

三工作面旋转式磁流变阻尼器设计与实验*

李军强 王娟 刘今越 陈贵亮

(河北工业大学机械工程学院, 天津 300130)

摘要: 设计了一种具有3个工作面新型结构的旋转式磁流变阻尼器, 转子2个端面 and 圆柱面均为工作面, 在不增大转子体积的情况下, 有效增加了转子工作面积。基于磁流变液与磁芯材料特性, 对阻尼器进行了磁路设计, 获得了阻尼器的相关机械参数与电气参数。针对阻尼器结构特点, 应用有限元法, 建立了磁流变阻尼器的有限元模型, 并对其进行了电磁场分析, 得到了阻尼器模型的电磁场物理量。结合有限元分析结果与磁流变液的本构关系, 对磁流变阻尼器的力学性能进行了仿真研究。在此基础上, 研制了磁流变阻尼器及其力学性能测试系统, 对阻尼器的力学性能进行了实验研究, 得到了阻尼器的力矩-转速力学特性以及屈服力矩-电流力学特性。

关键词: 磁流变阻尼器 磁路设计 有限元法 性能分析 实验

中图分类号: TH703.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0314-07

引言

磁流变阻尼器是一种优良的半主动控制器件, 具有阻尼力连续顺逆可调、响应快、温度稳定性好等优点, 在特种机器人、车辆悬挂系统、桥梁振动控制和高层建筑隔振等方面具有良好的应用前景^[1-5]。

磁流变阻尼器按其工作方式可分为直线式磁流变阻尼器和旋转式磁流变阻尼器。直线式磁流变阻尼器研究较早, 其结构设计、性能分析、力学模型的研究较为成熟^[6-8], 但是, 有些应用场合, 如康复机器人、变速与传动系统等, 要求阻尼器能够提供连续旋转的可控阻尼力矩, 因此, 旋转式磁流变阻尼器的研究具有重要的应用意义。

旋转式磁流变阻尼器的主体结构由定子和转子构成, 屈服应力可控的磁流变液填充于定子与转子之间的工作间隙内, 转子的工作面积是影响阻尼器性能的主要因素之一。目前, 旋转式磁流变阻尼器多以转子的2个端面作为工作面^[9-10], 此种结构的阻尼器通常具有较大的径向尺寸。有一些旋转式磁流变阻尼器以转子的圆柱面作为工作面^[11-12], 虽然增大转子轴向和径向尺寸均可增加阻尼器的输出力矩, 但是该种结构未能利用转子的端面。为了获得较大的阻尼力矩, 出现了多盘片式磁流变阻尼器^[13-14], 该阻尼器同样是利用转子的端面作为工作面, 工作时多个工作盘片的端面分别与定子相互作用, 以获得较大阻尼力矩。

本文设计旋转式磁流变阻尼器, 在提高阻尼器性能的同时, 使其具有较简单的结构。应用有限元法对阻尼器的性能进行仿真, 分析阻尼器的力学性能, 设计磁流变阻尼器及其力学性能测试系统, 通过实验研究获得阻尼器的屈服力矩-电流特性。

1 磁流变阻尼器结构

旋转式磁流变阻尼器由定子和转子构成, 磁力线经过定子和转子及定子和转子间的工作间隙, 构成一个封闭的回路。磁流变阻尼器的结构决定着阻尼器内磁力线的走向, 合理的阻尼器结构应使得工作面积大, 定子转子中的磁路短, 以减小磁芯上的磁动势。所设计的磁流变阻尼器结构如图1所示。

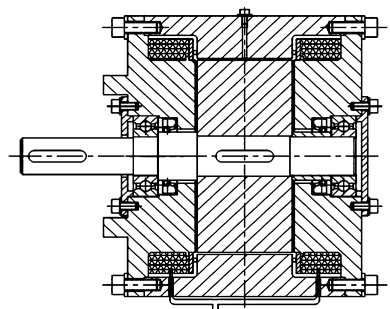


图1 磁流变阻尼器结构

Fig. 1 Magnetorheological damper structure

所设计的旋转式磁流变阻尼器包括转子、外壳、端盖、励磁线圈、密封圈、隔磁圈等部件, 端盖位于转子两侧, 端盖、外壳固连在一起构成定子, 定子与转

子间安装密封圈,磁流变液填充于定子与转子之间的空腔内,励磁线圈缠绕于端盖内,两组线圈产生相反方向的磁场,磁力线分布如图 2 所示,为了便于表达,半剖视图部分零件未画出剖面线。

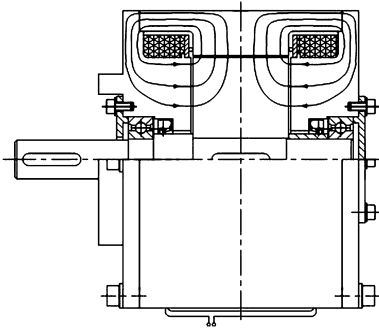


图 2 磁力线分布

Fig.2 Magnetic line of force distributing

该种结构使得转子的两个端面和圆柱面均为工作面,显著增大了阻尼器转子的工作面积,并且结构紧凑、构件简单,易于加工和装配。

2 磁路设计

2.1 磁流变液 Bingham 模型

磁流变液的特性是设计磁流变阻尼器的基础,由于磁流变效应的复杂性,目前还没有大家一致公认的数学计算模型,在磁流变液工程应用研究中,常用 Bingham 模型来描述其本构关系^[15],即

$$\begin{cases} \tau = \tau_y(H) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta(H)\dot{\gamma} & (\tau > \tau_y) \\ \dot{\gamma} = 0 & (\tau \leq \tau_y) \end{cases} \quad (1)$$

式中 τ_y ——磁流变液的屈服应力
 H ——磁场强度 η ——磁流变液粘度
 $\dot{\gamma}$ ——磁流变液的剪切应变率

由磁流变液的 Bingham 模型可知,阻尼器中工作区域内的磁流变液达到屈服状态以前,磁流变液保持凝固状态,屈服后开始流动。

2.2 阻尼器磁路设计

磁芯材料选用导磁率高,矫顽力低,退磁性能好的 DT4E 型电磁纯铁,根据材料手册提供的数据,采用插值的方法获得其基本磁化曲线。由电磁纯铁的磁化曲线可知,在磁感应强度大于 1.6 T 时,磁化曲线趋于平缓,所以选定 1.6 T 作为工作中磁芯的最大磁感应强度的初始设计值。

为了充分发挥磁流变液的性能,根据产品手册提供的磁流变液屈服特性曲线,在初始设计时,以 55 kPa 作为工作时磁流变液最大屈服应力的初始设计值,此时对应的磁场强度约为 160 kA/m,由磁流变液基本磁化曲线可知,此时对应的磁感应强度约为 0.85 T。

其他参数不变的情况下,较小的工作间隙可使工作区域内的磁流变液产生较大的磁感应强度,提供较大的屈服应力,考虑到加工安装等因素,工作间隙取 1.00 mm。图 3 为阻尼器各部位参数(为了便于表达,部分零件未画出剖面线),初始设计时 R_1 取 50.00 mm, l_1 取 23.00 mm。

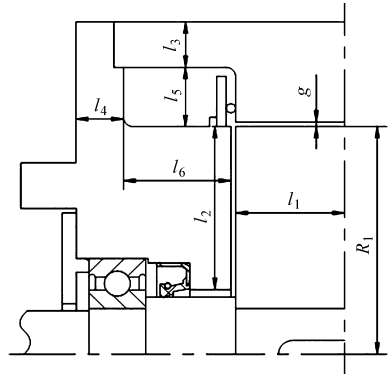


图 3 结构参数

Fig.3 Structure parameters

磁路中各处的磁通量相等,又 $\Phi = BS$,基于磁路欧姆定律,在进行磁路计算时遵循以下两个原则:①磁导特性相同的部位的磁通面积相同。②磁导特性不同的部位,磁通面积之比等于初始设计时该部位磁感应强度值之比的倒数。根据 2 个磁路计算原则以及磁流变阻尼器结构参数可得

$$\begin{cases} \frac{S_1}{S_3} = \frac{B_t}{\sigma B_y} \\ S_1 = S_2 \\ S_3 = S_4 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $S_1 = 2\pi R_1 l_1$ $S_4 = 2\pi R_1 l_4$
 $S_2 = \pi R_1^2 - \pi(R_1 - l_2)^2$
 $S_3 = \pi(R_1 + g + l_5 + l_3)^2 - \pi(R_1 + g + l_5)^2$

式中 B_t ——总磁通路中电磁纯铁的磁感应强度
 B_y ——工作区域磁流变液磁感应强度
 σ ——漏磁系数,初始设计时 σ 取 1.10

根据各段的 B 值,查材料的基本磁化曲线可求得各段 H 值,然后根据磁路第二定律和已知参数求得所需的磁通势,即

$$F = IN = \sum_{i=1}^6 H_i L_i \quad (3)$$

式中 N ——线圈匝数 I ——线圈中电流

求解时, l_5 和 l_6 取一初始值,待获得磁通势后,估算励磁线圈所需空间,然后修正 l_5 和 l_6 的取值,并对各参数重新进行求解,获得各参数最终值。考虑到阻尼器端盖与外壳安装时,螺钉所占用的空间对磁路的影响,对求解获得的 l_3 进行了适当的放大。

通过对磁流变阻尼器进行磁路设计,获得了阻

尼器的结构参数与电气参数,为阻尼器力学性能的有限元分析提供了基础数据。

3 有限元分析

初始设计时将工作区域的磁场强度近似为均匀,应用有限元法可以较准确地获得工作区域的磁场强度的分布情况。在此基础上,对磁流变阻尼器的性能进行分析,可以较准确地获得其性能,从而避免试制的浪费^[16]。

3.1 建模、加载与求解

应用 ANSYS 提供的参数化设计语言建立磁流变阻尼器的结构模型和有限元模型。阻尼器模型为轴对称模型,进行有限元分析时可简化为二维模型,在 ANSYS/EMAG 前处理模块中建立其结构模型,所建立的阻尼器结构模型如图 4 所示。

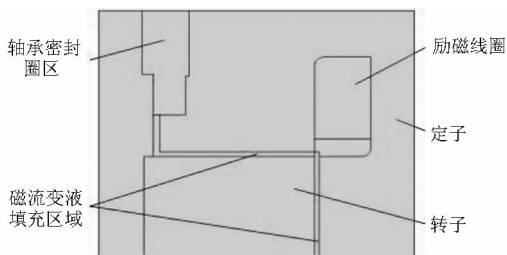


图 4 结构模型

Fig. 4 Structure model of damper

进行网格划分时,为了获得较精确的计算结果并提高运算速度,采用自定义网格划分方式,磁流变液模型采用较小单元,金属材料 and 线圈模型采用较大单元,获得的阻尼器有限元模型如图 5 所示。

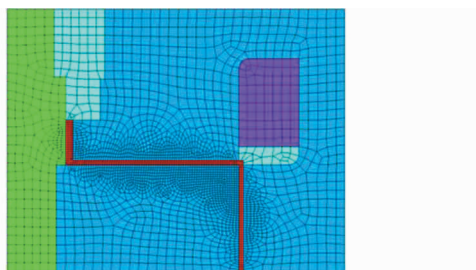


图 5 阻尼器有限元模型

Fig. 5 Finite element model of damper

根据模型对称性与内部磁力线走向,所建立模型的周边均为通量平行,所以模型外层节点均施加通量平行边界条件。使用 BFE 命令,对线圈加载电流密度。

求解后获得模型中磁力线分布如图 6 所示。由图 6 可知,应用有限元法获得的阻尼器内部磁力线分布与初始设计时设想的分布相一致。在 ANSYS/EMAG 后处理器中获得模型的磁感应强度分布,如图 7 所示。

由图 7 可知,阻尼器转子圆柱面与外壳间的磁

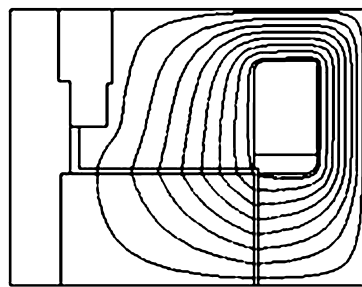


图 6 模型磁力线分布

Fig. 6 Magnetic line of force distributing of model

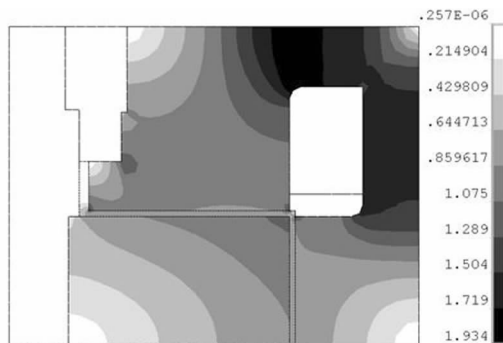


图 7 磁感应强度分布

Fig. 7 Magnetic induction intensity distributing

感应强度分布近似均匀,阻尼器端面与阻尼器端盖间的磁感应强度分布也近似均匀。此分析结果为阻尼器性能参数的获取提供了依据。

3.2 获取性能参数

磁流变阻尼器不同驱动电流作用下的屈服力矩是阻尼器的重要性能参数,漏磁系数也是评价磁流变阻尼器性能的指标之一,完成求解后,在 ANSYS/EMAG 后处理器中应用数值计算方法获得以上 2 参数。

首先,根据有限元分析结果、材料特性以及阻尼器机械结构参数得到阻尼器性能参数的计算模型,然后,在 ANSYS 的通用后处理器中,应用相应的计算模型获得阻尼器性能参数以及漏磁系数。

工作区域磁场强度是电流强度的函数,这一过程可由 ANSYS 进行数值模拟,得到工作区域磁场强度后,通过磁流变液本构关系可获得工作区域磁流变液屈服应力,而工作区域内的磁流变液为纯剪切工作模式,因此由磁流变液的屈服应力、磁流变阻尼器的工作面积以及工作半径可计算出阻尼器的屈服力矩。于是转子端面部分的屈服特性计算模型可描述为

$$\begin{cases} H = f(I) \\ \tau = -0.0015H^2 + 0.5765H + 0.8128 \\ T_1 = \int_{R_1}^{R_2} 2\pi r^2 \tau dr \end{cases} \quad (4)$$

式中 R_1 ——圆环面内径 R_2 ——圆环面外径

其中第 2 式为磁流变液本构关系,由产品手册获得。

磁流变阻尼器转子圆柱面部分屈服特性的计算模型可描述为

$$\begin{cases} H = f(I) \\ \tau = -0.0015H^2 + 0.5765H + 0.8128 \quad (5) \\ T_2 = \tau S(R'_1 + 0.5g) \end{cases}$$

式中 S ——工作区域有效截面积

R'_1 ——转子半径 g ——工作间隙

阻尼器中的漏磁定义为未通过工作面的磁通,漏磁系数为

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi} \quad (6)$$

式中 Φ_m ——总磁通 Φ ——主磁通

在模型的转子端面工作区域和转子圆柱面工作区域的中心位置定义路径 PATH1 和 PATH2,并在模型端盖处定义路径 PATH3,如图 8 所示。总磁通 Φ_m 为通过路径 PATH3 的磁通量,主磁通 Φ 取为通过 PATH1 和 PATH2 的磁通量的平均值。

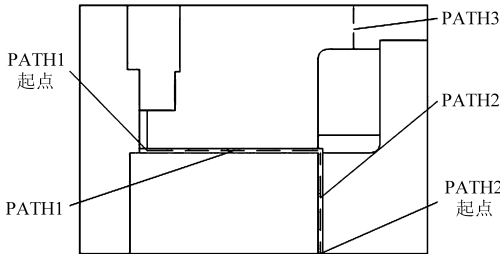


图 8 路径位置

Fig. 8 Paths position

将结果数据映射到路径上以后,获得磁场强度总量沿路径 PATH1 和 PATH2 的分布情况,如图 9 所示。

由图 9 可知,转子端面工作区域处的磁场强度总量沿路径分布近似均匀,获得磁场强度平均值后应用式(4)获得屈服力矩。转子圆柱面工作区域处的磁场强度总量沿路径分布也近似均匀,获得磁场强度平均值后应用式(5)获得屈服力矩。

求解漏磁系数 σ 时,应用 ANSYS 提供的宏命令 FLUXV 获得通过路径 PATH1、PATH2 和 PATH3 的磁通量,然后应用式(6)获得漏磁系数。

对磁流变阻尼器模型的励磁线圈施加不同数值的仿真电流,在 ANSYS 的通用后处理器中获得不同励磁电流下阻尼器的主要模型参数值,如表 1 所示。

由表 1 可知:随着励磁电流的增加,阻尼器屈服力矩随之逐渐增大,同时阻尼器的漏磁也略有增加,在驱动电流为 3 A 时,漏磁系数小于初始设计值,漏磁总量较小。

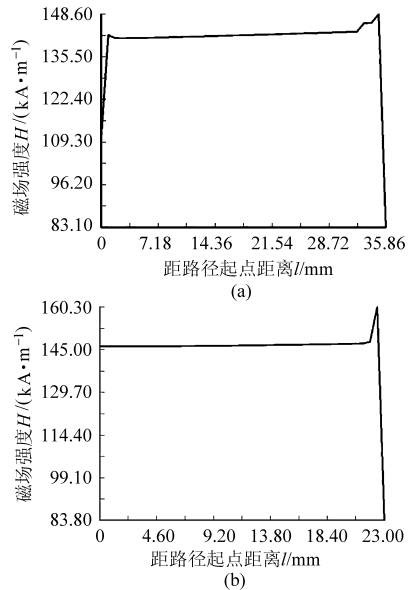


图 9 磁场强度沿路径的分布

Fig. 9 Magnetic intensity distributing along paths

- (a) 磁场强度沿路径 PATH1 的分布
- (b) 磁场强度沿路径 PATH2 的分布

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameter

参数	数值						
I/A	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$T/(N \cdot m)$	1.01	27.32	46.90	57.89	62.65	64.31	65.23
σ		1.06	1.06	1.07	1.07	1.07	1.07

根据磁流变液的 Bingham 模型可以得到阻尼器的力矩-转速关系式

$$T = -T_y \text{sgn}(\omega) - c_1 \omega - c_2 \omega \quad (7)$$

式中 T_y ——阻尼器理论屈服力矩

c_1 ——与磁流变液特性和阻尼器转子圆柱面尺寸有关的参数

c_2 ——与磁流变液特性和阻尼器转子端面尺寸有关的参数

根据 ANSYS 的分析结果,在后处理器中应用式(7),可得到磁流变阻尼器的力矩-转速特性,如图 10 所示。

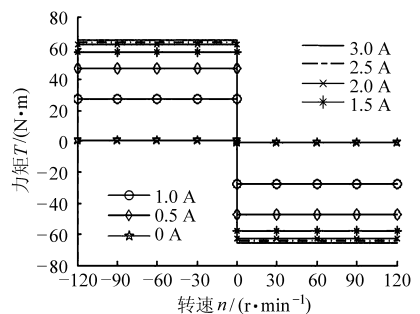


图 10 阻尼器力矩-转速特性仿真结果

Fig. 10 Simulation result of torque vs rev

由仿真获得的阻尼器力矩-转速特性可知,转速

的变化对阻尼器的输出阻尼力矩影响较小。应用仿真数值拟合出的阻尼器屈服力矩特性如图 14 中虚线所示。仿真获得的阻尼器屈服力矩特性显示:励磁电流 $I = 0$ A 时,磁流变阻尼器屈服力矩较小 ($T \approx 1.9$ N·m),改变励磁电流,阻尼器屈服力矩也随之变化,随着励磁电流强度的增加,阻尼器屈服力矩逐渐增大,呈非线性关系。

4 实验

4.1 力学性能测试系统

完成阻尼器的设计与性能预估后,设计了磁流变阻尼器及其力学性能测试系统,如图 11、12 所示。



图 11 磁流变阻尼器

Fig. 11 Magnetorheological damper

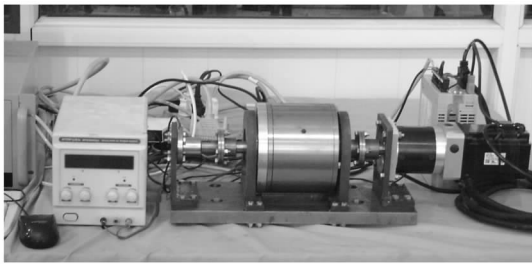


图 12 磁流变阻尼器性能测试系统

Fig. 12 Performance test system of damper

磁流变阻尼器力学性能测试系统中采用了静态力矩传感器,力矩传感器通过不锈钢法兰与阻尼器的外壳相连,2 个支架分别支撑于阻尼器的前端和尾端的不锈钢法兰,阻尼器与前后 2 个支架间安装有轴承,以减小其摩擦力,支架固定于底座,阻尼器内轴通过联轴器与减速器输出轴连接,减速器与伺服电动机相连。应用工控机和运动控制卡控制伺服电动机运动,数据采集卡对力矩传感器的输出数据进行采集,基于 VC++ 的数据采集程序,将数据采集卡的输出数据显示于 PC 机显示器,采用直流稳压电源为阻尼器提供可调的驱动电流。

4.2 实验结果

所设计的磁流变阻尼器将应用于康复机器人,工作时最高转速不超过 120 r/min,实验中以获得阻尼器的力矩-转速特性和屈服力矩-电流特性为主。

不同的驱动电流使得阻尼器具有不同的屈服力矩,在实验过程中,对阻尼器施加某一固定驱动电流,由伺服电动机以不同转速带动阻尼器旋转,获得该电流强度下阻尼器的力矩-转速特性,然后改变阻尼器的驱动电流,以获得不同驱动电流,不同转速下阻尼器的力学性能。实验过程中,对阻尼器分别施加 0、0.5、1.5、2.0、2.5、3.0 A 的驱动电流,所获得的阻尼器力矩-转速特性如图 13 所示。

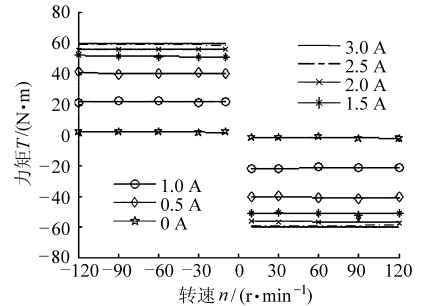


图 13 阻尼器力矩-转速特性实验结果

Fig. 13 Experimental result of torque vs rev

由图 13 可知,所设计的磁流变阻尼器在不施加驱动电流时,其输出的力矩随转速的增加变化较小,保持较低的输出力矩(输出力矩约为 1.9 N·m,略大于仿真力矩 1.0 N·m);对阻尼器施加某一驱动电流,转速由 10 r/min 增加到 120 r/min 时,阻尼器的输出力矩波动较小,与仿真结果具有一致性,这说明在转速为 10 r/min 时,阻尼器内的磁流变液已达到屈服状态,所设计的阻尼器具有较低的屈服转速,并且,转速的变化对阻尼器的输出力矩影响较小。

依据实验数据,阻尼器的屈服力矩-电流特性如图 14 中实线所示。

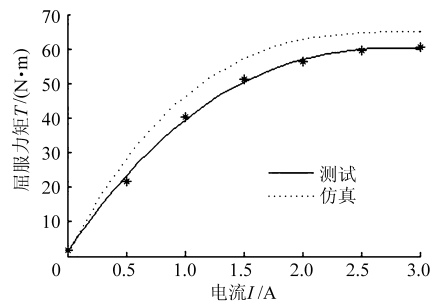


图 14 阻尼器屈服力矩-电流特性

Fig. 14 Damper properties of yield torque vs current

由图 14 可知,阻尼器屈服力矩与驱动电流呈非线性关系,并且随驱动电流的增大而单调上升,这一结果与仿真分析结果一致。与仿真结果相比,实验值略小于仿真值,驱动电流为 3.0 A 时,阻尼器测试力矩为 60.43 N·m,所设计的磁流变阻尼器可以提供较大的屈服力矩。影响阻尼器性能与设计效果的原因有多种,例如,阻尼器零件的加工精度,绕组缠绕的紧密程度,磁性材料磁性能理想值与实际值之

间存在的误差,测试系统的精度等,另外,由于所设计的磁流变阻尼器工作面积较大,工作间隙较小,磁流变液又具有一定的粘度,不排除工作区域中存在气泡的可能性。提高磁流变阻尼器性能与设计效果,需要对以上几个方面进行改善。

5 结论

(1) 设计了一种新型结构的旋转式磁流变阻尼器。磁流变阻尼器定子采用了新型结构,使得转子的端面 and 圆柱面均作为工作面,有效增加了转子的的工作面积。基于磁路欧姆定律,获得了适用于该种阻尼器结构的磁路计算方法,应用该方法可以得到阻尼器各部位结构参数。

(2) 应用有限元法获得了阻尼器磁力线分布图以及不同区域的磁场强度、不同部位的磁通量等数据。由阻尼器磁力线分布图可知,阻尼器转子端面

和圆柱面均为工作面,与设计预期一致。基于磁流变液的流变特性与有限元分析结果可以预估阻尼器的力学性能,力学性能分析结果显示:随着转速的变化,阻尼器的输出阻尼力矩的变化不明显,阻尼器屈服力矩随着励磁电流强度的增加而增大,且增长的幅度逐渐减小,呈非线性关系。

(3) 设计了磁流变阻尼器及其力学性能测试系统,对阻尼器的力学性能进行了实验研究。获得了阻尼器的力矩-转速特性、屈服力矩-电流特性,实验结果表明,所设计的磁流变阻尼器具有较低的屈服转速,并且,转速变化对阻尼器力学性能影响较小;所设计的磁流变阻尼器具有较大的屈服力矩,最大屈服力矩为 $60.43 \text{ N}\cdot\text{m}$,阻尼器屈服力矩随驱动电流的增大而单调上升,且增长的幅度逐渐减小,呈非线性关系。

参 考 文 献

- 戴金桥,王爱民,宋爱国. 基于磁流变液的柔性机器人振动控制阻尼器[J]. 机器人, 2010,32(3):358-362.
Dai Jinqiao, Wang Aimin, Song Aiguo. A magneto-rheological fluid based damper for vibration control of flexible robot[J]. Robot, 2010, 32(3):358-362. (in Chinese)
- Mats Jonasson, Fredrik Roos. Design and evaluation of an active electromechanical wheel suspension system[J]. Mechatronics, 2008,18(4):218-230.
- 樊晓平,武利冲,杨胜跃. 斜拉索的磁流变半主动自适应控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(10):1307-1314.
Fan Xiaoping, Wu Lichong, Yang Shengyue. Design of semi-active adaptive controllers for the stay cables using magneto-rheological damper[J]. Control Theory & Applications, 2010,27(10):1307-1314. (in Chinese)
- Nikos G Pnevmatikos, Charis J Gantes. Control strategy for mitigating the response of structures subjected to earthquake actions [J]. Engineering Structures, 2010, 32(11):3616-3628.
- 王道明,孟庆睿,侯友夫,等. 传动装置磁流变液瞬态温度场研究[J]. 农业机械学报, 2013,44(4):287-292.
Wang Daoming, Meng Qingrui, Hou Youfu, et al. Transient temperature field of magneto-rheological fluid in transmission device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):287-292. (in Chinese)
- Cecilia Cornejo, Luis Alvarez-Icaza. Vibration control of a building with magneto-rheological-dampers based on interconnection and damping assignment[C]//Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, 2006:6549-6554.
- Tu F H, Yang Q, He C H, et al. Experimental study and design on automobile suspension made of magneto-rheological damper [C]//2012 International Conference on Future Energy, Environment, Energy Procedia; and Materials, 2012, 16(A):417-425.
- 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, 2012,43(12):33-38.
Feng Zhimin, Wu Guangbin, Zhang Gang. Mechanical performance test of magnetorheological damper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):33-38. (in Chinese)
- Edward J Park, Luis Falca o da Luz, Afzal suleman. Multidisciplinary design optimization of an automotive magnetorheological brake design[J]. Computers and Structures, 2008,86(3-5):207-216.
- 崔治,葛友华,宋金德. 非匀强磁场应用于旋转式磁流变阻尼器的研究[J]. 机械设计与制造, 2012(12):208-210.
Cui Zhi, Ge Youhua, Song Jinde. Study of nonhomogeneous magnetic fields applied in rotary disc-type MRF dampers[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(12):208-210. (in Chinese)
- 李军强,臧希赓,赵杰. 旋转式磁流变阻尼器优化设计与力学性能试验[J]. 机械工程学报, 2010,46(5):177-182.
Li Junqiang, Zang Xizhe, Zhao Jie. Optimization design and mechanic characteristic experiment of the rotary magnetorheological damper[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(5):177-182. (in Chinese)
- Doruk Senkal, Hakan Gurocak. Serpentine flux path for high torque MRF brakes in haptics applications[J]. Mechatronics, 2010,20(3):377-383.
- 陈照波,涂奉臣,李明章. 旋转式磁流变阻尼器用于卷料张力模糊控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(11):1732-1735.
Chen Zhaobo, Tu Fengchen, Li Mingzhang. Study on coil tension fuzzy control by rotary magnetorheological damper[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(11):1732-1735. (in Chinese)
- Kerem Karakoc, Edward J Park, Afzal Suleman. Design considerations for an automotive magnetorheological brake [J]. Mechatronics, 2008, 18(8):434-447.

- 15 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,2006,25(3):121-126.
Deng Zhidang, Gao Feng, Liu Xiandong, et al. State-of-art research on dynamical models of magnetorheological damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006,25(3): 121-126. (in Chinese)
- 16 兰文奎,郑玲,李以农,等. 活塞式磁流变液阻尼器磁场有限元分析[J]. 农业机械学报,2007,38(4):142-145.
Lan Wenkui, Zheng Ling, Li Yinong, et al. FEM analysis of magnetic field of piston-type MR fluids damper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(4): 142-145. (in Chinese)

Design and Experiments of Rotary Magnetorheological Damper with Three Working Surfaces

Li Junqiang Wang Juan Liu Jinyue Chen Guiliang

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: A new structure rotary magnetorheological damper with three working surfaces was designed, which were two end surfaces and one cylindrical surface of the rotor. The area of the working surfaces was increased with the same volume of the rotor. Base on properties of magnetorheological fluid and magnetic core material, the magnetic circuit was designed, and the mechanical and electrical parameters of the damper were calculated. Depending on the characteristics of the magnetorheological damper structure, the finite element model of the magnetorheological damper was built, and the electromagnetic field analysis was performed. Then the magnetic field quantities of the damper model were got. With the results of the magnetic analysis and the constitutive relations, the performance simulation of the damper was conducted. On these bases, the magnetorheological damper and the mechanical performance test system were developed, and the mechanical performance of the damper was investigated using the test system. The damper properties, torque *vs* rev and yielding torque *vs* current, were obtained.

Key words: Magnetorheological damper Magnetic circuit design Finite element method Performance analysis Experiment

(上接第 200 页)

Influence of Composting Pretreatment on Dry Anaerobic Digestion of Pine Sawdust

Wang Zhongjiang^{1,2} Li Yebo² Zhao Jia²

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Ohio Agricultural Research and Development Center, The Ohio State University, Wooster OH 44691, USA)

Abstract: The effects of aerobic composting pretreatment on the mixed material of pine sawdust (6.35 mm, 9.53 mm, 12.70 mm) and food wastes and the influence on subsequent dry anaerobic digestion were studied by adding the food wastes aiming at the problems of the less effects and the high costs of pretreatment of conifer pine before anaerobic digestion. The experimental results showed that the pretreatment effects of aerobic composting process on the pine sawdust were obvious. But the pretreatment effects decreased with the increase of particle size of pine sawdust. The biogas production rates of anaerobic digestion of the raw materials, which were pretreated by aerobic composting, were all within the ranges of 199 ~ 215 L/kg, about 140% of unpretreated samples. And the total volatile fatty acid of the material, which had more subsequent potential for generating biogas, were all 24.5 or so after anaerobic digestion, about 150% of unpretreated samples.

Key words: Pine sawdust Food wastes Dry anaerobic digestion Composting pretreatment