

磁流变液智能材料与器件 及结构振动的智能控制

瞿伟廉 等著



科学出版社

磁流变液智能材料与器件 及结构振动的智能控制

瞿伟廉等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统、全面地介绍了智能材料与结构研究的重要分支——磁流变液智能材料、磁流变液阻尼器智能材料器件和它们在土木工程结构振动智能控制中应用的制备、设计计算方法及系统集成的理论和关键技术。全书共分八章。其中，第一章为绪论，主要介绍磁流变液智能材料及磁流变液阻尼器智能材料器件的智能特性及土木工程结构振动智能控制的原理；第二章详细介绍磁流变液智能材料的设计制备方法及主要的智能特性；第三章重点阐述磁流变液阻尼器智能材料器件的设计方法及制作的关键技术；第四章至第八章主要论述磁流变液阻尼器智能材料器件在五类土木工程结构振动智能控制中应用的设计计算方法与系统集成技术。

本书可供智能材料和土木工程防灾减灾领域的科研、设计人员，以及高等院校土木工程专业高年级本科生及研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

磁流变液智能材料与器件及结构振动的智能控制/瞿伟廉等著. —北京: 科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-039250-3

I. ①磁… II. ①瞿… III. ①磁流体-智能材料-建筑材料-结构振动控制-智能控制 IV. ①TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 289245 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 刘玉靖

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

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

*

2013年12月第一版 开本: B5 (720×1000)

2013年12月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 252 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BZ08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

智能材料与结构是（2006~2020年）国家中长期科学和技术发展规划纲要中优先发展的前沿研究领域，磁流变液智能材料与器件及工程结构振动的智能控制是该研究领域在土木工程学科中的分支。它为解决土木工程结构安全防灾的疑难问题提供了途径，是国民经济建设中土木工程安全防灾的需求。

土木工程结构的振动灾害，包括地震振动灾害、风致振动灾害、各种动力荷载作用下的振动灾害，是土木工程灾害的主要形式之一。如何减小工程结构的振动灾害一直是土木工程师长期的研究目标。从20世纪80年代末开始的结构振动控制的研究改变了传统的用结构的强度、刚度和延性“硬抗”灾害动力作用的思想，而采用在结构上安装某些控制装置或控制构件来减小结构主要受力构件的振动响应，以满足结构抗振动设计的要求，从而创建了新的工程结构振动设计的途径，在土木工程中获取了广泛的应用。但是，由于土木工程上的动力灾害作用能量巨大及工程结构体型庞大，工程结构的振动控制更偏向于简单、实用、可靠的被动控制技术，而很少采用能耗大、系统复杂、控制鲁棒性差的主动控制技术。因为被动控制技术控制效果的局限性，所以人们在思考：能否找到一种介于被动控制和主动控制技术之间的方法，以采用接近被动控制的控制装置来实现接近主动控制的控制效果呢？

基于磁流变液可控流体智能材料的结构振动智能控制技术由此应运而生。它利用磁流变液智能材料在磁场作用下可瞬间在流体和粘塑性固体之间变换的智能特性来实现磁流变液阻尼器智能材料器件的参数可调，从而实现阻尼器的出力（即控制力）的可调。它具有仅需很小的能源、可使控制效果介于被动控制和主动控制之间的特点，具有广阔的应用前景。但是，自20世纪90年代至本世纪初，基于磁流变液智能材料的结构振动智能控制技术理论成果多，应用

成果少。其中，最主要的原因是：①磁流变液智能材料和磁流变液阻尼器智能材料器件存在“稳定性差、出力不大和使用寿命短”等三个重大缺陷；②对各类工程结构缺乏具体的振动智能控制的设计、构建和系统集成的整套技术。

据此，在国家自然科学基金重点项目（编号：50038010）、国家自然科学基金重大国际合作项目（编号：50520130296）和国家高技术“863”计划项目（编号：2001AA339020）的支撑下，本书作者开展了针对上述问题的系统研究。本书详细介绍了作者在高稳定性磁流变液智能材料的制备，大出力、高寿命磁流变液阻尼器智能材料器件的设计与制作及各种工程结构振动智能控制的设计计算与系统集成等方面的研究成果。全书共分为八章。第一章概述了磁流变液智能材料的主要特性，磁流变液阻尼器的工作原理及研究现状，以及工程结构振动智能控制的设计原理和应用现状。第二章介绍了磁流变液的性能设计、测试和表征方法，磁流变液的抗沉降稳定性和动力本构关系。第三章介绍了足尺磁流变液阻尼器的动力模型与设计仿真、设计制作的关键技术与性能试验、参数识别与磁滞补偿的方法。第四章介绍了漂浮型铁路桥梁列车制动动力作用的计算方法，主梁的纵向地震和列车制动响应的分析方法，主梁纵向振动基于流体阻尼器的被动控制和基于磁流变液阻尼器智能控制的设计方法；比较了上述方法对漂浮型铁路桥梁主梁采纵向振动控制的不同效果，同时介绍了天兴洲公铁两用斜拉桥的工程应用情况。第五章介绍了大坝升船机顶部厂房地震鞭梢效应的分析方法，磁流变液屋盖智能隔震系统对大坝升船机地震鞭梢效应智能控制的设计方法和地震模拟振动台试验的情况，以及三峡大坝升船机在设计中应用的情况。第六章介绍了高耸电视塔结构脉动风振响应的分析方法，磁流变液阻尼器在高耸电视塔结构上安装的特点及其对高耸电视塔结构风致振动智能控制的双模型设计计算方法，以及合肥翡翠电视塔风致振动智能控制的效果。第七章介绍了带裙房高层建筑地震响应的分析方法及响应特点，带裙房高层建筑的“裙房-磁流变液阻尼器-主楼”结构系统的地震响应智能控制的设计方法和一个带裙房20层主楼计算结构地震响应的智能控制效果，以及该种智能控制结构系统地震模拟振动台的试验情况。第八章介绍了斜拉桥斜拉索振动响

应的特点及斜拉索在外部激励和支座运动激励下振动智能控制的设计方法，以及洞庭湖公路大桥和滨州黄河公路大桥的工程应用情况。

本书是作者近十多年来在“磁流变液智能材料、磁流变液阻尼器智能材料器件和工程结构振动智能控制”方面研究工作的总结，并已在多个重大土木工程结构上获得应用，其理论和关键技术成果已获得2012年度湖北省科技进步一等奖。

参加本书撰写的还有涂建维、程海斌、刘嘉、周强。限于作者水平，书中不足之处在所难免，敬请广大读者指正。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 磁流变液与电流变液	1
1.2 磁流变液智能材料的主要特性	2
1.3 磁流变液阻尼器智能材料器件的工作原理	3
1.4 磁流变液智能材料器件研究的发展历史和现状	5
1.5 结构振动智能控制的工作原理和工程应用发展历史	10
主要参考文献	13
第二章 磁流变液及其成分设计、合成和性能分析	19
2.1 磁流变液的特点简介	19
2.2 磁流变液的主要特性	19
2.2.1 磁致屈服应力	20
2.2.2 零场黏度	20
2.2.3 稳定性	21
2.2.4 工作温度范围	21
2.2.5 耐久性	21
2.2.6 侵蚀性	22
2.2.7 安全性	22
2.3 磁流变液成分设计及其原则	22
2.3.1 磁性粒子	22
2.3.2 载液	24
2.3.3 添加剂	25
2.4 磁流变液的合成工艺	25
2.5 磁流变液的性能表征	26
2.5.1 磁流变液流变特性测试装置和测试方法	27
2.5.2 磁流变液磁致屈服应力的测试与分析	28
2.5.3 磁流变液零场黏度的测试与分析	31
2.5.4 磁流变液沉降稳定性测试与分析	31
2.6 磁流变液主要性能的影响因素分析	34
2.6.1 屈服应力的影响因素分析	34
2.6.2 零场黏度的影响因素分析	42

2.6.3	磁流变液沉降稳定性的影响因素分析	47
2.7	小结	51
	主要参考文献	52
第三章	磁流变液阻尼器的设计制作、参数识别与磁滞补偿	58
3.1	MR 阻尼器几种典型的动力模型	59
3.1.1	Bingham 塑性模型	59
3.1.2	粘弹塑性模型	59
3.1.3	非线性磁滞 biviscous 模型	60
3.1.4	Bouc-Wen 磁滞模型	60
3.1.5	修正的 Bingham 模型	61
3.1.6	修正的 Dahl 模型	62
3.2	500kN 磁流变液阻尼器的仿真设计	63
3.2.1	几何设计	63
3.2.2	磁路设计	64
3.3	足尺大出力磁流变液阻尼器设计制作的关键技术	68
3.3.1	新型蓄能器技术	68
3.3.2	磁场防泄漏技术	70
3.3.3	长寿命耐久性技术	70
3.3.4	引线保护技术	72
3.4	500kN 足尺 MR 阻尼器的性能试验	73
3.4.1	性能试验安装	73
3.4.2	性能试验系统	73
3.4.3	性能测试结果	74
3.5	MR 阻尼器的参数识别	76
3.6	MR 阻尼器的磁滞效应与补偿	78
3.6.1	径向基 (RBF) 函数神经网络预测补偿磁滞效应	78
3.6.2	MR 阻尼器磁滞补偿的仿真分析	80
	主要参考文献	83
第四章	大跨度漂浮型铁路桥梁主梁纵向振动的智能控制	85
4.1	漂浮型桥梁纵向振动控制的应用现状及工程背景概况	85
4.1.1	流体阻尼器对漂浮型桥梁主梁纵向振动控制应用的现状	85
4.1.2	武汉天兴洲公铁两用斜拉桥的工程概况	86
4.2	列车制动动力作用的模拟	88
4.2.1	列车制动荷载的模拟	88
4.2.2	列车制动荷载在桥梁上的传递	94

4.2.3	列车行走移动荷载的模拟	96
4.3	漂浮型铁路桥梁主梁纵向振动反应及特点	97
4.3.1	漂浮型铁路桥梁主梁纵向振动反应的运动方程	97
4.3.2	漂浮型铁路桥梁主梁纵向地震反应分析	98
4.3.3	主梁纵向列车制动响应分析	101
4.3.4	漂浮型铁路桥梁主梁纵向振动反应的特点	103
4.4	常规流体阻尼器对漂浮型铁路桥梁主梁纵向振动反应的被动控制 ..	105
4.4.1	流体阻尼器的设置位置	105
4.4.2	流体阻尼器的被动控制方程	106
4.4.3	流体阻尼器的尺寸参数	106
4.4.4	流体阻尼器对主梁纵向地震反应的控制效果	107
4.4.5	流体阻尼器对主梁列车制动作用振动反应的控制效果	108
4.4.6	流体阻尼器对漂浮型铁路桥梁主梁纵向振动响应控制的 局限性	110
4.5	漂浮型铁路桥梁主梁纵向振动的 MR 阻尼器和流体阻尼器的智能 混合控制	110
4.5.1	漂浮型铁路桥梁主梁纵向振动的智能混合控制方案	110
4.5.2	漂浮型铁路桥梁主梁纵向振动响应智能混合控制的控制方程 ..	111
4.5.3	磁流变液阻尼器参数调节的半主动控制策略	113
4.5.4	漂浮型铁路桥梁主梁纵向振动反应智能混合控制仿真计算 的步骤	114
4.5.5	主梁纵向地震响应的智能混合控制的效果	115
4.5.6	主梁纵向列车制动响应智能混合控制的效果	115
	主要参考文献	118
第五章	大坝升船机地震鞭梢效应的屋盖智能隔震控制	121
5.1	三峡大坝升船机工程概况	121
5.2	三峡大坝升船机地震响应的特点	123
5.2.1	大坝升船机结构的三维空间有限元模型	123
5.2.2	大坝升船机结构等效的二维串联质量多自由度动力模型 ..	123
5.2.3	三峡大坝升船机的地震反应分析	125
5.3	屋盖 MR 智能隔震系统对三峡大坝升船机地震鞭梢效应的智能控制 ..	126
5.3.1	屋盖 MR 智能隔震系统的布置方案	126
5.3.2	屋盖 MR 智能隔震控制系统的力学模型与控制方程	127
5.3.3	磁流变液阻尼器参数调节的半主动控制策略	129
5.3.4	确定 MR 阻尼器控制电流的逆模式神经网络	132

5.3.5	大坝升船机顶部厂房地震鞭梢效应智能控制的仿真结果	134
5.4	大坝升船机地震鞭梢效应屋盖智能隔震控制的振动台试验	136
5.4.1	试验模型	136
5.4.2	结构模型参数的动力测试	137
5.4.3	振动智能控制试验	138
5.4.4	试验结果	140
5.4.5	试验结果与仿真结果的比较	142
	主要参考文献	145
第六章	高耸电视塔结构风振响应的智能控制	147
6.1	合肥翡翠电视塔工程概况	147
6.2	顺风向脉动风荷载的模拟方法	148
6.2.1	脉动风压的功率谱密度函数和脉动风压系数	148
6.2.2	脉动风的空间相关性	149
6.2.3	脉动风荷载的自功率与互功率谱密度函数	150
6.2.4	多维脉动风荷载的数值模拟	150
6.3	电视塔结构的动力分析模型及风振响应分析	152
6.3.1	三维空间有限元结构模型及结构的动力特性分析	153
6.3.2	二维串联质量多自由度结构动力模型及结构的风振响应分析	155
6.4	高耸电视塔风致振动响应的智能控制	158
6.4.1	磁流变液阻尼器的参数和安装位置	158
6.4.2	高耸电视塔风致振动智能控制双模型动力分析法	158
6.4.3	MR 阻尼器参数调节的半主动控制策略	161
6.4.4	高耸电视塔风致振动智能控制的效果	162
6.5	小结	163
	主要参考文献	163
第七章	磁流变液阻尼器对带裙房高层建筑地震反应的智能控制	165
7.1	磁流变液阻尼器耦联的带裙房高层建筑的地震反应方程	166
7.1.1	磁流变液阻尼器的力学模型	166
7.1.2	磁流变液阻尼器耦联的剪切型带裙房高层建筑的地震 反应方程	167
7.2	磁流变液阻尼器参数调节的控制策略	169
7.2.1	主动控制的最优主动控制位移	169
7.2.2	MR 阻尼器参数调节的半主动控制策略	170
7.3	计算实例的仿真分析	170
7.3.1	计算结构概况	170

7.3.2	半主动控制效果的比较	171
7.3.3	智能半主动控制与被动控制效果的比较	172
7.4	磁流变液阻尼器耦联的带裙房高层建筑地震反应的振动台试验	173
7.4.1	试验结构模型	173
7.4.2	磁流变液阻尼器动力特性测试	174
7.4.3	智能控制的振动台试验系统设计	176
7.4.4	结构响应的采集	178
7.4.5	智能控制的试验结果	178
	主要参考文献	180
第八章	磁流变液阻尼器对斜拉桥拉索振动响应的智能控制	181
8.1	斜拉桥拉索振动反应的特点	181
8.1.1	涡激共振	181
8.1.2	风雨激振	182
8.1.3	尾流驰振	182
8.1.4	抖振	182
8.1.5	裹冰拉索驰振	182
8.1.6	高风速下的涡激振动	183
8.1.7	参数振动和线性内部共振	183
8.1.8	斜拉索振动的抑制措施	183
8.2	斜拉索-磁流变液阻尼器系统运动方程及求解	184
8.2.1	磁流变阻尼器的动态力学特性	184
8.2.2	拉索-MR 阻尼器系统动力方程	184
8.2.3	MR 阻尼器提供的阻尼力	186
8.2.4	动力方程的离散化	187
8.3	非线性振动控制算法	188
8.3.1	调制均匀摩擦控制算法	188
8.3.2	基于平衡逻辑算法的半主动控制策略	189
8.4	磁流变液阻尼器对外部荷载激励下斜拉索振动的智能控制	189
8.4.1	外加均布随机荷载下拉索振动的智能控制	190
8.4.2	控制增益 β 对控制效果的影响	191
8.4.3	控制算法的鲁棒性	192
8.5	磁流变液阻尼器对支座运动下斜拉索振动的智能控制	192
8.5.1	超谐波振动 $\Omega \approx 2\omega_1$	193
8.5.2	谐波振动 $\Omega \approx \omega_1$	194
8.5.3	超谐波振动 $\Omega \approx 2\omega_1/3$	195

第一章 绪 论

传统的结构抗振动（抗震、抗风和抗动力荷载）设计是通过增强结构本身的能力（强度、刚度和延性）来抵御各种自然灾害的动力作用的。然而，由于自然灾害的能量巨大，因此，在自然灾害的动力作用下，传统的工程结构很难避免损坏或完全满足设计要求。因此，这就给广大结构工程师提出了一个任务：为了满足工程结构安全和防灾的设计要求，必须寻求新的工程结构防振动灾害的方法。

工程结构的振动控制至今已有近 30 年的历史。自 20 世纪 80 年代美国学者 Yao 提出结构振动控制的概念以来，结构振动控制的研究和应用越来越得到人们的广泛关注和重视，目前它已成为土木工程防灾领域最具前沿性的发展方向之一，并已在世界各国的工程实际中得到应用。结构振动控制是土木工程和自动控制、计算机科学、新材料科学等交叉的前沿学科领域，它利用设置在结构上的控制装置或控制构件对结构主动或被动施加的控制力，减轻外部动力荷载引起的结构振动，实现满足结构抗振动的设计要求。与土木工程结构传统的设计思想相比，结构振动控制理论改变了传统的用承重结构本身来抵御灾害动力荷载作用的思想，而采用非承重的控制装置或控制构件施加的控制力来减缓结构本身的振动反应，以使其满足结构抗振动的设计要求。它为结构抗振动灾害的设计理论提供了一个新思路，是结构设计思想上的一个飞跃，开辟了结构抗振动灾害设计的新途径。

以磁流变液阻尼器智能材料器件为控制器件的工程结构振动智能控制是“智能材料与结构”前沿领域在结构振动控制研究中的应用，是国内外土木工程防灾领域的研究热点之一。本章着重对磁流变液智能材料、磁流变液阻尼器智能材料器件及结构振动智能控制的基本原理、国内外的应用研究现状进行概述性的介绍，以使大家对其有一个概貌性的基本了解。

1.1 磁流变液与电流变液

磁流变液（magnetorheological fluid 或 magnetorheological suspension，通常简称为 MR fluid）是一种可控流体智能材料，它是由可磁化粒子分散在基液中所形成的固/液两相悬浮液。在外加磁场作用下，磁流变液能在瞬间（毫秒级）从流动性良好的流体转变为粘弹性固体（viscoelastic solid），其零场黏度为 $0.1\sim 3\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，但其屈服剪应力在外加磁场的作用下可以由很小值迅速达到 $50\sim$

100kPa。反之，当撤去外加磁场后，磁流变液可以在瞬间从粘弹性固体变回到原先的流体状态，屈服剪应力瞬间下降到原零场时的很小值，而且此过程是快速、可逆、可控的。正是因为磁流变液的屈服剪应力可以通过调节外加磁场强度的大小实现可逆、快速、精确控制，具有智能可控流体的特性，用其制作的智能材料器件和自适应调节的智能结构具有优异的可调特性，可以解决常规方法无法完成的各种结构动力响应的减振问题，在土木工程、航空、汽车、机械精密抛光等许多领域都有广泛的应用前景。

要研究磁流变液，就有必要了解另外一种智能可控流体——电流变液（electrorheological fluid，简称 ER fluid），因为它们与磁流变液既有相似之处，又有不同之处。电流变液是由非导电的可极化粒子分散在绝缘性基液中形成的悬浮体系。在电场作用下，电流变液的表现黏度能可逆地发生变化，典型的电流变液可在毫秒级的时间内，实现从液态到胶状固态的可逆转变。磁流变液与电流变液的流变机理十分相似，应用原理也相通，只是前者是利用磁场作用，后者是利用电场作用。电流变液的黏度随电场强度变化的效应，被称为“电流变效应”，也称为“Winslow effect”（是为了纪念 Winslow 首次发现电流变效应以及他为此所做的贡献）。磁流变液的黏度随磁场强度变化的效应，称为“磁流变效应（magnetorheological effect）”。因为电流变液与磁流变液有许多相似之处，特别是它们的应用机制和应用领域都有相似之处，而且磁流变效应的微观机理与电流变效应的微观机理十分相似，甚至可以互相借鉴和利用，所以人们总是将磁流变液和电流变液关联在一起，并且将磁流变液和电流变液的学术研讨合为一体。

1.2 磁流变液智能材料的主要特性

磁流变液主要由磁性颗粒和基液组成。通常磁流变液所用的磁性材料都属于铁、钴、镍等多畴材料，基液可为油、水或其他复杂的混合液体。良好的磁流变液需具备如下性能：①磁流变液具有磁化和退磁效应，它的磁滞回曲线狭窄，矫顽力较小，而磁导率很大，尤其是磁导率的初始值和最大值必须要大；②具有较大的磁饱和度，从而给悬浮体内的固体颗粒相互间提供最大能量；③损耗（例如磁滞现象、涡流现象）应该很小；④磁场粒子的分布率始终保持均匀不变；⑤具备较高的击穿磁场；⑥具有相当宽的温度范围稳定性。

磁流变液在外磁场作用下，它的粘滞性可以随外场的改变在毫秒级时间内变化，并且这种变化是可逆的。磁流变液中的磁性颗粒被当做一些刚性微球，它们可代表介电颗粒，在外加磁场作用下，磁流变液具有明显的磁流变效应。在 MR 流体中，每一个小颗粒都可当做一个小的磁体。在这种磁体中，相邻原子间存在着强交换耦合作用。它促使相邻原子的磁矩平行排列，形成自发磁化饱和区域作用即磁

畴。没有外磁场的作用时，每个磁畴中各个原子的磁矩排列取向一致，而不同磁畴磁矩取向不同。磁畴的这种排列方式使每一颗粒处于能量最小的稳定状态。因此，所有颗粒平均磁矩为零，颗粒不显磁性。在外磁场作用下，磁矩与外磁场同方向排列时的磁能低于磁矩与外磁场反方向排列时的磁能，结果是自发磁化磁矩成较大角度的磁畴体积逐渐缩小。这时颗粒的平均磁矩不等于零，颗粒对外显示磁性，按序排列相接成链。当外磁场强度较弱时，链数量少、长度短、直径也较细，剪断它们所需外力也较小。随外磁场不断增大，取向与外场成较大角度的磁畴全部消失，留下的磁畴开始向外磁场方向旋转，磁流变液中链的数量增加，长度加长，直径变粗，磁流变液对外所表现的剪切应力增强；再继续增加磁场，所有磁畴沿外磁场方向整齐排列，磁化达到饱和，磁流变液的剪切应力也达到饱和。

但是，磁流变液的磁流变效应受到多种因素的制约，如零场黏度、稳定性、成本等，因此在实际应用中，需要综合考虑多种因素，或者说平衡多个因素之间的利弊，选择符合工程需要的最佳磁流变液性能，且不同的应用背景对磁流变液的屈服剪应力、零场黏度、稳定性、工作温度范围、耐久性、腐蚀性、安全性等都有不同的要求。此外，生产的规模性、可持续性、成本、环境友好性等非技术因素也需要考虑。

1.3 磁流变液阻尼器智能材料器件的工作原理

磁流变液是由可磁化粒子、基液及添加剂组成的悬浮液，在非工作状态（无外加磁场作用）时，磁流变液中的可磁化粒子任意地分布在基液中，如图 1-1（a）所示，其具有良好的流动性；而当受到外加磁场作用时，可磁化粒子将沿着磁力线排列成链状结构，如图 1-1（b）所示，其屈服剪应力迅速增大，从流体状态迅速转变为类固体状态，流动性急剧下降，甚至消失；若撤去外加磁场，可磁化粒子能迅速从链状结构转变为弥漫分布状态，磁流变液从类固体状态转变为流体状态，恢复原有的流动性；这种从流体状态到类固体状态的可逆快速转变特性，赋予磁流变液的智能特性。

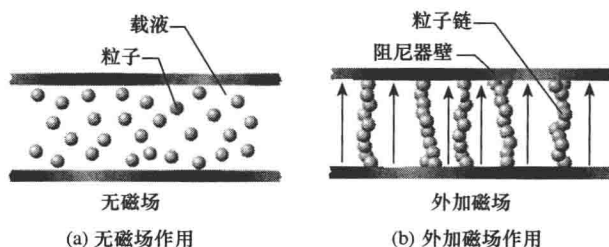


图 1-1 磁流变液中磁性粒子的分布状态示意图

依据磁流变液的屈服剪应力可由外加磁场强度可逆调控的特性，可以设计各种各样的磁流变液阻尼器。它们的工作模型大致可分为四种，即流动模式（flow mode）、剪切模式（shear mode）、挤压模式（squeeze mode）、挤压-流动模式（squeeze-flow mode），分别如图 1-2（a）～（d）所示。

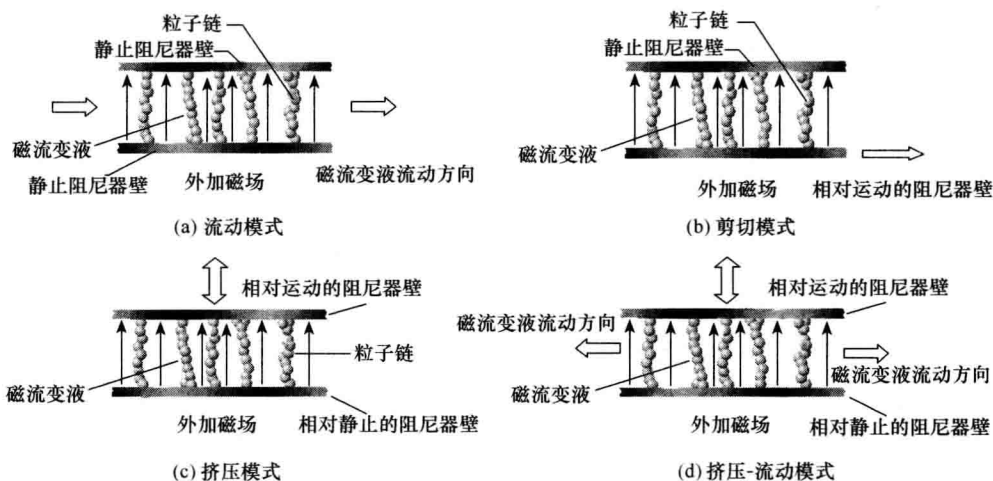


图 1-2 磁流变液阻尼器工作原理示意图

1) 流动模式

在流动模式中，磁流变液阻尼器的两个筒壁静止，在两壁之间施加磁场，磁力线与阻尼器壁垂直；磁流变液沿着与外加磁场的磁力线垂直方向流动，其中的可磁化粒子磁化后沿磁力线方向排列成链状结构，阻碍液体流动，产生阻尼力；此阻尼力随着外加磁场强度提高而增大，随着外加磁场强度降低而减小。此种结构的磁流变液阻尼器的工作模式是流动模式。通常磁流变液阀采用此种模式。

2) 剪切模式

在剪切模式中，磁流变液阻尼器的两个筒壁作剪切运动，在两壁之间施加磁场，磁力线与阻尼器壁垂直；磁流变液随着筒壁的运动被剪切，由于磁流变液中的可磁化粒子磁化后沿磁力线方向排列成链状结构，阻碍磁流变液阻尼器筒壁的剪切运动，也即产生阻尼力。此阻尼力随着外加磁场强度提高而增大，随着外加磁场强度降低而减小。此种结构的磁流变液阻尼器的工作模式是剪切模式。通常磁流变刹车离合器是采用此种模式。

3) 挤压模式

在挤压模式中，磁流变液阻尼器的两个筒壁作相对上下运动，在两壁之间施加磁场，磁力线与阻尼器壁垂直；磁流变液沿着外加磁场的磁力线方向排列成链状结构，阻碍磁流变液阻尼器筒壁的运动，产生阻尼力；此阻尼力随着外加磁场

强度提高而增大,随着外加磁场强度降低而减小。此种结构的磁流变液阻尼器的工作模式是挤压模式。

4) 挤压-流动模式

在挤压-流动模式中,磁流变液阻尼器的两个筒壁作上下运动,两个筒壁之间的体积发生变化,引起磁流变液向外流出或向内流入;在两壁之间施加磁场,磁力线与阻尼器壁垂直;磁流变液沿着外加磁场的磁力线方向排列成链状结构,阻碍磁流变液阻尼器筒壁的运动,产生阻尼力;此阻尼力随着外加磁场强度提高而增大,随着外加磁场强度降低而减小。此种结构的磁流变液阻尼器的工作模式是挤压-流动模式。

在剪切-流动模式的磁流变液阻尼器中,电磁线圈环绕在活塞上,产生磁场,磁力线通过阻尼器的狭窄通道(0.5~2mm)到达阻尼器的筒壁,再经过狭窄通道返回到活塞上,形成磁场闭合回路;磁流变液贮存在活塞的两端和通道内,当活塞移动时,磁流变液从阻尼器的一端经过狭窄通道到达另一端;磁流变液经过通道时,既有自身的流动又受活塞的剪切,所以符合剪切-流动模式。磁流变液在通过狭窄通道时,受到磁力线作用,形成链状结构,并随着在磁场强度增大从流体转变为类固体,阻碍活塞的剪切,同时也阻碍磁流变液从一端流向另一端,所以这样的阻尼器的阻尼力比较大。其阻尼力与磁场强度、狭窄通道的长度成正比,与狭窄通道的宽度成反比。

1.4 磁流变液智能材料器件研究的发展历史和现状

美国国家标准署工程师 Jacob Rabinow 于 1948 年首先发现磁流变现象,并设计了一个起吊一位体重 117lb^① 女孩的磁流变液装置,演示磁流变液器件的作用,此外还申请了第一个磁流变液器件的专利,试制了世界上第一台基于磁流变效应的离合器,由此拉开了磁流变液智能材料与器件研究的序幕。然而,由于磁流变液中分散相可磁化粒子的密度通常都远高于连续相基液的密度,磁性粒子在基液中的分散状态是极不稳定的,很快会形成沉淀,导致粒子的均匀分散性破坏,磁流变液的两相悬浮特征消失,磁流变液效应被削弱,工程应用的前提被破坏。所以,在磁流变液被发现的初期,其实际应用价值被怀疑,致使磁流变液的研究工作没有得到重视。

相比而言,人们对同时期美国学者 Winslow 发现的电流变液(electrorheological fluids, 简称为 ERF)的研究却兴趣盎然。电流变液与磁流变液有非常相似之处,同样是固/液两相悬浮体系,同样可以通过外场调控零场黏度和屈服应

^① 11b=0.453 592kg,下同。

力。所不同的是调控磁流变液流变特性的外场是磁场，而调控电流变液流变特性的外场是电场，组成磁流变液的分散相是可磁化粒子，基液为不导磁的溶剂；组成电流变液的分散相是可由电场极化的粒子，基液为不导电的溶剂。由于组成电流变液分散相粒子的可选范围很宽，其密度可调范围很大，且远比磁性粒子低（如淀粉的密度约为 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，与基液硅油的密度差仅为 $0.74\text{g}/\text{cm}^3$ ，聚苯胺的密度约为 $1.36\text{g}/\text{cm}^3$ ，与基液硅油的密度差仅为 $0.40\text{g}/\text{cm}^3$ ；而磁性粒子铁的密度约 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$ ，与基液硅油的密度差达到了 $6.84\text{g}/\text{cm}^3$ ），所以从理论上分析，电流变液的沉降稳定性比磁流变液高，电流变液应用可行性比磁流变液高。因此，从 20 世纪 50 年代到 90 年代研究热点都是电流变液，而不是磁流变液。在此时期，有关电流变液的材料制备、理论研究、器件研究工作都取得了飞速发展，各种不同的电流变材料和试验器件相继出现。

随着电流变液应用技术研究的不深入，电流变液的制备技术、应用理论都较为成熟。正当人们着手根据工程应用要求设计电流变液器件时，发现电流变液应用于工程中，仍然存在以下主要问题：屈服应力小，难以满足工程应用的要求；电流变液对杂质和温度敏感，增加了规模生产和器件设计制造，以及应用的难题；工作电压很高，需要高压电源，给电流变液器件的设计和应用增加了技术难度和使用安全问题。电流变液的这些固有问题，成为其走向工程应用的重大障碍，人们不得不从实际工程应用的角度，比较电流变液与磁流变液的优缺点，如表 1-1 所示。

表 1-1 磁流变液与电流变液主要性能对比

主要性能	电流变液	磁流变液
最大屈服力 τ_y	2~10kPa	50~100kPa
表观黏度 η_p	0.1~1.0Pa·s	0.1~10Pa·s
η_p/τ_y	$10^{-7}\sim 10^{-8}\text{s}/\text{Pa}$	$10^{-10}\sim 10^{-11}\text{s}/\text{Pa}$
最大能量密度	$0.001\text{J}/\text{cm}^3$	$0.1\text{J}/\text{cm}^3$
密度	$1\sim 2\text{g}/\text{cm}^3$	$3\sim 4\text{g}/\text{cm}^3$
密度差	存在	大
沉降问题	存在	严重
响应时间	ms	ms
温度范围	10~90℃	-50~250℃
杂质敏感性	敏感	不敏感
最大场强	4000V/mm	250kA/m
工作电源	2~5kV	2~25V
	1~10mA (2~50W)	1~2A (2~40W)