DOI: 10.3901/JME.2020.24.156

基于铰接角度稳定域与可行域的半挂汽车列车 直线倒车控制研究*

夏光^{1,2} 赵名卓^{1,2} 唐希雯³ 魏振亚¹ 陈无畏¹

- (1. 合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009;
2. 合肥工业大学汽车工程技术研究院 合肥 230009;
3. 国防科技大学电子对抗学院 合肥 230037)

摘要: 针对半挂汽车列车在倒车行驶时的不稳定开环工况造成的跟随期望直线倒车困难问题, 提出基于铰接角度稳定域与可行域的半挂汽车列车直线倒车控制策略; 在倒车过程中分析铰接角度、半挂车位姿角和轴线偏移距等参数的相互耦合关系以及上述参数对半挂汽车列车倒车稳定性与可行性的影响; 确定半挂汽车列车随期望直线倒车时的铰接角度稳定性区域与可行性区域, 并基于半挂汽车列车铰接角度稳定性区域与可行性区域制定半挂汽车列车直线倒车控制策略; 采用变论域模糊控制进行直线倒车路径跟踪控制, 并基于 ADAMS 和 Matlab/Simulink 进行联合仿真以及实车试验。仿真与试验结果表明, 所提出的基于铰接角度稳定域与可行域的半挂汽车列车直线倒车控制策略可使半挂汽车列车精准实现对于期望直线倒车的路径跟踪, 有效地避免在倒车过程中出现折叠、碰撞等问题、从而大大降低直线倒车操作难度。

关键词: 半挂汽车列车; 铰接角度稳定域; 铰接角度可行域; 半挂车位姿角; 轴线偏移距; 直线倒车

中图分类号: U270

Research on Linear Reversing Control of Semi-trailer Based on Hitch Angle Stable Domain and Feasible Domain

XIA Guang^{1,2} ZHAO Mingzhuo^{1,2} TANG Xiwen³ WEI Zhenya¹ CHEN Wuwei¹

- (1. School of Automotive and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;
2. Institute of Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;
3. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037)

Abstract: A linear reversing control strategy based on the stable and feasible domains of a hitch angle is proposed to address the linear reversing problem with expectation caused by unstable open-loop conditions of semi-trailer trains during reverse driving. In the reversing process, the coupling relationship among the location parameters, such as hitch angle, semi-trailer posture angle, and axis offset, as well as the influence of these parameters on the reversing stability and feasibility of semi-trailer trains, are analysed. The stable and feasible domains of the hitch angle when the semi-trailer is reversed in an expected straight line is determined, and the semi-trailer linear reversing control strategy is established on the basis of the hitch angle stable and feasible domains. The tracking control of the linear reversing path is adopted by the variable universe fuzzy control, and the co-simulation based on ADAMS and Matlab/Simulink and the subsequent actual vehicle experiment are conducted. Simulation and experimental results show that the proposed linear reversing control strategy of the semi-trailer based on the hitch angle stable and feasible domains can accurately realize the linear reverse-path tracking of the semi-trailer train, effectively avoiding the problems of jack-knife and trailer swing during the reversing process. Thus, the difficulty of the straight reverse operation is substantially reduced.

Key words: semi-trailer train; hitch angle stable domain; hitch angle feasible domain; posture angle; axis offset; linear reversing

* 国家自然科学基金(51875151)和安徽省重点研发计划(1804a09020017)资助项目。20200315 收到初稿, 20200902 收到修改稿

0 前言

半挂汽车列车在近几十年的路面运输过程中, 因为其载重量大、运输效率高及成本低、节油性好等优势已经成为物流运输行业的主力军。据统计, 英国 76% 以上的运输量, 芬兰、美国 60% 以上的运输量均是由半挂汽车列车的公路运输完成; 同时, 随着中国物流运输行业的空前发展, 半挂汽车列车在中国的保有量也飞速增加。2014 年, 半挂汽车列车产销达 28.67 万辆和 27.89 万辆, 而 2016 年, 半挂汽车列车产销已经达到了 39.87 万辆和 38.79 万辆。显然, 半挂汽车列车在物流货物运输过程中已经起到举足轻重的作用^[1]。

由牵引车、半挂车组成的汽车列车在直线行驶时的动力学状况是开环稳定的, 但由于其本身的非线性、不稳定性、不确定性等因素, 汽车列车在倒车行驶时的动力学状态是开环不稳定的, 容易产生折叠、碰撞等非稳定状态现象^[2]。同时, 汽车列车因为存在车身较长导致驾驶盲区较大, 在倒车时汽车列车的操纵可视性更差, 甚至于驾驶员很难判断汽车列车的瞬时铰接角度。实际生活中, 驾驶员驾驶汽车列车在一定铰接角度条件下直线倒入货仓是非常常见的情况。然而在上述条件下, 驾驶汽车列车完成直线倒车是极为困难的, 通常需要驾驶经验极其丰富的驾驶员才可以完成。所以, 为了降低汽车列车的直线倒车驾驶难度、提高汽车列车直线倒车效率, 有必要先解决半挂汽车列车的直线倒车控制问题, 同时也为之后研发半挂汽车列车的倒车辅助系统提供技术支持。

对于如何有效地完成半挂汽车列车直线倒车的控制, 有效地降低半挂汽车列车直线倒车的难度以及提高倒车效率, 世界各个国家的学者及研究机构都在积极地寻找解决方案。国内外研究学者对半挂汽车列车的倒车路径追踪控制进行了大量的研究。其中, SAMPEI 等^[3]建立了非离轴连接的铰接车辆的状态空间方程并进行了状态方程的精准线性化, 同时将铰接车辆的倒车轨迹分解为直线轨迹与圆弧轨迹并设计不同的控制器进行控制。TIMOTHY 等^[4]对汽车列车的机械结构限制进行分析, 提出在倒车过程中当铰接角度过大时会产生折叠现象, 使得铰接角度无法趋于 0, 从而直线倒车无法正常进行。ALTAFINI 等^[5]通过研究如何避免倒车时的折叠工况从而设计出前向和后向两种反馈控制器, 并给出了控制器切换的条件。李占江等^[6]以遗传算法、模

糊控制理论为基础, 完整阐述了直线倒车泊车问题的控制算法。ASTOLF 等^[7]利用李雅普诺夫技术, 研究了拖拉机-拖车系统直线运动渐近稳定问题。设计了沿期望路径实现渐近稳定的光滑、有界、非线性控制律, 并给出了吸引区域的显式界。国内研究学者中, 西北农林科技大学陈军等^[8]自 2005 年开始研究农用车辆的倒车技术并取得了阶段性进展, 其团队在 2005 年至 2011 年间, 设计了车辆沿行驶轨道自动行驶的一种时变线性二次型控制器, 利用设计的行驶轨道和控制器进行了实车试验; 基于反馈控制理论设计出拖拉机直线倒车控制的 PD 控制器, 并通过仿真试验及实车试验进行验证^[9]; 基于最优控制理论设计出控制铰接单轴拖车直线倒车行驶的线性二次型控制器, 并通过实车试验进行了验证, 但控制器稳定性会受车辆速度的影响^[10]; 夏文斌等^[11]在对拖拉机稳定性分析的基础上, 基于反馈控制理论设计出三输入单输出的角度跟踪反馈控制器, 并搭建双轴拖拉机半挂车机组实车试验平台以验证该倒车控制系统的可行性。

纵观国内外的研究, 主要针对不同的控制算法对直线倒车路径进行控制, 也取得了一定的成果。但在控制过程中对于铰接角度的变化对整个倒车过程产生的量化影响研究甚少。而铰接角度所带来的变化正是半挂汽车列车相较于其他类型车辆有所不同的核心。以铰接角度为分析变量来研究倒车路径的跟踪控制规律以及路径跟踪过程中铰接角度的稳定域和可行域问题是本文研究的核心。

本文在分析半挂汽车列车倒车过程中各定位参数的耦合关系及其对半挂汽车列车倒车稳定性与可行性影响的基础上, 确定了半挂汽车列车直线倒车时的铰接角度稳定性区域与可行性区域, 并基于半挂汽车列车铰接角度稳定性区域与可行性区域提出了一种半挂汽车列车直线倒车的控制方法, 采用变论域模糊控制进行直线倒车路径跟踪控制。最后基于 ADAMS 与 Matlab/Simulink 进行联合仿真与实车试验验证。

1 半挂汽车列车模型建立与直线倒车问题分析

1.1 半挂汽车列车的理论模型建立

半挂汽车列车一般可分为牵引车与半挂车两部分, 通常牵引车底盘上装备有鞍式牵引座, 牵引座上装备有牵引销, 牵引车与半挂车通过牵引销铰接连接。行驶时, 鞍式牵引座承担半挂车的前部载荷,

态变量和反馈,对上述半挂汽车列车理论模型中进行精确线性化,将变量 v 作为一个新的输入变量^[16]

$$\xi = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_2 \\ \tan \theta_2 \\ \frac{\tan \theta_1}{L_2 \cos^3 \theta_2} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$v = \frac{d\xi_3}{dx_2} \quad (9)$$

在定义变量 ξ 之后,可以观察到

$$\frac{d\xi_1}{dx_2} = \frac{dy_2}{dx_2} = \tan \theta_2 = \xi_2 \quad (10)$$

$$\frac{d\xi_2}{dx_2} = \frac{d \tan \theta_2}{dx_2} = \frac{\tan \theta_1}{L_2 \cos^3 \theta_2} = \xi_3 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\xi_3}{dx_2} &= \frac{d}{dx_2} \frac{\tan \theta_1}{L_2 \cos^3 \theta_2} = \\ &= \frac{3 \sin^2 \theta_1 \tan \theta_2 - \tan \theta_1}{L_2 \cos^2 \theta_1 \cos^4 \theta_2} + \\ &= \frac{L_1}{\frac{d}{2} + L_1 \cot \delta_1} = v \end{aligned} \quad (12)$$

通过式(12)进行代数变换后可得

$$\delta_1 = \arctan \frac{L_1}{\frac{L_1 \cos \theta_1 (3 \sin^2 \theta_1 \tan \theta_2 - \tan \theta_1)}{L_2} + L_1 L_2 \cos^3 \theta_1 \cos^4 \theta_2 v} - \frac{d}{2} \quad (13)$$

经过以上数学变换之后,可以得到如下的精确线性系统

$$\frac{d\xi}{dx_2} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \xi + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} v \quad (14)$$

在此精确线性化的基础之上,可以设计一个状态反馈控制器,此控制器的反馈为

$$v = (f_1 \quad f_2 \quad f_3) \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{pmatrix} = f_1 y_2 + f_2 \tan \theta_2 + f_3 \frac{\tan \theta_1}{L_2 \cos^3 \theta_2} \quad (15)$$

由式(13)中可知,在半挂汽车列车倒车过程中,为了实现期望直线倒车控制,牵引车外侧前轮转角的控制与轴线偏移距 y_2 、铰接角度 θ_1 、半挂车位姿角 θ_2 这三个变量息息相关。

1.3 直线倒车问题分析与解决

1.3.1 直线倒车问题分析

半挂汽车列车直线倒车:即牵引车与半挂车在初始工况下都与期望直线呈一定距离及角度,通过在倒车时控制转向盘转角,在最终工况使得半挂车及牵引车中轴线与期望直线轨迹完全重合(图 2)。

(a) 初始工况示意图

(b) 结束工况示意图

图 2 直线倒车示意图

由图 1 所示的运动学关系可知,半挂汽车列车实现直线倒车是一个相当具有挑战性的任务。

一方面,驾驶员只能调整牵引车的转向盘转角这一个参数,再经过牵引车鞍座的支撑和推动,期望将铰接角度、半挂车位姿角和轴线偏移距调零。并且上述三个参数变化过程中还都存在有一定程度的耦合关系,实现半挂汽车列车整个直线倒车过程中充斥着大量的非线性关系与影响。

另一方面,在调整车身姿态以实现直线倒车的过程中,由于铰接角度的大范围变化,有可能会引发折叠等不稳定工况,铰接角度绝对值不断增大,从而使得半挂汽车列车进入危险工况,继而已经无法进行直线倒车操作。

上述两个方面仅仅是理论上最简单、最具代表性的两个方面。实际上驾驶员在执行直线倒车操作时,往往会遇到更多、更复杂的问题。例如对操作工况的判断失误导致将半挂汽车列车倒车至更加难以直线倒车的工况、由于大范围视野盲区的存在导致驾驶员不能很好地掌握到期望直线的具体位置等问题。

综上,可以得知,半挂汽车列车直线倒车的路径跟踪具有很高程度的现实意义。一方面可以降低驾驶员的倒车驾驶技能要求,提升半挂汽车列车倒车的效率,加快物流运输的节奏和运载能力;另一

方面,可以减少倒车时危险工况的发生,避免驾驶员在意图操作直线倒车过程中使得半挂汽车列车进入不稳定的工况。

1.3.2 直线倒车问题解决

在半挂汽车列车倒车过程中,铰接角度始终是不不断变化的,因此需要驾驶员根据铰接角度的大小实时地对转向盘转角进行一定的调整并同时控制铰接角度保持在一定的范围,原因有两个方面:①防止半挂汽车列车进入不稳定工况,即此时的铰接角度可能会使汽车列车的倒车过程变得较为危险;②考虑到直线倒车的可行性,防止铰接角度绝对值过大使得车身姿态难以回正。

通过上述分析,半挂汽车列车铰接角度的范围是实现直线倒车的关键因素,下面将对半挂汽车列车可直线倒车的稳定性以及可行性与铰接角度的关系进行分析,确定合理的铰接角度范围。

2 半挂汽车列车倒车铰接角度稳定域

2.1 铰接角度稳定域的定义

半挂汽车列车的倒车行驶运动控制,因其系统具有非常强烈的非线性而使控制系统的设计变得异常的困难。在倒车行驶过程中,由于控制系统难以形成闭环,极易发生折叠和侧翻等失稳现象。同时,折叠现象在半挂汽车列车后向运动过程中,会出现一种特别的表现形式:在铰接角度超过某一范围阈值时,此时无论怎样改变转向盘转角,半挂汽车列车铰接角度 θ_1 都无法趋于0。继而铰接角度绝对值愈发增大,引发半挂汽车列车进入不稳定的折叠工况。此铰接角度的范围阈值称之为铰接角度稳定域 θ_w 。

此范围代表着铰接角度的极限值,超过此范围的铰接角度只能有增大的趋势,不仅会使得铰接角度在倒车过程中失控,无法调节。同时后续的倒车操作必将使得半挂汽车列车进入危险的、不稳定的工况。

2.2 铰接角度稳定域的确定

在国内外学者的研究中,已经有很多学者注意到上述现象。这种因系统内在的物理局限性产生的现象在1981年被Fossum and Lewis称之为Jackknife效应,并加以数学证明^[4]。之后,亦有很多文献涉及到上述观点,如文献[17-19]。但并未涉及到铰接角度稳定域具体值的确定,通常认为 $|\theta|$ 超过 90° 时,即会发生折叠效应。但同时,一些实际研究表明铰接角度稳定域 θ_w 必须在 $\pm 90^\circ$ 之间^[20-22]。

大多数情况下的理论研究都表明 θ_w 明显低于传统的 $\pm 90^\circ$ 的标准,但是对于如何量化 θ_w 的取值,只有存在于经验论的方法(如文献[23-24]分别确立其 θ_w 为 $\pm 30^\circ$ 及 $\pm 45^\circ$),对于明确量化铰接角度稳定域的研究甚少,对于此类角度的确定没有明确的解决方案。

2.3 铰接角度稳定域的数学描述

为了尝试解答这一问题,需要对铰接角度稳定域进行准确的数学定义,以确定 θ_w 具体的公式表达。

回顾一下铰接角度稳定域的物理定义:当铰接角度超过此范围时,无论转向盘角度如何变化,都无法使得铰接角度再次趋于0。

结论1:若 $0 < \theta_1 < \theta_w^+$,则当且仅当 $\delta_1 = \delta_{1\max}$ 时, θ_1 减小的趋势最大,即此时 $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_{1\max} > 0$;若 $\theta_1 < 0$,则有且仅当 $\delta_1 = \delta_{1\min}$ 时, θ_1 增大的趋势最大,即此时 $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_{1\min} < 0$ 。

从以上论述中可以发现:当 $\theta_1 = \theta_w^+$ 时,当且仅当 $\delta_1 = \delta_{1\max}$ 时, θ_1 保持不变,即 $\dot{\theta}_1 = 0$ 。同时,任意一个在铰接角度稳定域内的 θ_1 ,都有一个对应的 δ_1 ,使得 $\dot{\theta}_1 = 0$,即此时刻的铰接角度不发生改变。

结论2:若想求得 θ_w^+ ,即为解出当 $\dot{\theta}_1 = 0$ 时,对应 $\delta_1 = \delta_{1\max}$ 工况的铰接角度 θ_1 的值。

2.4 求解铰接角度稳定域

根据上述推论,定义稳定解 θ_s 表示倒车过程中 $\dot{\theta}_1 = 0$ 的任何瞬时的铰接角度^[25]。

结论3: θ_s 一定是以 δ_1 为其中一个自变量的函数。因为任意一个铰接角度,都有对应的 $\dot{\theta}_1 = 0$ 的瞬时时刻。

为了求解倒车过程中任意时刻的 θ_s ,在定义一个 Δx 的基础上^[26],在一个时间步长中,关于 θ_1 的变化值 $\Delta\theta_1$ (图3)

$$\Delta\theta_1 = 2 \arcsin \left(\Delta x \frac{\sin \theta_1}{2L_2} \right) - \frac{\Delta x}{R_v} \quad (16)$$

$$R_v = \frac{L_1}{\tan \delta_1} \quad (17)$$

当 $\dot{\theta}_1 = 0$,即有在一个时间步长 Δx 内, $\Delta\theta = 0$ 。

根据式(16)、(17)可以得出

$$\theta_s = -\arcsin \left[\frac{2L_2}{\Delta x} \sin \left(\frac{\Delta x}{2 \frac{L_1}{\tan \delta_1}} \right) \right] \quad (18)$$

图3 牵引车单位位移 Δx 示意图

在得出式(18)后, 可以验证 θ_s 是关于 δ_l 的函数。此时将 δ_l 的正负极限值代入, 即可得出

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_w^- = -\arcsin \left[\frac{2L_2}{\Delta x} \sin \left(\frac{\Delta x}{2 \operatorname{sgn}(\delta_l) \sqrt{\frac{L_1}{\tan(\delta_{l\min})^2}}} \right) \right] \\ \theta_w^+ = -\arcsin \left[\frac{2L_2}{\Delta x} \sin \left(\frac{\Delta x}{2 \operatorname{sgn}(\delta_l) \sqrt{\frac{L_1}{\tan(\delta_{l\max})^2}}} \right) \right] \end{array} \right. \quad (19)$$

综上, 即可确定出铰接角度稳定域 $\theta_w \in (\theta_w^-, \theta_w^+)$ 。

3 半挂汽车列车倒车铰接角度可行域

3.1 影响铰接角度可行域的原因及指标

为了考虑基于可行性的倒车铰接角度可行域的划分, 首先需要分析在直线倒车过程中各个参数对可行性带来的影响以及它们之间是否有相互关系, 以找到影响直线倒车可行性的主要原因以及相应指标。

由式(14)~(15)可知, 半挂汽车列车在直线倒车时的姿态可由 θ_1 、 θ_2 以及 y_2 表征。其相互之间的关系由式(1)~(3)给出。同时, 由于直线倒车过程中车速几近恒定, 所以 $dt = k \times dz_2$, 所以可以看出: ① 当 $\theta_1 > 0$, $\dot{\theta}_2 < 0$, 即有 θ_2 逐渐减小; ② 当 $\theta_2 > 0$, $\dot{y}_2 < 0$, 即有 y_2 逐渐减小。

可以发现, 这三者之间的影响是层层递进的。具体的关系如图4所示。那么, 有两种特殊工况就值得考究: ① θ_1 无限逼近 θ_w^+ 的左邻域, 且此时 $\theta_2 < 0$ 、 $y_2 > 0$; ② θ_1 无限逼近 θ_w^- 的右邻域, 且此

时 $\theta_2 > 0$ 、 $y_2 < 0$ 。

图4 参数耦合关系示意图

以工况①为例, 想要实现对 θ_2 和 y_2 的调零, 需要使得 $\theta_1 < 0$, 然而 θ_1 此时虽然仍旧在铰接角度稳定域内, 可以实现减小的趋势。

分析: 当 $\theta_1 = \theta_w^+$ 时, 由结论2可知, $\dot{\theta}_1 = 0$, 又由于 θ_1 的变化是连续的, 所以在工况①中, 当 θ_1 无限逼近 θ_w^+ 的左邻域时, 虽然此时 $\delta_l = \delta_{l\max}$, 但是初始时依旧 $\dot{\theta}_1 \approx 0$, 同时根据式(1)可以发现: 此时 δ_l 最大, $d(\theta_1 + \theta_2)$ 为最小负值, 而 $\dot{\theta}_1 \approx 0$, 则即有 $\dot{\theta}_2$ 为最小负值。然而本就 $\theta_2 < 0$, 此时依旧具有最大的减小趋势, 即会使得 θ_2 更加远离目标值, 同时这种在 θ_2 产生的误差也会使得 y_2 愈发增大。半挂汽车列车直线倒车过程中的姿态愈发脱离期望值, 直线倒车更加难以进行。

结论4: 在半挂汽车列车直线倒车过程中, 如果 θ_1 过大, 会造成: 即使给予最正确的 δ_l 输入, θ_1 也难以及时变化, 从而可能会造成 θ_2 和 y_2 越来越偏离期望值。

3.2 参数累积偏差与解决方案

为了解决上述结论中的问题, 首先注意到偏差产生的原因: 即因为 θ_1 过于接近 θ_w 的极限值, 从而导致调整不及时产生了大量的累积偏差。这些累积偏差又可能会使得 θ_2 与期望值之间产生更大的偏差, 从而在调整 θ_2 的过程中又产生了对于 θ_2 的累积偏差, 继而造成 y_2 愈发偏离期望值。

因此, 归根结底在于 θ_1 不能过于接近 θ_w^+ 和 θ_w^- , 至于究竟在什么范围内是可行的, 本文给出了如下的解决方案。

为了减少各个参数的累积误差以及减少对后续参数带来的偏差, 本文考虑从中间参数 θ_2 处截断误差, 不仅仅只考虑 θ_1 (仅仅只考虑 θ_1 会使得后续两个参数产生更多的累积偏差), 而对中间参数 θ_2 进行把控。一方面能够使得 θ_1 的累积偏差不能始终影响到

θ_2 的值; 另一方面能够控制 θ_2 产生的累积偏差, 从而减少对 y_2 产生的偏差影响。

3.3 铰接角度可行域的求解

考虑到 θ_2 的物理意义还可以表述为: v_{p_2} 在 X 轴和 Y 轴上分量的夹角。而 v_{p_2} 在 X 轴上的分量可以表述为半挂汽车列车沿着期望直线行驶的能力; v_{p_2} 在 Y 轴上的分量可以表述为改变轴线偏移距的能力。

当 v_{p_2Y} 与 y_2 方向相同且 $|v_{p_2X}| < |v_{p_2Y}|$, 即意味着此瞬时的 θ_2 会使得 $|y_2|$ 不断增大并且对于期望直线的跟踪趋势越来越小, 这显然不是期望的直线倒车行驶轨迹。

于是, 在对 θ_2 的把控中, 即以 v_{p_2Y} 与 y_2 方向相同且 $|v_{p_2X}| = |v_{p_2Y}|$ 为临界条件。

但同时因为半挂汽车列车直线倒车时的初始工况千变万化, 为了排除其他因素的干扰, 本文在确定铰接角度可行域过程中首先对初始工况进行定义: 半挂汽车列车处于铰接角度、半挂车位姿角和轴线偏移距都为 0 时处于初始工况。

在初始工况中下, 使 $\delta_1 = \delta_{1min}$ 后开始倒车, 直至到达上述临界条件, 此时的 θ_1 即为可行域的上界 θ_k^+ ; 同理, 使 $\delta_1 = \delta_{1max}$ 后开始倒车, 直至到达上述临界条件, 此时的 θ_1 即为可行域的下界 θ_k^- 。

综上, 即可确定出铰接角度可行域 $\theta_k \in (\theta_k^-, \theta_k^+)$ 。

4 基于铰接角度稳定域与可行域的半挂汽车列车直线倒车控制策略

在确定半挂汽车列车倒车的可行域以及稳定域之后, 下一步则是需要明确两者之间的相对关系。两者不存在绝对意义上的包容以及交叉关系, 因为这两个参数各自作为一个整体来说并不直接影响另一个参数的变化。两者之间的相互关系可以用图 5 表示。

图5 铰接角度稳定域与可行域相互关系

在图 5 中, 实线之间的范围为铰接角度稳定域 θ_w , 虚线之间的范围为铰接角度可行域 θ_k 。

当 θ_1 不在 θ_w 内, 半挂汽车列车会产生折叠; 当 θ_1 不在 θ_k 内, 半挂汽车列车定位参数 θ_1 、 θ_2 和 y_2 会出现更多的累积误差。所以为了避免上述情况的产生, 在确定好倒车时铰接角度的稳定域和可行域之后, 需要取上述两者的交集, 即图 5 中阴影区域表示的区间: $(\{\theta_w^-, \theta_k^-\}_{max}, \{\theta_w^+, \theta_k^+\}_{min})$, 本文称之为倒车可控范围 θ_d 。

综上, 当 θ_1 在倒车可控范围内时, 整个倒车的控制执行过程是稳定且可行的。而当 θ_1 在倒车可控范围外时, 倒车的控制执行过程要么不稳定, 要么不可行, 抑或二者皆不能满足。因此, 如图 6 所示, 基于半挂汽车列车的铰接角度稳定域与可行域, 进行其直线倒车的控制。

图6 半挂汽车列车直线倒车控制策略

在实现直线倒车的控制算法中, 本文使用了变论域模糊控制算法。因为在单一的模糊控制算法中, 其论域是不会改变的, 而半挂汽车列车的整个直线倒车过程中各个参数变量都是复杂多变的。所以为了提高对于期望直线的跟随精度, 即对半挂汽车列车直线倒车过程中的不同情况采用变论域控制, 从而提高对直线倒车轨迹跟踪的控制精度, 提高直线倒车的效率。

5 基于倒车可控范围的半挂汽车列车直线倒车变论域模糊控制

5.1 基于模糊推理的变论域模糊控制

自适应变论域模糊控制的思想最早是在文献[27]中被提出来, 同时在文献[28]中也提出了新的

几种类型的自适应变论域模糊控制器, 自此关于自适应变论域模糊控制的理论基础被建立起来, 以下主要介绍自适应变论域模糊控制的基本结构。其中, 关于不确定性推理等概念的详细内容可以参考文献[27]。

输入变量 x_i 的论域设为 $x_i = [-E, E]$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 输出变量 y 的论域设为 $Y_i = [-U, U]$; x_i 上的模糊划分为 $A = \{A_{ij}\} (1 < j < m)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), y 上的模糊划分为 $B = \{B_{ij}\} (1 < j < n)$, 视 A 、 B 语言变量, 可形成模糊推理规则库 R

$$\begin{cases} \text{rule1: if } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{21} \text{ and } \dots \text{ then } y \text{ is } B_1 \\ \text{rule2: if } x_1 \text{ is } A_{12} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{22} \text{ and } \dots \text{ then } y \text{ is } B_2 \\ \dots\dots\dots \\ \text{rule}n: \text{ if } x_1 \text{ is } A_{1m} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{2m} \text{ and } \dots \text{ then } y \text{ is } B_m \end{cases}$$

A_{ij} 的峰点设为 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$), B_i 的峰点设为 y_i , 基于上述规则的模糊控制器, 表现为一个 n 元分片插值函数, 即

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n A_{ij}(x_i) y_j$$

所谓变论域是指随着变量 x_{ij} 与 y 的变化, 论域 X_i 与 Y 可以自行调整

$$X_i(x_i) = [-\alpha_i(x_i)E_i, \alpha_i(x_i)E_i]$$

$$Y(y) = [-\beta(y)U, \beta(y)U]$$

式中, 论域的伸缩因子设为 $\alpha_i(x_i) (i=1, 2, \dots, n)$ 与 $\beta(y)$ 。

相对于变化后的论域, 初始论域为原来的论域 X_i 与 Y , 图 7 所示为论域的变化情况。

图 7 变论域示意图

在变论域模糊控制伸缩因子的选择上, 目前来

说是没有统一的形式, 一般来说则选取文献[27-28]中所述的函数模型, 在进行算法设计时必须要选择合适的函数模型及模型参数。但同时伸缩因子的变化规律是一种由经验总结出来的形式, 这些规律很难用简单函数模型所描述, 却更适合于用语言的形式去描述, 而适于语言描述正是模糊推理的一大特点。于是本节利用模糊推理的特点去描述变论域中的伸缩因子, 其有效避免了传统变论域模糊控制中固化的伸缩因子函数模型参数的选择。

5.2 伸缩因子模糊控制器设计

基于变论域模糊控制的工作原理即是不利用传统的函数模型确定伸缩因子, 而是设计一个伸缩因子模糊控制器用以实现对于输入输出论域的调节。在变论域模糊控制中, 一般来说都是以系统误差 e 以及误差变化率 ec 作为系统的输入, 然后通过论域调节的模糊规则, 在运行中不断检测 e 和 ec , 从而实现对论域的在线调整。通过总结论域的变化规律以及实际经验, 可以建立其伸缩因子的模糊控制规则表, 分别得到双输入三输出控制器的伸缩因子 α_1 、 α_2 和 β 以调整输入输出论域。

设伸缩因子模糊控制器的输入 e 和 ec 的模糊划分如图 8 所示。其中, 输入论域伸缩因子的模糊划分为 B、M、S、Z, 其对应的峰值点为 1.00、0.75、0.50、0.25, 隶属度函数为三角函数; 输出论域的模糊划分为 PB、PM、PS、PE, 其对应的峰值点为 0.500 0、0.666 7、0.833 3、1.000 0, 隶属度函数为三角函数。根据以上所述的论域调整规律, 可以得到伸缩因子的模糊控制规则表, 如表 1~3 所示。

图 8 模糊划分示意图

表 1 伸缩因子 α_1 模糊规则表

误差 变化率 ec	系统误差 e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	B	B	M	S	M	B	B
NM	B	M	S	S	S	M	B
NS	M	M	S	E	E	M	M
ZE	M	S	E	E	E	S	M
PS	M	M	S	E	S	M	M
PM	B	M	S	S	S	M	B
PB	B	B	M	S	M	B	B

表2 伸缩因子 α_2 模糊规则表

误差变化率 ec	系统误差 e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	B	B	M	M	M	B	B
NM	B	B	S	S	S	B	B
NS	M	M	S	E	E	M	M
ZE	M	S	E	E	E	S	M
PS	M	M	S	E	S	M	M
PM	B	M	S	S	S	B	B
PB	B	B	M	M	M	B	B

表3 伸缩因子 β 模糊规则表

误差变化率 ec	系统误差 e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NM	PB	PB	PM	PS	PM	PB	PB
NS	PB	PM	PS	PS	PS	PM	PB
ZE	PM	PM	PS	PE	PE	PM	PM
PS	PM	PS	PE	PE	PE	PS	PM
PM	PM	PM	PS	PE	PS	PM	PM
PB	PB	PM	PS	PS	PS	PM	PB

在设计完伸缩因子模糊控制器后,控制器会以 e 和 ec 作为系统输入,根据模糊控制规则实现对输入输出论域的自适应调节,再输出伸缩因子 α_1 、 α_2 和 β 作为直线倒车模糊控制器的输入,直线倒车模糊控制器再输入执行机构执行。其主要流程如图9所示^[30]。

图9 直线倒车模糊控制系统流程图

5.3 直线倒车变论域模糊控制器设计

如式(14)所示,整个半挂汽车列车系统是一个多变量系统,并且状态变量之间耦合非常严重,为了将多变量输入 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 转变为变论域模糊控制中的 e 和 ec ,可以利用融合函数将坐标变换后的三个状态变量转化成综合误差以及综合误差变化率,

记为 E 和 EC

$$E \triangleq (k_1 \quad k_2 \quad k_3)(\xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_3)^T \quad (20)$$

$$EC \triangleq (k_1 \quad k_2 \quad k_3)(\dot{\xi}_1 \quad \dot{\xi}_2 \quad \dot{\xi}_3)^T \quad (21)$$

式中, k_1, k_2, k_3 视为综合系数。

同时利用 LQR(Linear quadratic regulator)理论来为式(14)设计一个状态反馈矩阵,为此,首先给定一个最优控制泛函指标

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)) dt \quad (22)$$

式中, $\mathbf{Q} = \text{diag}(50, 100, 200, 0, 0, 0)$, $\mathbf{R} = 1$ 。即可求解 Riccati 方程

$$-\mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} - \mathbf{Q} = 0 \quad (23)$$

由式(14)可知, $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, 即有

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 178.7707 & 59.7948 & 10 \\ 59.7948 & 96.8955 & 17.8771 \\ 10 & 17.8771 & 5.9795 \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{K}^T = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = (10 \quad 17.8771 \quad 5.9795) \quad (25)$$

计算可得 $\|\mathbf{K}\|_2 = 21.3388$, 则有综合系数

$$(k_1 \quad k_2 \quad k_3) = \mathbf{K}^T / \|\mathbf{K}\|_2 = (0.4686 \quad 0.8378 \quad 0.2802) \quad (26)$$

取 E 和 EC 的初始论域为 $X = [-1, 1]$, $Y = [-1, 1]$, 同时输出论域 $Z = [-1, 1]$ 。则有基于模糊推理的变论域直线倒车模糊控制如表4所示^[29]。

表4 基于模糊推理的变论域模糊控制规则表

综合误差变化率 EC	综合误差 E						
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
B_1	-0.833	-0.833	-0.667	-0.500	-0.333	-0.167	0
B_2	-0.833	-0.667	-0.500	-0.333	-0.167	0	0.167
B_3	-0.667	-0.500	-0.333	-0.167	0	0.167	0.333
B_4	-0.500	-0.333	-0.167	0	0.167	0.333	0.500
B_5	-0.333	-0.167	0	0.167	0.333	0.500	0.667
B_6	-0.167	0	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833
B_7	0	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833	0.833

其中, 模糊集采用的隶属函数为三角函数, 等距划分论域。 $A_1, A_2, \dots, A_7$ 和 $B_1, B_2, \dots, B_7$ 分别是论域 X, Y 的模糊集, 其依次表示“负大、负中、负小、0、正小、正中、正大”。

通过上述的控制方法设计一种模糊控制器, 其

中输入变量为利用融合函数使矩阵 $(\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3)$ 降维后的综合误差和综合误差变化率，输出变量为伸缩因子 α_1 、 α_2 和 β 。构成如图 10 所示的基于铰接角度稳定域与可行域的变论域模糊 Simulink 控制器。

图 10 基于 Simulink 的变论域模糊控制器

6 整车虚拟样机模型建立

6.1 牵引车转向机构模型建立

虚拟样机的建立主要是为了对半挂汽车列车进行仿真得到其运动轨迹，因此需要建立较为精确的转向机构模型^[31]，而其余机构可作适当简化。牵引车转向机构如图 11 所示。

图 11 转向机构示意图

1.转向节 2.车轮 3.转向节臂 4.车轴 5.主销 6.地面 7.转向梯形臂

按照图 11 建立构件及其相互之间的运动副，同时选取轮胎构件后，再利用表 5 中的转向参数以及阿克曼原理对转向机构进行分析优化之后，牵引车转向机构总体上完成建模。建立的转向机构如图 12 所示。

表 5 牵引车转向参数

参数	数值/类型
最小转弯半径/m	24.013
牵引车内轮最大转角/(°)	40
牵引车外轮最大转角/(°)	33

图 12 ADAMS 转向机构图

6.2 半挂汽车列车整车模型建立

通过表 6 所示半挂汽车列车的整车参数，得到的半挂汽车列车整车 Adams 模型如图 13 所示。

表 6 半挂汽车列车整车参数

类型	参数	数值/类型
尺寸参数	汽车列车外形尺寸/mm	15 900×2 500×4 000
	牵引车外形尺寸/mm	5 470×2 490×2 910
	轴距/mm	牵引车轴距 3 150；半挂车(7 240+1 360+1 360)
	轮距/mm	牵引车前 2 045，后 1 860；半挂车 2 040
	牵引车后桥至牵引销中心的距离/mm	420
	牵引车轮胎规格/mm	11.00R20，断面宽 293，静力半径 507
	半挂车轮胎规格/mm	425/65R22.5，断面宽 422，静力半径 525
质量参数	最大总质量/t	38.15
	最大载质量/t	25.15
	整备质量/t	13(牵引车 6.5，半挂车 6.5)

图 13 整车 ADAMS 模型

7 基于ADAMS与MATALB/Simulink的联合仿真

本文基于 ADAMS 建立的整车模型和 MATLAB/Simulink 建立的基于铰接角度稳定域与可行域的变论域模糊控制器进行联合仿真, 最终形

成的联合仿真模型如图 14 所示。

根据式(19)以及第 2.7 节中的临界条件, 可以求得此半挂汽车列车倒车时铰接角度稳定域为 $(-55.36^{\circ}, +59.87^{\circ})$, 可行域为 $(-69.63^{\circ}, 70.53^{\circ})$ 。即得到其交集区间: 倒车可控范围 θ_a 为 $(-55.36^{\circ}, +59.87^{\circ})$ 。确定 θ_a 后即可进行仿真测试。

图 14 联合仿真系统

7.1 仿真工况

控制策略仿真采用四种仿真工况进行测试。

(1) 仿真工况一。选择实际中最常见的直线倒车情况, 即初始参数都有一定的偏离, 但是初始仿真工况的铰接角度处于倒车可控范围之内。初始参数: 铰接角度为 20° , 轴线偏移距为 5 m, 半挂车姿态角为 20° 。

(2) 仿真工况二。选择实际中不为常见但极为危险的工况, 即初始仿真工况的铰接角度不处于倒车可控范围之内, 铰接角度设置为 80° 。此时的半挂汽车列车后向行驶只能使得其进入更加不稳定的工况, 设置其他参数初始时刻为 0, 测试控制过程中对于铰接角度的判断, 以及在参数耦合的情况下调整铰接角度对于其他参数的后续控制效果如何。

(3) 仿真工况三。以上两种工况都是仿真车辆的主体在期望直线的左侧, 为了验证所制定的控制策略对于左侧与右侧都具有良好的控制效果。设定仿真工况三与四为半挂汽车列车车体在期望直线的右侧, 具体参数除了方向之外, 数值上与工况一、二无任何变化, 控制变量以保证比较的准确性。初始参数: 铰接角度为 -20° , 轴线偏移距为 5 m, 半挂车姿态角为 -20° 。

(4) 仿真工况四。与仿真工况二类似, 初始铰接角度为 -80° , 其余定位参数为 0。四种仿真工况

见图 15。其中, 直线代表的是期望直线的位置。

图 15 仿真工况示意图

7.2 仿真结果

如图 16~28 所示, 在设定的仿真工况一下, 将表征半挂汽车列车的各个参数与期望值进行横向对比, 同时再运用不同的算法进行纵向对比, 得到如下仿真数据。

图 16 仿真工况一铰接角度变化对比图

图 17 仿真工况一半挂车位姿角变化对比图

图 23 仿真工况三半挂车位姿角变化对比图

图 18 仿真工况一轴线偏移距变化对比图

图 24 仿真工况三轴线偏移距变化对比图

图 19 仿真工况二铰接角度变化对比图

图 25 仿真工况四铰接角度变化对比图

图 20 仿真工况二半挂车位姿角变化对比图

图 26 仿真工况四半挂车位姿角变化对比图

图 21 仿真工况二轴线偏移距变化对比图

图 27 仿真工况四轴线偏移距变化对比图

图 22 仿真工况三铰接角度变化对比图

图 28 行驶速度切换控制图

如图 16~27 所示,普通模糊控制的数据曲线显示为虚线,基于铰接角度稳定域与可行域的变论域

模糊控制的数据曲线显示为实线。

分析上述曲线可知,半挂汽车列车无论在何仿真工况的直线倒车控制中,相比于无控制时必然会在后续倒车过程中产生折叠使得无法直线倒车,采取变论域模糊控制与模糊控制下的直线倒车路径跟随效果都较好,但采取基于模糊推理的变论域模糊控制的效果更好。

相比于单一的模糊控制,可以看到采用变论域模糊控制无论是在调节时间、超调量,抑或是期望值跟随程度上来说,表现都要更加优异,实际即表现为半挂汽车列车的直线倒车精准且耗时少。

注意到仿真工况二和四的初始铰接角度是远远大于倒车可控范围的最大值的,此时在普通模糊控制下的直线倒车各个定位参数均呈现发散的趋势,说明在较为复杂的仿真工况二和四中,普通模糊控制对于直线倒车的控制已经失效。

图 28 为半挂汽车列车在出现后向与前向行驶的切换控制时呈现出的行驶速度变换图。

可以注意到控制器判定初始铰接角度不在倒车可控范围内,于是半挂汽车列车速度开始变为正值,执行前进操作以将铰接角度减小至倒车可控范围内。在 30 s 左右车辆行驶速度开始由正变为负值,同时此刻的铰接角度变化趋于平缓,说明此刻的半挂汽车列车铰接角度已经进入倒车可控范围内,车辆开始慢慢由正向行驶开始进入直线倒车。在最终的参数收敛上可以看出,变论域模糊控制在对于工况二及工况四的直线倒车控制上也具有优异的控制精度以及控制过程耗时短的优点。

8 实车试验

8.1 试验装置及环境

本次试验利用 13 m 平板式半挂汽车列车作直线倒车路径跟踪试验控制,建立了如图 29 所示的试验环境。

图 29 场地布置图

期望直线处于依据 UWB(Ultra Wideband)定位模块建立的坐标系中 $y=8\text{ m}$ 的位置。试验牵引车以 0.3 m/s 的速度进行倒车抑或是前进行驶,试验工况分为如下四种。

(1) 试验工况一。初始倒车工况为半挂汽车列车车体在期望直线的左侧且初始铰接角度属于倒车可控范围。

(2) 试验工况二。初始倒车工况为半挂汽车列车车体在期望直线的左侧且初始铰接角度不属于倒车可控范围。

(3) 试验工况三。初始倒车工况为半挂汽车列车车体在期望直线的右侧且初始铰接角度属于倒车可控范围。

(4) 试验工况四。初始倒车工况为半挂汽车列车车体在期望直线的右侧且初始铰接角度不属于倒车可控范围。

试验工况实物图见图30。

图 30 试验工况实物图

整个半挂汽车列车直线倒车控制系统包括拉线位移传感器、陀螺仪传感器、UWB 定位模块、倒车诱导提示系统、信息采集系统、主控制器总成等。图 31 描述了上述设备及系统的具体安装位置,表 6 介绍了其具体的参数及相关试验信息。

图 31 设备布置图

表 6 直线倒车控制系统介绍

设备系统	应用	备注
拉线位移传感器	测量铰接角度	通过初始标定将传感器的位移量转化为角度量
陀螺仪传感器	测量半挂车位姿角	通过陀螺仪的航向角输出功能实时输出位姿角
UWB 定位模块	测量轴线偏移距	通过在试验场地布置定位基站以确定半挂车上标签的坐标
倒车诱导提示系统	输出方向诱导	—
信息采集系统	采集传感器信号	—
主控制器总成	处理传感器信号并输出	—

8.2 试验数据及结果分析

根据所设置的四种试验倒车工况，进行半挂汽车列车直线倒车控制试验，得到四种工况下的参数对比，如图 32~44 所示。

图 32 试验工况一铰接角度变化对比图

图 33 试验工况一半挂车位姿角变化对比图

图 34 试验工况一轴线偏移距变化对比图

图 35 试验工况二铰接角度变化对比图

图 36 试验工况二半挂车位姿角变化对比图

图 37 试验工况二轴线偏移距变化对比图

图 38 试验工况三铰接角度变化对比图

图 39 试验工况三半挂车位姿角变化对比图

图 40 试验工况三轴线偏移距变化对比图

图 41 试验工况四铰接角度变化对比图

图42 试验工况四半挂车位姿角变化对比图

图43 试验工况四轴线偏移距变化对比图

图44 试验各工况半挂车横坐标变化图

从各工况的参数对比图中可以看出,当速度为 0.3 m/s 时,试验的倒车控制系统能够在无论是左转还是右转、铰接角度是否在可控范围之内的工作下,基于倒车可控范围的变论域模糊控制都能够在 180 s 之内实现半挂汽车列车倒车时各定位参数的调零。

普通的模糊控制则相形见绌,当初始铰接角度在倒车可控范围时,相关定位参数还可以在 180 s 内收敛,只是振荡地太频繁,控制的精度与鲁棒性较差;当初始铰接角度不处于倒车可控范围内时,普通的模糊控制在 180 s 内甚至都没法使得定位参数收敛,这一点在工况二与四的铰接角度变化趋势中尤为明显。即使某些参数在 180 s 内实现了收敛,其收敛趋势与期望值也相差甚远,如图 36 呈现的工况二半挂车位姿角的变化趋势。

上述的变化趋势亦与仿真结果互为验证。共同反映出此基于稳定域与可行域的变论域模糊控制能够很好地完成半挂汽车列车直线倒车的控制,对于期望直线的跟随效果突出。

从图 44 中可以看出,当初始铰接角度不处于可控范围之内时,控制器能够很好地识别此工况,从而执行牵引车的前进操作。可以看到,在倒车的 $0 \sim 40 \text{ s}$,半挂车标签的横坐标开始减小,即此刻牵引

车开始带动半挂车向行驶。同时在此时段,铰接角度快速逼近倒车可控范围,直至铰接角度重新进入倒车可控范围。半挂汽车列车重新进入倒车工况以实现后续的直线倒车控制。

综上,试验结果与仿真结果类似,验证了基于稳定域与可行域的变论域模糊控制运用在半挂汽车列车直线倒车过程中的稳定性与可行性。

9 结论

(1) 从理论层面分析了直线倒车定位参数之间的耦合关系。即牵引车带来的转向效应在经过铰接角度的传递后对半挂车的位置参数产生的对应影响。

(2) 从实际中完整实现整个直线倒车过程考虑,并将稳定性和可行性作为两个切入点,从这两个切入点分别考虑铰接角度带来的非完整约束对整个控制系统带来的限制。

(3) 基于上述两个方面确定了基于稳定性与可行性的铰接角度稳定域与可行域作为控制系统的约束,并基于稳定域与可行域提出了一种新的半挂汽车列车直线倒车控制策略。

(4) 为之后的学者提供一个新的入手点,用于在实际问题中解决半挂汽车列车按照目标轨迹倒车困难,影响倒车效率的问题,也为之后研发半挂汽车列车的倒车辅助系统提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] 李文. 半挂汽车列车运输的优越性与我国半挂汽车列车的发展对策研究[J]. 专用汽车, 1989, 1(3): 29-32.
LI Wen. Research on the advantages of semitrailer transportation and the development countermeasures of semitrailer in China[J]. Special Purpose Vehicle, 1989, 1(3): 29-32.
- [2] 郭丹丹. 半挂汽车列车倒车控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
GUO Dandan. Research on control of reversing for tractor-semitrailer combination[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [3] SAMPEI M, TAMURA T, KOBAYASHI T. Arbitrary path-tracking control of articulated vehicles using nonlinear control theory[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1995, 3(1): 125-131.
- [4] TIMOTHY V, FOSSUM G, LEWIS N. A mathematical model for trailer-truck jackknifing[J]. SIAM Review,

- 1979, 23(1): 95-99.
- [5] ALTAFINI C, SPERANZON A, WAHLBERG B. A feedback control scheme for reversing a truck and trailer vehicle[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(6): 915-922.
- [6] 李占江. 车辆自动泊车的模糊控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- LI Zhanjiang. Study on the fuzzy control of automotive automatic parking[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [7] ASTOLFI A, BOLZERN P, LOCATELLI A. Path-tracking of a tractor-trailer vehicle along rectilinear and circular paths: A Lyapunov-based approach. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(1): 154-160.
- [8] 陈军, 鸟巢谅, 武田纯一. 带单轴拖车拖拉机自动倒车行驶的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 82-85.
- CHEN Jun, TORISU R, TAKEDA J. Research on automatic reverse driving of tractor with single axle trailer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(10): 82-85.
- [9] 朱忠祥, 陈军, 鸟巢谅. 基于 PD 控制的拖拉机半挂车机组自动直线倒车系统[J]. 农业机械学报, 2006, 1(7): 98-100.
- ZHU Zhongxiang, CHEN Jun, TORISU R. Automatic backward driving system of tractor-trailer combination along rectilinear path using PD control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 1(7): 98-100.
- [10] 陈军, 韩冰, 朱忠祥, 等. 拖拉机半挂车机组自动直线倒车控制器设计与实验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 102-105.
- CHEN Jun, HAN Bing, ZHU Zhongxiang, et al. Optimal control for automatic backward driving system of tractor-trailer combination along rectilinear path[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 102-105.
- [11] 夏文斌. 带拖车拖拉机自动直线倒车系统的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- XIA Wenbin. Study on automatic backing system of tractor-trailer combination along rectilinear path[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011.
- [12] 韩厚禄. 三轴半挂车转向协调性及随动转向桥结构原理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- HAN Houlu. Research on the turning traits of three-axles semi-trailer and the structure principles of self-steering axle[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology.
- [13] SAMPEI M, FURUTA K. Robot control in the neighborhood of singular points[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 4(3): 303-309.
- [14] FERRARA A. Hybrid variable structure path tracking control of articulated vehicles[C]// Proceedings of The 2004 American Control Conference, June 30-July 2, 2004, Boston: MASP Amer Automat Control Council, 2004: 1-6.
- [15] BOLZERN P, Desantis R, LOCATELLI A. Path tracking for articulated vehicles with off-axle hitching[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1998, 6(4): 515-523.
- [16] WILFRED S. Linear equivalents of nonlinear systems[D]. Manhattan: University of British Columbia, 1987.
- [17] YONG O, DONG P. Self-tuning fuzzy controller with variable universe of discourse[J]. IEEE International Conference on Systems, 1995, 26(3): 28-32.
- [18] PARRA-LOERA, R. Expert system controller for backing-up a truck-trailer system in a constrained space[C]// Proceedings of the 37th Midwest Symposium on Circuits and Systems. Aug, 1994, Lafayette, LA, USA: IEEE, 1994: 1357-1361.
- [19] DENG W. Vehicle-trailer backing-up control system with vehicle rear wheel steering: United States, 6292094[P]. 2001-9-18.
- [20] LEE Y, DENG W, CHIN Y. Feasibility study for a vehicle-trailer backing up control[J]. SAE International, 2004, 113(6): 1095-1100.
- [21] GEVA S. A one neuron truck backer-upper[C]// International Joint Conference on Neural Networks. 7-11 June, 1992, Baltimore, USA: IEEE, 1992: 850-856.
- [22] ZOBEL D. Minimum parking maneuvers for articulated vehicles with one-axle trailers[C]// 2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. 5-8 Dec, 2006, Singapore: IEEE, 2006: 6.
- [23] PRADALIER C, USHER K. A simple and efficient control scheme to reverse a tractor-trailer system on a trajectory. IEEE Transactions on Robotics and Automation (ICRA). Roma: IEEE, 2007: 2208-2214.
- [24] CHEN Guanrong. Backing up a truck-trailer with suboptimal distance trajectories[C]// Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 8-11 Sept, 1996, New Orleans, LA, USA: IEEE, 1996: 1439-1445.

- [25] JIMMY C, AMBARISH G. The critical hitch angle for jackknife avoidance during slow backing up of vehicle-trailer systems[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(7): 992-1015
- [26] SHEPARD D. Trailer backing up device and method: United States, 7715953[P]. 2010-5-11.
- [27] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. *中国科学*, 1999, 1(1): 32-42.
LI Hongxing. Variable universe adaptive fuzzy controller[J]. *Science in China*, 1999, 1(1): 32-42.
- [28] 郭海刚, 李洪兴, 胡凯. 一类变论域自适应模糊控制[J]. *模糊系统与数学*, 2011, 25(6): 32-42.
GUO Haigang, LI Hongxing, HU Kai. Variable universe adaptive fuzzy controller[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2011, 25(6): 32-42.
- [29] 李良峰. 变论域模糊控制算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
LI Liangfeng. Research on variable universe fuzzy control algorithm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [30] 夏光, 杜克, 谢海, 等. 基于侧倾分级的叉车横向稳定性变论域模糊控制[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(12): 157-167.
- XIA Guang, DU Ke, XIE Hai, et al. Variable universe fuzzy control of forklift lateral stability based on roll classification[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(12): 157-167.
- [31] 杨秀建, 康南, 李西涛. 半挂汽车列车横向失稳的非线性动力学机制[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(8): 79-89.
YANG Xiujian, KANG Nan, LI Xitao. Nonlinear dynamic mechanism of tractor semitrailer lateral instability[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(8): 79-89.

作者简介: 夏光(通信作者), 男, 1983 年生, 博士, 硕士研究生导师。主要研究方向为车辆主动安全与控制。

E-mail: xiaguang008@163.com

赵名卓, 男, 1997 年生。主要研究方向为车辆主动安全与控制。

E-mail: 957849169@qq.com

魏振亚, 男, 1988 年生, 博士研究生。主要研究方向为车辆动力学与控制。

E-mail: 18655186161@163.com

陈无畏, 男, 1951 年生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学与控制。

E-mail: cwwmail@hf.ah.cn