

基于追尾危险感知模糊推理的交通流运行安全评价

陆斯文, 方守恩, 王俊骅

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为了有效替代基于事故数据的传统追尾风险评价方法, 对微观驾驶员追尾危险感知模糊推理中的跟驰安全距离计算方法, 包括影响驾驶员反应时间的天气状况隶属度函数进行了改进. 以此为基础, 提出可评价整个行车环境安全的道路行车危险总体感知度指标; 构建了一个衡量宏观交通流的平均追尾风险评价指标, 并通过 Aimsun 仿真软件得到不同交通条件下的平均追尾风险评价指标值, 采用通过模糊聚类方法对该指标进行等级划分, 可为道路交通事故预警技术提供支持.

关键词: 模糊推理系统; 追尾危险感知; 跟驰安全距离; 天气状况; 交通流安全评价

中图分类号: U 491

文献标识码: A

Safety Evaluation of Traffic Flow Operation Based on Fuzzy Inference of Risk Perception of Rear-end Collision

LU Siwen, FANG Shouen, WANG Junhua

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to effectively surrogate the traditional evaluation method based on the accident data, the calculation method of car-following safety distance including the membership function of weather condition in the microscopic fuzzy inference system for risk perception was improved. The whole road risk perception index was put forward to measure the total driving environment and the average risk evaluation indicator of rear-end collision was developed for macroscopic traffic flow. The value of the average risk indicator could be achieved by simulation of AIMSUN software. Then, the Fuzzy c-means cluster method was used to develop the criterion of the indicator. Therefore, the research results can provide a support for the early warning technology of traffic accidents.

Key words: fuzzy inference system; risk perception of rear-end collision; car-following safety distance; weather condition; safety evaluation of traffic flow

随着道路交通安全管理工作的不断深入和发展, 政府部门越来越注重道路安全管理工作的科学性和先进性. 但目前我国道路安全形势依然严峻, 事故发生总数仍高居不下, 尤其是作为运输业经济命脉的高速公路. 据 2007 年统计, 高速公路共发生了 12 364 起交通事故, 其中尾随相撞 5 525 起, 占 44.69%. 因此, 如何科学地预防高速公路追尾事故的发生成为高速公路交通安全问题的重点解决对象.

目前, 常用的道路安全评价方法有两种: 一种是基于事故数据的道路安全评价模型, 它主要通过分析事故数据与其影响因素包括日交通流量、道路几何条件等自变量的关系, 建立宏观回归模型, 从而说明上述影响因素对道路交通安全的影响程度, 但没有从本质上解释高速公路追尾事故发生的机理^[1-2]. 另一种是基于非事故数据的理论推导法, 主要是通过分析形成潜在追尾事故的车辆运动状态来评价道路行车安全性, 已有相关指标主要包含临界减速度、临界制动距离、冲突碰撞时间^[3]. 但这些指标不能反映行车过程中驾驶员行为的模糊性和不精确性特点. 同时, 考虑到目前我国道路交通事故采集信息无法细化到道路几何条件、交通流量等具体可量化参数, 因此, 针对文献^[4]利用模糊推理原理来描述不同天气条件下高速公路驾驶员追尾危险的感知特性. 本文主要利用非事故数据的理论推导法, 对其用于描述天气环境的隶属度函数和计算跟驰安全距离公式进行相应的调整, 从而使之更加符合实际条件. 以此为基础, 建立道路行车危险总体感知度和

收稿日期: 2009-10-15

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2007BAK35B03)

第一作者: 陆斯文(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路交通安全. E-mail: lusiwenwinner@163.com

通讯作者: 方守恩(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路交通安全. E-mail: fangsek@tongji.edu.cn

实时评价宏观车流运行安全的指标,更好地解释高速公路追尾事故发生机理及其跟驰过程中驾驶员的主观性和模糊性,并更有效地评价高速公路交通流运行的安全性。

1 跟车安全距离计算

文献[4]选用微观交通流条件下两车的速度差、前车的加速度和车头间距与跟车安全距离比值作为驾驶员风险感知的模糊推理系统输入.其中跟车安全距离指在同一条车道上,同向行驶前后两车间,保持既不发生追尾事故,又不降低道路通行能力的适当距离(后车车头与前车车尾间的距离).文献[4-5]通过将车辆制动过程中制动减速度增长阶段简化处理的方法计算车辆跟驰安全距离:

$$S_D = v_f(t_r + t_b) + \frac{v_f^2}{2a_{\max}^f} - \frac{v_l^2}{2a_{\max}^l} + L_s \quad (1)$$

式中: v_f 和 v_l 分别为后随车和引导车的制动初速度; t_r 为制动感觉反应时间; t_b 为车辆制动协调时间,按液压制动系统标准取 0.175 s; a_{\max}^f 是后随车的制动减速度; a_{\max}^l 是前车的制动减速度; L_s 是制动停车后两车之间的安全距离,考虑车辆类型对跟车时驾驶员产生的安全感差异性,如果前车是中大型车辆取 6 m,小型车辆取 3 m.

但上述跟驰安全距离是衡量在某一时刻两车处于不同车速条件下的安全状态,例如引导车的车速大于后随车的车速条件下,会出现跟驰安全距离为负的现象,此时,后随车不管保持多少间距都处于绝对安全状态.因此,为了规定后随车在一定车速和任何时刻下,其应保持的安全距离值,必须重新给定其跟驰安全距离,从而可以用于实际的交通管理控制中,具体如下:

因高速公路运营形成的是稳定车流,当两车跟驰的前后车速度相等时,计算所得的安全距离为基本安全间距,其具体形式为^[6]

$$S_{D1} = v_f(t_r + t_b) + \frac{v_f^2}{2a_{\max}^f} - \frac{v_l^2}{2a_{\max}^l} + L_s \quad (2)$$

当后随车遇到障碍物时,计算所得的安全距离为充分安全间距,其具体形式为^[6]

$$S_{D2} = v_f(t_r + t_b) + \frac{v_f^2}{2a_{\max}^f} + L_s \quad (3)$$

从道路交通实际运行情况看,前车发生瞬时停车的可能性很小,车辆之间的间距主要由驾驶员根据道路条件、交通变化、环境条件、车辆的操作性能、

驾驶的熟练程度以及主观愿望选择行车间距,实际行车间距和一般安全间距应介于充分安全间距与基本安全间距之间^[7].因此,本文将此定义为一般安全间距,具体如下:

$$S_D = \alpha S_{D1} + \beta S_{D2} \quad (4)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (5)$$

式中: α 和 β 分别为基本安全间距、充分安全间距相对于一般安全间距的相对系数.根据驾驶人实际行车经验,考虑到高速公路行车安全、舒适和快捷的总体目标^[7],本文将 α 取为 0.5, β 取为 0.5.

2 最大减速度

汽车制动减速度 a_{\max} 是反映车辆制动性能的重要指标.由于以高速公路为研究对象,故只考虑沥青混凝土路面.根据中华人民共和国机动车制动检验规范中规定的附着系数^[8],考虑到胎压与车辆类型之间的一般关系,将不同大小车辆类型的最大减速度值进行相应的确定,见表 1.

表 1 沥青混凝土路面不同车辆类型的最大减速度
Tab.1 Maximum deceleration of different vehicles on asphalt concrete pavement

表面状态	最大减速度/(m · s ⁻²)		
	小型车	中型车	大型车
干燥	7.4	6.4	5.5
潮湿	4.9	3.9	2.9
积雪	3.0	2.5	2.0
冰冻	1.3	1.0	0.7

3 天气状况与驾驶员反应时间的确定

文献[4]考虑了天气条件和跟驰车速对行车过程中驾驶员反应时间的影响,并利用模糊推理原理分别建立其相应的隶属度函数,获得了用于计算安全跟驰距离的驾驶员制动感觉反应时间,从而使跟驰安全距离更加符合实际跟车行为.文献[4]选用能见度评价指标描述天气条件,由于能见度需用气象检测设备测试而且不能全方位描述各种恶劣天气对驾驶员感知的影响,在实际应用中有一定困难.本文选用驾驶员对不同天气状况具有不同的感知来改进其相应的模糊性,如晴天驾驶员感觉良好;雨雪天气驾驶员感觉差.因此用于评价天气状况的输入变量为相应的天气状况指数 X_1 ,其论域为[1,5],相应的模糊子集分别为好、中、差,如图 1 所示.而其跟驰速

度和感知反应时间的隶属度函数仍参照文献[4]的具体作法。

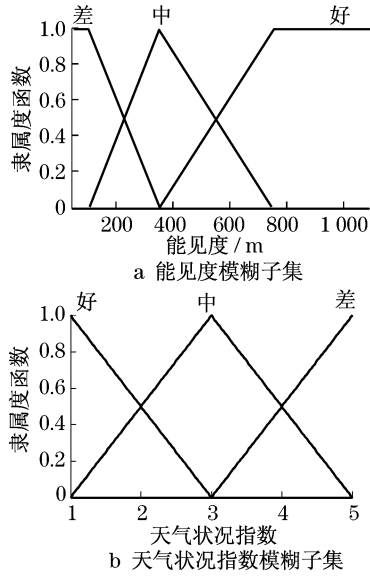


图1 改进的天气状况隶属度函数

Fig.1 Membership function of modified weather indexes

最终,利用 Matlab 提供的模糊工具箱建立用于计算跟驰安全距离所需要的驾驶员感知反应时间模糊推理系统,其构建方式可具体参见文献[4]。

4 追尾危险感知值

根据文献[4]追尾危险感知值的模糊推理计算方法,选用两车速度差 D_v 、前车加减速速度 L_a 和两车车头间距与改进的跟驰安全距离比值 D_b/S_b 作为驾驶员追尾危险感知模糊推理系统的输入变量,其论域分别取为 $[-30, 30] \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $[-9, 6] \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $(0, 2]$, 驾驶员追尾危险感知值 P_{RV} 作为输出变量,其论域为 $[1, 10]$ 。同时,相应的隶属度函数参见文献[4],其中 D_b/S_b 模糊集分别为{相对小(RS),相对稍小(RMS),1左右(RE),相对稍大(RMB),相对大(RB)}, P_{RV} 的模糊集分别为{很安全(VS),安全(S),一般(NM),危险(Da),很危险(VD)}。最终,得到的 Mamdanid 型追尾危险感知模糊推理系统可参见文献[4]。

5 道路行车危险总体感知度

从人-车-路-环境安全系统角度出发,道路行车安全主要影响因素分为道路主体基础设施、道路安全保障设施、天气条件及交通流运行状况等。因此,本文设想从整体上构建一个更为客观、合理、可衡量

高速公路行车安全水平的综合指标。根据王晓飞^[9]等人对此的研究,结合追尾危险感知研究基础,定义了道路行车危险总体感知度 H_{VAPR} ,主要是指行驶在高速公路上正常的驾驶人对来自于前车和道路、环境综合刺激所做出的危险感知。由于驾驶人根据行车经验做出的总体危险感知具有一定模糊性和主观性,所以利用模糊推理的方法构建该指标,具体如下:

$$H_{VAPR} = a_1 H_{RV} + a_2 H_{SV} + a_3 P_{RV} \quad (6)$$

式中: H_{RV} 为驾驶人对道路基础设施的危险感知; H_{SV} 为驾驶人对道路安全设施的危险感知; a_1, a_2, a_3 是权重系数。

由于天气状况对行车安全的影响已融入到追尾危险感知推理系统 P_{RV} 所涉及到的安全间距计算中,故该综合指标不再将其单独与道路基础设施危险感知等一起并列考虑。

道路基础设施的危险感知系统可以通过管理单元运营安全模糊综合评价^[10]中所涉及到的具体因素的隶属度函数和专家经验等来构建。道路基础设施主要包含几何线形、路面状况和视距子因素;道路安全设施由于无法直接量化,需要定性判断打分,所以也结合文献[10],直接给出道路安全设施定性评价输入和危险感知输出的隶属度。上述两个危险感知系统输入因素的隶属度函数完全按照文献[8]来构建;输出的危险感知隶属度函数参见追尾危险感知值 P_{RV} 隶属度来构建。限于篇幅,不例举出其相应的隶属度函数,只举例道路基础设施危险感知模糊推理系统,见图2。

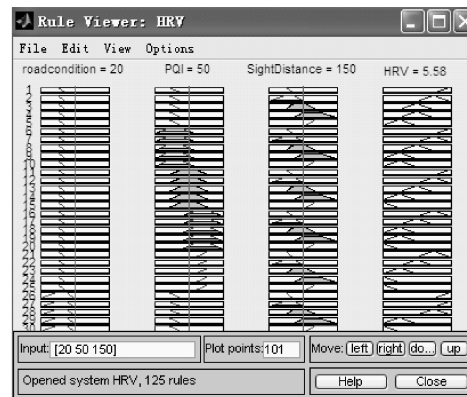


图2 道路基础设施危险感知模糊推理系统

Fig.2 Fuzzy inference system of risk perception of road condition

权重系数 a_1, a_2, a_3 通过层次分析法确定,其结果分别为 0.28, 0.072, 0.65。则公式(6)可写成

$$H_{VAPR} = 0.28 H_{RV} + 0.072 H_{SV} + 0.65 P_{RV} \quad (7)$$

根据上述系统危险感知隶属度函数,可计算出 H_{VAPR} 处于危险感知每个评价集{很安全,安全,一般,危险,很危险}的隶属度值,并确定其最大隶属度值 $u_{\max}(H_{VAPR})$,从而判断当前整个行车环境中道路、车辆、安全设施和天气等对驾驶员行车是否安全.

6 宏观交通流安全水平评价

6.1 平均追尾危险度

驾驶员追尾风险感知推理系统的作用是描述处于跟驰过程中驾驶员对自身行车状态所处危险级别进行评估的过程.因此,它主要是评价处于跟驰状态下两辆车行驶的危险度,而不是对路段上全部车流运行的安全水平进行描述.从这种角度来看,有必要建立一个用于评价交通流运行安全水平的指标.本文提出的单车道和断面平均追尾危险度 S_{LAPRV} , A_{PRV} ,主要用于在给定时间段内,评价所有通过检测断面每一车道上交通流量的平均追尾危险程度以及整个断面相对应的平均追尾危险程度,具体如下:

$$S_{LAPRV} = \sum_{j=2}^{N_{i,T}} \frac{P_{RV_{i,j}}}{N_{i,T}} \quad (8)$$

$$A_{PRV} = \frac{\sum_{k=1}^n S_{LAPRV_k}}{n} \quad (9)$$

式中: S_{LAPRV} 是在给定时间段 T 内单车道的交通流平均危险度; $N_{i,T}$ 是第 i 车道上在给定时间段 T 内总的车辆数; $P_{RV_{i,j}}$ 表示第 i 条车道上第 j 辆车驾驶员的跟驰风险感知值.

根据上述评价指标的定义,结合追尾风险感知量化方法,宏观交通流安全评价的整体流程及相互关系如图 3 所示.

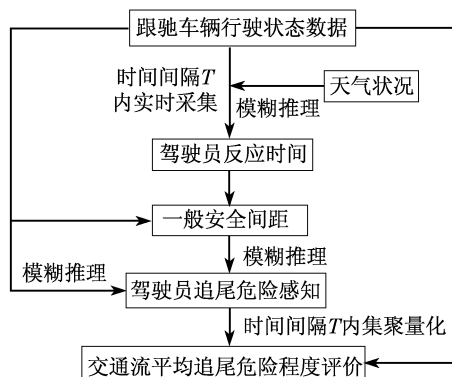


图 3 交通流平均追尾危险程度评价流程

Fig.3 Flow chart of average rear-end collision risk degree for traffic flow

从图 3 中可以看出,驾驶员反应时间可以通过模糊推理方法,在输入天气条件和跟车的车速后得到;接着,结合前后车辆的车速,计算出一般安全间距;然后,再通过模糊推理方法,输入两车行驶运动状态参数如速度差、前车加速度等得到实时的驾驶员追尾危险感知;最后,在时间间隔 T 内,计算出每一辆跟车的追尾危险感知,再通过集聚的方法,建立起平均追尾危险度指标,从而对其交通流安全状态进行评估.

但该评价安全指标是一个衡量在评估时段内平均每辆车所遇追尾风险程度的概念,削弱了驾驶员追尾风险感知危险及以上总的数量级影响.例如在相同的评估周期内,当通过两个不同断面交通流的断面平均追尾危险度相同,而驾驶员追尾风险感知危险总数却不同,则这两波交通流运行安全程度也各不一样.因此,必须将两者综合起来对交通流运行安全进行评价.驾驶员追尾风险感知值判断是否处于危险状态,是通过驾驶员跟驰风险感知度的隶属度函数来确定,也就是说, $u_{Da}(P_{RV})$ 或 $u_{VD}(P_{RV})$ 隶属度最大,就表示跟驰风险感知值处于危险状态,记为 1 次跟驰危险.最终,统计出评估周期内上述情况的总体个数.

6.2 数据采集

根据国外借助交通仿真软件来研究交通安全的经验^[10],本文利用 Aimsun 交通仿真软件模拟双车道基本路段交通流各种不同的运行状况,得到不同流量不同车型组成比例等情况下的交通流运行特征数据,使平均追尾危险度的评价等级阈值范围的划分变得更加准确、更加合理.

在进行仿真之前,先利用上海市某高速公路的实际交通流运行特征包括车速、流量和车型组成比例等来标定 Aimsun 仿真软件中的包含驾驶员行为的路段属性模块和车辆属性模块,从而使通过仿真得到的交通流平均追尾风险度值变得更加客观.

6.3 等级划分方法和等级标定

本文采用模糊 C 均值聚类方法对在固定评价周期 5 min 内不同交通条件下得出的单车道平均追尾风险度进行等级划分^[11].每隔 5 min,通过 Mamdanid 型追尾危险感知推理系统对所采集到的车辆微观行驶数据进行模糊推理,得到单车道平均追尾危险度后再聚类分析,最终分成类 $\{<4\}$, $\{[4 \ 4.5]\}$, $\{>4.5\}$, 分别代表“小”、“中”、“大”.根据仿真结果,统计出每 5 min 评价周期内通过路段断面的驾驶员风险感知处于危险状态的总个数 N ,再结合一定的专家主观经

验,将其分成 3 类 $\{[0, 4n]\}$, $\{[4n + 1, 8n]\}$, $\{\geq 8n + 1\}$, 分别代表“少”、“中”、“多”,其中 n 表示断面车道数. 以此为基础,得出交通流运行安全评价规则,见表 2.

表 2 断面交通流运行安全综合评价规则
Tab.2 Comprehensive evaluation of traffic flow on section

断面交通流 平均危险度	驾驶员风险感知危险状态总数		
	少	中	多
小	安全	安全	一般
中	一般	一般	危险
大	一般	危险	危险

根据表 2,本文对天气晴好条件下,双车道总流量为 2 000 辆和客货比为 1 : 4 的交通流进行 1 h 的交通仿真,然后对其结果进行交通流运行安全评价,评价周期为 5 min,具体如图 4 所示,其中 1 表示危险,2 表示一般,3 表示安全.

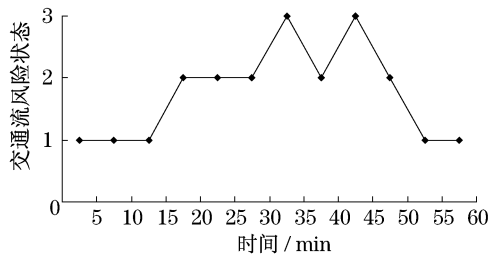


图 4 交通流风险状态评价图
Fig.4 Risk evaluation of traffic flow

7 结论

利用模糊推理原理,考虑了天气、跟驰速度的影响,建立了用于计算跟驰安全车距的制动感觉反应时间的模糊推理系统,改进了 Mamdanid 型追尾危险感知模糊推理系统,构建了考虑道路环境的行车危险总体感知度,从而可实时评价驾驶人在整个行车环境中的安全水平. 由于检测线圈能获取断面交通流参数,故提出了用于评价断面交通流平均追尾危险度指标,并结合 Aimsun 仿真软件的输出结果,利用模糊 C 均值聚类方法进行了相应的等级划分. 综合评价周期内通过路段断面的驾驶员风险感知处于危险状态的总个数,制订了断面交通流运行安全综合评价规则表,从而为交通流实时风险评价提供了理论支撑. 评价指标具体阈值的准确性,还需结合实际运用效果进一步完善.

参考文献:

[1] CHANG Liyen. Analysis of freeway accident frequencies negative binomial regression versus artificial neural network [J]. Safety Science, 2005, 43: 541.

[2] Shankar V N, Mannering F. Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies [J]. Accident Analysis and Prevention, 1995, 27(3): 371.

[3] 朱彤,赵永红,白玉,等.跟驰风险的概率估计方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(1): 13.
ZHU Tong, ZHAO Yonghong, BAI Yu, et al. Study of car following risk estimation by probability method[J]. Computer Engineering and Application, 2009, 45(1): 13.

[4] LU Siwen, ZHENG Shiwen. Research on fuzzy inference of driver's risk perception of rear-end collision on freeway[C]// 2009 Second International Conference on Intelligent Computing Technology and Automation, Volume 1. Changsa: IEEE Computer Society, 2009: 772 - 775.

[5] 徐杰,杜文,孙宏.跟车安全距离的分析[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(1): 101.
XU Jie, DU Wen, SUN Hong. Safety distance about car-following [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(1): 101.

[6] 郑安文.高速公路行车间距分析与防追尾装置开发[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(9): 62.
ZHENG An'wen. The analysis of the motorway vehicle gap and designing the device of protecting vehicle collision [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(9): 62.

[7] 石飞荣,杨少伟,戴经良.高速公路路段通行能力探讨[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2007(2): 161.
SHI Feirong, YANG Shaowei, DAI Jingliang. Study on freeway section capacity [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology, 2007 (2): 161.

[8] 中华人民共和国交通部. 中华人民共和国机动车制动检验规范: 试行[S]. 北京: 人民交通出版社, 1980.
Transportation Department. Motor vehicle inspection standard: piolt[S]. Beijing: China Communications Press, 1980.

[9] 王晓飞. 基于路网运营安全的管理对策及决策研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2008.
WANG Xiaofei. Research on operation safety countermeasure and decision-making of highway network[D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2008.

[10] Douglas Gettman, Larry Head. Surrogate safety measures from traffic simulation models[J]. Transportation Research Record, 2003, 1840: 104.

[11] 洪志令,姜青山,董槐林,等.模糊聚类中判别聚类有效性的新指标[J]. 计算机工程科学, 2004, 31(10): 121.
HONG Zhiling, JIANG Qingshan, DONG Huailin, et al. A new cluster validity index for fuzzy clustering [J]. Computer Science, 2004, 31(10): 121.