

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.005

基于Carsim的半主动悬架建模与仿真技术*

许吉祥,牛礼民*,刘超,徐永兴
(安徽工业大学 机械工程学院,安徽 马鞍山 243002)

摘要:针对目前半主动悬架系统结构和控制策略上存在的差异,为了更好地研究其合理性,提出了一种基于整车系统的半主动悬架建模与仿真技术。依据节流口可调式减振器理论分析的结果,利用Matlab/Simulink软件构建了节流口可调式减振器模型,并结合Carsim软件中的整车多体动力学模型,联合开发出了阻尼可调式半主动悬架的车辆模型。在Simulink软件中搭建出了控制器模型,通过采用确定性和不确定性相结合的控制策略,实现了对整车悬架阻尼的有效调节。通过仿真分析并将其与被动悬架系统进行了对比,研究结果验证了所开发模型的正确性以及控制策略的实用性,能够用于很好地改善车辆悬架的性能。

关键词:行驶平顺性; Carsim; 阻尼可调; 半主动悬架; 建模; 仿真

中图分类号: U461.4; U467.1³; TH122; TH39

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)05-0536-05

Modeling and simulation of semi-active suspension based on Carsim

XV Ji-chan, NIU Li-min, LIU Chao, XV Yong-xing

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: Aiming at the difference of the semi-active suspension system on the structure and control strategy at present, in order to better study its rationality, a semi-active suspension system based on the whole vehicle modeling and simulation technology was proposed. According to the result of theoretical analysis of the tunable throttle damper, a tunable throttle damper model was built using the Matlab/Simulink, and combined with the vehicle multi-body dynamics model in the software Carsim, then a vehicle model with damping adjustable semi-active suspension was developed. A controller model was built in Simulink with certainty and uncertainty combined control strategy, and effective adjustable of the vehicle suspension damping was achieved. Through simulation analysis of the model and compared with the passive suspension system, the results validate the correctness of the model and the practicality of the control strategy, which can improve the performance of the vehicle suspension.

Key words: automobile ride; Carsim; damping-adjustable; semi-active suspension; modeling; simulation

0 引言

行驶平顺性是当前汽车研究的热点之一,影响行驶平顺性的因素很多,而其中悬架系统的影响最大。在悬架系统设计时,为提高悬架的工作性能,主要从两个方面进行改进:结构及其控制策略。从最初的被动悬架到半主动悬架、全主动悬架,其弹性元件和减振器的结构不断地改进,出现了如空气弹簧、可调阻尼减振器等新部件。因半主动悬架工作几乎不消耗

发动机的功率,结构简单、造价低,且减振效果接近于全主动悬架,具有更现实的应用价值^[1],目前其控制策略主要有最优控制、自适应控制、模糊控制等,而应用最多的是模糊控制^[2-4]。

整车多体动力学和计算机技术的迅速发展,为现代汽车开发过程中的虚拟试验研究提供了更科学的理论依据和更方便的试验条件。虚拟试验研究是在虚拟的环境中对汽车进行模拟仿真,以获取各项参数,监测车辆的运行状态,优化车辆设计的同时大大

收稿日期: 2012-12-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275002);安徽工业大学研究生创新研究基金资助项目(2011025)

作者简介: 许吉祥 (1988-),男,安徽岳西人,主要从事汽车设计理论与技术方面的研究。E-mail: xujichan@163.com

通信联系人: 牛礼民,男,博士后,副教授,硕士生导师。E-mail: niulmdd@163.com

缩短开发周期,降低成本^[5-6]。因此,构建汽车半主动悬架系统模拟仿真模型,对研究其结构和控制策略的合理性具有十分现实的意义。

Carsim作为面向参数化建模的汽车动力学仿真软件,通过简洁易懂的界面将整车模型、仿真、结果等展示在使用者面前。同时,Carsim还提供了与Matlab软件的接口,通过二者联立可以建立完备的满足要求的车辆动力学模型,并进行试验仿真^[7-8]。

本研究首先分析半主动悬架的结构,确定其各部分的组成与建模方案,并利用Carsim和Simulink软件联合搭建带有半主动悬架系统的整车仿真模型;然后研究半主动悬架的控制策略,在Simulink软件中搭建控制器模型;最后,连接各模块并进行虚拟仿真分析与对比。

1 半主动悬架的结构分析及建模技术

半主动悬架是通过调节刚度或阻尼来实现的,但由于弹性元件的刚度调节比较困难,半主动悬架一般都是采用固定刚度的弹性元件和可调阻尼的减振器组合而成。

本研究的半主动悬架结构示意图如图1所示。该悬架系统由固定刚度的弹簧和节流口可调式减振器组成。控制中心接收相应的车况信号,得出步进电机的步进方向和步进脉冲信号,以驱动步进电机改变减振器节流口面积,进而起到调节阻尼的作用。

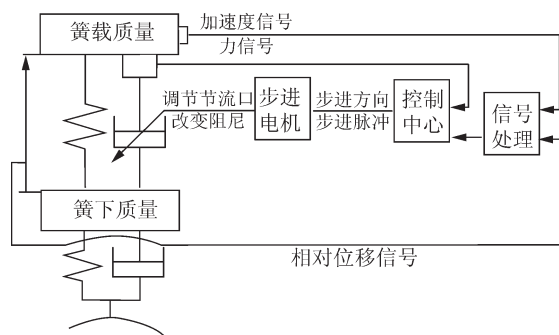


图1 半主动悬架结构示意图

通过对半主动悬架结构的分析,本研究提出了一种基于整车系统的半主动悬架仿真模型的构建方法,其框架如图2所示。

图2中,4个模块分别为:外接车辆模型、减振器机械模型、步进电机模型以及控制器模型,其中外接车辆模型、减振器机械模型和步进电机模型为半主动悬架的机械模型。外接车辆模型在Carsim软件中通过设置相应的车辆参数搭建,减振器机械模型利用Simulink软件建立其数学模型,步进电机模型则直接使用SimPowerSystems模块中的Stepper Motor模块,控

制器模型亦在Simulink软件中构建,实现接收信号后采取相应的控制策略对减振器进行控制的过程^[9]。

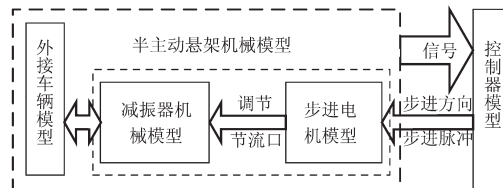


图2 半主动悬架仿真模型框架图

2 半主动悬架仿真模型的建立

本研究根据图2中对半主动悬架仿真模型的结构分析,首先将半主动悬架系统仿真模型进行模块化划分,然后分别对各模块进行建模,最后将所有模块连接起来。

本研究所建半主动悬架系统仿真模型的连接关系如图3所示。可见该模型主要由3个部分组成:外接车辆模型(Carsim S-Function)、悬架减振器模型(Suspension Subsystem ($L_1/L_2/R_1/R_2$))和控制器模型(ECU Subsystem)。下面分别对各模块的建模方法进行具体分析研究。

2.1 外接车辆模型的构建

Carsim软件中的车辆模型包括车体、轮胎、转向系统、悬架系统、动力传动系统、制动系统和空气动力学等七大子系统,只需要通过选择组件模块和配置模块参数就可以建立车辆模型。由于要建立半主动悬架,本研究在悬架系统参数设置时要求将减振器参数设置为外接Simulink模型,并且Carsim中的输入为4个悬架减振器(左前/左后/右前/右后)的阻尼力(IMP-FD- $L_1/L_2/R_1/R_2$),输出分别为4个减振器($L_1/L_2/R_1/R_2$)的压缩速率(CmpRD)及其压缩加速度(CmpAD)、车速(V_x)及其加速度(A_x)、转向盘转角(Steer-SW)及其角速度(StrAV-SW)、横摆角速度(AVz)、车身侧倾角(Beta)、车身质心垂直加速度(A_z -SM)。而车辆其他主要模型的参数配置如表1所示。

表1 车辆主要模型的参数

参数	配置
车辆外型长/宽/高/mm	3 850×1 795×1 471
轴距/mm	2 335
最小离地间距/mm	115
整备质量/kg	1 330
轮距前/后/mm	1 600/1 600
轮胎规格	215/55R17
制动系统	四轮制动+ABS
转向系统	齿轮齿条式转向器
传动系统	前轮驱动
悬架系统	独立悬架
弹簧刚度/(N·mm ⁻¹)	153
减振器	无

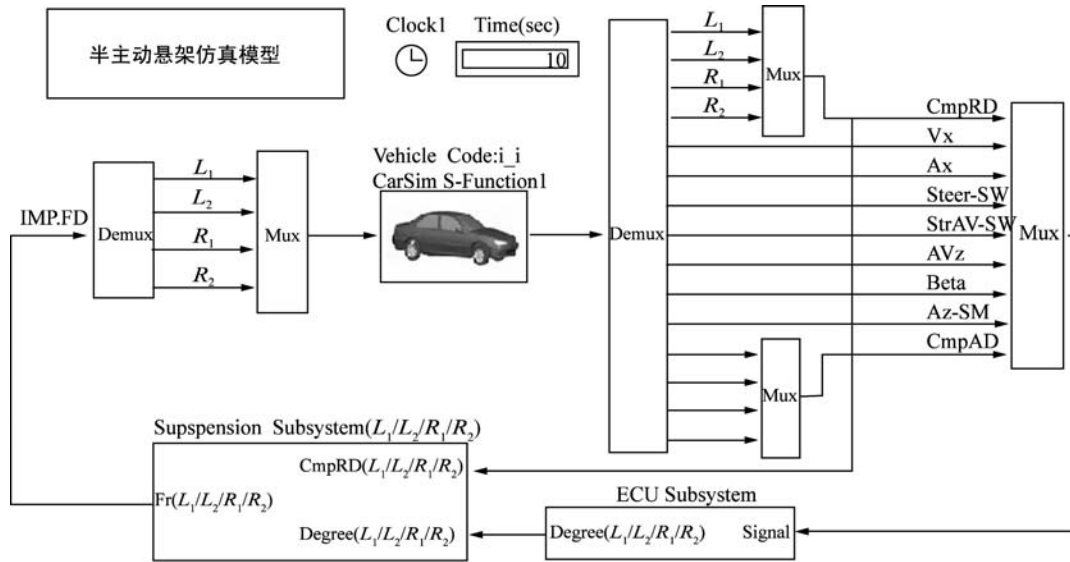


图3 半主动悬架系统仿真模型

2.2 节流口可调减振器模型的构建

节流口可调式减振器的工作原理图如图4所示。在减振器拉伸和压缩行程中,步进电机接受控制指令,通过改变转角驱动芯杆,进而调节节流口面积,达到控制减振器的阻尼的目的。

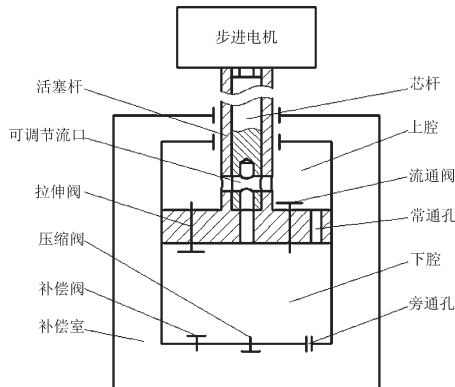


图4 节流口可调式减振器工作原理图

节流口可调式减振器模型的框架图如图5所示,模型分为步进电机模型和减振器机械模型,通过输入步进脉冲和步进方向信号,最后得到输出阻尼力的大小。

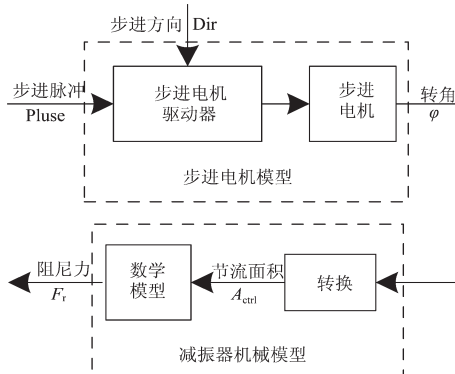


图5 节流口可调式减振器模型框架图

步进电机的模型利用SimPowerSystems中的step-per motor模块通过设置参数构建出两相步进电机,并建立相应的步进电机驱动模块,输入步进方向和脉冲信号控制步进电机的转角。因步进电机输出端与芯杆是相连的,步进电机的输出转角即为芯杆的转角 φ 。

根据文献[10]中对节流口可调式减振器的研究可知,在其拉伸行程和压缩行程中输出阻尼力 F_{r1} 和 F_{r2} 可由以下公式得出。

拉伸行程:

$$F_{r1} = \frac{\rho(A_p - A_r)^3}{2C_d(A_{ctrl} + A_0 + A_{req})^2} v^2 \quad (1)$$

压缩行程:

$$F_{r2} = \left[\frac{\rho(A_p - A_r)^3}{2C_d(A_{ctrl} + A_0 + A_{rev})^2} + \frac{\rho A_r^3}{2C_d(A_{bypass} + A_{ceq})^2} \right] v^2 \quad (2)$$

式中: ρ —油液密度; A_p, A_r —活塞和活塞杆截面积; C_d —空口流量系数; A_{ctrl} —可调节流面积; A_0, A_{req} —常通孔和拉伸阀当量节流面积; A_{rev} —流通阀当量节流面积; A_{bypass}, A_{ceq} —旁通阀和压缩阀当量节流面积; v —活塞的速度。

节流面积的大小由芯杆转角的大小决定的,芯杆转角与节流面积的转换示意图如图6所示。从图6中可知,节流口孔径为 $2r$,芯杆半径为 R , θ 为节流孔口张开的角度, φ 为芯杆转过的角度。在计算节流面积时,将侧向的圆孔半径近似为 r ,最后得出节流面积 A_{ctrl} 的表达式,如下式所示:

$$A_{ctrl} = 4(\sigma r^2 - r^2 \sin \sigma + Lr \sin \sigma) \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} \sigma = \arccos \frac{r-L}{r} \\ \sin \sigma = \frac{\sqrt{2rL-L^2}}{r} \end{cases}$$

而:

$$\begin{cases} L = R \sin \frac{\theta - \varphi}{2} \\ \theta = 2 \arcsin \frac{r}{R} \end{cases}$$

由式(3)可知,当节流口的结构确定后,其节流面积 A_{ctrl} 与芯杆转角 φ 间的关系就可以确定。

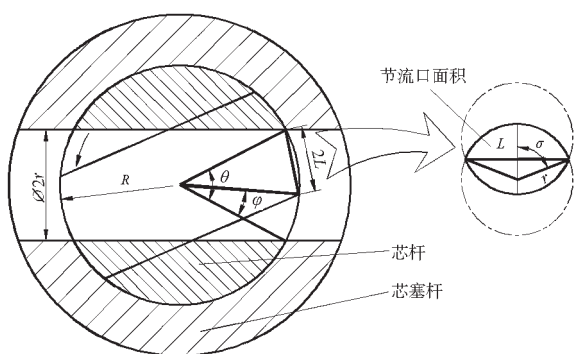


图6 芯杆转角与节流面积的转换示意图

从式(1~3)可以看出,当减振器的外形结构确定后,其阻尼力主要受芯杆转角、活塞速度以及活塞运动方向决定。故研究者可在Simulink中建立可调节流口减振器机械部分的数学模型,设置相应的结构参数,并以芯杆转角 φ 和活塞速度 v 及其方向作为输入参数,以减振器阻尼力 F_r 作为输出参数。

2.3 控制器模型的建立

本研究对半主动悬架的控制是基于整车系统的集成控制,要求能够根据车辆的运行状况以及行驶的路况来调节4个半主动悬架的阻尼,达到改善车辆行驶平顺性的目的。

一方面,根据车辆的运行状况(例如转弯、加速、制动等),确定4个悬架的阻尼的总体分布,防止车辆发生侧翻、点头等情形;另一方面,检测车辆悬架的振动状况,进而调节阻尼,改善车体的稳定性。对于悬架阻尼的调节,本研究通过改变步进电机的转动角度加以实现,故确定控制对象为步进电机的转角。笔者利用传感器接收车辆上的运行参数(如车速、转向盘转角、车身侧倾角和悬架振动速度和加速度等),采用确定性和不确定性相结合的控制策略,即对于车辆的运行状况以车辆运行参数的经验值为标准,通过控制模糊控制器中的比例因子,确定4个悬架阻尼的整体分布,而在车体振动性能上采取模

糊控制策略,根据各悬架中减振器压缩率及其变化率来调节悬架的阻尼。半主动悬架系统控制策略示意图如图7所示,图中,控制器的输入为车速 u_a 、加速度 a 、转向盘转角 δ 及其角速度 δ_r 、横摆角速度 ω_r 、车身侧倾角 β 、质心垂直加速度 A_z 和4个悬架中各减振器压缩速度 z_{dr} 及其变化率 z_{da} ,另外还有从模糊控制器中输出的转角信息;控制器的输出为4个模糊控制器计算得出的转角 $\varphi_{L1/L2/R1/R2}$ 。

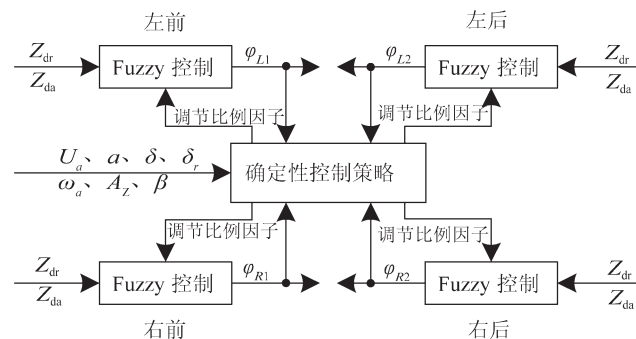


图7 半主动悬架系统控制策略示意图

控制器的模型利用Simulink软件中的模块按照相应的控制策略进行搭建,接收来自Carsim软件中车辆运行的参数,并输出相应的转角到半主动悬架系统模型中。

3 模型的仿真与结果分析

为了验证所设计的仿真模型的正确性与实用性,研究者可与Carsim软件数据库中自带的模型进行比较分析,在软件中设置两种除悬架系统之外其他参数都相同的车辆模型:一种带有被动悬架系统模型,其减振器的阻尼系数为 $30 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$;另一种带有所开发的半主动悬架系统Simulink仿真模型,模型的参数设置如表2所示。表2中给出了主要的参数,其他参数皆为结构参数,设定参数后其阻尼系数的变化范围为 $21 \text{ kN} \cdot \text{s/m} \sim 39 \text{ kN} \cdot \text{s/m}^{[11-13]}$ 。本研究将两种模型在转弯和通过减速带两种工况下进行了仿真。

表2 Simulink仿真模型参数

参数	油液密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	空口流量系数 C_d	节流口孔径 r/mm	芯杆半径 R/mm
值	860	0.67	5	10

3.1 转弯行驶工况

本研究设置两种车辆的行驶速度为 80 km/h ,无制动,档位控制选用闭环6档模式,在半径为 152.4 m 的圆周路面上进行仿真,时间为 10 s 。转弯工况下两种车辆垂直加速度和车身侧倾角的变化曲线如图8、图9所示,从图中曲线可知,所开发的半主动悬架系统相比被动悬架系统在转弯行驶工况下,整车达到稳定

的时间提前了52.94%,车身侧倾角降低了8.33%,可见半主动悬架系统能够有效地防止车辆侧翻,改善整车的行驶平顺性。

3.2 通过减速带行驶工况

本研究设置两种车辆的行驶速度为80 km/h,无制动,档位控制选用闭环6档模式,路面设置有3.5 cm高、40 cm宽的减速带,在直线柏油路面上进行仿真,时间为10 s。通过减速带工况下两种车辆垂直加速度变化曲线如图10所示,由图10所示曲线变化情况可知,在通过减速带时,所开发的半主动悬架系统的车辆能够比被动悬架系统的车辆提前40.74%达到稳定,且振动幅度降低了24.31%,说明半主动悬架的性能更佳,提高了车辆的乘坐舒适性。

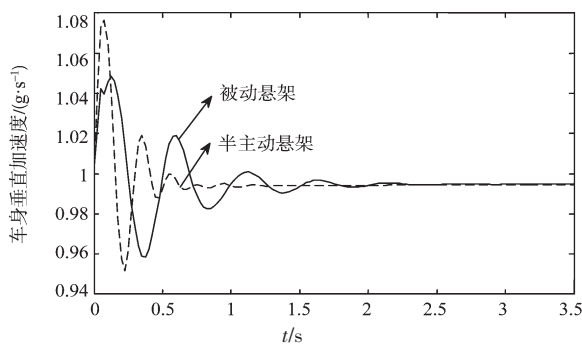


图8 转弯工况下车身垂直加速度变化曲线

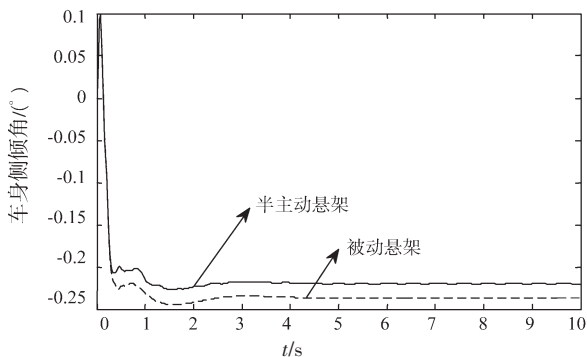


图9 转弯工况下车身侧倾角变化曲线

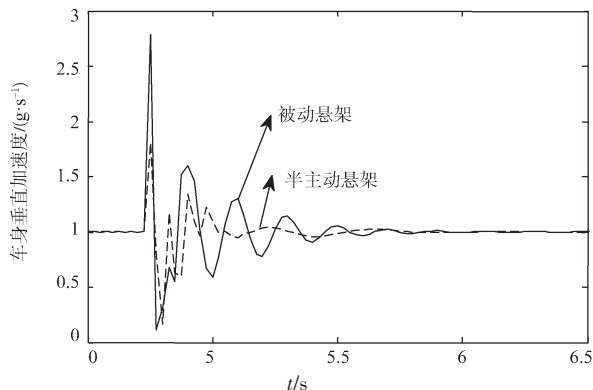


图10 通过减速带工况下车身垂直加速度变化曲线

4 结束语

通过对车辆半主动悬架结构的分析,本研究提出了半主动悬架系统的整体建模技术。利用Carsim和Simulink软件联合建模的方法,逐个构建半主动悬架系统中的外接车辆模型和减振器模型,通过研究半主动悬架的控制策略,利用Simulink软件构建出控制器模型,最后连接各模型,建立半主动悬架系统整车仿真模型。对模型的仿真分析结果表明,所设计的半主动悬架仿真模型能够实现控制减振器阻尼的作用。并且采用确定性和不确定性相结合的控制策略,能够达到改善悬架工作性能、提高行驶平顺性的目的。

同时,本研究所开发的模型是由相互独立的模块组合而成,这为以后进行相应的半主动悬架系统的硬件在环仿真研究提供了有效可行的途径。

参考文献(References):

- [1] 姚嘉伶,蔡伟义,陈 宁. 汽车半主动悬架系统发展状况[J]. 汽车工程,2006,28(3):276-280.
- [2] 薛显锋,庞 辉. 汽车半主动悬架控制策略研究[J]. 机械制造,2011,49(3):55-57.
- [3] 唐晓娟,谢能刚,宋崇智,等. 基于模块化的半主动悬架模糊控制及仿真分析[J]. 系统仿真学报,2009,21(13):4041-4044.
- [4] FANG Zi-fan, SHU Wen-hui, DU Dao-jia, et al. Semi-active suspension of a full-vehicle model based on double-loop control[J]. *Procedia Engineering*, 2011(16):428-437.
- [5] 朱一波,李 芳. 汽车半主动悬架数学模型与模糊控制研究[J]. 机电工程,2008,25(11):97-100.
- [6] 朱茂桃,邵长征,王国林. 基于CarSim的路面模型重构及车辆平顺性仿真分析[J]. 机械设计与制造,2010(10):78-80.
- [7] 郭孔辉,付 皓,丁海涛,等. 基于CarSim RT的车辆稳定性系统控制器开发[J]. 汽车技术,2008(3):1-4,51.
- [8] Meehanital Simulation Corporation. Carsim Reference Manual[Z]. Meehanital Simulation Corporation, 2005.
- [9] The MathWorks Inc.. Simulink User's Manual [Z]. The Math Works Inc., 2009.
- [10] 陈 龙,陈 杨,江浩斌,等. 节流口可调式减振器的性能分析与试验研究[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2004,25(3):208-211.
- [11] 徐永康,张 雷. 基于Matlab空间四连杆引纬机构运动仿真[J]. 轻工机械,2012,30(3):17-21.
- [12] 王 郝. 基于Matlab的优先阀动态特性分析[J]. 现代制造技术与装备,2012(3):79-80.
- [13] 刘勺华,李 彦,房 亚,等. 可调阻尼式汽车减振器设计与试验研究[J]. 机械设计与制造,2012(5):220-222.

[编辑:张 翔]