文章编号:1007 - 4252(2023)02 - 0002 - 061　　DOI:10.20027/j.gncq.2023.0014

磁流变阻尼器结构设计及参数优化研究进展

陈晓宁,刘　德,赵玉亮,李　健,苗吉军
(青岛理工大学土木工程学院,青岛 266520)

摘要:磁流变阻尼器作为半主动控制装置的典型代表,因其能耗低、响应快、结构简单可靠等优点,在机械、建筑、医疗等领域受到广泛关注。因此,磁流变阻尼器的优化设计成为磁流变阻尼器减振技术的研究热点。本文围绕磁流变阻尼器的结构设计思路、参数优化设计方法进行概述:从活塞形状、阻尼通道、线圈三个部分总结了近些年的结构设计思路。进而介绍了基于实验设计方法的优化、基于有限元软件的优化和智能算法优化这三类应用较广泛的参数优化方法。

关键词:磁流变阻尼器;结构设计;参数优化;
中图分类号:TB535.1　　**文献标志码**:A

Analysis of the current status of research on structural design and parameter optimization of magnetorheological dampers

CHEN Xiao-ning, LIU De, ZHAO Yu-liang, Li Jian, MIAO Ji-jun
(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: As a typical representative of semi-active control devices, magnetorheological dampers have received wide attention in machinery, construction and medical fields because of their low energy consumption, fast response, simple and reliable structure. Therefore, the optimal design of magnetorheological dampers has become a research hotspot for magnetorheological damper damping technology. This paper presents an overview of the structural design concepts and parameter optimization methods for magnetorheological dampers. Specifically, recent advancements in structural design concepts, namely piston shape, damping channel, and coil, are summarized into three parts. Further, three types of widely used parameter optimization methods, namely optimization based on experimental design methods, optimization based on finite element software and intelligent algorithm optimization, are introduced.

Key words: Magnetorheological dampers; structural design; parameter optimization.

0　引言

磁流变液作为一种智能材料,在制造、研究和开发方面受到了极大的关注。在磁场作用下,磁流变液可以迅速由液体转化为类固体,撤除磁场后,其又

收稿日期:2022-02-20;　　**修订日期**:2023-03-24
作者简介:陈晓宁(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向为防灾减灾及防护工程(E-mail:1004138214@qq.com).
通信作者:赵玉亮(1981-),男,博士,讲师,主要研究方向为防灾减灾及防护工程(E-mail:yliangzh@163.com).

会迅速转化为液体,转化过程快速且可逆[1]。磁流变液广泛应用于各种装置,磁流变阻尼器作为磁流变液的典型应用装置之一,在汽车[2]、建筑[3]、桥梁[4]、假肢[5]等领域的减振中起着重要的作用。

和其他减振设备相比,磁流变阻尼器具有结构简单、响应快、阻尼力大且连续可调的优点。磁流变阻尼器的优化设计是提高减振性能的有效途径,直接影响振动控制系统的减振效果。国内外学者对磁流变阻尼器结构,力学模型,控制策略等[6,7,8]方面进行了研究,本文主要针对其结构和参数的优化进行总结。

1 磁流变阻尼器结构设计

1.1 磁流变阻尼器工作模式

磁流变阻尼器有三种基本的工作模式(图 1),分别是流动模式(阀式)、剪切模式和挤压模式[9]。近年来,为了使磁流变阻尼器拥有更好的好工作性能,大量学者对混合模式进行了研究。

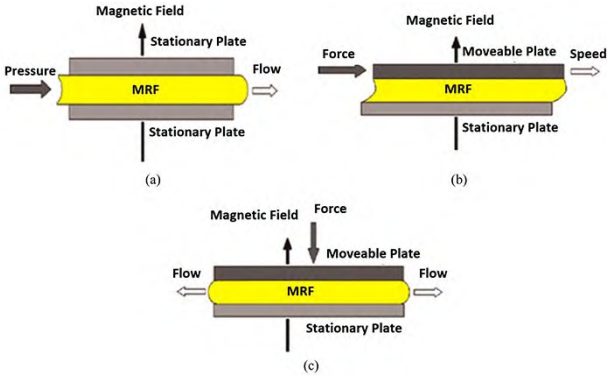


图 1 (a)流动模式;(b)剪切模式;(c)挤压模式[9]

Fig. 1 (a) flow mode; (b) shear mode; (c) squeeze mode[9]

Sung 等[10]对流动模式,剪切模式和混合模式的磁流变阻尼器进行了研究,通过模型计算和计算机模拟测得的流动模式和混合模式的阻尼力最大,同时由于混合模式有避免磁场固化现象的优点,所以选择制作混合模式磁流变阻尼器,并对其进行试验,证明其可用在小型建筑的减震。Yazid 等[11]提出了一种剪切挤压式磁流变阻尼器(图 2a),并且采用了多线圈设计,作者测试了剪切区和挤压区的磁通量密度,并根据模拟结果制作出了一个双出杆多线圈剪切挤压式磁流变阻尼器。采用三个活塞配置,提供剪切作用,阻尼器的顶部和底部各缠绕一个线圈提供挤压作用。通过控制激活不同位置的线圈来对其分别进行了剪切模式、挤压模式和混合模式下工作的试验,发现混合模式比单模式的减震性能更优。在对磁流变阻尼器工作模式的研究中,也有新的模式被提出,Gołdasz 等[12]在流动模式的基础上提出了磁梯度收缩模式(图 2b),这种模式的特征是,随着磁场的增加,磁梯度收缩模式下的压力和速度关系的斜率将显著增加,除此之外,能够使得磁流变液的要求降低,可以使用颗粒更大的磁流变液,降低了磁流变液的造价。

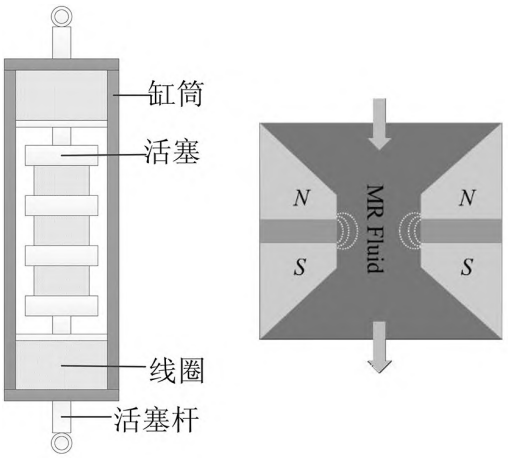


图 2 (a)剪切挤压式 MR 阻尼器;(b)磁梯度夹点模式

Fig. 2 (a) Shear-squeeze MR Damper; (b) Magnetic gradient pinch mode

1.2 活塞优化

活塞作为磁流变阻尼器中的一个重要组成,活塞的形状及设置对阻尼间隙和线圈布置有着很大的影响,所以许多学者对活塞进行优化研究,使磁流变阻尼器性能更优。Hu 等[13]针对双线圈磁流变阻尼器进行了研究(图 3)。验证了 7 种不同活塞配置下的阻尼器性能,发现平端活塞可以获得更大的磁密,更大的输出阻尼力及更大的阻尼力可调范围。

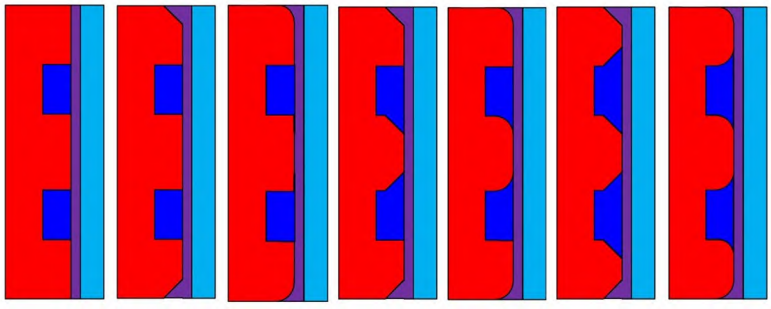
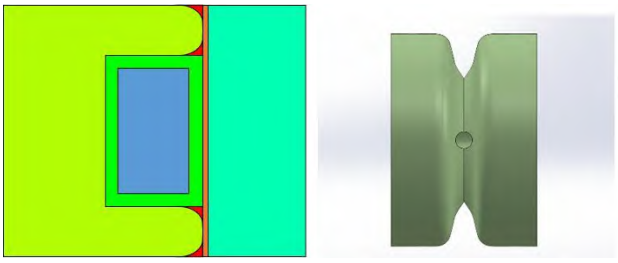


图 3　不同活塞形状的仿真模型[13]

Fig. 3 Simulation models of different piston shapes[13]

Khan 等[14]对磁流变阻尼器的不同活塞设置进行了研究,对单线圈、双线圈和三线圈活塞均设置了平头、倒角和圆角的形式。对九种活塞设置进行了仿真分析,发现带圆角设置的活塞(图 4a)压降在各种条件下均较大,说明活塞圆角设置可承受更大的荷载。Liu 等[15]为了解决前、后活塞和中部活塞之间的过渡区域中的区域磁饱和问题,提出了用 B 样条曲线对活塞进行优化,优化后的活塞如图 4b 所示。经过实验分析,发现优化后的磁流变阻尼器中间活塞和过渡区域周围的磁通密度降低。推迟了过渡区磁饱和发生时间,使阻尼间隙拥有更大的磁通密度且总阻尼力和可控力范围也有较大提升。利用参数曲线进行优化的方式给以后的参数优化提供了新的选择。



(a)　　(b)

图 4　(a)带圆角的活塞;(b)B 样条曲线优化后的活塞形状[15]

Fig. 4 (a) Piston with fillet; (b) Piston shape after B-spline curve optimization [15]

考虑到在磁流变液阻尼器上增加活塞旁通孔可以避免阻尼力在活塞速度较低时突然变化,而不会降低较高速度和最大阻尼力时的阻尼力,Sohn 等[16]对活塞旁路孔的设计进行了研究(图 5),以旁路孔的数量、直径、以及孔隙口的间隙为研究参数,设计了 8 组不同的参数情况进行了对比研究,证明了在低活塞速度下阻尼力的主要影响因素是旁路孔的数量和直径,在高活塞速度下,孔口的间隙成为影响阻尼力的主要因素。彭志召等[17]发现这种带有旁通孔的磁流变阻尼器(图 6),可以与简单的开关策略相配合,在输入最大电流时,磁流变液由小孔流入另一侧,输入零电流时,磁流变液可以从阻尼通道和小孔中流过,避免了采取开关控制时,因突然输入最大电流导致的震颤现象发生。

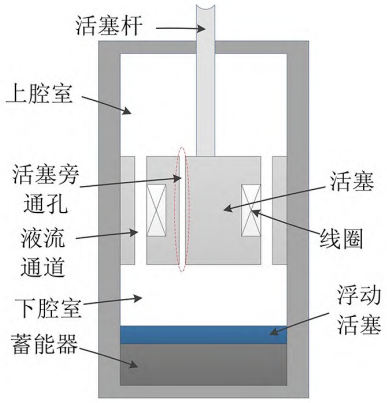


图 5　有活塞旁路孔的磁流变阻尼器[16]

Fig. 5 Magnetorheological damper with piston bypass hole[16]

1.3　阻尼通道优化

阻尼通道是磁流变液发生磁流变效应的主要区域,对磁流变阻尼器的性能有着极大的影响,国内外学者对阻尼通道的设置方式进行了大量研究。

1.3.1 旁路式阻尼通道

由于传统的磁流变阻尼器线圈随着活塞运动,

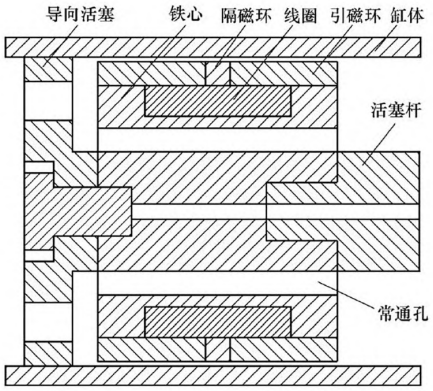


图 6 有并联常通孔的磁流变阻尼器[17]

Fig. 6 Magnetorheological damper with parallel standing hole[17]

使得阻尼通道不能被完全利用,为了更好地增加阻尼通道有效长度,许多学者对旁路式磁流变阻尼器进行了研究。旁路式设计分为内旁路式和外旁路式。Bai 等[18]提出了内部旁路式磁流变阻尼器(图7),这种结构以活塞和外管间隙为阻尼通道,阻尼通道全长有效,不受活塞杆运动的影响。在同等尺寸下,新型阻尼器比传统的阻尼器拥有更长的阻尼通道有效长度,经过试验测试发现内部旁路式的动态范围更大。采用双出杆设计的内旁路式磁流变阻尼器可以有更广阔的应用场景,并且在相同的活塞冲程和体积下,可以明显减少磁流变液的用量。

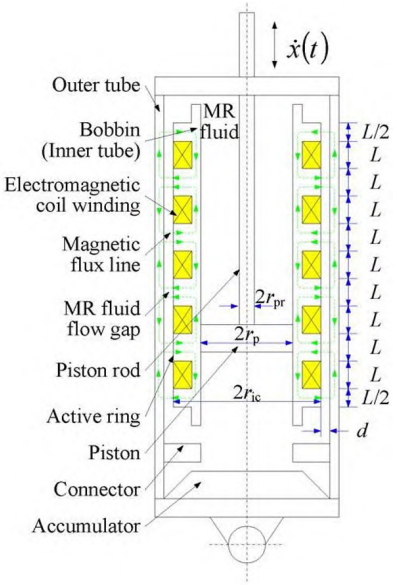


图 7 内旁路式磁流变阻尼器[18]

Fig. 7 Internal bypass magnetorheologicaldamper[18]

Bai 等[19]提出了基于活塞阀的内旁路磁流变阻尼器(图8),一种在磁流变液通道串联环形管道的新型阻尼器,活塞相对于阻尼筒压缩(反弹)时,磁流变流体从下(上)环形导管流入下(上)径向导管。然后磁流变液通过中心孔流入上(下)径向导管。最后,磁流变液通过上(下)环形导管流出活塞。经过实验分析,发现新型阻尼器的阻尼力范围更大,更有效地利用了电流,提高了磁流变阻尼器的工作效率。

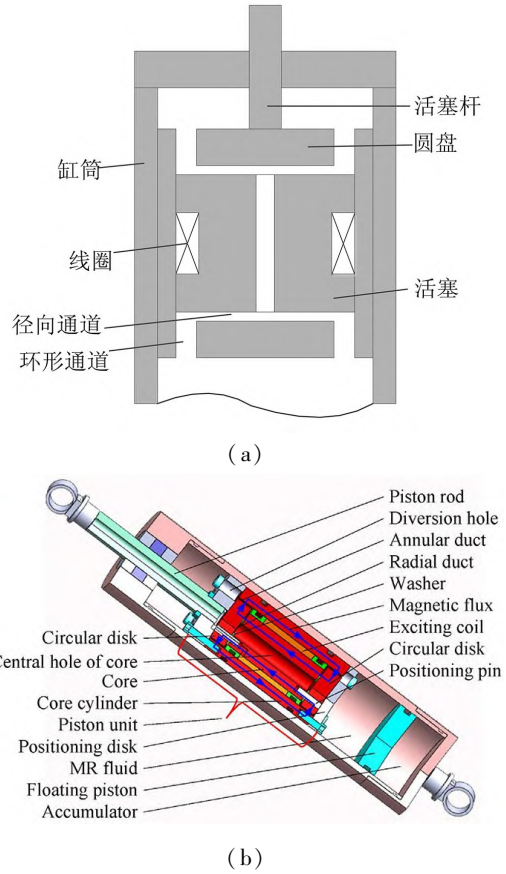
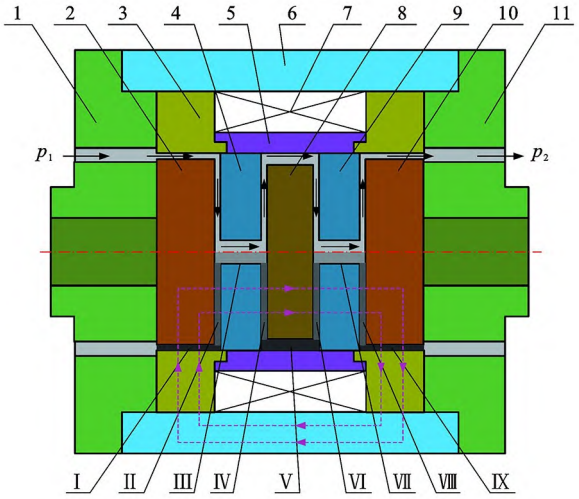


图 8 (a)活塞阀原理图;(b)基于活塞阀的内旁路磁流变阻尼器的三维模型[19]

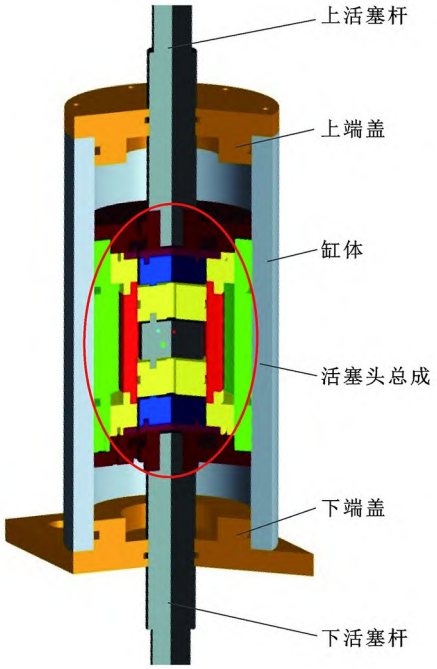
Fig. 8 (a) Schematic diagram of the piston valve; (b) 3D model of the internal bypass magnetorheological damper based on the piston valve [19]

胡国良等[20]采用蛇形阻尼通道布置的内置阀(图9),该通道设计有利于磁力线更多次穿过阻尼通道,在不使阻尼器体积增大的前提下,大大增加了有效阻尼通道的长度。由于内置式阀将磁流变阀放置在气缸内并连接到活塞上,阀门的空间非常有限,往往会缩短行程。而外置阀的好处是将阀门放在气缸外部,这使得它有更多的空间来放置磁流变阀,并

且不会阻碍活塞行程。



(a)



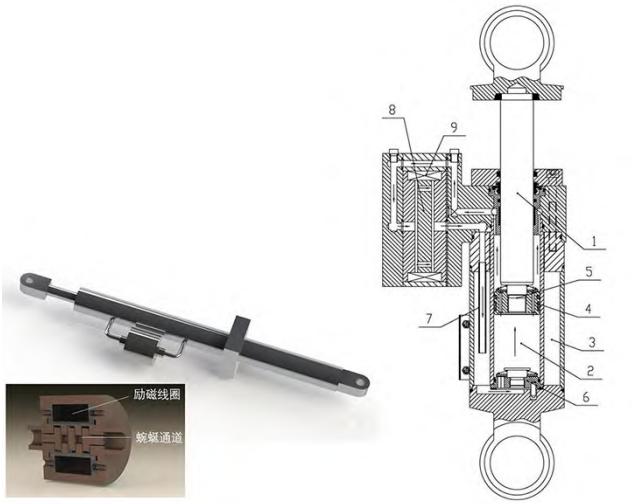
(b)

图 9　(a)内置阀结构原理;(b)内置阀式磁流变阻尼器结构[20]

Fig. 9 (a) Principle of built-in valve structure; (b) Structure of built-in valve type magnetorheological damper [20]

1. 阀左端盖 2. 左导流盘 3. 绕线架 4. 左定位盘 5. 隔磁环 6. 阀体 7. 励磁线圈 8. 阻尼圆盘 9. 右定位盘 10. 右导流盘 11. 阀右端盖

Imaduddin 等[21]对外旁路式磁流变阻尼器展开了研究,外置阀内采用轴径向混合流道(图 10a),经过实验分析,该阻尼器阻尼力可调范围优良。Guo 等[22]采用单流向设计的外置阀式(图 10b),降低了磁流变液的沉降性。经过试验测试发现该阻尼器最大阻尼可达 9kN,并且在零电流下拥有充分的阻尼力,拥有防故障的能力。传统外旁路式磁流变阻尼器会使磁流变阻尼器的宽度增大,Idris 等[23]将磁流变阀的布置采用与缸体同轴线的设计,置于缸体下方,与活塞分离(图 11),避免了内置阀式设计的问题。相比于内旁路设计,外旁路的加工与维护更加方便,可以采取整体替换的方式进行维护。



(a)　　(b)

图 10　(a)蜿蜒型阀旁路磁流变阻尼器[21];(b)双管旁路磁流变阻尼器原理图[22]

Fig. 10 (a) Bypass MR damper with meandering type valve[21]; (b) Schematic diagram of the twin-tube and bypass MR damper [22]

1. 活塞杆 2. 内储液器 3. 外储液器 4. 活塞阀 5. 活塞 6. 底阀 7. 连接管 8. 磁流变阀 9. 线圈

1.3.2 可调节式阻尼通道

Zheng 等[24]提出了一个阻尼通道变化的多线圈磁流变阻尼器(图 12a),每个线圈单独工作,这种设计可以使磁流变液在不同位置产生不同的阻尼力,随着活塞杆的移动而变化,经过多物理分析发现比传统磁流变阻尼器性能更优。Hu 等[25]提出了一种阻尼通道可调的磁流变阀(图 12b),通过调节阀芯可以使阻尼通道在 1-2mm 之间变化,这种阻尼通道宽度的变化不会改变磁流变阀的尺寸,也不会消耗能量,可以增大其应用范围。新型磁流变阀在有限元仿真、数值分析和实验中均表现出了较好的性

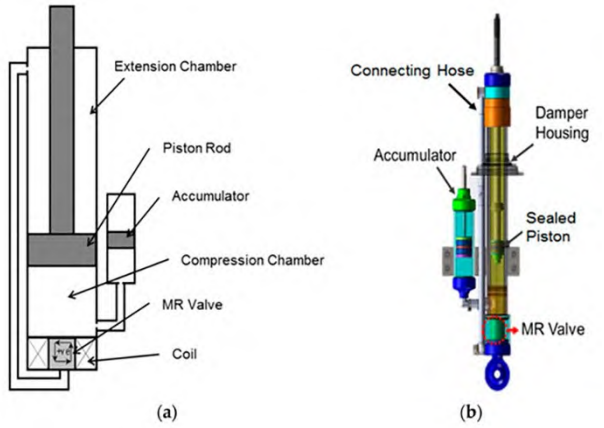
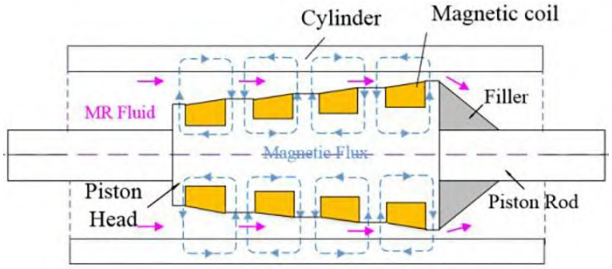


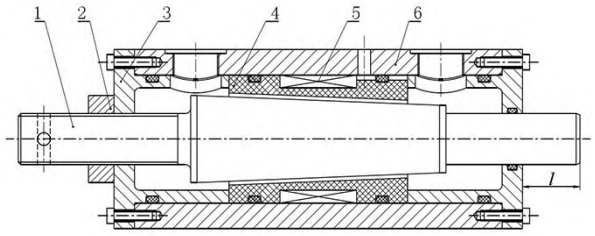
图 11 提出的磁流变阻尼器:(a)概念图;(b)设计图[23]

Fig. 11 Schematic configuration of the proposed MR damper: (a) The conceptual design; (b) the actual design[23]

能。在相同的电流激励下,随着阻尼通道的变动,压降在 470kPa-1150kPa 之间变化,证明新型磁流变阀可以很好的控制压力。



(a)



(b)

图 12 (a)可变阻尼通道磁流变阻尼器[24];(b)具有可调阻尼通道的磁流变阀[25]

Fig. 12 (a) Variable damping channel magnetorheological damper [24]; (b) Magnetorheological valve with adjustable damping channel[25]

1. 阀芯 2. 锁定螺母 3. 端盖 4. 阀套 5. 励磁线圈 6. 阀体

左强等[26]在可调阻尼通道磁流变阀的基础上提出了阻尼通道可调式磁流变阻尼器(如图 13)该阻尼器采用内置阀式,设有外通道和内通道,将外通道固定,通过旋转磁芯改变两个磁轭之间的距离来改变内通道即阻尼间隙的宽度。调节阻尼通道可以明显改变磁感应强度、最大阻尼力和动态范围,使其应用范围更加广泛。

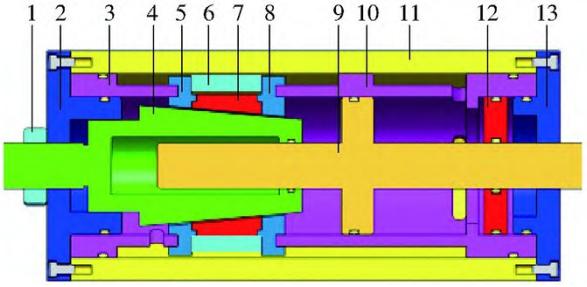


图 13 阻尼通道可调式磁流变阻尼器示意图[26]

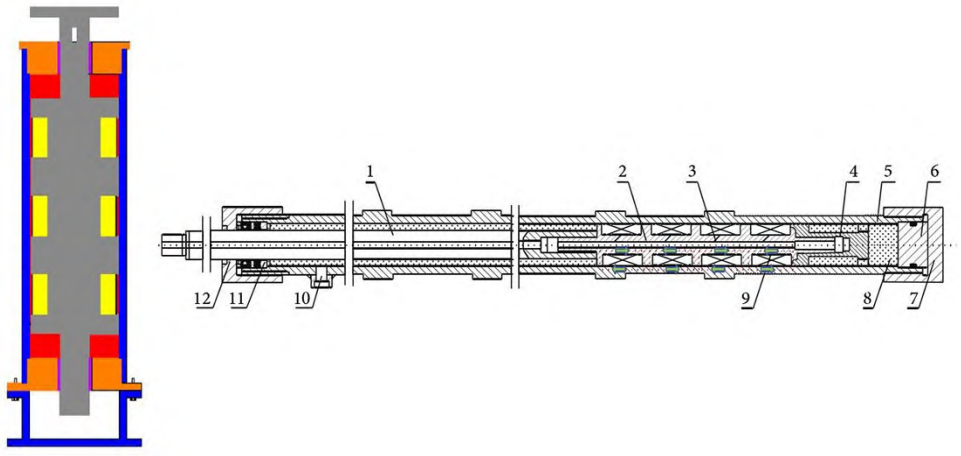
Fig. 13 Schematic diagram of damping gap adjustable magneto-rheological damper[26]

1. 紧锁螺母 2. 左端盖 3. 左缸筒 4. 阀芯 5. 左磁轭 6. 励磁线圈 7. 隔磁环 8. 右磁轭 9. 活塞杆 10. 右缸筒 11. 缸体 12. 浮动活塞 13. 右端盖

1.4 线圈数量及位置优化

1.4.1 线圈数量的优化

励磁线圈为磁流变阻尼器提供磁场,使磁流变液磁化产生阻尼力,国内外学者对励磁线圈的数量和布置作了大量研究,目前在实际应用的磁流变阻尼器中,线圈数量多为单线圈或双线圈,但基于不同的应用场景,多线圈也被提出,设置多个线圈时可以对各个线圈的输入电流进行控制,以探索最优的方案。Yang 等[27]对三线圈磁流变阻尼器(图 14a)进行了研究,对中间线圈通电测试单线圈性能,对两边线圈通电测试双线圈性能,以及对三线圈通电测试三线圈性能,在对多线圈通电时控制电流方向获得不同的效果。最终经过实验发现,三线圈的阻尼力可达单线圈的两倍,且当两端线圈通入同向电流,中间线圈输入反向电流时产生的阻尼力最大,这是由于这种情况下线圈所产上的磁感应强度最大。为多线圈磁场设计提供了经验。Zheng 等[28]提出了一个用于高速应用的新型 MR 阻尼器(图 14b),该阻尼器由四级线圈组成,采用各线圈独立输入电流的方式。对其进行了电磁、流场、热及电磁流热耦合等多物理理论分析,发现阻尼力、动态范围和响应时间均达到理想结果,证明了该磁流变阻尼器的可行性。



(a)　　(b)

图 14　(a)三线圈磁流变阻尼器原理图[27];(b)四线圈磁流变阻尼器设计图[28]

Fig. 14 (a) Schematic diagram of the three-coil magnetorheological damper[27]; (b) Design of the four-coil magnetorheological damper [28]

1. 活塞杆 2. 活塞头 3. 导线引线孔 4. 导向头 5. 缸筒 6. 后密封圈 7. 后盖 8. 磁流变液 9. 励磁线圈 10. 溢流孔 11. 前密封圈 12. 前盖

Cruze 等[29]研究了一个九线圈磁流变阻尼器,用 Opensees 模拟框架验证了其减震效果。增加线圈的数量可以使磁流变液受到的磁场更加均匀,推迟磁饱和现象。伴随着线圈的增加,阻尼器的体积也会随之变大,实际生产中要根据实际用途来权衡线圈的数量。

1.4.2 线圈位置的优化

贾双等[30]提出了一个线圈外置的磁流变阻尼器(图 15),将线圈放到阻尼器的缸体外部可以大大延长阻尼通道,且可以加强线圈的散热能力,达到更好的使用效果,线圈外置方便改变线圈个数及规格。胡国良等[31]将线圈放在靠近端盖处(图 16),改变了磁场通过阻尼间隙的方式,增加了有效阻尼通道长度。金京设等[32]采用了平行布置的双线圈磁流变阻尼器(图 17),这种设计相较于常规的双线圈磁流变阻尼器体积更小,阻尼性能更优。

1.4.3 带永磁体的多线圈结构

传统利用励磁线圈提供磁场的磁流变阻尼器,会面临着磁流变液沉降等问题,尤其是用于土木工程中的磁流变阻尼器,长时间的静置使磁流变液沉降成为一个亟待解决的问题。冯志敏等[33]提出了一种活塞-永磁体复合结构(图 18a),该结构励磁线圈采用缠绕方式为反向串联的双级线圈,并对该复

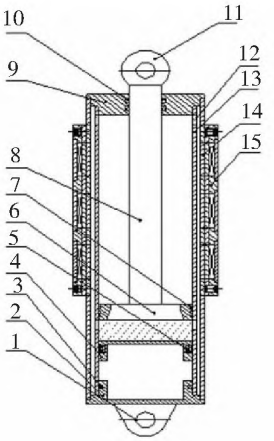


图 15　线圈外置磁流变阻尼器[30]

Fig. 15 Coil external magnetorheologicaldampers[30]

1. 缸底耳环 2. 缸底 3. 缸底密封 4. 浮动活塞 5. 浮动活塞密封 6. 活塞 7. 活塞密封 8. 活塞杆 9. 上盖 10. 上盖密封 11. 活塞杆耳环 12. 通流孔 13. 内层缸筒 14. 外层缸筒组件 15. 线圈组件

合结构进行了各种条件下阻尼力和响应时间的实验,最终证明这种复合结构能够同时提高阻尼力,减少响应时间。Olivier 等[34]将永磁体放置于活塞的两端(图 18b),与励磁线圈形成 3 条并联等效磁路。这种结构既增加了流体流动通道中的磁通密度,又

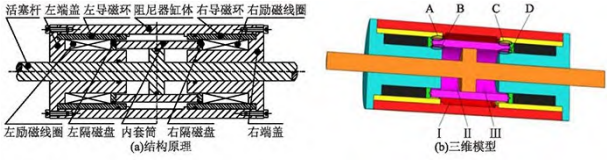


图 16 多段轴向液流阻尼通道磁流变阻尼器结构[31]

Fig. 16 Multi-segment axial fluid flow damping channel magnetorheological damperstructure[31]

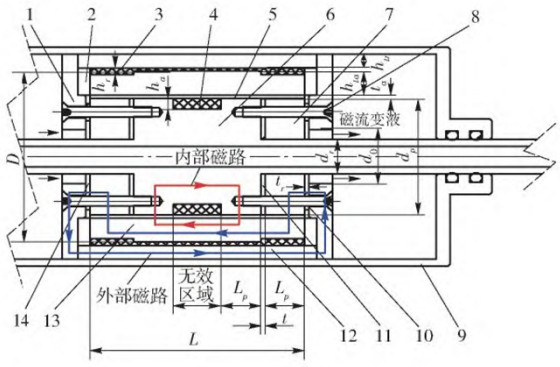
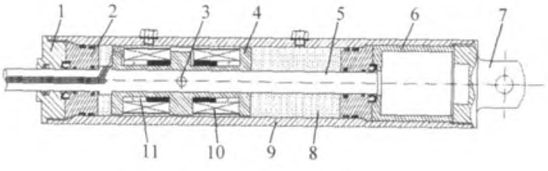


图 17 内置平行双线圈的磁流变阻尼器[32]

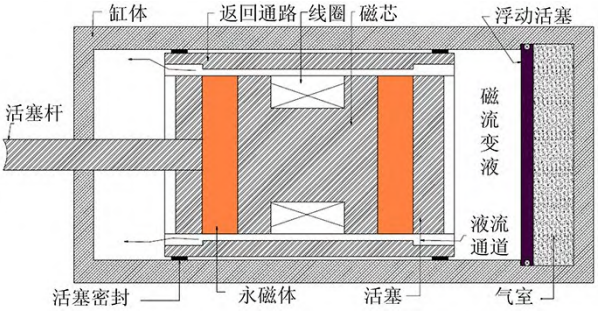
Fig. 17 Configuration of MR damper with parallel double coil[27]

1. 径向磁极 2. 线圈盖 3. 外线圈 4. 内线圈 5. 环形间隙 6. 活塞 7. 外磁极 8. 螺栓 9. 壳体 10. 垫圈 11. 分隔环 12. 外筒 13. 内筒 14. 径向间隙

保证了磁流变阻尼器在没有外加电流的情况下可以提供一定的输出阻尼力,拥有良好的防故障性能。董至臻等[35]提出了一种内置永磁体的新结构,该阻尼器在两个励磁线圈的两侧和中间分别加入了径向的瓦状永磁体,且为了使其有更佳的磁路利用率,将永磁体设置为同级相对。其最大阻尼力和可调范围均有所提升。



(a)



(b)

图 18 活塞-永磁体磁流变阻尼器[33,34]

Fig. 18 Piston - permanent magnetmagnet magnetorheological dampers[33,34]

1. 左缸盖 2. 密封体 3. 定位销 4. 活塞 5. 活塞杆 6. 导向管 7. 右缸盖 8. 磁流变液 9. 缸体 10. 励磁线圈 11. 永磁体

2 磁流变阻尼器参数优化方法

为了提高磁流变阻尼器的性能,通常要对关键参数进行优化,优化的目标主要是提高阻尼器出力,增加可调范围,缩短响应时间等,待优化的参数可根据不同结构形式和应用场景来选定。参数的优化设计结合仿真分析可以极大地节省人力物力,为制造出合理的磁流变阻尼器提供参考。国内外学者为磁流变阻尼器的参数优化提供了大量的研究方法和思路,例如实验设计方法,基于有限元软件的优化方法,智能算法优化等。

2.1 基于实验设计方法的参数优化

基于实验设计方法进行优化可以在短时间内获得较准确地结果,适用于参数较少的情况。Parlak 等[36]以最大阻尼力和动态范围为目标,利用田口方法对参数进行优化,选取了间隙宽度,法兰厚度,线圈导线直径和电流激励四个参数,对四个参数各取三个值,田口方法产生的 L9 正交阵列表(表 1),制造出 9 个阻尼器模型,通过实验测得 9 个最大阻尼力和动态范围,最终确定最优组合。作者是以阻尼器的简单性为前提选择的参数,其他参数也可以依据本方法来找出最优参数组合。

表 1　L9 正交阵列表

编号	间隙宽度	法兰厚度	活塞芯半径	电流
1	a_1	a_2	a_3	a_4
2	a_1	b_2	b_3	b_4
3	a_1	c_2	c_3	c_4
4	b_1	a_2	b_3	c_4
5	b_1	b_2	c_3	a_4
6	b_1	c_2	a_3	b_4
7	c_1	a_2	c_3	b_4
8	c_1	b_2	a_3	c_4
9	c_1	c_2	b_3	a_4

Olivier 等[34]对阻尼间隙、永磁体与励磁线圈的间距、永磁体与活塞边缘的间距、缸体厚度和线圈半径五个参数进行研究,采用响应面法(RSM)和 Box-Behnken 设计以屈服应力为目标函数对磁流变阻尼器参数进行优化,取样时每个参数设置三个等级。经过仿真模拟发现优化后的磁流变阻尼器的阻尼力和可调范围都有所提高。

2.2　基于有限元软件的参数优化

该方法可以基于建立的有限元模型进行多次仿真运算,并优化设计参数以达到预期的设计目标。王巍然等[37]采用 Ansys 软件以模型的最大磁感应强度值为约束条件,阻尼通道处的最大磁感应强度为目标函数,使用零阶方法进行迭代优化,优化后的磁流变阻尼器的动态范围更广,体积更加紧凑。胡国良等[20]利用 Ansys 软件的一阶方法进行优化,目标函数为最大阻尼力和动态范围,约束条件为磁感应强度,优化后的性能有所提升。两种方法优化流程如图 19 所示。这种优化方式适用于需要考虑多个因素相互作用的情况,但其依赖于对模型进行的有限元分析,易受到边界条件、网格划分等因素的影响。

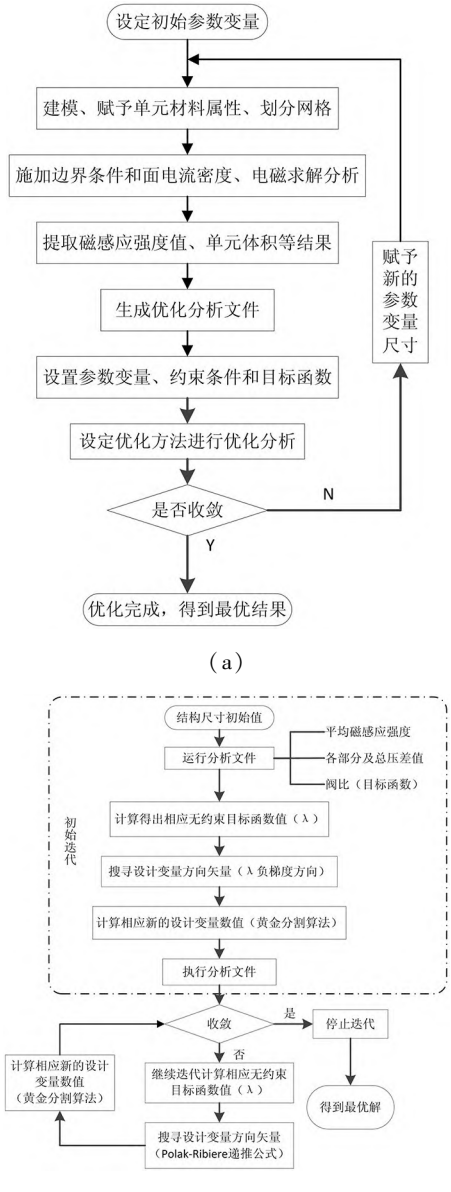


图 19　(a)零阶方法优化流程;(b)一阶方法优化流程

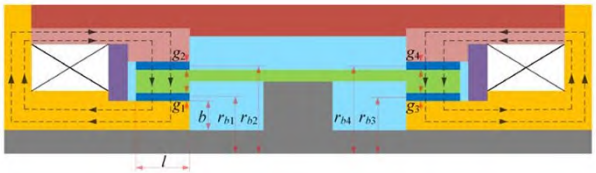
Fig. 19　(a) Zero-order method optimization process; (b) First-order method optimization process

2.3　基于智能算法的参数优化

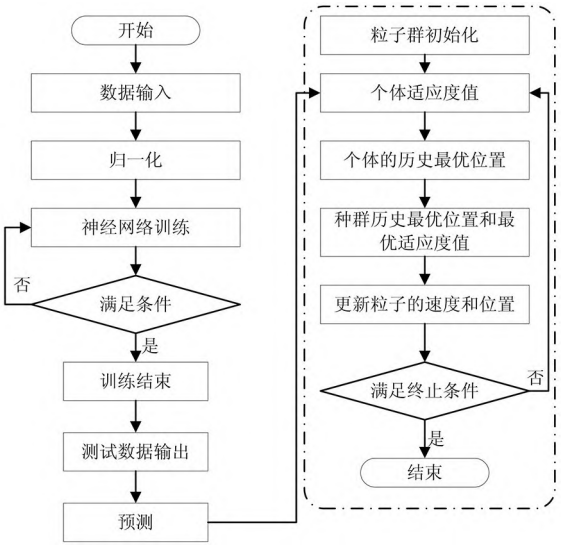
在处理复杂的非线性优化问题时,智能算法表现优越,有较好的鲁棒性。Dong 等[38]以输出阻尼力、可调范围、响应时间和磁通密度为优化目标,采用遗传算法对桥梁减振磁流变阻尼器的几何尺寸进行优化。Gao 等[39]利用粒子群算法对阻尼器的结构进行优化,试验结果表明,优化后的磁流变液阻尼器的能耗和重量分别降低了 1.34 J 和 0.2 kg。

Hu 等[40]以输出阻尼力和动态可调范围为目标函数,设计变量为图 20a 中的下轭厚度 b、轴向流道长度 l、内阻尼隙 g1 和外阻尼隙 g2,采用粒子群算法进行优化,在优化时,作者为了能适用更多的工况,对这两个目标函数设置不同的权重系数,转化为单目标优化问题。同时利用 BP 神经网络预测对粒子群算法进行适应性评价。该组合优化方法流程如

图 20b,通过有限元仿真和实验比较证实了优化方法的可行性。



(a)



(b)

图 20 (a)参数示意图[40];(b)优化流程图

Fig. 20 (a) Schematic diagram of the parameters [40]; (b) Optimization flow chart

3 总结

作为一种较为先进的半主动控制装置,磁流变阻尼器应用越来越广泛,为了得到适用于不同场景的阻尼器,优化问题十分重要。本文重点对以下两个方面进行了总结,为以后的磁流变阻尼器的优化提供了一定的参考。

(1)活塞、阻尼通道和线圈是磁流变阻尼器中关键的部分,直接影响阻尼力大小、动态响应范围、阻尼力响应时间等性能。因此需要对活塞、阻尼通道和线圈进行综合优化设计,才能适应不同工作场景的性能需要。

(2)参数优化是获得磁流变阻尼器最佳性能的关键工作,本文对关键优化目标进行阐述,对常用的参数优化方法进行了分析和总结。目前智能算法发展迅速,优化结果比传统优化方法更为准确。因此,进行参数优化时应该探索更多智能优化设计方法,寻找计算更稳定,计算速度更快的新型算法。

参考文献:

[1]张红辉,廖昌荣,陈伟民,等. 磁流变阻尼器磁路设计及磁饱和有限元分析[J]. 功能材料与器件学报,2004,(4):493-497.

[2]胡国良,刘前结,李 刚,等. 磁流变阻尼器参数对车辆悬架减振效果的影响[J]. 机械科学与技术,2018,(6):930-936.

[3]郭晓婧,赵 军,张香成,等. 外置磁流变阻尼器高强筋材混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. 建筑结构,2021,(12):79-86.

[4]Xu Y W, Xu Z D, Guo Y Q, et al. A programmable pseudo negative stiffness control device and its role in stay cable vibration control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 173: 109054.

[5]Fu Q, Wang D H, Xu L, et al. A magnetorheological damper-based prosthetic knee (MRPK) and sliding mode tracking control method for an MRPK-based lower limb prosthesis[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(4): 045030.

[6]Zhu X, Jing X, Cheng L. Magnetorheological fluid dampers: a review on structure design and analysis[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2012, 23(8): 839-873.

[7]邓志党,高 峰,刘献栋,等. 磁流变阻尼器力学模型的研究现状[J]. 振动与冲击,2006,(3):121-126.

[8]胡 铂. 基于磁流变阻尼器的半主动悬架控制策略研究[D]. 浙江大学,2017.

[9]Aziz M A, Aminossadati S M. State-of-the-art developments of bypass Magnetorheological (MR) dampers: A review[J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2021, 33(3): 225-249.

[10]Sung K G, Choi S B, Lee H G, et al. Performance comparison of MR dampers with three different working modes: shear, flow and mixed mode[J]. Electrorheological Fluids And Magnetorheo-logical Suspensions, 2005: 645-651.

[11]Yazid II M, Mazlan S A, Kikuchi T, et al. Design of magnetorheological damper with a combination of shear and squeeze modes[J]. Materials and Design, 2014, 54: 87-95.

[12]Gołdasz J, Sapiński B. Magnetostatic analysis of a pinch mode magnetorheological valve[J]. acta mechanica et automatica, 2017, 11(3).

[13]Hu G, Liu F, Xie Z, et al. Design, analysis, and experi-

mental evaluation of a double coil magnetorheological fluid damper[J]. Shock and Vibration, 2016.

[14]Khan M S A, Suresh A, Ramaiah N S. Analysis of magnetorheological fluid damper with various piston profiles[J]. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2012, 2(2): 77-83.

[15]Liu G, Gao F, Liao W H. Design and optimization of a magnetorheological damper based on B-spline curves[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 178: 109279.

[16]Sohn J W, Oh J S, Choi S B. Design and novel type of a magnetorheological damper featuring piston bypass hole [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(3): 035013.

[17]彭志召,张进秋,岳　杰,等.具有并联常通孔的磁流变阻尼器设计与分析[J].机械工程学报,2015,(8):172-177.

[18]Bai XX, Hu W, Wereley N M. Magnetorheo-logical damper utilizing an inner bypass for ground vehicle suspensions[J]. IEEE Trans-actions on Magnetics, 2013, 49(7): 3422-3425.

[19]Bai XX, Wang D H, Fu H. Principle, modeling, and testing of an annular-radial-duct magnetorheological damper [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201: 302-309.

[20]胡国良,邓英俊,冯海波,等.内置磁流变阀对磁流变阻尼器动力性能的影响[J].交通运输工程学报,2021,(3):289-299.

[21]Imaduddin F, Mazlan S A, Idris M H, 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.

[22]GUO, Chaoyang, et al. Twin-tube-and bypass-containing magneto-rheological damper for use in railway vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229.1: 48-57.

[23]Idris M H,Imaduddin F, Mazlan S A, et al. A concentric design of a bypass magnetorheo-logical fluid damper with a serpentine flux valve[C].//Actuators. MDPI, 2020, 9(1): 16.

[24]Zheng J, Li Y, Wang J. Design and multi-physics optimization of a novel magnetorheological damper with a variable resistance gap[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(17): 3152-3168.

[25]Hu G, Long M, Yu L, et al. Design and performance evaluation of a novel magnetorheo-logical valve with a tunable resistance gap[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(12): 127001.

[26]左　强,黄鑫芳,易　锋,等.阻尼间隙可调式磁流变阻尼器设计与动力性能实验[J].农业机械学报,2022,(1):431-440.

[27]Yang Y, Xu Z D, Guo Y Q, et al. Performance tests and microstructure-based sigmoid model for a three-coil magnetorheological damper[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021,28,(11): e2819.

[28]Zheng J, Li Z, Koo J H, et al. Magnetic circuit design andmultiphysics analysis of a novel MR damper for applications under high velocity[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 402501.

[29]Cruze D, Gladston H, Farsangi E N, et al. Development of a multiple coil magneto-rheological smart damper to improve the seismic resilience of building structures[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2020, 14(1)

[30]贾　双,邢海军,杨绍普.新型结构磁流变阻尼器的设计与实验[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2016,(2):83-87.

[31]胡国良,陈　苗,喻理梵,等.多段轴向液流阻尼通道磁流变阻尼器优化设计[J].磁性材料及器件,2021,(1):21-27.

[32]金京设,陈照波,程　明,等.改进阻尼特性的内置平行双线圈磁流变阻尼器研究[J].农业机械学报,2017,(3):368-375.

[33]冯志敏,伍广彬,张　刚.磁流变阻尼器设计与性能试验[J].农业机械学报,2012,(12):33-38.

[34]Olivier M, Sohn J W. Design and geometric parameter optimization of hybridmagnetorheo-logical fluid damper[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, (7): 2953-2960.

[35]董致臻,冯志敏,侯振宁.内置永磁体的磁流变阻尼器多目标优化设计方法[J].机械科学与技术,2019,(9):1429-1436.

[36]Parlak Z, Engin T, Şahin İ. Optimal magnetorheological damper configuration using the Taguchi experimental design method[J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(8).

[37]王巍然,祝世兴,倪卫国.基于 APDL 的磁流变阻尼器磁路结构的优化设计[J].机床与液压,2016,(21):62-66.

[38]Dong Z, Feng Z, Chen Y, et al. Design andmultiobjective optimization of magnetorheological damper considering the

consistency of magnetic flux density[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020.

[39] Gao F, Liu Y N, Liao W H. Optimal design of a magnetorheological damper used in smart prosthetic knees[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(3): 035034.

[40] Hu G, Qi H, Chen M, et al. Optimal design of magnetorheological damper with multiple axial fluid flow channels using BP neural network and particle swarm optimization methodologies[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2021, 67(3): 339-360.