



Principles of Tribology  
(Third Edition)



摩擦学原理  
(第3版)

温诗铸 黄平 著  
Wen Shizhu Huang Ping

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书汇集摩擦学研究的最新进展以及作者和其同事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 3 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的各种摩擦学现象,着重阐述摩擦过程中的变化规律和特征,进而介绍基本理论、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工程各类专业师生的教学参考书,也可供从事机械设计和研究的工程技术人员参考。

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,黄平著. —3 版. —北京:清华大学出版社,2008. 9  
ISBN 978-7-302-17946-7

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(2008)第 092610 号

责任编辑:张秋玲 洪 英

责任校对:刘玉霞

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto: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:175×245 印 张:29.75 字 数:611 千字

版 次:2008 年 9 月第 3 版 印 次:2008 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:58.00 元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:027781-01

## **Preface**

This book is a compilation of the current developments from the tribology research results of the authors and their co-workers for a long term. It is a systematic presentation of tribology fundamentals and their application. It also presents 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. 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 application in engineering.

The 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.

随着科学技术的迅速发展,近年来摩擦学学科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,在现第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的一节,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章节,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,随着科学技术和经济建设的不断发展,将给摩擦学学科的内容增加更多、更新的原理和应用。所以,本书在取材和论述方面必然存在许多不足之处,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作出贡献,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

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,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,全世界大约有 $1/2\sim 1/3$ 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,成为近三十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日益先进,目前摩擦学研究方法的发展趋势正由宏观进入微观;由定性进入定量;由静态进入动态;以及由单一学科角度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。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,敬请广大读者提出批评指正。

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,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作出贡献,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

## 第 1 篇 润滑理论与润滑设计

<b>第 1 章 润滑膜特性</b> .....	2
1.1 润滑状态 .....	2
1.2 润滑油的密度 .....	4
1.3 流体的黏度 .....	6
1.4 非牛顿特性.....	10
1.5 润滑剂的湿润性.....	15
1.6 黏度的测量与换算 .....	17
参考文献 .....	19
<b>第 2 章 流体润滑理论基础</b> .....	21
2.1 雷诺方程.....	21
2.2 流体动压润滑.....	24
2.3 接触问题的弹性力学基础.....	28
2.4 弹性流体动压润滑(入口分析).....	33
2.5 润滑脂的润滑.....	36
2.6 润滑状态图.....	38
参考文献 .....	43
<b>第 3 章 润滑计算的数值解法</b> .....	44
3.1 雷诺方程的数值解法.....	44
3.2 能量方程的数值解法.....	56
3.3 弹性流体动压润滑数值解法.....	61
3.4 多重网格法求解润滑问题.....	69
参考文献 .....	76

<b>第 4 章 典型机械零件的润滑设计</b> .....	78
4.1 滑块与止推轴承 .....	78
4.2 径向滑动轴承 .....	84
4.3 静压轴承 .....	90
4.4 挤压轴承 .....	94
4.5 动载轴承 .....	96
4.6 气体轴承 .....	103
4.7 滚动轴承 .....	107
4.8 齿轮润滑 .....	109
4.9 凸轮润滑 .....	115
参考文献 .....	116
<b>第 5 章 特殊流体介质润滑</b> .....	118
5.1 磁流体润滑 .....	118
5.2 微极流体润滑 .....	124
5.3 液晶润滑 .....	130
5.4 水薄膜润滑中的双电层效应 .....	138
参考文献 .....	145
<b>第 6 章 润滑状态转化与纳米级薄膜润滑</b> .....	146
6.1 润滑状态转化 .....	146
6.2 纳米液体薄膜润滑 .....	151
6.3 纳米薄膜润滑数值分析 .....	158
6.4 纳米气体薄膜润滑 .....	161
参考文献 .....	168
<b>第 7 章 边界润滑与添加剂</b> .....	170
7.1 边界润滑及其类型 .....	170
7.2 边界润滑的理论 .....	178
7.3 润滑油的添加剂 .....	183
参考文献 .....	187
<b>第 8 章 润滑失效与混合润滑</b> .....	188
8.1 粗糙度及材料黏弹性对润滑失效的影响 .....	188
8.2 流体极限剪应力对润滑失效的影响 .....	193

8.3 温度效应对润滑失效的影响 .....	198
8.4 混合润滑状态 .....	201
参考文献 .....	206

## 第 2 篇 摩擦磨损机理与控制

<b>第 9 章 表面形态与表面接触</b> .....	210
9.1 表面形貌参数 .....	210
9.2 表面形貌的统计参数 .....	212
9.3 表层结构与表面性质 .....	216
9.4 粗糙表面的接触 .....	218
参考文献 .....	222
<b>第 10 章 固体摩擦与控制</b> .....	223
10.1 摩擦的基本特性 .....	223
10.2 宏观摩擦理论 .....	226
10.3 微观摩擦理论 .....	234
10.4 滑动摩擦 .....	240
10.5 滚动摩擦 .....	242
10.6 摩擦的其他问题与摩擦控制 .....	244
参考文献 .....	257
<b>第 11 章 磨损特征与机理</b> .....	258
11.1 磨损的分类 .....	258
11.2 磨粒磨损 .....	261
11.3 黏着磨损 .....	265
11.4 疲劳磨损 .....	273
11.5 腐蚀磨损 .....	282
参考文献 .....	287
<b>第 12 章 宏观磨损规律与磨损理论</b> .....	289
12.1 摩擦副材料 .....	290
12.2 磨损过程曲线 .....	292
12.3 表面品质与磨损 .....	295
12.4 黏着磨损理论 .....	298

12.5	能量磨损理论 .....	300
12.6	剥层理论与疲劳磨损理论 .....	301
12.7	磨损计算 .....	303
	参考文献 .....	309
<b>第 13 章</b>	<b>抗磨损设计与表面涂层 .....</b>	<b>310</b>
13.1	润滑剂与添加剂选择 .....	310
13.2	摩擦副材料选配原则 .....	315
13.3	表面涂层 .....	319
13.4	涂层性能测试 .....	326
	参考文献 .....	332
<b>第 14 章</b>	<b>摩擦学实验与状态检测 .....</b>	<b>333</b>
14.1	摩擦学实验方法与装置 .....	333
14.2	磨损量的测量 .....	339
14.3	摩擦表面形态分析 .....	343
14.4	磨损状态检测 .....	347
14.5	磨损失效分析 .....	350
	参考文献 .....	352

### 第 3 篇 应用摩擦学

<b>第 15 章</b>	<b>微观摩擦学 .....</b>	<b>356</b>
15.1	微观摩擦 .....	356
15.2	微接触与黏着现象 .....	362
15.3	微观磨损 .....	365
15.4	分子膜与边界润滑 .....	370
	参考文献 .....	378
<b>第 16 章</b>	<b>金属成形摩擦学 .....</b>	<b>380</b>
16.1	成形中的力学基础 .....	380
16.2	锻造摩擦学 .....	383
16.3	拉拔摩擦学 .....	388
16.4	轧制摩擦学 .....	396
	参考文献 .....	403

---

第 17 章 生物摩擦学 .....	404
17.1 生物软组织的力学基础 .....	404
17.2 关节润滑液的特性 .....	407
17.3 人和动物关节的润滑 .....	410
17.4 人工关节的摩擦与磨损 .....	414
17.5 其他生物摩擦研究 .....	418
参考文献 .....	418
第 18 章 空间摩擦学 .....	419
18.1 空间机构与空间摩擦学的特点 .....	420
18.2 空间摩擦学性能分析 .....	422
18.3 空间润滑剂 .....	429
18.4 空间润滑特性 .....	435
18.5 加速寿命试验及其装置 .....	439
参考文献 .....	444
索引 .....	446



**Part One Lubrication Theory and Lubrication Design**

<b>Chapter 1 Properties of lubrication film</b> .....	3
1.1 Lubrication states .....	3
1.2 Density of lubricants .....	5
1.3 Viscosity of fluids .....	7
1.4 Non-Newtonian properties .....	11
1.5 Lubricant wettability .....	16
1.6 Measurement and exchange of viscosity .....	18
References .....	20
<b>Chapter 2 Basic theory of hydrodynamic lubrication</b> .....	22
2.1 Reynolds equation .....	22
2.2 Hydrodynamic lubrication .....	25
2.3 Basic elasticity theory of contact problems .....	29
2.4 Elastohydrodynamic lubrication (inlet analysis) .....	34
2.5 Grease lubrication .....	37
2.6 Elastohydrodynamic lubrication state diagrams .....	39
References .....	44
<b>Chapter 3 Numerical methods of lubrication calculation</b> .....	45
3.1 Numerical solutions of Reynolds equation .....	45
3.2 Numerical solutions of energy equation .....	57
3.3 Numerical solutions of elastohydrodynamic lubrication .....	62
3.4 Multi-grid level method used in lubrication problems .....	70
References .....	77
<b>Chapter 4 Lubrication design of typical mechanical elements</b> .....	79
4.1 Slider and thrust bearing .....	79