

# 第11章 齿轮传动

前言

轮齿的失效形式及计算准则

齿轮的材料

齿轮传动的精度

齿轮传动作用力分析及计算载荷

直齿圆柱齿轮传动齿面接触强度计算

直齿圆柱齿轮齿根弯曲疲劳强度计算

斜齿圆柱齿轮传动

直齿圆锥齿轮传动

齿轮的构造

齿轮传动的润滑和效率

## 教学要求:

- 1、了解齿轮传动特点、分类;
- 2、掌握主要失效形式;
- 3、了解常用齿轮材料及热处理措施;
- 4、掌握齿轮传动的计算载荷;
- 5、掌握直齿圆柱齿轮的强度计算措施及主要参数的选择措施;
- 6、掌握斜齿圆柱齿轮和圆锥齿轮受力分析和强度计算措施

**前言** 简介直齿圆柱、斜齿圆柱、直齿圆锥齿轮传动的设计。

## 分类

按类型分

直齿圆柱齿轮传动  
斜齿圆柱齿轮传及人字齿轮传动  
锥齿轮传动

按工作条件分

开式传动 外露、灰尘、易磨损，适于低速传动。  
半开式传动 有简朴防护罩，大齿轮浸入油池，润滑得到改善、适于非主要应用；  
闭式传动 全封闭、润滑良好、适于主要应用。

按载荷分

低速轻载:  $V \leq 1 \sim 3 \text{m/S}$  ;  $F_n \leq 5 \sim 10 \text{KN}$   
中速中载:  $3 \text{m/S} < V < 10 \text{m/S}$  ;  $10 \text{KN} \leq F_n < 50 \text{KN}$   
高速重载:  $V \geq 10 \text{m/S}$  ;  $F_n \geq 50 \text{KN}$

按齿面硬度分

硬齿面齿轮 (齿面硬度  $350 > \text{HBS}$ )  
软齿面齿轮 (齿面硬度  $\leq 350 \text{HBS}$ )

## §11-1 轮齿的失效形式及计算准则

### 一、失效形式

1 轮齿折断

2 齿面磨料磨损

3 齿面疲劳点蚀

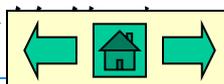
4 齿面胶合

### 二、计算准则

- 1、 齿轮主要的失效形式有哪些？
- 2、 多种失效形式产生的原因？
- 3、 多种失效形式主要发生的场合？
- 4、 应对多种失效形式的措施？

主要考虑的情况：

软齿面、硬齿面、高速、低速、  
重载、轻载、开式、闭式



## (一) 轮齿的失效形式

### 1. 轮齿折断

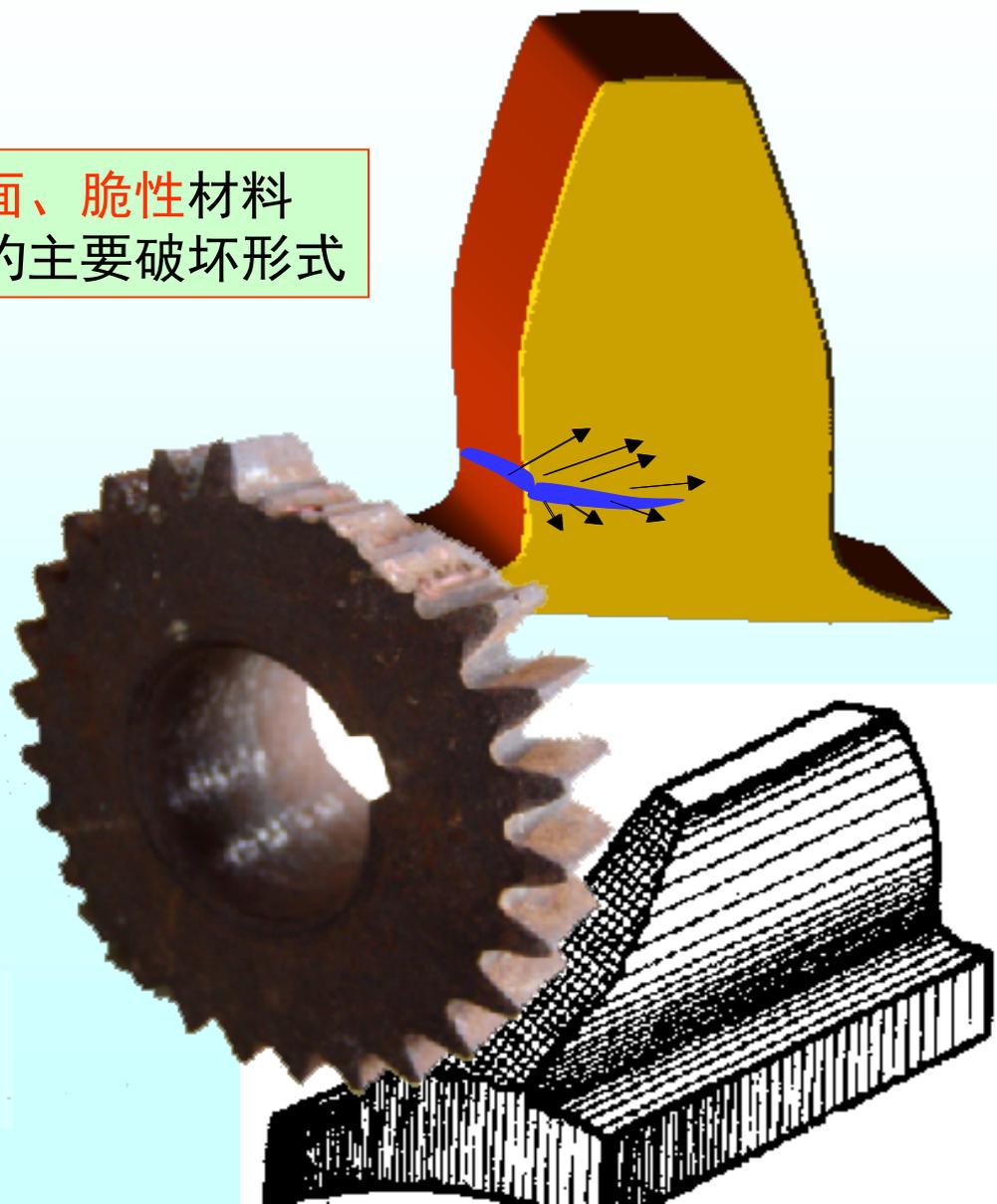
┌ 疲劳折断  
└ 过载折断

闭式硬齿面、脆性材料  
齿轮传动的主要破坏形式

→ { 全齿折断(齿根)(直齿)  
局部折断(斜齿受载不均)

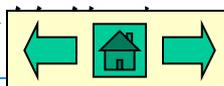
**疲劳折断：**轮齿受的弯曲应力是循环变化的，在齿根的过渡圆角处具有较大的应力集中。易发生轮齿**疲劳折断**。

**过载折断：**齿轮受到过载或冲击时，引起轮齿的**忽然折断**。



## 提升轮齿抗折断能力的措施：

- 1) 增大齿根过渡圆角半径，消除加工刀痕，减小齿根应力集中；
- 2) 增大轴及支承的刚度，使轮齿接触线上受载较为均匀；
- 3) 采用合适的热处理，使轮齿芯部材料具有足够的韧性；
- 4) 采用喷丸、滚压等工艺，对齿根表层进行强化处理。



## 2. 齿面失效

齿面点蚀  
齿面胶合  
齿面磨损  
齿面塑性变形

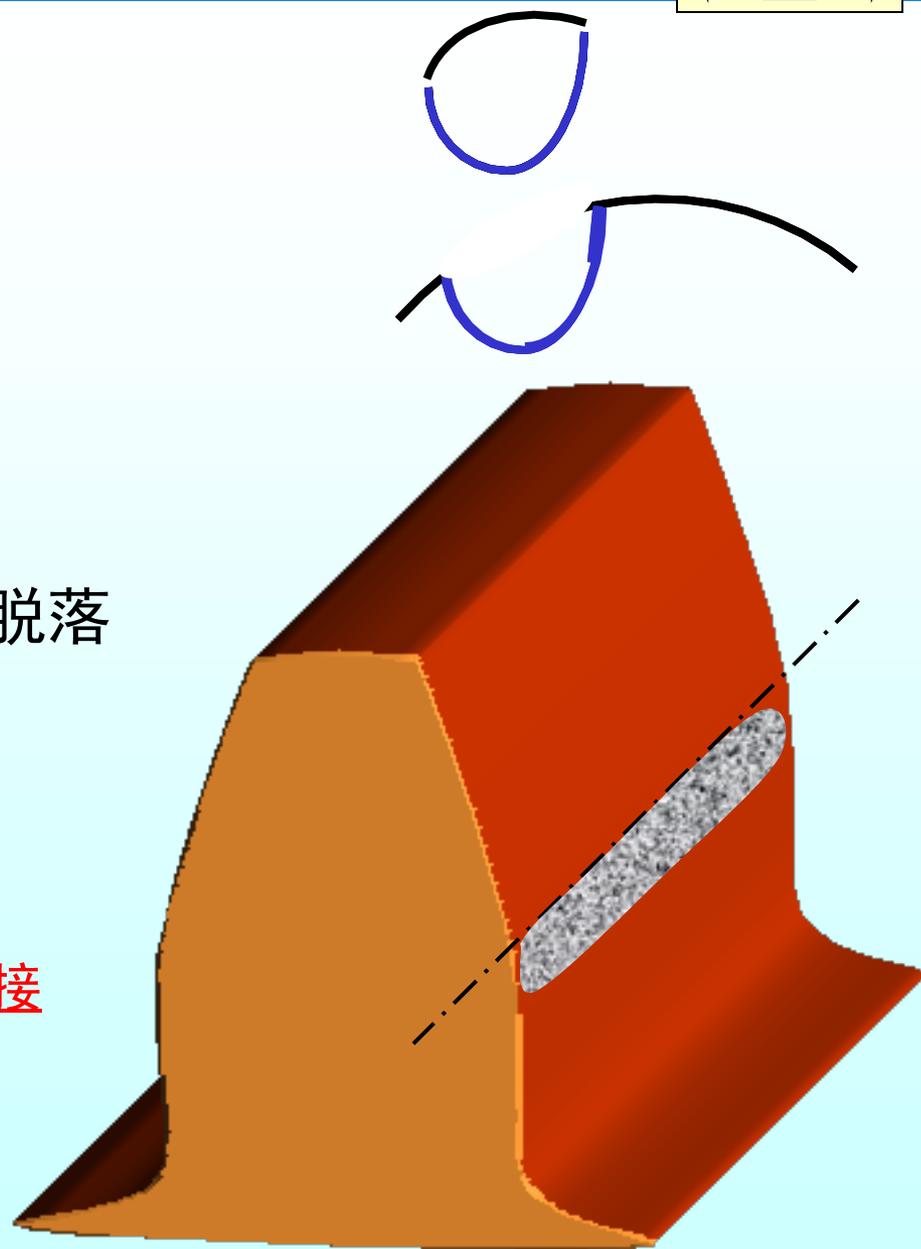
### 1) 齿面疲劳点蚀

$\sigma_H$  反复 → 裂纹 → 扩展 → 麻点状脱落

闭式软齿面齿轮传动的主要破坏形式。开式传动中一般不会出现点蚀现象。

发生部位：一般出现在齿根表面接近节线处。

(载荷大；速度低难形成油膜)

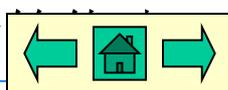


## 齿面点蚀



### 采用措施:

- 提升材料硬度 $\Rightarrow$ 增强抗点蚀能力
- 合理选择润滑油 $\Rightarrow$ 预防裂纹扩展



## 2) 齿面胶合

润滑失效→表面粘连  
→沿运动方向撕裂

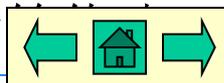
当齿面所受的压力很大且润滑效果差，或压力很大而速度很高时，因为发热大，瞬时温度高，相啮合的齿面发生粘联现象，此时两齿面有相对滑动，粘联的地方被撕裂。→这叫**热胶合**。

低速重载的齿轮，油膜遭破坏也发生胶合现象。这时齿面温度无明显增高，这种胶合→**冷胶合**。

高速重载、低速重载闭式传动的主要破坏形式。

- 措施：
- 1) 材料的硬度及配对
  - 2) 减小齿面粗糙度
  - 3) 增长润滑油粘度(低速)
  - 4) 加抗胶合添加剂(高速)





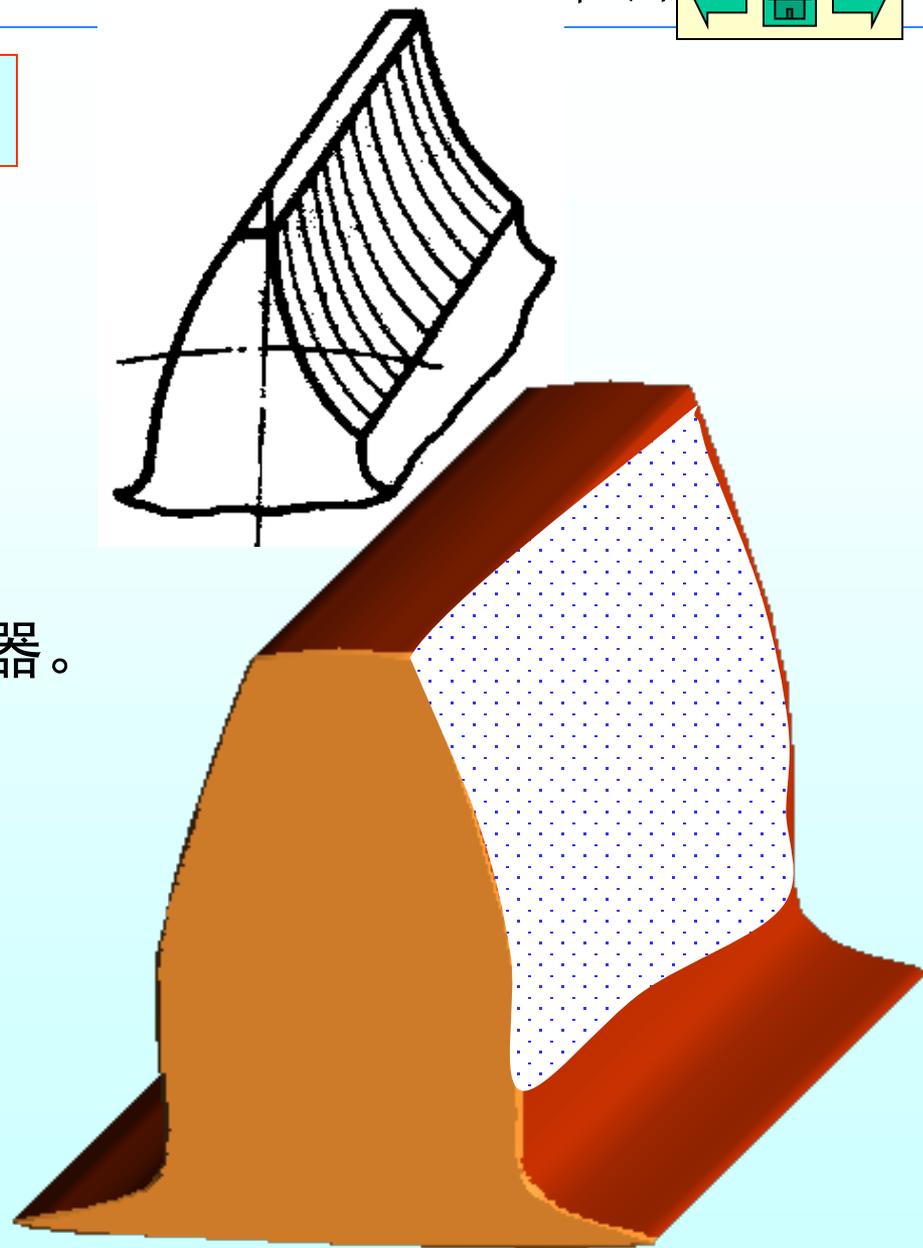
### 3) 齿面磨损

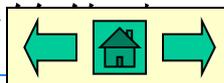
→ 齿形破坏

- 1) **磨粒磨损**：因为金属微粒，灰石砂粒进入齿轮引起的磨损。
- 2) **跑合磨损**：一般指新机器。

**开式齿轮传动**易发生磨粒磨损。

- 措施**：
- 1) 减小齿面粗糙度
  - 2) 改善润滑条件，  
清洁环境
  - 3) 提升齿面硬度

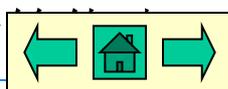




## 4) 齿面塑性变形

应力过大→材料屈服→塑性流动 →齿面变形

低速重载软齿面闭式传动  
的主要破坏形式。

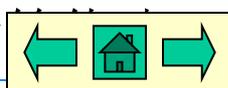


折断: { 疲劳折断 → 全齿折断(齿根)(直齿)  
           过载折断           局部折断(斜齿受载不均)

齿面失效: { 齿面点蚀:  $\sigma_H$  反复 → 裂纹 → 扩展 → 麻点状脱落  
                   → 接近节线的齿根表面  
           齿面胶合: 润滑失效 → 表面粘连 → 沿运动方向撕裂  
           齿面磨粒磨损: 磨粒磨损 → 齿形破坏  
           齿面塑性变形: 齿面沿摩擦力方向塑性变形

### 3. 多种场合的主要失效形式

{ \*闭式传动 → { 软齿面 → 齿面点蚀  
                   硬齿面 → 轮齿折断  
           \*开式传动 → 齿面磨粒磨损  
           \*闭式高速重载传动 → 齿面胶合  
           \*低速重载软齿面 → 齿面塑性变形

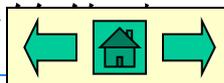


## (二) 齿轮传动常用计算准则

- 防齿面点蚀 → 齿面接触疲劳强度计算 → 求中心距  $a$
- 防轮齿折断 → 齿根弯曲疲劳强度计算 → 求模数  $m$

常用的计算措施:

- 闭式传动
  - 软齿面(点蚀): 按齿面强度设计(先求  $a$ ) → 按弯曲强度校核
  - 硬齿面(折断): 按弯曲强度设计(先求  $m$ ) → 按齿面强度校核
- 开式传动: 按弯曲强度设计(求  $m$ ) →  
(磨损) 考虑磨损将  $[\sigma_F] \times (0.7 \sim 0.8)$   
(许用弯曲应力)



## §11-2 齿轮的材料及热处理

### 1、对齿轮材料性能的要求

- 1) 齿面要硬, 齿芯要韧
- 2) 易于加工及热处理
- 3) 软齿面齿轮齿面配对硬度差为30~50HBS

### 2、常用齿轮材料

钢材的韧性好, 耐冲击, 经过热处理和化学处理可改善材料的机械性能, 最适于用来制造齿轮。

**锻钢** 含碳量为(0.15~0.6)%的碳素钢或合金钢。  
一般齿轮用碳素钢, 主要齿轮用合金钢。

**铸钢** 耐磨性及强度很好, 常用于大尺寸齿轮。

**铸铁** 常作为低速、轻载、不太主要的场合的齿轮材料;

**非金属材料** 合用于高速、轻载、且要求降低噪声的场合。

### 3. 常用热处理

软齿面：正火、调质

两轮材料相同步，采用不同的热处理

硬齿面：低碳钢—渗碳+淬火

中碳钢—表面淬火

钢制软齿面齿轮要求小齿轮硬度不小于大齿轮30-50HBS

- 原因：**
- 1) 小齿轮齿根强度较弱
  - 2) 小齿轮的应力循环次数较多
  - 3) 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，可提升大齿轮的接触疲劳强度

## 4. 钢制齿轮加工工艺过程

### 软齿面齿轮：

坯料→热(正、调)→切齿(一般8级、精切7级)

### 硬齿面齿轮：

坯料→热(正)→切齿→表面硬化处理(淬火、氰化、氮化)→精加工(磨齿)

## §11-3 齿轮传动的精度等级

### 误差的影响：

制造和安装齿轮传动装置时，不可防止会产生齿形误差、齿距误差、齿向误差、两轴线不平行误差等。

- 1.转角与理论不一致，影响运动的不精确性；
- 2.瞬时传动比不恒定，出现速度波动，引起震动、冲击和噪音影响运动平稳性；
- 3.齿向误差造成轮齿上的载荷分布不均匀，使轮齿提前损坏，影响载荷分布的不均匀性。

国标GB10095-88给齿轮副要求了12个精度等级。其中1级最高，12级最低，常用的为6~9级精度。

按照误差的特征及它们对传动性能的主要影响，将齿轮的各项公差提成三组，分别反应传递运动的精确性，传动的平稳性和载荷分布的均匀性。

表11-2 齿轮传动精度等级的选择及其应用

精度等级	圆周速度 $v(m/s)$			应 用
	直齿圆柱齿轮	斜齿圆柱齿轮	直齿圆锥齿轮	
6级	$\leq 15$	$\leq 25$	$\leq 9$	高速重载齿轮传动，如飞机、汽车和机床中的主要齿轮；分度机构的齿轮传动。
7级	$\leq 10$	$\leq 17$	$\leq 6$	高速中载或低速重载齿轮传动，如飞机、汽车和机床中的主要齿轮；分度机构的齿轮传动。
8级	$\leq 5$	$\leq 10$	$\leq 3$	机械制造中对精度无特殊要求的齿轮。
9级	$\leq 3$	$\leq 3.5$	$\leq 2.5$	低速及对精度要求低的齿轮

## §11-4 齿轮传动作用力分析及计算载荷

### (一) 直齿圆柱齿轮传动作用力分析

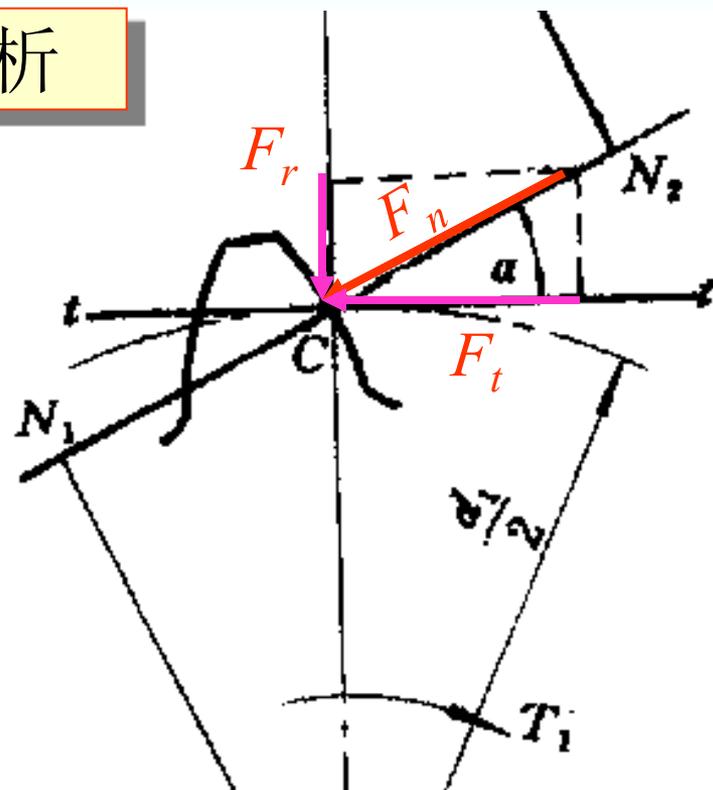
设一对原则齿轮正确安装，齿廓在C点接触，略去  $F_f$  不计 → 轮齿间的法向力为  $F_n$ ，沿啮合线指向齿面

→ 对  $F_n$  进行分解：

#### 一. $F_n$ 的分解：

$F_n$  分解为：

- 圆周力  $F_t$ ：沿分度圆切线方向指向齿面
- 径向力  $F_r$ ：沿半径方向指向齿面



## 二. 作用力的大小:

$$\begin{cases} F_t = 2T_1 / d_1 & (11-1) \\ F_r = F_t \cdot \tan \alpha \\ F_n = F_t / \cos \alpha & (11-1a) \end{cases}$$

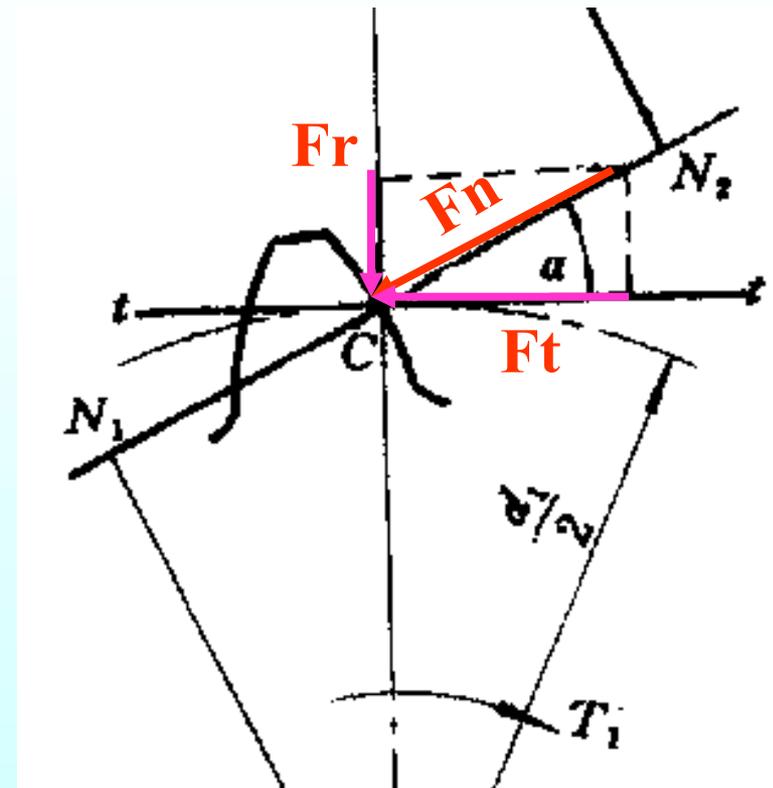
$T_1$ : 小齿轮转矩  $N \cdot mm$ ,

$d_1$ : 小齿轮分度圆直径  $mm$ ,

$\alpha$ : 压力角

$$T_1 = 10^6 \frac{P}{\omega_1} = 9.55 \times 10^6 \frac{P}{n_1} \quad N \cdot mm$$

$P$ —功率  $kw$ , 转速— $r/min$



# 三. 作用力的方向及判断

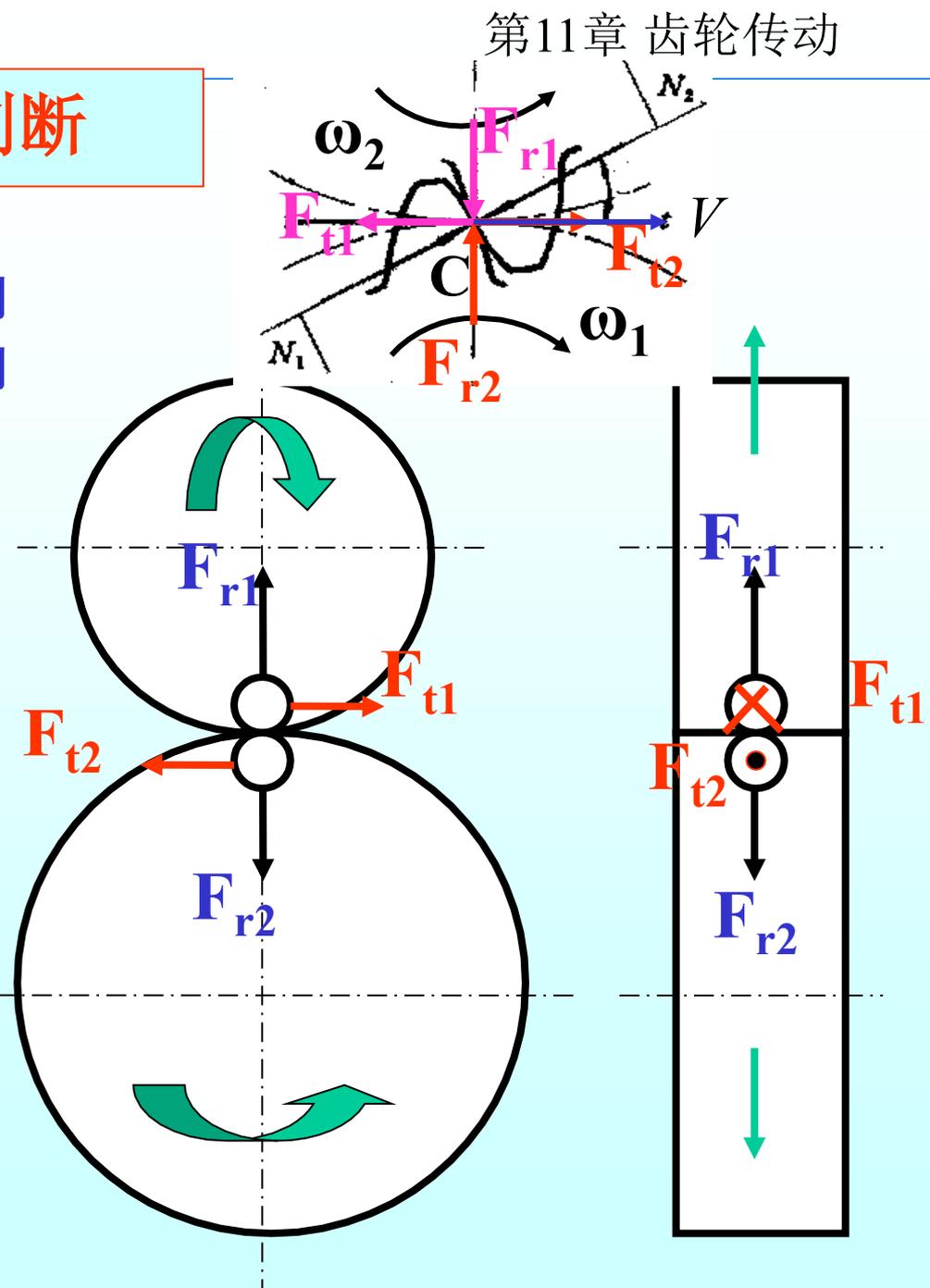
- $F_t$ 
  - $F_{t1}$  (主): 与  $V_1$  反向
  - $F_{t2}$  (从): 与  $V_2$  同向
- $F_r$  — 由啮合点指向各自轮心

## 示意图

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

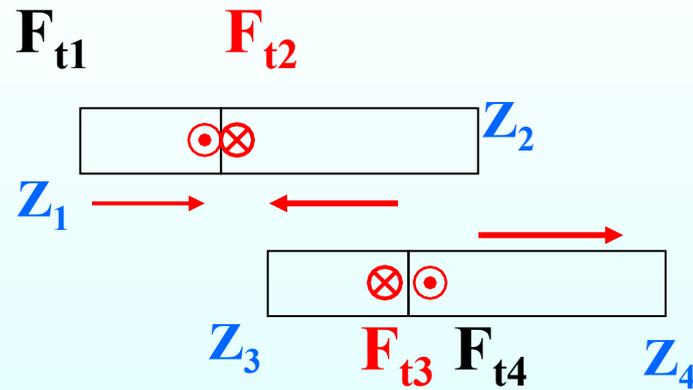
$$F_{r1} = -F_{r2}$$

※: 画受力图时, 各分力画在啮合点上



## 例题1

- 已知：如图
- 求：齿轮2、3的圆周力的方向

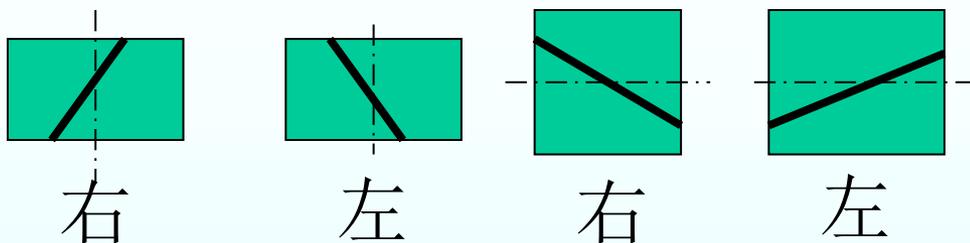


## (二)斜齿圆柱齿轮传动作用力分析

其轮齿沿螺旋线方向均匀地分布在圆柱体→左、右旋

### 一. $F_n$ 的分解:

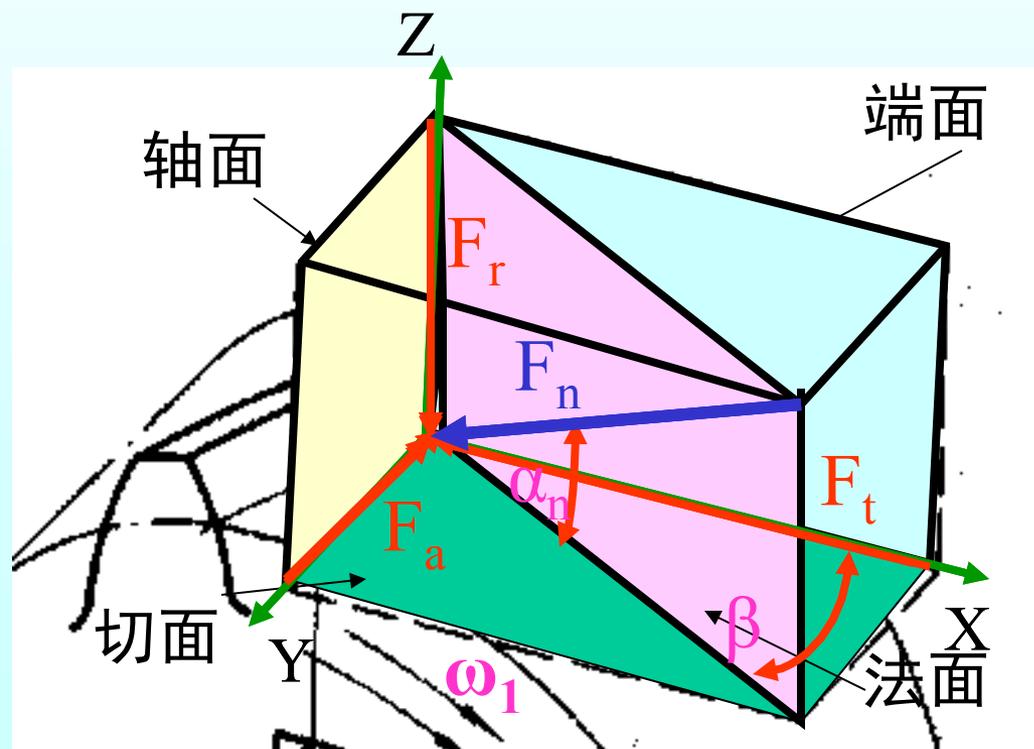
过C建立 $O_{XYZ}$ 坐标



圆周力  $F_t$ : 沿分度圆切线方向指向齿面

径向力  $F_r$ : 沿半径方向指向齿面

轴向力  $F_a$ : 与轴线平行并指向齿面

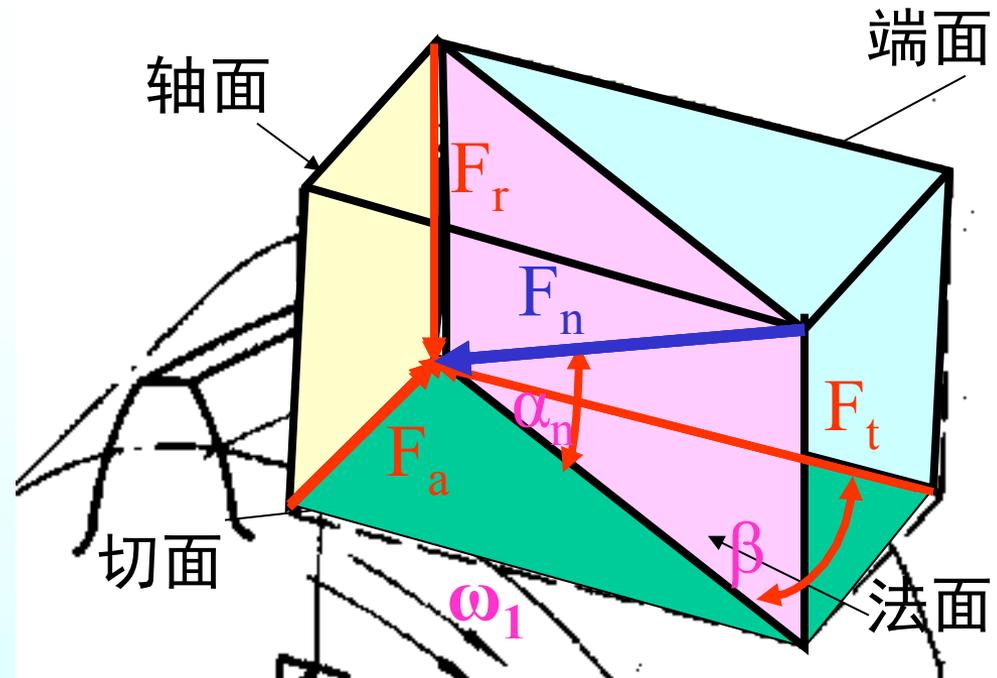


## 二. 作用力的大小:

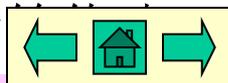
切面:  $F' = F_t / \cos \beta$

$$F_a = F_t \cdot \operatorname{tg} \beta$$

法面:  $F_r = F' \cdot \operatorname{tg} \alpha_n$



$$\left. \begin{array}{l} \text{圆周力: } F_t = 2 T_1 / d_1 \\ \text{径向力: } F_r = F_t \cdot \operatorname{tg} \alpha_n / \cos \beta \\ \text{轴向力: } F_a = F_t \cdot \operatorname{tg} \beta \end{array} \right\} \quad (11-11)$$



### 三. 作用力的方向及判断:

$F_t$  —  $F_{t1}$  (主): 与  $V_1$  反向

$F_{t2}$  (从): 与  $V_2$  同向

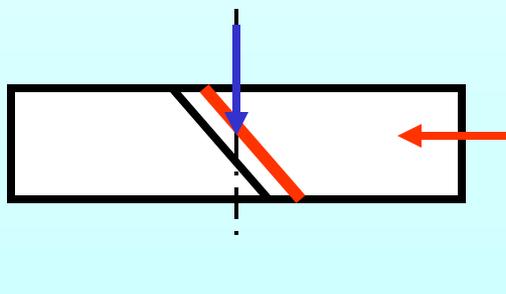
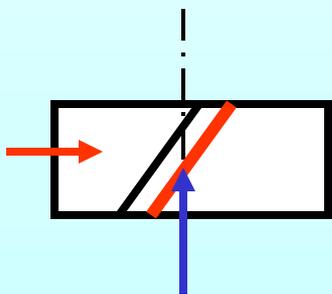
$F_r$  — 由啮合点指向轮心

$F_a$  — 主动轮用左右手定则  
(左旋左手、右旋右手、  
四指转向、拇指轴向)

★ 不能用在从动轮上

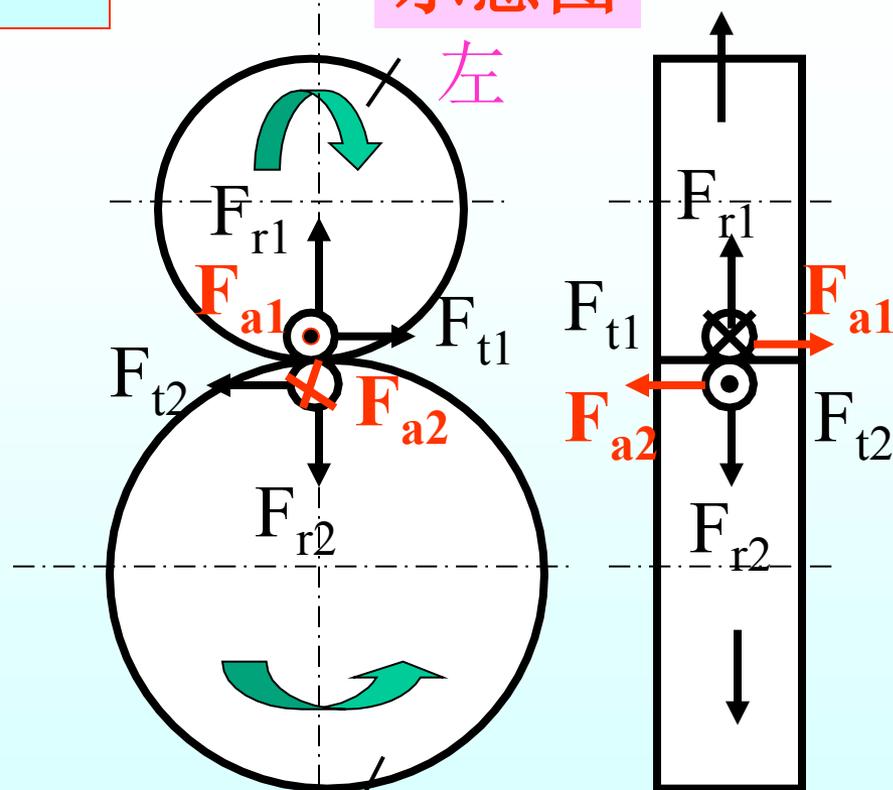
主

从



轴向力  $F_a$ : 与轴线平行并指向齿面

### 示意图



$$\begin{aligned} F_{t1} &= -F_{t2} \\ F_{r1} &= -F_{r2} \\ F_{a1} &= -F_{a2} \end{aligned}$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/278062111007006137>