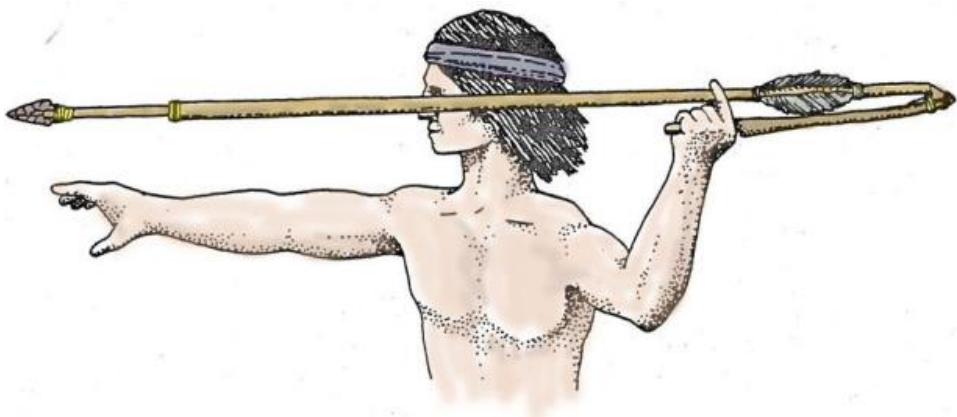


---

# 机器人设计与传动-1



朱秋国

浙江大学 控制学院

工业控制技术国家重点实验室

Email: [qgzhu@zju.edu.cn](mailto:qgzhu@zju.edu.cn)

2021年3月23日

---

# 1. 概述

# 概述

---

"The way we think, a bone is a link; a joint is a bearing; a muscle is an actuator; ligaments and tissues are springs..."

"Superb preparation in good, practical arts -- foundry, forge and machine shop."

- *Robert Mann*

"...Informed creative thinking."

- *Woodie Flowers*

"If you understand people's values better, you can create better products and services for them. That's the future of design."

- *Harry West*

"Design is a passionate process."

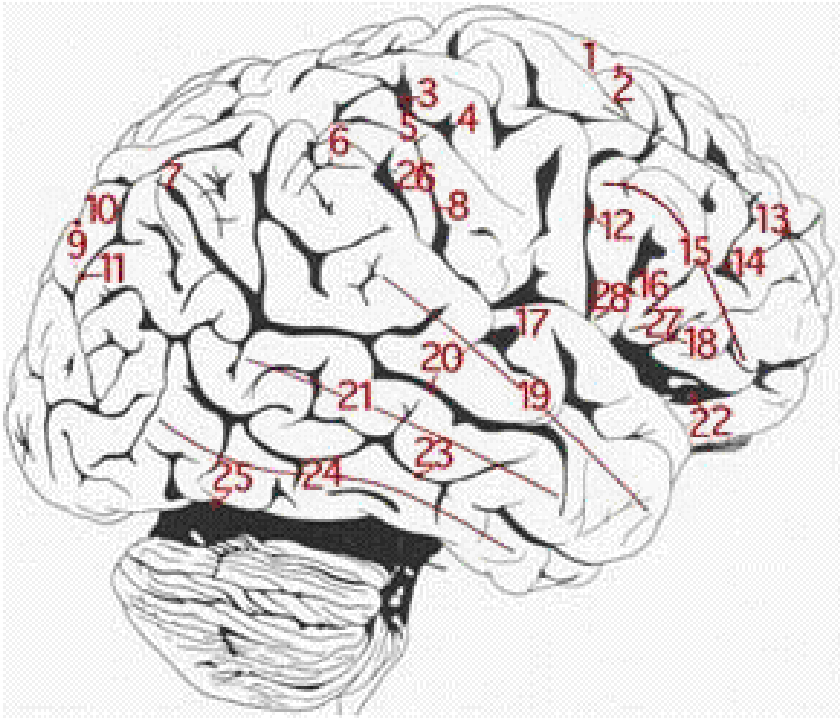
- *Alex Slocum*

---

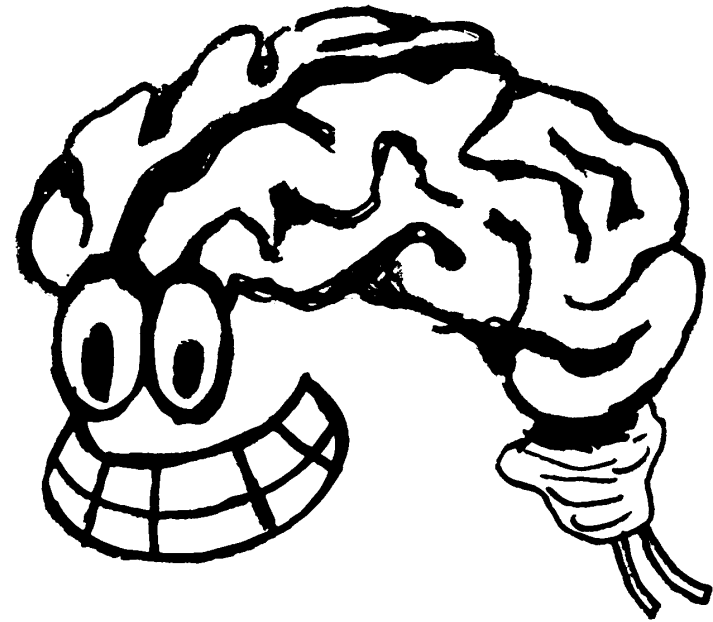


# 概述

---



It is your brain.



It is your brain  
on design!

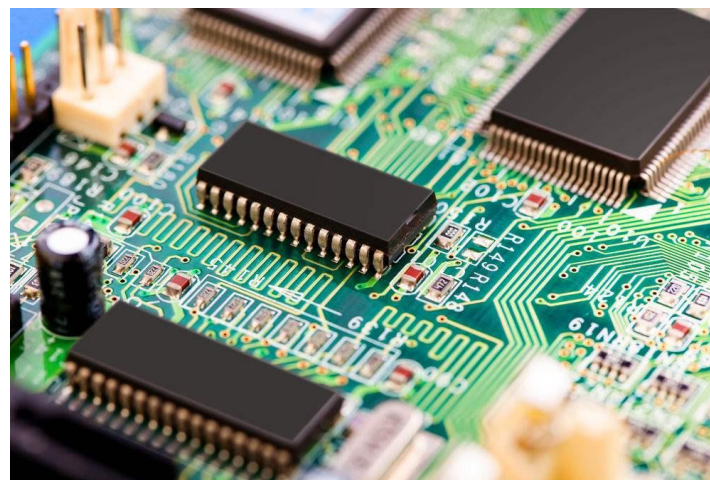
# 概述





# 概述

---



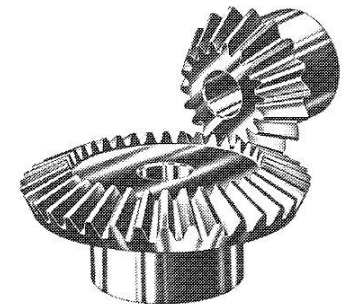
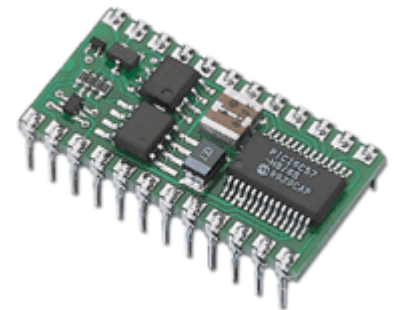
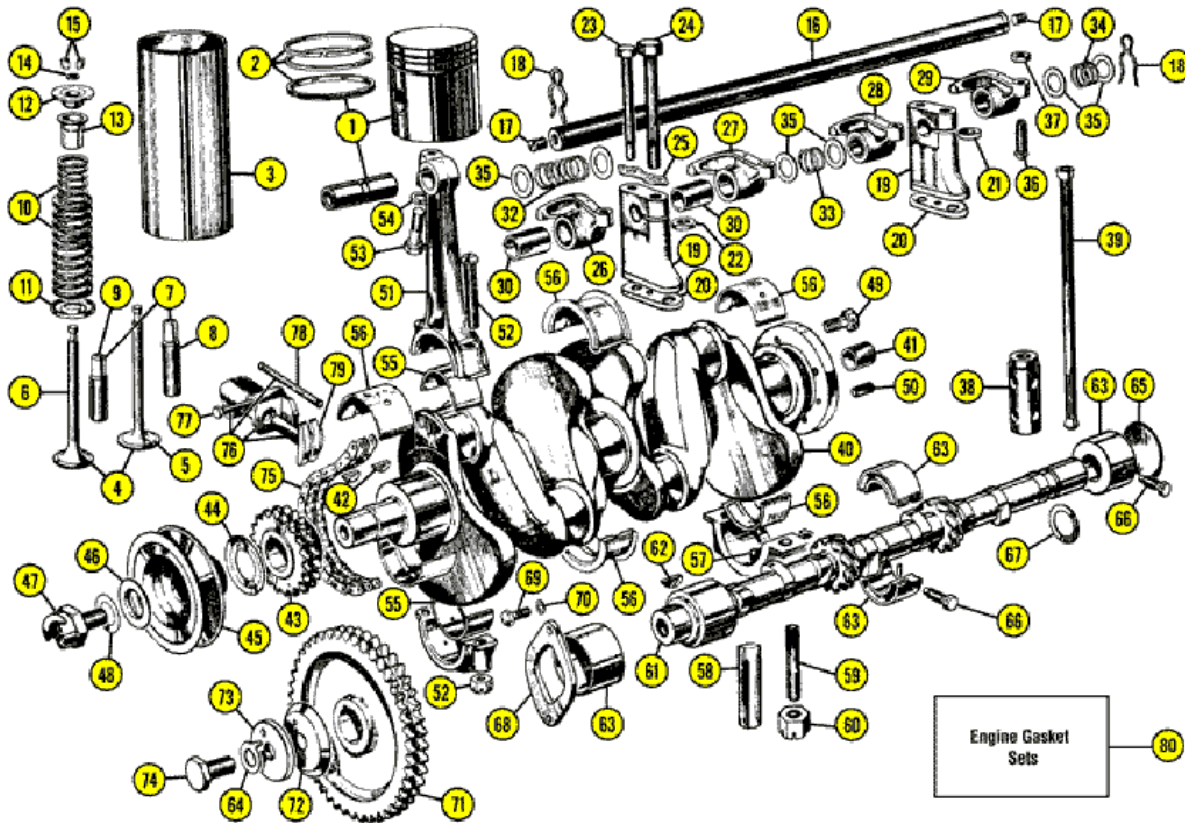
# 概述

---



# 概述

## ► Mechanical Design





# 概述

## ► History of Engineering Design

Stone tools >>1,000,000 BC

Fire >500,000 BC (1,900,000 BC \*)

Spears circa 400,000 BC

Sewing circa 23,000 BC



Spear thrower 14,000 BC

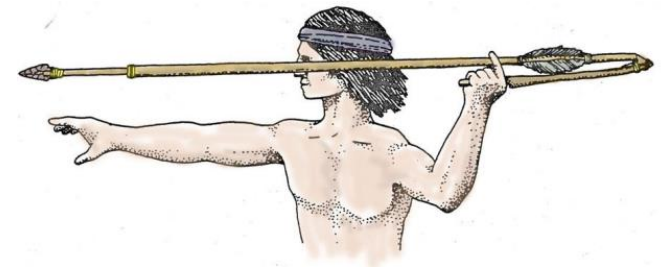


Domestication of sheep 9,000 BC

Permanent settlement and irrigation 7,000 BC

Copper circa 6,000 BC

Division of labor 5,000 BC

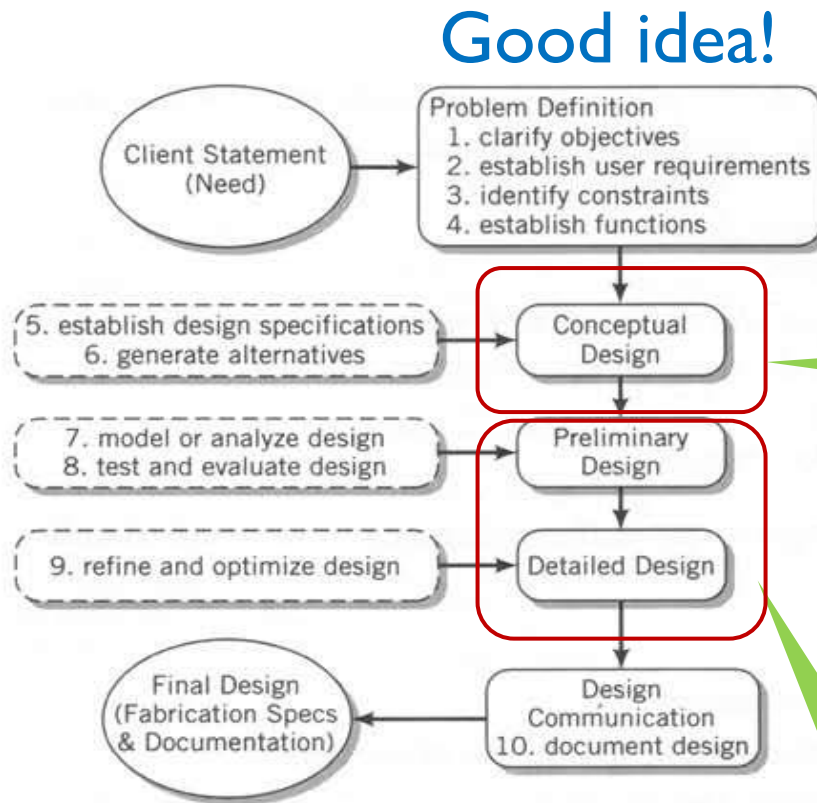


Also invented in  
Mesoamerica ("atlatl")

\*Wrangham, 2009, "Catching Fire: How Cooking Made us Human "

# 概述

## ► The Design Process: As a Flow Chart



分解和迭代是必不可少的！  
Decomposition and iteration are also essential.

《机器人设计》

**Figure 2.3** A prescriptive, five-stage model of the design process. Like the previous model, this model is also very stylized in that the process is shown as a linear sequence of artifacts (*need* and *final design*) and design phases, within which are situated the design tasks.

《机器人制作》

## 2. 基础知识

# 课程回复：思考题

---

在传动机构中，由旋转运动变成直线运动的机构有哪些？





# 机器人机构的组成

---

## 1.1 机器人机构的组成

概括地讲，机器人机械结构由三部分组成：

### 1、执行机构

执行机构用于完成操作任务。它需要在动力源的带动下，完成预定的操作。如：直流电机、舵机和气缸等。

### 2、传动机构

传动机构是**转速和转矩的变换器**，也是伺服系统的一部分，要求根据伺服控制系统进行选择设计，以满足控制性能。因此，需满足传动的精度，满足轻量、高速和高可靠性。如：齿轮。

### 3、支撑/导向机构

导向机构作用是**支撑和导向**，使运动能安全、准确地完成特定方向的运动。如：轴承和导轨。

---

# 设计的流程

1、明确**执行机构**

2、确定传动方式

3、设计**导向机构**

4、**结构设计**

5、**优化分析**

6、**组装与测试**

迭代设计



# 传动机构的性能要求

---

传动机构的性能一般需满足以下几个方面要求：

## 1、转动惯量

传动机构的**质量和转动惯量应尽量小**。否则，机构的负载会增大；系统响应会降低；固有频率会降低，易产生谐振。

## 2、刚度

- 伺服系统动力损失小。（**变形损失能量小**）
- 频率要高，超出机构的频带宽度，使之不易产生共振。
- 闭环系统更加稳定。

## 3、阻尼

阻尼越大，振动的振幅就越小，衰减也越快。但大阻尼会使系统稳态误差增大、精度降低。

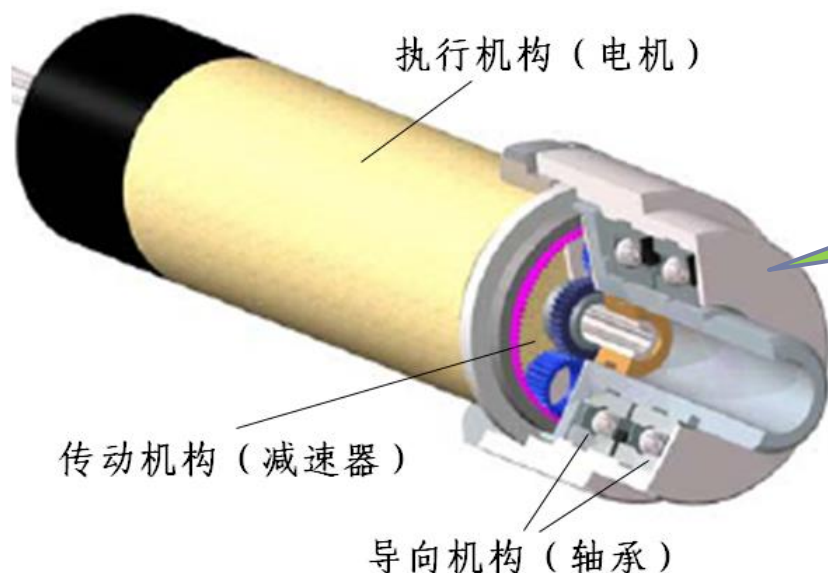
共振区域阻尼越大越好；远离共振区域阻尼越小越好。

---

► **其他要求：摩擦小、抗振性好、传动间隙小等。**

# 减速比

减速比，也即**传动比**。指减速机构**输入速度**与**输出速度**之比，用“ $i$ ”表示。即， $i = \text{输入速度} / \text{输出速度}$ ，并使输出力/力矩变为原来的 $i$ 倍。



减速作用：  
1、减小**速度**  
2、增大**力矩**

例：电机输入减速箱的速度 $1000\text{n/min}$ ，输出速度 $10\text{n/min}$ ，则减速比  $i = 1000/10 = 100$   
如电机输出力矩为 $T_{in} = 0.1\text{Nm}$ ，则输出力矩为 $T_{out} = T_{in} * i = 0.1\text{Nm} * 100 = 10\text{Nm}$



# 强度与刚度

---

- ▶ **强度：**零件在工作中**发生断裂或残余变形**均属于强度不足。

**设计要求：**采用强度高的材料；有足够大的截面尺寸；合适地设计截面积，增大截面积的惯性矩；采用合适的热处理工艺；提高运动零件的制造精度等。

- ▶ **刚度：**零件在工作中所产生的**弹性变形**不超过允许的程度，就算满足了刚度要求。包括整体刚度和表面刚度两种。

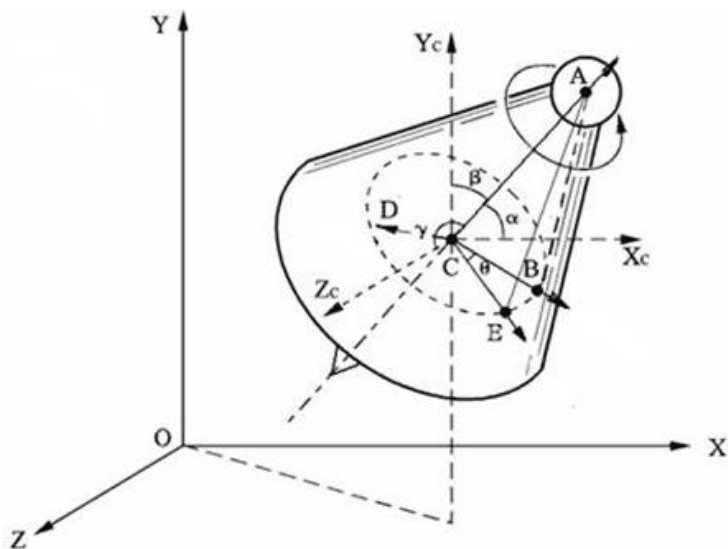
**设计要求：**增大零件截面积或截面的惯性矩；缩短支承距或采用多点支撑机构，以减小变形（整体刚度）。增大两零件的贴合面；提高加工精度等（表面接触刚度）。

**相同的强度，结构不同，刚度不同**

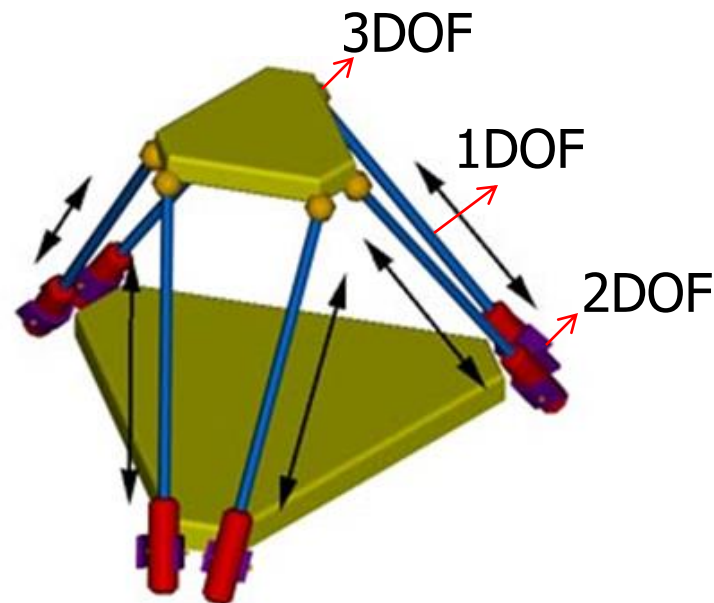
---

# 刚体的自由度

**定义：**刚体本身具有可独立运动方向的数目。



开环系统



闭环并联系统

闭环系统中， $l$ 为连杆数，包括基座；  
 $n$ 为关节总数；  
 $f_i$ 为第 $i$ 个关节的自由度数。

$$F = 6(l - n - 1) + \sum_{i=1}^n f_i$$
$$F = 6 \times (14 - 18 - 1) + 36 = 6$$

▶ 对于平面机构，其自由物体是三个自由度，上述公式中6改成3

# 支撑和导向机构

## ▶ 轴承

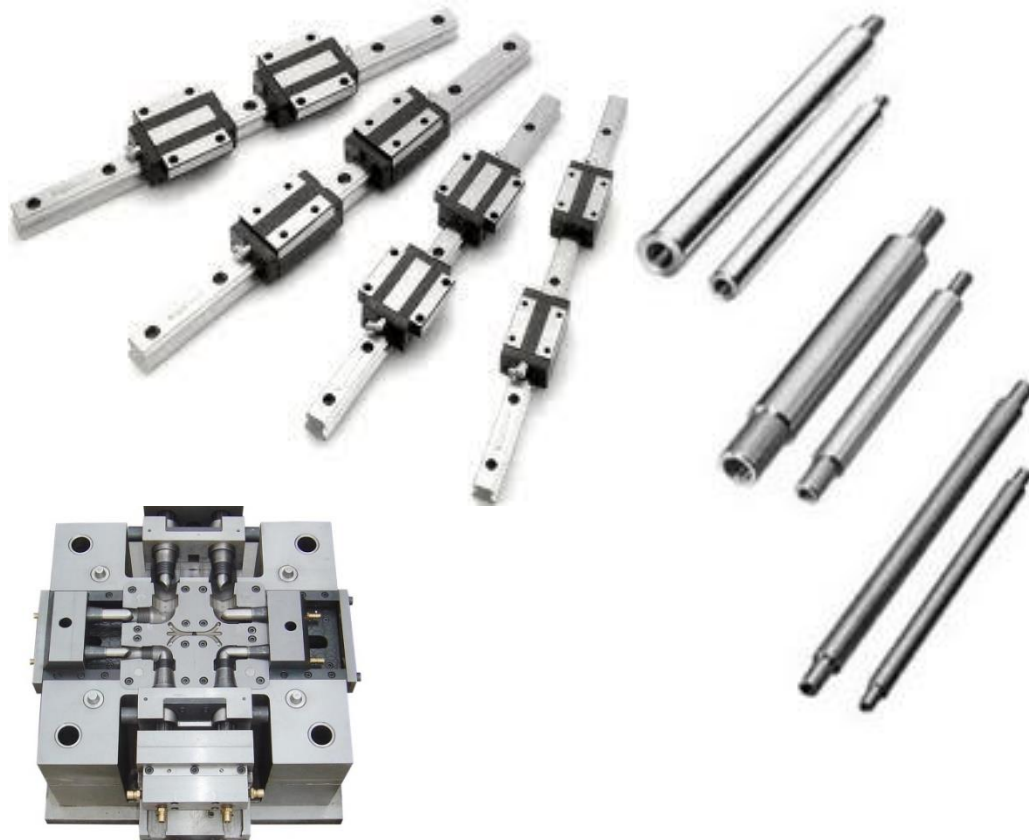
- ▶ 滑动轴承：应用于工作转速高、特大冲击与振动等场合。

- ▶ 滚动轴承

## ▶ 直线导轨

## ▶ 导向轴

## ▶ 模具



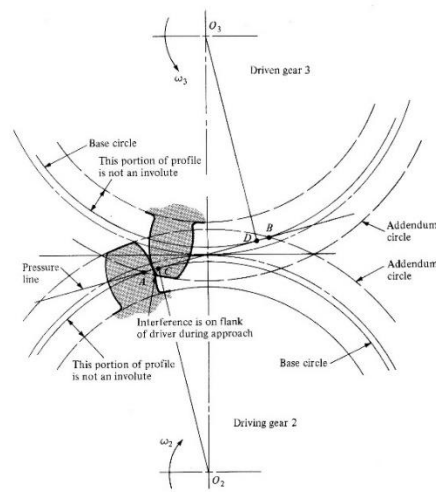
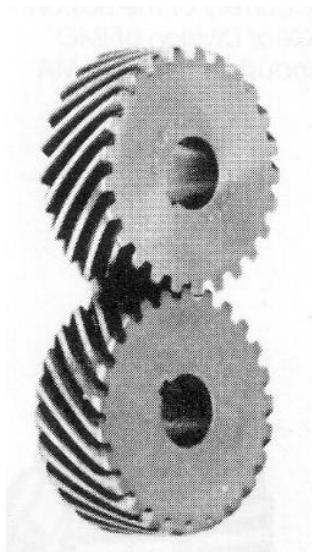
# 3. 齿轮传动



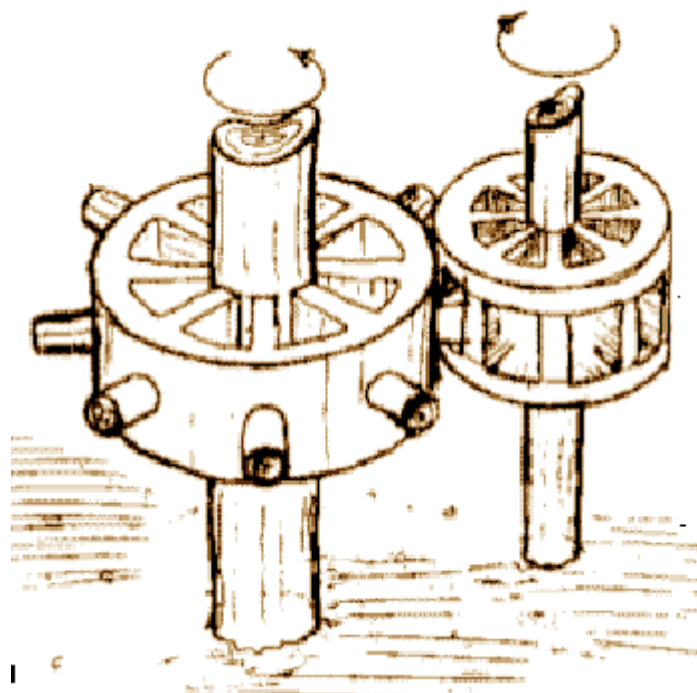
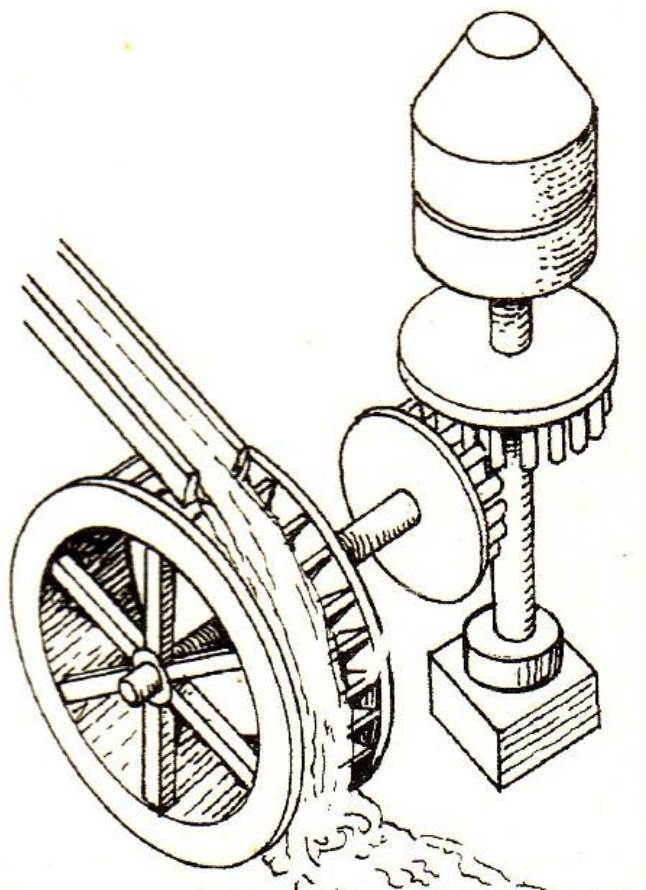
# 齿轮：术语、几何、齿轮系与强度

**齿轮传动**是指由齿轮副传递运动和动力的装置，它是现代各种设备中应用最广泛的一种机械传动方式。

优点：传动比较准确，效率高，结构紧凑，工作可靠，寿命长。



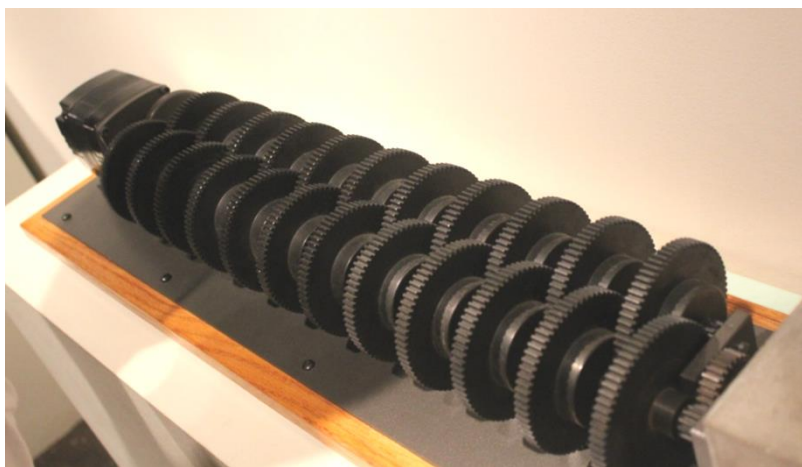
# 齿轮的早期应用



18世纪，纺织机器的应用

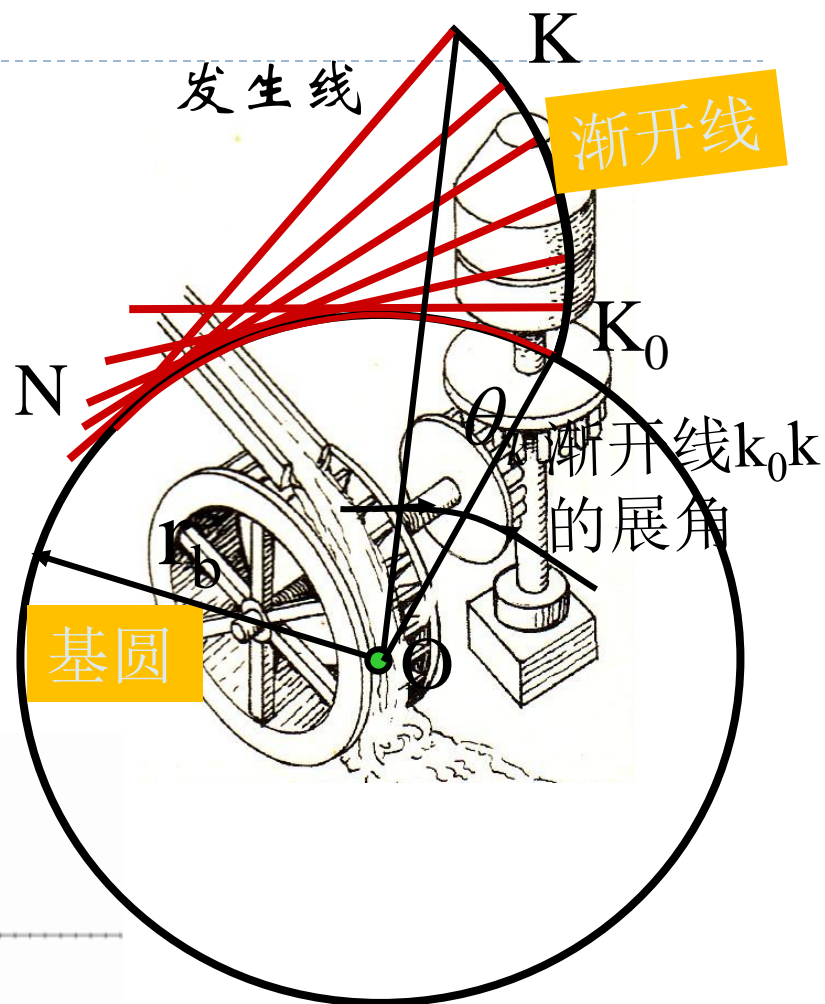
▶ 公元300年，罗马人的水车

# 齿轮的应用





# 齿形—渐开线



当直线沿一圆周作相切纯滚动时，直线上任一点在与该圆固联的平面上的轨迹 $k_0k$ ，称为该圆的渐开线。



# 齿轮的术语

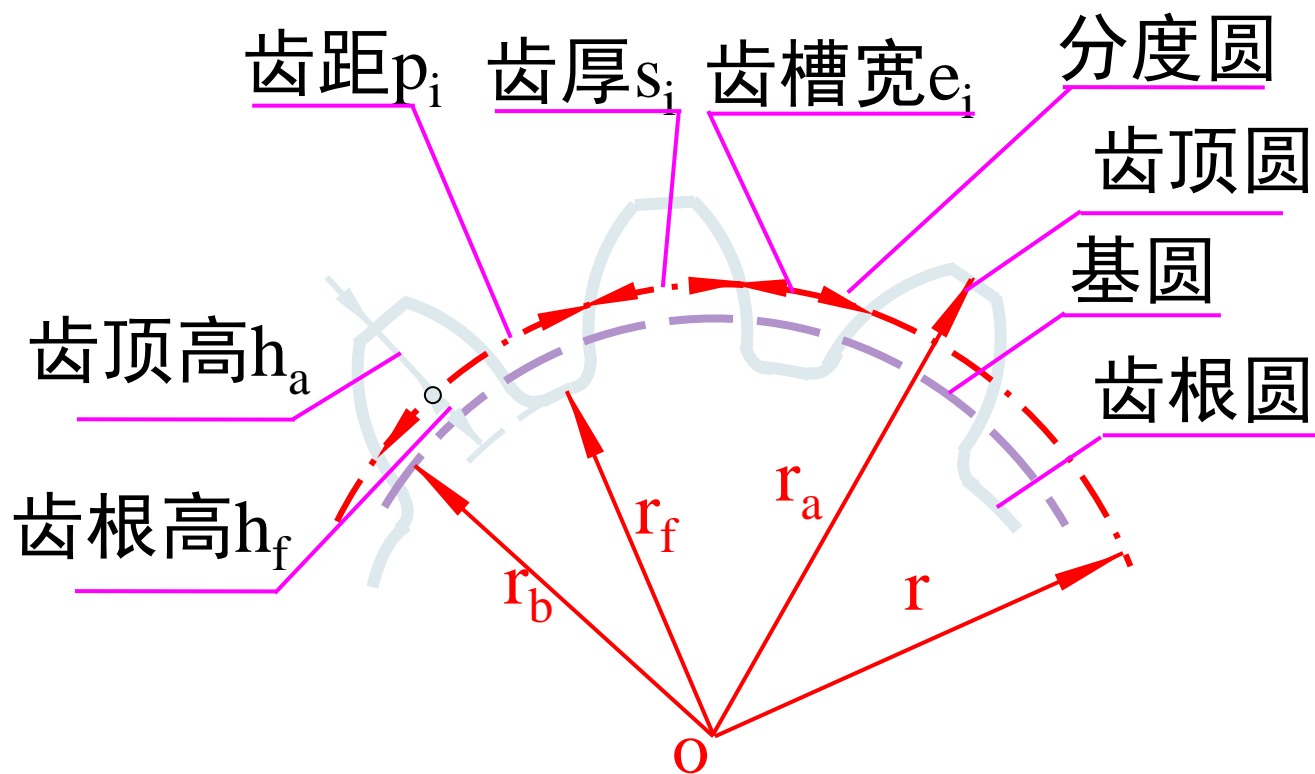
齿顶圆 ( $d_a$ )

齿根圆 ( $d_f$ )

分度圆 ( $d$ )

基圆 ( $d_b$ )

齿数 ( $z$ )



同一圆周上  $p_i = s_i + e_i$

齿距和齿厚均在分度圆上。

# 齿轮基本参数的计算公式

---

## 分度圆与模数

**模数 $m$ :** 人为地把  $p_i / \pi$  规定为一些简单的有理数，该比值称为模数，用 $m$ 表示。模数越大，齿厚就越大，齿轮的承载能力就越高。

**分度圆 $d$ :** 是齿轮上一个人为地约定的轮齿计算的基准圆，规定分度圆上的模数和压力角为标准值。分度圆又称节圆。

国标压力角的标准值为 $20^\circ$

---



✓分度圆直径为  $d = mz$

基圆直径为  $d_b = d \cos \alpha = mz \cos \alpha$

基圆上的齿距  $P_b = \pi d_b / z = \pi m \cos \alpha$

齿顶圆直径  $d_a = d + 2h_a$

齿根圆直径  $d_f = d - 2h_f$

法节  $P_n = P_b = \pi d_b / z = \pi m \cos \alpha$

一般情况下：

$$h_a^* = 1, \quad c^* = 0.25$$

$$h_f^* = (h_a^* + c^*)$$

$$h_a = h_a^* \times m$$

$$h_f = h_f^* \times m$$

欲使两齿轮正确啮合，两轮的模数必须相等

# 定常传动比

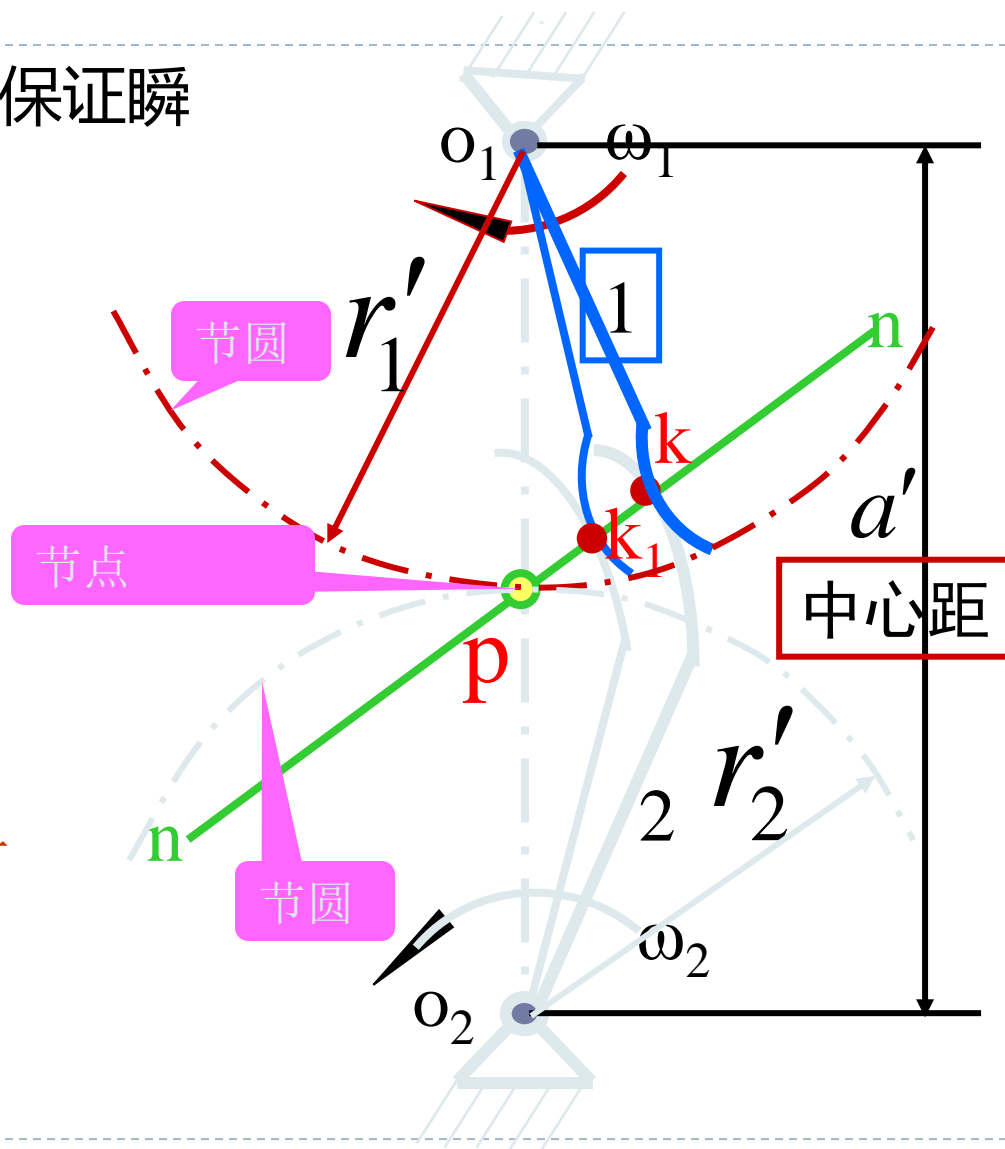
对齿轮传动的基本要求是保证瞬时传动比:

$$i_{12} = \omega_1 / \omega_2 = C$$

因为  $V_p = \omega_1 \overline{O_1 p} = \omega_2 \overline{O_2 p}$

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{O_2 P}{O_1 P}$$

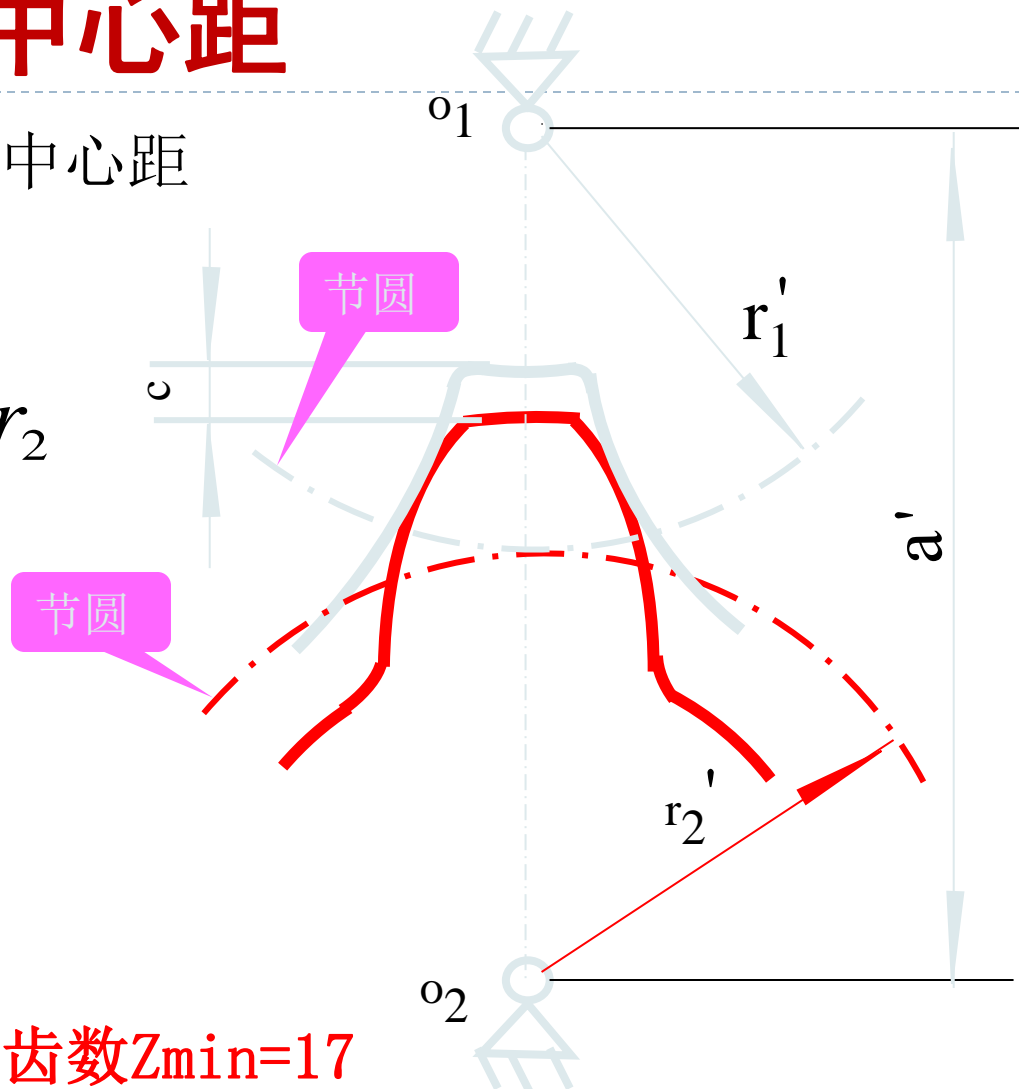
要使两齿轮的瞬时传动比为一常数，则不论两齿廓在任何位置接触，过接触点所作的两齿廓公法线都必须与连心线交于一定点p。



# 无侧隙传动的中心距

一对齿轮啮合传动时，中心距  
等于两节圆半径之和

$$\begin{aligned} a &= r_1' + r_2' = r_1 + r_2 \\ &= \frac{m}{2} (z_1 + z_2) \end{aligned}$$



特别注意：

当 **$ha^*=1$** ， **$a=20^\circ$**  时，齿数 **$Z_{min}=17$**

如果 **$Z_{min}<17$** ，那么采用变位修正法（建议尽量避免）

# 齿轮材料及选择原则

---

## ▶ 齿轮材料

- ▶ 钢：锻钢（软齿面齿轮，硬齿面齿轮），铸钢
- ▶ 铸铁
- ▶ 非金属材料

## ▶ 选择原则

- ▶ 钢制软齿面齿轮要求小齿轮硬度大于大齿轮30-50 HBS
- ▶ 原因
  - ▶ 小齿轮齿根强度较弱
  - ▶ 小齿轮的应力循环次数较多
  - ▶ 当大小齿轮有较大硬度差时，较硬的小齿轮会对较软的大齿轮齿面产生冷作硬化的作用，可提高大齿轮的接触疲劳强度
  - ▶ 大齿和小齿数一般应该互为质数。



# 齿轮强度校核

W. M. Berg, Inc. - Spur Gear Tooth Strength - Microsoft Internet Explorer

File Edit View Favorites Tools Help

Back Forward Stop Home Search Favorites Media Mail Print Word PDF Address Links

Google w m berg Search 120 blocked

**BERG**  
W. M. BERG, INC.  
PRECISION MECHANICAL COMPONENTS

Home Profile Products Solutions Engineering Support Employment

Back Engineering Tools

## Spur Gear Tooth Strength

Please Enter In The Data:

|                  |      |                  |            |
|------------------|------|------------------|------------|
| Face Width:      | .125 | Number Of Teeth: | 42         |
| Diametral Pitch: | 64   | Pressure Angle:  | 20 Degrees |
| Material:        |      | Delrin 500       |            |

Here Is The Output:

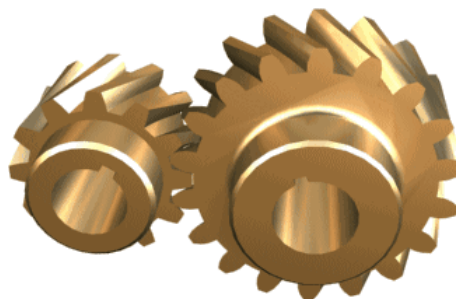
|                       |             |                           |          |
|-----------------------|-------------|---------------------------|----------|
| Allowable Tooth Load: | 3.8 lbs.    | Lewis Form Factor:        | 0.393    |
| Torque:               | 1.2 in-lbs. | Material Endurance Limit: | 5000 psi |
| Pitch Diameter:       |             | 0.6562 in.                |          |

\*Disclaimer: W. M. Berg and the programmer cannot be held responsible for any calculations presented; all results should be verified through your own calculations (this program may contain errors). The results presented are guidelines only. Please send all questions and any other feedback to the Engineering Department at the [Technical Support](#) mailbox. This web application is in beta testing currently and has only been tested under Microsoft Internet Explorer 5.5. The *Lewis Equation* was referenced from the book: Mott, Robert L. *Machine Elements In Mechanical Design*. Second Edition: Prentice Hall, 1992. Section 11-11 entitled "Stress In Gear Teeth". Page 417. Thank You for using W. M. Berg, Inc. for all your mechanical needs. Come back soon!

Internet

<http://www.wmberg.com/Tools/>

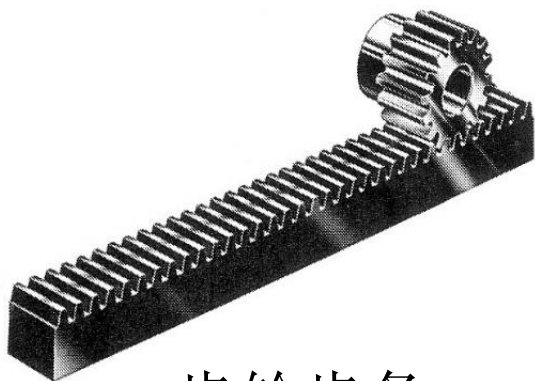
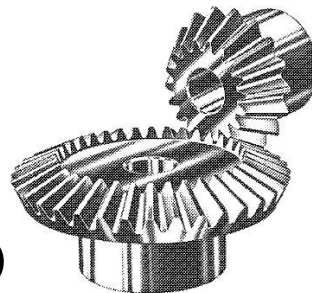
# 其他形式的齿轮



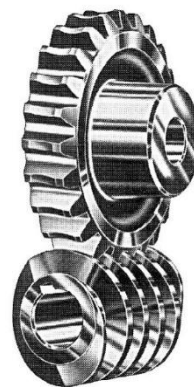
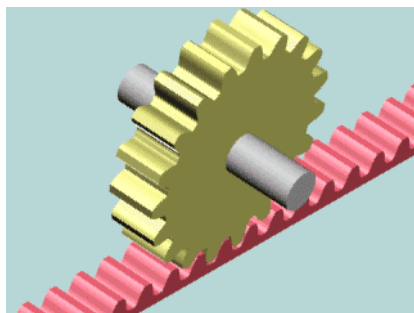
斜齿轮



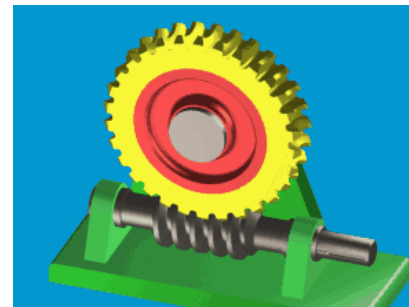
锥齿轮  
(伞齿轮)



齿轮齿条

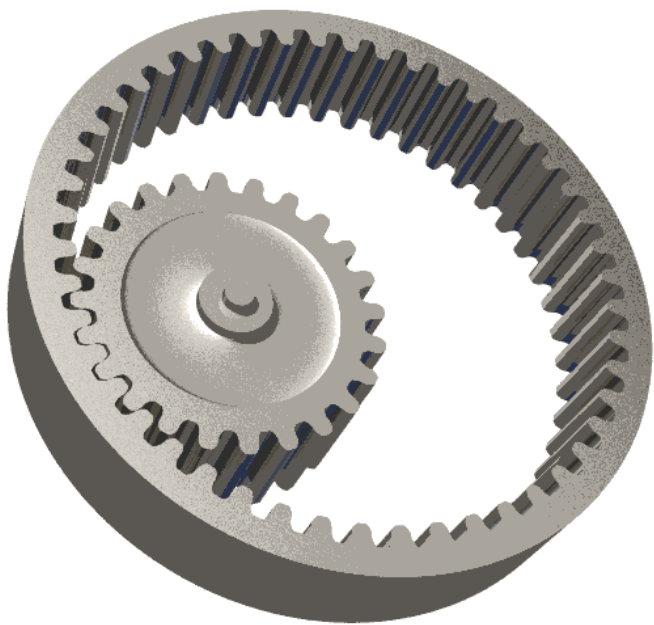


蜗轮蜗杆

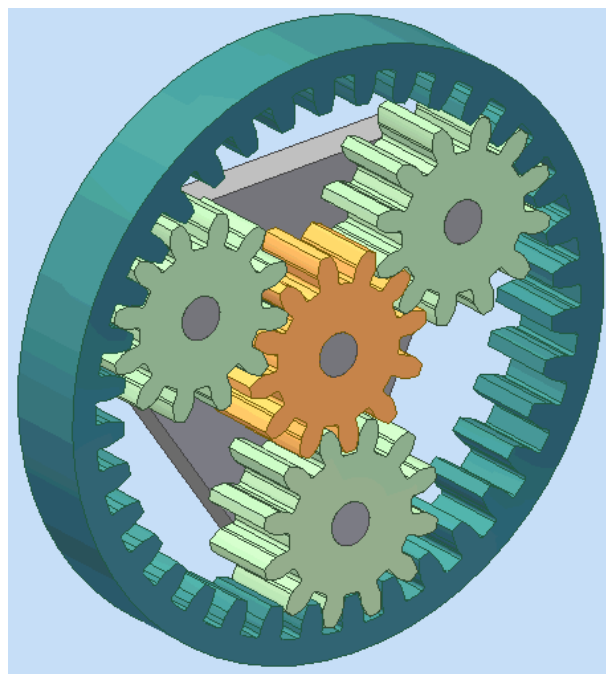


# 其他形式的齿轮

一般而言，啮合分成：**内啮合**和**外啮合**

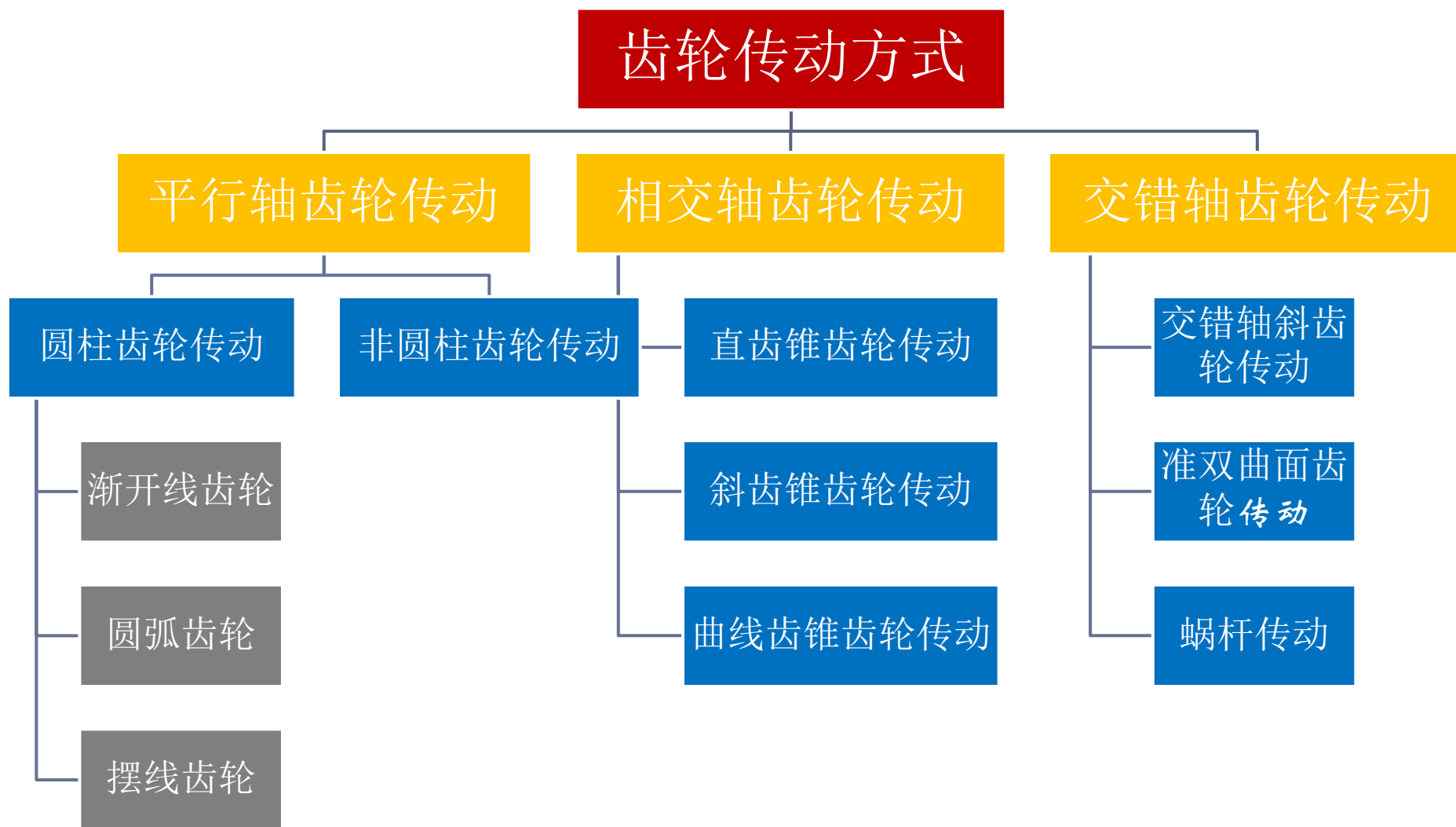


内啮合齿轮



行星齿轮传动

# 齿轮传动方式

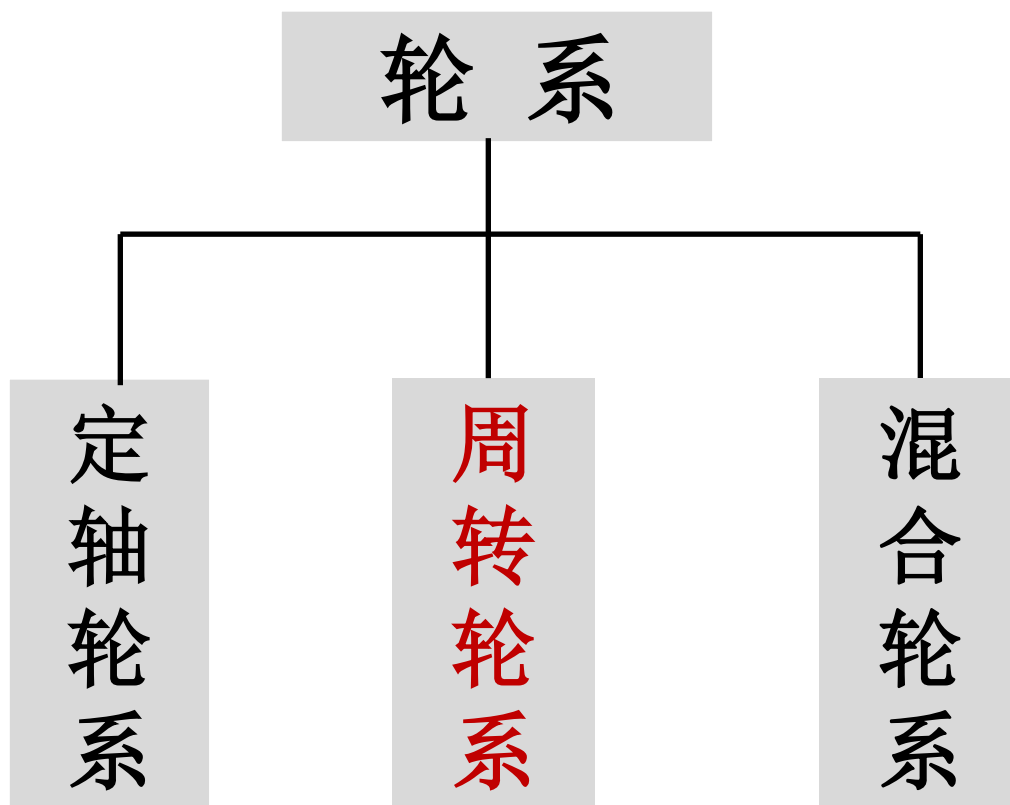


## 4. 齿轮轮系

# 齿轮轮系

---

- ▶ 由一系列齿轮所组成的传动系统。



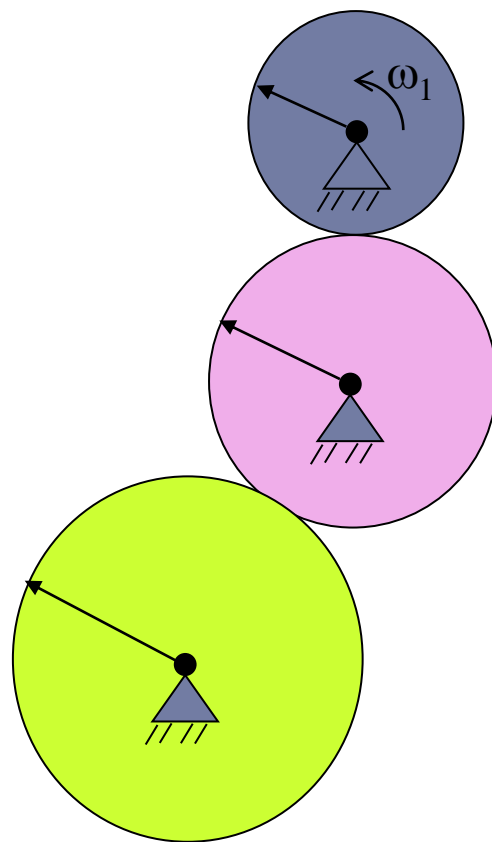


# 定轴轮系

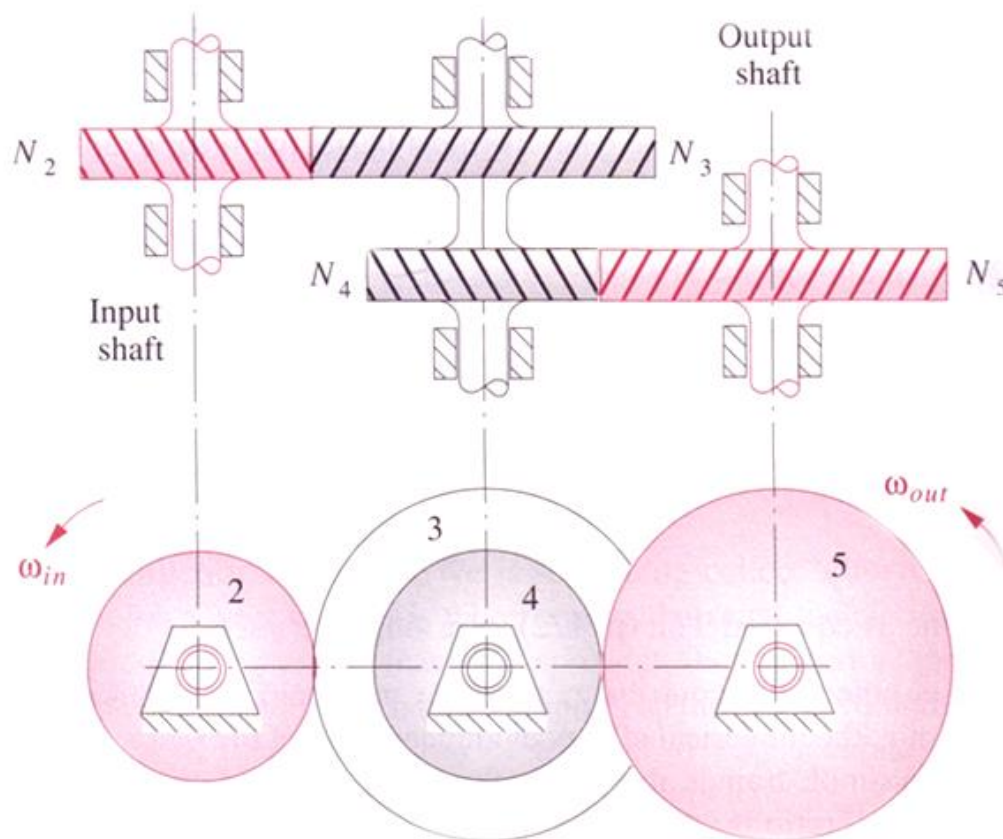
传动时，所有齿轮的几何轴线为固定的轮系。由一系列齿轮所组成的传动系统。

右图：“最简单”的齿轮箱：

- 1、所有转动轴都是平行的；
- 2、每个轴上只有一个齿轮。



# 定轴齿轮箱



- 1、所有转动轴可以是平行的或者交错的；
- 2、每个轴上可以有多个齿轮。

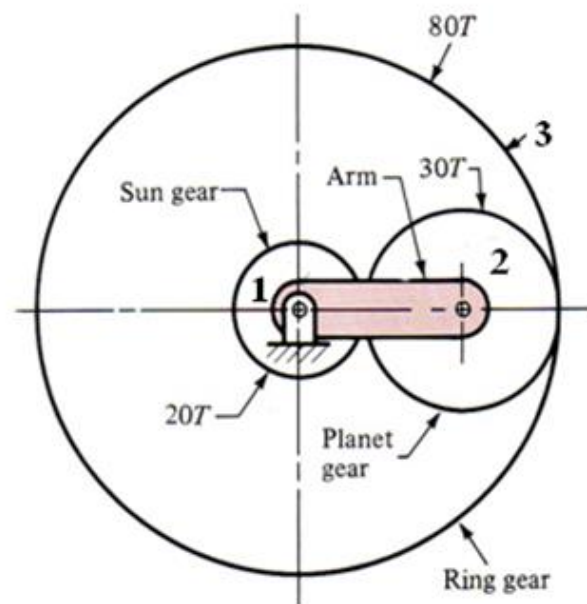
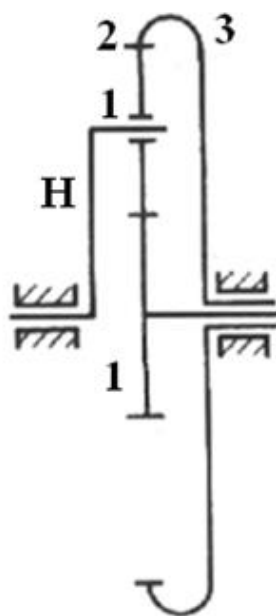
# 周转轮系

在齿轮系中，**至少有一个齿轮的轴线不固定**，而是绕另一个齿轮的轴线转动的轮系。

部件：1、3，称为太阳轮（可作为**输入/输出**）

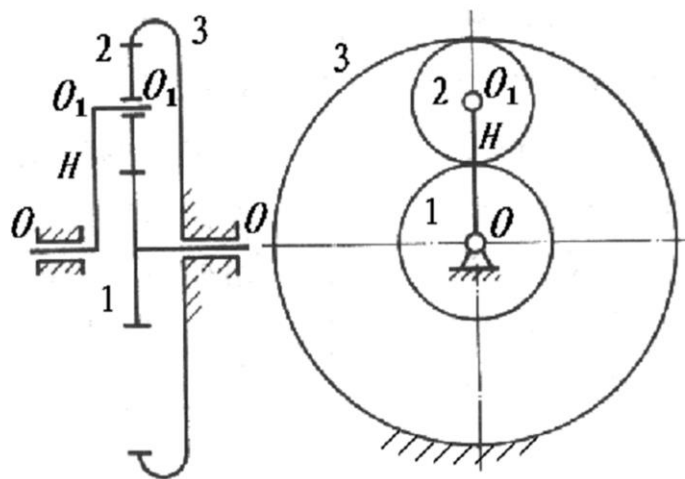
部件：H，称为行星架（可作为**输出/输入**）

部件：2，称为行星轮



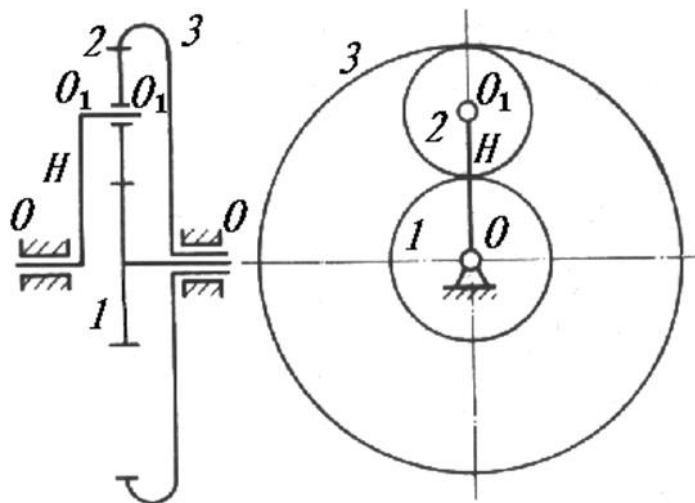
- 太阳轮与行星轮啮合
- 行星轮自转与公转
- 行星架支撑行星轮

# 周转轮系:



行星轮系

行星轮系有**1DOF**自由度，  
一个太阳轮必须件固定，  
只需给定一个独立的运动。

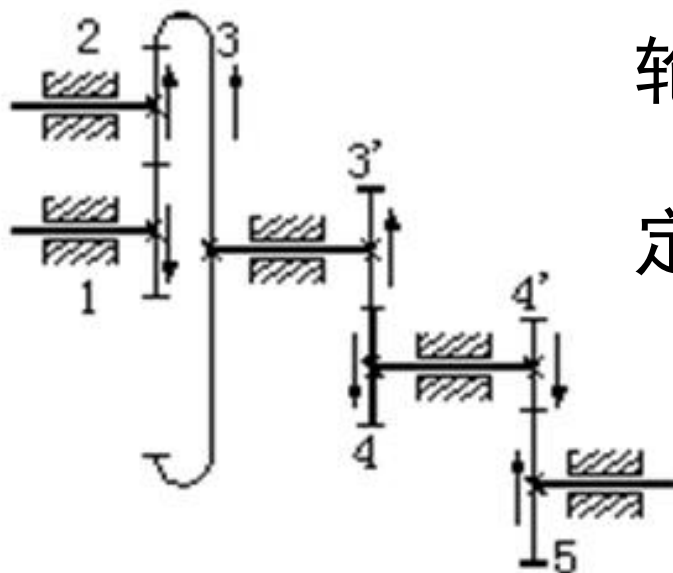


差动轮系

差动轮系有**2DOF**自由度；  
太阳轮均可动，且3个部件均  
可动，需要给定两个独立的运  
动，可用作运动的合成或分解。

# 减速比计算

定轴轮系的传动比  $\left\{ \begin{array}{l} 1、\text{传动比} \\ 2、\text{转向关系} \end{array} \right.$

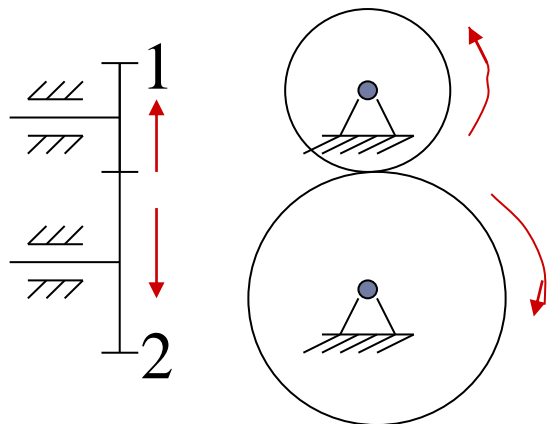


轮系的传动比:  $i_{\text{首末}} = \frac{\omega_{\text{首}}}{\omega_{\text{末}}} = \frac{z_{\text{首}}}{z_{\text{末}}}$

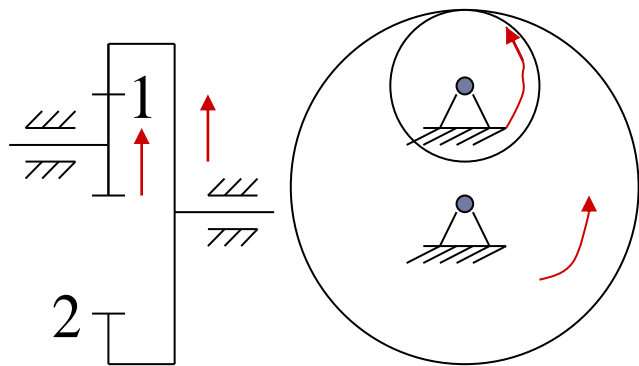
定轴轮系传动比:

$$i_{15} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \frac{\omega_2}{\omega_3} \frac{\omega_3}{\omega_4} \frac{\omega_4}{\omega_5} = \frac{\omega_1}{\omega_5}$$
$$= \frac{z_2}{z_1} \frac{z_3}{z_2} \frac{z_4}{z_3} \frac{z_5}{z_4} = \frac{z_5}{z_1}$$

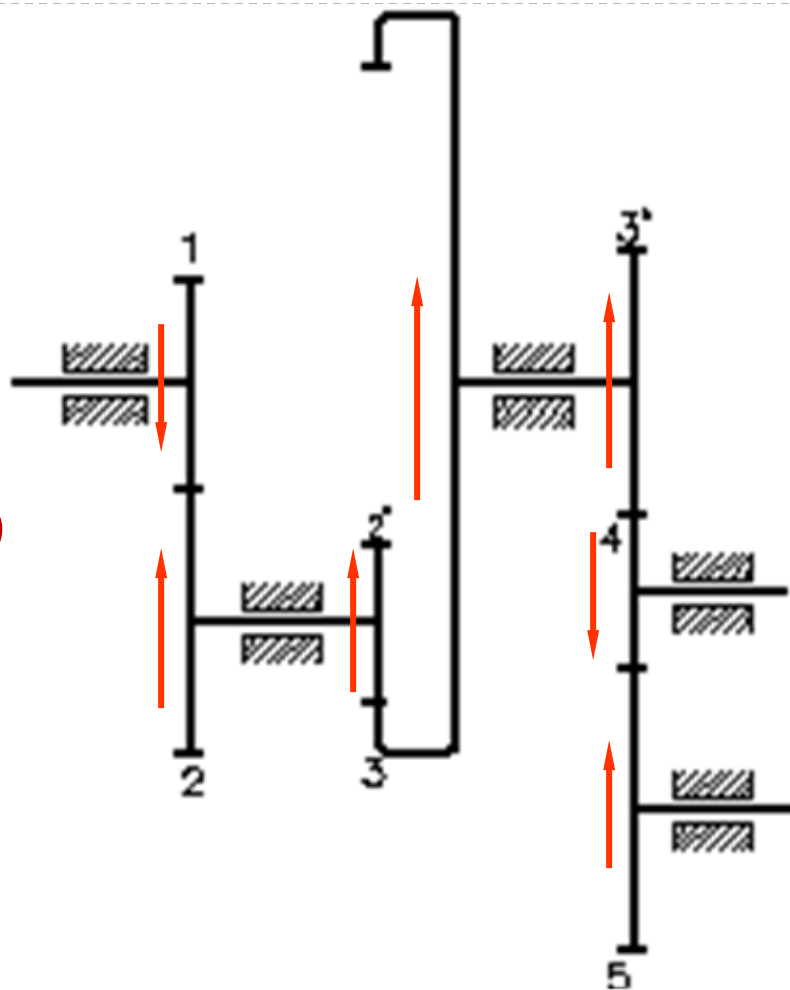
# 转向关系



外啮合：方向相反 (-)



内啮合：方向相同 (+)





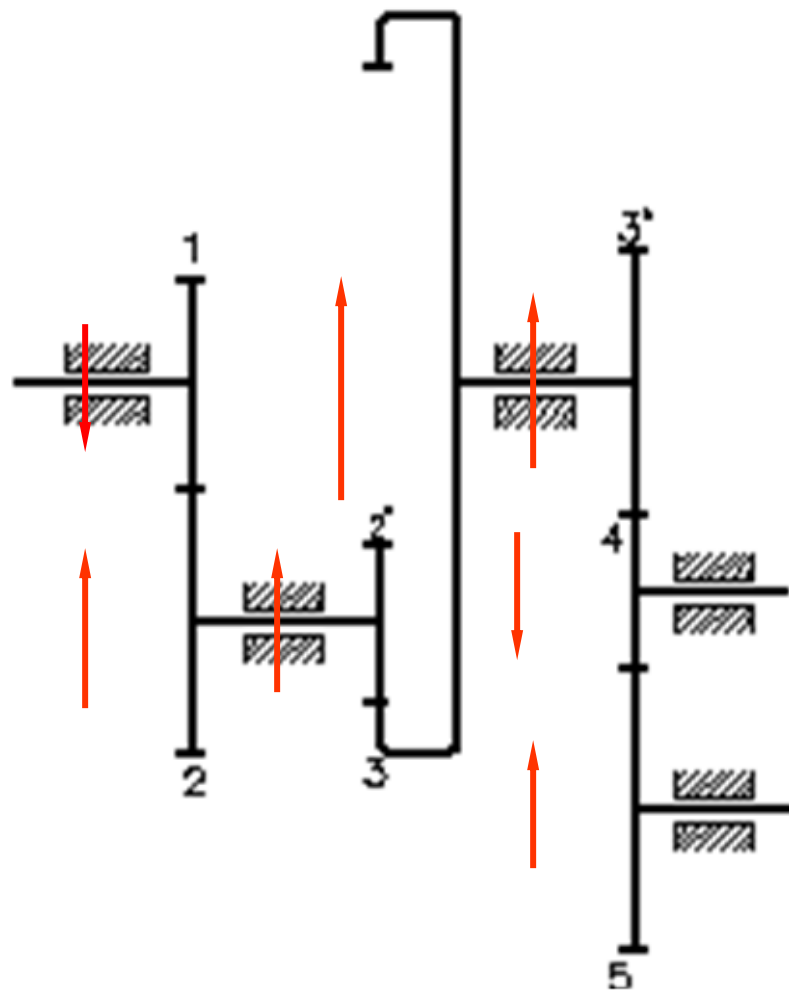
# 减速比计算

$$i_{1,2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{z_2}{z_1}$$

$$i_{2,3} = \frac{\omega_2}{\omega_3} = +\frac{z_3}{z_2}$$

$$i_{3',4} = \frac{\omega_{3'}}{\omega_4} = -\frac{z_4}{z_{3'}}$$

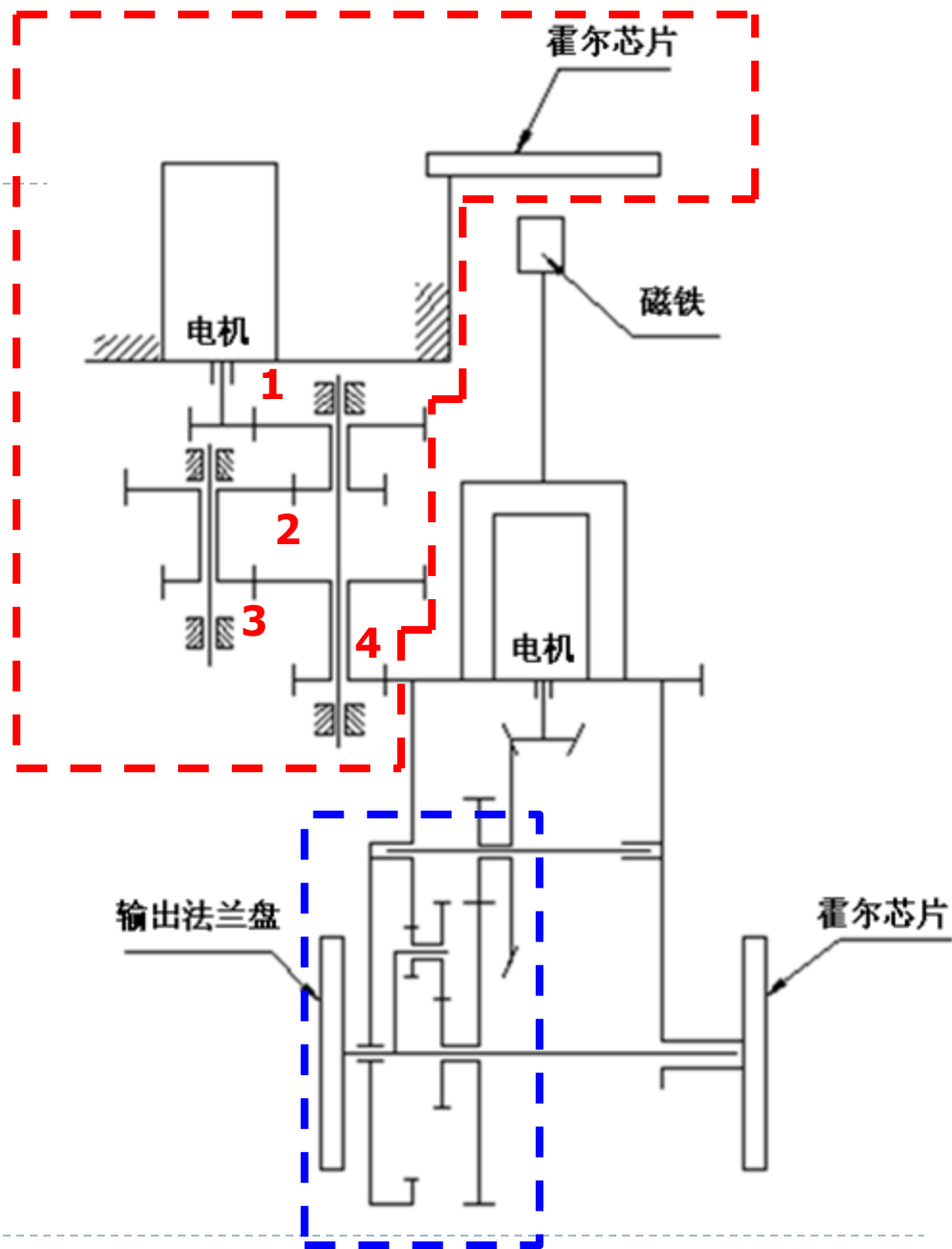
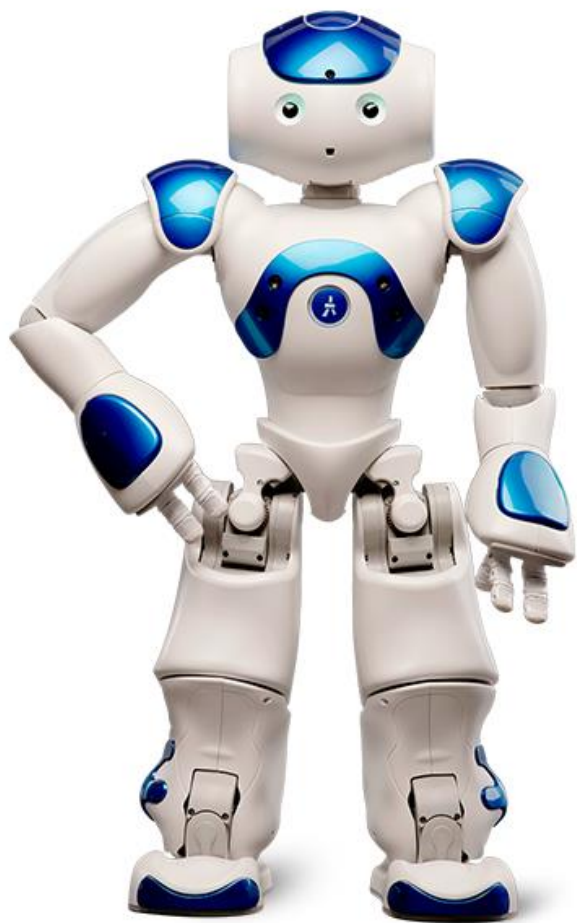
$$i_{4',5} = \frac{\omega_{4'}}{\omega_5} = -\frac{z_5}{z_{4'}}$$



$$i_{1,2} \cdot i_{2,3} \cdot i_{3',4} \cdot i_{4',5} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot \frac{\omega_{2'}}{\omega_3} \cdot \frac{\omega_{3'}}{\omega_4} \cdot \frac{\omega_{4'}}{\omega_5} = \left(-\frac{z_2}{z_1}\right) \left(+\frac{z_3}{z_{2'}}\right) \left(-\frac{z_4}{z_{3'}}\right) \left(-\frac{z_5}{z_4}\right)$$

$$\therefore i_{1,5} = \frac{\omega_1}{\omega_5} = i_{1,2} \cdot i_{2',3} \cdot i_{3',4} \cdot i_{4,5} = (-1)^3 \frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_3}{z_{2'}} \cdot \frac{z_5}{z_{3'}}$$

# 应用实例



---

**The End.**

**Thanks for your attention.**

