



工业和信息化部“十二五”规划教材

精品力作



MACHINERY



# 机械设计基础

王毅 程强 主编  
薛云娜 陈照强 副主编

- 展现机械设计整体知识架构、强化系统设计思想
- 叙述模式新颖，启发和引导读者进行积极的思考
- 注重应用技能、实践能力和创新能力培养

中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

内容简介

工业和信息化部“十二五”规划教材

# 机械设计基础

王毅 程强 主编

薛云娜 陈照强 副主编

ISBN 978-7-121-22107-7

定价：(含CD) 39.00元/册

本书可作为高等院校机械类、机电类、能源动力类等专业的教材，也可供从事机械工作的工程技术人员参考。

ISBN 978-7-121-22107-7

定价：(含CD) 39.00元/册

本书可作为高等院校机械类、机电类、能源动力类等专业的教材，也可供从事机械工作的工程技术人员参考。

责任编辑：王毅、程强

封面设计：薛云娜、陈照强

印刷：北京理工大学印刷厂

发行：北京理工大学出版社

地址：北京市海淀区中关村大街58号

邮编：100081

电话：(010) 62770175

网址：<http://www.bjup.com.cn>

定价：39.00元

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书将机械原理与机械设计的内容结合在一起,并将课程理论和实践内容有机地融合,突出知识的应用性,强化系统设计观念,强调设计技能的培养,适合普通高等学校应用型人才培养的需要。

本书系统地阐述了机械中的各种常用机构、零部件的结构设计与工作原理及设计方法。全书共分 14 章,内容包括绪论、平面机构的结构分析、平面连杆机构、凸轮机构与间歇运动机构、齿轮机构和齿轮传动、轮系、机械运转速度波动的调节与平衡、零件的连接、挠性传动、轴和联轴器、轴承、其他零部件、机械传动系统设计与实践、机械设计中的计算机辅助设计及实践。

本书主要作为高等工科院校机械设计基础课程的教材,对研究生、高职学生及相关的工程技术人员也有很好的参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容  
版权所有,侵权必究

### 图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础/王毅,程强主编. —北京:电子工业出版社,2015.5

工业和信息化部“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-25104-7

I. ①机… II. ①王… ②程… III. ①机械设计—高等学校—教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 292676 号

策划编辑:郭穗娟

责任编辑:陈韦凯 特约编辑:孙志明

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:20.25 字数:518.4 千字

版 次:2015 年 5 月第 1 版

印 次:2015 年 5 月第 1 次印刷

定 价:49.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlt@phei.com.cn](mailto:zlt@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

本书根据教育部《关于深化教学改革，培养适应 21 世纪需要的高质量人才的意见》的文件精神与普通高等学校机械设计基础课程教学的基本要求，针对普通高等院校应用型人才的培养目标，按照机械设计基础教学规范的核心知识体系编写。

本书根据编者长期的教学改革探索和教学实践经验，结合学生的认知规律，遵循机械设计科学的思维方法，着力于强化系统性，引导启发性，加强实践性，提升创新力。

在知识节点上，强化机械设计的系统性。在传统教学内容中引入系统设计的相关概念，从综合性角度增加机械系统分析与设计内容，培养读者的系统设计思想。将相对分散的传统内容加以集中，内容结构体系进一步优化，使读者建立起机械设计的整体知识架构。

在叙述方式上，创立新颖的叙述模式，章节结构采取示例启发式方法，引导读者带着问题主动学习和思考；用关键词的方式把课程内容的概念展现在读者面前，以达到宏观把握、微观清晰的目的；内容表述力求贴近读者的思维习惯，通俗易懂；增加相关研究内容的发展趋势介绍，开阔读者的思路与眼界。

在学科核心上，着力强调综合应用性知识，以提高读者的应用技能、实践能力和应用领域的创新能力。教材内容强化应用分析，加强例题和习题的应用思考，促使读者将理论与实践结合起来，在学习中获得综合能力的提高。

本书由齐鲁工业大学王毅和程强任主编，薛云娜和陈照强任副主编。参编人员及编写分工如下：

程强编写第 1 章、3 章；薛云娜编写第 5 章、8 章和 12 章；陈照强编写第 6 章；齐鲁工业大学沈学会编写第 2 章、宿艳彩编写第 11 章、高立营编写第 10 章、刘玉梅编写第 4 章、王宝林编写第 7 章；其余章节由王毅编写。本书由王毅统稿并做了大量的修改工作，王宝林负责全部稿件的格式统一。

青岛大学师忠秀教授和齐鲁工业大学许崇海教授详细审阅了本书，提出了许多宝贵意见，编者对此深表感谢。

本书配有电子课件和习题分析，选用本书的读者请登录 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn)（华信教育资源网）下载本书教学资源；也可通过邮件索取，索取邮箱：[guosj@phei.com.cn](mailto:guosj@phei.com.cn)（责编邮箱）。

最后，对参考文献中的各位作者表示最诚挚的感谢！电子工业出版社的编辑为本书的出版与提高质量投入了大量劳动，在此一并致以衷心的感谢。

尽管编者为本书付出了努力，但书中仍有不足和欠妥之处，衷心期待读者的批评指正。

编者

2015 年 1 月

# 目 录

第 1 章 绪论	1	4.3 凸轮机构的传力性能分析	61
1.1 机械设计的有关概念	1	4.4 平面凸轮廓线设计	63
1.2 本课程研究的内容、性质和任务	4	4.5 凸轮与从动件端部的结构设计	68
1.3 机械设计的基本要求和一般过程	4	4.6 间歇运动机构	69
1.4 机械设计的一般程序	8	习题	73
1.5 机械零件常用材料及热处理	9	第 5 章 齿轮机构和齿轮传动	75
1.6 金属材料加工方法及其精度和表面粗糙度	13	5.1 齿轮机构的特点和分类	76
1.7 机械零件设计中的标准化	14	5.2 齿廓啮合基本定律与齿轮的齿廓曲线	77
1.8 机械设备中的润滑油及润滑简介	15	5.3 渐开线直齿圆柱齿轮的基本参数	80
思考题	18	5.4 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动	82
第 2 章 平面机构的结构分析	19	5.5 渐开线齿轮的加工原理	84
2.1 平面机构的组成	20	5.6 根切、最少齿数及变位齿轮	86
2.2 平面机构的运动简图	21	5.7 齿轮的失效形式和材料	88
2.3 平面机构的自由度	25	5.8 齿轮的材料和精度等级	91
思考题	28	5.9 标准直齿圆柱齿轮传动的设计计算	94
习题	28	5.10 渐开线斜齿圆柱齿轮传动	101
第 3 章 平面连杆机构	30	5.11 直齿圆锥齿轮机构	107
3.1 平面四杆机构的基本形式及其演化	31	5.12 齿轮的结构、润滑和效率	109
3.2 铰链四杆机构曲柄存在的条件	38	5.13 蜗杆传动	113
3.3 四杆机构的传动特性	40	思考题	119
3.4 平面四杆机构的设计	43	习题	120
3.5 连杆机构的结构设计	49	第 6 章 轮系	122
思考题	53	6.1 轮系的分类	123
习题	53	6.2 定轴轮系的传动比计算及例题分析	125
第 4 章 凸轮机构与间歇运动机构	56	6.3 周转轮系的传动比计算	128
4.1 凸轮机构的类型和应用	57	6.4 复合轮系的传动比计算	131
4.2 从动件的常用运动规律	58	6.5 轮系的应用	133
		6.6 几种特殊的行星轮传动简介	136
		6.7 轮系的研究现状及其发展	138
		习题	138

第 7 章 机械运转速度波动的调节与平衡	141	第 11 章 轴承	243
7.1 机械运转速度波动调节的目的与方法	141	11.1 滚动轴承的主要类型、特点、代号及选择	244
7.2 机械的平衡	144	11.2 滚动轴承的工作情况	251
思考题	149	11.3 滚动轴承的寿命计算	253
习题	150	11.4 滚动轴承的静载荷计算	262
第 8 章 零件的连接	151	11.5 滚动轴承的组合设计	263
8.1 概述	152	11.6 滑动轴承简介	268
8.2 螺旋副的受力分析、特性及其应用	156	11.7 轴承业的发展及新型轴承	273
8.3 螺纹连接类型和螺纹连接件	159	思考题	274
8.4 螺纹连接的预紧和防松	162	习题	274
8.5 螺纹连接的强度计算	165	第 12 章 其他零部件	276
8.6 螺纹连接件的材料和许用应力	171	12.1 弹簧概述	276
8.7 提高螺纹连接强度的措施	173	12.2 圆柱螺旋弹簧的设计计算	279
8.8 键连接	176	12.3 弹簧的应用及技术发展	281
习题	183	12.4 机座和箱体	283
第 9 章 挠性传动	186	思考题	286
9.1 挠性传动概述	186	第 13 章 机械传动系统设计与实践	288
9.2 带传动概述	188	13.1 传动装置中原动机的选择	288
9.3 普通带传动的工作性能分析	189	13.2 常用机械传动的类型、主要特性及其选择原则	289
9.4 V 带传动设计	194	13.3 机械传动系统方案设计	291
9.5 同步齿形带和高速带传动简介	209	13.4 机械传动的运动和动力参数的计算	295
9.6 链传动	209	13.5 机械传动系统方案的创新设计	296
9.7 挠性传动的历史、现状及发展趋势简介	220	13.6 机械传动系统中的减速器	300
9.8 柔性传动应用示例	222	13.7 机械设计结构图与零件图表达示例	303
思考题	223	思考题与分析题	306
习题	224	第 14 章 机械设计中的计算机辅助设计及实践	310
第 10 章 轴和联轴器	225	14.1 计算机辅助设计在机械设计中的应用	310
10.1 轴概述	226	14.2 企业应用 CAD 软件进行设计的情况分析	311
10.2 轴的结构设计	227	14.3 CAD 在机械设计中的实践与分析	312
10.3 轴的计算	232	参考文献	317
10.4 联轴器	238		
习题	242		

# 第1章 绪 论

## 主要概念

机械设计、机械、机器、机构、构件、零件、通用零件、原动部分、传动部分、控制部分、执行部分、辅助部分、机械传动、功能、承载能力、工作能力设计准则、强度、极限应力、计算应力、疲劳极限、金属材料及热处理、零件的精度及粗糙度、润滑、密封。

## 学习引导

这一章的内容是机械设计基础中涉及的最基本的概念。内容特点是平铺直叙，但广泛性强。多数的概念以前都有接触，之所以把这些知识放在一起，意味着这些知识在该课程中是基本的知识点，进行机械设计时都会有应用，也体现出该课程综合性强的特点。因此，学习这门课，从绪论开始，读者要强化知识的综合性应用的观点，慢慢体会机械设计的真正内涵，提高设计能力。这也是该课程的学习要求。

## 1.1 机械设计的有关概念

机械是人类在长期生活和生产实践中创造出的劳动工具，用于减轻人类的劳动强度、改善劳动条件、提高劳动生产率和产品质量。机械设计水平和其现代化程度已成为衡量一个国家工业发展水平的重要标志。

机械是机器和机构的总称。机器是根据某种使用要求而设计的，用来变换或传递能量、物料和信息的执行机械运动的装置。如电动机和发电机用来变换能量，车床、滚齿机用来变换物料的状态，起重运输机械用来传递物料，计算机用来变换信息等。仅从功能的角度看，一部完整的机器一般包括四个基本组成部分：原动机部分、传动部分、控制部分和执行部分，也包括一些辅助部分如冷却系统、润滑系统等。

原动机部分是驱动整部机器完成预定功能的动力源，一般地说，它们都是把其他形式的能量转换为可以利用的机械能。例如：骑自行车是用人力作为原动机，而现代机器中使用的原动机大致是以各式各样的电动机和热力机为主。这些原动机大多输出的是旋转运动，同时输出一定的转矩。

执行部分是用来完成机器预定功能的组成部分，由于机器的功能是各式各样的，所以，要求的运动形式也是各式各样的。同时，要克服的工作阻力也会随着工作情况而异。

从原动机到执行部分之间就是传动部分，它的作用就是为了解决从原动机到执行部分之间运动形式、运动及动力参数的转变。在完整的机器中，传动部分是必须存在的，因为原动机的运动形式、运动和动力参数是有限的，而且是确定的，但执行部分却是随工作情况而有各式各样的运动形式、运动和动力参数。机器的传动部分多数使用机械传动系统，有时也用液压和电力传动系统。

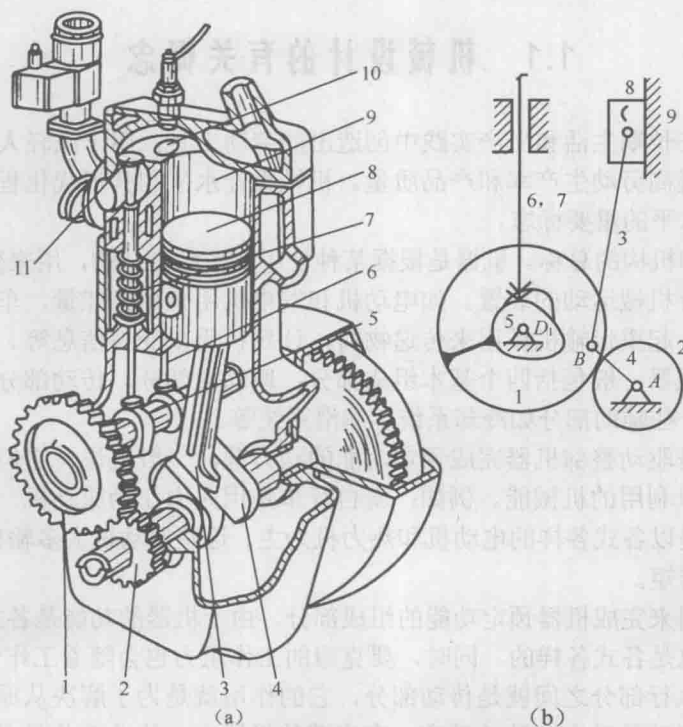
机械传动是绝大多数机器不可缺少的重要组成部分。

图 1-1 所示的轿车就是人们所熟悉的典型的机器，它完整表达出了机器的各组成部分。



图 1-1 轿车的组成

如图 1-2 所示的单缸内燃机，其主体部分是由曲轴 4、连杆 3、活塞 8 和汽缸体 9 所组成的连杆机构。燃气在汽缸内燃烧膨胀而推动活塞移动，通过连杆带动曲轴转动，从而把燃气燃烧所产生的热能转化为曲轴转动的机械能。



1—驱动齿轮 2—大齿轮 3—连杆 4—曲轴 5—凸轮轴 6、7—气门顶杆 8—活塞 9—汽缸体

图 1-2 单缸内燃机

凸轮 5、阀杆 6、7 和汽缸体组成凸轮机构，将凸轮轴的连续转动变为阀杆有规律的直线移动，使阀杆 6、7 定时开启和关闭进气阀门和排气阀门，从而送进燃气、排出废气。



曲轴上的齿轮 2 和凸轮轴上的齿轮 1 与汽缸体组成齿轮机构,用以保证曲轴每转两周,凸轮轴转一周,进气阀门和排气阀门各启闭一次。

三种机构协调配合,使进气、排气阀门的启闭与活塞的移动位置之间建立起一定的协同关系,从而把燃气的热能转化为曲轴连续转动的机械能。

单缸内燃机只采用了一组曲柄滑块机构,其曲轴回转的速度不够均匀。多缸发动机采用了多组对称布置的曲柄滑块机构,可提高曲轴运转的动力和平稳性。如图 1-3 所示为飞机螺旋桨发动机,它由 9 组对称布置的滑块(活塞)共同驱动曲柄轴(螺旋桨轴),可使飞机螺旋桨获得高速稳定运转。

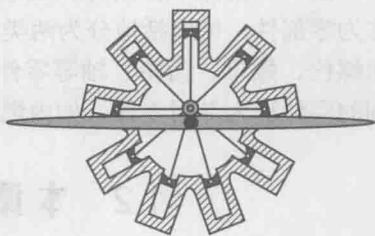


图 1-3 飞机螺旋桨发动机

通过上述分析可以看出,尽管各种不同的机器具有不同的形式、构造和用途,但就其组成来说,却是由许多运动构件组合而成的,并且为了传递运动和动力,各个运动构件之间的相对运动是确定的。这样,由若干个构件以构件间能够产生相对运动的连接方式而组成的构件系统称为机构。从机构的特征来看,机构是具有确定相对运动的构件组合体,它是用来传递运动或改变运动形式的可动装置。机器中最常用的机构有连杆机构、凸轮机构、齿轮机构和间歇运动机构等。

综上所述,机器是由若干机构组成的,用来变换或传递能量、物料和信息的机械装置。内燃机、装载机、挖掘机、焊接机器人、牛头刨床等就是常见的机器。机构与机器的区别在于:机构只是一个构件系统,而机器除构件系统之外还包含电气、液压等其他装置;机构只用于传递运动(或改变运动形式)和力,而机器除传递运动和力之外,还具有变换或传递能量、物料、信息的功能。

机器中具有各自特定运动的单元体称为构件,不可拆卸的基本单元称为零件。构件是机构运动的最小单元体,是组成机构的基本要素。构件可能是一个零件,也可能是由若干零件固联在一起的一个独立运动的整体。零件是机器加工制造的最小单元体。若将一部机器进行拆卸,拆到不可再拆的最小单元就是零件。

构件可以是单独的零件,如图 1-4 (a) 所示的曲轴,也可以由许多零件刚性地连接在一起组成。如图 1-4 (b) 所示的连杆,连杆大头轴孔应与曲轴连接。由于安装的需要,必须把连杆做成分体式,即连杆由连杆体 1、螺栓 2、连杆头 3、螺母 4 等零件组成,图 1-4 (c) 是连杆实物。

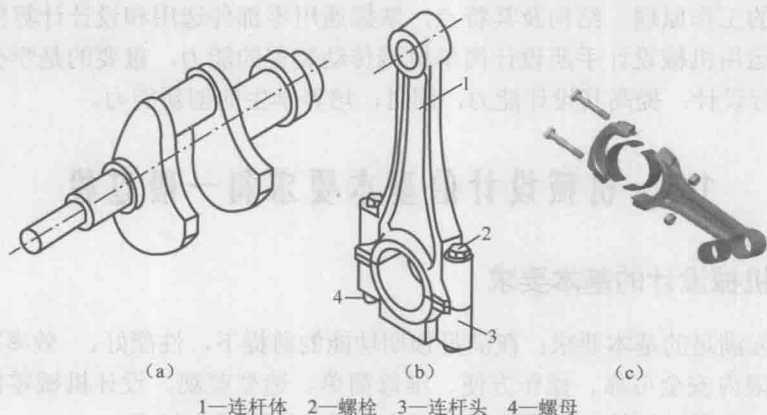


图 1-4 零件与构件

由一组协同工作的零件组成的独立制造或独立装配的组合物称为**部件**。零件和部件统称为**零部件**。可概括地分为两类：一类是各种机器中经常都能用到的零部件称为**通用零件**，如螺栓、螺母、齿轮、轴等零件，滚动轴承、联轴器等部件；另一类是只在某些机械中用到的零件称为**专用零件**，如内燃机活塞、汽轮机叶轮等。

## 1.2 本课程研究的内容、性质和任务

### 1.2.1 本课程研究的内容

机械设计基础主要研究机械中的常用机构和通用零件的工作原理、结构特点、基本的设计理论和计算方法。具体内容如下。

(1) 研究机械中常用机构的结构、工作特点、运动和动力特性及其设计计算方法，如连杆机构、凸轮机构、齿轮机构轮系和间歇运动机构，及机器动力学的基本知识（机械的调速和平衡）。

(2) 研究机械零部件的工作能力和计算准则。阐述常用连接（螺纹连接、键连接等）、机械传动（带传动、链传动、齿轮传动）、轴系零部件（轴、轴承、联轴器）等，从强度、刚度、寿命、结构工艺性和材料选择等方面，研究通用零部件的设计计算方法。

### 1.2.2 课程的性质

机械设计基础是工科类有关专业的一门重要的技术基础课，是多学科理论和实际知识的综合运用。本课程的主要先修课程有机械制图、工程力学、工程材料等课程，且更加结合工程实际，为学生学习专业机械设备课程和掌握新的机械科学技术提供必要的理论基础，为工程技术人员在了解各种机械的传动原理、设备的正确使用和维护、故障分析等方面提供必要的基础知识。

### 1.2.3 课程的任务

通过本课程的学习和课程设计实践，使学生掌握常用机构和通用零部件的基本理论和基本知识，了解常用机构的工作原理及其特点，掌握机构分析和设计的基本方法，了解通用机械零部件的工作原理、结构及其特点，掌握通用零部件选用和设计计算的基本原理和方法，并具有运用机械设计手册设计简单机械传动装置的能力，重要的是学会从机械系统整体的角度进行设计，提高其设计能力，同时，培养学生的创新能力。

## 1.3 机械设计的基本要求和一般过程

### 1.3.1 机械设计的基本要求

机械设计应满足的基本要求：在满足预期功能的前提下，性能好、效率高、成本低，在预定使用期限内安全可靠、操作方便、维修简单、造型美观。设计机械零件时，也必须考虑上述要求。即所设计的机械零件既要工作可靠，又要成本低廉。

(1) 满足预期功能及使用要求。设计者必须正确选择机器的工作原理、机构的类型和机械传动方案,以满足机器的运动性能、动力性能、基本技术指标等方面的预定功能要求。

如榨汁机的设计,就采用了螺杆根径带有锥度的螺旋机构,且螺杆螺距逐渐减小,以逐渐增加挤压程度,实现榨汁的功能。

(2) 安全可靠与强度及寿命要求。安全可靠是机械正常工作的必要条件,设计的机械必须保证在预定的工作期限内安全可靠地工作。应使所设计的机械零件具有合理的结构并满足强度、刚度、耐磨性、振动稳定性及寿命等方面的要求。特别是对关系到人身安全或重大设备事故的零部件都必须进行认真严格的设计计算和校核计算,不能仅凭经验或以“类比”代替。计算说明书应妥善保留,以备核查。

(3) 经济性要求。设计中应尽可能多选用标准件或成套组件,不仅可靠、价廉,还能大大节省设计工作量。零件设计必须关注加工工艺,力求减少加工费用且注意节约贵重材料,降低成本。

(4) 工艺性及标准化要求。机械及其零部件应具有良好的工艺性,零件要制造方便,加工精度和表面粗糙度适当,且要易于装拆。设计时,零部件和机器参数应尽可能标准化,以提高设计质量,降低设计制造成本,并可使设计者把主要精力放在关键零件的设计上。

(5) 环保及其他特殊要求。某些机械由于工作环境和要求的不同,而对设计提出某些特殊要求。如食品、纺织机械有不得污染产品的要求;高级轿车的变速箱齿轮要求低噪声;机床要长期保持精度的要求等。

总之,设计机械时要根据实际情况,分清应满足的主、次要求,尽量做到结构上可靠,工艺上可能,经济上合理。

### 1.3.2 机械零件的工作能力准则

机械零件由于某种原因而不能正常工作称为失效。在不发生失效的条件下,零件所能安全工作的限度,称为工作能力。通常此限度是对载荷而言,即零件的工作能力习惯上称为承载能力。零件的主要失效形式有断裂、塑性变形、过大的弹性变形、工作表面的过度磨损、发生强烈的振动、连接的松弛、摩擦传动的打滑等。

机械零件虽然有多种可能的失效形式,但归纳起来最主要的为强度、刚度、耐磨性、振动稳定性等几个方面的问题。对于不同的失效形式,相应地有其工作能力判定条件。这种为防止失效而制定的判定条件,称为工作能力计算准则或设计准则。

设计机械零件时,常根据一个或几个可能发生的主要失效形式,运用相应的判定条件,确定零件的形状和主要尺寸。零件常用的设计准则如下。

(1) 强度准则。强度是指零件受载后,抵抗断裂、塑性变形及表面破坏的能力。它是设计机械零件时首先应满足的基本要求。强度条件是作用在零件上的实际应力小于或等于零件材料的许用应力,其表达式为

$$\sigma \leq [\sigma], \tau \leq [\tau]$$

(2) 刚度准则。刚度是机械零件受载后抵抗弹性变形的能力。刚度条件:零件在载荷作用下所产生的弹性变形量小于或等于机器工作的许用变形量,如变形量  $y \leq [y]$ 。

(3) 寿命准则。磨损、腐蚀和疲劳是影响零件寿命的主要因素。但磨损和腐蚀目前尚无实用的计算方法和数据,只是进行条件性计算,即限制运动副的压强,即  $p \leq [p]$ 。相对

运动速度较高时, 还应考虑运动副单位时间接触面积的发热量, 即  $p v \leq [p v]$ 。

(4) 振动稳定性准则。当机械零件的自振(固有)频率与周期性干扰力的频率相等时就会发生共振, 不仅会影响机器的工作质量和精度, 甚至会造成严重事故。设计时, 必须使零件的自振频率远离干扰力频率, 以避免产生共振。可通过增加或减少零件的刚度、增添弹性零件等办法解决。

### 1.3.3 机械零件的强度

强度是保证机械零件工作能力的最基本要求, 在进行强度计算时, 必须判明机械零件所承受的载荷和作用在零件上应力的性质, 并合理确定许用应力。

#### 1. 载荷和应力的类型

零件所受的载荷可分为静载荷和变载荷两类。不随时间变化或变化很小的载荷称为静载荷, 随时间而变化的载荷称为变载荷, 其变化可以是周期性的或非周期性的。

按照应力随时间变化的特性不同, 可分为静应力和变应力。不随时间变化或变化缓慢的应力称为静应力[见图 1-5 (a)]。随时间变化的应力称为变应力[见图 1-5 (b)、(c)、(d) 分别为对称循环变应力、脉动循环变应力和非对称循环变应力], 绝大多数机械零件都是处于变应力状态下工作的。循环变应力的平均应力  $\sigma_m$  和应力幅  $\sigma_a$  分别为

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

平均应力  $\sigma_m$  表征循环应力中的不变部分, 应力幅  $\sigma_a$  则表征循环应力中的变动部分。应力循环中的  $\sigma_{\max}$  和  $\sigma_{\min}$  之比称为变应力的循环特性  $r$ , 即

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

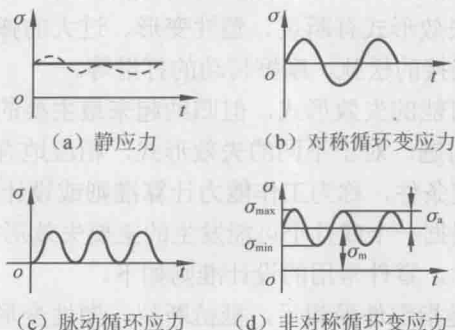


图 1-5 应力的类型

循环特性  $r$  表示循环变应力的变化情况和不对称度, 对于对称循环变应力  $r=-1$ , 脉动循环变应力  $r=0$ , 静应力可以看作变应力的特例,  $r=+1$ , 而非对称循环变应力的  $r$  值随具体应力情况不同在  $+1 \sim -1$ 。即  $r$  的变化范围是  $-1 \leq r \leq +1$ 。

上述分析中, 如果是切应力情况相同, 只要改变应力符号为  $\tau$  即可。

## 2. 许用应力和安全系数

在零件的强度计算中,要合理确定许用应力,使所设计的零件既有足够的强度和寿命,又不至于结构尺寸过大。从强度条件可知,许用应力取决于零件材料的极限应力和安全系数,表达式是

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

### 1) 极限应力

在静应力下工作的零件,其损坏形式为断裂或塑性变形。对于脆性材料制造的零件,为防止发生断裂,应取材料的强度极限 $\sigma_B$ 作为极限应力;对于塑性材料制造的零件,则取材料的屈服极限 $\sigma_s$ 作为极限应力。

据不完全统计,工程中约有80%~90%的零件是属于疲劳破坏,这些零件都是在变应力作用下产生的失效。疲劳破坏是一种损伤累积的效果,零件随着作用的应力循环次数增多时,表面产生细微裂纹,然后裂纹逐渐扩展,应力循环到一定程度时零件会发生突然的断裂。所以,疲劳断裂与一般静应力的破坏不同,它和应力循环次数密切相关。

当零件所受应力的循环特性一定时,经过 $N$ 次应力循环材料不发生破坏时的应力最大值称为疲劳极限,用 $\sigma_{rN}$ 表示。应力循环特性 $r$ 不同,疲劳极限数值也不同,在对称循环变应力下,材料的疲劳极限最低。

材料的疲劳极限由疲劳试验测定,表示疲劳极限与应力循环次数之间的关系曲线如图1-6所示,这条曲线被称作疲劳曲线,有时也称作 $\sigma-N$ 曲线。

由图可见,应力越小,试件能经受的应力循环次数就越多。对于一般钢材,当应力循环次数 $N$ 超过某一数值 $N_0$ 以后,曲线趋向于水平,即可认为试件经受“无限次”循环也不会断裂。 $N_0$ 称为循环基数,对应于 $N_0$ 的应力称为材料的疲劳极限 $\sigma_r$ ,也称为材料的持久疲劳极限,如 $\sigma_{-1}$ 表示对称循环应力下材料的疲劳极限, $\sigma_0$ 则是脉动循环应力下材料的疲劳极限。

因此,为防止零件的疲劳破坏,应取材料的疲劳极限作为极限应力。当不具体考虑应力的循环次数影响时,就取相应于循环基数 $N_0$ 时的疲劳极限 $\sigma_r$ (如 $\sigma_{-1}$ 、 $\sigma_0$ )作为极限应力。

需要指出的是,零件的疲劳强度还受到零件的应力集中、尺寸大小、表面质量等因素的影响,其数值比材料的疲劳极限值低,这在强度计算时需要考虑,可参考相关资料。

### 2) 安全系数

安全系数是考虑材料力学性能的离散性、计算方法的准确性、零件的重要性等多种不确定因素的影响而确定的。取值过大,零件的结构笨重,浪费材料,取值过小,零件容易损坏安全性降低。选取原则是在保证安全可靠的前提下,尽量选用较小的安全系数。在实际工作中,通常采用查表法确定安全系数。在不同的工业部门,根据长期生产实践经验和试验研究,制定有适合本部门的安全系数(或许用应力)规范(图表),数据具体,使用方便,但这种规范都各有其适用范围,使用时加以注意。

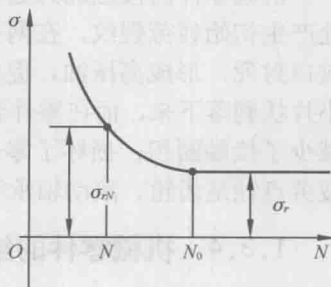


图 1-6 疲劳曲线

### 3. 机械零件的强度

(1) 机械零件的静强度。在静应力作用下，机械零件的失效形式主要是断裂和塑性变形，相应的强度条件需按材料力学强度内容进行计算。

(2) 机械零件的疲劳强度。机械零件的疲劳破坏主要是由零件受变应力所引起。疲劳断裂不同于一般静力断裂，它是损伤到一定程度后，即裂纹扩展到一定程度后，才发生的突然断裂，因此，在断裂截面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；另一个是最终发生脆性断裂的粗粒状区。

(3) 机械零件的接触强度。一些依靠表面接触工作的零件，如齿轮传动、滚动轴承等，它们的工作能力决定于接触表面的强度。

若两个零件在受载前是点接触或线接触，受载后，由于变形其接触处为一小面积，通常此面积甚小而表层产生的局部应力却很大，这种应力称为接触应力。这时零件强度称为接触强度。

机械零件的接触应力通常是随时间作周期性变化的，在载荷重复作用下，首先在表层处产生初始疲劳裂纹，在两接触表面的相互运动中，润滑油被挤入裂纹内，运动表面将裂纹口封死，形成高压油，促使裂纹扩展。当裂纹扩展到一定深度以后，就导致表层金属呈小片状剥落下来，而在零件表面形成一些小坑。这种现象称为疲劳点蚀。发生疲劳点蚀后，减少了接触面积，损坏了零件的光滑表面，因而也降低了承载能力，并引起振动和噪声。疲劳点蚀是齿轮、滚动轴承等零件的主要失效形式。

#### 1.3.4 机械零件的结构工艺性

设计机械零件时，不仅应使它满足使用要求，即具备所要求的工作能力，同时还应满足生产要求。机械零件具有良好的工艺性，是指在现有的生产条件下能方便而经济地生产出来并便于装配。有关工艺性的基本要求如下。

(1) 合理选择零件的毛坯种类。机械制造中毛坯的制备方法有直接利用型材、铸造、锻造、轧制件、冲压件和焊接件。毛坯的选择与机械对零件的具体要求及生产条件有关，可根据生产批量、零件的尺寸和形状、材料性能和加工可能性等选择。

(2) 结构简单合理。设计零件的结构形状时，最好采用最简单的表面，如平面、圆柱面、螺旋面及其组合，同时还应当尽量使加工表面数目最少和加工面积最小，以减少切削加工量及费用。零件的结构还应便于装拆和调整。

(3) 规定适当的制造精度及表面粗糙度。零件的加工费用随着精度的提高而增加。因此，在没有充分理由时，不应盲目规定高的精度。同样，零件的表面粗糙度也应当根据配合表面的实际需要，作出适当的规定。

机械制造基础课程和有关手册中也提供了一些有关工艺性的基本知识，可供设计时参考。

## 1.4 机械设计的一般程序

设计新机械是一项复杂细致的工作。要使设计的机械性能好、效率高、成本低，必须严格按照科学的工作程序来进行设计工作。一般设计过程如下：

(1) 计划——制订设计任务书。首先根据实际需要与需求,确定机械的功能和有关指标,确定设计课题,制订产品设计任务书。

(2) 方案设计——提出原理性设计方案。根据设计任务书,拟定总体设计方案,绘制传动系统的机构简图,进行运动和动力分析,论证方案的可行性,必要时要对某些技术指标作适当修改。

(3) 技术设计——装配图、部件图和零件图。确定机械各部分的结构和尺寸,对主要零件进行结构设计和工作能力的计算,合理选择标准零部件,绘制总装配图、零部件装配图和零件图。

机械零件的设计步骤如下:

- ① 根据零件的使用要求,选择零件的类型和结构并适当选择零件的材料和热处理方法。
- ② 拟定零件的计算简图,计算作用在零件上的载荷。
- ③ 根据零件可能的失效形式确定零件的计算准则,对零件进行工作能力的计算,从而确定出零件的主要尺寸。
- ④ 根据工艺性及标准化原则,进行零件的结构设计。
- ⑤ 绘制零件工作图,写出设计计算说明书。

(4) 技术文件的编制——设计计算说明书、使用说明书、标准明细表和其他技术文件。技术文件的类型比较多,常用的有机器的设计计算说明书、使用说明书、标准明细表等。在设计计算说明书中,应包括方案选择及技术设计的全部结论性的内容。编制供用户使用的机器使用说明书时,应向用户介绍机器的性能参数范围、使用操作方法、日常保养及简单的维修方法、备用的目录等。其他技术文件,如检验合格单、外购件明细表、验收条件等,视需要与否另行编制。

## 1.5 机械零件常用材料及热处理

机械制造中最常用的材料是钢和铸铁,其次是有色金属合金。另外,塑料、橡胶等非金属材料也有其独特的使用价值。

### 1.5.1 金属材料

钢和铸铁都是铁碳合金。含碳量小于2%的铁碳合金称为钢,含碳量大于2%的称为铸铁。

#### 1. 钢

钢是一种非常重要的工程材料,按照化学成分可分为碳素钢和合金钢两大类。

(1) 碳素钢。以铁、碳为主要成分,还含有少量的硅、锰、硫、磷等常存元素。碳素钢容易冶炼,价格低廉,性能可以满足一般工程机械、普通机械零件、工具及日常轻工业产品的使用要求,因此应用广泛。

碳素钢的性质主要取决于其含碳量,含碳量越高则钢的强度越高,但塑性越低。在碳素结构钢中,含碳量低于0.25%的是低碳钢,它的强度极限和屈服极限较低,但塑性好,且具有良好的焊接性能,适用于冲压、焊接,常用来制作螺钉螺母、轴和焊接件等。含碳

量在 0.25%~0.6%的是中碳钢，既有较高的强度，又有一定的塑性和韧性，用于制造受力较大的螺栓、螺母、齿轮、轴、键等零件。含碳量在 0.6%以上的是高碳钢，具有较高的强度和弹性，用于制作弹簧、钢丝绳等。

碳素结构钢牌号表示方法是由代表屈服强度的字母 Q、屈服强度数值按顺序组成。如 Q235，其屈服极限为  $\sigma_s = 235 \text{ MPa}$ 。

(2) 合金钢。在碳钢基础上有目的地加入某些元素以改善钢的性能。例如：加入镍能提高钢的强度但不会降低其韧性；铬能提高硬度、高温强度、耐腐蚀性和耐磨性；锰能提高钢的耐磨性、强度和韧性；硅能提高弹性极限和耐磨性但会降低韧性。应注意的是，合金钢的优良性能不仅取决于化学成分，还取决于适当的热处理。

按照用途，钢又可分为结构钢、工具钢和特殊钢。结构钢用于制造机械零件；工具钢用于制造刀具、模具和量具；特殊钢（不锈钢、耐热钢等）用于制造在特殊环境下工作的零件。

总之，与铸铁相比，钢具有较高的强度、韧性和塑性，并可用热处理方法改善其力学性能和加工性能。零件毛坯可用锻造、冲压、焊接、铸造等方法取得。

## 2. 铸铁

铸铁具有适当的易熔性，良好的液态流动性，因而可铸成形状复杂的零件。它的减振性、耐磨性、切削性均较好且成本低廉，因此应用广泛。铸铁分为灰口铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁、合金铸铁等。其中灰口铸铁和球墨铸铁属脆性材料，不可锻造。

常用钢铁材料的力学性能见表 1-1。

表 1-1 常用钢铁材料的力学性能

材料		力学性能			试件尺寸/mm
类别	牌号	强度极限 $\sigma_b$ /MPa	屈服极限 $\sigma_s$ /MPa	延伸率 $\delta$ /%	
碳素结构钢	Q215	335-410	215	31	$d \leq 16$
	Q235	375-460	235	26	
	Q275	490-610	275	20	
优质碳素结构钢	20	410	245	25	$d \leq 25$
	35	530	315	20	
	45	600	355	16	
合金结构钢	35SiMn	883	735	15	$d \leq 25$
	40Gr	981	785	9	$d \leq 25$
	20GrMnTi	1079	834	10	$d \leq 15$
	65Mn	981	785	8	$d \leq 80$
铸钢	ZG270-500	500	270	18	$d \leq 100$
	ZG310-570	570	310	15	
	ZG42SiMn	600	380	12	
灰口铸铁	HT150	145	—	—	壁厚 10~20
	HT200	195	—	—	
	HT250	240	—	—	
球墨铸铁	QT400-15	400	250	15	壁厚 30~200
	QT500-7	500	320	7	
	QT600-3	600	370	3	

注：钢铁材料的硬度与热处理方法、试件尺寸等因素有关，其数值详见机械设计手册。



### 3. 铜合金

铜合金可分为黄铜、青铜及白铜（铜镍合金）三大类。机器制造业中应用较广的是黄铜和青铜。

黄铜是铜和锌的合金，具有很好的塑性及流动性，可进行碾压和铸造。

青铜是以除锌和镍以外的其他元素作为主要合金元素的铜合金。按其所含的主要合金元素可分为锡青铜、铅青铜、铝青铜等。青铜的减摩性和抗腐蚀性较好，也可碾压和铸造，常用于制造滑动轴承的轴瓦和蜗轮的齿圈。

#### 1.5.2 非金属材料

橡胶富于弹性，常用作联轴器的弹性元件及带传动的胶带等。还可用于制造用于水润滑的轴承衬，如轮船的螺旋桨轴承。

塑料重量轻，且易于形成形状复杂的零件，在机械制造中的应用越来越广。

#### 1.5.3 钢的热处理

##### 1. 钢的退火与正火

退火是将钢件加热到一定温度，保温一定时间，然后缓慢冷却的热处理工艺。正火是将钢加热到适当温度（比退火高），再在空气中冷却的热处理工艺。退火或正火的主要目的可归纳如下。

(1) 调整钢件硬度，以利于随后的切削加工（如车、铣、刨等）。经退火或正火处理后钢件的硬度最适合于切削加工。

(2) 消除残余应力，以稳定钢件尺寸并防止其变形及开裂。

(3) 细化晶粒，改善内部组织结构，提高钢的力学性能和工艺性能，为最终热处理做好准备。

##### 2. 钢的淬火和回火

将钢加热到某一较高温度，保温一段时间后，以适当方式（如在油或水中）快速冷却，从而使钢材获得所需要的组织结构（马氏体或贝氏体）的热处理工艺，称为淬火。淬火是强化钢材最重要的热处理方法。

淬火后的零件一般都必须再进行回火，不同的回火温度可使钢材具有不同的力学性能。回火是将淬火钢重新加热到某一适当温度（比淬火时的温度要低），保温一段时间，然后冷却到室温的热处理工艺。回火的目的有以下三点。

(1) 获得零件所需的组织和性能。通常淬火钢组织具有较高的强度和硬度，但塑性与韧性较低。为了满足零件不同性能的要求，就必须配以适当的回火来改变淬火组织，来调整和改善钢的性能。

(2) 稳定工件尺寸。淬火后得到的组织（淬火马氏体和残留奥氏体）是不稳定的组织，它们具有自发的向稳定组织转变的趋势，因而会引起工件的形状和尺寸的改变。通过回火可使淬火组织转变为稳定组织，从而保证零件在使用过程中不再发生形状和尺寸的改变。

(3) 消除或减小淬火内应力。工件在淬火后存在很大内应力，如不及时通过回火消除，