

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2025.01.006

基于二型模糊逻辑控制的半挂车轨迹跟踪研究*

陈鹏, 蔡英凤, 原海波, 陈龙, 孙晓强

(江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013)

[摘要] 自动驾驶商用半挂车可以显著提升干线物流效率。然而半挂商用车是典型的欠驱动系统,在大曲率运动工况下难以同时兼顾牵引车和挂车的横向轨迹跟踪精度。随着车辆速度和负载的提升,挂车质心转移及载荷转移加剧,对铰接处产生更强烈的不确定性影响,造成挂车与牵引车之间行驶轨迹的偏差进一步加大,增加了轨迹跟踪难度,影响了行驶安全性。为提高半挂商用车牵引车与挂车的横向安全性,本文提出一种基于二型模糊控制的鲁棒路径跟踪策略。首先,在MATLAB/Simulink中建立了半挂车辆的7自由度动力学模型,精确模拟牵引车与挂车的横-纵向运动动力学特性。其次,利用二型模糊逻辑控制理论中输入隶属度函数对系统不确定性的覆盖特性,设计了同时调控牵引车和挂车横向轨迹跟踪精度的二型模糊控制器。为提高不确定因素影响下横向轨迹跟踪控制的精度,降低控制器设计难度,采用粒子群优化算法对二型模糊控制器的输入隶属度函数参数进行优化。最后,利用MATLAB/Simulink与TruckSim的联合仿真平台,分别在不同车速和负载条件下进行车辆轨迹跟踪的仿真,以验证本文提出的控制策略,并与一型模糊控制和预瞄控制结果进行对比。结果表明:在双移线这种轨迹曲率发生变化的工况下,本文提出的二型模糊控制器对牵引车和挂车的横向轨迹跟踪精度有明显提升。

关键词: 自动驾驶;半挂车;轨迹跟踪;二型模糊逻辑控制

Research on Semi-Trailer Trajectory Tracking Based on Type-2 Fuzzy Logic Control

Chen Peng, Cai Yingfeng, Yuan Haibo, Chen Long & Sun Xiaoqiang

Institute of Automotive Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013

[Abstract] Autonomous commercial semi-trailers can greatly improve trunk logistics efficiency. However, since the semi-trailer vehicle is a typical underdrive system, it is difficult to simultaneously achieve lateral trajectory tracking accuracy of both tractor and trailer under large curvature motion conditions. With the increase of vehicle speed and load, the transfer of the trailer centroid and load intensifies, causing a strong uncertain impact on the hinge point between the tractor and trailer and the deviation of the driving trajectory between the trailer and the tractor to further increase, which increases the trajectory tracking difficulty and affects its driving safety. To enhance the lateral safety of semi-trailer commercial vehicle tractor and trailer, a robust path tracking strategy based on a type-2 fuzzy control algorithm is proposed in this paper. Firstly, a seven-degree-of-freedom dynamic model of the semi-trailer vehicle is constructed in MATLAB/Simulink to accurately simulate the transverse and longitudinal motion dynamics of both tractor and trailer. Secondly, considering the coverage property of the input membership function to system uncertainty in type-2 fuzzy logic control theory, a type-2 fuzzy controller is designed to adjust the lateral tracking accuracy of both tractor and trailer simultaneously. To improve the precision of lateral trajectory tracking control under uncertain factors and reduce the difficulty of controller design, a particle swarm optimization algorithm is utilized to optimize the input membership function parameters of the type-2 fuzzy controller. Finally, vehicle trajectory tracking simulation is conducted under various speed and load conditions using a joint simulation platform of MAT-

* 国家自然科学基金(52225212, 52272418, U22A20100)和国家重点研发计划(2022YFB2503302)资助。

原稿收到日期为2024年06月02日,修改稿收到日期为2024年06月30日。

通信作者:蔡英凤,教授,博士,E-mail:caicaixiao0304@126.com。

LAB/Simulink and TruckSim to validate the control strategy proposed in this paper, and the tracking accuracy is compared with those using traditional type-1 fuzzy control and preview control. The results show that the proposed type-2 fuzzy controller can significantly enhance the lateral trajectory tracking accuracy of the tractor and trailer under the condition that track curvature changes with double shifting lines.

Keywords: autonomous; semi-trailer; trajectory tracking; type II fuzzy logic control

前言

目前,干线物流是公路货运最主要的运输方式,其中半挂商用车因其载质量大和运输效率高,已经成为最重要的运载工具之一^[1]。然而,驾驶员成本逐年递增以及疲劳驾驶极易引起安全事故,增加运输成本的同时降低了运输效率。随着高阶自动驾驶技术与高级辅助驾驶技术的发展^[2],给商用半挂车实现降本增效带来了新思路,商用半挂车轨迹跟踪控制是目前国内外学者研究热点之一。

近年来,许多学者已经对自动驾驶半挂式商用车的轨迹跟踪进行了大量研究,目前的主流控制算法归纳为以下几类:经典控制方法^[3]、最优控制方法^[4]、模型预测^[5]控制方法、滑模控制^[6]方法、线性二次型调节器控制方法^[7]和鲁棒控制^[8]。国内外研究现状中,半挂车轨迹跟踪控制研究的难点和重点是在降低成本的同时提升牵引车和挂车的轨迹跟踪能力。Chen等^[9]建立了考虑牵引车和挂车的运动轨迹和状态的驾驶员预瞄模型,对牵引车和挂车当前的局部目标路径进行预瞄,并提出了一种用于方向控制的双预测控制切换模型。Leng等^[10]将补偿牵引车和挂车的侧滑加以考虑,设计了基于双向曲率的牵引车控制器,保证在曲率变化时的轨迹跟踪精度。Yuan等^[11]提出了一种由笛卡尔平面给定的期望几何路径生成期望全状态轨迹的方法,使牵引车和挂车的期望状态轨迹形成同一期望路径,然后基于反步法设计了一个轨迹跟踪控制器,使系统的状态收敛到期望轨迹。Widyotriatmo等^[12]分别以牵引车和挂车的行驶轨迹与路径的跟踪效果作为评价指标和控制目标分别设计前馈反馈轨迹跟踪控制器,并通过实验对比综合跟踪效果,得出以挂车作为轨迹跟踪的主体来设计控制器,会得到较好的跟踪效果。

研究发现,在仅使用牵引车前轴前轮转向的情况下,挂车的运动方向由前轮转向装置和铰接装置决定^[13],其运动完全依赖于牵引车的牵引作用。一方面,单个控制变量难以协调多个控制目标,且过多

的控制输入增加控制器设计难度、降低控制器设计精度。另一方面,若仅考虑单一轨迹跟踪控制目标,则无法保证半挂车牵引车与挂车车体的轨迹跟踪控制精度。此外,在实际应用中铰接处易受挂车质心转移和载荷转移等变化造成的不确定性干扰,致使挂车的轨迹跟踪控制无法与牵引车保持一致。随着车速以及载荷的变化,这种特性将表现的更加明显。上述研究忽略了不确定性干扰对自动驾驶商用半挂车轨迹跟踪的影响。

为消除不确定性干扰对自动驾驶商用半挂车轨迹跟踪的影响,国内外的研究常采用T-S模糊模型建模^[14-16]、滑模控制^[17]、基于可拓理论的控制^[18]、鲁棒模型预测控制^[19]等方法。Ni等^[4]将车辆前进速度和拖车转向执行器的时间常数看作不确定性参数,建立了LQR控制器。为提高ATS系统的鲁棒性,采用遗传算法对基于LMI的LQR控制器的权矩阵进行了优化。Zhu等^[20]分析了拖车有效载荷、拖车横摆力矩惯性和拖车轮胎转弯刚度方面的参数不确定性对横向跟踪稳定性的影响并设计控制器。上述研究考虑了横向控制时受到不确定性因素的影响,却未将覆盖不确定性作为控制器设计指标,增大了模型的复杂程度。而二型模糊控制器在面对不确定性干扰下常有不俗表现。Taghavifar^[21]使用了二型模糊PID控制器,利用不确定高斯隶属度函数论域的自适应调整来处理:驾驶条件改变下导致的外部干扰、轮胎物理极限和车辆质量变化相关的参数不确定性导致的自动驾驶车辆的期望性能的改变。结果表明该控制器对参数不确定性和外部扰动具有较强的鲁棒性。Luo等^[22]针对具有不确定非线性、未知建模参数和未知状态的线控转向系统,构造了区间二型模糊逻辑系统和基于该系统的状态观测器。提出了一种预定的性能控制,在有限时间内保证规定的跟踪性能。然而,二型模糊控制器的参数众多、调节难度大,结合智能优化算法调节参数可以提升其准确性。粒子群算法全局搜索能力强、并行搜索能力强,在面临多参数优化问题时优势明显^[23]。

因此本文针对半挂车在大曲率轨迹行驶时,挂

车质心转移及载荷转移使得后车体与前车体行驶轨迹产生不确定性偏差,在轨迹跟踪时难以兼顾两车体跟踪效果这一难题,提出了一种基于二型模糊逻辑控制的半挂车轨迹跟踪方法。二型模糊控制的隶属度函数定义为一个区间增强了模糊性。不仅考虑元素的不确定性,还考虑了各元素对应的隶属度本身的不确定性,从而允许对系统不确定性有更灵活和全面的处理。在处理牵引车跟踪误差之外,将挂车跟踪误差受到的不确定性干扰涵盖。这种双层次的不确定性处理提升了模糊控制系统在复杂环境下的适应性和鲁棒性。并引入粒子群优化算法在解决二型模糊逻辑控制器参数众多、设计复杂难题的同时,保证对不确定性干扰的覆盖,提升控制器精度,使得改进的二型模糊逻辑控制器能够让半挂车在不同车速和不同负载下,面对质心转移和载荷转移的干扰,能够很好地处理在大曲率或曲率突变工况下进行的轨迹跟踪控制。

1 车辆动力学及轨迹模型

通过建立半挂商用车动力学模型以及车辆轨迹跟踪模型来进行轨迹跟踪控制器设计研究和仿真验证。

1.1 半挂车动力学模型

半挂车由牵引车与挂车通过铰接装置连接组成,其中牵引车通常具有2轴,挂车有3根轴,在建模过程中将其简化为单轴。除此之外车辆模型还做如下假设:(1)忽略空气动力学影响;(2)同轴左右车轮合并为一个等效车轮;(3)假设铰接角较小;(4)忽略轮胎的滚动阻力;(5)忽略车辆的侧倾与俯仰。采用7自由度动力学模型作为控制器中的参考模型^[24],根据半挂车的特点,同时考虑车辆纵向速度变化对车辆的影响,建立考虑牵引车侧向、纵向、横摆,挂车的侧向、纵向、横摆以及铰接角处的相对转动的7个自由度的车辆模型。如图1所示,其中XY为惯性坐标系;并通过拉格朗日法对牵引车变量求偏导以达到简化模型的要求,并分析铰接处不确定性来源,具体拉格朗日方程表达式如式(1)所示。

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (1)$$

式中: $L(q, \dot{q}, t)$ 是拉格朗日量,定义为 $L=T-V$,其中 T 为系统动能, V 为系统势能; q 为广义速度; Q 为广义力,广义坐标是时间的函数。

相对于牵引车,挂车的坐标可表示为

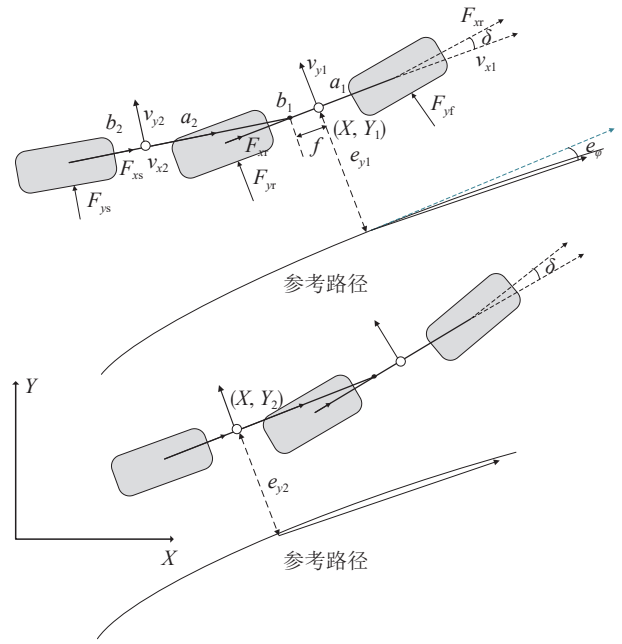


图1 车辆7自由度动力学模型及跟踪模型

$$x_2 = x_1 - f - a_2 \cos \varphi_2 \quad (2)$$

$$y_2 = y_1 - f \sin \varphi_1 - a_2 \sin \varphi_2 \quad (3)$$

选取 $q=[x_1, y_1, \varphi_1, \varphi_2]$ 作为广义坐标系,则动能表示为

$$T = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} I_1 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\varphi}_2^2 \quad (4)$$

式中: m_1 为牵引车质量; m_2 为挂车质量; \dot{x}_1 为牵引车纵向速度; \dot{x}_2 为挂车纵向速度; \dot{y}_1 为牵引车侧向速度; \dot{y}_2 为挂车侧向速度; γ 为铰接角度; φ_1 和 φ_2 分别代表牵引车和挂车的横摆角速度; I_1 、 I_2 分别表示牵引车、半挂车转动惯量; f 为牵引车质心与铰接点的距离,其中,势能 $V=0$,所以 $L=T$ 。此外,因为 φ_1 和 φ_2 较小,所以本文只考虑拉格朗日方程 L 对牵引车的纵横向速度、横摆角速度和挂车的纵横向速度、横摆角速度求偏导,可获得拉格朗日项:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial q} = 0 \\ \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = (m_1 + m_2) \ddot{x} \\ \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \dot{y}_1} = (m_1 + m_2) \ddot{y}_1 - m_2 f \ddot{\varphi}_1 - m_2 a_2 \ddot{\varphi}_2 \\ \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \alpha_1} = m_2 f (f \ddot{\varphi}_1 + a_2 \ddot{\varphi}_2 - \ddot{y}_1) + I_1 \ddot{\varphi}_1 \\ \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \alpha_2} = m_2 a_2 (f \ddot{\varphi}_1 + a_2 \ddot{\varphi}_2) + I_2 \ddot{\varphi}_2 \end{cases} \quad (5)$$

每个状态的广义力表达式为

$$\begin{cases} Q_x = F_{xf} + F_{xr} + F_{xs} - F_{yf}\delta + F_{ys}\gamma \\ Q_{y1} = F_{yf} + F_{yr} + F_{ys} + F_{xf}\delta - F_{xs}\gamma \\ Q_{\alpha 1} = a_1(F_{yf} + F_{xf}\delta) - b_1F_{yr} - \\ \quad m_2f(F_{ys} - F_{xs}\gamma) \\ Q_{\alpha 2} = -(a_2 + b_2)(F_{ys} - F_{xs}\gamma) \end{cases} \quad (6)$$

$$M = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (m_1 + m_2) & -m_2(f + a_2) & -m_2a_2 & 0 \\ 0 & -m_2f & m_2f(f + a_2) + I_1 & m_2fa_2 & 0 \\ 0 & -m_2a_2 & m_2a_2(f + a_2) + I_2 & m_2a_2^2 + I_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$f(x, \delta) = \begin{bmatrix} F_{xf} + F_{xr} + F_{xs} - F_{yf}\delta + F_{ys}\gamma + (m_1 + m_2)v_{y1}\omega_1 \\ F_{yf} + F_{yr} + F_{ys} + F_{xf}\delta - F_{xs}\gamma - (m_1 + m_2)v_{x1}\omega_1 \\ a_1(F_{yf} + F_{xf}\delta) - b_1F_{yr} - m_2f(F_{ys} - F_{xs}\gamma) + m_2fv_{x1}\omega_1 \\ -(a_2 + b_2)(F_{ys} - F_{xs}\gamma) - m_2a_2v_{x1}\omega_1 \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}$$

$$\dot{x} = M^{-1}f(x, \delta) \quad (7)$$

$$x = [v_{x1}, v_{y1}, \omega_1, \dot{\gamma}, \gamma]^T \quad (8)$$

$$F_{x_i} = K_a \cdot S \quad (9)$$

$$F_{y_i} = C_a \cdot \alpha \quad (10)$$

式中: a_1, b_1 分别为牵引车前后轴与质心之间的距离; a_2, b_2 分别为挂车前后轴与质心之间的距离; ω_1 为牵引车横摆角速度; v_{x1} 为牵引车纵向车速; v_{y1} 为牵引车横向车速; S 为车轮滑移率; α 为车轮侧偏角, 可由 Trucksim 软件得到; K_a 和 C_a 分别为轮胎的纵滑刚度和侧偏刚度, 在线性区域内与载荷大小成正比。由于不确定的载荷转移及质心变化等变化会引起轮胎的垂向力不确定, 纵滑刚度和侧偏刚度时变, 轮胎纵向力和侧向力的时变会引起半挂车铰接角处动力学特性的不确定性干扰。

因此式(9)、式(10)和式(7)实际应为

$$F_{x_i} = (K_a + \Delta K_a) \cdot S \quad (11)$$

$$F_{y_i} = (C_a + \Delta C_a) \cdot \alpha \quad (12)$$

$$\dot{x} = M^{-1}f(x, \delta) + \omega \quad (13)$$

式中 ω 为不确定干扰。

1.2 轨迹跟踪模型

轨迹跟踪模型是建立车辆坐标系与全局坐标系之间的关系^[25], 由上述动力学模型可以得到牵引车的横纵向车速及横摆角速度等状态量, 从而可求取牵引车的横向坐标位置。值得说明的是: 牵引车虽然同样受到铰接处干扰, 但由于牵引车轴距较短, 牵引车横向位置坐标受到的影响较小, 仍可以表示为

由上述公式可以推理得到:

$$Y_1 = \int v_{y1} dt \quad (14)$$

挂车的长度较长且与牵引车并不是通过刚性连接, 会受到与车速和载质量相关的载荷转移及质心变化导致的不确定性因素影响。因此挂车无法得到与牵引车 X_1 位置对应的 Y_1 横向位置。此时实际挂车的横向位置为

$$Y_2 = Y_1 + \Delta y \quad (15)$$

路径跟踪的运动学模型表示如下:

$$\begin{cases} e_y = Y_r - Y_1 \\ e_\varphi = \int \rho v_{x1} dt - \varphi_1 \\ e_{y2} = Y_r - Y_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中: ρ 为道路曲率; Y_r 为期望纵坐标。

2 轨迹跟踪控制器设计

为实现半挂车牵引车与挂车面对系统不确定因素时的精确轨迹跟踪控制, 提出了基于区间二型模糊逻辑算法的轨迹跟踪控制策略。

2.1 区间二型模糊逻辑控制算法

二型模糊控制器原理如图2所示, 相比于传统模糊控制理论, 区间二型模糊逻辑控制算法中输入隶属度为区间形式, 具有对系统不确定性的覆盖特性。对于双输入单输出的二型模糊逻辑控制器, 设为输入变量论域 $x = (x_1, x_2)^T$, 有 P 个规则 ($p = 1, \dots, P$) 定义如下:

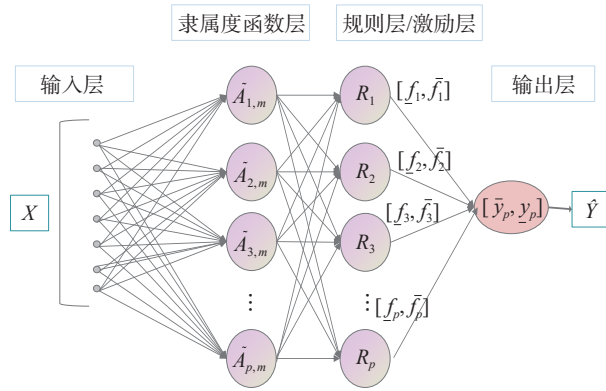


图2 二型模糊控制器原理图

$Rule_p = \text{If } x_1 \text{ is } \tilde{A}_{p,1} \text{ and } x_2 \text{ is } \tilde{A}_{p,2},$

Then y is \tilde{Y}_p

上述 $\tilde{A}_{p,1}$ 和 $\tilde{A}_{p,2}$ 为二型模糊逻辑控制器前项,本文设置为高斯型隶属度函数,包含上层隶属度函数 $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{p,m}}(\mathbf{x})$ 和下层的隶属度函数 $\underline{\mu}_{\tilde{A}_{p,m}}(\mathbf{x})$,这也是二型模糊逻辑控制器与一型模糊逻辑控制器的主要区别,将清晰的输入经过上下层隶属度函数模糊化来增强其模糊特性。其中每一个输入对应的上层隶属度为

$$\bar{\mu}_{\tilde{A}_{p,m}}(x_m) = \exp\left(-\frac{(x_m - \bar{c}_{p,m})^2}{2\bar{\sigma}_{p,m}^2}\right) \quad (17)$$

下层隶属度为

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}_{p,m}}(x_m) = h \exp\left(-\frac{(x_m - \underline{c}_{p,m})^2}{2\underline{\sigma}_{p,m}^2}\right) \quad (18)$$

式中: $\underline{c}_{p,m}$ 和 $\bar{c}_{p,m}$ 分别代表高斯型下层和上层隶属度函数的中心; $\underline{\sigma}_{p,m}$ 和 $\bar{\sigma}_{p,m}$ 分别为高斯型下层和上层隶属度函数的标准差; h 为下层隶属度函数的高度。

上述上下层隶属度函数设计使得输入的不确定性被覆盖,如图3高斯型隶属度函数示意图所示:不同于一型模糊逻辑控制器中每一个输入对应隶属度曲线上一个精确值,二型模糊逻辑控制器的输入在模糊化过程中对应的是上下两个高斯型隶属度函数之间某一隶属度值,即图3中阴影部分。利用这一特性,将原本牵引车和挂车的轨迹误差共同作为控制输入替换为单一车体的轨迹误差,通过隶属度函数上的模糊性体现两车体之间的误差不确定性(即铰接处的不确定性)。因此,在设计一个有效的二型模糊逻辑控制器时,选择合适的隶属度函数参数可以覆盖系统不确定性,从而提升轨迹跟踪控制精度。这些参数的选取将在接下来的部分中被重点介绍和讨论。

\tilde{Y}_p 为二型模糊逻辑控制器输出项,见图2所示

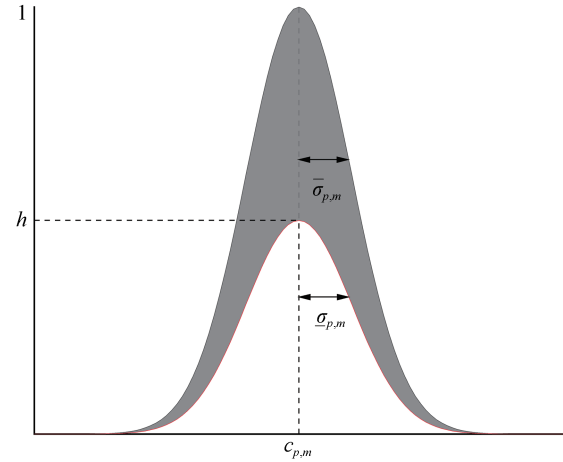


图3 高斯型隶属度函数示意图

的输出层部分^[26],包含模糊上层输出 $\bar{y}(x)$ 和模糊下层输出 $\underline{y}(x)$ 。模糊化后的因子触发模糊规则 $\tilde{F}_p = [f_{p,1}, \bar{f}_{p,1}]$,该规则对应的规则后项输出 $[\bar{y}_p, \underline{y}_p]$,经过运算后得到模糊输出,其中触发规则分别为

$$\underline{f}_p(\mathbf{x}) = \underline{\mu}_{\tilde{A}_{p,1}}(x_1) \cap \cdots \cap \underline{\mu}_{\tilde{A}_{p,M}}(x_M) \quad (19)$$

$$\bar{f}_p(\mathbf{x}) = \bar{\mu}_{\tilde{A}_{p,1}}(x_1) \cap \cdots \cap \bar{\mu}_{\tilde{A}_{p,M}}(x_M) \quad (20)$$

式中 \cap 表示为代数积。

本文选用T-S二型模糊逻辑控制器,且规则后件设计为常数型规则后件,即 $\bar{y}_p = \underline{y}_p$ 。模糊上层输出 $\bar{y}(x)$ 和模糊下层输出 $\underline{y}(x)$ 表示为

$$\bar{y}(x) = \frac{2 \sum_{p=1}^P \bar{f}_p(\mathbf{x}) \bar{y}_p}{\sum_{p=1}^P \underline{f}_p(\mathbf{x}) + \sum_{p=1}^P \bar{f}_p(\mathbf{x})} \quad (21)$$

$$\underline{y}(x) = \frac{2 \sum_{p=1}^P \underline{f}_p(\mathbf{x}) \underline{y}_p}{\sum_{p=1}^P \underline{f}_p(\mathbf{x}) + \sum_{p=1}^P \bar{f}_p(\mathbf{x})} \quad (22)$$

最终清晰化的输出 $y(x)$ 为

$$y(x) = (\underline{y}(x) + \bar{y}(x))/2 \quad (23)$$

2.2 二型模糊逻辑控制器参数设计

在二型模糊逻辑控制器的设计中,须设计的部分主要包括输入变量和输出变量的模糊子集论域范围划分及其隶属度函数参数,以及模糊规则的制定。

2.2.1 输入变量的模糊集论域参数设计

本文中牵引车横向位移误差的变化范围为 $[-0.3, 0.3]$,将此输入变量的高斯型隶属度函数划分为5个区域,用语言变量描述为:负大(NL),负小(NS),零(ZE),正小(PS),正大(PL)。牵引车航向角

误差的变化范围为 $[-0.1, 0.1]$,同理将其高斯型隶属度函数划分为5个区域,用语言变量描述为:负大(NL),负小(NS),零(ZE),正小(PS),正大(PL)。如图3所示, $\underline{c}_{p,m}$ 和 $\bar{c}_{p,m}$ 用来划分每一个隶属度函数的位置, $\underline{\sigma}_{p,m}$ 、 $\bar{\sigma}_{p,m}$ 和 h 确定上下层隶属度之间的区间大小。本文中隶属度 p 为5,输入量 m 为2,因此理论上须设计的参数个数为 $(2+2+1) \times 5 \times 2 = 50$ 。为进一步降低参数优化的难度,选取 $\underline{\sigma}_{p,m} = \bar{\sigma}_{p,m}$, $\underline{c}_{p,m} = \bar{c}_{p,m}$,简化后的参数个数为 $(1+1+1) \times 5 \times 2 = 30$ 。

规则后件 $[\bar{y}_p, \underline{y}_p]$ 的大小范围设置为 $[-12, 12]$,同样划分为5个区域:负大(NL)对应常数 y_1 ,负小(NS)对应常数 y_2 ,零(ZE)对应常数 y_3 ,正小(PS)对应常数 y_4 ,正大(PL)对应常数 y_5 。为降低控制器设计难度,这里按比例将该5个常数设置为 $y_1 = -12, y_2 = -6, y_3 = 0, y_4 = 6, y_5 = 12$ 。

2.2.2 模糊规则设计

本文设计的二型模糊逻辑控制器是以横向偏差和航向角偏差作为控制输入量,牵引车前轮转角为控制输出量。控制原则为当横向偏差为负的情况下,车辆位置在全局坐标系下偏右,需要左方向的转角,而航向角误差为负或零时,这时需要较大的左方向转角,此时控制量应该取正大(PL)。当横向偏差为正的情况下,车辆位置在全局坐标系下偏左,需要右方向的转角,而航向角误差为正或零时,这时需要较大的右方向转角,此时控制量应该取负大(NL)。以此类推,可以将模糊规则总结为表1。

表1 模糊规则表

e_y	e_φ				
	NL	NS	ZE	PS	PL
NL	NL	NL	NS	NS	NS
NS	NL	NL	NL	NL	ZE
ZE	NS	NS	ZE	PS	PL
PS	NS	ZE	PS	PS	PL
PL	PS	PS	PL	PL	PL

2.3 二型模糊逻辑控制器参数优化

2.3.1 粒子群优化算法

粒子群算法的灵感来自于对鸟群迁徙和鱼群觅食时的行为观察。这些群体在寻找食物或迁徙时表现出一种协同的行为,即个体之间相互协作,沿着最有利的方向移动,以获得更好的结果。这种群体行为的本质是个体之间的信息共享和协同,从而达到

整体上的优化目标^[27]。

基本的PSO算法方程为

$$v_{id}(t+1) = v_{id}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (P_{gd}(t) - x_{id}(t)) \quad (24)$$

$$x_{id}(t+1) = v_{id}(t+1) + x_{id}(t) \quad (25)$$

对于每个粒子的第 d 维度的速度信息,表示为 v_{id} ,其变化受到两个学习因子的影响,即 c_1 和 c_2 。其中, c_1 的作用是使粒子向其个体最优解靠近,而 c_2 的作用是使粒子向全局最优解靠近。为了确保粒子在搜索过程中保持在搜索空间内,引入了两个随机系数 r_1 和 r_2 ,它们的范围在 $[0, 1]$ 之间。这样做的目的是限制粒子的运动速度在一定范围内,即速度的每个维度 v_{id} 位于 $[-v_{\max}, v_{\max}]$ 区间内,从而保证粒子的位置始终处于搜索空间内,即粒子的每个维度的位置 x_{id} 位于 $[-x_{\max}, x_{\max}]$ 。PSO算法的执行过程主要包括初始化、更新粒子速度和位置、评估适应度、更新个体和全局最优解等步骤。PSO算法的基本步骤如下。

Step1 初始化:

将控制器参数随机生成为粒子群中的粒子,并随机生成每个粒子的位置和速度,初始化每个粒子的个体最优解(初始位置)和群体最优解。

Step2 迭代过程,对于每次迭代,执行以下步骤:

(1)按照式(21)更新粒子速度和位置;

(2)评估适应度,计算每个粒子的适应度值,该值由问题定义的目标函数决定;

(3)更新个体和全局最优解,对于每个粒子,根据当前位置和个体最优解比较适应度值,更新个体最优解。同时,根据所有粒子的适应度值比较,更新全局最优解。

Step3 终止条件:

当达到预定的迭代次数或满足特定停止条件时,终止算法。

2.3.2 控制器参数优化

通过上节控制器参数分析,模糊前项的隶属度函数参数 $\sigma_{p,m}$ 、 $c_{p,m}$ 和 h 为轨迹跟踪控制器设计的关键参数,如图4所示。本节将介绍如何使用粒子群优化算法对这些参数进行设计和优化。

优化算法的代价函数为

$$J = k_1 J_1^2 + k_2 J_2^2 + k_3 J_3^2 \quad (26)$$

通过上述公式将整个车体的横向位移偏差和航向角偏差同时进行考虑,其中:

$$J_1 = e_y = n_1 e_{y1} + n_2 e_{y2} \quad (27)$$

J_1 为牵引车的横向位移偏差和挂车的横向位移

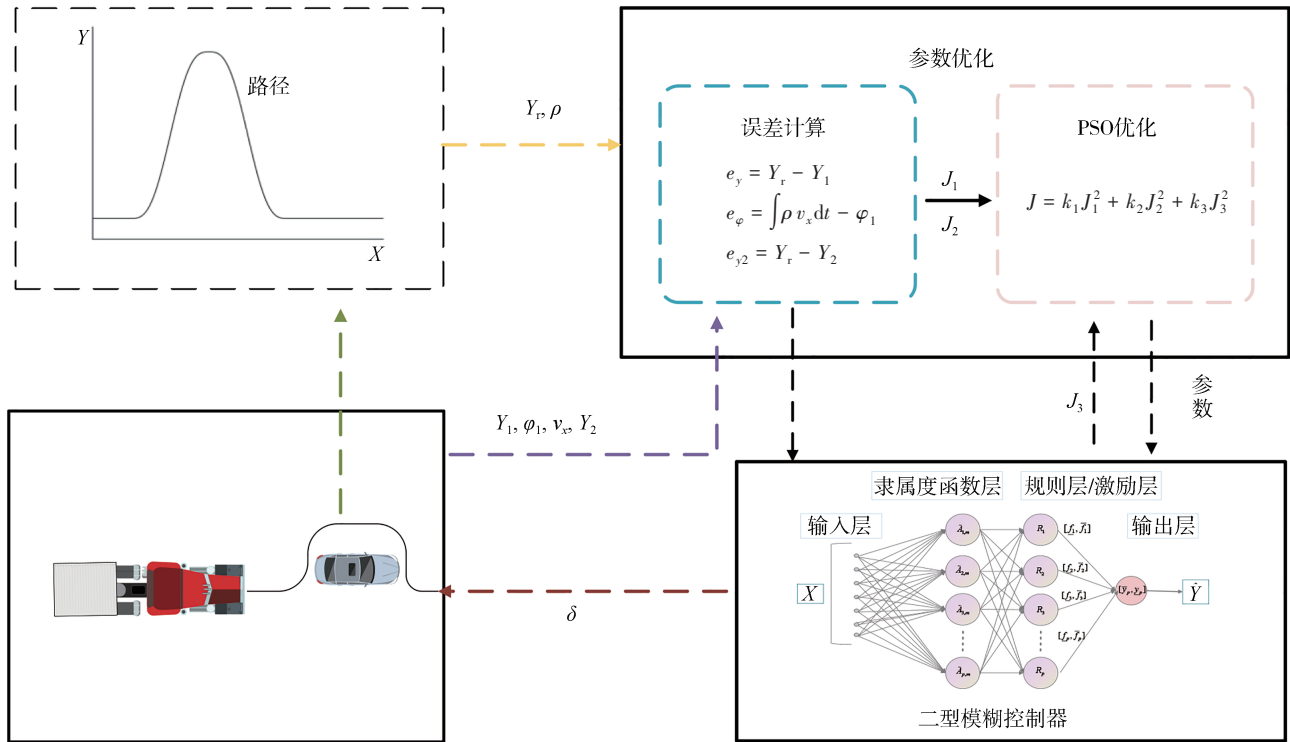


图4 优化控制器参数流程图

偏差按比例相加的误差之和,作为车体的横向位移偏差量。

$$J_2 = e_{\varphi_1} \quad (28)$$

e_{φ_1} 用来描述牵引车的偏航角度。

$$J_3 = \underline{j} + \bar{j} \quad (29)$$

$$\underline{j} = \max\left(\underline{\tau}(y_{x_q} - \underline{y}(x_q)), (\underline{\tau} - 1)(y_{x_q} - \underline{y}(x_q))\right) \quad (30)$$

$$\bar{j} = \max\left(\bar{\tau}(y_{x_q} - \bar{y}(x_q)), (\bar{\tau} - 1)(y_{x_q} - \bar{y}(x_q))\right) \quad (31)$$

引入分位数回归的统计方法来量化描述该模糊输入覆盖不确定性能力。分位数回归通过估计给定自变量条件下因变量特定分位数的函数形式,而不仅仅是条件均值,以更全面地了解数据的分布特征和变异程度。本文将 J_3 用来描述牵引车横向误差代替挂车横向误差作为输入的程度,设定 $\bar{\tau} = 0.95$ 、 $\underline{\tau} = 0.1$ 以期获得85%的不确定性覆盖率。式中的 x_q 表示牵引车横向位移误差作为控制器首个横向偏差输入量 e_{y_1} , x_g 表示挂车作为控制器首个横向偏差 e_{y_2} 。通过将两组误差数据作为输入,通过对比清晰的输出在模糊输出上的分布情况作为参数优化的指标,从而量化模糊前项对影响牵引车和挂车横向位置偏差的不确定性的覆盖作用。

基于上述代价函数,通过粒子群寻优求解出轨迹跟踪过程中半挂车车辆前后车体横向轨迹跟踪最小偏差时二型模糊逻辑控制器的参数。

3 仿真实验验证

本文的仿真工况为双移线工况,进行在不同车速和不同载荷情况下的跟踪效果仿真。通过对比粒子群算法优化后的二型模糊逻辑控制方法、一型模糊逻辑控制方法、传统预瞄PID控制方法的轨迹跟踪控制效果,验证所提出方法的有效性。

3.1 仿真环境搭建

选取一台搭载RTX 4070 GPU和Inter I9 CPU的台式计算机,在软件MATLAB/Simulink中建立动力学模型和控制器模型,并在软件Trucksim中配置了道路场景等,搭建了MATLAB与Trucksim的联合仿真实验平台。

整车参数如表2所示。

3.2 参数优化仿真

利用仿真软件Matlab/Simulink进行粒子群优化算法对二型模糊控制参数的优化,仿真优化过程如图5所示。图中横坐标为迭代次数,纵坐标为优化的代价函数值。

表2 整车参数

参数	数值
m_1/kg	4 525
m_2/kg	6 590
a_1/m	1.11
b_1/m	2.535
a_2/m	5.22
b_2/m	4.78
f/m	1.61
$I_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	34 823.6
$I_2/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	54 000

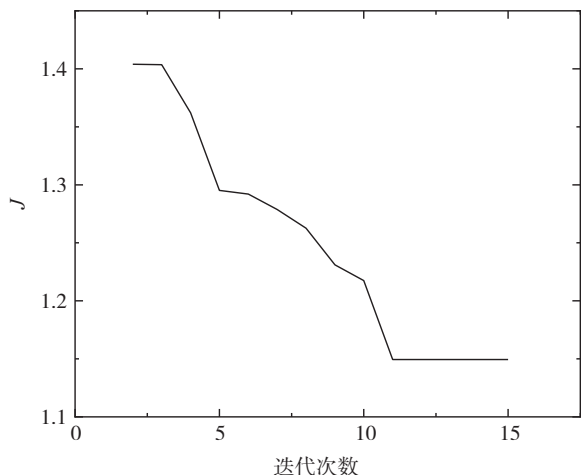


图5 优化算法迭代图

3.3 仿真验证

3.3.1 车速和载质量对质心转移及载荷转移的影响

在无人驾驶商用半挂车行驶过程中,质心转移载荷转移会对其铰接位置造成不确定性影响,进而影响车辆的跟踪性能。不同车速和负载下的质心转移的程度也不同。图6~图9通过在不同车速和负载情况下测量挂车轴的垂向力的变化,体现无人驾驶半挂车行驶时,质心在不断发生变化,在车辆转向时尤为明显。由上文所述,铰接处的不确定性影响会受到车速与负载的影响。

3.3.2 不同车速下的仿真验证

如3.3.1节仿真所示,不同车速下半挂车辆载荷转移及质心转移的程度不同,对铰接处的不确定性影响也不同。因此本节将在不同车速下对半挂车的仿真效果进行仿真验证。图10~图15为负载3 000 kg、不同车速下的跟踪效果。

表3和表4为负载3 000 kg、不同车速下的跟踪误差数据。

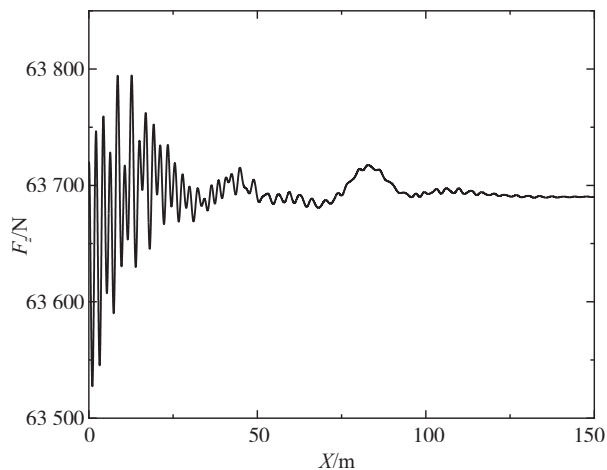


图6 30 km/h 牵引车轴载荷

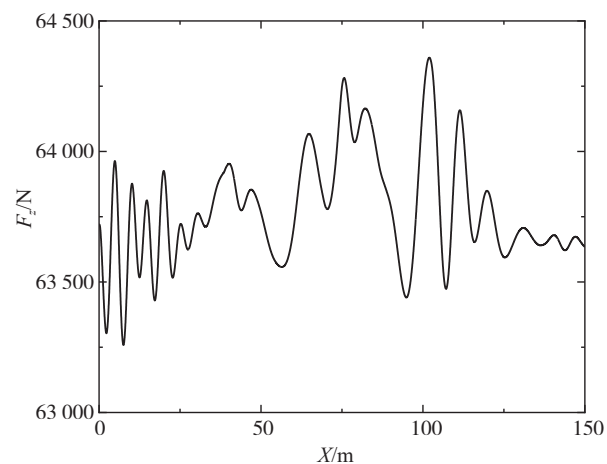


图7 30 km/h 挂车轴载荷

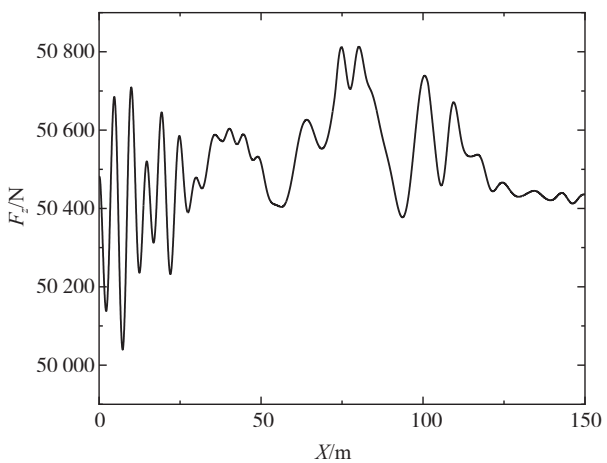


图8 3 000 kg 负载挂车轴载荷

3.3.3 不同负载下的仿真验证

本节在双移线工况下设定30 km/h的车速,分别

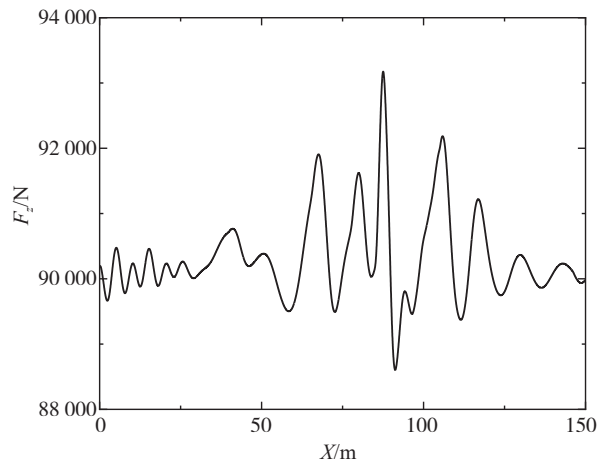


图9 12 000 kg负载挂车轴载荷

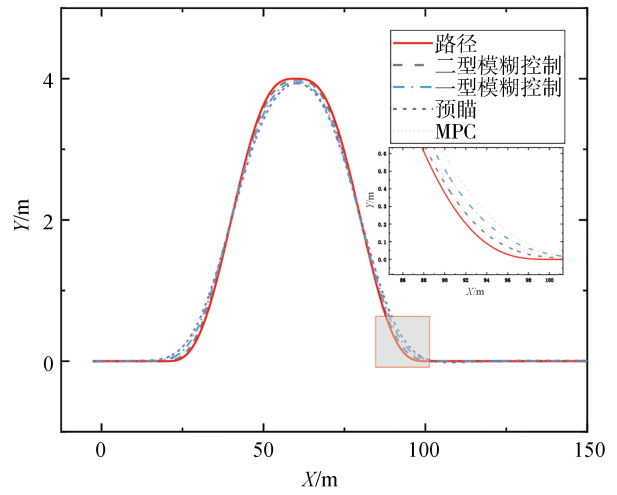


图12 30 km/h 挂车跟踪效果图

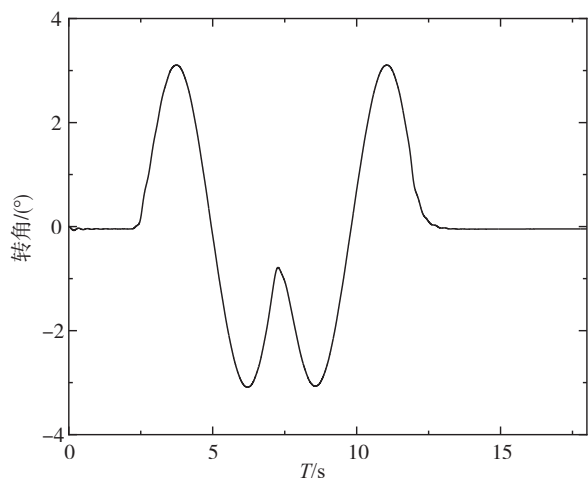


图10 30 km/h 车速时前轮转角

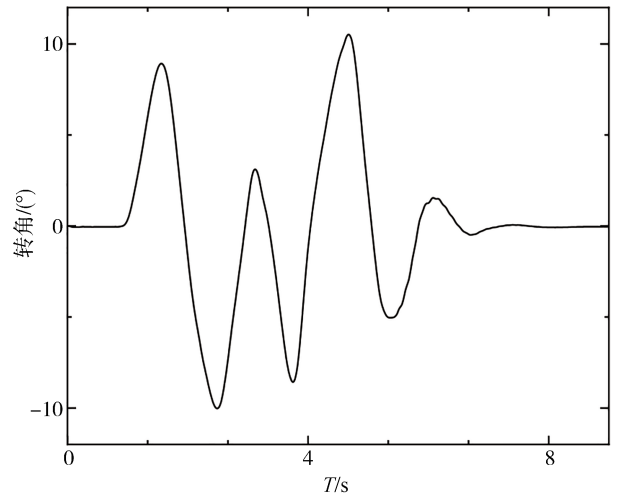


图13 70 km/h 车速时前轮转角

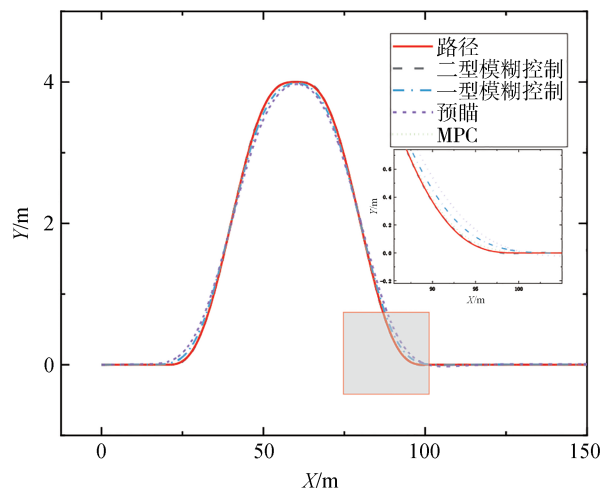


图11 30 km/h 牵引车跟踪效果图

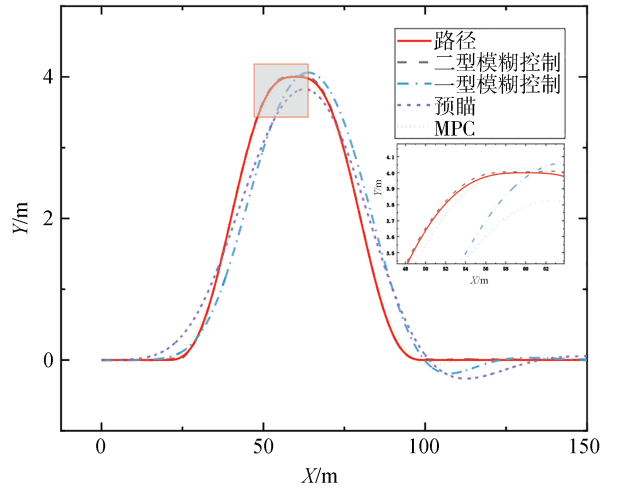


图14 70 km/h 牵引车跟踪效果图

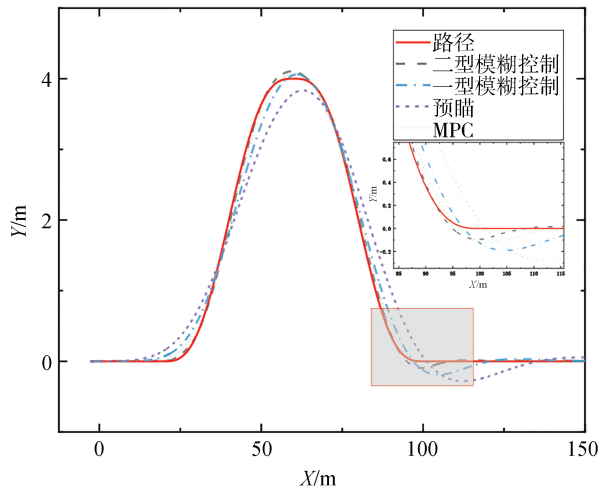


图15 70 km/h挂车跟踪效果图

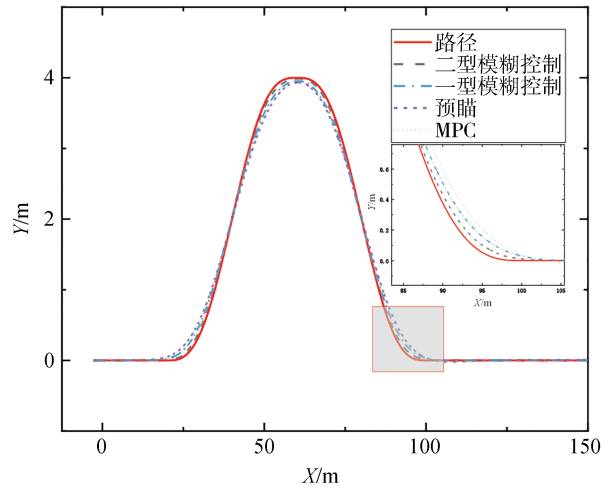


图17 挂车跟踪效果图(3 000 kg负载)

表3 30 km/h车速半挂车跟踪误差均方根值

项目	二型模糊控制	一型模糊控制	预瞄控制	MPC
牵引车/m	0.001 545	0.019 164	0.032 16	0.009 71
挂车/m	0.012 8	0.017 4	0.033 3	0.017 2

表4 70 km/h车速半挂车跟踪误差均方根值

项目	二型模糊控制	一型模糊控制	预瞄控制	MPC
牵引车/m	0.006 881	0.021 20	0.051 496	0.012 31
挂车/m	0.015 224	0.021 13	0.084 910	0.022 20

以3 000 kg负载与10 000 kg负载下进行仿真,来对比验证在受到载荷不同导致的不确定性影响下的二型模糊控制器与其他4种控制器的跟踪表现,如图16~图19所示。

表5和表6为相同车速、不同负载条件下的跟踪误差数据。

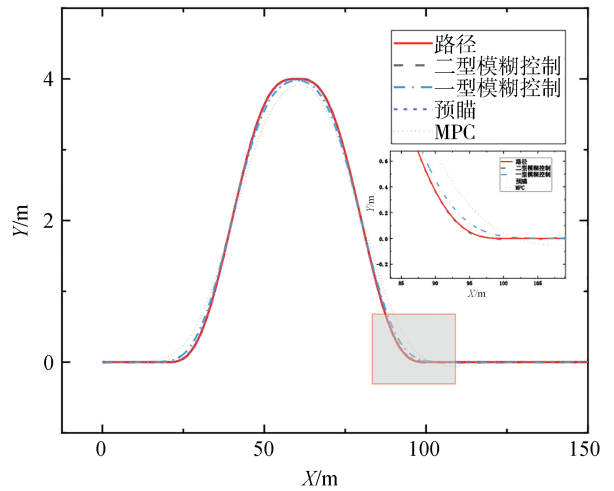


图18 牵引车跟踪效果图(10 000 kg负载)

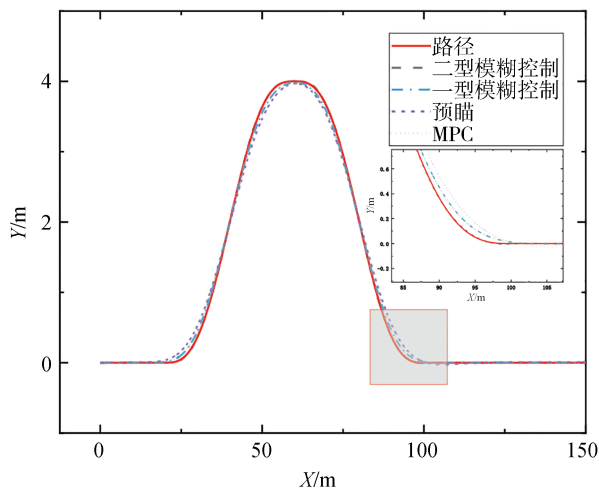


图16 牵引车跟踪效果图(3 000 kg负载)

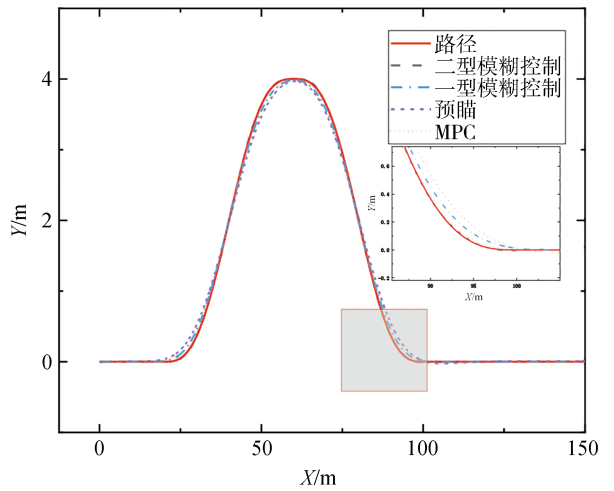


图19 挂车跟踪效果图(10 000 kg负载)

表5 3 000 kg 负载半挂车跟踪误差均方根值

项目	二型模糊控制	一型模糊控制	预瞄控制	MPC
牵引车/m	0.002 12	0.009 30	0.010 20	0.004 27
挂车/m	0.010 83	0.014 33	0.023 23	0.027 50

表6 10 000 kg 负载半挂车跟踪误差均方根值

项目	二型模糊控制	一型模糊控制	预瞄控制	MPC
牵引车/m	0.004 231	0.019 740	0.032 13	0.023 21
挂车/m	0.012 014	0.025 583	0.063 29	0.101 20

3.3.4 仿真结果分析

不同车速下跟踪效果如图10~图15所示。半挂车车辆在避障工况下低速行驶时,4种控制方法中牵引车的跟踪效果较好,但针对于挂车的轨迹跟踪效果,使用二型模糊逻辑控制方法在面临大曲率和突变曲率转向时的表现要明显强于其他控制方法。当半挂车以高速行驶时,二型模糊控制器展现出了亮眼的控制表现。如图16~图19所示,不同载荷导致的载荷转移对半挂车的确定性影响也存在差异。然而二型模糊控制器在不同载荷下,牵引车和挂车的跟踪效果都强于其他控制器。相比其他控制方法,二型模糊控制器更加有效地减小了挂车在转向拐点处的误差,使得挂车的轨迹跟踪更加稳定和准确。这种稳定性和精确性提升了行车安全性和稳定性。通过上述仿真验证,本文提出的二型模糊控制器的鲁棒性得到进一步验证。

4 结论

建立了自动驾驶商用半挂车的动力学模型,并分析了速度和负载不同情况下载荷转移对铰接处不确定性的干扰。针对半挂车具有牵引车和挂车两个车体,由于不确定性因素影响难以兼顾二者跟踪精度这一难题,提出并使用了一种二型模糊逻辑控制器处理不确定性干扰,提升车体跟踪精度。并通过粒子群优化算法对控制器的参数进行优化,提升了控制器效果,同时降低了控制器设计难度。最后在双移线的仿真场景下验证了半挂车在使用本文设计的控制器下的跟踪精度,结果表明使用该控制方法显著提升了在不确定性因素影响下的半挂车牵引车与车体的跟踪效果。

参考文献

[1] TANG X, YAN Y, WANG B, et al. Adaptive articulation angle

preview-based path-following algorithm for tractor-semitrailer using optimal control [J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(14):5163.

- [2] WANG Z H, CHEN L, CAI Y F, et al. Adaptive coordinated control strategy for autonomous vehicles based on four-wheel steering [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2023:1-16.
- [3] XU X, ZHANG L, JIANG Y, et al. Active control on path following and lateral stability for truck-trailer combinations [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, 44(2): 1365-1377.
- [4] NI Zhituo, HE Yuping. Design and validation of a robust active trailer steering system for multi-trailer articulated heavy vehicles (Article) [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2019, 57(10): 1545-1571.
- [5] YU X, WANG H, TENG C, et al. DGPR-MPC: learning-based model predictive controller for autonomous vehicle path following [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2023, 17(10): 1992-2003.
- [6] ESMAEILI N. An adaptive sliding mode controller for the lateral control of articulated long vehicles [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 2019, 233(3): 487-515.
- [7] DENG Z W, JIN Y H, GAO W, et al. A closed-loop directional dynamics control with LQR active trailer steering for articulated heavy vehicle [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2023, 237(12): 2741-2758.
- [8] ZHANG Y, WANG W, WANG W, et al. An adaptive constrained path following control scheme for autonomous electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(4): 3569-3578.
- [9] CHEN X, YAO Q. Dual predictive model adaptive switching control for directional control of tractor semitrailer combinations [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2023, 15(8):1-16.
- [10] LENG Z, MINOR M A. Curvature-based ground vehicle control of trailer path following considering sideslip and limited steering actuation [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(2): 332-348.
- [11] YUAN J, SUN F, HUANG Y. Trajectory generation and tracking control for double-steering tractor-trailer mobile robots with on-axle hitching [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(12): 7665-7677.
- [12] WIDYOTRIATMO A, NAZARUDDIN Y Y, PUTRANTO M R F, et al. Forward and backward motions path following controls of a truck-trailer with references on the head-truck and on the trailer [J]. *ISA Trans*, 2020, 105: 349-366.
- [13] WEI Y, HE S, XU E, et al. Steady-state steering characteristics of mathematical model for semitrailer based on variations in camber parameters [J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020:1-14.
- [14] ZHANG C, HU J, QIU J, et al. A novel fuzzy observer-based steering control approach for path tracking in autonomous vehi-

- cles [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 27(2): 278-290.
- [15] ZHANG C, LAM H K, QIU J, et al. Fuzzy-model-based output feedback steering control in autonomous driving subject to actuator constraints [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29(3): 457-470.
- [16] CHEN Y, LU C, CHU W. A cooperative driving strategy based on velocity prediction for connected vehicles with robust path-following control [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(5): 3822-3832.
- [17] CHEN T, CHEN L, XU X, et al. Passive actuator-fault-tolerant path following control of autonomous ground electric vehicle with in-wheel motors [J]. Advances in Engineering Software, 2019, 134(C): 22-30.
- [18] 蔡英凤,秦顺琪,臧勇,等.基于可拓优度评价的智能汽车横向轨迹跟踪控制方法[J].汽车工程,2019,41(10):1189-1196.
CAI Y F, QIN S Q, ZANG Y, et al. Lateral trajectory tracking control method of intelligent vehicle based on extension goodness evaluation [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(10): 1189-1196.
- [19] LIU W, CHEN G, KNOLL A. Matrix inequalities based robust model predictive control for vehicle considering model uncertainties, external disturbances, and time-varying delay [J]. Front. Neurorobot, 2021, 14: 1-16.
- [20] ZHU S, HE Y, REN J. On robust controllers for active steering systems of articulated heavy vehicles (Article) [J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2019, 26(1): 1-30.
- [21] TAGHAVIFAR H, HU C, QIN Y, et al. EKF-neural network observer based type-2 fuzzy control of autonomous vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(8): 4788-4800.
- [22] LUO G, LI H, MA B, et al. Design and experimental research of observer-based adaptive type-2 fuzzy steering control for automated vehicles with prescribed performance [J]. Mechatronics, 2022, 81(C): 1-16.
- [23] 王建波,刘毅力,梁继国.基于差分进化粒子群算法的PSS参数优化与整定[J].计算机与数字工程,2018,46(1):53-58.
WANG J B, LIU Y L, LIANG J G. PSS parameter optimization and tuning based on differential evolution particle swarm optimization [J]. Computer and Digital Engineering, 2018, 46(1): 53-58.
- [24] 李道飞,查安飞,徐彪,等.半挂汽车列车紧急避撞轨迹跟踪控制算法[J].汽车工程,2022,44(7):1098-1106.
LI D F, CHA A F, XU B, et al. Emergency collision avoidance trajectory tracking control algorithm of semi-trailer train [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(7): 1098-1106.
- [25] YANG W, CAI Y, SUN X, et al. Trajectory tracking control of autonomous vehicles based on Lagrangian neural network dynamics model [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering, 2023, 15(8): 1-16.
- [26] SARABAKHA A, FU C, KAYACAN E, et al. Type-2 fuzzy logic controllers made even simpler: from design to deployment for UAVs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 5069-5077.
- [27] WANG F, ZHANG H, LI K, et al. A hybrid particle swarm optimization algorithm using adaptive learning strategy [J]. Information Sciences, 2018, 436: 162-177.

(上接第76页)

- [24] ZENG Y, SONG C, XU Z. Wave height estimation based on the phase time series of millimeter-wave radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5.
- [25] 张瑞.基于毫米波雷达的减速带特征估计方法[D].秦皇岛:燕山大学,2022.
ZHANG Rui. Estimation method of speed bump features based on millimeter-wave radar [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [26] 冯志华,刘永斌,张健.用在频谱细化中Chirp-Z变换的特性分析[J].信号处理,2006(5):741-745.
FENG Zhihua, LIU Yongbin, ZHANG Jian. Characteristic analysis of Chirp-Z transform in spectral zooming [J]. Signal Processing, 2006(5): 741-745.
- [27] SONG Y, ZENG Z. Broadband signal spectrum monitoring method based on chirp-Z transform [C]. 2015 International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation. Atlantis Press, 2015: 283-286.
- [28] ZHANG R, HUANG Y, YANG J, et al. Improving range precision of LFM CW radar based on frequency domain up-sampling-interpolating method [C]. Proceedings. 2005 International Conference on Communications, Circuits and Systems, 2005. IEEE, 2005, 2.
- [29] JI S J, CHOI W J, KIM K Y, et al. A study on the precise distance measurement for radar level transmitter of FMCW type using correlation analysis method [C]. The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and The 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems. IEEE, 2012: 2009-2014.