

高等学校机械与汽车工程类专业教材

主编 余晓流

MOCHAXUE YU RUNHUA JISHU

# 摩擦学与 润滑技术

MOCHAXUE  
YU  
RUNHUA  
JISHU

机械工业出版社  
MECHANICAL INDUSTRY PUBLISHING HOUSE

高等学校机械与汽车工程类专业教材

# 摩擦学与润滑技术

主 编 余晓流

参 编 薛家国 于秀娟

合肥工业大学出版社

## 内容提要

本书以摩擦学系统为主线,全面地阐述了摩擦、磨损、润滑的基本原理及基本技术、基本方法与应用,并反映了摩擦学领域的新发展、新知识。本书主要内容包括摩擦学和润滑技术概述、表面形貌、摩擦磨损的基本原理、摩擦学系统及其复杂性、流体动压润滑、弹性流体动压润滑、流体静压润滑、润滑材料、润滑方法与润滑系统、表面工程概论、摩擦学设计的基本原理、摩擦学测试分析技术等。为了培养学生分析和解决实际问题的能力,本书还列举了有关汽车、生物等摩擦学方面的实例。

本书内容丰富全面、深入浅出、难易适中,突出摩擦学学科“综合、复合、交叉、系统”的性质,注重对基本原理、基本方法的理解和掌握以及润滑技术的应用。

本书可作为高等学校机械工程专业本科生、研究生的教材,也可作为车辆工程等相关专业摩擦学课程的教材,亦可供相关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

摩擦学与润滑技术/余晓流主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2013.8

ISBN 978-7-5650-1444-4

I. ①摩… II. ①余… III. ①摩擦学—高等学校—教材②润滑—技术—高等学校—教材 IV. ①O313.5②TH117.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 182463 号

## 摩擦学与润滑技术

余晓流 主编

责任编辑 汤礼广

出版 合肥工业大学出版社  
地址 合肥市屯溪路 193 号  
邮编 230009  
电话 理工编辑部:0551—62903087  
市场营销部:0551—62903198  
网址 www.hfutpress.com.cn  
E-mail hfutpress@163.com

版次 2013 年 8 月第 1 版  
印次 2013 年 8 月第 1 次印刷  
开本 787 毫米×1092 毫米 1/16  
印张 17.25  
字数 400 千字  
印刷 合肥学苑印务有限公司  
发行 全国新华书店

ISBN 978-7-5650-1444-4

定价:38.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

# 前 言

摩擦学是一门交叉学科，其主要内容主要包括摩擦、磨损与润滑，作为机械工程学科中发展最快的领域之一，无论是基础研究还是应用研究，它们均有着广泛的发展前景。由于摩擦、磨损、润滑的影响因素多，且其之间相互作用相互影响，因此使得学生在学习时感到难度较大。目前有关摩擦学的书籍虽然有多种，但它们大多采用较多的篇幅来阐述摩擦学原理和磨损机理，即侧重于基本理论的介绍，而关于设计零件表面性质和润滑技术的内容偏少，实践应用案例少，因此不利于学生全面掌握润滑技术及其工程应用。本书根据社会发展的实际需求，以培养摩擦学与润滑技术应用型人才为目标，使学生能够在机械设计中掌握并应用摩擦学设计的基础知识，提高学生相关的工程实践应用能力。

本书共分十二章，在第一章“绪论”中，阐明了摩擦学的研究对象与内容、学科特点、基本框架以及发展现状和趋势。在之后的章节中，分别介绍了固体表面、摩擦原理、磨损原理、摩擦学系统及其复杂性、润滑理论以及润滑技术、表面工程摩擦学设计基本原理以及摩擦学测试分析技术等内容，其中固体表面形貌是研究摩擦、磨损、润滑的基础，表面工程是用来降低磨损的手段。本书的特色是，结合机械设计中的摩擦磨损问题，着重分析摩擦、磨损和润滑的影响因素及其控制措施，讲述各种减摩、阻摩和耐磨材料的特性及选用原则，针对不同工况，如何选择流体动压润滑、弹性流体动压润滑、流体静压润滑，如何进行摩擦学设计和摩擦学测试分析。本书是作者在吸收多年教学经验的基础上参考国内外关于摩擦学的主要著作进行编写的，它针对学生碰到的难点和疑点，全面系统地阐述了本课程的基本原理和应用技术，并力求理论联系实际。

本书可作为高等院校机械类本科生、研究生的教材，也适合于机械工程技术人员阅读参考。

本书由安徽工业大学机械工程学院余晓流教授主编，参加编写的有薛家国、于秀娟。安徽工业大学机械工程学院教学委员会对本书进行了认真评审，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此深表感谢。

由于编者的水平所限，书中难免存有缺点或错误，欢迎广大读者批评指正。

编 者



# 目 录

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 第一章 摩擦性和润滑技术概述 .....          | (1)   |
| 第一节 摩擦学研究对象与内容 .....          | (1)   |
| 第二节 摩擦学与润滑技术的发展现状与展望 .....    | (4)   |
| 第二章 表面形貌 .....                | (9)   |
| 第一节 引言 .....                  | (9)   |
| 第二节 塑性指数 .....                | (18)  |
| 第三节 固体表面的接触特性 .....           | (19)  |
| 第三章 摩擦的基本原理 .....             | (25)  |
| 第一节 摩擦的分类 .....               | (25)  |
| 第二节 摩擦的理论 .....               | (27)  |
| 第三节 摩擦的作用 .....               | (40)  |
| 第四节 弹性体摩擦在充气轮胎中的应用 .....      | (51)  |
| 第四章 磨损的基本原理 .....             | (60)  |
| 第一节 概述 .....                  | (60)  |
| 第二节 粘着磨损 .....                | (64)  |
| 第三节 磨粒磨损 .....                | (66)  |
| 第四节 表面疲劳磨损(疲劳磨损) .....        | (69)  |
| 第五节 腐蚀磨损(摩擦—化学磨损) .....       | (72)  |
| 第六节 微动磨损 .....                | (74)  |
| 第七节 磨损理论简介 .....              | (75)  |
| 第八节 弹性体材料的磨损实例分析 .....        | (79)  |
| 第五章 摩擦学系统及其复杂性 .....          | (82)  |
| 第一节 系统概述 .....                | (82)  |
| 第二节 系统分析的基本内容 .....           | (85)  |
| 第三节 系统分析的方法 .....             | (88)  |
| 第四节 摩擦学系统分析 .....             | (90)  |
| 第五节 摩擦学系统分析的应用 .....          | (95)  |
| 第六节 摩擦学系统的复杂性 .....           | (101) |
| 第六章 流体动压润滑 .....              | (118) |
| 第一节 概述 .....                  | (118) |
| 第二节 Reynolds 方程 .....         | (120) |
| 第三节 广义三维 Reynolds 方程的简化 ..... | (123) |



|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| 第四节 推力轴承 .....                           | (126)        |
| 第五节 径向轴承 .....                           | (131)        |
| 第六节 流体动压的不稳定性及其抑制方法 .....                | (135)        |
| <b>第七章 弹性流体动压润滑 .....</b>                | <b>(138)</b> |
| 第一节 弹性流体动压润滑的基本方程 .....                  | (139)        |
| 第二节 刚性润滑理论 (Martin 线接触公式) .....          | (143)        |
| 第三节 Ertel—Grubin 弹性流体动压润滑近似解 .....       | (145)        |
| 第四节 Dowson—Higginson 线接触等温全膜弹流的数值解 ..... | (148)        |
| 第五节 部分弹性流体动压润滑 .....                     | (152)        |
| 第六节 混合润滑 .....                           | (156)        |
| 第七节 边界润滑 .....                           | (161)        |
| <b>第八章 流体静压润滑 .....</b>                  | <b>(167)</b> |
| 第一节 立式推力轴承的分析 .....                      | (169)        |
| 第二节 补偿器及设计参数 .....                       | (171)        |
| 第三节 静压轴承的优化设计 .....                      | (173)        |
| 第四节 气体润滑轴承 .....                         | (175)        |
| <b>第九章 润滑材料、润滑方法与润滑系统 .....</b>          | <b>(179)</b> |
| 第一节 概述 .....                             | (179)        |
| 第二节 润滑油的理化性质 .....                       | (180)        |
| 第三节 润滑油的分类与质量标准 .....                    | (185)        |
| 第四节 润滑脂 .....                            | (190)        |
| 第五节 添加剂 .....                            | (194)        |
| 第六节 润滑方法与润滑系统 .....                      | (199)        |
| <b>第十章 表面工程概论 .....</b>                  | <b>(211)</b> |
| 第一节 概述 .....                             | (211)        |
| 第二节 喷丸强化技术 .....                         | (212)        |
| 第三节 热喷涂技术 .....                          | (215)        |
| 第四节 气相沉积技术 .....                         | (219)        |
| <b>第十一章 摩擦学设计的基本原理 .....</b>             | <b>(225)</b> |
| 第一节 概述 .....                             | (225)        |
| 第二节 耐磨材料的选择与表面层设计 .....                  | (227)        |
| 第三节 IBM 磨损计算与预测法 .....                   | (230)        |
| 第四节 磨损系数与磨损图 .....                       | (236)        |
| 第五节 耐磨性结构设计 .....                        | (238)        |
| 第六节 摩擦学设计案例 .....                        | (240)        |
| <b>第十二章 摩擦学测试分析技术 .....</b>              | <b>(255)</b> |
| 第一节 摩擦表面测试分析技术 .....                     | (255)        |
| 第二节 磨损微粒分析技术 .....                       | (263)        |
| <b>参考文献 .....</b>                        | <b>(269)</b> |



# 第一章 摩擦学和润滑技术概述

## 第一节 摩擦学研究的对象与内容

摩擦学 (Tribology) 是 20 世纪 60 年代中期在英国首先创立的一门新兴学科。它是研究发生在做相对运动的相互作用的表面 (界面) 上的各种现象产生、变化和发展的规律及其应用的一门科学。它的研究对象是表面 (界面) 上发生的各种现象, 而这种现象的产生只是由于相对运动而引起的表面之间以及表面与环境之间的相互作用。这种相互作用不仅包括力学和物理的作用, 也包括化学、热力学、力化学和摩擦化学的作用。因此, 在机器设备的静止表面上产生的腐蚀现象以及机器零件内部发生的疲劳损伤均不属于摩擦学研究的对象。

摩擦与磨损是普遍存在于人类的物质生产和生活中并具有极其重要影响的自然现象。很难设想, 在一个没有摩擦的世界中人类如何生存。早在原始社会, 人类就学会了“钻木取火”, 这是最早记载摩擦现象的例子。在我国周代的《诗经》中就有“载脂载辖”的诗句。“辖”音“侠”是指车轴两端的金属部分。这说明我国早在 2000 多年前, 就已掌握了初步的润滑技术。早在 14 世纪以前, 我国在轴承、滑车、齿轮以及润滑材料的研制方面都居世界前列。

将摩擦现象作为科学研究的对象进行系统的研究, 始于 15 世纪意大利文艺复兴时期的杰出艺术家和科学家达·芬奇 (Leonardo da Vinci, 1452—1519), 他在摩擦研究领域中不少卓越的发现。他研究了摩擦的规律性, 并确定了摩擦系数以及滑动摩擦等概念, 还研究了摩擦表面上的磨损现象。

严格地说, 润滑现象作为科学研究对象的历史始于 1886 年。英国著名水利专家雷诺 (Osborne Reynolds, 1842—1912) 在英国皇家学会的论文集上发表的被称为对建立流体润滑理论具有历史意义的论文, 即《润滑的理论及本杰明·托尔 (Beauchamp Tower) 在试验方面的应用》。这篇论文从理论上阐述了这样一个原理: 将润滑油注入圆柱轴承之后, 当轴转动时, 轴与轴承之间的流体油膜因旋转而发生流体力学性质的压力, 支持轴载荷。

然而长期以来, 摩擦、磨损和润滑这三种现象被人为地进行相互分割的研究, 而且大多数都是从力学或物理学角度进行研究。其研究成果分散在各个传统的分支学科中, 如分散在有关知识学、机械原理和机械零件或机械设计等课程中, 而没有综合成一门统一的学科和课程。这就大大妨碍了它的发展, 从而不能适应经济和科学技术迅速发展的需要。正是在这种背景下, 1966 年摩擦学在传统学科的基础上诞生了。

摩擦学研究的基本内容是摩擦、磨损 (包括材料转移) 和润滑 (包括固体润滑) 的原理及其应用。大体上可概括为以下几个方面:



- (1) 摩擦学现象的机理。
- (2) 材料的摩擦学特性。
- (3) 摩擦学元件（包括人体人工关节）的特性与设计及其摩擦学失效分析。
- (4) 摩擦学材料。
- (5) 润滑材料。
- (6) 摩擦学状态的测试技术与仪器设备。
- (7) 机器设备摩擦学失效状态的在线检测与监控以及早期预报与诊断。
- (8) 摩擦学数据库与知识库。

从学科的性质上看，摩擦学具有以下三个特点：

(1) 摩擦学是一门在某些传统学科的基础上综合发展起来的边缘学科。摩擦、磨损和润滑涉及科学技术的极其广泛的专业领域，包括力学、物理学、化学、热力学、传热学、表面科学以及机械工程和材料科学与工程等多种学科。

(2) 摩擦学是一门具有很强应用背景的学科。摩擦学的产生主要是以节约资源、节省能源、提高效益等实用性很强的课题为背景。然而，它的应用背景已远远超出了机械行业及工业和交通运输业的领域，因而产生了生物摩擦学、地质摩擦学和生态摩擦学等新的学科。

(3) 摩擦学是一门学科边界还没有完全界定的新兴学科。随着科学技术的发展，摩擦学与一些先进的技术和方法相结合，并且不断地向其他学科渗透，从而又逐步形成新的学科分支，如摩擦化学、摩擦学设计以及陶瓷摩擦学、高分子材料摩擦学、空间摩擦学、核反应系统摩擦学和纳米摩擦学以及计算摩擦学等。

综上所述，摩擦学的基本框架可表示为一个以摩擦学的学科基础、研究内容及其应用目标组成的三维结构，如图 1-1 所示。

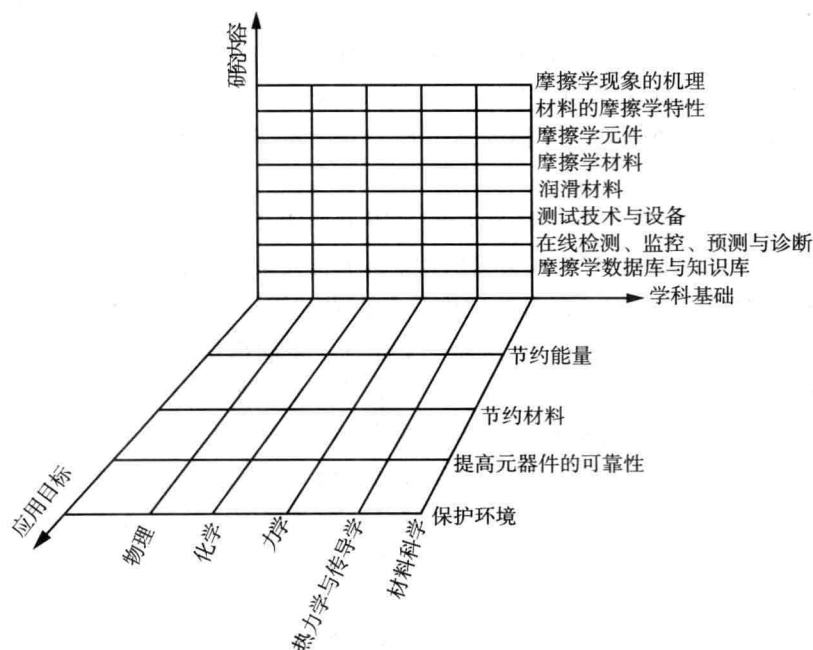


图 1-1 摩擦学的基本框架





摩擦学属于技术基础学科, 实用性强, 现象复杂, 影响因素多, 涉及知识面广, 需研究的内容很多。为了便于分析, 可将摩擦学及其工程应用的各方面研究内容归纳成如图 1-2 所示的方框图。图中箭头所指的实线方框为解决某项问题 (或开展某方面的研究) 所需的措施、有关的知识和研究内容或者是所需的测试技术, 都可成为摩擦学某一方面的研究实体。

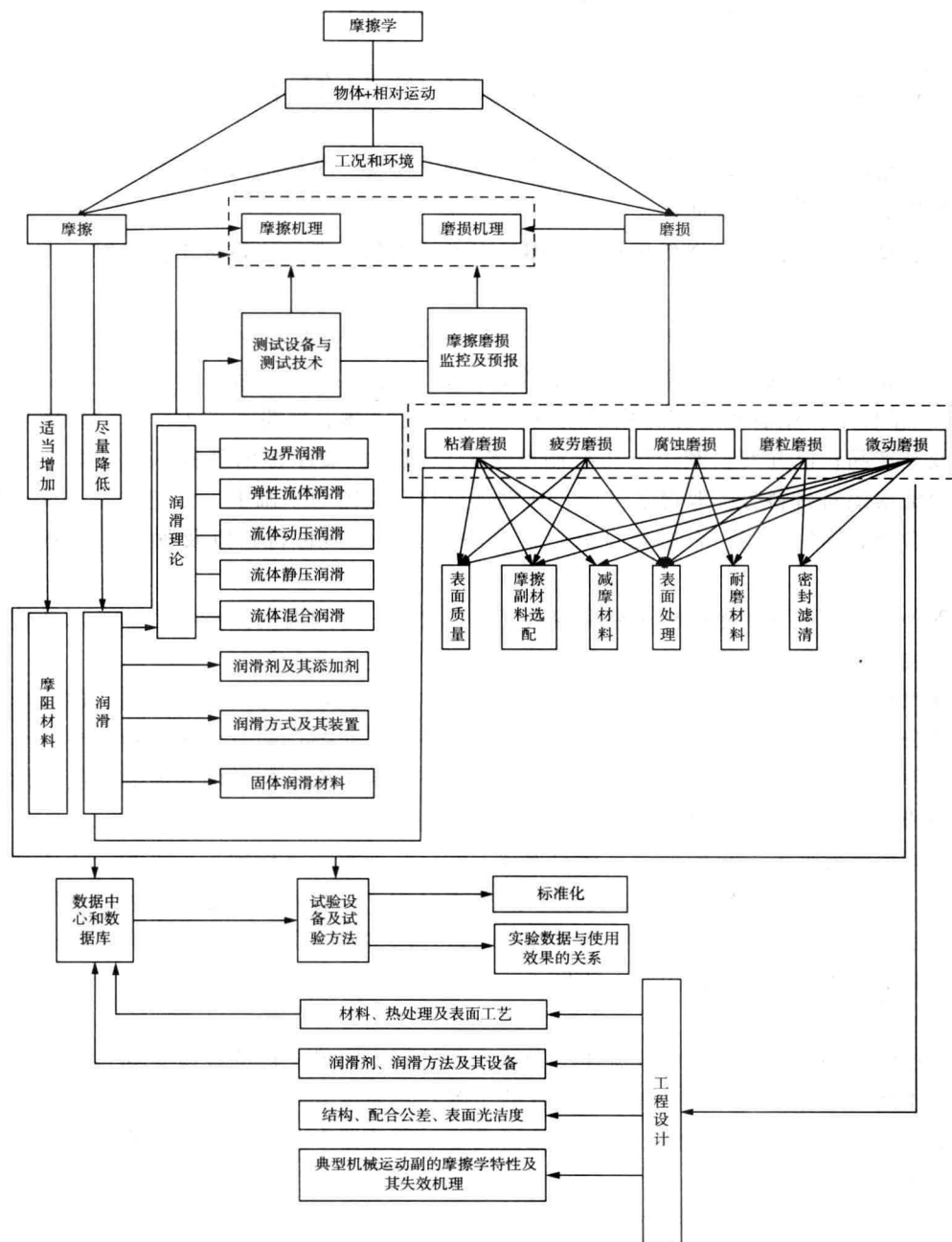


图 1-2 摩擦学研究及其应用方框图

自从摩擦学作为一门独立的学科创建以来, 它在工业和交通运输业中对国民经济的发展



展和科技进步所发挥的重要作用及其巨大的经济意义已越来越为人们所认识。然而,摩擦、磨损和润滑是自然界(包括人体)普遍存在的现象,大至宇宙,小至分子、原子,只要有相对运动的界面,这些现象都会发生。因此可以推断,摩擦学将会在更广泛的范围内促进其他学科的发展,如天体物理、地球科学、核子物理、医学工程、运动力学等。一旦这一点被人们所充分认识,摩擦学必将进入一个新的发展阶段。

## 第二节 摩擦学与润滑技术的发展现状与展望

为了适应现代经济和科学技术以及社会发展的需要,摩擦学的研究在不断地深化和扩展,主要表现在以下几方面。

### 一、摩擦、磨损和润滑仍是当今摩擦学研究的主题,但更注重其工业应用

#### 1. 摩擦与磨损

近年来,已经采用原子力显微镜(AFM)和摩擦力显微镜(FFM)等先进的仪器设备,观测相对运动的固体表面原子间的作用力以研究摩擦的起因;研究了在高真空( $10^{-7}$ Pa)条件下,粘着和摩擦的化学效应;研究了磁流体、磁粉和磁力—空气摩擦理论与技术及其产品;已开发出利用电压控制摩擦力以减少机械摩擦的新技术,即电控摩擦技术。用磨损图对材料分类取得了进展,在钢铁材料磨损图的基础上,已建立了切削刀具材料、铝合金、陶瓷、铝—石墨复合材料、聚四氟乙烯等多种材料以及耐磨镀层零件的磨损图。

此外,对摩擦学热效应的研究也取得了一些进展,如闪温的测量与预测,以及建立接触表面温度与平均温度之间的关系。

在摩擦学材料方面,已开发出应用于高温的单片陶瓷,填充(干润滑剂)的高分子材料和高分子金属复合材料,以及可在高速重载条件下工作的自润滑轴承材料和在汽车及飞机中应用的性能好、寿命长的刹车材料。此外,还研制了聚合物基的减摩和耐磨自润滑材料,并研究了这些材料的摩擦学特性及摩擦学应用。

在摩擦学元件方面也取得了可喜的进展,如空气轴承、永磁轴承、铁粉—流体动压密封和轴承以及电磁轴承等,电磁轴承既可用于直径为1m的涡轮发电机组和高速磨床,也可用于宇宙飞船、工业用泵和马达。摩擦学材料在医学工程上的应用(如人工髋关节、膝关节和心脏瓣膜)的进展也很引人注目。

#### 2. 润滑与密封

通过研究牛顿流体和非牛顿流体中光滑表面具有不同尺寸比的线接触和点接触的弹性流体动压润滑,并且对数弹流有了更深入的了解,从而可判断在全流体膜和边界膜润滑之间的混合区实现润滑的可行性。此外,还研究了磁存储器中非常薄的空气膜的流体动压润滑的机理。

随着计算机数值分析技术的发展,采用数据处理多重网格技术,可使各种制造方法形成的各种固体表面模式作为计算的输入数据,从而改善了对粗糙表面润滑接触的突起特性的预测方法,并深化了表面形貌对润滑有效性影响的认识。

采用扫描隧道显微镜(STM)、原子力显微镜和超薄膜干涉仪等先进仪器设备对边界



润滑和边界膜进行了原位研究,揭示了几种不同的原理,它们都涉及在边界润滑中起作用的油性膜 (Oiliness films)。近年来,又发展了纳米摩擦学 (Nanotribology) 或微观摩擦学 (Microtribology),研究了纳米尺度的超薄膜的摩擦与润滑特性。

此外,还研制了适用于润滑剂、涂层和自润滑材料产生选择性转移的“零磨损”效应的各类添加剂,并研究了它们的摩擦学特性。

20 世纪 80 年代提出的分子动力学模拟计算方法,不仅在润滑剂的研究中取得了重要进展,而且近年来,还在薄膜润滑研究中进行了较大分子的烷烃链的模拟研究,揭示了一系列新的现象。

## 二、摩擦学与表面工程的交叉研究在摩擦学研究中占有相当重要的地位

随着现代科学技术的发展,学科边界越来越模糊,一些先进的工艺技术和方法正在或已经渗透到摩擦学研究领域,形成交叉发展,相互促进,甚至形成新的学科生长点,其中最突出的就是表面工程。

应用表面涂层技术,尤其是应用物理气相沉积 (PVD)、化学气相沉积 (CVD) 和离子注入技术都已获得明显的减摩和耐磨效果。极薄的  $TiN$ ,  $Ti$ ,  $AlN$  和  $TiBN$  等涂层均已应用于金属切削工具和大型挖掘机的齿等不同尺寸的零件上,使生产率大幅度提高。用于真空空间卫星摩擦元件的干膜润滑中的  $Pb$  和  $MoS_2$  涂敷工艺,包括  $Pb$  涂敷的球轴承,在真空中已获得很长的寿命 ( $1 \times 10^9$  转)。

目前,已经开发了金刚石膜和类金刚石碳膜涂层 (DLC 涂层) 和用于减摩的  $P_b-S_n-C_u$  三元涂层,以及激光处理、摩擦化学处理、热化学处理和等离子喷涂技术。近年来,更重视了复合表面技术的开发,如复合陶瓷涂层—渗氮钢体系和复合 DLC 涂层氧扩散处理钛体系等新技术。

此外,在涂层的摩擦、磨损和润滑机理方面的研究也取得了一些进展,如模拟涂层中具有微观滑动的摩擦接触状态,用分子动力学模拟方法研究沉积 DLC 涂层的摩擦学特性。

## 三、摩擦学新领域的研究呈上升势头

### 1. 纳米摩擦学或微观摩擦学

这一领域已引起了世界上许多国家摩擦界的广泛兴趣,但目前大都还停留在基础性研究阶段。比如:用原子力显微镜和摩擦力显微镜研究微机电系统 (Micro electron mechanical system, MEMS) 材料的纳米尺度的耐磨性; LB 膜、自组装膜 (SA 膜) 和分子沉积膜 (MD 膜) 的微观摩擦特性及其影响因素;超薄层损伤的发展过程;纳米级表面涂层的微摩擦学性能;原子尺度压入的三维动力学分析;粘附磨损和抓伤的原子级机理的计算机模拟。

### 2. 生物摩擦学 (Biotribology)

生物体内存在大量的摩擦学现象。目前生物摩擦学的研究主要集中在美、英、日等几个国家,其研究内容大都是超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 制成的各种人工关节 (包括膝关节、髋关节、肘关节等) 以及与关节相连的软骨组织的摩擦、磨损与润油问题。

此外,还研究了用声发射进行摩擦与磨损状态的无损检测技术,研制了评价人工关节磨损的试验机。



### 3. 极端环境下的摩擦学

这方面的研究目前主要涉及航天飞机, 低温涡轮泵, 高温高速转子轴承以及在高真空、高负荷、核反应堆和可控核聚变等条件下机械元件的润滑、密封和寿命预测等方面的研究。

### 4. 磁记录技术中的摩擦学

#### (1) 薄膜磁盘的摩擦学性能和耐久性的研究

这方面的研究包括: 影响薄膜磁盘的摩擦学性能和耐久性的各种因素的研究; 磁盘表面的分形特性及其与磁盘启动和停止时摩擦特性的相互关系; 磁盘磨损机理的研究的测试技术等。

#### (2) 磨损研究

磨损研究包括: 用 AFM 研究磁盘介质的磨损特性; 关于计算机磁盘驱动器的磁极尖端磨损和磁带磨屑形成机理的研究等。

#### (3) 润滑研究

润滑研究包括: 磁盘表面特性与微观力学接触以及润滑过程的模拟; 高分子润滑膜、分子定向的摩擦学特性; 接触记录系统的润滑剂设计及磁盘润滑剂降解的分子轨道模拟等。

## 四、摩擦学与润滑技术的发展趋势

从历史上看, 摩擦学是紧密地随着机械科学技术与工程的发展而发展起来的。因此, 有人认为在 21 世纪, 摩擦学的命运仍将继续与新的机械系统的开发联系在一起, 如果不存在摩擦学问题的新的机械系统, 摩擦学的研究就会衰败。但是, 从摩擦学的研究对象和该学科所担负的任务看, 它的发展绝不会只是依附于并被限制在机械领域之内。根据人类社会发展和世界科学技术发展的总趋势, 摩擦学在 21 世纪的重大突破将很可能发生在机械领域之外。其发展具有以下三个特征:

(1) 摩擦学的发展将越来越多地超出机械领域, 并与新兴学科和高新技术实现大跨度的交叉与综合, 形成新的学科生长点。

(2) 摩擦学的基本科学问题的研究将从宏观向微观和宏观两头扩展, 并取得重大突破。

(3) 摩擦学的主要研究方法将从对面向现象与面向摩擦学元件的简化的定性描述向面向摩擦学系统的系统分析与定量化发展。

### 1. 摩擦学与润滑技术在机械领域内的发展

可以预料在今后 10~20 年期间, 机械科学技术与工程的发展将在以下四个方面向摩擦学提出更高的要求:

(1) 提高高速、重载、高温、高压机器设备的可靠性;

(2) 提高自动化和微型机器设备以及一些无法接近而须进行维护操作的机器设备和系统(如空间和核环境等)的可靠性;

(3) 节约能源和贵重材料;

(4) 保护环境, 防止或减少公害。

因此, 预计摩擦学将可能在以下方面取得进展:



(1) 为了提高机器设备和系统的可靠性,将大力开发适用于高应力摩擦学元件(如齿轮、轴承、密封等)的新型复合材料,特别是那些热稳定性和热传导性好及导电性能优良的高强度复合材料,以及性能优异的摩擦学材料。

(2) 润滑剂往往是影响在极端工况或特殊工况下工作的机器设备可靠性的关键。因而,今后势必有针对性地开发各种不同用途的特殊润滑剂,包括:可在高辐射条件下长期工作的润滑剂;可承受更高温度和压力(或真空)的润滑剂;在高温( $500^{\circ}\text{C}\sim 750^{\circ}\text{C}$ )下可以形成流体动压润滑和弹流润滑、摩擦系数可达到 $0.001\sim 0.0001$ 的润滑剂;应用于液氮、液氧或液氢的气相和蒸汽相的润滑剂;与生物相容性好的润滑剂;陶瓷润滑剂以及自润滑聚合物与自润滑陶瓷等。

(3) 为了节约能源和材料,并适应保护环境和生态的需要,摩擦学设计作为一种重要手段,将获得重大发展,将建立摩擦学材料、元件和系统的设计预测模型,以及量的设计准则和方法等。与此同时,还将开发出一些新的摩擦学系统;包括:可广泛应用的水基润滑系统;可用于悬浮和在较低摩擦系数下运行的磁和电磁系统;磨损小和可实现“零磨损”的选择性转移的自修复系统;采用液化固体(Liquefied Solid)的润滑系统;化学和生化加工厂用的新型密封系统;适用于发展纳米技术的摩擦学系统等。空气轴承和磁轴承也将会得到广泛的应用。

(4) 为了适应机械制造工业节省能源和材料的需要,加工和成形方面的摩擦学将会得到进一步发展;为了适应开发下一代电子产品的需要,电子摩擦学也将进一步形成并得到新的发展。

(5) 为了提高摩擦学元件的可靠性和节约贵重材料,人们将更加重视研究和发展摩擦学特性好的新型表面技术,开发应用于大气环境下无流体润滑元件的高耐磨性的固体润滑涂层。

(6) 为了适应机电系统(MEMS)和纳米机电系统(NEMS)发展的需要,各种可实现超低摩擦和零磨损的纳米薄膜技术和表面工程将会获得突破性的进展。

此外,计算机检漏与监控系统和摩擦学元件的各种检测技术,以及声、光、电诊断方面的技术也将会得到进一步的发展。

## 2. 摩擦学与润滑技术在机械领域之外的发展

在未来的几十年中,生物摩擦学将是在机械领域之外发展最快的一个摩擦学领域,目前的研究主要集中在人工关节材料、口腔修复材料和人工心脏瓣膜等方面。显然,为了获得寿命长、生物相容性好的仿生材料,必须进一步深化生物机体内部器官摩擦、磨损与润滑机理等方面的基础性研究。因此,无论在基础研究还是在应用研究方面,生物摩擦学都有着广泛的发展前景。

随着计算机技术的发展,计算摩擦学的学科体系将会逐渐建立起来。目前仅在薄膜润滑方面取得了一些初步的引入瞩目的研究成果。然而,可以预期,计算摩擦学必将在应用系统分析与量化方法揭示并阐明摩擦、磨损、润滑机理等方面发挥其独特的作用。

随着经济与社会的迅速发展,以及在其发展过程中所遇到的资源、环境与自然灾害等方面的问题,地质摩擦学(Geotribology)和生态摩擦学(Ecotribology)在21世纪会获得更大发展。目前,已初步明确了地质摩擦学的定义与研究对象,建立了其学科的基本框



架。然而,至今在国内外对此领域都还没有引起足够重视。至于生态摩擦学,目前还处于发展初期。但是,可以预期,地质摩擦学和生态摩擦学将会在 21 世纪的下半叶成为与纳米摩擦学、生物摩擦学和计算摩擦学等具有同样发展前景的新兴学科分支。

对于一个具有战略和战术头脑的科技工作者,必须对科学的未来走向有尽可能准确的判断。然而,在任何领域里进行预测都是要冒风险的。但是,没有把握的预测总比不做预测要好,因为“一切预测实际上都是在创造未来”。

国内公开发行的这类杂志主要有:

- (1) 摩擦学学报,1981 年创刊,原名“固体润滑”,1992 年改名,季刊;
- (2) 润滑与密封,1975 年创刊,原为季刊,1978 年下半年改为双月刊;
- (3) 中国表面工程,1988 年创刊,原名“表面工程”,1998 年改名,季刊。

国外公开发行的这类杂志主要有:

- (1) Wear, 1957 创刊,月刊(瑞士);
  - (2) Tribology International, 1968 年创刊,双月刊(英国);
  - (3) Tribology Transactions, 1958 年创刊,原名“ASME Transactions”,季刊(美国),1988 年改名,由美国润滑工程师协会出版,其内容还包括该协会每年春季和秋季会议上发表的论文;
  - (4) Journal of Tribology, 1967 年创刊,名“ASME Transact: SF, Journal of Tribology”,季刊,1984 年改名(美国),由美国原机械工程师协会出版;
  - (5) Lubrication Engineering, 1945 年创刊,原为季刊,1957 年起改为月刊(美国);
  - (6) Industrial Lubrication and Tribology, 原名“Scientific Lubrication”,1949 年创刊,双月刊(英国);
  - (7) Lubrication Science, 1988 年创刊,季刊(英国);
  - (8) Tribotest, 1994 年创刊,季刊(英国);
  - (9) Journal of Friction and Wear (译自俄文),1980 年创刊,双月刊,由前苏联科学院和白俄罗斯科学院出版;
  - (10) Japanese Journal of Tribology, 1956 年创刊,原名“润滑”,月刊。
- 此外,德、法等许多国家都出版这类期刊。



## 第二章 表面形貌

摩擦学研究的主要内容是做相对运动的相互作用的表面上发生的各种现象。因此，深入了解固体表面上的各种现象是研究摩擦学的基础。

### 第一节 引言

#### 一、表面几何特征（表面形貌）

表面形貌是指物体表面的几何结构，表面形貌包括粗糙度、波度、形状误差和纹理等方面的研究内容。所研究的范围在微米级，表面形貌对于摩擦副的摩擦、磨损及润滑方面有着重要的影响，而且在摩擦、磨损润滑之后，表面形貌也会发生变化。表面形貌对润滑的作用是从 20 世纪 60 年代才逐渐被人们认识，而较系统的研究是从 20 世纪 70 年代开始，到 80 年代才有了较大的进展。

为了对表面形貌及对润滑影响有一感性认识，现给出材料表面基层及表面膜在数量上的概念。零件表面有一材料加工硬化的微晶结构层，它是由于切削加工时分子层熔化及表面流动所产生的，这一层称为毕氏（Bielby）层，这一层常表面氧化层覆盖，大致在表面的是  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，中间是  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ，最里面是  $\text{FeO}$ 。由毕氏层往里是重变形层、轻变形层及基体（图 2-1）。

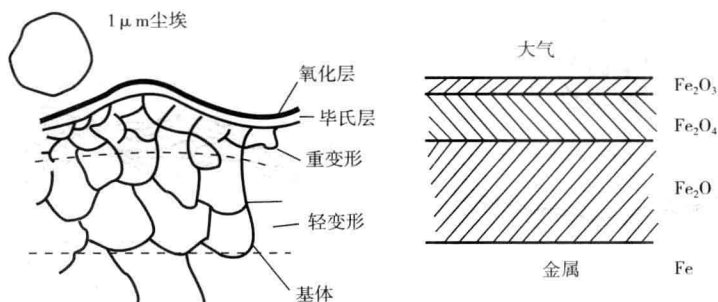


图 2-1 零件的表面结构及氧化层

关于润滑油膜的尺寸（其计算见第六、七、八章），依润滑油膜的性质不同有所不同。如果油的单分子层为  $10^8$  埃的数量级，那么边界润滑油膜（物理吸附膜及化学吸附膜）大约有几百埃（或  $0.01\mu\text{m}$ ），弹流润滑油膜在微米级，流体动力油膜可高达  $0.05\text{mm}$ ，对应其表面粗糙度  $\sigma=0.02\mu\text{m}$ ，研磨表面的均方根粗糙度  $\sigma=0.2\mu\text{m}$ ，粗加工表面  $\sigma=3.2\mu\text{m}$ 。



图 2-2 示意出它们的量级关系。

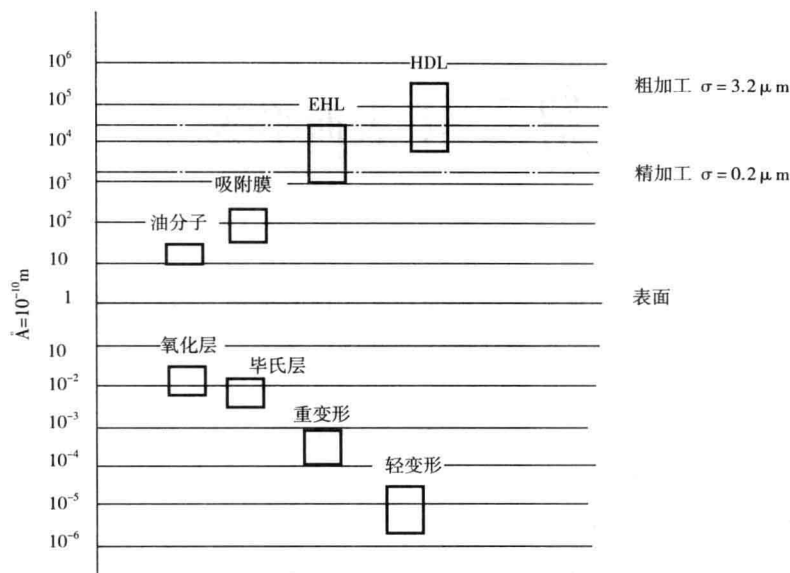


图 2-2 各种表面性能的数量级

一个零件的表面，即使加工得再精细，在显微镜下观察仍是很粗糙的。粗糙度是由表面上波长很短的、具有不同幅度和间距的峰谷的微凸体形成的。波度又称为宏观粗糙度，它是在表面上所见到的粗糙度（图 2-3）。此外，由于加工方法不同，如车削、铣削、刨削等，在加工表面上所形成微凸体的分布都有一定的方向，这就是纹向。研究低副接触（面接触）着重从波度及纹向着手。研究高副接触着重从微观的粗糙度及纹向入手。实际的零件表面是具有三维凸凹的表面（图 2-4），为了研究问题方便，我们将从一维表面形貌研究入手，逐步扩展到二维、三维。

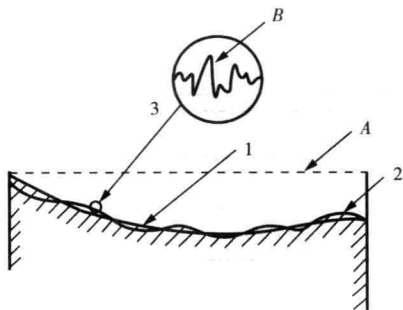


图 2-3 固体的工程表面特征

A—理想表面（物理表面）；B—工程表面；

1—宏观几何形状误差（平面度）；

2—中等几何形状误差（波度）；

3—微观几何形状误差（表面粗糙度）

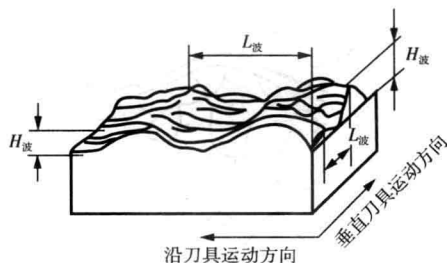


图 2-4 三维表面波纹理





## 二、一维形貌

### 1. 算术平均高度 $R_a$ 或 CLA (CenterLineAverage)

通常取表面的某一截面的外形轮廓曲线来研究沿表面方向 ( $x$  方向) 起伏高度 (图 2-5) 的变化。取轮廓中心线为  $x$  轴, 外形高度为  $z$  轴。算术平均值是在样本长度内, 中线上下高度偏差绝对值的平均值

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \approx \frac{\int_0^L |z(x)| dx}{L} \quad (2-1)$$

这个指标用途最广泛, 计算较简单但所反映轮廓的信息量很少, 许多相同  $R_a$  值的形貌差别很大 (图 2-6), 所以单靠这个参数是不够的。



图 2-5 表面方向的起伏高度

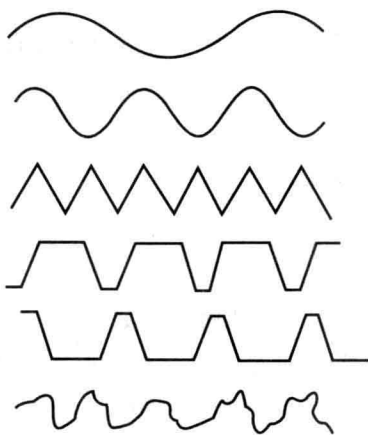


图 2-6 具有相同  $R_a$  的不同表面

### 2. 高度均方根值 $\sigma$ 或 RMS (RootMeanSquare)

它是轮廓在取样长度内, 中线上下高度偏差的平均平方根值。这项指标  $\sigma$  比  $R_a$  区别的形貌特征多一些, 目前用得也很广泛。

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2 \right]^{1/2} \approx \left[ \frac{\int_0^L [z(x)]^2 dx}{L} \right]^{1/2} \quad (2-2)$$

### 3. 交点密度 $N_o$ 和峰顶密度 $N_p$

$R_a$  和  $\sigma$  仅表示了  $z$  方向高度的平均值, 没有表示出轮廓沿  $x$  方向分布的疏密程度。这可用交点密度  $N_o$  和峰点密度  $N_p$  表示。如图 2-7 所示。交点密度  $N_o$  是指每单位长度轮廓