

基于列车悬挂系统的半主动混合控制仿真分析^{*}

赵义伟^{1,2} 杨绍普^{1,3†} 刘永强^{1,3} 廖英英^{1,4}

(1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043)

(2. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 石家庄 050043)(3. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 石家庄 050043)

(4. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043)

摘要 为了改善列车高速运行时的乘坐舒适性, 采用车辆二自由度模型对开关型和连续型两种控制策略进行对比分析, 根据传递特性分析结果提出了混合控制策略, 同时研究了调整系数对混合控制策略的影响. 为进一步验证控制策略的有效性, 建立了 UM 与 Simulink 联合仿真整车模型, 对二系横向减振器施加此控制策略, 并进行了仿真分析. 结果表明: 在调整系数选取适当的情况下, 该控制策略可同时兼顾开关型和连续型两种控制策略的优点, 降低了车体横向加速度, 改善了列车的横向平稳性.

关键词 高速动车组, 半主动控制, 舒适性, 横向减振器, 联合仿真

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-025

引言

如今, 随着高速铁路技术的飞速发展, 列车的运行时速也不断提高, 然而在速度提高的同时, 随之而产生的就是动力学问题. 一般情况下, 列车运行速度越高, 横向振动越剧烈, 列车的舒适性就越差. 针对此问题, 国内外诸多专家学者都进行了深入的研究, 悬挂系统的半主动以及主动控制技术因此越来越受到重视. 为了减小高速列车车体横向振动, 郭孔辉等人建立了高速动车组联合仿真模型, 开发了一种模糊控制策略, 并进行仿真分析, 最后与开关型和连续型控制算法进行了对比^[1]. 文献[2]提出了一种混合控制策略, 可以兼顾天棚阻尼和加速度阻尼两种控制效果, 并将此控制策略应用到铁道车辆上进行联合仿真, 此控制方法改善了列车的横向平稳性. 文献[3]提出了一种协调控制策略, 同时对列车二系横向减振器和抗蛇行减振器实施半主动控制, 从而提高了列车在曲线上行驶时的安全性和平稳性. 文献[4]提出了改进型天棚阻尼半主动控制算法, 并在四分之一悬架模型上进行仿真分析, 该方法能够显著提高乘坐舒适性, 且优于传统的天棚阻尼控制策略. 国外研究学者针对车辆

舒适性同样进行了大量的理论研究^[5-10], 提出或者改进某种控制策略从而降低车体的振动. 上述文献对控制策略进行了理论分析与仿真分析, 所提出的控制策略没有进行过试验分析. 文献[11]采用天棚控制、SH-ADD 控制和频域控制 3 种典型的控制策略, 在 1/4 车辆悬架试验台上进行了半主动振动控制对比试验. 文献[12]针对经典的开关型控制和加速度阻尼控制的优缺点, 从相频的角度出发, 提出了一种改进控制策略, 从而结合了两种控制策略的优点, 最后用可控减振器硬件在环试验台进行了四分之一悬架半主动控制试验, 证明了控制策略的有效性和优越性. 论文结合传统的开关型和连续型控制的控制特点, 提出了一种能同时兼顾两者优点的混合控制策略, 并在铁道车辆上进行仿真分析, 以验证该控制策略的有效性.

1 半主动控制策略的提出

论文建立的铁道车辆二自由度系统横向模型如图 1 所示.

利用牛顿第二定律建立其运动微分方程, 可表示为:

2019-09-17 收到第 1 稿, 2020-03-16 收到修改稿.

^{*} 国家自然科学基金(11790282, 11572206, U1534204, 11802184), 河北省自然科学基金(A2016210099), 河北省人才工程培养资助科研项目(A2016002036), 河北省创新资助项目(CXZZBS2019148)

[†] 通讯作者 E-mail: yangsp@stdu.edu.cn

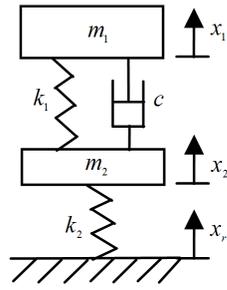


图1 铁道车辆二自由度系统模型

Fig. 1 Two degrees of freedom system model of railway vehicle

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_2) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_1(x_2 - x_1) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_r) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, m_1 、 m_2 分别是车体和构架质量, k_1 、 k_2 分别是一系和二系横向刚度, c 为二系横向阻尼系数.各模型参数如表1所示.

表1 模型参数表

Table 1 Model parameter table

Parameter	m_1/kg	m_2/kg	$k_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$c/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
Value	8441.5	1140	1.66e5	1.96e6	30000

建立1/4车的simulink模型,如图2所示.

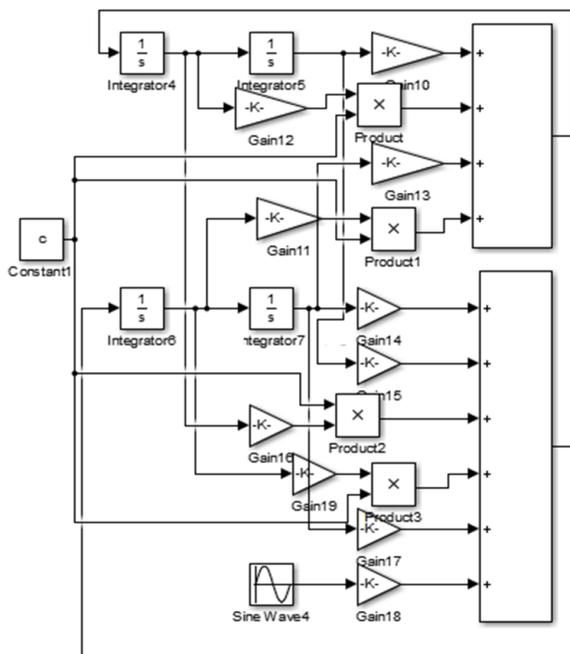


图2 Simulink搭建的车辆模型

Fig.2 A vehicle model built by Simulink

传统的天棚阻尼开关控制(on-off)控制策略表达式为:

$$c = \begin{cases} c_{\max}, & v_1(v_1 - v_2) > 0 \\ c_{\min}, & v_1(v_1 - v_2) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, v_1 、 v_2 分别是车体和构架速度, $c_{\max}=58800 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$, $c_{\min}=15000 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$.

连续型阻尼控制策略表达式为:

$$c = \begin{cases} \min(c_{\max}, c_{\max}v_1/(v_1 - v_2)), & v_1(v_1 - v_2) > 0 \\ c_{\min}, & v_1(v_1 - v_2) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

采用一种近似传递率的表达方法来描述各控制策略的加速度频响特性^[6],如公式(4)所示.

$$\hat{H}(f) = \sqrt{\frac{\int_0^T \ddot{x}_1^2 dt}{\int_0^T x_r^2 dt}} \quad (4)$$

式中, \ddot{x}_1 为车体加速度, x_r 为激励.

论文对simulink模型进行扫频,得到不同频率对应的加速度时域响应积分.激励为正弦激励,幅值为0.05m,频率 f 变化范围为0.2~25Hz,仿真时长设置为50s,步长为0.001s,求解方法为ode4.对模型施加被动控制(Passive)、开关型控制(On-off)和连续型控制(Continuous)三种控制策略,进行仿真分析,得到车体加速度传递率如图3所示.

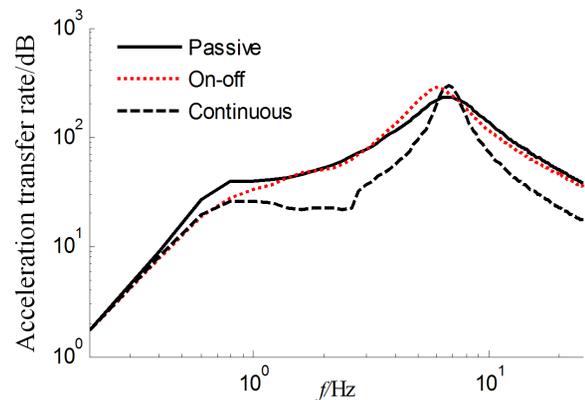


图3 各控制策略的车体加速度传递率

Fig.3 Vehicle acceleration transfer rate of each control strategy

由图3可知,开关型控制策略的控制效果在1.4Hz范围内优于被动控制,能够降低车体振动,大于1.4Hz时,控制效果变差,在3Hz~7Hz范围内控制效果比被动控制要差.连续型控制效果在6.2Hz~7.4Hz范围内较差,其余频率范围内均优于被动控制.而且在频率大于0.7Hz以后,连续型控制要优于开关型控制,在高频段尤为明显.

为了使控制效果在0.2~25 Hz整个频域范围上

均优于被动控制,论文提出一种混合控制策略(Mixed control),能够同时兼顾两种控制策略的优点.混合控制策略的表达式为:

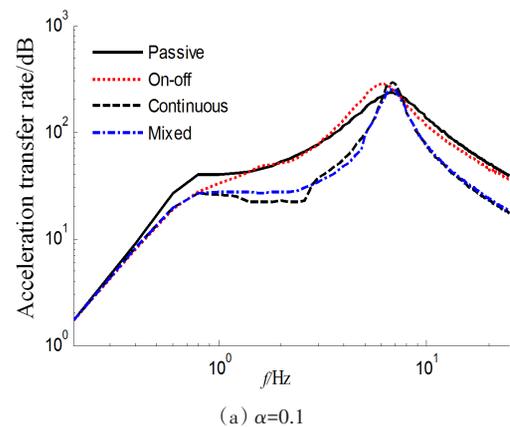
$$c = \begin{cases} \min(c_{\max}, \alpha c_{\max} + (1 - \alpha)c_{\max} v_1 / (v_1 - v_2)), & v_1(v_1 - v_2) > 0 \\ c_{\min}, & v_1(v_1 - v_2) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, α 为调整系数,取值为0~1.

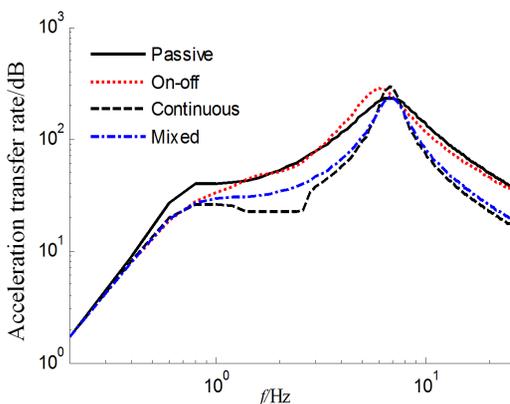
当 α 取不同值时,控制效果也会随之变化,因此调整系数的取值为控制策略控制效果的关键所在.当 α 取不同值时,四种控制策略下的加速度传递率的对比如图4所示.

由图4可以知道,当 α 取值接近0时,控制效果接近连续型控制效果;当 α 取值接近1时,控制效果接近开关型控制效果.当 α 取值为0.2或者0.3时,虽然在部分频域范围内控制效果没有达到连续型控制效果,但仍优于被动以及开关型控制效果,可以满足要求.而且此控制策略的控制效果在全频

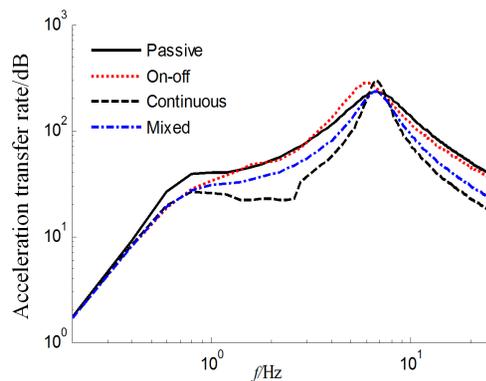
域内均优于被动控制,这是开关型和连续型控制策略所不能实现的.由此可知,提出的混合控制策略在抑制振动方面具有一定的优势.



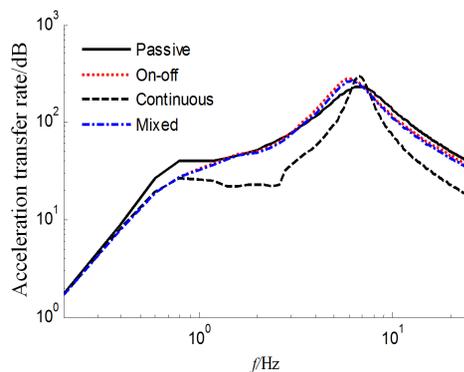
(a) $\alpha=0.1$



(b) $\alpha=0.2$



(c) $\alpha=0.3$



(d) $\alpha=0.8$

图4 不同 α 值下的四种控制策略的加速度传递率

Fig. 4 Acceleration transmittance of four control strategies with different α

2 UM与Matlab/Simulink联合仿真分析

UM软件基于现代计算机辅助工程技术,融合了许多优秀的算法和程序,能够求解复杂的多自由的运动微分方程,而且计算效率高,提高了软件的实用性,是一款优秀的动力学仿真软件,但建立控制系统比较困难.而simulink软件可以很容易地搭建控制模块,可以进行嵌入式编程,简单实用,容易操作.因此需要将两者结合满足论文的仿真需求.为了进一步研究提出的混合控制策略的有效性,将此控制策略应用到整车模型上进行仿真分析.首先利用UM动力学仿真软件建立了某高速动车组整车模型,如图5所示.仿真采用的是直线轨道,仿真运行速度为250 km/h.激励为德国低干扰谱,车轮踏面为LMA磨损型踏面,钢轨为T60型面.建立输入输出变量,然后将此模型以S-function的形式导入Simulink,建立半主动控制联合仿真模型,如图6所示.

想要获得良好的控制效果,需要对调整系数 α 进行优化.论文利用matlab编程对调整系数进行优化,得到的结果如图7所示.

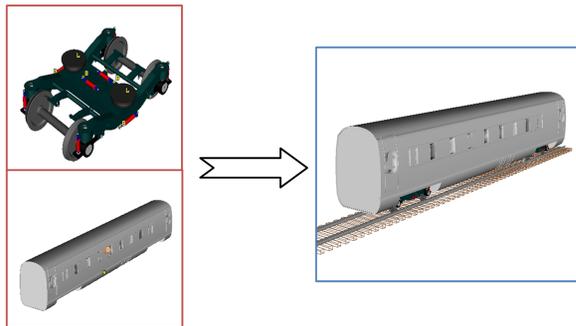


图 5 高速列车集成模型

Fig.5 High speed train integration model

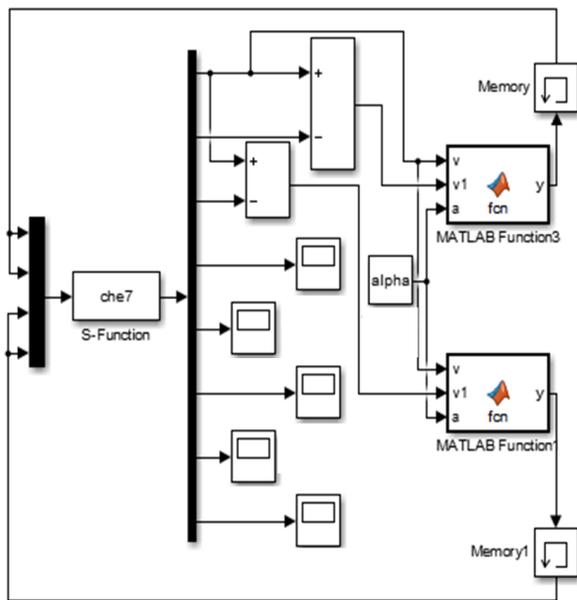


图 6 联合仿真整车模型

Fig. 6 Joint simulation of vehicle model

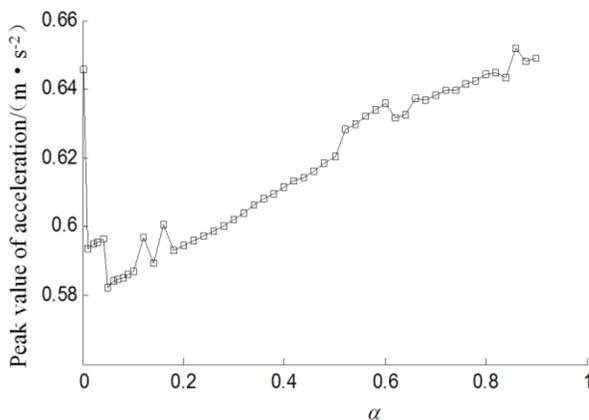


图 7 调整系数 α 优化

Fig.7 Adjustment factor α optimization

由图 7 可知, α 取 0.058 时, 本次仿真得到的车体加速度值最小. 将此数值带回模型当中进行半主动控制动力学仿真分析, 同时同被动控制、开关型控制和连续型控制进行对比分析, 得到车体加速度

功率谱密度, 如图 8 所示.

由图 8 可知, 开关型控制, 即 On-off 控制策略在低频段(小于 2Hz)控制效果最好, 但在中高频的控制效果比被动控制还要差. 而混合型控制策略的控制效果在低频段比连续型控制效果好, 但是要差于开关型控制, 在高频段两者均优于开关型控制策略. 混合型控制策略在低频段优于被动控制的基础上, 在中高频段的控制效果也优于开关型控制. 这表明了此混合控制的有效性, 可以兼顾开关型和连续型两种控制效果的优点, 能够在全频段范围内有效降低车体振动, 改善了车体的平稳性.

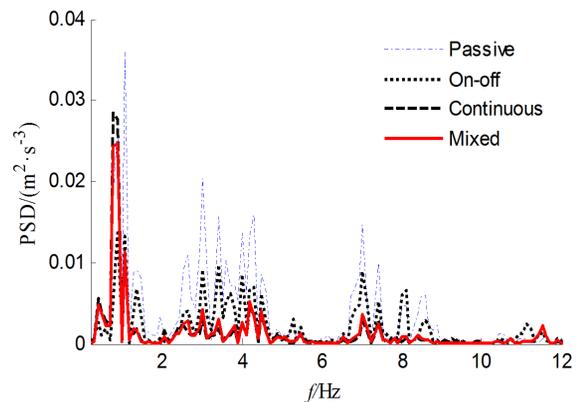


图 8 四种控制策略的加速度 PSD

Fig.8 Acceleration PSD of four control strategies

论文还仿真得到了脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力等表征列车动力学性能的相关指标, 将其时域曲线上的最大值和均方根值以表格的形式描述出来, 如表 2 所示.

根据表 2 可知, 提出的混合型控制策略可以有效降低车体加速度值和均方根值, 与被动控制相比有效降幅分别为 17.5% 和 37.1%, 同时比其他两种控制策略均有不同程度的下降. 脱轨系数和轮轨垂向力比被动控制稍大, 轮重减载率和轮轴横向力比被动控制有所减小, 所有指标均满足标准要求. 因此, 论文提出的混合控制策略在满足行车安全的前提下能够在全频域内有效的降低车体横向加速度.

3 结论

论文通过建立的铁道车辆二自由度模型分析了基于天棚阻尼的开关型和连续型控制策略的传递特性, 发现了两者的优缺点, 为了结合两者的优点, 论文引入了一种混合控制策略, 通过对该控制策略进行分析可以发现其在全频段范围内具有优

良好的控制效果,并将其应用到铁道车辆中进行半主动控制联合仿真,同时优化了混合控制策略的调整系数,以得到最优的控制效果.可以发现,相对于其

他普通控制策略,该控制策略可以有效地改善列车横向平稳性能.

表2 四种控制策略下的各动力学指标的对比结果

Table 2 Comparison results of dynamic indices under four control strategies

Control strategy	Acc/(m·s ⁻²)		Derailment coefficient		D.Ratio		Wheelset force/(N)		Vertical contact force/(N)	
	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS
Passive	0.7086	0.2248	0.1124	0.1252	0.4166	0.1252	10543	3325.7	77323	58563
On-off	0.6445	0.1687	0.1156	0.0334	0.4070	0.1250	9836.8	3120	77951	58550
Continuous	0.6455	0.1428	0.1193	0.0334	0.3913	0.1251	9828.9	2989.8	78274	58548
Mixed	0.5840	0.1414	0.1181	0.0333	0.3940	0.1252	9774.1	2981	78198	58552

参 考 文 献

- 郭孔辉,隋记魁,宋晓琳,等.高速车辆横向减振器模糊天棚半主动控制研究.工程设计学报,2012,19(3):174~181(Guo K H, Sui J K, Song X L, et al. Research on semi-active control of high speed vehicle transverse shock absorber with fuzzy skyhook. *Journal of Engineering Design*, 2012, 19(3): 174~181 (in Chinese))
- 廖英英,刘永强,杨绍普.一种新型混合半主动控制策略在高速铁道车辆振动控制中的应用.振动与冲击,2013,32(12):84~87(Liao Y Y, Liu Y Q, Yang S P. Application of a new hybrid semi-active control strategy in vibration control of high speed railway vehicles. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(12): 84~87 (in Chinese))
- 刘永强,杨绍普,廖英英,等.一种新型半主动协调控制对高速动车组曲线通过性能的影响.振动与冲击,2017,36(19):164~168,185(Liu Y Q, Yang S P, Liao Y Y, et al. A new type of semi-active coordinated control influence on curve passing performance of high-speed EMUs. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(19): 164~168, 185 (in Chinese))
- 张磊,张进秋,彭志召,等.车辆半主动悬架改进型天棚阻尼控制算法.汽车工程,2015,8:931~935(Zhang L, Zhang J Q, Peng Z Z, et al. Modified skyhook damping control algorithms for vehicle semi-active suspension. *Automotive Engineering*, 2015, 8: 931~935 (in Chinese))
- Gao Z Y, Tian B, Wu D P, et al. Study on semi-active control of running stability in the high-speed train under unsteady aerodynamic loads and track excitation. *Vehicle System Dynamics*, 2019, 55(1):1~14
- Liu Y L, Zuo L. Mixed skyhook and power-driven-damper: a new low-jerk semi-active suspension control based on power flow analysis. *Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control*, 2016, 138(8):1~10
- Savarese S M, Cristiano S. Mixed sky-hook and ADD: Approaching the filtering limits of a semi-active suspension. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 2007, 129(4):382~392
- Damien S, Olivier S, Luc D. Skyhook and H[∞] control of semi-active suspensions: some practical aspects. *Vehicle System Dynamics*, 2003, 39(4):279~308
- Sergio M S, Enrico S, et al. Acceleration-driven-damper (ADD): an optimal control algorithm for comfort-oriented semiactive suspensions. *Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control*, 2004, 127(2):218~229
- Jayabalan A, Kumar N K S. Vibration suppression of quarter car using sliding-mode and internal model-based skyhook controller. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2018, 6(2):117~126
- 彭志召,张进秋,张建,等.磁流变半主动悬架试验研究.汽车工程,2018,40(5):64~70(Peng Z Z, Zhang J Q, Zhang J, et al. Magnetorheological semi-active suspension experimental research. *Automotive Engineering*, 2018, 40(5):64~70(in Chinese))
- 郭孔辉,王杨.一种改进的加速度阻尼半主动控制策略研究.汽车工程,2019,41(5):481~486(Guo K H, Wang Y. Research on an improved semi-active control strategy of acceleration damping. *Automotive Engineering*, 2019, 41(5): 481~486 (in Chinese))

SIMULATION ANALYSIS OF SEMI-ACTIVE HYBRID CONTROL OF TRAIN SUSPENSION SYSTEM *

Zhao Yiwei^{1,2} Yang Shaopu^{1,3†} Liu Yongqiang^{1,3} Liao Yingying^{1,4}

(1.State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang
Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

(2.School of Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

(3.School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

(4.School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract In order to improve the ride comfort of trains at high speed, the semi-active hybrid control of a train suspension was studied. A two-degree-of-freedom vehicle model was established to analyze and compare the on-off control strategy and continuous control strategy. Based on the analyses of transmission characteristics, a hybrid control strategy was proposed, and the influence of adjustment coefficient on the hybrid control strategy was studied. In order to verify the effectiveness of the control strategy, a full-vehicle model was established based on UM and Simulink. The control strategy was applied to the secondary lateral shock absorber, and the simulation analysis was carried out. The results showed that the hybrid control strategy can take into account the advantages of both on-off and continuous control strategies, the lateral acceleration of the car body is reduced and the lateral stability of the train is improved, when the adjustment coefficient is selected properly.

Key words high-speed EMUs, semi-active control, comfort, lateral damper, joint simulation

Received 17 September 2019, revised 16 March 2020.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11790282, 11572206, U1534204, 11802184), the Hebei Provincial Natural Science Foundation (A2016210099), the Hebei Provincial Talent Engineering Training Subsidized Research Project (A2016002036), the Hebei Provincial Innovation Subsidized Project (CXZBS2019148)

† Corresponding author E-mail: yangsp@stdu.edu.cn