

基于协同转向的铰接车辆轨迹跟随控制研究^{*}

李前明¹ 杨蔡进^{1†} 李艳² 赵博¹ 张德华¹

(1.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,成都 610031)

(2.成都西南交通大学设计研究院有限公司,成都 610031)

摘要 针对铰接车辆后轴主动转向实现跟踪首轴轨迹的问题,本文提出一种基于多轴协同转向的补偿模糊 PID 控制方案.首先,根据各车轴具有同一转动中心的假设,利用扩展阿克曼转向原理确定了车轴的前馈控制转角;其次,依据首轴中心行驶轨迹,计算后轴的跟随偏差及变化率,并利用模糊 PID 控制理论,确定后轴的补偿控制转角,提高车辆的轨迹跟随控制性能;最后,在典型道路工况上,通过设置不同速度、道路附着系数及控制方案检验补偿模糊 PID 控制方案的轨迹跟随性能及鲁棒性.结果表明:在相同速度及道路附着系数下,相比于扩展阿克曼转向前馈控制及模糊 PID 控制方案,本文设计的补偿模糊 PID 控制进一步降低了轨迹跟随时各车体的横向偏差,并减小了车辆之间的横向铰接力;与 PID 控制相比,在不同速度及道路附着系数下,验证了补偿模糊 PID 控制具有一定的自适应性能.

关键词 铰接车辆, 扩展阿克曼转向, 模糊 PID 控制, 多轴协同转向

中图分类号:U482.2

文献标志码:A

Research on Trajectory Following Control of Articulated Vehicle Based on Cooperative Active Steering^{*}

Li Qianming¹ Yang Caijin^{1†} Li Yan² Zhao Bo¹ Zhang Dehua¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(2. Chengdu Southwest Jiaotong University Design and Research Institute Co. LTD., Chengdu 610031, China)

Abstract A compensation fuzzy PID control scheme (CFPID) based on multi-axles cooperative steering is proposed to solve the rear axles center following the driving track of the head axle in this paper. Firstly, according to the assumption that each axle has the same rotation center, the feedforward control angle of the axles is determined by using the extended Ackerman steering principle. Secondly, the following deviation and change rate of the rear axles are calculated according to the center trajectory of the head axle. And fuzzy PID control is used to determine the compensation control angle of the rear axles, so the vehicle trajectory following control performance is improved. Finally, the trajectory following performance and robustness of CFPID are verified by simulation with different speeds, road adhesion coefficients and control schemes under typical road condition. The simulation results show that the tracking control performance has improved with lest lateral deviation and lateral hinge force compared with the extended Ackerman steering feedforward control (EASF) and fuzzy PID control (FPID) under the same speed and road adhesion coefficient, which indicate the proposed CFPID reduced the transverse deviation of each vehicle body and the transverse hinge relay between vehicles. Compared with PID control, the adaptive performance of compensating fuzzy PID control is verified under different speed and road adhesion coefficient.

Key words Articulated vehicles, Extended Ackerman steering, Fuzzy PID control, Multi-axis Co-operative steering

引言

与普通公交车相比,铰接车辆通过多车体相连接进行扩容,可实现中等运量;与传统城市轨道交通相比,其造成本低廉,运行灵活.多铰接车辆可对公交车、地铁和有轨电车等为主体的城市公共交通运输体系形成有益补充.但由于车身较长,多铰接车辆需要实施多轴协同转向和轨迹跟随的主动控制,以适应在城市复杂路网中的行驶.

孙娜^[1]设计了一种基于采样切换时刻的主动转向控制器,保证了车辆过弯时受向心力干扰下稳定的轨迹跟随.徐晓美等^[2]提出了一种挂车车轮主动转向控制方法,减小半挂车的路径跟随偏差.Du等^[3]针对非线性跟踪控制问题,提出了一种具有强鲁棒性的整体滑模控制策略.Qiu等^[4]研究了一种基于最优预瞄的控制器,实现了智能电动汽车的路径跟踪控制.Zou等^[5]采用综合控制策略,实现了分布式驱动电动汽车的路径跟踪与横向稳定性运动.Chen等^[6]设计了二阶滑模和非线性扰动观测器,实现了四轮转向电动汽车的路径跟踪与控制.值得注意的是,现有研究主要围绕四轮或单铰接车辆,而鲜有关注多铰接车辆的主动转向控制及轨迹跟随问题.Wagner等^[7]提出了一种基于模型的控制策略,用于多铰接客车的轨迹跟踪控制.Zhang等^[8]针对 n 节编组全轮驱动/转向的多铰接式车辆的跟随控制问题,设计了自适应主动转向控制器和差分控制器,实现车辆自适应跟踪控制.严永俊等^[9]则设计了一种后退时域MPC控制器,并应用于智轨列车的轨迹跟踪.Wagner等^[10]基于扩展阿克曼转向原理,提出了一种基于运动学的后轴控制点跟随首轴的前馈控制策略.Peng等^[11]为了解决轨迹跟踪控制问题,提出了一种全轴转向补偿控制.Peng等^[12]研究了一种预瞄主动转向控制方法用于 n 节编组的虚拟轨道列车路径跟踪控制.

通常,车辆轨迹跟随控制与车体架构密切相关.不同车体结构,将采用不同的转向控制及轨迹跟随策略.本文研究一种结构简单、可扩展的铰接车辆,并针对该车辆轨迹跟随控制问题,提出一种基于扩展阿克曼转向原理和模糊PID控制理论的多轴协同转向控制方法.本文所提出的控制方法具

有计算量小、运算速度快,且不依赖于具体模型等优点.本文研究将为多铰接车辆在城市公共交通运输中的应用提供理论支撑,因此具有一定理论意义和工程价值.

1 铰接式车辆动力学建模

图1中铰接车辆采用了动力集中式驱动和全轮转向模式,首车为两轴牵引车,且前轴为驱动轴;后车均采用单轴拖车.车辆结构如图2所示,假设 $x_o y$ 是全局坐标系,坐标系 $x_i o_i y_i$ 分别表示固结在第 i 节车体质心处的车辆坐标系, a_1 和 b_1 分别表示牵引车质心 o_1 到前后轴的距离, d_j 表示第 j 节车体质心 o_j 到相应的后铰接点的距离,其中 $j=1$ 和 2 . c_k 和 b_k 表示拖车质心 o_k 到前铰接点及后轴的距离,其中 $k=2$ 和 3 .各车轴转角分别为 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 和 δ_4 ,相邻车体夹角分别为 $\Delta\psi_1$ 和 $\Delta\psi_2$, G_1 和 G_2 表示车间铰接点.车辆参数值如表1所示.

表1 铰接车辆参数
Table 1 Articulated vehicle parameters

Parameter	Mark	Value
Tractor Sprung mass/kg	m_1	9000
The middle trailer Sprung mass/kg	m_2	4700
The last trailer Sprung mass/kg	m_3	4700
Distance from tractor front axle to the vehicle mass center/m	a_1	1.8
Distance from tractor rear axle to the vehicle mass center/m	b_1	3.4
Distance from the middle trailer rear axle to the vehicle mass center/m	b_2	3.5
Distance from the last trailer rear axle to the vehicle mass center/m	b_3	3.5
Distance from the middle trailer mass center to the first centroid of hitch/m	c_2	3.95
Distance from the last trailer mass center to the second centroid of hitch/m	c_3	3.95
Distance from the middle trailer mass center to the first centroid of hitch/m	d_1	5.65
Distance from the last trailer mass center to the second centroid of hitch/m	d_2	5.65

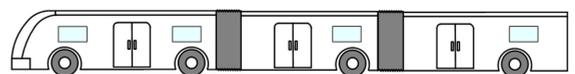


图1 铰接车辆示意图

Fig.1 Schematic of the articulated vehicle

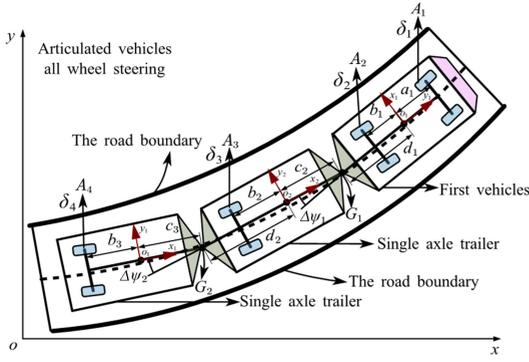


图 2 铰接车辆结构图

Fig.2 Structure diagram of articulated vehicle

利用表 1 中的车辆参数,基于 TruckSim 软件建立上述车辆的动力学模型,其中首车设置为 2A Tour Bus 车辆模型,后车设置为相应的单轴拖车模型.此外,采用球铰接装置模型来模拟车间铰接作用.上述建模过程如图 3 所示.

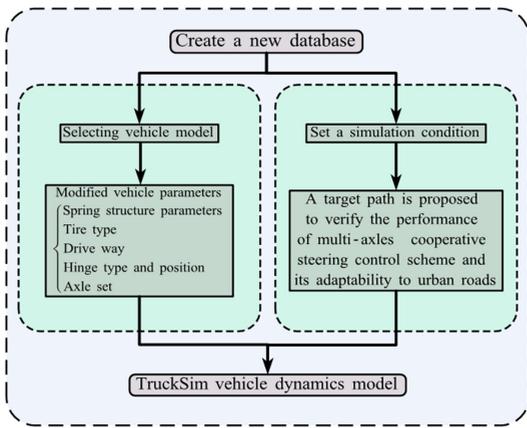


图 3 铰接车辆动力学建模流程

Fig.3 Flow chart of articulated vehicle dynamics modeling

2 多轴协同转向控制

通常铰接车辆车身较长,为适应城市复杂路网,通过多轴协同转向控制,减小行驶过程中的扫掠面积.本节针对图 1 所示四轴铰接车辆系统,提出了一种后轴 A_2 、 A_3 和 A_4 跟随前轴 A_1 行驶轨迹的多轴协同转向控制模型.首先,考虑各车轴中心在同一圆周曲线上,并基于扩展阿克曼转向原理确定后轴转角,实现一种后轴中心沿某圆形曲线运动逼近前轴行驶轨迹的前馈控制.其次,参照 A_1 轴的行驶轨迹,计算后轴中心的轨迹跟随偏差,再利用模糊 PID 控制理论确定各车轴的补偿转角.最后,基于各后轴转向的前馈及补偿控制,得到各车

轴协同转向的车轮转角.

2.1 基于扩展阿克曼转向的前馈车轮转角计算

首车由驾驶员直接进行操控, A_1 轴转角 δ_1 已知.Wagner 等^[10]提出了一种基于同一个转向中心的前馈控制方案,利用阿克曼转向几何原理,可确定首车的转动中心 M ,如图 4 所示. A_1 轴中心与转动中心 M 的距离为 R_1 ,假设车轴 A_1 、 A_3 和 A_4 的中心在以 M 为圆心,半径为 R_1 的动圆上,于是有:

$$R_1 = R_3 = R_4 \quad (1)$$

其中, R_3 和 R_4 分别表示车轴 A_3 和 A_4 中心到转动中心 M 的距离.该控制方案中 A_2 轴不转向导致其跟随偏差较大.本文在文献[10]的基础上进一步考虑到车轴转角变化的连续性,假定当前时刻 A_2 轴转角近似地等于上一时刻转角,因此确定了 A_2 轴的转角 δ_2 .

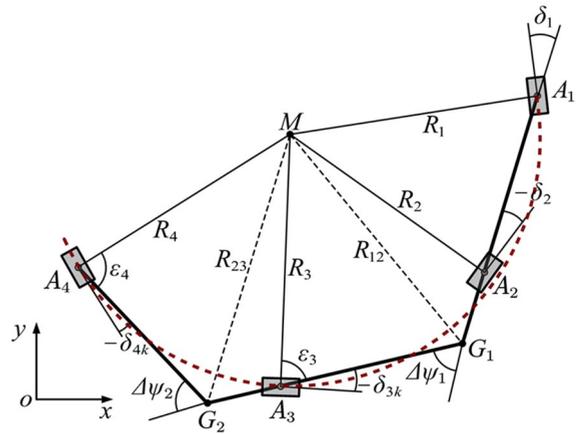


图 4 扩展阿克曼转向示意图

Fig.4 Schematic diagram of extended Ackerman steering

考虑图 4 中 $\triangle A_1MA_2$ 的正弦定理条件,可计算得到 A_1 轴的转向半径 R_1 为

$$R_1 = \frac{L_1 \cos \delta_2}{\sin(\delta_1 - \delta_2)} \quad (2)$$

式中, $L_1 = a_1 + b_1$ 表示首车轴距.类似地,可计算得到 A_2 轴的转向半径 R_2 为

$$R_2 = \frac{L_1 \cos \delta_1}{\sin(\delta_1 + \delta_2)} \quad (3)$$

进一步利用关于 $\angle MA_1A_2$ 的余弦定理,可计算转向中心 M 到铰接点 G_1 的距离 R_{12} 为

$$R_{12} = \sqrt{R_1^2 + (a_1 + d_1)^2 - 2R_1(a_1 + d_1)\sin \delta_1} \quad (4)$$

其次,考虑 $\triangle A_3G_1M$ 中几何关系,可计算得到 A_3 轴的转向角为

$$\delta_{3k} = \frac{\pi}{2} - \epsilon_3 \quad (5)$$

式中,内角 ϵ_3 可表示为

$$\epsilon_3 = \arccos\left(\frac{R_2^2 + L_2^2 - R_{12}^2}{2R_2L_2}\right) \quad (6)$$

其中,轴距 $L_2 = a_2 + b_2$.同理,考虑 $\triangle G_2A_3M$ 中几何关系,可计算转向中心 M 到铰接点 G_2 的距离 R_{23} 为

$$R_{23} = \sqrt{R_2^2 + (d_2 - b_2)^2 - 2R_2(d_2 - b_2)\sin\delta_{3k}} \quad (7)$$

最后,根据 $\triangle A_4G_2M$ 中几何关系,计算得到 A_4 轴转向角为

$$\delta_{4k} = \frac{\pi}{2} - \epsilon_4 \quad (8)$$

其中,内角 ϵ_4 可表示为

$$\epsilon_4 = \arccos\left(\frac{R_2^2 + L_3^2 - R_{23}^2}{2R_2L_3}\right) \quad (9)$$

其中,尾车轴距 $L_3 = b_3 + c_3$.

由运动学分析可知,当车辆后轴根据式(5)和式(8)中转角进行转向控制时,可使 A_3 和 A_4 轴中心沿着式(1)定义的圆周曲线不断地逼近首轴 A_1 的行驶轨迹,转角的正负对应着车轴的左右转向,可由右手定则判断.注意到上述计算过程假定正转角 δ_1 ,而当转角 δ_1 为负时,后轴转角可修正为

$$\begin{cases} \delta_{3a} = -\text{sign}(\delta_1)\delta_{3k} \\ \delta_{4a} = -\text{sign}(\delta_1)\delta_{4k} \end{cases} \quad (10)$$

后轴根据式(10)进行转向,实现了一种计算量小、运算速度快的多轴协同转向和轨迹跟随的无模型前馈控制.值得注意的是,上述多轴转向控制较为符合工程实际,特别地,当车辆进入稳态圆转向行驶时,车轴的转向半径近似地满足式(1)的关系.但是,上述转向控制不能根据车辆与目标轨迹之间的跟随偏差进行反馈,控制性能有待进一步提高.因此,下节将在本节转角前馈控制基础上,提出一种转角补偿控制策略.

2.2 基于模糊 PID 的车轮转角计算

(1) 参考轨迹

车辆 A_1 轴在已有的驾驶员模型作用下,沿道路工况行驶,选取 A_1 轴中心点的行驶轨迹为参考轨迹,对后轴 A_2 、 A_3 和 A_4 的运动进行补偿控制.

目前,已有多种不同的车辆定位技术及方案,

其中多传感器融合定位技术结合全球导航卫星系统和惯性导航系统,通过全球导航卫星系统获取高精度定位来改善惯性导航系统带来的累计定位误差^[13].而且,惯性导航系统可以解决全球导航卫星系统特殊环境易受影响的问题^[14].再与地图匹配技术相结合,就能实现铰接车辆各车轴中心的实时和精确定位^[15].

因此本文仿真过程中,可以把参考轨迹离散为点云,存储到内存中,获取参考轨迹.考虑到工程中定位信息采集、传输及处理等,本文参考轨迹的采样时间设置为 25 ms.

(2) 车轴中心的跟随偏差模型

在车辆行驶过程中,根据 A_2 、 A_3 和 A_4 轴的中心点到 A_1 轴中心点的距离及各轴的行驶速度,利用 Simulink 中的可变传输延迟模块延时获得 A_2 、 A_3 和 A_4 轴的目标跟随点坐标 $p_n(x_n(t), y_n(t))$ ($n = 2, 3, 4$) 为^[16]

$$\begin{cases} x_n(t) = x(t - \Delta t_{dn}(t)) \\ y_n(t) = y(t - \Delta t_{dn}(t)) \end{cases} \quad (11)$$

上式中的时滞 $\Delta t_{dn}(t)$,通过下式可以得到

$$\int_{t-\Delta t_{dn}(t)}^t \frac{1}{\Delta t_n(\tau)} d\tau = 1 \quad (12)$$

如图 5 所示,在铰接车辆轨迹跟随控制过程中, A_2 、 A_3 和 A_4 轴中心跟踪各自的目标跟随点 $p_n(x_n(t), y_n(t))$ ($n = 2, 3, 4$). $p_{n0}(x_{n0}(t), y_{n0}(t))$ ($n = 2, 3, 4$) 为 A_2 、 A_3 和 A_4 轴中心坐标.跟随偏差定义为后轴的中心点与对应目标跟踪点之间的距离.跟随偏差及变化率分别为

$$e(t) = \sqrt{(x_n(t) - x_{n0}(t))^2 + (y_n(t) - y_{n0}(t))^2} \quad (13)$$

$$\dot{e}(t) = \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

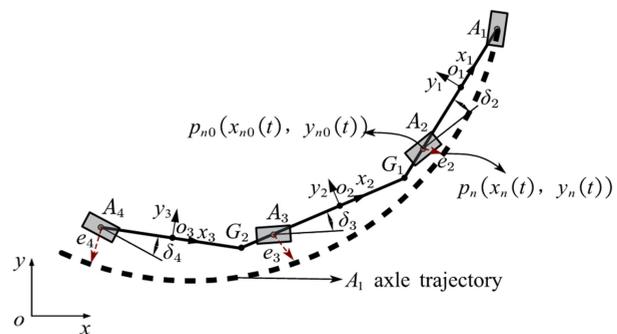


图5 铰接车辆轨迹跟随示意图

Fig.5 Schematic diagram of articulated vehicle trajectory following

(3) 模糊 PID 主动转向控制

PID 控制器制造成本低,且控制效果稳定,因此在工业中普遍应用.本文各轴的车轮转角是根据跟随偏差的大小进行 PID 控制,具体表示为

$$\delta(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (15)$$

式中, k_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数.

但是,传统 PID 控制参数是固定值,不能根据轨迹跟随工况进行调节,为了改善 PID 控制的自适应性能,本文设计了一种模糊控制,可以实时调节 PID 控制的三个参数,提高控制器自适应性能.

在铰接车辆行驶过程中,模糊 PID 控制器控制 A_2 、 A_3 和 A_4 轴的车轮转向,达到减小横向偏差的目的.模糊控制器的设计主要分为模糊化、知识库、推理决策及解模糊化过程^[16],如图 6 所示.

本文设计的模糊控制器以 A_2 、 A_3 和 A_4 轴目标跟随点的跟随偏差及变化率作为输入量,输出量设置为模糊系数 u .模糊子集的划分及数量决定了主动转向控制器的控制精度及计算量,个数越多,计算量越大,精度越高.考虑到计算速度,将 A_2 、 A_3 和 A_4 轴的跟随偏差模糊集设置为 {NB, NM, NS, Zero, PS, PM, PB}, 其论域为 $[-50, 50]$; 将 A_2 、 A_3 和 A_4 轴的跟随偏差变化率模糊集设置为 {NB, NS, Zero, PS, PB}, 其论域为 $[-40, 40]$; 模糊控制器的模糊系数 u 模糊集为 {NB, NM, NS, Zero, PS, PM, PB}, 其论域为 $[-48, 48]$.本文设计的双输入单输出模糊控制器的隶属度函数以及联合控制表面,如图 7 所示.其模糊控制规则见表 2.

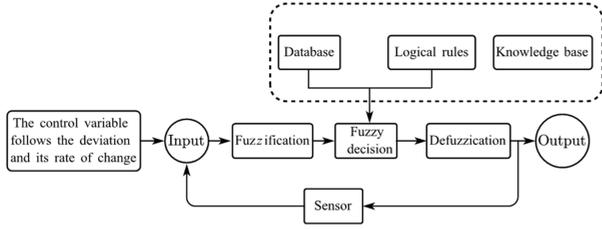
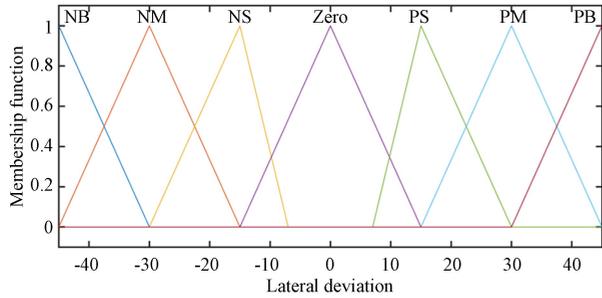
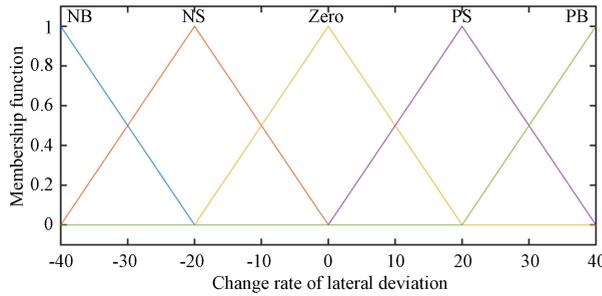


图 6 模糊控制流程图
Fig.6 Flow chart of fuzzy control



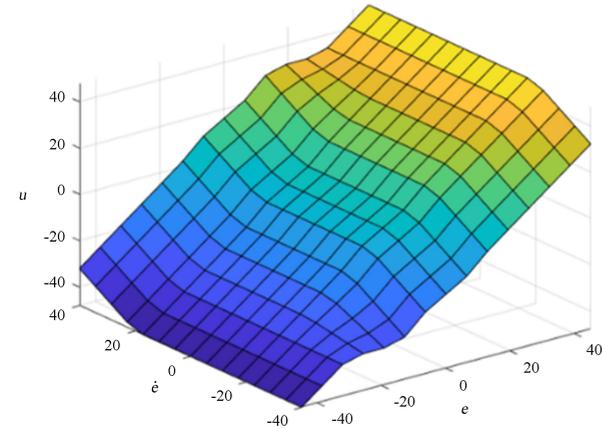
(a) 横向偏差隶属度函数

(a) Membership function of lateral deviation



(b) 横向偏差变化率隶属度函数

(b) Membership function of the change rate of lateral deviation



(c) 联合控制表面

(c) Combined control surfaces

图 7 模糊控制隶属度函数

Fig.7 Fuzzy control membership function

表 2 模糊控制规则表

Table 2 Fuzzy control rules list

Fuzzy coefficient u	Following deviation						
	NB	NM	NS	Zero	PS	PM	PB
Following deviation	NB	NB	NM	PS	Zero	PS	PM
change rate	NS	NB	NM	NS	Zero	PS	PM
	Zero	NB	NM	NS	Zero	PS	PM
	PS	NB	NM	NS	Zero	PS	PM
	PB	NM	NS	Zero	NS	NM	PB

本文设计的模糊 PID 控制器方案的控制过程如下:当铰接车辆的 A_2 、 A_3 和 A_4 轴中心点偏离 A_1 轴的行驶轨迹时,首先通过实时检测 A_2 、 A_3 和 A_4 轴的跟随偏差及其变化率;其次把检测偏差及变化率输入模糊控制器,根据模糊控制规则计算得到输出模糊系数 u ;然后,实时调节上述的 PID 控制的三个参数,提高控制器的鲁棒性;最后输出

A_2 、 A_3 和 A_4 轴车轮转向角 δ_{2m} 、 δ_{3m} 和 δ_{4m} 。

2.3 基于补偿模糊 PID 的车轮转角计算

车辆行驶过程中,虽然上述模糊 PID 控制能够实现轨迹跟随,但是在转弯行驶过程中各轴还存在一定的跟随偏差,且进出弯时车辆间的干扰加剧。本节设计了一种补偿模糊 PID 控制(Compensating Fuzzy PID Control,CFPID),该控制方案先使用扩展阿克曼转向进行前馈控制(Extended Ackerman Steering Feedforward Control,EASF),再利用模糊 PID 控制(Fuzzy PID Control,FPID)进行转角补偿控制,通过联合调节进一步减小了 A_2 、 A_3 和 A_4 轴轨迹跟随偏差以及减弱车辆之间横向干扰。补偿模糊 PID 控制流程如图 8 所示。

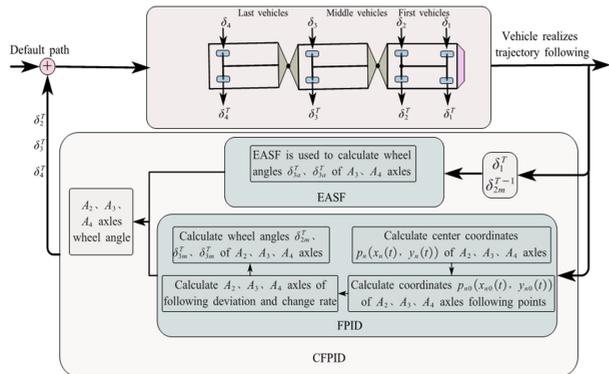


图 8 补偿模糊 PID 控制流程图

Fig.8 Flow chart of compensating fuzzy PID control

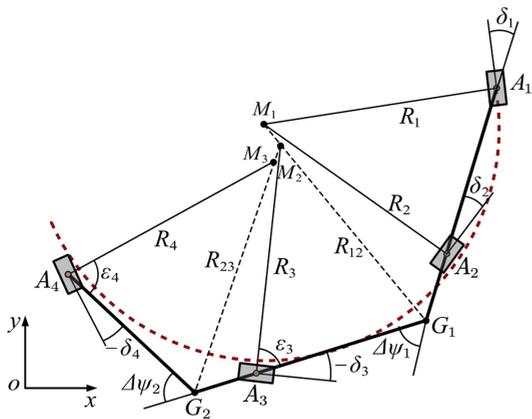


图 9 补偿模糊 PID:各轴转向示意图

Fig.9 Compensating fuzzy PID : Schematic diagram of steering of each axles

补偿模糊 PID 控制先利用上述扩展阿克曼前馈转向控制,计算出 A_3 和 A_4 轴车轮转向角大小 δ_{3a} 和 δ_{4a} ;再使用模糊 PID 控制进行车轮转角补偿控制,计算出 A_2 、 A_3 和 A_4 轴补偿转角 δ_{2m} 、 δ_{3m} 和 δ_{4m} ,

通过上述联合控制得到 A_2 、 A_3 和 A_4 轴车轮转角:

$$\begin{cases} \delta_2 = \delta_{2m} \\ \delta_3 = \delta_{3a} + \delta_{3m} \\ \delta_4 = \delta_{4a} + \delta_{4m} \end{cases} \quad (16)$$

上述扩展阿克曼转向进行前馈控制是基于同一个转向中心的假设,经过模糊 PID 控制补偿各轴车轮转角以后,各轴的转向中心就不交于同一点,而且各轴的转向半径也不相等,在补偿模糊 PID 主动转向控制器的控制下,各轴车轮转向如图 9 所示。

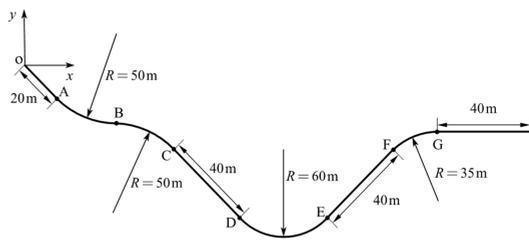
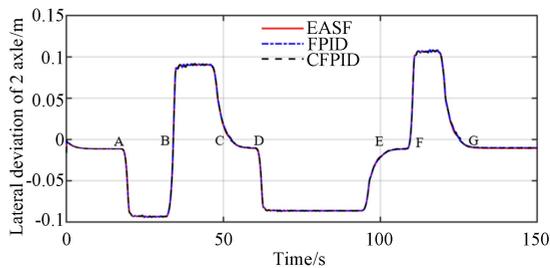


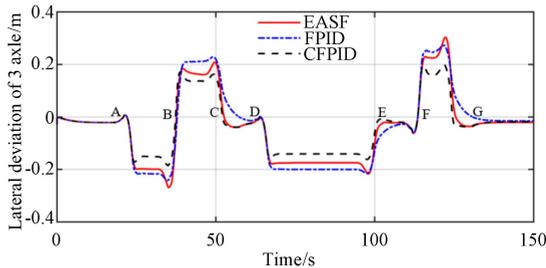
图 10 目标路径

Fig.10 The target path



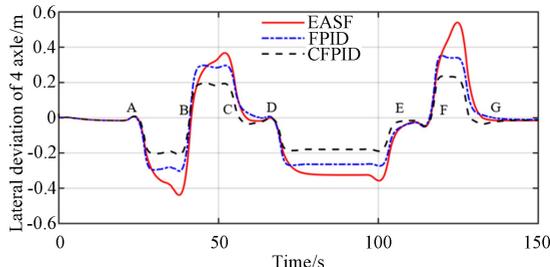
(a) 第 2 轴的横向偏差

(a) The lateral deviation of axle 2



(b) 第 3 轴的横向偏差

(b) The lateral deviation of axle 3



(c) 第 4 轴的横向偏差

(c) The lateral deviation of axle 4

图 11 第 2、3 和 4 轴的横向偏差

Fig.11 Lateral deviation of axles 2,3 and 4

3 仿真验证

3.1 仿真实验

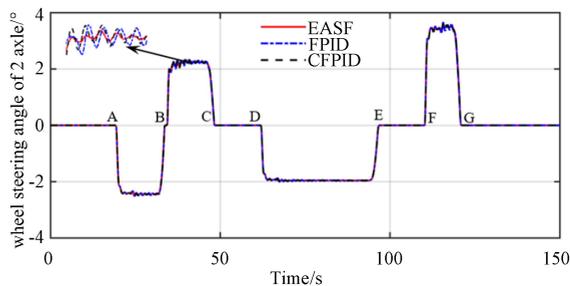
本文采用上述车辆动力学软件建立了车辆动力学模型,然后与在 MATLAB/Simulink 中搭建的多轴协同转向控制器进行联合仿真.本文的目标路径由 4 条直线段和 4 条圆弧线段组成,如图 10 所示.车辆仿真过程中依次经过一条 20m 的直道路 OA,两条半径 50m 的反向圆弧道路 AB 和 BC,一条 40m 的直道路 CD,一条半径 60m 的圆弧道路 DE,一条 40m 的直道路 EF,一条半径 35m 的圆弧道路 FG,一条 40m 的直道路.该道路基本可以反映城市道路环境:直道、大小曲率弯道、直线曲线过渡段及不同曲线过渡段,可以检验本文设计的主动转向控制的轨迹跟随性能.

3.2 仿真结果分析

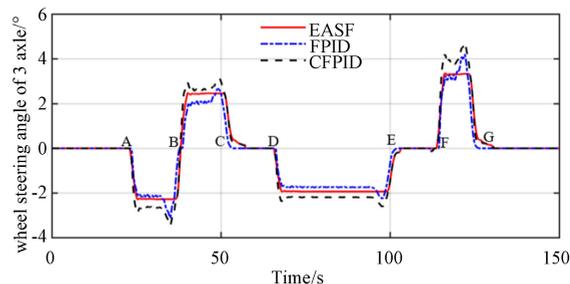
由于铰接车辆的车身过长,如果在转向行驶的时候速度过大易导致侧滑以及侧翻,因此车辆速度设置在 20 km/h 范围内,干燥的沥青道路附着系数为 $\mu=0.85$,湿润的沥青道路附着系数为 $\mu=0.60$ ^[17].

本次仿真车辆速度选为 $v=10\text{km/h}$.道路为干燥的沥青道路,设置路面附着系数 $\mu=0.85$.本文为了检验补偿模糊 PID 控制的控制性能,将补偿模糊 PID 控制的仿真结果分别与扩展阿克曼转向反馈控制及模糊 PID 控制的仿真结果进行对比,如图 11—图 12 所示.

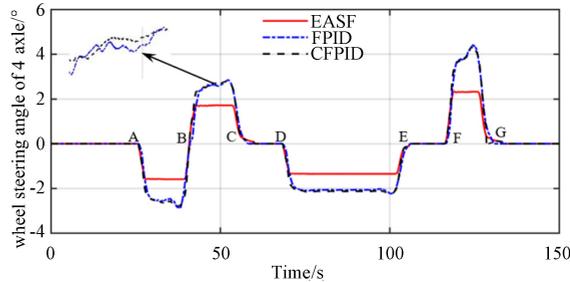
由上述仿真结果的对比可知,扩展阿克曼转向反馈控制、模糊 PID 控制及补偿模糊 PID 控制都能够提高铰接车辆的轨迹跟随性能及降低车间铰接横向力.与其他两种控制方案相比,补偿模糊 PID 控制可以进一步改善铰接车辆的轨迹跟随效果,使得 A_2 、 A_3 和 A_4 轴的中心点与目标路径最小横向距离(横向偏差)及车间横向铰接力更小.铰接车辆在补偿模糊 PID 控制的作用下,运行在半径 $R=35\text{m}$ 的最小半径曲线上,使得 A_2 、 A_3 和 A_4 轴的最大横向偏差分别减小到 0.109m、0.198m、0.235m 以内,如图 11 所示.车辆在曲线道路时,各轴在补偿模糊 PID 控制的作用下,车轮转角较大,转向稳定性适中,如图 12 所示.进出曲线道路行驶



(a) 第 2 轴车轮转角
(a) Wheel Angle of axle 2



(b) 第 3 轴车轮转角
(b) Wheel Angle of axle 3



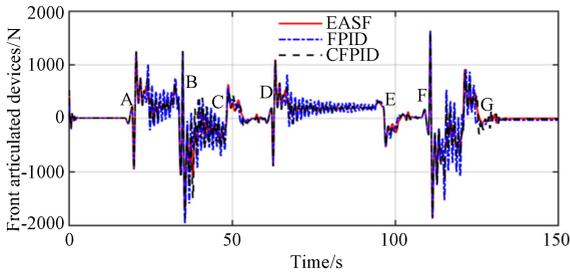
(c) 第 4 轴车轮转角
(c) Wheel Angle of axle 4

图 12 第 2、3 和 4 轴的车轮转角

Fig.12 Wheel angle of axles 2,3 and 4

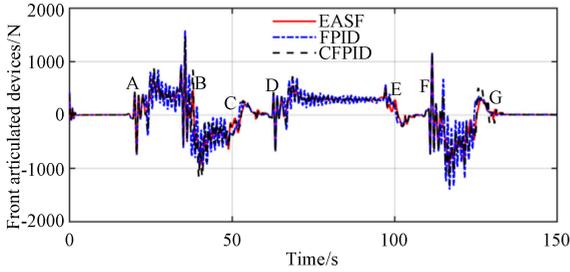
时,车辆之间的铰接横向力会发生激增,在补偿模糊 PID 控制方案的控制下最大横向力减小到 1867N 及 1452N 以内,在稳定行驶中也减小了铰接横向力,如图 13 所示.

由图 11、图 12、图 13 可知,在不同控制作用下,铰接车辆的最大横向偏差都发生在 A_4 轴上,其中扩展阿克曼转向反馈控制及模糊 PID 控制这两种方案,虽然能够实现轨迹跟随,但是也存在轨迹跟随的横向偏差较大、车轮转向过小及转向不稳或铰接横向力偏大的问题.车辆运行在半径 $R=35\text{m}$ 的最小半径曲线上,扩展阿克曼转向反馈控制方案虽然能将前后铰接装置所受的最大横向力控制在较小范围以内,但由于在该控制方案的作用下, A_2 、 A_3 和 A_4 轴的转角过小,导致铰接车辆的最大横向偏差达到了 0.541m,其是补偿模糊 PID 控制下的最大横向偏



(a) 前铰接装置横向铰接力

(a) Transverse hinge of the front articulated device



(b) 后铰接装置横向铰接力

(b) Transverse hinge of the rear articulated device

图 13 前后铰接装置的横向铰接力

Fig.13 Transverse hinge of front and rear articulated devices

表 3 PID 与补偿模糊 PID:不同参数下的仿真结果

Table 3 PID and compensating fuzzy PID: simulation results under different parameters

Controler	$v/(km/h)$	μ	E_{max}/m	F_{maxHf}/N	F_{maxrHy}/N
PID	10	0.85	0.446	1945	1506
PID	15	0.85	0.427	3951	2890
PID	20	0.85	0.402	6948	4210
PID	10	0.60	0.449	4010	1869
PID	15	0.60	0.430	5412	2709
PID	20	0.60	0.406	7235	4401
CFPID	10	0.85	0.235	1867	1452
CFPID	15	0.85	0.223	3727	2717
CFPID	20	0.85	0.196	6723	3985
CFPID	10	0.60	0.234	1961	1453
CFPID	15	0.60	0.222	3878	2698
CFPID	20	0.60	0.195	6950	3967

差的 2.3 倍左右.在模糊 PID 控制方案作用下,当铰接车辆运行在半径 $R=35\text{ m}$ 的最小半径曲线上时,在该控制方案的作用下, A_3 和 A_4 轴的转角过小,且在曲线上行驶的时候车辆转向不稳定,导致铰接车辆的最大横向偏差都达到了 0.353 m ,其是补偿模糊 PID 控制下的最大横向偏差的 1.5 倍左右,且该控制方案改善铰接横向力的效果最差.而基于扩展阿克曼转向反馈控制和模糊 PID 控制联

合调节的补偿模糊 PID 控制方案,不仅可以进一步改善 A_2 、 A_3 和 A_4 轴的轨迹跟随的横向偏差,提高铰接车辆的跟随性能,还能够减小车间铰接受到的横向铰接力,有利于改善车间的横向干扰.

表 3 中, E_{max} 是仿真过程中车辆后轴轨迹跟随的最大横向偏差, F_{maxHf} 是前铰接装置的最大铰接横向力, F_{maxrHy} 是后铰接装置的最大铰接横向力.

最后,通过设置不同的速度及道路附着系数,与 PID 控制方案相比,进一步检验补偿模糊 PID 控制的鲁棒性.由表 3 的仿真结果可知,与 PID 控制方案相比,在相同的速度和道路附着系数条件下,补偿模糊 PID 控制的最大横向偏差是 PID 控制的 0.5 倍左右,且该控制方案的前后铰接装置的铰接横向力也较小.且在不同道路附着条件下,本文设计的补偿模糊 PID 控制的轨迹跟随性能稳定,其对于铰接车辆轨迹跟随的横向偏差影响较小;在上表的速度范围内,补偿模糊 PID 控制方案都能实现稳定的轨迹跟随,随着速度增大,车间的横向铰接力有增大的趋势,但是横向铰接力还是远小于车辆自身质量,对于车辆的轨迹跟随控制效果影响较小.因此,与 PID 控制方案相比,在一定的速度和道路附着条件下,本文设计补偿模糊 PID 控制具有更好的自适应性能.

4 结论

针对铰接车辆的后轴轨迹跟随问题,本文设计了一种基于多轴协同转向的补偿模糊 PID 控制方案.该控制方案结合扩展阿克曼转向原理及模糊 PID 控制原理,对 A_2 、 A_3 和 A_4 轴实施转向控制,使得 A_2 、 A_3 和 A_4 轴跟随 A_1 轴的行驶轨迹,实现铰接车辆的整体轨迹跟随控制,且减小了车辆之间的铰接横向力.

通过搭建的联合仿真平台,在上述仿真道路上,首先在 $v=10\text{ km/h}$ 和 $\mu=0.85$ 仿真条件下验证了补偿模糊 PID 控制方案的轨迹跟随性能,该控制方案不仅可以减小铰接车辆的轨迹跟随横向偏差,而且还能减小铰接装置横向铰接力.然后,通过设置不同的速度及道路附着参数,与 PID 控制方案相比,进一步说明了补偿模糊 PID 控制具有一定的自适应性能.本文研究中主要围绕铰接车辆轨迹跟随的问题,尚未考虑铰接车辆的纵向及垂向运动等问题,后续的研究中以此为基础逐步深入研究.

参考文献

- [1] 孙娜. 基于双率采样的智能车辆弯道轨迹跟踪控制 [J]. 动力学与控制学报, 2019, 17(4): 348-355.
SUN N. Trajectory tracking control of intelligent vehicle on curve lane via dual-rate sampling [J]. Journal of Dynamics and Control, 2019, 17(4): 348-355. (in Chinese)
- [2] 徐晓美, 张磊, 刘凯, 等. 半挂汽车列车挂车主动转向控制研究 [J]. 汽车技术, 2018, (11): 36-40.
XU X M, ZHANG L, LIU K, et al. Research on active steering control of trailer wheels for a tractor-semitrailer [J]. Automobile Technology, 2018, (11): 36-40. (in Chinese)
- [3] DU H, WANG L, CHEN J, et al. Adaptive fuzzy radial basis function neural network integral sliding mode tracking control for heavy vehicle electro-hydraulic power steering systems [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2020, 234(2): 872-886.
- [4] QIU Q, FAN Z, MENG Z, et al. Extended ackerman steering principle for the coordinated movement control of a four wheels drive agricultural mobile robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018(152): 40-50.
- [5] ZOU Y, GUO N, ZHANG X. An integrated control strategy of path following and lateral motion stabilization for autonomous distributed drive electric vehicles [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Automobile Engineering, 2021(235): 1164-1179.
- [6] CHEN J, SHUAI Z, ZHANG H, et al. Path following control of autonomous four-wheel-independent-drive electric vehicles via second-order sliding mode and nonlinear disturbance observer techniques [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021(68): 2460-2469.
- [7] WAGNER S, NITZSCHE G, HUBER R, et al. Advanced automatic steering systems for multiple articulated road vehicles [C]. ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. California, 2013.
- [8] ZHANG D, YANG C, ZHANG W, et al. A novel tracking control method for the distributed-drive and active-steering articulated virtual rail train [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering, 2022, 236(2): 418-440.
- [9] 严永俊, 王金湘, 胡云卿, 等. 智轨电车横向运动预测控制研究 [J]. 控制与信息技术, 2020(2): 25-30.
YAN Y J, WANG J X, HU Y Q, et al. Research on lateral motion prediction and control of autonomous-rail rapid tram [J]. Control and Information Technology, 2020(2): 25-30. (in Chinese)
- [10] WAGNER S, NITZSCHE G. Advanced steer-by-wire system for world longest busses [C]// IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2016: 1932-1938.
- [11] PENG J, FENG J, XIAO L, et al. Research on autonomous guidance and track following technology of autonomous-rail rapid tram [J]. Information Technology and Control, 2020(1): 27-31.
- [12] PENG X, ZHU X. Autonomous path tracking control of intelligent electric vehicles based on lane detection and optimal preview method [J]. Expert Systems with Applications, 2019(121): 38-48.
- [13] WAN G, YANG X, CAI R, et al. Robust and precise vehicle localization based on multi-sensor fusion in diverse city scenes [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2018: 4670-4677.
- [14] ZHU X, TIAN W, LI G, et al. Research on localization vehicle based on multiple sensors Fusion system [C]// International Conference on Computer Network, Electronic and Automation. IEEE, 2017: 491-494.
- [15] ZHANG M, ZHANG Z, DAI Y, et al. Design of a multi-threaded positioning system software architecture for ground mobile robots [C]// 5th International Conference on Information Science and Control Engineering. IEEE, 2018: 699-703.
- [16] 李国勇, 杨丽娟. 神经·模糊·预测控制及其 MATLAB 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
LI G Y, YANG L J. Neural, fuzzy, and predictive control and its MATLAB implementation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018. (in Chinese)
- [17] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
YU Z S. Automobile theory [M]. Beijing: China Machine Press, 2009. (in Chinese)