

机械加工表面质量和精度

机械表面加工质量

- 生产任何一种机械产品，都要求在保证质量的前提下，做到高效率、低消耗。产品的质量是第一位的，没有质量，高效率、低成本就失去了意义。
- 产品质量是指用户对产品的满意程度。

机械表面加工质量

- 零件的机械加工质量不仅指加工精度，而且包括加工表面质量。
- 机械加工后的零件表面实际上不是理想的光滑表面，它存在着不同程度的表面粗糙度、冷硬、裂纹等表面缺陷。虽然只有极薄的一层（几微米~几十微米），但都错综复杂地影响着机械零件的精度、耐磨性、配合精度、抗腐蚀性和疲劳强度等，从而影响产品的使用性能和寿命，因此必须加以足够的重视。

机械表面加工质量

- 它有三层含意：一是产品的设计质量；二是产品的制造质量；三是服务。
- 以往强调较多的往往是制造质量，现代的质量观，主要站在用户的立场上衡量。
- 当今，服务也占据越来越重要的地位。

机械表面加工质量

- **制造质量**，它主要指产品的制造与设计的符合程度。
- **设计质量**，主要反映所设计的产品，与用户（顾客）的期望之间的符合程度。
- **服务**主要包括售前的服务，售后的培训、维修、安装等。

机械表面加工质量

- 产品的制造质量主要与零件制造质量、产品的装配质量有关，零件的制造质量是保证产品质量的基础。
- 零件的机械制造质量包括零件几何精度和零件表面层的物理机械性能两个方面。

表面层几何形状误差

- 表面粗糙度
- 表面粗糙度对零件表面磨损的影响很大。一般说表面粗糙度值愈小，其耐磨性愈好。
- 接触面的表面粗糙度有一个最佳值。

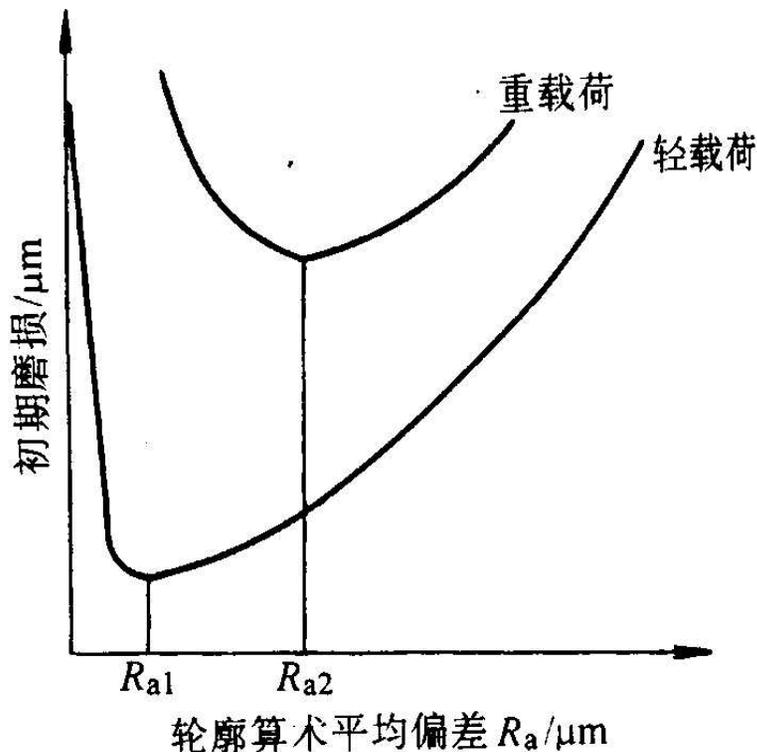
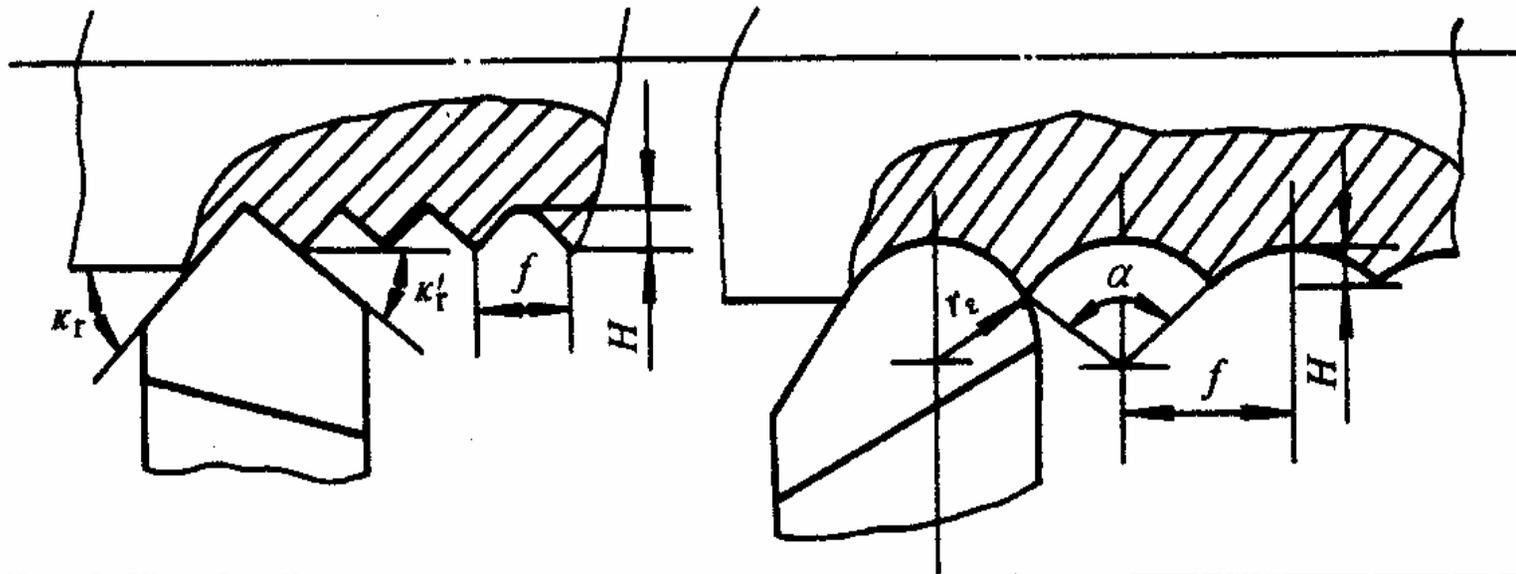


图5-45 表面粗糙度与初期磨损量的关系

表面粗糙度

- 切削加工中，刀具相对工件作进给运动，在加工表面留下切削层残留面积，即几何因素的影响，其高度值 H 即为理论表面粗糙度。减小 f ，主副偏角，增大刀尖半径可较小表面粗糙度



表面粗糙度

- 切削加工后表面粗糙度的实际轮廓形状和纯几何因素所形成的理论轮廓有较大的差别。

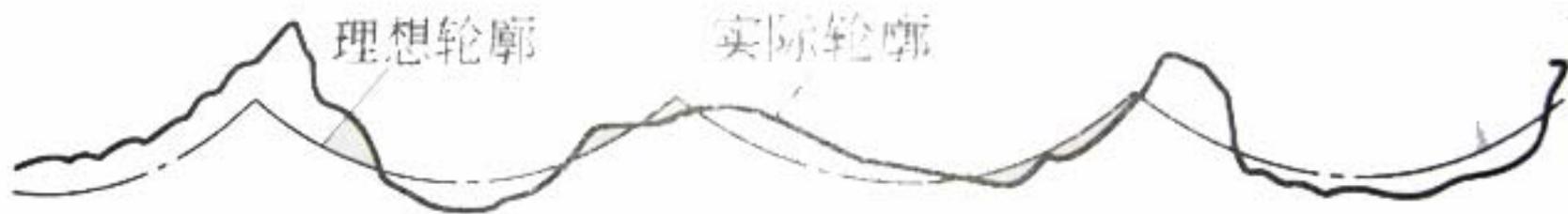


图 14-2 加工后表面的实际轮廓和理想轮廓

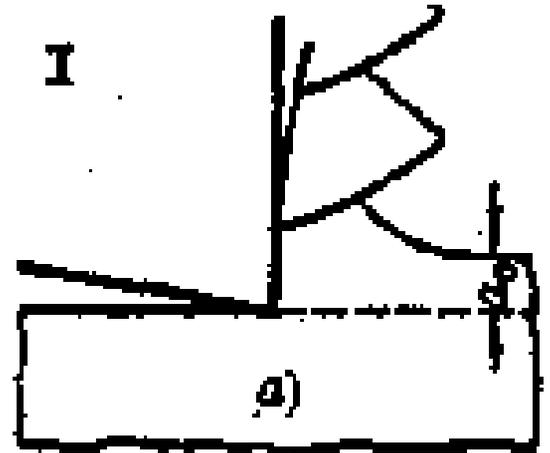
表面粗糙度

- 低速切削塑性材料时，积屑瘤和鳞刺的出现会使表面粗糙度严重恶化。
- 鳞刺就是已加工表面上的鳞片状毛刺。在较低的及中等的切削速度下，用高速钢、硬质合金或陶瓷刀具，切削一些常用的塑性金属，都可能出现鳞刺。鳞刺对表面粗糙度有严重的影响，使已加工表面变得很粗糙。由此可知，鳞刺的产生是切削加工中获得较小粗糙度的表面的一大障碍。

鳞刺的形成过程的四个阶段

➤ 抹拭阶段

- 鳞刺形成的第一阶段是抹拭阶段。这时，前一鳞刺已经形成，新鳞刺还未出现，而切屑沿着前刀面流出，切屑以刚切离的新鲜表面抹拭刀—屑摩擦面，将摩擦面上有润滑作用的吸附膜逐渐拭净，使冷焊面积增大，从而增大摩擦力，为切屑由前刀面上的停留创造条件。



鳞刺的形成过程的四个阶段

➤ 导裂阶段

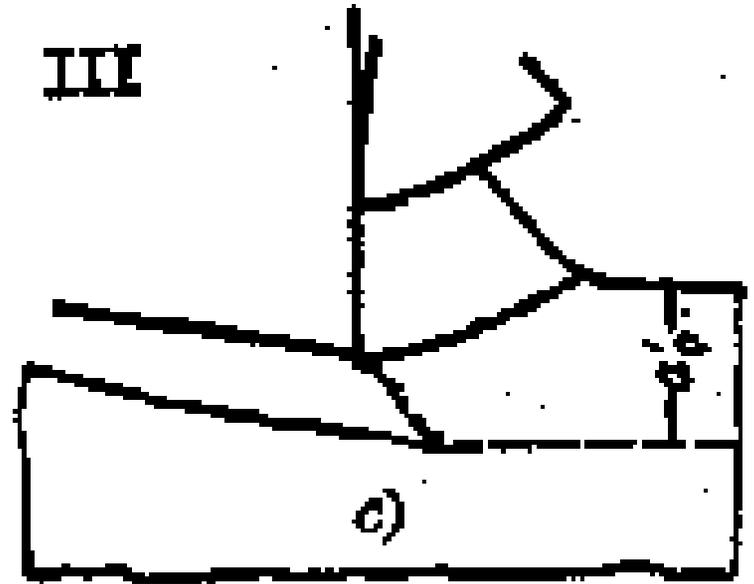
- 摩擦力增大到能抵御切削力推动切屑沿前刀面流出的切向分力时，切屑便停留在前刀面上，暂时不再沿前刀面流出。这时切屑代替前刀面挤压切削层，刀具只起支持切屑的作用。这一阶段的特征是：在切削刃前下方，切屑与已加工表面之间出现一裂口，即所谓导裂。



鳞刺的形成过程的四个阶段

➤ 层积阶段

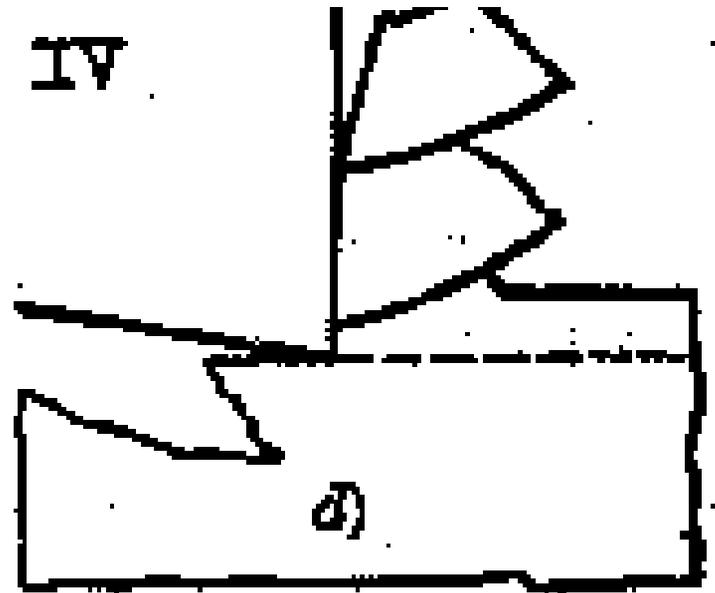
- 由于切削运动的连续性，切屑一旦停留在前刀面上，便代替刀具继续挤压切削层，使切削层中受到挤压的金属转变为切屑。而这部分新成为切屑的金属，只好逐层地积聚在起挤压作用的那部分切屑的下方。切削厚度将逐渐增大，切削力也随之增大。



鳞刺的形成过程的四个阶段

➤ 切顶阶段

- 由于切削厚度逐渐增大，切削抗力也随之增大，推动切屑沿前刀面流出的分力也增大。当层积金属达到一定厚度后，分力便也随之增大到能够推动切屑重新流出的程度，于是切屑又重新开始沿前刀面流出，同时切削刃便切出鳞刺的顶部。



积屑瘤

➤ 在很多情况下，积屑瘤形成后，便相当稳定地冷焊在前刀面上，包裹着切削刃，代替切削刃切削；而且积屑瘤伸出切削刃之外，增大了切削厚度，恰与伸出量相等，但是，切削刃上不同位置的各点，积屑瘤的伸出量是不一致的因此，积屑瘤前端代替切削刃切削的“伪刃”切出的表面是不平整的。



图 9-18 切削表面的犁沟和鳞刺的显微照片^[*]×20

45钢无缝管端面前白切削

刀 具: W18Cr4V; $\alpha_0=8^\circ$, $\gamma_0=0^\circ$;
切削条件: $b_D=1.5$ 毫米, $h_D=0.063$ 毫米,
 $v_c=0.338$ m/s(23m/min); 干切削。



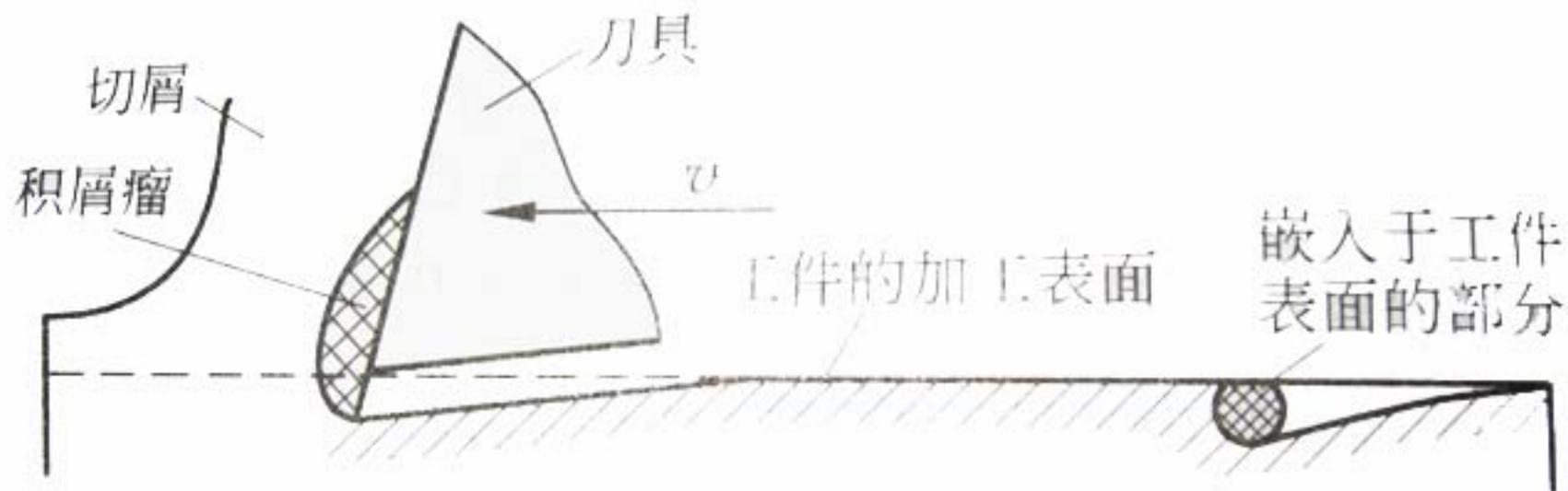
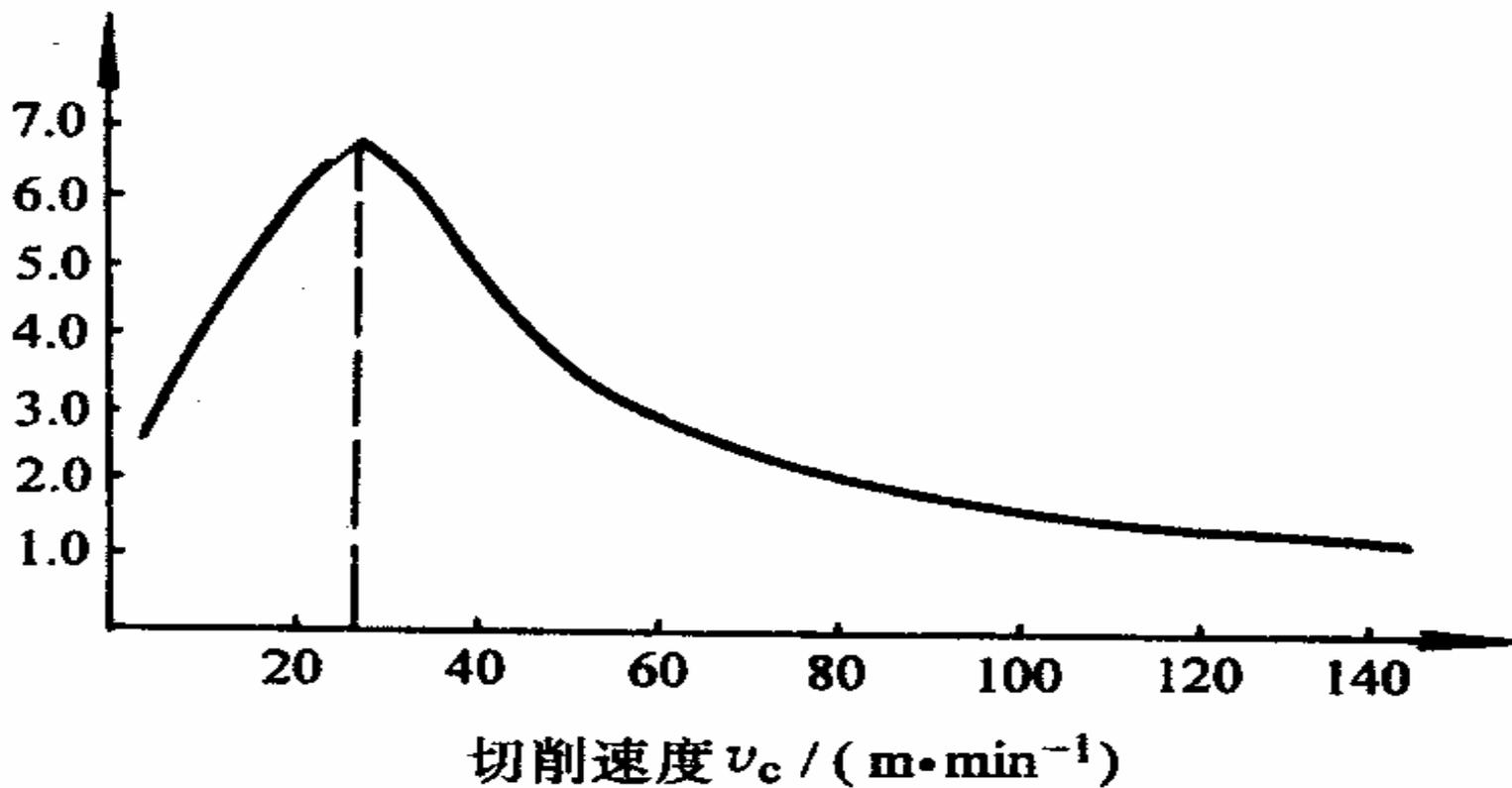


图 14-3 积屑瘤对工件表面质量的影响

影响表面质量的因素

- 切削速度的影响
- 加工塑性材料时，切削速度对表面粗糙度的影响（对积屑瘤和鳞刺的影响）。
- 此外，切削速度越高，塑性变形越不充分，表面粗糙度值越小
- 选择低速宽刀精切和高速精切，可以得到较小的表面粗糙度。

微观不平度十点高度 $R_z / \mu\text{m}$



工件材料的影响

- 韧性材料：工件材料韧性愈好，金属塑性变形愈大，加工表面愈粗糙。故对中碳钢和低碳钢材料的工件，为改善切削性能，减小表面粗糙度，常在粗加工或精加工前安排正火或调质处理。
- 脆性材料：加工脆性材料时，其切削呈碎粒状，由于切屑的崩碎而在加工表面留下许多麻点，使表面粗糙。

刀具的几何形状、材料、刃磨质量的影响

- 残留面积 $\downarrow \rightarrow Ra \downarrow$
- 前角 $\uparrow \rightarrow Ra \downarrow$
- 后角 $\uparrow \rightarrow$ 摩擦 $\downarrow \rightarrow Ra \downarrow$
- 刃倾角会影响实际工作前角

磨削后的表面粗糙度

- 磨削加工表面粗糙度的形成也是由几何因素和表面金属的塑性变形来决定的。
- 从几何因素的角度分析，被磨表面单位面积上通过的砂粒数愈多，则该面积上的刻痕愈多，刻痕的等高性愈好，表面粗糙度值愈小。
- 从塑性变形的角度分析，磨削过程温度高，磨削加工时产生的塑性变形要比刀刃切削时大得多。磨削时，金属沿着磨粒的两侧流动，形成沟槽两侧的隆起，使表面粗糙度值增大。



影响磨削表面粗糙度的主要因素

➤ 砂轮的粒度

➤ 磨粒在砂轮上的分布越均匀、磨粒越细，刃口的等高性越好。则砂轮单位面积上参加磨削的磨粒越多，磨削表面上的刻痕就越细密均匀，表面粗糙度值就越小。

➤ 砂轮的修整

➤ 修整砂轮的金刚石工具愈锋利，修整导程愈小，修整深度愈小，表面粗糙度值愈小。

影响磨削表面粗糙度的主要因素

- 砂轮的速度
- 提高磨削速度，工件表面粗糙度值小。
- 磨削切深与工件速度
- 磨削深度 \uparrow 、工件速度 \uparrow \rightarrow 塑性变形 \uparrow \rightarrow 表面粗糙度值 \uparrow ；
- 为提高磨削效率，通常在开始磨削时采用较大的径向进给量，而在磨削后期采用较小的径向进给量或无进给量磨削，以减小表面粗糙度值

影响磨削表面粗糙度的主要因素

➤ 冷却润滑液

➤ 冷却润滑液可及时冲掉碎落的磨粒，减轻砂轮与工件的摩擦，降低磨削区的温度，减小塑性变形，并能防止磨削烧伤，使表面粗糙度值变小。

➤ 砂轮的硬度

➤ 砂轮太硬，工件表面粗糙度值增大。砂轮太软，工件表面粗糙度值也会增大。

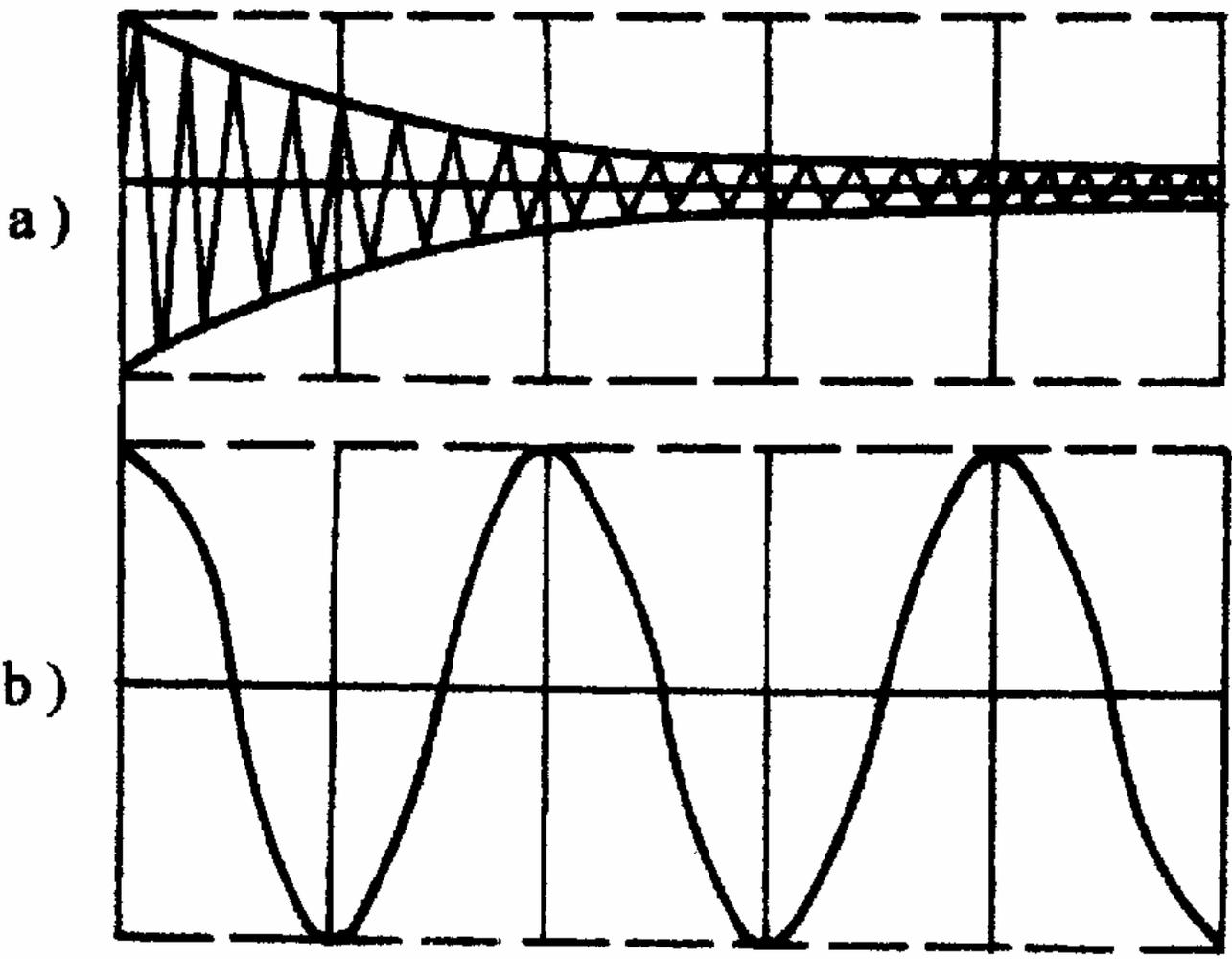
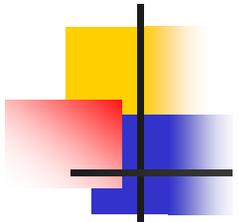
振动对表面质量的影响及其控制

- 振动会在工件加工表面出现振纹，降低了工件的加工精度和表面质量；
- 振动会引起刀具崩刃打刀现象并加速刀具或砂轮的磨损；
- 振动使机床连接部分松动，影响运动副的工作性能，并导致机床丧失精度；
- 强烈的振动及伴随而来的噪声，还会污染环境，危害操作者的身心健康。为减小加工过程中的振动，有时不得不降低切削用量，使机械加工生产率降低。

机械加工中振动的种类

➤ 自由振动

- 当系统受到初始干扰力激励破坏了其平衡状态后，系统仅靠弹性恢复力来维持的振动称为自由振动。由于总存在阻尼，自由振动将逐渐衰减（占5%）



机械加工中振动的种类

➤ 强迫振动

- 系统在周期性激振力(干扰力)持续作用下产生的振动，称为强迫振动。强迫振动的稳态过程是谐振动，只要有激振力存在振动系统就不会被阻尼衰减掉。

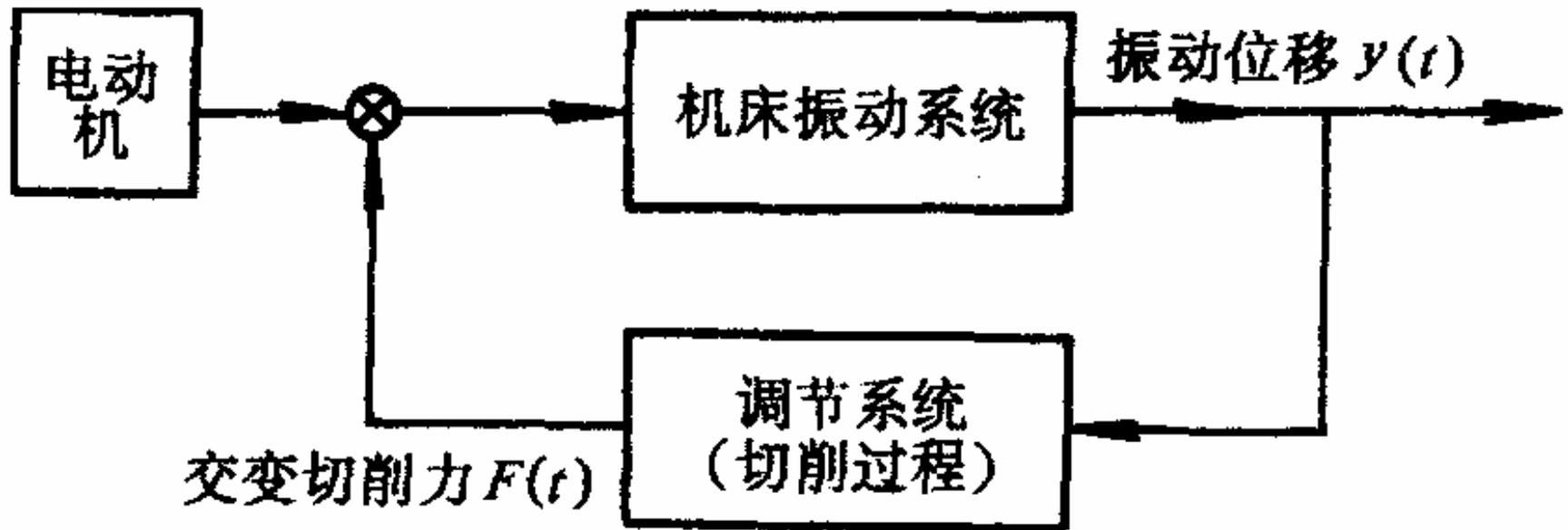
机械加工中振动的种类

- 自激振动
- 在没有周期性干扰力作用的情况下，由振动系统本身产生的交变力所激发和维持的振动，称为自激振动。切削过程中产生的自激振动也称为颤振。(占65%)

自激振动的特征

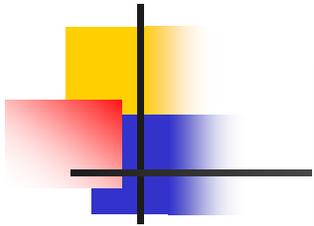
- 在实际加工过程中，由于偶然的外界干扰（如工件材料硬度不均、加工余量有变化等），会使切削力发生变化，从而使工艺系统产生自由振动。系统的振动必然会引起工件、刀具间的相对位置发生周期性变化，这一变化若又引起切削力的波动，则使工艺系统产生振动。因此通常将自激振动看成是由振动系统（工艺系统）和调节系统（切削过程）两个环节组成的一个闭环系统。

自激振动原理

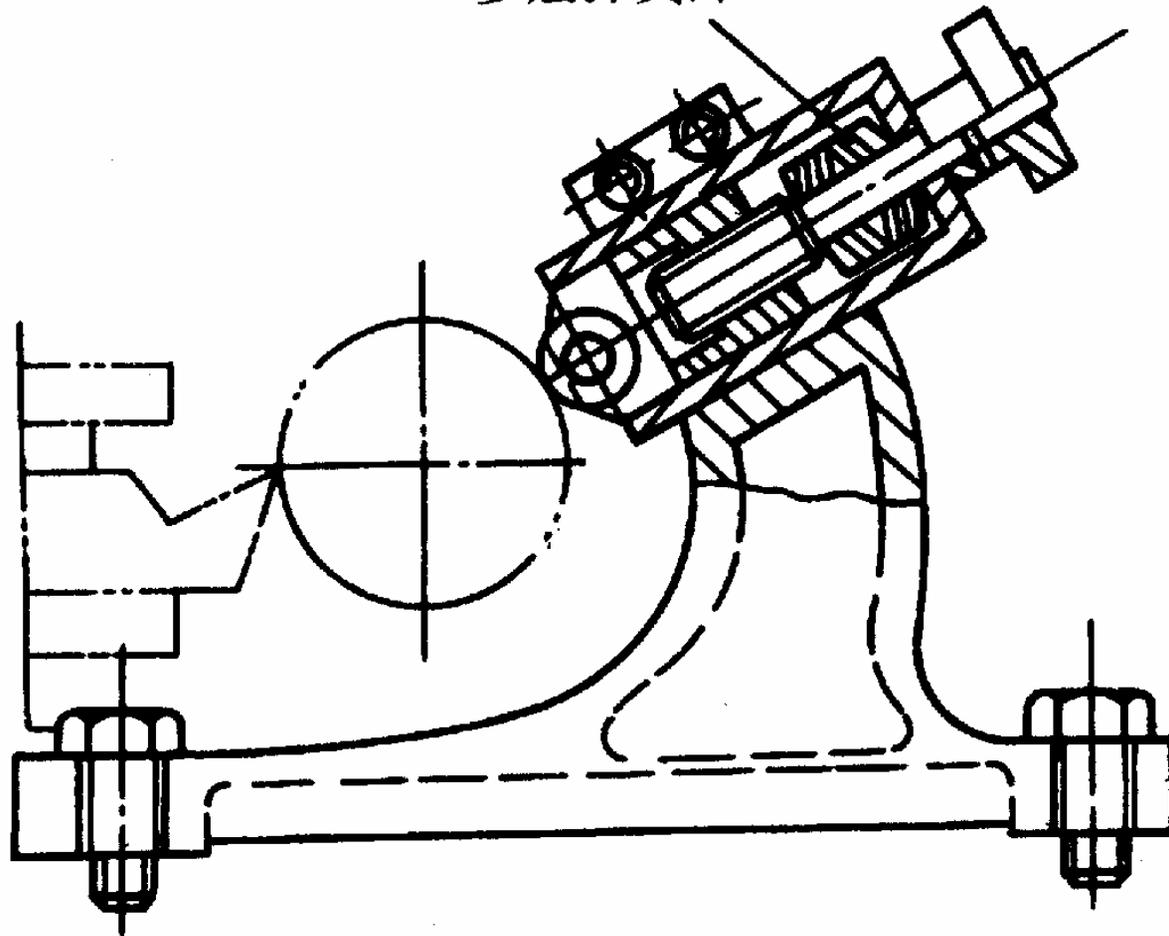


抑制和消除振动的措施

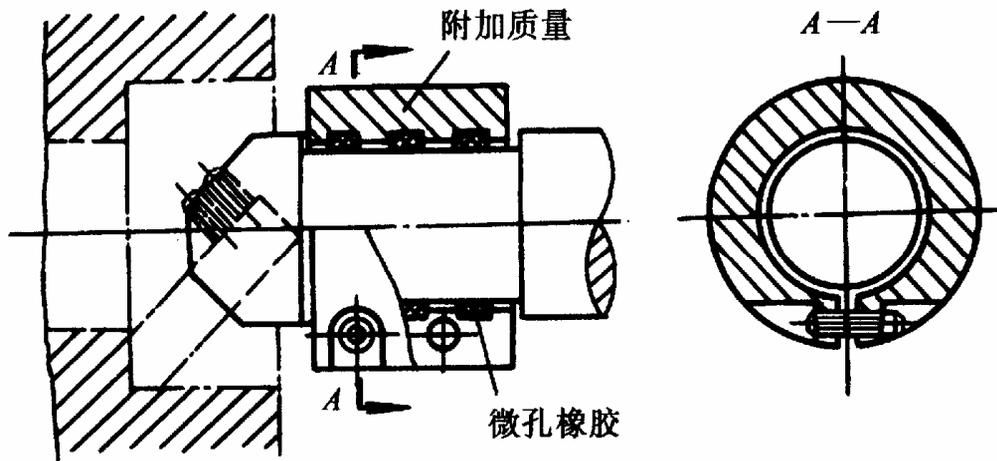
- 消振与隔振
- 提高系统抗振性
- 合理选择切削用量、刀具参数
 - $V=30\sim 70\text{m/min}\rightarrow$ 自振 \uparrow
 - $f\downarrow\rightarrow$ 自振 \uparrow ; 保证 R_a 时 $\rightarrow f\uparrow$
 - 前角、主偏角 $\uparrow\rightarrow$ 自振 \downarrow
 - 后角 $\downarrow\rightarrow$ 自振 \downarrow ; 但太小时 \rightarrow 自振 \uparrow
- 采用减振装置
- 利用振动改善加工性能



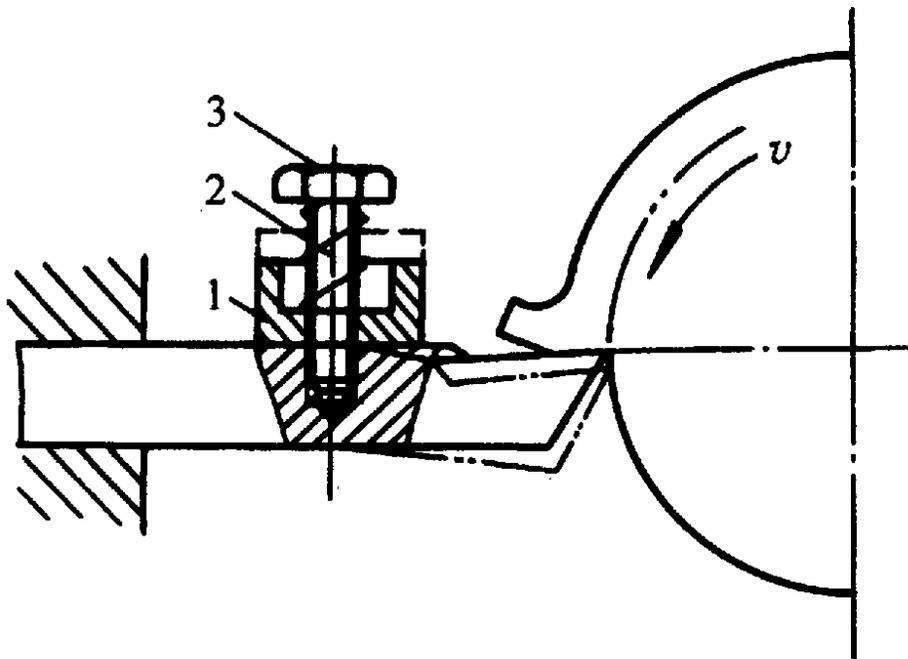
多层弹簧片



阻尼器减振装置



用于镗刀杆的
动力吸振



冲击式吸振器

- 1—自由质量
- 2—弹
- 3—螺钉



机械加工后表面物理机械性能的变化

- 加工表面的冷作硬化
- 机械加工过程中因切削力作用产生的塑性变形，使晶格扭曲、畸变，晶粒间产生剪切滑移，晶粒被拉长和纤维化，甚至破碎，这些都会使表面层金属的硬度和强度提高，这种现象称为冷作硬化。

机械加工后表面物理机械性能的变化

- 加工表面的金相组织变化——磨损烧伤
- 被磨工件表面层温度达到相变温度以上时，表层金属发生金相组织的变化，使表层金属强度、硬度降低，并伴随有残余应力产生，甚至出现微观裂纹，这种现象称为磨削烧伤。

机械加工后表面物理机械性能的变化

- 加工表面的金相组织变化——磨损烧伤
- 如果磨削区的温度未超过淬火钢的相变温度，但已超过马氏体的转变温度，工件表层金属的回火马氏体组织将转变成硬度较低的回火组织，这种烧伤称为回火烧伤。

机械加工后表面物理机械性能的变化

- 加工表面的金相组织变化——磨损烧伤
- 如果磨削区温度超过了相变温度，再加上冷却液的急冷作用，表层金属发生二次淬火，使表层金属出现二次淬火马氏体组织，其硬度比原来的回火马氏体的高，在它的下层，因冷却较慢，出现了硬度比原先的回火马氏体低的回火组织，这种烧伤称为**淬火烧伤**。

机械加工后表面物理机械性能的变化

- 加工表面的金相组织变化——磨损烧伤
- 如果磨削区温度超过了相变温度，而磨削区域又无冷却液进入，表层金属将产生退火组织，表面硬度将急剧下降，这种烧伤称为**退火烧伤**。

机械加工后表面物理机械性能的变化

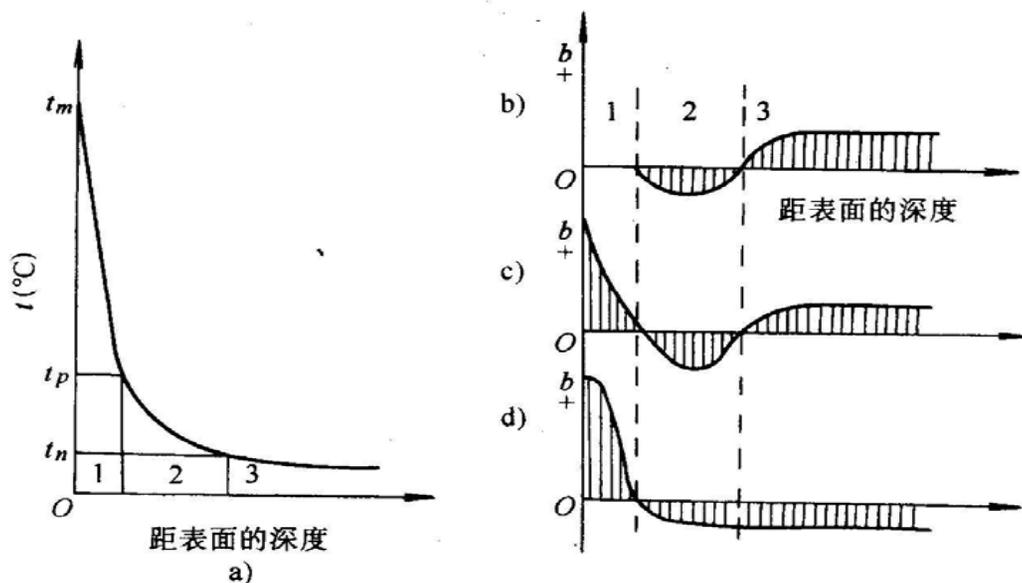
➤ 加工表面层的残余应力

- 1) 切削时在加工表面金属层内有塑性变形发生，使表层金属的比容加大，由于塑性变形只在表层金属中产生，而表层金属比容增大，体积膨胀，不可避免地要受到与它相连的里层金属的阻止，因此就在表面金属层产生了残余压应力，而在里层金属中产生残余拉应力。

机械加工后表面物理机械性能的变化

➤ 加工表面层的残余应力

2) 切削加工中，切削区会有大量的切削热产生。图为切削热在表层金属产生残余拉应力的分析过程。



由于切削热在表层金属产生残余拉应力的分析图

机械加工后表面物理机械性能的变化

➤ 加工表面层的残余应力

3) 不同的金相组织具有不同的密度，即具有不同的比容

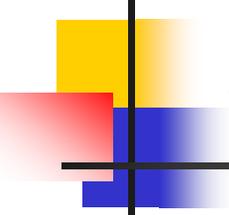
如果表面层金属产生了金相组织的变化，表层金属比容的变化必然要受到与之相连的基体金属的阻碍，因而就有残余应力产生。

磨削裂纹

- 磨削裂纹的产生也与材料及热处理工序有很大关系。
- 磨削硬质合金时，由于其脆性大，抗拉强度低以及导热性差，所以特别容易产生裂纹。
- 磨削含碳量高的淬火钢时，由于其晶界脆弱，也容易产生磨削裂纹。工件在淬火后如果存在残余应力，则即使在正常的磨削条件下也可能会出现裂纹。
- 渗碳、渗氮时如果工艺不当就会在表面层的晶界面上析出脆性碳化物、氮化物，当磨削时在热应力作用下就容易沿着这些组织发生脆性破坏，从而出现网状裂纹。

避免产生裂纹的措施

- (1) 提高冷却效果
- (2) 磨削用量的选择：提高工件速度和采用小的切深能够有效地减小残余拉应力和消除烧伤、裂纹等磨削缺陷。若在提高砂轮速度的同时相应提高工件速度，可以避免烧伤。
- (3) 改善砂轮的磨削性能



控制加工表面质量的途径

- 1)控制磨削参数
- 2)采用超精加工、珩磨等光整加工方法作为最终加工工序
- 3)采用喷丸、滚压、辗光等强化工艺

机械加工精度

- 加工精度是指零件经过加工后的尺寸、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称为加工误差。加工精度在数值上通过加工误差的大小来表示，即误差愈小，精度愈高；反之误差愈大，精度就愈低。
- 零件的几何参数包括各表面的几何形状、尺寸和相互位置三个方面。

机械加工精度

- 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、直线度等；
- 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、对称度等。

机械加工误差分类

- 系统误差与随机误差
- 误差的大小和方向为确定数值或具有确定性变化规律的误差称为系统误差，它可以用代数运算进行综合。
- 常值系统误差的数值是不变的。
- 变值系统误差是误差的大小和方向按一定规律变化。
- 误差具有随机性，符合统计规律的误差，为随机误差。



机械加工误差分类

- 静态误差、切削状态误差与动态误差
- 从误差是否与切削状态有关来分，可分为静态误差与切削状态误差。
- 工艺系统在不切削状态下所出现的误差，通常称之为静态误差。
- 工艺系统在切削状态下所出现的误差，通常称之为切削状态误差。
- 工艺系统在有振动的状态下所出现的误差，称之为动态误差。



影响加工精度的因素

- 原理误差
- 原理误差是由于采用了近似的加工运动或者近似的刀具轮廓而产生的。

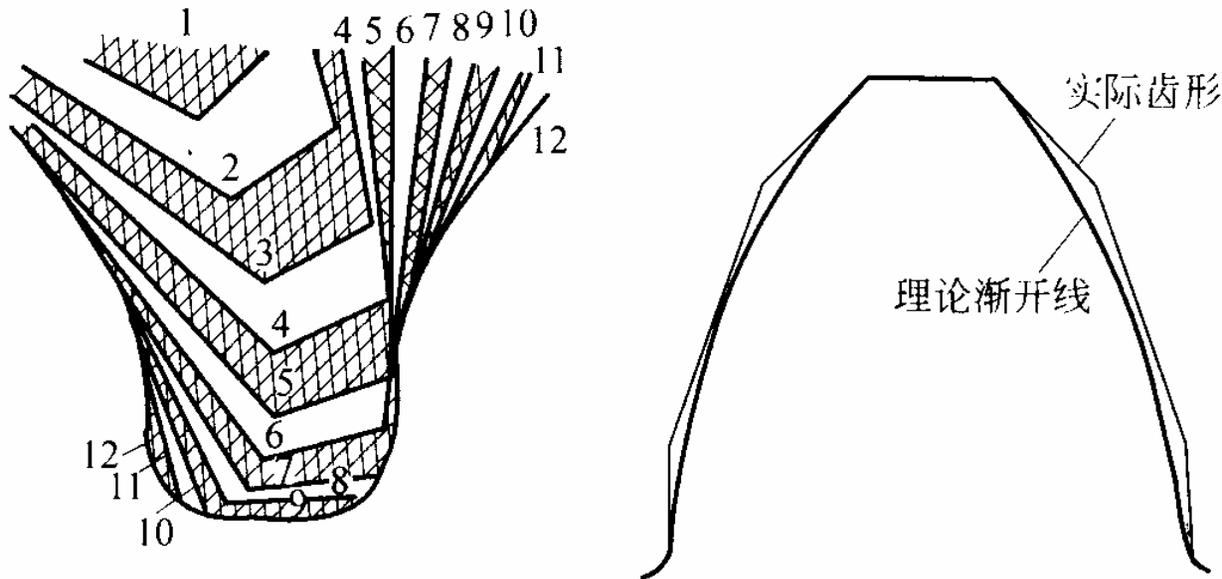


图 14-16 用展成法切削齿轮时的齿形误差



工艺系统误差对加工精度的影响

- 机床误差
- 机床的几何误差
- 加工中刀具相对于工件的成形运动一般都是通过机床完成的，因此，工件的加工精度在很大程度上取决于机床的精度。

机床制造误差对工件加工精度影响较大的有：

主轴回转误差

导轨误差

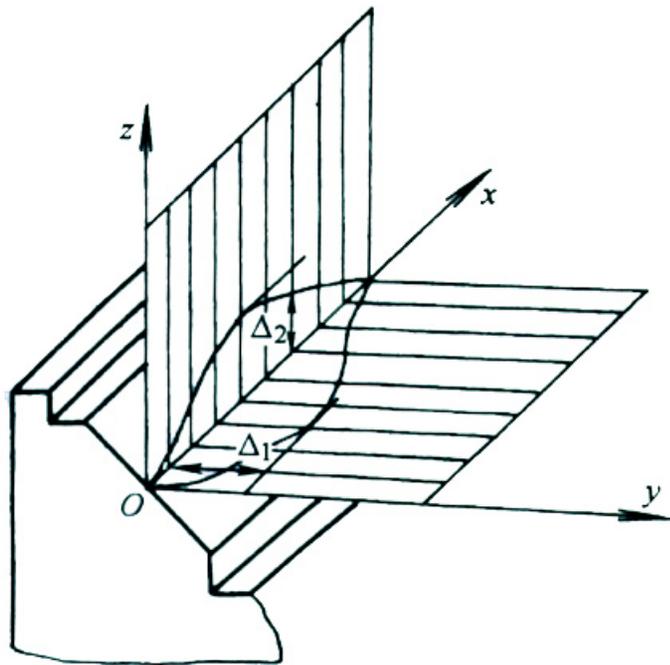
传动链误差

机床的磨损将使机床工作精度下降。

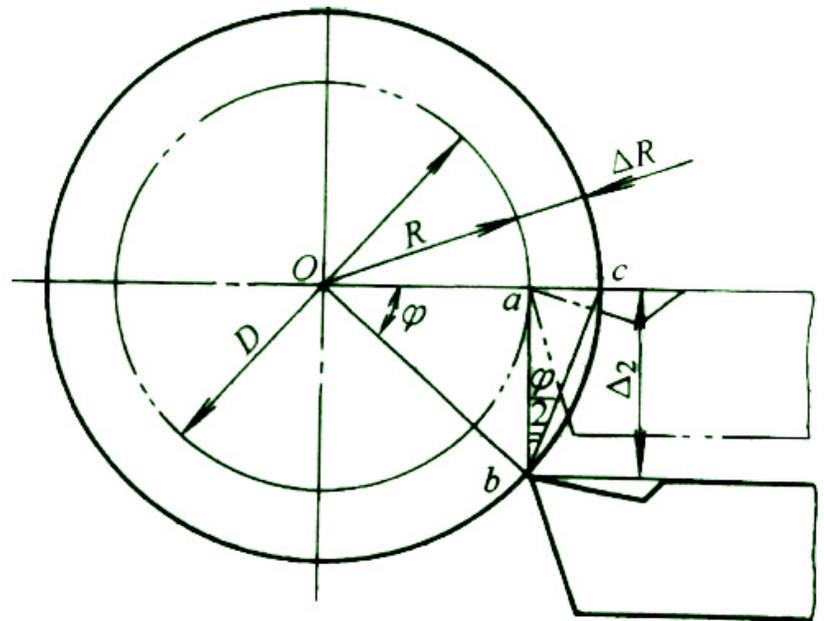
导轨误差

- 导轨是机床上确定各机床部件相对位置关系的基准，也是机床运动的基准。车床导轨的精度要求主要有以下三个方面：
 - 在水平面内的直线度；
 - 在垂直面内的直线度；
 - 前后导轨的平行度（扭曲）

导轨误差



卧式车床导轨直线度误差



卧式车床导轨垂直面内直线度误差对工件加工精度的影响

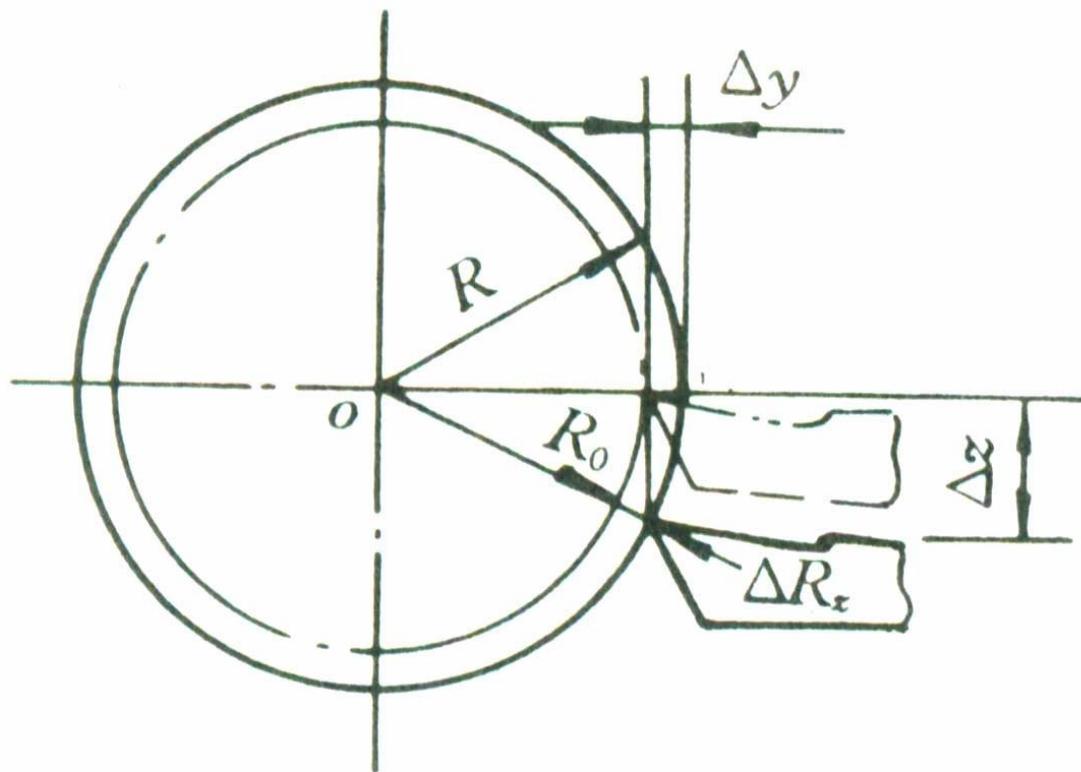
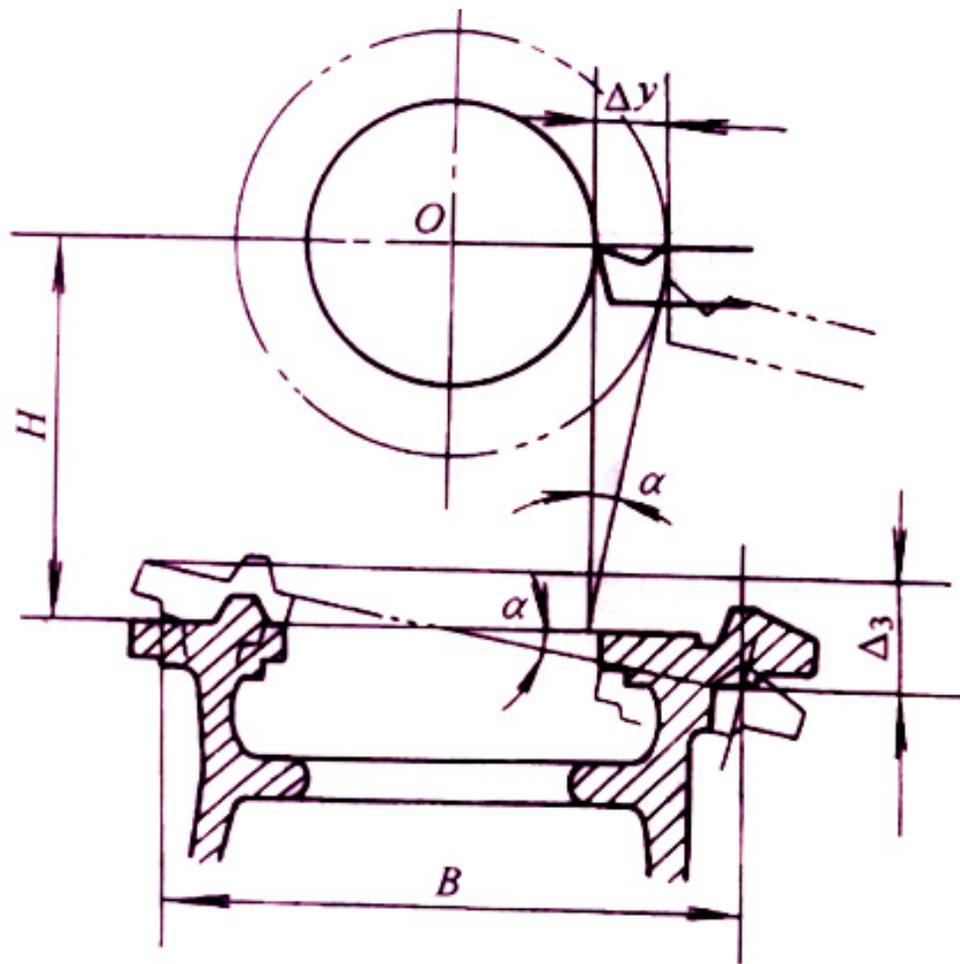


图 4-3 车外圆误差的敏感方向

导轨误差

- 当前后导轨存在平行度误差（扭曲）时，刀架运动时会产生摆动，刀尖的运动轨迹是一条空间曲线，使工件产生形状误差。



卧式车床导轨扭曲对工件加工精度的影响



主轴回转误差

- 机床主轴是装夹工件或刀具的基准，并将运动和动力传给工件或刀具，主轴回转误差将直接影响被加工工件的精度。
- 主轴回转误差是指主轴各瞬间的实际回转轴线相对其平均回转轴线的变动量。
- 它可分解为径向圆跳动、轴向窜动和角度摆动三种基本形式。
- 产生主轴径向回转误差的主要原因有：主轴几段轴颈的同轴度误差、轴承本身的各种误差、轴承之间的同轴度误差、主轴绕度等。但它们对主轴径向回转精度的影响大小随加工方式的不同而不同。



主轴回转误差

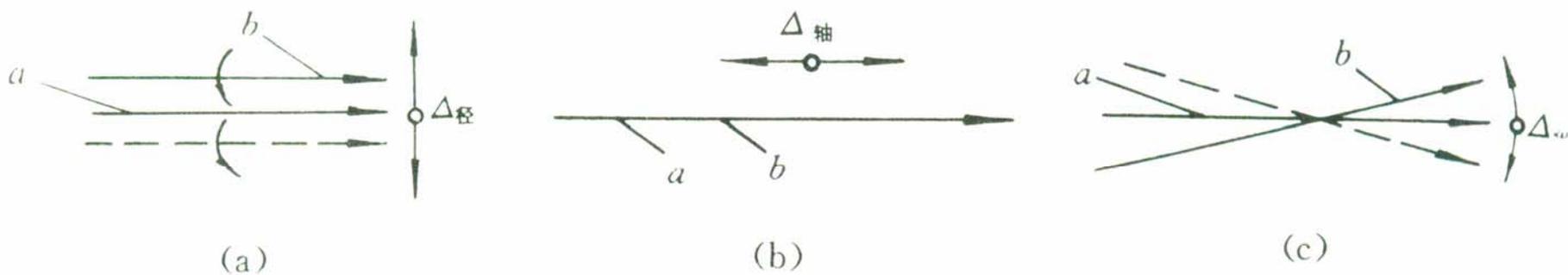


图 4-1 主轴回转误差分析图

a —平均回转轴线; b —瞬时回转轴线;

$\Delta_{\text{径}}$ —径向跳动; $\Delta_{\text{轴}}$ —轴向窜动; Δ_{ω} —角度摆动

主轴回转误差

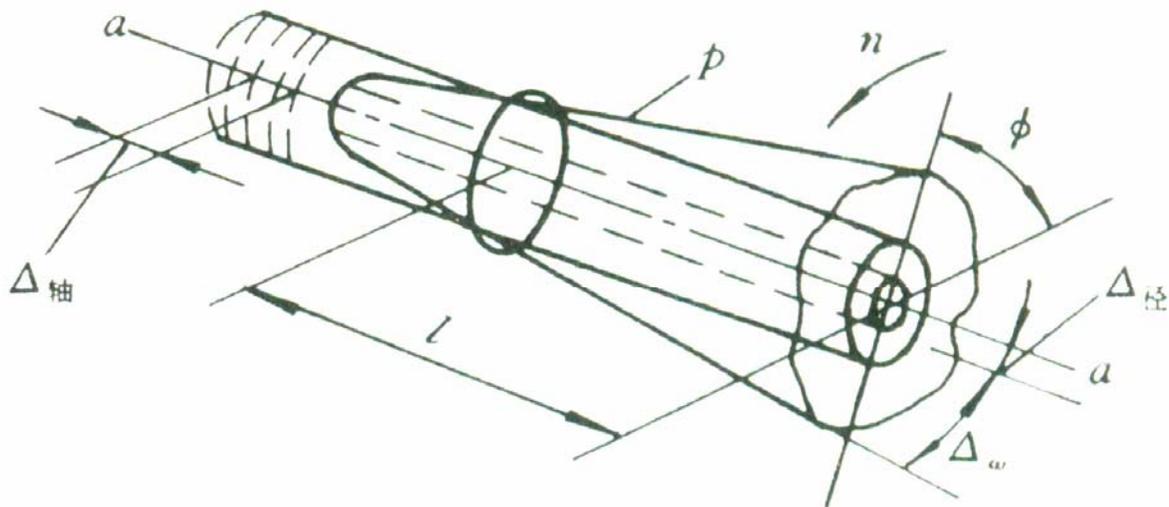


图 4-2 主轴回转误差的基本形式

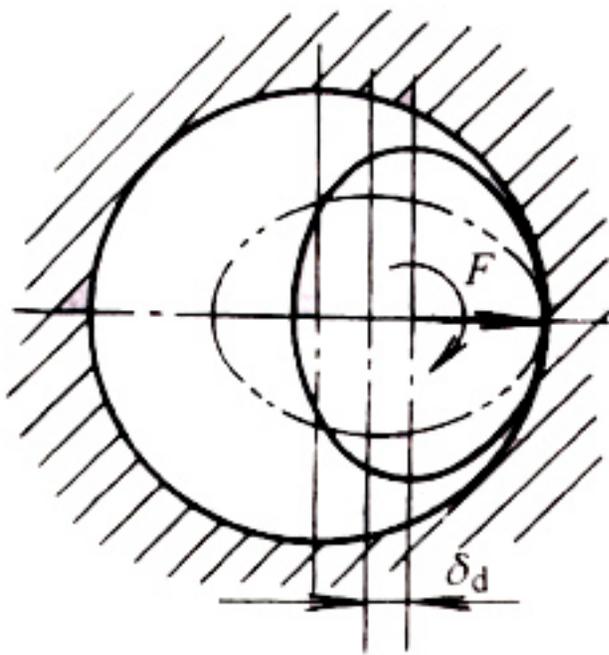
a —平均回转轴线； n —主轴转向； p —实际回转轴线；

ϕ —回转位置； l —轴承距离； $\Delta_{\text{轴}}$ —轴向窜动；

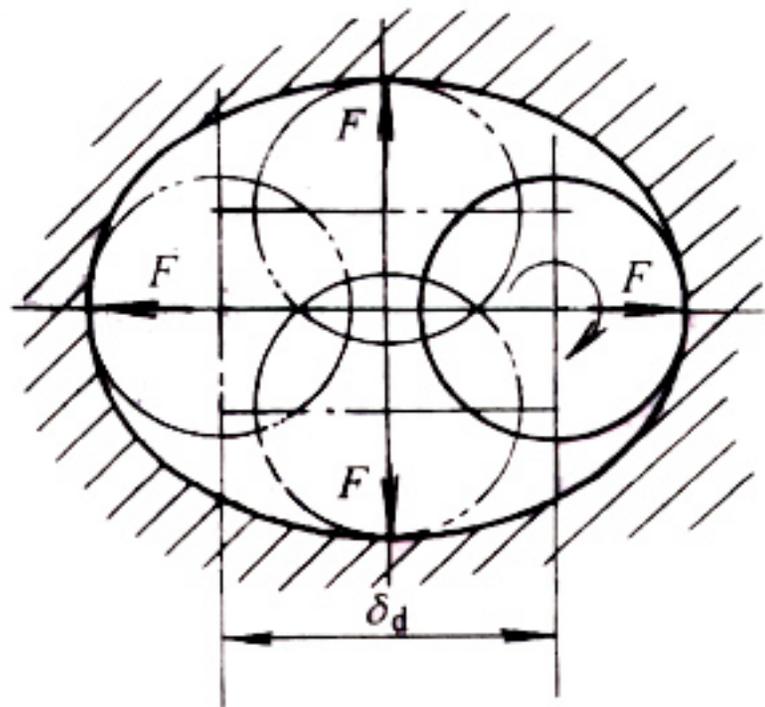
$\Delta_{\text{径}}$ —径向跳动； Δ_{ω} —角度摆动



径向圆跳动



a)



b)

主轴回转误差

- 产生轴向窜动的主要原因是主轴轴肩端面和轴承承载端面对主轴回转轴线有垂直度误差。
- 不同的加工方法，主轴回转误差所引起的加工误差也不同。
- 在车床上加工外圆和内孔时，主轴径向回转误差可以引起工件的圆度和圆柱度误差，但对加工工件端面则无直接影响。
- 主轴轴向回转误差对加工外圆和内孔的影响不大，但对所加工端面的垂直度及平面度则有较大的影响。
- 在车螺纹时，主轴向回转误差可使被加工螺纹的导程产生周期性误差。



主轴回转误差

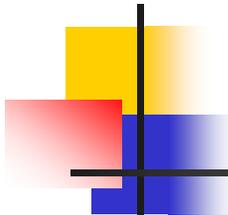
- 适当提高主轴及箱体的制造精度，选用高精度的轴承，提高主轴部件的装配精度，对高速主轴部件进行平衡，对滚动轴承进行预紧等，均可提高机床主轴的回转精度。

刀具的几何误差

- 刀具误差对加工精度的影响随刀具种类的不同而不同。采用定尺寸刀具成形刀具展成刀具加工时，刀具的制造误差会直接影响工件的加工精度；而对一般刀具（如车刀等），其制造误差对工件加工精度无直接影响。

任何刀具在切削过程中，都不可避免地要产生磨损，并由此引起工件尺寸和形状地改变。正确地选用刀具材料和选用新型耐磨地刀具材料，合理地选用刀具几何参数和切削用量，正确地刃磨刀具，正确地采用冷却液等，均可有效地减少刀具地尺寸磨损。必要时还可采用补偿装置对刀具尺寸磨损进行自动补偿。



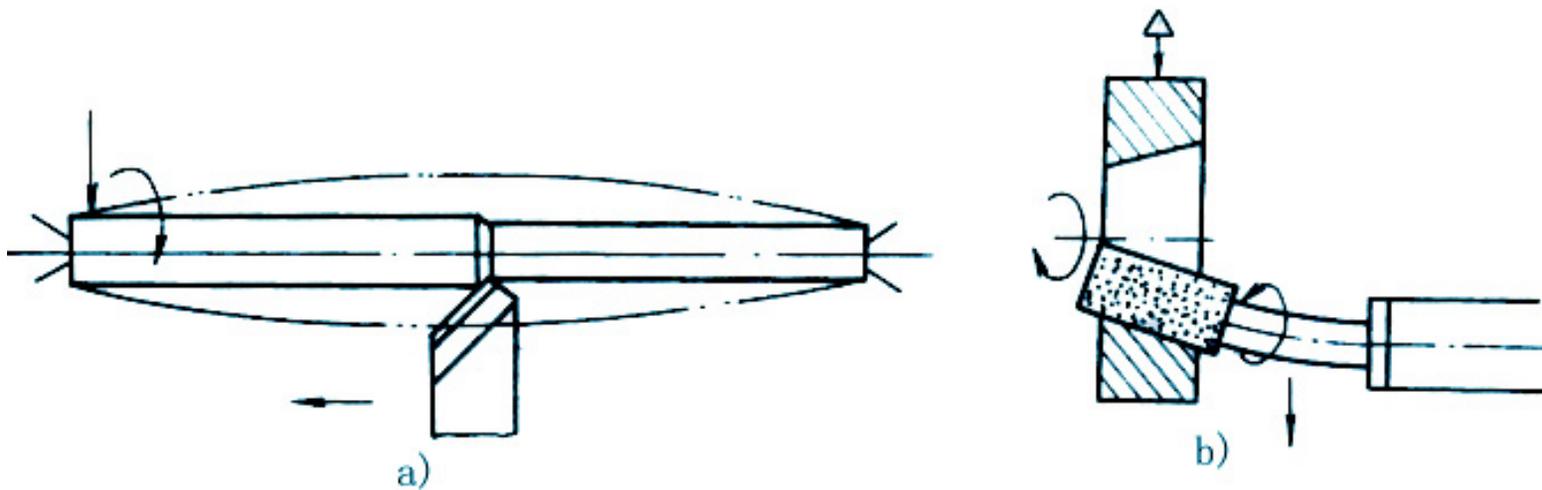


夹具的几何误差

夹具的作用是使工件相当于刀具和机床具有正确的位置，因此夹具的制造误差对工件的加工精度（特别是位置精度）有很大影响。

工艺系统受力变形引起的误差

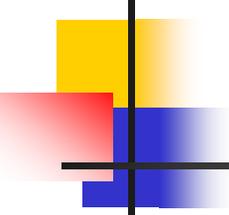
- 机械加工工艺系统在切削力、夹紧力、惯性力、重力、传动力等的作用下，会产生相应的变形，从而破坏了刀具和工件之间的正确的相对位置，使工件的加工精度下降。



受力变形对工件精度的影响

a) 车长轴 b) 磨内孔



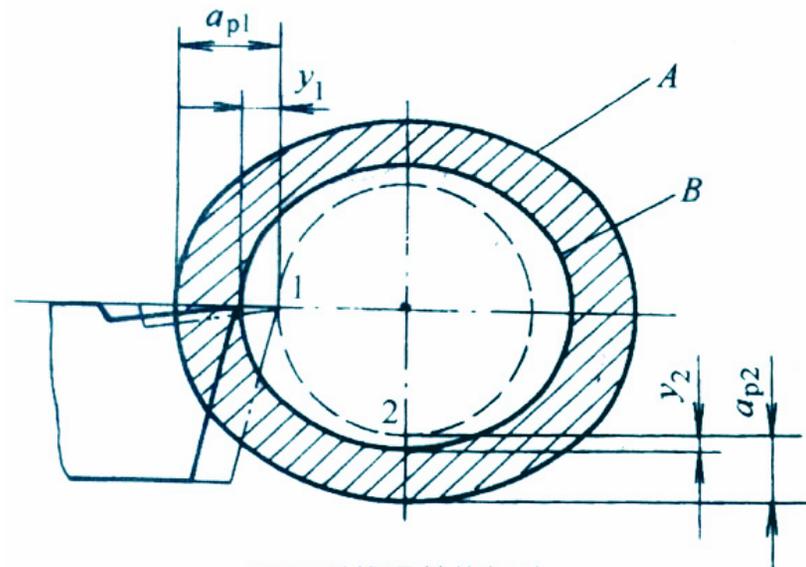


由于切削力变化引起的误差

- 加工过程中，由于工件的加工余量发生变化，工件材质不均等因素引起的切削力变化，使工艺系统变形发生变化，从而产生加工误差。

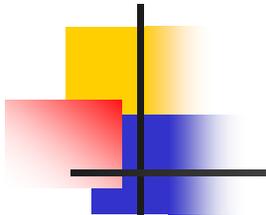
由于切削力变化引起的误差

- 若毛坯A有椭圆形状误差。
- 毛坯存在圆度误差 $\Delta_{\text{毛}} = a_{p1} - a_{p2}$,
- 工件的圆度误差 $\Delta_{\text{工}} = y_1 - y_2$,
- 毛坯误差复映现象。
 $\Delta_{\text{工}}$ 与 $\Delta_{\text{毛}}$ 之比值 ε 称为误差复映系数，它是误差复映程度的度量。



毛坯形状误差的复映



- 
- ①系统刚度愈高，加工精度愈高。
 - ②走刀次数(或工步次数)愈多，总的误差复映系数愈小，零件的形状精度愈高。
 - ③切深 a_p 值的大小并不影响误差复映系数值
 - ④可以根据零件所要求的形状精度和毛坯的情况来选择工艺系统刚度及走刀次数，也可以根据现有工艺系统的刚度及走刀次数，来计算工件可能达到的形状精度。

不平衡动力对加工精度的影响

➤ (1) 传动力的影响

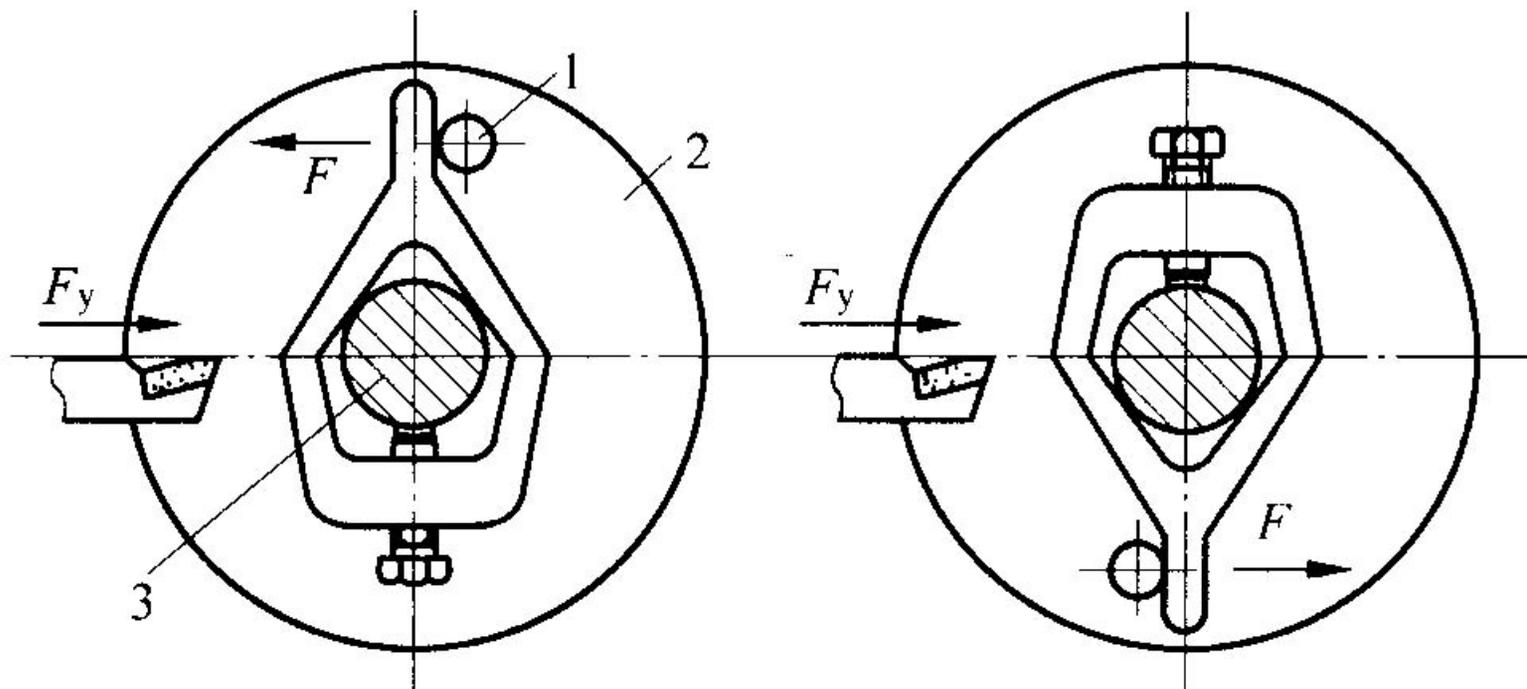


图 14-21 传动力对加工精度的影响

1—传动销(爪)；2—拨盘；3—工件



不平衡动力对加工精度的影响

➤ (1) 传动力的影响

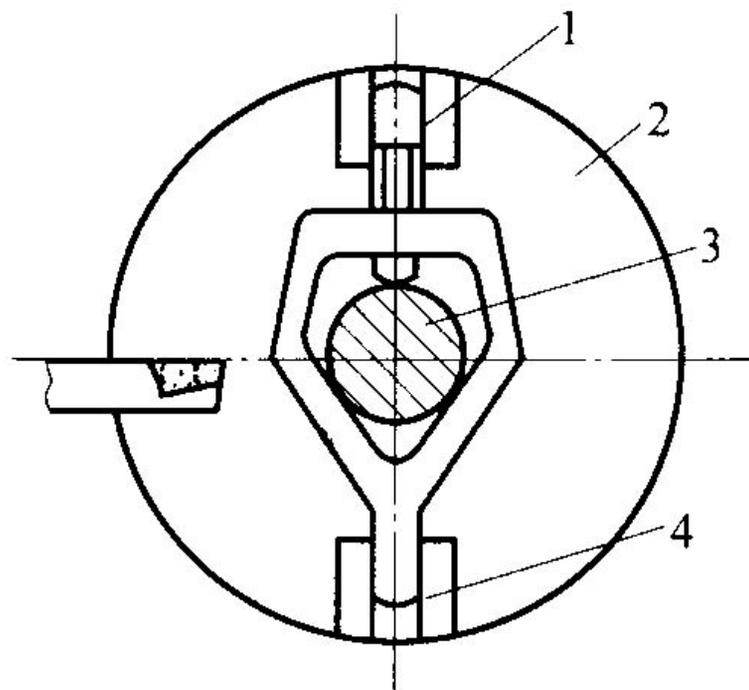


图 14-22 用双爪拨盘传动工件的结构示意图

1—拨爪；2—拨盘；3—工件；4—拨爪

惯性力的影响

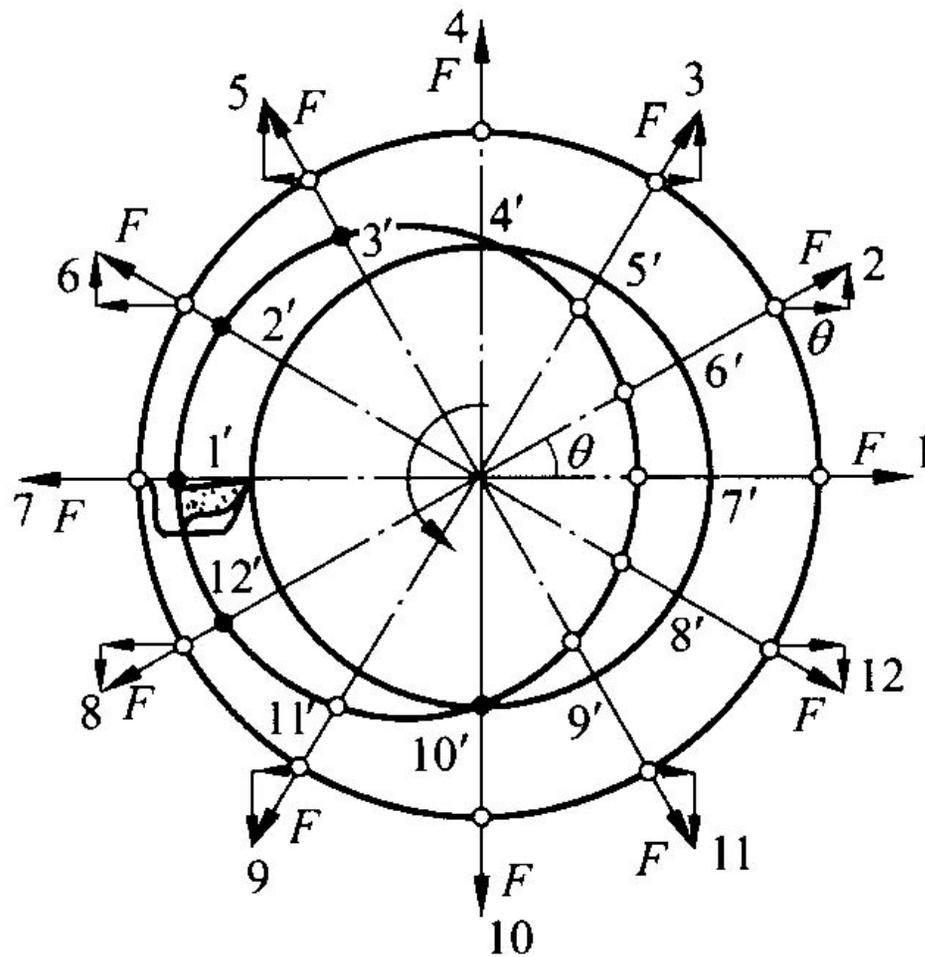


图 14-23 惯性力对加工精度的影响

重力的影响

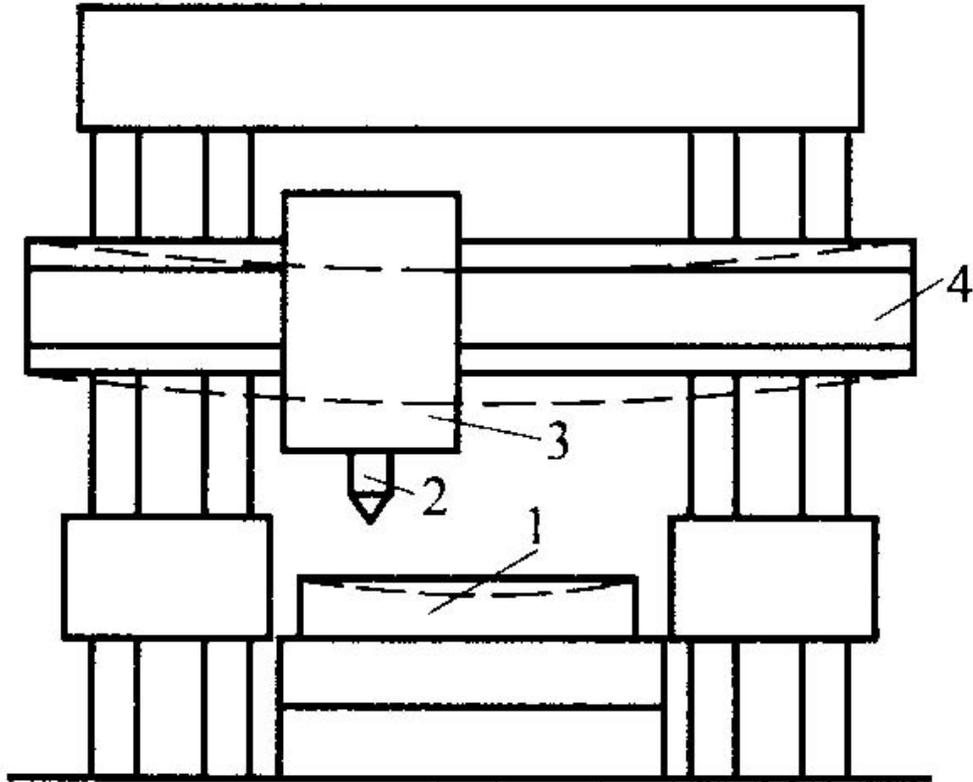


图 14-24 机床部件的重力所引起的加工误差

1—工件；2—刨刀；3—刀架；4—横梁



夹紧力对加工精度的影响

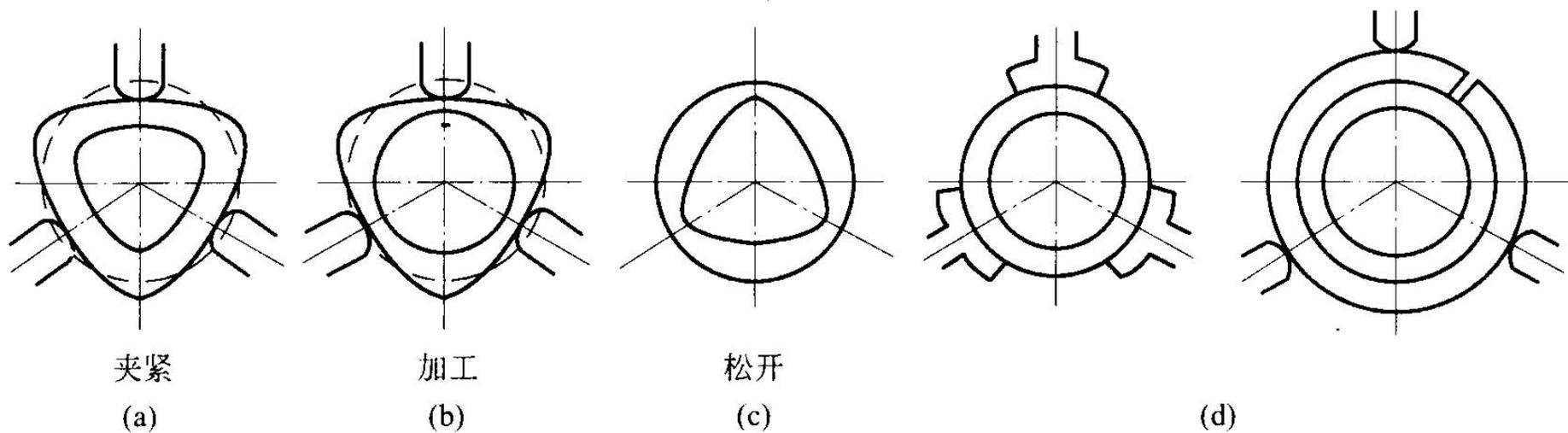


图 14-25 薄壁套筒零件由于夹紧力引起的加工误差

夹紧力对加工精度的影响

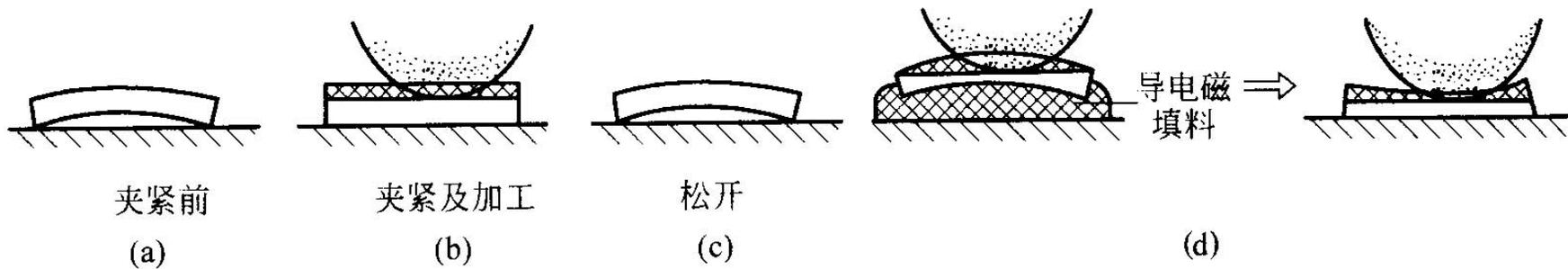


图 14-26 平面磨削薄片零件由于夹紧力引起的加工误差

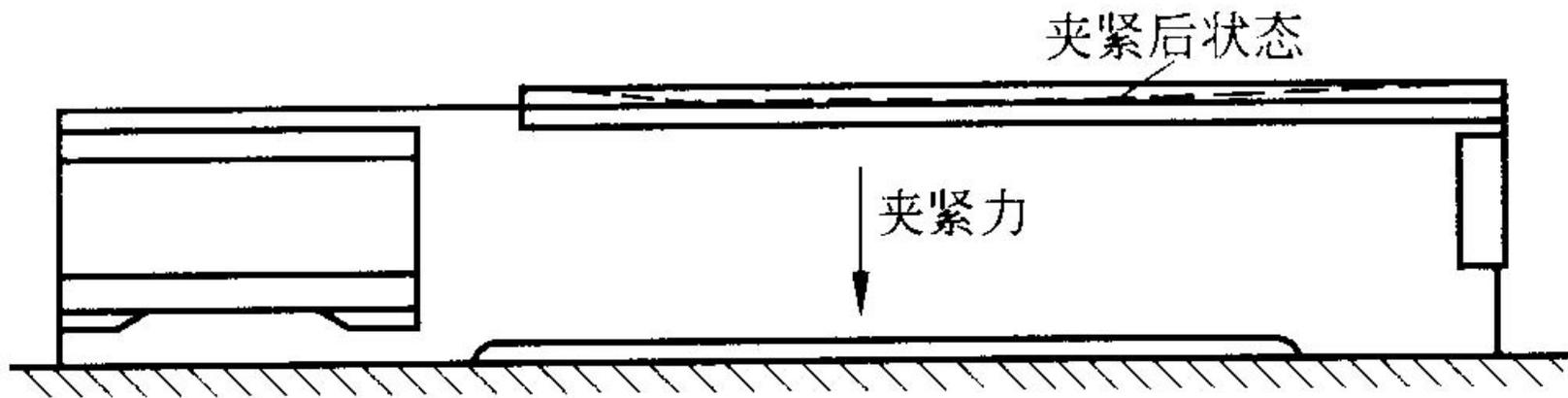
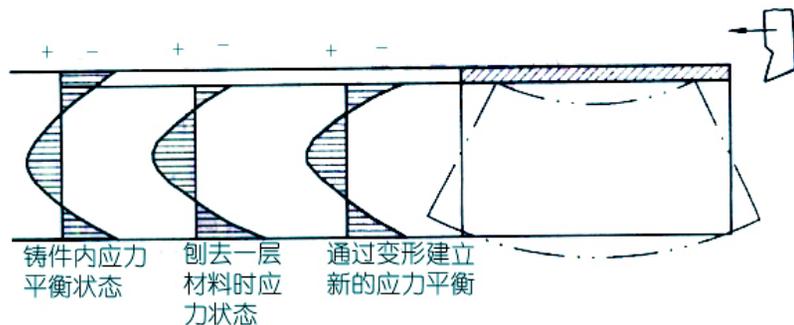
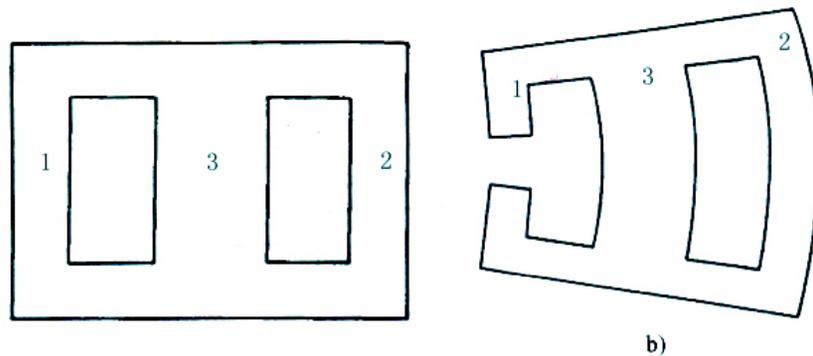


图 14-27 利用夹紧力使工件变形达到要求的精度



内应力对加工精度的影响

- **热加工中内应力的产生** 在热处理工序中由于工件壁厚不均匀、冷却不均、金相组织的转变等原因，使工件产生内应力。



铸件因内应力而引起的变形



内应力对加工精度的影响

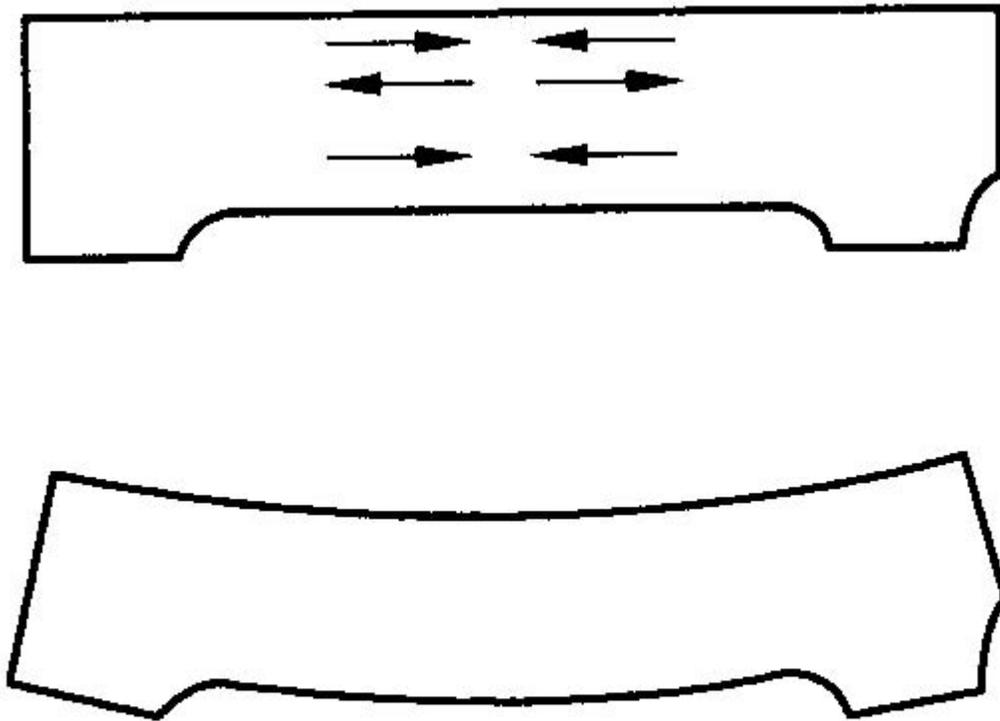


图 14-29 床身因内应力而引起的变形

工艺系统的受热变形对加工精度的影响

- 工艺系统热变形对加工精度的影响比较大，特别是在精密加工和大件加工中，由热变形所引起的加工误差有时可占工件总误差的40%~70%。机床、刀具和工件受到各种热源的作用，温度会逐渐升高，同时它们也通过各种传热方式向周围的物质和空间散发热量。当单位时间传入的热量与其散出的热量相等时，工艺系统就达到了热平衡状态。

工艺系统的受热变形对加工精度的影响

- 工件的热变形
- 例如磨削钢轴直径为100mm，工件温度均匀地由室温20℃升到60℃，直径方向的热膨胀为0.048mm，相当于IT8精度的公差值。
- 对于大型平板类零件，如高600mm，长2000mm的机床床身的磨削加工，若工件的顶面与底面的温度差为2.4℃，热变形可达20μm，工件中凸拱起，中间被多切除，加工完毕冷却后，加工表面产生中凹的误差。因此要采用充足的冷却液，或者提高工件的进给速度以减少传给工件的热量。



工艺系统的受热变形对加工精度的影响

- 刀具的热变形
- 刀具热变形的热源主要是切削热。切削热传给刀具的比例虽然一般都不很大，但由于刀具尺寸小，热容量小，刀具温升较高，刀头部位的温升更高，它对加工精度的影响是不能忽视的。

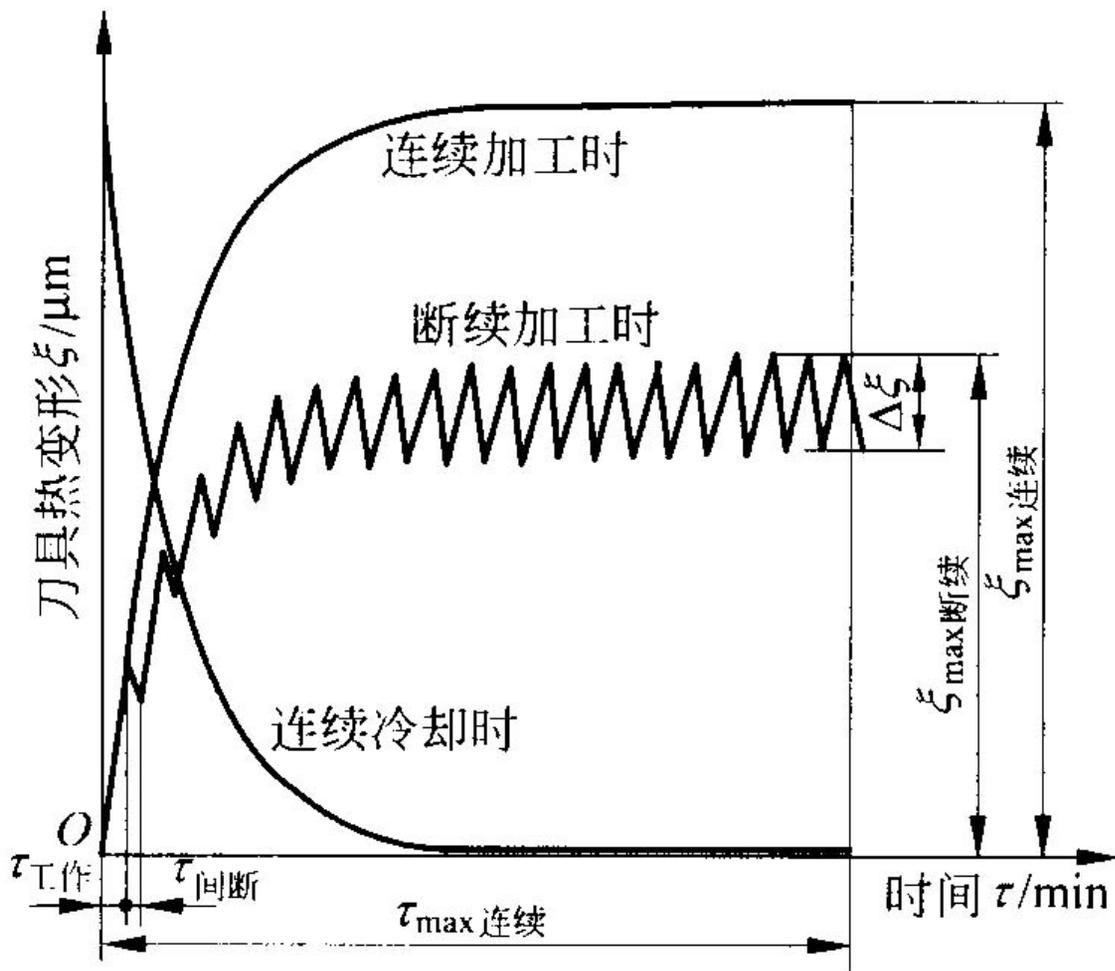


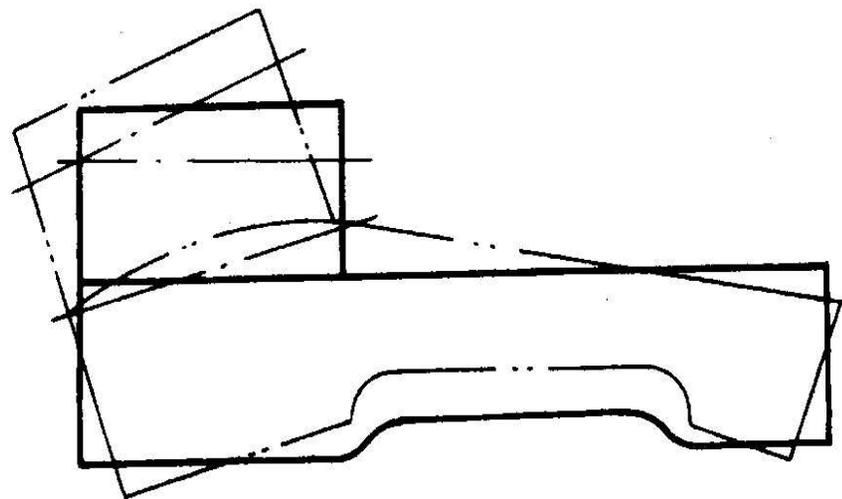
图 14-30 有节奏加工时车刀的温度变形规律



工艺系统的受热变形对加工精度的影响

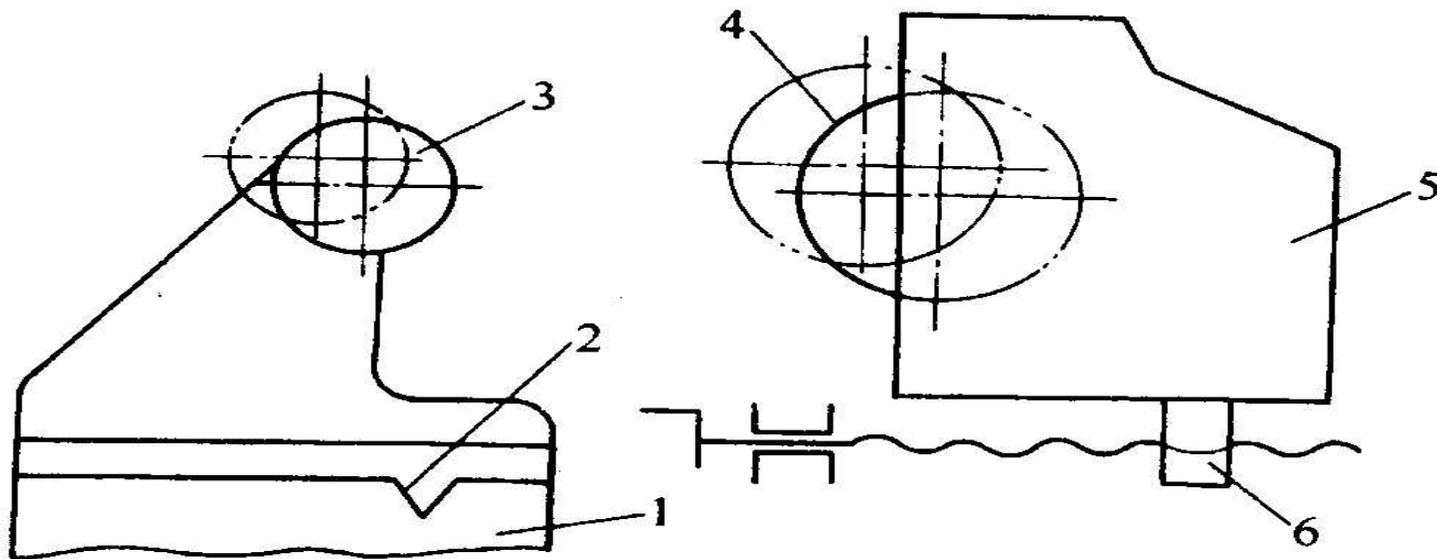
➤ 机床的热变形

车、铣、钻、镗等机床的主要热源是主轴箱。图5-26所示车床，主轴箱的温升将使主轴升高；由于主轴前轴承的发热量大于后轴承的发热量，主轴前端将比后端高；由于主轴箱的热量传给床身，床身导轨亦将不均匀地向上抬起。



工艺系统的受热变形对加工精度的影响

- 机床的热变形
- 外圆磨床上砂轮架5的主轴轴承发热严重，将使砂轮架主轴轴线升高并使砂轮架以螺母6为支点向工件3方向趋近；因床身内腔所贮液压油发热，将使装夹工件3的主轴箱主轴轴线升高并以导轨2为支点向远离砂轮4的方向移动。



减小工艺系统热变形的途径

- 减少发热和隔热
- 尽量将热源从机床内部分离出去。
- 不能分离出去的热源，一方面从结构设计上采取措施，改善摩擦条件，减少热量的发生，另一方面也可采取隔热措施。

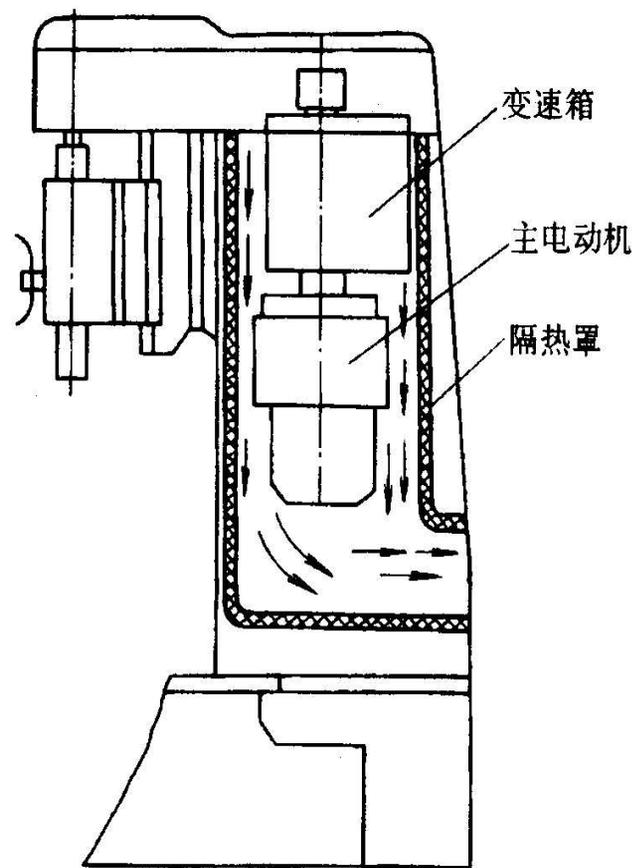


图5-29 采用隔热罩
减少热变形

减小工艺系统热变形的途径

➤ 均衡温度场

➤ 如图5-30所示的端面磨床，立柱前壁因靠近主轴箱而温升较高，采用风扇将主轴箱内的热空气经软管通过立柱后壁空间排出，使立柱前后壁的温度大致相等，减小立柱的弯曲变形。

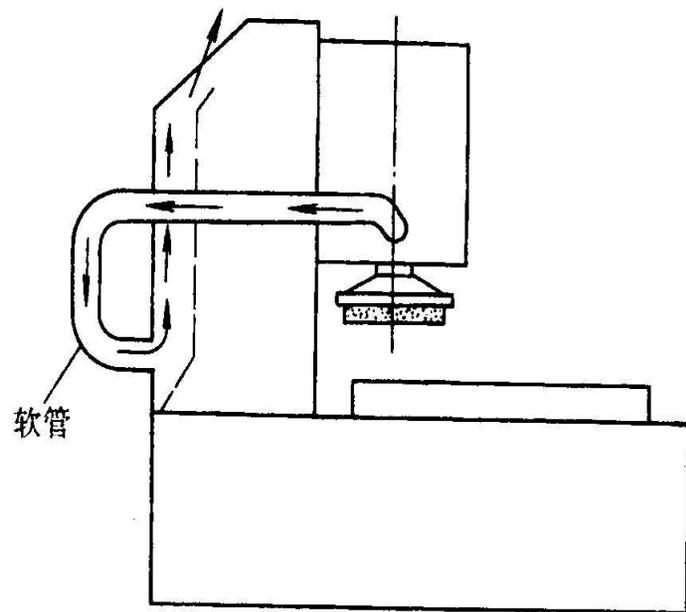


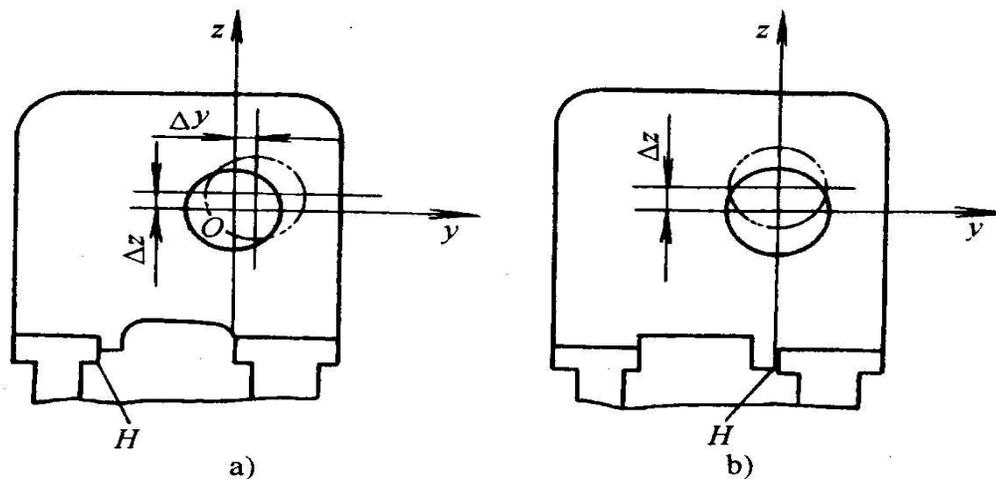
图5-30 均衡立柱前后壁的温度场



减小工艺系统热变形的途径

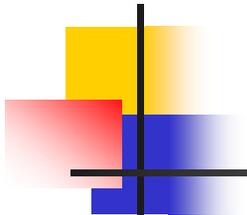
➤ 改进机床结构

- 将车床主轴箱在床身上的定位方式由图5-31a所示方式改为图5-31b所示方式，使误差敏感方向（y向）的热伸长量尽量小，以减小工件的加工误差。



减小工艺系统热变形的途径

- 加快温度场的平衡
- 在加工工件前使机床作高速空运转；在机床的适当部位设置附加的“控制热源”。
- 控制环境温度
- 精密加工机床应尽量减少外部热源的影响，避免日光照射，布置取暖设备时要避免使机床受热不均。精密加工、精密计量和精密装配都应在恒温条件下进行



加工误差的综合分析

加工误差的统计分析法就是以生产现场对工件进行实际测量所得的数据为基础，应用数理统计的方法，分析一批工件的情况，从而找出产生误差的原因以及误差性质，以便提出解决问题的方法。

在机械加工中，经常采用的统计分析法主要有分布图分析法和点图分析法。

1 分布曲线法

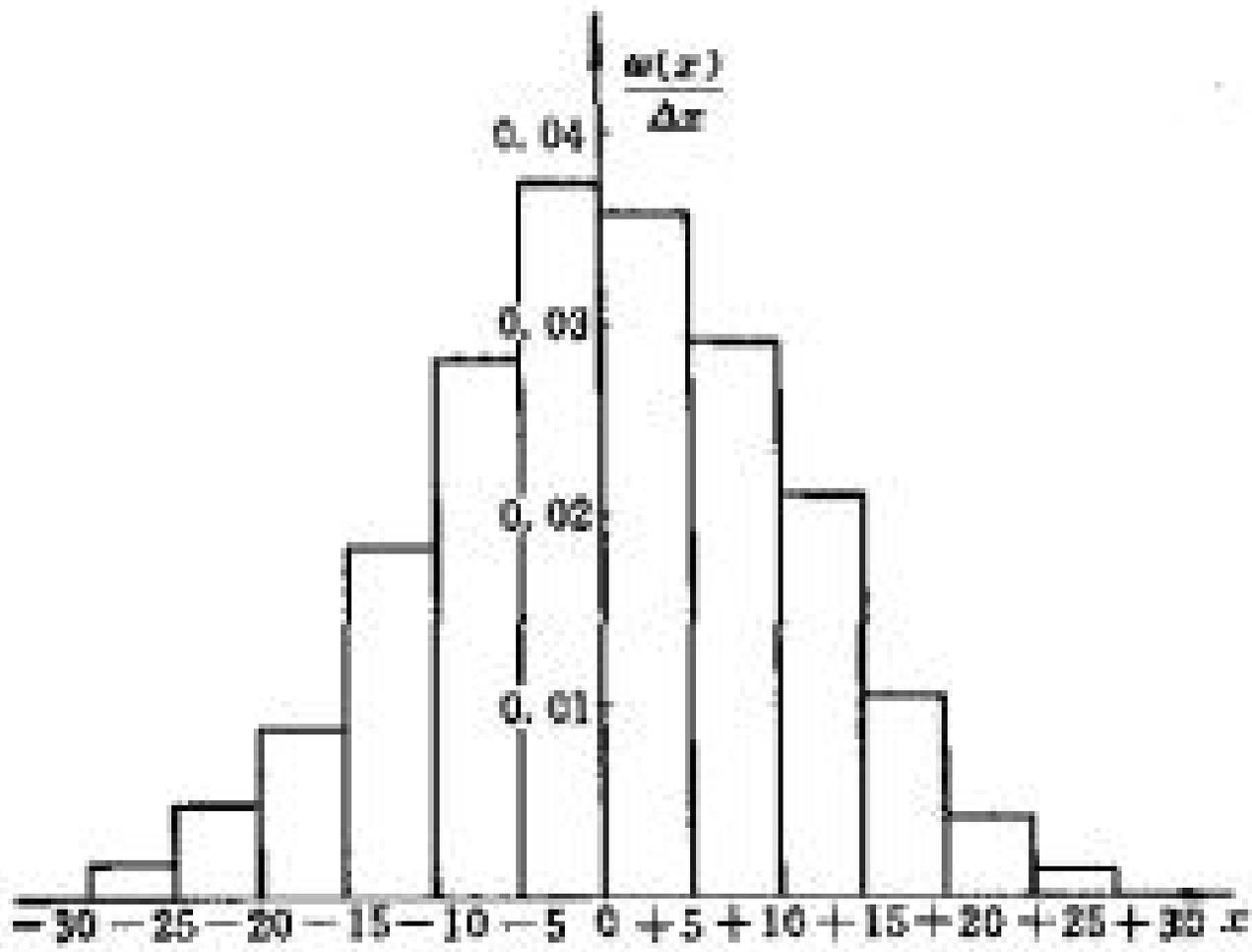
1)实际分布图——直方图

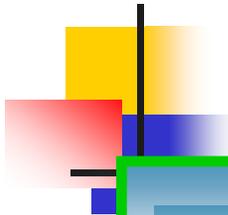
加工一批工件，由于随机性误差的存在，加工尺寸的实际数值是各不相同的，这种现象称为**尺寸分散**。

在一批零件的加工过程中，测量各零件的加工尺寸，把测得的数据记录下来，按尺寸大小将整批工件进行分组，每一组中的零件尺寸处在一定的间隔范围内。同一尺寸间隔内的零件数量称为**频数**，频数与该批零件总数之比称为**频率**。

以工件尺寸为横坐标，以频数或频率为纵坐标，即可作出该工序工件加工尺寸的实际分布图——**直方图**。







2) 理论分布图——正态分布曲线



大量实践经验表明，在用调整法加工时，当所取工件数量足够多，且无任何优势误差因素的影响，则所得一批工件尺寸的实际分布曲线便非常接近正态分布曲线。在分析工件的加工误差时，通常用正态分布曲线代替实际分布曲线，可使问题的研究大大简化。

(1) 正态分布曲线方程

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (-\infty < x < +\infty, \sigma > 0)$$

当采用该曲线代表加工尺寸的实际分布曲线时，上式各参数的意义为：

y —— 分布曲线的纵坐标，表示工件的分布密度（频率密度）；

x —— 分布曲线的横坐标，表示工件的尺寸或误差；

\bar{x} —— 工件的平均尺寸（分散中心）， $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ；

σ —— 一批零件的均方根差， $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ ；

n —— 一批工件的数目（样本数）。



(2) 正态分布曲线的特征参数

- 正态分布曲线的特征参数有两个，即 \bar{x} 和 σ
- 算术平均值 \bar{x} 是确定曲线位置的参数。它决定一批工件尺寸分散中心的坐标位置。若 \bar{x} 改变时，整个曲线沿 x 轴平移，但曲线形状不变。
- 使 \bar{x} 产生变化的主要原因是常值系统误差的影响。
- 工序标准偏差 σ 决定了分布曲线的形状和分散范围。
- 当算术平均值保持不变时， σ 值越小则曲线形状越陡，尺寸分散范围越小，加工精度越高；
- σ 值越大则曲线形状越平坦，尺寸分散范围越大，加工精度越低。
- σ 的大小实际反映了随机性误差的影响程度，随机性误差越大则 σ 越大。



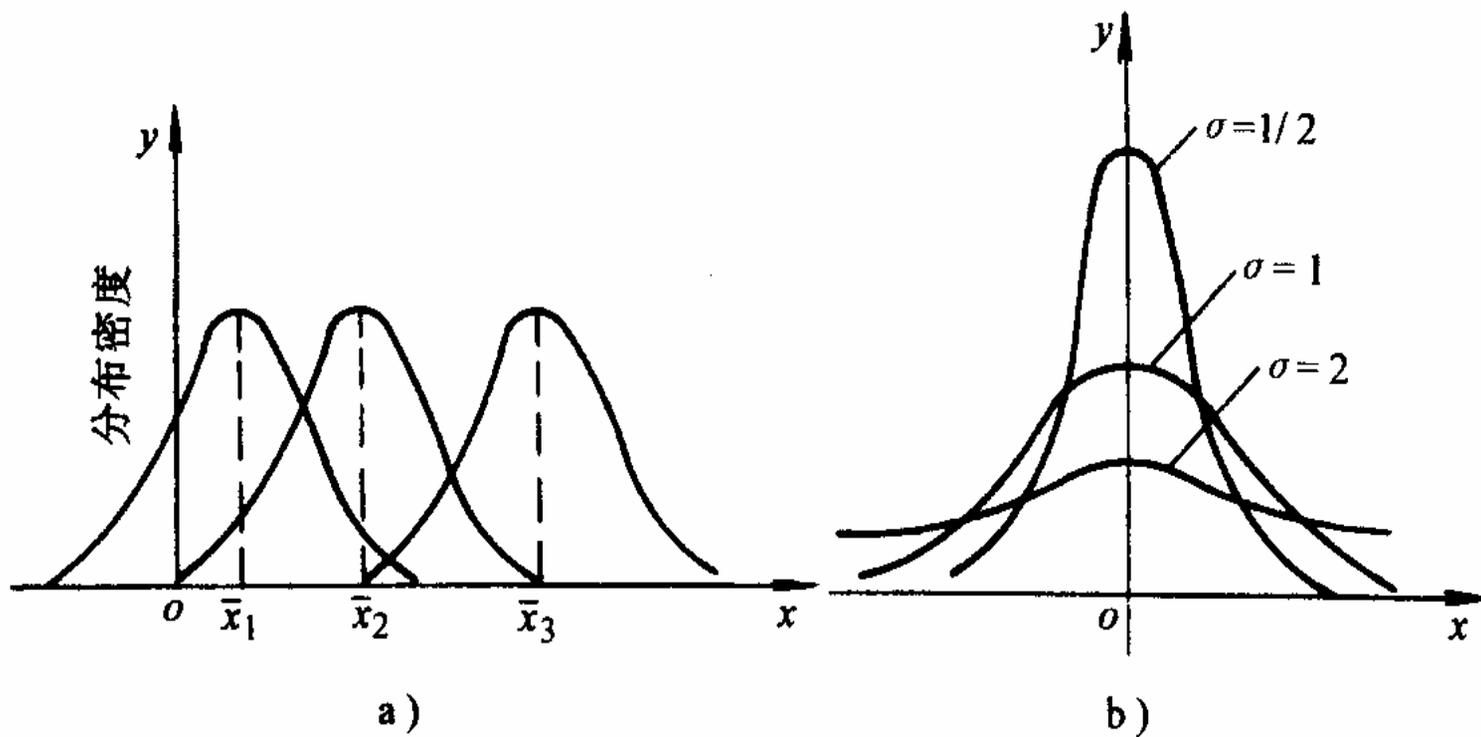


图4-33 正态分布曲线及其特征

(3) 正态分布曲线的特点

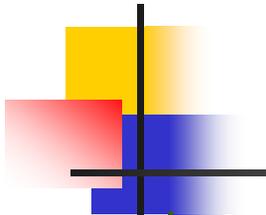
①曲线对称于直线 \bar{x}

②曲线与x轴围成的面积代表了一批工件的全部，即**100%**，其相对面积为**1**。

在 **$\pm 3\sigma$** 范围内，曲线围成的面积为**0.9973**。

实际生产中常常认为加工一批工件尺寸全部在 **$\pm 3\sigma$** 范围内，即：

正态分布曲线的分散范围为 **$\pm 3\sigma$** ，工艺上称该原则为**6 σ** 准则。



$\pm 3\sigma$ （或 6σ ）的概念在研究加工误差时应用很广。

6σ 的大小代表了某种加工方法在一定的条件（如毛坯余量、机床、夹具、刀具等）下所能达到的加工精度。

所以在一般情况下，应使所选择的加工方法的标准偏差 σ 与公差带宽度 T 之间具有下列关系：

$$6\sigma \leq T$$

但考虑到系统误差及其它因素的影响，应当使 6σ 小于公差带宽度 T ，才能可靠地保证加工精度。



3) 非正态分布曲线

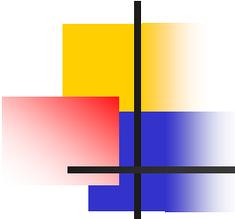
工件的实际分布，有时并不近似于正态分布，常见的非正态分布有以下几种形式：

1) **锯齿形** 直方图的矩形高低相间，形如锯齿。出现该图形的主要原因可能是测量方法不当或读数不准，也可能是数据分组不当所致。

2) **对称性** 中间直方最高，其左右直方逐渐降低且基本呈对称分布。该图形属正常图形。

3) **偏向形** 直方顶端偏向一侧，图形不对称。出现该图形的主要原因可能是工艺系统产生显著的热变形，如刀具受热伸长会使加工的孔偏大，图形右偏；使加工的轴偏小，图形左偏，或因为操作者加工习惯所致。有时端跳、径跳等形位误差也服从这种分布。





4) 孤岛形

在远离分布中心的地方又出现小直方。出现该图形的主要原因是加工条件有变动，也可能因毛刺影响测量结果的准确性。

5) 双峰形

分布图具有两个顶峰。产生这种图形的主要原因可能是经过两次不同的调整加工的工件混在一起。

6) 平顶形

靠近中间的几个直方高度相近，呈平顶状。产生这种图形的主要原因是生产过程中某种缓慢变动倾向的影响，如加工中刀具的显著磨损。



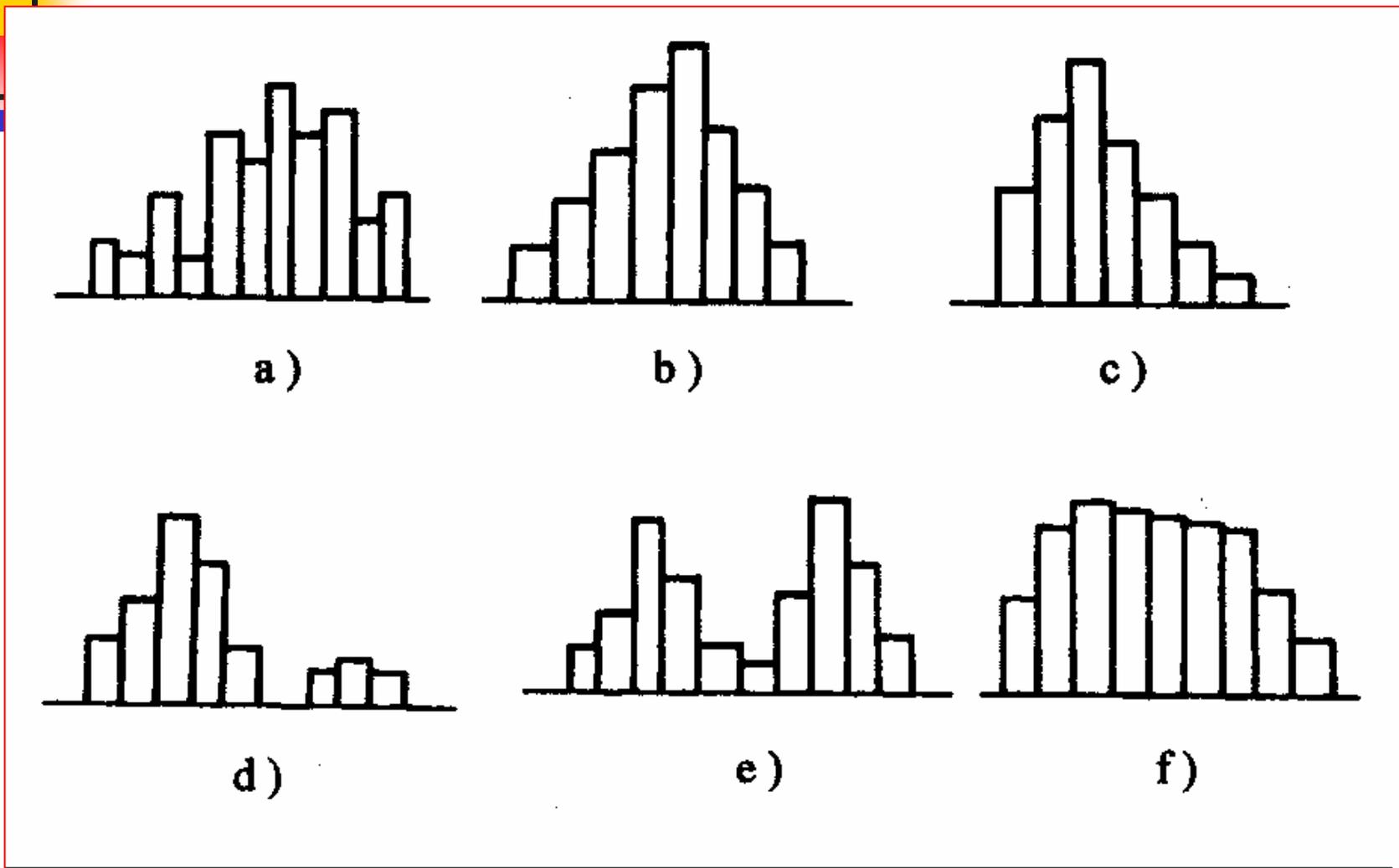


图7-44 常见的几种非正态分布图形

a) 锯齿形 b) 对称形 c) 偏向形
 d) 孤岛形 e) 双峰形 f) 平顶形



2. 点图分析法

(1) 点图的形式

1) 个值点图

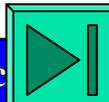
❖按加工顺序逐个地测量一批工件的尺寸，以工件序号为横坐标，以工件的加工尺寸为纵坐标，就可作出个值点图

❖个值点图反映了工件逐个的尺寸变化与加工时间的关系。若点图上的上、下极限点包络成二根平滑的曲线，并作这两根曲线的平均值曲线，就能较清楚地揭示出加工过程中误差的性质及其变化趋势。

❖平均值曲线 $O-O'$ 表示每一瞬时的分散中心，反映了变值系统性误差随时间变化的规律。

❖其起始点 O 位置的高低表明常值系统性误差的大小。整个几何图形将随常值系统性误差的大小不同，而在垂直方向处于不同位置。

❖上下限 AA' 和 BB' 间的宽度表示在随机性误差作用下加工过程的尺寸分散范围，反映了随机性误差的变化规律。



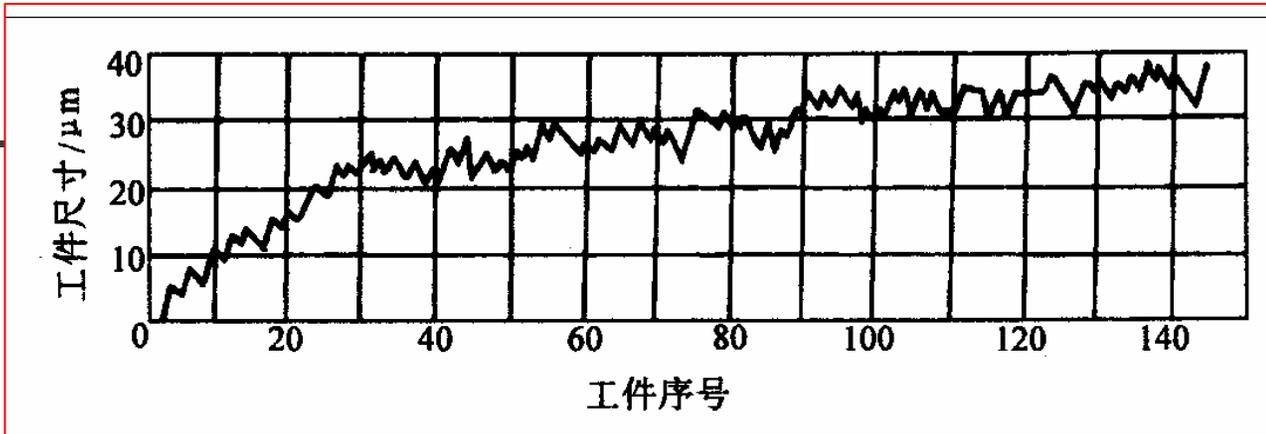


图7-47 个值点图

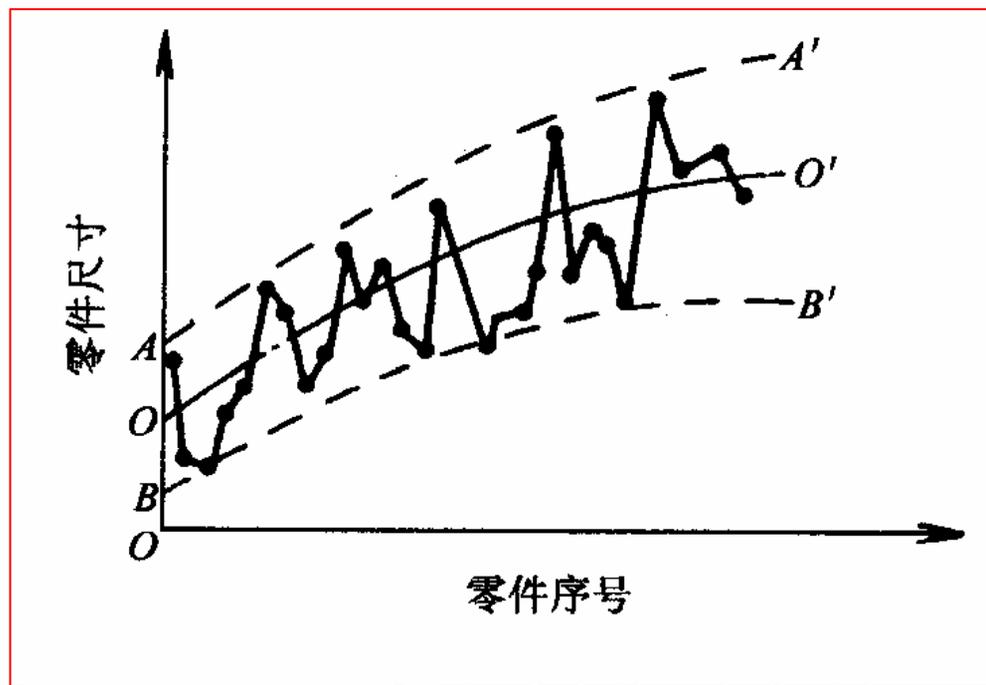


图7-48 个值点图上反映误差变化趋势

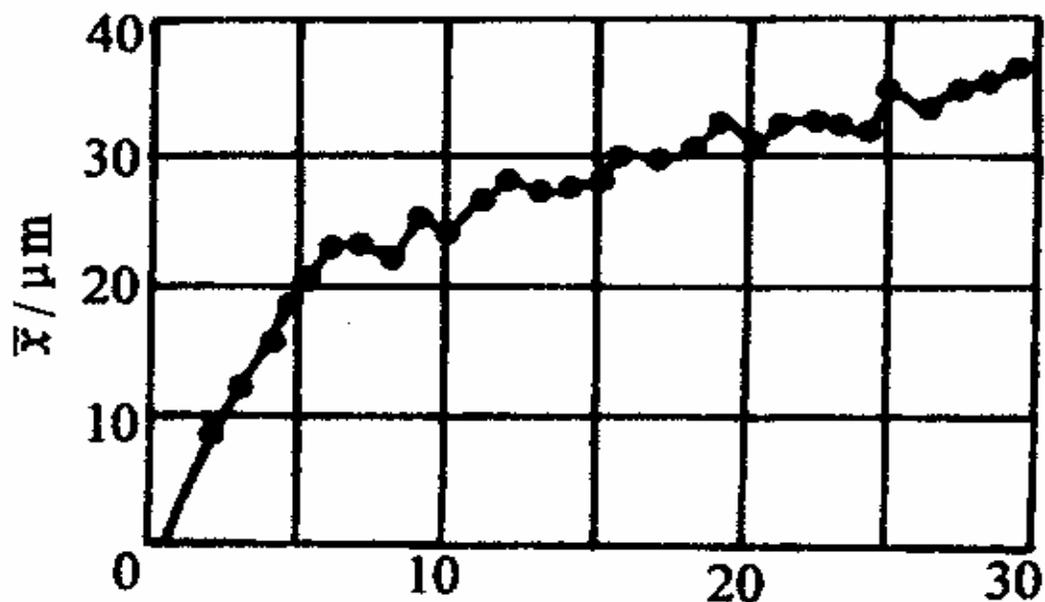


1) $\bar{X} - R$ 点图

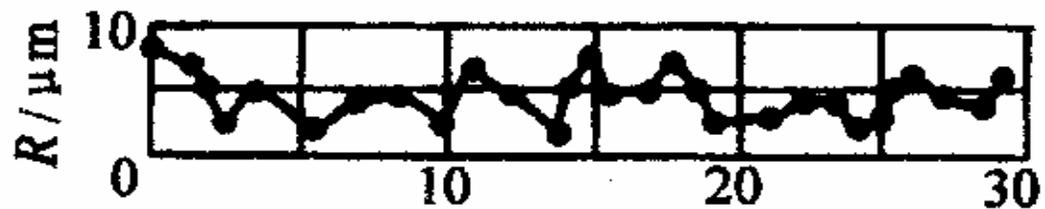
❖ 为了能直接反映出加工中系统性误差和随机性误差随加工时间的变化趋势，实际生产中常用样组点图来代替个值点图。

- 样组点图的种类很多，最常用的是 $\bar{X} - R$ 点图（平均值—极差点图）。
- 它由 \bar{X} 点图和 R 点图结合而成。
- 前者控制工艺过程质量指标的分布中心，反映了系统性误差及其变化趋势；
- 后者控制工艺过程质量指标的分散程度，反映了随机性误差及其变化趋势。
- 单独的 \bar{X} 点图或 R 点图不能全面反映加工误差的情况，必须结合起来应用。





工件组序号



工件组序号

图7-49 $\bar{X}-R$ 点图

工艺过程是否稳定，取决于该工序所采用的工艺过程中本身的误差情况，与产品是否出现废品不是一回事。

若某工序的工艺过程是稳定的，其工序能力系数 C_p 值也足够大，且样本平均值与公差带中心基本重合，那么只要在加工过程中不出现异常波动，就可以判定它不会产生废品。

加工过程中不出现异常波动，说明该工序的工艺过程处于控制之中，可以继续进行加工，否则就应停机检查，找出原因，采取措施消除使加工误差增大的因素，使质量管理从事后检验变为事前预防。

