

主编 邢冠梅 陈艳丽  
主审 谢黎明

(第2版)

# 机械原理与设计

J I X I E Y U A N L I Y U S H E J I



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

# 机械原理与设计

(第2版)

主 编 邢冠梅 陈艳丽  
主 审 谢黎明



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书根据教育部制定的“机械原理、机械设计课程教学基本要求”,并结合高等院校应用型、创新型人才培养目标的需求而编写。在编写过程中,对传统的教学内容进行整体优化与整合,注重内容的科学性、系统性和应用性。

本书共十六章,主要内容包括平面机构的运动简图及自由度计算、机械中的摩擦、效率和自锁、平面连杆机构、凸轮机构及其他常用机构、螺纹连接、带传动和链传动、齿轮传动、蜗杆传动、轮系、滑动轴承、滚动轴承、轴、联轴器和离合器、弹簧、机械的平衡与调速。同时还编写了《机械原理与设计习题及指导》,可与本教材配套使用。

本书主要用作高等工科院校机械类专业本科的机械原理和机械设计两门课程的教材、机械类相关专业本科的机械设计基础课程的教材,也可供高职高专院校相关专业的师生及其他相关技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械原理与设计/邢冠梅,陈艳丽主编. —2版.

—上海: 同济大学出版社, 2018. 8

ISBN 978 - 7 - 5608 - 8079 - 2

I. ①机… II. ①邢… ②陈… III. ①机械原理—高等学校—教材②机械设计—高等学校—教材 IV. ①TH111②TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 184870 号

---

---

## 机械原理与设计(第 2 版)

主 编 邢冠梅 陈艳丽

责任编辑 张崇豪 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)  
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)  
经 销 全国各地新华书店  
印 刷 浙江广育爱多印务有限公司  
开 本 787mm×1 092mm 1/16  
印 张 20.5  
字 数 512 000  
版 次 2018 年 8 月第 2 版 2018 年 8 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 8079 - 2

---

定 价 58.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

# 前 言

本教材按照教育部颁发的关于“机械原理、机械设计的教学基本要求”，并结合高等工科院校创新型、应用型的人才培养目标要求编写而成。

本教材在编写的过程中，本着拓宽专业基础知识、加强素质教育和应用能力培养的改革精神，以及近年来在教学改革中形成的教学思想和改革成果，对传统的教学内容进行整体优化与整合，注重加强基础、适度降低教材重心、淡化公式推导。在每一章节内容的组织和安排上，编者力求做到叙述简明、联系实际、便于学习。另外，为了增强学生创新意识的培养，本书还列举了很多与工程实际相关的实例，以激发学生对本课程的学习兴趣及创造性思维，并能够灵活运用所学理论知识解决工程实际问题。

本版是在第一版的基础上进行修订而成，主要从以下几项着手：

1. 更新了部分章节的内容。随着科学技术的发展，新技术、新理论、新标准不断更新出现，为了适应新的发展及时代的步伐，对原教材中部分章节的内容进行了更新。

2. 第一版教材在编写的过程中出现了部分内容重复、部分图片不够清晰、部分文字书写错误以及计算公式中部分参数代入错误，在新一版的教材中对上述错误进行修改及更正，使读者在阅读的过程中更加清晰。

本教材与《机械原理与设计习题及指导》相配套使用。

参加本教材修订的有邢冠梅、陈艳丽。本书由谢黎明教授担任主审。

在本书的编写过程中，参阅了其他相关教材、文献资料，在此对编著者表示诚挚的谢意！

由于编者的水平有限，教材中难免有错误及欠妥之处，恳切希望各位读者批评指正。

编 者

2018年5月

## 前言

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>第一章 绪 论</b> .....              | 1  |
| 1.1 课程研究的对象及内容 / 1                |    |
| 1.2 机械设计的基本要求和一般步骤 / 3            |    |
| 1.3 机械零件的主要失效形式、设计准则和一般过程 / 4     |    |
| 1.4 机械零件的强度 / 7                   |    |
| 1.5 机械零件的常用材料及选用原则 / 11           |    |
| 1.6 机械零件的工艺性及标准化 / 13             |    |
| <b>第二章 平面机构的运动简图及其自由度计算</b> ..... | 15 |
| 2.1 运动副及其分类 / 15                  |    |
| 2.2 平面机构运动简图的绘制 / 17              |    |
| 2.3 平面机构的自由度计算 / 19               |    |
| 2.4 速度瞬心法在机构速度分析中的应用 / 24         |    |
| <b>第三章 机械中的摩擦、效率和自锁</b> .....     | 27 |
| 3.1 机械中的摩擦 / 27                   |    |
| 3.2 机械的效率和自锁 / 33                 |    |
| <b>第四章 平面连杆机构</b> .....           | 38 |
| 4.1 铰链四杆机构的基本形式及其演化 / 38          |    |
| 4.2 平面四杆机构的基本特性 / 44              |    |
| 4.3 平面四杆机构的设计 / 48                |    |
| <b>第五章 凸轮机构及其他常用机构</b> .....      | 51 |
| 5.1 凸轮机构的应用和分类 / 51               |    |
| 5.2 从动件常用的运动规律 / 53               |    |



- 5.3 凸轮轮廓曲线的设计 / 58
- 5.4 凸轮机构基本尺寸的确定 / 63
- 5.5 其他常用机构 / 66

## 第六章 螺纹连接 ..... 72

- 6.1 螺纹的形成、主要参数和常用类型 / 72
- 6.2 螺纹连接的类型及标准连接件 / 75
- 6.3 螺纹连接的预紧与防松 / 77
- 6.4 单个螺栓连接的强度计算 / 81
- 6.5 螺纹连接件的材料和许用应力 / 85
- 6.6 螺栓组连接的设计计算 / 87
- 6.7 提高螺栓连接强度的措施 / 93

## 第七章 带传动和链传动 ..... 97

- 7.1 带传动的类型、结构和特点 / 97
- 7.2 带传动的工作情况 / 100
- 7.3 普通 V 带传动的设计计算 / 106
- 7.4 带传动的结构设计 / 118
- 7.5 链传动的类型、结构和特点 / 121
- 7.6 链传动的工作情况分析 / 126
- 7.7 滚子链链传动的设计 / 129
- 7.8 链传动的布置和张紧 / 134

## 第八章 齿轮传动 ..... 136

- 8.1 齿轮传动的特点与类型 / 136
- 8.2 齿廓啮合基本定律 / 137
- 8.3 渐开线齿廓及其啮合特点 / 139
- 8.4 渐开线标准齿轮的基本参数和几何尺寸 / 141
- 8.5 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动 / 143
- 8.6 渐开线圆柱齿轮的加工方法、根切和最少齿数 / 146
- 8.7 斜齿圆柱齿轮传动 / 149
- 8.8 直齿锥齿轮传动 / 153
- 8.9 轮齿的失效形式及设计准则 / 156
- 8.10 齿轮的材料、热处理 / 158
- 8.11 齿轮传动的计算载荷 / 160
- 8.12 标准直齿圆柱齿轮传动的强度计算 / 165
- 8.13 齿轮传动的设计参数、许用应力与精度选择 / 171
- 8.14 标准斜齿圆柱齿轮传动的强度计算 / 180



- 8.15 标准锥齿轮传动的强度计算 / 187
- 8.16 齿轮的结构设计 / 192
- 8.17 齿轮传动的润滑 / 196

## 第九章 蜗杆传动 ..... 198

- 9.1 蜗杆传动的特点和类型 / 198
- 9.2 普通圆柱蜗杆传动的主要参数及几何尺寸 / 202
- 9.3 普通圆柱蜗杆传动承载能力的计算 / 205
- 9.4 蜗杆传动的效率、润滑和热平衡计算 / 211

## 第十章 轮系 ..... 214

- 10.1 轮系及其分类 / 214
- 10.2 定轴轮系的传动比 / 215
- 10.3 周转轮系及其传动比 / 216
- 10.4 复合轮系的传动比 / 218
- 10.5 轮系的功用 / 220

## 第十一章 滑动轴承 ..... 223

- 11.1 概述 / 223
- 11.2 滑动轴承的类型、结构和材料 / 224
- 11.3 滑动轴承润滑剂的选择 / 228
- 11.4 非液体摩擦滑动轴承的设计计算 / 230

## 第十二章 滚动轴承 ..... 234

- 12.1 概述 / 234
- 12.2 滚动轴承的类型、代号和选择 / 235
- 12.3 滚动轴承的载荷及应力 / 241
- 12.4 滚动轴承尺寸的选择 / 244
- 12.5 滚动轴承的组合设计 / 253
- 12.6 滚动轴承的润滑和密封 / 259

## 第十三章 轴 ..... 263

- 13.1 轴的功用和分类 / 263
- 13.2 轴的材料 / 265
- 13.3 轴的结构设计 / 266
- 13.4 轴的强度计算 / 274
- 13.5 轴的刚度计算 / 278
- 13.6 轴毂连接 / 280



|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b>第十四章 联轴器和离合器</b> .....  | 287 |
| 14.1 概述 / 287              |     |
| 14.2 常用联轴器的类型及选择 / 288     |     |
| 14.3 离合器 / 294             |     |
| <b>第十五章 弹簧</b> .....       | 301 |
| 15.1 弹簧的类型与功用 / 301        |     |
| 15.2 弹簧的材料及许用应力 / 302      |     |
| 15.3 圆柱螺旋弹簧的设计计算 / 304     |     |
| <b>第十六章 机械的平衡与调速</b> ..... | 310 |
| 16.1 转动构件的平衡 / 310         |     |
| 16.2 机械运转速度波动的调节 / 313     |     |
| <b>参考文献</b> .....          | 318 |

## 第一章

## 绪 论

## 1.1 课程研究的对象及内容

人类由于生产、生活以及其他方面的需要,发明创造了各种各样的机械。在现代社会中,人们的工作质量和生活质量是与机械密切相关的。机械的设计、制造和使用水平,在一定程度上可以反映出一个国家的现代化发展水平。

我国是最早使用机械的国家之一。早在公元前 5 世纪,春秋时代的子贡就提出,机械是“用力寡而成功多的器械”。在现代,机械这个词是机器与机构的总称。机器是能执行机械运动并被用来变换或传递能量、物料与信息的装置。凡将其他形式的能量变换为机械能的机器称为原动机。例如:内燃机把热能变换为机械能;电动机将电能变换为机械能。凡利用机械能去变换或传递能量、物料、信息的机器称为工作机。如:发电机把机械能变换为电能;起重机传递物料;金属切削机床变换物料外形;计算机变换和传递信息。

机器的发展经历了一个由简单到复杂的过程。18 世纪蒸汽机的出现使机器在功能上开始具有完整的形态。如图 1-1 所示,一部完整的机器由动力部分、传动部分和执行部分三个基本部分所组成。

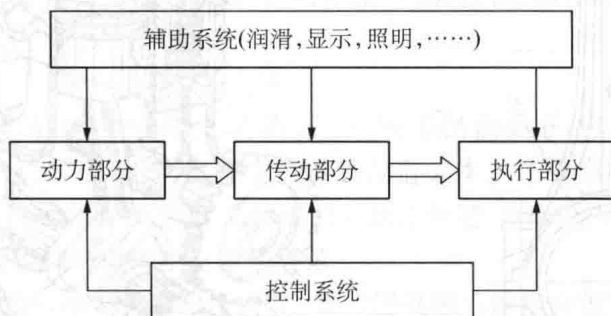


图 1-1 机器的组成

动力部分为机器工作提供动力源。从历史发展来说,人力和畜力是机器最早的动力源,后来人们使用水力和风力作为机器的动力源。工业革命后,蒸汽机(包括汽轮机)成为驱动机器工作的动力部分。现代的机器一般使用各种各样的电动机或内燃机作为其动力部分。



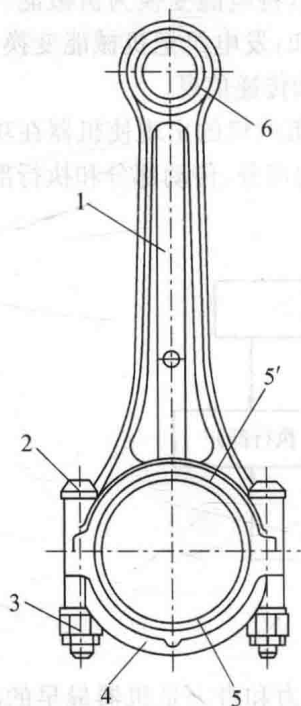
执行部分是机器完成预定工作任务的部分。一部机器可能有一个执行部分或多个执行部分。例如压路机只有压辊一个执行部分,而桥式起重机有三个执行部分:卷筒和吊钩部分执行上下吊放重物的任务,小车行走部分执行横向移动重物的任务,大车行走部分执行纵向移动重物的任务。

传动部分把机器动力部分所提供的运动形式、运动参数和动力参数,转变为执行部分所需要的运动形式、运动参数和动力参数。例如把旋转运动变为直线运动,把连续运动变为间歇运动,把高转速变为低转速,把小转矩变为大转矩等。

除了上述三个基本部分之外,一些复杂的机器还会不同程度地增加控制系统和辅助系统等其他部分。以汽车为例,发动机是它的动力部分;车轮、悬架系统、底盘及车身是它的执行部分;离合器、变速器、传动轴和差速器是它的传动部分。除此之外,转向盘及其转向装置、变速杆、制动和节气门构成它的控制系统;油量表、速度表、里程表等仪表构成它的显示系统;前后灯、仪表盘灯构成它的照明系统;转向信号灯和车尾红灯构成它的信号系统。此外还有后视镜、刮水器、车门锁等其他辅助装置部分。

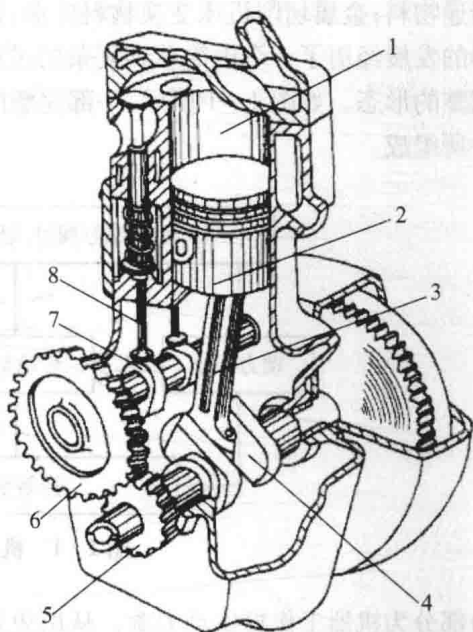
从制造的角度来看,任何机器都是由若干机械零件(如螺钉、弹簧、齿轮、轴等)装配而成的。机械零件(简称零件)是机器最基本的组成要素,它是制造的最小单元。

从运动的角度来看,机器是由若干可以相对运动的构件组装而成的。构件是机器中最小的运动单元:构件可以是单个零件。但是由于结构和工艺上的需要,常常将几个零件刚性地连接在一起,组成一个构件。如图 1-2 所示的内燃机连杆就是内燃机的一个构件,它由连杆体 1、螺栓 2、螺母 3、连杆盖 4、轴瓦 5 和 5'、轴套 6 等零件装配而成。这些零件之间没有相对运动,构成机器中的一个运动单元。



1—连杆体;2—螺栓;3—螺母;  
4—连杆盖;5,5'—轴瓦;6—轴套

图 1-2 内燃机连杆



1—气缸体;2—活塞;3—连杆;4—曲轴;5,6—齿轮;7—凸轮;8—顶杆

图 1-3 内燃机



从结构的角度来看,机器是由机构组成的,而机构则是由一些能相对独立运动的构件组成的。例如图 1-3 所示的单缸内燃机,它由气缸体 1、活塞 2、连杆 3、曲轴 4、齿轮 5 和 6、凸轮 7、顶杆 8 等构件组成。其中可以运动的活塞、连杆、曲轴和固定不动的气缸体构成曲柄滑块机构,该机构将活塞的往复运动变为曲柄的连续转动。凸轮、顶杆和气缸体构成凸轮机构,它将凸轮轴的连续转动变为顶杆有规律的间歇移动。齿轮 5 和 6 以及气缸体构成齿轮机构,它使曲轴的转速和凸轮轴的转速保持一定的比值。所谓机构,是能变换或传递运动与动力的、用可动连接组合而成,且有一个构件被固定的构件系统。

由于机器的主体是由机构组成,在研究构件的运动和受力情况时,机器与机构之间并无区别,因此,人们把机器与机构都称为机械。其实机构并不等于机器,因为机构只是一个构件系统,而机器可能有好几个构件系统,而且还可能包含电气、液压、气压、光学等其他系统;机构只能变换或传递运动和力,而机器除能变换或传递运动和力之外,还具有变换或传递能量、物料和信息的功能。

## 1.2 机械设计的基本要求和一般步骤

### 1.2.1 机械设计的基本要求

机械产品的功能、成本等很大程度上取决于设计工作的优劣,因此,不论是设计新产品还是对现有设备进行技术改造,设计人员都必须对设计过程的每个细节作周密、细致和深入的考虑。设计机械应满足的基本要求是:

#### 1. 使用要求

为了使所设计的机械具有预期的使用功能,首先必须选择适当的机构和适当的传动方案,以保证机械能够变换所需要的运动,并传递所需要的动力。

#### 2. 可靠性要求

为了使机械在预定的工作期间能够始终正常地工作,必须选择适当的零件材料并设计适当的结构尺寸,以保证零件具有足够的强度、刚度、抗磨性、耐热性和振动稳定性,避免零件过早破坏。

#### 3. 经济性要求

为了使机械具有较高的性能价格比,在保证工作可靠的前提下,应当尽量选择市场供应充分的材料并设计合理的零件结构,以降低机械的制造成本。还应当在设计方案中注意降低机械的能源消耗,使机械维护方便,提高机械的自动化程度,以降低机械的运行成本。

#### 4. 操作方便、安全性和环境保护方面的要求

在设计机械时,应当从使用者的角度出发,努力使机械的操作方便省力,不易疲劳,并针对其安全隐患,采取严格的防护措施。还应当避免或降低机械使用过程中带来的环境污染,如噪声污染、废弃物污染等。

除了以上要求之外,一些专用机械还有自己特殊的设计要求。例如:金属切削机床应能长期保持加工精度;钻探机械应便于搬运、安装和拆卸;食品、医药、印刷和纺织机械应能保持清洁,不得污染产品等。



在实际设计时,上述要求可能会发生矛盾,这时应分清主次,充分满足其主要要求,兼顾其次要要求。例如,机床的设计以性能好为其主要要求;起重机械、冶金机械和矿山机械的设计以保证安全为其主要要求;一般无特别要求的机械以经济性好为其主要要求。

### 1.2.2 机械设计的一般步骤

一般来说,一个机械产品的设计过程大致可以分为五个阶段:

#### 1. 计划阶段

根据社会需求进行调查,在对相关产品进行可行性分析并对有关技术资料进行研究的基础上,确定设计对象的主要性能指标和主要设计参数,编制设计任务书。

#### 2. 方案设计阶段

根据设计对象所要达到的性能指标和主要设计参数,确定它的工作原理,拟定总体设计方案,并绘制该方案的原理图或机构运动简图。

#### 3. 总体技术设计阶段

根据设计对象的工作原理和机构运动简图,进行构件的运动学分析和动力学分析,计算其运动参数和动力参数,绘制总体结构草图和控制系统、润滑系统、液压系统等其他辅助系统的系统图。

#### 4. 零件技术设计阶段

根据构件的运动参数和动力参数,对零件进行必要的强度、刚度、抗磨性、耐热性、振动稳定性计算,确定零件的材料、形状和尺寸,最后,绘制出总装配图、部件装配图以及零件工作图,编制出设计计算说明书、工艺说明书等各种技术文件。

#### 5. 改进设计阶段

根据设计图样和各种技术文件,试制产品的样机。通过实验,对产品样机进行综合评价并反复修改,使设计渐趋完善。最后整理完成各种设计技术文件。

在实际设计过程中,这五个阶段并不是截然分开的,各阶段的工作常常会交叉进行。其中总体技术设计阶段和零件技术设计阶段的联系更为紧密,可以把它们统称为技术设计阶段。设计人员在机械的设计中需要积极听取用户和工艺人员的意见,善于把设计信息以图形、文字和语言等各种形式与上级和同事进行沟通,及时发现和解决设计过程中出现的各种问题。

## 1.3 机械零件的主要失效形式、设计准则和一般过程

若机械中的某个零件不能正常工作,则称该零件失效。为了保证所设计的零件在预定的工作期间内能够正常工作,设计者需要事先了解零件在给定的工作条件下可能出现的失效形式。

### 1.3.1 机械零件的主要失效形式

#### 1. 整体断裂

零件在载荷的作用下,危险截面上的应力大于材料的极限应力而引起的断裂称为整体



断裂。如螺栓折断、齿轮断齿、轴断裂等。整体断裂分为静强度断裂和疲劳强度断裂。静强度断裂是由于静应力过大产生的,疲劳断裂是由于变应力的反复作用产生的。机械零件整体断裂中 80% 属于疲劳断裂。

## 2. 过大的变形

机械零件受载时将产生弹性变形。当弹性变形量超过许用范围时将使零件或机械不能正常工作。弹性变形量过大,将破坏零件之间的相互位置及配合关系,有时还会引起附加动载荷及振动。

塑性材料制作的零件,在过大载荷作用下会产生塑性变形,这不仅使零件尺寸和形状发生改变,而且使零件丧失工作能力。

## 3. 表面破坏

表面破坏是发生在机械零件工作表面上的一种失效形式。运动的工作表面一旦出现某种表面失效,都将破坏表面的精度,改变表面尺寸和形貌,使运动性能降低、摩擦加大、能耗增加,严重时导致零件完全不能工作。

表面破坏根据失效机理的不同,可分为点蚀、胶合、磨料磨损和腐蚀磨损四种情况。

## 4. 破坏正常工作条件引起的失效

有些零件只能在一定的工作条件下才能正常工作,若破坏了这些必备条件则将发生不同类型的失效。例如,受横向工作载荷的普通螺栓连接的松动失效等。

### 1.3.2 机械零件的设计准则

机械零件抵抗失效的能力,称为零件的工作能力。衡量零件工作能力的指标有强度、刚度、抗磨性、耐热性、振动稳定性等。设计人员在设计机械零件时,通常使用一些计算公式来确定零件的结构尺寸。这些公式能够判断零件是否具有足够的工作能力,因此把它们称为机械零件的工作能力计算准则。

#### 1. 强度计算准则

强度是指零件抵抗断裂、塑性变形以及表面损坏的能力。为了使零件具有足够的强度,设计时必须进行零件的强度计算,保证零件的强度计算准则得到满足,即保证

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{\lim}}{S} \text{ 或 } \tau \leq [\tau] = \frac{\tau_{\lim}}{S}$$

式中, $\sigma$  和  $\tau$  分别为零件的工作正应力和切应力; $[\sigma]$  和  $[\tau]$  分别为零件的许用正应力和许用切应力。

虽然增大零件截面尺寸和改用优质材料可以提高零件的强度,但是不能任意加大零件尺寸和滥用优质材料,以免造成浪费。

#### 2. 刚度计算准则

刚度是指零件抵抗弹性变形的能力。某些零件,例如机床主轴和电动机轴,当它们具有足够的刚度时才能正常工作。零件的刚度计算准则为

$$y \leq [y], \theta \leq [\theta] \text{ 或 } \varphi \leq [\varphi]$$

式中, $y$  为零件的挠度; $\theta$  为零件的偏转角; $\varphi$  为零件的扭转角; $[y]$ ,  $[\theta]$  和  $[\varphi]$  分别为零件的许用挠度、许用偏转角和许用扭转角。



提高零件刚度的措施有:改变零件的截面形状,增大零件的截面尺寸,缩小支承点之间的距离,采用有加强肋的结构设计等。

### 3. 抗磨性计算准则

抗磨性是指具有相对运动的两个零件表面的抗磨损能力。磨损是因摩擦导致零件表面材料逐渐丧失或迁移而形成的。磨损使零件的形状和尺寸逐渐发生变化,最终造成零件失效。为了使零件在预定工作期间内不因过度磨损而失效,需要对有些零件(例如滑动轴承)进行抗磨性计算。

影响零件磨损的因素很多。摩擦面之间压力的大小和性质、相对速度的大小、摩擦面的材质和加工质量、润滑剂的物理化学性质,这些因素都对零件表面的磨损速度有影响。但是还没有一个公认的计算公式能把这些影响定量地表述出来。目前实用的抗磨性计算准则是限制两个零件表面之间的压力  $p$ ,即

$$p \leq [p]$$

式中,  $[p]$  是根据实验或同类机械的使用经验所确定的许用压力。

当相对运动速度较高时,为了防止温升过高造成表面膜的破坏,还要对单位时间和单位接触面积内的摩擦发热量进行限制,即

$$pv \leq [pv]$$

式中,  $v$  是零件表面的相对滑动速度;  $[pv]$  是由实验或同类机械使用经验所确定的许用值。

由于可以假定设计对象与实验对象的摩擦系数  $f$  相同,所以上式中不含参数  $f$ 。

提高零件抗磨性的措施有:选用耐磨性好的材料,提高表面硬度,减小表面粗糙度值,采用更好的润滑剂或更有效的润滑方法等。

### 4. 寿命计算准则

腐蚀、磨损及疲劳是零件表面失效的主要形式,直接影响零件的寿命。由于腐蚀、磨损及疲劳的发生影响因素复杂,机理尚不清楚。因此,目前尚无法提出供工程应用的腐蚀和磨损寿命计算方法。至于疲劳寿命的计算,通常是以求出使用寿命时的疲劳极限或额定载荷作为疲劳寿命计算的依据。详细内容将在有关章节中阐述。

### 5. 振动稳定性计算准则

振动稳定性是指零件在周期性外力作用下不发生剧烈振动的能力。振动会在零件中产生额外的变应力,影响机械的工作质量,增大机械的噪声。发生共振的零件将丧失振动稳定性,并在短时间内损坏。因此,对于高速机械或高速运动的零件,应当进行振动分析与计算,使受激振零件的固有频率  $f_n$  远离其激振源的频率  $f_n$ 。一般须保证

$$f_n < 0.85f \text{ 或 } f_n > 1.15f$$

减轻振动的措施有:采用对称结构,减少悬臂长度,对转动零件进行平衡,设置弹簧、橡胶等缓冲零件,设置阻尼装置或吸振装置等。

在上述计算准则中,强度计算准则是最基本的计算准则。如果零件设计不满足强度计算准则,不仅零件不能正常工作,而且可能导致安全事故的发生。

## 1.3.3 机械零件设计的一般步骤

1. 根据零件的使用要求,选择零件的类型及结构形式。



2. 根据机器的运动学和动力学设计结果,计算作用在零件上的载荷。
3. 根据零件的工作条件,选择合适的材料和热处理方法。
4. 分析零件在工作时可能出现的失效形式,确定零件的设计计算准则,通过设计计算确定零件的基本尺寸。
5. 进行零件的结构设计,设计零件结构时,一定要考虑结构工艺性及标准化等原则要求。
6. 必要时应进行详细的校核计算,确保重要零件的设计可靠性。
7. 绘制零件的工作图,在工作图上标注详细的零件尺寸、配合尺寸、形位公差、表面粗糙度及技术条件等。
8. 编写设计计算说明书。

## 1.4 机械零件的强度

### 1.4.1 机械零件的载荷和应力

#### 1. 机械零件的载荷

载荷可根据其性质分为静载荷和变载荷。载荷大小或方向不随时间变化或变化缓慢时,称为静载荷,如自重、匀速转动时的离心力等;载荷的大小或方向随时间有明显的变化时,称为变载荷,如汽车悬架弹簧和自行车链条在工作时所受载荷等。

机械零部件上所受载荷还可分为:工作载荷、名义载荷和计算载荷。工作载荷是指机器正常工作时所受的实际载荷。由于零件在实际工作中,还会受到各种附加载荷的作用,所以工作载荷难以确定。当缺乏工作载荷的载荷谱,或难以确定工作载荷时,常用原动机的额定功率,或根据机器在稳定和理想工作条件下的工作阻力求出作用在零件上的载荷,称为名义载荷,用  $F$  和  $T$  分别表示力和转矩。若原动机的额定功率为  $P(\text{kW})$ 、额定转速为  $n(\text{r/min})$ ,则零件上的名义转矩为

$$T = 9\,550 \frac{P \eta_i}{n} (\text{N} \cdot \text{m})$$

式中  $i$ ——由原动机到所计算零件之间的总传动比;

$\eta$ ——由原动机到所计算零件之间传动链的总效率。

为了安全起见,强度计算中的载荷值,应考虑零件在工作中受到的各种附加载荷,如由机械振动、工作阻力变动、载荷在零件上分布不均匀等因素引起的附加载荷。这些附加载荷可通过动力学分析或实测确定。如缺乏资料,可用一个载荷系数  $K$  对名义载荷进行修正,而得到近似的计算载荷,用  $F_{\text{ca}}$  或  $T_{\text{ca}}$  表示,即

$$F_{\text{ca}} = KF \text{ 或 } T_{\text{ca}} = KT$$

机械零件设计时常按计算载荷进行计算。

#### 2. 机械零件的应力

在使用强度计算准则设计机械零件时,需要计算出零件中的应力。应力是由作用在零

件上的载荷引起的。

载荷引起的应力可以分为静应力和变应力两类。大小和方向不随时间变化或者变化很小的应力称为静应力。静应力只能由静载荷产生,例如蒸汽压力在锅炉壳体中引起的应力就属于静应力。

大小和方向随时间变化的应力称为变应力。变载荷肯定产生变应力。静载荷也会产生变应力。例如作用在转动心轴上的载荷虽然是静载荷,但是产生的应力却属于变应力。

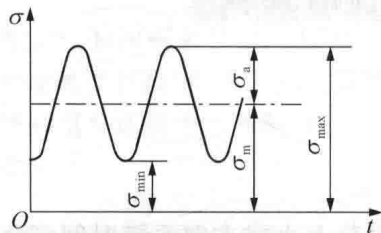
图 1-4 中,  $\sigma_{\max}$  为最大应力,  $\sigma_{\min}$  为最小应力,  $\sigma_m$  为平均应力,  $\sigma_a$  为应力幅,由图可知它们的关系为

平均应力

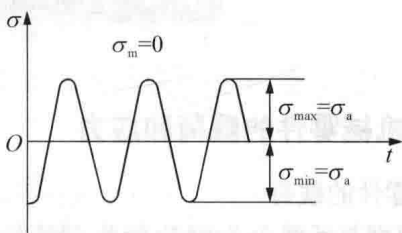
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

应力幅

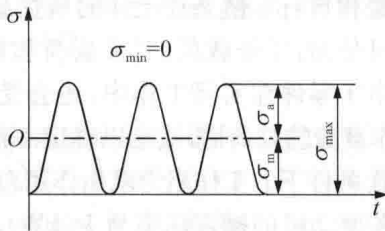
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$



(a) 非对称循环变应力



(b) 对称循环变应力



(c) 脉动循环变应力

图 1-4 应力的种类

最小应力与最大应力之比,用来表示变应力变化的情况,称为变应力的循环特性,通常用  $r$  表示。即

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

对于对称循环变应力:  $r = -1$ ,  $\sigma_m = 0$ ,  $\sigma_a = \sigma_{\max} = |\sigma_{\min}|$ ,如图 1-4(b) 所示。脉动循环变应力:  $r = 0$ ,  $\sigma_{\min} = 0$ ,  $\sigma_a = |\sigma_m| = \sigma_{\max}/2$ ,如图 1-4(c) 所示。静应力:  $r = 1$ ,  $\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$ ,  $\sigma_a = 0$ 。

### 1.4.2 静应力下的许用应力

静应力下,零件材料有两种损坏形式:断裂和塑性变形。对于塑性材料,可按不发生塑性变形的条件进行计算。这时应取材料的屈服极限  $\sigma_s$  作为极限应力,故许用应力为



$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{S} = \sigma_s / S$$

对于用脆性材料制成的零件,应取强度极限  $\sigma_b$  作为极限应力,故许用应力为

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{S} = \sigma_b / S$$

### 1.4.3 变应力下的许用应力

在变应力条件下,零件的损坏形式是疲劳断裂。疲劳断裂具有以下特征:1)疲劳断裂的最大应力远比静应力下材料的强度极限低;2)不管是脆性材料或塑性材料,其疲劳断口均表现为无明显塑性变形的脆性突然断裂;3)疲劳断裂是损伤的积累,它的初期现象是在零件表面或表层形成微裂纹,这种微裂纹随着应力循环次数的增加而逐渐扩展,直至余下的未裂开的截面积不足以承受外载荷时,零件就突然断裂。在零件的断口上可以清晰地看到这种情况。如图 1-5 所示为轴的弯曲疲劳断裂的断口,微裂纹常起始于应力最大的断口周边上。在断口上明显地有两个区域:一个是在变应力重复作用下裂纹两边相互摩擦形成的表面光滑区;一个是最终发生脆性断裂的粗粒状区。

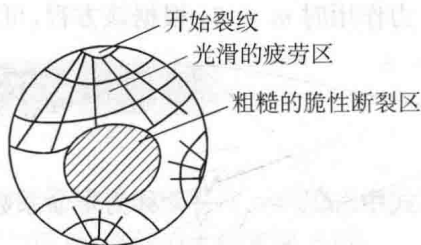


图 1-5 疲劳断裂的裂口

如图 1-5 所示为轴的弯曲疲劳断裂的断口,微裂纹常起始于应力最大的断口周边上。在断口上明显地有两个区域:一个是在变应力重复作用下裂纹两边相互摩擦形成的表面光滑区;一个是最终发生脆性断裂的粗粒状区。

疲劳断裂不同于一般静力断裂,它是损伤到一定程度即裂纹扩展到一定程度后才发生的突然断裂。所以疲劳断裂与应力循环次数(即使用期限或寿命)密切相关。

#### 1. 疲劳曲线

材料发生疲劳破坏时的应力水平称为材料的疲劳极限,材料的疲劳极限通过试件的疲劳试验来确定,由材料力学可知,表示应力  $\sigma$  与应力循环次数  $N$  之间的关系曲线称为疲劳曲线。

如图 1-6 所示表示试件在循环特性为  $r$  的变应力作用下的疲劳曲线,其中如图 1-6(a)所示为塑性金属材料的疲劳曲线,曲线上任一点的横坐标为循环次数  $N$ ,纵坐标为与该循环次数相对应的疲劳极限  $\sigma_{rN}$ 。图中的纵轴为试件加载的应力水平  $\sigma$ 。从图中可以看出,应力水平越低,试件能经受的循环次数越多,对于一般的铁碳合金,当循环次数  $N$  超过某一数值  $N_0$  以后,疲劳曲线与横轴几乎平行。因此当应力水平等于或低于与  $N_0$  对应的疲劳极限  $\sigma_{rN_0}$  时,试件即使经受“无限”次应力循环也不会发生疲劳破坏,即具有“无限寿命”。这里的  $N_0$  称为

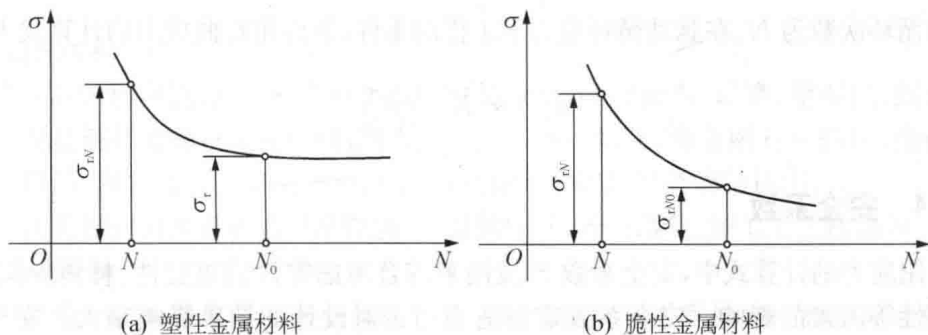


图 1-6 疲劳曲线