

清华大学学术专著

摩擦学原理

(第2版)

温诗铸 黄平 著



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书取材于摩擦学研究最新进展以及作者和同事们长期从事该领域研究的成果,系统地阐述摩擦学的基本原理与应用,全面反映现代摩擦学的研究状况和发展趋势。

全书共 18 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。本书针对工程实际中各种摩擦学现象,着重阐述在摩擦过程中的变化规律和特征,进而介绍基本理论和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和高等院校机械工程类专业师生的教学参考书,亦可供从事机械设计和研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

摩擦学原理/温诗铸,黄平著. —2 版. —北京:清华大学出版社,2002
ISBN 7-302-05904-7

I. 摩… II. ①温…②黄… III. 摩擦学 IV. O313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 073677 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

[http:// www. tup. tsinghua. edu. cn](http://www.tup.tsinghua.edu.cn)

责任编辑: 金文织

印 刷 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 33.5 彩插: 1 字数: 563 千字

版 次: 2002 年 11 月第 2 版 2002 年 11 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-05904-7/TH·104

印 数: 0001~2000

定 价: 66.00 元



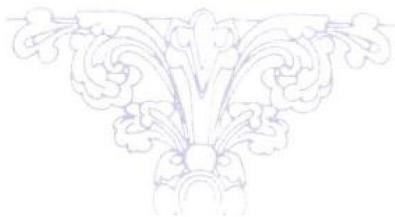
作者简介



温诗铸 清华大学精密仪器与机械学系教授，中国科学院院士。1932年生于江西丰城，1955年毕业于清华大学机械制造系后留校任教，历任机械设计教研室主任、摩擦学研究室主任、摩擦学国家重点实验室主任。长期从事机械设计与理论专业的教学和研究，出版《摩擦学原理》、《耐磨损设计》、《弹性流体动力润滑》、《纳米摩擦学》等4部著作，发表学术论文300余篇，获国家自然科学二等奖、国家发明三等奖、全国优秀科技图书一、二等奖以及省部级科技进步奖等共18项，并获2002年度何梁何利基金科学与技术进步奖。



黄平 华南理工大学机械工程学院教授。1957年生于黑龙江省齐齐哈尔市，1989年毕业于清华大学工程力学系获博士学位。曾在摩擦学国家重点实验室工作，现任华南理工大学机械设计及理论研究所所长。长期从事机械设计与理论专业的教学和研究，出版《机械零件及机构常用图册》和《机械设计》著作2部，发表学术论文100余篇，获国家自然科学二等奖、国家发明三等奖以及省部级科技进步奖等共7项。



Preface

This book is a compilation of the current developments from the tribology research results of the author and his co-workers for a long term. It is a systematic presentation of tribology fundamentals and their application. It also shows the current state and development trend in tribology research.

There are eighteen 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. This 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 application in engineering.

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

前 言

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 根据粘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的能量转换和摩擦起因;特别是 F. P. Bowdon 和 D. Tabor 建立了以粘着效应和犁沟效应为基础的摩擦磨损理论等。这些研究不仅扩展了摩擦学的范畴,而且促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边缘学科,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,由于电子显微镜及各种材料表面微观分析仪器的商品化和广泛应用,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起着重要的推动作用。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、聚合物及复杂材料的研究。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。而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,摩擦学作为一门边缘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1992年第六届全国优秀科技图书二等奖。本书编写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和推动这些领域的发展。对于本学科的经典内容,凡属基本的也力求陈述清楚。

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作出贡献,并为本书编写给予热情支持与帮助的同事们和研究生们,表示最真诚的感谢。

温诗铸

2002年元旦于清华园

目 录

前言	III
----------	-----

第一篇 润滑理论与润滑设计

第 1 章 润滑膜流变特性	2
1.1 润滑状态	3
1.2 润滑油的密度	5
1.3 流体的粘度	6
1.4 非牛顿流体	12
1.5 粘度的测量与换算	18
第 2 章 流体润滑理论基础	22
2.1 雷诺方程	23
2.2 流体动压润滑	27
2.3 线、点接触问题的弹性力学基础	31
2.4 弹性流体动压润滑(入口区分析)	36
2.5 润滑脂的润滑简介	40
2.6 广义雷诺方程	42
第 3 章 润滑计算的数值解法	50
3.1 雷诺方程的数值解法	51
3.2 能量方程的数值解法	63
3.3 弹性流体动压润滑数值解法	68
3.4 多重网格法求解润滑问题	79
第 4 章 典型机械零件的润滑设计	94
4.1 滑块与推力轴承	94

4.2	径向滑动轴承	100
4.3	静压润滑	107
4.4	挤压膜轴承	112
4.5	动载轴承	116
4.6	气体轴承	124
4.7	滚动轴承	129
4.8	齿轮传动	132
4.9	凸轮机构	138
4.10	弹流润滑状态图	140
第5章	特殊流体介质润滑	147
5.1	磁流体润滑	147
5.2	微极流体润滑	154
5.3	液晶润滑	161
5.4	陶瓷水润滑薄膜中的双电层效应	170
第6章	边界润滑与添加剂	179
6.1	流体润滑向边界润滑的转化	179
6.2	边界润滑的类型	181
6.3	边界润滑的理论	189
6.4	润滑油的添加剂	194
第7章	润滑状态转化与薄膜润滑	200
7.1	弹流润滑研究展望	201
7.2	润滑状态转化	206
7.3	薄膜润滑的特征	211
7.4	薄膜润滑数值分析	224
第8章	润滑失效与混合润滑	230
8.1	粗糙度及材料粘弹性对润滑失效的影响	230
8.2	流体极限切应力对润滑失效的影响	236
8.3	温度效应对润滑失效的影响	242
8.4	混合润滑状态	246

第二篇 摩擦磨损机理与控制

第 9 章 表面形态与表面接触	256
9.1 表面形貌参数	256
9.2 表面形貌的统计参数	259
9.3 表层结构与表面性质	263
9.4 粗糙表面的接触	265
第 10 章 固体摩擦与控制	271
10.1 摩擦的基本特性	271
10.2 经典摩擦理论	274
10.3 粘着摩擦理论	276
10.4 摩擦二项式定律	282
10.5 滑动摩擦的影响因素	284
10.6 滚动摩擦	287
10.7 滑动摩擦的其他问题	289
第 11 章 磨损特征与机理	301
11.1 磨损的分类	302
11.2 磨粒磨损	305
11.3 粘着磨损	310
11.4 疲劳磨损	319
11.5 腐蚀磨损	331
第 12 章 宏观磨损规律与磨损理论	336
12.1 摩擦副材料	337
12.2 磨损过程曲线	340
12.3 表面品质与磨损	344
12.4 粘着磨损理论	348
12.5 能量磨损理论	350
12.6 剥层理论与疲劳磨损理论	351
12.7 磨损计算	354

第 13 章 抗磨损设计与表面涂层	361
13.1 润滑油脂与添加剂选择	361
13.2 摩擦副材料选配原则	368
13.3 表面涂层	372
13.4 涂层性能测试	381
第 14 章 摩擦磨损实验与状态检测	390
14.1 摩擦磨损实验方法与装置	390
14.2 磨损量的测量	394
14.3 摩擦表面形态的分析	401
14.4 磨损状态的检测	404
14.5 磨损失效分析	407
第三篇 应用摩擦学	
第 15 章 微观摩擦学	412
15.1 微观摩擦	412
15.2 微接触与粘着现象	420
15.3 微观磨损	424
15.4 分子膜与边界润滑	430
第 16 章 金属成形摩擦学	442
16.1 成形中的力学基础	443
16.2 锻造摩擦学	447
16.3 拉拔摩擦学	452
16.4 轧制摩擦学	463
第 17 章 生物摩擦学	472
17.1 生物软组织的力学基础简介	472
17.2 关节润滑液的特性	476
17.3 人和动物关节的润滑	479
17.4 人工关节的摩擦	484
17.5 人体关节的磨损	486
17.6 其他生物摩擦研究	489

第 18 章 生态摩擦学	491
18.1 超滑技术	491
18.2 磨损表面的修复技术	498
18.3 摩擦噪声与控制	499
18.4 绿色润滑油	511

Contents

Introduction	III
---------------------------	-----

Part One Lubrication Theory and Lubrication Design

Chapter 1 Rheological Properties of Lubrication Film	2
1.1 Lubrication States	3
1.2 Density of Lubricants	5
1.3 Viscosity of Fluids	6
1.4 Non-Newtonian Fluids	12
1.5 Measurement and Exchange of Viscosity	18
Chapter 2 Basic of Hydrodynamic Lubrication Theory	22
2.1 Reynolds Equation	23
2.2 Hydrodynamic Lubrication	27
2.3 Basic Elasticity Theory of Line and Point Contact Problems	31
2.4 Elastohydrodynamic Lubrication (inlet analysis)	36
2.5 Grease Lubrication	40
2.6 Generalized Reynolds Equation	42
Chapter 3 Numerical Solutions of Lubrication Calculation	50
3.1 Numerical Solutions of Reynolds Equation	51
3.2 Numerical Solutions of Energy Equation	63
3.3 Numerical Solutions of Elastohydrodynamic Lubrication ...	68
3.4 Multi-grid Level Method Used in Lubrication Problems ...	79

Chapter 4	Lubrication Design of Typical Machine Parts	94
4.1	Slider and Thrust Bearing	94
4.2	Journal Bearing	100
4.3	Hydrostatic Lubrication	107
4.4	Squeezing Bearing	112
4.5	Dynamic Bearing	116
4.6	Gas Bearing	124
4.7	Rolling Bearing	129
4.8	Gear Transmission	132
4.9	Cam Machinery	138
4.10	Elastohydrodynamic Lubrication State	140
Chapter 5	Lubrication of Special Fluid Medias	147
5.1	Magneto Fluid Lubrication	147
5.2	Micro-polar Fluid Lubrication	154
5.3	Liquid Crystal Lubrication	161
5.4	Double Electric Layer Effect in Ceramic Water Thin film Lubrication	170
Chapter 6	Boundary Lubrication and Additives	179
6.1	Transformation from Hydrodynamic Lubrication to Boundary Lubrication	179
6.2	Types of Boundary Lubrication	181
6.3	Theory of Boundary Lubrication	189
6.4	Additives of Lubricant	194
Chapter 7	Transformation of Lubrication States and Thin Film Lubrication	200
7.1	Prospect of Elastohydrodynamic Lubrication Study	201
7.2	Transformation of Lubrication States	206
7.3	Characteristics of Thin Film Lubrication	211
7.4	Numerical Analysis of Thin Film Lubrication	224

Chapter 8	Lubrication Failure and Mixed Lubrication	230
8.1	Influence of Roughness and Material Visco-elastic Property on Lubrication Failure	230
8.2	Influence of Fluid Limiting Shear Stress on Lubrication Failure	236
8.3	Influence of Temperature on Lubrication Failure	242
8.4	Mixed Lubrication	246
Part Two Friction and Wear Mechanism and Friction Control		
Chapter 9	Surface Forms and Surface Contacts	256
9.1	Parameters of Surface Topography	256
9.2	Statistic Parameters of Surface Topography	259
9.3	Superficial Structure and Surface Properties	263
9.4	Rough Surface Contacts	265
Chapter 10	Solid Friction and Friction Control	271
10.1	The Basic Characteristics of Friction	271
10.2	Classical Friction Theory	274
10.3	Adhesive Friction Theory	276
10.4	Friction Binomial Law	282
10.5	Influence Factors on Sliding Friction	284
10.6	Rolling Friction	287
10.7	Sliding Friction and Other Problems	289
Chapter 11	Wear Characteristics and Mechanism	301
11.1	Wear Classification	302
11.2	Particle Wear	305
11.3	Adhesive Wear	310
11.4	Fatigue Wear	319
11.5	Corrosion Wear	331
Chapter 12	Macro Wear Regularities and Wear Theory	336
12.1	Materials of Friction Pair	337

12.2	Curves of Wear Processes	340
12.3	Surface Quality and Wear	344
12.4	Adhesive Wear Theory	348
12.5	Energy Wear Theory	350
12.6	Spalling Theory and Fatigue Wear Theory	351
12.7	Wear Calculation	354
Chapter 13	Anti-Wear Designs and Surface Coatings	361
13.1	Choice of Lubrication Oil, Grease and Additive	361
13.2	Principles of Friction Pair Material Choice	368
13.3	Surface Coatings	372
13.4	Measurement of Coating Properties	381
Chapter 14	Friction and Wear Experiment and State Detection ...	390
14.1	Methods and Equipments of Friction and Wear Experimental	390
14.2	Measurement of Wear	394
14.3	Form Analysis of Friction Surface	401
14.4	Detection of Wear States	404
14.5	Analysis of Wear Failure	407
Part Three Applied Tribology		
Chapter 15	Micro Tribology	412
15.1	Micro Friction	412
15.2	Micro Contact and Adhesive Phenomena	420
15.3	Micro Wear	424
15.4	Molecular Film and Boundary Lubrication	430
Chapter 16	Metal Forming Tribology	442
16.1	Mechanics Basics in Forming Technology	443
16.2	Forge Tribology	447
16.3	Drawing Tribology	452
16.4	Milling Tribology	463

Chapter 17	Biological Tribology	472
17.1	Fundamental of Mechanics on Biological Soft Tissue	472
17.2	Characteristics of Joint Liquid Lubricant	476
17.3	Men and Animal Joint Lubrications	479
17.4	Friction of Joint Prosthesis	484
17.5	Wear of Joint Prosthesis	486
17.6	Other Biological Tribology Studies	489
Chapter 18	Ecotypical Tribology	491
18.1	Super Sliding Technique	491
18.2	Wear Surface Prosthesis	498
18.3	Friction Noise and Its Control	499
18.4	Green Lubricants	511