

摩擦学及 润滑技术

薛景文编著



兵器工业出版社

7M17
K95

摩擦学及润滑技术

薛景文 编著

兵器工业出版社

(京)新登字049号

内 容 简 介

本书共分十章, 主要对摩擦、磨损、润滑理论及应用等诸方面作了比较系统的阐述, 是作者多年来教学与科学实践的结晶。在选材方面注意了基础理论与应用技术相结合的原则, 深入浅出、层次分明、重点突出、文字简练易懂, 便于自学。可作为高等工科院校的机械类专业教学参考书和中等职业技术学校的教师用书, 并可作为高级技工培训用教材。

摩擦学及润滑技术

薛景文 编著

兵器工业出版社 出版发行

(北京市海淀区车道沟10号)

各地新华书店经销

北京通县向阳印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 14.5 字数: 334.12 千字

1992年2月第1版 1992年2月第1次印刷

印数: 1—8000 定价: 11.60元

ISBN 7-80038-385-7/TG·27

前 言

“摩擦学”是一门新兴的边缘性学科。这门学科主要研究有相对运动、相互作用表面间的科学、技术和有关的实践。它既有较深的理论基础，又有广泛的实践性和实用价值。其内容涉及到数学、力学、表面物理、表面化学、材料学、冶金学、石油化工和机械工程等诸多方面的理论和应用知识。

“摩擦学”的有关知识虽应用比较广泛，但它形成一门独立的学科却是在本世纪60年代后期。由于“摩擦学”的兴起和对其理论与应用的研究在工业各个部门，尤其是对大型、高速、重载的机械和自动化设备，及对提高设备的可靠性、延长机器寿命、减少维修和节约能源等诸方面，都起着重要作用，因此，它在国内外均受到普遍的重视。本学科近年来在我国发展也比较快，陆续出版了不少有关这方面的著作和论文，一些高校还开设了“摩擦学”课程。为适应国民经济日益发展的需求，我国科技界、高等院校和生产部门都对这门学科的研究和应用给予了很高的重视，尤其重视这方面人材的培养与提高工作。与此同时，润滑技术在各工业生产部门也得到了广泛的应用，它与“摩擦学”有着不可分割、相互依存的关系。为适应广大读者的需求，故编著了《摩擦学及润滑技术》。

本书共分十章，第一章至第八章由薛景文同志编著；第九章由薛景文与王健民同志编著；第十章由王健民同志编著；张学望同志参加了部分编写统稿工作；全书由薛景文同志统编。天津大学张桂芳教授对本书进行了审阅，在此表示诚挚的谢意。

由于我们工作条件所限，时间仓促，不当和缺点在所难免，敬希同行和读者批评指正。

编著者

1991.3

目 录

第一章 摩擦学概论	(1)
§ 1-1 摩擦学的概念	(1)
§ 1-2 摩擦学的发展及意义	(2)
§ 1-3 摩擦学设计中的有关问题	(4)
§ 1-4 摩擦学研究的有关问题	(8)
第二章 表面性质及接触问题	(12)
§ 2-1 表层结构和表面状态	(12)
§ 2-2 表面几何形状	(13)
§ 2-3 微观几何形状(表面粗糙度)的评定参数	(15)
§ 2-4 表面粗糙的统计特性	(17)
§ 2-5 表面接触概述	(18)
§ 2-6 赫芝(Hertz)接触	(20)
§ 2-7 粗糙表面的接触	(25)
第三章 摩擦	(30)
§ 3-1 概述	(30)
§ 3-2 滑动摩擦学说及发展	(32)
§ 3-3 滑动摩擦理论	(33)
§ 3-4 弹性体材料的摩擦简介	(40)
§ 3-5 摩擦热效应及滑动速度的影响	(41)
§ 3-6 滚动摩擦机理	(43)
§ 3-7 滚动接触的摩擦特性	(45)
第四章 磨损	(52)
§ 4-1 概述	(52)
§ 4-2 磨损机理	(53)
§ 4-3 磨损计算方法	(64)
§ 4-4 影响磨损的因素	(67)
§ 4-5 磨损的预防措施	(72)
第五章 润滑剂性能和边界润滑	(73)
§ 5-1 润滑剂的一般知识	(73)
§ 5-2 流体粘度	(76)
§ 5-3 润滑油的油性及边界润滑现象	(80)
§ 5-4 边界膜的物理及化学作用	(82)
§ 5-5 边界润滑机理	(84)
§ 5-6 粘-滑现象.....	(86)

第六章 液体静压润滑原理	(89)
§ 6-1 液体静压润滑的意义及特点	(89)
§ 6-2 挤压油膜及其计算公式	(90)
§ 6-3 液体静压润滑支承原理	(95)
§ 6-4 恒压供油的静压润滑原理	(99)
§ 6-5 恒流量供油的静压润滑原理	(102)
§ 6-6 油膜刚度	(103)
§ 6-7 静压向心轴承	(106)
第七章 液体动压润滑原理	(109)
§ 7-1 流体动力学基本方程式	(109)
§ 7-2 液体动压润滑的承载原理	(114)
§ 7-3 液体动压润滑推力轴承	(117)
§ 7-4 液体动压润滑向心轴承	(123)
§ 7-5 有限宽度轴承	(130)
§ 7-6 液体动压向心轴承的不稳定性简介	(134)
§ 7-7 紊流概念及雷诺数	(138)
第八章 弹性流体动压润滑理论	(142)
§ 8-1 刚性滚动体动压润滑	(143)
§ 8-2 弹性流体动压润滑的基本方程组	(147)
§ 8-3 弹性流体动压润滑机理	(150)
§ 8-4 有关的弹流理论及其方程式	(151)
§ 8-5 影响弹流油膜形状和压力分布的因素	(156)
§ 8-6 有关的润滑理论及其应用范围	(158)
§ 8-7 点接触弹流理论的概念和机理	(162)
第九章 常用机械零部件的结构特点及润滑	(168)
§ 9-1 轴承的结构特点	(168)
§ 9-2 齿轮和蜗轮传动特点	(173)
§ 9-3 润滑方法和润滑装置	(179)
§ 9-4 常用机械零部件的润滑	(186)
§ 9-5 普通车床的润滑	(196)
第十章 密封与治漏	(198)
§ 10-1 密封方法的类型、特点及应用	(198)
§ 10-2 O形密封圈	(204)
§ 10-3 皮碗	(213)
§ 10-4 密封螺旋	(221)
§ 10-5 堵漏方法简介	(222)

第一章 摩擦学概论

§ 1-1 摩擦学的概念

摩擦学是研究两表面摩擦、磨损、润滑这三项相互联系的科学和技术的，为此，首先介绍一下有关摩擦、磨损及润滑的概念。

1. 摩擦、磨损及润滑的概念

摩擦 两个互相接触的物体作相对运动时，在接触面之间必然产生妨碍运动的阻力，该阻力称为摩擦力，而这种现象称为摩擦。它是各种机械运动副相对运动时，在互相作用表面间产生的一种不可避免的物理现象。

摩擦在工程中要一分为二的分析，在某些情况下，利用增大摩擦实现工程上的要求。因为有的机器的效能、生产率以及可靠性、安全性的提高，取决于摩擦力的增大。如摩擦传动、制动装置等；又譬如汽车轮胎制成花纹，其目的也是为了增大摩擦，甚至汽车在有冰、雪的路面上行驶时，在轮子上绕上铁链，以增大摩擦保证安全行驶；但是在多种情况下，摩擦增大是极其有害的，应当尽量减小摩擦以满足工程和经济上的要求。因为摩擦将造成能量损失和机械零件的磨损，据统计世界能源 $1/3 \sim 1/2$ 以各种形式消耗于摩擦。同时，耗损的能量变成热并造成表面的损坏、甚至造成整台机器的失效。

磨损 运动副表面层材料不断损失的现象称磨损，它是摩擦的必然结果。磨损将引起运动副零件尺寸及形状的变化，导致零件损坏或机器失效。例如，轴承孔与轴颈表面相对运动，逐渐磨损，间隙逐渐扩大，机器精度和效率下降，伴随产生冲击载荷、磨损速度加剧，最后使机械失效。又如，蜗轮、齿轮、丝杠与其配偶相对运动，表面层产生磨损，齿厚变薄，强度降低，终至不能使用。据估计磨损造成的损失是摩擦造成损失的12倍，有人估计国民经济收入的 $1/2$ 是用于补偿磨损或类似磨损上。一般机器中磨损失效的零部件大约占全部报废零部件的80%。因此，减小磨损，提高零件材料的耐磨性能，会大大地提高机器的寿命和可靠性，同时在减少维修时间和配件数量，节约原材料和能源等方面也有着重大意义。

润滑 在作相对运动的相互作用的表面上施加润滑剂，称为润滑。润滑是减小摩擦、降低磨损的重要措施。同时，润滑剂还有减振和冷却的作用。近年来，由于机器向高速、大功率方向发展，对于润滑提出了更高的要求，尤其是空间技术、原子能技术及海洋开发等的迅速发展，解决特殊环境(如真空、高温、低温、辐射、海水等条件)下的润滑和密封问题，显得极其重要和迫切。

2. 摩擦学的概念

人类在日常生活和生产实践中，早就察觉了摩擦、磨损和润滑的重要性，同时作为一种现象大量地存在于所有工程、医药等部门以及人们生活和生产的各个方面。同时，由上述可知，摩擦是能量耗损的重要因素之一，因此减少摩擦能获得巨大的能量节约；磨损是材料损耗的一个主要因素，降低磨损可以大量的节省原材料等；润滑是指控制和降低磨损的有效的重要措施，摩擦、磨损及润滑三者的关系十分密切，研究三者的科学和技术是极其重要的方

面。在这方面已经作了大量的工作，但是摩擦、磨损及润滑作为一门学科提出来，是在1966年英国约斯特(H·P·Jost)关于英国润滑教育与研究的现状和工业需要的报告中建议建立“摩擦学”(Tribology)或称“摩擦、磨损与润滑学”的新学科来统帅该方面的研究工作。

摩擦学定义为“研究有相对运动相互作用表面间的科学、技术和有关的实践”。它包括的范围很广、如固体表面形貌的研究；摩擦及磨损机理和规律；各种润滑理论及其应用；有关润滑剂以及减摩、耐磨材料的性能；有关摩擦、磨损、润滑的试验方法和检测技术等等多方面的内容。这些内容涉及到数学、物理学、化学、材料学、冶金学、固体力学、流体力学、热力学、以及石油与化工工程、机械工程等学科。因此摩擦学是一门新兴的跨学科的科学，它既需要有较深的理论基础，又具有广泛的实践性，同时对该学科的研究具有重大的经济效益和社会意义。因而引起了世界各国的广泛重视，成为迫切需要解决的科学技术问题。我国同样给予了很高重视，在学术活动、科学研究、培养人材方面都取得了较大的成绩，从而促进了摩擦学的迅速发展。

§1-2 摩擦学的发展及意义

1. 摩擦学的发展简况

摩擦、磨损及润滑的现象，很早就为人们注意和利用。我国古代燧人氏钻木取火，即利用摩擦发热的原理。在3千年前我国《诗经》里已有关于润滑技术的记载。国外古代也有许多关于这方面的应用和记载。大约一万年前，巨大物体的移动也只能完全依靠物体本身的滑动。人类在实践中体会到摩擦的现象和应用。后来以动物油脂为主的原始润滑剂以及稍晚出现的轮系的发展。最早的历史记载中就有应用轮子减小阻力的资料，因此，轮子的发明大概至少在6千年以前。古埃及距今4千年以前建造金字塔时已利用了液体润滑剂以减小移动巨大物体所需的力。这些都促进了摩擦学方面的应用和发展，但是上述应用还谈不上摩擦现象的科学研究。只是到了15世纪以后，随着科学技术的不断发展，对摩擦、磨损以及润滑现象的认识与研究才不断的深入和发展。

摩擦现象的研究始于15世纪意大利文艺复兴时期。达·芬奇(1452—1519)曾用大理石做实验得出结论：两光滑平面间的摩擦，当物体刚要开始滑动时，摩擦力为其重量的1/4，这是最早确立的摩擦力与垂直力成正比(或摩擦系数)的概念。他还提出过关于滚动的论点：“滚动摩擦并非起因于摩擦，而是由接触所引起，这种接触可以描述为无限多个微小阶段形成的过程”。17世纪末到18世纪初，正处于英国工业革命和法国资产阶级大革命时期，由于他们的工业和制造业得到了发展，因而摩擦的研究得到了重视。这时，法国的阿蒙顿(G·Amontons)和库伦(E·Coulomb)在大量实验基础上建立了古典摩擦定律，即摩擦力大小与接触面间的法向载荷成正比，与名义接触面积无关，与其相对滑动速度无关。但是，这后一条并不是普遍正确的。由于工业的迅速发展，在这段时期后还出现了若干其他的摩擦问题的研究成果。

润滑剂的作用起源很早，但是有关润滑的理论，则是后来的事。牛顿(1642—1727)首先提出粘性液体流动定律。直到上世纪末才开始对轴承润滑的理论研究。1883年俄国彼得罗夫(Petroff)提出了有润滑的两同心圆柱体间的摩擦力为

$$F = (\eta v / h_m) A$$

式中 η 为润滑油粘度、 v 为表面滑动速度、 h_m 为平均油膜厚度、 A 为润滑面积,这是第一个关于流体润滑的表达式。1886年英国雷诺(O·Reynolds)建立了润滑膜中压力分布的微分方程,论证了产生流体动压力的原理,为以后润滑技术奠定了理论基础。

第二次世界大战后,机械工程向高速、重载以及高温方向发展,在这一时期中,高副接触(如齿轮、滚动轴承等)的润滑问题,具有很大的实际意义。这时摩擦表面间的接触应力高达几万个大气压,金属表面几何形状及润滑油的粘度都要发生较大变化。因此,不能简单的应用雷诺方程求解。1949年苏联格鲁宾(Грубин)把弹性理论和润滑理论结合起来,分析了弹性接触区油膜压力分布问题,提出了弹性流体动力润滑理论。到50年代末英国道森(D·Dowson)和黑金森(C·R·Higginson)通过电子计算机求得大量数值解,得到精确计算油膜厚度的公式,并为实验所证实,将弹流理论的研究引向高潮。同时,在此期间,边界润滑、静压润滑、润滑剂等方面的研究也得到了很大进展。

1966年英国“约斯特(H·P·Jost)报告”提出形成一门独立的“摩擦学”(Tribology)学科后,在英国和一些工业先进的国家相继采用这个新词“Tribology”,并引起许多国家的极大重视。从此,摩擦学研究在国际范围内受到有力的推动,原来分散在各个领域中从事这方面工作的人员,现在集合在摩擦学的旗帜下,形成一支包括许多不同专业专家的非常庞大的队伍。1973年在伦敦举行第一届欧洲摩擦学会议,并成立了国际摩擦学会,选举约斯特为主席。在此之后,国际性的摩擦学会议相继召开,以摩擦学命名的杂志刊物大量涌现,摩擦学方面的研究成果及论文每年数以万计的发表,促使摩擦学蓬勃发展。

我国对摩擦学的研究比较重视,起步较早。60年代初期,中国科学院就已经组织在兰州召开了第一次全国摩擦磨损润滑工作报告会,开展过不少研究工作。1979年成立了全国摩擦、磨损及润滑学会,之后又开展了不少的国际性和全国性的学术活动。同时创办了“摩擦磨损”期刊,并发表了有关论文和研究成果。这对我国摩擦学的发展具有很大的推动作用。

2. 摩擦学的意义

摩擦学对人类的生活和生产的各个方面都有着极为密切的关系,尤其是科学技术及工业生产高度发展的今天,要求摩擦学不断深入研究和迅速发展,则更有它的重要现实意义。

1) 摩擦学是一门能源保护的科学

当今世界能源紧张,但据估计世界上的能源的 $1/3—1/2$ 最终以各种方式表现为摩擦的损失,说明世界能源近一半由于摩擦而白白浪费掉。这是一个十分可观的数字。据统计1977年美国能源消耗最大的四个部门(交通运输、电力、加工以及商业和民用部门)的分析,共占全国能源消耗的80%,但是,其中近乎一半是在使用过程中未经作功而损失掉的。如果从摩擦学方面采取必要的合理的措施,就会大大地节省能源的消耗。

2) 摩擦学的发展是工业和科学技术发展的迫切需要

摩擦学问题大量地、普遍地存在于所有机械设备中,由于近代工业的机械设备的功率、速度、精度等参数日益提高,生产的连续性和自动化水平不断提高,尤其要求高的可靠性和良好的性能。因此,摩擦学问题更显得突出,只依靠单独学科已不能解决有关问题,必然会发展成为一门新兴的边缘学科,综合地解决提出的新问题。

现代机械装置设计工作,要求设计者应用摩擦学的理论和实验解决设计、制造、运行和维修等一系列问题,因而可有力地促进这门学科的发展。测试手段的提高,新型材料的应用,如美国“哥伦比亚”号宇航飞机应用的新瓷材料是材料发展过程中的第三次大革命,以及

应用人工关节和心脏等各方面的新成就，需要摩擦学不断开拓出新的应用领域。因此，摩擦学问题就成为许多技术部门最普遍最主要的问题之一。摩擦学近年来发展如此迅速，其根本原因就在于它提供的新成就恰好是工业和新技术发展的迫切要求。

3)摩擦学的研究和应用具有重大的经济意义

讨论摩擦学的经济意义时，经常要算非常细致的经济账。摩擦学的经济效益也往往要经过一段时间之后才能体现出来。只有进行全面的经济核算和技术分析才能显现出其重大意义。根据英国1966年的调查报告，如果英国应用现有的摩擦学知识，则每年能够节省5亿多英镑、美国每年可节约160亿美元，西德每年可节约100亿马克，日本每年可节约27亿美元，对于我国有人作过同样估计，如果很好的应用摩擦学及润滑技术，每年可节约人民币150亿元。

世界各工业国家因磨损造成的损失是十分惊人的。苏联的机械制造和轻工企业，每年维护和修理费用占机器购置款的30~50%，苏联机械制造部门机器磨损损失为100~120亿卢布。现代化连续生产的钢厂，一个轴承的失效可能造成全厂停产，每分钟损失300英镑。同样，据统计我国机械行业所消耗的钢材有一半以上是做配件，而配件大部分是用来做维修，机件的早期损失又大多数属于摩擦、磨损方面的损坏。如40%农机备件的损耗是由于磨料磨损报废，锅炉管1/3是由于浸蚀磨损损坏。由上述分析看出摩擦磨损造成损失是可观的。

但是许多研究表明，现代化工业中大量摩擦、磨损等方面的问题可以运用现有的摩擦学知识来解决，所耗费用仅占节约费用很小的比例，据美国估计，减少摩擦、磨损方面的损失，每年可节约160亿美元，但是加强摩擦学科研和发展所需要资金不过2300万美元，只占节约的0.144%。实际上许多国家的摩擦学科研咨询和服务工作表明：改善摩擦学的应用对节约有巨大潜力，所耗不多，收益巨大。因此，摩擦学的理论和应用研究具有巨大的经济意义。

§1-3 摩擦学设计中的有关问题

1. 摩擦学设计中要解决的主要问题

任何机器的运动副，其接触表面间都是处于相对运动和相互作用的状态。因此，必然存在摩擦和磨损，致使造成机器和零件的失效及大量资金的损失。摩擦学设计中要解决的主要问题是力图减小摩擦和磨损的有关问题，而且希望把摩擦和磨损同时减小到最低程度。但是，摩擦和磨损虽然在同处产生，而且两者有密切关系，然而这两种现象之间并不存在简

表1-1 各种材料组合的摩擦和磨损

材 料 组 合	摩擦系数 μ	磨损率($\text{cm}^3/\text{cm} \times 10^{-12}$)
低碳钢对低碳钢	0.62	157000
黄铜对工具钢	0.24	24000
聚四氟乙烯对工具钢	0.18	2000
钨铬合金对工具钢	0.60	320
不锈钢对工具钢	0.53	270
聚乙烯对工具钢	0.65	30
碳化钨对碳化钨	0.35	2

单关系。例如表1-1所示，用各种不同材料的组合，其摩擦系数 μ 值和磨损率之间无一定规律性。由表中看出：第一，最低的摩擦系数 μ 值并不意味着有最小的磨损率(单位长度上的磨损量)，反之大的摩擦也不意味着磨损严重；第二，所有 μ 值都分布在相差大致3倍范围内，而磨损率则很离散，最大和最小磨损率的数值相差78000倍之多，这就增加了解决问题的复杂性。因此，在摩擦学设计中不可能使摩擦和磨损同时达到最满意的要求，关键是解决起主导作用的那些问题，同时也要考虑到另一方面的有关问题。

2. 摩擦学设计的方案选择

在摩擦学设计中必须正确地选择设计方案，设计者在初始设计中有关方案的选择列在表1-2中。A行为选择运动副的形式，有高副和低副两类，高副和低副的重要区别是前者为点或线的接触，后者为面接触。任何机器两构件构成的运动副，不外乎是通过点、线或面的接触来实现的。为更清楚的理解表1-2中方案选择，从摩擦学的观点说明其中有关概念。

1) 同形和反形表面

如表1-2中的B行所示，根据运动副接触性质分为两种：同形表面(属于低副)，即两构件接触处的外形轮廓完全相同，如图1-1(a)、(b)及(c)；反形表面(属于高副)，即两构件接触处的外形轮廓不同，如图1-1(d)、(e)及(f)。如果设计中滚动和滑动必须只在一对运动副内，那么，就必须用反形表面副。如果设计中允许运动副分成低副所能适应的运动，可用同形表面副，但一般不采用。

表1-2 设计者在设计初期可选择的方案

A	运动副形式	低 副	高 副
表面间加入球或滚子 转动副(径向轴承)或滑动副(推力轴承)之间作用的区分			
B	接触性质	同形表面	反形表面
C	应力系统	分散接触、塑性方式	集中接触、弹性方式(赫芝方式)
D	材料配合	软对硬	硬对硬
E	润滑方式	流体动压、流体静压或干摩擦	弹性流体动压或干摩擦
F	磨损主要形式	磨料磨损、粘合磨损	点蚀或胶合

2) 分散接触和集中接触

当设计决定采用是同形或反形表面副(即低副或高副)后，从而就决定了应力系统，如表1-2中C行所示。在同形表面副中两表面轮廓完全相同，因此接触分散在整个名义接触面上，实际上表面总不是理想光滑的，所以实际接触只限于分散的粗糙凸峰接触，而实际接触面积与名义接触面积比较起来是很小的(假设实际接触面积与名义面积之比为1/1000)，在这种情况下

下凸峰接触多数是塑性变形(塑性方式)。

在反形表面副中两表面轮廓不同,接触集中在一点或一条线邻近很狭窄的区域内。由于接触应力很高,而且因弹性变形应力有一定程度的减小。因此,实际接触面积决定于载荷、接触表面的几何形状和两物体材料的弹性模量。在数学上解接触问题,首先由赫芝在弹性情况下求得的。故属于弹性变形范围(赫芝接触方式)。

3) 材料的匹配

由于分散接触和集中接触的性质不同,因而对材料的选择会产生不同的要求,见表1-2D行。在分散接触情况下,例如在一转动副中,其中一个表面通常用较软材料制造或用软材料衬垫。使软的材料与另一表面吻合,所以宜用硬度相差很大的材料。因此,如果一个转轴在轴承中承受的载荷方向是固定的,则轴颈的材料通常用保持其形状的硬材料制成(如钢),而轴瓦用能与轴颈形状吻合的软材料制成(如用软轴承合金作衬垫),轴承的固定形状由较硬的轴颈表面决定。如图1-2(a)所示。

有时用手工将轴瓦或轴承衬刮到与轴吻合,但通常是将其直径加工得稍大些,经过轻度的跑合过程而吻合。如果轴颈是完全圆形,那么表面基本上没有磨损,很快就形成密切的吻合。如果材料是与上述相反的匹配,即轴表面用较软材料,而轴承(瓦或衬)用较硬的材料。则轴上任何磨损和变形并不能改进吻合,而使轴承寿命缩短。

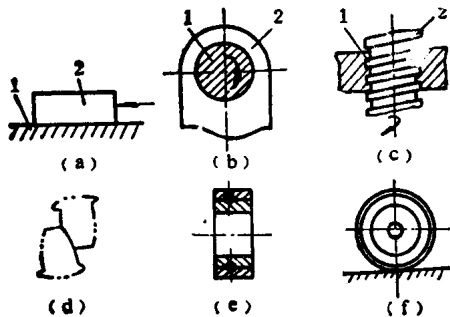


图1-1 运动副

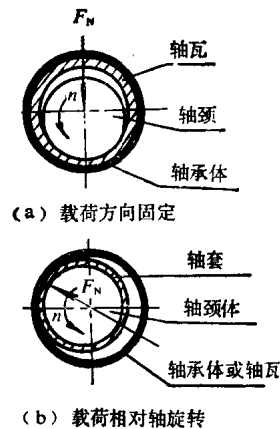


图1-2 材料的匹配示意图

在载荷的方向随轴的转动而变化的情况,如图1-2(b)所示,如周转轮系属于这种情况,这时,材料的匹配反过来是合理的,将软轴承合金放在轴颈上,这样使其表面上每一单元体受到尽可能不变的应力。

对于集中接触,由于赫芝应力值高,因而需要两接触面都用很硬的材料匹配。大多数情况下将表面淬硬或整体淬硬,但有人指出两表面硬度稍有差别是有利的。然而,两个表面必须足够硬以承受赫芝应力。

关于表1-2E和F行有关概念在后面章节中再详述。

3. 解决摩擦学问题的一般方法

解决摩擦学设计中的问题,可以根据具体条件和要求采用不同方法,如图1-3所示为摩擦学问题的几种解决方法。

1) 用干接触方法

如图1-3(a)所示。我们可以通过合理地选用配对材料副,使其具有较好的摩擦和磨损特征。但这种情况,一般承受的载荷较小。例如表1-1中聚四氟乙烯(PTFE)与淬硬工具钢对磨时, μ 值较小而磨损率适中,由于这个原因其材料常常用于所谓“干轴承”。但这种材料软,承受载荷受到限制;其次,耐热性差,因而使速度也受到限制。这些问题可以用金属和塑料组合结构或采用减摩性好的金属材料就可解决。为满足零件结构强度的要求,一般把减摩、耐磨性好的材料支承在基体材料上使用,如铅、铜等复盖在钢背上。近期研究认为:金属的某种形式的晶体结构,例如钴基合金通常在这方面就可以解决问题。

2) 用表面膜的方法

如图1-3(b)及(c)所示。

在固体表面上复盖一层表面膜,为固体接触形成一层保护层,膜层剪切易产生滑动,减少了界面上的摩擦和磨损。但该膜极薄容易破裂,故不能使固体表面间的直接接触完全消除。常用的表面膜可以分三类:

一种是化学膜,如图1-3(b)所示。它是由润滑剂与金属表面接触时的化学反应而形成的膜,使之保护固体摩擦表面,减少基体材料的直接接触,但由于滑动时在接触处产生局部高温,故膜的稳定性是一个重要因素。如极压添加剂可以与金属表面生成氯或硫的化合物表面膜,这样膜能在摩擦过程的高温下保持其化学稳定性,所以它是符合在极压条件下工作的要求。化学膜受到摩擦也会损坏,因而膜层愈厚抗磨能力愈高。

第二种固体润滑膜,如图1-3(c)所示。如石墨或二硫化钼等层状固体,它是一个层状结构,它在垂直分层方向具有一定强度承受垂直载荷,而且在分层方向上层与层之间剪切强度弱,可以自由滑动,而获得小的摩擦阻力。

第三种是软金属膜形成的表面膜,如在前面讲的基体材料上复盖一层铅、铜等软材料即属于这种,它也是利用软金属的低剪切强度来减小摩擦力,而基体金属的强度仍能在垂直方向上承受高载荷。

3) 用流体压力润滑膜的方法

如图1-3(d)所示。它是用相对较厚的润滑剂流体膜将两表面完全隔开,两固体表面不直接接触。在这样的系统中流体膜必须有一个内在压力以平衡外载荷。这个内压力可以由两种性质不同的方法提供:即流体静压或流体动压的润滑方法(关于这两种润滑的情况后面章节再叙),这两种润滑方法的流体膜应用的流体包括水、油、空气,在原子反应堆中的液态金属已经完全成功的使用了。

4) 用弹性的方法

如图1-3(e)及(f)所示。它是用弹性体或柔软塑料层状物体把两表面分开的方法,这种

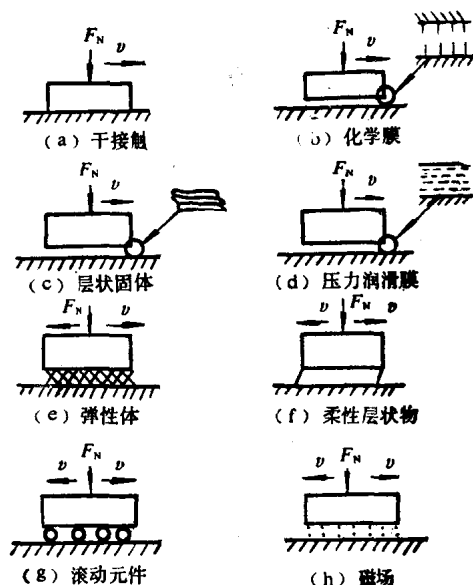


图 1-3 解决摩擦学问题的方法

方法是应用在横向移动行程很小的往复运动中(两元件间的滑动范围是受到限制的), 汽车的支承系统就是这种例子。

5) 滚动接触的方法

如图1-3(g)所示。它是在两表面间放入滚动元件, 如球、圆柱等的方法。典型的例子就是我们熟知的滚动轴承, 它的原理是滑动摩擦转化为滚动摩擦, 从而更好的减少摩擦和磨损。因此, 它是一个广泛使用的摩擦学解决方法。

6) 磁力悬浮法

如图1-3(h)所示。它是用磁力来平衡外载荷, 可使两表面完全分开, 而且无任何机械的直接接触的方法, 例如普通的供电计量仪中用的磁力轴承。

设计师在掌握了上述的有关解决摩擦学的一般方法后, 要想使其设计的问题得到满意的答案, 必须考虑有关条件和要求, 譬如载荷大小和性质; 速度大小及方向, 自然环境和工作情况以及关于摩擦磨损的影响因素等, 根据实际情况, 上述的方法可以几种结合使用。同时, 在可能条件下尽量减少摩擦副。使所设计的机器达到所期望的要求。

§1-4 摩擦学研究的有关问题

摩擦学主要是研究摩擦磨损的各种现象、机理、影响因素、实验方法以及减少摩擦(或增大摩擦)、降低磨损及润滑措施等方面的问题。

摩擦学研究发展得很快, 在较短的时间内已普及到人类生产和生活的各个领域。从研究工作看, 摩擦、磨损及润滑的研究从宏观的观测向微观的分析发展; 从经验地对摩擦现象作定性分析或粗略的定量分析, 进而发展为对摩擦的各种物理和化学现象的相互关系, 建立精确的定量动态数学模型; 从摩擦磨损现象的个别少数因素的研究向全面的综合的研究方向发展。下面简单提一下有关的方面。

1. 对摩擦磨损润滑机理的深入研究

大力开展摩擦、磨损及润滑机理的更深入研究, 反过来又能指导和推动工业应用的研究。

边界摩擦是常见的摩擦形式, 因为大量的机器零件长期(或短期)处于边界条件下工作, 从而产生磨损, 但另一方面影响边界摩擦的因素很多, 边界摩擦理论的研究还很不够。所以研究边界摩擦是摩擦磨损的迫切任务之一。边界摩擦问题就是要在摩擦副之间建立和保持具有低剪切强度的表面膜(保护层), 以更好的降低摩擦和磨损。这是现代摩擦学中的迫切和很艰巨的任务。同时, 研究边界摩擦表面膜的物理化学过程也是很重要、很复杂的。如前面(§1-3节)提到的氯或硫化合物的表面膜等, 必须应用现代物理和化学概念及方法研究这些现象。

固体的选择性转移效应是值得重视的。例如铜合金(或铜)与钢在甘油或酒精甘油中进行摩擦, 在一定规范内出现一种很有意义的反常现象, 钢表面形成富铜薄层。摩擦系数极低(接近滚动摩擦), 磨损极小, 这种现象称为选择性转移, 早期曾称为选择性扩散或选择性原子粘着。关于形成富铜薄膜的机理研究, 仅仅开始, 最初认为是原子扩散, 后来有人认为金属转移是由于真实接触区产生粘着并涂抹在相互作用的表面上, 最后认为是电化学现象起主要作用。选择性转移可以大幅度减小摩擦和磨损, 这对提高机器寿命和降低其摩擦损失有很大的潜在能力。因此, 研究选择性转移的物理化学、电化学、弄清机理和影响因素, 探索新

的能形成选择性转移的介质和摩擦副。控制选择性转移过程，实现工业应用，这对现代机器减少摩擦损失和提高机器寿命是会起重要作用的。

关于磨损问题的研究，现在还处于开始阶段，因为磨损中各种机理的互相转化和出现，形成了一个复杂的过程，至今对各种磨损机理仍不十分清楚。同时，对磨损规律，即磨损速度与摩擦条件(单位压力、滑动速度、温度与环境气氛等)和摩擦零件副的材料特性的关系掌握和研究得也很不够，急待解决这方面问题。然而，要解决磨损规律，必然涉及实际接触面积、磨损机理、磨屑形成机理及各种参数对磨损的影响等一些问题的研究和解决。以上问题研究得还很不够成熟，因此，许多磨损理论和计算方法均带有很大的局限性、距离工程上的应用还有相当大的距离。

因而磨损规律、磨损机理及磨损计算方法的研究，实际上是一个非常重大的课题，也是各国摩擦学研究者力图解决的主要课题，应当予以足够的重视。

液体润滑方面的研究，如关于弹性流体动压润滑理论形成于50年代，近几十年发展很快，目前国外对弹性流体润滑理论的研究工作的规模及范围不断扩大，计算精度不断提高，实验方法完善尚需作大量工作；又如紊流工况对轴承性能产生很大的影响，进入紊流工况的表现是摩擦功耗急剧增加，油流量增加、温度增高，但承载能力也增大等变化，为了估计这些影响和变化，已经有康斯坦丁尼斯库(Constantinescu)、Ng和潘(Pan)等人提出有关几种计算方法。但仍有许多未能解决的问题，因为到目前为止在流体力学领域中，紊流基本现象的理论还未完满建立、有待于继续深化研究和发展。

其次，目前在非等温、非稳定、非牛顿液体，在苛刻条件和特殊环境中有关的润滑问题都还存在着大量课题有待探索、

2. 新型润滑剂的应用

在流体润滑剂中矿物油是主要的，约占润滑剂的95%以上。这主要是由于矿物油资源丰富，价格便宜，而且能通过各种途径如进行精制，加入各种添加剂等，不断改进润滑材料的性能，克服它的缺点，满足多方面的使用要求。但其润滑能力毕竟是有限的，在条件苛刻和具有特殊要求的摩擦学问题中，广泛地发展了其它润滑手段。在50年代以来，各种合成润滑油有较大的发展，合成润滑油具有特殊的使用性能，能够满足一般润滑油、脂无法达到的苛刻使用要求，如各种高低温、高真空、高精度、高负荷、强辐射、强化学介质等特殊使用条件的润滑，在原子能、航天、航空等尖端技术和大型化肥、化纤、轧钢和石油钻探等设备中得到广泛的使用。近十几年来已发展到在更多的工业设备润滑中应用。虽然合成润滑油价格较高，然而，其特殊的润滑性能却是石油润滑材料所无法达到的优良性能。

我国各种润滑油、脂添加剂发展很迅速，基本上能满足生产各种主要润滑油品种的需要，但在质量和添加剂加量方面和国外相比还存在一定的差距。

近年来，自润滑材料的研究和应用发展也很迅速，是十分有前途的润滑材料。

自润滑材料是指那些本身具有良好的减摩和耐磨性能的固体材料，可以用来在两个相对运动相互作用的表面间减少摩擦和磨损，在自润滑材料方面我国起步较早，在应用石墨、二硫化钼以及其他一些类型的自润滑材料上也取得了很大进展。我国新发展的HNT耐磨涂层材料已经在重型机床上推广使用，各类新型自润滑材料的扩大应用，正在引起各方面的注意。

自润滑材料是近30多年来发展起来的一种新材料，目前正对这种新材料的物性，基础理

论和新工艺等开展一系列的试验研究,发展前景十分光明。

3. 设备损坏的监测、技术诊断、早期预报和追踪技术的研究和应用。

技术诊断的概念是从医学引渡过来的。设备损坏技术诊断就是借助经验和量具、仪器等对设备的整体或其中某些零部件的技术状态作出判断,确定所存在的问题、磨损程度并决定如何修理,以避免发生故障和事故。

设备故障的监测是使用某些仪器检测设备性能和各零部件状态是否正常,进行观察、监督和测试,并将设备性能、状态的情报或信息反映出来,使我们能够了解设备的运转状态和产生故障的原因,以保证设备安全经济的运转。

设备故障的诊断技术和监测技术使我们早期得知设备技术状态和保养状态,搞设备维修的人成天与设备接触,为设备损坏技术诊断和早期预报创造了丰富的实际经验,并积累和掌握了设备零部件及整台设备磨损、损坏的早期资料 and 情况。近代的设备损坏的诊断,监测和追踪技术就是在这个基础上总结和发展起来的。在设备上装设监测装置,或借助于一些测试设备就可以早期预报设备损坏是否可能将要发生,并对一些早期损坏症状进行追踪。

例如现在有一种新型滤油器,带有油的污染指示图,当润滑油或液压油的污染度过高而造成滤油器堵塞时,滤油器出口与入口的压力差必然升高,迫使滤芯位置发生移动,而带动指示器偏移。操作者与维修人员可以从指示器上得到油的污染过高的信息,然后即可着手清洗滤油器和换油。有的新滤油器还带有与机床开关联动的电触点,指示器如发生偏移可使机床断电而停止运转,如要仔细地明了油的污染度必须用油的污染度检查仪,例如自动颗粒计数仪器,将颗粒的尺寸大小与数量进行分类分析。

对轴承的损坏可用监测发热、振动、噪声等不正常现象是否超过允许范围来进行分析。对机械零件磨损颗粒的尺寸及形态的观察,则采用各种光谱分析器(SOAP),放射性同位素测量仪,电子扫描显微镜,电子探针及铁谱仪(Ferrogroph)等仪器进行观察与分析。

总之,设备磨损的监测和诊断最早起源于航空、航天工业和核能工业,但其应用范围不局限于这些“高级”技术领域。目前国外多数工厂的现代化设备十分复杂和昂贵,用一般的识别和诊断来检测故障已日趋困难,而且复杂的现代化设备经不起经常拆卸检查,同时设备经常拆卸、检查,经济上的耗资也相当巨大。因此,监测诊断和追踪技术的应用范围正不断的发展,一些工厂正在试用对故障预发警报,以防止事故扩大,现在已经取得了明显的效果。

据英国资料报导,在应用合理的工厂中,监测系统的投资费用在6个月之内就可由其产生的效果得到偿还。据英国用户的经验和英国工业部调查,对于一般用途监测系统初次投资额的合理数字为固定资产的1%左右,对于特殊危险性的监测对象,用户允许这个数字提高到5%。

由于发展了设备磨损的早期预报、追踪技术和监测、诊断,可以把设备的定期维修制度改变为经济的预知维修制度,以减少设备非必要的拆卸所造成的损坏,避免事故故障损失,这对设备管理制度来说是一个革命。

4. 用系统工程分析的方法来处理摩擦磨损润滑问题

摩擦磨损润滑学是一门综合性的相互渗透的边缘性基础学科,由于机械设备日益向大型化、自动化发展,一套大型设备各个运动副就成为一个较复杂的工程系统,而且设备的摩擦磨损引起的能量损失是一个离散的动态系统,往往不能用一定的规律来进行分析。摩擦磨损润滑学的研究方法正在试用系统分析的方法来研究摩擦学问题。摩擦学涉及的因素较多,应

用系统工程原理可以提供方便。将研究对象看成为摩擦学系统，它与其他工程系统不同之处，在于系统本身由于磨损结构不断发生变化。将摩擦学问题经过系统学加工以后，可以进行损坏分析、材料选择和状态检测。

系统工程学是一门解决综合性的、复杂科学技术问题的行之有效的科学。由于目前摩擦磨损润滑学中各个参数之间的相互关系还未能充分掌握，这种系统分析方法在实用上还有许多困难。当前，用系统工程来分析摩擦磨损润滑学的方法已得到各国的重视。西德、荷兰、日本等国已在开展这项工作的研究，西德已出版了有关的专著。

总之，许多国家对摩擦学的研究和应用十分重视，并且做了大量的工作，取得很大的进展。如1966年“约斯特报告”发表后，英国成立了三个摩擦学中心，即国家摩擦学中心(N、C、T)斯旺西摩擦学中心和里兹大学摩擦学中心，主要任务是应用摩擦学为工业服务，解决生产中存在机器失效的摩擦学问题，使国家在材料消耗、能源节约、人力浪费等方面得到改善，为国家节约资金。同时协助工业运用摩擦学知识，改进设计工艺和材料选用，以提高设备可靠性，延长机器服役期限，提高机器性能参数。

我国有几个研究所在摩擦、磨损、润滑方面做了不少工作，开展研究工作、为工厂解决生产问题、参加攻关组、行业网等。但是工厂中存在的大量摩擦磨损润滑方面问题仍很多。我们机械工业设备普遍存在服役期短、零件寿命低、停机检修损失大、设备故障和失效率较高等许多问题。其中有一大部分是可以通过控制摩擦、减少磨损、改进润滑来解决的，投资有限、节能巨大，这是一件为工业服务刻不容缓的工作。