

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.08.005

# 馈能型磁流变减振器的设计与仿真研究\*

岳 旭<sup>1</sup>, 刘淑莲<sup>2</sup>, 杨礼康<sup>2\*</sup>, 孙海杰<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014;

2. 浙江科技学院 机械与汽车工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:**针对磁流变减振器需要外部供电限制其应用范围的问题,基于磁流变减振器的工作特点和振动能收集方法的探讨,提出了一种馈能型(自主供电)磁流变减振器。根据该馈能型磁流变减振器的功能模块分析,研究了集成馈能装置的磁流变减振器的设计方法并确定了其结构参数,并设计了与馈能装置相匹配的电能管理电路。特别地,在频率 1 Hz ~ 3 Hz、振幅 10 mm 振动条件下,利用有限元软件 Ansoft 对馈能装置进行了输出电能仿真,然后进一步仿真分析了其输出电能使磁流变减振器产生阻尼力的大小。仿真结果表明,该馈能型磁流变减振器产生阻尼力变化范围为 1 072 N ~ 2 028 N,说明在低频、小振幅振动条件下,该馈能型磁流变减振器可以在无需外部供电的情况下改变自身阻尼特性。

**关键词:** 馈能;磁流变减振器;阻尼力;Ansoft

中图分类号:TH703.63;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)08-1038-06

## Design and simulation of energy regenerative magnetorheological damper system

YUE Xu<sup>1</sup>, LIU Shu-lian<sup>2</sup>, YANG Li-kang<sup>2</sup>, SUN Hai-jie<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Aiming at the restricted application range of magnetorheological damper (MRD) with external power supply, based on the working characteristics of MRD and the investigation about harvesting energy from the vibration, a new type of Energy-regenerative MRD (called self-powered MRD) was proposed. According to the analysis on function modules of Energy-regenerative MRD, the design methods of MRD integrated Energy-regenerative device was investigated to confirm their structure parameters, the electrical circuit was designed in accordance with Energy-regenerative device. Particularly, at the vibration condition of 1 Hz to 3 Hz frequencies and 10 mm amplitude, by utilizing the finite element software Ansoft, the simulation about power output of Energy-regenerative was performed, then the capacity of damping force produced by MRD under power output of Energy-regenerative was simulated. The simulation results show that the Energy-regenerative MRD can produce 1 072 N ~ 2 028 N, at the vibration condition of low frequency and small amplitude, the energy-regenerative MRD is able to change its damping characteristics without external power supply.

**Key words:** energy regenerative; magnetorheological damper (MRD); damping force; Ansoft

收稿日期:2015-03-30

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51175474)

作者简介:岳旭(1988-),男,湖南邵阳人,主要从事磁流变减振器技术方面的研究. E-mail: yuexu282@163.com

通信联系人:杨礼康,男,博士,教授,硕士生导师. E-mail: yanglikang@zust.edu.cn

## 0 引言

磁流变液是一种智能材料,在外加磁场的作用下,它可瞬间(毫秒级)从牛顿流体转变为具有一定屈服剪切应力的非牛顿液体。磁流变减振器是应用磁流变液的新型智能减振器,相比于电流变减振器,它具有阻尼力可控、工作温度范围宽、响应快、功率消耗较低等优点,被广泛应用于汽车、工程建设、桥梁、铁路、航空航天等领域的振动控制<sup>[1]</sup>。

磁流变减振器工作时需要外部电源为其提供励磁电流,产生控制磁流变液特性的磁场以调节阻尼力大小。在将磁流变减振器应用于实际工程领域时,电源供给的中断会影响磁流变减振器工作的可靠性。因此需要考虑通过设计振动能收集装置来回收减振器在工作环境中的振动能,以摆脱其对外部电源的依赖。振动能收集方式主要有静电式、压电式、电磁式。静电式一般需要外部源设备工作,且发电能力弱,可用的场合很少。压电式虽然装置体积小,发电效率高,但总体产生的功率比较小,大多应用于无线传感和微机电系统等,不能给磁流变减振器提供足够的电能。

电磁式具有发电数值高,适应性强,因此国内外学者开始研究基于电磁式的馈能型磁流变减振器。马里兰大学的 Choi 和 Wereley<sup>[2]</sup>设计了一种馈能型磁流变减振器,将电磁感应发电装置集成在磁流变减振器的活塞上,整个装置体积较小,实现了振动能的收集目的,但是发电装置中永磁体会使磁流变液极化,缩小了磁流变减振器阻尼力的可控范围。香港大学陈超等人<sup>[3]</sup>设计了一种具有自感应速度的自供电磁流变减振器系统,相应的馈能装置早受振动驱动时产生的电能可满足磁流变减振器减振需求,但整个装置加工工艺要求较高;Bogdan<sup>[4,5]</sup>采用了永磁发电机作为振动能量采集装置,虽然解决了磁流变减振器系统的电能需求问题,但是该发电装置布置在磁流变减振器外部,很难推广应用。湖南大学汪志昊<sup>[6]</sup>是应用旋转式电磁感应发电装置为磁流变减振系统来供电,但为实现直线运动而引入了齿轮齿条转换结构,机械损耗比较大,发电效率不高。

本研究针对磁流变减振器需要外部供电限制其应用范围的问题,设计一种馈能型磁流变减振器,并对其进行研究与分析。

## 1 馈能型磁流变减振器工作原理

馈能型磁流变减振器结构示意图如图1所示。其主要由磁流变装置、馈能装置、电能管理模块及相关连接

件构成,减振器底部法兰与馈能装置的外筒通过螺栓连接,中间连接杆将为馈能装置动子杆和减振器的活塞杆组成一个整体的运动部件。馈能装置的发电线圈与磁流变减振器励磁线圈通过导线连接在一起,电能管理电路对馈能装置产生的电能进行调节。

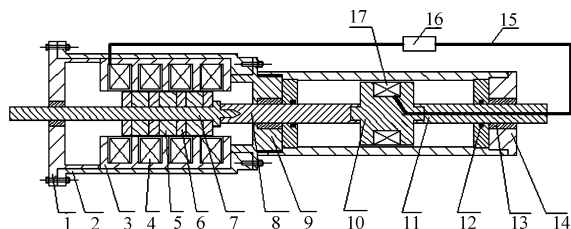


图1 馈能型磁流变减振系统结构示意图

1—下端盖;2—外筒;3—定子;4—发电线圈;5—永磁体;6—背铁;7—动子杆;8—中间连接杆;9—法兰;10—活塞;11—活塞杆;12—密封圈;13—导向套;14—上端盖;15—导线;16—电能管理模块;17—励磁线圈

由图1可知馈能装置的外筒与磁流变减振器的缸筒通过法兰连接在一起,其定子凹槽内缠绕着发电线圈。振动时磁流变减振器的活塞杆在缸筒内做往复直线运动,带动动子杆上永磁体在相对定子做往复直线运动。由法拉第电磁感应定律可知,定子上的发电线圈内部的磁通量发生变化,从而产生感应电动势。由电能管理模块将产生的交流电转换之后控制磁流变减振器。

## 2 馈能型磁流变减振器设计

馈能型磁流变减振器可按功能分成3个模块,即馈能模块=(馈能装置)、阻尼模块=(磁流变减振器)、电能管理模块=(全桥整流滤波电路)。性能好坏取决于这3个模块的主要参数,本研究对其进行分析并计算。

### 2.1 磁流变减振器力学模型和结构设计

磁流变液力学特性可以采用 Bingham 本构方程来进行描述:

$$\tau = \tau_y \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中: $\tau$ —剪切应力; $\tau_y$ —磁致屈服应力; $\eta$ —动力粘度; $\dot{\gamma}$ —切应变率; $\operatorname{sgn}$ —符号函数,它表示活塞运动时的速度方向。

磁流变减振器用于减振装置,仅有剪切、流动和挤压3种工作模式<sup>[7]</sup>,图1中,磁流变减振器采用剪切和流动共同作用的混合模式结构示意图如图2所示。

在流动模式中,阻尼力的大小为  $F_1$ :

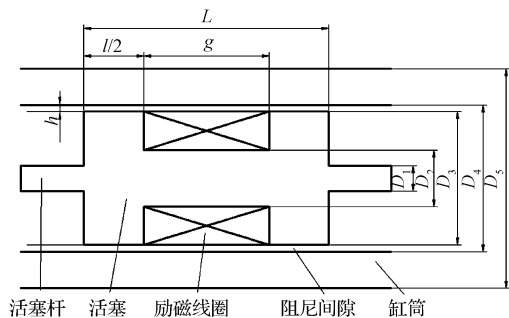


图 2 磁流变减振器结构示意图

$$F_1 = \frac{12\eta l A^2}{bh^3}v + \frac{3lA\tau_y}{h}\text{sgn}(v) \quad (2)$$

在剪切模式中, 阻尼力的大小为  $F_2$ :

$$F_2 = \frac{b\eta l}{h}v + bl\tau_y\text{sgn}(v) \quad (3)$$

图 2 中, 混合模式的总阻尼力为:

$$F = F_1 + F_2 = \left[ \frac{12\eta l A^2}{bh^3}v + \frac{3l\tau_y A}{h}\text{sgn}(v) \right] + \left[ \frac{\pi D_3 \eta l}{h}v + \pi D_3 l \tau_y \text{sgn}(v) \right] \quad (4)$$

其中:

$$A = \pi(D_3^2 - D_1^2)/4, b = \pi D_3$$

式中:  $D_3$ —活塞的直径,  $D_1$ —活塞杆直径,  $l$ —阻尼通道长度,  $h$ —阻尼间隙,  $A$ —活塞端面有效作用面积,  $b$ —阻尼间隙等效宽度,  $v$ —活塞运动速度。其他符号同上文所示。

根据某汽车悬架在低频、小振幅(频率 1 Hz ~ 3 Hz、振幅 10 mm)的振动产生的阻尼力范围为 1 122 N ~ 1 460 N<sup>[8]</sup>, 为此笔者设计出磁流变减振器的主要结构参数如表 1 所示。

表 1 磁流变减振器主要结构参数

结构名称	参数值
活塞杆直径 $D_1$ /mm	16
励磁线圈槽直径 $D_2$ /mm	24
活塞直径 $D_3$ /mm	40
缸筒内径 $D_4$ /mm	43
缸筒外径 $D_5$ /mm	60
励磁线圈槽长度 $g$ /mm	12
阻尼通道长度 $l$ /mm	10
阻尼间隙高度 $h$ /mm	0.5
活塞长度 $L$ /mm	22
励磁线圈匝数 $N_1$	340
励磁线圈电阻 $R_1/\Omega$	3.4
最大工作行程 $s$ /mm	±50

## 2.2 馈能模块数学模型及尺寸计算

### 2.2.1 馈能模块的数学模型

馈能装置的结构示意如图 3 所示。该馈能装置主要包括定子、发电线圈、动子杆、永磁体以及背铁。定子凹槽有 4 个发电线圈, 通过反向串联形成单相绕组。背铁和圆环形永磁体固定在动子杆上, 永磁体作为磁源, 其充磁方向为轴向方向, 相邻永磁体的充磁方向相反。定子和背铁所采用的材料是高导磁的硅钢材料, 动子杆使用质量较轻的非导磁材料, 永磁体为高磁性 NdFeB35, 发电线圈选取常规的漆包线。

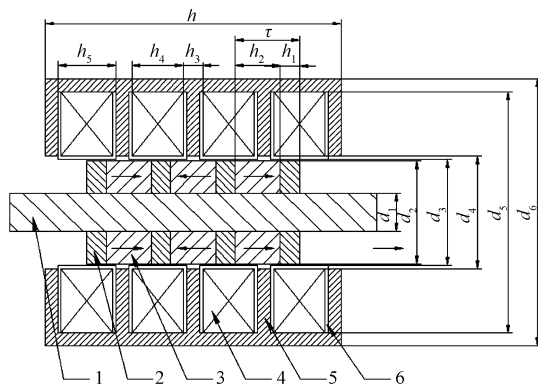


图 3 馈能装置内部结构示意图

1—动子杆; 2—背铁; 3—永磁体; 4—发电线圈; 5—定子; 6—绝缘固定件

### 2.2.2 馈能模型

在振动激励下, 永磁体随动子杆往复运动, 导致发电线圈内磁通量发生变化产生感应电动势。当发电线圈没有和外部负载相连处于开路状态时, 定子凹槽内第  $i$  个线圈产生感应电动势可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$E_i = \frac{d\Psi_i}{dt} = \frac{d\Psi_i}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{d\Psi_i}{dz} v \quad (5)$$

式中:  $E_i$ —第  $i$  个发电线圈产生的感应电动势,  $\Psi_i$ —发电线圈  $i$  中由永磁体产生的磁链,  $z$ —动子杆运动位移,  $v$ —动子杆运动速度。

由于永磁体和发电线圈之间是相对直线运动,  $\Psi_i$  可以表示成:

$$\Psi_i = N_i \phi_g \cos\left(\frac{\pi}{\tau}z + \theta_i\right) \quad (6)$$

式中:  $N_i$ —发电线圈  $i$  的匝数,  $\phi_g$ —轴向方向气隙内的磁通量,  $\tau$ —馈能装置的磁极距,  $\theta_i$ —发电线圈  $i$  的相位角。

联立式(5,6)可得:

$$E_i = -N_i \phi_g v \frac{\pi}{\tau} \sin\left(\frac{\pi}{\tau}z + \theta_i\right) \quad (7)$$

假设第一个发电线圈产生的感应电动势的相位角

为  $0^\circ$ , 由于相邻发电线圈的相位角相差  $180^\circ$ , 相邻发电线圈产生的感应电动势大小相等、方向相反, 通过将 4 个发电线圈反向串联构成一个单相绕组, 则可以使 4 个发电线圈产生的感应电动势方向和大小都相同, 设 4 个发电线圈的匝数为  $N$ , 得到馈能装置感应电动势  $E$  为:

$$E = -N\varphi_g v \frac{\pi}{\tau} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} z\right) \quad (8)$$

当馈能装置中发电线圈与外部负载即活塞励磁线圈相连时, 馈能装置向外输出的电能可以表示为:

$$P = \frac{E^2}{R + R_1} = \frac{N^2 \varphi_g^2 v^2 \frac{\pi^2}{\tau^2} \sin^2\left(\frac{\pi}{\tau} z\right)}{R + R_1} \quad (9)$$

式中:  $P$ —馈能装置输出功率,  $R$ —发电线圈的电阻,  $R_1$ —活塞励磁线圈的电阻。

由式(9)可知在一定振动速度下, 馈能模块的永磁体确定后, 发电线圈匝数是影响馈能装置输出功率的主要因素, 需分析计算。

### 2.2.3 发电线圈匝数分析

发电线圈匝数及相应电阻与漆包线直径之间的关系为:

$$R = \frac{16\rho\kappa h_4 (d_5^2 - d_4^2)}{\pi w_d^4} \quad (10)$$

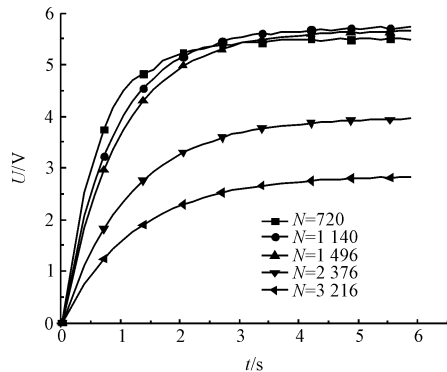
$$N = \frac{4\kappa h_4 (d_5 - d_4)}{\pi w_d^2} \quad (11)$$

式中:  $\rho$ —漆包线的电阻率,  $\kappa$ —发电线圈充满系数,  $h_4$ —发电线圈轴向长度,  $d_5$ —发电线圈的外径,  $d_4$ —发电线圈的内径,  $w_d$ —漆包线的直径。

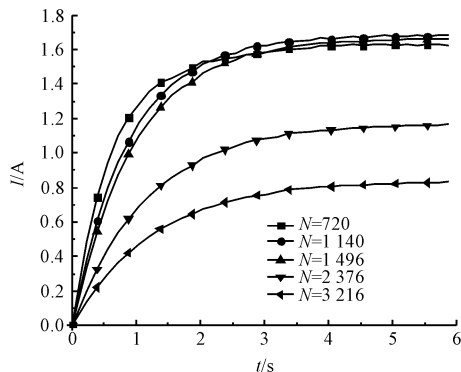
式(10,11)表明: 发电线圈电阻和匝数成正比, 增大发电线圈匝数则必然致电阻增大。因此需要优选匝数和线圈电阻, 以便在一定条件下, 使输出功率最大。

本研究基于低频、小振幅(频率 1 Hz ~ 3 Hz、振幅 10 mm)的振动场合, 考察阻尼模块输出最大阻尼力对应馈能模块产生的电能值大小, 选取在振幅 10 mm, 最大频率 3 Hz 的振动条件下, 观察其发电线圈匝数对馈能装置输出电能的影响, 从而选取合适的发电线圈匝数。下面通过仿真分析得到发电线圈匝数与馈能装置输出电能的变化曲线如图 4 所示。

图 4 中, 当发电线圈匝数  $N$  由 720 增加到 1 140 的过程中, 随着发电线圈匝数的增加, 馈能装置输出的电压和电流也随之增大。当线圈匝数由 1 140 增至 3 216 的过程中, 输出电压和电流随着线圈匝数的增加都呈下降的趋势。在发电线圈匝数为 1 140 时, 馈能



(a) 发电线圈匝数对馈能装置输出电压的影响



(b) 发电线圈匝数对馈能装置输出电流的影响

图 4 发电线圈对馈能装置输出电能的影响

装置输出最大电压和电流分别为 5.73 V 和 1.62 A, 其理论上输出的最大电能为 9.28 W。

仿真结果表明, 馈能装置输出电能的效率与发电线圈的匝数有关。发电线圈匝数过少则直接影响馈能装置的发电能力; 发电线圈匝数过多, 尽管馈能装置产生的电能多, 但是由于其内阻较大, 输出的电能大部分消耗在内阻上, 从而使负载获得的电能减少。因此, 本研究通过仿真比较分析, 选取发电线圈匝数为 1 140, 此时, 输出功率最大。

馈能装置的根据在低频、小振幅(频率 1 Hz ~ 3 Hz、振幅 10 mm)的振动下, 馈能装置输出电能能够满足磁流变减振器在某汽车悬架减振功能, 设计的馈能装置主要结构尺寸如表 2 所示。

表 2 馈能装置的主要结构尺寸

结构名称	参数值
定子杆直径 $d_1$ /mm	16
永磁体外径 $d_2$ /mm	32
绝缘固定件内径 $d_3$ /mm	33
发电线圈内径 $d_4$ /mm	35
发电线圈外径 $d_5$ /mm	75
定子外径 $d_6$ /mm	83
背铁长度 $h_1$ /mm	6
永磁体长度 $h_2$ /mm	14
定子齿宽 $h_3$ /mm	4

(续表)

结构名称	参数值
发电线圈轴向长度 $h_4$ /mm	16
定子齿槽长度 $h_5$ /mm	18
定子总长度 $h$ /mm	92
磁极距 $\tau$ /mm	20
发电线圈匝数 $N$	1 140
发电线圈匝数 $R/\Omega$	3.6

### 2.3 电能管理模块电路

根据馈能装置收集的电压特点及相关结构参数,本研究设计的全桥整流滤波电路如图 5 所示,该电路由一个桥式整流电路和一个存储电容组成。桥式整流电路可以将方向不断改变的感应电动势转换成方向不变的直流电压,通过存储电容充、放电功能可以使馈能装置输出稳压直流电,满足磁流变减振器工作需求。

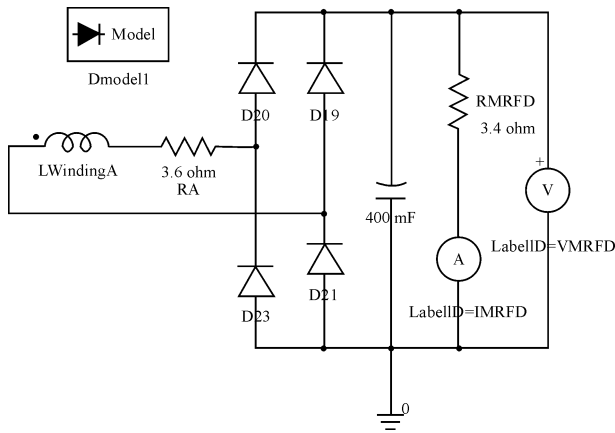


图 5 全桥整流滤波电路

### 3 馈能型磁流变减振器仿真分析

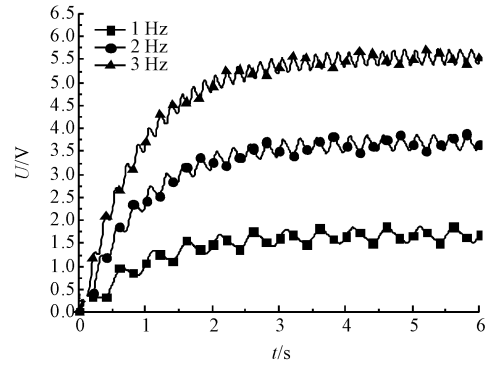
本研究应用所确定的发电模块和阻尼模块的结构参数,分析整体性能特性。

#### 3.1 基于 Ansoft 的馈能特性仿真分析

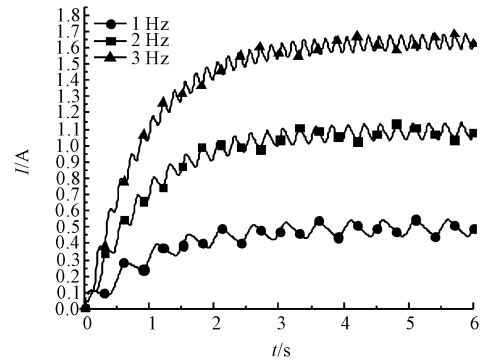
本研究应用表 2 给出的馈能装置主要结构参数进行 Ansoft 电磁场仿真分析,其回馈电压和电流如图 6 所示。可以看出随着振动的频率的增大,回馈的电压和电流也随之增大。振动频率为 1 Hz 时,输出电压和电流分别为 1.64 V 和 0.50 A;振动频率为 2 Hz 时,输出的电压和电流分别为 3.62 V 和 1.07 A;振动频率为 3 Hz 时,输出的电压和电流分别为 5.73 V 和 1.62 A。在频率 1 Hz ~ 3 Hz、振幅 10 mm 的振动条件下,馈能装置输出的电能范围为 0.82 W ~ 9.28 W。

#### 3.2 基于 Simulink 的磁流变减振器的阻尼力仿真分析

馈能模块给阻尼模块提供的电能范围为 0.82 W ~



(a) 频率 1 Hz~3 Hz、振幅 10 mm 振动条件下回馈电压



(b) 频率 1 Hz~3 Hz、振幅 10 mm 振动条件下回馈电流

图 6 低频、小振幅条件下回馈电能情况

9.28 W,本研究采用 Lord 公司生产的 MRF140CG 磁流变液<sup>[10]</sup>,应用表 1 给出的磁流变减振器结构参数,根据公式(5)建立的仿真框图如图 7 所示。

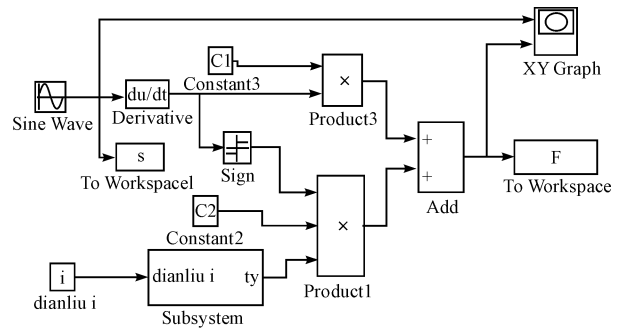


图 7 磁流变减振器阻尼力仿真模型

仿真所得磁流变减振器的阻尼力-位移如图 8 所示。

从图 8 中可知,随着振动频率的不断增加,磁流变减振器输出的阻尼力也逐渐增大。振动频率 1 Hz、2 Hz、3 Hz 时,所对应的阻尼力分别为 1 072 N、1 685 N、2 028 N。

以上仿真分析说明,所设定的振动条件下,发电模块提供的电能使阻尼模块可产生的阻尼力在 1 072 N ~ 2 028 N 范围内变化,能够满足馈能型磁流变减振器的

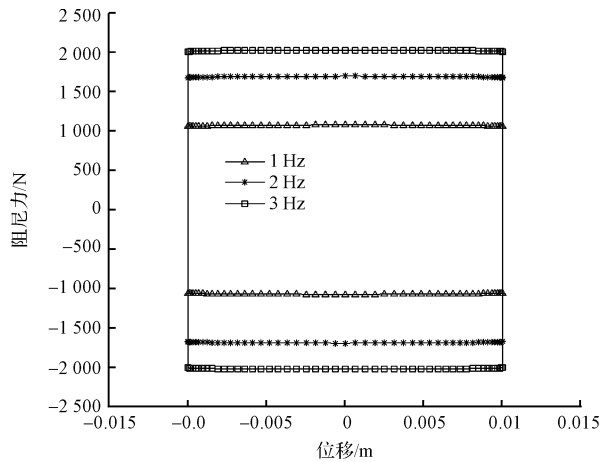


图8 磁流变减振器的阻尼力-位移曲线

减振性能要求。

## 4 结束语

针对集成式馈能型磁流变减振器,本研究探讨了其阻尼、馈能结构设计方法,并通过馈能装置输出电能的数学模型,分析了选取其发电线圈匝数和建模合理选取了其发电线圈匝数负载。

在设定条件下,仿真结果表明,发电模块提供的电能可使阻尼模块产生1 072 N ~ 2 028 N 的阻尼力,能够实现低频、小振幅条件下对阻尼力的调节作用。整体上,说明本研究中该馈能型磁流变减振器设计方法的可行性。

### 参考文献 (References):

[1] 姚春,梅德庆.用于汽车悬架的磁流变减振器研究综述[J].机电工程,2006,23(1):58-62.

- [2] CHOI Y T, WERELEY N M. Self-powered magnetorheological dampers [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2009, 131(4):44-46.
- [3] CHEN C, LIAO W H. A self-powered, Self-sensing Magnetorheological Damper [C]//Proceedings of the 2010 IEEE. International Conference on Mechatronics and Automation. New York: [s. n.], 2010:1364-1369.
- [4] SNAMINA J, SAPINSKI B. Energy balance in self-powered MR damper-based vibration reduction system [J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 2011, 59(1):75-80.
- [5] SAPINSKI B, SNAMINA J, JASTRZEBSKI L. Laboratory stand for testing self-powered vibration reduction systems [J]. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 49(4):1169-1181.
- [6] 汪志昊,陈政清.基于振动能量回收的自供电MR阻尼器集成与试验研究[J].振动与冲击,2013,32(12):88-94.
- [7] 赵银.新型结构磁流变减振器的设计与仿真研究[D].湘潭:湘潭大学机械工程学院,2011.
- [8] 王勤.集成永磁直线发电机的汽车自供电磁流变减振器研究[D].重庆:重庆大学机械工程学院,2013.
- [9] 蒋学争,胡红生,王灵.基于电磁感应能量捕获技术的磁流变阻尼器研究[J].振动与冲击,2012,31(13):11-15.
- [10] 蒋学争.自供电磁流变阻尼器的振动能量捕获技术研究[D].南京:南京理工大学机械工程学院,2012.

[编辑:李辉]

### 本文引用格式:

岳旭,刘淑莲,杨礼康,等.馈能型磁流变减振器的设计与仿真研究[J].机电工程,2015,32(8):1038-1043.

YUE Xu, LIU Shu-lian, YANG Li-kang, et al. Design and simulation of energy regenerative magnetorheological damper system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(8):1038-1043.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>