

Magnetorheological Fluid
Transmission Technology

磁流变液传动技术

刘新华 著



科学出版社

江苏高校优势学科建设工程资助项目

磁流变液传动技术

刘新华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统、全面地介绍了磁流变液在传动领域应用的最新研究成果。主要内容包括磁流变液及其性能研究、磁流变传动理论及传动装置的设计研究、磁流变液动力传递机理模拟方法研究、磁流变液挤压强化技术研究、磁流变液传动系统调速技术研究。此外,书中还针对磁流变液传动机理进行了大量的实验研究,对实验的原理和结构进行了分析。

本书可供智能材料和工程应用领域的科研人员、从事磁流变液的学者、工程技术人员以及高等院校高年级本科生及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

磁流变液传动技术/刘新华著. —北京:科学出版社, 2015.9

ISBN 978-7-03-045763-9

I. ①磁… II. ①刘… III. ①智能材料-传动-研究 IV. ①TB381

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 225188 号

责任编辑: 惠 雪 曾佳佳/责任校对: 郑金红

责任印制: 徐晓晨/责任设计: 许 瑞

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年9月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2015年9月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 217 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

目前,机电产品主要采用电气调速(调压或变频)、液黏传动调速、液力调速等技术进行启动和调速。当机电产品功率较小时,启动和调速效果较好;但对于大功率机电产品(功率超过 100kW),如带式输送机、刮板输送机、水泵、大型电机、风机、球磨机、辊磨机等,应用上述技术进行启动和调速时,则存在装置体积过大、响应时间过长等缺点;如果采用变频技术,则会产生二次谐波,“污染”电网,并导致效率下降、能耗增加。此外,据统计,我国在役带式输送机、刮板输送机数量达 70 多万条,而且随着经济建设的发展,每年都在以近万条的速度递增;风机、水泵拥有量约 3700 万台,耗电量占全国发电量的 37%,超过全国工业用电的 50%以上。鉴于此种状况,非常有必要开展新型、高效、节能的大功率传动技术研究。

磁流变液传动系统主要引入磁流变液作为工作介质,利用磁流变液的剪切屈服应力来实现动力传递,基于磁流变液的传动装置具有如下特点:①通过调节外加磁场的大小,实现传递转矩或转速的无级调节,调速简单方便,易于实现计算机自动控制;②调速灵敏度高,响应迅速(一般均为毫秒级),传递的转矩几乎不随转速变化而变化,表现出良好的恒转矩特性;③主要工作部件磨损较小,工作可靠,使用寿命长,工作过程无冲击,振动小,噪声低,安全系数高;④不需要复杂的控制装置,传动装置能耗低;⑤整个装置结构紧凑,体积较小,维护方便。近年来磁流变液及其相关器件取得了众多研究成果,其中磁流变液阻尼器已进入工程实际应用阶段。本书着重介绍了作者研究团队多年来的相关研究成果。

本书共分 5 章,绪论部分概述了磁流变液、磁流变液制备及其器件应用的国内外研究现状,并指出应用中存在的问题。第 1 章详细地介绍了磁流变液的组成、流变特性、性能指标及影响因素、制备方法,并对磁流变液的性能进行了测试与分析,在实验的基础上对本研究团队制备的磁流变液样本的剪切屈服应力进行了测试,并提出了剪切屈服应力随磁场强度变化的宏观模型。第 2 章介绍了磁流变传动理论及传动装置的设计理论,设计了磁流变液传动装置的总体结构,确定了传动装置的各项基本参数,选取了主要零部件的材料;根据磁路欧姆定律和安培定律进行了详细的磁路设计,并基于磁路分析软件对实验台进行了磁路仿真工作。第 3 章分析计算了磁流变液中磁性颗粒的受力情况,将双网格技术与格子玻尔兹曼方法相结合,并利用双网格格子玻尔兹曼方法模拟了磁流变液流变特性,得到磁流变液磁性颗粒在不同磁场强度下的微观结构,并与实验观测磁场作用下的磁

性颗粒结果进行对比分析,为以后的磁流变液制动器的设计研究提供理论基础,利用蒙特卡罗方法和动力学方法分别从能量和力学角度研究磁流变液的磁性颗粒在不同磁场下的运动规律,得出磁场强度对磁流变液成链和链的结构形态有着非常显著的影响。第4章从微观的角度对磁流变液轴向挤压力学特性进行机理分析研究,并对磁流变液的轴向挤压力学特性做了相关的实验研究;然后,为了探索磁流变液的径向挤压力学特性,本章还利用磁流变液径向挤压力学特性测试实验台对磁流变液的励磁电流-磁场特性、励磁电流-剪切屈服应力特性以及径向压力-剪切屈服应力特性进行相关的实验研究,为进一步研究磁流变液的径向挤压力学特性提供理论技术支持。第5章分析了磁流变液传动系统的调速技术工作原理、调速方法,并基于可编程直流电源对励磁线圈的电流进行控制,进行了相关的开环控制实验,提出了磁流变液的模糊控制策略,总结了磁流变液调速技术的特点。

本书所进行的研究,得到了国家自然科学基金项目“大功率磁流变液传动系统动力传递失效机理及其控制方法研究”(51475454)、“磁流变液传动系统动力学演变过程的多尺度模拟”(51005231),中国博士后科学基金项目“磁流变液传动系统多尺度物理建模与虚拟仿真技术研究”(20100471408),清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金项目“磁流变液摩擦磨损特性研究”(SKLTKF14B06),浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金项目“磁流变液传动系统挤压力学特性研究”(GZKF-201316),中央高校基本科研业务费专项资金“磁流变液传动系统动力传递及温度特性研究”(2014QNA38)、“大功率磁流变液传动系统固液耦合动力学特性研究”(2012QNB14)的大力支持,作者在此表示衷心的感谢。

本书所进行的研究还得到了江苏高校优势学科建设工程资助项目、江苏省矿山机电装备重点实验室(中国矿业大学)、江苏省矿山智能采掘装备协同创新中心的大力支持,作者在此表示衷心的感谢。

参加本书撰写的还有刘浩、刘永志、陈庆庆、路和、王冬冬、王利锋、任衍坤、张秋香。由于作者水平有限,书中不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

刘新华

2015年5月

目 录

前言

绪论	1
0.1 磁流变液的发展与应用	1
0.1.1 磁流变液阻尼器	2
0.1.2 磁流变液抛光	5
0.1.3 磁流变液控制阀	7
0.1.4 柔性夹具	8
0.1.5 复合构件	8
0.2 磁流变液制备的研究概况	8
0.3 磁流变液传动技术研究概况	12
0.3.1 传动理论研究概况	12
0.3.2 磁流变液传动器件研究概况	13
0.4 磁流变液挤压强化技术的研究概况	16
参考文献	18
第 1 章 磁流变液及其性能	27
1.1 磁流变液的组成	27
1.1.1 分散相	28
1.1.2 连续相	28
1.1.3 添加剂	28
1.2 磁流变液流变特性	29
1.2.1 磁流变效应	29
1.2.2 磁流变液宏观模型	32
1.2.3 磁流变液工作模式	34
1.3 磁流变液性能指标及其影响因素	35
1.3.1 屈服应力	35
1.3.2 零场黏度	37
1.3.3 沉降稳定性	37
1.3.4 密度	39
1.3.5 响应时间	40
1.3.6 工作温度	40

1.4 磁流变液的制备	41
1.4.1 实验原料及仪器	41
1.4.2 制备工艺及优化	42
1.5 磁流变液性能测试与分析	48
1.5.1 磁性颗粒体积分数对磁流变液性能的影响	48
1.5.2 球磨时间对磁流变液性能的影响	51
1.5.3 硅油黏度对磁流变液性能的影响	55
1.5.4 纳米磁性颗粒的添加对磁流变液性能的影响	57
1.6 磁流变液剪切屈服应力及其宏观模型	61
参考文献	64
第2章 磁流变传动理论及传动装置的设计研究	67
2.1 磁流变传动理论	67
2.1.1 磁流变传动的定义	67
2.1.2 磁流变传动的原理	67
2.1.3 磁流变传动的特点	68
2.1.4 磁流变传动的失效形式	68
2.1.5 磁流变传动对磁流变液性能的要求	69
2.2 传动装置结构设计理论	70
2.2.1 磁流变液的工作结构模式	70
2.2.2 磁流变液传动励磁线圈的布置方式	71
2.2.3 磁流变液传递扭矩的计算模型	72
2.3 磁学设计原理	73
2.3.1 磁路设计准则和基本方程组	73
2.3.2 磁学原理	75
2.3.3 材料的选取原则	77
2.4 磁流变液传动装置详细设计过程	77
2.4.1 结构设计与分析	77
2.4.2 整体结构	79
2.5 传动装置磁路仿真	81
2.6 传动系统的设计	86
2.6.1 实验台整体方案	86
2.6.2 实验仪器与设备	86
2.6.3 传动系统调试	90
参考文献	96

第3章 磁流变液动力传递机理模拟方法研究	97
3.1 磁性颗粒的力学分析	98
3.1.1 布朗力	98
3.1.2 黏性阻力	98
3.1.3 磁力	98
3.1.4 范德瓦耳斯力	99
3.1.5 排斥力	100
3.1.6 重力和浮力的合力	100
3.2 磁流变液的双网格格子玻尔兹曼方法模拟	100
3.2.1 双重网格方法	100
3.2.2 两相格子玻尔兹曼模型	102
3.2.3 磁流变液的双重网格两相格子(LBM)模拟分析	103
3.3 磁性颗粒的蒙特卡罗模拟	108
3.3.1 磁性颗粒的简化模型	109
3.3.2 磁性颗粒的能量计算	109
3.3.3 蒙特卡罗模拟方法	110
3.3.4 GPU技术的应用	110
3.3.5 模拟结果与分析	113
3.4 磁性颗粒的动力学模拟	115
3.4.1 磁性颗粒的受力分析与计算	116
3.4.2 磁性颗粒的运动方程	117
3.4.3 磁性颗粒的运动模拟	117
3.4.4 模拟结果分析	118
3.5 磁性颗粒的微观结构观测	120
参考文献	122
第4章 磁流变液挤压强化技术研究	124
4.1 磁流变液轴向挤压力学特性机理分析	124
4.1.1 直链形颗粒链的压缩力分析	125
4.1.2 卫星形颗粒链的压缩力分析	128
4.1.3 十字形颗粒链的压缩力分析	130
4.2 磁流变液轴向挤压力学特性实验研究	132
4.2.1 实验台系统及原理	132
4.2.2 实验步骤及结果分析	134
4.3 磁流变液径向挤压力学特性实验研究	136
4.3.1 实验台系统	136

4.3.2 实验内容	137
4.3.3 实验步骤及结果分析	137
参考文献	142
第 5 章 磁流变液传动系统调速技术研究	143
5.1 调速原理	143
5.1.1 磁流变液传动系统控制机理	143
5.1.2 不同负载下磁流变液的调速特性	144
5.2 磁流变液传动系统调速方法	146
5.2.1 开环控制	147
5.2.2 闭环控制	147
5.3 基于程控电源的开环控制研究	149
5.4 基于模糊控制的闭环控制策略研究	152
5.4.1 启动控制的评价指标	152
5.4.2 模糊控制分析	152
5.4.3 模糊控制设计	153
5.5 磁流变液调速技术的特点	160
参考文献	161
索引	162

绪 论

磁流变液 (magnetorheological fluid, MRF) 是一种形态和性能受外加磁场约束和控制的固液二相功能材料, 主要由纳米级和微米级磁性颗粒通过表面活性剂或分散剂稳定分散于某种特殊载液中而形成。它在无外加磁场时, 表现为流动良好的牛顿流体, 但在外加磁场作用下, 流体的流变特性发生巨大变化, 其表观黏度可在 10ms 内增加几个数量级, 并呈现类似固体的力学性质, 且黏度变化是连续可逆的, 即一旦去掉磁场后, 又变成可以流动的液体。磁流变效应连续、可逆、迅速和易于控制的特点使得磁流变液在航空、航天、汽车工业、液压传动、密封、精密加工、生物技术、医疗等领域具有十分广泛的应用前景。

磁流变液传动是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型动力传递技术, 其传动理论是基于磁流变液的流变效应, 以磁流变液为动力传递介质, 通过调节外加磁场强度以改变磁流变液的剪切屈服应力, 进而调节传递转矩或转速的大小。磁流变液传动装置是一种利用磁流变液传动技术开发的动力传递装置, 具有响应速度快 (一般为毫秒级)、传动部件磨损较小、控制简单 (通过调节外加磁场, 可实现转矩或转速的无级调节)、体积小、控制能源消耗低 (2~50W)、控制电压低 (2~25V)、对外界杂质的干扰不敏感等特点, 是一种较为理想的动力传动器件, 其在机电装置启动、制动、转矩调节、无级调速、过载安全保护等方面具有得天独厚的优势。国内外对于磁流变液器件的研究应用, 多集中在阻尼器等振动控制领域, 而对磁流变液传动技术的研究应用较少; 在国内还未见成熟的磁流变液传动产品出现, 在国外也仅有少数几种商业化磁流变液传动产品问世, 且其介绍仅限于一般技术原理, 开发过程的关键技术还处于保密阶段。此外, 现有的磁流变液传动产品传递转矩均较小, 限制了其应用范围, 迫切需要对大转矩传动技术进行研究。因此, 在我国开展磁流变液传动技术研究, 并将磁流变液产品进一步推向应用方向发展具有极其重大的现实意义。

0.1 磁流变液的发展与应用

美国学者 Winslow^[1]于 1947 发明了电流变材料, 1948 年美国学者 Rabinow^[2]研究出磁流变材料, 并在 1951 年申请了磁流变液传动技术相关专利^[3]。但是随后的研究主要集中在电流变材料, 磁流变材料的研究相对较少, 直到 20 世纪 80 年代各国学者才重新将目光集中在磁流变材料的研究, 近年来磁流变技术发展迅速。

磁流变液是一种极具潜力的智能材料,具有响应快、易于控制、耗能低且变化可逆等优点,已经广泛应用在阻尼器、离合器、制动器、抛光装置、液压阀、密封装置、复合构件、柔性夹具等磁流变液产品上。

0.1.1 磁流变液阻尼器

磁流变液阻尼器可广泛用于各种振动控制系统,具有结构简单、能耗低、体积小、工作连续可逆等优点,能够很好地满足各种场合的需要,可实现实时的主动、半主动控制,特别适合于对重量和空间都有限制的机械装置。阻尼器特有的可控性,能实现迅速的无级阻尼力调节,这些优良特性使得这种阻尼器有着广阔的应用前景,可应用于对减振有较高要求的机械装置。磁流变液阻尼器主要应用于振动控制场合如桥梁、车辆、工程机械等。在磁流变液阻尼器的开发和应用方面,美国 Lord 公司、Ford 公司、马里兰大学、内华达大学、宾夕法尼亚大学的技术已经比较成熟,并有相关产品已经商品化了。国内主要有哈尔滨工业大学、武汉理工大学、天津大学在这方面研究较为出色。

美国 Lord 公司、Delphi 公司、Ford 公司、德国 BASF 公司等均已经开发出商业磁流变液减振器产品。美国 Lord 公司所生产的磁流变液阻尼器性能优良,并将其应用于土木工程领域,开发出了尺寸、强度足够的磁流变液阻尼装置^[4]。Yang^[5]系统地测试了 200kN 磁流变液阻尼器的阻尼力性能;美国内华达大学以 Gordaninejad 教授为首的科研团队 CIML 实验室^[6]开发了双活塞磁路磁流变液阻尼器;美国 Lord 公司的工程技术人员开发了一种车辆座椅悬架阻尼器^[7],该阻尼器为单筒式,如图 0-1 所示,采用压缩氮气作补偿,阻尼孔环形分布在活塞上,电磁线圈绕制在活塞上,通过活塞杆引出电源线。该阻尼器直径为 41mm,活塞行程为 $\pm 29\text{mm}$,阻尼器消耗磁流变液体积为 70cm^3 ,在活塞中发生流变作用的磁流变液为 0.3cm^3 ,在输入电流为 1A 时输入功率为 5W,该阻尼器使用 5×10^6 次无故障发生。

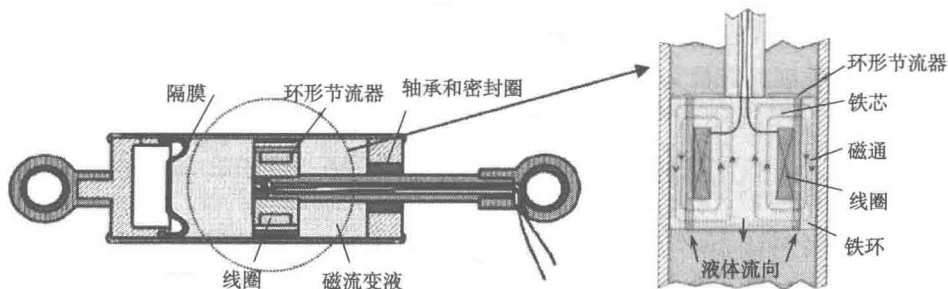


图 0-1 车辆座椅悬架阻尼器^[7]

Lord 公司的研究人员还开发出了可用于建筑结构减震的阻尼器, 如图 0-2 所示, 其最大阻尼力为 20t, 可调阻尼系数为 10。励磁线圈内置于阻尼器内部, 将活塞成组地串联起来, 有效地增大了阻尼力; 为了控制精度, 还加入了补偿装置, 增加了实用性与安全性, 阻尼器行程为 $\pm 8\text{mm}$, 内径为 203mm, 总长约为 1000mm, 耗用磁流变液体积为 5L^[8,9]。建筑结构振动控制阻尼器绝大多数时间是静止不动的, 密封和磨损不是重点考虑的问题。Dyke 等^[10]对磁流变液阻尼器的应用进行了研究, 为了取得优良的控制效果, 他们将加速度控制策略用于磁流变液阻尼器阻尼力控制, 取得了良好的成效。

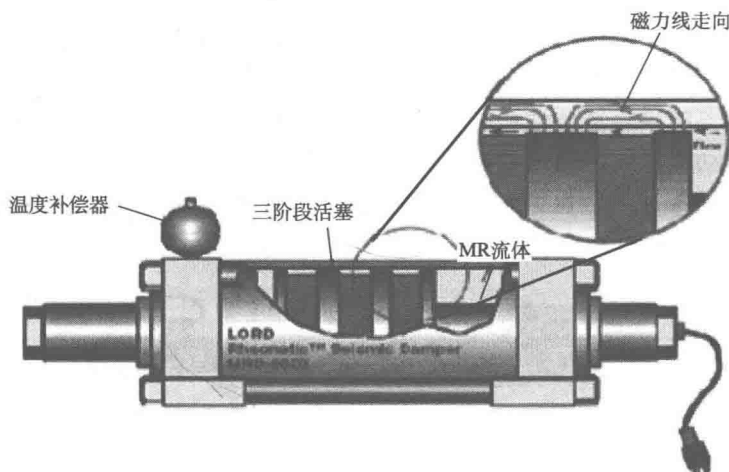


图 0-2 建筑结构抗振用阻尼器^[9]

美国弗吉尼亚理工大学先进车辆动力学实验室 (AVDL) 在磁流变液阻尼器开发及其系统应用方面取得了大量的成果。他们分别在 Volvo VN 重型卡车和 Future car 轿车的悬架上进行了控制实验, 取得了明显的控制效果。同时, AVDL 还开展了磁流变液阻尼器在火车、山地自行车和大炮的后坐力控制方面的相关研究。将磁流变液阻尼器用于枪炮后坐力控制的经典例子是美国阿帕奇直升机^[11], 如图 0-3、图 0-4 所示。针对阿帕奇 AH-64 直升机开发的半主动后坐阻尼系统, 使用美国 Lord 公司开发的磁流变液减振器, 结合数字控制系统, 以抑制安装在机身前端的 30mm 口径机关枪在发射期间产生的后坐负荷。

在国内, 宁波杉工公司设计制造并应用在宁波招宝山大桥上的减振器经现场测试, 减振效果良好, 已通过工程质量验收, 如图 0-5 所示。孟克明等^[12]对磁流变液阻尼器在汽车悬架控制中的应用进行了相关研究; 王洪涛等^[13]设计出一种基于被动式双筒液压减振器的盘形缝隙式双筒磁流变液减振器, 推导出盘形缝隙式双筒

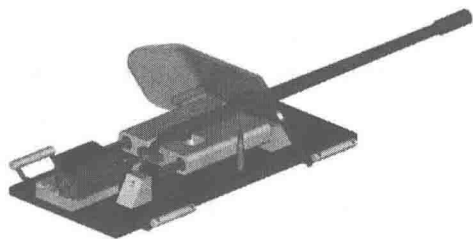


图 0-3 大炮的后坐力控制

图 0-4 阿帕奇直升机^[11]

MRD 的阻尼力计算模型；王修勇等^[14]设计并制作了阻尼力可调范围大、位移不受限制的旋转剪切式 MR 阻尼器。郭全民等^[15]为解决传统的被动悬架阻尼参数不可调节、汽车的乘坐舒适性和操纵稳定性难以改善的问题，提出使用磁流变液阻尼器代替被动阻尼器，通过将磁流变液阻尼器基于 BP 神经网络的逆向模型与模糊 PID 控制器形成闭环反馈来实现对汽车悬架的半主动控制，有效地提高了汽车的乘坐舒适性和操作稳定性，改善了悬架系统的性能。

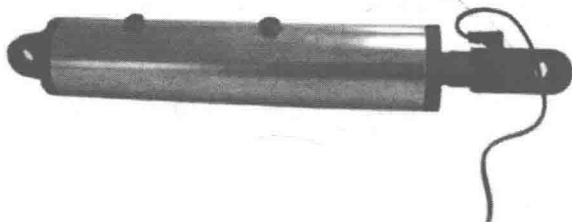


图 0-5 宁波招宝山大桥磁流变液阻尼器

最大阻尼力的大小往往决定阻尼器在实际大型工程中的应用，国内外学者也对大阻尼力的磁流变液阻尼器进行了大量的研究工作，取得了一系列研究成果。日本 SanwaTekki 公司通过改变磁路的形式和阻尼器的结构方案，开发了一种大阻尼力的旁通阀式阻尼器，其最大阻尼力可达到 20t。工作时，磁流变液流经旁通阻尼通道，旁通阻尼通道内由十阶段励磁线圈并联方式相连接，这种磁路形式可以大大提高磁流变液阻尼器的最大阻尼力，并且磁流变液工作间隙位于整个阻尼器的下方，这样可以很好地避免磁流变液团聚沉降所带来的负面影响^[16]。

国内哈尔滨工业大学设计研制出 TIDER-MRD-100-10 磁流变液阻尼器，该阻尼器的最大阻尼力达到 10t，缸体内径为 160mm，单面行程 8cm，磁流变液饱和屈服强度达 40kPa，最大耗电功率仅有 30W。目前该阻尼器已在锦州凝析气田北高点井口 JZ20-2NW 平台上得到应用。

0.1.2 磁流变液抛光

磁流变液抛光是一种以磁流变液为介质的流体动力抛光技术，与传统抛光技术相比，磁流变液抛光技术具有工件表面不易损伤、抛光质量更高、方便计算机智能控制以及加工效率高的优点^[17]。磁流变液抛光技术的系统原理图如图 0-6 所示，工作原理如图 0-7 所示，在运动盘和工件之间存在很小的工作间隙，工作间隙内充满磁流变液。当需要抛光时，给励磁线圈通入电流，使之产生竖直方向的磁场，可使磁流变液在瞬间变成高黏塑性的 Bingham 流体；当运动盘和工件之间相对运动时，磁流变液对工件表面多余的材料形成很大的剪切力，从而达到抛光的效果。抛光过程中剪切力的大小可依靠励磁线圈中电流来控制，因此可通过计算机进行智能控制，以获得更好的抛光效果，并且可以完成复杂工件的表面抛光^[18]。

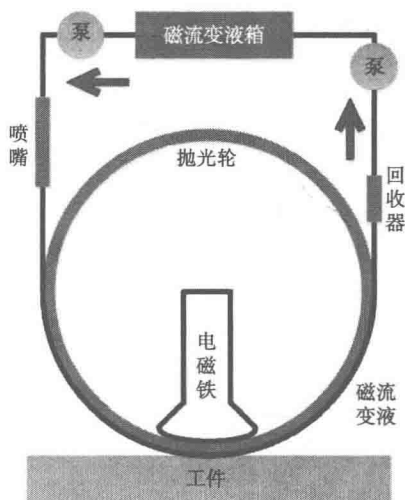


图 0-6 磁流变液抛光系统

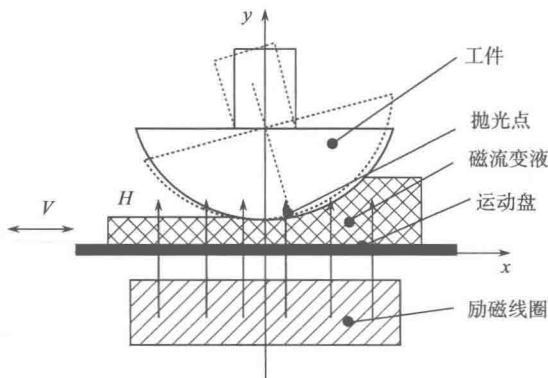


图 0-7 磁流变液抛光原理

20 世纪 90 年代初，Kordonski 等将电磁学和流体动力学理论结合，利用磁流变液在磁场中的流变特性对光学玻璃进行抛光，并提出了磁流变液抛光技术^[19]，图 0-8 为世界第一台磁流变液抛光机。1997 年 Jacobs 等^[20]对各种类型“标准”抛光磁流变液进行了分析研究，找出了其优缺点并进行了改进，改进后的 MRF 在抛光方面具有了更加优良的性能。Kordonski^[21,22]提出用含有磨料的 MRF 在磁场中形成具有高瞄准度的硬化喷射流，用于工件成型或抛光，并就磁流变液抛光设备和方法申请了相关专利。美国 QED^[23]公司已经成功研制了多台不同型号的磁流变液抛光机床，Q22-XE 小型抛光机床如图 0-9 (a) 所示；德国的菲博士磁流变液抛光机 EDMF-1899^[24]能达

到亚微米级加工精度，如图 0-9（b）所示；韩国的 Kim 等^[25]研制的磁流变液抛光平台加工表面粗糙度可以达到 3.8nm，如图 0-9（c）所示。

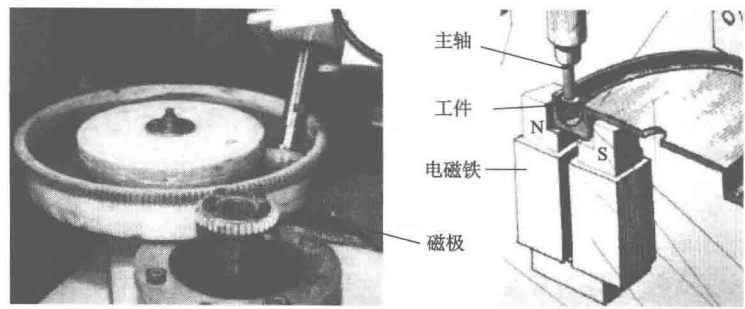


图 0-8 第一台磁流变液抛光机^[19]

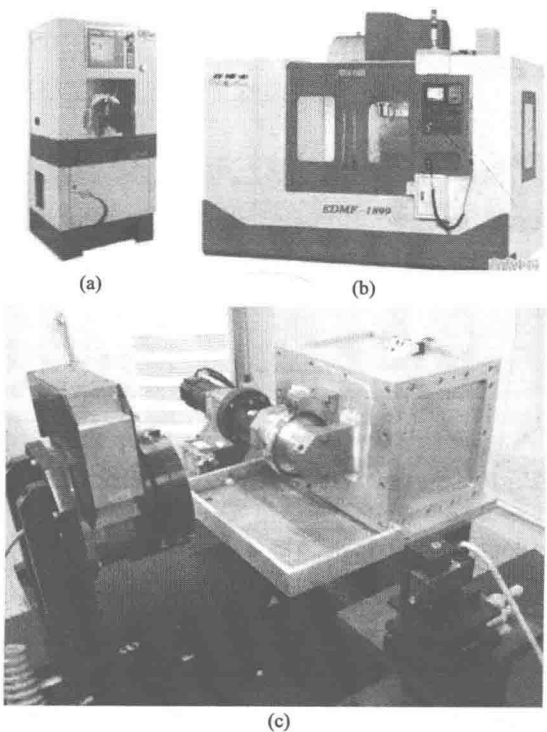


图 0-9 磁流变液抛光装置^[23-25]

（a）美国 QED 公司的 Q22-XE 小型抛光机床；（b）德国菲博士磁流变液抛光机 EDMF-1899；
（c）韩国的磁流变液抛光平台

张峰^[26]、彭小强等^[27]将磁流变液抛光技术引入我国,并在加工工艺和相关理论上有所创新。董申等则对磁流变液抛光机床数控系统关键技术进行了研究,孙桓五^[28]在理论上对磁流变液抛光工具及其去除函数进行了一些分析。仇中军等^[29]对用于光学玻璃抛光的磁流变液进行了研究,以水为载液、粒径为 $5\mu\text{m}$ 的微米级羰基铁粉为磁性颗粒、氧化铈为抛光颗粒并加入适量的防锈剂和防腐剂制备出了性能优良的磁流变抛光液,利用 AFM 测量得到的抛光表面 $R_a=1.015\text{nm}$ 。

与传统抛光技术相比,磁流变液抛光技术具有以下优点:①工件表面不易损伤,抛光质量更高;②易于实现计算机智能控制,加工范围更广;③加工效率高;④不存在刀具堵塞和磨损现象。

0.1.3 磁流变液控制阀

传统液压阀结构较复杂,加工要求高,存在不易控制、响应慢、工作噪声大等问题。另外,阀芯相对阀体往返运动容易造成磨损,导致运动不可靠,易产生泄漏、降低系统效率等问题。磁流变液可以作为液压系统的工作介质,通过给液压阀加上一定的磁场,当磁流变液经过阀门时,由于受磁场作用的影响,磁流变液的黏度逐渐增大,流经阀门的液流阻力也随之增大,使阀门进口压力增高,由此减缓或停止液体的流动。利用磁流变技术开发的控制阀,没有相对运动的阀芯,拥有要求精度低、制造成本较低、无磨损、寿命长、易于控制等优点,具有较好的发展前景^[30,31]。如图 0-10 所示,磁流变液控制阀通过控制阻尼间隙两端的励磁线圈,可以控制各段阻尼段的流动情况,不同励磁电流组合可以形成不同的流动通道,实现换向功能;同时,通过控制电流的大小可控制进出口的压力差,实现调压功能。

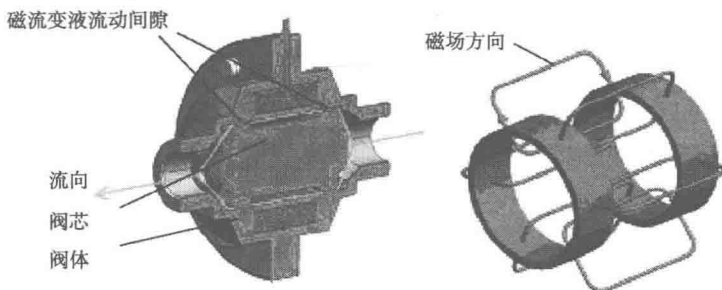


图 0-10 磁流变液控制阀

Kordonsky 等^[32]提出了一种磁流变液液压系统并申请了专利;Yoo 等^[33]设计了一个高效的磁流变液阀;李松晶等^[34]利用磁流变液改善了伺服阀力矩马达动

态特性,提高了它的稳定性和抗干扰能力;吉林大学裴彦明^[35]提出了一种流量-压力特性可调的磁流变压力控制阀,并将其应用于车辆悬架减振器上,实现一种阻尼可调的磁流变阀控减振器;赵四海等^[36]也进行了磁流变液控制阀的研究。

0.1.4 柔性夹具

随着工业化产品更新换代步伐的加快,在机械加工过程中,对自动化加工技术以及产品的精度要求有了进一步的提高。在加工过程中,部件的定位和夹持是最常见的工序,由于数控机床(NCMT)技术、柔性制造系统(FMS)以及计算机集成制造(CIM)技术的快速发展,夹具的制造及其组装技术自动化程度较低,成为了技术的短板,无法适应不同的加工对象。基于磁流变液的柔性夹具具有方便可控、自动化程度高的优势,能够满足生产的要求。Tang 等^[37]对磁流变柔性夹具的制造可行性进行了研究,探索了提高磁流变液剪切屈服应力的方法,以满足柔性夹具使用要求。Zhang 等^[38,39]申请了磁流变液柔性夹具的相关专利。

0.1.5 复合构件

磁流变复合构件是将磁流变液封闭在相对的夹层中,与其他材料形成一个整体,如图 0-11 所示。通过控制磁场强度就可以改变磁流变液的剪切和压缩量,来控制复合构件的刚度和阻尼。Weiss 等^[40]和李华峰等^[41]就磁流变复合结构申请了专利。

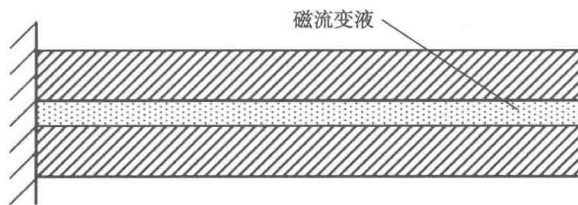


图 0-11 磁流变复合构件

此外,磁流变液在密封装置^[42,43]、伺服装置^[44]等领域也同样有着广泛的应用前景。

0.2 磁流变液制备的研究概况

白俄罗斯学者 Shulman^[45,46]和 Kordonsky^[47,48]、美国 Lord 公司、Delphi 公司、Ford 汽车公司、德国 BASF 公司^[49]都进行了磁流变液制备的研究,并且开发出各类磁流变液产品,取得了一定的成果。