



第4、5讲 机械传动系统设计

主讲教师：张立勋 教授

上节回顾

机电一体化系统设计的工程路线

前期 方案设计

拟定目标及初步技术规范
可行性分析
初步设计
评价、评审

建模（理论分析）
仿真、模拟试验
模块化设计
详细设计（样机设计）

中期 技术设计

后期 生产设计

试制样机
样机试验测试
技术评价、审定
小批量生产
试销
批量生产

学习要点

重点放在怎样为系统选择合理的传动方案和元件的**选择方法**，而不是具体传动元件的结构设计。

1. 了解伺服控制对机械传动系统的要求。
2. 了解系统传动精度的主要影响因素和减小传动误差的主要措施。
3. 了解传动方案的选择原则。
4. **掌握惯量、阻尼、刚度、间隙等参数对机械传动系统特性的影响，以及折算惯量、驱动力等参数的计算方法。**掌握机电一体化系统中，常用传动机构的特点和一般设计方法。

学习要点

重点放在怎样为系统选择合理的传动方案和元件的**选择方法**，而不是具体传动元件的结构设计。

1. 了解伺服控制对机械传动系统的要求。
2. 了解系统传动精度的主要影响因素和减小传动误差的主要措施。
3. 了解传动方案的选择原则。
4. **掌握惯量、阻尼、刚度、间隙等参数对机械传动系统特性的影响，以及折算惯量、驱动力等参数的计算方法。**掌握机电一体化系统中，常用传动机构的特点和一般设计方法。

4.1 机电一体化产品 对机械传动系统的要求

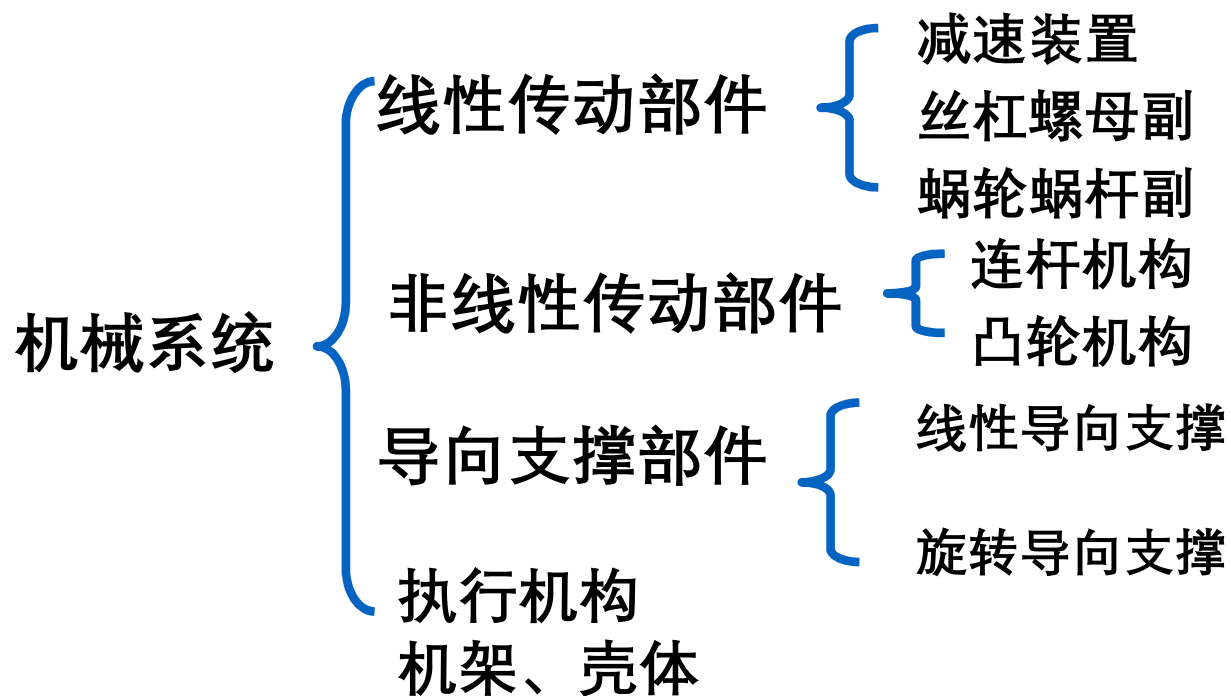
3.1.1 机械系统构成

1984年，美国机械工程师协会（ASME）提出**现代机械系统**的定义：

- ✓ 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)机电部件相互联系的系统。
- ✓ 现代机械是一个机电一体化的机械系统，核心是由计算机控制的，包括机、电、液、光等技术的伺服系统。

4.1.1 机械系统构成

机械系统组成



4.1.1 机械系统构成

(1) 传动机构

不仅仅是转速和转矩的变换器，而是成为伺服系统的一部分。传动精度、小型、轻量、高速、低噪声、高可靠性

(2) 导向支撑机构

作用是支承和导向，为各运动装置完成其特定方向的运动提供保障。

(3) 执行机构

根据操作指令的要求在动力源的带动下，完成预定的操作。

高灵敏度、精度、良好的重复性和可靠性，实现动力、运动功能

(4) 机架和壳体

机构的支撑基础构件，满足支撑强度刚度等负载能力要求；壳体防护要求

4.1.2 对机械传动系统的要求

A1

1、对机械传动系统的要求

➤机械传动的主要功能

传递力（转矩）和运动（速度、位移）。其传动类型、传动方式、传动刚性及传动可靠性都会影响伺服系统的伺服特性。

➤主要的机械传动方式

螺旋传动、齿轮传动、同步带、高速带传动以及各种非线性传动方式。

➤传动性能要求

定位精度、响应速度、稳定性、可靠性

➤传动机构的设计要求

在满足传动功率（力、速度）的前提下，尽量保证：

小间隙、低摩擦、低惯量、高刚度、高谐振频率、适当的阻尼比

4.1.2 对机械传动系统的要求

传动机构的发展趋势：

随着机电一体化技术的发展，要求传动机构不断适应新的技术要求。

(1) 精密化

根据机电一体化产品性能的不断需要，提出适当的精密度要求。

(2) 高速化

产品工作效率的提高，提出了对机械传动的运动速度要求。

(3) 模块化、小型化、轻量化

高度集成的模块化设计，提高了传动精度、减小产品的体积和重量，提高了产品开发的工作效率。

4.1.2 对机械传动系统的要求

2、伺服系统的设计要求

功率、精度、响应速度、稳定性、可靠性

控制性能对伺服机械传动系统的设计任务和要求

(1) 传动精度

制造误差、装配误差、传动间隙和弹性变形

(2) 响应速度（加速度）

减小摩擦力矩、减小折算到电动机的负载和转动惯量，提高传动效率

(3) 稳定性

提高传动系统的固有频率，提高系统阻尼

4.1.2 对机械传动系统的要求

3、机械传动系统的设计任务（步骤）

- 估算载荷（力、速度、功率）
- 选择总传动比、选择伺服电机
- 选择传动机构形式
- 确定传动级数、分配各级传动比
- 配置传动链、估算传动链精度
- 传动机构结构设计
- 计算传动装置的刚度和结构固有频率
- 做必要的工艺分析和经济分析

4.2 机械传动特性对机电系统性能的影响

- 伺服特性对机械传动装置的要求：
 - ✓ 良好的加速性--小的折算惯量、低摩擦、高传动刚度
 - ✓ 良好的稳定性--合理阻尼、高的固有频率、低回程误差
 - ✓ 高的控制精度--传动间隙小，传动链的变形小、低的摩擦力（静）
 - ✓ 机械部分的动态特性与伺服电机的动态特性相匹配性
- 影响伺服性能的主要机械参数：
 - 折算惯量，传动刚度、支撑刚度，阻尼特性，摩擦特性，谐振频率，传动误差（回程误差）
 - 惯量、阻尼、刚度是机械系统的3个系统参数（体现在控制模型上）

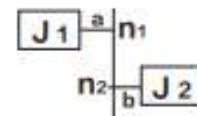
4.2 机械参数对系统性能的影响

4.2.1. 惯量

一般负载的惯量及其计算方法

形 状	J 的 计 算 公 式	形 状	J 的 计 算 公 式
圆 盘 	$J = \frac{1}{8} W D^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$ <p>W: 重量[kg] D: 外径[m]</p>	空心圆柱 	$J = \frac{1}{8} W (D^2 + d^2) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$ <p>W: 重量[kg] D: 外径[m] d: 内径[m]</p>
棱 柱 	$J = \frac{1}{12} W (a^2 + b^2) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$ <p>W: 重量[kg] a, b, c: 各边长度[m]</p>	均质圆杆 	$J = \frac{1}{48} W (3D^2 + 4L^2) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$ <p>W: 重量[kg] D: 外径[m] L: 长度[m]</p>
直 杆 	$J = \frac{1}{3} W L^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$ <p>W: 重量[kg] L: 长度[m]</p>	分离杆 	$J = \frac{1}{8} W D^2 + W S^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$ <p>W: 重量[kg] D: 外径[m] S: 距离[m]</p>

减速机



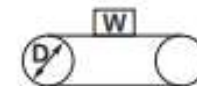
换算至a轴的惯量

$$J = J_1 + \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$$

n₁: a轴转速[r/min]

n₂: b轴转速[r/min]

传送带



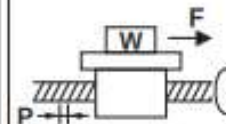
$$J = \frac{1}{4} W D^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$$

W: 传送带上的重量[kg]

D: 传送轮直径[m]

※不含传送轮的J

丝杆



$$J = J_B + \frac{W \cdot P^2}{4\pi^2} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \text{]}$$

W: 重量[kg]

P: 螺距

J_B: 滚珠丝杆的J



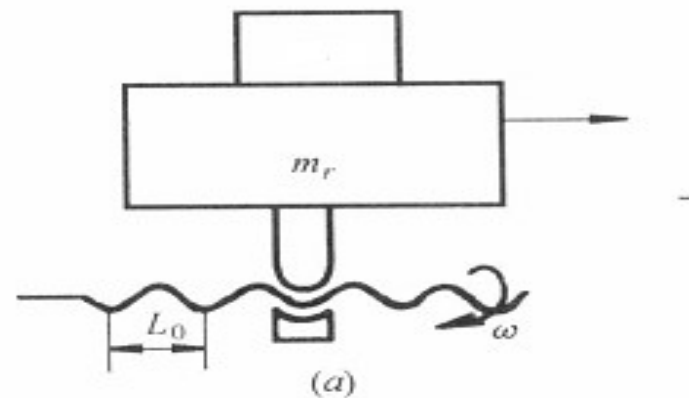
4.2 机械参数对系统性能的影响

4.2.1. 惯量

(1) 折算惯量计算

计算原则：输入侧与输出侧的惯性力相等

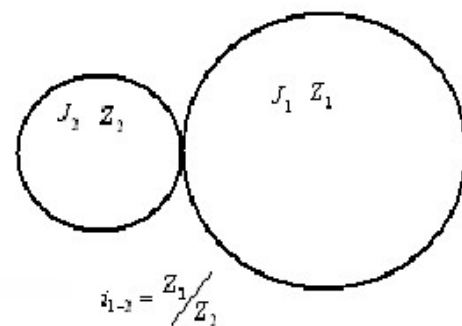
➤ 直线运动（丝杠螺母机构）



$$J_{er} = m_r \left(\frac{L_0}{2\pi} \right)^2$$

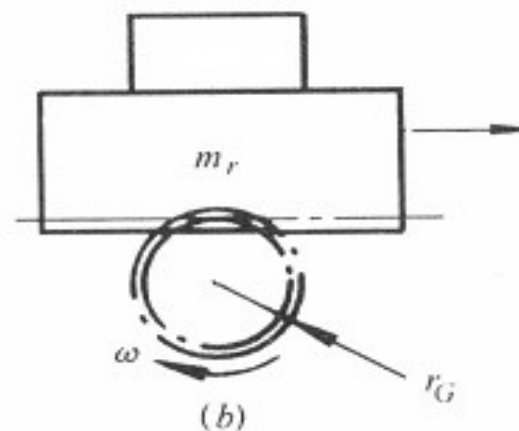
➤ 齿轮传动

$$J_{e2} = J_2 / i_{1-2}^2$$

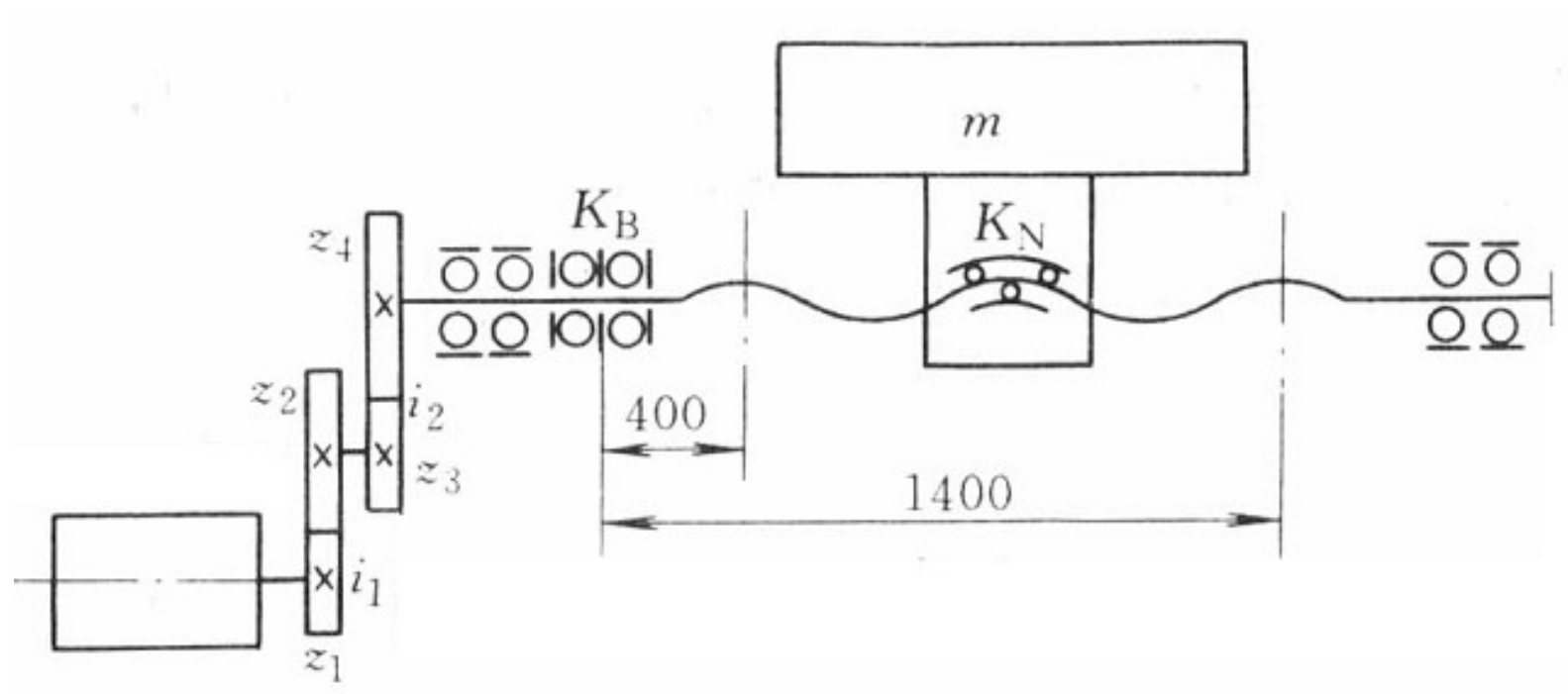


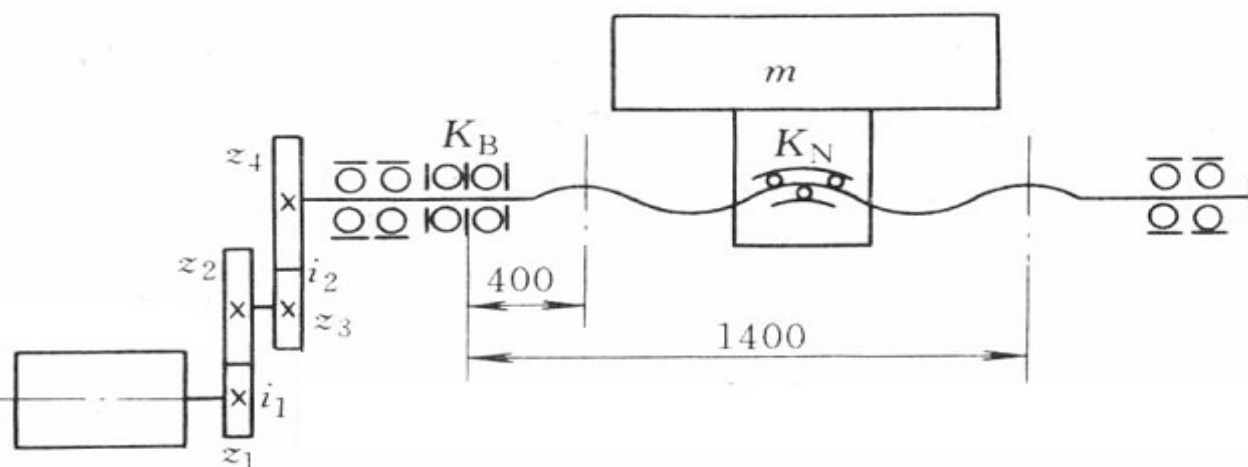
➤ 齿轮尺条（带传动）

$$J_{er} = m_r r_0^2$$



例：计算电机轴折算惯量





解： 传动系统有三根轴，每根轴上的总惯量分别为 $J_1 = J_{z1}$

总的转动惯量

$$J_2 = J_{z2} + J_{z3}$$

$$J_3 = J_{z4} + J_s + J_{em}$$

其中 $J_{z1}, J_{z2}, J_{z3}, J_{z4}$ 分别是四个齿轮的转动惯量，

J_s 是丝杠的转动惯量

J_{em} 是工作台折算到丝杠上的转动惯量

$$J_e = J_1 + \frac{1}{i_1^2} J_2 + \frac{1}{(i_1 i_2)^2} J_3$$

$$= J_{z1} + \frac{1}{i_1^2} (J_{z2} + J_{z3}) + \frac{1}{(i_1 i_2)^2} (J_{z4} + J_s + J_{em})$$

4.2.1. 惯量

(2) 转动惯量对系统性能的影响

惯量取决于质量的大小和质量分布。对系统特性有以下影响：

- 机械负载、功耗
- 启停特性
- 固有频率

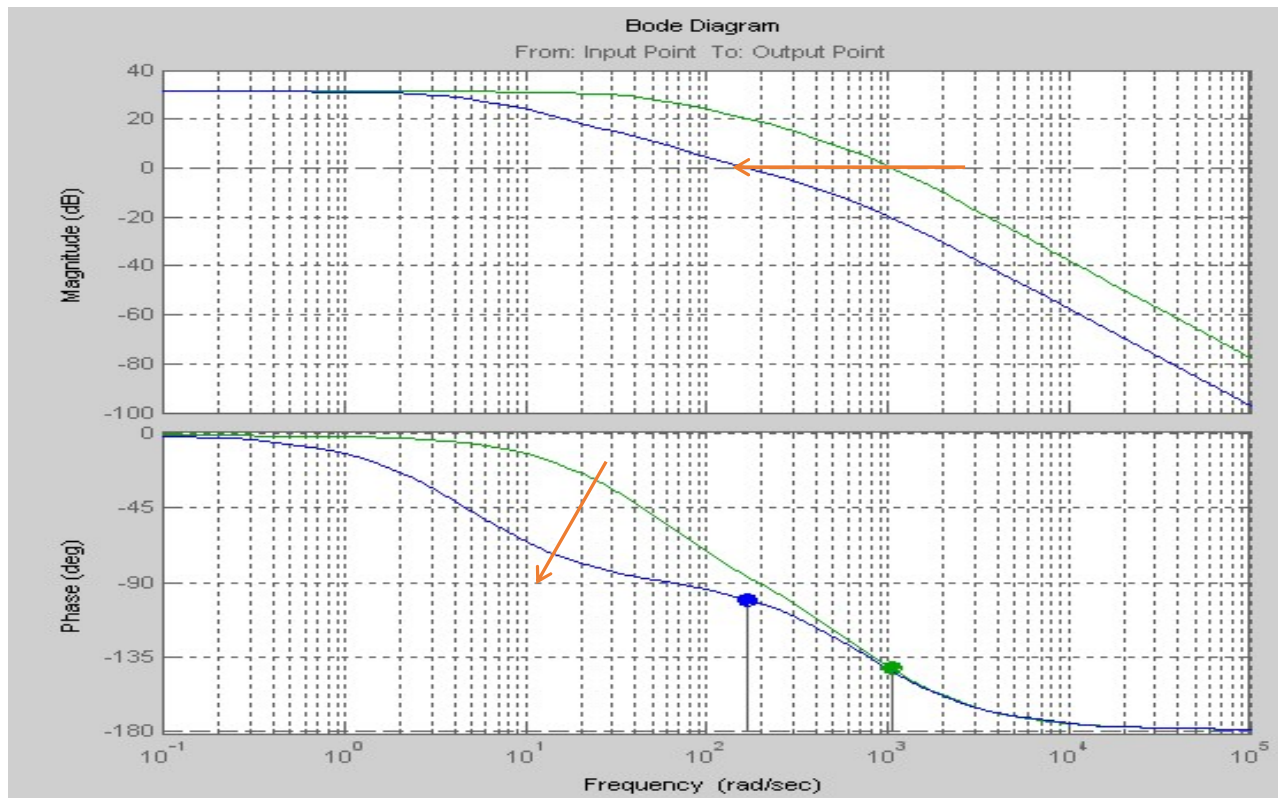
$$\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G}{J}}$$

- 阻尼比

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{f}{2\sqrt{JG}}$$



4.2.1. 惯量

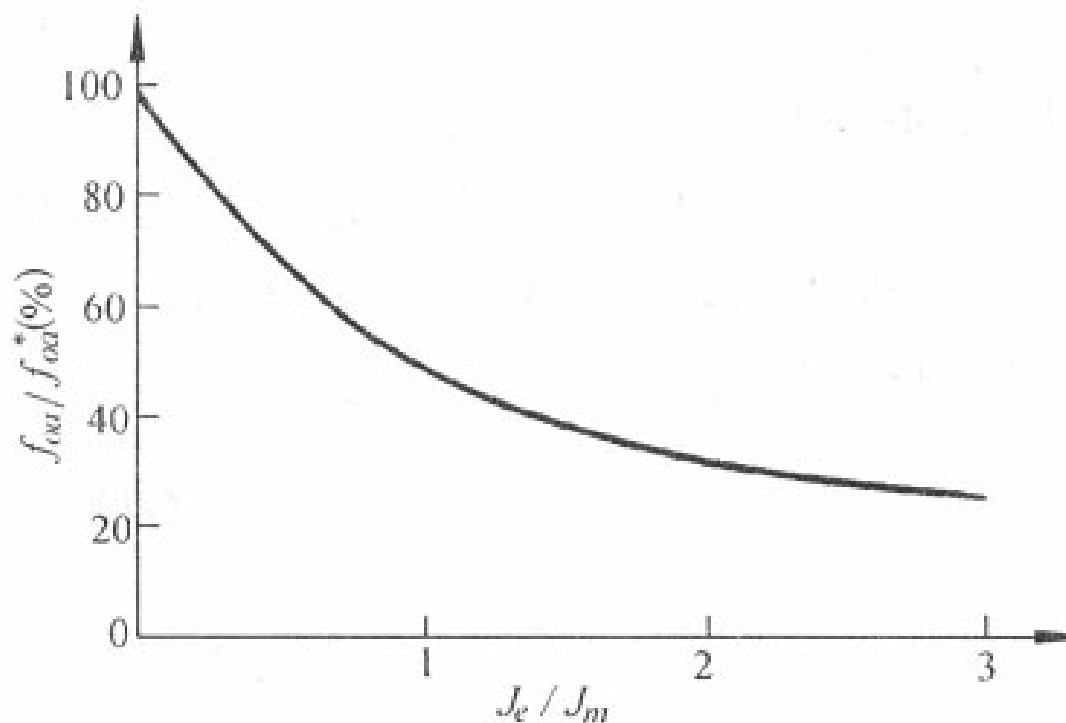


随着惯量的增加：
幅频特性曲线左移，响应速度变慢；

相频特性曲线下移，相位滞后量增大，系统的稳定性变差。

惯量变化10倍时系统频率特性的变化 $J1=10*J2$

惯量分布对快速性的影响



横轴：折算负载转动惯量 J_e 与电机轴自身的转动惯量 J_m 之比

纵轴：系统的谐振频率 f_{oa} 与空载时的谐振频率 f_{oa}^* 之比

4.2.1. 惯量

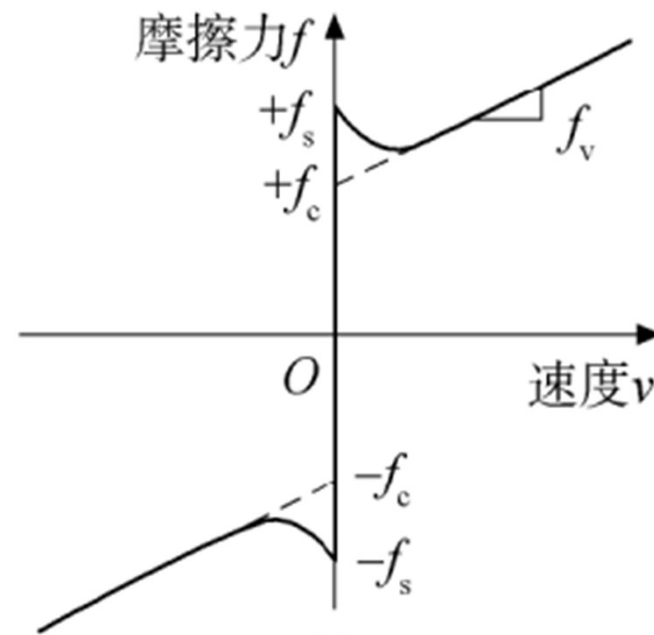
(3) 机械传动系统转动惯量设计原则

在不影响系统刚度的前提下，机械部分的质量和转动惯量要尽量小。

减小折算惯量—减小惯性力—提高加速性
减小惯量—减小运动负载，降低驱动功率；减少材料使用，降低成本；重力负载降低；

4.2.2 阻尼

- 系统的摩擦力可划分为3类：
 - ✓ 静摩擦力
 - ✓ 库仑摩擦力
 - ✓ 粘性摩擦力（粘滞摩擦阻尼）
- 只有 粘性摩擦影响系统的阻尼特性
- 库伦摩擦会使产生系统消耗，可认为是系统的负载力



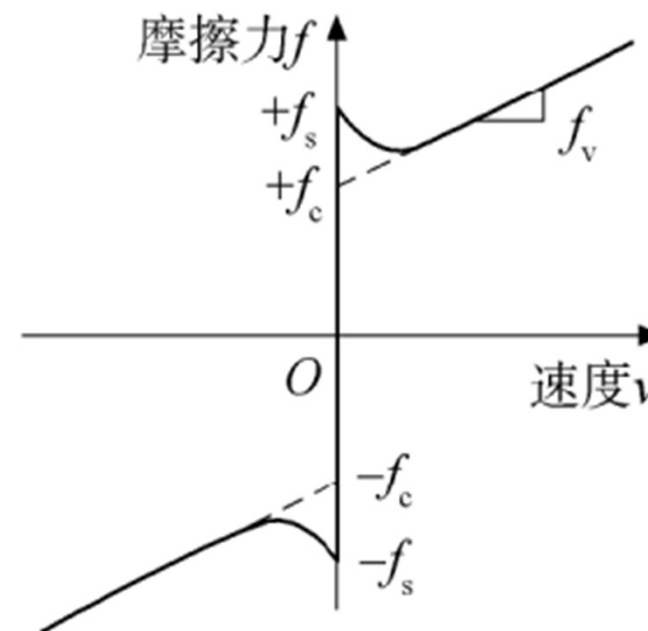
4.2.2 阻尼

(1) 阻尼特性

摩擦特性：静摩擦和库仑摩擦相当于系统负载的一部分，摩擦力的方向与运动趋势相反。

- ✓ 静摩擦阻尼增加，使系统的回程误差增大。
- ✓ 库仑会增加使系统的功耗增大。
- ✓ 动静摩擦系数变化过大还会使系统产生爬行现象。

- 粘性摩擦阻尼与速度成正比，会影响系统的相对阻尼系数的大小，对系统的动态特性和快速响都有影响。
- ✓ 一方面它使系统的功耗增大、磨损增加、使系统的响应速度下降；
- ✓ 另外一方面可以改善系统的响应特性，减小振幅。



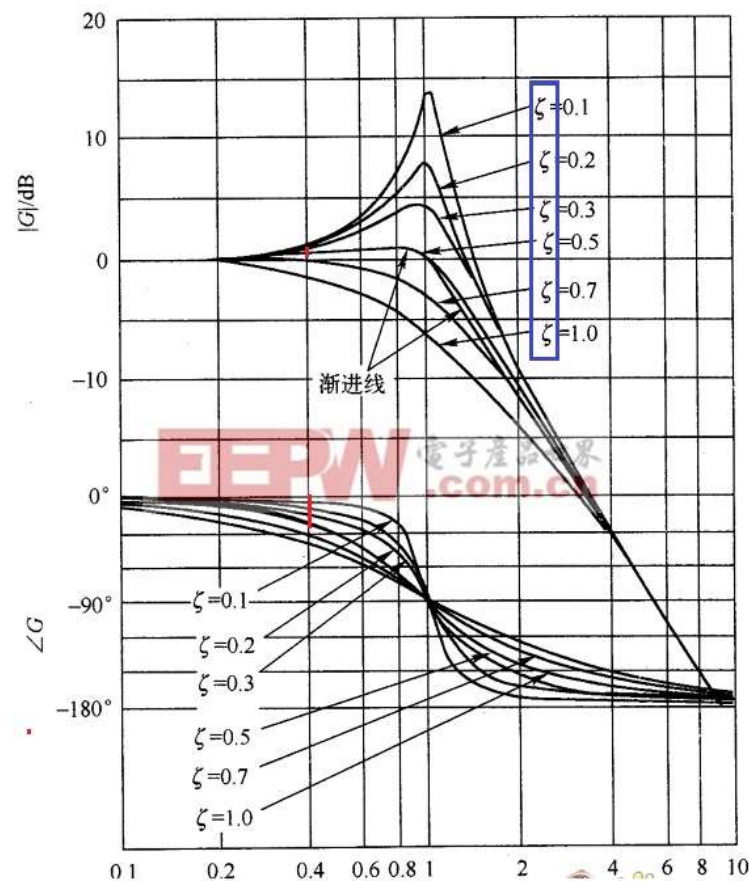
概念区分——

什么是

阻尼力、阻尼比、阻尼系数？

(2) 阻尼比对系统性能的影响

- ◆ 欠阻尼 ($0 < \xi < 1$)
系统响应速度快，但振幅大、振荡衰减慢。
- ◆ 临界阻尼 ($\xi=1$)
系统的输出响应不发生振荡，且达到稳定状态的速度较快。 $\xi=0.707$ 时系统既具有快的响应速度，超调量又比较小。
- ◆ 过阻尼 ($\xi > 1$)
无超调，是满足快速性前提下的最佳状态



(2) 阻尼比计算

在带有阻尼的弹簧—质量的移动和转动系统中

$$\xi = \frac{f}{2\sqrt{mk_0}} \quad \xi = \frac{f}{2\sqrt{JG}}$$

式中 f ——粘性阻尼系数, $\text{N/m}^2 \cdot \text{s}$

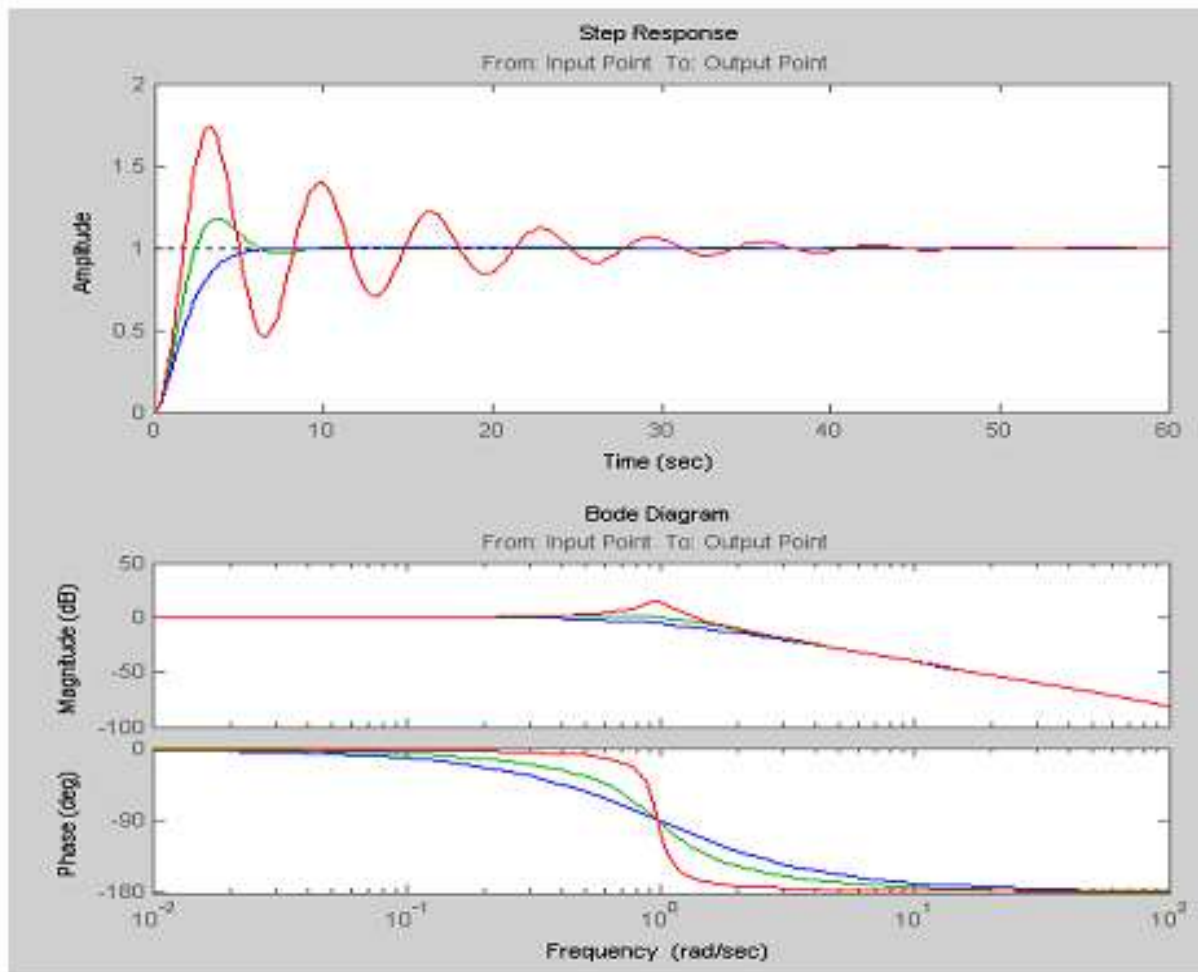
m ——系统质量

K_0 ——系统拉压刚度

J ——系统转动惯量

G ——系统扭转刚度

可见, 阻尼比除了与机械系统的粘性阻尼系数有关外, 还与系统刚度和质量分布有关。



随着阻尼比的增大，

系统的幅频特性曲线的
谐振峰值减小，振荡
减轻；

相频特性曲线下移，相
位滞后量增大，系统
响应速度变慢。

不同阻尼比时系统的响应 ($\xi > \xi > \xi$)

(3) 阻尼比的设计原则

在机械结构设计时，应当通过对刚度、质量、摩擦系数等参数的合理匹配，得到系统阻尼比 ξ 的适当取值，以保证系统的良好动态特性。

惯性阻尼系统

$$G(s) = \frac{K}{Js + B}$$

惯量J，粘滞摩擦系数B的大小对系统性能有什么影响？

4.2.3 刚度

(1) 刚度对系统特性的影响

刚度对系统的精度和动态特性都有影响。

- 对精度的影响

系统的刚度越大，因静摩擦力的作用而产生的传动部件的变形越小，系统的失动量也越小。

4.2.3 刚度

◆ 对固有频率的影响

典型的移动和转动型弹簧-质量系统固有频率

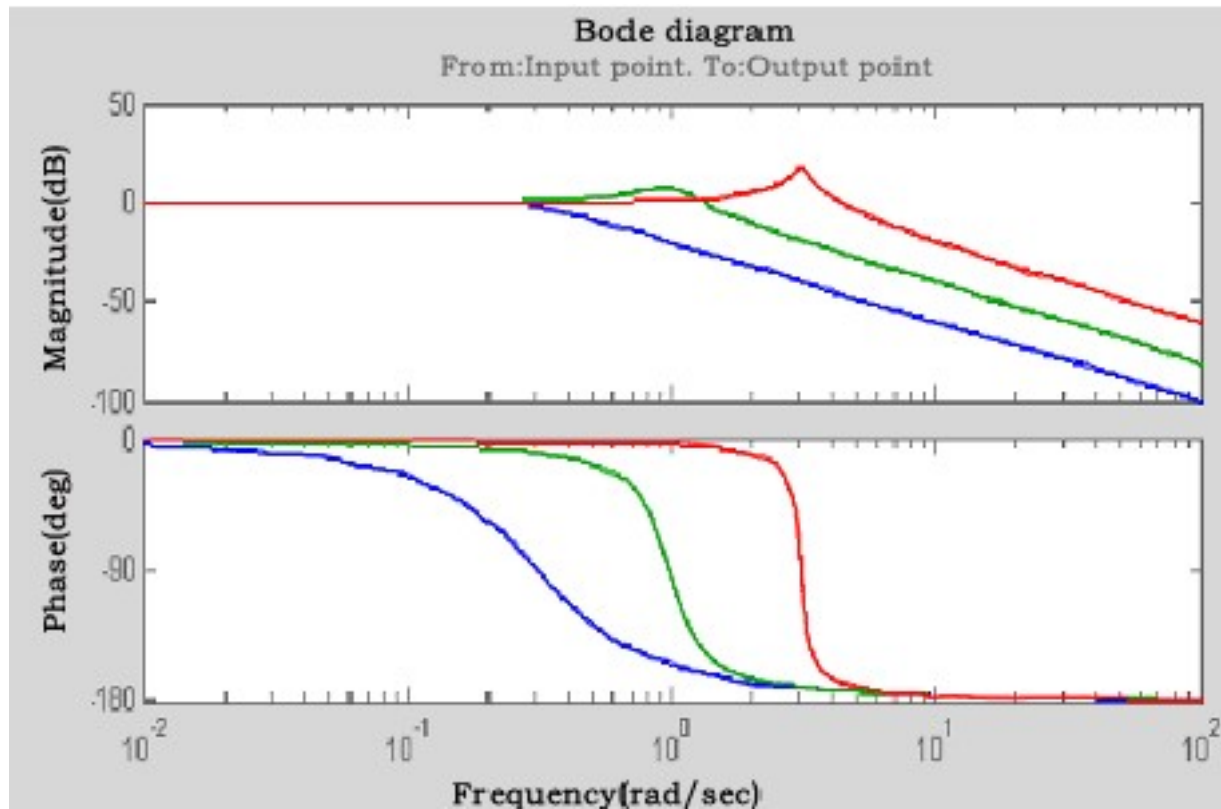
$$\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G}{J}}$$

可见，系统的刚度越大，固有频率越高。可以避开控制系统或者驱动系统的频带，从而避免产生共振。

◆ 快速性和稳定性

固有频率提高，有利于提高快速性和稳定性

4.2.3 刚度



在其它参数不变时，随着刚度的增加，

系统的幅频特性曲线右移，
响应速度变快；

相频特性曲线上移，相位
滞后量减小，系统的
稳定性变好。

不同刚度时系统的频率特性 ($K < K < K$)

4.2.3 刚度

(2) 机械传动系统中对刚度的设计原则

在条件允许的情况下尽量采用高刚度低密度的材料，还采用提高刚度的辅助措施（结构优化）。

4.2.4 传动精度

(1) 误差

由于传动件之间的间隙和传动件的安装及制造误差而引起两种误差

◆ 传动误差

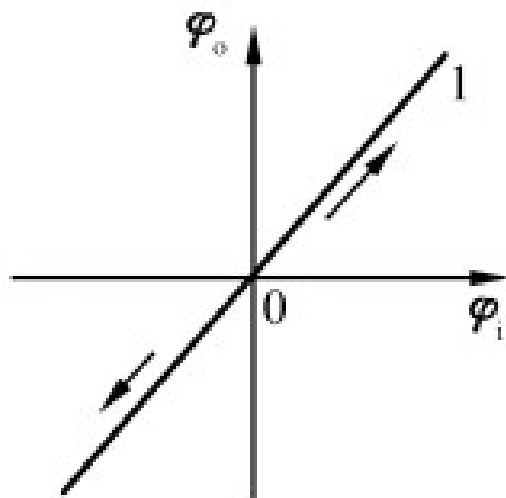
输入轴单向转动时，输出轴转角的实际值相对于理论值的变动量。其结果使得输出轴与输入轴之间的传动比发生变化，使得传动不准确，影响传动精度。它主要由于传动件的**变形**和**制造误差**所引起的。

◆ 回程误差

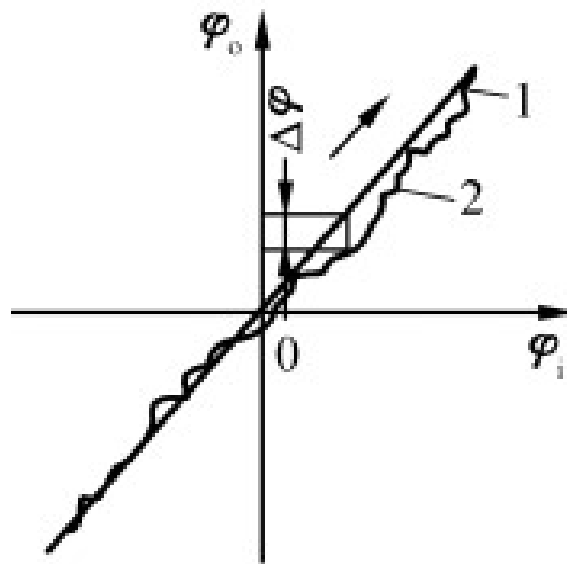
输入轴由正向转动变为反向转动时，输出轴转角的滞后量。

为当输入轴固定时，输出轴可以任意转动的角度。它主要由于传动件的**间隙**而引起的。

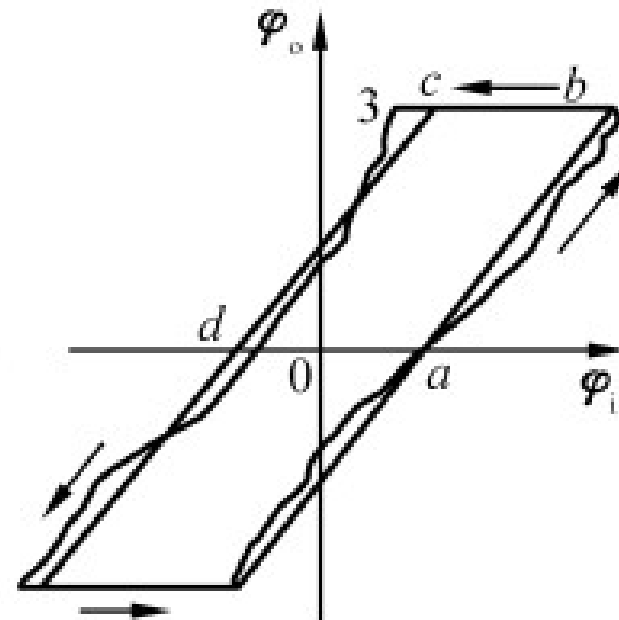
4.2.4 传动精度



(a) 理想关系



(b) 传动误差

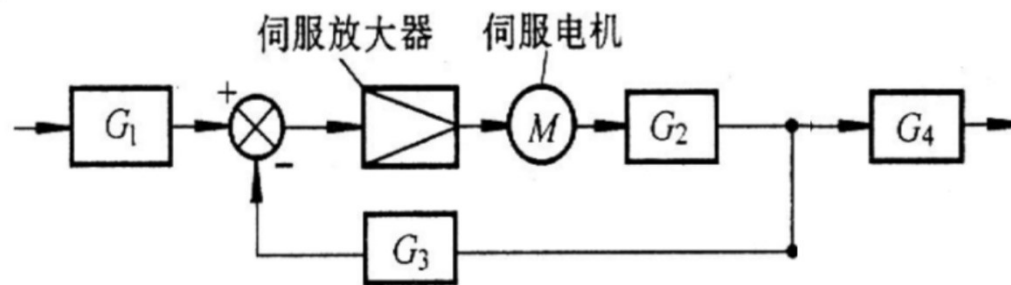
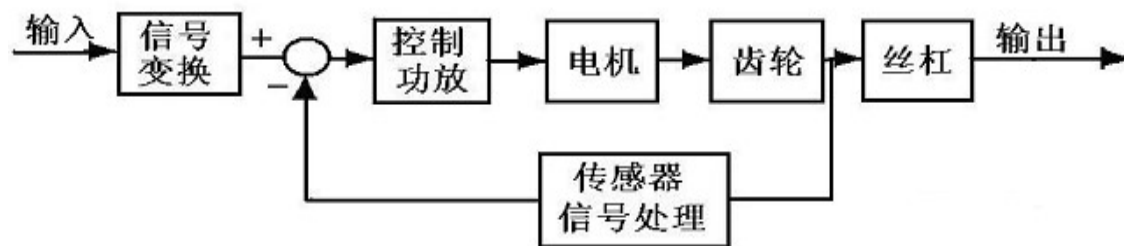
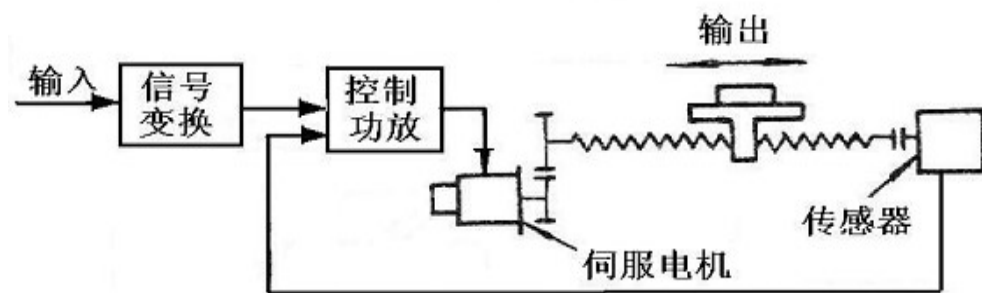


(c) 回程误差

传动误差与回程误差

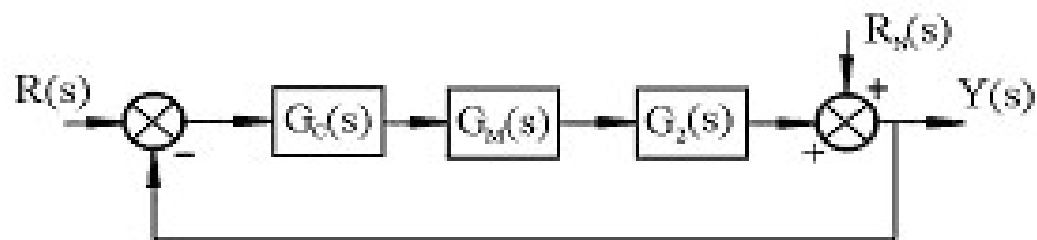
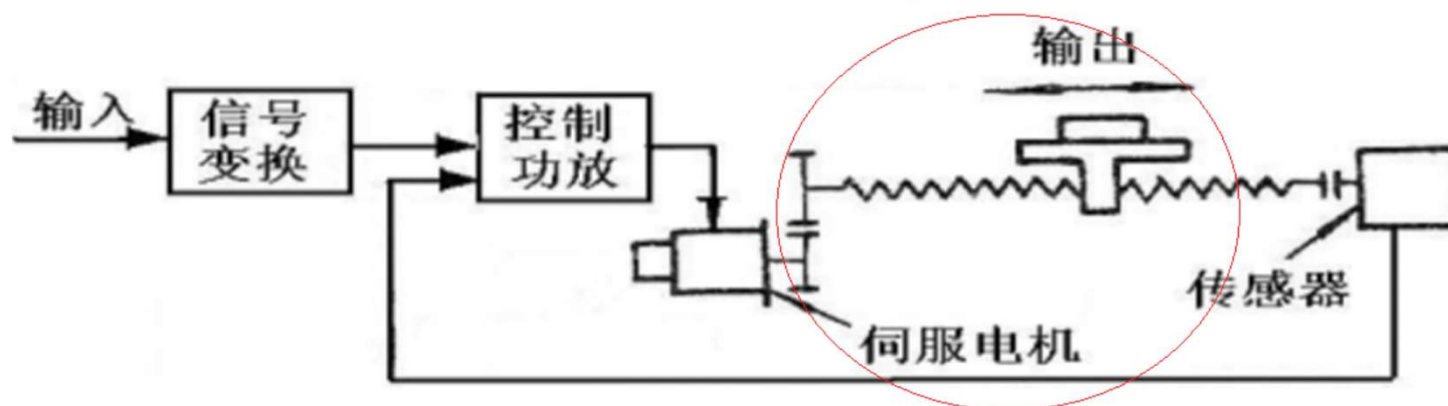
4.2.4 传动精度

(2) 传动链的误差对系统性能的影响



典型伺服系统原理图

➤ 驱动元件之后闭环之内误差 $G_2(s)$

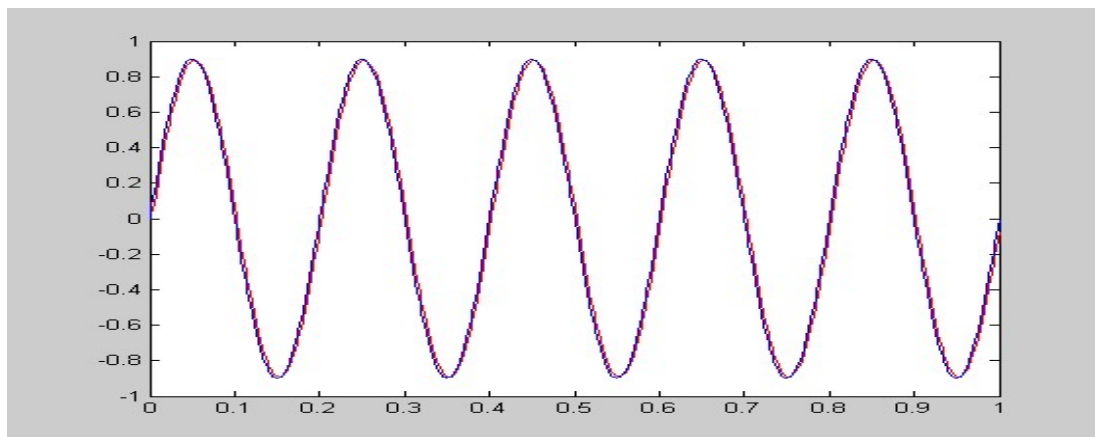


相当于在前向通道增加的外干扰信号

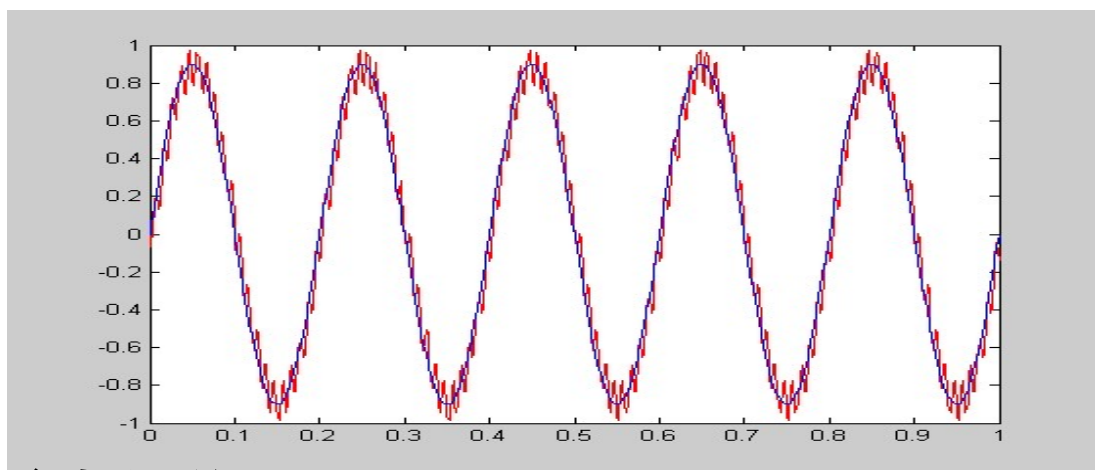
分析输出与扰动之间的模型 $Y=Q_e R$

G_2 环节误差的影响

低频误差



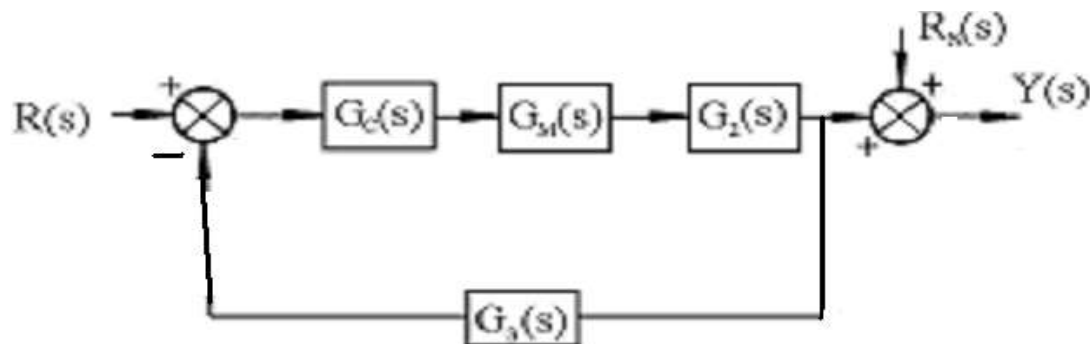
高频误差



结论

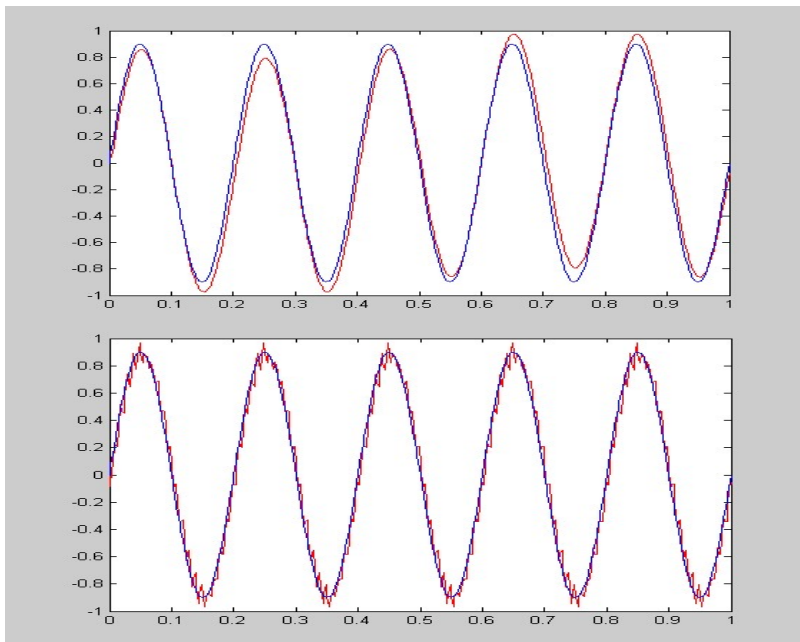
- ◆ 误差的低频分量（如回程间隙）会通过闭环控制得到校正，不影响输出精度。
- ◆ 误差的高频分量（如齿形误差）影响输出精度。

输出通道误差 $G_4(s)$



相当于在输出通道增加的外干扰信号，闭环之外，无法补偿

分析输出与扰动之间的模型 $Y_e = QR$



低频误差

高频误差

结论

- ◆ 误差的低频分量影响输出精度。
- ◆ 误差的高频分量影响输出精度。

4.2.4 传动精度

传动链的误差对系统性能的影响

- 1、传动链的传动误差和回程误差会影响系统的精度和稳定性。
- 2、传动链的传动误差和回程误差对系统性能的影响随其在系统中的位置的不同而不同。

(1) 闭环之前输入通道。

由于闭环系统具有低通特性，误差作为输入信号的一部分，其低频分量可以通过闭环系统，因此误差影响系统输出，而误差的高频分量会通过闭环控制得到校正被衰减，因此不影响输出精度。

(2) 闭环内正向通道的传动链误差。

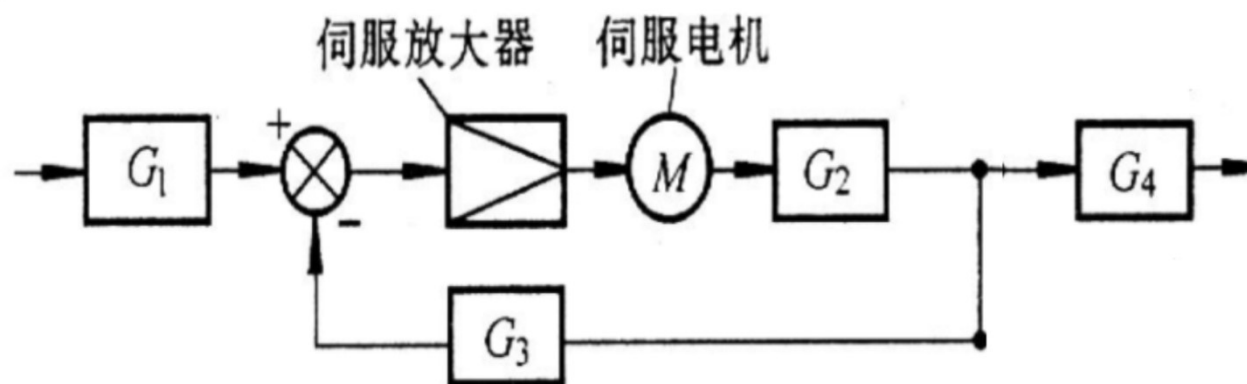
误差的低频分量（间隙）会通过闭环控制得到校正，不影响输出精度，传动误差的高频分量影响输出精度。

(3) 闭环之外的传动链误差。

控制系统对传动链的转动误差没有校正作用，因此误差的低频分量和高频分量都会影响输出精度。

思考

闭环内反馈通道的误差（ G_3 ）对系统输出精度有什么影响？



4.3 传动机构的特点

(1) 转动输出型机构-线性传动比

◆ 齿轮传动

工艺性好、适用范围广、可实现大功率或者高精度传动、效率高、传动平稳，不易实现大传动比、体积较大。

◆ 蜗轮蜗杆传动

传动比大、可反向自锁、结构紧凑，效率低，一般工业传动。

◆ 行星轮减速器

传动比范围宽、结构紧凑、效率高、传动精度高、适合于各种传动，特别是与电机构成伺服机组。

◆ 谐波减速器

传动比大、结构紧凑、效率高、传动精度高、适合于中小功率传动。

◆ RV减速器

传动比大、结构紧凑、效率高、传动精度高、广泛应用于机器人关节。

4.3 传动机构的特点

(2) 转动输出型机构-非线性传动比

- ◆转动原动件+非线性连杆机构：如曲柄连杆（转动、摆动）
非线性传动比、主要用于摆动运动或转动、适用范围广、可实现特殊运动规律、结构较复杂、体积较大。
- ◆直线型原动件+连杆：如液压缸实现的转动（摆动）
非线性传动比、主要用于摆动运动、适用范围广、结构较复杂、可实现紧凑机构、可实现高精度传动。
- ◆槽轮、凸轮等机构组成的符合机构
非线性传动比、主要用于实现指定运动规律、适用范围广、结构较复杂。
如正弦机构。

4.3 传动机构的特点

(3) 直线输出型机构-线性传动比

◆丝杠螺母传动

传动比大、可反向自锁、结构简单、工艺性好，效率较低。

滚珠丝杠可以实现高效率、高精度传动。

◆带传动

传动比较小、结构较复杂、效率较高，传动平稳、**低噪声**。可用于转动型或者直线型传动。**如同步齿形带**可实现准确运动专递。

◆齿轮齿条传动

工艺性好、适用范围广、可实现大功率或者高精度传动、效率高、传动平稳，不易实现大传动比、体积较大。

◆直线驱动元件直接驱动

结构紧凑，使用方便。成本较高。如直线电机、液压缸。

4.3 传动机构的特点

(4) 直线输出型机构-非线性传动比

- ◆ 曲柄滑块传动机构
- ◆ 槽轮、凸轮传动机构
- ◆ 特殊的复合传动机构

转动输入，移动输出。实现特定的运动规律，运动规律固定，变更困难，结构较复杂，对输入的运动控制要求较低。与发动机曲轴活塞机构。

(5) 复合输出型机构-非线性传动比

依靠多种机构复合，一个转动运动件，实现负载平面或者空间多自由度运动输出。是不使用伺服控制技术而实现复杂运动规律的有效方法。

4.3 传动比的分配原则

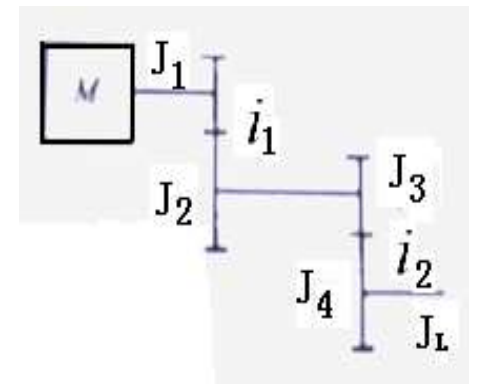
1. 最大加速度

当折算到电机上的负载惯量正好等于电机本身的转动惯量时，可获得最大启动加速度（获得最大加速转矩）。

$$i = \sqrt{\frac{J_L}{J_m}}$$

前大后小（电机为前）：
获得最小折算惯量

$$J_e = J_1 + \frac{1}{i_1^2} (J_2 + J_3) + \frac{1}{i_2^2 i_1^2} (J_4 + J_L)$$



4.4 传动比的分配原则

(2) 重量最轻

➤ 小功率传动 $i_1 = i_2 = \dots i_n$

➤ 大功率传动 前大后小

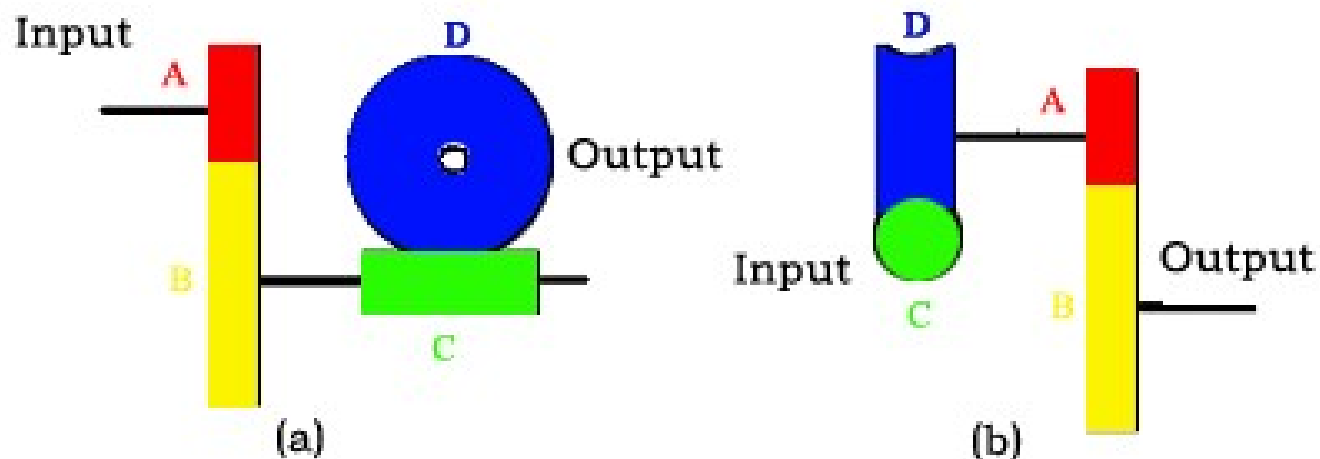
❖ 靠近电机为前

4.4 传动比的分配原则

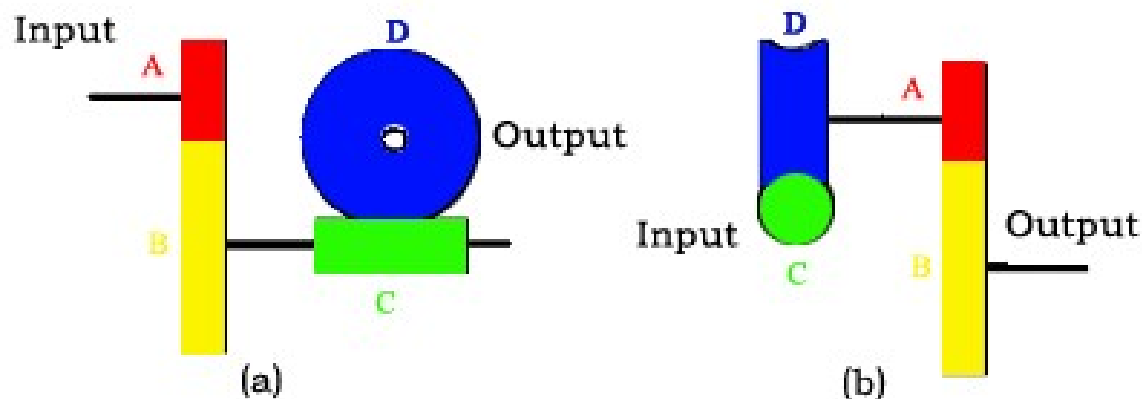
(3) 最小转角误差

前小后大

例3.2 已知齿轮传动比为 $i_{BA} = 6$ ，蜗轮蜗杆机构的传动比为 $i_{DC} = 60$ ，试分析两种传动方案的传动精度。



4.4 传动比的分配原则



解： 设单级传动机构的传动误差分别为 Δ_{AB} 和 Δ_{CD} ，且 $\Delta_{CD} = \Delta_{AB} = \Delta$ 则总的传动误差分别为

$$\Delta_b = \Delta_{AB} + \frac{\Delta_{CD}}{i_{AB}} = (1 + \frac{1}{6})\Delta = \frac{7}{6}\Delta$$

$$\Delta_a = \Delta_{CD} + \frac{\Delta_{AB}}{i_{DC}} = (1 + \frac{1}{60})\Delta = \frac{61}{60}\Delta$$

显然， $\Delta_a < \Delta_b$ 方案 (a) 的传动精度高于 (b) 的传动精度。

传动比分配总的原则

- 对于以提高精度和减小回程误差为主的采用降速传动。
可按输出转角误差最小的原则。
- 对于要求传动平稳、启停频繁、动态特性要求高的传动链。
可按最小惯量和输出转角误差最小的原则。
- 对于要求重量最轻的传动链。
可按最小重量原则。
- 对传动比很大的传动链，应把定轴轮系与行星轮系结合使用。或采用谐波齿轮传动。
- 对负载变化的传动链，各级传动比最好采用不可约的比数。

4.5 减小传动链误差的措施

- ◆ 提高零件本身的制造精度可以减少传动误差和回程误差。
- ◆ 合理地设计传动链可以减少传动误差：

(1) 合理地选择传动类型

一般说：圆柱齿轮的传动精度较高，蜗轮蜗杆机构次之，圆锥齿轮的传动精度则较差；谐波齿轮传动的精度较高。

(2) 合理确定传动级数、分配传动比

减少传动级数就可以减少零件数量，也就减少了产生误差的环节。因此，在满足使用要求的前提下尽可能减少传动级数。对减速传动链，各级传动比宜从高速端开始逐级递增，尽量提高末级传动比。

4.5 减小传动链误差的措施

(3) 合理地布置传动链

在减速传动中，精度较低的传动机构应尽量布置在高速轴上（如圆锥齿轮传动），这样可以减小低速轴上的误差。

(4) 采用消除间隙机构可以减少回程误差

螺纹传动间隙的消除机构，齿轮传动侧隙的消除机构，滚珠丝杠螺母间隙的调整机构等。

螺纹传动
消除机构

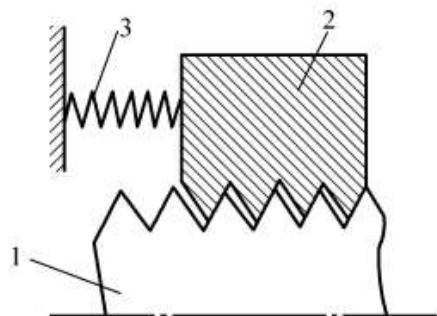


图 3-12 弹簧加载消除

1—丝杠螺纹；2—螺母；3—弹簧

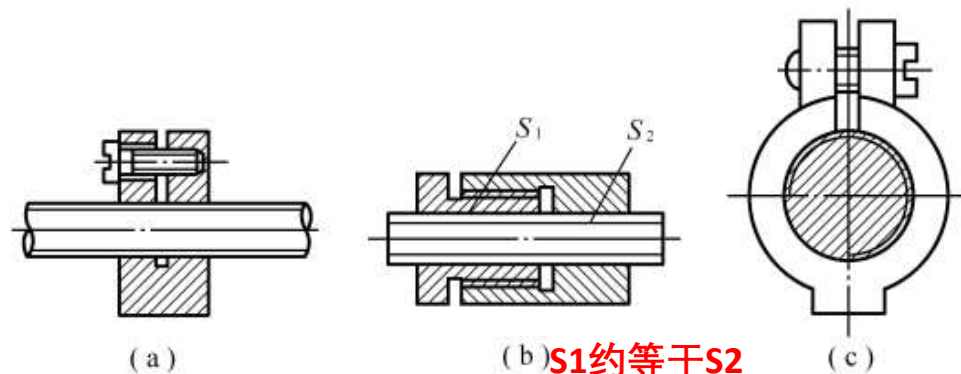
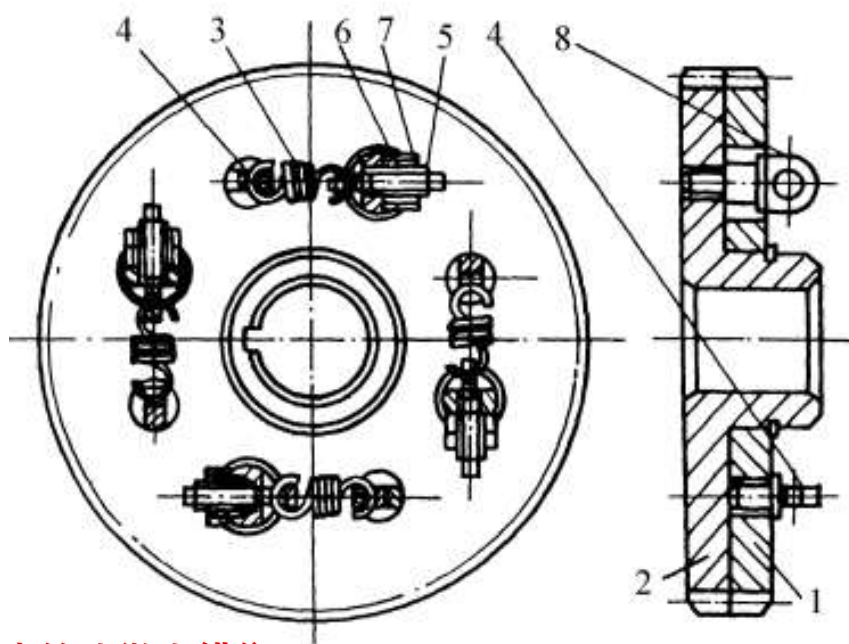


图 3-11 螺旋传动消除

(a) 轴向消除间隙方法；(b) 不等螺距消除间隙方法；(c) 径向消除间隙方法

6.1.4 减小传动链误差的措施

齿轮间隙消除机构



两个齿轮片微小错位

图 3-16 双齿轮错齿式消隙机构

1,2—薄片齿轮;3—弹簧;4,8—凸耳;5—调节螺钉;6,7—螺母

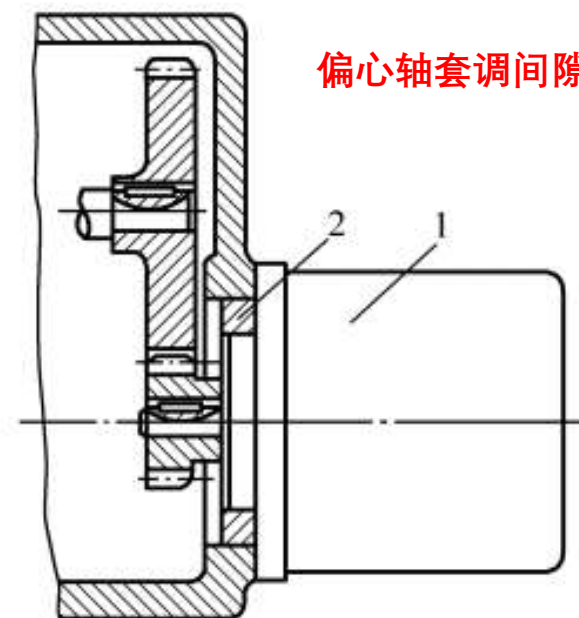


图 3-13 主轴套消隙机构

1—电动机;2—偏心轴套



4.5 减小传动链误差的措施

典型间隙的消除机构

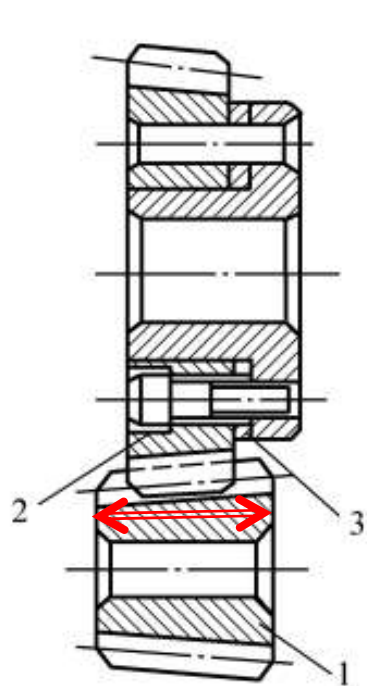


图 3-14 锥度齿轮消隙

1,2—齿轮;3—垫片

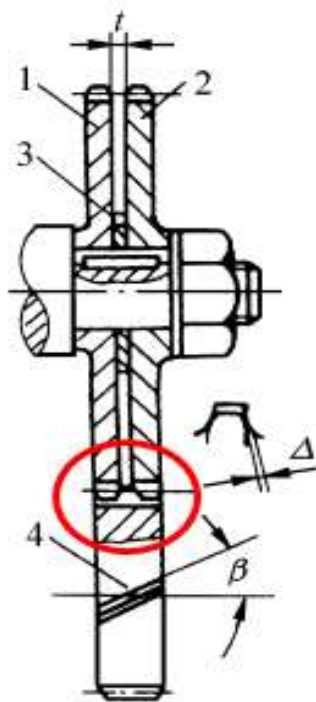


图 3-15 斜齿轮消隙机构

1,2—窄斜齿轮;3—垫片;
4—宽齿轮

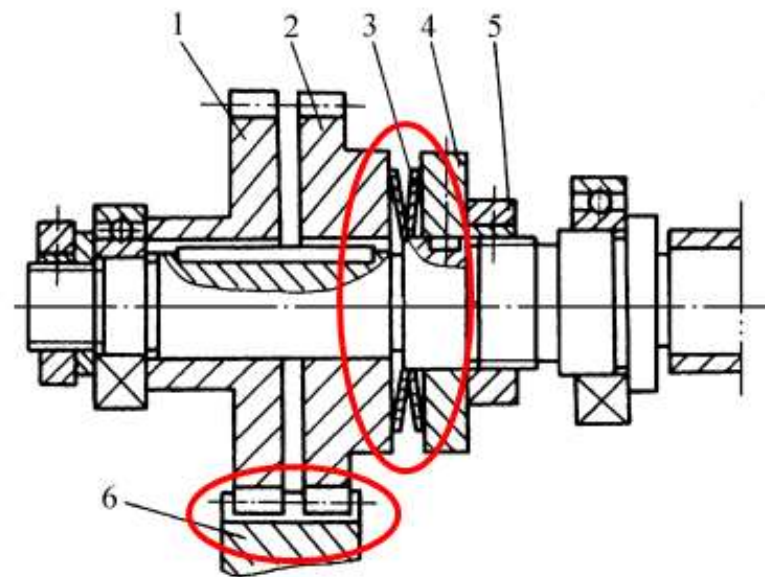


图 3-17 碟形弹簧消隙机构

1,2—薄片斜齿轮;3—碟形弹簧;4—垫片;5—螺母;6—宽齿轮



4.5 减小传动链误差的措施

典型间隙的消除机构

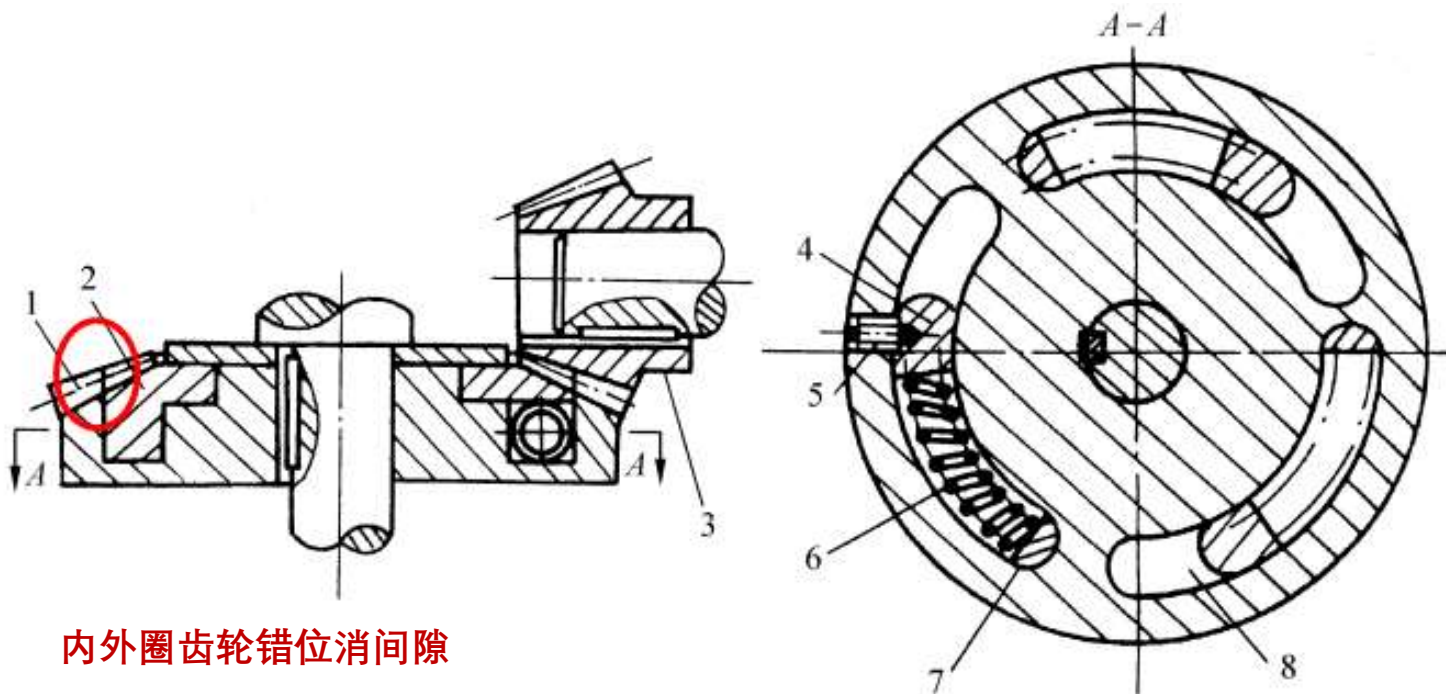


图 3-18 压力弹簧消隙机构

1—锥齿轮外圈;2—锥齿轮内圈;3—锥齿轮;4—凸爪;5—螺钉;6—弹簧;7—镶块;8—圆弧槽



感谢聆听

机电一体化系统设计

主讲教师：张立勋教授