

时代教育·国外高校优秀教材精选

摩擦学导论

Introduction to Tribology

(美) B.布尚 (Bharat Bhushan) 著

葛世荣 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



Introduction to Tribology

Bharat Bhushan

ISBN 0-471-15893-3

Original English language edition Copyright © 2002 by John Wiley & Sons, New York. All rights reserved.

本书中文简体字版由 Wiley Publishing, Inc. 授权机械工业出版社独家出版发行。

版权所有，侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号：图字 01-2005-5489

图书在版编目 (CIP) 数据

摩擦学导论 / (美) 布尚 (Bhushan, B.) 著; 葛世荣译. —北京: 机械工业出版社, 2006.8

(时代教育·国外高校优秀教材精选)

书名原文: Introduction to Tribology

ISBN 7-111-19708-9

I. 摩... II. ①布...②葛... III. 摩擦学 IV. 0313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 089751 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 蔡开颖 版式设计: 张世琴 责任校对: 王欣

封面设计: 饶薇 责任印制: 杨曦

北京机工印刷厂印刷

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 25 印张 · 618 千字

定价: 40.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

著译者简介



布尚博士

B. 布尚 1971 年获得麻省理工学院理学硕士学位, 1973 年和 1976 年分别获得科罗拉多大学力学硕士和机械工程博士学位, 1980 年获得纽约伦赛勒工业学院工商管理硕士学位, 1990 年获得挪威工业大学技术博士学位, 1996 年获得波兰华沙技术大学博士学位, 2000 年获得白俄罗斯国家科学院荣誉博士。

布尚博士是一位注册机械工程师和俄亥俄州杰出学者, 现任俄亥俄州立大学机械工程系教授和信息存储与 MEMS/NEMS 纳米摩擦学实验室主任。他是国际公认的纳米力学和纳米摩擦学专家, 也是磁记录装置摩擦学和力学研究的先驱者之一和纳米摩擦学和纳米力学研究的领军者之一。他著有 5 部专著, 编著过 50 多部手册的章节, 发表了 500 余篇论文, 编辑出版 25 本书, 拥有 16 项美国专利。他应邀作过 250 多场学术报告和 60 多次国际学术会议的主题或大会报告。

布尚博士是一位出色的组织者, 他组织了 1984 年的第一届磁记录系统摩擦学和力学研讨会、1990 年的第一届信息存储系统进展研讨会, 这两个会议现在每年都举办一次。他于 1993 年创立了美国机械工程师协会信息存储和处理系统分会, 并于 1993 ~ 1998 年担任该分会首任主席。他获得过各类专业学会、工业界和美国政府部门颁发的 20 多项技术奖励, 荣获了洪堡基金会高级科学家研究奖、普朗克基金会杰出外籍科学家研究奖和福布莱特高级学者奖。他是俄罗斯国际工程科学院、白俄罗斯工程技术科学院和摩擦工程科学院的院士, 还是白俄罗斯摩擦学会荣誉会员及 ASME、IEEE、STLE 和纽约科学院的高级会员。



葛世荣博士

葛世荣 1989 年获得中国矿业大学工学博士学位。现任中国矿业大学副校长, 材料科学与工程学院和机电工程学院教授、博士生导师, 可靠性工程与救灾机器人研究所所长。发表论文 140 余篇, 出版《摩擦学的分形》、《矿井提升机可靠性技术》、《矿山机械可靠性设计》等著作。目前从事生物摩擦学、摩擦学非线性理论、救灾机器人和机械可靠性等方向的研究。

葛世荣博士获得过国家技术发明二等奖、国家科技进步三等奖、江苏省科技进步一等奖、教育部自然科学二等奖等 9 项省部级以上科技成果奖励。曾荣获“中国青年科技奖”、“国家有突出贡献的中青年技术专家”、“全国优秀科技工作者”、“中国机械工程学会青年科技成就奖”、“霍英东高校青年教师奖(研究类)”、“中国科技奖励基金会孙越崎青年科技奖”、“江苏省青年科学家奖提名奖”、“江苏省优秀学科带头人”等称号。

葛世荣博士现被聘为教育部第五届科学技术委员会委员, 国家自然科学基金委员会工程与材料学部第九、十届专家评审组成员、江苏省自然科学基金评审委员会工程学科副组长。他受聘为清华大学摩擦学国家重点实验室、中国科学院固体润滑国家重点实验室、重庆大学机械传动国家重点实验室的学术委员会委员。他目前担任中国工程机械学会副理事长、矿山机械分会理事长, 中国机械工程学会摩擦学分会常务理事、学术工作委员会副主任、生物摩擦学与内植物工程专业委员会副主任, 中国机械工程学会机械设计分会常务理事, 江苏省煤炭学会副理事长, 江苏省振动工程学会副理事长等学术职务。他还兼任《摩擦学学报》、《煤炭学报》、《中国工程机械学报》、《Journal of Bionics》、《中国表面工程》、《中国矿业大学学报》、《润滑与密封》、《矿山机械》、《煤矿机电》等学术刊物的编委。

中文版序

自 20 世纪 80 年代以来，摩擦学作为一门独立的边缘学科，它的研究和教育工作在我国得到了广泛重视，并迅速发展成为机械、材料等学科中最活跃的研究领域之一。

我国摩擦学的学科建设是与国民经济建设密切结合而发展的，它有力地推动了现代化建设，促进了我国机电装备摩擦学性能得以普遍而迅速提高。同时，在普及摩擦学知识的基础上，通过学术研究也造就了一支从事摩擦学研究的专门队伍，建设了多种类型的研究基地，创办了专业学术刊物，出版了一批学术著作和科技图书。在相关学术组织的推动下，频繁地召开国际或全国学术会议。我国学者在国际摩擦学的学术舞台上也非常活跃。可以说，当前我国摩擦学研究已经为今后的学科持续发展奠定了坚实基础。

摩擦学作为一门技术基础学科，必然同时受到现代科技发展和经济建设需求两方面的驱动。因此，我们既要努力吸收相关学科的先进理论和技术来充实学科内容并改进研究方法，也要通过本学科的研究而努力为经济建设作出切实的贡献。这是摩擦学学科的特点所决定的。

摩擦学研究的重要意义在于节约资源、延长机械设备的使用寿命。特别是当今人类正面临着经济和社会可持续发展的战略任务，摩擦学面向经济建设的研究任务就更加重要。摩擦学发展的显著特点是不断与其他学科交叉而形成新的研究领域，例如微观摩擦学等。因此，摩擦学研究的范畴也应该经常得以调整和补充。

为了适应我国现代化建设和高新技术蓬勃发展的需求，不断增强摩擦学研究的自主创新能力、拓宽研究领域将是我国摩擦学工作者当前面临的挑战。在这种形势下，加大摩擦学研究的深度和广度，加强国际学术交流和吸收国外先进成果必将有助于本学科的发展。

本书原作者布尚 (B. Bhushan) 教授是美国著名的摩擦学专家，在微观摩擦学领域取得了许多卓越的研究成就，其成果对微纳米摩擦学发展起到了重要作用。本书译者葛世荣教授是我国颇具学术影响的中年摩擦学学者之一，富于创见，研究成果丰硕。他们都经历了长期从事摩擦学研究和教育实践的积累，对本学科的学科体系和内涵有深刻理解。

本书的特点是以汇章的篇幅全面系统地阐述摩擦学的基本内容，涵盖了表面形貌、摩擦、磨损、润滑等基本原理及其应用。书中内容翔实，反映了现代摩擦学的发展全貌。其次，本书取材新颖，收入了许多最新研究成果。除了以整章的篇幅介绍微纳米摩擦学之外，对于传统内容（例如固体表面接触、粘着、摩擦表面温度等）也作了大量补充。此外，本书还介绍了摩擦学的试验方法和摩擦学的工业应用，对于本学科的研究和实践具有一定的指导作用。

总之，本书的翻译和出版将为我国摩擦学工作者和相关工程技术人员提供有益的借鉴，对于我国摩擦学的基础研究和应用研究具有重要的参考价值。

温诗铸

中国科学院院士、清华大学教授

2005 年 12 月 9 日

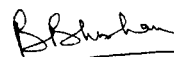
中文版前言

在滑动和滚动的机械中，认识界面之间的相互作用机理和解决它们的技术问题是摩擦学的主题。摩擦学的经济效益很大，一些国家的调查表明，利用摩擦学原理可以节约 1% 左右的国民生产总值，这相当于常规研发经费的最低投入。

中国的科学家和工程师在摩擦学研究中一直非常活跃。伴随中国工业的飞速增长，摩擦学教育将愈加重要。摩擦学的教学溶于工科大学生的设计和材料课程之中，非常需要一本综合性的摩擦学教材。本书的覆盖面从宏观摩擦学到微观摩擦学，还包含摩擦学的工业应用，它是目前最综合的一本摩擦学教材。

葛世荣教授是我的好友，2002~2003 年在我的实验室做过半年的访问研究。那时，他提出翻译本书的想法，我对此有点发怵，因为翻译这本技术著作是一项非常繁重的事务。我知道，他为本书的准确翻译付出了巨大努力。他的贡献将得到大家的赞赏。

我欢迎中国学生、工程师和科学家阅读本书，并从中有所收获。



俄亥俄杰出学者和 Howard D. Winbigler 教授
俄亥俄州立大学信息存储与 MEMS/NEMS 纳米摩擦学实验室主任

译者前言

通俗地讲，摩擦学是一门研究接触界面力学行为和损伤机理的学科，它是控制摩擦行为、预防磨损失效、提高工作可靠性所必须掌握的一门基础知识。现代装备的失效主要源于三种形式，即磨损、断裂和腐蚀，其中磨损约占60%。摩擦作为大多数机械中不希望出现的阻力，消耗着大量的能源。因此，准确认识摩擦、磨损的发生机理，寻找合理的技术手段控制摩擦磨损行为，对于节材、节能、降耗是非常重要的技术途径。

摩擦磨损现象无处不在、无时不有。摩擦学是一门复杂性很强的学科，某个摩擦副的摩擦因数和耐磨强度并不是材料本身的特性，而是一个受很多因素影响的系统响应，它涵盖的学科知识很多，例如接触力学、传热学、流体力学、化学、物理学、材料学、机械学等。因此，研究摩擦学现象需要较为广泛的基础知识。同时，摩擦学又是一门实践性很强的学科，它既需要良好的实验测试能力，也需要利用理论模型和试验数据解决实际问题的能力，摩擦学设计可谓是从理论到实践的桥梁。

2002年10月，我公派赴美国俄亥俄州立大学高访，在布尚教授的实验室进行摩擦电磁效应的研究。抵达实验室第二天，他赠送我一本刚出版的《Introduction to Tribology》。细读之后，深感此书系统性较强，基础面较宽，知识点较新，是近年出版的一本摩擦学综合知识较为全面的教材。此书有四个特点，一是摩擦磨损的计算模型多，既介绍必要的接触力学、传热学分析模型，也包含许多摩擦磨损计算模型，这有益于培养学生的数学建模意识；二是摩擦学最新成果多，既补充了传统摩擦副的新试验数据，也收录了微纳米摩擦学、微机电系统摩擦等新方向的研究结果，这有助于学生了解摩擦学的前沿进展；三是摩擦学参考文献多，全书列出的英文参考文献近730篇，时间跨度从1699年到2001年，仅阅读这些参考文献，也是对国际摩擦学格局的一种了解，这有益于学生通晓摩擦学的发展历程；四是摩擦学的实践指导多，既介绍各种摩擦学的试验测试方法，也提供一些典型工业摩擦学问题的解决方案，这有益于学生积累摩擦学的实践经验。

本书的翻译工作历时一年半，中国矿业大学可靠性研究所的师生给予了很大帮助。当时在读研究生黄孝龙、黄传辉、李伟、王世博、王庆良、马睿、韩东太、钱善华、吴兆宏、王永华、陆兴华、刘立国、张箭、冯尊田、朱叶卫等参与了原著的初译工作，他们为本书作出了很大贡献。朱华教授、张德坤副教授、王庆良副教授从任课教师角度阅读了译稿，博士生罗勇、王世博从学生角度阅读了译稿，他们的意见对提高本书的可读性和准确性很有益处。感谢他们为此的付出。

我十分感谢清华大学温诗铸院士对本书的关怀和支持，他欣然为本书作序。感谢清华大学摩擦学国家重点实验室主任雒建斌教授审校本书，感谢国家杰出青年科学基金项目(50225519)和国家自然科学基金重点项目(50535050)的大力支持。

葛世荣

英文版序

1966年，英国教育与科学部的报告首次阐述了摩擦学的概念，它涵盖了运动表面之间相互作用及相关问题和实践的交叉学科理论和技术。摩擦学涉及到物理学、化学、固体力学、流体力学、热传导、材料科学、润滑剂流变学、可靠性和维修工程等学科的知识。

摩擦学的命名时间虽然不长，但摩擦和磨损这两个摩擦学的核心问题却与人类历史一样悠久。摩擦学的经济效益非常大，一些国家的调查表明，利用摩擦学原理可以节约1%~1.4%的国民生产总值，这通常相当于研发经费的最小投入。

由于摩擦学是一个交叉学科领域，所以很难在一本书中覆盖摩擦学所有重要内容，满足从学生到学术研究人员、企业工程师的不同兴趣。为了编著如此宽泛的摩擦学著作，布尚教授汲取了他在一些公司和大学工作所积累的知识和经验。在这本书中，他不仅介绍了摩擦、磨损、润滑以及摩擦磨损试验方法、工业摩擦学的基本内容，而且还包含了微纳米摩擦学，这是模拟探针与表面相互作用和界面行为的近极探测和计算机技术出现之后的新兴领域。

布尚教授的这本综合性著作既可作为大学课程的教材，也可作为研究人员的参考资料。本书是对摩擦学文献库的及时补充，我希望它会激发和增进人们对摩擦学的兴趣，对国际摩擦学研究和工业领域也有所帮助。

Prof. H. Peter Jost

*President, International Tribology Council
Angel Lodge Laboratories & Works
London, UK*

英文版前言

摩擦学是研究运动表面之间相互作用机理及相关问题和实践的一门理论与技术，它的英语流行代用词是摩擦、磨损和润滑。界面相互作用的机理和结果决定着摩擦、磨损和润滑的行为。在界面作用过程中，将产生力的传递和机械能的转换，材料的物理化学性质和表面形貌也发生变化。揭示相互作用界面的现象及其本质、解决相关的技术问题是摩擦学的主题。

滑动和滚动表面是大多数技术领域的关键界面，而掌握摩擦学原理则是成功设计机械零件的基础。当两个名义上平整的表面产生接触时，表面粗糙度使接触分布在若干离散接触点上，同时发生界面粘着。摩擦是一个固体在另一个固体上运动时遇到的阻力。磨损是运动接触界面的一个表面或两个表面上的材料损伤或剥离。材料选择、涂层和表面处理可以控制摩擦和磨损，而适当的润滑则是减小摩擦磨损的最有效方法之一，它使机械零件运行平稳、寿命延长。润滑剂有液体、固体和气体之分。为了使力学性能和可靠性得以优化，必须认识表面粗糙度的作用、粘着和摩擦、磨损的机理以及润滑剂和界面之间的物理化学作用。但是，从经济性和长期可靠性而言，摩擦磨损控制的重要性也不可过分强调。

近期涌现的近极探测技术，尤其是基于探针的扫描隧道显微镜、原子力显微镜和表面力仪的出现以及探针与表面相互作用和界面性能的计算机模拟技术的发展，推动了界面问题的高分辨率系统性研究，也为原子结构的放大和操作提供了方法。这些进展为从原子尺度上研究材料的相互作用机理和结果提供了推动力。简言之，它们引领微纳米摩擦学这个新领域的诞生，它是从原子和分子尺度到微米尺度对界面作用过程的实验和理论研究。研究微纳米摩擦学对于掌握界面现象的本质、搭起科学与工程之间的桥梁非常有价值。

当今一些工程和应用科学的学生，没有学习足够的摩擦学基础知识，这是一件值得关注的事情。目前尚无一本广泛接受的综合性摩擦学教材，迄今的书籍一般都是基于作者在摩擦学领域某个范围的专门技术，因此，很需要一本宽泛基础的摩擦学教材。本书是综合性著作《摩擦学原理与应用》的压缩，该书1999年由John Wiley出版社第一次出版。本书之目的是介绍摩擦学的基本原理和一些最常见工业领域的摩擦学知识，它基于作者30多年来在摩擦学、力学和材料科学领域积累的研究和教学经验，重点放在摩擦学的当代知识，包括微纳米摩擦学这个新兴领域。本书从机械工程、力学和材料科学方面集成出摩擦学知识，第一部分先介绍摩擦学基本原理，为学生理解工业应用的摩擦学问题作准备，然后介绍微纳米摩擦学，最后介绍摩擦学部件和应用。

本书可作为机械工程、材料科学和应用力学等专业的研究生和高年级大学生的摩擦学课程教材，也适用于活跃在摩擦学领域或即将投身于摩擦学领域的研究人员以及那些在工程中遇到摩擦学问题而期望尽快得以解决的工程师们。

作者可以向学时为一个季度或一个学期的课程提供本书的Powerpoint文稿，方程求解手

册也可供选用。但是，Powerpoint 文稿和手册仅供给采用本书作为教材且学生人数最少达到 6 人的教学班。

我感谢所有从前和现在的同事和学生们，他们帮助我掌握了摩擦学知识。1970 年秋，我在麻省理工学院聆听了 Rightmyer 教授和 Rabinowicz 教授的摩擦学研究生课程，那时我才入门摩擦学。从我的硕士导师 Cook 教授那里，我学到了很多。我在实践中学习摩擦学是从受雇于机械技术有限公司研发部（Latham，纽约）和 SKF 工业有限公司的技术服务部（King of Prussia，宾夕法尼亚州）时开始的，先后得到 Wilcock 博士、Walowit 博士和 Gray 先生的指导和 Tallian 博士的指导。从 IBM 公司通用产品部（Tucson，亚利桑那州）和 IBM 研究部 Almaden 研究中心（San Jose，加利福尼亚州）的许多同事那里，我得益颇多，Joshi 博士帮助我在 IBM 通用产品部定居，Schechtman 博士是我在 Almaden 研究中心的良师益友，对我帮助很大。俄亥俄州立大学的 Hamrock 教授向我提供了友好支持。从 1991 年起，我在俄亥俄州立大学多次讲授研究生和大学学生的摩擦学课程，也多次在美国和海外的摩擦学短训班上讲课。本书就是根据我讲授各类课程的教案整理出来的。

我特别感谢我的妻子、儿子和女儿。当我夜以继日地从事研究、整理资料以及编著本书时，他们多年一直对我很宽容，也为减小家庭的摩擦和磨损提供了必要的润滑剂。

B. 布尚

于美国俄亥俄州波韦尔市

目 录

著译者简介	
中文版序	
中文版前言	
译者前言	
英文版序	
英文版前言	
第1章 绪论	1
1.1 摩擦学的发展历史	1
1.2 摩擦学的重要意义	2
1.3 微纳米摩擦学的兴起	3
1.4 本书的基本框架	4
参考文献	4
第2章 固体表面的特征	6
2.1 表面的基本特性	6
2.2 表层的基本特性	7
2.2.1 变形层	7
2.2.2 贝氏层	7
2.2.3 化学反应层	7
2.2.4 物理吸附层	8
2.2.5 化学吸附层	8
2.2.6 表层分析技术	9
2.3 表面粗糙度	9
2.3.1 表面粗糙度的平均参数	11
2.3.2 统计表征参数	14
2.3.3 分形表征参数	28
2.3.4 表面粗糙度测量的影响因素	29
2.4 表面粗糙度测量方法	32
2.4.1 触针法	32
2.4.2 光学法	35
2.4.3 扫描探针测量法	41
2.4.4 流体测量法	46
2.4.5 电学测量法	47
2.4.6 扫描电子显微镜法	47
2.4.7 测量方法评价	47
参考文献	51
推荐读物	55
第3章 固体表面的接触	56
3.1 引言	56
3.2 接触力学分析	56
3.2.1 匀质体上的单凸体接触	56
3.2.2 多层体上的单凸体接触	64
3.2.3 多微凸体接触	70
3.3 接触面积测量	87
3.3.1 测量技术	87
3.3.2 测量实例	87
参考文献	89
推荐读物	92
第4章 粘着	94
4.1 引言	94
4.2 固体接触的粘着	94
4.2.1 共价键	96
4.2.2 离子键	97
4.2.3 金属键	97
4.2.4 范德华力	98
4.2.5 表面自由能理论	98
4.2.6 聚合物的粘着	102
4.3 液体接触的粘着	102
4.3.1 单微凸体的粘着力	103
4.3.2 多微凸体的粘着力	107
参考文献	111
第5章 摩擦	114
5.1 引言	114
5.2 固体接触的摩擦	115
5.2.1 滑动摩擦定律	115
5.2.2 滑动摩擦机理	118
5.2.3 其他摩擦机理	128
5.2.4 摩擦状态过渡	130
5.2.5 静摩擦	130
5.2.6 粘滑现象	132
5.2.7 滚动摩擦	134
5.3 液膜介质的摩擦	137

5.4 材料的摩擦特性	139	8.1 引言	231
5.4.1 金属的摩擦特性	141	8.2 流体润滑机理	231
5.4.2 陶瓷的摩擦特性	143	8.2.1 流体静压润滑	231
5.4.3 聚合物的摩擦特性	145	8.2.2 流体动压润滑	232
5.4.4 固体润滑材料的摩擦特性	148	8.2.3 弹性流体动压润滑	233
参考文献	153	8.2.4 混合润滑	233
推荐读物	158	8.2.5 边界润滑	233
第 6 章 摩擦表面的温度	159	8.3 粘性流动和雷诺方程	234
6.1 引言	159	8.3.1 粘度和牛顿流体	234
6.2 热传导分析	160	8.3.2 液体流动及方程	237
6.2.1 热传导的基本解	160	8.4 流体静压润滑	243
6.2.2 高接触应力情况	160	8.5 流体动压润滑	249
6.2.3 低接触应力情况	165	8.5.1 推力轴承	250
6.3 摩擦温度测量方法	173	8.5.2 径向轴承	257
6.3.1 传感器测量法	174	8.5.3 挤压膜轴承	268
6.3.2 辐射测量法	176	8.5.4 气体润滑轴承	270
6.3.3 金相观察法	179	8.6 弹性流体动压润滑	278
6.3.4 液晶变色法	179	8.6.1 接触面形状	279
参考文献	180	8.6.2 线接触情况	280
第 7 章 磨损	182	8.6.3 点接触情况	284
7.1 引言	182	8.6.4 热影响修正	285
7.2 磨损机理	182	8.6.5 润滑油的流变性	285
7.2.1 粘着磨损机理	183	参考文献	286
7.2.2 磨粒磨损机理	190	推荐读物	289
7.2.3 疲劳磨损机理	197	第 9 章 边界润滑与润滑剂	290
7.2.4 冲击磨损机理	202	9.1 引言	290
7.2.5 化学腐蚀磨损机理	207	9.2 边界润滑膜	290
7.2.6 电弧诱导磨损机理	208	9.2.1 吸附膜的影响	293
7.2.7 微动磨损机理	209	9.2.2 分子层数的影响	293
7.3 磨屑的分类	210	9.2.3 化学膜的影响	294
7.3.1 片状磨粒	210	9.2.4 分子链长度的影响	296
7.3.2 长条磨粒	210	9.3 液体润滑剂	296
7.3.3 球形磨粒	212	9.3.1 润滑剂的分类	296
7.3.4 不规则磨粒	212	9.3.2 润滑剂的理化特性	300
7.4 材料的磨损性能	213	9.3.3 添加剂	300
7.4.1 金属的磨损性能	214	9.4 润滑脂	302
7.4.2 陶瓷的磨损性能	217	参考文献	303
7.4.3 聚合物的磨损性能	220	推荐读物	304
参考文献	224	第 10 章 微纳米摩擦学	305
推荐读物	230	10.1 引言	305
第 8 章 流体润滑原理	231	10.2 表面力仪 (SFA)	306

10.2.1 SFA 工作原理	306	11.3.5 腐蚀试验	356
10.2.2 分子润滑膜特性	308	参考文献	356
10.3 原子力显微镜 (AFM)	314	推荐读物	357
10.3.1 AFM 的应用	314	第 12 章 工业摩擦学问题	359
10.3.2 微摩擦与微粘着试验	320	12.1 引言	359
10.3.3 微磨损与微加工试验	326	12.2 常见摩擦学部件	359
10.3.4 微压痕试验	333	12.2.1 滑动轴承	359
10.3.5 薄膜润滑试验	336	12.2.2 滚动轴承	360
10.4 分子动力学模拟	338	12.2.3 密封件	361
10.4.1 模拟方法	339	12.2.4 齿轮	363
10.4.2 固体界面作用模拟	340	12.2.5 凸轮机构	365
10.4.3 液膜界面作用模拟	341	12.2.6 活塞环	365
参考文献	342	12.2.7 电刷	366
推荐读物	347	12.3 微机电系统的摩擦学问题	367
第 11 章 磨损试验方法	348	12.4 材料加工的摩擦学问题	370
11.1 引言	348	12.4.1 刀具磨损	370
11.2 磨损试验设计	348	12.4.2 磨削和研磨工艺	373
11.2.1 模拟磨损试验	348	12.4.3 成形模具磨损	373
11.2.2 加速磨损试验	349	12.4.4 切削液	374
11.2.3 试样制备	349	12.5 工业领域的摩擦学问题	374
11.2.4 试验参数测量	349	12.5.1 汽车发动机	375
11.3 典型配副形式	351	12.5.2 涡轮发动机	376
11.3.1 滑动磨损试验	351	12.5.3 铁路车辆	378
11.3.2 磨粒磨损试验	253	12.5.4 磁记录装置	378
11.3.3 滚动疲劳试验	355	参考文献	383
11.3.4 颗粒冲蚀试验	355	推荐读物	386

第 1 章 绪 论

1.1 摩擦学的发展历史

摩擦学一词最早是 1966 年 Jost 发表的一篇具有划时代意义的报告中提出的，它来源于古希腊词“tribos”，意思是摩擦，词义可译为摩擦科学，与其意思相当的英语词义是摩擦磨损或润滑科学，后者几乎包含了摩擦的全部内容。在词典里，摩擦学的定义是研究相互运动表面之间的相互作用以及相关问题的科学与技术。

摩擦学是分析和解决装备中磨损、可靠性、维修等问题的一门学问，这些问题具有重大经济意义，涉及的领域大到太空船，小到家用设备。摩擦表面的相互作用非常复杂，要认识它们需要掌握多门学科知识，例如物理学、化学、应用数学、固体力学、流体力学、热力学、热传导、材料科学、流变学、润滑、机械设计、可靠性分析等。

虽然摩擦学的定名时间相对较晚，而实际上人们了解摩擦学的相关知识却要早于其历史记录时间^[15]，例如旧石器时代发明的钻孔或生火钻具就已经安装了用鹿角或骨头制作的轴承；制作陶器的转盘或碾谷物的石辊也使用了一些轴承^[14]；罗马附近的尼米湖曾发现了一个公元 40 年的推力球轴承。

公元前 3500 年人们就开始利用车轮，这表明我们的祖先那时就知道如何在移动物体时降低摩擦。在搬运铺路或建造纪念碑的巨大石块时，人们利用了减摩技巧，例如用水作为滑橇的润滑剂。图 1.1.1 是公元前 1880 年埃及人使用滑橇搬运巨大雕像的情景^[19]，172 人沿着木制轨道拖拉重力约 600 kN 的雕像，一个人站在滑橇上将一种液体（很可能是水）向滑动轨道上喷洒，他可谓是最早的润滑工程师之一。Dowson 估计过这个工地的摩擦因数^[15]，以每人的拉力为 800 N 计算，172 人的总拉力为 172×800 N，物体滑动时此力至少等于摩擦力，因此摩擦因数约为 0.23。埃及人在公元前几千年前就会使用润滑脂，曾在一个墓穴里发现了古战车轴承上的残留动物脂。

在古罗马辉煌之后的一段时间里，军队工程师利用摩擦学原理设计作战机械和防御工事，使他们名声显赫。达芬奇（Da Vinci，1452—1519）是文艺复兴时期的工程师和艺术家，他在军事工程方面的天才与他的绘画、雕塑天赋同样出色，他最先提出了摩擦的科学定义。达芬奇推断了矩形物块在平面上的滑动规律，他第一次提出了摩擦因数的概念，认为摩擦因数是摩擦力与正压力之比。可惜他的试验笔记在几百年中都未出版，他的这些工作并没有产生历史影响。直到 1699 年，法国物理学家阿芒顿（Amontons）研究了两个平面之间的干摩擦之后，再次发现这个摩擦定律^[1]。第一，阻止界面滑动的摩擦力与正压力成正比；第二，摩擦力的大小与接触面积无关。这些发现后来被法国物理学家库仑（Coulomb）修正^[13]，他以发现静电现象而闻名，他补充了第三条摩擦定律，即滑动摩擦力与速度无关，并且对静摩擦和动摩擦作了清晰的区别。

在 16 世纪，轴承材料有了很大发展。1684 年，Hooke 把钢轴颈和青铜轴瓦组合为车轮轴承，它比木质轴颈与铁质轴瓦的组合要好得多。伴随着 18 世纪后叶的工业化，早期石油

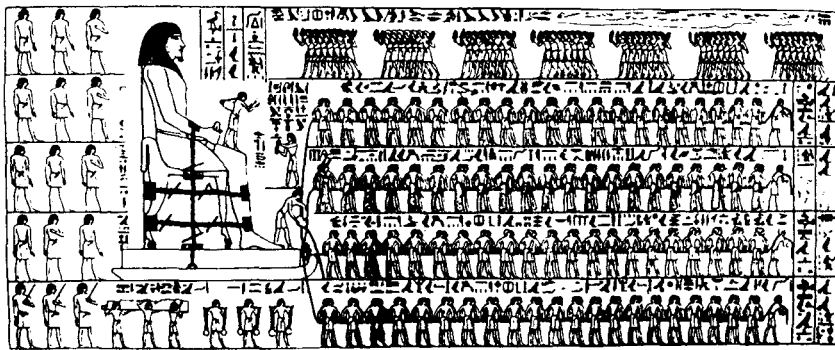


图 1.1.1 公元前 1880 年埃及人移动巨型雕像时利用润滑剂技术

工业于 19 世纪 50 年代出现于苏格兰、加拿大和美国^[15, 20]。

牛顿 (Newton) 1668 年提出了粘性流体的基本理论。一直到 19 世纪后期, 人们对轴承的润滑作用才有了科学认识。实际上, 人们对流体动力润滑原理的认识, 始于 1884 年 Tower 的试验研究、1886 年雷诺 (Reynolds) 对其进行的理论解释以及 Petroff 的相关工作。此后, 为了提高新型机械的轴承可靠性, 流体动力轴承的理论及实践就发展得非常快。

相对于摩擦理论和轴承技术的发展而言, 磨损研究起步较晚, 它基于大量的试验工作。直到 20 世纪中期, 对磨损进行的研究还比较少。Holm 是最早对磨损研究做出实质性贡献的先驱者之一^[16]。

工业革命期间 (公元 1750 ~ 1850 年), 机械制造业得到快速发展。蒸汽机及随后的铁路工业促进了制造技术的进步, 从 20 世纪初开始, 工业的巨大发展推动了摩擦学发展, 对摩擦学各方面知识的需求也急速增长^[3, 6, 11, 12, 16]。

1.2 摩擦学的重要意义

对于由滑动和滚动表面构成的现代机械而言, 摩擦学是非常重要的。利用摩擦的机械有制动闸、离合器、车辆驱动轮、螺栓、螺母等。利用磨损的场合有铅笔写字、机加工、抛光等。不需要摩擦磨损的场合有内燃机、航天发动机、齿轮、凸轮、轴承、密封等。

据估计, 美国由于缺乏摩擦学知识而每年造成的损失占其国民生产总值的 4% 左右, 以 1966 年计算, 约损失 2000 亿美元。目前, 世界三分之一总能源被一种或多形式的摩擦所消耗。因此, 从经济和可靠性角度看, 减小摩擦和控制磨损的重要性不可低估。按照 Jost 的论述^[17, 18], 通过摩擦学研究及其合理实践, 将节约一个工业化国家 1% 的国民生产总值。近期研究表明, 通过节约获取的收益相当于研发投入经费的 50 倍, 这些节约不仅现实而且重要, 它不需要投入大量资金。研究摩擦学的目的是减少或消除表面摩擦磨损所造成的损失, 提高生产效率, 改善产品性能, 减少零件失效, 节约可观资源。

摩擦学不仅对工业设备具有重要意义, 同时也影响人们的日常生活。例如, 写字就是一个摩擦学过程, 它需要有控制地把铅笔或墨水转移到纸上, 当用铅笔写字的时候, 笔铅与纸之间必须有很好的粘着作用, 这样才能将少量的笔铅转移到纸上, 同时笔铅必须具有很好的

强度或者硬度，才能保证不发生断裂。剃须要求尽可能高效地去除体毛，同时也要降低对皮肤造成的不舒适感，因此要用剃须膏来减小剃刀和皮肤之间的摩擦。摩擦对人们的步行和驾驶有很大帮助，没有足够的摩擦，行人会滑倒，汽车会打滑。摩擦学对体育运动也相当重要，例如雪橇与冰雪之间的低摩擦一直是滑雪者所渴求的。

1.3 微纳米摩擦学的兴起

对于大多数工业部件的摩擦界面，表面接触发生在无数个微凸体上。因此，长期以来人们都知道研究单个微凸体接触对掌握接触表面的摩擦学行为和力学行为的重要性。近期出现了基于探针的扫描隧道显微镜、原子力显微镜等微观探测技术，模拟探针表面接触的计算技术也得到发展，这些进展都为研究接触表面特性提供了高分辨率的测量技术和修饰、操纵纳米结构的方法，它们促进了微观摩擦学、纳米摩擦学、分子摩擦学、原子尺度摩擦学等一些新领域的发展^[5-7]，使人们能够从原子、分子尺度到微米尺度上对滑动表面的粘着、摩擦、磨损、薄膜润滑进行试验和理论研究。

宏观摩擦学与微纳米摩擦学的区别如图 1.3.1 所示。对于宏观摩擦学，试验测试是在大质量和重载条件下进行的，此时不可避免产生磨损，因此摩擦副材料的表观性能对摩擦学性能具有决定性影响。而在微纳米摩擦学中，配副中至少有一个部件的质量很轻而且处于微小载荷状态，此时的磨损可以忽略不计，因此表面特性决定着摩擦学性能。



图 1.3.1 宏观摩擦学与微纳米摩擦学的比较

研究微纳米摩擦学有助于认识微小尺度下的界面现象，也有助于认识磁记录系统、微机电系统及其他工业应用中的微纳米结构的界面现象。微纳米结构部件非常轻，只有几毫克重，它们在几微克到几毫克的极轻微载荷下运行。这些微纳米器件的摩擦和磨损都在纳米尺度上显现，表面原子层的作用对摩擦磨损行为影响很大。通常，微纳米器件采用分子薄膜来润滑。微纳米摩擦学技术在研究微纳米结构的摩擦和磨损时得心应手，同时微纳米摩擦学对理解宏观的接触现象也很有益处，它在科学与工程之间架起了一座桥梁。

扫描隧道显微镜、原子力或摩擦力显微镜、表面力仪在微纳米摩擦学研究中广泛使用。1981年，Binnig (宾宁) 博士、Rohrer 博士及同事在 IBM 公司的苏黎世实验室发明了扫描隧道显微镜 (STM)，它是第一台能够以原子分辨率直接获得固体表面三维成像的装置^[8]，但 STM 只能测量导电的表面。在 STM 的基础上，宾宁等又发明了原子力显微镜 (AFM)，它能够测量 AFM 探针和试样表面之间小于 $1 \mu\text{N}$ 的微小作用力^[9, 10]，可以测量导电或绝缘的各种工程表面。AFM 已普遍用于测量微纳米尺度的表面轮廓。经过改进的 AFM 可以同时测量表面上的正压力和摩擦力，被称为摩擦力显微镜 (FFM) 或侧向力显微镜 (LFM)，它能够测出

微观尺度和纳米尺度的摩擦。AFM 还能测量粘着、划痕、磨损、润滑性能、表面温度以及弹/塑性力学性能（例如压痕硬度及弹性模量）等。表面力仪（SFA）于 1969 年研制成功，它可以研究两个分子级光滑表面之间的液体分子膜的静态和动态特性^[5, 23]。

伴随着微纳米测试技术的发展，在时间和空间上对复杂接触行为进行高精度的理论分析也成为可能，它得益于对材料结构、相互作用的本质理解和利用计算机建模和模拟的跨越式发展^[5]。这些模拟方法有助于从原子尺度上探究摩擦过程中的能量、微观结构、动力学、热力学、传质、流变等现象，将对试验数据解析、新试验方法设计、基于原子理论预测新现象有很大帮助。

1.4 本书的基本框架

界面的摩擦、磨损和润滑行为在很大程度上依赖于表面材料、配副界面形状及工况环境，表面膜和周围环境可以改变材料表面上几个原子层的物理和化学特性。所以，紧跟本章之后，第 2 章将介绍固体表面特性，它包括表面特性、固体表面的物理化学特征、表面粗糙度统计分析、固体表面表征方法等。第 3 章专门介绍两个固体表面接触的弹塑性接触面积分析，包括统计分析方法、数值分析方法和测量技术等。第 4 章讨论干燥和润湿条件下的各种粘着机理，介绍预测液体介质粘着的解析和数值方法。当两个接触表面有相对滑动或者转动时就会产生摩擦，各种摩擦机理、影响摩擦的物理和化学特性以及一些典型的摩擦数据将在第 5 章中予以介绍。第 6 章介绍摩擦产生的界面温度的分析方法和测量技术以及温升对界面行为的影响。持续的滑动或滚动将引发磨损，第 7 章介绍磨损机理、磨粒类型以及各种工程材料的磨损数据。第 8 章将回顾各种润滑理论，介绍流体静压、流体动压和弹性流体动压润滑理论及各种轴承的设计。第 9 章论述边界润滑机理，介绍各种液体润滑剂、添加剂和油脂。第 10 章介绍微纳米摩擦学的试验方法和分子动力学模拟技术，以及微纳米摩擦学的现状、应用及相关数据。第 11 章介绍摩擦磨损的试验设计方法和一些典型的试验方案。第 12 章介绍常见的摩擦学部件工作原理、磨损机理和常用材料，另外还对微器件、材料加工、工业应用等摩擦学问题给予介绍。

参考文献

- [1] Amontons, G. (1699), "De la résistance causée dans les Machines," *Memoires de l' Académie Royale*, A, 257-282.
- [2] Bhushan, B. (1992), *Mechanics and Reliability of Flexible Magnetic Media*, Springer-Verlag, New York.
- [3] Bhushan, B. (1996), *Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices*, Second edition, Springer-Verlag, New York.
- [4] Bhushan, B. (1997), *Micro/Nanotribology and its Applications*, NATO ASI Series E: Applied Sciences-Vol. 330, Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands.
- [5] Bhushan, B. (1999), *Handbook of Micro/Nanotribology*, Second edition, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [6] Bhushan, B. and Gupta, B.K. (1997), *Handbook of Tribology: Materials, Coatings and Surface Treatments*, McGraw-Hill, New York (1991); Reprinted with corrections, Krieger Publishing Co., Malabar, Florida.
- [7] Bhushan, B., Israelachvili, J.N. and Landman, U. (1995), "Nanotribology: Friction, Wear and Lubrication at the Atomic Scale," *Nature* 374, 607-616.

- [8] Binnig, G., and Rohrer, H., Gerber, Ch., and Weibel, E. (1982), "Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy," *Phys. Rev. Lett.* 49, 57-61.
- [9] Binnig, G., Quate, C.F., and Gerber, Ch. (1986), "Atomic Force Microscope," *Phys. Rev. Lett.* 56, 930-933.
- [10] Binnig, G., Gerber, Ch., Stoll, E. Albrecht, T.R., and Quate, C.F. (1987), "Atomic Resolution with Atomic Force Microscope," *Europhys. Lett.* 3, 1281-1286.
- [11] Bowden, F.P. and Tabor, D. (1950), *The Friction and Lubrication of Solids*, Part I, Clarendon Press, Oxford, U.K.; Revised edition (1954); Paperback edition (1986) .
- [12] Bowden, F.P. and Tabor, D. (1964), *The Friction and Lubrication of Solids*, Part II, Clarendon, Press, Oxford, U.K.
- [13] Coulomb, C.A. (1785), "Theorie des Machines Simples, en ayant regard au Frottement de leurs Parties, et a la Roideur des Cordages," *Mem. Math. Phys.*, X, Paris, 161-342.
- [14] Davidson, C.S.C. (1957), "Bearings Since the Stone Age," *Engineering* 183, 2-5.
- [15] Dowson, D. (1998), *History of Tribology*, Second edition, Instn Mech. Engrs, London, U.K.
- [16] Holm, R. (1946), *Electrical Contacts*, Springer-Verlag, New York.
- [17] Jost, P. (1966), *Lubrication (tribology) - A Report on the Present Position and Industry's Needs*, Dept. of Education and Science, H.M. Stationary Office, London.
- [18] Jost, P. (1976), "Economic Impact of Tribology," *Proc. Mechanical Failures Prevention Group*, NBS Spec. Pub. 423, Gaithersburg, Maryland.
- [19] Layard, A.G. (1853), "Discoveries in the Ruins of Nineveh and Babylon," I and II, John Murray, Albemarle Street, London, U.K.
- [20] Parish, W.F. (1935), *Three Thousand Years of Progress in the Development of Machinery and Lubricants for the Hand Crafts*, *Mill and Factory* 16 and 17.
- [21] Petroff, N.P. (1883), "Friction in Machines and the Effects of the Lubricant," *Engng. J.* (in Russian), St. Petersburg, 71-140, 228-279, 377-436, 535-564.
- [22] Reynolds, O.O. (1886), "On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 177, 157-234.
- [23] Tabor, D. and Winterton, R.H.S. (1969), "The Direct Measurement of Normal and Retarded van der Waals Forces," *Proc. R. Soc. Lond.* A 312, 435-450.
- [24] Tower, B. (1884), "Report on Friction Experiments," *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 632.