

JIXIEYUANLI  
JIXIE  
LINGJIAN

朱景梓 主编

机械原理及机械零件

**机械原理及机械零件**

**(上下共两册)**

**朱景梓 主编**

**责任编辑：胡章顺**

•  
山西人民出版社出版 (太原并州北路十一号)  
山西省新华书店发行 山西新华印刷厂印刷

•  
开本：850×1168 1/32 印张：13.625 字数：330 千字  
1984年9月第1版 1984年9月太原第1次印刷  
印数：1—12,500册

•  
书号：15088·169 定价(下册)：1.87元

<b>第九章 机械零件设计总论</b> .....	( 1 )
§ 9-1 机械零件设计概述.....	( 1 )
§ 9-2 机械零件工作能力的计算准则.....	( 2 )
§ 9-3 机械零件常用材料.....	(11)
§ 9-4 钢的热处理简介.....	(20)
<b>第十章 联接</b> .....	(23)
§ 10-1 概述.....	(23)
§ 10-2 键、花键和销联接.....	(25)
§ 10-3 螺纹联接和螺旋传动.....	(33)
<b>第十一章 渐开线齿轮传动</b> .....	(74)
§ 11-1 概述.....	(74)
§ 11-2 齿轮轮齿的主要失效形式.....	(76)
§ 11-3 齿轮材料及其热处理.....	(82)
§ 11-4 直齿圆柱齿轮的强度计算.....	(88)
§ 11-5 斜齿圆柱齿轮的强度计算.....	(116)
§ 11-6 直齿圆锥齿轮的强度计算.....	(125)
§ 11-7 齿轮的结构.....	(131)
§ 11-8 齿轮传动的效率和润滑.....	(136)
<b>第十二章 蜗杆传动</b> .....	(145)
§ 12-1 概述.....	(145)
§ 12-2 蜗杆传动的啮合特性和运动关系.....	(148)
§ 12-3 蜗杆传动主要参数的选择和几何 尺寸计算.....	(150)
§ 12-4 蜗杆传动的失效形式和材料选择.....	(157)

§ 12 - 5	蜗杆传动承载能力计算	(161)
§ 12 - 6	蜗杆和蜗轮的结构	(174)
§ 12 - 7	圆弧齿圆柱蜗杆和圆弧面蜗 杆传动	(175)
<b>第十三章</b>	<b>带传动和链传动</b>	<b>(182)</b>
§ 13 - 1	带传动的类型和应用	(182)
§ 13 - 2	三角胶带的结构和型号	(184)
§ 13 - 3	带传动的工作情况分析	(187)
§ 13 - 4	三角胶带传动的设计计算	(197)
§ 13 - 5	三角胶带带轮设计	(209)
§ 13 - 6	三角胶带传动的张紧装置	(212)
§ 13 - 7	同步齿形带传动简介	(214)
§ 13 - 8	链传动的类型和应用	(217)
§ 13 - 9	套筒滚子链的结构和规格	(219)
§ 13 - 10	套筒滚子链链轮	(221)
§ 13 - 11	链传动的运动特性	(226)
§ 13 - 12	套筒滚子链传动的设计计算	(229)
§ 13 - 13	链传动的布置与润滑	(237)
<b>第十四章</b>	<b>轴</b>	<b>(241)</b>
§ 14 - 1	概述	(241)
§ 14 - 2	轴的材料	(244)
§ 14 - 3	轴的结构设计	(246)
§ 14 - 4	轴的强度计算	(251)
§ 14 - 5	轴的刚度计算及振动计算简介	(263)
<b>第十五章</b>	<b>滑动轴承</b>	<b>(272)</b>
§ 15 - 1	概述	(272)
§ 15 - 2	滑动轴承的结构及材料	(273)

§ 15 - 3	滑动轴承的润滑	(283)
§ 15 - 4	滑动轴承摩擦状态及动压润 滑机理	(291)
§ 15 - 5	非液体摩擦滑动轴承的计算	(296)
§ 15 - 6	液体动压润滑轴承的计算	(298)
§ 15 - 7	其它轴承简介	(306)
<b>第十六章</b>	<b>滚动轴承</b>	<b>(311)</b>
§ 16 - 1	概述	(311)
§ 16 - 2	滚动轴承的代号及类型选择	(316)
§ 16 - 3	滚动轴承尺寸的选择计算	(322)
§ 16 - 4	滚动轴承的组合设计	(342)
<b>第十七章</b>	<b>联轴器与离合器</b>	<b>(358)</b>
§ 17 - 1	概述	(358)
§ 17 - 2	联轴器	(360)
§ 17 - 3	离合器	(367)
§ 17 - 4	其它联轴器与离合器简介	(375)
<b>第十八章</b>	<b>弹簧</b>	<b>(378)</b>
§ 18 - 1	概述	(378)
§ 18 - 2	圆柱形螺旋弹簧的端部结构、 材料及许用应力	(380)
§ 18 - 3	圆柱形压缩和拉伸螺旋弹簧的 设计计算	(384)
<b>附 录</b>		<b>(396)</b>
<b>习 题</b>		<b>(415)</b>
<b>参考书目</b>		<b>(426)</b>

## 第九章 机械零件设计总论

---

本书上册主要是研究常用机构的组成和运动规律。下册将从失效形式、工作能力、构造、材料选择、工艺性和使用维护等方面来研究通用零件，以便正确设计或选用零、部件，力求满足工作的需求。本章将对机械零件设计计算的共性问题 and 基本原则，作一概括性的说明。

### § 9-1 机械零件设计概述

设计机械零件的基本要求是工作可靠，成本低廉。工作可靠是指该零件的强度、刚度、耐磨性、振动稳定性、耐热性和可靠性等能达到预期的合理指标。另外，为了使机械零件成本低廉，还需要正确选择材料，合理确定零件的形状、尺寸和精度等级，降低零件重量，使零件具有良好的工艺性，力求标准化等。

零件设计的大体步骤是：1)根据使用要求，参考已用零件，确定零件类型和结构型式；2)拟定出零件的计算简图，确定作用在零件上的载荷；3)选择材料和处理方法（如热处理）；4)分析零件可能出现的失效形式和工作能力的计算准则；5)确定零件的形状和计算的主要尺寸；6)进行结构设计、绘制零件工作图。

通过计算求得零件主要尺寸的过程，称为设计计算。所用公式，称为设计公式；先参照已有产品、图纸和经验数据，初步拟

定零件的结构和尺寸，然后再进行验算，这种过程称为校核计算。所用公式，称为验算公式。设计计算和校核计算，都是设计中常采用的方法。

## § 9-2 机械零件工作能力的计算准则

由于某些原因，使机械零件不能正常工作，称为失效。常见的失效形式有断裂、塑性变形、过大的弹性变形、表面过度磨损、疲劳点蚀、胶合、靠摩擦力工作的零件发生打滑，等等。

同一零件在不同的工作条件下，可能产生不同的失效形式。如齿轮可能由于牙齿断裂而失效，也可能由于齿面发生点蚀而失效。

在设计计算时，衡量机械零件工作能力的准则，称为机械零件工作能力的计算准则。机械零件的工作能力准则包括有：强度、刚度、耐磨性、振动稳定性、耐热性和可靠性等。但对具体的某一个零件，可根据它可能出现的失效形式，选择一项或几项准则去确定该零件的主要尺寸及有关参数。

### 一、强度

强度是指零件受载后抵抗发生断裂或超过容许限度的残余变形的能力。关键零件的断裂将会使机器停车，甚至造成严重的人身事故。强度计算应满足的条件是

$$\left. \begin{aligned} \sigma &\leq [\sigma] = \frac{\sigma_{Lim}}{S} \\ \tau &\leq [\tau] = \frac{\tau_{Lim}}{S} \end{aligned} \right\} \quad (9-1)$$

式中， $\sigma$ 、 $\tau$ 为零件的名义应力（ $\sigma$ 为正应力， $\tau$ 为剪应力，下同），可根据材料力学中有关的公式进行计算； $[\sigma]$ 、 $[\tau]$ 为许用应力，

是零件设计的条件应力； $\sigma_{Lim}$ 、 $\tau_{Lim}$  是极限应力； $S$  是安全系数。

根据应力的种类选取极限应力值。例如，在静应力情况下，对塑性材料制成的零件，取材料的屈服极限  $\sigma_s$  为极限应力，对于脆性材料制成的零件，取强度极限  $\sigma_B$  作为极限应力；对于对称变应力应取对称循环疲劳极限  $\sigma_{-1}$  作为极限应力；对于脉动变应力要取脉动疲劳极限  $\sigma_0$  作为极限应力等。

承受变应力的零件，还应考虑到应力集中、零件尺寸及零件表面状态对强度的影响。

确定安全系数  $S$  值时，应考虑载荷和应力的计算准确性、材料可靠性和零件的重要性。通常采用算法或查表法。

齿轮、蜗轮和滚动轴承，在受载以前都是线或点接触。受载

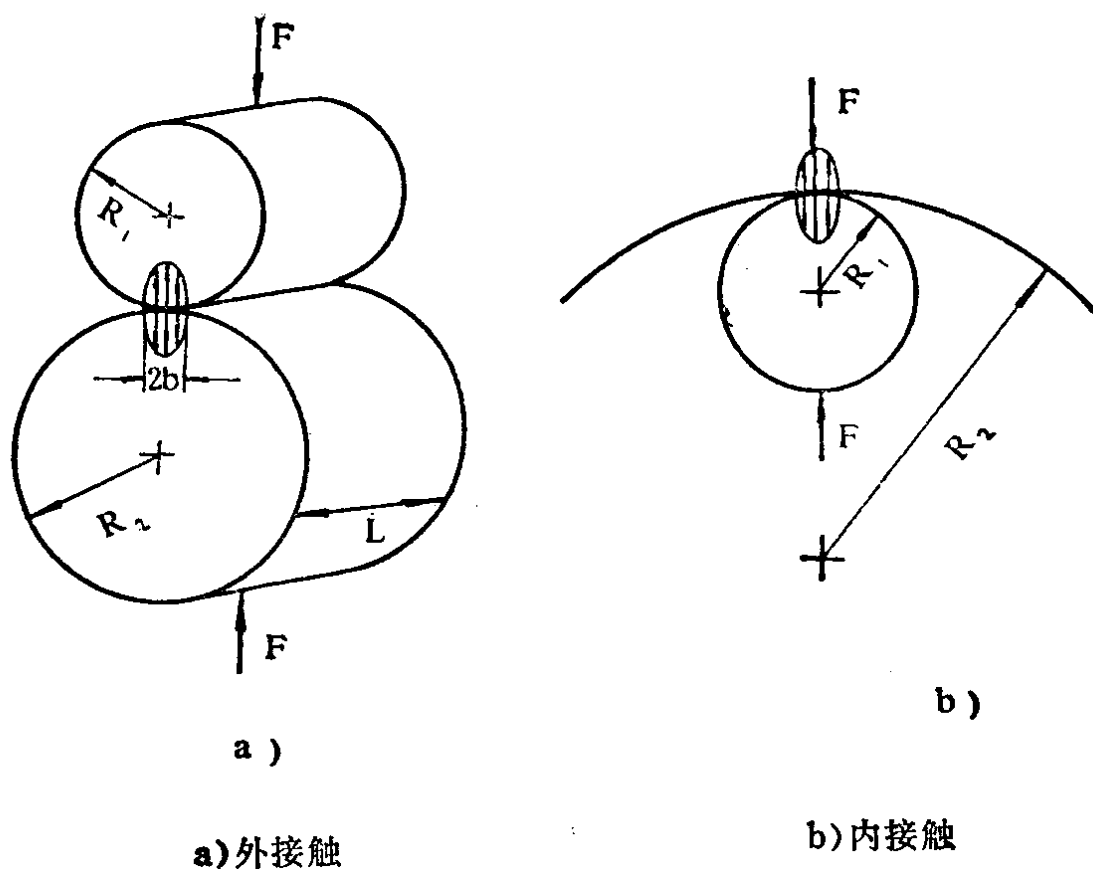


图9—1 两圆柱体接触



后，由于变形，使接触处成为一小面积，此面积甚小，但表层产生的局部应力值却很大。这种应力称为表面接触应力，此时的零件强度称为接触强度。

由弹性力学赫兹（Hertz）公式知，两个轴线平行的钢制圆柱体相互接触（图 9—1），当承受均布载荷  $q = \frac{F}{L}$  时，局部弹性变形后的接触面积为—狭长的矩形，最大接触应力  $\sigma_{H_{max}}$  发生在接触区中线上，其值为

$$\sigma_{H_{max}} = 0.418 \sqrt{\frac{qE}{R}} \quad (9-2)$$

式中， $E$  为两圆柱体材料的弹性模量（ $E = E_1 = E_2$ ）； $R$  为综合曲率半径。即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \quad (9-3)$$

式中正号用于外接触，如图 9—1 a) 所示；负号用于内接触，如图 9—1 b) 所示。

图 9—2 为两个钢制球体接触，局部变形后形成一个半径为  $a$  的圆形接触面积，最大接触应力  $\sigma_{H_{max}}$  在接触面的中心为

$$\sigma_{H_{max}} = 0.388 \sqrt[3]{\frac{FE^2}{R^2}} \quad (9-4)$$

式中， $E$  为两钢球体材料的弹性模量（ $E = E_1 = E_2$ ）； $R$  为综合曲率半径， $R$  值仍用式（9—3）求得。

当两圆柱体或两球体表面相互运动时，应进行接触疲劳强度计算，以避免发生点蚀失效或控制点蚀的发展速度。

接触疲劳强度计算应满足的条件是

$$\sigma_{H_{max}} \leq [\sigma_H] = \frac{\sigma_{HLIm}}{S_H} \quad (9-5)$$

式中， $\sigma_{H_{Lim}}$  为材料的接触持久极限，可由实验测得； $\sigma_{H_{max}}$  为零件的最大接触应力。由于两个接触表面的接触应力值相同，因此在两个零件的硬度不同时， $\sigma_{H_{Lim}}$  值应取较软零件的接触持久极限。

若两零件初始接触是面接触，当挤压力较大时，接触面可能产生塑性变形。因此，应进行挤压强度计算。挤压强度应满足的条件是

$$\sigma_p = \frac{F}{A} \leq [\sigma_p] \quad (9-6)$$

式中， $\sigma_p$  为面接触时产生的挤压应力； $F$  为挤压载荷； $A$  为有效挤压面积。

## 二、刚 度

刚度是指零件承受载荷时抵抗弹性变形的能力。零件的刚度常用产生单位变形所需的力或力矩来表示。某些零件如机床的主轴、丝杠、导轨、电动机轴、安装高精度齿轮的轴及支承该轴的轴承等，如果刚度不足，就会影响机器的工作性能。若机床主轴刚度不足，就会使加工出来的成品精度过低；当齿轮轴的弯曲变形超过许可值时，将使载荷集中于齿宽的一端，甚至引起轮齿的破坏，并使非自动调心式轴承的工作条件急剧恶化。对于这类零件，除了作强度计算外，还需作刚度计算，并以刚度计算为主，去确定零件的剖面尺寸。

刚度计算应满足的条件是

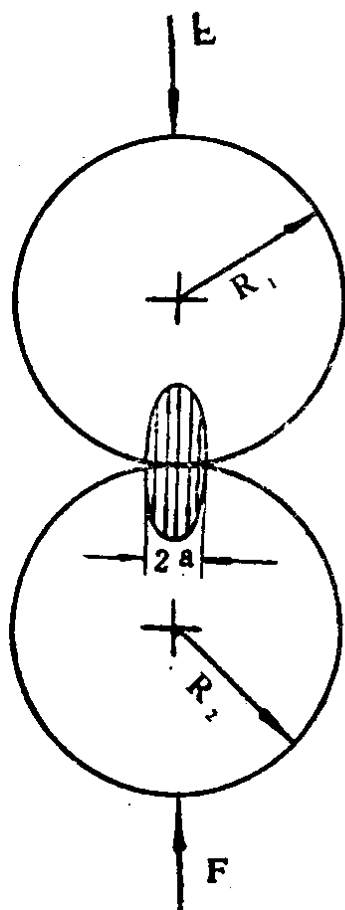


图9-2 两球形体接触

$$\left. \begin{aligned} y &\leq [y] \\ \phi &\leq [\phi] \\ \theta &\leq [\theta] \end{aligned} \right\} \quad (9-7)$$

式中， $y$ 、 $\phi$ 、 $\theta$ 分别为零件受载后的线变形量（伸长或挠度）、扭转角、偏转角，可用材料力学公式求得。 $[y]$ 、 $[\phi]$ 、 $[\theta]$ 分别为相应的许用变形量，可根据工作要求，从有关的设计手册中查得。

提高零件刚度的主要措施是：合理地确定零件的剖面形状与尺寸，以增大剖面的惯性矩；适当减小轴的跨距和合理添置加强筋等。

由于各类钢材的弹性模量  $E$  或  $G$  相差很小，所以采用合金钢代替碳素钢或用高强度钢代替低强度钢，对提高零件刚度并无效果。

对于螺旋弹簧、板簧和仪器中的弹性件等，要具有一定的弹性变形能力；某些零件为了能承受冲击载荷或使载荷分布较均匀，也要有一定的弹性变形能力。所以要求这些零件的柔度（刚度的倒数）都应该大一些。

### 三、耐 磨 性

摩擦表面物质在相对运动中不断损失的现象称为磨损。耐磨性是指零件在载荷作用下抵抗磨损的能力。零件磨损会使零件的形状和尺寸改变，精度降低，效率下降，强度减弱，导致零件失效。在一般机械中，据统计由于磨损而失效的约占全部报废零件、部件的80%。因此，保证零件的磨损寿命是有重大意义的。

磨损是一个复杂的现象。主要类型有磨料磨损、粘着磨损、腐蚀磨损和接触疲劳磨损等。

#### 1. 磨料磨损

在摩擦的过程中，粗糙的硬表面凸起处把软表面创伤或两表

面间有外界硬颗粒划伤工作表面，都称为磨料磨损。通常所说的磨损，主要是指磨料磨损。磨料磨损的机理有三种假说：①磨料在金属表面上做微量切削；②磨料使零件表面产生循环接触应力，引起表面疲劳破坏；③磨料压入塑性较大的零件表面，从表面挤出剥落颗粒。试验表明，零件表面的耐磨性与金属表面的硬度、钢中含碳量及碳化物生成元素含量成正比。摩擦副的耐磨性也与磨料的硬度、颗粒的大小、形状和锐度有关。此外，冷作硬化虽然能提高硬度，但并不能提高零件的耐磨性。为了减轻磨料磨损，设计时应注意密封措施；注意油的清洁过滤；合理选配两表面的材料；适当提高表面光洁度；在润滑油中加入硫化物抗磨损添加剂等等。对磨料磨损特别严重的零件（例如球磨机的衬板与钢球），应选用耐磨损材料。例如锰钢、白口铸铁或高硬度的钢材。

## 2. 粘着磨损（也称胶合）

粘着磨损是指摩擦副在相对运动时，接触表面的材料，从一个表面转移到另一个表面的现象。当润滑油不足或摩擦热使润滑油膜破坏时，粗糙的两金属表面直接接触，其实际接触面积极小，表面粗糙凸峰受载过大，致使接触应力超过材料的流动强度，在高温下峰顶塑性变形、粘着或焊联。在滑动过程中粘结点剪切撕脱，较软表面的材料脱离原表面，产生粘着磨损。

被撕脱下来的材料如粘在摩擦表面上，则形成凸起。若混在润滑油中，就成为颗粒磨料，会引起磨料磨损，并使温度剧增，甚至使零件迅速报废。

实践表明，一般脆性材料比塑性材料抗胶合能力高。当两种材料的性质和成分相近时则易发生胶合。例如，两摩擦表面都是高硬度镍钢，或是两个低硬度钢零件相配都易胶合；而高硬度钢对磷青铜或硬度不高的青铜、黄铜、轴承合金、铸铁及尼龙

等均能很好地工作；低硬度钢与轴承合金、铸铁相配工作也较好。

采用高粘度润滑油，或在润滑油中加混合的硫氯化合物或其它抗胶合添加剂，亦有利于防止胶合。

使摩擦副表面生成互溶性小、带有化合物的组织结构，可以防止粘着磨损。例如 Ag 和 Fe 互溶小；In 和 Pb 也不溶于 Fe；Sn 和 Sb 能与 Fe 生成化合物，所以它们都是很好的轴承材料。采用巴氏合金轴瓦镀 In 和 Ag，都能改善轴承的耐磨性。

### 3. 腐蚀磨损

在摩擦过程中，摩擦表面和周围介质发生化学或电化学反应，引起摩擦表面产生物质损失的现象，称为腐蚀磨损。常见的有氧化磨损和特殊介质磨损。钢铁零件常常氧化生成  $Fe_3O_4$ 、 $Fe_2O_3$  和  $FeO$ 。腐蚀严重。

润滑油里的酸性物质，很容易腐蚀含 Cd 或 Pb 等的滑动轴承材料。最初在轴承表面上生成黑点，逐渐扩展成海绵状空洞，在摩擦过程中成小块剥落。

但是，有些氧化膜或其它化合物膜的韧性较大，与基体金属结合强度较高，耐磨性也比基体金属高，或者是形成膜的速度大于磨损速度，从而能起到保护膜的作用。例如 Ni 与 Cr 两种金属在特殊介质作用下能形成保护膜；W 与 Mo 两金属在  $500^\circ\text{C}$  以上能生成保护膜，都具有较高的抗腐蚀磨损能力。

### 4. 接触疲劳磨损（又称点蚀）

在接触应力的重复作用下，零件在厚度约  $15\sim 25\mu\text{m}$  的表层可能产生微观的疲劳裂纹（图 9—3），裂纹沿着和表面成锐角的方向向内侵入，在达到某一不大的深度后，裂纹又向表面延伸、由于润滑油被渗进并封闭在裂纹内，所以作用在零件表面的外载荷就使裂纹内的油液形成高压，促使裂纹进一步扩张，终于

使表层金属沿 A—A 处呈小片状剥落下来，如此反复，结果在零件表面形成许多小坑，这种现象称为疲劳点蚀。设表面 1 的速度  $V_1$  大于表面 2 的速度  $V_2$ ，相应称表面 1 为追越面，表面 2 为被追越面。实验表明，点蚀总发生在被追越面上，而在追越面上则不易形成点蚀。

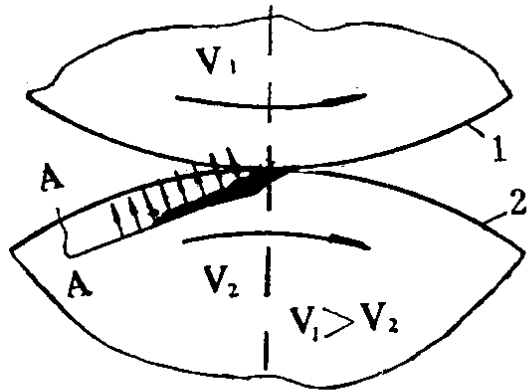


图9—3 接触表面产生微观裂纹示意图

点蚀后，工作零件外廓产生变形，使零件的动载荷及噪音都显著增加，并引起表面强烈磨损。

提高零件表面光洁度，会增强零件的抗点蚀能力。但表面光洁度超过  $\nabla 11$  后，效果就不再显著了；表面越硬，则抗点蚀的能力越高。但当硬度超过 HRC 62 后，抗点蚀的能力反而会下降。此外，提高润滑油粘度，严格控制润滑油的含水量，在润滑油中适当加入固体润滑剂（如  $MoS_2$ ）等，也能适当提高零件抗点蚀的能力。

#### 四、振动稳定性

一般高速机器容易发生振动，从而产生额外的变应力，影响工作质量，产生噪声，使零件早期疲劳断裂。当机器或零件的自振频率与周期性载荷的频率相等或相近时，就要发生共振，使振幅急剧增大，可能导致零件或整部机器迅速损坏。为了避免共振，必须使自振频率远离载荷的频率。为此，可用增加或减小零件的刚度，增添弹性元件，提高制造精度，进行动平衡等措施，以减少零件间的冲击和动载荷。

高速转动的零、部件，必要时应进行相应的振动计算。

## 五、耐热性

在高温环境中工作或由于磨擦热而形成高温的钢制零件，当温度在 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 以上时，引起热变形及附加热应力，强度极限和疲劳极限也随之下降，甚至出现蠕变。为此，应根据热平衡条件判断工作温度是否超过该零件的许可温度，并考虑是否需要采取降温措施。必要时应进行蠕变计算。

## 六、可靠性

可靠性一般用“可靠度”来衡量。“可靠度”是指机器或零件在规定工作条件，预定使用寿命内，能正常工作的概率。如承受额定动载荷的一大批同型号滚动轴承，工作到 $10^6$ 转时已有10%的轴承发生点蚀，则轴承的可靠度就是90%。

由概率论知，一般情况下，整部机器中各零件，其功能呈串联关系时，则整部机器的可靠度  $R$  是各零件可靠度  $R_1, R_2, \dots, R_n$  的乘积，即

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdots R_n \quad (9-8)$$

因此，机器中不允许有任一个过于薄弱的环节，最好由等可靠度的零件组成。由上式可看出零件数越多，机器的可靠性就越低。因此，在可能条件下，应尽力简化传动系统。

## 七、工艺性

除了满足上述各项工作能力准则之外，设计者还应使零件具有良好的工艺性。所谓良好的工艺性，就是在满足使用要求的前提下，根据具体生产条件，能用最低的成本和很容易的方法制造出来。为此，应注意以下几个方面：1) 零件形状简单合理；2) 适当选择表面光洁度和制造精度；3) 合理选择毛坯种类等。

## 八、标准化

零件标准化、部件通用化、产品系列化（简称“三化”），

便于广泛实行专业协作，不仅能大大降低成本，并且有利于迅速提高产品质量，使设计人员集中精力于产品的更新换代和处理好技术关键。因此，在设计时应尽量采用标准。只有当标准与设计要求之间有矛盾，且有充分理由时，才可以不采用标准。

另外，在设计时，还应优先考虑人身安全和工人的健康，使所设计的机器操作方便，使用舒适。

以上各项要求，有的是互相矛盾的（如重量轻与强度高，经济性与可靠性）。在设计不能全部满足时，应抓主要矛盾，满足主要要求，全面地辩证地衡量各项基本准则，完成好设计任务。

### § 9-3 机械零件常用材料

在设计机械零件时，选择材料是否妥当，对零件的成本、制造难易及使用维护等都有直接影响。

#### 一、机械制造中常用的材料

目前，可用作机械零件的材料至少有五百种以上。其中应用最广泛的是钢和铸铁，其次是有色金属。金属陶瓷材料、塑料、橡胶、皮革、石棉、木材、纸板、棉、丝、玻璃及复合材料等，也有一定的用量。

##### 1. 钢

钢是含碳量小于 2% 的铁碳合金。由于钢的强度较高，韧性及塑性较好，可以用热处理等方法改善其机械性能和加工性能。钢制零件的毛坯可用多种工艺方式（锻造、铸造、辗压等）获得，加之钢材品种较多，因此钢材的应用极为广泛。其中，碳钢的生产批量大、价格低、供应充分，对于一般机械零件都应当优先选用。用于机械零件的钢材有：



(1)普通碳素钢 这种钢材分为甲类、乙类和特类。以符号A、B、C表示。每种又按含碳量多少由0~7编号,号码越大,机械强度越高,但塑性也越低。甲类只保证机械性能而不保证化学成分。一般用来制造不经热处理而要求一定强度的零件,如制造受静应力作用的轻载机械零件。乙类是只保证化学成分而不保证机械性质。一般用来制造需热处理的零件。特类既保证机械性能又保证化学成分,但由于综合性能还不理想,价格又比甲类高,因此应用较少。在普通碳素钢中,以A3、A4、A5应用最广。

(2)优质碳素钢 这种钢的机械性能和化学成分可同时得到保证,其机械性能优于普通碳素钢。当零件受载较大,而且承受变应力或冲击载荷时,宜选用优质碳素钢。优质碳素钢又分为两组:第一组为普通含锰量;第二组为较高含锰钢。优质碳素钢的牌号以含碳量的万分数表示,如25、45、55号钢分别表示平均含碳量为0.25%、0.45%、0.55%。而50Mn表示含锰量较高(近似1%),其含碳量约为0.50%。

优质碳素钢的性质主要取决于含碳量,含碳量越高,强度也越高,但塑性随着下降。优质碳素钢在机械加工后可进行热处理,但是淬透性不佳(普通含锰量),淬火变形较大,一般还要进行回火处理。仅含锰量较高的钢仍属碳素钢,随着含锰量的增高,钢材的强度和耐磨性都有很大提高,并且有很好的可淬性,但韧性稍低。根据含碳量,优质碳素钢又分低碳钢( $C \leq 0.25\%$ )、中碳钢( $C = 0.3 \sim 0.5\%$ )和高碳钢( $C = 0.5 \sim 0.7\%$ )。

(3)合金钢 在优质碳素钢中加入合金元素,如镍、铬、钨、钼、锰、钒、铝、硅、钛等,能显著改善钢的机械性能和热处理性能,并随合金元素的不同而具有某些特殊的性质。例如,镍能提高强度而不降低钢的韧性;铬能提高硬度、高温强度、耐