

第十章 连接

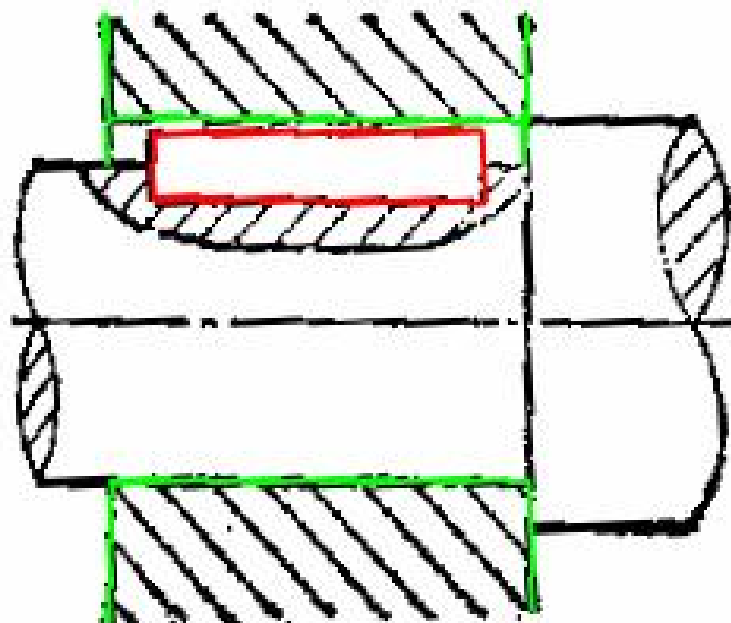
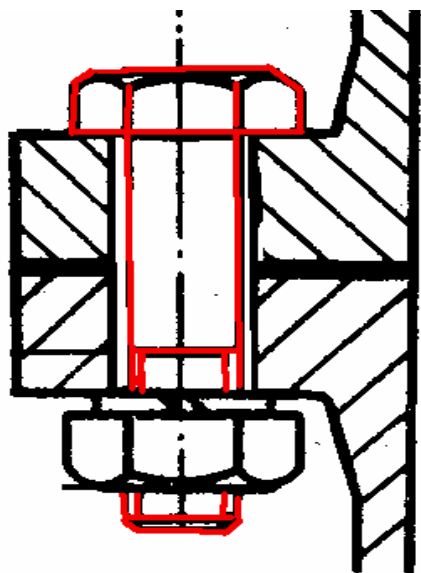


北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

第十章 连接

- 各种机器是由多个零件通过连接形成的整体

概述



连接的类型

- **动连接：** 各种运动副（铰链（轴承）、齿轮、凸轮）
- **静连接：**
 - ✕ 可拆连接
 - ✕ 不可拆连接

静连接是本章研究的内容

主要的连接方式

.. 螺纹连接

.. 键连接

.. 销连接

.. 过盈连接

.. 铆接

.. 粘接

.. 焊接

可拆连接

不可拆连接

连接件



又称为紧固件，如螺栓、螺母
键
销
铆接

有些连接则没有专门的连接件

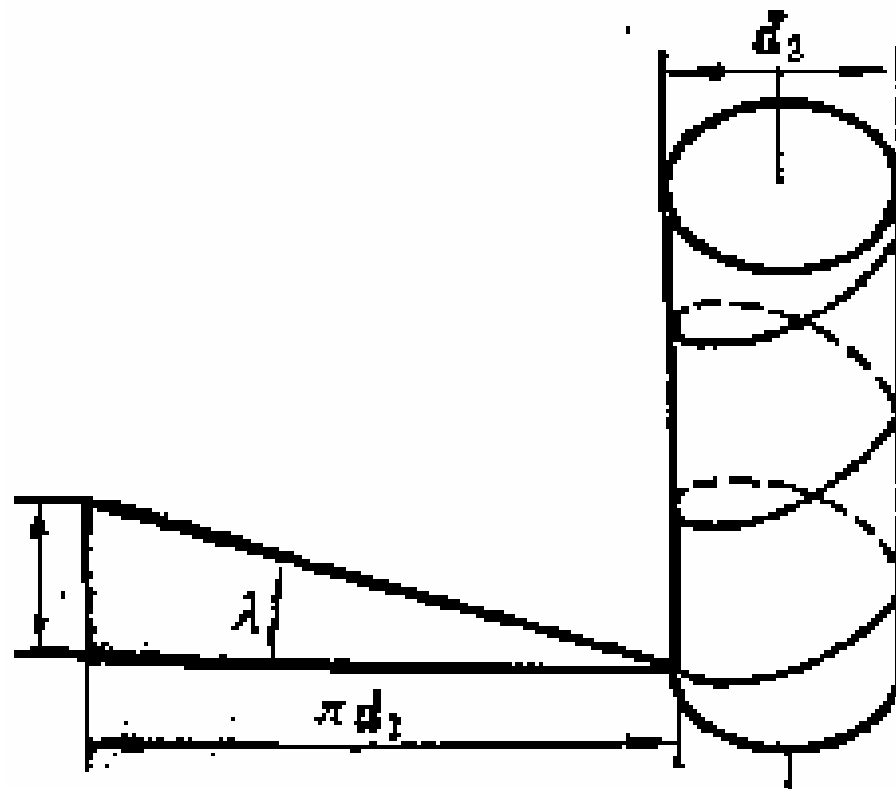
10-1 螺纹参数

.. 螺旋线的形成

如图所示，一点a沿圆柱或圆锥面的切向、轴向匀速运动，则该点的轨迹是一条螺旋线。

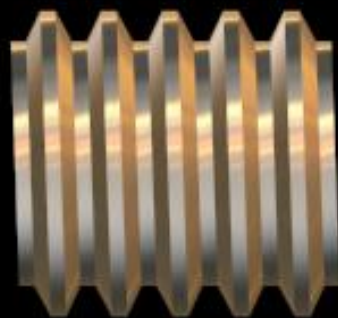
.. 平面图形沿螺旋线上升 — 螺纹

.. 斜面的转化机构

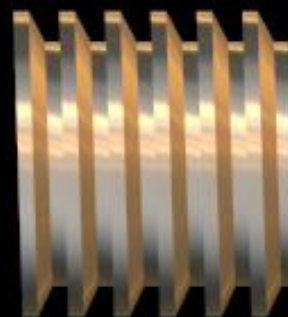


平面图形——牙型

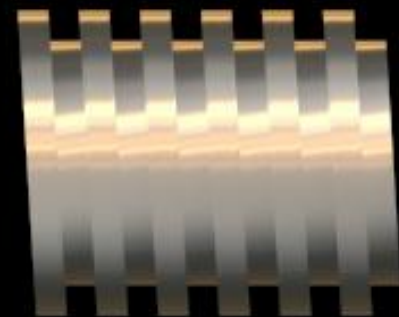
- .. 三角形
- .. 梯形
- .. 锯齿形
- .. 矩形



梯形螺纹



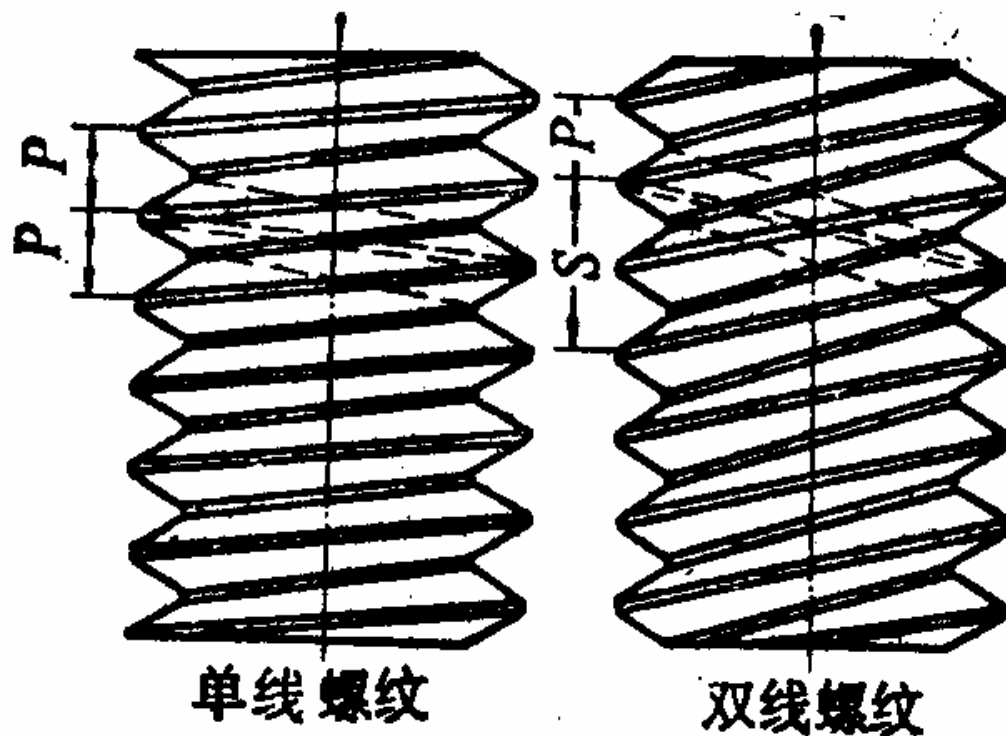
锯齿形螺纹



矩形螺纹


螺旋方向和螺纹线数

- 螺旋方向
 - 左旋、右旋
- 螺纹的线数
 - 单线
 - 双线
 - 多线
 - 一般不超过4线



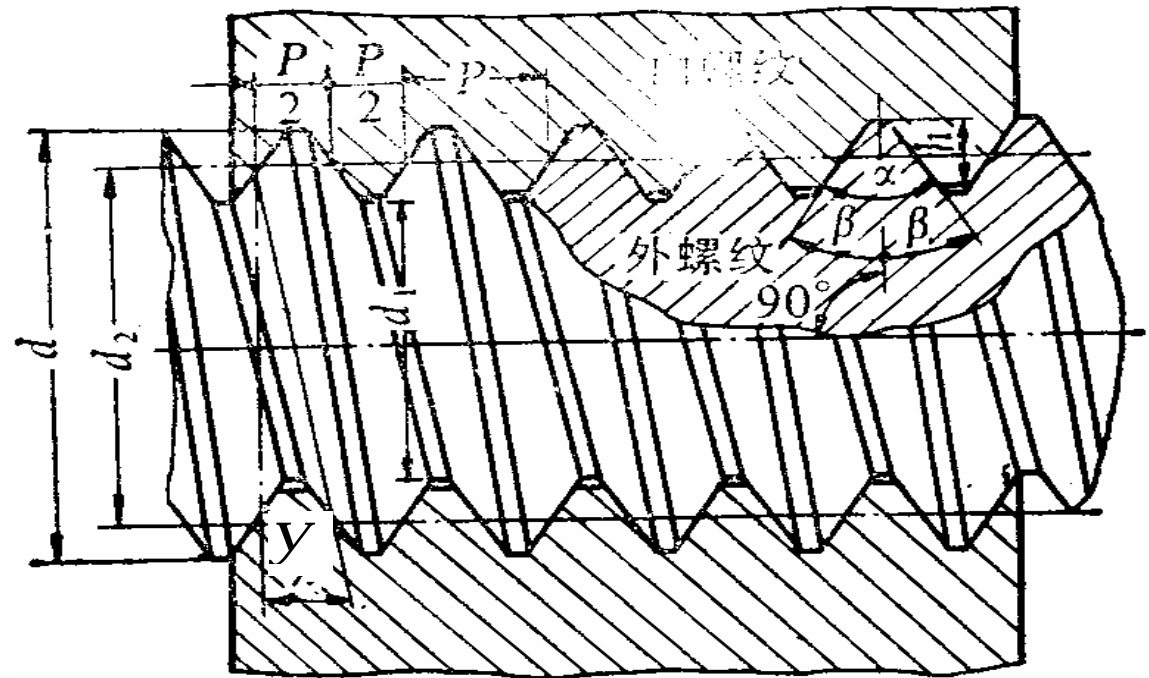
螺纹的分类

- .. 按母体分
 - ✧ 内螺纹
 - ✧ 外螺纹
- .. 按母体形状分
 - ✧ 圆柱螺纹
 - ✧ 圆锥螺纹

- 
- .. 在圆柱外表面形成的螺纹——外螺纹
 - .. 在圆柱内表面形成的螺纹——内螺纹
 - .. 在圆锥圆柱面上形成的螺纹——锥螺纹
 - .. 在管子的内外形成的螺纹——管螺纹

主要几何参数

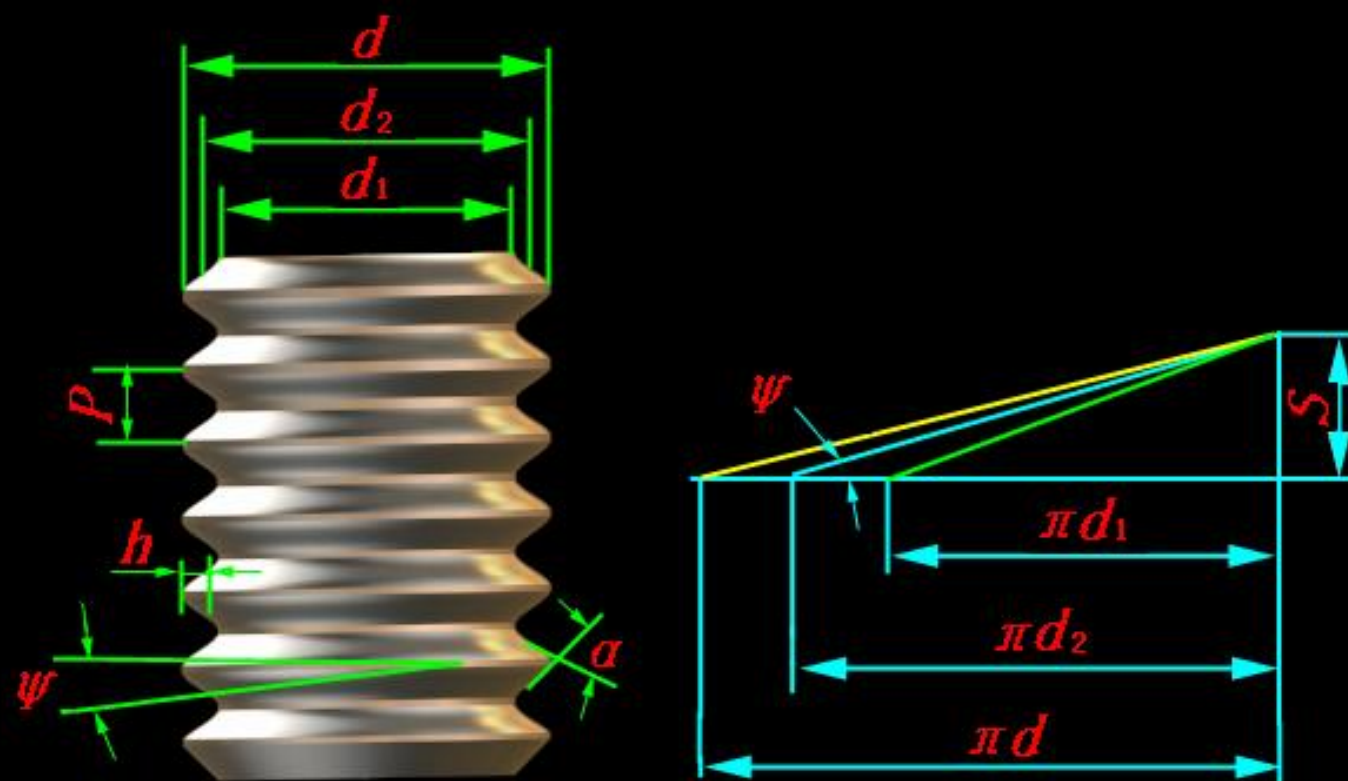
- .. 大径 d
- .. 小径 d_1
- .. 中径 d_2
- .. 螺距 P
- .. 导程 S $S=nP$



• 螺旋升角 Y $\operatorname{tg} Y = \frac{nP}{pd_2} = \frac{S}{pd_2}$

• 牙型角 $a = 2b$, 其中 b 为牙型斜角

- .. 大径 d ——与外螺纹牙顶相重合的圆柱面的直径，称为公称直径（M10）。
- .. 小径 d_1 ——与外螺纹牙底相重合的圆柱面的直径。
- .. 中径 d_2 ——处于大径和小径之间，有一个假想的圆柱面，螺纹齿厚与齿槽相等，此直径为中径。



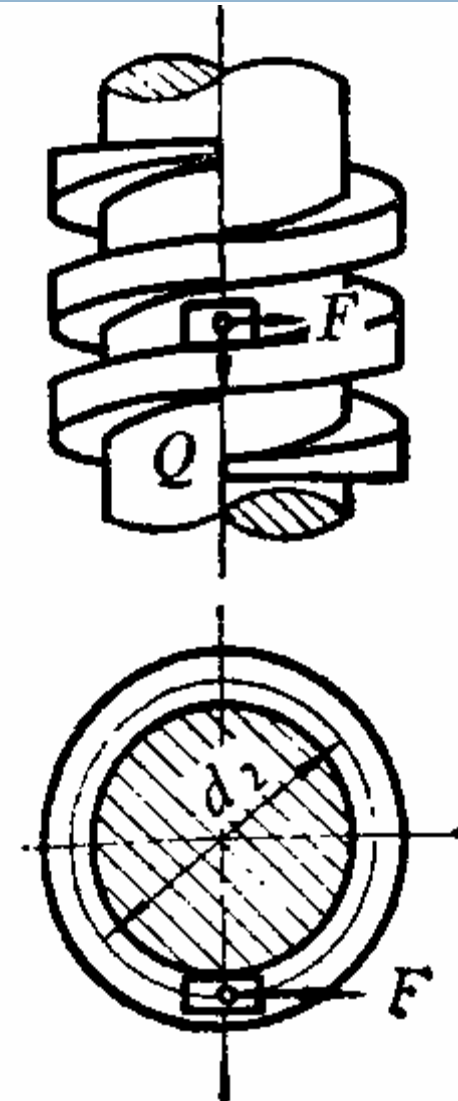
螺纹基本参数

10-2 螺旋副的受力分析、效率和自锁

矩形螺纹

- 矩形螺纹牙型斜角

$$b=0^\circ$$



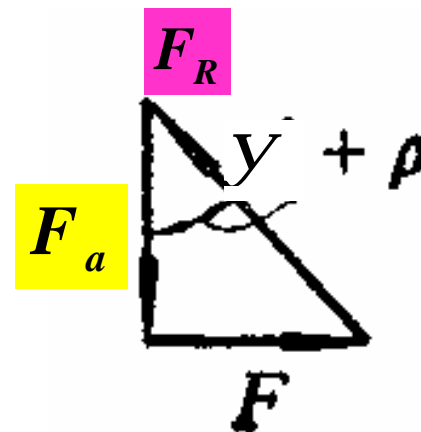
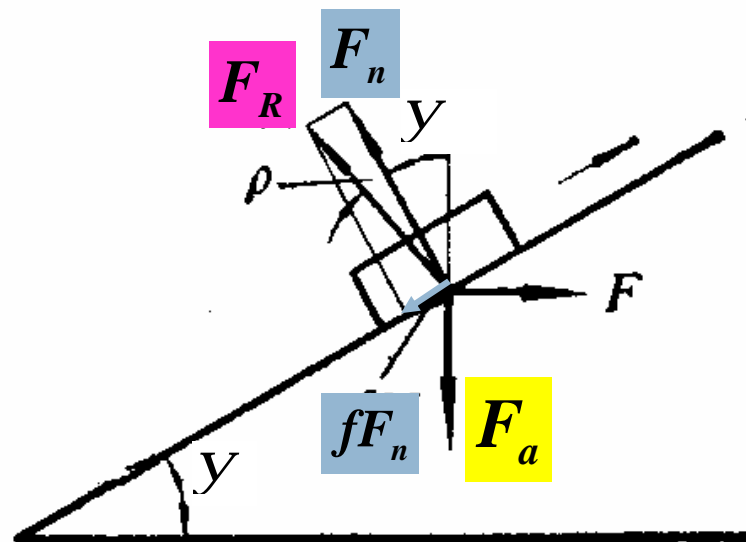
矩形螺纹的受力分析

由平衡条件得
螺母等速上升时
水平推力为

$$F = F_a \operatorname{tg}(\gamma + \rho)$$

$$T = F \times \frac{d_2}{2}$$

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{fN}{N} = f$$



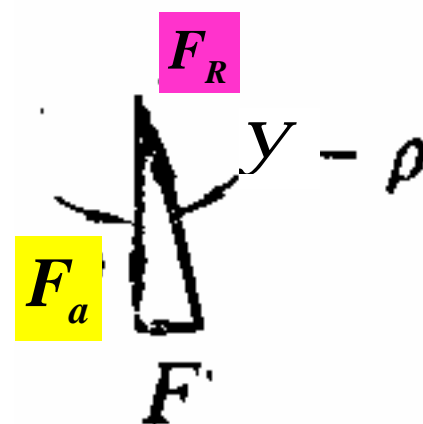
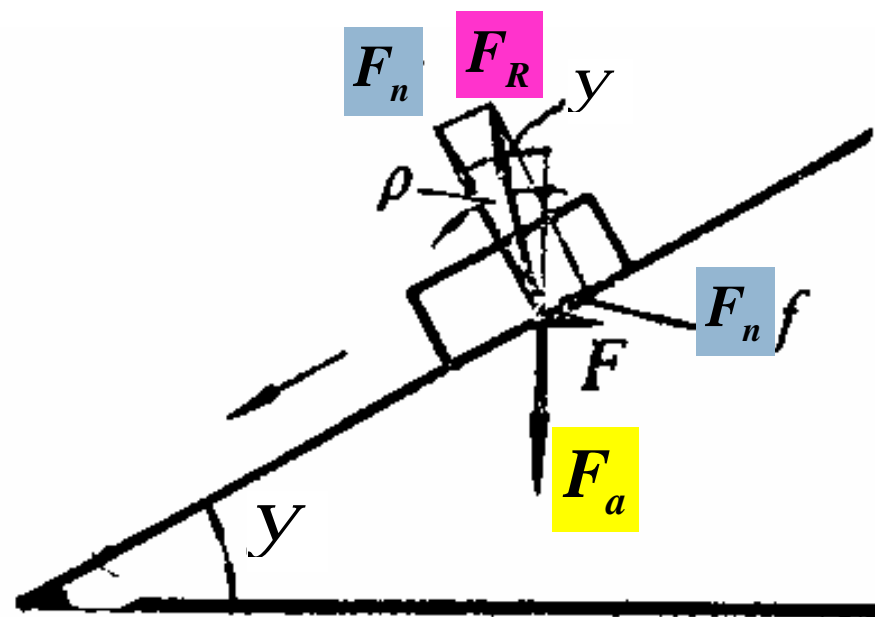
矩形螺纹的受力分析

由平衡条件得
螺母等速下降时水平
推力为

$$F = F_a \operatorname{tg}(\gamma - \rho)$$

注意：力的方向
大于0为推力
小于0为拉力

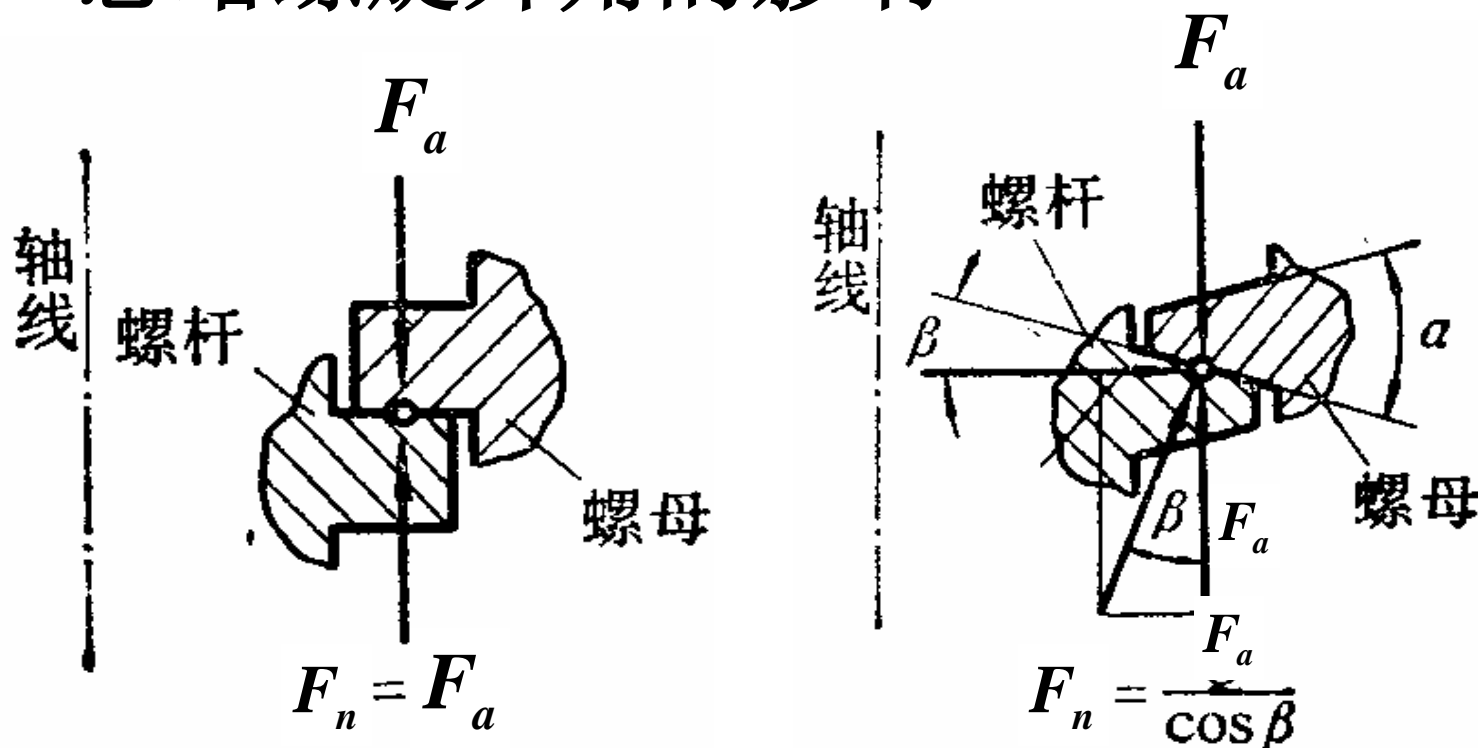
$$T = F \times \frac{d_2}{2}$$



2 非矩形螺纹

· 非矩形螺纹 $b \neq 0^\circ$

忽略螺旋升角的影响



非矩形螺纹的受力分析

- .. 同样的轴向载荷时非矩形螺纹的法向力增大，从而使摩擦力增大
- .. 若把法向力的增加看作摩擦系数的增加，摩擦阻力为

$$\frac{F_a}{\cos b} f = \frac{f}{\cos b} F_a = f' F_a$$

当量摩擦系数

非矩形螺纹的受力分析

… 当量摩擦系数为

$$f' = \frac{f}{\cos b} = \operatorname{tg} r'$$

只要用当量摩擦系数 f' 代替摩擦系数 f
非矩形螺纹的分析就和矩形螺纹完全一致

非矩形螺纹的受力分析

.. 螺母等速上升时

$$F = F_a \operatorname{tg}(\gamma + \rho')$$

.. 螺母等速下降时

$$F = F_a \operatorname{tg}(\gamma - \rho')$$

螺纹力矩

- 用以克服摩擦阻力并提升重物

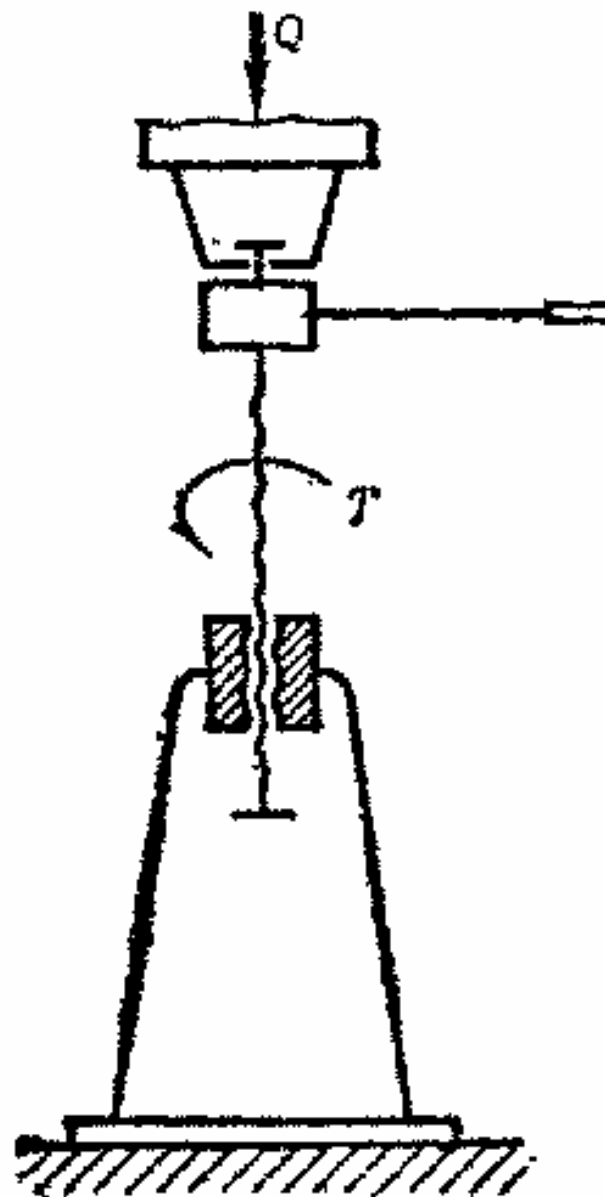
$$T = F \frac{d_2}{2} = F_a \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\gamma + \rho)$$

螺纹的自锁

$$F = F_a \operatorname{tg}(\gamma - r)$$

- .. 自锁
- .. 自锁条件

$$\gamma \leq r$$



螺纹的效率

.. 螺纹传动时的效率

$$h = \frac{\text{有用功}}{\text{总输入功}} = \frac{F_a S}{2pT} = \frac{\operatorname{tg} y}{\operatorname{tg}(y + \rho)}$$

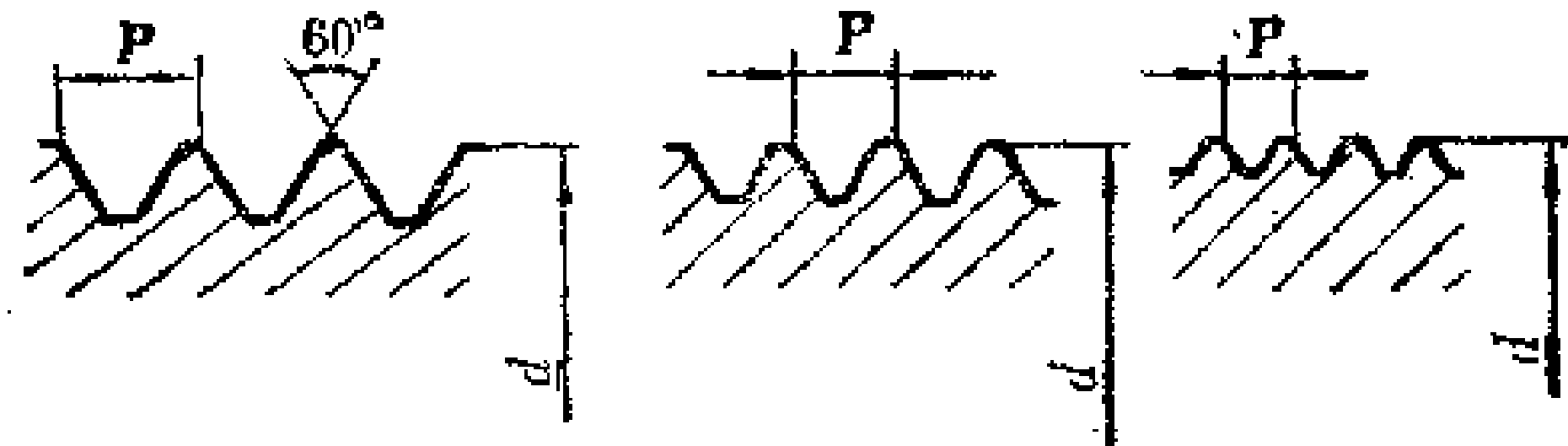
螺旋副的效率与螺旋升角的关系
如图**10-6**所示

10-3 机械制造常用的螺纹

- .. 三角形 普通螺纹——紧固连接
管螺纹 ——紧密连接

三角形螺纹

- 牙型角 $=60^\circ$ ，牙根较厚，强度较高，自锁性好，主要用于连接。
- 三角形螺纹
 - 粗牙
 - 细牙

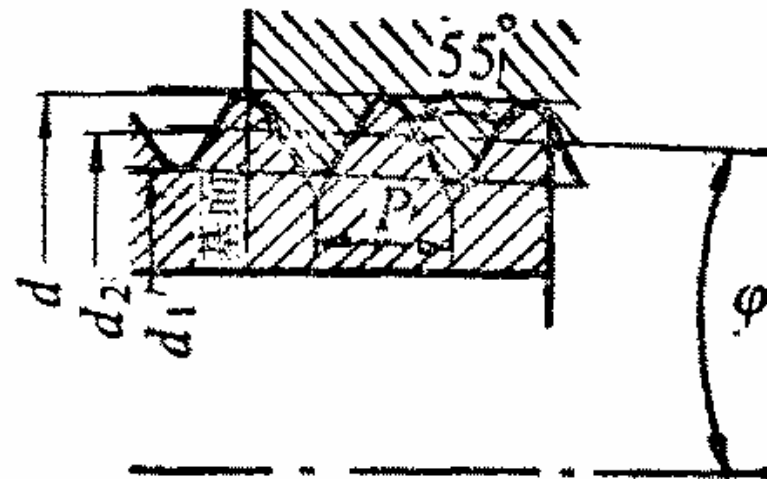
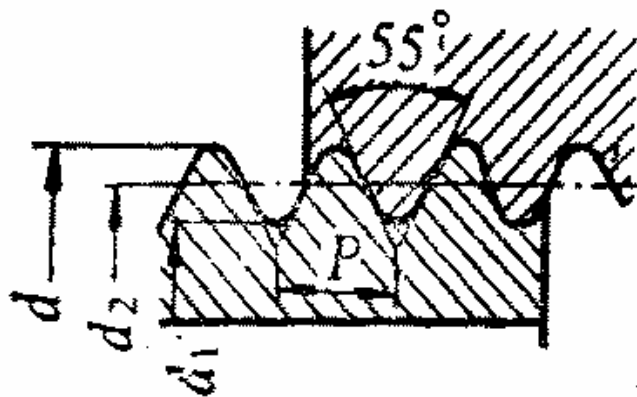


细牙螺纹

- .. 升角较小、小径大，更易自锁，强度高。
- .. 在受冲击、振动及变载荷，空心薄壁零件、微调装置、飞机及汽车制造中应用较多。
- .. 缺点是牙小磨损快，易脱扣。

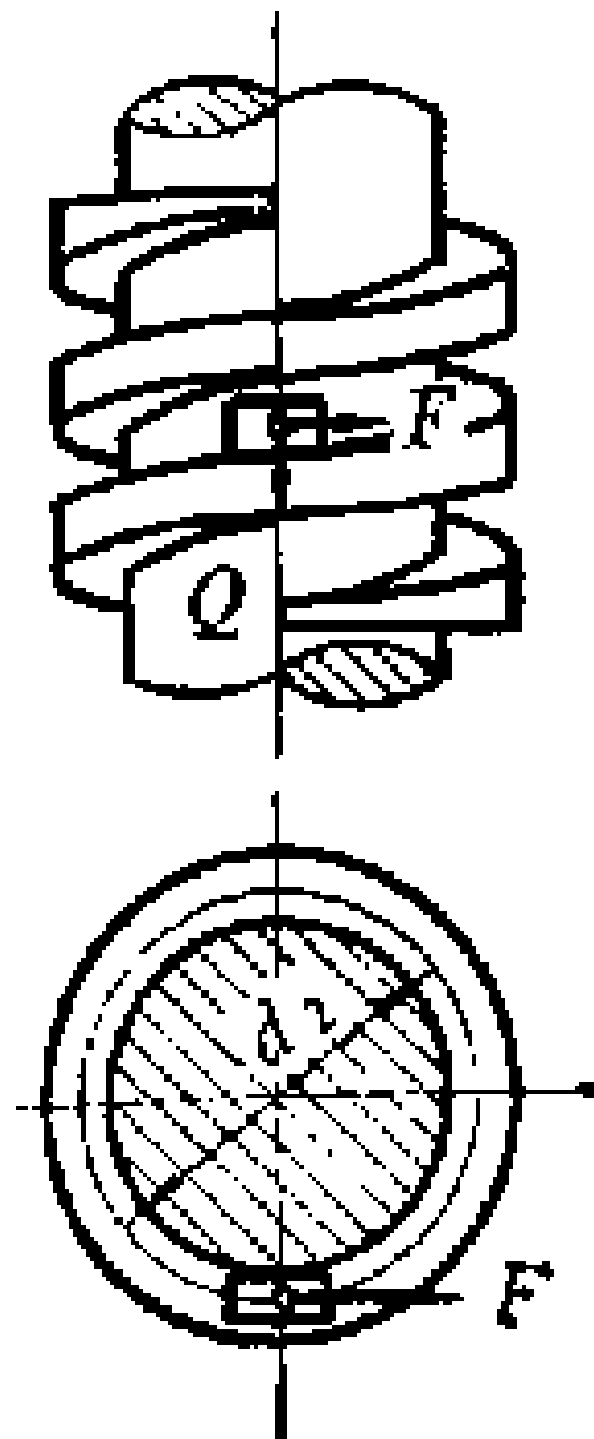
管螺纹

- .. 普通细牙螺纹
- .. 圆柱管螺纹 ($a = 55^\circ$) ——非螺纹密封
- .. 圆锥管螺纹 ($a = 55^\circ$) ——螺纹密封
- .. 圆锥管螺纹 ($a = 60^\circ$) ——螺纹密封
- .. 公称直径——管子的公称通径

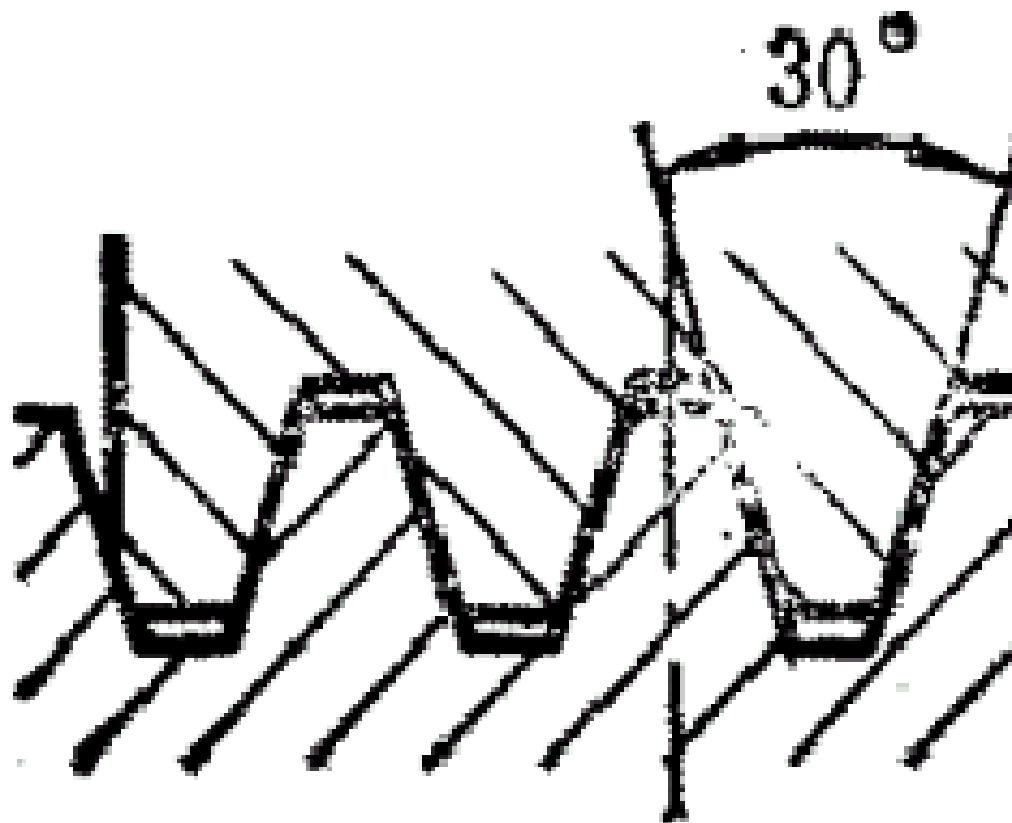


矩形螺纹

- .. 牙型角 0°
- .. 传动效率高
- .. 牙根强度低，难于精加工，磨损后无法调整补偿间隙，常用梯形螺纹代替。

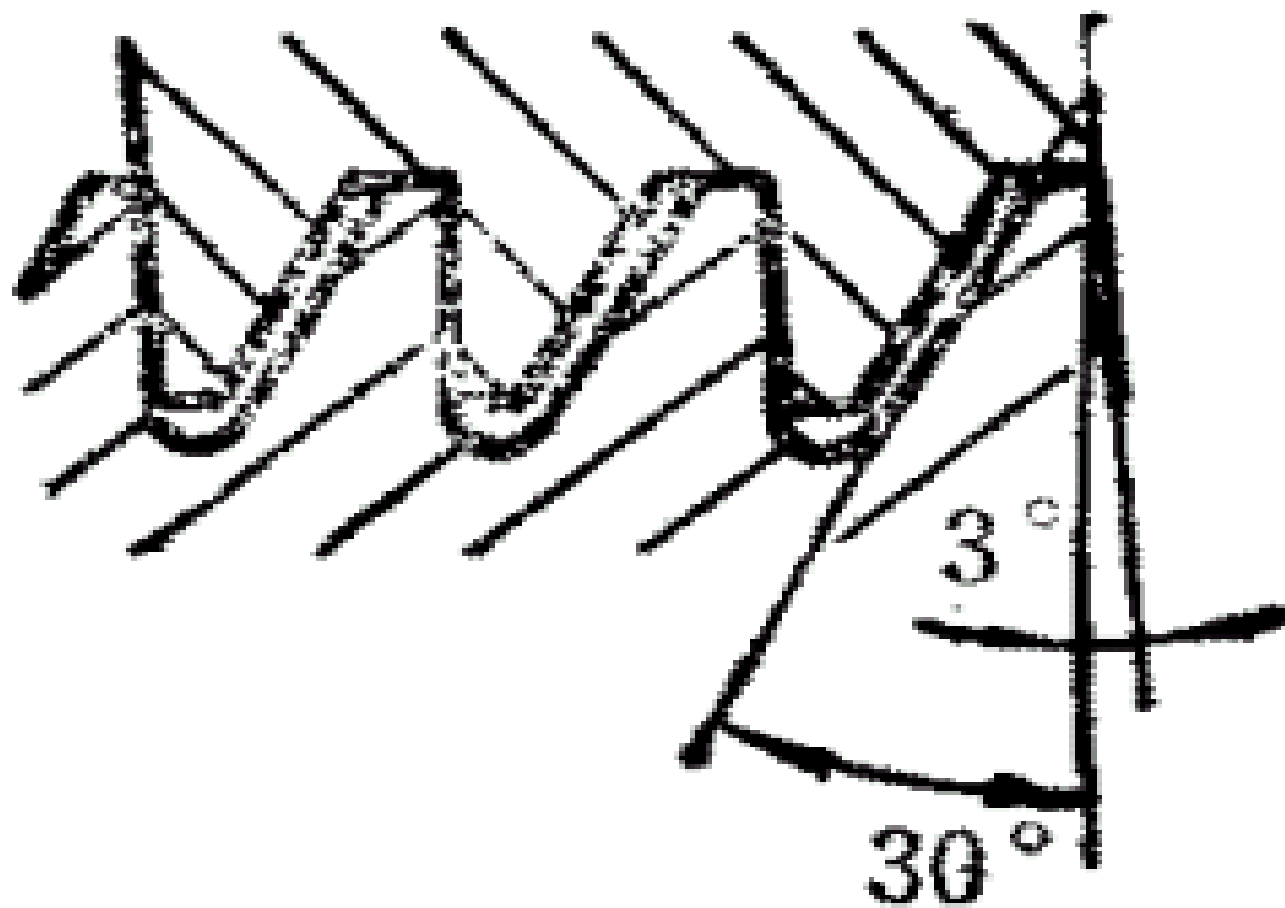


梯形螺纹



- .. 牙型角 30°
- .. 较矩形螺纹传动效率略低，牙根强度高，工艺性好，如用剖分螺母，磨损后可调整补偿间隙，广泛用于传动。

锯齿形



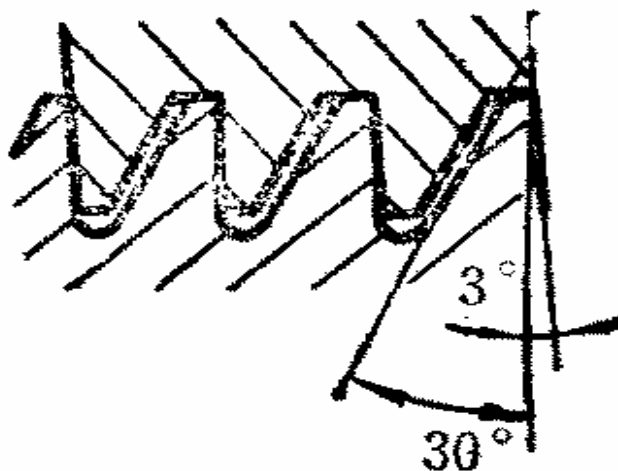
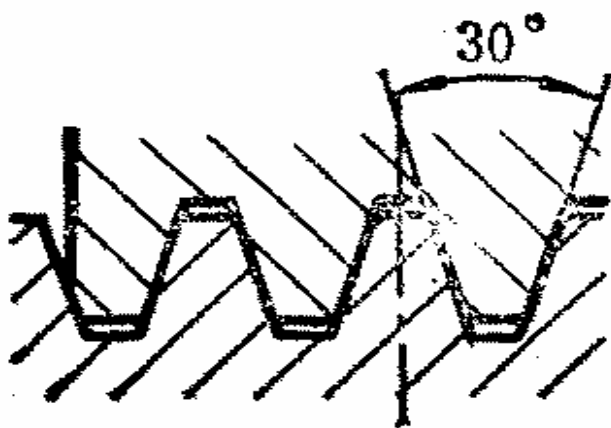
连接用的普通螺纹



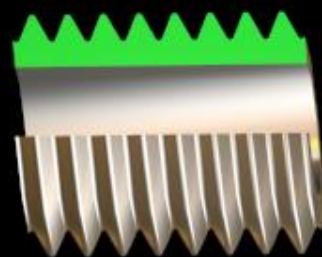
- .. 三角形、单线、右旋螺纹
- .. 标准粗牙、细牙

机械制造常用的传动螺纹

- .. 梯形螺纹
- .. 锯齿形螺纹



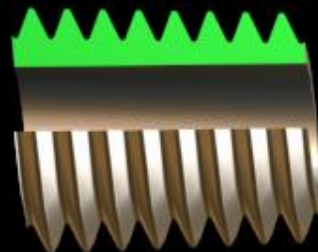
- .. 螺纹——GB
- .. 标准件



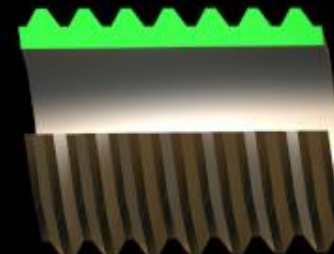
非螺纹密封的管螺纹



普通螺纹



用螺纹密封的管螺纹



米制锥螺纹

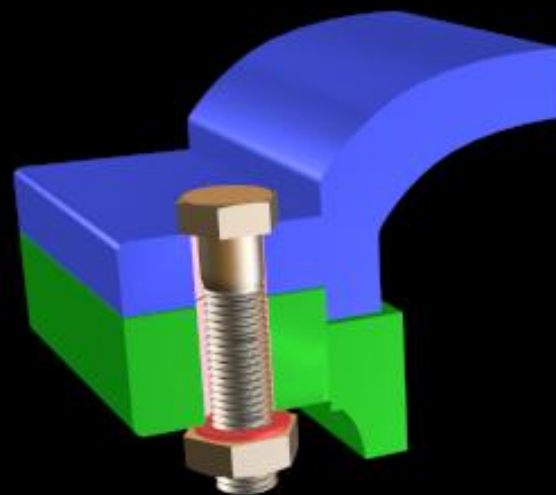
10-4 螺纹连接的基本类型及 螺纹紧固件

1 螺纹连接的基本类型

- ✕ 螺栓连接
- ✕ 双头螺柱连接
- ✕ 螺钉连接
- ✕ 紧定螺钉连接

受拉螺栓连接

- .. 在被连接件上制出通孔，孔与螺栓杆之间有间隙，螺纹主要受拉力。广泛用于被连接件不太厚的场合

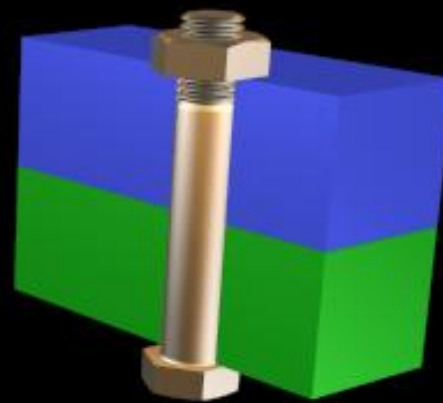


普通螺栓联接

(受拉螺栓)

受剪螺栓连接

- 这种连接采用的是小六角头铰制孔用螺栓，被连接件上的通孔与螺栓光杆间无间隙，采用过渡配合（**H7/m6, H7/n6**），用来承受横向载荷

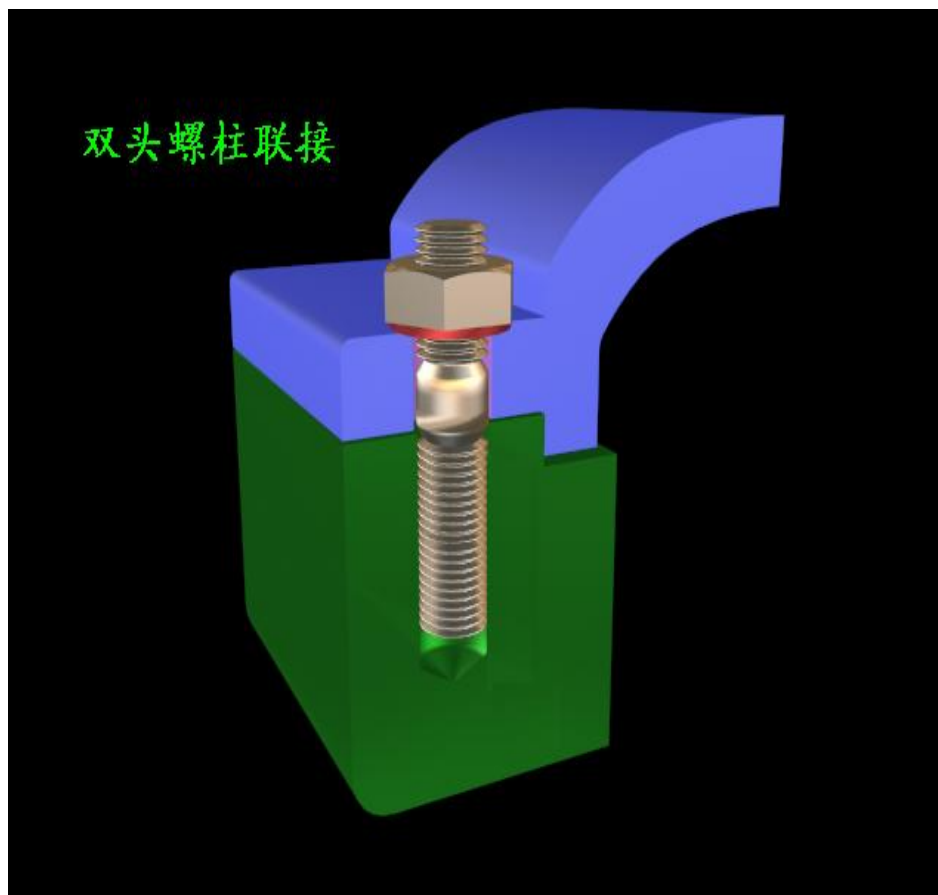


铰制孔用螺栓联接

（受剪螺栓）

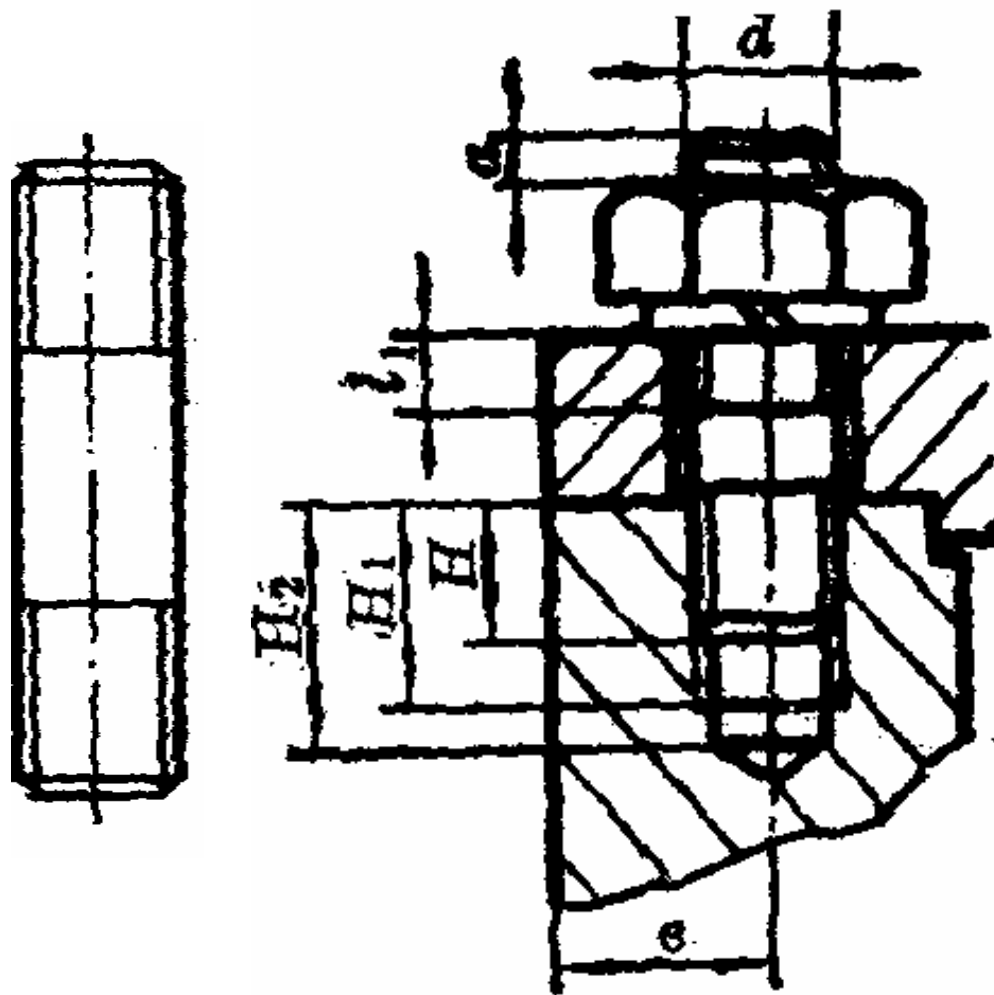
双头螺柱连接

- 当被连接件之一较厚，螺栓不便贯穿，且需经常装拆时，采用这种连接。



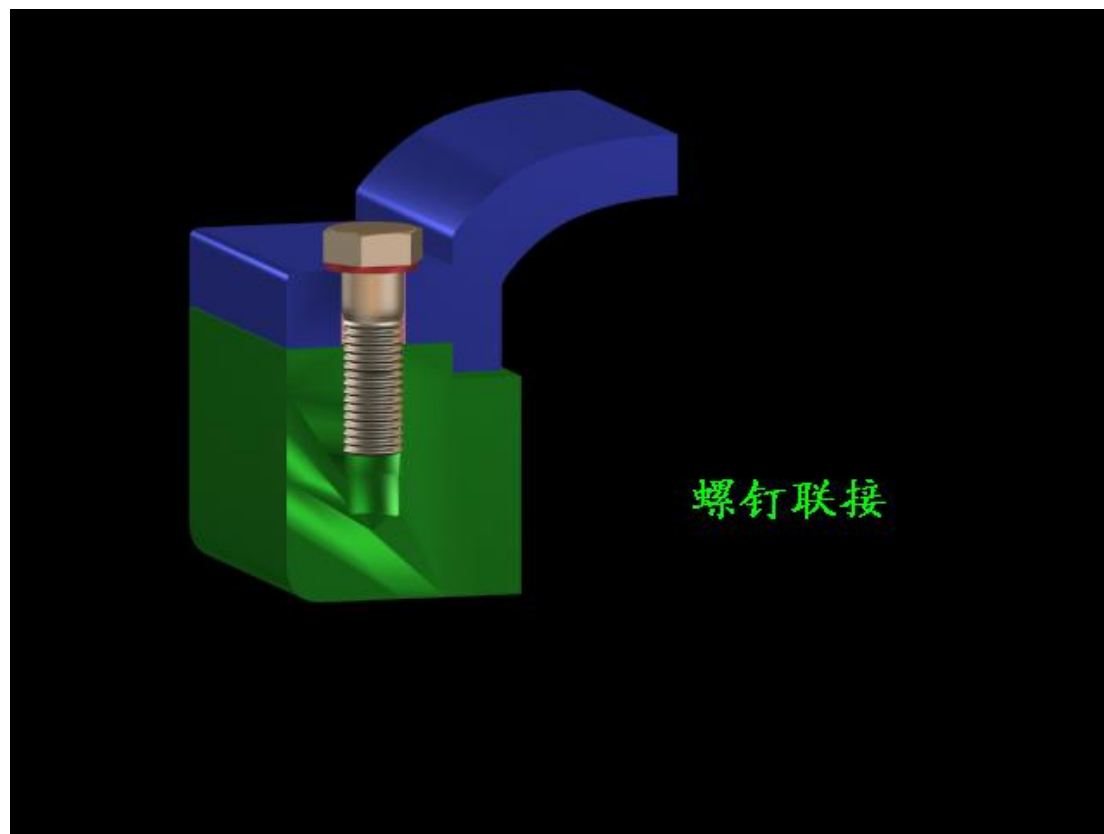
双头螺柱连接

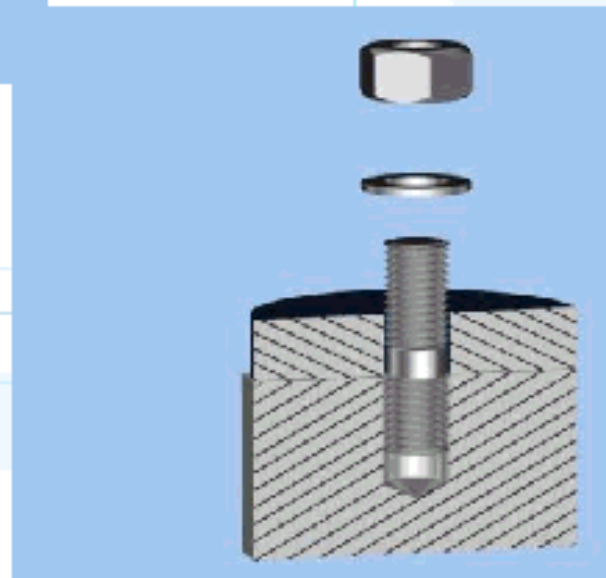
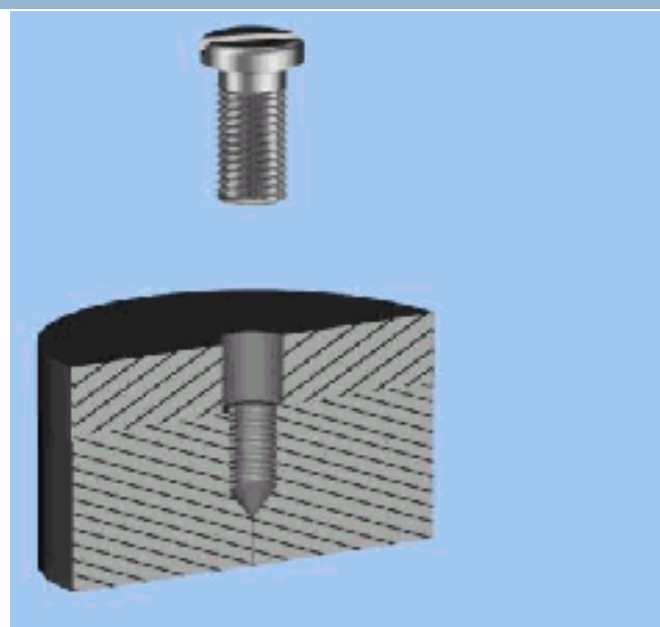
- .. 结构紧凑
- .. 允许多次拆装



螺钉连接

- .. 将螺钉穿过一个被连接件的通孔后，直接拧入另一个较厚的被连接件的螺纹盲孔中，应用于不常装拆的场合，如在仪表中广泛应用





螺钉连接

座端拧入深度 H ,当螺孔材料为:

钢或青铜 $H \approx d$,

铸铁 $H = (1.25 \sim 1.5)d$,

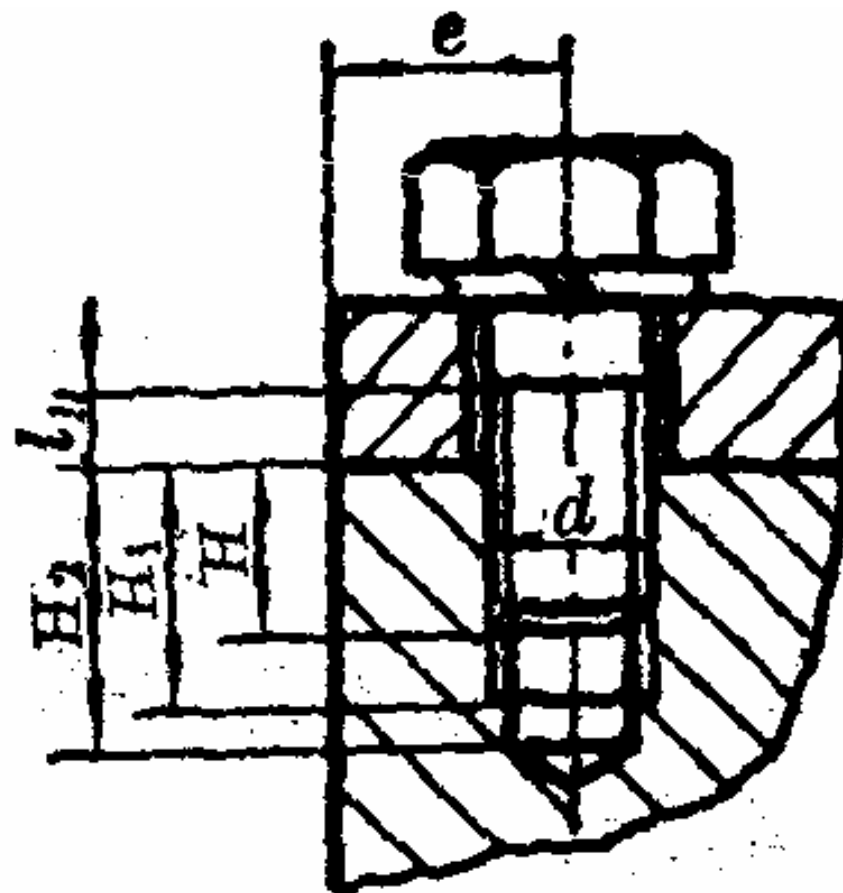
铝合金 $H = (1.5 \sim 2.5)d$,

螺纹孔深度 $H_1 = H + (2 \sim 2.5)P$,

钻孔深度 $H_2 = H_1 + (0.5 \sim 1)d$,

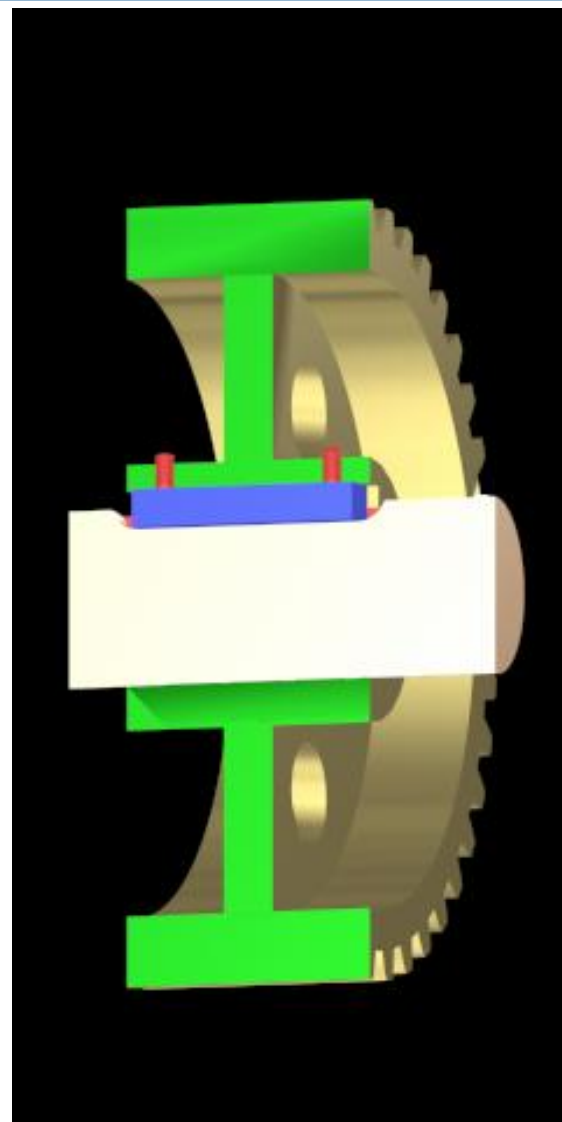
l_1, a, e 值同图 10-9

- .. 结构简单
- .. 不宜多次拆装



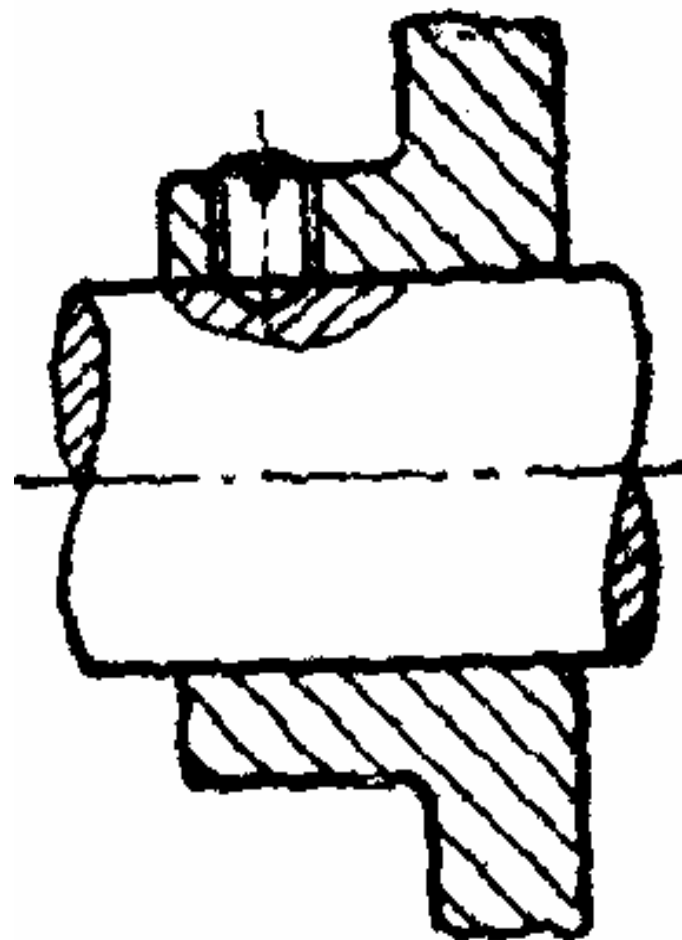
紧定螺钉连接

- 将紧定螺钉拧入一个零件的螺纹孔后，其末端顶紧另一个零件，以使两零件的相对位置固定，并能传递不大的力和力矩，多用于轴环、带轮、齿轮等零件和轴的连接。



紧定螺钉连接

- .. 固定两零件间的相对位置
- .. 传递不大的力或力矩



2 螺纹紧固件

- .. 螺栓
- .. 双头螺柱
- .. 螺钉
- .. 紧定螺钉
- .. 螺母/垫片

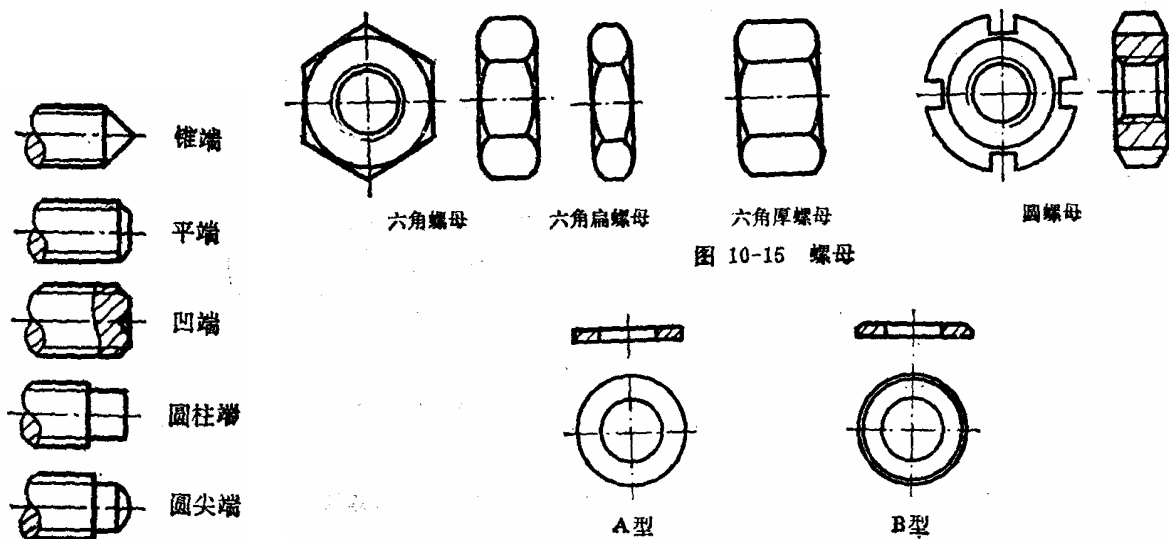
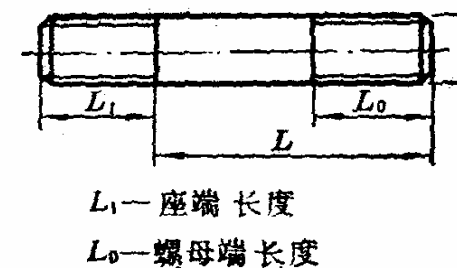
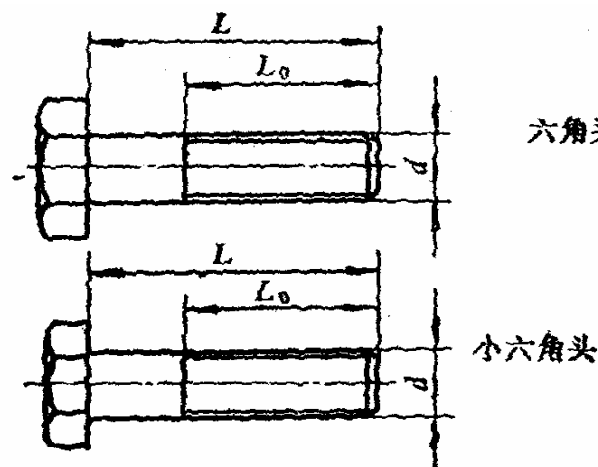
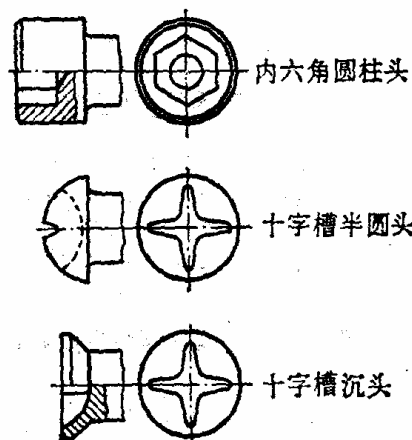


图 10-15 螺母

螺钉展示

- .. 头部形状——方头、内六角、十字头、一字头
- .. 末端形状——平端、锥端
- .. 方头可承受较大的拧紧力矩
- .. 平端用于被顶表面硬度较高，或常需调整相对位置的连接
- .. 锥端用于被顶表面硬度较低，不常调整的连接

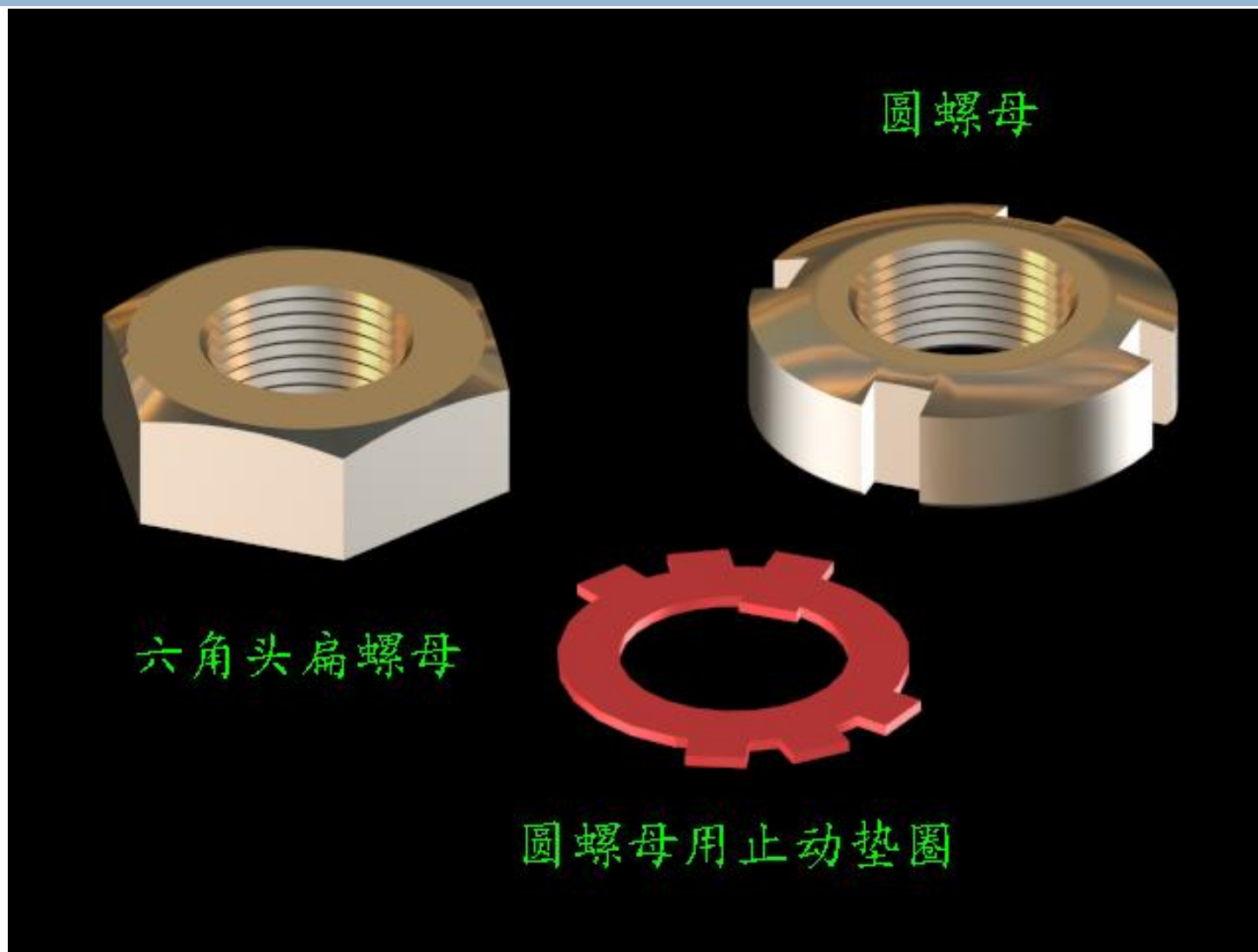
螺母和垫圈

- .. 在螺纹连接中与螺栓、螺柱配合使用
- .. 六角螺母、六角开槽螺母、圆螺母等。
- .. 六角螺母应用最普遍。
- .. 开槽螺母用于振动、变载的场合，配以开口销可防止螺纹连接松动。
- .. 圆螺母常用于较大直径的连接，如固定滚动轴承。

垫圈

- .. 常用有平垫圈和弹簧垫圈。
- .. 平垫圈可以保护并垫平被连接件的支承面。
- .. 弹簧垫圈用于经常拆开的连接处，靠其弹性及斜口防止连接松动。

螺母&垫圈



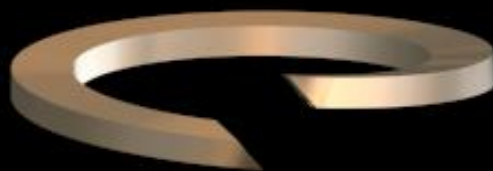
垫圈



平垫圈



斜垫圈



弹簧垫圈

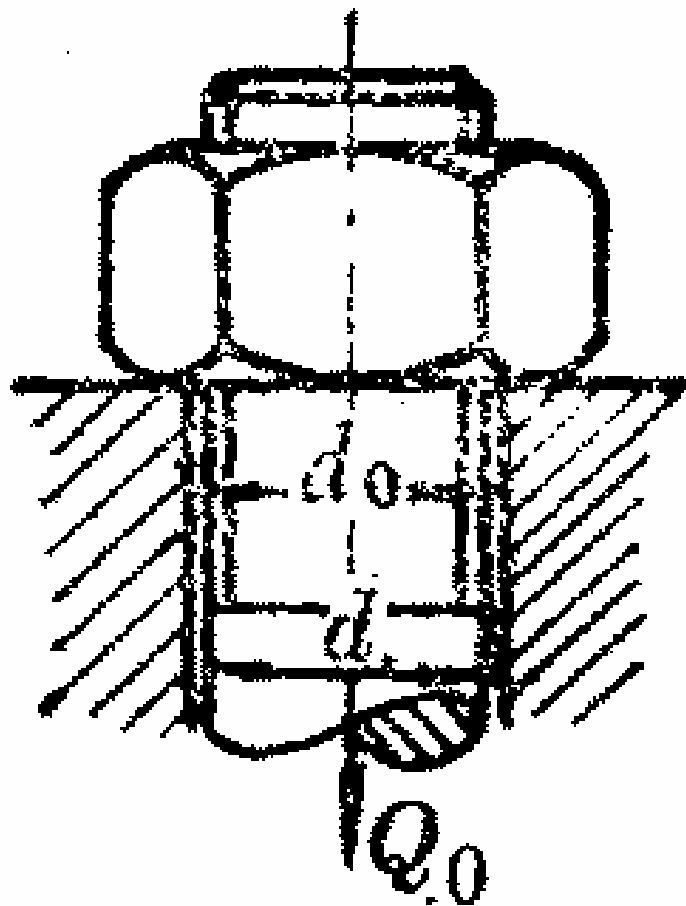


薄平垫圈

10-5 螺纹连接的预紧与防松

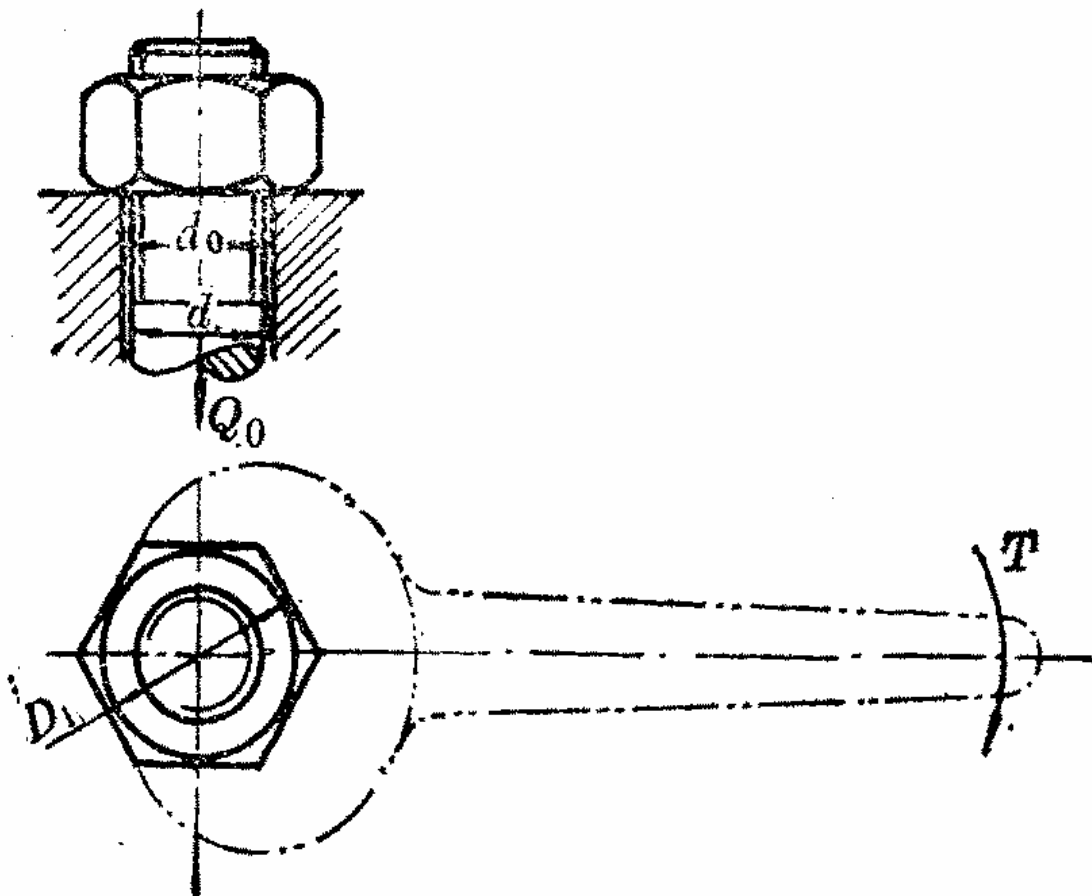
.. 预紧

- .. 除个别情况外，螺纹连接在装配时必须拧紧，这个拧紧的过程称为**预紧**
- .. 此时螺栓将受到预先给定的拉力，即**预紧力**
- .. 重要的螺栓连接须控制预紧力，它影响到连接的可靠性、连接强度及密封性



1 拧紧力矩

用来克服螺旋副相对转动的阻力矩和螺母支承面上的摩擦阻力矩



拧紧力矩

$$\begin{aligned} T &= T_1 + T_2 \\ &= \frac{F_a d_2}{2} \operatorname{tg}(\gamma + r\phi) + f_c F_a r_f \end{aligned}$$

- **M10-M68**的粗牙螺纹，取摩擦系数为**0.15**，则拧紧力矩可简化为

$$T \gg 0.2 F_a d \quad \text{N}\cdot\text{mm}$$

$$f\phi = \operatorname{tg} r\phi = 0.15$$

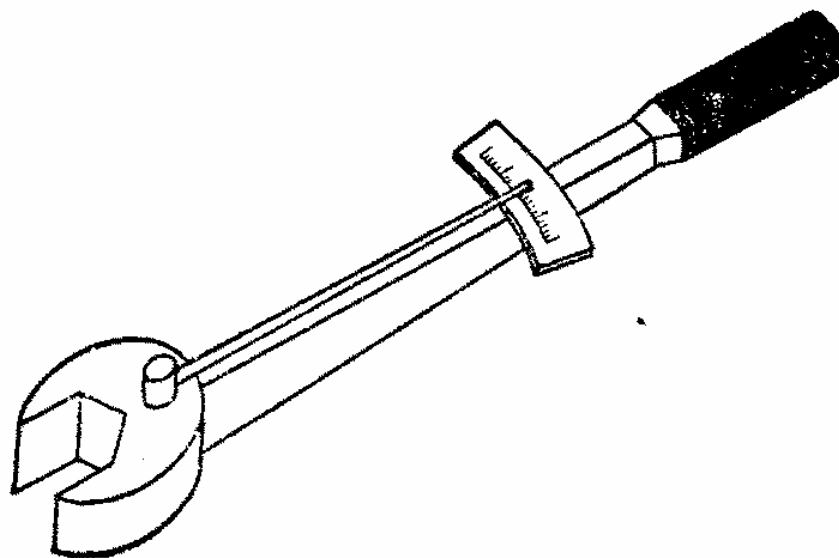
$$f_c = 0.15$$

拧紧力矩的控制

- .. 对于重要的连接具有重要的意义
- .. 由拧紧力矩控制预紧力
- .. 为充分发挥螺栓的工作能力和保证预紧可靠，预紧应力一般可达材料屈服极限的**50~70%**

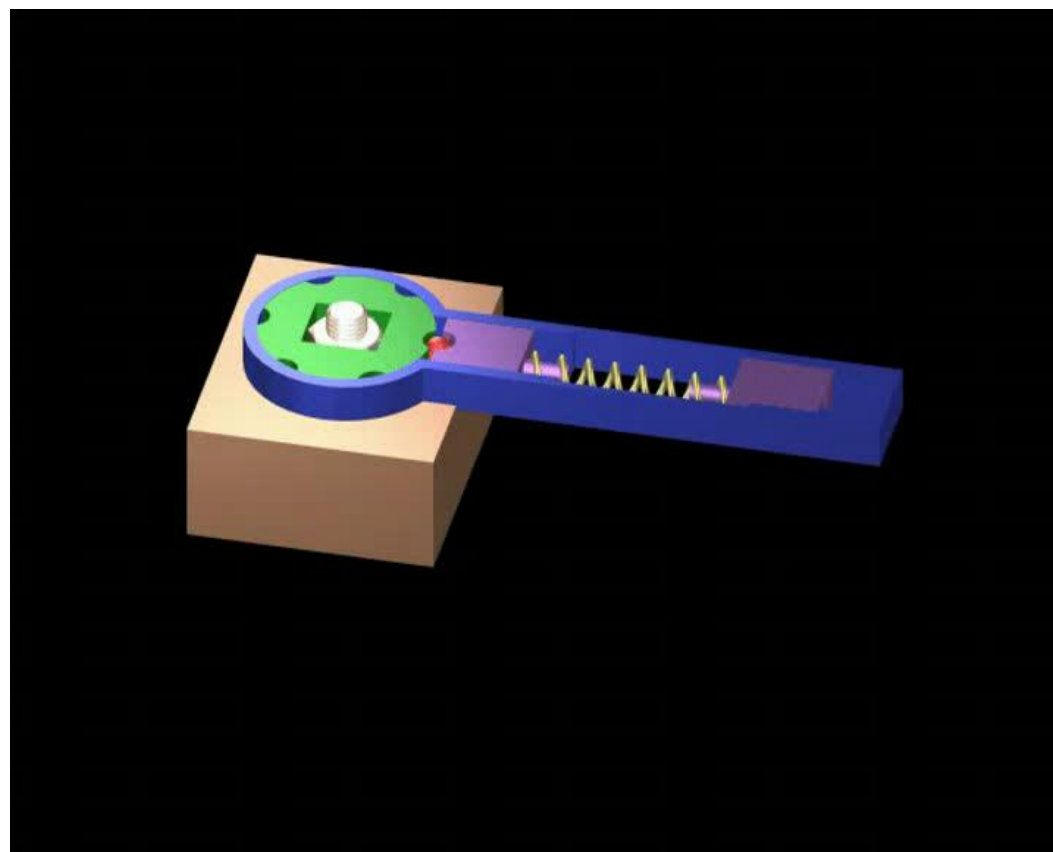
拧紧力矩的控制方法

- .. 经验法
- .. 测力扳手
- .. 测量螺栓的伸长



螺纹拧紧

- 力矩扳手
- 定力矩扳手



2 螺纹连接的防松

- 为什么要防松

- 连接螺纹用三角螺纹具有自锁性，但是在冲击、振动和变载荷的作用下以及温度变化的条件下，预紧力可能在某一瞬时消失，从而连接发生松脱

- 防松的根本问题

- 防止螺纹副的相对转动


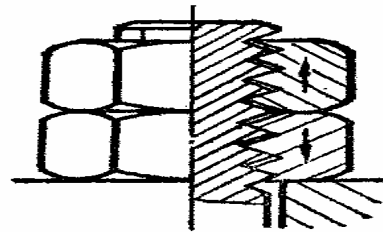
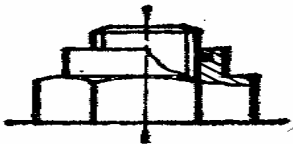
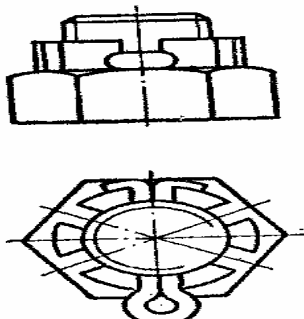
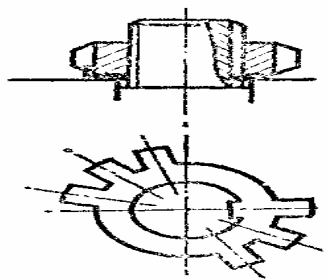
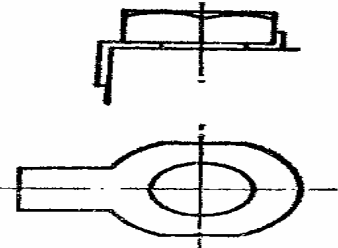

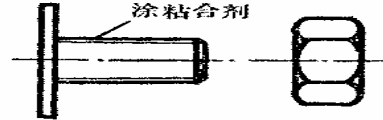
防松的方法

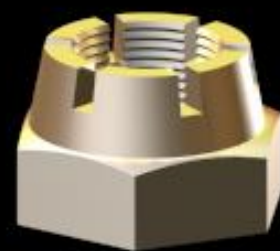


- .. 利用附加摩擦力防松
- .. 采用专门防松元件防松
- .. 其他方法防松

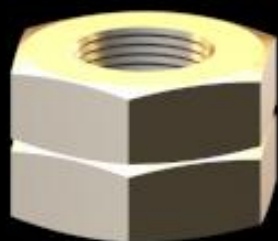
防松的方法

表 10-3 常用的防松方法

利用附加摩擦力防松	 <p>弹簧垫圈</p>	 <p>对顶螺母</p>	 <p>尼龙圈锁紧螺母</p>
	<p>弹簧垫圈材料为弹簧钢，装配后垫圈被压平，其反弹力能使螺纹间保持压紧力和摩擦力</p>	<p>利用两螺母的对顶作用使螺栓始终受到附加的拉力和附加的摩擦力。结构简单，可用于低速重载场合</p>	<p>螺母中嵌有尼龙圈，拧上后尼龙圈内孔被胀大，箍紧螺栓</p>
采用专门防松元件防松	 <p>槽形螺母和开口销</p>	 <p>圆螺母用带翅垫片</p>	 <p>止动垫片</p>
	<p>槽形螺母拧紧后，用开口销穿过螺栓尾部小孔和螺母的槽，也可以用普通螺母拧紧后再配钻开口销孔</p>	<p>使垫片内翅嵌入螺栓(轴)的槽内，拧紧螺母后将垫片外翅之一折嵌于螺母的一个槽内</p>	<p>将垫片折边以固定螺母和被联接件的相对位置</p>
其他方法防松	 <p>冲点法防松 用冲头冲 2~3点</p>	 <p>粘合法防松</p>	<p>用粘合剂涂于螺纹旋合表面，拧紧螺母后粘合剂能自行固化，防松效果良好</p>



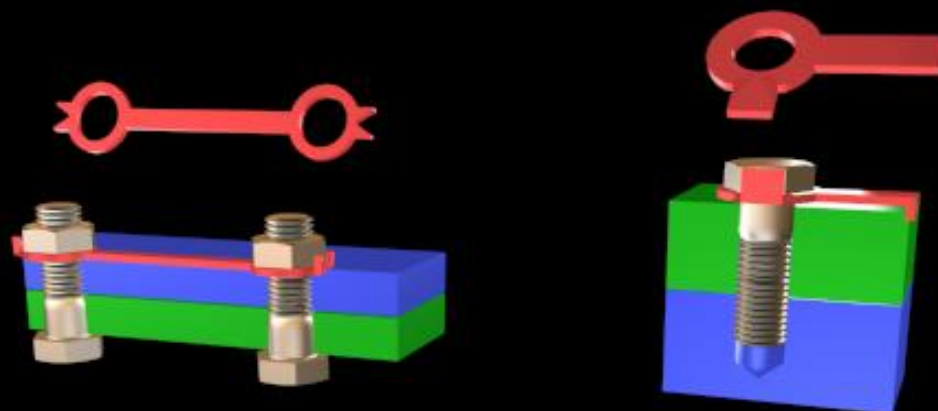
自锁螺母



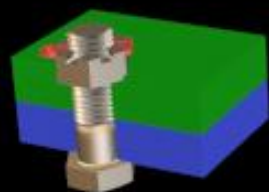
对顶螺母



弹簧垫圈



止动垫圈



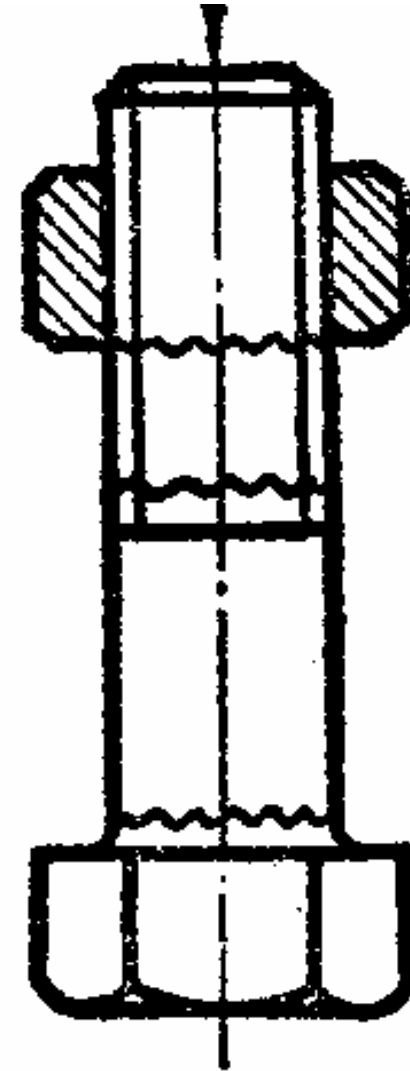
开口销与六角开槽螺母



串联钢丝

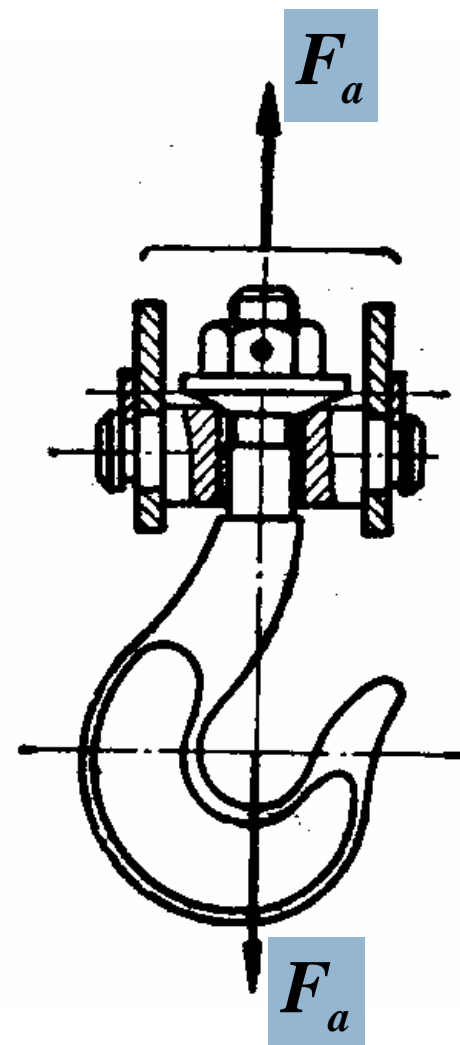
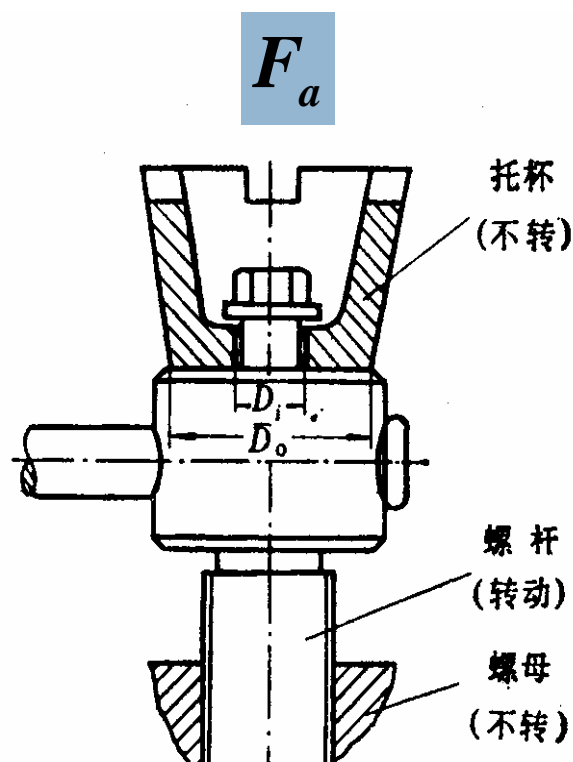
10-6 螺栓连接的强度计算

- 螺栓的主要失效形式
 - 螺栓杆拉断
 - 螺纹被压溃和剪断
 - 因磨损而发生滑扣



1 松螺栓连接

- 载荷：只有外载荷的拉力，没有预紧力



强度条件

∴ 计算应力 \leq 许用应力

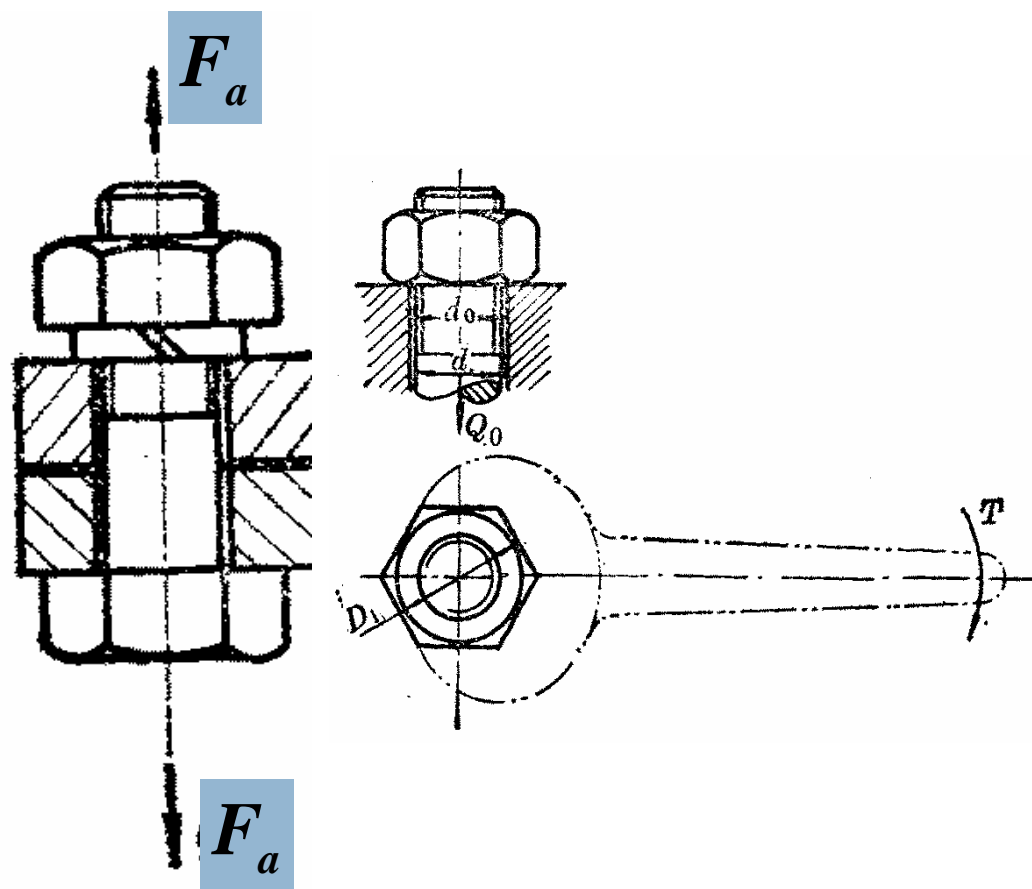
$$S = \frac{F_a}{\frac{p d_1^2}{4}} \text{ £ } [S]$$

2 紧螺栓连接

.. 受力

✧ 承受预紧力，拧紧过程是又受到螺纹力矩的作用

✧ 按拉扭组合强度进行计算



对于M10~M68的普通螺纹

.. 剪应力

$$t = \frac{T_1}{p d_1^3 / 16}$$

.. 取 d_1, d_2, y 的平均值, 且 $\operatorname{tg} r' = f' = 0.15$

.. 则 $t \approx 0.5S$

.. 由第四强度理论, 当量应力为

$$S_e = \sqrt{S^2 + 3t^2} \approx 1.3S$$

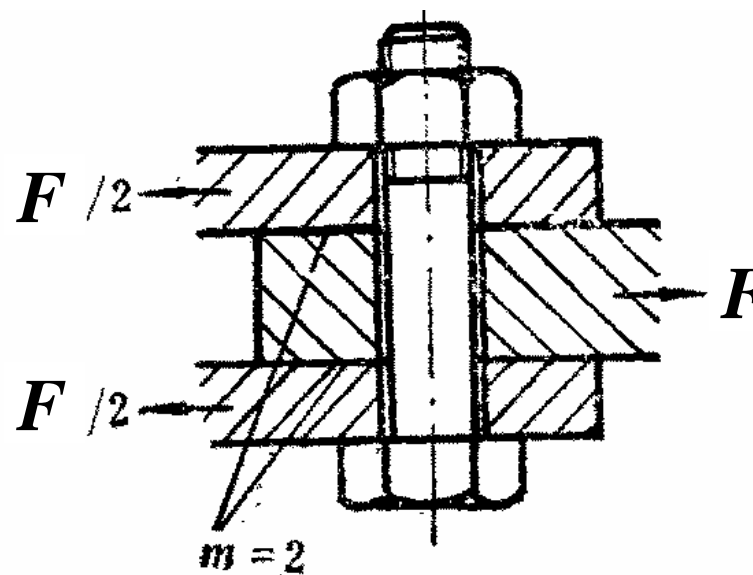
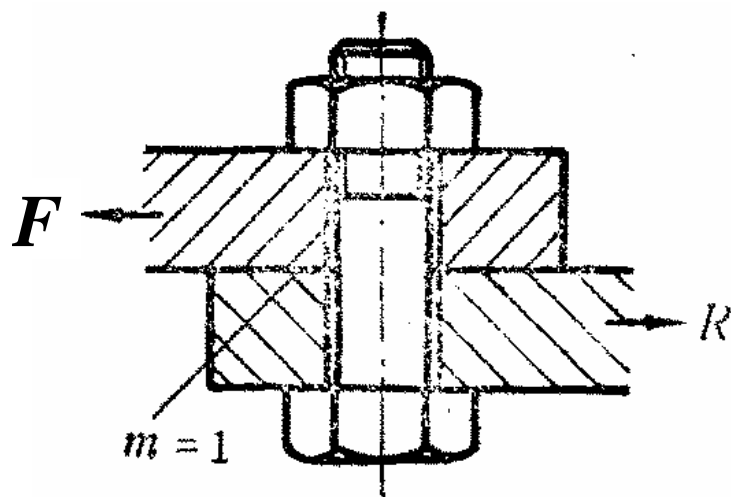
拧紧状态下的强度条件

不受外载荷的作用之前

$$S = \frac{1.3 F_a}{\frac{p d_1^2}{4}} \text{ } \text{£} [S]$$

1 受横向工作载荷的连接

·· 载荷方向垂直于螺栓轴线



1 受横向工作载荷的连接

.. 失效形式

✧ 接触间的相对滑动

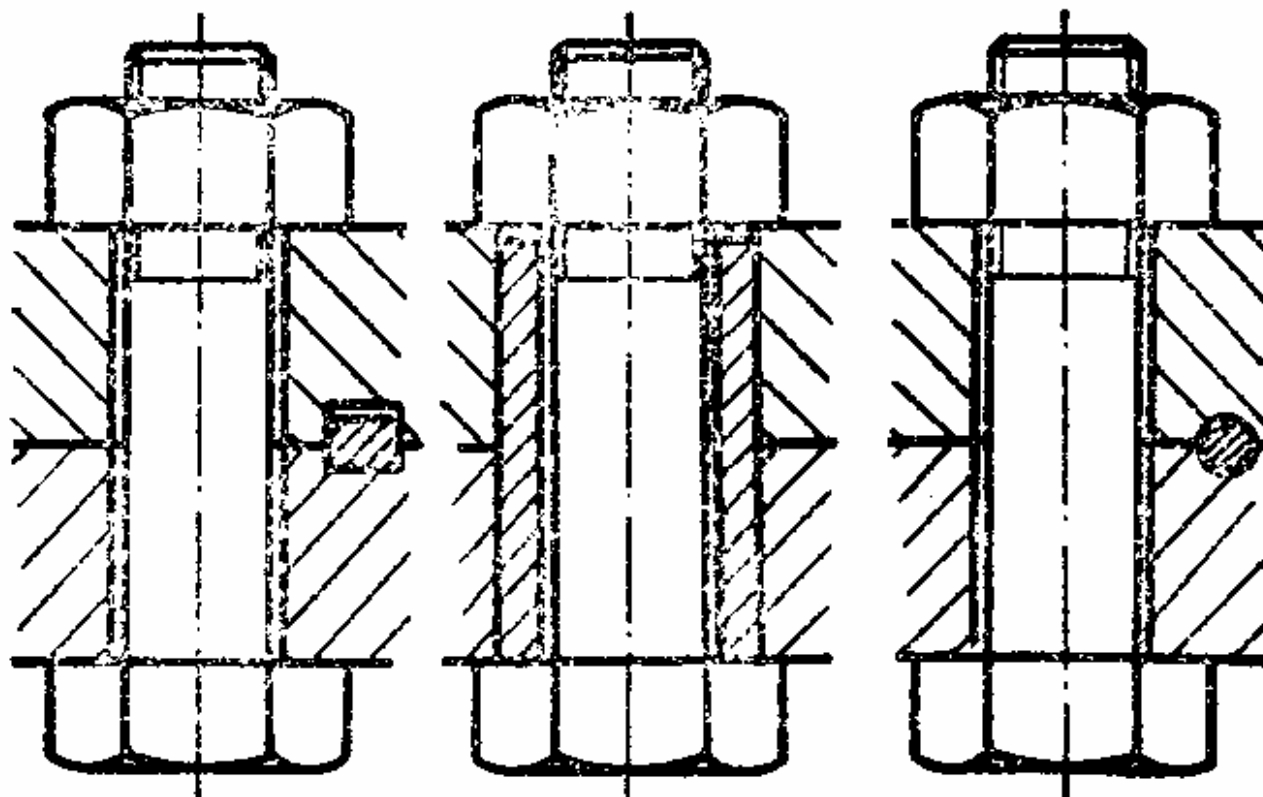
.. 受力：预紧力

✧ 保证使摩擦力大于拉力而不发生相对滑动

$$F_a = F_0 \geq \frac{CF}{mf}$$

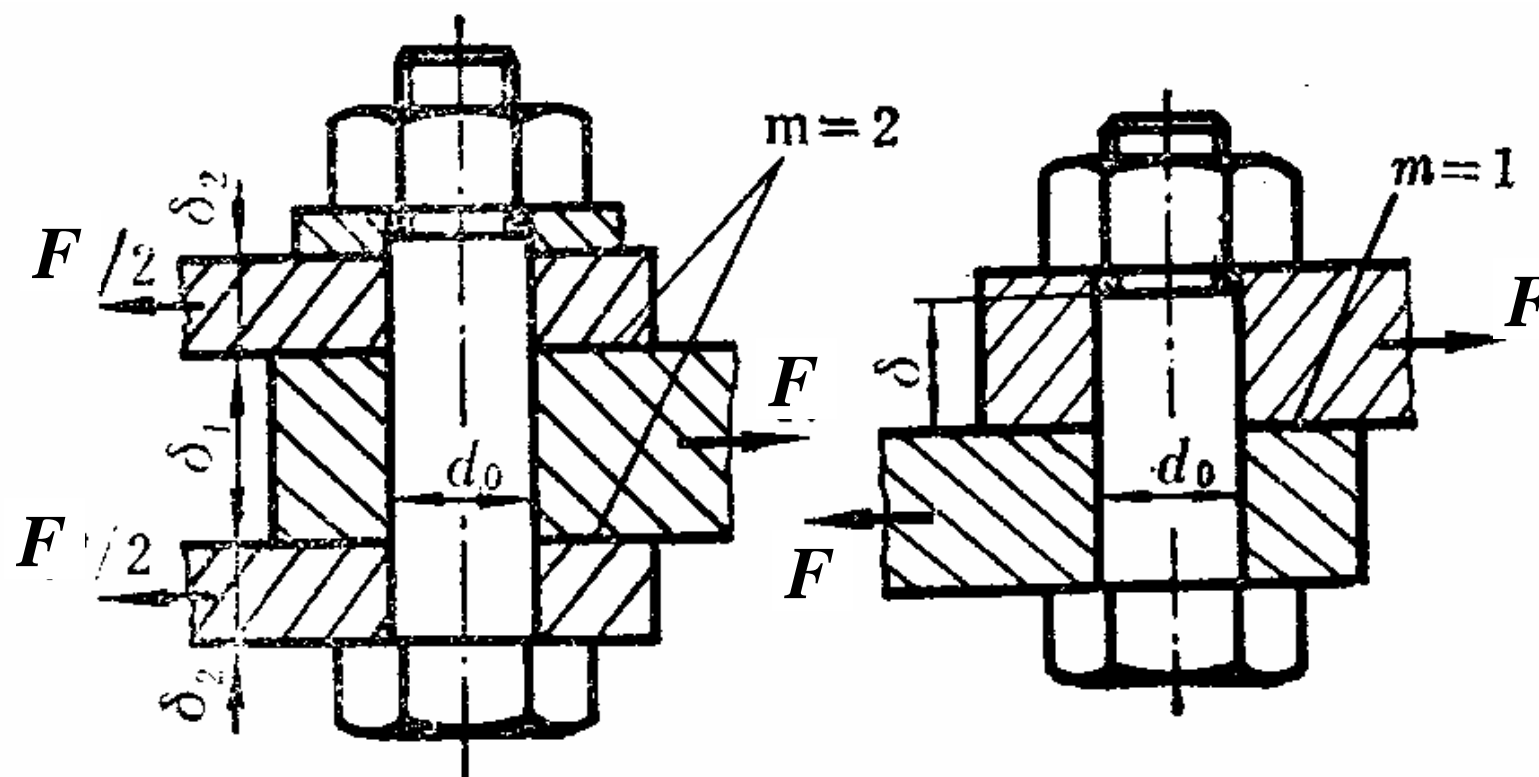
● 当 $f=0.15$, $C=1.2$, $m=1$ 时, $F_0 \geq 8F$

为此可以采用各种减载装置



铰制孔螺栓连接

螺栓受剪切和挤压



强度条件

.. 剪切

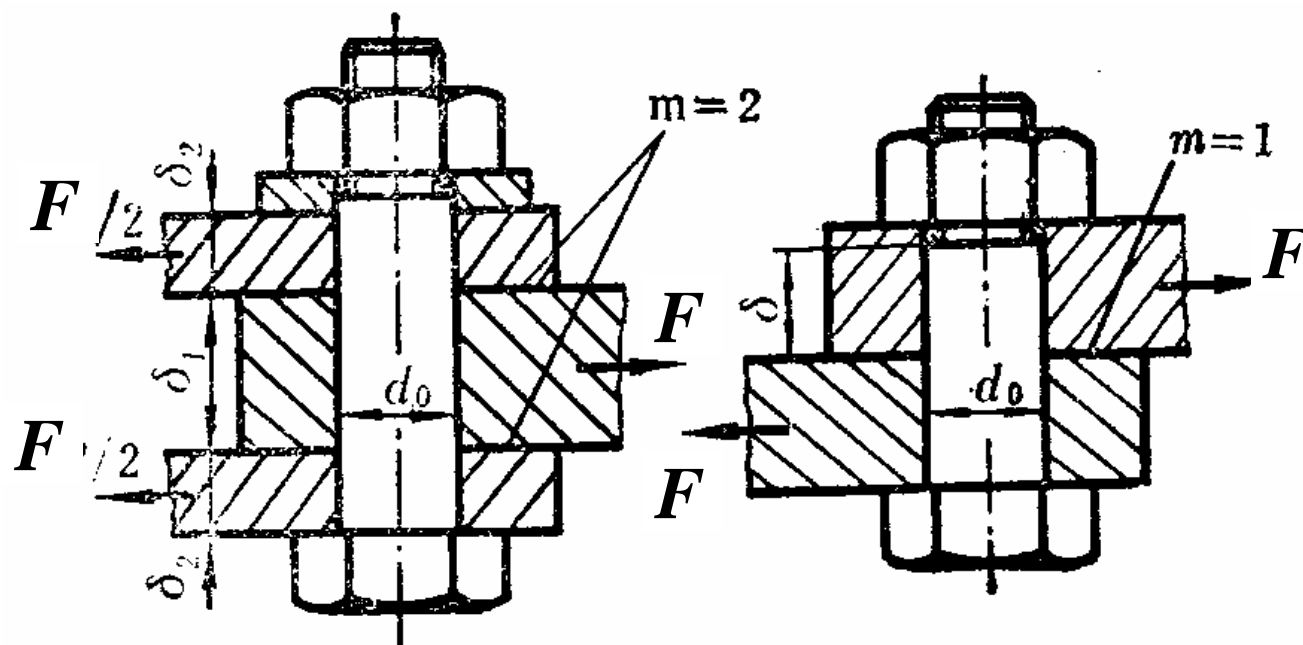
$$t = \frac{F}{m \frac{d_0^2 p}{4}} \leq [t]$$

● 挤压

$$s_p = \frac{F}{d_0 d} \leq [s_p]$$

铰制孔螺栓连接

螺栓受剪切和挤压

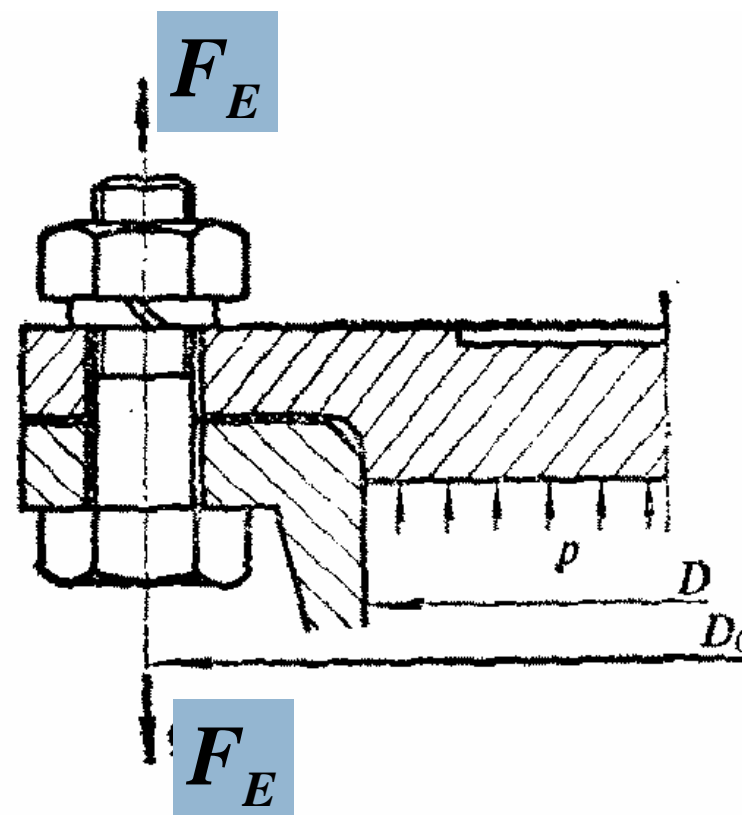


2 受轴向工作载荷的螺栓连接

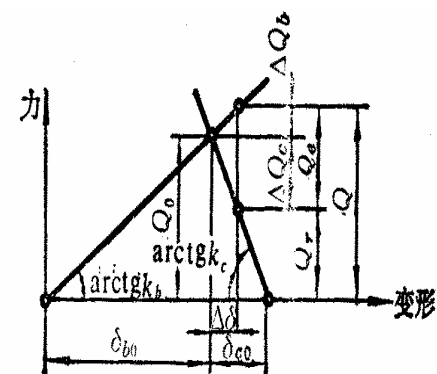
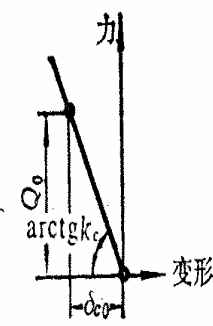
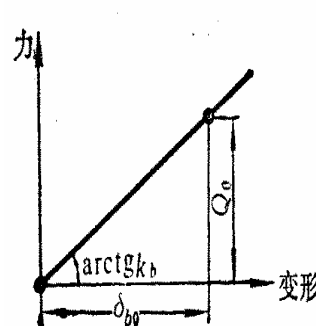
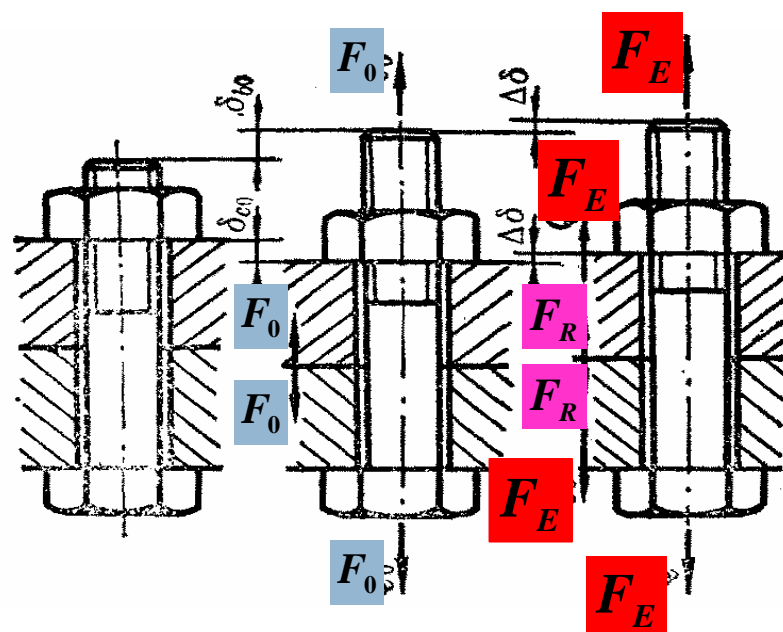
- 预紧力 F_0
- 工作载荷 F_E
- 残余预紧力 F_R
- 作用在螺栓上总的载荷

$$F_a = F_E + F_R$$

$$^1 F_E + F_0$$



受轴向工作载荷的紧螺栓连接的受力与变形



变形协调

总载荷

$$F_a = F_E + F_R$$

连接不开缝条件

- 由于 F_E 的增加, F_0 减小, 两被连接件间的压力减小, 当该压力减至小于0时, 两零件将分开
- 不开缝条件

$$F_R \geq 0$$

为保证不开缝, 对于不同的应用场合, 规定了残余预紧力的大小

强度条件

.. 强度条件为

$$S = \frac{1.3 F_a}{\frac{p d_1^2}{4}} \text{ £ } [S]$$

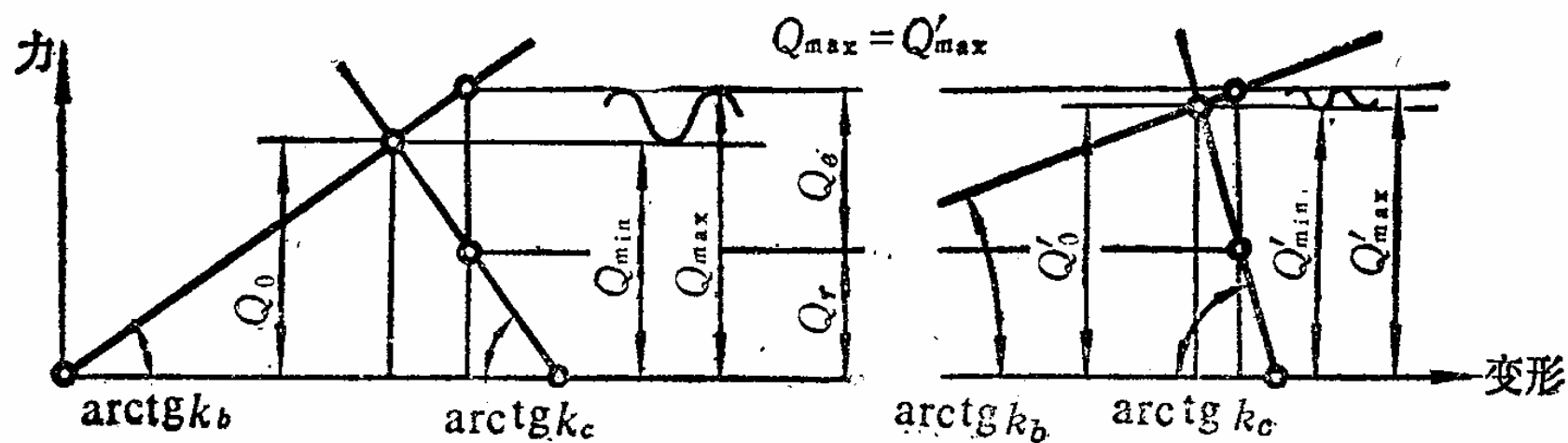
- 1.3的意义是考虑可能补充拧紧
- 许用应力从表中查取

10-7 螺栓的材料和许用应力

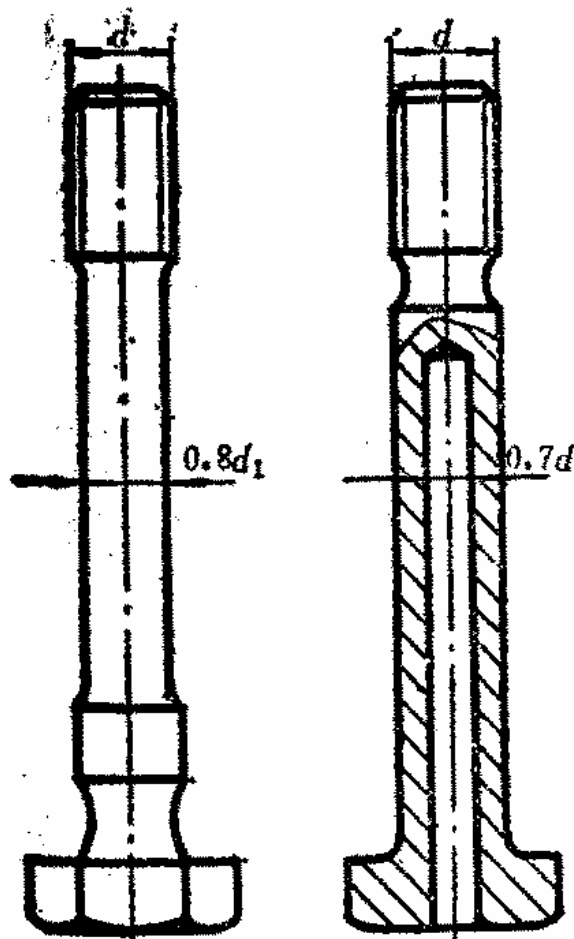
- .. 一般螺栓用碳素结构钢
- .. 重要的用合金结构钢
- .. 螺栓中所承受的载荷为动、静载荷的意义
- .. 控制预紧力与不控制预紧力

10-8 提高螺栓连接强度的措施

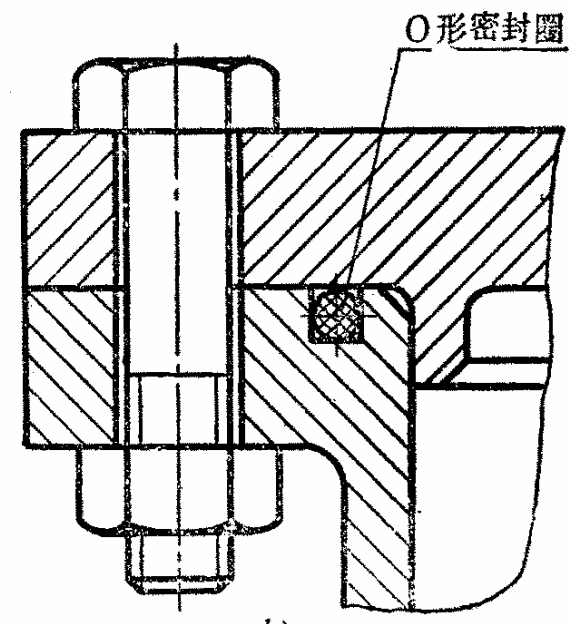
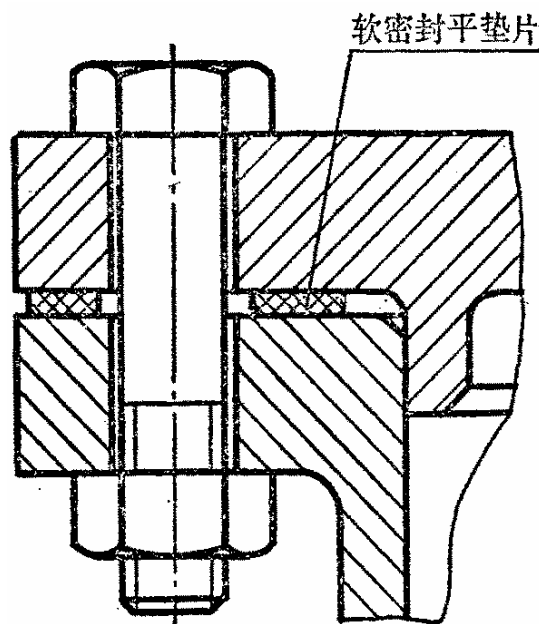
- 降低螺栓总拉伸载荷的变化范围



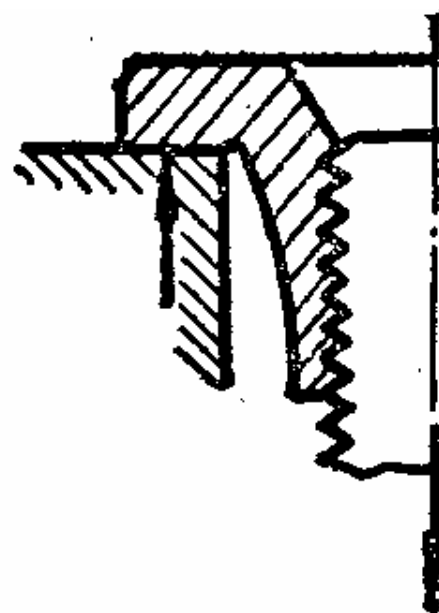
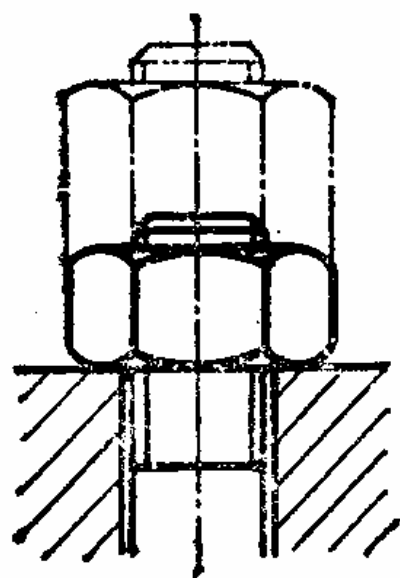
改变连接的刚度



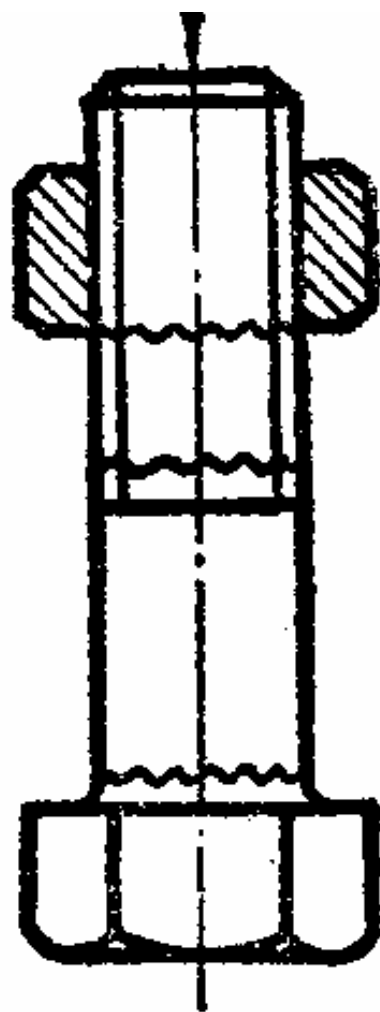
$$F_a = F_0 + F_e \frac{k_b}{k_b + k_c}$$



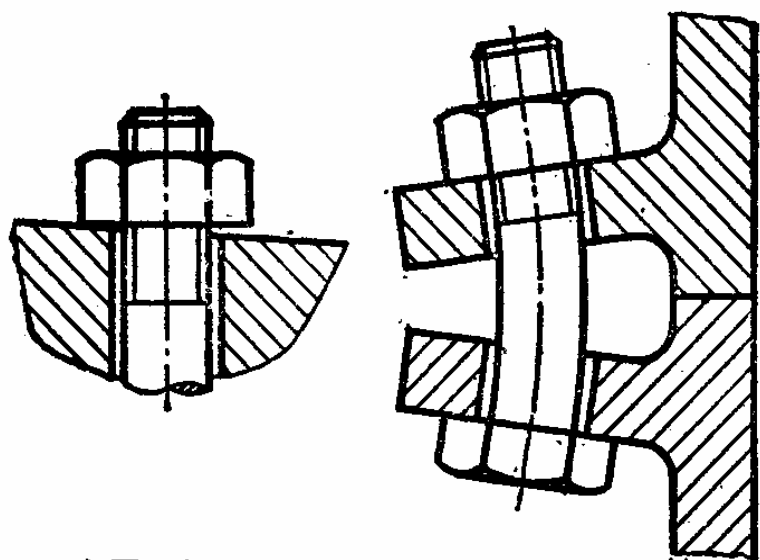
改善螺纹牙间载荷分布状态



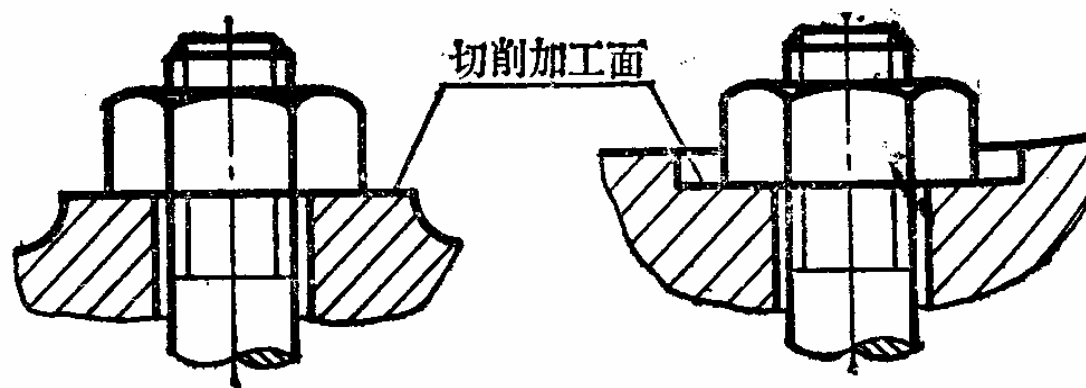
减小应力集中



避免或减小附加应力



支承面不平 被联接件变形太大



螺纹加工的方法



- .. 车、磨——直径较大
- .. 搓丝、滚丝——大批量生产
- .. 攻丝——内螺纹，工具是丝锥
- .. 套扣——外螺纹，工具是板牙

10-11 键连接

.. 键的功用

- ✧ 实现轴的轴上零件间的周向固定——传递扭矩
- ✧ 有些类型的键还可以实现轴上零件轴向固定或轴向移动

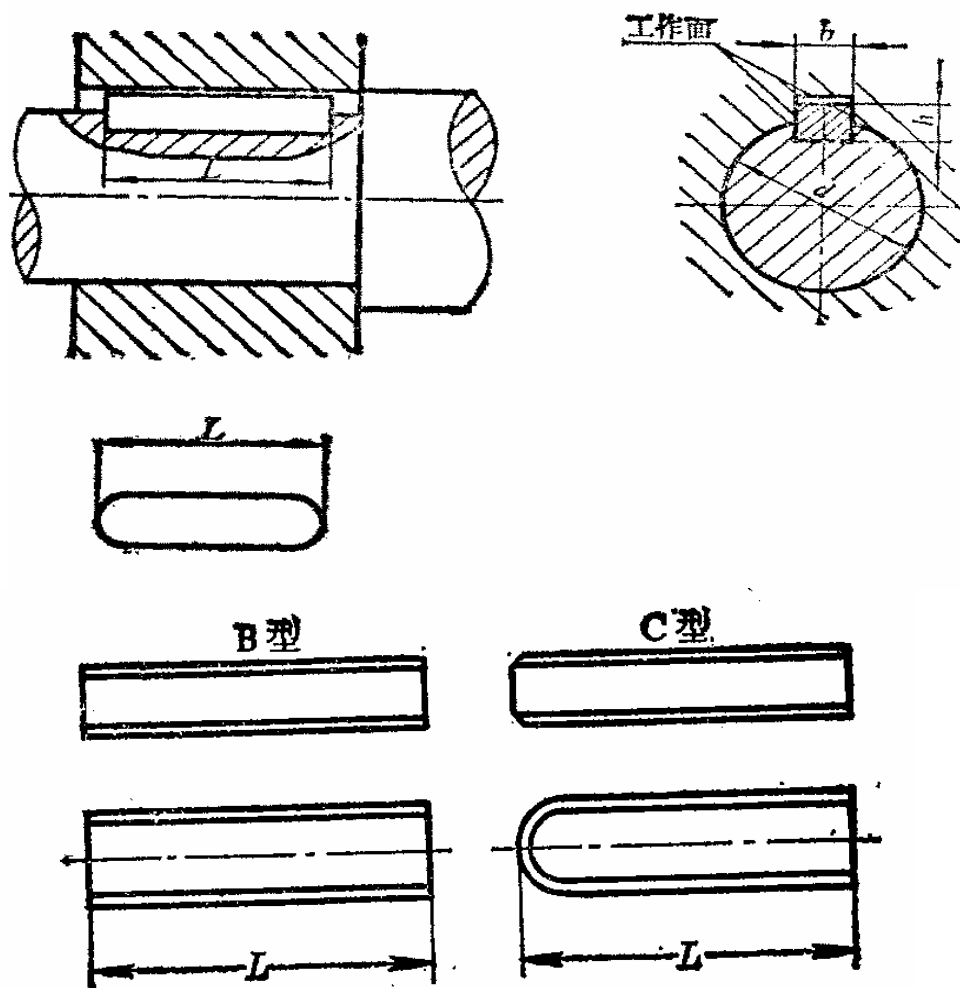
键的类型



- .. 平键
- .. 半圆键
- .. 楔键
- .. 切向键

平键

- 工作面：两侧面
- 特点：定心性能较好，装拆方便
- 型式：普通平键 A, B, C 三种

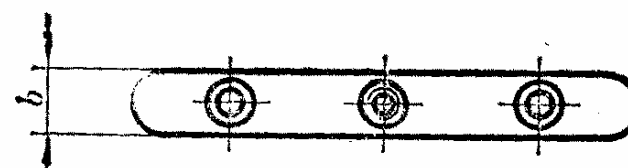
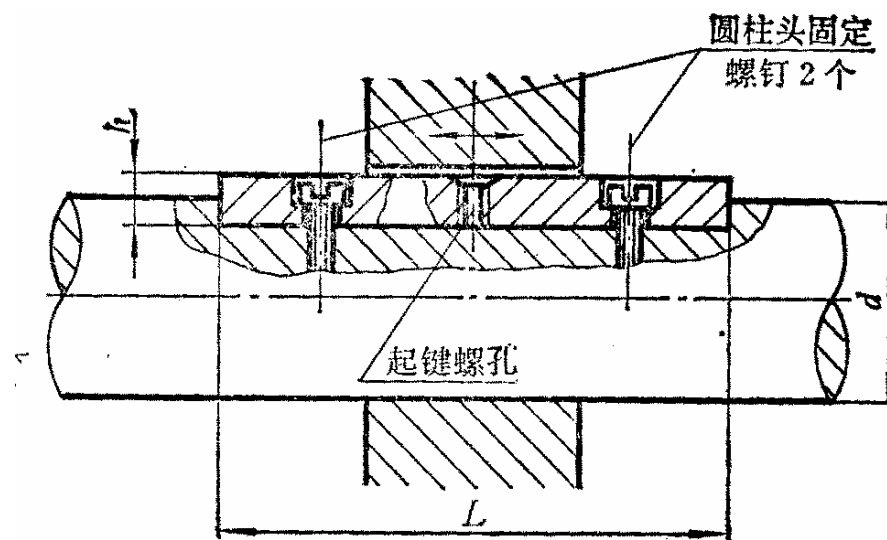


平键连接

- 普通平键连接有圆头和方头两种
 - ✧ 圆头用于端铣刀加工的轴槽
 - ✧ 方头用于盘铣刀加工的轴槽
- 用于轴上零件和轴的周向固定，组成回转件，靠键的两侧与轴槽和毂槽的接触面受挤压而传递扭矩
- 普通平键的两侧面是工作面

导向平键

- .. 长度较长，需用螺钉固定
- .. 起键螺钉
- .. 常用于变速箱中的滑动齿轮与轴的连接



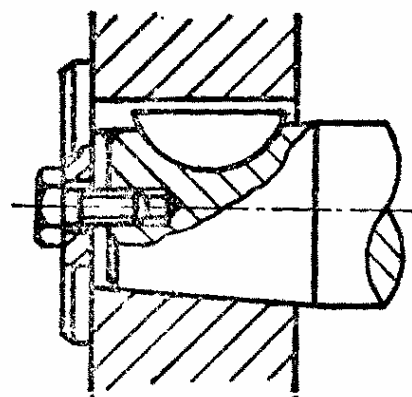
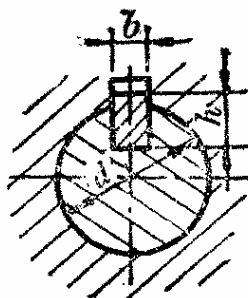
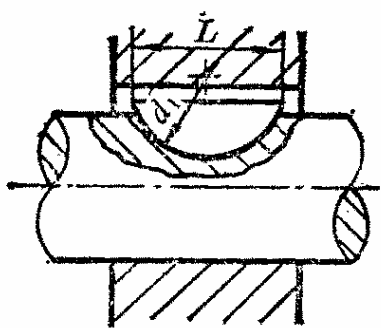
b) 导向平键

半圆键连接

- .. 键为半圆形，能在轴槽中饶槽底圆弧曲率中心摆动
- .. 靠键的侧面传递扭矩
- .. 常用于轻载场合——锥轴

半圆键

- .. 工作面：两侧面
- .. 特点：定心性能较好，装拆方便，对轴的强度削弱大
- .. 只适用于轻载

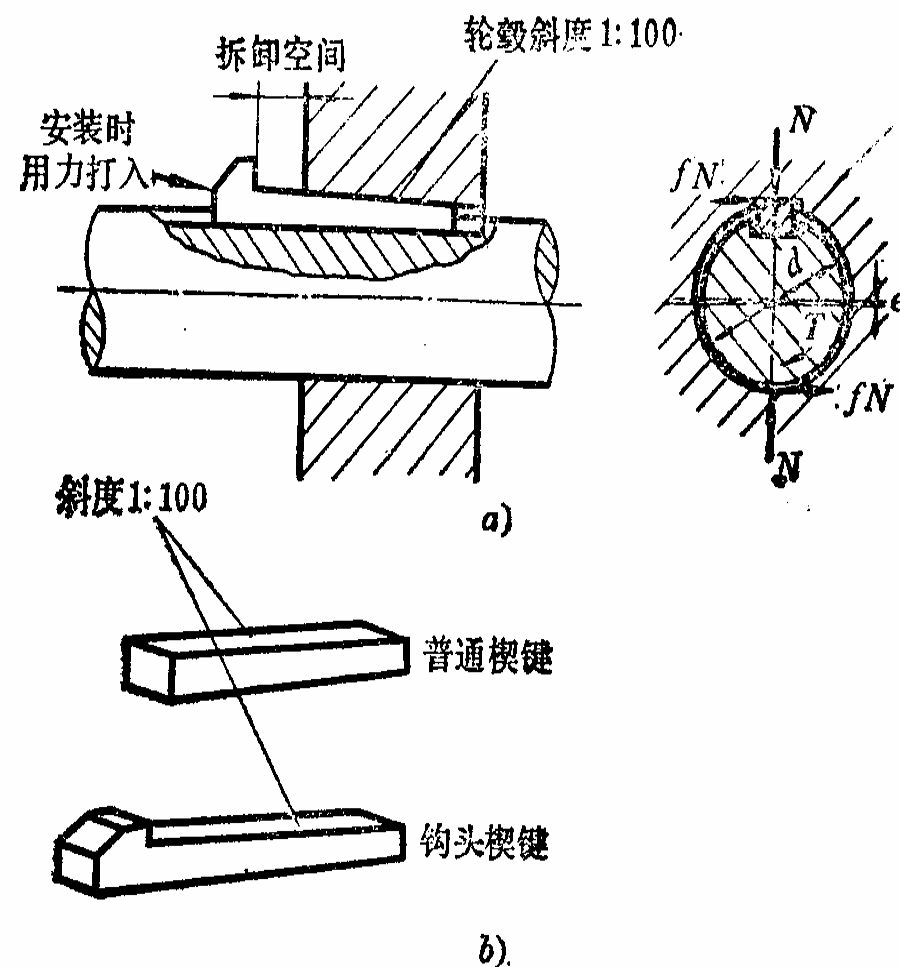


楔键连接

- .. 有普通楔键和钩头楔键
- .. 后者便于装拆，楔键的上、下两面是工作面。
- .. **1: 100**斜度
- .. 常用于精度要求不高，转速较低の場合。

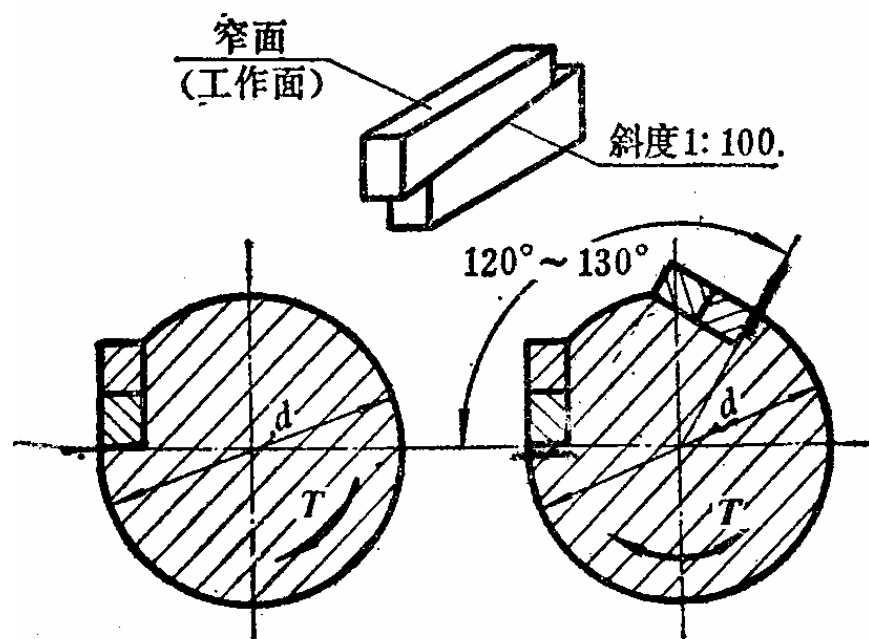
楔键

- 工作面：上下面
- 特点：上下表面有斜度，打入后有偏心
- 适于定心性能要求不高、转速较低、载荷平稳的场合
- 型式 钩头楔键
平头楔键



切向键

- 由一对楔键组成，装配时两楔键楔紧
- 工作面：窄面
- 特点：压力沿轴的切向，承载能力大



2 平键连接的强度校核

- .. 键的材料

- ✧ 破坏极限不小于**600N/mm²**的碳钢，通常为**45**钢（常采用抗拉强度不小于**600Mp**的**45**键用型钢）

- .. 已经标准化，**剖面尺寸**按标准（根据轴的**直径**）从标准中查取

- .. **键的长度**尺寸按轴上零件的轮毂宽度而定）参考轮毂长度）

- .. **BXh XL**

- .. 必要时进行强度校核

2 平键连接的强度校核

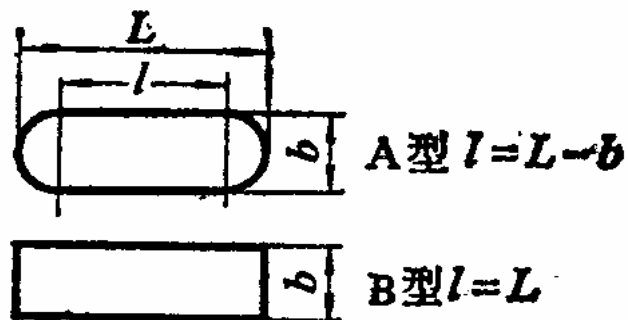
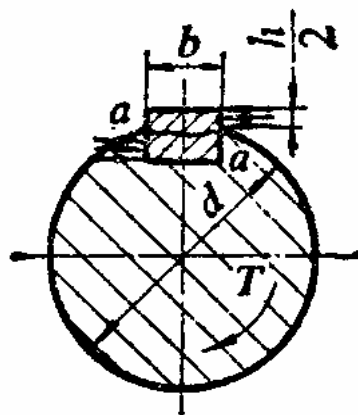
- 平键连接的失效形式
 - 静连接：工作面的压溃
 - 动连接：工作面的磨损

挤压强度假设

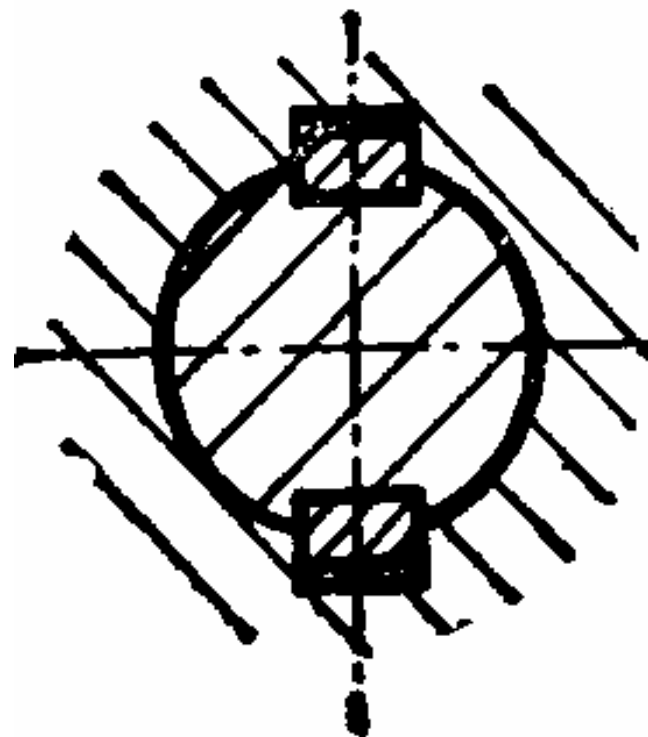
$$s_p = \frac{4T}{dhl} \leq [s_p]$$

磨损强度条件

$$p = \frac{4T}{dhl} \leq [p]$$



- .. 若强度不够，可采用**两个键**按**180°**布置
- .. 考虑载荷分布的不均匀性，强度校核中按**1.5**个键计算



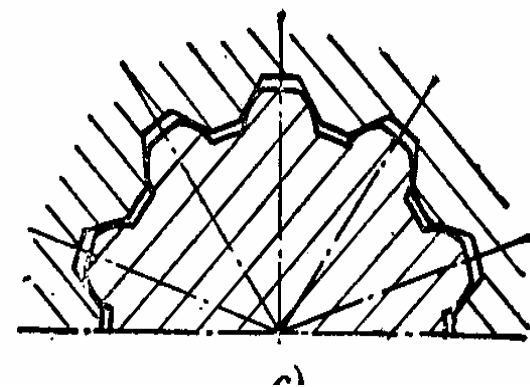
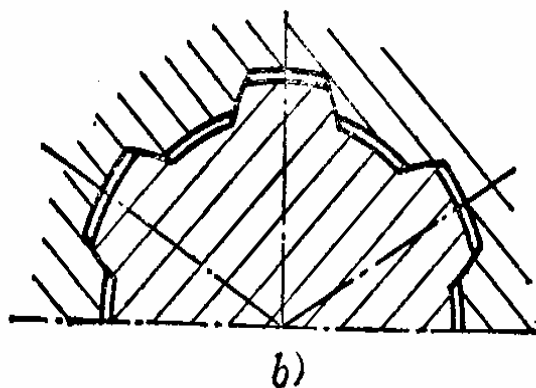
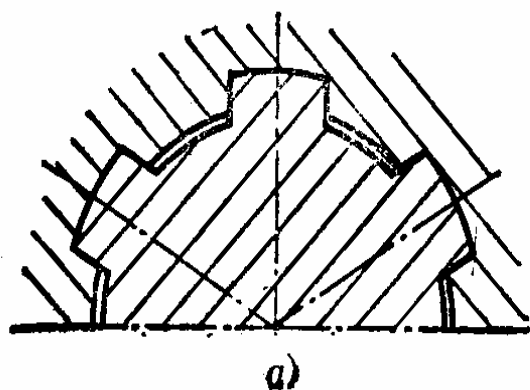
3 花键连接

- .. 工作面：侧面
- .. 特点：承载能力高，对轴的强度削弱小，定心性和导向性好
- .. 适于定心精度要求高，载荷大或经常滑移的场合

花键的类型

- .. 矩形花键
- .. 渐开线花键
- .. 三角形花键

可以做成动连接，也可以做成静连接设计
选用可参考有关手册



花键连接

- 侧面是工作面，按齿形的不同分为矩形花键、渐开线花键和三角形花键。前两种用的较多。
- 可以传递较大的转矩，轴上零件的对中性及导向性好。适用于载荷较大，对中精度要求较高或经常滑移的连接。
- 花键轴的制造复杂，可用成型铣刀或滚刀铣削；花键孔可以拉削或插出。

10-12 销连接

