
机 械 设 计

程志红 主编

东南大学出版社

· 南 京 ·

内 容 提 要

机械设计是机械类专业的专业基础核心课程,适用于机械工程及自动化,热能与动力工程,测试技术与仪器等专业,建议学时为 64 学时。本书是作者在长期的教学与学术研究的基础上,考虑到市场经济的发展对机械设计人才提出更高的要求而写成的。

本书共分 13 章,它们是机械设计总论,螺纹联接和螺旋传动,轴毂联接,带传动,链传动,齿轮传动,蜗杆传动,轴,滑动轴承,滚动轴承,联轴器、离合器和制动器,弹簧,典型零部件结构设计。

本书可作为高等院校工科机械类专业本专科生学习“机械设计”课程的教材,也可供其他有关专业的教师与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计/程志红主编. —南京:东南大学出版社,
2006.6

ISBN 7-5641-0346-9

I. 机... II. 程... III. 机械设计—高等学校—教材 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 130757 号

机械设计

主 编:程志红

责任编辑:张 煦

装帧设计:王 玥

出版发行:东南大学出版社

社 址:江苏省南京市四牌楼 2 号(210096)

经 销:江苏省新华发行集团有限公司

制 版:南京水晶山制版有限公司

印 刷:大丰市科星印刷有限责任公司印制

版 次:2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:13.75

字 数:343 千

印 数:1~3 000 册

定 价:22.00 元

前 言

本书是根据原国家教委高教司的高等工业学校《机械设计课程教学基本要求》(1995年修订版),并参考各高校近年来关于机械设计课程的讨论意见编写的。

作为机械类本科各专业必修的技术基础课程,本着“打好基础、精选内容、注重设计能力培养”的精神,本书在编写中突出体现以下主要特点:

1. 精选机械零部件设计的基本内容,注重工程应用

弱化成熟的理论公式推导过程,侧重设计参数的选择方法,以及设计零件的工程应用。

2. 增加反映现代机械设计方法的新内容

适当增加反映机械设计领域的新进展、新内容和先进的设计理念和设计方法。

3. 加强机械零部件结构设计的内容

将机械零部件中有关结构设计问题集中起来讲述,突出结构设计的准则和设计方法,有利于提高学生的结构设计能力。

4. 增强 CAD 内容

在本书配套的上机教材中介绍常用数表和线图的程序化处理方法,以及典型零部件的计算机辅助程序设计,有利于快速得到多方案设计结果,也可满足学生上机实验训练要求。

5. 采用最新国家标准

本书在内容安排上分为五大部分:第一部分为机械设计总论,包括机械设计的基本问题、基本概念;第二部分为联接件设计,包括螺纹联接和轴毂联接;第三部分为传动件设计,包括带传动、链传动、齿轮传动和蜗轮蜗杆传动;第四部分为轴系零部件及弹簧设计,包括轴、滚动轴承、滑动轴承、联轴器和离合器等;第五部分为机械零部件的结构设计。

要求学生通过本课程的学习,能够掌握通用机械零件的设计原理、方法和机械设计的一般规律,具有设计一般机械的能力;树立正确的设计思想,了解国家当前的有关技术经济政策;具有运用标准、规范、手册和图册等有关技术资料的能力;掌握典型机械零件的实验方法和程序设计方法;对机械设计的新发展有所了解。

由于水平有限,书中尚存错误与不足之处在所难免,敬请广大同仁和读者不吝指正。

编 者

2006年3月

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

目 录

1	机械设计总论.....	(1)
1.1	机械设计的基本要求及设计程序.....	(1)
1.1.1	机械设计的基本要求.....	(1)
1.1.2	机械设计的程序.....	(1)
1.2	机械零件的主要失效形式和计算准则.....	(3)
1.2.1	机械零件的主要失效形式.....	(3)
1.2.2	机械零件的计算准则.....	(3)
1.3	摩擦、磨损及润滑.....	(4)
1.3.1	摩擦.....	(4)
1.3.2	磨损.....	(7)
1.3.3	润滑.....	(8)
1.4	现代机械设计方法简介.....	(12)
1.4.1	可靠性设计.....	(12)
1.4.2	动态分析设计.....	(13)
1.4.3	最优化设计.....	(13)
1.4.4	虚拟设计.....	(13)
1.4.5	并行设计.....	(14)
1.4.6	绿色设计.....	(14)
2	螺纹联接和螺旋传动.....	(15)
2.1	螺纹.....	(15)
2.1.1	螺纹的类型与应用.....	(15)
2.1.2	圆柱螺纹的基本参数.....	(16)
2.2	螺纹联接的类型及螺纹联接件.....	(16)
2.3	螺纹联接的预紧和防松.....	(18)
2.4	螺栓组联接的结构设计与受力分析.....	(20)
2.4.1	螺栓组联接的结构设计.....	(20)
2.4.2	螺栓组联接的受力分析.....	(20)
2.5	单个螺栓联接的强度计算.....	(23)
2.5.1	配合螺栓联接.....	(23)
2.5.2	普通螺栓联接.....	(24)
2.5.3	螺纹联接的材料、许用应力与许用安全系数.....	(27)
2.6	提高螺栓联接强度的措施.....	(29)
2.7	螺旋传动.....	(31)
2.7.1	螺旋传动的类型与应用.....	(31)

2.7.2	滑动螺旋传动的设计	(32)
	习题 2	(35)
3	轴毂联接	(39)
3.1	键联接	(39)
3.1.1	键联接的类型及应用	(39)
3.1.2	平键联接的选择计算	(40)
3.2	花键联接	(41)
3.2.1	花键联接的类型及应用	(41)
3.2.2	花键联接的强度计算	(42)
3.3	销联接	(42)
	习题 3	(44)
4	带传动	(46)
4.1	概述	(46)
4.1.1	带传动类型及应用	(46)
4.1.2	普通 V 带的规格	(47)
4.2	带传动的工作情况分析	(47)
4.2.1	带传动受力分析	(47)
4.2.2	带传动运动分析	(49)
4.2.3	带传动工作应力分析	(50)
4.3	V 带传动的设计计算	(51)
4.3.1	带传动承载能力	(51)
4.3.2	V 带传动的设计计算	(54)
4.4	带传动的张紧	(58)
	习题 4	(58)
5	链传动	(60)
5.1	概述	(60)
5.2	传动链的结构特点	(60)
5.2.1	套筒滚子链结构	(60)
5.2.2	滚子链链轮齿形、材料	(62)
5.3	链传动的运动特性	(63)
5.3.1	链传动不均匀性	(63)
5.3.2	链传动的动载荷	(64)
5.4	滚子链的选择与计算	(65)
5.4.1	失效形式和功率曲线图	(65)
5.4.2	链传动的选择计算	(65)
5.5	链传动的润滑、布置和张紧	(69)
5.5.1	链传动的润滑	(69)
5.5.2	链传动的布置	(70)
5.5.3	链传动的张紧	(71)

习题 5	(71)
6 齿轮传动	(73)
6.1 概述.....	(73)
6.2 齿轮传动的失效形式与设计准则.....	(73)
6.2.1 失效形式	(73)
6.2.2 设计准则	(74)
6.3 齿轮材料及其热处理.....	(74)
6.4 齿轮传动的计算载荷.....	(76)
6.5 标准直齿圆柱齿轮传动的强度计算	(77)
6.5.1 直齿圆柱齿轮受力分析	(77)
6.5.2 齿面接触疲劳强度计算	(77)
6.5.3 齿根弯曲疲劳强度计算	(80)
6.6 设计参数选择.....	(84)
6.7 标准斜齿圆柱齿轮传动的强度计算.....	(89)
6.7.1 斜齿圆柱齿受力分析.....	(89)
6.7.2 斜齿轮传动的强度计算	(90)
6.8 标准直齿锥齿轮传动的强度计算.....	(92)
6.8.1 几何尺寸计算	(92)
6.8.2 标准锥齿圆柱齿受力分析	(93)
6.8.3 标准锥齿圆柱传动的强度计算	(94)
6.9 齿轮传动的效率及润滑.....	(96)
习题 6	(98)
7 蜗杆传动	(101)
7.1 蜗杆传动的类型.....	(101)
7.2 ZA 蜗杆传动的主要参数和几何尺寸计算	(102)
7.2.1 ZA 蜗杆传动的主要参数	(102)
7.2.2 蜗杆传动的几何尺寸计算	(104)
7.3 ZA 蜗杆传动承载能力计算	(105)
7.3.1 蜗杆传动的失效形式、设计准则和材料	(105)
7.3.2 蜗杆传动的受力分析及计算载荷	(106)
7.3.3 蜗轮齿面接触疲劳强度计算	(107)
7.3.4 蜗轮齿根弯曲疲劳强度计算	(108)
7.4 蜗杆传动的效率、润滑、热平衡计算.....	(108)
7.4.1 蜗杆传动的效率	(108)
7.4.2 蜗杆传动的润滑	(109)
7.4.3 蜗杆传动的热平衡计算	(110)
习题 7	(113)
8 轴	(114)
8.1 轴的类型、应用和常用材料	(114)

8.1.1	轴的类型、特点和应用	(114)
8.1.2	轴的材料	(115)
8.1.3	轴设计中应解决的主要问题	(116)
8.2	轴的结构设计	(116)
8.2.1	拟定轴上零件的布置方案	(116)
8.2.2	轴上零件的定位	(117)
8.3	轴的工作能力计算	(118)
8.3.1	按扭转强度条件计算	(118)
8.3.2	按弯扭合成强度条件计算	(119)
8.3.3	按疲劳强度条件进行精确校核	(120)
8.3.4	按静强度条件进行校核	(123)
8.3.5	轴的刚度校核计算	(124)
8.3.6	轴的振动及振动稳定性的概念	(125)
8.4	提高轴的强度、刚度和减轻重量的措施	(125)
	习题 8	(131)
9	滑动轴承	(133)
9.1	滑动轴承类型、结构和材料	(133)
9.1.1	滑动轴承的类型	(133)
9.1.2	径向滑动轴承的结构形式	(133)
9.1.3	推力滑动轴承的结构形式	(134)
9.1.4	轴承材料	(135)
9.1.5	轴瓦构造	(137)
9.2	非液体摩擦滑动轴承的计算	(138)
9.2.1	失效形式和设计准则	(138)
9.2.2	设计方法与步骤	(138)
9.2.3	润滑剂和润滑装置选择	(140)
9.3	液体动力润滑径向滑动轴承的设计计算	(142)
9.3.1	理论基础	(142)
9.3.2	单油楔径向滑动轴承	(143)
9.3.3	设计参数选择	(148)
9.4	其他型式滑动轴承简介	(150)
9.4.1	多油楔轴承	(150)
9.4.2	液体静压轴承	(150)
9.4.3	气体静压轴承	(150)
	习题 9	(151)
10	滚动轴承	(152)
10.1	滚动轴承类型与选择	(152)
10.1.1	滚动轴承的构造和材料	(152)
10.1.2	滚动轴承的主要类型与特点	(152)

10.1.3	滚动轴承类型选择	(154)
10.1.4	滚动轴承代号	(155)
10.2	滚动轴承的载荷分析和失效形式	(156)
10.2.1	滚动轴承载荷分析	(156)
10.2.2	滚动轴承常见失效形式及计算准则	(157)
10.3	滚动轴承疲劳寿命计算	(158)
10.3.1	基本额定寿命和基本额定动载荷	(158)
10.3.2	滚动轴承疲劳寿命计算的基本公式	(158)
10.3.3	滚动轴承的当量动载荷	(159)
10.3.4	角接触球轴承与圆锥滚子轴承的轴向载荷	(161)
10.4	滚动轴承静强度校核	(162)
10.5	滚动轴承的润滑和密封	(165)
10.5.1	滚动轴承的润滑	(165)
10.5.2	滚动轴承的密封	(166)
	习题 10	(168)
11	联轴器、离合器和制动器	(170)
11.1	联轴器	(170)
11.1.1	联轴器类型	(170)
11.1.2	联轴器的选择	(172)
11.2	离合器	(174)
11.2.1	离合器的类型及应用	(174)
11.2.2	牙嵌离合器	(175)
11.2.3	圆盘摩擦离合器	(176)
11.3	制动器	(177)
11.3.1	制动器的类型	(177)
11.3.2	制动器的选择	(178)
	习题 11	(180)
12	弹簧	(181)
12.1	弹簧的功用、类型及其特性	(181)
12.1.1	弹簧的功用	(181)
12.1.2	弹簧的类型和特性	(181)
12.2	弹簧的材料及制造	(183)
12.2.1	弹簧的材料	(183)
12.2.2	弹簧的制造	(186)
12.3	圆柱螺旋拉伸(压缩)弹簧的设计计算	(186)
12.3.1	圆柱螺旋弹簧的参数和几何计算	(186)
12.3.2	圆柱螺旋拉伸(压缩)弹簧的特性曲线	(188)
12.3.3	圆柱螺旋压缩(拉伸)弹簧受载时的应力及变形	(189)
12.3.4	压缩弹簧的稳定性	(190)

12.3.5	承受变载荷的圆柱螺旋弹簧的疲劳强度	(190)
12.3.6	圆柱螺旋压缩(拉伸)弹簧的设计	(191)
	习题 12	(193)
13	典型零部件的结构设计	(194)
13.1	机械结构设计的基本原则	(194)
13.1.1	明确	(194)
13.1.2	简单	(195)
13.1.3	安全	(195)
13.2	带轮、链轮的结构设计	(196)
13.2.1	带轮的结构设计	(196)
13.2.2	链轮的结构设计	(196)
13.3	齿轮类零件的结构设计	(198)
13.3.1	齿轮的结构设计	(198)
13.3.2	蜗杆和蜗轮的结构设计	(200)
13.4	滚动轴承的结构设计	(201)
13.4.1	滚动轴承支承结构形式	(201)
13.4.2	滚动轴承的轴向固定	(203)
13.4.3	轴承座孔支承刚度和同心度	(204)
13.4.4	滚动轴承游隙调整	(204)
13.4.5	滚动轴承的预紧和装拆	(205)
	习题 13	(205)
	主要参考文献	(207)

1 机械设计总论

机械设计是泛指机器及其零部件的设计,或者单独一个部件、零件的设计。其目的是为了**满足社会生产和人们生活需求**,应用新技术、新工艺、新方法开发适应社会需求的各种新的机械产品,以及对原有机械进行改造,从而改变或提高原有机械的性能。任何机械产品都始于设计,设计质量的高低直接关系到产品的功能和**质量**,关系到产品的**成本和价格**,机械设计在产品开发中起着非常关键的作用。为此,要在设计中合理确定机械系统功能,增强可靠性,提高经济性,确保安全性。

1.1 机械设计的基本要求及设计程序

1.1.1 机械设计的基本要求

(1) 实现预定功能

设计的机器应在规定的工作条件下、规定的寿命期限内实现预定功能和效率,并能正常运转。

(2) 满足可靠性要求

可靠性要求是指在规定的时间内和预定的环境条件下,机械能够正常工作的一定概率。机械的可靠性是机械的一种重要属性。

(3) 符合经济性要求

设计的机械产品应成本低、生产效率高、使用维护方便、消耗能源少,在产品寿命周期内用最低的成本实现产品的预定功能。

(4) 确保安全性要求

要能保证操作者的安全和机械设备的安全,以及保证设备对周围环境无危害,要设置过载保护、安全互锁等装置。

(5) 推行标准化要求

设计的机械产品规格、参数符合国家标准,零部件应最大限度地与同类产品互换通用,产品应成系列发展,推行标准化、系列化、通用化。

(6) 体现工艺美观要求

重视产品的工艺造型设计,不仅要功能强、价格低,而且外型美观、实用。

(7) 其他特殊要求

有些机械由于工作环境和要求的不同,对设计提出特殊要求,如高级轿车有低噪音的要求,食品、纺织机械有不得污染产品的要求,煤矿井下机械有防尘、防爆的要求等。

1.1.2 机械设计的程序

机械设计是一个反复的构思、决策与修改的复杂过程。对于新产品的开发设计,一般要

经过以下阶段：

(1) 计划阶段 即预备阶段。首先要根据用户要求了解所设计的机械产品在功能、造价、设计期限上的要求,然后进行调查研究、收集资料,对设计任务进行分析,与用户进行协商,使设计任务既合理又先进,最后写成任务书。设计任务书应明确规定机械产品的名称、功用、生产效率、主要性能指标、可靠性和使用维护要求、工作条件、生产批量、预定成本、设计和制造完成日期以及其他特殊要求。

(2) 方案设计阶段 根据多方面的调查研究,广泛收集国内外有关的设计资料后,设计者对机械产品的工作原理进行创新构思,提出多种设计方案。对满足设计任务书规定的条件和技术限定的少数几个可行方案进行技术经济分析,综合比较技术性能及经济指标,淘汰较差方案。对保留下来的方案同时展开下一阶段的设计,待进行到可以较精确地确定技术性能及经济指标时,再确定方案的取舍。这一阶段设计内容包括必要的运动学计算、机构原理试验等,最后绘制出机构工作原理图、机构运动简图。

(3) 技术设计阶段 在机械产品工作原理图和机构运动简图的基础上设计整机及其零、部件的形状、尺寸,选择零件所用的材料及热处理、加工装配和制定试验的技术条件等。这一阶段成果是机器整机及部件的装配图、零件工作图以及计算说明书和其他技术文件(标准件明细表、外购件明细表、协作件明细表、试验和验收条件、检验合格证、使用说明书等)等。在整个技术设计阶段,不可避免地要反复修改,与用户反复协商。

(4) 样机试制和鉴定阶段 根据技术设计所提供的图样等技术文件进行样机试制,并对试制提供的样机进行性能测试;组织鉴定,进行全面的技术经济评价,主要包括动力特性审查、标准化审查、工艺审查、成本预测等。同时可对设计进行适当修改,以完善设计方案。

(5) 产品投产阶段 在样机试制与鉴定通过的基础上,将机械的全套设计图样(总装图、部装图、零件图、电气原理图、安装地基图、备件图等)和全套技术文件(设计任务书、设计计算说明书、试验鉴定报告、零件明细表、产品质量标准、产品检验规范、包装运输技术条件等)提交产品定型鉴定会评审。评审通过后,进行批量生产并投放市场,交付用户使用。

机械新产品的开发设计流程图如图 1-1 所示。

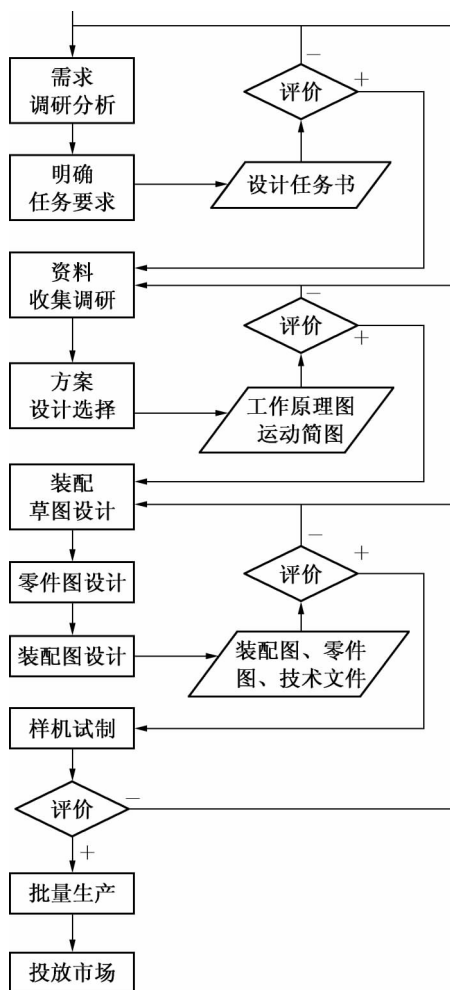


图 1-1 机械新产品开发设计流程图

1.2 机械零件的主要失效形式和计算准则

1.2.1 机械零件的主要失效形式

机械零件由于各种原因而不能正常工作称为失效。机械零件的失效形式主要有：

(1) 整体断裂

零件在受拉、压、弯、剪、扭等外载荷作用时，由于某一危险截面上的应力超过零件的强度极限而发生的断裂；或者零件在受变应力作用时，危险截面上发生的疲劳断裂均属此类。

(2) 过大的残余变形

如果作用于零件上的应力超过了材料的屈服极限，则零件将产生残余变形。机床上夹持定位零件的过大的残余变形，要降低加工精度；高速转子轴的残余挠曲变形，将增大不平衡度，并进一步引起零件的变形。

(3) 零件的表面破坏

零件的表面破坏主要有腐蚀、磨损和接触疲劳。腐蚀是发生在金属表面的一种电化学或化学侵蚀现象。磨损是两个接触表面在作相对运动的过程中表面物质丧失或转移的现象。零件表面的接触疲劳，是指受到接触变应力长期作用的表面产生裂纹或微粒剥落的现象。腐蚀、磨损和接触疲劳都是随工作时间的延续而逐渐发生的失效形式。

零件到底会发生哪种形式的失效，与很多因素有关，并且在不同行业和不同的机器上也不尽相同。从有关统计分类结果来看，由于腐蚀、磨损和各种疲劳破坏所引起的失效就占了73.88%，而由于断裂所引起的失效只占4.79%。所以可以说，腐蚀、磨损和疲劳是引起零件失效的主要原因。

1.2.2 机械零件的计算准则

设计零件所依据的计算准则，是与零件的失效形式紧密联系在一起，针对不同的失效形式，提出不同的计算准则。

(1) 强度准则

强度是衡量机械零件工作能力最基本的计算准则。它是指受载后零件中的应力不得超过允许的极限。判断机械零件的强度条件有两种形式：

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

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

σ ——计算应力，泛指拉压应力 σ 、剪切应力 τ 、弯曲应力 σ_b 、扭转应力 τ_T 、挤压应力 σ_p 、接触应力 σ_H 、当量应力 σ_e 以及应力幅 σ_a 等。

$[\sigma]$ ——许用应力
 S ——安全系数
 $[S]$ ——许用安全系数

} 与上述应力相对应。

许用安全系数 $[S]$ 是为了考虑在强度计算中一系列不确定的因素：计算所用力学模型的精确性；推导公式忽略一些影响因素的程度；所用载荷的精确性；材料机械性能的均匀性和

准确性;零件的重要性等等。

(2) 刚度准则

刚度是指零件在载荷作用下抵抗弹性变形的能力。其刚度条件为:零件在载荷作用下产生的弹性变形量应小于或等于机器工作性能允许的极限值,其表达式为:

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

弹性变形量 y 可按各种求变形量的理论或实验方法来确定,而许用变形量 $[y]$ 则应随不同的使用场合,根据理论或经验来确定其合理的数值。

(3) 寿命准则

由于影响寿命的主要因素——腐蚀、磨损和疲劳是三个不同范畴的问题,所以它们各自发展的规律也就不同。关于腐蚀,由于迄今为止还没有提出实用有效的腐蚀寿命计算方法,因而也无法列出腐蚀的计算准则。关于磨损,由于磨损类型众多,产生的机理还未完全搞清,影响因素也很复杂,所以目前尚无通行的能够进行定量计算的方法。关于疲劳,通常是求出零件在预定使用寿命时的疲劳极限作为计算的依据。

(4) 振动稳定性准则

为避免共振,在设计高速机械中,应进行振动分析和计算,使零件和系统的自振频率与周期性载荷的作用频率错开一定的范围,以确保零件及机械系统的振动稳定性。令 f 代表零件的固有频率, f_p 代表周期性载荷的作用频率,则通常应保证如下的条件:

$$0.85f > f_p \text{ 或 } 1.15f < f_p \quad (1-4)$$

如果不能满足上述条件,则可用改变零件及系统的刚度,改变支承位置,或增加(或减少)辅助支承等办法来改变 f 值。

把激振源与零件隔离,使激振的周期性改变的能量不传递到零件上去,或者采用阻尼以减小受激振动零件的振幅,都会提高零件的振动稳定性。

(5) 可靠性准则

零件的可靠度用零件在规定的使用条件下,在规定的时间内能正常工作的概率来表示,即用在规定的寿命时间内连续工作的件数占总件数的百分比表示。如有 N_0 个零件在预期寿命内只有 N 个零件能连续正常工作,则其系统的可靠度为:

$$R = \frac{N}{N_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

如机械制造业常取 90%~99% 的可靠度。

1.3 摩擦、磨损及润滑

摩擦学(Tribology)是研究作相对运动的两零件表面间相互作用、变化及其有关理论与实践的一门学科。它的基本内容是研究工程表面的摩擦、磨损和润滑问题。摩擦(Friction)能引起能量转换而消耗能量,磨损(Wear)则使摩擦表面损坏和材料损耗,润滑(Lubrication)是减少摩擦、磨损的重要手段。这三者是相互联系的。

1.3.1 摩擦

相互接触的两物体在外力的作用下发生相对运动或有相对运动趋势时,在接触面上就

会产生抵抗运动的阻力,这种现象称为摩擦,这种阻力称为摩擦力。

摩擦可分为两大类:一类是发生在物体内部,阻碍分子间相对运动的内摩擦;另一类是在接触表面上产生的阻碍两物体相对运动的外摩擦。根据作相对运动两物体位移形式的不同,摩擦又可分为滑动摩擦与滚动摩擦。本节讨论的是金属表面间的滑动摩擦。

根据摩擦面间存在润滑剂的情况,滑动摩擦可分为干摩擦、边界摩擦(又称边界润滑)、液体摩擦(又称液体润滑)及混合摩擦(又称混合润滑),如图 1-2 所示。其中干摩擦的摩擦系数最大,液体摩擦的摩擦系数最小。

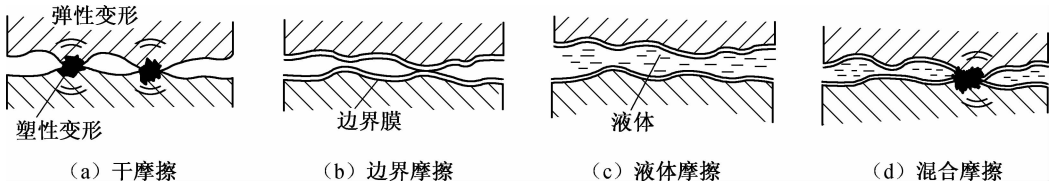


图 1-2 摩擦状态

1) 干摩擦

两摩擦表面间直接接触不加入任何润滑剂的摩擦称为干摩擦。工程实际中,并不存在真正的干摩擦,因为在任何零件的表面总存在一层氧化膜和污染膜。在机械设计中,通常把人们无意加以润滑而又不会出现明显润滑现象的摩擦当作干摩擦处理。

工程设计中,常用库仑摩擦定律(古典摩擦定律)来揭示摩擦现象和计算摩擦力。库仑摩擦定律是基于实验建立的定律,虽然过了几百年,它仍被认为是合理的。但近代对摩擦的深入研究发现,库仑摩擦定律与实际情况有许多不尽符合的地方,如对于极硬材料(如金刚石)或极软材料(如聚四氟乙烯)摩擦力与法向载荷不呈线性关系;当粗糙度低到一定程度时,两相对滑动摩擦表面的摩擦力随着表面粗糙度的降低而增大;当滑动速度较大时,摩擦力与速度有关,等等。

关于摩擦机理,有多种学派,其中由英国的 *Bowden* 和 *Tabor* 建立的粘着摩擦理论对于摩擦磨损研究具有重要意义,现简介如下。

当两金属表面接触时,由于表面是粗糙的,所以不是整个金属表面接触,只是某些凸峰接触,形成接触斑点的微面积,如图 1-3 所示。由于真实接触面积(A_r)只有表面接触面积的百分之一到万分之一,在法向载荷 N 的作用下,接触斑点上的压应力很容易达到材料的压缩屈服极限而产生塑性流动,如图 1-4(a)所示。接触点处受到高压力和塑性变形后,金属表面膜遭到破坏,在表面分子结合力的作用下,接触斑点牢固地粘结在一起,发生金属表面的粘着现象。当两金属表面相对滑动时,粘着结点被剪断。设粘着结点的剪切极限为 τ_B ,则粘着剪切力的总和 $T = A_r \tau_B$ 。摩擦过程就是粘着和滑动交替进行的过程。摩擦力等于粘着效应和犁刨效应产生阻力的总和,即 $F = T + P$, P 为犁刨力。相应地,摩擦系数 $f = f_a + f_m$, 式中 f_a 为粘着分量, f_m 为犁刨分量。除了磨粒磨损外,多数切削加工表面的干摩擦系数可忽略 f_m ,故 $f = f_a = F/N = T/N$, 其中 $N = A_r \times \sigma_s$, 经整理得

$$f = \tau_B / \sigma_s \tag{1-6}$$

一般金属表面膜的剪切极限 τ_f 很低 ($\tau_f \ll \tau_B$), 当剪切发生在界面上, 摩擦系数 f 为

$$f = \tau_f / \sigma_s \tag{1-7}$$

用公式(1-6)、(1-7)可以在相当大的范围内解释干摩擦现象。

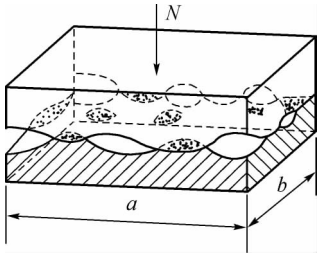


图 1-3 接触面积

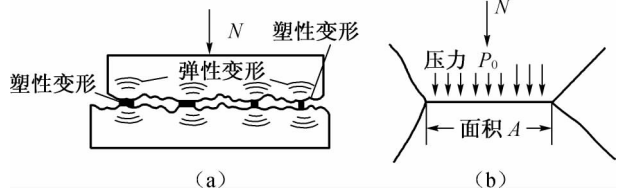


图 1-4 粘着

2) 边界摩擦

所谓边界摩擦是指作相对运动的两金属表面被极薄的边界膜(润滑膜)隔开,两表面之间的摩擦和磨损不是取决于润滑剂的粘度,而是取决于两表面的特性和润滑剂的特性。边界膜有物理吸附膜、化学吸附膜和化学反应膜。

(1) 物理吸附膜

当润滑油与金属接触时,靠分子吸力使润滑油中极性分子定向排列吸附在金属表面上,形成物理吸附膜,如图 1-5 所示。在吸附膜中极性分子相互平行,并都垂直于摩擦表面,吸附膜通常由三、四层分子组成,这些极性分子彼此聚集在一起,形成一种能防止粗糙度凸峰穿透、避免金属直接接触的薄膜。当两摩擦表面相对滑动时,剪切仅在吸附膜各分子层间进行,所以摩擦系数较低。物理吸附膜很弱,吸附和脱附完全可逆,在高温时容易脱附,所以适用于常温、低速与轻载。

(2) 化学吸附膜

润滑剂吸附在金属表面上以后,一些极性分子的有价电子将与金属或其氧化表面的电子发生交换而产生新的化合物,使金属皂的极性分子定向排列吸附在金属表面上形成化学吸附膜。化学吸附膜的形成是不可逆的。化学吸附膜适宜在中等载荷、中等温度和中等滑动速度条件下工作。

(3) 化学反应膜

化学反应膜是润滑油中的硫、磷、氯等有机化合物在较高温度下与金属表面发生化学反应而生成的油膜。化学反应膜的熔点高,抗剪强度低,比任何吸附膜都要稳定得多,这种反应是不可逆的,一般用于高速、重载及高温下的润滑。

合理选择摩擦副材料和润滑剂,降低零件表面粗糙度,在润滑剂中加入油性添加剂和极压添加剂,都能提高边界膜的强度。

3) 液体摩擦

两摩擦表面间被一层具有一定压力、一定厚度、连续的流体润滑剂完全隔开,摩擦性质取决于液体内部分子间粘性阻力的摩擦,称为液体摩擦。

液体摩擦的摩擦阻力小,理论上不发生磨损,是理想的摩擦状态。

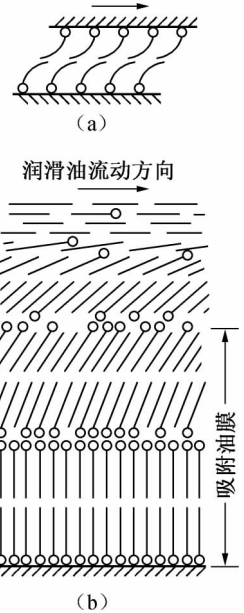


图 1-5 物理吸附边界膜模型

4) 混合摩擦

在实际应用中,有较多的摩擦副处于干摩擦、边界摩擦和液体摩擦的混合状态,称为混合摩擦。

研究表明,摩擦副处于何种摩擦润滑状态,可用膜厚比 λ 来表征,即

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{R_{a1} + R_{a2}} \quad (1-8)$$

式中 R_{a1} 、 R_{a2} 为两摩擦表面轮廓的算术平均偏差。

当 $\lambda \leq 1$ 为边界摩擦润滑状态; $1 < \lambda < 5$ 为混合摩擦状态; $\lambda > 5$ 为液体摩擦润滑状态。

如图 1-6 所示为滑动轴承摩擦特性曲线,反映了滑动轴承在各种摩擦润滑状态下,摩擦系数 f 随轴承特性系数 $\eta n/p$ (η 为润滑油动力粘度, n 为相对转速, p 为单位面积载荷) 的变化规律。在边界摩擦润滑时, f 的变化很小,进入混合摩擦润滑后, f 急剧变化,在刚刚进入液体摩擦润滑时, f 达到最小值,以后随 $\eta n/p$ 的增加,油膜厚度也随之增加,油膜中的总内摩擦阻力相应有所增加,因而 f 将略有增加。

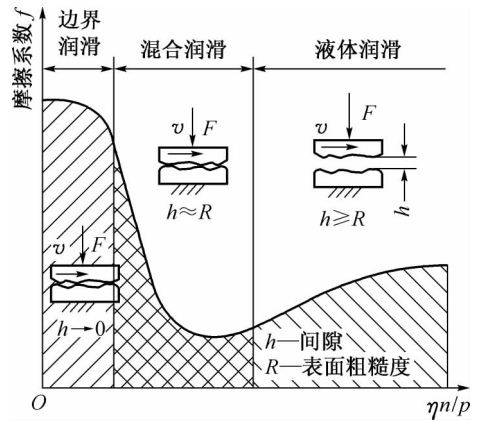


图 1-6 摩擦特性曲线

1.3.2 磨损

由于零件的相对运动而使其表面的物质不断损失的现象称为磨损。磨损将消耗能量,降低机械效率;磨损将改变零件的形状和尺寸,降低零件工作的可靠性,缩短设备的使用寿命。因此,在设计时必须考虑如何避免或减轻磨损,以保证机器达到预期寿命。在工程上有时也利用磨损来加工机械零件,如精加工中的磨削、抛光以及机器的“跑合”等。

磨损过程可分为三个阶段,如图 1-7 所示。I 为跑合磨损阶段。新零件开始运转时,由于零件表面粗糙度的影响,使得摩擦副的实际接触面积较小,单位接触面积上的实际载荷较大,因此在开始工作的一段短时间内,磨损量较大。随着跑合的进行,摩擦面尖峰被逐渐磨平,实际接触面积增大,单位面积载荷减小,磨损速度变慢,转入稳定磨损阶段。由于跑合可改善机器零件摩擦表面的接触性能,故新机器一般需经过跑合后才交付使用。跑合

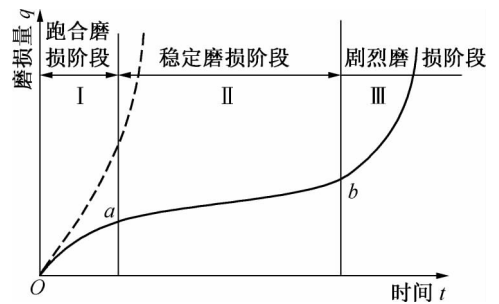


图 1-7 磨损过程

时应注意由轻至重且缓慢加载,跑合后,要全部更换润滑油。II 为稳定磨损阶段。这个阶段零件的磨损速度缓慢而稳定,磨损率 $e = dq/dt = \text{常数}$ 。该阶段是零件的正常工作阶段,阶段的长短代表了零件使用寿命的长短。III 为剧烈磨损阶段。零件经稳定磨损阶段后,间隙加大,精度下降,润滑状况恶化,出现异常噪声和冲击振动,磨损率急剧上升,温度迅速升高,零件很快就报废。应在零件进入剧烈磨损阶段前对机器及时进行检修。

根据磨损机理的不同,磨损主要有 4 种基本类型:粘着磨损、磨粒磨损、接触疲劳磨损和腐蚀磨损。

1) 粘着磨损(*Adhesive Wear*)

两摩擦表面的不平度凸峰在相互作用的各结点发生粘着,在相对滑动时,由于粘着点被剪切,材料或脱落成磨屑,或由一个表面迁移到另一个表面,这类磨损称为粘着磨损。

粘着磨损按破坏程度的不同可分为5类:(1)轻微磨损:剪切破坏发生在界面上,表面材料的转移极为轻微。(2)涂抹:剪切破坏发生在软金属浅层,并转移到硬金属表面上。(3)擦伤:剪切破坏发生在软金属亚浅层处,有时硬金属表面接近浅层处也有划痕。(4)撕脱:剪切破坏发生在摩擦副一方或双方金属较深处。(5)咬死:表面粘着严重,摩擦副不能运动。擦伤、撕脱和咬死通常也称为胶合,胶合是高速重载接触时常见的损伤形式。

减轻粘着磨损可以采取以下措施:(1)合理选择摩擦副材料。同类材料之间的互溶性比异类材料的大;脆性材料比塑性材料抗粘着性好;采用表面处理可提高抗粘着性。(2)采用油性好和含有极压添加剂的润滑油。(3)控制摩擦副表面的温度和压强。

2) 磨粒磨损(*Abrasive Wear*)

从外部进入摩擦表面间的硬质颗粒或摩擦表面上的硬质突起物在摩擦过程中起到切削或刮擦作用,使零件表面材料脱落的现象称为磨粒磨损。磨粒磨损与摩擦表面的硬度和磨粒的硬度有关。

减轻磨粒磨损可采用以下措施:(1)提高材料硬度;(2)对零件表面进行处理以提高耐磨性;(3)定期更换润滑油,防止外部磨粒进入摩擦副表面。

3) 接触疲劳磨损(*Fatigue Wear*)

零件表面在接触处产生接触应力,在此交变接触应力的作用下,经过若干循环次数后,零件表面材料产生小片剥落而使零件表面形成小麻坑,这种由于表面材料接触疲劳而产生物质转移的现象称为接触疲劳磨损(亦称疲劳点蚀)。接触疲劳磨损是由于接触应力超过材料的接触疲劳极限时,零件表面产生初始疲劳裂纹,裂纹与表面成锐角扩展,达到一定深度,裂纹又越出表面,形成小块材料剥落,呈点蚀现象。润滑油对被追越面的裂纹扩展也起到一定的促进作用。

减轻接触疲劳磨损的措施:(1)提高润滑油粘度;(2)提高接触表面硬度;(3)降低表面粗糙度。

4) 腐蚀磨损(*Corrosive Wear*)

零件在摩擦过程中,金属与周围介质发生化学反应或电化学反应而产生的表面材料损失现象,称为腐蚀磨损。氧化磨损和特殊介质磨损是常见的腐蚀磨损形式。氧化磨损指金属摩擦表面在氧化性介质中工作时金属表面生成氧化膜,在相对运动过程中氧化膜被磨去,新鲜表面很快又形成新的氧化膜,然后又被磨掉。特殊介质磨损是指金属表面与酸、碱、盐等介质发生化学反应,形成腐蚀磨损。

1.3.3 润滑

润滑就是在两摩擦表面间加上润滑剂使两摩擦表面尽量分开,避免表面直接接触,以减小摩擦减轻磨损,降低工作表面温度。此外,润滑剂还能防锈、减振、密封、清除污物和传递动力等。

1) 润滑剂的分类

润滑剂有液体、气体、半固体和固体4种。