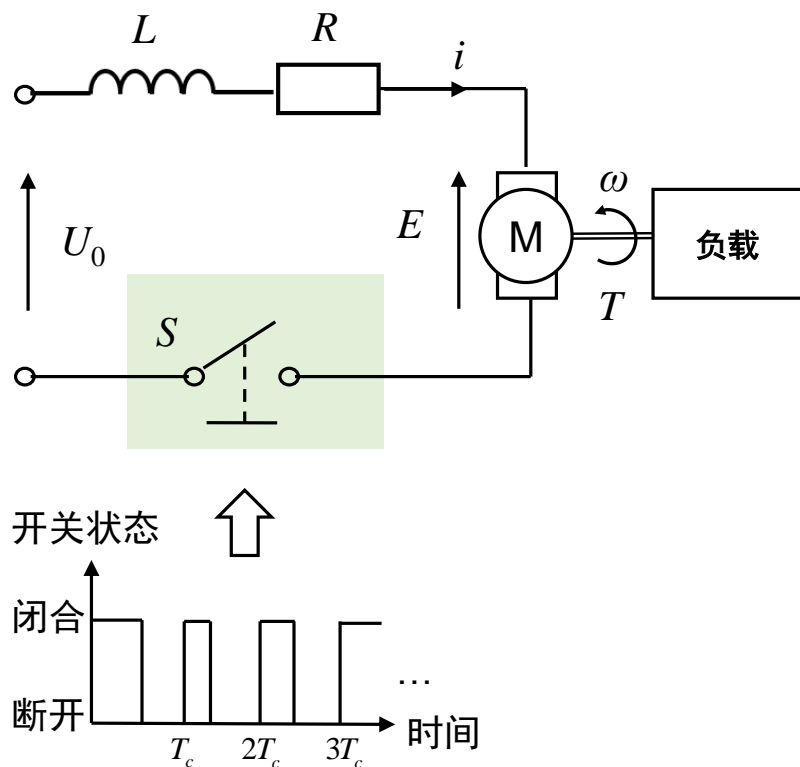


# 脉宽调制技术

基本原理：

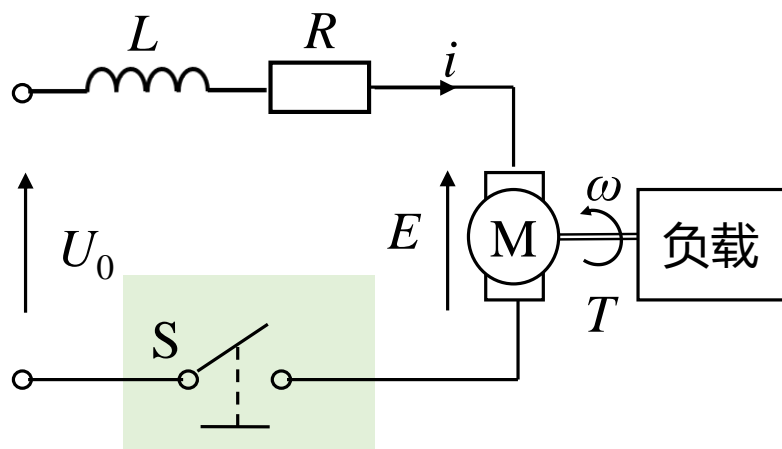
- 动力源直接给电机供电；
- 控制器输出的“小功率”控制信号
- 在控制信号作用下，电机驱动器把动力源的电压“调制”成“大功率”控制电压



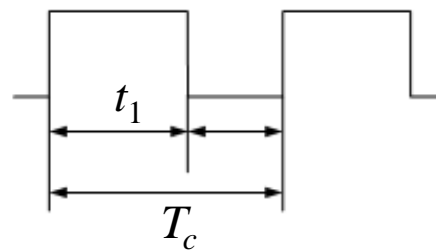
- 电路中串联**高速开关S**，把供给电机的连续电流离散化
- 电源供应的能量受到离散电流的调控
- 当**开关速度远大于电机响应速度**时，开关对电机转速平稳性的影响可以忽略不计

# 脉宽调制技术

- 开关闭合-断开一个周期时间, 记为  $T_c$
- 开关频率, 即开关的速度, 记为  $f_c = 1 / T_c$
- 在一个周期内, 开关闭合时间占整个周期的比例称为占空比  $d$



开关波形



$$d = t_1 / T_c \times 100\%$$

施加到电机的等效电压

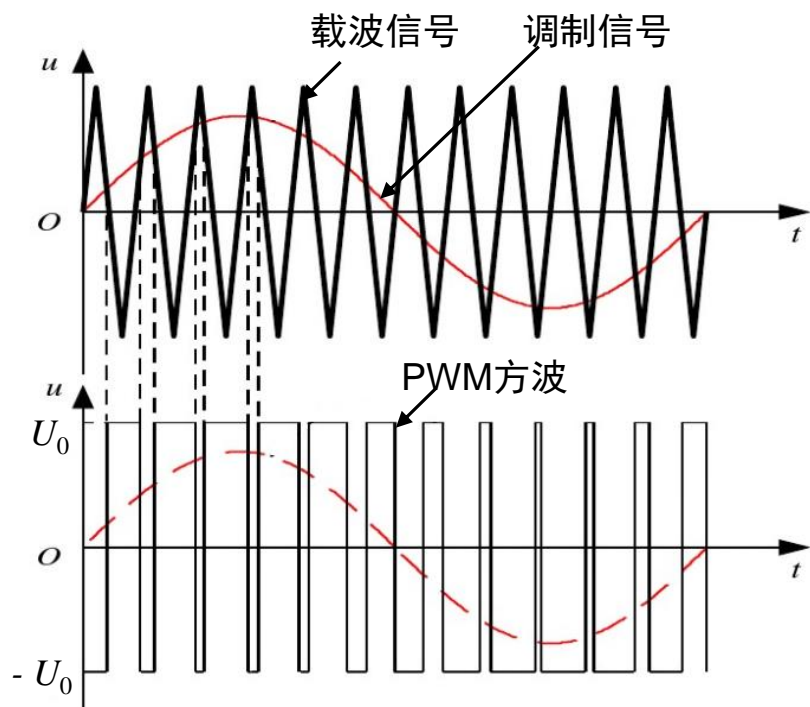
$$U_d \approx d \cdot U_0$$

- 控制占空比  $d$ , 即开关  $S$  的开合时间, 即可控制电机上的电压, 实现电机调速

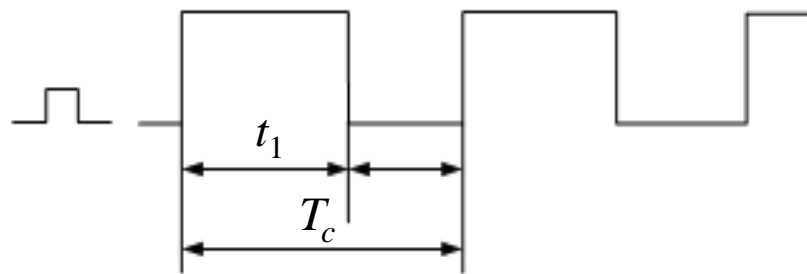
# 脉宽调制技术

- 把连续变化的控制电压转化为**固定频率的方波信号**，方波占空比与电压大小成正比，利用方波信号控制电机调速的技术称为脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM)控制技术
- PWM控制信号可以用MCU生成，通过程序调节占空比，无需使用模拟器件

脉宽调制技术产生方波



MCU直接产生占空比可调的方波



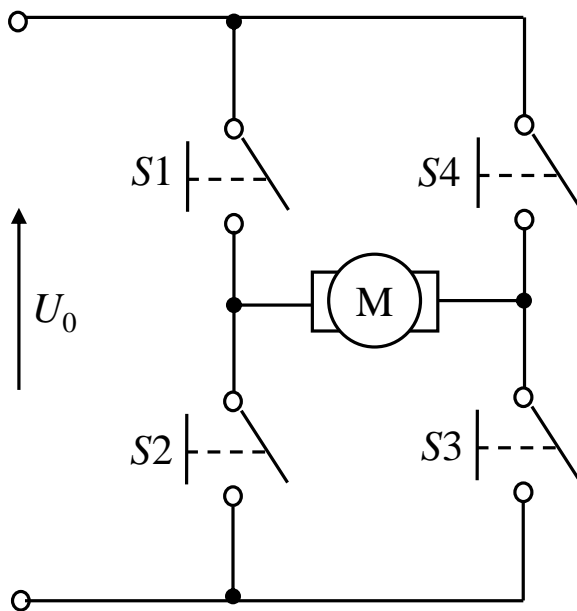
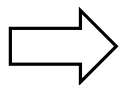
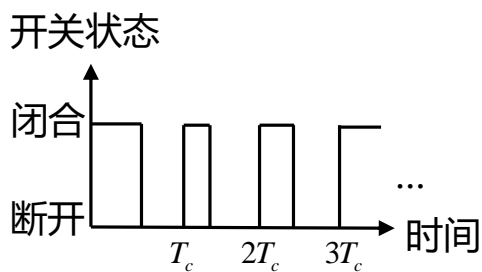
$$U_d \approx d \cdot U_0$$

方波频率通常为1KHz ~ 80KHz

# 脉宽调制技术

带有正反转换向功能的调速原理：

- 采用4个高速开关有序闭合、断开，可实现电机旋转换向



H桥电路

$S1$ 、 $S3$ 闭合， $S2$ 、 $S4$ 断开，则电机正转；

$S2$ 、 $S4$ 闭合， $S1$ 、 $S3$ 断开，则电机反转；

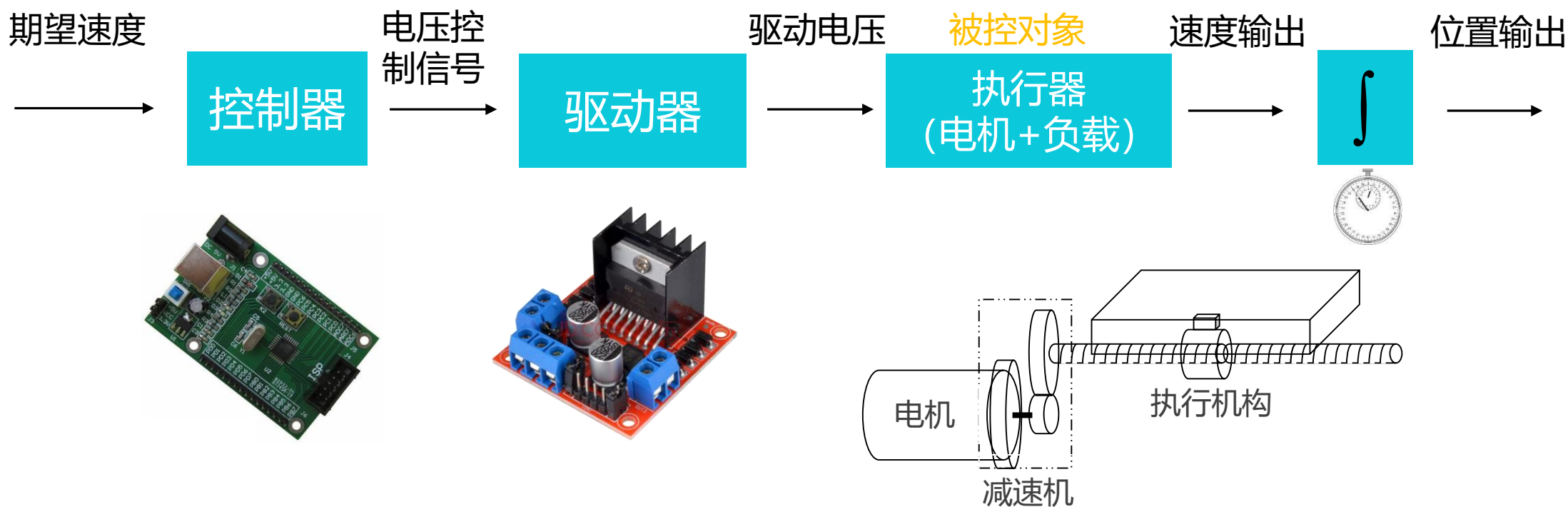
# 04

## 直流电机控制技术

- 开环控制
- 闭环控制
- 伺服的替代方案

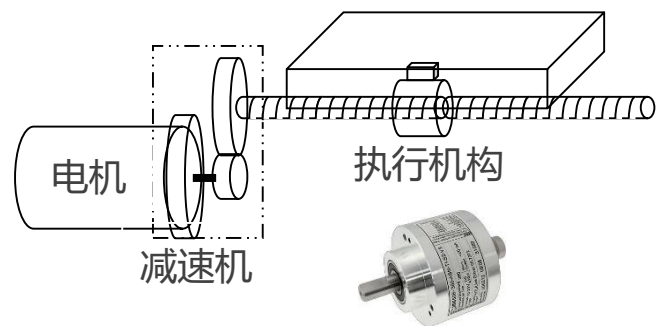
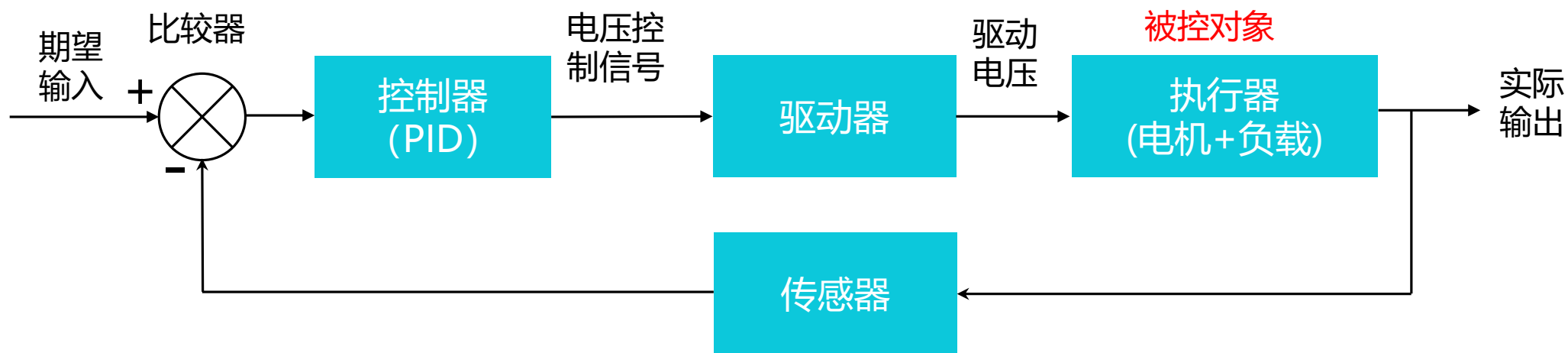
# 开环控制

- 利用电压与速度的对应关系，直接改变输入电压实现转速控制
- 利用速度对时间的积分估计电机转过的角度，实现位置控制



# 闭环控制

- 使用传感器检测速度（或位置）的实际输出值，以期望速度值与实际速度值之间的差值作为输入，经过控制器处理后生成电压控制信号，又称闭环反馈控制或伺服控制



## 伺服的替代方案

闭环控制的优缺点：

- 优点：调速“刚性”好，精度高，响应快，抗扰动能力强
- 缺点：系统复杂，可靠性低，成本高

在动态性能要求不高的场合，为降低系统应用的复杂度，可采用步进电机或舵机来替代伺服系统



典型步进电机与驱动器

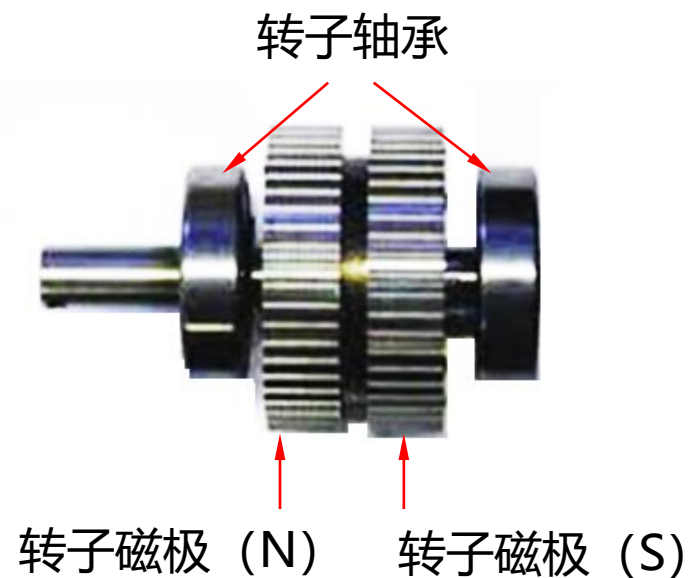
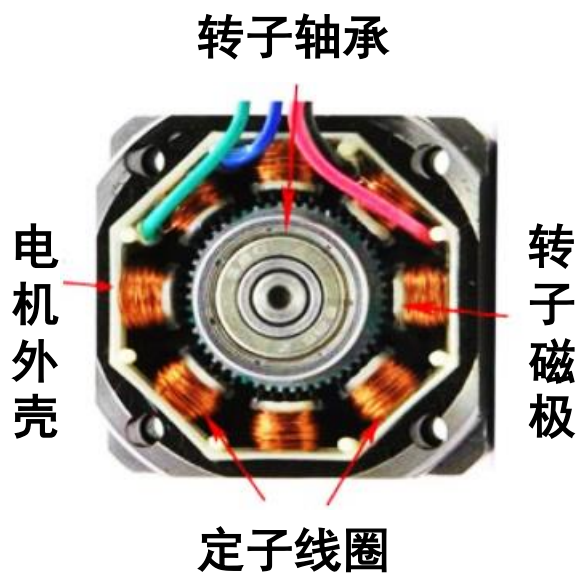
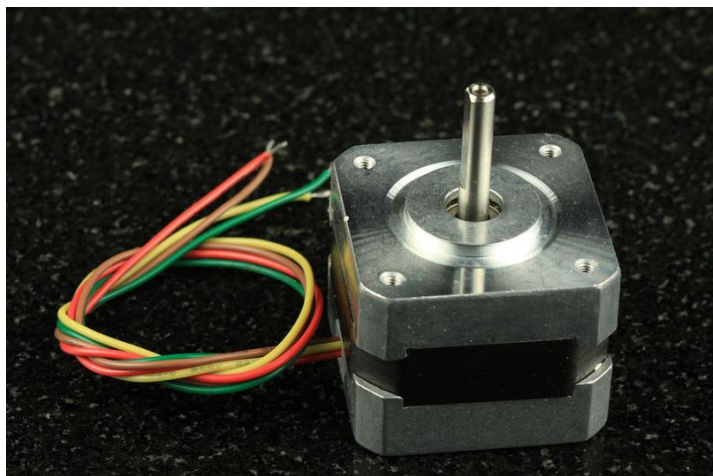


典型舵机



# 步进电机

- 步进电机通过脉冲信号进行控制，每输入一个脉冲信号，步进电机前进一步
- 输出转角与输入的脉冲的个数成线性关系，因此可以用开环控制的方式实现较为精准的速度和位置控制



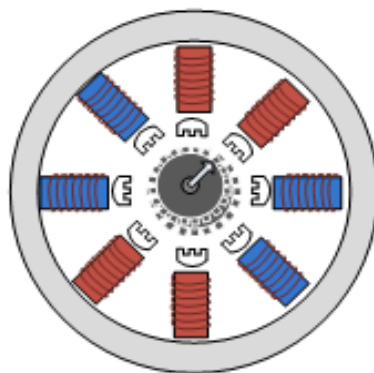
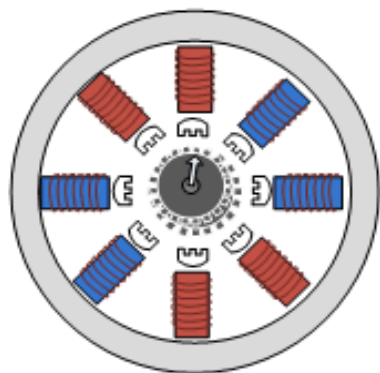
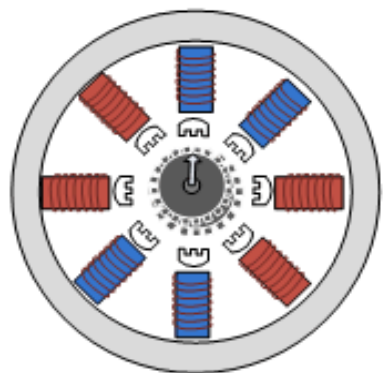
# 步进电机

## 步距角

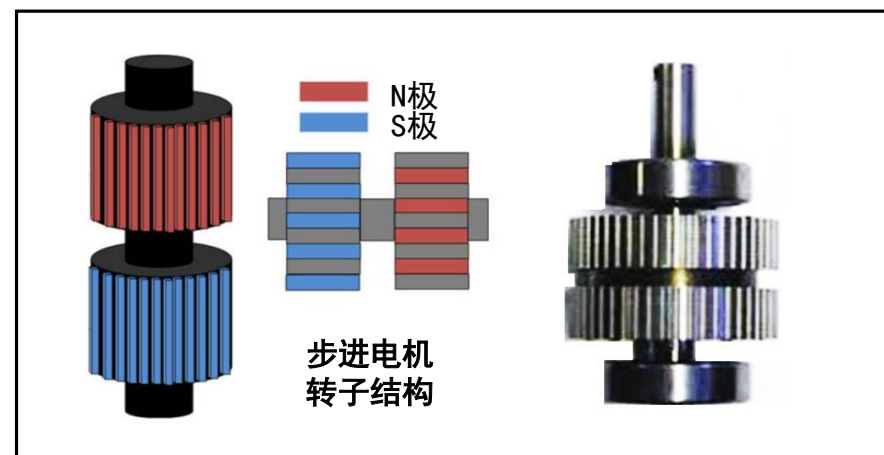
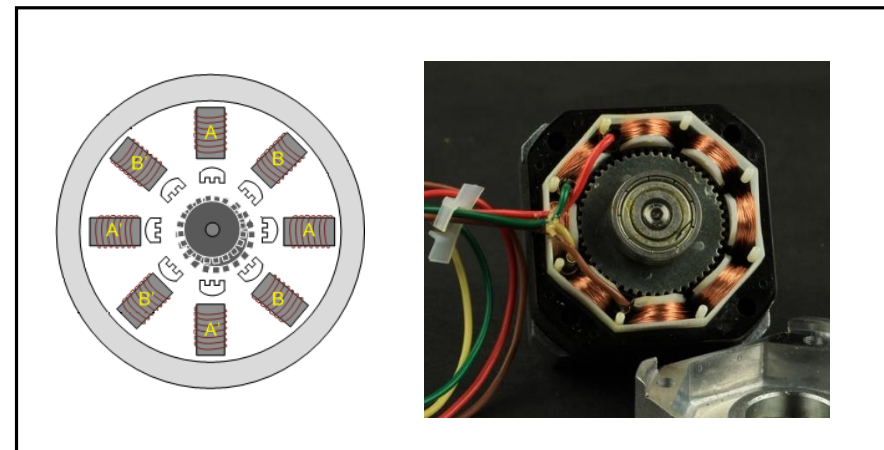
- 电机每通过一个电脉冲，转子转过的角度 $\theta_s$
- 常见的步距角为 $1.8^\circ$  ( $0.9^\circ$ ,  $3.6^\circ$ ,  $7.5^\circ$ )等

步距角为 $1.8^\circ$ ，则需要200个脉冲电机旋转1圈

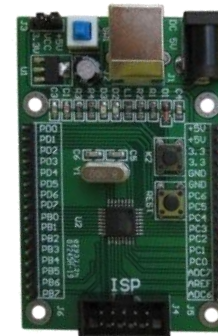
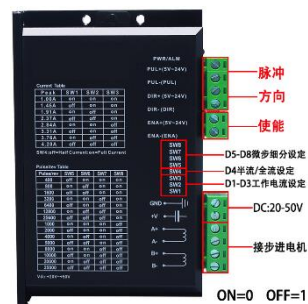
步距角为 $7.5^\circ$ ，则需要48个脉冲电机旋转1圈



■ N极    ■ S极



### 3. 步进电机 + 步进驱动器 + 伺服控制器



- 成本低
- 易集成
- 高精度位置伺服

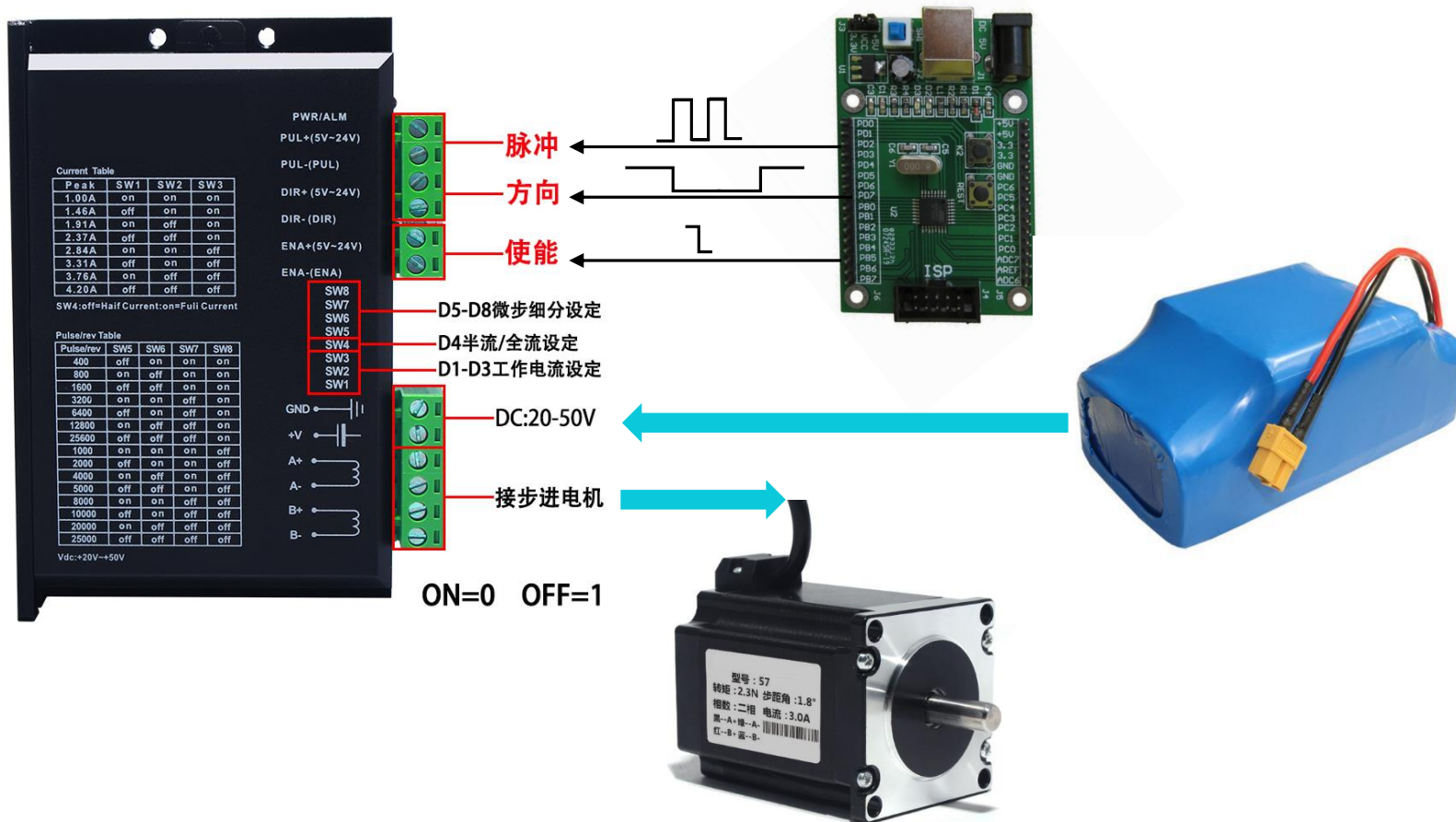


3d打印机（直角坐标架）



轻型机械臂

### 3. 步进电机 + 步进驱动器 + 伺服控制器



优点:

- ✓ 可实现精密位置控制
- ✓ 简单易用
- ✓ 成本低

缺点:

- ✓ 存在“丢步”现象导致精度下降
- ✓ 对负载波动适应性差

# 步进电机

- **速度控制：**用脉冲信号控制电机绕组依次导通，改变脉冲频率 $f$ ，即可实现速度控制

转动速度：

$$\omega = f \theta_s (\text{deg} / s) = \frac{1}{6} f \theta_s (\text{rpm}) \quad (4-5)$$

- **位置控制：**由于步距角是固定值，因此改变脉冲的个数 $N$ ，即可实现位置控制

转动位置：

$$S = N \theta_s \quad (4-6)$$

- **细分功能：**如果步进电机驱动器带有细分功能，等效为步距角减小，则控制精度可进一步提升

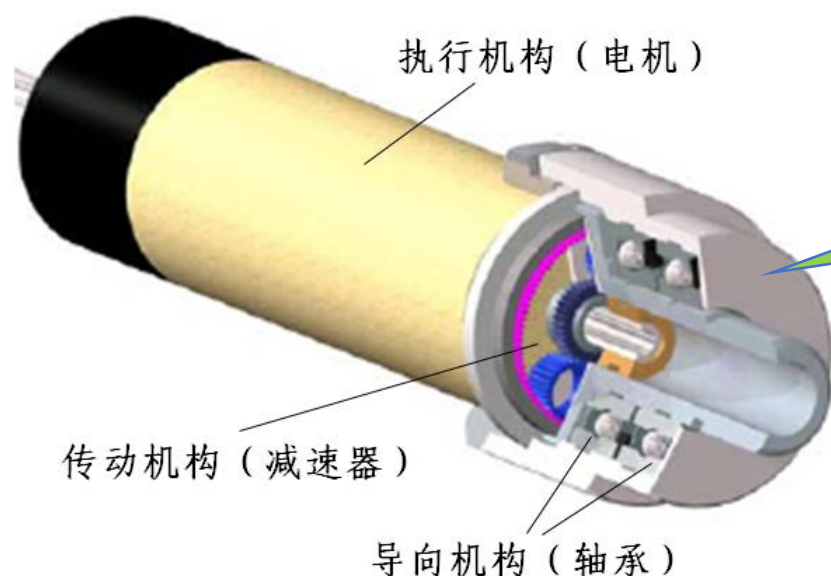
经过 $m$ 级细分后：

$$\omega = \frac{\theta_s}{m} f \quad S = \frac{\theta_s}{m} N \quad (4-7)$$



# 传动比（减速比）

**传动比**，也即减速比。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**

功率 = 扭矩 × 转速

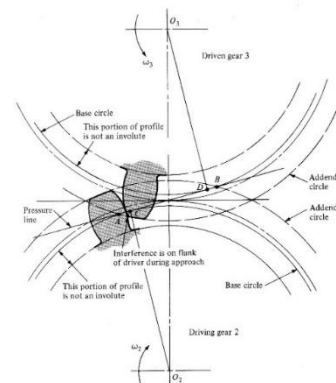
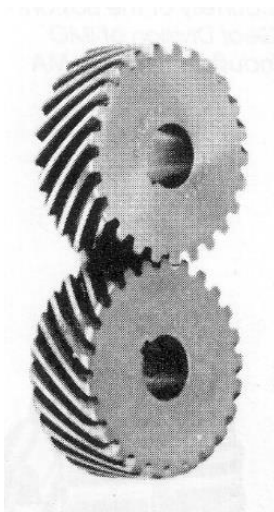
例：电机输入减速箱的速度 $1000\text{n/min}$ ，输出速度 $10\text{n/min}$ ，则减速比  $i = 1000/10 = 100$

如电机输出力矩为 $T_{in} = 0.1\text{Nm}$ ，则输出力矩为 $T_{out} = T_{in} * i = 0.1\text{Nm} * 100 = 10\text{Nm}$

# 齿轮：术语、几何、齿轮系与强度

**齿轮传动：** 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。



# 渐开线齿形

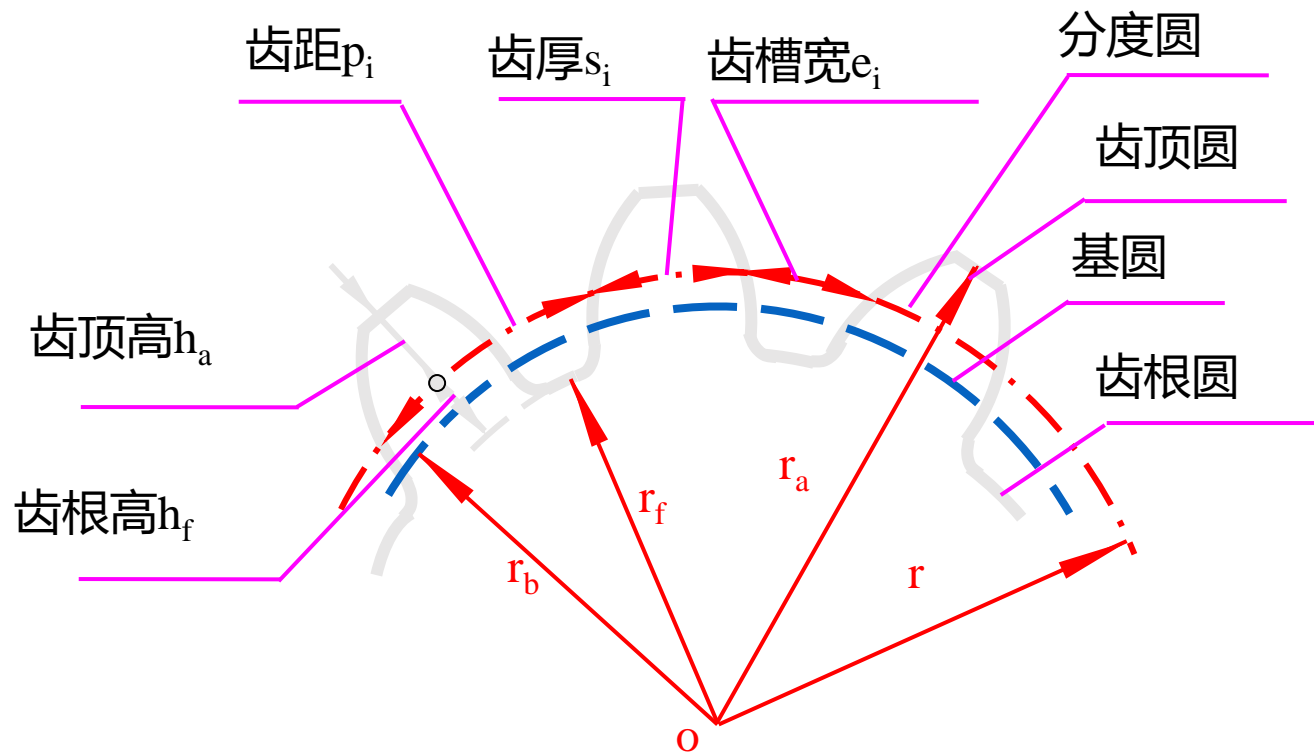
齿顶圆 ( $d_a$ )

齿根圆 ( $d_f$ )

## 分度圆 (d)

基圆 ( $d_b$ )

齿数 (z)



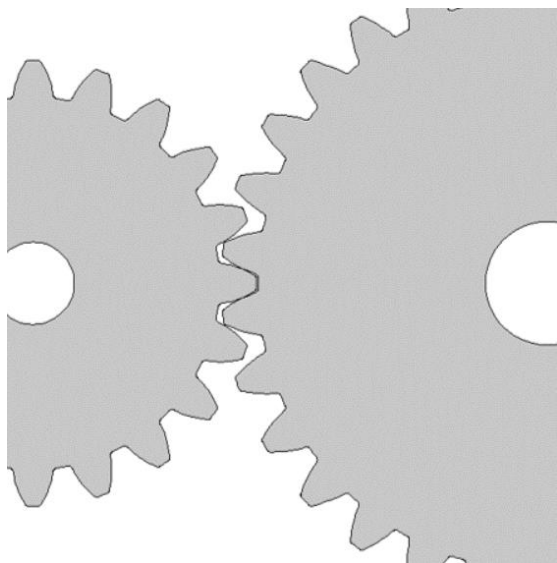
同一圆周上  $p_i = s_i + e_i$

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 $d$** : 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。**
- **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。**



- 国标压力角的标准值为 $20^\circ$
- 两齿轮正确啮合的条件：模数相等，啮合处压力角相等

# 齿轮基本参数的计算公式

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：

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

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

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

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

# 定常传动比

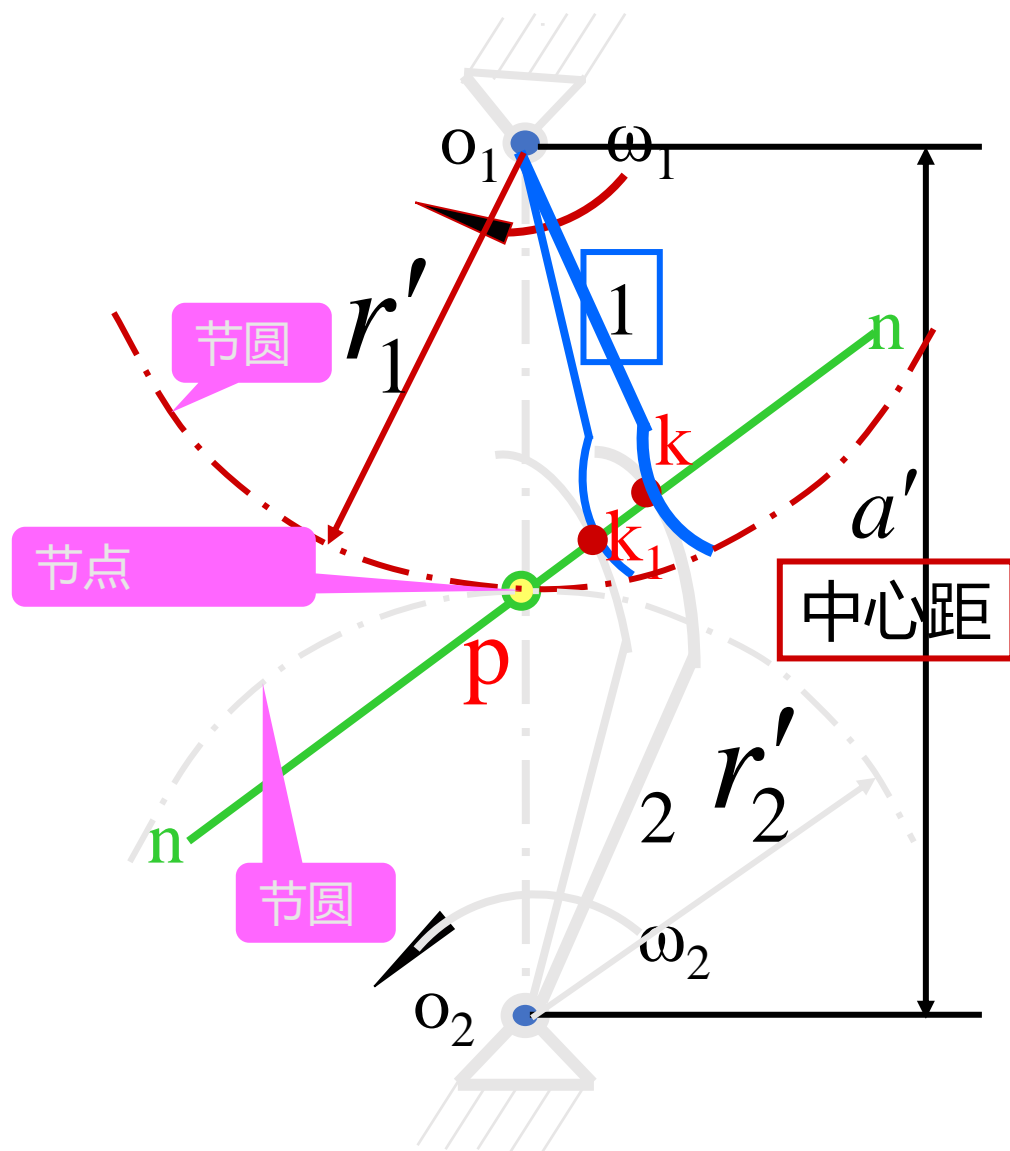
对齿轮传动的基本要求是保证瞬时传动比:

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

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

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

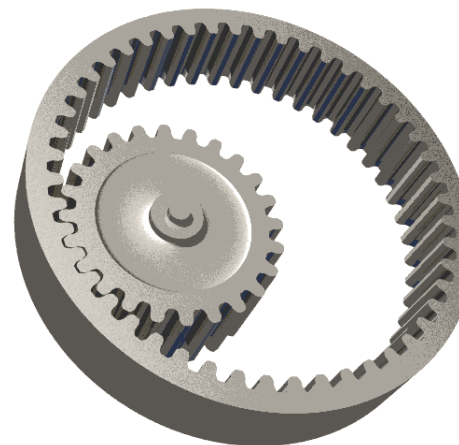
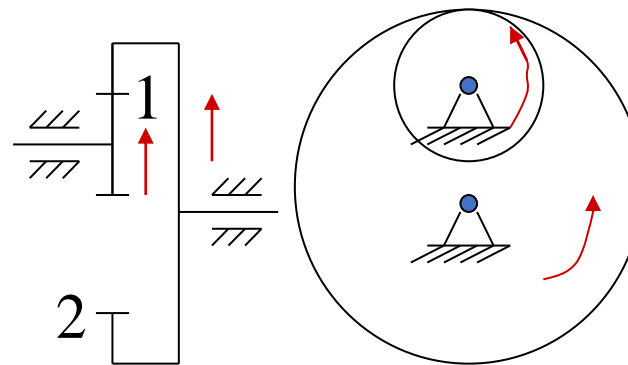
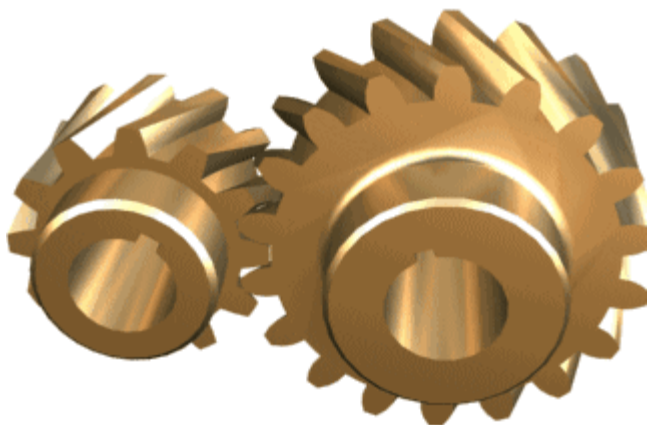
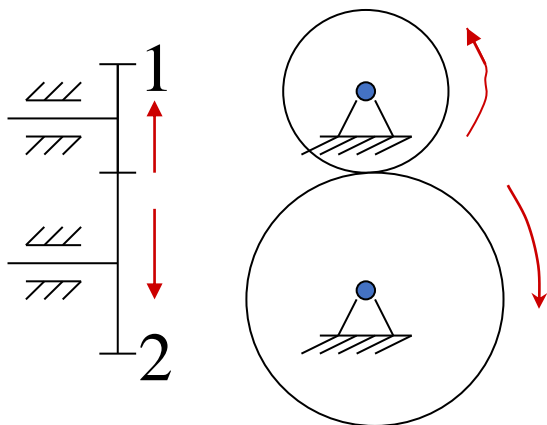
要使两齿轮的瞬时传动比为一常数，则不论两齿廓在任何位置接触，过接触点所作的两齿廓公法线都必须与连心线交于一定点p。



# 齿轮的啮合形式

外啮合齿轮：方向相反（-）

内啮合齿轮：方向相同（+）

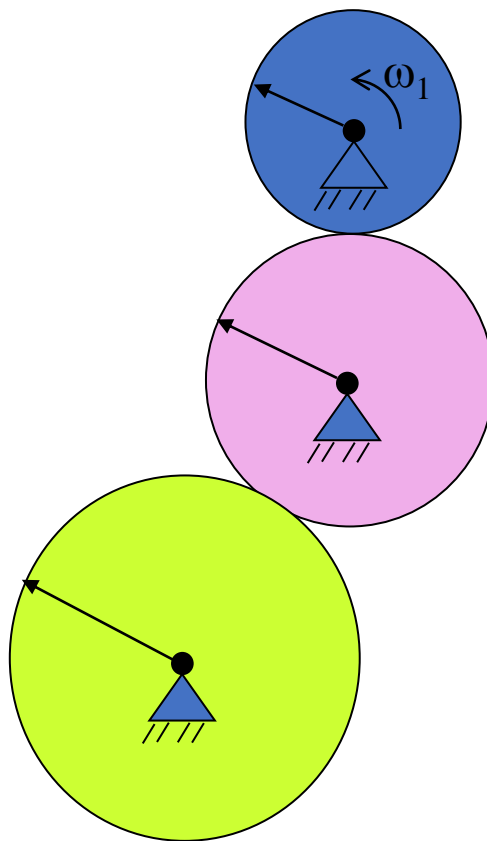


# 定轴轮系

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。

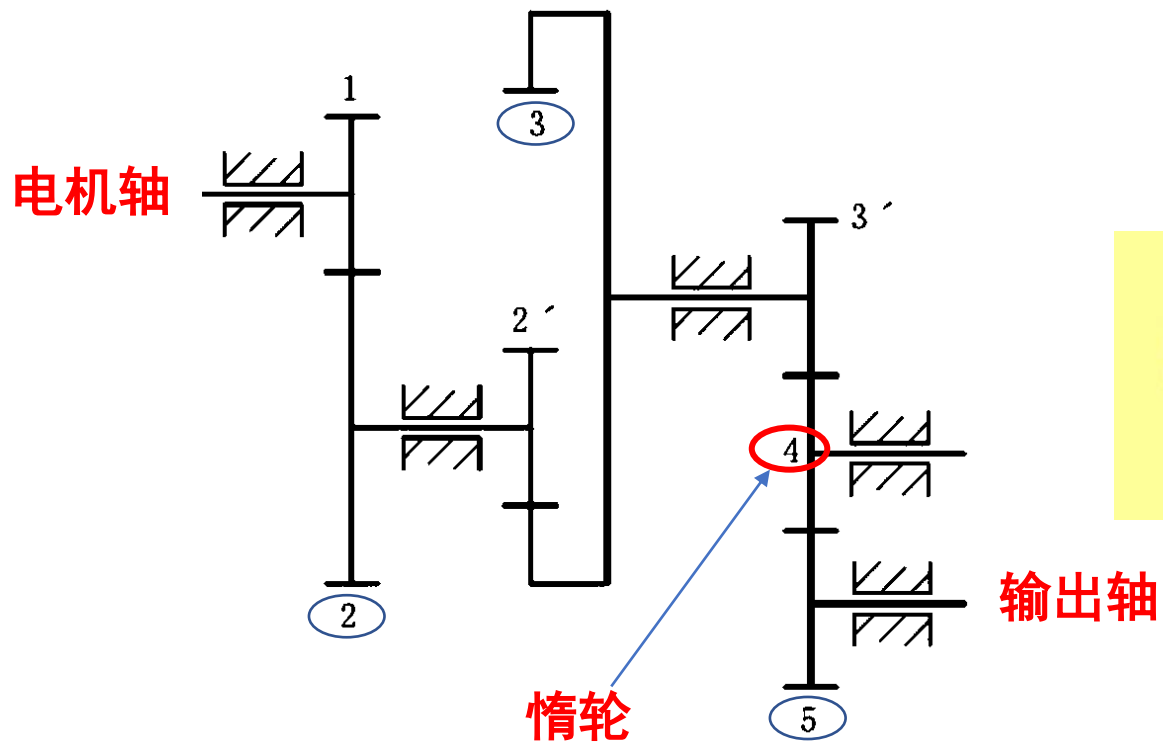
**“最简单”的齿轮箱：**

- 1、所有转动轴都是平行的；
- 2、每个轴上只有一个齿轮。



# 定轴轮系传动比（减速比）

$$i_{1k} = \frac{n_1}{n_k} = \frac{\text{轮系中所有从动轮齿数}}{\text{轮系中所有主动轮齿数}} \quad \begin{matrix} \text{积} \\ \text{积} \end{matrix}$$



$$i_{15} = \frac{n_1}{n_5} = \frac{z_2 z_3 z_4 z_5}{z_1 z_{2'} z_{3'} z_4}$$

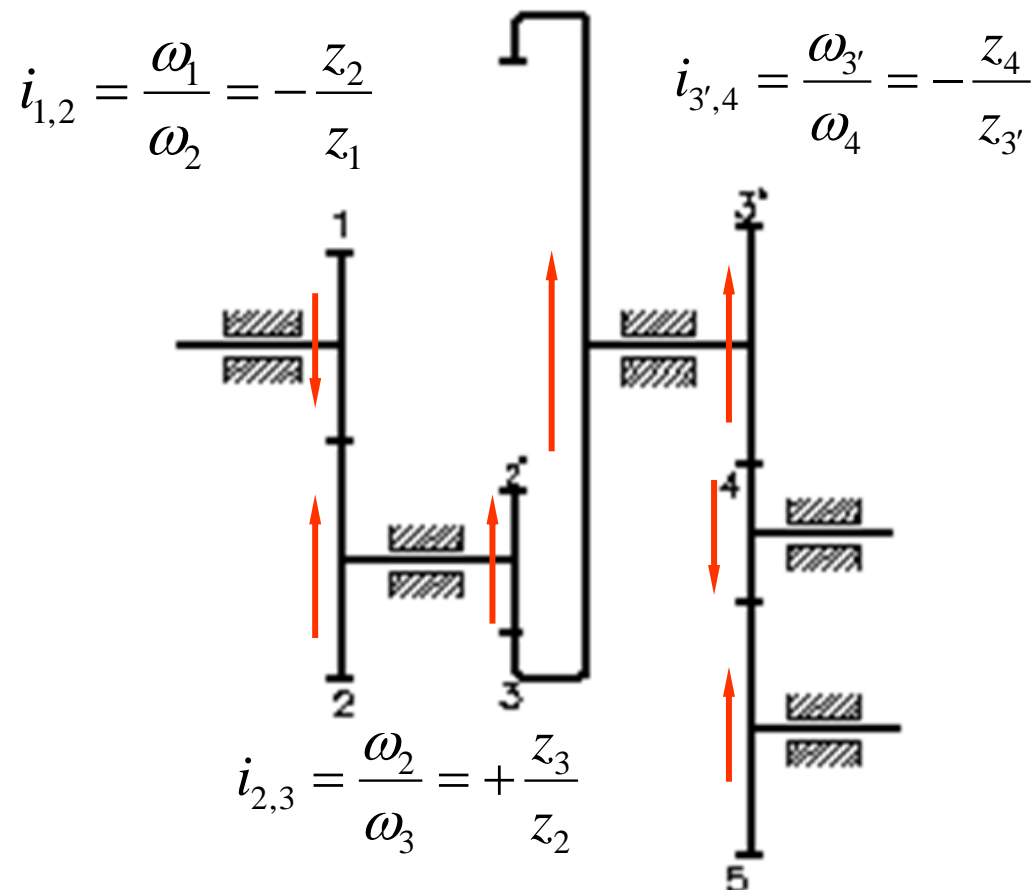
# 定轴轮系传动比（减速比）

定轴轮系的传动比 { 1、传动比  
2、转向关系

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

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

$(-1)^m$ ,  $m$ 表示外啮齿的对数



# 连杆传动特点

## 优点：

- （1）连杆机构中的运动副一般均为低副（连杆机构也称低副机构），低副元素之间为面接触，压强较小，承载能力较大；
- （2）可改变各构件的 长度使得从动件得到不同的运动规律；
- （3）可以设计出各种曲线轨迹。

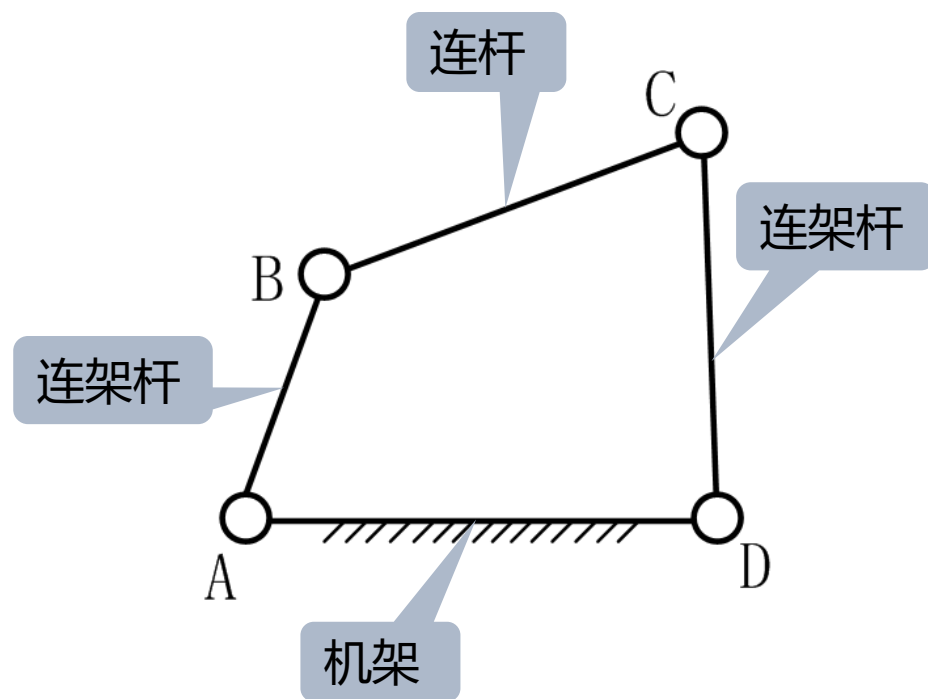
## 缺点：

- （1）需要经过中间构件传递运动，传递路线较长，易产生较大的误差，同时，使得机械效率降低；
- （2）质心在作变速运动，所产生的惯性力难于用一般平衡方法加以消除，易增加机构的动载荷，不适宜高速运动（相对于齿轮而言）。



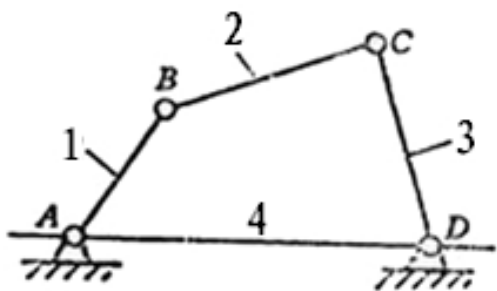
# 连杆的组成

- 铰链四连杆是平面四杆机构的基本形式，其他形式可以认为是它的演化形式。
- 在右图机构中：
  - AD为**机架**
  - BC为**连杆**
  - AB、CD与机架相连为**连架杆**
- 能做整周回转者为**曲柄机构**
- 只能一定范围摆动的为**摇杆机构**

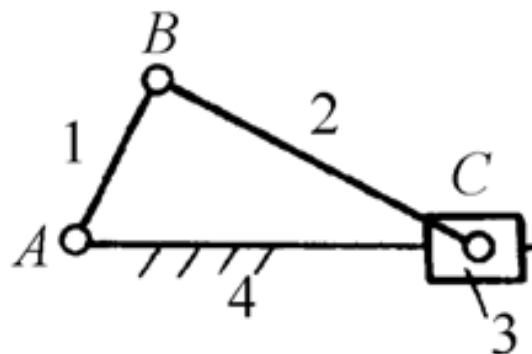


## 5.2 平面四连杆机构

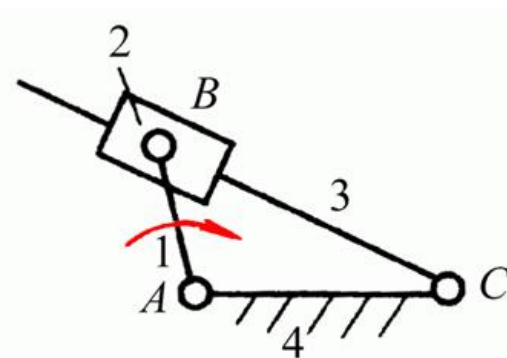
- 常见的四连杆机构



铰链四连杆机构



曲柄滑块机构



导杆机构

- 图中1为原动件，中间件2称为连杆，3为从动件
- 原动件1的运动经过一个不直接与机架相联的中间构件2才能传动从动件3