

Fifth Edition

Principles of Tribology

摩擦学原理

第5版

温诗铸 黄平 田煜 马丽然 著

Wen Shizhu Huang Ping Tian Yu Ma Liran

清华大学出版社



▼ ▼ ▼ ▼

温诗铸 黄平 田煜 马丽然 著

Wen Shizhu · Huang Ping · Tian Yu · Ma Liran

摩擦学原理 **第5版**

Principles of Tribology

Fifth Edition

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书反映了摩擦学研究的最新进展以及作者从事该领域研究的成果,系统地阐述了摩擦学的基本原理与应用、现代摩擦学的研究状况和发展趋势。

全书共 22 章,由润滑理论与润滑设计、摩擦磨损机理与控制、应用摩擦学等三部分组成。除摩擦学传统内容外,还论述了摩擦学与相关学科交叉而形成的研究领域的进展。本书针对工程实际中的各种摩擦学现象,着重阐述了摩擦过程中的变化规律和特征,进而介绍了基本理论、分析计算方法以及实验测试技术,并说明它们在工程中的实际应用。

本书可作为机械设计与理论专业的研究生教材以及高等院校机械类专业的教学参考书,也可供从事机械设计和研究的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

摩擦学原理/温诗铸等著.—5版.—北京:清华大学出版社,2018
ISBN 978-7-302-50008-7

I. ①摩… II. ①温… III. ①摩擦—理论 IV. ①O313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 076794 号

责任编辑:赵 斌

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:32

字 数:775千字

(附光盘1张)

版 次:1990年1月第1版 2018年5月第5版

印 次:2018年5月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:98.00元

产品编号:078521-01

Preface

This book reflects the current developments from the tribology research results of the authors for a long term. It is a systematic presentation of tribology fundamentals and their applications. It also presents the current state and development trend in tribology research.

There are 22 chapters in the book, consisting of three parts including lubrication theory and lubrication design, friction and wear mechanism and control, and applied tribology. Besides the classical tribology contents, it also covers scopes of intercross research areas of tribology. The book focuses on the regularities and characteristics of the tribological phenomena in the practice. Furthermore, it presents the basic theory, numerical analysis methods and experimental measuring techniques of tribology as well as their applications in engineering.

The book is intended for use as a textbook for senior-level or post-graduate students majoring in mechanology or in the related fields in the universities. It can also be served as a valuable reference for practicing engineers in machine design and research.

清华大学摩擦学国家重点实验室于1984年开始筹建,1988年通过国家验收并正式成立,成为我国摩擦学领域重要的基础性研究和人才培养基地,一直致力于服务国家的现代化建设,迄今已走过30余年的历程。与此同时,温诗铸教授撰写的《摩擦学原理》著作于1988年末定稿,1990年初正式出版发行,迄今也走过近30年历程。在这一过程中,根据科学研究持续发展,我们不断充实和扩展学科内容,相继修订再版。该书可作为培养机械工程学科以摩擦学为研究方向、机械设计与理论专业研究生的学位课程教材,也可作为从事相关学科领域科学技术人员的参考书。

《摩擦学原理》自出版以来得到从事机械工程科技工作的同行们的热情支持,得以广泛引用,对于推动摩擦学知识传播和科学技术发展起到重要作用。1992年,本书获得第六届全国优秀科技图书二等奖。

在这近30年期间,《摩擦学原理》从初版到历次修订共发行了4版。篇幅逐版增加,由初版40.9万字,扩充到第4版67.5万字,增加了近60%,所阐述的科学内容在深度和广度方面都有很大的发展。从《摩擦学原理(第2版)》开始,邀请了在清华大学摩擦学国家重点实验室工作多年的黄平教授共同编写。黄平教授在摩擦学研究中取得了丰硕的创新成果,对于不断提高本书的学术水平做出了重要贡献。

2012年,根据英国Wiley出版社的要求,我们在中文版《摩擦学原理(第4版)》的基础上出版了英文版 *Principles of Tribology*。2015年,再次应Wiley出版社的要求,作者进一步充实和补充内容, *Principles of Tribology (2nd Edition)* 于2017年8月在国外出版发行,同年10月在中国大陆出版发行。

科学实践使我们深刻认识到科技著作必须跟随着科学技术的日益发展而不断充实提高,我们需要努力发现本学科发展的新原理新技术,同时也要密切关注未来社会生产提出的挑战和需求。为此,在《摩擦学原理(第5版)》的编写过程中,我们力争做到推陈出新。为此,我们邀请清华大学摩擦学国家重点实验室在科学研究中做出突出贡献的青年学者田煜和马丽然共同参与编写。他们学风严谨踏实,具有开拓进取和求实创新的精神,一贯坚持深入科学研究实践。在本学科及其相关领域,积累了较全面的认识。本书由他们对于全书进行进一步整合修订,同时,根据近年来科学技术的发展补充了新的内容。

在本书编写中,我们力图全面系统地反映当今摩擦学的基本内容,同时,介绍新近的研究进展以及未来发展趋势。对于本学科的经典内容作了进一步精炼。

本书引用了国内外许多学者的研究成果,作者对于他们为摩擦学发展做出的贡献,及为本书出版给予的热情支持,表示最衷心的感谢!

作者

2018年1月于清华大学

第1版

前
言

FOREWORD

摩擦学(tribology)是有关摩擦、磨损与润滑科学的总称。它是研究在摩擦与磨损过程中两个相对运动表面之间相互作用、变化及其有关的理论与实践的一门学科。由于摩擦引起能量的转换、磨损则导致表面损坏和材料损耗,因而润滑是降低摩擦和减少磨损的最有效的措施。摩擦、磨损与润滑三者之间的关系十分密切。

摩擦学的研究对于国民经济具有重要意义。据估计,全世界有 $1/2\sim 1/3$ 的能源以各种形式消耗在摩擦上。而摩擦导致的磨损是机械设备失效的主要原因,大约有80%的损坏零件是由于各种形式的磨损引起的。因此,控制摩擦减少磨损、改善润滑性能已成为节约能源和原材料、缩短维修时间的重要措施。同时,摩擦学对于提高产品质量、延长机械设备的使用寿命和增加可靠性也有重要作用。由于摩擦学对工农业生产和人民生活的巨大影响,因而引起世界各国的普遍重视,成为近30年来迅速发展的技术学科,并得到日益广泛的应用。

摩擦学问题中各种因素往往错综复杂,涉及多门学科,例如,流体力学、固体力学、流变学、热物理、应用数学、材料科学、物理化学,以及化学和物理学等内容,因此多学科的综合分析是摩擦学研究的显著特点。

由于摩擦学现象发生在表面层,影响因素繁多,这就使得理论分析和实验研究都较为困难,因而理论与实验研究的相互促进和补充是摩擦学研究的另一个特点。随着理论研究的日益深入和科学技术的不断进步,目前摩擦学研究方法的发展正由宏观进入微观,由定性进入定量,由静态进入动态,以及由单一学科的分析进入多学科的综合研究。

目前已经有各种有关摩擦学的书籍出版,但大都偏重于介绍摩擦学的部分领域。本书试图全面地阐述摩擦学整个领域的基本理论与应用,以使读者获得较系统的知识和了解本学科的全貌。全书共计25章,可以分为3部分:第1~10章介绍流体润滑理论;第11~18章论及弹性流体动压润滑与边界润滑理论;第19~25章阐述摩擦与磨损问题。

本书试图尽可能地介绍摩擦学最新的研究领域和发展趋势。关于本学科的经典内容,凡属基础理论,也都力求陈述清楚。

本书是在参阅大量专业文献,总结我们自己多年来的科学研究和教学经验的基础上编写而成的。它是一本适合研究生和大学生使用的教学参考书,亦可供从

事摩擦学研究和设计的工程技术人员使用。

由于摩擦学涉及的范围较广,而本书的篇幅有限,因此,在取材和论述方面必然存在不少缺点,敬请广大读者批评指正。

在本书编写过程中,得到清华大学摩擦学研究所的同事和研究生的热情支持和帮助,在此对他们表示真诚的感谢。

温诗铸

1988年6月

摩擦学作为一门实践性很强的技术基础学科,它的形成和发展与社会生产要求和科学技术的进步密切相关,因而摩擦学的研究模式和研究范畴也在不断发展。

早期的摩擦学研究以18世纪G. Amontons和C. A. Coulomb对固体摩擦的研究为代表,他们根据大量的试验归纳出滑动摩擦的经典公式。这一时期的研究是以试验为基础的经验研究模式。19世纪末O. Reynolds根据黏性流体力学揭示出润滑膜的承载机理,并建立表征润滑膜力学特性的基本方程,奠定了流体润滑的理论基础,从而开创了基于连续介质力学的研究模式。在20世纪20年代以后,由于生产发展的需要,摩擦学的研究领域得以进一步扩大。其间W. B. Hardy提出依靠润滑油中的极性分子与金属表面的物理化学作用而形成吸附膜的边界润滑理论,推动了润滑剂和添加剂化学研究;G. A. Tomlinson从分子运动角度解释固体滑动过程中的能量转换和摩擦起因;特别是F. P. Bowdon和D. Tabor建立了以黏着效应和犁沟效应为基础的摩擦磨损理论。这些研究不仅扩展了摩擦学的范畴,而且使它发展成为一门涉及力学、材料科学、热物理和物理化学等的交叉学科,从而开创了多学科综合研究的模式。

1965年英国教育科学研究部发表《关于摩擦学教育和研究报告》,首次提出tribology(摩擦学)一词,扼要地定义为“关于摩擦过程的科学”。此后,摩擦学作为一门独立的学科受到世界各国工业界和教育研究部门的普遍重视,摩擦学研究进入了一个新的发展时期。

随着理论与应用研究的深入开展,人们认识到:为了有效地发挥摩擦学在经济建设中的潜在效益,在研究模式上的发展趋势将是由宏观进入微观,由定性进入定量,由静态进入动态,由单一学科的分析进入多学科的综合研究。同时,研究领域也逐步扩展,开始从分析摩擦学现象为主逐步向着分析与控制相结合,甚至以控制摩擦学性能为目标的方向发展。此外,摩擦学研究工作也从以往主要面向设备维修和技术改造逐步进入机械产品的创新设计领域。

现代科学技术特别是信息科学、材料科学和纳米科技的发展对摩擦学研究起着巨大的推动作用。例如,随着计算机科学和数值分析技术的迅猛发展,许多复杂的摩擦学现象有可能进行相当精确的定量计算。在流体润滑研究中采用数值模拟分析方法,已经建立了能够考虑多项实际因素综合影响的润滑理论,为现代机械润滑设计提供更加符合实际的理论基础。

又如,电子显微镜及各种材料表面微观分析仪器的广泛应用,为磨损表面层分析提供了研究磨损机理的手段。与此同时,材料科学的发展促使许多新材料以及

一系列表面处理技术的出现,对磨损研究向着广度和深度发展有着重要的推动作用。现代磨损研究的领域已从金属材料为主体扩展到非金属材料(包括陶瓷、聚合物及复合材料)的研究。而表面处理技术即利用各种物理、化学或机械的方法使材料表面层具有优异的性能已成为近年来摩擦学研究中发展最为迅速的领域之一。

纳米科技的发展派生出一系列新学科,纳米摩擦学或称微观摩擦学就是其中之一。它的迅速兴起也是本学科发展的必然趋势,因为摩擦学的研究对象是发生在摩擦表面和界面上的微观动态行为与变化,而在摩擦过程中界面所表现出的宏观特性与微观结构密切相关。纳米摩擦学提供了一种新的研究模式,即从原子分子尺度上揭示摩擦磨损与润滑机理,从而建立材料微观结构与宏观特性之间的构性关系,这将更加符合摩擦学的研究规律。可以说,纳米摩擦学的出现标志着摩擦学发展进入了一个新阶段。

此外,摩擦学作为一门交叉学科往往与其他学科相互交叉渗透从而形成新的研究领域,这是摩擦学发展的显著特点。近年来出现的摩擦化学、生物摩擦学、生态摩擦学等有可能成为今后的重点研究领域。

本书是在作者以前出版的《摩擦学原理》(清华大学出版社1990年出版)的基础上重新编写而成的。该书曾两次印刷,发行8000册,并获得1992年第六届全国优秀科技图书二等奖。本书试图反映现代摩擦学的全貌,尽可能地介绍新的研究领域和发展趋势。显然,这些新的研究领域在理论和实践上目前都还不够成熟,通过简略的阐述希望能够引起读者关注并推动这些领域的发展。对于本学科的经典内容,凡属基础知识的力求陈述清楚。

由于摩擦学涉及的范围广泛,而本书的篇幅有限,因此在取材和论述方面必然存在不妥和不足之处,敬请广大读者批评指正。

作者邀请同事多年的黄平教授共同编写本书。黄平教授在摩擦学研究中取得的丰硕成果,以及他的创新精神给作者以深刻的印象。在本书出版之际,作者对于黄平教授的合作和他付出的辛勤劳动致以谢意。同时,在本书编写中,引用了国内外许多学者的研究成果,对于他们以及数十年来与作者通力合作为清华大学摩擦学研究的发展做出贡献,并为本书编写给予热情支持与帮助的同事和研究生,表示最真诚的感谢。

温诗铸

2002年元旦于清华园

随着科学技术的迅速发展,近年来摩擦学的内容和范畴得到了进一步扩展,并取得了许多新的研究成果。正如我们在本书第2版的前言中指出的,随着纳米科学技术的发展,微观摩擦学越来越受到人们的广泛关注。除了前两版介绍的内容外,人们对于摩擦起因的微观模型和纳米润滑膜特性进行了更加深入的研究。

本书第3版是在前两版的基础上,根据摩擦学研究的新发展进行修改、补充而形成的。自本书于1990年出版第1版、于2002年出版第2版以来,受到了广大读者的欢迎,已成为本学科重要的参考图书之一。据粗略统计,本书前两版公开检索到的引用次数超过2000次。与此同时,也有读者对本书提出了不少的建议和意见,使我们感到有必要进行一次修订再版,以满足广大读者的需要。

本书第3版保留了第2版的编写架构,分3篇,分别是润滑理论与润滑设计篇、摩擦磨损机理与控制篇和应用摩擦学篇,共18章。除了对原版的错误进行补正外,主要的修改内容包括:为了更加突出润滑剂特性对各种润滑状态的影响,本版将润滑剂的湿润性并入第1章。虽然利用流量推导雷诺方程比较直观,但数学上不够严谨,因此在第2章雷诺方程的推导中,引入连续方程分析得出雷诺方程的一般形式。有兴趣的读者可以对比这两种推导过程,深入理解雷诺方程的本质。第3章中增加了处理阶梯问题的算法介绍,并删减了多重网格法算例。将原4.10节的弹流润滑状态图移至第2章。将第6章和第7章做了对调,在第6章的纳米薄膜润滑中,加入了纳米气体润滑分析,这些内容对计算机磁头/磁盘以及其他气体薄膜支承的设计是十分重要的。对第10章的内容做了调整,特别增加了微观摩擦理论一节,对现今几种微观摩擦模型作了介绍。在第14章摩擦磨损实验与状态检测中,增加了薄膜润滑测量装置和原子力显微镜测量原理和方法。将原第18章的内容精简后分别并入其他章节,例如摩擦噪声与控制移至第10章;并根据现代航天科学技术发展的需要,将第18章改为空间摩擦学作为新增加的内容。在本版的最后还增加了中英文对照和检索,以方便读者阅读使用。

我们设想,通过本版的修订,将使本书内容更加系统和完善。

我们也充分认识到,科学技术和经济建设的不断发展,将给摩擦学增加更多、更新的内容。所以,本书在取材和论述方面可能存在许多不足之处,敬请广大读者批评指正。

在本书编写中引用了国内外许多学者的研究成果,对于他们以及数十年来与作者通力合作为摩擦学的发展做出贡献,并为本书编写给予热情支持与帮助的同事和研究生们,再一次致以最诚挚的感谢。

温诗铸

黄平

2008年春节

本书第4版是在前3版以及2012年由Wiley和清华大学出版社共同出版的英文版 *Principles of Tribology* 的基础上,根据近年来摩擦学研究的热点和前几版的不足之处加以修改和完善形成的。本书自1990年第1版出版,并经多次改版、重印和完善以来,受到了广大读者的欢迎,成为摩擦学学科的重要参考图书之一。根据读者对本书提出的建议和意见,以及国内外科学技术的发展,促使我们感到有必要进一步对本书进行修订。

本书第4版保留了第3版的基本构架,分3篇共20章。这次再版的一项重要工作是对原版的错误进行较为详细的勘正。另外,针对我国高速铁路和城市轨道交通的实施,将滚动摩擦单独列出一章(第11章)。虽然在前几版中,滚动摩擦作为摩擦的一个典型现象,在书中有所提及,但只是给出了它的基本定义。在本版的第11章中,我们对滚动摩擦定义、滚动摩擦理论、在滚动摩擦过程中的黏着-滑动现象,以及滚动摩擦在铁路轮-轨中的接触和发热等问题的研究做了较详细的介绍。事实上,滚动摩擦广泛应用于交通运输车辆、机械制造、生产生活的许多方面,滚动摩擦有着不可替代的功能。另一个主要新增的内容就是第20章的微机电系统摩擦学。这部分内容包括了原子力显微镜在微机电系统摩擦学中的应用,微机电摩擦学研究和微磨损机理分析,这些内容都是随着微机电系统的快速发展而带来的研究热点。当然,无论是滚动摩擦,还是微机电系统摩擦学的内容远不止于此,限于篇幅有限,我们只能做必要的取舍。我们希望通过本次再版使本书内容更加系统和完善。

我们认识到,随着科学技术和经济建设的不断发展,必将给摩擦学学科的内容增加更新、更多的原理和应用。

最后,我们在本书编写中引用了国内外许多学者的研究成果,对于他们以及长期以来与作者通力合作为摩擦学的发展做出贡献,并为本书编写给予热情支持与帮助的同事和研究生们,再一次致以最诚挚的感谢。对本书存在的不足之处和需要完善的地方,敬请广大读者提出宝贵的意见和建议。

温诗铸

黄平

2012年8月

第 1 篇 润滑理论与润滑设计

第 1 章 润滑膜特性.....	3
1.1 润滑状态	3
1.2 润滑油的密度	5
1.3 流体的黏度	6
1.4 非牛顿特性与流变模型	9
1.5 润滑剂的湿润性.....	14
1.6 黏度的测量与换算	15
参考文献	18
第 2 章 流体润滑理论基础	19
2.1 雷诺方程.....	19
2.2 流体动压润滑.....	22
2.3 接触问题的弹性力学基础.....	25
2.4 弹性流体动压润滑(入口区分析).....	29
2.5 润滑脂的润滑.....	33
2.6 润滑状态图.....	34
参考文献	38
第 3 章 润滑计算的数值解法	39
3.1 雷诺方程的数值解法.....	39
3.2 能量方程的数值解法.....	49
3.3 弹性流体动压润滑数值解法.....	53
3.4 用多重网格法求解润滑问题.....	60
参考文献	67
第 4 章 典型机械零件的润滑设计	69
4.1 滑块与止推轴承.....	69

4.2	径向滑动轴承	74
4.3	静压轴承	79
4.4	挤压轴承	83
4.5	动载轴承	85
4.6	气体轴承	91
4.7	滚动轴承	95
4.8	齿轮润滑	97
4.9	凸轮润滑	101
	参考文献	103
第5章 特殊流体介质润滑		104
5.1	磁流体润滑	104
5.2	微极流体润滑	110
5.3	液晶润滑	115
5.4	水薄膜润滑中的双电层效应	122
5.5	乳液润滑	128
	参考文献	132
第6章 润滑状态转化与纳米级薄膜润滑		134
6.1	润滑状态转化	134
6.2	纳米液体薄膜润滑	138
6.3	纳米薄膜润滑数值分析	145
6.4	纳米气体薄膜润滑	147
	参考文献	154
第7章 边界润滑与添加剂		156
7.1	边界润滑及其类型	156
7.2	边界润滑的理论	163
7.3	润滑油的添加剂	167
	参考文献	170
第8章 润滑失效与混合润滑		171
8.1	粗糙度及材料黏弹性对润滑失效的影响	171
8.2	流体极限剪应力对润滑失效的影响	176
8.3	温度效应对润滑失效的影响	180
8.4	混合润滑状态	183
	参考文献	187

第 2 篇 摩擦磨损机理与控制

第 9 章 表面形态与表面接触	191
9.1 表面形貌参数	191
9.2 表面形貌的统计参数	193
9.3 粗糙表面的接触	196
参考文献	200
第 10 章 滑动摩擦及其应用	201
10.1 摩擦的基本特性	201
10.2 宏观摩擦理论	203
10.3 微观摩擦理论	211
10.4 滑动摩擦	216
10.5 摩擦的其他问题与摩擦控制	218
参考文献	229
第 11 章 微动摩擦及其应用	231
11.1 微动摩擦的发展概况及分类	231
11.2 微动摩擦的基本理论	234
11.3 提高微动摩擦性能的方法	238
11.4 微动摩擦学应用研究	240
参考文献	241
第 12 章 滚动摩擦及其应用	243
12.1 滚动摩擦基本理论	243
12.2 轮-轨滚动摩擦与热分析	249
12.3 滚动摩擦在月球车设计中的应用	259
参考文献	266
第 13 章 磨损特征与机理	268
13.1 磨损的分类	268
13.2 磨粒磨损	271
13.3 黏着磨损	274
13.4 疲劳磨损	281
13.5 腐蚀磨损	289
参考文献	294

第 14 章 宏观磨损规律与磨损理论	295
14.1 摩擦副材料	296
14.2 磨损过程曲线	297
14.3 表面品质与磨损	300
14.4 黏着磨损理论	303
14.5 能量磨损理论	304
14.6 剥层理论与疲劳磨损理论	306
14.7 磨损计算	307
参考文献	312
第 15 章 抗磨损设计与表面涂层	313
15.1 润滑剂与添加剂选择	313
15.2 摩擦副材料选配原则	317
15.3 表面涂层	320
15.4 涂层性能测试	327
参考文献	332
第 16 章 摩擦学实验与状态检测	333
16.1 摩擦学实验方法与装置	333
16.2 磨损量的测量	338
16.3 摩擦表面形态分析	342
16.4 磨损状态检测	345
16.5 磨损失效分析	348
参考文献	349
第 3 篇 应用摩擦学	
第 17 章 微观摩擦学	353
17.1 微观摩擦	353
17.2 微接触与黏着现象	357
17.3 微观磨损	359
17.4 分子膜与边界润滑	363
参考文献	369
第 18 章 金属成形摩擦学	371
18.1 成形中的力学基础	371
18.2 锻造摩擦学	374