

MRD 模型参数识别及其在振动控制中的应用*

廖英英, 刘永强, 刘金喜, 杨绍普

(石家庄铁道大学土木学院 石家庄, 050043)

摘要 为了识别磁流变阻尼器(MRD)Bouc-Wen 模型中的未知参数,提高半主动控制中的参数通用性,提出一种逐渐缩小参数取值范围的遗传算法(GA)提高识别精度,并根据参数随电流的变化趋势对其函数关系进行拟合。对 MRD Bouc-Wen 模型进行了数值仿真设计。除试验数据外,在无其他先验知识的条件下利用遗传算法进行了参数识别,并在建立 62 个自由度铁道车辆整车模型的基础上进行了悬挂半主动控制系统数值仿真分析,用于验证识别出的Bouc-Wen 模型。仿真结果表明,利用遗传算法识别的MRD Bouc-Wen 模型进行半主动控制可以有效降低车体横向加速度,提高车辆运行平稳性能。

关键词 磁流变阻尼器; Bouc-Wen 模型; 参数辨识; 遗传算法; 半主动控制

中图分类号 TB535.1; U260.11

引言

磁流变阻尼器是近年来发展最为迅速的一种智能化阻尼器,磁流变液在强磁场作用下,能在瞬间(ms级)从自由流动状态转为半固体状态,呈现可控的屈服强度。磁流变阻尼器具有出力大、调节范围宽、温度适应能力强、响应迅速和低能耗等优点,被广泛应用在军事、工业和民用领域^[1-3]。由于磁流变阻尼器存在着一种特殊的力学特性——滞回特性^[4],使其力学模型十分复杂,模型参数识别比较困难,Bouc-Wen 模型就是最为典型的一个。Ikhouane 等^[5-6]曾采用解析的方法对 Bouc-Wen 模型的参数识别过程作详细阐述,但其参数识别过程异常复杂,且需要先进行大量假设和定义。Giuclea 等^[7-8]利用遗传算法(GA)对 Bouc-Wen 修正模型进行参数辨识,但假设了 4 个未知参数为常值或对模型的表达式进行了修改。因此,在除试验数据外无其他任何先验知识的条件下,怎样通过非解析的方法对 Bouc-Wen 模型参数进行辨识已成为研究重点。

笔者采用遗传算法对 Bouc-Wen 模型的 8 个未知参数进行辨识,并在模型参数辨识的基础上对基于磁流变阻尼器的半主动控制在铁道车辆中的应用进行仿真分析,以验证其有效性。

1 MRD 力学特性试验

利用 MTS 材料性能测试试验台测量 MR 阻尼器输出阻尼力,激励采用正弦信号 $A\sin(2\pi ft)$,其中, $A=10\text{ mm}$, $f=0.5\text{ Hz}$, 电流强度分别取为 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 和 3 A。测量得到的位移-阻尼力曲线和速度-阻尼力曲线如图1、图2所示。由图中可以发现,当电流增大到 3 A 时,MR 阻尼器输出阻尼力达到了饱和。

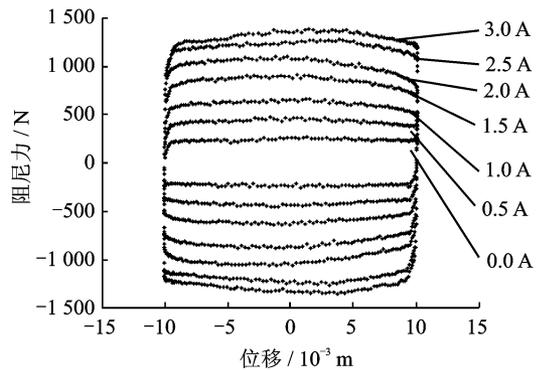


图1 位移-阻尼力试验曲线

2 Bouc-Wen 模型参数识别

MRD Bouc-Wen 模型^[9]的结构如图 3 所示,其

* 国家自然科学基金资助项目(编号:10902074,11172182);铁道部重点资助项目(编号:2011J013-A);河北省教育厅资助项目(编号:Z2011228)

收稿日期:2010-04-12;修改稿收到日期:2010-09-03

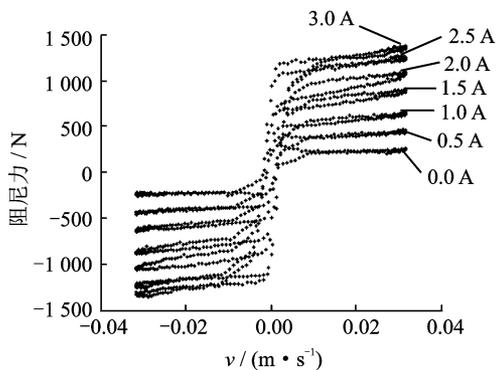


图2 速度-阻尼力试验曲线

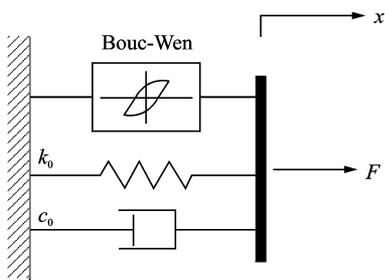


图3 Bouc-Wen 模型结构

数学表达式为

$$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z \quad (1)$$

其中:滞回变量 z 由下式决定

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (2)$$

其中: x 和 \dot{x} 分别为阻尼力两端相对位移和相对速度; x_0 为刚度为 k_0 的弹簧的初始变形。

利用SIMULINK对Bouc-Wen模型进行设计,采用4阶Runge-Kutta法进行数值仿真,其实现过程如图4所示。

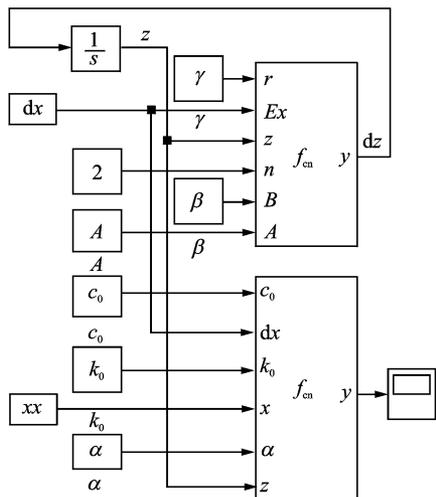


图4 Bouc-Wen 模型在SIMULINK 中的实现

2.1 遗传算法

Bouc-Wen 模型包含 $c_0, k_0, x_0, \alpha, \gamma, \beta, A$ 和 n 共8个未知参数,一般迭代的优化算法很难精确识别。1962年Holland提出一种新的全局优化算法——遗传算法。该算法借用了生物遗传学的一些观点,凭借自然选择、遗传和变异等作用机制,体现了自然界中生物进化过程,具有准确性、计算速度快和效果理想等优点^[10-11]。MATLAB遗传算法的命令为

$$[x, fval] = ga(@fitnessfunc, N \text{ var } s, A, b, Aeq, beq, LB, UB, Nonlcon, Options) \quad (3)$$

其中:fitnessfunc为适应度函数; $N \text{ var } s$ 为待求未知变量的个数;Options为GA的结构参数。

GA的线性约束表达为

$$Ax \leq b; Aeqx = beq; LB \leq x \leq UB \quad (4)$$

GA的非线性约束用Nonlcon函数来表达,它包括

$$\begin{cases} c_i(x) \leq 0 & (i = 1, 2, \dots, m) \\ ceq_i(x) = 0 & (i = m + 1, \dots, mt) \end{cases} \quad (5)$$

2.2 参数识别

对MRD Bouc-Wen模型的8个未知参数进行GA运算之前,除了通过试验得到的试验数据外,在无任何先验知识的条件下,首先需要设置较宽的参数取值范围。如

$$\begin{cases} LB = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 1; 0] \\ UB = [1 \times 10^6; 1 \times 10^6; 10; 1] \end{cases} \quad (6)$$

定义Bouc-Wen模型的适应度函数为

$$fitnessfunc = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i^{sim} - F_i^{exp}}{\Delta F} \right)^2 \quad (7)$$

其中: n 为试验数据点个数; F^{sim} 和 F^{exp} 分别为通过仿真和试验得到的阻尼力; $\Delta F = F_{max}^{exp} - F_{min}^{exp}$ 为试验数据中最大与最小阻尼力值之差。

较宽的取值范围计算出的参数精度较差,因此需要将0~3 A电流作用下识别出的各参数的最小值作为下限,最大值作为上限,重新设置参数取值范围进行GA运算。由于遗传算法在全局优化过程中是随机抽取参数范围内的值并进行交叉和变异的。为防止估算结果出现偶然性,保证计算结果的收敛性,本文根据0~3 A不同电流作用下的试验数据,共进行3组参数估算。3组计算结果中 $c_0, k_0, x_0, \alpha, \gamma, \beta, A$ 和 n 这8个参数随电流增大的变化趋势及3次

计算误差曲线如图5所示。由图5可以发现,除 α, c_0, k_0 外,其余参数均随电流增大呈随机变化,因此,参数 x_0, γ, β, A, n 均分别取3组数据的平均值为

$$\gamma = 7.0369 \times 10^5, \beta = 2.1535 \times 10^4, A = 175.2096, n = 1.7936, x_0 = 0.0028 \quad (8)$$

根据0~3 A不同电流作用下的试验数据,对待识别参数 c_0, k_0, α 再次进行GA估算,得到3个参数的估算值。利用MATLAB中的曲线拟合工具箱对参数随电流变化曲线进行多项式拟合,拟合结果如图6所示。 c_0, k_0, α 为电流 I 的多项式函数为

$$\begin{cases} \alpha = 3.171 \times 10^4 I + 2.0251 \times 10^4 \\ c_0 = -932.9 I^2 + 5233 I + 930.6 \\ k_0 = 651.9 I^2 - 60.65 I + 1572 \end{cases} \quad (9)$$

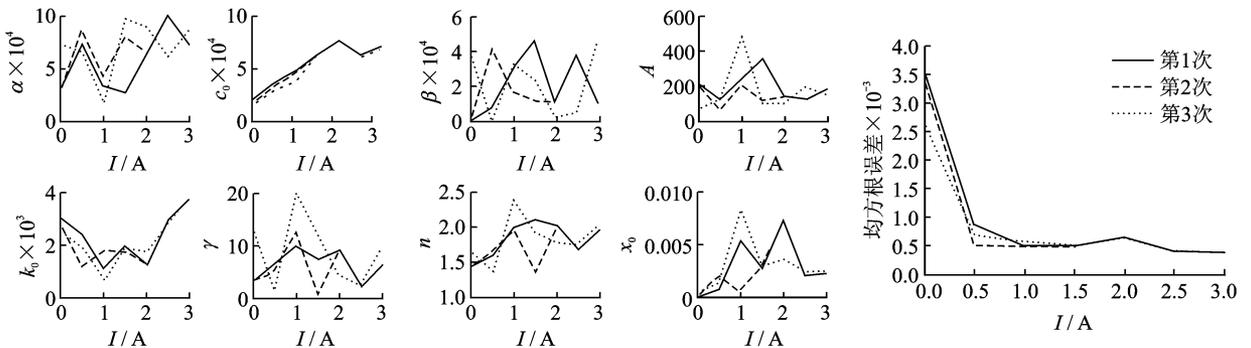


图5 参数随电流变化趋势及误差曲线

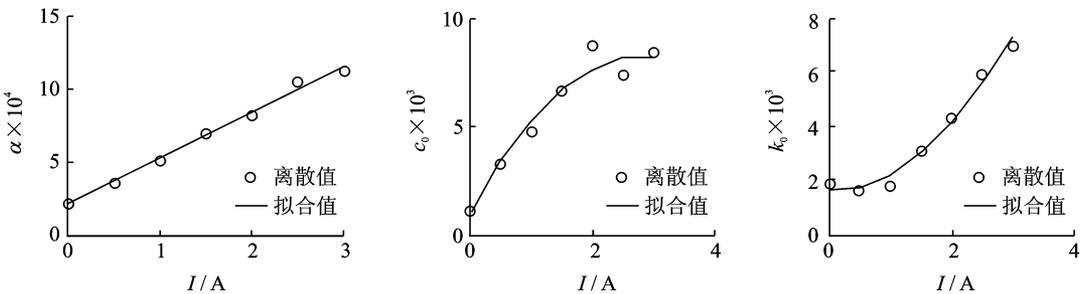


图6 c_0, k_0, α 拟合结果

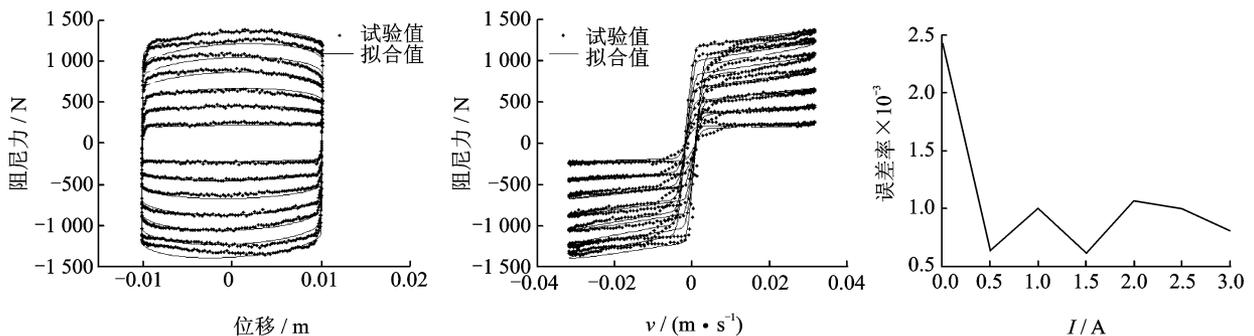


图7 仿真值与试验值对比

2.3 误差分析

根据GA识别出的未知参数,Bouc-Wen模型可以表示为

$$\begin{cases} F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z \\ \dot{z} = -\gamma |\dot{x}| |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \end{cases} \quad (10)$$

其中:参数分别见式(8)和式(9)。

根据上述公式进行数值仿真,对比仿真与试验的位移-阻尼力和速度-阻尼力结果,如图7所示。按照式(10)计算出的不同电流作用下的仿真值与试验值之间的误差曲线,发现两者之间的均方根值误差保持在 10^{-3} 量级范围内,吻合效果较好。

3 MRD 在车辆悬挂系统半主动控制中的应用

3.1 车辆模型

对基于MRD的半主动控制系统进行设计和仿真分析,将MRD Bouc-Wen模型用于单车整车模型。

整车模型采用ADAMS软件建立,包括车体和转向架两部分,其中非线性弹性部件有一系和二系悬挂、牵引拉杆、抗蛇行减振器、抗侧滚扭杆以及轴箱衬套等。模型共有27个部件,共62个自由度,包括车体、轮对和构架的横向、垂向、纵向位移以及点头、摇头和侧滚运动。单车整车模型如图8所示,主要参数见表1。

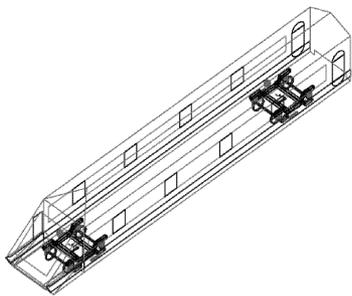


图8 单车整车模型

表1 模型主要参数

名称	数值	名称	数值
轮对质量/t	2.812	一系垂向刚度/ (kN·m ⁻¹)	1 244
构架质量/t	2.063	空簧横向刚度/ (kN·m ⁻¹)	186
车体质量/t	51	空簧纵向刚度/ (kN·m ⁻¹)	186
一系横向刚度/ (kN·m ⁻¹)	980	二系横向阻尼/ (kN·s·m ⁻¹)	58.8
一系纵向刚度/ (kN·m ⁻¹)	980	二系抗蛇行阻尼/ (kN·s·m ⁻¹)	2 450

轨道随机激励采用文献[12]中的秦沈客运专线轨道不平顺功率谱密度公式,在MATLAB中进行模拟。不同类型的轨道不平顺功率谱密度公式如下:

高低不平顺功率谱密度

$$S_v(f) = \frac{A B^2}{f^2(f^2 + B^2)} \quad (11)$$

其中: f 为空间频率(1/m);功率谱密度单位为

mm²/m;波长范围为1~45 m。

方向不平顺功率谱密度

$$S_a(f) = \frac{A B^2}{(f^2 + B^2)(f^2 + C^2)} \quad (12)$$

水平和轨距不平顺功率谱密度

$$S_c(f) = S_g(f) = \frac{A B^2 f^2}{(f^2 + B^2)(f^2 + C^2)(f^2 + D^2)} \quad (13)$$

其中: A, B, C 和 D 为特征参数,取值见文献[13]。

利用ADAMS和MATLAB联合仿真的方法实现车辆悬挂系统的横向半主动控制。首先将二系悬挂横向减振器输出阻尼力设置为控制变量的形式,将车辆模型导入SIMULINK环境中,然后设计半主动控制器和MRD,最后将车辆模型、半主动控制器和MRD整合成车辆悬挂半主动控制系统^[14],其结构框图如图9所示。

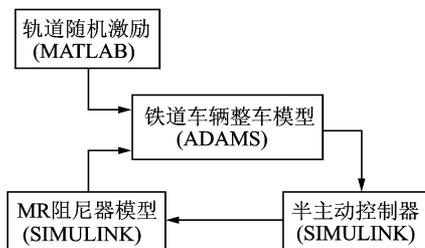


图9 半主动控制系统结构框图

3.2 半主动控制策略

MRD可以通过调节输入电流 I 来调节输出阻尼力的大小,基于MR阻尼器的半主动控制策略最常见的是天棚阻尼开关控制^[15],其表达式为

$$I_d = \begin{cases} I_{\max} & \dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \geq 0 \\ I_{\min} & \dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) < 0 \end{cases} \quad (14)$$

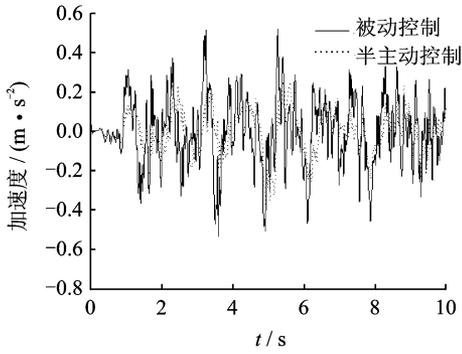
其中: I_{\max} 为阻尼器最大电流,本取研究3 A; I_{\min} 为阻尼器最小电流,本研究取0 A; \dot{x}_1, \dot{x}_2 为车体、转向架构架横向速度, $\dot{x}_1 - \dot{x}_2$ 即为阻尼器两端的相对速度。

对比半主动控制与被动控制的作用效果,可以检验MRD在车辆悬挂系统半主动控制中的有效性。

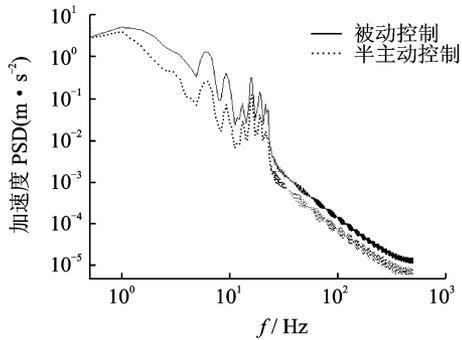
3.3 数值仿真

利用ADAMS和MATLAB联合仿真的方法对铁道车辆整车模型二系悬挂横向MR阻尼器进行半主动控制仿真分析。

半主动控制与被动控制下的车体横向加速度时域和功率谱密度曲线如图10所示。由图10可以发现,在整个频率段内半主动控制作用下车体的横向加速度均有明显降低,车辆横向运动平稳性和安全性对比如表2所示。



(a) 时域曲线



(b) 频域曲线

图10 半主动与被动控制下的车体横向加速度时、频域曲线

表2 半主动和被动控制下车辆横向平稳性与安全性对比

控制方法	横向平稳性指标	车体横向加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	车体横向最大加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	最大脱轨系数	最大轮重减载率
被动控制	2.19	0.17	0.52	0.32	0.44
半主动控制	1.90	0.11	0.25	0.35	0.46
降低幅度/%	13.48	34.02	50.78	-7.01	-3.33

由表2可以发现,为了抑制横向振动,阻尼器在半主动控制下在车体和转向架之间产生横向作用力,该作用力会导致最大脱轨系数和最大轮重减载率有所增加,增加幅度分别为7.01%和3.33%,但其值均低于国家标准中0.8的限值,且半主动控制能大幅降低横向平稳性指标、车体横向加速度均方根

值和车体横向最大加速度,降低幅度分别达13.48%,34.02%和50.78%。从而证明了基于MRD的半主动控制在抑制铁道车辆横向振动中的有效性。

4 结束语

在除试验数据外无其他任何先验知识的条件下,首先利用遗传算法对磁流变阻尼器 Bouc-Wen 模型中的8个未知参数进行识别,并对辨识结果进行了验证;然后在建立铁道车辆62个自由度单车整车模型的基础上,应用识别出的 Bouc-Wen 模型在车辆模型中建立了基于磁流变阻尼器的半主动控制系统;最后利用联合仿真的方法对基于磁流变阻尼器的铁道车辆悬挂系统横向半主动控制进行数值仿真分析。仿真结果表明,半主动控制虽然稍微增大了车辆的安全性指标,但能大幅降低车体横向加速度和平稳性指标,从而证实了应用磁流变阻尼器进行半主动控制的可行性。

参 考 文 献

[1] 邢海军,杨绍普,申永军,等. 孔隙阀式磁流变阻尼器准静力分析[J]. 振动. 测试与诊断,2009,29(4):454-456.
Xing Haijun, Yang Shaopu, Shen Yongjun, et al. Quasi-static analysis of magnetorheological-damper with a hole duct valve[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(4): 454-456. (in Chinese)

[2] Yang Guangqiang, Spencer B F, Jung H J, et al. Dynamic modeling of large-scale Magnetorheological damper systems for civil engineering applications[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(9): 1107-1114.

[3] Choi Y T, Wereley N M. Semi-active vibration isolation using magnetorheological isolators [J]. Smart Structures and Materials 2002(4697):284-291.

[4] Yang Shaopu, Li Shaohua, Wang Xiaojie, et al. A hysteresis model for magneto-rheological damper[J]. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 2005, 6(2):139-144.

[5] Ikhouane F, Rodellar J. Systems with hysteresis: analysis, identification and control using the Bouc-Wen model [M]. Chichester: John Wildy & Sons, Ltd, 2007.

- [6] Sireteanu T, Giuclea M, Mitu A M. An analytical approach for approximation of experimental hysteretic loops by Bouc-Wen model[J]. Proceedings of the Romanian Academy, Series A, 2009,10(1):1-12.
- [7] Giuclea M, Sireteanu T, Stancioiu D, et al. Model parameter identification for vehicle vibration control with magnetorheological dampers using computational intelligence methods[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2004,218(I):569-581.
- [8] Kwok N M, Ha Q P, Nguyen M T, et al. Bouc-Wen model parameter Identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA[J]. ISA Transactions, 2007(46):167-179.
- [9] Wen Y K. Method of random vibration of hysteretic systems[J]. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE,1976,102(EM2):249-263.
- [10] Kristinsson K. System identification and control using genetic algorithms[J]. System, Man and Cybernetics, 1992,22(5):1033-1046.
- [11] Schneider T R. A genetic algorithm for the identification of conformationally invariant regions in protein molecules[J]. Acta Crystallographica Section D: Biological Crystallography, 2002,58(2):195-208.
- [12] 王开云,翟婉明,蔡成标. 秦沈客运专线轨道谱与德国轨道谱的比较[J]. 西南交通大学学报,2007,42(4):425-430.
Wang Kaiyun, Zhai Wanming, Cai Chengbiao. Comparison on track spectra of qinghuangdao-Shengyang passenger railway line and German railway line[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(4):425-430. (in Chinese)
- [13] 陈宪麦,杨凤春,吴旺青,等. 秦沈客运专线轨道谱评判方法的研究[J]. 铁道学报,2006,28(4):84-88.
Chen Xianmai, Yang Fengchun, Wu Wangqing, et al. Study on the evaluation method of power spectrum density(PSD) for Qianghuangdao-Shenyang dedicated passenger railway line[J]. Journal of the China Railway Society,2006,28(4):84-88. (in Chinese)
- [14] Liu Yuguang, Liao W H. Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2005(219):261-276.
- [15] 刘永强,杨绍普,申永军. 基于磁流变阻尼器的汽车悬架半主动相对控制[J]. 振动与冲击,2008,27(2):154-156,161.
Liu Yongqiang, Yang Shaopu, Shen Yongjun. Semi-active relative control schemes for vehicle suspension using a magnetorheological damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(2): 154-156, 161. (in Chinese)

第一作者简介:廖英英,女,1979年8月生,博士研究生。主要研究方向为机车车辆非线性动力学与控制。曾发表《半主动控制与时滞对高速铁道车辆平稳性、稳定性及安全性的影响》(《振动与冲击》2011年第6期)等论文。
E-mail:sjzlyy820@163.com