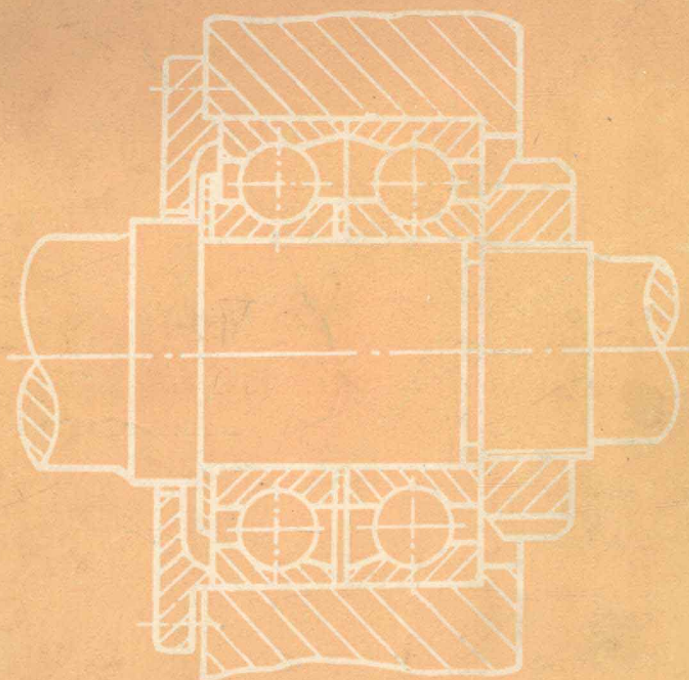


高等学校教材

机械设计学习指导 与习题集

主编 王瑾玉 杨昂岳 吕秀屏



湖南科学技术出版社

高等学校教材

机械设计学习指导 与习题集

主编 王瑾玉 杨昂岳 吕秀屏

江苏工业学院图书馆
藏书章

湖南科学技术出版社

湘新登字 004 号

高等学校教材

机械设计学习指导与习题集

王瑾玉 杨昂岳 吕秀屏主编

责任编辑：何信媛

*

湖南科学技术出版社出版发行

(长沙市展览馆路3号)

湖南省新华印刷二厂印刷

(印装质量问题请直接与本厂联系)

*

1993年6月第1版第1次印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：12.25 字数：299,000

印数：1—6,100

ISBN 7-5357-1324-6
TH·36 定价：6.90元

会员委编教材序

为了增强和提高学生进行机电产品设计工作的能力,适应课程从“机械零件”改名为“机械设计”,从“机械原理与机械零件”改名为“机械设计基础”,以及贯彻执行课程教学基本要求的需要,促进教学改革的深入发展,逐步编写出不同风格、不同特点的教学用书,中南地区机械设计教学研究会根据国家教委机械设计课程教学指导小组制定的“机械设计”和“机械设计基础”课程教学基本要求及补充说明,组织编写了“机械设计”系列教材。这套系列教材共五本书,即:《机械设计基础》、《机械设计》、《机械设计课程设计》、《机械设计学习指导与习题集》、《机械结构设计五百例》。

这套系列教材的主要特点为:

1. 总结了一些院校多年来贯彻执行课程教学基本要求的教学改革经验和教学方法,其内容根据内部的有机联系划分篇章,合理协调与精选基本内容,突出各自重点,尽量避免重复,文字通俗易懂,便于教师教学和学生学。

2. 为了适应科学技术和生产发展的需要,特别是我国机械产品正面临更新换代,要求上质量、上水平、上品种,提高经济效益的局面,首先遇到的是设计现代化问题。因此,系列教材中既保留了传统的教学内容,又对教材内容的推陈出新作了一些尝试,适量增加了反映现代机械设计方法和理论的新内容。

3. 为有利于培养学生分析问题和解决问题的能力,加强了整体机械系统的分析与设计,加强了机械零部件结构设计能力的训练。

4. 教材中凡涉及到标准之处,一律采用最新国家标准。

这套系列教材,适用于作为高等学校工科相应专业的教材,也可作为中等专业学校相应专业的教学参考书,还可供有关教师与工程技术人员参考。其中的《机械结构设计五百例》更适于广大机械工程技术人员阅读。

这套系列教材是在“机械设计”系列教材编辑委员会的组织下编写的。期望这套教材对提高本课程的教学质量能起到更大的作用。

由于编写这套教材的工作量大,时间仓促,又受编者水平和经验所限,教材中不妥之处在所难免,殷切期望广大读者提出批评和改进意见。

中南地区机械设计教学研究会
“机械设计”系列教材编委会

1991年6月

“机械设计”系列教材编辑委员会

主任委员 彭文生

副主任委员 黄华梁 黎桂英 叶元烈

唐齐飞 胡长禧

委 员 王均荣 王瑾玉 曲金江 周迪勋

顾问 余俊 熊文修

会审和审校机械设计系列教材

会审和审校机械设计系列教材

1991年

前 言

本书是根据国家教委 1987 年批准的高等工业学校“机械设计(原机械零件)课程教学基本要求”,由中南地区机械设计教学研究会组织中南地区十几所高等院校长期从事机械设计教学的教师编写的系列教材之一,它是与另一本系列教材“机械设计”配套使用的。

本书分两大部分,第一部分内容是指出“机械设计”教材中各章的主要内容(并用框图表示)、基本要求、重点与难点分析及学习方法指导,为了启发学生积极思维,深入理解机械设计的基本概念与基本理论,我们编写了有一定难度和带启发性的思考题 356 个。为了加深对基本公式的应用和基本方法及基本技能的训练,在编写的 170 个习题中,不但有一般的设计计算题,而且有设计方案的对比与选择、结构设计和改错,同时还有与教材中例题不同类型的示范题解,以开拓学生的解题思路,每章有 1~2 题,计 24 题。在思考题与习题中打“★”者是为扩大知识面与难度较大的题,供教师在“因材施教”时选用。本书的第二部分是设计作业题选,由于教学基本要求规定每个学生至少要完成 1~2 个设计作业,根据目前多数院校经常选做的设计作业题编选了 7 个题,每个题都有 5~6 组数据,以利于教师根据学生的学习程度适当分组。最后还附有许多院校经常使用的螺旋起重器设计中第 4 组数据的示范题解,供师生参考。

本书作为高等工科院校机械类各专业“机械设计”课程的配套教材之一,也可供职工大学、业余大学、电视大学、函授大学师生以及工程技术人员学习参考。

参加本书编写工作的有:广西大学吕端明(第一章)、禚保明(第二章)、陈树保(第三章);广东工学院罗道元、虞秀敏(第四、五、六章);广东机械学院吕秀屏(第七章);武汉工业大学林财和(第八章)、胡远敬(第十八章);武汉工学院侯玉英(第九章);武汉水运工程学院倪笃明(第十章);武汉纺织工学院杨智(第十一章);武汉钢铁学院王瑾玉(第十二章、第二部分设计作业);湖北工学院周世棠(第十三章);国防科技大学杨昂岳(第十四、十五、十六、十七章);中国地质大学孙立鹏(第十九、二十章)。由王瑾玉、杨昂岳、吕秀屏担任主编。

本书插图由武汉钢铁学院蔡恒绘制。

本书承华中理工大学余俊教授细心审阅,提出了很多宝贵意见;另外,系列教材“机械设计”的各位编者分别对有关章节提出过不少有益的建议与意见。编者对此一并表示衷心感谢。

由于编者经验不足,水平有限,殷切希望广大读者对书中的错误和欠妥之处提出批评与宝贵意见。

编 者

1992 年 9 月

目 录

前 言

第一部分 学习指导与习题

一	第一章	机械设计概述	(1)
二	第二章	机械零、部件设计中的强度问题	(4)
三	第三章	机械零、部件的摩擦、磨损和润滑	(18)
四	第四章	焊接与胶接	(25)
五	第五章	键、花键和销联接	(30)
六	第六章	过盈配合联接	(36)
七	第七章	螺纹联接	(40)
八	第八章	螺旋传动	(54)
九	第九章	摩擦传动	(60)
十	第十章	带传动	(68)
十一	第十一章	链传动	(75)
十二	第十二章	齿轮传动	(82)
十三	第十三章	蜗杆传动	(112)
十四	第十四章	轴	(122)
十五	第十五章	滑动轴承	(133)
十六	第十六章	滚动轴承	(145)
十七	第十七章	联轴器、离合器和制动器	(159)
十八	第十八章	弹簧	(165)
十九	第十九章	机械零、部件结构设计基础	(171)
二十	第二十章	机械系统设计综述	(176)
	第二部	设计作业	(178)
	参考文献		(187)

学习指导与习题

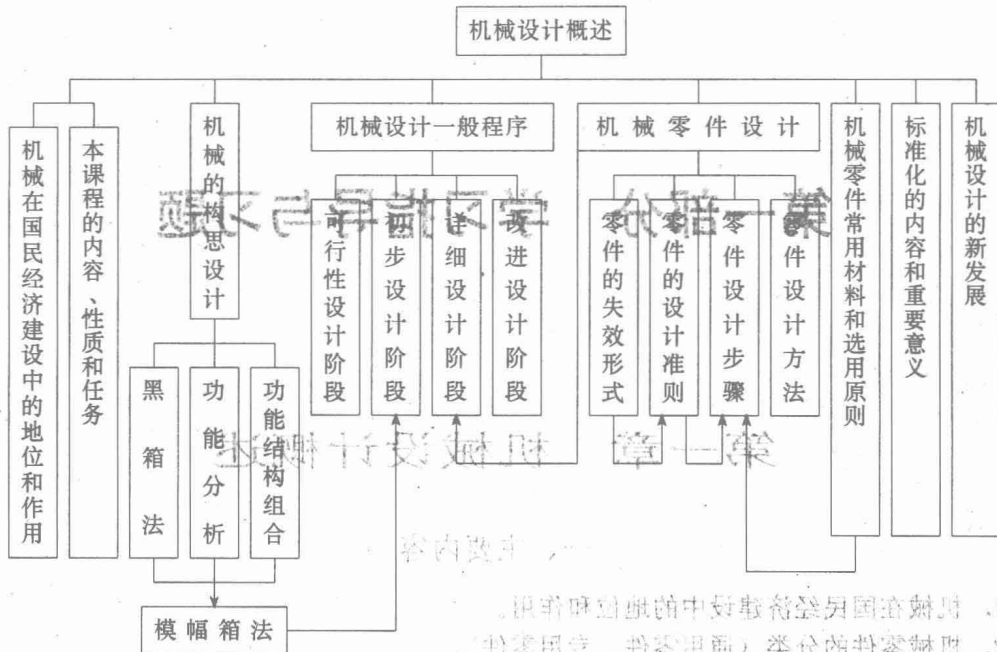
机械设计概述

一、主要内容

- 本章主要内容框图见下页。豫丰、荣财、新利田运营具(8)、荣财裕盛木处关育南西武藤的十处财具(2)、泰顺本基财新姓健更裕茂、为衣健美南裕零财田堡典新章(4)、代

二、基本要求

10. 了解机械设计的新发展。



11. 重点内容：〈1〉本课程的性质和任务。〈2〉机械设计的一般程序和各阶段的主要任务。〈3〉功能分析的方法和“模幅箱法”。〈4〉零件的失效形式和设计准则。〈5〉机械零件设计的一般步骤和方法。〈6〉选择材料的原则。

三、要点分析

1. 本课程是一门培养学生具有机械设计能力的技术基础课，其主要任务是培养学生：〈1〉掌握通用机械零件、部件的工作原理、特点、选用、常规设计原理与方法和机械设计的一般规律，具有设计机械传动装置和简单机械的能力。〈2〉树立正确的设计思想，了解国家当前的有关技术经济政策。〈3〉具有运用标准、规范、手册、图册和查阅有关技术资料的能力。〈4〉掌握典型机械零件的实验方法、获得实验技能和基本训练。〈5〉对机械设计的新发展有所了解。

2. 掌握功能分析的方法，就可把机械系统的总功能分解到功能元，即找到能实施功能单元的技术物理效应或技术装置。掌握“模幅箱法”就可以把机械系统的各个分功能和功能元作为“列”，而把它们的各种解答作为“行”，组成“模幅箱”，就可从中组合出很多不同的设计方案，设计者就可用技术经济评价的方法从中筛选出最佳的设计方案。

3. 本课程主要是研究机械零件设计的问题，所以对零件的失效形式、设计准则、设计步骤、设计方法和选择材料的原则等要先有一个全面性的概略的了解，以后各章在讲到各类零件的设计时，再作具体的研究：根据零件的受力和具体的工作情况，分析其可能出现的失效形式；针对其主要失效形式，选定设计准则；根据选择材料的原则，合理地选定零件的材料，确定许用应力；再按零件的设计步骤，设计出零件的基本尺寸；最后进行结构设计，确定零件的形状和尺寸。这里需要提醒注意的是：在进行机械零件设计时，设计计算虽然重要，但它只是为结构设计提供一个基础，而零件的最后尺寸和形状，通常都是由结构设计取定的，计算所得的数字，往往会被结构设计所修改。因此，对结构设计必须要给予足够的重视。

四、思考题

- 1—1 本课程的性质与任务是什么?
- 1—2 什么是通用零件?什么是专用零件?举例说明。
- 1—3 对机械系统进行功能分析的目的是什么?试对起重机进行功能分析。
- 1—4 “模幅箱法”有什么用途?试作出起重机的“模幅箱”,并计算出其可能组合成的设计方案数。
- 1—5 机械设计的一般程序是什么?其各阶段大致需要完成哪些任务?
- 1—6 试述机械零件设计的一般步骤。
- 1—7 常用的机械零件设计方法有哪些?
- 1—8 什么叫机械零件的失效?机械零件的主要失效形式有哪些?试结合日常接触的机械举出其中几种零件的失效形式并分析其原因。
- 1—9 机械零件设计计算准则与失效形式有什么关系?有哪些常用的计算准则?它们是针对什么失效形式建立的?
- 1—10 常用的机械零件材料有哪些?其中哪些是塑性材料?哪些是脆性材料?选择零件材料时需考虑哪些具体要求?
- 1—11 什么是标准化、系列化和通用化?在机械设计中采用“三化”具有什么重要意义?

第二章 机械零、部件设计中的强度问题

一、主要内容

1. 阐述机械设计中强度计算的有关概念：(1) 机械零、部件的工作能力。(2) 静载荷，变载荷；静应力，变应力。(3) 工作载荷，名义载荷，计算载荷。(4) 体积应力，表面应力(表面挤压应力、表面接触应力)。(5) 稳定循环变应力，非稳定循环变应力，随机变应力。(6) 极限应力，计算应力，许用应力。(7) 实际安全系数，许用安全系数。

2. 根据以许用应力或许用安全系数作为判断零件危险截面强度安全的准则，即

$$\text{工作应力} \leq \text{许用应力} = \frac{\text{材料极限应力}}{\text{许用安全系数}} \quad \text{或}$$

$$\text{安全系数} = \frac{\text{材料极限应力}}{\text{工作应力}} \geq \text{许用安全系数}$$

来阐述：在静应力和变应力作用下材料极限应力的确定方法；在静应力单向应力状态、复合应力状态下零件的强度计算方法；在变应力单向应力状态、复合应力状态下零件的强度计算方法。其中重点阐述稳定和不稳定对称循环与非对称循环变应力下的强度计算方法。

3. 阐述变应力作用下零件疲劳失效形式的机理和分析影响零件疲劳强度的因素。

4. 扼要介绍随机变应力下的强度计算、低频疲劳的寿命计算方法和断裂力学在机械零件设计中的应用。

本章主要内容框图见下页。

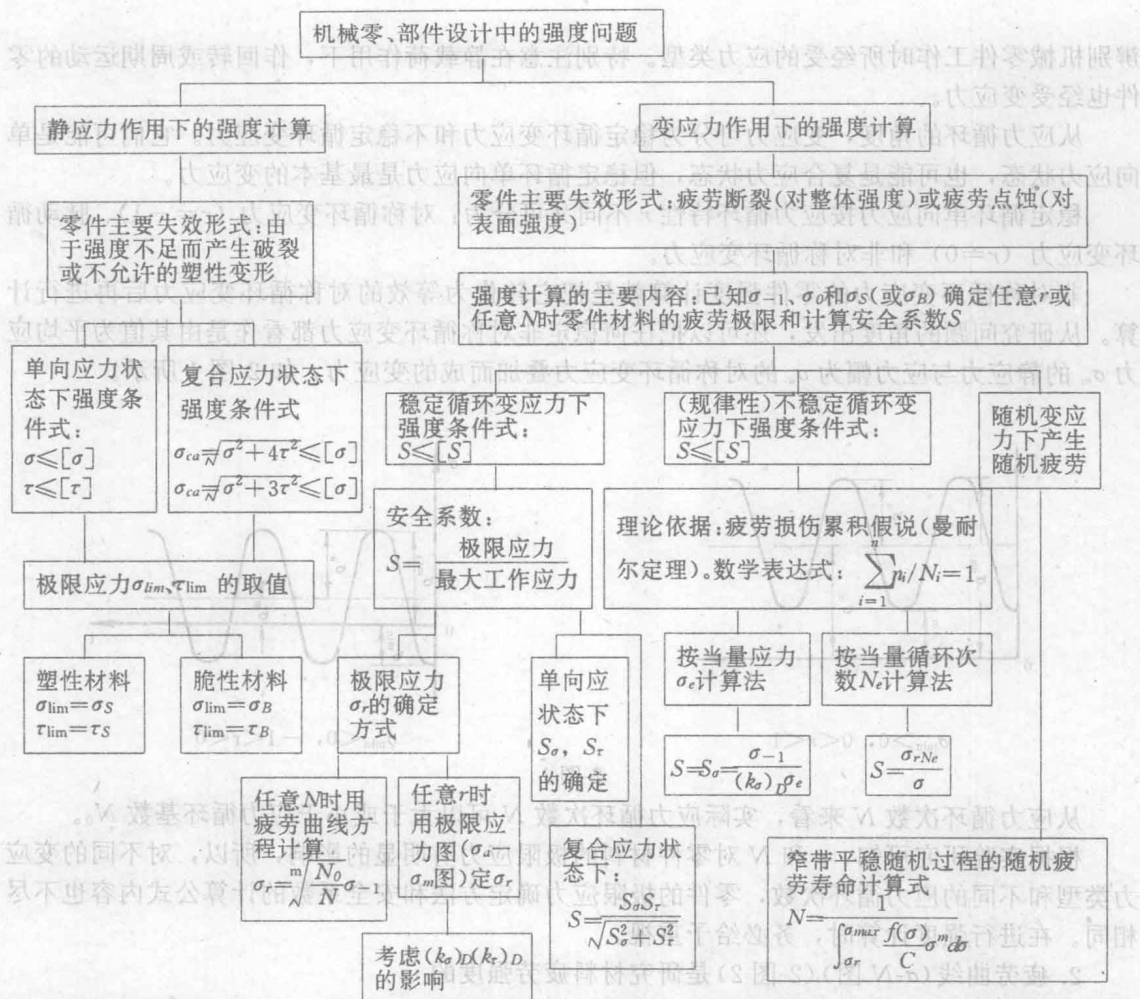
二、基本要求

本章内容是机械零件强度设计计算的基础。确切地掌握本章的概念、理论与强度计算方法，有助于学习掌握后续各章所述的零件强度设计计算的内容。为此，对学习本章提出如下要求：

1. 确切地掌握本章所述概念，能正确区分机械零件承受的应力类型；牢固地记住判断零件强度的两个准则的强度条件式。

2. 掌握变应力的类型及变应力的 $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 、 σ_a 、 σ_m 、 r 五个参数的意义。特别要注意在对称循环变应力时， $\sigma_a = \sigma_{\max}$ ， $\sigma_m = 0$ ；在脉动循环变应力时， $\sigma_a = \sigma_m = \frac{1}{2}\sigma_{\max}$ 的关系应用于强度计算式中的情况。

3. 疲劳强度设计计算的理论基础是疲劳曲线方程 ($\sigma^m N = \text{常数}$)、疲劳极限应力图 ($\sigma_a - \sigma_m$ 图) 和疲劳损伤累积假说 (曼耐尔定理)，一定要熟练掌握。例如，要会根据疲劳曲线方程 $\sigma_{-1}^m N_0 = \sigma_{rN}^m N = \text{常数}$ 的关系，充分利用已知的 σ_{-1} 和 N_0 去计算任意循环次数 N 时的疲劳极限



σ_{rN} ; 根据任意循环特征 r , 用极限应力线图去确定零件和材料的疲劳极限 σ_r ; 根据曼耐尔定理去理解不稳定循环变应力下强度计算公式的建立等等。

4. 掌握受稳定循环变应力下的机械零件疲劳强度计算方法; 了解规律性不稳定循环变应力下疲劳强度计算采用的当量应力计算法和当量循环次数计算法。

5. 本章学习重点是掌握机械零件在稳定循环变应力下, 根据任意循环次数 N 和任意循环特征 r 确定极限应力的方法; 各种应力类型的单向应力状态和复合应力状态下的安全系数计算方法。这里要特别强调的是, 在计算安全系数时所用的极限应力与工作应力的变化规律必须相一致, 以及正确应用寿命系数 K_N 。

本章学习的难点是正确区分变应力的类型; 理解和掌握将非稳定循环变应力转化为等效的稳定循环变应力、非对称循环变应力转化为等效的对称循环变应力、复合应力状态转化为单向应力状态的原则和方法。

三、要点分析

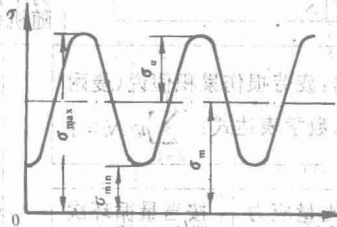
1. 由于变应力作用下机械零件的失效形式与静应力作用下的失效形式完全不同, 在强度计算中, 极限应力的确定方法也有明显的区别。因此, 要使强度计算正确, 首要的是能正确

辨别机械零件工作时所经受的应力类型。特别注意在静载荷作用下，作回转或周期运动的零件也经受变应力。

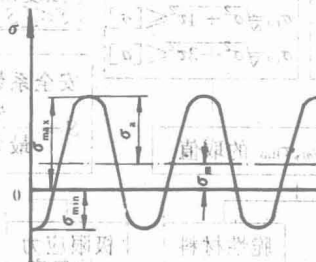
从应力循环的角度，变应力可分为稳定循环变应力和不稳定循环变应力。它们可能是单向应力状态，也可能是复合应力状态，但稳定循环单向应力是最基本的变应力。

稳定循环单向应力按应力循环特性 r 不同又可分为：对称循环变应力 ($r=-1$)、脉动循环变应力 ($r=0$) 和非对称循环变应力。

非对称循环变应力的零件强度计算就是把它转化为等效的对称循环变应力后再进行计算。从研究问题的角度出发，还可以把任何稳定非对称循环变应力都看作是由其值为平均应力 σ_m 的静应力与应力幅为 σ_a 的对称循环变应力叠加而成的变应力，如 2-图 1 所示。



$$\sigma_{\min} > 0, 0 < r < 1$$



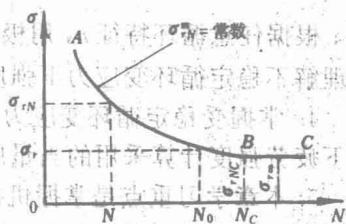
$$\sigma_{\min} < 0, -1 < r < 0$$

2-图 1

从应力循环次数 N 来看，实际应力循环次数 N 可以大于或小于应力循环基数 N_0 。

根据实验研究可知， r 和 N 对零件材料的极限应力有明显的影响，所以，对不同的变应力类型和不同的应力循环次数，零件的极限应力确定方法和安全系数的计算公式内容也不尽相同。在进行强度计算时，务必给予重视。

2. 疲劳曲线 ($\sigma-N$ 图) (2-图 2) 是研究材料疲劳强度的基本曲线。 N_0 称为应力循环基数。 N_0 因材料不同而异。通常取低碳钢 $N_0=10^6 \sim 10^7$ ，合金钢 $N_0=10^8$ (或 5×10^8)。在 $N < 10^3$ (或 10^4)， σ_{rN} 接近或超过屈服极限 σ_s 时，疲劳曲线就不再适用，此时的强度设计应按静强度处理。在 $10^3 < N < N_0$ 的曲线称为有限寿命区，而 $N > N_0$ 的曲线称为无限寿命区。在有限寿命区内，随着 N 的减少，疲劳极限 σ_{rN} 增大。在无限寿命区， σ_{rN} 为一常数而与 N 的变化 (增大或减小) 无关。在 $N=N_0$ 时，若 $-1 < r < 0$ 或 $0 < r < 1$ ，则相应的



2-图 2

的疲劳极限 $\sigma_{rN} = \sigma_s = \frac{\sigma_s (\sigma_a + \sigma_m)}{\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$ ；若 $r = -1$ ，则 $\sigma_{rN} = \sigma_s = \sigma_{-1}$ 。 σ_{-1} 是一个应用很广的数值。由上述可知，疲劳曲线方程 $\sigma_{rN}^m N = \text{常数}$ 只适用于 $10^3 < N \leq N_0$ (实际为 N_c) 的范围内。

顺便指出，掌握疲劳曲线的概念，其意义绝不只局限应用于本章的强度计算，它对学习“机械设计”课程时，理解受变应力作用下零件的强度计算很有帮助。例如，学习齿轮传动轮齿强度计算时，有助于理解寿命系数的物理意义；学习滚动轴承疲劳强度计算时，运用疲劳曲线概念，建立 $P \cdot L_{10} = \text{常数} = C \cdot 1$ 的关系，易于理解导出寿命计算式 $L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{1}{m}}$ ，等等。

3. 必须明确, 材料的疲劳曲线是在同一 r 值, 不同的 N 值下做实验得到的, 而材料的极限应力线图 (σ_a - σ_m 图) 是在同一 N 值 (通常 $N=N_0$), 不同的 r 值试验得到的。极限应力图曲线表征非对称循环疲劳极限应力。应用这两个“图”来确定极限应力时, 要“对号入座”。即当求受 $-1 < r < 0$ 或 $0 < r < +1$ 范围循环特征值应力的零件的极限应力时, 要应用极限应力线图 (σ_a - σ_m 图); 当求受 $N_0 > N > 10^3$ 范围应力的零件材料的极限应力 σ_{rN} 时, 要应用疲劳曲线 (σ - N 图), 运用疲劳曲线方程建立 $\sigma_{rN}^m N = \sigma_r^m N_0 = \text{常数}$ 的关系, 求得:

$$(2-59) \quad \sigma_{rN} = \sqrt{\frac{N_0}{N}} \cdot \sigma_r = K_N \sigma_r$$

式中: K_N ——寿命系数;

σ_r ——为 $N=N_0$, 循环特征为 r 时的极限应力。由极限应力图求得:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{-1}(\sigma_a + \sigma_m)}{\sigma_a + \psi_0 \sigma_m}$$

当 $r=-1$ 时, $\sigma_m=0$, $\sigma_r=\sigma_{-1}$, 这就是对称循环极限应力。

4. 关于“应力转化”的讨论。先观察下面几个安全系数计算公式:

(1) 稳定对称循环变应力下疲劳极限应力及安全系数计算式:

$$(2-63) \quad \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_{-1}}{(k_\sigma)_D} \\ S_\sigma &= \frac{\sigma_{-1}}{(k_\sigma)_D \sigma_a} = \frac{\sigma_{-1}}{(k_\sigma)_D \sigma_{\max}} \end{aligned} \quad (2-63)^\text{①}$$

(2) 单向稳定非对称循环变应力下的疲劳极限应力和安全系数计算式:

$$(2-44) \quad \sigma_r = \frac{\sigma_{-1}(\sigma_a + \sigma_m)}{(k_\sigma)_D \sigma_a + \psi_0 \sigma_m}$$

$$(2-47) \quad S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(k_\sigma)_D \sigma_a + \psi_0 \sigma_m}$$

(3) 复合稳定循环变应力下安全系数计算式:

$$(2-55) \quad S = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_r} = \frac{S_\sigma S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}}$$

式中: $\sigma_r = \sqrt{[(k_\sigma)_D \sigma_a]^2 + 4[(k_\tau)_D \tau_a]^2}^{\frac{1}{2}}$

$$(2-60) \quad \sigma_r = \sqrt{[(k_\sigma)_D \sigma_a + \psi_0 \sigma_m]^2 + 4[(k_\tau)_D \tau_a + \psi_\tau \tau_m]^2}^{\frac{1}{2}}$$

(b) 复合应力为对称循环应力时:

$$(2-61) \quad S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(k_\sigma)_D \sigma_a}, \quad S_\tau = \frac{\tau_{-1}}{(k_\tau)_D \tau_a}$$

(c) 复合应力为非对称循环应力时:

$$(2-62) \quad S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(k_\sigma)_D \sigma_a + \psi_0 \sigma_m}, \quad S_\tau = \frac{\tau_{-1}}{(k_\tau)_D \tau_a + \psi_\tau \tau_m}$$

(4) 不稳定对称循环变应力下安全系数计算式:

$$(2-61) \quad S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(k_\sigma)_D \sigma_r} = \frac{\sigma_{-1}}{(k_\sigma)_D \left\{ \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^n \sigma_i^m n_i \right\}^{\frac{1}{m}}}$$

① (2-63) 为配套教材《机械设计》书中公式编号。以下同。

式中: σ_{ai} ——不稳定对称循环变应力, $\sigma_i = \sigma_{ai}$ 。

σ_{ai} ——应力幅。

σ_e ——对应于 N_0 的等效稳定对称循环变应力。

$$\sigma_e = \left\{ \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^n \sigma_{ai}^m n_i \right\}^{\frac{1}{m}}$$

(5) 不稳定非对称循环变应力下安全系数计算式:

$$S_s = \frac{\sigma_{-1}}{(k_s)_D \sigma_e} = \frac{\sigma_{-1}}{\left\{ \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^n [(k_s)_D \sigma_{ai} + \psi_s \sigma_{mi}]^m n_i \right\}^{\frac{1}{m}}} \quad (2-65)$$

对照 (2-65) 式, 若令:

$$(k_s)_D \sigma_i = (k_s)_D \sigma_{ai} + \psi_s \sigma_{mi}$$

$$\text{则: } (k_s)_D \sigma_e = \sqrt[m]{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^n [(k_s)_D \sigma_i]^m n_i}$$

那么, 可以认为 $(k_s)_D \sigma_e$ 就是由具有应力幅 σ_{ai} 和平均应力 σ_{mi} 的不稳定非对称循环变应力转化得到的等效不稳定对称循环变应力 (或称等效不稳定对称循环应力幅); $(k_s)_D \sigma_i$ 就是由等效不稳定对称循环变应力转化得到的等效稳定对称循环变应力。

以上各式中的 ψ_s 称为等效系数, 是将平均应力折合为应力幅的系数。

$$\psi_s = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \quad (2-28)$$

比较上面的安全系数计算式, 可以得出这样的结论: 所有各种应力类型下的安全系数计算式, 从形式上看都相似于稳定对称循环变应力下的安全系数计算式。因此, 可以认为, 各种非对称循环变应力下的强度计算问题, 都要转化为等效的稳定对称循环变应力下的强度计算。由此提出了“应力转化”问题。例如, 从式 (2-47) 中, 可以把 $[(k_s)_D \sigma_a + \psi_s \sigma_m]$ 看作是把应力幅为 σ_a , 平均应力为 σ_m 的非对称循环变应力转化为一个等效的对称循环变应力的应力幅的计算式, 其值等于对称循环变应力的最大值。再如从式 (2-65) 中, 可以看作是经过将具有应力幅为 σ_{ai} , 平均应力为 σ_{mi} 的不稳定非对称循环变应力转化为等效的不稳定对称循环变应力幅, 其值等于等效不稳定对称循环变应力的最大值 $(k_s)_D \sigma_i$; 然后又将 $(k_s)_D \sigma_i$ 转化为一个等效的稳定对称循环变应力 $(k_s)_D \sigma_e$; 最后获得了与按稳定对称循环变应力下安全系数计算式 $\left[S_s = \frac{\sigma_{-1}}{(k_s)_D \sigma_{\max}} \right]$ 相似的不稳定非对称循环变应力下安全系数计算式: $S_s = \frac{\sigma_{-1}}{(k_s)_D \sigma_e}$ 。如果将有关公式代入此式中并作进一步运算和整理后则得到公式 (2-65)。

综合上述分析, 可得出本章所涉及的“应力转化”的分类和步骤:

(a) 复合稳定非对称循环变应力转化为等效的稳定对称循环变应力 σ_e 的步骤:

① 将具有应力幅为 σ_a 、 τ_a 和平均应力 σ_m 、 τ_m 的非对称循环变应力转化为相应等效的对称循环变应力 σ_e 、 τ_e 。它们的表达式分别为:

$$(k_s)_D \sigma_e = (k_s)_D \sigma_a + \psi_s \sigma_m = (k_s)_D \sigma_{ea}$$

$$(k_r)_D \tau_e = (k_r)_D \tau_a + \psi_r \tau_m = (k_r)_D \tau_{ea}$$

式中: $(k_s)_D \sigma_{ea}$ 、 $(k_r)_D \tau_{ea}$ 为等效应力幅。

② 按第三强度理论, 将具有应力幅为 $(k_s)_D \sigma_{ea}$ 、 $(k_r)_D \tau_{ea}$ 的复合应力状态转化为单向应力状态时的等效应力幅 σ'_e , 其表达式为:

$$\begin{aligned}\sigma'_e &= \sqrt{[(k_\sigma)_D \sigma_{ei}]^2 + 4[(k_\tau)_D \tau_{ei}]^2} \\ &= \sqrt{[(k_\sigma)_D \sigma_e]^2 + 4[(k_\tau)_D \tau_e]^2} \\ &= \text{最大工作应力}.\end{aligned}$$

讨论:

i) “应力转化”的内容包括非对称循环变应力转化为等效的对称循环变应力;复合应力状态转化为单向应力状态;不稳定循环应力转化为稳定循环应力。

ii) 对于单向稳定非对称循环变应力,只需将非对称循环应力转化为对称循环变应力 $(k_\sigma)_D \sigma_e$ 或 $(k_\tau)_D \tau_e$ 。

iii) 不管是单向还是复合应力状态,由“转化”得到等效单向稳定对称循环变应力后,可按 $\text{安全系数} = \frac{\text{极限应力}}{\text{最大工作应力}}$ 列式求出安全系数。这里要特别注意,所用的极限应力的变化规律必须与最大工作应力的变化规律相一致(这也是为什么上述各安全系数公式中的分子均为对称循环极限应力 σ_{-1} 的答案)。

(b) 不稳定非对称循环变应力转化为等效稳定对称循环变应力 $(k_\sigma)_D \sigma_e$ 的步骤:

① 将具有应力幅 σ_{ai} 、平均应力 σ_{mi} 的不稳定非对称循环变应力转化为等效的不稳定对称循环变应力 $(k_\sigma)_D \sigma_i$ 。其表达式为:

$$(k_\sigma)_D \sigma_i = (k_\sigma)_D \sigma_{ai} + \psi_\sigma \sigma_{mi}.$$

② 将等效不稳定对称循环变应力 $(k_\sigma)_D \sigma_i$ 转化为等效稳定对称循环变应力 $(k_\sigma)_D \sigma_e$ 。其表达式为:

$$(k_\sigma)_D \sigma_e = \left\{ \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^n [(k_\sigma)_D \sigma_i]^{m_i} \right\}^{\frac{1}{m}} = \text{最大工作应力}.$$

讨论:

i) 对于不稳定对称循环变应力的“转化”,只需执行步骤②。

ii) 对于不稳定非对称循环变应力的“转化”,要按顺序执行步骤①、②。

iii) “转化”得到 $(k_\sigma)_D \sigma_e$ 后,按 $\text{安全系数} = \frac{\text{极限应力}}{\text{最大工作应力}}$ 列式求出安全系数。

5. 关于应力集中对疲劳强度的影响:

零件上的最大变应力位于有应力集中处的局部区域,它在疲劳破坏中起决定作用。离开应力集中区,应力便迅速降低。因此,疲劳强度计算是以应力集中处的最大应力为准的,所算出的 S_0 、 S_1 也是应力集中处的安全系数。根据零件的结构,可能在危险截面上有多个应力集中源。这时,在计算综合影响系数 $(k_\sigma)_D = \frac{k_\sigma}{\epsilon_s \beta}$ 或 $(k_\tau)_D = \frac{k_\tau}{\epsilon_r \beta}$ 时,应取诸应力集中系数中数值最大的 k_σ 和 k_τ 代入相应的式中计算,而不是多个应力集中系数的和或积。

6. 关于规律性不稳定变应力下零件的疲劳强度计算:

这类问题计算时,要根据疲劳损伤累积假说理论,将不稳定对称循环变应力转化为等效的稳定对称循环变应力来计算安全系数。

当零件受有不稳定变应力 σ_1 、 σ_2 、 $\sigma_3 \cdots \sigma_n$ 时,因其中小于材料疲劳极限的应力对疲劳寿命无影响,计算时不应计入。所谓小于疲劳极限的应力,是指在考虑了应力集中 K 、 (K_r) 、尺寸系数 ϵ_s 、 (ϵ_r) 和表面状态系数 β 的影响以及考虑了安全系数后仍小于材料的疲劳极限的应力。

另外,当采用当量循环次数 N_e 算法来计算强度时,计算基准应力 σ 的选取会直接影响

$N_r \left[= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_i}{\sigma} \right)^m n_i \right]$ 值。由此导致影响寿命系数 $K_N \left[= \sqrt[m]{\frac{N_0}{N_r}} \right]$ 值和疲劳极限 $\sigma_{rN_r} (= K_N \cdot \sigma_r)$

值,从而使强度计算 $S_\sigma \left(= \frac{\sigma_{rN_r}}{\sigma} \right)$ 的结果差异甚大。一般情况下, σ 是选取 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ 中的最大者或其中应力循环次数最多者。

四、思考题

- 2-1 机械零件所载荷是如何分类的?为什么要对所载荷进行分类?
- 2-2 何谓工作载荷、名义载荷和计算载荷?
- 2-3 在载荷作用下的机械零件剖面所产生的应力如何分类?
- 2-4 在静应力作用下和在变应力作用下的机械零件,其主要失效形式是什么?根据零件的断裂截面,如何判断其是疲劳断裂还是静强度断裂?
- 2-5 如何区分体积应力和表面应力,单向应力状态和复合应力状态?单向应力状态和复合应力状态的计算应力各如何计算?
- 2-6 怎样区分表面挤压应力和表面接触应力?试说明如下表面接触应力计算公式中各符号的意义。

$$\sigma_{H\max} = \sqrt{\frac{F}{\pi L} \cdot \frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}}}$$

- 2-7 何谓机械零件的强度?判断零件强度有哪两种方式?试分别写出这两种判断准则的强度条件式。

2-8 在计算安全系数(极限应力与最大工作应力之比)和许用应力(极限应力与许用安全系数之比)时,都应用到极限应力。试问(1)在单向静应力、复合静应力作用下,零件的极限应力如何确定?(2)在变应力作用下零件的疲劳极限应力如何确定?

2-9 作用在机械零件上的变应力怎样分类?各有何特点? $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 、 σ_a 、 σ_m 、 r 五个参数各代表什么?已知 $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$,如何求出 σ_a 、 σ_m 和 r ?

2-10 变应力的循环特征 r 在什么范围内变化? r 值的大小反映了变应力的什么情况?

2-11 试述疲劳裂纹的形成和扩展过程。怎样从裂纹扩展过程去区分零件是应力疲劳破坏还是应变疲劳破坏?

2-12 何谓材料的疲劳极限(或称持久极限)?塑性金属材料 and 脆性金属材料的疲劳曲线有何区别?疲劳曲线中的 N_0 对不同材料的取值是怎样?塑性金属材料疲劳曲线($\sigma-N$ 图)、方程 $\sigma_{rN}^m N = \text{常数}$ 适用于 N 的范围如何?方程说明了哪些与疲劳强度有关的问题?

2-13 怎样根据塑性金属材料的疲劳曲线($\sigma-N$ 曲线)划分有限寿命区和无限寿命区?这样划分对零件进行疲劳强度计算有何用途?怎样应用疲劳曲线方程计算零件在有限寿命下工作时,其材料的条件疲劳极限应力 σ_{rN} ?

2-14 寿命系数 K_N 的意义是什么?如何应用它?

2-15 绘制材料的极限应力线图必须已知哪些极限应力?如何根据这些必须已知的极限应力绘制材料的极限应力图($\sigma_a-\sigma_m$ 图)?又如何简化极限应力图?试比较材料的极限应力图与零件的极限应力线图的异同点,并说明极限应力曲线表征什么循环特性的极限应力?

2-16 影响机械零件疲劳强度的主要因素有哪些?这些因素在机械零件的疲劳强度计算