



《机械设计》课程

第7讲 齿轮传动

主讲 吴伟国



《机械设计》课程

第7讲 齿轮传动

7.1 齿轮传动概述

7.1 齿轮传动—概述

- 机械传动中应用最广泛的一种传动形式
- 齿轮传动特点
 - 瞬时传动比恒定, 而且可实现大减速比
 - 传动效率高: 98~99% (一对齿轮副)
 - 工作可靠、寿命长 (比带传动、链传动寿命长)
 - 结构紧凑;
 - 适用范围大, 传递功率1W、0.几W至数万KW, 转速几转~上万转;
 - 需要专门的机床和刀具加工、成本高轮齿加工方法— 铣齿、滚齿、剃齿、珩齿、插齿;
 - 可以实现高精度 — 1~12级精度, 常用精度7, 8级, 5、6级精度较高;
 - 精度低时噪音大、有回差;
 - 不宜用于传递轴间距过大的运动和动力 (不如带传动、链传动)。

7.1 齿轮传动—概述

- 齿轮传动的类型 本课程讲授渐开线齿轮传动设计!

按齿廓曲线类型分

- 渐开线
- 摆线
- 圆弧齿

按齿轮工作条件不同分

- 开式
- 闭式
- 半开式

按齿轴相对位置分

- 圆柱齿轮—轴线平行
- 圆锥齿轮—轴线相交
- 蜗轮蜗杆—轴线相错且垂直
- 螺旋齿轮—轴线相错

按齿面硬度分

- 软齿面、中硬齿面 } **HBW≤350**
- 硬齿面 } **HBW>350**

7.1 齿轮传动—概述

• 齿轮的精度等级

圆柱齿轮 } 国标中规定了12个精度等级：1级最高、
圆锥齿轮 } 12级最低。常用6~8级。

精度等级↑ → 成本↑

• 渐开线齿轮的模数—国家标准(GB/T 1357-2008)

表7.1 渐开线齿轮的标准模数 m (摘自GB/T 1357-2008)

第一系列	1	1.25	1.5	2.0	2.5	3	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50
第二系列	1.125	1.375	1.75	2.25	2.75	3.5	4.5	5.5	(6.5)	7	9	11	14	18	22	28	35	45

注：1.对于斜齿圆柱齿轮及人字齿轮，取法向模数为标准模数；对锥齿轮，取大端模数为标准模数。

2.应优先选择第一系列，括号中的模数尽可能不用。



《机械设计》课程

第7讲 齿轮传动

7.2 齿轮传动的主要失效形式

7.2.1 齿轮传动的主要失效形式

- **轮齿的折断** — 是齿轮传动中最严重的失效形式，必须避免！

— 齿轮受载 — 相当于悬臂梁。

齿根处有最大的弯曲应力；

齿根处有应力集中。

齿根处交变应力 — 疲劳折断；

受冲击、过载时 — 脆性断裂。

— 轮齿折断部位

直齿轮轮齿 — 从齿根处全齿折断；

人字齿或斜齿轮 — 局部折断。

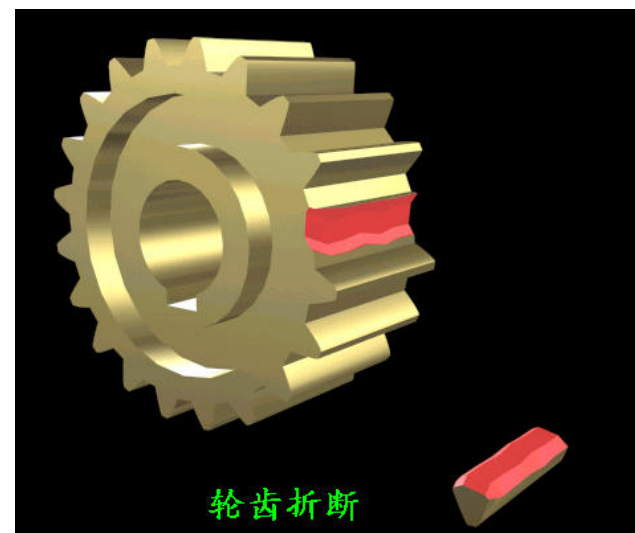
— 防止轮齿折断措施：

a) 减小应力集中；

b) 提高制造、安装精度；

c) 选择合理的材料、热处理方式；

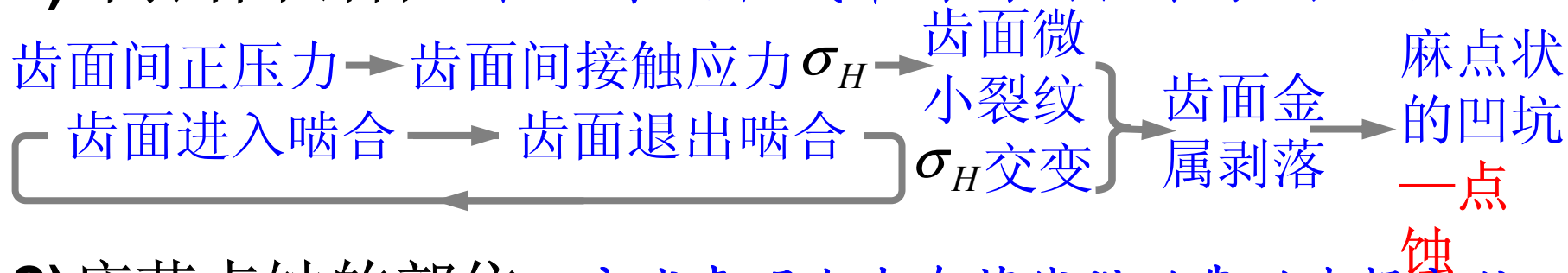
d) 齿根喷丸、碾压等强化处理。



7.2.1 齿轮传动的主要失效形式

- **齿面疲劳点蚀** — 由齿面间交变的接触应力引起的。

1) 两齿面啮合 — 相当于两轴线平行的圆柱滚子间接触。



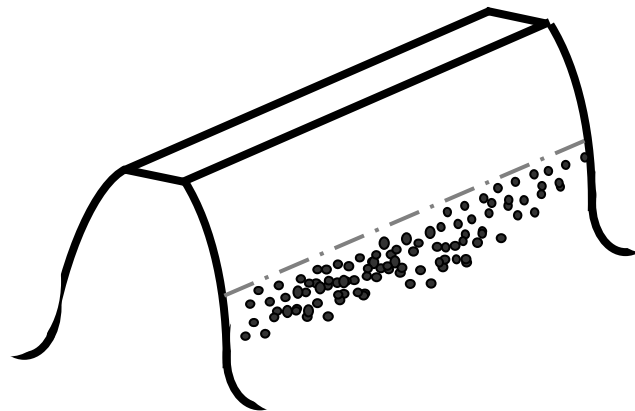
2) 疲劳点蚀的部位 — 实践表明发生在节线附近靠近齿根部位。

3) 疲劳点蚀过程的后果



4) 开式齿轮传动 — 无点蚀现象。

5) 疲劳点蚀是软齿面闭式齿轮传动最主要的失效形式。



7.2.1 齿轮传动的主要失效形式

- **齿面疲劳点蚀** — 由齿面间交变的接触应力引起的。

6) 提高齿面抗点蚀能力的措施

- ↑ 齿面硬度;
- ↓ 表面粗糙度;
- 合理选用润滑油粘度。

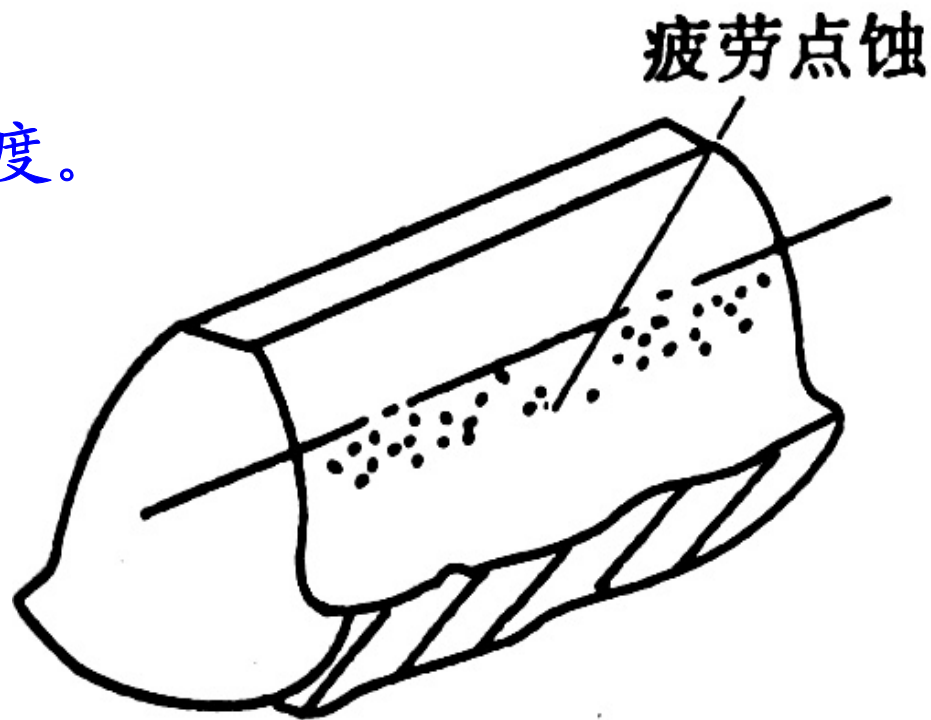


图 7-2 齿面点蚀

7.2.1 齿轮传动的主要失效形式

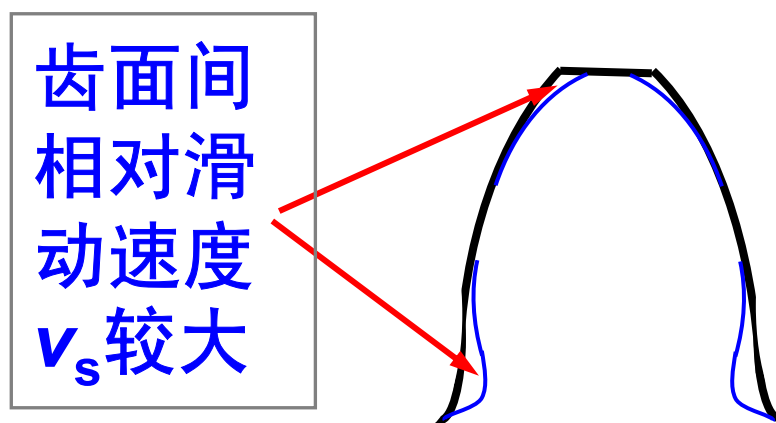
- **齿面磨损** 一是开式齿轮传动的主要失效形式。



1) 不同磨损程度发生的部位——相对滑动速度较大的部位磨损大。

2) 减轻齿面磨损的措施:

- (1) 改善密封和润滑条件;
- (2) 提高齿面硬度;
- (3) 开式 → 闭式。



7.2.1 齿轮传动的主要失效形式

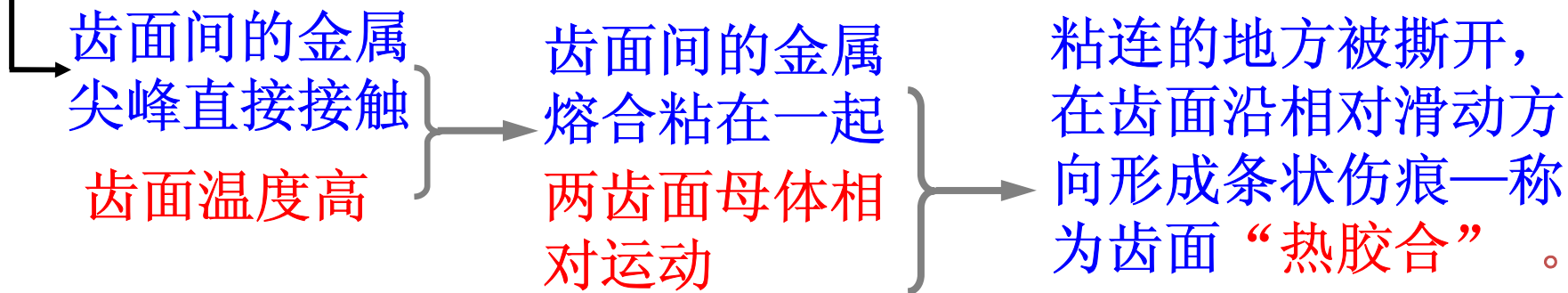
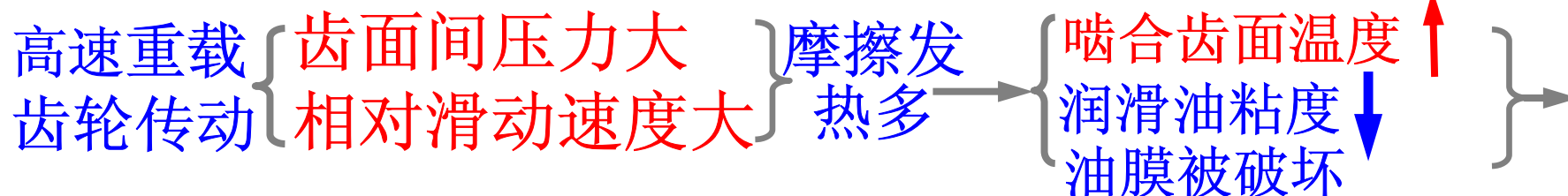
- 齿面磨损 一是开式齿轮传动的主要失效形式。



7.2.1 齿轮传动的主要失效形式

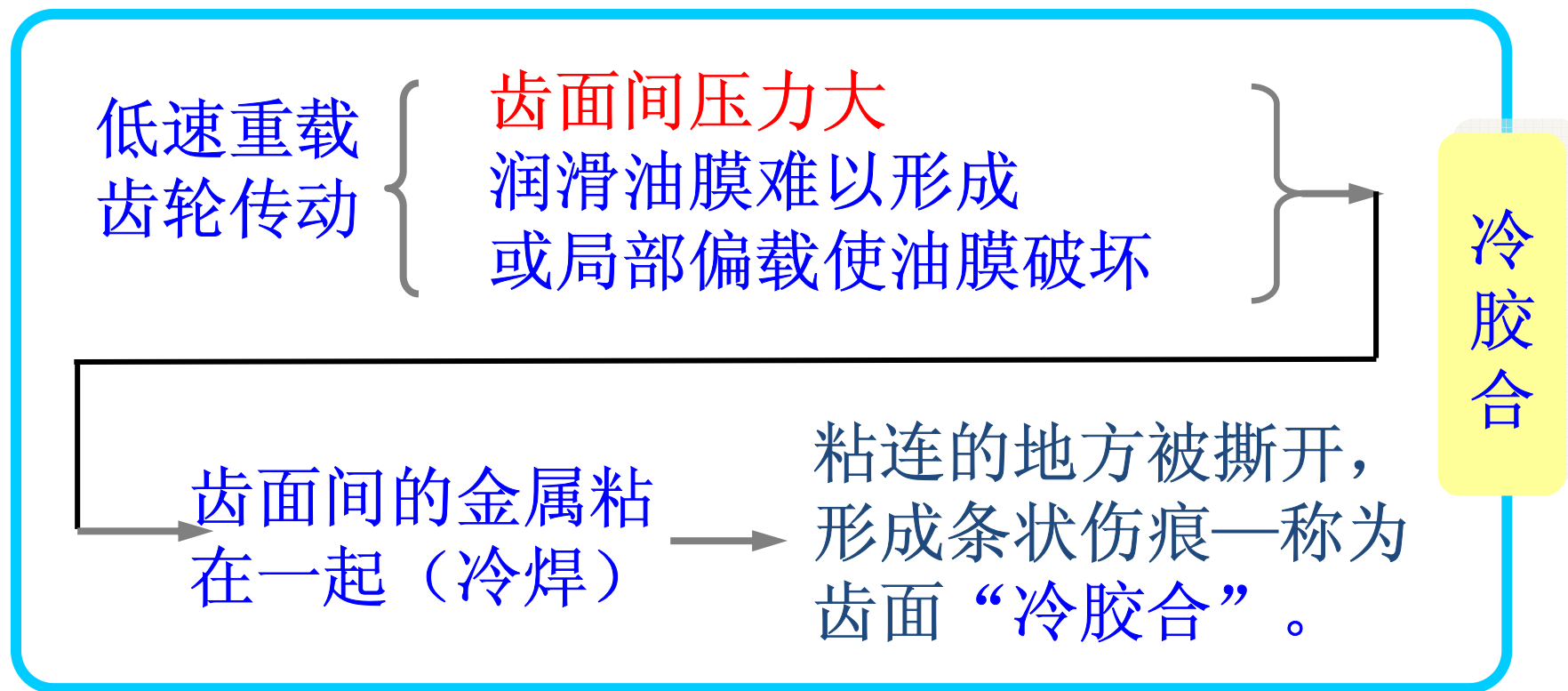
• 齿面胶合

热胶合



7.2.1 齿轮传动的主要失效形式

- 齿面胶合



7.2.1 齿轮传动的主要失效形式

- 齿面胶合

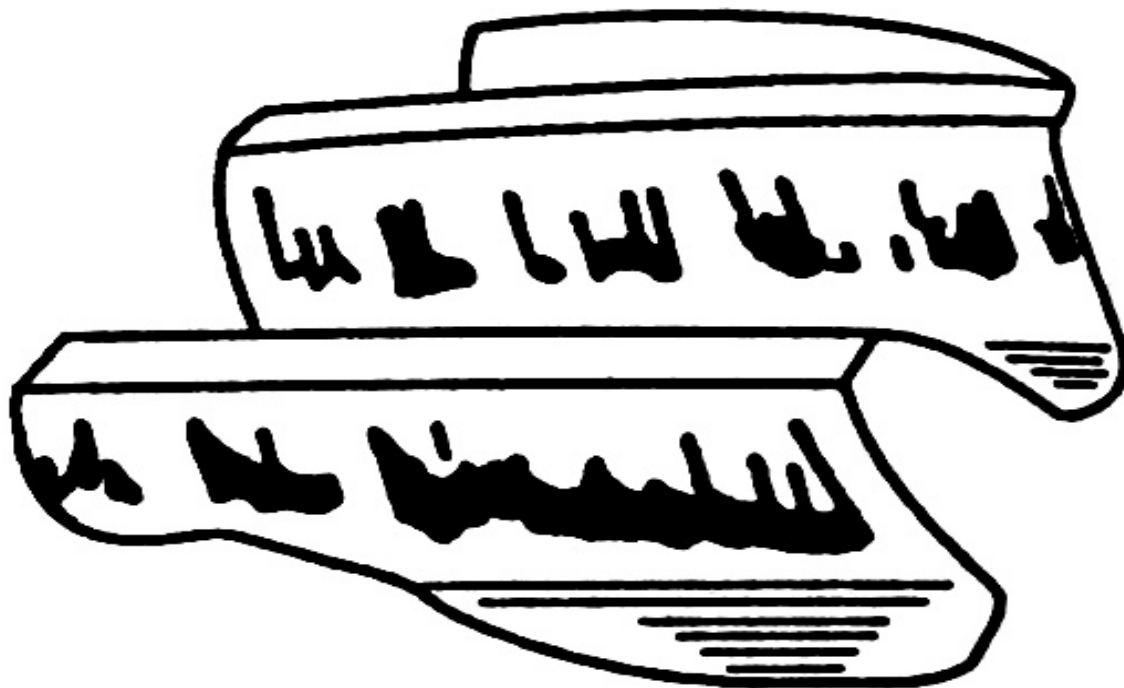


图 7-4 齿面胶合

7.2.1 齿轮传动的主要失效形式

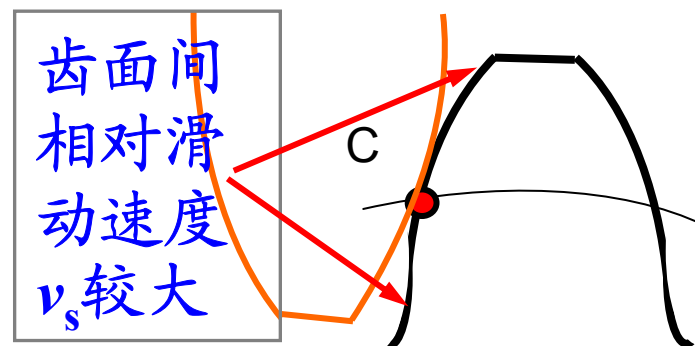
• 齿面胶合

1) 齿面胶合发生的部位？相对滑动速度较大的齿根或齿顶。

2) 齿面胶合的后果：

(1) 温度 \uparrow

(2) 振动、噪声 $\uparrow \rightarrow$ 失效



3) 热胶合 一是高速齿轮传动的主要失效形式。

4) 提高齿面抗胶合能力的措施

(1) $m \downarrow$ 、 $h_a \downarrow \rightarrow$ 降低滑动系数

(2) 齿面硬度 \uparrow

(3) 采用齿廓修形，减少啮入冲击

(4) 采用抗胶合能力强的材料和加入极压添加剂的润滑油

7.2.1 齿轮传动的主要失效形式

- **轮齿塑性变形** — 常发生在齿轮齿面材料较软、低速重载、频繁启动的传动中。

1) 齿体的塑性变形 — 突然过载引起轮齿歪斜

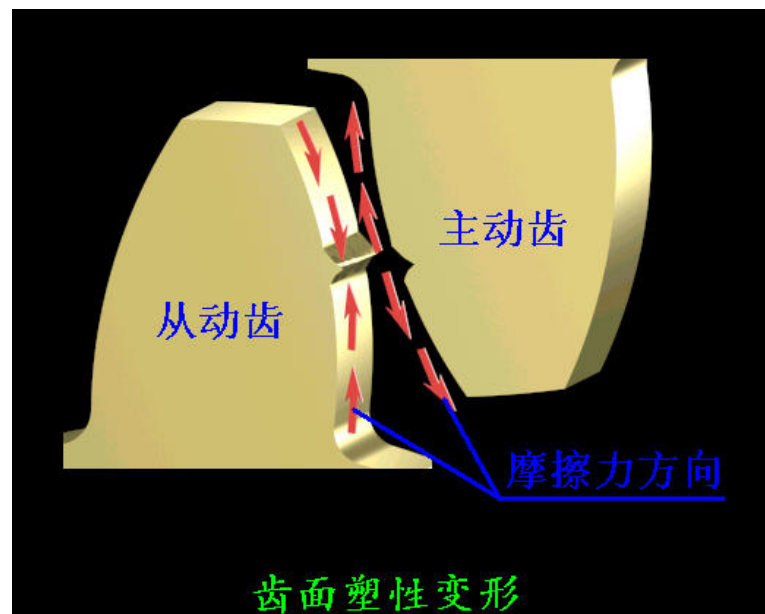
2) 齿面的塑性变形 — 过载使齿面油膜破坏 → 摩擦力↑↑

→ 使齿面表层的材料沿摩擦方向运动。

关于右图摩擦力方向的理解必须从《机械原理》齿轮在理论啮合线上各点啮合位置时的相对速度方向来判别。

3) 提高抗塑性变形能力措施

- (1) 提高齿面硬度;
- (2) 采用粘度高的润滑油。





《机械设计》课程

第7讲 齿轮传动

7.3 齿轮传动的设计准则

7.3 齿轮传动的设计准则

软齿面闭式
齿轮传动

主要失效形式？

齿面
点蚀

齿面接触疲
劳强度设计

校核齿根弯
曲疲劳强度

硬齿面闭式
齿轮传动

齿面接触承
载能力较高

齿根弯曲疲
劳强度设计

校核齿面接
触疲劳强度

高速重载齿
轮传动

齿面
胶合

还需校核齿
面胶合强度

开式齿轮传动

主要失效形式？

齿面磨损

轮齿磨薄后断齿

先按齿根弯曲
疲劳强度设计

考虑磨损的影响

将 m 加大10~15%



《机械设计》课程

第7讲 齿轮传动

7.4 齿轮常用材料、 热处理方法及其选择

7.4.1 齿轮常用材料

- 齿轮材料基本要求

齿面有足够的硬度 — 抗点蚀、胶合、磨损等；

轮芯有足够的强度和韧性 — 抗塑性变形、轮齿折断等；

具有良好的机械加工和热处理工艺性；

价格低。

- 制造齿轮常用材料

钢—45,20Cr,40Cr,20CrMnTi等

铸铁—HT150,HT200,HT300等

有色金属

非金属材料 — 塑料、尼龙等

7.4.2 齿轮常用热处理方法

什么是调质？——淬火后低温回火。

1) 正火 }
2) 调质 } 软齿面齿轮，材料：**45**等低碳钢、**40Cr**

3) 调质+表面淬火 }
4) 渗碳淬火 } 硬齿面齿轮，材料：**40Cr**，
38CrMnMo，**20Cr**，**20CrMnTi**
5) 调质+渗氮淬火 } 等，材料较贵。

6) 碳氮共渗——硬齿面齿轮，材料：**38CrMoAlA**
热处理后变形较小。

热处理后硬齿面 → 磨齿（**4、5级精度**）

齿轮材料、热处理方式选择 — 必须综合考虑载荷大小、重要程度、结构紧凑性、加工能力、成本等因素。

7.4.3 齿轮常用材料、热处理方法与选择

P92-表7.2 齿轮常用材料的机械性能及应用范围

材料牌号	热处理方法	机械性能			应用范围
		强度极限 σ_B (MPa)	屈服极限 σ_s (MPa)	硬度 HB、HRC 或 HV	
45	正火	580	290	HB162~217	低中速、中载的非重要齿轮
	调质	640	350	HB217~255	低中速、中载的重要齿轮
	调质、表面淬火			HRC40~50 (齿面)	高速、中载而冲击较小的齿轮
40Cr	调质	700	500	HB241~286	低中速、中载的重要齿轮
	调质、表面淬火			HRC48~55	高速、中载、无剧烈冲击的齿轮
38SiMn Mo	调质	700	550	HB217~269	低中速、中载的重要齿轮
	调质、表面淬火			HRC45~55	高速、中载、无剧烈冲击的齿轮

7.4.3 齿轮常用材料、热处理方法与选择

P92-续表7.2 齿轮常用材料的机械性能及应用范围

材料 牌号	热处理 方法	机械性能			应用范围
		强度极限 σ_B (MPa)	屈服极限 σ_S (MPa)	硬度 HB、HRC 或 HV	
20Cr	渗碳-淬火	650	400	HRC56~62 (齿面)	高速、中载、并承受冲击的重要 齿轮
20CrMnTi	渗碳-淬火	1100	850	HRC56~62 (齿面)	
16MnCr5	渗碳-淬火			HRC56~62 (齿面)	
17CrNiMo6	渗碳-淬火	1080~1320	785	HRC56~62 (齿面)	
38CrMoAlA	调质-渗氮	1000	850	>HV850	耐磨性强、载荷平稳、润滑良好的传动

7.4.3 齿轮常用材料、热处理方法与选择

P93-续表7.2 齿轮常用材料的机械性能及应用范围

ZG310 - 570	正火	570	310	163 ~ 197 HBS	低中速、中载的大直径 齿轮
ZG340 - 640		640	340	179 ~ 207 HBS	
HT250	人工时效	250		170 ~ 240 HBS	低中速、轻载、冲击较 小的齿轮
HT300		300		187 ~ 255 HBS	
HT350		350		179 ~ 269 HBS	
QT500 - 5	正火	500	350	170 ~ 230 HBS	低中速、轻载、有冲击 的齿轮
QT600 - 2		600	420	190 ~ 270 HBS	
QT700 - 2		700	490	225 ~ 305 HBS	
布基酚醛层压板		100		30 ~ 50 HBS	高速、轻载、要求声响 小的齿轮
MC 尼龙		90		21 HBS	

- 注：1. 我国已成功地研制出许多低合金高强度的钢，在使用时应注意选用。40 MnB、40MnVB 可替代 40Cr；20Mn2B、20MnVB 可替代 20Cr、20CrMnTi。
2. 表中的速度界限是：当齿轮的圆周速度 $v < 3 \text{ m/s}$ 时称为低速； $3 \leq v < 6 \text{ m/s}$ 时称为低中速； $v = 6 \sim 15 \text{ m/s}$ 时称为中速； $v > 15 \text{ m/s}$ 时称为高速。



《机械设计》课程

第7讲 齿轮传动

7.5 齿轮传动的计算载荷及载荷系数

7.5 齿轮传动的计算载荷及载荷系数

- 计算载荷与名义载荷
 - 计算载荷 = $K \cdot$ 名义载荷
 - 载荷系数 $K = K_A K_v K_\beta K_\alpha$
 - 问题：为什么引入载荷系数？
- 载荷系数 $K = K_A K_v K_\beta K_\alpha$
 - K_A - 使用系数
 - K_v - 动载系数
 - K_β - 齿向载荷分布系数
 - K_α - 齿间载荷分配系数

7.5.1 使用系数 — $K_A (\geq 1)$

- K_A 的物理意义

- 考虑由于齿轮啮合外部因素引起附加动载荷影响的系数

- 影响 K_A 的主要因素

- 原动机工作特性

- 工作机工作特性

- 工作特性

- 均匀平稳

- 轻微振动

- 中等冲击

- 严重冲击

7.5.1 使用系数 — $K_A (\geq 1)$

• K_A 的选择

— 教材P95表7.3

表7.3 使用情况系数

原动机工作特性	工作机工作特性			
	均匀平稳	轻微冲击	中等冲击	严重冲击
均匀平稳	1.00	1.25	1.50	1.75
轻微冲击	1.10	1.35	1.60	1.85
中等冲击	1.25	1.50	1.75	2.0
严重冲击	1.50	1.75	2.0	≥ 2.25

注：(1)对于增速传动，根据经验建议取上表值的1.1倍；

(2)当外部机械与齿轮装置之间挠性连接时，取值可适当减小。

7.5.2 动载系数 — $K_v (\geq 1)$

- K_v 的物理意义

- 考虑由于齿轮制造精度、运转速度等轮齿内部因素引起附加动载荷影响的系数

- 影响 K_v 的主要因素

- 基节、齿形误差产生的传动误差

- 啮入冲击

- 换齿冲击

- 节线速度: $v \uparrow \rightarrow K_v \uparrow$

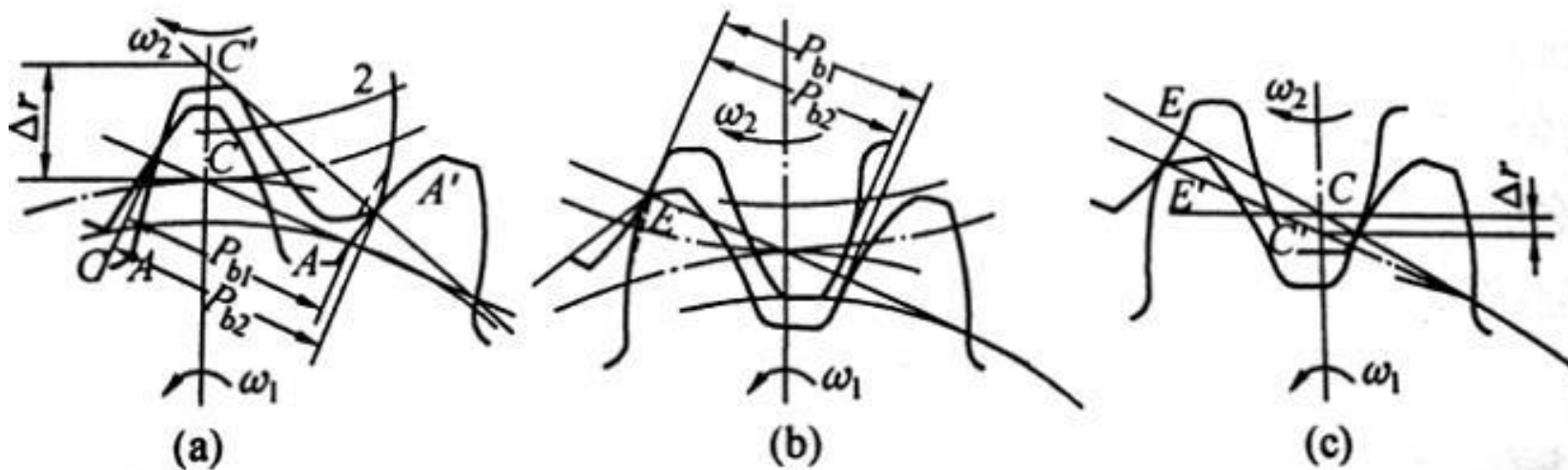
- 轮齿啮合刚度等。

7.5.2 动载系数 — $K_v (\geq 1)$

• 影响 K_v 的主要因素

— 基节、齿形误差产生的传动误差

• 啮入冲击



基节差引起动载荷

啮入冲击

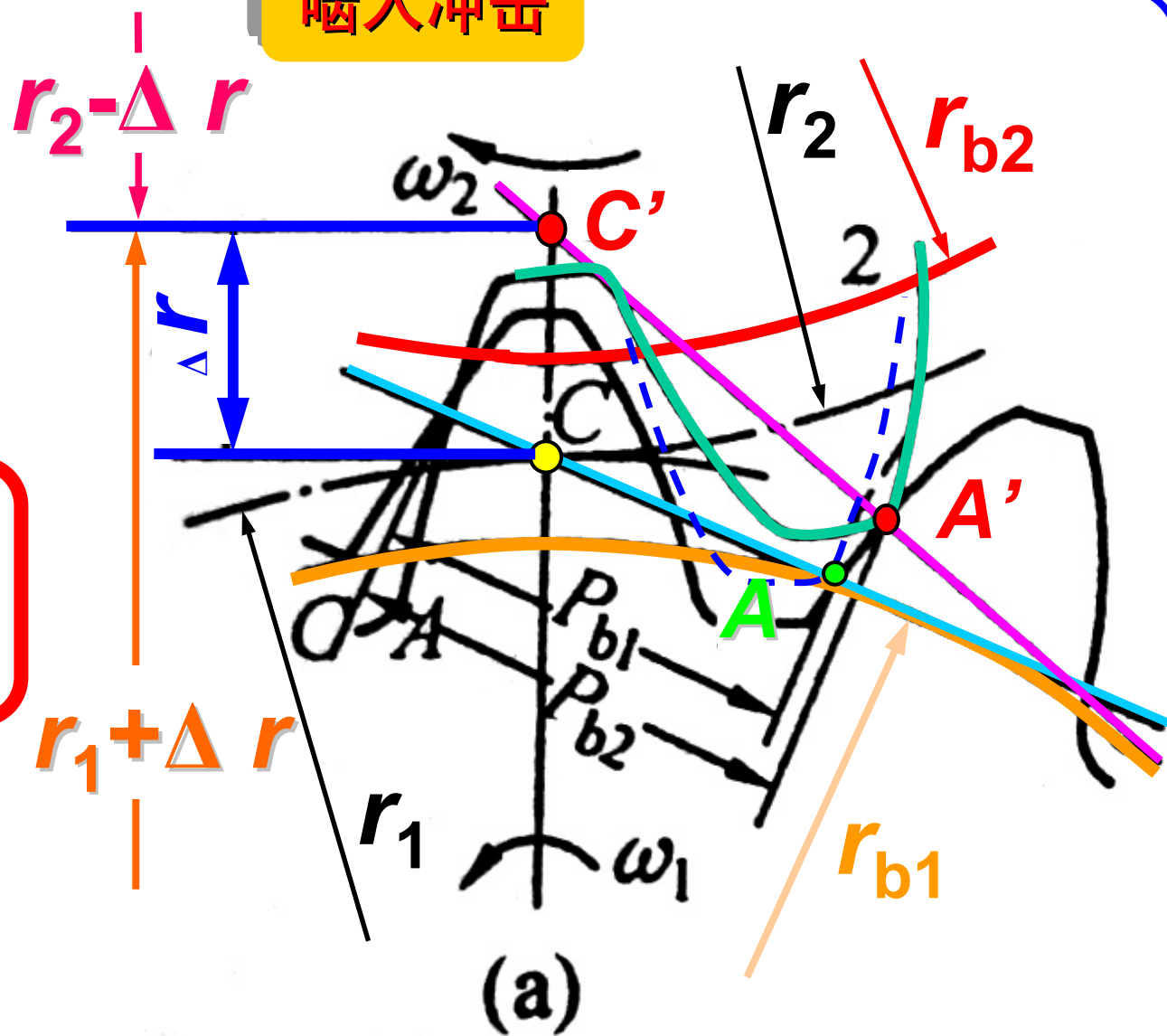
当 $P_{b1} < P_{b2}$;

瞬时传动比:

$$i = \frac{r_2 - \Delta r}{r_1 + \Delta r} < \frac{r_2}{r_1}$$

这种情况称为

啮入冲击



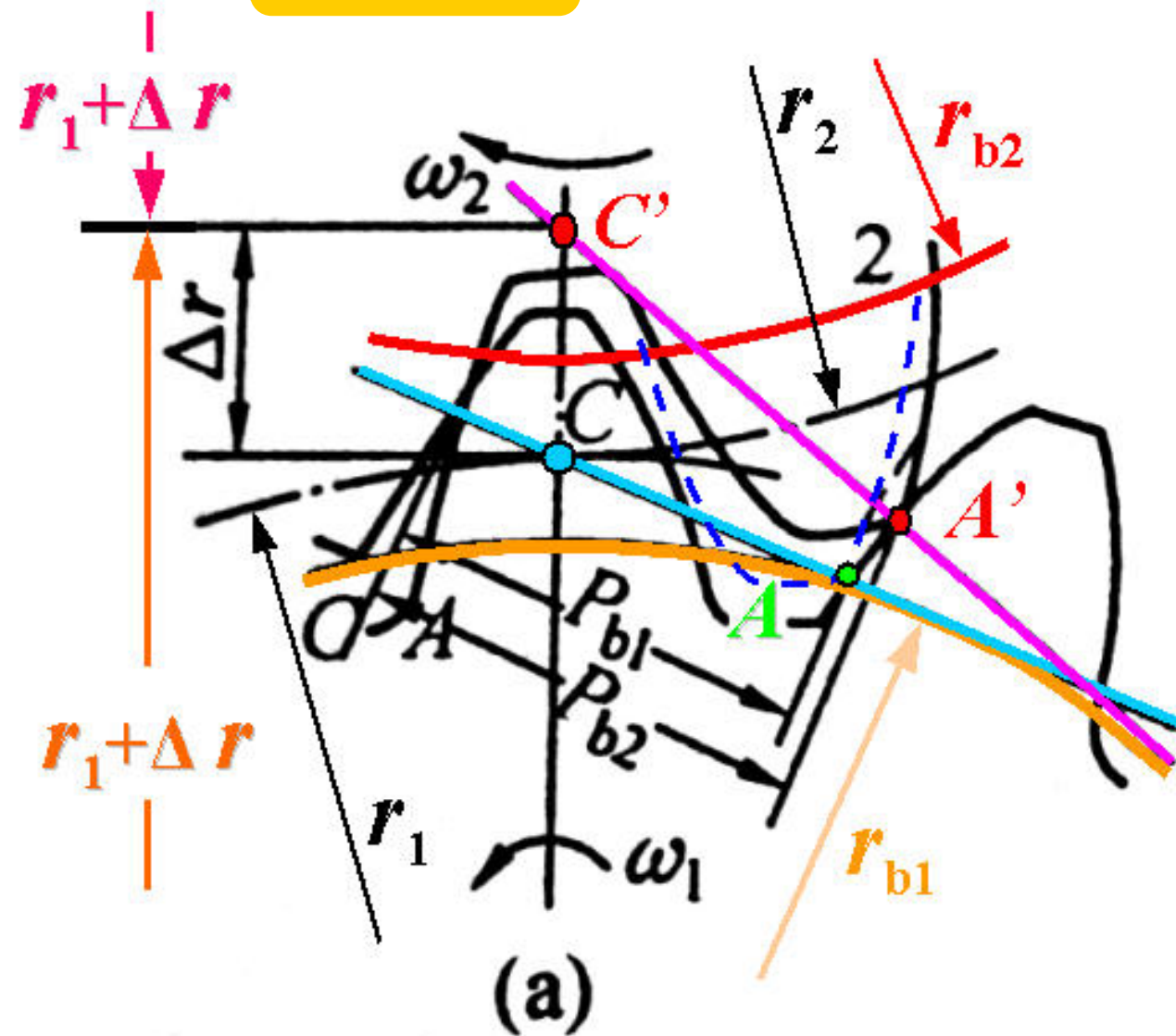
啮入冲击

当 $P_{b1} < P_{b2}$;

瞬时传动比:

$$i = \frac{r_2 - \Delta r}{r_1 + \Delta r} < \frac{r_2}{r_1}$$

这种情况称为
啮入冲击

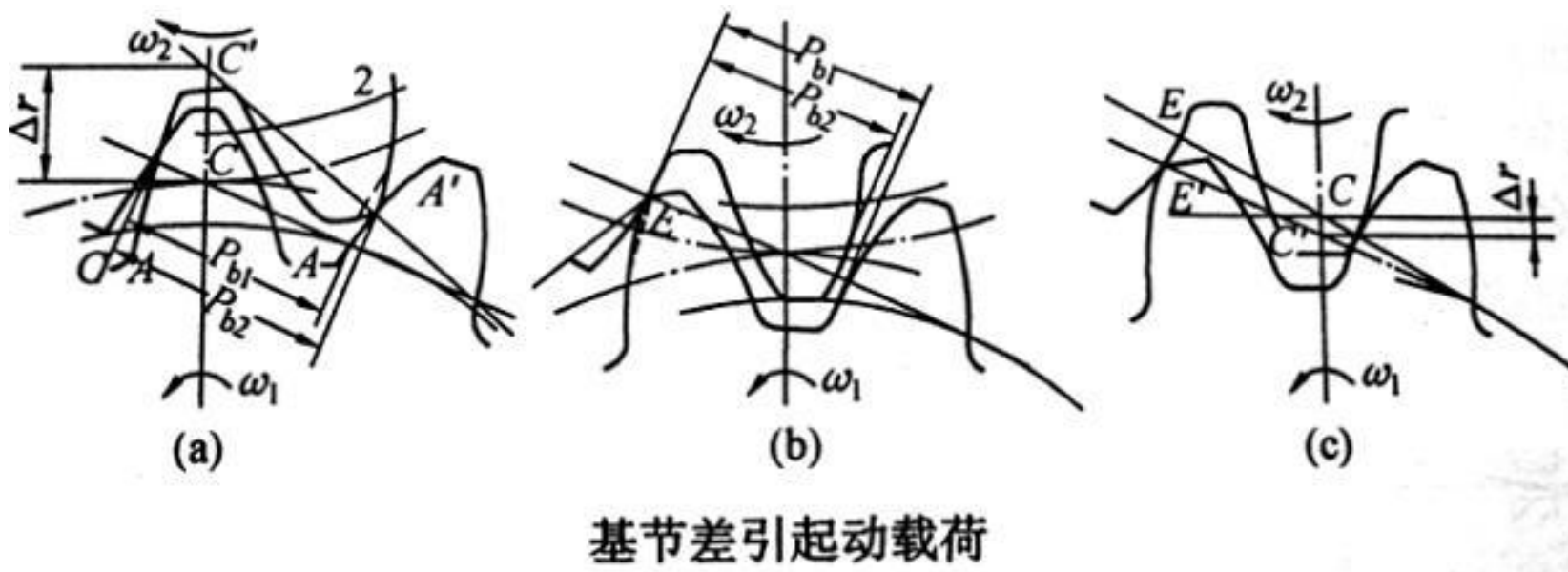


7.5.2 动载系数 — $K_v (\geq 1)$

• 影响 K_v 的主要因素

— 基节、齿形误差产生的传动误差

• 换齿冲击



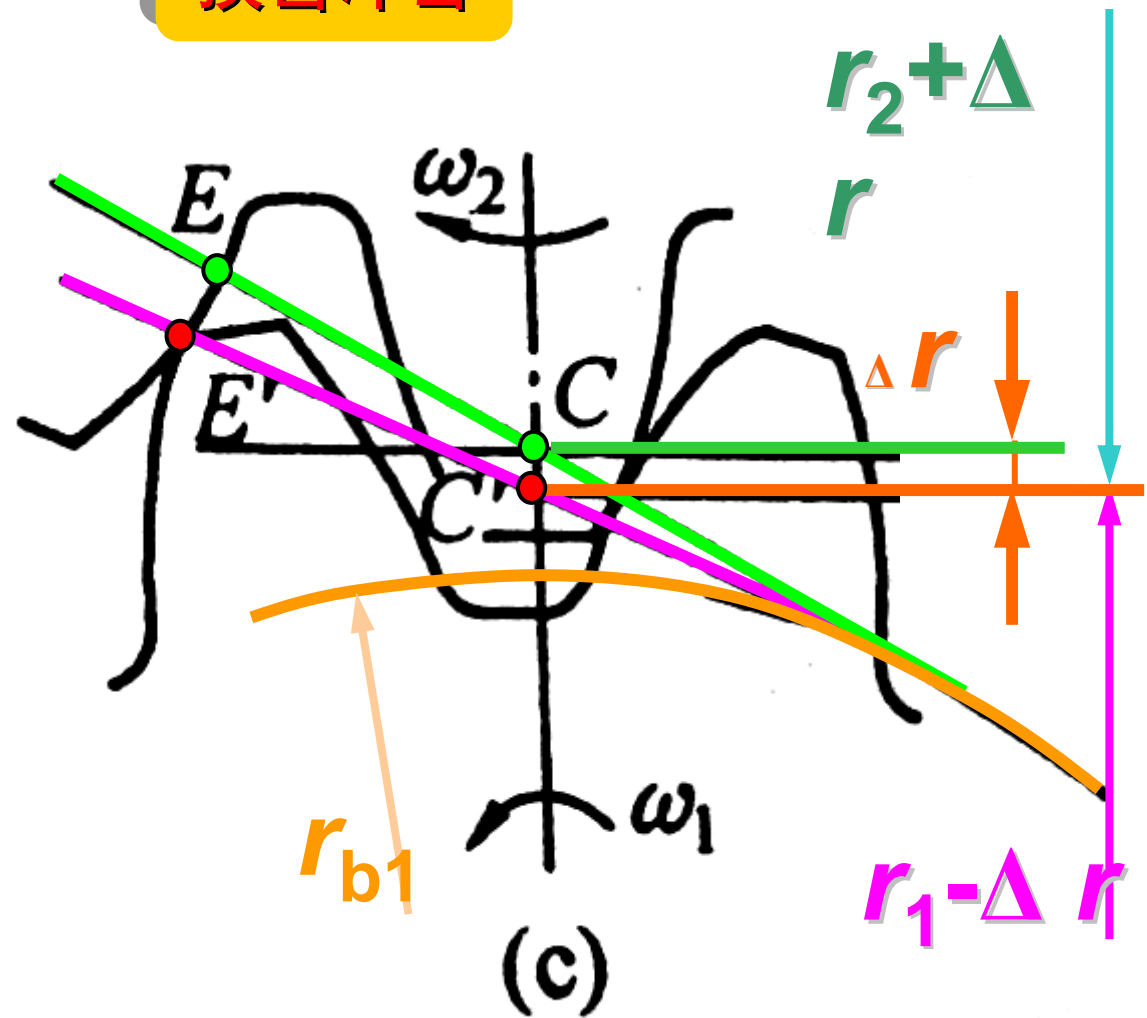
换齿冲击

当 $p_{b1} > p_{b2}$

瞬时传动比

$$i = \frac{r_2 + \Delta r}{r_1 - \Delta r} > \frac{r_2}{r_1}$$

这种情况称为
换齿冲击。



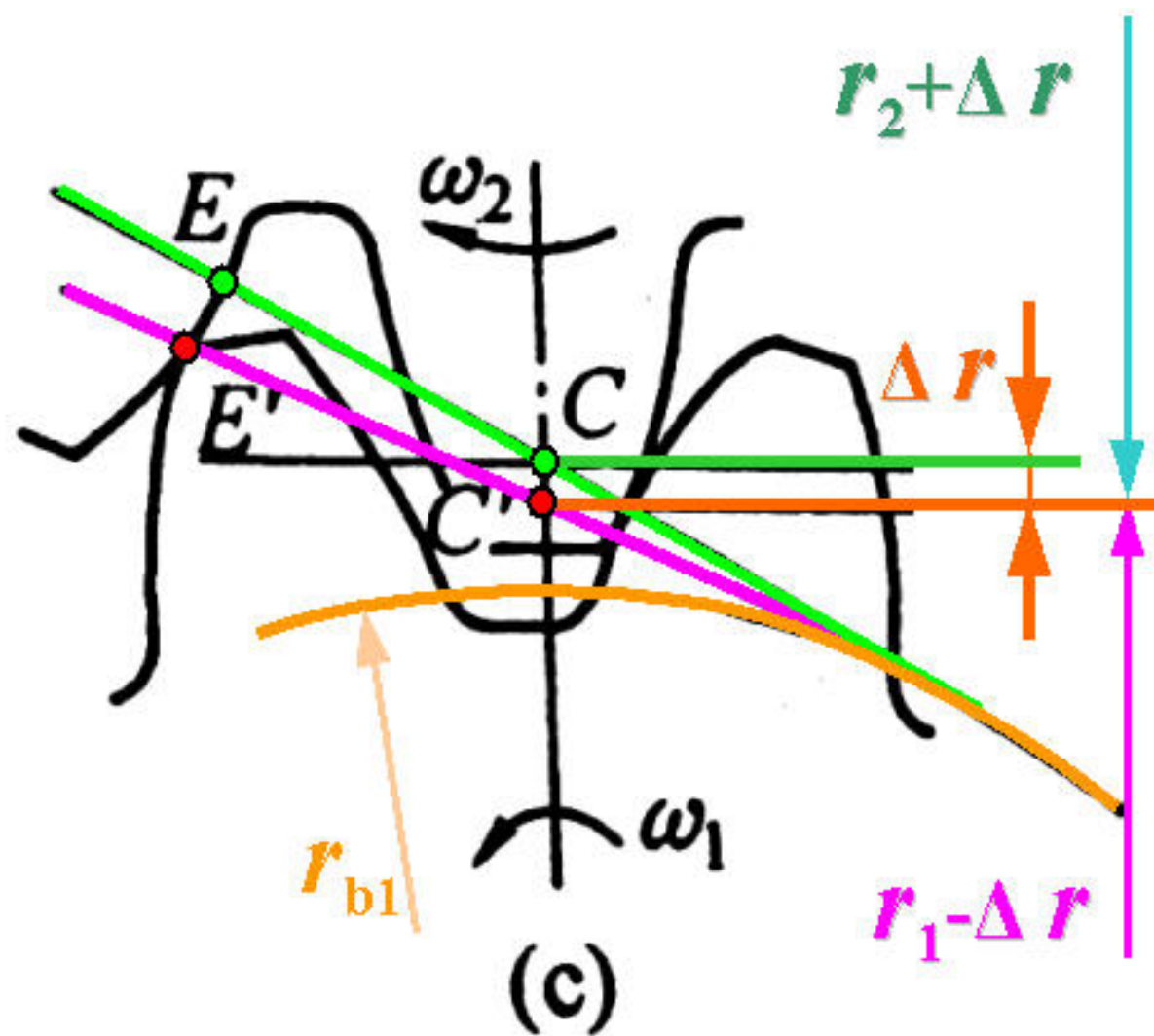
换齿冲击

当 $p_{b1} > p_{b2}$

瞬时传动比

$$i = \frac{r_2 + \Delta r}{r_1 - \Delta r} > \frac{r_2}{r_1}$$

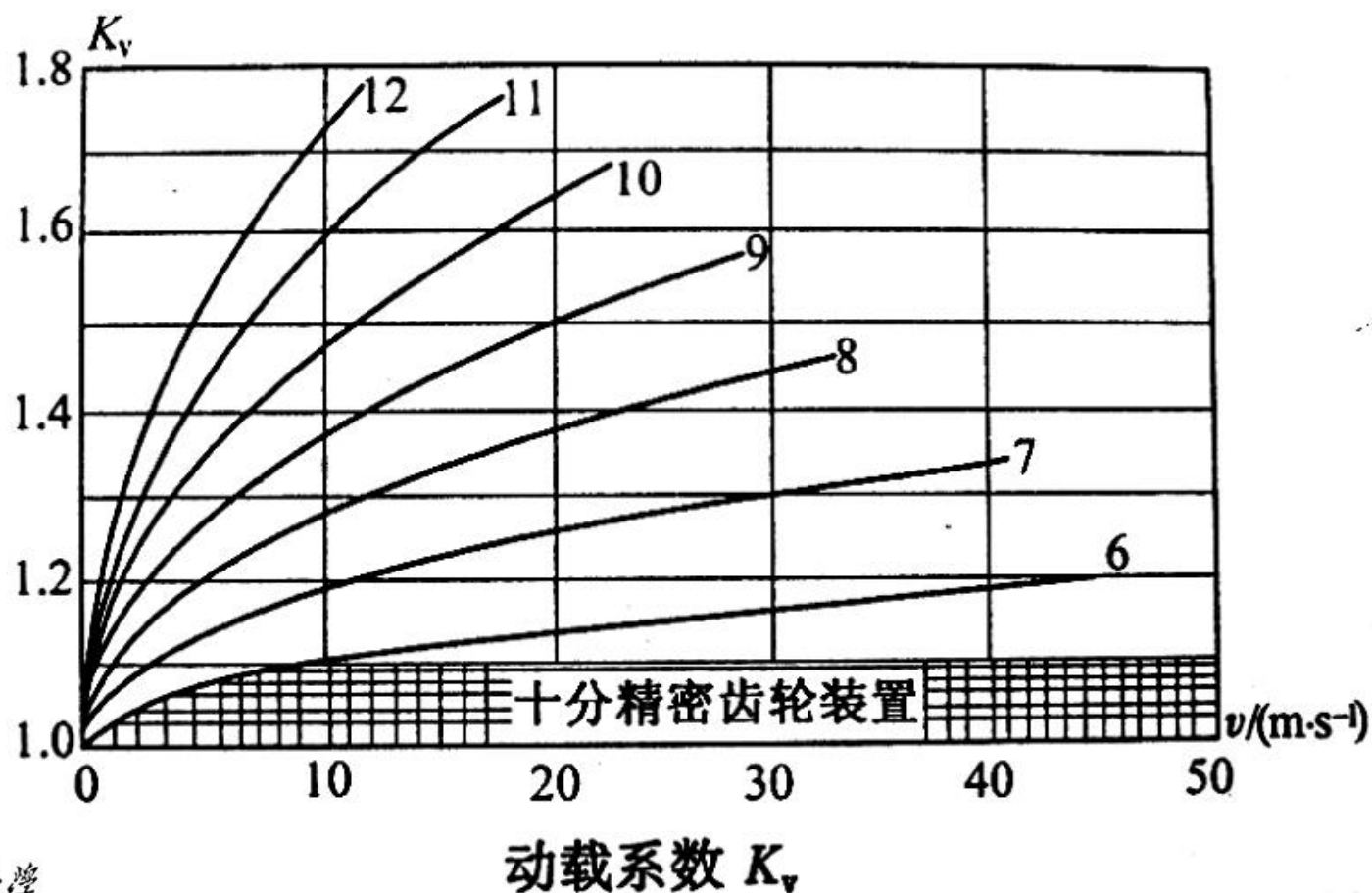
这种情况称为
换齿冲击。



7.5.2 动载系数 — $K_v (\geq 1)$

• K_v 的选择

— 根据精度等级及圆周速度查教材P96图6.7



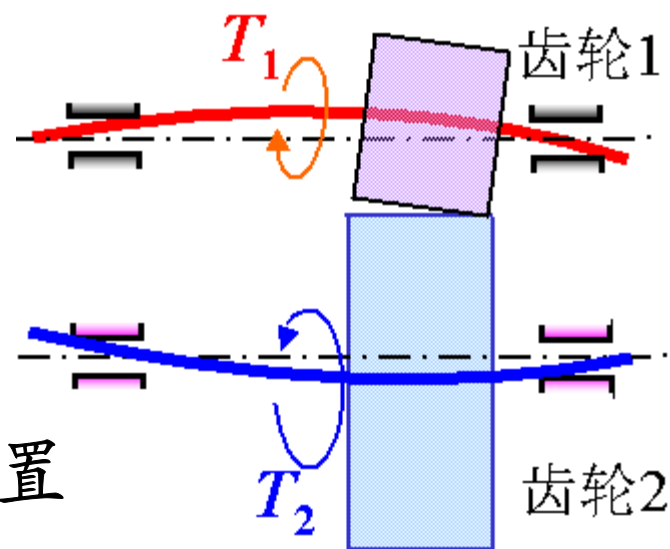
7.5.3 齿向载荷分布系数— K_β (≥ 1)

• K_β 的物理意义

- 考虑沿齿宽方向载荷分布不均匀对轮齿应力的影响系数

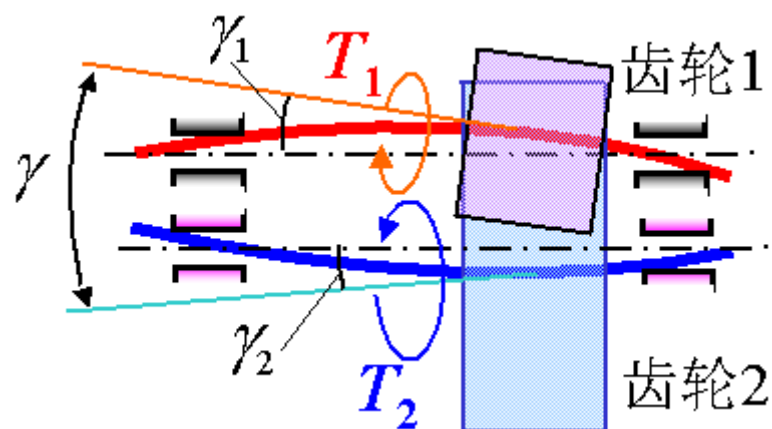
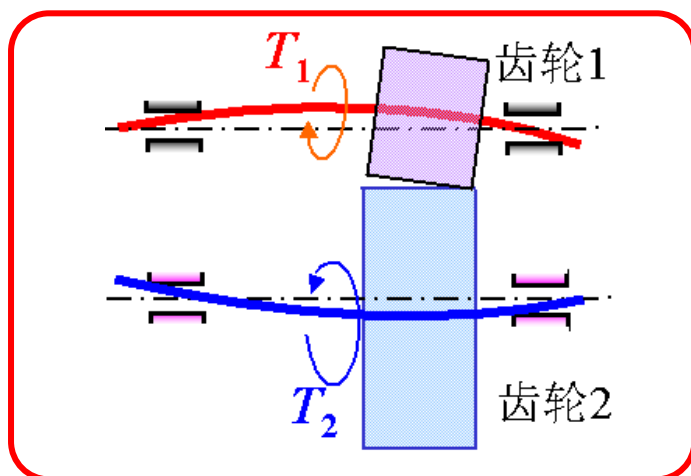
• 影响 K_β 的主要因素

- 齿轮的制造和安装误差
- 轮齿、轴系及机体的刚度
- 齿轮在轴上相对于轴承的位置
- 轮齿的宽度
- 齿面硬度 等

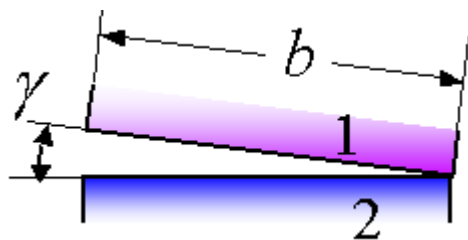


7.5.3 齿向载荷分布系数— K_{β} (≥ 1)

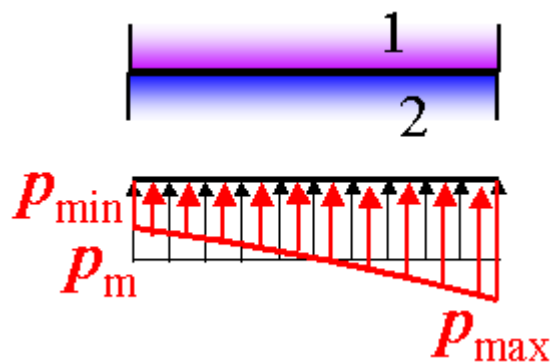
(a) 非对称布置的圆柱齿轮受载后产生齿面位置产生偏斜



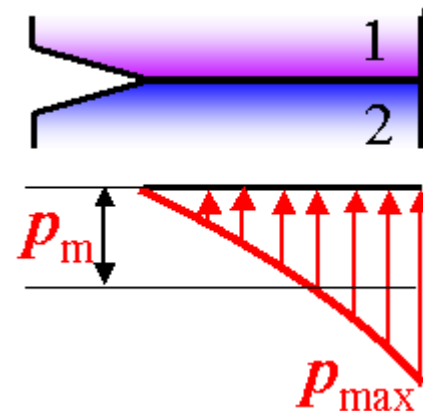
(b) 轮齿为绝对刚体



(c) 轮齿为弹性体时全齿宽接触



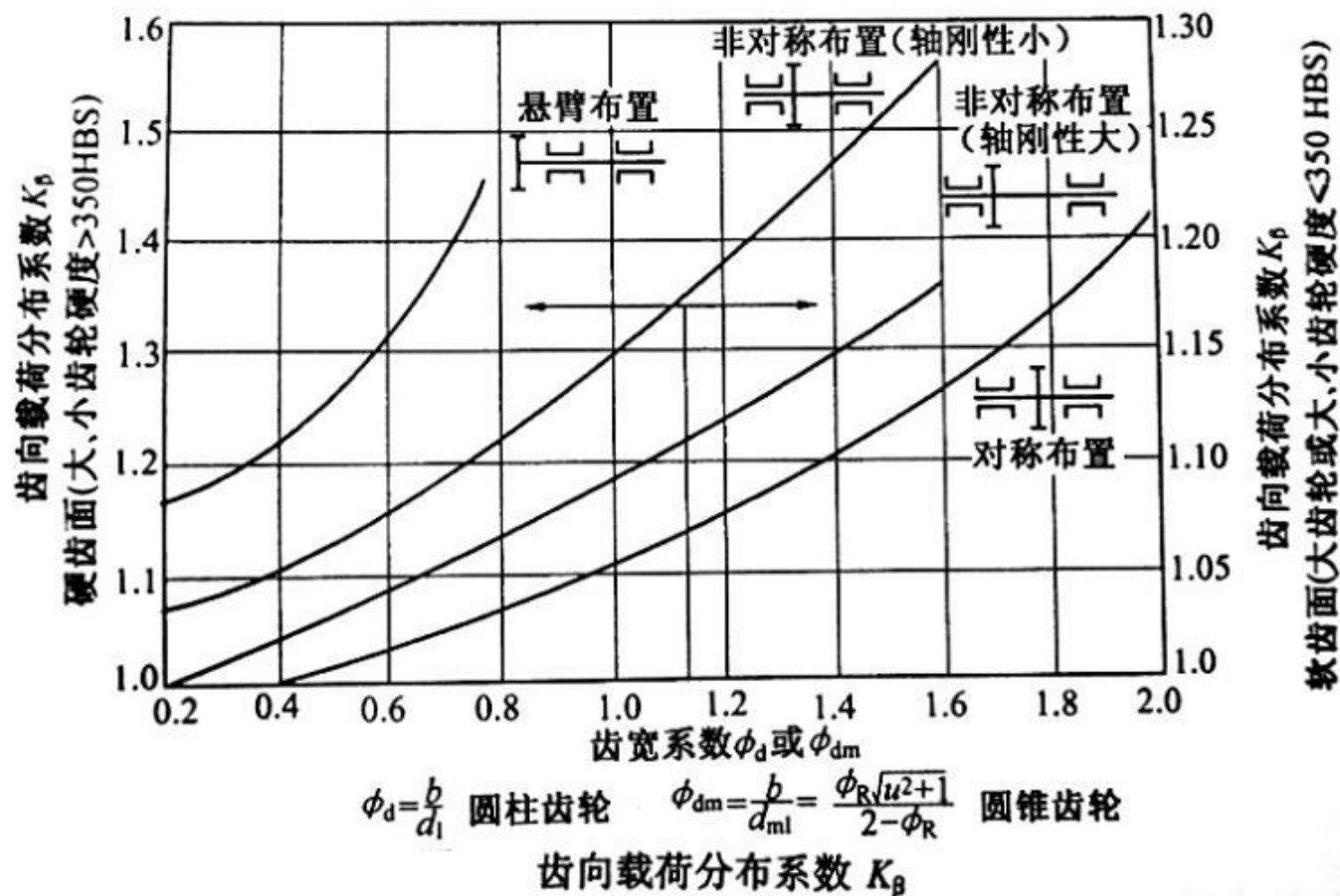
(d) b 或 γ 较大时齿宽方向接触情况



7.5.3 齿向载荷分布系数— K_β (≥ 1)

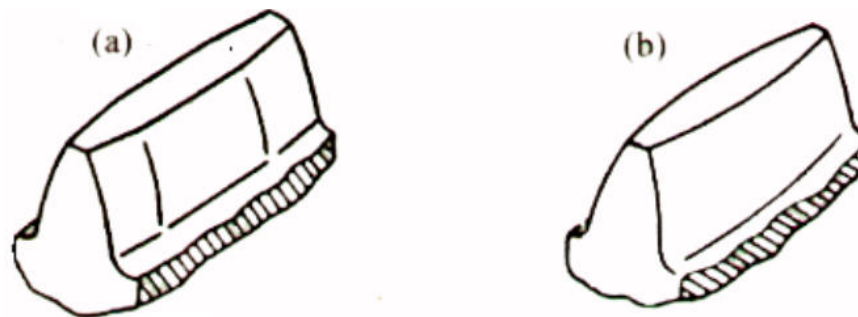
• K_β 的选择

- 根据齿宽系数、齿轮在轴上的布置形式、齿面硬度 $HB > 350$? $HB \leq 350$? 查教材P98图7.12



7.5.3 齿向载荷分布系数— K_{β} (≥ 1)

- 改善齿向载荷分布不均匀状况的措施
 - 考齿轮的制造和安装精度 \uparrow
 - 轴、轴承及机体的刚度 \uparrow
 - 齿轮在轴上的布置 ——合理选择
 - 轮齿的宽度 ——设计时合理选择
 - 采用软齿面 ——通过跑合使载荷均匀
 - 硬齿面齿轮 ——将齿端修薄、或做成鼓形齿

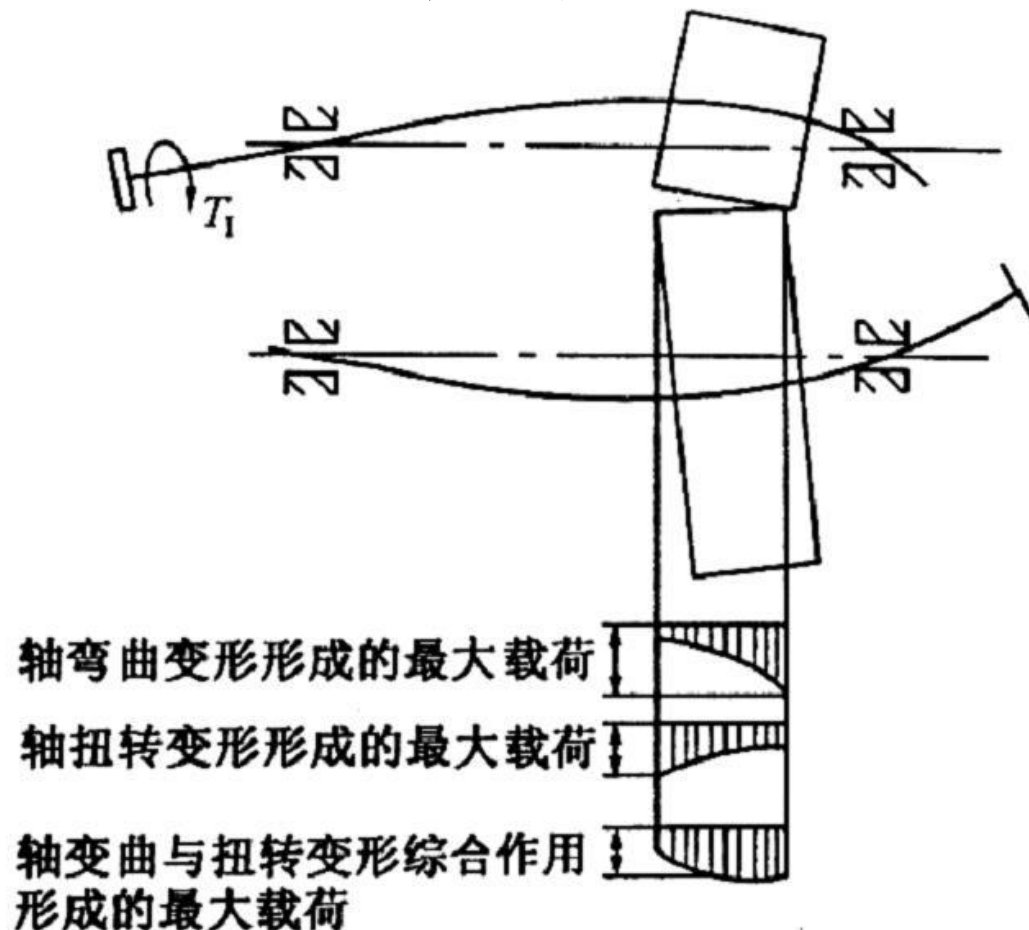


— 齿轮要布置在远离转矩输入端的位置。

7.5.3 齿向载荷分布系数— K_{β} (≥ 1)

• 改善齿向载荷分布不均匀状况的措施

— **问题：**为什么齿轮要布置在远离转矩输入端的位置？



弯扭变形综合作用

7.5.4 齿间载荷分配系数— K_α (≥ 1)

• K_α 的物理意义

— 考虑同时啮合的各对轮齿载荷分配不均匀对轮齿应力的影响系数

• 影响 K_α 的主要因素

— 齿轮的制造误差特别是基节偏差

— 齿轮的啮合刚度

— 重合度

— 跑合情况 等

• K_α 的选择

— 根据齿面是否硬化、精度等级查教材P99表6.4
或根据端面重合度、轴面重合度计算

7.5.4 齿间载荷分配系数— K_α (≥ 1)

- K_α 的选择—查教材P99表7.4，表中参数说明：

(1) Z_ε 、 Y_ε —分别为计算齿面接触应力和齿根弯曲应力时重合度系数。其值分别由图7.16、图7.22查取；

(2) β_b —基圆螺旋角；

(3) ε_γ —为总的重合度， $\varepsilon_\gamma = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta$

表 6.4 齿间载荷分配系数 K_α 。

精度等级(Ⅱ组)		5	6	7	8	9	
直 齿 轮	未经表面硬化	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	
	经表面硬化	1.0	1.0	1.1	1.2	接触	$1/Z_\varepsilon^2 \geq 1.2$
						弯曲	$1/Y_\varepsilon \geq 1.2$
斜 齿 轮	未经表面硬化	1.0	1.0	1.1 ^①	1.2	1.4	
	经表面硬化	1.0	1.1	1.2	1.4	$\frac{\varepsilon_\gamma}{\varepsilon_\alpha Y_\varepsilon} \geq \varepsilon_\alpha / \cos^2 \beta_b \geq 1.4$	



7.5.4 齿间载荷分配系数— K_α (≥ 1)

- K_α 的选择—查教材P99表7.4，表中参数说明：

对于标准外啮合齿轮传动：

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta$$

$$\varepsilon_\alpha = \left[1.88 - 3.2 \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right) \right] \cos \beta$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \sin \beta}{\pi m_n} = 0.318 \phi_d z_1 \tan \beta$$



《机械设计》课程

第7讲 齿轮传动

7.6 轮齿受力分析

7.6 轮齿受力分析

- 问题

- 为受力分析，力的作用位置取在何处？
- 齿面间的摩擦力如何考虑？

- 考虑

- 在实际啮合线上有单对齿啮合区，轮齿受力大；
- 在节点 C 附近主从动轮轮齿相对滑动速度较小，在节点C处为零。

- 结论

- 取在节点C处啮合时进行受力分析，并不计摩擦力。

7.6 轮齿受力分析

• 力的类型

主动轮：
法向力 F_{n1}

 F_{t1}
 F_{r1}

径向力

圆周力

从动轮：

法向力 F_{n2}

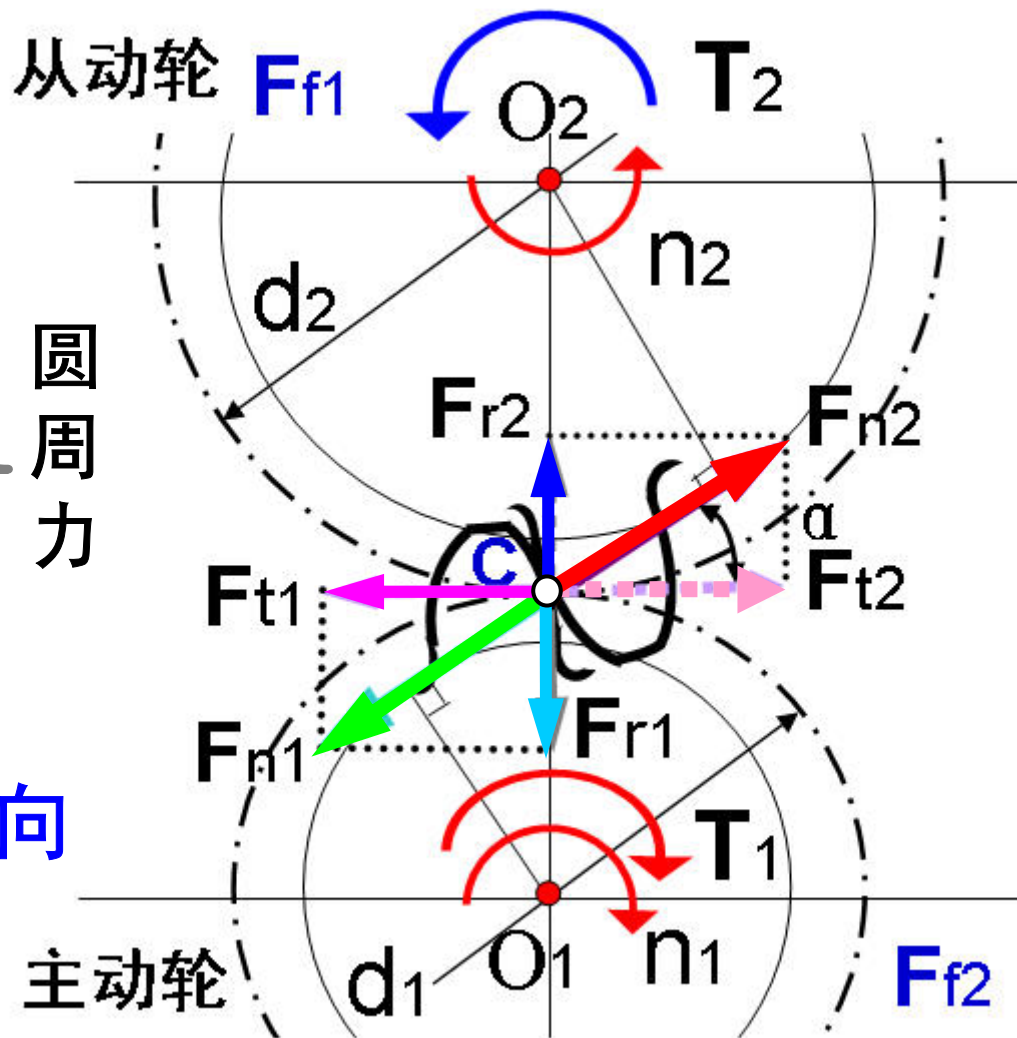
 F_{r2}
 F_{t2}

• 各分力的大小、方向

$$F_{n1} = -F_{n2}$$

$$F_{t1} = -F_{t2}$$

$$F_{r1} = -F_{r2}$$



7.6 轮齿受力分析

圆周力 $F_t = ?$ $F_t = \frac{2T_1}{d_1}$

径向力 $F_r = ?$ $F_r = F_t \tan \alpha$

法向力 $F_n = ?$ $F_n = \frac{F_t}{\cos \alpha}$

• 各分力方向判别方法

– 作用于主、从动轮上的各对力均大小相等，方向相反：

- F_t 方向？ — 在主动轮上与运动方向相反，在从轮上与运动方向相同；
- F_r 方向？ — 与啮合方式有关，对于外啮合，主、从动轮上的径向力分别指向各自的轮心。

