

# 新型磁流变阻尼器 结构及原理

左 强    王国忠    胡国良    著

---

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

# 前言

## PREFACE

以磁流变液智能材料为传动介质的磁流变阻尼器（MRD）目前已广泛应用于车辆工程、土木工程、生物医疗等领域的减振吸振场合，成为工业应用领域应用广泛的半主动执行器件。

本书共 8 章，系统总结和阐述了双线圈型 MRD，具有串联式液流通道的 MRD，内置阀式 MRD，阻尼间隙可调式 MRD，多段轴向液流阻尼通道 MRD 以及具有 T 型转子的旋转式 MRD 的结构、原理及性能，同时基于 DOE 及 RSM 对单线圈磁流变阻尼器进行了优化设计及动力性能研究。

第 1 章阐述了磁流变液（MRF）的流变特性与工作模式，磁流变阻尼器的工作原理及结构，同时详细介绍了国内外 MRD 的结构设计及优化进展情况。

第 2 章介绍了双线圈型磁流变阻尼器的结构及工作原理。通过分析 7 种不同结构的活塞头来系统研究双线圈 MRD 的性能。建立了优化问题的目标函数，并使用 ANSYS 参数化设计语言（APDL）构建优化程序，以获得双线圈 MRD 的最佳阻尼性能。

第 3 章介绍了一种具有串联式液流通道的磁流变阻尼器。该结构在活塞头处安装了 2 个活塞端盖、3 个活塞套筒和 4 个活塞导磁套筒，并按序组合成三条串联式液流通道，组合成 6 节有效阻尼路径。阐述了磁流变阻尼器结构及工作原理，推导出所设计阻尼器阻尼力计算模型。运用电磁场仿真软件对设计的磁流变阻尼器进行仿真分析，同时测试了不同电流激励、不同幅值和不同加载频率下的动力性能。

第 4 章介绍了一种内置阀式磁流变阻尼器。该阻尼器内置磁流变阀结构，以磁流变阀代替活塞头，使得构成的磁流变阻尼器具有蛇形蜿蜒式液流通道，在受限体积下延长了有效阻尼通道长度。

第 5 章提出了一种阻尼间隙可调式 MRD。该阻尼器内置阻尼间隙可调式磁流

变阀，内置阀阻尼间隙可在 0.6~1.6 mm 无级可调，通过对阻尼间隙尺寸的调整来改变进出口压降，达到改变输出阻尼力的效果。通过对 MRD 的力学模型计算与电磁学仿真分析，探究不同输入电流激励以及不同阻尼间隙下阻尼器的动力性能。

第 6 章提出了一种多段轴向液流通道磁流变阻尼器。该阻尼器绕线槽由端盖和隔磁盘组合而成，对称分布在阻尼器两端，两个并联工作的励磁线圈缠绕于此，在励磁线圈旁布置有呈内外分布的四段轴向圆环流通道。通过合理设计各部分结构、布置隔导磁零部件，以及增加液流通道数目、延长阻尼通道长度达到改善阻尼器阻尼性能的目的。为了提高磁场利用率，利用田口法和有限元仿真，分析各优化变量对目标值的影响程度和规律，并结合 BP 神经网络和粒子群算法对多段轴向液流通道磁流变阻尼器进行结构尺寸优化。

第 7 章设计了一种具有 T 型转子的旋转式磁流变阻尼器。该阻尼器利用磁性材料与隔磁材料的合理配合，引导磁力线走向，使其具有径向和轴向两种形式的工作间隙，在保证阻尼器整体尺寸不增大的情况下，来提升旋转式磁流变阻尼器的性能，并将其应用在汽车剪式座椅的减振中。

第 8 章设计了一种单线圈磁流变阻尼器，并推导出其阻尼力数学模型。采用 DOE 和 RSM 相结合的方法得到磁感应强度与设计变量的近似响应函数，建立目标函数并求解得到最优几何参数。对单线圈磁流变阻尼器进行电磁场仿真和动力性能仿真。搭建动力性能测试试验台，分别测试优化前后阻尼器在不同电流、频率、振幅及速度下的动力性能。

本书研究工作得到了国家自然科学基金项目（52165004、51765016，51475165）、江西省自然科学基金重点项目（20212ACB204002）、江西省重点研发计划重点项目（20212BBE51009）以及浙江省基础公益研究计划项目（LGG20E050007）的大力支持，在此表示衷心感谢。

本书可供机械工程专业高年级本科生及研究生阅读，也可供在车辆工程、土木工程等领域从事减振工作的技术员及工程师参考。

由于本书涉及范围广，作者学识有限，加之时间仓促，难免会有疏漏或不当之处，欢迎广大读者及业内人士予以指正。

作 者

2022 年 10 月

# 目录

## CONTENT

第 1 章	绪 论 .....	001
1.1	MRF 的流变特性与工作模式 .....	001
1.2	MRD 传统结构 .....	003
1.3	MRD 结构设计及优化国内外研究现状分析 .....	004
	本章参考文献 .....	017
第 2 章	双线圈型磁流变阻尼器结构设计及阻尼运动特性研究 .....	024
2.1	双线圈型 MRD 工作原理及结构设计 .....	024
2.2	双线圈型 MRD 磁路分析 .....	026
2.3	双线圈型 MRD 仿真分析及优化设计 .....	032
2.4	双线圈型 MRD 性能测试分析 .....	043
	本章参考文献 .....	049
第 3 章	具有串联式液流通道的磁流变阻尼器结构设计及动力 性能研究 .....	051
3.1	具有串联式液流通道的磁流变阻尼器工作原理及结构 设计 .....	051
3.2	具有串联式液流通道的磁流变阻尼器仿真分析 .....	058
3.3	具有串联式液流通道的磁流变阻尼器的实验 测试分析 .....	068
	本章参考文献 .....	076

第 4 章	内置阀式磁流变阻尼器结构设计及动力性能研究	078
4.1	内置阀式磁流变阻尼器结构设计	079
4.2	内置阀式磁流变阻尼器阻尼力数学模型	085
4.3	内置阀式磁流变阻尼器电磁场仿真分析	087
4.4	内置阀式磁流变阻尼器实验分析	095
	本章参考文献	101
第 5 章	阻尼间隙可调式磁流变阻尼器结构设计及动力性能研究	102
5.1	阻尼间隙可调式 MRD 结构设计	102
5.2	阻尼间隙可调式 MRD 力学模型	108
5.3	阻尼间隙可调式 MRD 仿真分析	115
5.4	阻尼间隙可调式 MRD 实验测试分析	123
	本章参考文献	135
第 6 章	基于 BP 神经网络和粒子群算法的多段轴向液流通道磁流变阻尼器优化设计	138
6.1	多段轴向液流通道磁流变阻尼器的结构及原理	138
6.2	多段轴向液流通道磁流变阻尼器的磁路分析	139
6.3	多段轴向液流通道磁流变阻尼器的力学模型	143
6.4	多段轴向液流通道磁流变阻尼器性能仿真	144
6.5	多段轴向液流通道磁流变阻尼器优化设计	151
6.6	多段轴向液流通道磁流变阻尼器性能测试分析	163
	本章参考文献	178
第 7 章	旋转式磁流变阻尼器结构设计及其在剪式座椅悬架中的应用研究	180
7.1	结构设计	180

7.2	电磁场和力学性能仿真分析 .....	188
7.3	实验测试 .....	195
	本章参考文献 .....	210
第 8 章	基于 DOE 及 RSM 的磁流变阻尼器优化设计及 动力性能研究 .....	212
8.1	单线圈磁流变阻尼器结构设计 .....	212
8.2	基于 DOE 及 RSM 的单线圈磁流变阻尼器结构 优化设计 .....	218
8.3	性能仿真 .....	226
8.4	动力特性测试 .....	228
	本章参考文献 .....	239





# 第1章 绪论

磁流变阻尼器 (Magneto-rheological Damper, MRD) 以磁流变液 (Magneto-rheological Fluid, MRF) 为工作介质, 是一种高效的半主动可控变阻尼器件, 具有结构简单、出力大、毫秒级响应且阻尼力连续可调等诸多优势, 被广泛应用于多种振动控制系统中, 如建筑抗震、汽车悬架、座椅悬架和假肢膝关节等。

在实际应用场合中, MRD 体积会受到安装空间的限制, 此时 MRD 传统结构往往不能提供较大阻尼力, 因此有必要研究新型 MRD 结构以改善其阻尼性能。改善 MRD 阻尼性能的普遍做法是延长有效液流通道, 但有效液流通道的延长可能使 MRD 体积更大, 结构更复杂, 并影响 MRD 的响应和能耗等其他性能, 因此有必要对其结构进行设计及优化, 以满足多方面要求。

## 1.1 MRF 的流变特性与工作模式

### 1.1.1 MRF 流变特性

作为一种智能材料, 磁流变液在外加磁场作用下能够实现牛顿流体与类固体之间可逆可控的快速转换<sup>[1-2]</sup>。磁流变液的固有特性使其适用于多种工业领域, 如振动控制、制动、传感器、密封、夹具和抛光<sup>[3-8]</sup>。

磁流变液主要由非导磁载液和均匀分散于其中的磁性微粒组成, 为保证其悬浮稳定性, 通常会加入适量添加剂。在磁场作用下, 磁流变液可在瞬间 (10 ms 左右) 产生磁流变效应, 由流动性能良好的牛顿流体变为宾厄姆类固体, 且这种变化连续、可控、可逆。磁流变效应示意如图1.1所示, 可以看到, 零磁场下磁流变液中的磁性微粒自由分布, 而在磁场作用下, 磁性微粒沿磁场方向呈链束状, 因此磁流变液的屈服应力发生变化, 并与磁场强度成正比, 从而使自身流动受限。研

究表明，磁流变效应主要与外加磁场有关，同时又受磁性微粒尺寸及占比影响<sup>[9]</sup>。

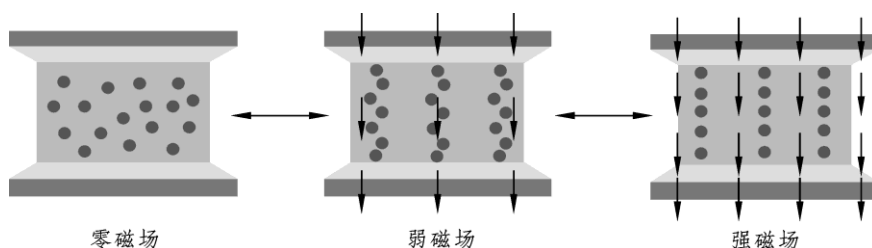
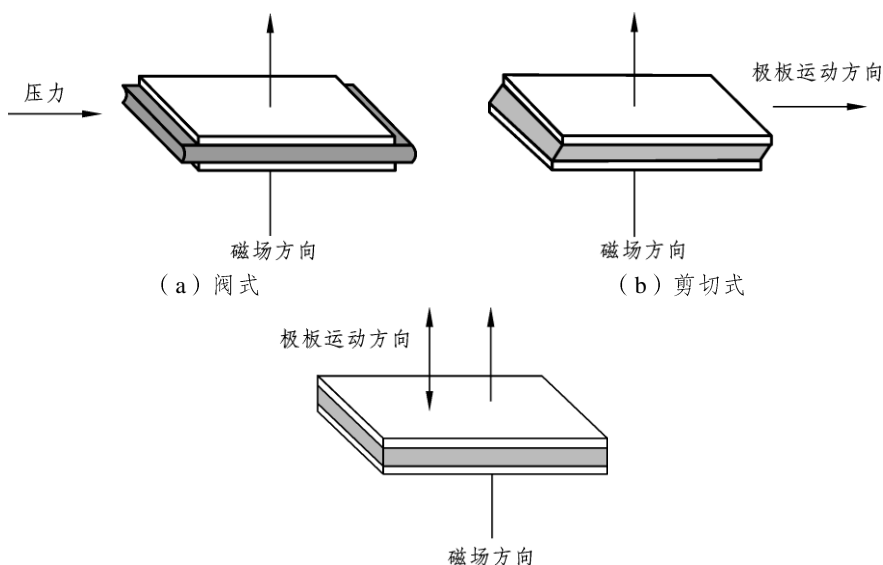


图 1.1 磁流变效应

### 1.1.2 MRF 工作模式

如图 1.2 所示，磁流变液的基本工作模式包括阀式（磁流变液在两个相对静止的极板之间流动，流动方向垂直于外加磁场方向）、剪切式（两极板作相互平行运动，磁流变液位于两极板之间，外加磁场方向垂直于极板运动方向）和挤压式（两极板作相互挤压运动，运动方向与外加磁场方向一致，磁流变液受极板的挤压向周围运动）三种<sup>[10]</sup>。在实际应用中，阀式常见于一些早期的单出杆 MRD、阀控 MRD 和减震器等；剪切式主要应用在离合器、制动器等装置中；受自身运动方式的限制，应用挤压式设计的装置工作行程短，但可提供较大阻尼力，故常应用于一些特殊领域的制动器中。另外，三种基本工作模式可互相组合，如剪切阀式就是应用最广的一种组合工作模式。



(c) 挤压式

图 1.2 磁流变液的基本工作模式

除了上述三种基本工作模式,近年来又提出了一种新的工作模式:夹点式<sup>[11]</sup>。该模式在压降控制方面与阀式相似,但在磁场方向和压力分布方面与阀式有所区别。在阀模式下,磁场方向与磁流变液流动方向垂直,如图 1.3 (a) 所示。由于磁性微粒成链直接使磁流变液流动受阻,因此无论流速如何,压降都可以通过提高磁场强度来增加,如图 1.3 (c) 所示。然而在夹点模式下,如图 1.3 (b) 所示,磁场方向与磁流变液流动方向水平,磁性微粒只能阻塞部分流道,因此如图 1.3 (d) 所示,压降会随流速的变化而变化。

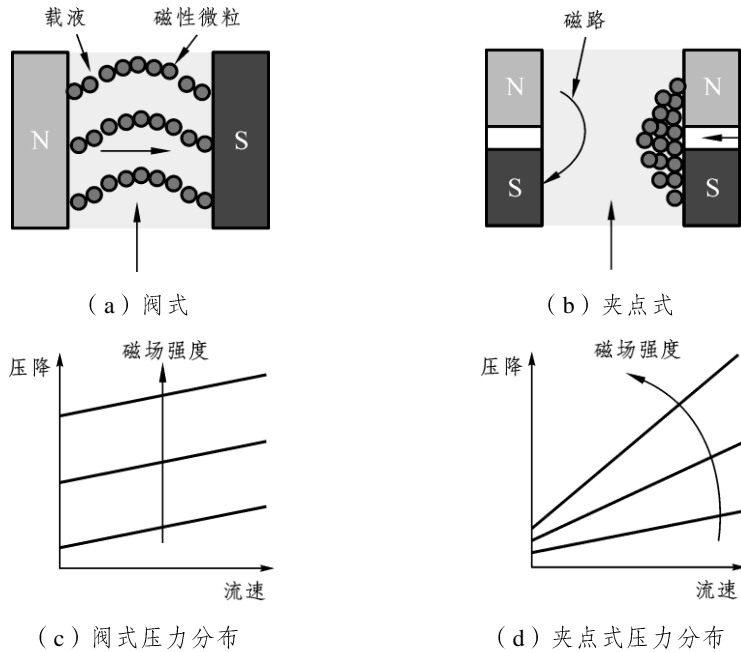


图 1.3 阀模式和夹点模式的工作原理

## 1.2 MRD 传统结构

MRD 传统结构如图 1.4 所示,由于其结构简单且工作可靠,因此被广泛应用于建筑、车辆、军事和医疗等领域的振动控制<sup>[12-17]</sup>。由图可知,励磁线圈通入电流时,由于电磁感应原理,磁场在线圈周围形成,磁力线垂直穿过活塞头和缸体间的液流通道,因此液流通道处的磁流变液会产生磁流变效应。当活塞

杆在外界负载下带动活塞头往复振动时，磁流变液被迫流经液流通道，活塞头运动受限，从而输出阻尼力。改变外加电流大小，阻尼性能可被调节。在 MRD 的出力过程中，被磁力线垂直穿过的这部分液流通道起了关键作用，因此将其称为有效液流通道。

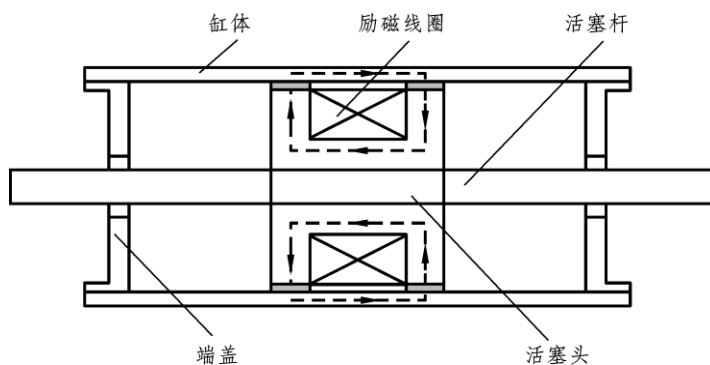


图 1.4 MRD 传统结构

### 1.3 MRD 结构设计及优化国内外研究现状分析

#### 1.3.1 MRD 结构设计

在实际应用中，阻尼器体积会受到安装空间的限制，这时 MRD 传统结构的有效液流通道长度往往得不到保证，就不能提供满足要求的阻尼性能，因此有必要研究 MRD 新型结构。

一般来说，通过增加励磁线圈数量，阻尼性能会被改善。胡志明工业大学的 Bui 等人在单线圈剪切式 MRD 的基础上，提出了一种双线圈 MRD<sup>[18]</sup>，其结构如图 1.5 所示。通过在磁芯上设置两组励磁线圈，有效延长了液流通道长度，并增强了液流通道内的磁感应强度，实验结果表明该阻尼器具有良好的阻尼性能，可用于前置式洗衣机上。

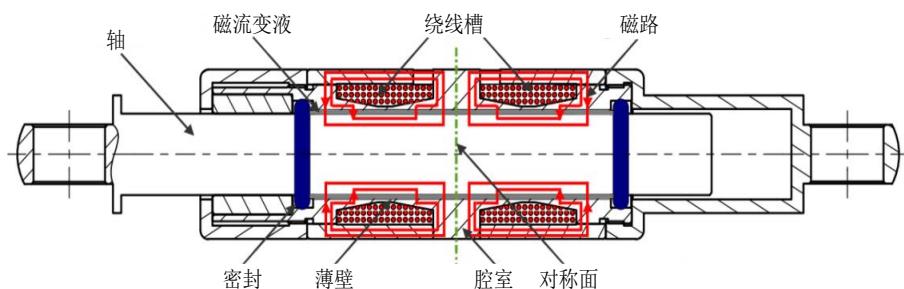


图 1.5 双线圈 MRD

美国 LORD 公司的 Jolly 等人设计了一种具有三线圈 MRD<sup>[19]</sup>，其结构如图 1.6 所示。通过设置三个串联的励磁线圈，阻尼性能被提高。实验表明，该阻尼器的输出阻尼力最大为 20 kN，动态可调范围最大为 10，可用于土木抗震领域。

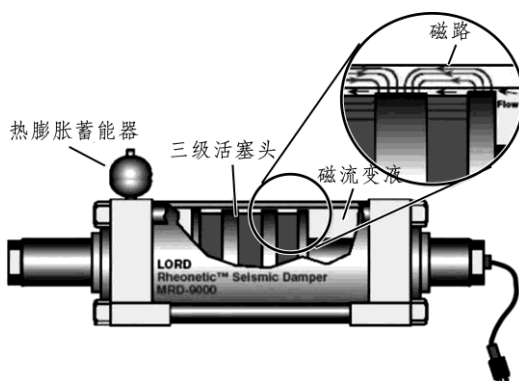


图 1.6 三线圈 MRD

南京理工大学的郑佳佳等人设计了一种四线圈 MRD，其结构如图 1.7 所示，通过耦合方程分析了电磁热流耦合问题，并利用 COMSOL 软件对该阻尼器进行了电磁学、热动力学和流体力学仿真分析<sup>[20]</sup>。仿真结果表明，该阻尼器在高速工况下性能优良，若对多个线圈分别施加电流，则性能更佳。



图 1.7 四线圈 MRD

东南大学的许飞鸿等人设计了一种多线圈 MRD<sup>[21]</sup>，其结构如图 1.8 所示。该阻尼器的活塞头上绕有五组励磁线圈，通过仿真与实验对比分析，可知励磁线圈数量越多，MRD 的阻尼性能越显著。多线圈结构的引入能改善阻尼性能，但也不可避免地延长了 MRD 的轴向尺寸，因此并不能突破实际应用中的体积限制。

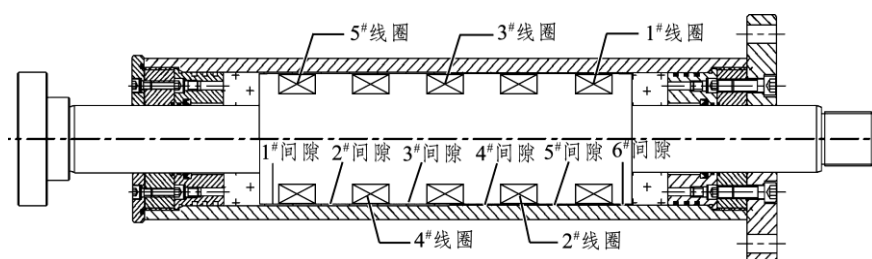


图 1.8 多线圈 MRD

阻尼间隙（即有效液流通道厚度）能显著影响 MRD 的阻尼性能，通过减小阻尼间隙，输出阻尼力能得到极大提高，但阻尼间隙过小会导致零场阻尼力激增，从而影响阻尼器的动态可调范围，并易使磁流变液堵塞在液流通道中。根据已有研究，阻尼间隙取值应在 0.5~1.5 mm<sup>[22]</sup>。上面提到，有效液流通道是影响阻尼性能的关键因素，因此国内外学者多数通过延长有效液流通道来改善 MRD 的阻尼性能。哈尔滨工业大学的 Kim 等人提出了一种具有折叠式液流通道的 MRD<sup>[23]</sup>，通过设置反馈孔，该阻尼器的内外两层液流通道相连接，从而延长了有效液流通道长度，该阻尼器的流道结构如图 1.9 所示。

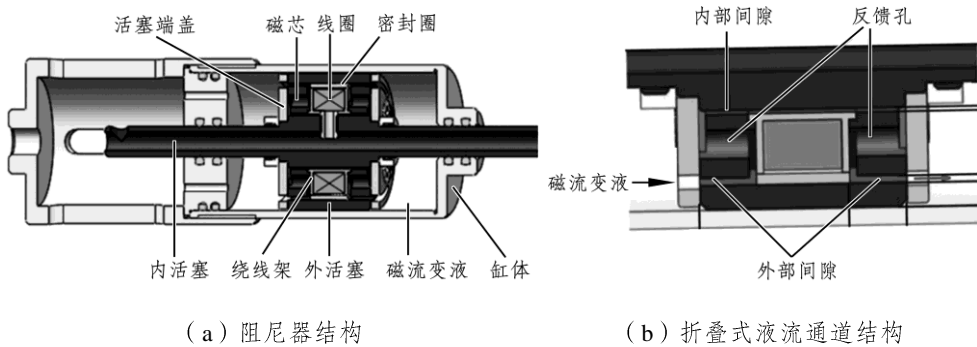


图 1.9 具有折叠式液流通道的 MRD

根据已有研究,在同样的结构参数和磁场参数下,径向圆盘液流通道产生的压降大于轴向圆环液流通道产生的压降<sup>[24]</sup>。由于阻尼器的输出阻尼力来源于液流通道产生的压降,因此设置径向液流通道可提高阻尼器的阻尼性能。马来西亚理工大学的 Imaduddin 等人提出了一种旁通阀式 MRD<sup>[25-29]</sup>,通过设置多级阀芯,旁通阀内的有效径向液流通道被增至六段,其结构如图 1.10 所示。实验结果表明,该阻尼器的动态可调范围是传统结构的 1.5 倍,且装配维修更加方便。

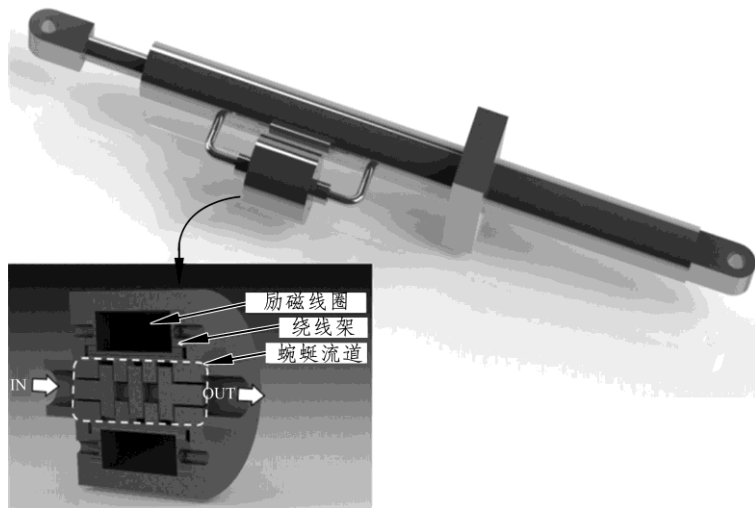


图 1.10 旁通阀式 MRD

第二炮兵工程大学王佑君等人设计了一种固定阀式 MRD<sup>[30]</sup>,其结构如图 1.11 所示。通过有限元仿真可知励磁线圈匝数和外加电流对阻尼器阻尼性能的

影响较大。

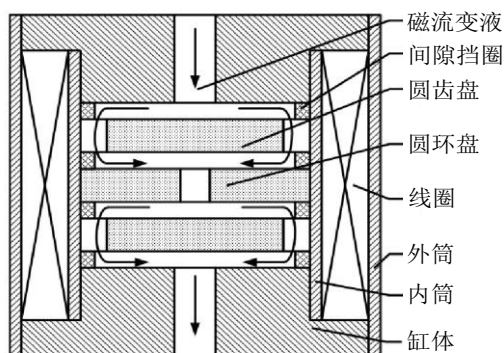


图 1.11 固定阀式 MRD

加拿大圭尔夫大学的 Hajjyan 等人提出了一种多盘旋转式 MRD，其结构如图 1.12 所示。在单盘旋转式 MRD 的基础上，通过增加两个固定圆盘和一个转动圆盘，可使阻尼器具有五段径向有效液流通道，并在线圈下方布置隔磁零件引导磁力线走向，通过仿真分析可得该多盘旋转式 MRD 在 2 A 电流下可以输出 18.492 N·m 的阻尼转矩<sup>[31]</sup>。

重庆大学的赵丹侠设计了一种具有蜿蜒液流通道的 MRD<sup>[32]</sup>，其结构如图 1.13 所示。通过延长有效液流通道长度，该阻尼器的输出阻尼力被提高。由于液流通道的结构改变只发生在 MRD 内部，因此不会大幅增加阻尼器的整体体积。实验证明，与传统结构相比，该阻尼器有更好的阻尼性能。

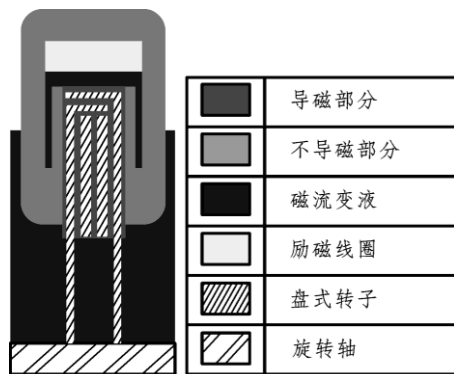


图 1.12 多盘旋转式 MRD

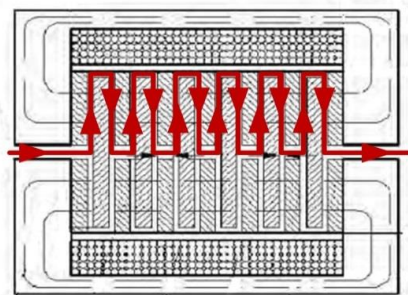


图 1.13 蜿蜒液流通道式 MRD

除了同时设置轴向圆环流道和径向圆盘流道，国内外一些研究人员也提出



了其他特殊结构来延长 MRD 的有效液流通道的。重庆大学的于建强等人提出了一种螺旋流 MRD<sup>[33]</sup>，其结构如图 1.14 所示，并在高低转速下分别进行实验，结果表明该螺旋流结构可以在有限体积下输出更高的阻尼转矩。

马里兰大学的 McLaughlin 等人设计了一种具有螺旋流道的旁通阀式 MRD<sup>[34]</sup>，并对如图 1.15 所示的三种旁路流道，即螺旋流道、带磁珠的螺旋流道和带磁珠的直流道进行了性能研究。通过改变谐波激励频率和外加磁场，发现无磁珠的螺旋流道输出阻尼力最小，但可调阻尼系数最大；带磁珠的螺旋流道输出阻尼力最大，但动态可调范围与磁珠直流道无明显差异。

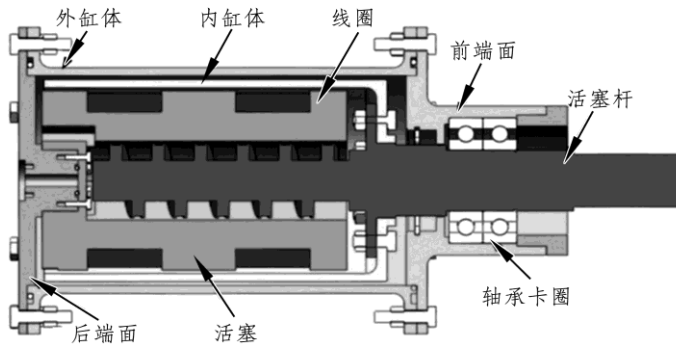


图 1.14 螺旋流 MRD

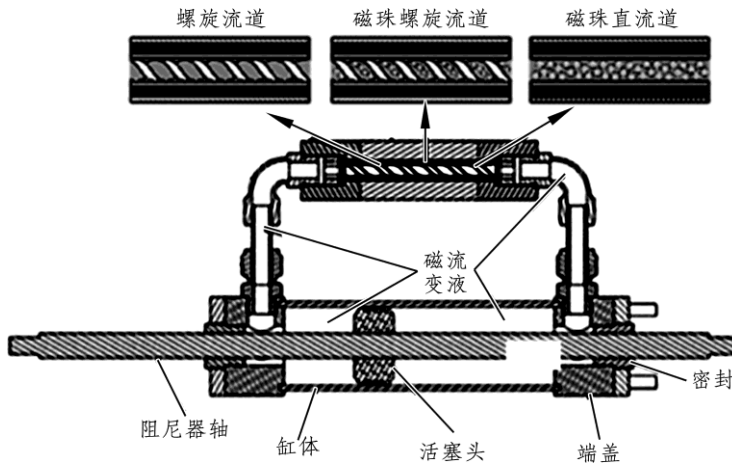


图 1.15 具有螺旋流道的旁通阀式 MRD

Matsuoka 等人设计出一种长螺旋旁通管 MRD，其结构如图 1.16 所示。该

阻尼器在缸体内设置了一条螺旋流旁通管，当活塞杆运动时，内部的磁流变液受到挤压而在此螺旋通道中流动。该结构有效延长了液流通道长度，使输出阻尼力和动态可调范围都得以提高<sup>[35]</sup>。

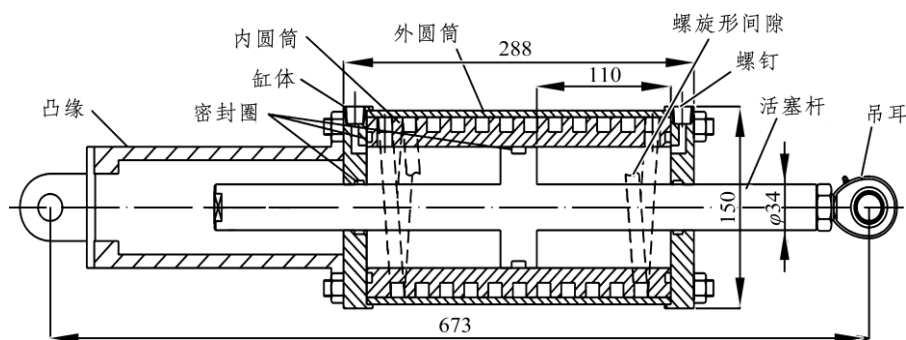


图 1.16 长螺旋旁通管 MRD

另一方面，通过导磁零件和隔磁零件的交替排布来设置蜿蜒磁路，也可以延长 MRD 的有效液流通道。印度尼西亚 Sebelas Maret 大学的 Satria 等人将导磁材料与隔磁材料有序布置，设计出一种基于螺旋流模式的蛇形磁路旋转式 MRD，其结构如图 1.17 所示。实验结果表明，在不增加体积的情况下，该阻尼器具有更高的输出阻尼转矩和阻尼转矩密度<sup>[36]</sup>。

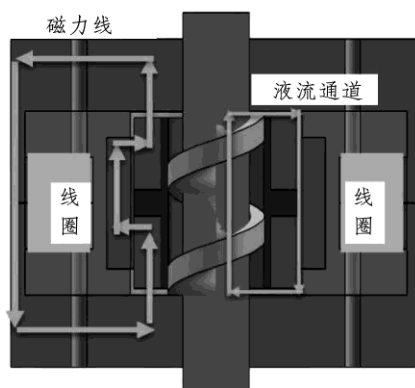


图 1.17 基于螺旋流模式的蛇形磁路旋转式 MRD

华盛顿州立大学的 Senkal 等人设计了一种具有多级蜿蜒磁路的旋转式 MRD<sup>[37]</sup>，其结构如图 1.18 所示。这种方式通过设置多个导磁环和隔磁环，迫使磁力线多次穿过液流通道。实验结果表明，该阻尼器的输出阻尼转矩是传统结

构的 2.7 倍，且体积更小。

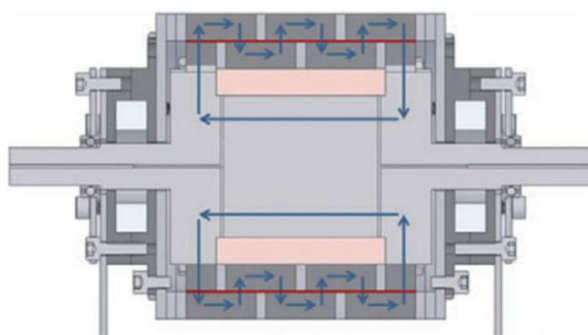
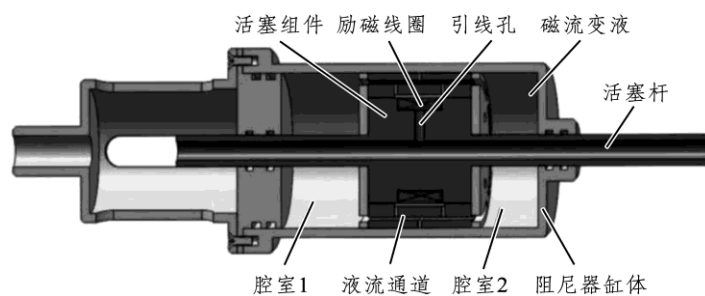


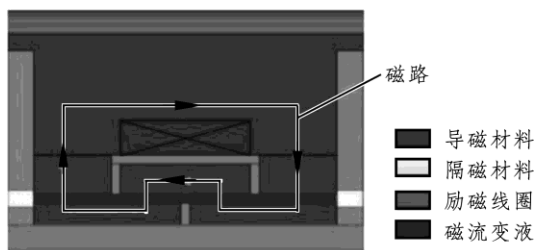
图 1.18 具有多级蜿蜒磁路的旋转式 MRD

通过导磁零件和隔磁零件的有序排布，哈尔滨工业大学的程明等人设计了一种能产生蜿蜒磁路的 MRD<sup>[38-40]</sup>，其三维模型和磁路示意如图 1.19 所示。实验结果表明，在 2.0 A 外加电流下，所设计的 MRD 的零场阻尼力与传统结构相当，但最大输出阻尼力达 11 kN，远超传统结构。

Sassi 等人设计了一种具有新型磁路的 MRD，这种 MRD 通过将传统的励磁线圈轴向缠绕方式改变为径向缠绕，来改变磁力线的走向，阻尼器的绕线架结构及样机如图 1.20 所示。通过仿真分析和实验验证，可知与传统结构相比，该阻尼器在更低能耗下能实现更高的阻尼系数，因此可用于汽车减振悬架<sup>[41]</sup>。

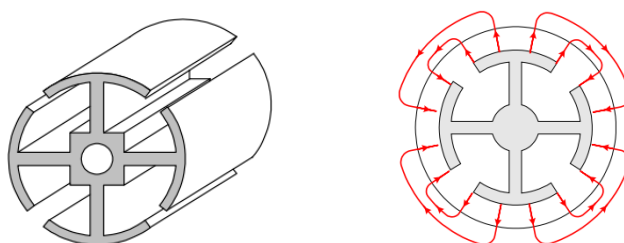


(a) 三维模型

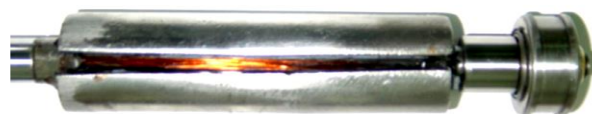


(b) 磁路示意

图 1.19 具有蜿蜒磁路的 MRD



(a) 绕线架结构



(b) 阻尼器样机

图 1.20 具有新型磁路的 MRD

### 1.3.2 MRD 优化设计

以上所述均为通过设计不同的结构来改善 MRD 的阻尼性能。对于现有的阻尼器结构，合理设计尺寸参数可使其工作性能更优，同时可提高材料利用率并使阻尼器结构紧凑，因此对阻尼器尺寸参数进行优化设计是十分必要的。国内外研究学者对阻尼器优化设计做了大量研究，提出了众多不同的思路和方法，其中包括基于比较分析，预先设置几组结构，对比得出最优；利用 ANSYS 软件参数化编程语言 APDL 对阻尼器结构尺寸进行优化；采用实验设计 (DOE) 的方法，首先选择设计变量及水平数，通过 DOE 的方法得到每个设计变量的最优水平，最终得到最优的阻尼器结构尺寸；还有编制相应优化程序进行优化设

计等其他方法。

(1) 基于比较分析的优化设计。

装甲兵工程学院的张进秋等人提出了一种用于军事车辆的叶片式 MRD<sup>[42]</sup>，其结构如图 1.21 所示。由于尺寸限制，在有限空间内对阻尼器进行优化非常必要。通过有限元方法对该阻尼器进行磁场仿真，发现内部铁芯尺寸是影响整个磁路磁感应强度的关键。设置初始阀芯半径为 5 mm，逐步扩大阀芯半径尺寸至 13 mm，利用有限元软件得到不同尺寸下的磁感应强度，进而比较得到最优的阻尼器结构尺寸。实验结果表明，优化后的阻尼器具有更宽的可调范围，稳定性良好，能够满足实车应用要求。

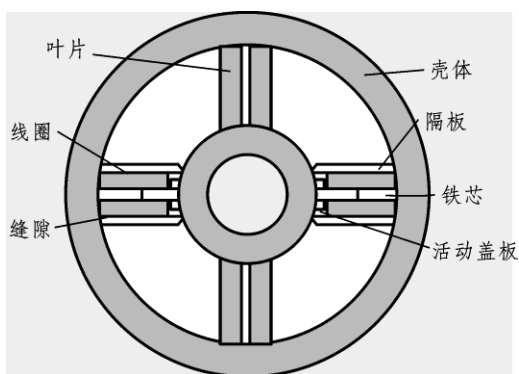


图 1.21 叶片式 MRD

磁路部分是影响阻尼器性能的关键，因此很多专家学者对 MRD 的活塞头结构优化做了研究。马里兰大学的 Khan 等人为了分析活塞头形状对阻尼器最大输出阻尼力的影响，分别对端部平直、端部倒角和端部圆角三种不同的活塞头进行了仿真建模<sup>[43]</sup>，如图 1.22 所示。仿真结果表明，端部圆角的活塞头中磁力线分布更密集。

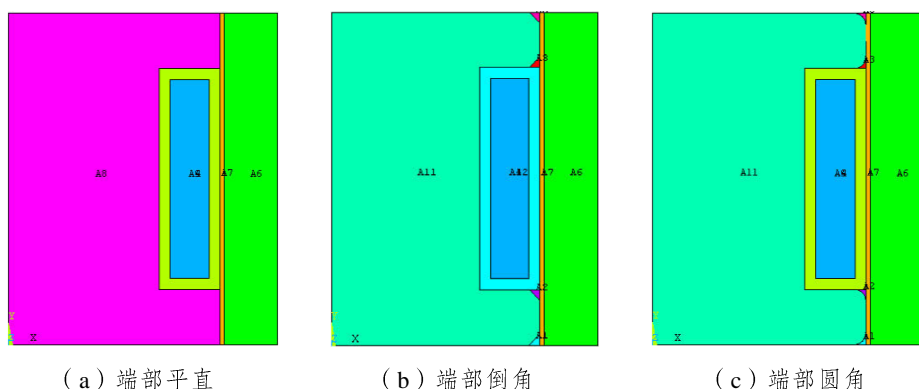


图 1.22 三种不同活塞头类型

为了进一步研究活塞头形状对阻尼器的影响，马来西亚国际伊斯兰大学的 Ferdaus 等人设计了 5 种不同类型的活塞头<sup>[44]</sup>，如图 1.23 所示。对每个活塞头结构进行有限元磁场仿真分析后，通过对比可知顶部和底部倒角的活塞头结构性能优于其他几种类型。另外，对配置有这 5 种活塞头的 MRD 样机进行了动力学性能测试，测试结果验证了结构优化的有效性。马里兰大学的 Khan 等人对 MRD 活塞头形状做了进一步研究，在单线圈、双线圈和三线圈的基础上，对端部平直、端部倒角以及端部圆角共九种不同形状的活塞头进行了仿真分析<sup>[45]</sup>。

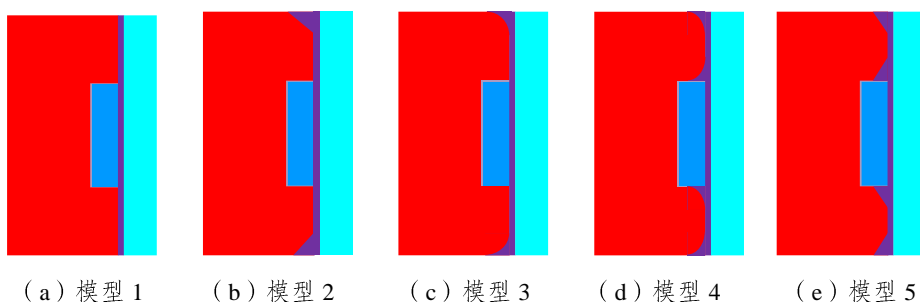


图 1.23 不同形状的 MRD 活塞头

除了对阻尼器的结构进行优化之外，阻尼器的最优材料选择也被研究。西安交通大学的 Yang 等人通过有限元仿真比较了不同活塞头材料对阻尼器性能的影响<sup>[46]</sup>，并得出当缸体、上盖和底盖材料为低碳钢，活塞头材料为铜时，液流通道处的磁感应强度最大。

(2) 基于 ANSYS 软件参数化编程的优化设计。

重庆大学的李以农等人设计了一种汽车悬架用 MRD，同时建立了其优化模型<sup>[47]</sup>。所建立模型的优化计算流程如图 1.24 所示。首先确定设计变量及目标函数，并将其转化为 log 文件形式，再利用 ANSYS 软件运行并得到设计变量最优值。结果表明，优化后阻尼器整体尺寸明显减少，工作过程中更节能，磁场利用率更高且具有更宽的动态可调范围。

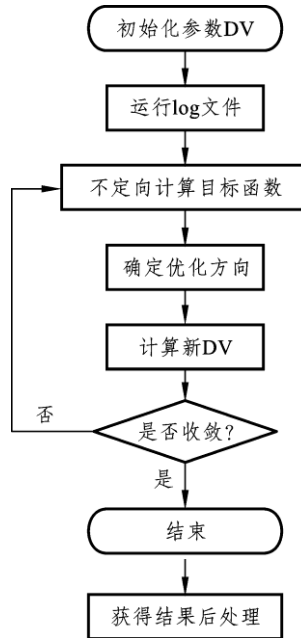


图 1.24 优化计算流程图

韩国仁川大学的 Sung 等人针对中型商用车设计了一款圆柱形 MRD，利用 ANSYS 软件的一阶优化方法对其进行优化，并通过 1/4 车辆测试设备对优化前后的 MRD 分别进行实验测试。实验结果表明，优化后的阻尼器具有更大的输出阻尼力和更低的能耗<sup>[48]</sup>。

除了对传统 MRD 进行优化之外，浙江大学宁波理工学院的郑堤等人利用 ANSYS 软件对一种旋转式 MRD 进行了优化设计，优化时将最大输出转矩设为目标函数<sup>[49]</sup>。上海海事大学的周渊等人利用 ANSYS 软件对一种车床用旋转式 MRD 进行了优化设计<sup>[50]</sup>。韩国仁荷大学的 Nguyen 等人对洗衣机减振用 MRD 进行了优化设计与实验验证<sup>[51]</sup>，阻尼器减振性能实验台如图 1.26 所示。根据洗衣机质量不平衡引起的刚性振动模态，确定了洗衣机减振系统的最佳位置，再

以零场阻尼力最小，且最大输出阻尼力大于需求值为优化目标，采用有限元分析优化方法并结合优化工具，得到了最优结构参数。Nguyen 等人还基于磁流变液的 Herschel-Bulkley 模型推导了磁流变制动器的制动转矩<sup>[52]</sup>，采用一阶优化方法和黄金分割算法来获得多种磁流变制动器在特定体积约束下的最优几何尺寸，并根据最优解给出了磁流变制动器的选型准则。

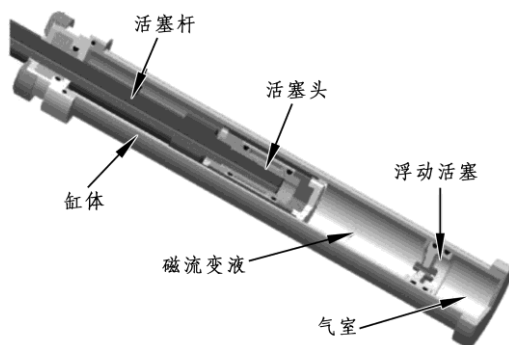


图 1.25 圆柱形 MRD

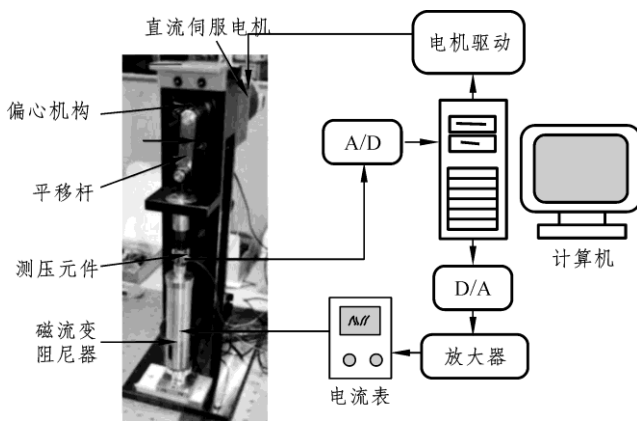


图 1.26 阻尼器减振性能实验台

### (3) 基于实验设计 (DOE) 的优化设计。

萨卡利亚大学的 Parlak 等人利用实验设计方法对 MRD 结构进行了优化<sup>[53]</sup>。选择阻尼间隙、法兰盘厚度、活塞头半径及外加电流作为设计变量，每个设计变量设置三个水平值，进而利用 L9 正交表得到 9 种不同的阻尼器结构参数，以输出阻尼力和动态可调范围作为目标函数，得到阻尼器的最优结构参数。与此同时，加工了如图 1.27 所示 9 个阻尼器样机进行实验测试，实验结果验证了优



化设计的有效性。



图 1.27 MRD 实物图

印度 Mepco Schlenk 工程学院的 Thanikachalam 等人基于实验设计对一种旋转式 MRD 进行了结构优化,选取圆盘半径、线圈匝数及外加电流作为设计变量,各设计变量取三个水平值,得到 9 种不同的设计变量组合,比较后得到阻尼器的最优尺寸参数<sup>[54]</sup>。

(4) 其他类型的优化设计。

西蒙弗雷泽大学的 Naserimojarad 等人提出了一种基于应用数学优化和有限元分析的优化设计方法,通过考虑加工局限和公差等物理约束,避免了不可行解,并把每个可行解考虑在内,使最终解是优化代价方程的全局最优值,克服了传统优化方法可能会收敛于局部极值而未能收敛于全局最优值的缺陷<sup>[55]</sup>。另外,该方法被用来优化一种活塞头材料为 AlNiCo 永磁合金的阀式 MRD,阻尼器结构如图 1.28 所示。

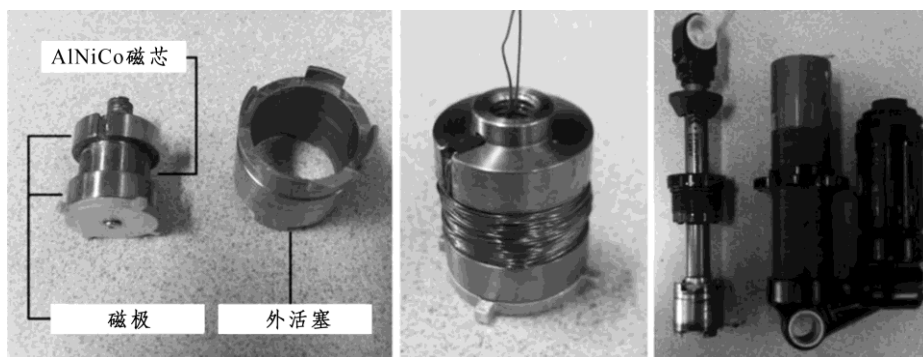


图 1.28 应用数学优化和有限元分析设计的 MRD

北京工业大学的聂松林等人通过多物理场耦合仿真研究了绕线槽形状对

MRD 性能的影响,并结合粒子群算法对阻尼器进行了结构优化<sup>[56]</sup>。该阻尼器优化前后的样机及磁流耦合仿真结果如图 1.29 所示。仿真结果表明,绕线槽倒角的阻尼器具有更好的性能。

印度马德拉斯理工学院的 Manjeet 等人通过拟合二阶响应面回归模型来预测磁流变阀有效液流通道和阀芯处的磁感应强度<sup>[57]</sup>。通过  $p$  值检验对回归模型进行改进,通过分析决定系数选出最佳回归模型,并采用遗传算法对最佳回归模型进行优化求解,得到了最优结构参数。Manjeet 等人还利用 Herschel-Bulkley 模型对磁流变液在轴向圆环液流通道中的流动进行了建模<sup>[58]</sup>,基于所建模型,以磁流变阀的重量和性能指标作为目标函数,利用遗传算法对磁流变阀进行结构优化。

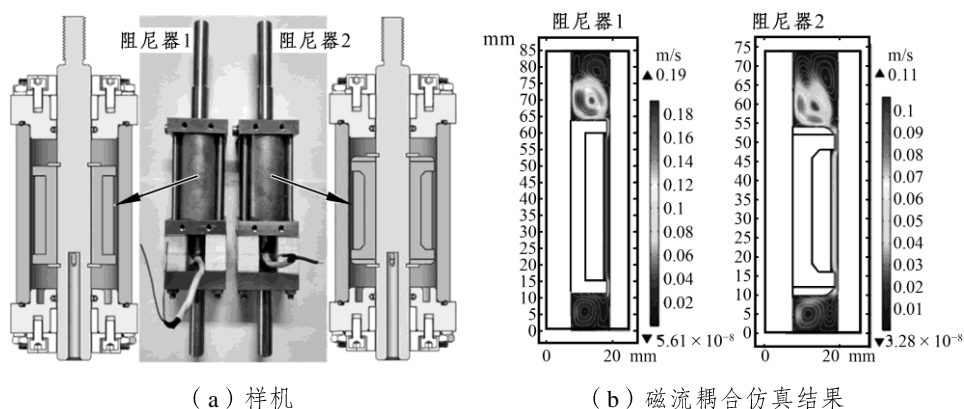


图 1.29 绕线槽形状不同的 MRD

## 本章参考文献

- [1] Peng G R, Li W, Tian T F, et al. Experimental and modeling study of viscoelastic behaviors of magneto-rheological shear thickening fluids[J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2014, 26(2): 149-158.
- [2] De Vicente J, Klingenberg D J, Hidalgo-Alvarez R. Magnetorheological fluids: a review[J]. Soft Matter, 2011, 7(8): 3701-3710.
- [3] Guo Y, Xu Z, Chen B, et al. Preparation and experimental study of magnetorheological fluids for vibration control[J]. International Journal of

- Acoustics and Vibration, 2017, 22(2): 194-200.
- [4] Hu G, Wu L, Li L, et al. Performance analysis of rotary magnetorheological brake with multiple fluid flow channels[J]. IEEE Access, 2020, 8: 173323-173335.
- [5] Kaluvan S, Park Y, Choi S. A novel resonance based magnetic field sensor using a magneto-rheological fluid[J]. Sensors and Actuators A-physical, 2016, 238: 19-24.
- [6] Kubik M, Pavlicek D, Machacek O, et al. A magnetorheological fluid shaft seal with low friction torque[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(4): 047002.
- [7] Ma J, Zhang D, Wu B, et al. Stability improvement and vibration suppression of the thin-walled workpiece in milling process via magnetorheological fluid flexible fixture[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5-8): 1231-1242.
- [8] Singh A K, Jha S, Pandey P M. Performance analysis of ball end magnetorheological finishing process with mr polishing fluid[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(12): 1482-1489.
- [9] Kumar J S, Paul P S, Raghunathan G, et al. A review of challenges and solutions in the preparation and use of magnetorheological fluids[J]. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2019, 14(1): 1-18.
- [10] 李忠献, 徐龙河. 新型磁流变阻尼器及半主动控制设计理论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] Lee T, Kang B, Choi S. A quasi-static model for the pinch mode analysis of a magnetorheological fluid flow with an experimental validation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 134: 106308.
- [12] Yu Y, Royel S, Li Y, et al. Dynamic modelling and control of shear-mode rotational MR damper for mitigating hazard vibration of building structures[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(11): 114006.
- [13] He M, Zheng Z, He B, et al. Optimising intelligent control of a highway

- bridge with magnetorheological dampers[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-structures and Buildings, 2018, 173(3): 210-216.
- [14] Liu Q, Chen W, Hu H, et al. Effect of magnetorheological damper parameters on dynamic responses of a full-vehicle suspension system[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 63(3): 483-503.
- [15] Jamadar M, Desai R M, Saini R S T, et al. Dynamic analysis of a quarter car model with semi-active seat suspension using a novel model for magneto-rheological (MR) damper[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2021, 9(1): 161-176.
- [16] Li Z, Gong Y, Wang J. Optimal control with fuzzy compensation for a magnetorheological fluid damper employed in a gun recoil system[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30(5SI): 677-688.
- [17] Gao F, Liu Y, Liao W. Optimal design of a magnetorheological damper used in smart prosthetic knees[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(3): 035034.
- [18] Bui D Q, Diep B T, Dai H L, et al. Hysteresis investigation of shear-mode MR damper for front-loaded washing machine[C]. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2019, 889: 361-370.
- [19] JOLLY M R, BENDER J W, CARLSON J D. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 1(10): 5-13.
- [20] Zheng J, Li Z, Koo J, et al. Magnetic circuit design and multiphysics analysis of a novel MR damper for applications under high velocity[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014: 402501.
- [21] 许飞鸿, 徐赵东. 多级线圈磁流变阻尼器磁路分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(1): 104-108.
- [22] Wang D H, Ai H X, Liao W H. A magnetorheological valve with both annular and radial fluid flow resistance gaps[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(11): 115001.

- [23] Kim K, Chen Z, Yu D, et al. Design and experiments of a novel magneto-rheological damper featuring bifold flow mode[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(7): 075004.
- [24] 胡国良, 李海燕, 李卫华. 径向流和圆环流磁流变阀压降性能分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 364-371.
- [25] Imaduddin F, Mazlan S A, Rahman M A A, et al. A high performance magnetorheological valve with a meandering flow path[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(6): 065017.
- [26] Imaduddin F, Mazlan S A, Zamzuri H, et al. Design and performance analysis of a compact magnetorheological valve with multiple annular and radial gaps[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, 26(9): 1038-1049.
- [27] Ichwan B, Mazlan S A, Imaduddin F, et al. Development of a modular MR valve using meandering flow path structure[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(3): 037001.
- [28] Imaduddin F, Mazlan S A, Ubaidillah, et al. Testing and parametric modeling of magnetorheological valve with meandering flow path[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 85(1): 287-302.
- [29] Imaduddin F, Mazlan S A, Ubaidillah, et al. Characterization and modeling of a new magnetorheological damper with meandering type valve using neuro-fuzzy[J]. *Journal of King Saud University Science*, 2017, 29(4): 468-477.
- [30] 王佑君, 向书迪, 朱海涛, 等. 新型固定阀式磁流变阻尼器的磁路分析[J]. *磁性材料及器件*, 2016, 47(2): 53-56.
- [31] Hajiyan M. A new design of magnetorheological fluid based braking system using genetic algorithm optimization[J]. *International Journal of Mechanics & Materials in Design*, 2015: 1-14.
- [32] 赵丹侠. 基于多级径向流动模式的磁流变减振器理论与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

- [33] Yu J, Dong X , Wang W . Prototype and test of a novel rotary magnetorheological damper based on helical flow[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(2): 025006.
- [34] McLaughlin G, Hu W, Wereley N M. Advanced magnetorheological damper with a spiral channel bypass valve[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(17): 17B532.
- [35] Matsuoka T, Hiramoto K, Sunakoda K, et al. Fluid inertia damper using MR fluid with a long spiral bypass pipe[J]. Mechanical Engineering Journal, 2016, 3(2): 101299.
- [36] Satria R R, Ubaidillah U, Imaduddin F. Analytical approach of a pure flow mode serpentine path rotary magnetorheological damper[J]. Journal of Engineering, 2020: 103390.
- [37] Senkal D, Gurocak H. Serpentine flux path for high torque MRF brakes in haptics applications[J]. Mechatronics, 2010, 20(3): 377-383.
- [38] Cheng M, Chen Z B, Xing J W. Design, analysis, and experimental evaluation of a magnetorheological damper with meandering magnetic circuit[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(5): 1-10.
- [39] 程明, 陈照波, Kyongsol KIM, 等. 多级蜿蜒磁路式磁流变阻尼器的设计与分析[J]. 工程设计学报, 2017, 24(3): 350-358.
- [40] 程明. 新型磁流变阻尼器及整星半主动隔振系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [41] Sassi S, Cherif K, Mezghani L, et al. An innovative magnetorheological damper for automotive suspension: from design to experimental characterization[J]. Smart Materials & Structures, 2005, 14(4): 811-822.
- [42] 张进秋, 彭志召, 张建, 等. 叶片式磁流变减振器结构设计与优化[J]. 振动, 测试与诊断, 2013, 33(1): 132-137.
- [43] Khan M, Suresh A, Ramaiah N S. Investigation on the performance of MR damper with various piston configurations[J]. Virology, 2013, 177(2): 764-767.

- [44] Ferdaus M M, Rashid M M, Hasan M H, et al. Optimal design of Magneto-Rheological damper comparing different configurations by finite element analysis[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(9): 3667-3677.
- [45] Khan M, Suresh A, Ramaiah N S. Analysis of magneto rheological fluid damper[J]. *International Journal of Engineering & Advanced Technology*, 2012(2): 77-83.
- [46] Yang B K, Luo J L, Dong L L. Magnetic circuit FEM analysis and optimum design for MR damper[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2010, 33(1): 207-216.
- [47] 李以农, 潘杰锋, 郑玲. 磁流变阻尼器的有限元参数优化设计[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(5): 35-40.
- [48] Sung K G, Choi S B. Effect of an electromagnetically optimized magnetorheological damper on vehicle suspension control performance[J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2008, 222(12): 2307-2319.
- [49] Zheng D, Ye W C, Li Y et al. Optimal design for working clearance of rotary MRF dampers[J]. *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2009, 5(8): 3866-3871.
- [50] Zhou Y, Zhang Y L. Optimal design of a shear magnetorheological damper for turning vibration suppression[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(9): 095012.
- [51] Nguyen Q H, Choi S B, Woo J K. Optimal design of magnetorheological fluid-based dampers for front-loaded washing machines[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, 228(2): 294-306.
- [52] Nguyen Q H, Choi S B. Selection of magnetorheological brake types via optimal design considering maximum torque and constrained volume[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(1): 015012.
- [53] Parlak Z, Engin T, İsmail Şahin. Optimal magnetorheological damper

- configuration using the Taguchi experimental design method[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2013, 135(8):081008.
- [54] Thanikachalam J, Nagaraj P. Optimised design for magnetorheological brake using DOE methods[J]. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2015, 394(10): 074163.
- [55] Naserimoharad M M, Moallem M, Arzanpour S. A comprehensive approach for optimal design of magnetorheological dampers[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 29(18): 3648-3655.
- [56] Nie S, Xin D, Ji H, et al. Optimization and performance analysis of magnetorheological fluid damper considering different piston configurations[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30(5SI): 764-777.
- [57] Keshav M, Bhagyarajan A, Chandramohan S. Regression models for magnetic flux density using DoE techniques and geometric optimization of MR valve[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(7): 075008.
- [58] Manjeet K, Sujatha C. Magnetorheological valves based on Herschel-Bulkley fluid model: modelling, magnetostatic analysis and geometric optimization[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(11): 115008.



