

国外机械工业基本情况

摩擦学与密封件

广州机床研究所 编

机械工业出版社

1995年4月

T17117
G76

摩擦学与密封件

广州机床研究所 编



机械工业出版社

(京)新登字 054 号

摩擦学与密封件

广州机床研究所 编

*

责任编辑：李松山

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

燕东印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 9 · 字数 225 千字

1995 年 4 月北京第 1 版 · 1995 年 4 月北京第 1 次印刷

印数 001—700 定价 45.00 元

*

ISBN 7-111-04485-1/TH · 586

出版说明

机械工业肩负着为国民经济各部门提供实用、先进的技术装备的重任。为适应社会主义市场经济体制的发展要求，必须大力发展机械工业。上质量、上品种、上水平，提高经济效益，是今后一个时期机械工业的战略任务。为了借鉴国外机械工业的发展道路、措施方法和经验教训，了解国外机械工业的生产、技术和管理水平，以便探索我国机械工业在社会主义市场经济体制下自我完善的发展道路，我们组织编写了第四轮《国外机械工业基本情况》。这一轮是在前三轮的基础上，围绕我国机械系统各行业和专业的发展战略，针对我国机械工业的技术发展的实际要求，全面系统地介绍国外机械系统各行业、企业、生产技术和科学研究等方面的综合情况，着重报道了国外机械工业80年代中后期到90年代初期的水平及到本世纪末的发展趋向。

第四轮《国外机械工业基本情况》共60多分册，编写人员达500余人。本书为《摩擦学与密封件》分册，由广州机床研究所编，执笔人汪德涛，责任编辑李松山。

机械工业部科技信息研究院

序 言

摩擦学是研究作相对运动相互作用表面的理论与实践的一门科学技术，也就是研究作相对运动的对偶表面的摩擦、磨损与润滑的科学技术。自从1966年3月9日英国教育与科学部的一个委员会发表著名的对润滑故障引起的经济损失的调查报告（即“乔斯特报告”）并创造摩擦学这个名词以来，许多国家开展了摩擦学理论及其在生产中的应用研究，创造了大量科技成果并带来了巨大的经济效益。现在已经普遍了解到，摩擦学和机械产品的精度保持性、寿命、可靠性、质量、节能、省料和减少故障与维修工作量直接有关。摩擦学原理及技术成果在机械产品的研究、设计、生产和使用过程中充分利用，对于机械行业提高产品技术水平、质量和经济效益，具有十分重要的意义。

自从摩擦学诞生27年来，摩擦学研究和开发得到迅速发展，学科领域不断扩大，许多国家设立了摩擦学研究所（中心）或重点实验室、学会等。目前国际摩擦学理事会（International Tribology Council 即 ITC）已有25个会员，（参见下表）。另有10个联络会员，即澳大利

国际摩擦学理事会成员

国 别	名 称
奥地利	奥地利摩擦学会
白俄罗斯*	白俄罗斯摩擦学家协会
保加利亚	保加利亚国家摩擦学理事会
中国	中国机械学会摩擦学分会
芬兰	芬兰摩擦学会
法国	法国摩擦学会
德国	德国摩擦学会
匈牙利	机械工程师科技协会摩擦学分会
印度	印度摩擦学会
以色列	以色列摩擦学会
意大利	意大利摩擦学中心
日本	日本摩擦学家协会
朝鲜	朝鲜润滑工程师协会
荷兰	
尼日利亚*	尼日利亚摩擦学会
挪威	挪威摩擦学协会
波兰	波兰摩擦学协会
俄罗斯	俄罗斯国立摩擦学中心
罗马利亚	罗马利亚摩擦学协会
西班牙	
南非	南非摩擦学研究所
瑞典	瑞典摩擦学协会
联合王国	机械工程师协会摩擦学分会
美国（机械工程师协会）	美国机械工程师协会摩擦学分会
美国（润滑工程师协会）	摩擦学家和润滑工程师协会

* 在1993年9月29日的“ITC会议”上得到认可

亚、比利时、加拿大、捷克、斯洛伐克、丹麦、波多黎各、克罗地亚、瑞士与津巴布韦等国的有关组织。

自1973年以来，国际摩擦学理事会每四年召开一次欧洲摩擦学国际会议，对推动摩擦学的进一步调查、研究和开发、应用以及摩擦学成果知识的交流推广起了十分重要的作用。

1966年乔斯特报告指出，英国应用摩擦学原理和实践，减少不必要的摩擦磨损、有关的设备故障、能源消耗等，估计1年可得到财政节约51500万英镑（1965年价值），相当于英国当年国民生产总值（GNP）的1.1%左右。此外还发现，摩擦学知识的缺乏对设计起了阻碍作用。以后美国机械工程师学会在1980年提出的报告“通过摩擦学节约能源的战略”中估计美国每年的类似财政节约为240亿英镑（1980年价值）。而在联邦德国（原西德）1983年所作调查报告中则估计该国由于摩擦学的原因造成的总损失约为387.1亿马克（130亿英镑），其他一些国家如加拿大等也有类似调查。据估计从这些国家通过摩擦学而获得的节约总值为1.1%~1.8%，而所花费的研究和开发费用为1:30至1:76（平均50%），也就是说每投入100万元，可望在两年内节约5000万元。

据乔斯特估计，摩擦学的主要研究、开发领域大致如下：

- 材料科学与技术（包括表面工程）：40%
- 机械系统：30%
- 润滑与润滑剂：20%
- 其他包括状态监测、摩擦学诊断、测试设备、摩擦学信息传播——数据库等）：10%

由此可以看出，材料科学与技术降低磨损方面与设计同等重要，特别是在无润滑磨损领域内，开发研究材料与表面工程技术占有较大的比例。

在过去27年中摩擦学领域的最大成就是在国际合作的协作和推动下逐步形成了一个为学术界、工业界和政府所公认的以控制摩擦和降低磨损为目标的学科，获得了大量科技成果，并在生产中推广应用，实现了它能促进提高机械及其他有关行业产品技术水平、质量和经济效益的目标，提高了产品精度保持性、寿命、可靠性和质量，节能、省料和减少了设备故障与维修工作量。

随着设备工况条件的日益严酷和设备自动化、微型化和计算机化以及经济压力和环境保护压力的增长，对摩擦学领域的研究开发提出了不少新的课题。一般认为，要想使已经取得的摩擦学科技成果转移到工业生产中，有许多工作要做。摩擦学是为工业生产服务的，摩擦学的概念只有纳入工程设计中，体现在工业生产中才能发挥出应有的作用。

从不同国家摩擦学领域的技术发展过程来看，主要从以下几方面推动摩擦学发展：

- 建立独立的摩擦学研究和技术转让中心以及重点试验室和科研生产联合体，开展科研、生产；
- 开展摩擦学技术咨询服务；
- 建立有关摩擦学标准、规范；
- 开发摩擦学专家系统、数据库、信息系统；
- 开展摩擦学的教育、培训工作、编辑出版教材，举办各种讲座、学术会议；
- 编辑摩擦学方面的手册、专著、丛书、期刊、文摘；

从本分册（摩擦学）第三轮出版（1985）以来，在摩擦学领域内已出现了较多的技术进展，下面着重报道近十年以来的综合情况和发展趋向。

参 考 文 献

- [1] Jost H P. 现代摩擦学的过去和未来. Eurotrib' 93 - Budapest, ITC, 1993, 1~35; 陈家庆译. 润滑与密封. 1994, (3): 52~63
- [2] Jost H P. トテイボロシ——発足 25 年間の歩みと将来への課題. 山田恭久 . トテイボロシスト . 1992, 37 (1): 2~9
- [3] Jost H P. 摩擦学. 二十五年の回顾与今后的任务. 润滑与密封. 1991, (6): 2~7
- [4] Jost H P. 25 年来摩擦学在科技方面的成就. 润滑与密封. 1993, (2): 2-3
- [5] Jost H P. Tribology—Origin and Future. Wear. 1990, 136 (1): 1~17

目 录

第一篇 摩擦学

第一章 摩擦与磨损	1
1.1 引言	1
1.2 摩擦的机理	2
1.3 磨损的分类和机理的研究	2
1.4 关于摩擦磨损研究的成就与待解决的问题	3
参考文献	5
第二章 流体润滑	6
2.1 引言	6
2.2 流体润滑的研究动向	7
2.3 流体润滑滑动轴承中流体膜的流态	8
2.4 流体动压润滑滑动轴承的结构型式	8
2.5 弹性流体动压润滑的进展	13
2.6 液体静压润滑	17
2.7 空气润滑	23
2.8 磁流体润滑与密封	27
2.9 高速铁路列车的润滑	29
参考文献	35
第三章 固体润滑	38
3.1 引言	38
3.2 固体润滑剂的类型和应用方法	38
3.3 发展动向	40
参考文献	43
第四章 润滑剂与摩擦化学	45
4.1 引言	45
4.2 润滑油	47
4.3 金属加工液	75
4.4 润滑脂	90
4.5 合成润滑剂	95
参考文献	98
第五章 摩擦学设计的现状与展望	100
5.1 引言	100
5.2 摩擦学设计的工业应用范围	100
5.3 机械零件的摩擦学设计过程	101
5.4 摩擦学数据库和专家系统	102
5.5 摩擦学失效预测及状态监测	103

参考文献	104
------------	-----

第二篇 密封件

第一章 引言	106
第二章 密封的基础理论	108
2.1 静密封的密封作用	108
2.2 接触式密封理论的进展	108
第三章 国内外橡胶密封技术发展趋势	111
3.1 高压化、高速化、适应高温、低温及砂尘等严酷环境	111
3.2 挤压型密封件的技术发展动向	112
3.3 唇形密封件的技术发展动向	112
3.4 旋转轴唇形密封件的技术发展动向	115
第四章 填料密封与密封垫片	118
4.1 填料密封	118
4.2 密封垫片	120
第五章 机械密封	121
5.1 概述	121
5.2 关于机械密封理论的进展	122
5.3 机械密封动态特性的研究	122
5.4 机械密封的材质	122
第六章 其他密封	124
6.1 间隙密封	124
6.2 迷宫密封	124
6.3 冷冻密封	125
6.4 粘性密封	125
6.5 螺旋密封	125
6.6 离心密封	125
6.7 磁流体密封	125
第七章 密封的性能指标	127
7.1 密封的工作条件	127
7.2 泄漏量及使用寿命	127
7.3 轴的偏心量与振动	130
7.4 与流体的相容性	130
第八章 关于密封件的标准	131
8.1 国际标准化组织 (ISO) 标准	131
8.2 日本工业标准中有关密封件的标准	132
8.3 美国标准与规范中有关密封件的标准	132
8.4 其他国家标准中有关密封件的标准	133
参考文献	134

第一篇 摩擦学

第一章 摩擦与磨损

1.1 引言

从摩擦学的历史演变过程来看,自从1966年摩擦学作为一门专门的科学技术领域诞生以前,摩擦、磨损与润滑方面的事件可一直追溯到公元前2400年有纪录的第一个润滑工出现,那时在古埃及萨卡拉(Saqqara)古墓中浮雕上刻着搬运大型雕像时有人在底板下面加润滑剂的情景。如果以钻木产生摩擦而取火的历史事件来分析,还可以往前追溯至两万年以前的旧石器时代。根据英国道森教授的著作:《摩擦学历史》一书中的记载,自1508年开始,意大利达·芬奇(Leonardo da Vinci)和阿蒙顿(G. Amontons, 1699)、库伦(C. A. Coulomb, 1785)先后证实了滑动摩擦定律,即后人称之为阿蒙顿-库伦外摩擦定律,开始进入研究摩擦的时代。到19世纪80年代先后出现了一系列有关弹性理论和润滑理论的基础理论,如1881年赫兹(H. Hertz)提出的弹性接触理论、1883年托尔(B. Tower)提出了第一个有润滑的滑动轴承试验的摩擦实验的报告,1886年雷诺(O. Reynolds)提出了滑动轴承流体动压润滑理论,可以说开始了系统研究润滑理论与实践的时代,但是进展并不快。到第二次世界大战(1945)前后,开始有关于磨损研究的报告出现。最早对磨损有实质性研究成果的霍尔姆(Ragnar Holm),最初在柏林的西门子康采恩(Siemen-Konzern)的实验室中工作,后来来到美国宾夕凡尼亚圣玛丽斯的Stackpole Carbon公司研究电接触点的性能,如断路器、继电器、接头、话筒、集流器与整流子等接点的摩擦、磨损,于1946年发表了报告“电接点”,以后在其妻子埃尔斯霍尔姆的协助下于1958年出版了电接点手册,对研究磨损的学生成为最好起点指导,其中包括有对于表面相互作用与磨损机理的基础知识的最有价值的说明。他将磨损过程看成是均匀原子转移过程,即由许多分子集合而成的具有一定厚度的均匀转移材料层的去除过程,建立了磨损的材料容积(V)与滑动距离(X)与真实接触面积相对的关系。1951年拉实诺维奇(E. Rabinowicz)与泰博(D. Tabor)使用放射性示踪原子技术监测磨损过程,分清材料转移与磨损间的区别。材料由一个表面扯下而在另一表面牢固地粘附,而这些转移层中的颗粒在随后的去除,成为磨屑。

以后于1952年巴威尔与斯特伦(J. T. Burwell and C. D. Strang)发表了在销盘机上对磨损的实验研究结果,回答了霍尔姆所建议的磨损的原子转移假说的有关规律。即磨损过程包括一部分接触面形成的微凸体接点的材料去除过程。

从霍尔姆发表第1篇报告的1946年起,一般认为摩擦学开始入“磨损”研究阶段。磨损研究是摩擦学领域内最重要的内容,到目前为止还不能说已经彻底解决,仍在进行大量研究工作。

1.2 摩擦的机理

尽管在古代人们就已知摩擦的存在，长时间内有不少学者对摩擦进行实验研究并提出了不少摩擦理论，如机械理论、分子理论、变形或“犁沟”理论、分子—机械理论、修正的粘附理论、能量平衡理论等。如弗莱舍尔 (G. Fleischer) 等人从摩擦过程中的能量平衡观点出发，将摩擦功看成是由变形功、达到某一预定的热相变的动能、发生完全相变的能量、容积变化所作功、辐射能、电位能、激发化学过程的能、表层解吸的能量等所组成，里格尼 (D. A. Rigney) 等则假设在稳态滑动时，全部摩擦功用来使材料产生塑性变化，并且转化成熟。在原民德马德堡技术大学 (TH. Magdeburg) 设计与摩擦学技术研究所中对摩擦的能量平衡理论进行深入研究，建立了完整的试验方法和试验台架。

目前在摩擦理论与实用研究方面，主要有以下几个方面：

- (1) 固体的接触与表面相互作用特性；
- (2) 摩擦的机械与分子分量的相互作用特性；
- (3) 剪切阻力递减规则；
- (4) 抗摩系数及划伤问题；
- (5) 摩擦副的选择；
- (6) 边界摩擦与混合润滑问题；
- (7) 特殊工况下的摩擦与磨损问题如高速、高温、低温、真空、有幅射源、高压等。
- (8) 超微细部件接触与摩擦问题，如计算机与电子部件间的摩擦、磨损与润滑问题。
- (9) 聚合物、陶瓷与固体润滑材料等新型材料的摩擦学问题。

1.3 磨损的分类和机理的研究

磨损的分类取决于许多因素，例如磨损量的大小、相对运动和载荷类型、磨损机理以及摩擦表面形貌如表层破坏形式等，因此有许多分类方法。例如最简单的磨损分类方法是根据磨损量将磨损分或轻微磨损与严重磨损，主要以磨屑尺寸的大小来衡量磨损的特征。磨损颗粒尺寸小于几个微米的磨损称为轻微磨损，有时轻微磨损用来表示弹性接触下的磨损，这时磨损过程发生在外层表面，表面仍然保持相对光滑，并且由摩擦中所产生的氧化层所保护。磨损颗粒尺寸大至 100 μm 的磨损称为严重磨损，有时严重磨损用来表示已达到塑性接触时的磨损。

不少学者先后提出了一些磨损分类方法，举例如下：

- (1) J. T. Burwell 与 C. D. Strang 于 1952 年将磨损分或磨料磨损、粘附磨损、腐能磨损、表面疲劳磨损 (点蚀) 微动磨损、浸蚀与气蚀。
- (2) M. M. Xpywob 于 1953 年将磨损分成磨料磨损、粘附磨损、塑性变形、脆性剥落、氧化磨损和化学腐蚀磨损。
- (3) Nam P. Suh 于 1973 年提出剥层磨损理论。
- (4) D. Scott 于 1979 年将磨损分为粘附磨损、磨料磨损、表面疲劳磨损与腐蚀磨损。
- (5) S. Jahanmir 于 1980 年提出的分类是粘附磨损、剥层磨损、微动磨损、磨料磨损、浸蚀、冲击磨损、表面疲劳、腐蚀磨损、扩散磨损与电接触磨损。
- (6) D. Godfrey 于 1980 年提出的分类是轻微粘附磨损、严重粘附磨损、磨料磨损、浸蚀、

表面疲劳、剥层磨损、腐蚀磨损、电腐蚀磨损、点蚀、气蚀损伤、放电与抛光。

(7) S. L. Rice 于 1980 年提出的分类是粘附磨损、磨料磨损、疲劳磨损、腐蚀或氧化磨损以及电磨损。

(8) DIN 50320: 粘附磨损、磨料磨损、表面疲劳与摩擦化学反应磨损。

(9) И. В. Крагельский 1984 年的著作中的分类是^[29]：磨料磨损、分子的（粘附）磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、气蚀磨损、浸蚀磨损等。他在 1981 年 Eurotrib' 81 会议上的报告中将磨损分为三类，即在弹性接触下产生的轻微磨损以及在塑性接触下产生的磨料磨损（带有明显的交叉状表面粗糙度）和粘附磨损（材料转移到对偶表面上）。

(10) H. Czichos 于 1985 年提出了图 1-1 所示的磨损分类。表明了摩擦学的相互作用关系与磨损机理。

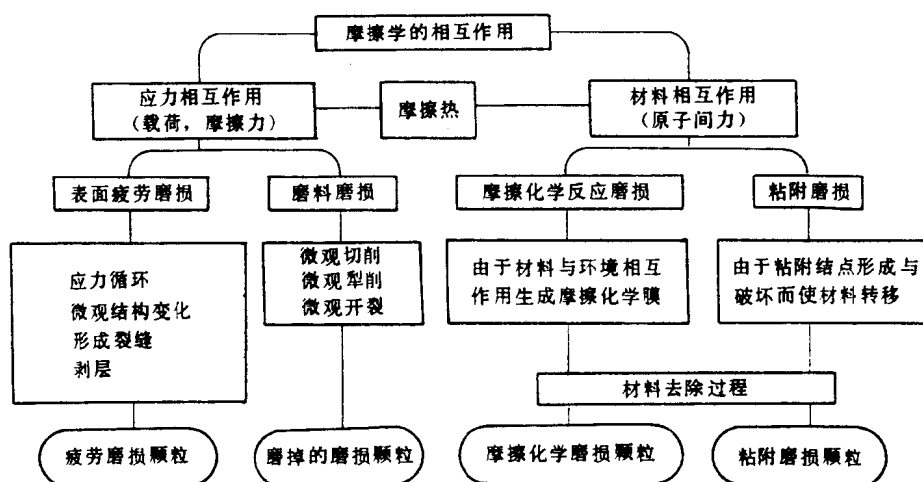


图 1-1 摩擦学的相互作用与磨损机理的分类

(11) M. Godet 等于 1984 至 1989 年间几次著文提出了三体磨损机理。

此外还有一些有关磨损的分类与名词术语，此处不一一列举。对于塑料或高聚合物、陶瓷等还会产生另外一些类型或高聚合物、陶瓷等还会产生另外一些类型的磨损。例如作相对运动的高聚合物往往因受热的影响而软化、烧蚀、熔融或蒸发，使材料损耗。

1.4 关于摩擦磨损研究的成就与待解决的问题

1.4.1 关于摩擦磨损研究所取得的成果

在国际摩擦学会主席乔斯特 (Jost) 在 1993 年 8 月 30 日至 9 月 2 日匈牙利布达佩斯举行的第六届欧洲国际摩擦学学会议上所作题为“现代摩擦学的过去和未来”的报告提到了有关摩擦、磨损研究的成就有以下几点：

- (1) 在扫描电镜下以及在空气中，对表面接触和接触机理的理解取得了进步；
- (2) 大大提高了对磨损机理的理解；
- (3) 固体润滑时电子转移对表面的影响；
- (4) 研究粘着和摩擦中的化学效应，得出某些过渡材料 (Ta、W、Nb、Ti 等) 在高真空

(10^{-9} torr) 下的粘着现象的规律；

- (5) 提高了对润滑滑动失效机理的理解；
- (6) 对单晶材料和多晶材料内聚力与附着力的研究取得了进展；
- (7) 发展了纳米级摩擦学，包括对极薄的润滑膜和边界润滑膜 (10^{-3} m) 的研究；并且
- (8) 确立磨损图并将陶瓷的磨损机理用图表示，为不同的磨损方式建立了模型；用“磨损图”对磨损材料进行分类取得了进展；
- (9) 对制动材料的改良，使汽车和飞机制动系统的制动性能更好，寿命更长；
- (10) 含颗粒润滑剂对弹流接触表面磨损率及持久性的影响，并计算含颗粒润滑剂产生的剪切力以获得润滑接触的持久寿命；
- (11) 发展了表面耐磨涂层技术，特别是减磨、增强磨损寿命的物理气相沉积 (PVD)、化学气相沉积及离子注入技术的开发；
- (12) 开发并应用了耐磨钢，大大地降低了寿命一循环费用；
- (13) 发展了切削刀具用的极薄的 TiN、TiAlN、TiBN 及其它涂层的涂膜方法，广泛用于机械制造、土木工程中的金属切削刀具、大型挖掘机的铲齿，大大提高了生产效率；
- (14) 发展了整体陶瓷在高温下的摩擦学应用；
- (15) 发展了充填聚合物（干润滑剂）和聚合物/金属复合材料；
- (16) 发展了 Pb 和 MoS₂ 表面涂层技术，用于真空摩擦零件的干膜润滑，包括铅涂层的球轴承在真空中有很长的寿命（典型值 10^9 转）；
- (17) 发展了类金刚石的表面涂层；
- (18) 改良了自润滑轴承材料，使其能在高速重载条件下运转；
- (19) 发展激光表面改性和溅射技术；
- (20) 发展了 Pb—Sn—Cu 三元减磨涂层；

有关摩擦、磨损科学技术未来的任务有以下几方面：

- (1) 研制自润滑聚合物；
- (2) 为承受高应力的摩擦学零部件如齿轮、轴承和传动机构开发材料，以减少维修甚至可以不维修；
- (3) 开发复合材料，特别是具有优异热稳定性，高导热导电性及高强度的复合材料；
- (4) 先进的聚合物基复合材料；
- (5) 研制自润滑陶瓷；
- (6) 发展增强摩擦学特性的新的表面处理手段；
- (7) 开发以更好地了解摩擦化学和弹流界面特性为基础的摩擦化学技术；
- (8) 进一步发展激光表面改性技术和 PVD、GVD 及离子镀等离子注入技术，以及极薄层表面的改性工艺；
- (9) 开发高耐磨涂层和固体润滑涂层，尤其是用于无液体润滑的操作条件下滑动和滚动部件的开发；
- (10) 发展特别适用于高温润滑的摩擦——催化剂粒子技术 (Tribo-Particulate Technology)，开发适用于热轧和冷轧轧钢机润滑的润滑剂，以提高控制摩擦的程度；开发令人满意的陶瓷用润滑剂；

- (11) 发展和建立用于预告和优化摩擦付材料设计的定量公式、设计准则和设计方法, 包括适用于设计者的一个全范围的磨损寿命公式;
- (12) 进一步发展用于悬浮和极低摩擦下操作的磁和电磁支承系统;
- (13) 发展切削和加工成型摩擦学, 包括“卡咬摩擦学”, 以提高材料切削和加工成型的效率, 并获得加工表面合适的应用力状态, 例如有压应力而不是拉应力;
- (14) 研究和发能识别摩擦变形和破坏的摩擦学原因的系统, 并建立足够的摩擦磨损模型;
- (15) 发展摩擦化学系统, 象低磨损或零磨损的“选择性转移”那样的自我修复系统; 为了获得先进的和有新远景的技术, 要开发为提高摩擦学水平和科学交叉性的基础研究和应用研究, 特别要注意以下几个方面的问题:
 - (1) 更加重视摩擦学系统的环境适应性, 包括摩擦学材料的再生利用;
 - (2) 进一步研究边界润滑, 弄清被普遍接受的边界润滑的定义;
 - (3) 更广泛地开发空气轴承和磁悬浮轴承技术;
 - (4) 进一步研究电子摩擦学, 包括对计算机信息存蓄的磁盘, 磁带录像机 (VCR) 的磁头和磁带的摩擦磨损研究, 以适应下一代电子设备的需要;
 - (5) 更广泛地使用水基润滑系统;
 - (6) 开发使滑润剂无菌化的方法。

参 考 文 献

- [1] Dowson D. History of Tribology. London: Longman Group Ltd, 1979
- [2] Fleischer G. Zur Energetik der Reibung. Wiss. Zeit. der TU "Otto von Guericke" Magdeburg, Sek. Maschinenbau. 1990, 34 (8): 55~66
- [3] Крагельский Ц В. Some Problems of External Friction and Wear. Proc. of 3rd Intl. Tribology congress. Eurotrib' 81, Sep. 21st~24th, Vol. I. Warszawa (Poland); Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1981, 247~270
- [4] [英] Jost H Peter. 现代摩擦学的过去和未来. 润滑与密封. 1994, (3): 52~63
- [5] 林亨耀, 汪德涛主编. 机修手册第8卷, 设备润滑 (第3版). 北京: 机械工业出版社, 1994
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰伯 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍澧等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Dorinson A, Ludema K C. Mechanics and Chemistry in Lubrication. Amsterdam; Elsevier, 1985
- [8] Peterson M B et al. Wear Control Handbook. New York; ASME, 1986
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions (Tribology in the 80's). New Jersey; Noyes Publ, 1985, 68~113
- [10] Zum Gahr K-H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc., 1986
- [12] Godet M. Third-Bodies in Tribology. Proc. 5th Intl. Congress on Tribology; Vol. I. Eurotrib' 89, Helsinki, 1989, 1~15

第二章 流体润滑

2.1 引言

流体润滑理论的发展是从 19 世纪后期开始的, 1883 年托尔 (B. Tower) 发表了第一篇“有润滑的轴承摩擦的试验”报告, 观察到采用油浴润滑的火车轮轴轴承中在运动时产生的流体动压力, 足以将轴承体壳油孔中的油塞冲掉。同年彼德洛夫 (H. И. Петров) 发表了“机械中的摩擦及润滑剂的影响”论文。1886 年雷诺 (O. Reynolds) 发表了“润滑的理论以及其在托尔先生试验中的应用, 包括实验确定橄榄油粘度”论文, 成功地应用流体动力学中的理论, 推导计算流体润滑油膜压力分布的方程即以后称之为雷诺方程, 从而为流体润滑理论奠定了基础。108 年以来, 人们应用与发展了雷诺方程解决了一系列滑动轴承等机械零件的润滑问题。目前已成为摩擦学研究最深入而成熟的一个分支。但至今应用起来仍然会发生机械零件因润滑不良而失败或发生重大事故, 这主要是由于经典润滑理论中一系列基本假设带有局限性, 而当今机器的运行工况已有了很大变化, 重载、高精度、高速、高温、非常规材料、非稳定工况等极端条件, 需要系统地发展摩擦学系统理论以及润滑理论, 开展摩擦学设计, 运用电子计算机和数值计算并结合先进实验测试技术, 使理论与设计计算结果和实际相符。

1989 年 9 月至 1991 年 3 月间, 日本摩擦学学会摩擦学实用计算研究会对“流体润滑实用计算的现状及今后的课题”进行了调查研究, 发表了研究报告。报告中列举了美国 Trans. ASME J. of Tribology 在 1986~1990 年间发表的有关流体润滑理论的专题论文有关研究领域的统计数据, 参见表 2-1。

表 2-1 Trans. ASME Tribology 发表的 1986~1990 年间
流体润滑有关联的论文数目。

序号	论文的研究内容	论文数	同时考虑项目
1	考虑润滑油粘度的温度变化的理论 (THL)	33	2, 4, 5, 8, 10, 11
2	考虑润滑油流动的紊流的理论	17	1, 3
3	考虑润滑油的惯性的理论	7	2, 6
4	考虑多相流 (例如气液二相流) 的理论	5	1
5	考虑气蚀 (空穴) 的理论	8	1
6	考虑润滑气体的压缩性的理论	18	3, 10, 12
7	考虑润滑气体在滑动面的转移的理论	12	10, 11
8	考虑润滑面的弹性变形的理论 (EHL)	42	1, 10, 11
9	考虑润滑面的热变形的理论	3	
10	考虑润滑面的凹凸的理论 (混合润滑)	28	1, 6, 7, 8, 13
11	润滑油的流变学	21	1, 7, 8, 13
12	轴承的动特性	21	6, 13
13	挤压膜	13	10, 11, 12
14	不对中	3	

(续)

序号	论文的研究内容	论文数	同时考虑项目
15	边界条件	2	
16	沟槽轴承	5	
17	多孔质轴承	4	
18	其他(浮环、建立入口压力、摩擦热、磁力轴承、涡流轴承等)	各1	
	合 计	241	

由此可以看到流体润滑理论的研究动向,如何考虑逐项和联合取消雷诺方程的假设,(如受表面粗糙度影响而不是理想的光洁表面,润滑油的流动是紊流,润滑油的粘度受温度和压力等的影响而改变,考虑润滑油的惯性影响等等)等。建立了相应的模型和解题的方法,建立特殊润滑介质及特殊工况下相应模型与解算方法;建立将流体润滑膜做为摩擦学系统中的一个要素的动力学解题方法;研究极端条件下润滑参数的测量技术,包括间隙函数、压力场、温度场、变形场、流体润滑膜的刚度、阻尼等;极端条件下流体润滑的结构和新材料、参数和设计方法等。

2.2 流体润滑的研究动向。

上面所提到的日本摩擦学实用计算研究会,对其会员作了一次预测,题目是:流体润滑理论应用领域的今后发展趋向,结果如表 2-2 所示。

表 2-2 关于流体润滑理论的预测结果(收回 12 份)

序号	题 目	●	○	△	×
1	考虑润滑油粘度的温度变化的理论 (THL)	5	5	1	0
2	考虑润滑油流动的紊流的理论	2	4	3	0
3	考虑润滑油的惯性的理论	0	1	7	0
4	考虑多相流(例如气液二相流)的理论	2	3	3	0
5	考虑气蚀(空穴)的理论	5	4	1	0
6	考虑润滑气体的压缩性的理论	2	2	4	0
7	考虑润滑气体在滑动面的滑移的理论	0	5	4	0
8	考虑润滑面的弹性变形的理论 (EHL)	7	5	0	0
9	考虑润滑面的热变形的理论	5	7	0	0
10	考虑润滑面的凹凸的理论(混合润滑)	7	4	1	0
11	其他(非牛顿流体、多孔质轴承、使用实物进行实验验证试验研究、考虑流体力与固体接触力的理论等曾被提到)				

注: ●——持一定要发展的观点

○——持最好从另外方向发展的观点

△——持无所谓观点

×——无必要发展

从表 2-2 可以看到和表 2-1 一样,研究 THL、EHL 与关于考虑润滑的凹凸(粗糙度)理论等题目是多数人的意见,而考虑气蚀、润滑面的热变形需解决实际问题,对感到理论的预测的必要性较多的成员,是可理解的。

2.3 流体润滑滑动轴承中流体膜的流态

流体动力润滑滑动轴承中流体膜的流态随着机组向大型、高速发展，轴颈相对轴承的圆周速度随之而增大，使轴承中油膜流态由层流转向紊流。流态由层流转向紊流后，在相同结构型式和几何、运行参数情况下后者较前者具有较小的偏心距和流量、较大的功耗、较高的温升和较低的稳定性。以功耗为例，层流工况下功耗与转速平方成正比，紊流工况下功耗与转速立方成正比，影响较大，为此，必须考虑紊流对轴承性能的影响。国外不少学者在研究紊流理论，如 V. N. Constantinescu (1959, 1965)、C. W. Ng, C. H. Pan (1965)，青木弘、原田正躬 (1971)、G. G. Hirs (1973, 1974) 等分别提出了紊流理论。紊流是一种复杂的流体流动现象，在紊流理论用在润滑理论上的主要是 (1) 按壁面定律的方法；(2) 按紊流能量方程的方法；(3) 按混合长度理论的方法；(4) 按整体流动的计算方法，但在相当宽的雷诺数范围内这些理论所得到的结果都可满足一般工程需要。但随着一些大型发电机组轴承的发展，这些轴承大多处于层流向紊流转变的过渡区或紊流润滑区，这时雷诺数将超过临界值，轴承的摩擦功率损失显著增加，流量减少，温升提高，而偏心率减小。因此近 20 年来国外进行了大量研究工作，以了解从层流向紊流润滑的过渡条件，转变过程以及在紊流工况下轴承的工作性能及设计等。德国波鸿大学许勒尔 (D. Schuler) 与霍普夫 (G. Hopf) 等曾观察到双油楔轴承 ($\phi 500$ 直径) 在 3600r/min 下 (线速度 94.2m/s) 摩擦功率损失达 400kW，大大高于按层流润滑理论计算的摩擦功率。

2.4 流体动压润滑滑动轴承的结构型式

随着机械向高速化、大型化、高性能化和节能发展，加上信息机械与机电一体化机械等的进展，对轴承的结构型式，轴承的承载、抗振能力以及稳定性提出了更高的要求。以大型汽轮发电机轴承为例，由单一油叶或油楔型轴承到油叶与油楔型组合、圆与椭圆复合、部分固定和部分可倾瓦混合、以及在瓦面开设多种沟槽的特种轴承。这主要是由于常用的轴承型式往往是提高了稳定性，但降低了承载能力、增强了不平衡响应。有的轴承型式虽具有高的失稳转速，但由它支承的轴系对数衰率却较小或抗干扰振动的性能较差，为解决上述矛盾促使轴承型式不断更新，瓦面结构日益复杂。再如高速透平机械，一般承载较小，而稳定性问题较突出，通常除采用稳定性较好的轴承如可倾瓦、多油叶轴承外，还在原有圆柱轴承上采用一些措施，如将上下瓦错位、上瓦设置油坝、下瓦开设卸荷槽或在下瓦承载区开设卸荷腔等。

2.4.1 旋转机械用滑动轴承

旋转机械如压缩机、汽轮机、发电机、泵与发动机等，其轴承直径可达 10m 以上，高速轴承转速可达 5×10^5 r/min 以上，一些大型轴承的线速度可达 150m/s。图 2-1 是旋转机械的轴承直径与转数的状况，图中有一条临界线，即：

$$D^2 N = 1.572 \times 10^9 \nu (D/C)^{3/2}$$

式中 D——轴承直径 (mm)；
C——直径间隙 (mm)；
N——轴承转数 (r/min)；
 ν ——润滑油粘度 (m^2/s)。