



国家级精品课程主干教材
辽宁省“十二五”普通高等教育本科省级规划教材



机械设计 (第二版)

孙志礼 闫玉涛 田万禄 主编



科学出版社

国家级精品课程主干教材
辽宁省“十二五”普通高等教育本科省级规划教材

机械 设计

(第二版)

孙志礼 闫玉涛 田万禄 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书根据教育部高等学校机械基础课程教学指导分委员会制订的“机械设计课程教学基本要求”编写而成,以培养学生的综合设计能力为主线,突出设计性、实践性和综合性。

全书共15章。绪论介绍了机械的组成和机械设计的一般步骤以及本课程研究的内容、性质和任务;第1章介绍了机械设计共用的基础知识;第2~12章分别介绍了连接件、传动件、轴系零(部)件及弹簧的工作原理、特点、设计计算方法及标准件的选用原则等;第13章从整体的角度介绍了机械系统设计时应考虑的问题及设计原则;第14章简要介绍了可靠性设计、优化设计、计算机辅助设计和摩擦学设计等现代设计方法,以拓宽设计思路。

本书可作为普通高等院校机械类各专业机械设计课程的教材,也可供有关专业的师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计/孙志礼,闫玉涛,田万禄主编. —2版. —北京:科学出版社, 2015.3

(国家级精品课程主干教材·辽宁省“十二五”普通高等教育本科省级规划教材)

ISBN 978-7-03-042463-1

I. ①机… II. ①孙… ②闫… ③田… 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268333号

责任编辑:毛莹 张丽花 / 责任校对:桂伟利
责任印制:霍兵 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

安泰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2015年3月第 二 版 印张:21 1/2
2015年3月第八次印刷 字数:539 000

定价:46.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是在保留第一版教材特色的基础上，依据教育部高等学校机械基础课程教学指导分委员会制订的“机械设计课程教学基本要求”，结合近几年来教材使用反馈情况和教学改革实践经验修订而成。

在本书的编写过程中，本着“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的精神，突出本门课程所必需的基本理论、基本知识和基本技能，以满足教学基本要求为前提，精选编写内容。为了充分利用计算机进行设计，本书将很多图、表代之以公式表述，同时还增加了其他传动件设计、机械系统设计和现代机械设计方法简介，主要是为了拓宽学生的知识面，使其对现代设计方法有所了解，同时也让学生对机械设计有一个整体的概念。

本书采用截至 2013 年底的最新国家标准和资料，并采用我国法定计量单位。此外，为了加强学生对知识的整体掌握和理解，各章章首增加了内容提要。本书还配有《机械设计课程设计（第二版）》、《机械设计习题与解析（第二版）》，方便教师教学和学生自学。

本书的编写人员如下：孙志礼（第 0、1、6~8、10~14 章），闫玉涛（第 2、5、9 章），田万禄（第 3、4 章）。本书由孙志礼、闫玉涛、田万禄担任主编，由鄂中凯教授担任主审。

在本书的修订过程中，很多机械设计主讲教师和使用过第一版教材的兄弟院校同行提出了许多宝贵意见和建议，对提高本书的质量给予了很大帮助，在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平，书中难免存在不妥和疏漏之处，希望广大读者批评指正。

编 者

2014 年 8 月

目 录

前言

第 0 章 绪论	1
0.1 机械的组成	1
0.2 机械设计的一般程序	2
0.3 机器应满足的基本要求	2
0.4 本课程的研究对象、主要内容、 性质和任务	3
0.5 本课程的特点和学习方法	4
第 1 章 机械零件设计的基础知识	5
1.1 机械零件设计的一般步骤	5
1.2 机械零件的主要失效形式及计算 准则	5
1.3 载荷及应力的分类	8
1.4 静应力时机械零件的强度计算	9
1.5 变应力时机械零件的强度计算	11
1.6 机械零件的材料及选用原则	24
1.7 机械零件的工艺性和设计的标 准化	24
第 2 章 螺纹连接	30
2.1 概述	30
2.2 螺纹	30
2.3 螺纹连接的类型和标准连接件	33
2.4 螺纹连接的预紧和防松	37
2.5 螺栓组连接的结构设计及受力 分析	41
2.6 单个螺栓的强度计算	46
2.7 提高螺栓连接强度的措施	54
第 3 章 轴毂连接	60
3.1 键连接	60
3.2 花键连接	63
3.3 销连接	66
3.4 过盈配合连接	67
3.5 型面连接和胀紧连接	73
第 4 章 挠性件传动	75
4.1 带传动概述	75

4.2 带传动的工作情况分析	78
4.3 带传动的设计准则和单根 V 带能 传递的功率	84
4.4 V 带传动设计	86
4.5 其他带传动简介	91
4.6 链传动的特点、类型及应用	94
4.7 滚子链与链轮	95
4.8 链传动的运动特性	99
4.9 链传动的失效形式及功率曲 线图	101
4.10 滚子链传动的设计计算	103
4.11 链传动的布置、张紧与润滑	107
第 5 章 齿轮传动	110
5.1 齿轮传动的失效形式和计算 准则	110
5.2 齿轮材料	113
5.3 齿轮传动的载荷计算	115
5.4 标准直齿圆柱齿轮传动的强度 计算	119
5.5 齿轮精度、设计参数选择及 许用应力	125
5.6 标准斜齿圆柱齿轮传动的强度 计算	135
5.7 标准直齿锥齿轮传动的强度 计算	140
5.8 变位齿轮传动的强度计算	143
5.9 齿轮传动的润滑	143
第 6 章 蜗杆传动	146
6.1 蜗杆传动的类型、特点及应用	146
6.2 圆柱蜗杆传动的主要参数和 几何尺寸计算	150
6.3 蜗杆传动的失效形式、计算 准则及常用材料	155
6.4 圆柱蜗杆传动的受力分析和 计算载荷	156
6.5 圆柱蜗杆传动的承载能力计算	157

6.6	蜗杆传动的效率、润滑及热平衡 计算	161	10.7	非液体摩擦轴承的计算	251
第7章	其他传动	167	10.8	滑动轴承的结构类型	252
7.1	螺旋传动	167	10.9	轴承材料与轴瓦结构	255
7.2	圆弧齿轮传动	171	10.10	滑动轴承的润滑	260
7.3	摩擦轮传动与无级变速器	179	第11章	联轴器、离合器和制动器	266
7.4	摆线针轮行星传动	185	11.1	概述	266
第8章	轴	192	11.2	联轴器	266
8.1	概述	192	11.3	操纵式离合器	274
8.2	轴的材料	193	11.4	自动离合器	278
8.3	轴的结构设计	195	11.5	制动器	279
8.4	轴的强度计算	200	第12章	弹簧	282
8.5	轴的刚度计算	203	12.1	概述	282
8.6	轴的共振和临界转速的概念	204	12.2	弹簧的材料、许用应力和 制造	285
第9章	滚动轴承	205	12.3	圆柱形压缩(拉伸)螺旋弹簧 的结构和尺寸	288
9.1	概述	205	12.4	圆柱形压缩(拉伸)螺旋弹簧 的设计计算	291
9.2	常用滚动轴承类型、代号及 选择	206	第13章	机械系统设计	298
9.3	滚动轴承内部载荷分布及 失效分析	212	13.1	概述	298
9.4	滚动轴承寿命计算	213	13.2	传动子系统的方案设计及 评价	299
9.5	滚动轴承的静强度计算	221	13.3	机械系统的匹配性设计	301
9.6	滚动轴承的组合设计	222	13.4	机械系统的总体布置原则	305
第10章	滑动轴承	230	第14章	机械设计现代方法简介	306
10.1	概述	230	14.1	机械可靠性设计	306
10.2	润滑油的黏度	230	14.2	优化设计	310
10.3	流体动压润滑的基本理论	232	14.3	计算机辅助设计	313
10.4	单油楔向心动压轴承设计 计算	236	14.4	摩擦学设计	321
10.5	滑动轴承设计参数选择	245	参考文献		337
10.6	液体动压推力轴承的设计 计算	247			

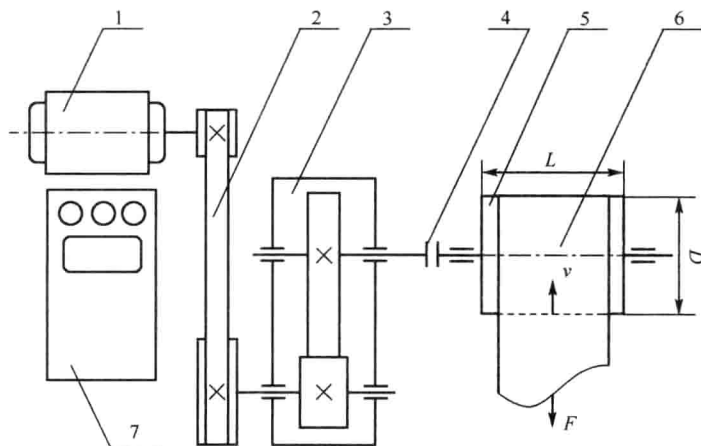
第 0 章 绪 论

内容提要：主要介绍本课程的研究对象、主要内容、性质和任务，介绍课程的特点和学习方法、机械设计的程序和要求。本章学习的重点是了解本课程的性质、特点和学习方法。

机械是人类进行生产的主要劳动工具。它可以代替或减轻人的体力劳动，改善劳动条件，提高生产率和产品质量。此外，只有使用机械才能进行大批量生产，并对生产进行严格的分工与科学化管理；也只有使用机械，才便于实现产品的标准化、系列化和通用化，尤其是便于实现高度的机械化、电气化和自动化。因此，机械工业在为国民经济各部门提供技术装备和促进技术改造中起到了重要的作用，它是国民经济中的一个重要部分。机械工业的发展促进了国民经济的发展，推动了我国的社会主义现代化建设。可以说，机械工业的发展水平反映了一个国家和地区的社会生产力发展水平。

0.1 机械的组成

在生产和生活中，人们使用着各种各样的机械，如汽车、机床、起重机、运输机、洗衣机等。尽管这些机械的构造、用途和性能千差万别，但一般都是由原动机、传动装置、工作机和控制装置四部分组成的。例如，图 0-1 所示的带式运输机就是由这四部分组成的机械。



1-电动机； 2-V带传动； 3-齿轮传动； 4-联轴器； 5-卷筒； 6-运输胶带； 7-控制系统

图 0-1 带式运输机

原动机是机械设备工作的动力来源，大部分原动机是电动机、内燃机、燃气轮机和柴油机等，而电动机是最为常用的一种原动机。工作机是直接完成预期功能的执行装置，如带式运输机中的卷筒和运输带，机床中的加工刀具等。传动装置则是将原动机的运动和动力传递给工作机的装置，主要作用是协调原动机和工作机在运动形式、转矩和转速方面的不同，使之达到匹配的作用。传动装置大多是机械传动，有些场合使用的是液压传动、气压传动和电

力传动,本教材仅介绍常用的机械传动装置。控制系统是根据机械系统的不同工况对原动机、传动装置和工作机实施控制的装置。

从制造和装配方面来分析,任何机械都是由许多机械零部件组成的。机械零件是机械制造过程中单独加工的单元体,而机械部件则是机械制造过程中为完成同一目的而由若干协同工作的零件组合在一起的组合体。凡在各类机械中经常被用到的零部件称为通用零部件,如螺栓、齿轮、轴、轴承、联轴器以及减速器等;而只有在特定类型的机械中才能用到的零部件称为专用零部件,如涡轮机上的叶片、内燃机中的曲轴、洗衣机中的波轮等。

0.2 机械设计的一般程序

一部新机械从着手设计到制造出来,大致要经过以下六个阶段:

(1) 制订设计工作计划。根据社会、市场的需求确定所设计机械的功能范围和性能指标;根据现有的技术、资料及研究成果研究其实现的可能性,明确设计中要解决的关键问题;拟订设计工作计划和任务书。

(2) 方案设计。按设计任务书的要求,了解、分析同类机械的设计、生产和使用情况以及制造厂的生产技术水平;拟订机械系统的组成、总体布置;确定有关的机构和传动方式。这一阶段往往需要制订多种方案进行比较,进行技术经济评价及可行性评价,从中选出最优方案。

(3) 技术设计。对已选定的设计方案进行运动学和动力学分析;确定机构和零件的功能参数,必要时进行模拟试验、现场测试;修改参数,计算零件的工作能力,进而确定机械的主要结构尺寸,绘制设计总图。

(4) 施工设计。根据技术设计的结果,考虑零件的工作能力和结构工艺性,确定零件的形状和结构尺寸以及配合件间的公差;完成零部件及整机的全部工作图;编写有关技术文件。

(5) 试制、试验、鉴定。所设计的机械能否实现预期的功能、满足所提出的要求,其可靠性、经济性如何等,都须通过样机的试验来加以验证。再经过鉴定,进行科学的评价以确定是否可以投产或进行必要的改进设计。

(6) 定型产品设计。经过试验和鉴定,对设计进行必要的修改后,可进行小批量的试生产。经过实际条件下的使用,将取得的数据和使用意见反馈回来,再进一步修改设计,即定型产品设计,然后正式投产。

实际上整个机械设计的各个阶段是互相联系的,在某个阶段发现问题后,必须返回到前面的有关阶段进行设计的修改。整个机械设计过程是一个不断修改、不断完善以至逐渐接近最佳结果的过程。

0.3 机器应满足的基本要求

机器应满足的要求有以下几个方面:

(1) 具有预定功能的要求。所设计制造的机器必须实现预定的解决生产或生活问题的功能,这是机器设计的最基本出发点。为使所设计的机器具有预定功能,合理选择机器的工作原理是最重要的。显然,预定实现的功能不同,设计的要求也不同。

(2) 经济性要求。机器的经济性是一个综合指标, 在产品的设计、制造、使用、销售、维修、管理等各个环节均有所体现。总之, 经济性要求就是在满足功能要求的前提下使机器的总费用最低。

(3) 安全性要求。在机器的设计阶段就必须对机器的使用安全予以足够的重视。简单地讲, 安全就是指使用机器的人的安全及机器工作时本身的安全。因此, 要采取各种各样的防护措施, 如防护罩、过载保护装置、连锁闭合装置等。

(4) 可靠性要求。简单地讲, 可靠性就是机器在使用中性能的稳定性, 是机器的一个重要质量指标。可靠性水平高, 说明机器在使用过程中发生故障的概率小, 能正常工作的时间长。

(5) 操作使用方便的要求。机器的工作和人的操作密切相关。在设计机器时必须注意操作要轻便省力、操作机构要适应人的生理条件、机器的噪声要小、有害介质的泄漏要少等。

此外, 对有些机器还有一些特殊要求, 如食品机械要防止污染、建筑机械要便于拆装和搬运、交通运输机械要重量轻等。设计机器时, 在满足基本要求的前提下还要满足这些特殊要求, 以提高机器的使用性能和保证机器的工作质量。

0.4 本课程的研究对象、主要内容、性质和任务

0.4.1 本课程研究的对象及主要内容

机械设计的任务是根据使用要求, 应用各种有关的先进科学理论和技术成果, 创造一个在技术上尽可能先进、经济上合理、外形上美观大方的具体机械。然而, 本课程不可能涵盖机械设计的所有内容, 也不是讲某种机械的设计, 而是介绍机械设计中的基本共性问题。由于机械零件是组成机械的基本单元, 而通用机械零件又是在各种机械中都能经常遇到的, 因此, 本课程将重点研究在一般工作条件下, 通用机械零件的设计理论及设计方法。同时, 也介绍这些零件的类型、特点、工作原理、失效形式、应用范围等方面的知识。具体内容包括:

(1) 机械设计的基础知识。从机械的整体出发, 阐述机械设计共性内容, 介绍有关的基础理论。

(2) 连接零件设计。介绍螺纹连接、轴毂连接的设计。

(3) 传动零件设计。介绍带传动、链传动、齿轮传动、蜗杆传动、螺旋传动、摩擦传动、摆线针轮行星传动的设计。

(4) 轴系零部件设计。介绍轴、滚动轴承、滑动轴承和联轴器、离合器以及制动器的设计。

(5) 其他零部件设计。主要介绍弹簧的设计。

(6) 系统设计。主要介绍系统的方案设计及创新设计的方法。

(7) 机械设计新方法。简单介绍现代设计方法, 包括可靠性设计、优化设计、计算机辅助设计(CAD)和摩擦学设计。

0.4.2 本课程的性质和任务

本课程是一门论述机械设计理论, 研究机械设计方法的课程。它是学习机械工程学、从

事机械工程设计的基础。在教学计划安排上,它起到由基础理论课向工程专业课过渡的承上启下的作用。它是综合运用先修课程的知识来解决机械工程中设计问题的技术基础课。

本课程的主要任务有:

- (1) 培养学生树立正确的设计思想,了解国家当前的技术经济政策。
- (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,具有设计机械传动装置和一般工作机的能力。同时,培养学生具有一定的创新意识和创新能力。
- (3) 培养学生具有正确运用标准、规范、手册及其他有关技术资料的能力。
- (4) 使学生掌握典型零件的试验方法,获得试验技能的基本训练。
- (5) 使学生了解机械设计的新发展。

0.5 本课程的特点和学习方法

由于本课程是一门综合性和实践性都很强的设计基础课,因此,在学习本课程时必须掌握本课程的特点,在学习方法上应尽快完成由单科向综合、由抽象向具体、由理论到实践的思维方式的转变。在学习本课程时应注意以下几点:

(1) 理论联系实际。本课程研究的对象是各种机械中的零部件,只有从整机分析入手,才能设计出满足实际要求的机械零部件,才能设计出性能优良的机械。因此,无论是学习课程还是进行机械设计都必须了解机械的工作条件和要求,从方案选择到参数选择和结构设计都要联系实际。

(2) 抓住设计这条主线,掌握设计规律。本课程的内容看似杂乱无章,但在设计时却都要遵循相同的设计规律,这一规律表现在设计机械零部件时所考虑的问题及设计程序一般都是相同的,即

类型选择—工作原理—失效形式—设计准则—计算方法—结构设计

只要抓住设计这条主线,就能把本课程的各章内容贯穿起来。因此,学习本课程时一定要抓住设计这条主线,熟练掌握设计机械零部件的一般规律。

(3) 培养解决工程实际问题的能力。进行多因素的分析、设计参数多方案的选择、经验公式或经验数据的选用及结构设计,在解决工程实际问题中是经常遇到的问题,也是学生在学习本课程中的难点。因此,在学习本课程时一定要尽快适应这种情况,按解决实际问题的思维方法,努力培养自己的机械设计能力,特别是要学会不断修改、逐步完善的设计方法。此外,机械零部件的设计往往受多种因素的制约,应选出一个主要制约条件确定计算准则,据此确定零件的尺寸后,再进行其他制约条件的校核,使零件尺寸满足所有制约条件。还有一点必须注意,就是机械零件的尺寸并不是完全都由计算得来的,而是在计算得到主要尺寸后,通过结构设计确定其余的所有尺寸。因此,结构设计能力的培养也是非常重要的一个方面。

(4) 综合运用先修课程的知识。本课程介绍的各种机械零部件的设计,从分析研究到设计计算,直到完成零部件工作图,都要用到多门先修课程的知识,因此,对有关先修课程要牢牢掌握,做到融会贯通、综合应用。

第1章 机械零件设计的基础知识

内容提要：强度准则是机械零件设计的基本准则。本章主要介绍机械零件的主要失效形式、计算准则，机械零件设计的一般步骤，机械零件的材料及选用原则；机械零件承受静应力、对称循环应力、非对称循环应力、规律性非稳定应力和双向变应力下的疲劳强度计算。重点为机械零件在静应力、对称循环应力、非对称循环应力及规律性非稳定应力下的疲劳强度计算。

1.1 机械零件设计的一般步骤

为了满足机器的各项要求，必须以组成机器的机械零件的正确设计和制造为前提。零件设计的好坏，将对机器使用性能的优劣起着决定性的作用。

由于零件种类不同，其具体的设计步骤也不一样，但一般可按下列步骤进行：

(1) 类型选择。根据使用条件、载荷性质及尺寸大小选择零件的类型。为此，必须对各种常用机械零件的类型、特点及适用范围有明确的了解。

(2) 受力分析。通过受力分析求出作用在零件上的载荷，以便进行设计计算。

(3) 选择材料。根据零件工作条件及受力情况，选择合适的材料，并确定计算中的许用应力等。

(4) 确定计算准则。根据失效分析，确定出零件的设计计算准则。

(5) 理论设计计算。由设计准则所得到的设计计算公式，确定出零件的主要几何尺寸和参数。

(6) 结构设计。根据功能要求、加工及装配工艺性要求、强度要求等进行零件的结构设计，确定出其结构尺寸。

(7) 精确校核。零件全部设计完成后，对有些重要的零件应进行详细的校核计算，以判定结构的合理性。

(8) 绘制零件工作图。理论设计和结构设计最终都要通过零件工作图体现出来。在工作图上除了标注详细的零件尺寸外，还需要对零件的配合尺寸等标注尺寸公差及必要的形位公差，标注表面粗糙度及技术条件等。

(9) 编写设计计算说明书。将设计计算的资料整理成简练的设计计算说明书，作为技术文件之一备查。

1.2 机械零件的主要失效形式及计算准则

1.2.1 机械零件的主要失效形式

机械零件在规定的时间内，在规定的条件下，不能完成规定的功能称为失效。常见的失效形式主要有以下几种。

1. 整体断裂

零件在载荷作用下,危险截面上应力大于材料的极限应力而引起的断裂称为整体断裂,如螺栓破断、齿轮断齿、断轴等。整体断裂分为静强度断裂和疲劳断裂。静强度断裂是由于静应力过大产生的;疲劳断裂是由于变应力的反复作用产生的。机械零件整体断裂失效的80%属于疲劳断裂。

2. 表面破坏

表面破坏是发生在机械零件工作表面上的一种失效。运动的工作表面一旦出现某种表面失效,都将破坏表面精度,改变表面尺寸和形貌,使运动性能降低,摩擦加大,能耗增加,严重时导致零件完全不能工作。根据失效机理的不同,表面破坏可分为:

(1) 磨料磨损。不论是摩擦表面的硬凸峰,还是外界掺入的硬质颗粒,在摩擦过程中都会对摩擦表面起切削或碾破作用,引起表面材料的脱落,这种失效称为磨料磨损。

(2) 胶合。金属表面接触时,实际上只有少数凸起的峰顶在接触,因受压力大而产生弹性变形,这使摩擦表面的吸附膜破裂。同时,因摩擦而产生高温,造成基体金属的“焊接”现象。当摩擦表面相对滑动时,切向力将黏着点切开呈撕脱状态。被撕脱的金属黏在摩擦表面上形成表面凸起,严重时会造成运动副咬死。这种由于黏着作用使材料由一个表面转移到另一个表面的失效称为胶合。

(3) 点蚀。如滚动轴承、齿轮等点、线接触的零件,在高接触应力(接触部分受载后产生弹性变形,接触表面产生的压力)及一定工作循环次数下可能在局部表面上形成小块的,甚至是片状的麻点或凹坑,进而导致零件失效,这种失效称为点蚀。

(4) 腐蚀磨损。在摩擦过程中,摩擦表面与周围介质发生化学反应或电化学反应的磨损,即腐蚀与磨损同时起作用的磨损称为腐蚀磨损。

3. 变形量过大

机械零件受载时将产生弹性变形。当弹性变形量超过许用范围时将使零件或机械不能正常工作。弹性变形量过大,将破坏零件之间的相互位置及配合关系,有时还会引起附加动载荷及振动。

塑性材料制作的零件,在过大载荷作用下会产生塑性变形,它不仅使零件尺寸和形状发生改变,而且使零件丧失工作能力。

4. 破坏正常工作条件引起的失效

有些零件只有在一定的工作条件下才能正常工作,若破坏了这些必备条件则将发生不同类型的失效。例如,V带传动当传递的有效圆周力大于最大摩擦力时产生的打滑失效;受横向载荷作用的普通螺栓连接的松动失效等。

1.2.2 机械零件的计算准则

在设计零件时所依据的准则是与零件的失效形式紧密地联系在一起的。对于一个具体零件,要根据其主要失效形式采用相应的计算准则。现将一些主要准则分述如下。

1. 强度准则

强度是零件抵抗整体断裂、表面接触疲劳及塑性变形的能力。如果零件的强度不够，就会出现上述的某种失效而丧失工作能力。强度准则是零件设计最基本的准则。强度准则的一般表达式（工作应力小于或等于许用应力）为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &\leq [\sigma] (\text{MPa}) \\ \tau &\leq [\tau] (\text{MPa}) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

满足强度准则要求的另一种表达方式是零件工作时的计算安全系数大于或等于许用安全系数，即

$$S \geq [S] \quad (1-2)$$

2. 刚度准则

刚度是零件抵抗弹性变形的能力。零件的刚度不够，将改变其正常几何位置及形状，从而改变受力状态及影响正常工作，因此，重要的零件要验算刚度是否足够。还有一些零件，如机床主轴、电动机轴等，其基本尺寸是由刚度条件确定的。刚度准则的一般表达式（广义的弹性变形量小于或等于许用变形量）为

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

3. 寿命准则

影响零件寿命的主要失效形式有腐蚀、磨损及疲劳，它们产生的机理及发展规律完全不同。迄今为止，关于腐蚀与磨损的寿命计算尚无法进行。关于疲劳寿命计算，通常是求出使用寿命时的疲劳极限来作为计算的依据，这在本书有关章节中再作介绍。

4. 耐磨性准则

零件磨损后会改变结构形状和几何尺寸，使机械的精度降低、效率下降，以致使零件报废。因此，在机械设计中总是力求提高零件的耐磨性，减少磨损。

关于磨损，尚无简单的理论计算公式，目前通常是采用条件性计算。一是验算压强使其不超过许用值，以防压强过大使零件工作表面油膜破坏而产生过快磨损，其验算式为

$$p \leq [p] (\text{MPa}) \quad (1-4)$$

二是对滑动速度 v 较大的摩擦表面，还要防止摩擦表面温升过高使油膜破坏，导致磨损加剧，严重时产生胶合。因此，要限制单位接触面上单位时间产生的摩擦力不要过大。当摩擦系数 f 为常数时，则可验算 pv 值不超过许用值，即

$$pv \leq [pv] (\text{MPa} \cdot (\text{m/s})) \quad (1-5)$$

5. 振动稳定性准则

机械上存在着许多周期性变化的激振源，例如，齿轮的啮合、轴的偏心转动等。当零件自身因其自振频率 f 接近上述激振源的振动频率 f_p 时，零件就要发生共振，致使零件或机械失效。所谓振动稳定性准则，就是设计时使机械中受激振源作用的零件的固有频率与激振源的频率错开，计算式为

$$\left. \begin{array}{l} f_p < 0.87f \\ f_p > 1.18f \end{array} \right\} \quad (1-6)$$

如果不能满足上述条件,则可改变零件或系统刚度或采用防振、减振措施,如提高零件制造精度,提高回转件动平衡精度,增加阻尼系统,提高材料或结构的衰减系数,采用减振、隔振装置等都可改善零件的振动稳定性。

1.3 载荷及应力的分类

1.3.1 载荷的分类

根据载荷是否随时间变化,可将其分为静载荷和变载荷两类。大小和方向不随时间变化或变化缓慢的载荷称为静载荷,如物体的重力等;随时间作周期性或非周期性变化的载荷称为变载荷。周期性变化的载荷,如各种往复式动力机械和钢板轧机等所受的载荷;非周期性变化的载荷,如汽车、拖拉机等所受的载荷。

根据原动机的额定功率或机器在稳定和理想工作条件下的工作阻力,用力学公式计算出的作用在零件上的载荷称为名义载荷。

考虑机器在工作中由于外载荷随时间的变化和载荷在零件上分布的不均匀性等因素的影响,有些机械零件在计算中常把名义载荷乘上一个大于1的载荷系数(或工作情况系数) K 。 K 与名义载荷(如 P 、 M 、 T 、 F 等)的乘积称为计算载荷,用在相应的载荷符号下加下脚标 ca 来表示,如 P_{ca} 、 M_{ca} 、 T_{ca} 、 F_{ca} 等(如 $F_{ca} = KF$)。齿轮传动、蜗杆传动等均按计算载荷进行计算。载荷系数的取值和计算在以后各有关章节中将具体说明。

1.3.2 应力的分类

与载荷相似,应力也可分为静应力和变应力两大类。不随时间变化或变化缓慢的应力称为静应力(图1-1(a)),它只能在静载荷作用下产生;随时间变化的应力称为变应力,它可由变载荷产生,也可由静载荷产生。变应力可分为稳定变应力(图1-1(b))和非稳定变应力。非稳定变应力又可分为有规律的非稳定变应力(图1-1(c))和无明显规律的随机变应力(图1-1(d))。稳定变应力又可分为非对称循环(图1-1(b))、脉动循环(图1-2(a))和对称循环(图1-2(b))三种典型变应力。

在稳定变应力中,最大应力 σ_{\max} 、最小应力 σ_{\min} 、平均应力 σ_m 和应力幅 σ_a 之间的关系为

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1-7)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1-8)$$

最小应力与最大应力之比称为变应力的循环特性 r ,即

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1-9)$$

由上可知,五个变应力参量中只要知道其中两个参量便可求出其余三个参量。

几种典型变应力的变化规律见表1-1。

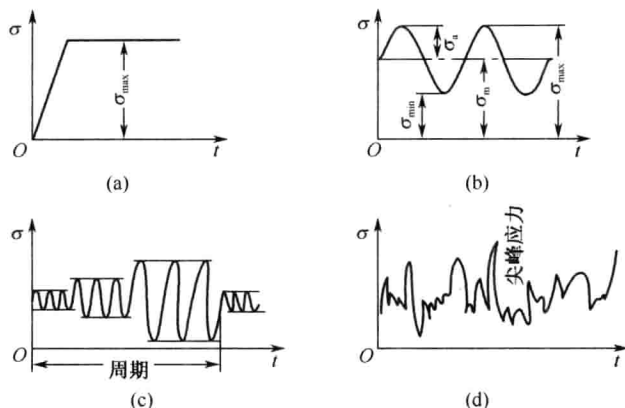


图 1-1 应力的类型

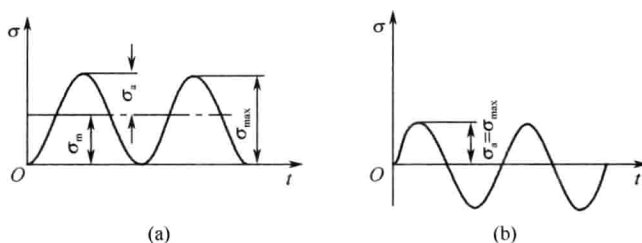


图 1-2 脉动循环变应力和对称循环变应力

表 1-1 几种典型变应力的变化规律

序号	循环名称	循环特性	应力特点	图例
1	静应力	$r=+1$	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = \sigma_m, \sigma_a = 0$	图 1-1(a)
2	非对称循环	$-1 < r < +1$	$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a, \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$	图 1-1(b)
3	脉动循环	$r=0$	$\sigma_m = \sigma_a = \sigma_{\max} / 2, \sigma_{\min} = 0$	图 1-2(a)
4	对称循环	$r=-1$	$\sigma_{\max} = \sigma_a = -\sigma_{\min}, \sigma_m = 0$	图 1-2(b)

通常在设计时，对于应力变化次数较少（如在整個使用寿命期间应力变化次数小于 10^3 的通用零件）的变应力，可近似按静应力处理。

零件的失效形式与材料的极限应力及零件工作时的应力类型有关。在进行强度计算时，首先要弄清楚零件所受应力的类型。

1.4 静应力时机械零件的强度计算

1.4.1 强度判据

机械零件的强度判据有两种表达方式。一种是危险剖面处的计算应力 σ_{ca} 、 τ_{ca} 小于或等于许用应力，强度条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ca} &\leq [\sigma] = \frac{\sigma_{lim}}{[S]} \\ \tau_{ca} &\leq [\tau] = \frac{\tau_{lim}}{[S]} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式中, σ_{lim} 、 τ_{lim} ——极限正应力和切应力;

$[S]$ ——许用安全系数。

另一种是危险剖面处的计算安全系数 S_σ 、 S_τ 大于或等于许用安全系数 $[S]$, 强度条件为

$$\left. \begin{aligned} S_\sigma &= \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_{ca}} \geq [S] \\ S_\tau &= \frac{\tau_{lim}}{\tau_{ca}} \geq [S] \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

1.4.2 极限应力

对于塑性材料, 其静拉伸的应力-应变曲线有明显的屈服点, 故零件的主要失效形式是塑性变形。取材料的屈服极限 σ_s 、 τ_s 作为极限应力, 即 $\sigma_{lim} = \sigma_s$, $\tau_{lim} = \tau_s$ 。

对于脆性材料, 由于没有明显的屈服点, 故零件的主要失效形式是脆性断裂。取材料的强度极限 σ_B 、 τ_B 作为极限应力, 即 $\sigma_{lim} = \sigma_B$, $\tau_{lim} = \tau_B$ 。

1.4.3 计算应力

单向应力(拉伸、压缩、弯曲、剪切和扭转任一种)状态下工作的零件, 其危险剖面上的最大工作应力即为计算应力; 复杂应力状态下工作的零件, 则应按一定的强度理论来求计算应力。在通用零件的设计中, 常用到第一、三、四强度理论(第一强度理论适用于脆性材料; 第三、四强度理论适用于塑性材料)。现将这些强度理论的公式汇总列于表 1-2 中, 供使用时参考。

表 1-2 计算应力 σ_{ca} 表达式

强度理论	已知应力状态	计算公式	适用零件材料
第一强度理论 (最大主应力理论)	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ σ_b, τ	$\sigma_{ca} = \sigma_1$ $\sigma_{ca} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$ $\sigma_{ca} = \frac{\sigma_b}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2}$	脆性材料
第三强度理论 (最大剪应力理论)	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ σ_b, τ	$\sigma_{ca} = \sigma_1 - \sigma_3$ $\sigma_{ca} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$ $\sigma_{ca} = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$	塑性材料
第四强度理论 (最大变形能理论)	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ σ_b, τ	$\sigma_{ca} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$ $\sigma_{ca} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + 3 \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2\right]}$ $\sigma_{ca} = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2}$	塑性材料

注: 1. $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力。

2. $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为平面应力。

3. σ_b 为弯曲应力, τ 为扭转应力。

1.4.4 许用安全系数与许用应力

合理选择许用安全系数或许用应力是强度设计中的一项重要工作。许用安全系数取得过大,会使机器笨重;取得过小,机器又可能不安全。因此,许用安全系数或许用应力的选取原则是在保证机器安全可靠的前提下,尽可能减小许用安全系数或提高许用应力。

影响许用安全系数的因素很多,主要有:载荷和应力计算的准确性、材料机械性能数据的可靠性和零件的重要性等。所以,在确定许用安全系数的数值时,就应结合具体情况斟酌选取。

在各个不同的机器制造部门,常制定有自己的许用安全系数或许用应力规范,有时还附有计算说明。一般都应严格按照这些规范中的规定来确定许用安全系数或许用应力。但是,在使用这些规范时必须充分注意这些规范中所规定的使用条件,决不能随意套用。通用机械零件的许用安全系数或许用应力详见以后各章。

在进行静强度设计时,若无规范可循,可参照表 1-3 所推荐的数值选取许用安全系数。

表 1-3 静应力下的许用安全系数

塑性材料					脆性材料
σ_s/σ_B	0.45~0.55	0.55~0.7	0.7~0.9	铸件	
[S]	1.2~1.5	1.4~1.8	1.7~2.2	1.6~2.5	3~4
说明	如载荷和应力的计算不十分准确时, [S]加大 20%~50%				计算不十分准确时, [S]加大 50%~100%

例 1-1 某静止构件受弯曲应力 $\sigma_b = 150\text{MPa}$, 扭转剪应力 $\tau_T = 50\text{MPa}$; 材料为 35 钢 ($\sigma_B = 540\text{MPa}$, $\sigma_s = 320\text{MPa}$)。试校核其静强度。

解 (1) 求材料的许用应力。

由于 $\sigma_s/\sigma_B = 320/540 = 0.593$, 按表 1-3 得

$$[S] = 1.4 + \frac{0.593 - 0.55}{0.7 - 0.55} \times (1.8 - 1.4) = 1.51$$

许用应力按式 (1-10) 得

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{[S]} = \frac{\sigma_s}{[S]} = \frac{320}{1.51} = 212(\text{MPa})$$

(2) 求计算应力。

因为该构件为塑性材料,故按第三强度理论(表 1-2)得

$$\sigma_{\text{ca}} = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau_T^2} = \sqrt{150^2 + 4 \times 50^2} = 180.28(\text{MPa})$$

由强度条件(式(1-10))知: $\sigma_{\text{ca}} = 180.28\text{MPa} < [\sigma] = 212\text{MPa}$, 故该构件静强度足够,安全。

1.5 变应力时机械零件的强度计算

1.5.1 疲劳曲线及疲劳极限

机械零件在变应力作用下,经过一段时间后在局部高应力区形成微裂纹,微裂纹逐渐扩