

高等学校机械设计系列教材

机 械 设 计

(机械类)

杨景蕙 陆玉 唐蓉城 主编

第 2 版

机械工业出版社

高等学校机械设计系列教材

机 械 设 计

(机 械 类)

第 2 版

主编 杨景蕙 陆 玉 唐蓉城

主审 董阳照 卜 炎



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据国家教委 1987 年批准的“机械设计课程教学基本要求”的基本精神,在 1993 年第 1 版基础上修订而成的。

全书共分十八章。第一、二、三、四章为设计总论,其它各章分别介绍联接、传动、轴系零部件及弹簧等的工作原理、设计计算及结构设计。

本书主要用作高等工科院校机械类专业的教材,也可供其它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:机械类/杨景蕙等主编.—2 版.—北京:机械工业出版社,1996 重印

高等学校机械设计系列教材

ISBN 7-111-05078-9

I. 机… II. 杨… III. 机械设计—高等学样—教材 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 01681 号

出 版 人:马九荣(北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)

责任编辑:钱飒飒 王世刚 赵爱宁 版式设计:王 颖

责任校对:肖新民 封面设计:方 芬 责任印制:路 林

机械工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1996 年 8 月第 2 版第 2 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·23 印张·562 千字

0 001—6 000 册

定价:23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

第 1 版 前 言

本书是天津大学和河北省机械设计教学研究会合编的机械设计系列教材之一。本系列教材有机械设计（机械类）、机械设计基础（近机类）、机械设计基础（非机类）、机械设计课程设计、机械设计习题集（与机械设计配套使用）五种。该系列教材是天津大学和河北省十余所高等学校多年来的教学经验总结。

本书符合 1987 年国家教委批准的教学基本要求。在编写过程中，注意在传统模式上作一定的改进。此书在一些主要章节增加了设计计算流程图，有利学生综合所学内容，同时也为开展计算机辅助教学打下基础。为了便于教与学，书中插图做了适当的更新。改变了传统的“概述”的写法，突出各零件的设计计算和结构设计，为扩宽学生的知识面适当增加了一些内容。对某些与先修课程有直接关联的内容，编写时不再重述，这样可促使学生温故知新，以达到学习的连贯性。凡涉及国家标准的内容，一律采用 1991 年底所颁布的标准。

参加本书编写的有唐蓉城（第一、七章和传动综述），常觉民（第二、十四章），王凤礼（第三、十七章），佟延伟（第四、九章），陆玉（第五、六、八章），杨景蕙（第十章），潘凤章、唐蓉城（第十一章），程福安（第十二、十三、十八章），陈冠国（第十五、十六章）。

全书由唐蓉城、陆玉主编，天津大学郭芝俊教授、河北工学院董阳照教授主审。唐山工程技术学院李国柱老师在本书出版印制过程中作了大量工作，在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中错误和不当之处希广大读者给予指正。

编 者

1992 年 8 月

第 2 版 序

根据两年来各校试用本书第 1 版的实践经验,及师生们提出的问题和不妥之处,在内容上作了修改,并考虑高等工程教育改革和发展的需要,凡涉及国家标准的内容,进行了更新(采用 1994 年底所颁布的标准),使之更好地满足教学需要。

参加本书修订工作的有:唐蓉城(第一、七章),李建功、董刚(第二、十四章),陈冠国(第三、十六章),郑启鸿、王凤礼(第四、十五章),陆玉(第五、六、八章),杨景蕙、佟延伟(第九、十、十八章),潘凤章、唐蓉城(第十一章),程福安(第十二、十三、十七章)。

河北理工学院李国柱老师在本书出版印刷过程中作了大量工作,在此表示衷心感谢。

欢迎各位老师和广大读者对书中错误和不妥之处给予批评指正。

编 者

1995 年 12 月

目 录

第 1 版前言

第 2 版序

第一章 机械设计概论	1
第一节 机械和机械零件设计的基本程 序和原则	1
第二节 机械设计的发展	2
第三节 机械设计课程介绍	3
第四节 机械设计计算准则	4
第二章 机械零件的疲劳强度设计	12
第一节 概述	12
第二节 疲劳曲线和极限应力图	13
第三节 影响零件疲劳强度的主要因素	17
第四节 受恒幅循环应力时零件的疲劳 强度	24
第五节 受变幅循环应力时零件的疲劳 强度	31
第六节 低周循环疲劳寿命计算	34
第七节 疲劳裂纹扩展寿命计算	35
第三章 摩擦、磨损和润滑	37
第一节 摩擦	37
第二节 磨损	41
第三节 润滑	45
第四节 流体动力润滑的基本原理	53
第四章 机械零件常用材料及制造工 艺性	56
第一节 机械零件常用材料和选择原则	56
第二节 机械零件的制造工艺性	60
第五章 螺纹联接及螺旋传动	66
第一节 螺纹	66
第二节 螺纹联接	68
第三节 单个螺栓联接的强度计算	72
第四节 螺栓组联接受力分析与计算	81
第五节 提高螺栓联接强度的措施	86
第六节 螺旋传动	90
第六章 键、花键、销和成形联接	98
第一节 键联接	98

第二节 花键联接	102
第三节 销联接	105
第四节 成形联接	108
第七章 过盈联接	109
第一节 组成、性能和应用	109
第二节 过盈联接的装配方法	109
第三节 提高过盈联接承载能力的措 施	110
第四节 圆柱面过盈联接的设计计算	111
第五节 弹性环联接	122
第八章 铆、焊、粘联接	124
第一节 铆接	124
第二节 焊接	127
第三节 粘接	132
第九章 摩擦轮传动	135
第一节 概述	135
第二节 定传动比摩擦轮传动的计算	138
第三节 变传动比摩擦轮传动	143
第十章 带传动	147
第一节 概述	147
第二节 带和带轮	147
第三节 带传动的受力分析及滑动	151
第四节 V 带传动设计	156
第五节 带传动的张紧装置	166
第六节 其它带传动简介	170
第十一章 齿轮传动	171
第一节 概述	171
第二节 齿轮传动的失效形式与计算 准则	174
第三节 齿轮材料及其热处理	176
第四节 圆柱齿轮传动的载荷计算	178
第五节 直齿圆柱齿轮传动的强度计 算	185
第六节 斜齿圆柱齿轮传动的强度计 算	206
第七节 直齿锥齿轮传动	213
第八节 齿轮传动的效率与润滑	222

第九节 齿轮结构·····	223	第六节 滚动轴承的极限转速·····	293
第十二章 蜗杆传动·····	227	第七节 滚动轴承的组合设计·····	297
第一节 概述·····	227	第八节 滚动轴承的润滑与密封·····	302
第二节 蜗杆传动的主要参数与几何尺寸·····	228	第十六章 滑动轴承·····	306
第三节 蜗杆传动的强度计算·····	232	第一节 概述·····	306
第四节 蜗杆和蜗轮的结构·····	239	第二节 滑动轴承的结构·····	307
第十三章 链传动·····	243	第三节 滑动轴承的材料·····	311
第一节 概述·····	243	第四节 润滑材料和润滑方法·····	314
第二节 链传动的运动特性·····	246	第五节 滑动轴承的条件性计算·····	317
第三节 滚子链传动的设计计算·····	249	第六节 液体动力润滑径向轴承的计算·····	318
第四节 链传动的合理布置和润滑·····	253	第七节 液体动力润滑止推轴承简介·····	329
第五节 齿形链传动计算简介·····	255	第八节 静压轴承简介·····	331
第十四章 轴·····	257	第十七章 联轴器和离合器·····	333
第一节 概述·····	257	第一节 联轴器的分类及性能特点·····	333
第二节 轴的结构设计·····	260	第二节 几种常用的联轴器·····	334
第三节 轴的强度计算·····	263	第三节 离合器·····	339
第四节 轴的刚度计算·····	272	第十八章 弹簧·····	344
第五节 轴的振动与临界转速·····	276	第一节 概述·····	344
第十五章 滚动轴承·····	279	第二节 圆柱螺旋弹簧的结构、材料、许用应力及制造·····	346
第一节 滚动轴承的构造与类型·····	279	第三节 圆柱螺旋弹簧的设计计算·····	350
第二节 滚动轴承的代号·····	282	第四节 受变载荷螺旋弹簧的强度计算·····	357
第三节 滚动轴承的载荷分布、失效形式和计算准则·····	285	参考文献·····	360
第四节 滚动轴承的寿命计算·····	286		
第五节 滚动轴承的静强度计算·····	291		

第一章 机械设计概论

第一节 机械和机械零件设计的基本程序和原则

机械是人类利用外力减轻体力劳动和提高生产率的工具。机械的发展经历了一个由简单到复杂的漫长过程。人类在生产和生活中使用机械的水平,是衡量社会生产力发达水平的重要标志。完整机械的形态,在蒸汽机出现后才逐步形成。现以机械的功能为基点,说明机械的组成,见图1-1。

机械设计的基本要求是实现预定功能做到人-机协调、提高经济效益和保证安全可靠。

机械设计常用的方法可归纳为三种:

(1) 内插式设计 借鉴现有的设计方案和成功的经验,通过少量的试验研究,进行技术改进设计出新的产品。内插式设计是设计一般机械的常用方法。

(2) 外推式设计 设计时虽有部分经验可以借鉴,但外推部分尚为未知领域,一旦某些设计参数超出通用设计的许用范围,有可能出现意想不到的后果。因此,对外推式设计要进行必要的技术研究、理论探索和科学实验。

(3) 开发式设计 用新原理、新技术或开发新功能设计新的机械为开发式设计。

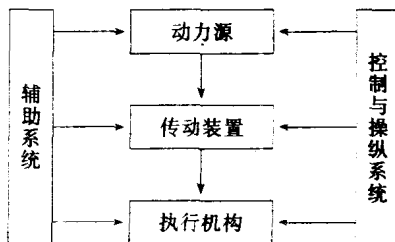


图 1-1 机械的组成

机械设计是一项复杂、细致和科学的工作。要想提供功能好、质量高、成本低、竞争力强、市场广的新机械,就应逐步深化机械设计方法的综合研究。

机械设计是开发新机械产品的第一个程序。开发新机械产品时不仅要考虑机械的功能本身,还要考虑制造与装配、生产成本、生产周期、售后服务(维修)和用后回收等产品生命周期全过程的各个方面。

机械设计的基本程序见图1-2。

机械零件是组成机器的基本单元,是影响机器性能质量的关键。机械零件设计的基本要求是工作可靠、工艺性好和成本低廉。机械零件设计的基本程序,见图1-3。

机械零件设计分为设计计算和校核计算。设计计算是根据零件的工作情况和工作能力准则(将在后面讨论)确定安全条件,用计算方法求得零件的主要几何尺寸,然后再按工艺要求和尺寸协调进行结构设计。校核计算是已知零件的主要几何参数和经验数据,初步拟定零件的结构尺寸,然后再按工作能力准则进行校核验算。无论是设计计算和校核计算,一般均应对某些复杂的物理现象做出适当的简化,如以集中力代替实际的分布力,以支承点代替支承面等,所以机械零件设计计算总带有一定的条件性。为使计算结果更加实际化,应多参考已有的成功设计和在实际应用中累积的统计资料。设计工作是一个综合的反复实践过程,要经过多次循环修改设计方案和设计参数,才能获得比较合理的设计,这个过程实质上也是一个逐步的宏观优化过程。

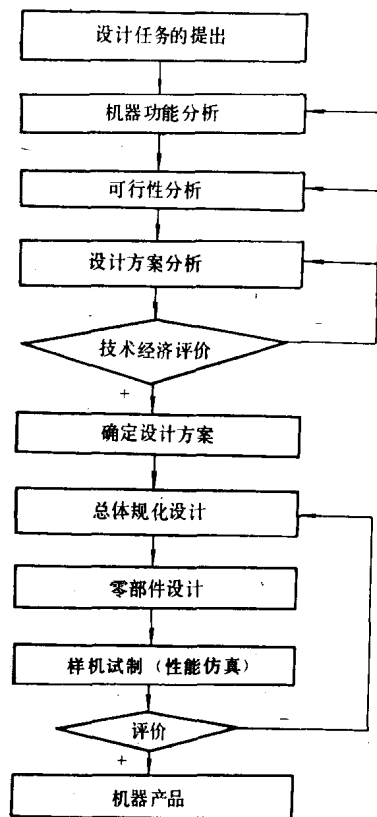


图 1-2 机械设计基本程序

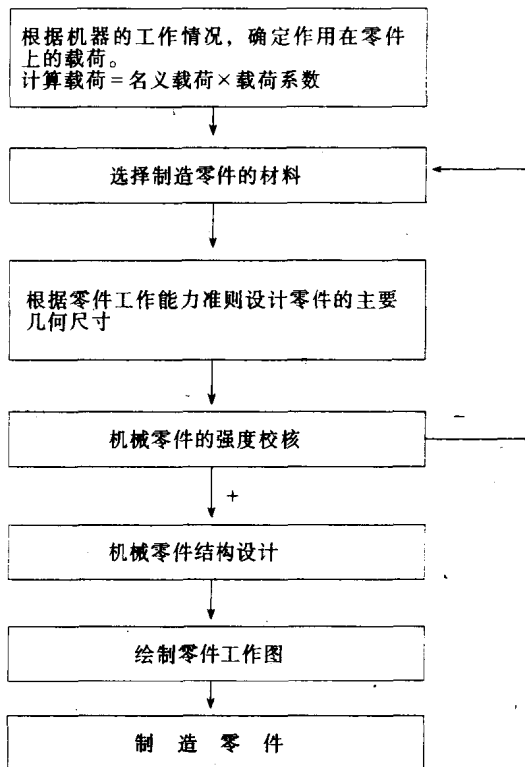


图 1-3 机械零件设计基本程序

在不同类型、不同规格、不同用途的各种机械中，有许多零件是相同的。将这些零件按照尺寸、结构、材料、检验等要求加以标准化、系列化和通用化，使之成为设计者共同遵守的准则。标准化、系列化和通用化对机械设计有着十分重要的实际价值，简称为“三化”。在机械设计中贯彻“三化”的重要意义为：

(1) 简化设计工作、缩短设计周期，以便设计人员将主要精力用于关键零部件的设计。

(2) 标准化零件便于由专门工厂采用先进技术组织大规模的集中生产，有利于提高生产率、合理使用材料、确保质量降低成本和增加经济效益。

(3) “三化”零部件具有很大的互换性，可以大大简化机器设备的维修工作。

(4) 便于改进、提高和增加新的品种。

我国现行标准分有：国家标准（GB）、部颁标准和行业标准。出口产品则应采用国际标准（ISO）。

第二节 机械设计的发展

20 世纪后期科学技术的进步日新月异，给机械设计学科注入新的生命力。在设计理论、设计技术、设计自动化和设计规律等方面均有新的研究成果涌现。机械设计学科突破了传动的設計方法，正由静态向动态、由经验计算向建模分析、由满足单个机件的性能要求向整个

机械系统的功能综合和分析、由使用计算器计算和手工绘图向 CAD 发展。当今机械设计学科发展进步的表现有：

1. 深化设计理论研究 机械设计学科过去仅从宏观概念研究问题，现在是宏观、微观概念并举，积极探索机械本身的失效规律，建立了疲劳强度设计、摩擦学设计等设计理论。过去只研究静态问题，研究单一零件性能，现在研究机械系统的动态性能，建立了系统动力学设计理论。

2. 创建新的设计技术 可靠性理论、优化理论的发展为机械设计提供了新的基础理论，创建了机械可靠性设计、机械优化设计等新技术。

3. 提高设计自动化水平 引入计算机技术提高了设计的自动化水平，不仅可以省去手工计算、绘图的程序，还有代替样机试制、性能试验等程序，实现 CAD、CAD/CAE 集成等，同时计算机技术可以完成过去手工无法想象的复杂问题，提高了计算精度与速度，比过去更科学。

4. 研究设计的本身规律 设计工作本身有内在规律，为探讨其规律提高对其认识，创立了设计方法学，并提出了模块化设计、反求工程设计等新的设计方法。

机械设计者是完成机械产品设计任务的核心。设计者必需跟上科学技术发展的步伐，才能有效地进行设计工作。设计者的职业特征是由各种知识和专业能力组合而成的综合表现，因此，培养一个合格的设计人员，并使之达到成熟，要经历一个长期的、艰苦的实践过程。设计者应具备的基本条件如下：

(1) 要具备理论分析、生产实践和观察思考的能力。设计者具备渊博的理论知识，是搞好设计理论分析的基础；生产实践知识是对设计质量的有利保证；观察思考是发现问题和提出问题的渊源。

(2) 要有创新和改革的意识。设计者要不断进行创造性思维能力的锻炼，提高捕捉新动态（科技动态、产品动态、市场动态等）的能力。设计者在社会实践中，应在提炼设计问题、制定技术方案、规划功能作用、分析工作原理、构思设计结构，评价设计成果等诸方面，不断开拓设计思维运动。

(3) 要有不断进取的精神。设计者要不断积累信息、扩宽知识、勤于归纳、善于分析，从中预测未来的发展趋向。

(4) 要有良好的思想修养。设计是将各种各样的工作活动结合成一体的系统过程，因此要求设计者具有高度的责任心和团结协作精神。同时还要求设计者有牢固的法制观念，严格遵守国家颁布的各种设计法规。

设计者是人类需要和科学成果之间的一座桥梁。要求设计者不断总结经验，学习新的科学知识，为提高设计水平而努力。

第三节 机械设计课程介绍

一、定义几个名词

1. 机器 是执行机械运动的装置，用来转换和传递能量、物料和信息。

2. 机械 是机器和机构的总称

3. 零件 是组成机械的不可拆的基本单元。它分为通用零件（各种机器中经常使用的

零件,如螺钉、齿轮、轴等)和专用零件(只在一定类型机器中使用的零件,如曲轴、纺锭、织梭等)。

4. 部件 为完成同一使命在结构上组合在一起,并协同工作的零件总体。如滚动轴承、联轴器等。

5. 机械零件 泛指零件和部件。

二、课程性质

机械设计课程是机械工程类专业学生应着重学习的一门主干技术基础课。它综合运用理论力学、材料力学、机械原理、金属工学、金属学和热处理、公差技术测量、机械制图等先修课的知识,进行机械设计学科的基本训练,并为学生进一步学习专业课程打下基础。该课程是工程教育中的重要环节。

三、课程任务

设计是为了满足某一特定要求而进行的创新性活动。接受工程教育的学生,应具备掌握设计基本理论和基本方法的基本能力。机械设计课程,可以培养学生应用新原理、新概念,完成机械设计能力的基础训练。同时培养学生初步树立正确的设计思想,了解国家的技术经济政策。

四、课程内容

机械零件的设计和计算,是本课程的基本内容。最终目的是要求学生综合运用各种机械零件和各种机构,以及其它先修课的知识,独立完成机械传动装置和简单机械的设计。

机械设计是生产机械产品的第一道工序,设计质量的优劣,直接影响产品质量和经济效益,因此,机械设计学科对国民经济的发展具有重要意义。

第四节 机械设计计算准则

机械零件的设计和计算是本课程的基本内容,机械零件的失效是设计计算的依据(计算准则)。何谓失效?即机械零件丧失工作能力或达不到设计所要求的性能称为失效。失效不仅意味着破坏,失效有破坏性失效(如断裂)和非破坏性失效(如刚度不足)两类。机械零件虽然有很多种可能的失效形式,但归纳起来,最主要的是由于强度、刚度、耐磨性、温度对工作能力的影响以及振动稳定性、可靠性等方面的问题。

为了避免机械零件失效,应使零件具有足够的工作能力。所谓工作能力,即机械零件不发生失效时的安全工作限度(对载荷而言的工作能力称为承载能力)。衡量机械零件工作能力的准则,随零件失效形式的不同而不同。以轴为例,它的失效可能是疲劳断裂,也可能是过大的弹性变形。对于前者,轴的工作能力取决于轴的疲劳强度;对于后者,则取决于轴的刚度。下面分别阐述考虑这些问题的计算准则。

一、强度准则

机器运转时,机器中的各个零件将承受载荷,如果强度不够,零件将出现失效。显然,保证所设计的零件有足够的强度,是保证机器正常运转的根本条件。强度准则是指在机械零件中,由载荷引起的应力不应超过允许的限度。

常用的判断零件强度的方法有两种,一是判断零件危险剖面处的最大应力(σ 、 τ)是否小于许用应力($[\sigma]$ 、 $[\tau]$)。其判断条件(强度条件)为

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

而 式中 $\sigma_{\lim}$ 、 $\tau_{\lim}$ ——分别为极限正应力和切应力；

$[S]_{\sigma}$ 、 $[S]_{\tau}$ ——分别为正应力和切应力时的许用安全系数。

另一种方法是判断零件危险剖面处的实际安全系数 (S_{σ} 、 S_{τ}) 是否大于许用安全系数 ($[S]_{\sigma}$ 、 $[S]_{\tau}$)。其判别条件为

$$\left. \begin{aligned} S_{\sigma} &= \frac{\sigma_{\lim}}{\sigma} \geq [S]_{\sigma} \\ S_{\tau} &= \frac{\tau_{\lim}}{\tau} \geq [S]_{\tau} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

1. 载荷和应力 载荷按照随时间变化的特性分为静载荷和变载荷。不随时间变化或变化缓慢的载荷为静载荷，如零件自重、静水压力等。随时间作周期性变化或非周期性变化的载荷为变载荷，前者如活塞式水泵的活塞所受的载荷，后者如机车、拖拉机、汽车等行驶部分的零件所受的载荷。非周期性变化的载荷可用统计规律来表征。

与载荷相对应，应力分为静应力和循环应力（图 1-4）。

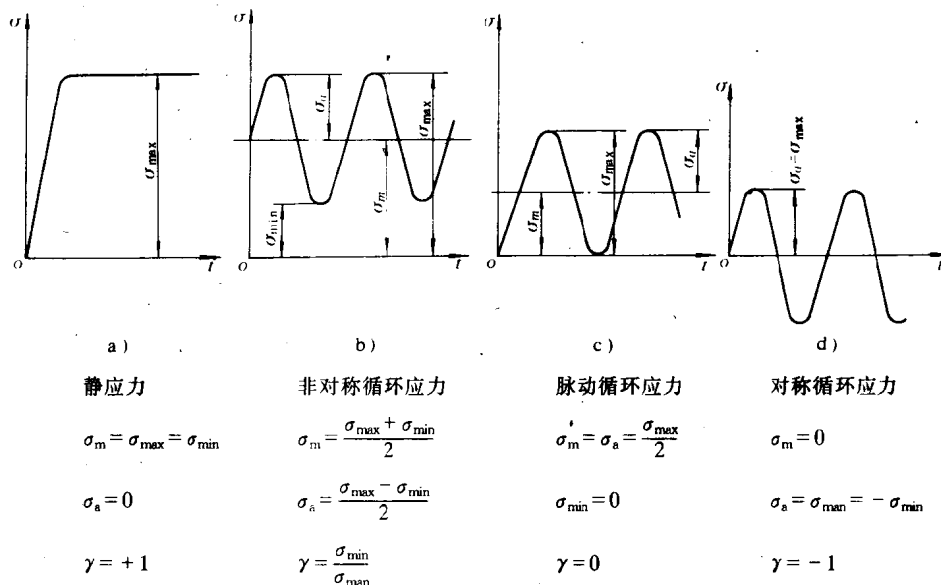


图 1-4 应力的分类

应力计算公式如下：

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \\ \gamma &= \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \end{aligned}$$

式中 $\sigma_{\max}$ ——最大应力；

$\sigma_{\min}$ ——最小应力；

σ_m ——平均应力；

σ_a ——应力幅；

γ ——应力比。

静应力只能在静载荷作用下产生。循环应力由变载荷产生，也可由静载荷产生，例如转轴在静载荷作用下转动时，剖面上将产生循环应力，滚动轴承在静载荷作用下工作时，轴承的内、外圈和滚动体均产生循环应力。

2. 静应力下的强度 零件在静应力条件下工作，其失效形式为断裂或塑性变形。

(1) 在简单应力条件下工作的塑性材料零件，应按照不发生塑性变形的条件进行强度计算。此时取材料的屈服点 (σ_s 、 τ_s) 为极限应力。其强度条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &\leq [\sigma], [\sigma] = \frac{\sigma_s}{[S]_\sigma} \\ \tau &\leq [\tau], [\tau] = \frac{\tau_s}{[S]_\tau} \\ S_\sigma &= \frac{\sigma_s}{\sigma} \geq [S]_\sigma \\ S_\tau &= \frac{\tau_s}{\tau} \geq [S]_\tau \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

(2) 在复合应力下工作的塑性材料零件，可按第三或第四强度理论确定其强度条件。对于弯扭复合应力，可采用第三强度理论确定其强度条件。即

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\sigma_w^2 + 4\tau_T^2} \leq [\sigma] \\ S &= \frac{\sigma_s}{\sqrt{\sigma_w^2 + 4\tau_T^2}} \geq [S] \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中 S 、 $[S]$ ——复合应力时的实际安全系数、许用安全系数；

σ_w ——弯曲应力；

τ_T ——切应力。

近似取 $\sigma_s/\tau_s=2$ 时，可得安全系数计算式为

$$S = \frac{S_\sigma S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \quad (1-5)$$

对塑性材料，零件绝对尺寸和应力集中的影响不大，计算时可不予考虑，故许用安全系数 $[S]_\sigma$ 、 $[S]_\tau$ 、 $[S]$ 均取为 1.5~2。

(3) 在简单静应力下工作的脆性材料零件，应按不发生断裂的条件进行强度计算。此时取材料的抗拉强度 (σ_b 、 τ_b) 为极限应力。其强度条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &\leq [\sigma], [\sigma] = \frac{\sigma_b}{[S]_\sigma} \\ \tau &\leq [\tau], [\tau] = \frac{\tau_b}{[S]_\tau} \\ S_\sigma &= \frac{\sigma_b}{\sigma} \geq [S]_\sigma, S_\tau = \frac{\tau_b}{\tau} \geq [S]_\tau \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

(4) 在弯、扭复合应力下工作的脆性材料零件，其强度条件由第一强度理论确定。即

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2} [\sigma_w + \sqrt{\sigma_w^2 + 4\tau_T^2}] \leq [\sigma] \\ S &= \frac{2\sigma_b}{\sigma_w + \sqrt{\sigma_w^2 + 4\tau_T^2}} \geq [S] \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

对组织不均匀的脆性材料（如灰铸铁）由于材料内部不均匀引起的应力集中，远远大于零件形状和机械加工等所引起的应力集中，后者对零件强度无显著影响，计算时可不考虑。对组织均匀的低塑性材料（如低温回火的高强度钢），计算时应考虑应力集中的影响。故许用安全系数 $[S]_s$ 、 $[S]_r$ 、 $[S]$ 均取值为 3~9，小值用于无应力集中的情况。

3. 循环应力下的强度 在循环应力作用下，零件的失效将是疲劳破坏。循环应力的极限应力为疲劳极限 σ_N 。即应力比 γ 一定时，应力循环 N 次后，材料不发生疲劳破坏时的最大应力。循环应力时的疲劳强度计算详见第二章。

4. 机械零件的表面接触强度 高副零件工作时，载荷是通过线接触（如渐开线齿廓的接触）或点接触（如滚动轴承的滚动体（球）与内、外圈的接触）来传递的。由于接触部位的弹性变形，实际是由很小的接触面积来传递载荷。两接触体受载运转时，接触部位是周期性接触，所以接触应力是随时间变化的变应力，出现的失效为表面疲劳破坏，称为表面疲劳磨损（疲劳点蚀）。其强度条件为：

两球体接触（图 1-5）

$$\sigma_H = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{6F \left[\frac{\frac{1}{\rho}}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}} \right]^2} \leq [\sigma]_H \quad (1-8)$$

当 $\mu_1 = \mu_2 = 0.3$ 、 $E_1 = E_2 = E$ 时

$$\sigma_H = 0.388 \sqrt[3]{\frac{FE^2}{\rho^2}} \leq [\sigma]_H \quad (1-9)$$

两圆柱体接触（图 1-6）

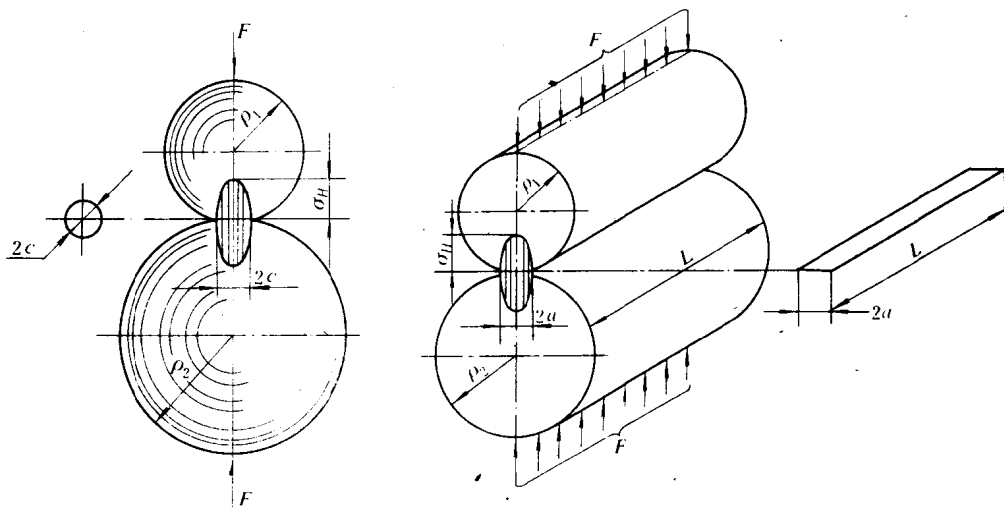


图 1-5 两球体接触

图 1-6 两圆柱体接触

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F}{\pi L} \left[\frac{1}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}} \right]} \leq [\sigma]_H \quad (1-10)$$

当 $\mu_1 = \mu_2 = 0.3$ 、 $E_1 = E_2 = E$ 时

$$\sigma_H = 0.418 \sqrt{\frac{FE}{L\rho}} \leq [\sigma]_H \quad (1-11)$$

式中 ρ ——综合曲率半径 (mm), $\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2}$, 正号用于外接触, 负号用于内接触。平面

和圆柱体或球体相接触时, 平面的曲率半径 $\rho_2 = \infty$;

E ——综合弹性模量 (MPa), $E = 2E_1E_2 / (E_1 + E_2)$, E_1 、 E_2 分别为两接触体材料的弹性模量 (MPa);

L ——接触宽度 (mm);

μ_1 、 μ_2 ——两接触体材料的泊松比;

$[\sigma]_H$ ——许用接触应力 (MPa);

σ_H ——实际接触应力 (MPa)。

提高接触表面的硬度、改善表面加工质量、增大接触表面的综合曲率半径, 均能提高接触疲劳强度。

二、刚度准则

刚度是指机械零件在载荷作用下抵抗弹性变形的能力, 大多数零件在工作时应有足够的刚度, 如机床主轴刚度不足, 将影响被加工零件的精度。刚度有时又是保证强度的重要条件, 如受压长杆的刚度不足, 将影响其受压稳定性。刚度也会影响零件的自激振动频率, 刚度小自激振动频率低, 刚度大自激振动频率高, 所以说刚度是影响振动稳定性的主要因素。

零件在载荷作用下所产生的弹性变形量, 小于或等于机器工作性能所允许的极限变形量 (许用变形量), 即为刚度条件

$$y \leq [y] \quad (1-12)$$

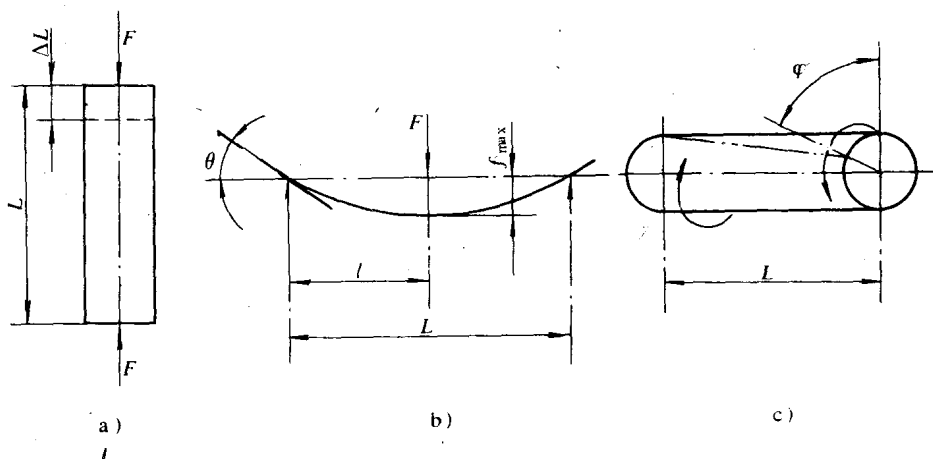


图 1-7 变形形式
a) 拉压 b) 弯曲 c) 扭转

式中 y ——实际变形量, 可由各种求变形量的理论或实验方法确定。它分为拉压变形 ΔL 、挠度 f 、转角 θ 、扭角 φ (图 1-7)。

$[y]$ ——许用变形量, 根据不同的工况由理论或经验确定其合理的数值。

由刚度计算所得零件剖面尺寸, 一般要比由强度计算的大, 所以满足刚度的零件往往也能同时满足强度要求。对于尺寸较大的零件, 当满足刚度要求时, 强度可能不够。

零件材料的弹性模量愈大, 零件的刚度愈大, 采用弹性模量大的材料制造零件, 可提高零件的刚度。应当注意的是, 碳钢与合金钢的弹性模量相差不大, 在尺寸相同的条件下, 为提高零件的刚度而采用合金钢的意义不大。

减小力臂和支点距离、增加辅助支承、选择合理的剖面形状 (如中空剖面)、采用加强肋等都能提高零件的刚度。

三、振动稳定性准则

零件发生周期性弹性变形的现象称为振动。当作用在零件上的周期性外力的变化频率, 与零件本身的自激振动频率相等或接近时便产生共振。共振时振幅急剧加大, 致使零件破坏、机器工作失常。这种现象称之为“失去振动稳定性”。

引起零件振动的周期性外力有: 往复运动零件产生的惯性力、摆动零件产生的惯性力矩、转动零件的不平衡质量引起的惯性离心力, 还有周期性作用的外力等。

振动稳定性的计算准则是: 在设计时应使机器中受激振作用的各个零件的自激振动频率与外力作用的频率 (激振源的频率) 不相等。通常应保证如下条件

$$0.85f > f_F > 1.15f \quad (1-13)$$

式中 f ——零件的自激振动频率;

f_F ——外力作用的频率。

因外力作用的频率 f_F , 取决于工作转速和往复行程数, 通常 f_F 为不变的数。因此, 当式 (1-13) 的条件不能满足时, 只能用改变零件和系统的刚性、改变支承位置、增加或减少辅助支承等方法, 来改变零件的自激振动频率 f , 以避免发生共振。

采用对称结构、减少悬臂长度、对转动零件进行平衡、利用阻尼消耗引起振动的能量、增加隔振元件防止振动传播、用阻尼器减弱冲击等, 均能改善零件的振动稳定性。

四、可靠性准则

经过正确设计的零件, 因其材料强度、加工精度、外载荷等均存在离散性, 有可能出现早期的意外失效。这样的偶然情况一旦发生, 便将造成很大的损失。在设计时应把这种偶然情况的概率限制在一定限度之内, 即对零件应提出可靠性要求。

一批零件 (其件数为 N) 在规定使用条件和规定时间 t 内进行试验, 有 N_f 个零件偶然失效, 其余 N_i 个零件仍能继续工作, 则此种零件的可靠度 R_t 为

$$R_t = \frac{N_i}{N} = \frac{N - N_f}{N} = 1 - \frac{N_f}{N} \quad (1-14)$$

不可靠度 (即失效概率) 为

$$F_t = \frac{N_f}{N} = 1 - R_t \quad (1-15)$$

可靠度与不可靠度之和等于 1, 即

$$R_t + F_t = 1 \quad (1-16)$$

随着试验时间的加长, 能正常工作的件数 N_t 也在减小, 可靠度也在改变。即, 零件可靠度本身是时间的函数。假如时间 $t \rightarrow t + dt$ 间隔中, 零件又有 dN_t 件发生破坏, 则在 dt 时间间隔内的失效率 $f(t)$ 为

$$f(t) = \lambda = -\frac{\frac{dN_t}{dt}}{N}$$

将其积分得

$$-\int_0^t \lambda dt = \int_{N_0}^{N_t} \frac{dN_t}{N} = \ln \frac{N_t}{N} = \ln R_t$$

则

$$R_t = e^{-\int_0^t \lambda dt} \quad (1-17)$$

零件(或部件)的失效率 $\lambda = f(t)$ 与时间 t 的关系, 如图 1-8 所示。该图之曲线习惯称为浴盆曲线, 曲线分三段。即 I 段表示早期失效阶段, 在此段失效率由很高急剧下降到某一稳定值。II 段表示正常使用阶段, 在此阶段所发生的失效, 多是由偶然因素造成的, 因其发生的随机性, 失效率为常数, 此阶段愈长, 零件的有效寿命愈长。III 段表示损坏阶段, 零件长期工作将发生磨损、疲劳裂纹扩展等, 致使失效率急剧增加。良好的维护保养、及时更换即将破坏的零件, 可延缓机器进入这一阶段的时间, 延长有效寿命。

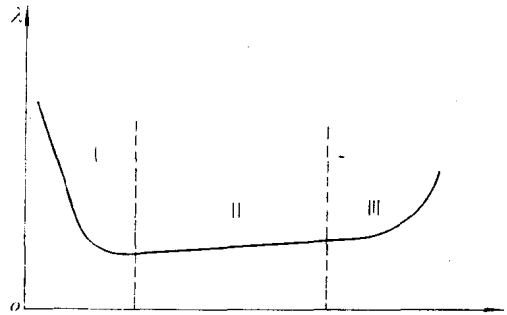


图 1-8 失效率曲线

可用两次失效间的平均工作时间 MTBF (Mean Time Between Failures) 表征失效率。即

$$m = \frac{1}{\lambda} \quad (1-18)$$

为保证零件具有所需的可靠度 R , 应对零件进行可靠性设计 (参阅有关资料)。

提高可靠性的方法有:

- 1) 力求零件数量少、结构简单、传动链短、联接可靠。
- 2) 选用可靠度高的标准件。
- 3) 采用便于维护和操作的结构。
- 4) 规定合理的维修时间。
- 5) 增加必要的备用系统、设立监测系统。
- 6) 增加过载保护装置和自动停机装置。

五、温度对零件工作能力的影响