

一种新型结构磁流变阻尼器

郝瑞晓, 邢海军, 郝瑞参, 王荣栋, 杨绍普

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:提出了一种新型结构的磁流变阻尼器,该阻尼器主要包括内层缸筒、外层缸筒和线圈组件,其中线圈组件固定于外层缸筒的外侧,电磁线圈不与磁流变液接触,具有装拆方便、容易维护、散热良好、能够提高磁流变阻尼器活塞的有效行程等优点。采用 ANSYS 软件建立新型结构磁流变阻尼器的电磁场有限元模型,将电磁场理论分析值和有限元分析值进行比较,分析结果表明,外层缸筒和线圈组件的特殊结构,能够保证磁流变液流动通道内产生有效磁场。

关键词:磁流变阻尼器;电磁场;有限元分析

中图分类号:TH703 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)04-0069-06

0 引言

磁流变阻尼器(MRD)是具有磁流变液(MRF)可控特性的阻尼器件,在土木、车辆、建筑、机械工程等振动控制领域得到广泛关注^[1-4]。当没有磁场时,磁流变液是很好的牛顿流体;当在它周围施加磁场时,仅仅需要毫秒级的时间磁流变液就会快速转化为粘塑性流体^[5]。其屈服强度受控于磁场强度。利用 MRF 的可控特性制作的 MRD 具有阻尼力调节范围宽泛,响应快速,结构简单,方便控制等优点^[6-7]。

常见 MRD 的电磁线圈绕于活塞上,环状通道设置在活塞上或设在活塞与缸体的间隙之间。给 MRD 施加电场时 MR 流体流过环状通道,从而产生阻尼力^[8-9]。给电磁线圈通电后,在环状通道内产生磁场,磁场的方向和磁流变液流动的方向相垂直,调节施加给电磁线圈的电流来改变环状通道内的磁场强度,就可以控制 MRF 的流变特性从而达到控制阻尼力的目的^[10]。这种结构有以下缺点:(1)电磁线圈缠绕在活塞上,周围被 MR 流体包围,工作时产生的热量积聚在线圈附近,容易烧毁线圈;(2)当线圈烧坏需要更换时,密封结构不容易拆卸;(3)线圈外接电源时需要在活塞杆上钻孔引线,这样 MRF 很容易在引线部位泄漏;(4)活塞的结构过于紧凑,容易产生磁场饱和现象,限制了阻尼力的调节范围;(5)活塞的轴向尺寸较大,当 MRD 的轴向安装尺寸受到限制时,会减小活塞的有效行程,尤其是为了提高阻尼器的阻尼力而采用多级活塞时,这种情况更明显。

为了克服上述缺陷,本文提出了一种新型结构的 MRD,该 MRD 主要包括内层缸筒、外层缸筒和线圈组件,其中线圈组件固定于外层缸筒的外侧。电磁线圈不与磁流变液接触,具有线圈组件装拆方便、散热良好、能够提高磁流变阻尼器活塞的有效行程等优点。多个线圈串联,可以增加阻尼器的阻尼力调节范围。电磁线圈通电时会在 MRD 的磁流变液通道内产生有效磁场,MRD 的磁流变效应明显。

1 新型 MRD 的结构

新型 MRD 的结构如图 1 所示,主要包括缸底耳环、缸底、缸底密封、浮动活塞、浮动活塞密封、活塞、活塞密封、活塞杆、缸盖、缸盖密封、活塞杆耳环、内层缸筒、外层缸筒组件、紧定螺钉和线圈组件。浮动活塞、上盖和内层缸筒构成的腔体称为 MR 腔,其中缸盖、活塞与内层缸筒构成 MR 上腔;浮动活塞、活塞和内层缸筒构成 MR 下腔;缸底、内层缸筒和浮动活塞构成蓄能腔。内层缸筒与外层缸筒之间的环状通道

收稿日期:2014-09-03 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2015.04.13

作者简介:郝瑞晓(1986—),女,硕士研究生,研究方向为机械施工设计理论。E-mail:haoruixiao123@163.com

基金项目:河北省科技支撑计划(14212202D)

郝瑞晓,邢海军,郝瑞参,等.一种新型结构磁流变阻尼器[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(4):69-74.

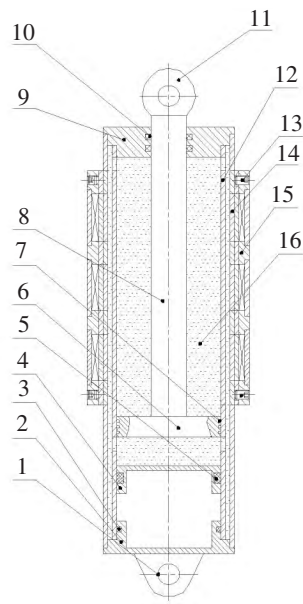
为 MR 流动通道,内层缸筒上部及下部开有通流孔。MR 腔及 MR 流动通道内,充满磁流变液。当活塞上下移动时,MR 由 MR 上腔(或下腔)流经通流孔及 MR 流动通道回到下腔(或上腔)。

线圈组件通过紧定螺钉固定于外层缸筒。新型 MRD 的线圈组件直接套装在阻尼缸筒的外侧,这样线圈不与 MRF 直接接触,当线圈出现故障需要更换时不用拆卸密封装置,直接将线圈组件拆下更换即可,也避免了在活塞杆上钻孔引出线圈导线不方便且容易泄露 MRF 的现象发生;同时多个线圈串联也会使阻尼力的调节范围增大。

内层缸筒结构如图 2 所示,在内层缸筒的上端和下端(位于蓄能器上部)沿周边分布若干个通流孔将磁流变液腔与环状通道联通,通流孔联通了 MR 内腔和 MR 流动通道。工作时活塞在内层缸筒上端和下端的通流孔之间上下运动。内层缸筒采用高磁导率软磁材料制作,内层缸筒与上盖、缸底之间为小间隙配合。

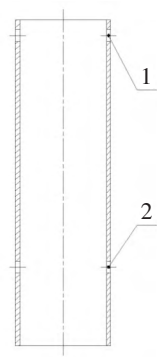
2 新型 MRD 的磁路设计

新型 MRD 内层缸筒全部导磁,外层缸筒为导磁段和不导磁段间隔的结构,线圈组件上各部分也为导磁段和不导磁段间隔的结构,而且相对应的导磁段和不导磁段长度相同。这样线圈工作时会在内层缸筒和外层缸筒之间形成分段的有效磁场,根据线圈的个数划分有效磁场形成区域,每个区域内会形成相应的磁路。图 3 为外层缸筒结构剖视图,上部为不导磁段,下部为不导磁段,其中中部导磁段和不导磁段为间隔设置结构,通过焊接将各段连接起来。外层缸筒的导磁段采用高磁导率软磁材料,不导磁段采用不导磁材料,中部导磁段与不导磁段的长度与线圈组件上导磁段和不导磁段的长度相同。

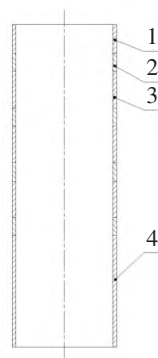


1. 缸底耳环;2. 缸底;3. 缸底密封;4. 浮动活塞;5. 浮动活塞密封;6. 活塞;7. 活塞密封;8. 活塞杆;9. 缸盖;10. 缸盖密封;11. 活塞杆耳环;12. 内层缸筒;13. 紧定螺钉;14. 外层缸筒组件;15. 线圈组件;16. 磁流变液。

图 1 新型 MRD 结构



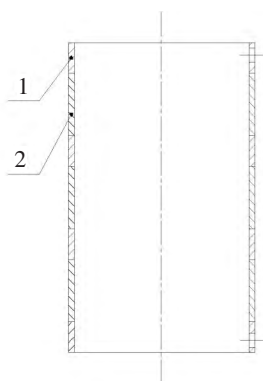
1. 上部通流孔;2. 下部通流孔
图 2 内层缸筒剖视图



1. 上部不导磁段;2. 中部导磁段
3. 中部不导磁段;4. 下部不导磁段
图 3 外层缸筒剖视图

图 4 为线圈组件的剖视图。线圈组件主要由导磁套筒、导磁环、线圈缠绕体和电磁线圈组成。导磁环和导磁套筒制作材料为高磁导率软磁材料。图 4 中导磁环分为上端导磁环、中部导磁环和下端导磁环,中部导磁环将线圈分别隔开,上端导磁环和下端导磁环上分别设有螺纹通孔。整个线圈组件通过紧固螺钉固定于外侧缸筒,拆卸线圈组件时直接松开紧固螺钉即可,方便简单。

图 5 为线圈组件中的线圈缠绕体剖视图,采用导磁段和不导磁段间隔设置的焊接结构,其中导磁段和不导磁段的长度和外层缸筒中部结构的导磁段和不导磁段的长度一致,导磁段材料采用高磁导率软磁材料。为了便于进行磁路分析和计算,需要分析磁路的形成原理。新型 MRD 线圈组件中的两个导磁环、导磁套筒和线圈缠绕体的不导磁段将单个线圈包围起来,内层缸筒和外层缸筒之间的 MR 流动通道内充满 MRF,在线圈形成的有效磁场区域内,会形成如图 6 所示的磁路。



1. 导磁段;2. 不导磁段

图 5 线圈缠绕体剖视图

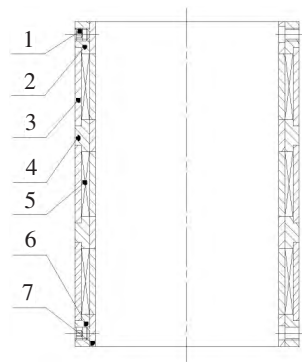
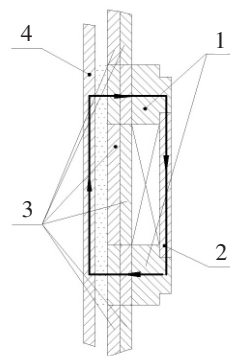
1. 紧定螺钉;2. 上端导磁环;3. 导磁套筒;4. 中部导磁环;
5. 电磁线圈;6. 下端导磁环;7. 线圈缠绕体

图 4 线圈组件剖视图



1. 导磁环;2. 导磁套筒;3. 不导磁段;4. 内层套筒

图 6 MRD 的磁路

3 MRD 磁路分析

通过对磁路的分析,可以对 MRD 的结构尺寸进行更加合理的设计。磁路中可以将 MRD 看作两部分:一部分为导磁材料组成的实体部分;另一部分为 MR 阻尼通道间隙,里面充有磁流变液体。这里内层缸筒、外层缸筒导磁段、线圈缠绕体导磁段、导磁环和导磁套筒采用 40 号低碳钢材料,不导磁段采用黄铜材料,磁流变液采用美国 LORD 公司生产的 MRF-132LD 磁流体。表 1 列出 MRF-132LD 磁流体和低碳钢的其他磁性参数值。

表 1 低碳钢和磁流变液的磁性参数值

材料	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	最大相对磁导率/ μm	最大磁导率对应的磁场强度 $H/(A \cdot m^{-1})$	最大磁感应强度 B/T
低碳钢	7.85	715	1 224	1.562
MRF	3.05	5	1.5×10^5	0.8

3.1 MRD 的电磁场理论计算分析

以便于和用 ANSYS 软件分析出来的 MRD 磁场强度做对比,MR 阻尼通道间隙设置为 $h=1\text{ mm}$,其他结构尺寸参数如表 2 所示。

磁路欧姆定律是计算激励电流和磁路设计中磁场强度关系的基础公式,是所有电磁设备设计和制作的基础。对于此 MRD 的设计,由安培环路定理

$$\oint H dl = \sum I \quad (1)$$

表 2 磁流变阻尼器的结构尺寸参数值

参数名称	尺寸值/mm	参数名称	尺寸值/mm
活塞杆宽度 d_1	11	活塞杆半径 r_1	11
活塞宽度 d_2	13	活塞半径 r_2	24
内层缸筒宽度 d_3	5	内层缸筒半径 r_3	29
外层缸筒宽度 d_4	1	外层缸筒半径 r_4	31
线圈缠绕体宽度 d_5	1	线圈缠绕体半径 r_5	32
线圈铁芯宽度 d_6	3	线圈铁芯半径 r_6	35
导磁环宽度 d_7	8	导磁环半径 r_7	40
导磁套筒宽度 d_8	5	导磁套筒半径 r_8	40

可以得出公式

$$Hl = IN \quad (2)$$

式中, H 为线圈铁芯的磁场强度; I 为励磁电流; N 为电磁线圈的匝数; l 为磁路的平均长度。磁感应强度公式为

$$B = \mu H \quad (3)$$

磁通量公式为

$$\Phi = BS \quad (4)$$

式中, μ 为线圈铁芯的磁导率; S 为铁芯横截面积。线圈铁芯横截面积 $S = \pi \times (r_6^2 - r_5^2)$, 得出 $S = 201\pi$ 。将公式(2)、(3)带入公式(4)得出

$$\Phi = \frac{\mu SIN}{l} \quad (5)$$

若令 $R_m = \frac{l}{\mu S}$, 则得出计算磁通量的公式

$$\Phi = \frac{IN}{R_m} \quad (6)$$

忽略漏磁因素所形成的磁力线的走向为: 先通过内层缸筒到达 MR 流动通道; 而后依次穿过外层筒导磁段、线圈缠绕体导磁段、导磁环, 再依次穿过下部导磁环、线圈缠绕体导磁段、外层缸筒导磁段、MR 流动通道和内层缸筒, 最后形成一个闭合回路。磁路沿轴向长度 $l = 50$ mm, 其中导磁环轴向长度 $L_1 = 10$ mm, 电磁线圈轴向长度 $L_2 = 40$ mm。磁路中沿轴向方向的电阻计算式为

$$R = \frac{l}{\mu S} \quad (7)$$

磁力线依次穿过的各个导磁段横截面积的电阻计算式为

$$R = \frac{l^2}{\mu SL_1} \quad (8)$$

式中, S 为所求各段电阻的横截面积, $S = \pi \times (D_2 - d_2)/4$; l 为所求各段电阻的长度。

这样磁路中总电阻为

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_6 + 2(R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_0) \quad (9)$$

式中, R_1 为内层缸筒轴向电阻; R_6 为导磁套筒电阻; R_0 为阻尼间隙内空气的电阻; R_2 为内层缸筒横向电阻; R_3 为外层缸筒电阻; R_4 为线圈缠绕体电阻; R_5 为导磁环电阻。

当 MRD 尺寸按表 2 所给参数计算时, MRF-132LD 的饱和磁感应强度 $B = 0.8$ T, 此时磁场强度 $H_f = 1.5 \times 10^5$ A/m。由于 MR 间隙内存在磁流变液, μ 不能按空气磁导率 μ_0 计算, 此时 $R_{\text{总}}$ 约为 700 Ω , 取 $N = 300$ 匝, 综合以上公式计算出达到饱和时的电流 I 为

$$I = \frac{B \cdot S \cdot R_{\text{液}}}{N} \quad (10)$$

将各个参数值代入公式(9), 最后得出饱和电流 I_m 的值: $I_m = 3.33$ A。

将 $\mu_{\text{钢}} = 715\mu_0$, $\mu_{\text{液}} = 5\mu_0$ (其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$), 代入公式(1)(2)(3)(4) 计算得出此时磁场强度公式

$$H = \frac{N \cdot I}{R_{\text{总}} S \mu_{\text{液}}} \quad (11)$$

将磁场强度公式(11)代入磁感应强度公式(3),得出磁感应强度 B 与磁导率 μ 的关系

$$B = 0.534 \mu I \quad (12)$$

当 $I=2 \text{ A}$ 时, $R_{\text{总}}=989.58 \Omega$, 此时未达到饱和电流 I_m 的值, 可知计算结果有效。MRD 间隙内的磁场强度 $H=271.1168 \text{ (A/m)}$ 。

3.2 MRD 的有限元分析

利用有限元软件可以更精确地分析 MRD 在阻尼间隙内的磁场强度分布和磁力线分布。由于新型磁流变阻尼器为轴对称结构, 只对其二分之一结构进行电磁场有限元分析。约束条件为: 磁通量的作用方向和轴对称分析结构的表面相平行, 即 $A_z=0$ 。根据静态磁场有限元分析步骤对其进行建模分析: (1) 首先对两种 MRD 创建物理环境; (2) 在 ANSYS 环境下对两种 MRD 进行建模, 然后经过单元的选择, 网格的划分、对两种模型的不同区域赋予材料特性; (3) 加载约束条件; (4) 求解; (5) 后处理^[11-12]。

根据表 2 列出的新型 MRD 结构尺寸建立二维模型, 并分析在励磁电流 $I=2 \text{ A}$ 时阻尼间隙内的磁力线分布情况。图 7、图 8 分别为设计尺寸参数下 MRD 的有限元模型和 MRD 磁力线分布。

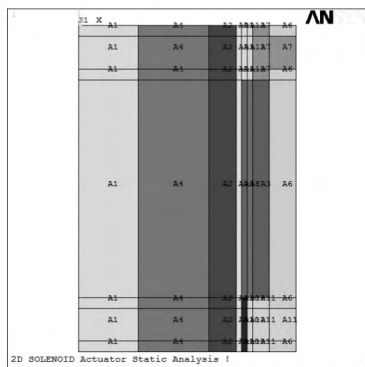


图 7 $I=2 \text{ A}$ 时模型分块图

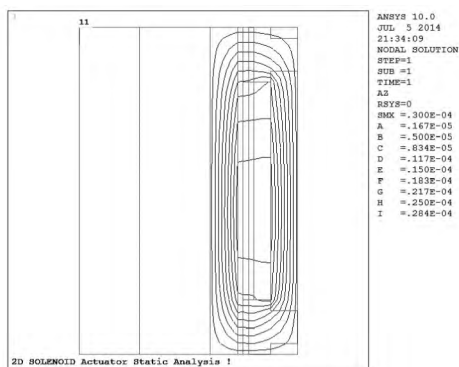


图 8 $I=2 \text{ A}$ 时磁力线分布

由图 8 可见, 大部分磁力线绕内缸筒经内层缸筒、外层缸筒组件、线圈缠绕体、导磁环及导磁套筒流回, 形成封闭的闭合曲线; 只有 4 根磁力线经内层缸筒直接与导磁套筒相接。在磁流变液阻尼通道之外的磁力线几乎平行分布, 与磁流变液的流动方向几乎相垂直。

仿真得出 $I=2 \text{ A}$, $N=300$ 匝时 MR 间隙内的磁流变液在水平方向的磁场强度 H 值分别为 224.11 A/m 、 283.54 A/m 、 363.58 A/m 、 376.27 A/m 、 59.216 A/m 、 119.05 A/m 、 174.50 A/m 。取最大值和最小值的平均值, 得出此时磁场强度 $H=217.743 \text{ A/m}$ 。

当励磁电流 I 分别取 0.4 、 0.8 、 1.2 、 1.6 、 2.0 、 2.4 、 2.8 、 3.2 、 3.6 、 4.0 时, 仿真不同励磁电流下的磁感应强度值 B , 列出仿真结果如表 3 所示。

表 3 电流 I 取不同值时磁感应强度 B 的平均值

I/A	B/T	I/A	B/T
0.4	0.056 33	2.4	0.542 70
0.8	0.112 65	2.8	0.607 58
1.2	0.213 79	3.2	0.663 30
1.6	0.365 51	3.6	0.746 23
2.0	0.456 89	4.0	0.813 20

根据表 3 仿真得出的励磁电流 I 不同时 MRD 阻尼间隙内磁感应强度 B 的平均值。用 MATLAB 软件画出电磁场理论分析和有限元分析时 MR 阻尼通道内 MRF 的 $I-B$ 曲线。这样更加直观地描述随着激励电流的增大磁感应强度的变化情况。为了验证新型 MRD 结构设计的可行性, 将忽略漏磁的情况下对新型 MRD 电磁场分析的理论值和利用 ANSYS 软件对新型 MRD 有限元分析的实际值进行比较。图 9 为 MR 阻尼通道内磁流变液的 $I-B$ 曲线。

4 结论

提出了一种新型磁流变阻尼器的结构设计,克服了常见磁流变阻尼器的缺陷和不足,尤其描述了阻尼缸筒和线圈组件的设计结构。阐述了其工作原理及材料的选择。分别通过电磁场理论分析和应用 ANSYS 软件对新型 MRD 进行了静态磁场分析。分析结果表明:大部分磁力线绕内缸筒经内层缸筒、外层缸筒组件、线圈缠绕体、导磁环及导磁套筒流回,形成封闭的闭合曲线,只有少数磁力线直接由内层缸筒与导磁套筒相接;MR 通道之处的磁力线几乎平行分布,与磁流变液的流动方向几乎垂直;相同尺寸的 MRD 饱和电流相差不大;在允许的电流范围内利用电磁场理论分析和有限元软件分析 MR 阻尼间隙内的磁场强度值几乎相等。根据理论分析和有限元分析可知这种新型 MRD 的结构设计是可行的。

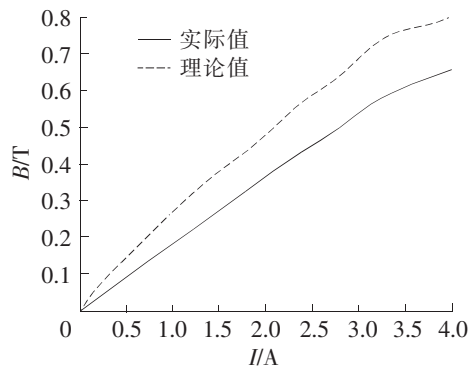


图 9 MR 阻尼通道内 MRF 的 I-B 曲线

参 考 文 献

- [1] Jolly M R. properties and application of commercial Magneto-rheological fluids[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(1): 5-13.
- [2] Rabinow J. The magnetic fluid clutch[J]. AIEE Trans, 1948, 67: 1308-1315.
- [3] 张红辉, 廖昌荣, 陈伟民, 等. 磁流变阻尼器磁路设计及磁饱和和有限元分析[J]. 功能材料与器件学报, 2004, 10(4): 493-497.
- [4] 沙凌锋, 徐赵东, 李爱群, 等. 磁流变阻尼器的设计与分析[J]. 工业建筑, 2008, 38(3): 59-64.
- [5] 司鸽, 李晓红, 等. 磁流变阻尼器管道流动特性研究[J]. 功能材料, 2006(5): 831-833.
- [6] 徐晓美, 富春. 线圈外置式磁流变阻尼器及其磁场有限元分析[J]. 拉机与农用运输车, 2009, 36(5): 54-56.
- [7] 刘斌, 李爱群. 磁流变阻尼器及其研究进展[J]. 常州工学院学报, 2005, 18(B12): 1-6.
- [8] 王昊, 史小梅. 磁流变阻尼器的磁场分析[J]. 液压与气动, 2009(12): 67-69.
- [9] 梁允魁, 胡元等. 磁流变阻尼器原理及力学特性研究[J]. 煤矿机械, 2012, 33(2): 45-47.
- [10] 徐晓美, 曾才民, 余伟. 线圈外置式磁流变阻尼器阻尼特性理论研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(12): 46-48.
- [11] 兰文奎, 郑玲, 李以农. 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): 142-146.
- [12] 孙明礼. ANSYS 10.0 电磁学有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 41-51.

A New Structure of Magneto-rheological Damper

Hao Ruixiao, Xing Haijun, Hao Ruican, Wang Rongdong, Yang Shaopu

(Dept of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: A new structure of magneto-rheological damper is presented, which mainly includes inner cylinder, outer cylinder and the coil assembly. Coil assembly is fixed at the outside of outer cylinder. Electromagnetic coil is not in touch with magnetic flow. This new structure has such advantages as convenient assembling and disassembling, easy maintaining, good heat dissipation, and improved effective stroke of magneto-rheological damper. Electromagnetic finite element model of magneto-rheological damper is modeled with ANSYS. Compared with the values of the electromagnetic field theory and the values of finite element analysis, analysis from ANSYS confirms that the structure of outer cylinder and the coil assembly enables effective electromagnetic field generated in flow channel of magnetic flow.

Key words: magneto-rheological damper; electromagnetic field; finite element analysis