

2 机械加工精度及其控制

Machining Precision and Errors Control



影响加工精度的原始误差及分类

原始误差——引起加工误差的根本原因是工艺系统存在着误差，将工艺系统的误差称为原始误差。

原始误差分类

原始误差

与工艺系统原始状态有关的原始误差(几何误差)

原理误差
定位误差
调整误差
刀具误差
夹具误差
机床误差

工件相对于刀具静止状态下的误差

主轴回转误差
导轨导向误差
传动误差

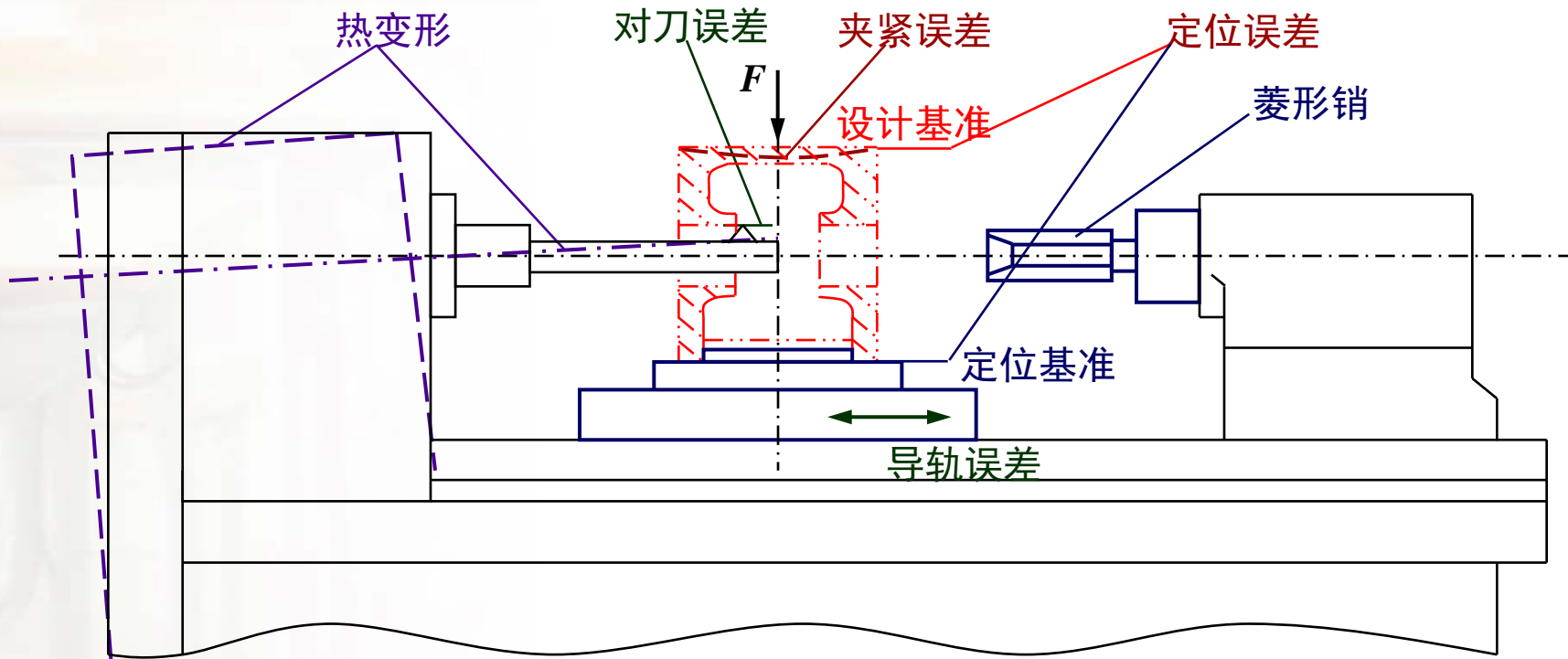
工件相对于刀具运动状态下的误差

与工艺过程有关的原始误差(动误差)

工艺系统受力变形(包括夹紧变形)
工艺系统受热变形
刀具磨损
测量误差
工件残余应力引起的变形



影响加工精度的原始误差及分类



活塞销孔精镗工序中的原始误差



误差敏感方向

❑ 工艺系统原始误差方向不同，对加工精度的影响程度也不同。对加工精度影响最大的方向，称为误差敏感方向。

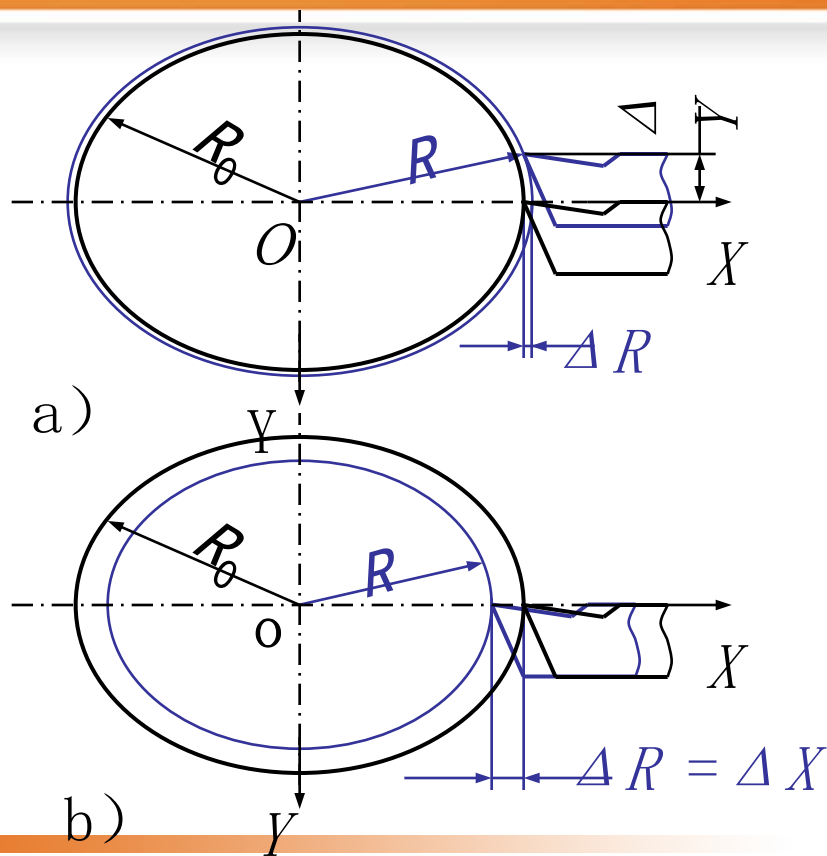
❑ 误差敏感方向一般为已加工表面过切削点的法线方向。

❑ 图中：

$$\Delta R_y = \frac{\Delta Y^2}{2R_0}$$

$$\Delta R_x = \Delta X$$

显然： $\Delta R_x \gg \Delta R_y$



影响加工精度的误差来源

影响加工误差的因素

工艺系统几何误差

工艺系统受力变形

工艺系统热变形

加工误差的统计分析

提高加工精度途径



2.7.1 工艺系统几何误差 对加工精度的影响



加工原理误差

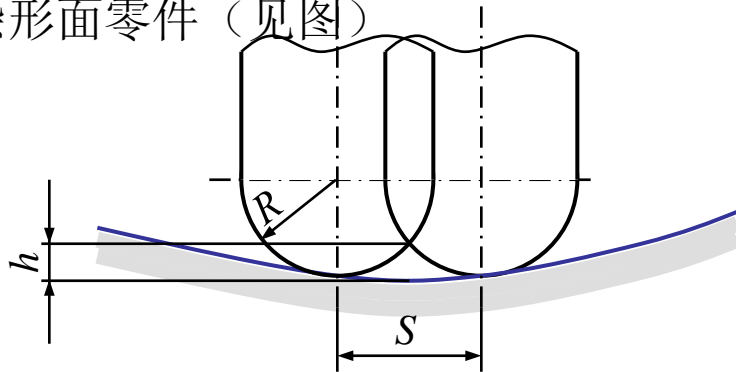
□ 加工原理误差是指采用了近似的成型运动或近似的刀刃轮廓进行加工而产生的误差。

➤ 例如在数控铣床上采用球头刀铣削复杂形面零件（见图）

$$S = \sqrt{8 \cdot R \cdot h}$$

式中 R ——球头刀半径；
 h ——允许的残留高度。

➤ 又如用阿基米德蜗杆滚刀滚切渐开线齿轮



空间曲面数控加工

★ 采了近的成型运动或近的刀刃轮廓，常常可以简化机床结构或刀具形状，或可提高生产率，有时还可得到较高加工精度。故在生产中广泛采用，其前提是原理误差不超过规定精度要求。通常原理误差不超过10~15%工件公差。

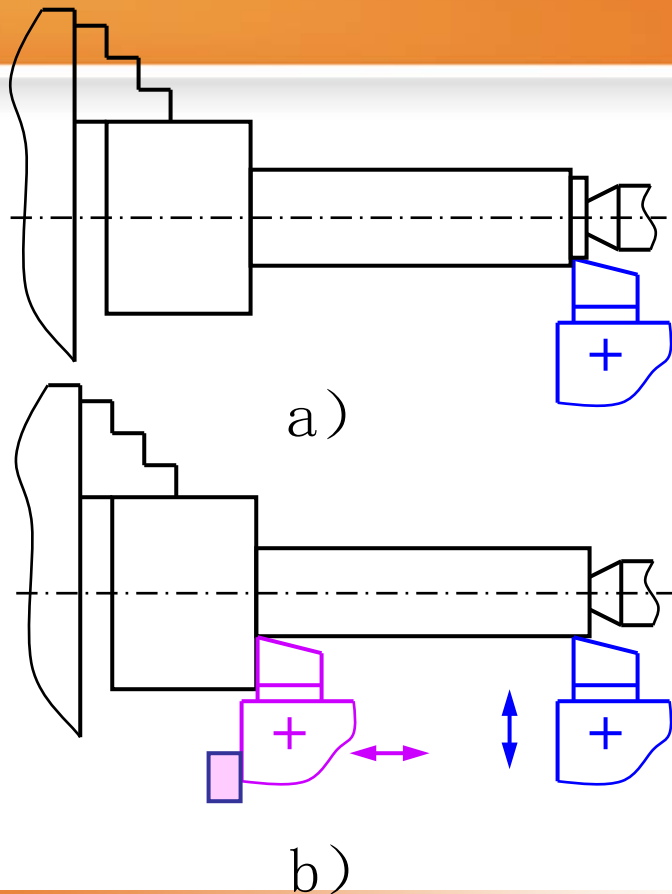
调整误差

试切法（图 a）

- 测量误差
- 试切时与正式切削时切削厚度不同造成的误差
- 机床进给机构的位移误差

调整法（图 b）

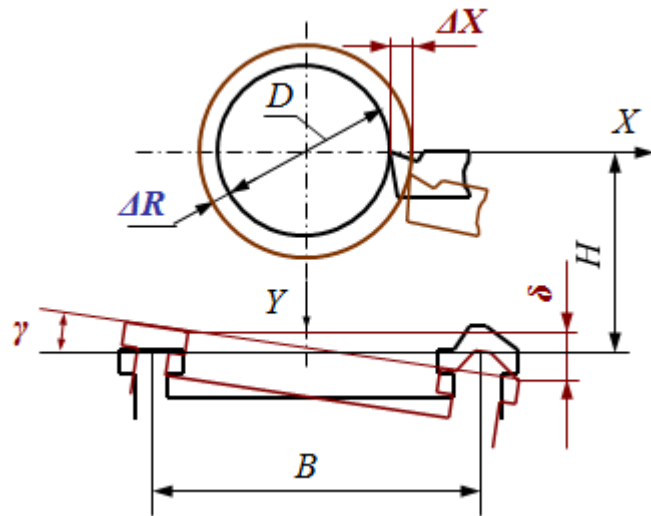
- 定程机构误差
- 样件或样板误差
- 测量有限试件造成的误差
- 和试切法有关的误差



机床误差

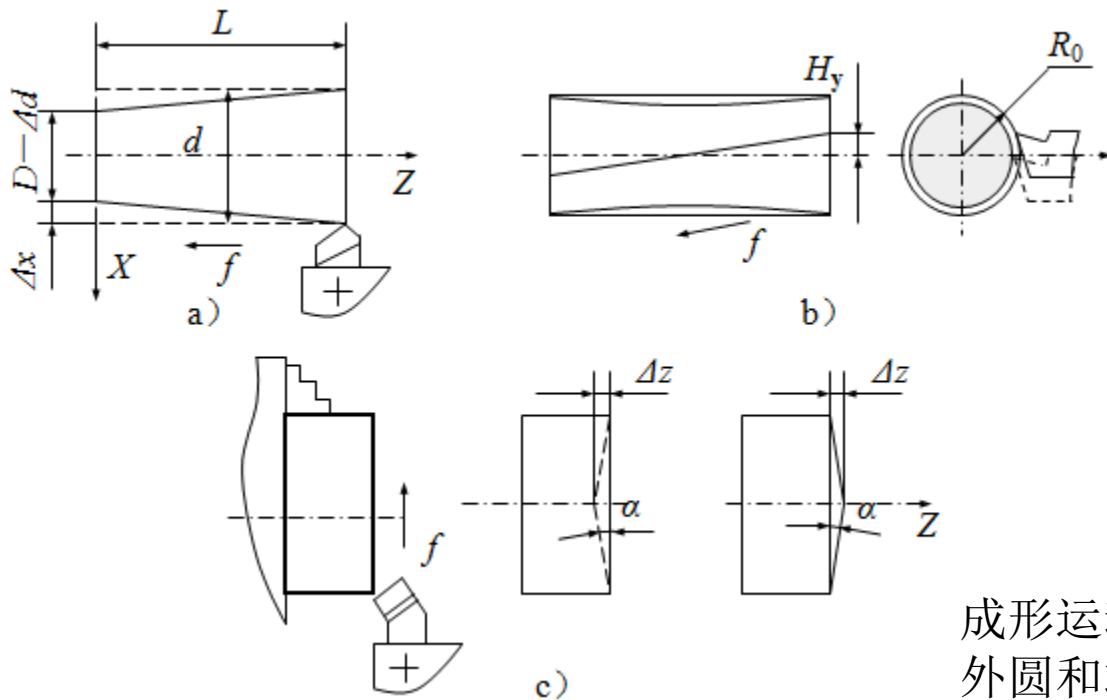
导轨导向误差

- ✦ 导轨副运动件实际运动方向与理想运动方向的偏差
 - ✦ 包括：导轨在水平面内的直线度，导轨在垂直面内的直线度，前后导轨平行度（扭曲），导轨与主轴回转轴线的平行度（或垂直度）等
- 导轨导向误差对加工精度的影响
- ✦ 导轨水平面内直线度误差：误差敏感方向，影响显著
 - ✦ 导轨垂直面内直线度误差：误差非敏感方向，影响小
 - ✦ 导轨扭曲：对加工精度的影响显著（图）



机床误差

➤ 导轨与主轴回转轴线位置误差对加工精度的影响



成形运动间位置误差对外圆和端面车削的影响



机床误差

□ 导轨导向误差理论分析方法

★ 机床坐标系： $O-i, j, k$ ，床鞍坐标系： O_1-i_1, j_1, k_1 ，工件坐标系： O_2-i_2, j_2, k_2 ， P 为工件上一点

★ 若无导向误差，床鞍在 x 处， P 点坐标：

$$(x_2, y_2, z_2) = (x_1, y_1, z_1) = (x_1 + x, y_1, z_1)$$

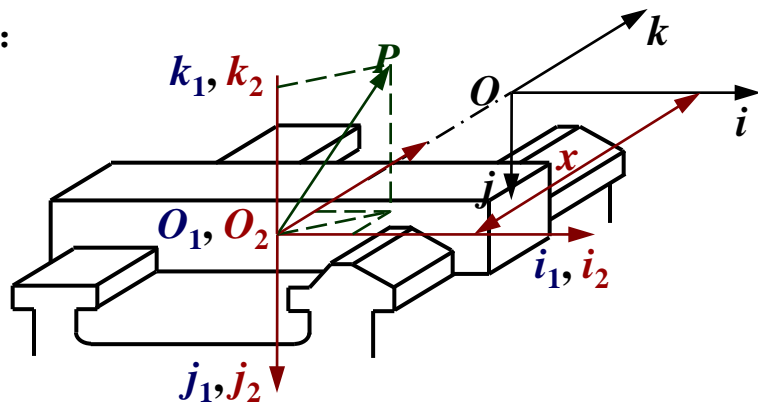
★ 若存在导向误差 α （绕 i 转角）， P 点坐标：

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = E^{i\alpha} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$

也可写成： $\vec{r}_2 = E^{i\alpha} \cdot \vec{r}_1$

式中 $E^{i\alpha}$ 为变换矩阵，同理可得绕 i 转 β 角、绕 k 转 γ 角的变换矩阵，最后有：

$$\vec{r}_2 = E^{k\gamma} E^{j\beta} E^{i\alpha} \cdot \vec{r}_1 = E \cdot \vec{r}_1$$



导轨导向误差分析



机床误差

由于 α 、 β 、 γ 数值很小，有： $\sin \alpha = \alpha$ ， $\sin \beta = \beta$ ， $\sin \gamma = \gamma$ ， $\cos \alpha = \cos \beta = \cos \gamma = 1$ ， $\alpha \beta = \beta \gamma = \gamma \alpha = 0$ ，3个旋转坐标矩阵相乘与顺序无关，于是可得到：

$$E = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix}$$

★ 不考虑平移误差， P 点由角位移引起的线性误差：

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 + x \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1 + x \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \bar{r}_2 - \bar{r}_1 = E\bar{r}_1 - \bar{r}_1 = (E - I)r_1$$

★ 综合考虑导向误差及进给系统线性位移误差，可得到：

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_x = \begin{bmatrix} \Delta x_t \\ \Delta y_t \\ \Delta z_t \end{bmatrix}_x + \begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \end{bmatrix}_x = \begin{bmatrix} \Delta x_t \\ \Delta y_t \\ \Delta z_t \end{bmatrix}_x + \begin{bmatrix} 0 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix}_x \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$



机床误差

【例】用上述公式求解车床导轨扭曲对加工误差的影响

【解】车床车削外圆表面， Δz 不产生加工误差， Δy 产生的加工误差可忽略不计（误差非敏感方向）。仅考虑导轨扭曲，则 $\Delta x_r=0$ 。于是得到加工误差：

$$\Delta R = \Delta x_r = -\gamma y_1 + \beta z_1$$

取刀尖为 P 点，有：

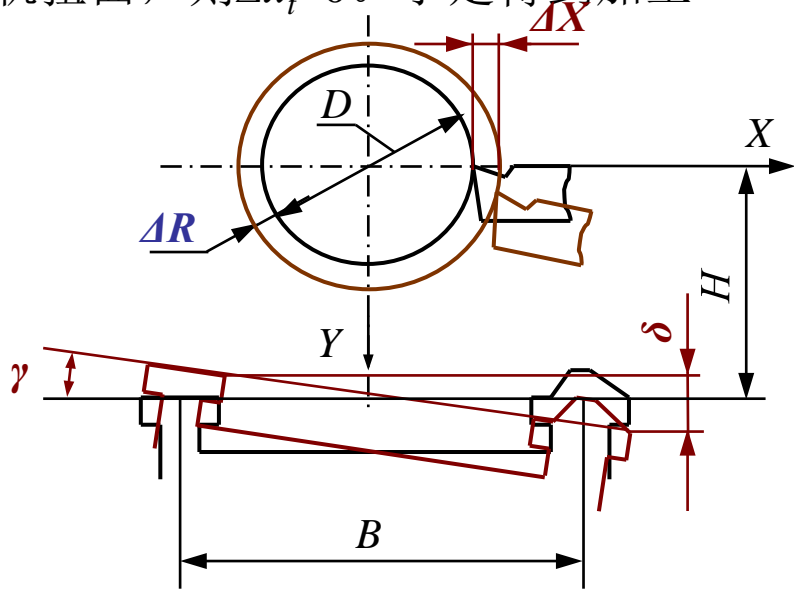
$$(x_1, y_1, z_1) = \left(\frac{D}{2}, -H, 0 \right)$$

代入上式得到： $\Delta R = \gamma H$

$$\text{又： } \gamma = \frac{\delta}{B}$$

于是可得到：

$$\Delta R = \gamma \cdot H = \frac{\delta \cdot H}{B}$$



导轨扭曲引起的加工误差



机床误差

- 影响导轨导向精度的主要因素
 - 机床制造误差
 - 机床安装误差
 - 导轨磨损

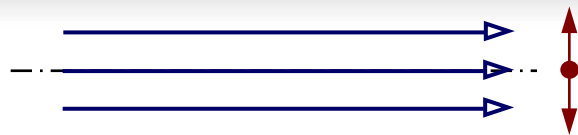


机床误差

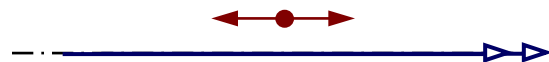
主轴回转误差

□ 主轴回转误差概念

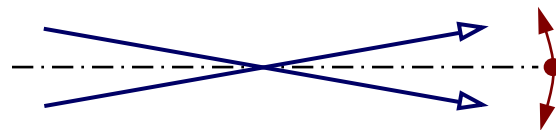
- 主轴回转误差是指主轴实际回转线对其理想回转轴线的漂移。
- 为便于研究，可将主轴回转误差分解为径向圆跳动、端面圆跳动和倾角摆动三种基本型式。



a) 径向圆跳动



b) 端面圆跳动



c) 倾角摆动

主轴回转误差基本形式



机床误差

□ 主轴回转误差对加工精度的影响

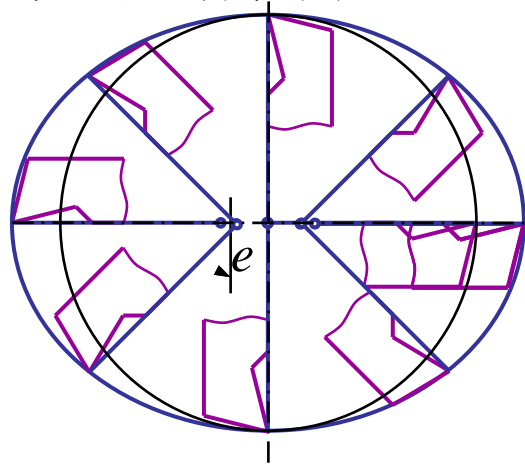
➤ 主轴径向圆跳动对加工精度的影响（镗孔）

考虑最简单的情况，主轴回转中心在X方向上作简谐直线运动，其频率与主轴转速相同，幅值为 $2e$ 。则刀尖的坐标值为：

$$\begin{cases} X = (R + e) \cos \phi \\ Y = R \sin \phi \end{cases}$$

式中 R —— 刀尖回转半径；
 ϕ —— 主轴转角。

显然，上式为一椭圆。



径向跳动对镗孔精度影响



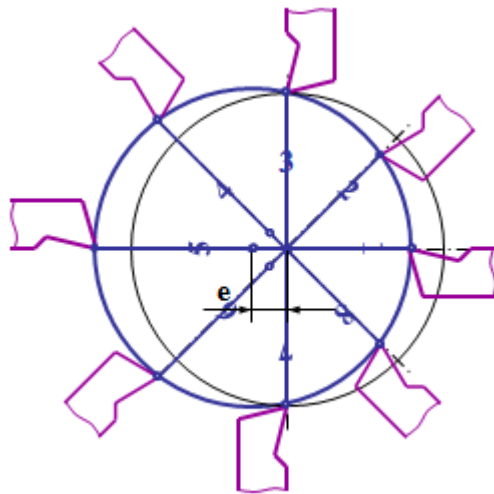
机床误差

➤ 主轴径向圆跳动对加工精度的影响（车外圆）

仍考虑最简单的情况，主轴回转中心在X方向上作简谐直线运动，其频率与主轴转速相同，幅值为 $2e$ 。则刀尖运动轨迹接近于正圆（图）。

❖ 思考：主轴回转中心在X方向上作简谐直线运动，其频率为主轴转速两倍，被车外圆形状如何？

★ 结论：主轴径向跳动影响加工表面的圆度误差



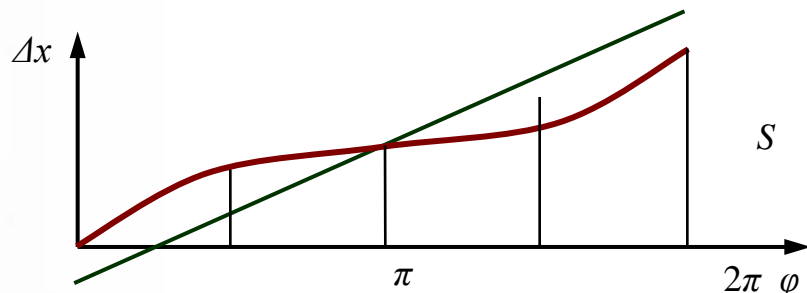
径向跳动对车外圆精度影响



机床误差

➤ 主轴端面圆跳动对加工精度的影响

- ✦ 被加工端面不平，与圆柱面不垂直（如主轴回转一周，端面跳动一次，加工出的端面近似螺旋面）
- ✦ 加工螺纹时，产生螺距周期性误差。



主轴端面跳动引起螺距加工周期误差

➤ 主轴倾角摆动对加工精度的影响

与主轴径向跳动影响类似，不仅影响圆度误差，而且影响圆柱度误差。



机床误差

BA

影响主轴回转精度的主要因素

滑动轴承

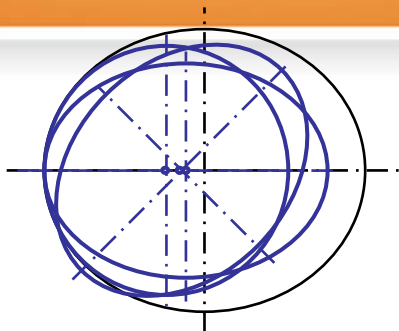
★ 车床——轴径不圆引起车床主轴轴向跳动（注意其频率特性）

★ 镗床——轴承孔不圆引起镗床主轴径向跳动

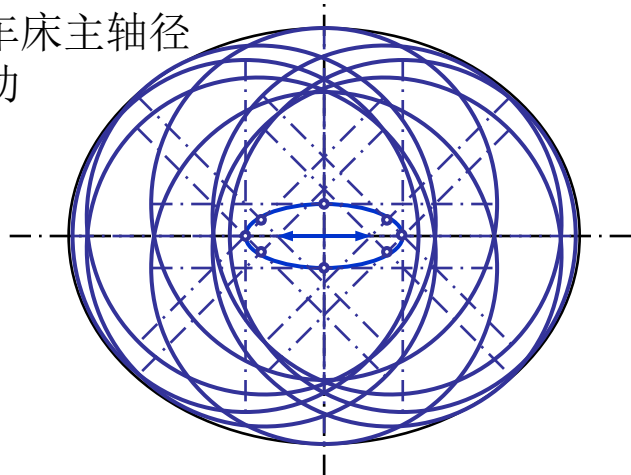
★ 静压轴承——对轴承孔或轴径圆度误差起**均化**作用

滚动轴承

内外滚道圆度误差、滚动体形状及尺寸误差



轴径不圆引起车床主轴轴向跳动



轴承孔不圆引起镗床主轴径向跳动



机床误差

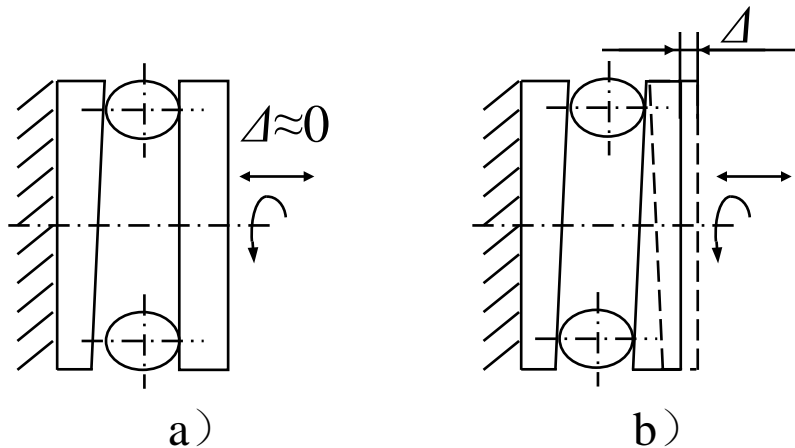
□ 影响主轴回转精度的主要因素

➤ 推力轴承

滚道端面平面度误差及与回转轴线的垂直度误差

➤ 其他因素

轴承孔、轴径圆度误差；轴承孔同轴度误差；轴肩、隔套端面平面度误差及与回转轴线的垂直度误差；装配质量等

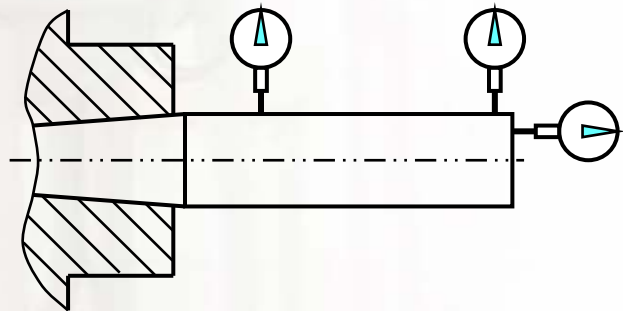


止推轴承端面误差对主轴轴向窜动的影响

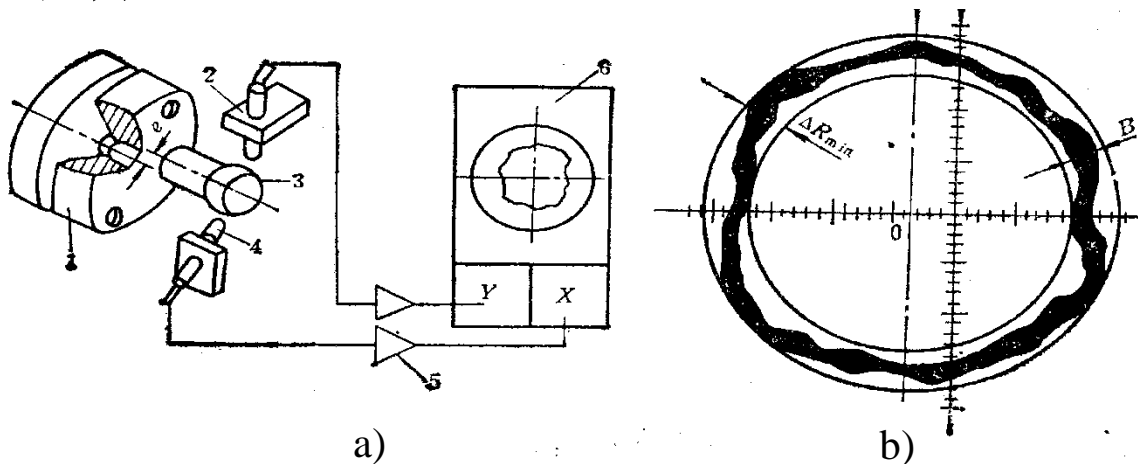
机床误差

□ 主轴回转误差的测量

- 传统测量方法存在问题
 - ✦ 包含心轴、锥孔误差在内
 - ✦ 非运动状态。
- 准确测量方法



传统测量方法



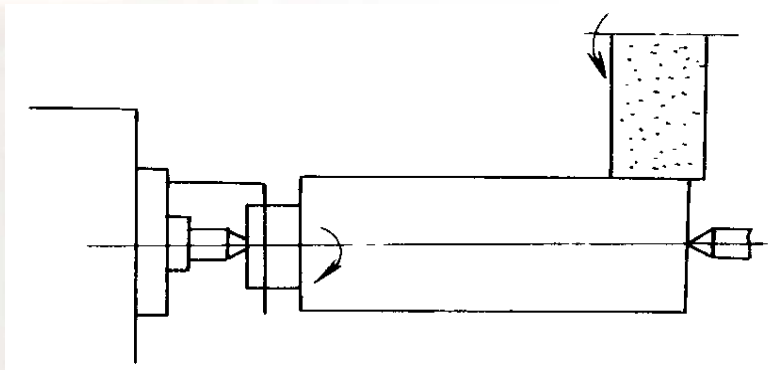
主轴回转误差测量法

1 — 摆动盘 2, 4 — 传感器 3 — 精密测球 5 — 放大器 6 — 示波器

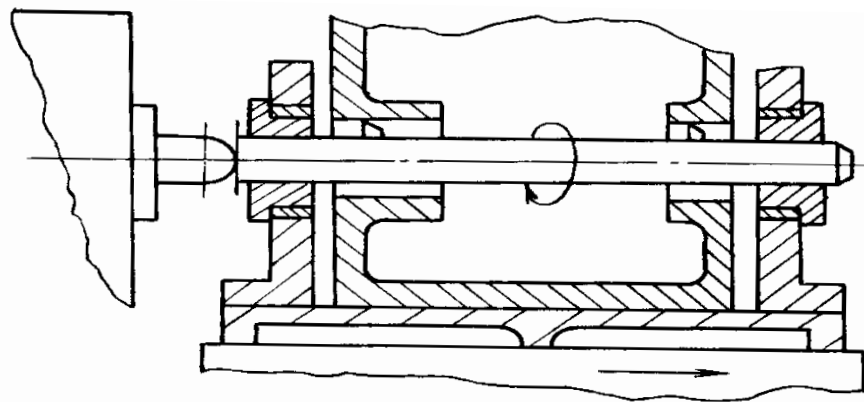


机床误差

- 提高主轴回转精度的措施
 - 提高主轴部件制造精度
 - 对滚动轴承进行预紧
 - 使主轴回转精度不反映到工件上



磨床采用死顶尖支承



用镗模镗孔

机床误差

机床传动误差

机床传动误差对加工精度的影响

以齿轮机床传动链为例：

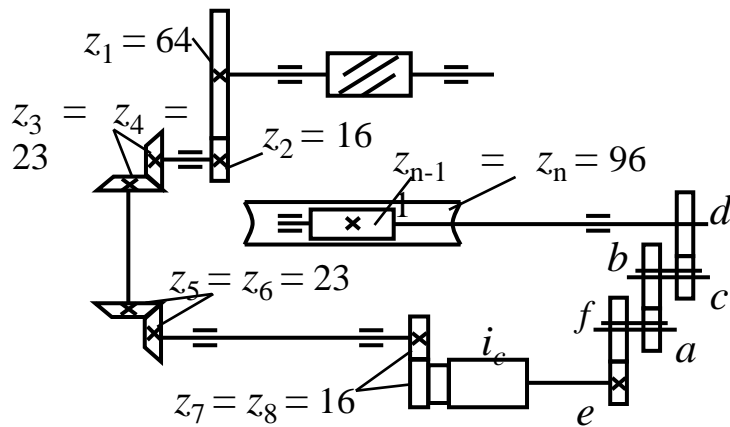
$$\Delta\phi_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n k_j \cdot \Delta\phi_j = \sum_{j=1}^n k_j \cdot \sin\left(\frac{1}{k_j} \omega_n t + \alpha_j\right)$$

式中 $\Delta\phi_n$ —— 传动链末端元件转角误差；

k_j —— 第j个传动元件的误差传递系数，
表明第j个传动元件对末端元件转角误差影响程度，
其数值等于该元件至末端元件的传动比；

ω_n —— 传动链末端元件角速度；

α_j —— 第j个传动元件转角误差的初相角。

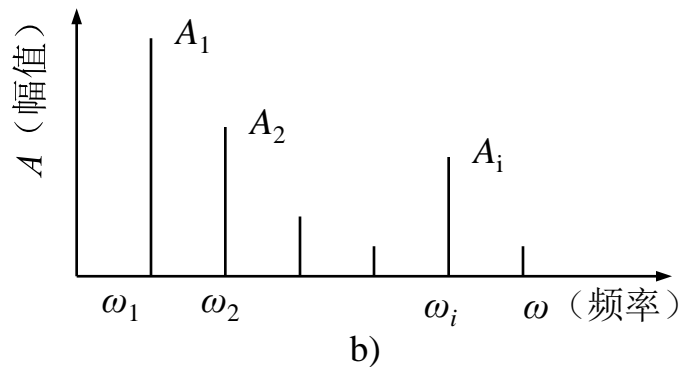
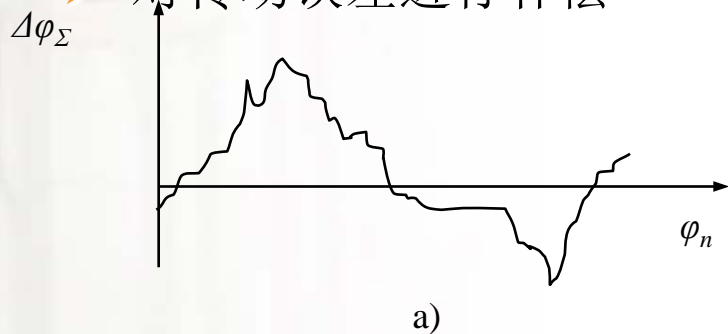


齿轮机床传动链

机床误差

提高传动精度措施

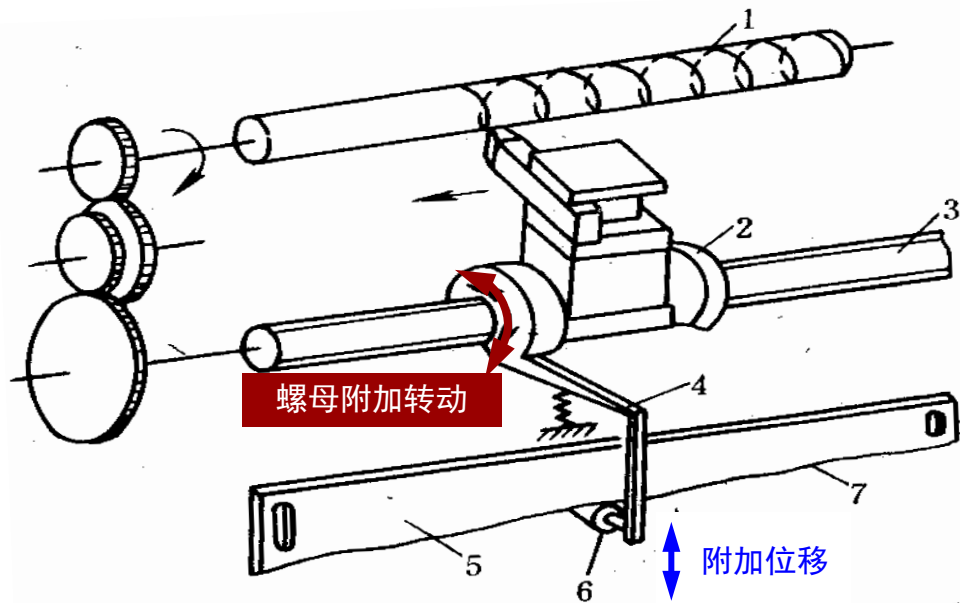
- 缩短传动链长度
- 提高末端元件的制造精度与安装精度
- 采用降速传动
- 采用频谱分析方法，找出影响传动精度的误差环节
- 对传动误差进行补偿



传动链误差的频谱分析



机床误差

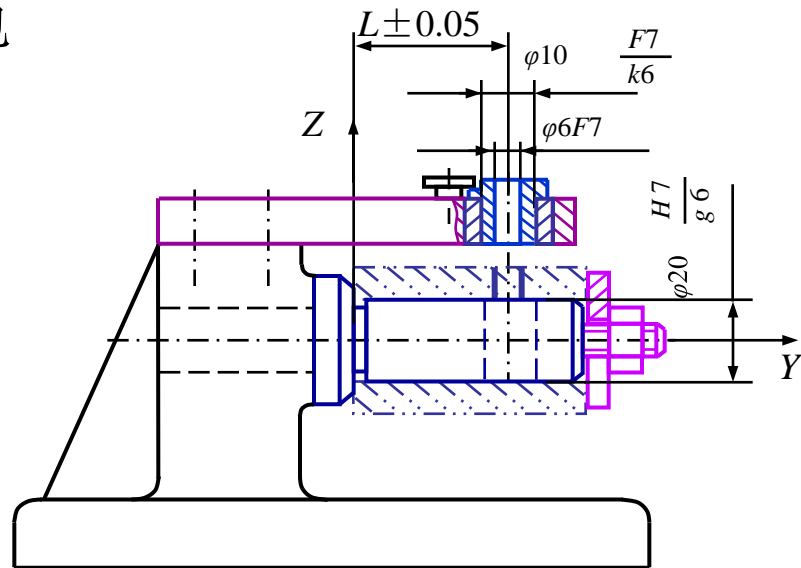


丝杠加工误差补偿装置

- 1—工件 2—螺母 3—母丝杠 4—杠杆 5—校正尺 6—触头 7—校正曲线

夹具制造误差与磨损

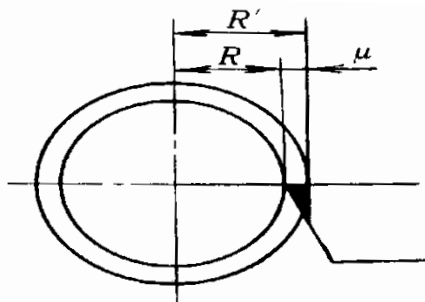
- ❑ 夹具误差影响加工位置精度。
- ❑ 与夹具有关的影响位置误差因素包括：
 - 1) 定位误差；
 - 2) 刀具导向（对刀）误差；
 - 3) 夹紧误差；
 - 4) 夹具制造误差；
 - 5) 夹具安装误差；
 -
- ❑ 通常要求定位误差和夹具制造误差不大于工件相应公差的1/3。



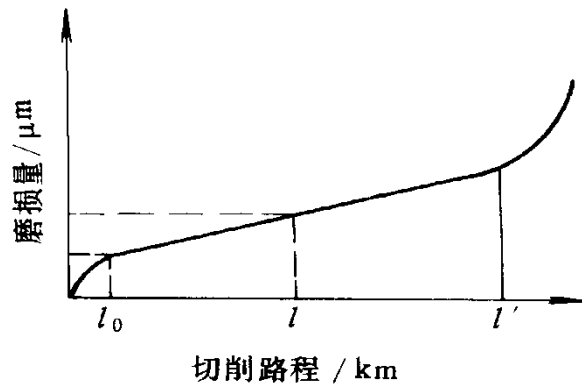
钻孔夹具误差分析

刀具制造误差与磨损

- ❑ 定尺寸刀具（钻头、绞刀、键槽铣刀、浮动镗刀块、拉刀等）尺寸误差影响加工尺寸误差
- ❑ 成形刀具和展成刀具形状误差影响加工形状误差
- ❑ 刀具磨损影响加工尺寸误差或形状误差



车刀后刀面磨损
对加工尺寸影响



刀具磨损过程

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/428001061117006030>