

机械设计

JIXIE SHEJI

杨玉鼎 主编

机
械
设
计



机 械 设 计

杨玉鼎 主编

重 庆 大 学 出 版 社

内 容 提 要

全书共分十四章：第一、二章为设计总论部分（包括设计总论及摩擦、磨损及润滑概述）；第三至第七章分别论述各种常用机械传动的设计；第八至第十一章为轴及其支承和联接（轴、轴承、联轴器及离合器）的设计；第十二至十四章为其它常用零件（弹簧、铆、粘、焊、螺纹联接及螺旋传动）的设计。

本书可作为高等工业学校机械类各专业的教材，也可供有关专业师生和广大工程技术人员参考。

机 械 设 计

杨玉鼎 主编

责任编辑 梁 涛

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆印制一厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：17.5 字数：437 千

1989年8月第1版 1989年8月第1次印刷

印数：1—7000

标准书号：ISBN 7-5624-0261-2 定价：3.49

TH·14

前 言

本书是根据编者1984年编写的机械零件教材，参照国家教委1987年颁布的“高等工业学校机械设计（原机械零件）课程教学基本要求”遵循“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则编写而成的。

本书除保证本课程共性的设计基础知识（设计总论，摩擦、磨损及润滑）外，在编写体系上是按“机械传动件——轴及其支承和联接——其它常用零件”展开论述的，由此加强了教材内容的内在联系。为了培养学生的机械设计能力，本书在内容上着重基本知识、基本理论、基本方法的介绍。随着科学技术的发展及新的国家标准的不断制定，在有关章节（如材料代号、蜗杆传动、滚动轴承、链传动等）中对设计计算方法和设计资料进行了更新。本书采用了国家法定计量单位。

参加本书编写的有重庆大学何小柏（第一、二、四章）、史仲民（第三、八、九、十章）、杨玉鼎（第五、六、七、十二章）、彭立勳（第十一、十三、十四章）。本书由杨玉鼎担任主编。

本书由成都科学技术大学黄贵根教授主审，并对全书提出了许多宝贵意见和建议，在编写过程中得到了重庆大学机械零件教研室全体教师和西南地区一些高校同行的支持和帮助，在此一并表示谢意。

由于编者水平所限，本书不当之处望读者给予批评指正。

编者

一九八八年十一月

目 录

第一章 机械设计总论	(1)
§1-1 机械工业对发展国民经济和实现社会主义现代化的作用.....	(1)
§1-2 机器的组成 机械零件和部件.....	(1)
§1-3 机械设计的主要内容和一般程序.....	(1)
§1-4 本课程研究的对象、主要内容、性质和任务.....	(2)
§1-5 机械零件应满足的基本要求及设计的一般步骤.....	(3)
§1-6 机械零件的主要失效形式.....	(3)
§1-7 机械零件的工作能力准则.....	(4)
§1-8 许用安全系数的选择.....	(6)
§1-9 载荷和应力的分类.....	(7)
§1-10 机械零件的体积强度.....	(9)
§1-11 机械零件的接触强度.....	(18)
§1-12 机械零件的设计方法.....	(19)
第二章 摩擦、磨损及润滑概述	(21)
§2-1 摩擦.....	(21)
§2-2 磨损.....	(25)
§2-3 润滑.....	(28)
第三章 带传动	(36)
§3-1 概述.....	(36)
§3-2 带传动的工作原理.....	(39)
§3-3 带传动的工作情况分析.....	(40)
§3-4 三角胶带传动的设计.....	(43)
§3-5 带传动的特点和应用.....	(55)
§3-6 其它类型带传动简介.....	(55)
第四章 链传动	(58)
§4-1 概述.....	(58)
§4-2 传动链及链轮.....	(58)
§4-3 链传动的运动特性.....	(62)
§4-4 链传动的受力和作用在轴上的载荷.....	(64)
§4-5 滚子链传动的设计计算.....	(65)
§4-6 链传动的合理布置和张紧方法.....	(70)
第五章 齿轮传动	(72)
§5-1 轮齿的损伤形式.....	(72)
§5-2 齿轮常用材料.....	(75)

§5-3 标准直齿圆柱齿轮传动的强度计算	(77)
§5-4 变位直齿圆柱齿轮传动的强度计算	(87)
§5-5 设计参数的选择和许用应力	(89)
§5-6 标准斜齿圆柱齿轮传动的强度计算	(96)
§5-7 变位斜齿圆柱齿轮传动的强度计算	(99)
§5-8 直齿圆锥齿轮传动的强度计算	(102)
§5-9 变载荷时齿轮的疲劳强度计算和短期过载时的静强度计算	(105)
§5-10 齿轮传动的效率和润滑	(106)
§5-11 齿轮构造	(107)
§5-12 圆弧齿圆柱齿轮传动简介	(109)
第六章 蜗杆传动	(112)
§6-1 蜗杆传动的主要类型	(112)
§6-2 蜗杆传动的几何关系和运动学计算	(114)
§6-3 蜗杆、蜗轮的材料和结构	(116)
§6-4 蜗杆传动的受力分析	(118)
§6-5 蜗杆传动的强度计算	(119)
§6-6 蜗杆传动的效率和热平衡计算	(122)
§6-7 环面蜗杆及锥蜗杆传动简介	(124)
第七章 摩擦轮传动与无级变速器	(127)
§7-1 摩擦轮传动	(127)
§7-2 无级变速器	(128)
第八章 轴及轴毂联接	(131)
§8-1 概述	(131)
§8-2 轴的材料	(132)
§8-3 轴的强度计算	(134)
§8-4 轴的结构设计	(137)
§8-5 轴的刚度计算	(141)
§8-6 轴的振动计算简介	(142)
§8-7 轴毂联接	(143)
第九章 滑动轴承	(159)
§9-1 概述	(159)
§9-2 向心滑动轴承的结构型式	(160)
§9-3 轴瓦的材料和结构	(161)
§9-4 润滑剂和润滑方法	(166)
§9-5 混合摩擦向心滑动轴承的设计计算	(169)
§9-6 液体动压向心滑动轴承的设计计算	(171)
§9-7 推力滑动轴承	(180)
§9-8 其它滑动轴承简介	(182)
第十章 滚动轴承	(186)

§10-1	概述	(186)
§10-2	滚动轴承的主要类型及选择	(189)
§10-3	滚动轴承的尺寸选择	(191)
§10-4	滚动轴承组合设计	(202)
§10-5	滚动轴承和滑动轴承的比较	(207)
第十一章	联轴器与离合器	(210)
§11-1	概述	(210)
§11-2	联轴器	(210)
§11-3	操纵离合器	(217)
§11-4	自动离合器	(219)
第十二章	弹簧	(221)
§12-1	概述	(221)
§12-2	圆柱螺旋压缩(拉伸)弹簧的设计	(223)
§12-3	组合同心圆柱螺旋压缩弹簧设计特点	(227)
§12-4	受变载荷作用弹簧的疲劳强度验算	(228)
§12-5	其它弹簧简介	(229)
第十三章	铆接、焊接和粘接	(233)
§13-1	铆接	(233)
§13-2	焊接	(235)
§13-3	粘接	(240)
第十四章	螺纹联接及螺旋传动	(243)
§14-1	螺纹及螺纹联接的主要类型	(243)
§14-2	螺纹联接的拧紧和防松	(246)
§14-3	螺栓组联接的受力分析	(248)
§14-4	单个螺栓联接的强度计算	(252)
§14-5	提高螺栓联接强度的措施	(259)
§14-6	螺旋传动	(262)
主要参考文献		(269)

第一章 机械设计总论

§1-1 机械工业对发展国民经济和实现社会主义现代化的作用

机器是人类进行生产以减轻体力劳动和提高劳动生产率的主要劳动工具。现代化的机械装备能够最大限度地提高劳动生产率和产品质量,而且便于对生产进行科学管理以及实现产品的标准化、系列化和通用化。机械工业能够为国民经济各部门提供最新、最好的成套机械装备和促进技术改造,从而起到促进国民经济的高速发展,加速实现我国四个现代化建设的作用。

§1-2 机器的组成 机械零件和部件

一台完整的机器通常都是由原动机、传动装置和工作机三大部分所组成。在现代化的机械装备中,除机械部分外,还常包括电气、控制和监测等部分,但作为机器的主体仍然是它的传动装置和工作机等机械系统部分。

组成机器的基本单元称为机械零件,如机器中的轴、齿轮、螺钉等。为完成同一职能在结构上组合在一起,协同工作的零件的总成称为机械部件,如机器中的联轴器、减速器等。

机器中的零、部件通常可分为两大类:在各种机器中都经常使用的零、部件,称为通用零、部件,如齿轮、滚动轴承等;只在某些特定类型的机器中才使用的零、部件,称为专用零、部件,如曲轴、汽轮机叶片等。

机器的性能与组成机器的机械零、部件性能的好坏是密切相关的。因此,要想设计出一台性能好的机器,必须合理地设计或选择它的零、部件。但每个零、部件的设计或选择又是和整台机器的要求分不开的。显然,如果不从机器这个全局出发,任何一个零、部件要想正确地设计和选择出来都是不可能的。

§1-3 机械设计的主要内容和一般程序

在对所设计的机器的用途和功能明确以后,在调查研究国内外有关情况和资料的基础上,机械设计的主要内容是:选择机器的工作原理;运动和动力计算;零、部件的工作能力计算;绘制零、部件及整机的工作图和装配图等。

机械设计过程实际上是一个发现矛盾、分析矛盾和处理矛盾的过程。例如,要求机器的零、部件强度大,刚性好和要求机器重量轻的矛盾;加工、装配精度高和制造成本低的矛盾等。设计者一定要抓住主要矛盾,恰如其分地处理好各种次要矛盾,才能设计出高质量的机器来。

一部新机器从设计到使用,要经过调查研究、设计、制造和运行考核等一系列过程。

机械设计并没有一个通用的固定程序,须视具体情况而定。较为典型的一般程序如下:

1. 设计任务的研究和制订

根据社会、市场或用户的需要和使用要求确定机器的功能范围和工作指标，研究实现的可能性；明确设计需要解决的课题；编制出完整的设计任务书及明细表。

2. 方案设计

根据设计任务书的要求，确定机器的工作原理和技术要求；拟定机器的总体布置、传动方案和机构简图等。在这一阶段中，往往要进行多方案比较和技术经济评价，从中选出最佳方案。

3. 总体设计

机器的总体设计是根据方案设计中得到的最佳方案进行的。其内容包括：零、部件的布置；机构的运动学和动力学分析；动力计算；零、部件的工作能力计算，必要时可进行模型试验和测试以取得设计数据；最后确定零、部件和机器的主要参数和尺寸。在这一阶段中要结合分析和计算绘制出总体设计图。

4. 施工设计

根据总体设计的结果，考虑零、部件的工作能力和结构工艺性，将零、部件的全部尺寸和形状、装配关系和安装尺寸等完全确定下来，绘制出零件、部件和整机的全部工作图。编写出各种技术文件和说明书。

5. 鉴定和评价

设计结果是否能满足使用要求；机器的预定功能是否能全部实现；可靠性和经济性指标是否合理；与同类机器相比有何改进效果；制造部门是否能够制造等均需经过鉴定，给予科学的评价。通常新设计的机器要先经过试制，并进行模型或样机试验。有的还要进行破坏性测试，以鉴定机器的质量。

6. 机器定型设计

经过鉴定和评价，对设计进行必要的修改后就可进行小批量的试制和试验，必要时还应在实际使用条件下试用，对机器进行各种考核和测试。通过几个小批量生产，在进一步考察和验证的基础上将原设计进行改进之后，即可进行适于成批生产的机器定型设计。

从以上机械设计的全过程可见，整个设计过程的各个阶段是相互紧密关联的，某一阶段中发现的问题和不当之处，必须返回到前面有关阶段去修改。因此，设计过程是一个不断返回、不断修改和完善，以逐渐接近最优结果的过程。

综上所述，完成整个设计过程需要进行一系列艰巨的工作。设计者首先应树立正确的设计思想，努力掌握先进的科学技术知识和科学的辩证的思想方法。同时，还要坚持理论联系实际，并在实践中不断总结和积累设计经验，向有关领域的科技工作者和从事生产实践的工作者学习，不断发展和创新，才能较好地完成机械设计任务。

§ 1-4 本课程研究的对象、主要内容、性质和任务

本课程研究的对象是一般工作条件下的通用机械零、部件。对于巨型、微型以及高速、高压、高温、低温条件下工作的通用零、部件则在有关专业课中研究。

本课程的内容主要是从工作能力、构造、工艺和维护等方面来研究上述通用零、部件的设计理论和设计方法，从而达到能正确地设计和改进这些零、部件的目的。其中包括如何确

定最适当的材料、结构、尺寸、精度等级、表面质量以及规定制造和装配上的技术条件等，并绘出能满足生产要求的零件工作图和装配图。同时，也概括地论述设计这些零、部件时必须了解的有关整机设计方面的基本知识。

本课程是一门技术基础课。在这门课程中将综合运用高等数学、理论力学、材料力学、机械原理、金属工艺学、金属学及热处理、互换性及技术测量、机械制图等多方面的知识来解决通用零、部件的设计问题。同时，本课程又为专业课程的学习创造必要的条件，从而起着技术基础课和专业课之间的桥梁作用。

本课程的主要任务是通过理论学习、作业、现场课和实验课、课程设计等环节，培养学生运用基础理论解决机械设计中有关问题的能力。即初步树立正确的设计思想；掌握设计和选用通用零、部件的基本知识、基本理论和基本方法；学会运用设计资料和手册；能较正确地设计、分析和改进通用零、部件；初步了解整台机器的设计原则和主要内容等。从而培养学生具有设计机械传动部件、较为简单的机械以及相应的分析和解决问题的能力。

§ 1-5 机械零件应满足的基本要求及设计的一般步骤

一、机械零件应满足的基本要求

设计的机械零件既要在预定的期间内工作可靠，又要成本低廉。满足工作可靠要求就应在设计时使零件在强度、刚度、寿命、振动稳定性等方面满足一定条件，这些条件是判断机械零件工作能力的准则。要使成本低廉，就必须从设计和制造两方面着手，设计时应正确选择零件的材料、合理的尺寸和符合工艺要求的结构，并合理规定制造时的公差等级和技术条件等。

设计机械零件时也往往需拟出几种方案，认真比较后选用最佳方案。

二、机械零件设计的一般步骤

- 1) 根据机器的总体设计方案，针对零件的工作情况进行载荷分析，建立力学模型，考虑影响载荷的各项因素，确定零件的计算载荷。
- 2) 分析零件在工作时可能出现的失效形式，确定零件工作能力的计算准则。
- 3) 根据零件的工作条件和对零件的特殊要求选择合适的材料，并确定必要的热处理或其他处理。
- 4) 分析零件的应力或变形，根据工作能力计算准则建立或选定相应的计算式，计算出零件的主要尺寸，并加以标准化或圆整。
- 5) 根据计算得出的主要尺寸并结合结构上和工艺上的要求，绘制零件工作图。并写出零件的计算说明书。

§ 1-6 机械零件的主要失效形式

机械零件由于某些原因不能正常工作时，称为失效。其主要失效形式有：

一、断裂

断裂可分为韧性断裂、脆性断裂和疲劳断裂等几种形式。

当零件在外载荷作用下，由于某一危险剖面上的应力超过零件的强度极限时将发生前两种断裂；当零件在循环变应力作用下，工作时间较长的零件，最易发生疲劳断裂，这是大多数机械零件的失效形式。

断裂是一种严重的失效形式，它不但使零件失效，有时还会招致严重的人身及设备事故。

二、过量变形

机械零件受载工作时，必然会发生弹性变形。在允许范围内的微小弹性变形，对机器工作影响不大，但过量的弹性变形会使零件或机器不能正常工作，有时还会造成较大振动，致使零件损坏。

当零件过载时，塑性材料还会发生塑性变形。这会造成零件的尺寸和形状改变，破坏零件与零件间的相互位置和配合关系，使零件或机器不能正常工作。

三、表面失效

绝大多数零件都与别的零件发生静的或动的接触和配合关系。载荷作用于表面，摩擦和磨损发生在表面，环境介质也包围着表面，因此，失效大都会出现在表面。

表面失效包括：表面疲劳、磨损、胶合、塑性变形、压溃及腐蚀等。

表面失效后通常都会增大摩擦，增加能量消耗，破坏零件的工作表面，致使零件尺寸发生变化，最终造成零件报废。零件的使用寿命在很大程度上受到表面失效的限制。

§ 1-7 机械零件的工作能力准则

零件不发生失效时的安全工作限度称为零件的工作能力。对载荷而言的工作能力即称零件的承载能力。工作能力有时也对变形、速度、温度、压力等而言。同一种零件可能有好几种不同的失效形式，那么对应于各种失效形式就有其不同的工作能力。例如轴的失效可能由于疲劳断裂，也可能由于过量的弹性变形。前者取决于轴的疲劳强度，而后者则取决于轴的刚度。显然，起决定作用的将是工作能力中的较小者。为了保证机器在预定的使用期限内正常地工作，在设计机械零件时应根据具体情况对其进行强度、刚度、寿命、振动、温升、可靠性等方面的计算。

一、强度准则

强度是机械零件首先应满足的基本要求。强度是指零件在载荷作用下抵抗断裂、塑性变形及表面破坏的能力。为了保证零件具有足够的强度，计算时应使其在载荷作用下零件危险剖面或工作表面的工作应力 σ ，不超过零件的许用应力 $[\sigma]$ ，其表达式为

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1-1)$$

满足强度要求的另一种表达方式是使零件工作时的实际安全系数 S 不小于零件的许用安

全系数 $[S]$, 即

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

二、刚度准则

刚度是零件受载后抵抗弹性变形的能力。为了保证零件具有足够的刚度, 设计时应使零件在载荷作用下产生的弹性变形量 y (广义地代表任何形式的弹性变形量), 小于或等于按机器工作性能所允许的极限值, 即许用变形量 $[y]$, 其表达式为

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

弹性变形量可按各种求变形量的理论或用实验方法确定, 而许用变形量则应随不同的使用场合, 按理论或经验来确定其合理的数值。

三、寿命准则

影响零件寿命的主要因素是磨损、疲劳和腐蚀。

耐磨性是指零件在载荷作用下抵抗磨损的能力。为了保证零件具有良好的耐磨性, 应运用摩擦学原理设计零件的结构、选定摩擦副的材料和热处理、表面状态、油品等。同时, 给与合理而充分的润滑, 以延长零件的使用寿命。

迄今为止, 还没有提出关于腐蚀寿命的计算方法, 因而也无法列出其计算准则。

四、振动稳定性准则

机器在运转中一般都有振动。轻微的振动并不妨碍机器的正常工作。但剧烈的振动将影响机器的运转质量和工作精度, 甚至会造成破坏事故。机器中存在着很多周期性变化的激振源, 如果某一零件本身的固有频率与激振源的频率重合或成整数倍关系时, 零件就会发生共振。此时零件的振幅急剧增大, 将在短期内导致零件甚至整个系统毁坏。因此, 对易于失稳的高速机械应进行振动分析和计算, 以确保零件及系统的振动稳定性。

五、散热性准则

在两零件发生剧烈摩擦处, 会产生大量的热。如散热不良, 则会使零件温度升高, 从而改变两零件的结合性质, 破坏正常润滑条件, 甚至导致金属局部熔融而产生胶合或引起燃烧。要满足散热性准则, 即应对发热较大的零件 (如蜗轮、滑动轴承等) 进行热平衡计算。

六、可靠性准则

一个零件的偶然失效或一个控制系统的偶然失灵, 都有可能造成事故, 这使人们认识到获得可靠性的重要意义。

通常用可靠度 R 作为可靠性指标。在规定时间内 (或作用次数、距离等) 和规定的使用条件下, 无故障地发挥规定机能的概率称为可靠度。它是衡量机器在寿命方面的质量指标。

设有 N_T 个零件在预定时间 t 内, 有 N_f 个零件随机失效, 剩下 N_s 个零件仍能继续工作, 则

$$\text{可靠度 } R = \frac{N_s}{N_T} = \frac{N_T - N_f}{N_T} = 1 - \frac{N_f}{N_T} \quad (1-4)$$

$$\text{不可靠度 (失效概率)} F = N_f / N_r \quad (1-5)$$

$$R + F = 1 \quad (1-6)$$

根据概率统计, 可求出在不同时间内零件随机失效数 N_f 的分布(密度)曲线, 从而可计算出可靠度。常见的分布曲线有正态分布、指数分布等几种。强度、寿命、工艺误差等均按正态分布。

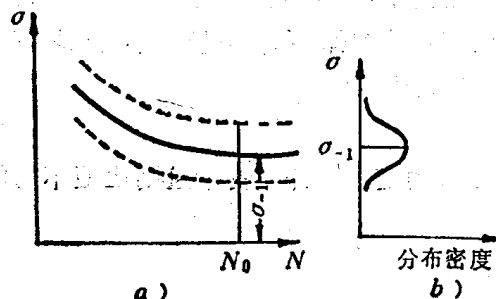
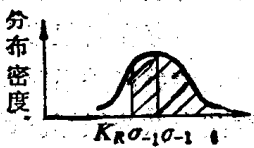


图 1-1

下面以对称循环变应力下材料的疲劳极限 σ_{-1} 为例加以说明。 σ_{-1} 值的离散情况如图 1-1a 所示。根据概率统计, σ_{-1} 值呈正态分布(如图 1-1b)。在一般手册中给出的 σ_{-1} 值为平均值, 可靠度为 50%。如可靠度要求高于 50% 时, 则 σ_{-1} 值应有所降低, 当降至最低值时, 可靠度为 100%。反之, 如可靠度要求低于 50% 时, 则 σ_{-1} 值就可以提高。所以, σ_{-1} 值应

根据可靠度要求乘以可靠度系数 K_R 求得。可靠度 R 大于 50% 时的 K_R 值见表 1-1。 K_R 是根据对疲劳极限进行统计分析后由计算得出的。提出可靠度要求时, 要考虑到现实的技术水平、对零件的工作要求和经济性等, 不是越高越好。

表 1-1 可靠度系数

	可靠度 $R\%$	可靠度系数 K_R
	50	1
	90	0.897
	95	0.868
	99	0.814
	99.9	0.753
	99.99	0.700

一个由许多零件组成的系统, 当各零件的功能呈串联关系时, 只要其中之一失效, 则该系统即告失效。设该系统各零件的可靠度为 $R_1, R_2, \dots, R_n$, 则该串联系统的可靠度 R_s 为

$$R_s = R_1 R_2 \dots R_n \quad (1-7)$$

由上式可知, 串联系统的可靠度一定低于最低可靠度零件的可靠度。因此, 系统的可靠度主要取决于最低可靠度零件的可靠度。串联的零件越多, 可靠度越低。

为了提高可靠度, 在设计时可采用下列措施: 1) 在满足机器性能要求的前提下, 力求结构简单, 零件数目少; 2) 尽可能采用有可靠度保证的标准件; 3) 安全系数要留有余地; 4) 增加重要环节的备用系统; 5) 合理规定维修期等。

§ 1-8 许用安全系数的选择

合理地选择许用安全系数 $[S]$ 是机械设计中的一项重要工作。安全系数过大, 则零件尺寸大, 笨重, 在用料、加工、运输、运转等方面都不符合经济原则; 安全系数过小, 零件又可能不够安全。设计人员的任务在于, 在保证零件工作安全可靠的前提下, 尽可能减小许用

安全系数的数值,或者说尽可能提高许用应力的数值。

影响许用安全系数(或许用应力)数值大小的因素主要有:

1) 与工作应力的计算有关的因素:工作应力计算时所依据的载荷值的准确程度;工作应力计算时所用的力学模型与实际状况之间的差异等。

2) 与材料的极限应力有关的因素:材料机械性能本身的变化;零件的尺寸效应;不同的毛坯制取方法及机械加工工艺对材料机械性能的影响等。

3) 与零件重要性有关的因素:零件破坏要引起人身事故;引起严重的设备事故;使机器停车修理,但不致引起事故;不会使机器立即停止工作。

许用安全系数是在考虑上述诸因素的基础上确定的。但目前在各个不同的机械设计部门中,通过多年的生产实践,已制定了本部门的许用安全系数的专用规范。在设计时如无特殊原因,就应当结合具体要求按照规范中的规定酌情选取许用安全系数。在设计新机器没有规范可循时,可参照下列原则来选定许用安全系数 $[S]$:

1) 用塑性材料制成的零件,在静应力作用下以屈服极限 σ_s 作为极限应力时,其 $[S]$ 可按表1-2选取;如载荷和应力的计算不十分准确, $[S]$ 应加大20~50%。

表1-2 $[S]$ 的最小值

$\frac{\sigma_s}{\sigma_B}$	0.45~0.55	0.55~0.70	0.70~0.90	铸件
$[S]$	1.2~1.5	1.4~1.8	1.7~2.2	1.6~2.5

2) 用组织不均匀的脆性材料制成的零件,在静应力作用下以强度极限作为极限应力时,可取 $[S]=3\sim4$;如果计算不十分准确,应加大50~100%。

3) 零件在变应力作用下以疲劳极限作为极限应力时,如果计算足够准确,工艺过程的质量和材料的均匀性都很好,可取 $[S]=1.3\sim1.4$;计算不十分准确,工艺过程的质量和材料均匀都是中等时,取 $[S]=1.4\sim1.7$;计算不够准确,材料又不够均匀,尤其是尺寸很大时,取 $[S]=1.7\sim3.0$ 。

在设计实践中,有时也会在规范中直接给出许用应力值。在使用这些数值时,必须充分注意规范中规定的使用条件,不能随意套用。

§ 1-9 载荷和应力的分类

一、载荷分类

作用在机械零件上的载荷可分为静载荷和变载荷两类。不随时间变化或变化较缓慢的载荷称为静载荷。随时间变化的载荷称为变载荷。

在设计计算中,还常把载荷分为名义载荷与计算载荷。根据额定功率用力学公式计算出作用在零件上的载荷称为名义载荷,它没有反映载荷随时间作用的不均匀性、载荷在零件上分布的不均匀性及其他影响零件受载等因素。因此,常用载荷系数 K 来考虑这些因素的综合影响。载荷系数 K 与名义载荷的乘积即称为计算载荷。

二、应力分类

按应力随时间变化的特性不同,可分为静应力和变应力。不随时间变化或变化缓慢的应

力称为静应力（如图1-2a）。随时间变化的应力称为变应力（如图1-2b、c、d）。绝大多数机械零件都是处于变应力状态下工作的。

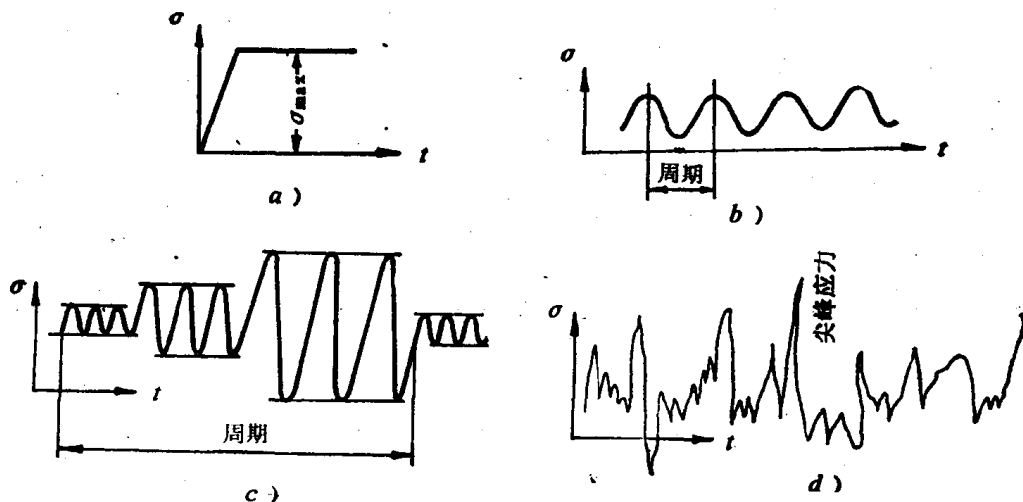


图 1-2

变应力可分为：稳定循环变应力（如图1-2b），不稳定循环变应力（如图1-2c）及随机变应力（如图1-2d）。瞬时作用的过载或冲击所产生的应力称为尖峰应力，如图1-2d所示。

稳定循环变应力的类型是多种多样的，但归纳起来有下列三种基本类型：a) 非对称循环变应力；b) 脉动循环变应力；c) 对称循环变应力。（如图1-3）。

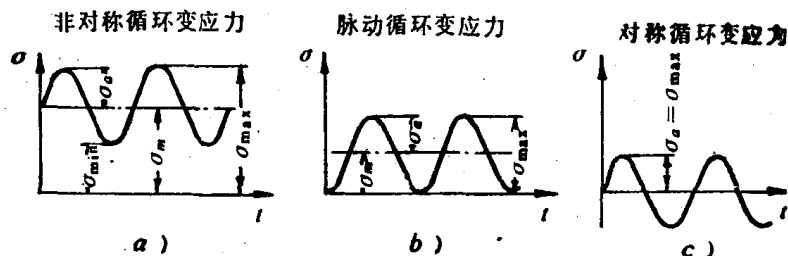


图 1-3

为了表示变应力状况，引入下列的变应力参数： $\sigma_{\max}$ ——变应力最大值； $\sigma_{\min}$ ——变应力最小值； σ_m ——平均应力； σ_a ——应力幅； r ——循环特性。

由图1-3可看出， $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ ； $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$ ； $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$ ； $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ ； $r = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = (\sigma_m - \sigma_a)/(\sigma_m + \sigma_a)$ 。当 $r = +1$ 时，表明 $\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$ ，即为静应力；当 $r = -1$ 时，表明 $\sigma_{\max}$ 与 $\sigma_{\min}$ 的数值相等但符号（即方向）相反，这类应力称为对称循环变应力；当 $r = 0$ 时，即 $\sigma_{\min} = 0$ ， $\sigma_m = \sigma_a = \sigma_{\max}/2$ ，这类应力称为脉动循环变应力。当 r 为任意值时（即 $r \neq +1, -1, 0$ ），这类应力统称为非对称循环变应力（如图1-3a）。

通常在设计时，对于应力变化次数较少（例如在整个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，可近似地按静应力处理。

变应力由变载荷产生，也可能由静载荷产生。在静载荷作用下产生变应力的例子如图1-4所示，图示为转轴和滚动轴承a点的应力变化。

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。

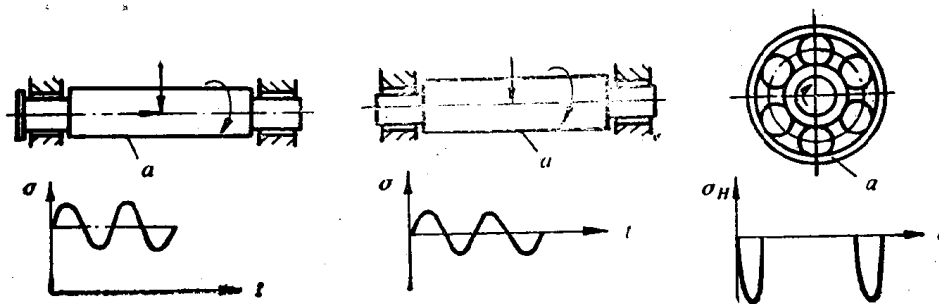


图 1-4

§ 1-10 机械零件的体积强度

一、机械零件的静强度

在静应力作用下的机械零件，其主要失效形式是断裂或塑性变形。

机械零件的静强度条件为

$$S_{\sigma} = \sigma_{\text{lim}} / \sigma \geq [S_{\sigma}] \quad S_{\tau} = \tau_{\text{lim}} / \tau \geq [S_{\tau}] \quad (1-8)$$

$$\text{或} \quad \sigma \leq [\sigma] \quad \tau \leq [\tau] \quad (1-9)$$

式中 S_{σ} 、 S_{τ} ——计算安全系数；

σ_{lim} 、 τ_{lim} ——材料的极限应力；

σ 、 τ ——零件剖面的最大工作应力；

$[S_{\sigma}]$ 、 $[S_{\tau}]$ ——许用安全系数；

$[\sigma]$ 、 $[\tau]$ ——许用应力。

上式中符（脚）号为 σ 时，用于零件工作时产生正应力的场合，如拉伸、压缩、弯曲等；符（脚）号为 τ 时，用于切应力的场合，如剪切、扭转等。

极限应力 σ_{lim} 、 τ_{lim} 和许用应力 $[\sigma]$ 、 $[\tau]$ 是通过拉伸、压缩、剪切、扭转和弯曲等试验分别测出的。在有关手册和资料中给出的数据是通过大量试验统计数据的均值。因此，在选取这些数据时应考虑失效概率对所设计的机械零件作具体分析。零件的材料在不同的应力状态和工作状况下，如可能出现脆断时，则极限应力即为材料的强度极限；可能出现塑性变形时则为材料的屈服极限。

对于双向及三向应力状态，则按强度理论来计算零件剖面的最大工作应力。

二、机械零件的疲劳强度

绝大多数机械零件都是在变应力下工作的，在变应力作用下经过较长时间工作的零件，其失效形式将是疲劳断裂。表面无宏观缺陷的金属材料，其疲劳过程可分为两个阶段：1) 表面通过各种滑移方式形成初始裂纹；2) 裂纹尖端在切应力作用下发生反复塑性变形，使裂纹扩展以致断裂。如果零件在制造过程中出现划伤、裂纹、非金属夹杂物以及酸洗小坑等缺陷，则疲劳裂纹将首先在这些地区产生和扩展。

零件的圆角、凹槽、缺口等造成的应力集中也会促使零件表面裂纹的生成和发展。

疲劳断裂剖面由光滑的疲劳发展区和粗粒状的断裂区组成（如图1-5）。在变应力下形成初始裂纹后，裂纹继续发展形成疲劳区，疲劳区留下有标志裂纹发展过程的前沿线。由于裂

纹边缘反复压紧和分开使疲劳区呈光滑状态。粗粒状的断裂区是由于当裂纹达到临界尺寸后，在较少的应力循环次数作用下迅速发生断裂而造成的。

实际上有相当一部分零件，即使出现了宏观裂纹，由于疲劳裂纹的扩展速度较慢，要经历相当长的时间后才达到临界尺寸而发生断裂。这就为工程上采用有限寿命设计提供了前提。而研究微观和宏观裂纹的扩展规律，则是有效地进行有限寿命设计的理论基础，这就是工程断裂力学所研究的主要内容。

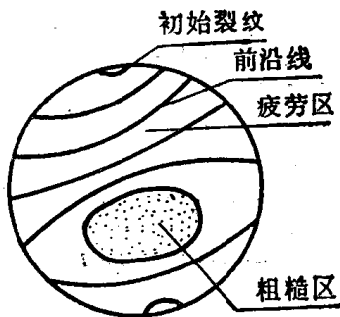


图 1-5

1. 疲劳极限

在任一给定循环特性 r 的条件下，应力循环 N 次后，材料不发生疲劳破坏时的最大应力称为疲劳极限，用 σ_{rN} 表示。

表示应力循环次数 N 与疲劳极限 σ_{rN} 的关系的曲线称为疲劳曲线或 $\sigma-N$ 曲线。如图1-6所示。曲线的横坐标为循环次数 N (或 $\lg N$)，纵坐标为疲劳极限 σ_{rN} (或 $\lg \sigma_{rN}$)。

金属材料的疲劳极限有两种类型。一种是当循环次数 N 超过某一值 N_0 后，曲线即趋向水平 (如图1-6)，另一种曲线没有水平部分 (如图1-7)，有色合金及某些高硬度合金钢的疲

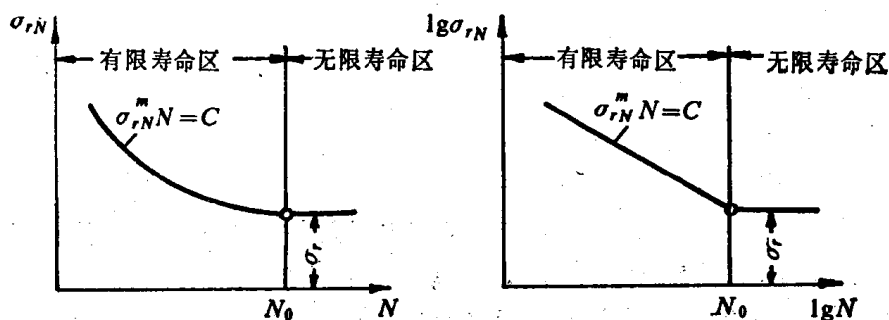


图 1-6

劳曲线多数为后一类。

疲劳曲线的曲线部分 (即图1-6 中之有限寿命区) 可用下列方程表示

$$\sigma_{rN}^m \cdot N = C \quad (1-10)$$

式中 C ——材料常数；

m ——随应力状态不同的特性系数。

随着材料性质的不同， N_0 在很大范围内变动。在作材料试验时，常取一规定的应力循环次数 N_0 (N_0 称应力循环基数)，把相应于这一循环次数的疲劳极限，称为材料的疲劳极限，并记为 σ_r 。于是，在有限寿命区，疲劳曲线方程为

$$\sigma_{rN}^m \cdot N = \sigma_r^m \cdot N_0 = C \quad (1-11)$$

因而材料的有限寿命 (即寿命为 N 时) 的疲劳极限 σ_{rN} 则为

$$\sigma_{rN} = \sigma_r \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} = K_N \cdot \sigma_r \quad (1-12)$$

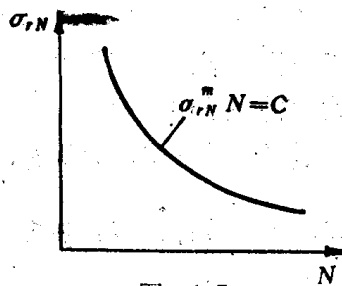


图 1-7