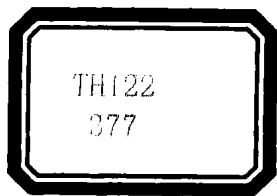
The cover features a dark blue background with faint technical drawings of mechanical parts. In the upper left, there is a large gear with a dark center and a golden-brown outer ring. Below it, a silver-colored bolt with a hexagonal head is shown diagonally. The background contains various technical annotations such as  $0^\circ X 45^\circ$ ,  $1:120$ ,  $\approx 10$ ,  $R_2$ , and  $d_1$ .

# 机械设计

(修订版)

陈铁鸣 王连明 王黎钦 主编

哈尔滨工业大学出版



# 机 械 设 计

(修 订 版)

陈铁鸣 王连明 王黎钦 主编

哈尔滨工业大学出版社

·哈尔滨·

## 内 容 简 介

本书以培养学生综合设计能力为主线,突出了设计性、实践性和综合性。本书按机械设计总论、常用机械零部件设计和机械系统设计三部分,设有:绪论,机械及机械零件的设计基础,机械设计方法简介,摩擦、磨损和润滑,螺纹连接与螺旋传动,轴毂连接,挠性件传动,齿轮传动,蜗杆传动,轴,滚动轴承,滑动轴承,联轴器、离合器及制动器,弹簧,机架零件和机械系统设计等十六章。为便于学生学习专业英语及阅读专业文献,本书每章前有中英文对照的内容提要,在全书最后有机械设计常用中英文词汇表。

本书主要用作高等工业学校机械类专业教材,也可供其他有关专业的师生和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械设计/陈铁鸣等主编.—修订版.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003.8

ISBN 7-5603-0527-X

I.机… II.陈… III.机械设计-高等学校-教材 IV.TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 071077 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006  
传 真 0451-86414749  
印 刷 肇东粮食印刷厂  
开 本 787×1092 1/16 印张 21.5 字数 517 千字  
版 次 2003 年 8 月第 3 版 2003 年 8 月第 3 次印刷  
书 号 ISBN 7-5603-0527-X/TH·36  
印 数 11 001~16 000  
定 价 26.00 元

# 前 言

本书是在保留过去《机械设计》教材特色的基础上,根据高等工业学校机械类专业“机械设计课程教学基本要求”和教育部组织实施的“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的要求,结合近年来的教学改革实践经验修订而成的。

本书的编写遵循了以下原则:

(1)以培养学生的综合机械设计能力为主线,以机械设计的基本理论、基本知识和基本设计计算方法为主要内容,突出设计性、实践性和综合性,以利于培养学生的创新精神和实践能力。

(2)引入整机设计的概念,重视培养学生总体方案设计能力和结构设计能力。

(3)适应科学技术的发展,适度反映一些本领域中的新知识、新理论和新方法。

(4)对传统教学内容,着重阐明概念,讲清思路,简化理论推导,强调在工程设计中的应用。

(5)为提高学生的专业外语水平,营造外语学习的良好氛围,使外语学习不断线,在各章都编写出中英文对照的“内容提要”,书尾编写了“机械设计常用中英文词汇表”。

(6)注意与先修课、后续课的联系与衔接。

(7)采用最新标准和规范。

(8)为适应不同授课对象的需要,编写部分选讲内容(书中带“\*”部分)。

(9)更正了原书中的文字、公式、图表中的错误和遗漏。

参加本书编写工作的有:陈铁鸣(第五章、第六章、第七章的链传动部分)、王连明(第一章、第二章、第八章、第九章)、王黎钦(第三章、第十六章)、荣涵锐(第十章、第十一章、第十五章)、姜洪源(第七章的带传动部分、第十三章、第十四章)和曲建俊(第四章、第十二章)。全书由陈铁鸣、王连明和王黎钦主编,王黎钦还负责对全书各章的“内容提要”进行了英文翻译和译文修改及“中英文机械设计常用词汇表”的编汇工作。

本书在编写过程中,哈尔滨工业大学机械设计系许多老师和许多使用过原书的兄弟院校的同行都提出了许多宝贵的意见和建议,编者对此表示诚挚的感谢。

由于编者水平所限,难免仍有缺点和疏漏,恳切希望广大读者给予批评指正。

编 者  
2003 年 4 月

# 目 录

## 第一章 绪论

- 1.1 机械的组成及本课程研究的对象 ..... (1)
- 1.2 本课程的性质、地位和任务 ..... (2)
- 1.3 本课程的特点和学习方法 ..... (2)

## 第二章 机械及机械零件的设计基础

- 2.1 设计机械时应满足的基本要求和一般步骤 ..... (4)
- 2.2 机械零件的载荷和应力 ..... (5)
- 2.3 机械零件材料的选用原则 ..... (10)
- 2.4 机械零件的结构工艺性 ..... (11)
- 2.5 机械设计中的标准化 ..... (15)
- 思考题 ..... (15)

## 第三章 机械零件的设计方法简介

- 3.1 机械零件的常见失效形式和设计准则 ..... (16)
- 3.2 设计机械零件时应满足的基本要求及其设计方法 ..... (19)
- 3.3 机械零件的强度和刚度设计方法 ..... (21)
- 3.4 机械零件的精度设计方法 ..... (21)
- 3.5 机械零件的动态性能设计方法 ..... (23)
- 3.6 机械零件的可靠性设计方法 ..... (25)
- 3.7\* 机械性能的有限元分析方法 ..... (32)

## 第四章 摩擦、磨损和润滑

- 4.1 摩擦 ..... (37)
- 4.2 磨损 ..... (40)
- 4.3 润滑剂和添加剂 ..... (42)
- 思考题 ..... (48)

## 第五章 螺纹连接与螺旋传动

- 5.1 螺纹 ..... (51)
- 5.2 螺纹连接的基本类型和标准螺纹连接件 ..... (53)
- 5.3 螺纹连接的预紧 ..... (55)
- 5.4 螺纹连接的防松 ..... (56)
- 5.5 单个螺栓连接的强度计算 ..... (59)
- 5.6 螺栓组连接设计 ..... (66)
- 5.7 提高螺栓连接强度的措施 ..... (73)
- 5.8 螺旋传动 ..... (75)

思考题与习题 .....	(81)
<b>第六章 轴毂连接</b>	
6.1 键连接 .....	(83)
6.2 花键连接 .....	(86)
6.3* 胀紧连接 .....	(87)
6.4* 其他形式轴毂连接 .....	(87)
思考题与习题 .....	(88)
<b>第七章 挠性件传动</b>	
7.1 带传动概述 .....	(90)
7.2 V带的结构、型号和基本尺寸 .....	(91)
7.3 带传动的理论基础 .....	(93)
7.4 普通V带传动的设计计算 .....	(100)
7.5 V带轮 .....	(104)
7.6 带的张紧 .....	(106)
7.7 同步带传动简介 .....	(107)
7.8 链传动概述 .....	(108)
7.9 传动链和链轮 .....	(109)
7.10 链传动的运动特性 .....	(112)
7.11* 滚子链传动的设计计算 .....	(115)
7.12* 链传动的布置和润滑 .....	(119)
思考题与习题 .....	(120)
<b>第八章 齿轮传动</b>	
8.1 概述 .....	(122)
8.2 齿轮传动的失效形式和设计准则 .....	(123)
8.3 齿轮材料及其热处理 .....	(125)
8.4 齿轮传动的计算载荷 .....	(127)
8.5 标准直齿圆柱齿轮传动的强度计算 .....	(131)
8.6 标准斜齿圆柱齿轮传动的强度计算 .....	(137)
8.7 圆柱齿轮传动的设计 .....	(141)
8.8* 变位齿轮传动强度计算的特点 .....	(152)
8.9 直齿圆锥齿轮传动的强度计算 .....	(153)
8.10 齿轮的结构设计 .....	(159)
8.11 齿轮传动的润滑 .....	(161)
思考题与习题 .....	(163)
<b>第九章 蜗杆传动</b>	
9.1 概述 .....	(165)
9.2 普通圆柱蜗杆传动的主要参数和几何尺寸计算 .....	(168)
9.3 蜗杆传动的失效形式、设计准则和材料选择 .....	(173)
9.4 普通圆柱蜗杆传动的强度计算 .....	(173)

9.5 蜗杆传动的效率、润滑和热平衡计算 .....	(176)
9.6 蜗杆和蜗轮的结构 .....	(179)
9.7* 其他蜗杆传动简介 .....	(181)
思考题与习题 .....	(183)
<b>第十章 轴</b>	
10.1 概述 .....	(185)
10.2 轴的材料 .....	(188)
10.3 轴径的初步估算 .....	(188)
10.4 轴的结构设计 .....	(190)
10.5 轴的强度校核计算 .....	(195)
10.6 轴的刚度计算 .....	(198)
思考题与习题 .....	(205)
<b>第十一章 滚动轴承</b>	
11.1 滚动轴承的构造的特点 .....	(207)
11.2 滚动轴承的类型和选择 .....	(208)
11.3 滚动轴承代号 .....	(210)
11.4 滚动轴承的失效形式和计算准则 .....	(214)
11.5 滚动轴承的寿命计算 .....	(215)
11.6 滚动轴承的静强度计算 .....	(220)
11.7 滚动轴承的极限转速 .....	(221)
11.8 滚动轴承部件结构设计 .....	(222)
11.9 减速器输出轴部件设计 .....	(227)
思考题与习题 .....	(233)
<b>第十二章 滑动轴承</b>	
12.1 概述 .....	(235)
12.2 滑动轴承的结构型式 .....	(236)
12.3 轴瓦的材料和结构 .....	(238)
12.4 非液体摩擦滑动轴承的计算 .....	(243)
12.5 液体动压形成原理及基本方程 .....	(245)
12.6 液体动压径向滑动轴承的计算 .....	(248)
12.7 多油楔动压轴承简介 .....	(258)
12.8 滑动轴承用润滑剂与润滑装置 .....	(261)
思考题与习题 .....	(265)
<b>第十三章 联轴器、离合器和制动器</b>	
13.1 概述 .....	(266)
13.2 联轴器 .....	(267)
13.3 离合器 .....	(272)
13.4* 制动器 .....	(277)
思考题与习题 .....	(279)

<b>第十四章 弹簧</b>	
14.1 概述	(280)
14.2 弹簧的材料、许用应力及制造	(280)
14.3 圆柱压缩(拉伸)螺旋弹簧的设计计算	(284)
14.4 受交变载荷的弹簧设计	(292)
思考题与习题	(294)
<b>第十五章 机架零件</b>	
15.1 概述	(295)
15.2 计算载荷、剖面形状及壁厚	(296)
15.3 机架零件的结构设计	(298)
思考题	(301)
<b>第十六章 机械系统设计</b>	
16.1 机械系统设计的任务和目标	(302)
16.2 常用动力机械的特性及其选配	(305)
16.3 执行机构及其创新设计	(310)
16.4 传动子系统的方案设计及评价	(313)
16.5 机械系统的匹配性设计	(315)
16.6 机械系统的总体布置	(319)
思考题与习题	(321)
<b>附录 机械设计常用中英文词汇表</b>	(322)
<b>参考文献</b>	(332)



# 第一章 绪 论

**内容提要** 本章主要介绍本课程的学习内容、性质和任务,并结合课程的特点介绍学习本课程的一般方法。学习本章的重点是了解本课程的性质、特点和学习方法。

**Abstract** This chapter covers the topics of contents, natures and tasks included in the course of Machine Design, and introduces the learning methods based on the course characteristics. The main points are the knowledge of the course natures, features and learning methods that the students should understand.

## 1.1 机械的组成及本课程研究的对象

人类在生产劳动中,创造出了各种各样的机械设备,如机床、汽车、起重机、运输机、缝纫机、洗衣机等。机械既能承担人力所不能或不便进行的工作,又能较人工生产大大提高劳动生产率和产品质量,同时还便于集中进行社会化大生产。因此,生产的机械化和自动化已成为反映当今社会生产力发展水平的重要标志。改革开放以来,我国社会主义现代化建设在各个方面都取得了长足的发展,国民经济的各个生产部门迫切要求实现机械化和自动化。我国的机械产品正面临着更新换代的局面,要求上质量、上水平和上品种。这一切都对机械工业和机械设计工作者提出了更新、更高的要求。而本课程就是为培养机械工程师而设置的一门重要课程。随着国民经济的进一步发展,本课程在社会主义建设中的地位 and 作用将日益显得重要。

### 1.1.1 机械的组成

生产和生活中的各种各样机械设备,尽管它们的构造、用途和性能千差万别,但一般都是由原动机、传动装置、工作机和控制系统四大基本部分组成的。例如,图 1.1 所示的带式运输机就是由电动机(原动机),V 带传动、齿轮传动及联轴器(传动装置),卷筒、输送带(工作机)和控制系统所组成。

原动机是机械设备完成其工作任务的动力来源,最常用的是各类电动机;传动装置是将原动机的运动和动力传递给工作机的装置;工作机则是直接完成生产任务的执行装置,其结构形式取决于机械设备本身的用途;而控制系统是根据机械系统的不同工况对原动机、传动装置和工作机实施控制的装置。

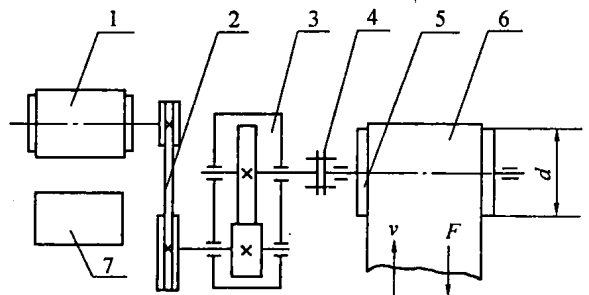


图 1.1 带式运输机

1—电动机;2—V 带传动;3—齿轮传动;4—联轴器;  
5—卷筒;6—输送带;7—控制系统

从制造和装配方面来分析,任何机械设备都是由许多机械零、部件组成的。机械零件是机械制造过程中不可分拆的最小单元,而机械部件则是机械制造过程中为完成同一目的而由若干协同工作的零件组合在一起的组合体。凡在各类机械中经常被用到的零、部件称为通用零、部件,例如,螺栓、齿轮、轴、滚动轴承、联轴器、减速器等;而只有在特定类型的机械中才能用到的零、部件称为专用零、部件,例如,涡轮机上的叶片、往复式活塞内燃机的曲轴、飞机的起落架、机床的变速箱等。

### 1.1.2 本课程研究的对象

本课程主要从研究一般机械传动装置的设计出发,研究机械中具有—般工作条件和常用参数范围内的通用机械零、部件的工作原理、结构特点、基本设计理论和设计计算方法。

## 1.2 本课程的性质、地位和任务

本课程是一门设计性的技术基础课。它综合运用工程图学、工程力学、金属工艺学、机械工程材料与热处理、公差与技术测量和机械原理等先修课程的知识 and 生产实践经验,解决通用机械零、部件的设计问题,使学生在设计一般机械传动装置或其他简单的机械方面得到初步训练,为学生进一步学习专业课程和今后从事机械设计工作打下基础。因此,本课程在机械类及近机械类专业教学计划中具有承前启后的重要作用,是一门主干课程。

本课程的主要任务是培养学生:

- (1)初步树立正确的设计思想。
- (2)掌握设计或选用通用机械零、部件的基本知识、基本理论和方法,了解机械设计的一般规律,具有设计一般机械传动装置和一般机械的能力,具有一定的工程意识和创新能力。
- (3)具有计算、绘图、查阅与运用有关技术资料的能力。
- (4)掌握本课程实验的基本知识,获得实验技能的基本训练。
- (5)对机械设计的新发展有所了解。

## 1.3 本课程的特点和学习方法

本课程和基础理论课程相比较,是一门综合性、实践性很强的设计性课程。因此,学生在学习时必须掌握本课程的特点,在学习方法上应尽快完成由单科向综合、由抽象向具体、由理论到实践的思维方式的转变。通常在学习本课程时应注意以下几点:

(1)要理论联系实际。本课程研究的对象是各种机械设备中的零、部件,只有从整机机械分析入手,才能设计出满足实际要求的机械零、部件,才能设计出性能优异的机械设备。因此,无论是学习课程还是进行机械设计,都必须了解机械的工作条件和要求,从方案选择到参数选择和结构设计都要联系实际。

(2)要抓住设计这条主线,掌握机械零、部件的设计规律。本课程的内容看似杂乱无章,不同的机械零、部件,在工作原理、材料、结构特点、载荷与应力、失效形式与设计准则等方面都有很大的差异,但是在设计时却都遵循相同的设计规律,只要抓住设计这条主线,就能把本课程的各章内容贯串起来。因此,学习本课程时一定要抓住设计这条主线,熟练掌握设计

机械零、部件的一般规律。一般情况下设计的程序和要考虑的问题是:

① 研究要设计的零、部件的工作原理、类型、特点及其适用场合;

② 对零、部件的工作情况进行分析,如受力分析、应力分析等;

③ 研究零、部件的失效形式和防止发生失效的设计计算准则,并导出相应的设计计算公式或校核计算公式;

④ 选择合适的材料及热处理方式,确定材料的机械性能(主要是许用应力);

⑤ 按设计公式确定该零、部件的主要几何参数和尺寸,或按校核公式校核已经确定的几何参数和尺寸是否满足设计计算准则(主要是强度条件);

⑥ 进行零、部件的结构设计,绘制零、部件工作图。

(3) 要努力培养解决工程实际问题的能力。多因素的分析、设计参数多方案的选择、经验公式或经验数据的选用及结构设计,在解决工程实际问题中是经常遇到的问题,也是学生在学习本课程中的难点。因此,在学习本课程时一定要尽快适应这种情况,按解决工程实际问题的思维方法,努力培养自己的机械设计能力,特别是要学会不断修改、逐步完善的设计方法。例如,按齿面接触疲劳强度设计直齿圆柱齿轮传动时,算出小齿轮分度圆直径  $d_1 = 37.5 \text{ mm}$ ,而  $d_1 = mZ_1$ ,若初选齿数  $Z_1 = 21$ ,则模数  $m = d_1/Z_1 = 37.5/21 = 1.78 \text{ mm}$ ,圆整为标准模数,  $m = 2.0 \text{ mm}$ ,这时  $d_1 = mZ_1 = 2 \times 21 = 42 \text{ mm} > 37.5 \text{ mm}$ ,显然满足强度条件要求,但是传动尺寸却增大了,传动装置的成本也提高了,可见初选的齿数不合适。应将  $Z_1$  减小(但  $Z_1 \geq Z_{\min}$ ),使计算出的模数值接近于 2。故重取  $Z_1 = 19$ ,  $m = 37.5/19 = 1.97 \text{ mm}$ ,圆整为  $m = 2.0 \text{ mm}$ ,则  $d_1 = mZ_1 = 2 \times 19 = 38 \text{ mm}$ ,此数值既大于  $37.5 \text{ mm}$ ,又接近于  $37.5 \text{ mm}$ ,这样的设计才合理。此外,还要注重培养结构设计能力,这就要求学生要多看(机械实物或模型)、多想、多问、多练,逐步积累结构设计知识,逐步提高结构设计能力。

(4) 要综合运用先修课程的知识,解决工程实际问题。本课程讲授的各种零、部件的设计,从分析研究到设计计算,直至完成零、部件工作图,要用到多门先修课程的知识,因此,在学习本课程时必须及时复习先修课程的有关内容,做到融会贯通、综合应用。

## 第二章 机械及机械零件的设计基础

**内容提要** 本章从整机设计的总要求出发,重点介绍了机械及机械零件设计的一些共性问题。这些问题主要有:设计机械时应满足的基本要求和一般步骤、机械零件的载荷和应力、机械零件的材料和结构工艺性、机械设计中的标准化等。

**Abstract** In this chapter, the common problems encountered in designing a machine and machine components are introduced according to the general design requirements of a mechanical system. These problems consist of the basic requirements and general procedures in designing, load and stress analyses of machine components, materials and technical feasibility of designed structures, standardization in machine design and so on.

### 2.1 设计机械时应满足的基本要求和一般步骤

#### 2.1.1 设计机械时应满足的基本要求

根据生产及生活的需要不同,设计的机械种类也不同,但设计时应满足的基本要求却往往是相同的,这些基本要求是:

##### 1. 使用功能要求

就是要求所设计的机械应具有预定的使用功能,既能保证执行机构实现所需的运动,又能保证组成机械的零、部件工作可靠,有适当的使用寿命,而且使用、维修方便。这是机械设计的基本要求。

##### 2. 工艺性要求

所设计的机械无论总体方案还是各部分结构方案,在满足使用功能要求的前提下,应尽量简单、实用,在毛坯制造、机械加工、装配、维修诸方面都具有良好的工艺性,合理地选用材料,尽可能地选用标准件。

##### 3. 经济性要求

经济性要求是一个综合指标,它体现于机械的设计、制造及使用的全过程中,因此,设计机械时应全面综合地进行考虑。

提高设计、制造经济性的措施主要有:运用现代设计方法,使设计参数最优化;推广标准化、通用化和系列化;采用新工艺、新材料、新结构;改善零、部件的结构工艺性等。

提高使用经济性的措施主要有:选用效率高的传动系统和支承装置,以降低能源消耗;提高机械生产的机械化和自动化水平,以提高生产率;采用适当的防护及润滑,以延长机械的使用寿命等。

##### 4. 其他要求

例如,劳动保护的要求(应使机械的操作方便、安全,应使操作者和机械有良好的工作环

境)、便于装拆和运输的要求及长期保持工作精度的要求等。

### 2.1.2 设计机械的一般步骤

设计机械时应按实际情况确定设计方法和步骤,但一台新的机械设备从确定设计任务书到形成产品,基本上都要经过以下几个阶段:

#### 1. 计划阶段

计划阶段的任务是在调查研究的基础上,根据生产或生活的需要,制定出设计对象的功能要求、主要技术指标和限制条件,完成设计任务书。

#### 2. 方案设计阶段

在这一阶段中充分地表现出了机械设计具有多个解(方案)的特点,设计者要根据设计任务书的要求,本着技术先进、使用可靠、经济合理的原则,拟定出几种不同的原理设计方案——原理图或机构运动简图,并从技术方面和经济方面进行综合评价,从中选出最佳方案。

设计者一定要正确处理继承与创新的关系,同类机械成功的经验应当继承,原先薄弱环节及不符合现有任务要求的部分应当改进或做根本性改变。

#### 3. 技术设计阶段

技术设计阶段的任务主要是:

(1)通过对机械所进行的运动学、动力学分析计算和零、部件的工作能力设计,确定主要零、部件的基本尺寸。

(2)根据已确定的结构方案和主要零、部件的基本尺寸,设计机械的装配工作图和零件工作图。

在这一阶段中,设计者既要重视理论设计计算,更要注重结构设计。

#### 4. 技术文件编制阶段

在完成技术设计后,应编制技术文件,主要有:设计计算说明书、使用说明书、标准件明细表等。这些是对机械进行生产、检验、安装、调试、运行、维护的依据。

#### 5. 技术审定和产品鉴定阶段

组织专家和有关部门对设计资料进行审定,认可后即可进行样机试制,样机运行后再进行鉴定,以考核样机的性能是否符合设计任务书的各项规定。鉴定通过后,经过小批量生产,在进一步考察的基础上改进原设计,定型后即可根据市场需求量大小决定一定批量的生产。到此机械设计工作才告一段落。

## 2.2 机械零件的载荷和应力

### 2.2.1 载荷

#### 1. 静载荷与变载荷

作用在机械零件上的载荷,按它的大小和方向是否随时间变化分为静载荷与变载荷两类。不随时间变化或变化缓慢的载荷称为静载荷,如物体重力;随时间作周期性变化或非周期性变化的载荷称为变载荷。前者如内燃机等往复式动力机械的曲轴所受的载荷,后者如

承受车身质量的悬挂弹簧所受的载荷。

## 2. 名义载荷与计算载荷

根据原动机或工作机的额定功率计算出的作用于机械零件上的载荷称为名义载荷。它是机器在平稳工作条件下作用在机械零件上的载荷,它没有反映载荷的不均匀性及其他影响零件受载的因素。在设计计算时,常用载荷系数  $K$  来考虑这些因素的综合影响。载荷系数  $K$  与名义载荷  $F$  的乘积称为计算载荷  $F_{ca}$ ,即

$$F_{ca} = KF \quad (2.1)$$

### 2.2.2 应力

#### 1. 静应力与变应力

大小和方向不随时间变化或变化缓慢的应力称为静应力(图 2.1(a))。零件在静应力作用下可能产生断裂或塑性变形。

大小和方向随时间变化的应力称为变应力(图 2.1(b))。变应力可以由变载荷产生,也可以由静载荷产生,例如,在静载荷作用下的转轴中的应力。零件在变应力作用下可能产生疲劳破坏。

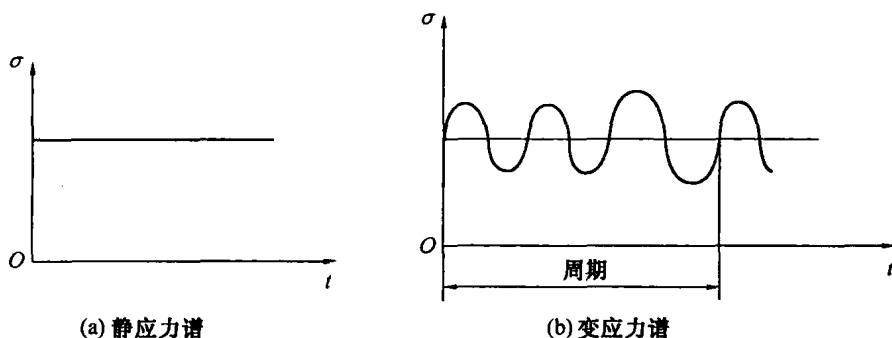


图 2.1 应力谱

周期、应力幅和平均应力保持常数的变应力称为稳定循环变应力(图 2.2)。按其循环特征  $r(r = \sigma_{\min}/\sigma_{\max})$  的不同,可分为对称循环变应力、脉动循环变应力和非对称循环变应力三种。它们的变化规律见表 2.1。

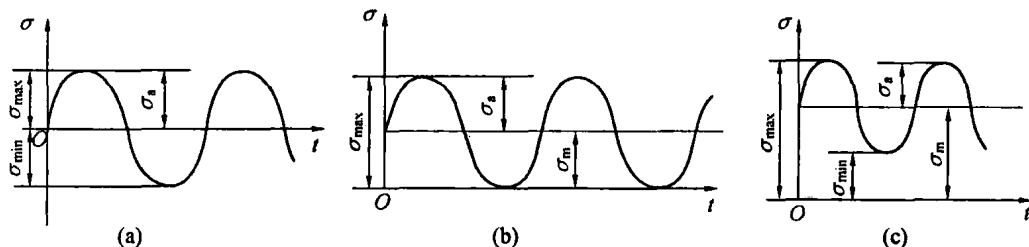


图 2.2 稳定循环变应力谱

表 2.1 稳定循环变应力的变化规律

循环名称	循环特征	应力特点	应力谱
对称循环	$r = -1$	$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} = \sigma_a, \sigma_m = 0$	图 2.2(a)
脉动循环	$r = 0$	$\sigma_m = \sigma_a = \sigma_{\max}/2, \sigma_{\min} = 0$	图 2.2(b)
非对称循环	$-1 < r < 1$	$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a, \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$	图 2.2(c)

当零件受剪切应力  $\tau$  作用时,以上概念仍然适用,只需将  $\sigma$  改为  $\tau$  即可。

## 2. 工作应力与计算应力

根据计算载荷,按照材料力学的基本公式求出的、作用于机械零件剖面上的应力称为工作应力。

当零件危险剖面上呈复杂应力状态时,按照某一强度理论求出的、与单向拉伸时有同等破坏作用的应力称为计算应力,以符号  $\sigma_{ca}$  表示。计算应力的表达式见材料力学。

## 3. 极限应力

按照强度准则设计机械零件时,根据材料性质及应力种类而采用材料的某个应力极限值,称为极限应力,以符号  $\sigma_{lim}$ 、 $\tau_{lim}$  表示。对于脆性材料,在静应力作用下的主要失效形式是脆性破坏,故取材料的强度极限( $\sigma_B$ 、 $\tau_B$ )为极限应力,即  $\sigma_{lim} = \sigma_B$ 、 $\tau_{lim} = \tau_B$ ;对于塑性材料,在静应力作用下的主要失效形式是塑性变形,故取材料的屈服极限( $\sigma_s$ 、 $\tau_s$ )为极限应力,即  $\sigma_{lim} = \sigma_s$ 、 $\tau_{lim} = \tau_s$ ;而材料在变应力作用下的主要失效形式是疲劳破坏,故取材料的疲劳极限( $\sigma_r$ 、 $\tau_r$ )为极限应力,即  $\sigma_{lim} = \sigma_r$ 、 $\tau_{lim} = \tau_r$ 。

疲劳极限又分无限寿命疲劳极限和有限寿命疲劳极限。在任一给定循环特征  $r$  的条件下,应力循环达到规定的  $N_0$  次后,材料不发生疲劳破坏时的最大应力,称为材料的无限寿命疲劳极限,以符号  $\sigma_r$ 、 $\tau_r$  表示,工程上最常用的是  $\sigma_{-1}$  和  $\tau_{-1}$ 。 $N_0$  称为应力循环基数,一般对硬度小于等于 350 HBS 的钢材,取  $N_0 = 10^7$ ,对硬度大于 350 HBS 的钢材,取  $N_0 = 25 \times 10^7$ 。而在任一给定循环特征  $r$  的条件下,应力循环  $N$  次后,材料不发生疲劳破坏时的最大应力,称为材料的有限寿命疲劳极限,以符号  $\sigma_{rN}$ 、 $\tau_{rN}$  表示。图 2.3 为根据疲劳试验结果而绘制的材料疲劳曲线。

在有限寿命区,疲劳曲线方程为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rN}^m \cdot N &= \sigma_r^m \cdot N_0 = C \\ \sigma_{rN} &= \sigma_r \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} = K_N \sigma_r \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

式中  $C$ ——常数;

$K_N$ ——寿命系数,  $K_N = \sqrt[m]{N_0/N}$ ;

$m$ ——取决于应力状态和材料的指数,如钢材弯曲时,取  $m = 9$ ,钢材线接触时,接触强度计算,取  $m = 6$ 。

应力循环次数  $N$  的取值范围为  $10^3 < N \leq N_0$ ,在  $N > N_0$  时,按  $N = N_0$ ;  $N < 10^3$  时,按静应力处理。

由于实际零件几何形状、尺寸大小和加工质量等因素的影响,使得零件的疲劳极限要小于材料试件的疲劳极限。影响零件疲劳极限的主要因素有:(1) 应力集中;(2) 绝对尺寸;(3)

表面状态。

(1) 应力集中对零件疲劳极限的影响。在零件剖面的几何形状突然变化处(如孔、圆角、键槽、螺纹等),局部应力要远远大于名义应力,这种现象称为应力集中(图 2.4)。应力集中使零件疲劳极限降低的程度常用有效应力集中系数  $K_\sigma$  或  $K_\tau$  来表征。材料、尺寸和受载情况都相同的一个无应力集中试件和一个有应力集中试件的疲劳极限的比值,称为有效应力集中系数,即

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1K}} \quad K_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{-1K}} \quad (2.3)$$

式中  $\sigma_{-1}, \tau_{-1}$ ——弯曲、扭转时无应力集中的光滑试件的对称循环疲劳极限;

$\sigma_{-1K}, \tau_{-1K}$ ——弯曲、扭转时有应力集中的试件的对称循环疲劳极限。

如果计算剖面上有几个不同的应力集中源,则零件的疲劳极限由各  $K_\sigma(K_\tau)$  中的最大值决定。

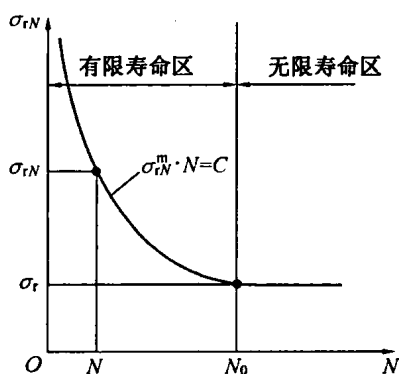


图 2.3 疲劳曲线

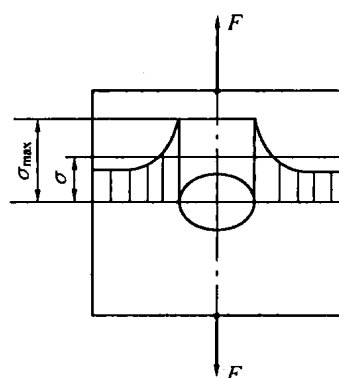


图 2.4 受拉平板的应力集中

(2) 绝对尺寸对零件疲劳极限的影响。零件的绝对尺寸愈大,材料包含的缺陷可能愈多,机械加工后表面冷作硬化层相对越薄,因此零件的疲劳极限愈低。零件绝对尺寸对零件疲劳极限的影响可用绝对尺寸系数  $\epsilon_\sigma$  或  $\epsilon_\tau$  来表征。直径为  $d$  的大尺寸零件的疲劳极限  $\sigma_{-1d}(\tau_{-1d})$  与直径为  $d_0 = 6 \sim 10 \text{ mm}$  的标准试件的疲劳极限  $\sigma_{-1}(\tau_{-1})$  的比值,称为绝对尺寸系数,即

$$\epsilon_\sigma = \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}} \quad \epsilon_\tau = \frac{\tau_{-1d}}{\tau_{-1}} \quad (2.4)$$

(3) 表面状态对零件疲劳极限的影响。因为疲劳裂纹多发生在表面,不同的表面状态(表面质量、强化方法等)对零件的疲劳极限会发生不同的影响。通常用表面状态系数  $\beta$  来表征。零件在某种表面状态下的疲劳极限  $\sigma_{-1\beta}(\tau_{-1\beta})$  与试件在精抛光下的疲劳极限  $\sigma_{-1}(\tau_{-1})$  的比值,称为表面状态系数,即

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{-1\beta}}{\sigma_{-1}} \quad \beta_\tau = \frac{\tau_{-1\beta}}{\tau_{-1}} \quad (2.5)$$

由试验得知,应力集中、绝对尺寸和表面状态只对应力幅有影响。考虑了这些因素的综合影响后,零件的对称循环弯曲疲劳极限  $\sigma_{-1e}$  为

$$\sigma_{-1e} = \frac{\epsilon_d \beta_\sigma}{K_\sigma} \sigma_{-1} \quad (2.6)$$



而零件的对称循环扭转疲劳极限  $\tau_{-1e}$  为

$$\tau_{-1e} = \frac{\epsilon_\tau \beta_\tau}{K_\tau} \tau_{-1} \quad (2.7)$$

$K_\sigma$ 、 $K_\tau$ 、 $\epsilon_\sigma$ 、 $\epsilon_\tau$ 、 $\beta_\sigma$  和  $\beta_\tau$  值见第十章。

#### 4. 许用应力和安全系数

设计零件时,计算应力允许达到的最大值,称为许用应力。常用带方括号的应力符号  $[\sigma]$  和  $[\tau]$  来表示。许用应力等于极限应力  $\sigma_{\text{lim}}$  ( $\tau_{\text{lim}}$ ) 和许用安全系数  $[S_\sigma]$  ( $[S_\tau]$ ) 的比值,即

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{[S_\sigma]} \quad [\tau] = \frac{\tau_{\text{lim}}}{[S_\tau]} \quad (2.8)$$

显然,合理地选择许用安全系数是强度计算中的一项重要工作。其值取得过小则不安全,而取得过大又会使机器尺寸增大,质量增加,很不经济。因此,合理的选择原则是:在保证安全可靠的原则下,尽可能选择较小的安全系数。

影响安全系数的因素很多,主要有:计算载荷的准确性、材料性能数据的可靠性、零件的重要程度和计算方法的精确程度等。通常确定安全系数的方法有三种:

(1) 表格法。此法是各个行业根据本部门多年实践经验而制订的安全系数规范。这种方法适用范围较窄,但简单、具体。

(2) 经验数据法。一般取  $[S] = 1.25 \sim 4$ 。如果材料性能数据可靠,载荷与应力计算准确,可取  $[S] = 1.25 \sim 1.5$ 。

(3) 部分系数法。即取  $[S] = S_1 \times S_2 \times S_3$ 。式中  $S_1$  表示确定计算载荷和应力准确性的系数,一般取  $S_1 = 1 \sim 1.5$ ;  $S_2$  表示材料机械性能不均匀的系数,一般取  $S_2 = 1.2 \sim 2.5$ ;  $S_3$  表示零件重要程度的系数,一般取  $S_3 = 1 \sim 1.5$ 。

#### 5. 接触应力

当两物体在压力下接触时,若两接触面(或其中一个)为曲面,便在接触处的表层产生很大的局部应力,这种应力被称为接触应力,以符号  $\sigma_H$  表示。例如,齿轮传动、凸轮机构以及滚动轴承等,它们在工作时,理论上是通过点、线接触传递运动和载荷,而实际上受载后接触处产生局部的弹性变形,呈面接触,但接触面积很小,所以往往在接触处产生很大的接触应力。

本书只讨论线接触时的接触应力计算。设有两个半径分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$  的轴线平行的圆柱体以正压力  $F_n$  相压紧,则其接触处将呈一窄带形,如图 2.5 所示。其接触应力按椭圆柱规律分布,最大接触应力发生在窄带中线的各点上,而且,由于接触应力是在两个物体上的作用力与反作用力的影响下产生的,因此它在两个物体上的分布规律及数值都是相同的。最大接触应力可按赫兹(Hertz)公式计算

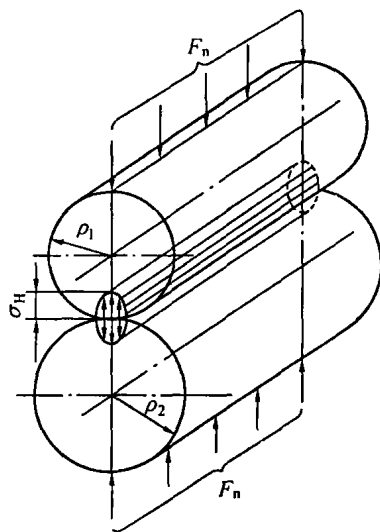


图 2.5 接触应力计算简图