doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2022.0006.011

# 基于 Speedgoat 的半主动悬架模糊 PID 控制研究

姚行艳, 胡力月
(重庆工商大学 检测控制集成系统重庆市工程实验室,重庆 400067)

**摘　要**:作为半主动悬架最为核心的运行组件,磁流变液阻尼器的阻力性能可结合外界电流变化连续控制。对于该阻尼器为半主动悬架的控制,本文搭建了汽车半主动悬架系统仿真模型,给出了一类以 Speedgoat 为基础的半主动悬架模糊 PID 控制器,并通过模糊推理求解 PID 参数的调整系数,运行了基于 Matlab/Simulink 的模糊 PID 控制器的联合半实物仿真,利用 Speedgoat 在不同路面等级、不同速度下进行了仿真试验。试验表明:设计的基于 Speedgoat 的半主动悬架模糊 PID 控制器比起经典 PID 控制器有更优良的控制性能,从而提高了车辆行驶平顺性和乘坐舒适性。

**关键词**:半主动悬架;阻尼器;模糊 PID 控制;Speedgoat
**中图分类号**:U463.33　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-058X(2022)06-0087-06

## 0　引　言

汽车的悬架系统可以有效减少汽车行驶时的颠簸、冲击,增加乘客乘坐舒适性。因为被动悬架具有不可控制弹簧和固定的参数的阻尼器,只适用于特定工况,主动悬架则克服了问题可适应各种工况但是主动悬架通常需要较大的电流。半主动悬架结合了两者的优点既能有效规避被动悬架系统刚度,阻尼不变的弊端,还能取得与主动悬架系统相媲美的控制性能,而且其结构简单、能耗低、易实现,因此成为汽车悬架领域中的研究热点之一[1-3]。

要充分发挥半主动悬架系统的性能,需要合适的控制策略。庞辉等[9]提出将神经网络和粒子群优化相结合设计了一种变域模糊控制方案。Yang 等[10]在提出新型半主动悬架系统模型基础上,提出了一种基于 MPC 控制策略的两级递阶控制方案但未将系统的可靠性和稳定性考虑在内。模糊控制是将相关领域的专家经验或知识用自然语言表达形成控制决策表,它不需要建立精准的数学模型、鲁棒性强,其具备勿需构建准确的数学系统、鲁棒性突出等优势。但若模糊控制域和隶属度函数划分不当会影响控制结果的准确性以及对系统稳定效果造成干扰,PID 控制器积分模块能够有效地消除误差提高,微分模块可以提高系统的稳定性[2],模糊 PID 控制结合两者的优点根据系统误差的变化实时对参数进行调整可以实现在线对被控对象的有效控制。结合车辆二自由度 1/4 半主动悬架系统的动力学模型以及 Speedgoat 开发了一款半主动悬架模糊 PID 控制器,利用 Speedgoat 进行了半实物仿真试验,同时和

**收稿日期**:2021-10-30;**修回日期**:2021-11-25.
**基金项目**:国家自然科学基金(51605061);重庆市自然科学基金面上项目(CSTC2020JCYJ-MSXMX0736);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201900808);重庆英才计划创新创业示范团队(CQYC201903246);重庆市大学生创新创业计划(S202011799029,S202011799030,S202011799031,S202011799032);重庆市中小学创新人才培养工程项目(CY210801).
**作者简介**:姚行艳(1984—),女,湖北随州人,副教授,博士,从事智能结构与振动控制、故障预测与诊断等研究.

应用被动悬架与经典 PID 控制的半主动悬架运行效果展开对比研究。

# 1 半主动悬架系统数学模型

## 1.1 车辆二自由度 1/4 动力学模型

为了更好地对汽车悬架系统进行研究,需要建立一个理想的动力学模型。对汽车模型进行性能研究时,越精简的模型涉及的参量越少,也更便于控制。二自由度 1/4 动力学模型结构简单但保留能体系了汽车在行驶中性能的参数因此本文对整车模型做出如下假设:簧上质量和簧下质量均视为刚体,忽略各组件之间的摩擦;车辆左右轮胎所遇到的路面激励一样,汽车无侧倾和横摆运动;车身相对地面只做 $z$ 轴方向上运动。

根据上述的假设,可以将复杂的半主动悬架系统简化成如图 1 所示的动力学模型。表 1 列出了与悬架运动特征相关的一些系统参数值。

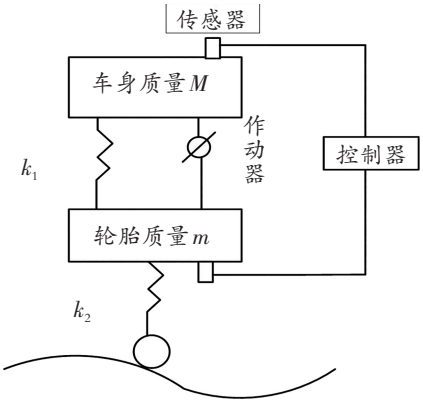



**图 1 半主动悬架系统动力学模型**

**Fig. 1 Dynamic model of semi-active suspension system**

**表 1 车身模型主要参数**

**Table 1 Main parameters of vehicle**

| 车身模型参数 | 数 值 |
|---|---|
| 车身质量 $m_2$/kg | 492 |
| 轮胎质量 $m_1$/kg | 40 |
| 悬架刚度 $k_1$/(N·m$^{-1}$) | 16 021 |
| 轮胎刚性 $k_2$/(N·m$^{-1}$) | 238 145 |

## 1.2 随机路面输入模型

路面输入模型是分析受控车辆系统性能的重要基础之一,合适的路面输入模型能提高整个系统仿真结果的准确性。为了更好地模拟汽车在行驶时所受到的路面激励情况,采用滤波白噪声作为路面模型的输入。

$$\dot{x}_0(t)=-2\pi f_0 x_0(t)+2\pi\sqrt{G_p(n_0)u}\,w(t) \tag{1}$$

其中,$x_0(t)$、$f_0$、$G_P(n_0)$、$u$、$w(t)$ 分别指代里层不平度移动;下截止频率,即 0.1;路面的不定度指标;车速以及均值是零的高斯白噪声。

## 1.3 汽车半主动悬架系统数学模型

根据半主动悬架系统的运动特性,由半主动悬架系统动力系统,构建了图 1 的数学系统。

结合牛顿第二定律,可获得二自由度 1/4 半主动悬架动力学方程即:

$$\ddot{M}x_1=k_1(x_2-x_1)-k_2(x_1-h_0)-f_x \tag{2}$$

$$\ddot{m}x_2=-k_1(x_2-x_1)+f_x \tag{3}$$

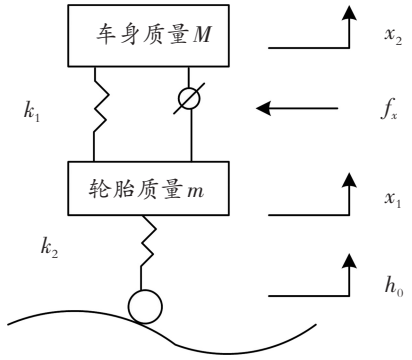



**图 2 半主动悬架数学模型**

**Fig. 2 Mathematical model of semi-active suspension**

整理可得:

$$\ddot{x}_1=[k_1(x_2-x_1)-k_2(x_1-h_0)-f_x]/M \tag{4}$$

$$\ddot{x}_2=[-k_s(x_2-x_1)]+f_x/m \tag{5}$$

其中,$f_x$ 为为阻尼力。根据式(2)和式(3)将系统运动方程表示为系统的状态空间方程,如下所示:

$$\dot{x}(t)=\boldsymbol{A}x(t)+\boldsymbol{B}u(t) \tag{6}$$

$$y(t)=\boldsymbol{C}x(t)+\boldsymbol{D}u(t) \tag{7}$$

其中,$x(t)$、$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{D}$ 分别表示系统状态变量、系统矩阵、扰动输入矩阵、输出矩阵、直接联系矩阵、确定状态参量 $x(t)=[\dot{x}_2,\dot{x}_2,x_2,x_1]$,扰动输入变量 $x(t)=[x_0,u_x]$,则半主动悬架系统运动学一阶微分方程组为

$$\begin{cases}\dot{x}_2=-\dfrac{k_1}{m}x_2+\dfrac{k_1}{m}x_1+\dfrac{1}{m}f_x\\ \dot{x}_1=\dfrac{k_1}{M}x_2-\dfrac{k_1+k_2}{M}x_1+\dfrac{k_2}{M}h_0+\dfrac{1}{M}f_x\\ x_2=x_2\\ x_1=x_1\end{cases} \tag{8}$$

# 2 半主动悬架系统模糊 PID 控制

## 2.1 汽车半主动悬架模糊 PID 控制

模糊 PID 控制实际上就是将模糊算法应用到

PID 参数的选择上,本文选择二维输入的模糊控制器,将车身在 $Z$ 轴加速度偏差 $e$ 以及加速度的偏差变化率 $ec$ 当作模糊控制器的输入。为了达到更好的控制效果,模糊控制器输出的 PID 参数会时刻随着输入的变化而改变。

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + K_p \\ K_I = K_{I0} + K_i \\ K_D = K_{D0} + K_d \end{cases} \tag{9}$$

其中,$K_{P0}$、$K_{I0}$、$K_{D0}$ 是经典 PID 控制模块的 $t=0$ 时刻的值,$K_P$、$K_I$、$K_D$ 则是模糊 PID 控制组件的输出值。

想要得到最终的 PID 控制参数,要经历以下 3 个步骤:第一先将精确的输入量通过隶属度函数模糊化得到模糊子集;第二步根据采集到的模糊输入计算出相应的隶属度然后在控制规则中找到输出值的隶属度;第三步将得到模糊化输出通过隶属度函数结模糊化得到精确的输出参数。将初始时刻的 PID 参数与输出的参数相加即为模糊控制 PID 的输出量。

### 2.2　半主动悬架模糊 PID 控制器设计

输入以及输出参量的模糊论域都为[-3,-2,-1,0,1,2,3]划定成 7 个语言参量,分别是负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。由此获得 $K_p$、$K_i$、$K_d$ 的模糊控制机制,如表 2。

明确这一模糊器的模糊化因子,即 $ke$、$kec$ 分别为 1 和 0.2;解模糊化因子为 $K_1$、$K_2$、$K_3$ 分别为 0.2、1、1。

确定高斯方程为输入方程的隶属函数。三角形函数为输出变量的隶属函数。解模糊的方法是面积重心法[7]。模糊控制的制定规则即:当偏差出现过高情况下主要以提升 $K_P$、$K_I$ 的值尽快消除偏差为目的;如若误差不大的情况下,可适当减小 $K_P$、$K_I$ 从而避免系统超调,提升稳定效果。

**表 2　模糊控制规则**

**Table 2　Rules of fuzzy control**

| | NB | | | NM | | | NS | | | Z | | | PS | | | PM | | | PB | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $K_p$ | $K_1$ | $K_d$ | $K_p$ | $K_1$ | $K_d$ | $K_p$ | $K_1$ | $K_d$ | $K_p$ | $K_1$ | $K_d$ | $K_p$ | $K_1$ | $K_d$ | $K_p$ | $K_1$ | $K_d$ | $K_p$ | $K_1$ | $K_d$ |
| NB | PB | NS | NB | PB | PS | NB | PM | Z | NB | PM | NM | NM | PS | Z | NM | PS | PB | NM | Z | PB | Z |
| NM | PB | NS | NB | PB | NS | NB | PM | NS | NM | PM | Z | NM | Z | Z | Z | Z | NS | Z | Z | PM | Z |
| NS | PM | NB | NM | PM | NB | NM | PM | NM | PS | PS | NS | NS | NS | Z | PS | NS | PS | NS | NM | PM | PS |
| Z | PS | NB | NM | PS | NM | NS | PS | NM | NS | Z | NS | Z | NS | Z | NS | NM | PS | PS | NM | PS | PM |
| PS | PS | NM | Z | PS | NM | NS | Z | MS | Z | NS | NS | PS | NS | Z | NS | NM | PS | PM | NM | PS | PM |
| PM | Z | NM | Z | Z | NS | Z | NS | NS | PS | NM | NS | PS | NM | Z | PM | NM | PS | PB | NB | PS | PB |
| PB | Z | PS | Z | NS | Z | Z | NM | Z | PM | NM | Z | PM | NM | Z | PB | NB | PB | PB | NB | PB | PB |

## 3　半主动悬架系统硬件设计及实现

基于 Speedgoat 的半实物仿真与 Matlab/Simulink 可以实现无缝连接。采用车身加速度作为输出信号控制对象,以尽可能降低车身加速度为目的来建立模糊 PID 控制系统。

Speedgoat 输出加速度信号经过 IO102 板卡传输到功率放大器并控制激振器振动,从而模拟车身加速度的上下振动,振动信号通过加速度传感器输入到示波器中,示波器就能实时显示加速度波形并能采集到经激振器仿真的数据。所搭建的实验平台如图 3 所示。

在 Matlab/Simulink 模拟环境下,以 Speedgoat 为基础搭建的半主动悬架系统模糊 PID 控制的模拟模型框图如图 4 所示。

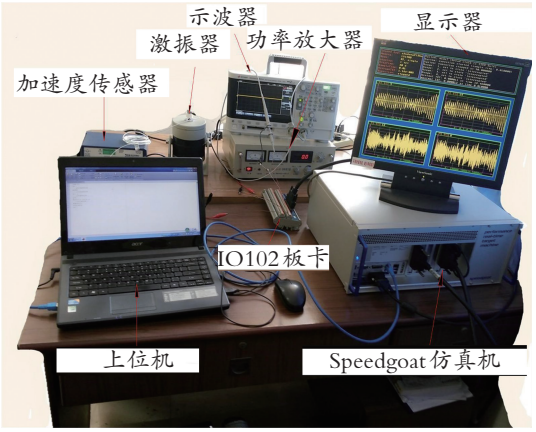



**图 3　Speedgoat 仿真实验平台**

**Fig. 3　Experiment platform of Speedgoat**

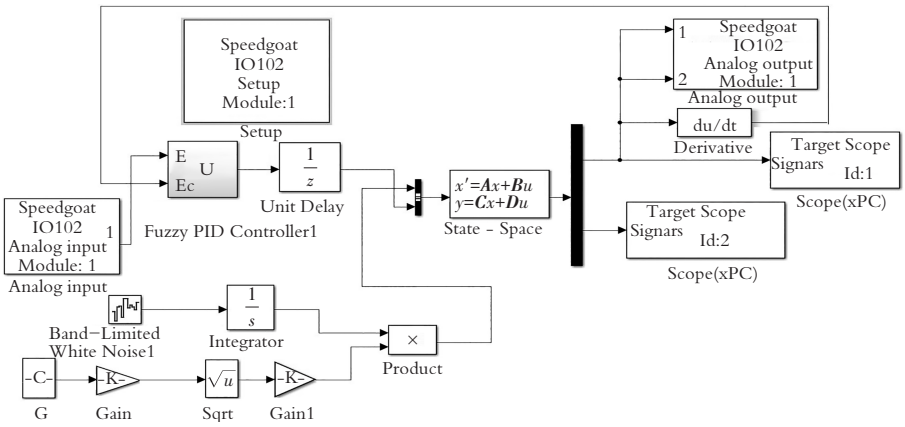



**图 4 半主动悬架模糊 PID 控制模型框图**

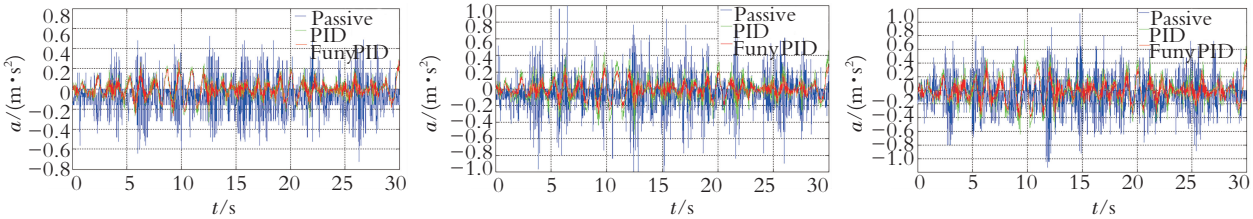
**Fig. 4 Fuzzy PID control of semi-active suspension**

## 4 半实物仿真结果与分析

结合 Matlab/Simulink 以及 Speedgoat 对半主动悬架系统予以半实物模型,同时把模拟的结果和应用被动悬架,经典的 PID 管控的半主动悬架模拟结果予以对比。

假定车辆于 B 级路面情况下,按照 20 km/h、40 km/h、60 km/h 的速率运行,在此种情况下,被动悬架模型、PID 控制模型和模糊 PID 控制模型的车身垂向速度分别如图 5 所示。

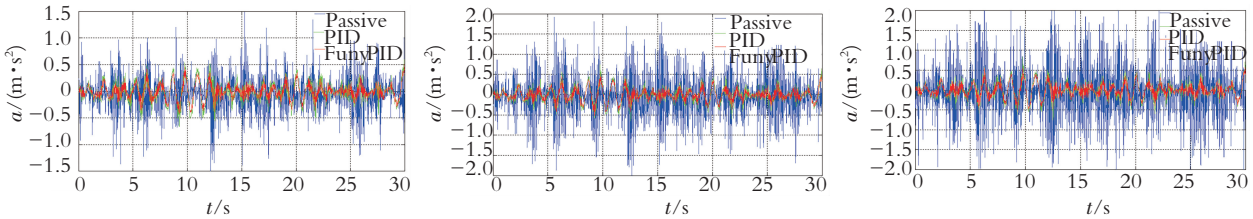
同理,假定汽车在 C、D、E 级路面输入下以 20 km/h、40 km/h、60 km/h 的速度行驶,在此种情况下,被动悬架模型、PID 控制模型和模糊 PID 控制模型的车身垂向加速度分别如图 6、图 7、图 8 所示。




**(a) 20 km/h** **(b) 40 km/h** **(c) 60 km/h**

**图 5 B 级路面半实物仿真曲线**

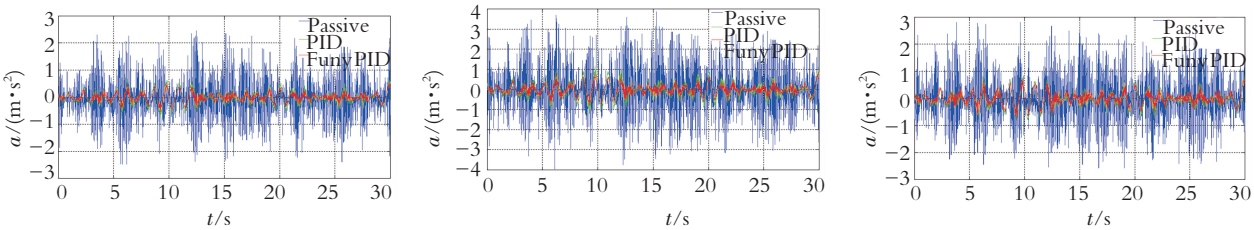
**Fig. 5 HIL simulation curve of B-class road**




**(a) 20 km/h** **(b) 40 km/h** **(c) 60 km/h**

**图 6 C 级路面半实物仿真曲线**

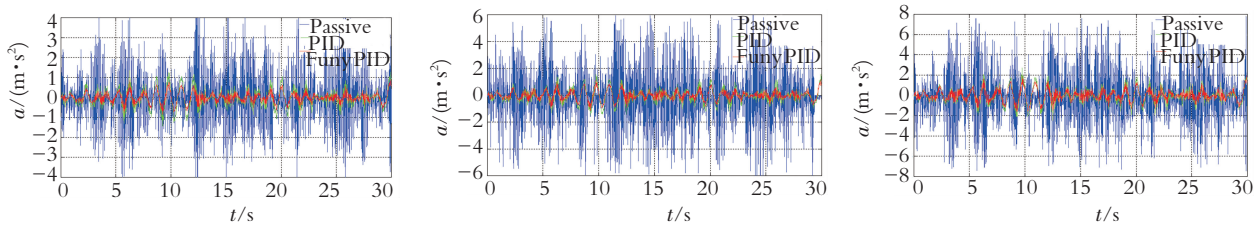
**Fig. 6 HIL simulation curve of C-class road**




**(a) 20 km/h** **(b) 40 km/h** **(c) 60 km/h**

**图 7 D 级路面半实物仿真曲线**

**Fig. 7 HIL simulation curve of D-class road**




(a) 20 km/h　　(b) 40 km/h　　(c) 60 km/h

**图 8　E 级路面半实物仿真曲线**

**Fig. 8　HIL simulation curve of E-class road**

从图 6—图 8 中可知,在不同路面等级、不同速率情况下,在模糊 PID 控制策略下和经典的 PID 控制策略下的半主动悬架系统的垂向加速度与相同控制策略下的被动悬架相比要小得多,其中模糊 PID 控制下的加速度减小得更多,控制效果更为理想。表明了设计的模糊 PID 算法可以更为理想地保证车子的平稳运行,提升车的乘用舒适度。

为更好地论证模糊 PID 算法下的半主动悬架表现,结合车身的垂向加速度均方值为评估参量,对比分析在不同等级路面输入下模糊 PID 控制相较于经典 PID 控制和被动控制的有效性,其结果如表 3 所示。

**表 3　仿真结果均方根值对比**

**Table 3　Comparison of RMS of simulation results**

| 路面等级 | 速率/(km/h) | PID 控制 | 模糊 PID 控制 | 被动悬架 |
|---|---|---|---|---|
| B | 20 | 0.094 | 0.082 | 0.197 |
| | 40 | 0.141 | 0.092 | 0.247 |
| | 60 | 0.187 | 0.141 | 0.285 |
| C | 20 | 0.187 | 0.142 | 0.375 |
| | 40 | 0.189 | 0.154 | 0.581 |
| | 60 | 0.206 | 0.170 | 0.742 |
| D | 20 | 0.219 | 0.164 | 0.865 |
| | 40 | 0.271 | 0.232 | 1.028 |
| | 60 | 0.363 | 0.256 | 1.372 |
| E | 20 | 0.433 | 0.264 | 1.518 |
| | 40 | 0.499 | 0.350 | 2.476 |
| | 60 | 0.733 | 0.569 | 2.886 |

仿真结果表明:在不同路面等级、不同速率情况下选择模糊 PID 以及经典 PID 两类控制算法的半主动悬架系统垂向加速度均方值都比选择被动悬架下的值有明显下降,而采用模糊 PID 控制下的垂向加速度均方根值降低幅度更大。当车速为 20 km/h 时,在 B、C、D、E 级路面输入下,模糊 PID 算法对比于被动悬架垂向加速度均方值结果依次降低了 41.7%、37.9%、19.0%、17.4%。当车速为 40 km/h 时,在 B、C、D、E 级路面输入下,模糊 PID 控制相较于被动悬架垂向加速度均方根值分别减少了 37.3%、26.6%、22.6%、14.1%。当车速为 60 km/h 时,在 B、C、D、E 级路面输入下,模糊 PID 控制相较于被动悬架垂向加速度均方根值分别减少了 49.6%、23.0%、18.7%、19.7%。

## 5　结　论

采用鲁棒性较强的模糊 PID 控制策略,搭建了汽车二自由度 1/4 主动悬架系统,引入 Speedgoat 予以半实物模拟,最终可得以结合了 Speedgoat 的半主动悬架模糊 PID 控制器,在不同条件下都能有效降低整车的垂向加速度,且优于经典 PID 控制。由此说明,所设计的基于 Speedgoat 的半主动悬架模糊 PID 控制机制有着突出的操控性,大大提升了车辆运行的稳定性以及舒适度。

**参考文献(References):**

[1] 郑玲,邓兆祥,李以农. 基于电流变减振器汽车半主动悬架最优控制[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2003,26(7):1—5.
ZHENG Ling, DENG Zhao-xiang, LI Yi-nong. Optimal control of semi-active suspensions with ER shock absorber [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Editon), 2003, 26(7): 1—5.

[2] 董小闵,余淼,廖昌荣,等. 具有非线性时滞的汽车磁流变悬架系统自适应模糊滑模控制[J]. 振动与冲击,2009, 28(11): 55—60.
DONG Xiao-min, YU Miao, LIAO Chang-rong, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for magneto-rheological suspension system considering non-linearity and time delay[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(11): 55—60.

[3] 姚行艳,刘传文,喻其炳,等. 多孔泡沫金属磁流变液阻尼器设计及力学性能研究[J]. 机械设计与制造,2016(5): 186—188.
YAO Xing-yan, LIU Chuan-wen, YU Qi-bing, et al. Mechanical properties of porous foam metal magne-torheological damper[J]. Machinery Design & Manu-

facture, 2016(5): 186—188.

[4] BHATTACHARJEE V, CHATTERJEE D, KARABASOGLU O. Hybrid control strategy for a semi active suspension system using fuzzy logic and bio-inspired chaotic fruit fly algorithm[J]. arXiv preprint arXiv: 1703.08878, 2017.

[5] GB/T 4970-1996, 汽车平顺性随机输入行驶试验方法[S]. 北京: 国家技术监督局, 1996.
GB/T7031-8, Metohd of random input running test-automotive ride comfort[S]. Beijing: The State Bureau of Quality and Technical Supervision, 1996.

[6] 吴晓君, 郑超, 路超, 等. 基于遗传算法和 ADAMS 的麦弗逊悬架优化研究[J]. 工程设计学报, 2012, 19(4): 274—277.
WU Xiao-jun, ZHENG Chao, LU Chao, et al. The research on optimization of Macpherson suspension based on genetic algorithm and ADAMS[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2012, 19(4): 274—277.

[7] 黄晨, 陈龙, 袁朝春, 等. 半主动悬架系统的混合模糊控制[J]. 汽车工程, 2014, 36(8): 999—1003.
HUANG Chen, CHEN Long, YUAN Zhao-chun, et al. Hybrid fuzzy control of semi-active suspension system[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(8): 999—1003.

[8] 王威, 薛彦冰, 宋玉玲, 等. 基于 GA 优化控制规则的汽车主动悬架模糊 PID 控制[J]. 振动与冲击, 2012, 31(22): 157—162.
WANG Wei, XUE Yan-bing, SONG Yu-ling, et al. Fuzzy-PID control strategy for an active suspension based on optimal control laws with genetic algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(22): 157—162.

[9] PANG H, LIU F, XU Z. Variable universe fuzzy control for vehicle semi-active suspension system with MR damper combining fuzzy neural network and particle swarm optimization[J]. Neurocomputing, 2018(306): 130—140.

[10] YANG L, WANG R, DING R, et al. Investigation on the dynamic performance of a new semi-active hydro-pneumatic inerter-based suspension system with MPC control strategy [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021(154): 107569.

# Research on Fuzzy PID Control of Semi-active Suspension Based on Speedgoat

**YAO Xing-yan, HU Li-yue**

(Chongqing Engineering Laboratory for Detection Control and Integrated System, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** As the core operating component of the semi-active suspension, the resistance performance of the magnetorheological fluid damper can be continuously controlled in combination with external current changes. For the control of the damper as a semi-active suspension, a simulation model of the vehicle semi-active suspension system is built in this paper, a class of fuzzy PID controllers for the semi-active suspension based on Speedgoat is given, the adjustment coefficient of PID parameters through fuzzy reasoning are solved by fuzzy reasoning, the hardware-in-the-loop simulation of fuzzy PID controller based on Matlab/Simulink was carried out with Speedgoat under different road grades and different speeds. The experimental results show that the designed fuzzy PID controller for semi-active suspension based on Speedgoat has better control performance than the classic PID controller, thereby improving the traveling comfort and riding comfort of the vehicle.

**Key words:** semi-active suspension; damper; fuzzy PID control; speedgoat

**责任编辑:罗姗姗**

**引用本文**/Cite this paper:

姚行艳,胡力月. 基于 Speedgoat 的半主动悬架模糊 PID 控制研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2022,39(6):87—92.

YAO Xing-yan, HU Li-yue. Research on fuzzy PID control of semi-active suspension based on Speedgoat[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition),2022,39(6):87—92.