

汽车半主动悬架对整车耐久性的影响

徐刚, 周心悦

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 随着智能网联汽车的发展,半主动悬架系统的应用范围也更加广泛,因此有必要针对半主动悬架系统对车辆耐久性的影响进行深入研究。首先基于实际天棚阻尼控制模型建立了半主动悬架振动模型,并将其运用到车辆悬架七自由度模型中;其次确定了基于该七自由度模型的悬架性能评价指标,标定出了最优天棚阻尼控制系数;然后以悬架输出的四通道垂向力作为激励,基于一典型轿车的有限元模型,使用惯性释放法进行了静应力分析;之后使用准静态叠加法,对其疲劳损伤进行了分析,确定了该车身的疲劳损伤关键位置,对比了使用半主动悬架和被动悬架时疲劳损伤值,结果发现前者的疲劳寿命得到了较大的优化。

关键词: 车辆耐久性;半主动悬架;天棚阻尼控制

中图分类号: U461.7

文献标志码: A

Effect of Semi-Active Suspension on Vehicle's Durability

XU Gang, ZHOU Xinyue

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201800, China)

Abstract: With the implementation of intelligent and connected vehicle, the application of semi-active suspension has become more extensive. In this paper, the effect of semi-active suspension on vehicle durability is studied. Firstly, a semi-active suspension vibration model is established based on the actual skyhook damping control model, and it is applied to a vehicle-suspension seven degrees of freedom (7DOF) model. Next, the suspension performance evaluation index is determined based on this 7DOF model, and the optimal skyhook damping control coefficient was calibrated. Then, the fatigue damage analysis was carried out based on a typical sedan finite element model using the inertia release method followed by the quasi-static superposition method, with the four-channel vertical force output from the suspension model as stimulation. The fatigue damage key locations of the vehicle body were determined, and

the fatigue damage values were compared when using a semi-active suspension and a passive suspension, and it was found that the fatigue life of the former was optimized to a greater extent.

Key words: vehicle durability; semi-active suspension; skyhook damping control

悬架是影响车辆平顺性和操作稳定性等关键性能指标的重要零部件,可分类为被动悬架、半主动悬架、全主动悬架。其中,半主动悬架相比全主动悬架有着能耗低、成本低的优势,而相比被动悬架有更佳的性能,因此受到了较广泛的关注。在半主动悬架的控制理论方面,Kamopp等^[1]最先提出了天棚控制理论,假想簧载质量与天棚之间通过阻尼器相连,以提升车辆平顺性;基于该思想,又产生了地棚控制理论^[2],以抑制非簧载质量的振动;天棚控制能优化汽车平顺性性能指标,但也会使车轮动载荷劣化,引入地棚控制使车辆操稳性得到了提升^[3-4]。惯容器^[5]的提出促成了“惯容-弹簧-阻尼”这一新的悬架结构体系,进一步提高了悬架性能。而随着智能网联汽车概念的推行,半主动悬架又拥有了新的应用场景,例如基于车辆响应、激光雷达等识别路面的半主动悬架控制^[6-8],基于云数据的半主动悬架控制^[9]等。在智能网联汽车迅速发展的大背景下,半主动悬架的应用也拥有了更多可能性,然而半主动悬架对耐久性能的影响却较少被关注,一部分文献研究了半主动悬架的道路友好性^[10],也有文献对半主动悬架零部件耐久性进行了研究,并得出了天棚控制下半主动悬架下摆臂的疲劳寿命相比被动悬架更短^[11],但是在簧载质量的疲劳寿命方面的研究较少。

本文将基于天棚控制理论,在车辆悬架七自由度模型上标定天棚阻尼系数,仿真得到簧载质量的四通道悬架垂向力输入,然后结合一典型轿车的

CAE 模型,分析使用半主动悬架和被动悬架对车身疲劳寿命的影响。

1 基于天棚控制理论的悬架振动模型

理想的天棚阻尼控制理论假想簧载质量通过阻尼器与天棚相连,如图 1(a)所示,通过 c_{sky} 耗散簧载质量垂向运动能量,提升车辆的平顺性。实际车辆不可能与天棚相连,因此需要通过连接了簧载质量和非簧载质量的可变阻尼器 C ,如图 1(b)所示,实现对天棚阻尼 c_{sky} 的等效。

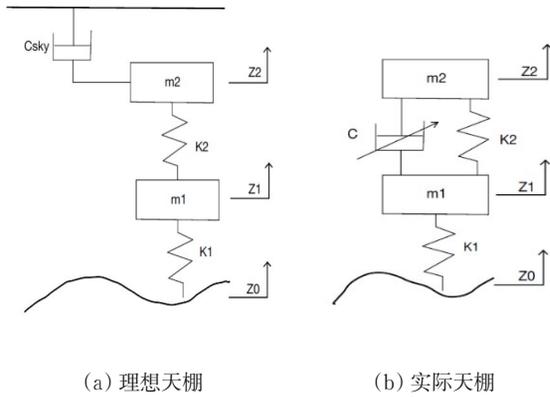


图 1 天棚控制悬架

Fig.1 Skyhook control suspension

对从理想天棚阻尼转换到实际天棚阻尼的过程进行推导。首先,分别建立起其运动微分方程,对理想天棚阻尼悬架控制模型建立运动微分方程如下:

$$\begin{cases} m_2 \ddot{z}_2 = -c_{sky} \dot{z}_2 + k_2(z_1 - z_2) \\ m_1 \ddot{z}_1 = k_2(z_2 - z_1) + k_1(z_0 - z_1) \end{cases} \quad (1)$$

对实际天棚阻尼悬架控制模型建立运动微分方程如下:

$$\begin{cases} m_2 \ddot{z}_2 = c(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_2(z_1 - z_2) \\ m_1 \ddot{z}_1 = c(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_2(z_2 - z_1) + k_1(z_0 - z_1) \end{cases} \quad (2)$$

因为天棚阻尼控制以簧载质量为被控对象而不考虑非簧载质量的运动,故需使式(1)、式(2)中描述簧载质量运动的微分方程等效,即:

$$-c_{sky} \dot{z}_2 + k_2(z_1 - z_2) = c(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_2(z_1 - z_2)$$

在不考虑分母为 0 的情况下,可得理想天棚阻尼与实际天棚阻尼的等效方程:

$$c = \frac{c_{sky} \dot{z}_2}{\dot{z}_2 - \dot{z}_1} \quad (3)$$

式(3)中 c_{sky} 为标定量,需要通过综合考量车辆的平顺性、操稳性等性能参数确定。同时也可以通过 $c_{sky} = \alpha c_{max}$ 的形式表示,其中 c_{max} 为阻尼器能提供的最大阻尼,使 α 成为标定参数。 $\dot{z}_2 / (\dot{z}_2 - \dot{z}_1)$ 则相当于一连续可变的系数。二者相乘就得到了实际天棚控制中连续可变的阻尼系数 c 。

基于公式(3)得到的 c 的值为 $(-\infty, +\infty)$,显然还不符合实际。实际天棚阻尼系数 c 必定是在阻尼器能提供的最大与最小阻尼系数间变化,故进一步完善该公式,得:

$$\begin{cases} c = \frac{\alpha c_{max} \dot{z}_2}{\dot{z}_2 - \dot{z}_1}, c \in [c_{min}, c_{max}]; \dot{z}_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) > 0 \\ c = c_{min}; \dot{z}_2 = 0; \text{或 } \dot{z}_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) < 0 \\ c = c_{max}; (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

基于式(2)和式(4),在 Simulink 软件中建立实际天棚阻尼悬架振动模型,如图 2 所示。

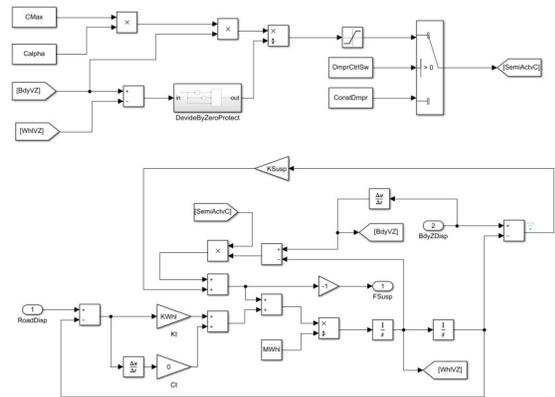


图 2 实际天棚阻尼悬架振动

Fig.2 Actual skyhook damping suspension vibration

该模型的上半部分为实际天棚阻尼 c 的计算,下半部分为非簧载质量振动模型。模型的输入为簧载质量垂向位移和路面垂向位移,输出为悬架垂向力。模型中的参数取值将在下一章节详细列出。

2 天棚阻尼系数标定

使用六自由度刚体模型对簧载质量建模,但因天棚阻尼悬架模型只输出垂向力给该刚体模型,故

实际仅考量该刚体模型中沿 z 轴位移、绕 x 轴旋转及绕 y 轴旋转这3个自由度,加上4个悬架中的非簧载质量沿 z 轴位移,构成了车辆悬架七自由度模型。该模型在Simulink软件中的结构如图3所示,具体参数设置如表1所示。

路面输入采用一段正弦扫频路和一段交叉轴路。正弦扫频路的空间频率从 0.05 m^{-1} 增加到 0.5 m^{-1} ,用于激励车辆在垂向加速度、pitch角加速度方面的响应。交叉轴路空间频率为 2.8 m^{-1} ,与车辆轴距相等,用于激励车辆在roll角加速度上的响应。

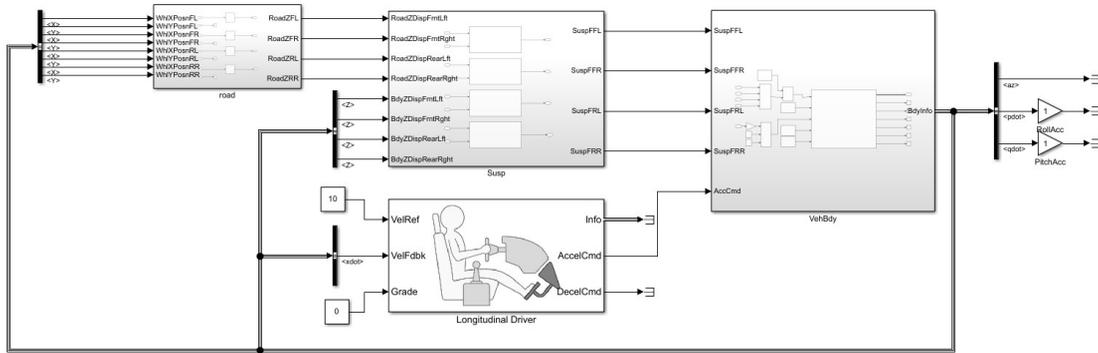


图3 七自由度车辆模型

Fig.3 7 DOF vehicle model

表 1 七自由度车辆模型模型参数

Tab.1 Parameter of the 7 DOF vehicle model

悬架模型参数	参数值	车身刚体模型参数	参数值
天棚阻尼系数最大值 c_{\max}	8 000 N·s/m	簧载质量	1 600 kg
天棚阻尼系数最小值 c_{\min}	100 0N·s/m	前轴到质心纵向距离	1.68 m
被动悬架阻尼系数 c_{const}	1 500 N·s/m	后轴到质心纵向距离	1.12 m
悬架弹簧刚度 k_{susp}	20 000 N/m	质心到车轴平面垂向高度	0.35 m
轮胎刚度 k_{whl}	300 000 N/m	绕 x, y, z 轴转动惯量	350、1 500、1 700 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
非簧载质量 m_{whl}	45 kg	前后轮距	1.55、1.55 m
		纵向等效车速	10 m/s

因式(4)中的 α 为标定量,参考文献[12-13]中性能指标的确定和参数优化方法,本文采用的求解最优 α 的方式为:①确定了5个悬架性能指标:车身垂向加速度、车身pitch角加速度、车身roll角加速度、悬架动行程、车轮动载荷;②计算这5项性能指标在 α 不同取值下的均方根值,令其为 $p_i(\alpha)$, $i=1\sim 5$;③计算综合性能指标 P ,若每一项指标的权重都相等,则有: $P = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{p_i(\alpha)}{\max[p_i(\alpha)]}$;④求 P 取值最小时 α 的值,为最优天棚阻尼系数标定量。

基于上述方法得到天棚阻尼控制半主动悬架和被动悬架的各项性能指标的对比,如图4所示。车身垂向加速度、车身pitch角加速度、车身roll角加速度这3项平顺性指标的均方根在 α 的取值范围 $[0,1]$

内都要优于被动悬架。但因为天棚阻尼控制不考虑非簧载质量的运动,故悬架动行程、车轮动载荷在使用半主动悬架时均出现了劣化。根据图5的综合性能指标曲线,得到最优天棚阻尼系数标定量 $\alpha_{\text{best}} = 0.67798$ 。此时,从图6中其pitch角加速度和roll角加速度时域信号相对被动悬架的对比可以较明显地分辨出天棚阻尼控制在车辆平顺性上的优势。

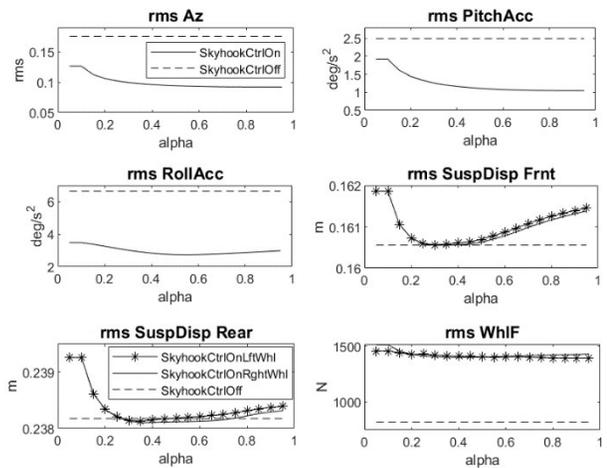


图 4 天棚阻尼控制半主动悬架与被动悬架性能对比

Fig.4 Comparison of performance between semi-active suspension and passive suspension with skyhook damping control

3 车辆耐久性分析

本文将上一节中悬架振动模型所输出的悬架垂向力作为研究车身疲劳寿命的输入载荷。在耐久性

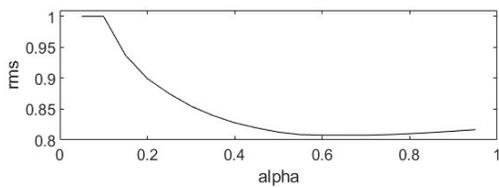


图 5 天棚阻尼控制综合性能指标曲线

Fig. 5 Comprehensive performance index curve of skyhook damping control

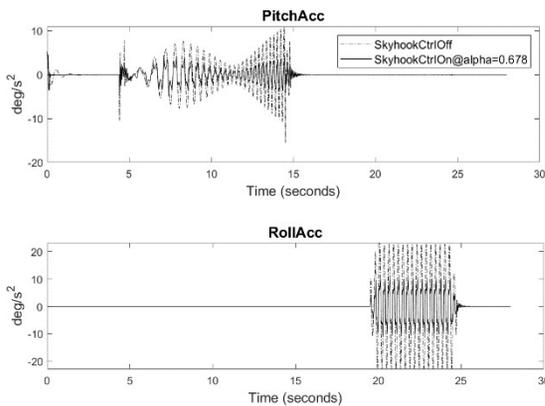


图 6 天棚阻尼控制@alpha=0.678与被动悬架性能对比

Fig.6 Comparison of performance between skyhook damping control @ alpha=0.678 and passive suspension

研究中,雨流计数法所得到的雨流矩阵对载荷历程的计数能反映材料在应力-应变响应中的滞回环特性,拥有明确的物理意义,因而被广泛采用。为了使不同载荷历程所得的雨流矩阵对比更直观,可以提取雨流矩阵中代表相同载荷幅值的部分并由大到小累加,得到 range pair 累积频次曲线。以左后轮的力激励为例,其计数结果如图 7 所示。可以看到二者的总频次接近,都在 100 左右,使用半主动悬架时有更多小幅值的频次,但小幅值区对疲劳损伤的影响很小。使用半主动悬架的累计频次曲线总体上处于更低的位置,意味着其相比使用被动悬架,前者所受激励力在总体上幅值更小,因此受到的损伤更小。

但以上单通道的计数结果还不能准确反映使用半主动悬架和被动悬架时车身关键点处的疲劳寿命的区别,因为车身几何形状和受力情况更复杂,关键点处的应力大小与上述单轴力输入之间的数学关系未知。基于这一考量,本文使用一典型轿车的 CAE 模型,以图 2 的悬架振动模型的四通道力输出作为输入,计算车身疲劳寿命。

本文使用准静态叠加法来实现对该车架的疲劳寿命预测。首先,基于车身有限元网格文件进行单

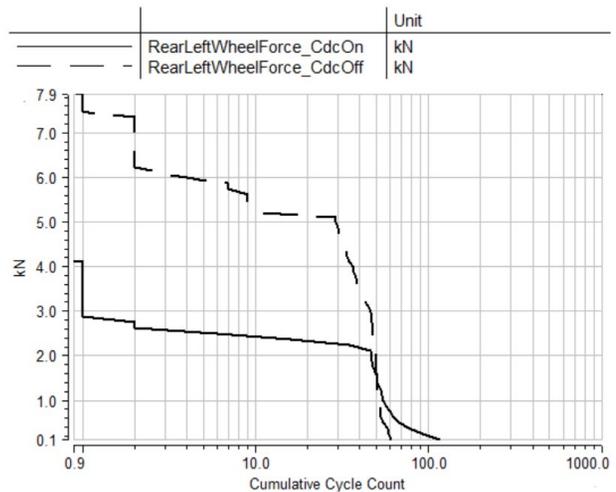


图 7 使用被动和半主动悬架的车辆左后轮力计数对比

Fig.7 Comparison of left rear wheel force counts for vehicles using passive and semi-active suspensions

位载荷下的静态应力分析,分析时采用惯性释放法,依靠自身重力对施加的力进行平衡;然后,利用悬架振动模型输出的垂向力作为车身接附点处的边界载荷;获取到部件的应力-时间历程之后,结合定义的材料 S-N 曲线,选用临界平面法和 Goodman 平均应力修正,对车身进行疲劳寿命预测。

基于上述流程,对该轿车车身进行疲劳寿命计算的结果如图 8 和图 9 所示,由图可见两云图有相同的疲劳损伤显示范围。首先可以看到在边界载荷加载位置(前塔顶、后纵梁),两者都出现了较大的疲劳损伤,图 9 中各结构件的疲劳损伤总体上相较图 8 明显更大。两图中的疲劳危险位置相同,主要包括:车头下纵梁接附位置;A 柱上接附点;B 柱上下接附点;后纵梁、轮拱、车厢隔板接附位置。

在表 2 中列出了上述关键位置的应力集中危险点处的疲劳损伤大小,Node 位置如图 8 所示。其中疲劳损伤最大的前纵梁接附点处,此处与受前悬架垂向力作用的塔顶相连,又增加了发动机附加质量,且具有几何突变,故在静应力分析中就受较大的应力作用。总体上没有出现疲劳寿命显著薄弱的位置,基本满足等寿命设计的要求。使用被动悬架和使用半主动悬架的车身关键点损伤值趋势相同,但在数值上表现出了较明显差异,平均相差 1 058%,且在危险点处没有发现使用被动悬架损伤更小的情况,使用半主动悬架的车身相比之下有更优的疲劳寿命表现。

表 2 使用半主动悬架和被动悬架的车身关键点损伤对比

Tab.2 Comparison of key point damage of vehicle body using semi-active suspension and passive suspension

Node 编号	位置	使用被动悬架的疲劳损伤 d_1	使用半主动悬架的疲劳损伤 d_2	相对差值 $(d_2 - d_1)/d_1$
7503	前纵梁接附点	5.533×10^{-5}	5.213×10^{-6}	961%
103993	A 柱上接附点	2.729×10^{-6}	3.432×10^{-7}	695%
99984	B 柱上接附点	4.996×10^{-6}	3.848×10^{-7}	1198%
271327	C 柱下接附点	9.825×10^{-7}	6.149×10^{-8}	1498%
382873	后纵梁、轮拱接附位置	3.685×10^{-6}	3.535×10^{-7}	942%

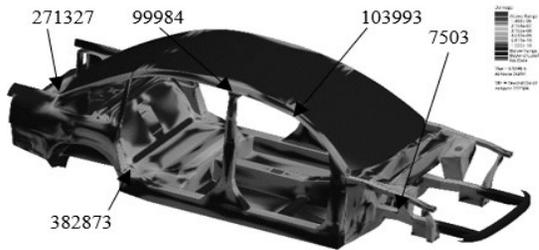


图 8 使用半主动悬架的车身疲劳损伤云图

Fig.8 Cloud map of vehicle fatigue damage using semi-active suspension



图 9 使用被动悬架的车身疲劳损伤云图

Fig.9 Cloud map of vehicle fatigue damage using passive suspension

4 结语

本文基于实际天棚阻尼控制,建立了使用该控制方法的悬架振动模型并运用到车辆悬架七自由度模型中。使用正弦扫频和交叉轴路作为模型激励,综合车身垂向加速度、车身pitch角加速度、车身roll角加速度、悬架动行程、车轮动载荷5项性能指标,标定得到最优天棚阻尼控制系数 α 。使用悬架振动模型以正弦扫频和交叉轴路面为输入后输出的垂向力作为边界载荷,基于一典型轿车有限元模型,使用准静态叠加法计算四通道力输入下车身的疲劳损伤,对使用半主动悬架和被动悬架的车身在损伤关键位置做了对比,发现使用半主动悬架的非簧载车身有更优的疲劳寿命表现。

但天棚阻尼控制并不考虑非簧载质量的振动,有研究表明车轮动载荷会增加,悬架下摆臂寿命会降低,故半主动悬架对车辆疲劳寿命的影响仍值得进一步研究。

参考文献:

- [1] CROSBY M J, KARNOPP D C. The active damper: a new concept for shock and vibration control[J]. Shock and Vibration Bulletin, 1973, 43(4): 119.
- [2] VALÁŠEK M, NOVAK M, ŠIKA Z, *et al.* Extended ground-hook-new concept of semi-active control of truck's suspension [J]. Vehicle system dynamics, 1997, 27(5/6): 289.
- [3] 吴光强,黄焕军,叶光湖.基于分数阶微积分的汽车空气悬架半主动控制[J].农业机械学报,2014,45(7):19.
WU G Q, HUANG H J, YE G H. Semi-active control of automotive air suspension based on fractional calculus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 19.
- [4] 叶光湖,吴光强.汽车磁流变减振器半主动空气悬架仿真研究[J].汽车工程,2015,37(5):560.
YE Guanghu¹, WU Guangqiang. A study on the simulation of semi-active air suspension with magneto-rheological damper [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(5): 560.
- [5] SMITH M C. Synthesis of mechanical networks: the inerter [J]. IEEE Transactions on automatic control, 2002, 47(10): 1648.
- [6] QIN Y, DONG M, ZHAO F, *et al.* Road profile classification for vehicle semi-active suspension system based on adaptive neuro-fuzzy inference system[C]//2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Osaka: IEEE, 2015: 1533.
- [7] WANG R, LIU W, DING R, *et al.* Switching control of semi-active suspension based on road profile estimation[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(6): 1972.
- [8] YANG Z, SHI C, ZHENG Y, *et al.* A study on a vehicle semi-active suspension control system based on road elevation identification[J]. PLoS one, 2022, 17(6): e0269406.
- [9] LI Z J, KOLMANOVSKY I V, ATKINS E M, *et al.* Cloud aided semi-active suspension control [C]//2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Vehicles and Transportation Systems (CIVTS). Orlando: IEEE, 2014: 76.
- [10] VALÁŠEK M, KORTŮM W, ŠIKA Z, *et al.* Development of semi-active road-friendly truck suspensions [J]. Control

- Engineering Practice, 1998, 6(6): 735.
- [11] RAMLI R. Dynamic simulation of semi-active suspension systems for durability analysis [D]. Leeds: University of Leeds, 2007.
- [12] 张亮修,王宇,吴光强,等. 汽车阻尼可调半主动悬架混杂模型预测控制[J]. 西安交通大学学报,2017,51(11):156.
ZHANG Liangxiu, WANG Yu, WU Guangqiang, *et al.* Hybrid model control of semi-active suspension with variable damping shock absorber[J] Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(11):156.
- [13] 康耀东,庞辉,刘凯,等. 多级可调阻尼半主动空气悬架的天棚控制研究[J]. 机械科学与技术,2016,35(5):778.
KANG Yaodong, PANG Hui, LIU Kai, *et al.* Research on skyhook control strategy of multi-grade adjustable damper in semi-active air suspension [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(5):778.