

摩擦学译丛 1

摩 擦 学

对摩擦、润滑和磨损科学技术的系统分析

机械工业出版社

摩 擦 学 译 丛 1

摩 擦 学

对摩擦、润滑和磨损科学技术的系统分析

〔西德〕霍斯特·契可斯

刘钟华 王夏鋈 陈善雄 吴鹿鸣 译



机 械 工 业 出 版 社

本书用系统观点,对摩擦学基本原理作了系统的分析。

全书共分为八章:第一、二章绪论、基础知识和系统概念;第三章摩擦学的一般理论,是本书的中心理论部分,探讨系统概念在摩擦学方面的应用以及摩擦学相互作用问题;第四章摩擦学过程;第五、六章摩擦学过程对机械系统结构和功能的影响;第七章摩擦计量学,介绍有关摩擦学试验、模拟和控制方法;第八章实用系统方法学。

本书内容侧重于基本原理方面,并把大量资料纳入有限篇幅内,为读者提供了统一的、跨学科的基础知识。

本书可作为高等院校高年级学生和研究生学习摩擦学课程时参考,也可供从事摩擦学研究和应用工作的科技人员参考。

TRIBOLOGY SERIES, 1

TRIBOLOGY

a systems approach to the science and
technology of friction, lubrication and wear

HORST CZICHOS

ELSEVIER

Second impression 1979

* * *

摩擦学译丛 1

摩 擦 学

对摩擦、润滑和磨损科学技术的系统分析

[西德]霍斯特·契可斯

刘钟华 王夏整 陈善雄 吴鹿鸣 译

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可登记证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $10 \frac{1}{2}$ ·字数 272 千字

1984 年 3 月北京第一版·1984 年 3 月北京第一次印刷

印数 0,001—7,600·定价 1.60 元

*

统一书号: 15033·5570

出版序言

摩擦学形成为一门专门的学科仅仅是六十年代的事,但是由于它对国民经济与科学技术的发展具有重要意义,所以发展很快。现在各种学术活动频繁,生产与机械设计中的大量问题正在应用摩擦学去解决,许多高等学校开设了摩擦学课程或招收了研究生。

为了满足科研、生产、教学的需要,我出版社决定以翻译荷兰 Elsevier 科技图书出版公司出版的国际性摩擦学丛书为主,出版摩擦学译丛。

荷兰 Elsevier 科技图书出版公司聘请国际上著名的摩擦学专家作为编辑顾问委员会的成员,选择国际上反应现代摩擦学研究与应用成果的具有较高水平的新著作为这套丛书出版。丛书的编辑顾问委员会主席是英国的 D. 斯科特 (D. Scott), 成员有西德的 W. J. 巴茨 (W. J. Bartz) 和 H. 契科斯 (H. Czichos)、美国的 W. A. 格莱泽 (W. A. Glaeser) 和 K. C. 鲁德马 (K. C. Ludema)、英国的 G. W. 罗 (G. W. Rowe)、苏联的 И. В. 克拉盖尔斯基 (И. В. Крагельский)、日本的桜井俊男,以及法国、加拿大、意大利、澳大利亚、印度、瑞士等国的十三名专家、学者。

我社对这套丛书有所取舍或替补,翻译出版摩擦学译丛。我们希望这对于我国开展摩擦学理论与应用研究、对于培养中高级科技人材将能起到一定的积极作用。

译 序

本书是根据荷兰 Elsevier 科学图书出版公司 1978 年出版的德国 H. Czichos 所著的 TRIBOLOGY (英文版) 一书进行翻译的。

本书作者用系统观点, 对摩擦、磨损、润滑的基本原理及其对动态机械系统结构和功能的影响作了系统而统一的分析。书中有关系统工程分析方法在摩擦学方面应用的内容主要来源于作者多年来的科研成果。这些成果曾得到摩擦学学术界的重视和好评。摩擦学的系统分析方法在很大程度上是把原来分散在各个学科领域中的摩擦学知识和成果加以汇集, 并用系统观点、一般系统理论和系统方法来分析解决多学科性的摩擦学问题。它完全体现了现代科学的发展动态, 所以是一本值得推荐的新书。由于作者采用系统观点来阐述摩擦学基本原理, 因此使得这本书不论在体系或在内容方面都显得比较新颖。同时, 作者还在有关章节中引用了大量的参考文献, 从而为读者学习和研究摩擦学问题提供了不少方便。

正如作者在前言中所说, “本书的目的是为从事摩擦学各种专业领域工作的工程师、物理学家、化学家和材料科学家提供统一的跨学科的基础知识”。

本书可作为高等院校理、工科高年级大学生和研究生学习摩擦学课程时的教学参考书; 也可供从事摩擦学研究和应用方面的有关专业人员参考使用。

本书第一、二、三章由刘钟华翻译, 第四章由吴鹿鸣翻译, 第五、八章由王夏璠翻译, 第六、七章由陈善雄翻译。全书由刘钟华审校。由于该书内容较新, 涉及范围又相当广泛, 限于译者水平, 译文中难免有不妥之处, 恳请读者多提宝贵意见, 给予批评指正。

译者

一九八一年一月
于西南交通大学

前 言

本书对摩擦学作了系统而统一的分析：摩擦、润滑和磨损的基本原理及其对动态机械系统结构和功能的影响。由于摩擦是有用机械能损耗的主要原因，而磨损是设备需要进行更新的主要原因，因此更好地了解和利用摩擦学原理，在工程设计中对于节约能源和节约材料是特别重要的。

本书编写计划是在参加由“经济合作和发展组织”(OECD)主办的“工程材料磨损国际研究小组(IRG)”的协作工作时逐渐形成的，作者从本世纪七十年代初期就参加了这个组织。理论研究和实际经验都表明，迫切需要一个全面而又实用的体制，以便把摩擦学这门边缘学科的许多方面，包括从接触力学、表面物理学和流体动力学，直到轴承工艺和机械设备的维修和可靠性问题联系起来。此外，近年来看得很明显，把各个事件逐一孤立出来加以研究，并类似于分析材料的其它（整体）机械性能来处理摩擦和磨损问题，这种具体分析方法对于研究复杂的摩擦学问题只是部分地有用。摩擦学原来的定义：“研究作相对运动的相互作用表面的科学、技术和与此有关的实践”显然是一个动态机械系统的定义。因而，摩擦磨损和许多有关现象本质上都是由于系统的运动元件之间的动态相互作用而产生的（在附录A中汇编了发生摩擦磨损过程的机械系统）。可以断定，应用系统思想和一般系统理论，特别适宜用来制订一套合适的摩擦学体制，把它目前分散在整个科技文献中的许多方面汇集在一起。由此可见，一个摩擦机械系统既要用它的“结构”（系统的元素、元素的性能、各元素之间的相互关系），又要用它的“功能”（输入、输出、传递函数）来加以分析和描述。在分析电气系统时，人们的兴趣主要集中在输入输出功能关系方面，而在摩擦学，则关键在于系统（动态）

结构的分析和描述。

本书的编排是简单明了的,并在 1.4 节中提出了要点。如果读者主要对系统方法在摩擦学问题中的实际应用感兴趣,建议可在读完绪论性的第一、第二章之后,先转到第八章“实用系统方法学”,然后再按第三、第四章等顺序读下去。由于摩擦学的范围广泛,本书主要集中在主题的一般基本原理方面,以便把大量的资料纳入有限的篇幅中。因此,本书的目的是为从事摩擦学各个专业领域工作的工程师、物理学家、化学家和材料科学家提供统一的跨学科基础知识。在用作教科书时,本书适合工科和理科高年级大学生或第一年研究生课程水平。

本书内容中某些部分曾于 (a) 1973 年 7 月在伦敦的帝国学院, (b) 1974 年 10 月在柏林-达伦的联邦材料检验研究所 (BAM), (c) 1976 年 4 月在巴黎的全国科学技术中心 (CNRS) 召开的 IRG-OECD 会议上提出作为讲义。……。

霍斯特·契可斯

1977 年 5 月于柏林-达伦

* 从这里开始一直到完都是作者对协助编写人员的致谢,从略——译者注。

目 录

前 言

第一章 绪论和基础知识	1
1.1 物理系统动力学和摩擦磨损现象	1
1.2 摩擦学发展史	2
1.2.1 摩擦研究	3
1.2.2 磨损研究	5
1.2.3 润滑研究	7
1.3 摩擦学的意义	10
1.4 本书的研究范围	11
第二章 系统概念	13
2.1 引言	13
2.2 系统的描述	15
2.3 能量平衡、网络、相似性	17
2.4 键图法	18
2.5 系统的分类	18
第三章 摩擦学的一般理论	21
3.1 系统概念在摩擦学方面的应用	21
3.2 摩擦机械系统的功能	24
3.3 摩擦机械系统的结构	26
3.4 摩擦学的相互作用	29
3.4.1 功能平面	29
3.4.2 机械功平面	30
3.4.3 热平面	32
3.4.4 材料平面	33
3.5 结论	35
第四章 摩擦学过程	37
4.1 机械系统中摩擦过程的作用	37
4.2 接触过程	38
4.2.1 接触力学	39

X

4.2.2 接触物理学及接触化学	46
4.3 摩擦过程	58
4.3.1 接触过程中的切向力	58
4.3.2 滑动摩擦	60
4.3.3 滚动摩擦	67
4.3.4 能量传递和能量消耗	72
4.4 磨损过程	80
4.4.1 概述	80
4.4.2 表面疲劳磨损机理	87
4.4.3 磨粒磨损机理	94
4.4.4 粘附磨损机理	99
4.4.5 摩擦化学磨损机理	102
4.4.6 磨损过程的合成	105
4.5 润滑方式	108
4.5.1 Stribeck曲线及润滑方式	108
4.5.2 流体动压润滑	110
4.5.3 弹性流体动压润滑	121
4.5.4 混合润滑	127
4.5.5 边界润滑	129
4.5.6 润滑极限	138
第五章 摩擦学过程对机械系统结构的影响	147
5.1 一般原理	147
5.2 系统元素性能的变化	148
5.2.1 表面形貌的变化	150
5.2.2 表面组成的变化	156
5.2.3 表面强度性能的变化	160
5.3 材料损耗	164
5.4 无磨损情况的解决办法	167
5.4.1 流体膜	168
5.4.2 磁场	170
5.4.3 界面弹性体	171
5.4.4 柔性措施	172

5.4.5 耐磨覆层.....	173
第六章 摩擦学过程对机械系统功能的影响	177
6.1 一般原理.....	177
6.2 运动的传递和粘滑效应.....	180
6.2.1 摩擦学机械系统的动力学.....	180
6.2.2 粘滑特性的模拟.....	182
6.3 机械效率.....	185
6.4 功能失效.....	190
6.4.1 失效原因.....	190
6.4.2 实例研究: 齿轮的失效方式.....	192
6.5 机械设备的可靠性.....	196
6.6 对正确功能特性的要求.....	201
6.6.1 交替解法的研究.....	201
6.6.2 系统结构的正确设计.....	202
6.6.3 工作变量的正确选择.....	204
6.6.4 系统功能的监控.....	205
第七章 摩擦计量学: 试验、模拟和控制方法	207
7.1 引言.....	207
7.2 摩擦和磨损试验方法.....	208
7.2.1 摩擦计试验系统的类型.....	210
7.2.2 工作变量的控制.....	212
7.2.3 摩擦计量特性.....	214
7.3 模拟摩擦试验.....	221
7.4 摩擦技术元件的试验.....	227
7.5 机器状况的监控.....	232
7.6 表面研究技术.....	239
第八章 实用系统方法学	250
8.1 引言.....	250
8.2 摩擦学系统数据表.....	251
8.2.1 系统的技术功能.....	252
8.2.2 工作变量.....	253
8.2.3 系统的结构.....	254

8.2.4 摩擦学特征.....	256
8.3 摩擦工程系统的描述.....	258
8.4 摩擦和磨损研究数据的表示法.....	260
8.5 系统方法学应用于摩擦学问题的解法：几个实例的研究.....	264
8.5.1 “库伦摩擦”用于聚合物对钢滑动副的有效性的研究.....	265
8.5.2 耐磨扩散表面覆层的摩擦学特性的表征.....	269
8.5.3 海上轴承应用方面的材料选择.....	273
8.5.4 仪表枢轴轴承润滑剂的选择.....	278
8.5.5 减少凸轮和挺杆设计的剧烈磨损.....	280
8.5.6 减少轮轨系统摩擦引起的噪声.....	283
8.5.7 电触点的失效研究.....	286
8.5.8 金属加工过程特点汇编.....	289
附录	293
(A) 基本摩擦工程系统汇编	293
(B) 摩擦工程系统的元素	297
(C) 文献目录编集：摩擦学文献汇编.....	298
参考资料	302
符号一览表	322

第一章 绪论和基础知识

1.1 物理系统动力学和摩擦磨损现象

有许多工程系统（如机器、仪器、车辆等）的技术功能取决于运动过程。运动一词，按其基本的物理定义是指一个物体的位置随时间而发生的变化。更广义地说，研究事物如何随时间而变化，并研究使之发生变化的力，就是动力学的研究对象。

自然界和工业技术上有许多过程取决于固体、液体和气体的运动和动态特性。例如，血在血管中流动或力借运动机件传递，这样一些运动过程本来就是无数生物系统和机械工程系统完成功能所必不可少的。此外，某些明显的非机械类学科，如电子学或光学，也是以运动过程为基础的，这就是说在这种情况下是以亚微观粒子，即电子、离子或光量子的运动为基础的。看来，运动过程把不同的学科联系起来，好像是一个重要的根本原理。因此，动态特性分析已经成了许多现代科学技术的基本原理〔1.1〕。

一切运动过程的共同特点是存在“运动阻力”作用，也就是存在某种形式的摩擦。摩擦作用是由于作相对运动的物体间实际相互作用的结果。由于存在摩擦，整个系统的运动过程和动态特性受到了影响或干扰，有一部分运动能量消耗掉了。此外，如果在动态系统中有一个运动件是固体，则摩擦作用一般会带来磨损，磨损就是“由于表面作相对运动而造成的物体工作表面上物质的逐渐损耗”〔1.2〕。图 1-1 以图解的方式说明固体运动的基本形式以及有关的工程系统、运动阻力形式和损坏机理。

现代工业技术已经发展到这样一个水平：解决运动表面的问题必须仔细研究并综合有关多元系统动力学的一切知识。例如，在飞机上确实有成千上万个机件发生摩擦和磨损，其中有制动器、轴承、密封装置、齿轮、传动机构、泵、飞行控制系统、仪表、

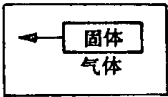
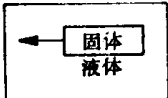
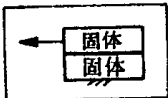
表面运动	工程系统	运动阻力	损坏机理
	空气轴承 飞机 涡轮机	空气摩擦力	流体侵蚀
	液力传动 船舶 管道	粘滞摩擦力	气蚀
	干轴承 车轮与轨道 制动器	固体摩擦力	磨损

图1-1 表面运动形式及有关项目

花键,甚至“静”联接。而过去在设计动态机械系统时,由摩擦引起的能量损耗和由磨损造成的材料损耗等问题或多或少受到忽视,今后在工程设计中一定要认真考虑如何节约能量和材料。为了综合考虑机械系统中的运动表面以及能量和材料的转移和消耗等各方面问题,英国有一个委员会于1966年根据古希腊语中“tribos”(意思是“摩擦”)一字创造了“Tribology”(摩擦学)这个名词^[1.3]。

研究摩擦学的现象(摩擦学的基本概念、它的基本物理过程和它对机械工程系统的功能和结构的影响)是本书的主题。

1.2 摩擦学发展史

“要作精确定量的摩擦试验是十分困难的,尽管有经过精确分析的大量工程数据,但对摩擦定律仍然没有分析得很完善。”

Richard P. Feynman—诺贝尔奖金获得者
—Feynman讲义, 1963

象摩擦和磨损这样一些明显的老问题,在许多方面仍未得到解决,这似乎是不能理解的。而且,目前在许多先进技术领域中,这些问题似乎比过去更加显得重要。造成这种情况的某些原因,

在研究了该领域的发展史之后就会清楚了。因此，在深入研究各种具体问题之前，回顾一下我们在摩擦学方面知识的增长过程可能是有益的（更详细的情况见〔1.4~1.8〕）。我们按年代先后来进行回顾，首先谈及摩擦，然后再谈磨损和润滑。

1.2.1 摩擦研究

也许早在史前，人们就已对摩擦的两个方面发生了兴趣。第一个实用方面好象是利用摩擦热来取火。第二个实用方面是在运输材料时克服摩擦。人们利用滑橇来运输可能已经将近有9000年了。为了解决有关建造金字塔的大量工程运输问题，埃及人曾经使用液体润滑剂来尽量减少运输重物所需的功。

据说车轮是人类历史上的最大发明之一。事实上，正确利用这一发明，就能大大减少克服摩擦所需的功。根据考古学研究的结果可以推断出，在美索不达米亚大约在5000年前就已经认识到滚动比滑动好了。

但是对动力学和摩擦现象进行科学研究，比上述的这些早期应用要晚得多。据了解，这方面工作是360年前才由伽利略开始的。伽利略发现了“惯性原理”——如果运动着的物体未被扰动，即未受摩擦力的干扰，则它将继续沿一直线作等速运动。从而对理解运动取得了很大的进展。牛顿提出了著名的经典力学基本定律，从而在动力学的科学发展上完成了第二步工作。

为了补充伽利略和牛顿在理想运动力学方面的定律，阿蒙顿在1699年和库伦在1785年根据大量的试验先后制订了有关固体摩擦的一些法则〔1.9, 1.10〕。库伦为了进行摩擦试验研制了一种取名“摩擦计”的专用量仪（见图1-2）。

阿蒙顿和库伦的试验结果都表明，摩擦力 F_f ，与法向载荷 F_N 成正比。他们把摩擦力与法向载荷之比称为“摩擦系数”，即 $f = F_f/F_N$ 。试验表明，摩擦系数的大小与几何接触面积无关。在解释这些结论时曾假设，表面上到处是凹凸不平的，而摩擦则起因于接触表面上微凸体的互嵌作用。这一理论称为“摩擦的凹凸假说”。库伦还研究了Desagulier在1724年提出的摩擦时存在粘附过程

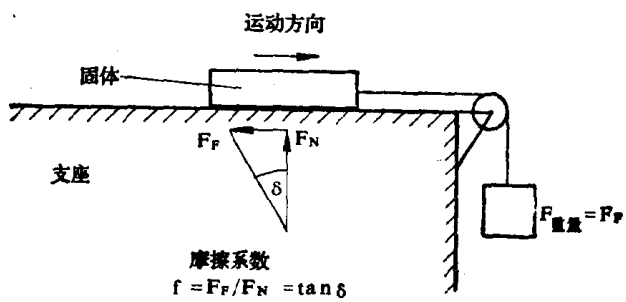


图1-2 库伦测量摩擦用的摩擦计

的可能性。Desagulier 发现两个铅球在相互压紧时会发生牢固的粘附，他认为摩擦时也会产生类似的力[1.11]。但是库伦在解释摩擦过程时却否定了这种粘附假说。早在阿蒙顿和库伦进行研究之前，利奥纳德·达·芬奇在十五世纪中叶就已经发现摩擦力与载荷成正比[1.12]。他根据自己的试验结果得出，摩擦力的大小为载荷的四分之一，而且对于各种材料都一样（即 $f = 0.25 = \text{常数}$ ）。

虽然这些发现似乎解答了机械工程的某些基本问题，但从物理观点看，摩擦的起因仍不能用古典的刚体力学加以解释。如果假定表面上微凸体为刚体，则根据能量平衡可知，仅有使一个滑动表面跨越配偶面峰部的过程并不消耗机械能，而实际上能量是消耗掉了。由此可见，阿蒙顿和库伦的发现只能认为是有效性有限的近似经验法则。但是，由于这些法则是在力学发展的初期制订的，因此这些发现已被当作是摩擦“定律”。而且，机械系统的摩擦特性已经按假定为“材料固有性能”的定值摩擦系数来处理。由于下列原因：

- (i) 完全忽略摩擦作用的理想化力学理论获得了发展。
- (ii) 把摩擦系数误解为“材料固有的常数”。

在整个十九世纪内和跨入二十世纪后，在摩擦方面的进展实际上没有超出凹凸假说。

作为固体摩擦起因的另一种解释，Hardy[1.13]和 Tomlinson

[1.14]在本世纪二十年代提出了摩擦的“粘附理论”。在这个理论中假定,为克服作用在接触表面之间的分子粘附力,需要摩擦力。虽然这个理论似乎比较清楚,但它需要一个与接触面积成正比的摩擦力。可是,这一点就同许多摩擦试验结果不符合了,而试验表明摩擦力与接触面积无关。

在摩擦分析发展史中的这个阶段认识到,摩擦的物理起因是非常复杂的,不能用简单的理论进行解释,而需要作精确的试验和详细的物理分析。由于在本世纪二十和三十年代,物理学家的主要兴趣在原子物理和量子力学这类课题,因此直到1940年前后才弄清了上述分歧。这时,Holm[1.15]、Ernst与Merchant[1.16]、Bowden与Tabor[1.17]都已发现表观几何接触面积与两个表面上微凸体接触形成的“真实”接触面积相差很大。Bowden和Tabor[1.18]应用了这种观察结果并假设了在微凸体接点上作用有分子粘附力,因而就能解释阿蒙顿和库伦的经验法则了。由此可见,摩擦具有“二重”性,即摩擦时既有变形过程又有粘附过程。这种二重分子机械概念已被大家公认为是一种“综合”的摩擦理论。

1.2.2 磨损研究

在材料磨损性能方面最初所作的系统研究中,有些工作是由伟大的天才利奥纳德·达·芬奇完成的。1967年在马德里发现了利奥纳德的手稿(抄本马德里I)[1.12],他在手稿中介绍了自己在简单滑动轴承磨损方面的研究。他发现,磨损随载荷的增大而加剧,同时磨损方向不一定是铅垂方向,而是沿着载荷的主向量方向。为了减少磨损,他研制了一种滑动轴承,其衬套建议用一种含30%铜和70%锡的合金来制造。

除了利奥纳德的研究外,在科学基础上开始研究磨损还是最近的事。德国在1930年前后才开始对磨损作早期的系统研究,这项研究几乎没有引起英语国家研究人员的注意。Füchsel把金属的干磨损解释为一种变形过程和继之以金属变形部分的分离(剥落)过程[1.19]。这个理论已经由Fink,Mailänder和Dies作了补

充〔1.20, 1.21〕。他们发现在磨损过程中变形金属零件会发生氧化, 因而强调了周围大气对金属磨损的重要影响。1938年, Siebel 对于早期系统磨损研究的科学技术水平曾作过评论。他根据引起磨损的外部条件的不同性质, 区分了以下几种磨损形式:

1. 干表面滑动摩擦时的磨损;
2. 润滑表面滑动摩擦时的磨损;
3. 干表面滚动摩擦时的磨损;
4. 润滑表面滚动摩擦时的磨损;
5. 振动接触时的磨损;
6. 由运动中的固体颗粒引起的磨损 (侵蚀);
7. 由流动中的流体引起的磨损 (气蚀)。

Siebel 指出, 由于磨损形式繁多, 看来不可能靠单一的试验来测定材料的磨损性能, 从而获得唯一的磨损数据。他根据相当先进的设想建议由物理学家、化学家、冶金学家、弹塑性理论家和工厂工程师密切协作, 共同进行研究, 以便在最复杂的磨损方面获得真正的进展。

初期的磨损研究是在第二次世界大战期间结束的。此后可以看到, 在本世纪五十年代里这项工作有一定的重复和发展, 这主要是在美国和英国进行的。对于金属与金属发生磨损的情况Feng、Burwell 和 Strang 也许是首先看出金属从一个表面向另一表面转移和金属磨耗过程二者有区别的一些研究者〔1.23〕。Kerridge 指出, 在金属转移之后, 转移的金属会发生氧化, 而“缓和”磨损这一过程的后期将表现为金属氧化物的磨耗〔1.24〕。与缓和磨损不同, 在“严重”磨损过程中, 磨耗直接发生在转移的金属上。对于干金属滑动表面在缓和磨损状态下的某些情况, Archard 发现了经验法则, 即磨损体积与载荷和滑动距离成正比, 而与两个相互作用金属中软者的硬度成反比〔1.25〕。在 Archard 发表干磨损经验法则的前后, Burwell 对磨损的主要物理机理进行了分类〔1.26〕。根据这个分类法, 至少有四种不同的主要物理机理应该加以区别, 即,