

专业课强化精讲课程

第14讲

第十六章 轴

一、轴的用途与分类

1、功用：1) 支承回转零件；2) 传递运动和动力

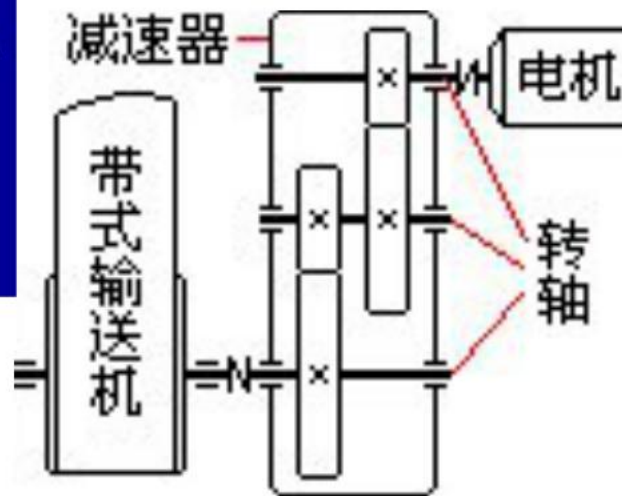
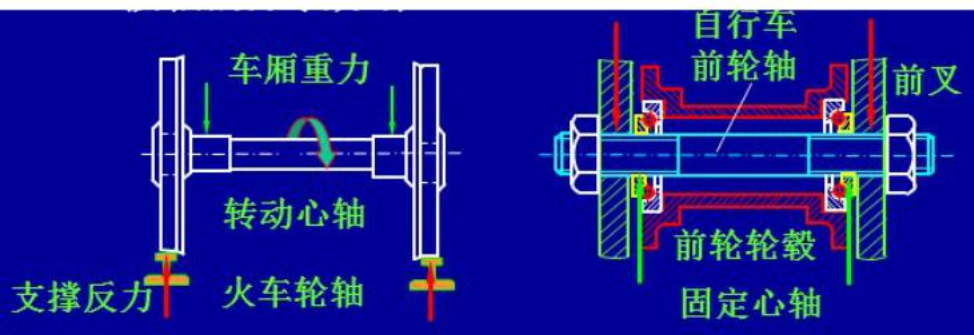
2、分类：

按承载情况分

转轴——承受扭矩和弯矩

心轴——只受弯矩 { 转动心轴
固定心轴

传动轴——主要受扭矩

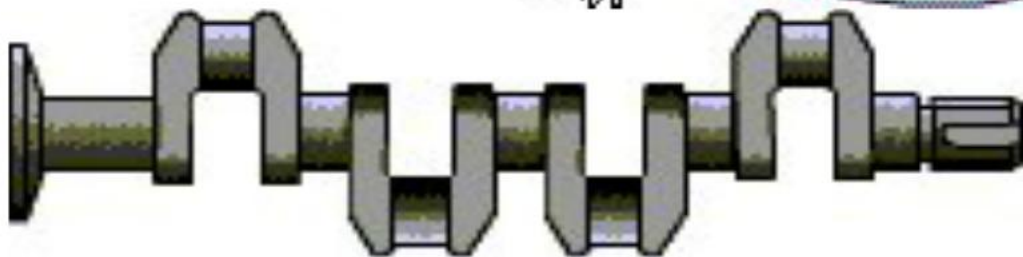
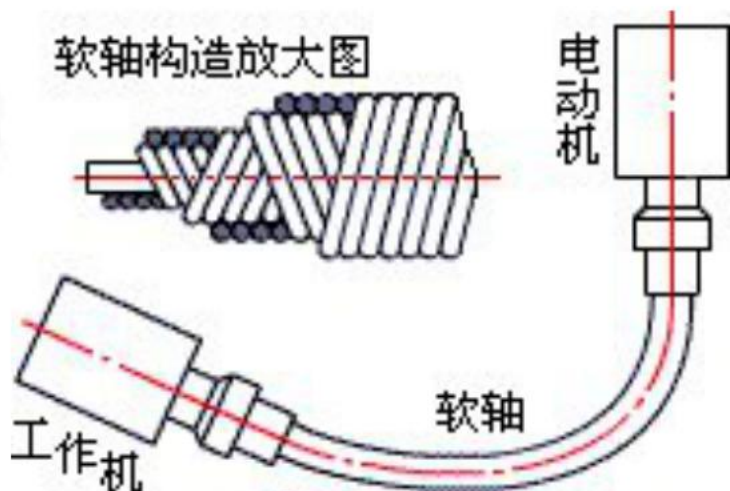


按轴线形状的不同，轴可分：

直轴 { 光轴 { 实心轴
 阶梯轴 { 空心轴: 有特殊要求时，如航空发动机的
 主轴。
曲轴
挠性轴: 可以随意弯曲，把回转运动灵活地传到任意空间位置。



软轴构造放大图



二、轴的工作能力计算模型

1. 轴上载荷及应力

机器工作时，作用于轴上的载荷可能是静载荷，也可能是变载荷。多数情况下，轴受到的是变载荷。

轴上应力的性质与 载荷性质既有联系又有区别。变载荷引起变应力；静载荷可能引起静应力，也可能引起变应力。

各种机器中在不同条件下工作的轴，其上载荷及应力的分布和变化规律大都比较复杂。合理分析和确定轴上载荷性质及应力状态，对正确判断轴的失效形式和进行轴的强度计算都是十分重要的。

2. 轴的失效形式及设计准则

轴常见的失效形式如下：

1) 因疲劳强度不足而产生的疲劳断裂

- 2) 因静强度不足而产生的塑性变形或脆性断裂
- 3) 因刚度不足而产生超过许可的弯曲变形或扭转变形
- 4) 在高转速下发生共振或振幅过大
- 5) 其他。比如轴颈磨损，在高温环境中工作时的蠕变，在腐蚀介质中工作被腐蚀并加速疲劳失效等。

3. 轴的强度计算

轴的强度计算方法有三种：按扭转强度计算；按弯扭合成强度计算；安全系数校核计算。

1) 按扭转强度计算

用于：①只受扭矩或主要承受扭矩的传动轴的强度计算

②结构设计前按扭矩初估轴的直径 d_{min}

强度条件

$$\tau = \frac{T}{W_T} = \frac{9550 \times 10^6 \frac{P}{n}}{0.2d^3} \leq [\tau]$$

T: 轴传递的扭矩
W_T: 轴的抗扭截面系数

设计公式

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{5 \times 9550 \times 10^6 P}{[\tau]n}} = A \sqrt[3]{\frac{P}{n}}$$

轴上有键槽时: 放大轴径: 一个键槽: 3~5%
二个键槽: 7~10%

表16-2 常用材料的 $[\tau]$ 值和A值

取标准值

轴的材料	Q235,20	Q255、35	45	40Cr, 35SiMn
$[\tau](\text{N/mm})$	12~20	20~30	30~40	40~52
A	160~135	135~118	118~107	107~98

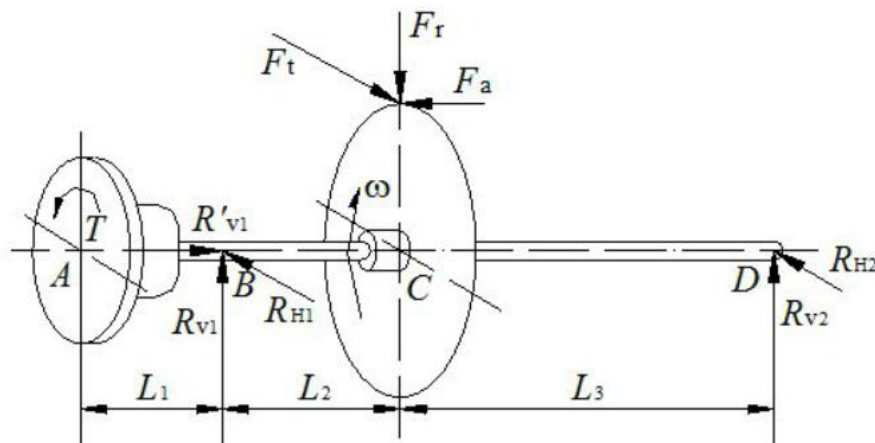
当作用在轴上的弯矩比传递的转矩小或只传递转矩时,A取较小值;否则取较大值

2) 按弯扭合成强度计算

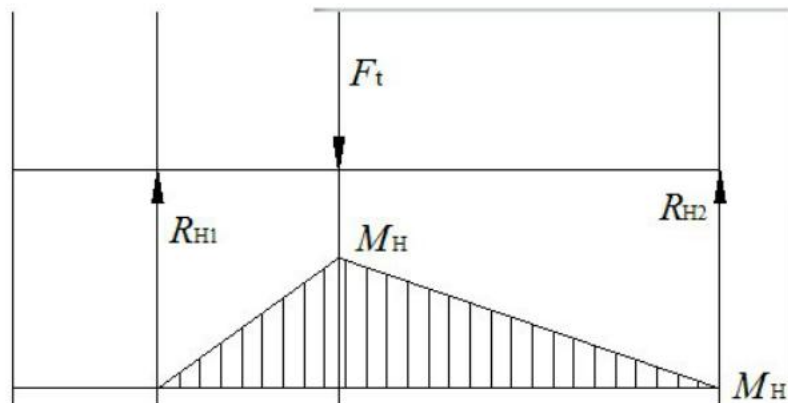
条件：已知支点、扭距，弯矩

步骤：

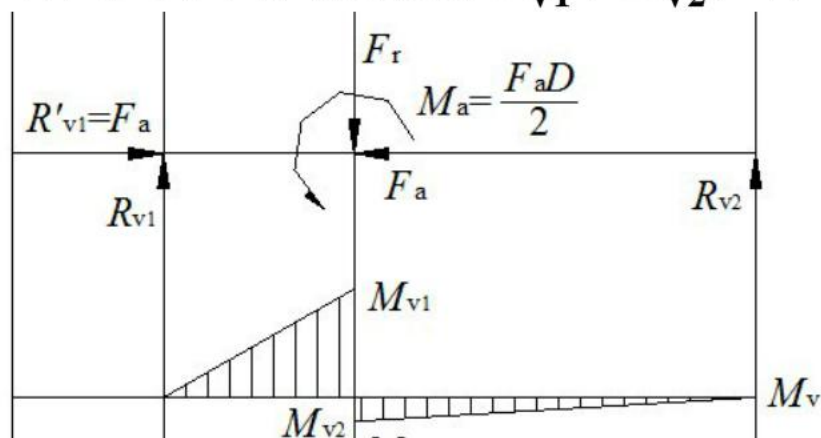
1、作轴的空间 受力简图



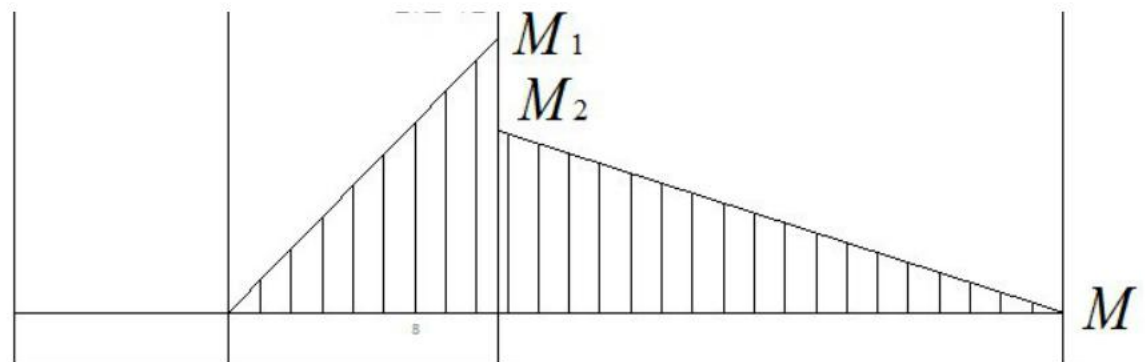
2、求水平面支反力 R_{H1} 、 R_{H2} 作水平面弯矩图



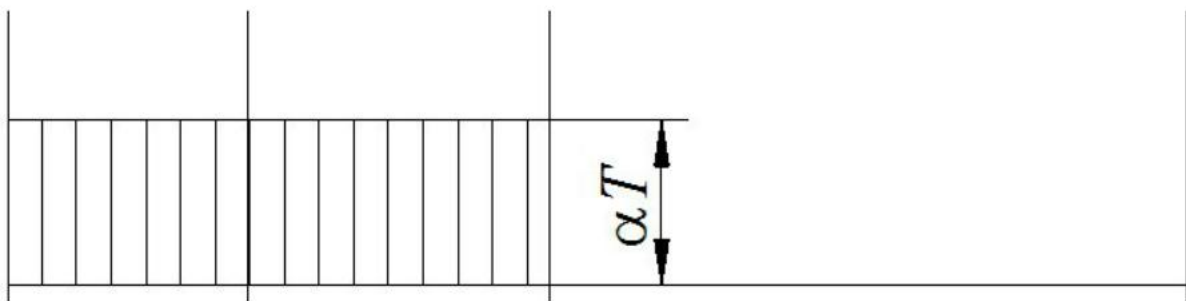
3、求垂直平面内支反力 R_{V1} 、 R_{V2} ，作垂直平面内的弯矩图



4、作合成弯矩图 $M = \sqrt{M_H^2 + M_V^2}$

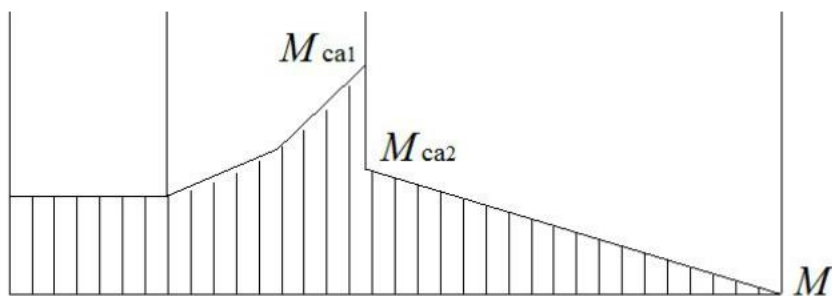


5、作扭矩图



6、作当量弯矩图 $M_{ca} = \sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}$

α —为将扭矩折算为等效弯矩的折算系数



对于不变的转矩, $\alpha = \frac{[\sigma_{-1b}]}{[\sigma_{+1b}]} \approx 0.3$

当转矩脉动变化时, $\alpha = \frac{[\sigma_{-1b}]}{[\sigma_{0b}]} \approx 0.6$

7、校核危险截面轴的强度

$$\sigma_{ca} = \frac{M_{ca}}{W} = \frac{M_{ca}}{\frac{1}{32} \pi d^3} \approx \frac{M_{ca}}{0.1d^3} \leq [\sigma]$$

对于频繁正反转的轴, $\alpha = \frac{[\sigma_{-1b}]}{[\sigma_{-1b}]} = 1$

设计公式，计算轴颈 $d \geq \sqrt[3]{\frac{M_{ca}}{0.1[\sigma]}}$

4. 轴的刚度计算

1) 弯曲刚度计算

• 挠度条件: $y \leq [y]$

• 倾角条件: $\theta \leq [\theta]$

2) 扭转刚度计算

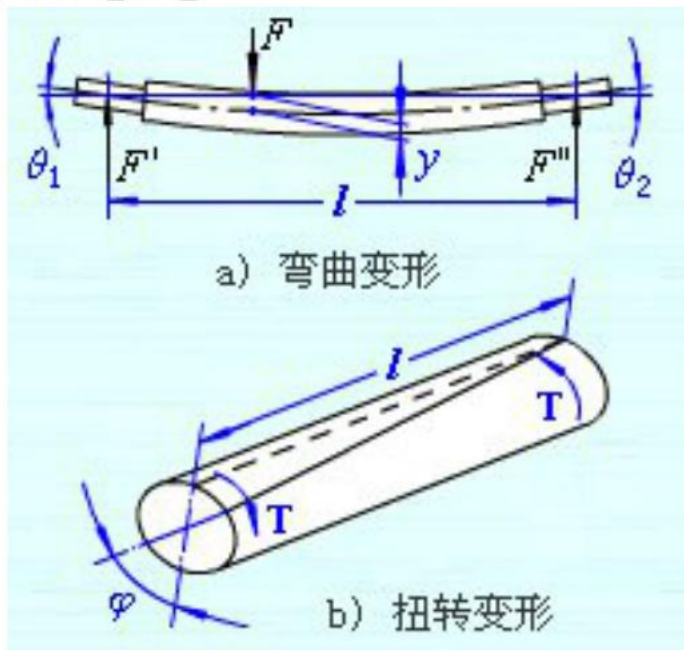
• 扭角条件: $\varphi \leq [\varphi]$

5. 轴的振动计算

◆ 轴是一弹性体，旋转时，会产生弯曲振动、扭转振动及纵向振动。

◆ 当轴的振动频率与轴的自振频率相同时，就会发生共振。

◆ 共振时轴的转速称为临界转速。



◆ 临界转速有多个，其中一阶临界转速（其转速最低）下的共振最激烈。

■ 一般通用机械中的轴很少发生共振。高速轴易共振，多为弯曲共振。

一阶临界转速 n_{c1}

$$\omega_{c1} = \sqrt{\frac{g}{y_0}} \quad (\text{rad/s}) ; \quad n_{c1} \approx 964 \sqrt{\frac{1}{y_0}} \quad (\text{r/min})$$

{ 刚性轴：工作转速 n 低于 n_{c1} 的轴，要求： $n < 0.75n_{c1}$
挠性轴：工作转速 n 超过 n_{c1} 的轴，要求： $1.4 n_{c1} < n < 0.7n_{c2}$

满足上述条件的轴就是具有了弯曲振动的稳定性。

三、轴的结构设计

轴的结构设计应遵循一般原则如下：

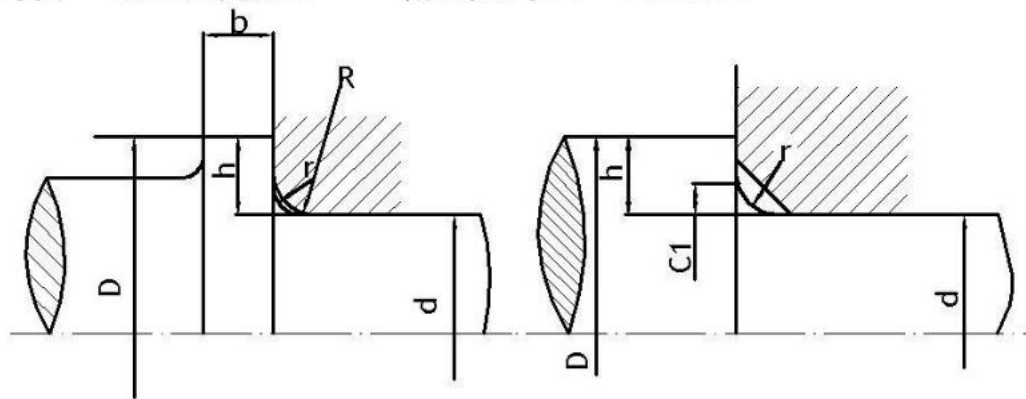
- (1) 受力合理，有利于提高轴的强度和刚度。
- (2) 轴相对于机架和轴上零件相对于轴的定位准确，固定可靠。
- (3) 便于加工制造，且轴上零件便于装拆和调整。
- (4) 尽量减小应力集中，并节省材料、减轻重量。

1. 轴上零件的轴向固定

1) 轴肩和轴环

轴肩分为定位轴肩和非定位轴肩两类，利用轴肩定位方便可靠，但会使轴的直径加大，轴肩处有应力集中。因此，轴肩定位多用于轴向力较大的场合。定位轴肩的高度 h 一般取为 $h=(0.07\sim0.1)d$ 。

轴肩处的过渡圆角半径 r 必须小于与之相配的零件毂孔端部的圆角半径 R 或倒角尺寸 C 。非定位轴肩是为了加工和装配方便而设置的，其高度没有严格的规定，一般取为 $1\sim 2\text{mm}$ 。



轴肩圆角和相配零件的倒角或圆角

轴肩圆角半径 $r < \text{圆角半径} R$ 轴肩圆角半径 $r < \text{倒角} C_1$

轴肩高 $h > R$

轴肩高 $h > C_1$

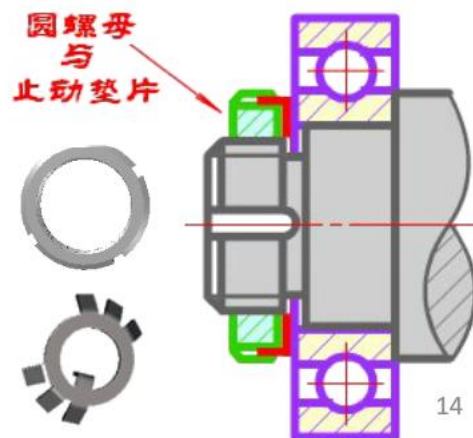
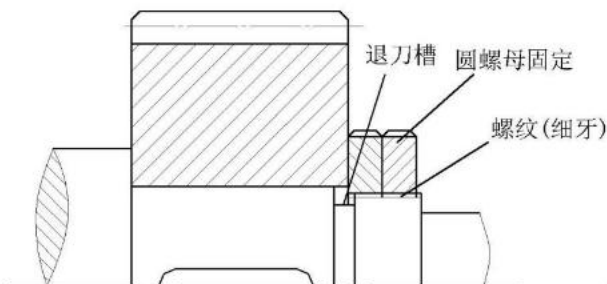
2) 套筒定位

套筒固定结构简单，定位可靠，轴上不需开槽、钻孔和切制螺纹，因而不影响轴的疲劳强度，一般用于轴上两个零件之间的固定。如两零件的间距较大时，不宜采用套筒固定。

因套筒与轴的配合较松，如轴的转速较高时，也不宜采用套筒固定。套筒所固定的轮毂宽度应略大于对应的轴头长度。

3) 圆螺母

圆螺母固定可承受大的轴向力，但轴上螺纹处有较大的应力集中，会降低轴的疲劳强度，故一般用于固定轴端的零件，有双圆螺母和圆螺母与止动垫片两种型式。当轴上两零件间距离较大不宜使用套筒固定时，也常采用圆螺母固定。

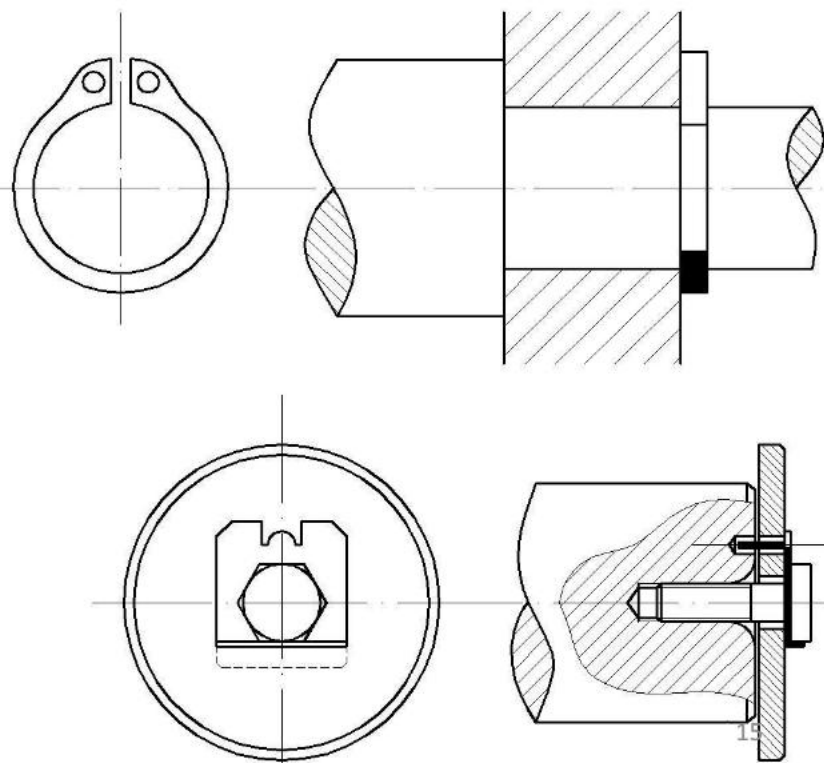


4) 挡圈定位

锁紧挡圈用紧定螺钉固定在轴上, 定位拆装方便, 但不能承受大的轴向力, 且钉端会引起应力集中; 弹性挡圈定位工艺性好, 但不能承受较大的轴向力, 且对轴的强度削弱较大; 轴端挡圈常用于轴端零件的固定。

5) 轴端压板

轴端压板与轴肩相结合, 可使轴端零件得到轴向定位与双向固定。其结构简单, 装拆方便。为防止压板转动, 应采用止动垫圈或用双螺钉将压板固定在轴端。



6) 圆锥面定位

锥面定心精度高，拆卸容易，能承受冲击及振动载荷；常用于轴端零件的固定，可以承受较大的轴向力，与轴端压板或螺母联合使用，使零件获得双向轴向固定。

2. 轴上零件的周向固定（轴毂连接）

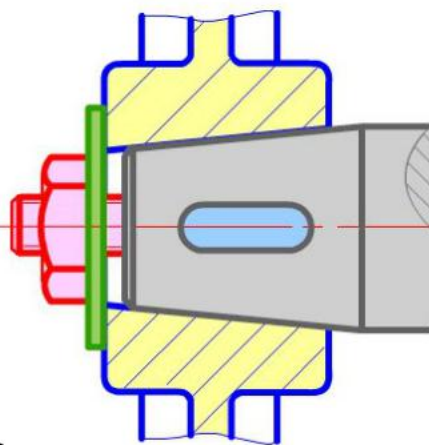
为限制轴上零件与轴发生相对转动，并满足机器传递运动和扭矩的要求，轴上零件还必须作可靠的周向定位。常用的周向定位方式有：键连接、紧定螺钉、销钉、过盈配合等。

1) 键连接

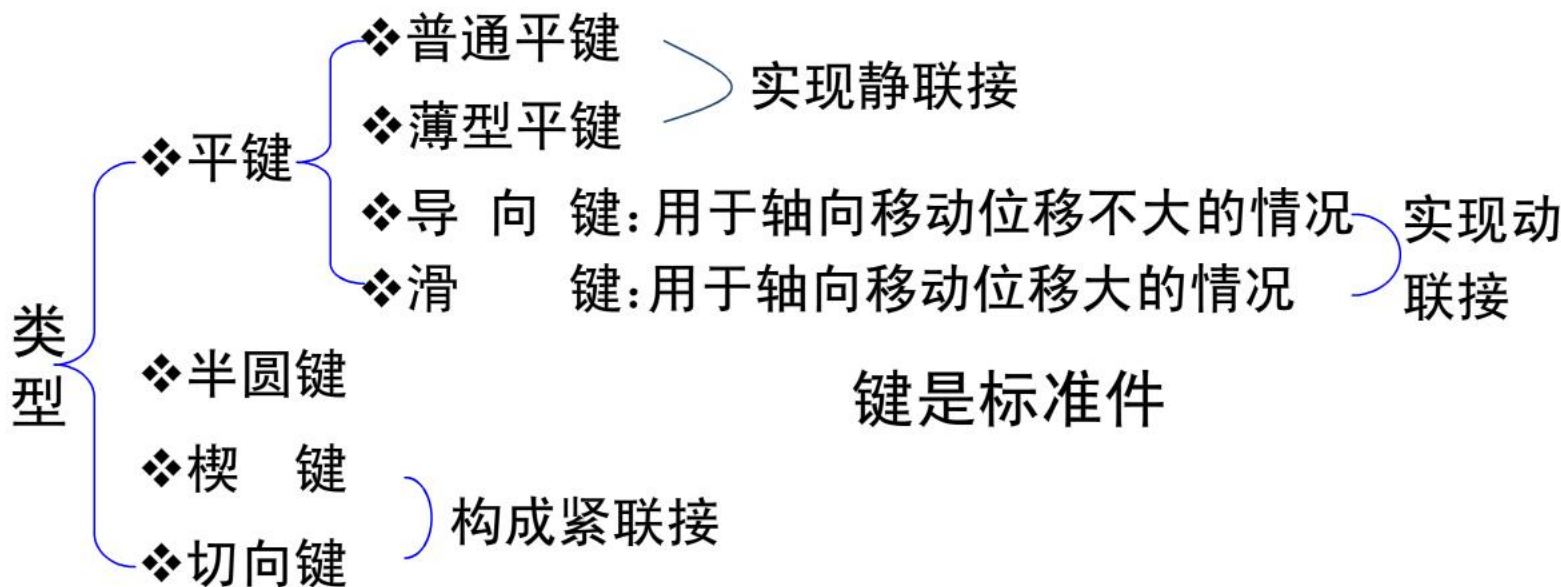
功用：1) 实现轴和轴上零件之间的周向固定；

2) 传递扭矩；

3) 有些键还可实现轴上零件的轴向固定或移动。



四、键联接的类型、工作原理及特点

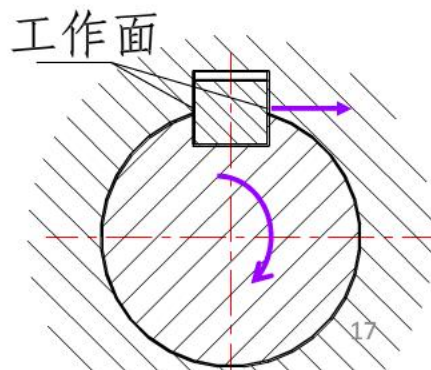


1. 平键联接

工作面: 两侧面

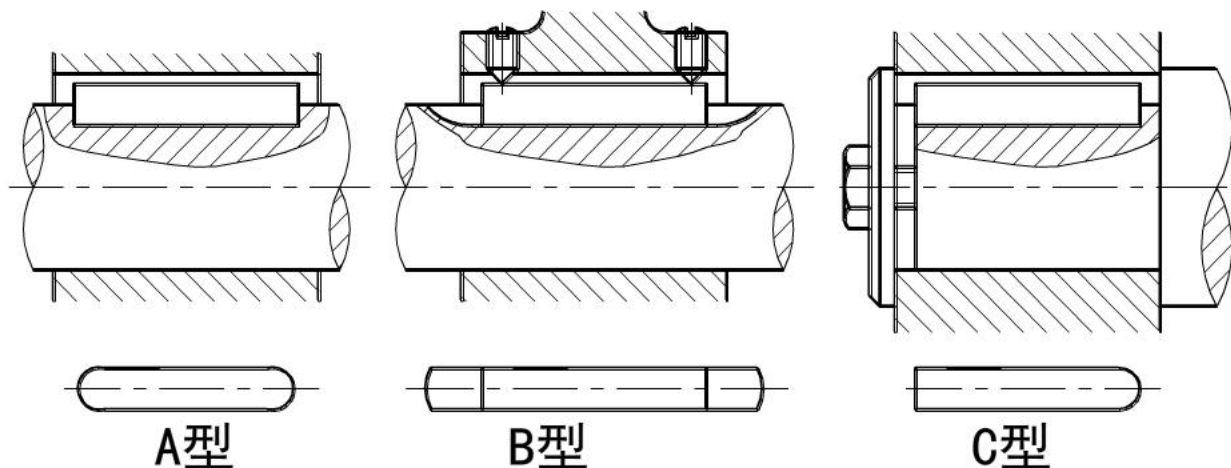
工作原理: 靠键与键槽两侧面的相互挤压传递转矩。

特点及应用: 平键联接结构简单, 装拆方便, 对中性较好, 应用最广。



1) 普通平键

- 圆头 (A型)
- 方头 (B型)
- 单圆头 (C型)

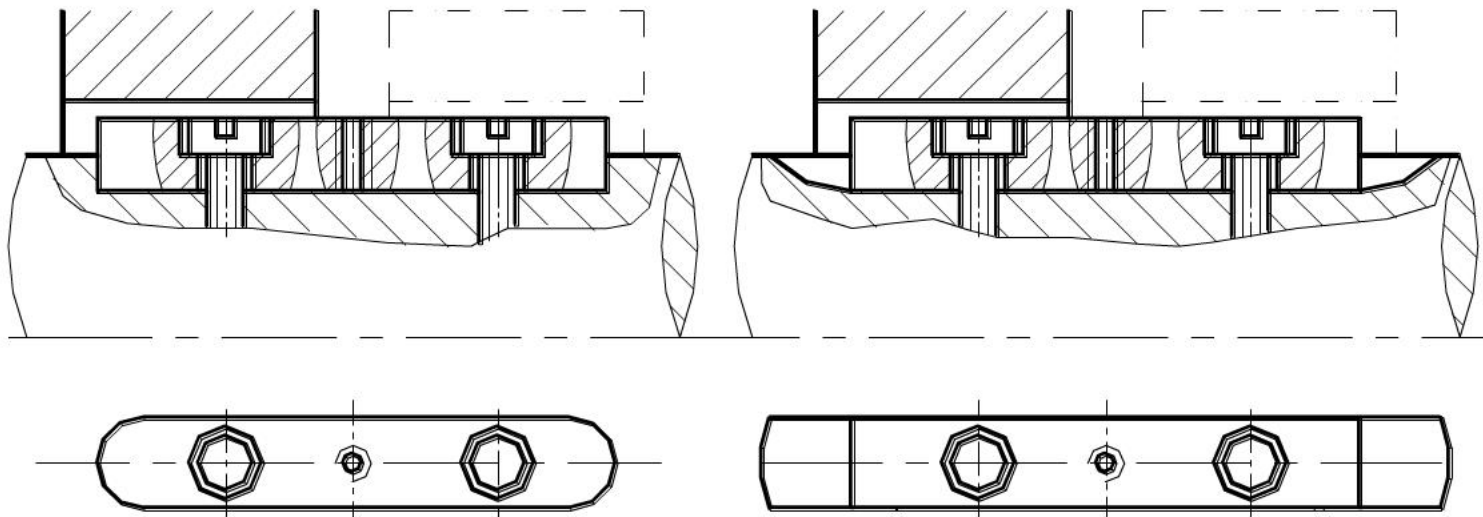


2) 薄型平键

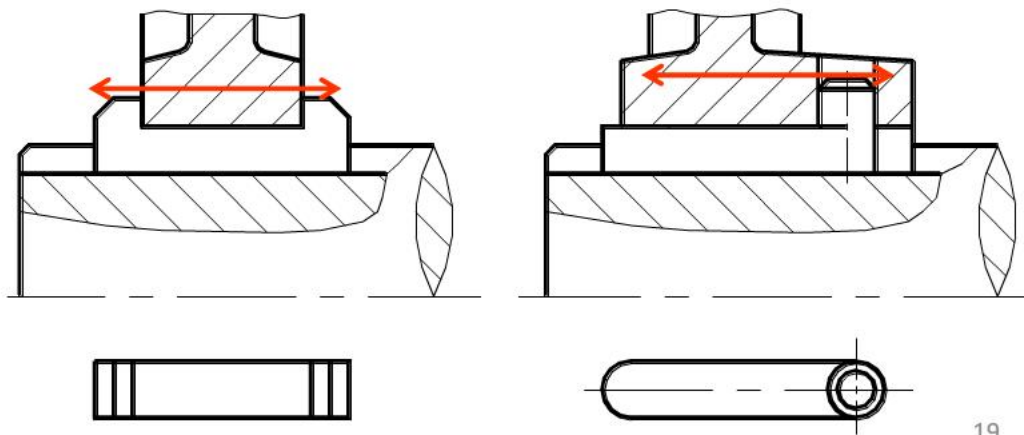
高度是普通平键的60~70%，传递能力较低，常用于薄壁结构、空心轴或径向尺寸受到限制的场合。

分为：圆头 (A型)、方头 (B型)、单圆头 (C型)

3) 导向键 是一种比较长的平键



4) 滑键

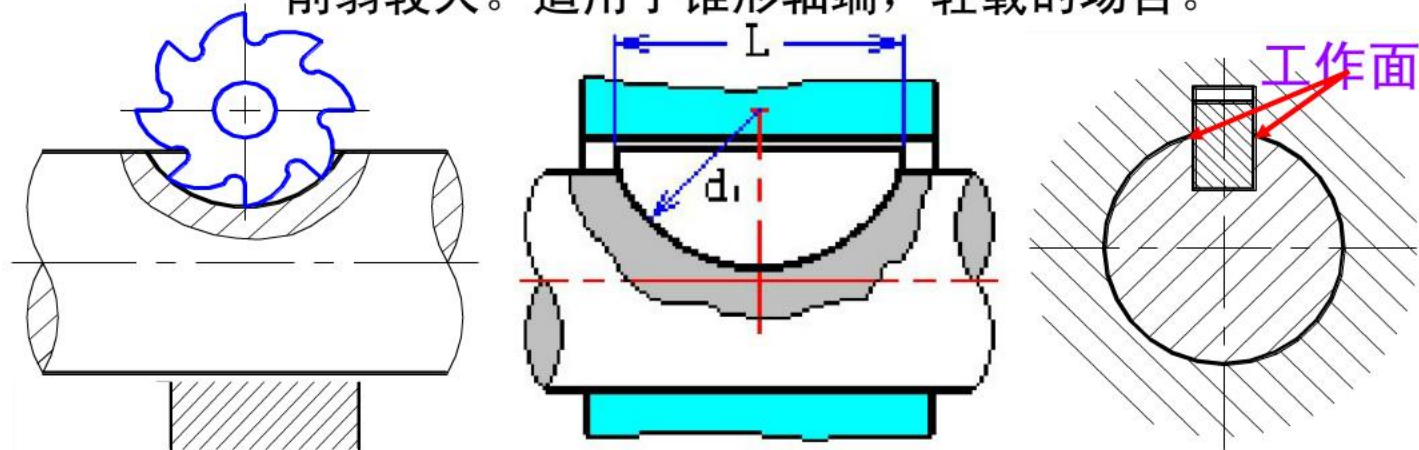


2. 半圆键联接

工作面：键的两侧面

工作原理：靠键与键槽的互压传递转矩。

特点及应用：工艺性较好，装拆方便，但键槽较深，对轴的强度削弱较大。适用于锥形轴端，轻载的场合。

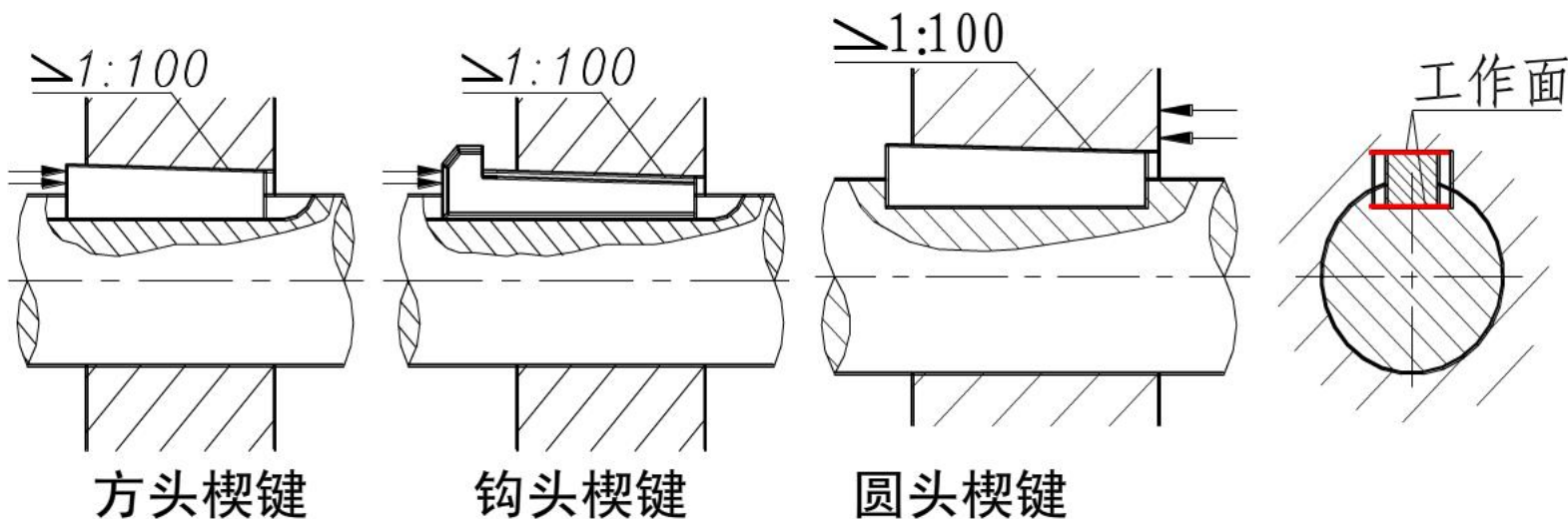


3. 楔键

工作面：键的上下表面

工作原理：靠上下表面的摩擦力传递转矩，同时可承受单向的轴向力，起单向轴向固定。

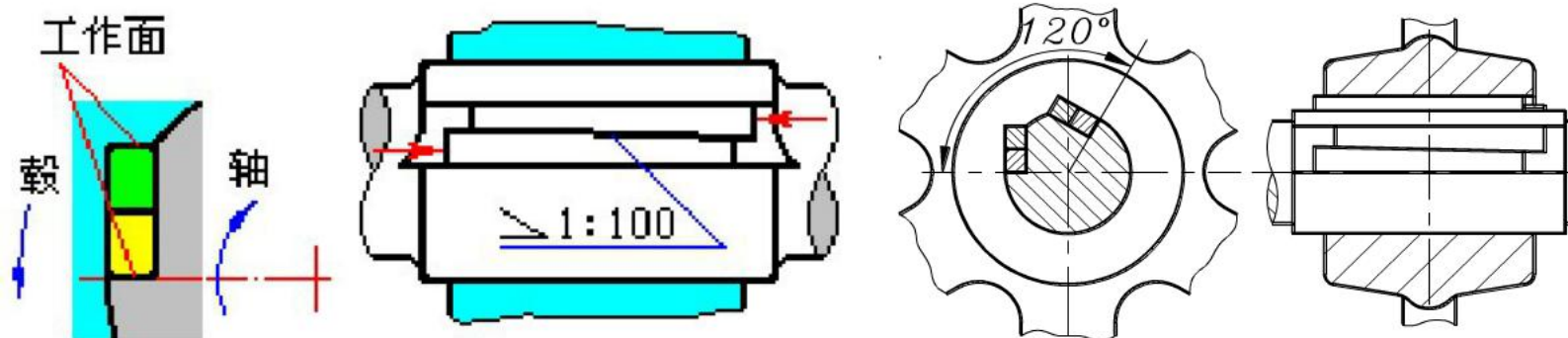
特点及应用：联接可靠，但对中精度差。适用于定心精度要求不高，低转速的场合。



4. 切向键：

两个楔键成对布置在轴断面的切线上，一个切向键可承受很大的单向转矩。当要传递双向转矩时，需采用两个切向键。

工作面：相互平行的两个窄面



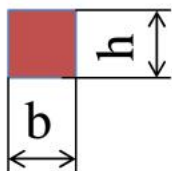
工作原理：靠工作面的挤压力和轴与轮毂的摩擦力传递转矩

特点及应用：对轴的强度削弱较大。一般用于轴径大于100mm的轴上。

键的选择

1. 类型的选择：据联接的结构、使用特性、工作条件来选择。选择时应考虑的因素有：
 - 1) 需传递扭矩的大小；
 - 2) 是否有相对运动；
 - 3) 滑动距离的长短；
 - 4) 联接中对心性的要求；
 - 5) 是否有轴向定位；
 - 6) 键在轴上的位置（中、端）等。

2. 尺寸的选择: 主要尺寸 $b \times h$ 与长度 L



由轴的直径按标准选

L 由轮毂的长度定: 略小于轮毂的长度所选长度应符合国标中规定的长度系列。

3. 标注: 键 $b \times h$ GB...

键联接的强度计算

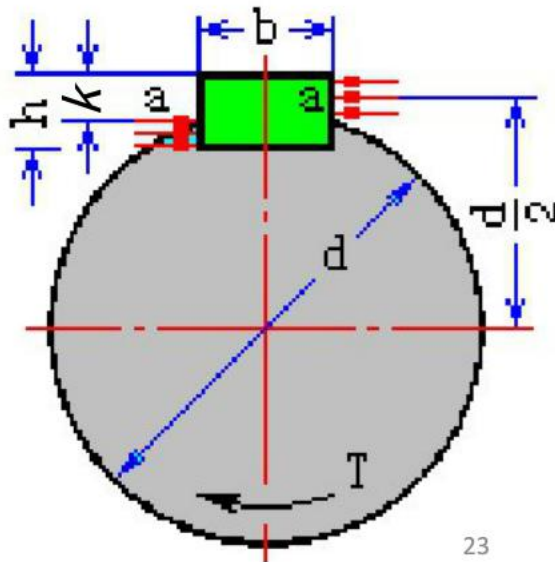
1. 平键联接的强度计算

失效形式:

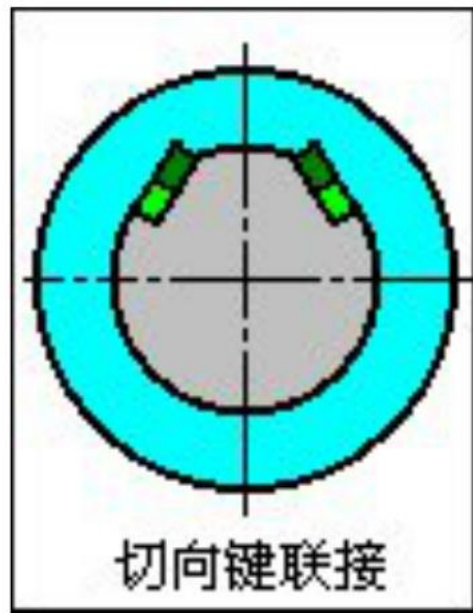
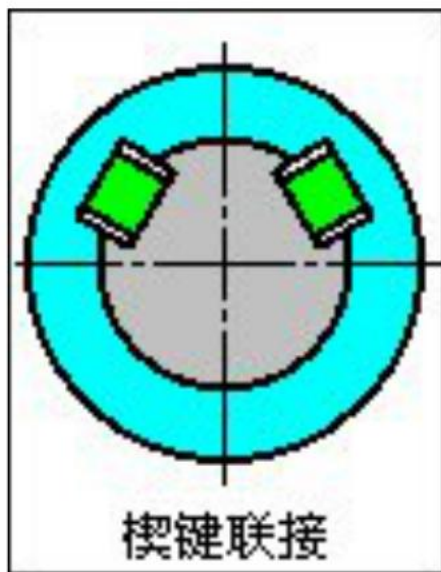
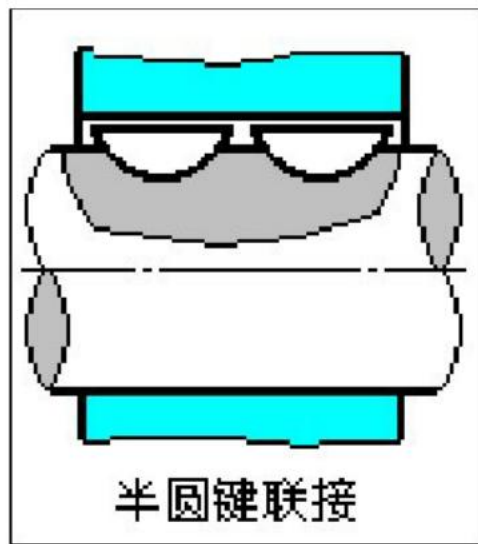
- 1) 键与键槽的弱者被压溃 (静联接);
- 2) 键与键槽工作面的磨损 (动联接)。

静联接: 挤压条件

$$\sigma_p = \frac{F}{A} = \frac{4T}{dhl} \leq [\sigma_p] MPa$$



当采用单键强度不满足时，应采用双键，考虑到载荷分配不均的问题，双键只能按1.5个键计算。此外，采用双键时，布置是有讲究的：平键应间隔 180° ，半圆键应位于同一母线上，楔键和切向键应间隔 120° 左右。



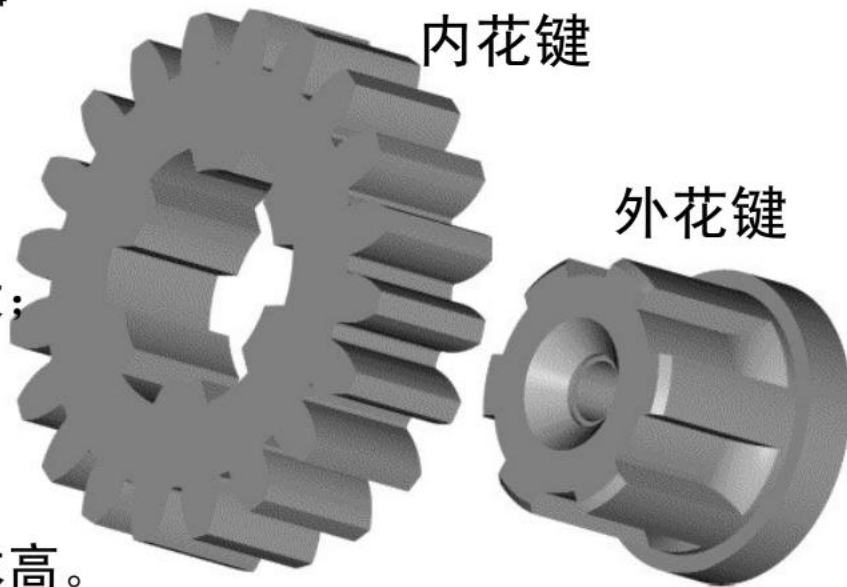
5. 花键联接

花键联接的类型、特点和应用

(1) 组成：外花键、内花键

(2) 花键联接特点及应用：

- 1) 各花键齿受力较均匀；
- 2) 轴和轮毂应力集中小；
- 3) 花键齿数多，承载能力大；
- 4) 对中性好；
- 5) 导向性好，
- 6) 加工精度高；
- 7) 需专门设备和工具。成本高。

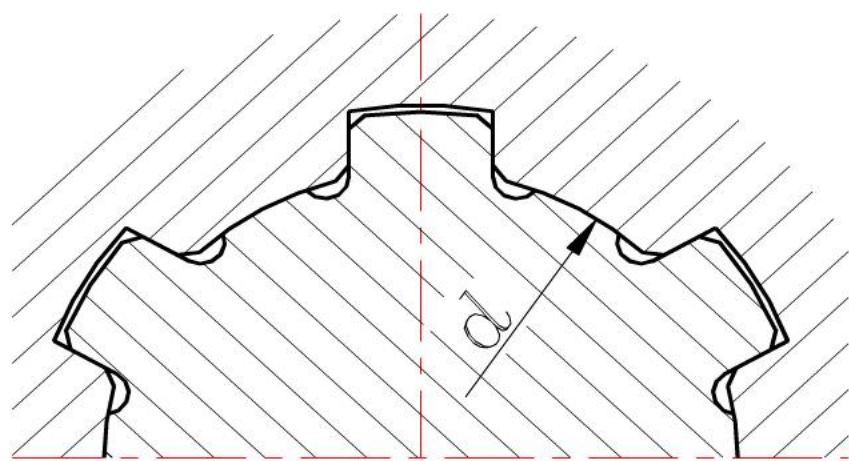


适用于定心精度要求高，载荷大或需经常滑移的联接

(3) 常用类型有：矩形花键联接
渐开线花键联接

花键已标准化

- 1) 矩形花键： 轻系列
中系列
小径 d 定心： 定心精度高、
定心稳定性好。内、外花
键均可用磨削方法消除热
处理引起的变形。矩形花
键最为常用。

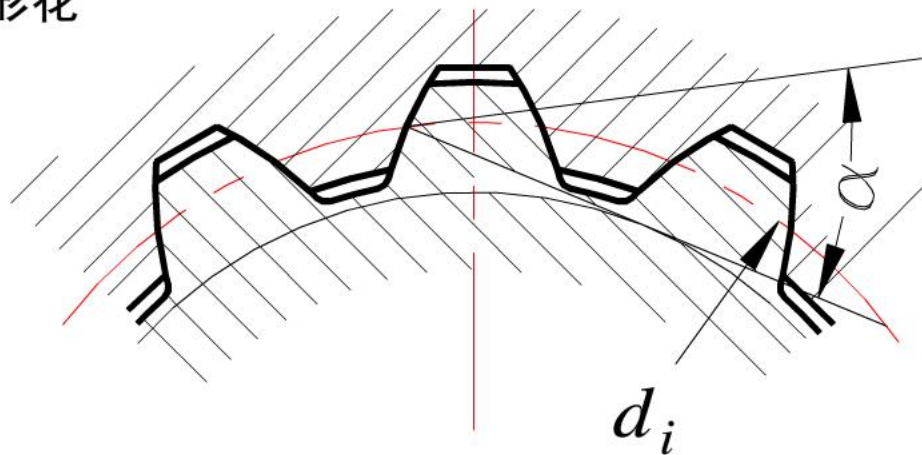


- 2) 渐开线花键联接

$$\alpha = 30^\circ, 45^\circ$$

$$h_a = 0.5m, 0.4m$$

齿形定心



渐开线花键承载能力最大，可用制造齿轮的方法来加工，工艺性好，精度也高，齿根强度高，应力集中小，易于定心。多用于重要场合或适用于薄壁零件；

五、紧定螺钉、销钉连接

(1) 紧定螺钉

传递力小

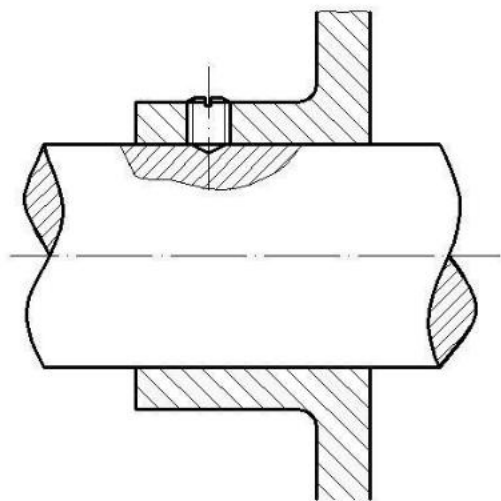
(2) 销钉连接

销联接的作用：固定零件间的相对位置，并传递不大的载荷。有时也作安全装置中的过载保护元件（安全销）。

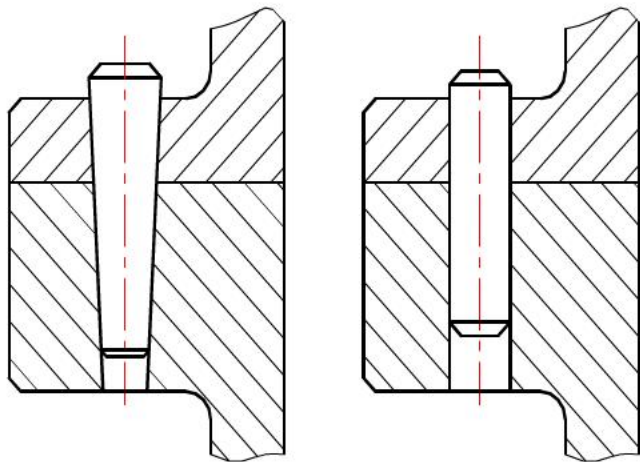
销联接的基本形式：

圆柱销：多次拆装定位精度会降低。

圆锥销：有1:50的锥度，安装比圆柱销方便，多次拆装对定位精度的影响较小。



紧定螺钉

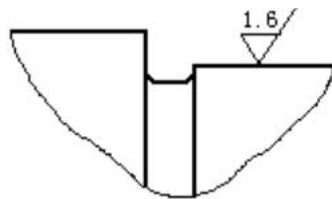


六、轴的结构工艺性

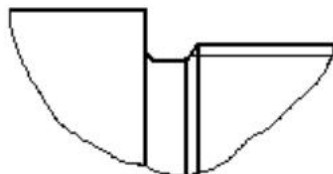
1) 加工工艺性

(1) 在保证使用要求的前提下，轴的阶梯应尽可能少，以减少加工工时和节约材料。

(2) 对需要磨削加工或有螺纹的轴段，应留有砂轮越程槽或螺纹退刀槽。

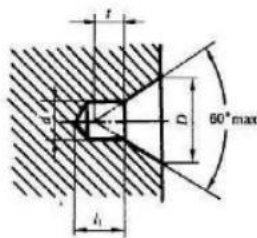
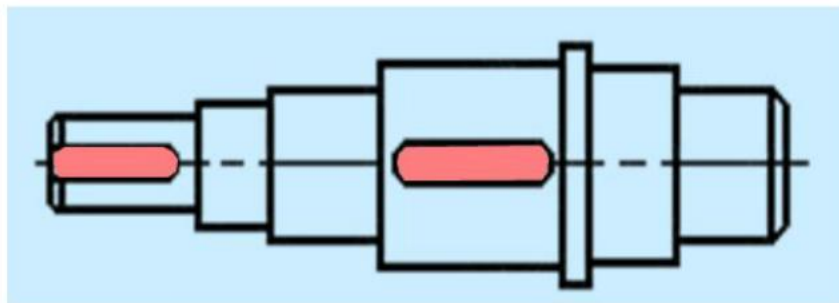


a) 砂轮越程槽



b) 螺纹退刀槽

(3) 轴上不同轴段的键槽应布置在同一母线上，以减少装夹时间。



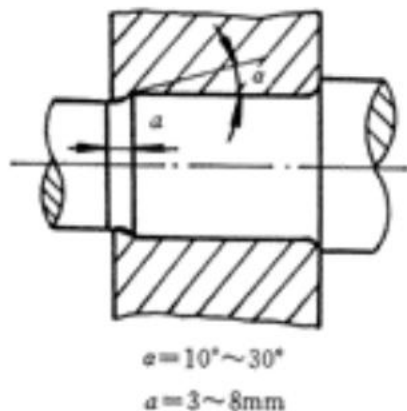
(4) 如果要求轴的各轴段有较高的同轴度，或轴的长径比 L/D 大于4时，轴的两端应开设工艺孔——中心孔。

(5) 为了减少刀具品种、节省换刀时间，同根轴上所有的圆角半径、倒角尺寸、环形切槽宽度等应尽可能同一，以便于加工和检验。

(6) 加工精度和表面粗糙度应定得合理，不必要的提高要求将增加加工难度及工时，相应增加了成本。

2) 装配工艺性

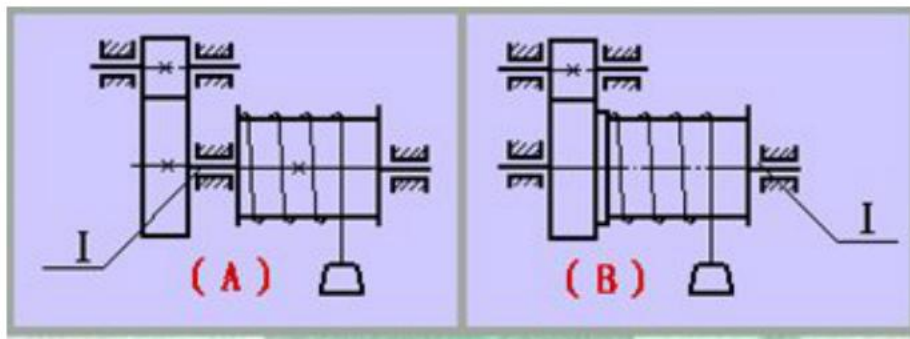
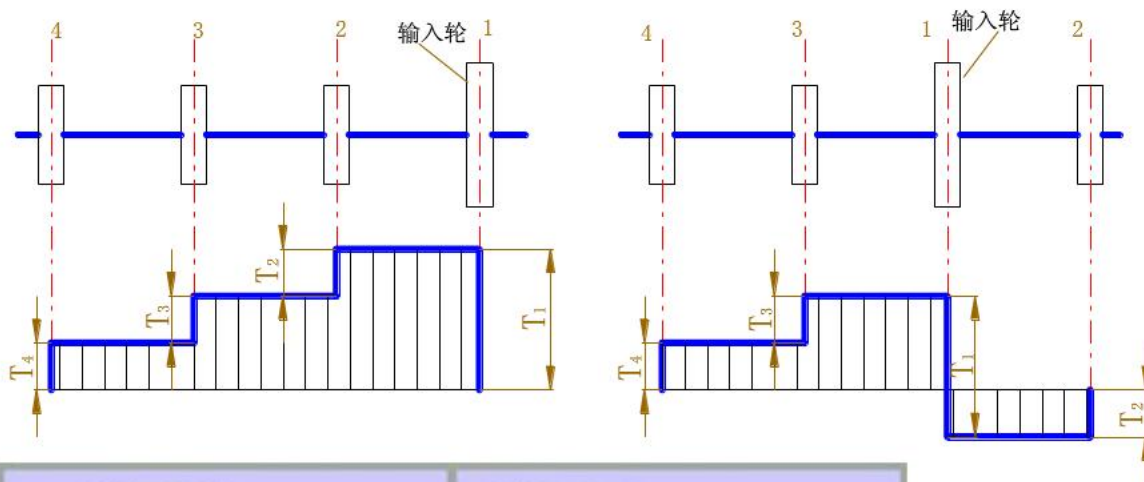
轴的结构应便于轴上零件的装配。为防止擦伤零件的配合表面各零件装配时应尽不接触或无过盈地通过其他零件的表面。出零件经过轴段的公称直径略小于配合轴段的公称直径外，还应在装配的装入端设 30° 或 $10^\circ \sim 15^\circ$ 的导向锥面。



过盈配合固定

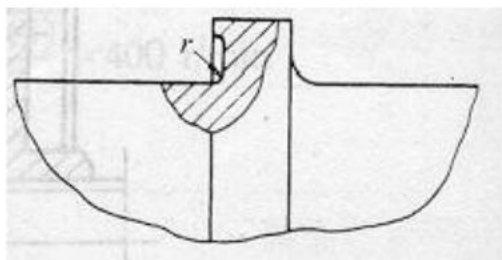
七、提高轴的强度和刚度

1) 合理布置轴上零件，改善轴的受载状况

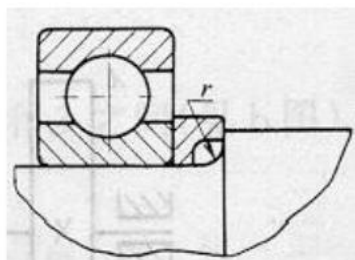


2) 改进轴的结构，降低应力集中，提高疲劳强度

(1) 在轴肩处采用较大的过渡圆角半径来降低应力集中。当圆角半径增大受到限制时，可采用凹切圆角或加装中间环等措施。



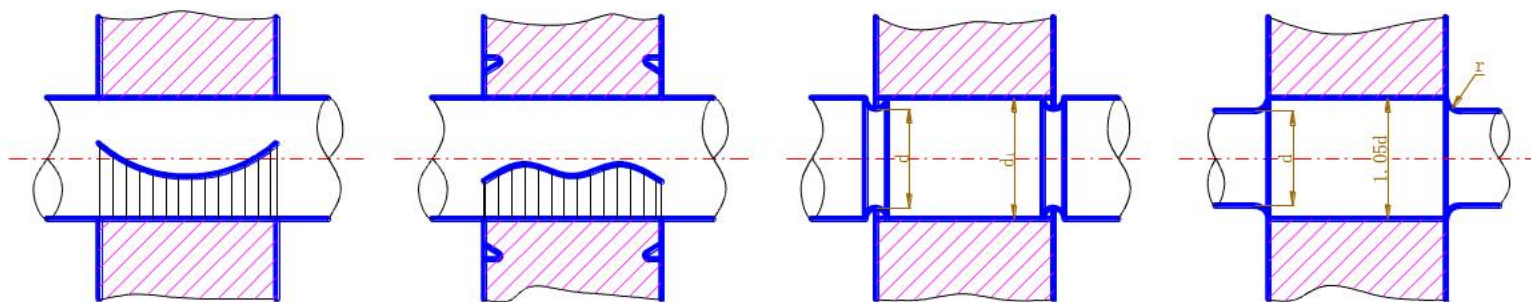
凹切圆角



中间环

(2) 尽量选用应力集中小的定位与固定方法。例如，采用套筒代替圆螺母和弹性挡圈，可避免在轴上切制螺纹和环形槽；条件允许时，用渐开线花键代替矩形花键等。

(3) 当轴与轴上零件为过盈配合时，配合边缘处会产生较大的应力集中。



a) 过盈配合应力集中 b) 轮毂上开卸载槽 c) 轴上开卸载槽 d) 增大轴径

3) 改善轴的表面质量、提高轴的疲劳强度

↓ 表面粗糙度；

表面强化：表面高频淬火、表面渗碳、氮化、氰化、辗压、喷丸等。