

高 等 学 校 教 材

机械学基础

赵继俊 姜雪 赵娥 编



化学工业出版社

TH11/49

2008

高等学校教材

机械学基础

赵继俊 姜 雪 赵 娥 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书涵盖了与通用机械零部件设计相关的力学基本知识和概念、机械工程常用材料的性能及热处理方法、公差与技术配合的基本概念、机械零部件的结构工艺性等内容。同时本书也系统地阐述了通用机构及通用机械零部件的工作原理与设计理论,内容包括:机构的组成原理及平面杆机构、凸轮机构、齿轮机构、间歇机构、带传动与链传动、轴承、轴及联轴器等。

本书适用于自动化、测控技术、通信和电气工程等非机械类专业本科学生学习,可作为技术基础课“机械学基础”或“机械设计基础”参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

机械学基础/赵继俊,姜雪,赵娥编. —北京:化学工业出版社,2008.1
高等学校教材
ISBN 978-7-122-01708-6

I. 机… II. ①赵…②姜…③赵… III. 机械学-高等学校-教材 IV. TH11

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第196831号

责任编辑:程树珍 金玉连
责任校对:陈 静

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张13¼ 字数341千字 2008年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:22.00元

版权所有 违者必究

前 言

教育部实施的“高等学校教学质量和教学改革工程”是继2001年提出“加强高等学校本科教学工作”、“提高教学质量”等一系列的措施和意见之后全面提升高等教育人才培养质量的又一重大举措。“质量工程”包括对高等教育人才培养模式的改变、教学内容的改变、教学体系的改变以及如何提高在校大学生的质量问题四个方面内容。

为适应“质量工程”对教学改革的需要,培养新型高素质人才,拓宽知识面,加强素质教育,培养创新能力,就要不断增设现代应用技术课程,对多学科、多领域知识加以融合和衔接。对电类专业,机械设计系列课程只作为必须掌握的一般性工程基础知识,在现今国内许多高校的人才培养计划中都作为一门课程进行教学,称为“机械学基础”或“机械设计基础”。

本书以注重电类专业的知识结构、系统性和连贯性为主导思想,阐述了机械设计中力学基本知识、常用工程材料及热处理方法、机械设计的结构工艺性、公差与技术配合基础、通用机构的工作原理分析及设计、通用机械零部件的设计理论。本书力求通过课堂讲授结合实验和课程设计等实践环节,使电类专业学生具有常见机械结构分析和设计能力,以达到社会对高素质、创新人才的需要。

参加本书编写工作的有哈尔滨工业大学(威海)赵继俊(绪论、第1~4章),姜雪(第5、6、8、9、11章),赵娥(第7、10、12~14章),全书由赵继俊任主编,姜雪、赵娥任副主编。

由于编者水平所限,难免有不妥之处,恳切希望读者给予批评指正。

编者

2007年9月

目 录

0 绪论	1	2.5.1 选材的一般原则.....	30
0.1 机器的组成.....	1	2.5.2 工艺性原则.....	30
0.1.1 按功能分析机器的组成.....	1	2.5.3 经济性原则.....	31
0.1.2 按结构分析机器的组成.....	2	2.5.4 选材的一般步骤和应注意的	
0.2 机械设计的基本要求与一般过程.....	3	问题.....	31
0.2.1 机械设计的基本要求.....	3	3 机械零件设计制造的结构工艺性	33
0.2.2 机械设计的一般过程.....	3	3.1 机械零件结构设计的任务、特点、	
0.3 本课程的研究内容和学习方法.....	4	内容及过程.....	33
1 机械设计的力学基础知识	5	3.1.1 机械结构设计任务和特点.....	33
1.1 载荷和应力.....	5	3.1.2 机械结构设计的内容和过程.....	33
1.1.1 机械零部件的工作能力.....	5	3.2 机械结构设计的设计准则.....	35
1.1.2 机械零件的强度.....	5	3.2.1 实现预期功能的设计准则.....	35
1.1.3 载荷.....	5	3.2.2 满足强度要求的设计准则.....	36
1.1.4 应力.....	6	3.2.3 满足结构刚度的设计准则.....	37
1.2 机械零部件失效形式与设计准则.....	10	3.2.4 考虑加工工艺的设计准则.....	37
1.2.1 失效与防止失效的对策.....	10	3.2.5 考虑装配工艺的设计准则.....	38
1.2.2 失效分析与设计准则.....	12	3.2.6 考虑造型设计的准则.....	39
2 机械工程材料及钢的热处理	13	3.3 机械零件结构工艺性.....	39
2.1 金属材料的力学性能.....	13	3.3.1 零件热处理的结构工艺性.....	39
2.1.1 强度与塑性.....	13	3.3.2 铸件的结构工艺性.....	41
2.1.2 硬度.....	15	3.3.3 锻件的结构工艺性.....	42
2.1.3 韧性.....	16	3.3.4 焊接件的结构工艺性.....	43
2.1.4 线膨胀系数 α	16	3.3.5 零件切削加工结构工艺性.....	46
2.2 常用金属材料.....	16	3.3.6 零部件装配结构工艺性.....	48
2.2.1 铸铁.....	16	4 机械精度设计基础	50
2.2.2 碳素钢.....	17	4.1 概述.....	50
2.2.3 合金钢.....	19	4.1.1 互换性的含义.....	50
2.2.4 有色金属材料.....	21	4.1.2 互换性的作用.....	50
2.3 常用非金属材料.....	22	4.1.3 误差与公差.....	50
2.3.1 塑料.....	22	4.2 尺寸公差与配合.....	51
2.3.2 橡胶.....	24	4.2.1 公差与技术配合术语和定义.....	51
2.3.3 工业陶瓷.....	24	4.2.2 标准公差与基本偏差.....	53
2.3.4 复合材料.....	25	4.2.3 公差与配合在图上的标注.....	57
2.4 钢的热处理.....	25	4.2.4 公差与配合的选用.....	57
2.4.1 概述.....	25	4.3 表面粗糙度.....	59
2.4.2 钢的退火与正火.....	26	4.3.1 表面粗糙度的概念.....	59
2.4.3 钢的淬火与回火.....	26	4.3.2 表面粗糙度的评定.....	59
2.4.4 钢的表面淬火.....	27	4.3.3 表面粗糙度的选用与标注.....	60
2.4.5 钢的化学处理.....	28	4.4 形状与位置公差.....	62
2.4.6 金属零件的表面处理.....	29	4.4.1 概述.....	62
2.5 机械零件的选材.....	30	4.4.2 形位公差项目及其选用原则.....	64

5 机构的组成原理及平面连杆机构	66	7.3.2 普通 V 带传动的设计计算	98
5.1 平面机构的运动简图及自由度	66	7.3.3 V 带轮结构设计	101
5.1.1 机构的组成	66	7.4 链传动	103
5.1.2 平面机构的运动简图	67	7.4.1 链传动的类型、特点和应用	103
5.2 机构的自由度计算	68	7.4.2 传动链的结构特点	103
5.2.1 平面机构自由度计算公式	69	习题	104
5.2.2 计算平面机构自由度时应注意的几个问题	69	8 齿轮传动机构	105
5.3 铰链四杆机构的基本形式及其演化	71	8.1 齿轮机构的基本类型	105
5.3.1 铰链四杆机构的基本形式	71	8.2 齿廓实现定角速比的条件	105
5.3.2 铰链四杆机构的演化	72	8.3 渐开线齿廓	106
5.4 平面连杆机构曲柄存在的条件和特性	74	8.3.1 渐开线的形成及特性	106
5.4.1 铰链四杆机构曲柄存在的条件	74	8.3.2 渐开线齿廓满足定角速比要求	107
5.4.2 急回运动特性	75	8.4 齿轮各部分名称及渐开线标准齿轮	108
5.4.3 压力角与传动角	76	8.5 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动	110
5.4.4 死点位置	76	8.5.1 渐开线直齿圆柱齿轮的正确啮合条件	110
5.5 平面连杆机构的设计	77	8.5.2 渐开线直齿圆柱齿轮连续传动的条件	111
5.5.1 按照给定的行程速比系数设计四杆机构	77	8.6 渐开线齿廓的根切与变位	111
5.5.2 按给定连杆位置设计四杆机构	77	8.6.1 齿轮加工的基本原理	111
习题	78	8.6.2 轮齿的根切现象	113
6 凸轮机构	80	8.6.3 变位齿轮的概念	113
6.1 凸轮机构的应用和类型	80	8.7 斜齿圆柱齿轮传动	114
6.1.1 凸轮机构的应用	80	8.7.1 斜齿圆柱齿轮的啮合特点	114
6.1.2 凸轮机构的分类	81	8.7.2 斜齿圆柱齿轮的几何关系及尺寸计算	115
6.2 从动件的常用运动规律	82	8.7.3 斜齿轮传动正确啮合的条件	116
6.3 凸轮机构的压力角	85	8.7.4 当量齿轮和当量齿数	116
6.3.1 凸轮机构的压力角及其许用值	85	8.8 锥齿轮传动	116
6.3.2 压力角与凸轮机构尺寸的关系	85	8.8.1 锥齿轮概述	116
6.4 图解法设计凸轮轮廓曲线	86	8.8.2 直齿锥齿轮的几何关系和几何尺寸计算	117
6.4.1 凸轮轮廓设计的基本原理	86	8.9 蜗杆传动的特点和类型	117
6.4.2 用图解法设计凸轮轮廓线	86	8.9.1 蜗杆传动的特点	117
习题	89	8.9.2 普通圆柱蜗杆传动的主要参数和几何尺寸	117
7 带传动与链传动	90	8.10 轮系	120
7.1 带传动的类型和特点	90	8.10.1 轮系的类型	120
7.1.1 带传动的类型	90	8.10.2 定轴轮系的传动比计算	120
7.1.2 V 带的类型与结构	90	8.10.3 周转轮系的传动比计算	122
7.1.3 带传动的几何关系	90	8.10.4 复合轮系的传动比计算	125
7.2 带传动的工作情况分析	92	习题	126
7.2.1 带传动的受力分析	92	9 间歇运动机构	128
7.2.2 带传动的应力分析	93	9.1 棘轮机构	128
7.2.3 带传动的弹性滑动和打滑	94	9.1.1 棘轮机构的工作原理	128
7.2.4 带传动常用的张紧方法	95	9.1.2 棘轮机构的特点和应用	129
7.3 普通 V 带传动的设计计算	96		
7.3.1 带传动承载能力计算	96		

9.1.3 棘轮机构的设计	129	12.1.2 轴径的初步估算	162
9.2 槽轮机构	130	12.1.3 轴的结构设计	165
9.2.1 槽轮机构的工作原理	130	12.1.4 轴的强度计算	167
9.2.2 槽轮机构的主要参数选择及几何尺寸	131	12.1.5 轴的刚度计算	172
习题	132	12.2 联轴器	172
10 连接	133	12.2.1 刚性联轴器	173
10.1 可拆连接	133	12.2.2 弹性联轴器	174
10.1.1 螺纹连接	133	12.2.3 联轴器的选择	175
10.1.2 键连接	142	习题	175
10.1.3 销连接	143	13 轴承	176
10.2 不可拆连接	144	13.1 滑动轴承	176
10.2.1 铆接	144	13.1.1 摩擦状态	176
10.2.2 焊接	144	13.1.2 滑动轴承的结构形式	176
10.3 螺旋传动	145	13.1.3 轴承材料	178
10.3.1 概述	145	13.1.4 轴瓦结构	178
10.3.2 螺旋传动的设计计算	146	13.1.5 润滑剂和润滑装置	179
习题	147	13.2 滚动轴承	179
11 齿轮传动设计	149	13.2.1 滚动轴承的基本类型和特性	180
11.1 齿轮的失效形式和设计准则	149	13.2.2 滚动轴承的代号	182
11.1.1 齿轮的失效形式	149	13.2.3 滚动轴承的选择计算	184
11.1.2 设计准则	150	13.2.4 滚动轴承的组合设计	189
11.2 齿轮材料、热处理和精度等级	151	13.2.5 滚动轴承的润滑和密封	191
11.2.1 齿轮材料及热处理	151	习题	192
11.2.2 齿轮传动的精度	151	14 弹簧	194
11.3 直齿圆柱齿轮的强度计算	152	14.1 弹簧的功用和类型	194
11.3.1 受力分析和计算载荷	152	14.1.1 弹簧的主要功用	194
11.3.2 齿面接触强度计算	152	14.1.2 弹簧的类型	194
11.3.3 齿根弯曲强度计算	154	14.2 螺旋弹簧的材料、许用应力和制造	194
11.3.4 齿轮传动主要参数选择	155	14.2.1 弹簧的材料	194
11.4 斜齿圆柱齿轮的强度计算	157	14.2.2 弹簧的许用应力	194
11.4.1 受力分析	157	14.2.3 弹簧的制造	194
11.4.2 齿面接触强度计算	157	14.3 圆柱螺旋弹簧的设计	197
11.4.3 轮齿弯曲强度计算	158	14.3.1 弹簧的端部结构	197
11.5 齿轮的结构设计	158	14.3.2 弹簧的应力、变形和载荷-变形图	197
11.6 齿轮传动的效率和润滑	159	14.3.3 圆柱螺旋弹簧主要参数及几何尺寸计算	199
11.6.1 齿轮传动的效率	159	14.3.4 圆柱螺旋弹簧的设计计算	200
11.6.2 齿轮传动的润滑	160	习题	202
习题	160	参考文献	203
12 轴与联轴器	162		
12.1 轴	162		
12.1.1 轴的分类和材料	162		

0 绪 论

本章提要

在现代的日常生活和生产活动中，人们越来越多地使用着各种各样的机器，以代替或减轻人的体力劳动，提高生产效率和产品质量。在那些人类难以生存或接近的场合，更是要借助于机器代替人工。而大规模地使用现代机器进行生产，是一个国家生产高度发展和现代化程度的重要标志。

0.1 机器的组成

机器的种类繁多，它们的构造、用途和功能也各不相同。为了认识机器组成的基本规律，可从机器的功能和结构等角度来剖析机器。

0.1.1 按功能分析机器的组成

就功能来说，一般机器主要由四个基本部分组成，如图 0-1 所示。

(1) 动力部分

动力部分是机器工作的动力源。通常，一部机器只用一个原动机，复杂的机器也有采用几个原动机的。现代机器中使用的原动机大多以电动机和热力机（内燃机、汽轮机、燃气轮机）为主，而电动机的使用较为广泛。

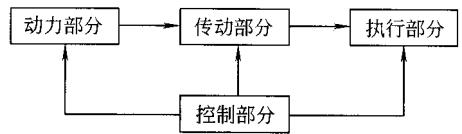


图 0-1 机器的组成（按功能）

(2) 执行部分

执行部分也称工作部分，是直接完成机器预定功能的部分。一部机器根据其功能要求不同，可以只有一个执行部分，也可以有几个执行部分。

(3) 传动部分

传动部分是为解决动力部分与执行部分之间的各种矛盾所需要的中间部分。机器的功能各异，要求的运动参数和运动形式各不相同，同时要克服的工作阻力也随工作情况各异。但是原动机的运动参数、运动形式和动力参数范围都是有限的，并且是确定的，往往不能满足机器执行部分的要求。为了解决两者之间的矛盾，就需要通过传动部分把原动机的运动参数、运动形式和动力参数变换为机器执行部分所需要的运动参数、运动形式和动力参数。例如，把高转速变为低转速，小转矩变为大转矩，回转运动变为直线运动。

(4) 控制部分

控制部分（也称操纵部分）的作用是控制机器的其它部分，使操作者能随时实现或终止各种预定的功能。例如机器的开动和停止，改变运动的速度和方向，输出或切断动力等。例如汽车的方向盘和转向系统、排挡杆、刹车及其踏板、离合器踏板及油门等就组成了汽车的控制部分。

图 0-2 所示的带式运输机就是由电动机（原动机）1、V 带传动 2、齿轮传动 3、联轴器（传动部分）4、卷筒 5、输送带（执行部分）6 和控制系统 7 所组成。

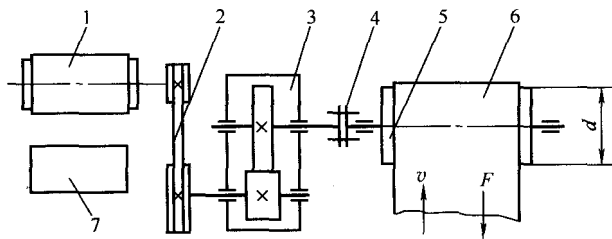


图 0-2 带式运输机

1—电动机（原动机）；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

一部简单的机器主要由前三个基本部分组成，其控制部分很简单。随着科学技术和生产的快速发展，对机器的功能、精度和自动化程度都提出了更高的要求，对控制系统的要求也越来越高。

0.1.2 按结构分析机器的组成

一般情况下，机器的各个部分都是由各种机构组合而成，例如执行部分、传动部分和控制部分，都是由机构组成的。机构则由若干构件通过动连接组合而成，而构件又是由若干零件通过静连接组装而成，组成机器的最基本单元是零件，如图 0-3 所示。

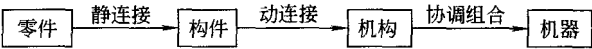


图 0-3 机器的组成

例如，图 0-4 所示单缸四冲程内燃机，它是由活塞 1、连杆 2、曲轴 3、缸体 4、凸轮 5、顶杆 6、进气阀与排气阀 7、齿轮（8、9）等零件或构件组成的。

燃气推动活塞作往复移动，经连杆转变为曲轴的转动。凸轮和顶杆用来启闭进气阀和排气阀。为了保证曲轴每转两周进、排气阀各启闭一次，曲轴和凸轮轴之间安装齿数比为 1：

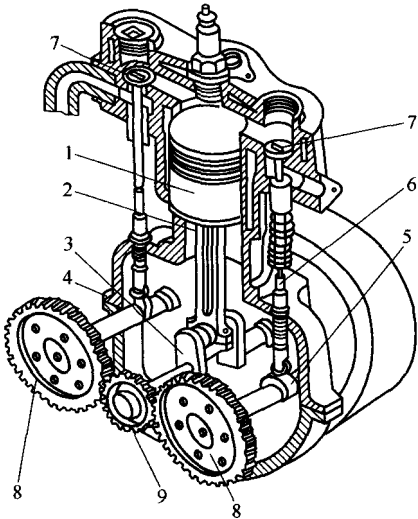


图 0-4 单缸四冲程内燃机

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

2 的齿轮。这样，当燃气推动活塞运动时，各构件协调地动作，进、排气阀有规律地启闭，就把燃烧燃料的热能转换为曲柄回转的机械能，对外做功。该内燃机主要包括由缸体（机架），活塞、连杆和曲轴组成的曲柄滑块机构，凸轮、顶杆和机架组成的凸轮机构以及齿轮和机架组成的齿轮机构。

组成机构的各相对运动的实体称为构件，机构运动时构件作为一个整体参与运动。构件可以是一个零件，也可以由若干分别加工的零件通过静连接组装而成。如上述内燃机中，凸轮 5 与齿轮 8 以及曲轴 3 与齿轮 9 都是作为一个整体作回转运动，各构成一个构件，连杆 2 也是由许多零件组成的。因此，构件与零件的区别在于：构件是运动单元，而零件是制造或加工单元。

机器与机构的区别在于：机器能实现能量

的转换（如内燃机、发电机和电动机），而机构则没有这种功能。从结构和运动的观点看，机器与机构并无区别，它们都是构件的组合，各构件之间具有确定的相对运动。因此，通常把机器与机构统称为机械。

0.2 机械设计的基本要求与一般过程

机械设计的任务是从需求出发，创造性地设计出具有特定功能的新机械或改进原有机器的性能，以满足人们日益增长的生产和生活需要。机械设计是机械产品开发和技术改造的关键环节，是机械产品开发的第一步。机械的功能决定于设计，机械的质量、性能和成本也主要是在设计阶段决定的，而制造过程的本质就在于实现设计时所规定的质量。

0.2.1 机械设计的基本要求

为使所设计的机械产品满足社会需要，为用户所接受，并在市场上具有竞争能力，设计时应满足以下基本要求。

（1）实现预定的功能，性能好，效能高

这是一切机械设计应实现的首要目标。在满足预定功能的前提下，应力求使机器性能好，效能高，以便使机器具有应有的工作质量、高效率和高生产率，从而获得大的技术经济效益。

（2）工作可靠

机械在预定的使用期限内应具有高度的可靠性，能够自始至终地正常工作。为了防止偶发事件，特别是对于大型或重型机械设备，还应设置安全保护装置、显示装置和报警系统，以免发生人身事故和机械的严重损坏。

（3）制造工艺性好

工艺性是指设计的机械及其零部件在制造过程中能省工、省料地达到要求的质量，它包括毛坯制造、机械加工、装配、调整 and 维修等各方面的工艺性。总的来说，在满足使用要求的前提下，机械的整体结构及其零部件越少、越简单、越实用，则其质量、性能和工作可靠性就越易保证，成本也越低。设计时还应尽可能地采用标准件，这既能降低设计和制造的费用，又便于在使用中维修更换。

（4）操作与维护要安全、简便

设计时应注意人与机械间的各种联系环节，保证工人操作安全。必要时还应设置各种安全保护装置。操作要简便省力；操作手柄和按钮等应放在便于操作的部位；操作方式应符合人的心理和习惯。此外，环境污染以及防爆、防火等，都应符合劳动保护法规的要求。

（5）成本低廉

成本是一项必须考虑的经济指标，它体现在设计、制造和使用的全过程中。在满足前述各项基本技术要求的前提下，设计时应力求降低成本。对各种可行方案进行技术与经济的综合比较，全面考虑各方面因素，选择符合技术经济合理性的最佳方案。

（6）外形美观

此外，根据具体设计对象，还可能有一些其它要求。例如，大型机械和零部件的起吊和搬运要求；食品、纺织和造纸机械防止产品被污染的要求；对于交通工具和携带式机械装置来说，体积小、重量轻是至关重要的。

0.2.2 机械设计的一般过程

机械设计的主要内容包括：①明确任务要求，即确定设计对象的预定功能、有关指标和

限制条件；⑪按功能要求确定机械的工作原理，然后根据工作原理，选择合适的机构，拟定最优设计方案；⑫进行运动和动力分析计算以及零部件的工作能力计算；⑬技术设计、总体结构设计、零部件结构设计等。

一部机器的诞生，从发现某种社会需要，萌发设计念头，明确设计任务开始，经过具体的设计、制造、鉴定直到产品定型，是一个复杂细致的反复过程。机械设计一般包括三个阶段：计划、方案设计与技术设计。每一阶段都应对机械设计的基本要求进行全面的技术经济评价，并做出决策。

在计划阶段，应进行充分的需求分析和市场调查与预测，明确机器应具有的功能；同时要通过调研、分析或实验给出合理的原始设计参数以及由环境、经济、加工和期限等各方面提出的限制条件，作为设计评价和决策的依据。在此基础上，制定出设计任务书，明确设计任务的全面要求与细节。

方案设计属原理设计。该阶段对设计的成败起关键作用。首先应对机械的功能进行分析，然后确定机械的工作原理，搜寻解决方法。机械的工作原理及其解法都可能有多种可行方案，必须进行方案综合，经评价、决策选出最佳方案，绘出机械工作原理图或运动简图。在搜寻解法时，可分别对原动机部分、传动部分和执行部分进行分析求解。

技术设计是将原理方案结构化、具体化。在该阶段要考虑机械的总体布局和外形，进行总体结构设计。首先绘制总装配草图及部件装配草图，通过草图确定出各零部件的外形及基本尺寸与材料。为此，在该阶段应进行机械的运动参数、动力参数计算和零部件工作能力计算。有些零部件工作能力的计算或校核常需在结构草图完成以后进行，即计算与结构设计交叉进行。为了制造，最后应绘制出零件工作图、部件装配图和装配总图，并编写技术文件，包括设计计算说明书、使用说明书等必要文件。

设计的机械经过样机试制和鉴定，以及在使用中都可能出现一些问题。对这些问题加以分析，必要时对原设计中的一部分或几部分进行修改。这样反复不断地改进设计会使机械的质量不断地提高，更好地满足社会需要。

设计是一项创造性工作。设计者应富有创造精神，深入实际，调查研究，创造性地提出设计方案和设计出新的结构。

0.3 本课程的研究内容和学习方法

本课程是对工科电类专业本科生开设的一门技术基础课程，主要介绍常用机构的工作原理和通用零件设计的基础知识、基本理论和基本方法，以及相关的金属材料及热处理方法、公差配合、机械加工工艺性等方面的基本概念。

“机械学基础”是一门实践性很强的工程课程。要学好本课程必须多看、多练、多总结。经常观察分析日常生活和生产中遇到的各种机械装置，有助于加深对课程内容的理解。多练习、多实践有助于提高自己的设计能力。多总结可使所学知识系统化，有助于课程内容的掌握。

1 机械设计的力学基础知识

本章提要

本章概要地介绍与机械和机械零件设计有关的一些力学基础知识,包括机械零件的载荷及应力性质,构件的变形及应力分析,机械零件的失效形式和设计准则。

1.1 载荷和应力

1.1.1 机械零部件的工作能力

每种机械都具有不同的功能,如机床切削工件、洗衣机洁净衣物、搅拌机混合物料、减速器使传动减速增矩等。设计机械时首先要保证其功能的实现,同时要考虑零部件加工装配的工艺性和操作维护的方便合理性,并使产品成本尽量降低,这样才能在市场竞争中取得更大的优势。

组成机械的各零部件也应有其自己的功能,如齿轮传递动力,轴、轴承和机座支承传动零件,密封圈密封防漏等。零部件工作能力反映其功能和工作中的性能,如强度、刚度、精度、稳定性、寿命等。以传动为主的零件一般要求有一定的强度和刚度,即在工作负荷下不发生破坏和过大的变形;具有相对运动并传力的零件需要有较好的耐磨性;而高速转动的零件则要具有较高的振动稳定性。

1.1.2 机械零件的强度

强度反映机械零件承受载荷时抵抗破坏的能力。强度必须从引起破坏的主要因素(外载荷)和机械零件本身抵抗破坏的因素(形状、尺寸和材料)两个方面同时进行考虑。根据工作条件不同,机械零件的强度可分为静强度和疲劳强度,而根据破坏部位和破坏形式的不同又有各种类型的整体强度和表面强度。

1.1.3 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可分为静载荷与变载荷两种。不随时间变化或随时间变化缓慢的载荷称为静载荷,比如重力。随时间作周期性变化或非周期性变化的载荷称为变载荷。如内燃机的曲轴或连杆所受的载荷为周期性变载荷,而汽车车身的悬挂弹簧所受的载荷为非周期性变载荷。

(2) 名义载荷与计算载荷

根据名义功率或额定功率计算出的作用在零件上的载荷称为名义载荷。它是机械在理想平稳工作条件下作用在零件上的载荷。一般螺栓、键等静连接零件可直接用名义载荷进行计算。

机械在工作时,实际上零件还要承受各种附加的载荷,如动载、偏载、冲击载荷等,设计中用引入载荷系数 K 的办法来考虑这些因素的影响。载荷系数 K 与名义载荷的乘积称为计算载荷。齿轮、滚动轴承、联轴器等零部件的承载能力就应按计算载荷计算。各零部件的

载荷系数 K 按实际工作条件由实验取得，其值不尽相同。

1.1.4 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，如图 1-1 所示。

大小和方向随时间变化的应力称为变应力，如图 1-2 所示。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。

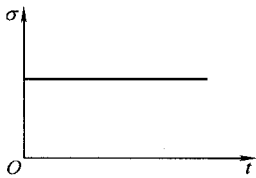


图 1-1 静应力

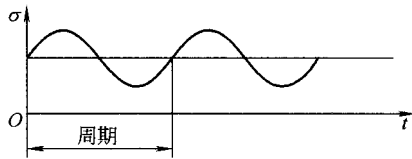


图 1-2 变应力

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，如图 1-3 所示。按其循环特性系数 r ($r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$) 的不同，可以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。表 1-1 列出了几种典型应力的特点。

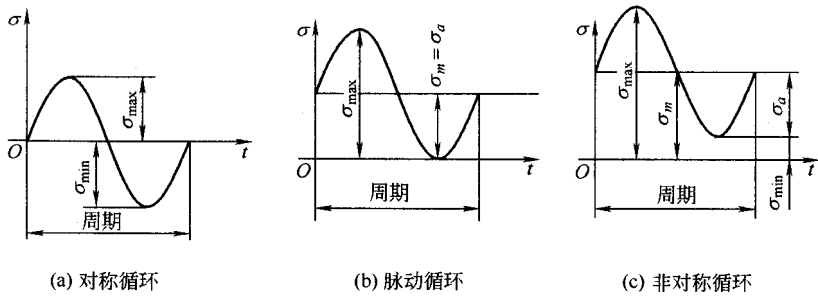


图 1-3 稳定循环变应力

表 1-1 典型应力的特点

应力名称	应力特点	应力循环特性
静应力	$\sigma_m = \sigma_{\max} = \sigma_{\min}, \sigma_a = 0$	$r = 1$
脉动循环变应力	$\sigma_m = \sigma_a = \sigma_{\max} / 2, \sigma_{\min} = 0$	$r = 0$
对称循环变应力	$\sigma_a = \sigma_{\max} = -\sigma_{\min}, \sigma_m = 0$	$r = -1$
非对称循环变应力	$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a, \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$	$-1 < r < 1$

(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、与简单单向拉伸时有同等破坏作用的应力称为计算应力，用符号 σ_{ca} 表示。

(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，用 $\sigma_{\lim}$ 、 $\tau_{\lim}$ 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 σ_b 、 τ_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 σ_s 、 τ_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 σ_r 、 τ_r 为极限应力,即 $\sigma_{\lim} = \sigma_r$ 、 $\tau_{\lim} = \tau_r$ 。

(4) 疲劳曲线和疲劳极限

零件在变应力作用下的损坏形式是疲劳断裂。疲劳破坏的初期现象是在零件表面产生微小裂纹,随着应力循环次数的增加,裂纹逐渐扩展而突然断裂。疲劳断裂是与应力循环次数有关的破坏。用一组标准试件进行疲劳试验,将试件的疲劳破坏应力 σ_N 与循环次数 N 之间的关系用疲劳曲线表示,如图 1-4 所示。

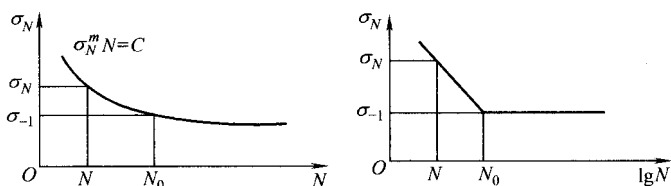


图 1-4 疲劳曲线

分析疲劳曲线可以看出以下几个问题。

i. 应力越小,试件能经受的循环次数越多。反之,如果应力越大,则试件经过很少循环次数就会破坏。疲劳曲线可用如下关系表示

$$\sigma_N^m \cdot N = C \quad (1-1)$$

式中 m ——取决于应力状态和材料的指数。

ii. 在一给定循环特性系数 r 的条件下,疲劳曲线在 $N \geq N_0$ 后趋于水平,可以认为在无限次循环后试件也不会断裂。 N_0 称为循环基数,与 N_0 相对应的应力为材料的疲劳极限,用 σ_r 或 τ_r 表示,工程中常用对称循环 $r = -1$ 的 σ_{-1} 和 τ_{-1} 作为材料的疲劳极限。一般对硬度小于 350HBW 的钢材,取 $N_0 = 10^7$,对于硬度大于 350HBW 的钢材,取 $N_0 = 25 \times 10^7$ 。

iii. 当工作的应力循环次数 $N < N_0$ 时,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 σ_N 。由式 (1-1) 可知

$$\begin{aligned} \sigma_N^m \cdot N &= \sigma_{-1}^m \cdot N_0 \\ \sigma_N &= \sigma_{-1} \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中指数 m ,如钢材弯曲时,取 $m=9$;接触疲劳时,取 $m=6$ 。

(5) 零件的疲劳极限

由于实际零件受几何形状、尺寸大小和加工质量等因素的影响,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以下几点。

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变处(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。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_σ 或 K_τ 来表示。有效应力集中系数等于材料、尺寸和受载情况都相同的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

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1K}} \quad K_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{-1K}} \quad (1-3)$$

式中 σ_{-1} 、 τ_{-1} ——弯曲、扭转时无应力集中的光滑试件对称循环疲劳极限;

σ_{-1K} 、 τ_{-1K} ——弯曲、扭转时有应力集中的试件对称循环疲劳极限。

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 ϵ_σ 或 ϵ_τ 来表示。绝对尺寸系数等于直径为 d 的大尺寸零件的疲劳极限 σ_{-1d} 、 τ_{-1d} 与直径为 $d_0 = 6 \sim 10\text{mm}$ 的标准试件的疲劳极限 σ_{-1} 、 τ_{-1} 的比值，即

$$\epsilon_\sigma = \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}} \quad \epsilon_\tau = \frac{\tau_{-1d}}{\tau_{-1}} \quad (1-4)$$

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 β 来表示。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 σ_{-1} 、 τ_{-1} 的比值，称为绝对尺寸系数，即

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{-1\beta}}{\sigma_{-1}} \quad \beta_\tau = \frac{\tau_{-1\beta}}{\tau_{-1}} \quad (1-5)$$

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 σ_{-1e} 为

$$\sigma_{-1e} = \frac{\epsilon_\sigma \beta_\sigma}{K_\sigma} \sigma_{-1} \quad (1-6)$$

零件的对称循环扭转切应力疲劳极限 τ_{-1e} 为

$$\tau_{-1e} = \frac{\epsilon_\tau \beta_\tau}{K_\tau} \tau_{-1} \quad (1-7)$$

(6) 许用应力与安全系数

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 $[\sigma]$ 和 $[\tau]$ 来表示。许用应力等于极限应力 σ_{lim} (τ_{lim}) 和许用安全系数 $[S_\sigma]$ ($[S_\tau]$) 的比值，即

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{[S_\sigma]} \quad [\tau] = \frac{\tau_{\text{lim}}}{[S_\tau]} \quad (1-8)$$

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：在保证安全可靠的前提下，尽可能选择较小的安全系数。

(7) 整体强度与表面强度

零件在传力过程中要同时考虑整体强度与表面强度。零件受载时在本体内产生应力为整体强度问题，整体强度的形式有拉伸、压缩、弯曲、扭转、剪切等，如图 1-5 所示。连接两

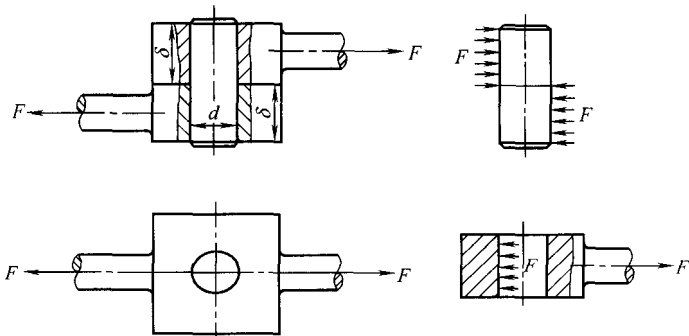


图 1-5 销连接

连杆的圆柱销在载荷 F 的作用下可能发生剪切破坏, 剪切强度条件式为

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi}{4}d^2} \leq [\tau] \quad (1-9)$$

零件受载时, 在传力的接触表面上产生应力, 引起表面强度问题。面接触传力时产生挤压应力 σ_p , 它可能使表面压溃破坏; 而点接触或线接触传力时, 产生接触应力 σ_H , 交变的接触应力可能使表面发生疲劳点蚀破坏。图 1-5 所示圆柱销连接两连杆传力, 连杆孔与销在接触面上都会产生挤压应力, 其强度条件式为

$$\sigma_p = \frac{F}{d\delta} \leq [\sigma_p] \quad (1-10)$$

上式中 $d\delta$ 为接触表面垂直于作用力方向的投影面积。挤压破坏首先在材料较薄弱的面上产生, 式中许用压应力 $[\sigma_p]$ 值应取销与连杆材料的许用应力中较小的值。

(8) 接触强度

两个零件(如摩擦轮、齿轮、滚动轴承等)通过点接触或线接触传递载荷时, 受载后在接触部分产生局部弹性变形, 接触面积很小而表层产生很大的应力, 称为接触应力。此时零件的工作能力取决于表面的接触强度。零件在接触应力的反复作用下, 首先在表面或表层产生初始疲劳裂纹, 应力继续作用或润滑油挤入裂纹产生高压促使裂纹扩展, 最后表层金属呈小片剥落, 形成一个个小的凹坑, 这种现象称为疲劳点蚀。点蚀使传动不平稳, 发生振动和噪声, 以致零件不能正常工作。

滚子轴承、摩擦轮、齿轮的啮合面等工作情况都相当于两个平行轴圆柱体接触受力。当两个平行轴圆柱体接触受压时, 其接触面为狭长矩形, 应力分布如图 1-6 所示。最大接触应力 σ_H 的值可根据弹性力学中赫兹(Hertz)公式计算, 其作用点位于接触区中线。

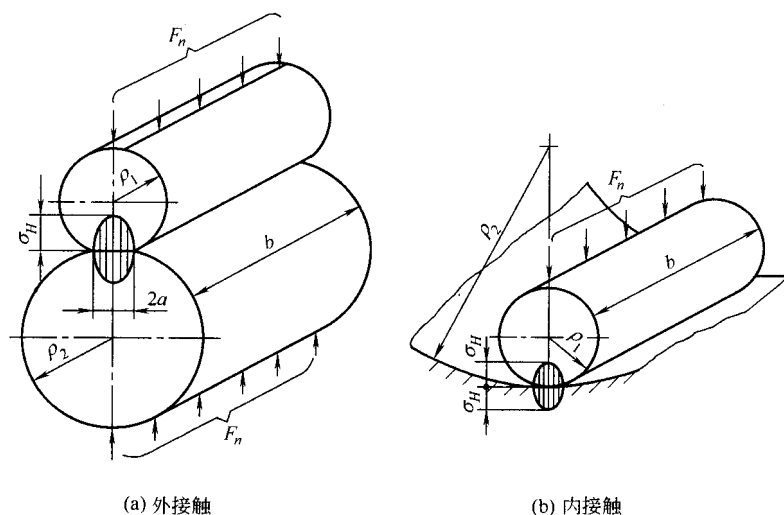


图 1-6 平行轴圆柱体的接触应力

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_n}{\pi L} \frac{\left(\frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2}\right)}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}} = Z_E \sqrt{\frac{F_n}{L} \cdot \frac{1}{\rho_\Sigma}} \quad (1-11)$$

式中 F_n ——作用在圆柱体上的压力，N；

L ——接触线长度，mm；

ρ_Σ ——综合曲率半径，mm， $\frac{1}{\rho_\Sigma} = \frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2}$ ；

($\pm$)——正号用于外接触，负号用于内接触；

μ_1 、 μ_2 ——两圆柱体材料的泊松比；

Z_E ——材料弹性系数， $Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}}$ ，式中 E_1 、 E_2 分别为两圆柱体材料的弹性模量，MPa。

1.2 机械零部件失效形式与设计准则

1.2.1 失效与防止失效的对策

机械零部件由于某种原因丧失工作能力而不能正常工作时称为失效。常见的零部件失效形式分类见表 1-2。

表 1-2 失效形式分类

失效	强度失效	{	整体破坏	拉、弯、扭、剪
			表面破坏	挤压（面接触） 接触（点、线）
	刚度失效	变形过大		
	磨损	{	磨粒磨损	
			胶合磨损	
	失稳	{	压杆稳定（侧弯）	
			振动失稳（共振）	
	其它	{	不自锁（斜面、螺旋）	
			打滑（摩擦传动）	
			松脱（如螺钉）	
			过热	
			噪声过大	
			腐蚀	

为保证零部件正常工作能力，避免失效，一般采取以下几方面的措施。

(1) 控制零件尺寸

按强度、刚度等工作能力准则计算零件尺寸，使在满足工作要求条件下尺寸尽量紧凑。

以图 1-7 所示圆杆拉伸强度计算为例，这类计算一般有三种形式。

① 校验计算 已知外载荷 F ，初定零件尺寸及材料，校验强度。

$$\sigma = \frac{F}{\frac{\pi}{4}d^2} \leq [\sigma]$$

(1-12)

② 设计计算 已知外载荷 F 及材料，求零件尺寸。

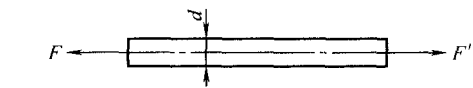


图 1-7 圆杆拉伸