}{\sigma}\right)$$

$$\text{不合格率} = 1 - \text{合格率}$$

5.7.3.3 C_{pK} 与 C_{mK} 的用途及计算

1. 过程能力指数 C_{pK}

1. 工艺能力系数 C_p 只能表示是在过程的平均值和目标值重合的情况下。但是在实际生产应用中目标值和平均值重合的情况很少。
2. 可以利用过程能力指数 C_{pK} 来表征产品的加工质量与要求相吻合的程度
3. 过程能力是指工序处于稳定状态期间生产出的产品满足加工质量要求的能力，不仅显示过程中实际加工误差和公差 T 之间的关系，还关注过程中加工尺寸的均值是否偏

离公差 T 的中间值。

4. 计算：

$$C_{pK} = \frac{\min(USL - \bar{X}, \bar{X} - LSL)}{3\sigma}$$

USL ：加工公差上限； LSL ：加工公差下限

5. 使用方法：

$C_{pK} > 1.67$ ， 说明过程能力充分，考虑降低成本； ↵

$1.67 \geq C_{pK} > 1.33$ ， 说明过程能力理想，可以维持现状； ↵

$1.33 \geq C_{pK} > 1.00$ ， 说明过程能力正常，可以尽量改进； ↵

$1.00 \geq C_{pK} > 0.67$ ， 说明过程能力不足，必须提升能力； ↵

$0.67 \geq C_{pK}$ ， 说明过程能力严重不足，必须进行全面整改。

一般 C_{pK} 要求要大于 1.33。 ↵

2. 临界机器能力指数 C_{mk}

1. 仅考虑设备本身的影响，同时考虑分布的平均值与规范中心值的偏移，是衡量设备稳定运行的一个指标。
2. 由于仅考虑设备本身的影响，因此在采样时对其他因素要严加控制，尽量避免其他因素的干扰
3. 其计算公式与Cpk相同，只是取样不同
4. 使用方法：

根据 C_{mk} 值的大小，机器能力可以分为以下三个等级：

$C_{mk} > 1.67$ ，说明设备能力足够；

$1.67 \geq C_{mk} > 1.33$ ，说明设备能力尚可；

$1.33 \geq C_{mk}$ ，说明设备能力不足，必须进行改进。

一般 C_{mk} 要求应大于 1.67。

3. 采样方法对比：

1. C_{pK} 是描述整个过程或者说长时间过程的稳定性，采样100组
2. C_{mk} 是描述短过程稳定性的，特别是对新机床加工过程稳定性，一般采样25组，每组数据4-5个

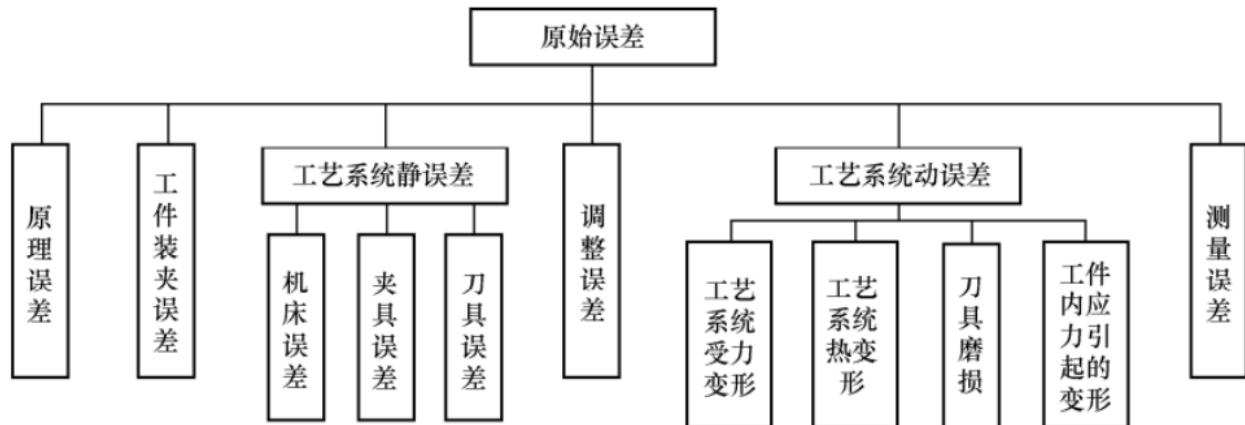
5.7.4 减小加工误差的基本思路和方法

1. 加工误差的性质：

1. 系统性误差——连续加工一批零件时，误差的大小和方向保持不变，或按一定的规律而变化。

1. 前者称为常值系统性误差（机床、刀具制造误差等）
2. 后者称为变值系统性误差（机床热变形，刀具磨损）
2. 随机性误差——在加工一批零件中，误差的大小和方向无法预知。
 1. 毛坯误差（余量大小不一，硬度不匀等）的复映、定位误差（基准面尺寸不一，间隙影响等）、夹紧误差（夹紧力大小不一）、多次调整的误差、内应力引起的变形误差等等都是随机性误差。

2. 机床工艺系统原始误差分类



3. 两种误差的处理方法：

1. 系统性误差

1. 常值性系统误差：可通过相应的调整或检修工艺装备的办法来解决，如：可以通过重新调整刀具的起始加工位置加以消除；
2. 变值性系统性误差：可通过自动连续补偿、自动周期补偿等办法来解决，磨床上对砂轮磨损和砂轮修正的自动补偿；机床热变形则采用空车运转使机床达到热平衡后再加工的方法来减少热变形的影响。
2. 随机性误差——不能消除，只能采取工艺措施来减小：提高毛坯制造精度、提高系统动静刚度、工艺过程主动控制等。

CH 6 机器装配工艺基础

6.1 机器装配概述

6.1.1 机器装配的概念

1. 定义：按照规定的技术要求，将零件或部件进行配合和连接，使之成为机器的过程。
2. 零件是组成机器的最基本装配单元。
3. 装配单元等级：零件、合件、组件、部件和机器
 1. 零件：组成机器的基本元件
 2. 合件：可以是若干零件永久连接，或者是连接在一个“基准零件”上少数零件的组合
 3. 组件：一个或几个合件和几个零件的组合
 4. 部件：一个或几个组件、合件或零件的组合
 5. 机器：或叫产品，是由上述全部装配单元结合而成的整体

6.1.2 装配工作的基本内容

1. 准备阶段

1. 清洗：去除制造、储藏、运输过程中所黏附的切屑、油脂和灰尘，刮削、运转磨合后也需进行清洗，对保证和提高机器装配质量，延长产品使用寿命有着重要意义
2. 平衡：包括静平衡和动平衡两种方法，对直径大、长度小者一般只需进行静平衡，对于长度较大者则需进行动平衡，方法包括钻、锉刮、螺纹连接、铆接、补焊等方法

2. 装配阶段

1. **刮削：**机床导轨面、密封结合面、内孔、轴承或轴瓦以及蜗轮齿面等较多采用该方法。刮削切削量、切削力小，热量产生、装夹变形小，用具简单、操作灵活、不受工件形状和位置及设备条件的限制且精度高，但刮削工作的劳动量大，需要操作工人具有一定工作经验
2. **过盈连接：**轴、孔的配合连接较多采用该方法。常用压入装配、温差装配和可拆性的液压套装装配方法，对于过盈连接件，在装配前应清洗洁净，包容件与被包容件相对位置要求准确，且过盈量需符合规定。
3. **螺纹连接：**应用最广泛的装配方法之一。常见形式有螺栓连接、双头螺柱连接、螺钉连接、自攻锁紧螺钉连接等，其装配质量除受到加工精度的影响外，与装配技术有很大关系。对于重要的螺纹连接，必须规定预紧力的大小。
4. **校正：**通过各零部件间相互位置的找正、找平及相应的调整工作，以消除加工、装配过程中产生的形位公差。一般用于大型机械的基本件装配和总装配中，常用校正的方法有平尺/角尺/水平仪校正、拉钢丝校正、光学校正，近年来又有激光校正等方法。

3. 后期阶段

1. 对重大产品部装、总装后，还需要进行运转试验，以保证机器的运转安全
2. 常见的运转检测有：运动副的啮合间隙和接触情况，过盈连接、螺纹连接的准确性和牢固情况，各种密封件和密封部位的装配质量

6.1.3 机器装配生产类型及特点

1. 装配工艺的选择需根据产品结构、零件大小、制造精度、生产批量等因素，选择装配工艺的方法、装配的组织形式和装配自动化的程度
2. 机器装配的生产类型按装配工作的生产批量大致可分为**大批量生产、批量生产、单件生产**三种
3. 不同的生产类型，装配工作的特点都有其内在的联系，装配工艺方法亦各有侧重

4. 特点：

生产类型	大批量生产	批量生产	单件生产
装配工作特点	产品固定，生产活动经常反复，生产周期一般较短	产品在系列化范围内变动，分批次交替投产或多品种同时投产，生产活动在一定时期内重复	产品经常变换，不定期重复生产，生产周期一般较长
组织形式	多采用流水装配线，有连续移动、间隔移动及可变节奏等移动方式，还可采用自动装配机或自动装配线	笨重、批量不大的产品多采用固定流水装配，批量较大时采用流水装配，多品种平行投产时采用多品种可变节奏流水装配	多采用固定装配或固定式流水装配进行总装，同时对批量较大的部件亦可采用流水装配
装配工艺方法	按互换法装配，允许有少量简单的调整，精密偶件成对供应或分组供应装配，无任何修配工作	主要采用互换法，但灵活运用其他保装配精度的装配工艺方法，如调整法、修配法	以修配法及调整法为主，互换件比例较少及合并法以节约加工费用
工艺过程	工艺过程划分很细，力求达到高度的均衡性	工艺过程的划分需适合于批量的大小，尽量使生产均衡	一般不制定详细工艺文件，工序可适当调度，工艺也可灵活掌握
工艺装备	专业化程度高，宜采用专用、高效工艺装备，易于实现机械化、自动化	通用设备较多，但也采用一定数量的专用工装、夹具、量具，以保证装配质量和提高工效	一般通用设备及通用工装、夹具量具
手工操作要求	手工操作占比小，熟练程度容易提高，便于培养新工人	手工操作占比不小，技术水平要求较高	手工操作比例大，要求工人有高的技术水平和多方面的工艺知识
应用实例	汽车、拖拉机、内燃机、滚动轴承、手表、机床、机车车辆、中小型锅炉、矿山采掘机械	重型机床、重型机器、汽轮机、大型内燃机、大型锅炉	

6.1.4 装配工艺过程设计

1. 基本原则：

1. 保证产品装配质量，并力求提高其质量。
2. 钳工装配工作量尽可能小。
3. 装配周期尽可能缩短。
4. 所占车间生产面积尽可能小，也就是力争单位面积上具有最大生产率。

2. 装配工艺过程设计步骤

1. 产品分析。
2. 研究产品图纸和装配时应满足的技术要求。
3. 对产品结构进行“工艺分析”与“尺寸分析”。
4. 将产品分解为可以独立进行装配的“装配单元”。
5. 结构装配工艺性要求：
 1. 机器结构能被分解成若干独立的装配单元。
 2. 装配中的修配工作和机械加工工作应尽可能少。
 3. 装配与拆卸都方便

3. 装配组织形式的确定

1. 分为固定式和移动式，
2. 主要取决于产品结构特点（尺寸大小与质量等）和生产批量。

4. 装配工艺方法及设备的确定

1. 根据机械结构及其装配技术要求确定装配工作内容，并选择合适的装配工艺及相应的设备或工装、夹具、量具。

5. 装配顺序的确定

1. 包括合件、组件、部件装配和机器的总装配过程。
2. 原则：有利于保证装配精度，以及使装配连接、校正等工作能顺利进行。
3. 一般规律：先下后上，先内后外，先难后易，先重大后轻小，先精密后一般

6. 装配工艺规程文件的整理与编写

1. 在装配单元系统图基础上，结合装配工艺方法及顺序，绘制装配工艺流程图。

2. 分别绘制各级装配单元的流程图和一张总装流程图。

6.2 装配的性能要求及工艺方法

6.2.1 装配精度保证与装配尺寸链

6.2.1.1 互换法

1. 在装配过程中，同种零件互换后仍能达到装配精度要求的装配方法。
2. 包括完全互换法和不完全互换法。
3. 互换法的实质和关键是要控制零件加工误差，从而保证装配精度。
4. 完全互换法：

$$\delta_0 \geq \sum_{i=1}^n \delta_i, \quad \delta_0 : \text{装配公差}; \quad \delta_i : \text{各零件制造公差}$$

1. 条件：各有关零件的公差之和小于或等于装配公差
2. 装配精度高时加工成本高
5. 不完全互换法：

$$\delta_0 \geq \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}$$

1. 条件：有关零件公差值平方之和的平方根小于或等于装配公差
2. 相较完全互换法，加工更为经济
6. 装配尺寸链
 1. 有极值法和概率法两种计算方法
 2. 最短路线原则，须做到“一件一环”
7. 计算：书P282 例6.1

6.2.1.2 选配法

选配法是将配合件中各零件仍按经济精度制造，然后选择合适的零件进行装配，以保证装配精度的一种装配方法。

1. 直接选配法：由装配工人在许多待装配的零件中，凭经验挑选合适的互配件装配在一起。
2. 分组选配法：事先将互配零件测量和分组，装配时按对应组进行装配，以达到装配精度要求。
 1. 优点：零件公差要求不高时，可获得较高装配精度；同组内零件可互换
 2. 缺点：增加了零件存储量，增加了零件的测量、分组工作并使其存储、运输工作复杂化。
 3. 注意事项：
 1. 配合件公差应相等

2. 配合件粗糙度、形位公差保持原设计要求
3. 保证分组装配中都能配套
4. 分组数不宜过多
5. 严格组织测量、分组、识别、保管、运输工作
3. 复合选配法：直接选配法与分组选配法的复合形式，即零件预先测量、分组，装配时再在各对应组中凭工人经验直接选配。

6.2.1.3 修配法

1. 定义：在零件上预留修配量，在装配过程中用手工挫、刮、研等方法修去多余部分材料，使装配精度满足技术要求。
2. 注意事项：
 1. 正确选择修配对象
 2. 应该通过计算，合理确定修配件的尺寸及其公差，既要保证它有足够的修配量，又不要使修配量过大

6.2.1.4 调整法

1. 定义：用一个可调整的零件，在装配时调整它在机器中的位置或增加一个固定尺寸零件（如垫片、垫圈、套筒等）以达到装配精度。
2. 分为可动补偿件调整法和固定补偿件调整法。

6.2.2 结合面装配刚度保证方法

1. 固定结合面
 1. 主要通过螺纹连接实现，包括螺栓-螺母连接和螺钉-螺孔连接，结合部的连接刚度包括结合面的接触刚度和螺钉连接刚度
 2. 刚度计算：

$$k_n = \alpha \cdot p_e^\beta, \quad K_n = 1 \times 10^6 \cdot k_n \cdot S_e$$

2. 动结合部
 1. 常见的有轴承副、丝杠-螺母副、导轨-滑块副、滑动导轨、静压导轨、静压丝杠副等。
 2. 轴承副刚度受预紧力等因素影响；丝杠-螺母副轴向刚度直接影响进给系统动态性能，主要受结构类型、预紧方式和轴向载荷影响；导轨-滑块副主要包括弯曲刚度和扭转刚度两方面指标。

6.2.3 无应力/小应力装配

1. **精益化工艺补偿**：为避免零件强迫装配产生装配应力，需采用工艺补偿措施，对配合特征的几何不协调进行修正。
 1. 针对A350复材机翼壁板：

1. 对翼壁板与翼肋的配合面外形进行快速、精确测量，并拟合配合面间隙和干涉的三维形状数据
 2. 根据形状数据生成柔性机器人末端执行器运动轨迹，在零件表面对应干涉处进行自动铣削
2. **基于力控制的装配策略：**在装配过程中，通过限制零件所受的装配应力值来进行装配的方法，被称为基于力控制的装配策略。

6.2.4 其他装配性能要求

1. 选用合适的密封材料：常用密封材料有橡胶、塑料、金属、密封胶等。
2. 合理配合，均匀压紧：螺纹连接时压紧度不够时会引发泄漏或丧失压紧。
3. 采用合理的密封结构

6.3 数字化装配技术

6.3.1 数字化装配的定义

1. 定义：利用数字化现实技术、计算机图形学、人工智能技术和仿真技术等构造数字化现实环境和产品数字模型，从而在产品装配过程中通过交互分析，规划与仿真装配过程和装配结果。
2. 重点：直观的人机交互，通过直接操作和自然命令完成装配操作。
3. 数字化装配流程：
 1. 工艺数据模型构建
 2. ABOM构建
 3. 装配工艺规划
 4. 装配工艺仿真

6.3.2 数字化装配的关键技术

1. **装配顺序规划：**
 1. 由零件几何关系、物理结构及功能决定
 2. 应满足的条件：装配模型可直接推导出装配序列，装配序列的各种表达方法之间易于实现变换，装配序列各工序的关系表达清楚，保证装配序列的完整性以及正确性，装配序列表达所需的存储空间
2. **装配路径规划：**利用装配信息进行路径分析和求解，判断并生成合理的装配运动路径。
3. **碰撞与干涉检查：**通过对装配路径进行干涉和间隙体积计算，避免物理之间相互穿透和彼此重叠等不真实现象。
4. **实时图形化处理技术**

6.4 自动化装配技术

6.4.1 自动化装配的定义

1. 定义：利用自动化设备和手段，通过执行机构，使装配过程中各零部件按预先规定的程序自动地进行装配，无须人工直接干预，装配过程实现自动化操作的装配方式
2. 传统手工装配方法：依靠工人经验，费时费力，装配效率和装配质量依赖于装配工人的熟练程度。
3. 自动化装配方法：可快速、准确地完成装配任务，装配效率高；减少人工操作，降低人力成本，减少人为操作失误，减少了人为因素对产品质量的影响，降低成本的同时保障了质量；具有较高的稳定性和可靠性，可保证长时间、连续、安全作业。

6.4.2 自动化装配的关键技术

1. 给料与传送：

1. 自动给料包括装配件的上料、定向、隔料、卸料等。
2. 自动传送是指装配零件由给料口向各个环节或在不同工位间自动传输，再在工位上完成相应装配作业，最终完成整个装配过程。

2. 定位：

1. 基础件、配合件和连接件等必须要停止在精确的位置，才能顺利完成装配工作，这需要定位机构来保证准确定位。

3. 装入与联接：

1. 工件经定向，送进至装配工位后，通过装入机构对准基件装入
2. 螺纹联接是最普遍的联接方法之一，螺纹联接自动化包括螺母、螺钉的对准、拧入、拧紧、拧出

4. 自动检测：给料、传送、定位、装入、联接，每个环节都需要自动化检测

CH 7 智能产线、车间、工厂

1. 智能生产是智能制造的主要组成部分，而智能生产的主要载体是智能工厂。
2. 数字化网络化智能化技术和先进制造技术的深度融合将使得生产线、车间、工厂发生革命性大变革，使生产能力提升到历史性的新高度，将从根本上优化制造业的质量、效率和企业竞争力。
3. 从产品类型和生产工艺组织方式的角度，可以将制造业分为离散型制造业和流程型制造业

7.1 离散型制造业及工厂

7.1.1 离散型制造业

1. 概念及意义：

1. 离散型制造业一般将产品分解成若干个零件，每个零件经过一系列并不连续工序的加工，最后将每个零件按一定顺序装配而形成产品。
2. 在离散型制造业的生产过程中，基本没有发生物质改变，而只是物料的形状和组合发生改变，产品与所需物料之间有确定的数量比例。
3. 制造业31个大类：离散型13类，其他18个属于流程型制造或流程-离散型混合型

4. 大力培育和发展这些离散制造业，是提升我国产业核心竞争力的必然要求，是抢占未来经济和科技发展制高点的战略选择，对于加快转变经济发展方式、实现由制造业大国向强国转变具有重要战略意义。

2. 特点：

1. **产品结构层次明晰**：离散型制造业的产品结构可以用树的结构进行描述，最终产品一定是由固定数量的零件或部件组成，相互间的关系是固定和明确的。

2. **产品工艺流程复杂**：

1. 产品生产过程是断续的
2. 生产工艺方法有铸造、锻造、焊接、机械加工等
3. 不同零件的生产工艺过程有所不同
4. 同一零件当产量不同时，其工艺过程也会有很大区别

3. **生产计划管理要求高**：典型的离散型制造企业按订单组织生产，一般从事多品种小批量生产，产品的工艺环节较多，生产组织难度大，对采购和生产的快速响应提出了较高要求，常需要应用计算机进行生产计划排产及管理工作，以达到对生产任务快速响应的目的。因此，零散制造对生产计划管理系统建设的要求较高。

7.1.2 离散型制造工厂

1. 概念：**离散型制造业的基本生产组织单位称为离散型制造工厂**：工厂广义上包括了产品的设计、生产、采购、管理、销售、服务等环节，工厂生产是工厂任务的主体，从产品零件的工艺设计到零件的制造和装配，再到产品的测试试验，共同组成了整个生产过程。

2. 工厂的组成和目标

1. 生产装备/单元：完成单工序或多工序加工
2. 生产线：进行同系列零部件集中加工或装配
3. 生产车间：进行同类产品加工及装配
4. 工厂：完成生产组织及生产

7.1.3 离散型制造工厂的发展历程

1. 传统工厂 (HPS, human-physical systems)

1. **由人和物理系统（如机器）两大部分所组成**：

1. 由人和机器所组成的制造系统替代了人的体力劳动，大大提高了制造的质量和效率
2. HPS系统中人起主导作用，机器由人来掌控的，因此每个零件或产品都会因人技能的不同而表现出不同的质量

2. **集群制造**：将同工序加工设备集中放置形成同序加工单元，每一个单元加工零件的同一工序，物料在单元之间的转运即为工序转运

2. 数字化工厂 (HCPS1.0, human-cyber-physical systems, 第一代智能工厂)

1. **数控机床（20世纪50年度）**：

1. 1952年美国研制成功世界上第一台三坐标数控铣床，实现了数控加工
2. 精度和效率都得到大大改进，同时产品的一致性也大幅提升

2. 柔性制造系统 (FMS, 20世纪70年度) :

1. 由数控加工装备、物流输送系统、电气控制系统及信息软件系统等组成
2. 从单台数控机床应用发展到加工中心、柔性制造单元、柔性生产线和计算机集成制造系统，工厂柔性化得到迅速发展

3. 物料需求计划 (MRP, 20世纪60年度) :

1. 解决采购、库存、生产、销售的管理，建立了信息化管理系统，提升生产各环节的效率和质量

3. 数字化网络化工厂 (HCPS1.5, 第二代智能工厂)

1. 内涵：实现从设计、工艺、管理和制造等多层次数据的充分共享和有效利用

1. 生产线层级核心：管控系统
2. 车间层级核心：制造执行系统MES
3. 工厂层级核心：企业资源计划ERP

2. 制造业与“互联网+”

1. 20世纪末，“互联网+”推动制造业发展，促进企业从数字化工厂向数字化、网络化工厂转变
2. 互联网和云平台成为重要组成部分，一端接入信息系统，另一端连接物理系统，同时还与人进行交互。

3. 工业4.0

1. 2013年德国推出，利用信息-物理系统将生产中的供应、制造、销售信息数据化
2. 核心是连接，把设备、生产线、工厂、供应商、产品、客户紧密地连接在一起
3. 适应了“万物互联”的发展趋势，组成一个大型制造系统

4. 新一代智能工厂 (HCPS2.0)

1. 人工智能+互联网+数字化制造
2. 促进了人——信息系统——物理系统的三元融合

7.2 数字化网络化工厂

7.2.1 概述

1. 离散型制造工厂具有明显的层级性

1. 自顶向下：工厂级->车间级->产线级->装备级
2. 系统：物理系统、信息系统
3. 人：操作与管理人员

2. 数字化网络化工厂的信息系统：

1. 生产自动化控制系统：侧重底层设备的控制问题

1. 数字控制NC系统
2. 分布式数字控制DNC系统

2. 生产管控优化系统：偏重解决工厂生产资源的管控与优化

1. ERP

2. MES

3. 网络连接和信息集成系统：存在于四个层级，解决所有物理装备的连接与信息交换问题

7.2.2 数字化网络化工厂的物理系统

1. 装备级物理系统：

1. 组成：主体加工装备、辅助工艺装备、连接运输装备

2. 产线级物理系统：

1. 组成：按照零件加工工艺过程顺序将装备级物理系统连接构成

2. 特点：各类装备具有网络数据通信接口，运行状态数据采集与远程诊断

3. 车间级物理系统：

1. 组成：由多条不同零件的产线、半成品仓储设施以及连接运输系统组成

2. 连接运输系统：产线连接系统，物料识别系统，货位管理系统、自动分拣系统

4. 工厂级物理系统：

1. 组成：由多个零件的生产车间、成品仓储设施以及连接运输系统组成

2. 重点考虑工厂布局与连接

7.2.3 数字化网络化工厂的信息系统

1. 装备级信息系统：

1. 组成：装备的数字控制（NC）系统、网络连接与信息集成系统

2. 数控系统读取由外接传输的数控加工程序，将加工程序转化成机床或机器人可执行的指令，实现运动控制

3. 网络连接与信息集成系统通过将各类装备进行网络化连接、装备运行状态与工艺数据采集与分析，实现对加工过程的监控、决策与维护

4. 数控系统：主要包括驱动控制装置、系统控制装置、传感器检测装置、人机交互装置以及相关通信连接等组成部分

5. PLC：具有微处理器的数字电子设备，用于自动化控制的数字逻辑控制器，可以将控制指令随时加载存储器内存储与运行

2. 产线级信息系统：

1. 混合型信息系统：除了具有网络连接与信息集成系统外，还包括面向底层装备控制的生产自动化控制系统和面向上层生产任务调度的生产管控优化系统

3. 车间级信息系统：以制造执行系统（MES）为主，解决制造计划如何执行的问题

1. MES位于上层的计划管理系统与底层的装备控制系统之间，是企业资源计划和装备控制之间的桥梁。

2. MES接受来自ERP的主生产计划，同时把主生产计划细分等下达给人员、装备等，再把生产结果等信息动态地反馈给上层系统。

4. 工厂级信息物理系统：以企业资源计划（ERP）为主

1. 是一种建立在信息技术基础上，以系统化的管理思想，全面集成企业所有资源信息，为企业提供决策、计划、控制与经营业绩评估的全方位和系统化的管理平台

2. 五个层次的划分从宏观到微观，从战略到战术，从粗到细。第一层到第三层为决策层计划，第四层为管理层计划，第五层为操作层计划

1. **经营规划层**：完成企业战略规划，根据市场、国家相关政策、企业能力等，制定企业的经营计划。
2. **生产规划层**：规划企业产品结构，根据经营规划的目标，确定企业的每种产品在未来一段时间内生产多少，需要消耗哪些资源。
3. **主生产计划层**：粗略制定企业生产计划，以生产大纲为依据，计划企业应生产的最终产品数量与交货期，并在生产需求与可用资源之间做出平衡。
4. **物料需求计划层**：制定物料需求，根据生产计划推导出构成产品的零部件及原材料的需求数量与需求日期。
5. **车间生产计划层**：详细制定车间生产计划，根据 MRP 生成的制造和采购订单定来编制生产工序，用以安排生产和进行原材料采购。

5. 数字化网络化工厂的工业互联网

1. 工业网络：与传统工厂相比，数字化网络化工厂需要实现由加工主体装备、辅助工艺装备、连接运输装备所构成的物理系统的互联互通，实现的方式主要有现场总线和工业以太网两种。

2. 工业现场总线

1. 工业现场的智能化仪器仪表、传感器、控制器、执行机构等通过工业现场总线实现了现场设备间的数字通信以及现场控制设备和高级控制系统之间的信息传递。
2. 现场总线协议包括 RS-232、RS-485、CAN、Modbus、OPC、Profibus 等，利用一台接入网络的服务器与生产线数字化设备进行连接，进而实现设备的集群控制。

3. 工业以太网

1. 采用TCP/IP协议，实现设备之间的互联互通，具有传输速度快、稳定可靠、软硬件产品丰富等优势，同时也具有网络集成化、信息资源管理与共享等网络技术优势
2. 使用工业以太网将数控机床、机器人、检测设备以及其他辅助工艺设备等各类分散的数字化装备连接起来
3. 常用的工业以太网协议包括HSE、Modbus TCP/IP、PROFINET、Ethernet/IP 等

4. 工业物联网

1. 为了实现将不具备网络接入能力的装备、物料、工件、工装、刀具等生产要素的数据采集与互联，通常使用条形码、二维码、射频识别电子标签（RFID）自动识别技术。
2. 使生产管控优化系统中的生产过程数据可视化、生产调度优化、仿真系统建模等功能模块发挥更大的作用

5. 工业云平台

1. 为面向制造业数字化、网络化、智能化的需求，构建基于海量数据采集、汇聚、分析的服务体系，用于支撑制造资源泛在连接、弹性供给、高效配置的工业云平台

2. 在“互联网 +”技术的推动下，通过云平台建设，企业能够将分散的计算资源整合成虚拟的超级计算机，以提供超大的存储空间和超强的计算能力，进行工业大数据的存储、集成、访问、分析与管理，实现产品研发设计、生产制造，运行管理过程的优化。

7.2.4 数字化网络化工厂的数字孪生

1. 数字孪生的定义及作用

1. 是一种利用物理模型、传感器、生产过程数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映对应物理实体全生命周期过程的一种技术。
2. 数字化、网络化工厂采用数字孪生技术，不仅可以加速产品的开发过程，提高生产过程的有效性和经济性，同时更有效追踪产品的使用情况
2. **产线数字孪生：**产线数字孪生体针对物理世界的生产线，通过数字化手段构建一个与之对应的数字世界的虚拟生产线。建立产线的数字孪生体模型，在物理与数字两个空间同时记录产线的运行轨迹，可以在虚拟空间中对物理空间中的生产过程实现三个层面的仿真与优化：几何仿真、运动学仿真、动力学仿真
3. **车间数字孪生：**在新一代制造技术和信息技术驱动下，通过物理车间与虚拟车间的双向真实映射与实时交互，实现物理车间、虚拟车间、车间服务系统的全要素、全流程、全业务数据的集成和融合。
4. 数字孪生车间
 1. **物理车间：**负责接收车间服务系统下达的生产任务
 2. **虚拟车间：**负责对生产计划 / 活动进行仿真、评估及优化
 3. **车间服务系统：**负责在车间孪生数据驱动下对车间智能化管控提供系统支持和服务
 4. **车间孪生数据：**以上三者相关的数据，以及数据融合后产生的衍生数据的集合
5. 车间级信息星系统：在车间层生产优化管控系统中加入数字孪生和生产大数据。以数字孪生为中枢，将以ERP为核心的工厂级信息系统、以MES为核心的车间级信息系统、以数字孪生技术中的仿真分析和生产大数据系统进行有效的衔接，形成以数字孪生为智能大脑的新型车间级生产管控优化系统架构。



7.3 数字化、网络化、智能化工厂

7.3.1 概述

1. 智能化动机：数字化、网络化、智能化制造是制造业的第三种范式，一般称之为新一代智能制造。它融合人工智能技术的学习认知能力，使得制造系统不仅具有强大的感知、计算分析与控制能力，还具有自学习、自适应的能力，能够实现复杂系统的精确建模与优化，解决数字化、网络化工厂存在的问题。

1. 智能化快速响应客户的个性化需求，实现高效制造
2. 智能化优化生产过程，实现批量零件的高质量制造
3. 智能化保证高效率的同时，实现产品的低成本制造
4. 智能化实现从基于经验的制造向基于科学预测的制造转变

2. 建模与优化：HCPS2.0 新一代智能制造工厂利用人工智能和大数据技术实现了对系统的精确建模，具有认知和学习的能力，可以极大提高制造系统处理复杂性、不确定性问题的能力。

1. 工业大数据

1. 数据量大：制造装备多样化、检测装备精确化、制造流程复杂化，工厂数据急剧增加
2. 重复性高：生产环节各个部分会有很多重复数据，导致无用的分析与仿真计算量大大增加
3. 时效性强：数据实时处理要求高，尤其是实时数据的分析更意义

2. 智能工厂建模

1. 依靠传统的力学和数学模型确定性的方程难以实现精确描述
2. 结合大数据和人工智能的仿真模型：制造过程体现出自适应、自优化等智能化特征
3. 建模方法：数理模型，数据模型，数据机理混合模型

7.3.2 智能化重点发展方向

1. 制造工艺优化：利用工业大数据分析技术，通过对生产工艺的研究，实现以最低成本和最快交付为约束条件的数据驱动建模，在生产过程中不断迭代，分析工艺缺陷和产品质量等方面的数据，修正模型，实现工艺设计和工艺参数的最优化。

1. 工厂虚拟仿真与优化
2. 工艺仿真分析与优化
3. 基于CPS 的工艺感知
4. 生产的预测与控制

2. 产品质量优化：利用工业物联网、智能建模等技术建立基于工业大数据的可追溯性产品质量分析和预报智能系统，是实现离散型制造质量监控的无人化与智能化的必由之路。

1. 最终产品/中间零部件产品的质量智能化在线检测与预报
2. 最终产品/中间零部件产品的自动识别和全程可视化跟踪与追溯
3. 基于客户评价的产品质量分析与优化
4. 智能仓储物流设施的物料/中间零部件自动配送与配套防错

3. 装备健康保障优化：利用智能终端实现设备的实时状态监控，通过对设备日志和指令的实时分析，建立即时应对体系，实现生产过程设备集群控制，达到设备异常启停、人员误操作、设备故障警报等方面的快速异常处理。

1. 用工业大数据智能感知、设备日常运行的可视化监控
 2. 分析设备日常运行情况，实现设备工况的智能分析
 3. 达到预测设备故障、耗材损耗程度的目标
4. **生产管控决策优化：**智能排产与决策优化是智能制造的一个关键点，通过观察积累大量数据以及由这些数据所组成的流程，了解规律，将决策问题建模和量化，并定义这个决策中的限制调节和规则，实现排产和决策的优化。