

流体力学润滑

*Hydromechanical
Lubrication*

池长海 著

国防工业出版社

TH117

C79

412474

流体力学润滑

Hydromechanical Lubrication

池长青 著



国防工业出版社

·北京·

D253/01

图书在版编目(CIP)数据

流体力学润滑/池长青著. —北京: 国防工业出版社,
1998. 7

ISBN 7-118-01856-2

I. 流… II. 池… III. 滑动轴承-流体动力润滑-研究
IV. TH133. 31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 28975 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 16 3/8 427 千字
1998 年 7 月第 1 版 1998 年 7 月北京第 1 次印刷
印数: 1—1000 册 定价: 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一种新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾铎		
秘书长	崔士义		
委员	于景元	王小谟	尤子平
(以姓氏笔划为序)	冯允成	刘仁	朱森元
	朵英贤	宋家树	杨呈豪
	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果
	张均武	张涵信	陈火旺
	范学虹	柯有安	侯正明
	莫悟生	崔尔杰	

目 录

第一章 结论	1
1.1 摩擦学的定义	1
1.2 摩擦学的研究内容	2
1.3 润滑力学的研究内容	5
参考文献	25
第二章 流体力学润滑方程	27
2.1 概述.....	27
2.2 正交曲线坐标系中的流体力学基本方程.....	28
2.3 流体力学方程的润滑近似.....	33
2.4 正交曲线坐标系中的雷诺润滑方程.....	41
2.5 正交曲线坐标系中润滑膜的流量与剪应力.....	47
2.6 直角坐标系中的基本润滑方程.....	49
2.7 圆柱坐标系中的基本润滑方程.....	51
2.8 圆球坐标系中的基本润滑方程.....	54
2.9 润滑膜产生承载能力的物理解释.....	56
2.10 无量纲的雷诺润滑方程以及流体润滑中的 无量纲参数	75
2.11 润滑膜的性能参数	82
2.12 二维平均能量方程的润滑近似	90
参考文献	98
第三章 外部供压润滑	100
3.1 概述	100
3.2 外部供压润滑的流体力学基础	100
3.3 外部供压润滑的机理	113

3.4	外部供压止推轴承	122
3.5	外部供压轴颈轴承的近似理论分析	135
	参考文献	145
第四章	流体动力润滑	146
4.1	线性化雷诺润滑方程的本征函数的正交性质	146
4.2	幂滑块	156
4.3	倾斜平板滑块	179
4.4	气体润滑的平板滑块的摄动解	190
4.5	二维滑块轴承的精确解——指数膜形	194
4.6	二维滑块轴承的精确解——平面阶梯膜形	201
4.7	倾斜阶梯滑块	212
4.8	全周圆柱形轴颈轴承	221
4.9	浮环轴颈轴承的静态性能	261
4.10	气体动压轴颈轴承的 ΠH 线性化方法	270
附录 4-1	含轴颈轴承的膜厚函数 $H=1+\varepsilon\cos\theta$ 的积分	281
附录 4-2	关于反三角函数的取值	282
附录 4-3	雷诺边界条件下全周轴颈轴承收敛区 的进口问题	285
附录 4-4	雷诺边界条件下全周轴颈轴承的承载 性能	286
	参考文献	286
第五章	流体静压/流体动力润滑	288
5.1	动静压混合润滑的基本性质和特点	288
5.2	可渗透多孔材料的动静压混合窄轴颈轴承理论	303
5.3	液体润滑的动静压混合阶梯滑块	317
5.4	冕形表面浅腔动静压混合可倾瓦止推轴承	333
5.5	气体动静压混合轴颈轴承的 ΠH 线性化分析	350
	参考文献	367
第六章	动载荷下润滑膜的特性	369

Contents

Chapter 1. Introduction	1
1.1 Definition of tribology	1
1.2 Basic subjects in tribology	2
1.3 Basic subjects in Iubrication mechanics	5
References	25
Chapter 2. Equations of Hydromechanical Lubrication	27
2.1 Introduction	27
2.2 Basic equations of fluid mechanics in orthogonal curvilinear coordinates	28
2.3 Lubrication approximation of equations of fluid mechanics	33
2.4 The Reynolds equations of lubrication in orthogonal curvilinear coordinates	41
2.5 Lubricant flow and shear stress in lubricating films in orthogonal curvilinear coordinates	47
2.6 Basic equations of lubrication in rectangular coordinates	49
2.7 Basic equations of lubrication in cylindrical coordinates	51
2.8 Basic equations of lubrication in spherical coordinates	54
2.9 A physical explanation for load-carrying capacity of lubricating films	56
2.10 The dimensionless Reynolds equations of lubrication	

	and dimensionless parameters in fluid lubrication	75
2. 11	Performance parameters of lubricating films	82
2. 12	Lubrication approximation of the two-dimensional average energy equation	90
	References	98
Chapter 3.	Externally Pressurized Lubrication	100
3. 1	Introduction	100
3. 2	Fluid mechanic basis of externally pressurized lubrication	100
3. 3	Mechanism of externally pressurized lubrication	113
3. 4	Externally pressurized thrust bearings	122
3. 5	An approximate theoretical analysis of externally pressurized journal bearings	135
	References	145
Chapter 4.	Hydrodynamic Lubrication	146
4. 1	Orthogonality of the eigenfunction of the linearized Reynolds equations of lubrication	146
4. 2	Power sliders	156
4. 3	Plane inclined sliders	179
4. 4	Perturbation solutions for gas lubricated plane sliders	190
4. 5	Accurate solutions for two-dimensional sliders, exponential films	194
4. 6	Accurate solutions for two-dimensional sliders, step films	201
4. 7	Tapered step sliders	212
4. 8	Cylindrical full journal bearings	221
4. 9	Steady state performance of floating-ring journal bearings	261
4. 10	The linearized IIH-method for gasdynamic journal	

bearings	270
Appendix 4-1 Integrals of functions containing the film thickness function($H=1+\varepsilon \cdot \cos\theta$) in journal bearings	281
Appendix 4-2 Evaluation of inverse trigonometric functions	282
Appendix 4-3 Problems related to the inlet of the convergent region of a full journal bearing under the Reynolds boundary conditions	285
Appendix 4-4 Load capacity of full journal bearings under the Reynolds boundary conditions	286
References	286
Chapter 5. Hydrostatic/Hydrodynamic Lubrication	288
5.1 Basic characteristics and unique properties of hydrostatic/hydrodynamic bearings	288
5.2 Theory of hydrostatic/hydrodynamic porous narrow journal bearings	303
5.3 Hydrostatic/hydrodynamic liquid-lubricated step sliders	317
5.4 Hydrostatic/hydrodynamic shallow pocket crown tilting pad thrust bearings	333
5.5 An analysis of the linearized IIH-method for hydrostatic/hydrodynamic gas lubricated journal bearings	350
References	367
Chapter 6. Characteristics of fluid Lubricating Films under Dynamic Loading	369
6.1 Introduction	369
6.2 The Reynolds equations of lubrication under dynamic loading	369

6.3	Characteristics of squeeze films in journal bearings	372
6.4	Characteristics of infinitely narrow journal bearings under the combination of wedging and squeezing ...	376
6.5	Characteristics of infinite-width journal bearings under the combination of wedging and squeezing	379
6.6	Characteristics of finite-width journal bearings under the combination of wedging and squeezing	385
6.7	Locus of a full journal bearing's shaft center	390
Appendix 6-1	Integrals for solving infinitely narrow journal bearings	400
Appendix 6-2	Integrals for solving infinite-width journal bearings	401
References	402
Chapter 7. Stability Theory of Bearings	403
7.1	Introduction	403
7.2	A linearized analysis of stability	404
7.3	Coefficients of dynamic characteristics of fluid lubricating films	413
7.4	Coordinate transformation of coefficients of dynamic characteristics of fluid lubricating films	421
7.5	Equations of motion for a single-disk rotor supported by fluid lubricating films	424
7.6	Stability criteria of fluid lubricating films	427
7.7	Methods for improving the stability of bearings	429
7.8	Stability of floating-ring journal bearings	438
References	444
Chapter 8. High Speed Lubrication	446
8.1	Introduction	446
8.2	Inertia effects in high speed lubrication	448

8. 3	Turbulent lubrication	464
8. 4	Effects of temperature in high speed lubrication	479
8. 5	High speed elastic foil bearings	485
	References	506

第一章 绪 论

1.1 摩擦学的定义

任何一种运转的机械都必然存在着运动副。运动副之间的摩擦导致了机件的磨损和机械能的耗散。前者表现为尺寸变化和精度降低;后者表现为发热和噪声等。这些都是希望避免的有害现象。尽管对摩擦、磨损、润滑的研究开始得很早,但它们获得迅速发展却是近半个世纪以来的事。第二次世界大战以后,机械工程中的普遍发展趋势是高速、重载、高温。在这类严酷条件下工作的机器,其摩擦、磨损所带来的损失是极为巨大的,主要表现在以下两个方面。

(1)全世界每年生产的总能源约有 1/3 消耗在摩擦过程中。

(2)机器设备的损坏报废绝大部分是由于过度磨损而不堪使用的结果。据估计^[1],英国、原联邦德国等这样一些高度工业化的国家中,磨损造成年损失达到 20 亿美元之谱,这还是 1976 年估出的数字。

降低摩擦和减少磨损最普遍、最有效的办法就是润滑,至少在当前的技术水平下是如此。所以,近几十年来,对摩擦、磨损和润滑的研究工作发展很快,并且取得了显著的成就。1957 年一种国际性的学术期刊 Wear 开始出版。在美国机械工程师协会的学报 Trans. ASME 的系列中还专门有 Journal of Lubrication Technology。1958 年美国润滑工程师协会创办了自己的学报 Trans. ASLE。1966 年英国专门成立了一个研究组来调查润滑方面的教育和科学研究的状况。在这个研究组的报告中,首先提出了摩擦学(tribology)这个科学名词^[1]。摩擦学是一门新的边缘学科,它包含摩擦、磨损和

润滑三个组成部分,其综合性和牵涉面极为广泛。1981年开始, *Journal of Lubrication Technology* 改名为 *Journal of Tribology*。从1966年以来,对摩擦学的研究工作迅速展开,每年发表的论文数量之多,达到惊人的程度,1976年前后统计的数字为每年8 000篇左右。

1966年提出摩擦学这个名词的同时,也对这门学科下了个定义^[1,2]:摩擦学是研究相对运动的相互作用表面的理论和实践的科学技术。这是一个全面的定义,它确定了这门学科的研究内容和性质。

1.2 摩擦学的研究内容

上述摩擦学的定义确定了其研究内容是关于相对运动表面间的相互作用。就我们所考虑的范畴来说,运动表面间的相互作用就是摩擦。磨损是摩擦的直接后果,润滑则是减小摩擦的最重要的方法。

1.2.1 摩擦

固体间的摩擦是十分复杂的,它包括机械的相互作用、物理的相互作用和化学的相互作用。机械作用是接触过程中接触点的弹性变形、塑性变形和摩擦过程中的塑性流动等作用。摩擦中的物理作用包括各种形式的能量如热能、机械能、电磁能和声能等的转换,其中特别重要的是热的生成,大量摩擦热的产生,促进了局部接触点处材料的软化和熔融,它更进一步使塑性流动变得容易。在接触点上的巨大压力造成分子粘附和熔焊现象。摩擦力就是剪切这些结点所需要的力。化学作用则主要是表面气体的化学吸附作用和表面氧化膜的形成。在分子粘附中还应包括化学键的作用。摩擦的化学过程中,最重要的是表面膜(氧化膜、氮化膜)的形成问题。

研究摩擦过程的基础是固体表面间的接触状况,接触状况取

决于表面形貌,表面形貌通常包括表面粗糙度和表面纹理两方面。任何一个工程表面,在微观上总是凸凹不平的。这种凸凹不平的现象就称为粗糙度。它的数值表示方法是使用测量范围内的平均值(算术的、均方根的、统计学的等)。显然,表面凸起的峰是两表面间互相接触的点,它们决定摩擦力的产生和大小。表面凹下去的谷,则对流体润滑有重要的影响,它们实际上起着保持润滑剂的贮存空间的作用。表面形貌的第二个重要方面就是表面纹理。通常使用机械加工方法得到的工程表面,在平行于和垂直于切削方向,其粗糙度分布明显不同,形成具有方向性的纹理。显然,表面纹理的存在,使摩擦、磨损和润滑的性能具有方向性。

表面粗糙度对摩擦和磨损都有影响^[3,4]。按照现代摩擦学的观念,摩擦由三个主要因素构成:

- ①微凸体变形;
- ②粘着;
- ③犁沟。

由此将摩擦系数表示为粘着、犁沟和粗糙度的函数。加工形成的工程表面,其粗糙度对初始阶段的摩擦、磨损有显著的影响,而对稳态磨损过程则影响不明显。但是,在一些特定情况下,初始粗糙度在磨损中形成的粒子嵌入滑动表面,则加工的初始粗糙度对摩擦磨损过程有持续的影响。所以,在合理的前提下,降低加工表面粗糙度是减少摩擦、磨损并提高机械寿命的重要途径。

1.2.2 磨损

磨损过程就是工程表面间接触的部位产生变形随之与本体分离的过程。按照磨损的机械的、物理的和化学的机理,大致可划分为四种类型:

- ①粘附磨损;
- ②磨粒磨损;
- ③腐蚀磨损;
- ④表面疲劳磨损。

(1)粘附磨损。当真实接触面积相互接近到非常小的距离时,开始是范德瓦尔斯力起作用。当距离小于1nm时,表面物质的分子力便起作用,这就是所谓的分子粘附力。当发生相对运动时,接触点的下部就要被剪断,从而发生表面材料的转移或损失。

(2)磨粒磨损与微切削过程相类似。如果一个硬表面与一个软表面相接触,硬表面上的微凸峰就嵌入到较软的表面中。当出现相对切向运动时,硬表面的微凸峰就在软表面上犁沟并切除材料,如同砂轮的磨粒磨削零件。磨粒磨损是磨损的主要形式。在工业中,有一半左右的磨损属于这种类型。

(3)腐蚀磨损的机理与其他形式的磨损有很大的不同。其他形式的磨损只包含两种成员之间的相互作用,即只有两接触表面。而化学磨损还包括第三成员在内,即还有间于两接触面的介质。若介质在摩擦的环境中能与两表面活泼地起反应,则表面的反应层就将在摩擦过程中形成不断被除去又不断产生的循环,从而导致接触表面材料的转移或损失。

(4)表面疲劳磨损的最大特点是它的产生并不需要两表面直接接触。在足够厚的润滑膜实现完全润滑的条件下,疲劳磨损也能发生。由于材料表面受到的润滑膜的力是一种循环力,这种力作用较长时间之后,表面就出现裂纹。这种表面疲劳与普通机械零件的疲劳损坏不一样,它找不到明确的疲劳应力极限。表面疲劳磨损主要发生在滚动接触上,如滚子轴承的滚道圈、齿轮牙等,这些都是典型的承受循环应力的零件。

1.2.3 润滑

润滑是减小摩擦与磨损的最重要的方法,至少在目前的技术条件下是如此。润滑流体力学是研究如何使用流体膜有效地将运动副分隔开的问题。1883年彼德罗夫(Н. Петров)首先解决了两圆柱表面间流体润滑的平面问题。这是粘性流体力学中不多的精确解之一,称为彼德罗夫润滑油理论。1886年流体力学家雷诺(O. Reynolds)利用狭缝流假设简化了纳维—斯托克斯(Navier-Stokes)