

高等学校教材

机械设计基础

(修订版)

王新华 主 编

沈景凤 石云霞 副主编



JIXIE
SHEJI JICHU



化学工业出版社

高等学校教材

机械设计基础

(修订版)

王新华 主 编
沈景凤 石云霞 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共分 4 篇 15 章, 主要内容包括机械传动设计、联接设计、轴系零部件设计及其他零部件设计等。本书坚持以应用为目的, 在兼顾各专业实际需要的基础上, 删去了一些烦琐的理论推导, 更新了设计计算方法, 在各章均有教学提示和习题, 基本可以满足本课程的学习和课程设计的使用要求。

本书可作为高等工科院校机械工程类及相关专业教材, 也可作为高职、电大、夜大等学生的教材或参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械设计基础/王新华主编. —修订版. —北京:
化学工业出版社, 2014. 10
ISBN 978-7-122-21600-7

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 (2014) 第 184951 号

责任编辑: 韩亚南 陈 丽

装帧设计: 史利平

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: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 392 千字 2015 年 1 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: 37.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书第一版自 2011 年 1 月出版以来,深受广大读者的欢迎。《机械设计基础》修订版是为适应高等院校大专业规划的要求而编写的,根据教育部有关机械设计基础课程的教学基本要求,结合各专业学习的基本要求对原有的教材内容进行了必要的修订。

教材立足于基础和应用,通盘考虑了各个专业的实际需求及应用,删去了一些烦琐的理论推导、论证和陈旧内容。参照机械工业发展的现状,更新了若干个设计计算方法,引入了一些先进的设计方法和理论。根据最新颁布的国家及部颁标准,对设计的术语、数据及图表进行了规范和补充。全书共分 15 章,简明扼要地讲述常用机构的运动分析与设计;通用零部件的设计与计算。在各章中有教学提示,并配有相应的例题、习题以及必要的资料,基本可以满足本课程的学习和课程设计的使用要求。

本教材可以满足教学计划在 48~64 课时的教学需要,是高等工科院校机械工程类和非机械工程类的基本教材,还可供高职、电大、夜大、自学考试等学生作为教材或参考书,还可供工程技术人员参考。

本书由上海理工大学王新华老师担任主编,沈景凤和石云霞老师担任副主编,参加本书编写的人员有沈景凤(第 1、2、6 章)、黄一晴(第 7、8 章)、钱炜(第 9、10、11 章)、王新华(机械设计概论、第 14、15 章)、石云霞(第 5、12 章)、赵高晖(第 13 章)和吕方梅(第 3、4 章),全书由王新华老师负责统稿。

本书承上海理工大学崔建昆副教授细心审阅,并提出许多宝贵意见;上海理工大学仲梁维教授对教材的编写提出了许多具体的指导意见,陈彩凤副教授在本书的编写过程中给予了热情支持和帮助,在此表示诚挚的谢意!各位编者在编写本书过程中,参阅了大量的文献资料和教材,无法在此一一列出,谨此一并向原作者表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,殷切希望广大读者批评指正。

编 者
2014 年 8 月

目 录

机械设计概论	1
0.1 机械的组成	1
0.2 本课程的内容、性质和任务	2
0.3 机械设计的基本要求和一般程序	3
0.4 机械零件的工作能力和计算准则	4
0.5 机械设计中常用材料的选用原则	8
小结	9
思考题和习题	9

第 1 篇 机械传动设计

第 1 章 平面机构的运动简图	10
1.1 运动副	10
1.2 平面机构的运动简图	11
1.3 平面机构具有确定运动的条件	15
小结	19
思考题和习题	19
第 2 章 平面连杆机构设计	21
2.1 铰链四杆机构	21
2.2 铰链四杆机构的演变	27
2.3 平面四杆机构的设计	32
小结	35
思考题和习题	36
第 3 章 凸轮机构设计	38
3.1 凸轮机构的应用和分类	38
3.2 从动件的常用运动规律	40
3.3 盘形凸轮轮廓的设计	45
3.4 设计凸轮机构应注意的问题	49
3.5 凸轮常用材料和结构	51
小结	53
思考题和习题	53
第 4 章 间歇机构设计	56
4.1 棘轮机构	56
4.2 槽轮机构	59
4.3 不完全齿轮机构	61
小结	62
思考题和习题	62
第 5 章 齿轮传动设计	64

5.1	概述	64
5.2	齿廓啮合基本定律	65
5.3	渐开线及渐开线齿廓	66
5.4	标准直齿圆柱齿轮各部分名称及几何尺寸计算	68
5.5	渐开线标准直齿圆柱齿轮的啮合传动	70
5.6	渐开线齿轮的切齿原理和齿轮的变位原理	72
5.7	齿轮传动的失效形式及设计准则	74
5.8	齿轮的材料、热处理及传动精度	75
5.9	直齿圆柱齿轮传动的受力分析和计算载荷	77
5.10	直齿圆柱齿轮传动的强度计算	78
5.11	斜齿圆柱齿轮传动的设计特点	83
5.12	直齿圆锥齿轮传动的设计特点	87
5.13	齿轮的结构设计	90
5.14	齿轮传动的润滑和效率	91
5.15	齿轮传动的发展趋势	92
	小结	93
	思考题和习题	93
第 6 章	蜗杆传动设计	95
6.1	概述	95
6.2	普通圆柱蜗杆传动的主要参数和几何尺寸计算	96
6.3	蜗杆传动的常用材料和结构	99
6.4	蜗杆传动的受力分析和强度计算	101
6.5	蜗杆传动的效率、润滑和热平衡计算	103
	小结	106
	思考题和习题	107
第 7 章	轮系	108
7.1	轮系分类	108
7.2	定轴轮系的传动比计算	109
7.3	周转轮系的传动比计算	110
7.4	复合轮系的传动比计算	113
7.5	轮系的功用	114
7.6	几种特殊的行星齿轮传动简介	117
	小结	119
	思考题和习题	119
第 8 章	带传动和链传动设计	122
8.1	带传动概述	122
8.2	带传动的工作情况分析	124
8.3	带与带轮结构和标准	127
8.4	普通 V 带传动设计	129
8.5	带传动的张紧与维护	137
8.6	链传动概述	138
8.7	链传动的运动特性	141
8.8	滚子链传动的设计计算	142

8.9 链传动的润滑及布置	146
小结	147
思考题和习题	147

第2篇 联接设计

第9章 螺纹联接设计	148
9.1 螺纹	148
9.2 螺旋副的受力分析、效率和自锁	150
9.3 螺纹联接的基本类型	152
9.4 螺纹联接的预紧和防松	153
9.5 螺栓联接的强度计算	155
9.6 螺栓组的结构设计	158
9.7 提高螺栓联接强度的措施	160
9.8 螺旋传动	161
小结	163
思考题和习题	163
第10章 键、花键、销和型面联接设计	165
10.1 键联接	165
10.2 花键联接	167
10.3 销联接	168
10.4 型面联接	169
小结	169
思考题和习题	169
第11章 铆接、焊接和胶接设计	170
11.1 铆接	170
11.2 焊接	171
11.3 胶接	173
小结	173
思考题和习题	173

第3篇 轴系零部件设计

第12章 轴的设计	174
12.1 概述	174
12.2 轴的结构设计	176
12.3 轴的强度计算	179
12.4 轴的设计实例分析	183
小结	187
思考题和习题	187
第13章 轴承设计	189
13.1 滑动轴承的类型	189
13.2 滑动轴承的结构型式	189
13.3 滑动轴承的材料	190
13.4 滑动轴承的润滑	191

13.5	非液体摩擦滑动轴承设计	193
13.6	液体摩擦滑动轴承简介	194
13.7	滚动轴承的结构、类型和代号	196
13.8	滚动轴承类型的选择	199
13.9	滚动轴承的主要失效形式和设计准则	200
13.10	滚动轴承的寿命计算	200
13.11	滚动轴承的静载荷计算	204
13.12	滚动轴承装置设计	205
13.13	滚动轴承与滑动轴承的比较	208
	小结	208
	思考题和习题	208
第14章	联轴器、离合器和制动器	210
14.1	概述	210
14.2	联轴器	210
14.3	离合器	214
14.4	制动器	216
	小结	217
	思考题和习题	217

第4篇 其他零部件设计

第15章	弹簧设计	219
15.1	弹簧的功用及类型	219
15.2	弹簧的材料及制造	220
15.3	圆柱弹簧的参数及几何尺寸	221
	小结	223
	思考题和习题	223
附录		224
参考文献		228

机械设计概论

【学习提示】

本章将阐述机器、机构等概念，简述机械设计的要求、一般过程及具体设计的有关问题。要求掌握机器、机构及其组成，特别是机器及机构的特征；掌握机械设计的基本要求和一般过程；了解方案设计、机械零部件设计的要求及内容；掌握机械零部件设计计算准则、标准化及材料选用。

0.1 机械的组成

0.1.1 机器、机构及其结构组成

机械是机器和机构的总称。它是人类改造自然、发展进步的主要工具。

人们在日常生活中以及从事工业、农业和国防等各项生产活动中，都会接触到各种各样的机器，如汽车、拖拉机、收割机、内燃机、各种机床、缝纫机等。

机器是一种用来转换或传递能量、物料、信息的，能执行机械运动的装置。它可用来代替或减轻人类的劳动强度，改善劳动条件，提高劳动生产率。

图 0-1 所示为单缸四冲程内燃机。它由汽缸体、曲柄、连杆、活塞、进气阀、排气阀、顶杆、凸轮、齿轮等组成。燃气推动活塞往复运动，经连杆转变为曲柄的连续转动。凸轮和顶杆是用来启闭进气阀和排气阀的。为了保证曲柄每转两周进、排气阀各启闭一次，曲柄和凸轮轴之间安装了齿数比为 1:2 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，加上汽化、点火等装置的配合，就把热能转化为曲柄回转的机械能了。

从以上实例可以看出，机器的主体部分是由许多运动构件组成的。它具有三个共同的特征：机器是由人为制造的实物所组成的；机器的各个部分之间具有确定的相对运动；在工作时能够完成有用的机械功或实现能量的转换。

机器是由机构组成的，一般一部机器可包含一个或若干个机构。机构是人为实物组合的各个部分之间具有确定相对运动的装置。因此，机构具有机器的前两个特征。在机器中普遍使用的机构称为常用机构，常用的有连杆机构、齿轮机构、凸轮机构以及各种间歇运动机构等。

从运动的角度来看，机构也是一种执行机械运动的装置。组成机构的各个相对运动部分称为构件。机构和机器一般都是由许多构件组合而成的。

如前所述，从运动的观点来看，机器与机构之间并无差别。因此，机械是机器和机构的总称。

随着科学技术的飞速发展，伺服驱动技术、检测传感技术、自动控制技术、信息处理技术以及精密机械技术、系统总体技术在机械中的使用，形成了一个崭新的现代制造业。

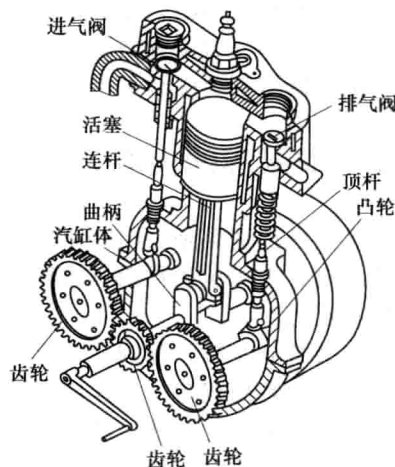


图 0-1 内燃机

现代机械是一个以机械技术为基础,以电子技术为核心的高新技术的综合系统。与传统的机械相比,在产品的工作原理、结构和设计方法等方面都发生了深刻的变化。

0.1.2 机器的功能组成

作为一部完整的机器,仅具有上述的机械部分是不够的,它不能完成预期的工作。从功能和系统的角度来看,机器一般主要由五部分组成,如图0-2所示。

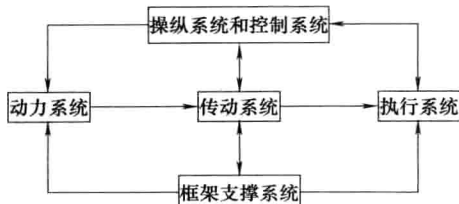


图 0-2 机器的功能组成

动力系统包括动力机及其配套装置;它的功能是向机器提供运动和动力,是机械系统的动力源,如电动机、内燃机、液压马达、气马达、液压缸、汽缸、电磁驱动及控制电路等。

执行系统包括若干执行机构,它的功能是驱动执行构件按给定的运动规律运动,实现预期的工作。执行系统一般处于机械系统的末端,执行构件直接与工作对象接触。执行系统可以只包含一个执行机构和执行构件,也可以由几个执行机构组成。

传动系统是把动力系统的运动和力传递给执行系统的中间装置。如齿轮传动和带传动。

操纵系统和控制系统都是为了使动力系统、传动系统、执行系统彼此协调工作,并准确可靠地完成整机功能的装置。控制系统是指通过人工操作或测量元件获得的控制信号,经控制器使控制对象改变其工作参数或运行状态而实现上述要求的装置。

框架支撑系统包括基础件(如床身、底座、立柱等)和支撑构件(如支架、箱体等)。它用于安装和支撑动力系统、传动系统和操作系统等,如机床的床身。

机器各部分的位置精度、运动精度及机器的承载能力等主要依靠框架支撑系统来保证,该系统是机械系统中必不可少的部分。

0.2 本课程的内容、性质和任务

机械设计基础是一门介绍常用机构和通用机械零件的基本知识和基本设计方法的技术基础课。内容主要包括常用机构和通用零件的工作原理、运动特性、结构特点、使用维护以及标准和规范。

本书共分4篇,分别介绍了机械传动设计、联接设计、轴系零部件设计和其他零部件设计,重点为常用机构的工作原理和通用零部件的设计计算。常用机构包括连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系等;通用零件包括螺栓、齿轮、蜗杆、轴、轴承等。这些常用机构和通用零件的工作原理、设计理论和计算方法,对于专用机械和专用零件的设计也具有一定的指导意义。

随着机械化生产规模的日益扩大,在动力、采矿、冶金、石油、化工、轻纺、食品等许多生产部门工作的工程技术人员,都会经常接触各种类型的通用机械和专用机械。他们必须对机械具备一定的基础知识。因此,机械设计基础如同机械制图、电工学、计算机应用技术一样,是高等学校工科的一门重要的技术基础课。

本课程的主要任务是培养学生各项能力。

① 掌握常用机构的结构、特性等基本知识,并初步具有选用、分析基本机构的能力。

② 掌握通用机械零件的工作原理、特点、应用和简单设计计算方法,并初步具有选用和分析简单机械传动装置的能力。

③ 具有运用标准、规范、手册、图册等有关技术资料的能力。

0.3 机械设计的基本要求和一般程序

机械设计的最终目的是为市场提供优质高效、价廉物美的机械产品，在市场竞争中取得优势，赢得用户，取得良好的经济效益。

产品的质量和经济效益取决于设计、制造和管理的综合水平，而产品设计则是关键。没有高质量的设计，就不可能有高质量的产品；没有经济观念的设计者，绝不可能设计出性能价格比好的产品。据统计，产品质量事故，约有 50% 是设计不当造成的；产品的成本 60%~70% 取决于设计。因此，在机械产品设计中，特别强调和重视从系统的观点出发，合理地确定系统的功能；重视机电技术的有机结合，注意新技术、新工艺及新材料等的采用；努力提高产品的可靠性、经济性 & 保证安全性。以下简述机械设计应满足的基本要求。

① 良好的使用性能 实现预期功能，满足使用要求。操作容易，保养简单，维修方便。

② 安全 机械设计要注重产品的安全性。使整个技术系统和零件在规定的外载荷和规定的工作时间内，能正常工作而不发生断裂、过度变形、过度磨损、不丧失稳定性；能实现对操作人员的防护，保证人身安全和身体健康；对于周围环境和人不造成危害和污染，同时要保证机器对环境的适应性。

③ 可靠、耐用 在预定的使用期限内不发生或极少发生故障。大修或更换易损件的周期不宜太短，以免经常停机影响生产。但是，也不宜过分强调“耐用”。

④ 经济 在产品整个设计周期中，必须把产品设计、销售及制造三方面作为一个系统工程来考虑，用价值工程理论指导产品设计，正确使用材料，采用合理的结构尺寸和工艺，以降低产品的成本。设计机械系统和零部件时，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。

⑤ 符合环保要求 机器噪声不超标；不采用石棉等禁用的原材料；确保机械使用过程不漏水、油、粉尘和烟雾；生产中的废水、废气必须经过治理，达标排放。

机械产品设计的过程是一个复杂的过程，不同类型的产品、不同类型的设计，其产品的设计过程不尽相同。产品的开发性设计过程大致包括规划设计、方案设计、技术设计、施工设计及改造设计五个阶段，如图 0-3 所示。



图 0-3 机械设计的一般过程

设计人员要富有创新精神,既要实际出发,又要善于调查研究,广泛听取用户和工艺人员的意见,在设计、加工、安装、调试过程中及时发现问题,反复修改,以期取得最佳的成果,并从中积累设计经验。

0.4 机械零件的工作能力和计算准则

机械设计应满足在预期的功能前提下,性能好、效率高、成本低,在预期的使用期限内安全可靠、操作方便、维修简单和造型美观。

设计机械零件时,也必须认真考虑上述要求。概括地说,所设计的机械零件既要工作可靠,又要成本低廉。

工程中,零部件失去原有设计所规定的功能称为失效。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,所以习惯上又称为承载能力。

失效包括完全丧失原定功能;功能降低和有严重损伤或隐患,继续使用会失去可靠性及安全性。机械零件的失效主要有磨损、断裂和腐蚀,而磨损失效占 60%~80%。设计人员的任务是设计出合格的零件,使它具有一定的工作能力,抵抗失效。

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、稳定性和温度的影响等几个方面的问题。对于各种不同的失效形式,相应地有各种工作能力判定条件。例如,当强度为主要问题时,按强度条件判定,即应力小于或等于许用应力;当刚度为主要问题时,按刚度条件判定,即变形量小于或等于许用变形量等。判定条件可概括为计算量小于或等于许用量。这种为防止失效而制定的判定条件,通常称为工作能力计算准则。

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。

0.4.1 机械零件的整体强度

(1) 载荷与应力的分类

① 载荷的分类 作用在机械零件上的载荷通常分为静载荷和变载荷两大类。静载荷是指大小、作用位置和方向不随时间变化或变化缓慢的载荷,如锅炉压力。变载荷是指大小、作用位置或方向随时间变化的载荷,如曲柄压力机的曲轴和汽车悬架弹簧等所受的载荷。

在机械设计计算中,通常把载荷分为名义载荷和计算载荷。名义载荷是在理想的平稳工作条件下作用在零件上的载荷。然而在机器运转时,零件还会受到各种附加载荷,通常采用引入载荷系数 K (有时只考虑工作情况的影响,则用工作情况系数 K_A) 的办法来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 应力的分类 按应力随时间变化的特性不同,应力分为静应力和变应力两大类。静应力是不随时间变化或变化缓慢的应力(图 0-4)。变应力是随时间变化的应力。变应力是多种多样的,但可归纳为稳定变应力和不稳定变应力两大类,而稳定变应力又分为非对称循环变应力、脉动循环变应力和对称循环变应力三种基本类型(图 0-5)。

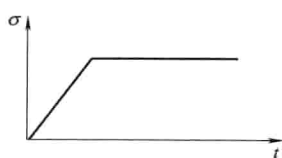


图 0-4 静应力

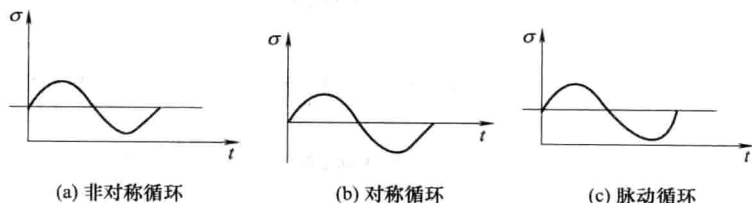


图 0-5 变应力

描述变应力特性的主要参数有 $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 、 σ_m 、 σ_a 、 r 。

$$\text{应力循环特性} \quad r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (0-1)$$

$$\text{平均应力} \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (0-2)$$

$$\text{应力幅} \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (0-3)$$

静应力只能在静载荷作用下产生。变应力可能由变载荷产生,也可能由静载荷产生。在静载荷作用下产生变应力的例子如图 0-6 所示。

(2) 机械零件强度的判断准则

当机械零件按强度条件判定时,可采用许用应力法或安全系数法。许用应力法是比较危险截面处的计算应力 (σ 、 τ) 是否小于零件材料的许用应力 ($[\sigma]$ 、 $[\tau]$)。即

$$\left. \begin{aligned} \sigma &\leq [\sigma] = \frac{\sigma_{\lim}}{S} \\ \tau &\leq [\tau] = \frac{\tau_{\lim}}{S} \end{aligned} \right\} \quad (0-4)$$

式中 $\sigma_{\lim}$ 、 $\tau_{\lim}$ ——材料的极限正应力、极限切应力;
 S ——安全系数。

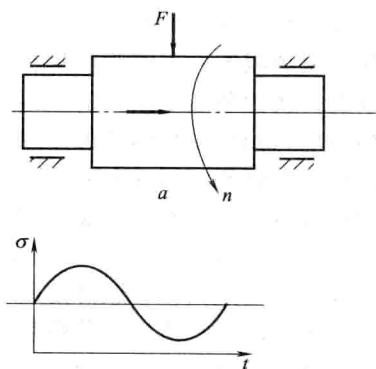


图 0-6 静载荷下产生变应力

安全系数法是判断危险截面处的安全系数是否大于或等于许用的安全系数 $[S]$, 即

$$\left. \begin{aligned} S = \frac{\sigma_{\lim}}{\sigma} &\geq [S] \\ S = \frac{\tau_{\lim}}{\tau} &\geq [S] \end{aligned} \right\} \quad (0-5)$$

(3) 静应力强度

在静应力下工作的零件,其主要失效形式是塑性变形或断裂。

① 单向应力时的塑性材料零件 按照不发生塑性变形的条件进行强度计算。强度条件为式(0-4)、式(0-5), $\sigma_{\lim} = \sigma_s$ 或 $\tau_{\lim} = \tau_s$, 计算 σ 、 τ 时可不考虑应力集中。

② 复合应力时的塑性材料零件 根据第三或第四强度理论来确定其强度条件。
 强度条件

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau_T^2} \leq [\sigma] \\ \sigma &= \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau_T^2} \leq [\sigma] \end{aligned} \right\} \quad (0-6)$$

复合安全系数

$$S = \frac{\sigma_s}{\sqrt{\sigma_b^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\tau_s}\right)^2 \tau_T^2}} \geq [S] \quad \text{或} \quad S = \frac{S_\sigma S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \geq [S] \quad (0-7)$$

③ 允许少量塑性变形的零件 可根据允许达到一定塑性变形时的载荷进行强度计算。

④ 脆性材料和低塑性材料的零件 式(0-4)中的极限应力为材料的强度极限。因不连续组织在零件内部引起的局部应力集中要远大于零件形状和机械加工等引起的局部应力集中,所以对组织不均匀的材料,在计算时不考虑应力集中。组织均匀的低塑性材料应考虑应力集中。

(4) 变应力强度

在变应力作用下，机械零件的主要失效形式是疲劳断裂。表面无缺陷的金属材料，其疲劳断裂过程分为两个阶段：第一阶段是零件表面上应力较大处的材料发生剪切滑移，产生初始裂纹，形成疲劳源，疲劳源可以有一个或数个；第二阶段是裂纹尖端在切应力下发生反复塑性变形，使裂纹扩展直至发生疲劳断裂。实际上，材料内部的夹渣、微孔、晶界以及表面划伤、裂纹、腐蚀等都有可能产生初始裂纹。因此一般说零件的疲劳过程是从第二阶段开始的，应力集中促使表面裂纹产生和发展。

通常疲劳断裂具有以下特征：疲劳断裂的最大应力远比静应力下材料的强度极限低，甚至比屈服极限低；不管脆性材料或塑性材料，其疲劳断口均表现为无明显塑性变形的脆性突然断裂；疲劳断裂是损伤的积累，它的初期现象是在零件表面或表层形成微裂纹，这种微裂纹随着应力循环次数的增加而逐渐扩展，直至余下的未裂开的截面积不足以承受外荷载时，零件就突然断裂。图 0-7 所示为一旋转弯曲、荷载小和表面应力集中大并有三个初始裂纹的疲劳断裂截面。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；一个是最终发生脆性断裂的粗粒状区。

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。所以疲劳断裂与应力循环次数（即使用期限或寿命）密切相关。

① 疲劳极限 对任一给定的应力循环特性 r ，当应力循环 N 次后，材料不发生疲劳破坏的最大应力称为疲劳极限，以 σ_{rN} 表示。以 N 或 $\lg N$ 为横坐标， σ_{rN} 或 $\lg \sigma_{rN}$ 为纵坐标，把表示 σ_{rN} 和 N 的关系曲线称为疲劳曲线或 $\sigma-N$ 曲线（图 0-8）。对于大多数黑色金属及其合金，当应力循环次数 N 高于某一数值 N_0 后，疲劳曲线呈现为水平直线。 N_0 称为应力循环基数，它随材料不同而有不同的数值。通常，对硬度小于或等于 350HBS 的钢， $N_0 \approx 10^7$ ；对大于 350HBS 的钢， $N_0 \approx 25 \times 10^7$ 。

疲劳曲线可以分为两个区域： $N < N_0$ 的部分称为有限寿命区， $N \geq N_0$ 的部分称为无限寿命区。有限寿命区应力循环次数和疲劳极限之间的关系可用下列方程表示：

$$\sigma_{rN}^m N = \sigma_r^m N_0 = C \tag{0-8}$$

所以

$$\sigma_{rN} = \sigma_r \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} = K_N \sigma_r \tag{0-9}$$

式中 $K_N = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}}$ ——寿命系数。

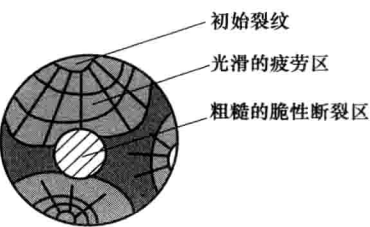


图 0-7 疲劳裂纹

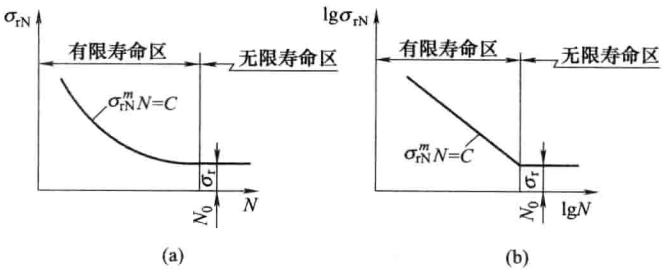


图 0-8 疲劳曲线

② 许用应力 变应力下，应取材料的疲劳极限作为极限应力。同时还应考虑零件的切口和沟槽等截面突变、绝对尺寸和表面状态等影响，为此引入有效应力集中系数 K_σ 、尺寸系数 ϵ_σ 和表面状态系数 β 等。许用应力为

$$[\sigma_r] = \frac{\epsilon_\sigma \beta}{K_\sigma S} \sigma_r \quad (0-10)$$

式中 S ——安全系数；

σ_r ——材料的疲劳极限。

ϵ_σ 、 β 、 K_σ 可在材料力学或有关设计手册中查得。

以上所述为无限寿命下零件的许用应力。若零件在整个使用期限内，其循环总次数 N 小于循环基数 N_0 时，可根据式(0-9)求得对应于 N 的疲劳极限 σ_{rN} 。代入式(0-10)后，可得有限寿命下零件的许用应力。由于 σ_{rN} 大于 σ_r ，故采用 σ_{rN} 可得到较大的许用应力，从而减小零件的体积和重量。

(5) 许用安全系数

在许用安全系数中要考虑的因素有：载荷和应力的性质以及计算的准确性；材料的性质和材质的不均匀性；零件的重要程度；工艺质量和探伤水平；运转条件；环境状况等。

安全系数的选择原则：在保证安全、可靠的前提下，尽可能选用较小的许用安全系数。

安全系数过小，机器可能不够安全；安全系数过大，在材料、加工、运输等方面不符合经济原则，且机器笨重。

不同的机器制造部门，常有自己制定的许用应力和许用安全系数的专用规范。没有规范的可遵循以下原则选用许用安全系数。

① 静应力下，塑性材料以屈服极限为极限应力。由于塑性材料可以缓和过大的局部应力，故可取安全系数 $S=1.2\sim 1.5$ ；对于塑性较差的材料（如 $\sigma_s/\sigma_b > 0.6$ ）或铸钢件可取 $S=1.5\sim 2.5$ 。

② 静应力下，脆性材料以强度极限为极限应力，这时应取较大的安全系数。例如，对于高强度钢或铸铁件可取 $S=3\sim 4$ 。

③ 变应力下，以疲劳极限作为极限应力，可取 $S=1.3\sim 1.7$ ；若材料不够均匀、计算不够精确时可取 $S=1.7\sim 2.5$ 。

0.4.2 机械零件的表面强度

机械零件的表面强度分为三种：表面接触强度；表面挤压强度；表面磨损强度。

(1) 表面接触强度

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。如齿轮、滚动轴承等机械零件，都是通过很小的接触面积传递载荷的，因此它们的承载能力不仅取决于整体强度，还取决于表面的接触强度。

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，首先在表层内约 $15\sim 25\mu\text{m}$ 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。疲劳点蚀常是齿轮、滚动轴承等零件的主要失效形式。

按照弹性力学，对线接触的情况，当两个半径为 ρ_1 、 ρ_2 的圆柱体在压力 F_n 作用下接触时，其接触区为一狭长矩形，最大接触应力发生在接触区中线的各点上（图 0-9），其值为

$$\sigma_{H\max} = \sqrt{\frac{F_n}{\pi b} \times \frac{\frac{1}{\rho}}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}}} \quad (0-11)$$

式中 b ——接触长度；

F_n ——作用在圆柱体上的载荷；

ρ ——综合曲率半径, $\rho = \rho_1 \rho_2 / (\rho_2 \pm \rho_1)$, 正号用于外接触 [图 0-9(a)], 负号用于内接触 [图 0-9(b)]。

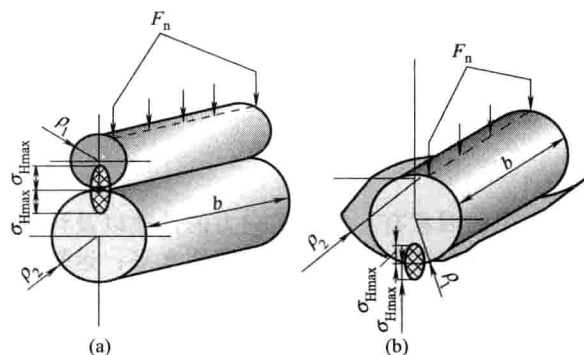


图 0-9 两圆柱体的接触应力

不发生失效的强度条件为

$$\sigma_{H\max} \leq [\sigma_H]_{\max} \quad (0-12)$$

(2) 表面挤压强度

通过局部配合面间的接触来传递载荷的零件, 在接触面上的压应力称为挤压应力。当挤压应力过大时, 塑性材料将产生表面塑性变形, 脆性材料将产生表面破坏。挤压应力分布比较复杂, 常采用简化的方法计算。主要失效形式: 塑性材料——表面塑性变形; 脆性材料——表面破碎。

挤压强度条件为

$$\sigma_p = \frac{F}{A} \leq [\sigma_p] \quad (0-13)$$

式中 σ_p , $[\sigma_p]$ ——挤压应力和许用挤压应力；

A ——接触面积或曲面接触时的投影面积。

(3) 表面磨损强度

在滑动摩擦下工作的零件, 常因过度磨损而失效。影响磨损的因素很多, 而且比较复杂, 通常采用条件性计算。

① 滑动速度低、载荷大时, 可只限制工作表面的压强, 即

$$p \leq [p] \quad (0-14)$$

② 滑动速度较高时, 还要限制摩擦功耗, 以免工作温度过高而使润滑失效。

$$pv \leq [pv] \quad (0-15)$$

③ 高速时还要限制滑动速度, 以免由于速度过高而加速磨损, 降低零件工作寿命, 即

$$v \leq [v] \quad (0-16)$$

0.5 机械设计中常用材料的选用原则

机械零件所用的材料是各种各样的, 即使同一种零件也可以选择不同的材料。因此, 如何选择零件的材料是零件设计的重要一环。以下提出材料选用的主要原则, 供设计时考虑。

(1) 满足零件的使用要求

机械零件的使用要求主要有以下几点。

- ① 零件承受工作载荷的能力, 主要从载荷的特点、强度及刚度等方面考虑。
- ② 零件的工作条件(运动速度等)及工作环境(温度、湿度、腐蚀等)。
- ③ 耐磨性、寿命、可靠性等要求。
- ④ 零件尺寸和质量的要求。

设计零件应以零件承受工作载荷的能力为主, 综合考虑其他因素, 合理地选择材料。如零件受力较大且有较大的冲击载荷, 工作速度较高与可靠性要求高, 而且要求零件的尺寸较小、质量较小, 应采用高强度合金钢制造, 并要热处理及精加工。

(2) 工艺要求

- ① 毛坯制造。
- ② 机械加工。
- ③ 热处理。

(3) 经济性要求

- ① 材料价格。
- ② 加工批量和加工费用。
- ③ 材料的利用率。
- ④ 局部品质原则。
- ⑤ 替代(尽量用廉价材料来代替价格相对昂贵的稀有材料)。
- ⑥ 考虑当地材料的供应情况。

小 结

- 机器和机构总称为机械。
- 机械零件的强度计算分为整体强度和局部强度两种。
- 零件的材料选择是零件设计的重要一环。

思考题和习题

- 0-1 机构与机器有什么区别? 举例说明机器与机构各自的特点及联系。
- 0-2 机械零件常见的失效形式有哪些? 举例说明常见零件的失效。
- 0-3 指出下列机器的动力部分、传动部分、控制部分和执行部分: 汽车; 车床; 自行车。
- 0-4 比较说明变强度与静强度设计计算的方法有何不同。