

专业课强化精讲课程

第5讲

第八章 齿轮传动（一）

一、齿轮传动的组成及工作原理：



1. 组成：主动轮、从动轮

2. 工作原理：齿轮传动是啮合传动，靠主动轮齿和从动轮齿的相互啮合来传递运动和动力。

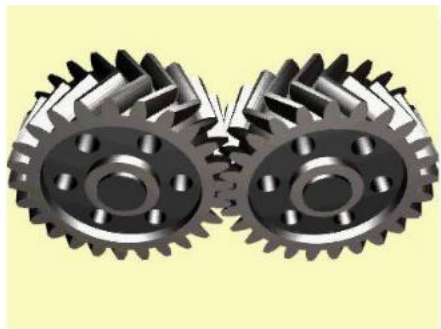
二、齿轮传动的特点：

1. 效率高；
2. 结构紧凑；
3. 工作可靠、寿命长；
4. 传动比稳定；
5. 可用于传递空间任意两轴之间的运动和动力；
6. 制造安装精度要求高，因此成本高；
7. 不宜传动距离过大的场合。

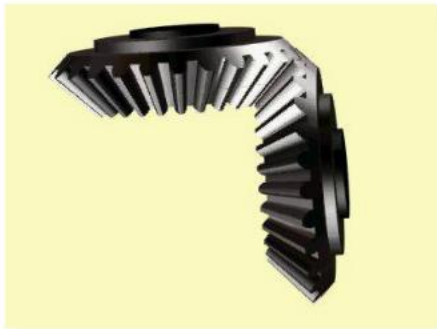
三. 齿轮传动的类型:

1. 按装置型式分: 1) 开式齿轮传动
2) 闭式齿轮传动
2. 按速度的大小分: 高速 ($v > 15\text{m/s}$)
低速 ($v < 3\text{m/s}$)
3. 按载荷大小分: 轻载
重载
4. 按齿面的软硬分: 硬齿面 ($\text{HB} > 350$ 或 $\text{HRC} > 38$)
软齿面 ($\text{HB} \leq 350$ 或 $\text{HRC} \leq 38$)
5. 按齿廓曲线分: 渐开线齿轮传动 圆弧齿轮传动
摆线齿轮传动 其他

6. 按轴的布置分：
平行轴齿轮传动
相交轴齿轮传动
交错轴齿轮传动



平行轴齿轮传动



相交轴齿轮传动



交错轴齿轮传动

7. 按齿轮轮齿齿向分：
直齿轮传动
斜齿轮传动
人字齿轮传动

对齿轮传动的要求：

1. 传动要平稳、准确
2. 要具有足够的承载能力

四、齿廓啮合的基本定律

根据三心定律可知：P点为相对瞬心。

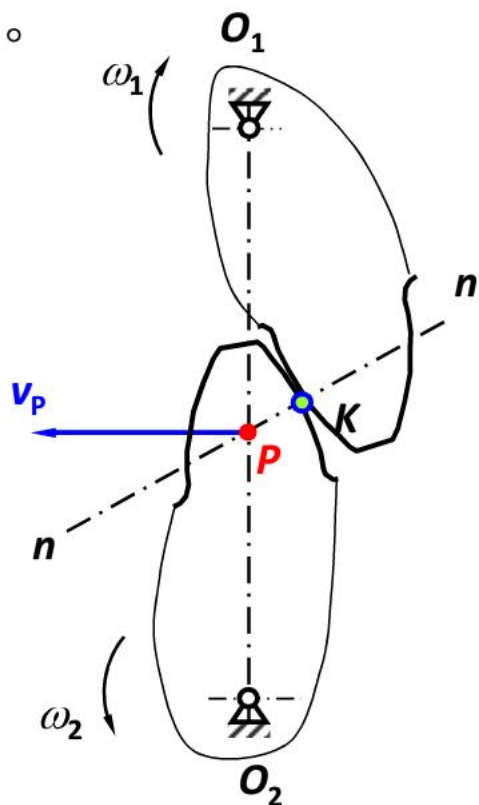
$$\because V_P = \omega_1 \cdot \overline{O_1P} = \omega_2 \cdot \overline{O_2P}$$

$$\therefore i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\overline{O_2P}}{\overline{O_1P}}$$

从上面的分析可看出：互相啮合的一对齿轮在任一位置时的传动比，都与连心线 O_1O_2 被其啮合齿廓在接触处的公法线所分成的两段成反比。

——齿廓啮合基本定律

该定律表明了齿轮传动比与齿廓曲线的关系。



五、渐开线方程

1. 压力角 α_k

K点所受正压力的方向(渐开线法线方向)与K点速度方向线之间所夹的锐角。

在 $\triangle KOB$ 中, 有: $r_b = r_k \cos \alpha_k$

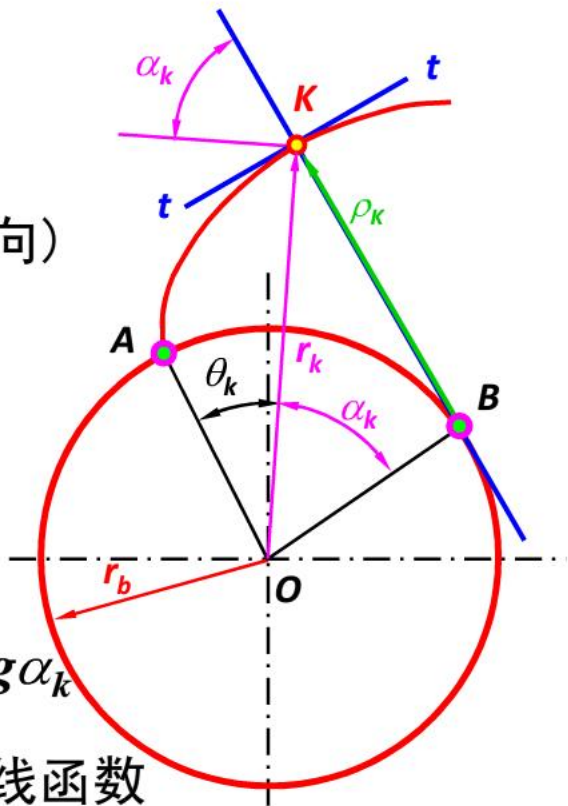
$$\therefore r_k = \frac{r_b}{\cos \alpha_k}$$

且有:

$$r_b \cdot (\theta_k + \alpha_k) = \widehat{AB} = \widehat{BK} = \rho_k = r_b \cdot \operatorname{tg} \alpha_k$$

$$\therefore \theta_k = \operatorname{tg} \alpha_k - \alpha_k = \operatorname{inv} \alpha_k \quad \text{——渐开线函数}$$

$$2. \text{ 渐开线方程 } \begin{cases} r_k = \frac{r_b}{\cos \alpha_k} \\ \theta_k = \operatorname{tg} \alpha_k - \alpha_k = \operatorname{inv} \alpha_k \end{cases}$$



六、渐开线齿廓的啮合特性

1. 渐开线齿廓啮合过程

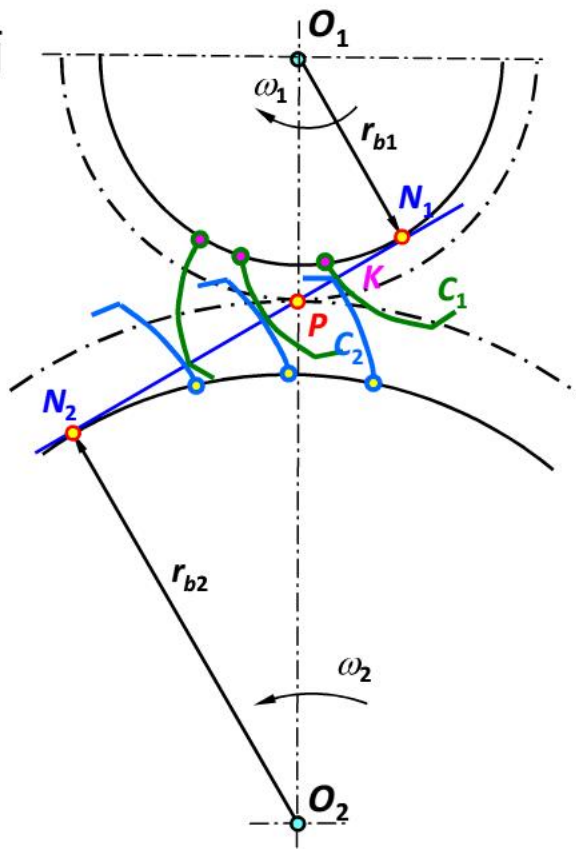
过 K 作两齿廓的公法线 N_1N_2 ，为两齿轮啮合点的轨迹——理论啮合线

渐开线性质

理论啮合线 N_1N_2 必同时与两轮的基圆相切，且即为其内公切线，又为力作用线，在齿轮啮合过程中，其位置、方向均不变。

N_1 、 N_2 ——极限啮合点

N_1N_2 与 O_1O_2 的交点 P (节点) 为一定点。



2. 渐开线齿廓能保证定传动比传动

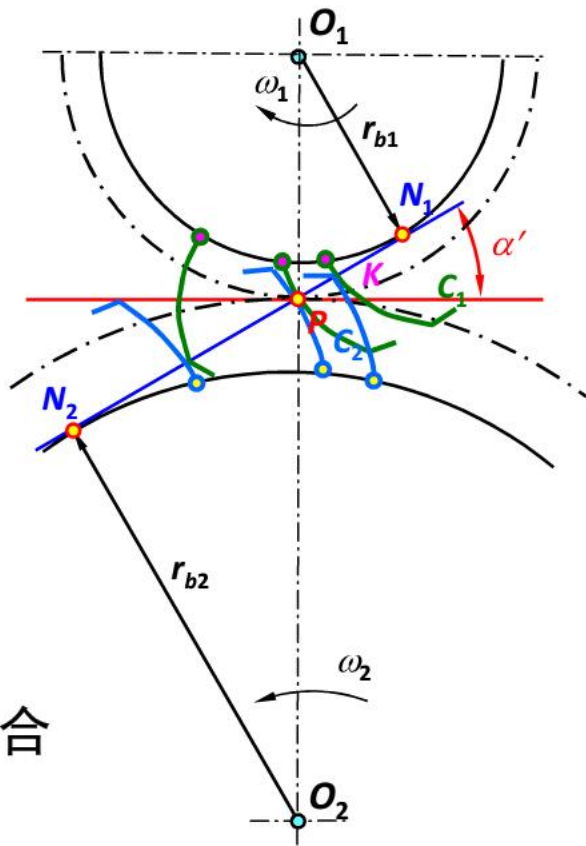
理论啮合线 N_1N_2 与 O_1O_2 的交点P（节点）为一定点。在齿轮啮合过程中，其位置、方向均不变。

➡
$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\overline{O_2P}}{\overline{O_1P}} = \text{常数}$$

3. 渐开线齿廓间的正压力方向不变

➤ 啮合角 α' ：节圆压力角。

➤ 渐开线齿轮在传动过程中，理论啮合线和啮合角始终不变，传动平稳。



4. 渐开线齿廓传动具有可分性

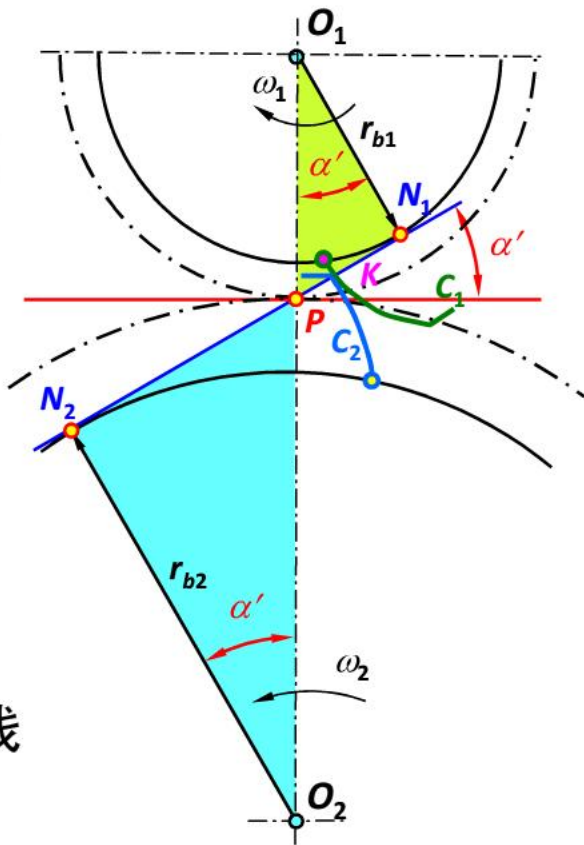
$$\triangle O_1 N_1 P \sim \triangle O_2 N_2 P$$

$$\text{故 } i_{12} = \omega_1 / \omega_2 = r_{b2} / r_{b1}$$

渐开线齿轮的传动比取决于两轮基圆半径比

实际安装中心距略有变化时，不影响 i_{12} ，这一特性称为运动可分性，对加工和装配很有利。

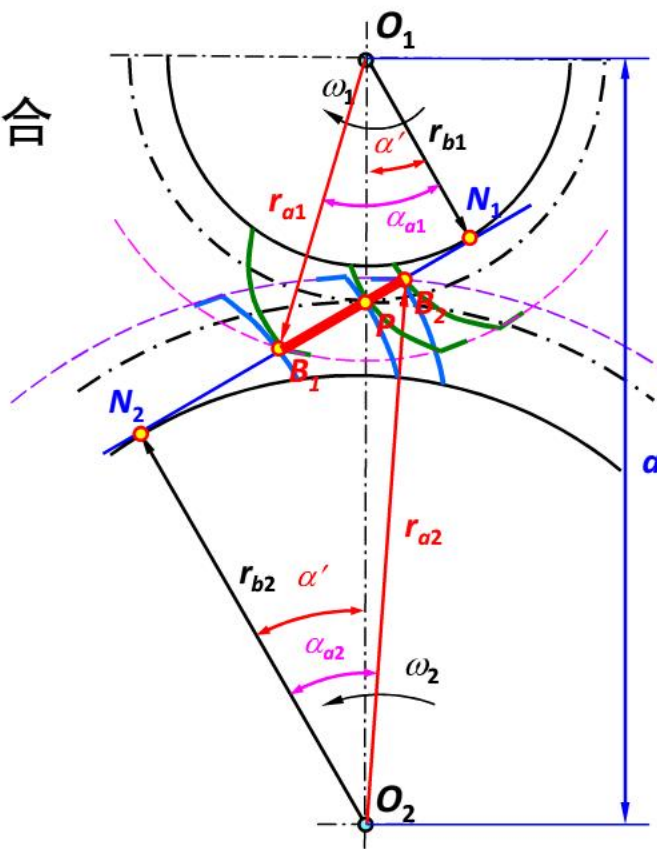
由于上述特性，工程上广泛采用渐开线齿廓曲线。



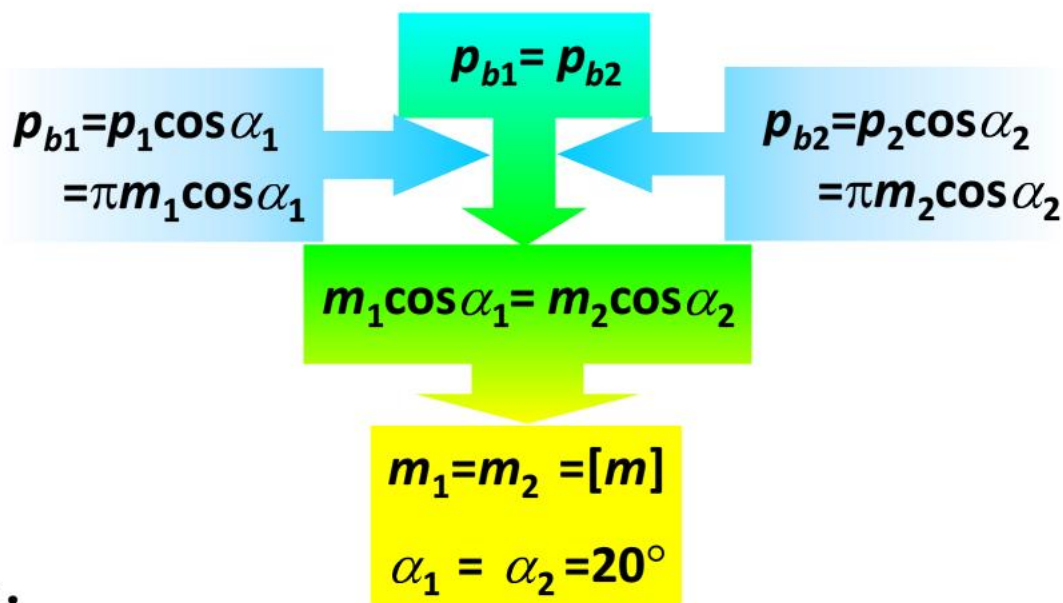
七、一对渐开线齿轮的啮合传动

1. 正确啮合条件

- 理论啮合线—— N_1N_2 ，为两齿轮啮合点的轨迹
- N_1 、 N_2 ——极限啮合点
- 啮合起始点 B_2 ——主动轮齿根部分推动从动轮齿顶部分。
- 啮合终止点 B_1 ——主动轮齿顶部分推动从动轮齿根部分。
- 实际啮合线—— B_1B_2
- α_{a1} 、 α_{a2} ——齿顶圆压力角。
- 啮合角 α' ——节点处的压力角。
- 中心距 a ——两轮中心距离。



要使进入啮合区内的各对齿轮都能正确地进入啮合，两齿轮的相邻两齿同侧齿廓间的法向距离（法节）应相等： $p_{n1} = p_{n2}$



★ 结论：

一对渐开线齿轮的正确啮合条件是——两轮的模数和压力角应分别相等。

2. 连续传动的条件

为保证齿轮能连续传动，必须使得前一对轮齿尚未脱离啮合时，后一对轮齿进入啮合，即

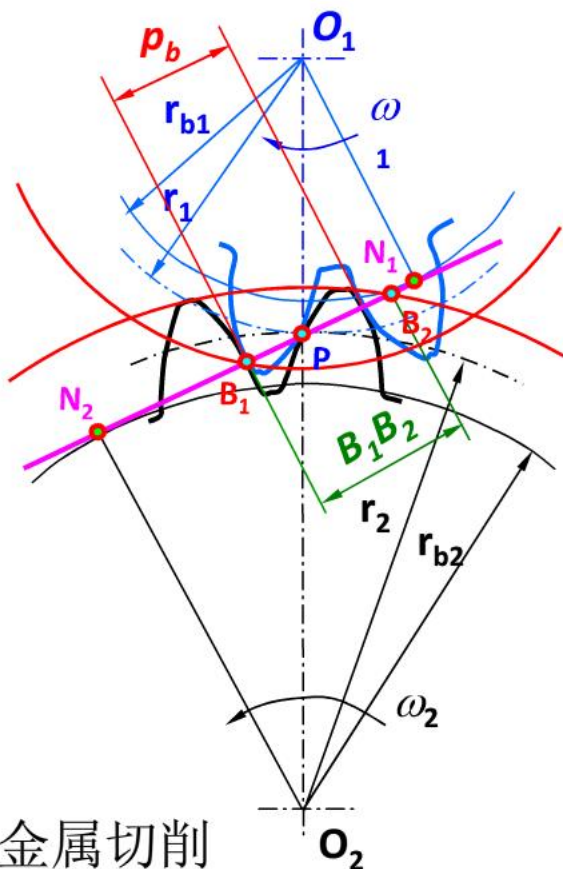
$$\overline{B_1B_2} \geq p_b = p_n$$

令： $\frac{\overline{B_1B_2}}{p_b} = \varepsilon_\alpha$ 称为一对齿轮的
重合度

若要连续传动，必须 $\varepsilon_\alpha \geq 1$ ★

$[\varepsilon_\alpha]$ 的推荐值：

使用场合	一般机械制造业	汽车拖拉机	金属切削机床
$[\varepsilon_\alpha]$	1.4	1.1~1.2	1.3



重合度的计算公式

1) 外啮合传动

$$\overline{B_1B_2} = \overline{B_1P} + \overline{PB_2}$$

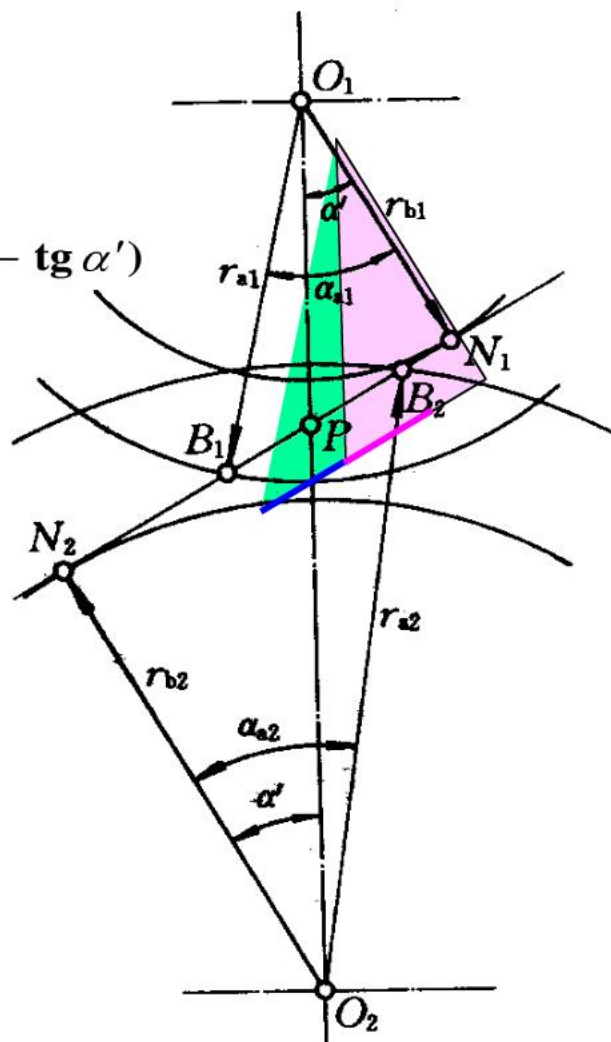
$$\begin{cases} \overline{PB_1} = r_{b1}(\operatorname{tg} \alpha_{a1} - \operatorname{tg} \alpha') = \frac{mz_1}{2} \cos \alpha (\operatorname{tg} \alpha_{a1} - \operatorname{tg} \alpha') \\ \overline{PB_2} = r_{b2}(\operatorname{tg} \alpha_{a2} - \operatorname{tg} \alpha') = \frac{mz_2}{2} \cos \alpha (\operatorname{tg} \alpha_{a2} - \operatorname{tg} \alpha') \end{cases}$$

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\overline{B_1B_2}}{p_b} = \frac{\overline{PB_1} + \overline{PB_2}}{\pi m \cos \alpha}$$

$$= \frac{1}{2\pi} [z_1(\operatorname{tg} \alpha_{a1} - \operatorname{tg} \alpha') + z_2(\operatorname{tg} \alpha_{a2} - \operatorname{tg} \alpha')]$$

其中

$$\begin{cases} \cos \alpha_{ai} = \frac{r_i}{r_{ai}} \cdot \cos \alpha \\ \cos \alpha' = \frac{r_i}{r'} \cdot \cos \alpha \end{cases}$$



4) 讨论

外啮合 $\varepsilon_{\alpha} = \frac{1}{2\pi} [z_1(\text{tg } \alpha_{a1} - \text{tg } \alpha') + z_2(\text{tg } \alpha_{a2} - \text{tg } \alpha')]$

✓ ε_{α} 与模数 m 无关

✓ $h_a^* \uparrow \Rightarrow \varepsilon_{\alpha} \uparrow$

✓ $\alpha \uparrow \Rightarrow \varepsilon_{\alpha} \downarrow$

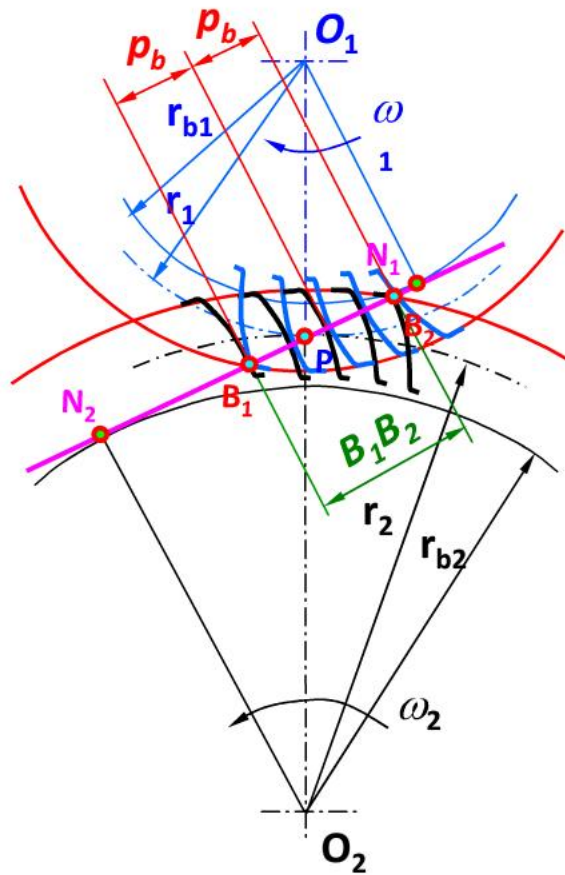
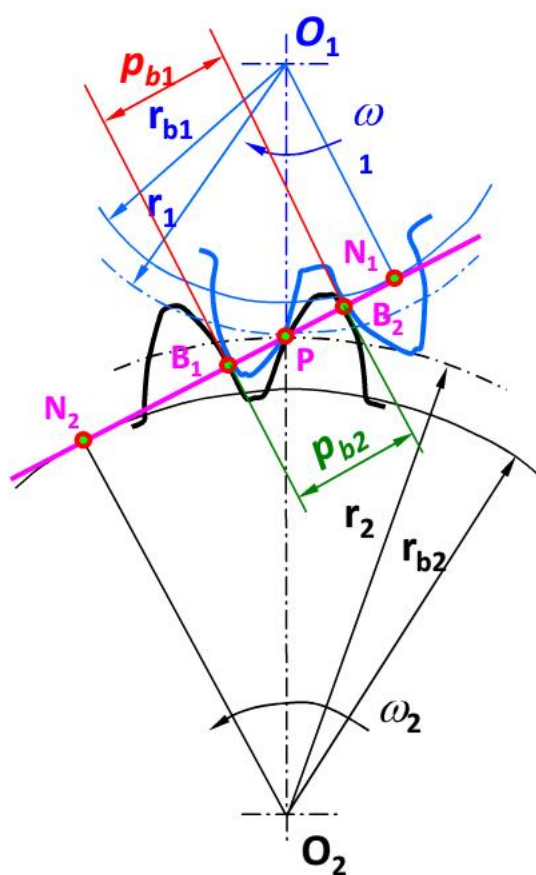
✓ $z \uparrow \Rightarrow \varepsilon_{\alpha} \uparrow$ 当 $z \rightarrow \infty$, $\varepsilon_{\alpha} \rightarrow \varepsilon_{\alpha \max}$

重合度的物理意义

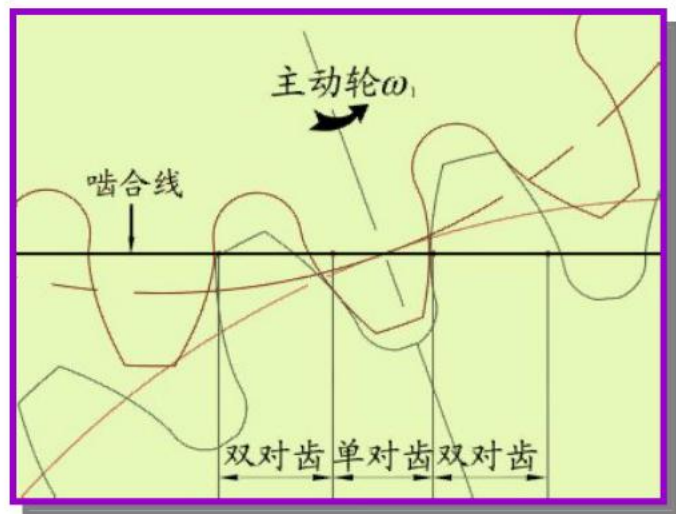
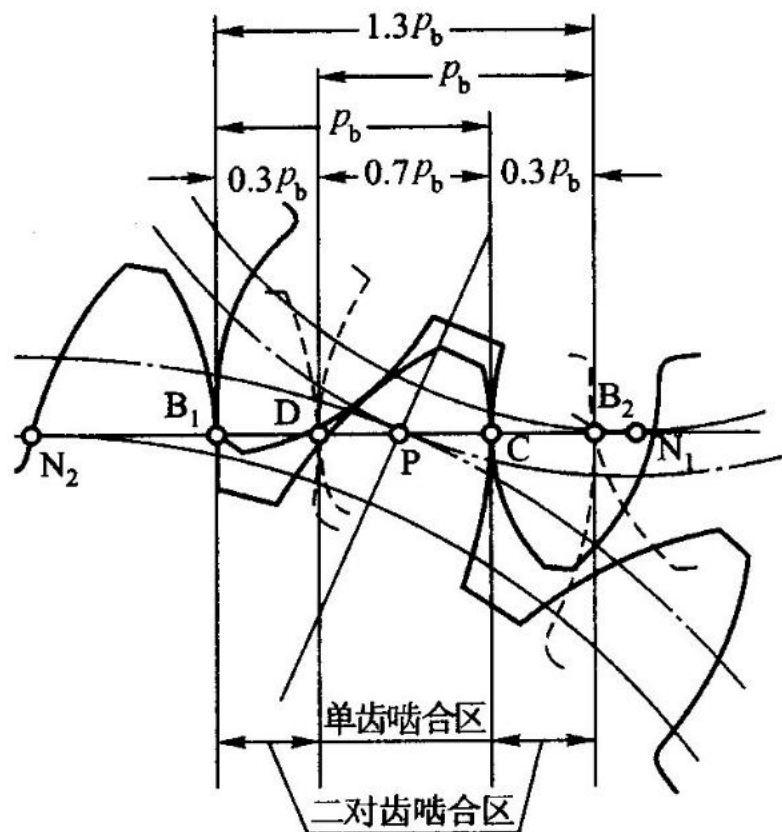
ε_α 实质上表明同时参与啮合的轮齿对数的多少。

□ 当 $\varepsilon_\alpha = 1$ ：
在齿轮传动的过程中，始终有一对轮齿参加啮合；

□ 当 $\varepsilon_\alpha = 2$ ：
在齿轮传动的过程中，始终有两对齿啮合；



□ 当 $\varepsilon_\alpha = 1.3$: 在齿轮传动的过程中, 有两个 $0.3p_b$ 的长度上, 有两对轮齿同时啮合, 在 $0.7p_b$ 的长度上, 则只有一对轮齿啮合。



重合度是衡量齿轮传动质量的指标。

重合度 $\uparrow \Rightarrow$ 传动平稳性 $\uparrow \Rightarrow$ 承载能力 \uparrow

八、 渐开线齿轮的加工方法及齿轮变位的概念

1. 渐开线齿轮的加工

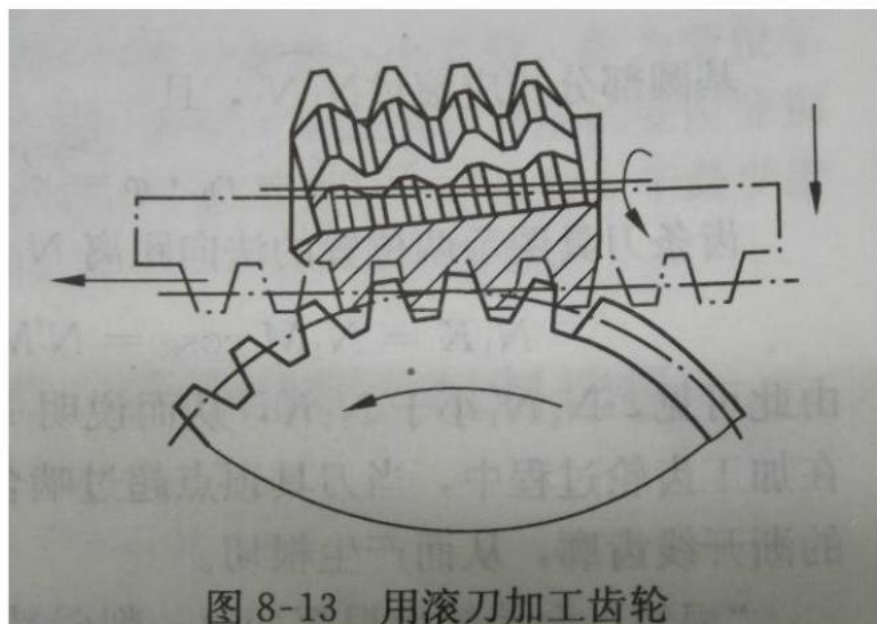
齿轮的加工方法有很多，包括铸造法、热轧法、冲压法和切削法等，常用的为切削法。

切削法有仿形法和展成法两类，在这里我们介绍展成法。

展成法也称范成法或包络法，是目前齿轮加工中最常用的一种方法，它是利用一对齿轮相互啮合时其共轭齿廓互为包络的原理，或者说用复演齿轮传动关系的方法来加工齿廓的。

展成法加工齿轮时常用的刀具有齿轮插刀，齿条插刀，滚刀等。

齿轮插刀加工齿轮



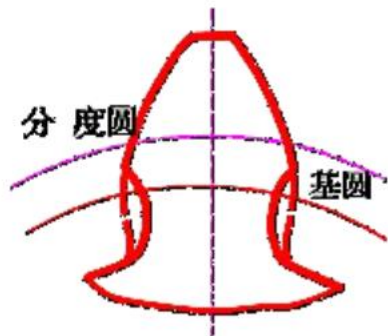
加工过程包括有展成、切削、进给及让刀运动

滚刀的轴向截面相当于一个齿条，利用滚刀加工齿轮能实现连续切削，有利于提高生产率。

2. 渐开线齿廓的根切现象

1). 根切现象及其后果

➤ 根切——用范成法加工齿轮时，刀具的顶部切入了轮齿的根部，将齿根的渐开线齿廓切去一部分的现象。



➤ 根切的后果

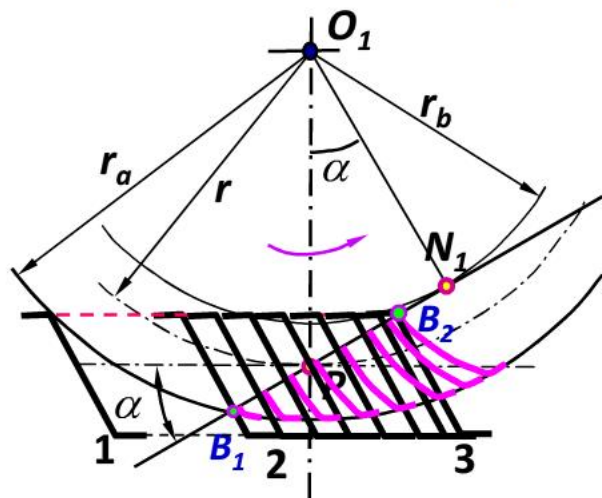
➤ 降低轮齿的抗弯强度；

➤ 降低齿轮传动的重合度。

2). 产生根切的原因

❖ 当 B_2 落在 N_1 点的下方： $PB_2 < PN_1$

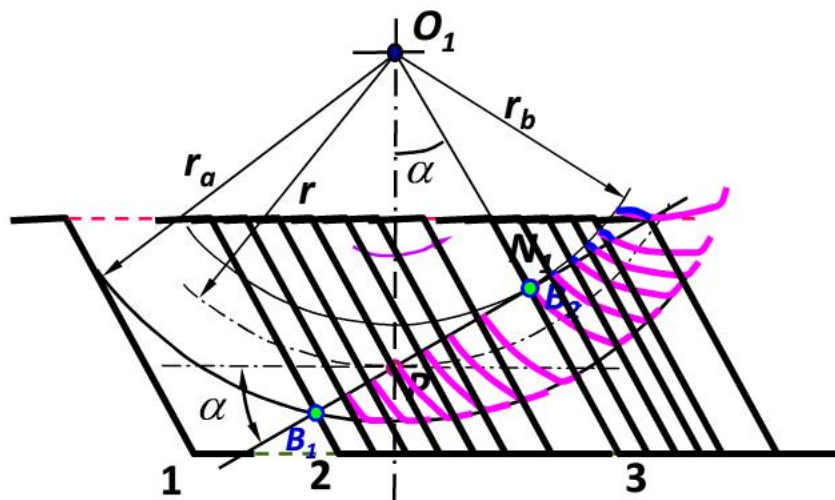
刀具在位置1开始切削齿间；
在位置2开始切削渐开线齿廓；
在位置3切削全部齿廓；



$PB_2 < PN_1$ 不根切

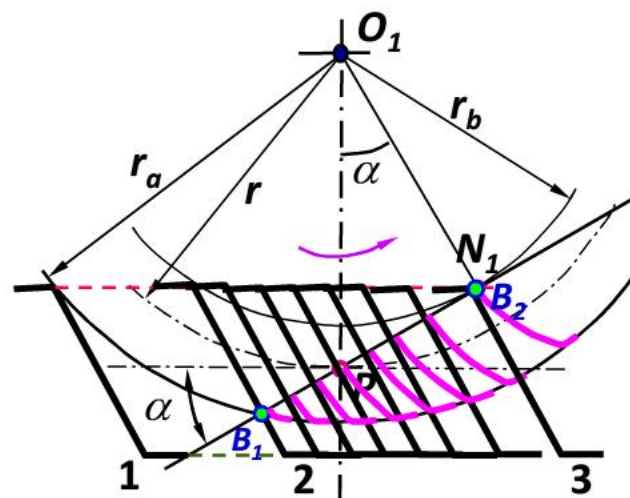
❖ 当 B_2 与 N_1 点重合: $PB_2=PN_1$

刀具在位置1开始切削齿间;
在位置2开始切削渐开线齿廓;
在位置3切削全部齿廓;



❖ 当 B_2 落在 N_1 点的上方: $PB_2 > PN_1$

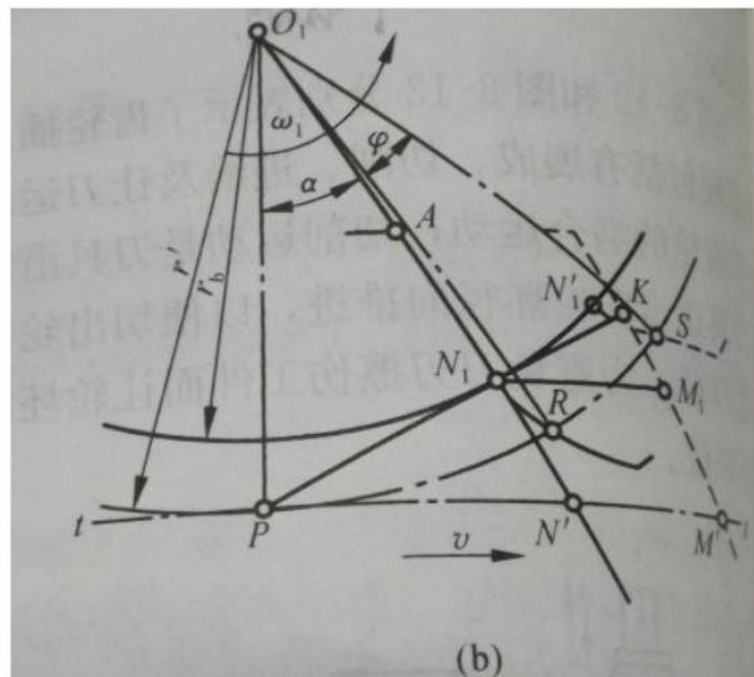
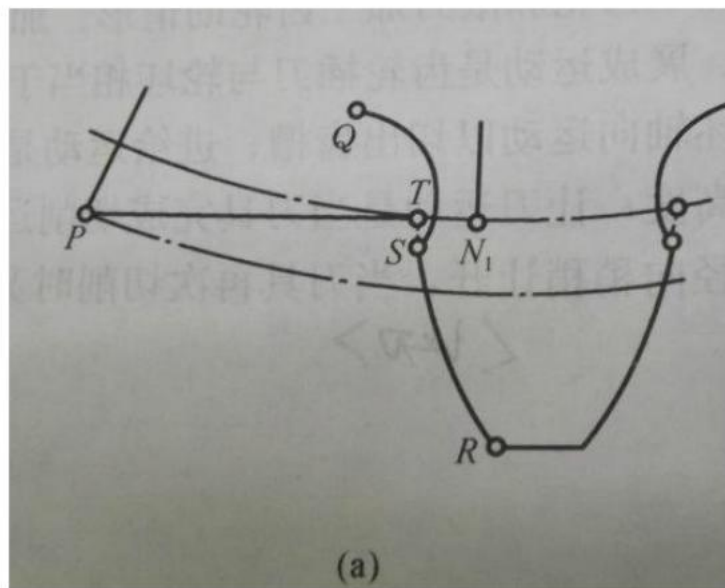
$PB_2 > PN_1$ 根切



$PB_2=PN_1$ 不根切

★ 结论:

用范成法切齿时, 刀具的齿顶线超过了理论啮合点 N_1 发生根切。



在加工齿轮过程中，当刀具顶点超过极限啮合点时，刀刃顶点部分必切入已形成的渐开线齿廓，从而产生根切现象。

3). 不发生根切的条

件恰好不发生根切时，刀具的齿顶线通过理论啮合点N1，即：

$$\overline{PN_1} = \overline{PB_2}$$

被加工齿轮：

$$\overline{PN_1} = r \cdot \sin \alpha = \frac{mz_1}{2} \cdot \sin \alpha$$

齿条刀具：

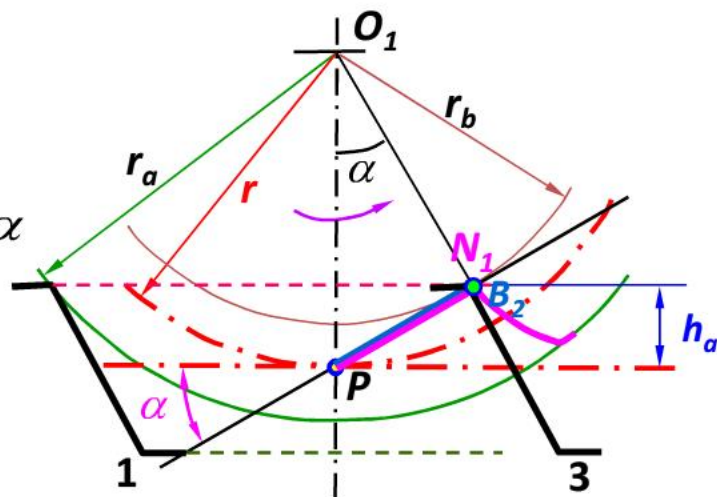
$$\overline{PB_2} = \frac{h_a}{\sin \alpha} = \frac{h_a^* m}{\sin \alpha}$$

$$\Rightarrow \frac{h_a^* m}{\sin \alpha} = \frac{mz_1}{2} \sin \alpha \Rightarrow$$

$$z_1 = \frac{2h_a^*}{\sin^2 \alpha} = z_{\min}$$

为了保证无根切现象，要求 $z \geq z_{\min}$

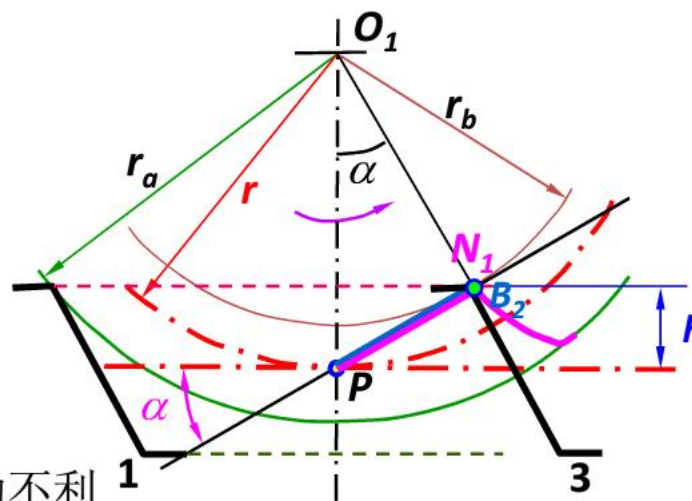
当 $h_a^*=1$ ， $\alpha=20^\circ$ 时，被切齿轮不发生根切的最少齿数 $z_{\min}=17$ 。



不发生根切的最少齿数

4). 避免根切的措

为了制造齿数 $z < z_{\min}$ ，而又不发生根切的齿轮，可以使刀具的齿顶线不超过理论啮合点 N_1 ，即使： $\overline{PN_1} \geq \overline{PB}$



提高轮坯 N_1
点的位置

$\alpha \uparrow \rightarrow z_{\min} \downarrow$
 $\epsilon_\alpha \downarrow \rightarrow$ 对传动不利
功率损耗 \uparrow

降低刀具 B_2
点的位置

$h_a^* \downarrow \rightarrow z_{\min} \downarrow$
 $\epsilon_\alpha \downarrow \rightarrow$ 对传动不利

改变刀具中线与轮坯分度圆的相对位置——变位齿轮

齿条刀具中线外移距离 x_m ，使刀具的齿顶线通过理论啮合点 N_1

x 称为径向变位系数

{	$x > 0$ 刀具远离轮坯，正变位；
	$x = 0$ 标准齿轮；
	$x < 0$ 刀具移近轮坯，负变位；

齿条刀具中线外移距离 x_m ，使刀具的齿顶线通过理论啮合点 N_1

x 称为径向变位系数 $\begin{cases} x > 0 & \text{刀具远离轮坯，正变位；} \\ x = 0 & \text{标准齿轮；} \\ x < 0 & \text{刀具移近轮坯，负变位；} \end{cases}$

加工变位齿轮时刀具的变位

❖ 径向变位量 x_m ：切制变位齿轮时，刀具由切制标准齿轮的位置沿径向从轮坯中心向外移开或向内移入的距离。

❖ 径向变位系数 x （变位系数）

$\begin{cases} x > 0 & \text{刀具远离轮坯，正变位；——正变位齿轮} \\ x < 0 & \text{刀具移近轮坯，负变位；——负变位齿轮} \end{cases}$

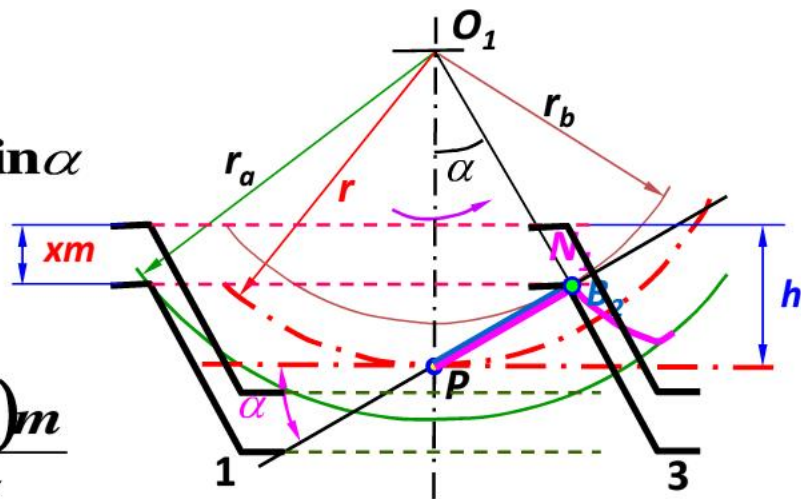
不发生根切的刀具最小变位系数 x_{\min}

被加工齿轮:

$$\overline{PN_1} = r \cdot \sin \alpha = \frac{mz_1}{2} \cdot \sin \alpha$$

齿条刀具:

$$\overline{PB_2} = \frac{h_a - xm}{\sin \alpha} = \frac{(h_a^* - x)m}{\sin \alpha}$$



$$\therefore x \geq h_a^* - \frac{z \sin^2 \alpha}{2}$$

$$z_{\min} = 2h_a^* / \sin^2 \alpha$$

$$x \geq \frac{h_a^* (z_{\min} - z)}{z_{\min}} = x_{\min}$$

——不发生根切的最小变位系数