

粘滞阻尼系数对磁流变悬架影响分析

杨蒙蒙, 杨绍普, 邢海军

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:建立了汽车磁流变半主动悬架 1/4 车辆模型的基础上, 采用模糊控制策略, 对半主动悬架进行模糊控制仿真。粘滞阻尼系数是磁流变阻尼器的重要参数之一, 为研究其对悬架性能的影响, 在 Simulink 环境下采用多次对粘滞阻尼系数赋值的方法, 分别对半主动悬架簧载质量加速度、悬架动行程和轮胎动载荷的均方根值进行了仿真计算, 得到了粘滞阻尼系数对悬架性能的影响曲线。结果表明: 调节粘滞阻尼系数可使簧载质量加速度均方根值达到最小值; 增大粘滞阻尼系数可使悬架动行程和轮胎动载荷减小。粘滞阻尼系数为定值时对半主动悬架和被动悬架进行了仿真对比。

关键词:粘滞阻尼系数; 模糊控制; 半主动悬架

中图分类号:U463.11 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)03-0071-05

0 引言

汽车悬架是汽车的重要组成部分之一, 其性能的优劣直接影响车辆的乘坐舒适性和操纵稳定性。被动悬架系统阻尼和刚度不可调, 难以根据道路状况和车辆自身状态进行实时调节^[1]。半主动悬架系统通过调节减振器阻尼或弹簧刚度来实现悬架性能优化, 具有结构简单、成本低, 减振效果好等优点, 有广阔的应用前景^[2]。

随着磁流变液应用技术的发展, 基于磁流变阻尼器的汽车半主动悬架已经成为国内外研究的热点之一。国外 Nguyen^[3] 等用 ANSYS 对磁流变阻尼器的最大阻尼力和动态阻尼范围进行优化, 对磁流变阻尼器的设计具有指导意义。Rosenfeld^[4] 等对具有一定体积的磁流变阻尼器进行了结构尺寸优化。杨绍普^[5-6] 等综述了磁流变滞回非线性模型的研究进展, 并提出了一种改进的磁流变滞回模型。磁流变半主动悬架本身具有较强的非线性, 且存在车辆-道路耦合现象, 国内学者^[7-9] 对磁流变悬架研究了其动力学行为并提出了车辆-道路耦合动力学的研究框架, 为磁流变半主动悬架的推广奠定了一定的理论基础。

粘滞阻尼系数是磁流变阻尼器的重要参数之一, 对汽车磁流变悬架的控制中, 粘滞阻尼系数为具体值, 不能通过调节电流的方式来调整, 为研究其对悬架性能的影响, 本文在鲁棒性较好的模糊控制策略下采用重复多次对粘滞阻尼系数赋值的方法对半主动悬架进行仿真计算, 得到了粘滞阻尼系数对悬架性能的影响曲线, 为磁流变半主动悬架的推广应用提供有益的参考。

1 半主动悬架模型的建立

1.1 路面输入

本文采用滤波白噪声随机路面输入, 其时域数学模型为^[10]

$$\dot{q}(t) = -\alpha v q(t) + \omega(t) \quad (1)$$

式中, $q(t)$ 为随机路面激励; v 为汽车车速; $\omega(t)$ 为一白噪声; α 为常系数, 不同路面激励 α 的参数估计值不

收稿日期: 2015-06-29 责任编辑: 刘宪福 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2015.03.14

作者简介: 杨蒙蒙(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为车辆系统动力学。E-mail: ymmhebei@163.com

基金项目: 河北省科技支撑计划资助项目(14212202D)

杨蒙蒙, 杨绍普, 邢海军. 粘滞阻尼系数对磁流变悬架影响分析[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2015, 28(3): 71-75.

同,其中 B 级路面 α 为 0.130 3。

1.2 磁流变阻尼器特性

磁流变阻尼器是一种理想的可控阻尼器,通过改变磁流变液的特性来调节阻尼力的大小,具有响应速度快、能耗低、调节范围大等优点^[11]。磁流变阻尼器的阻尼力表示如下^[12]

$$F = -C_e v_0 + F_{MR} \quad (2)$$

式中, F 为磁流变阻尼力; C_e 为粘滞阻尼系数; v_0 为活塞的相对运动速度; F_{MR} 为库伦阻尼力,它只是励磁电流的函数,通过改变 F_{MR} 的大小来实现磁流变半主动悬架系统的控制。

1.3 汽车半主动悬架 1/4 车辆模型

基于磁流变阻尼器特性,将减振器阻尼力分为基值阻尼力和可调阻尼力,其中基值阻尼力为粘滞阻尼系数与活塞相对运动速度的乘积,可调阻尼力为库伦阻尼力。忽略轮胎阻尼,用定刚度弹性元件近似表示轮胎,建立如图 1 所示的二自由度 1/4 车辆半主动悬架简化模型。其中 m_2 为簧载质量, m_1 为非簧载质量, k_2 为悬架刚度, k_1 为轮胎刚度, C_e 为粘滞阻尼系数, x_2, x_1, x_0 分别为车身位移,轮胎位移和路面输入。由牛顿第二运动定律得到二自由度 1/4 车辆运动微分方程为

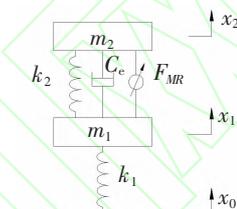


图 1 磁流变半主动悬架 1/4 车辆模型

$$\begin{cases} m_2 \ddot{x}_2 = -k_2(x_2 - x_1) - C_e(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + F_{MR} \\ m_1 \ddot{x}_1 = k_2(x_2 - x_1) + C_e(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - F_{MR} - k_1(x_1 - x_0) \end{cases} \quad (3)$$

设状态变量 $\mathbf{X} = [x_2 - x_1 \quad \dot{x}_2 \quad x_1 - x_0 \quad \dot{x}_0]^T$, 得到半主动悬架的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{U} = [\dot{x}_0 \quad F_{MR}]^T$ 为状态输入; $\mathbf{Y} = [\dot{x}_2 \quad x_2 - x_1 \quad k_1(x_1 - x_0) \quad \dot{x}_1]^T$ 为状态输出; 有

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{C_e}{m_2} & 0 & \frac{C_e}{m_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{m_1} & \frac{C_e}{m_1} & -\frac{k_1}{m_1} & -\frac{C_e}{m_1} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2} \\ -1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m_1} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{C_e}{m_2} & 0 & \frac{C_e}{m_2} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

2 模糊控制策略的实现

模糊控制的特点是不需要考虑被控对象的精确数学模型和复杂情况,采用模糊数学语言变量表述的控制规则来操纵系统工作,对数学模型难以建立或系统本身具有较强非线性的控制过程有较好的控制效果。

2.1 输入输出变量的选取

较为常见的是采用误差和误差变化率作为二维模糊控制器的输入变量,本文以簧载质量速度 \dot{x}_2 和簧载质量加速度 \ddot{x}_2 作为模糊控制器的输入变量,以库伦阻尼力 F_{MR} 作为模糊控制器的输出变量。本文根据实际控制对象,对输入输出变量均采用 7 个语言值表示,即负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZE)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。输入输出均采用灵敏度较好的三角形隶属函数。

2.2 模糊控制规则的建立

模糊控制规则可表述为:当误差(与 0 作偏差)较大时,调节输出量使误差减小;当误差较小时,控制

输出量使系统保持稳定性^[1]。在二维模糊控制器中,共采用 49 条控制规则,如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

\ddot{x}_2	\dot{x}_2						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NM	NM	NB	NB	NB	NM	NM
NM	NM	NM	NB	NB	NB	NM	NM
NS	NS	NM	NM	NM	NM	NS	ZE
ZE	NS	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PS
PS	ZE	PS	PM	PM	PM	PM	PM
PM	PS	PM	PB	PB	PB	PM	PM
PB	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM

2.3 模糊控制仿真模型的建立

根据路面输入,1/4 车半主动悬架模型和模糊控制器建立如下图 2 所示的半主动悬架模糊控制仿真模型。

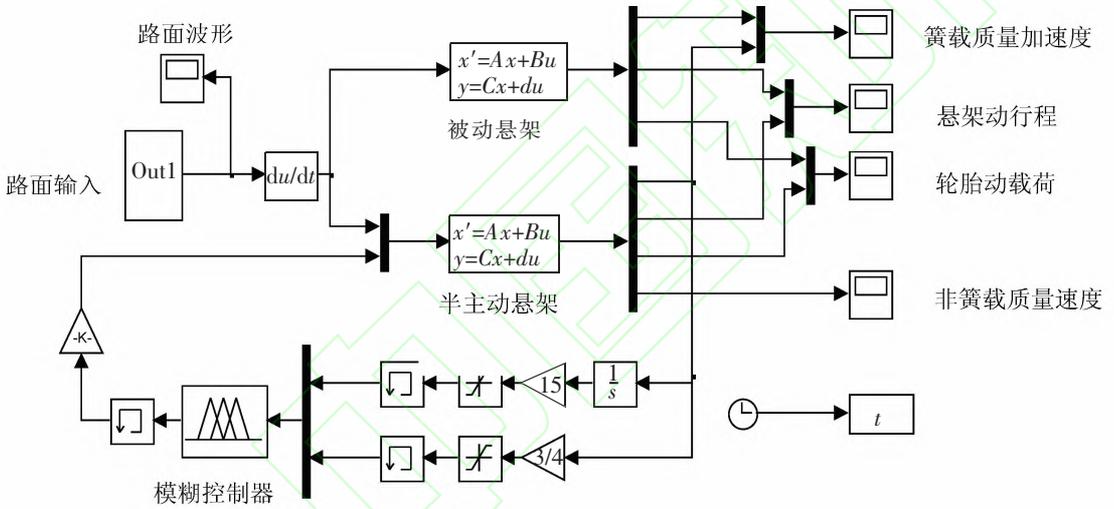


图 2 模糊控制仿真模型

3 仿真结果及分析

3.1 仿真计算

在 Simulink 仿真平台下,以 B 级随机路面作为干扰输入,车速为 20 m/s,仿真时间为 20 s。仿真参数为 $m_2 = 136 \text{ kg}; m_1 = 24 \text{ kg}; k_2 = 10\,000 \text{ N/m}; k_1 = 100\,000 \text{ N/m}; C_0 = 760 \text{ N} \cdot \text{s/m}$,其中, C_0 为被动悬架的减振器阻尼系数。粘滞阻尼系数是磁流变阻尼器的重要参数之一,为研究其对悬架性能的影响,将粘滞阻尼系数 C_c 从 50~500 $\text{N} \cdot \text{s/m}$ 范围内每隔 10 $\text{N} \cdot \text{s/m}$ 进行一次赋值,每赋值一次就对模糊控制悬架模型进行仿真计算一次。将得到的悬架 3 个性能指标簧载质量加速度、悬架动行程和轮胎动载荷的均方根值拟合合成曲线如图 3~图 5。

取 C_c 为 120 $\text{N} \cdot \text{s/m}$,进行模糊控制半主动悬架与被动悬架的仿真对比,得到悬架的簧载质量加速度曲线如图 6 所示。为了更清楚仿真结果,将各性能指标的均方根值列入表 2 中。

表 2 悬架指标数据分析

悬架指标	被动悬架	模糊控制
簧载质量加速度	1.141 4	0.655 7
悬架动行程	0.007 2	0.008 1
轮胎动载荷	299.765 7	502.856 0

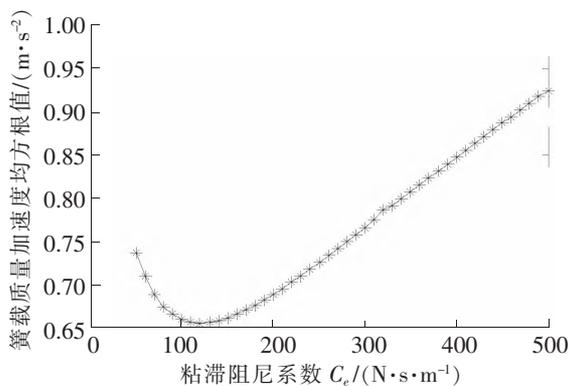


图 3 簧载质量加速度均方根值与粘滞阻尼系数的关系曲线

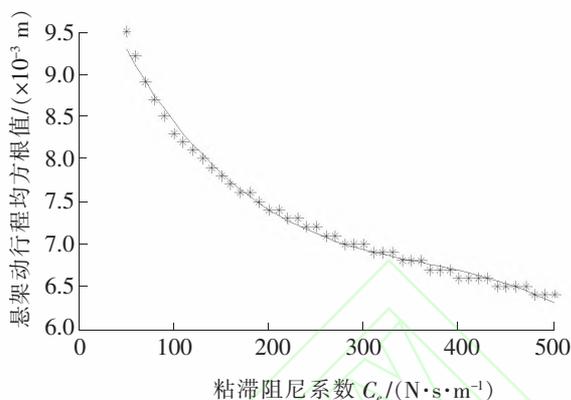


图 4 悬架动行程均方根值与粘滞阻尼系数的关系曲线

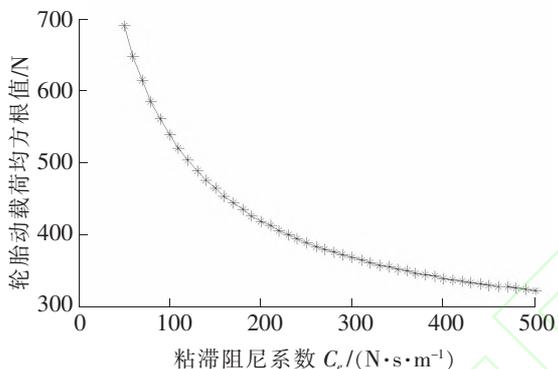


图 5 轮胎动载荷均方根值与粘滞阻尼系数的关系曲线

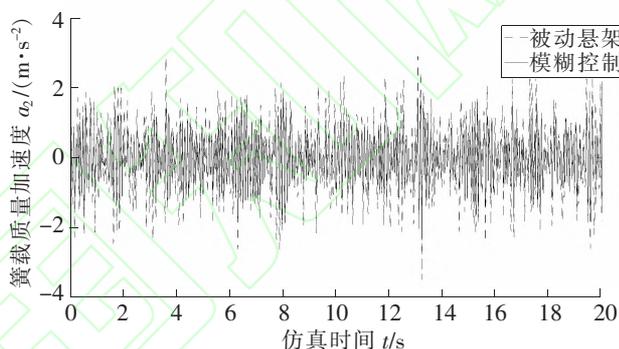


图 6 簧载质量加速度曲线图

3.2 结果分析

图 3 表明随着粘滞阻尼系数 C_e 的增大,簧载质量加速度均方根值呈现先减小后增大的趋势,当 C_e 为 $120 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$ 时到达最低点;图 4 和图 5 中悬架动行程均方根值和轮胎动载荷均方根值均随着粘滞阻尼系数 C_e 的增大出现减小趋势。粘滞阻尼系数取最佳值 $120 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$ 时,图 6 中模糊控制能有效降低簧载质量加速度,有助于汽车的乘坐舒适性;表 2 显示模糊控制策略使悬架动行程和轮胎动载荷有不同程度的增加,不利于操纵稳定性。

4 结论

粘滞阻尼系数 C_e 作为磁流变阻尼器的重要参数之一,在悬架控制中不能通过调节电流来调整,但其取值对磁流变半主动悬架性能有一定的影响,特别是对于簧载质量加速度来说, C_e 在某个取值点处可使簧载质量加速度均方根值达到最小值,有效提高车辆的乘坐舒适性,增大 C_e 的值可使轮胎动载荷减小。上述结论可对设计磁流变半主动悬架提供有益的参考。

参 考 文 献

- [1] 顾海明,赵桂范,杨佳璘,等. 基于最优控制和模糊控制的半主动悬架仿真研究[J]. 机械设计与制造,2013(6):65-71.
- [2] Peter J Gawthrop, Simon A Neild, David J Wagg. Semi-active damping using a hybrid control approach [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012,23(18):2103-2116.
- [3] Nguyen Q H, Choi S B. Optimal design of a vehicle magnetorheological damper considering the damping force and dynamic range[J]. Smart Materials and Structures,2009,18(1):015013-015022.
- [4] Rosenfeld N C, Wereley N M. Volume-constrained optimization of magnetorheological and electrorheological valves and dampers[J]. Smart Materials and Structures,2004,13(6):1303-1313.
- [5] Yang S P, Gordaninejad G H. A Hysteresis model for magneto-rheological damper[J]. International Journal of Nonlin-

earSciences and Numerical Simulation,2005, 6(2): 139-144.

- [6] Yang S P, Shen Y J. Recent advances in dynamics and control of hysteretic nonlinear systems [J]. Chaos, Solitons and Fractals,2009, 40(4):1808-1822.
- [7] 杨绍普,申永军. 滞后非线性系统的分岔与奇异性[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [8] 杨绍普,陈立群,李韶华. 车辆道路耦合系统动力学[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [9] 潘存治,杨绍普,邢海军,等. 磁流变阻尼器半主动隔振系统试验研究[J]. 石家庄铁道学院学报,2006,19(3):36-39.
- [10] 姚嘉凌. 车辆磁流变半主动悬架系统理论和试验研究[D]. 南京:南京林业大学,2009.
- [11] 李锐,余森,陈伟民,等. 基于磁流变减振器的汽车悬架振动控制[J]. 机械工程学报,2005,41(6):128-132.
- [12] 余森. 汽车磁流变半主动悬架控制系统研究[D]. 重庆:重庆大学,2003.

Analysis of Viscous Damping Impact of Magnetorheological Suspension

Yang Mengmeng, Yang Shaopu, Xing Haijun

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

Abstract: Based on a 1/4 vehicle model with magnetorheological semi-active suspension, a fuzzy control simulation model of semi-active suspension is built with the fuzzy control strategy. As one of the important parameters of magnetorheological damper, viscous damping has some impact on suspension performances. To prove that impact, the rms of sprung mass acceleration, suspension travel and tire load of semi-active suspension are emulated individually in the Simulink environment with assigning viscous damping repeatedly. The results show that the rms of sprung mass acceleration could reach the minimum by regulating viscous damping, and increasing viscous damping could reduce suspension travel and tire load. With a certain value of viscous damping, the performances of semi-active suspension and passive suspension are compared.

Key words: viscous damping; fuzzy control; semi-active suspension

(上接第70页)

- [4] 庞原冰,李群湛,刘炜,等. 基于电场的地铁杂散电流模型研究[J]. 铁道技术监督,2008,36(1):32-35.
- [5] 李威. 地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2004:12-15.
- [6] 蔡文娟,李威,叶果,等. 地铁杂散电流光纤传感系统的信号采集与处理[J]. 仪表技术与传感器,2009(3):107-108.
- [7] 王禹桥. 地铁杂散电流分布规律及腐蚀智能监测方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2012.
- [8] Charalambous C A, Cotton I, Aylott P. Modeling for Preliminary Stray Current Design Assessments [J]. The Effect of Crosstrack Regeneration Supply,2013,28(3):1899-1908.

Research of Subway Stray Current Monitoring System

Liu Jiajia, Li Xiaolong, Yao Di

(Institute of Railway & Urban Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In the subway transportation system, stray currents cause a corrosion of metal loss. The main purpose of this paper is to design a wireless stray current monitoring system based on the rail line of Tongji University. Through the analysis of urban rail power system, this paper researches the causes of stray current and corrosion damage to metal structures and introduces the common stray current protection measures.

Key words: urban transit; stray current; ZigBee; monitoring system