

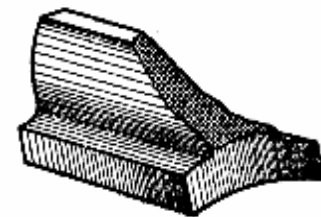
第11章 齿轮传动

- n 齿轮零件的设计
- n 研究齿轮传力时的强度问题
- n 按工作条件分:
 - ✧ 闭式齿轮
 - ✧ 开式齿轮

11-1 轮齿的失效形式

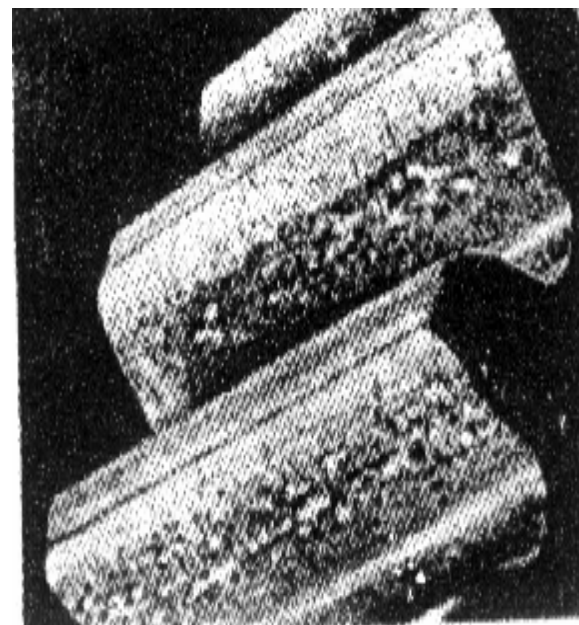
1、轮齿折断

- 过载折断——短时意外严重过载引起
- 疲劳折断——脉动（对称）循环应力引。



2、齿面点蚀

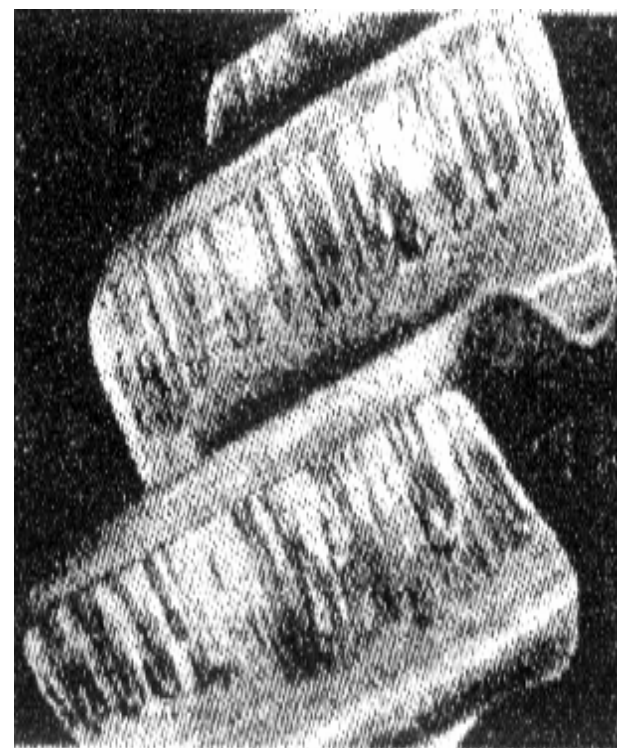
- .. 现象：齿面在反复的脉动循环的接触应力作用下表面发生剥落。
- .. 点蚀是润滑良好的闭式传动常见的失效形式。
- .. 开式传动没有点蚀现象。



3、齿面胶合

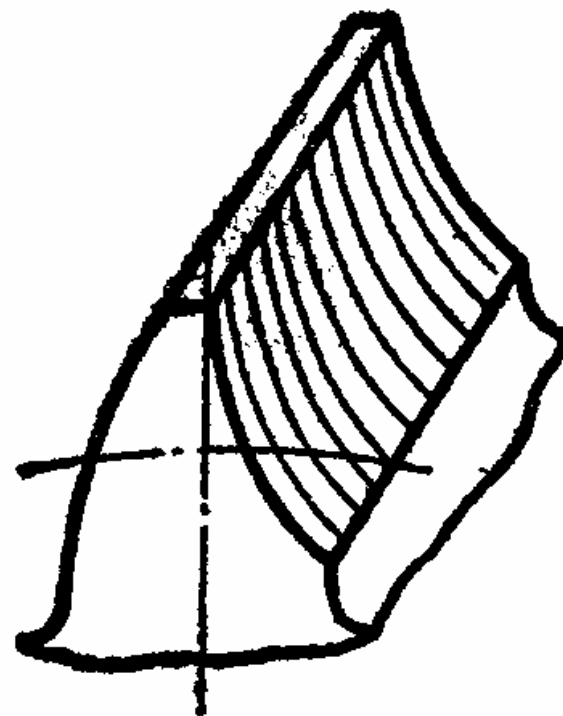
.. 胶合：

- ✧ 高速重载时，啮合点温度高——油膜破裂，表面直接接触——粘合，撕裂——失效。
- ✧ 低速重载时，啮合点压力大——不易形成油膜，表面直接接触——粘结，撕裂。



4、齿面磨损

- ∴ 磨粒磨损。措施：
 - ✧ 提高表面硬度
 - ✧ 保持清洁
 - ✧ 按时更换油
- ∴ 跑合磨损：
 - ✧ 跑合后要更换润滑油



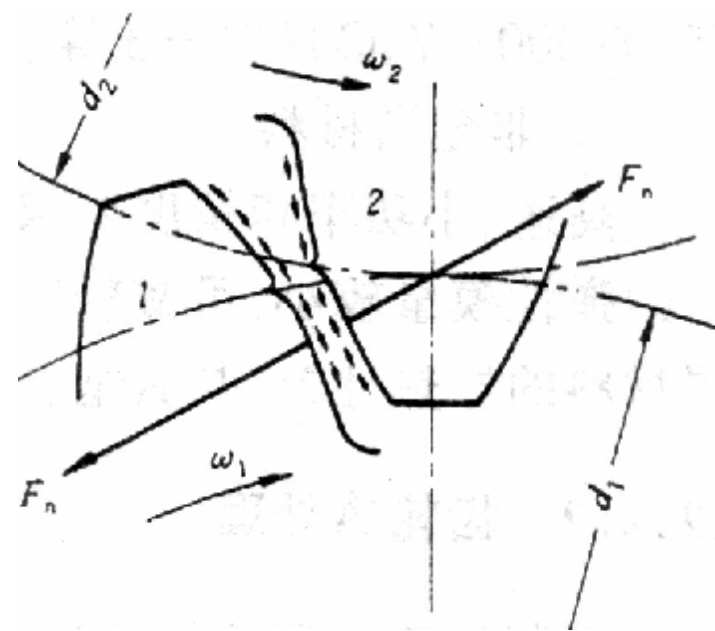
5、齿面塑性变形

.. 现象：

重载下较弱的齿面发生局部塑性变形。

.. 措施：

- ✧ 适当提高齿面硬度；
- ✧ 采用粘度较大的润滑油。



11-2 齿轮材料及热处理

.. 常用材料

- ✧ 各种优质碳素钢
- ✧ 合金钢
- ✧ 铸钢
- ✧ 铸铁
- ✧ 非金属材料

热处理方式

- 硬齿面 $HB > 350$ ——外硬内韧。承载能力大，成本高。常用于要求结构紧凑，或大批量生产的齿轮
 - § 表面淬火：HRc52~56，变形不大，可以不磨齿。
 - § 渗碳淬火：HRc52~56，常需要磨齿。
 - § 渗氮处理：HRc60~62，化学热处理。
- 软齿面 $HB \leq 350$ ——有一定硬度，韧性好。工艺过程简单，适于一般的传动，
 - § 调质处理。
 - § 正火处理。

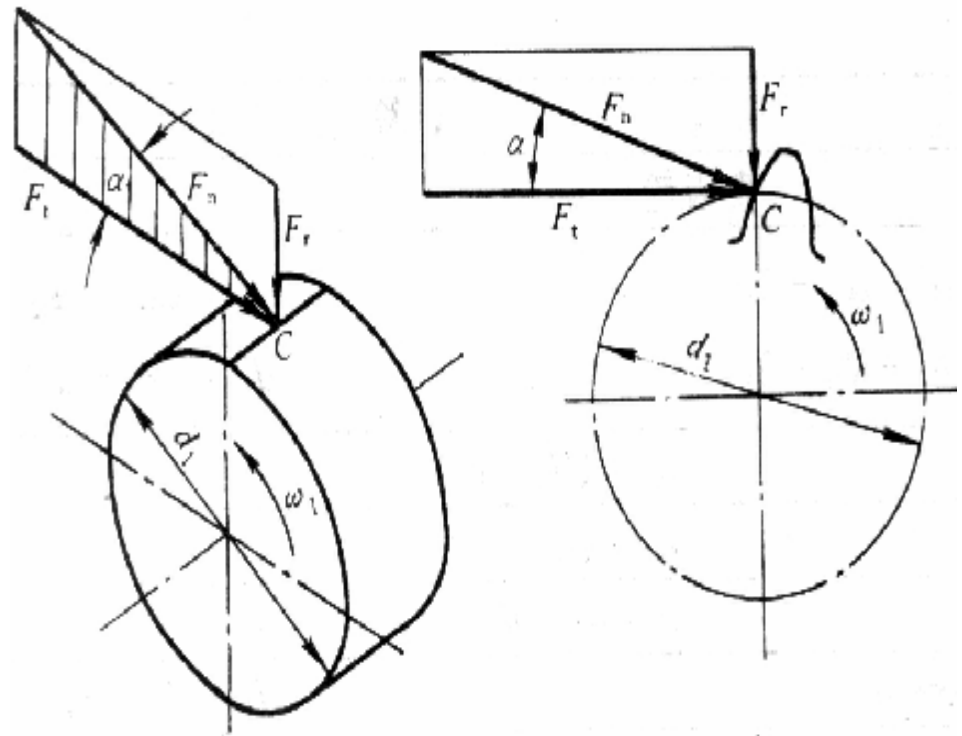
11-3 齿轮传动的精度

- .. 齿轮传动的误差可产生：
 - ✧ 传递运动的准确性误差
 - ✧ 传动平稳性误差
 - ✧ 载荷分布不均匀
- .. 针对三种误差分别规定三个公差组
- .. **GB10095-88**中，对圆柱齿轮及齿轮副规定了**12**个等级的精度。**12**级最低，常用**6~9**级。

11-4 直齿圆柱齿轮传动作用力及计算载荷

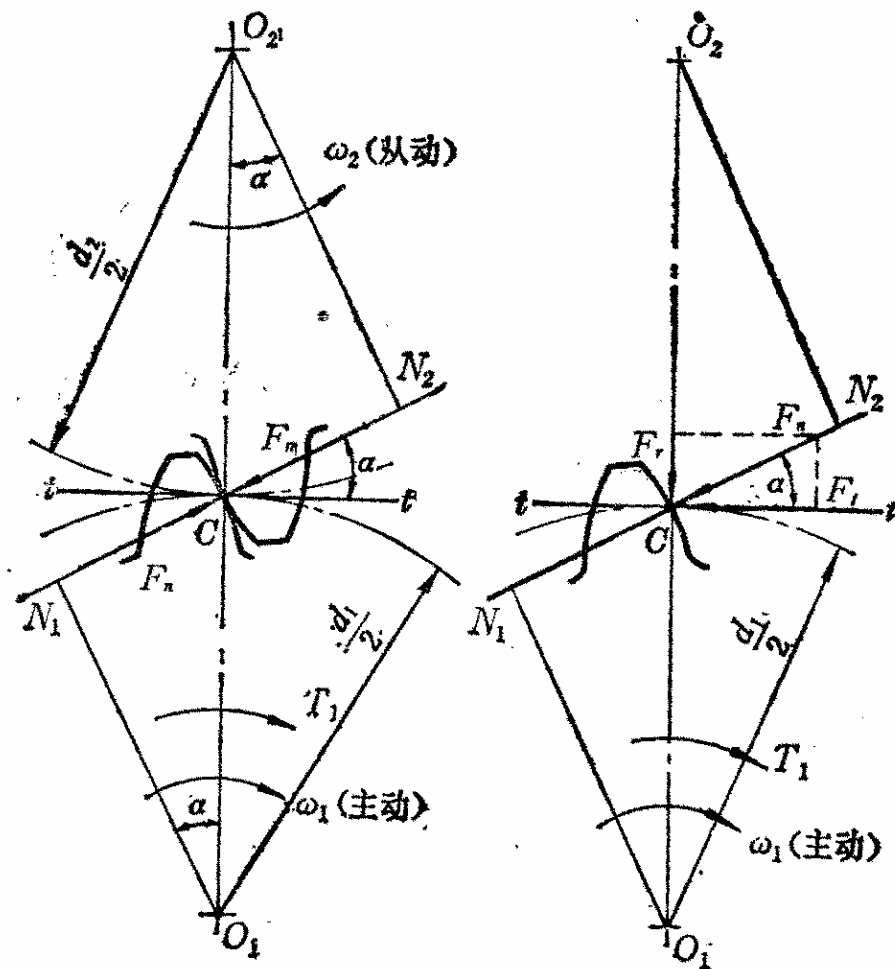
一、轮齿上的作用力

- 忽略轮齿间的摩擦力。
- 法向力 F_n 可以分解为二个互相垂直的力：
 - ✓ 圆周力
 - ✓ 径向力
 - 法向力



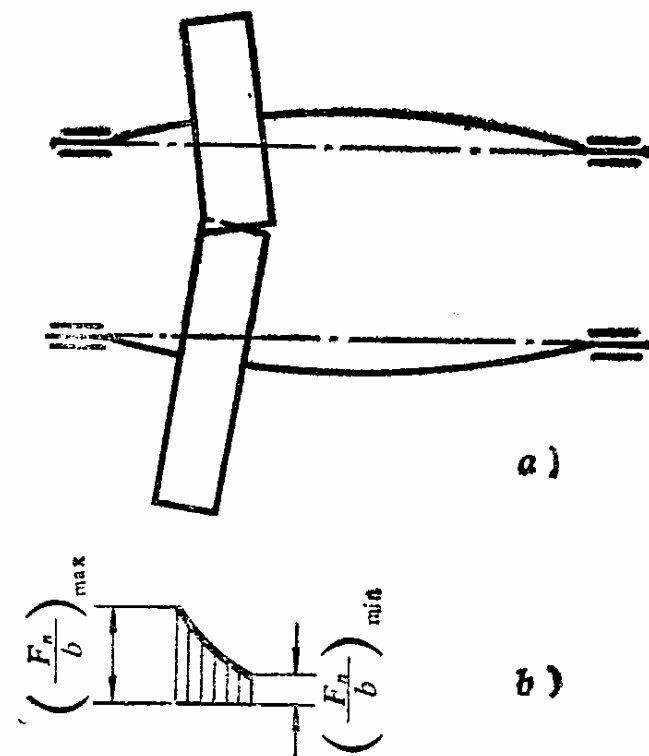
各分力的方向

- 圆周力 F_t 方向:
 - √ 主动轮上圆周力 F_t 方向与回转方向相反;
 - √ 从动轮上圆周力 F_t 方向与回转方向相同;
- 径向力分别指向各轮轮心。
- 根据作用力与反作用力的关系,作用在主动轮和从动轮上各对应力大小相等、方向相反。



二、计算载荷

- 由于以下因素的影响，载荷 F_n 沿齿宽分布不均匀：
 - 轴和轴承的变形
 - 制造安装误差
 - 工作机特性
 - 齿轮误差
 - 附加动载荷
- 通常用计算载荷 $K F_n$ 代替名义载荷。
- 载荷系数 K 可由表查。



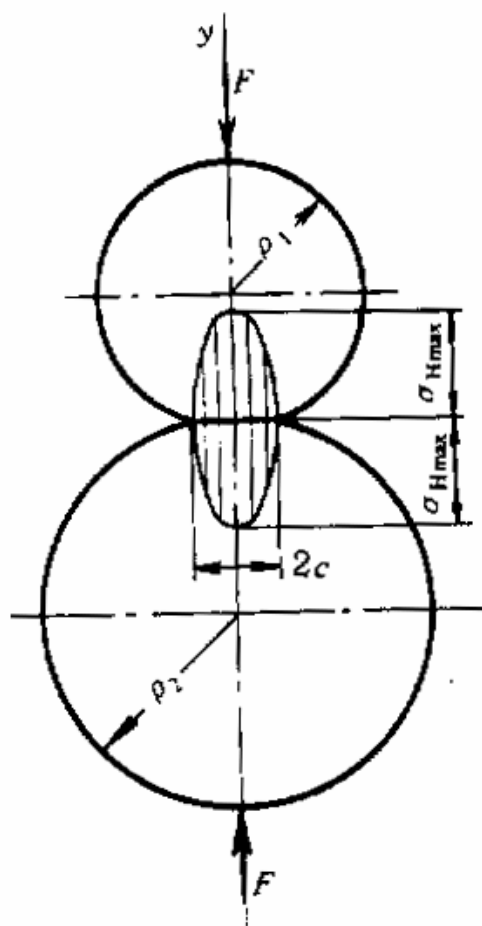
11-5 直齿圆柱齿轮传动的齿面接触强度计算

- 齿面的接触疲劳强度计算，强度条件为：

$$\sigma_H \leq [\sigma_H]$$

- σ_H ——齿面啮合点最大接触应力
- $[\sigma_H]$ ——齿轮材料的许用接触应力

圆柱面的最大接触应力 σ_H 的计算

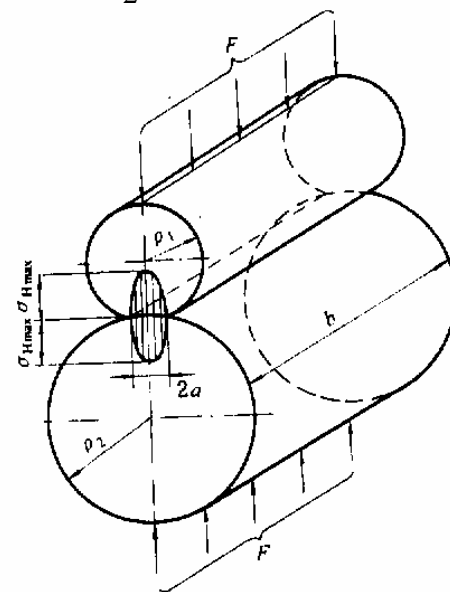


赫兹公式：

$$S_H = \frac{4}{p} \frac{F_n}{2ab} = \sqrt{\frac{F_n}{pb} \frac{\frac{1}{r_1} \pm \frac{1}{r_2}}{\frac{1-m_1^2}{E_1} + \frac{1-m_{21}^2}{E_2}}}$$

σ_H ——最大接触应力

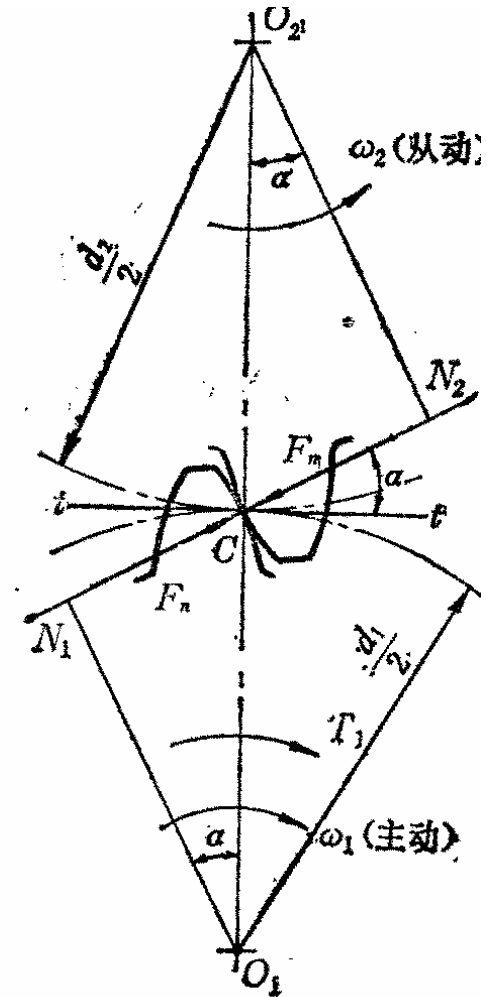
- 与法向力 F_n 成正比；
- 与接触变形宽度 $2a$ 成反比
- 与曲率半径 ρ_1 、 ρ_2 成反比。
- 与宽度 b 成反比。



以齿面上哪一点的应力作为计算的依据

取节点啮合时的接触应力作计算：

- ☐ 单对齿啮合
- ☐ 齿面点蚀首先发生的部位



节点的几何分析

节点曲率半径

$$r_1 = N_1C = \frac{1}{2}d_1 \sin a$$

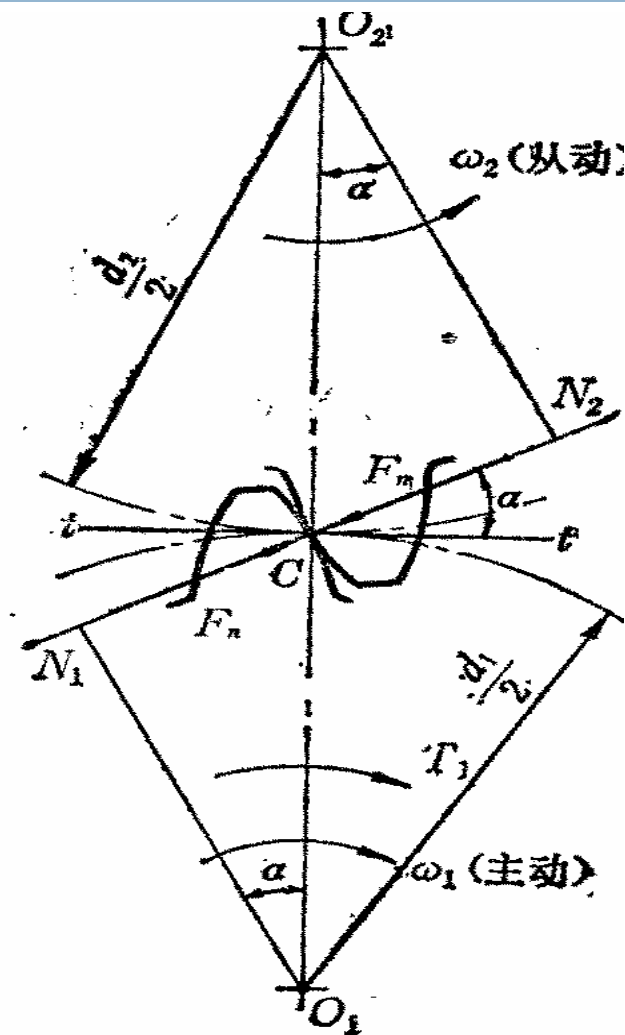
$$r_2 = N_2C = \frac{1}{2}d_2 \sin a$$

$$u = \frac{z_2}{z_1} \quad d_1 = \frac{2a}{u \pm 1}$$

$$\frac{1}{r_1} \pm \frac{1}{r_2} = \frac{u \pm 1}{u} \bullet \frac{2}{d_1 \sin a}$$

.. a ——齿轮中心距

.. u ——大齿轮齿数与小齿轮齿数比



齿面法向载荷

- 用齿轮1的力矩计算法向载荷：

$$F_n = \frac{F_t}{\cos a} = \frac{2T_1}{d_1 \cos a}$$

- 节点处只有一对齿啮合，将法向载荷及曲率半径 $\frac{1}{r_1} \pm \frac{1}{r_2} = \frac{u \pm 1}{u} \cdot \frac{2}{d_1 \sin a}$ 代入赫兹公式

$$S_H = \sqrt{\frac{F_n \frac{\frac{1}{r_1} \pm \frac{1}{r_2}}{\frac{1-m_1^2}{E_1} + \frac{1-m_{21}^2}{E_2}}}{pb}}$$

齿面接触应力

- 节点处的最大接触应力：

$$s_H = \sqrt{\frac{1}{p\left(\frac{1-m_1^2}{E_1} + \frac{1-m_2^2}{E_2}\right)} \frac{2}{\sin a \cos a} \frac{u \pm 1}{u} \frac{KF_t}{bd_1}}$$
$$= Z_E Z_H \sqrt{\frac{2KT_1}{bd_1^2} \frac{u \pm 1}{u}}$$

- Z_E ——弹性系数，见表11-4。
- Z_H ——节点区域系数，标准齿轮=2.5。
- b ——齿轮的宽度。

.. 齿面接触强度条件为：

$$S_H = Z_E Z_H \sqrt{\frac{2KT_1}{bd_1^2} \frac{u \pm 1}{u}} \leq [S_H] = \frac{S_{H \lim}}{S_H} \quad N/mm^2$$

.. $\sigma_{H \lim}$ ——齿轮材料的接触疲劳极限，可查表11-1；

.. S_H ——齿面接触疲劳极限安全系数，可查表11-5。

设计公式

- .. 取齿宽系数
- .. 可查表取。
- .. 设计公式为

$$f_d = \frac{b}{d_1}$$

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\frac{2KT_1}{f_d} \frac{u \pm 1}{u} \left(\frac{Z_E Z_H}{[S_H]} \right)^2} \text{ mm}$$

计算中注意的几个问题

$$s_H = Z_E Z_H \sqrt{\frac{2KT_1}{bd_1^2} \frac{u \pm 1}{u}} \leq [s_H] = \frac{S_{H \lim}}{S_H} \text{ N/mm}^2$$

- .. 各量的单位。
- .. +号：外啮合，-号：内啮合。
- .. 计算中只用到 T_1 而没有 T_2
- .. 一对相啮合的齿轮的接触应力相等， $\sigma_{H1} = \sigma_{H2}$ 。
- .. 一对相啮合的齿轮的许用接触应力不一定相等， $[s_{H1}] \neq [s_{H2}]$ 。

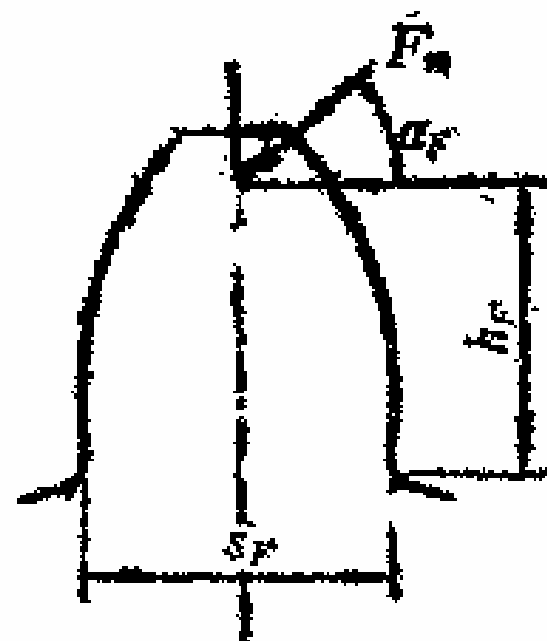
提高齿轮齿面接触强度

- ∴ 减小接触应力 σ_H :
 - ✧ 增加中心距 a ;
 - ✧ 减小外载荷 T_1 ;
- ∴ 提高许用接触应力 $[\sigma_H]$:
 - ✧ 选 σ_{Hlim} 高的材料和热处理。

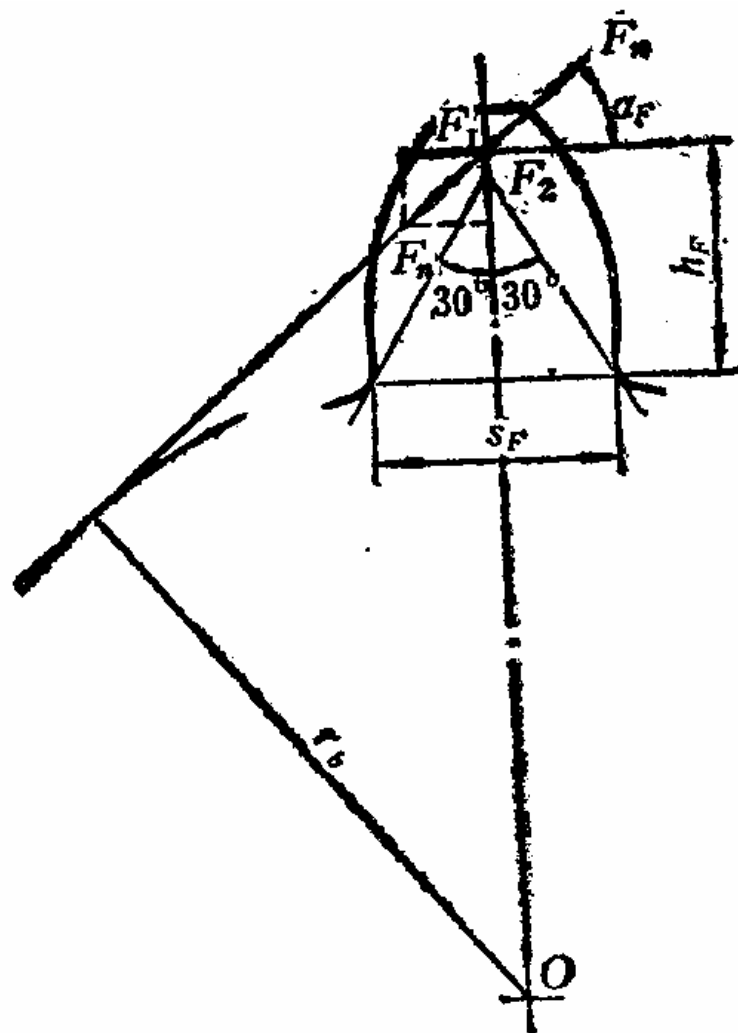
$$s_H = Z_E Z_H \sqrt{\frac{2KT_1}{bd_1^2} \frac{u \pm 1}{u}} \leq [s_H] = \frac{s_{Hlim}}{S_H} \text{ N/mm}^2$$

11-6 直齿圆柱齿轮传动的轮齿弯曲强度计算

- 轮齿相当于一个悬臂梁，受载后会发生弯曲。
- 两个问题：
 - 计算时载荷的作用点及大小
 - 危险截面的位置



-



弯曲应力

$$\text{弯曲应力 } s_F = \frac{M}{W}$$

$$\text{其中 } M = KF_n h_F \cos a_F \quad W = \frac{bs_F^2}{6}$$

$$s_F = \frac{6KF_n h_F \cos a_F}{bs_F^2} = \frac{KF_t}{bm} \frac{6\left(\frac{h_F}{m}\right) \cos a_F}{\left(\frac{s_F}{m}\right)^2 \cos a}$$

弯曲疲劳强度条件

$$\text{令} : Y_{Fa} = \frac{6 \left(\frac{h_F}{m} \right) \cos a_F}{\left(\frac{s_F}{m} \right)^2 \cos a}$$

- .. Y_{Fa} ——齿形系数，与齿数 Z 成反比，不随模数 m 变化，可查图11-8。
- .. Y_{Sa} ——应力修正系数，与齿数 Z 成正比，可查图11-9。
- .. 强度条件

$$s_F = \frac{KF_t Y_{Fa} Y_{Sa}}{bm} = \frac{2KT_1 Y_{Fa} Y_{Sa}}{bd_1 m} = \frac{2KT_1 Y_{Fa} Y_{Sa}}{bm^2 z_1} \leq [s_F] = \frac{s_{FE}}{S_F}$$

弯曲疲劳强度条件

∴ 强度条件

$$S_F = \frac{KF_t Y_{Fa} Y_{Sa}}{bm} = \frac{2KT_1 Y_{Fa} Y_{Sa}}{bd_1 m} = \frac{2KT_1 Y_{Fa} Y_{Sa}}{bm^2 z_1} \leq [S_F] = \frac{S_{FE}}{S_F}$$

σ_{FE} ——单侧齿轮材料的弯曲疲劳极限，可查表 11-1。双向工作时乘以0.7。

S_F ——齿面弯曲疲劳极限安全系数，可查表

设计公式

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2KT_1}{f_d z_1^2} \frac{Y_{Fa} Y_{Sa}}{[S_F]}} \text{ mm}$$

开式齿轮传动，考虑齿面磨损，可将模数 m 加大10%——15%。

其中 $f_d = \frac{b}{d_1}$ 称为齿宽系数

计算中注意的几个问题

$$S_F = \frac{KF Y_t Y_{Fa} Y_{Sa}}{bm} = \frac{2KT_1 Y_{Fa} Y_{Sa}}{bd_1 m} = \frac{2KT_1 Y_{Fa} Y_{Sa}}{bm^2 z_1} \leq [S_F] = \frac{S_{FE}}{S_F}$$

- ∴ 各量的单位。
- ∴ 计算中只用到 T_1 而没有 T_2 。
- ∴ 一对相啮合的齿轮的许用接触应力不一定相等， $[\sigma_{F1}] \neq [\sigma_{F2}]$ 。

计算中注意的几个问题

- 设计时：代入 $\frac{Y_{Fa1}Y_{Sa1}}{[s_{F1}]}$ 和 $\frac{Y_{Fa2}Y_{Sa2}}{[s_{F2}]}$ 中较大的值
- 校核时：分别校核。
- m 应圆整，且对于传力齿轮，其模数不小于1.5。

$$s_F = \frac{2KT_1 Y_{Fa} Y_{Sa}}{bm^2 z_1} \leq [s_F] = \frac{s_{FE}}{s_F} \quad m \geq \sqrt[3]{\frac{2KT_1}{f_d z_1^2} \frac{Y_{Fa} Y_{Sa}}{[s_F]}} \text{ mm}$$

提高齿轮弯曲疲劳强度

.. 减小接触应力 σ_F :

✧ 增加模数 m ;

✧ 减小外载荷 T_1 ;

✧ 增大齿数 z 。

$$S_F = \frac{2KT_1 Y_{Fa} Y_{Sa}}{bm^2 z_1} \leq [S_F] = \frac{S_{FE}}{S_F}$$

.. 提高许用弯曲应力 $[\sigma_F]$:

✧ 选 σ_{Flim} 高的材料和热处理。

✧ 避免齿轮双侧工作。

不同类型齿轮的设计准则

- 软齿面闭式齿轮传动：
 - ☒ 按齿面接触强度设计，
 - ☒ 按齿根弯曲强度校核。
- 硬齿面闭式齿轮传动：
 - ☒ 按齿根弯曲强度设计，
 - ☒ 按齿面接触强度校核。
- 开式齿轮传动：
 - ☒ 只按弯曲强度设计，将模数 m 加大10%——15%。

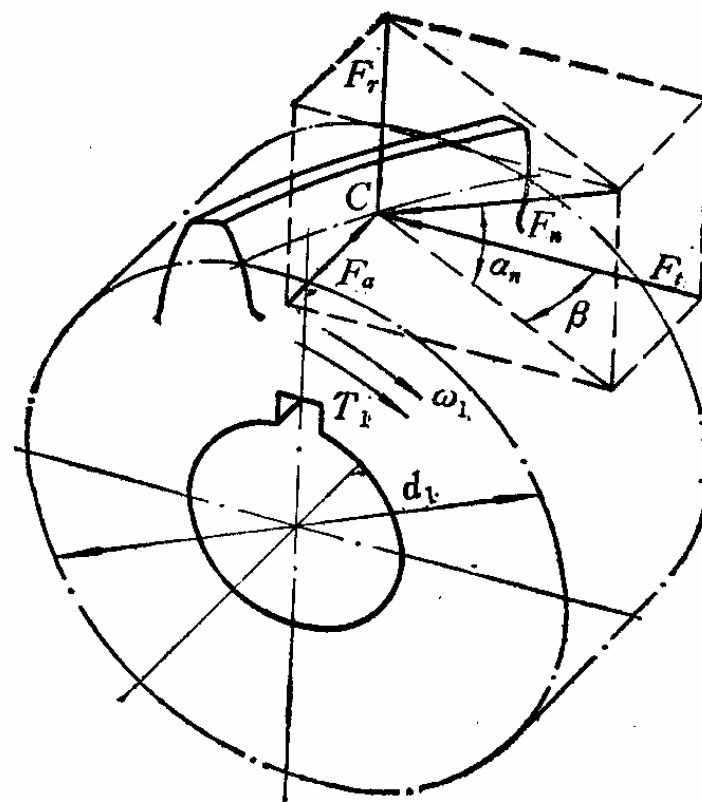
11-8 斜齿圆柱齿轮传动

一、作用在轮齿上的作用力

圆周力: $F_t = \frac{2T_1}{d_1}$

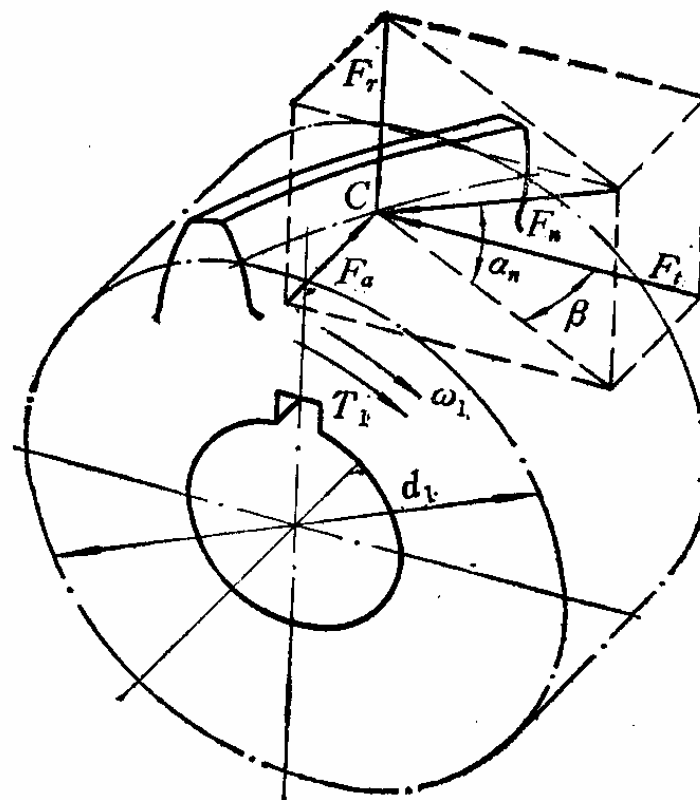
径向力: $F_r = \frac{F_t \operatorname{tg} a_n}{\cos b}$

轴向力: $F_a = F_t \operatorname{tg} b$



各力的方向

- 主动轮轴向力方向的判别：左右手法则：
 - 左旋用左手，右旋用右手；
 - 四指指向齿轮转动方向；
 - 拇指指向轴向力方向；



强度计算方法

- 当量齿轮法，强度当量。
- 接触强度计算公式

✧ 校核公式

$$s_H = Z_E Z_H Z_b \sqrt{\frac{2KT_1}{bd_1^2} \frac{u \pm 1}{u}} \leq [s_H]$$

✧ 设计公式

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\frac{2KT_1}{f_d} \frac{u \pm 1}{u} \left(\frac{Z_E Z_H Z_b}{[s_H]} \right)^2} \text{ mm}$$

齿根弯曲强度计算公式

.. 校核公式

$$\sigma_F = \frac{2KT_1}{bd_1m_n} Y_{Fa} Y_{Sa} \leq [\sigma_F] = \frac{\sigma_{FE}}{S_F}$$

.. 设计公式

$$m_n \geq \sqrt[3]{\frac{2KT_1}{f_d z_1^2} \cdot \frac{Y_{Fa} Y_{Sa}}{[\sigma_F]} \cos^2 b} \quad \text{mm}$$

.. 齿形系数 Y_{Fa} 按当量齿数 $z_v = \frac{z}{\cos^3 b}$ mm
查图11-8。

11-7 齿轮设计的参数选择

- .. 斜齿轮中心距可以圆整
- .. 螺旋角在 $8^\circ \sim 20^\circ$ 之间，要精确到秒：

$$m_n = \frac{2a \cos b}{Z_1 + Z_2}$$

$$b = \cos^{-1} \frac{m_n (Z_1 + Z)}{2a}$$

选小齿轮齿数 Z_1 :

- 硬齿面闭式传动、开式传动：一般取18~22;
- 软齿面闭式传动：在传动尺寸不变并满足弯曲疲劳强度要求的前提下，齿数宜取多些（模数相应减小， $d=m \cdot z$ ）。一般可取 $Z_1 = 20 \sim 40$ 。

齿数增多好处有：

- .. 增大重合度，提高传动平稳性；
- .. 减小滑动系数，提高传动效率；
- .. 减小毛坯外径，减轻齿轮重量；
- .. 减少切削量（模数小则齿槽小），延长刀具使用寿命，减少加工工时等。

齿宽系数及齿宽**b**

- .. 齿宽系数 $f_d = \frac{b}{d_1}$ 的选择——考虑各方面的影响，取**0.2~1.4**。
- ✓ 载荷一定，增大齿宽——减小齿轮直径（传动中心距），圆周速度降低，载荷分布愈不均匀。
- ✓ 必须合理选择齿宽系数。
- ✓ 大齿轮宽度 $b_2 = f_d d_1$ ；
- ✓ 为便于装配和调整，小齿轮宽度 **b_1 取 **$b+(5 \sim 10)$ mm****

齿轮设计步骤:

1. 选定齿轮传动的精度等级
2. 选定各齿轮材料及热处理，查出各齿轮的接触疲劳极限 σ_{Hlim} 和弯曲疲劳极限 σ_{FE} ；
3. 选定齿宽系数 ϕ_d
4. 初选小齿轮齿数 Z_1 、螺旋角 $\beta=15^\circ$ ；
5. 确定设计准则；
6. 设计公式算 d_1 或 m_n ；

7. 计算齿轮几何参数

1. $Z_2 = i \cdot Z_1$ ，调整两齿轮齿数互质；
2. 由 $d = m_n z / \cos \beta$ 计算两齿轮的 d 或 m_n ， m_n 应取标准值；
3. 计算斜齿轮的中心距 $a = (z_1 + z_2)m_n / (2 \cos \beta)$ ，并将 a 圆整；
4. 精确计算螺旋角 $\beta = \cos^{-1} \left[(z_1 + z_2)m_n / 2a \right]$ ；
5. 精确计算两齿轮的 $d = m_n z / \cos \beta$ ；
6. 计算齿轮宽度 b_1 、 b_2 ，并圆整；
7. 进行齿轮的接触疲劳强度校核、弯曲疲劳强度校核；若强度不够，应对齿轮的相应尺寸进行调整；
8. 计算并确定齿轮的其它尺寸结构；
9. 画出齿轮零件图或装配图。

11-9 直齿圆锥齿轮传动

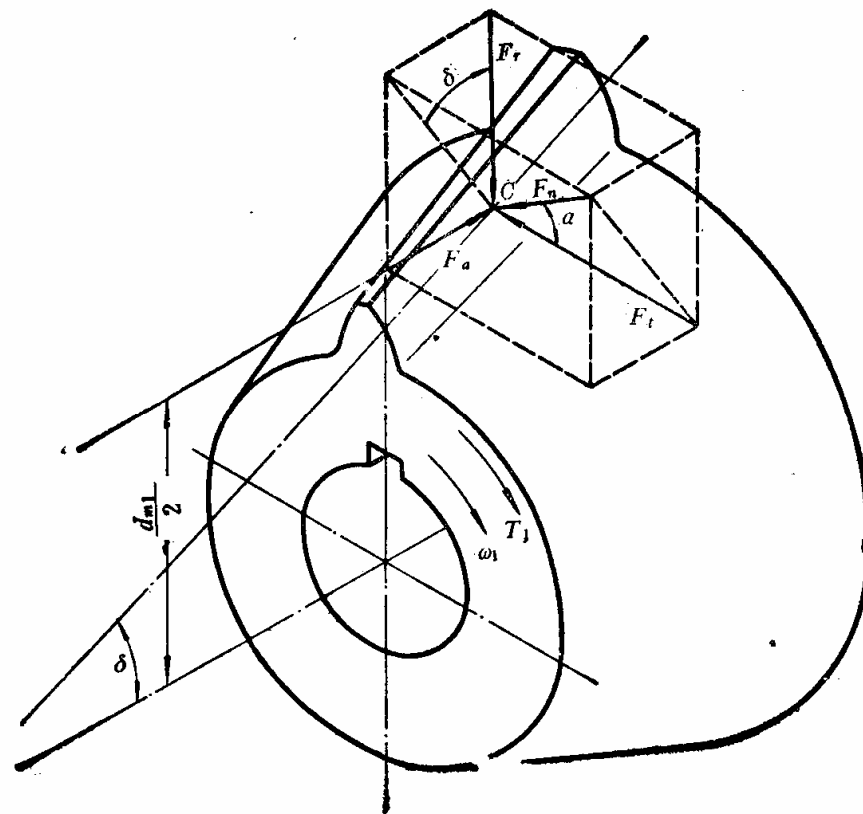
一、作用在轮齿上的作用力

$$F_t = \frac{2T_1}{d_1}$$

$$F_r = \frac{F_t \operatorname{tg} a_n}{\cos b}$$

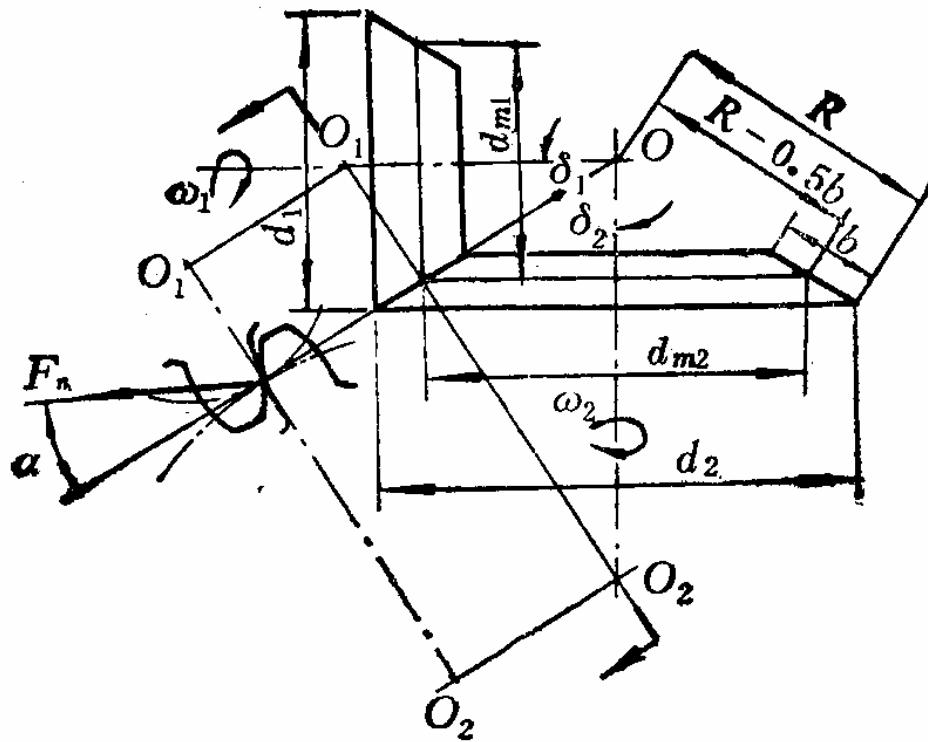
$$F_a = F_t \operatorname{tg} b$$

.. 轴向力方向的判别：
从小端指向大端。



强度计算方法

- 方法：当量齿轮法，按齿宽中点处的当量齿轮计算



11-10 齿轮的构造

齿轮结构设计应考虑：

- ∴ 毛坯——锻造、铸造、焊接、组合齿轮。
- ∴ 几何尺寸的大小：
 - ✓ 齿轮轴—— d 与轴径相差很小；
 - ✓ 实心结构—— d 较小的齿轮；
 - ✓ 腹板式结构—— $d_a < 500\text{mm}$ ；
 - ✓ 轮辐式结构—— $d_a > 400\text{mm}$ 。
- ∴ 加工工艺；
- ∴ 生产批量、成本等。
- ∴ 各部分尺寸可由经验公式求得。

11-11 齿轮传动的润滑和效率

- ∴ 闭式齿轮传动的效率 $\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3$
 - ✓ η_1 ——啮合效率，与齿轮精度有关；
 - ✓ η_2 ——搅油效率；
 - ✓ η_3 ——轴承效率。
- ∴ 各种精度的传动的效率见表11-9

齿轮润滑的目的：



- ∴ 减磨；
- ∴ 散热；
- ∴ 清洁。

齿轮传动的润滑方式

- 浸油润滑——齿轮圆周速度 $v \leq 12\text{m/s}$ 时；
- 喷油润滑——齿轮圆周速度 $v > 12\text{m/s}$ ；
- 油雾润滑——无搅油损失，可冷却；不漏油；不能散热。
- 润滑脂润滑——开式齿轮传动和低速重载闭式传动。
- 固体润滑（如石墨）——极高温、极低温、多尘环境，轻载传动。

齿轮类零件工作图绘制

- 单个齿轮零件图：
 - 主视图；
 - 侧视图；
- 分度圆用点画线表示

