



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械原理与机械设计

(第三版)

下 册

主编 冯雪梅 李波 韩少军

高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械原理与机械设计

Jixie Yuanli yu Jixie Sheji

(第三版)

下 册

主 编	冯雪梅	李 波	韩少军
副主编	周廷美	郑银环	燕松山
顾 问	彭文生	李志明	黄华梁

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是根据教育部制定的高等学校机械类专业本科《机械原理课程教学基本要求》与《机械设计课程教学基本要求》，在第二版使用经验的基础上修订而成的。

本书第一、二版原名《机械设计》，由彭文生、李志明、黄华梁主编。为便于教学，本版更名为《机械原理与机械设计》，分为上、下两册共24章。上册是机械原理部分，下册是机械设计部分。

本册为机械设计部分，共15章，第1章机械设计基础，第2章齿轮传动设计，第3章蜗杆传动设计，第4章带传动设计，第5章链传动设计，第6章轴毂连接设计，第7章螺纹连接与螺旋传动设计，第8章轴的设计，第9章联轴器、离合器和制动器，第10章滑动轴承设计，第11章滚动轴承及其装置设计，第12章防振、缓冲零部件概述，第13章机械结构设计基础，第14章机械创新设计，第15章机械系统设计。书后附有机械设计名词术语中英文对照表。

与本书配套的《机械原理与机械设计习题集》(毛娅等主编)、《机械设计课程设计》(杨光等主编)、《机械设计教学指南》(彭文生等主编)、《机械设计学习指导与典型题解》(侯玉英等主编)已由高等教育出版社出版。以上各书均含机械原理机械设计内容，可供读者选用。

本书可作为高等工科大学机械类专业机械原理与机械设计课程分别开课或合并开课的教材，也可供有关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理与机械设计. 下册 / 冯雪梅, 李波, 韩少军主编. --3版. --北京: 高等教育出版社, 2014. 8
ISBN 978-7-04-040282-7

I. ①机… II. ①冯… ②李… ③韩… III. ①机构学-高等学校-教材②机械设计-高等学校-教材 IV. ①TH111②TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 136859 号

策划编辑 卢广 责任编辑 卢广 封面设计 李小璐 版式设计 马敬茹
插图绘制 杜晓丹 责任校对 殷然 责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京鑫海金澳胶印有限公司		http://www.landaco.com.cn
开 本	787mm×1092mm 1/16	版 次	2002年8月第1版
印 张	22.5		2014年8月第3版
字 数	550千字	印 次	2014年8月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	32.80元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 40282-00

第三版前言

本书是根据教育部制定的高等学校机械类专业本科《机械原理课程教学基本要求》和《机械设计课程教学基本要求》，在总结前两版使用经验的基础上修订而成的。

本书第一、二版原名《机械设计》，由彭文生、李志明、黄华梁教授主编。为便于教学，同时贯彻落实教育部“卓越工程师培养计划”，提高学生的综合素质，加强本科教育和教学改革，培养造就创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量工程技术人才，对本书按精品教材建设的要求进行了修订，更名为《机械原理与机械设计》，并分上、下两册。

本次修订原则是：以继承为主，在保持第二版教材特色的基础上，从内容到形式进行了新的探索；树立精品意识，千方百计提高教材质量，把本书锤炼成为精品教材。具体进行了以下几项工作：

1. 把原来的一本教材分成了上、下两册，上册为机械原理部分，下册为机械设计部分，两册内容既相互独立，又有机融合，以方便教学。

2. 本书所涉及的国家标准尽可能使用最新颁布的国家标准。同时对有些公式按新国家标准规定的最新计算方法进行了订正，并对个别章节内容进行了适当的增删。

3. 下册把原来的第二十二章中的轮类零件的结构设计分别按类插入到相关设计章节中。

4. 与本书配套的《机械原理与机械设计习题集》、《机械设计课程设计》、《机械设计教学指南》、《机械设计学习指导与典型题解》（以上各书均含机械原理和机械设计内容）已由高等教育出版社出版，更方便了教与学。

本书分上、下两册。上册为机械原理部分，共九章；下册为机械设计部分，共十五章。参加下册修订工作的有：武汉理工大学冯雪梅、李波、韩少军、郑银环、燕松山、罗齐汉、周廷美、王小娟、郭柏林、张宏、江连会，武汉科技大学杨文提、孙瑛、陶平，长江大学徐小兵，湖北工业大学王为，湖北汽车工业学院任爱华，河南科技大学舒寅清，江汉大学彭和平，武汉理工大学华夏学院夏会芳，广西大学龙有亮、黄华梁，华南理工大学朱文坚。下册由冯雪梅、李波、韩少军任主编，由周廷美、郑银环、燕松山任副主编。

武汉科技大学校长孔建益教授审阅了本书，并提出宝贵的意见。此外，本书顾问华中科技大学彭文生教授、武汉理工大学李志明教授、广西大学黄华梁教授对本书的修订工作进行了指导，在此谨表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，疏漏之处在所难免，欢迎广大读者提出批评和改进意见。

编者

2014年3月

第二版前言

本书是根据教育部新制定的高等学校机械类专业本科《机械原理课程教学基本要求》和《机械设计课程教学基本要求》、《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》、《教育部关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知》(教高[2003]1 号文)、《教育部关于进一步深化本科教学改革全面提高教学质量的若干意见》(教高[2007]5 号文)等有关文件精神,在总结第一版使用经验的基础上修订而成的。

本书第一版于 2002 年 8 月出版,考虑到机械工业迅速发展的需要、国家对 21 世纪培养创新人才的需求,以及适应和实施国家以科学发展观为指导制定的“十一五”规划,我国要建设成为有国际影响力的创新型国家,加强本科教育和教学改革,提高学生的综合素质,培养自主创新人才,为此本书按精品教材的要求进行了修订。

本次修订原则是:以继承为主,在保持和发扬第一版教材特色的基础上,从内容和体系上进行了新的探索;树立精品意识,千方百计提高教材质量,锤炼成为精品教材。具体进行了以下几项工作:

1. 突破原有课程的界限。将机械原理、机械设计、机械创新设计等课程的有关内容进行了重组、融合及整体优化,按照“机构分析与设计—机械系统动力学基础及运动方案设计—机械零部件设计—机械创新设计及系统设计”的新体系划分篇章,以加强课程的整体性和系统性。例如,本书内容编排顺序为:从机构分析与设计到机械创新及系统设计,从机械系统的组成和运动简图设计到机械传动及其零部件设计、机械创新设计、机械系统方案设计和机械传动系统设计。

2. 以系统分析和综合设计能力的培养为主线,突出创新能力的培养和总体方案的设计,并将这一思想贯穿于教材的始终。机械系统总体方案设计是最具有创新性的一个设计环节,例如在各章具体机构及零部件设计计算时,都从整体设计思想出发,联系到具体机械的工况与技术要求,进行系统分析和综合设计能力的训练。另外,对机械创新设计及机械系统设计有专章阐述。对主要章均增加了“设计实例分析及设计时应注意的事项”一节,旨在培养学生的综合设计能力。

3. 为了适应科学技术和经济发展的需要,本书内容进行了大胆的改革,例如增加了机械创新设计、机械系统的运动方案设计、机械系统设计三章全新的内容;对传统教材的内容进行了推陈出新,例如增加了组合机构、点线啮合齿轮、新型蜗杆传动、变速轴承、模糊评价等新内容。

4. 为了加强对学生结构设计能力的培养,本书将机械零部件设计中有关结构设计的内容集中在“常用零部件结构设计”一章,抓住共同特点,通过典型实例的正误对比分析,培养学生的结构创新设计能力。

5. 合理处理传统教学内容与现代教学内容的关系。精选“三基”内容,注意少而精的原则,淡化公式的演绎和推导,适当压缩篇幅,尽量避免重复,以适应学时减少的需要。

6. 为了适应经济全球化、培养大学生的国际化意识和推行的“双语教学”的需要,本书在常

用的名词术语后标注了英文词语,全书共收录 600 余词条。

7. 与本书配套的系列教材《机械设计习题集》、《机械设计课程设计》、《机械设计教学指南》、《机械设计学习指导与典型题解》由高等教育出版社同时出版,更方便教与学。

本书共四篇 24 章,参加本书修订工作的有:华中科技大学彭文生(第一章、第十一章、第二十三章的一部分),河南科技大学何晓玲(第二章)、田同海(第五章)、舒寅清(第十四章),湖北工业大学魏兵(第三章)、王为(第十三章),武汉理工大学陈晓岑(第四章)、韩少军(第七章)、杨光(第八章)、李志明(第十六章)、郭柏林(第二十章),武汉科技学院郭毕佳(第六章)、杨文堤(第十章),华中农业大学王树才(第九章),长江大学徐小兵(第十二章),江汉大学彭和平(第十五章),广西大学龙有亮(第十七章)、黄华梁(第二十三章的一部分、第二十四章),湖北汽车工业学院任爱华(第十八章),华南理工大学朱文坚(第十九章),武汉科技大学孙瑛(第二十一章)、陶平(第二十二章)。全书由彭文生、李志明、黄华梁担任主编,朱文坚、陈晓岑、徐小兵、舒寅清、王为担任副主编。

本书承武汉科技大学校长孔建益教授和武汉理工大学王均荣教授审阅,他们提出了宝贵的意见,在此谨表示衷心的感谢。

由于编者的水平和时间所限,误漏之处恐属难免,诚恳欢迎广大读者对本书提出批评和改进意见。

编者

2008 年 1 月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

第 1 章 机械设计基础	1	§ 4-4 带轮的结构设计及带传动的张紧	106
§ 1-1 概述	1	* § 4-5 同步带传动设计	108
§ 1-2 机械设计中的强度、许用应力和安全系数	3	* § 4-6 其他带传动简介	113
§ 1-3 机械设计中的摩擦、磨损和润滑	12	§ 4-7 V 带传动设计的实例分析及设计时应注意的事项	114
§ 1-4 机械零件的工作能力和计算准则	24	第 5 章 链传动设计	117
§ 1-5 机械设计中常用材料的选用原则	25	§ 5-1 概述	117
第 2 章 齿轮传动设计	27	§ 5-2 链传动的运动特性与受力分析	120
§ 2-1 概述	27	§ 5-3 滚子链传动设计	123
§ 2-2 齿轮传动的受力分析与计算载荷	27	* § 5-4 链传动的润滑、布置、张紧及链轮结构设计	130
§ 2-3 齿轮传动的失效形式及设计准则	33	§ 5-5 链传动设计的实例分析及设计时应注意的事项	135
§ 2-4 齿轮材料及许用应力	36	第 6 章 轴毂连接设计	137
§ 2-5 齿轮传动的强度计算	42	§ 6-1 键连接设计	137
§ 2-6 齿轮传动的润滑	52	§ 6-2 花键连接设计	141
§ 2-7 齿轮的结构设计	53	* § 6-3 其他轴毂连接简介	144
§ 2-8 齿轮传动设计的实例分析及设计时应注意的事项	55	第 7 章 螺纹连接与螺旋传动设计	147
第 3 章 蜗杆传动设计	60	§ 7-1 概述	147
§ 3-1 蜗杆传动的类型及特点	60	§ 7-2 螺纹连接	150
§ 3-2 普通圆柱蜗杆传动的主要参数及几何尺寸计算	65	§ 7-3 单个螺栓连接的强度计算	154
§ 3-3 蜗杆传动的受力分析、失效形式及材料选择	70	§ 7-4 螺栓组连接的设计	162
§ 3-4 普通圆柱蜗杆传动的设计计算	72	§ 7-5 提高螺栓连接强度的措施	167
* § 3-5 圆弧圆柱蜗杆传动的设计计算	75	§ 7-6 螺纹连接设计的实例分析及设计时应注意的事项	169
§ 3-6 蜗杆传动的效率、润滑及热平衡计算	81	* § 7-7 螺旋传动简介	173
§ 3-7 蜗杆和蜗轮的结构设计	85	第 8 章 轴的设计	176
§ 3-8 蜗杆传动设计的实例分析及设计时应注意的事项	86	§ 8-1 概述	176
第 4 章 带传动设计	89	§ 8-2 轴径的初步估算	179
§ 4-1 概述	89	§ 8-3 轴的结构设计	180
§ 4-2 带传动的理论基础	93	§ 8-4 轴的强度和刚度计算	185
§ 4-3 V 带传动设计	98	§ 8-5 轴设计的实例分析及设计时应注意的事项	193

第 9 章 联轴器、离合器和制动器	200	§ 12-3 圆柱螺旋压缩(拉伸)弹簧的设计 计算	277
§ 9-1 联轴器	200	* § 12-4 圆柱螺旋扭转弹簧的设计计算 ..	285
§ 9-2 离合器	206	* § 12-5 防振装置简介	287
§ 9-3 制动器简介	209	* § 12-6 缓冲装置简介	288
第 10 章 滑动轴承设计	211	* 第 13 章 机械结构设计基础	290
§ 10-1 概述	211	§ 13-1 机械结构设计基础知识	290
§ 10-2 滑动轴承的结构形式	212	§ 13-2 机架与机座的结构设计	295
§ 10-3 轴瓦的结构和材料	213	* 第 14 章 机械创新设计	300
§ 10-4 滑动轴承的润滑	216	§ 14-1 机械创新设计概述	300
§ 10-5 非液体摩擦滑动轴承的设计	217	§ 14-2 创新思维的类型和特点	303
§ 10-6 液体摩擦径向滑动轴承的设计 ..	219	§ 14-3 创新设计的基本原理	307
§ 10-7 滑动轴承设计的实例分析及设计 时应注意的事项	227	§ 14-4 常用的创新设计方法	308
* § 10-8 其他形式滑动轴承简介	230	§ 14-5 机械创新设计的实例分析	313
第 11 章 滚动轴承及其装置设计	235	* 第 15 章 机械系统设计	322
§ 11-1 滚动轴承的主要类型、代号及其 选择	235	§ 15-1 现代机械系统的组成	322
§ 11-2 滚动轴承的载荷、应力、失效形式 及计算准则	243	§ 15-2 机械系统的设计任务和设计 方法	323
§ 11-3 滚动轴承的寿命计算	245	§ 15-3 机械系统的构思设计方法	325
§ 11-4 滚动轴承装置设计	253	§ 15-4 机械系统执行机构的方案设计 ..	331
§ 11-5 滚动轴承设计的实例分析及设计 时应注意的事项	264	§ 15-5 机械传动系统方案的设计	332
* § 11-6 滚动导轨简介	266	§ 15-6 机械传动系统方案设计的实例 分析及评价	337
第 12 章 防振、缓冲零部件概述	270	机械设计名词术语中英文对照	343
§ 12-1 弹簧的功能、类型及特性曲线 ..	270	参考文献	351
§ 12-2 弹簧的材料、许用应力及制造 ..	272		

第 1 章

机械设计基础

§ 1-1 概 述

一、机械设计的性质、内容与任务

机械设计是机械工程类专业学生必须学习的一门设计性质的重要技术基础课,是学习许多专业课程和从事机械设备设计的基础。

机械设计课程的内容主要是从工作能力、构造、工艺和维护等方面来研究通用零件,从而达到能正确设计和改进这些零件的目的,其中包括如何确定零件最适当的外形和尺寸,如何选择材料、公差等级、表面质量以及制造上达到技术条件等。为了适应 21 世纪中国高等工程教育培育人才的需要,机械设计课程内容增加了机械创新设计,较系统地介绍机械创新设计的基本原理、创新性思维、创新设计方法和创新设计实例分析;增加了机械系统的现代设计方法概述,以反映现代机械设计方法和理论的新内容,并结合实例讲述了机械系统的构思设计方法和创造性设计方法。

本课程的主要任务:①培养学生逐步树立正确的设计思想,了解和贯彻执行国家的技术经济政策;②使学生掌握设计机械所必需的基本知识、基本理论和基本技能,具有初步设计机械传动装置和一般机械的能力;③培养学生具有应用标准、规范、手册及其他技术资料的能力,使学生获得实验技能的基本训练;④对于机械设计的新发展、现代设计方法(优化设计、可靠性设计、CAD 等)应有所了解,在条件允许时应尽可能在设计中加以应用。

二、机械设计的基本要求

尽管机械的类型很多,但其设计的基本要求都大体相同,主要有以下几方面。

1. 实现预定的功能,满足运动和动力性能的要求

所谓功能是指用户提出的需要满足的使用上的特性和能力,它是机械设计的最基本的出发点。在机械设计过程中,设计者一定要使所设计的机械实现用户要求的功能,为此必须正确地选择机械的工作原理、机构的类型和拟定机械传动系统方案,并且所选择的机构类型和拟定的机械

传动系统方案能满足运动和动力性能的要求。

运动要求是指所设计的机械应保证实现规定的运动速度和运动规律,满足工作平稳性、启动性、制动性等性能的要求。动力要求是指所设计的机械应具有足够的功率,以保证机械完成预定的功能。为此,要正确设计机械的零件,使其结构合理并满足强度、刚度、耐磨性和振动稳定性等方面的要求。

2. 可靠性和安全性的要求

机械的可靠性是指机械在规定的使用条件下,在规定的时间内完成规定功能的能力。安全可靠是机械的必备条件,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、加工工艺的制订等方面加以保证。

3. 市场需要和经济性的要求

在产品设计中,产品设计、销售(市场需要)及制造三方面自始至终都应作为一个整体考虑。只有设计与市场信息密切结合,在市场、设计、生产中寻求最佳关系,才能以最快的速度回收投资,获得满意的经济效益。

4. 机械零部件结构设计的要求

机械设计的成果都是以一定的结构形式表现出来的,且各种计算都要以一定的结构为基础。所以设计机械时,往往要事先选定某种结构形式,再通过各种计算得出结构尺寸,将这些结构尺寸和确定的几何形状画成零件工作图,最后按设计的工作图进行制造、装配组成部件乃至整台机械,以满足机械的使用要求。

5. 工艺及标准化、系列化、通用化的要求

机械及其零部件应具有良好的工艺性,即零件要制造方便,加工精度及表面粗糙度适当,易于装拆。设计时,零部件参数应尽可能标准化、通用化、系列化,以提高设计质量,降低制造成本,并且使设计者将主要精力用在关键零件的设计上。

6. 其他特殊要求

有些机械由于使用环境的不同,而对设计提出某些特殊要求。例如,高级轿车的变速箱齿轮有低噪声的要求,机床有较长期的保持精度的要求,食品、纺织机械有不得污染产品的要求等。

三、机械设计的一般程序

设计一种新的机械系统(机械产品)是一项复杂细致的工作,要提供性能好、质量高、成本低、竞争能力强、受用户欢迎的机械产品,必须有一套科学的工作程序。机械产品的设计一般可按如下程序(见图1-1)进行:

1. 制定设计任务书

任务书可由主管部门指定性下达或由用户提出,也可由设计部门根据需要提出。不论设计任务书是谁提出的,都应由主管部门召开可行性论证会,通过专家评议审查,才能确定设计任



图1-1 机械系统的设计程序

务书。设计任务书中应明确规定:机械产品的名称(或代号)、功用、生产率、主要性能指标、可靠性和使用维护要求、工作条件、生产批量、预定的成本、设计和制造完成日期以及其他特殊要求等。

2. 方案设计

根据设计任务书规定的要求,应进行充分的调查研究,包括:收集类似机械产品的技术数据及有关图纸资料;了解国内外的生产状况;了解制造单位的设备、材料供应情况等。然后根据机械产品的性能要求,提出若干个可行的方案,召开方案审查会,对方案进行对比分析、可行性分析,必要时还可以进行试验分析,最后选定一种较好的方案。方案设计包括机械产品的整体方案、传动系统方案及工作机构选择等,它是下一步技术设计的基础,是很重要的。方案设计得好,可以说设计成功了一半;如果方案设计得不好,将影响设计甚至导致设计工作失败。

3. 技术设计

方案确定之后,为实现设计方案就要进行技术设计,其中包括运动设计、结构设计、动力设计和主要零部件的工作能力(强度、刚度、寿命)设计。这一阶段要完成装配图、零件工作图及编写出设计计算说明书等技术文件。这一阶段工作很重要,它是把设计方案变成技术文件的过程。

4. 样机试制

用技术设计所提供的图纸等技术文件进行样机试制。

5. 样机试验

对试制的样机进行试验,检测样机是否达到设计要求,还存在什么问题,以便为进一步修改设计提供依据。

6. 技术经济评价

进行技术经济评价可以从多种设计方案的比较中找出理想的设计方案。遇到两个评价相近的方案时,若其中之一技术价值高,而另一个则经济价值高,最好选用技术价值高的设计方案。

7. 修改设计

针对样机试验和技术经济评价中暴露出来的问题,修改原来的设计方案,使设计更趋完善。

8. 生产设计

根据修改设计后所得的图纸等技术文件,考虑生产的批量,进行工艺流程和工艺装备的设计,以确保机械产品的性能和质量。

9. 正式投产

按照修改后的技术文件确定的生产批量,正式组织生产合格的机械产品,投放市场交付用户使用,并不断总结使用中的经验,为将来改进设计提供依据。

§ 1-2 机械设计中的强度、许用应力和安全系数

在机械设计过程中,主要零件的基本尺寸往往是通过强度计算、刚度计算并经结构化之后确定的。而进行设计计算时,应先确定该零件工作时所承受的载荷和应力的性质。

一、载荷和应力

1. 载荷的分类

载荷根据其性质可分为静载荷和变载荷。大小和方向不随时间变化(或变化极缓慢)的载荷,称为静载荷(static load),如自重、匀速转动时的离心力等;大小或方向随时间变化的载荷,称为变载荷(fluctuating load)。循环变化的载荷,称为循环变载荷。每个工作循环内的载荷不变,各循环的载荷又相同的,称为稳定循环载荷(图 1-2)。若每一个工作循环内的载荷是变动的,称为不稳定循环载荷(图 1-3)。突然作用且作用时间很短的载荷,称为动载荷(dynamic load),例如冲击载荷、机器起动和制动时的惯性载荷、振动载荷等。很多机械,例如汽车、飞机、农业机械等,由于受工作阻力、动载荷、剧烈振动等偶然性因素的影响,载荷随时间而随机变化(图 1-4),这种频率和幅值随机变化的载荷,称为随机变载荷。

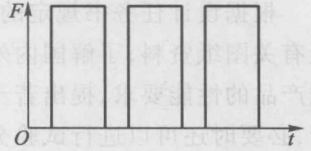


图 1-2 稳定循环载荷

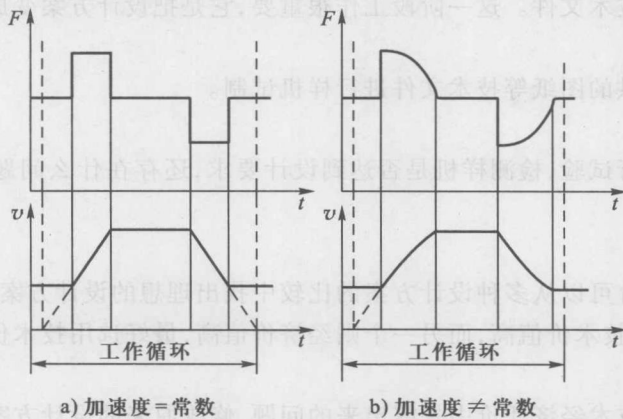


图 1-3 不稳定循环载荷

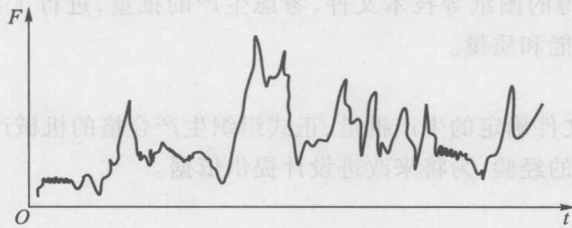


图 1-4 随机变载荷

2. 工作载荷、名义载荷和计算载荷

机械零部件上所受的载荷可分为工作载荷、名义载荷和计算载荷。工作载荷是机械正常工作时所受的载荷。当缺乏工作载荷的载荷谱(载荷与时间的坐标图称为载荷谱,可用分析法或实测法得到)或难于确定工作载荷时,常由原动机的功率计算求得,这样求出的载荷称为名义载荷(nominal load),记为 F ;若原动机的额定功率为 $P(\text{kW})$,额定转速为 $n(\text{r/min})$,则传动零件上的名义转矩 $T(\text{N} \cdot \text{mm})$ 为

$$T = 9.55 \times 10^6 \frac{P}{n} \eta i \quad (1-1)$$

式中： i ——由原动机到所计算的零件之间的总传动比；

η ——由原动机到所计算的零件之间的传动链的总效率。

为了可靠，计算中的载荷值，应计及零部件工作中受到的各种附加载荷，例如，由原动机、工作机或传动系统本身的振动而引起的附加载荷等。这些附加载荷可通过动力学分析或实测确定。如缺乏资料，可用一载荷系数 K 对名义载荷 F 或名义转矩 T 进行修正而得到近似的计算载荷 (calculating load) F_c 或计算转矩 (calculating moment) T_c 为

$$\left. \begin{aligned} F_c &= KF \\ T_c &= KT \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

3. 计算应力

在计算载荷作用下，机械零件危险截面上产生的应力，称为计算应力 (calculating stress)。按应力随时间变化的情况不同，应力可分为静应力和变应力两大类。不随时间而变的应力为静应力(图 1-5)；不断地随时间而变的应力为变应力。大多数机械零部件都是处于变应力状态下工作的，较典型的变应力有：非对称循环变应力(图 1-6)、对称循环变应力(图 1-7)和脉动循环变应力(图 1-8)。

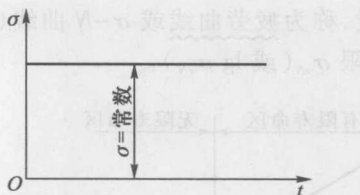


图 1-5 静应力

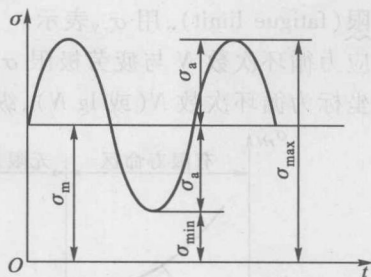


图 1-6 非对称循环变应力

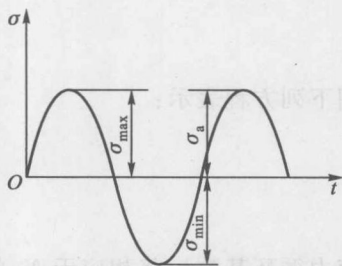


图 1-7 对称循环变应力

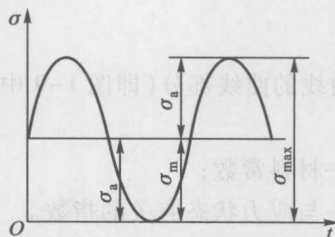


图 1-8 脉动循环变应力

如图 1-6 所示，稳定变应力的最大应力为 σ_{\max} 、最小应力为 σ_{\min} 时，其平均应力 σ_m 和应力幅 σ_a 分别为

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1-3)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1-4)$$

最小应力 σ_{\min} 与最大应力 σ_{\max} 之比称为循环特征 r , 即

$$r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (1-5)$$

由上述可知, 变应力参数共有五个, 即 σ_{\max} 、 σ_{\min} 、 σ_m 、 σ_a 和 r , 已知其中两个参数便可求出其余参数。而循环特征 r 可以用来表示应力变化的情况 (参见图 1-5 至图 1-8): 对于对称循环变应力, $r = -1$; 脉动循环变应力, $r = 0$; 非对称循环变应力, r 随具体受力情况不同, 在 $+1 \sim -1$ 之间变化; 静应力则可看作变应力的一个特例, 即 $r = +1$ 。

二、机械零件的疲劳强度

满足强度是设计机械零件的最基本的要求。强度可分为静应力强度和变应力强度两种。前者可利用材料力学的知识进行零件的静应力强度设计, 后者在材料力学中也作了基本的介绍, 这里仅从工程设计的角度来加以延伸, 只讨论机械零件的疲劳强度问题。

1. 疲劳极限

在任一给定循环特性 r 的条件下, 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 (fatigue limit), 用 σ_{rN} 表示。

表示应力循环次数 N 与疲劳极限 σ_{rN} 间的关系曲线, 称为疲劳曲线或 $\sigma-N$ 曲线 (图 1-9)。曲线的横坐标为循环次数 N (或 $\lg N$), 纵坐标为疲劳极限 σ_{rN} (或 $\lg \sigma_{rN}$)。

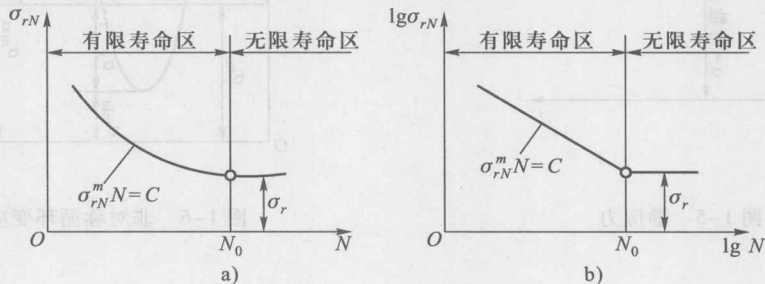


图 1-9 疲劳曲线

疲劳曲线的曲线部分 (即图 1-9 中的有限寿命区) 可用下列方程表示:

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

式中: C ——材料常数;

m ——与应力状态有关的指数。

在进行材料试验时, 常取一规定的应力循环次数 N_0 (应力循环基数), 将相应于 N_0 的疲劳极限称为材料的疲劳极限 (也叫无限寿命疲劳极限), 记为 σ_r 。随着材料性质的不同, N_0 在很大范围内变动。在有限寿命区, 疲劳曲线方程为

$$\sigma_{rN}^m N = \sigma_r^m N_0 = C \quad (1-7)$$

因此, 材料的有限寿命 (即寿命为 N) 的疲劳极限为

$$\sigma_{r,N} = \sigma_r \sqrt[m]{N_0/N} = k_N \sigma_r \quad (1-8)$$

式中, k_N 为寿命系数, $k_N = \sqrt[m]{N_0/N}$; N_0 一般为 $10^6 \sim 10^8$ 之间。 m 、 N_0 值参阅本书有关章节。

2. 极限应力图

为了得到各种循环特征 r 下的疲劳极限值, 需借助极限应力图。以平均应力 σ_m 为横坐标、应力幅 σ_a 为纵坐标, 可作出任一材料的极限应力图, 如图 1-10 所示。

在进行材料试验时, 通常是求出对称循环和脉动循环时材料的疲劳极限 σ_{-1} 和 σ_0 。将这两个极限应力标在 $\sigma_m - \sigma_a$ 坐标上, 可得到对称循环点 $A(0, \sigma_{-1})$ 和脉动循环点 $B(\sigma_0/2, \sigma_0/2)$ 。 C 为静应力点 $(\sigma_B, 0)$ 。如果再在其他的循环特性下, 对材料进行试验,

则可求得相应的疲劳极限, 因此在 $\sigma_m - \sigma_a$ 坐标上又可描出几个点。将上述这些点描成一平滑的曲线, 即为该材料的疲劳极限应力图, 如图 1-10 的 ABC 曲线。

为了简化试验, 常用两条直线 AD 和 DG 来代替疲劳曲线。用 AD 和 DG 两直线构成的疲劳曲线称为材料的简化极限应力曲线。它不但可用较少的试验数据 (σ_{-1} 、 σ_0 、 σ_S) 画出, 而且也能满足设计的需要。

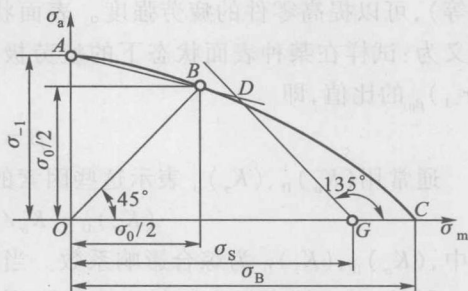


图 1-10 简化极限应力图

3. 影响机械零件疲劳强度的主要因素

影响机械零件疲劳强度的主要因素, 除上面提到的材料性能、应力循环特征和循环次数之外, 还有应力集中、绝对尺寸和表面状态等。

(1) 应力集中的影响

在零件截面的几何形状突然变化之处 (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 (stress concentration)。最大局部应力与名义应力的比值 α , 称为理论应力集中系数。理论应力集中系数不能直接判断因局部应力使零件的疲劳强度降低多少, 因为它在不同材料制造的零件上, 表现有所不同。实际上常用有效应力集中系数 K_σ 、 K_τ 来表示疲劳强度的真正降低程度。有效应力集中系数定义为: 材料、尺寸和受载情况都相同的一个无应力集中试样与一个有应力集中试样的疲劳极限的比值, 即

$$K_\sigma = \sigma_{-1} / (\sigma_{-1})_k, K_\tau = \tau_{-1} / (\tau_{-1})_k$$

式中, σ_{-1} 、 τ_{-1} 、 $(\sigma_{-1})_k$ 、 $(\tau_{-1})_k$ 分别为无应力集中试样和有应力集中试样的疲劳极限。

如果截面上有几个不同的应力集中源, 则零件的疲劳强度由各个 K_σ (K_τ) 中的最大值来决定。

(2) 绝对尺寸的影响

当其他条件相同 (包括截面上的应力大小) 时, 零件截面的绝对尺寸越大, 其疲劳极限就越低。这是由于尺寸大时, 材料晶粒粗, 出现缺陷的概率大和机械加工后表面冷作硬化层 (对提高疲劳强度有利) 相对较薄。

截面绝对尺寸对疲劳极限的影响, 可用绝对尺寸系数 ε_σ 、 ε_τ 表示。绝对尺寸系数定义为: 直径为 d 的试样的疲劳极限 $(\sigma_{-1})_d$ 与直径 $d_0 = 6 \sim 10$ mm 的试样的疲劳极限 $(\sigma_{-1})_{d_0}$ 的比值, 即

$$\varepsilon_{\sigma} = (\sigma_{-1})_d / (\sigma_{-1})_{d_0}, \varepsilon_{\tau} = (\tau_{-1})_d / (\tau_{-1})_{d_0}$$

(3) 表面状态的影响

当其他条件相同时,零件表面光滑或经过各种强化处理(如喷丸、表面热处理或表面化学处理等),可以提高零件的疲劳强度。表面状态对疲劳强度的影响,可用表面状态系数 β 表示,其定义为:试样在某种表面状态下的疲劳极限 $(\sigma_{-1})_{\beta}$ 与精抛光试样(未经强化处理)的疲劳极限 $(\sigma_{-1})_{\beta_0}$ 的比值,即

$$\beta = (\sigma_{-1})_{\beta} / (\sigma_{-1})_{\beta_0}$$

通常用 $(K_{\sigma})_D$ 、 $(K_{\tau})_D$ 表示这些因素的综合影响:

$$(K_{\sigma})_D = K_{\sigma} / (\varepsilon_{\sigma}\beta), (K_{\tau})_D = K_{\tau} / (\varepsilon_{\tau}\beta)$$

式中, $(K_{\sigma})_D$ 、 $(K_{\tau})_D$ 为综合影响系数。当其他条件相同时,钢的强度越高, $(K_{\sigma})_D$ 或 $(K_{\tau})_D$ 值越大。所以,对于用高强度钢制造的零件,为了提高强度,必须特别注意减少应力集中和提高表面质量。

由试验得知,有效应力集中系数、绝对尺寸系数和表面状态系数,只对变应力的应力幅部分产生影响。因而,计算时可用综合影响系数对变应力的应力幅部分进行修正。

4. 考虑 K_{σ} (K_{τ})、 ε_{σ} (ε_{τ})和 β 影响的零件极限应力图

对于有应力集中、绝对尺寸和表面状态影响的零件,在计算安全系数时,必须考虑应力集中系数 K_{σ} (K_{τ})、绝对尺寸系数 ε_{σ} (ε_{τ})及表面状态系数 β 的影响。考虑到 K_{σ} (K_{τ})、 ε_{σ} (ε_{τ})及 β 只对应力幅部分有影响,因而在极限应力图(图1-10)的纵坐标上的 σ_{-1} 和 σ_0 ,须除以 $(K_{\sigma})_D$ 进行修正。修正后的简化极限应力图为图1-11所示的 $A'B'D'G$ 折线图。

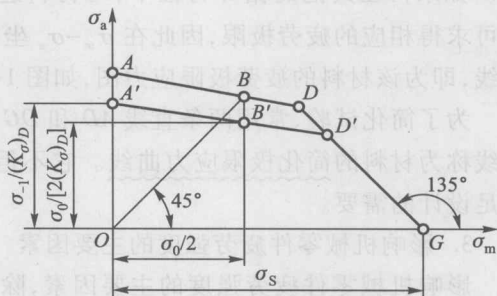


图 1-11 考虑 K_{σ} 、 ε_{σ} 和 β 影响的极限应力图

对于有应力集中、绝对尺寸和表面状态影响的零件,在计算安全系数时,必须考虑应力集中系数 K_{σ} (K_{τ})、绝对尺寸系数 ε_{σ} (ε_{τ})及表面状态系数 β 的影响。考虑到 K_{σ} (K_{τ})、 ε_{σ} (ε_{τ})及 β 只对应力幅部分有影响,因而在极限应力图(图1-10)的纵坐标上的 σ_{-1} 和 σ_0 ,须除以 $(K_{\sigma})_D$ 进行修正。修正后的简化极限应力图为图1-11所示的 $A'B'D'G$ 折线图。

* 三、稳定变应力状态下机械零件的疲劳强度计算

1. 单向应力状态下机械零件的疲劳强度计算

在进行机械零件的疲劳强度计算时,首先要求出零件危险截面上的最大应力 σ_{\max} 及最小应力 σ_{\min} ,并据此计算出平均应力 σ_m 及应力幅 σ_a ,然后在极限应力图的坐标上,标出相应于 σ_m 和 σ_a 的一个工作应力点 N 或 M 。

强度计算时所用的极限应力应是零件的极限应力曲线($A'D'G$)上的某一点所代表的应力。用哪一点来表示极限应力才算合适,这要根据零件应力可能发生的变化规律来确定。通常典型的应力变化规律有三种:1)变应力的循环特性不变,即 $r=C$ (例如绝大多数转轴中的应力状态);2)变应力的平均应力不变,即 $\sigma_m=C$ (例如振动着的受载弹簧中的应力状态);3)变应力的最小应力不变,即 $\sigma_{\min}=C$ (例如紧螺栓连接中受轴向变载荷时的应力状态)。

(1) 当 $r=C$ 时,需找一个循环特性与零件工作应力的循环特性相同的极限应力值(图1-12)。因为

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} = \frac{1-r}{1+r} = C' \quad (1-9)$$

可以看出, C' 也是一个常数,所以图1-12中从坐标原点引射线通过工作应力点 N (或 M)与极限应力曲线交于 N'_1 (或 M'_1),得到 ON'_1 (或 OM'_1),则此射线上任意一点所代表的应力循环都具有相同的循环特性值。而 N'_1 (或