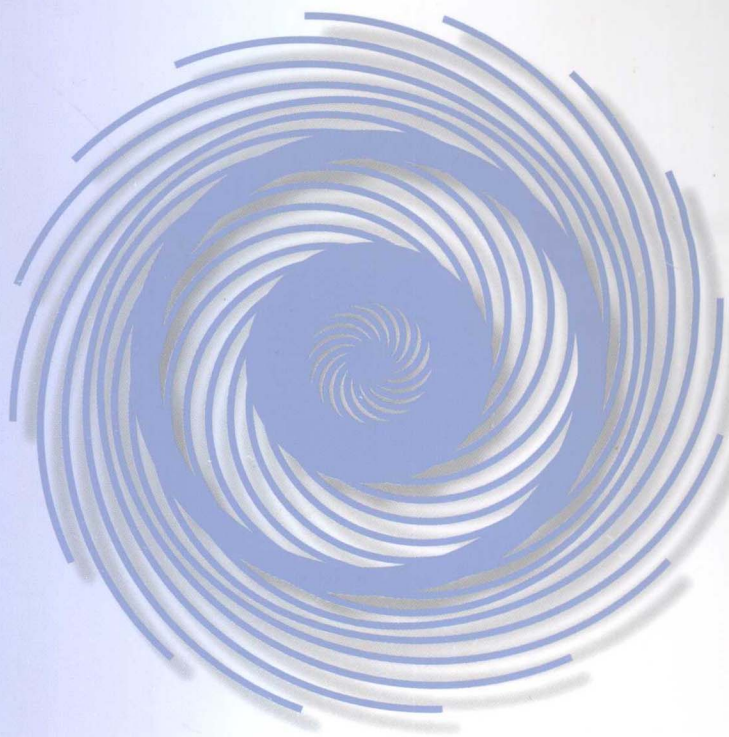




高等学校研究生教材

铁磁流体的 物理学基础和应用



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

高等学校研究生教材

铁磁流体的物理学基础和应用

池长青 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

铁磁流体是一种人工合成的液态磁性物质,它有许多工业应用领域。本书内容包含铁磁流体的物理学基础及其在机械学中最重要两个方面的应用:润滑和密封。全书共分9章。第1~3章是铁磁流体的力学基础、电磁学基础和统计物理学基础,内容均围绕铁磁流体固相微粒的行为进行描述;第4~5章是牛顿流的铁磁流体混合流方程和非牛顿流铁磁流体的特性,它们是铁磁流体宏观行为定量计算的基础;第6~9章是关于铁磁流体非牛顿流润滑及铁磁流体的静止密封和运动密封的原理与设计。

本书可以作为有关铁磁流体专业研究人员的参考书和高等学校研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

铁磁流体的物理学基础和应用 / 池长青著. -- 北京:
北京航空航天大学出版社, 2011. 11
ISBN 978-7-5124-0424-3

I. ①铁… II. ①池… III. ①铁磁流体 IV.
①O361.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 074721 号

版权所有,侵权必究。

铁磁流体的物理学基础和应用

池长青 著

责任编辑 潘晓丽 张雯佳 刘秀清

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:19 字数:486千字

2011年11月第1版 2011年11月第1次印刷 印数:2000册

ISBN 978-7-5124-0424-3 定价:59.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

铁磁流体自 20 世纪中叶被研制出来以后,迄今已半多个世纪。到目前为止,它仍然是工业应用中唯一的人造磁性液体。自 1993 年本书著者和两位同事共同编著了《铁磁流体力学》以来,至今已 18 年了。在这 18 年中,著者积累的研究工作需要整理和系统化,这就成为撰写这本书的动力和目的。

本书共分 9 章。第 1 章简述铁磁流体的物理性质和流体力学基础,即不可压缩流体的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。第 2 章是铁磁流体的电磁学基础,阐明铁磁流体的磁性固相微粒在电磁学上的三个等效模型:平面微电流环、圆球形线圈和磁性偶极子,以及三者 in 空间任意点上产生的磁场一致性。第 3 章是铁磁流体的统计物理学基础,阐明铁磁流体的内禀性和非内禀性的磁化机制,由统计物理方法导出铁磁流体的磁化过程和分散剂的摆动杆物理模型的排斥能。第 4 章是铁磁流体牛顿流动力学方程,使用微元体分析法给出磁场力和力矩。第 5 章是铁磁流体非牛顿流。由于磁性固相微粒之间的相互作用力形成各式各样的微结构,导致铁磁流体宏观的非牛顿流特性。阐明外磁场、涡旋的剪切率和分散剂对铁磁流体非牛顿流特性的影响。给出二次式本构方程。第 6 章是铁磁流体的拟塑性 Bingham 体润滑。导出铁磁流体普适的广义 Reynolds 润滑方程。给出润滑膜内粘附核的生成条件和存在条件。导出粘附核对轴承影响的定量结果。第 7 章是铁磁流体的拟塑性润滑,证明其广义 Reynolds 润滑方程在轴承的边界条件下,其本征函数具有正交性,从而可以使用平均本征值修正而得到二维的近似解。第 8 章是非均匀磁场中铁磁流体的牛顿流润滑。所导出的 Reynolds 润滑方程中包含粘性剪切应力的导数项,并给出平板滑块和阶梯滑块的解。第 9 章是铁磁流体密封,分析静止密封能力和注入量的关系,以及运动密封能力在高速时下降甚至失效的机理。提出一种抵抗高速影响的设计思想,并给出其计算关系。

本书是著者总结对铁磁流体研究工作的专门性著作。研究项目得到原国家教育委员会高等学校专项科研基金和原航空工业部航空科学基金的资助。著者对于参与研究工作的同事们和这两个基金深怀感激之情。此外,著者非常感谢北京航空航天大学出版社。由于获得了这些支持,本书才得以问世。

池长青

2011 年 1 月

目 录

引 论	1
参考文献	5
第 1 章 铁磁流体的物理性质和流体力学基础	6
1.1 铁磁流体	6
1.2 铁磁流体的物理性质	7
1.2.1 铁磁流体的磁学性质	7
1.2.2 铁磁流体的力学性质	7
1.2.3 铁磁流体的热学性质	8
1.2.4 铁磁流体的光学性质	8
1.2.5 铁磁流体的声学性质	8
1.3 流体力学基本方程	9
1.3.1 概 述	9
1.3.2 连续性方程	9
1.3.3 动量守恒方程(N-S 方程)	9
1.3.4 能量守恒方程	10
1.3.5 直角坐标系、圆柱坐标系和圆球坐标系中的流体力学方程	10
1.4 铁磁流体固相微粒旋转时所受到的液体粘性阻力矩	12
1.5 铁磁流体固相微粒移动时所受到的液体粘性阻力	14
参考文献	15
第 2 章 铁磁流体的电磁学基础	16
2.1 概 述	16
2.2 Lorentz 力和磁感应强度	16
2.3 Ampere 定律	16
2.4 Biot-Savart 定律	17
2.4.1 Biot-Savart 实验定律公式	17
2.4.2 载流直导线周围产生的磁场	17
2.4.3 在任意形状的平面电流环法线上的磁感应强度 B	18
2.4.4 任意形状电流环平面上的磁场	19
2.4.5 在平面电流环外任意点处的磁感应强度	21
2.5 圆球形线圈的磁场	23
2.5.1 概 述	23
2.5.2 球形线圈在其磁矩方向上产生的磁场	23
2.5.3 球形线圈赤道平面上的磁场	25

2.5.4 在球形线圈外任意点处的磁场	26
2.6 磁场的 Gauss 定理和 Ampere 环路定理	26
2.6.1 概 述	26
2.6.2 导磁物质内的磁场	27
2.6.3 磁场的 Gauss 定理的物理概念	27
2.6.4 磁场的 Ampere 环路定理的物理概念	28
2.7 Gauss 定理和 Ampere 环路定理的证明	30
2.7.1 Biot - Savart 定律的旋度形式	30
2.7.2 磁场的 Gauss 定理	31
2.7.3 磁场的 Ampere 环路定理	31
2.8 在铁磁流体中 Gauss 定理和 Ampere 环路定理的实例	34
2.8.1 长直导线电流产生的磁场	34
2.8.2 铁磁流体磁性固相微粒产生的磁场	37
2.9 磁场的边界问题	39
2.9.1 边界上磁通量的连续性	39
2.9.2 边界面上磁场强度的切向分量	40
2.9.3 永磁体的边界条件	40
2.9.4 以永磁体作为磁源的磁路定理	41
2.9.5 分子电流密度 i' 与磁化强度 M 的关系	43
2.9.6 铁磁流体密封装置的磁路优化设计	43
2.10 任意形状的平面微电流环在外磁场中所受的力和力矩	44
2.10.1 概 述	44
2.10.2 坐标系	44
2.10.3 电流环所受的磁场力	45
2.10.4 在磁场中电流环所受的磁力矩	48
2.11 圆球形线圈在非均匀磁场中所受的磁力和磁力矩	49
2.11.1 圆球形线圈所受的磁力	49
2.11.2 圆球形线圈所受的磁力矩	50
2.12 铁磁流体的固相磁性微粒(圆球形线圈)在外磁场中的势能	50
2.13 磁偶极子理论	51
2.13.1 概 述	51
2.13.2 磁偶极子产生的磁场	52
2.13.3 磁偶极子在外磁场中所受的力	53
2.13.4 磁偶极子在外磁场中所受的力矩	53
2.13.5 磁偶极子在外磁场中所具有的势能	53
参考文献	54
第 3 章 铁磁流体的统计物理学基础	55
3.1 概 述	55
3.2 理想气体分子运动的统计物理学理论	55

3.2.1 Boltzmann 常数 k_0	56
3.2.2 Maxwell - Boltzmann 分配定律	58
3.2.3 能量均分定理	64
3.2.4 速度分布和平均速率	65
3.3 气体分子或铁磁流体固相微粒之间的相互作用力	67
3.3.1 概 述	67
3.3.2 铁磁流体中的固相微粒之间的 van der Waals 势能	68
3.4 铁磁流体的胶体稳定性	69
3.4.1 概 述	69
3.4.2 在重力场中铁磁流体的胶体稳定性	69
3.4.3 在外磁场中铁磁流体的胶体稳定性	70
3.4.4 在重力场和外磁场中铁磁流体的磁性固相微粒的平衡浓度分布	71
3.5 分散剂机理	73
3.5.1 概 述	73
3.5.2 分散剂的理论模型——摆动杆	73
3.6 铁磁流体的磁化和退磁	76
3.6.1 概 述	76
3.6.2 铁磁流体磁化的量子力学理论	77
3.6.3 铁磁流体的内禀性磁松弛过程	84
3.7 铁磁流体的非内禀性磁松弛过程	87
3.7.1 铁磁流体的非内禀性磁化过程	87
3.7.2 铁磁流体的非内禀性退磁过程	90
3.7.3 铁磁流体的磁松弛时间 t_r	91
3.8 铁磁流体中固相微粒浓度的扩散过程	93
3.8.1 概 述	93
3.8.2 在非均匀磁场中,铁磁流体固相微粒的浓度分布和扩散系数 D_p	93
3.8.3 铁磁流体中固相微粒分布的均匀化过程	95
参考文献	97
第 4 章 铁磁流体牛顿流动力学方程	98
4.1 概 述	98
4.2 铁磁流体胶体混合物的组成参数	99
4.2.1 体积分量参数 ϕ	99
4.2.2 质量分量参数 φ	99
4.2.3 体积分量 ϕ 和质量分量 φ 的关系	99
4.3 铁磁流体的热力学参数	100
4.3.1 压 力	100
4.3.2 密 度	101
4.3.3 铁磁流体的热内能 E_{10} 和温度 T_1	101
4.3.4 铁磁流体的熵	102

4.4 铁磁流体的输运参数	103
4.4.1 输运的通用方程式	103
4.4.2 铁磁流体混合物的粘性系数	104
4.4.3 铁磁流体的导热系数	106
4.4.4 铁磁流体的扩散系数	107
4.5 在外磁场中铁磁流体的热力学定律和热力学函数	108
4.5.1 铁磁流体的磁化功	108
4.5.2 在存在外磁场时,铁磁流体的主要热力学函数	109
4.5.3 铁磁流体磁化性能的本构方程及其磁化强度的导数	110
4.5.4 在外磁场很弱和很强两种情况下,铁磁流体磁化性能的本构方程	111
4.6 铁磁流体在外磁场中的粘度系数 η_H	112
4.6.1 概 述	112
4.6.2 作用于铁磁流体上的粘性力矩和磁力矩	112
4.6.3 在等速涡旋下,铁磁流体磁化强度矢量 M 的分量 M_x	114
4.6.4 铁磁流体在外磁场中的粘度系数 η_H 的表达式	118
4.7 铁磁流体的混合流运动方程	119
4.7.1 铁磁流体运动方程的基本形式	119
4.7.2 两相涡旋速度滞后引起的附加力 f_e 和附加力矩 L_e	120
4.7.3 铁磁流体所受的磁场力 f_m	122
4.7.4 铁磁流体混合流的运动方程	128
4.8 铁磁流体中固相微粒的动量矩方程	129
4.9 铁磁流体的磁化方程	131
4.10 铁磁流体的涡量方程	131
4.11 铁磁流体的质量守恒方程	132
4.12 铁磁流体的能量守恒方程	133
4.13 内禀性铁磁流体的动力学方程组	136
4.14 铁磁流体的边界条件	137
4.14.1 铁磁流体的磁学方程和边界条件	137
4.14.2 铁磁流体力学方程的边界条件	137
参考文献	139
第5章 铁磁流体非牛顿流	140
5.1 概 述	140
5.2 铁磁流体固相微粒之间的相互作用	141
5.2.1 概 述	141
5.2.2 一个偶极子在另一个偶极子产生的磁场中所具有的磁势能	142
5.2.3 偶极子对之间的磁力	143
5.2.4 偶极子对的磁力矩	145
5.2.5 磁偶极子对的磁力因子和磁力矩因子	146
5.3 磁偶极子对在特定的相对位置下的磁力和磁力矩	147

5.3.1 两偶极子平行, $\varphi=0$	147
5.3.2 两偶极子反平行, $\varphi=\pi$	147
5.3.3 两偶极子互相垂直, $\varphi=\pi/2$	147
5.3.4 两偶极子反垂直, $\varphi=3\pi/2$	148
5.4 偶极子对的磁场功	148
5.4.1 两偶极子中心距改变时的磁势能和磁场功	149
5.4.2 在偶极子对中, 一个偶极子的翻转功和磁势能的变化	150
5.5 偶极子长链	153
5.5.1 概 述	153
5.5.2 串接偶极子长链中的内部磁场	153
5.5.3 在串接长链中偶极子的磁势能和相互作用力	154
5.5.4 外磁场 B_0 对串接长链中的偶极子的作用	156
5.6 铁磁流体中, 磁性作用形成的微结构在外磁场影响下的行为	157
5.6.1 概 述	157
5.6.2 偶极子对处于外磁场中	157
5.6.3 外磁场对固相微粒聚集体的作用	159
5.6.4 外磁场对网状结构的影响	160
5.7 铁磁流体流动过程中涡旋(或剪切率)对磁化性能和流动特性的影响	163
5.7.1 网状结构和屈服应力	163
5.7.2 剪切率 D 对网状结构和长链的破坏作用	165
5.7.3 表面活性剂(或分散剂)对铁磁流体性能的影响	166
5.8 铁磁流体流动特性的一种二次型本构方程	167
5.8.1 铁磁流体的非牛顿流特性	167
5.8.2 铁磁流体的实用的二次型本构方程	168
参考文献	169
第 6 章 铁磁流体的拟塑性 Bingham 体润滑	170
6.1 概 述	170
6.2 非牛顿流铁磁流体的广义 Reynolds 润滑方程	171
6.2.1 平衡方程	171
6.2.2 润滑膜内的速度	173
6.2.3 润滑膜厚度上的速度梯度	174
6.2.4 润滑膜内单位宽度上的体积流量	174
6.2.5 具有“固态”核的铁磁流体润滑膜	175
6.2.6 非牛顿流铁磁流体的润滑方程	177
6.3 在非均匀外磁场中具拟塑性 Bingham 体性质的铁磁流体润滑的一般关系式	178
6.3.1 概 述	178
6.3.2 非牛顿流铁磁流体在非均匀外磁场中的一维润滑方程	179
6.3.3 铁磁流体润滑膜中存在“固态”核时的一般关系式	180
6.3.4 铁磁流体润滑膜中粘附核的几何边界	181

6.3.5	润滑膜内出现粘附核的临界条件	183
6.3.6	粘附核保持存在的条件	184
6.4	在均匀外磁场中,铁磁流体润滑的倾斜平板滑块的粘附核	185
6.4.1	概 述	185
6.4.2	倾斜平板滑块中的压力	186
6.4.3	倾斜平板滑块中纯剪切流截面 h_0 的值	187
6.4.4	具有粘附核的倾斜平板的量纲归一化特征尺寸	188
6.4.5	倾斜平板滑块中粘附核出现的临界条件	190
6.4.6	倾斜平板滑块中粘附核保持存在的临界条件	191
6.5	铁磁流体润滑的倾斜平板滑块的性能——进口和出口均存在粘附核	192
6.5.1	概 述	192
6.5.2	倾斜平板滑块内的压力量纲归一化方程	192
6.5.3	进出口均有粘附核的倾斜平板滑块的承载能力	193
6.5.4	进出口均有粘附核的倾斜平板滑块的摩擦应力	195
6.5.5	具有进口和出口粘附核的倾斜平板滑块的摩擦力和摩擦系数	198
6.6	铁磁流体润滑的倾斜平板滑块的性能——只存在进口粘附核	200
6.6.1	概 述	200
6.6.2	压力分布函数	200
6.6.3	滑块的承载能力	200
6.6.4	仅有进口粘附核的倾斜平板滑块的摩擦力和摩擦系数	202
6.6.5	C_0 值的确定	203
6.7	铁磁流体拟塑性 Bingham 体润滑的轴颈轴承	203
6.7.1	概 述	203
6.7.2	轴颈轴承中的粘附核	205
6.7.3	在均匀磁场中,铁磁流体轴颈轴承的压力——进出口均有粘附核	207
6.7.4	在均匀磁场中,铁磁流体轴颈轴承的压力——只存在进口粘附核	212
6.7.5	在均匀磁场中,铁磁流体轴颈轴承的压力——只存在出口粘附核	213
6.8	铁磁流体拟塑性 Bingham 体润滑的阶梯滑块	214
6.8.1	概 述	214
6.8.2	存在浅腔粘附核和台阶粘附核的阶梯滑块的性能	216
6.8.3	只存在浅腔粘附核的阶梯滑块	222
6.8.4	只存在台阶粘附核的阶梯滑块	223
第 6 章附录	有关轴颈轴承间隙函数的积分	226
6A-1	基本关系式	226
6A-2	轴颈轴承间隙函数的积分	226
	参考文献	227
第 7 章	铁磁流体的拟塑性润滑	229
7.1	概 述	229
7.2	铁磁流体的二维拟塑性润滑基本关系	229

7.2.1	铁磁流体的拟塑性粘度系数	229
7.2.2	铁磁流体拟塑性润滑的稳态润滑方程及其边界条件	230
7.2.3	铁磁流体的稳态拟塑性润滑方程本征函数的正交性质	231
7.2.4	二维润滑方程解的一般形式	233
7.2.5	二维润滑中的平均本征值方法	235
7.3	轴承二维流动的平均剪切率	236
7.3.1	概 述	236
7.3.2	倾斜平板滑块	237
7.3.3	轴颈轴承	238
7.4	铁磁流体拟塑性润滑的无限宽倾斜平板滑块	239
7.4.1	方程式(7.20)的一般积分形式	239
7.4.2	在均匀磁场中铁磁流体拟塑性润滑无限宽倾斜平板中的压力	240
7.4.3	铁磁流体拟塑性润滑倾斜平板滑块的承载能力	241
7.4.4	摩擦力和比摩擦力	242
7.4.5	铁磁流体牛顿流润滑的倾斜平板滑块	243
7.5	用平均本征值方法对轴承性能做二维修正	243
7.5.1	压力和比压	243
7.5.2	摩擦应力和比摩擦力	244
7.6	倾斜平板滑块轴承拟塑性润滑的二维近似解	244
7.6.1	压力和比压的二维近似解	244
7.6.2	摩擦应力和比摩擦力的二维近似解	245
7.6.3	倾斜平板滑块的牛顿流润滑二维近似解	245
7.6.4	倾斜平板滑块的平均本征值	246
7.6.5	铁磁流体拟塑性流润滑的无限宽倾斜平板滑块的数值举例	246
7.7	铁磁流体拟塑性流润滑的平行平板阶梯滑块	247
7.7.1	概 述	247
7.7.2	阶梯滑块中的压力分布函数	248
7.7.3	承载力	250
7.7.4	摩擦力	250
7.7.5	二维阶梯滑块性能参数的量纲归一化	251
7.7.6	无限宽的平行平板阶梯滑块	252
7.8	铁磁流体拟塑性流润滑的无限宽轴颈轴承及其二维修正	254
7.8.1	无限宽轴颈轴承的压力——润滑方程积分解	254
7.8.2	无限宽轴颈轴承的承载能力	256
7.8.3	无限宽轴颈轴承的摩擦力	258
7.8.4	铁磁流体拟塑性流润滑的无限宽轴颈轴承的数值举例	260
7.8.5	无限宽轴颈轴承性能的二维修正	261
7.9	铁磁流体拟塑性流润滑的无限窄轴颈轴承	262
7.9.1	无限窄轴颈轴承的润滑方程和压力分布	262

7.9.2 无限窄轴颈轴承的承载能力	263
7.9.3 无限窄轴颈轴承的摩擦力	264
参考文献	265
第8章 非均匀磁场中铁磁流体的牛顿流润滑	266
8.1 概 述	266
8.2 在非均匀的磁场中,铁磁流体牛顿流润滑的基本关系式	267
8.2.1 在非均匀磁场中,铁磁流体牛顿流的润滑方程	267
8.2.2 轴承中铁磁流体润滑剂的流量和粘性剪应力	271
8.3 非均匀磁场中铁磁流体牛顿流润滑方程的本征函数的正交性质	271
8.4 非均匀磁场中铁磁流体牛顿流润滑的倾斜平板滑块	272
8.4.1 滑块内的压力分布	272
8.4.2 滑块的承载能力	273
8.5 在非均匀磁场中,铁磁流体牛顿流润滑的阶梯滑块	274
8.5.1 无限宽阶梯滑块中的压力分布	274
8.5.2 滑块的承载能力	275
8.5.3 摩擦力	276
8.5.4 均匀磁场中的阶梯滑块	276
参考文献	277
第9章 铁磁流体密封	278
9.1 概 述	278
9.2 铁磁流体的 Bernoulli 方程	278
9.3 铁磁流体静止密封的性能	280
9.3.1 最大密封能力	280
9.3.2 在静止状态下铁磁流体密封膜的表面	282
9.3.3 最大密封能力与铁磁流体注入量的关系	283
9.4 轴高速旋转时铁磁流体膜的密封	284
9.4.1 内筒高速旋转下,无限长同心圆筒间隙内铁磁流体的 Bernoulli 方程	284
9.4.2 轴高速旋转时铁磁流体膜的密封能力	285
9.5 铁磁流体密封区的磁场计算	287
9.5.1 基本概念	287
9.5.2 密封磁场的工程估算方法	289
参考文献	290

引 论

本书阐明了铁磁流体最基本的物理学内容。铁磁流体首先是流体,因而它的运动遵循流体动力学的规律;其次它又是磁性物质,因而它的行为可以受到磁场的控制,其磁性能服从电磁学的规律。所以流体力学和电磁学是铁磁流体最重要的物理学基础。铁磁流体是一种液固两相流体,它的基本成分作为载体的非磁性液体和有磁响应能力的铁磁性固体微粒。为了保持固相微粒在基载液体中悬浮而不沉淀,固相微粒的尺寸极为微小,通常粒度在 $8\sim 10\text{ nm}$ 的范围内,相当于 100 个单分子的大小,实际上就是大分子。于是在铁磁流体中,固相微粒具有热运动。纷乱无序的热运动保持固相微粒的弥散分布,使铁磁流体在宏观上具有均匀的各向同性性质。固相微粒必须很小的另一个重要理由是造成固相和液相之间的巨大的接触面积(或润湿面积)。尽管固相微粒只占铁磁流体总体积的 10 % 以下,但每毫升铁磁流体中所含有的固相微粒为 10^{18} 颗的量级,因而两相的接触面积达到了 $40\text{ m}^2/\text{cm}^3$ 。这样巨大的接触面积,使得仅凭两相界面上的粘附作用,就足以通过控制固相微粒来控制整个铁磁流体。显然,控制固相微粒的办法就是利用外磁场。每一个固相微粒在非均匀的外磁场中,都受到磁力和磁力矩的作用。磁力通过固相微粒施加到铁磁流体上,从而控制它的运动;磁力矩使固相微粒之磁矩转向和外磁场平行,这种一致的有序转动就是铁磁流体的磁化过程。因为磁化过程要受到固相微粒热运动的干扰,所以铁磁流体只能在外磁场作用和热运动作用相平衡的水平上磁化。由于固相微粒数量巨大而且运动无序,根本不可能逐个去研究固相微粒的行为,所以,所谓的热运动作用仅是一种统计的宏观表现。在这方面,统计物理学就成为研究铁磁流体的物理学基础之一。

无论是在力学上,还是在电磁学上,对于固相微粒有两个通用的、基本的假设:① 所有的固相微粒都是大小一致的圆球形状;② 尽管在铁磁流体内,固相微粒的数密度极其大,但总体积不到铁磁流体的 10 %,所以认为它是稀疏相。由此,固相微粒在铁磁流体中的运动可以看作是圆球在无界流中的低 Reynolds 数运动,于是 Stokes 阻力和阻力矩适用于固相微粒的移动和转动。

由于固相微粒的粒度远小于它本身材料的磁晶单畴临界尺寸,所以铁磁流体中的固相微粒都是磁单畴的。在电磁学上有三种模型可用来分析固相微粒的磁学特性,这三种模型是:平面微电流环、圆球形线圈、磁偶极子。可导出这三种模型在空间远处任意点产生磁场的数学关系式,且三者的关系式完全一致,由此证明三种模型的等效性。微粒自身磁场和外磁场的相互作用,不仅决定了铁磁流体的磁响应性能,而且还影响铁磁流体内部微粒形成的微结构的生成和瓦解。所以,外磁场不仅决定铁磁流体的磁化程度,而且对铁磁流体的流动特性也有显著影响。

由于数密度巨大,因而铁磁流体内固相微粒热运动的碰撞率非常高。碰撞是造成聚集的主要原因,而聚集形成的大块必定导致沉淀。所以固相微粒的热运动具有正负两方面的作用,其既是保持固相微粒均匀弥散的基础,同时又是导致沉淀的重要原因。微粒因碰撞而聚集的原因是 van der Waals 力和磁力的存在,防止聚集的最有效的手段是在铁磁流体中加入足量

的分散剂。分散剂是一种长链分子,其一端吸附在固相微粒的表面上,另一端处于自由状态。分散剂长链分子遏制固相微粒碰撞的机理,Rosensweig 在 Mackor 的平面弹簧缓冲器的基础上,拓展于圆球形固相微粒而得到分散剂的排斥能^[1],很好地解释了分散剂的机理。但是,分散剂长链分子终究不能像弹簧那样可以压缩,所以弹簧缓冲器模型在物理直观上并非完善。本书按照将吸附于固相微粒表面上的长链分子视作一端球铰连接的摆动杆模型,得出分散剂的排斥势能。其物理概念是,在自由状态下,长链分子摆动的范围是 $[-\pi/2, \pi/2]$;当两个微粒相接近时,长链分子的摆动范围受到限制而缩小,而实现这样的限制就得做功,此功便转换成分散剂的排斥势能。

铁磁流体的磁化通常使用 Langevin 方程,这个方程是从量子力学导出的 Brillouin 方程的特殊情况。无论是 Brillouin 方程,还是 Langevin 方程,它们给出的都是磁化的平衡状态,并不涉及磁化的过程。本书用统计力学的方法得出非内禀性磁化和退磁的过程,它们都近似地与时间呈线性关系。其磁化过程是

$$M = \begin{cases} \phi M_p L(\alpha) \frac{t}{t_B}, & 0 \leq t \leq t_B \\ \phi M_p L(\alpha), & t \geq t_B \end{cases}$$

式中, M 是铁磁流体的磁化强度; M_p 是固相微粒材料的磁化强度; ϕ 是固相微粒的体积分量; $L(\alpha)$ 是 Langevin 函数; t_B 是 Brown 扩散时间。铁磁流体的退磁过程是

$$[(\varphi - \varphi_e)^2]_e = \begin{cases} \frac{t}{t_B}, & 0 \leq t \leq t_B \\ 1, & t \geq t_B \end{cases}$$

式中, φ 是固相微粒的磁矩矢量 m_{pi} 与外磁场矢量 H 的夹角, φ_e 是全体固相微粒的 φ 角的数学期望,即统计平均值, $(\varphi - \varphi_e)^2$ 称为方差,角度 φ 的方差的统计平均值就表示了在外磁场方向的磁化程度。若方差的统计平均值是零,则表示全体微粒的磁矩都有同样的方向,这时是有秩序的排列,表示处于磁化平衡状态;若方差的统计平均值为 1,则是完全无序的混乱状态,此时铁磁流体宏观上没有磁性,即完全退磁。

非内禀性铁磁流体的磁化和退磁,两者的特征时间都是 Brown 扩散时间 t_B 。内禀性的磁化和退磁的机理并非固相微粒自身在基载液中的旋转,而是固相微粒内部的磁畴旋转,它的特征时间是 Neel 扩散时间 t_N 。但实际上,在外磁场作用下,微粒自身的旋转和微粒内部的磁畴旋转同时在进行。只有很小粒度的微粒,磁畴的旋转远快于微粒体的旋转,此时的磁过程特征时间取决于 t_N ,这就是内禀性铁磁流体。在固相微粒尺寸很大时,情况相反,磁过程的特征时间取决于 t_B ,此时就是非内禀性情况。但在某些中间尺寸下, t_N 和 t_B 之间相差不那么大,此时磁过程取决一个综合的磁松弛时间 t_r 。内禀性和非内禀性的概念不能绝对化的另一个原因是,铁磁流体内微粒的粒度只是一个平均的概念,实际上它们是大小不一的,因而微粒磁化过程取决于 t_N 、 t_B 和 t_r 的都有,固相微粒是大小一致的圆球的假设,只是为了分析上的方便而已。

铁磁流体中的固相微粒的尺寸极其微小,所以在流动中两相间的滞后效应一般可以忽略。这样,就可以将铁磁流体作为一种各向同性的均匀流体对待,它的力学和热力学的物性参数都需要进行折算。在铁磁流体的力学方程组中,除质量守恒方程以外,都包含有磁作用项。应用最广泛的是动量方程中的磁力项。磁力项的产生是外磁场的非均匀性。在非均匀的外磁场

中,铁磁流体的磁化也是不均匀的。在大多数情况下,铁磁流体的磁松弛速度远远快于流动速度,所以在流场中,铁磁流体的磁化强度处处和外磁场强度相适应,这就是所谓的“磁平衡流”。磁场不均匀,铁磁流体的磁化也不均匀,于是就有未被抵消的束缚电流存在于铁磁流体内部,这时磁化强度 $\mathbf{M}$ 是有旋的;如果也存在传导电流穿过磁场,则磁场也是有旋的。利用微元控制体分析所得到的磁力是

$$\mathbf{f}_m = \mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{B}_0 + \mathbf{M} \times (\nabla \times \mathbf{B}_0) + \mathbf{B}_0 \times (\nabla \times \mathbf{M})$$

式中,右方第1项是外磁场梯度产生的力,即 Kelvin 力,第2项是传导电流的贡献,第3项是非均匀磁化引起的力。

在外磁场中,铁磁流体所具有的磁势能是 $e_p = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{B}_0$,于是磁力 $\mathbf{f}_m = \nabla (\mathbf{M} \cdot \mathbf{B}_0)$ 。由矢量恒等式展开则有

$$\mathbf{f}_m = \mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{B}_0 + \mathbf{M} \times (\nabla \times \mathbf{B}_0) + \mathbf{B}_0 \times (\nabla \times \mathbf{M}) + \mathbf{B}_0 \cdot \nabla \mathbf{M}$$

其结果多出一项 $\mathbf{B}_0 \cdot \nabla \mathbf{M}$,但从物理上看,这一项是不应存在的。铁磁流体的磁化不均匀,只是其内的固相微粒的磁矩矢量转向外磁场的程度不一致而已。对固相微粒产生力的作用是 $\mathbf{B}_0$ 的梯度,而 $\mathbf{B}_0$ 则只引起力偶作用于圆球微粒之上,虽然各微粒上的力偶大小不同、方向各异,但所有微粒力偶矢量的合成仍为力偶矢,而不出现力。所以只有在均匀磁化情况下,铁磁流体单位体积的磁势能才是一 $\mathbf{M} \cdot \mathbf{B}_0$ 。

只要有外磁场存在,就必然有磁力矩作用于固相微粒上。如果外磁场矢量 $\mathbf{B}_0$ 与铁磁流体流动的涡旋矢量 $\boldsymbol{\omega}$ 互相垂直,则作用于固相微粒上的磁力矩将阻碍微粒随流动涡旋的翻转。于是宏观上就出现铁磁流体的粘度增大。Shliomis 在这个概念的基础上导出了一个铁磁流体粘度的数学关系式。此式是在略去 $\omega_c t_B$ 的二次和二次以上的项得出的。然而在某些场合,例如较高速的润滑,其润滑剂的涡旋速度很大, $\omega_c t_B$ 并不是太小的量,所以应当保留其二次项。本书按这种观念导出的铁磁流体粘度关系式,更具一般性,可以满足铁磁流体润滑的要求。

虽然在铁磁流体内部加入分散剂,但分散剂的长链大分子在固相微粒间的分配却是随机的,不能保证所有固相微粒都能得到足够的分散剂长链大分子。因而总有部分固相微粒在磁力和 van der Waals 力作用下聚集和絮凝。假定每毫升铁磁流体内部含有 10^{17} 颗固相微粒,微粒的平均直径为 10^{-8} m,如果有 1% 的微粒因未得到足够的分散剂分子而结合成微粒链,则这些长短不一的微粒链总长度会达到 10^7 m,即 10^4 km 的量级。在 1 mL 铁磁流体内部,有总长为 10^4 km 的微粒链,纵横交错地分布于其中,对铁磁流体的运动特性不能没有影响。所以铁磁流体流动特性的实验数据表明大多数铁磁流体是一种非牛顿流体。与普通非牛顿流体不同,外磁场对铁磁流体的流动特性有重要的影响。从电磁学的视角来看,铁磁流体非牛顿流的主要根源就是固相微粒之间的磁力和磁力矩。本书利用磁偶极子模型给出了当两固相微粒的磁矩成任意角度,并且两者之间处于空间任意相对位置时,它们之间的磁力和磁力矩的一般关系式。对于固相微粒构成的长链,则以密圈螺旋电流圈为模型,得到串接长链中微粒的磁势能和相互作用力、串接长链的拉伸功、长链中的微粒的翻转功等。在外磁场作用下所有固相微粒都受到一个外磁场的力矩,这种力矩力图使所有微粒的磁矩转向外磁场方向,从而微粒间的结合力越来越小。若外磁场足够强,则微粒之间的结合势能低于热动能,或者微粒之间的磁力由吸引力转变成排斥力。于是,由磁性结合成的微结构便瓦解,铁磁流体的非牛顿流性质渐渐减弱而趋向于牛顿流。同时,相当多的磁中性聚集体瓦解成较小的极性聚集体以及单体微粒,从而铁磁流

体的磁化强度增大。

铁磁流体的流动是有旋的。在流动的涡旋中,不断地有一些微结构的固相微粒链受到拉伸应力而断开,使微结构破碎成越来越小的聚集体,对涡旋运动的阻碍也越来越弱。这就是剪切稀化的原因。在开始流动时,需要有足够的剪切应力来使固相微粒链断开,流动才能发生。这时的剪切应力就是铁磁流体的屈服应力。按照这样的观念,本书给出了铁磁流体屈服应力的估算关系式。

从目前见到的实验数据来看,还没有一种铁磁流体是膨胀体。铁磁流体最一般的非牛顿流特性是拟塑性 Bingham 体,其既有剪切稀化,又有屈服应力;此外,当然也有纯拟塑性流,或纯 Bingham 体。以铁磁流体作为轴承的润滑剂时,润滑方程不能从 Navier - Stokes 方程导出。但无论如何,流体中力的平衡总是存在的。本书由微元控制体的平衡和牛顿第二定律得出铁磁流体的广义 Reynolds 润滑方程。由于屈服应力的存在,铁磁流体润滑膜中就会有“固态”核。“固态”核只能发生在润滑中流动剪切应力小于屈服应力的部位,所以它是局部性的。“固态”核是一个区域的概念,它在润滑膜中的位置是固定的。当润滑剂进入这种区域内时立即“冻结”成“固态”,并且像刚体平移那样,各点均以同样大小的速度和方向运动。一旦移出这种区域,就立刻恢复成流体状态。本书给出了铁磁流体润滑膜的进口和出口粘附核的几何边界方程、核的生成条件和保持存在的条件。生成条件只是核出现的可能条件,能不能存在则取决于屈服应力和剪切应力的相对关系。剪切应力主要取决于轴承运动表面的速度。所以高速轴承的铁磁流体润滑膜内很难存在粘附核。高速下主要关注的是剪切稀化,即拟塑性润滑。

单纯的拟塑性润滑使广义 Reynolds 润滑方程得到简化,并且这种润滑方程的本征函数具有正交性质,从而可以使用平均本征值方法进行二维修正^[2]。铁磁流体粘度的实验数据都是由一维流动取得的,本书使用一个平均剪切率系数来估计二维影响。计算结果表明,在实用的轴承参数范围内,这个剪切率系数非常接近于 1,因而使用轴承表面速度 U 和间隙 h 的比值作为二维流的平均剪切率,并且假定铁磁流体是一种各向同性的流体。于是本书提出的拟合实验数据的二次型本构方程为

$$\eta(H) = \tau_s(H) + \eta_N(H) \frac{\partial u}{\partial y} + \eta_t(H) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$$

上式可以改写成

$$\eta(H) = \tau_s(H) + \eta_N(H) \left[1 + \frac{\eta_t(H)}{\eta_N(H)} \frac{|U|}{h} \right] \frac{\partial u}{\partial y}$$

这种二次型的本构方程拟合实验数据具有很高的精度。式中 $\tau_s(H)$ 是屈服应力, $\eta_N(H)$ 具有牛顿流粘度系数的意思, $\eta_t(H)$ 对于拟塑性流体是负值,表达剪切稀化。

外磁场对铁磁流体轴承的影响有两个方面:① 磁场梯度产生的磁力作用于铁磁流体润滑剂上;② 磁场改变铁磁流体的粘度。在目前的情况下,第一方面的作用与流体动力相比,可以说是微乎其微。而第二方面的作用则有显著的影响。但是,非均匀磁场对铁磁流体润滑并不是没有意义。例如,在轴颈轴承的小间隙部位设置磁场,局部地提高该处的铁磁流体润滑剂的粘度。这样在小偏心率下,既可提高承载能力,又可使最大压力区移向小间隙,从而减小姿态角,有助于轴承运转的稳定性;在大载荷下,可以在保证承载力要求的条件下,减小偏心率,从而使轴承在足够的安全裕度下运行。本书导出的非均匀磁场下铁磁流体的润滑方程,除包含

磁场梯度产生的 Kelvin 力以外,更重要的是有铁磁流体润滑剂粘度变化的项。这种项在润滑力学的概念上可以称之为“粘度楔效应”。

铁磁流体在机械学中另一个重要的应用是密封。在现今的技术中,铁磁流体密封是最接近零泄漏和无摩擦的密封,所以在精密机械、真空技术、仪器仪表等方面得到很多的应用。铁磁流体静止密封膜的表面是等压面,也就是等磁场强度面。在高速旋转下,铁磁流体密封膜的表面仍然是一个等压面,但不是等磁场强度面,它是由磁场力和离心力相平衡决定的表面。在高速旋转下,铁磁流体密封膜的低压表面上不可避免地会产生流失。本书建议采用一种能抵抗很高转速的设计。

参考文献

- [1] ROSENSWEIG R E. Ferrohydrodynamics[M]. Cambrige University Press,1985.
- [2] 池长青. 流体力学润滑[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [3] 池长青,王之珊,赵丕智. 铁磁流体力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1993.
- [4] 平克斯 O,斯德因李希特 B. 流体动力润滑理论[M]. 西安交通大学轴承研究小组,译. 北京:机械工业出版社,1980.
- [5] 池长青. 均匀磁场中铁磁流体润滑的轴颈轴承[J]. 航空动力学报,2000(2).
- [6] 池长青. 铁磁流体润滑中的非牛顿流影响[J]. 北京航空航天大学学报,2001,27(1): 88-92.
- [7] 池长青. 均匀磁场中铁磁流体润滑的平板滑块的性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2001,27(1):93-96.