

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2025.04.016

磁流变半主动悬架史密斯-区间二型模糊 时滞补偿控制*

王骏骋, 周明垚, 章世伟

(浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018)

[摘要] 针对传统史密斯-一型模糊控制在变参数工况下的时滞补偿不足与鲁棒性欠佳等问题, 提出一种磁流变半主动悬架史密斯-区间二型模糊时滞补偿控制方法。该方法将车身垂直加速度、悬架动挠度和轮胎动位移作为控制系统的状态输入, 全面捕捉并响应车辆动态变化; 通过引入上下隶属度函数, 明确了模糊变量隶属度区间, 进而计算出不同模糊规则下的激活度区间, 显著提升了系统抗干扰能力; 创新性地引入 Center-of-sets 算法优化模糊降阶过程, 避免归一化重复计算, 提升系统执行速度与实时性。仿真结果显示, 该控制策略在提升磁流变半主动悬架控制效果与鲁棒性方面表现优异, 有效应对复杂多变行驶环境。

关键词: 半主动悬架; 磁流变减振器; 时滞补偿; 史密斯; 区间二型模糊控制

Interval Type2-Smith Fuzzy Based Time Delay Compensation Control for Magnetorheological Semi-active Suspension

Wang Juncheng, Zhou Mingyao & Zhang Shiwei

School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018

[Abstract] For the limitation of traditional type-1 Smith fuzzy control in terms of inadequate time delay compensation and insufficient robustness under varying parameter driving conditions, an interval type-2 Smith fuzzy time delay compensation control method is introduced for magnetorheological (MR) semi-active suspension systems. This approach incorporates the vehicle's vertical acceleration, suspension deflection, and tire dynamic displacement as the state input of the control system, enabling a comprehensive capture and response to dynamic vehicle changes. By introducing in upper and lower membership functions, the method defines clear membership intervals for fuzzy variables, which are then leveraged to calculate activation intervals under various fuzzy rules, significantly enhancing the system's anti-interference capability. Additionally, the Center-of-sets algorithm is innovatively introduced into the fuzzy reduction process, avoiding redundant normalization calculation during the type reduction of type-2 fuzzy sets, thereby improving the system's execution speed and real-time performance. Simulation results demonstrate that the proposed interval type-2 Smith fuzzy delay compensation control strategy achieves improvement in both control effectiveness and robustness for MR semi-active suspension systems, effectively tackling complex and varied driving environment.

Keywords: semi-active suspension; magnetorheological (MR) damper; time delay compensation; Smith; interval type2 fuzzy control

* 国家自然科学基金(52205135)资助。

原稿收到日期为 2024 年 08 月 26 日, 修改稿收到日期为 2024 年 11 月 05 日。

通信作者: 王骏骋, 特聘副教授, 博士, E-mail: wangjc90@163.com。

前言

磁流变半主动悬架,以其阻尼力连续可调、响应迅捷、能耗低及宽范围阻尼控制能力,成为当前底盘研究热点之一^[1]。然而,信号传递和处理及减振器响应等均伴随时滞,导致阻尼力与悬架状态不匹配,影响了系统稳定性^[2]。因此,研究悬架系统的时滞补偿控制策略具有重要意义。

国内外学者对主动/半主动悬架系统响应时滞问题进行了大量研究,其主要思路是将控制策略与时滞补偿策略相结合,常见的控制策略包括:PID控制^[3]、LQG控制^[4]和自适应控制^[5]等;常见的时滞解决方法有 Lyapunov-Krasovskii 鲁棒控制理论^[6]和史密斯预测控制器^[7]两类。Lyapunov-Krasovskii 泛函方法通过构造含时滞的泛函来抑制时滞导致的悬架性能下降,但受限于时滞约束,难以在保证鲁棒性的同时实现最优控制^[8-9]。而史密斯预估方法是在控制反馈回路中引入时滞补偿环节来提升时滞补偿控制效果。Tao 等^[10]提出了一种基于史密斯和泰勒级数的 LQG 控制方法;桂航等^[11]设计了一种史密斯-PID 控制器,能够抑制驾驶室的振动响应。尽管最优控制策略能够实现精确控制,但缺乏鲁棒性。PID 控制虽可调响应快,但对非线性系统控制效果有限。因此,须探索更先进控制策略,以提高控制系统的鲁棒性和适应性。

模糊控制可有效改善非线性系统静/动态控制特性^[12]。Pang 等^[13]将模糊控制与史密斯预估相结合来提高系统时滞补偿能力,但上述控制方法的控制效果及鲁棒性能仍有较大提升空间。虽然传统模糊控制能够结合史密斯预估器,但其单一隶属度函数限制了系统的抗干扰能力。此外,Wong 等^[14]采用区间二型模糊控制方法来应对车辆悬架控制系统不确定性影响。但是,上述研究并未将区间二型模糊控制与任何时滞控制方法相结合,因此该控制系统无法有效应对时滞对悬架控制系统带来的不利影响。

鉴于区间二型模糊控制及传统模糊时滞补偿策略的局限性,本文融合了史密斯预估器的时滞解耦与补偿优势,提出了一种磁流变半主动悬架史密斯-区间二型模糊时滞补偿控制策略。该方法以车身垂直加速度、悬架动挠度和轮胎动位移作为核心状态输入,实现对车辆动态特性的全面捕捉与即时响应,精确补偿系统时滞,提高控制效果;并通过定义模糊

变量的上下隶属度函数计算出不同模糊规则下的激活度区间,精确计算出各模糊规则下的激活度区间,增强了系统鲁棒性;引入了 Center-of-sets 算法优化计算流程,成功避免了模糊降型过程中的冗余计算,进一步提升了控制策略的执行效率。在控制策略的设计过程中,考虑了面对复杂多变的行驶环境需求,通过模拟多种工况下的行驶条件,全面验证了控制策略的有效性与鲁棒性,为解决复杂动态系统时滞与干扰问题提供了新视角和有力的技术支撑。

1 四分之一车垂向动力学模型构建

构建如图 1 所示的四分之一车垂向动力学模型^[15]。

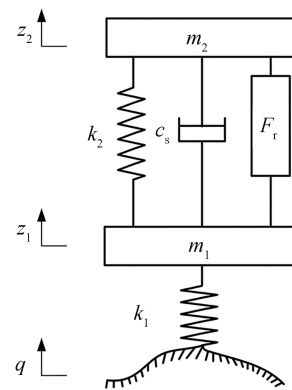


图1 四分之一车垂向动力学模型

根据牛顿第二定律,模型运动方程表达如下:

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

式中: m_1 和 m_2 分别表示车辆的非簧载和簧载质量,对应的垂直位移分别为 z_1 和 z_2 ; k_1 和 k_2 分别表示轮胎刚度和悬架刚度; c_s 为磁流变减振器黏滞阻尼; F_r 为时滞为 τ 的磁流变减振器在 t 时刻产生的库伦阻力; q 为路面输入模型。

Bingham 模型经常被用以描述磁流变减振器力学特性^[16],具有结构精简、参数简明等特性,能直接且灵敏地反映参数变化对悬架系统性能的影响。根据 Lord 公司 RD-1005-3 磁流变减振器测试数据,建立了不考虑时滞的 Bingham 模型^[4]:

$$\begin{cases} F(t) = c_s(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + F_r \operatorname{sgn}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) \\ F_r = 1510.1 \cdot I \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F(t)$ 和 F_r 分别为磁流变器减振器 t 时刻阻尼力和库伦阻尼力; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; I 为电流。

当磁流变减振器时滞为 τ 时, 库伦阻尼力满足:

$$F_r' = F_r(t - \tau) = 1510.1 \cdot I(t - \tau) \quad (3)$$

设定半主动悬架控制系统的状态向量为

$$\mathbf{X} = (z_1 - q, z_2 - z_1, \dot{z}_1, \dot{z}_2)^T \quad (4)$$

将式(4)代入式(1), 进一步构建状态空间方程:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{G}\mathbf{W} \quad (5)$$

$$\mathbf{W} = [\dot{q}]; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{m_1} & \frac{1}{m_2} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{U} = [F_r']; \mathbf{G} = [-1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ -\frac{k_1}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{c_s}{m_1} & \frac{c_s}{m_1} \\ 0 & -\frac{k_2}{m_2} & \frac{c_s}{m_2} & -\frac{c_s}{m_2} \end{bmatrix}$$

基于车身垂直加速度 \ddot{z}_2 、悬架动挠度 $z_2 - z_1$ 以及轮胎动位移 $z_1 - q$ 3 个单一评价指标, 构建磁流变半主动悬架的综合性评价指标 J , J 值越小说明悬架系统综合性能越好^[17]。 J 满足:

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\ddot{z}_2^2 + \delta_1(z_1 - q)^2 + \delta_2(z_2 - z_1)^2] dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{N} \mathbf{U} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U}] dt \quad (6)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_2 + \frac{k_2^2}{m_2^2} & -\frac{k_2 c_s}{m_2^2} & \frac{k_2 c_s}{m_2^2} \\ 0 & -\frac{k_2 c_s}{m_2^2} & \frac{c_s^2}{m_2^2} & -\frac{c_s^2}{m_2^2} \\ 0 & \frac{k_2 c_s}{m_2^2} & -\frac{c_s^2}{m_2^2} & \frac{c_s^2}{m_2^2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T; \mathbf{R} = [0]$$

式中: T 为车辆行驶总时间; \ddot{z}_2 的加权系数默认为 1 时, $z_1 - q$ 和 $z_2 - z_1$ 加权系数分别为 δ_1 和 δ_2 。

2 传统的一型模糊控制算法分析

传统一型模糊控制器设计主要包括模糊集合构建与模糊化、模糊规则构建与模糊推理、去模糊化 3 个步骤。本节针对基于传统一型模糊控制方法的半主动悬架系统设计步骤及其缺点进行分析。根据文献[13]上述 3 个步骤具体描述如下。

步骤 1: 模糊集合构建与模糊化

根据二维输入变量模糊控制器(设定车身加速度误差和车身加速度误差的变化率为输入变量), 构建模糊集合(其中 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 分别表示“负大”, “负中”, “负小”, “零”, “正小”, “正中”, “正大”, 将输入变量范围划分为 7 个等级)。基于半主动悬架动态特性确定表征输入值的隶属度函数, 通过将精确输入值转化为隶属度值组成的集合, 得到模糊输入, 进而完成模糊化过程。

步骤 2: 模糊规则构建与模糊推理

基于经验法构建 49 条模糊规则, 引用权重因子调整模糊规则, 利用 Mamdani 方法推理得到模糊输出。

步骤 3: 去模糊化

利用质心法进行去模糊化, 计算隶属度函数曲线与横坐标围成面积的质心, 将模糊输出转换为可控阻尼力值, 用于半主动悬架控制。

上述控制系统虽然在一定程度上能满足半主动悬架性能控制需求, 但是仍存在如下两点不足。

(1) 输入维度约束下的性能局限。传统模糊控制器在设计上主要面向输入变量较少、系统结构相对简单的应用场景。但在处理如磁流变半主动悬架系统等复杂系统时, 须综合多维度信息(如车身垂直加速度、悬架动挠度、轮胎动位移)以全面反映状态。受限于二维设计, 现有系统未能充分利用这些信息, 影响控制效能。

(2) 隶属度函数单一性对抗干扰能力制约。传统模糊控制器在隶属度函数上采用精确数值, 对确定性信息有效, 但对不确定性信息灵活性不足。实际系统中, 路面、车速、载质量等变量含丰富的不确定性信息, 精确表征这些信息对提升控制效果关键。因隶属度函数设计单一, 传统控制器在面对不确定因素时抗干扰能力弱, 难以在复杂工况下实现稳定控制。

3 史密斯-区间二型模糊时滞补偿

为弥补传统一型模糊控制与史密斯预估在信息量不足及不确定信息处理上的局限, 本研究创新性地融合区间二型模糊控制理论, 通过上下隶属度函数精确界定隶属度区间, 并引入 Center-of-sets 算法优化计算效率, 避免归一化冗余。基于此, 构建了史密斯-区间二型模糊时滞补偿控制策略, 显著提升系

统抗干扰能力,其工作流程如图2所示。

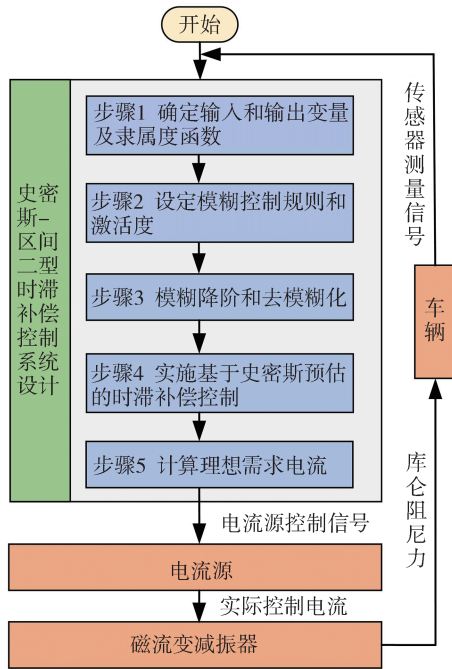


图2 史密斯-区间二型模糊时滞补偿控制系统流程

如图2所示,史密斯-区间二型时滞补偿控制系统集成实时传感器数据,依据先进控制策略计算磁流变减振器的理想需求电流。电流源接收控制指令后,精确输出电流至减振器,从而调节车辆所需的库仑阻尼力。进一步地,史密斯-区间二型时滞补偿控制系统的设计步骤如下。

步骤1:确定输入和输出变量及隶属度函数

控制系统的输入增加至3个,即轮胎动位移、悬架动挠度和车身垂直加速度,输出为理想主动控制力,对应的模糊集合分别为 $x_1 = \{NB, ZO, PB\}$, $x_2 = \{NB, ZO, PB\}$, $x_3 = \{NB, ZO, PB\}$ 和 $y = \{C_1, C_2, \dots, C_{27}\}$, 其中NB、ZO和PB分别表示“负大”、“零”和“正大”; C_1, C_2, \dots, C_{27} 则表示由小到大的输出模糊子集。此外,设定控制输入和输出变化范围为: $z_1 - q \in [-0.05, 0.05]$; $a \in [-6, 6]$; $z_2 - z_1 \in [-0.02, 0.02]$; $F_1' \in [-2000, 2000]$ 。

相比于传统一型模糊控制,区间二型模糊集合输入变量中各模糊子集对应的隶属度函数均由上/下隶属度函数UMF和LMF构成^[18],不确定覆盖域FOU为UMF至LMF的区间,能更为全面地描述车辆载荷和轮胎刚度变化等外界不确定信息对控制系统所造成的影响。

构建如图3所示区间二型模糊控制输入变量的

隶属度函数。

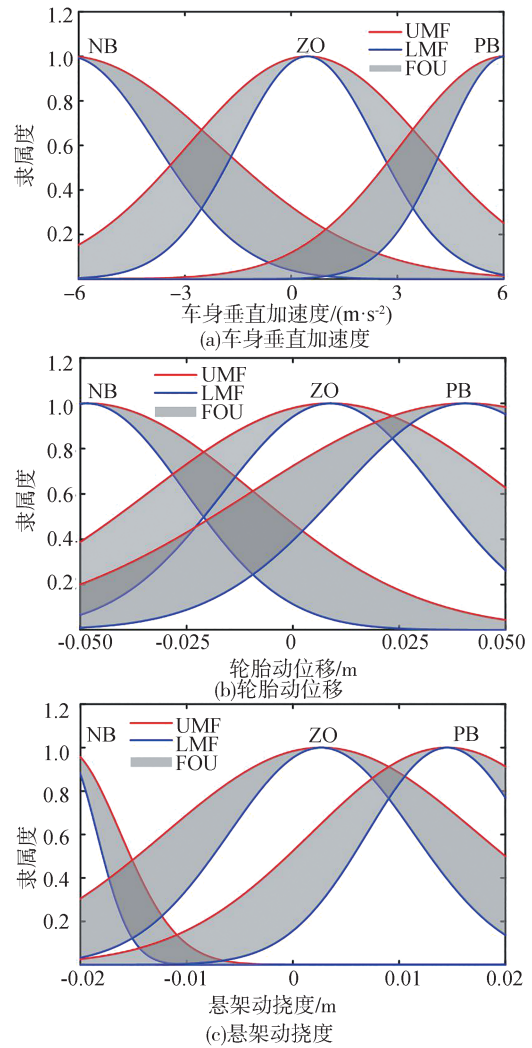


图3 区间二型模糊控制输入变量隶属度函数

其表达式如下:

$$\begin{cases} \text{UMF: } \bar{u}(x) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\bar{\sigma}}\right)^2\right] \\ \text{LMF: } \underline{u}(x) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\underline{\sigma}}\right)^2\right] \end{cases} \quad (7)$$

式中: x 是输入元素; c 为高斯型隶属度函数均值; $\bar{\sigma}$ 和 $\underline{\sigma}$ 分别为高斯型隶属度函数标准差上界和下界。

通过构建上/下隶属度函数,调整所述高斯型隶属度函数标准差和均值,优化隶属度范围分布,从而降低不确定信息对控制效果的影响。

步骤2:设定模糊控制规则和激活度

一个设定 N 条规则的区间二型模糊系统,每条规则有以下表达式:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_i: \text{If } x_1 \text{ is } \tilde{X}_1^n \text{ and } x_2 \text{ is } \tilde{X}_2^n \\ \cdots \text{ and } x_i \text{ is } \tilde{X}_i^n \\ \text{Then } y \text{ is } Y^n (n = 1, 2, \cdots, N) \end{array} \right. \quad (8)$$

式中: $\tilde{X}_i^n (i = 1, 2, \cdots, I)$ 为输入区间二型模糊集; Y^n 为模糊规则后件模糊集。

使用乘法 t-norm 计算第 n 条激活度区间:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_n(x_i) = [u_{\tilde{X}_1^n}(x_1) \times \cdots \times u_{\tilde{X}_i^n}(x_i), \\ u_{\tilde{X}_1^n}(x_1) \times \cdots \times u_{\tilde{X}_i^n}(x_i)] \equiv (\underline{f}_n, \bar{f}_n) \end{array} \right. \quad (9)$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, I; n = 1, 2, 3, \dots, N; u_{\tilde{X}_i^n}(x_i)$ 和 $u_{\tilde{X}_i^n}(x_i)$ 是输入模糊集的上下隶属度, 组成隶属度区间; \underline{f}_n 和 \bar{f}_n 分别代表激活度的上下界限。

设计如下 27 条区间二型模糊规则:

$$\begin{aligned} R_1: & \text{If } x_1 \text{ is NB and } x_2 \text{ is NB and } x_3 \text{ is NB Then } y \text{ is } C_1 \\ R_2: & \text{If } x_1 \text{ is NB and } x_2 \text{ is NB and } x_3 \text{ is ZO Then } y \text{ is } C_2 \\ R_3: & \text{If } x_1 \text{ is NB and } x_2 \text{ is NB and } x_3 \text{ is PB Then } y \text{ is } C_3 \\ & \cdots \end{aligned}$$

$$R_{27}: \text{If } x_1 \text{ is PB and } x_2 \text{ is PB and } x_3 \text{ is PB Then } y \text{ is } C_{27}$$

根据上述隶属度函数和激活度, 计算输出的模糊集合, 实现区间二型模糊推断。

步骤 3: 模糊降阶和去模糊化

区间二型模糊集合通常需要更为复杂的数学运算, 将其降阶到 1 阶模糊集可大幅降低计算复杂度, 采用 Center-of-sets 降阶器^[19]表达如下:

$$y_{\text{cos}}(x) = \bigcup_{\substack{f_n \in F^n(x) \\ y^n \in Y^n}} \frac{\sum_{n=1}^N f_n y^n}{\sum_{n=1}^N f_n} = [y_l, y_r] \quad (10)$$

$$y_l = \frac{\sum_{n=1}^L \bar{f}_n \underline{y}^n + \sum_{n=L+1}^N \underline{f}_n \underline{y}^n}{\sum_{n=1}^L \bar{f}_n + \sum_{n=L+1}^N \underline{f}_n} \quad (11)$$

$$y_r = \frac{\sum_{n=1}^R \underline{f}_n \bar{y}^n + \sum_{n=R+1}^N \bar{f}_n \bar{y}^n}{\sum_{n=1}^R \underline{f}_n + \sum_{n=R+1}^N \bar{f}_n} \quad (12)$$

式中: y_l 和 y_r 分别为区间二型模糊集合降阶输出左端点和右端点; L 为左转换点; R 为右转换点; \underline{f}_n 和 \bar{f}_n 分别代表激活度的上下界限; \bar{y}^n 和 \underline{y}^n 分别为隶属度函数对应的规则后件的上下界限质心, 满足式(13)和式(14)不等式关系。

$$\underline{y}^L \leq y_l \leq \underline{y}^{L+1} \quad (13)$$

$$\bar{y}^R \leq y_r \leq \bar{y}^{R+1} \quad (14)$$

对模糊降阶得到的输出进行去模糊化后的输出

为

$$y = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (15)$$

上述 Center-of-sets 降阶器巧妙地通过计算区间二型模糊集合的中心点, 直接生成 1 阶模糊集合, 此过程无须繁琐地操作隶属度函数, 从而显著减少了不必要的重复计算, 提升了效率。

步骤 4: 实施史密斯预估时滞补偿控制

通过将史密斯预估补偿器与区间二型模糊控制器巧妙融合, 针对系统闭环方程中的纯滞项, 设计了预估补偿环节, 该环节有效地将纯滞项从系统闭环方程中剥离, 并促使系统输出在时间上提前时滞量, 从而精准抵消纯滞项后效应带来的不利影响^[20]。所提出的史密斯-区间二型模糊时滞补偿控制系统的工作原理如图 4 所示。

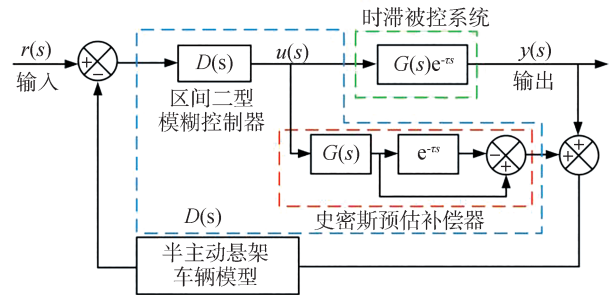


图 4 史密斯-区间二型模糊时滞补偿控制系统工作原理

图中: $D(s)$ 表示控制器传递函数; $G(s)e^{-\tau s}$ 为时滞被控系统的传递函数; $G(s)$ 为无时滞被控系统的传递函数; $e^{-\tau s}$ 为被控系统的纯滞项部分的传递函数; $u(s)$ 、 $r(s)$ 及 $y(s)$ 分别为控制器输入、参考输入及系统输出的拉普拉斯变换。

如图 4 所示, 结合区间二型模糊控制器和史密斯预估器设计的控制器为 $\bar{D}(s)$, 其表达式为

$$\bar{D}(s) = \frac{D(s)}{1 + D(s)G(s)(1 - e^{-\tau s})} \quad (16)$$

设计的史密斯-区间二型模糊控制系统的总传递函数表达式如下:

$$N(s) = \frac{\bar{D}(s)G(s)e^{-\tau s}}{1 + \bar{D}(s)G(s)e^{-\tau s}} = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)} e^{-\tau s} \quad (17)$$

上述控制系统接收由半主动悬架车辆传感器采集的输入信号, 经计算后输出理想控制力。

步骤 5: 计算理想需求电流

根据磁流变减振器的力学特性, 其库仑阻尼力具有一定变化范围, 实际中的主动控制力满足:

$$F_{MR}(t) = \begin{cases} F_{MRmin}, & F_s(t) \leq F_{MRmin} \\ F_s(t), & F_{MRmin} < F_s(t) < F_{MRmax} \\ F_{MRmax}, & F_s(t) \geq F_{MRmax} \end{cases} \quad (18)$$

式中： F_{MRmin} 和 F_{MRmax} 分别为磁流变减振器所能产生的最小和最大控制阻尼力； $F_s(t)$ 为约束阻尼力。

电流计算环节根据库伦阻尼力和电流的关系，通过上述步骤4得到理想控制力，由式(3)可推导出式(19)，计算可得控制电流 $I(t)$ 。

$$I(t) = \frac{F_{MR}(t)}{1510.1} \quad (19)$$

经计算所得理想控制电流，由控制器转换产生电流源控制信号，经过电流源产生实际控制电流，作用于磁流变减振器，磁流变减振器在电流作用下内部形成磁场，产生可控制的库伦阻尼力，最终作用于车辆，实现减振效果。

4 仿真分析

4.1 名义工况下的性能比较

假设车辆在C级路面名义工况下以20 m/s的速度行驶，且满足：

$$\dot{q} = -2\pi f_0 q + 2\pi n_0 w \sqrt{G_q(n_0)} v \quad (20)$$

式中： $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 是空间参考频率； w 是路面白噪声信号； $G_q(n_0)$ 是路面不平度系数； v 是车速； f_0 是下截止时间频率。

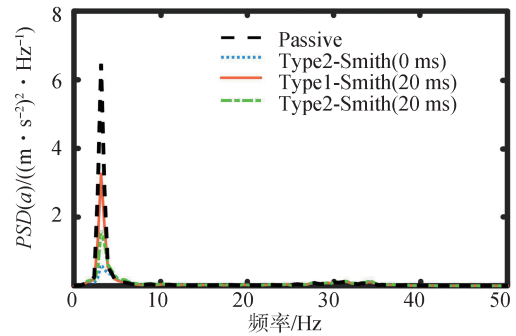
磁流变减振器时滞取14.2 ms^[21]，半主动悬架参数见表1^[10]。

表1 半主动悬架相关参数

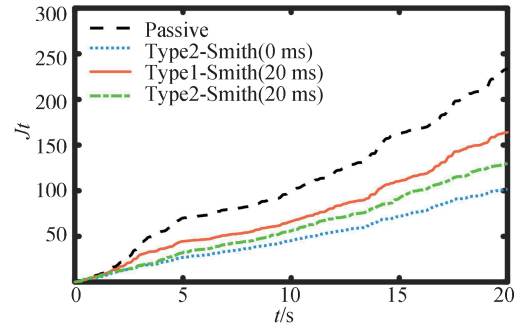
参数	数值	参数	数值
m_1/kg	35	m_2/kg	500
$k_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	300 000	$k_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	50 500
$c_1/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	700	δ_1	53 775
δ_2	4 108.8		

图5表示名义工况下悬架性能比较曲线。其中Passive表示被动悬架；Type2-Simth(0 ms)表示无时滞状态下的史密斯-区间二型模糊控制器；Type1-Simth(14.2 ms)表示14.2 ms时滞下的史密斯-一型模糊控制器；Type2-Simth(14.2 ms)表示14.2 ms时滞下的史密斯-区间二型模糊控制器。表2为名义工况条件评价指标的均方根值。

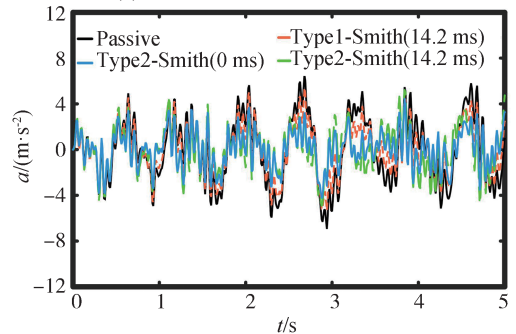
如图5和表2所示，在名义工况下，与被动悬架及史密斯-一型模糊控制相比，采用史密斯-区间二型模糊控制器后，车身垂直加速度均方根值分别降



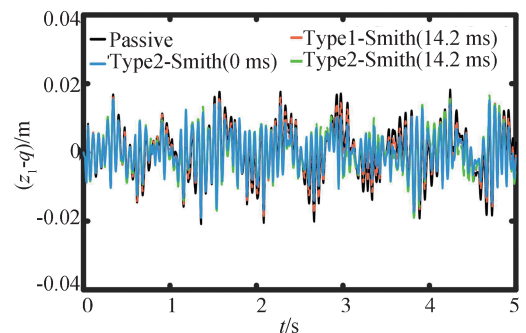
(a) 车身垂直加速度PSD频率变化曲线



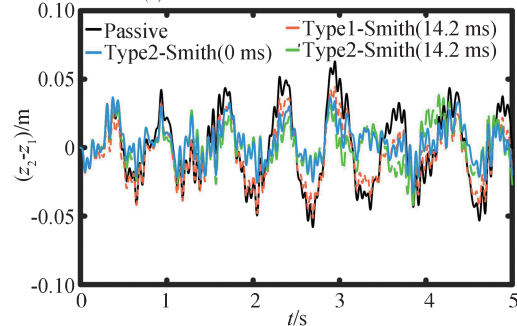
(b) 悬架综合性能指标随时间变化曲线



(c) 车身垂直加速度时间变化曲线



(d) 轮胎动位移时间变化曲线



(e) 悬架动挠度时间变化曲线

图5 名义工况下悬架性能比较曲线

低了 25.62% 与 9.48%; 轮胎动位移均方根值也分别减少了 13.42% 与 3.75%; 同时, 悬架动挠度均方根值分别下降 38.24% 与 24.95%; 尤为重要的是, 悬架综合性能指标与时间乘积的均方根值分别降低了 42.98% 与 17.99%, 全面验证了史密斯-区间二型模糊控制器在各项性能指标上的优越性。

表 2 名义工况条件下评价指标均方根值

RMS	被动悬架	史密斯-二型模糊 (0 ms)	史密斯-一型模糊 (14.20 ms)	史密斯-二型模糊 (14.20 ms)
Jt	124.932 0	56.210 4	86.858 6	71.233 7
$a/(m \cdot s^{-2})$	2.609 7	1.622 6	2.144 4	1.941 1
$(z_1 - q)/m$	0.006 7	0.005 5	0.006 0	0.005 8
$(z_2 - z_1)/m$	0.024 4	0.014 5	0.020 1	0.015 1

4.2 变参数工况下性能对比

在车辆实际运行中, 除磁流变减振器的固有时滞外, 动态变化的行驶环境带来的不确定信息同样会深刻影响悬架的控制效能。鉴于此, 深入探究半主动悬架在不同响应时滞及多样化参数条件下的性能表现, 对于提升整体操控稳定性和乘坐舒适性具有重要意义。

根据文献 [20], 将响应时滞设为 10、14.20 和 20 ms, 并选择以下 4 种参数状态:

- 变参数工况 1 ($1.3m_2, 0.7k_1$ 和 $\tau = 14.2$ ms);
- 变参数工况 2 ($0.7m_2, 1.3k_1$ 和 $\tau = 14.2$ ms);
- 变参数工况 3 ($m_2, 1.3k_1$ 和 $\tau = 10$ ms);
- 变参数工况 4 ($0.7m_2, k_1$ 和 $\tau = 20$ ms)。

图 6~图 9 分别表示 4 种参数状态下车身垂直加速度 PSD 频率变化曲线和悬架综合性能指标 J 随时间 t 的变化曲线。表 3 表示上述 4 种变参数条件下各评价指标的均方根值。

图 6~图 9 表明: 在 4 种参数状态下, 相比于被动悬架和史密斯-一型模糊控制器, 史密斯-区间二型模糊控制器能更好地降低车身垂直加速度, 同时能实现较为理想的悬架综合性能。

表 3 显示, 相较于被动悬架, 采用史密斯-区间二型模糊控制器的车身垂直加速度均方根值在 4 种参数状态下分别降低了 9.58%、13.98%、30.82% 和 14.11%; 轮胎动位移均方根值分别降低了 11.89%、6.53%、12.56% 和 7.77%; 悬架动挠度分别下降 11.44%、25.72%、44.95% 和 23.31%; 悬架综合性能与时间乘积均方根值分别降低了 20.25%、22.98%、50.50% 和 22.78%。相较于史密斯-一型模糊控制

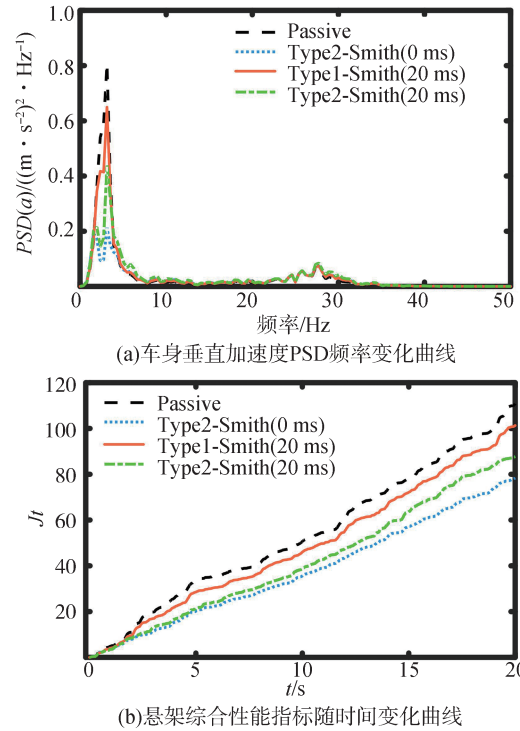


图 6 变参数状态 1 下悬架性能比较曲线

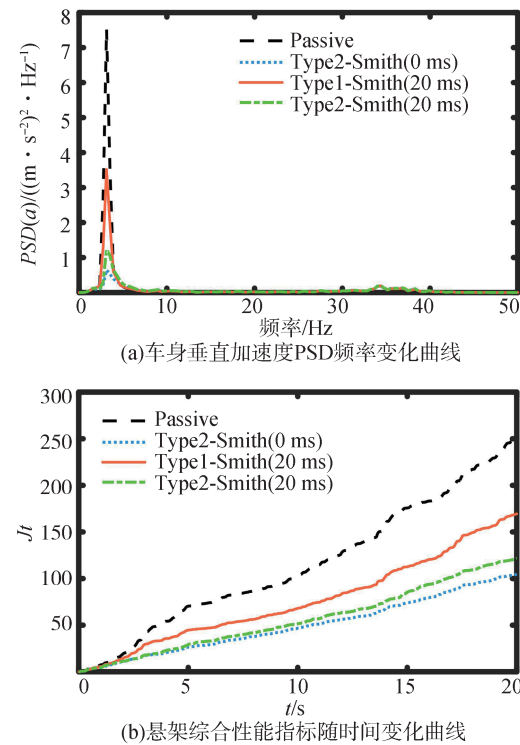
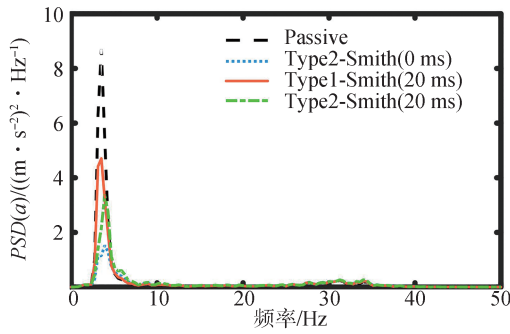
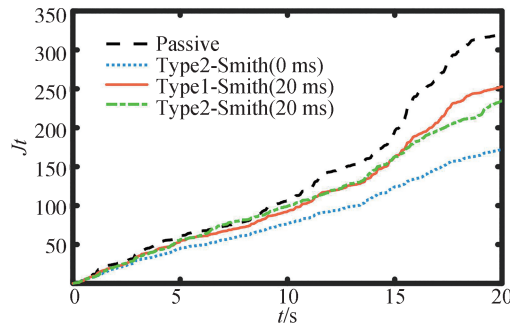


图 7 变参数状态 2 下悬架性能比较曲线

器, 采用史密斯-区间二型模糊控制器的车身垂直加速度均方根值分别降低了 5.79%、2.69%、13.90% 和 2.54%; 轮胎动位移均方根值分别降低了 6.07%、

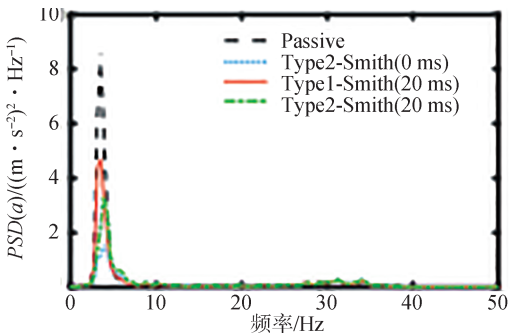


(a) 车身垂直加速度PSD频率变化曲线

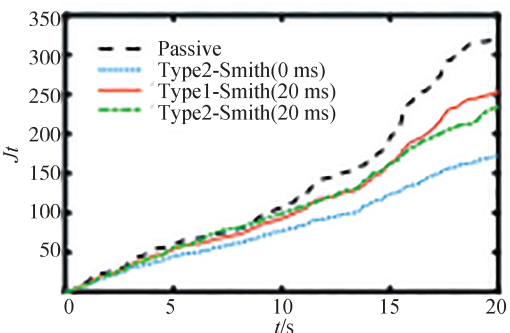


(b) 悬架综合性能指标随时间变化曲线

图8 变参数状态3下悬架性能比较曲线



(a) 车身垂直加速度PSD频率变化曲线



(b) 悬架综合性能指标随时间变化曲线

图9 变参数状态4下悬架性能比较曲线

0.93%、4.37%和0.47%;悬架动挠度均方根值分别下降10.17%、16.35%、31.58%和13.80%;悬架综合性能与时间乘积均方根值分别降低了12.74%、4.25%、25.65%和4.24%。

表3 变参数条件下评价指标均方根值

(a) 参数状态1: $1.3m_2$ 、 $0.7k_1$ 和 $\tau = 14.2$ ms

RMS	被动悬架	史密斯-二型模糊(0 ms)	史密斯-一型模糊(14.20 ms)	史密斯-二型模糊(14.20 ms)
Jt	61.322 3	43.747 6	56.045 4	48.907 5
$a/(m \cdot s^{-2})$	1.423 2	1.134 9	1.365 9	1.286 9
$(z_1 - q)/m$	0.006 6	0.005 6	0.006 2	0.005 8
$(z_2 - z_1)/m$	0.017 0	0.015 2	0.016 8	0.015 1

(b) 参数状态2: $0.7m_2$ 、 $1.3k_1$ 和 $\tau = 14.2$ ms

RMS	被动悬架	史密斯-二型模糊(0 ms)	史密斯-一型模糊(14.20 ms)	史密斯-二型模糊(14.20 ms)
Jt	161.770 5	97.795 6	130.127 7	124.590 8
$a/(m \cdot s^{-2})$	3.441 5	2.545 3	3.042 2	2.960 2
$(z_1 - q)/m$	0.006 0	0.005 4	0.005 6	0.005 6
$(z_2 - z_1)/m$	0.021 9	0.014 4	0.019 4	0.016 2

(c) 参数状态3: m_2 、 $1.3k_1$ 和 $\tau = 10$ ms

RMS	被动悬架	史密斯-二型模糊(0 ms)	史密斯-一型模糊(10 ms)	史密斯-二型模糊(10 ms)
Jt	133.205 3	57.393 5	88.684 7	65.935 0
$a/(m \cdot s^{-2})$	2.774 8	1.693 9	2.229 5	1.919 5
$(z_1 - q)/m$	0.006 2	0.005 3	0.005 7	0.005 4
$(z_2 - z_1)/m$	0.025 8	0.014 5	0.020 8	0.014 2

(d) 参数状态4: $0.7m_2$ 、 k_1 和 $\tau = 20$ ms

RMS	被动悬架	史密斯-二型模糊(0 ms)	史密斯-一型模糊(14.20 ms)	史密斯-二型模糊(14.20 ms)
Jt	163.766 4	96.188 9	132.061 0	126.455 9
$a/(m \cdot s^{-2})$	3.427 4	2.464 1	3.020 5	2.943 9
$(z_1 - q)/m$	0.006 5	0.005 6	0.006 0	0.006 0
$(z_2 - z_1)/m$	0.022 2	0.014 6	0.019 7	0.017 0

仿真结果表明,在4种不同参数状态下,史密斯-区间二型模糊控制器不仅在性能上全面超越了被动悬架,还显著优于传统的史密斯-一型模糊控制器。其车身垂直加速度均方根值平均降低了22.10%和14.75%,而悬架综合性能与时间乘积均方根值则平均下降了34.2%和21.92%。这表明,在变参数工况下,史密斯-区间二型模糊控制器表现出更理想的控制效果及鲁棒性。

5 结论

本文设计了一种史密斯-区间二型模糊控制器,

通过引入区间二型模糊控制将不确定性信息转化为上下隶属度区间范围全面地描述模糊变量的不确定性,同时利用史密斯预估控制原理来补偿系统时滞,克服了传统模糊史密斯控制处理不确定信息能力的局限性。仿真结果显示:在名义工况和变参数工况条件下,相比于被动悬架和传统史密斯模糊控制器,采用所提出史密斯-区间二型模糊控制器在降低车辆车身垂直加速度、悬架动挠度以及轮胎动位移和改善系统鲁棒性方面均取得理想的控制效果。下一步,将聚焦于磁流变半主动悬架在车辆防侧倾/侧翻等领域的应用研究,并计划采用半车模型和整车模型作为控制系统设计的研究载体,以期在更复杂的环境条件下,更真实地模拟并验证所提出控制策略的时滞补偿控制效果。

参考文献

- [1] YOON D S, KIM G W, CHOI S B. Response time of magnetorheological dampers to current inputs in a semi-active suspension system: modeling, control and sensitivity analysis [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146: 106999.
- [2] WANG J C, LV L F, REN J Y, et al. Time delay compensation control using a Taylor series compound robust scheme for a semi-active suspension with magneto rheological damper [J]. *Asian Journal of Control*, 2022, 24(5): 2632-2648.
- [3] DAI L, FANG C, LU H, et al. Research on structure design and control method of magnetorheological suspension based on improved fruit fly optimization algorithm [J]. *Machines*, 2023, 11(2): 273.
- [4] 陈士安, 祖广浩, 姚明, 等. 磁流变半主动悬架的泰勒级数-LQG时滞补偿控制方法 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(8): 190-196.
CHEN S A, ZU G H, YAO M, et al. Time delay compensation control using Taylor serie-LQG control method for magnetorheological semi-active suspension [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(8): 190-196.
- [5] 高翔, 张祥, 魏东旭, 等. 馈能式半主动悬架振动自适应最优容错控制 [J]. *汽车工程*, 2024, 46(1): 92-99.
GAO X, ZHANG X, WEI D X, et al. Adaptive optimal fault-tolerant control of vibration of energy-fed semi-active suspension [J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46(1): 92-99.
- [6] RENKAI D, RUOCHEN W, XIANGPENG M, et al. Research on time-delay-dependent H_{∞}/H_2 optimal control of magnetorheological semi-active suspension with response delay [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2023, 29(5-6).
- [7] 寇发荣, 范养强, 张传伟, 等. 车辆电动静液压作动器的半主动悬架时滞补偿控制 [J]. *中国机械工程*, 2016, 27(15): 2111-2117.
KOU R F, FAN Y Q, ZHANG C W, et al. Semi active suspension delay compensation control for vehicle electrohydrostatic actuators [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(15): 2111-2117.
- [8] 叶青, 姜笑, 张垚, 等. 考虑响应时滞的磁流变半主动悬架 H_{∞} 控制与试验研究 [J/OL]. *机械工程学报*, 2024, (18): 276-287.
YE Q, JIANG X, ZHANG Y, et al. Magnetorheological semi-active suspension control of H_{∞} considering response delay and experimental research [J/OL]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, (18): 276-287.
- [9] DING R, WANG R, MENG X, et al. Research on time-delay-dependent H_{∞}/H_2 optimal control of magnetorheological semi-active suspension with response delay [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2023, 29(5-6): 1447-1458.
- [10] TAO L, CHEN S, FANG G, et al. Smith predictor-Taylor series-based LQG control for time delay compensation of vehicle semi-active suspension [J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019(1): 3476826.
- [11] 桂航, 钟绍华, 张艺腾. 基于整车十自由度模型的商用车驾驶室半主动悬架系统研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(18): 258-264.
GUI H, ZHONG S H, ZHANG Y T. Research on semi-active suspension system of commercial vehicle cab based on the ten degree of freedom model of the whole vehicle [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(18): 258-264.
- [12] 陈兵, 马凯璇, 刘洋, 等. 基于模糊PID的动态履带张紧力控制系统研究 [J]. *振动、测试与诊断*, 2023, 43(5): 872-879, 1035.
CHEN B, MA K X, LIU Y, et al. Research on dynamic track tension control system based on fuzzy PID [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2023, 43(5): 872-879, 1035.
- [13] PANG H, FU W Q, LIU K. Stability analysis and fuzzy smith compensation control for semi-active suspension systems with time delay [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2015, 29(6): 2513-2525.
- [14] WONG P K, LI W, MA X, et al. Adaptive event-triggered dynamic output feedback control for nonlinear active suspension systems based on interval type-2 fuzzy method [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 212: 111280.
- [15] ALJARBOUH A, FAYAZ M. Hybrid modelling and sliding mode control of semi-active suspension systems for both ride comfort and road-holding [J]. *Symmetry*, 2020, 12(8): 1286.
- [16] ABDALAZIZ M, SEDAGHATI R, VATANDOOST H. Design optimization and experimental evaluation of a large capacity magnetorheological damper with annular and radial fluid gaps [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2023, 34(14): 1646-1663.
- [17] LI X J, LIU J, FU Y X, et al. Design of LQG controller for vehicle active suspension based on analytic hierarchy process and genetic algorithm. *Mod [J]. Manuf. Eng*, 2019, 10: 70-76.

- [11] 夏秋,陈特,陈龙,等.基于冗余信息融合的车辆质心侧偏角估计方法[J].汽车工程,2022,44(2):280-289.
XIA Q, CHEN T, CHEN L, et al. Vehicle sideslip angle estimation method based on redundant information fusion [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(2): 280-289.
- [12] CHEN T, CAI Y, CHEN L, et al. Sideslip angle fusion estimation method of three-axis autonomous vehicle based on composite model and adaptive cubature Kalman filter [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023.
- [13] 陈建锋,吴强,葛新元,等.基于切换策略的车辆质心侧偏角高性能获取[J].汽车工程,2024,46(2):346-355.
CHEN J F, WU Q, GE X Y, et al. High-performance acquisition for vehicle sideslip angle based on switch strategy [J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46(2): 346-355.
- [14] BERTIPAGLIA A, DE MOL D, ALIREZAEI M, et al. Model-based vs data-driven estimation of vehicle sideslip angle and benefits of tyre force measurements [J]. *arXiv preprint arXiv: 2206.15119*, 2022.
- [15] BONFITTO A, FERACO S, TONOLI A, et al. Combined regression and classification artificial neural networks for sideslip angle estimation and road condition identification [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020, 58(11): 1766-1787.
- [16] BOADA B L, BOADA M J L, GAUCHÍA A, et al. Sideslip angle estimator based on ANFIS for vehicle handling and stability [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29: 1473-1481.
- [17] GIULIACCI T A, BALLESEO S, FAINELLO M, et al. Recurrent neural network model for on-board estimation of the side-slip angle in a four-wheel drive and steering vehicle [J]. *SAE International Journal of Passenger Vehicle Systems*, 2023, 17(15-17-01-0003).
- [18] SRINIVASAN S, SA I, ZYNER A, et al. End-to-end velocity estimation for autonomous racing [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 6869-6875.
- [19] ZHANG B, ZHAO W, ZOU S, et al. A reliable vehicle lateral velocity estimation methodology based on SBI-LSTM during GPS-outage [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(14): 15485-15495.
- [20] LIU J, WANG Z, ZHANG L, et al. Sideslip angle estimation of ground vehicles: a comparative study [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2020, 14(20): 3490-3505.
- [21] 孙晓强,王玉麟,胡伟伟,等.基于轮胎分段仿射辨识模型的车辆行驶状态估计策略研究[J].汽车工程,2023,45(7):1212-1221.
SUN X Q, WANG Y L, HU W W, et al. Research on estimation strategy of vehicle driving state based on tire piecewise affine identification model [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(7): 1212-1221.
- [22] LI X, XU N, LI Q, et al. A fusion methodology for sideslip angle estimation on the basis of kinematics-based and model-based approaches [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2020, 234(7): 1930-1943.
- [23] HERMANDSORFER L, TRAUTH R, BETZ J, et al. End-to-end neural network for vehicle dynamics modeling [C]. 2020 6th IEEE Congress on Information Science and Technology (CiSt). IEEE, 2021: 407-412.

(上接第763页)

- [18] GOGO K O, NDERU L, MUTUA M. Variances in knowledge-based interval type 2 Gaussian fuzzy on linear regression models [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, 41(1): 1807-1820.
- [19] CHEN Y, LI C, YANG J. Design of discrete noniterative algorithms for center-of-sets type reduction of general type-2 fuzzy logic systems [J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2022, 24(4): 2024-2035.
- [20] ZHANG X, KIM D, BANG J, et al. Time delay compensation of a robotic arm based on multiple sensors for indirect teaching [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, 22: 1841-1851.
- [21] YAN G, FANG M, XU J. Analysis and experiment of time-delayed optimal control for vehicle suspension system [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 446: 144-158.