



Lubrication of
Non-Newtonian Fluid

非牛顿流体润滑

黄平 杨倩倩 / 著

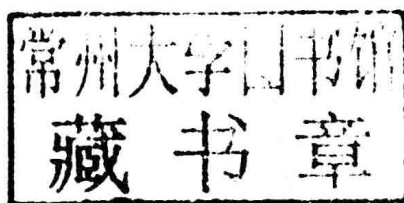
非
外
借

清华大学出版社

Lubrication of
Non-Newtonian Fluid

非牛顿流体润滑

黄平 杨倩倩 / 著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书最大的特色是在提出流速分离法的基础上,推导出求解流体润滑问题的普适流体润滑方程。流速分离法解决了推导非牛顿流体润滑统一方程的难点,普适流体润滑方程可用于牛顿流体和非牛顿流体润滑问题的求解。此外,本书还对非牛顿流体的黏度做了较详细的分析,提出了增量黏度和全量黏度的概念。流体非牛顿性是导致润滑失效的重要原因之一。本书分析了剪应力有界非牛顿流体的润滑失效机理和流体润滑膜承载能力,并介绍了测量极限剪应力的多种实验方法。最后,本书还给出了利用上述基本方法编写的数值分析计算程序。通过这些程序可以对常见非牛顿流体的流体动压润滑、弹流润滑和热弹流润滑进行计算分析。

本书可作为机械类各专业的研究生教材或相关专业师生的教学参考书,也可供从事非牛顿流体润滑计算分析与研究的工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

非牛顿流体润滑/黄平,杨倩倩著. —北京:清华大学出版社,2017
ISBN 978-7-302-48784-5

I. ①非… II. ①黄… ②杨… III. ①流变动压润滑 IV. ①TH117.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 272624 号

责任编辑:赵 斌
封面设计:常雪影
责任校对:刘玉霞
责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14.25

字 数:344千字

版 次:2017年11月第1版

印 次:2017年11月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:88.00元

产品编号:076509-01



在润滑过程中,润滑剂的非牛顿特性是一个非常普遍的现象。但是由于本构方程的非线性(即非牛顿性),以往的非牛顿流体润滑问题的求解非常复杂和困难,即便是通过数值求解,对非线性较大的问题也很难求得收敛的解,因此非牛顿流体润滑一直是润滑理论中的一个难点。

由于长期以来对非牛顿流体润滑计算没有找到有效的求解方法,尽管人们通过实践得到了各种各样典型的非牛顿流体本构方程,但是人们还只能尽量将流体简化成牛顿流体进行分析和计算。这种将非牛顿流体润滑问题拟线性化的处理,常常会使模拟与实际工况存在显著偏差,从而计算结果可能存在设计失真和失误隐患。因此,寻求有效的求解非牛顿流体润滑问题的方法是润滑计算分析中的一个重要任务。

求解非牛顿流体润滑的难点主要在于:①非牛顿流体因其本构方程的非线性给推导带来非常大的障碍;②即便是可以得到类似的 Reynolds 方程,求解过程中也会因其非线性,常常得不到收敛解。以往在求解任何流体润滑问题时人们总是希望推导得到一个类似牛顿流体的 Reynolds 方程,然后对仅有压力变量的润滑方程(Reynolds 方程)进行求解。而想要推导出不同非牛顿流体的 Reynolds 方程,除个别非牛顿流体外,大多数情况下无法得到适合求得稳定的数值解的表达式。

本书共分 3 篇。第 1 篇为基础理论篇,包括第 1~4 章。篇中首先对非牛顿流体的黏度做了较详细的分析,提出了增量黏度和全量黏度的概念。因为黏度原本的定义是来自于牛顿流体,因此为了正确认识非牛顿流体,必须首先清楚地了解牛顿和非牛顿流体黏度之间的不同性质,否则很难深入研究。流速分离法是本书重点介绍的一个有效求解非牛顿流体润滑问题的方法。从牛顿流体润滑分析开始,延伸出非牛顿流体润滑问题所存在的难点之后,通过利用润滑问题的特殊性,提出了求解非牛顿流体润滑问题的流速分离法,从而建立了适用于非牛顿流体润滑问题的求解方法,推导出了普遍适用的求解非牛顿流体润滑问题的润滑方程的表达式——普适流体润滑方程。

第 2 篇为润滑失效篇,包括第 5~7 章。理论上,牛顿流体不会引起润滑失效,但这与实际情况不符。这使得人们不得不深入寻找润滑失效的原因。非牛顿性自然成为重要原因之一。本书在分析了剪应力有界非牛顿流体本构方程的基础上,对极限剪应力引起的润滑失效机理、流体润滑膜承载能力分析和实验测量极限剪应力等方面做了较深入的讨论。本书给出了纯滚动不存在润滑失效、极限剪应力和滑动会引起润滑失效等重要结论。这些结论有助于深入认识流体非牛顿性带来的影响。本篇还讨论了摩擦因数、载荷、膜厚和润滑失效

之间的关系和联系。

第3篇为计算方法与程序篇,包括第8~12章。给出了利用上述基本理论推导的常见非牛顿流体润滑问题的计算公式、数值方法与求解程序。通过这些程序得到的计算结果表明:基于流速分离法得到的普适流体润滑方程不仅能成功地应用于非牛顿流体润滑中的压力分布、膜厚和温升计算;而且与现有的非牛顿流体润滑问题的计算方法相比,它的求解过程格式统一、计算步骤简单、计算收敛性好、结果准确。

本书可为非牛顿流体润滑问题的研究提供理论和数值分析支持。本书由黄平和杨倩倩编写,黄平撰写第1~7章,杨倩倩编写第8~12章。本书的研究内容得到国家自然科学基金“计算摩擦学”(51575190)的资助,同时书中引用了不少摩擦学同行们的出色成果,此外占旺龙在成书期间对资料收集提供了很大帮助,在此一并感谢!

由于非牛顿流体润滑问题的复杂性,加上作者的水平所限,书中存在错误在所难免。望广大读者不吝赐教,提出宝贵意见和建议。

作 者

2017.6 于广州



第 1 篇 基础理论篇

第 1 章 流体黏度	3
1.1 概述	3
1.2 牛顿流体黏度	4
1.2.1 黏度定义	4
1.2.2 黏度单位	4
1.3 非牛顿流体流变特性	5
1.3.1 非牛顿流体类型	5
1.3.2 非牛顿流体黏度	7
1.4 黏度的主要影响因素	11
1.4.1 黏度与温度的关系	11
1.4.2 黏度与压力的关系	12
1.4.3 黏度随温度和压力的变化	12
1.5 常用流变性能实验装置	13
1.5.1 同轴圆筒式流变仪	13
1.5.2 锥板式流变仪	13
1.5.3 平行板式流变仪	14
参考文献	15
第 2 章 流体润滑基本方程	16
2.1 流体润滑基本方程与假设	16
2.1.1 基本方程	16
2.1.2 基本假设	17
2.2 连续方程	18
2.3 平衡方程	19
2.3.1 平衡方程表达式	19
2.3.2 平衡方程推导	19

2.4	流体本构方程	21
2.4.1	牛顿流体本构方程	21
2.4.2	非牛顿流体本构方程	21
2.5	流体润滑方程边界条件	25
2.5.1	流固界面边界条件	25
2.5.2	润滑区压力边界条件	26
	参考文献	26
第3章	流体润滑 Reynolds 方程	27
3.1	Reynolds 方程推导过程	27
3.1.1	基本方程组与分析	27
3.1.2	消去剪应力变量	28
3.1.3	消去流速变量	28
3.2	一般非线性问题	30
3.2.1	线性问题	30
3.2.2	非线性问题	30
3.2.3	非牛顿流体润滑问题	31
3.3	非牛顿流体润滑 Reynolds 方程推导与难点	32
3.3.1	幂本构非牛顿流体 Reynolds 方程	32
3.3.2	一般非牛顿流体 Reynolds 方程推导难点	34
	参考文献	36
第4章	普适流体润滑方程	37
4.1	流速分离法	37
4.1.1	流速分离法基本原理	37
4.1.2	流速分离法求解非牛顿流体润滑问题步骤	38
4.1.3	流速分离法理论基础	40
4.2	普适流体润滑方程推导	41
4.2.1	普适流体润滑方程推导过程	41
4.2.2	普适流体润滑方程简化	43
4.2.3	普适流体润滑方程求解	43
4.3	流速分离法定解条件	45
4.3.1	流速分离法满足所有方程	45
4.3.2	流速分离法满足所有边界条件	46
4.4	常用非牛顿流体润滑方程	46
4.4.1	幂函数流体润滑方程	47
4.4.2	其他常用非牛顿流体润滑方程	47
	参考文献	50

第 2 篇 润滑失效篇

第 5 章 非牛顿润滑失效分析	53
5.1 极限剪应力下边界滑移	53
5.1.1 边界滑移现象	53
5.1.2 滑移边界条件	54
5.1.3 滑移区流速分布	55
5.2 流体非牛顿性对纯滚动摩擦的影响分析	56
5.2.1 滑滚比	57
5.2.2 纯滚动流体动压润滑 Reynolds 方程	57
5.2.3 纯滚动流体润滑的压力梯度、剪应力与膜厚的关系	59
5.2.4 存在滑动的非牛顿流体润滑失效	60
5.3 滑动摩擦下流体润滑摩擦因数	61
5.3.1 Stribeck 曲线与润滑失效	61
5.3.2 流体动压润滑摩擦因数分析	61
5.3.3 流体润滑摩擦因数与润滑失效的关系	63
5.3.4 最小摩擦因数	64
参考文献	66
第 6 章 流体润滑失效分析	67
6.1 黏塑性流体	67
6.1.1 黏塑性流体本构方程	67
6.1.2 黏塑性流体润滑基本方程	69
6.1.3 黏塑性流体润滑失效分析	72
6.2 屈曲型流体	75
6.2.1 屈曲流体本构方程	76
6.2.2 屈曲流体润滑基本方程	76
6.2.3 屈曲流体润滑失效分析	77
6.3 圆本构流体	82
6.3.1 圆本构方程	82
6.3.2 圆本构流体润滑基本公式	83
6.3.3 圆本构流体润滑失效分析	84
参考文献	86
第 7 章 流体流变性能实验分析	87
7.1 高压流变性能实验	87
7.1.1 双圆盘式	87
7.1.2 冲压式	88

7.1.3	剪切式	89
7.1.4	毛细管式	91
7.1.5	纯剪式	91
7.1.6	冲击剪切式	92
7.1.7	冲击挤压式	92
7.1.8	落柱式	94
7.2	界面滑移模型与实验	95
7.2.1	滑移长度模型	95
7.2.2	极限剪应力滑移模型	97
7.2.3	界面滑移测量	98
7.2.4	界面滑移影响因素	99
	参考文献	103

第3篇 计算方法与程序篇

第8章	非牛顿流体动压润滑计算方法与程序	107
8.1	一维流体动压润滑基本方程、数值方法与程序	107
8.1.1	基本方程	107
8.1.2	数值方法	108
8.1.3	计算程序	109
8.2	二维流体动压润滑基本方程、数值方法与程序	113
8.2.1	基本方程	113
8.2.2	数值方法	114
8.2.3	计算程序	114
	参考文献	118
第9章	非牛顿流体弹性流体动压润滑计算方法与程序	119
9.1	线接触非牛顿流体弹流基本方程、数值方法与程序	119
9.1.1	基本方程	120
9.1.2	数值方法	122
9.1.3	计算程序	123
9.2	点接触非牛顿流体弹流基本方程、数值方法与程序	128
9.2.1	基本方程	128
9.2.2	数值方法	130
9.2.3	计算程序	131
	参考文献	137
第10章	润滑中的温度计算方法与程序	138
10.1	热润滑分离流速法推导	138

10.1.1	非牛顿流体热润滑的流速	139
10.1.2	非牛顿流体热弹流润滑方程	140
10.2	热润滑能量方程	140
10.2.1	能量方程	140
10.2.2	能量方程的数值计算	141
10.2.3	温度计算流程图	146
10.3	牛顿流体润滑温度计算程序	147
10.3.1	一维温度计算程序	147
10.3.2	二维温度计算程序	149
	参考文献	152
第 11 章	非牛顿流体热流体动压润滑计算方法与程序	153
11.1	一维热流体动压润滑方程、数值方法与程序	153
11.1.1	基本方程	153
11.1.2	数值方法	155
11.1.3	计算程序	155
11.2	二维热流体动压润滑方程、数值方法与程序	159
11.2.1	基本方程	159
11.2.2	数值方法	161
11.2.3	计算程序	161
	参考文献	167
第 12 章	非牛顿流体热弹性流体动压润滑计算方法与程序	168
12.1	线接触热弹性流体润滑基本方程、数值方法与程序	168
12.1.1	基本方程	168
12.1.2	数值方法	171
12.1.3	计算程序	172
12.2	点接触热弹性流体润滑方程、数值方法与程序	187
12.2.1	基本方程	187
12.2.2	数值方法	191
12.2.3	计算程序	191
	参考文献	205
	索引	206

CONTENTS

目录



Part I Basic Theory

Chapter 1 Fluid viscosity	3
1.1 Introduction	3
1.2 Newtonian fluid viscosity	4
1.2.1 Definition of viscosity	4
1.2.2 Unit of viscosity	4
1.3 Rheological properties of non-Newtonian fluid	5
1.3.1 Types of non-Newtonian fluid	5
1.3.2 Viscosity of non-Newtonian fluid	7
1.4 Key influencing factors on viscosity	11
1.4.1 Relationship between viscosity and temperature	11
1.4.2 Relationship between viscosity and pressure	12
1.4.3 Viscosity changing with temperature and pressure	12
1.5 Commonly used testers of rheological property	13
1.5.1 Coaxial cylindrical rheometer	13
1.5.2 Cone-plate rheometer	13
1.5.3 Parallel plate rheometer	14
References	15
Chapter 2 Basic equations of hydrodynamic lubrication	16
2.1 Basic equations and assumptions	16
2.1.1 Basic equations	16
2.1.2 Basic assumptions	17
2.2 Continuous equation	18
2.3 Equilibrium equation	19
2.3.1 Expression of equilibrium equation	19
2.3.2 Derivation of equilibrium equation	19

2.4	Constitutive equation of fluid	21
2.4.1	Newtonian fluid constitutive equation	21
2.4.2	Non-Newtonian fluid constitutive equations	21
2.5	Boundary conditions of hydrodynamic lubrication equation	25
2.5.1	Boundary conditions of fluid-solid interface	25
2.5.2	Pressure boundary condition on lubrication zone	26
	References	26
Chapter 3 Reynolds equation of hydrodynamic lubrication		27
3.1	Derivation process of Reynolds equation	27
3.1.1	Basic equations and analysis	27
3.1.2	Elimination of shear stress	28
3.1.3	Elimination of flows	28
3.2	General nonlinear problems	30
3.2.1	Linear problem	30
3.2.2	Non-linear problems	30
3.2.3	Lubrication problems of non-Newtonian fluid	31
3.3	Derivation of Reynolds equation of non-Newtonian fluid and its difficulties	32
3.3.1	Reynolds equation of power fluid	32
3.3.2	Derivation difficulty of Reynolds equation of general non-Newtonian fluid	34
	References	36
Chapter 4 Pervasive lubrication equation		37
4.1	Velocity separation method	37
4.1.1	Basic principles of velocity separation method	37
4.1.2	Velocity separation method for solving non-Newtonian fluid problems	38
4.1.3	Theoretical basis of velocity separation method	40
4.2	Derivation of pervasive lubrication equation	41
4.2.1	Derivation steps of pervasive lubrication equation	41
4.2.2	Simplified pervasiv lubrication equations	43
4.2.3	Solution of pervasiv hydrodynamic lubrication equation	43
4.3	Statutory solution conditions of velocity separation method	45
4.3.1	Velocity separation method satisfies all equations	45
4.3.2	Velocity separation method satisfies all boundary conditions	46
4.4	Lubrication equations of some commonly used non-Newtonian fluid	46
4.4.1	Lubrication equation of power fluid	47

4. 4. 2	Lubrication equations of some other commonly used non-Newtonian fluid	47
References	50

Part II Lubrication Failure

Chapter 5	Analysis of lubrication failure of non-Newtonian fluid	53
5. 1	Boundary slip under ultimate shear stress	53
5. 1. 1	Boundary slip phenomenon	53
5. 1. 2	Boundary slip conditions	54
5. 1. 3	Velocity distribution of slip zone	55
5. 2	Analysis of the influence of fluid non-Newtonian on pure rolling	56
5. 2. 1	Sliding-roll ratio	57
5. 2. 2	Reynolds equation of pure rolling	57
5. 2. 3	Relationship between pressure gradient, shear stress and film thickness in pure rolling lubrication	59
5. 2. 4	Lubrication failure of non-Newtonian fluid under sliding	60
5. 3	Friction coefficient of hydrodynamic lubrication under sliding	61
5. 3. 1	Stribeck curve and lubrication failure	61
5. 3. 2	Analysis of friction coefficient of hydrodynamic lubrication	61
5. 3. 3	Relationship between friction coefficient of hydrodynamic lubrication and lubrication failure	63
5. 3. 4	Friction and friction coefficient	64
References	66
Chapter 6	Analysis of hydrodynamic lubrication failure	67
6. 1	Viscoplastic fluid	67
6. 1. 1	Constitutive equation of viscoplastic fluid	67
6. 1. 2	Basic equations of hydrodynamic lubrication of viscoplastic fluid	69
6. 1. 3	Lubrication failure analysis of viscoplastic fluid	72
6. 2	Buckling fluid	75
6. 2. 1	Constitutive equation of buckling fluid	76
6. 2. 2	Basic equations of hydrodynamic lubrication of buckling fluid	76
6. 2. 3	Failure analysis of hydrodynamic lubrication of buckling fluid	77
6. 3	Circular fluid	82
6. 3. 1	Constitutive equation of circular fluid	82

6.3.2	Basic equations of hydrodynamic lubrication of circular fluid	83
6.3.3	Failure analysis of hydrodynamic lubrication of circular fluid	84
	References	86
Chapter 7 Experimental analysis of rheological properties of fluid		87
7.1	Testers of rheological property under high pressure	87
7.1.1	Double disc tester	87
7.1.2	Stamping tester	88
7.1.3	Shearing tester	89
7.1.4	Capillary tester	91
7.1.5	Pure shear tester	91
7.1.6	Impact shear tester	92
7.1.7	Impact extrusion tester	92
7.1.8	Falling order tester	94
7.2	Interface slip model and experiment	95
7.2.1	Slip length model	95
7.2.2	Limiting shear stress model	97
7.2.3	Interface slip measurement	98
7.2.4	Influence factors of interface slip	99
	References	103
Part III Numerical Methods and Procedures		
Chapter 8 Numerical calculation method and program for isothermal hydrodynamic lubrication		107
8.1	One dimensional isothermal hydrodynamic lubrication	107
8.1.1	Basic equation	107
8.1.2	Numerical method	108
8.1.3	Program	109
8.2	Two dimensional isothermal hydrodynamic lubrication	113
8.2.1	Basic equation	113
8.2.2	Numerical method	114
8.2.3	Program	114
	References	118
Chapter 9 Numerical calculation method and program for isothermal elastohydrodynamic lubrication		119
9.1	Isothermal elastohydrodynamic lubrication in line contact	119
9.1.1	Basic equation	120

9.1.2	Numerical method	122
9.1.3	Program	123
9.2	Isothermal lastohydrodynamic lubrication in point contact	128
9.2.1	Basic equation	128
9.2.2	Numerical method	130
9.2.3	Program	131
	References	137
Chapter 10	Thermal lubrication of non-Newtonian fluid	138
10.1	Fluid velocity separation method of thermal lubrication	138
10.1.1	Fluid velocity of non-Newtonian thermal lubrication	139
10.1.2	Reynolds equation of non-Newtonian thermal lubrication	140
10.2	Energy equation in thermal lubrication	140
10.2.1	Energy equation	140
10.2.2	Numerical calculation	141
10.2.3	Calculation diagram of temperature	146
10.3	Temperature calculation program of hydrodynamic lubrication for Newtonian fluid	147
10.3.1	One-dimensional temperature calculation program	147
10.3.2	Two-dimensional temperature calculation	149
	References	152
Chapter 11	Numerical calculation method and program for thermal hydrodynamic lubrication	153
11.1	One-dimensional thermal hydrodynamic lubrication	153
11.1.1	Basic equation	153
11.1.2	Numerical method	155
11.1.3	Program	155
11.2	Two-dimensional thermal hydrodynamic lubrication	159
11.2.1	Basic equation	159
11.2.2	Numerical method	161
11.2.3	Program	161
	References	167
Chapter 12	Numerical calculation method and program for thermal elastohydrodynamic lubrication	168
12.1	Thermal elastohydrodynamic lubrication in line contact	168
12.1.1	Basic equation	168
12.1.2	Numerical method	171
12.1.3	Program	172

12.2 Thermal elastohydrodynamic lubrication in point contact	187
12.2.1 Basic equation	187
12.2.2 Numerical method	191
12.2.3 Program	191
References	205
Index	206

第1篇

基础理论篇

科学的真理不应在古代圣人的蒙着灰尘的书上去找,而应该在实验中和以实验为基础的理论中去找。真正的哲学是写在那本经常在我们眼前打开着的最伟大的书里面的。这本书就是宇宙,就是自然本身,人们必须去读它。

——伽利略

润滑是通过将润滑剂引入到相对运动的摩擦副间,构建具有高法向承载能力和低切向阻力的流体润滑膜,从而避免摩擦表面直接接触,达到减少摩擦阻力和降低材料磨损的目的,进而提高机器的使用性能和寿命并减少能源消耗。此外,润滑膜还具有散热、密封、除锈、减振和降噪等作用。

流体动压润滑理论主要是利用流体力学理论来分析流体润滑膜的形成机理和性能^[1]。润滑理论的研究是从19世纪80年代开始,至今已有100多年的历史。1883年Tower对火车轮轴轴承进行实验时首次观察到了流体动压现象^[2],开启了流体润滑理论的研究。随后,1886年Reynolds根据流体力学理论提出了求解润滑问题的关键方程——Reynolds方程,成功地描述了流体动压现象的机理,奠定了流体润滑理论的基础,开创了基于连续介质力学的润滑问题理论和实验研究^[3]。20世纪50年代以来,由Грубин提出将Reynolds流体润滑理论和Hertz弹性接触理论结合起来处理弹流润滑的方法^[4],以及后来Dowson和Higginson^[5]、Archard和Cowking^[6]、Cheng等^[7]陆续提出的弹流润滑问题的解,使流体润滑理论得到了进一步完善^[8]。与摩擦学中摩擦和磨损另外两个分支相比,因为准确和完善的数学表达,并结合计算技术的迅猛发展,润滑理论研究体系得到了极大的完善。

然而,非牛顿流体润滑问题一直是润滑领域困扰人们的一个难题。长期以来没有找到非牛顿流体润滑计算有效的求解方法,因此,寻求有效的求解非牛顿流体润滑问题的方法是润滑计算分析中的一个重要任务。本篇的主要内容就是要解决这一难点问题。

本篇共包含4章。在第1章中,首先介绍了各种非牛顿流体的类型,然后提出了关于非牛顿流体的总量黏度和增量黏度的概念,并举例分析了它们的差异。最后介绍了常用润滑剂流变性能测量装置——流变仪。大部分的流变仪是旋转式的,其中以锥板式应用最广。