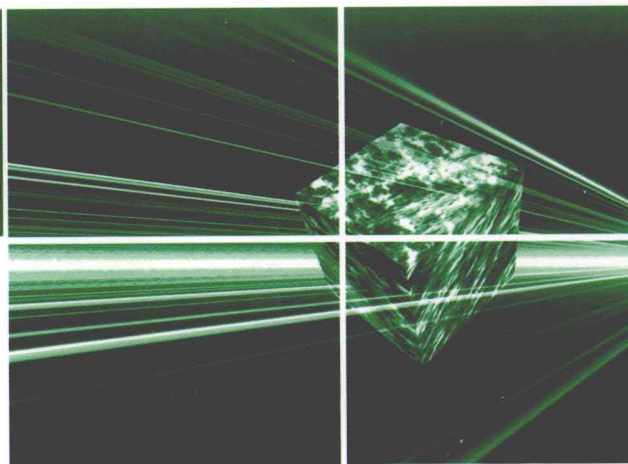


普通高等教育规划教材



摩擦磨损与润滑

侯文英 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书主要介绍摩擦、磨损与润滑方面的基本知识、基本理论与基本方法,使学生能应用有关知识分析与解决机械设备尤其是冶金设备中出现的摩擦、磨损与润滑方面的有关问题。

本书可作为机械设计制造及其自动化专业本科教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

摩擦磨损与润滑/侯文英主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 3
普通高等教育规划教材
ISBN 978-7-111-36996-7

I. ①摩… II. ①侯… III. ①机械-摩擦-高等学校-教材②机械-磨损-高等学校-教材③机械-润滑-高等学校-教材 IV. ①TH117

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 280135 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:倪少秋 责任编辑:倪少秋 周璐婷

版式设计:常天培 责任校对:张 媛

封面设计:张 静 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13 印张 · 315 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-36996-7

定价: 25.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

摩擦、磨损与润滑是机械设计制造及其自动化专业的一门专业选修课。了解摩擦存在的机理从而控制磨损,改善润滑与密封,已成为当前节约能源和原材料、缩短停机及维修时间的重要手段。同时,摩擦、磨损与润滑在提高产品质量、延长设备寿命和增加可靠性等方面发挥重要作用。

近几年国内出版的关于摩擦、磨损与润滑的教材较少,以往的教材内容又比较陈旧,不够全面,不能反映当今摩擦学发展的最新成果。而且对于具有冶金特色的学校,除了上述摩擦学基本内容以外,还应针对自身特点,加入一些关于冶金机械中如何研究应用摩擦学的章节,以满足学生的专业学习需求。因此,迫切需要一本内容全面、资料新颖且能满足专业特色的一本摩擦学教材。这是机械专业建设的一个亟待解决的迫切任务。

本书正是考虑了上述原因,为机械专业大学本科高年级学生编写的。其目的在于培养学生具有摩擦、磨损与润滑方面的基本知识、基本理论与基本方法,能应用有关知识分析与解决机械设备尤其是冶金设备中出现的摩擦、磨损与润滑方面的有关问题。

本书由内蒙古科技大学侯文英担任主编(第1~6章、第10章),高琳担任副主编(第7~9章、第11、12章),李文卓、张春艳、朱东岳参编。

本书在编写过程中得到了机械工业出版社和本书编辑的大力支持和热情帮助,并提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

编 者

目 录

前言	
第1章 绪论 1	状态类型和转化 65
1.1 摩擦学的发展 1	6.2 边界润滑 66
1.2 摩擦学研究的内容以及研究意义 5	6.3 流体动压润滑 68
1.3 本课程的目的和要求 7	6.4 流体静压润滑 70
第2章 固体的表面特性 8	6.5 弹性流体动压润滑 75
2.1 固体表面的几何特性 8	第7章 耐磨和减摩材料 79
2.2 固体表面的物理化学特性 9	7.1 金属耐磨材料 79
第3章 固体表面的接触特性 15	7.2 减摩材料 85
3.1 概述 15	第8章 润滑剂和添加剂 93
3.2 研究接触特性的方法 20	8.1 概述 93
第4章 摩擦原理 22	8.2 润滑油的理化性质 94
4.1 摩擦的概念与分类 22	8.3 润滑油的分类及简要介绍 98
4.2 古典摩擦定律 23	8.4 润滑脂 101
4.3 摩擦理论概述 25	8.5 添加剂 104
4.4 分子—机械理论 30	8.6 矿物基础油的生产工艺 109
4.5 摩擦的能量理论 32	第9章 润滑方法和润滑系统 114
4.6 摩擦时金属表面特性的变化 35	9.1 润滑方法 114
4.7 摩擦因数的影响因素 40	9.2 润滑装置 114
4.8 滚动摩擦 43	9.3 润滑系统 119
4.9 特殊工况条件下的摩擦 46	第10章 钢铁冶金典型设备的润滑 122
第5章 磨损 47	10.1 烧结和炼焦设备的润滑 122
5.1 概述 47	10.2 炼铁设备的润滑 130
5.2 磨损的几种主要类型 47	10.3 炼钢与连铸设备的润滑 134
5.3 近代磨损理论 60	10.4 轧钢机的润滑 140
第6章 润滑理论 65	10.5 炼钢与连铸设备润滑技术应用实例 145
6.1 润滑的作用以及常见的润滑	10.6 轧钢设备润滑技术的应用 156
	10.7 无缝钢管轧制芯棒石墨润滑



系统的国产化改进	164	12.2 磨损试验的模拟问题和实验	
第 11 章 摩擦学设计	168	参数的选择	181
11.1 摩擦学设计概述	168	12.3 摩擦、磨损、润滑试验机	183
11.2 耐磨设计	169	12.4 摩擦磨损试验中的测试	187
11.3 典型零部件的摩擦学设计	173	12.5 摩擦表面的近代微观分析法	192
第 12 章 摩擦磨损试验和测试分析		12.6 磨损微粒的分析技术	194
技术	180	参考文献	199
12.1 摩擦磨损试验的分类	180		

第 1 章 绪 论

1.1 摩擦学的发展

1.1.1 摩擦学的发展过程

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。很难设想人类能够生存在一个没有摩擦的世界。早在原始社会，人类就学会了“钻木取火”，这是人类最早利用摩擦现象的例子。在我国周代的《诗经》中就有“载脂载鞆”的诗句，鞆（音狹）是指车轴两端的金属部分。说明我国早在 2000 多年前，就已掌握了初步的润滑技术。

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），他在摩擦研究领域中有不少卓越的贡献。他研究了摩擦的规律性，确定了摩擦因数以及滑动摩擦与滚动摩擦等概念，此外还研究了摩擦表面上引起的磨损现象。1785 年，法国的库仑根据前人的研究，用机械啮合概念解释干摩擦，提出摩擦理论。后来又有人提出分子吸引理论和静电力学理论。1935 年，英国的鲍登（Bowdon）等人开始用材料粘着概念研究干摩擦。1950 年，鲍登提出粘着理论。严格地说，润滑现象作为科学研究对象的历史始于 1886 年，英国著名水力学家雷诺（Reynolds）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“润滑的理论及比彻姆·陶渥尔（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产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分割开来进行研究，而且大多数都是从力学或物理学的角度进行研究。其研究成果分散在各个传统的分支学科中，有关知识分散在大学的物理、力学、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。这就大大地妨碍了它的发展。

20 世纪 50 年代普遍应用电子计算机以后，线接触弹性流体动压润滑理论有所突破。60 年代在相继研制出各种表面分析仪的基础上，磨损研究得以迅速开展。至此，综合研究摩擦、磨损与润滑相互关系的条件已初步具备，并逐渐形成摩擦学（Tribology）这一新学科。

随着计算机技术的发展，以前不能用解析法解决的问题大都可以进行精确的定量计算，所分析的因素更加全面和符合实际，目前经典流体润滑理论已经基本成熟，研究的重点转向特殊介质和极端工况下的润滑理论，例如超层流润滑、多相流体和流变润滑理论，特别是针对异向曲面摩擦副的润滑问题所建立的弹性流体动压润滑理论和应用研究已取得重大进展。

混合润滑是最为普遍的润滑状态，在国外也受到广泛的关注。

材料磨损研究已从早期的宏观现象分析转向微观机理研究，应用现代表面分析技术揭示磨损过程中表面层组织结构和物理化学变化。目前国际上提出的能量理论或材料疲劳机制的各种磨损理论，可以作为摩擦副材料选择和抗磨损设计的依据。此外，新型轴承和动密封装置的结构、新型材料与表面热处理技术、新型润滑材料与添加剂等方面的研究均有较大的进展。

摩擦学学科的迅速发展是与工业界的需求密不可分的。随着机械设备向着大功率、高速度方向发展，以及机械设备在苛刻工况下的应用，机械零件因摩擦磨损而加速失效，不仅维修费用增大，甚至使整个机械设备丧失功能。因此，降低机械设备的摩擦损耗，提高机械设备的效率，维护机械设备的正常工作，就成为机械设计、制造及使用维护部门关注的问题。正是工业界的这种需求，推动了摩擦学理论的发展。

今天，摩擦学研究已经深入到更为广阔的领域，除了在摩擦与磨损机理、润滑理论、摩擦学测试技术和设备工况检测技术，以及减摩耐磨材料研究等传统领域摩擦学研究得到进一步发展外，而且在以往未曾达到的技术领域，例如太空领域、微观领域、生命科学等亦形成了新的研究方向和学科分支，并对推动这些领域的科学进步作出了贡献。

摩擦学研究的对象也越来越广泛，在机械工程中主要包括：①动、静摩擦副，如滑动轴承、齿轮传动、螺纹联接等；②零件表面受工作介质摩擦或碰撞、冲击，如犁铧和水轮机转轮等；③机械制造工艺的摩擦学问题，如金属成形加工、切削加工和超精加工等；④弹性体摩擦副，如汽车轮胎与路面的摩擦、弹性密封的动力浸漏等；⑤特殊工况条件下的摩擦学问题，如宇宙探索中遇到的高真空、低温和离子辐射，深海作业的高压、腐蚀、润滑剂稀释和防漏密封等。此外还有生物中的摩擦学问题，如研究海豚皮肤结构以改进舰船设计，研究人体关节润滑机理以诊治风湿性关节炎，研究人造心脏瓣膜的耐磨寿命以谋求最佳的人工心脏设计方案等。地质学方面的摩擦学问题有地壳运动、火山爆发和地震，以及山、海、断层形成等。在音乐和体育以及人们日常生活中也存在大量的摩擦学问题。随着科学技术的发展，摩擦学的理论和应用必将由宏观进入微观，由静态进入动态，由定性进入定量，成为系统综合研究的领域。

1.1.2 摩擦学主要研究方向的发展

摩擦学是一门十分复杂的学科，迄今发现的与摩擦有关的因素多达上百个。在一般的基础物理教材中很少谈及摩擦的起因和本质问题，只给出一些经验规律。事实上目前也确实还没有建立起十分成熟的摩擦理论，摩擦问题一直是科学技术研究领域的一个重要课题。

1. 流体润滑理论的发展

随着人们对润滑机理和理论的深入研究，润滑理论经历了由宏观观察到微观分析的发展；从凭经验对摩擦现象作定性分析，发展到对摩擦的各种物理和化学现象的相互关系建立精确的定量动态模型；从对摩擦磨损的少数因素的研究向全面综合研究的方向发展。

1886年，Reynolds提出了润滑方程，开创了流体润滑理论研究。随后，基于粘性流体力学建立的流体动润滑理论广泛应用于滑动轴承等面接触机械零件的设计中。20世纪60年代以后，人们又将Reynolds流体润滑理论与Hertz弹性接触理论相结合而发展了弹流理论，成功地解释了诸如齿轮传动、滚动轴承等点线接触机械零件的润滑设计问题。弹流理论经历



了从经典的弹流理论到现代弹流理论的发展过程，经典的弹流理论考虑了固体表面在流体动压作用下的弹性变形，润滑剂的粘度和可压缩性。但它所预测的油膜厚度不能满意地解释牵引力的数值是随着滚动速度或滑动速度变化的原因。1919年，Hardy提出边界润滑状态，即润滑油添加剂中的元素通过物理或化学作用，在金属表面形成具有润滑作用的吸附膜。边界膜更薄，通常由规则排列的单分子或几个分子层组成。边界润滑的理论基础主要是物理化学和表面吸附理论。

弹性润滑理论及其观测技术的深入发展，促使人们去探索新的润滑状态，如薄膜润滑(Thin Film Lubrication)状态，用它来描述边界润滑与弹流润滑之间的过渡状态。20世纪90年代初，从理论和实验两方面都论证了薄膜润滑状态的存在，并在薄膜润滑性能和机理研究方面取得了重要进展。

2. 纳米摩擦学

现代机械科学的发展趋于机电一体化、超精密化和微型化。许多高新技术装置中的摩擦副间隙常处于纳米量级。微型机械因受到尺寸效应的影响，使零件表面的粘着力、摩擦力和膜粘滞力相对于体积而言显得非常突出。因此，微观摩擦磨损和纳米薄膜润滑成为关键问题。

纳米摩擦学研究不仅是现代科技发展的需要，也是摩擦学深入发展的趋势。纵观摩擦学的发展历史，它作为技术基础的学科，随着机械工业的技术进步经历了几个发展阶段和研究模式。17世纪，Amontons建立了以固体摩擦经典理论为代表的研究模式，属于经验研究模式。18世纪末，在工业革命的推动下，Reynolds根据流体力学奠定了流体润滑理论基础，从此开创了摩擦学。到20世纪30年代，随着机器工况参数日益复杂，人们开始应用表面物理学、金属物理和工程热力学等研究摩擦学行为。例如，Tomlinson研究摩擦学过程中的原子间能量转换，Bowdon和Tabor建立表面粘着理论等，促使摩擦学成为涉及机械、物理化学、材料化学和热物理等的边缘学科，其研究模式由单一的学科研究进入多学科的综合分析。1989年，Winer在欧洲摩擦学国际会议的特邀报告中指出，研究微观或原子水平的摩擦学在今后可能获得重大突破，1992年里兹-里昂摩擦学国际研讨会上，Dowson在主题报告中总结近20年来摩擦学的重大发展并提示：人们已认识到亚微米和纳米厚度的润滑膜和表面涂层的重要作用，现代摩擦学研究正在向表面和界面科学的方向发展。从20世纪80年代末期开始，美国、日本等发达国家提出微观摩擦学研究，20世纪90年代微观摩擦学发展为纳米摩擦学，并迅速成为机械学科的前沿研究领域。

纳米摩擦学旨在原子、分子尺度上研究摩擦界面磨损与机理。其学科基础之一是现代表面科学，在研究方法、理论基础、测试技术和应用对象等方面与宏观摩擦学不同。显然，在纳米摩擦学研究范围内，材料的物理化学特性及其对环境变化的反应都有很大变化，作为宏观摩擦学主要依据的连续介质的力学性能和材料的体相特征均不完全适用。

纳米摩擦学有着广泛的研究前景，其中，薄膜润滑的机理研究是近年来摩擦学领域中最活跃的研究方向之一。人们对弹性流体理论的研究过程中发现，许多处于低速、重载、高温和低粘度润滑介质的机械设备和超精密机械的摩擦副常处于比通常弹流润滑膜厚度更薄的润滑状态(即薄膜润滑状态，膜厚在几个至几十个纳米之间)下工作。另外，随着现代高新技术和超精密机械的发展以及新型材料和表面工程的应用，处于纳米间隙的摩擦磨损问题也较为突出。因此，有关纳米摩擦学的研究无论是在理论上还是在工程应用前景上都有重



大的价值。

3. 摩擦学设计

作为在机械设计阶段就可以有效地解决设备中摩擦、磨损与润滑问题的现代设计方法之一，摩擦学设计以摩擦学理论为基础，从系统工程观点出发，通过理论、试验以及经验类比分析，预测并排除可能发生的故障，使机械设备在使用中具有最好的工作性能和经济性。摩擦学设计和其他现代设计方法被认为是机械零件设计经历了运动学设计和强度设计之后的第三阶段的设计过程。

早在1985年，美国标准局组织了一个摩擦学设计的专题讨论会，会议制定了开发计算人工智能技术计划，以便实现真正意义上的摩擦学设计，并在工程实际中得到推广运用。1988年9月，第十五届里兹-里昂国际摩擦学学术会议在英国召开，会上宣读论文54篇，其中已有一些论文使用了人工智能的设计思想和方法，并把它用于摩擦学设计中，研究内容涉及航空、汽车、铁路和电力等诸多行业。在中国，1989年4月中国摩擦学学会和机械设计学会共同在南京召开了摩擦学设计研讨会，会上正式提出了以摩擦学设计的名称开展研究工作，并提出了研究的方法。以中国工程院院士谢友柏教授领衔的西安交通大学润滑理论及轴承研究所在该领域里开展了大量的颇有成效的研究工作。黄碧华、谢友柏等人针对柴油机的磨损问题进行了“柴油机磨损状态监测及故障诊断专家系统知识库建立的研究”。武汉汽车工业大学梁华、杨明忠等人在研究人工智能的基础上提出了摩擦学系统磨损趋势神经网络预测模型，并进一步研究了磨损趋势神经网络预测的单步预测法和多步预测法。合肥工业大学的桂长林教授及其研究小组在AICAD摩擦学设计的研究方面已经取得初步成效，已在1999年3月完成机械工业技术发展基金项目“发动机摩擦学设计理论和方法的研究”，运用人工智能CAD的方法，对发动机摩擦副进行了概括性的分析研究，并提出了一种集成化智能CAD的研究方法。武汉工程大学徐建生副教授在研究人工智能摩擦学设计的基础上开发了一套丝杆螺母副摩擦学设计程序软件，此软件所设计的丝杆螺母副既能满足强度设计要求，又能满足摩擦磨损设计要求，为人工智能摩擦学设计 and 应用起到了较好的示范作用。

4. 耐磨材料

耐磨材料广泛用于矿山、建材、冶金、电力及铁路等行业的耐磨零件的制造，如破碎机的颚板、锤头、球磨机衬板、磨球等。衬板是主要磨损件，磨球和磨段更是大宗消耗材料。磨损件很快失效，频繁更换，不仅浪费大量的金属材料，而且造成巨大的停工停产损失，这已成为制约生产发展的一个障碍。

高锰钢在国内外已经成功地应用了一百多年了，它必须在充分的强烈冲击条件下才能产生加工硬化而变得耐磨，所以在许多工况条件下，高锰钢并不是一种万能和有效的耐磨材料。例如，目前公认的球磨机衬板、熟料破碎机锤头等零件在采用高锰钢时冲击硬化程度很低，使用寿命较短。

与传统的金属耐磨材料相比，陶瓷和非金属耐磨材料有着比金属材料更优异的性能。但是，由于陶瓷材料的脆性，往往限制了其在有冲击条件下的应用范围。现在，利用高硬度的脆性耐磨材料和韧性较好的基体相结合的复合耐磨材料得到了成功的应用。最普遍的是采用高铬铸铁和高锰钢或中、低合金钢基体的复合（包铸）件；也有采用硬质合金和陶瓷材料镶嵌的复合件（如锤头和磨辊等）。双金属复合材料是由具有优良抗磨性的合金白口铸铁与具有一定强度和韧性的钢组成，白口铸铁作为抗磨组元能有效地抵抗磨料磨损，而钢具有一



定的强度和冲击韧度来承受冲击载荷。这种复合金属材料可应用于既受到严重磨料磨损，又受到较大的冲击载荷，如颚式破碎机、锤式破碎机锤头、大型球磨机衬板等。实践表明，这种双金属复合材料的冲击韧度是单一白口铸铁的5~10倍，其使用寿命是传统高锰钢的几倍或十几倍，且使用过程中安全可靠，双金属复合材料在冶金、矿山、采石场、水泥厂等工矿企业的应用前景广阔。

目前国内外对耐磨材料的需求在不断增长，为了不断提高我国耐磨材料的品质，应认真做好如下几点：①提高冶金质量；②积极研究和推广耐磨材料的加工工艺；③建立严格的材料检验制度；④正确选择和使用耐磨材料。

1.2 摩擦学研究的内容以及研究意义

1.2.1 摩擦学研究的内容

摩擦学是20世纪60年代中期在英国首先创立的一门新兴学科。它是研究发生在作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。

摩擦学研究的基本内容是摩擦、磨损（包括材料转移）与润滑（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。

从学科性质上看，摩擦学具有以下三个特点：

1) 摩擦学是一门在传统学科的基础上综合发展起来的边缘学科。摩擦、磨损与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横断学科。摩擦学的产生主要是以节约资源、节省能源、提高效益等近代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以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分支。

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图，如图 1-1 所示。

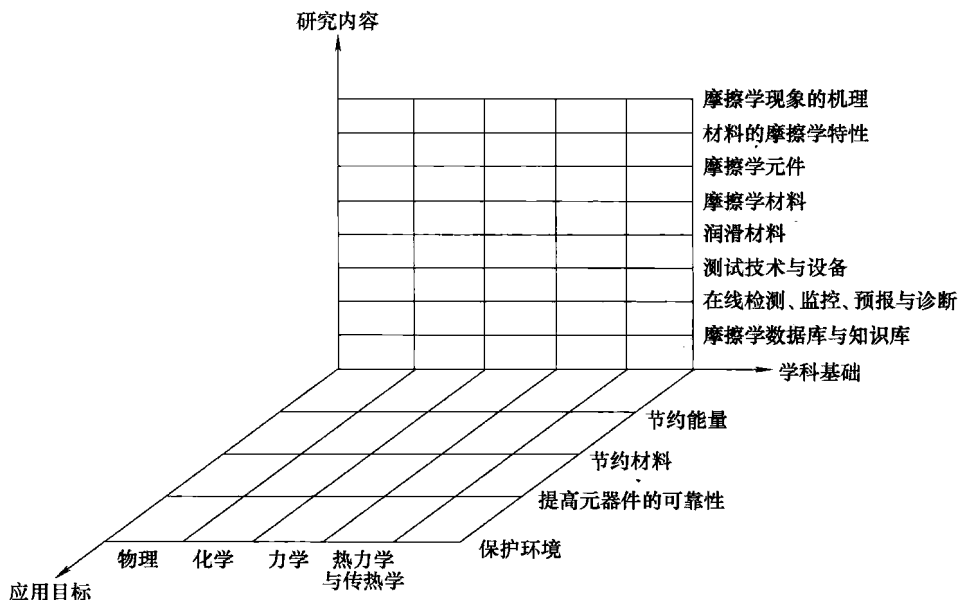


图 1-1 摩擦学的基本框架

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、磨损与润滑是自然界（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。

1.2.2 摩擦学研究的意义

摩擦学与人类生活和生产的各个方面都有着极为密切的关系，尤其是科学技术及工业生产高度发展的今天，要求摩擦学不断深入研究和迅速发展，就更有重要的现实意义。

1. 摩擦学是一门能源保护的科学

据估计，世界上能源的 1/3 ~ 1/2 最终以各种方式表现为摩擦的损失，近一半由于摩擦而浪费掉，这是一个十分可观的数字。据 1977 年美国能源消耗最大的四个部门（交通运输、电力、加工以及商业和民用部门）的统计分析，这四个部门的能源消耗占全国能源消耗的 80%，但是，其中近乎一半是在使用过程中未经做功而损失掉的，如果从摩擦学方面采取合理必要的措施，就会大大地节省能源消耗。

2. 摩擦学的发展是工业和科学技术发展的迫切需要

摩擦学问题大量、普遍地存在于所有机械设备中。统计分析表明，导致机械失效的主要原因，并不是零部件的断裂，而是运动副的摩擦损坏。我国现在的机械产品，在国际市场上



缺乏竞争力，其主要问题之一是许多基础件不过关，而其中很大一部分是由于摩擦学方面的设计不够完善造成的。如汽轮发电机组因轴承发生油膜振荡而不能运行，汽车因制动材料热性能差而不能提高行驶速度，许多机械因磨损过快而达不到寿命要求或精度要求，流体系统因密封不可靠而影响使用等。现在机械产品在国际市场上的竞争力，都体现在效率高、精度保持性好、使用可靠、寿命长，这些要求大部分与摩擦学设计有关。所以，现在国际上公认，机械产品如不进行摩擦学设计，必然要丧失市场竞争力。

3. 摩擦学的研究和应用具有巨大的经济意义

摩擦学的经济效益往往要经过一段时间之后才能体现出来。据国外文献报导，日本一年依靠摩擦学技术可节约 27 亿美元（1974 年）；美国仅在运输、发电、工业生产等几个领域，依靠摩擦学技术一年即可节约 160 亿美元（1976 年）。其他国家也有类似的报导，其每年可节约的数字大致相当于国民经济年总产值的 1% 左右。我国在改善摩擦润滑方面可能获得的经济效益的潜力比发达国家更大。

1.3 本课程的目的和要求

本课程的主要目的是通过对本课程的学习，使学生深入、系统地了解摩擦、磨损与润滑的基本原理，并在此基础上初步掌握“控制摩擦、减轻磨损、改善润滑”的主要方法，以及摩擦学研究的某些基本方法。从工程应用来看，摩擦学也可以认为是研究材料的摩擦学性能及其工程应用的一门技术科学。对材料的摩擦学性能的认识和分析，从系统分析的观点看，可以大体上归纳为以下两种基本方法。

1. 黑箱法

只知其输入值和输出值，不知其内部结构的系统称为“黑箱”。而通过对系统输入—输出数据的测量和处理，以建立系统数学模型的方法，即系统辨识方法。因此，用这种方法建立相应的“黑箱数学模型”去解决实际问题的研究方法，可称为“黑箱法”。它是研究结构和机理尚难弄清楚的复杂系统以及不能或不允许打开的系统的一种有效的方法。在摩擦学中常用这种方法分析材料的摩擦学性能，即在不了解材料内部的组织结构，或者不考虑其组织结构时，可把材料的内部组织结构看成是一个尚未认识或不能打开的黑箱，而可以从其输入与输出的信息及其之间的传递函数来认识与分析材料的摩擦学性能。

输入与输出信息反映了黑箱与周围环境的联系；而在外部环境恒定条件下将输入信息转换为输出信息的方法或机制（以传递函数表示）反映了黑箱的功能。

2. 相关法

这种方法是在大量试验数据的基础上，建立材料的摩擦学性能 P_i 与材料表面组织结构参数 S_i 相关性之间的函数关系，即

$$f(P_i, S_1, S_2, \dots) = 0$$

应用上述函数关系，可通过各种表面技术改变材料表面的组织结构，以达到控制材料摩擦学性能的目的。

显然，上述两种基本方法的基础都是试验。因此，试验研究是解决摩擦学问题的基本手段。

第 2 章 固体的表面特性

摩擦学是研究接触表面在相对运动的过程中，表面上所发生的摩擦、磨损与润滑现象的。摩擦是一种表面效应，两个物体作相对运动时遇到的阻力主要取决于该表面的状态，即表面是光滑的还是粗糙的，清洁的还是污染的，以及材料的机械力学特性和表面的物理化学特性。因此，在深入研究这些现象之前，有必要对与摩擦学特性有关的固体表面本身的几何特性和物理化学特性进行了解。近代科学技术的发展，为揭示摩擦表面的物理化学性质提供了手段，使摩擦学机理的研究能够更深入地探索其微观本质。

2.1 固体表面的几何特性

任何固体的表面都不是绝对平整光滑的，即使经过精密加工的机械零件表面也存在许多肉眼很难看到的凸起和凹谷。在显微镜下观察到的零件表面如同大地上的峡谷、山峰和丘陵一样。这是因为任何加工表面不论其加工手段如何，在加工过程中机床—刀具—工件系统的振动、切屑分离时的塑性变形以及加工刀痕，都会形成大小不等的几何形状误差，这些误差可归纳为三类，即宏观几何形状误差、中等几何形状误差和微观几何形状误差。

2.1.1 宏观几何形状误差

宏观几何形状误差主要是由机床精度、夹紧力、切削力引起工件和设备的弹性变形等造成的，其波距在 10mm 以上。与摩擦磨损有关的宏观几何形状误差主要有平面度、圆度、圆柱度。

平面度是指实际平面不平的程度。平面度误差可用包容该平面的一对距离最小的理想平面之间的距离 H 来表示（图 2-1）。

圆度是指一个柱面在同一横截面内的实际轮廓的不圆程度，实际轮廓往往可用无数组同心的理想圆来包容，而其中必有一组同心圆的半径差最小，此最小半径差 r 就是该横截面的圆度误差（图 2-2）。

圆柱度是控制圆柱面的横截面和纵截面形状误差的综合性指标。一个实际圆柱面可以用无数组同轴圆柱面包容，其中必有一组同轴圆柱面的半径差最小，此最小半径差 r 即为该圆柱面的圆柱度误差（图 2-2）。

宏观几何形状误差的特点在于它是与名义几何形状不同的、连续的、不重复的表面形状偏差。它对零件的使用性能影响很大。在圆柱面的间隙配合中会使

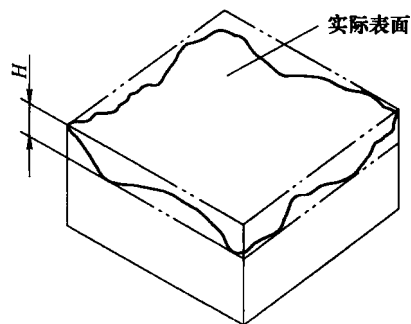


图 2-1 平面度

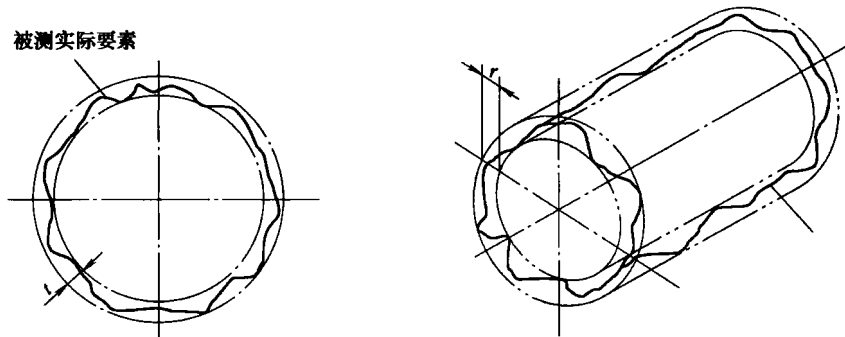


图 2-2 圆度和圆柱度

其间隙不均匀, 从而造成局部过度磨损, 使配合性质遭到破坏, 致使零件使用寿命下降甚至完全失效。在平面接触的情况下, 这种误差会使互相配合零件的实际支承表面面积减少, 从而增大比压, 使表面变形也相应增大, 而在发生相对运动时, 导致磨损加剧。

2.1.2 中等几何形状误差

中等几何形状误差又称为表面波纹度, 是由机床、工件、刀具的振动引起的, 其特点具有周期性, 其波距为 $1 \sim 10\text{mm}$ (图 2-3)。

接触表面上波度的存在会使零件实际支承面积减小, 在间隙配合中使磨损加剧, 对于高速旋转的零件, 还会引起振动和噪声。通常, 波高的影响要比波距的影响大得多。

2.1.3 微观几何形状误差

微观几何形状误差以表面粗糙度来表示, 其特点是没有明显的周期性, 波距较小, 一般为 $2 \sim 800\mu\text{m}$ 。

表面越粗糙, 接触面上的支承面积越小, 单位压力就越大, 越易于磨损。表面平滑可以减小摩擦因数, 对工作机来说可以提高效率, 对动力机来说可以增加输出功率, 减少表面磨损延长寿命。但是表面过于光洁, 不利于储藏润滑油, 也会增大两表面之间的分子吸附力, 从而增大摩擦因数。

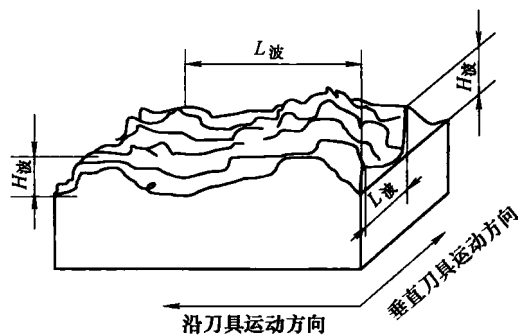


图 2-3 表面波纹度

2.2 固体表面的物理化学特性

2.2.1 固体的表面能和表面力

表面, 确切地说是指物体相对真空或本身的蒸气所接触的界面。而物体与另一物体相接触的表面, 应称之为界面, 即两种相的交界面。人们所研究的表面现象, 都是发生在界面上的现象, 由于习惯, 仍称之为表面。

液体表面上的分子不同于液体内部的分子, 液体内部的分子受周围分子对它的吸引而平



衡，而液体表面上的分子所受液体内部分子的吸引力大于受液体表面以外空气分子的吸引力，从而使液体表面具有自动缩小的趋势。当内部分子上升到液体表面上组成新液体表面时，就必须克服内部分子的引力而做功，如同举起重物做功一样，从而使处于液体表面上的液体分子的能量增加，产生使液体表面缩小的力，这个力就叫做表面张力。

固体表面的质点（分子、原子、离子）也和液体表面上的质点一样，处于力场的不平衡状态中，这些力场不会突然消失，而继续延伸到固体以外的空间，使表面具有一定的能量，即表面能。

当两个物体彼此靠近而进入接触时，两物体便被其表面的凸峰所分开，两物体的表面越光洁，接近的程度就越高，可见表面粗糙度值小的物体，表面能大。如果把两个表面粗糙度值很小的物体压在一起，靠界面上分子间的吸引力，就会形成非常牢固的粘结；同时，表面能高的表面会导致快速的表面吸附，吸附层使表面隔开，从而减少了摩擦。

表面上的大多数质点都表现出很高的化学活性，急于吸引其邻近质点即外来的分子、原子、离子，而得到某种补偿，结果就降低了固体的表面能（自由焓）。金属表面形成的氧化膜降低了金属的表面能。同样，对表面进行润滑的结果，就是明显减弱了物体的表面能。固体表面能的概念已经成为研究摩擦磨损问题中公认的主题，但是至今还没有更多的资料作为定量分析的基础。

固体表面的分子、原子、离子吸附周围邻近粒子这一现象，说明固体表面具有表面力，表面力是在很小的距离上才发生作用的（图 2-4）。对于两个铜原子来说，当两个原子的距离为 0.3nm（相当于铜原子的直径）时，在 P 点上，吸力和斥力相平衡；OP 为其平衡原子距。对于所有原子、分子间的作用都具有图 2-4 所示的形式，Q 点是使两个原子分离的临界点。物体的表面力是指两相或两物体相互作用时有助于物体内聚的各种力，按照固体晶体结构的不同，这些力可以是离子键力、共价键力、金属键力和范德华力等。

1. 离子键力

离子晶体的结合力叫做离子键力。当电离能较小的金属原子与电子亲和能较大的非金属元素的原子相互接近时，前者放出最外层电子而形成正离子，后者吸收前者放出的电子而变成满壳层的负离子，正负离子由于库仑引力作用而相互靠近，当它们靠近到一定程度时，两闭合壳层的电子云因重叠而产生排斥力，当斥力和吸力相等时就可以形成稳定的离子键。离子键没有方向性和饱和性。氯化钠晶体就是典型的离子晶体。

2. 共价键力

原子晶体的结合力称为共价键力，原子晶体又称为共价晶体，典型的是氢分子（ H_2 ）中的两个原子之间的结合。两个氢原子相互靠近形成分子时，两个价电子集中在两原子核之间运动，为两原子核所共有，且两电子的自旋相反，故共价键是由两原子之间一对自旋相反的共有电子形成的。共价键的结合力很强，具有方向性和饱和性。具有代表性的共价晶体是金刚石。

3. 金属键力

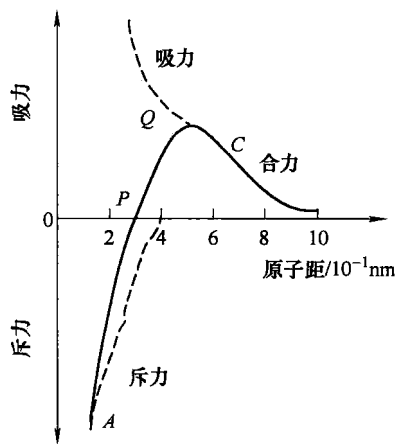


图 2-4 原子吸力、斥力与原子距的关系



在金属晶体中，原子失去了它的部分或全部价电子而成为离子实，这些离开原子的价电子，不属于某一个离子实所专有，而为全体离子实所共有，金属键力就是靠共有价电子和离子实之间的相互作用而形成的。金属键没有饱和性和明显的方向性，因此金属的结合很牢固，有很高的硬度和熔点，导电和导热性能都很好。

4. 范德华力

分子之间的相互作用力称为范德华（Vander Waals）力。分子晶体的结构单元就是分子，分子晶体的结合力就是范德华力，故称为范德华键，这种键没有方向性和饱和性。由于相互极化而产生的引力很弱，晶体结合力很小，熔点和硬度都很低。范德华键就是靠偶极矩或瞬时偶极矩的相互作用、相互极化而产生吸引力的。表 2-1 给出上述四种力的主要特性。

表 2-1 四种键合力的主要特性

表面力类别	离子键力	共价键力	金属键力	范德华力
化学键	离子键	共价键	金属键	范德华键
作用方式	静电场	电子分布交错	界面游离电子	电磁场振动
作用范围	< 原子尺寸	= 原子尺寸	≈ 原子尺寸	> 原子尺寸
结合能/eV	8.5	6.0	2.5	0.1

2.2.2 吸附和固体的表面膜

如果由于界面上的吸引力而形成一层与界面不相同的组织，那么就把这个新表面层叫做吸附层，吸引的过程就叫吸附，吸附层具有被吸附物本身的特性。在固体界面的情况下，被吸附的物质叫做吸附质，能吸附的相称为吸附剂。吸附有两种，即物理吸附和化学吸附。

吸附层在边界润滑中起着十分重要的作用。在特殊条件下工作的轴承，其摩擦的大小取决于轴承表面上形成的表面膜。因为发生边界摩擦时，首先发生摩擦的是表面膜，所以边界摩擦的大小主要与表面膜相对运动的阻力有关。润滑剂所产生的效果是使表面变得更加光滑，从而起到减摩作用。

原子能够获得电子或失掉电子而呈负电性或正电性。例如直链碳氢化合物的感应分子中电荷抵消，而在饱和脂肪酸的非感应分子中，分子的一端为正，另一端为负，两端形成偶极子。偶极矩等于其偶极电荷乘以极距。具有偶极矩的分子称为高极性分子，如脂肪酸的极性分子中的羟基—COOH 为极性头。它不同于相应的烃类中的—CH₃。碳基 C=O 中的氧吸引碳原子，而使碳原子失去电子带正电，羟基中氧化了的碳原子反过来又吸引氢原子中的电子，而使氢原子带正电（图 2-5）。偶极矩就等于移动的电荷和移动距离的乘积。该偶极矩有大小也有方向，永久性偶极子和诱发性偶极子不同，把永久性偶极子称为极性分子。



图 2-5 脂肪酸中的极性头

即使在永久性偶极子不存在的情况下，非常接近的原子和分子之间的作用也会引起瞬时极化。这些极化作用同时发生，从而又进一步增强了极矩。这种复合过程是非常复杂的，它涉及原子和分子的振荡频率，根据被动理论，这些力具有的能量是可以计算出来的。这种影响可称为散射效应，所产生的力称为散射力。固体中分子间的吸引力或键价力是很复杂的，

主要取决于固体本身的结构。通常，这些力主要是范德华力，由引起永久偶极子、感应偶极子的力和散射力组成。计算这些力不是目的，但是说明这些力的存在及作用，对于认识固体表面特性是必要的。

脂肪酸分子被认为是有极性的。分子的极化部分对其他极性分子和水具有亲和力。短链脂肪酸既可溶解在水中也可溶解在油里。分子中的烃基部分溶解于油，极性头（或—COOH团）则可溶解在水里。当把它放在油/水或空气/水界面上，它们就可以利用极性头固定在水中，利用烃基部分固定在油中或空气里，使分子定向排列出多分子层。这种表面吸附就是表面活性的一个例子，而脂肪酸就是活性材料，通常称为活性剂。

固体的表面能不能直接测量出来的，但可通过与液体的接触状态推算出来。如图 2-6 所示，在液/固界面上，根据液体与固体表面之间夹角 θ 的大小可推断出液体和固体之间吸附力的大小。当 $\theta < 90^\circ$ 时，固体与液体之间的吸引力大于液体内部的吸引力，将发生润湿；当 $\theta > 90^\circ$ 时，固体与液体间的吸引力小于液体内部的吸引力，将不发生润湿。显然，润湿程度的大小，对摩擦面上的吸附具有很大的影响，吸附的强弱将影响到润滑的性能。

1. 物理吸附膜

清洁的表面具有很大的活性，处于不稳定状态，具有很高的表面能和吸附能力。物理吸附是一种最容易形成的吸附现象。固体表面和被吸附分子之间只依靠分子之间的引力形成的吸附叫物理吸附，物理吸附没有电子交换，结合力很弱，形成的物理吸附膜（图 2-7）是单层分子，也可以是多层分子，过程是可逆的。既可以发生吸附，也可以发生脱吸。物理吸附膜的厚度很小，如硬脂酸在金属表面上的吸附膜厚度只有 1.9nm（19Å）。

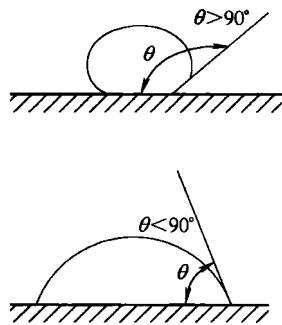


图 2-6 润湿角

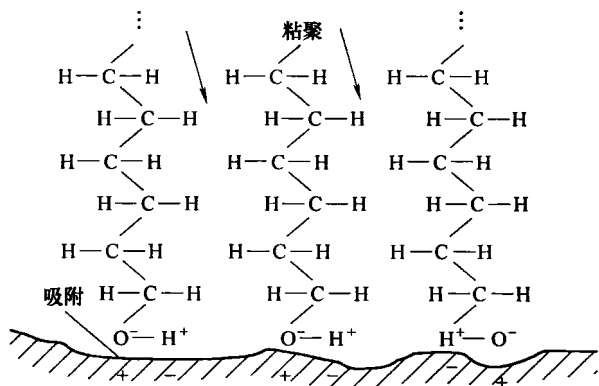


图 2-7 物理吸附膜示意图

物理吸附对温度很敏感，高温可以引起脱吸或分子的重新排列等。因此，物理吸附只能在低载荷、低温度、低速工作状态下存在。

2. 化学吸附膜

由于极性分子（感应或永久的）有价电子与基体表面的电子发生交换而产生的化学结合力，使极性分子定向地排列在固体表面上形成的吸附现象，叫做化学吸附。化学吸附形成化学吸附膜（图 2-8）。处于固体表面的原子的价未被周围原子所饱和，还有剩余的键合能力，在吸附物和吸附剂之间有电子转移而生成化学键。因此，化学吸附具有一定的选择性。