

〔英〕 D.F.摩 尔著

Principles
and

摩擦学原理和应用

Application
of
Tribology

机械工业出版社

摩 擦 学 原 理 和 应 用

〔英〕 D. F. 摩 尔 著

黄文治 谢振中 杨明安 译

黄文治 校



机 械 工 业 出 版 社

本书是珀格蒙(Pergamon)材料科学与工艺学国际丛书的第十四卷。内容分摩擦学原理和应用两个部分。第一部分共十一章,其中:第二章讨论表面织构的评定与测量方法;第三、四、五章叙述关于金属、弹性体和其它材料的摩擦原理;第六、七、八章研究流体动力润滑、边界润滑和弹性流体动力润滑理论;第九章讨论金属和弹性体的磨损机理;第十章概述固体、液体和气体中的内摩擦现象;第十一章介绍试验方法。第二部分共五章,分别讨论摩擦学原理在制造工艺、汽车、运输与行动、支承设计和其它方面的应用问题。

本书可作为机械工程和材料科学与工程专业的学生和研究生参考书,也可供从事摩擦学工作的工程技术和科研人员阅读。

International Series in Materials
Science and Technology, Volume 14.

Principles and Applications of Tribology

D. F. Moore

Pergamon International Library, 1975.

材料科学与工艺学国际丛书

第14卷

摩擦学原理和应用

[英] D. F. 摩尔 著

黄文治 谢振中 杨明安 译

黄文治 校

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 787×1092 1/16·印张 15 1/2·字数 378 千字
1982年8月北京第一版 1982年8月北京第一次印刷
印数 0,001—9,000·定价 1.60 元

统一书号: 15033·5208

前 言

摩擦学的定义是研究在相对运动中工程表面上的摩擦、润滑与磨损的科学及其有关的实践。近年来它已被广泛承认是一门广泛而又跨学科的研究领域。在确定表面摩擦的总的状态中,物理、化学、冶金学、材料科学、流变学、润滑学、弹性力学、粘弹性力学、弹性流体动力学、热力学和热传导等,都起着复杂而又相互影响的作用。曾经估计目前世界上的能源消耗,约有三分之一到二分之一最终以这种或那种的摩擦形式表现出来。因此,摩擦磨损对我们现代世界的重要性,是不能忽视的。

这本书试图以一单卷论及摩擦学的整个领域。有人认为这是一项不可能实现的工作,但还有一些人,包括作者在内,觉得今天的工科学生应该接受这一学科领域内一个较为简明而统一的训练。为了这一目的,把这本书的内容分成两个部分,分别概括地讨论摩擦学的原理和应用。这本书是按机械工程师的观点写出的,原理部分强调在进行各种应用的研究以前,应对学科内容有一根本的理解。

虽然整本书是按照一定的次序陈述的,但每一章在很大程度上是独立的和自成系统的,因此可以按不同的次序选用,以适应特定的教学计划。第一章涉及摩擦学的广大领域和在现代技术界中的应用范围。第二章专门研究表面织构的评定和测量方法。第三、四、五章分别介绍有关金属、弹性体和其它材料的摩擦的基本概念。在第六章中简要地阐述了流体动力润滑的原理,而边界润滑和弹性流体动力润滑的机理则分别在第七和第八章中作较为全面的研究。第九章对金属和弹性体中的磨损和磨粒磨损现象,作一个综合的论述。从第二章到第八章专门研究表面的相互作用,而在第十章中则对固体、液体和气体中的内摩擦,予以鉴别与解释。第十一章对在摩擦学研究工作中使用的实验方法,作了一个简略,但是根本的分析。其余五章讨论了一些特定的应用方面,包括制造工艺、汽车上的应用、运输、行动、支承设计和其它。

由于摩擦学的领域宽广,以致在一本篇幅有限的教科书中不可避免地要有一些删节,但希望这种删节的地方不是太多。最重要的是希望加深学生对摩擦学与整个机械化社会的关系的认识,以提高他对这一重要的工程科学新领域的兴趣。为了试图实现这些目标,在这本篇幅不算太多的教科书中,把摩擦学原理的基本知识与尽可能多的实例结合在一起讨论。

本雪文尼亚州立大学的迈耶(W. E. Meyer)教授、台而夫脱高等技术学校的齐美(H. C. A. Van Eldik Thieme)教授、和慕尼黑技术大学的赫斯孟(A. W. Hussmann)教授,以各种不同方式鼓励并提高作者在这一学科中不断工作的兴趣,作者对他们表示真诚的感谢。特别是对过去在慕尼黑技术大学工作的我的同事和密友杰耶(W. Geyer)博士,在过去的三年中,他的十分宝贵的热诚与支持,应特别予以感谢。斯旺西学院的霍普金斯(D. W. Hopkins)先生,作为本书的丛书编辑,审阅了原稿并提出了有益的意见,应特别受到感谢。最后,还应对沃伦(Geraldine Warren)女士出色的打字技术,和我的妻子米丽亚姆(Miriam)在准备原稿时的耐心与理解,表示感谢。

目 录

前 言

第一篇 原 理

第一章 引言 1

- 1.1 摩擦学的定义和领域 1
- 1.2 宏观的和微观的观点 2
- 1.3 内摩擦与外摩擦 2
- 1.4 干表面和润滑表面 3
- 1.5 应用的范围 3
- 1.6 摩擦学的任务 5

第二章 表面形貌 6

- 2.1 表面织构的测量 6
- 2.2 轮廓测量 7
- 2.3 绘图法 8
- 2.4 摄影测量 8
- 2.5 表面织构的深度 9
- 2.6 出流量计 10
- 2.7 表面摹印 11
- 2.8 统计学特性 12
- 2.9 数学表示法 14
- 2.10 参数选择 16
- 2.11 模拟的和理想的表面 18
- 2.12 随机性要求 19
- 2.13 表面间的真实接触 20

第三章 金属的摩擦 21

- 3.1 经典摩擦定律 21
- 3.2 一般的摩擦理论 21
- 3.3 金属中的弹性接触 22
- 3.4 弹塑性接触 24
- 3.5 摩擦的基本机理 25
- 3.6 焊合、剪切及犁削理论 25
- 3.7 连接点的生长 26
- 3.8 工作硬化 27
- 3.9 摩擦的犁削分量 28
- 3.10 摩擦的粘附分量 30
- 3.11 表面污染 31
- 3.12 金属转移 32
- 3.13 滑动摩擦中热的产生 32
- 3.14 滑动速度的影响 34

- 3.15 金属的硬化 36

- 3.16 真空条件 37

第四章 弹性体的摩擦 39

- 4.1 基本摩擦机理 39
- 4.2 粘附项 40
- 4.3 迟滞项 41
- 4.4 粘弹性 43
- 4.5 粘附理论 44
- 4.6 粘附是一个接触问题 48
- 4.7 迟滞摩擦理论 49
- 4.8 广义的迟滞摩擦系数 51
- 4.9 平均压力效应 52
- 4.10 宏观及微观迟滞 52
- 4.11 粘附项与迟滞项的分离 53
- 4.12 威廉-兰特-福来变换 54

第五章 各种材料的摩擦 56

- 5.1 层状固体的摩擦 56
- 5.2 特氟隆 (PTFE) 的摩擦 59
- 5.3 金刚石的摩擦和磨损 61
- 5.4 冰的粘附 63
- 5.5 脆性固体的摩擦 64
- 5.6 木材的摩擦 64
- 5.7 纱和纤维的摩擦 67

第六章 流体动力润滑 68

- 6.1 简史 68
- 6.2 广义的雷诺方程 68
- 6.3 速度分布 70
- 6.4 承载机理 71
- 6.5 挤压膜 73
- 6.6 流体静压润滑 80
- 6.7 气穴作用 81
- 6.8 其他 84

第七章 边界润滑 86

- 7.1 前言 86
- 7.2 金属的边界润滑 87
- 7.3 弹性体的边界润滑 88
- 7.4 边界润滑剂的分子结构 89
- 7.5 金属膜的一般性能 92

7.6 润滑剂的吸附作用	94	11.6 冲击或动态试验机	151
7.7 润湿性和接触角	96	11.7 相交圆柱式装置	152
7.8 固体润滑剂	97	11.8 四球滚动摩擦机	152
7.9 粘滑现象	98	11.9 干涉测量仪器	153
第八章 弹性流体动力润滑	100	11.10 电子衍射和显微镜	155
8.1 前言	100	11.11 其他	156
8.2 一般的迭代程序	100		
8.3 基本参数	102	第二篇 应 用	
8.4 法向接近	103	第十二章 制造工艺	158
8.5 相对滑动	106	12.1 金属的机械加工	158
8.6 压力尖峰	108	12.2 金属切削中的摩擦	159
8.7 弹性流体动力因数	108	12.3 热量的产生	161
8.8 宏观弹性流体动力学	110	12.4 刀具磨损	164
8.9 弹性流体动力学和迟滞	112	12.5 润滑剂的作用	165
8.10 结论	113	12.6 机械加工工艺的分类	166
第九章 磨损和磨粒磨损	114	12.7 摩擦焊	169
9.1 金属的磨损机理	114	12.8 挤压工艺	171
9.2 清洁金属的磨损	116	12.9 其他各种工艺	173
9.3 自由流动的磨屑	117	第十三章 汽车上的应用	174
9.4 弹性体的磨损机理	119	13.1 充气轮胎的性能	174
9.5 磨损测量	119	13.2 制动机理	182
9.6 本征的和成花纹的磨粒磨损	120	13.3 发动机的摩擦	188
9.7 磨粒磨损	121	13.4 其他各种应用	190
9.8 疲劳磨损	124	第十四章 运输与行动	191
9.9 卷筒形成引起的磨损	125	14.1 道路和跑道上的表面纹理	191
9.10 速度和温度的影响	127	14.2 轨-轮的粘附	196
9.11 结语	130	14.3 地面行动	202
第十章 内摩擦	131	14.4 其他运输课题	207
10.1 物质的分子结构	131	第十五章 支承设计	211
10.2 固体的内摩擦	132	15.1 滑块支承	211
10.3 测定内摩擦的方法	132	15.2 径向轴承	216
10.4 费兹格拉德(Fitzgerald)内摩擦仪	135	15.3 箔带支承	222
10.5 内摩擦的主要理论	136	15.4 滚动轴承	223
10.6 液体中的内摩擦: 粘度	139	15.5 其他	224
10.7 粘度测定	141	第十六章 其他方面的应用	227
10.8 紊流	143	16.1 柔性密封	227
10.9 气体中的内摩擦	145	16.2 梁的分层阻尼	228
第十一章 实验方法	146	16.3 摩擦阻尼	230
11.1 旋转圆盘式装置	146	16.4 人和动物关节的润滑	232
11.2 外鼓和内鼓式设备	147	16.5 其他	236
11.3 平带式装置	149	附表	238
11.4 磨损和磨粒磨损试验机	149	参考文献	240
11.5 挤压膜试验装置	150		

第一篇 原 理

第一章 引 言

1.1 摩擦学的定义和领域

摩擦学(Tribology)的定义是研究在相对运动中相互作用着的表面的科学和技术,它的语源希腊字“tribos”是摩擦的意思。它研究工程表面的摩擦、润滑和磨损,目的是详细地了解表面的相互作用,而后在特定的应用中提出改进办法。事实上摩擦学的领域比这一定义所指的要广泛得多。原国际性杂志“磨损”的编辑所罗门博士(Dr. Solomon)的看法是:摩擦学意味着是在不同人民之间通过理智达到灵活协作的一种心情和技术。它是应用运算分析于具有巨大经济意义的问题的一种技术,即包括从宇宙飞船到家用器具的技术装备的可靠性、维护和磨损。”摩擦学家的工作确实是属于跨学科的,包含的学科有物理、化学、力学、热力学和材料科学,并包括一个涉及有关表面间相对运动的机械设计、可靠性和工作性能的、庞大复杂并交缠在一起的领域。

估计世界上目前的能源消耗,约有三分之一是以这种或那种摩擦形式出现的。在今天的机械化社会里,这是潜在能量的一个惊人损失。不难理解,研究摩擦学的目的是在有关表面摩擦技术的各个方面减小或消除不必要的浪费。滑动表面和滚动表面,确是代表了我们的技术社会中大量提高效能的关键。

或许会问:摩擦表面使西方世界的经济损失有多大?还没有一个人曾提供过明确的数字,但是从英国的数字中可能得出一个估计。据英国摩擦学委员会1965年的一份报告说,单单在联合王国,磨损的零件就造成了每年约五亿英镑的损失,这是由于企业对相互运动的表面上所发生的情况缺乏了解所致。问题涉及如此庞大的数字,因此英国、苏联和几个西欧国家的企业和政府,以及美国的个别公司,都已制定了摩擦学的研究规划。

从第二次世界大战以来,技术上的高速进步,要求大量开展对摩擦表面的研究工作。明显的措施集中于学习如何加油、擦油脂、或是用别的方法来润滑。传统的润滑技术涉及:

- (a) 按照标准规范评价润滑剂;
- (b) 配制润滑剂以满足新的情况,或
- (c) 确定润滑剂怎样适应冷、热、核辐射和其它环境,以及它对润滑材料的反应。

大量与摩擦表面有关的技术,仍陷于上述传统的润滑技术之中。确实,1950年以前大多数机械设备主要还是用矿物油和肥皂增稠的矿物油油脂来润滑,而对给定用途的润滑剂的选择,大多仍是凭经验的。可是现在合成材料在润滑中已获得日渐增多的使用,而大量的研究和发展工作已有可能设计润滑剂来满足不寻常的或日益严峻的要求。复杂的系统如核潜艇、超音速飞机或阿波罗宇宙飞船,要求解决一些关键的润滑问题。这样,不断发展的技术已促使我们必须对与摩擦表面有关的现象的每个方面加以研究,而新的学科——摩擦学——在我们的

机械化环境中,起着越来越大的作用。

研究摩擦学的一个重要目的是控制摩擦力的大小,按照我们的需要调节到最小(如在机器中),或最大(譬如说防滑表面)。可是,必须强调,只有对在温度、滑动速度、润滑、表面光洁度和材料性质等所有条件下的摩擦过程有基本了解之后,这个目的才能实现。这本书在编写中以最简单的方法解释摩擦学的基本原理,并用种种日常应用的事例来说明其基本概念。

1.2 宏观的和微观的观点

两个作相对切向运动的物体间所产生的摩擦力,按读者的兴趣与倾向,可以用宏观的或微观的机理来研究。微观的或分子的机理也可以说是解释原因的,因为它相当详尽地、并在各种各样的实验条件下,对滑动副表层分子之间的相互作用进行研究,用以确定摩擦机理的真正起因。这种方法显然对物理学家和物理化学家更有吸引力。另一方面,宏观的机理常认为是重结果的,它以模拟原始摩擦现象为基础,归纳出简单而合理的模型。对于把重点放在应用上,而不放在原因基础上的简化处理方法,工程师更感兴趣。

赞扬任何一种方法的优点而贬低另一种,不是本书的目的。实际上,两种机理应配合起来进行研究,适当地相互补充,可以形成对摩擦学原理的全面理解。这本书就是本着这样一个目的写成的。有趣的是,被普遍接受的关于金属摩擦的焊接-剪切-犁削的理论,可划归宏观机理,因为它没有提到表层分子的活动。另一方面关于弹性体摩擦的多数近代理论,把粘附现象说成是一种热态活化的分子动力交换机理,它采用的是微观的观点。

撇开事态的规模来说,宏观和微观方法之间的本质差异是连续体和真实性之间的区别。在摩擦分界面上,每一表层分子都扩散到比原子尺寸大的体积里,并因热能而不断振动和扭曲。这些表层分子相互交换位置,一个表面时而从其配合表面上俘获、时而失去几个表层分子,这就是引起粘附摩擦的真实情况。可是在一定的表面积内,当这种分子活动有关的自由度数量过大,甚至连现代的计算机也难于掌握,因此我们在下列两种方法中,任选一种:

- a) 可以用统计的方法计算分子运动和力的中间值或平均值,或
- b) 可以完全忽略分子的活动,而把两个滑动材料看作连续体,它具有与实验中所观察到的相同的一般性质。

微观的方法在说明表面的相互作用时是比较准确的,但在应用上则严重地受到限制,而宏观的方法则相反。在模拟连续体的状态中,机械模型(包括弹簧和阻尼器的不同组合)使用得非常广泛,但必须认识到,它们只是预示粘弹性物体中动态特性的一种工具。一般可以说摩擦过程的微观知识,对正确建立实际应用的宏观模型是有不可估量的价值的。

1.3 内摩擦与外摩擦

现在来明确物体的内摩擦和外摩擦间的区别。由于明显的理由,通常可把表面的相互作用划入总称为外摩擦的一类。反之,发生在材料物体内部的分子动力现象和大量的能量消耗,则分别为内摩擦的原因和结果。物理学家把表面定义为一个厚度为零的轮廓,当然这样一个表面实际上是不存在的。因此我们必须修正这一定义,让一个表面占有一厚度无限小的薄层,这可能要用埃($\text{\AA}$)为单位来测量。“表面”摩擦力的根源是前面所说的分子动能互换,它就发

生在两个摩擦件上都可测到的这种薄层里。这个合成活动表层的实际尺寸是接近于零的。

固体中的内摩擦是整体分子强迫运动的直接后果, 这些分子在平衡状态下间隔紧密, 彼此之间显示出一种强烈的相互吸引或排斥作用(见第十章)。这种运动引起物体材料的内部剪切, 并导致内部发热。通常用阻尼能量、损失角正切、或正切模数来表示内摩擦。就液体和气体来说, 内摩擦表现为绝对粘度或运动粘度。可以用充气轮胎作为内摩擦和外摩擦的最明显的实例。在正常的滚动中, 胎面与路面进入或脱离接触时发生连续的弯曲和复原, 使轮胎的胎身或胎壳温度增高。这是内摩擦产生的机理。同时, 在滚动、制动、驱动和转弯中, 胎面橡胶在不平的路面上有局部的“蠕动”, 引起控制和驾驶车辆的外摩擦分量。在这个例子里, 内摩擦和外摩擦的相对消长, 在很大程度上决定于车辆的工作方式和实验条件。

1.4 干表面和润滑表面

从设计的观点看, 对一已知应用场合的最重要的判别标准, 是在滑动分界面上呈现干的还是润滑的状态。在许多应用场合, 例如在机器中, 只呈现一种状态(通常是润滑状态), 虽然可能存在几种不同的润滑方式。可是在少数情况下, 分界面究竟是干的还是湿的, 事前无法知道, 显然对任何设计这是难于进行下去的。这种现象的最普通的例子仍是充气轮胎。它最好是处于干摩擦状态, 这样可以保证轮胎与道路之间的接触面积最大, 使摩擦的粘附^①分量达到最大值, 这是在光滑的外胎面和光滑的路面上实现的。可是, 这样一种组合在湿的情况下将产生一灾难性的低摩擦系数。在后一种情况下, 如果在胎面上适当刻些花纹和使路面结构合理些, 就能提供最佳的状态, 虽然这在干燥的气候下摩擦系数会降低一些。

润滑的状态可以划分为: 流体动力润滑、边界润滑和弹性流体动力润滑。现今使用的轴承(径向、滑动、推力和薄膜轴承), 是完全流体动力润滑状态的最好例子, 其滑动表面完全被界面间的润滑油膜隔开。边界或混合润滑是在运动表面之间存在流体动力润滑与固体接触的一种混合状态。这种状态通常被认为, 只有在一既定的产品设计中, 当流体动力润滑失效时才会出现。例如径向滑动轴承在给定载荷和速度下设计成完全流体动力润滑的, 但是速度下降或载荷增大就可能引起在轴颈和轴承表面间发生部分固体接触和部分流体动力润滑状态。这种边界润滑状态是不稳定的, 正常情况下既可恢复到完全液体动力润滑, 也可演变成表面完全咬住。当薄的润滑油膜中的压力达到能使润滑剂的边界面发生弹性变形时, 则滑动界面上的润滑状态属于弹性流体动力润滑。目前已普遍认为在许多应用装置中存在弹性流体动力的接触状态, 而过去却一直不确切地认为: 不是属于流体动力润滑, 就是属于边界润滑状态, 例如啮合轮齿的接触, 或滚珠轴承在座环中的接触, 或在加工过的转轴上的唇形密封等等。固体润滑剂处于干的和润滑状态之间的中间状态, 虽然接触界面在正常状态下是干的, 但固体润滑材料在起动时显得好象是湿润过了的。这是在特定的载荷和滑动条件下、固体润滑剂涂层表面上发生的一种物理-化学相互作用的结果, 这样就产生一种相当于润滑的作用。

1.5 应用的范围

把刚性-刚性、刚性-挠性和挠性-挠性表面对偶区别开来, 是划分摩擦学应用的一种有效

^① 摩擦包含两个主要分量, 粘附和变形, 在第三章中阐述。

表 1.1 制造工艺中的摩擦过程

摩 擦 分 类	制 造 工 艺	有 关 的 工 业
金属对金属 (刚性-刚性) 表面对偶 ^(a)	自由锻 铰 孔 冲 压 剪 切 磨 削 拉 延 铣 削 挤 压 精 研 成形加工 旋 压 旋 锻	线材制造 钢铁制造 金属加工 工具设计 机械零件 机器设计
塑料 ^(b) 对金属 (刚性-挠性) 表面对偶 ^(a)	喷射铸造 冷 加 工 挤压成形 热 成 形 拉 延 真空成形 敷 镀 层 压	轮胎制造 塑料工业 建筑结构 电气绝缘 制 鞋 铺面材料 固体润滑剂
纤维对纤维 (挠性-挠性) 对偶	纺 纱 编织等等 梳 毛	纺织工业 塑 料 针 织 品 电 缆 制造

(a) 包括垂直方向运动和切线方向运动。

(b) 包括弹性体材料、固体润滑剂和橡胶。

注：所有操作可以用，也可以不用润滑剂。

方法，如表 1.1 所示。刚性-刚性对偶是最普通的型式，通常的应用是金属对金属的摩擦。表 1.1 说明摩擦学原理应用于制造工艺的情况，中间一栏列出特定的制造工艺，而有关的生产企业则列于右边的一栏。刚性-挠性类通常包括弹性体或塑性体在刚性基体表面上的摩擦，而纤维对纤维的摩擦构成挠性-挠性表面对偶一类。从表 1.1 得到的总的结论是，在制造工艺和有关领域中，摩擦学的可能应用范围是大得惊人的，而直接涉及的主要工业种类也很多。

整个工业中典型的金属摩擦的应用如下：

- (a) 往复式机械的润滑；
- (b) 制造作业中的工具设计；
- (c) 拉丝、模具润滑和挤压；
- (d) 轮齿和滚动轴承中的接触应力；
- (e) 钢铁的机械加工。

弹性体-刚性表面对偶的最普通的型式是：

- (a) 汽车轮胎的制动滑行与侧滑状态；
- (b) 机器中弹性密封和 O 形圈的动态泄漏；
- (c) 在粗糙的皮带轮上，柔性皮带的弹性滑动；
- (d) 风挡刮水板和汽车盘式离合器的工作性能；
- (e) 机械加工中固体润滑剂的使用；
- (f) 建筑工业中分层结构梁的阻尼。

纤维对纤维表面对偶在纺织工业和电缆包皮加工中有其特殊的应用，如表 1.1 所示。一般，加工过程的最佳化可以说在很大程度上决定于对摩擦学原理的了解和应用。

摩擦学的其它重要应用场合是在汽车、运输和空间工业中,这些将在本书的第二部分中详述。内燃机、气垫车、防滑制动系统、充气 and 钢缘轮胎的设计,以及流体动力润滑轴承的最终选择,就是众所周知的实例。空间研究工作,在接近真空条件和低温下对工程材料提出了一种特殊的摩擦(润滑)性能要求。在这样一个空气稀薄的环境中,表面敷层和润滑剂容易脱附或蒸发,使本应润滑的表面暴露出来而发生冷焊合,这是导致破坏后果的真正危险。在宇宙空间里特别需要充分润滑,但由于离子辐射的持续时间和照射强度总在变化,使问题更加复杂化了。潜水船艇和其它水下机械设备(如轴承和螺旋桨轴),其运动部件的润滑是需要考虑极端环境条件的另一个领域。这方面的特有问题是高压、腐蚀和润滑油稀释,特别是要求有效的防漏密封。

摩擦学的一种更有意义和有益于人类的应用,是在生物力学方面,特别是关于人体关节的润滑方面。当滑膜的分泌液在人体关节上不再能充分地润滑运动表面时,不用说就开始患关节炎了。正常情况下,滑膜液在承载表面(软骨组织)间的关节中能充分增稠,使关节能做灵活的相对运动,而关节炎病人则不能提供这种增稠作用。摩擦学家的一个有希望的办法应是在有毛病的关节上注射适当的聚合物,以恢复滑膜液的增稠能力。

1.6 摩擦学的任务

生产技术已经推进到远远超过这一时代,几乎是可以随心所欲地使用润滑剂能以对付今天这个复杂世界里滑动表面的问题。只要把有关相互作用的表面的全部知识,用于一个多元系统中易出故障的组件上,就将满意地解决其中的许多问题。在本书的各章节中确已列述了摩擦学的基本理论,但实际上还是留下不少问题没有解决。我们怀疑为什么海豚能在水中行动得比理论预示的更快。是不是因为海豚在它的皮肤表面上形成了完全的层流,如果是这样,紊流是怎样避免的?已经证明采用某些聚合物和添加剂能使管道和液压系统减少阻力,但理论又不能解释这是什么原因。这种添加剂在消防和鱼雷的设计中得到有效的应用(在消防设备里使水龙的射口有更大的发射压力,因而一既定尺寸的水管能有更长的水柱和更大的水流)。有什么办法能使汽车轮胎在湿路上减少侧滑,或者在高速火车加速时能使驱动轮消除打滑?我们怎样能使僵挺的臂腿关节恢复功能,又怎样能设计出最佳的假肢器官?作为摩擦学家,我们能做些什么以消除制造过程中不必要的废物?作为工程师,我们能否设计出经得起空间酷烈气候的润滑剂和轴承?我们对废弃的工业油、溶剂、切削液或冷却剂,是否已找到了满意的利用或处理办法,以防止水源的进一步污染?

摩擦学家的任务确实重大,而实际上无穷无尽的应用要求,说明这一跨学科的和相对新的工程科学领域的重要性。自然,从1886年雷诺的创造性工作开始,润滑的原理已被广泛理解,但是谁曾预言过把摩擦、润滑和磨损综合成为一门学科,应用到我们现代的机械化世界的全部意义?确实,我们时代的一个最紧迫的问题——环境污染,已经证明在工业和技术的所有方面,需要(至少部分地)应用摩擦学原理和消除废物废料来解决。

第二章 表面形貌

在显微镜下观察时,工程表面无非是平滑的。它们由许多个显然不规则的尖峰和凹谷所组成。在一已知的应用场合,除了要知道那里是干的还是润滑的状态以外,决定摩擦特性最重要的参数是表面的织构(surface texture)。因此在研究实际表面的相互作用以前,稍为详细地考察一下那些滑动表面的织构特征,是可取的。表面织构与摩擦力两者,从它们在特定应用中分别代表原因和结果这一意义来说,可以认为是不可分的。为了明确和简化起见,在这本书中微凸体(asperity)一词用于表示表面织构的独立的单体,而宏观粗糙度(macro-roughness)一词将用于表示这些单体的组合。一个典型微凸体(特别是在靠近它的尖峰处)的几何形状细节,将称为微观粗糙度(micro-roughness),当需要更精细的数量级时,采用分子粗糙度(molecular-roughness)这一词。在大多数的工程应用中,宏观粗糙度常用毫米为单位来测定,而微观粗糙度则用微米为单位,分子粗糙度最好以埃 $\ominus$ 为单位来表示。图 2.1 列出一个典型的加工过的表面。为了便于图示,纵坐标上的放大倍数是格外地加大的了。此后将会明白,当另一个表面与之接触时,这个轮廓上的尖峰与摩擦阻力的产生有关系,微凸体间的空穴,在润滑情况下起着润滑剂储存器的作用。

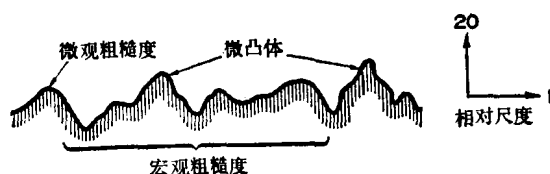


图 2.1 表面织构的术语

2.1 表面织构的测量

现在,必须把测定表面织构的宏观特性和微观特性的方法加以区别,这主要视应用的场合而定。对大多数的工程和加工表面,宏观的方法已能满足要求,这些方法本质上几乎全是机械性质的。表 2.1 列出以宏观手段为基础的八项通用的方法。另一方面,物理学家和物理化学家需要表面的精微细节,往往是分子粗糙度的细节。这些细节通常用光学的方法^[3,4]获得,较常用的是干涉带图形、低能电子衍射,分子束法,和场致发射及场离子显微技术。

宏观的方法可概括地分为两类,看具体需要的是表面的整个轮廓还是它的一部分而定。描绘和测量整个轮廓的两种主要方法是轮廓测量法和绘图法,这将在下面两节中陈述。反之,当只需要整个轮廓的一部分时,这通常是指微凸体间的平均空穴宽度,或微凸体的锐度。

$\ominus$ $1 \text{ \AA}(\text{埃}) = 10^{-8} \text{ cm}$ 。

表 2.1 宏观的表面结构的测量^[2]

测量方法	测定的参数	详细说明
1. 描图针	直接获得轮廓	当描图针在表面上匀速移动时, 描图针的垂直运动被放大, 并予以记录
2. 横截面切割	间接获得轮廓	通过表面, 切成许多个垂直、倾斜、平行的截面, 注意防止边缘弄碎
3. 绘图法	间接获得轮廓	把一系列平行截面重迭起来, 得到表面的图形
4. 填充空穴	平均纹理深度	把已知体积的砂或油脂撒在表面上, 并弄平, 复盖面积给出结构深度的大致量度
5. 表面摹印	平均空穴间隔	把一张纸均匀地压在预先涂了染料的表面上, 获得微凸体密度的摹印, 而后计算印出的点数
6. 水力流量计	空穴的平均水力半径	把周缘有橡胶环的无底容器和表面结构间的泄流量予以标定, 用以指示结构的平均水力半径
7. 表面结构仪	轮廓的长度	随着表面轮廓线密集分布的探针、把不能伸长的软线压在宏观的表面结构上
8. 摄影测量	三维图象	从邻近位置上垂直拍摄的宏观结构的两张照片, 提供立体照相的充分资料, 用比较仪进行测量

2.2 轮廓测量

测定表面结构全部特征最简单、最方便的方法是使用一种轮廓测量仪, 如图 2.2 所示。这种仪器包括一个平台, 它在特氟隆 (teflon) 制的滑行装置上对底架作水平运动。底架是由三个校平螺钉支承在被测表面上的。平台由一可逆电动机通过齿条、齿轮副可向任一方向驱动, 速度为均速每秒 5 毫米。一个铝块装在两根平行的板簧上, 而板簧的另一端与可动平台连接, 使铝块对平台能作无摩擦的上下运动。在铝块低的一端装一倾斜的针头, 当平台运动时它随被测表面的轮廓线移动, 而在铝块的上端, 竖直地装了一根薄的挠性接杆, 后者接到一线性可变差示变压器的铁心上。一个电动机的换向开关和变压器的稳压电源组成一单元装置如图所示。

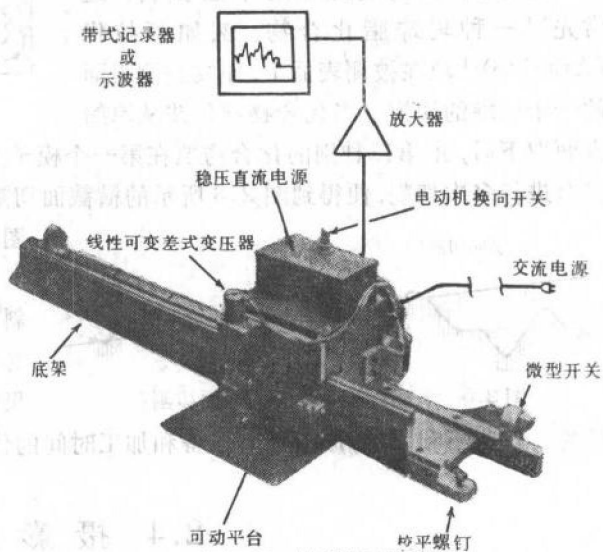


图 2.2 轮廓测量仪

把铁心位置变动所引起的变压器输出, 用作一台示波器的输入。这样轮廓测量在垂直方向上, 几乎任何程度的灵敏度或放大率都能实现, 但为了获得更高的灵敏度, 必须装置一滤波网络, 以消除低频漂移, 并使波形图留在记录纸上。调整校平螺钉使平台上的圆形气泡处于中

心位置,用以校平底架。针头的最佳倾角和锐度,必须通过多次反复试验来确定,使之既不粘附而又能真实地再现表面的轮廓。对十分尖锐的表面织构,宜用一空心针,并有一微小泄流通过其内腔,给针尖以部分支承力并消除粘附现象(图 2.2 中未表示)。

用这种轮廓测量仪所能得到的精确度,对大多数工程上的应用是足够的。在各种表面上所测得的轮廓范例,将在本章后面列出。轮廓测量法的缺点是所描绘的轮廓通常只代表一随机三维表面在一个线性方向上的行程。下节叙述的绘图法克服了这一存在问题。在脆性表面上使用轮廓测量仪时,应注意在针尖行进中不要弄破微凸体的边缘。

2.3 绘 图 法

再研究一下图 2.1 中的随机轮廓图。设想有一系列平行的切割面与这个图形相交并限定

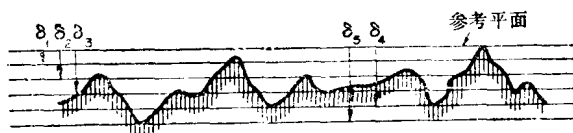


图 2.3 表面织构中平行截面的切割

这一织构的轮廓面积,而每一次的平面切割都位于一参考平面下的某一特定距离处,这一参考平面则恰好接触最高微凸体的尖峰,如图 2.3 所示。

然后把每次平面切割所横切的织构的截面积,绘成等高线图,如图 2.4 中所示。为了获得等高线图,并不全都需要作二维的断面图(如图 2.3 所示)。确实,图 2.3 中的断面图只是为了说明作等高线图的方法,而不是一个必要步骤。等高线图有明显的优点,它用二维来表示一个三维的图象,而这一点用图 2.1 和 2.3 中的轮廓图是不能实现的。



图 2.4 横截面面积的等高线图

事实上,等高线图可用下法获得,通常先用一种玛瑞脂化合物,例如阿拉代(Araldite)^[4]填在被测表面上,作成被测表面的一个三维的阴模。当化合物固化并从原始表面取下后,用第二种别的化合物填在第一个模子内,让它在这一位置上固化。此后,对这种组合进行多次切割,便得到图 2.3 所示的横截面切割。许多次不同深度切割的结果,最后产生

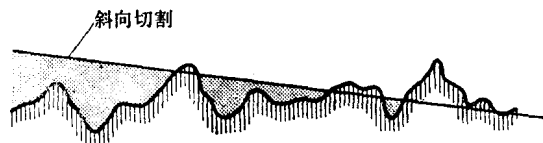


图 2.5 表面织构中斜向的截面切割

图 2.4 中的等高线图。

平行切割法是十分麻烦的,有时用一个斜向的切割来代替(图 2.5)。此时切割长度必须大为加长以期产生与平行切割相同的结果,而对所形成的断面进行整理显然是更困难的。

这些不利因素,应与节省准备和加工时间的优点联系起来考虑。

2.4 摄影测量

仿制表面织构整个特征的第三种方法是摄影法。两个表面织构的图象或照相,是从一距离很近的与表面平行的平面中的两点上拍摄的。通常摄影机竖直向下——这称为垂直摄影法,别的一般称为斜向摄影法。

这个方法是以前物体的顶视和底视图象间视差的变化, 与其垂直长度相联系为基础的。如果我们设想一下从正上方拍摄的一枝铅笔的照片, 它是一个圆。现在设想第二张照片, 它是在从第一位置水平地向一边移动一距离 b 的位置上拍摄的, 铅笔顶端表观的横向移动, 超过它底端表观的移动, 我们现在除了看到铅笔的顶端以外, 还能看到它的侧面。令 h 表示摄影机镜头与铅笔顶端间的距离, Δh 表示铅笔的垂直高度。若 p 为第一次到第二次照相所发生的视差或铅笔顶端表观的横向移动距离, 则可以简单地证明:

$$p/b = f/h$$

式中 f 为镜头和底片之间的距离。研究铅笔的底端, 设视差为 $(p - \Delta p)$, 则

$$\frac{p - \Delta p}{b} = \frac{f}{(h + \Delta h)}$$

把这两个公式相减, 得关系式

$$\Delta h = (h^2/bf) \Delta p \quad (2.1)$$

公式清楚地表明, 铅笔的高度是可以用它两端视差的变化来表示的。公式(2.1)成为摄影测量法的基础。

这种立体重迭照片可用特殊设计的摄影机拍摄, 它用一个单镜头使之在每两次摄影中横向移动上述距离 b 。当这种成对拍摄的照片装在一比较仪中时^[5], 一个表面的图象看起来象是浮雕了。表面上任何两点之间的视差变化 Δp , 可用一视差杆来测定, 它由一导架连同两块滑动的玻璃标线板构成, 每一标线板对应一张照片并各有一蚀刻的参考点。比较仪允许两张照片对应于两块标线板作相对运动, 这样表面的左边照片上的任一点可以移到左边参考点之下。然后用测微器螺钉调整标线板之间的水平距离, 直到两参考点融合在一起, 并聚集在浮雕视象表面上的一点为止。移动照片使表面上相邻的一点进入左边参考点之下, 在三维图象中使两点融合在一起所需的测微器读数的变化, 便是 Δp 的量度。根据公式(2.1), 这又给出表面中两点的相对高度 Δh 。如需观察大量的立体重迭照片, 摄影测量法可能是很麻烦的, 但现在可以用计算机把视差读数转变成穿孔带, 并把结果绘成曲线。

2.5 表面织构的深度

前几节中陈述的轮廓测量法、绘图法和摄影测量法, 都涉及表面粗糙度的整个轮廓, 通常把结果加以放大以便后来使用。现在的问题是: 已经仿制了表面的粗糙度后, 对这些断面图、等高线图或照像, 将如何处理? 在摩擦学的研究工作中, 所以需要了解一个表面粗糙度的几何图形, 只是因为它对以后的摩擦、润滑或磨损性能, 有决定性的影响。因此, 只对摩擦性能有兴趣的工程师, 主要关心微凸体形状和锐度的细节, 而液压工程师主要关心微凸体间的空穴间隔, 这些空穴在润滑情况下起局部储存器的作用。在表面织构的测量中, 必须区分两种不同的方法:

(a) 在第一种情况下, 表面的整个轮廓或几何形状, 通常仿制成放大的形式, 而与某一应用有关的一些特征, 是后来从仿制图形中选取的;

(b) 一种比较简单但也许不太精确的方法, 是在一既定的表面织构上只直接测出与某一应用有关的那些几何特征。

按照第二种方法, 表面织构的三种最重要的特征可以用织构深度法、出流量计和表面摹印

法测出。织构深度法按下列关系式给出空穴容积的一个平均数值:

$$\text{织构深度 } \varepsilon = \text{空穴总容积} / \text{复盖的表面积} \quad (2.2)$$

估算 ε 的常用方法是在被测表面上撒布已知体积的细砂^[6] 或油脂^[7]、直到多数微凸体的顶部刚好露出为止,而后测量所覆盖的面积。当然,覆盖某一圆的或长方形的表面积比较简便。在许多国家中,这种方法广泛用于估算道路和跑道的织构深度, ε 的一典型平均值为 1 毫米。

织构深度法使用起来虽然简单,但用于较精细的表面时其精确度就大为降低。例如对于机加工面,由于精度关系完全不能用这种方法,即使在道路上正常使用时,由于湿度、可压实性和操作人员的“感觉”,这一方法就其整体而论也会引起误差。下一节将讨论一种更精确的测定有效织构深度的方法。

2.6 出 流 量 计

出流量计是一种精确地测定微凸体间有效空穴容积的水力学方法。这种出流量计的最简

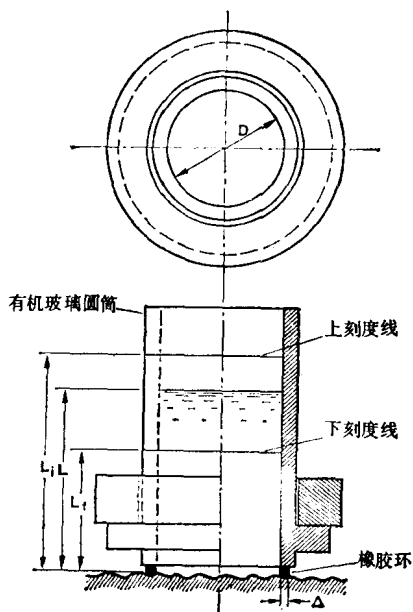


图 2.6 出流量计的两个视图

单形式^[8]是由一透明而两端开口的圆筒,和一个方形截面的薄的氯丁橡胶或橡胶环粘接在它的一端所构成。这个设备竖直地压置在被试的表面上,如图 2.6 中所示。用钢环在圆周上对橡胶环施加一规定载荷,使之压紧在表面的织构上。圆筒用水装满,通过观察(用一停表)容器内水平面从上刻度线下降到下刻度线所需的时间,测出从橡胶环和表面轮廓间流出一定水量的时间。根据这种仪器的创制原理^[8],控制流出量速度的表面织构的重要几何参数,是橡胶环和织构槽(即表面空穴)之间所形成的水道的平均水力半径(MHR)。对表面上一典型的平均空穴而言,平均水力半径的定义为水流面积对湿面周长之比,并用下式表示:

$$\text{MHR} = K_1 (\mu / t \sqrt{N'})^{\frac{1}{4}} \quad (2.3)$$

式中 μ 为水的绝对粘度, t 为流出时间(或容器内水平面下降 $(L_1 - L_2)$ 距离的时间), N' 为表面密度或表面单位面积上的微凸体数 $\ominus$, K_1 为仪器的常数。用砂或油脂求得的表面织构深度,与用液体求得的 MHR 之间的关系式^[9]如下:

$$\varepsilon / \text{MHR} = \sqrt{(N') P} \quad (2.4)$$

式中 P 为织构中一个槽或空穴的平均周长, $\sqrt{N'}$ 为线性密度或断面单位长度上的微凸体数。公式(2.4)的右侧项大于 1, 因而 ε 稍稍大于 MHR。在图 2.7 中比较了用砂和水力两种方法测出的空穴间隔,结果也是明显的。由织构深度法表示的空穴容积,比用出流量计测出的要大得多,原因是在后一情况下,在各个表面微凸体附近的橡胶环被压皱了。这种压皱效应随载荷的增加而加大,如图 2.7 中所示,而这一特性的一个最重要的应用是用它来区分有尖锐微凸体的织构和有平坦微凸体的织构。图 2.8 清楚地表明, MHR(或织构深度)随载荷增加的下降

$\ominus$ 第 2.7 节说明在一既定实例中 N' 是怎样估算的。

率,在有平坦微凸体的织构中,比图 2.7 列出的尖锐微凸体的实际上低些,这是由于在平坦微凸体上压皱的程度降低了的缘故。

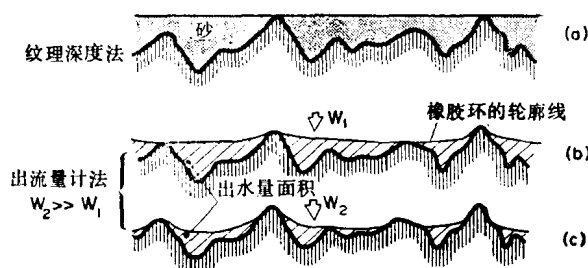


图 2.7 用砂和水力法测得的出水量面积或空穴间隔的比较

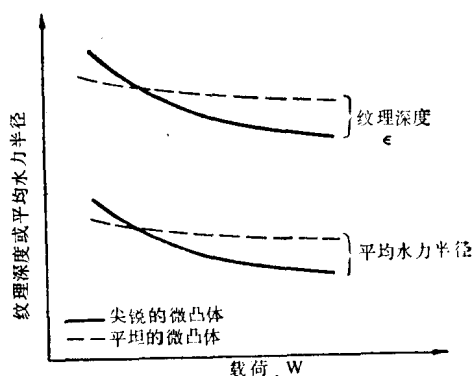


图 2.8 压皱效应对表面织构深度和 MHR 的影响

图 2.7 中叙述的那种简单的出流量计,对有较大粗糙度的表面是理想的, ε 可能在 0.2~1 毫米的范围以内。更精细的粗糙度,例如加工过的金属表面上的粗糙度,可用一以空气而不是以水为工作介质的出流量计来测定。这种装置的示意图列于图 2.9 中。用适当的管道、阀和压力表,把压缩空气源接到一台类似前面图 2.6 中列出的那种水力型出流量计上。这种出流量计的上端是封闭的,容器下边橡胶环的相对硬度要适当地增大,因为表面织构的粗糙度和工作介质的粘度都降低了。这种设备的操作方法,是按正常方式,对橡胶环施加一已知的周向重力,并同时观察通过旋转式流量计的气流的速度和出流量计内部所产生的空气压力。用下式求出织构的 MHR:

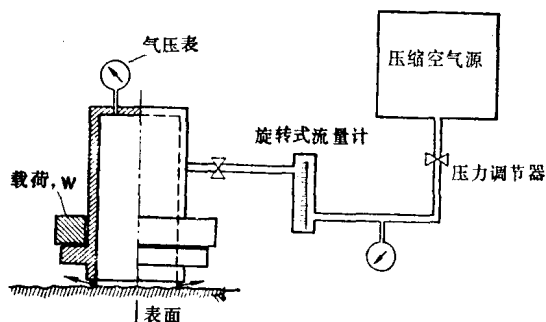


图 2.9 用于较精细表面的使用空气的出流量计

$$\text{MHR} = K_2 (Q/N\Delta p)^{\frac{1}{4}}, \quad (2.5)$$

式中 Q 为旋转式流量计的气流速度, Δp 为出流量计中压力表读数和大气压力差, N 为在橡胶环下的空穴数或微凸体数(肉眼测量),而 K_2 为仪器常数。

出流量计不论是用于粗糙的或精细的织构上的水力型或气压型装置,都能给出精确和有重现性的读数,而且使用起来比较简单。求出微凸体的分布密度 N' 或环下的微凸体数,是计算 MHR 的先决条件,而这最好用下节所述的表面摹印法获得。

2.7 表面摹印

表面摹印法是在被测宏观粗糙度的表面上涂以普鲁士兰染料,而后将一张白纸均匀地压在微凸体尖顶上完成的。从砂纸表面取得的图形示于图 2.10 中,图中还列出用图 2.2 的轮廓测量仪在同一表面上测得的轮廓图。把一边长 1 英寸的方框放在摹印上,通过一狭长缝隙大