

常用机械零件

项目 3.1 轴

一、工作任务

传动轴如图 3-1-1 所示。已知该轴转速 $n=300\text{r}/\text{min}$ ，主动轮输入功率 $P_C=30\text{kW}$ ，从动轮输出功率 $P_D=15\text{kW}$ ， $P_B=10\text{kW}$ ， $P_A=5\text{kW}$ ，材料的切变模量 $G=80\text{GPa}$ ，许用切应力 $[\tau]=40\text{MPa}$ ， $[\theta]=1^\circ/\text{m}$ 。试按强度条件及刚度条件设计此轴直径。

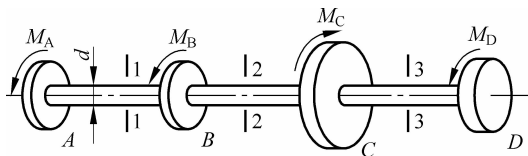
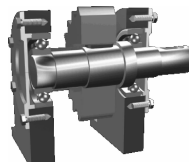


图 3-1-1 传动轴

通过对轴零件结构的观察分析，导入本次情境教学的任务，工作任务书如表 3-1-1 所示。

表 3-1-1 工作任务书

	任务名称	轴零件的结构设计
	任务内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 轴的类型、特点、材料及其选择，轴的结构设计及技术要求 2. 轴承的功用与类型，滑动轴承的结构设计及其材料选择

二、工作目标

- ① 了解轴的类型及特点。
- ② 了解轴的材料及选择。
- ③ 掌握轴的结构设计。
- ④ 掌握轴的强度计算，熟悉轴的设计方法。

三、相关知识

通过对减速器中各个零件的介绍,以及对轴的结构观察分析,导入本次情境教学的任务相关知识。

1. 轴的功用和结构特点

一般的轴如图 3-1-2 所示。细而长并由具有同一回转中心线的不同回转体“组合”而成的机械零件称为轴。

轴是组成机器的重要零件之一。轴的主要功用是支承传动零件(如齿轮、蜗轮等)、传递运动和动力。轴工作状况的好坏直接影响到整台机器的性能和质量。其结构特点为:长度大于直径,加工表面通常有内外圆柱面、圆锥面以及螺纹、花键、横向孔、沟槽等。

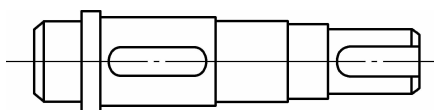


图 3-1-2 阶梯轴

2. 轴的分类及应用特点

根据轴线形状的不同,轴可分为直轴(见图 3-1-3)、曲轴(见图 3-1-4)和挠性钢丝轴(见图 3-1-5)。曲轴和挠性钢丝轴属于专用零件。直轴按其外形不同又可分为光轴[见图 3-1-3(a)]、阶梯轴[见图 3-1-3(b)]和空心轴[见图 3-1-3(c)]3 种。光轴形状简单,应力集中源少,易加工,但轴上零件不易装配和定位,常用于心轴和传动轴。阶梯轴各轴段截面的直径不同,这种设计使各轴段的强度相近,而且便于轴上零件的装拆和固定,因此阶梯轴在机器中的应用最为广泛。直轴一般都制成实心轴,但为了减少重量或为了满足有些机器结构上的需要,也可以采用空心轴。

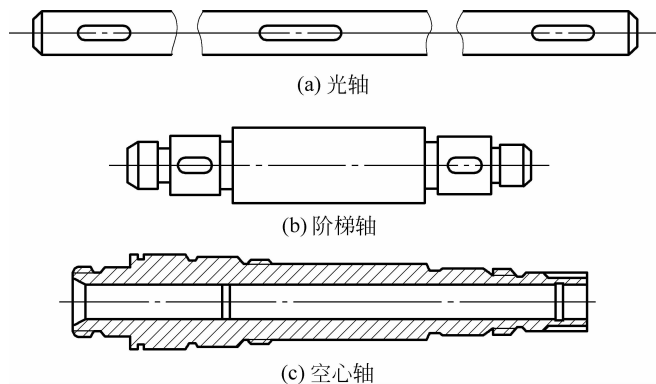


图 3-1-3 直轴

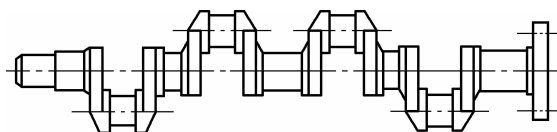


图 3-1-4 曲轴

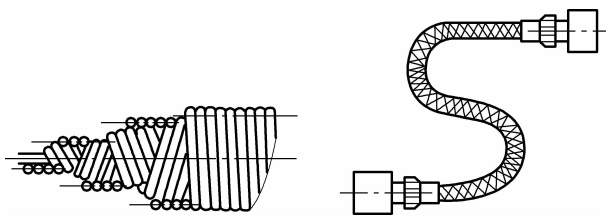


图 3-1-5 挠性钢丝轴

根据轴的承载性质不同,又可将轴分为转轴、心轴、传动轴 3 类。工作时既承受弯矩又承受转矩的轴称为转轴,如图 3-1-6 所示。转轴是机器中最常见的轴,通常简称为轴。用来支承转动零件,只承受弯矩而不传递转矩的轴称为心轴。心轴有固定心轴和旋转心轴两种。固定心轴工作时不转动,轴上承受的弯曲应力是不变的(为静应力状态),如图 3-1-7 所示自行车的前轮轴等。旋转心轴工作时随转动件一起转动,轴上承受的弯曲应力按对称循环的规律变化,如图 3-1-8 所示铁路机车的轮轴。主要用于传递转矩而不承受弯矩,或所承受的弯矩很小的轴称为传动轴(见图 3-1-9),如汽车中连接变速箱与后桥之间的轴。

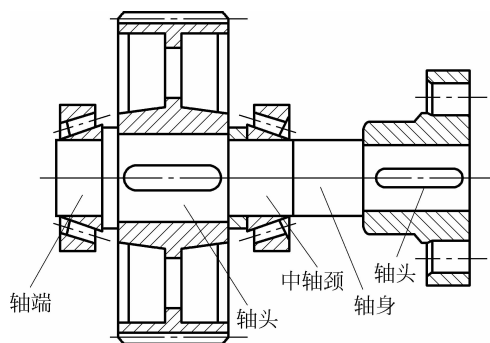


图 3-1-6 转轴

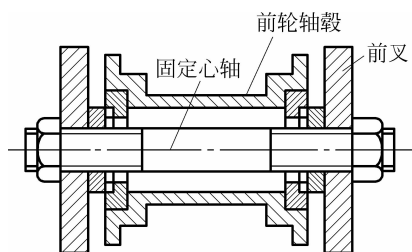


图 3-1-7 自行车的前轮轴

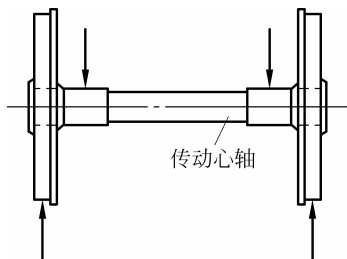


图 3-1-8 铁路机车的轮轴

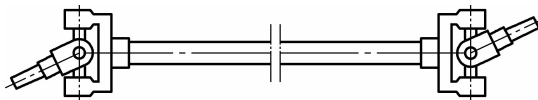


图 3-1-9 传动轴

3. 轴的材料及毛坯

轴的材料主要是碳素钢和合金钢。轴的毛坯多数用轧制圆钢和锻件。锻件的内部组织均匀,强度较好,重要的轴、大尺寸或阶梯尺寸变化较大的轴,应采用锻制毛坯。对直径较小的轴,可直接用圆钢加工。轴的常用材料的性能特点、应用场合如下。

(1) 碳素钢

常用的优质碳素钢有 35、40、45、50 号钢。其中 45 号钢应用最广泛,它具有一定的机械强度,对应力集中不太敏感,价格也比合金钢便宜;普通碳素钢有 Q235、Q260、Q280 等,主要用于制造不重要的轴或受力较小的轴。为了改善材料的切削性能,提高综合力学性能,优质碳素结构钢应进行调质或正火处理。

(2) 合金钢

合金钢比碳素钢具有较高的机械强度、良好的渗透性、冲击韧性和耐磨性。但合金钢对应力集中较敏感,价格亦较贵。只有在传递大功率并要求缩小轴尺寸、减轻轴重量和提高轴颈耐磨性时才采用合金钢材料。常用的合金钢有 20Cr、40Cr、35SiMn、40MnB 等。为了改善其切削性能和力学性能,40Cr、35SiMn、40MnB 钢应进行正火或调质处理,20Cr 钢先渗碳后淬火。

(3) 球墨铸铁

球墨铸铁的优点是价廉,吸振性强,对应力集中敏感性小。它的毛坯是铸造成型的,所以容易得到复杂的形状,可用来制造曲轴、凸轮轴等。缺点是它的工艺过程不易控制,质量不够稳定,废品率较高。轴的毛坯主要有轧制圆钢和锻件。对于直径相差不大的轴通常采用轧制圆钢;直径相差较大或力学性能要求高的轴采用锻件,单件小批量生产采用自由锻件,大批量生产采用模锻件;对于一些形状复杂的轴,如曲轴、凸轮轴等,目前广泛采用球墨铸铁件。

轴的常用材料及其主要力学性能如表 3-1-2 所示。

表 3-1-2 轴的常用材料及其主要力学性能

材料牌号	热处理方法	毛坯直径 d/mm	硬度 /HBS	抗拉强度	屈服强度	弯曲疲劳	应用说明
				极限 σ_b /MPa	极限 σ_s /MPa	极限 σ_{-1} /MPa	
Q235A(A3)				440	240	200	用于不重要或载荷不大的轴
Q275A(A5)			190	580	280	230	用于一般的轴
35	正火	≤ 100	143~187	520	270	250	用于一般的轴
45	正火	≤ 100	170~217	600	300	275	用于较重要的轴,应用最广泛
	调质	≤ 200	217~255	650	360	300	
35SiMn	调质	≤ 100	229~286	750	559	350	用于较重要的轴
40Cr	调质	≤ 100	241~286	750	550	350	用于载荷较大、无很大冲击的重要轴
40MnB	调质	≤ 200	241~286	750	550	335	性能接近 40Cr,用于重要的轴
20Cr	渗碳淬火,回火	≤ 60	表面硬度 56~ 62HRC	650	400	280	用于要求强度、韧性及耐磨性均较高的轴
QT450-5			170~207	450	330	160	用于铸造外形复杂的轴
QT600-3			197~269	600	370	215	用于铸造外形复杂的轴

4. 轴的结构

图 3-1-10 所示为圆柱齿轮减速器中的低速轴。轴通常由轴头、轴颈、轴肩、轴环、轴端及不装任何零件的轴段等部分组成。

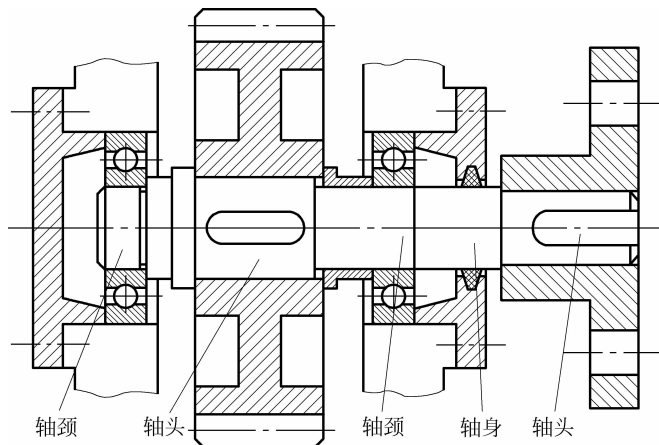


图 3-1-10 圆柱齿轮减速器中的低速轴

- ① 轴头。轴与传动零件配合处。用以支持传动零件,确定传动零件的回转中心。
 - ② 轴颈。轴与轴承配合处。轴颈通过轴承将轴和轴上零件支承在机身上。根据轴颈所在的位置又可分为端轴颈(位于轴的两端,只承受弯矩)和中轴颈(位于轴的中间,同时承受弯矩和转矩)。根据轴颈所受载荷的方向,轴颈又可分为承受径向力的径向轴颈(简称轴颈)和承受轴向力的止推轴颈。
 - ③ 轴肩。轴两段不同直径之间形成的台阶。用以确定轴承、齿轮等轴系零件的轴向位置。
 - ④ 轴环。两段不同直径轴中间的突出部分。其作用与轴肩相同。
 - ⑤ 键槽。轴与传动零件配合的轴头上开出的槽。用键配合以实现联轴器、齿轮的周向固定,传递扭矩。
 - ⑥ 轴上螺纹。在轴的一段直径上切制出的螺纹。轴端螺纹与垫圈、螺母配合使用起紧固联轴器作用。
 - ⑦ 螺纹退刀槽和砂轮越程槽。轴阶梯根部环槽。其作用是便于切制螺纹时退刀和磨削轴颈时的清根。
 - ⑧ 锥面。轴某段直径一端的锥径。在轴上零件装配时起导向作用。
 - ⑨ 倒角。每一直径与端面交界处的倒棱,用于装配导向;过渡圆弧,轴台阶根部的小圆弧,切削时因刀尖有圆弧自然形成,有时则是特意制成以减少应力集中。
 - ⑩ 中心孔。轴的首、尾端面上制出的标准锥孔,用以加工或测量时支承轴。
- 轴的结构主要决定于载荷情况,轴上零件的布置、定位及固定方式,毛坯类型,加工和装配工艺,轴承类型和尺寸以及运输、安装等条件。由于影响轴结构的因素较多,且其结构形式又要随着具体情况的不同而异,所以轴没有标准的结构形式。设计时,必须针对不

同情况进行具体的分析,但是,不论何种具体条件,轴的结构都应满足以下条件。

- ① 轴和装在轴上的零件要有准确的位置。
- ② 轴上零件应便于装拆和调整,轴应做成中间为轴环的左右阶梯结构。
- ③ 轴应具有良好的制造工艺性等。

5. 轴的结构设计

对于轴的结构设计,主要是确定轴的结构形状和尺寸。一般在进行结构设计时的已知条件有机器的装配简图、轴的转速、传递的功率、轴上零件的主要参数和尺寸等。

(1) 外力偶矩的计算

$$M = 9550 \frac{P}{n}$$

式中: M ——外力偶矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

P ——轴所传递的功率, kW ;

n ——轴的转速, r/min 。

在确定外力偶矩的方向时,应注意:输入力偶矩为主动转矩,其方向与轴的转向相同;输出力偶矩为阻力矩,其方向与轴的转向相反。

(2) 扭矩与扭矩图

扭矩也称为内力偶矩 T ($M=T$ 但方向相反),其方向采用右手螺旋法则,如图 3-1-11 所示。当轴上作用有多个外力偶矩 M 时,须以外力偶矩所在的截面将轴分成数段,逐段求出其扭矩 T 。为形象地表示扭矩沿轴线的变化情况,通常沿轴线方向取坐标表示横截面的位置,以垂直于轴线的方向取坐标表示扭矩,绘制出扭矩图。



图 3-1-11 右手螺旋法则

(3) 传动轴扭转时的应力

传动轴扭转时横截面上任一点的切应力计算公式为

$$\tau_{\rho} = \frac{T\rho}{I_{\rho}}$$

式中: τ_{ρ} ——横截面上任一点的切应力;

ρ ——该点到圆心的距离;

T ——横截面上的扭矩;

I_{ρ} ——横截面对圆心的极惯性矩。

当 $\rho=0$ 时, $\tau_{\rho}=0$; 当 $\rho=R$ 时, 切应力最大。此时, $\tau_{\max} = \frac{TR}{I_{\rho}} = \frac{T}{W_n}$ 。 W_n 称为抗扭截面系数。

① 对于直径为 D 的圆截面有

$$I_{\rho} = \frac{\pi D^4}{32} \approx 0.1D^4$$

$$W_n = \frac{\pi D^3}{16} \approx 0.2D^3$$

式中： I_{ρ} ——极惯性矩；

W_n ——抗扭截面系数。

② 对于外径为 D 、内径为 d 的圆环形截面有

$$I_{\rho} = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32} = \frac{\pi D^4(1 - \alpha^4)}{32} \approx 0.1D^4(1 - \alpha^4)$$

$$W_n = \frac{\pi D^3(1 - \alpha^4)}{16} \approx 0.2D^3(1 - \alpha^4)$$

式中： α ——圆环截面内径和外径比值，有

$$\alpha = \frac{d}{D}$$

(4) 轴的强度校核

轴的强度与工作应力的性质和大小有关。在选择轴的结构和形状时应注意以下几个方面。

① 使轴的形状接近于等强度条件，以充分利用材料的承载能力。对于只承受转矩的传动轴常制成光轴或接近于光轴的形状；对于受交变弯曲应力的轴应制成阶梯轴。

② 尽量避免各轴段剖面突然改变以降低局部应力集中，提高轴的疲劳强度。为了减少应力集中，常将过渡处制成适当的圆角，并应尽量避免在轴上开孔或开槽，以免轴在热处理时产生淬火裂纹的危险。

③ 轴上零件的合理分布，可以减小轴上的载荷。

④ 改进轴上零件的结构也可以减小轴上的载荷。

由传动轴扭转时横截面上任一点的切应力计算公式可知，等直圆轴最大切应力发生在最大扭矩截面的外圆周边各点处。为了使传动轴能正常工作，必须使最大工作切应力不超过材料的许用切应力，于是传动轴扭转时的强度条件为

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{W_n} \leq [\tau]$$

至于传动轴为阶梯轴，由于 W_n 各段不同， τ_{\max} 不一定发生在 $|M_n|_{\max}$ 所在的截面上，因此需综合考虑 W_n 和 T 两个因素来确定。

(5) 轴的刚度校核

设计轴类构件时，不仅要满足强度要求，有些轴还要考虑刚度问题。工程上通常是限制单位长度的扭转角 θ ，使它不超过规定的许用值 $[\theta]$ ，有

$$\theta = \frac{T}{GI_{\rho}} \times \frac{180}{\pi} \leq [\theta]$$

式中： θ ——扭转角，rad/m；

G ——剪切弹性模量，GPa；

$[\theta]$ ——许用扭转角，°/m。

$[\theta]$ 值按轴的工作条件和机器的精度来确定,可查阅有关工程手册,一般规定:

精密仪器的轴 $[\theta]=0.25^\circ/\text{m}\sim 0.5^\circ/\text{m}$

一般传动轴 $[\theta]=0.5^\circ/\text{m}\sim 1.0^\circ/\text{m}$

精度较低的轴 $[\theta]=1.0^\circ/\text{m}\sim 2.5^\circ/\text{m}$

(6) 轴的基本直径

确定轴的直径时,由于轴上载荷作用点不明确,是无法按实际载荷来确定轴的直径的。通常的方法是,首先根据轴所传递的扭矩,按扭转强度来初步估算轴的基本直径(轴的基本直径是指仅受扭矩的那一段轴的最小直径);其次,可按所拟订的装配方案,从最小直径开始,逐一确定轴的直径和长度;最后,对于转轴还应按有关强度理论进行校核计算。

轴的基本直径的估算公式为

对于实心轴,有

$$d \geq A_0 \sqrt[3]{P/n} (\text{mm})$$

对于空心轴,有

$$d \geq A_0 \sqrt[3]{P/n(1-\beta^4)} (\text{mm})$$

式中:

① 系数 A_0 与材料有关,并考虑到弯曲的影响。常用材料的 A_0 值范围见表 3-1-3。

表 3-1-3 几种常用材料的 A_0 值范围表

轴的材料	A3、20	A5、35	45	35SiMn、40Cr
A_0	158~134	134~117	117~106	106~97

取 A_0 值时应注意:如估计轴的弯矩较小时取 A_0 较小值,轴的弯矩较大时取 A_0 较大值;工作条件好的轴取较小值,工作条件差的轴取较大值;采用 20Cr、35Cr、40Cr 钢时取 A_0 较小值,采用 A3、A5、35SiMn 钢时取 A_0 较大值。

② $\beta=d_1/d$,即 β 为空心轴的内径 d_1 与外径 d 之比,通常取 $\beta=0.5\sim 0.6$ 。

③ P 为轴所传递的功率,单位为 kW。

④ n 为轴的转速,单位为 r/min。

应当指出,当轴的剖面上开有键槽时,应增大轴径以考虑键槽对轴的强度的削弱。一般开有一个键槽时,轴颈增大 4%~5%;开有两个键槽时,应增大 7%~10%。如果是花键轴,则计算出的轴径近似地作为花键轴的内径。

(7) 按弯扭合成强度条件的计算

完成轴的结构设计以后,轴的主要结构尺寸、轴上零件的位置、轴受到的外载荷和支反力的作用位置均已确定,轴上的载荷(弯矩和扭矩)已可以求得,因而可按弯扭合成强度条件对轴进行强度校核计算。具体的计算步骤如下:

① 画出轴的空间力系图。将轴上作用力分解为水平面分力和垂直面分力,并求出水平面和垂直面上的支点反力。

② 分别作出水平面上的弯矩(M_H)图和垂直面上的弯矩(M_P)图。

③ 计算出合成弯矩 $M = \sqrt{M_H^2 + M_P^2}$, 绘出合成弯矩图。

④ 作出扭矩(T)图。

⑤ 计算当量弯矩, 绘出当量弯矩 $M_e = \sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}$ 图。式中, α 为考虑弯曲应力与扭转剪应力循环特性的不同而引入的修正系数。通常弯曲应力为对称循环变化应力, 而扭转剪应力随工作情况的变化而变化。对于不变的转矩 $\alpha = \frac{[\sigma_{-1b}]}{[\sigma_{+1b}]} \approx 0.3$, 脉动循环转矩 (轴单向转动) $\alpha = \frac{[\sigma_{-1b}]}{[\sigma_{0b}]} \approx 0.6$, 对称循环转矩 (轴双向转动) $\alpha = \frac{[\sigma_{-1b}]}{[\sigma_{+1b}]} = 1$ 。其中 $[\sigma_{-1b}]$ 、 $[\sigma_{0b}]$ 、 $[\sigma_{+1b}]$ 分别为对称循环、脉动循环及静应力状态下的许用弯曲应力, 如表 3-1-4 所示。当不能确切知道载荷的性质时, 通常 α 按脉动循环处理, $\alpha = 0.6$ 。

表 3-1-4 轴的许用弯曲应力

材 料	σ_b	$[\sigma_{+1b}]$	$[\sigma_{0b}]$	$[\sigma_{-1b}]$
碳素钢	400	130	70	40
	500	170	75	45
	600	200	95	55
	700	230	110	65
合金钢	800	270	130	75
	900	300	140	80
	1000	330	150	90
铸钢	400	100	50	30
	500	120	70	40

⑥ 校核危险截面的强度。根据当量弯矩图找出危险截面, 进行轴的强度校核, 其校核公式为

$$\sigma_e = \frac{M_e}{W} = \frac{\sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}}{0.1d^3} \leq [\sigma_{-1b}]$$

式中: W ——轴的抗弯截面系数, mm^3 ;

M 、 T 、 M_e ——单位均为 $\text{N} \cdot \text{mm}$;

d ——单位为 mm ;

σ_e ——当量弯曲应力, MPa 。

6. 轴系零件在轴上的轴向、周向固定的结构

轴上零件的轴向固定的目的, 主要是使轴上零件准确且可靠地处在规定的位置 (定位), 以保证机器正常工作; 轴上零件的周向固定的目的是使轴上零件能同轴一起转动, 以传递转矩。轴系零件的轴向、周向固定的方法很多, 常见的固定方式及应用场合见表 3-1-5 和表 3-1-6。

表 3-1-5 零件的轴向固定方法

方式	结构图形	应用说明
轴肩或轴环结构		<p>简单可靠,且能承受较大的轴向载荷,是一种应用极为广泛的结构。①为保证轴上零件与轴的端面靠紧,轴的过渡圆弧半径r应该小于相配零件的倒角尺寸C或圆角半径R。②轴肩与轴环高度a,既不能太低也不能过高,一般$a=(2\sim 3)C$;轴环宽度$b\approx 1.4a$。③为了保证轴零件定位可靠,轴头或轴颈的长度应略短于与之相配合的轮毂长度</p>
套筒结构		<p>结构简单,可以减少轴的阶梯数。一般用在两个零件的间距较小或受某些条件限制(如考虑装配要求),不便加工出轴的情况。①套筒与轴的配合较松,不宜用于高速旋转处。②修磨套筒长度可保证装配尺寸要求;使用时应使$L < B$</p>
紧定螺钉结构		<p>结构简单,只能承受不大的轴向载荷。①这种结构常和零件的周向定位结合使用。②不宜用于高速转动的轴</p>
弹性挡圈结构		<p>结构紧凑,只适用于轴向载荷不大,或不受轴向载荷的情况。①切槽尺寸要有一定精度;否则可能出现与被固定零件的间隙或挡圈装不进槽的现象。②常与轴肩联合用于滚动轴承的轴向定位</p>
止动垫圈结构与圆螺母		<p>固定可靠,但轴上需切制螺纹和纵槽,对轴强度有削弱。常用于零件与轴承之间的距离较大,且轴上允许车制螺纹的情况</p>
轴端挡圈结构		<p>定位可靠,拆装方便。一般用于轴端要求固定很可靠或承受较大轴向载荷的情况。①其中,圆锥面连接能使轴上零件与轴保持较高的同心度,常用于高速轴端,对中性要求高或需经常拆卸的情况。②应用时需附加防松装置</p>