

机械设计基础

徐广红 张柏清 钟礼东 主编



江西高校出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础/徐广红,张柏清,钟礼东主编. —2
版.—南昌:江西高校出版社,2010.1

ISBN 978-7-81132-847-9

I. ①机... II. ①徐... ②张... ③钟... III. ①
机械设计—高等学校—教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 015141 号

出版发行	江西高校出版社
社 址	江西省南昌市洪都北大道 96 号
邮政编码	330046
电 话	(0791)8529392,8504319
网 址	www.juacp.com
印 刷	南昌市光华印刷有限责任公司
照 排	江西太元科技有限公司照排部
经 销	各地新华书店
开 本	787mm×1092mm 1/16
印 张	20.25
字 数	500 千字
版 次	2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
印 数	1~4000 册
书 号	ISBN 978-7-81132-847-9
定 价	30.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

本书自 2007 年问世以来,受到了大家的厚爱,于 2008 年荣获江西普通高等学校第三届优秀教材一等奖。

机械设计基础课程是工科专业必修的一门主干技术基础课。本书根据拓宽专业口径,淡化专业意识,拓宽基础,加强素质教育和能力培养等教改精神,结合编者多年的教学实践而编写。本书对机械设计基础的内容进行了整体优化与整合,以增强教材的适应性。

本书的主要特色为:

1. 以机械系统分析和设计为主线,突出机械系统和整体机械的设计。按照机械系统——传动及其零部件——系统的体系,将机械原理和机械零部件设计的有关内容进行有机的整合,使全书结构紧凑、内容精练,有助于提高学生机械设计能力,特别是整机设计的观念和能力。

2. 对于传统内容,在保证基本内容的前提下,精简压缩了一般内容,尽量避免重复,简化公式的演绎推导,使全书结构紧凑。

3. 实现了机械原理和机械设计课程教学内容的有机融合和提高。如将机械的组成、运动及动力学和零件的强度、材料的选择等共性问题,一并组成绪论,将相关的内容进行合并(如常用连接和螺旋传动合并为一章),避免重复。

本书由江西理工大学徐广红、景德镇陶瓷学院张柏清、华东交通大学钟礼东担任主编,华东交通大学洪家娣担任主审。参加本书编写工作的有景德镇陶瓷学院张柏清、吕冬青、韩文,井冈山大学谢世坤、胡茶根、夏翔,江西理工大学徐广红、刘静、林玲,宜春学院彭路南,华东交通大学钟礼东、许玢、潘辉、沈晓玲、洪家娣等。

这本书并非十全十美,本书也有许多不尽如人意之处,所以,对该书的不足之处给予修订。

参加本次修订工作的有江西理工大学徐广红、刘静、黄跃飞、景德镇陶瓷学院张柏清、华东交通大学钟礼东等。

编著者

2011 年 12 月

内容简介

本书是根据教学改革的需要,参照原国家教委颁发的机械设计基础教学基本要求,为适应新世纪人才培养的要求而编写的。

全书共 14 章,外加附录。内容包括平面机构的运动简图及其自由度、平面连杆机构、凸轮机构及间隙运动机构、常用连接和螺旋传动、带传动和链传动、齿轮传动设计、轮系及减速器、轴与联轴器和离合器、滑动轴承、滚动轴承、弹簧、机械的调速和平衡、一般机械传动系统的设计等。

本书可作为大学本科、专科近机械类、非机械类大学生机械设计基础课程的教材,也可供有关的工程技术人员参考。

目 录

第 1 章 绪论

- § 1.1 本课程的研究对象及主要内容
 - § 1.2 本课程的性质、任务和学习要求
 - § 1.3 机械设计的基本要求和一般程序
 - § 1.4 机械零件设计概述
 - § 1.5 机械零件的常用材料及其选择
- 习 题

第 2 章 平面机构的运动简图及其自由度

- § 2.1 机构的组成
 - § 2.2 平面机构的运动简图
 - § 2.3 平面机构的自由度
 - § 2.4 速度瞬心简介
- 习 题

第 3 章 平面连杆机构

- § 3.1 铰链四杆机构的基本形式及其演化
 - § 3.2 铰链四杆机构存在曲柄的条件
 - § 3.3 平面四杆机构的基本特性
 - § 3.4 平面四杆机构的设计
- 习 题

第 4 章 凸轮机构及间歇运动机构

- § 4.1 凸轮机构的应用和分类
 - § 4.2 从动件的常用运动规律
 - § 4.3 凸轮机构的压力角
 - § 4.4 图解法设计凸轮轮廓
 - § 4.5 解析法设计凸轮轮廓
 - § 4.6 间歇运动机构
- 习 题

第 5 章 常用连接和螺旋传动

- § 5.1 螺纹连接
- § 5.2 键连接

- § 5.3 花键连接
- § 5.4 销连接
- § 5.5 螺旋传动
- 习 题

第 6 章 带传动和链传动

- § 6.1 带传动的类型和应用
- § 6.2 带传动的工作情况分析
- § 6.3 带传动的弹性滑动和传动比
- § 6.4 V 带传动的计算
- § 6.5 V 带轮的结构
- § 6.6 V 带传动的张紧装置
- § 6.7 同步带传动简介
- § 6.8 链传动
- 习 题

第 7 章 齿轮传动设计

- § 7.1 概述
- § 7.2 齿廓啮合基本定律
- § 7.3 渐开线齿廓和渐开线齿轮传动的特点
- § 7.4 渐开线标准直齿圆柱齿轮各部分名称及几何尺寸
- § 7.5 渐开线齿轮正确连续啮合条件
- § 7.6 齿轮加工原理和根切现象
- § 7.7 变位齿轮
- § 7.8 齿轮传动的失效形式和设计准则
- § 7.9 齿轮材料及热处理
- § 7.10 齿轮传动的精度
- § 7.11 直齿圆柱齿轮传动的作用力及计算载荷
- § 7.12 直齿圆柱齿轮的强度计算
- § 7.13 斜齿圆柱齿轮传动
- § 7.14 直齿圆锥齿轮传动
- § 7.15 蜗杆传动
- § 7.16 齿轮传动、蜗杆传动的效率、润滑以及蜗杆传动的热平衡计算
- § 7.17 齿轮、蜗杆及蜗轮的结构设计
- 习 题

第 8 章 轮系及减速器

- § 8.1 定轴轮系及传动比
- § 8.2 周转轮系及传动比

§ 8.3 混合轮系及传动比

§ 8.4 轮系的应用

§ 8.5 减速器简介

习 题

第 9 章 轴与联轴器、离合器

§ 9.1 轴的功用和类型

§ 9.2 轴的材料

§ 9.3 轴的结构设计

§ 9.4 轴的强度计算

§ 9.5 轴的刚度计算

§ 9.6 轴的临界转速的概念

§ 9.7 联轴器、离合器的类型和应用

§ 9.8 固定式刚性联轴器

§ 9.9 可移式刚性联轴器

§ 9.10 弹性联轴器

§ 9.11 牙嵌离合器

§ 9.12 圆盘摩擦离合器

习 题

第 10 章 滑动轴承

§ 10.1 概述

§ 10.2 滑动轴承的结构

§ 10.3 轴瓦和轴承衬的材料

§ 10.4 不完全液体润滑径向滑动轴承的设计计算

§ 10.5 滑动轴承的润滑

§ 10.6 液体动力润滑滑动轴承简介

习 题

第 11 章 滚动轴承

§ 11.1 滚动轴承的基本类型和特点

§ 11.2 滚动轴承的代号

§ 11.3 滚动轴承的选择计算

§ 11.4 滚动轴承的润滑与密封

§ 11.5 滚动轴承的组合设计

习 题

第 12 章 弹簧

§ 12.1 弹簧的功用和类型

- § 12.2 圆柱螺旋压缩(拉伸)弹簧的结构和几何尺寸
- § 12.3 圆柱螺旋压缩(拉伸)弹簧的制造、材料和许用应力
- § 12.4 圆柱螺旋压缩(拉伸)弹簧的设计计算
- § 12.5 其他弹簧简介

习 题

第 13 章 机械的调速和平衡

- § 13.1 概述
- § 13.2 机械速度波动及其调节
- § 13.3 飞轮的近似设计方法
- § 13.4 转子的平衡

习 题

第 14 章 一般机械传动系统的设计

- § 14.1 机械传动方案的设计
- § 14.2 机械传动的运动、动力参数的计算
- § 14.3 机械传动系统的评价

习 题

附录 I 公差与配合简介

附录 II 机械零件制造工艺简介

主要参考文献

第 1 章 绪 论

§ 1.1 本课程的研究对象及主要内容

本课程的研究对象是机械。机械是什么？机械是机器和机构的总称。

机器是执行机械运动的装置,用来变换或传递能量、物料(包括被加工对象、被搬运物体等)和信息。凡将其他形式的能量变换成机械能的机器统称为原动机,如电动机、内燃机(分别将电能和热能变换成机械能)等都是原动机。凡利用机械能实现能量、物料、信息的变换或传递的机器统称为工作机,如金属切削机床(变换物料外形)、运输机(传递物料)、发电机(机械能变换为电能)、打字机(变换和传递信息)、包装机、轧钢机、缝纫机、自行车等都属于工作机。

把一个或几个构件的运动变换成其他构件所需的具有确定运动的构件系统称为机构。如连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、间歇运动机构等。机构是机器的主要组成部分。

如图 1-1 所示为单缸四冲程内燃机,它是由气缸体 1、曲轴 2、连杆 3、活塞 4、进气阀 5、排气阀 6、顶杆 7、凸轮 8、齿轮 9 和齿轮 10 等组成的。燃气推动活塞做往复移动,经连杆转变为曲轴的连续转动。凸轮和顶杆是用来启闭进气阀和排气阀的。为了保证曲轴每转两周进、排气阀各启闭一次,曲轴与凸轮轴之间安装了齿数比为 1:2 的齿轮。这样,当燃气推动活塞运动时,各构件协调地动作,进、排气阀有规律地启闭,加上气化、点火等装置的配合,就把热能转换为曲轴回转的机械能。

如在图 1-1 所示的内燃机中,活塞、连杆、曲轴和气缸体组成一个曲柄滑块机构,可将活塞的往复运动变为曲柄的连续转动。凸轮轴及与它连成一体的齿轮与气缸体组成凸轮机构,将凸轮轴的连续转动变为顶杆有规律的间歇移动。曲轴和凸轮轴上的齿轮与气缸体组成齿轮机构,使两轴保持一定的速比。由此可见,一部机器可以包含一个或若干个机构。例如,电动机只包含一个机构,而内燃机则包含曲柄滑块机构、凸轮机构、齿轮机构等若干个机构。

通过上面的例子可看出,就功能而言,一般机械系统由四个主要部分组成:动力部分、

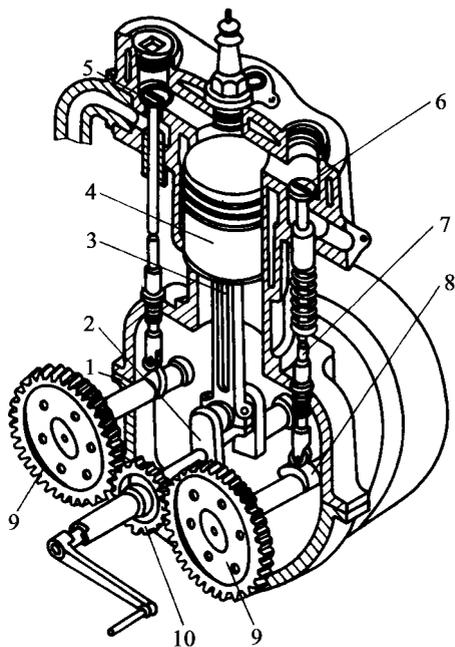


图 1-1 单缸内燃机

传动部分、执行部分以及控制部分(图中未画出)。动力部分可采用人力、畜力、风力、液力、电力、热力、磁力、压缩空气等作动力源,其中利用电力和热力的原动机(电动机和内燃机)使用最广;传动部分和执行部分由各种机构组成,是机器的主体;控制部分包括各种控制机构(如内燃机中的凸轮机构)、电气装置、计算机和液压系统、气压系统等。

机构与机器的区别在于:机构只是一个构件系统,而机器除构件系统之外,还包含电气、液压等其他装置;机构只用于传递运动和力,机器除传递运动和力之外,还应当具有变换或传递能量、物料、信息的功能。但是,在研究构件的运动和受力情况时,机器与机构之间并无区别。因此,习惯上用“机械”一词作为机器和机构的总称。

从运动的角度来看,机构中的构件是实现运动的基本单元,它由一个或多个无相对运动的零件固结而成。从制造的角度来看,机器的基本组成要素是零件,零件是制造单元,如单个的齿轮、凸轮、连杆体等。通常,把由一组零件组合起来为实现某一功能而形成的独立装配体称为部件,部件是装配单元,如联轴器、滚动轴承、减速器等。

概括地说,机械中的零件或部件可分为两大类:一类是通用零部件,在各种机械中经常会用到,如螺钉、轴、轴承、齿轮、联轴器、弹簧等;另一类是专用零部件,只是在特定类型的机器中用到,如直升机的螺旋桨、内燃机的曲轴和活塞等。机械设计基础主要研究机械中的常用机构和通用零部件的工作原理、结构特点、基本的设计理论和计算方法等。值得注意的是,机器是由机构和零部件组成的整体。

§ 1.2 本课程的性质、任务和学习要求

机械设计基础是高等工科学校有关专业必修的一门设计性质的技术基础课,学好本课程将为后续的专业课程的学习打下坚实的基础。

本课程的主要任务是:初步培养学生正确的设计思想,使学生掌握常用机构及通用零部件的基本知识、基本理论和基本技能,初步具备选用和设计常用机构和通用零部件的能力,为进一步学习专业课程和今后从事机械技术工作打好基础。

通过本课程的学习,学生应达到的基本要求是:熟悉常用机构及通用机械零部件的工作原理、应用场合、选择原则和设计方法;初步具备设计机械传动装置和简单机械的能力;能较熟练地使用标准、规范、手册等技术资料;具有常规实验的基本技能;初步具备正确使用和维护一般机械的能力,并且能够分析和处理机械中常用机构和通用零部件经常发生的一般故障。机械设计基础需要综合运用许多先修课程的知识,如画法几何及机械制图、工程材料、工程力学、机械制造基础、金工实习等,故涉及的知识面广且偏重于应用。因此,学习本课程时,应重视理论联系实际,重视基本技能的训练,注意学习分析和解决问题的方法,力求运用本课程所学的知识解决一般简单机械及其零部件的设计问题。

§ 1.3 机械设计的基本要求和一般程序

一、机械设计的基本要求

机械的种类繁多,但设计的基本要求大致相同,一般有如下要求:

1. 功能要求

机械设计的目的是要使所设计的机械实现预期的功能。为此,设计者必须正确地选择机械的工作原理、机构的类型和拟订机械传动系统方案,并且所选择的机构类型和拟订的机械传动系统能满足运动和动力性能的要求。

2. 可靠性要求

在满足功能要求的前提下,机械应在预定的使用期间能安全可靠地工作,即机械在使用中不发生破坏,不因零件的过度磨损或变形而失效,不能产生强烈的振动和冲击而损害机器的工作性能,更不能因某些零部件的破坏而引起人身和财产安全事故。为满足可靠性要求,必须正确地进行机械的整体设计及零部件的强度计算。

3. 经济性要求

机械产品的经济性体现在设计、制造、销售和使用的全过程中。产品的成本在很大程度上取决于设计阶段,所以,设计人员进行机械设计时,应在保证质量的前提下采用简单实用的设计方案,尽可能地降低原材料消耗,在满足要求的前提下选用价格低廉的材料,尽量采用标准零部件,充分考虑零部件的结构工艺性,以减少加工装配成本。

4. 标准化要求

标准化程度是衡量一个国家生产技术水平和管理水平的尺度之一,标准化工作是我国现行的很重要的一项技术政策,设计工作中的全部行为都要满足标准化的要求。因此,从事机械设计时,除应尽量采用标准件外,自制件的某些尺寸、参数也应参照标准、规范来选取。

二、机械设计的一般程序

机械设计的过程是一个复杂、细致的工作过程,不可能有固定不变的程序,需视具体情况而定。机械设计的主要过程大致上可分为三个主要阶段(图 1-2):产品规划阶段、方案设计阶段和技术设计阶段。

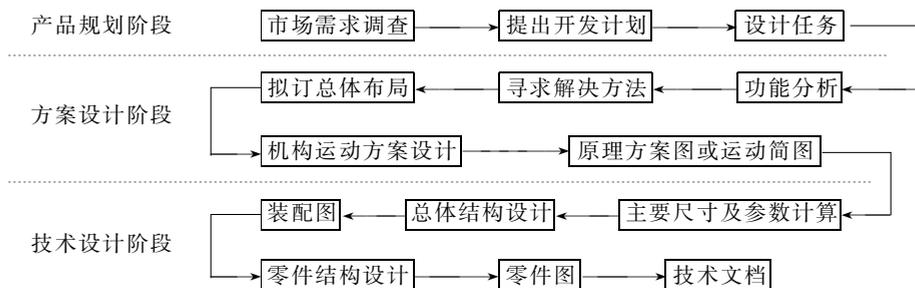


图 1-2 机械设计的主要过程

产品规划阶段包括:进行市场调查,研究市场需求,提出开发计划并确定设计任务书。方案设计阶段包括:确定机械的功能,寻求合适的解决方法,初步拟订总体布局,对机构进行运动分析及其方案设计,提出原理方案图或运动简图。技术设计阶段包括:选择材料,计算关键零部件的主要参数,进行总体结构设计、零件结构设计,绘制装配图、零件图,编制其他一些技术文档。值得注意的是:机械设计的过程是一个不断完善的过程,各个设计阶段并非简单地按顺序进行,为了改进设计结果,经常需要在各步骤之间反复、交叉地进行修改,直至获得满意的结果为止。

§ 1.4 机械零件设计概述

一、机械零件的工作能力和失效形式

机械零件由于某种原因不能正常工作时称为失效。

机械零件的工作能力是指在一定的运动、载荷和环境条件下,在预定的使用期限内,不发生失效,安全实现规定功能的限度。通常,此限度是对载荷而言,所以习惯上亦称承载能力。机械零件有如下主要失效形式:

1. 断裂

零件在受外载荷作用时,某一危险截面上的应力超过零件的强度极限时,会发生脆性断裂,或零件在变应力作用下会发生疲劳断裂,如轴的断裂、齿轮轮齿的断裂等。

2. 工作表面点蚀

零件的工作表面长期受接触变应力作用时,在其表面会产生疲劳裂纹,从而引起表层金属的点状剥落,这就是点蚀,如齿轮的齿面点蚀、轴承滚道的点蚀等。点蚀会引起振动、冲击和噪声,使机器的运转精度下降。

3. 塑性变形

作用在零件上的应力超过了材料的屈服极限后,零件会产生塑性变形。塑性变形过大,会改变零件的正确工作位置,引起运转不平衡,产生振动等。

4. 过大的弹性变形

零件的弹性变形虽然是可以恢复的,但过大的弹性变形也会影响零件的正常工作。如机床主轴的弯曲弹性变形过大,不仅会引起振动,而且会使轴的回转精度降低,造成被加工零件的质量严重下降。

5. 磨损

两个接触的并做相对运动的工作表面可能会发生磨损现象。工作表面的过度磨损会影响机器的工作性能,会使运动不连续而引起冲击,随着材料的丧失会削弱零件的强度。

6. 失去振动稳定性

对于高速旋转的零件,当作用在其上的周期性干扰力的频率与零件的固有频率接近时,会产生共振,导致振幅急剧增大,这种现象称为失去振动稳定性。共振会使零件甚至机器在短时间内遭到致命破坏。

机械零件可能的失效形式很多,归纳起来主要有几个方面的问题:强度问题(断裂、点蚀、塑性变形)、刚度问题(弹性变形)、耐磨性问题(磨损)和振动稳定性问题。机械零件在工作中到底会出现哪种形式的失效,与很多因素有关,比如材料、使用条件、受载状况等,要根据具体情况认真分析,找出其主要的失效形式。

二、机械零件的计算准则

为保证零件在预定的期间内正常工作,设计时应针对可能出现的失效形式,相应地确定零件工作能力的判定条件。这些判定条件就是机械零件的设计准则,如果所设计的零件满足这些判定条件,则说明它们在工作中是安全的。主要的准则有:强度、刚度、耐磨性、振动稳定性和耐热性。它们是计算并确定零件基本尺寸的主要依据,故称为计算准则。

1. 强度准则

强度表明了零件抵抗断裂、点蚀及塑性变形等失效的能力。具备足够的强度是保证机械零件工作能力的最基本要求。强度的计算准则通常采用比较应力大小的方式来表达,即强度的计算准则为:工作应力 \leq 许用应力,即 $\sigma \leq [\sigma], \tau \leq [\tau]$ 。上述的前三种失效形式均适用强度的计算准则来判定。

2. 刚度准则

刚度反映了零件抵抗弹性变形的能力。刚度准则设立的目的是防止零件发生过的弹性变形,即刚度的计算准则为:实际变形量 \leq 许用变形量,即 $y \leq [y], \theta \leq [\theta]$ 。

3. 耐磨性

在各种机械中,凡是具有相对运动趋势的接触表面间都存在摩擦。其摩擦将导致零件表面材料的逐渐丧失或迁移,即形成磨损。磨损会影响机器的效率,降低工作的可靠性,甚至促使机器提前报废。据统计,世界上约有1/3的能源消耗在摩擦上;在各种报废的机械零件中,约有80%是由于磨损而引起的。因此,在设计时就应预先考虑如何避免或减轻磨损,以保证机器达到设计寿命,这就要求零件有抗磨损的能力,即耐磨性。

一个零件的磨损过程大致可分为如图1-3所示的三个阶段,即磨合磨损阶段、稳定磨损阶段、剧烈磨损阶段。

磨合磨损阶段是新机器或刚大修完的机器在运转初期,通过逐渐增加载荷,迅速磨去零件制造时遗留下来的波峰尖部。随着波峰高度的逐渐降低,摩擦副的实际接触面积加大,磨损速度逐渐减缓,零件进入稳定磨损阶段。

稳定磨损阶段是零件在平衡而缓慢的速度下磨损,它标志着摩擦条件保持相对恒定。这个阶段的长短代表零件使用寿命的长短。

剧烈磨损阶段是零件经过稳定磨损阶段后,零件的表面遭到破坏,两摩擦零件间的间隙增大,出现噪声和振动。这样就无法保证良好的润滑状态,使摩擦副的温升急剧增大,磨损速度也急剧增大,此时必须停机,更换零件。

上述三个阶段是正常情况下零件的磨损阶段。在设计和使用时,要力求缩短磨合磨损期,延长稳定磨损期,推迟剧烈磨损期的到来,对延长机器的使用寿命有着十分重要的意义。

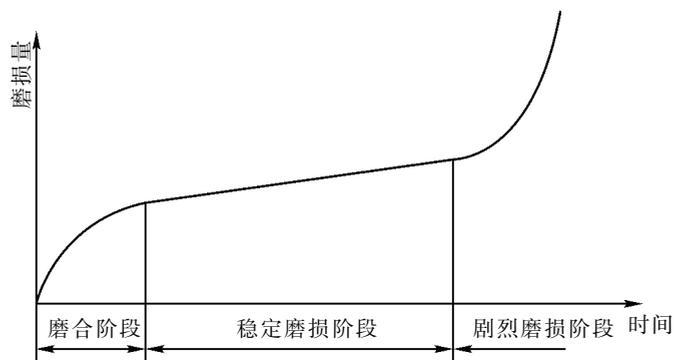


图 1-3 机件的磨损量与工作时间的关系 (磨损曲线)

磨损按其见解的不同可分为两种:一种是根据磨损结果着重对磨损表面外观的描述,如点蚀磨损、胶合磨损、擦伤磨损等;另一种则是根据磨损机理来分类,主要有磨粒磨损、粘着

磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、液体侵蚀磨损等。

(1)磨粒磨损 硬质颗粒进入摩擦表面,或硬表面上的凸峰在摩擦过程中引起表层材料脱落的现象称为磨粒磨损。

(2)粘着磨损(胶合) 摩擦表面的接触实际上是高低不平的微凸体接触。高速轻载时温升使得接触区润滑油膜破裂,低速重载时也不易形成润滑油膜,这都将导致接触处发生粘着。在此情况下,两表面相对滑动,粘着撕脱,材料从一个表面转移到另一个表面,这种现象称为粘着磨损,也称为胶合。

(3)疲劳磨损(疲劳点蚀) 疲劳点蚀产生在零件表层,属于表面磨损范畴,故也称疲劳磨损。

(4)腐蚀磨损 在摩擦过程中,与周围介质发生化学反应或电化学反应的磨损称为腐蚀磨损。

(5)流体侵蚀磨损(冲蚀磨损) 由液流或气流冲蚀作用引起的机械磨损称为流体侵蚀磨损。

磨损是一个相当复杂的现象,影响的因素也很多,除疲劳磨损外,目前尚无可靠的计算方法,通常采取下列措施减少磨损:

第一,选用减摩、耐磨性能较好的材料;

第二,对摩擦表面进行润滑;

第三,进行耐磨性计算。摩擦表面的耐磨性计算也是条件性的,实用的计算是限制摩擦面间的压强 P 和 P_v 值(详见第 10 章);

第四,提高零件的加工精度和表面质量;

第五,完善密封,正确使用和维护等。

当然,对于其他的失效形式,还可以确定相应的工作能力判定准则。如振动稳定性准则等,在此不一一赘述。设计机械零件时,并不需要用到所有的判定准则,而是针对零件可能发生的主要失效形式,选用一个或几个相应的判定准则来确定零件的主要尺寸或参数。例如,对于轴的设计,当它的主要失效形式是断裂时,应采用强度准则进行设计;主要失效形式是弹性变形时,则采用刚度准则。由于强度准则是机械设计中经常遇到的问题,下面将对它作进一步的讨论。

三、机械零件的强度

1. 载荷和应力

机械零件的载荷是指零件工作时所受的外力、弯矩或扭矩。设计机械零件时,载荷可通过力学计算或实验来测定,通常作为已知条件。载荷可分为名义载荷和计算载荷。在理想的平稳工作条件下,作用在零件上的载荷称为名义载荷。实际上,机器工作时会受到各种干扰因素的影响,如振动、冲击、工作阻力变化等,使零件受到附加载荷的作用,因此,工作中作用于零件上的载荷要大于名义载荷,这种载荷称为计算载荷。设计机械零件时应该采用计算载荷设计,其值等于载荷系数与名义载荷的乘积:

$$F_{ca} = KF \quad (1-1)$$

式中, F_{ca} 为计算载荷; F 为名义载荷; K 为载荷系数,它考虑了各种干扰因素的影响。

根据载荷的性质不同,还可将载荷分为静载荷和变载荷两类。不随时间变化或变化缓慢的载荷称为静载荷,随时间变化的载荷称为变载荷。受载荷作用后,零件的体积内部或表

面会产生拉、压、弯、剪等各种应力,并产生相应的变形。根据名义载荷求出的应力称为名义应力,而根据计算载荷求出的应力称为计算应力。按照应力随时间的变化情况,应力也可分为静应力和变应力。不随时间变化的应力,称为静应力(图 1-4(a))。纯粹的静应力是没有的,但如变化缓慢,就可看成是静应力。例如,锅炉的内压力所引起的应力,拧紧螺母所引起的应力等。随时间变化的应力,称为变应力。具备周期性的变应力称为循环变应力,如非对称循环变应力、对称循环变应力、脉动循环变应力等,其变化规律如图 1-4(b)、(c)、(d)所示。图中 T 为应力循环周期。图 1-4 中的 σ_{\max} 为最大应力, σ_{\min} 为最小应力, σ_m 为平均应力, σ_a 为应力幅。它们关系是:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1-2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1-3)$$

最小应力 σ_{\min} 与最大应力 σ_{\max} 之比称为循环特征 r , 即

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

由图 1-4(c) 可知, 对于对称循环变应力, 因其 $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$, 故 $r = -1$, 且 $\sigma_m = 0$, $\sigma_a = \sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$; 对于脉动循环变应力, 因 $\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_{\max} \neq 0$, 故 $r = 0$, 且 $\sigma_m = \sigma_a = \sigma_{\max}/2$; 对于非对称循环变应力, 其 r 在 $+1 \sim -1$ 之间变化; 静应力也可看成是变应力的特例, 其 $\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$, $r = +1$ 。

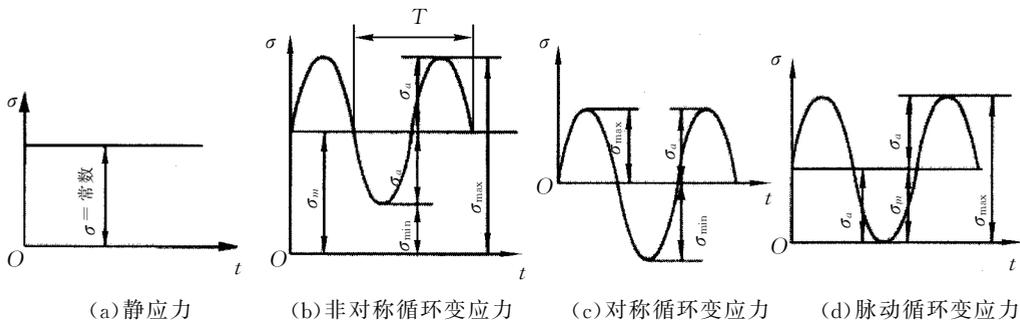


图 1-4 常见的应力种类

2. 静应力下的许用应力

在静应力作用下,机械零件的失效形式主要是断裂和塑性变形,相应的强度条件可表示为

$$\sigma_{ca} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{\lim}}{S} \quad \tau_{ca} \leq [\tau] = \frac{\tau_{\lim}}{S} \quad (1-4)$$

式中, σ_{ca} 、 τ_{ca} 分别为计算正应力和切应力, $[\sigma]$ 、 $[\tau]$ 分别为许用正应力和许用切应力, σ_{\lim} 、 τ_{\lim} 分别为零件材料的极限正应力和极限切应力, S 为安全系数。

在以后的讨论中只涉及正应力 σ , 若应力是切应力 τ , 则只需将 σ 换为 τ 即可。静应力作用下, 极限应力 σ_{\lim} 取决于机械零件的失效形式。对于塑性材料制成的零件, 其主要失效形式是塑性变形, 此时应取材料的屈服极限 σ_s 作为极限应力 σ_{\lim} 。对于脆性材料制成的零件, 其主要失效形式是断裂, 所以应取材料的强度极限 σ_b 作为极限应力 σ_{\lim} 。因此, 静应力下的

强度条件为

$$\text{对于塑性材料:} \quad \sigma_{ca} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{S} \quad (1-5)$$

$$\text{对于脆性材料:} \quad \sigma_{ca} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_b}{S} \quad (1-6)$$

3. 变应力下的许用应力

变应力作用下,机械零件的主要失效形式是疲劳断裂,其强度条件在形式上与静应力作用时相同,关键是极限应力的确定方法不同。

疲劳断裂是损伤的积累,首先在零件表面产生初始裂纹,在变应力的反复作用之下,裂纹的尖端部分发生反复的塑性变形,使得裂纹不断向纵深发展,当裂纹扩展到一定程度后,零件的有效截面面积不足以承受外载,最终导致零件断裂。由此可见,疲劳断裂不仅与变应力的大小有关,还与变应力作用的时间或变应力循环次数密切相关,也与循环特征 r 有关。零件发生疲劳断裂所需的最大应力远比零件材料的强度极限低,也就是说,在一定大小的静应力作用下,零件不会发生脆性断裂,但在同样大小的变应力作用下,却可能发生疲劳断裂。

如图 1-5 所示的为循环特征等于 r 时的应力 σ 与应力循环次数 N 之间的关系曲线,称为疲劳曲线。试验表明,零件(或试件)所受的应力加大,则零件(或试件)发生疲劳断裂的应力循环次数将减少;反之,应力循环次数增加,即零件的寿命增长。图 1-5 中, σ_{rN} 为对应循环次数 N 的极限应力,称为疲劳极限。当循环次数 N 超过某一数值 N_0 后,疲劳曲线趋向于一水平线而减小,可认为应力循环无限次后试件仍不会发生疲劳断裂。 N_0 称为循环基数,对应的疲劳极限是 σ_r 。 N_0 的左侧看成有限寿命区,右侧看成无限寿命区。从图 1-5 中可明显地看出,应力循环次数越少,极限应力(疲劳极限)越高。在有限寿命区 ($N \leq N_0$),疲劳曲线满足关系式: $\sigma_{rN}^m N = \text{常数}$,则

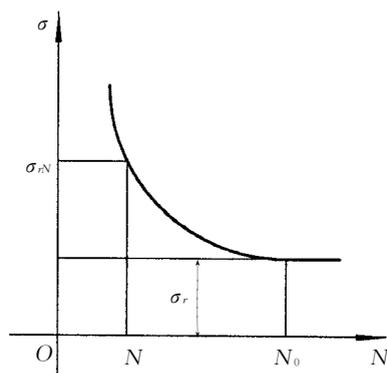


图 1-5 疲劳曲线

$$\sigma_{rN}^m N = \sigma_r^m N_0 \quad (1-7)$$

由此得

$$\sigma_{rN} = \sigma_r \left(\frac{N_0}{N} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1-8)$$

式中, m 是与应力状态有关的指数,若零件受弯曲应力作用,则取 $m=9$ 。在无限寿命区 ($N > N_0$),疲劳极限均为 σ_r 。不同材料的 N_0 、对称或脉动循环变应力下的 σ_r 可通过试验测定,也可从有关手册中查取。

疲劳极限 σ_{rN} 和 σ_r 就是变应力作用下的极限应力,是计算零件许用应力的依据。另外,零件的疲劳强度还与应力集中、绝对尺寸大小、表面状态等因素有关,故计算许用应力时,还需引入有效应力集中系数 κ_σ 、尺寸系数 ϵ_σ 和表面状态系数 β ,其值可在有关设计手册中查取。这样,变应力作用时的强度条件应为

$$\sigma_{ca} \leq [\sigma] = \frac{\epsilon_\sigma \beta \sigma_{rN}}{\kappa_\sigma S} \quad (1-9)$$

处于无限寿命区时,将上式中的 σ_{rN} 替换为 σ_r 。

4. 安全系数 S

在强度计算中引入安全系数,是考虑到设计中的一些不确定因素的影响,这样可提高零件的可靠性。这些因素主要有:载荷或应力计算的准确性、零件的重要程度、材料性能参数的准确性、计算方法的合理性等。所以,如何合理地选择安全系数是强度计算时应认真考虑的一个问题。若 S 取得过大,则设计出来的机器笨重;取得过小,又不安全。经过长期的生产实践,各机械制造部门都制订有适合本部门的安全系数选取原则或规范。本教材在以后相关章节中给出了安全系数的取值范围,应根据具体要求酌情选取。零件的重要程度高、破坏后会严重的人身安全事故或设备事故时, S 应取大值。如飞机起落架的受力零件、起重机的承重零件、汽车转向器拉杆等。反之,可适当取小些,以尽量减小机器的体积和重量。

四、机械零件的接触强度

机械零件的强度有整体强度和接触强度之分。前面所述的强度为机械零件的整体强度,是指零件受载时在较大的体积内产生应力,零件的破坏也发生在较大的体积范围内。对于理论上点接触或线接触的两个零件,当有载荷作用时,由于局部变形使接触处形成小的接触区,在面积很小的接触区表层产生很大的应力,称为接触应力。接触应力的分布如图 1-6 所示,其最大值用 σ_H 表示,在接触应力作用下零件的强度称为接触强度,它属于表面强度。如齿轮、滚动轴承等机械零件,都是通过很小的接触面积传递载荷的,因此它们的承载能力不仅取决于整体强度,还取决于表面的接触强度。机械零件的接触应力通常是随时间作周期性变化的,它们在交变应力的重复作用下,其表层先是产生疲劳裂纹,如有润滑油进入疲劳裂纹,在裂纹封口压缩的情况下,裂纹中产生极高的油压,迫使裂纹加速扩展,直至表层金属呈小片状剥落下来,在零件表面形成小坑(图 1-6),这种现象称为疲劳点蚀。点蚀出现后,使得零件接触面积减小,零件光滑的表面被损坏了,既降低了承载能力,并且还会引起振动和噪声。疲劳点蚀常是齿轮、滚动轴承等零件的主要失效形式。

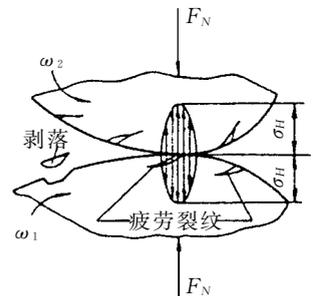


图 1-6 接触应力与疲劳点蚀

接触应力的计算是一个弹性力学问题。对于线接触,弹性力学给出的计算公式为

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_n}{\pi b} \cdot \frac{\frac{1}{\rho_e} \pm \frac{1}{\rho_2}}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}}} \quad (1-10)$$

式中, F_n 为作用于接触线上的总压力; b 为接触长度; ρ_1 、 ρ_2 分别为零件 1 和零件 2 接触处的曲率半径,通常令 $\frac{1}{\rho_e} = \frac{1}{\rho_2} \pm \frac{1}{\rho_1}$, 称为综合曲率, $\rho_e = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_2 \pm \rho_1}$, 称为综合曲率半径,其中正号用于外接触,负号用于内接触; μ_1 、 μ_2 分别为零件 1 和零件 2 材料的泊松比; E_1 、 E_2 分别为零件 1 和零件 2 材料的弹性模量; σ_H 为最大接触应力(亦叫赫兹应力)。

设计时应满足的接触疲劳强度条件为

$$\sigma_H \leq [\sigma_H], [\sigma_H] = \frac{\sigma_{Hlim}}{S} \quad (1-11)$$

式中, $[\sigma_H]$ 为材料的许用接触应力; σ_{Hlim} 为实验材料的接触疲劳强度极限; S 为接触疲劳强度安全系数。考虑到接触应力的局部性及离开接触中心应力迅速减小等因素,可取 S_H