

Contact Mechanics and Friction
Physical Principles and Applications

接触力学与摩擦学的 原理及其应用

(德) 瓦伦丁 L. 波波夫 著
李强 雒建斌 译

清华大学出版社

Contact Mechanics and Friction
Physical Principles and Applications

接触力学与摩擦学的 原理及其应用

(德) 瓦伦丁 L. 波波夫 著
李强 雒建斌 译



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书将摩擦学问题与经典力学结合起来,既反映了摩擦学领域接触、黏着、毛细力、摩擦、润滑和磨损等问题的研究进展,又着重介绍了从接触力学角度认识摩擦学的新成果。具体内容包括:(1)摩擦学中基本参数的粗略估算方法;(2)将复杂问题简化的解析计算方法和多种数值仿真方法;(3)从纳米摩擦学到地震研究的摩擦学特征;(4)摩擦学系统的动力学研究等。

本书适合高校和科研院所机械、材料、力学等专业的师生和研究人员参考,也可供相关生产企业的技术人员阅读。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2011-4828

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

接触力学与摩擦学的原理及其应用/(德)瓦伦丁 L.波波夫著;李强,雒建斌译.--北京:清华大学出版社,2011.10

ISBN 978-7-302-26493-4

I. ①接… II. ①波… ②李… ③雒… III. ①接触应力—力学 ②摩擦—理论 IV. ①O343.3 ②O313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 171463 号

责任编辑:黎 强

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

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153×235 印 张:19 字 数:316 千字

版 次:2011 年 10 月第 1 版 印 次:2011 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:60.00 元

中文版前言

接触和摩擦的概念所包含的内容远远多于人们对其的第一印象。接触和摩擦无处不在,并且对我们的日常生活和科技进步有着重要意义。这个概念除了狭义的摩擦外,还包含了从原子级到地壳尺度的磨损、润滑、黏着、毛细作用、流变学和系统动力学等,它不仅对现实应用非常重要,而且对应着一个让人着迷的世界。本书采用统一的、全局的观点来阐述接触力学和摩擦学的各个方面。

这本书最初的构想是作为教科书,所有的章节都配有习题,因此也可以作为一本参考书。我希望本书不仅对初学者有用,而且对从事摩擦学的研究人员也有所帮助。在这本书的写作中,我尽力约束自己,不是在描绘个人的研究成果,而是接触力学和摩擦学领域的普遍知识,但最后三章即超声波对摩擦的影响、摩擦学中的数值仿真方法和地震动力学算是例外。

我很高兴在德文版和英文版之后,本书又有了中文版,这对我来说非常高兴和荣幸,因为自2003年起,我一直与中国的摩擦学专家保持着合作,其中包含了合作项目、摩擦学会议、学术交流和工业协会合作等。

对于这本书的翻译和审订工作,我衷心地感谢柏林工业大学的研究助理李强和清华大学的摩擦学国家重点实验室的维建斌教授。本书在英文版翻译过程中,我的同事 Rainer Heise 博士、Birthe Grzemba 和 Jasminka Starcevic 博士给出了很多建议,因此,我也要感谢他们的帮助。



V. L. Popov

2011年8月于柏林

译者按

本书是德国柏林工业大学波波夫(V. L. Popov)教授根据自己的科研和教学经验编写而成的。波波夫教授是摩擦力学专家,在该领域取得了诸多重要成果,书中包含了作者多年的科研成果与教学中所积累的经验,其特色是将接触力学和摩擦学进行关联和结合,既反映了这方面的基础知识,又融入了作者多年来的研究进展,体现了作者优秀的教学方法和思路。因此,这是一本很好地反映从接触力学角度认识摩擦学的专著,对深入了解摩擦学是很有帮助的。

接触与摩擦二者联系紧密,在工程实际应用中是非常普遍的问题。了解界面之间的相互作用机理并加以应用,这是从事机械、力学等方面的科研和工程技术应用的热点课题之一。接触力学与摩擦学涵盖面广泛,包括了弹塑性理论、黏弹性理论、材料科学、热力学、流体力学和系统动力学等学科,研究的尺度涵盖微观的纳米级到宏观的地震科学。本书不仅阐述了接触、黏着、毛细力、摩擦、润滑和磨损等一般现象,而且重点介绍了摩擦学中一些参数的粗略估算方法、许多复杂问题的简化解析计算方法和多种数值仿真方法;同时,作者还讨论了摩擦学中的系统动力学问题,如尖叫声及其抑制、失稳和空间形态等。此外,作者还论述了“橡胶摩擦”现象,这一现象在许多技术领域中都有重要的应用价值。

本书的另一特点是给出了一些针对性很强的练习题和相应的求解过程,这不仅有助于读者加深对接触力学和摩擦学的了解,也有助于从事相关技术开发和研究的工程技术人员解决具体的技术问题。因此,本书既可以作为机械、力学等专业的研究生教材或辅助教材,也适合从事相关领域科学研究和技术工作的科研人员和工程师阅读参考。

我们殷切希望本书的翻译和出版能够对我国的接触力学和摩擦学的教学和研究工作提供必要的借鉴和启发作用。我们在本书翻译过程中虽然已竭尽全力,但难免有错误和不妥之处,希望读者批评指正。

译 者

2011年9月

英文版序言

呈现在您面前的是英文版《接触力学与摩擦学的原理及其应用》，多数内容是由相应的德文第1版翻译而来(Springer 出版,2009)。本书增加了一章关于地震的摩擦问题。第15章补充了关于弹性流体的一节。另外,在一些章节的“习题”部分增加了新的举例。

本书得到了 J. Gray 的大力支持,是他将德语版翻译过来,没有他,这项工作是不可能完成的。我要感谢 G. G. Kocharyan 教授和 S. Sobolev 教授在震动力学方面给出的重要建议和意见。R. Heise 博士对各章的习题解答和订正做出了重要贡献,我真诚地感谢 J. Starcevic 博士在本书编写中的全力支持,感谢 Ch. Koll 女士的绘图,感谢 R. Heise, M. Popov, M. Heß, S. Kürscher 和 B. Grzempa 等人在校对中的帮助。

V. L. Popov
2009 年 11 月于柏林

德文版序言

对于希望能更好地了解接触力学和摩擦物理学的人来说,他会很快发现,没有任何一个领域比它更多元化,更吸引人,更让人兴奋。它涵盖的知识面非常广泛,如弹塑性理论、黏弹性理论、材料科学、流体力学(包括牛顿和非牛顿流体)、热动力学、电动力学、系统动力学等。接触力学和摩擦物理学的应用也十分广泛,从纳米领域的测量技术到地震的研究,几乎包括了工程摩擦的所有领域。学习了接触力学和摩擦物理学的人,能够对工程科学中不同的方法有一个全面的掌握。

本书的目的之一是清楚地阐述该领域的多个重要分支,并理清它们之间的关系。首先是接触力学的经典理论,包括黏着和毛细作用;接着是宏观摩擦理论、润滑、现代纳米摩擦学基础、摩擦机械的系统动力学(包括振动)、高弹性体摩擦、磨损等。在某些特定的情况下,这些领域之间的相互影响非常复杂。在实际中,摩擦学问题总是以不同的方式表现出来,没有一个简单的方法能解决摩擦学问题。唯一的通用方法就是我们必须先从摩擦学的观点了解这个系统。本书的另外一个目的就是讲述怎样了解这个系统。

作者一直坚信,机械接触和摩擦的本质通常比它们的表象要简单得多。如果一个人能够定性评估自己,他就可以理解机械接触和摩擦中很多不同层面的定性评估。因此,这本书很重视定性评估的方法。

分析计算中,我们采用了一些经典举例,像搭积木一样来理解和解决一系列现实问题。

摩擦学中很多的实际问题,尤其是摩擦系统的最优化问题,是很难得到解析解的。因此,本书对接触力学和摩擦的数值模拟方法进行了概述,并重点介绍了统一模型中在不同空间尺度中,若干个与接触力学有关的过程的综合方法。

这不仅是一本教科书,也可以作为这个领域的参考书。书中除了描述基本原理之外,还举了很多特别的例子,作为对应章节的习题。同时也提供了简单的习题解答。

这本书的基础来源于作者在柏林工业大学的教学讲义《接触力学与摩擦物理学》，所以这些材料能够在一或两个学期内完成学习。

本书的编写,得到了同事们的很大帮助。力学研究所“系统动力学和摩擦物理”的同事们对本书的完成做出了很多贡献,在此,我非常感谢 M. Schargott 博士、T. Geike 博士、M. Hess 先生和 J. Starcevic 博士。J. Starcevic 博士在本书编写中给了我全力的支持,M. Hess 先生仔细校对了所有公式,我要向他们表示诚挚的谢意。同时,我要感谢 Ch. Koll 女士为本书耐心的绘图,感谢 M. Popov 和 G. Putzar 博士的校对,感谢交通运输和机械系统的院长给我一个学期的时间来研究,使我能在此期间完成这本书。

V. L. Popov

2008 年 10 月于柏林

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 接触和摩擦现象及其应用	1
1.2 接触力学和摩擦物理学的历史	3
1.3 本书的结构	6
第 2 章 接触问题的定性分析——无黏着法向接触	7
2.1 材料性能	8
2.2 简单接触问题.....	10
2.3 三维弹性连续体接触的评估计算方法.....	13
习题	16
第 3 章 黏着接触的定性分析	19
3.1 物理背景.....	20
3.2 曲面间黏着力的计算.....	23
3.3 弹性体之间黏着力的定性估计.....	24
3.4 粗糙度对黏着的影响.....	25
3.5 胶带.....	26
3.6 范德华力和表面能的补充内容.....	27
习题	28
第 4 章 毛细作用力	32
4.1 表面张力和接触角.....	33
4.2 接触角滞后.....	35
4.3 压力和曲率半径.....	35
4.4 毛细桥梁.....	36
4.5 刚性平面和刚性球体之间的毛细力.....	37
4.6 粗糙表面的液体.....	37
4.7 毛细力和摩擦学.....	38
习题	39

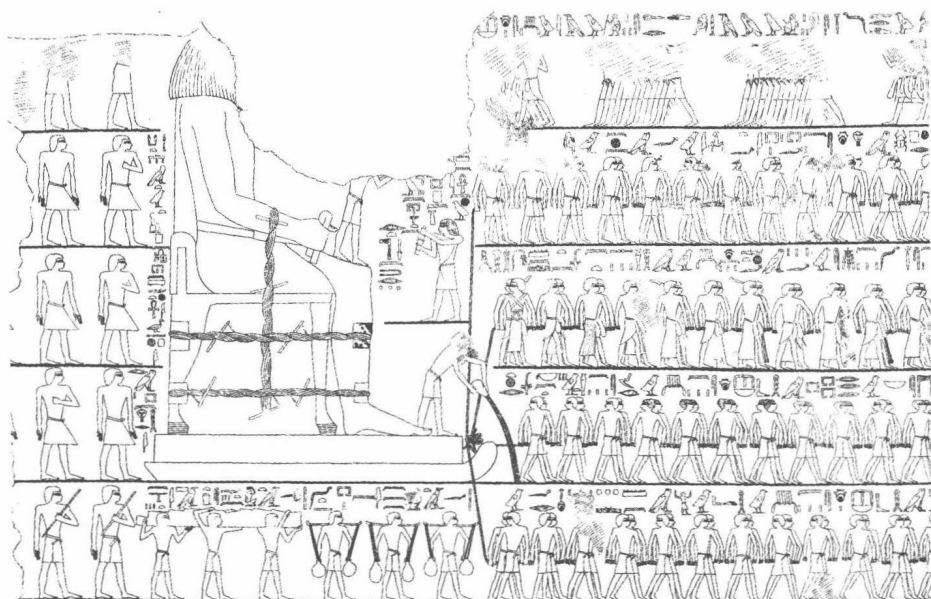
第 5 章 接触问题的精确解法——赫兹接触	43
5.1 表面力作用下弹性半空间体的变形	44
5.2 赫兹接触理论	46
5.3 两个曲面弹性体之间的接触	48
5.4 刚性锥头和弹性半空间体的接触	50
5.5 赫兹接触的内部应力	51
习题	52
第 6 章 接触问题的精确解法——黏着接触	56
习题	61
第 7 章 粗糙表面之间的接触	63
7.1 Greenwood 和 Williamson 模型	64
7.2 微凸体的塑性变形	68
7.3 电接触	69
7.4 热接触	71
7.5 接触机械刚度	72
7.6 密封	72
7.7 粗糙度和黏着	73
习题	74
第 8 章 切向接触问题	81
8.1 切向力作用下弹性半空间体的变形	82
8.2 分布切向力作用下弹性半空间体的变形	82
8.3 无滑动切向接触问题	84
8.4 考虑滑动的切向接触问题	85
8.5 无滑动刚性圆柱压头	87
习题	88
第 9 章 滚动接触	91
9.1 滚动接触过程的定性讨论	92
9.2 平稳滚动接触的应力分布	94
习题	98
第 10 章 库仑摩擦定律	102
10.1 概述	102
10.2 静摩擦与动摩擦	103
10.3 摩擦角	104

10.4	摩擦系数与接触时间的关系	104
10.5	摩擦系数与法向力的关系	106
10.6	摩擦系数与滑动速度的关系	107
10.7	摩擦系数与表面粗糙度的关系	107
10.8	库仑对摩擦定理起源的观点	108
10.9	Bowden 和 Tabor 理论	109
10.10	摩擦系数与温度的关系	111
	习题	112
第 11 章	Prandtl-Tomlinson 干摩擦模型	120
11.1	概述	120
11.2	Prandtl-Tomlinson 模型的基本性质	122
11.3	弹性失稳	125
11.4	超滑	128
11.5	纳米机械: 微电机与纳米电机的概念	128
	习题	132
第 12 章	摩擦引起的振动	135
12.1	摩擦力与速度为减函数关系时的摩擦失稳	136
12.2	有弹性力分布的系统中的失稳	138
12.3	临界阻尼和尖叫声的最优化抑制	140
12.4	主动抑制尖叫声	141
12.5	尖叫时的强度	143
12.6	稳定性标准与系统刚度的关系	144
12.7	自锁-滑动	147
	习题	149
第 13 章	接触中的热效应	153
13.1	概述	154
13.2	微接触中的瞬现温度	154
13.3	热机械的失稳	156
	习题	157
第 14 章	润滑系统	159
14.1	两个平行面之间的流动	160
14.2	流体动力润滑	161
14.3	黏性黏着	163

14.4	润滑剂流变学	166
14.5	边界层润滑	167
14.6	弹性流体动力学	168
14.7	固体润滑剂	170
	习题	171
第 15 章	高弹体的黏弹性能	177
15.1	概述	177
15.2	应力弛豫	178
15.3	频率相关的复数剪切模量	179
15.4	复模量的性质	181
15.5	黏弹性材料中的能量耗散	182
15.6	复模量的测量	183
15.7	流变学模型	184
15.8	橡胶的简单流变学模型(标准模型)	186
15.9	温度对流变学性能的影响	187
15.10	组合曲线	188
15.11	Prony 级数	189
	习题	192
第 16 章	橡胶摩擦和橡胶接触力学	195
16.1	高弹体和刚性粗糙面之间的摩擦	196
16.2	滚动阻力	200
16.3	高弹体的黏着接触	202
	习题	204
第 17 章	磨损	208
17.1	概述	208
17.2	磨粒磨损	209
17.3	黏着磨损	212
17.4	低摩擦磨损的条件	214
17.5	磨损作为摩擦区材料的运输工具	215
17.6	高弹体的磨损	216
	习题	218
第 18 章	超声振动影响下的摩擦行为	220
18.1	超声振动在宏观角度对摩擦的影响	221

18.2	超声振动在微观角度对摩擦的影响	225
18.3	静摩擦力与振幅函数关系的实验研究	227
18.4	动摩擦力与振幅函数关系的实验研究	229
	习题	230
第 19 章	摩擦物理学中的数值仿真方法	233
19.1	概述	234
19.2	接触问题从三维到一维的简化	237
19.3	宏观摩擦学系统中的接触问题	238
19.4	多元接触问题的降维方法	241
19.5	降维和黏弹性质	244
19.6	降维模型中应力的表达	245
19.7	降维模型框架中的计算步骤	246
19.8	降维方法框架中的黏着、润滑、空穴和塑性变形	246
	习题	247
第 20 章	地震与摩擦	250
20.1	概述	251
20.2	地震的量化	252
20.3	岩石的摩擦定律	254
20.4	在速率相关和状态相关摩擦下滑动的稳定性	256
20.5	地震成核和后期滑动	259
20.6	前震和余震	262
20.7	块介质和断层结构的连续介质力学	262
20.8	地震可以预测吗?	265
	习题	266
附录	269
扩展阅读文献	272
各章压题图片说明	279
索引	281

第 1 章 绪论



1.1 接触和摩擦现象及其应用

接触力学和摩擦物理是工程科学的基础性学科,在结构安全设计和节能设计中是必不可少的。其应用十分广泛,例如离合器,刹车片,轮胎,衬套和球轴承,压缩机,铰链,垫圈,铸造,机加工,冷成型,超声波电焊,电触头等。这些应用从接触单元或接触副的应力分析,包括了润滑和材料设计对摩擦的影响,延伸到微观和纳米技术的应用。人们对摩擦现象的兴趣已经持续了几百年甚至上千年,直至今天摩擦仍然在新产品和技术的发展中扮

演着重要的角色。

典型的摩擦接触例子就是轮轨接触,此接触中我们最感兴趣的就是材料强度和力的传递性能。接触能够传递机械力(螺纹),能够导电导热,以及防止材料的流失(密封)。原子力显微镜尖端和基材的接触或者两个地壳板块间的接触也是摩擦接触的例子。接触和摩擦现象存在于不同尺度领域,从纳米微小尺度到千兆米的庞大尺度,但它们有很多共同点,可以采用相似的方法加以处理。现代研究和技术表明,接触力学和摩擦物理拥有巨大的应用空间,从马达蛋白、心肌收缩到地震动力学,涵盖了工业摩擦学中的很多领域。

摩擦会导致能量的损耗,而且在微接触中会出现极端应力,同时还会导致微细裂缝和表面磨损。我们经常在设计中会尽力减小摩擦来减少能量损耗。但是有时候摩擦也是必需的,如果没有摩擦,我们就无法享受优美的钢琴曲,甚至无法行走和开车。在很多例子中,摩擦不能最小化,反而要最大化,比如刹车过程中轮胎和路面的摩擦。磨损也是一样,不能总是将其最小化,快速可控研磨技术为工艺处理打下很好基础,例如磨削、抛光、喷砂等。

摩擦磨损总是与黏着现象紧密联系在一起。对于黏着而言,了解两个物体是否紧密接触非常重要。从宏观尺度上讲,当两个刚性物体(如金属、木块)相互接触时,黏着的作用可以忽略,但若其中一个接触物体较为柔软时,黏着就变得非常重要,这点可以应用到很多领域。对黏合剂的使用,我们可以从接触力学中学到很多。在微观技术领域,黏着就显得更加重要,在微观尺度上摩擦力和黏着力已成为一个应用研究问题,被命名为“黏着摩擦”。

本书介绍的另外一个跟黏着很相似的现象是毛细效应,这种现象出现在少量流体当中。在精密机械如钟表中,空气中的水分会产生毛细作用力,破坏机械的精度。但是毛细效应也可以加以利用,如控制通往摩擦区域的润滑剂的流量。

在讲述接触和摩擦的书中,总是不可避免地讲到与之相应的声音现象。车闸、轮轨接触和轴承这些接触现象不仅消耗能量和材料,同时会发出刺耳的声音,严重的甚至会影响人的听力。如今很多工程中由于技术原因产生的噪声成为了主要问题。与摩擦力性质紧密相关的振动问题也同样是本书的讨论内容之一。

如果按照投资多少来衡量摩擦学中哪方面最重要,毫无疑问,润滑技术

一定是第一位。但本书中不可能对这方面的相关内容作过多的介绍,当然,流体润滑和弹流润滑动力学的基本原理是必不可少的。

我们对接触力学和摩擦学的研究是为了能够控制摩擦、磨损和黏着,从而达到我们的期望。为此,本书对接触和摩擦磨损现象与材料性能和系统性能的关系研究做了详细的介绍。

1.2 接触力学和摩擦物理学的历史

对摩擦学的应用及其重要性的第一印象应该按照其历史发展来表达。摩擦学(tribology)这个词是 Peter Jost 于 1966 年 5 月提出的,作为一个工程研究课题,融合了摩擦、磨损和润滑。摩擦学这个名字虽然较新,但关于摩擦学的研究历史非常久远。火的发现就来源于摩擦生热。车轮和简单衬套的发明,使用流体来减少摩擦磨损在公元前几千年就已经被应用,这都是摩擦学的应用。在对摩擦学历史的简短回顾中,我们从文艺复兴时期达·芬奇(Leonardo da Vinci)在这方面的贡献开始。

在 Codex-Madrid I(1495)中,达·芬奇描述了他发明的球轴承,低摩擦合金合成物,以及他对摩擦磨损现象的实验研究。他是第一个定量研究摩擦定律的工程师,他得到的结论用今天的语言总结,那就是以下两条摩擦基本定律:

- (1) 摩擦力和法向压力或法向载荷成正比;
- (2) 摩擦力与接触面积的大小无关。

达·芬奇也是提出摩擦系数这个术语的第一人,而且他通过实验测出的摩擦系数的大小就是典型的 0.25。

在科学发展史上,就像多次发生的那样,这些结论也被人们遗忘。约 200 多年后,这些结论又被法国的物理学家阿蒙顿(Guillaume Amontons)于 1699 年重新发现,而摩擦力与法向压力成正比,这条定律就是我们所知的“阿蒙顿定律”。

雷诺德·欧拉(Leonard Euler)在用实验研究摩擦力的同时,也花费了大量精力采用数学观点来研究,他介绍了静摩擦力和动摩擦力的区别,解决了绳索摩擦力的问题,这可能是历史上第一个采用分析方法解决的接触问题(1750 年)。他也是采用数学方法处理干摩擦定律的第一人,这种方法推动了以后的发展。我们要感谢他将 μ 作为摩擦系数,欧拉的研究理念为:摩擦发生在小三角不规则的物体之间,摩擦系数与这些不规则物体的斜率