

文章编号:1005-0523(2020)05-0001-08

# 磁流变制动器结构设计研究现状分析

胡国良,吴礼繁

(华东交通大学机电与车辆工程学院,江西 南昌 330013)

**摘要:**磁流变制动器作为一种新型的半主动制动器,目前已被广泛应用于各种制动场合。文章中阐述了磁流变制动器的基本工作原理,且针对磁流变制动器的单位体积可传递制动转矩较小和工作时散热问题,围绕国内外现有的典型磁流变制动器结构,对其结构改进进行了适当的分析。同时在结构改进的基础上,探讨了一些不同的结构优化方法。最后介绍了磁流变制动器部分领域的应用情况,以及未来发展所需解决的关键技术问题。

**关键词:**磁流变制动器;结构设计;优化;散热

**中图分类号:**U463.5 **文献标志码:**A

**本文引用格式:**胡国良,吴礼繁.磁流变制动器结构设计研究现状分析[J].华东交通大学学报,2020,37(5):1-8.

**Citation format:**HU G L,WU L F. Review on structure design of magnetorheological brake [J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(5):1-8.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.001

传统的制动器主要采用零件之间的摩擦方式实现制动,其安全性较高,但摩擦制动存在着零件磨损大、工作寿命短以及噪声大等缺点,比较难实现较高平稳性和制动可控性的制动要求<sup>[1-3]</sup>。磁流变制动器利用磁流变液独特的流变特性来实现运动部件的可控柔性制动,其制动性能可控、能耗低、响应较为迅速,便于集成新型控制技术<sup>[4-7]</sup>。其通过控制励磁电流产生可控的制动转矩来代替传统的机械式摩擦制动,不再需要传统制动系统的机械传动结构,因此能够减少机械传动耗时所导致的制动延时问题,更好地保证了制动的安全性。磁流变制动器在医疗器械、公共设施、汽车制动等方面具有较好的应用前景<sup>[8-9]</sup>。根据制动盘的结构特点,主要分为盘式和鼓式磁流变制动器<sup>[10]</sup>。国内外的学者对磁流变液的流变性质和磁流变制动器做了大量的实验研究,但受应用场合的空间限制以及磁流变液本身特性影响<sup>[11]</sup>,磁流变制动器应用于较大功率的制动时,常常会出现制动转矩不足的问题,因此磁流变制动器的结构设计是影响制动性能的一个重要环节<sup>[12-15]</sup>。同时磁流变制动器在工作时产生的热量会对磁流变液的流变特性有较大的影响,解决制动器工作时的温升问题成为了目前研究的一个重要方向<sup>[16]</sup>。

## 1 磁流变制动器的工作原理

图1所示为典型的磁流变制动器的结构示意图。磁流变制动器主要由励磁线圈、转轴、制动盘及缸筒等组成<sup>[17]</sup>。当磁流变制动器中励磁线圈未通电时,磁流变液以牛顿流体状态填充在有效阻尼间隙处,其自身零场粘度相对较小,提供磁流变制动器基础的制动转矩。当磁流变制动器中励磁线圈通电时,由于电流的磁效应,制动器阻尼间隙处产生感应磁场,在磁场的作用下,磁流变液中的磁性颗粒沿磁场方向迅速形成链状结构,使其从牛顿流体转变为类固体状态,制动器中磁流变液粘度增加<sup>[18]</sup>,且随磁场强度的增加而增大,从而提供制动所需的转矩。通过调节输入电流的大小,进而控制磁流变制动器的转矩大小,可实现对制动转矩的无级调节。由于磁流变制动器的工作特性,且为了避免其结构过于复杂,通常采用剪切模式作为磁流变液的工作模式。

收稿日期:2020-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51765016)

作者简介:胡国良(1973—),男,教授,博士生导师,研究方向为磁流变智能器件及结构、流体传动及控制研究。E-mail:glhu2006@163.com。

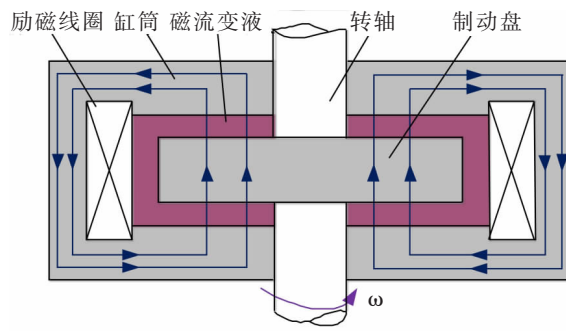


图1 磁流变制动器结构示意图

Fig.1 Structural diagram of MR brake

## 2 磁流变制动器的结构设计

从磁流变制动器本身设计结构考虑,增加其制动性能主要有两种方式,一是增加有效阻尼间隙处的磁感应强度;二是增加有效阻尼通道的长度。增加有效阻尼间隙处的磁感应强度主要通过对其激励方式进行优化,如增加励磁线圈个数或采用电磁双激励等工作方式;增加有效阻尼通道长度可以通过对制动鼓或制动盘进行结构及数量的改进,达到增加制动性能的目的<sup>[19-20]</sup>。

### 2.1 激励方式的改进设计

为了获得更好的制动性能,Kikuchi T和 Kobayashi K<sup>[21]</sup>设计了一种双线圈鼓式磁流变制动器,该制动器磁路的外轭包含有2个励磁线圈,2个励磁线圈轴向排列,使每个线圈内的电流方向相反,可以达到制动器内磁感应强度的最大化。在零电流工况时的转矩约为 $1.0 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,其主要由磁流变液自身粘度以及油封的摩擦而产生。当输入电流为 $1.0 \text{ A}$ 时,该制动器的最大转矩约为 $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,最大功率为 $6.1 \text{ W}$ ,功耗值低于常规的磁流变制动器,达到了节能减耗的目的。

Shiao Y和 Nguyen Q<sup>[22]</sup>提出了一种新的多磁极磁流变制动器,其结构原理图如图2所示。采用常规的单一环形磁极磁流变制动器,最大转矩值相对不高,其中一个主要原因是由于线圈的尺寸约束,液流通道内的磁场强度不够大。多磁极式磁流变制动设计特点是采用多个励磁线圈均匀布置,从而产生多个磁极,且相邻线圈产生的磁极方向相反,转子表面的磁感线得到了充分的利用。结果表明,磁流变液的有效阻尼间隙处的磁感应强度有较大的增加,制动转矩得到显著提高。

如图3所示,Yu等<sup>[23]</sup>提出了一种多磁路的磁流变制动器。6对线圈均匀分布在制动器的两侧,产生高强度的磁场。通过快速改变励磁线圈的电流方向来改变磁场,实现制动状态和非制动状态的快速转换。与切断电流实现零制动转矩状态不同,该设计有效地减少了制动器中的磁滞现象。该制动器的创新之处在于其利用了有限的磁场,制动性能在一定程度上得到了提升;另一方面因为有效避免了磁滞现象,非制动状态转换的响应时间也得到了缩短。

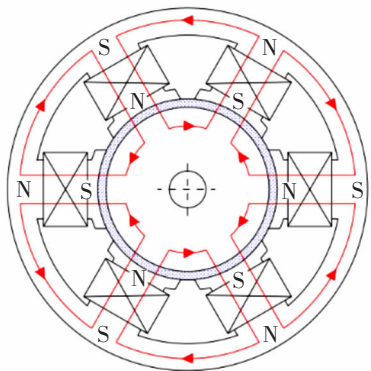


图2 多磁极磁流变制动器原理图

Fig.2 Schematic diagram of multiple MR brake

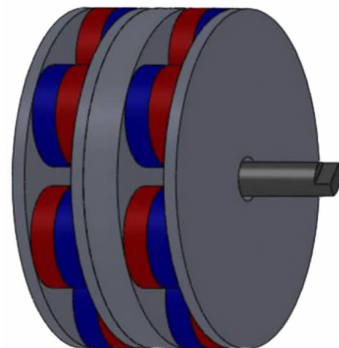


图3 多磁路磁流变制动器

Fig.3 MR brake with multiple magnetic circuit

在大多数工况下,粘滞转矩导致的巨大能量损失是磁流变制动器在实际应用中主要存在的问题。Shamieh H 和 Sedaghati R<sup>[24]</sup>提出了如图 4 所示的一种用于汽车的新型磁流变制动器设计方案,该方案通过在制动器内设置永磁体,使得其在外无加磁场的情况下几乎不产生粘滞转矩。所提出的磁流变制动器采用永磁体来将磁流变液与阻尼间隙完全分离,因此在没有应用磁场的情况下不会产生粘滞转矩,使其更适用于汽车的应用。研究表明,无论道路状况如何,与传统的液压制动器和传统的磁流变制动器相比,该磁流变制动器提供了良好的制动转矩能力,没有剩余粘滞转矩产生,而且效率提高了约 40%。

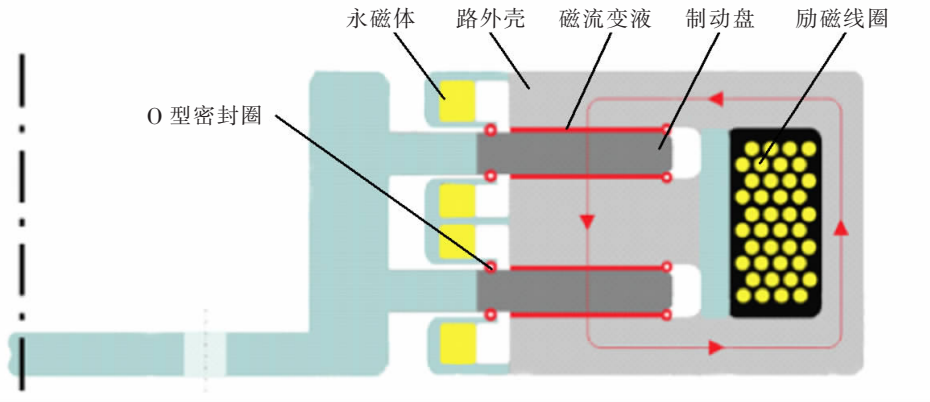


图 4 零粘滞磁流变制动器原理图  
Fig.4 Schematic diagram of MR brake with no zero-field viscous torque

### 2.2 液流通道的改进设计

传统的磁流变制动器一般为单鼓或单盘式,其结构相对较简单,但输出的制动转矩相对较小<sup>[25]</sup>。因此 Qin H 等<sup>[26]</sup>设计了一种如图 5 所示的新型的中空多鼓式磁流变制动器来解决实际应用的磁滞问题,将微电机置于制动器内部,使其结构紧凑,且多鼓式结构增加了有效阻尼间隙长度。制动器直径为 40 mm,长为 28 mm,其产生的最大扭矩达到 1.26 N·m。通过闭环控制,利用微电机 PID 控制器使得微电机产生补偿转矩,混合式制动器的转矩曲线中没有明显的滞回。前后转矩的最大差值从总转矩范围的 7.2%降低到 1.94%,动态范围从 41.17 dB 增加到 45.42 dB。实验结果表明,与普通磁流变制动器相比,该混合式制动器在有限的体积下能够产生更大的制动转矩,且有效地减小了转矩的滞回现象。

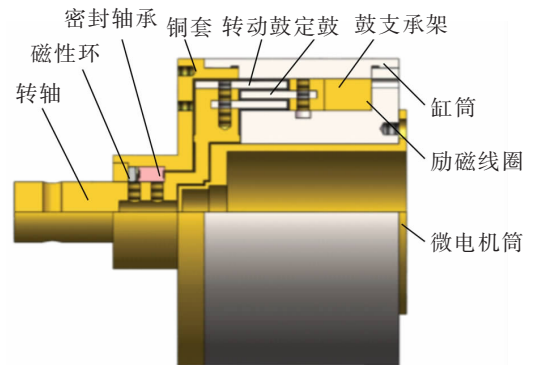


图 5 中空多鼓式磁流变制动器  
Fig.5 Hollowed multi-drum type MR brake

Wang S 等<sup>[27]</sup>提出的多鼓式磁流变制动器能够很好的解决制动器内空间利用率不高的问题,常规的电磁线圈的放置方式有内置、外置和侧置 3 种,其中侧置结构型式更紧凑,扭矩传递效率高。图 6 所示为一种侧面安装电磁线圈、左右对称结构的多鼓式磁流变制动器,一共有 16 个制动鼓,18 个有效阻尼间隙,当线圈通电时,制动器能够获得更大的制动转矩。

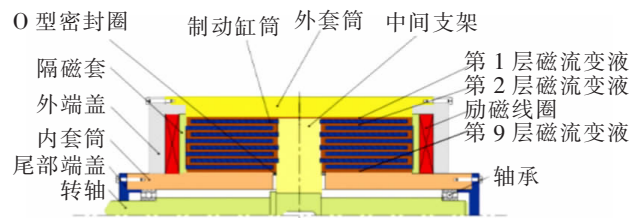


图 6 多鼓式磁流变制动器  
Fig.6 Multi-drum MR brake

在相同激励条件下,多鼓式磁流变制动器有效阻尼间隙处的磁通密度分布不均匀,每个液流通道处都有不同的磁感应强度和剪切面积。因此,优化制动鼓的数量是多鼓式磁流变制动器设

计中需要考虑的重要参数。Qin H 等<sup>[28]</sup>根据优化制动鼓的数量,对制动器进行了有限元分析,对给定鼓数和优化阻尼间隙选择条件下的制动器进行了优化。过多的制动鼓会使得制动器的结构更加复杂,且体积会过大,结果表明,3个制动鼓对制动性能的提升最大。

Mousavi S H 和 Sayyaadi H 等<sup>[29]</sup>提出了一种 T 形鼓磁流变制动器,T 形鼓的设计使得制动器在有限的体积下,获得了更多的有效剪切区域,且在 T 形鼓的左右两端各设置一个励磁线圈,增加了有效阻尼间隙处的磁感应强度。

为了研究阻尼间隙对制动性能的影响,Song W 等<sup>[30]</sup>设计了一种阻尼间隙可调的磁流变制动器。通过改变转轴和制动盘的相对位置,从而调节阻尼间隙的尺寸。实验结果表明,当阻尼间隙尺寸在 0.25~1 mm 范围内变化时,对制动器制动性能的影响较大,因此阻尼间隙的尺寸应该尽量根据实际工作要求在此范围内进行适当的选取;且阻尼间隙可调的设计也有效地增加了制动转矩的可调范围,使其更加适用于各种变化的工况。

如图 7 所示,胡国良等<sup>[31]</sup>提出的多液流通道旋转式磁流变制动器,将隔磁材料应用到旋转套筒中间位置,从而使得磁力线通过未被利用到的外轴向液流通道部分,制动器发生磁流变效应的区域增加了,且有效阻尼间隙从传统磁流变制动器的 2 段变为 4 段。实验结果表明其制动性能较常规液流通道制动器得到良好的改善。

### 2.3 针对散热问题的结构改进设计

在制动过程中,制动器中活动部件间的摩擦、磁流变液中磁性颗粒的摩擦、通电线圈的发热都会导致制动器的温度上升,从而使得其基液有一定蒸发,粘度下降以及磁性颗粒出现沉淀,导致磁流变制动器工作失效。制动过程产生的热量成为目前影响磁流变制动器制动性能的主要因素<sup>[32-33]</sup>。

为了研究温度对磁流变制动器制动性能的影响,Wang N 等<sup>[34]</sup>设计了一种水冷散热的大转矩磁流变液制动器。实验结果表明,较大的冷却水流量可以提高磁流变液的冷却速率,通过水冷散热方法可以有效的减少制动器温升对制动性能的影响。因此,有效的冷却方法对大转矩磁流变制动器的稳定运行至关重要,极大地提高制动器的制动性能。

Huang H 等<sup>[35]</sup>设计了一种具有自保护和散热功能的磁流变制动器。磁流变制动器采用永磁体系统,不仅能与励磁线圈形成双磁场,在正常运行状态下提高制动转矩,还能在断电时提供一定的保护制动力矩。此外,在磁流变制动器的制动轴上还设计了冷却通道,以保证磁流变液的有效散热。

## 3 磁流变制动器的优化设计

磁流变制动器的性能指标主要有制动转矩、转矩可调系数、响应速度和质量等<sup>[36-37]</sup>。而其性能指标的优劣主要受制动器的尺寸参数影响。对磁流变制动器进行结构的改进在一定程度上提高了制动性能,但通过激励方式以及液流通道改进的同时,其复杂的结构使得加工制造的难度更大,一定程度上增加了制造成本,且活动构件的数量随之增加,导致制动器整体体积增大<sup>[38-40]</sup>。

因此在结构设计的基础上合理的采用优化算法对磁流变制动器进行尺寸优化,不仅能够改善其制动性能,且能有效地提高磁路的利用率以减小制动器的整体体积,使其结构更加紧凑<sup>[41-42]</sup>。

胡国良和李林森<sup>[43]</sup>提出的利用 ANSYS 软件中的一阶优化方法对磁流变制动器进行结构优化,采用线性加权组合法将制动转矩和转矩可调系数构成目标函数,实现多目标优化。其优化设计如图 8 所示,结果表明,优化后的制动器体积更小,制动性能提升了 34.6%。

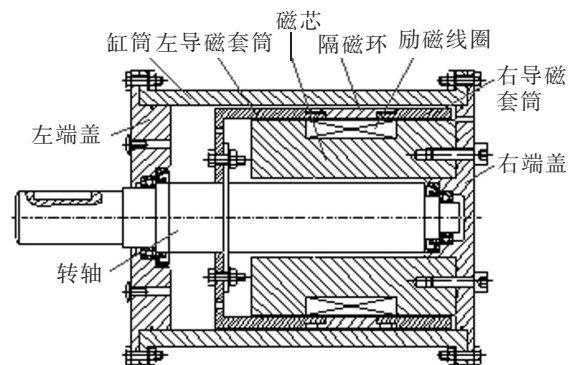


图 7 多液流通道旋转式磁流变制动器结构图  
Fig.7 Structure diagram of rotary MR brake with multiple fluid flow channels

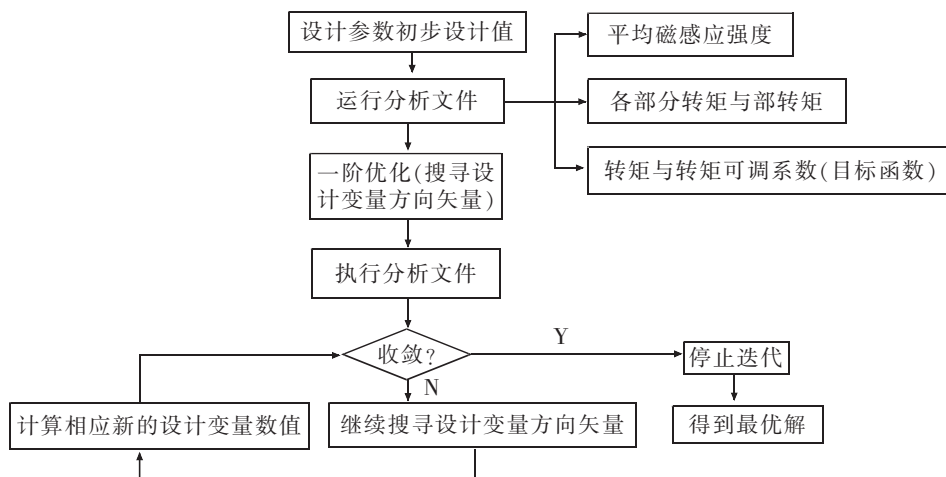


图 8 优化设计流程图

Fig.8 Flowchart of optimization design

Assadsangabi B 等<sup>[44]</sup>利用遗传算法对汽车用盘式磁流变制动器进行了结构优化。通过有限元软件分析了磁流变制动器内部的磁场强度分布,然后利用该制动器的有限元模型进行优化,并结合遗传算法获得最优设计参数。优化目标是在尽可能降低制动器重量的同时增加制动器的制动转矩性能。与初始设计相比,优化设计的制动转矩更大。

在对磁流变制动器进行优化时,由于优化目标的非单一性,且其都需要通过 ANSYS 软件进行仿真,因此优化过程比较费时。曾宁<sup>[45]</sup>提出了一种基于 RBF(radial basis function)网络代理模型的磁流变制动器的优化方法,以改进制动器的性能并提高优化求解的效率。将制动转矩与制动器质量作为优化目标,利用拉丁超立方采样方法构建了源函数的 RBF 网络代理模型,最后通过多目标遗传算法对其进行优化。该方法很好地解决了制动器的优化问题,且提出的优化方法在提高计算精度的同时,保证了求解的效率。

近年来,随着优化理论不断发展,粒子群优化算法也被广泛用于解决各类优化问题<sup>[46]</sup>。Topcu O 等<sup>[47]</sup>针对旋转式磁流变制动器提出了一种改进的粒子群算法来解决多物理场工程优化问题。与传统粒子群算法不同的是,其将原始的单一种群分成多个次种群,求解速度较快。仿真结果表明,改进的粒子群算法在提高精度的同时,克服了多物理场计算量大的问题,优化后的制动器体积更小。

Thanikachalam J 和 Nagaraj P<sup>[48]</sup>提出一种基于实验设计的磁流变制动器的优化设计方法,将几组待优化变量各取不同的值,组合成 9 种不同尺寸参数的磁流变制动器。如表 1 所示为其结构参数表,通过 COMSOL 软件对制动器进行仿真,最终得出最优参数为制动盘半径 70 mm,线圈匝数 300 匝,电流 2 A。

表 1 制动器结构参数表

Tab.1 Structure parameter of brake

序号	制动盘半径/mm	线圈匝数/匝	电流/A
1	65	100	1
2	65	200	1.5
3	65	300	2
4	70	100	1
5	70	200	1.5
6	70	300	2
7	75	100	1
8	75	200	1.5
9	75	300	2

## 4 磁流变制动器的应用

磁流变制动器以其独特的工作特性,越来越被广泛应用于各个领域,在医疗器械、汽车制动、公共设施等方面具有良好的应用前景。Adiputra D 等<sup>[49]</sup>设计了一种用于矫正站姿的脚踝辅助装置,集成磁流变制动器的设计使得矫正康复设备更加便携稳定,利用被动控制使得该装置能够针对不同患者的步态习惯更好的辅助康复。王道明等<sup>[50]</sup>设计的一种用于汽车制动的多盘式磁流变制动器,其制动性能稳定可控,且工作噪音小。陈凯峰<sup>[51]</sup>设计了一种用于电梯制动的磁流变制动器,基于磁流变效应并结合了永磁铁的制动,使得其更加适用于拽引式电梯,在突发断电情况下能够保证了电梯的安全性。目前,磁流变制动器被应用于汽车制动的研究较为普遍,但磁流变制动器大多数尚处于理论和实验的阶段,仍存在一些待解决的问题,如单位体积输出转矩的不足,工作时内部温升而导致的制动性能下降,这些问题成为了当前制约磁流变制动器推广发展的主要因素。国内外学者正在不断研究改善,使得磁流变制动器能够逐渐替代常规液压或机械式制动器,应用于更多的工作场合。

## 5 结束语

磁流变制动器是一种被广泛应用于各类制动的智能设备。文中对近年来国内外现有的磁流变制动器设计研究进行了综合分析,重点介绍了不同的结构设计以及优化方法对磁流变制动器性能的提升。当前的磁流变制动器因其结构紧凑、能耗低、可控性强,比较适用于中低转矩制动场合,但对于需要提供大转矩的工作环境,磁流变制动器尚不能较好的满足工作要求,同时对于需要持续工作的制动场合,自身的发热问题也会影响其制动性能。因此磁流变制动器的结构设计是影响制动性能的关键环节,本文对其结构及优化问题的探讨为磁流变制动器的设计提供了一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] GEORGE L K, TAMILARASAN N, THIRUMALINI S. Design and analysis of magneto rheological fluid brake for an all terrain vehicle[J]. *Materials Science and Engineering*, 2018, 310(1): 1-6.
- [2] PATIL S R, POWAR K P, SAWANT S M. Thermal analysis of magnetorheological brake for automotive application[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 98: 238-245.
- [3] KUMBHAR B K, PATIL S V, PATIL S R, et al. Fault tree analysis of magnetorheological brake [J]. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2015, 4(1): 202-215.
- [4] QIN H, SONG A, ZENG X, et al. Design and evaluation of a small-scale multi-drum magnetorheological brake[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 29(12): 2607-2618.
- [5] LYDIA R S, MOKHTAR R, HUSAINI A B M, et al. Design and development of coil casing MRF brake system[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2017, 90: 1-7.
- [6] WU J, HU H, LI Q, et al. Simulation and experimental investigation of a multi-pole multi-layer magnetorheological brake with superimposed magnetic fields[J]. *Mechatronics*, 2020, 65: 102314-102325.
- [7] 单慧勇, 杨延荣, 卫勇. 圆盘型磁流变制动器的理论设计与探讨[J]. *机床与液压*, 2006(4): 53-55.
- [8] LI S, MENG W, WANG Y. Numerical and experimental studies on a novel magneto-rheological fluid brake based on fluid-solid coupling[J]. *Science progress*, 2020, 103(1): 1-33.
- [9] PARK E J, LUZ L F D, SULEMAN A. Multidisciplinary design optimization of an automotive magnetorheological brake design[J]. *Computers and Structures*, 2007, 86(3): 207-216.
- [10] 李志华, 喻军, 曾宁, 等. 圆盘式磁流变制动器仿真优化设计[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 364-369.
- [11] WANG H, BI C. Study of a magnetorheological brake under compression-shear mode[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(1): 17001.
- [12] DAI J, CHANG H, ZHAO R, et al. Investigation of the relationship among the microstructure, rheological properties of MR grease and the speed reduction performance of a rotary micro-brake[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 116: 741-750.

- [13] STRECKER Z, KUBIK M, VITEK P, et al. Structured magnetic circuit for magnetorheological damper made by selective laser melting technology[J]. *Smart materials and structures*, 2019, 28(5):55016.
- [14] NAM T H, AHN K K. A new structure of a magnetorheological brake with the waveform boundary of a rotary disk[J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(11):115029.
- [15] LIJESH K P, KUMAR D, GANGADHARAN K V. Design of magneto-rheological brake for optimum dimension[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(3):161.
- [16] SONG W, WANG S, CHOI S, et al. Thermal and tribological characteristics of a disc-type magnetorheological brake operated by the shear mode[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 30(5):722-733.
- [17] SUKHWANI V K, HIRANI H. Design, development, and performance evaluation of high-speed magnetorheological brakes[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part L*, 2008, 222(1):73-82.
- [18] KORDONSKY W I. Magnetorheological effect as a base of new devices and technologies[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1993, 122(1-3):395-398.
- [19] 倪晋尚. 电动汽车磁流变液制动器优化及制动特性研究[J]. *机械传动*, 2018, 42(10):29-34.
- [20] 沙树静, 张贺, 张和权. 双盘式磁流变制动器的结构设计和性能研究[J]. *机械设计与制造*, 2015(11):100-102.
- [21] KIKUCHI T, KOBAYASHI K. Design and development of cylindrical MR fluid brake with multi-coil structure[J]. *Journal of System Design and Dynamics*, 2011, 7(5):1471-1484.
- [22] SHIAO Y, NGUYEN Q. Development of a multi-pole magnetorheological brake[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(6):065008.
- [23] YU L, MA L, SONG J. Design, testing and analysis of a novel automotive magnetorheological braking system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2017, 231(10):1402-1413.
- [24] SHAMIEH H, SEDAGHATI R. Development, optimization, and control of a novel magnetorheological brake with no zero-field viscous torque for automotive applications[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 29(16):1-15.
- [25] 张贺. 磁流变制动器的结构设计与性能研究[D]. 长春:长春工业大学, 2016.
- [26] QIN H, SONG A, MO Y. A hybrid actuator with hollowed multi-drum magnetorheological brake and direct-current micromotor for hysteresis compensation[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30(7):1-12.
- [27] WANG S, SONG W, LI H, et al. Modeling and multi-field simulation analysis of a multi-cylindrical magneto-rheological brake[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, 57(4):399-414.
- [28] QIN H, SONG A, MO Y. Evaluation of a multi-drum magnetorheological brake via finite element analysis considering number of drums and fluid gap selection in optimization[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30(5):1-10.
- [29] MOUSAVI S H, SAYYAADI H. Optimization and testing of a new prototype hybrid MR brake with arc form surface as a prosthetic knee[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(3):1204-1214.
- [30] SONG W, LI D, TAO Y, et al. Simulation and experimentation of a magnetorheological brake with adjustable gap[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, 28(12):1614-1626.
- [31] 胡国良, 李林森, 喻理梵. 多液流通道旋转式磁流变制动器结构设计及特性分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11):420-426.
- [32] SHINDE V V, DESHMUKH B B. Thermal analysis of magneto-rheological brake for two wheelers[J]. *Techno-Societal*, 2018, 751-761.
- [33] 张玉鲁, 李兆松, 梁彬. 圆盘式磁流变液制动器的设计与磁场仿真[J]. *汽车工程学报*, 2018, 8(1):54-60.
- [34] WANG N, LIU X, KROLCZYK G, et al. Effect of temperature on the transmission characteristics of high-torque magnetorheological brakes[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(5):057002.
- [35] HUANG H, CHEN S, CHEN K. Novel magnetorheological brake with self-protection and water cooling for elevators[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32(5):1955-1964.
- [36] 严荣. 磁流变液刹车装置设计及性能研究[D]. 天津:中国民航大学, 2018.
- [37] 郑祥盘, 郭源帆, 唐晓腾, 等. 曳引电梯磁流变制动装置的多物理场耦合分析与试验[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(15):1821-1827.
- [38] NGUYEN Q H, CHOI S B. Optimal design of an automotive magnetorheological brake considering geometric dimensions and zero-field friction heat[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(11):115024.

- [39] 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.
- [40] NGUYEN Q H, CHOI S B. Optimal design of a novel hybrid MR brake for motorcycles considering axial and radial magnetic flux[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(5):55003–55012.
- [41] 孟文俊, 邬思敏, 李淑君, 等. 圆盘式磁流变制动器磁路多目标优化[J]. *机械设计与制造*, 2017(07):41–44.
- [42] 李志华, 林阳, 朱丰友, 等. 圆筒式磁流变制动器结构与磁路耦合的优化设计[J]. *工程设计学报*, 2009, 16(4):261–265.
- [43] 胡国良, 李林森. 多液流通道旋转式磁流变制动器结构设计及优化[J]. *现代制造工程*, 2019(12):145–153.
- [44] ASSADSANGABI B, DANESHMAND F, VAHDATI N, et al. Optimization and design of disk-type mr brakes[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2011:921–932.
- [45] 曾宁. 基于 RBF 网络代理模型的磁流变制动器优化设计[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2016.
- [46] 黄江平, 程绍榕. 改进粒子群算法的轨道列车节能控制优化[J]. *华东交通大学学报*, 2020, 37(2):56–63.
- [47] TOPCU O, TASCIOGLU Y, KONUKSEVEN E L. Design and multi-physics optimization of rotary MRF brakes[J]. *Results in Physics*, 2018, 8:805–818.
- [48] THANIKACHALAM J, NAGARAJ P. Optimised design for magnetorheological brake using DOE methods[J]. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2015, 4(11):394–406.
- [49] ADIPUTRA D, RAHMAN M A A, MAZLAN S A, et al. Control reference parameter for stance assistance using a passive controlled ankle foot orthosis—a preliminary study[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(20):4416.
- [50] 王道明, 姚兰, 邵文彬, 等. 汽车磁流变液制动器温度特性仿真与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(6):100–107.
- [51] 陈凯峰. 带有自保护和散热的磁流变电梯制动装置研究[D]. 福州:福州大学, 2017.

## Review on Structure Design of Magnetorheological Brake

Hu Guoliang, Wu Lifan

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** As a new type of semi-active controller, magnetorheological (MR) brake has been widely used in various braking occasions. In this paper, the working principle of the MR brake was described, and the improvement of the typical MR brake structure was analyzed in order to solve the problems of small braking torque and heat dissipation during operation. At the same time, on the basis of structural improvement, some different optimization methods were discussed. Finally, partial applications and future development issues of MR brake were introduced. The relevant analysis and conclusions can provide certain reference for the design of MR brake.

**Key words:** MR brake; structure design; optimization; heat dissipation