

高等院校教材

机械设计

高泽远 姚玉泉 李林贵 主编

东北工学院出版社

内 容 提 要

本书是根据1987年由国家教委课程教学指导委员会审订通过, 经国家教委批准的高等工业学校机械类专业适用的“机械设计(原机械零件)课程教学基本要求”编写的。是辽宁省机械设计教学研究会组织编写的《机械设计》六本系列教材之一。

全书分五篇, 共十五章。第一篇机械设计总论(第一、二、三、四章); 第二篇联接件设计(第五、六章); 第三篇传动件设计(第七、八、九、十章); 第四篇轴系零(部)件设计(第十一、十二、十三、十四章); 第五篇其它零部件设计(第十五章)。

本书可作为高等工业学校机械类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。

机 械 设 计

高泽远 姚玉泉 李林贵 主编

东北工学院出版社出版 辽宁省新华书店发行
(沈阳 南湖) 东北工学院印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 24.5 字数: 611 千字
1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷
印数: 1~10,000册

责任编辑: 崔华林 责任校对: 杨 红

ISBN 7-81006-073-2/TH·13

定 价: 4.42 元

序

为适应教学改革深入发展的需要,逐步编出不同风格、不同特点的教学用书,辽宁省机械设计教学研究会根据国家教委课程教学指导委员会制定的《机械设计课程教学基本要求》组织编写了《机械设计》系列教材,该系列教材包括:《机械设计》、《机械设计习题集》、《机械设计学习指导》、《机械设计课程设计》、《机械设计程序设计》、《机械设计实验》、等六本书。

本系列教材反映了教学改革深入发展的成果,其主要特点为:

1. 充分总结了一些院校多年来《机械设计》课程的教学经验和教学方法,教材内容取材合理、适量,文字通俗易懂,便于教师教学和学生学。

2. 本系列教材在体系上作了科学的合理分工,内容既充分体现了传统的教学内容,同时又适当地反映了机械设计学科研究的新进展。

3. 本系列教材使《机械设计》课程教学各阶段教学用书紧密配合,互相呼应,符号、计算公式、计算方法统一,是《机械设计》课程的一套完整而系统的教学用书。

本系列教材适用于高等工科院校机械类专业,也可供有关教师及机械工程技术人参考。

本系列教材是在《机械设计》系列教材编辑委员会组织下编写的。期望本系列教材能使学生全面而系统地了解并掌握机械设计的基本内容、基本理论、基本方法及基本技能,对提高《机械设计》课程的教学质量有所推动。

由于编写本套教材工作量较大,时间短,又缺乏经验,加上编者水平所限,教材中不妥之处,恳请读者批评指正。

辽宁省机械设计教学研究会
《机械设计》系列教材编委会

1987年12月

编 辑 委 员 会

主任委员: 鄂中凯

副主任委员: 李林贵 齐治国 王金 姜恒甲

委 员: 高泽远 姚玉泉 田世新 王志兆

张锡安 徐承俊 刘孔钧

前 言

本书是根据国家教委课程教学指导委员会 1987 年审订通过、经国家教委批准的高等工业学校机械类专业适用的“机械设计（原机械零件）课程教学基本要求”编写的。

在编写中，贯彻了原教育部《关于编审高等工业学校理工科基础课和技术基础课教材的几项原则》中的有关规定，本着“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的精神和“少而精”的原则，突出本门课程所必需的基本理论、基本知识和基本技能，精选编写内容。

有关本教材编写工作中的几个问题说明如下：

1. 在机械设计基础理论和计算方法的选材方面，一般都尽量采用新的科学分析方法（如第三、四章）和承载能力计算方法（如第七、九章）。
2. 考虑到机械类专业较多，各校规定本课程的教学时数又不尽一致，且各专业对内容的要求也不相同，故在教材内容上增多了*号内容的编排，使用时可根据学时适当取舍。
3. 各重点章节都增加了例题的类型和数量，并作到例题分散，以便于读者能及时通过例题消化基础理论，做到理论紧密联系实际。
4. 本教材是“机械设计”系列教材之一，故本书各章之后未编习题，习题均置于《机械设计习题集》中。
5. 鉴于多数学校将减速器一章列为“课程设计”的学习内容，故本书将这部分内容编入了“机械设计”系列教材之三的《机械设计课程设计》中。

参加本书编写工作的有：东北工学院的姚玉泉（第一、四章），王金（第二章），高泽远（第三章），银成好（第五章），蒋尊贤（第六章），李桂华（第八章），鄂中凯、丁津原（第九章）；阜新矿业学院的李木（第七章）；沈阳工业大学的曹国春（第十章）；大连理工大学的王志兆（第十一章），李林贵、姜恒甲（第十三章）；锦州工学院的高克里、叶东学（第十二章）；大连水产学院的赵雅琴（第十四章）；沈阳建筑工程学院的王正国（第十五章）。

本书由大连理工大学胡西樵教授和东北工学院马先贵教授担任主审，对本书提出了许多宝贵意见，编者致以衷心感谢！

殷切希望广大读者对书中不妥之处批评指正。

编 者

1987 年 12 月

目 录

序

前 言

第一篇 机械设计总论

第一章 绪 论

- § 1-1 机械设计课程的内容、性质和任务····· (1)
- § 1-2 机械设计的一般程序····· (2)
- § 1-3 机器应满足的基本要求····· (2)
- § 1-4 机械设计中的标准化····· (3)

第二章 机械零件设计概述

- § 2-1 机械零件设计的一般步骤····· (4)
- § 2-2 机械零件的主要失效形式····· (4)
- § 2-3 机械零件的工作能力和计算准则····· (5)
- § 2-4 可靠性设计概述····· (7)
- § 2-5 机械制造中常用材料和选用原则····· (12)
- § 2-6 机械零件的工艺性····· (14)

第三章 机械零件的强度

- § 3-1 载荷与应力的分类····· (18)
- § 3-2 静应力下机械零件的强度计算····· (19)
- § 3-3 疲劳与疲劳曲线····· (22)
- § 3-4 线性疲劳损伤积累理论——迈内尔 (Miner) 定理····· (26)
- § 3-5 材料的疲劳极限线图····· (27)
- § 3-6 影响疲劳强度的因素····· (29)
- § 3-7 单向变应力下机械零件的疲劳强度计算····· (31)
- § 3-8 双向变应力下机械零件的疲劳强度计算····· (38)
- § 3-9 机械零件的接触疲劳强度····· (39)
- 本章附录····· (40)

第四章 摩擦、磨损和润滑基础

- § 4-1 概 述····· (44)

• 1 •

§ 4-2	金属的表层结构及其摩擦、磨损	(45)
§ 4-3	常见的几种摩擦（润滑）状态	(50)
§ 4-4	润滑剂及其主要性能指标	(51)
§ 4-5	流体动压润滑	(59)
§ 4-6	弹性流体动压润滑	(59)
§ 4-7	边界润滑	(64)

第二篇 联接件设计

第五章 轴毂联接

§ 5-1	键联接	(68)
§ 5-2	花键联接	(72)
§ 5-3	过盈配合联接	(74)

第六章 螺纹联接及螺旋传动

§ 6-1	螺 纹	(82)
§ 6-2	螺纹联接的类型和标准联接件	(85)
§ 6-3	螺纹联接的预紧和防松	(87)
§ 6-4	螺栓组联接的受力分析	(90)
§ 6-5	单个螺栓联接的强度计算	(94)
§ 6-6	提高螺栓联接强度的措施	(101)
§ 6-7	螺旋传动	(107)

第三篇 传动件设计

第七章 带传动

§ 7-1	概 述	(116)
§ 7-2	带传动的工作情况分析	(119)
§ 7-3	带传动的设计准则和单根V带能传递的功率	(126)
§ 7-4	V带传动设计	(130)
§ 7-5	其它带传动介绍	(139)

第八章 链传动

§ 8-1	概 述	(143)
§ 8-2	套筒滚子链与链轮	(145)
§ 8-3	链传动的运动特性	(148)
§ 8-4	链传动的失效形式及功率曲线图	(151)
§ 8-5	套筒滚子链传动的设计计算	(153)
§ 8-6	链传动的布置、张紧与润滑	(157)

第九章 齿轮传动

§ 9-1 概 述	(161)
§ 9-2 齿轮传动的失效形式及计算准则	(163)
§ 9-3 齿轮材料	(166)
§ 9-4 齿轮传动的载荷计算	(169)
§ 9-5 标准直齿圆柱齿轮传动的强度计算	(173)
§ 9-6 设计参数选择及许用应力	(180)
§ 9-7 标准斜齿圆柱齿轮传动的强度计算	(190)
§ 9-8 标准直齿圆锥齿轮传动的强度计算	(190)
§ 9-9 变位齿轮传动强度计算的特点	(202)
§ 9-10 圆弧齿圆柱齿轮传动简介	(202)
§ 9-11 齿轮的结构设计	(204)
§ 9-12 齿轮传动的润滑	(208)

第十章 蜗杆传动

§ 10-1 概 述	(212)
§ 10-2 普通圆柱蜗杆传动的主要参数和几何尺寸计算	(215)
§ 10-3 蜗杆传动的失效形式、计算准则及常用材料	(220)
§ 10-4 普通圆柱蜗杆传动的受力和计算载荷	(221)
§ 10-5 普通圆柱蜗杆传动的承载能力计算	(223)
§ 10-6 蜗杆传动的效率、润滑及热平衡计算	(227)
§ 10-7 蜗杆和蜗轮的结构	(232)
* § 10-8 其它类型的蜗杆传动简介	(236)

第四篇 轴系零（部）件设计

第十一章 轴

§ 11-1 概 述	(240)
§ 11-2 轴的材料	(243)
§ 11-3 轴的结构设计	(244)
§ 11-4 轴的强度计算	(249)
§ 11-5 轴的刚度计算	(257)
* § 11-6 轴的共振和临界转速的概念	(258)
* § 11-7 钢丝软轴简介	(260)

第十二章 滚动轴承

§ 12-1 概 述	(261)
------------	-------

§ 12-2	滚动轴承的类型、特点和代号	(262)
§ 12-3	滚动轴承类型的选择	(266)
§ 12-4	滚动轴承的载荷及失效分析	(268)
§ 12-5	滚动轴承的寿命计算	(271)
§ 12-6	滚动轴承的静载荷计算	(279)
§ 12-7	滚动轴承组合的设计	(285)
* § 12-8	高速高温轴承简介	(296)

第十三章 滑动轴承

§ 13-1	概 述	(297)
§ 13-2	滑动轴承的结构类型	(297)
§ 13-3	轴承材料与轴瓦结构	(300)
§ 13-4	滑动轴承的润滑	(306)
§ 13-5	非液体摩擦轴承的计算	(308)
§ 13-6	流体动力润滑的基本理论	(310)
§ 13-7	单油楔向心动压轴承设计计算	(315)
§ 13-8	设计参数选择	(323)
* § 13-9	液体动压推力轴承的设计计算	(330)
* § 13-10	高速液体动压轴承简介	(334)
* § 13-11	液体静压轴承简介	(335)

第十四章 联轴器和离合器

§ 14-1	概 述	(339)
§ 14-2	联轴器	(340)
§ 14-3	操纵式离合器	(352)
§ 14-4	自动离合器	(358)
* § 14-5	制动器	(360)

第五篇 其它零部件设计

第十五章 弹 簧

§ 15-1	弹簧的功用	(362)
§ 15-2	弹簧的类型和特性	(362)
§ 15-3	弹簧材料和许用应力	(365)
§ 15-4	圆柱形压缩(拉伸)螺旋弹簧的结构和尺寸	(367)
§ 15-5	圆柱形压缩(拉伸)螺旋弹簧的设计计算	(371)
* § 15-6	圆柱组合压缩螺旋弹簧的设计	(379)
§ 15-7	圆柱形扭转螺旋弹簧	(381)
主要参考文献		(383)

第一篇 机械设计总论

第一章 绪 论

机械是人们用以代替或减轻体力劳动,改善劳动条件和提高生产率、提高产品质量的工具。现代机械一般包括四个部分:原动机、传动装置、工作机和计算控制装置。

根据结构和工作需要,各部分可能由下列之中的有关系统组成:机械系统、电气系统、液压或气动系统、滑润系统、冷却系统、控制系统和监测系统。

机械设计的任务是根据使用要求,应用各种有关先进科学理论和技术成果,创造一个在技术上尽可能完善,在经济上制造及使用费用低,外形美观大方的具体机械。

§ 1-1 机械设计课程的内容、性质和任务

机械设计课,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。因此本课程将重点讨论一般工作条件和一般参数,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) 机械设计总论——从机械整体出发,考虑结构、强度、摩擦磨损润滑、可靠性、工艺性和经济性等方面问题,阐述机械设计的共性内容,介绍有关基础理论。
- 2) 联接零件设计——介绍轴毂联接、过盈联接、螺纹联接的设计。
- 3) 传动零件设计——介绍带传动、链传动、齿轮传动和蜗杆传动的设计。
- 4) 轴系零部件设计——介绍轴、滑动轴承、滚动轴承和联轴器、离合器的设计。
- 5) 其它零部件设计——主要介绍弹簧的设计。

机械设计课是一门论述机械设计理论,研究机械设计方法的设计性质的技术基础课。它是学习机械工程专业、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。它是综合运用理论力学、材料力学、机械原理、机械制图、机械制造工艺学、金属材料及热处理、公差配合及技术测量等先修课的知识解决机械工程设计问题。

本课程的主要任务是:

- 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须的基本知识、基本理论和基本技能,具有设计机械传动装置和一般机械的能力。
- 3) 培养学生具有运用标准、规范、手册及其它有关技术资料的能力。

- 4) 使学生掌握典型零件的实验方法, 获得实验技能的基本训练。
- 5) 使学生了解机械设计的新发展和新动向。

§ 1-2 机械设计的一般程序

一部新机械从着手设计到制造出来, 要经过一系列过程。但这些过程并无通用的固定顺序, 往往根据具体条件来确定。机械设计的一般程序大致如下:

1) 制定设计工作计划 首先根据社会、市场的需求确定所设计机械的功能范围和性能指标; 依据已掌握的资料、现有的研究成果以及本单位的技术情况, 研究其实现的可能性, 明确设计中要解决的问题和项目; 拟定设计工作计划和制订设计任务书。

2) 方案设计 方案设计是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; 拟定机械系统的组成、总体布置; 确定有关机构和传动方式。

这一阶段往往需要制定多种方案进行比较, 进行技术经济评价, 分析各方案的可行性, 从中选取最优方案。

3) 技术设计 技术设计是指对已选定的设计方案之有关部分进行运动学和动力学分析; 确定机构和零件的力能参数, 有必要时还要进行模拟试验、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。

在这个阶段亦要不断地进行技术比较和经济评价, 并及时修改和完善设计。一成不变的机械设计客观上是不存在的。

4) 施工设计 施工设计是根据技术设计的结果, 考虑零件的工作能力和结构工艺性, 确定零件形状和结构尺寸以及配合件间公差; 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 所设计的机械是否能实现预期的功能、满足所提出的要求, 其可靠性、经济性如何等等, 通过样机的试验及现场使用就可反映出来。再经过鉴定, 进行科学地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。产品还要经过实际条件下的使用, 进行有关的考核。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, 然后可正式投产。

以上所述机械设计程序, 可用图 1-1 简明表示。实际上整个机械计设过程的各个阶段是互相联系的, 在某个阶段发现问题后, 必须反回到前面的有关阶段进行设计的修改。因此说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。

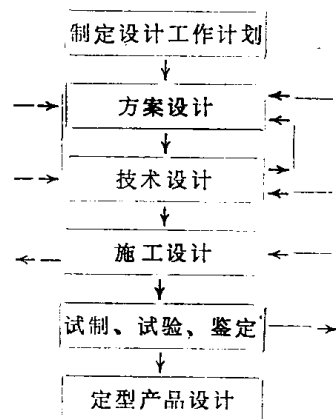


图 1-1 机械设计一般程序

§ 1-3 机器应满足的基本要求

机器应满足的基本要求有以下几方面:

1) 实现预定功能 实现预定功能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,合理地选择机器的工作原理是最重要的。如果预定实现的功能不同,显然对设计的要求也不同。

2) 安全可靠 安全可靠是机器的必备条件,机器的其它要求首先要服从于安全可靠要求。为了满足这一要求,既要从机器的整体设计来保证,又要从机械零件的结构、设计计算、材料选择等方面加以保证。

3) 经济合理 机器设计应在实现预定功能和保证安全可靠的前提下尽可能做到经济合理。经济合理既体现在机器的设计、制造过程中,又体现在使用过程中。满足这一要求必须从整体设计上综合考虑。有时,从某一局部上看是经济合理的,但从整机来考虑却又不合理的。

4) 操作使用方便 机器的工作和人的操作密切相联。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。

此外,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。

§ 1-4 机械设计中的标准化

一个国家的标准化程度,反映了这个国家的技术发展水平。标准化是进行现代化生产的重要手段,贯彻标准化是国家的一项重要技术经济政策。

实际上标准化工作包括三方面内容,即标准化、系列化和通用化。标准化是对机械零件的尺寸、结构要素、材料性质、检验方法、设计方法、公差配合和制图规范等,制定出相应的标准供设计、制造时遵照使用;系列化是按产品的规格尺寸大小依次分档,使用时恰当地选用合适的规格,这样可用较少的品种规格以满足机械工艺发展的需求;通用化是把同类型机械产品中的主要零件,特别是易损零件统一起来,设计成完全一样的(或很少品种的),以使同类机械产品的零件最大限度地通用互换。通用化是广义标准化的一部分,它既包括已经标准化的也包括尚未标准化的项目。习惯上常把标准化、系列化和通用化简称为“三化”。贯彻“三化”有如下好处:

1) 设计新产品时按系列设计,并尽量使用标准件和通用件,以减少设计工作量,缩短设计周期,使设计者的主要精力用在关键零件的设计上。

2) 可集中成功经验,减少设计、制造上的技术差错。

3) 扩大互换性,便于维修工作。

4) 有利于增加产品品种,扩大生产批量,容易收到优质高产低消耗的经济效果。

5) 为专业化生产创造了有利条件。而专业化生产可以采用先进的生产工艺和机械化自动化操作,节约工时,提高劳动生产率,提高产品质量。

机械设计是贯彻标准化、系列化和通用化的第一个步骤。如果同一类机械的不同规格产品,其零件各自一套,全不相同,不能通用互换,则必然使工艺过程复杂化,使生产装备增多,延长生产期,阻碍生产率的提高。因此,设计者必须认真地贯彻“三化”。

第二章 机械零件设计概述

§ 2-1 机械零件设计的一般步骤

由于零件种类不同,设计计算方法不同,其具体的设计步骤也不一样。但一般地说,可按下列设计步骤进行。其框图如 2-1 所示。

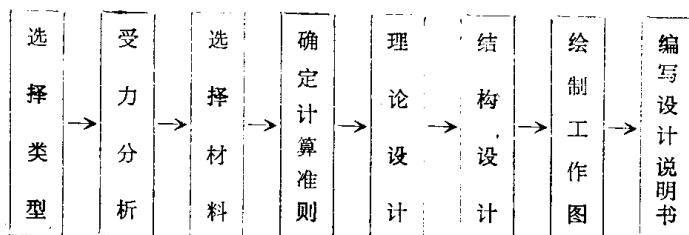


图 2-1 机械零件一般设计步骤

1) 选择类型 根据使用条件及载荷性质、尺寸大小选择零件的类型。为此,必须对各种常用的机械零件的类型、特点及应用范围有明确了解。

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,确定出零件设计计算准则。

5) 理论设计计算 由设计准则所得到的一些设计或校核设计计算公式,确定出零件的主要几何尺寸及参数。如螺栓的小径;齿轮的齿数、模数及节圆直径等。

6) 结构设计 通过理论设计计算,一般只能从防止某种失效观点出发,确定出零件的主要几何尺寸及参数,其余结构尺寸,是要考虑功能要求,加工及装配工艺性要求,受力情况,尽量减小应力集中,尺寸小重量轻等原则来确定,即所谓结构设计。

7) 绘制零件工作图 理论设计和结构设计最终都要通过绘制零件工作图体现出来,同时,在零件工作图上,除了有详细的尺寸外,还需要对零件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。

8) 编写设计计算说明书 把设计计算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。

§ 2-2 机械零件的主要失效形式

机械零件在限定的期间内,在规定条件下,不能完成正常的功能称为失效。零件常见的失效形式主要有如下几种:

1. 整体断裂

零件在载荷作用下,某危险剖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。比如螺栓破断、齿轮断齿、断轴等。整体断裂可分为静强度断裂及疲劳断裂。静强度断裂是

由于静应力过大而引起的断裂, 疲劳断裂是由于变应力的作用而产生的断裂。机械零件整体断裂失效中, 80%属疲劳断裂。

2. 表面破坏

表面破坏发生在机械零件工作表面上。常见的失效形式有: 压溃、磨损、表面疲劳、胶合、腐蚀等。各种表面失效形式产生的原因及机理可参见本书第四章。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。

3. 变形量过大

机械零件受载荷时, 要产生弹性变形。当弹性变形量超过许用范围(即刚度不够)将使零件或机械不能正常工作。弹性变形量过大, 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。比如机床主轴刚度低, 会影响被加工件的精度, 电动机轴刚度低会使转子与定子间的间隙改变。

塑性材料制作的零件, 在过大载荷作用下可能产生塑性变形, 零件的塑性变形不仅造成尺寸和形状的改变, 而且使零件丧失工作能力。

4. 功能失效

机械零件不能完成规定功能的失效称为功能失效。如摩擦传动中的带传动, 由于带打滑而失效, 高速转子发生共振而导致的失效均属于功能失效。

§ 2-3 机械零件的工作能力和计算准则

一、机械零件的工作能力

机械零件抵抗失效的能力称为工作能力(或称为承载能力)。或者说零件在预定的使用期限内, 不发生失效的安全工作限度。衡量零件工作能力的指标, 称为零件工作能力准则。设计机械零件时, 就是根据工作能力计算准则进行设计计算。

零件由于结构、受力情况、材料、工作条件的不同, 常表现出不同的失效形式。即使是同一种零件, 也可能出现多种失效形式, 比如齿轮, 可能出现断齿、磨损、表面疲劳点蚀、胶合或塑性变形等, 因此, 对于一个具体零件, 要根据其失效形式, 采用相应的设计准则(详见以后各章)。

二、机械零件的计算准则

现将设计机械零件时一些主要计算准则分述如下:

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, 就会出现上述某种失效而丧失工作能力。可见, 强度准则是零件设计计算的最基本的计算准则, 强度计算准则的一般表达式为

$$\sigma \leq [\sigma] \text{ 或 } \tau \leq [\tau] \quad \text{N/mm}^2 \quad (2-1)$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{S} \text{ 或 } [\tau] = \frac{\tau_{\text{lim}}}{S_{\tau}} \quad \text{N/mm}^2 \quad (2-2)$$

式中 σ, τ ——零件的工作正应力、剪应力;

$[\sigma], [\tau]$ ——零件材料的许用正应力、剪应力;

S, S_τ ——正应力、剪应力的安全系数;

$\sigma_{\text{lim}}, \tau_{\text{lim}}$ ——零件材料的极限正应力、极限剪应力。

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, 重要零件要验算刚度是否足够。还有些零件, 如机床主轴, 电动机轴等, 其基本尺寸是由刚度条件确定的。一般地讲, 刚度准则的计算式为

$$y \leq [y]; \theta \leq [\theta]; \varphi \leq [\varphi] \quad (2-3)$$

式中 y, θ, φ ——零件的挠度、偏转角和扭转角;

$[y], [\theta], [\varphi]$ ——零件的许用挠度、偏转角和扭转角。

另外, 也有些零件(如弹簧)有相反的要求, 即不容许有很大的刚度, 而要求其具有一定的柔度。

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, 关于腐蚀与磨损寿命计算尚无法进行。关于疲劳寿命计算, 参见本书齿轮、滚动轴承各章。

4. 耐磨性准则

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

关于磨损方面, 尚无简单的理论计算公式, 通常是采用条件性计算: 一是验算压强(单位接触面所受压力)不超过许用值, 以防压力过大, 使零件工作表面油膜破坏而产生过快磨损, 其验算式为

$$p \leq [p] \quad \text{N/mm}^2 \quad (2-4)$$

式中 p ——工作表面压强, N/mm^2 ;

$[p]$ ——材料的许用压强, N/mm^2 。

二是对滑动速度 v 比较大的摩擦表面, 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功不要过大。如果摩擦系数 f 为常数时, 则可验算 pv 值不超过许用值, 即

$$pv \leq [pv] \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2-5)$$

式中 $[pv]$ —— pv 的许用值, $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ 。

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, 比如齿轮的啮合, 轴的偏心转动等, 零件本身因其自振频率 f 接近上述激振源的振动频率 f_p 时, 零件就要发生共振, 以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。其计算式为

或

$$\left. \begin{array}{l} f < 0.87f_p \\ f > 1.18f_p \end{array} \right\} \quad (2-6)$$

如果不能满足上述条件, 则可用改变零件或系统刚度或采用防振、减振措施。例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。

6. 可靠性准则

机械零件可靠性水平的高低, 直接影响到机械系统的可靠性水平的高低。从根本上讲, 要提高机械设备的可靠性, 关键是提高零件的可靠性。当对机械系统进行可靠性设计时, 组成系统的一些关键、重要、基础零件也应按可靠性要求进行设计。有关可靠性设计计算准则见本章第四节。

除上述一些零件计算准则外, 某些情况下还可能有一些其他一些计算准则, 比如高温环境下工作的零件, 还应考虑温度影响进行蠕变计算等, 这里不再赘述。

§ 2-4 可靠性设计概述

可靠性设计是把可靠性理论和技术应用到产品设计中, 根据需求和可能, 从设计一开始就考虑可靠性指标, 在满足性能、费用、时间等条件下使产品的可靠性最高; 或者在保证可靠性指标条件下, 使上述各因素最佳。

产品的可靠性是产品的重要质量指标之一。随着科学技术的不断发展, 机械产品的更新换代周期的加快和产品市场竞争的日趋激烈, 产品的可靠性越来越为人们所重视。因此, 机械产品设计中必须充分考虑可靠性的要求。产品可靠性水平高低主要取决于设计。常规的机械设计中所用的载荷、材料性能及尺寸因素等都视为一个确定量, 没有考虑这些因素的离散性, 所以不能回答产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率。对于重要的系统(设备)或要求重量轻而可靠度高的零、部件要进行可靠性设计, 保证所设计的产品具有一定的可靠性水平。

本节简要介绍常用的可靠性特征量、系统可靠性设计及零件的概率法设计的基本知识。

一、可靠性的特征量

产品的可靠性定义是: “产品在规定的条件下和规定的时间内, 完成规定功能的能力”。这里所说的产品是一个泛指名词, 可以是元件、零件、部件或机器、机组等系统。度量可靠性的各种量统称为可靠性特征量。常用的可靠性特征量有可靠度, 累积失效概率(不可靠度), 失效率, 平均寿命和可靠寿命等。

1. 可靠度

可靠度是产品在规定条件下和规定时间内, 完成规定功能的概率。一般记为 R , 它是时间 t 的函数, 故也记为 $R(t)$, 称为可靠度函数。

一批产品, 若其中某一件产品失效时间用 T 表示, T 是一个随机变量, 其分布密度 $f(t)$ 如图 2-2 所示, 则该产品到时间 t 的可靠度 $R(t)$ 为

$$R(t) = P(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2-7)$$

可靠度的观测值记为 $\hat{R}(t)$ ，是由试验求出。如图 2-3 所示，若开始投入试验产品数为 N 个，到时刻 t 尚能完成功能产品数为 $N_s(t)$ ，已失效的产品数为 $N_f(t)$ ，则

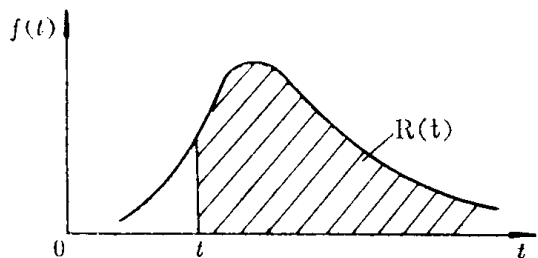


图 2-2 分布密度与可靠度

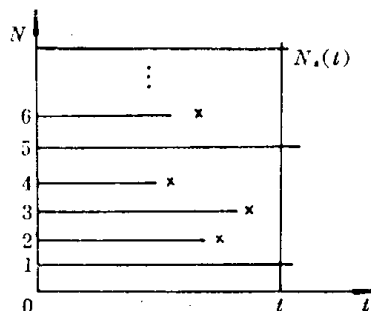


图 2-3 试验结果
“x”表示失效，共 $N_f(t)$ 个

$$\hat{R}(t) = \frac{N_s(t)}{N} = \frac{N - N_f(t)}{N} = 1 - \frac{N_f(t)}{N} \quad (2-8)$$

2. 累积失效概率

累积失效概率是产品在规定的条件下和规定的时间内不能完成规定功能的概率，又称为不可靠度，一般记为 $F(t)$ ，或简记为 F 。由图 2-2 可知

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t) dt \quad (2-9)$$

按概率互补定理可知

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2-10)$$

其观测值 $\hat{F}(t)$ 也可按式(2-10)求出，即

$$\hat{F}(t) = 1 - \hat{R}(t) \quad (2-11)$$

3. 失效率

失效率是工作到某一时刻 t 尚未失效的产品，在该时刻后单位时间内发生失效的概率，一般记为 $\lambda(t)$ 。按上述定义，失效率是时刻 t 尚未失效的产品在时间 t 到 $t + \Delta t$ 的间隔中发生失效的条件概率，即

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) \quad (2-12)$$

它反映了 t 时刻失效的速率，也称为瞬时失效率。

若在 t 时刻尚未失效的产品数为 $N_s(t)$ ，经过 Δt 时间间隔，产品又有 $\Delta N_f(t)$ 个失效，则失效率的观测值为

$$\lambda(t) = \frac{\Delta N_f(t)}{N_s(t) \Delta t} \quad (2-13)$$

产品的失效率 $\lambda(t)$ 与时间 t 的关系如图 2-4 所示，该曲线形状如盆，故常称为浴盆曲线。典型的失效率曲线分为三个区域：I 区域为早期失效期，这一阶段失效较高且下降速率很大，这是由于设计，加工或装配上存在的缺陷引起的失效。II 区域为偶然失效期，这是正

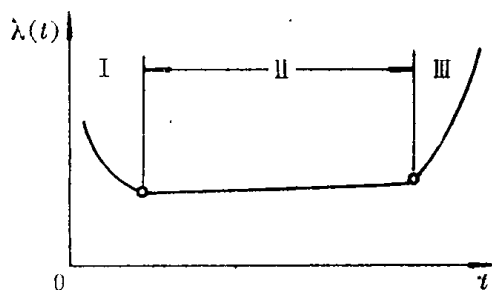


图 2-4 失效率曲线

常使用阶段，由于一些偶然因素引起产品失效，这一阶段失效率变化很小，几乎接近一个常数。Ⅲ区域为耗损失效期，产品使用到一定时间后，由于老化、疲劳、磨损等造成产品失效率迅速上升。采用及时维修可使Ⅱ区域延长。

工程中，失效率常用单位是“失效数/10⁶h”。根据使用经验，正常工作阶段的失效率可由下列经验公式计算

$$\lambda = K_f \lambda_g \quad (2-14)$$

式中 λ_g ——通用失效率，其值见表 2-1；

K_f ——环境系数，其值见表 2-2。

表 2-1 通用失效率 λ_g 的经验值 $1/10^6 h$

产 品 名 称	最上限	平均值	最下限	产 品 名 称	最上限	平均值	最下限
凸 轮	0.004	0.002	0.001	弹 簧	0.221	0.1125	0.004
带 传 动	15.00	3.875	0.142	弹簧（校准用）	0.42	0.22	0.009
齿 轮	0.20	0.12	0.0118	弹簧（恢复力用）	0.022	0.012	0.001
齿轮箱（运输用）	0.36	0.20	0.11	O型密封圈	0.03	0.02	0.01
扇形齿轮	1.80	0.9125	0.051	橡胶密封垫	0.03	0.02	0.011
轴	0.62	0.35	0.15	转动密封	1.12	0.70	0.25
一般轴承	1.00	0.50	0.02	滑动密封	0.92	0.30	0.11
球轴承（高速、重载）	3.53	1.8	0.072	液 压 缸	0.12	0.008	0.005
球轴承（低速、轻载）	1.72	0.875	0.035	气 压 缸	0.013	0.004	0.002
滚子轴承	1.00	0.50	0.02	液压马达	7.15	4.30	1.45
轴套或轴承（滑动）	1.00	0.50	0.02	压 力 表	7.80	4.00	0.135
弹性联轴器	1.348	0.6875	0.027	阀 门	8.00	5.10	2.00
刚性联轴器	0.049	0.025	0.001	电 动 机	0.58	0.30	0.11
离 合 器	1.10	0.4	0.06	箱 体	2.05	1.10	0.0151
电磁离合器	0.93	0.6	0.45	机床铸件（基础铸件）	0.70	0.175	0.015

注：用料可靠，加工精细，质量控制严格，使用维护得当等条件下取表中小值。

表 2-2 环 境 系 数 K_f

实验室 计算机	地 面 设 备	船 上 设 备	拖 挂 车 设 备	火 车 设 备	飞 机 设备 (台架试验)	导弹设备 (台架试验)	飞 机 设备 (飞行时)	导弹设备 (飞行时)
1	10	20	25	30	50	25	100	1000

4. 平均寿命和平均无故障工作时间

平均寿命是产品寿命的平均值，一般记为 MTTF (Mean Time to Failures)。对可修复产品，常用平均无故障工作时间，一般记为 MTBF (Mean Time Between Failures)。它们都是表示寿命 T (随机变量) 的数学期望，简记为 t 。若已知 T 的分布密度函数 $f(t)$ ，则由概率论可知