

文章编号:1000-582X(2010)05-035-06

磁流变阻尼器的有限元参数优化设计

李以农,潘杰锋,郑 玲

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:磁流变阻尼器结构优化设计是高性能磁流变阻尼器研制及应用的关键技术。在传统磁流变阻尼器设计方法的基础上,将有限元分析方法引入结构优化设计程序中。针对某汽车磁流变阻尼器的设计、开发,建立了优化模型,提出了磁流变阻尼器优化设计计算流程。采用有限元分析软件 ANSYS 的参数化编程语言 APDL(ANSYS Parametric Design Language),对汽车磁流变阻尼器的结构参数进行了优化。研究表明:采用参数化编程语言 APDL 程序对磁流变阻尼器进行优化设计,结构体积明显减小,磁场分布更加合理,能量利用率增加,阻尼力调节范围满足实际工程需要,优化设计方法是可行和有效的。

关键词:有限元;参数化设计语言;磁流变阻尼器;优化设计

中图分类号: TM 142 ;U463.1

文献标志码: A

Design optimization of magneto-rheological damper based on finite element parametric language

LI Yi-nong, PAN Jie-feng, ZHENG Ling

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Design optimization of Magneto-rheological (MR) dampers is important to meet engineering applications and obtain MR dampers with better performance compared with that designed by conventional design methods. Optimal design of MR dampers in vehicle based on Finite Element (FE) is proposed. A mathematical model to describe optimization problem is constructed. In the optimization, the special cylindrical volume filled with active fluid is considered as the objective function, and the controllable range of damping force is constrained to satisfy the requirements of semi-active control system in vehicle. An optimization procedure is constructed via a commercial finite element method parametric design language. Optimization design of the MR damper with valve mode in vehicle is performed by using the optimization tool developed. The results show that the optimal MR damper has minimum volume, reasonable magnetic flux density distribution, effective energy consumption and the controllable damping force to satisfy the requirement of semi-active control system in vehicle. The results demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed optimization approach.

Key words: finite element method; parametric design language; magneto-rheological damper; optimization

收稿日期:2009-12-20

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA110111);重庆市科技攻关重点项目(CSTC 2009 AB6022)

作者简介:李以农(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事汽车底盘控制研究。(Tel)023-65106094;
(E-mail)ynli@cqu.edu.cn。

磁流变液是一种能随周围磁场变化而做出响应的流体^[1-2],具有响应速度快,可控范围宽的特点。由于机电转换的快速性和连续性,磁流变作动器被广泛应用于工程机械、汽车、建筑及医疗等行业^[3-6]。

传统磁流变阻尼器结构设计主要根据 Bingham 塑性模型,结合工程经验,计算结构参数^[7-9]。但这种方法比较粗放,未实现结构参数优化和精细化设计。Nam 等^[10]分析了结构参数对磁流变阻尼器静态特性和动态特性的影响,采用改变截面形状的方法,提高聚磁性能以增强静态和动态性能,实验验证了这种设计的有效性。同样的思想还被运用于磁流变离合器^[11]。Li 等^[12]运用 ANSYS,导入不同电工材料属性,讨论了工作缝隙宽度和长度对阀芯性能的影响。尽管他们在设计中运用了有限元电磁场分析,但目的是验证前期参数设计的有效性,并没有真正将有限元分析纳入结构参数设计中。Nguyen 等^[13]对磁流变液压阀进行了优化设计,尽管在设计中作了很多假设,如平均缝隙磁流密度等,使问题大为简化,但其设计思想成为磁流变器件优化设计的重要参考。

笔者结合磁流变阻尼器的工程应用,以磁流变阻尼器的工作体积为设计目标,以可控阻尼力和流体工作区域的磁感应强度为约束条件,建立了磁流变阻尼器优化设计模型。以 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 为设计工具,编写了优化设计计算程序,对某重型汽车磁流变阻尼器进行了结构优化设计。

1 磁流变阻尼器结构设计

图 1 是基于流动模式的磁流变阻尼器。铁芯和外套由活塞杆同心固定,形成活塞。当活塞运动时,磁流变液流过铁芯和外套形成的缝隙,产生基值阻尼力。当线圈中通过一定电流时,线圈产生磁场,由铁芯轭铁导向形成磁场回路,作用于缝隙中的磁流变液,使磁流变液体的剪切应力增大,产生可控阻尼力。

磁流变液在无磁场作用下表现为牛顿流体,在磁场作用下表现为非牛顿流体。根据 Bingham 模型^[14],其特性为

$$\tau = \tau_y(B) + \eta \dot{\gamma}, \quad (1)$$

式中: τ_y 是磁场作用下的剪切屈服应力; η 是零场黏度; $\dot{\gamma}$ 是剪切速率。

选用的磁流变液体,其剪切屈服应力 τ_y 与磁感应强度 B 的关系可拟合为

$$\tau_y = 1.43 \times 10^6 B^2 + 4.743 \times 10^{-3} B - 1. \quad (2)$$

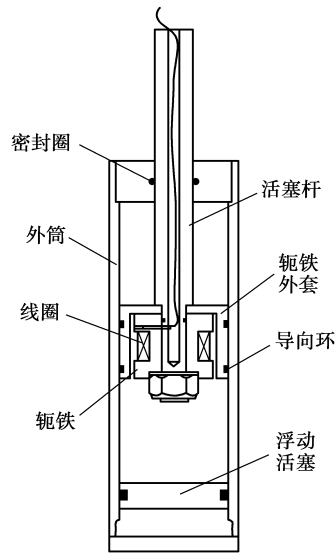


图 1 磁流变阻尼器示意图

由于磁流变阻尼器具有流动工作模式,当磁流变液体流过环形通道时,磁流变阻尼器产生的阻尼力可描述为

$$F = \frac{12\eta L Q}{g^3 \omega} \Delta A v + \Delta A \frac{c L \tau_y}{g}, \quad (3)$$

式中:第 1 项为黏性阻尼力;第 2 项是可控阻尼力; L 是工作缝隙长度; g 是缝隙高度; ω 是缝隙宽度; Q 是磁流变液体流量; ΔA 是活塞有效面积; c 是常数根据经验可取 2~3; v 是活塞的速度。

由公式(3)可以看出:磁流变阻尼器的基本阻尼力与磁流变液体的零场黏度和结构参数有关,而可控阻尼力则与环形通道处的磁感应强度有关。为了增加磁流变阻尼器的可控阻尼力,改善静态特性,应尽量提高环形工作区域的磁感应强度 B_t 。根据安培法则:

$$NI = \oint_c H dl = \sum_{e=1}^n H_e l_e + H_t l_t, \quad (4)$$

式中: H_t 为环形工作区域的磁场强度; l_t 为其轴向长度; H_e 、 l_e 分别是闭环磁路其他部分的磁场强度和磁路长度。很明显,在 N 、 I 为定值的情况下,要增大工作通道处的磁场强度 H_t ,必须减小磁路其他部分的磁压降。由于 H_e 与材料本身性质有关,且与 H_t 同步增减,变化不大。因此,改善静态特性最好的办法是缩减其他部分的长度 l_e ,即使磁路部分结构尽量紧凑,活塞体积最小。

$$\text{根据高斯定律: } \varphi = \int_s B ndS = B_t S_t = B_e S_e. \quad (5)$$

式中: S_t 为环形工作区域的磁面面积; B_e 和 S_e 分别是其他区域的磁感强度和磁通面积。

为保证磁流变液能尽量工作在磁饱和强度附

近,其他区域的磁感应强度不能达到自身的饱和点。

2 磁流变阻尼器的优化设计

2.1 优化模型

图 2 是磁流变阻尼器磁路结构示意图。

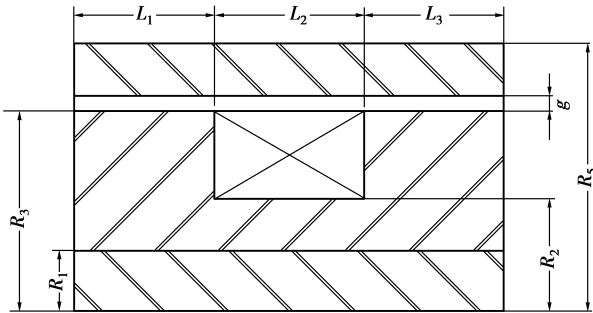


图 2 磁流变阻尼器磁路结构示意图

考虑到结构对称性,在对磁场进行有限元分析时,采用 1/2 轴对称平面模型。

在优化设计中,考虑到阻尼力的需求和可加工性,将 L_1 、 L_3 和 g 设为定值,其他参数如 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_5 以及 L_2 则为设计变量(见 2.3 节中的表 4)。目标函数为工作区域(图 2 所示的圆柱体)的体积。约束条件即状态空间见 2.3 节中的表 5。

2.2 优化流程

采用 ANSYS 软件的 APDL(ANSYS Parametric Design Language)编程语言编写优化主程序^[15-16],对磁流变阻尼器的结构参数进行优化,同时调用有限元分析模块,对电磁场进行有限元分析并提取相关数据,以实现优化设计参数的循环迭代。

优化设计流程如图 3 所示。

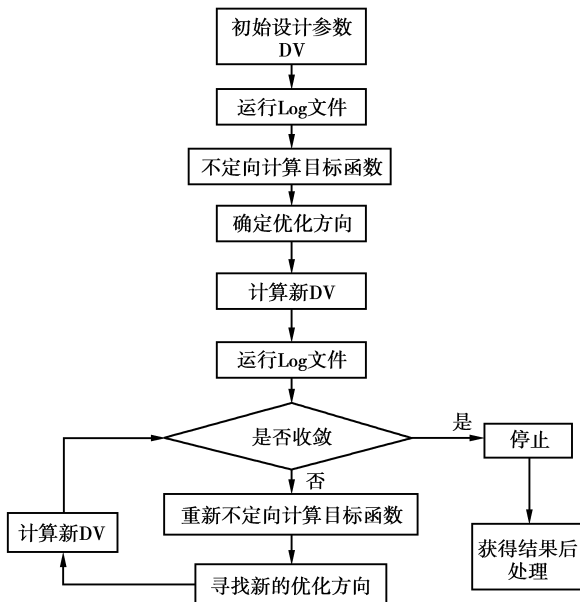


图 3 优化计算流程图

2.3 优化步骤

用 APDL 编制一个 log 文件,此 log 文件包含一个完整的分析过程如前处理、求解和后处理。运行该 log 文件,可获得初始参数条件下的模拟计算结果如磁流变阻尼器的基值阻尼力、可控阻尼力、工作区域体积及各部分的磁感应强度等。在 log 文件中,首先要定义材料属性包括磁流变液体、外筒(45 钢)和磁芯(DT4)的性能,见表 1-3。然后划分网格,加载边界条件和电流密度,对电磁场有限元进行求解并提取相关部位的磁感应强度。ANSYS 软件在优化程序中提供了设计变量(DV)、状态空间(SV)和目标函数。其中,设计变量是指的一些关键设计参数,包括活塞杆半径 R_1 ,线圈槽底到活塞杆的距离 T_1 ,线圈槽深度 T_2 等设计变量。状态空间(SV)是指约束条件,这里限定可控阻尼力的工作范围和某些区域的磁感应强度,以保证优化设计后的磁流变减振器的阻尼力工作范围和调节参数满足工程应用的需要。目标函数设定为工作体积(含活塞、缝隙和外筒磁路区域体积),优化设计的目的是在满足可控阻尼力约束条件的情况下,使工作部分体积最小,结构更紧凑,能量分布更加集中和合理。优化计算采用零阶法快速搜索再用一阶法精确计算的方法。根据 ANSYS 软件确认收敛的条件,只要后一步的优化结果与前一步优化结果的差小于优化时设定的精度,就可以认为收敛。

表 1 磁流变液的磁感强度与磁场强度关系

$H/(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	30.0	40.0	60.0	80.0	100.0
B/T	0.08	0.20	0.30	0.38	0.50
$H/(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	120.0	140.0	160.0	180.0	200.0
B/T	0.55	0.62	0.66	0.71	0.76

表 2 45 钢的电工性能

$H/(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	164.0	245.0	365.0	545.0	813.0
B/T	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
$H/(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	1 213.0	1 809.0	2 996.0	11 204.0	
B/T	1.20	1.40	1.60	1.80	

表 3 DT4 的电工性能

$H/(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	21.2	42.0	63.2	84.8	104.0
B/T	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
$H/(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	120.0	135.0	180.0	220.0	304.4
B/T	1.10	1.20	1.32	1.40	1.45
$H/(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	480.0	893.0	1 600.0		
B/T	1.50	1.55	1.60		

表 4 优化程序的设计变量

DV	含义
R_1	活塞杆半径
T_1	到活塞杆的距离: $R_2 = T_1 + R_1$
T_2	线圈槽深度: $R_3 = T_2 + R_2$
T_4	活塞外径: $R_5 = T_4 + R_1$
L_2	线圈槽长度

表 5 优化程序的状态空间

SV	含义及限制范围
F_1	无磁场作用的纯基值阻尼力(1 000~1 500 N)
F_2	单纯磁场作用下的阻尼力(6 000~6 500 N)
$B_{\max 1}$	活塞杆处磁感强度最大值(≤ 1.4 T)
$B_{\max 2}$	铁芯磁感强度最大值(≤ 1.5 T)
$B_{\min 4}$	一处工作缝隙磁感强度最小值(≥ 0.55 T)
$B_{\min 6}$	另一处工作缝隙磁感强度最小值(≥ 0.55 T)
$B_{\max 7}$	外罩磁感强度最大值(≤ 1.4 T)

3 优化设计实例

针对某重型汽车磁流变阻尼器,设定初始设计变量值和相关约束条件,采用 APDL 优化设计程序,对磁流变阻尼器进行优化设计。表 6 是初始设计变量,其中 B_2 为磁芯最大磁感应强度, B_4 为缝隙处磁感应强度。表 7 是约束条件。

表 6 初始设计变量

结构参数					
R_1/mm	T_1/mm	T_2/mm	g/mm	T_4/mm	L_2/mm
15	13	10	2	8	25
性能特性					
V/mm^3	F_2/N	B_2/T	B_4/T		
354 673	14 707	1.441	0.720		

表 7 约束条件

状态空间(DV)			
$B_{\max 1}/B$	$B_{\max 2}/B$	$B_{\max 4}/B$	$B_{\max 6}/B$
0~1.50	0~1.60	0.52~0.60	0.52~0.60
$B_{\max 7}/B$	F_1/N	F_2/N	
0~1.50	1 500~2 100	6 000~7 000	

表 8 优化结果

F_1/N	F_2/N	L_2/mm	R_1/mm
1 349	6 270	15.736 0	8.582 6
T_1/mm	T_2/mm	T_4/mm	V/mm^3
8.616 4	9.958 3	4.718 9	0.172 58E06
$B_{\max 2}/\text{T}$	$B_{\min 4}/\text{T}$	$B_{\min 6}/\text{T}$	$B_{\max 7}/\text{T}$
1.320 6	0.530 3	0.529 6	1.372 1

经过 28 次迭代运算,优化结果收敛,约束条件满足要求。表 6 的初始参数和表 8 的优化结果对比可以看出:与初始设计参数相比,体积减小 48.6%,阻尼力在 1 349~7 619 N 之间,调节系数为 5.648,达到悬架半主动控制的要求。

图 4 是目标函数随迭代次数的变化,可以看出:随着迭代次数的增加,体积从初始的 354 673 mm^3 减小到 172 580 mm^3 ,结构更加紧凑。事实上,当磁芯体积减小时能有效降低磁回路的长度,使磁场分布理论上更集中,从而减小涡旋电流产生概率,提高磁场作用于工作区域的效率,提高能量利用率。图 5 是工作缝隙处的磁感应强度 B 随迭代次数的变化,可见,随迭代次数增加,磁感应强度有所下降,磁感应强度的变化主要受可控阻尼力 F_2 (约束条件)的影响。图 6 是可控阻尼力随迭代次数的变化,可控阻尼力在迭代过程中逐步下降,以满足约束条件的要求。图 7 和 8 是初始条件和优化后的磁感应强度分布,表明优化后磁场分布更加集中,结构更加紧凑,导致活塞的磁损耗减小,能量利用率提高。

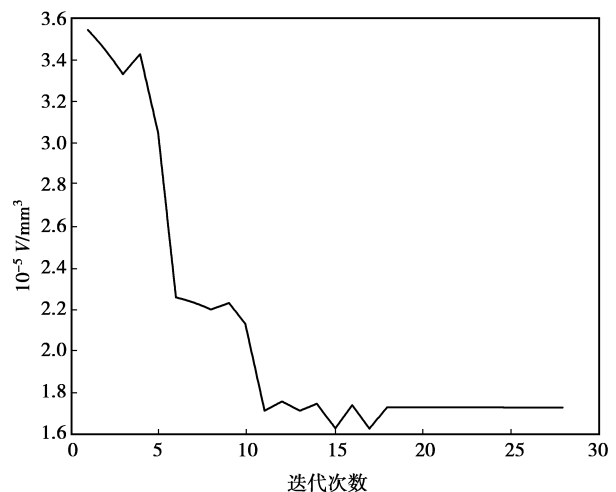


图 4 工作体积的迭代过程

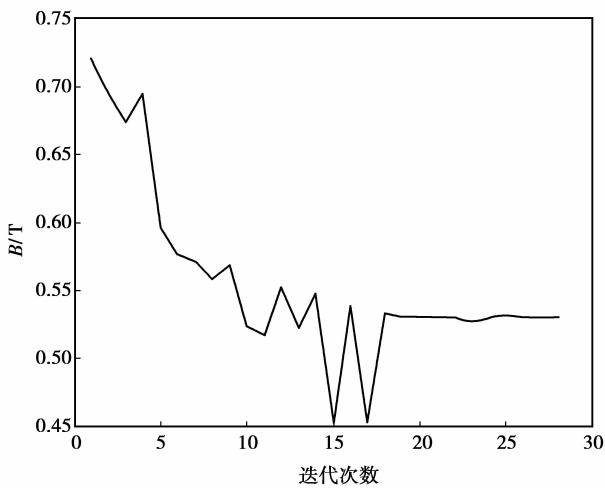


图5 缝隙处磁感强度的迭代过程

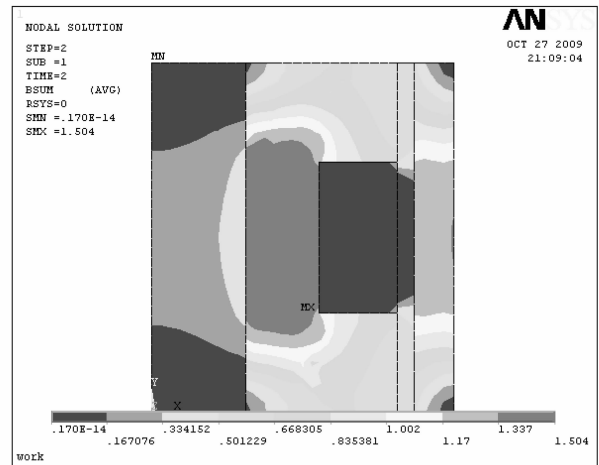


图8 优化后的磁感应强度分布

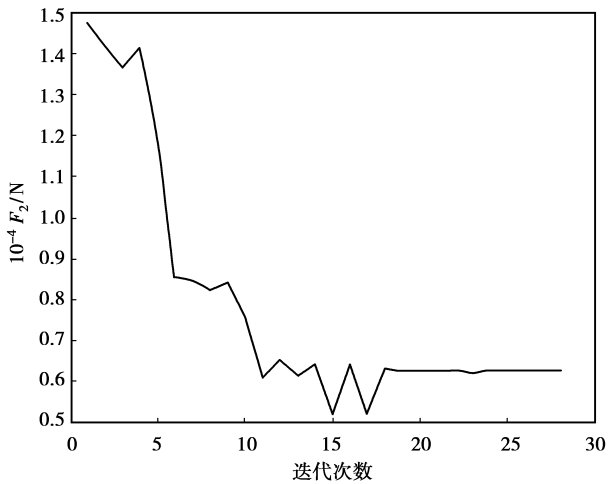


图6 可控阻尼力的迭代过程

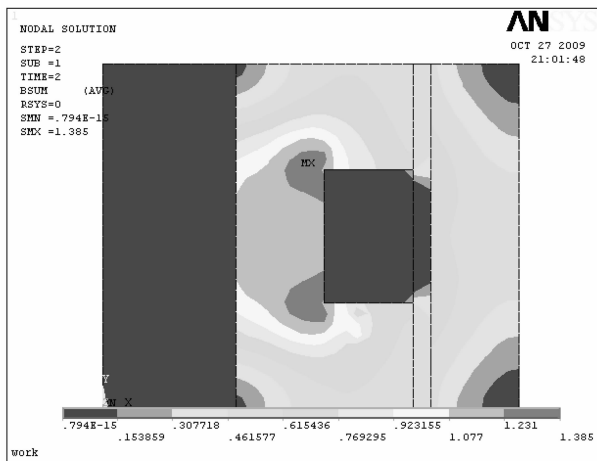


图7 初始条件下的磁感应强度分布

4 结 语

笔者针对磁流变阻尼器的结构优化设计,将有限元电磁场分析融入结构优化过程中,建立了以工作体积为目标函数,阻尼力及相关部位的磁感应强度为约束条件的优化模型,提出了基于 ANSYS 参数化设计语言(APDL)的优化设计方法。研究结果表明:

- 1)基于 ANSYS 参数化设计语言(APDL)的优化设计方法是可行的,随着迭代次数的增加,目标函数逐步收敛并趋于最小值。优化后活塞总体积明显减小,从而提高聚磁性能,使能量利用效率提高。
- 2)采用 ANSYS 软件的 APDL 编程语言编写优化主程序,实现了有限元电磁场分析与优化设计过程的有机结合,使磁流变阻尼器的优化设计效率和设计空间大大提高,便于工程应用。

完成优化磁流变减振器的加工和性能测试,是拟进一步完成的研究工作。

参考文献:

[1] DORFMANN A, OGDEN R W, WINEMAN A S. A three-dimension non-linear constitutive law for magnetorheological fluids, with applications [J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 2007, 42(2):381-390.

[2] 贾永枢,周孔亢. 车用磁流变液流变特性分析及试验[J]. 机械工程学报,2009(6):246-250.

JIA YONG-SHU, ZHOU KONG-KANG. Rheological properties analysis and via experiment of magnetorheological fluid fpr automobile [J]. Chinese

- Journal of Mechanical Engineering, 2009(6):246-250.
- [3] XU Z D, GUO Y Q. Neuro-fuzzy control strategy for earthquake-excited nonlinear magnetorheological structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28(9):717-727.
- [4] JOLLY M R, BENDER J W, CARLSON J D. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(5):13-15.
- [5] WIESLAW L Y, WOJCIECH S, CEZARY J. Simulation and investigation of magnetorheological fluid brake[C]// 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference September 1-3, 2008, Poznań - Poland. [S. l.]: IEEE, 2008(13):2406-2411.
- [6] 舒红宇,郭元锋.汽车磁流变风扇离合器分析与设计[J].重庆工学院学报:自然科学版,2008,22(12):1-4.
SHU HONG-YU, GUO YUAN-FENG. Analysis and design of automobile magnet orheological fan clutch[J]. Journal of Chongqing Institufe of Technology: Natural Science Edition, 2008,22(12):1-4.
- [7] 郑玲,李以农,胡勇,等.磁流变减振器磁路设计与结构优化[J].振动工程学报,2008,21(2):173-178.
ZHENG LING, LI YI-NONG, HU YONG, et al. Electromagnetic design and optimization of magnetorheological dampers [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(2):173-178.
- [8] 孙鸿.磁流变减振器设计及控制系统仿真[D].长春:吉林大学,2006.
- [9] 刑海军,杨绍普,申永军.旁置孔隙阀式磁流变阻尼器阻尼力解析解[J].振动与冲击,2009, 28(5):176-179.
XING HAI-JUN, YANG SHAO-PU, SHEN YONG-JUN. Analytic solution of damper force of a bypass slot valve type magnetorheological damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(5):176-179.
- [10] NAM Y J, PARK M K. Electromagnetic design of a magnetorheological damper[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(2): 181-191.
- [11] NAM Y J, MOON Y J, PARK M K. Performance improvement of a rotary MR fluid actuator based on electromagnetic design [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 19(6): 695-705.
- [12] LI W H, DU H, GUO N Q. Finite element analysis and simulation evaluation of a magnetorheological valve[J]. Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(6): 438-445.
- [13] NGUYEN Q H, CHOI S B, WERELEY N M. Optimal design of magnetorheological valves via a finite element method considering control energy and a time constant [J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(2):24-25.
- [14] DYKE S J, SPENCER B F, SIAN M K, et al. Experimental verification of semi-active structural control strategies using acceleration feedback [C]// The 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, September 1-6, 1996, Chiba, Japan. Chiba, Japan: IEEE, 1996(3): 291-296.
- [15] 秦琴,陶津平,邱峰,等.基于ANSYS APDL的复杂载荷加载法[J].计算机辅助工程,2009,18(2):92-94.
QIN QIN, TAO JIN-PING, QIU FENG, et al. Application method for complex loads with ANSYS APDL [J]. Computer Aided Engineering, 2009, 18(2):92-94.
- [16] 博弈创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2004.

(编辑 张 芊)