

# Simulation of Electric Vehicle Suspension Dynamic Characteristics

Yonghong Wang<sup>1</sup>, Zhifei Wu<sup>2\*</sup>, Junhao Mei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dayun Automobile Co., Ltd., Yuncheng Shanxi

<sup>2</sup>Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi

Email: \*wuzhifei@tyut.edu.cn

Received: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2019; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2019; published: Jun. 27<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Due to the change of the powertrain system, the suspension dynamic characteristics of the electric vehicle are different from those of the conventional car. In this paper, based on the relevant parameters of an electric vehicle suspension system, a quarter-vehicle active suspension fuzzy controller is established in the Matlab/Simulink environment. The dynamic characteristics of the vertical acceleration of the vehicle body, the dynamic deflection of the suspension spring, and the dynamic load of the tire are used as evaluation indexes for the effects of ride comfort and operational stability of vehicle. The simulation results show that the semi-active suspension with fuzzy controller has a good effect on the improvement of dynamic characteristics of electric vehicle suspension.

## Keywords

Electric Vehicle, Suspension Dynamic Characteristics, Dynamic Simulation, Matlab/Simulink

---

# 电动汽车悬架动态特性仿真

王永红<sup>1</sup>, 武志斐<sup>2\*</sup>, 梅军豪<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大运汽车股份有限公司, 山西 运城

<sup>2</sup>太原理工大学, 山西 太原

Email: \*wuzhifei@tyut.edu.cn

收稿日期: 2019年6月2日; 录用日期: 2019年6月20日; 发布日期: 2019年6月27日

---

## 摘要

由于动力传动系统的改变, 电动汽车的悬架动态特性与传统汽车不相同。本文以某电动汽车悬架系统相关参数为参考, 在Matlab/Simulink环境中建立了四分之一车主动悬架模糊控制器。以车身垂直加速度、

\*通讯作者。

悬架弹簧动挠度以及轮胎动载荷等相关动态特性作为对电动车平顺性和操纵稳定性影响的评价指标。仿真结果表明, 具有模糊控制器的半主动悬架对电动车悬架动态特性的改善有良好的效果。

## 关键词

电动汽车, 悬架动态特性, 动力学仿真, Matlab/Simulink

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前应用于电动车悬架动态特性控制系统的控制理论比较多, 主要有最优控制、预测控制、模糊控制、自适应控制、神经网络控制以及复合控制等[1] [2] [3]。模糊控制由于不需要建立被控对象的精确数学模型, 且对于非线性对象具有良好的 Robust 和高控制精度的特点, 因而被广泛的运用在改善电动汽车悬架动态特性上[4] [5]。刘静构建了一种带“天棚”阻尼的 1/2 车辆主动悬架系统, 推导出基于 LQR 设计的该系统的动力学方程, 为其他控制策略提供理想的参考模型[6]。美国加州大学的 Abdel-Hady 将模糊控制和 LQR 控制的半主动悬架进行对比发现: 前者的车身加速度和悬架动行程较后者分别下降 16% 和 18% [7]。英国剑桥大学的 Ruey-Jing Lian 建立了基于自组织模糊控制的半主动悬架, 并进行了控制试验, 结果表明该控制器有效降低了簧上质量加速度, 对于悬架系统的平顺性提升效果显著[8]。合肥工业大学的陈杰平在半主动悬架模型基础上, 利用八板块方法设计了整车的变论域控制策略。在随机路面激励的条件下, 通过仿真和试验研究发现: 采用模糊变论域控制的半主动悬架相比于被动悬架的振动强度改善了 9%~22% [9]。

因此本文基于现代模糊控制理论, 建立了主动模糊控制模型来验证模糊控制对电动车悬架动态特性控制的有效性和适应性。

## 2. 四分之一悬架模型的建立

弹簧是表示力与位移关系的元件, 在力学模型中, 它被抽象成为无质量并具有线弹性的元件。阻尼器是表示力与速度关系的元件, 在力学模型中, 它被抽象成无质量且具有线性阻尼系数的元件。如图 1 所示, 本文采用二自由度 1/4 半主动悬架模型, 利用牛顿第二定律建立如下运动微分方程:

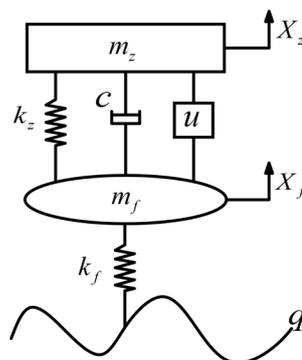


Figure 1. 1/4 Car active suspension model

图 1. 1/4 车主动悬架模型

$$\begin{aligned} m_z \ddot{x}_z + c(\dot{x}_z - \dot{x}_f) + k_z(x_z - x_f) - u &= 0 \\ m_f \ddot{x}_f - c(\dot{x}_z - \dot{x}_f) - k_z(x_z - x_f) + k_f(x_f - q) + u &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

其中： $m_z$ 为簧载质量， $m_z = 480 \text{ kg}$ ； $m_f$ 为轮胎质量， $m_f = 40 \text{ kg}$ ； $x_z$ 为车身垂向位移，单位米/m； $x_f$ 为轮胎垂向位移，单位米/m； $q$ 为路面激励位移，单位米/m； $k_z$ 为悬架刚度，取 $k_z = 15000 \text{ N/m}$ ； $k_f$ 为轮胎刚度，取 $k_f = 150000 \text{ N/m}$ ； $c$ 为悬架阻尼系数，取 $c = 12000 \text{ N/(m/s)}$ ； $u$ 为主动控制力，单位牛顿/N。

为了与路面 8 级分类标准对应，本文采用基于有理函数的路面不平度时域模型，B 级路面标准，仿真速度为 20 m/s，其时域数学模型可以用下式描述[10]

$$\dot{q}(t) = -avq(t) + w(t) \tag{2}$$

式中， $q(t)$ 是车轮所受到的路面随机激励； $v$ 是汽车的行驶速度； $w(t)$ 是一白噪声。 $a(1/m)$ 是常系数，不同路面的参数估计值  $a$  的值为：B 级路面  $a = 0.1303$ ，C 级路面  $a = 0.12$ 。当车速为 20 m/s 时，路面不平度激励仿真如图 2 所示：

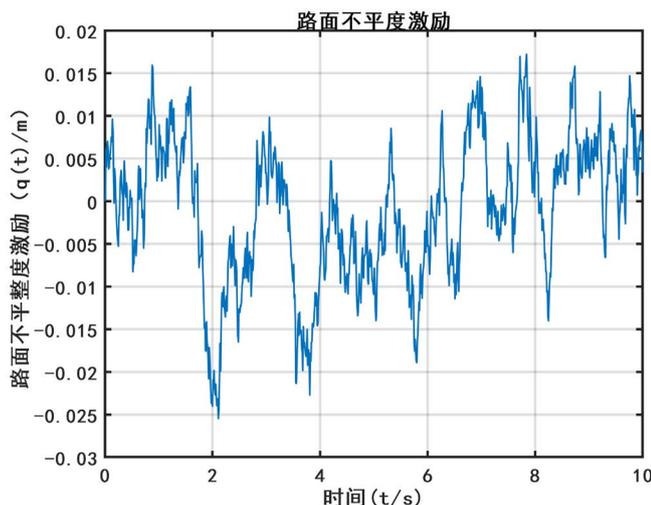


Figure 2. Road unevenness excitation  
图 2. 路面不平度激励

### 3. 模糊控制器的设计

模糊控制器设计主要包括选取控制器结构、选择输入和输出变量的论域、制定控制规则及解模糊化策略等。本文选取误差  $e$  为车身垂向速度，误差  $e_c$  为车身垂向速度变化速率即加速度， $u$  为控制悬架系统的控制力。

由被动悬架仿真得到车身垂向速度变化范围为 $[-0.15, 0.15]$ ，车身垂直加速度变化范围为 $[-1.5, 1.5]$ 。设输入和输出变量模糊集基本论域分别为：

$$\begin{aligned} e &= [-6, 6] \\ e_c &= [-6, 6] \\ u &= [-6, 6] \end{aligned} \tag{3}$$

使用速度变化量化因子  $K_e$ 、加速度变化量化因子  $K_{e_c}$  与输出控制力变化量化因子  $K_u$  来表征模糊集论域精确量模糊化的加权程度，经反复仿真试验得：

$$\begin{aligned}
 K_e &= 40 \\
 K_{ec} &= m/e_c = 4 \\
 K_u &= x/u = 115
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

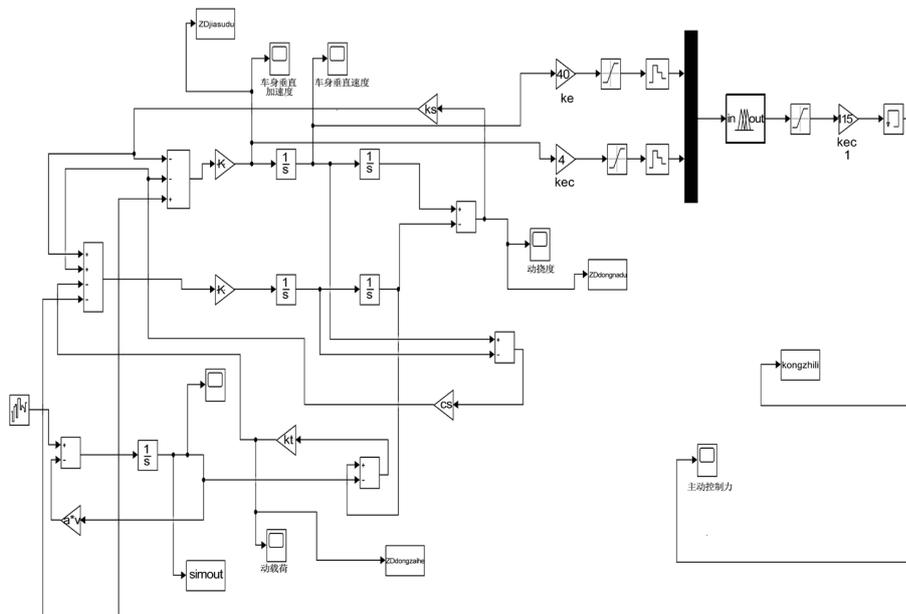
其中： $n$ 、 $m$  分别为误差  $e$ 、 $e_c$  的模糊集论域的边界范围； $x$  为悬架系统需要的理论控制力，变化范围为[-500, 500]。模糊子集采用 7 个语言变量值[NB NM NS ZO PS PM PN]描述。建立表 1 所示的 49 条模糊控制规则。

**Table 1.** Fuzzy rule control table  
**表 1.** 模糊规则控制表

| Ec | E  |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
|    | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB | PB | PB | PM | PM | PS | ZO | ZO |
| NM | PB | PB | PM | PS | PS | ZO | NS |
| NS | PM | PM | PM | PS | PS | ZO | NS |
| ZO | PM | PM | PS | ZO | NS | NS | NM |
| PS | PS | PS | ZO | NS | NS | NM | NM |
| PM | PS | ZO | NS | NS | NM | NM | NB |
| PN | ZO | ZO | NM | NM | NM | NB | NB |

### 4. 仿真分析

按标准 ISO/TC 108/SC2N67 中将路面不平度分为 8 级规定，本文采用 B 级路面，路面不平度系数平均值取  $64 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ，仿真车速为 20 m/s，参考空间频率为  $0.1 \text{ m}^{-1}$ ，采样频率为 0.01 Hz，仿真时间取 10 s。在 Simulink 中建立 1/4 车主动悬架仿真模型，如图 3 所示。车身垂向加速度、悬架动挠度、轮胎动载荷在不施加模糊控制力和施加模糊控制力两种模式下的仿真结果对比如图 4~6 所示。



**Figure 3.** Fuzzy control Simulink simulation model  
**图 3.** 模糊控制 Simulink 仿真模型

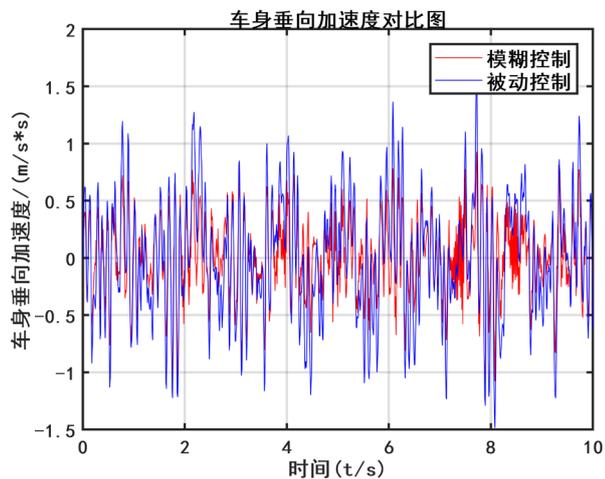


Figure 4. Vertical acceleration of the car body

图 4. 车身垂向加速度

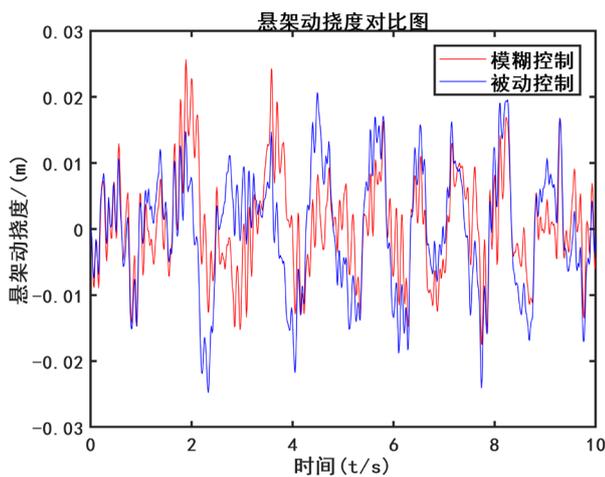


Figure 5. Suspension deflection comparison

图 5. 悬架挠度对比

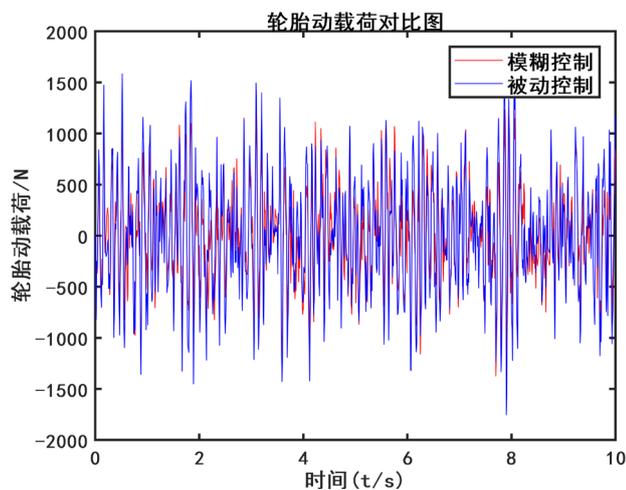


Figure 6. Tire dynamic load comparison

图 6. 轮胎动载荷对比

依据两种控制策略下车身垂向加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷的时域图及其均方根值(如表 2 所示)可知,采用模糊控制策略有效降低了车身垂向加速度、悬架动挠度、轮胎动挠度的幅值。

**Table 2.** Comparison of smoothness evaluation indicators

**表 2.** 平顺性评价指标对比表

| 指标参数    | 控制类型 | 被动悬架   | 模糊控制悬架 | 模糊控制增幅(%) |
|---------|------|--------|--------|-----------|
| 车身垂直加速度 |      | 0.5174 | 0.3368 | 34.91     |
| 悬架动挠度   |      | 0.0093 | 0.0076 | 18.28     |
| 悬架动载荷   |      | 558.94 | 471.11 | 15.71     |

## 5. 结论

1) 车辆行驶路面的不平度是随机性的,本文以随机白噪声作为系统的输入,来模拟随机路面,和实际路况相符。

2) 本文采用模糊控制的策略建立了四分之一车辆半主动悬架模型,通过本文提出的模糊控制策略控制主动控制力的实时输出,有效地改善了电动车悬架系统的平顺性和操纵稳定性。验证了具有模糊控制器的半主动悬架对电动车悬架动态特性的改善有良好的效果。同时,模糊控制系统搭建简便,使得半主动悬架系统的建立具有实际意义。

## 基金项目

山西省科技重大专项项目,编号:20181102006。

## 参考文献

- [1] 喻凡, 郭孔辉. 车辆悬架的最优自适应与自校正控制[J]. 汽车工程, 1998, 20(4): 193-200.
- [2] 喻凡, 郭孔辉. 自适应悬架对车辆性能改进的潜力[J]. 中国机械工程, 1998, 9(6): 67-69.
- [3] 顾亮, 顾志强. 车辆悬架行驶平顺性全状态反馈主动控制[J]. 车辆与动力技术, 1998(2): 16-22.
- [4] 丁科, 侯朝楨, 罗莉. 车辆主动悬架的神经网络模糊控制[J]. 汽车工程, 2001, 23(5): 340-343.
- [5] 刘宏伟, 雷海蓉, 陈燕虹, 等. 空气悬架系统模糊控制仿真分析[J]. 汽车技术, 2003(7): 13.
- [6] 刘静. 基于 MATLAB/Simulink 的车辆悬架建模与仿真[J]. 公路与汽运, 2011(6): 22-27.
- [7] Sun, Y.Q., Zhao, L.F. and Xiang, W. (2013) A Fuzzy Logic Controller for Vehicle-Active Suspension Systems. *Journal of Hunan University*, **805-806**, 1645-1649. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.805-806.1645>
- [8] Lian, R.J., et al. (2005) Self-Organizing Fuzzy Control of Active Suspension Systems. *International Journal of Systems Science*, **36**, 119-135. <https://doi.org/10.1080/00207720512331338102>
- [9] 陈杰平, 冯武堂, 郭万山, 等. 整车磁流变减振器半主动悬架变论域模糊控制策略[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 7-13.
- [10] 檀润华, 陈鹰, 路甬祥. 路面对汽车激励的时域模型建立及计算机仿真[J]. 中国公路学报, 1998, 11(3): 96-102.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2332-6980，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[iae@hanspub.org](mailto:iae@hanspub.org)