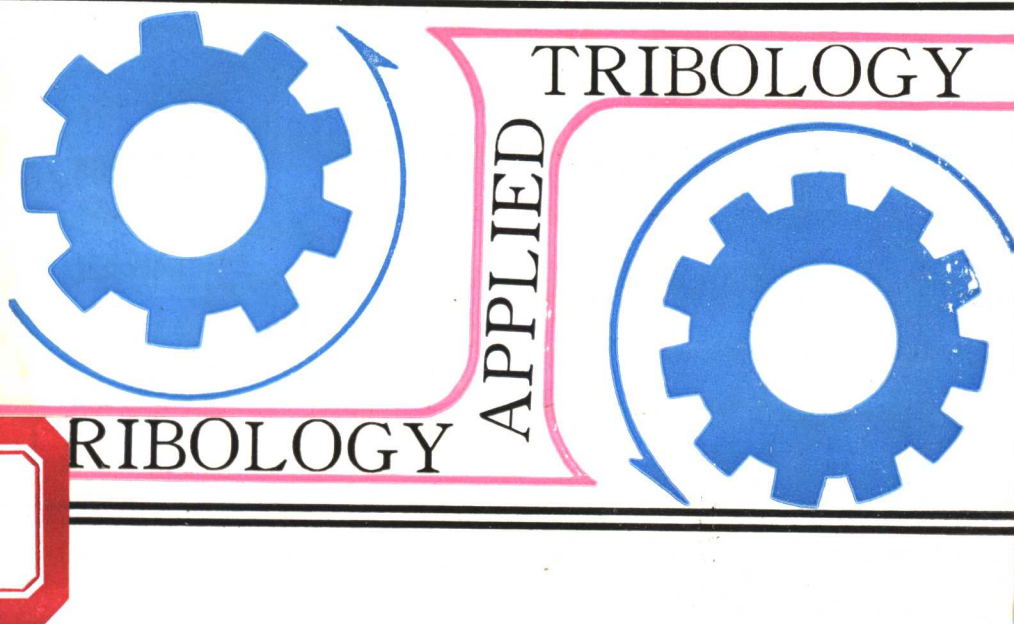


应用摩擦学

翟玉生 李 安 张金中



石油大学出版社

应 用 摩 擦 学

翟玉生 李 安 张金中

石油大学出版社

内 容 提 要

摩擦学是一门新兴边缘科学,它涉及国民生产和生活的许多领域,在我国正在得到普及和推广。本书介绍了摩擦、磨损、润滑基本理论和机械设备中摩擦副的计算和摩擦学系统分析的概念及方法。内容包括:粗糙表面的接触特性、摩擦磨损和润滑的基本理论、机械摩擦副的计算、摩擦学的系统分析方法等,共七章。内容深入浅出,各章密切相关又各具独立性。

本书可作为机械设计与制造专业大学本科生的教材,又可作为机械工程技术人员的继续教育参考书,也可供从事石油机械设计、制造、使用和维护的工程技术人员自学参考。

应用摩擦学

翟玉生 李 安 张金中

*

石油大学出版社出版发行

(山东省东营市)

新华书店经销

胜利油田第六中学印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 8.125 印张 208 千字

1996年8月第1版 1996年10月第2次印刷

印数 1—600 册

ISBN 7-5636-0877-X/TH·37

定价:12.00 元

前 言

世界工业界大约有 30% 的能量消耗在摩擦上,机械零件的失效有 80% 是由磨损引起的。由此可见,由于摩擦磨损造成的材料和能源损失是十分惊人的。在美国,每年由摩擦引起的损失达 1 000 多亿美元,据我国有关部门的不完全统计,每年由于摩擦造成的损失就达 400 多亿元人民币。可见,科学技术越先进、工业越发达,摩擦学知识和技术的推广应用就越重要。

众所周知,机器报废的原因往往不是其整体强度不足,而是由于某些关键零部件过度磨损,致使精度降低或不能正常运转而报废的。按照传统的机械设计原则,设计师们几乎不进行摩擦磨损的设计和计算。随着摩擦学知识和技术的普及及推广应用,对零件接触界面上所发生的各种现象有了越来越深刻的认识,摩擦磨损的计算已经在向单纯体积强度计算的传统机械设计方法中渗透,逐步形成更加完善的摩擦学设计方法体系。研究摩擦界面上所发生的各种现象,就是“固体摩擦”这门新学科的任务。

摩擦是一种普遍存在的物理现象,它的客观存在是不以人们的意志为转移的。人们已经注意到摩擦在国民生产和人民生活中的地位及其与经济发展的重要关系,早就从“克服摩擦和利用摩擦”这样两个完全相反的方向,自觉或不自觉地在利用摩擦学理论。摩擦、磨损、润滑理论与实践密切相关。可以说,摩擦学是一门实践性很强的应用科学。也只有把摩擦学和具体的物理现象和物理过程结合起来,才能充分体现出摩擦学特有的理论价值和实践意义。

根据石油高校矿机专业指导委员会 1992 年专业指导会议审定的教学大纲和教材内容,结合多年来的摩擦学教学实践和科研

成果,我们组织编写了这本“应用摩擦学”。作为教材,在教材内容和结构编排上,我们力求做到符合教学规律,满足教与学的要求,最大限度地保证摩擦学理论知识的完整性和系统性;围绕摩擦学的基本理论,介绍成功地运用摩擦学理论的范例,避免泛泛综述前人的成果,从而突出了摩擦学的实践性,使理论知识的学习更加切合实际。正是这本“应用摩擦学”突出的两个特点。

本教材的编写首先得益于著名摩擦学专家张嗣伟教授,张教授及其领导下的研究室多年来的教学和科研活动为本教材的编写奠定了基础,同时,在编写过程中也得到了张嗣伟教授的关怀和指导。著名密封专家顾永泉教授对本教材的内容进行了认真的审改,并提出了许多宝贵的改进意见。在此,对两位教授以及关心、帮助本教材的编写和出版、发行工作的所有同志表示衷心的感谢。

本教材共分七章。翟玉生编写了第一、第三、第四、第六章;李安编写了第七章及第六章的第五节;第五章由翟玉生、李安共同编写;张金中编写了第二章及第四章的第二节;邓全胜完成了全书插图的收编工作。尽管我们力求准确无误,但是由于我们知识和经验的不足,书中错误和遗漏在所难免,真诚希望并衷心感谢同行和读者给予批评指正,以便进一步改正,避免误导。

编 者

1995. 8

目 录

第一章 绪论.....	1
一、摩擦学的定义	1
二、摩擦学的研究内容及任务	2
三、摩擦学的发展	4
四、摩擦学研究的意义	6
第二章 固体表面特性	10
第一节 固体表面的几何特性	10
一、宏观几何形状误差	10
二、中等几何形状误差	12
三、微观几何形状误差	12
第二节 固体表面的物理化学特性	13
一、固体的表面能和表面力	13
二、吸附和固体的表面膜	16
三、典型的金属表面结构	20
第三节 固体表面的接触特性	21
一、表面接触的概念	21
二、表面接触模型	22
三、固体表面的接触面积	24
第三章 固体的摩擦	33
第一节 摩擦的概念及分类	33
一、按照摩擦表面的润滑状况分类	34
二、按照摩擦副的运动状态分类	35
第二节 摩擦理论	36

一、古典摩擦理论	36
二、粘着摩擦理论	38
三、摩擦的分子——机械理论	44
第三节 摩擦系数的影响因素	49
一、表面氧化膜对摩擦系数的影响	49
二、材料性质对摩擦系数的影响	50
三、载荷对摩擦系数的影响	51
四、滑动速度对摩擦系数的影响	51
五、温度对摩擦系数的影响	52
六、表面粗糙度对摩擦系数的影响	53
第四节 固体的摩擦热	54
一、摩擦发热的一般概念	54
二、摩擦温度的计算	56
第五节 特种摩擦	62
一、静摩擦	62
二、滚动摩擦	70
三、冲击摩擦	73
四、干摩擦	77
五、边界摩擦(边界润滑)	79
第四章 磨损	89
第一节 概述	89
一、磨损现象及研究磨损的意义	89
二、磨损的定义和分类	91
三、磨损过程	91
第二节 粘着磨损	93
一、粘着磨损的本质和特点	93
二、粘着磨损的机理	93
三、粘着磨损的主要形式	95
四、粘着磨损的影响因素及提高摩擦副抗粘着能力	

的措施	97
第三节 磨粒磨损	100
第四节 腐蚀磨损	103
一、氧化磨损	104
二、特殊介质腐蚀磨损	105
第五节 微动磨损	106
第六节 表面疲劳磨损	107
第七节 近代磨损理论	108
一、磨损的疲劳理论	110
二、磨损的剥层理论	112
三、磨损的能量理论	113
第八节 磨损的测量和计算	115
一、磨损量的测量方法	115
二、磨损过程的计算	119
第五章 流体润滑	138
第一节 润滑概述	138
第二节 流体润滑的特点及流体的性质	139
一、流体润滑的特点	139
二、流体的粘度	140
第三节 流体动压润滑	144
一、收敛油楔的作用	144
二、润滑膜产生压力的机理	145
三、雷诺方程	147
四、雷诺方程的应用	156
第四节 弹性流体动压润滑	171
一、刚体滚动中的流体动压润滑-马丁方程	172
二、弹性流体动压润滑的特点	174
三、线接触弹性流体动压润滑的最小油膜厚度	175
四、刚性体及弹性体动压润滑公式的适用范围	176

五、弹性流体动压润滑的判据——膜厚比	179
第六章 机械中的摩擦	180
第一节 平面的摩擦	180
第二节 槽面的摩擦	182
第三节 螺旋副的摩擦	183
一、矩形螺旋副的摩擦	183
二、三角形螺纹螺旋副的摩擦	185
第四节 轴的摩擦	187
一、向心轴颈的摩擦	187
二、推力轴颈的摩擦	195
三、轴的密封	197
第五节 摩擦传动与制动	200
一、柔韧带的摩擦	200
二、摩擦离合器	204
三、摩擦制动器	209
第七章 摩擦学系统分析	221
第一节 系统概述	221
一、系统的概念	221
二、系统的特性	222
三、系统的分类	224
四、系统的数学描绘	224
第二节 系统分析的基本内容	226
一、系统分析概述	226
二、系统分析的步骤	227
三、目标系统的分析与选定	228
四、系统的模型化	229
五、系统的最优化	230
第三节 系统分析的方法	231
第四节 摩擦学系统分析	234

一、摩擦学系统	234
二、摩擦学系统的静态和动态分析	236
第五节 摩擦学系统分析的应用	241
参考文献	247

第一章 绪 论

摩擦学是本世纪六十年代逐渐形成的一门新兴边缘学科。它涉及机械、材料、化学、生物等多门学科领域。摩擦学的研究和应用已经给社会带来了巨大的经济效益,因此受到世界各国政府及工业界的极大关注,正处工蓬勃发展之中。

一、摩擦学的定义

摩擦学(Tribology)一词是由希腊语 Tribos 派生而来。牛津大词典已将 Tribology 定义为“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”,我国正式译为“摩擦技术”或“摩擦学”。定义中着重强调了“相对运动”和“相互作用”。通俗说来,摩擦学就是研究相互作用表面在相对运动过程中发生的摩擦、磨损、润滑现象的一门科学与技术,这里明确了摩擦学的理论性和实践性。摩擦学就是摩擦、磨损和润滑及其有关的实践活动的总称。摩擦学是将运算分析应用于具有巨大经济意义问题的一门技术,从宇宙飞船到家用器具,涉及人们的衣食住行。摩擦学家们的工作是跨学科的,涉及到物理、化学、热力学、材料学及界面工程、冶金学等多门学科,它是一个包含与相对运动表面有关的机械设计、可靠性和工作效能评价,并且相互交织在一起的庞大复杂的领域。

摩擦是能量转换的一种形式;磨损是在摩擦过程中所伴随发生的必然结果,其表现形式为材料的破坏和损耗;润滑则会降低摩擦、减少磨损。三者相互关联,是存在于自然界中的普遍现象,与人类的物质生产和生活密切相关。在史前,人们就已经在两个方面应用了摩擦学的原理。一方面利用摩擦热取火,使人类第一次支配了

一种自然力;另一方面人们采用滑撬搬运物体,即利用滚动代替滑动,使用动物油作润滑剂以减少机械运动的阻力。

在很长的时间内,人们只是从各个侧面孤立地研究摩擦、磨损和润滑,经验和数据几乎是分散在相关的各个分支中,研究者们只是从力学角度来解释摩擦过程。实践表明,作相对运动的接触表面在摩擦时,将产生一系列的物理、化学、冶金学、力学等方面的变化。因此,作为研究这一过程和变化的新学科——摩擦学,就是涉及数学、力学、物理、化学、冶金学、机械工程、材料科学、石油化工等多种学科领域而发展成为一门综合性边缘学科。

二、摩擦学的研究内容及任务

摩擦学研究的内容是随着工业生产和科学技术的发展而提出来的,并在实践中得到补充和发展。总的说来,摩擦学研究的内容可以归纳为以下几个方面:

(1) 摩擦学机理的研究:摩擦学机理主要包括摩擦的起因,磨屑的形成和润滑理论等方面的内容。其目的是为了揭示摩擦磨损问题的本质,为解决工程中所存在的摩擦学问题提供理论基础。

(2) 各种机械运动副在不同介质中的摩擦学特性及失效机理的研究:针对不同介质中的典型摩擦副,应用摩擦学知识及有关学科的知识综合分析、研究各种因素对其摩擦学特性的影响,为摩擦副的研究、设计、生产和设备维修提供科学依据,从而保障设备有足够的寿命和使用可靠性。

(3) 各种耐磨、减磨材料及表面处理工艺对摩擦磨损特性影响的研究:合理地选择材料及表面处理工艺,研究新型耐磨和减磨材料,减少磨损,提高设备的使用寿命,以适应高速、重载、高精度设备的开发和推广应用的需要。通过控制摩擦、改善润滑、减少磨损等技术措施,最终达到提高设备效率,节约能源和原材料,延长使用寿命的目的。

(4) 摩擦学测试技术和测试设备的应用及研究:由于摩擦学

研究已从宏观发展到微观,从定性发展到定量,从分散研究发展为系统综合研究,从静态研究发展为动态研究,从基本机理的研究发展到对设备实际工作性能的预测,从而就要研制适用于摩擦学研究和试验的新型测试设备。有了这样的设备和装置,我们就可以应用所获得的有关系统的原始资料,对系统的工作性能和寿命进行预测。如在摩擦制动装置中,我们可以根据摩擦材料的化学、机械力学性能以及系统的速度、负荷和工作环境条件,预测刹车系统的工作特性、热状态及寿命,从而通过监控装置可以准确地预测其工作效能,确定何时更换制动衬片;在流体润滑中,可以根据固体表面的机械性能、表面形貌、磨损产物的特性和油的粘度,以及速度、载荷和环境条件,有把握地预测系统的特性;利用润滑剂的化学知识以及对固体的摩擦性能和变形能的充分了解,就能预测何时应该更换轴承或更换润滑油。

技术的传递是和教育联系在一起的,为此,必须大力开展摩擦学的教育和培训。著名摩擦学金质奖章获得者英国里兹大学D·道森(Duncan Dowson)教授指出“现在,年轻的科学家、工程师被吸引到了那些似乎令人敬畏的事情里去了,如微电子、计算机、机器人等。但是,和摩擦学比起来,却平淡无奇。我们有责任去引导他们,保持他们的兴趣,激起他们的热情,强调摩擦学的重要性。这必须纳入我们的教育,并且一定要成为青年人的职业活动”^[1]。应当把摩擦学的知识及摩擦学的巨大经济意义灌输到每位工程技术人员的海里,使他们完全明了摩擦学在设计之中或在使用、维护过程中的重要作用。摩擦学的原理及技术不应只是在出了问题之后试着纠正用的,而应作为在设计阶段进行设备的可靠设计所必需的科学依据。只有这样,才能保证设备具有足够的可靠性和最佳效率。为此,就需要对现有企业的技术人员和有关工人进行摩擦学的教育,对高等学校有关专业的在校学生也要安排学习摩擦学课程。

为便于对工业界提供摩擦学知识的咨询服务,各国都已建立

了国家摩擦学中心。许多大学开设了摩擦学课程,培养研究生,对在职工程技术人员进行培训。

我国自 1979 年成立全国摩擦学学会以后,相继在研究院、所和高等院校成立了摩擦学研究室,大力开展摩擦学方面的研究、应用和教育、培训工作。

三、摩擦学的发展

摩擦学是顺应社会的生产和生产的发展而发展起来的。可以说,摩擦学的发展贯穿于整个人类发展史,人类在与有害的摩擦作斗争的同时,也学会了充分利用有益的摩擦。

一个人在地面上拖动重物,就会感受到摩擦的存在,尽管当时人们还不知道如何解释这种现象,但是却知道如何减小它。人类迄今所取得的最伟大的发明之一就是滚轮,滚动摩擦比滑动摩擦省力,这在 5000 年前就已得到了应用。

我国,在 2000 多年前就已经普遍使用驴辘起升重物,在《诗经》中就有记述当时木质滑动轴承和润滑技术应用的诗句。14 世纪以前,我国在摩擦、磨损、润滑技术的应用方面一直居于世界领先地位。

作为一种技术,摩擦学知识的应用已有几千年的历史,但作为一门科学的研究则是在 15 世纪意大利文艺复兴时期的达·芬奇(Leonardo da Vinci)对摩擦现象进行研究之后才开始的。当时,达·芬奇提出了两条基本的摩擦定律。摩擦力与载荷成正比,这是摩擦第一定律;与接触面积无关,这是摩擦第二定律。他还指出“移动物体的难易程度是由于摩擦状态不同所引起的,每一个摩擦物体都有等于其 $1/4$ 重量的摩擦阻力”。法国工业革命的开始和机械驱动式机器(如 1770 年法国第一台速度为 3 英里/小时的自动汽车)的出现,航海业的迅速发展急需耐用、精确度高的罗盘,这就要求工程师们在寻找新的动力装置的同时,还要解决如何提高设备的效率和耐用性的问题。当时最先受到注目的就是“摩擦学”。

最初的摩擦学试验研究是在法国开始的,法国的阿蒙顿(A-monton, 1699)、库仑(Coulomb, 1785)通过大量的试验确定了关于固体摩擦的定律。他们从实验中得出摩擦力 F 和载荷 N 成正比, 比值 $f=F/N$ 称为“摩擦系数”。并进一步指出摩擦系数的大小与几何接触面积无关。

上述发现作为定律,一直把摩擦系数看作一个常数和物体的固有属性来处理。随着摩擦知识的积累,人们开始明白,对于一定的摩擦副,摩擦系数的大小取决于许多因素,如粗糙度、表面的尺寸和形状、界面的状态等。因此,关于摩擦的物理起因是非常复杂的,不能用简单的“表面粗糙度”假说(或叫做“凹凸说”)和“粘着”假说进行解释。这既需要精确的试验,同时也需要详尽的物理分析作为基础。从本世纪 20 年代到 30 年代,由于原子物理和量子力学理论的深入发展,才使固体摩擦理论的研究进入了一个兴旺发展的时期,直到 40 年代,摩擦的起因才得到更加科学的解释。

1938 年英国学者鲍登(Bowden)指出了实际接触面积和名义接触面积的不同,提出了摩擦面间产生焊合“结点”的原理。1946 年苏联学者克拉盖尔斯基(П. в. Крагельский)等,提出了新的分子-机械摩擦理论。这两个理论成为现代摩擦理论的基础。

磨损问题早在许多年以前就为人们所观察到。在原始社会,人类就会用石头通过研磨加工制作各种工具。但是历史上第一个进行磨损研究的是达·芬奇,他首先对含 30% 铜和 70% 锡的轴承进行了研究,发现磨损随载荷的增加而增大。第二次世界大战以后,主要是在美国和英国,重新发展起来的磨损研究出现了新局面,阿卡德(Archard)发现,材料的磨损率正比于载荷与滑动路程的乘积,与较软材料的硬度成反比。布里尔(Burwell)把磨损分为四种主要类型:粘着磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损和疲劳磨损。

大约在 5000 年前,人类就开始应用润滑技术和各种润滑剂。但对润滑的科学及其工程特性所进行的研究却是在被称之为工业革命的时代,为顺应精密机器零件制造业的需要而产生的。巴德罗

夫(Вадров)1883年提出了第一个完全流体润滑摩擦力的表达式,即:

$$F = (\eta \frac{v}{h_{av}} \times A_l)$$

式中: η ——流体粘度;

v ——轴的线速度;

h_{av} ——平均有效油膜厚度;

A_l ——润滑面积。

1886年雷诺(Reynolds)以其著名的雷诺方程奠定了流体润滑的数学基础,其基本试验工作直到20世纪才由斯特里拜克(Stribeck)完成。通过试验详细研究了各种工作参数(如载荷和速度)对润滑、滚动和滑动摩擦的影响。应用雷诺方程和新得到的试验结果,当时就出现了动压轴承的工业设计。为了解释非流体润滑或单分子层润滑状态下滑动表面的润滑问题,1922年哈迪(Hardy)提出了边界润滑的理论,为了提高油膜的承载能力和对工况的适应能力,相继开展了各种化学添加剂的研究和开发工作。

近年来,随着工业生产及科学技术的进步,摩擦学研究取得了很大发展,不仅解决了各种工业生产部门提出的摩擦、磨损和润滑的实际问题,而且在理论研究方面也取得了很大成果。在阐明摩擦理论方面提出了各种理论,如机械理论、分子吸引理论、粘着理论、分子-机械理论等。在解释磨损起因方面有粘着理论、表面疲劳理论、磨粒磨损理论等;在润滑方面有流体动压润滑理论、流体静压润滑理论以及弹性流体动压润滑理论。

四、摩擦学研究的意义

自从1966年以来,摩擦学已被广义地解释为适用于许多领域的新概念。这些领域包括能量的传递和能量的损耗,涉及摩擦、磨损、润滑课题的机械设备用材料的损失问题以及相应的科学和技术领域。因此,摩擦学的研究和应用具有十分重要的经济意义和科

学价值。

1. 经济意义

据估计,世界工业界大约有 30% 的能量是消耗在摩擦上,工业高度发达的英国、日本及联邦德国每年由于磨损而造成的损失就达几百亿到上千亿美元。机器零件的损坏和失效是必然要发生的,其中约有 80% 是由磨损引起的。美国国会材料政策委员会 1975 年调查发现,由于摩擦和磨损方面的原因,每年要消耗 1000 亿美元,约相当于美国国民经济产值的 5%;我国由于未作全面的调查和测算,要准确估计全国这方面的损失和可能节约的费用还十分困难。

据估计,从事摩擦学研究投入的经费与可回收效益的比约等于 1:30~1:76,因此摩擦学的应用和研究越来越受到重视,成为近年来发展最快的学科之一。

运用现在的摩擦学知识解决工业中存在的摩擦学问题,不仅收效快,而且花费不多。一些发达的工业国家每年用于摩擦学研究的经费,包括研究人员的薪水在内,仅为其所节约费用的 1%~2%。因此,这些国家相继都建立了相应的学术机构,投巨资竞相发展和应用这门科学。

石油矿场机械一般都在野外使用,工作条件相当恶劣,其零部件的工作特性和寿命问题尤为突出。因此,如何正确设计及合理使用和维护以延长其使用寿命,正确分析、判断机器的故障和零部件的失效,以便采取相应的措施提高设备的可靠性、减少停工时间,就成为石油矿场机械工程技术人員面临的极为重要的课题。

1982 年,在大庆油田进行了一次摩擦学工业调查,根据调查结果所作的测算,该油田应用摩擦学的原理与技术,一年就可获得 1.8 亿元的经济效益;如果把钻机部件的更换率降到每口井 0.5 件,每年就可节约 700 万元。

2. 摩擦学研究的科学价值

众所周知,自然界中的所有宏观过程都是不可逆的。由于“理