

育“十二五”规划教材

机械设计基础 CAI教程

王春香 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



附赠光盘

本书是根据教育部制定的《机械设计基础课程教学基本要求》和目前教学改革发展的要求编写的,注重实用性,并贯彻最新的国家标准。

本书内容编排采用模块化结构,将机械原理与机械设计的内容有机地结合在一起。本书共分为六篇(十八章):第一篇总论;第二篇常用机构;第三篇联接;第四篇机械传动;第五篇轴系零、部件;第六篇机械的平衡、调速与弹簧。每章开始均撰写了内容提示,介绍该章的研究内容及其相互联系,归纳知识要点;各章后面配有习题,以利于学生的学习。

本书含有配套的多媒体 CAI 助教助学软件,十分便于 CAI 教学。

本书主要用作高等工科院校近机、非机类各专业机械设计基础课程(60~90 学时)的教材,也可作为其他有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础 CAI 教程/王春香主编 —北京:机械工业出版社,2011 12
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-36007-0

I. ①机… II. ①王… 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(2011)第 199289 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:刘小慧 责任编辑:刘小慧 章承林 冯 钺

版式设计:张世琴 责任校对:陈立辉

封面设计:张 静 责任印制:乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19 75 印张·488 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-36007-0

ISBN 978-7-89433-611-8(光盘)

定价:41.00 元(含 1DVD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服 务 中 心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据国家教育部制定的高等学校工科近机、非机类专业对机械设计基础课程最新的基本要求和教学改革的实际需要，在 2003 年初版的基础上重新编写而成的。编者在教材编写中力求贯彻以下意图：

1) 构建立体化教材。与本书配套的多媒体 CAI 教学辅助软件构成立体化课程教材，采用了二维或三维动画设计，利用多种软件技术以运动仿真、装配仿真等形式展现常用机构、通用零件的工作原理、结构特点、几何与运动设计等方面的复杂内容。为实现形象化、立体化教学，提高教学效益，提供了软件方面的可行性。对于一些实践性强的难点内容，则采用了视频剪辑处理技术，将在工程实际中采集的实况录像插入到教学软件中，以丰富和充实教学素材。在教学软件中，还编入本章教学要求、学习指南、习题测验等，以帮助学生深入理解基本概念、基本理论，把握重点，突破难点。

2) 考虑到近机类、非机类专业对本课程的教学要求，编者对教材内容进行了必要的整合。按照课程内容本身的内在规律和建立多媒体教学平台的需要，将全书分为总论，常用机构，联接，机械传动，轴系零、部件，机械的平衡、调速与弹簧共六个教学模块。在内容选择上突出实用性，尽量简明扼要，简化公式推导，方便教学。

3) 随着机械设计新理论、新技术的迅速发展，教材适度增加了现代设计方法简介。如计算机辅助设计、优化设计、可靠性设计、有限元等内容，以使学生对现代设计方法在机械设计方面的应用有一个初步的了解，培养学生的创新意识和运用知识的能力。

参加本书编写的有：王春香（第 1 章，第 2 章 2.2，第 3 章，第 4 章，第 6 章 6.1 ~ 6.9）；关丽坤（第 2 章 2.3，第 5 章，第 6 章 6.10，第 7 章，第 10 章，第 11 章，第 17 章）；高耀东（第 2 章 2.1、2.4，第 8 章，第 9 章，第 12 章，第 13 章）；张永红（第 15 章，第 16 章，第 18 章及附录）；高琳、潘宁美（第 14 章）。本书由王春香担任主编，关丽坤、高耀东、张永红担任副主编。全书由北京工业大学王大康教授担任主审，并提出许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，误漏之处恐属难免，恳请读者给予指正。

编 者

目 录

前言

第一篇 总 论

第 1 章 机械设计基础概论·····	1	2.2 机械优化设计·····	18
1.1 本课程研究的对象、内容和任务·····	1	2.3 机械可靠性设计·····	23
1.2 机械设计的基本要求及一般过程·····	3	2.4 有限元法·····	26
1.3 机械零件设计的基本知识·····	5	习题·····	28
1.4 机械零件的强度·····	7	第 3 章 平面机构的组成和运动	
1.5 机械零件的材料和选用原则·····	11	简图·····	30
1.6 机械零件的工艺性及标准化·····	14	3.1 平面机构的组成·····	30
习题·····	15	3.2 平面机构的运动简图·····	32
第 2 章 现代机械设计方法简介·····	17	3.3 平面机构的自由度·····	35
2.1 计算机辅助设计·····	17	习题·····	40

第二篇 常用机构

第 4 章 平面连杆机构·····	42	6.2 齿廓啮合基本定律·····	79
4.1 概述·····	42	6.3 渐开线齿廓·····	80
4.2 铰链四杆机构的类型及应用·····	42	6.4 渐开线标准齿轮的主要参数和	
4.3 铰链四杆机构曲柄存在条件·····	46	基本尺寸计算·····	82
4.4 铰链四杆机构的演化·····	48	6.5 渐开线直齿圆柱齿轮的啮	
4.5 平面四杆机构的基本特性·····	53	合传动·····	86
4.6 平面四杆机构的设计·····	55	6.6 渐开线齿廓的切齿原理·····	89
习题·····	59	6.7 渐开线齿廓的根切现象、最少	
第 5 章 凸轮机构·····	61	齿数和变位齿轮·····	92
5.1 凸轮机构的应用和类型·····	61	6.8 平行轴斜齿圆柱齿轮机构·····	94
5.2 从动件的常用运动规律·····	63	6.9 锥齿轮机构·····	99
5.3 图解法设计凸轮轮廓·····	67	6.10 蜗杆机构·····	104
5.4 解析法设计凸轮轮廓·····	70	习题·····	109
5.5 凸轮机构基本尺寸的确定·····	72	第 7 章 间歇运动机构·····	111
习题·····	75	7.1 棘轮机构·····	111
第 6 章 齿轮机构·····	77	7.2 槽轮机构·····	114
6.1 概述·····	77	7.3 不完全齿轮机构·····	116

7.4 凸轮间歇运动机构	116	习题	117
--------------	-----	----	-----

第三篇 联 接

第8章 螺纹联接	118	8.8 提高螺纹联接强度的措施	136
8.1 螺纹	118	8.9 螺旋传动	138
8.2 螺旋副的受力分析、自锁和效率	120	习题	142
8.3 机械制造常用螺纹	122	第9章 键联接、花键联接和销	
8.4 螺纹联接的基本类型和标准联接件	125	联接	143
8.5 螺纹联接的预紧和防松	128	9.1 键联接和花键联接	143
8.6 螺纹联接的强度计算	130	9.2 销联接	147
8.7 螺纹联接件的材料和许用应力	134	习题	148

第四篇 机 械 传 动

第10章 齿轮传动	149	11.3 周转轮系及其传动比	183
10.1 概述	149	11.4 复合轮系及其传动比	186
10.2 齿轮的失效形式及计算准则	149	11.5 轮系的应用	187
10.3 齿轮的材料、热处理及传动精度	151	11.6 其他新型行星齿轮传动简介	190
10.4 直齿圆柱齿轮传动的作用力及计算载荷	154	习题	192
10.5 直齿圆柱齿轮传动承载能力计算	155	第12章 带传动	194
10.6 直齿圆柱齿轮传动的设计	160	12.1 概述	194
10.7 斜齿圆柱齿轮传动	162	12.2 带传动工作情况的分析	196
10.8 直齿锥齿轮传动	165	12.3 普通V带传动的设计计算	200
10.9 齿轮的结构设计及齿轮传动的润滑和效率	167	12.4 V带轮的结构设计	208
10.10 蜗杆传动	171	习题	210
习题	178	第13章 链传动	212
第11章 轮系	181	13.1 链传动的特点和应用	212
11.1 轮系的类型	181	13.2 传动链和链轮的结构	212
11.2 定轴轮系及其传动比	181	13.3 链传动的运动分析和受力分析	216
		13.4 滚子链传动的设计计算	218
		13.5 链传动的布置和润滑	222
		习题	223

第五篇 轴系零、部件

第14章 轴	225	14.4 轴的弯扭合成强度计算	232
14.1 概述	225	14.5 轴的刚度计算	237
14.2 轴的扭转强度计算	228	习题	239
14.3 轴的结构设计	228	第15章 轴承	241

15.1 滑动轴承	241	16.1 概述	274
15.2 滚动轴承的组成、类型及特点	251	16.2 联轴器	274
15.3 滚动轴承的代号	254	16.3 离合器	278
15.4 滚动轴承的选择计算	257	16.4 联轴器和离合器的选用	280
15.5 滚动轴承的组合设计	266	16.5 制动器	281
习题	272	习题	283
第16章 联轴器、离合器和制动器	274		

第六篇 机械的平衡、调速与弹簧

第17章 机械的平衡与调速	284	18.1 概述	296
17.1 回转件的平衡	284	18.2 圆柱螺旋压缩(拉伸)弹簧的几何 参数和特性曲线	299
17.2 机械速度波动的调节	288	18.3 圆柱螺旋弹簧的设计计算	301
习题	294	习题	304
第18章 弹簧	296		
附录	306		
参考文献	308		
读者信息反馈表			

第一篇 总 论

第 1 章 机械设计基础概论

【本章提示】

1. 介绍机械、机器、机构、零件、部件等概念，明确本课程的研究对象、内容和任务。
2. 阐明机械设计的基本要求及一般过程。
3. 扼要介绍零件设计的基本知识。

1.1 本课程研究的对象、内容和任务

1.1.1 基本概念

1. 机械、机器及机构

为了满足生活和生产的需要，人类创造并发展了机械，以代替和减轻人的体力和脑力劳动。那么，何谓机械呢？它是机器和机构的总称。

机器的类型很多，用途也各不相同，外形结构千差万别，但仔细分析，可以发现它们具有许多共性。

例如图 1-1 所示的单缸内燃机，其中，气缸体 1、活塞 2、连杆 3、曲轴 4 组成主体部分，当燃气在缸内推动活塞作往复移动时，通过连杆使曲轴作连续转动；凸轮轴 6（进气阀 9、排气阀 10）、进排气顶杆 5 和气缸体组成进排气的控制部分，凸轮轴转动，使得气阀按一定的运动规律启闭，以分别控制燃气的输入和废气的排出；凸轮轴上的齿轮 7、曲轴上的齿轮 8 和气缸体组成传动部分，曲轴转动，通过曲轴上的齿轮 8、凸轮轴上的齿轮 7 将其运动传给凸轮轴。上述三个部分

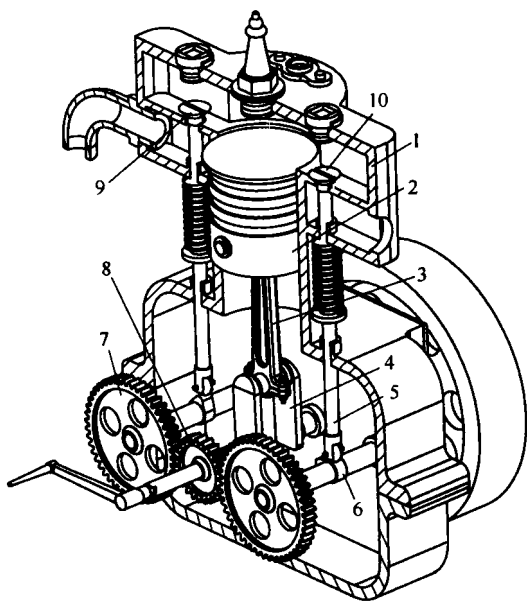


图 1-1 单缸内燃机

1—气缸体 2—活塞 3—连杆 4—曲轴 5—顶杆
6—凸轮轴 7、8—齿轮 9—进气阀 10—排气阀

相互配合,共同保证整个内燃机协调地工作,从而将燃气的热能不断地转换为曲轴的机械能。

又如图 1-2 所示的颚式破碎机,由电动机 1、带轮 2 和 3、V 带 4、偏心轴 5、动颚板 6、肘板 7、定颚板 8 等组成。当电动机通过 V 带驱动带轮运转时,偏心轴则绕轴 A 转动,使动颚板作平面运动,辗碎动颚板与定颚板之间的矿石,从而使动颚板做有用的机械功。

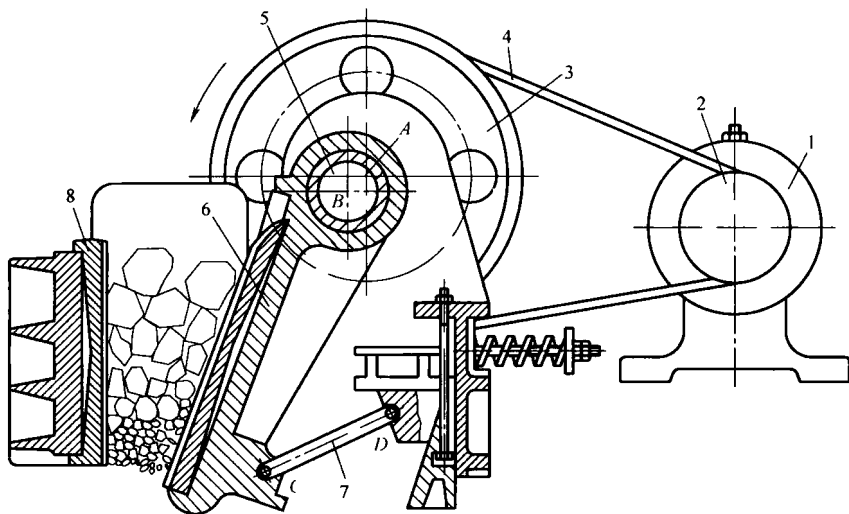


图 1-2 颚式破碎机

1—电动机 2、3—带轮 4—V 带 5—偏心轴 6—动颚板 7—肘板 8—定颚板

从以上示例可知:机器是一种能实现确定的机械运动,又能做有用的机械功或完成能量、物料和信息转换或传递的装置。根据用途的不同,可将它们分为用来实现其他形式的能量与机械能之间变换的动力机器(电动机、内燃机、发电机等)、做机械功或搬运物料的工作机器(轧钢机、颚式破碎机、金属切削机床、起重机、汽车、飞机等)和作信息获取或变换的机器(照相机、打字机、录音机等)。如果只能传递运动和力或改变运动和动力参数、运动形式的机械传动装置则称为机构。简单地说,凡是能够实现预期的机械运动的实物组合即为机构。若不讨论做机械功或完成能量、物料和信息转换或传递方面的问题,机器便可以看做机构。据此,内燃机的主体部分就称为连杆机构,进排气控制部分可称为凸轮机构,传动部分则称为齿轮机构,整个内燃机就是由这三个基本机构组成的;同理,颚式破碎机的主体部分也称为连杆机构,传动部分则称为 V 带传动机构,整个颚式破碎机就是由这两个基本机构组成的。

机器的种类繁多,其构造、性能和用途各不相同,但就其功能组成而言,一般都由原动机(动力部分)、工作部分、传动部分和操纵控制部分所组成。

对于较复杂和自动化程度较高的机器,如计算机控制的全自动洗衣机、数控机床等,往往还包括完成各种功能的信息处理、传递系统。

综上所述可见,机器是由机构组成的,但仅从运动的观点来看,两者之间并无差别,故工程上将机器和机构统称为机械。另外,从功能分析的观点来看机器,还可以认为机器是由动力部分、传动部分、执行部分和控制部分等基本部分组成的。

2. 零件和部件

各种机械中普遍使用的机构称为常用机构,如齿轮机构、连杆机构、凸轮机构、间歇机构等。若从制造的角度看,机器是由若干个机械零件(简称零件)装配而成的,零件是机器中不可拆卸的制造单元,如齿轮、轴、键、螺钉等。有时,为了装配方便,先将完成共同任务一组协同工作的零件分别装配和制造成一个组合体,然后再装配整机,此种组合体称为部件。例如:滚动轴承、联轴器及自行车脚踏等。故从装配的角度来看,机器是由若干个部件装配而成的,部件是指机器的装配单元。工程中,通常用“机械零件”来泛指零件和部件。在各类机器中普遍使用的机械零件,称为通用零件,例如齿轮、轴、键、螺栓和轴承等;只在某些特定类型的机器中才使用的零件,称为专用零件,它常可以表征该机器的特点,例如内燃机的活塞、起重机的吊钩等。将机器看成是由零部件组成的,不仅有利于装配,也有利于机器的设计、运输、安装和维修。

1.1.2 本课程的内容、性质和任务

机械设计基础是工科机电类、近机类、非机类和工业设计各专业的主干课程,是学生必修的专业技术基础知识。该课程是以一般工况条件下的常用机构和通用机械零、部件为研究对象,以它们的工作原理、运动特性、结构形式,以及设计、选用和计算方法等为研究内容。对于巨型、微型以及高温、高速、高压或低温条件下工作的零、部件,则在有关专门课程中研究。

本课程是一门重要的技术基础课程,在从基础理论课程学习过渡到专业课程学习的过程中,起着承上启下的作用。其主要先修课程是机械制图、工程力学、机械制造基础、工程材料、金工实习等。本课程的基本任务是:

- 1) 培养学生正确的设计思想和创造性思维方法,了解和贯彻国家的技术经济政策和法规。
- 2) 熟悉常用机构和通用零件的工作原理、结构特点和应用场合。
- 3) 掌握通用零、部件的选用和设计的基本方法,初步具有正确运用各类标准、规范、手册、图册、CAD及网络信息等工程技术资料设计简单机械传动装置的能力。
- 4) 了解机械设计的革新和发展,扩大学生的视野,使所学知识具有时代性。

1.2 机械设计的基本要求及一般过程

机械设计是为了实现机器的某些特定功能要求而进行的创造过程,它可以是开发创造出新产品,也可以是对现有机械局部进行创新改革。概括地说,机械设计就是设计人员按照所设计的机械需要具备的功能,运用设计理论、方法和技能,通过创造性思维和实践活动,将该机械的系统及其零部件的参数和具体结构用图样和文字(实物或电子手段)等技术文件表达出来。

1.2.1 机械设计的基本要求

机械的种类繁多,但其设计的基本要求大致相同,主要有以下几个方面:

- (1) 使用要求 所设计的机械在规定的使用期限内,保证实现预定的生产上或生活上

所要求的功能或性能,这是设计机器的根本目的,也是选择和确定方案的依据。这项要求主要靠合理地选择机械的工作原理、机构的类型,正确地设计传动方案和合理地配置辅助系统等来实现。

(2) 可靠性要求 机械的可靠性是指机械在既定的使用条件和使用期限内,能够完成预定功能的能力。常用的衡量可靠性的指标是可靠度。可靠度即为机械完成其预定功能的概率。机械的重要性不同,对其可靠度的要求也不同。为了满足这一要求,必须从机械系统的整体设计、零部件的结构设计、材料及热处理的选择、加工工艺的制定等方面加以保证。

(3) 经济性要求 机械的经济性是一个综合性指标,它体现在设计、制造和使用的全过程中,具体表现为低的设计制造成本,高生产率,高效率以及低的日常能耗、维护费用等。

(4) 其他要求 在满足以上基本要求的基础上,不同用途的机械还有其特殊要求,如高级轿车的变速器有低噪声要求;医药、食品、印刷和纺织机械有不能污染产品的要求;流动使用的大型设备有便于运输和安装的要求。此外,还应考虑环保问题,产品外形和色彩符合工业美学原则,具有时代感等要求。

上述要求往往是矛盾的,在设计时应依照主要要求进行设计,适当照顾其他要求。

1.2.2 机械设计的一般过程

机械设计过程一般可分为以下几个阶段:

(1) 规划和准备阶段 主要是根据市场信息、市场预测或用户要求确定设计任务。要在反复调查研究、分析和论证的基础上作出决策,编制设计任务书。设计任务书一般包括机械的用途、功能、基本结构形式、主要设计参数、动力来源及主要技术经济指标等内容。

(2) 方案设计阶段 确定机械的工作原理,执行部分、动力部分和传动部分各采用何种方案,这三大块如何连接、怎样布置,操纵控制它们的装置采用什么方案。此阶段是设计中的重要阶段,应反复推敲、科学论证、全面评价,力求最优方案。

(3) 技术设计阶段 就是要将总体方案具体化,主要包括机械的运动设计、动力计算、零部件的材料选择、结构设计和主要零部件的工作能力(主要是强度)计算、绘制部件装配图、总装配图及零件图等各种图样等。此阶段应尽量采用 CAD 技术,以提高设计质量和设计效率。

(4) 试验分析阶段 图样设计完成后,需要编制必要的技术文件,进行产品试制、试运行或在生产现场试用,获得预期的设计要求,否则需要进行反复的修改,直至最后通过鉴定。

上述的机械设计过程和设计方法应该说大体上是属于常规设计。随着现代科学技术、工程技术和应用数学特别是计算机技术的飞速发展,一系列以计算机为核心工具的现代设计方法和设计哲理如优化设计、可靠性设计、有限元法、创新设计、计算机辅助设计、模块化设计、反求工程、并行工程等,在机械设计以及工程设计中获得了发展、推广和应用。有关上述的一些现代设计方法,将在第 2 章中作概要介绍。

1.3 机械零件设计的基本知识

1.3.1 机械零件的主要失效形式

零件由于某些原因不能在既定的工作条件和使用期限内正常工作,即丧失工作能力或达不到设计功能的现象,称为失效。零件的主要失效形式大致有以下几种:

(1) 断裂 零件在承受过大载荷时,某一危险截面的应力超过零件的强度极限时,会发生断裂,这种断裂称为过载断裂;若受变应力长期作用而发生的断裂,称为疲劳断裂。疲劳断裂是多数机械零件的主要失效形式。

断裂是零件的严重失效形式,它不仅使零件丧失工作能力,有时会造成严重的人身和设备事故,应力求避免。

(2) 表面失效 由于机械中各零件接合面之间都是静或动的接触关系,载荷作用于接合表面,摩擦发生于接合表面,环境介质也包围于零件工作表面,故零件的损伤与失效常发生于工作表面。表面失效主要有疲劳点蚀、胶合、磨损、压溃和腐蚀等。

(3) 过量变形 零件受载后一般会产生弹性变形。过大的弹性变形会使零件或机器不能正常地工作。当严重过载时,即当应力超过零件材料的屈服极限时,还可能产生塑性变形,这不仅会改变零件的尺寸和形状,破坏零件间的配合关系,也会使零件失去工作能力。

(4) 破坏正常工作条件而引起的失效 有些零件只有在一定的工作条件下才能正常工作,否则就会引起失效。如摩擦传动的打滑、液体摩擦滑动轴承油膜破坏等均为破坏正常工作条件而引起的失效。

1.3.2 机械零件的工作能力计算准则

进行机械零件设计时,必须根据零件的失效形式分析失效的原因。在不发生失效的条件下,零件所能安全工作的限度,称为工作能力或承载能力。对于具体的零件,其失效形式取决于受载情况、结构特点和工作条件。针对不同失效形式建立的判定零件工作能力的条件,称为工作能力计算准则,主要包括以下几种:

(1) 强度 强度是零件抵抗整体断裂、塑性变形和表面失效(磨粒磨损及腐蚀除外)的能力。强度计算是零件应满足的基本要求。保证零件强度的计算条件为

$$\sigma \leq [\sigma] \text{ 或 } \tau \leq [\tau] \quad (1-1)$$

式中 σ 、 τ ——零件危险截面的最大计算正应力和最大计算切应力(MPa);

$[\sigma]$ 、 $[\tau]$ ——零件的许用正应力和许用切应力(MPa)。

(2) 刚度 刚度是零件受载后抵抗弹性变形的能力。对于某些零件(如机床主轴和电动机主轴),若刚度不足,会使机器不能正常工作。保证零件刚度的计算条件为

$$f \leq [f] \quad (1-2)$$

式中 f ——零件工作时的广义变形;

$[f]$ ——零件工作时的广义许用变形,如许用挠度、许用偏转角和许用扭转角等。

(3) 耐磨性 机械中,凡是具有相对运动或相对运动趋势的接触表面都存在摩擦。摩擦表面物质在相对运动中不断损耗,造成形状和尺寸逐渐改变的现象称为磨损。

1) 磨损的过程。一般情况下,零件的磨损过程大致可以分为三个阶段,如图 1-3 所示:

①磨合磨损阶段(OA段)。它是新机械在运转初期,通过逐渐增大载荷,快速磨去零件制造时表面遗留下来的波峰尖部。随着波峰的降低,接触面的实际面积增大,磨损速度逐渐减缓,零件进入稳定磨损阶段。②稳定磨损阶段(AB段)。零件的磨损是缓慢而稳定的,其对应的时间就是零件的使用寿命。③剧烈磨损阶段(BC段)。组成摩擦副零件间的间隙明显增大,温升剧增,机械效率大幅下降,并伴有异常的振动和噪声。此时应立即检修,更换零件。

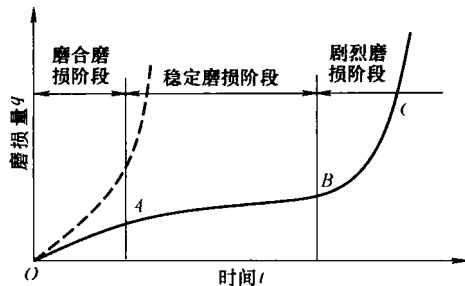


图 1-3 磨损过程

以上是正常情况下的磨损过程。但如果摩擦表面压强过大、相对速度过高、润滑不良时,则磨合期缩短,会立即转入剧烈磨损阶段,使零件过早报废,如图 1-3 中虚线所示。

2) 磨损的类型。按照破坏机理,磨损分为磨粒磨损、粘着磨损(也称胶合)、表面疲劳磨损(又称疲劳点蚀)和腐蚀磨损四种基本类型。

3) 耐磨性计算。耐磨性是指作相对运动的零件工作表面抵抗磨损的能力。由于磨损机理复杂,除疲劳磨损外,目前尚无公认的定量计算方法,一般采用条件性计算。例如对于非液体摩擦,为了防止表面膜破坏而产生过度磨损,通常用限制摩擦副工作表面压强值的方法。即

$$p \leq [p] \quad (1-3)$$

式中 p ——零件工作表面的压强(MPa);

$[p]$ ——零件工作表面材料的许用压强(MPa)。

有些相对滑动速度较大的摩擦表面,为了防止摩擦面温升过高,避免表面膜破坏,还要限制摩擦发热量(摩擦功耗)。即

$$pv \leq [pv] \quad (1-4)$$

式中 v ——零件工作表面的相对滑动速度(m/s);

$[pv]$ ——零件工作表面的 pv 许用值(MPa·m/s)。

4) 振动稳定性。振动稳定性是指防止高速运转的机械及其零件发生共振,使其转速避开共振区域。如果机械或零件的固有频率等于或接近受激振源作用引起的强迫振动频率时,就会产生共振。共振不仅影响机械的正常工作,产生噪声,而且还可能造成破坏性事故。

设计零件时,上述各项工作能力的计算不必全部进行,应视具体情况而定。一般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,确定零件的主要参数或基本尺寸。

1.3.3 机械零件设计一般步骤

当机械的总体布置和传动方案已经确定,力学分析已基本完成时,就要进行零件的设计,其一般步骤如下:

(1) 拟定计算简图 即依据零件的基本结构和载荷情况,建立力学模型、进行载荷分析等。

(2) 选择材料 应根据零件的工作要求和条件, 综合材料的力学、物理和化学性能, 以及经济因素和资源状况, 选择合适的材料和热处理方法。

(3) 工作能力计算 针对零件可能出现的失效形式, 确定工作能力计算准则, 计算和确定出零件的基本尺寸和主要参数。

(4) 结构设计 依据工作能力确定出的零件基本尺寸和主要参数, 考虑加工和装配等要求, 确定零件的形状和全部尺寸。

(5) 绘制工作图并写出设计计算说明书 完成上述工作后, 就可绘制出零件工作图, 并撰写设计计算说明书。

1.4 机械零件的强度

1.4.1 载荷和应力

1. 载荷及其分类

机械零件所受的载荷有力、弯矩和转矩等。载荷的类型可分为:

(1) 静载荷和变载荷 不随时间变化或变化缓慢或变化幅度很小的载荷, 称为静载荷, 如零件的重力等。相反, 随时间作周期性或非周期性变化的载荷, 称为变载荷。实际中, 大多数的机械及其零部件都是在变载荷条件下工作的。

(2) 名义载荷和计算载荷 机械零件在理想工况条件下所受的载荷称为名义载荷。零件在理想工况条件下的理想载荷实际上几乎是不存在的。考虑到实际工况下零件还会受到各种附加的载荷, 为此, 通常采用引入载荷系数 K (≥ 1) 的办法来大致估计这些因素的影响。载荷系数与名义载荷的乘积称为计算载荷。

2. 应力及其分类

在载荷的作用下, 零件上将产生某种应力。按照名义载荷用力学公式求得的应力称为名义应力, 按照计算载荷求得的应力称为计算应力。

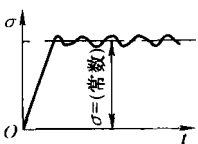
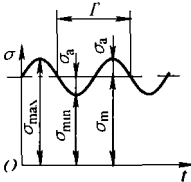
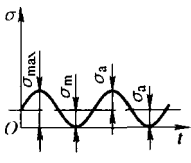
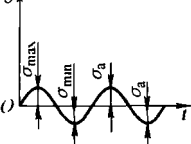
应力的种类有静应力和变应力。参见表 1-1 中的应力图, 不随时间变化或变化缓慢的应力称为静应力 (如表 1-1 中图 a)。静应力只能由静载荷产生, 并且只有载荷方向和大小相对零件不变时的应力, 才是静应力。随时间显著变化的应力称为变应力 (如表 1-1 中图 b、c、d)。变载荷作用在零件上, 肯定产生变应力。如果静载荷的方向相对零件变化时, 则在零件中也会产生变应力, 如齿轮、带、滚动轴承等。大多数零件都在变应力状态下工作。

在变应力中, 周期、应力幅和平均应力都不随时间变化的变应力称为稳定变应力。稳定变应力有五个参数: 最大应力 $\sigma_{\max}$ 、最小应力 $\sigma_{\min}$ 、平均应力 σ_m 、应力幅 σ_a 和循环特征 r 。静应力及稳定变应力类型与其特征参数见表 1-1。不难看出, 应力循环特征 r 的变化范围为: $-1 \leq r \leq +1$ 。

1.4.2 许用应力

许用应力是强度条件的尺度和判据。合理的许用应力值可以使零件在具有足够强度及寿命的前提下, 尺寸小、质量轻。许用应力的确定一般采用下式进行计算

表 1-1 静应力及稳定变应力类型与其特征参数

应力类型	静应力	非对称循环应力	脉动循环应力	对称循环应力
应力图				
平均应力 σ_m	$\sigma_m = \sigma_{\min} = \sigma_{\max}$	$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$	$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2}$	0
应力幅 σ_a	0	$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$	$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2}$	$\sigma_a = \sigma_{\min} = \sigma_{\max}$
循环特征 r	+1	$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$	0	-1

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\lim}}{S}, [\tau] = \frac{\tau_{\lim}}{S} \quad (1-5)$$

式中 $\sigma_{\lim}$ 、 $\tau_{\lim}$ ——分别为极限正应力和极限切应力 (MPa);
 S ——安全系数。

显然, 许用应力的大小取决于零件材料的极限应力和安全系数。

1. 极限应力

极限应力的确定与零件承受的应力种类和其材料的性质有关。

在静应力作用下, 对于塑性材料 (碳钢、合金钢等) 制造的零件, 其主要失效形式为塑性变形, 所以极限应力取材料的屈服点 (σ_s , τ_s), 即 $\sigma_{\lim} = \sigma_s$, $\tau_{\lim} = \tau_s$; 对于脆性材料 (铸铁、一些有色金属等) 制造的零件, 其主要失效形式为脆性断裂, 所以极限应力取材料的强度极限 (σ_b , τ_b), 即 $\sigma_{\lim} = \sigma_b$, $\tau_{\lim} = \tau_b$ 。

在变应力作用下, 零件的主要失效形式为疲劳破坏, 在计算变应力条件下工作零件的许用应力时, 应以其疲劳极限作为极限应力。关于疲劳极限的概念请参见 1.4.4 节。

2. 安全系数

合理选用安全系数是十分重要的, 安全系数过大, 则零件尺寸大, 机器笨重, 成本高; 安全系数过小, 机器不安全。具体取值通常采用查表法, 不同的机械制造行业或部门, 经过长期实践制定出适合本行业或部门的安全系数或许用应力等专用规范, 以供查用, 详情见以后的各章节。有时, 如果没有可靠的资料可直接确定安全系数时, 则可采用部分系数法。有关该方法的详情可查阅相关参考资料。

1.4.3 机械零件的静强度

在静应力作用下的强度计算, 简称静强度计算。静强度计算条件见式 (1-1)。对于在单向应力状态下工作的零件, 零件危险截面上的最大工作应力即为计算应力; 对于在平面和三向应力状态下工作的零件, 应按照一定的强度理论来计算零件危险截面上的最大工作应力

并作为计算应力。例如,在通用零件螺栓联接(受拉扭复合应力)设计中,常用到第Ⅳ强度理论;转轴(受弯扭复合应力)的强度计算常用第Ⅲ强度理论。

1.4.4 机械零件的疲劳强度

1. 疲劳破坏过程

零件在变应力作用下,经过一段时间后,若最大工作应力超过其疲劳极限,零件的损坏形式将是疲劳断裂。疲劳断裂具有以下特征:①疲劳断裂的最大应力远低于静应力下材料的强度极限;②不论脆性材料还是塑性材料,其疲劳断口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工作一段时间后,在表面应力较大处产生初始微裂纹,形成疲劳源,然后,此微裂纹随着应力循环次数的增加而逐渐扩展,直到余下的尚未断裂的截面不足以承受外载荷时,便发生突然断裂。如果零件内部有缺陷或表面有划伤、刻痕,则疲劳裂纹将首先在这些部位产生和扩展,即疲劳破坏对各种缺陷具有高敏感性。

金属的宏观疲劳断口上总是明显地存在两个区域:一个是在变应力重复作用下裂纹两侧相互摩擦形成的表面光滑的疲劳区;另一个是最终发生脆性断裂后形成的粗糙的瞬断区。

2. 疲劳极限与疲劳曲线

疲劳断裂不同于一般的静力断裂,它是损伤到一定程度后,也就是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)有关。

在任一给定循环特征 r 的条件下,应力经过 N 次循环后,材料不发生疲劳破坏时的最大应力,称为疲劳极限,用 σ_{rN} 表示。由材料力学可知,根据疲劳试验结果,绘制出表示应力循环次数 N 与疲劳极限 σ_{rN} 之间关系的曲线称为疲劳曲线(σ - N 曲线),如图1-4所示。从图中可以看出,应力越小,试件能够经受的循环次数 N 就越多,即寿命越长。

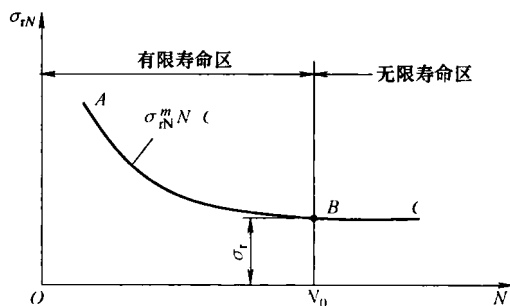


图 1-4 σ - N 疲劳曲线

查看图1-4所示的疲劳曲线 ABC , BC 段趋于水平。与曲线上 B 点相对应的循环次数 N_0 称为应力循环基数,对应于 N_0 的疲劳极限 σ_{rN} 记为 σ_r ,称为材料的持久极限。随着材料性质的不同, N_0 在很大范围内变动。

疲劳曲线左半部 AB ($N < N_0$)段代表有限寿命疲劳阶段,在此阶段,试件经过 N 次应力循环后,若应力超过了与之对应的疲劳极限 σ_{rN} ,就会发生疲劳破坏。故以后 σ_{rN} 特指有限寿命的疲劳极限。 AB 段曲线可近似用下列方程表示为

$$\sigma_{rN}^m N = C \quad (1-6)$$

式中 C ——常数;

m ——与材料性质、试样形式和应力状态有关的指数。

当 $N = N_0$ 时, $\sigma_{rN} = \sigma_r$,由式(1-6)可得

$$\sigma_{rN}^m N = \sigma_r^m N_0 = C$$

因此,引入寿命系数 k_N 后,材料在有限寿命 N 时的疲劳极限 σ_{rN} 为

$$\sigma_{rN} = \sigma_r \sqrt{\frac{N_0}{N}} = k_N \sigma_r \quad (1-7)$$

则

$$k_N = \sqrt{\frac{N_0}{N}} = \frac{\sigma_{rN}}{\sigma_r} \quad (1-8)$$

疲劳曲线右半部 BC ($N \geq N_0$) 段, 代表了无限寿命疲劳阶段, 在此阶段, 只要试件经受的最大应力不超过持久极限 σ_r , 就可经历任意多次数的应力循环而不会发生疲劳破坏。

3. 影响疲劳强度的因素

前面讲到的疲劳极限均是指材料标准试件的疲劳极限, 但由于零件的实际尺寸、形状和表面质量等因素的影响, 使得零件的疲劳极限要低于材料试件的疲劳极限。影响零件疲劳极限的因素主要有: 应力集中、绝对尺寸和表面状态等。这些影响因素常用相应的应力集中系数、尺寸系数和表面状态系数等来计算, 需要时这些系数值可通过相关的设计手册查得。

4. 疲劳强度计算

各种材料的持久极限应由疲劳试验获得, 然后通过以上各式在考虑各种影响因素后, 求得零件的极限应力, 最后利用式 (1-5) 确定出许用应力, 以便进行相应的疲劳强度计算。

1.4.5 机械零件的接触强度和挤压强度

1. 接触强度

摩擦轮传动、齿轮传动、滚动轴承传动等, 在理论上, 载荷是通过点或线传递的, 而实际上, 零件受载后在接触部分要产生局部弹性变形而形成面接触。这种接触面积很小而局部应力很大的应力称为接触应力, 在表面接触应力作用下的零件强度称为接触强度。如图 1-5 所示, 两个轴线平行的圆柱体在承受法向载荷 F_n 时, 由于局部弹性变形, 接触区为一狭长矩形 (截面积为 $2ab$), 在此很小的接触区内将产生很大的接触应力, 在垂直于轴线的截面内接触应力呈椭圆分布, 两圆柱体接触处接触应力的分布规律和数值大小相同, 最大接触应力 σ_H 发生在接触区的中线上。其大小可由弹性力学的赫兹 (H. Hertz) 公式求出:

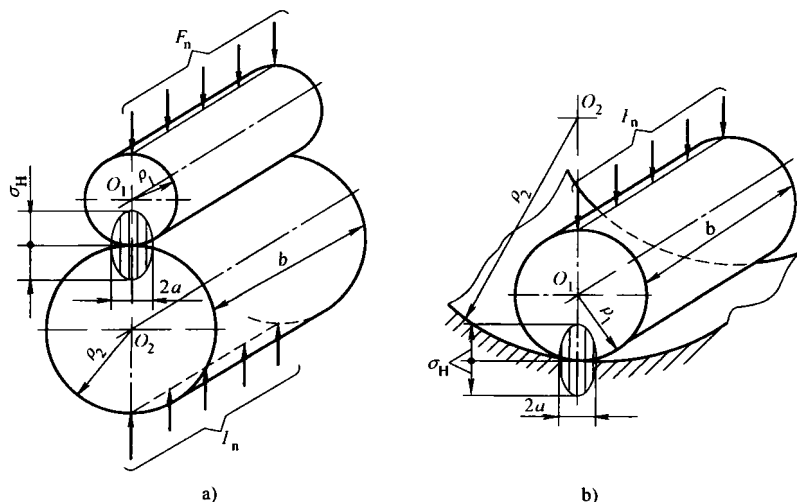


图 1-5 两圆柱体的内外接触应力

a) 外接触 b) 内接触

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_n}{\pi b} \frac{\left(\frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2}\right)}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}}} \quad (1-9)$$

式中 F_n ——作用在两圆柱体上的法向力 (N);

b ——两圆柱体的接触宽度 (mm);

E_1 、 E_2 ——分别为两圆柱体材料的弹性模量 (MPa);

μ_1 、 μ_2 ——分别为两圆柱体材料的泊松比;

ρ_1 、 ρ_2 ——分别为两圆柱体在接触处的曲率半径 (mm);

“+、-”——分别用于外接触 (图 1-5a) 和内接触 (图 1-5b)。

机械中的高副 (见 3.1.2 节) 结构, 如齿轮副、凸轮副、滚动轴承副等, 工作时零件的接触表面会产生很大的接触应力。接触应力一般是交变应力, 通常按脉动循环处理。在变化的接触应力反复作用下, 零件表面先是产生微小的疲劳裂纹, 有润滑时, 润滑油会渗入裂纹内, 在受挤压后产生很高的油压加速裂纹的扩展, 直至表层金属呈小片状剥落, 即在工作表面形成麻坑, 此种现象称为疲劳点蚀, 简称点蚀。点蚀的结果是使零件的接触面积减小, 不仅降低承载能力, 还会引起振动和噪声, 是润滑良好的高副零件常见的失效形式。

为防止疲劳点蚀, 设计时应满足式 (1-10) 的强度条件。即

$$\sigma_H \leq [\sigma_H] \quad (1-10)$$

式中 $[\sigma_H]$ ——许用接触应力 (MPa)。

2. 挤压强度

铰制孔螺栓、销钉、键、铆钉等联接件, 除了承受剪切外, 在联接件和被联接件的接触面上还相互压紧, 这种现象称为挤压。挤压面上的压强习惯上称为挤压应力。若挤压应力过大, 零件的接触表面将因出现压溃破坏而失效。即对于塑性材料的零件接触面将产生局部塑性变形, 而对于脆性材料的零件接触面将产生破碎。

通常, 接触面上的挤压应力的分布是不均匀的, 工程上一般采用简化计算, 假定挤压面上的应力是均匀分布的。这样, 挤压强度条件为

$$\sigma_p = \frac{F_n}{A} \leq [\sigma_p] \quad (1-11)$$

式中 F_n ——接触面上的作用力 (N);

A ——接触面在垂直于作用力方向的投影面积 (mm^2);

$[\sigma_p]$ ——相接触的零件中材料较弱者的许用挤压应力 (MPa)。

1.5 机械零件的材料和选用原则

制造机械零件最常用的材料是黑色金属 (钢和铸铁), 其次是有色金属及其合金、非金属材料 and 复合材料。

1.5.1 机械零件的材料

1. 钢

钢和铸铁都是铁碳合金, 它们的主要区别在于含碳量的不同。钢是指碳的质量分数低于