

基于模糊推理的驾驶员车速决策行为建模及其标定

齐玉东^{1a}, 丁通², 杨松^{1b}

(1. 海军航空工程学院 a. 兵器科学与技术系; b. 研究生管理大队, 山东 烟台 264001;
2. 91963 部队, 天津 300451)

摘要:为模拟驾驶员在行驶过程中处理不确定信息的能力,并解决以往微观交通仿真中自由行驶与跟驰状态相互转换时的不平滑问题,对将2种行为综合起来的车速决策行为建立模糊推理(fuzzy inference system, FIS)模型。提出了一种隶属度函数参数化设计方法来解决 FIS 模型的标定问题。以车头时距、相对速度、期望速度差作为输入,加速度作为输出,结合专家经验构建模糊规则,建立了 FIS 模型。采用美国公路署 NGSIM(next generation simulation)项目免费提供的车辆行驶数据,在对数据筛选、预处理的基础上,通过对驾驶员反应时间标定、期望车速设定,构造了模型的输入输出数据,并对模型参数利用遗传算法进行了标定。标定后的 FIS 模型对实际行驶数据有良好的拟合精度;通过想定实验,证明在模型较好地解决了状态转换的不平滑问题;最后对模型在跟驰状态下表现与 GM 模型进行了比较,结果表明标定后的 FIS 模型略优些,说明本文建立参数化车速决策 FIS 模型具有良好的实用价值和应用前景。

关键词:模糊推理;隶属度函数标定;车速决策;跟驰;反应时间标定

本文引用格式:齐玉东,丁通,杨松.基于模糊推理的驾驶员车速决策行为建模及其标定[J].四川兵工学报,2014(6):115-120.

中图分类号:TP391.9; TP273+.4

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2014)06-0115-07

Driver's Speed Decision-making Behavior Modeling Based on Fuzzy Inference and Its Calibration

QI Yu-dong^{1a}, DING Tong², YANG Song^{1b}

(1. a. Department of Ordnance Science and Technology; b. Group of Graduate Student Management, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. The 91963 Unit of PLA, Tianjin 300451, China)

Abstract: To simulate the driver's ability to deal with uncertainty and solve the unsmooth problem in the driving state transformation between free-traveling and car-following during microscopic traffic simulation, the fuzzy inference system (FIS) was introduced to model the driver's speed decision-making behavior which integrated the free-traveling and car-following behavior. A new way to calibrate the FIS model by parameterizing the membership function was proposed. The inputs of the FIS mode are difference between velocity and desired speed, headway and relative velocity. The output is acceleration. The NGSIM (next generation simulation) data was used to calibrate and evaluate the model. With the analysis and pretreatment of NGSIM data, drivers' reaction time was calibrated, and the desired speed of different vehicle type was approximated as the corresponding free speed. Using the driving data, the FIS model was calibrated and the model output was validated and compared with the real data. The results show that the calibrated

FIS model simulates the drivers' behavior appropriately. A scenario experiment is designed to prove that the model can solve the unsmooth problem in the driving state transformation. In addition, the output of the calibrated FIS model under car-following state was compared with that of GM model. The comparison shows that the calibrated FIS performs are better in practical value and application prospect.

Key words: fuzzy inference; membership function calibration; speed decision-making; car-following; reaction time calibration

Citation format: QI Yu-dong, DING Tong, YANG Song. Driver's Speed Decision-making Behavior Modeling Based on Fuzzy Inference and Its Calibration[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(6): 115 - 120.

在以往的微观交通仿真中,自由行驶模型与跟驰模型是分开的 2 个模型。当车辆不处于换道状态时,需要不断地判断车辆行驶状态,再决定是采用自由行驶模型还是跟驰模型^[1]。这样的方式存在两点不足:一是在实际中,驾驶员行驶状态判定标准存在模糊性;二是车辆在 2 种行驶状态之间转换时,可能出现车辆在状态转换的瞬间急刹车或急加速的情况,状态转换的过渡不够平滑。

事实上可以不把车速决策行为为依据行驶状态划分为自由行驶行为与跟驰行为,直接对其建立模糊推理模型(fuzzy inference system, FIS)既可以有效地解决行驶状态判断标准的模糊性问题,又可使车辆在 2 种状态间的转换更为平滑自然。然而模糊推理模型往往依据专家经验建模,模糊集合确定和隶属函数标定仍然制约着这类模型的发展^[2]。

本文提出了一种隶属函数参数化设计方法来构建车速决策模糊推理模型。经过模型标定与验证,参数化车速决策模糊推理模型能够实现 2 种行驶行为的综合与平滑过渡,且模型标定后对实际驾驶行为的拟合效果良好,其在跟驰状态下的表现略优于传统的 GM 模型。

1 驾驶员车速决策行为分析

将驾驶员、车辆作为一个整体进行研究,简化起见假设所有驾驶员的行为方式都是一样的。在不考虑换道行为的情况下,驾驶员在不同行驶状态下的行驶目标分别为:①自由行驶状态:调节车速至期望车速;②跟驰状态:首先是调整车速使车距维持在最佳车距,其次是尽可能地加速,使车速趋于期望车速。其中期望车速指的是在车辆行驶过程中在不受或基本不受其他车辆约束条件下驾驶员心目中希望达到的最高安全行驶车速^[3]。

以往的跟驰模型中,多采用相对速度 V_r 、相对间距 D 、本车速度 V 作为模型输入,加速度 A 为输出^[2]。考虑到不同速度下最佳间距的不同^[4],本文采用剔除了速度信息的车头时距 T 作为驾驶员判断车距是否合适的指标。本文拟建立的车速决策模型在上述输入的基础上,还应加入期望车速信息,类似于相对速度,采用期望速度差 V_d 的形式,其计算公式为 $V_d = V_{Desired} - V_{Current}$,其中 $V_{Desired}$ 为期望车速, $V_{Current}$ 为本车速度。

2 参数化模糊推理模型建立

本文建立的是基于 Mamdani-style 推理^[5]的 FIS 系统,采用质心法进行逆模糊化。

2.1 语言变量定义

在对文献^[6-8]中行驶状态判定标准分析对比综合的基础上,本文做如下设定:当车头时距 $T \geq 8$ s 时,车辆处于自由行驶状态; $T \leq 5$ s,则处于跟驰状态; $5 < T < 8$ s,处于过渡状态。

各语言变量的定义见表 1。其中, $t_1, t_2, t_3, r_1, r_2, d_1, d_2, n_4, n_3, n_2, n_1, p_1, p_2, p_3, p_4$ 为待标定的参数,共 15 个。 T 的上限设为 30 s; V_r, V_d 范围为 $[-100, 100]$ 。在实际运算中,对超出范围的输入值,令其等于相应的上下限,比如若 $T = 40$,则在输入 FIS 模型时,令 $T = 30$ 。

表 1 语言变量及范围

语言变量	语言值	符号	值范围
T/s	小	S	$[0, t_1]$
	合适	M	$[t_1, t_3]$
	大	B	$[t_2, 8]$
	自由	FR	$[5, 30]$
$V_r/$ ($m \cdot s^{-1}$)	负	N	$[-100, 0]$
	零	Z	$[r_1, r_2]$
	正	P	$[0, 100]$
$V_d/$ ($m \cdot s^{-1}$)	负	N	$[-100, 0]$
	零	Z	$[d_1, d_2]$
	正	P	$[0, 100]$
$A/$ ($m \cdot s^{-2}$)	很负	VN	$[n_4, n_3]$
	负	N	$[n_3, n_1]$
	稍负	RN	$[n_2, 0]$
	零	M	$[n_1, p_1]$
	稍正	RP	$[0, p_2]$
	正	P	$[p_1, p_3]$
	很正	VP	$[p_3, p_4]$

2.2 参数化隶属度函数设计

隶属度函数实际上代表了驾驶员相应的感知阈值或行为为阈值。为尽可能地避免主观设定隶属度函数带来的模型失真问题,将隶属度函数进行参数化设置,这样可以结合实际数据对其进行标定。简化起见,隶属函数只采用等腰三角形隶属函数或梯形隶属函数。一般而言,三角形隶属函数的形状参数为3个实数,分别表示从左下角的顶点起按顺时针3个顶点的X坐标;梯形隶属函数的形状参数与三角形隶属函数的类似,只是数量为4个实数。

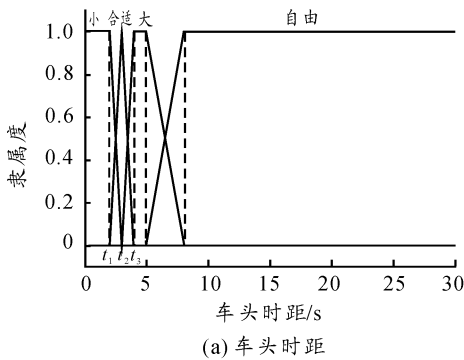
本章提出的参数化隶属度函数设计方法是:令三角形隶属度函数与梯形隶属度函数的形状参数均等于相应的坐标参数。各语言变量的隶属度函数参数化设置如图1所示。以车头时距隶属函数的参数化设计为例,如图1(a)所示,车头

时距的“合适”模糊集的隶属函数形状参数为 $[t_1, t_2, t_3]$;“大”模糊集的隶属函数形状参数为 $[t_2, t_3, 5, 8]$ 。

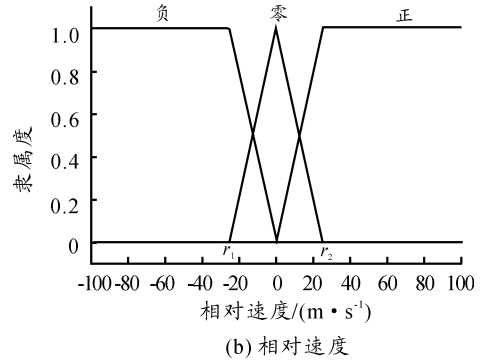
待标定参数的取值范围及约束条件见表2。

表2 参数取值范围及约束条件

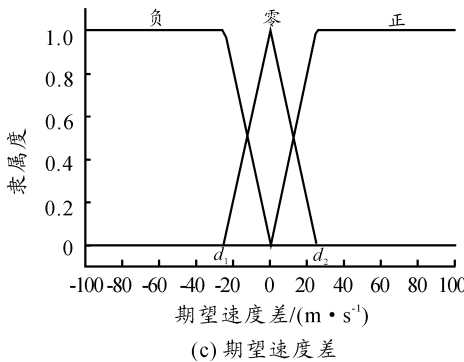
语言变量	参数取值范围及约束条件
T/s	$0 < t_1 < t_2 < t_3 < 5$
$V_r/(m \cdot s^{-1})$	$-100 < r_1 < 0, 0 < r_2 < 100$
$V_d/(m \cdot s^{-1})$	$-100 < d_1 < 0, 0 < d_2 < 100$
$A/(m \cdot s^{-2})$	$-20 < n_4 < n_3 < n_2 < n_1 < 0,$ $0 < p_1 < p_2 < p_3 < p_4 < 20$



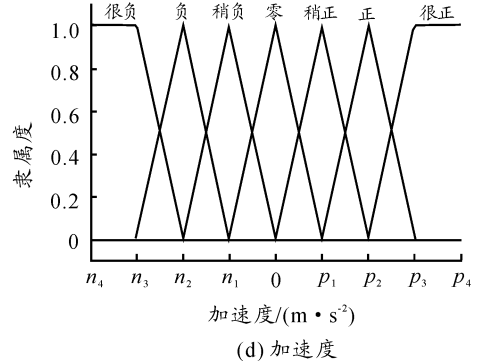
(a) 车头时距



(b) 相对速度



(c) 期望速度差



(d) 加速度

图1 各语言变量隶属度函数

2.3 模糊规则构造

实际行车过程中加减速行为存在不对称性^[2]。具体表现在:自由行驶状态下,基于快捷性和舒适性的考虑,驾驶员采取的加速度更大些;跟驰状态下,驾驶员对安全刺激更敏感,往往会采取更大的减速度。本文构造的模糊规则如表3所示。

2.4 参数标定方法

模型参数标定可以抽象为求非线性规划最优解问题^[4]。目标函数是模型产生的数据与实际数据的差距,自变量是待标定的各个参数,约束条件是各参数的取值范围及大小关系。其中,目标函数采用 Theil's U 函数^[9],其表达式为

$$F_{obj} = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^M (a_{real,m} - a_{sim,m})^2}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M (a_{real,m})^2 + \sum_{m=1}^M (a_{sim,m})^2}} \quad (1)$$

式中: $a_{real,m}$ 是真实加速度; $a_{sim,m}$ 是模型产生的仿真加速度; $m=1,2,\dots,M$ 是数据样本的编号。

利用遗传算法标定隶属度函数参数化的模糊推理模型的具体流程如图2。由于遗传算法为成熟的经典算法,其计算流程本文不再赘述。其中,每个个体对应一组15个待标定参数的值。

表3 模糊规则表

If		Then		编号
T	V_r	V_d	A	
自由	任意	负	稍负	1
		零	零	2
		正	很正	3
小	任意	负	很负	4
		零	很负	5
		正	负	6
合适	任意	负	负	7
		任意	负	8
	零	零	9	
	零	正	零	10
	正	零	零	11
	正	正	正	12
大	任意	负	稍负	13
		任意	零	零
	负	正	稍正	15
	零	正	正	16
	正	正	很正	17

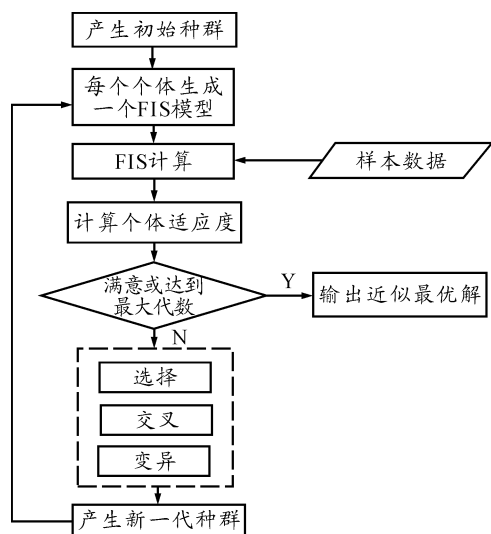


图2 模型参数标定流程

3 数据集及处理

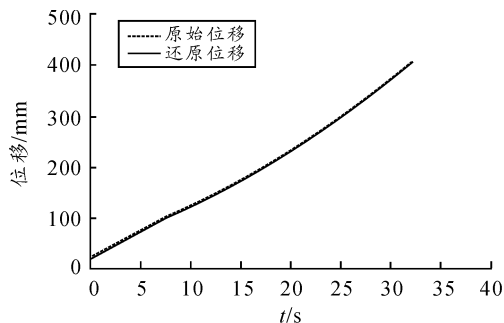
3.1 数据来源

本文采用的数据来源于美国公路署免费提供的项目NGSIM中的数据。本文选用数据的采集区域位于美国加利福尼亚州旧金山市的洲际公路 I-80, 全长 1 650 英尺(约 502 m), 共 6 个车道, 和一个入口车道。采集时间为 4:00 至

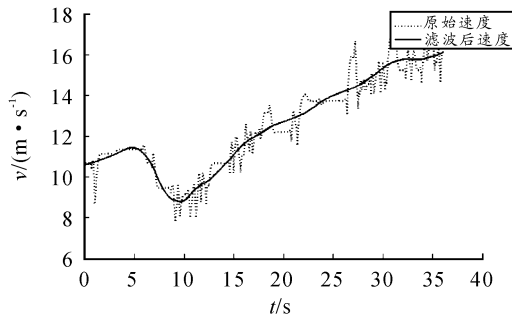
4:15, 共 15 min。数据采样频率为每秒 10 帧, 每条数据既包含车辆编号、长度、宽度、类型等静态信息, 也包括车辆速度、加速度、所在车道、相邻前车编号、相邻后车编号、与前车的车头间距、车头时距、所处时间点等动态信息^[10]。主要以车道 1 上的车辆行驶数据为研究对象。

3.2 数据预处理

NGSIM 的数据是直接针对位移进行观测, 再解算出速度、加速度。在观测、记录位移数据的过程中, 不可避免的存在噪声, 在计算过程中, 噪声被逐级放大, 导致速度、加速度信息呈现出明显的噪声现象。针对噪声迹象已经明显的速度数据, 采用小波降噪方法^[11]进行滤波处理, 并尽可能地保留有效信息。然后利用滤波后得到的速度信息, 还原出位移、加速度信息, 作为建模的基础数据。编号 3050 车辆的速度滤波与位移还原见图 3, 可见还原位移曲线与原始位移曲线基本重合, 其平均绝对误差为 0.201 3 m, 说明滤波后的速度较好还原了位移。



(a) 位移还原



(b) 速度滤波

图3 小波降噪效果示意图

3.3 反应时间标定

应对每个驾驶员的反应时间分别进行标定。本文研究数据的采集区域全长只有 500m, 可以假定驾驶员的反应时间在该区域内是不变的。

在紧密跟驰状态下(借鉴文献[8], 车头时距小于 3 s 时), 本车的加速度与相对速度的变化趋势是基本一致的^[12]。而在自由行驶或者“远距离”跟驰状态下, 驾驶员可能在受到前车刺激后, 由于刺激未大于一定心理阈值或注意力不够集中等因素, 而没有立即做出驾驶反应, 故这部分对应的行驶数据不能用来进行反应时间的标定。选取连续 10s 以上处于紧密跟驰状态的行驶数据进行该车驾驶员的反应时间标定。使用互相关分析法这个最常用的估计反应时间

的方法^[12]对其进行标定。部分驾驶员的反应时间标定结果见表4所示。

表4 反应时间标定结果(s)

车辆编号	1072	1093	1127	1156
反应时间	1.6	0.4	1.8	0.6
车辆编号	1190	1196	120	1201
反应时间	1.1	0.8	1.5	1.8

3.4 期望车速设定

选取路段上的自由行驶车辆的自由车速作为本路段期望车速的近似值^[13]。自由行驶数据筛选规则是:不是本车道头车;车辆距离记录终点距离大于150 m(约500英尺,时速108 km/h车辆5s的行驶距离);没有前车或者与前车间距大于150 m。选取最短连续5s的自由行驶数据为一个数据片,以所有同类车辆平均自由车速作为该类型车辆驾驶员的期望车速。经过计算,客车平均自由车速为74.5 km/h,货车平均自由车速为72.4 km/h。

4 模型标定及仿真验证

4.1 模型标定结果

由于本文模型没有把驾驶员性格、车辆性能等差异性因素考虑进去,可以预见用来标定的车辆样本越多,模型的误差就越大。每次随机选取10辆车的行驶数据作为数据样本对模型参数进行标定,所选取的行驶数据应尽可能地包含自由行驶与跟驰2种状态。遗憾的是,由于采集区域较短,没有成功标定反应时间并满足2种状态共存的行驶数据。虽然样本数据均为跟驰状态下的数据,但由于本文所建模型的标定工作实际上是确定驾驶员的感知阈值与行为阈值,且自由行驶行为本身较为简单(在2.3节中构建的17条模糊规则中只占前3条),故采用该数据对模型进行标定是可行的,所进行的结果验证也能够反映出模型的优劣。

选取均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、标准均方误差(normalized mean square error, NMSE)3个指标来评价模型的效果^[14],计算表达式见式(2)到式(4)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{x}_i - x_i| \quad (3)$$

$$NMSE = \left[\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2 \right] / \left[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2 \right] \quad (4)$$

式中: x_i 为原始值; \bar{x}_i 为原始值的平均值; \hat{x}_i 为模型输出值; $i=1,2,\dots,N$ 是数据编号。

本文共进行了3次标定。3次模型标定的评价结果见表5。其中第3次标定的模型计算值与实际加速度的对比见图4。对应的隶属函数参数标定结果见表6。由表5与图4可知,标定后的FIS模型对实际行驶数据有良好的拟合精

度,整体趋势也有较好的吻合。

表5 FIS模型评价结果

指标值	第1次	第2次	第3次
F_{obj}	0.439 3	0.373 1	0.357 9
RMSE	0.562 3	0.379 0	0.391 5
MAE	0.428 2	0.291 7	0.307 5
NMSE	0.760 7	0.607 5	0.560 3

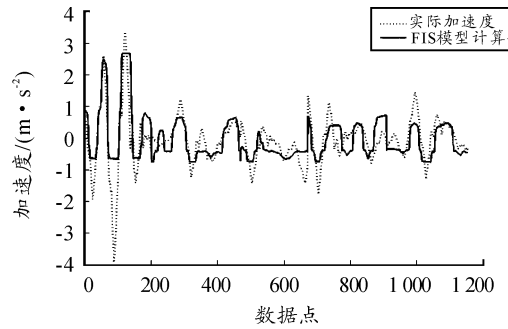


图4 FIS模型输出值与实际值对比示意图

表6 FIS模型标定结果

参数	t_1	t_2	t_3	r_1	r_2
标定值	0.279 0	2.397 1	3.720 6	-1.377 3	1.328 0
参数	d_1	d_2	n_4	n_3	n_2
标定值	-3.581 4	0.284 8	-1.595 9	-0.901 5	-0.801 3
参数	n_1	p_1	p_2	n_3	n_4
标定值	-0.554 1	0.868 1	0.970 3	1.092 7	1.546 1

4.2 模型验证

本文设计了一个想定实验,来检验模型在2种行驶状态之间的转换能力。模型参数的设置如表7。

表7 FIS模型参数设置

参数	t_1	t_2	t_3	r_1	r_2
设定值	2	3	4	-2	2
参数	d_1	d_2	n_4	n_3	n_2
设定值	-2	2	-4	-3	-2
参数	n_1	p_1	p_2	n_3	n_4
设定值	-1	1	2	3	4

假定驾驶员的反应时间为1 s,车道为直线,且长度足够长。前车起始位置为200 m,前车速度变化为

$$v_f = \begin{cases} \frac{4}{9}t + 15, & 0 \leq t < 45 \\ 35, & 45 \leq t < 60 \\ 65 - \frac{1}{2}t, & 60 \leq t < 100 \\ 15, & 100 < t \leq 150 \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_f 为前车速度; t 为仿真时间。本车起始位置为0 m,初速15 m/s,期望车速30 m/s。

仿真结果如图5所示。本车的行驶过程经历了自由行驶状态、跟驰状态(以车头时距是否大于5s为判定标准),以及在2种状态之间的转换。本车能够根据前车的行驶状态和自身的期望车速进行合理的速度决策,2种行驶状态之间的过渡也较为平滑(最大减速度约为-2,对应于“负”),达到了模型设计的预期目的。

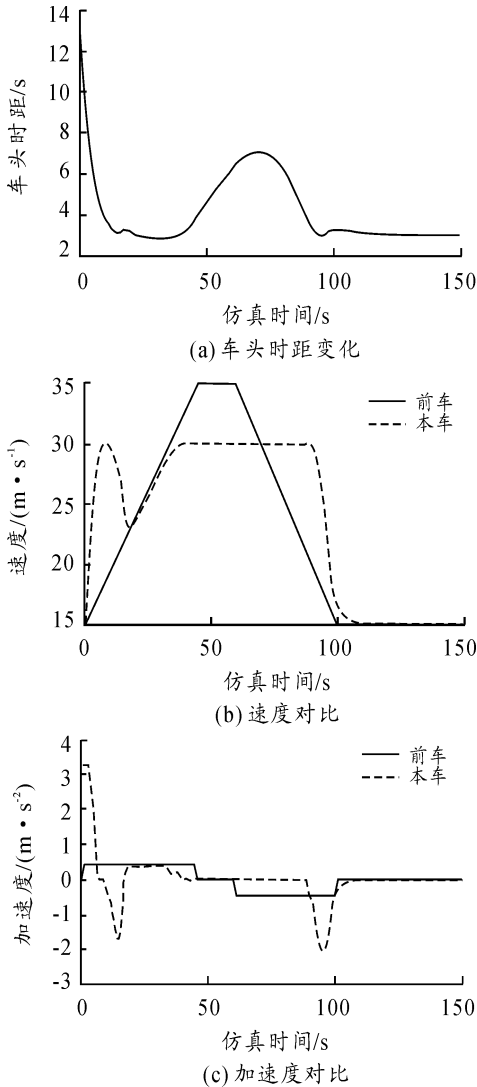


图5 仿真结果

4.3 与GM模型的比较

选取与4.1中一样的数据,对GM模型进行标定,比较2种模型在跟驰状态下的表现。

GM模型的一般表达式为^[10]:

$$a_n(t+T) = \frac{\lambda v_n^m(t+T)}{[x_{n-1}(t) - x_n(t)]^l} [v_{n-1}(t) - v_n(t)] \quad (6)$$

式中: $a_n(t+T)$ 为n车在时刻 $t+T$ 的加速度; $v_{n-1}(t)$ 与 $v_n(t)$ 为n-1车和n车在时刻 t 的速度; $x_{n-1}(t)$ 与 $x_n(t)$ 为n-1车和n车在时刻 t 的位移; T 为驾驶员的反应时间; λ 为敏感

系数; λ, m, l 均为待定系数。GM模型评价结果见表8。

表8 GM模型评价结果

指标值	第1次	第2次	第3次
F_{obj}	0.494 2	0.381 3	0.398 9
RMSE	0.631 7	0.399 0	0.445 0
MAE	0.411 7	0.308 8	0.346 7
NMSE	0.990 2	0.595 6	0.650 2

可见,FIS模型与GM模型在跟驰状态下的表现基本一致,比较而言FIS略优一些。然而本文建立的驾驶员车速决策FIS模型具有天生适应2种行驶状态的优势,这是GM模型所无法比拟的。

5 结束语

本文提出了一种隶属度函数参数化设计方法建立了涵盖自由行驶和跟驰2种行为的车速决策FIS模型,并结合实际行驶数据对其进行了标定。通过想定实验证明了模型在2种行驶状态转换过程中具有良好表现。标定后的FIS模型较好地拟合了实际的驾驶行为,且在跟驰状态下的表现略优于GM模型。这说明本文建立的FIS模型具有良好的实用价值和前景。不足之处是期望车速设定有些简单,应进一步建模完善;应区分不同类型驾驶员在不同跟驰类型(前车类型不同)下的行驶数据,分别对模型进行标定,以增强模型参数的针对性。此外,本文提出的FIS模型可在目前基础上适当增加隶属函数的数量及相应的模糊规则,促使模型往更精细化的方向发展。

参考文献:

- [1] 刘东辉,苏虎.虚拟交通环境中的微观交通仿真模型实现[J].西南交通大学学报,2013,48(1):1-8.
- [2] 王殿海,全盛.车辆跟驰行为建模的回顾与展望[J].中国公路学报,2012,25(1):115-127.
- [3] 李鑫铭,陆建,谭丹丹.普通公路驾驶员期望车速调查分析与建模[J].交通信息与安全,2010,28(2):16-20.
- [4] 杨达,蒲云,杨飞,等.基于最优间距的车辆跟驰模型及其特性[J].西南交通大学学报,2012,47(5):889-894.
- [5] Mamdani E H, Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller[J]. International Journal of Man-Machine Studies, 1975, 7(1): 1-13.
- [6] 何民,荣建,任福田.判定跟驰状态的研究[J].公路交通科技,2001,18(4):74-78.
- [7] 杨小宝,张宁.一种改进的跟驰状态判定方法[J].交通运输系统工程与信息,2006,6(2):14-17.
- [8] 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):131-135. (下转第139页)

大悬架刚度将减小,因此当车辆行驶的典型工况使悬架动挠度的标准差较大时,应增大扭杆刚度(图4)。图5即为采用上述等效线性化方法给出设计值,另外计算表明在整个范围内减震器阻尼值的变化不大(小于1%)。

表1 悬架参数计算对比

	扭杆刚度 $K/(\text{Nmm} \cdot \text{rad}^{-1})$	阻尼 $C/(\text{Ns} \cdot \text{m}^{-1})$	预扭角 $\alpha/(\circ)$
静位置	7 263.4	1 100	14.2
等效法	8 127.9	1 103	12.6

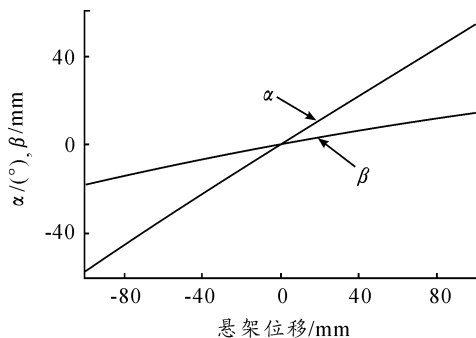


图4 扭杆、减震器位移与悬架位移关系

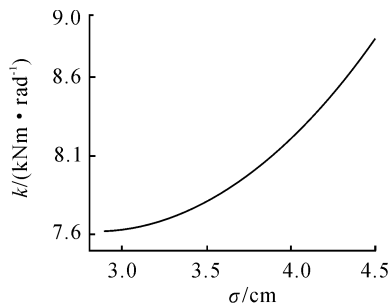


图5 等效刚度与动挠度标准差关系

5 结论

本文基于等效线性化方法给出了一种通用的独立悬架参数设计方法,该方法可以方便地将经典单自由度、双自由度车辆振动分析的结果转化为具体弹簧刚度和减震器阻尼值设定。编写的数值求解程序,对某扭杆式双横臂悬架进行了设计计算,与传统方法相比精度较高。该法能适用于大部分独立悬架的力学参数初步计算,为车辆前期设计和精细仿真时初始参数设置提供了参照。

参考文献:

- [1] 陈辛波,赵锐. 双横臂悬架力学特性的非线性分析与设计[J]. 同济大学学报,2006(5):655-659.
- [2] 戴旭文,谷中丽,刘剑. 汽车双横臂悬架的运动分析和计算[J]. 车辆与动力技术,2002(6):39-43.
- [3] Manfred Mitschke, Henning Wallentowitz [德]. 汽车动力学[M]. 陈荫三,余强,译. 北京:清华大学出版社,2009.
- [4] 李惠彬. 振动理论与工程应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006.
- [5] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [6] 叶全勇,俞德孚. 悬架减震器外特性平安比(η)的设计研究[J]. 兵工学报,1994(1):22-29.
- [7] 张军,雷帅,段嗣盛. 空气悬架大客车高度控制仿真与试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2012(4):123-126.
- [8] 徐中明,徐浩轩,张志飞,等. 基于RecurDyn的扭力梁悬架运动学分析与改进[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版,2012(7):1-5.

(责任编辑 周江川)

(上接第120页)

- [9] BROCKFELD E, K HNE D, WAGNER P. Calibration and validation of microscopic models of traffic flow[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2005 (1934): 179-187.
- [10] 王殿海,陶鹏飞,金盛,等. 跟驰模型参数标定及验证方法[J]. 吉林大学学报:工学版,2011,41(增刊1):59-65.
- [11] 陆斯文,王俊骅. 基于ANFIS的高速公路车辆跟驰模型与仿真[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(7):1018-1022.

- [12] 乔晋. 车辆跟驰模型参数标定与验证研究[D]. 上海:上海交通大学,2008:27-32.
- [13] 薛峰. 城市快速路微观交通仿真系统建模[D]. 上海:华东师范大学,2010:28-32.
- [14] Ghaffari A, Khodayari A, Arvin S, et al. Lane Change Trajectory Model Considering the Driver Effects Based on MAN-FIS[J]. International Journal of Automotive Engineering, 2012,2(4):261-275.

(责任编辑 杨继森)