

# 摩擦学原理

〔英〕·J 霍林 主编

MECAXUE

YUANLI

机械工业出版社

# 摩 擦 学 原 理

〔英〕J. 霍 林 主编

上海交通大学摩擦学研究室 译

机 械 工 业 出 版 社

本书是一部系统地论述摩擦学基本原理的专著。书中提供了为打下这门学科扎实基础而需要的摩擦、磨损和润滑理论。全书共十三章：绪论、表面性能和测量、表面接触、摩擦理论、磨损、固体材料的摩擦学性能、摩擦不稳定性、滚动力学、润滑剂的性能和试验、流体动力润滑、弹性流体动力润滑、流体静力润滑以及摩擦学解法的选择。书末还增附英国教育科研部关于摩擦学教育和研究的报告译文。本书对机械工程技术人员、科研人员以及工科院校师生均有参考价值。

## Principles of Tribology

Edited by J. Halling

The Macmillan Press LTD.

1975.

## 摩擦学原理

[英] J. 霍林 主编

上海交通大学摩擦学研究室 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证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32·印张 13 3/8·字数 347 千字  
1981 年 10 月北京第一版·1981 年 10 月北京第一次印刷  
印数 0,001—8,800·定价 1.65 元

统一书号：15033·4997

## 译 序

摩擦学是近十多年来发展起来的一门边缘学科。它是研究作相对运动的相互作用表面及其有关理论和实践的一门科学技术。摩擦学的研究范围相当广泛,包括机械学、冶金学、力学、物理学、化学等方面的内容。

世界各国的教育界和科技界,已日益认识到摩擦学这门学科对发展国民经济和科学技术的重大作用。因此,近年来国外已大量出版了有关摩擦学的著作和刊物,并在不少高等工科院校开设了有关摩擦学的课程。目前,摩擦学已成为世界上发展最快的应用科学之一。

英国塞尔福德大学霍林教授主编的《摩擦学原理》,是第一部有系统地论述摩擦学基本原理的专著。书中提供了为打下这门学科扎实基础而需要的摩擦、磨损和润滑理论。因此,本书对高等工科院校的教师、研究生和学生以及在工程设计和工业研究部门工作的科学技术人员都有一定的参考价值。为此,我们把本书译出,供从事摩擦学教育和研究的同志参考。

摩擦学一词是由乔斯特报告首先提出的,报告中明确地指出了摩擦学是一门边缘学科,具有重大的经济意义和社会意义。乔斯特报告的发表引起了世界各国的广泛重视,对摩擦学的迅速发展起了一定的促进作用。我们也把这份报告译出,将其正文增附在本书的末尾,供有关同志参考。

本书的译校分工如下:前言和原序由汪一麟译,第一章由朱安仁译,第二章由顾佩芝译,第三章由张永清译,第四章由顾佩芝译,第五章由朱安仁译,第六章由张培金译,第七章由李柱国译,第八章和第九章由王世佐译,第十章由董勋译,第十一章由沈继飞译,第十二章由谢绍玄译,第十三章和附录由赵冬初译,乔斯特报告由

重勋、张培金、沈继飞和谢绍玄译, 全书译稿由汪一麟作了校阅、统一和整理。限于我们的理论知识和业务水平, 译文中定有错误和不妥之处, 恳请读者批评指正。

上海交大摩擦学研究室

1979年6月

## 前 言

没有摩擦学，或者说，没有“作相对运动的相互作用表面”，也就是没有相互滚动的表面、相互滑动的表面和相互摩擦的表面，人就不可能生存。

这个真理也同样适用于重型机械和精密机构、制动器和火箭、机械联接和人的关节。

摩擦学的主要内容摩擦和磨损自古以来就已存在，人们一直力图控制摩擦和减轻磨损。然而，在英国认识到摩擦学是现代的一门边缘学科，还不到九年时间。一旦认识到这一点，它的发展就象燎原之火一样燃遍了整个工业界。

导致这种发展的主要原因，也就是本书之所以重要的主要原因是，一方面看到了摩擦学设计原理和实践之间的密切关系，另一方面也看到了它的经济效果。仅靠一门学科的知识进行设计和用试探法进行设计的日子已经一去不复返了。现代产品在其设计阶段就应该把能充分控制摩擦和防止磨损的各种因素考虑进去。

为了做到这一点，Halling 教授和他的合著者以一本书的篇幅提供了为打下这门学科的扎实基础而需要的几乎全部的基础理论。因此，本书对每个工科大学生都是极为有用的。此外，我相信正在工业设计和研究部门工作的工程师们也会感到“摩擦学原理”非常有用。这里把宝贵的资料集中于一书，以免去查阅几方面的书籍和科学论文，为从事工业的人们以及其他争分夺秒地进行工作的人们节约宝贵的时间。

同样，本书对在其他许多领域内工作的人们一定也有很大的价值，他们在工作中常常不得不面临实际的摩擦学问题，而他们在本书中至少能找到解决他们一些问题的基本答案。

据本人署名的原报告（见附录 C）估计，由于较好地应用了摩擦学的原理和实践，英国工业每年能节约五亿一千五百万英镑（按

1965年估算)。自从该报告发表以来显而易见,上述对节约数值的估计是太保守了。确实如此,美国国会最近所作的报告中指出,由于摩擦学方面的原因(摩擦与磨损)而造成的损失,有很大的节约余地,据估计每年约值一千亿美元,其中二百亿是材料费。

正确地应用本书中所概括的摩擦学原理,就可以大大地节约。社会科学研究会(S. S. R. C.)最近所作的报告中指出,“对于个体企业,即使是有实力的企业,其主要设备的摩擦学性能得到改善后,回收率确会很高,远高于通常的工业投资。”

现代机器、机构和设备都必须可靠。我坚信,应用了“摩擦学原理”中所概括的基本准则,就能大大有利于提高工业产品的可靠性,从而为节约本国财富作出贡献。

我祝贺 Halling 教授和他的合著者的著作出版。我要热诚地推荐给未来的工程师,以及在职工程师和其他从事控制摩擦和防止磨损(也就是在工作中必须尽量减少由于摩擦学方面的原因而造成的故障、更换和停车)的人们。

H. Peter Jost

## 原 序

摩擦学(Tribology)是一新词,尚未被普遍采用,但它涉及的却是人类有史以来就遇到的问题。人们创造这个词,是为了集中研究作相对运动的固体界面的承载问题。因此,摩擦学的内容是各种完备知识的综合,它包罗很广,有润滑、摩擦、磨损、接触力学、表面物理和化学等方面的专题。摩擦学确实是一门边缘学科,因为它运用了物理、化学、数学、材料科学和工程方面的基础知识来研究各种工程问题、医学问题和从刷牙到打高尔夫球几乎所有的日常生活方面的问题。

由于已经认识到摩擦学的社会意义和经济意义,某些高等院校已把它选为好几门课程的内容。本书力图以一本书的篇幅,将通常分散在各种科学文献中的这方面内容集中在一起。本书特别强调摩擦学的基本原理,仅用一些实例来说明这些原理的物理意义。因此,本书可作为其他如轴承设计一类的实用专著的一本有价值的补充读物。本书主要供大学工科毕业班学生使用,然而作者希望它也将使广大读者感到兴趣。刚接触摩擦学的研究人员以及设计师和研究工程师,要想在现有文献中探索基础知识的话,在此必能找到有关材料。

作者有意省略了一般的设备和方法的说明,因为大学毕业班学生和在职工程师对此已经熟悉。符号的标注也许前后不完全一致,但是已经力使书中各专题所用的符号符合于现有的文献。这就便于查阅第一流的参考文献,而其中有许多已列在各章的末尾。所用的符号也在各章的正文里清楚地加以阐明。

由于本书作者较多,文笔上可能有些差异,但因各章基本上都是自成起迄的,这就不致使读者感到有什么问题。全书作者属同一部门,我们相信在大家共同努力之下,书中的基本观点是一致的。作者对每一专题都着重讲解重要的物理原理,虽然书中列有



最重要的数学式子,但作者不想作严密的数学推导。应该指出,作者主要从事研究摩擦学在工程中的应用,因而书中未收入摩擦学在化学方面的许多资料。这并不意味着对这方面内容的重要性有任何贬低,而是认为这类专题应属于专业知识的范畴。

本书最后一章是其他各章简要的说明。读者确实应该把这章提前阅读,这样可以有助于理解前面各章所论专题的意义。

在本书的附录中列出一些问题及其解法的梗概,而概念的最终建立还得靠我们根据已知条件处理问题的能力。

最后,作者对 L. M. Chadderton 夫人表示深切感谢,她热诚而负责地把凌乱的草稿整理成清楚的稿件。

J. Halling

# 目 录

译序

前言

原序

第一章 绪论 (J. Halling) .....	1
§ 1.1 摩擦学 .....	1
§ 1.2 简史 .....	3
§ 1.3 工业摩擦学 .....	7
§ 1.4 经济性 .....	10
§ 1.5 摩擦学解法 .....	11
第二章 表面性能和测量 (J. Halling 和 K. A. Nuri) .....	16
§ 2.1 金属表面的性质 .....	16
§ 2.2 表面织构的评定 .....	18
§ 2.3 表面参数 .....	21
§ 2.4 表面的统计性能 .....	24
§ 2.5 表面参数的测量 .....	37
第三章 表面接触 (J. Halling 和 K. A. Nuri) .....	39
§ 3.1 引言 .....	39
§ 3.2 加载时产生的应力分布 .....	40
§ 3.3 加载时产生的位移 .....	45
§ 3.4 赫兹接触 .....	46
§ 3.5 粗糙表面的接触 .....	58
§ 3.6 变形型式的判据 .....	63
§ 3.7 热效应 .....	64
第四章 摩擦理论 (D. G. Teer 和 R. D. Arnell) .....	69
§ 4.1 引言 .....	69
§ 4.2 摩擦测量 .....	71
§ 4.3 摩擦起因 .....	73
§ 4.4 粘着摩擦理论 .....	75

## IV

§ 4.5	修正粘着理论 .....	77
§ 4.6	表面微凸体的塑性相互作用 .....	82
§ 4.7	犁沟影响 .....	85
§ 4.8	弹性滞后损耗 .....	86
§ 4.9	各种摩擦理论综述 .....	87
<b>第五章</b>	<b>磨损(D. G. Teer 和 R. D. Arnell) .....</b>	<b>89</b>
§ 5.1	引言 .....	89
§ 5.2	磨损型式 .....	89
§ 5.3	影响磨损的各种因素 .....	108
§ 5.4	磨损试验 .....	115
§ 5.5	防止磨损的方法 .....	117
§ 5.6	磨损关系式在设计中的应用 .....	117
§ 5.7	磨损实例——内燃机磨损 .....	119
§ 5.8	结论 .....	121
<b>第六章</b>	<b>固体材料的摩擦学性能(R. D. Arnell 和 D. G. Teer) .....</b>	<b>123</b>
§ 6.1	引言 .....	123
§ 6.2	金属的摩擦学性能 .....	124
§ 6.3	自润滑材料 .....	127
§ 6.4	固体润滑剂的种类 .....	128
§ 6.5	塑料的摩擦学性能 .....	134
<b>第七章</b>	<b>摩擦不稳定性(L. Eaton) .....</b>	<b>140</b>
§ 7.1	引言 .....	140
§ 7.2	摩擦振动的特性 .....	143
§ 7.3	各种解析法综评 .....	147
§ 7.4	摩擦力模型 .....	150
§ 7.5	粘滑振动分析 .....	153
§ 7.6	进一步分析 .....	162
§ 7.7	消除粘滑的方法 .....	163
<b>第八章</b>	<b>滚动力学(J. Halling) .....</b>	<b>166</b>
§ 8.1	引言 .....	166
§ 8.2	自由滚动 .....	167

§ 8.3	滚动中的微滑 .....	175
§ 8.4	轮胎与路面的接触 .....	189
<b>第九章</b>	<b>润滑剂的性能和试验 (R. B. Howarth) .....</b>	<b>192</b>
§ 9.1	引言 .....	192
§ 9.2	粘度 .....	192
§ 9.3	粘度测量 .....	201
§ 9.4	润滑油 .....	210
§ 9.5	润滑脂 .....	214
<b>第十章</b>	<b>流体动力润滑 (T. L. Whomes) .....</b>	<b>218</b>
§ 10.1	引言 .....	218
§ 10.2	理论 .....	220
§ 10.3	雷诺方程在推力轴承中的应用 .....	223
§ 10.4	异形圆盘的接触 .....	228
§ 10.5	径向轴承 .....	231
§ 10.6	变粘度——折算压力概念 .....	236
§ 10.7	流体动力润滑膜中的剪应力和牵引力 .....	237
§ 10.8	有限宽轴承 .....	244
§ 10.9	热效应 .....	252
§ 10.10	气体润滑轴承 .....	255
§ 10.11	流体动力不稳定性 .....	266
<b>第十一章</b>	<b>弹性流体动力润滑 (T. L. Whomes 和 J. Halling) .....</b>	<b>272</b>
§ 11.1	重载接触情况 .....	272
§ 11.2	弹性流体动力润滑理论 .....	275
§ 11.3	理论与实验的比较 .....	280
§ 11.4	牵引力 .....	284
§ 11.5	三维解 .....	288
§ 11.6	疲劳破坏 .....	289
<b>第十二章</b>	<b>流体静力润滑 (P. B. Davies 和 R. B. Howarth) .....</b>	<b>292</b>
§ 12.1	外压式轴承 .....	292
§ 12.2	流体静压轴承概述 .....	293

§ 12.3	流过矩形通道和圆形毛细管的粘滞流动 .....	294
§ 12.4	恒流系统中的长矩形推力轴承 .....	295
§ 12.5	多轴承装置中的补偿要求 .....	298
§ 12.6	补偿式轴承的特性 .....	301
§ 12.7	特性比较 .....	308
§ 12.8	其他形状轴承的流量、载荷和功率因数 .....	317
§ 12.9	推力轴承的滑动影响 .....	323
§ 12.10	流体静压径向轴承 .....	332
§ 12.11	其他型式的流体静压轴承 .....	341
<b>第十三章</b>	<b>摩擦学解法的选择(J. Halling) .....</b>	<b>343</b>
§ 13.1	引言 .....	343
§ 13.2	载荷和速度 .....	344
§ 13.3	径向轴承的选择 .....	348
§ 13.4	摩擦学解法的比较 .....	350
§ 13.5	结论 .....	351
<b>附录 A</b>	<b>雷诺方程 .....</b>	<b>352</b>
<b>附录 B</b>	<b>一些典型问题 .....</b>	<b>358</b>
<b>附录 C</b>	<b>英国教育科研部关于摩擦学教育和研究的报告</b>	
	<b>(Jost 报告) .....</b>	<b>374</b>
<b>索引</b>	<b>.....</b>	<b>403</b>

# 第一章 绪 论

## § 1.1 摩 擦 学

摩擦学 (Tribology) 一词是什么意思呢? 它是由希腊字“Tribos”(意为摩擦)派生而来,所以可直译为“摩擦的科学”。这是一个新词,只有在最新出版的词典上才查得到,其定义为:“研究作相对运动的相互作用表面及其有关的理论和实践的一门科学技术。”后一定义虽然也是一种直译法,但其含义更为广泛,它综合了化学家、工程师、冶金学家、物理学家和其他专家所感兴趣的摩擦和磨损问题。摩擦学范围之广泛,足以表明该学科的边缘性质。就某种意义说,仅仅名词是新的,因为人们对摩擦学内容的关注远在有文字记载的历史以前。显然,从车轮的发明可以看出,人们已在设法减小平移运动中的摩擦,而这一发明无疑早于有文字记载的历史。人们一定会研究摩擦和磨损这一类摩擦学问题,这是不足为奇的,因为牵连到这种现象的事物几乎波及到我们生活中的各个方面。

不仅我们所使用的机器有摩擦学问题,我们生活的其他许多方面也深受摩擦学的影响。动物的关节活动显然属于摩擦学范畴,关节炎一类疾病的治愈已经归功于摩擦学家的专门知识。我们还依赖于摩擦力控制来进行娱乐活动,无论是爬山运动,还是任何球类运动,象板球或网球的旋转、高尔夫球的抽击或溜冰滑雪的技巧动作等都是。夹持、切割和洗刷,是摩擦学在日常生活中的其他方面的反映,例如刷牙显然是一种受到控制的磨损过程,我们希望在剔除污垢的同时避免磨去珐琅质。甚至我们之所以能步行,也是由于存在着适当的摩擦的缘故,显而易见,在人类的整个进化过程中,摩擦学效应起着重要的影响。

我们可以研究人类历史上在地面上移动方式的发展情况来考

察摩擦对人类进化过程的影响<sup>[1]</sup>。图 1.1 中用一阻力与重量之比来表示移动阻力,此比值可以视为当量摩擦系数  $\lambda$ 。这显然表示移动的难易,它随着历史的发展而减小,这可看作是从原始时代的滑动逐渐进化到现代运动员的运动,也就是沿曲线 G 进化。必须指出,图中标尺不是线性尺而是对数尺,因此曲线形状容易使人发生误解。约在一万年前开始形成的现代人曾利用其创造能力获得了远较动物生理进化为好的成就。因此,润滑剂的应用和车轮设计的改进显然是有利的。

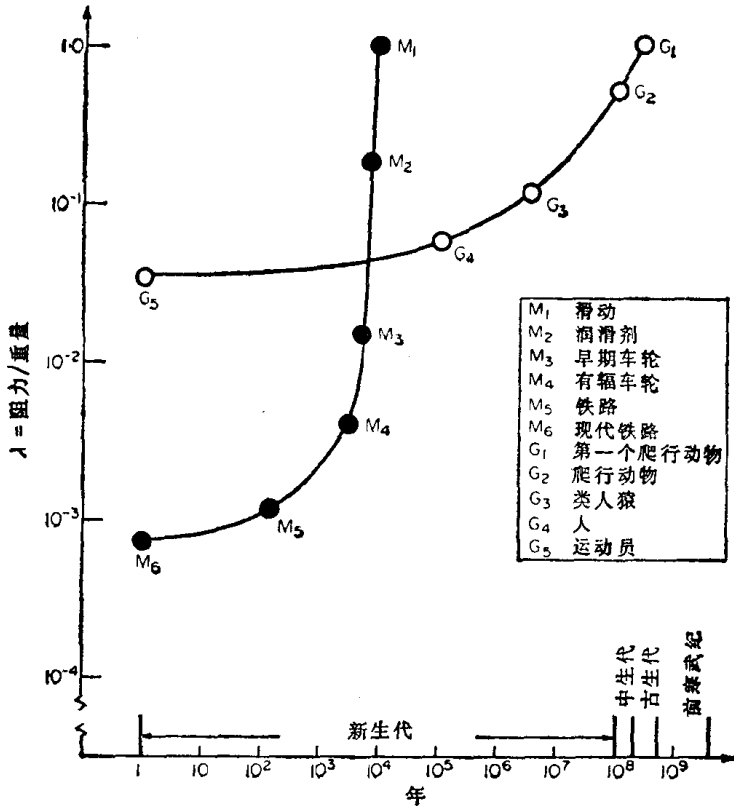


图 1.1 人类历史上地面运输的进步

将图 1.1 中的结果按照用各种移动方法达到的速度来点绘,如图 1.2 所示,也是很有趣的。我们再来看图中两条曲线,一条表示进化过程,另一条表示人类的创造能力。在这一对数尺线图中,最有趣的是,进化线接近于直线,其斜率为负  $45^\circ$ 。这意味着

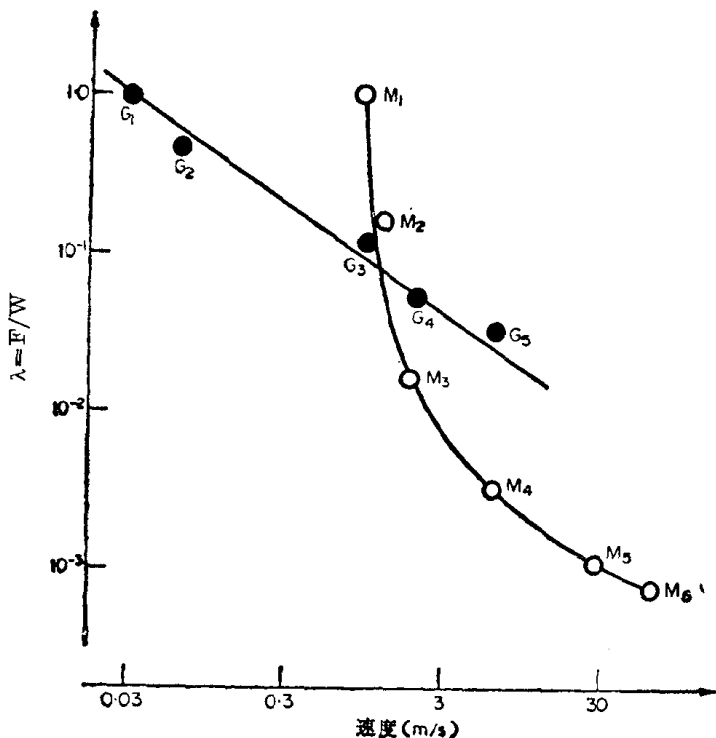


图 1.2 图 1.1 中的结果与达到的速度的关系曲线

$$\log \lambda = -1 \times \log S + \log C \quad (1.1)$$

式中  $S$  为移动速度, 而  $C$  为某个常数。因此, 此式可以表示为

$$\lambda S = C \quad (1.2)$$

但是,  $\lambda S$  为阻力乘以速度并除以重量, 即功率除以载重量, 因此这条直线表示, 进化线决定于几乎恒定不变的功率与重量之比。显然, 这是合理的, 因为功率/重量这一比值决定于包括人类在内的各种动物的相同生理过程。表示人类创造能力的曲线则不受这种限制, 因为我们的创造能力由于较成功地应用了科学原理和使用了纯生理物质以外的材料而已奏成效。

## § 1.2 简 史

前已指出, 人类所发明的车轮是最早的摩擦学用具之一, 但摩擦还以其他许多方式影响着文明人类的进步<sup>[2]</sup>。众所周知, 原始



时代为了钻孔或取火而制作的钻孔器就配有鹿角或骨头制成的轴承,陶轮和碾谷物用的石磨等显然也需要某种形式的轴承<sup>[37]</sup>。根据历史记载知道,公元前 3500 年就已使用了车轮,但值得指出,就是较晚近的非常进步的印加文明社会也从未发现车轮的原理。润滑剂也是大约从这一时期开始使用的,这个事实已由埃及的一所古墓所证实。古墓中的一辆战车,在其车轮轴承中仍保存有一些早先使用的动物脂肪润滑剂,引人兴趣的还有,这种润滑剂沾染着石英砂状的路土以及铝、铁、石灰的化合物。

埃及人在其不朽的建筑施工中还显示出,他们已清楚地懂得了摩擦学原理<sup>[4]</sup>。残存的浮雕像表明,他们曾用滚子和滑板来搬运重物。图 1.3 表示这种搬运方法的一例,图中有 172 个奴隶沿着木头轨道拖曳一台重约  $6 \times 10^5 N$  的大雕像。仔细观察可知,有一人(站在安放雕像的滑板上)将液体倒在跑道上,他也许就是最早的润滑工程师之一。我们如果假设每个奴隶大约拉  $800 N$ ,就可知道图中所示的摩擦系数为

$$\mu = \frac{172 \times 800}{6 \times 10^5} \approx 0.23$$

此值恰好约为我们所预期的木头滑块经润滑后的摩擦系数,因此我们可以推断,该图真实地记载了实际发生的情况。将奴隶故意这样排列,可能是因为画家不会画透视图的缘故。

1928 年,在罗马附近的尼米湖里发现了推力球轴承的碎片,其年代可能在公元 40 年前后。这一轴承如图 1.4 所示<sup>[5]</sup>。它也许是雕刻工场中用作支承雕像的,以便在雕刻过程中能回转自如。Leonardo da Vinci (1452~1519) 第一个对摩擦提出了科学的论断,在他以前,摩擦学的进展并无明显的迹象。他认识到,摩擦力与载荷成正比,而与名义接触面积无关。过了将近二百年,Amonton 于 1699 年也发表了这两条定律,这与 Leonardo da Vinci 毫无联系,一般认为这两条定律是他发现的。十八世纪由于人们愈来愈多地使用了新机器,摩擦学获得了很大的发展。约在 1780 年,Coulomb 提出了第三摩擦定律,即摩擦力与速度无关。