

轴 的 设 计

牛锡传 王文生 编著



国防工业出版社

轴 的 设 计

牛锡传 王文生 编著

国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

本书除了对轴的常规设计方法作了简要的介绍之外,还在轴所受的载荷、轴的强度计算及轴的临界转速等章节中引进了一些现代设计的理论和方法,如疲劳损伤的线性累积假设、疲劳损伤的断裂力学概念、临界转速计算的普罗尔法、可靠性理论及轴的优化设计等,并附有一些可在微型计算机上应用的简单计算程序。

本书可供从事机械设计的工程技术人员和高等院校师生参考。

牛锡传 王文生 编著

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京大兴兴达印刷厂印装

*

850×1168毫米 32开本 印张 6 1/2 171千字

1993年3月第一版 1993年3月第一次印刷 印数: 00001—3000册

ISBN 7-118-01047-2/TH·77 定价: 6.10元

目 录

第一章 轴的功用、分类及设计准则	1
第一节 轴的功用及分类	1
第二节 轴的失效形式及设计准则	5
第二章 轴的常用材料	8
第三章 轴的结构设计	12
第一节 轴的结构设计任务和原则	12
第二节 轴上零件的定位	12
第三节 轴的轴向定位	26
第四节 轴的结构工艺性	29
第五节 轴的结构设计步骤	34
第四章 轴所承受的载荷	42
第一节 载荷特性	42
第二节 随时间而变化的载荷	43
第三节 服从统计规律的载荷	45
第四节 相对于轴位置发生变化的载荷	47
第五节 零件在轴上的布置及零件结构对载荷分布的影响	49
第六节 轴上载荷的简化	52
第五章 轴的强度计算	55
第一节 按经验关系式或扭转切应力计算法	55
第二节 按许用弯曲应力计算法	58
第三节 安全系数校核法	69
第四节 变载荷下轴的计算	83
第五节 疲劳强度的断裂力学概念	90
第六章 强度计算的统计方法	94
第一节 实际载荷和承载能力的统计特性	94
第二节 零件承载能力与载荷的统计分布间的基本关系	96
第三节 变量的正态分布	97

IV

第四节 安全系数的统计分析	100
第七章 多支点轴的计算	109
第一节 多支点轴的特点	109
第二节 多支点轴内力的计算	109
第八章 轴的刚度计算	118
第一节 轴的弯曲变形计算	118
第二节 轴的扭转变形计算	133
第九章 轴的振动计算	135
第一节 轴的临界转速	135
第二节 轴的扭转振动	148
第十章 计算弯曲振动临界转速的普罗尔法	152
第一节 普罗尔法的基本原理	152
第二节 普罗尔法的计算机程序	160
第十一章 软轴	170
第一节 概述	170
第二节 钢丝软轴	171
第三节 软管的结构形式	174
第四节 软轴接头	176
第五节 软管接头	178
第六节 软轴组件的结构示例	182
第七节 软轴的失效形式	185
第八节 钢丝软轴的选择	186
第九节 软管、软轴接头和软管接头的选择	189
第十节 软轴的使用与维护	190
第十二章 轴的优化设计初步	191
第一节 优化的概念	191
第二节 轴的优化设计实例	196
参考文献	203

第一章 轴的功用、分类及设计准则

第一节 轴的功用及分类

一、轴的功用

轴是组成机器的重要零件之一。它的功用有两个。(1) 支持回转零件 (如齿轮、带轮、链轮等), 使其有确定的工作位置; (2) 传递运动和转矩。

二、轴的分类

(一) 按照轴线形状分类

轴可分为直轴、曲轴和软轴。

1. 直轴 (见图 1-1)

直轴按其外形不同可分为光轴、阶梯轴及一些特殊用途的轴, 如凸轮轴、花键轴、连齿轮轴及连蜗杆轴等。

光轴形状简单、加工方便、轴上应力集中源少、成本低; 缺点是轴与轴上零件毂孔的配合采用基轴制, 零件定位不便, 尤其是轴上需安装几个受轴向力的零件时就更加困难, 因此, 光轴往往只在轴端安装零件。另外, 光轴外形与其上弯矩分布不相适应, 故多用于传递转矩。

光轴在纺织机械、机床、农业机械中应用较多。

阶梯轴各轴段的直径不同, 轴上零件的安装, 定位比较方便。由于轴上应力分布通常是中间大、两端小, 所以阶梯轴受载比较合理, 其外形接近于等强度梁 (见图 1-1 b 中虚线所示)。

阶梯轴应用最广。

直轴一般是实心剖面。有时因机器结构要求需在轴中装其它零件或待加工的棒料 (如车床主轴), 或者需在轴孔中输送润滑

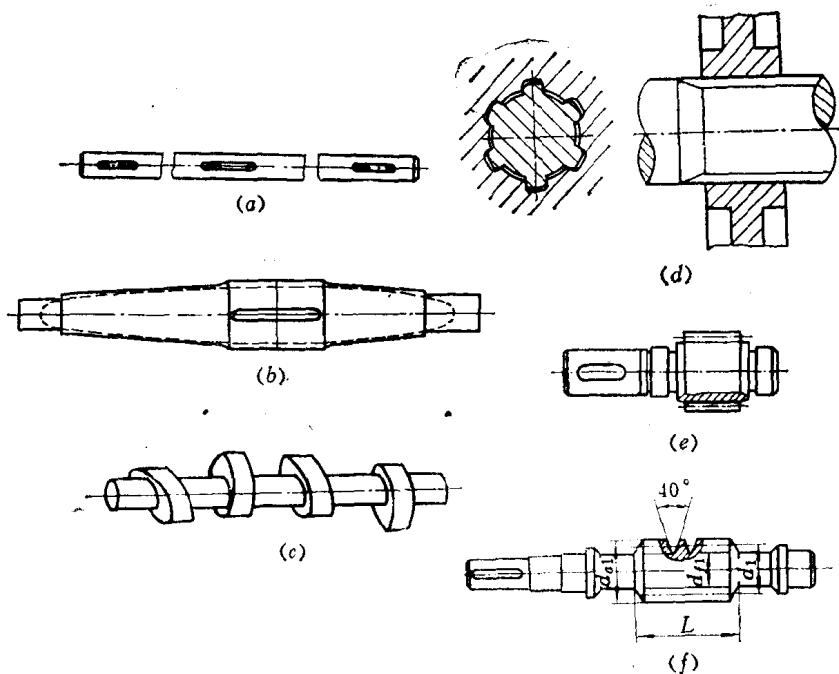


图1-1 直轴

(a) 光轴；(b) 阶梯轴；(c) 凸轮轴；(d) 花键轴；
(e) 连齿轮轴；(f) 连蜗杆轴。

油、冷却液、或者对减轻轴的重量有重大作用时（如水轮发电机轴），则将轴制成空心的。图 1-2 所示为车床主轴。

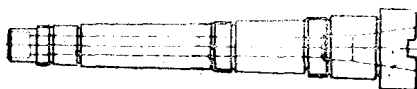


图1-2 车床主轴

由于轴传递转矩时，其外层材料所受剪应力最大（见图 1-3），所以空心传动轴的材料利用较充分。在空心轴和实心轴抗弯剖面模量相等条件下，空心轴减轻重量的程度列于表1-1。

为保证空心轴有足够的刚度和扭转稳定性，一般要求 $d_0/d_1 = 0.5 \sim 0.6$ 。

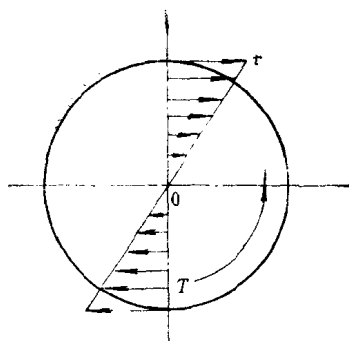


图1-3 轴上扭转剪应力

表1-1 空心轴减轻重量的程度

d_0/d_1	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
d_1/d	1.01	1.02	1.05	1.10	1.19	1.47
减轻重量 (%)	15	22	29	39	49	61

注: d_0 —空心轴内径 (mm); d_1 —空心轴外径 (mm); d —实心轴直径 (mm)。

简单的空心轴可用无缝钢管制造。复杂的空心轴需专门制造, 费工、费料。所以必须从经济和技术指标两方面综合分析, 决定其是否有利。

2. 曲轴 (见图1-4)

曲轴是内燃机、曲柄压力机等机器上的专用零件, 用以将往复运动转变为旋转运动, 或作相反转变。

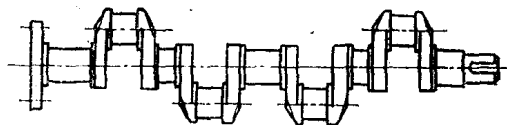


图1-4 曲轴

3. 软轴 (见图1-5)

软轴主要用于两传动轴线不在同一直线或工作时彼此有相对运动的空间传动, 也可用于受连续振动的场合, 以缓和冲击。近年来, 也成功地用于机器人和机械手中。

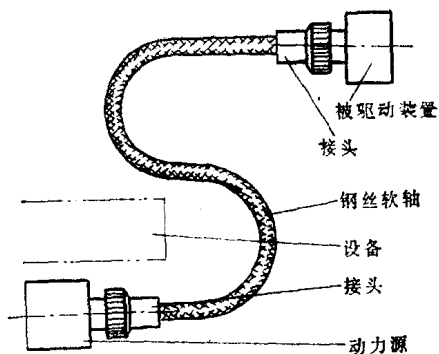


图1-5 软轴

(二) 按照所受载荷性质分类

轴可分为心轴、转轴和传动轴。

1. 心轴 (见图1-6)

通常只承受弯矩而不承受转矩的轴称为心轴。心轴可以是旋转的，如火车轮轴；也有不转动的，如自行车前、后轮轴，汽车轮轴。当心轴上所受的横向力方向不变时，固定心轴上任一点所受的弯曲应力不变，而转动心轴上任一点的弯曲应力是对称循环

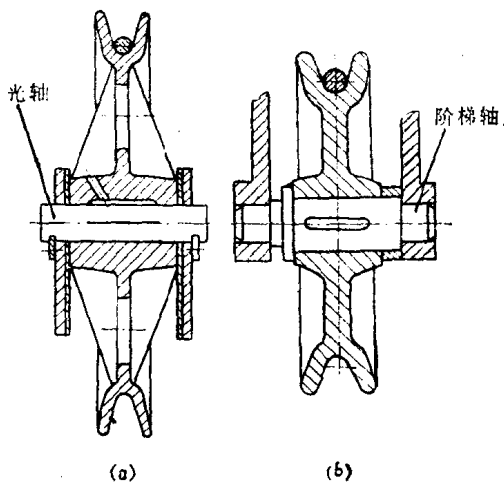


图1-6 心轴

(a) 轴固定不动；(b) 轴随滑轮转动。

的，因此，前者的疲劳强度比后者高。

2. 转轴 (见图1-7)

既受弯矩又受转矩的轴称为转轴。转轴在各种机器中最为常见。

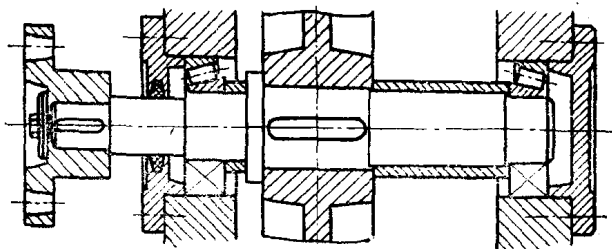


图1-7 转轴

3. 传动轴 (见图1-8)

只受转矩不受弯矩或受很小弯矩的轴称为传动轴。车床上的光杠、船舶螺旋桨轴、连接汽车发动机输出轴和后桥的轴，均是传动轴。

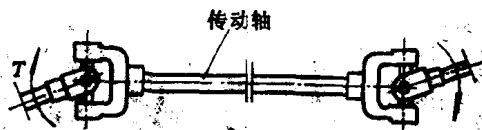


图1-8 传动轴

第二节 轴的失效形式及设计准则

一、轴的失效形式

轴的失效形式与下述因素有关：所受应力的性质和大小、材料的机械性能、结构形状及加工方法和轴的工作环境等。

轴常见的失效形式有：

(一) 因疲劳强度不足而产生疲劳断裂

这种失效形式约占轴的失效总数的40%~50%。其破坏特点是：

(1) 破坏时的应力值低于轴材料的抗拉强度极限 σ_B , 甚至低于材料的屈服极限 σ_s ;

(2) 一般表现为突然的脆断而无明显的塑性变形;

(3) 断口表面 (见图 1-9) 分为光滑区和晶粒状粗糙区两部分。光滑区有疲劳源和以疲劳源为中心向外扩展的弧形疲劳线, 它是裂纹缓慢扩展的痕迹。粗糙区是裂纹加速扩展和最终断裂区, 它具有宏观脆性断裂的特征。

工作中过载大的轴会产生低周疲劳断裂。

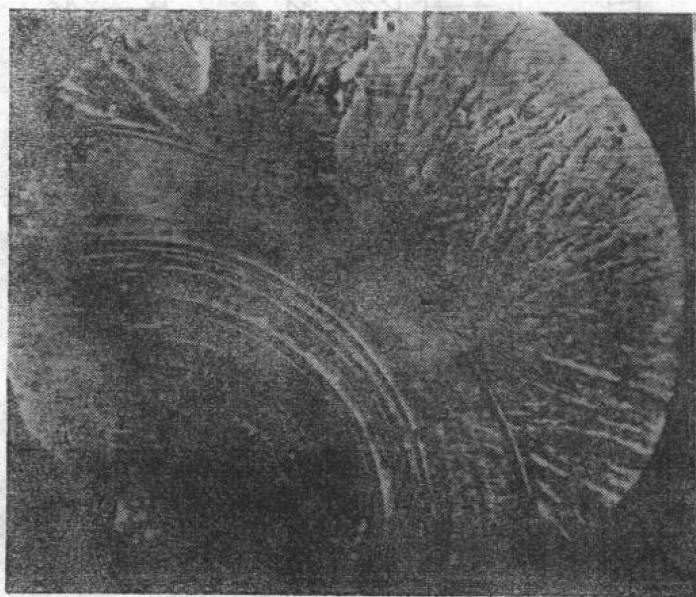


图1-9 轴的疲劳断口

(二) 由于静强度不足而产生塑性变形或脆性断裂

轴工作过程中若受到振动、冲击、会瞬时过载。如果轴用钢或合金钢制造, 当最大工作应力超过材料的屈服极限时, 轴将发生塑性变形; 若轴用球墨铸铁制造, 则最大工作应力超过材料的强度极限时, 轴将发生脆性断裂。

(三) 因刚度不足而产生过大的弯曲变形和扭转变形

(四) 在高转速下工作时振幅过大

(五) 其它

如轴颈和花键轴的磨损；过盈配合轴段的擦伤和挤伤；在高温环境中工作时的蠕变；在腐蚀介质中工作时被腐蚀等等。

二、轴的设计准则

为了保证轴在规定寿命下能正常地工作，必须针对上述失效形式进行正确设计。设计轴的主要内容是：

(1) 根据轴的工作条件、生产批量和经济性原则，选取适合的材料、毛坯形式及热处理方法：

(2) 根据轴的受力情况、轴上零件的安装位置、配合尺寸及定位方式、轴的加工方法等具体要求，确定轴的合理结构形状及尺寸，即进行轴的结构设计。

(3) 轴的强度计算或校核。对受力大的细长轴（如蜗杆轴）和对刚度要求高的轴（如车床主轴），还要进行刚度计算。对在高速下工作的轴，因有共振危险，故应进行振动稳定性计算。

第二章 轴的常用材料

轴的材料首先应有足够的强度，对应力集中敏感性低；还应满足刚度、耐磨性、耐腐蚀性及良好的可加工性，以及价格低廉、易于获得的要求。

轴常用的材料主要有碳钢、合金钢、球墨铸铁和高强度铸铁。

碳钢有足够高的强度，对应力集中的敏感性较低，便于进行各种热处理及机械加工，价格低，供应充足，故应用最广。一般机器中的轴，可用 30、40、45、50 等牌号的优质中碳钢制造，尤以 45 号钢经调质处理最常用。对低速轻载或不重要的轴，可用 A3、A4、A5 等普通碳素钢制造。

合金钢的机械性能更高，常用于制造高速、重载的轴，或受力大而要求尺寸小、重量轻的轴。至于那些处于高温、低温或腐蚀介质中工作的轴，多数用合金钢制造。

为了提高轴的强度及耐磨性，用优质碳素钢或合金钢制造的轴，常进行各种热处理、化学处理及表面强化处理。特别是合金钢，只有进行热处理后才能充分显示其优越的机械性能。

值得注意的是，合金钢对应力集中敏感性高，所以合金钢轴的结构形状必须合理，尽量减少应力集中源，并且要求表面粗糙度数值低，否则就失去用合金钢的意义。另外，在一般工作温度下，合金钢和碳钢的弹性模量十分接近，因此依靠选用合金钢来提高轴的刚度是不行的，此时应通过增大轴径等方式来解决。

球墨铸铁和高强度铸铁的机械强度比碳钢低，但因其铸造工艺性好，易于得到较复杂的外形，吸振性、耐磨性好，对应力集中的敏感性低，价廉，故应用日趋增多。汽车、拖拉机发动机的曲轴，多用球墨铸铁制造。

随着科学技术的发展,近年来逐渐采用复合材料和纤维增强合成树脂材料制造轴,这对减轻轴的重量、简化结构、改进加工方法具有积极意义。

轴的毛坯可用轧制圆钢材、锻造、焊接、铸造等方法获得。对要求不高的轴或较长的传动轴,毛坯直径小于150mm时,可用轧制圆钢材;受力大、生产批量大的重要轴的毛坯为锻件;对直径特大而件数很少的轴可用焊接毛坯;生产批量大、外形复杂、尺寸较大的轴,可用铸造毛坯。

选择轴的材料时,应考虑轴所受载荷的大小及性质、转速高低、周围环境、轴的形状和尺寸、生产批量、重要程度、材料机械性能及经济性等因素,全面比较,合理选用。

轴的常用材料及其主要机械性能见表2-1。

表2-1 轴的常用材料及其主要机械性能

材料牌号	热 处 理 方 式	毛 坯 直 径 (mm)	机 械 性 能				硬 度 HB	备 注
			σ_b	σ_s	σ_{-1}	τ_{-1}		
			(MPa)					
A 3		≤40	432	235	180	104		用于不重要的或载荷不大的轴
A 5			569	275	228	132		
20	正 火	25	412	245	177	102	≤156	用于载荷不大要求韧性较高的轴
	正 火	≤100	392	216	165	95	103~156	
		>100~300	373	196	154	89		
		>300~500	363	186	148	86		
	回 火	>500~700	353	177	142	83		
35	正 火	25	530	314	228	132	≤187	有好的塑性和适当的强度,用于对强度和加工塑性均有一定要求的轴,如曲轴等
	正 火	≤100	510	265	210	121	143~187	
	正火或 正火+回火	>100~300	490	255	201	116	143~187	
	正火+回火	>300~500	471	235	191	110	137~187	
		>500~700	451	226	183	106	131~187	

(续)

材料牌号	热 处 理 方 式	毛坯直径 (mm)	机 械 性 能				硬 度 HB	备 注
			σ_b	σ_s	σ_{-1}	τ_{-1}		
			(MPa)					
35	调 质	≤ 100	549	294	227	131	163~207	
		$>100\sim 300$	530	275	217	126	149~207	
45	正 火	25	598	353	257	148	≤ 241	应用最为广泛
	正 火	≤ 100	588	294	238	138	170~217	
		$>100\sim 300$	569	284	230	133	162~217	
		$>300\sim 500$	549	275	222	128	162~217	
		$>500\sim 700$	530	265	215	124	156~217	
	回 火							
	调 质	≤ 200	637	353	268	155	217~255	
40Cr	调 质	25	981	785	477	275		用于载荷较大而无很大冲击的重要轴
		≤ 100	736	539	344	199	241~286	
		$>100\sim 300$	686	490	317	183	241~286	
		$>300\sim 500$	637	441	291	168	229~269	
		$>500\sim 800$	588	343	251	145	217~255	
35SiMn 42SiMn	调 质	25	883	736	437	253		性能接近于 40Cr, 用于中小型轴
		≤ 100	785	510	350	202	229~286	
		$>100\sim 300$	736	441	318	184	217~269	
		$>300\sim 400$	686	392	291	168	217~255	
		$>400\sim 500$	637	373	273	158	196~255	
40MnB	调 质	25	981	785	477	275		性能接近于 40Cr, 用于重要的轴
		≤ 100	736	491	331	191	241~286	
40CrNi	调 质	25	981	285	477	275		用于很重要的轴
35CrMo	调 质	25	1000	850	510	285		性能接近于 40CrNi, 用于重要的轴
		≤ 100	750	550	390	200	207~269	

(续)

材料牌号	热 处 理 方 式	毛坯直径 (mm)	机械性能				硬 度 HB	备 注
			σ_b	σ_s	σ_{-1}	τ_{-1}		
			(MPa)					
35CrMo	调 质	>100~300	700	500	350	185	207~269	性能接近于40CrNi, 用于重要的轴
38SiMn- Mo	调 质	≤100	736	588	358	206	229~286	性能接近于40CrNi, 用于重要的轴
		>100~500	686	539	331	191	217~209	
		>300~500	637	490	304	176	196~241	
		>500~800	588	392	265	153	187~241	
20Cr	渗 碳 淬 火 回 火	15	834	539	371	214	表 面 HRC 56~62	用于对强度和韧性要求均较高的轴（如齿轮轴、蜗杆等）
		30	637	392	278	160		
		≤60	637	392	278	160		
2Cr13	调 质	≤100	647	441	294	170	197~248	用于腐蚀条件下工作的轴
1Cr18- Ni19Ti	淬 火	≤60	539	216	204	118	≤192	用于高低温及腐蚀条件下工作的轴
		>60~100	530	196	196	113		
		>100~200	490	196	185	107		
QT 400-10			392	294	142	123	156~197	用于制造外形复杂的轴
QT450-5			450	330	160	140	170~207	
QT 500-15			500	380	180	155	187~255	
QT600-2			588	412	212	182	197~269	

注：1. 表中 σ_{-1} 、 τ_{-1} 系按下列关系计算，并按四舍五入原则圆整：

钢： $\sigma_{-1} \approx 0.27 (\sigma_b + \sigma_s)$ ； $\tau_{-1} \approx 0.156 (\sigma_b + \sigma_s)$

球墨铸铁： $\sigma_{-1} \approx 0.36 \sigma_b$ ， $\tau \approx 0.31 \sigma_b$

2. 其它性能，一般可取 $\tau_s \approx (0.55 \sim 0.62) \sigma_s$ ； $\sigma_0 \approx 1.4 \sigma_{-1}$ ； $\tau_0 \approx 1.5 \tau_{-1}$

第三章 轴的结构设计

第一节 轴的结构设计任务和原则

功用相同的轴却有各不相同的结构形状。这是因为，影响轴的结构形状因素很多，这些因素是：载荷的大小、方向、性质及其分布状态，轴上零件的数量及安装位置、定位方法，轴的制造工艺和生产规模等。

轴的结构设计的任务，就是在满足强度、刚度和振动稳定性的基础上，根据轴上零件的定位要求及轴的加工、装配工艺性要求，合理地定出轴的结构形状和全部尺寸。

轴的结构设计的原则是：（1）受力合理，有利于提高轴的强度和刚度；（2）轴和轴上零件有确定的工作位置。即保证轴相对于机架定位可靠，轴上零件的轴向和周向定位可靠；（3）轴有良好的结构工艺性，包括：便于加工制造；轴上应力集中小；材料省、重量轻；轴上零件装、拆和调整方便，保证每个零件装配到轴上时，不论其配合性质如何，均能自由地通过前面各轴段，而不损伤其表面；（4）对重型轴还应考虑毛坯制造、探伤、运输、吊装等特殊要求。

第二节 轴上零件的定位

一、轴上零件的轴向定位

零件在轴上的轴向定位方法，主要取决于它所受轴向力的大小。此外，还应考虑轴的制造及轴上零件装拆的难易程度、所占地位大小、对轴强度的影响及工作可靠性等因素。

当轴上零件所受轴向力的值大时，常用轴肩、轴环、过盈配合等定位方式；受中等轴向力时，可用轴套、圆螺母、轴端挡