



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

机械设计基础

(近机类专业适用)

李威 王小群 主编

第2版



附光盘



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
北京高等教育精品教材

机械设计基础

(近机类专业适用)

第2版

北京市高等教育学会机械设计研究会 组编

主 编	李 威	王小群	
副主编	傅燕鸣	邱丽芳	张淑敏
参 编	边新孝	严升明	郑晓雯
主 审	王大康	谈嘉祯	

机械工业出版社

本书第2版是根据当前教学改革的实际需要,参照目前高等院校机械设计基础课程教学基本要求及最近提出的有关教改的精神,为适应21世纪人才培养的需要而编写的。

全书共16章,包括常用传动机构设计(平面连杆机构、凸轮机构、齿轮传动、轮系和减速器、螺旋传动、挠性传动和其他常用机构),通用机械零件设计(联接零件、滑动轴承、滚动轴承、联轴器、离合器、制动器、轴和弹簧),机械的动力设计(机械运转速度波动的调节和回转件的平衡),以及机械系统设计(机械传动系统设计和计算机辅助三维机械设计基础)的基本内容。为便于学生学习、复习和总结,各章均附有一定数量的例题、习题和思考题,以及必要的资料。

本书可作为高等院校近机类专业“机械设计基础”课程的教材,也可供其他有关专业师生及工程技术人员参考。

本书附有光盘。光盘录有本书的学习指导,其中包括教学基本要求、重点与难点分析、典型例题分析和自测试题等四大部分,便于教师使用多媒体授课和学生学习。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础/李威,王小群主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2007.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 近机类专业适用
ISBN 978-7-111-12948-6

I. 机… II. ①李…②王… 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(2007)第140610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:冯 铨 版式设计:霍永明
责任校对:李秋荣 封面设计:张 静 责任印制:邓 博
北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)
2009年6月第2版第1次印刷
184mm×260mm·18印张·443千字
标准书号:ISBN 978-7-111-12948-6
ISBN 978-7-900142-75-7(光盘)
定价:35.00元(含1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

序 言

为了满足 21 世纪我国社会主义现代化建设和科学发展的需要,培养具有较宽知识结构和扎实理论基础的复合型人才,高等机械工程教育需要按照“教育要面向现代化、面向世界、面向未来”的方针,在教育思想、教学内容和教学方法等方面进行全方位的改革。

机械设计系列课程在机械工程学科中占有重要地位,它是面向工科相关专业课程改革的重要组成部分,而教材建设又是教学改革的核心。为此,北京市高等教育学会机械设计研究分会组织北京市和外省市部分院校有丰富教学经验的教师,采取老、中、青相结合的方式,编写了这套现代机械设计系列教材。该系列教材按照教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的精神组织实施,充分反映了高等工业院校机械工程学科的发展和机械设计系列课程改革的成果,其主要特点为:

1. 本系列教材总结了各院校近年来机械设计系列课程教学改革的经验和方法,教材内容编排合理,注重理论联系实际,便于教师教学和学生学学习。
2. 本系列教材在体系上作了科学的分工,注重教材内容的创新性和系列教材的整体性,既体现了传统的教学内容,又立足于创新,增加了反映本学科发展的部分新内容。
3. 本系列教材是一套较为完整的系统教学用书,通过学习可以达到整体优化学生的知识、能力和素质的目的,可供不同专业、不同办学方式的学校选用。
4. 本系列教材注重拓宽基础知识,加强工程背景和培养学生的工程实践能力,以期形成一个适应 21 世纪我国现代化建设和市场经济发展的教材体系。
5. 为配合各校开展 CAI 教学,便于指导学生学习,在多数教材中配备了光盘。

本系列教材自问世以来,已有四本教材被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,四本教材被评为北京市精品教材。我们殷切希望这套系列教材能够得到各校师生的关心和帮助,在实际使用中不断进行修订和完善,为我国高等工程教育和机械类人才的培养作出积极的贡献。

北京市高等教育学会机械设计研究分会
高等院校现代机械设计系列教材编委会

第2版前言

本书第1版是根据原国家教委1995年颁发的机械设计基础课程教学基本要求编写的。经过三年来各校使用本教材的实践,由北京科技大学、中国矿业大学、上海大学和中国农业大学合作编写的《机械设计基础》近机类第2版教材是在总结第1版使用经验的基础上,根据当前机械设计基础课程教学改革的实际需要修订而成。

这次修订,在章节顺序和风格体系等方面与第1版相同。其中部分章节在内容上作了一些增补和删减,并更正或改进了第1版在文字、插图及计算中的某些疏漏和印刷中的错误,进一步提高了本书的质量。随着科学技术的迅猛发展以及计算机技术的广泛应用,机械设计及其研究工作已经开始从二维静态设计发展为三维动态设计,本书在第1版的基础上增补了计算机辅助三维机械设计基础的内容,极大地提高了机械设计工作的质量和效率。

参加本次修订工作的有:北京科技大学边新孝、邱丽芳、王小群、李威(第五章、第六章、第七章、第八章、第十一章、第十二章、第十四章、第十六章),中国农业大学张淑敏(第九章、第十三章),中国矿业大学严升明、郑晓雯(第一章、第十章),上海大学傅燕鸣(第二章、第三章、第四章、第十五章),并由李威、王小群任主编,傅燕鸣、邱丽芳、张淑敏任副主编。

本书承北京工业大学王大康教授、北京科技大学谈嘉桢教授精心审阅,提出了很多宝贵的意见,对提高本书质量给予了很大的帮助,编者在此表示衷心的感谢!

由于编者水平和时间所限,误漏之处在所难免,敬请广大读者随时予以批评指正。

编者

第 1 版前言

为了适应我国现代化建设高速发展和培养高质量的适应 21 世纪人才的需要,我国教育事业正在经历着一次深刻而广泛的改革。目前许多高等院校为了提高学生的综合素质和创新意识,扩展知识领域,普遍压缩原有各门课程的学时。鉴于这种情况,根据当前机械设计基础课程教学改革的实际需要,结合我们多年来课堂教学和教学改革的实践经验,参照原国家教委 1995 年颁发的“机械设计基础课程教学基本要求”及最近提出的有关教改精神,以“加强创造性思维能力和设计能力的综合培养,重视工程应用”为宗旨,我们编写了这本新的《机械设计基础》近机类教材。本教材的特色主要表现在以下几个方面:

(1) 为了适应在大环境下教学学时缩短的需要,根据教材内容的有机联系,将机械原理和机械零部件设计的相关内容有机地合在一起划分章节,使全书结构紧凑,相关内容联系紧密,教材内容更加精练。

(2) 适度拓宽了知识面。本教材增添了稳健设计、并行设计、虚拟设计、绿色设计、智能设计和机械传动系统设计等内容,这些内容不仅反映了机械设计的最新发展,而且还拓宽了知识面,培养了同学解决实际问题的能力。

(3) 全书各章均采用最新国家标准和国际通用的符号与角标。在论述各章内容时,力求分清主次、突出重点、避免重复。

(4) 按照“面向工程设计”的原则,在着重讲清有关机械设计的基本概念、基本理论和基本方法的基础上,强调整体设计概念,重视综合设计能力的培养,简化理论推导和设计计算,增强与工程实际的联系,力求全书简明易懂和更具启发性。

(5) 本书配有光盘一张。光盘录有本书的学习指导,包括教学基本要求、重点与难点分析、典型例题分析和自测试题等四大部分,便于教师使用多媒体授课、学生自学和课后复习。

本书内容丰富,一些章节并非必须讲授的内容,可以根据专业需要予以取舍或侧重,有些内容可以安排学生自学。各章编排顺序亦非不能变动的讲授顺序,可以根据具体情况加以调整。

参加本书编写工作的有:中国矿业大学严升明、郑晓雯(第一章、第十章);上海大学傅燕鸣(第二章、第三章、第四章、第十五章);北京科技大学边新孝、邱丽芳、王小群、李威(第五章、第六章、第七章、第八章、第十一章、第十二章、第十四章);中国农业大学张淑敏(第九章、第十三章)。本书由李威、王小群任主编,傅燕鸣、邱丽芳任副主编。

本书由北京工业大学王大康教授担任主审,他对本书初稿进行了仔细的审阅,提出了许多有助于提高本书质量的宝贵意见,编者对此深表感谢!同时,在本书编写和出版过程中,自始至终都得到了北京机械设计教学研究会万小利、王之栋、刘莹等老师的帮助和支持,在此一并向他们表示衷心的感谢!

鉴于编者水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，恳切希望读者给予批评指正。

编者
2003年6月

目 录

序言

第2版前言

第1版前言

第一章 绪论 1

第一节 机械、机器、机构及其组成 1

第二节 本课程的内容、性质和任务 3

第三节 机械设计的基本要求和设计过程 3

第四节 机械零件的工作能力及其计算准则 4

第五节 机械零件的载荷、应力和许用应力 6

第六节 机械零件材料的选用原则 10

第七节 机械设计的新发展 12

思考题 13

第二章 平面机构的结构分析 15

第一节 构件和运动副 15

第二节 平面机构的运动简图 17

第三节 平面机构的自由度计算 19

思考题 24

习题 24

第三章 平面连杆机构设计 26

第一节 铰链四杆机构的基本形式和特性 26

第二节 铰链四杆机构存在曲柄的条件 31

第三节 铰链四杆机构的演化 33

第四节 平面四杆机构的设计 36

思考题 44

习题 44

第四章 凸轮机构设计 47

第一节 凸轮机构的应用和分类 47

第二节 从动件的常用运动规律 49

第三节 凸轮轮廓的设计 54

第四节 凸轮机构设计中应注意的问题 60

思考题 63

习题 64

第五章 齿轮传动设计 67

第一节 齿轮传动的特点及类型 67

第二节 齿廓啮合基本定律及渐开线齿廓 68

第三节 渐开线标准直齿圆柱齿轮各部分名称及几何尺寸 71

第四节 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动 73

第五节 渐开线圆柱齿轮的切齿原理与根切现象 76

第六节 轮齿的失效形式及设计准则 79

第七节 齿轮的材料、热处理和许用应力 81

第八节 直齿圆柱齿轮传动的受力和强度计算 84

第九节 斜齿圆柱齿轮传动 90

第十节 直齿锥齿轮传动 96

第十一节 蜗杆传动 100

第十二节 齿轮、蜗杆及蜗轮的结 构 108

思考题 109

习题 109

第六章 轮系和减速器 111

第一节 轮系的分类 111

第二节 轮系的传动比 112

第三节 轮系的应用 116

第四节 减速器 119

思考题 122

习题 122

第七章 挠性传动设计 125

第一节 带传动设计 125

第二节 链传动设计 139

思考题	146	习题	234
习题	147	第十三章 弹簧设计	235
第八章 间歇运动机构	148	第一节 弹簧的功用和类型	235
第一节 棘轮机构	148	第二节 弹簧的材料和许用应力	236
第二节 槽轮机构	151	第三节 圆柱形螺旋压缩(拉伸) 弹簧的设计计算	238
第三节 其他间歇运动机构	154	思考题	246
思考题	155	习题	246
第九章 联接设计	156	第十四章 机械的平衡与调速	247
第一节 螺纹联接	156	第一节 回转件的平衡	247
第二节 螺纹联接设计	162	第二节 机械运转速度波动的调 节	249
第三节 螺旋传动	173	思考题	254
思考题	178	习题	254
习题	178	第十五章 机械传动系统设计	256
第十章 轴及轴毂联接设计	181	第一节 概述	256
第一节 轴的功用和类型	181	第二节 机械传动系统方案设计	257
第二节 轴的材料选择	182	第三节 原动机的选择及机械传动 系统运动、动力参数的 计算	260
第三节 轴的结构设计	183	第四节 机械传动系统的评价	263
第四节 轴的强度及刚度计算	187	第五节 机械传动系统设计实例	265
第五节 轴毂联接	194	思考题	269
思考题	198	习题	269
习题	198	第十六章 计算机辅助三维机械设计 基础	270
第十一章 轴承设计	200	第一节 计算机辅助三维参数化设计	270
第一节 摩擦状态	200	第二节 计算机辅助三维机械结构分析	271
第二节 滑动轴承	201	第三节 计算机辅助三维机械动态仿真	272
第三节 滚动轴承	207	思考题	275
思考题	222	习题	275
习题	223	参考文献	276
第十二章 联轴器、离合器和 制动器	224		
第一节 联轴器	224		
第二节 离合器	229		
第三节 制动器	232		
思考题	234		

第一节 机械、机器、机构及其组成

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，在一定意义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。例如内燃机把热能变换为机械能；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。这些装置都是机器。

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。

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

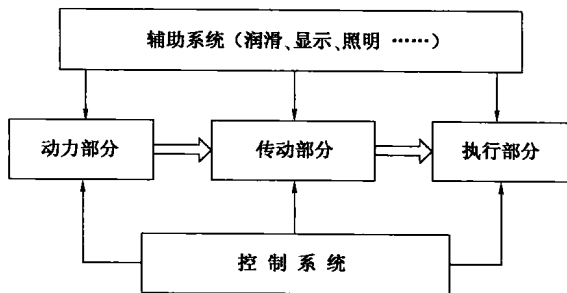


图 1-1 机器的组成

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，常常将几个零件连接在一起，组成一个构件。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。

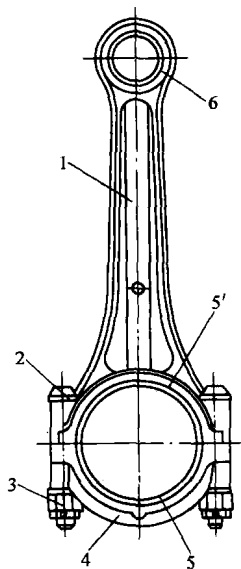


图 1-2 内燃机连杆

1—连杆体 2—螺栓 3—螺母
4—连杆盖 5、5'—轴瓦 6—轴套

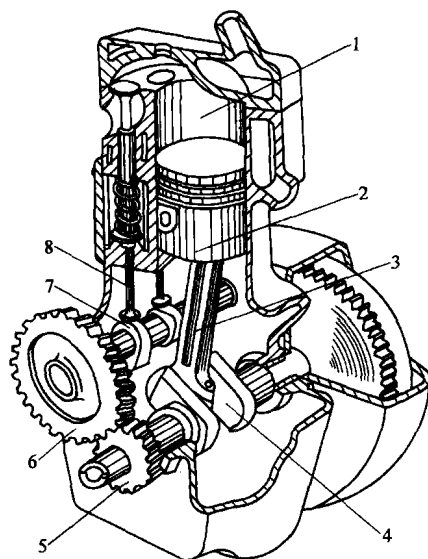


图 1-3 内燃机

1—气缸体 2—活塞 3—连杆 4—曲轴
5、6—齿轮 7—凸轮 8—顶杆

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。因此所谓机构，是能变换或传递运动与动力的、用可动连接组合而成、而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的，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。但机构并不等于机器。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。

第二节 本课程的内容、性质和任务

机器中普遍使用的机构称为常用机构,例如连杆机构、凸轮机构、齿轮机构和间歇机构等。机械中普遍使用的零件称为通用零件,例如齿轮、轴、螺栓、弹簧等。

本课程主要研究常用机构和通用零件的工作原理、结构特点以及它们的设计理论和方法,同时介绍相关的国家标准和规范,以及某些标准零件的选用原则和方法。

本课程是一门综合应用理论力学、材料力学、工程制图等基础理论知识和机械制造等生产实践性知识的技术基础课程,虽然研究的是常用机构和通用零件,但是其设计理论和方法对于专用机构和零件的设计也具有一定的指导意义。

通过本课程的学习,读者将获得分析、选用和维护简单机械设备的基础知识,并且获得设计简单机械传动装置的能力。本课程也为读者将来学习专业课程打下必要的理论基础。

第三节 机械设计的基本要求和设计过程

一、机械设计的基本要求

机械设计的基本要求是:在完成规定功能的前提下,力求性能好、效率高、成本低;在规定使用期内,做到安全可靠、操作方便、维护简单和造型美观等。一般应满足以下几方面要求:

(1) 运动学和动力学方面的要求 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) 工作可靠性方面的要求 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) 经济性方面的要求 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。

二、机械的一般设计过程

一般来说,一个机械产品的设计过程大致可以分为图 1-4 所示的五个阶段:

(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。

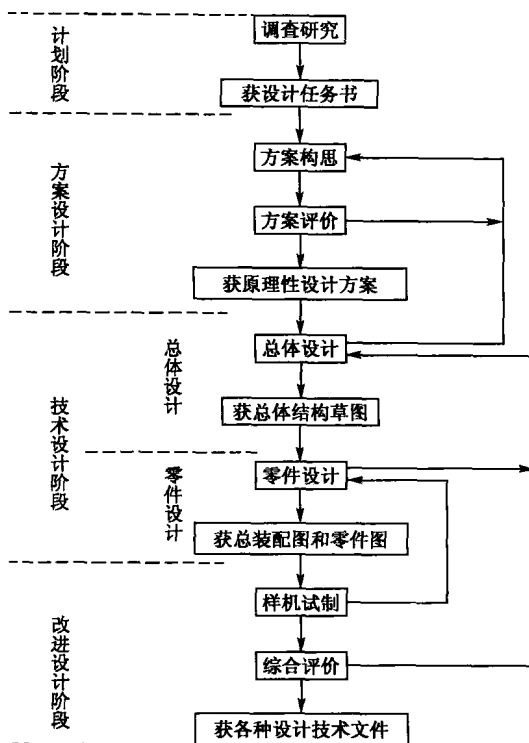


图 1-4 机械设计的一般过程

第四节 机械零件的工作能力及其计算准则

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。机械零件的主要失效形式有:零件断裂或发生塑性变形;零件工作表面出现疲劳破坏或过度磨损;零件的弹性变形过大;零件发生强烈振动等。

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

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

式中， σ 和 τ 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

$$y \leq [y], \theta \leq [\theta] \text{ 或 } \phi \leq [\phi] \quad (1-2)$$

式中， y 为零件的挠度； θ 为零件的偏转角； ϕ 为零件的扭转角； $[y]$ 、 $[\theta]$ 和 $[\phi]$ 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，但是目前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。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

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

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

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

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因数 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. 耐热性计算准则

耐热性是指零件在较高温度下抗蠕变、抗氧化和抗热变形的能力。当钢制零件的温度超过 $300 \sim 400^\circ\text{C}$ 、轻合金和塑料零件的温度超过 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ 时，它们的强度将急剧下降，并

且会出现较严重的蠕变。所谓蠕变,是指零件在应力作用下缓慢而连续地发生塑性变形的现象。另外,高温下的零件还会发生氧化并且产生较大的热变形和热应力。这些现象的发生将大大削弱零件的工作能力。因此,在较高温度下工作的零件,为了保证零件的工作温度不超过设计规范所允许的温度,一般应进行热平衡计算。即

$$H_1 \leq H_2 \quad (1-5)$$

式中, H_1 为系统产生的总热量; H_2 为系统散逸的总热量。

必要时还应对零件进行蠕变计算。

为了保证零件在高温下正常工作,除了选用耐热材料外,还可采取一些冷却或隔热的措施。

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,使它们的工作频率 f 远离其共振频率 f_p 。一般须保证

$$f < 0.87f_p \text{ 或 } f > 1.18f_p \quad (1-6)$$

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产生。

第五节 机械零件的载荷、应力和许用应力

一、机械零件的载荷和应力

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。机械零件的载荷是指零件工作时所受的外力、弯矩或转矩。不随时间变化或者变化相对较小的载荷称为静载荷;随时间变化的载荷称为变载荷。大多数机械零件都在变载荷下工作。

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 t 变化或者变化很小的应力称为静应力(图 1-5a)。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。

大小或方向随时间 t 变化的应力称为变应力(图 1-5b~d)。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。

大小或方向呈周期性变化的变应力称为循环变应力。当循环变应力的最大应力 $\sigma_{\max}$ (或 $\tau_{\max}$) 和最小应力 $\sigma_{\min}$ (或 $\tau_{\min}$) 大小相等、方向相反时,称为对称循环变应力(图 1-5c)。当循环变应力的最大应力为定值,而最小应力为零时,称为脉动循环变应力(图 1-5d)。

循环变应力的最小应力与最大应力的比值称为应力的循环特性,通常用 r 表示

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \text{ 或 } r = \frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}} \quad (1-7)$$

对于对称循环变应力, $r = -1$; 对于脉动循环变应力, $r = 0$; 静应力可视为变应力的特殊情况, 这时 $r = +1$; 对于一般循环变应力, r 可能是 $+1$ 与 -1 之间的任何数值 (图 1-5b)。在图 1-5 中, σ_m 是循环变应力的平均应力, $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$; σ_a 是应力幅, $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ 。

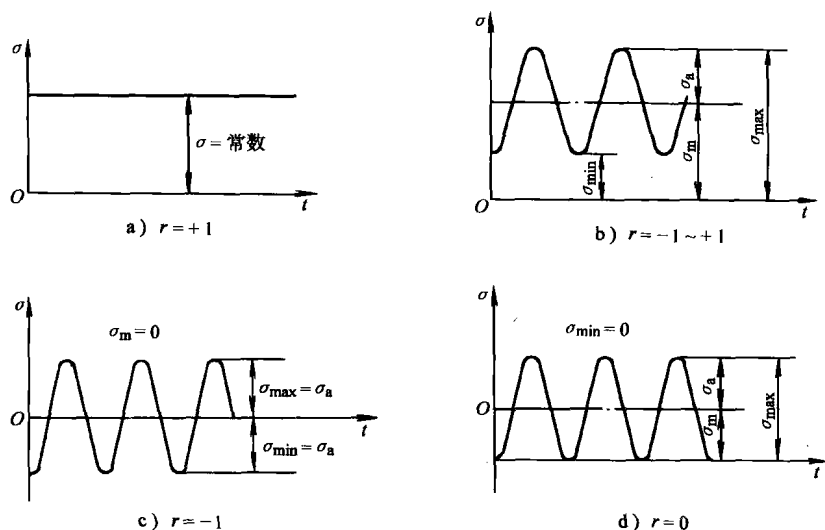


图 1-5 静应力与变应力

a) 静应力 b) 循环变应力 c) 对称循环变应力 d) 脉动循环变应力

应力还有体积应力和表面应力之分。产生并分布于零件体内各处的应力称为体积应力, 弯曲应力、拉应力、压应力、扭转切应力都属于体积应力。产生并分布于两个零件接触表面 (实际是表层) 的应力称为表面应力, 面接触时的挤压应力和点、线接触时的接触应力便属于表面应力。

二、静应力下的许用应力

在静应力下工作的机械零件, 其强度计算准则中的许用应力用下式计算

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

式中, $\sigma_{\lim}$ 和 $\tau_{\lim}$ 分别为零件材料的极限正应力和极限切应力; S 为零件的安全系数。

当零件选用塑性材料制造时, 为使零件不因塑性变形而失效, 可取材料的屈服强度 σ_s 作为极限应力, 即 $\sigma_{\lim} = \sigma_s$; 当零件选用脆性材料制造时, 为使零件不因断裂破坏而失效, 可取材料的抗拉强度 σ_b 作为极限应力, 即 $\sigma_{\lim} = \sigma_b$ 。

三、变应力下的许用应力

1. 变应力下的疲劳破坏

在变应力下工作的机械零件, 整体应力可能使它发生疲劳断裂, 接触应力可能使它发生疲劳点蚀。疲劳断裂造成零件整体的损坏; 疲劳点蚀造成零件工作表面的损坏。这两种损坏统称为疲劳破坏。

疲劳断裂是这样发生的: 零件在变应力反复作用一段时间后, 其表面薄弱部位开始出现细微的裂纹。以后随着应力循环次数的增加, 裂纹逐渐扩展, 承受载荷的截面积随之逐渐减小。当零件的工作时间过长, 即应力循环次数过多时, 零件便因承载面积太小而突然断裂。

图 1-6 所示为疲劳断裂的断口示意图，它的特征是：

①有一个或数个疲劳源。图中键槽拐角处因应力集中而成为疲劳裂纹萌生处，即疲劳源，它与临近的条纹形成“眼”状。②断口上有明显的两个区域：疲劳断裂区和瞬时断裂区。疲劳断裂区是因在变应力作用下，裂开的两面反复张合磨压而使表面光滑；瞬时断裂区是因为剩余承载面上的应力超过材料的强度极限而突然断裂形成的，它的特点是表面粗糙，塑性金属呈纤维状，脆性金属呈颗粒状。③疲劳断裂区有时有贝壳纹存在，它是由于裂纹在扩展过程中遇到载荷变化或材料组织强弱不同，裂纹扩展出现暂时停顿而留下的。

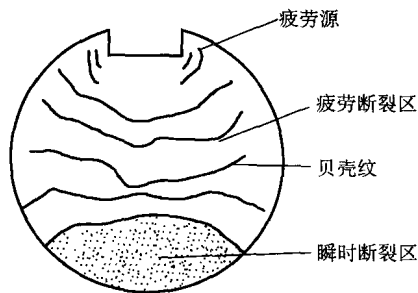


图 1-6 疲劳断裂的断口

疲劳点蚀是这样发生的：零件在接触变应力反复作用一段时间后，首先在表面薄弱部位约 $20\mu\text{m}$ 深处出现初始裂纹，以后裂纹逐渐扩展（如果接触表面存在润滑油，那么润滑油被挤进裂纹内部产生高压，还会加速裂纹的扩展），最终造成表层金属的片状剥落，并在零件的工作表面形成许多小坑（图 1-7）。这些小坑（点蚀）减小了接触面积，破坏了表面形状，因而使零件的承载能力下降，并且引起振动和噪声。疲劳点蚀是齿轮和滚动轴承的主要失效形式。

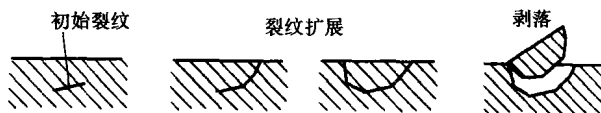


图 1-7 疲劳点蚀发生的过程

疲劳破坏是零件的损伤积累到一定程度时发生的，因此它不仅与变应力的的大小和应力循环特性有关，而且与零件的工作应力循环次数有关。此外，从疲劳破坏的产生机理可以知道，疲劳破坏还与零件表面是否容易产生初始裂纹有关。

2. 疲劳曲线 $\tau_{\max}$

材料发生疲劳破坏时的应力水平（循环变应力的最大应力 $\sigma_{\max}$ 或 $\tau_{\max}$ ）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。材料的疲劳极限与应力循环次数的关系曲线称为疲劳曲线。

图 1-8 表示试件在循环特性为 r 的变应力作用下的疲劳曲线。其中图 1-8a 所示为塑性金属材料的疲劳曲线，为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 σ_{rN} 。图中的纵轴为试件加载的应力水平 $\sigma_{\max}$ 。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 超过某个数值 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 σ_{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 称为循环基数，对于钢材， $N_0 = (1 \sim 10) \times 10^6$ ；通常把 σ_{rN_0} 简记为 σ_r 和 τ_r ，并把它称为持久疲劳极限。对于脆性金属材料，疲劳曲线没有水平段，如图 1-8b 所示，即不存在持久疲劳极限。但为计算方便，也人为规定一 N_0 ，称为脆性金属材料持久疲劳极限，通常取 $N_0 = 5 \times 10^7$ ，同时，定义 σ_{rN_0} 为某循环特征下，对应于 N_0 的疲劳极限。

疲劳曲线在 $N < N_0$ 区间内的方程近似为