



# 机电一体化机械系统设计

祁文军

阿曼

# 目 录

## 子情境1 认识机电一体化机械系统

- 任务1 了解机电一体化机械系统的组成
- 任务2 了解机械系统的设计思想
- 任务3 了解机械传动设计的原则
- 任务4 了解机械系统性能的仿真分析

## 子情境2 传动机构

- 任务1 认识机械传动机构
- 任务2 常用单一传动机构设计
- 任务3 齿轮传动机构消间隙方法及措施
- 任务4 复合传动机构设计

# 目 录

## 子情境3 支承部件

- 任务1 认识支承部件
- 任务2 导轨
- 任务3 滚动直线导轨设计计算

## 子情境4 执行机构

- 任务1 微动机构应用
- 任务2 末端执行机构应用
- 任务3 其他执行机构应用

## 子情境5 机械系统的 运动控制

- 任务1 机械传动系统建模
- 任务2 机械系统的制动控制
- 任务3 机械系统的加速控制

是否预习情境二的内容？



预习



没有预习

提交

# 机械系统设计总体目标

## 情境导入

当你看到某款机器人时，当你使用**ATM**机时，当你有机会操作数控机床时，你有没有想过它们的机械机构都由哪些部分组成？该如何设计才能完成相应的动作，实现相应的功能？

## 情境剖析

### 知识目标

1. 了解机电一体化对机械系统的**要求**。
2. 熟悉机械系统的**组成**。
3. 熟练运用机械传动**设计原则**。

### 技能目标

1. 能根据产品**功能需求**进行**传动机构**和**导向机构**的设计。
2. 应用**MATLAB**完成机构仿真，根据仿真结果修改机构。
3. **绘制**传动机构、导向机构**工程图**。

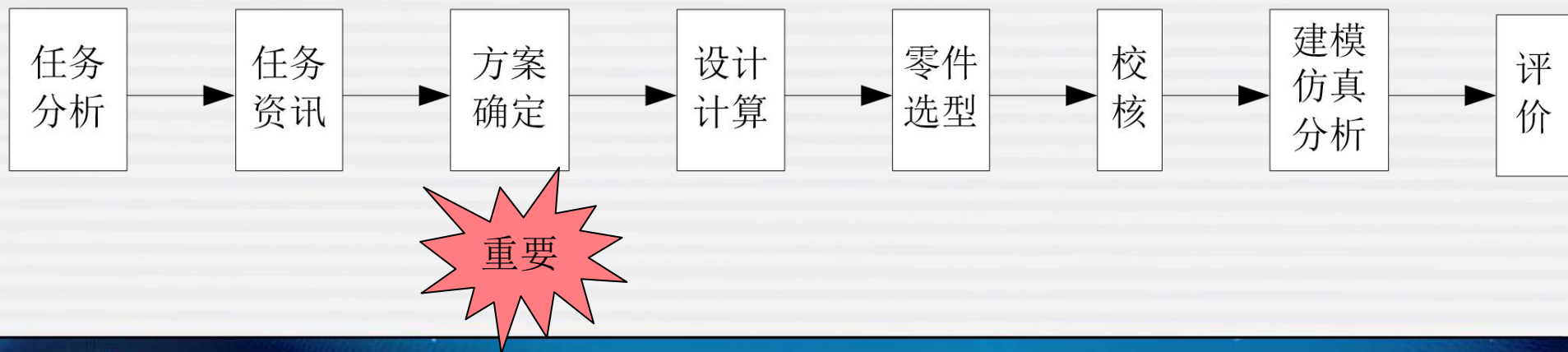




# 机械系统设计流程

机电一体化机械系统是由计算机信息网络协调与控制的，用于完成包括机械力、运动和能量流等动力学任务的机械和（或）机械部件相互联系的系统。其核心是由计算机控制的，包括机械、电力、电子、液压、气压、光学等技术的伺服系统。

## 机械系统设计流程



# 子情境1 认识机电一体化机械系统

1

机电一体化机械系统的组成

2

机械系统的设计思想

3

机械传动设计的原则

4

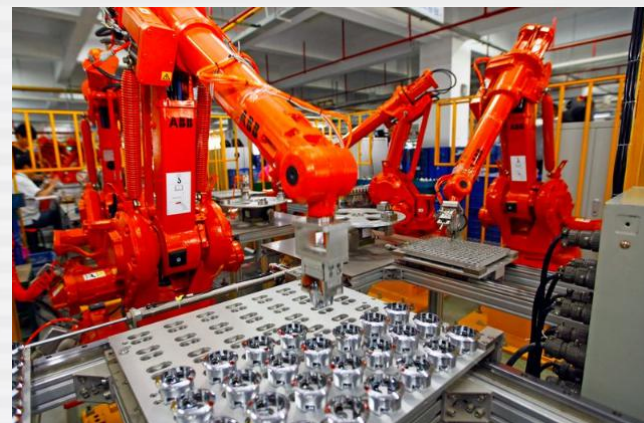
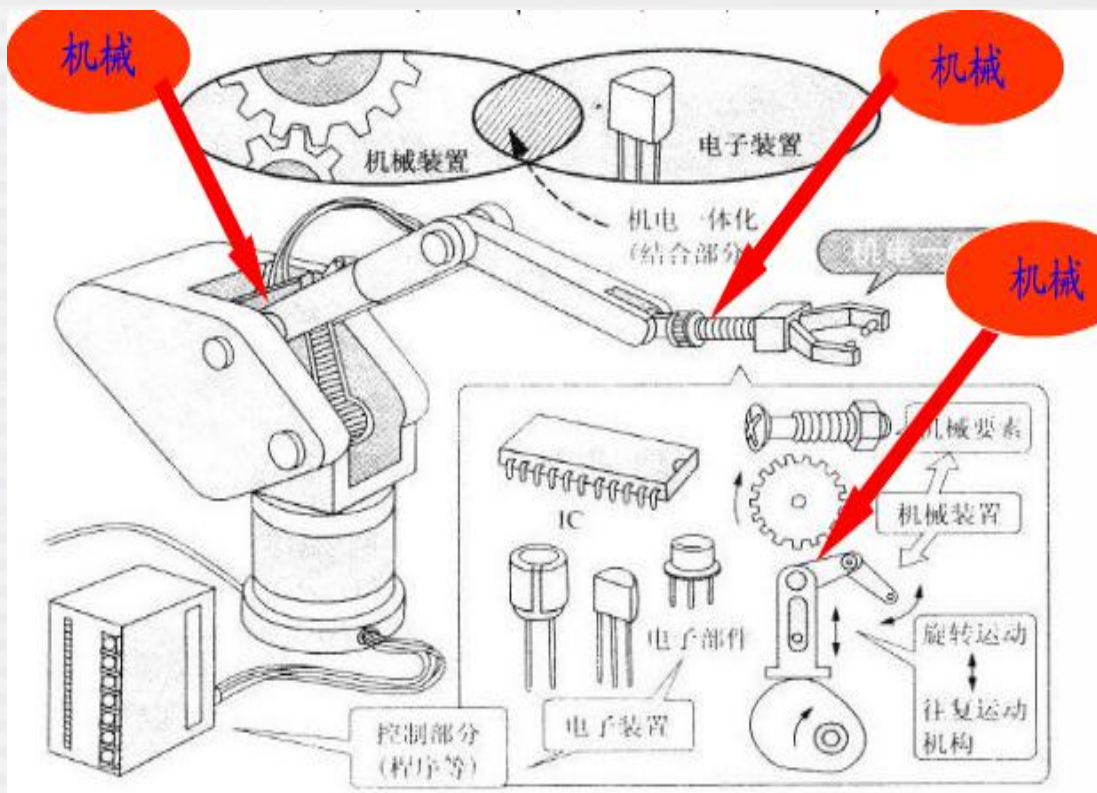
机械系统性能的仿真分析

5

同步训练：数控机床传动机构  
仿真分析

# 任务1 了解机电一体化机械系统的组成

## 体例——工业机器人产品分析



what?哪些装置能完成  
how?怎样完成  
多种方案

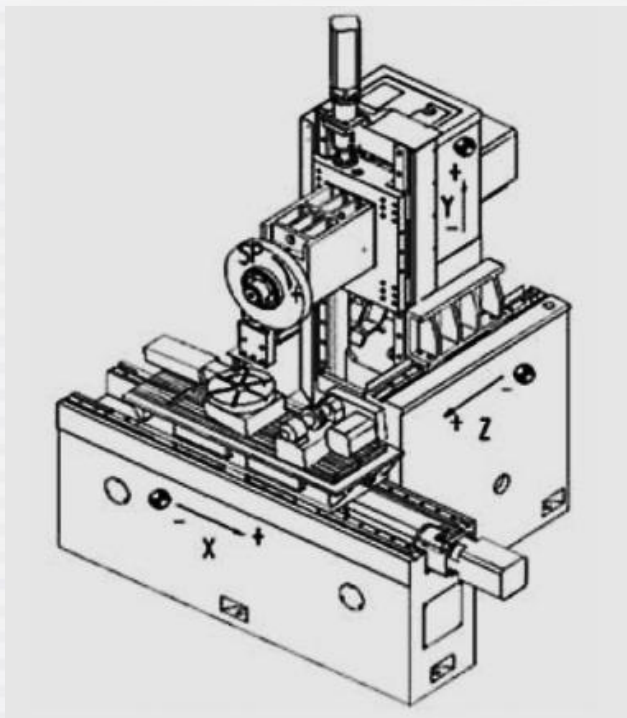
???

产品名称	产品属性	产品功能	产品组成 (结构)			机械装置运动形式		
工业机器人	机电一体化产品	夹持及搬运工件	机械装置	电子装置	控制部分 (软件)	旋转运动	往复运动	夹持运动



# 任务1 了解机电一体化机械系统的组成

## 体例——数控机床产品分析



产品名称	产品属性	产品功能	产品组成 (结构)	机械装置运动形式
数控机床	机电一体化产品	移动及加工工件	??	??

1.数控机床由 [填空1]、 [填空2]、 [填空3] 组成。

作答

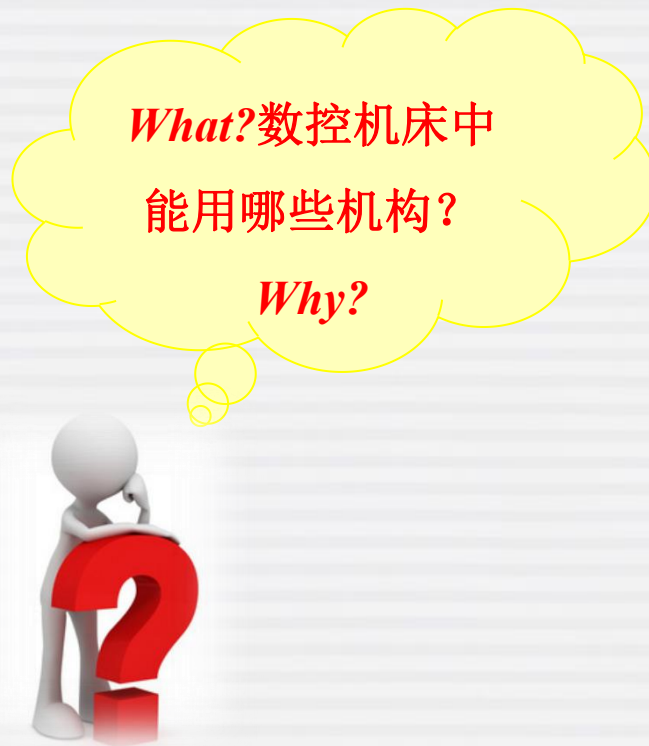
## 数控机床机械装置运动形式

- ☒ A 直线运动、旋转运动
- ☐ B 直线运动、旋转运动、往复运动
- ☐ C 直线运动、往复运动
- ☐ D 旋转运动、往复运动

提交

下列哪些机构可以实现将电动机的旋转运动转变为直线运动？

- ☒ A 齿轮齿条
- ☐ B 蜗轮蜗杆
- ☒ C 滚珠丝杆
- ☒ D 曲柄滑块
- ☒ E 凸轮机构
- ☒ F 螺旋机构
- ☐ G 带传动机构



提交



# 任务1 了解机电一体化机械系统的组成

## 机电一体化对机械系统的要求

1.高精度

2.快速响应

3.良好的稳定性

无间隙、低摩擦、低惯量、高刚度、高谐振频率和适当的阻尼比

体积小、重量轻、高可靠性、寿命长和绿色环保





# 任务1 了解机电一体化机械系统的组成

## 机电一体化机械系统的组成

### 传动机构

作用：转速和转矩的变换器

要求：传动精度和效率高、轻量、高速、低噪声、高可靠性。

### 导向机构

作用：支承和导向。

要求：高的支撑强度和高的导向精度

### 执行机构

作用：完成操作任务的直接装置

要求：高灵敏度、精确度、良好的重复性、可靠性。



## 任务2 了解机械系统的设计思想

### 静态设计

依据系统的功能要求，研究制定出机械系统的初步设计方案

### 稳态设计

设计系统的各组成部件的结构、运动关系及参数；零件的材料、结构、制造精度确定；执行元件（如电机）的参数、功率及过载能力的验算

### 动态设计

借助静态设计，建立系统组成各环节的数学模型，推导出系统整体的传递函数，利用控制理论方法求得系统的频率特性



## 任务2 了解机械系统的设计思想

### 静态设计与动态设计

1. 静态设计忽略系统自身运动和干扰因素的影响
2. 静态设计能够满足伺服精度和响应速度要求不高的系统设计要求。
3. 对于精密和高速智能化机电一体化系统，必须通过调节各个环节的相关参数，改变系统的动态特性以保证系统的功能要求。
4. 动态分析与设计过程往往会改变前期的部分设计方案，有时甚至会推翻整个方案，要求重新进行静态设计。

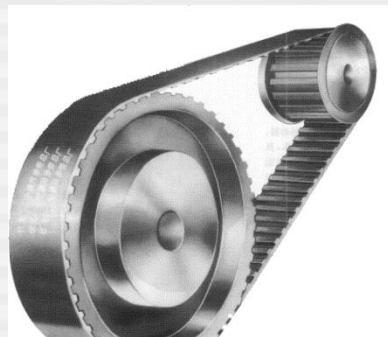
## 任务3 了解机械传动设计的原则

### 机电一体化系统对机械传动的要求

**定义：**把动力机产生的运动和动力传递给执行机构的中间装置，是**扭矩**和**转速**的变换器。

**目的：**在动力机与负载之间进行**扭矩**和**惯量**的匹配，实现对输出速度的调节。

**要求：**机械传动部件的**转动惯量小**、**刚度大**、**阻尼合适**、**摩擦小**、**间隙小**、**抗振性好**，并满足**小型**、**轻量**、**高速**、**低噪声**高可靠性和环保等要求。



# 任务3 了解机械传动设计的原则



## 总传动比的确定

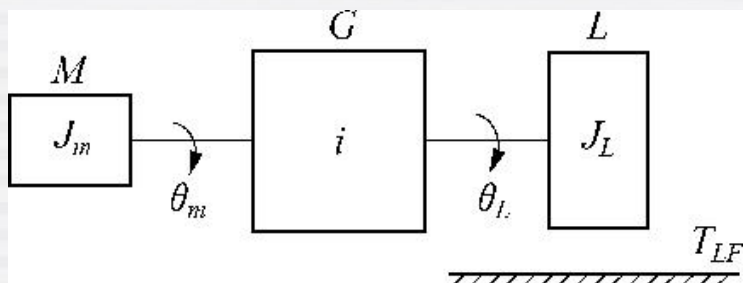


图2.1.1 电机、传动装置和负载的传动模型

电动机的角位移、角速度、角加速度

传动关系:  $i = \frac{\theta_m}{\theta_L} = \frac{\dot{\theta}_m}{\dot{\theta}_L} = \frac{\ddot{\theta}_m}{\ddot{\theta}_L}$

负载的角位移、角速度、角加速度



## 如何确定？角加速度最大原则

$T_{LF}$ —摩擦阻抗转矩

$T_m$ —电动机的驱动转矩

$T_a$ —电动机轴上的合转矩

合转矩:  $T_a = T_m - \frac{T_{LF}}{i} = (J_m + \frac{J_L}{i^2}) \times \ddot{\theta}_m = (J_m + \frac{J_L}{i^2}) \times i \times \ddot{\theta}_L$

牛二律来  
啦





### 任务3 了解机械传动设计的原则

$$\ddot{\theta}_L = \frac{T_m i - T_{LF}}{J_m i^2 + J_L} \quad \text{令} \quad d\ddot{\theta}_L / di = 0$$

$$i = \frac{T_{LF}}{T_m} + \sqrt{\left(\frac{T_{LF}}{T_m}\right)^2 + \frac{J_L}{J_m}}$$

不计摩擦，即  $T_{LF} = 0$

$$i = \sqrt{\frac{J_L}{J_m}} \left( \frac{T_L}{i^2} = T_m \right)$$

**$i$  的最佳值的时刻**就是 $J_L = J_m$ 的时刻，此时，电动机的输出转矩一半用于加速负载，一半用于加速电动机转子，达到了惯性负载和转矩的最佳匹配。

## 任务3 了解机械传动设计的原则

### 传动链级数和各级传动比的分配原则

- 等效转动惯量最小原则：较高的响应速度
- 质量最小原则：航空、航天的传动装置
- 输出轴转角误差最小原则：传动精度要求高

**确定依据：**折算到电动机轴上的总等效转动惯量与第一级主动齿轮的转动惯量之比 $J_e/J_1$ 不能太大，同时考虑结构的复杂度

## 任务3 了解机械传动设计的原则

- 等效转动惯量最小原则

### 1) 小功率传动装置

$$i_1 = 2^{\frac{2^n - n - 1}{2(2^n - 1)}} i^{\frac{1}{2^n - 1}}$$

$$i_k = \sqrt{2} \left( \frac{i}{2^{n/2}} \right)^{\frac{2^{(k-1)}}{2^n - 1}} \quad (k = 2, 3, 4, \dots, n)$$

各级传动比分配应遵循“前小后大”的原则。

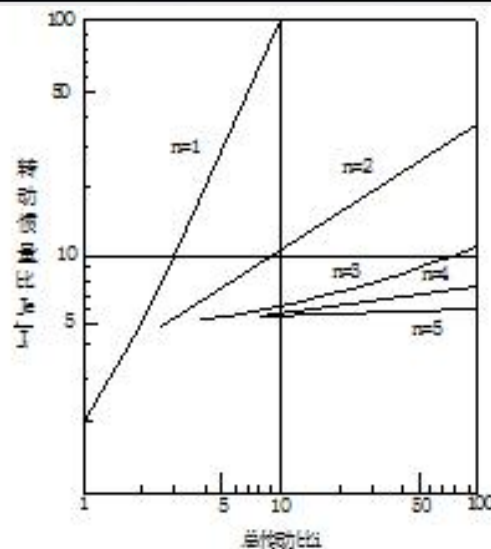


图 2.1.3 小功率传动装置确定传动级数曲线

## 任务3 了解机械传动设计的原则

**设计任务1：**某150W小型传送机构齿轮传动系统  $i=100$ , 传动级数  $n=5$ , 试确定各级传动比。

**任务分析：**150W属于小功率范围，传送机构对响应速度有较高要求，因此应该按照小功率传动装置等效转动惯量最小原则分配传动比

**设计计算**

$$\begin{aligned} i_1 &= 2^{\frac{2^5-5-1}{2(2^5-1)}} \times 100^{\frac{1}{2^5-1}} = 1.5515; i_2 = \sqrt{2} \times \left(\frac{100}{2^{5/2}}\right)^{\frac{2^{(2-1)}}{2^5-1}} = 1.7021 \\ i_3 &= \sqrt{2} \times \left(\frac{100}{2^{5/2}}\right)^{\frac{2^{(3-1)}}{2^5-1}} = 2.0487; i_4 = \sqrt{2} \times \left(\frac{100}{2^{5/2}}\right)^{\frac{2^{(4-1)}}{2^5-1}} = 2.9678 \\ i_5 &= \sqrt{2} \times \left(\frac{100}{2^{5/2}}\right)^{\frac{2^{(5-1)}}{2^5-1}} = 6.228 \end{aligned}$$

**校核：**

$$i = i_1 i_2 i_3 i_4 i_5 \approx 100。$$

# 任务3 了解机械传动设计的原则

- 等效转动惯量最小原则

## 2) 大功率传动装置

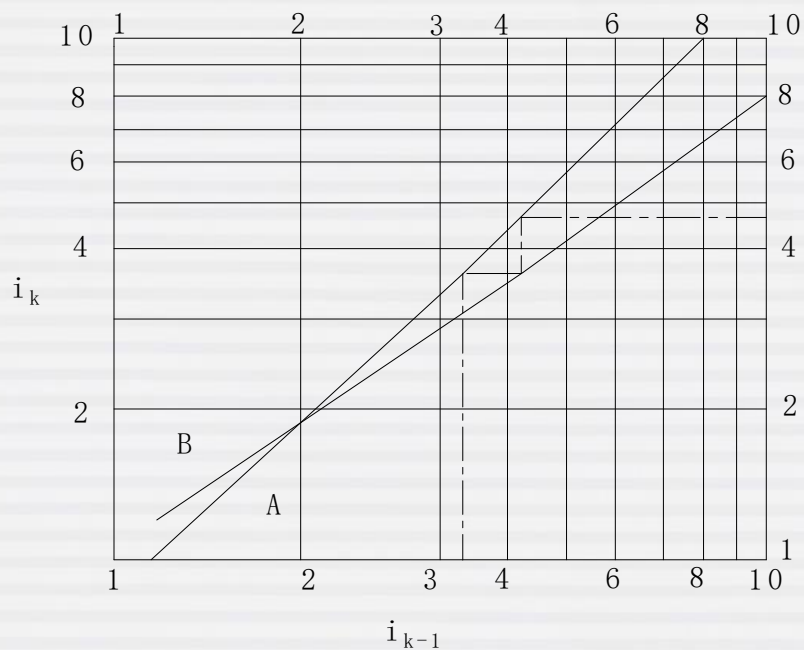


图2.1.6大功率传动装置确定各级传动比曲线

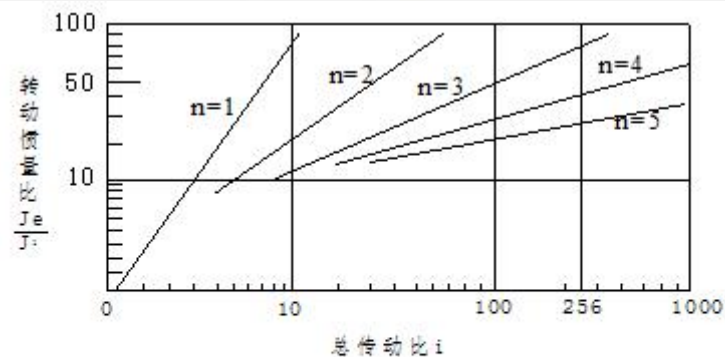


图 2.1.4 大功率传动装置确定传动级数曲线

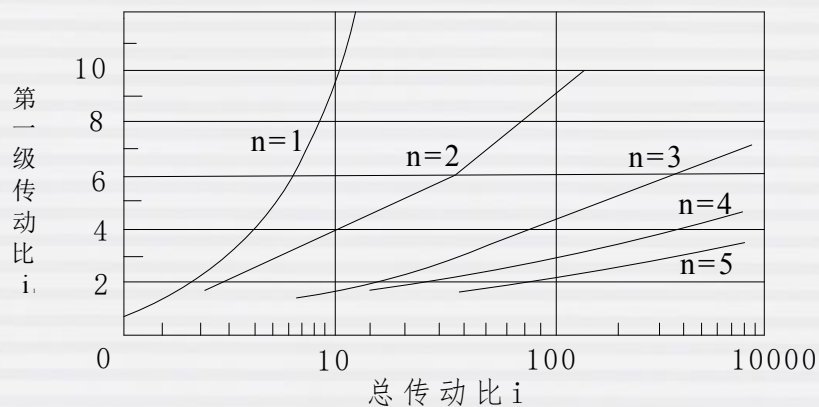


图2.1.5 大功率传动装置确定第一级传动比曲线



# 任务3 了解机械传动设计的原则

**设计任务2：**某煤炭输送传动装置传动比  $i=256$ ,试确定各级传动比。

**任务分析：**煤炭输送传动装置属于大功率传动装置，考虑效益，采用等效转动惯量最小原则分配传动比

**设计计算：**

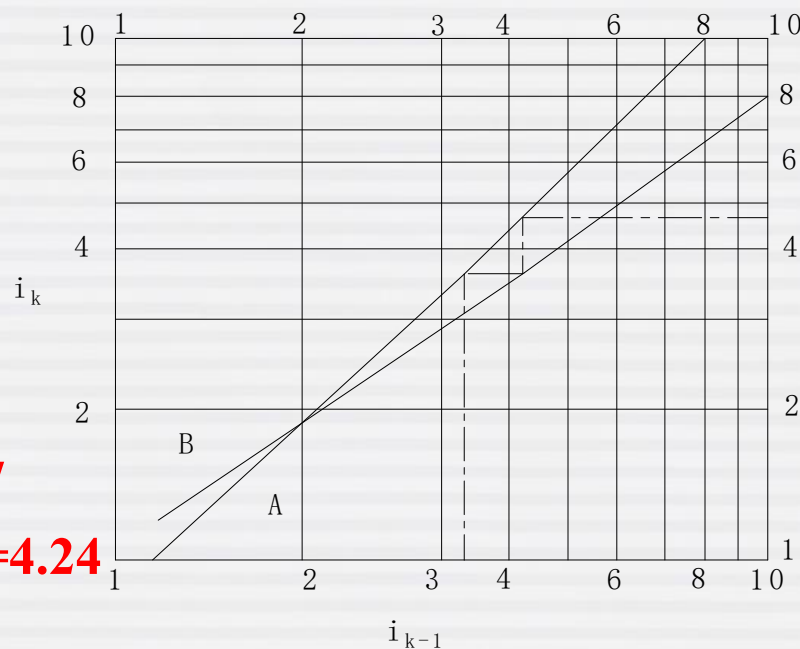
由图2.1.4得， $n=4$

由图2.1.5得，当 $i=256$ ， $n=4$ 时， $i_1=3.3$

由图2.1.6得，在横坐标 $i_{k-1}$ 上**3.3**处做垂线与A线交于第一点，在纵坐标 $i_k$ 轴上查得 **$i_2=3.7$**

通过该点作水平线与B曲线相交得第二点 **$i_3=4.24$**

由第二点作垂线A曲线相交得第三点 **$i_4=4.95$**



**校核：** 验算  $i_1 i_2 i_3 i_4 i_5 \approx 256.26$  满足设计要求。

## 任务3 了解机械传动设计的原则

- 质量最小原则

### 1) 大功率传动装置

$i$  一定时，传动级数过少会使大齿轮尺寸过大，导致传动装置体积和质量增大；传动级数过多会增加轴、轴承等辅助构件，导致传动装置质量增加。设计时应综合考虑

**结构的紧凑，传动级数要尽量少**

**传动比分配遵循“前大后小”的原则**

减速齿轮传动的后级齿轮比前级齿轮的转矩要大得多，同样传动比的情况下齿厚、质量也大得多，因此减小后级传动比就相应减少了大齿轮的齿数和质量。

# 任务3 了解机械传动设计的原则

## • 质量最小原则

### 1) 大功率传动装置

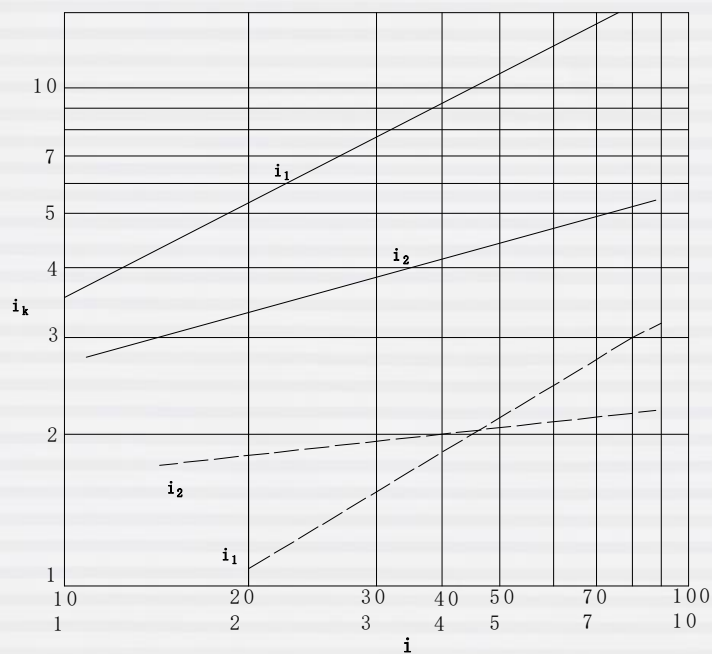


图2.1.7大功率传动装置二级传动比分配曲线  
( $i < 10$ 时使用图中虚线)

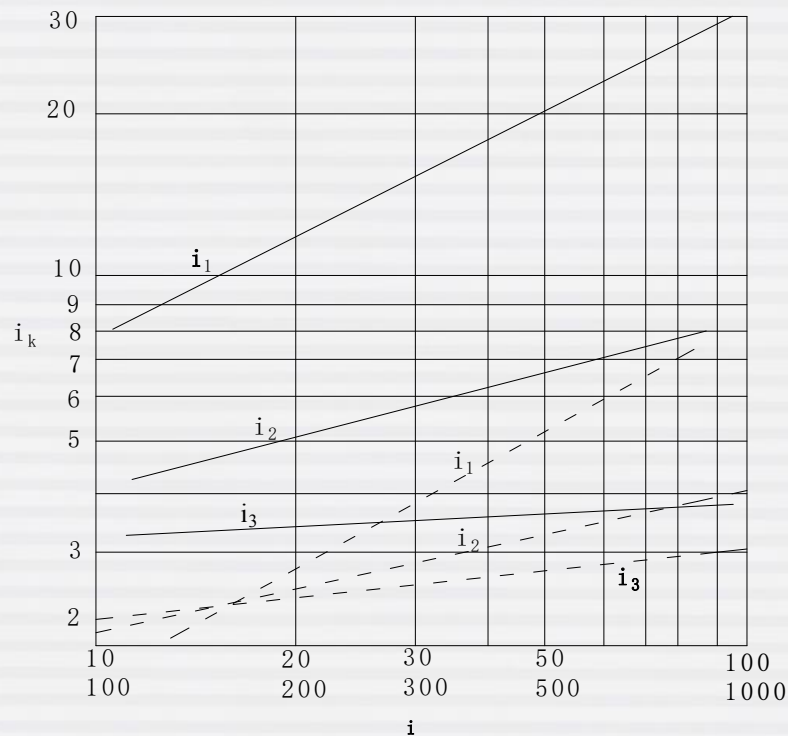


图2.1.8大功率传动装置三级传动比分配曲线  
( $i < 100$ 时使用图中虚线)

# 任务3 了解机械传动设计的原则

- 质量最小原则

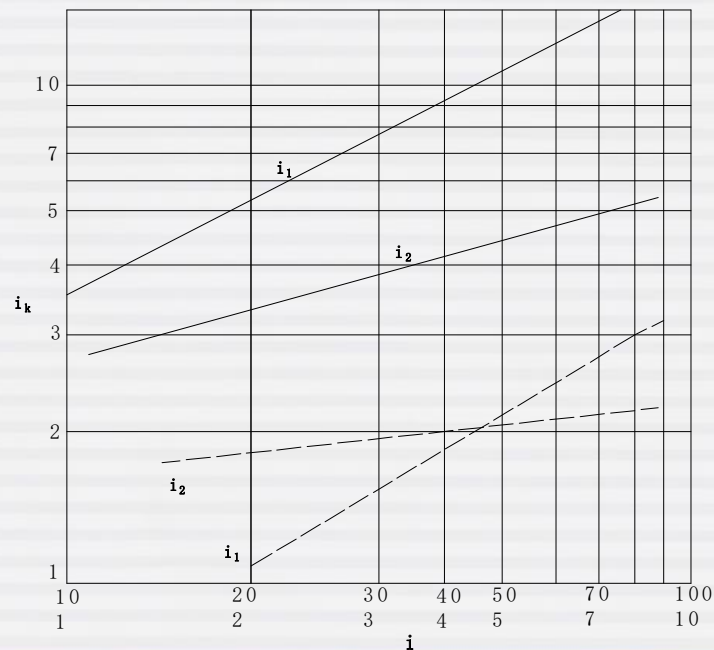
## 1) 大功率传动装置

**设计任务3：**某飞机用齿轮传动机构  $n=2$ ,  $i=40$ , 试确定各级传动比,

**任务分析：**飞机属于航空航天设备, 其传动机构应该按照质量最小原则设计。

**设计计算：**由图2.1.7可得  $i_1=9.1$ ,  $i_2=4.4$ 。

**校核：**  $i_1 \times i_2 = 40.04$



# 任务3 了解机械传动设计的原则

- 质量最小原则

## 2) 小功率传动装置

选择相等的各级传动比

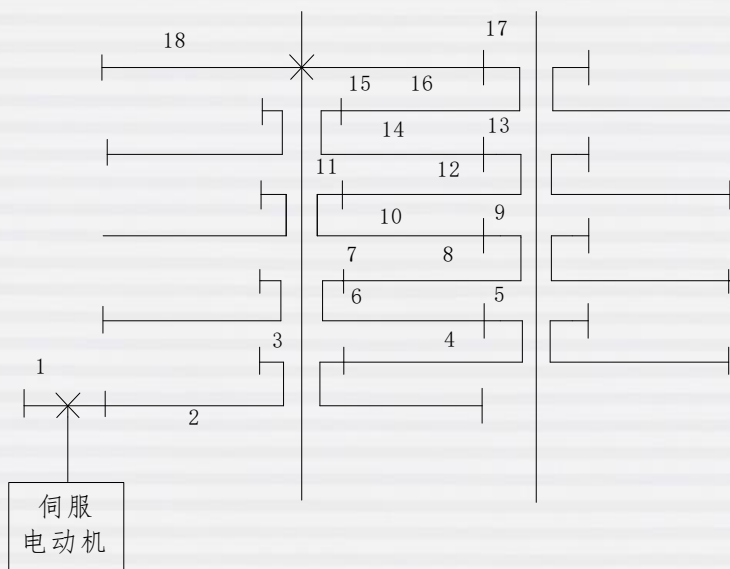


图2.1.9回曲式齿轮传动链





## 任务3 了解机械传动设计的原则

- 输出轴转角误差最小原则

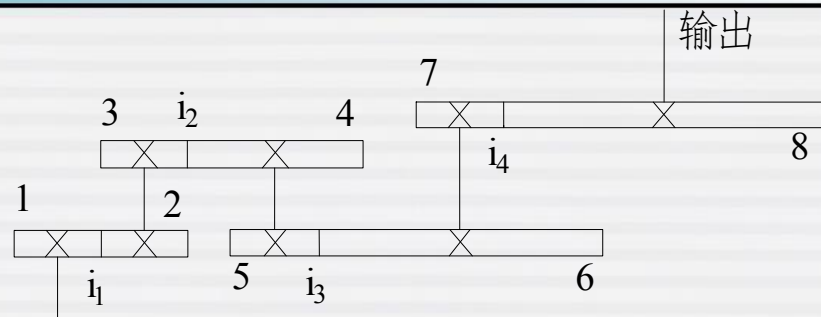


图2.1.10四级减速齿轮传动链

$$\Delta\Phi_{\max} = \frac{\Delta\Phi_1}{i_1 i_2 i_3 i_4} + \frac{\Delta\Phi_2 + \Delta\Phi_3}{i_2 i_3 i_4} + \frac{\Delta\Phi_4 + \Delta\Phi_5}{i_3 i_4} + \frac{\Delta\Phi_6 + \Delta\Phi_7}{i_4} + \Delta\Phi_8$$

低速级的误差在总误差中占的比重大。要提高传动精度，就应减少传动级数，并使末级齿轮的传动比尽可能大，制造精度尽可能高

各级传动比按“前小后大”原则排列，总转角误差较小



## 任务3 了解机械传动设计的原则

### 传动比分配原则的选择

1. 传动精度要求高的降速齿轮传动链，按**输出轴转角误差最小**原则设计。
2. 运转平稳、启停频繁和动态性能好的降速传动链，按**等效转动惯量最小原则**和**输出轴转角误差最小**原则设计。
3. 质量尽可能小的降速传动链，按**质量最小原则**设计。

# 任务3 了解机械传动设计的原则

## 本任务小结

### 内容

1. 机电一体化系统对机械传动的要求
2. 总传动比的确定
3. 传动比的分配原则

### 重点

传动比的分配

# 任务4 了解机械系统性能的仿真分析

## 数控机床性能仿真系统分析

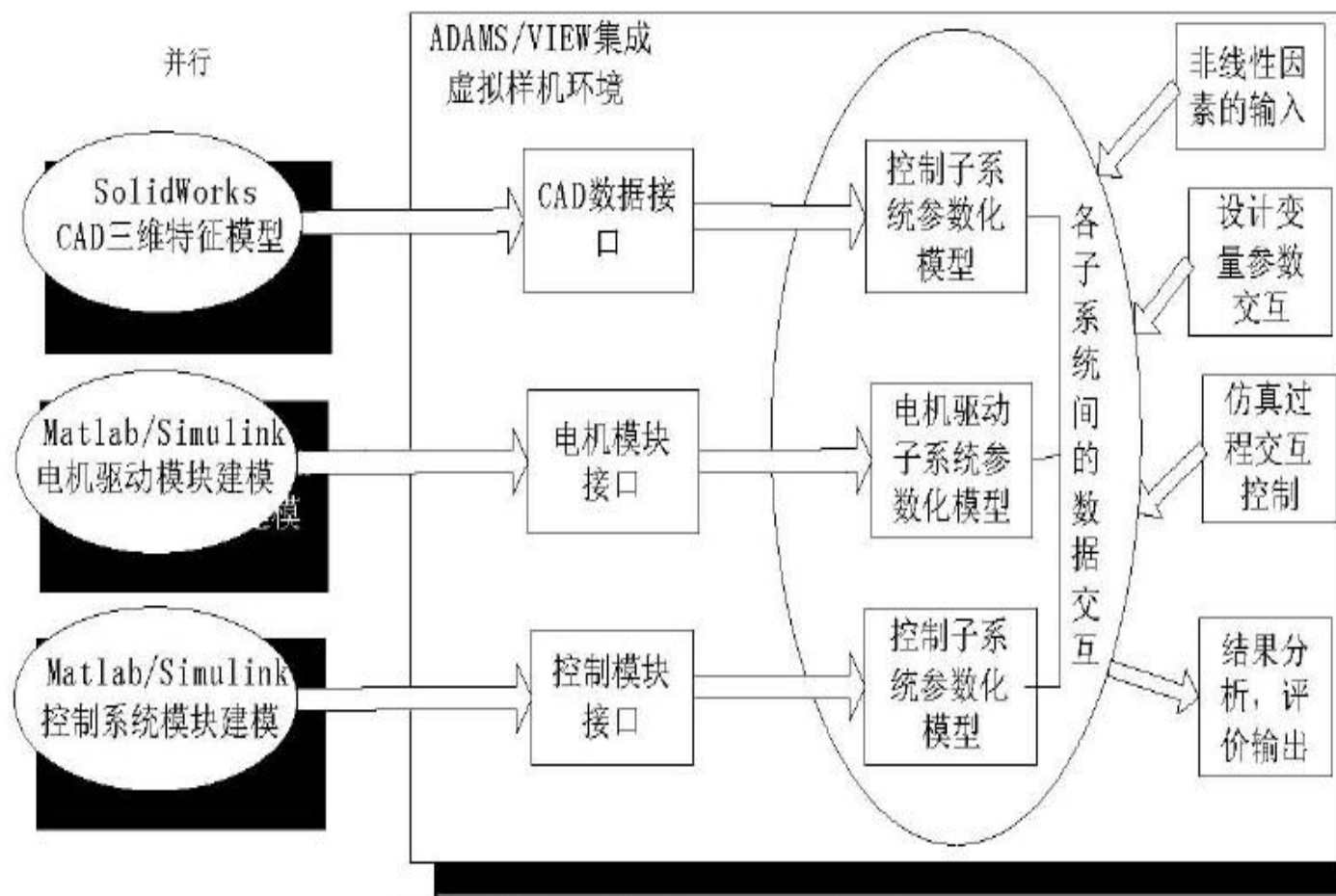
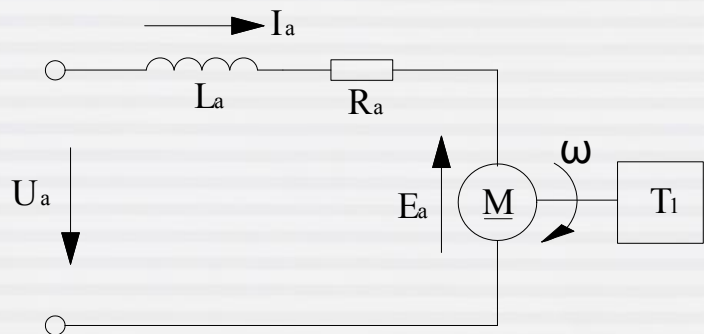


图 2.2 数控机床性能仿真系统的实现框架

# 任务4 了解机械系统性能的仿真分析



电压平衡方程为

$$L_a \frac{di_a}{dt} + i_a R_a + e_a = u_a \quad (2.1.10)$$

电枢反电动势 $E_a$ 与角速度 $\omega$ 之间关系

$$E_a = C_e \Phi \omega$$

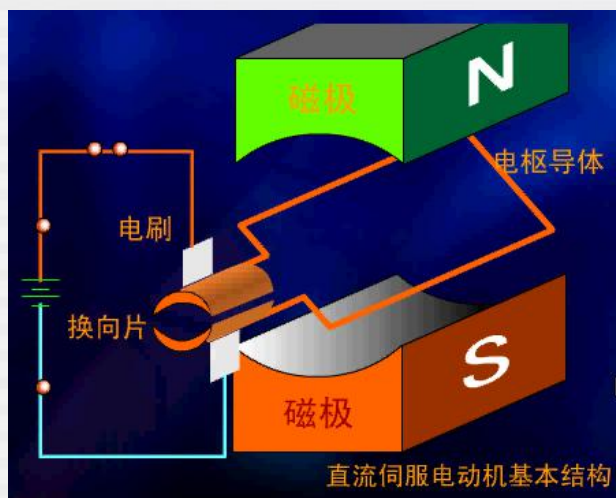
电枢电流切割磁场磁力线所产生的电磁转矩 $T_m$

$$T_m = C_m \Phi I_a$$

$C_e$ 是电动势常数， $C_m$ 是转矩常数

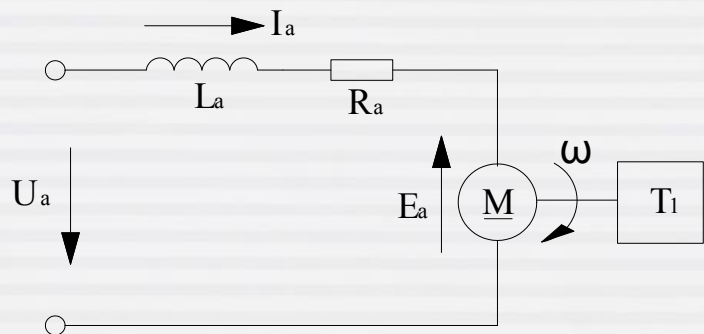
直流伺服电动机的动态转矩平衡方程为

$$T_m = T_l + J \frac{d\omega}{dt}$$





## 任务4 了解机械系统性能的仿真分析



$$\dot{i}_a = \frac{T_1}{C_m \Phi} + \frac{J}{C_m \Phi} \frac{d\omega}{dt}$$

直流伺服电动机转速方程为

$$\frac{JL_a}{C_m \Phi} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{JR_a}{C_m \Phi} \frac{d\omega}{dt} + C_e \Phi \omega + \frac{L_a}{C_m \Phi} \frac{dT_1}{dt} + \frac{R_a}{C_m \Phi} T_1 = u_a$$

机电时间常数

$$\tau_j = \frac{JR_a}{C_e C_m \Phi^2}$$

电磁时间常数

$$\tau_d = \frac{L_a}{R_a}$$

## 任务4 了解机械系统性能的仿真分析

空载启动情况下，直流伺服电动机的过渡过程及主要参数的影响：

**传统经典方法**——解方程（进行拉式反变换，求 $\omega(t)$ 的时域响应）

**现代分析方法**——应用MATLAB中SIMULINK仿真工具，依据研究对象传递函数，建立仿真模型。针对三种阻尼情况，选择具体阻尼系数建立模型。

## 任务4 了解机械系统性能的仿真分析

$$G_m(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{K_m \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \text{ (传递函数)}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{\tau_j \tau_d}}$$
$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_j}{\tau_d}}$$

电动机启动时，输入电枢控制电压 $U_a$ 为一阶跃信号。设其为单位阶跃信号，即 $U_a=1$ ，则 $U_a(s)=1/s$ ，可得频域函数

$$\Omega(s) = \frac{K_m \omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)} \text{ (频域函数)}$$

## 任务4 了解机械系统性能的仿真分析

按阻尼比 $\zeta$ 的不同取值，分析电动机角速度的单位阶跃响应规律。

### 1.欠阻尼情况( $0 < \zeta < 1$ )

$$\omega(t) = K_m \left[ 1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t + \arctan \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}) \right] (t \geq 0)$$

# 任务4 了解机械系统性能的仿真分析

## 2. 临界阻尼情况( $\zeta = 1$ )

$$\Omega(s) = \frac{K_m \omega_n^2}{s(s + \omega_n)^2}$$

$$\omega(t) = K_m [1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t)]$$

## 3. 过阻尼情况( $\zeta > 1$ )

$$\tau_d < \frac{1}{4} \tau_j$$

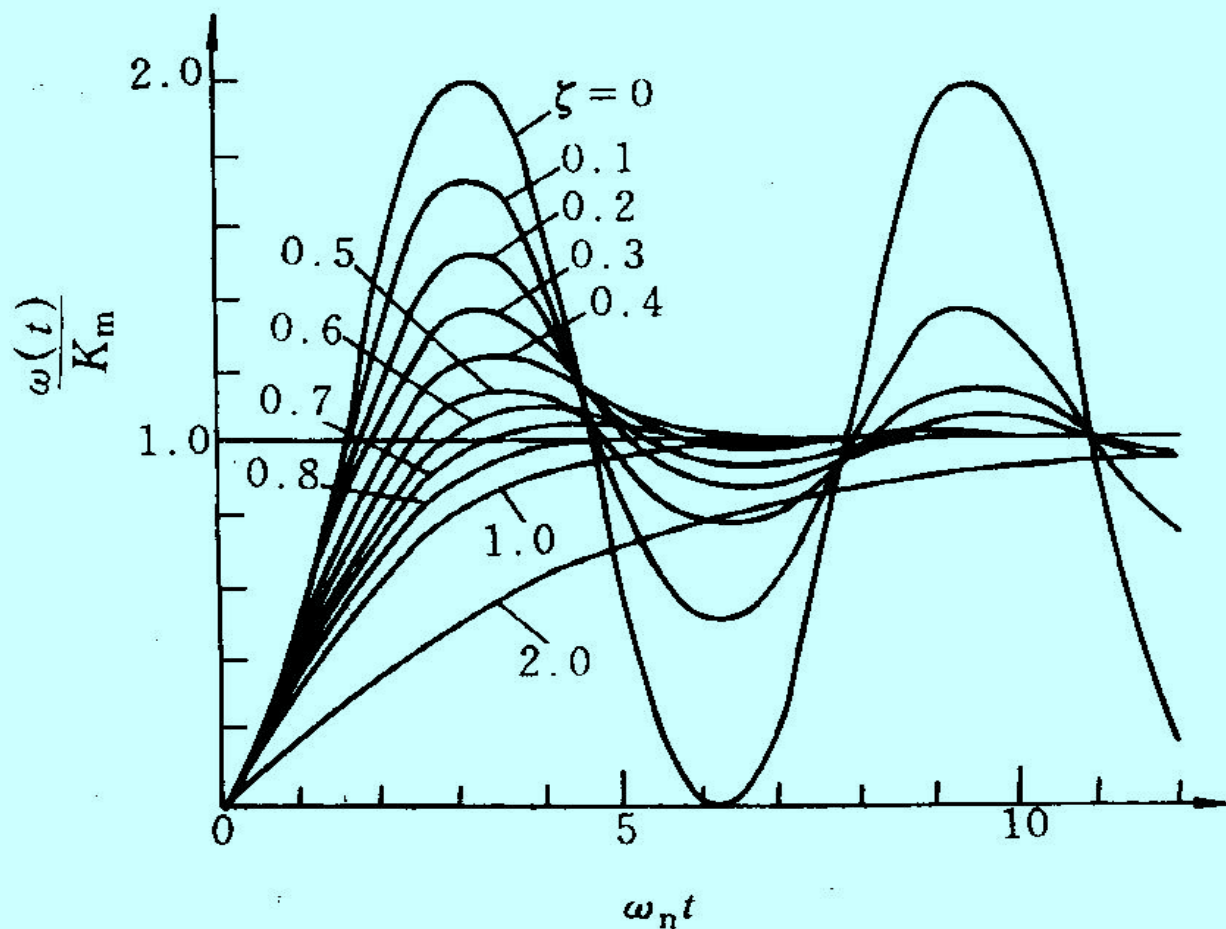
忽略电磁时间常数 $\tau_d$

$$G_m(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{K_m}{1 + \tau_j s}$$

$$\omega(t) = K_m (1 - e^{-t/\tau_j})$$

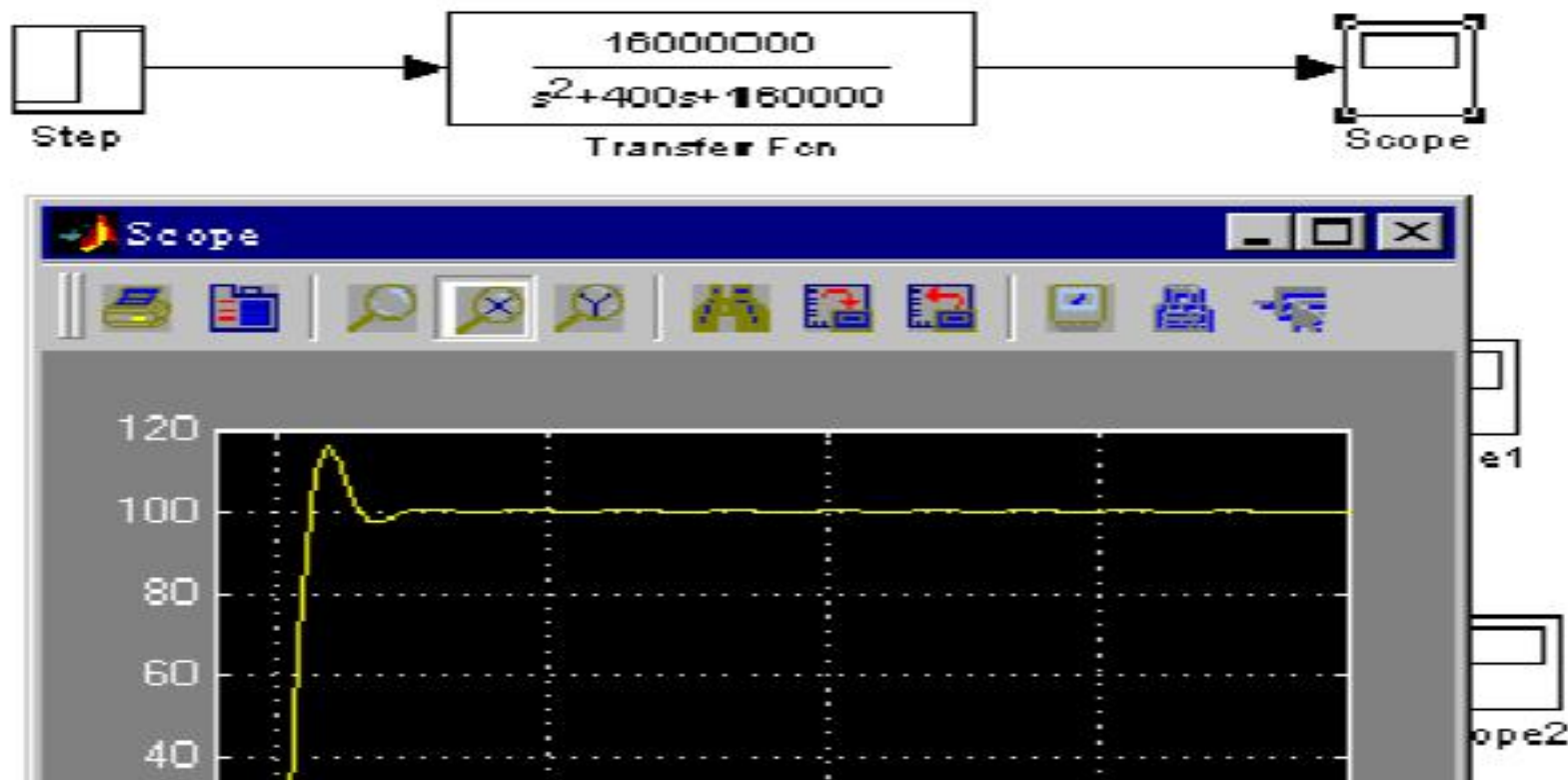


## 任务4 了解机械系统性能的仿真分析



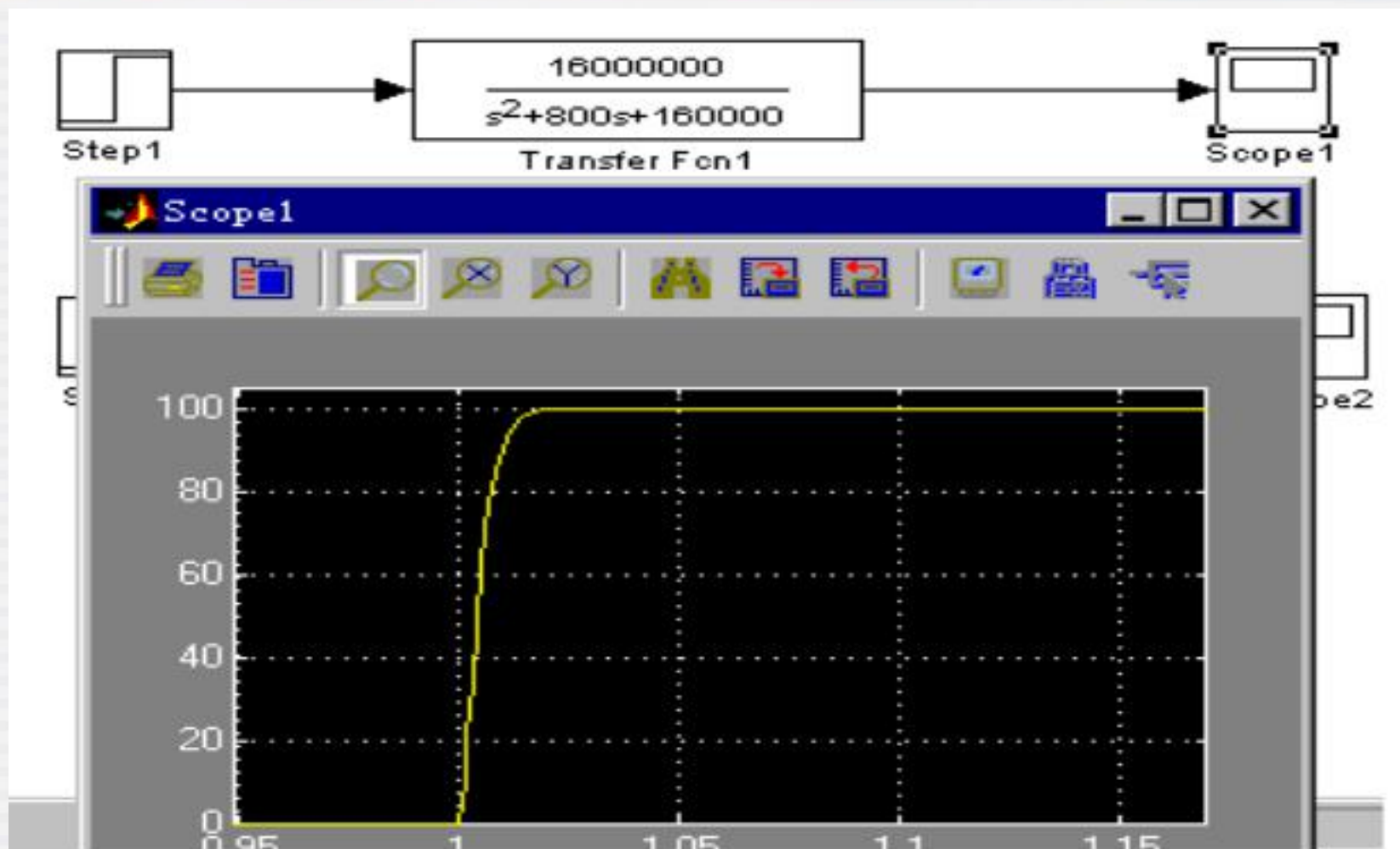
# 任务4 了解机械系统性能的仿真分析

## 现代分析方法



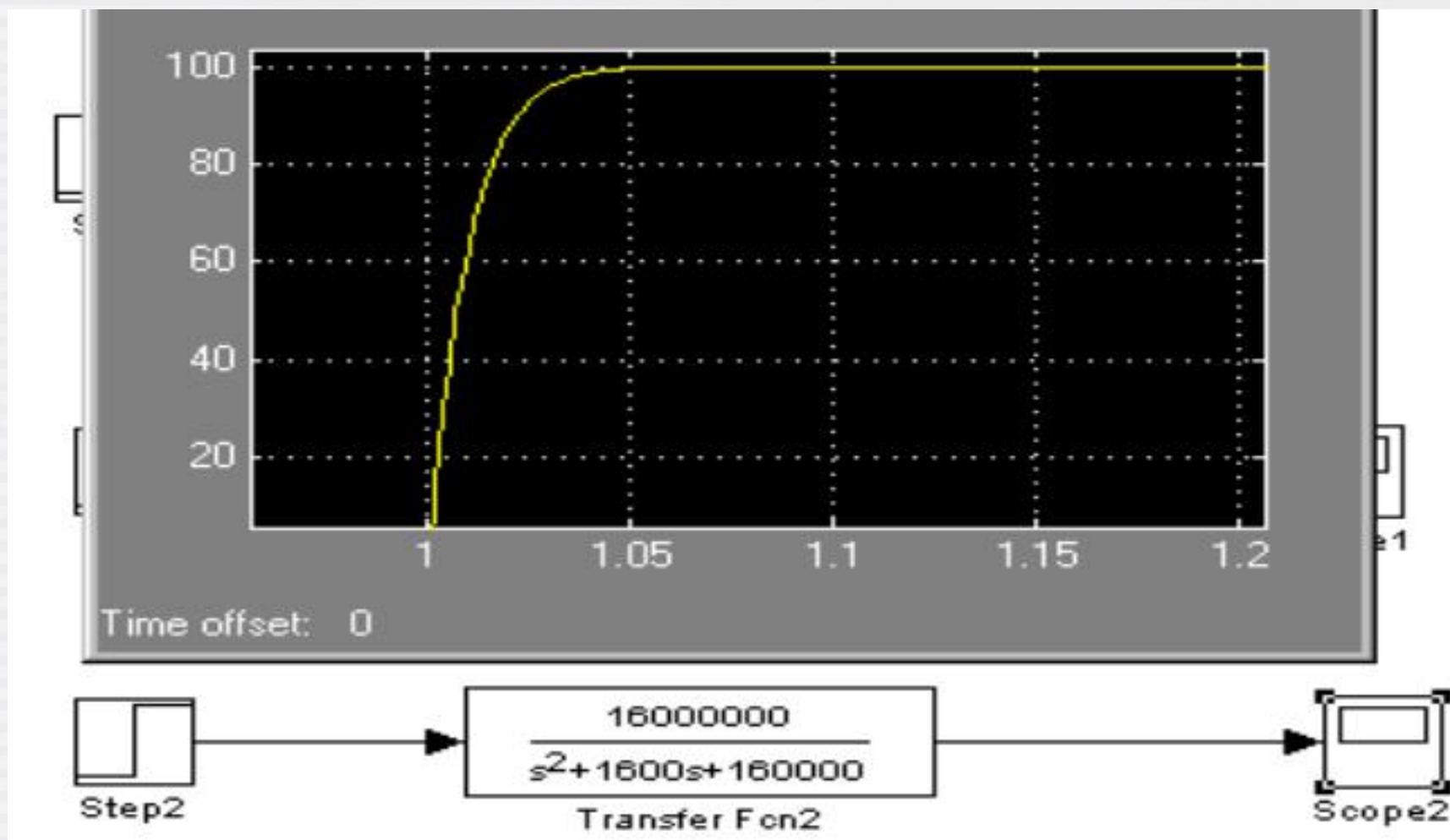
$$K_m = 100, \quad \omega_n = 400, \quad \zeta = 0.5 \quad (\text{欠阻尼})$$

## 任务4 了解机械系统性能的仿真分析



$$K_m = 100, \quad \omega_n = 400, \quad \zeta = 1 \quad (\text{临界阻尼})$$

## 任务4 了解机械系统性能的仿真分析



$$K_m = 100, \quad \omega_n = 400, \quad \zeta = 2 \quad (\text{过阻尼})$$

# 任务4 了解机械系统性能的仿真分析

## 两种分析方法比较

比较内容	经典分析方法	现代分析方法
计算过程	复杂	简单
计算内容	部分需要简化处理	无需简化
结果呈现	抽象	直观

应用**MATLAB**分析方法可以不用对研究对象作任何简化，从而使得分析结果更接近于实际情况。



## 任务4 了解机械系统性能的仿真分析

$$\tau_j = \frac{JR_a}{C_e C_m \Phi^2}$$

为使直流伺服电动机获得平稳的、无振荡的角速度过渡过程，为减小过渡过程时间，应尽量减少机电时间常数，设法**减小 $J$ 和 $R_a$** ，但这样又会使电动机易于振荡。

$$\tau_j = \frac{\omega_0}{\frac{T_d}{J}}$$

空载角速度

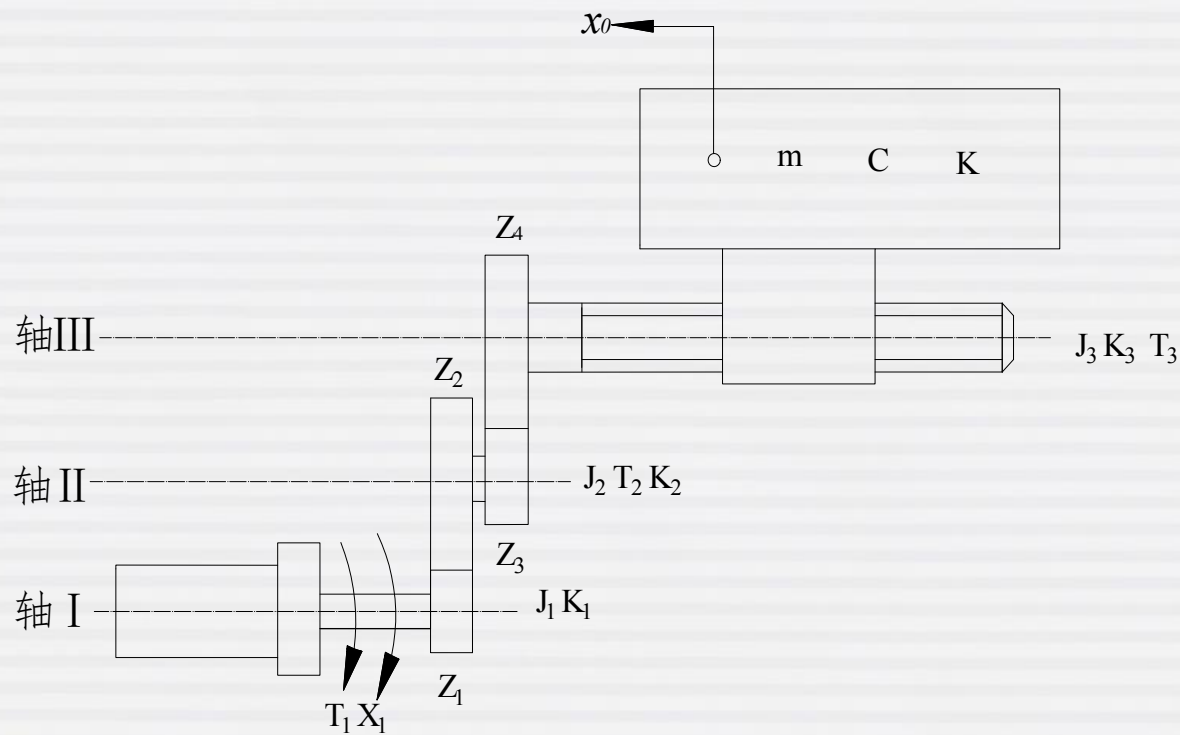
$$\omega_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi}$$

**加大力矩—惯量比的方法**，既可加快过渡过程，又不致于引起振荡。小惯量直流伺服电动机和大惯量直流伺服电动机都是基于这一原理设计的。

## 4.2 建模

- 通过**折算**的办法将复杂的结构装置转换成等效的简单**函数关系**
- 机械系统的数学模型分析的是**输入**（如电机转子运动）和**输出**（如工作台运动）之间的相对关系。
- 等效折算过程是将复杂结构关系的机械系统的**惯量、弹性模量和阻尼**（或阻尼比）等机械性能参数**归一处理**，从而通过**数学模型**来反映各环节的机械**参数**对系统整体的影响。

## 体例：数控机床进给传动系统



## 步骤

1. 把机械系统中各基本物理量折算到传动链中的某个元件上（本例折算到轴I上）——归一处理
2. 在单一轴基础上根据输入量和输出量的关系建立它的输入/输出的数学表达式——数学模型

## 1. 转动惯量的折算

### 1) I、II、III轴转动惯量的折算

根据动力平衡原理

$$T_1 = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + T_1'$$

传动关系

$$\omega_2 = \frac{z_1}{z_2} \omega_1$$

I轴负载转矩  $T_1' = J_2 \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 \frac{d\omega_1}{dt} + \left(\frac{z_1}{z_2}\right) T_2'$

II轴负载转矩  $T_2' = J_3 \left(\frac{z_1}{z_2}\right) \left(\frac{z_3}{z_4}\right)^2 \frac{d\omega_1}{dt} + \left(\frac{z_3}{z_4}\right) T_3'$



## 1. 转动惯量的折算

### 2) 工作台质量折算

根据动力平衡原理  $T_3' 2\pi = m \left( \frac{dv}{dt} \right) L$

传动关系 
$$v = \frac{L}{2\pi} \omega_3 = \frac{L}{2\pi} \left( \frac{z_1}{z_2} \frac{z_3}{z_4} \right) \omega_1$$

III轴负载转矩 
$$T_3' = \left( \frac{L}{2\pi} \right)^2 \left( \frac{z_1}{z_2} \frac{z_3}{z_4} \right) m \frac{d\omega_1}{dt}$$

记住啊!

总的当量转动惯量 
$$J_{\Sigma} = J_1 + J_2 \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^2 + J_3 \left( \frac{z_1}{z_2} \frac{z_3}{z_4} \right)^2 + m \left( \frac{z_1}{z_2} \frac{z_3}{z_4} \right)^2 \left( \frac{L}{2\pi} \right)^2$$

## 2. 粘性阻尼系数的折算

系统工作过程中，相互运动的元件间存在着阻力，并以不同的形式表现出来，如摩擦阻力、流体阻力以及负载阻力等，这些阻力在建模时需要折算成与速度有关的粘滞阻尼力。

当工作台匀速转动时，轴III的驱动转矩 $T_3$ 完全用来克服粘滞阻尼力的消耗。

只计工作台导轨的粘性阻尼系数 $C$

## 2. 粘性阻尼系数的折算

工作台与丝杠之间的动力平衡关系  $T_3 2\pi = C v L$

丝杠转一周  $T_3$  所作的功，等于工作台前进一个导程时其阻尼力所作的功

力学原理和传动关系有：  $T_3 = i T_1$   $v = \frac{L}{2\pi} \omega = \frac{L}{2\pi} \frac{\omega_1}{i}$

$$T_1 = \left( \frac{z_2}{z_1} \frac{z_4}{z_3} \right)^2 \left( \frac{L}{2\pi} \right)^2 C \omega_1 = C' \omega_1$$

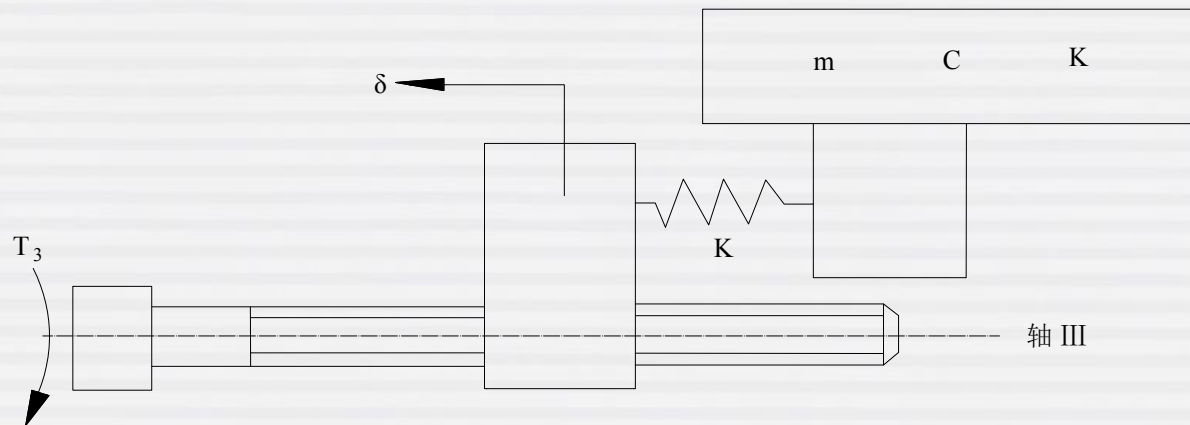
记住  
啊！

工作台导轨折算到轴I上的粘性阻力系数  $C' = \left( \frac{z_2}{z_1} \frac{z_4}{z_3} \right)^2 \left( \frac{L}{2\pi} \right)^2 C$

## 3. 弹性变形系数的折算

建模时要把各种变形折算成相应的扭转刚度系数或轴向刚度系数。

### 1) 轴向刚度的折算



## 3. 弹性变形系数的折算

### 1) 轴向刚度的折算

在丝杠左端输入转矩 $T_3$ 的作用下，丝杠和工作台之间的弹性变形为 $\delta$ ，对应的丝杠附加扭转角为 $\Delta\theta_3$ 。根据动力平衡原理和传动关系，

$$T_3 2\pi = K \delta L \qquad \delta = \frac{\Delta\theta_3}{2\pi} L$$

$$T_3 = \left(\frac{L}{2\pi}\right)^2 K \Delta\theta_3 = K' \Delta\theta_3$$

附加扭转刚度系数  $K' = \left(\frac{L}{2\pi}\right)^2 K$



## 3. 弹性变形系数的折算

### 2) 扭转刚度系数的折算

轴I、II、III产生的扭转角  $\theta_1 = \frac{T_1}{K_1}$

$$\theta_2 = \frac{T_2}{K_2} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right) \frac{T_1}{K_2}$$

$$\theta_3 = \frac{T_3}{K_3} = \left(\frac{z_2}{z_1} \frac{z_4}{z_3}\right) \frac{T_1}{K_3}$$

轴III上实际扭转角  $\theta_{III} = \theta_3 + \Delta\theta_3$

## 3. 弹性变形系数的折算

### 2) 扭转刚度系数的折算

$$\theta = \frac{T_1}{K_1} + \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 \frac{T_1}{K_2} + \left(\frac{Z_2}{Z_1} \frac{Z_4}{Z_3}\right)^2 \left(\frac{1}{K_3} + \frac{1}{K'}\right) T_1 = \left[\frac{1}{K_1} + \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 \frac{1}{K_2} + \left(\frac{Z_2}{Z_1} \frac{Z_4}{Z_3}\right)^2 \left(\frac{1}{K_3} + \frac{1}{K'}\right)\right] T_1 = \frac{T_1}{K_\Sigma}$$

折算到轴I上的**总扭转刚度系数**

$$K_\Sigma = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 \frac{1}{K_2} + \left(\frac{Z_2}{Z_1} \frac{Z_4}{Z_3}\right)^2 \left(\frac{1}{K_3} + \frac{1}{K'}\right)}$$

记住啊!

## 4. 建立系统的数学模型

在轴I上根据动力平衡原理有

$$J_{\Sigma} \frac{d^2 \Phi}{dt^2} + C' \frac{d\Phi}{dt} + K_{\Sigma} \Phi = K_{\Sigma} X_i$$

$$\Phi = \left( \frac{2\pi}{L} \right) \left( \frac{z_2}{z_1} \frac{z_4}{z_3} \right) X_0$$

$$G(s) = \frac{X_0(s)}{X_i(s)} = \frac{\left( \frac{L}{2\pi} \right) \left( \frac{z_1}{z_2} \frac{z_3}{z_4} \right) K_{\Sigma}}{J_{\Sigma} s^2 + C' s + J_{\Sigma}} = \left( \frac{L}{2\pi} \right) \left( \frac{z_1}{z_2} \frac{z_3}{z_4} \right) \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\omega_n = \sqrt{K_{\Sigma} / J_{\Sigma}}$$

$$\xi = \frac{C'}{2\sqrt{J_{\Sigma} K_{\Sigma}}}$$

## 机械性能参数对系统性能仿真的影响

1. 阻尼的影响
2. 摩擦的影响
3. 弹性变形的影响
4. 惯量的影响

## 阻尼的影响

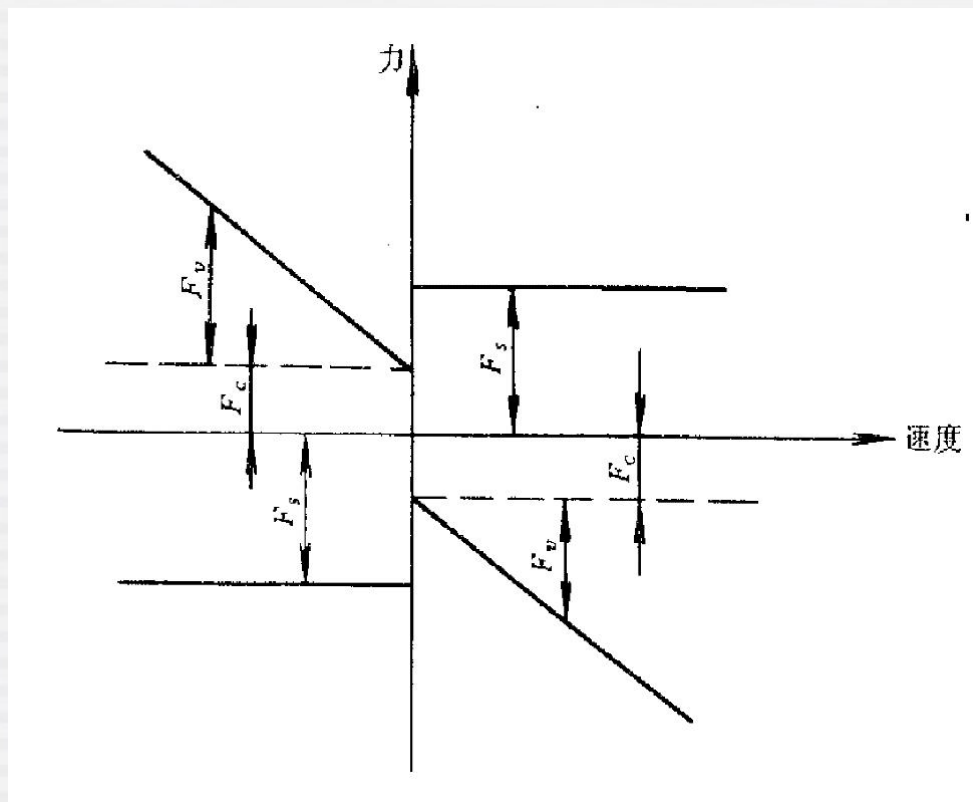
1.  $\zeta = 0$ 时，系统处于等幅持续振荡状态；
2. 当 $\zeta \geq 1$ 时，为临界阻尼或过阻尼系统。无振荡，但响应时间较长；
3. 当 $0 < \zeta < 1$ 时，欠阻尼系统，系统处于减幅振荡状态，其幅值衰减的快慢，取决于衰减系数 $\xi$ 。



## 摩擦的影响

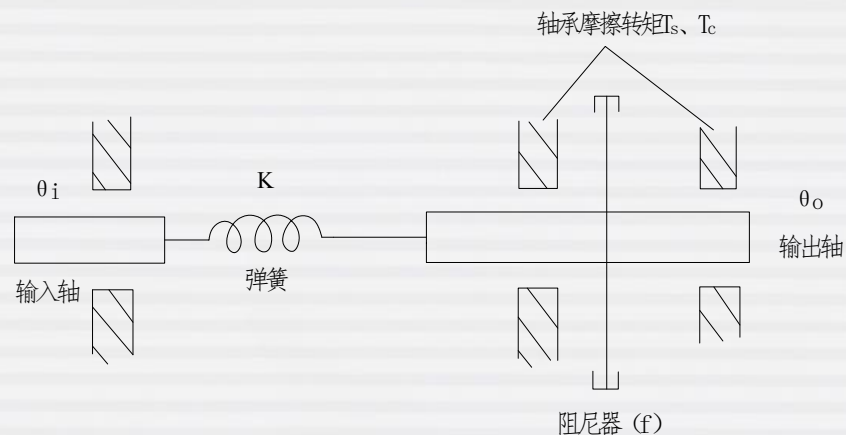
摩擦力可分为粘性摩擦力 $F_v$ 、库仑摩擦力 $F_c$ （动摩擦）和静摩擦力 $F_s$ 三种，方向均与运动趋势方向相反。

对伺服系统的影响：引起动态滞后，降低系统的响应速度，导致系统误差和低速爬行。



摩擦力——速度曲线

## 摩擦的影响



静摩擦力矩 $T_s$ 的作用，在  $\theta_i \leq \left| \frac{T_s}{K} \right|$  范围内，输出轴将不会运动，值  $\theta_i$  即为静摩擦引起的传动死区。

在  $\theta_i > \left| \frac{T_s}{K} \right|$  后，输出轴若以恒速 $\Omega$ 运动，但始终滞后输入轴一个角度，若粘性摩擦系数为 $f$ ，

$$\text{系统的稳态误差} \quad \theta_{ss} = \frac{f\Omega}{K} + \frac{T_c}{K}$$

## 摩擦的影响

当静摩擦大于库仑摩擦，且系统在低速运行时（忽略粘性摩擦引起的滞后），在驱动力引起弹性变形的作用下，系统总是启动、停止的交替变化之中运动，该现象被称为低速爬行现象，低速爬行导致系统运行不稳定。爬行一般出现在某个临界转速以下，而在高速运行时并不出现。

应尽量减少静摩擦和降低动、静摩擦之差值

## 摩擦的影响

- 采用摩擦性能良好的塑料—金属滑动导轨，滚动导轨，滚珠丝杠，静、动压导轨，静、动压轴承，磁轴承等新型传动件和支承件，并进行良好的润滑。
- 适当的增加系统的惯量 $J$ 和粘性摩擦系数 $f$ 也有利于改善低速爬行现象，但惯量增加将引起伺服系统响应性能的降低；增加粘性摩擦系数 $f$ 也会增加系统的稳态误差，故设计时必须权衡利弊，妥善处理

## 弹性变形的影响

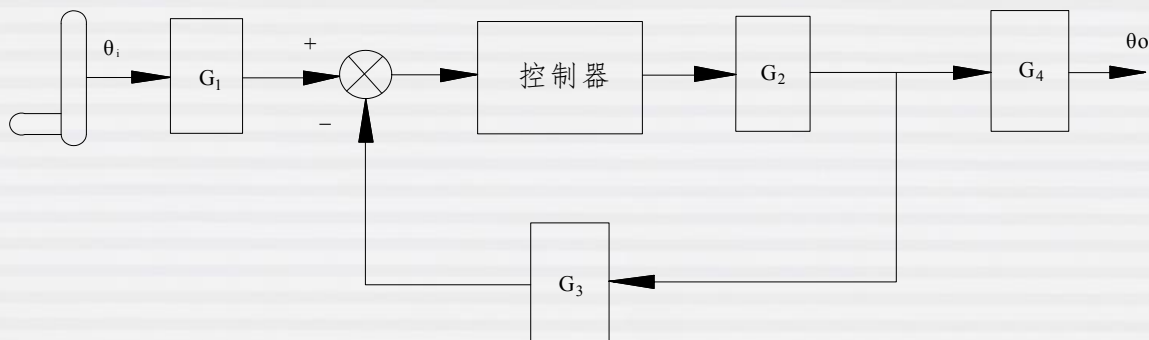
- 结构弹性变形是引起系统不稳定和产生动态滞后的主要因素。
- 采取提高系统刚度、增加阻尼、调整机械构件质量和自振频率等方法来提高系统抗振性，防止谐振的发生。
- 不改变机械结构固有频率的情况下，通过增大阻尼也可以有效地抑制谐振。



## 惯量的影响

- 惯量大，响应慢，固有频率下降，容易产生谐振，因而限制了伺服带宽，影响了伺服精度和响应速度。
- 惯量的适当增大只在改善低速爬行时有利。
- 在不影响系统刚度的条件下，应尽量减少惯量。

## 传动间隙的影响

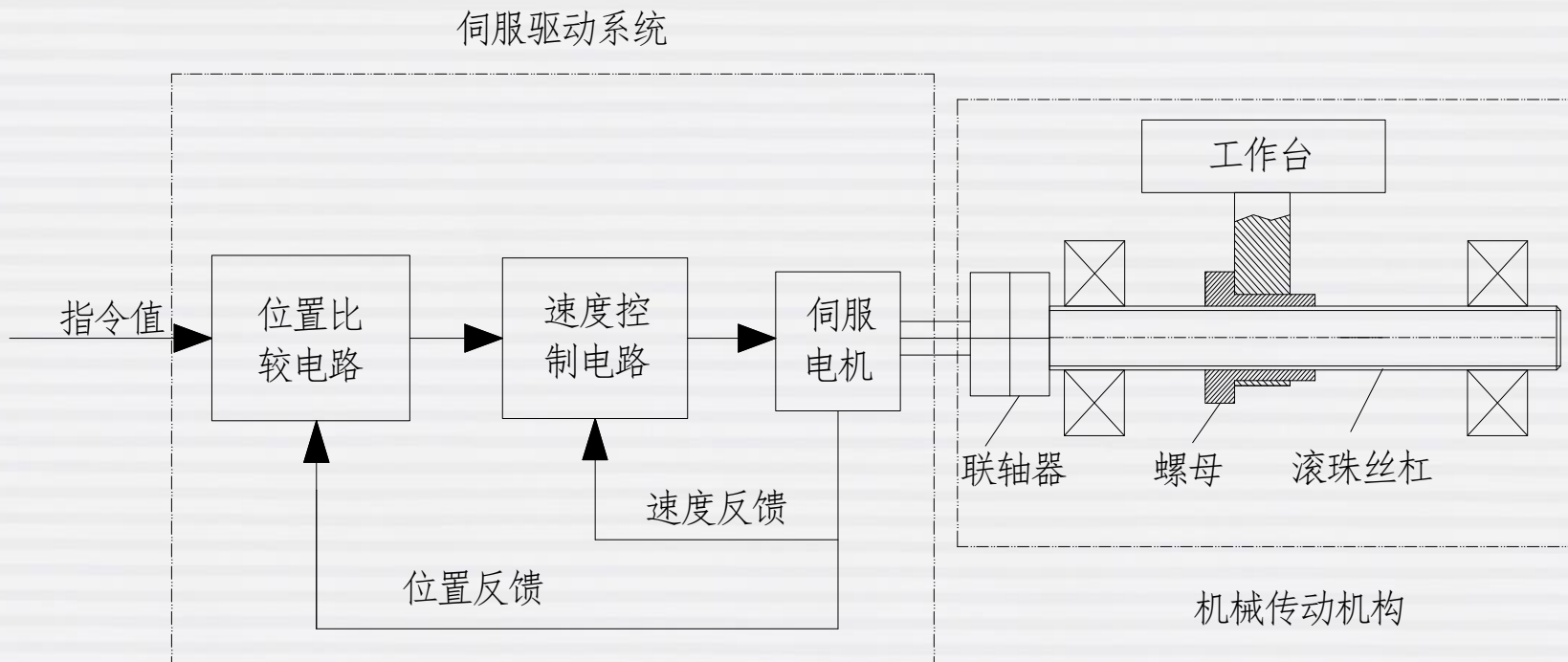


(1) 闭环之外的齿轮 $G_1$ 、 $G_4$ 的齿隙，对系统稳定性无影响，但影响伺服精度。

(2) 闭环之内传递动力的齿轮 $G_2$ 的齿隙，对系统静态精度无影响。但由于齿轮副的啮合间隙会造成传动死区，若闭环系统的稳定裕度较小，则会使系统产生自激振荡，因此闭环之内动力传递齿轮的齿隙对系统的稳定性有影响。

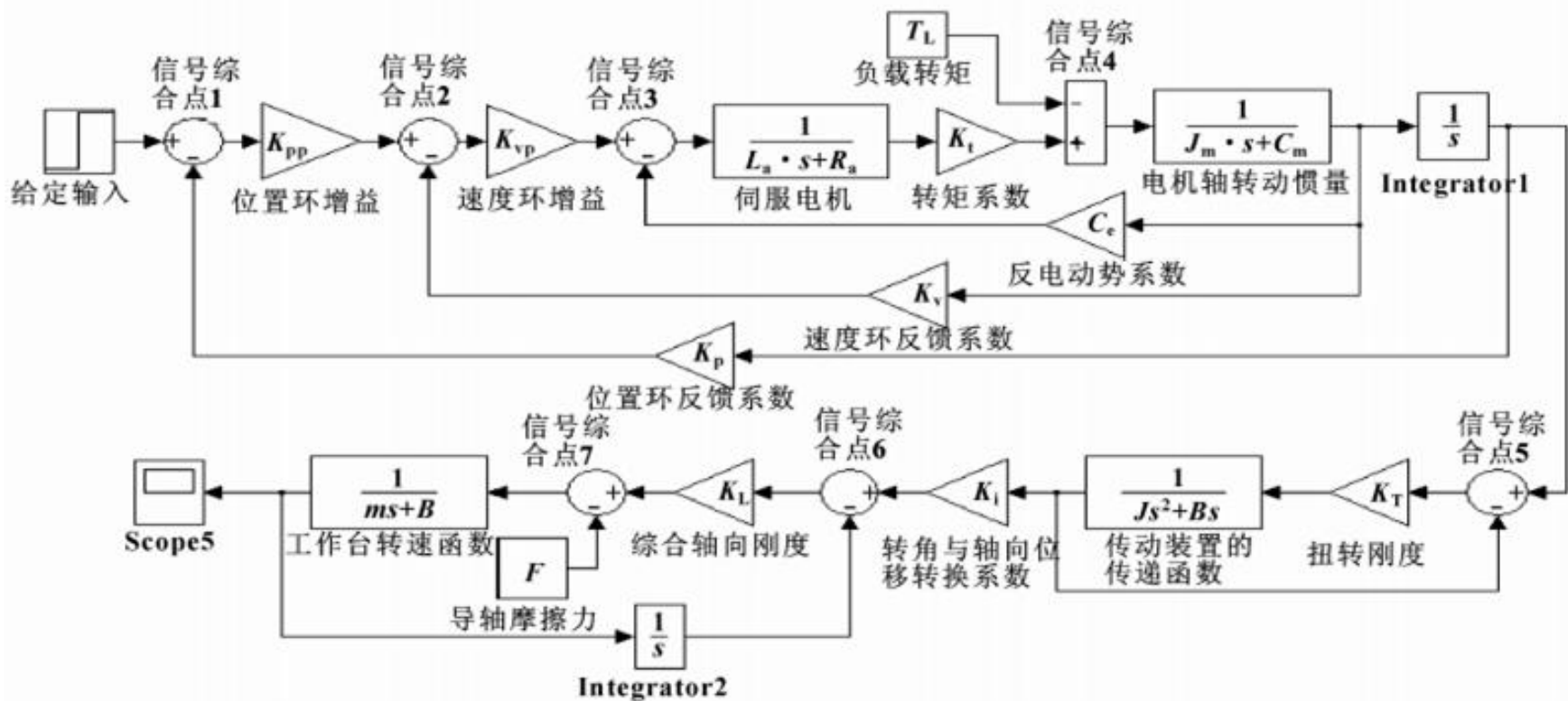
(3) 反馈回路上数据传递齿轮 $G_3$ 的齿隙既影响稳定性，又影响精度。

# 同步训练：数控机床传动机构仿真分析



进给系统的结构简图

# 同步训练：数控机床传动机构仿真分析



进给系统的Simulink仿真模型

# 任务4 了解机械系统性能的仿真分析

## 本任务小结

### 内容

1. 直流伺服电动机动态特性仿真
2. 建模

### 重点

1. 了解**MATLAB**仿真
2. 各参数的折算

## 子情境2 传动机构

1

认识机械传动机构

2

常用单一传动机构设计

3

复合传动机构设计

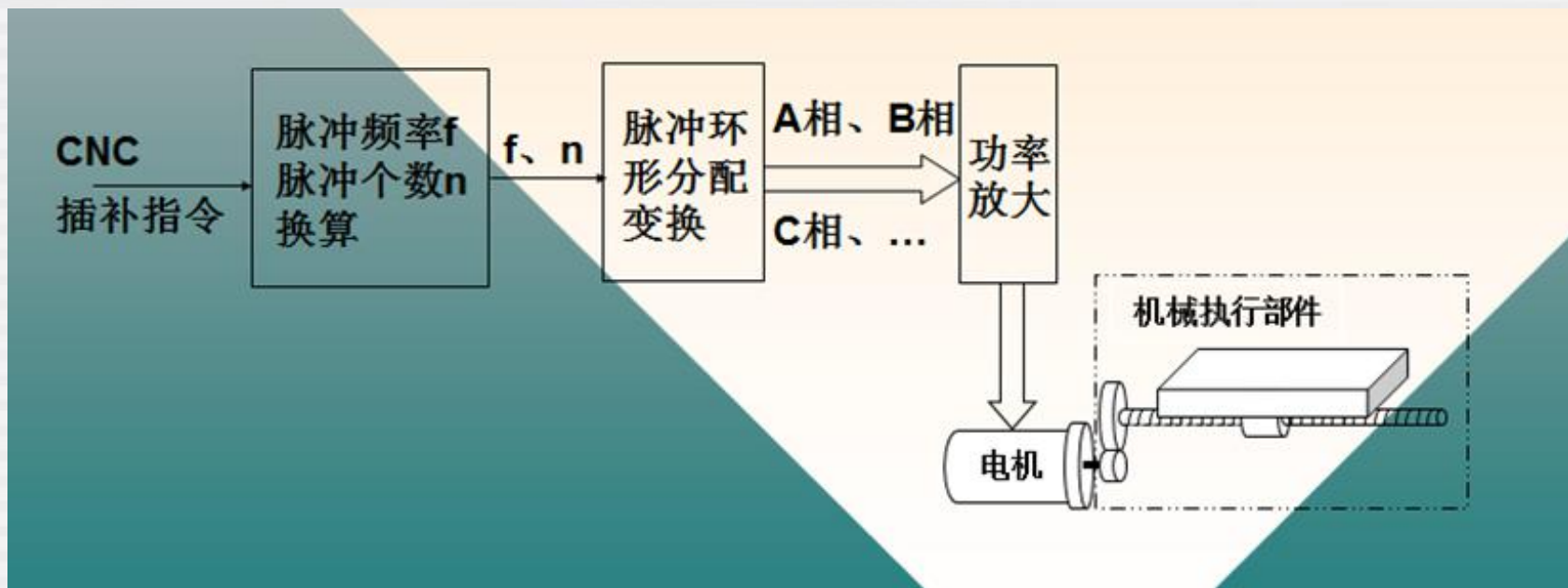
4

同步训练：数控机床传动机构设计



# 任务1 认识机械传动机构

## 数控机床伺服进给传动机构



产品名称	机构属性	机构类型	机构功能	零件类型)	机构运动形式
数控机床	传动机构	齿轮传动	传动，转矩变换	直齿轮	旋转运动
		滚珠丝杠副传动	传动，运动形式变换	丝杠、螺母	旋转运动——直线运动



# 任务1 认识机械传动机构

## 机械传动知识资讯

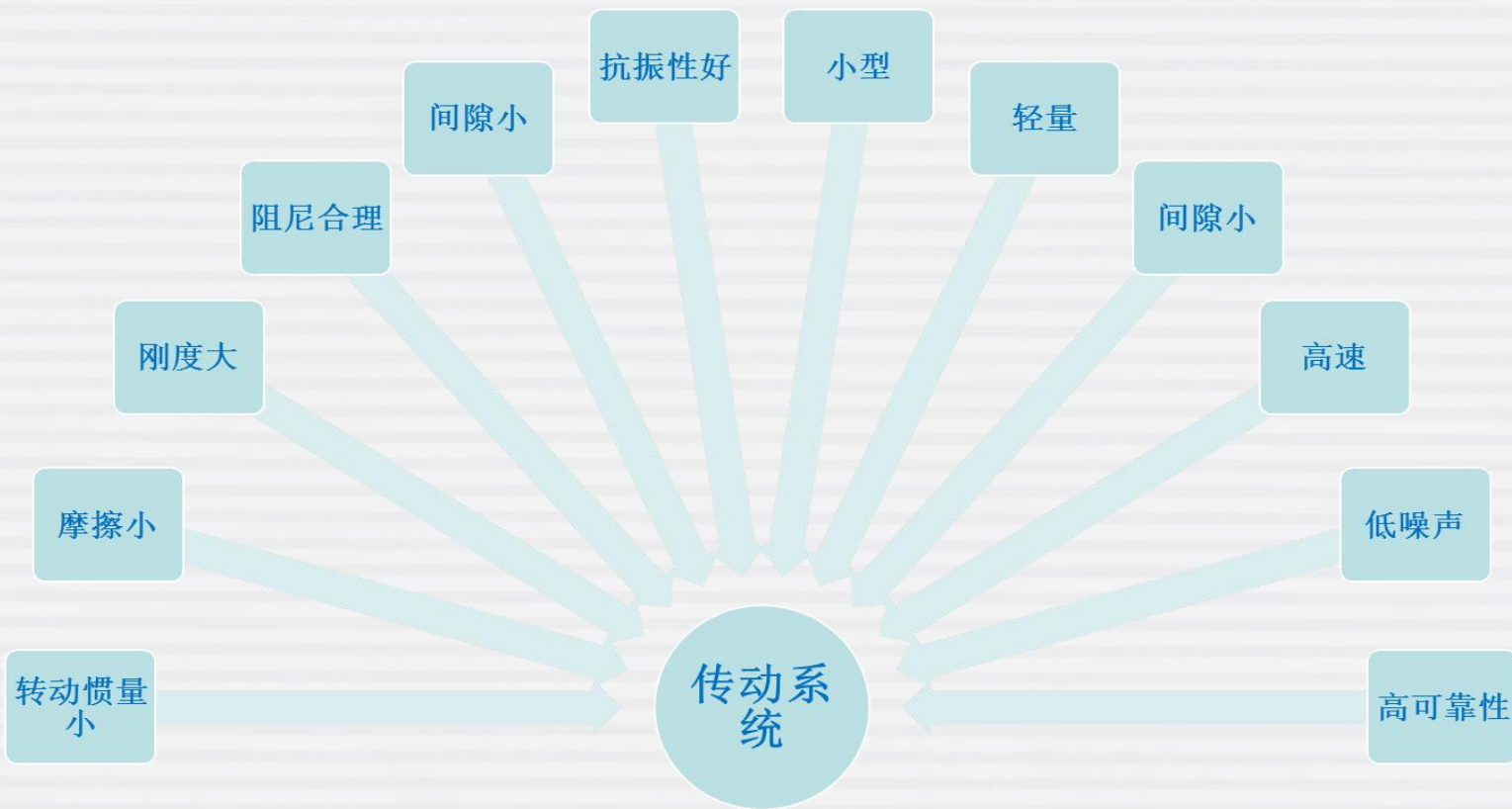
**机械传动：**传递动力的中间装置，是转矩和转速的变换器。

**目的：**使转矩得到合理的匹配，实现对输出的速度调节。



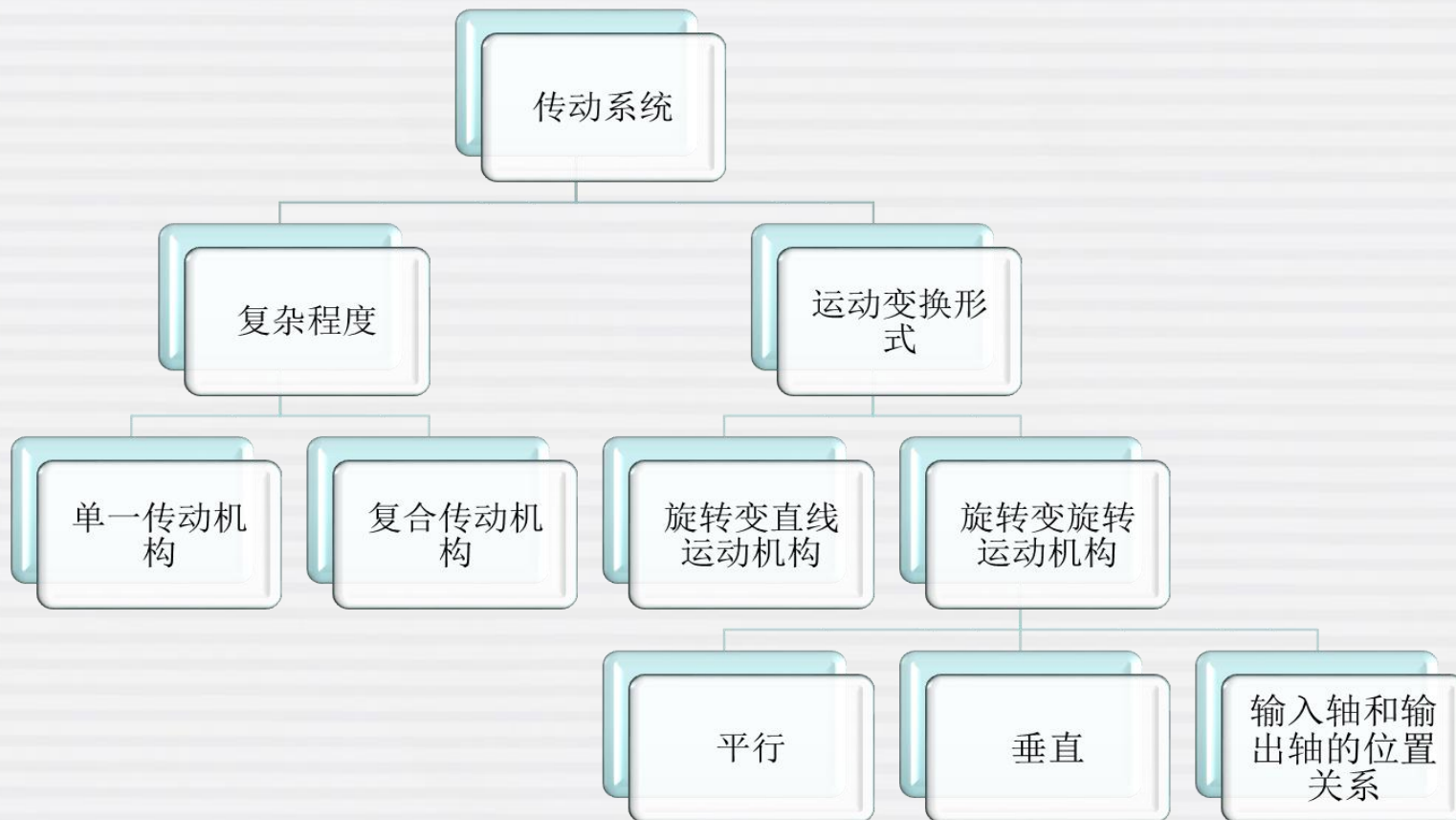
# 任务1 认识机械传动机构

## 传动系统的要求



# 任务1 认识机械传动机构

## 传动系统分类









# 任务1 认识机械传动机构

旋转变直线

名称	组成	特点	示意图
凸轮机构	凸轮、从动件、机架	结构简单、紧凑、设计方便，能使从动件获得较复杂的运动规律。但行程不大，运动副为高副，不宜重载。	
螺旋机构	螺杆、螺母，机架	工作平稳、传动精度高、结构简单、制造方便，可实现微动、增力、定位等功能，较小回转力矩、易于自锁。但效率低，易磨损。	
曲柄滑块机构	机架、曲柄、连杆、滑块	面接触低副，压强小，便于润滑，磨损轻，寿命长，传递动力大；低副易于加工，可获得较高精度，成本低；杆可较长，可用作实现远距离的操纵控制；可利用连杆实现较复杂的运动规律和运动轨迹。	
齿轮齿条机构	齿轮齿条传动机构、滑块限位机构、锁紧机构	传递动力大，效率高；寿命长，工作平稳，可靠性高；能保证恒定的传动比，能传递任意夹角两轴间的运动。	
滚珠丝杠副传动机构	丝杠、螺母、滚珠、反向器（回程引导装置）	轴向刚度高(即通过适当预紧可消除丝杠与螺母之间的轴向间隙)、运动平稳、传动精度高、不易磨损、使用寿命长等。但由于不能自锁，具有传动的可逆性，在用作升降传动机构时，需要采取制动措施。	



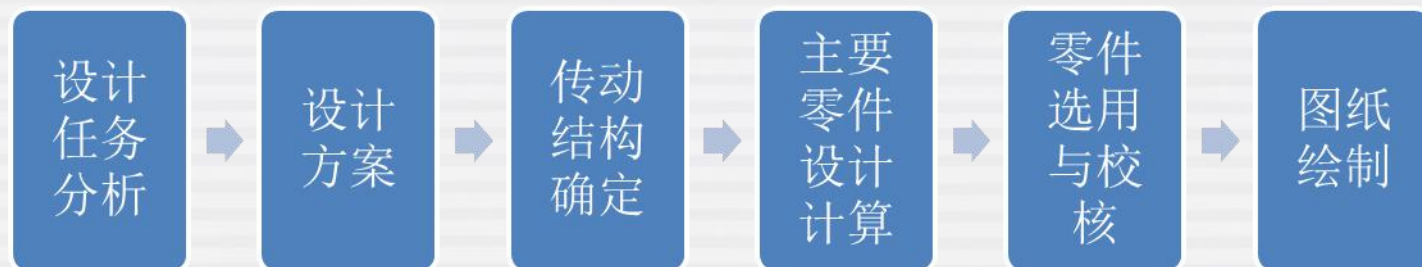
# 任务1 认识机械传动机构

名称	组成	特点	示意图
直齿轮机构	齿轮、传动轴	轮齿分布在圆柱体外表面且与其轴线平行，两轮的转动方向相反。容易产生冲击，振动和噪音。	
斜齿轮机构	齿轮、传动轴	轮齿与其轴线倾斜一个角度，沿螺旋线方向排列在圆柱上，两轮转向相反，传动平稳，适合高速重载传动，但有轴向力。	
锥齿轮机构	齿轮、传动轴	轮齿沿圆锥母线排列于圆锥表面，是相交轴齿轮传动的的基本形式。寿命长，承载能力强，降噪、减震，润滑性好制造较为简单。	
带传动机构	主动轮、从动轮、张紧轮、环形带、机架	结构简单、传动平稳、能缓冲吸振、可以在大的轴间距和多轴间传递动力，且造价低廉、不需润滑、维护容易，适用于中心距较大的传动。	
同步齿形带机构	齿轮、齿形带、传动轴	兼有带传动、齿轮传动及链传动的优点，能方便地实现较远中心距的传动，传动比恒定、准确、结构紧凑，耐磨性好；齿形带薄且轻，强度高，可用于低速及高速传动。齿形带无需特别张紧，作用在轴和轴承处的载荷小，传动效率高。	
蜗轮蜗杆机构	蜗轮、蜗杆、传动轴	两轴垂直交错，可以得到很大的传动比，结构紧凑；两轮啮合齿面间为线接触，其承载能力高于交错轴斜齿轮机构；传动平稳、噪音小；可实现反向自锁；但传动效率较低，磨损较严重，蜗杆轴向力较大。广泛用于机床、汽车、起重设备等传统机械中。	



# 任务2 常用单一传动机构设计

## 一般流程



传动机构设计的一般流程



## 任务2 常用单一传动机构设计

1. 滚珠丝杠副传动机构
2. 直齿轮传动机构
3. 蜗轮蜗杆传动机构
4. 同步带传动机构

# 滚珠丝杠副传动机构

分类：内循环式和外循环式。

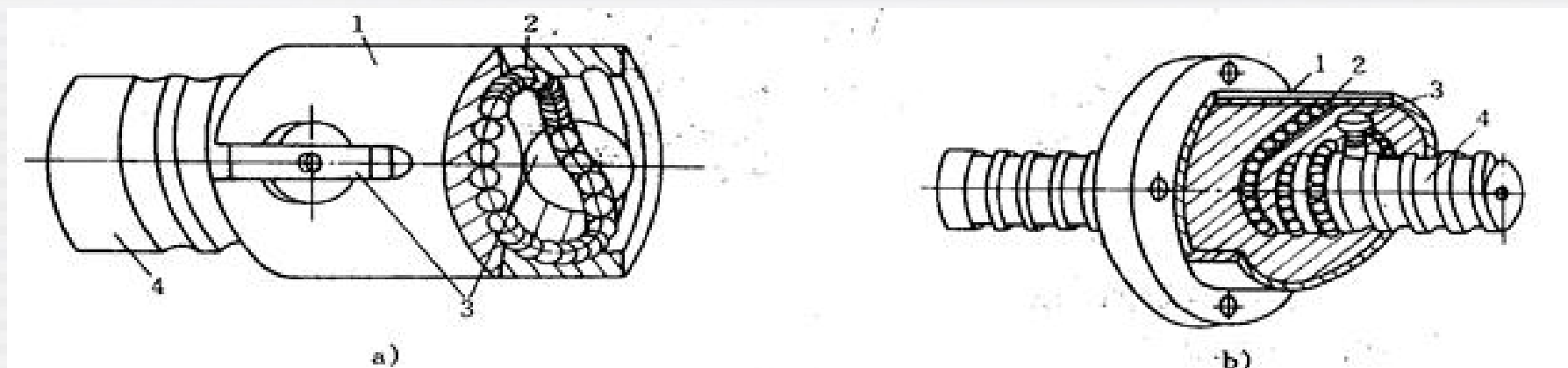
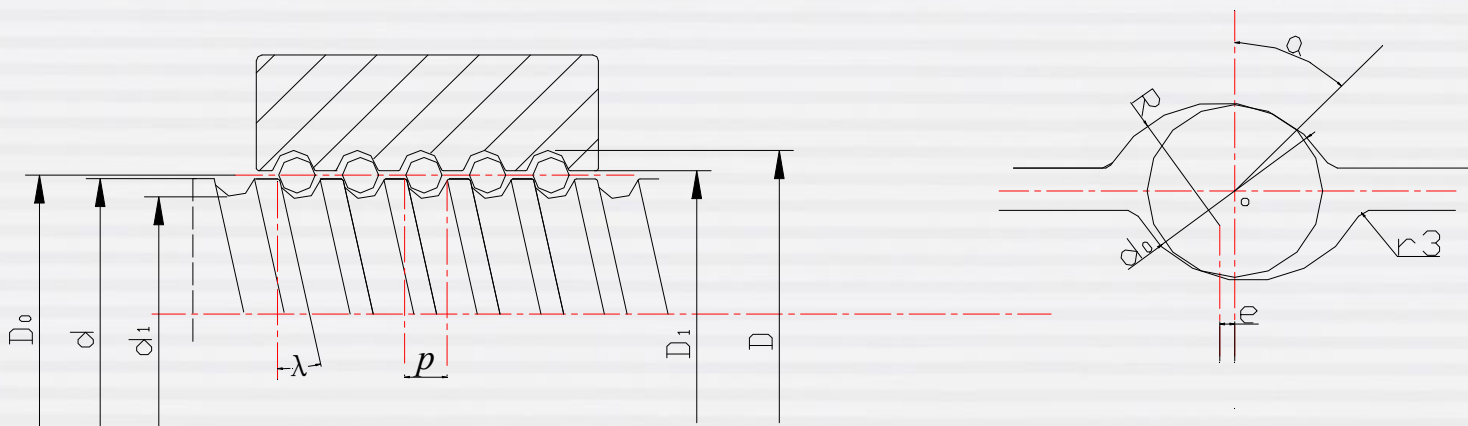


图 2-8 滚珠丝杠副

1—螺母 2—滚珠 3—回程引导装置 4—丝杠

# 滚珠丝杠副传动机构

## 滚珠丝杠副的主要尺寸、精度等级及标注



滚珠丝杠副的主要尺寸

$D_0$ 为公称直径，又称为标称直径；  
 $D_1$ 为螺母内径； $D$ 为螺母外径；  
 $R$ 为螺纹滚道半径； $e$ 为偏心距；  
 $\alpha$ 为接触角，一般为 $45^\circ$ ；  
 $r_3$ 为螺纹牙顶圆角半径。

$d$ 为丝杠外径； $d_1$ 为丝杠内径；  
 $d_0$ 为滚珠直径；  
 $p$ 为丝杠导程；  
 $\lambda$ 为螺旋升角；



## 滚珠丝杠副传动机构

**精度等级：** JB3162.2—82分为六个等级：C、D、E、F、G、H。C级最高,H级最低;设计选用滚珠丝杠副时，应根据传动机构的精度要求，选择滚珠丝杠副的精度等级。在每一精度等级内再分项，用以规定各精度等级的检查项目。

JB3162.2—91《滚珠丝杠副精度》标准规定分为7个等级：1，2，3，4，5，7，10。1级最高。



## 滚珠丝杠副传动机构

滚珠丝杠副的标注采用汉语拼音字母、数字及汉字，各制造厂略有不同。例如：**FFZD40 5-3-D3 / 1400×900**（南京工艺制造设备厂），表示浮动式内循环、法兰与直筒螺母组合垫片预紧、标称直径40mm，基本导程5mm、承载滚珠总圈数为3圈、D级精度、检验1~3项，右旋、丝杠全长1400mm、螺纹长度900mm。

**FC1B-6006-5-E2左**（汉江机床厂）



# 滚珠丝杠副传动机构

表2.2.5 导程精度检验项目

机械种类		坐标方向			
		X（横向）	Y（立向）	Z（纵向）	W（刀杆、镗杆）
开环系统	数控压力机	E	—	E	—
	数控绘图机	E	—	E	—
	数控车床	E、D	—	E	—
	数控磨床	D、C	—	D	—
	数控线切割机	D	—	D	—
	数控钻床	E	E、F	E	—
	数控铣床	D	D	D	—
	数控镗床	D、C	D、C	D、C	E
	数控坐标镗床	D、C	D、C	D、C	D
	自动换刀数控机床	D、C	D、C	D、C	E
坐标镗床，螺纹磨床		D、C	D、C	D、C	D
仪表机床		D、C	D、C	D、C	—
普通机床，通用机床		F	F	F	—

## 轴向间隙的调整和预紧力的施加

✓滚珠丝杠副的轴向间隙是承载时在滚珠与滚道型面接触点的弹性变形所引起的螺母位移量和螺母原有间隙的总和。通常采用双螺母预紧的方法，把弹性变形控制在最小限度内，以减小或消除轴向间隙，并可以提高滚珠丝杠副的刚度。

✓单螺母式滚珠丝杠副的轴向间隙达0.05mm。

✓双螺母预紧消除轴向间隙时应注意以下两点：

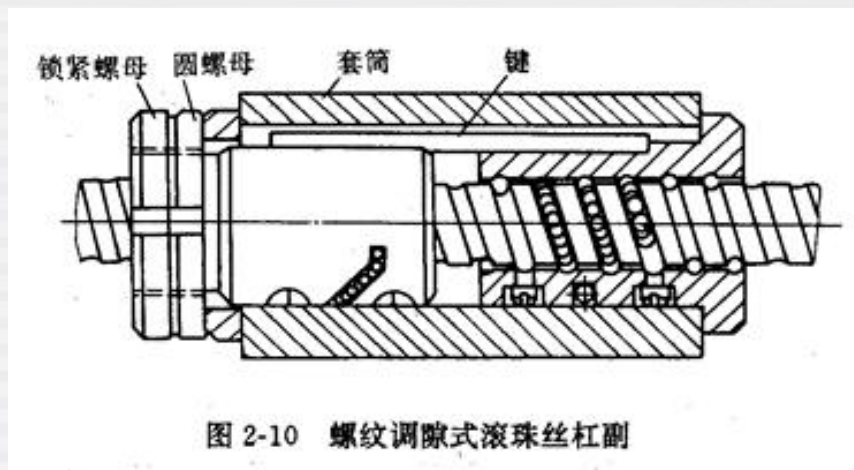
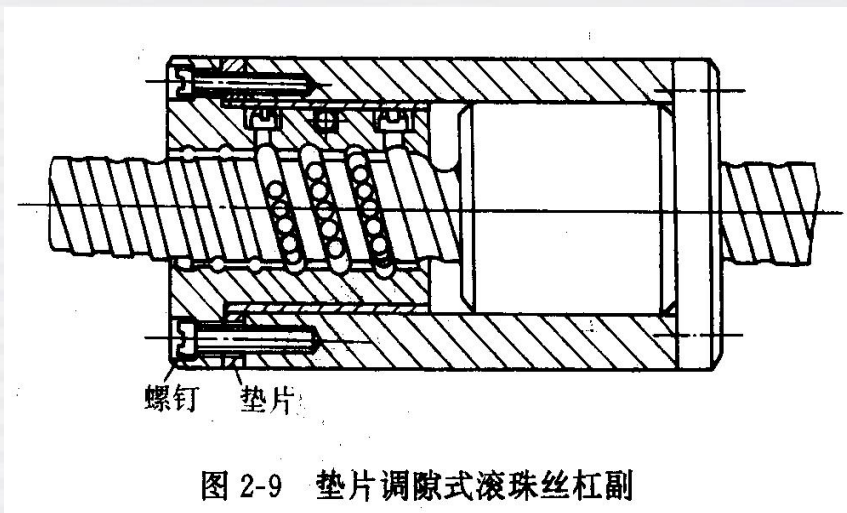
- 1) 预紧力大小必须合适，预紧力应不超过最大轴向负载的1/3。
- 2) 要特别注意减小丝杠安装部分和驱动部分的间隙。

# 滚珠丝杠副传动机构

## 轴向间隙的调整和预紧力的施加

**垫片调隙式:**通过调整垫片厚度实现，该结构紧凑，工作可靠，调整方便，应用广，但不很准确，适用于一般精度的传动机构。

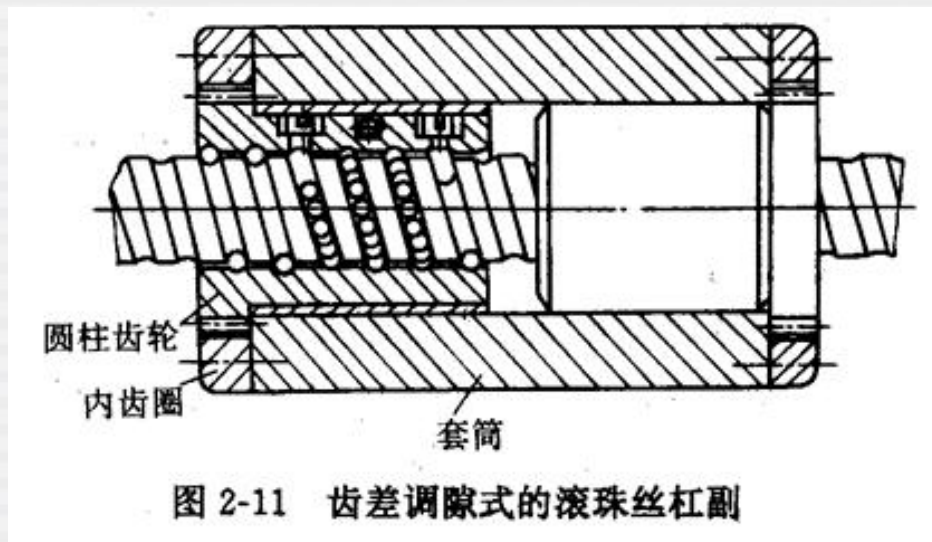
**螺纹调隙式:**形式结构紧凑，工作可靠，调整方便，缺点是不很精确。



# 滚珠丝杠副传动机构

## 轴向间隙的调整和预紧力的施加

**齿差调隙式:**形式调整精度很高，工作可靠。但结构复杂，加工和装配工艺性能较差。



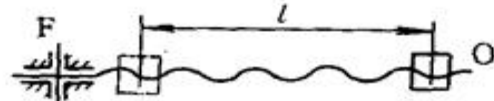
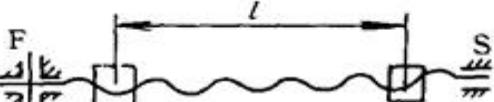
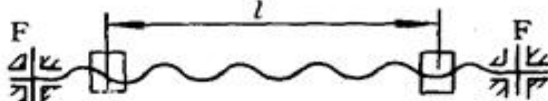
$$\Delta s = \left( \frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} \right) p = \frac{z_2 - z_1}{z_1 z_2} p = \frac{1}{z_1 z_2} p$$



# 滚珠丝杠副传动机构

## 滚珠丝杠副的安装

表 2-5 滚珠丝杠副支承形式

支承形式	简 图	特 点
一端固定 一端自由 (F-O)		<ol style="list-style-type: none"><li>1. 结构简单</li><li>2. 丝杠的轴向刚度比两端固定低</li><li>3. 丝杠的压杆稳定性和临界转速都较低</li><li>4. 设计时尽量使丝杠受拉伸</li><li>5. 适用于较短和竖直的丝杠</li></ol>
一端固定 一端游动 (F-S)		<ol style="list-style-type: none"><li>1. 需保持螺母与两端支承同轴, 故结构较复杂, 工艺较困难</li><li>2. 丝杠的轴向刚度和 F-O 相同</li><li>3. 压杆稳定性和临界转速比同长度的 F-O 型高</li><li>4. 丝杠有热膨胀的余地</li><li>5. 适用于较长的卧式安装丝杠</li></ol>
两端固定 (F-F)		<ol style="list-style-type: none"><li>1. 同 F-S 的 <math>l</math></li><li>2. 只要轴承无间隙, 丝杠的轴向刚度为一端固定的 4 倍</li><li>3. 丝杠一般不会受压, 无压杆稳定问题, 固有频率比一端固定要高</li><li>4. 可以预拉伸, 预拉伸后可减少丝杠自重的下垂和热补偿膨胀, 但需一套预拉伸机构, 结构及工艺都比较困难</li><li>5. 要进行预拉伸的丝杠, 其目标行程应略小于公称行程, 减少量等于拉伸量</li><li>6. 适用于对刚度和位移精度要求高的场合</li></ol>

# 滚珠丝杠副传动机构

## 滚珠丝杠副的支承

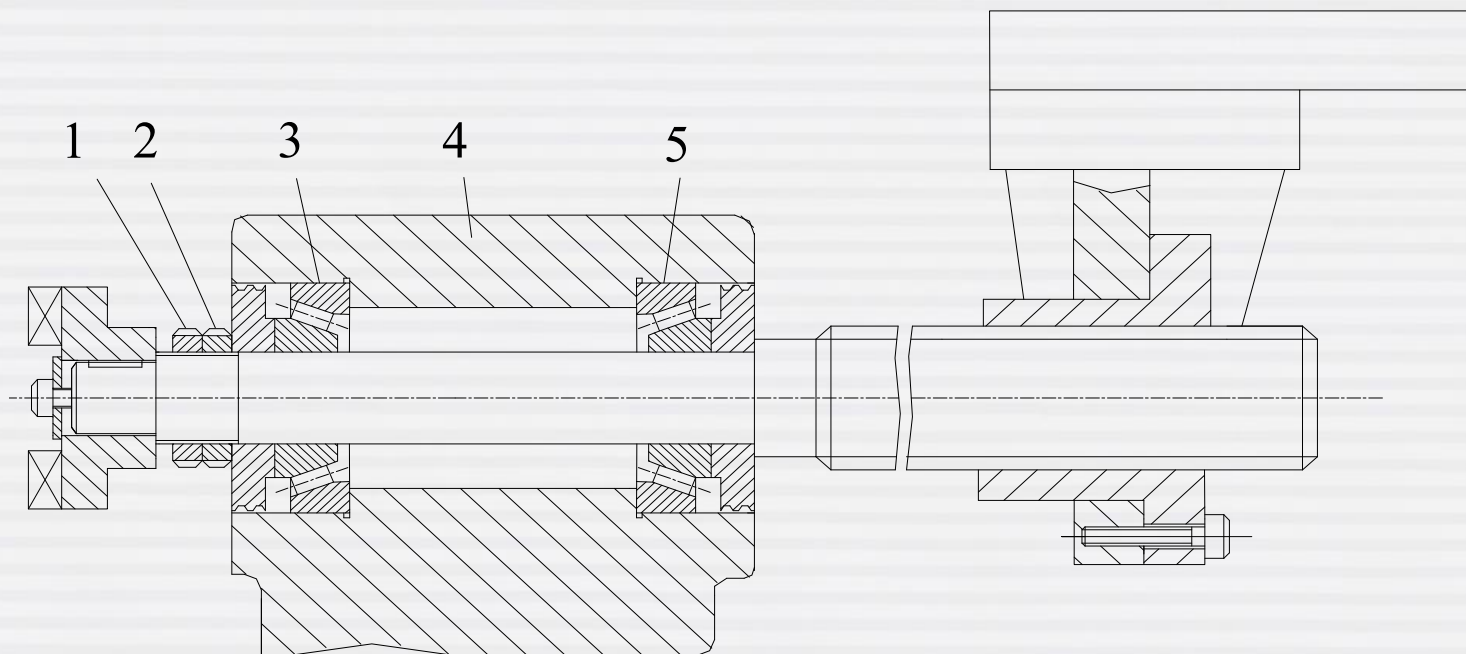


图2.2.7一端固定一端自由支承  
1、2—螺母 3、5—轴承 4—支承座



# 滚珠丝杠副传动机构

## 滚珠丝杠副的支承

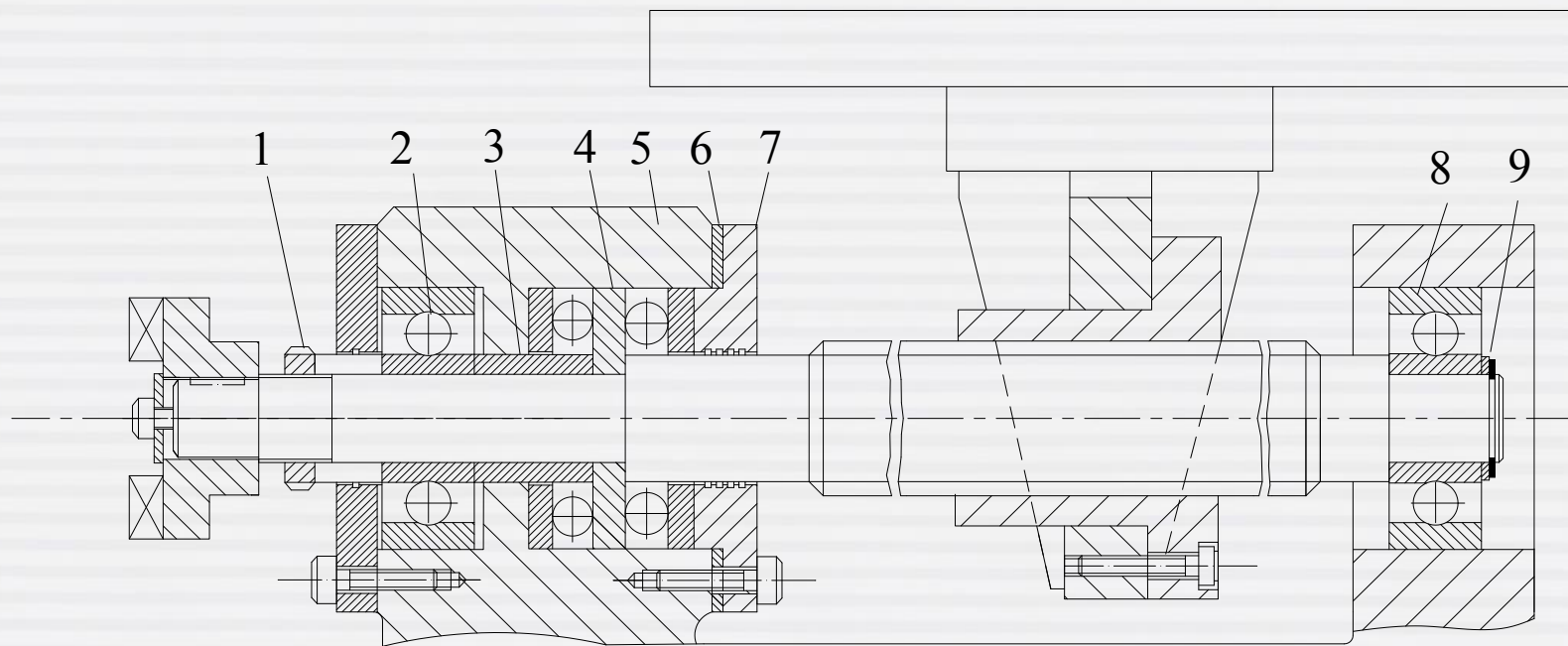


图2.2.8一端固定一端游动式支承

# 滚珠丝杠副传动机构

## 滚珠丝杠副的支承

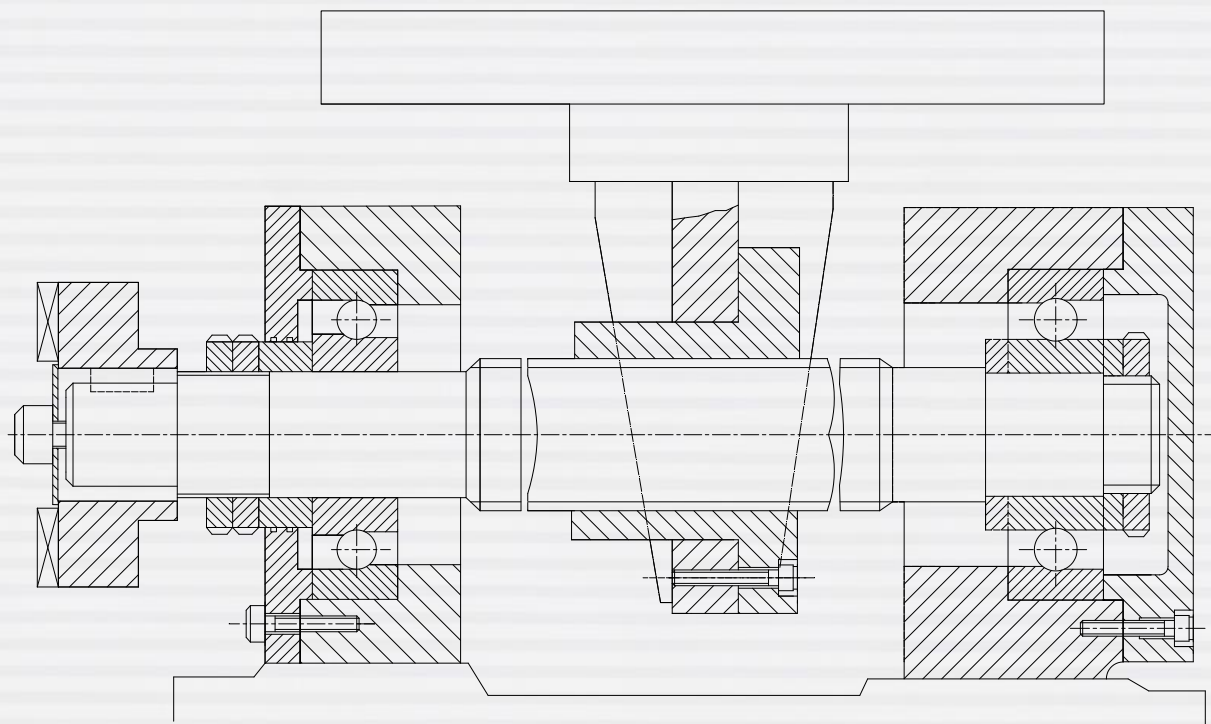


图2.2.9 两端固定式支承

# 滚珠丝杠副传动机构

## 润滑和密封

### (1) 润滑

润滑油为一般机油或90~180号透平油或140号主轴油

### (2) 密封

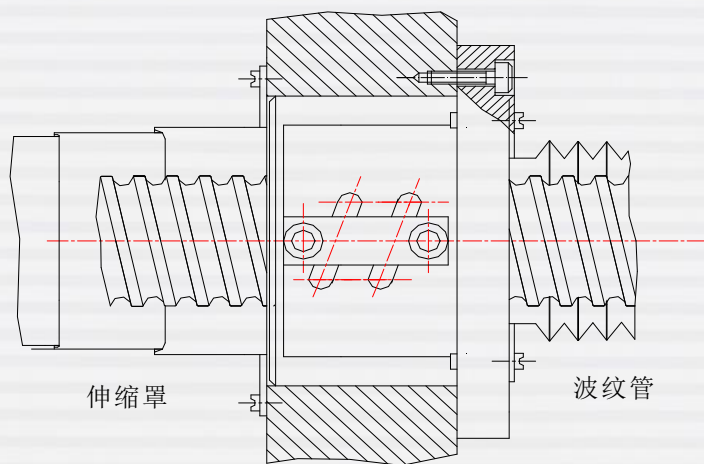


图2.2.10 丝杠密封

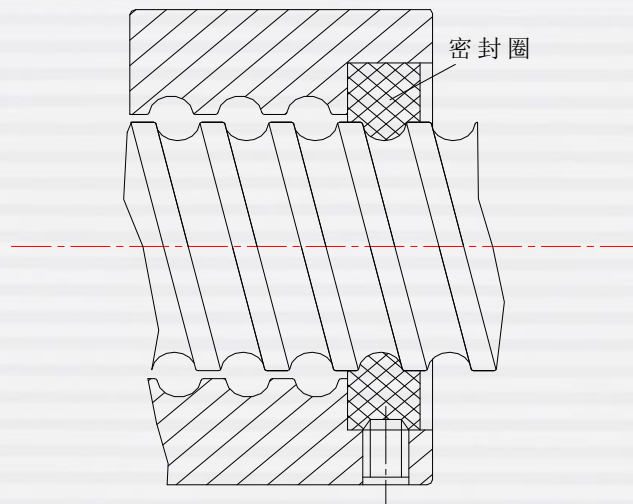


图2.2.11 螺母端部密封



# 滚珠丝杠副传动机构

## 滚珠丝杠副传动机构的设计

**设计任务1：** 已知工作载荷或平均工作载荷，使用寿命，丝杠的工作长度(或螺母的有效行程)，丝杠的转速，以及滚道硬度和运转情况。设计滚珠丝杠副。

## 滚珠丝杠副传动机构的设计

**设计任务2：** 已知平均工作载荷  $F_m=4000\text{N}$ ，丝杠工作长度  $l=2\text{m}$ ，平均转速  $n=120\text{r/min}$ ，每天开机6小时，每年300个工作日，要求工作8年以上，丝杠材料为CrWMn钢，滚道硬度为58~62HRC，丝杠传动精度为 $\pm 0.04\text{mm}$ 。设计某数控机床工作台进给用滚珠丝杠副。

# 滚珠丝杠副传动机构

- 设计步骤及方法如下：

(1) 计算载荷 $F_c$  (N) 的计算

$$F_c = K_F K_H K_A F_m$$

式中， $K_F$ 为载荷系数，按表2.2.7选取； $K_H$ 为硬度系数，按表2.2.8选取； $K_A$ 为精度系数，按表2.2.6选取； $F_m$  (N) 为平均工作载荷。

(2) 额定动载荷计算值 $C'_a$  (N) 的计算

$$C'_a = F_c \sqrt[3]{\frac{n_m L'_h}{1.67 \times 10^6}}$$

- (3) 根据 $C'_a$  值从滚珠丝杠副系列中选所需要的规格，使所选规格的丝杠副的额定动载荷 $C_a$ 值等于或大于 $C'_a$ ，并列出其参数值。
- (4) 验算传动效率、刚度及工作性是否满足要求（参见例2-1），如不能，则应另选其它规格并重新验算。

对于低速（ $n \leq 10 \text{r/min}$ ）传动，只按额定静载荷计算即可。



齿轮传动的瞬时传动比为常数，传动精确度高，可做到零侧隙无回差，强度大能承受重载，结构紧凑，摩擦力小和效率高消除齿侧间隙，保证双向传动精度。

## 1. 齿轮传动机构消间隙方法及措施

**刚性消隙法：**严格控制轮齿齿厚和齿距误差，调整后齿侧间隙不能自动补偿，但能提高传动刚度。

**柔性消隙法：**调整后齿侧间隙可以自动补偿。对轮齿齿厚和齿距的精度要求可适当降低，但对传动平稳性有负面影响，且传动刚度低，结构也较复杂。

# 齿轮传动机构

## 1. 齿轮传动机构消间隙方法及措施

### 直齿圆柱齿轮传动机构

- 偏心轴套调整法
- 双片薄齿轮错齿调整法

### 斜齿圆柱齿轮传动机构

- 垫片调整法
- 轴向压簧调整法

### 锥齿轮传动机构

- 轴向压簧调整法
- 周向弹簧调整法

## 直齿圆柱齿轮传动机构消隙

### (1) 偏心轴套调整法—刚性消隙

转动偏心轴套1可以调整两啮合齿轮的中心距，从而消除直齿圆柱齿轮传动的齿侧间隙及其造成的换向死区。结构简单，侧隙调整后不能自动补偿。

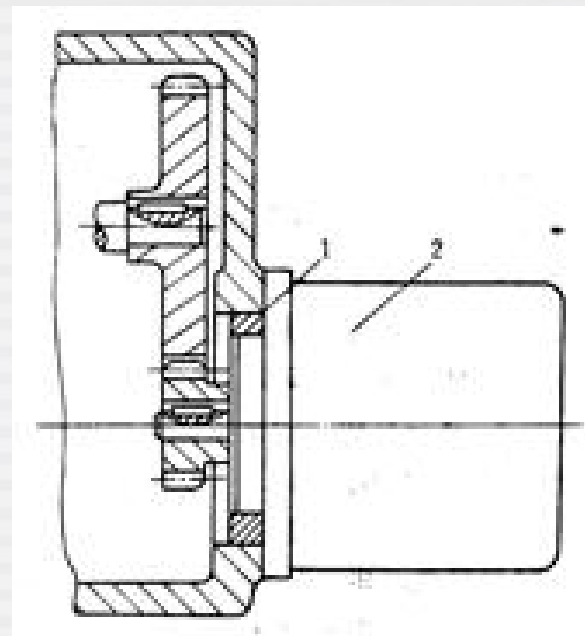


图2.2.12偏心轴套式消隙机构  
1—偏心轴套； 2—电动机

## 直齿圆柱齿轮传动机构消隙

### (2) 双片薄齿轮错齿调整法— 柔性消隙

装配时使一片薄齿轮的齿左侧和另一片的齿右侧分别紧贴在宽齿轮齿槽的左右两侧。

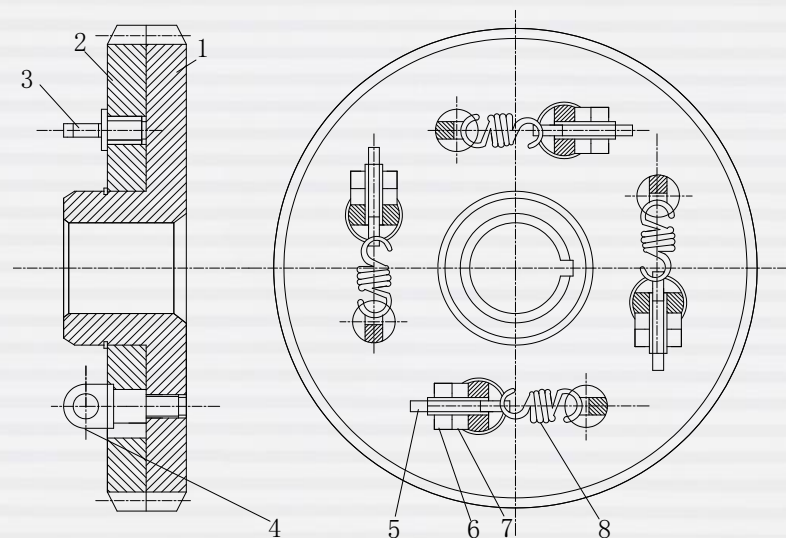


图2.2.13 圆柱薄片齿轮消隙结构

## 斜齿轮传动机构消隙

### (1) 垫片调整法—刚性消隙

$$H = \Delta \cdot \cot \beta$$

$\Delta$ 为齿侧间隙， $H$ 为垫片厚度，  
 $\beta$ 为螺旋角

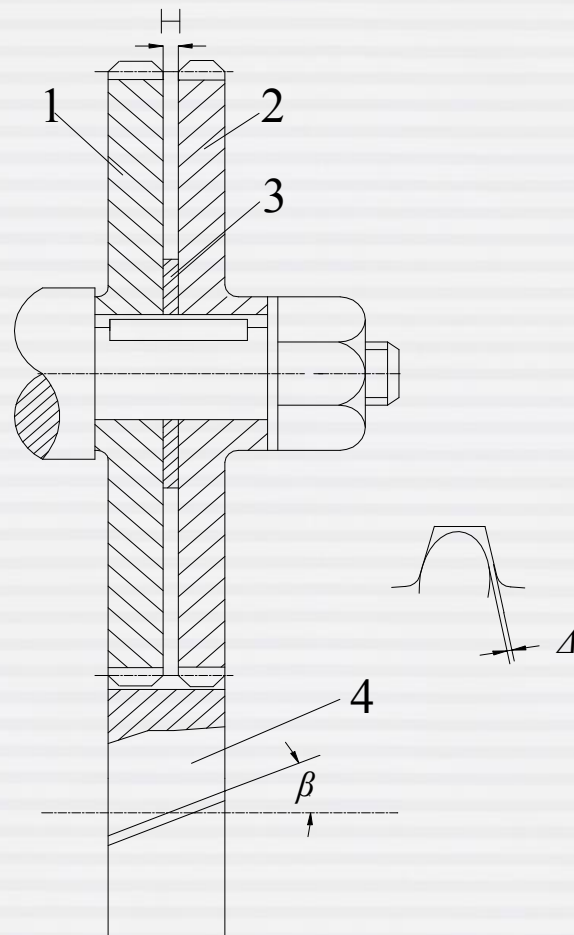


图2.2.14斜齿轮垫片消隙结构

## 斜齿轮传动机构消隙

### (2) 轴向压簧调整法—柔性消隙

用弹簧3的轴向力来获得薄片斜齿轮1、2之间的错位，错齿消除间隙。

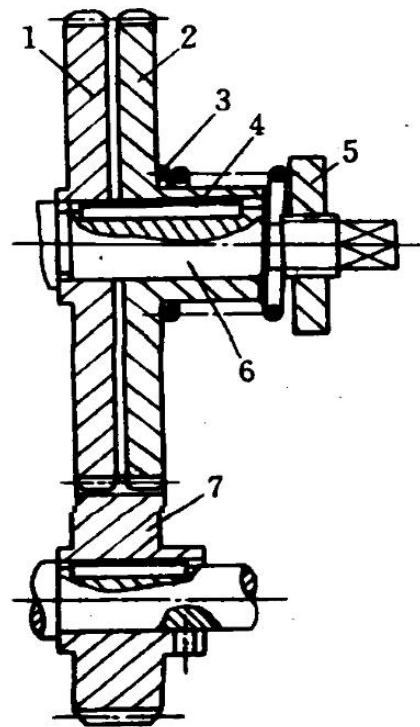


图 2-4 斜齿薄片齿轮轴向压簧调整

1、2—薄片齿轮 3—弹簧 4—键  
5—螺母 6—轴 7—宽齿轮



## 锥齿轮传动机构消隙

### (1) 轴向压簧调整法—柔性消隙

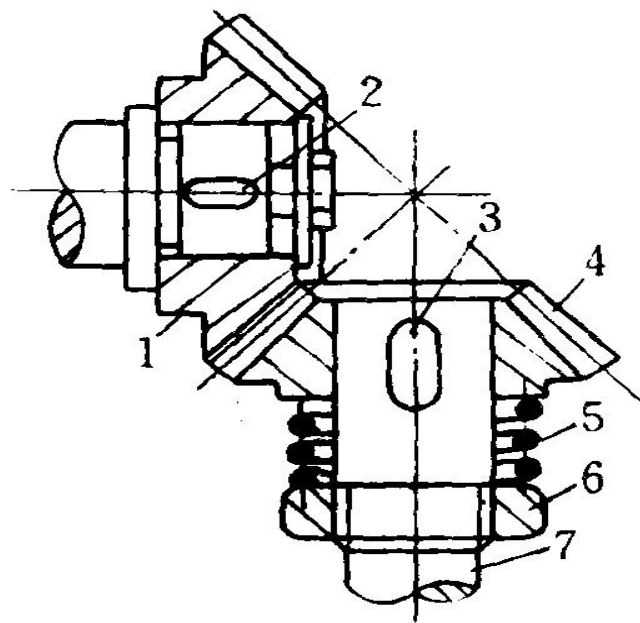


图 2-5 锥齿轮轴向压簧调整

1、4—锥齿轮 2、3—键

5—压簧 6—螺母 7—轴

# 齿轮传动机构

## 锥齿轮传动机构消隙

### (2) 周向弹簧调整法—柔性消隙

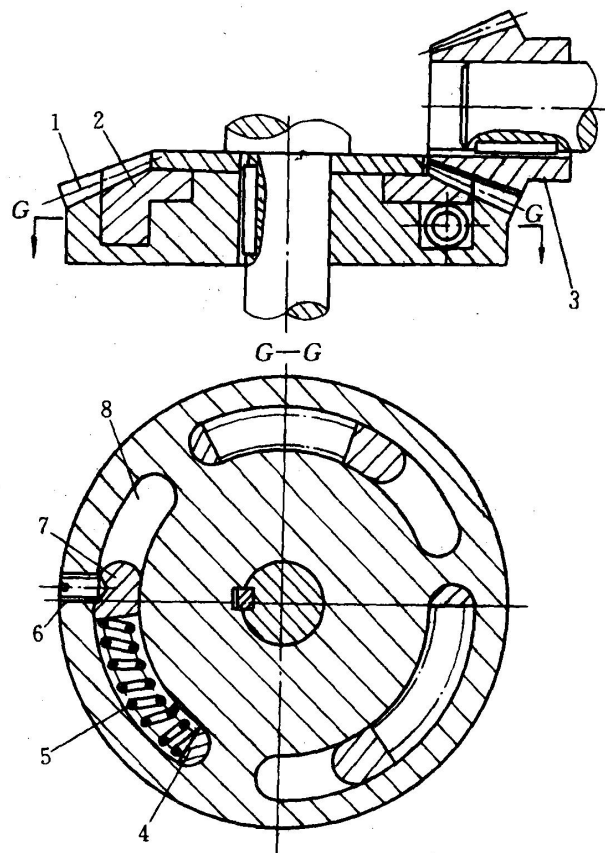


图 2-6 锥齿轮周向弹簧调整

1—大片锥齿轮 2—小片锥齿轮 3—锥齿轮 4—镶块  
5—弹簧 6—止动螺钉 7—凸爪 8—槽

## 齿轮齿条传动机构消隙

### (1) 双齿轮预载装置调整法 —刚性消隙

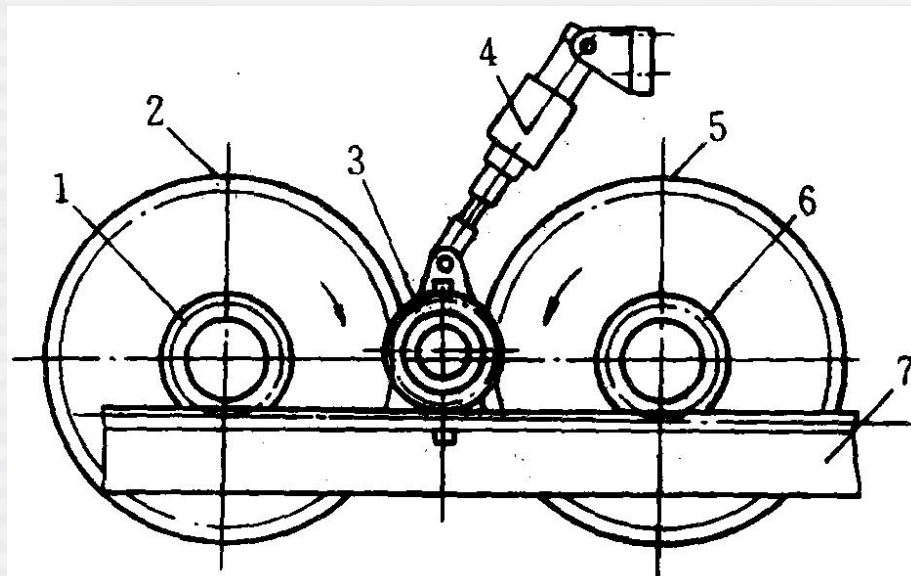


图 2-7 双齿轮调整

1、6—小齿轮 2、5—大齿轮 3—齿轮  
4—预载装置 7—齿条

# 齿轮传动机构

## 齿轮齿条传动机构消隙

### (2) 双斜齿轮柔性消隙

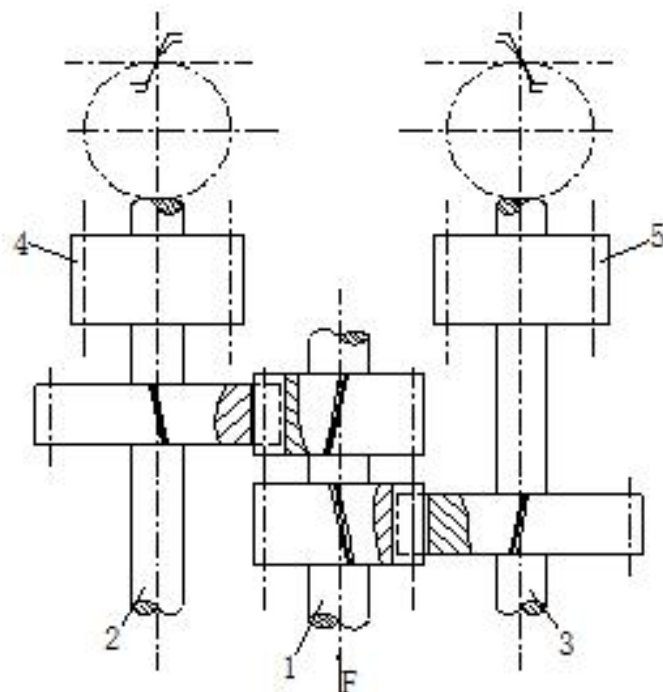
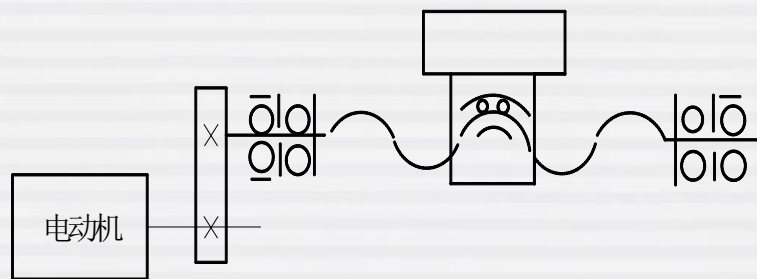


图 2.2.19 双斜齿轮消隙机构

1—主动斜齿轮；2、3—被动斜齿轮；4、5—直齿轴

## 2. 齿轮传动机构的设计计算

**设计任务2：**设计某开环控制的数控车床纵向进给传动机构，传动链如图所示。已知工作台质量为80kg，滚动丝杠导程 $p=6\text{mm}$ ，直径 $d=32\text{mm}$ ，总长度 $L=1400\text{mm}$ ；步进电机步距角 $\alpha=0.75^\circ$ ，最大静转矩为 $10\text{N}\cdot\text{m}$ ，转子转动惯量 $J_m=1.8\times 10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。要求系统脉冲当量为 $0.01\text{mm}$ 。





# 齿轮传动机构

按照等效转动惯量最小原则设计，设计计算步骤如任务表2.2.2.2所示。

任务表 2.2.2.2 直齿轮传动机构设计

计算项目	设计计算与说明	计算结果
1. 传动比计算	$i = \frac{\omega_p}{360\delta_p} = \frac{0.75 \times 6}{360 \times 0.01} = 1.25$	$i=1.25$
2. 齿轮参数计算	$Z_1=20, Z_2=25$ , 模数 $m=2mm$ , 齿宽 $b=20mm$	$Z_1=20, Z_2=25$
3. 转动惯量计算	<p>齿轮转动惯量</p> $J_{Z1} = \frac{\pi \rho d_1^4 b}{32} = \frac{\pi \times 7.8 \times 10^3 \times (2 \times 20 \times 10^{-3})^4 \times 0.02}{32} = 3.92 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$ $J_{Z2} = \frac{\pi \rho d_2^4 b}{32} = \frac{\pi \times 7.8 \times 10^3 \times (2 \times 25 \times 10^{-3})^4 \times 0.02}{32} = 9.57 \times 10^{-5} kg \cdot m^2$ <p>丝杠转动惯量</p> $J_s = \frac{\pi \rho d^4 l}{32} = \frac{\pi \times 7.8 \times 10^3 \times (32 \times 10^{-3})^4 \times 1.4}{32} = 1.12 \times 10^{-3} kg \cdot m^2$	
2).总当量转动惯量	$J_d = J_{Z1} + \frac{1}{i^2} (J_{Z2} + J_s) + \left(\frac{P}{2\pi i}\right)^2 m$ $= 3.92 \times 10^{-5} + \frac{1}{1.25^2} (9.57 \times 10^{-5} + 1.12 \times 10^{-3}) + \left(\frac{0.006}{2\pi \times 1.25}\right)^2 \times 80$ $= 8.6 \times 10^{-4} kg \cdot m^2$	
3) 惯量匹配验算	$\frac{J_d}{J_m} = \frac{8.6 \times 10^{-4}}{1.8 \times 10^{-3}} = 0.48 \in [0.25, 1]$	惯量匹配符合要求





# 蜗轮蜗杆传动机构

**设计任务3：**设计某行走小车的蜗杆传动。已知蜗杆输入功率  $= 3\text{kW}$ ，转速  $= 960\text{r/min}$ ，传动比  $i = 20$ ，蜗杆减速器的工作情况为单向传动，工作载荷稳定，长期连续运转，试设计此蜗杆减速器。

# 同步带传动

综合了带传动、齿轮传动和链传动特点

## 同步带传动的特点

传动比准确，传动效率高

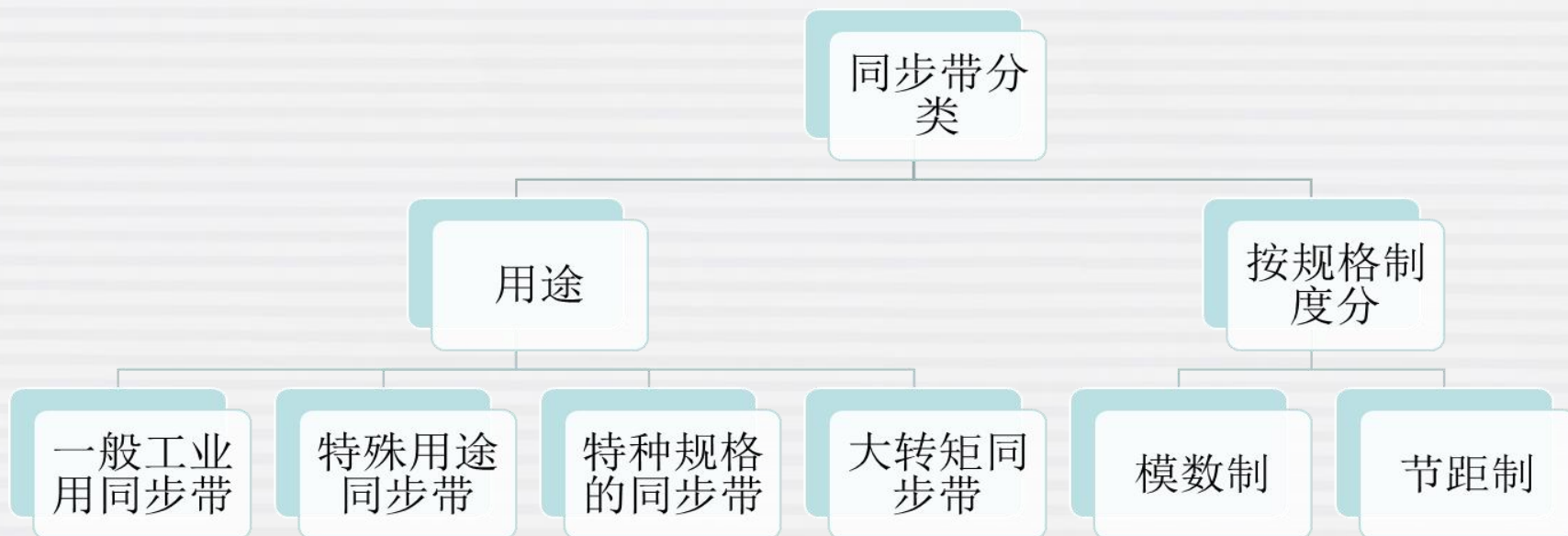
工作平稳，能吸收振动

不需润滑，耐油、水、耐高温，  
耐腐蚀，维护保养方便

中心距要求严格，安装精度  
要求高

制造工艺复杂，成本高

## 1.同步带分类



# 同步带传动

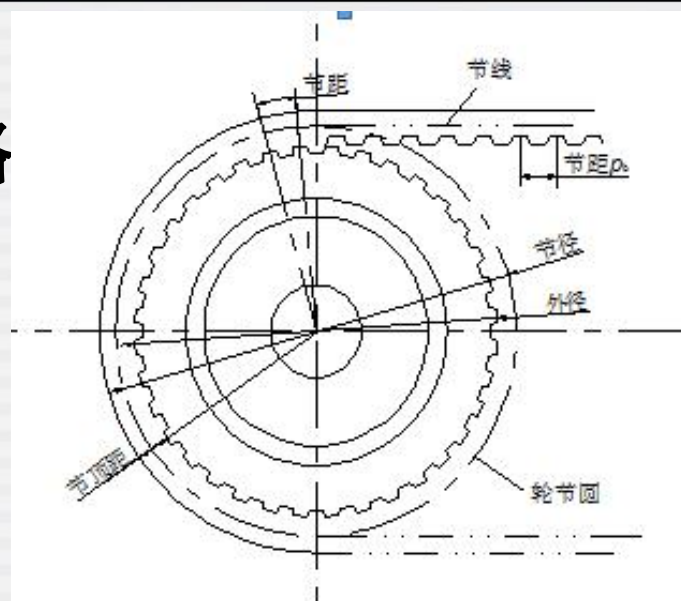
## 2.同步带结构、主要参数和尺寸规格

**组成：**带背、承载绳、带齿；

**承载绳材料有：**钢丝、玻璃纤维、芳纶；

**主要参数：**带齿的节距 $p_b$ ；

**标记：**长度代号、型号、宽度代号。双面齿同步带还应再加上符合 $D_I$ 或 $D_{II}$ 。



# 同步带传动

## 2.同步带结构、主要参数和尺寸规格

型号	MXL	XXL	XL	L	H	XH	XXH
节距 $p_b$ (mm)	2.032	3.175	5.080	9.525	12.700	22.225	31.75

例 1 420 L 050

宽度代号 (带宽 12.7mm)  
型号 (节距 9.525mm)  
长度代号 (节线长度 1066.80mm)

例 2 800 D<sub>1</sub> H 300

宽度代号 (带宽 76.2mm)  
型号 (节距 12.700mm)  
双面齿带型代号 (对称齿形)  
长度代号 (节线长度 2032mm)



# 同步带传动

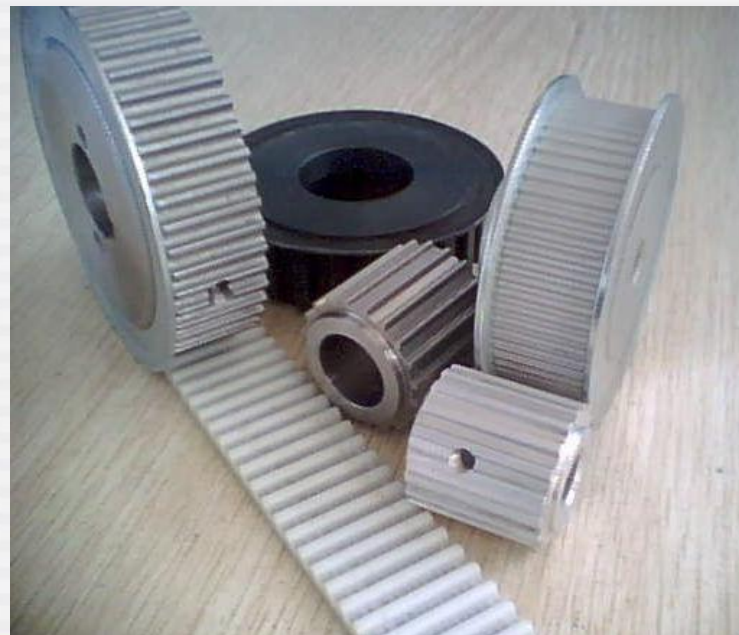
## 3.同步带轮

材料：铸铁或钢。高速、小功率塑料或轻合金。齿形与同步带相对；两侧装有挡圈。

带轮的标记

30 L 075

轮宽 (19.05mm)  
带型号 (节距 9.525mm)  
带轮齿数 30





## 4.同步带传动计算

主要破坏形式有三种：同步带的承载绳疲劳拉断；同步带的打滑和跳齿；同步带齿的磨损。

设计要求：具有较高的抗拉强度；还应对带齿进行耐磨性计算。



## 同步带传动

**设计任务4：**已知额定功率为0.5kW，转速为1500r/min的电动机，驱动某机电设备中转速为500r/min的机械工作。该设备每天8h满载运转，采用同步带传动，两轮中心距要求350mm左右，不使用张紧轮，试设计此设备用同步带传动。

# 同步带传动

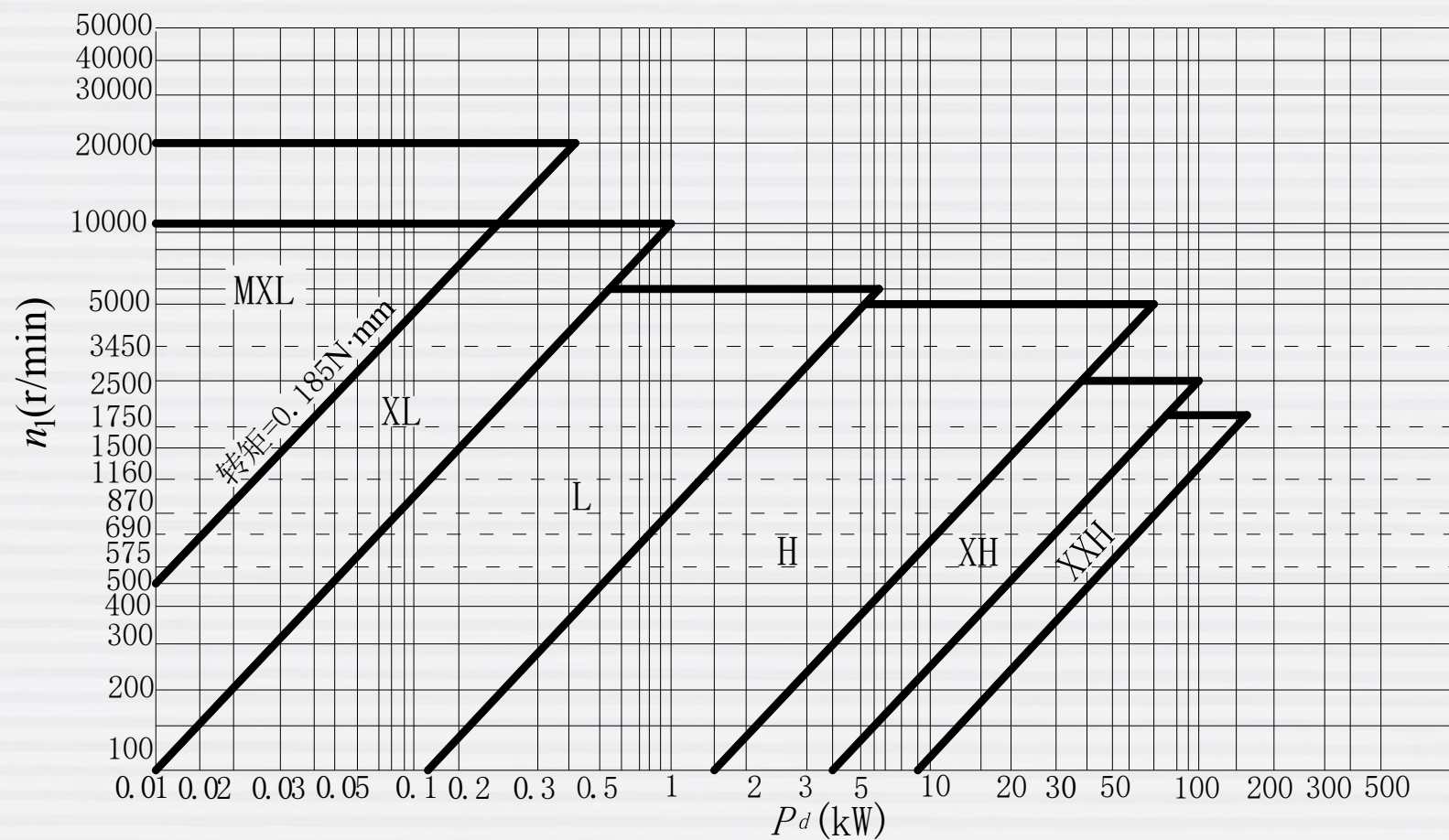


图2.2.24同步带选型图

# 任务2 常用单一传动机构

## 本任务小结

### 内容

1. 滚珠丝杠副
2. 齿轮传动机构
3. 蜗轮蜗杆传动机构
4. 同步齿形带传动机构

### 重点

1. 滚珠丝杠副
2. 齿轮传动机构
3. 同步齿形带传动机构

习题 7、9、14



# 任务3 复合传动机构设计

## 复合传动机构设计

1. 齿轮连杆组合机构

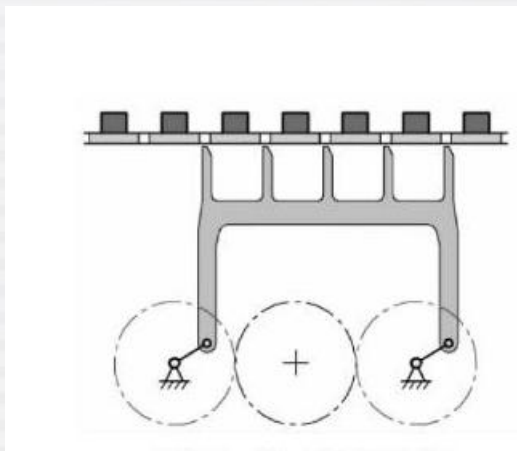
2. 凸轮—连杆机构

3. 齿轮凸轮机构

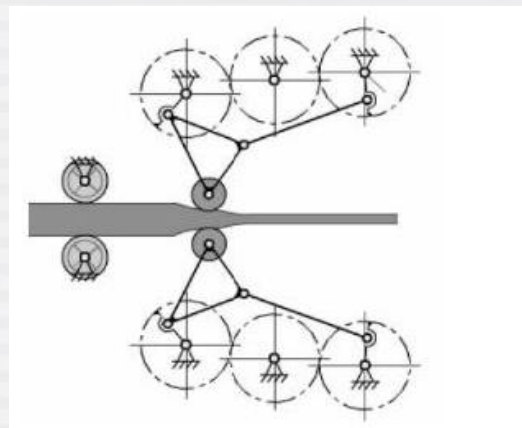
# 任务3 复合传动机构设计

## 复合传动机构：齿轮连杆组合机构

齿轮连杆机构是应用最广泛的一种组合机构，它能实现较复杂的运动规律和轨迹，且制造方便。



齿轮—连杆机构实现间隙传送  
装置振摆式组合机构



钢机轧辊驱动装置中的  
齿轮—连杆组合机构



## 任务3 复合传动机构设计

### 复合传动机构：凸轮—连杆机构

凸轮—连杆机构精确地实现给定的复杂运动规律和轨迹。

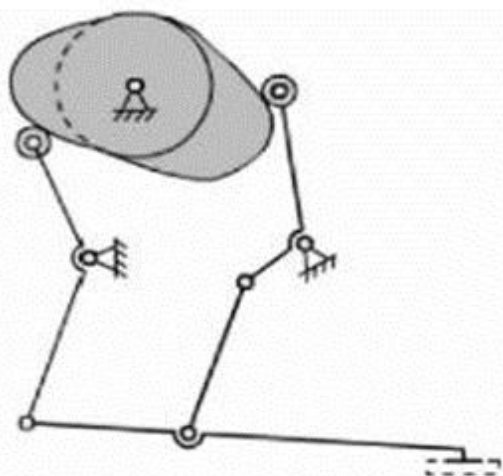


图2.2.28平板印刷机上的吸纸机构

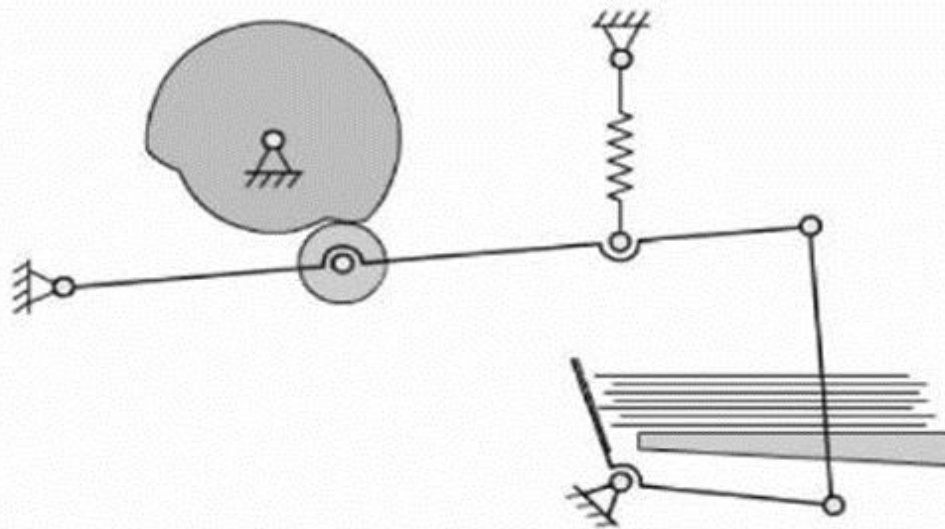


图2.2.29印刷机械中的齐纸机构

## 任务3 复合传动机构设计

### 复合传动机构：齿轮凸轮机构

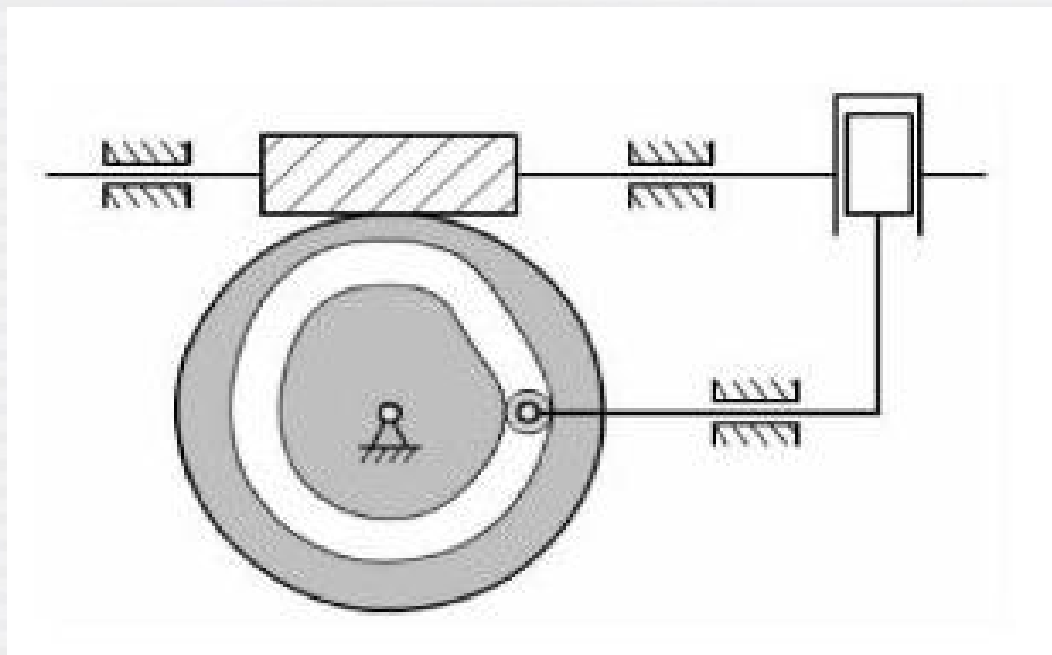


图2.2.30 齿轮加工机床中的误差补偿机构

- 齿轮凸轮机构可实现误差的补偿(闭环系统)。

# 同步训练：数控机床机械传动系统方案选择

在机械传动设计中，主要采取如下措施：

尽量采用低摩擦的传动副

选用最佳传动比

数控机床进给系统设计  
要求

尽量缩短传动链以及用预紧的方法提高传动系统的刚度

尽量消除传动间隙，减少反向行程误差

# 同步训练：数控机床机械传动系统方案选择

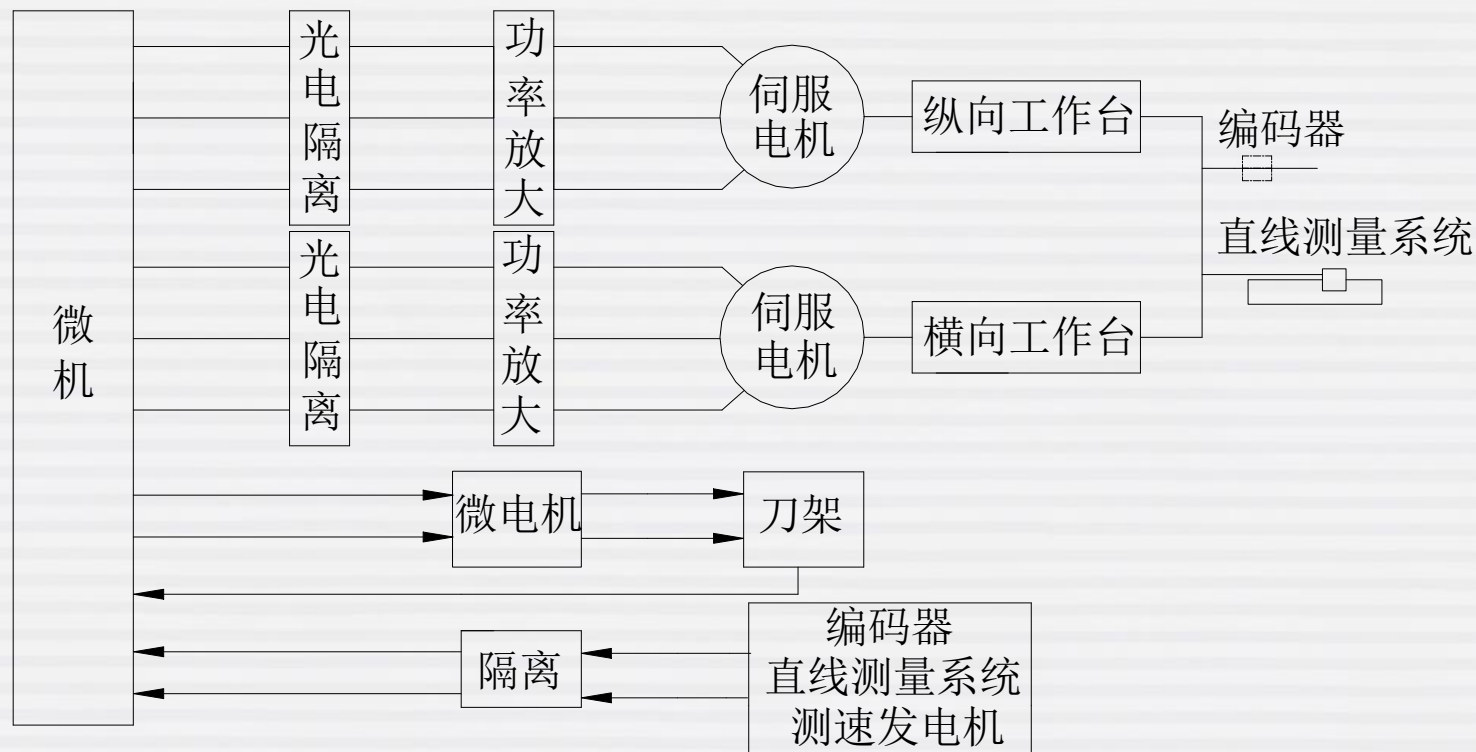


表2.2.24不同传动方案比较：不同的电动机、不同的传动机构、传动比、转矩、转速、能量、加速度、受力

# 同步训练：数控机床机械传动系统方案选择

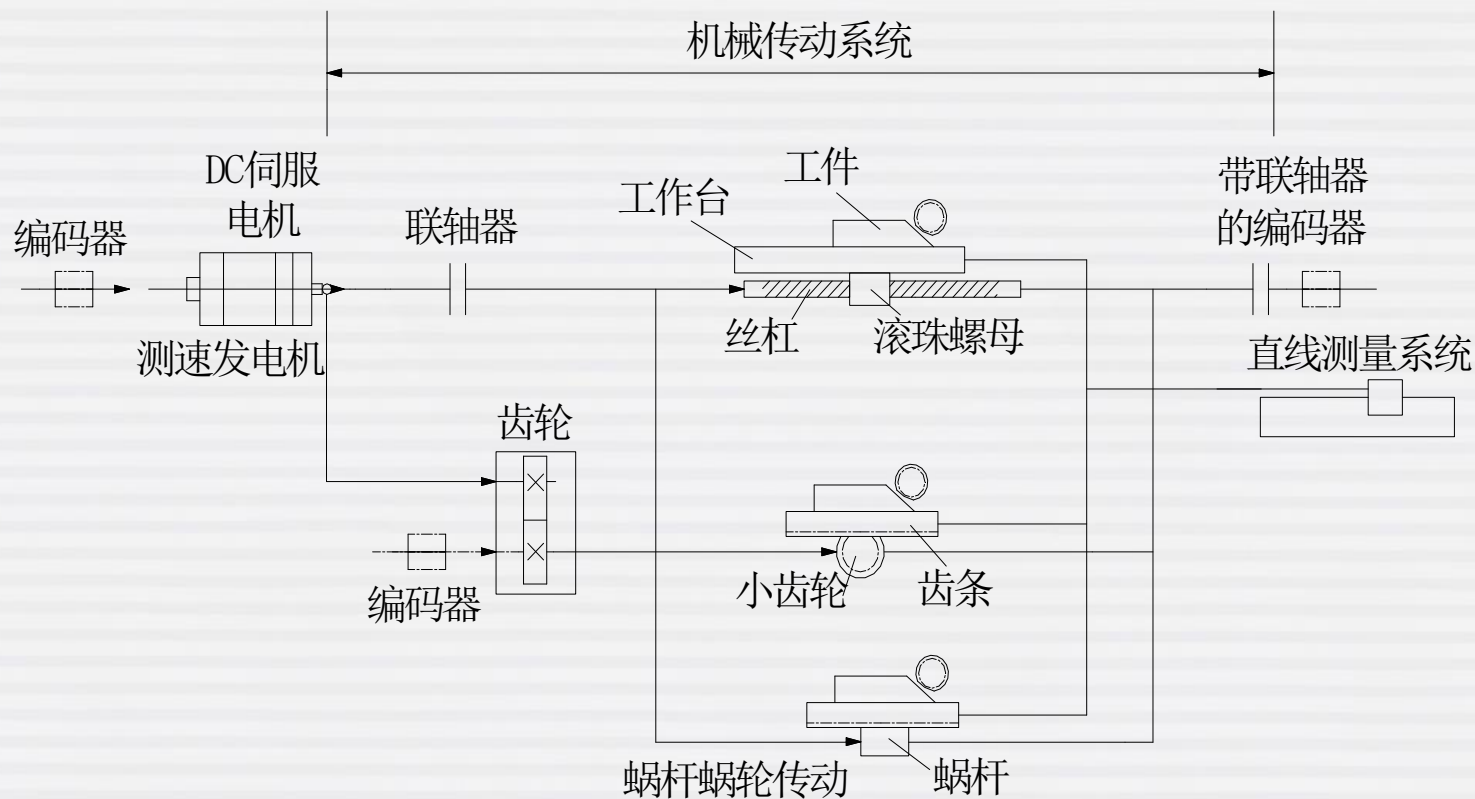


图2.2.32数控车床的总体设计方案示意图

## 子情境3 支承部件

1

认识支承部件

2

导轨

3

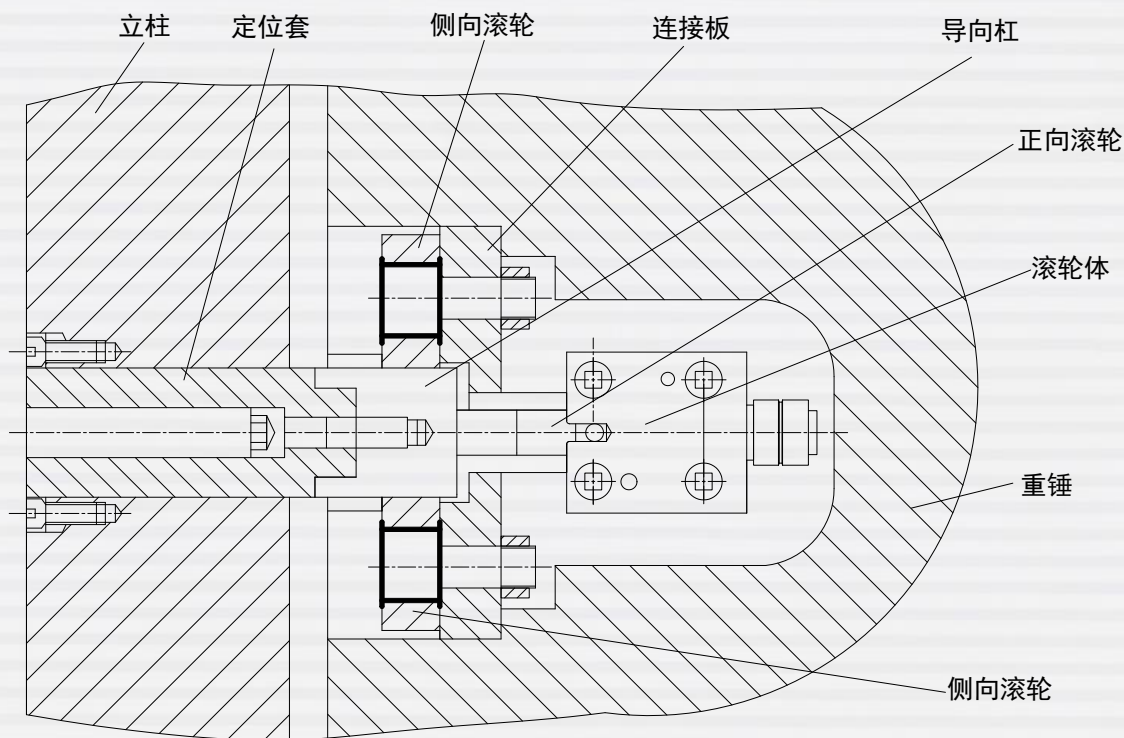
直线滚动导轨副的选型与  
计算

4

同步训练：数控机床导向  
机构设计



## 支承部件：知识资讯



图体例2.3.1线接触式主轴平衡导向机构示意图

数控落地式铣镗床主轴箱平衡系统是通过安装在配重重锤上的滚轮与固定在立柱内腔的导向杠形成的运动副来实现重锤沿导向杠的上下运动。滚轮与导向杠轨道的接触方式有弧线接触和线接触两种

# 子情境3 支承部件

## 支承部件：知识资讯

表体例2.3.1线接触式主轴箱导向机构分析

产品名称	产品属性	产品功能	产品组成(结构)	机械装置运动形式
线接触式主轴箱导向机构	机电一体化产品	定位，导向	立柱、定位套、滚轮、导向杠、滚轮体	滚轮沿导向杠直线运动

## 子情境3 支承部件

### 任务1 认识支承部件

#### 机电一体化系统对支承部件的要求

**支承部件：**支承、固定和联接系统中的其它零部件，保证零部件间的相互位置要求和相对运动的精度要求，是伺服系统的组成部分。

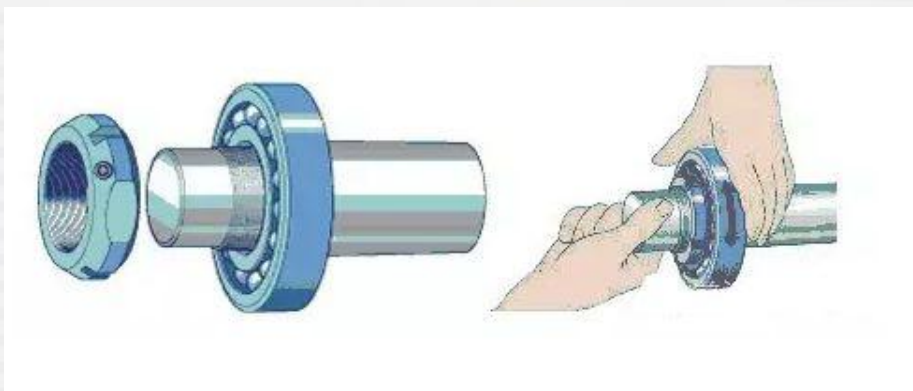
**要求：**精度高、刚度大、热变形小、抗振性好、可靠性高。

**常见零件：**轴承、导轨和机身（或基座）。

## 子情境3 支承部件

### 任务1 认识支承部件

#### 回转运动支承



主要构件

- 滚动轴承、动、静轴承

作用

- 支承回转运动的轴或丝杠

使用要求

- 精度、承载能力、刚度、抗振性、寿命、转速

# 子情境3 支承部件

## 任务1 认识支承部件

### 直线运动支承

主要构件

- 滑动直线导轨、贴塑导轨、滚动直线导轨、液体气体静压导轨

作用

- 支承与导向

使用要求

- 导向精度高、刚度大、耐磨、运动灵活平稳





## 任务2 导轨

### 2.1 导轨的基本要求





## 任务2 导轨

### 2.2 滑动摩擦导轨

**特点：**结构简单、制造容易、接触刚度低。

**常用：**V形导轨、直角形导轨、燕尾导轨、圆柱导轨等。

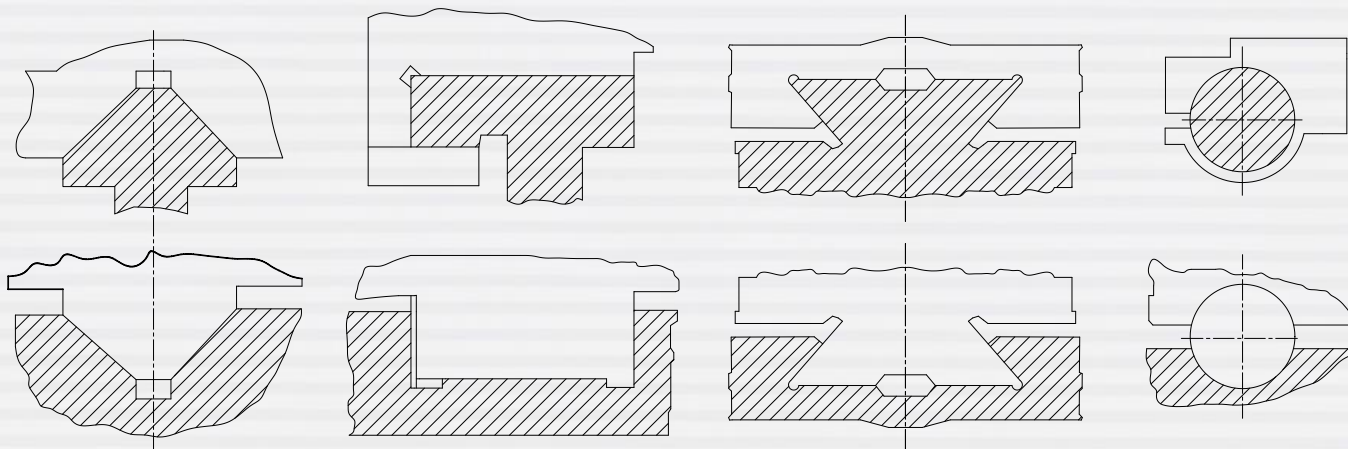


图2.3.3滑动摩擦导轨

a) V形导轨 b) 直角导轨 c) 燕尾导轨 d) 圆柱导轨

### 任务2 导轨

#### 2.3 塑料导轨

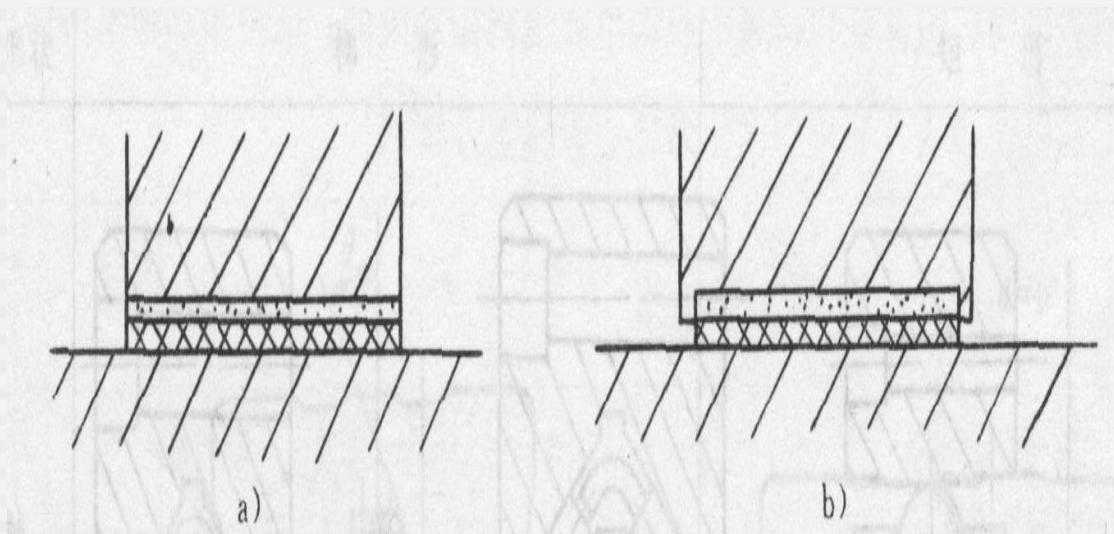
**优点：**化学稳定性、工艺性好、使用维护方便。

**缺点：**耐热性差，且易蠕变。注意散热

**常用材料：**塑料导轨软带、金属塑料复合导轨板、塑料涂层

## 任务2 导轨

### 1. 塑料导轨软带



导轨软带粘接形式  
a)平面式    b)埋头式

# 子情境3 支承部件

## 任务2 导轨

### 2. 金属塑料复合导轨板

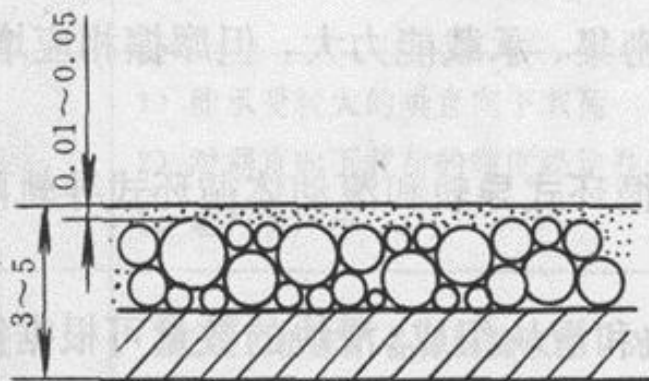


图 2-49 金属塑料复合导轨板

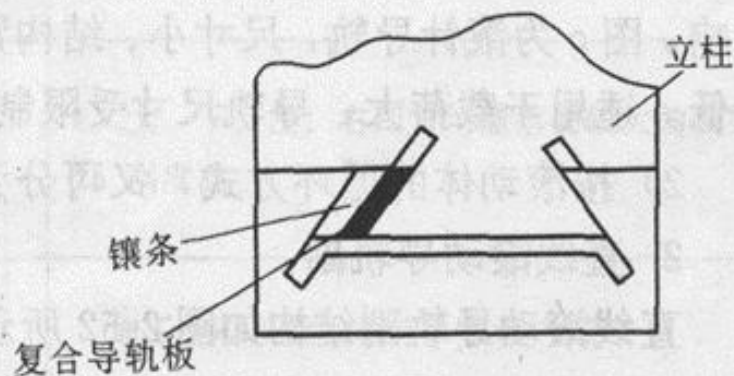


图 2-50 复合导轨板的应用

## 任务2 导轨

### 3. 塑料涂层

导轨副中，若只有一面磨损严重，则可以把磨损部分切除，涂敷配制好的胶状塑料涂层。

**常用材料：**环氧涂料和含氟涂料。

**使用条件：**导轨的维修和设备的改造，也可用于新产品设计

环氧涂料：摩擦系数小且稳定，防爬性能好，有自润滑作用，但不宜存放，且粘度逐渐变大  
含氟涂料则克服上述缺点

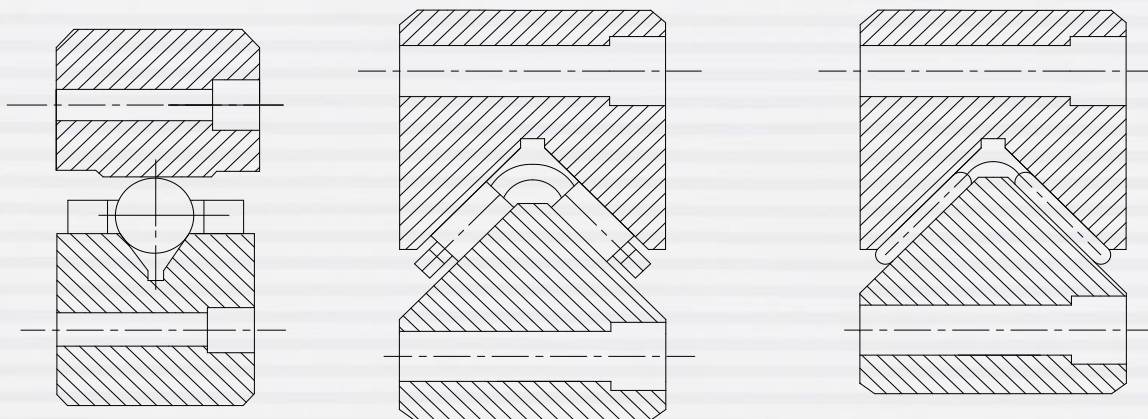


## 任务2 导轨

### 2.4 滚动摩擦导轨

#### 1. 分类

按照滚动体形状分



滚动导轨结构形式

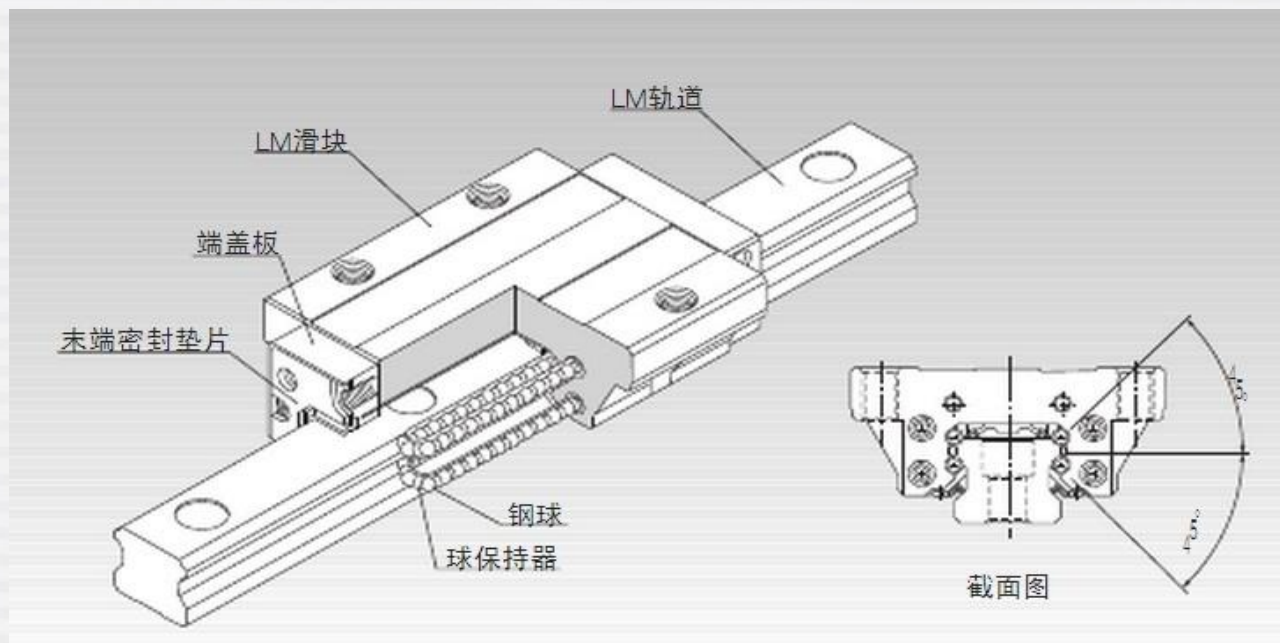
a) 滚珠导轨   b) 滚柱导轨   c) 滚针导轨



# 子情境3 支承部件

## 任务2 导轨

### 2. 滚动直线导轨



滚珠导轨机构图

## 任务2 导轨

### 2. 滚动直线导轨

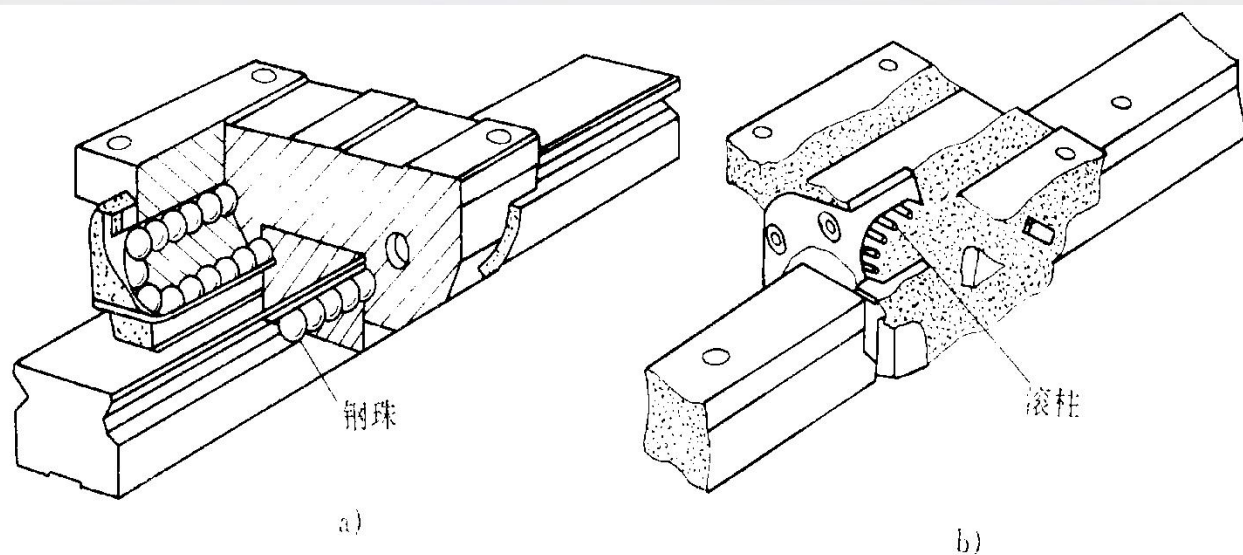


图 2-28 滚动直线导轨的滚动体形式

# 子情境3 支承部件

## 任务2 导轨

### 2. 滚动直线导轨

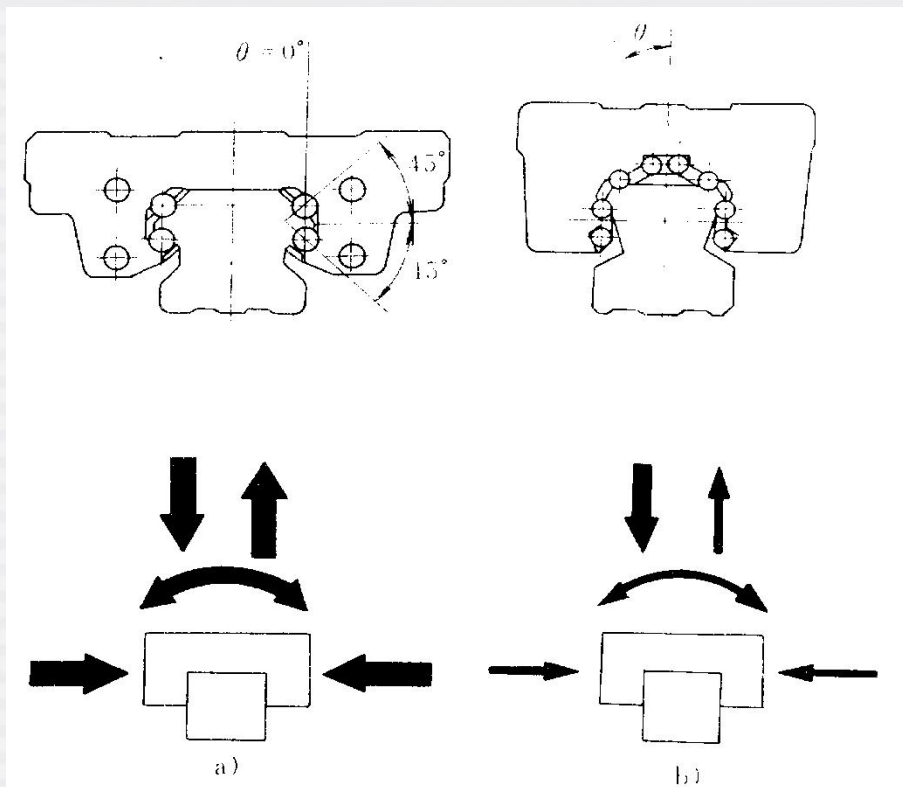


图 2-29 滚动直线导轨的截面形式

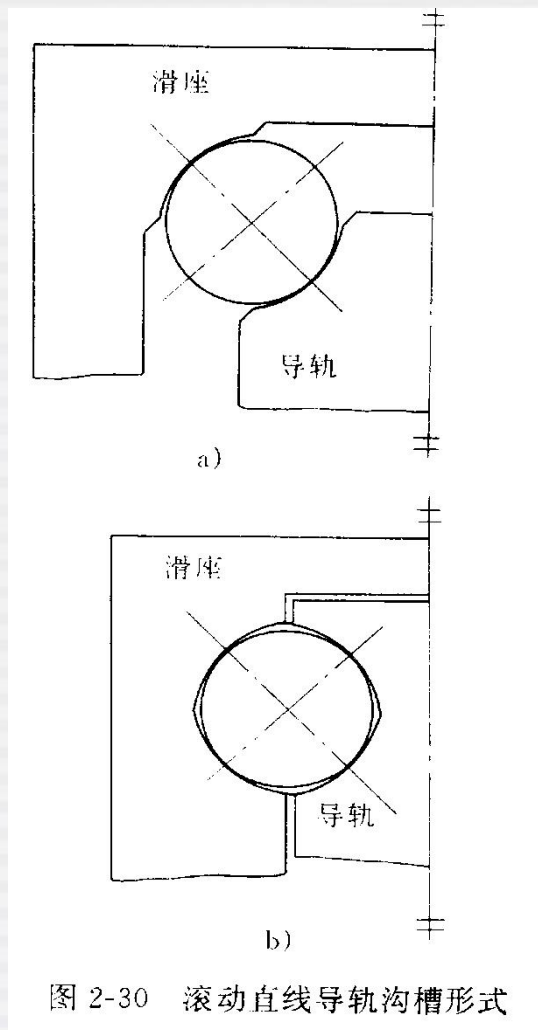
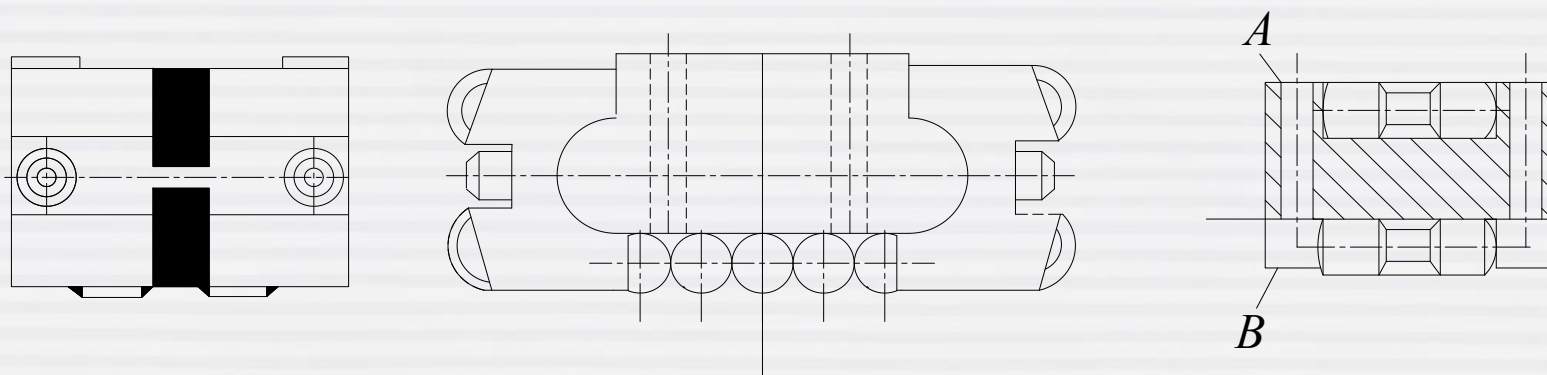


图 2-30 滚动直线导轨沟槽形式

## 任务2 导轨

### 3. 滚动导轨块



这种结构的导轨块承载能力大，刚度高，行程不受限制，但滚子容易侧向偏移，装配比较困难。

## 任务2 导轨

### 4. 直线运动球轴承及其导轨副

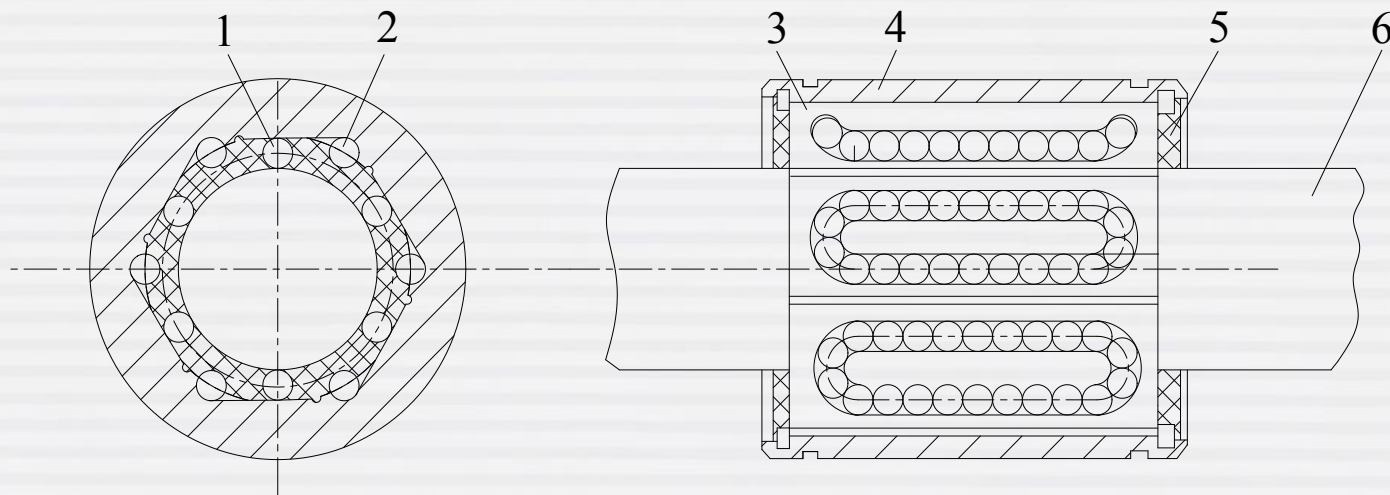


图2.3.11直线运动球轴承结构

1—负载滚珠；2—回珠；3—保持架；4—外套筒；  
5—挡圈和橡胶密封垫；6—导轨轴

## 子情境3 支承部件

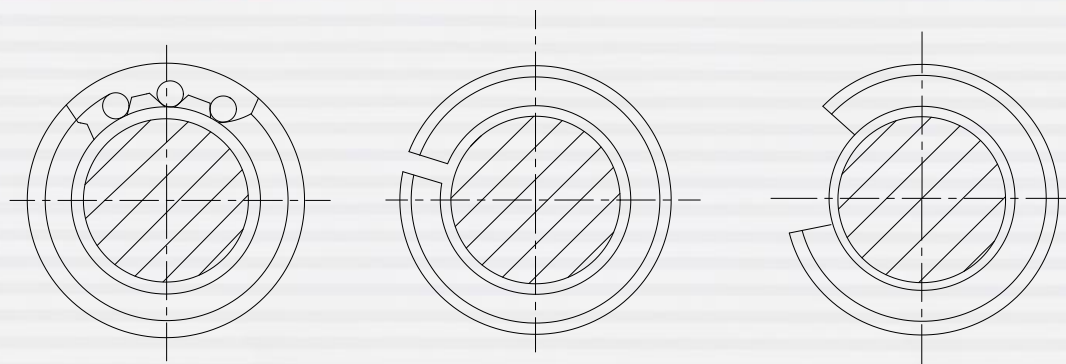


图2.3.12直线运动球轴承结构形式

a) ZX型 b) ZX-T型 c) ZX-K型

**标准型(ZX):** 是常用型，轴承与导轨轴间的间隙不可调。

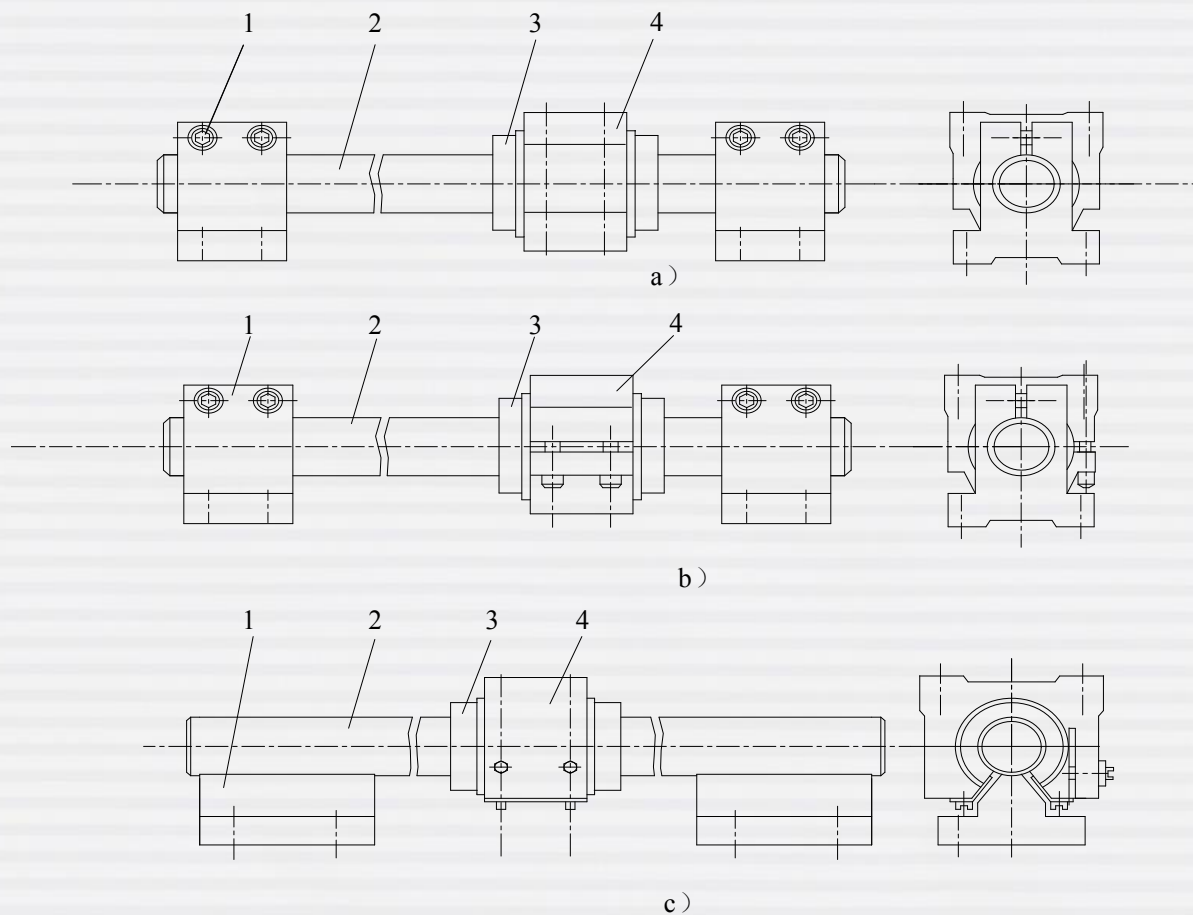
**调整型(ZX-t):** 在轴承外套筒和挡圈上开有轴向切口，能任意调整它与导轨轴之间的间隙；

**开放型(ZX-K):** 在轴承外套筒和挡圈上开有轴向扇形切口，轴承与导轨的间隙可调。



# 子情境3 支承部件

## 直线运动球轴承的安装方式



# 任务2 导轨

## 本任务小结

### 内容

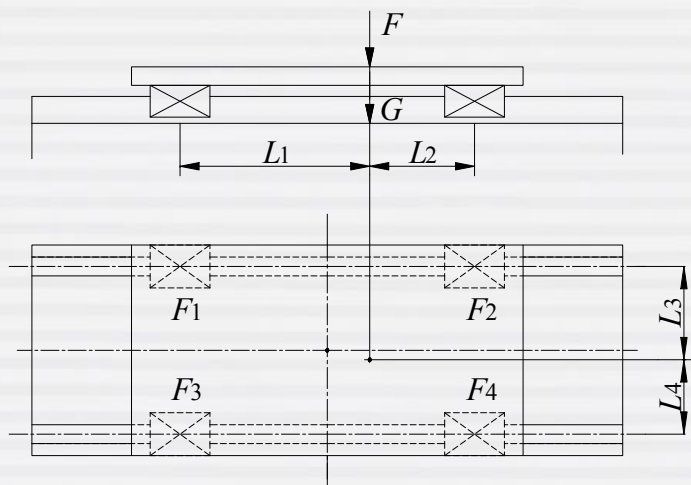
1. 导轨的基本要求
2. 滑动摩擦导轨
3. 塑料导轨
4. 滚动摩擦导轨

### 重点

1. 导轨的基本要求
2. 塑料导轨
3. 滚动摩擦导轨

## 任务3 直线滚动导轨副的选型与计算

### 1. 工作载荷的计算



$$F_1 = \frac{F + G}{4} - \frac{F}{4} \times \left( \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} + \frac{L_3 - L_4}{L_3 + L_4} \right)$$

$$F_2 = \frac{F + G}{4} + \frac{F}{4} \times \left( \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} - \frac{L_3 - L_4}{L_3 + L_4} \right)$$

$$F_3 = \frac{F + G}{4} - \frac{F}{4} \times \left( \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} - \frac{L_3 - L_4}{L_3 + L_4} \right)$$

$$F_4 = \frac{F + G}{4} + \frac{F}{4} \times \left( \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} + \frac{L_3 - L_4}{L_3 + L_4} \right)$$

### 任务3 直线滚动导轨副的选型与计算

#### 2. 额定距离寿命的计算

滚动体为钢球时  $L = T_S = 50 \times \left( \frac{f_H f_T f_C f_R}{f_W} \frac{C_a}{F} \right)^3$

滚动体为滚子时  $L = T_S = 100 \times \left( \frac{f_H f_T f_C f_R}{f_W} \frac{C_a}{F} \right)^{\frac{10}{3}}$

#### 3. 额定时间寿命的计算

$$T_h = \frac{T_S \times 10^3}{2nS \times 60}$$

### 任务3 直线滚动导轨副的选型与计算

#### 4. 产品选型

根据导轨副的使用要求，计算出额定动载荷，选定合适的导轨副型号。常见球导轨的期望距离寿命为50km，滚子导轨为100km。

当滚动导轨的工作速度较低、静载荷较大时，选型时还应考虑相应的额定静载荷 $C_{0a}$ 不小于工作静载荷的两倍。

### 同步训练：数控机床导向机构设计

**设计任务：**设作用在滑座上的总载荷=18000N，滑座数 $M=4$ ，单向行程长度 $l_s=0.8\text{m}$ ，每分钟往返次数为3，工作温度不超过 $120^{\circ}\text{C}$ ，工作速度为 $40\text{m/min}$ ，工作时间要求10000h以上，滚道表面硬度为60HRC。请根据以上条件，选择HJG-D系列滚动直线导轨。



## 子情境3 支承部件

$$\therefore T_h = \frac{T_s \times 10^3}{2Sn}$$

$$T_s = 2T_h \cdot S \cdot n \times 10^{-3} = 2 \times 10000 \times 0.8 \times 3 \times 60 \times 10^{-3} = 2880 \text{ km}$$

$\therefore T \leq 120^\circ\text{C}$   $\therefore$  查表2.3.1—表2.3.5选取  $f_T=0.9$ ,  $f_C=0.81$ ,  $f_w=2$ ,  $f_H=1.0$ ,  $f_R=1.0$

$$F = \frac{F_\Sigma}{M} = \frac{18000}{4} = 4500 \text{ N}$$

$$T_s = K \left( \frac{f_H f_T f_C}{f_w} \frac{Ca}{F} \right)^3$$

$$2880 = 50 \times \left( \frac{1.0 \times 0.9 \times 0.81}{2} \times \frac{C_a}{4500} \right)^3$$

$\therefore Ca=47678.5\text{N}$  选HJG-D55 其  $Ca=60700\text{N} > 47678.5\text{N}$ , 可满足要求。



## 子情境4 执行机构

1

微动机构应用

2

末端执行机构应用

3

其他执行机构应用

## 子情境4 执行机构

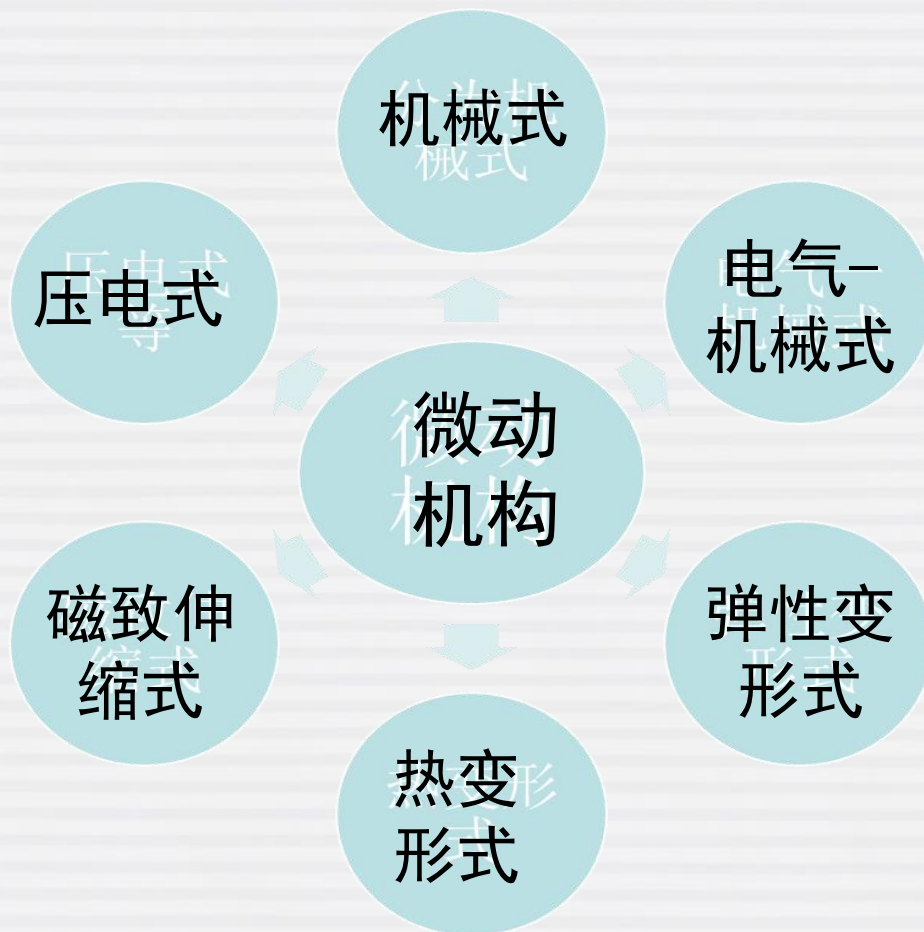
### 任务1 微动机构应用

**定义：**指行程范围为毫米级、位移分辨率及定位精度达纳米级(甚至亚纳米级)的位移机构。微动机构通常由**微位移器**和**精密导轨**两部分组成。

**要求：**灵敏度高，最小移动达到使用要求，传动灵活、平稳，无空程与爬行，制动后能保持稳定的位置；抗干扰能力强，响应快速；结构工艺性良好。

# 子情境4 执行机构

## 微动机构分类



# 子情境4 执行机构

## 微动机构——机械式

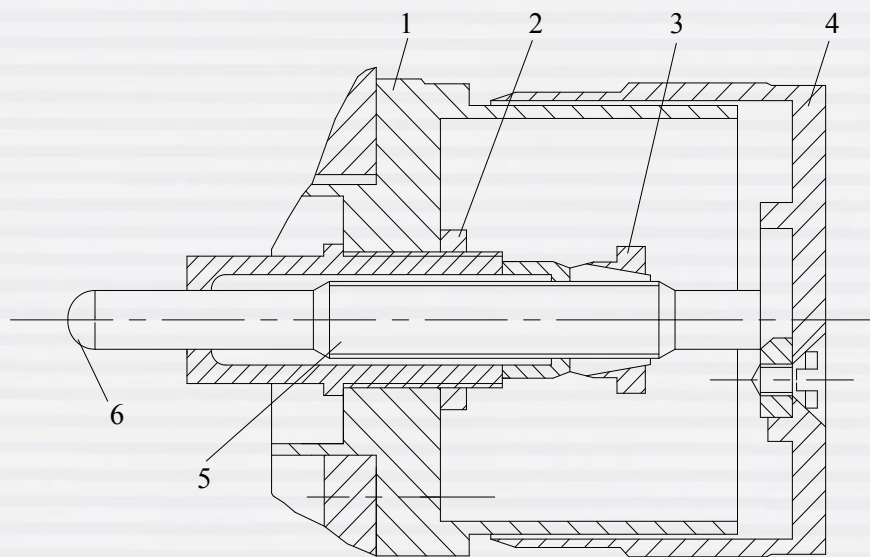


图2.4.1螺旋微动机构

1—测微套；2—紧定螺母；3—调节螺母；  
4—微动手轮；5—螺杆；6—钢珠

螺旋微动机构的最小微动量：

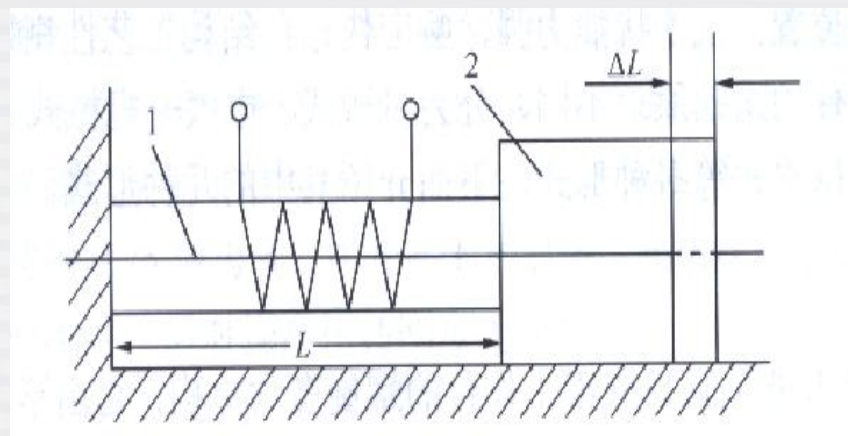
$$S_{\min} = \frac{P\Delta\varphi}{360}$$

$P$ —螺杆的螺距（mm），  
—人手的灵敏度，即人  
手轻微旋转手轮一下，手  
轮的最小转角（°）。

# 子情境4 执行机构

## 微动机构——磁致伸缩式

该类机构利用某些材料在磁场作用下具有改变尺寸的磁致伸缩效应，来实现微量位移。



$$\Delta L = \pm \lambda L$$

$\lambda$ —材料磁致伸缩系数 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

$L$ —被磁化部分长度 ( $\text{m}$ )

最小位移量

$$\Delta L_{\min} > F_0 / K$$

最大位移量

$$\Delta L_{\max} \leq \lambda_s L - F_d / K$$



# 子情境4 执行机构

## 任务2末端执行机构应用

工业机器人的机械部分：**末端执行器（手部）、手腕、手臂和机座**

末端执行器（手部）是机器人直接用于抓取和握紧工件或夹持专用工具的部件。

分为：**夹钳式取料手、吸附式取料手、专用操作器及转换器、仿生多指灵巧手。**

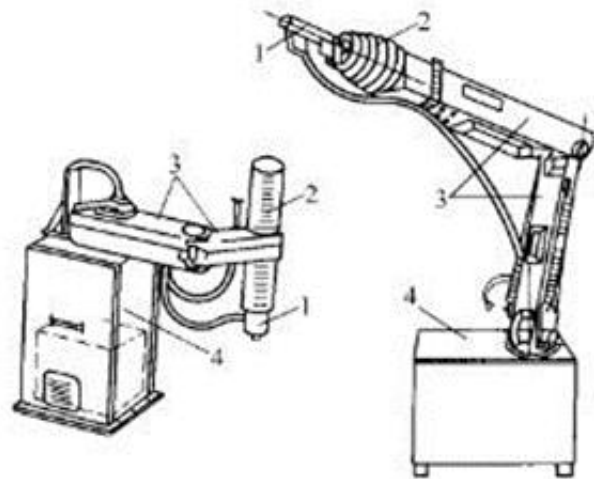


图 7-6 机器人机械结构组成  
1—手部 2—手腕 3—手臂 4—机座

## 子情境4 执行机构

### 2.1 夹钳式取料手

夹钳式取料手由手指（手爪）和驱动装置、传动机构及连接与支承元件组成；通过手指的开、合动作实现对物体的夹持。

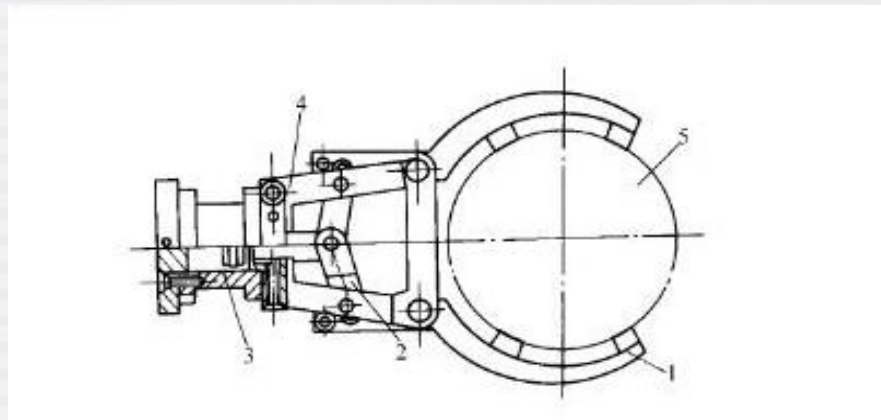
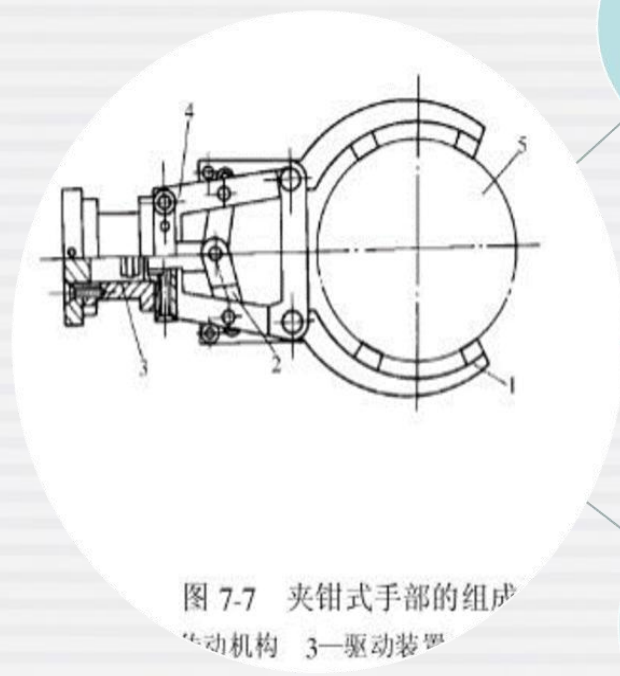


图2.4.4夹钳式手部的组成

1—手部；2—传动机构；3—驱动装置；  
4—支架；5—工件

## 子情境4 执行机构

### 夹钳式取料手



手指

- 指端形状
- 指面形式

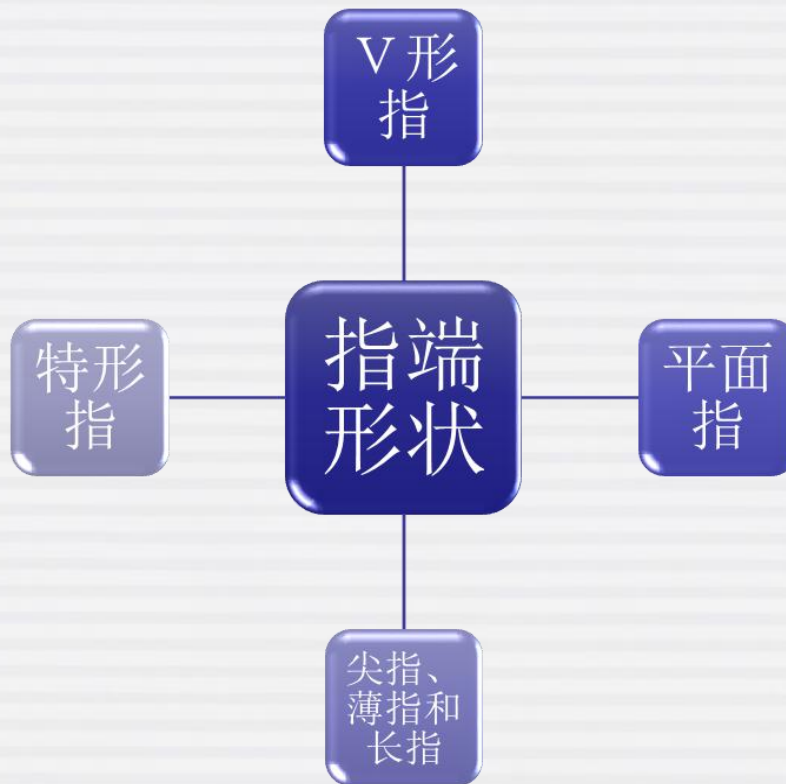
传动装置

驱动装置

- 液压
- 气压
- 电力
- 机械驱动

## 子情境4 执行机构

### 1.手指



### V形指端形状

- 特点：**
- a) 夹紧平稳可靠，夹持误差小；
  - b) 能快速夹持旋转中的圆柱体；
  - c) 有自位能力，与工件接触好，浮动件是机构中的不稳定因素。

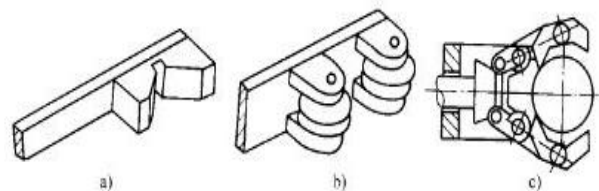


图 7-8 V 形指端形状

a) 固定 V 形 b) 滚柱 V 形 c) 自定位式 V 形

## 指端形状

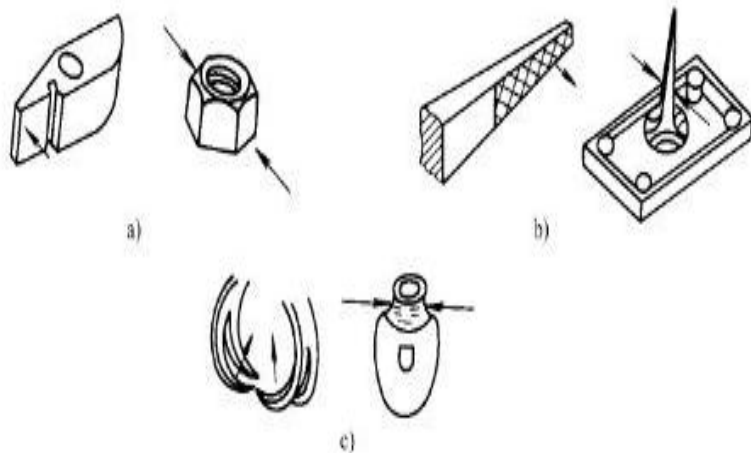


图 7-9 夹钳式手指端

a) 平面指 b) 尖指 c) 特形指

**平面指：**用于夹持方形工件、板形或细小棒料。

**尖指、薄指和长指：**用于夹持小型或柔性工件；

**薄指：**夹持位于狭窄工作场地的细小工件；

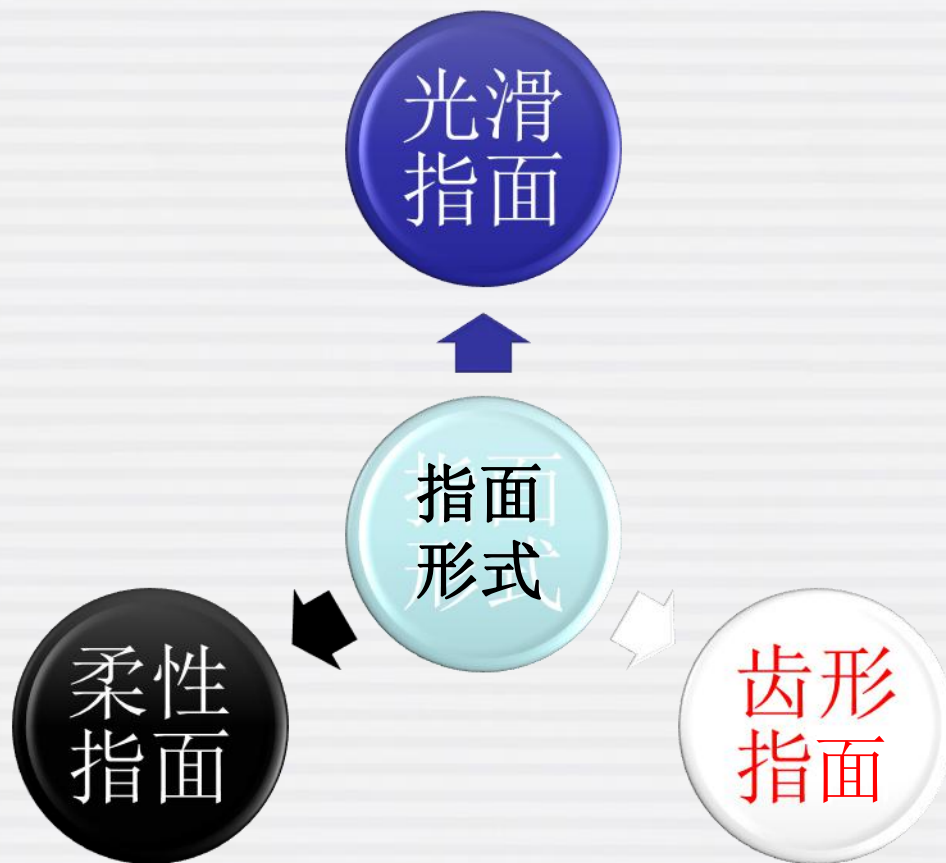
**长指：**夹持炽热的工作，以免热辐射对手部传动机构的影响。

**特形指：**对于形状不规则的工件，必须设计出与工件形状相适应的专用特形手指。



## 子情境4 执行机构

### 夹钳式取料手指指面形式



## 子情境4 执行机构

### 2. 传动机构

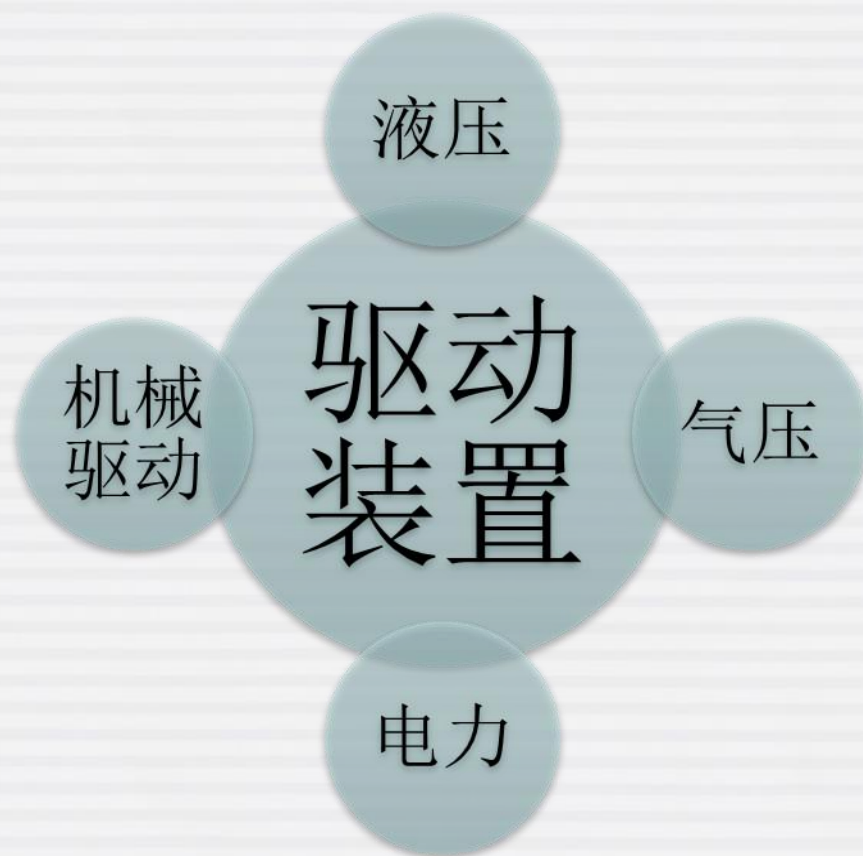
**机械手传动机构：**它是向手指传递运动和动力，以实现夹紧和松开动作的机构。





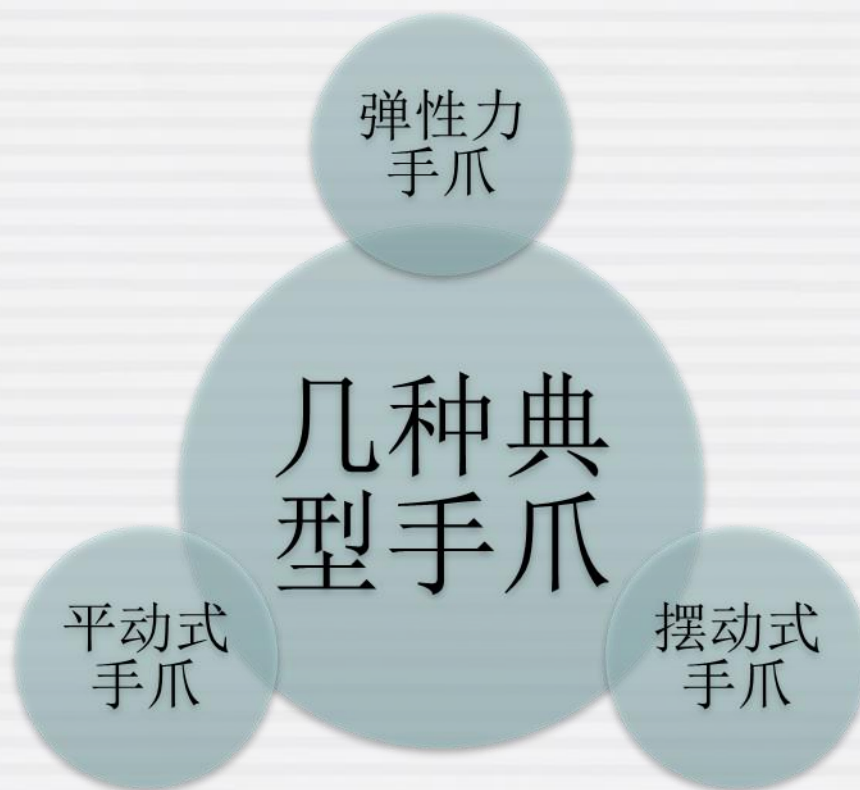
## 子情境4 执行机构

### 3.驱动装置



## 子情境4 执行机构

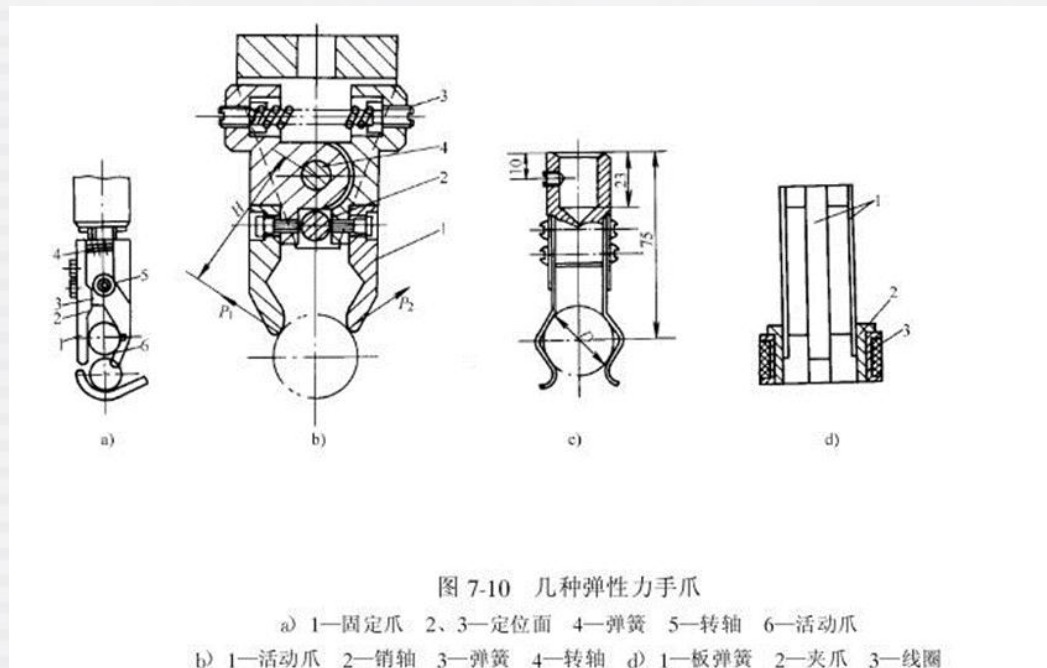
### 2.2 几种典型手爪



# 子情境4 执行机构

## 弹性力手爪

**特点：**夹持物体的抓力是由弹性元件提供的，不需要专门的驱动装置，在抓取物体时需要一定的压入力，卸料时，则需要一定的拉力。



# 子情境4 执行机构

## 摆动式手爪

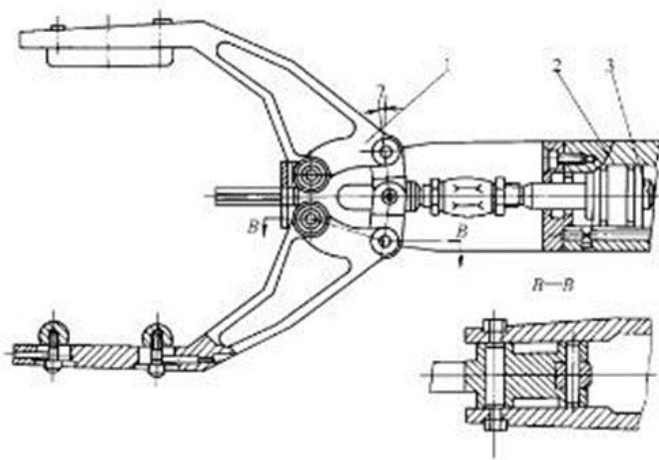
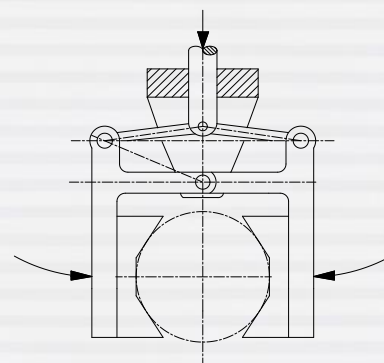
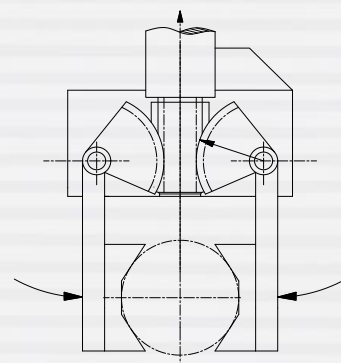


图 7-11 摆动式手爪的结构原理图

1—手爪 2—夹紧液压缸 3—活塞杆



a)



b)

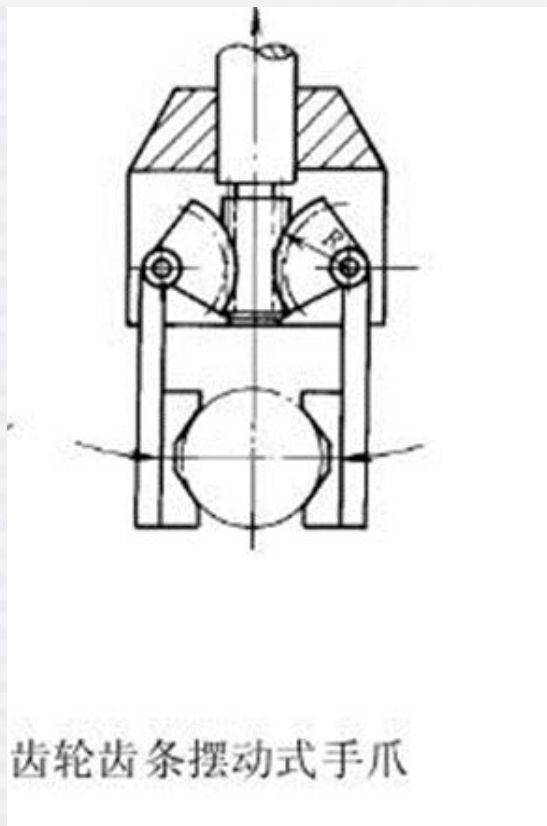
特点：在手爪的开合过程中，手爪的运动状态是绕固定轴摆动的，适用于圆柱体表面的抓取。

a) 是活塞连杆摆动式手爪，活塞杆的移动，通过连杆带动手爪摆动，完成开合动作。



# 子情境4 执行机构

## 摆动式手爪



推拉杆端部的两侧有齿条，与固定在手爪上的扇形齿啮合，齿条的上下移动带动两个手爪绕各自的转轴摆动。

## 子情境4 执行机构

### 3. 平动式手爪

特点是手爪在开合过程中，其爪的运动状态是平动的。可以有圆弧式平动和直线式平动之分。

适用于被夹零件表面是两个平行平面的物体。

采用平行四边形平动机构，使爪在开合过程中保持其方向不变，作平行开合运动，而爪上任一点的运动轨迹为一弧摆动。

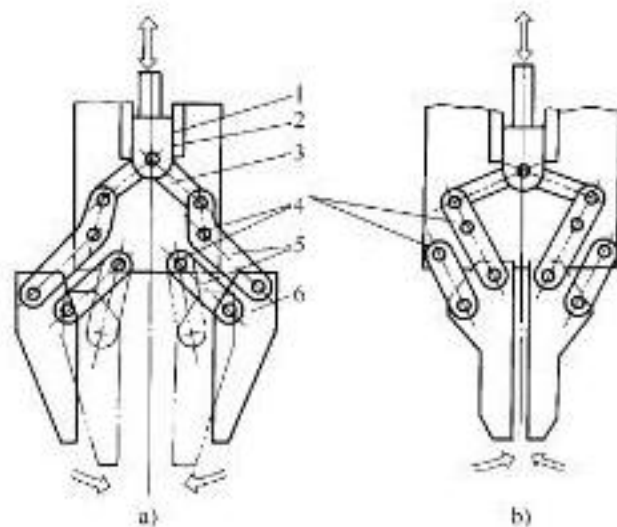


图 7-13 连杆圆弧平动式手爪的结构原理图

1—导向槽 2—滑块 3—推杆

4—固定轴 5—摆动杆 6—手爪

# 子情境4 执行机构

## 平动式手爪

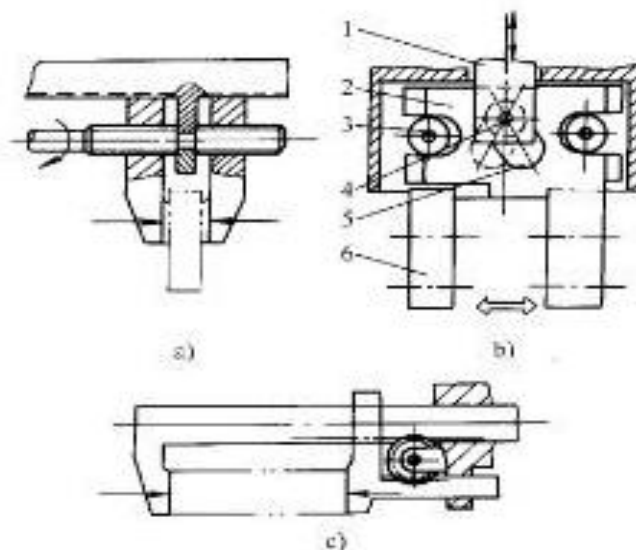


图 7-14 几种直线平动式手爪

- a) 螺杆副直线平动式手爪    b) 凸轮副直线平动式手爪  
c) 齿轮齿条直线平动式手爪
- 1—活塞杆    2—指的滑动块    3—导向滚子  
4—滚子    5—凸轮槽    6—指

## 2.2 现代机械系统可靠性设计

1. 加强设计（强度设计），严格加工
2. 缩短传动链，减少元件数
3. 必要时增加设备用元件或系统
4. 简化结构，标准化
5. 增加过载保护装置、自动停机装置
6. 设置监控系统
7. 合理规定维修期

## 总结

### 内容

1. 机电一体化机械系统
2. 传动机构
3. 支承部件
4. 执行机构

### 重点

1. 机电一体化机械系统
2. 传动机构（滚珠丝杠副、齿轮传动机构、同步带）
3. 支承部件（滚动直线导轨设计）





谢谢!