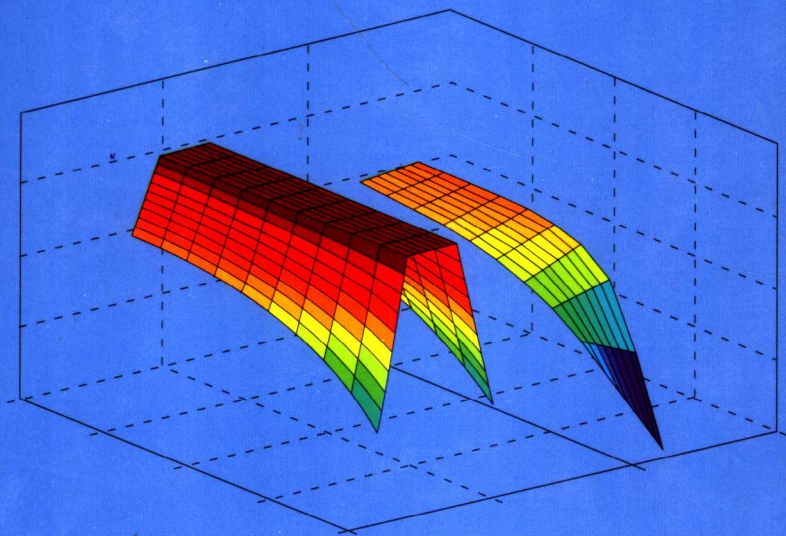


液体变粘度缝隙 流动理论与解析

Theoretical Solutions to Flowing
Fluid Viscosity Changes in a Gap

姜继海 著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

液体变粘度缝隙流动 理论与解析

**Theoretical Solutions to Flowing
Fluid Viscosity Changes in a Gap**

姜继海 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

液体变粘度缝隙流动理论与解析 / 姜继海著. —北京:
国防工业出版社, 2005.8

ISBN 7-118-03818-0

I. 液... II. 姜... III. 密封 - 缝隙 - 液体流动 -
流动理论 IV. TB42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 014182 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)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 8 1/8 205 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备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,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部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,原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。

设立出版基金是一件新生事物,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和武器装备建设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

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡锺		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

前 言

液体作为流体动力系统的主要工作介质对系统的性能和工作可靠性有极大的影响。液体的性能通常包括液体的温度、粘度和密度等参数,其中液体粘度的影响最为重要,正是粘度这个参数对流体动力系统的摩擦损失、机械效率、负载容量、油膜厚度和配合偶件的磨损等起主要作用。

但是,在对液压系统和液压流体动力润滑等问题的研究和实际应用中,常常假设液体粘度为常数。这主要是由于液体变粘度问题的引入使得对液体进行研究时其数学模型变得非常复杂,分析计算也变得非常困难,而在绝大多数情况下,液体粘度不变的假设能够满足实际工作需要,所以在建立 Reynolds 方程时已经假定了液体粘度不变的前提条件。这为后来的研究者限定了研究范围,使得多年来对液体变粘度缝隙流动特性的研究处于徘徊不前的状态,人们的研究仅停留在液体粘温关系的本身,而没有或很少定量地研究液体粘度随温度变化的规律。

随着当今科学技术的发展,随着计算机技术、计算方法和有限元分析手段的完善,人们有可能在液体变粘度的前提下来研究液体流动时的速度场、压力场、温度场和功率损失等液体的流动特性,从而在液体变粘度的条件下对液体粘度为常数时液体流动的经典理论重新进行探讨,探索出与实际工作情况尽可能一致的关系,这样才不失其真实性,并用来指导生产实际。因此,本书的第一个目的是全面和系统地介绍液体变粘度缝隙流动的基础理论。

液体(或气体)在旋转对称密封缝隙中的流动除了用于传递动力外,还可以作为轴向作用滑动部件以及液体调节器中的润滑和承载的基本组成部分。这些液压元件和液压元件的基本组成部分

包括液体静压轴承、柱塞泵的配流盘和静压滑环等。在对由缝隙组成的液压元件进行分析和设计时,如果忽略了液体粘度带来的影响,则它们的功率损失是不能进行优化的。因此,在液体变粘度条件下研究旋转对称密封缝隙中液体的流动特性具有重要的理论价值和实际意义。

液体变粘度缝隙流动理论的实际应用范围很广,如在静压轴承、柱塞泵滑靴和静压滑环的设计中等,其中对静压滑环的制造和使用尤为重要。静压滑环的主要功能是将液体(也可以是气体)在旋转件和固定件之间进行传输,使液体动力不断地传递下去,并保证在此传递过程中,能量损失尽可能小。静压滑环可以使液压系统中一些原来无法实现的功能得以实现,还可以使其质量减小、体积变小,并且使用更灵活。因此,本书的第二个目的是使读者了解静压滑环,并在生产实际中能推广使用。

10多年来,本书作者一直从事对液体变粘度缝隙流动理论的研究(特别是对旋转对称密封缝隙液体变粘度流动特性的理论和实验研究)和对静压滑环的设计、生产和实验等工作,并取得了一些成果,如果将其加以总结,对业内人士会有很大的参考价值。因此,本书的第三个目的是对作者的工作进行总结,期望读者能够从中有所参考。

为了达到以上目的,本书在写作过程中力求做到以下几点:

(1) 本书在章节安排上本着由简单到复杂的原则,循序渐进地组织本书的结构体系,易于为读者掌握。

(2) 从一门学科的发展角度出发,本书充分注意到了全书内容的完整性和系统性。

(3) 贯彻学以致用、理论联系实际的原则。知识来源于实践,同时更应指导实践。书中所介绍的理论、所进行的分析和应用,力求概念准确、简明扼要、实用性强。因此本书所介绍的知识,如果能够真正地对读者在对液体进行分析和使用时有所参考,则是作者的最大期望。

由于对液体变粘度缝隙流动理论的研究还是一门新课题,在

国内外尚未发现类似的著作和系统化的文字材料,可供参考的文献资料有限,且作者本人学术水平有限,难免有不足甚至谬误及不当之处,敬请同行们指正。

本书所涉及内容的研究得到了国家自然科学基金、浙江大学流体传动及控制国家重点实验室开放实验室基金和哈尔滨工业大学留学回国基金的资助;本书的出版得到了总装备部国防科技图书出版基金的资助,并由国防工业出版社出版,在此一并表示衷心的感谢!

在本书的写作过程中,张冬泉博士、马文琦博士和博士生胡志栋除了校对工作外,还参与了部分章节的写作,其中张冬泉博士主要参与了第4章的写作工作;马文琦博士主要参与了第5章的写作工作;博士生胡志栋主要参与了第6章的写作工作。

感谢张冬泉博士、马文琦博士和博士生胡志栋,他们的研究工作是本书的基本素材;感谢本书在参考文献中所提到的那些专家和学者,他们所作的工作为本研究奠定了基础;感谢那些为密封缝隙液体变粘度流动特性研究作出了贡献的同行们,他们锲而不舍的奉献精神鼓励了作者对本方向的研究;感谢那些为流体传动及控制技术发展作出了贡献的同行们!

著 者

2004年12月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 密封缝隙液体变粘度流动特性研究现状	1
1.1.1 密封缝隙液体变粘度流动特性研究问题的提出	1
1.1.2 密封缝隙液体变粘度流动特性的研究	3
1.1.3 密封缝隙流场的分析方法	11
1.2 液体流动理论及应用	13
1.2.1 液体薄膜润滑	13
1.2.2 液体粘性传动	15
1.2.3 流体力学润滑	16
1.3 密封缝隙液体变粘度流动理论的应用	16
1.3.1 静压滑环	16
1.3.2 静压轴承	19
1.3.3 静压滑环与旋转接头	20
参考文献	23
第 2 章 旋转对称密封缝隙液体变粘度流动特性理论	28
2.1 旋转对称密封缝隙流场研究的基础理论	28
2.1.1 旋转对称密封缝隙液体变粘度流动特性研究的假设	29
2.1.2 流体动力学基本方程	29
2.1.3 流体动力学基本方程的无量纲化和化简	33
2.1.4 液体在密封缝隙中流动的基本特性	36
2.2 旋转对称密封缝隙液体流动的粘度函数	38
2.3 旋转对称密封缝隙流场的粘温关系	40
2.3.1 常用的液体粘温方程分析	41
2.3.2 常用的液体粘温方程比较	44

2.3.3 液体的粘温方程构造和拟合	44
2.3.4 参考温度 $T = 40^{\circ}\text{C}$ 时的液体粘温方程	48
2.4 不同稳定工作点下液体流动特性分析	49
2.4.1 液压油稳定工作点的确定	50
2.4.2 液压油稳定工作点的 3 种选取方法	51
2.4.3 不同稳定有效粘度下液体流动特性的对比	53
参考文献	56
第 3 章 旋转对称密封缝隙液体变粘度流动的有限元分析及 可视化研究基础	58
3.1 旋转对称密封缝隙流场的有限元分析	58
3.1.1 变分原理	58
3.1.2 有限元方程	60
3.1.3 密封缝隙流场的有限元网格划分和插值函数选择	62
3.1.4 有限元方程的推导	64
3.1.5 有限元方程的求解	69
3.1.6 有限元离散化方程的矩阵形式	70
3.1.7 有限元离散化方程组的求解	75
3.2 面向对象的方法	78
3.2.1 面向对象方法和面向对象方法学	78
3.2.2 面向对象的基本概念和特征	79
3.2.3 面向对象编程	80
3.2.4 面向对象有限元流场分析	80
3.2.5 面向对象有限元类层次	81
3.2.6 面向对象有限元类实现	83
3.3 密封缝隙液体变粘度流场的计算机可视化	86
3.3.1 可视化概念的提出	86
3.3.2 计算机流动可视化的发展	88
3.3.3 流场可视化	89
3.3.4 流场计算机可视化的视觉化造型	90
3.3.5 流场的计算机可视化方法	91

3.3.6 计算机可视化系统设计	98
参考文献	104
第4章 旋转对称盘形密封缝隙液体变粘度流动特性	
研究	110
4.1 旋转对称盘形密封缝隙液体变粘度的应用	110
4.1.1 柱塞泵滑靴	110
4.1.2 径向止推轴承	111
4.2 旋转对称盘形密封缝隙液体变粘度流动理论分析	111
4.2.1 旋转对称盘形密封缝隙液体变粘度流动的描述	111
4.2.2 旋转对称盘形密封缝隙液体变粘度流动特性分析	112
4.2.3 液压油的稳定工作点	129
4.3 旋转对称盘形密封缝隙流场有限元分析及可视化	130
4.3.1 模型及边界条件	130
4.3.2 密封缝隙中速度分布	131
4.3.3 密封缝隙中温度及粘度分布	133
4.3.4 密封缝隙中压力分布	134
4.4 旋转对称盘形密封缝隙液体变粘度流动特性	
实验研究	135
4.4.1 旋转对称盘形密封缝隙液体变粘度流动特性实验系统	135
4.4.2 旋转对称盘形密封缝隙液体变粘度流动特性实验结果 及分析	138
参考文献	143
第5章 旋转对称环形密封缝隙液体变粘度流动特性	
研究	145
5.1 旋转对称环形密封缝隙液体流动的应用	145
5.1.1 静压滑环	145
5.1.2 油腔节流静压径向止推轴承	146
5.2 旋转对称环形密封缝隙液体变粘度流动的理论 分析	147
5.2.1 旋转对称环形密封缝隙液体变粘度流动模型的描述	147

5.2.2 液体粘度函数	148
5.2.3 旋转对称环形密封缝隙液体变粘度流动特性分析	150
5.2.4 旋转对称环形密封缝隙液体流动的承载力及刚度	164
5.2.5 不同稳定有效粘度下的液体承载力及油膜刚度	173
5.3 旋转对称环形密封缝隙流场的有限元分析及 可视化	177
5.3.1 模型及边界条件	177
5.3.2 有限元分析结果	178
5.3.3 不同求解方法的对比	181
5.4 旋转对称环形密封缝隙液体流动实验研究	184
5.4.1 旋转对称环形密封缝隙液体流动实验系统	185
5.4.2 实验结果及分析	188
参考文献	194
第 6 章 静压滑环密封缝隙液体变粘度流动特性的研究	196
6.1 静压滑环	196
6.2 静压滑环密封缝隙液体变粘度流动的理论分析	198
6.2.1 静压滑环模型的建立	198
6.2.2 液体粘度函数	199
6.2.3 静压滑环密封缝隙液体变粘度流动的理论分析	207
6.3 静压滑环的有限元分析结果及对比	221
6.3.1 模型及边界条件	221
6.3.2 有限元分析结果	221
6.4 静压滑环密封缝隙液体流动实验研究	223
6.4.1 静压滑环密封缝隙液体流动实验系统	223
6.4.2 实验结果及分析	227
参考文献	239

CONTENTS

Chapter 1	Generality	1
1.1	The current state of research on the flowing properties of variable viscous liquid in the sealing gap	1
1.1.1	Condition under which the problem is put forward	1
1.1.2	Research methodology	3
1.1.3	Analytical methods	11
1.2	The flowing theory of liquid and its application	13
1.2.1	Liquid thin film lubrication	13
1.2.2	Liquid viscosity transmission	15
1.2.3	Liquid dynamic lubrication	16
1.3	The application of the flowing theory	16
1.3.1	Hydrostatic slipping	16
1.3.2	Hydrostatic bearing	19
1.3.3	Hydrostatic slipping and rotating connector	20
	References	23
Chapter 2	Theory of flowing properties of the variable viscous fluid in rotating symmetrical seal gap	28
2.1	Theoretical bases	28
2.1.1	Hypothesis for the research	29
2.1.2	Hydrokinetics equations	29
2.1.3	Non-dimension and simplification of the equations	33
2.1.4	Basic characteristic of the liquid	36
2.2	Viscosity function	38
2.3	Relationship between viscosity and temperature	40

2.3.1	Analysis of the equations	41
2.3.2	Contrast of the equations	44
2.3.3	Formation and simulation of the equations	44
2.3.4	Viscosity-temperature equation at $T = 40^{\circ}\text{C}$	48
2.4	The flowing properties under different stable points	49
2.4.1	Stable working points for hydraulic oil	50
2.4.2	Three methods for selecting the points	51
2.4.3	Contrast of the flowing characteristic under different stable viscosity	53
	References	56
Chapter 3 Finite element (FE) analysis and basis of visualized research on flowing properties of variable viscosity fluid in rotating symmetrical seal gap		
3.1	FE analysis	58
3.1.1	Principle of variable difference	58
3.1.2	FE equations	60
3.1.3	FE grid partition and insertion function choice	62
3.1.4	Deduction of the FE equations	64
3.1.5	Solutions of the FE equations	69
3.1.6	Matrix form of the FE equations	70
3.1.7	Solutions of the FE. disperse equations group	75
3.2	Object oriented (O-O) method	78
3.2.1	O-O method and O-O methodology	78
3.2.2	O-O primary concepts and characteristic	79
3.2.3	O-O programming	80
3.2.4	O-O FE field analysis	80
3.2.5	O-O FE class arrangement	81
3.2.6	O-O FE class realization	83
3.3	Computer-aided visualization	86
3.3.1	Concept of visualization	86

3.3.2	Development of computer-aided visualization	88
3.3.3	Field visualization	89
3.3.4	Vision modeling	90
3.3.5	Computer-aided visualization method	91
3.3.6	Computer-aided visualization system design	98
	References	104
Chapter 4 Research on flowing properties of variable viscosity		
	in rotating symmetrical disk seal gap	110
4.1	Application of the flowing fluid	110
4.1.1	Sliding-shoe in piston pump	110
4.1.2	Radical thrust bearing	111
4.2	Theoretical analysis	111
4.2.1	Description of the flowing fluid	111
4.2.2	Flowing characteristic analysis	112
4.2.3	Stable working points of oil	129
4.3	FEM analysis and visualization	130
4.3.1	Modal and boundary conditions	130
4.3.2	Velocity distribution	131
4.3.3	Temperature and viscosity distribution	133
4.3.4	Pressure distribution	134
4.4	Experimental research	135
4.4.1	Testing system	135
4.4.2	Experimental results and analysis	138
	References	143
Chapter 5 Research on flowing properties of variable viscous		
	liquid in rotating symmetrical annular sealing	
	gap	145
5.1	The application of the flowing fluid	145
5.1.1	Hydrostatic slipping	145
5.1.2	Hydrostatic radial thrust bearing	146

5.2	Theoretical analysis	147
5.2.1	Description of the flowing of the liquid	147
5.2.2	Liquid viscosity function	148
5.2.3	Flowing characteristic analysis	150
5.2.4	Loading capacity and stiffness	164
5.2.5	Loading capacity and stiffness under different stable variable viscosity	173
5.3	FE analysis and visualization	177
5.3.1	Modal and boundary conditions	177
5.3.2	The FEM results	178
5.3.3	Contrast among different methods	181
5.4	Experimental research	184
5.4.1	Testing system	185
5.4.2	Experimental results and its analysis	188
	References	194
Chapter 6 Research on flowing properties of variable viscous liquid in the sealing gap of hydrostatic slipping ...		
6.1	Hydrostatic slipping	196
6.2	Theoretical analysis	198
6.2.1	Modeling of hydrostatic slipping	198
6.2.2	Viscosity function of the liquid	199
6.2.3	Theoretical analysis of the fluid	207
6.3	Results of FEM and contrast analysis	221
6.3.1	Modal and boundary conditions	221
6.3.2	Analysis of FEM results	221
6.4	Experimental research	223
6.4.1	Testing system	223
6.4.2	Experimental results and its analysis	227
	References	239