

考虑驾驶风格的模糊控制跟驰模型

吴 兵, 罗 雪, 李林波

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对传统模糊控制跟驰模型较少考虑驾驶风格的差异,同时缺乏真实数据的有效验证,基于模糊控制理论,模拟驾驶人在跟驰过程中采取的动态驾驶决策过程,考虑不同驾驶风格,在分析自然驾驶数据的基础上,利用实测数据对不同驾驶风格进行分析,获得各驾驶风格的期望车头时距参数,在此基础上,利用前后车距离误差和速度差作为独立变量,并建立了模糊控制规则。数值分析结果表明,该模型与自然驾驶数据拟合较好。

关键词: 跟驰模型; 驾驶人风格; 模糊控制; 期望车头时距

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

Fuzzy Control Car-Following Model with the Consideration of Driving Style

WU Bing, LUO Xue, LI Linbo

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201084, China)

Abstract: In view of the traditional fuzzy control car-following model, the difference of driving style was less considered, and the effective verification of real data was lack. Based on the fuzzy control theory, the dynamic driving decision-making process adopted by the driver in the following process was simulated, and different driving styles were considered. Based on the analysis of the natural driving data, different driving styles were analyzed by use of the measured data, and the desired time headway parameters of each driving style were obtained. On this basis, the distance error and speed difference between the front and rear cars were used as independent variables, and the fuzzy control rules were established. The numerical analysis results show that the proposed model fits well with natural driving data.

Key words: car - following model; driving style; fuzzy control; desired time headway

车辆跟驰模型是微观交通流的一个基本模型^[1],传统跟驰模型中,后车的驾驶决策与前车的刺激存在着——对应的关系。在实际行驶过程中,驾驶人对其他车辆的行驶状态所作出的反应,不一定是线性关系,更多的是根据驾驶经验和驾驶情况所决定的,因此引入模糊控制跟驰模型,来模拟驾驶人对于车辆决策的过程。

最早把模糊控制方法引入跟驰模型的学者是 Kikuchi 和 Chakroborty^[2],在实际道路条件下,对一辆跟驰车辆采集其车头时距和速度数据,对人的感知和推理过程中固有的不精确性进行了研究,建立模糊控制规则并进行仿真模拟,结果表明,与传统 GM (general motors)模型相比,该模型具有局部稳定性,在一定程度上能够预测驾驶人或车辆反应的变化。在此基础上, Khodayari 等^[3]将模糊控制的输入参数增加为瞬时反应延迟、相对速度、相对距离和后车速度,通过 NGSIM (next generation simulation) 数据进行了模型验证,证明其对驾驶人行为预测方面效率较高。Mar 和 Lin^[4]对跟驰模型的模糊控制系统进行了持续的研究,首先提出了一种基于自适应网络模糊控制系统的汽车追尾防撞控制器,解决前车与后车距离和相对速度的振荡问题,随后提出了一种基于模糊函数网络的汽车跟驰防撞控制器,实现汽车速度的非线性控制^[5],然后提出了一种基于级联模糊控制系统的车辆跟驰、变道防撞系统设计方案^[6]。Xiong^[7]对模糊控制模型的隶属度函数进行研究,采用最小二乘法对离散数据进行拟合,得出隶属度函数。王文清等^[8]提出了考虑最小安全距离的跟驰模型,用模糊控制来模拟驾驶人控制车辆的行为。邱小平等^[9]建立相应的车辆跟驰模糊控制系统,采用 NGSIM 数据进行模型标定,并与 Gipps 模

收稿日期: 2019-08-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0102800),上海市科学技术委员会科研项目(18DZ1200200)

第一作者: 吴兵(1960—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为交通系统分析与优化、交通拥挤管理等。

E-mail: wubing@tongji.edu.cn

通信作者: 李林波(1974—),男,副教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为交通规划、交通拥挤管理等。

E-mail: llinbo@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

型进行对比评价,发现模型拟合更优。

目前大部分基于模糊控制的跟驰模型,假设驾驶人的驾驶行为方式相同,然而,在真实的交通流中,驾驶人的年龄、身体素质、反应敏感性、驾驶技能等个体差异导致了不同的跟驰行为^[10-12],同时驾驶人心理生理活动是不确定的、复杂的^[13],同一数学模型无法准确描述所有驾驶人的跟驰行为。因此,有学者开始对不同类型的驾驶人的特点进行研究,将驾驶人分为激进型、温和型和保守型三种,但在隶属函数划分部分和模型验证时,由于缺乏真实数据支撑,仅进行了定性分析^[14]。

实际上,同一个驾驶人在不同状态下也会呈现出不同的驾驶风格,基于此,本研究拟针对不同驾驶风格,利用自然驾驶跟驰数据,定量分析不同驾驶风格对模糊变量的影响,并提出相应的模糊控制跟驰模型,深入探讨驾驶风格对模糊控制模型的影响。

1 数据来源及处理

1.1 基本数据

本研究的数据来自“上海自然驾驶研究”项目的中国驾驶人自然驾驶数据,数据情况见表1。

表1 中国驾驶人自然驾驶数据情况

Tab.1 Naturalistic driving data of Chinese drivers

采集内容	数据情况
采集时间	2012.12~2015.12
采集对象数量	56名中国驾驶人
采集对象标准	25~60岁,驾驶经验2年以上
采集对象占比	女性占比为20%,接近2016年中国驾驶人中女性占比(27%)
采集信息	累计161 055 km的日常驾驶数据
采集频率	10 Hz
采集设备	全球定位系统、雷达系统、温度及湿度传感器、4路摄像头和SHRP2NextGen数据采集系统

1.2 跟驰片段提取

在跟驰片段分析之前,需要确定车辆跟驰过程中一些关键变量的阈值范围,因此,参考已有研

究^[15],对侧向距离绝对值、自车速度、纵向距离、相对速度绝对值、跟驰持续时间的约束见表2,保证车辆处于跟驰状态中。

表2 跟驰片段提取准则

Tab.2 Extraction criteria of car-following segment

侧向距离绝对值/m	自车速度/(km·h ⁻¹)	纵向距离/m	相对速度绝对值/(m·s ⁻¹)	跟驰持续时间/s
<2.5	>18	>7且<120	<2.5	>15

利用表2的提取准则,通过编程对跟驰片段进行提取,共提取2 350个自然驾驶快速路跟驰片段,跟驰片段平均持续时间为18.62 s,跟驰车辆的平均车速49.93 km·h⁻¹(13.87 m·s⁻¹),累计时长为729 min。

1.3 跟驰片段分析

分析提取的快速路跟驰片段数据,车头时距分布在0.41~5.95 s之间,平均车头时距为1.66 s。每个跟驰片段的跟驰车辆平均车速与平均车头时距散点图如图1所示,车头时距的直方图如图2所示。

由图1可知,随着车速增加,车头时距变化不显著,不同车速下车头时距的分布较相似,车速和车头时距没有明显关系,同一车速对应不同车头时距,反之亦然,无规律可循,与文献^[16-18]结论相似。值得注意的是,车速为20~80 km·h⁻¹的车头时距中3 s以上的比较少。从分布图2的变化趋势观察,车头时距在1.3 s左右出现概率的峰值,且集中于1~2 s

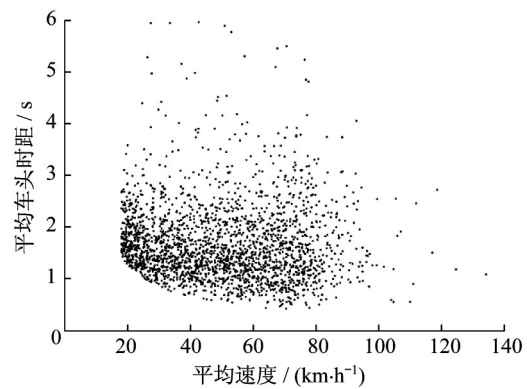


图1 车速与车头时距的散点图

Fig.1 Scatter diagram of speed and time headway

范围内,随着车头时距的增加,相应比例降低。因此,车头时距的分布未以峰值为中心左右对称,而是在分布右侧出现“长尾”现象,呈正偏态分布,这一分布规律与文献^[19-20]结论类似。

为分析跟驰车头时距与驾驶人个体特性的相关

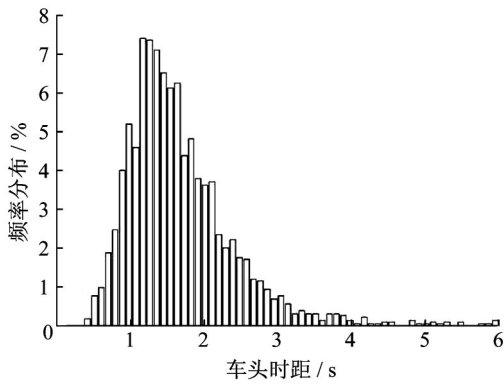


图2 跟驰片段车头时距的频率分布图

Fig.2 Frequency distribution of time headway in car-following segment

性,对56名驾驶人的跟驰片段进行归类分析,并按照车头时距大小排序,结果如图3所示。图中每一个小图为同一驾驶人的所有跟驰片段车头时距分布(按照从小到大排序),横坐标为按照平均车头时距大小排列后的跟驰片段序列数,纵坐标为驾驶人的每个跟驰片段平均车头时距长度。

由图3可发现,同一驾驶人在不同的状态下,跟驰片段车头时距分布呈现波动性,并且同一驾驶人的跟驰片段数量越多,波动性越明显,表现出驾驶人在不同状态下,心理生理活动的不确定性和复杂性,参考已有的驾驶人分类^[10,12,21-22],将驾驶类型分为三

种类型:激进型、普通型和保守型。因此,实际的车头时距数据可以由三类满足不同分布的数据组成。假设三类驾驶风格车头时距满足正态分布^[19-20],激进型的概率密度函数为 $f(x)_{ATH}$,普通型的概率密度函数为 $f(x)_{NTH}$,保守型的概率密度函数为 $f(x)_{CTH}$ 。则实测车头时距数据应满足理论分布:

$$f(x) = a_1 f(x)_{ATH} + a_2 f(x)_{NTH} + a_3 f(x)_{CTH}$$

$$= a_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + a_2 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_2} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} + a_3 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_3} e^{-\frac{(x-\mu_3)^2}{2\sigma_3^2}}$$

式中: a_1, a_2, a_3 为不同类型驾驶风格比例,满足 $a_1 + a_2 + a_3 = 1$; μ_1, μ_2, μ_3 为正态分布函数的位置参数; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为正态分布函数的变异度参数。

利用MATLAB中fittype函数进行混合正态分布函数拟合,得到三类驾驶风格的期望车头时距分别为: $\mu_1 = 1.15, \mu_2 = 1.95, \mu_3 = 3.39$,根据期望车头时距得出对应的车头时距区间见表3。

表3 期望车头时距

Tab.3 Desired time headway

驾驶风格	激进型	普通型	保守型
车头时距分布/s	0~1.55	1.55~2.60	2.60~6.00
期望车头时距/s	1.15	1.95	3.39

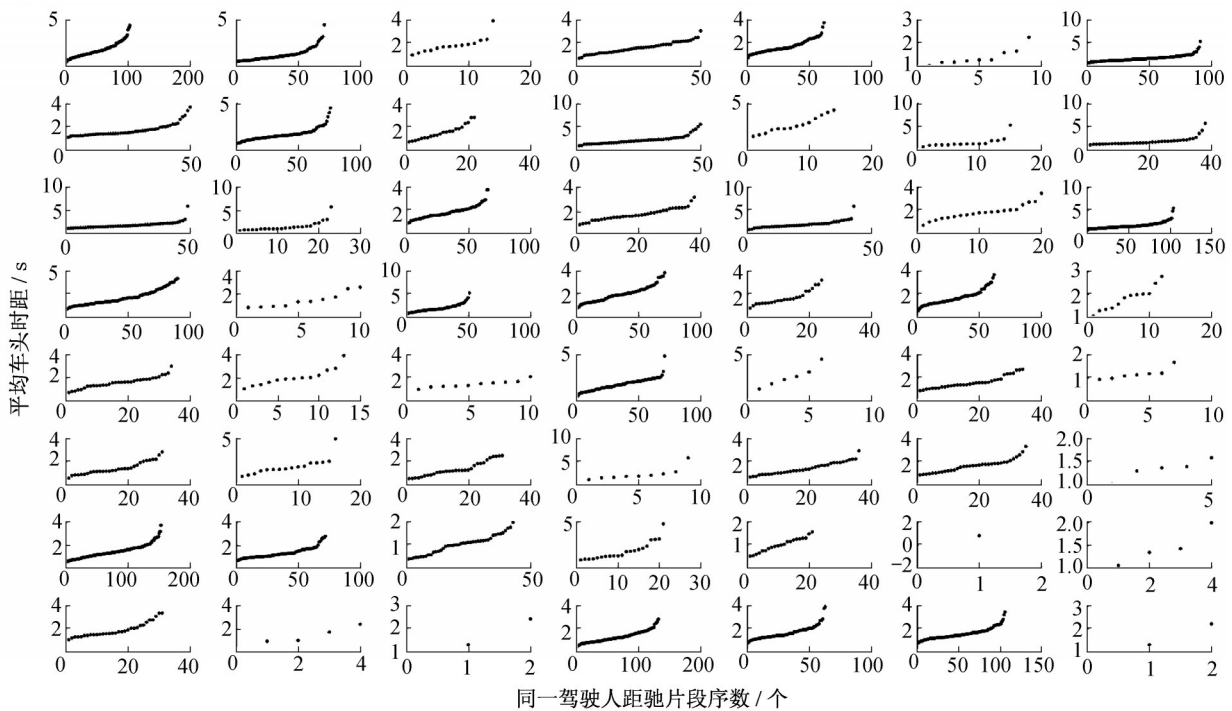


图3 驾驶人跟驰片段车头时距分布

Fig.3 Driver based time headway distribution of car-following segment

2 模型建立

设有论域 U , 其中的任意个体 $u \in U$, 那么在该论域上的一个模糊集合 \tilde{A} 定义为: $\tilde{A} = \{(\mu_{\tilde{A}}(u), u) | u \in U\}$. 其中, $\mu_{\tilde{A}}(u)$ 或 $\mu_{\tilde{A}} \in [0, 1]$ 是模糊集合 \tilde{A} 的隶属函数, 它把论域 U 中的每个元素映射到 0 和 1 之间, 越接近 1 表征 u 属于 $\mu_{\tilde{A}}$ 的程度越高^[23].

设计模糊控制原理 4 个计算步骤: ① 确定期望距离差和速度差; ② 把期望距离差和距离差的确切值变成模糊状态作为输入量; ③ 由模糊控制规则(即合算法)计算出模糊控制量 a_F ; ④ 将由③算出的模糊控制转化为确切的值加载到对象上。

2.1 模型变量

基于模糊推理跟驰模型的相关研究^[2,4-7,22], 本研究的输入变量:

(1) 后车与前车的实际距离 Δl_R 与期望距离 Δl_D 之差 Δl :

$$\Delta l = \Delta l_R - \Delta l_D$$

式中: 期望距离 Δl_D 为期望车头时距 t_{HW} 和后车速度 v_F 之积^[24].

(2) 前车速度 v_L 与后车速度 v_F 之差 Δv :

$$\Delta v = v_L - v_F$$

输出变量: 后车加速度 a_F :

$$a_F = \{\Delta l, \Delta v\}$$

2.2 变量论域

根据模糊控制参数论域的确定方法, 在提取的跟驰片段中, 对前车与后车的车头间距进行计算, 每个跟驰片段提取最大车头间距、最小车头间距、平均车头间距, 如图 4 所示, 并分别与期望距离求差值, 如图 5 所示。后车与前车的实际距离 Δl_R 与期望距离 Δl_D 之差 $\Delta l \in (-40, 40)$, 单位: m, 若分为 11 级, 期望距离差论域 X :

$$X = \{-40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40\}$$

取 7 个语言值, $\tilde{A}_i (i=1, 2, \dots, 7)$ 是论域 X 上的模糊集, 分别代表正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(Z)、负小(NS)、负中(NS)和负大(NB), 隶属函数采用三角形函数分布。

同理, 前车速度与后车速度之差如图 6 所示, $\Delta v \in (-5, 5)$, 单位: $m \cdot s^{-1}$, 速度差论域 Y :

$$Y = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$$

取 7 个语言值, $\tilde{B}_j (j=1, 2, \dots, 7)$, 隶属函数采用三角形函数分布。

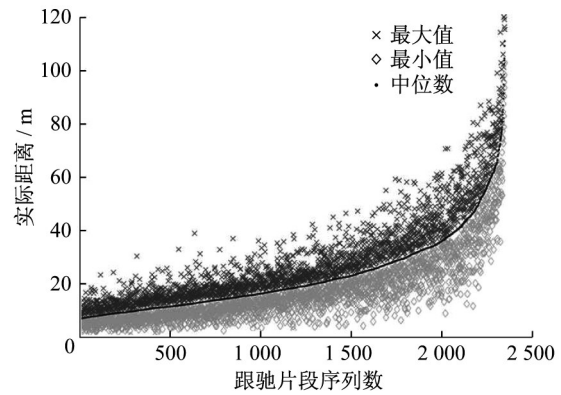


图4 前车与后车实际距离

Fig.4 Actual distance between the front vehicle and the rear vehicle

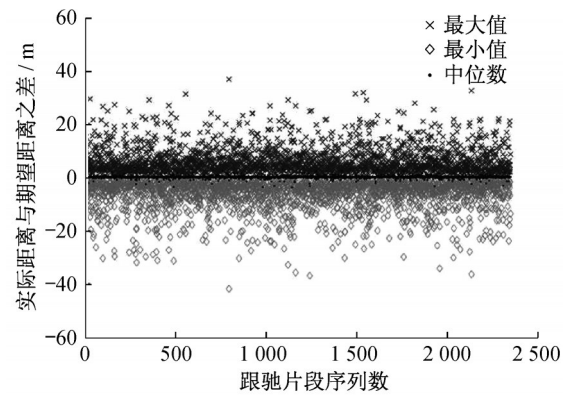


图5 实际距离与期望距离之差

Fig.5 Difference between the actual distance and the expected distance

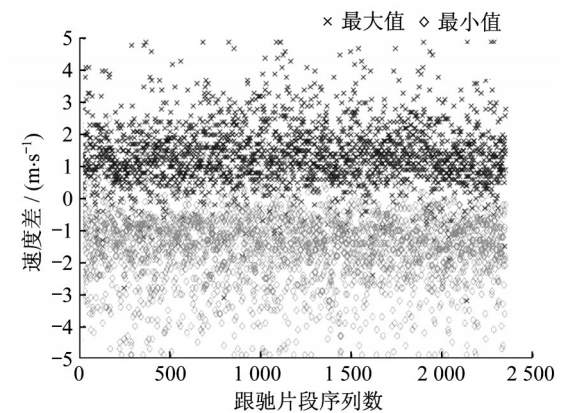


图6 前车与后车速度之差

Fig.6 Speed difference between the front vehicle and the rear vehicle

后车加速度如图 7 所示: $a_F \in (-9, 3)$, 单位: $m \cdot s^{-1}$, 其论域为 Z :

$$Z = \{-9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$$

取 7 个语言值, $\tilde{C}_k(k=1, 2, \dots, 7)$, 隶属函数采用三角形函数分布。

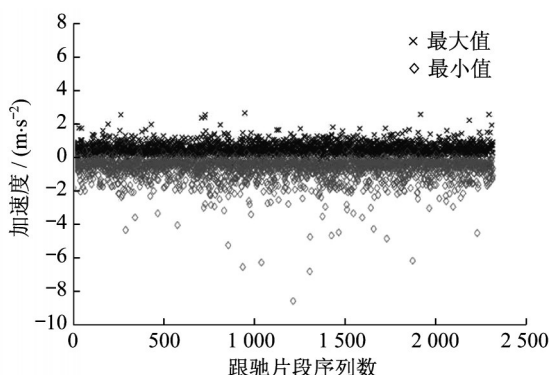


图 7 后车加速度分布

Fig.7 Acceleration distribution of the rear vehicle

2.3 模糊控制的跟驰模型建立

模糊控制规则用下列符合条件语句表示:

若 \tilde{A}_i, \tilde{B}_j 则 $\tilde{C}_k, i=1, 2, \dots, 7; j=1, 2, \dots, 7; k=1, 2, \dots, 7$ 。

每一条语句对应一个模糊关系, 即:

$$R_l = \Delta l \Delta v \alpha_F$$

$$R = \bigcup_l R_l = \bigcup_{n=1, 2, \dots, 49} \{\Delta l \cap \Delta v \cap \alpha_F\}$$

式中: R 为模糊关系; Δl 为后车与前车的实际距离 Δl_R 与期望距离 Δl_D 之差, Δl 是 PB、PM、PS、Z、NS、NM、NB; Δv 为前车的速度 v_L 与后车速度 v_F 之差, 语言值分别为 PB、PM、PS、Z、NS、NM、NB。

根据数据规律, 确定 49 条模糊控制规则, 如表 4 所示。

表 4 模糊控制规则表

Tab.3 Fuzzy control rules

α_F	Δv						
	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
PM	PB	PB	PM	PM	PS	PS	Z
PS	PB	PM	PS	PS	Z	Z	NS
Δl	Z	PB	PM	PS	Z	NS	NM
NS	PS	Z	Z	NS	NS	NM	NB
NM	Z	NS	NS	NM	NM	NB	NB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

根据模糊控制原理建立考虑驾驶风格的模糊控制跟驰模型框架^[25], 如图 8 所示, 其中将不同的驾驶风格转化为车头时距, 通过输入该参数变量来反映三种驾驶风格的差异。本模糊控制系统采用面积中心法作为清晰化规则, 求出模糊集合函数曲线和横坐标包围区域面积的中心, 选择这个中心对应的横坐标值, 作为这个模糊集合的代表值。

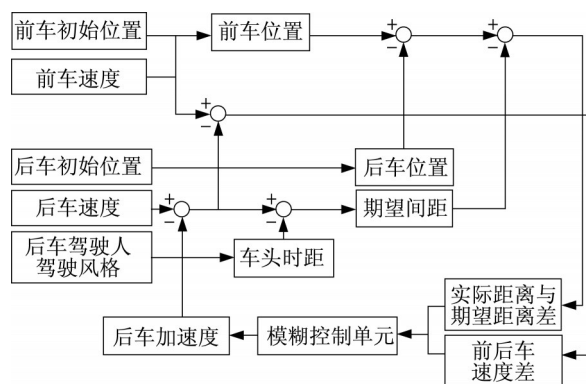


图 8 基于模糊控制的跟驰模型结构

Fig.8 Car-following model structure based on fuzzy control

3 Simulink 数值分析

利用 MATLAB 的 Simulink 进行数值分析, 设置模糊控制系统过程, 并根据模糊规则设置输入、输出参数隶属度函数, 建立与对应的跟驰模块如图 9 所示, 模型计算步长设为 1 s。

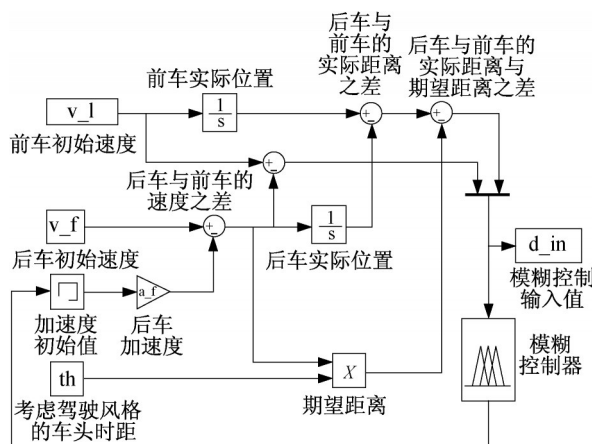


图 9 模糊控制系统 Simulink 模块图

Fig.9 Simulink module diagram of fuzzy control system

输入前车的速度和实际位置, 后车的初始速度、位置和驾驶风格, 对于不同驾驶风格, 根据表 3 判断, 得到不同的期望车头时距, 输入对应的参数。

在 Simulink 中分别得到三种类型驾驶风格的位移-时间图, 如图 10~12 所示, 将模型得到的后车位移与真实数据进行对比分析。同时分别得到三种类型驾驶风格的速度-时间图, 如图 13~15 所示, 将模型得到的后车速度与真实数据进行对比分析, 并验证误差情况。

根据平均绝对误差(mean absolute error, MAE) 和均方根误差(root mean square error, RMSE) 对模

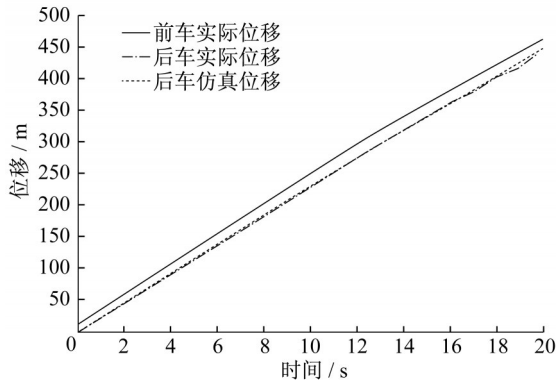


图10 激进型 位移-时间关系

Fig.10 Displacement-time relationship of angry driving style

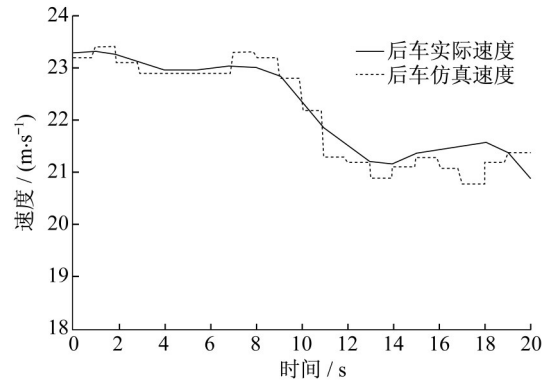


图13 激进型 速度-时间关系

Fig.13 Velocity-time relationship of angry driving style

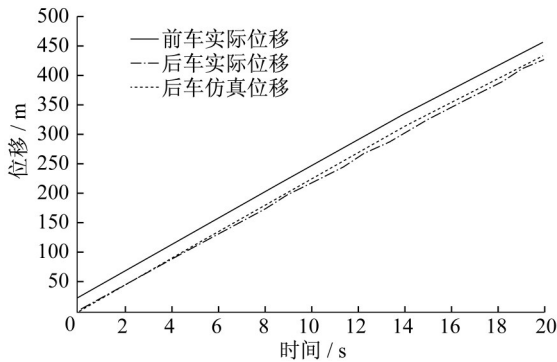


图11 普通型 位移-时间关系

Fig.11 Displacement-time relationship of normal driving style

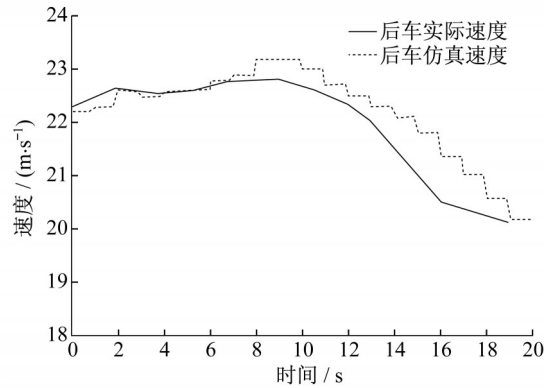


图14 普通型 速度-时间关系

Fig.14 Velocity-time relationship of normal driving style

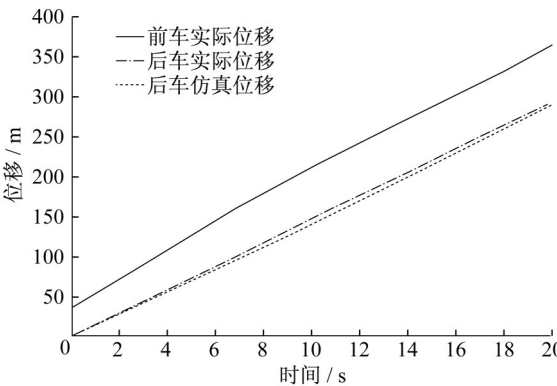


图12 保守型 位移-时间关系

Fig.12 Displacement-time relationship of conservative driving style

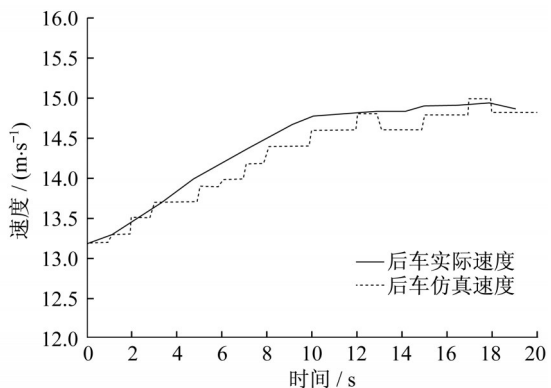


图15 保守型 速度-时间关系

Fig.15 Velocity-time relationship of conservative driving style

型进行评价,其指标计算公式如下:

$$\delta_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

$$\delta_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|^2}$$

式中: i 为样本编号; n 为样本总量; y_i 为第*i*个样本实

际数据; \hat{y}_i 为第*i*个样本仿真数据;

对三类驾驶风格的模型分别计算位移和速度的评价指标,结果见表5。

在不同出发间距、不同初始速度、不同驾驶风格的情况下,后车的跟驰状态不同,但模型的数值结果

表5 模型评价结果

Tab.5 Model evaluation results

驾驶风格		激进型	普通型	保守型
位移	MAE	1.936 0	5.706 4	4.562 6
	RMSE	2.457 6	7.089 6	5.195 5
速度	MAE	0.161 5	0.267 3	0.115 9
	RMSE	0.200 0	0.339 9	0.135 8

与自然驾驶实测的车辆轨迹相近,同时车速度变化较一致,数据的评价结果表示,模型的误差较小,说明本模型对于中国驾驶人有较好的适用性。

4 结语

现有的基于模糊控制的跟驰模型,大多假设驾驶人行为方式相同,或是对不同驾驶人的行为风格进行分类,未考虑过同一驾驶人在不同状态下出现驾驶风格的差异,且在划分隶属函数论域时,缺乏自然驾驶数据的分析。

本文利用中国驾驶人自然驾驶数据,按驾驶风格,对快速路自然驾驶跟驰片段的驾驶行为进行分类。通过数据分析发现,驾驶风格对跟驰车头时距的影响显著,并可以拟合为三类驾驶风格。在此基础上,利用真实数据划分输入变量的论域,建立相应的三角隶属度函数,对模糊控制规则表进行调整优化,建立了基于模糊控制的跟驰模型。通过验证与实际数据对比表明,该模型能够准确地描述不同驾驶风格的驾驶人跟驰过程。

由于自然驾驶数据样本数量有限,后期可以增加更多的验证,同时由于各国驾驶风格类型不同,若将该模型应用于国外情况时,需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 赵淑芝,张泉雄,贾洪飞,等.利用五轮仪实验数据建立车辆跟驰模型[J].公路交通科技,2003,20(1):132.
ZHAO Shuzhi, ZHANG Xiaoxiong, JIA Hongfei, *et al.* A car-following model developed on five-wheel system experiment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(1): 132.
- [2] CHAKROBORTY P, KIKUCHI S. Evaluation of the general motors based car-following models and a proposed fuzzy inference model [J]. Transportation Research Part C (Emerging Technologies), 1999, 7(4): 209.
- [3] KHODAYARI A, KAZEMI R, GHAFFARI A, *et al.* Design of an improved fuzzy logic based model for prediction of car following behavior[C]//Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference. [S.l.]: IEEE, 2011: 200-205.
- [4] MAR J, LIN F J. An ANFIS controller for the car-following collision prevention system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2001, 50(4): 1106.
- [5] MAR J, LIN F J, LIN H T, *et al.* The car following collision prevention controller based on the fuzzy basis function network [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 139(1): 167.
- [6] MAR J, LIN H T. The car-following and lane-changing collision prevention system based on the cascaded fuzzy inference system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 910.
- [7] XIONG Q P. Development of membership degree functions of the car-following models based on fuzzy logic [C]//International Conference on Intelligent Computation Technology & Automation. [S.l.]: IEEE, 2009: 697-699.
- [8] 王文清,王武宏,钟永刚,等.基于模糊推理的跟驰安全距离控制算法及实现[J].交通运输工程学报,2003,3(1):72.
WANG Wenqing, WANG Wuhong, ZHONG Yonggang, *et al.* Car-following safe distance control algorithm and implementation based on fuzzy inference [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(1): 72.
- [9] 邱小平,孙若晓,于丹.改进的基于模糊推理的车辆跟驰行为分析方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(8):135.
QIU Xiaoping, SUN Ruoxiao, YU Dan. An improved method to analyze car-following behavior based on fuzzy inference system [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(8): 135.
- [10] TANG T Q, LI C Y, HUANG H J. A new car-following model with the consideration of the driver's forecast effect [J]. Physics Letters A, 2010, 374(38): 3951.
- [11] PENG G H. A study of wide moving jams in a new lattice model of traffic flow with the consideration of the driver anticipation effect and numerical simulation [J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2012, 391(23): 5971.
- [12] TANG T Q, HUANG H J, SHANG H Y. A new macro model for traffic flow with the consideration of the driver's forecast effect [J]. Physics Letters A, 2010, 374(15): 1668.
- [13] TREIBER M, KESTING A, HELBING D. Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models [J]. Physica A, 2006, 360(1): 71.
- [14] 钟益萍,张存保,石永辉.考虑驾驶员行为特性的模糊推理跟驰模型改进研究[J].交通信息与安全,2010,28(3):17.
ZHONG Yiping, ZHANG Cunbao, SHI Yonghui. Improving car-following model by considering driver's behaviors with fuzzy inference [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2010, 28(3): 17.
- [15] 王雪松,朱美新,邢伟伦.基于自然驾驶数据的避撞预警对跟车行为影响[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(7):1045.
WANG Xuesong, ZHU Meixin, XING Yilun. Impacts of collision warning system on car-following behavior based on

- naturalistic driving data [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(7): 1045.
- [16] GILL S A, RUDDLE R A. Using virtual humans to solve real ergonomic design problems [C]// *IEEE International Conference on Simulation*. York, UK: IEEE, 1998: 223-229.
- [17] HANSON L. Computerized tools for human simulation and ergonomic evaluation of car interiors [J]. *Human Factors & Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 2000, 44(38): 836.
- [18] SANTOS J, SARRIEGI J M, NICOLÁS S, *et al.* Using ergonomic software in non-repetitive manufacturing processes: a case study [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2007, 37(3): 267.
- [19] AL-GHAMDI A S. Analysis of time headways on urban roads [J]. *Civil Engineering Systems*, 2002, 19(2): 169.
- [20] 孟凡兴, 张良, 张伟. 驾驶员车头时距研究[J]. *工业工程与管理*, 2013, 18(2): 131.
- MENG Fanxing, ZHANG Liang, ZHANG Wei. A study on drivers' time headway [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2013, 18(2): 131.
- [21] 吴超仲, 严新平, 马晓风. 考虑驾驶员性格特性的跟驰模型[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2007, 5(4): 18.
- WU Chaozhong, YAN Xinping, MA Xiaofeng. Car-following model based on drivers' characteristics [J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2007, 5(4): 18.
- [22] ZHANG Y, NI P, LI M, *et al.* A new car-following model considering driving characteristics and preceding vehicle's acceleration [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2017, 2017: 1.
- [23] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 5版. 2011.
- YANG Lunbiao, GAO Yingyi. *Principles and applications of fuzzy mathematics* [M]. 5th ed. 2011.
- [24] YANG H H, PENG H, GORDON T J, *et al.* Development and validation of an errorable car-following driver model [C]// *American Control Conference*. [S.l.]: IEEE, 2008: 3927-3932.
- [25] 孙赫. 基于模糊控制的车辆跟驰模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- SUN He. *The study on car-following model based on fuzzy control* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

~~~~~

(上接第672页)

- [11] TANARSLAN H M. Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates [J]. *Engineering Structures*, 2017, 151: 337.
- [12] YANG I H, JOH C, KIM B S. Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(11): 3478.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [14] INSTITUTION B S. Eurocode 2: Design of concrete structures: part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. [S.l.]: British Standards Institution, 2004.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [16] AFGC. Ultra high performance fibre-reinforced recommendation [S]. Paris: AFGC, 2013.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018 [S]. Beijing: China Communications Publishing, 2018.
- [18] PREM P R, MURTHY A R, VERMA M. Theoretical modelling and acoustic emission monitoring of RC beams strengthened with UHPC [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 670.