

BOMO RUENHUA LILUN

薄膜润滑理论

● 曲庆文 著



科学出版社
www.sciencep.com

薄膜润滑理论

曲庆文 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共分13章,内容涉及分子流体动力学、微观粒子的时空特性、流体的流态特性、黏度的微观特性、薄膜润滑理论、轴承特性分析、温度修正、剪切稀化修正、实验分析等研究领域。本书是作者十余年研究工作的积累,充分揭示薄膜润滑的本质,构建薄膜润滑方程,建立微观与宏观的联系。本书总结了国内外薄膜润滑研究的成就,经过系统的分析研究,提出了作者的观点。

本书可用作机械设计及理论专业研究生教材及高等院校有关专业师生的教学参考书,也可供从事润滑理论及轴承技术研究的科研工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

薄膜润滑理论/曲庆文著. —北京:科学出版社, 2006

ISBN 7-03 017057-1

I. 薄… II. 曲… III. 薄膜-润滑 IV. TH117

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第025202号

责任编辑:田士勇 张 静 杨 然/责任校对:朱光光

责任印制:安春生/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年11月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2006年11月第一次印刷 印张: 14 3/4

印数: 1—2 500 字数: 276 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

从 20 世纪 80 年代初兴起的纳米技术被广泛认为是 21 世纪的先进技术和领导技术。这一技术几乎渗透到现有的各个技术领域,使人们认识事物的观点发生了根本性的转变。纳米摩擦学是随纳米科学和技术应运而生的一个新学科。本书所介绍的薄膜润滑理论就是纳米摩擦学中的重要分支。薄膜润滑是介于边界润滑和弹性流体动压润滑之间的一种独立润滑状态。其润滑膜厚度在几个纳米到几十纳米之间,润滑特性和机理与弹性流体动压润滑和边界润滑有本质区别。在国际上首先由英国学者于 1991 年测量到薄膜润滑的膜厚,后来,我国清华大学摩擦学重点实验室学者(1992 年)、捷克学者(1996 年)等研制出新的测量方法,实现了薄膜润滑的测量。1996 年清华大学摩擦学重点实验室首先提出了薄膜润滑的物理模型。香港城市大学、日本东北大学等在薄膜润滑实验方面也做了大量研究工作。在薄膜润滑理论计算方面,美国 Tichy 教授、中国胡元中教授、曲庆文教授、张超辉教授等人开展了大量研究。

该书作者曲庆文教授长期进行薄膜润滑理论的研究,形成了一定的分析方法;综合了现有的研究工作经验,以微观分析动力学为基础,把微观与宏观分析有机地结合,提出了薄膜润滑分析计算的修正方程;以能量流的观点分析吸附层特性,把吸附层与流体的黏度相结合,得到了研究薄膜润滑的一系列黏度修正模型;把黏度修正模型引入到 Reynolds 方程,进行简化假设研究分析得到薄膜润滑分析的广义计算方程。对推动薄膜润滑理论与实验的进展,促进纳米摩擦学的快速发展做出了重要工作。该著作具有理论的前沿性和系统性,对于薄膜润滑的深入研究起到了推动作用。

雒建斌

前 言

流体润滑理论经过了 100 多年的发展,逐渐建立了较完善的理论体系和研究方法。在这百年中,人们的认识发生了根本转变,从润滑的建模到实验研究,无不是科研工作者不懈努力的结晶。从基本的 Reynolds 方程入手,经历了基本性能计算、实验研究的修正、假设条件的演变、真实工作状态的模拟,形成了完整的计算方程和分析方法,开发了静动态液、气体轴承等多种结构形式的轴承以满足结构稳定性及适应不同工况的要求等。揭示物流特性、挖掘自然规律、回归自然,是人们一直关注的课题。

薄膜润滑的发展主要集中在近 30 年,通过对自然现象的理解和实验研究而逐步形成新的概念,由此再形成了新的理论,并同时指导工程实践和实验。薄膜润滑理论是在计算技术和微型机械的发展中得到快速发展的,计算和模拟技术使得机器能够较精确地模仿自然,从而揭示自然规律的本质。其发展主要经历三个阶段:①自然现象的发现与分析和实验检测阶段,主要是对发现的特殊现象加以证明和分析解释,开发实验设备,模拟自然现象,以此证明现象的存在;②建立模型和模拟求解阶段,在模拟自然现象的基础上,利用微观理论对现象分析研究,结合实验规律得出理论解释和计算方程;③回归实验分析研究阶段,把由假设分析模型得到的计算数据用实验来证明,以示模型的正确性和理论解释的准确性。从实践到理论,由理论回归实践,人们的认识不断深化,对自然现象的理解不断升华,揭示自然现象本质的能力不断提高,在现代科学技术的条件下,实践—认识—实践的过程不断缩短。

目前薄膜润滑理论的研究可以说是刚刚起步,所采用的模型也是多种多样的,对薄膜润滑现象的解释正逐步走向统一。薄膜润滑的产生,主要在高副传动系统中,其分析的重点是如何进行模型计算。在弹流润滑的分析中,怎样考虑薄膜润滑的特性,现行的做法是综合考虑黏度随间隙的变化,在此基础上进行修正,基本统一在黏度修正上,使得解决问题的基本方法不变,同时能正确地解释薄膜润滑的特殊性。对于低副,由于加工技术的限制,达到薄膜润滑级别的加工精度是十分困难的,分析研究落后于高副的研究。

本书重点论述低副薄膜润滑理论,就修正、建模、特性分析等方面充分论证在低副接触条件下,薄膜润滑实现的可能性及模型的意义和应用。

本书共 13 章,第 1 章充分论述了当前国内外薄膜润滑的研究现状、内容和意义,总结已有的工作;第 2 章论述了吸附层的定义及特性,吸附层在薄膜润滑

中是至关重要的性能指标,影响流体内部分布和宏观表现;第3章就流体内部特性主要介绍了分子内部作用效果,流体分子的分布函数与热力学特性及分子势的关系;第4章论述了流体的输运特性,解决了分布函数等与流体宏观表现的关系,流体的空间和时域特性;第5章介绍了分子流体动力学计算方程,形成微观与宏观的结合;第6章分析了薄膜润滑条件下流体的特性,以流变学的观点论证流体黏度在微间隙内的表现,黏压、黏温、黏度与间隙、剪切稀化、滑移边界等,建立了计算薄膜润滑性能的黏度修正方程;第7章介绍了当前国内外对薄膜润滑的建模方式及基本模型,以利于与作者提出的模型相比较;第8章以作者提出的计算模型进行了轴承特性的分析计算,论述了平板轴承在无限光滑表面情况下不同黏度修正的特性;第9章论述了径向轴承的分析方法,得出了不同修正模型下径向轴承薄膜润滑特性;第10章分析论述了有限宽轴承的特性和温度分布,推导了薄膜润滑条件下的能量方程,研究了温度分布的特殊性;第11章分析了温度修正的等效黏度模型,就提出的模型进行了理论计算分析;第12章分析论述了剪切稀化问题的重要性,研究了在考虑润滑剂存在剪切稀化条件下轴承的特性,分析了考虑剪切稀化的必要性;第13章以实验分析为主,进行理论与实验的比较。

本书的主要内容是作者多年工作的积累。作者在西安交通大学朱均教授、清华大学温诗铸院士和雒建斌教授的支持和帮助下,长期进行薄膜润滑理论的研究,形成了一套分析方法;综合了现有的工作经验,以微观分析动力学为基础,把微观与宏观有机结合,提出了薄膜润滑修正方程;以能量流的观点分析吸附层,把吸附层与黏度结合,得到研究薄膜润滑的黏度模型,从而运用 Reynolds 方程进行轴承的特性分析。作者希望通过本书能使更多的研究工作者对薄膜润滑的研究产生兴趣,从而推动薄膜润滑理论与实验的进展,促进纳米摩擦学的快速发展,同时使得研究工作真正应用于实践,设计实用的薄膜润滑轴承,也希望薄膜润滑理论能在其他学科应用,希望能与更多的专家、学者共同开发研究摩擦学及其相关领域问题。

薄膜润滑理论的发展时间较短,理论和实验上都非常欠缺,由于作者的水平有限,在论述中其观点和对问题的理解难免存在缺陷和错误,敬请专家、学者和对此感兴趣的科研工作者提出批评和指正。

曲庆文

2005年2月

目 录

序

前言

1 薄膜润滑理论的形成与发展	1
1.1 润滑理论的形成与发展	1
1.2 薄膜润滑的提出及特点	2
1.3 薄膜润滑机理	4
1.4 薄膜润滑中主要的影响因素	5
1.5 薄膜润滑的建模方式	6
1.6 薄膜润滑实验及模拟研究	9
1.7 薄膜润滑理论研究的主要内容和意义	10
2 相互作用界面的动力学特性	13
2.1 吸附层厚度的确定	13
2.2 界面压力	17
2.3 表面压力和表面张力	20
3 流体粒子分布及热力学特性	24
3.1 流体内部的分子力	24
3.2 流体的分子势	30
3.3 流体分子的分布及密度函数	32
3.4 基本热动力学方程	33
3.5 径向分布函数与热力学特性的关系	35
3.6 径向分布函数与对势的关系	37
4 流体的时空及输运方程	39
4.1 时空相关函数	40
4.2 静态相关函数	43
4.3 和规则和短时特性	47
4.4 长时性能和输运系数	51
5 分子流体的薄膜润滑基本方程	58
5.1 流体动力学方程	58
5.2 流体动力学模态分析	64

5.3 松弛过程和耗散效应·····	68
6 薄膜润滑状态下流体的流动特性分析·····	72
6.1 基本理论·····	73
6.2 模拟流体应力分析·····	74
6.3 计算参数的选择及控制·····	75
6.4 无量纲化及迭代方程·····	76
6.5 流场模拟分析·····	76
6.6 薄膜润滑黏度修正模型的建立·····	83
7 基于流变学的超薄膜润滑建模方式综述·····	86
7.1 附加方向黏度下的建模方法·····	86
7.2 吸附介质建模方式·····	89
7.3 超薄气膜的建模方式·····	91
7.4 考虑表面力作用下的建模方式·····	92
7.5 EHD 接触润滑的流变及热效应建模方式·····	93
7.6 二阶流体非牛顿薄膜润滑·····	95
8 薄膜流体润滑理论计算·····	99
8.1 常规润滑的基本方程与结果·····	99
8.2 表面吸附理论基础·····	100
8.3 润滑类型与对应的计算方程·····	102
8.4 三层平均黏度模型及广义 Reynolds 方程·····	105
8.5 三层平均黏度模型特性分析·····	111
8.6 等效黏度修正解·····	121
8.7 精确的黏度修正方程及轴承特性·····	129
9 油膜润滑径向轴承的全域解模拟计算·····	137
9.1 径向轴承的广义 Reynolds 方程·····	137
9.2 等效黏度修正方程解·····	138
9.3 分层黏度计算模型及轴承特性分析·····	143
9.4 指数型黏度修正及特性计算·····	148
10 薄膜润滑有限宽轴承的性能计算及温度场分析·····	152
10.1 有限宽轴承性能分析·····	152
10.2 薄膜状态下能量方程的简化·····	156
10.3 能量方程的无量纲化·····	157
10.4 温度场分析·····	158
10.5 实例计算·····	159

11 黏温修正的等效黏度模型	170
11.1 黏温修正的等效黏度模型.....	170
11.2 黏温修正的等效黏度模型 Reynolds 方程	170
11.3 黏温修正的等效黏度模型的能量方程.....	172
11.4 特性分析.....	173
12 剪切稀化黏度模型的特性分析	178
12.1 基本理论.....	178
12.2 特性分析.....	180
13 薄膜润滑的实验分析	188
13.1 自适应综合测试仪简介.....	188
13.2 薄膜润滑的摩擦特性实验.....	191
13.3 膜厚的定量测量原理.....	197
13.4 实验与理论计算的比较.....	199
参考文献	203
附录 1 主要符号表	214
附录 2 数值计算方法	216
附录 3 部分计算程序	219

1 薄膜润滑理论的形成与发展

纳米摩擦学是随着科学技术的发展,特别是计算技术和实验技术的发展而兴起的多学科交叉学科,并使得人们认识事物的观点的发生根本转变。微观变化是纳米摩擦学的重要支柱,任何宏观的反应都是微观粒子运动的结晶,这充分体现了微观变化的不可忽视性和重要性。薄膜润滑理论在这种结晶中产生和发展,把微观的不可见变为宏观的可见。

1.1 润滑理论的形成与发展

经典流体润滑理论自 1886 年 Reynolds 首先提出 Reynolds 方程^[1]以来已有 100 多年的历史,从原始的多条件假设发展到目前基本模拟现实,在这漫长的发展过程中所前进的每一步,都与科学技术的发展紧密相连。科技的进步促进理论的发展,理论的发展又推动科技的进步,相辅相成。润滑理论的发展过程大体可以分为三个阶段。

第一阶段:从 Reynolds 方程的提出到第二次世界大战以前。在此阶段,由于计算技术的落后,主要的研究是 Reynolds 方程的计算方法。以 Reynolds 方程为主体的解析解及简单宏观场的模拟等,经简化假设得到了无限长轴承解^[2]和短轴承解^[3],以说明轴承压力分布的基本规律。对气体和液体动压润滑在性能上的区别有了一定的了解,同时也推动了轴承技术的发展。但是,此阶段只是对 Reynolds 方程的简化计算,与实际轴承的计算相差尚远。

第二阶段:二战以后到 20 世纪 60 年代,随着战时保密技术的公开及数值计算技术的进步,润滑理论得到了快速的发展。随着有限长径向轴承的性能计算,对油膜破裂边界的认识及计算的发展,进而计算扩展到由轴承的静特性→动特性→稳定性,由定常到非定常状态下的润滑^[4]。轴承技术也得到了飞速发展,20 世纪 50 年代流体静压轴承开始广泛采用,到了 60 年代气体静压和动压润滑得以快速发展。此时,人们也开始认识到弹性变形、温度、惯性、流体的非牛顿性等因素对润滑性能的影响,这些问题开始成为研究的热点。

第三阶段:20 世纪 60 年代以后到现在,工程模型的开发日趋完善。对于低副接触的推力轴承和径向轴承,形成了静、动态相结合的计算方法和设计型的基本方程,进行了几乎无简化的流体润滑基本方程的解,增加了表面粗糙度模型、

润滑剂性能模型、几何参数模型的有效融入^[5~7]。在高副接触方面,把 Reynolds 方程和 Hertz 弹性接触理论耦合^[8],对滚动轴承、齿轮和凸轮等高副接触的弹流计算^[9],弹流与温度场耦合的热弹流计算^[10],弹流与粗糙度模型耦合的微弹流计算^[11,12],把变形、表面微结构、温度耦合形成微热弹流计算^[13],把温度、压力、粗糙度、弹性变形、热变形、非牛顿等耦合计算得出较实用的理论模型^[14~17]。对工程润滑、大型机组的失效分析、机械故障诊断提供了理论依据。目前,润滑理论正朝着多学科结合的方向发展,以微粒子为体系的分析方法随着科技的发展正向我们走来。

流态分析是润滑分析的另一重要问题,决定着分析方法运用是否正确。从 Newton 的层流到紊流^[18,19],在流态的短暂变化过程中,将使计算方程产生根本性的变化。使工况产生大的改变,如在相同结构形式和尺寸、运行参数情况下紊流条件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。通过流场的分析,对紊流实现的条件加以改变,以推迟紊流,增加轴承运转的稳定性。从而得到各种不同结构的轴瓦形式,推动了轴承技术和实验设备的发展。如椭圆、可倾瓦、多油楔、浮环轴承等的开发及性能计算。弹性挡块改性的研究对提高轴承稳定运行速度也获得了良好的效果^[20]。

润滑剂的性能研究与润滑剂产品的开发直接影响润滑过程,对提高产品使用寿命起重大作用。润滑剂的低压流变性^[21]、高压流变性^[22]、温时变性^[23]等的研究对润滑剂的开发起到了催化作用。

添加剂的研究大大改善了润滑剂的性能,使之对形成润滑膜的条件产生了根本性的变化,采用不同的添加剂对固体表面的弥补收到了良好的效果,涂抹润滑等特殊的润滑方式,证明了润滑剂性能研究的重要性和润滑剂开发的重要意义。

1.2 薄膜润滑的提出及特点

1.2.1 薄膜润滑的提出

从 20 世纪 90 年代初兴起的纳米技术被认为是面向 21 世纪先进技术的基础。这一技术是随着计算技术、机械加工技术、材料技术及多学科交叉技术的迅速发展而骤然兴起的多学科交叉技术。

从 20 世纪 80 年代末起步的微机械的发展,使机械加工达到了突破性的发展。把机械带进了微观的领域,同时,微观的摩擦润滑成为微机械的不可忽视的问题。此类机械的特点是:体积小(尺寸可在 $10\sim 100\mu\text{m}$)、高精度(加工在纳米级水平)、运动精度高、轻载等。因此,如何解决摩擦润滑问题是能否实现其运动稳定性的重要条件。

Granick 等对受限于极薄固体表面间的液体特性进行系统研究后指出：由于壁面作用，等效黏度将较体相黏度有几个数量级的增加，而且有黏-滑现象。对于非常光滑的表面，小于综合粗糙度的油膜厚度也能维持良好的润滑。对于这种亚微米和纳米级薄膜的润滑，开始时有人称为超薄膜润滑或部分薄膜润滑和分子薄膜润滑，但更多人称之为薄膜润滑，如温诗铸^[24]等。

国际上，关于薄膜润滑的概念也有不同观点，以英国帝国理工学院 Spikes^[25]小组为代表，认为薄膜润滑是边界润滑的延伸，有时认为是弹流润滑的发展。然而，就机理而言，薄膜润滑是介于弹流润滑与边界润滑之间的一种独立的润滑形态，它具有特殊的润滑规律和润滑本质。胡元中等人的分子动力模拟结果^[26~31, 194, 195]也证明了这一特点。因此，关于润滑状态的划分应如图 1.1 所示。图中 h 为润滑膜厚度， R_a 为摩擦副对偶面的综合粗糙度， R_c 为润滑分子的有效半径。

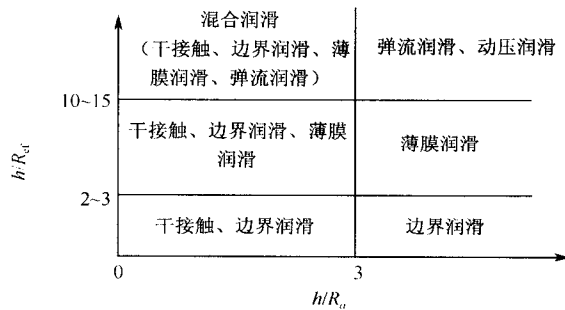


图 1.1 润滑状态划分图

在实际使用的机械中，特别是在微动机械中，人们发现了一些由理论无法分析的结果。Kingsburg (1985) 曾在精密滚动轴承表面涂抹 0.08~0.1mm 的润滑油后不再供油，结果发现该轴承仍能保持良好的润滑状态。这说明在宏观的弹流润滑与边界润滑之间存在着鲜为人知的薄膜润滑状态。

揭示上述状态的内在因素成为人们研究的热点，但是到目前为止理论还没有完全成熟。在国内主要是清华大学进行了一定的理论和实验研究^[32~35]，证明薄膜润滑的存在及可测性，能够定性证明薄膜润滑的性能变化规律，且在高副润滑有较好的结论及实验论证。国外的研究也证明了薄膜润滑的存在^[36, 37]。西安交通大学润滑理论及轴承研究所也进行了一定的研究^[196]，其主要工作是从曲庆文^[38~43]在攻读博士学位期间开始的，后续研究进行的较少，目前也没有太多的新进展。清华大学的温诗铸教授在研究中把润滑的层次划分为：流体动压润滑状态、弹流润滑状态、薄膜润滑状态和边界润滑状态，进行了各种状态的定性和定

量描述,对薄膜润滑的定量描述还是初步的,尤其是低副条件下薄膜润滑的存在性及计算模型的研究缺乏有力的实验证明。曲庆文等对极限光滑表面的理论计算模型做了较深入的研究。

薄膜润滑是指纳米级膜厚润滑,一般分子量级在 1nm 左右,分析中膜厚为 10~100nm 左右,在 10~100 个分子量级,最小可在 2、3 个分子量级。在此润滑方式下,根据流变学^[44]的观点进行简化假设分析,认为润滑剂在一定条件下发生流变现象,由液体特性转变为似固性^[45],由此在极高的压力下不产生流失。换句话说,产生流动的瞬时间断,呈现出固体的承载特性、液体的润滑特性。

1.2.2 薄膜润滑的机理探索及特点

温诗铸、雒建斌领导的研究小组在研究了薄膜润滑膜厚与速度、润滑剂黏度、压力、滚滑比等工况因子的关系后,考察了不同的表面能对成膜能力的影响。这就清楚地表明薄膜润滑与弹流润滑有不同的作用机理^[46~50],表面吸附可以改变近表面液体分子的排列;进一步研究了电场作用和加入纳米颗粒对薄膜润滑特性的影响。

在实验中发现并研究了薄膜润滑的时间效应,提出了膜厚增加的“滚雪球”机理。关于薄膜润滑与边界润滑的转化,则主要是通过薄膜润滑失效问题的研究建立流体膜的失效条件。

综合上述研究成果,可以得到薄膜润滑的基本特征是介于弹流润滑与边界润滑之间的一种状态,它具有自己的润滑本质和变化规律。它区别于弹流润滑之处,在于其润滑分子在剪切诱导和固体表面吸附势等作用下处于取向有序状态,因而表现出不同的润滑特性,如尺寸效应等。它区别于边界润滑之处,在于具有相当的膜厚值,润滑剂具有流动性,因而黏度等对润滑性能具有重要影响。

1.3 薄膜润滑机理

为了从机理上解释薄膜润滑的特性,人们先后提出了富集分子模型和有序分子模型。

1.3.1 富集分子模型

1996 年 Smeeth 等人提出了富集分子物理模型^[51]。他们认为在固体表面附近形成了一层富集的高黏度的高分子吸附膜。当油膜非常薄时,黏性大的高分子富集于入口处,由于黏度大,润滑似乎处于较体相黏度大得多的流体之中。该模

型的局限性是没有考虑到润滑油分子在固体表面附近形成静态吸附膜和极薄油膜的物理性能是随着时间而变化的。

1.3.2 有序分子模型

1994年雒建斌等建立了薄膜润滑动态物理模型^[52,53],即有序液体模型(图1.2),认为在薄膜润滑状态下,油膜除了吸附膜和动压膜外,还存在兼有流体膜和吸附膜二者性质的有序液体膜(ordered liquid film)。润滑膜被约束在摩擦表面之间狭窄的区域中,由于载荷和表面能作用,在摩擦剪切过程中润滑膜分子结构将发生向有序排列的变化。随着运行时间的延长,有序排列的分子越来越多,因而靠近表面的分子层有序度增加,当达到表面力有效作用范围时,有序膜的厚度趋于稳定。这种有序排列的分子膜是有序液体膜,它比体相液体的分子有序度高,故不易流动;但它又兼有液体的性质,在流体动力效应作用下,既能够支承载荷,又能减少端泄。在此基础上,沈明武等提出了含固体颗粒的薄膜润滑物理模型。

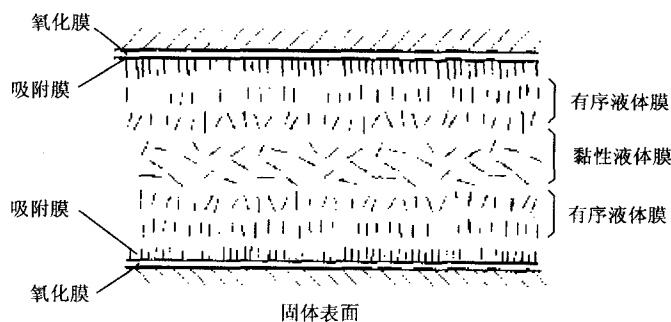


图 1.2 薄膜的有序模型

1.4 薄膜润滑中主要的影响因素

在薄膜润滑中,影响油膜膜厚的因素很多,包含工况条件、材料性能和配副形式、润滑剂性能、表面质量、配副材料与润滑剂的吸附特性等,工况条件又含有载荷特性、设备运行状态、设备散热条件等。在实践中要全面考虑是十分困难的,分析中考虑其主要因素,因此,可归纳如下:①润滑剂的表观黏度 η ^[54],与常用的动力黏度 η_0 不同,在工作过程中表现出的特性与流体所受的应力和温度等都有关系, η 是压力、温度 and 时间的函数,还与润滑剂的成分有关,同时对

薄膜润滑分析最重要的是两表面之间距离的函数^[55]。在建模中采用不同的假设来确定黏度值；②模型的基本方程是以流体动力学的基本方程为基础来进行修正^[56,57]；③粗糙度是必须考虑的因素，主要是因为膜厚微小，微凸体的峰决定能否形成膜润滑^[58~61]；④材料的性能一般决定微凸体的变形，此变形将影响到弹性膜，也是某些理论的依据；⑤表面微结构^[62~66]是与材料的性能、加工状态、膜的亲和性等因素有关的参数的综合表现。目前对于薄膜润滑的计算是考虑以上因素而加以简化。

1.5 薄膜润滑的建模方式

1.5.1 考虑微结构的建模方法

此部分的建模方法是基于流体质点的整体平均的，即认为在整体上取平均，而不完全考虑局部问题，从而使问题简化。主要考虑微结构对油膜厚度有影响，建模时可以归纳为两种情况：一是认为分子黏附到固体表面上^[67]，在形成膜润滑后，分子定向与润滑速度方向呈一定角度，且具有恢复原方向的性能，然而要消耗一定的能量，把此能量以黏度表示即定义为方向黏度。由此可知，研究的问题是各向异性的，此部分主要集中在极性分子或长链分子（高分子）。在建立模型时包括三个材料性能参数，即惯用黏度、方向黏度和方向角。此黏度用于描述取决于方向器定向和相对于方向器散度的弹性模量的变流阻力。原则上，这些性能能在黏度仪上测量，典型的方向器以一定的方向黏附到边界表面，接近边界表面的润滑剂呈现似固性，横过剪切层接近完全滑动。此类问题的解一般是直接在应力平衡方程中增加附加弯矩项。二是微极流体的分析^[62~66]，主要是对 Reynolds 方程进行修正^[68]，相当于在方程中修正黏度。

1.5.2 吸附介质建模方式^[69]

应用流变学的观点认为，在固体表面存在微孔，因而介质被吸附到固体表面内部，此层介质的性能与内部介质不同，流动阻力增大，具有似固特性。此模型是以流变学的观点，把流变特性用吸附层的变化来表示，以整体平均的观点来分析薄膜润滑。模型也包括三个材料性能：惯用黏度、吸附层厚度和吸附层参数。原则上，黏度和吸附层参数可由黏度仪实验得出，吸附层厚度由已知润滑材料的分子结构来得到。结果表明，吸附层厚度参数增大，载荷增大，而摩擦因数减小；若吸附层参数是零，表面相当于固体材料，增加吸附层值倾向于减小载荷增

加的量,此时,可由模型预测到在介质层内产生滑动流。

1.5.3 超薄气膜的建模方式^[70~73]

在液体薄膜润滑中,应用流变学理论分析不可压缩修正的雷诺方程,从而解出其所需的量。对于气体是可压缩的,且与边界固体一般无宏观吸附性,在此模型中,运用变系数 Reynolds 方程。由于气体的可压缩性和低吸附性,引入壁面滑动方程。

1.5.4 考虑表面力作用下的建模方式^[74~76]

本节中的建模是考虑表面力的作用。表面力直接作用于表面上,而不受液体性能的影响。在液固表面间的表面力有三种形式:静电力、范德瓦尔斯力和溶解力。静电力与表面电荷交换有关,在此模型中不予考虑,余下的两种力则与液体动压力耦合。吸引范德瓦尔斯力能以压力分布的形式表示,作为分离间隙的函数。溶解力的产生是把流体分子引入高阻间隙,而形成一系列的层,根据在间隙中的分子顺序,此力是分离量的振荡和指数函数,递减速度和振荡周期与分子尺寸有关。当两固体表面的分离量大于 5nm 时,表面力可以忽略;当分离量在 1nm 时,表面力产生的当量压力与黏性压力同数量级。在实际中,由于滑动,液体动压和表面压力足以引起固体的变形,所以在分析时,此模型也是一种不可忽视的方式。

1.5.5 EHD 接触润滑的流变建模方式^[77~81,202]

在 EHD 接触润滑中的牵引力研究,不能用简单的牛顿模型来描述,一般可用黏—弹—塑模型来得到牵引力曲线,现在可直接用流变理论来得到。根据实验证明,润滑剂一般有三个参数表示,它们是黏度 η 、剪切弹性模量 G 和极限应力 τ_1 。对参数进行一级近似,建议所有参数仅是压力和温度的函数,而与时间无关,时间效应包含在流变模式中。在计算过程中同时求解流变性能、动量矩方程和能量方程,以求得接触区中的压力 p 和油膜形状 h ,忽略垂直于滚动速度方向的流量和压力变化。同时,Johnson 提出了耗散函数模型^[82]。这种模式的结果表明,在膜的中部塑性占主导地位;在入口和接近表面,弹性占主导地位;在出口区黏性占主导。同时也存在等效黏度模型来计算弹流润滑,把薄膜润滑中的全部效应用黏度的变化来表示,以保持能用弹流润滑方程来求解。

1.5.6 黏度模拟变化建模方式

根据分子动力学运动规律^[83], 进行模拟流体的分子运动^[84], 进行动力学分析, 得出流体的运动特性, 把流体的流变以黏度的变化来表示, 则形成计算过程中的黏度修正模型, 以此进行轴承特性计算分析, 把薄膜润滑中的微观问题宏观化, 以黏性的变化表达微间隙的影响, 运用 Reynolds 方程进行求解。

综上所述, 各种在流变学指导下的建模方式, 全部的模型都是以流体力学的基本方程为基础, 即连续方程、动量矩方程和能量方程。其参数修正具有以下特点: 主要对润滑剂材料的流变性进行修正, 无论是黏度修正、吸附层修正、剪变形修正及表面力修正, 其本质都是润滑材料分子之间作用的结果。

1.5.7 薄膜润滑建模的修正方式

1) 黏度修正 黏度修正在经典计算中就出现过, 黏度随压力和温度在变化, 但在流变学理论中, 存在低压流变问题^[85], 即在低压作用下产生流变现象, 这是经典理论中不存在的。薄膜润滑中分子的定向排列性与反定向所造成的能量损失, 也是以黏度表现的一种流变学特性。

2) 吸附层修正 吸附层修正是在极薄的膜内, 膜显示出多种性态, 性态随所处的层不同而不同。在吸附层内, 流动显示强烈的黏度增强。与液体流动有本质的区别, 吸附层内体现流变性, 按流变学理论修正黏度。在吸附层外按牛顿理论计算^[86,87]。但在实际应用中, 吸附层厚度是难以精确确定的量, 且到目前为止还没有精确计算的报道。

3) 剪切变形修正 在经典理论中, 应力与应变成正比关系, 即线性关系。在流变理论中, 时间是一个必要因子, 在不同的时刻材料表现出不同的性能。要考虑弹性、黏性和塑性影响, 这在薄膜中以微凸体为处理对象时, 是十分清楚的。在这种修正中最终实质还是修正润滑剂的参数, 如黏度、剪切模量和极限剪应力及剪切稀化等。

4) 表面力修正 表面力修正是在流变状态下考虑分子间力的作用, 特别是短程范德瓦尔斯力和溶解力^[88,89]的作用, 这种力只有在间隙是分子量级时才十分明显。在这种模型中把流变影响归于表面力的作用, 以常黏度解雷诺方程。表面力的计算须知道润滑剂特性及微结构。

总之, 目前薄膜润滑的计算模型及修正方法, 从整体上讲是围绕着润滑剂的黏度来进行, 有相当多的研究都是如此处理。从模拟流体的流动来看, 是以简单流体的简单流动为主, 同时兼顾了长链分子问题, 以得出流体对单一问题的反