

21 世纪高等学校新理念教材建设工程

机械设计学习指导

主 编 田万禄 熊晓航
王 伟 张世娴

东北大学出版社
· 沈 阳 ·

© 田万禄 等 2006

图书在版编目 (CIP) 数据

机械设计学习指导 / 田万禄等主编 .— 沈阳 : 东北大学出版社, 2006.8

ISBN 7-81102-296-6

I. 机... II. 田... III. 机械设计—高等学校—教学参考资料 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 090119 号

内容提要

本书对机械设计课程各章的主要教学内容、基本要求、重点难点、内容分析和重要基本概念等进行了分析和阐述;精选了典型的例题并进行分析和求解;通过示范解题给学生以解题的思路和技巧;编写了内容全面的自测题,并附有答案。

本书既可作为机械类本科学生学习机械设计课程的辅助教材,也可作为报考硕士研究生人员的考前辅导材料,还可用作机械设计课程教学的教学参考书。

出 版 者 : 东北大学出版社

地址 : 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编 : 110004

电话 : 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真 : 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail : neuph @ neupress.com

http : // www.neupress.com

印 刷 者 : 沈阳市政二公司印刷厂

发 行 者 : 东北大学出版社

幅面尺寸 : 184mm × 260mm

印 张 : 11.5

字 数 : 294 千字

出版时间 : 2006 年 8 月第 1 版

印刷时间 : 2006 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑 : 牛连功 责任校对 : 文 悦

封面设计 : 唐敏智 责任出版 : 秦 力

定 价 : 15.00 元

前 言

机械设计课是机械类专业的一门主干技术基础课，在机械类本科教学体系中占有十分重要的地位，许多学校都将其列为研究生招生的必考科目之一。随着教学体系的改革，机械设计课程的计划教学时数越来越少，虽普遍采用了 CAI 教学，以增加课堂教学的信息量和教学效果，但教学时数少与教学内容多的矛盾仍然很突出。因此，为了提高本课程的教学效果，必须帮助广大同学进行有效的学习和复习，在学习内容和方法上给予全面的指导，使同学能在较短的时间内掌握本课程的基本内容，掌握解题的方法和技巧，提高分析问题、解决问题的能力。因此，我们组织有丰富实际教学经验的老师编写了此书。

本书的每一章均包括：主要内容、基本要求、重点难点内容分析、重要基本概念、精选例题与解析、自测题与答案。其中，主要内容与基本要求和教学大纲相一致，对不同的教学内容有不同层次的要求，学生必须心中有数；重点难点内容分析中对学生应掌握的重要基本理论知识和基本方法进行了总结性的分析和指导；重要基本概念主要包括那些没有被列入重点难点内容的重要概念；在精选例题与解析中，通过示范解题给学生以解题的思路和技巧；自测题包括单选题、填空题、简答题、计算题、结构题等多种题型，并给出了参考答案。精选例题与解析和自测题内容互补，基本包括了本课程常见的考试内容与常见题型。在编写过程中，我们查阅了许多重点大学的考研试题。因此，本书既可作为机械类本科学生学习机械设计课程的辅助教材，也可作为报考硕士研究生人员的考前辅导教材，还可用作机械设计课程教学的教学参考书。

参加本书编写工作的有：王伟（第二、五、六章），张世娴（第三、四、十二章），熊晓航（第七、八章和模拟试题），田万禄（第一、九、十、十一章）。全书由田万禄和熊晓航统稿，由崔志恩教授担任主审。高虹、张荣江、赵欣欣等老师在编写过程中给予了许多帮助，在此表示诚挚谢意。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免有不妥和错漏之处，殷切希望广大读者给予批评指正。

编 者
2006 年 3 月

目 录

第一章 机械设计总论.....	1
本章主要内容.....	1
本章基本要求.....	1
重点难点内容分析.....	1
重要基本概念.....	5
精选例题与解析.....	6
第二章 机械零件的强度.....	7
本章主要内容.....	7
本章基本要求.....	7
重点难点内容分析.....	8
重要基本概念	11
精选例题与解析	12
自测题与答案	15
第三章 螺纹联接与螺旋传动	20
本章主要内容	20
本章基本要求	20
重点难点内容分析	20
重要基本概念	27
精选例题与解析	27
自测题与答案	32
第四章 键和花键联接	42
本章主要内容	42
本章基本要求	42
重点难点内容分析	42
重要基本概念	45
精选例题与解析	45
自测题与答案	47
第五章 带传动	50
本章主要内容	50
本章基本要求	50

重点难点内容分析	50
重要基本概念	54
精选例题与解析	55
自测题与答案	58
第六章 链传动	64
本章主要内容	64
本章基本要求	64
重点难点内容分析	64
重要基本概念	67
精选例题与解析	68
自测题与答案	68
第七章 齿轮传动	72
本章主要内容	72
本章基本要求	72
重点难点内容分析	73
重要基本概念	80
精选例题与解析	82
自测题与答案	87
第八章 蜗杆传动	97
本章主要内容	97
本章基本要求	97
重点难点内容分析	97
重要基本概念	101
精选例题与解析	102
自测题与答案	104
第九章 轴	112
本章主要内容	112
本章基本要求	112
重点难点内容分析	112
重要基本概念	116
精选例题与解析	116
自测题与答案	118
第十章 滑动轴承	123
本章主要内容	123

本章基本要求.....	123
重点难点内容分析.....	124
重要基本概念.....	127
精选例题与解析.....	128
自测题与答案.....	131
第十一章 滚动轴承	137
本章主要内容.....	137
本章基本要求.....	137
重点难点内容分析.....	137
重要基本概念.....	141
精选例题与解析.....	142
自测题与答案.....	150
第十二章 联轴器和离合器	158
本章主要内容.....	158
本章基本要求.....	158
重点难点内容分析.....	158
重要基本概念.....	160
精选例题与解析.....	161
自测题与答案.....	161
模拟试题	164
试卷一.....	164
试卷二.....	166
试卷三.....	168
试卷四.....	171
试卷五.....	173
参考文献	175

□第一章 机械设计总论

本章主要内容

本章的内容包括绪论和机械设计概述。通过介绍机器组成、对机器的基本要求、机械设计的一般程序，进而讲授本课的内容、性质和基本任务。同时学习有关机械设计基本知识，为本课后续内容的学习打下良好的基础。本章教学内容包括：

- (1) 机器的组成和对机器的主要要求；
- (2) 机械设计的一般程序；
- (3) 本课的内容、性质和基本任务；
- (4) 机械零件的主要失效形式和设计准则；
- (5) 机械零件的工艺性和标准化设计。

本章基本要求

根据教学大纲要求，对本章教学内容作如下具体要求：

- (1) 了解机器的组成和对机器的主要要求；
- (2) 了解机械设计的一般程序和每个阶段应完成的主要工作任务；
- (3) 掌握机械零件的所载荷、主要失效形式和失效机理，并掌握有关分析方法；
- (4) 掌握通用机械零件的工作能力准则及其选用；
- (5) 掌握机械零件的工艺性要求；
- (6) 掌握本课的性质、教学内容和基本任务，了解通过本课程的学习应获得的基本能力。

重点难点内容分析

一、重点内容分析

(一) 机械零件的主要失效形式

机械零件不能完成正常的工作，工作指标达不到预定的要求即为失效。机械零件的失效形式主要有以下几种。

- (1) 整体断裂：分为静强度断裂和疲劳断裂。
- (2) 表面破坏：如压溃、磨损等，零件失去了正常的工作表面，工作尺寸改变，不再满足正常工作要求。
- (3) 变形量过大：弹性变形过大，破坏零件的相对关系，引起振动，降低工作精度；塑

性变形过大，改变了零件的形状尺寸，丧失工作能力。

(4) 功能失效：正常的工作条件被破坏。如：螺栓联接松动，带传动打滑，等等。

(二) 磨损的类型与机理

磨损：摩擦过程中，摩擦表面发生材料微量脱落或转移的现象。零件磨损后，改变了零件的形状和尺寸，使机器的工作精度降低，效率下降，噪声和冲击振动增大。

根据磨损机理，可将磨损分为四类。发生机理不同，防止措施也不同。

1. 磨料磨损(简称磨损)

机理：摩擦表面有凹凸尖峰或摩擦表面之间有硬质颗粒。

防止措施：提高表面硬度；降低表面粗糙度；密封，改善润滑条件。

验算指标：不能直接计算，只能条件性计算比压：

$$p \leq [p]$$

2. 黏着磨损(简称胶合)

机理：当两表面间压力大且相对滑动速度高(即高速重载)时，摩擦发热量大，导致如下系列现象的发生：温度升高，润滑油黏度降低，工作面直接接触，摩擦系数增大，温度再度升高，工作面的局部或尖峰发生黏着，再随着相对运动撕脱。

防止措施：选用减摩性材料(摩擦系数小)；降低零件表面粗糙度；选用抗胶合润滑油，并适当提高润滑油的黏度。

验算指标：条件性验算 pv 值(摩擦功)：

$$pv \leq [pv]$$

3. 疲劳磨损(简称点蚀)

机理：高副接触的表面，接触应力 σ_H 很大(见图 1-1)，经多次反复循环作用后，产生小裂纹，润滑油渗入并起楔裂作用，裂纹扩展，成小块脱落，形成点蚀。

防止措施：提高表面硬度，降低零件表面粗糙度，适当提高润滑油的黏度，增大接触处的曲率半径。

验算指标：按接触疲劳强度验算：

$$\sigma_H \leq [\sigma_H]$$

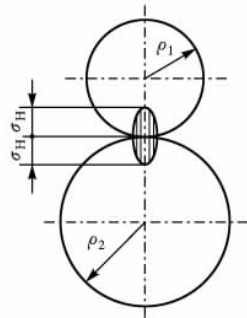


图 1-1

4. 腐蚀磨损

机理：在摩擦过程中，摩擦表面材料与周围介质发生化学反应或电化学反应，材料性质改变，并被磨损掉(腐蚀与磨损同时起作用的磨损)。

(三) 机械零件的设计计算准则

设计机械零件所依据的准则与失效形式紧密地联系在一起。对于一个具体的零件，可能发生几种形式的失效，要根据其主要失效形式采用相应的一个或几个计算准则。

1. 强度准则

强度：零件抵抗断裂和塑性变形的能力。零件强度不够，就会发生断裂或塑性变形，丧失工作能力。强度准则是机械零件设计的基本准则。

处理强度问题时，常根据其失效性质不同分为不同的强度问题。如：根据是整体断裂还是表面裂纹，称为整体强度和表面强度；根据是静强度断裂还是疲劳断裂，称为静强度和疲

劳强度；零件受挤压破坏时称之为挤压强度；表面接触疲劳时称为接触疲劳强度。

强度准则的一般表达式为：

$$\sigma \leq [\sigma] \quad \text{或} \quad S \geq [S].$$

提高零件强度的措施：改变零件尺寸使工作应力 σ 减小，使材料的许用应力 $[\sigma]$ 增大。

2. 刚度准则

刚度：零件抵抗弹性变形的能力。刚度不够，弹性变形过大。

刚度准则的一般表达式为：

$$y \leq [y], \theta \leq [\theta], \varphi \leq [\varphi].$$

提高刚度的措施：减小跨距，增大截面面积及惯性矩，改换弹性模量大的材料。

注意 用合金钢代替碳素钢而零件尺寸不变，不能提高刚度，因其弹性模量相近。

3. 寿命准则

影响零件寿命的主要失效形式有腐蚀、磨损和疲劳，但它们的发生机理和发展规律完全不同。目前对腐蚀和磨损还无法进行寿命计算。对疲劳寿命，常用的是根据使用寿命求出疲劳极限或额定载荷作为计算依据。

4. 耐磨性准则

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，目前没有直接的计算方法，都是采用条件性验算。通常是验算压强 p 、滑动速度 v 和压力速度 pv 值，使之不超过许用值。表达式为：

$$p \leq [p], v \leq [v], pv \leq [pv].$$

5. 振动稳定性准则

当零件或机械自身的固有频率 f 与振源的激振频率 f_p 接近时，将发生共振。所谓振动稳定性准则，就是使零件或机械系统的固有频率 f 与振源的激振频率 f_p 不同。表达式为：

$$f_p < 0.87f \quad \text{或} \quad f_p > 1.18f.$$

6. 可靠性准则

零件或机械在要求的寿命内能稳定工作的概率称为零件或机械可靠度。所谓可靠性准则，就是要使机械的可靠度达到某一定值。

(四) 机械零件的工艺性要求

1. 造型简单合理

在满足使用要求的前提下，零件的几何形状应尽量简单。

2. 合理选择毛坯种类

对结构大且复杂、大批量生产的零件宜采用铸造毛坯。

3. 铸造工艺性

壁厚要均匀，过渡平缓，避免缩孔和裂纹；要有拔模斜度；要有铸造圆角。

4. 机械加工工艺性

要求不仅能加工，还要力求加工方便，节省工时。如要有合适的基准面，便于卡紧定位；结构尺寸便于检查测量；尺寸精度和表面粗糙度要合理。

5. 零件的装拆工艺性

指零件能够方便地装配到位,而且能够方便地拆卸更换、维修。如:要有定位基准,配合表面尺寸合理,配合端面有倒角或引导锥,等等。

二、难点内容分析

(一) 根据机械零件工作原理和载荷判定其失效形式

之所以作为难点,是因为要通过这部分内容的学习,为整门课程打好基础。

通过机械设计课的学习,应掌握机械设计的一般规律和方法,能根据机械零件的工作原理及特点,分析其在工作中所受的载荷及性质,进而判定零件可能发生的失效形式,选择相应的设计准则,最后能够确定并完成设计计算的全部内容,包括机械零件的尺寸参数计算和结构设计。本课的后续内容涉及多种机械零部件,它们在工作原理、工作载荷、失效形式、设计准则、设计计算内容等方面各不相同。这是本课的特点,也是本课难学的原因。如果在开始就对机械零件的失效形式和失效机理有较好的掌握,不仅为后续各章的学习打下基础,也为培养分析问题和解决问题的能力提供很多帮助,这正是培养设计技术素质的关键环节。

对所有强度问题,无论是静强度还是疲劳强度,体积强度还是表面强度,都可以认为是应力问题。因强度不够而发生的失效形式就是断裂或塑性变形。机械零件发生断裂(包括表面裂纹)的原因,都是工作应力超过了极限应力。

虽然强度问题都是应力问题,但失效机理并不相同。如疲劳断裂是变应力对材料损伤累积的结果,而静强度断裂是工作应力超过了强度极限所致,等等。提高机械零件强度的措施,可以归纳为:减小零件的工作应力,提高其许用应力。但因为断裂的机理不同,提高强度的具体措施并不完全相同,可随着继续学习不同零件的设计再深入理解和掌握。

机械零件的刚度,对零件载荷的分布、系统的工作精度、机械的振动都有严重影响。工作精度要求较高或转速较高的机械,对其中的主要零件,例如轴,不能忽视刚度要求。

磨损是机械零件报废的最主要原因,也是机械设计中时时面对的问题。各种磨损发生的机理不同,相应的克服措施和计算内容也不相同。必须对其认真分析,加以区别。对于有相对滑动的零件副,一定要想到可能发生磨损(磨料磨损);相对滑动速度较高时还可能发生胶合(黏着磨损);高副接触的零件,主要失效形式是点蚀(疲劳磨损)。

除了上述常见的失效形式外,零件的工作条件得不到保证或被破坏时,也会发生失效。

(二) 机械零件的工艺性分析

课上对这部分内容的讲授时间并不多,但对其要求掌握的程度却很高。对于一个具体的机械结构,可以从以下几个方面入手分析其是否合理。

1. 零件的加工是否能够更方便

设计机械零件结构的基本要求就是不仅能加工,而且要加工方便。应尽量减少装卡次数和换刀次数,能一刀加工就不用两刀。例如钻孔加工时,零件上的钻入面和钻出面与孔的轴线应尽量垂直。又如,细长孔或细长杆的加工都比较麻烦,应尽量避免。

2. 零件的装拆是否方便

零件配合时应该有定位措施,但是又不能过定位。如圆柱形零件只能用一个圆柱面作定位面,若用两个不等的同心圆柱面同时定位,则不能装配。零件装配时都需要一定的装配空间,若空间过小就不能装配。另外,拆卸方便往往是初学者容易忽略的问题。

3. 零件的固定是否可靠

机械零件在机械系统中应该定位准确，固定可靠。

4. 铸造件是否满足铸造工艺要求

铸造工艺也是比较复杂的技术，只需要了解简单常用的即可。如有拔模斜度、铸造圆角等。铸造零件的形状应尽量简单。

关于机械零件的工艺性的知识，初学者不可能一下子就能掌握。需要同学根据课上和教材上的例题及作业，认真分析比较，举一反三，通过不断学习，逐渐掌握其规律。

重要基本概念

一、机器的基本组成

机器一般由原动机、传动系统、执行系统、控制系统和辅助系统等几部分组成。

本课的教学内容以传动部分为主，再加一些机械设计中必需的基本知识，如机械零件的联接、润滑等。

二、对机器的基本要求

(1) 使用功能的要求：包括对机器各种性能指标的要求，如运动参数、承载能力等。

(2) 经济性要求：要求成本最低，性能最好。降低成本的措施有：用先进的设计方法，降低设计成本；合理选择材料、加工工艺和精度，降低制造成本；减小工作消耗，避免使用贵重耗材，降低使用成本；采用标准件，提高互换性，降低维护成本。

(3) 安全性要求：应保证机器操作人员的安全和机器本身的安全。

(4) 环保性要求：改善机器周围的环境条件，如降低工作噪声，防止有毒、有害物质渗漏，对废气、废液等进行处理。

(5) 可靠性要求：保证机器工作的稳定性，避免经常发生故障。

(6) 使用操作要求：力求操作简单、方便、省力，符合大多数人的操作习惯，等等。

三、机械零件材料的选用原则

合理选用机械零件的材料是一个很重要的问题，主要考虑三个方面的要求。

1. 使用要求

使用要求一般是指零件的工况、受力情况、重要性等因素对材料性能、零件尺寸和重量的种种限制。所选材料应保证机械零件在既定的工况、载荷、环境等条件下，满足机器在重量、工作精度、使用寿命等方面的要求。

2. 工艺性要求

工艺性要求是指所选用的材料的加工性能要好，必须适合拟采用的冷、热加工、热处理等制造工艺。

3. 经济性要求

经济性体现在材料的价格、加工制造费用、使用维护费用等方面，要综合考虑。在满足使用要求的前提下应尽量选用价格低廉、加工容易的材料。

精选例题与解析

例 1-1 图 1-2 所示为两个齿轮减速器装配图的局部，试分析找出在吊环、吊耳、螺栓、油标、螺塞处的设计问题，并简述其不合理的原因。

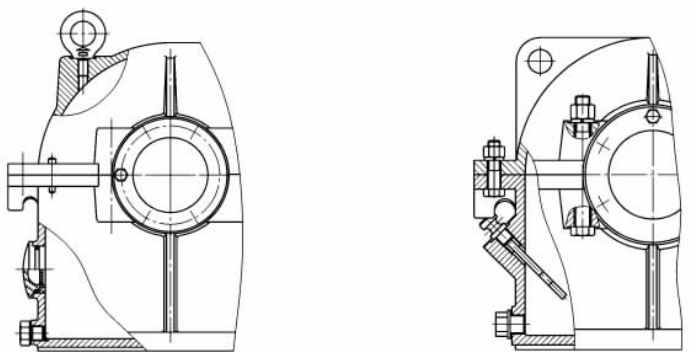


图 1-2

答 (a) 图中的问题：(1)上箱体上吊环螺钉的螺纹孔与内表面不垂直，孔不能钻通。(2)油标和螺塞的凸台应该等高，以方便加工。(3)下箱体底部内表面螺塞处应有工艺沉坑，以方便螺塞孔的加工。(4)轴承端盖上的螺钉有两个恰好在上下箱体的接缝上，应调整。

(b) 图中的问题：(1)上箱体上的吊耳没有拔模斜度，不容易铸造。(2)上下箱体在联接螺栓处没有沉头座，对螺栓工作不利，容易产生附加载荷。(3)下箱体凸缘影响油标处沉头座的加工。(4)螺塞位置过高，不能将箱体内的润滑油排放干净。(5)下箱体的装配空间不够，轴承旁螺栓不能装入。

□第二章 机械零件的强度

本章主要内容

在机械零件的设计计算中，强度计算占有很大比重。由于机械零件所受的载荷大部分是变化的，因此变载荷强度计算很重要。本章的主要内容包括以下几个方面：

- (1) 载荷和应力的分类以及名义载荷和计算载荷的概念；
- (2) 疲劳曲线和简化极限应力线图；
- (3) 影响机械零件疲劳强度的因素；
- (4) 稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算；
- (5) 规律性非稳定变应力下机械零件的强度计算；
- (6) 双向变应力下机械零件的疲劳强度计算。

本章基本要求

本章主要讲授变应力下机械零件的疲劳强度计算。教学大纲要求：掌握载荷和应力的分类；熟练掌握稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算；掌握影响机械零件疲劳强度的因素；了解机械零件在双向变应力下的疲劳强度计算；了解疲劳损伤累积假说和在规律性非稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算。对上述某些内容的具体要求进一步说明如下。

(1) 对载荷和应力的分类，要重点掌握名义载荷和计算载荷的关系及应用；重点掌握稳定变应力的五个参数及其计算方法；要深刻理解静载荷既可以产生静应力，又可以产生变应力，而变载荷一定产生变应力。

(2) 稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算所涵盖的内容较多，对其中的重要内容，如极限应力线图(疲劳极限线图)的绘制、材料和零件在某个循环特性下极限应力的求解、在简单加载情况下极限应力点的确定、机械零件破坏形式的判定、强度计算的具体内容和有关公式等，必须熟练掌握。对材料疲劳曲线、循环基数和疲劳极限的概念、有限寿命的疲劳极限求解、加载方式等也必须掌握。同时，要理解疲劳破坏的特点，理解疲劳破坏与静强度破坏在破坏机理上的不同和在强度计算上的区别。

(3) 对影响机械零件疲劳强度的因素，要掌握其具体影响的机理，在零件强度计算中如何考虑它们的影响，在强度计算公式中有怎样的体现。

(4) 对双向稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算，掌握其安全系数计算方法即可。

(5) 对非稳定变应力下的疲劳强度计算是机械零件设计的重要内容，由于授课学时有限，只作简单介绍。因此，目前只要求了解其计算方法和计算过程，本科生考试一般不作要求，但研究生招生考试则要求掌握。

重点难点内容分析

一、重点内容分析

(一) 稳定变应力的基本类型

稳定变应力有五个基本参数 (见图 2-1).

最大应力: σ_{\max} .

最小应力: σ_{\min} .

平均应力: $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$.

应力幅: $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$.

循环特性: $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$.

说明 最大应力和最小应力, 一般是指其绝对值最大和最小. 在这五个参数中, 只需知道二个, 便可求出另外三个.

根据循环特性 r 的值, 稳定循环变应力分为如下四种类型.

$r = +1$: $\sigma_{\min} = \sigma_{\max}$, 称为静应力;

$r = -1$: $\sigma_{\min} = -\sigma_{\max}$, $\sigma_m = 0$, $\sigma_a = \sigma_{\max}$, 称为对称循环变应力;

$r = 0$: $\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_m = \sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2}$, 称为脉动循环变应力;

$-1 < r < 0$ 和 $0 < r < +1$: 统称为非对称循环变应力.

(二) 材料的疲劳极限曲线

对材料的疲劳极限曲线需要掌握以下两个重点.

1. 极限应力与寿命有关

寿命要求越长, 极限应力越小. 这是与静强度计算的区别.

当 $N < N_0$ 时, 称为有限寿命;

当 $N \geq N_0$, 称为无限寿命.

对应循环基数 N_0 的疲劳极限称为材料的疲劳极限, 是对应无限寿命的极限应力, 用 σ_r 表示 (见图 2-2).

2. 有限寿命疲劳极限 σ_{rN} 的求解

根据疲劳曲线的方程, 将有限寿命和无限寿命的分界点 (N_0, σ_r) 代入, 得到:

$$\sigma_{rN} = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} \sigma_r = K_N \cdot \sigma_r,$$

式中, K_N 称为寿命系数, 当 $N < N_0$, $K_N > 1$; 当 $N \geq N_0$, $K_N = 1$. 当 $N < 10^3$ 时, 按静应力处理.

(三) 材料和零件的简化疲劳极限线图

材料和零件的简化疲劳极限线图是本章的重要教学内容, 对其画法一定要熟练. 由于综

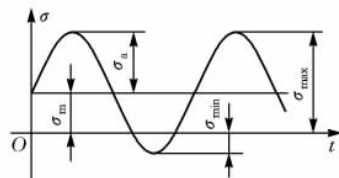


图 2-1

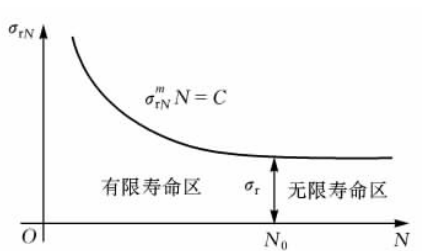


图 2-2

合影响系数 K_σ 只影响应力幅，不影响平均应力，因此，零件的疲劳极限线图与材料的疲劳极限线图只是 AE 线与 $A'E'$ 线上各对应点的纵坐标不同。 $A'E'$ 线上各点的纵坐标均为 AE 线上各对应点的纵坐标除以综合影响系数 K_σ （见图 2-3）。

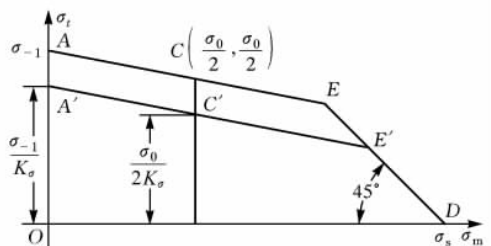


图 2-3

直线 AE 的方程：

$$\sigma_{-1} = \sigma_{ra} + \Psi_\sigma \sigma_{m.}$$

直线 $A'E'$ 的方程：

$$\sigma_{-1} = \frac{k_\sigma}{\epsilon_d \beta} \sigma'_{ra} + \Psi_\sigma \sigma'_{m.}$$

直线 DE 的方程：

$$\sigma_s = \sigma_{ra} + \sigma_{m.}$$

Ψ_σ 的物理意义：将平均应力 σ_m 折合为应力幅 σ_a 的等效系数。

Ψ_σ 的几何意义：直线 AE 与横轴夹角的正切值。

利用各条直线的方程，与加载方式直线方程联立，可以求得材料和零件任何循环特性下的疲劳极限。

(四) 稳定循环变应力下机械零件的疲劳强度计算

计算零件的疲劳强度离不开零件的极限应力，而极限应力的求解与零件加载方式有关。常见的加载方式有三类：循环特性等于常数，记为 $r = C$ ；平均应力等于常数，如振动着的弹簧；最小应力等于常数，如承受轴向工作载荷的普通螺栓。目前，一般只要求对 $r = C$ 加载方式下机械零件的疲劳强度计算熟练掌握。

对机械零件进行疲劳强度计算，应首先根据零件的工作应力点位置和加载方式找到极限应力点，判断零件的破坏形式，然后进行相应的计算。对 $r = C$ 加载方式，从原点 O 出发，过工作应力点作射线与极限应力线图的交点，即为极限应力点。

当极限应力点位于直线 $A'E'$ 上时，零件将发生疲劳破坏，应该计算零件的疲劳强度。一般是校核零件的安全系数。疲劳强度条件为：

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_\sigma}{\epsilon_d \beta} \sigma_a + \Psi_\sigma \sigma_w} \geq [S]$$

当极限应力点位于直线 DE 上时，零件将发生静强度破坏，应该计算零件的静强度。静强度条件为：

$$S_\sigma = \frac{\sigma_s}{\sigma_a + \sigma_m} \geq [S]$$

当极限应力点位于 E' 点附近时, 两种破坏形式均可能发生, 零件的疲劳强度和静强度均应进行校核计算。

说明 在缺少零件的极限应力线图的情况下, 可以使用材料的极限应力线图来近似判定零件的破坏形式。有时不容易区分零件的破坏形式, 即不好确定应按疲劳强度还是静强度校核, 可以同时对照零件的两种强度都进行校核计算。

二、难点内容分析

(一) 根据零件的破坏形式决定强度计算内容

前面已经述及, 极限应力点位于直线 AE 上和位于直线 DE 上零件的破坏形式不同, 强度计算的公式和计算内容也不同。解决这个问题并不难。之所以作为难点提出来, 是因为许多初学者在此问题上常犯错误。例如, 零件本来发生静强度破坏, 可总有人忽略破坏形式的判定, 直接进行疲劳强度计算, 或者干脆进行两种强度的计算。

(二) 非对称循环变应力的等效

所谓等效, 就是将非对称循环变应力等效为对称循环变应力。在对承受规律性非稳定变应力的零件进行疲劳强度计算时, 必须先分别将其所受各个稳定变应力(不一定是对称循环)等效为对称循环的变应力。根据等效的目标不同, 等效方法可以分为两种。

1. 将零件承受的变应力等效为材料承受的变应力

具体地说, 就是将零件承受的非对称循环变应力等效为材料所受的对称循环变应力。等效表达式为:

$$\sigma_{ad} = \frac{k_\sigma}{\epsilon_d \beta} \sigma_a + \Psi_\sigma \sigma_m.$$

零件实际承受平均应力为 σ_m 和应力幅为 σ_a 的非对称循环变应力, 可以等效为材料承受的应力幅为 σ_{ad} 的对称循环变应力。其零件的安全系数等于材料对称循环的疲劳极限 σ_{-1} 与材料所受的对称循环变应力的应力幅(最大应力值) σ_{ad} 之比。即

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ad}} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_\sigma}{\epsilon_d \beta} \sigma_a + \Psi_\sigma \sigma_m}.$$

2. 将零件承受的变应力等效为零件承受的变应力

就是将零件承受的非对称循环变应力等效为零件承受的对称循环变应力。等效表达式为:

$$\sigma_{adc} = \frac{\epsilon_d \beta}{k_\sigma} \left(\frac{k_\sigma}{\epsilon_d \beta} \sigma_a + \Psi_\sigma \sigma_m \right).$$

将零件实际承受平均应力为 σ_m 和应力幅为 σ_a 的非对称循环变应力, 等效为零件承受的应力幅为 σ_{adc} 的对称循环变应力。其安全系数就等于零件对称循环的疲劳极限 σ_{-1c} 与零件所受的对称循环变应力的应力幅 σ_{adc} 之比。

因为 $\sigma_{-1c} = \frac{\epsilon_d \beta}{k_\sigma} \sigma_{-1}$, 综合影响系数 $K_\sigma = \frac{k_\sigma}{\epsilon_d \beta}$, 则:

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1c}}{\sigma_{adc}} = \frac{K_\sigma \sigma_{-1}}{K_\sigma \left(\frac{k_\sigma}{\epsilon_d \beta} \sigma_a + \Psi_\sigma \sigma_m \right)} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_\sigma}{\epsilon_d \beta} \sigma_a + \Psi_\sigma \sigma_m}.$$

可见，两种等效方法相同，但前一种等效方法比较容易理解。

(三) 在规律性非稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算

零件受到 n 个稳定变应力 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ 有规律的循环作用，其作用次数分别为 n_1, n_2, \dots, n_n 。（见图 2-4）

其中， $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ 是将零件所受的变应力，按式

$$\sigma_{ad} = \frac{k_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta} \sigma_a + \Psi \sigma_m$$

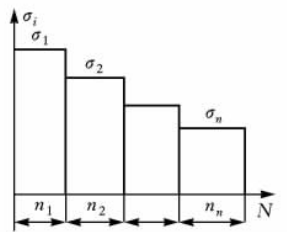


图 2-4

等效为材料所受的对称循环变应力的应力幅，并且不包括小于材料疲劳极限的 σ_{-1} 等效应力。

如果是等效为零件的对称循环变应力，只要将材料的疲劳极限改为零件的即可。

非稳定变应力下零件的强度计算，必须使用疲劳损伤理论，常用的是 Miner 理论：

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1.$$

常用的强度计算方法有两种，分述如下。

1. 当量循环次数法

将 σ_1 作用 n_1 次， σ_2 作用 n_2 次， \dots ， σ_n 作用 n_n 次，当量为其中最大的应力 σ_1 作用 N_v 次。其当量循环次数 N_v 的大小为：

$$N_v = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_1} \right)^m \cdot n_i.$$

材料对应于有限寿命 N_v 的疲劳极限 σ_{-1N_v} 为：

$$\sigma_{-1N_v} = K_N \sigma_{-1} = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N_v}} \sigma_{-1}.$$

疲劳强度条件为：

$$S = \frac{\sigma_{-1N_v}}{\sigma_1} = \frac{K_N \sigma_{-1}}{\sigma_1} \geq [S].$$

2. 当量应力法

将 σ_1 作用 n_1 次， σ_2 作用 n_2 次， \dots ， σ_n 作用 n_n 次，当量应力 σ_{ca} 作用 N_0 次。其当量应力 σ_{ca} 的大小为：

$$\sigma_{ca} = \sqrt[m]{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^n n_i \sigma_i^m}.$$

则安全系数和疲劳强度条件为：

$$S = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ca}} \geq [S].$$

重要基本概念

一、疲劳破坏及其特点

疲劳破坏：在远低于材料抗拉强度极限的交变应力作用下工程材料发生破坏。

疲劳破坏的特点：

(1) 在循环变应力多次反复作用下发生；