

基于云理论的人车冲突严重度研究

牟瑞芳¹,王春勤^{1,2}

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院,四川 成都 610031; 2. 越南交通运输大学,越南 河内 100000)

摘 要:为科学判断过街行人与机动车冲突的严重度,提高过街行人安全性、减少交通事故风险,选取对过街行人与机动车冲突影响比较显著的碰撞时间(TTC)和冲突速度(CS)两个因子为评价指标,提出一种新的基于云理论的行人与机动车冲突严重度判别模型。首先,引入过街行人-机动车冲突的相关概念,分析碰撞时间和冲突速度对人车冲突安全性的影响,分析人车冲突严重度判别过程中评价指标自身的随机模糊性问题,建立评价指标属性离散标准,并由此构建人车冲突严重度矩阵,确定了人车冲突等级。然后,介绍了云模型相关理论,利用已建立的人车冲突严重度矩阵构建其云推理评估模型,实现了人车冲突严重度的定性概念与评价指标定量概念之间的自然转化;该模型充分利用云关联规则建立了云推理器,由此计算得到的冲突严重度和严重等级为最终评价结果,并根据冲突严重度对人车冲突进行了排序。最后,随机选取某条道路的过街人车冲突的样本数据,按提出模型计算得到了人车冲突严重等级,并与常用的评价方法相比,以验证该评价方法的合理性。研究结果表明,基于云理论的人车冲突严重度评价简单,判断准确性和可靠性较高,具有一定的应用价值。

关键词:交通工程;云理论;人车冲突;严重度;碰撞时间;冲突速度

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.06.011

Study on pedestrian-vehicle conflict severity grade based on cloud theory

MOU Rui-fang¹, VUONG Xuan-can^{1,2}

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. University of Transport and Communications, Hanoi 100000, Vietnam)

Abstract: In order to scientifically judge the severity of the traffic conflict between crossing pedestrian and vehicle, improve the safety of pedestrian crossing and reduce the risk of traffic accidents, the two factors, including time to collision (TTC) and conflicting speed (CS), which have significant influence on pedestrian-vehicle conflict severity, were selected as evaluation indicators, and a new model of pedestrian-vehicle conflict severity based on cloud theory was proposed. Firstly, the concept of crossing pedestrian-vehicle conflict was introduced to analyze the impact of time to collision and conflicting speed on the safety of pedestrian-vehicle conflict. At the same time, the randomness and fuzziness of the evaluation indicator itself in the judging process of the severity of the pedestrian-vehicle conflicts were analyzed, and the discretization criteria for evaluation indicators were established. Thus, the severity matrix of pedestrian-vehicle

收稿日期:2019-06-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802209)

作者简介:牟瑞芳(1962-),男,山东栖霞人,教授,博士研究生导师,E-mail:472909402@qq.com。

通讯作者:王春勤(1982-),男,越南河内人,工学博士研究生,E-mail:1323972686@qq.com。

conflicts was established to determine the severity grade. Secondly, the cloud model theory was introduced to establish the cloud reasoning assessment model of the vehicle-pedestrian conflict severity using the constructed severity matrix, which implements the natural transformation between the qualitative concept of the severity of the pedestrian-vehicle conflicts and the quantitative concept of the evaluation indicators. The model makes full use of cloud association rules to build a cloud inference engine. Thus, the conflict severity and the severity grade were calculated as the final evaluation results. Simultaneously, according to the conflict severity, the conflicts between pedestrian and vehicle were sorted. Finally, the samples of pedestrian-vehicle conflicts on a certain road were randomly selected, the severity grade of pedestrian-vehicle conflicts obtained from the proposed model was compared with the commonly used evaluation methods to verify the rationality of the new model. The results show that the severity assessment of pedestrian-vehicle conflicts based on cloud theory is simple, accurate and reliable, and has a certain application value. 6 tabs, 8 figs, 38 refs.

Key words: traffic engineering; cloud theory; pedestrian-vehicle conflict; severity grade; TTC; CS

0 引言

根据统计,2016 年全球死于道路交通事故的人数高达 135 万,其中行人占到道路交通事故总死亡人数的 23%^[1],中国 2013~2015 年行人死亡人数在交通事故总死亡人数中占比约 20%,行人的致死率相对较高^[2]。行人与机动车混合互相干扰而发生交通冲突是交通事故最主要的来源。交通冲突频率和严重度越高,其对应的交通事故发生可能性及事故严重性也越高,研究人车冲突对过街行人安全相关措施的制定具有一定的意义。近年来,国内外研究者对人车冲突进行了相关研究并取得了一定的成果,主要的人车冲突程度评价指标有碰撞时间^[3-4]、后侵犯时间^[5-6]、安全减速度时间、冲突时间差、碰撞速度等,其中碰撞时间(time to collision, TTC)定义为车辆如果继续以当前的速度和路径前进,至冲突点所需的时间^[7]。TTC 越小,冲突就越严重,但当速度较大而距离较远,或距离较近而速度较小时,都可导致 TTC 减小,即该指标不直接与碰撞严重性相关^[8]。此外,目前 TTC 的临界值界定不完全一致,大多数学者认为人车冲突 TTC 临界值小于 3 s。Brown 利用 TTC 将避免行为分为 (0, 1 s), [1 s, 1.5 s) 和 [1.5 s, 2 s) 3 个时段^[9]。Sayed 等采用 TTC 和碰撞风险得分之和确定冲突严重程度,其得分越高冲突的风险性越高,其中 TTC 的得分为 1~3,依次为 [1.6 s, 2.0 s]、[1.0 s, 1.5 s] 和 (0, 0.9 s];类似的,碰撞风险的得分为 1~3,依次为低风险、中等风险以及高风险,并以 TTC 值为 1.5 s 和碰撞风险为中等作为临界事件^[10]。Wu 等认为

当 TTC 值小于 1.0 s 为严重冲突、大于 1.0 s 小于 1.6 s 为一般冲突、大于 1.6 s 为不构成危险^[11]。Huang 等通过现场调查分析表明,TTC 范围为 0.7~3.0 s^[12]。Wu 等将 TTC 分成 5 个阈值,分别为 2.0、2.3、2.5、2.7、3.0 s,通过现场调查分析和模拟分析表明,在人车冲突中最大 TTC 阈值为 2.7 s^[4]。Sha 等按 TTC 阈值为 3 s,将人车冲突严重度分为 3 个等级^[3]。Matsui 等通过调查分析表明,TTC 在 [0.5 s, 5 s] 之间,将其均值 1.7 s 作为人车事故临界值^[13]。综上可知,TTC 临界值没有明确的规定,并具有不确定性。

车速不仅是导致交通事故的重要参数之一,而且直接影响交通事故的严重度和事故中人员的死亡率^[14-16]。当平均车速增加 1 km/h 会导致死亡事故风险增加 4%~5%,平均车速降低 5%则使死亡人数减少 30%^[17]。当车辆碰撞的车速在 30 km/h 以上时,其所造成的伤害超过行人承受能力^[18],而碰撞速度在 50 km/h 时,行人死亡风险是 30 km/h 时的 5 倍以上^[19-20],当碰撞速度在 50~60 km/h,行人死亡风险增快^[21]。一般在碰撞速度小于 50 km/h 时成人死亡率不到 20%,但 80 km/h 时行人几乎直接被撞击死亡。Kong 等研究表明,车辆碰撞的速度为 50、58、70 km/h 时,行人死亡风险依次为 26%、50%、82%;而若碰撞速度为 80 km/h,行人几乎直接死亡^[22]。Lu 等研究指出,采用与速度、加(减)速度等参数相关的 TTC 判别冲突严重度较为直观和合理^[23]。Hyden 首次结合碰撞时间和冲突速度制图,并按该图将交通冲突分为非严重冲突和严重冲突两大类,认为 TTC 小于或等于 1.5 s 为严

重冲突^[24]。李杰等在 Hyden 方法基础上利用模糊控制来辨别机动车追尾冲突严重度,并将严重度分为严重、轻微、正常 3 类^[25]。胡小平将减速度、冲突速度和 TTC 作为评价指标,利用模糊综合法判定交叉口交通冲突严重度,并将其分为安全通过、一般冲突、中度冲突以及严重冲突 4 个等级^[26]。胡宏宇等将人车冲突分为 3 个等级,以冲突时间差和车速为评价指标,建立了基于模糊控制的冲突判别法^[27]。除上述方法外,还有以 TTC、后侵犯时间和减速度为指标,通过映射方法、自组织映射特征神经网络法等对人车冲突严重度进行分级^[28-29]。

上述方法大多建立在单一评价指标上,或者利用模糊综合法、神经网络法的多评价指标,在处理实际不确定性问题上还存在一定缺陷:模糊数学的隶属函数概念及确定方法不够精确,不能表示出决策者主观判断的随机性、函数具体形式难以确定并且确定方式单一;传统权重确定方法,如专家评估法、层次分析法等在权重的确定过程中主观性较强^[30-31];神经网络法难以寻找学习算法和确定差异度系数;且同时考虑发生碰撞可能性和碰撞后果的研究较少。

由于影响人车冲突程度的因素较多,难以用模型精确量化,且人车冲突情况不同,冲突严重度也不同。冲突严重分级需综合考虑多个评价指标,且分级是随机事件,其临界值也存在模糊性,即冲突严重度辨别具有不确定性。对于工程上的不确定性问题,李德毅等提出了云模型的概念,其方法能够实现定性与定量描述之间的自然转换^[32]。目前该模型已广泛应用于国防、电力、气象等领域的系统评价和决策研究工作中,但鲜有将云模型用于人车冲突严重性研究。

本文选取对交通冲突影响比较显著的碰撞时间(TTC)和冲突速度(conflicting speed,CS)两个基本因子为评价指标,其中 TTC 表示行人与机动车冲突导致发生事故的可能性,CS 表示人车事故的损失程度。在建立人车冲突严重度矩阵的基础上,提出了基于云理论的人车冲突严重度判别模型,并通过算例检验该模型,研究结果对行人过街安全的相关措施制定具有理论价值。

1 人车冲突严重度的指标临界值

人车冲突指当行人以个体或群体形式过街时,与转向或直行车辆在同一时间、空间上相互接近,如果至少一方不采取避险行为,如减速、停留、变向

等时,则会发生碰撞^[33],可以通过冲突指标来衡量严重度。针对冲突车辆为主体,人车冲突 TTC 的定义为当车辆感知到冲突情况,在开始采取行为时,假设继续按照当前的速度和路径前进,到达冲突点所需要的时间^[7,13],如图 1 所示。图 1 中, D_v 、 V_v 分别为冲突距离和车速, T_{TC} 为 TTC 的值。当避险行为开始时车辆的瞬时速度作为冲突速度 CS。可以采用人工观测、视频观测、交通模拟仿真等方法获得车速、人车相距等相关信息,计算 TTC 和 CS^[3-4,12,34]。

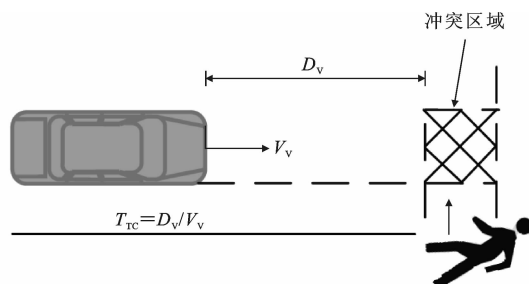


图1 人车冲突 TTC 计算

Fig. 1 Calculating of TTC of pedestrian-vehicle conflict

在车辆避让与行人冲突时因驾驶人觉察到了冲突发生的可能性,迅速做出制动,但此时很难立即停车。因此,这可能是一个潜在的碰撞。一般 TTC 越短,CS 越高,冲突就会越严重,发生事故的可能性越高且损失也越严重,但对于严重等级(severity grade,SG)的判断很难给出精确的定义和阈值。将人车冲突严重度分为轻微(I)、一般(II)、严重(III) 3 个等级^[34],其在 $[0,1]$ 之间分配,并需要考虑 TTC 和 CS 两个评价指标。将 TTC 分为很长(I)、长(II)、中(III)、短(IV)、很短(V);CS 分为很低(I)、低(II)、中(III)、高(IV)、很高(V)。根据上述可知,目前国内外交通冲突研究中并没有将人车冲突 TTC、CS 指标进行总体界定,大多数学者以 TTC 等于 3 s 为上界,所以本文中以 TTC 等于 3 s 作为人车冲突和非冲突的临界值^[3,12]。结合文献[9]~文献[11],将 TTC 初步离散化为 $(0, 1\text{ s}]$ 、 $(1\text{ s}, 1.5\text{ s}]$ 、 $(1.5\text{ s}, 2\text{ s}]$ 、 $(2\text{ s}, 2.5\text{ s}]$ 和 $(2.5\text{ s}, 3\text{ s}]$,分别对应 5 个等级,见表 1。考虑各等级界限值的模糊性和随机性,有些评估的点会落在 2 个等级之间,将在第 2 节中利用云模型进一步处理。分析可知,当碰撞速度小于 30 km/h 时,一般对行人不会产生重大伤害,而碰撞速度大于 80 km/h 时,行人几乎直接死亡。对于驾驶人来说,随着车速的提高,驾驶人判断的碰撞风险也越来越高。当速度在 40 km/h 以下时,驾驶人对风险评估较低,其感知的

风险随车速变化逐渐增加;在 40~60 km/h 时,感知的风险随车速变化的趋势逐渐变缓;而当车速超过 60 km/h 后,感知风险很高^[35]。因此,确定将冲突速度初步划分为(0,30]、(30,40]、(40,50]、(50,60]、(60,80]对应 5 个等级,见表 1。

因 TTC 代表发生事故的可能性,而 CS 代表潜在事故的损失程度,利用风险矩阵法,结合文献[24]~文献[25]建立了人车冲突严重度矩阵,如表 2 所示。

表 1 评价指标属性离散标准

等级	CS 值/(km·h ⁻¹)	TTC 值/s	SG 值
I	(0,30)	(2.5,3.0]	(0,0.33]
II	[30,40)	(2.0,2.5]	(0.33,0.67]
III	[40,50)	(1.5,2.0]	(0.67,1.00]
IV	[50,60)	(1.0,1.5]	
V	[60,80]	(0,1.0]	

表 2 人车冲突严重度矩阵

冲突速度 CS	不同碰撞时间 TTC 下的冲突严重度				
	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)
(I)	I	I	I	II	II
(II)	I	I	II	II	III
(III)	I	II	II	II	III
(IV)	II	II	II	III	III
(V)	II	III	III	III	III

2 基于云理论的人车冲突严重度模型

云理论将随机性和模糊性信息完全集成到一起,表示某个定性概念与其定量数值之间的不确定性转换模型^[32]。设 U 是一个用精确数字表示的论域, C 是论域 U 上的定性概念,设 $x \in U$,为定性概念 C 在论域中的一次随机实现, x 对于 C 所表达的隶属度 $u_C(x) \in [0,1]$,为一个具有稳定倾向的随机数,则 x 在论域 U 上的分布称为隶属云(云模型),简称为云,每个 x 称为云滴(x, u_C)。云理论采用 3 个数字特征来反映,即期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 来表征一个定性概念 C 。若 x 满足 $x \sim N(E_x, E_n^2)$ 和 $E_n \sim N(E_n, H_e^2)$,而且对概念 C 的隶属度满足式(1),则 x 在 U 上的分布称为正态云。除了正态云之外本文中采用了半升正态云、半降正态云、梯形云、虚拟云等^[32,36]。

u_C(x)=exp[-(x-E_x)^2/2E_n^2] (1)

云理论的定性与定量间的相互转换可以通过正向云发生器(forward cloud generator,CG)和逆向云发生器(backward cloud generator,CG⁻¹)来实

现,各种云发生器可以构造规则生成器,实现从一个定性概念到另一个定性概念的推理,比如 if A then B,A、B 为语言值表示的对象。可以运用 X 条件(即特定值)正向云发生器和条件 Y 正向云发生器来构造定性规则 and 不确定推理过程,图 2 为定性规则的构造方法与其推理过程。其中: x_A, x_C 分别为云滴(x_A, u_A)和(x_C, u_A); $E_{xA}, E_{xC}, E_{xC'}$ 为其对应的期望值; $E_{nA}, E_{nC}, E_{nC'}$ 为其对应的熵值; $H_{eA}, H_{eC}, H_{eC'}$ 为其对应的超熵值。多个这样的云单规则生成器组合起来作用时,就构成了多条件多规则生成器^[37]。但当多个条件时用这样推理法需要实现多组合定性语言值,必须实现各种维度的云发生器^[38],则过于复杂,可以用多个一维云模型通过“软与(soft and,SA)”构造的乘法器实现。

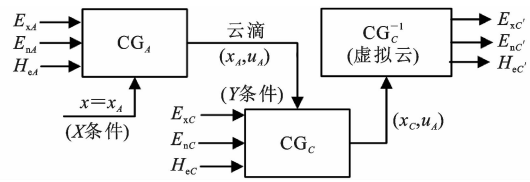


图 2 一维单规则的生成器

Fig. 2 One-dimensional single-rule generator

一维单规则的推理过程如下:首先特定值 $x = x_A$ 通过 CG_A 生成 X 条件下云滴(x_A, u_A),然后 u_A 通过 CG_C 生成 Y 条件下云滴(x_C, u_A),以在通过 CG_C^{-1} 或者虚拟云可以得出云模型的数字特征。在二维(双条件)多规则情况下,可通过 X 条件正向云发生器 CG_A, CG_B, Y 条件正向云发生器 CG_C ,乘法器(multiplier,MP),逆向云发生器 CG_C^{-1} 或虚拟云以及规则选择器(rule selector,RS)构成人车冲突严重度的云推理器,如图 3 所示。

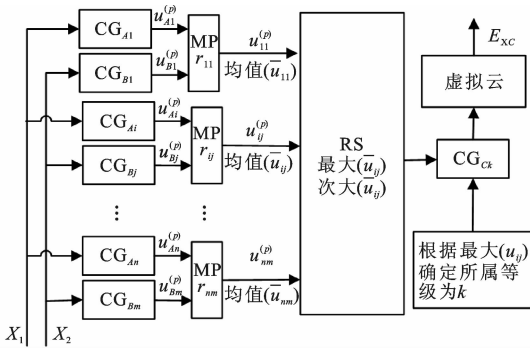


图 3 人车冲突严重度的云推理器

Fig. 3 Cloud inference engine for severity of pedestrian-vehicle conflicts

图 3 中, CG_{Ai}, CG_{Bj} 为定性规则的前件($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$),表示在 r_{ij} 推理规则中对应

于语言值 A_i, B_j 的输入值 X_1, X_2 多次刺激 CG_{A_i}, CG_{B_j} 时,得到了 $u_{A_i}^{(p)}$ 值和 $u_{B_j}^{(p)}$ 值($p=1,2,\cdots,P, P$ 为刺激次数),然后通过乘法器 MP 得到 r_{ij} 推理规则的 $u_{ij}^{(p)}$ 值作为对应该条定性规则的激活强度,从而算出每条规则的平均值 \bar{u}_{ij} 并形成矩阵 $\boldsymbol{u}=\{\bar{u}_{ij}\}$ 。经过规则选择器 RS,先检索出 \boldsymbol{u} 矩阵中每个等级的最大值,然后选取最大值和次大值 $\bar{u}_l(l=1,2)$ 及其的位置,即对应规则。此外, \bar{u}_l 每次刺激规则后件对应的云发生器 CG_{C_k} 得到了 4 个输出 y_q 值, $q=1\sim 4$,即利用式(1)反计算在 E_n 和 \bar{u}_l 条件下的 4 个云滴 (y_q, \bar{u}_q) ,选取最外侧的 2 个云滴 $(y_1, \bar{u}_1), (y_2, \bar{u}_2)$,并运用几何方法构建一个虚拟云,其数字特征为 $(E_{xc}, E_{nc}, 0)$ 。 E_{xc}, E_{nc} 分别为其期望和熵。其中 E_{xc} 作为人车冲突严重度的输出,就是人车冲突严重度最终的评价值。该推理的具体过程如下。

(1)确定各指标云数字特征,若是定性概念具有左端点与右端点 $(X_{\min}, X_{\max}]$,即其极大值与极小值,其云数字特征计算式为

$$\begin{cases} E_x=(X_{\max}+X_{\min})/2 \\ E_n=(X_{\max}-X_{\min})/6 \\ H_e=\alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 为常数,据变量本身的稳定性来具体调整。

当定性概念只有单边界限时,可先确定其期望值,然后再按式(2)来计算云。此外,要考虑 2 个概念的交叉度:因按式(2)所得的云图,在边界处彼此分隔清晰,模糊性较低,适用于需精确区分的一些概念,但是在人车冲突严重度评价中,评价指标分级界限具有模糊性和随机性,有些评估的点会落在 2 个等级之间,无需精确区分其属于哪个等级,隶属云可以相对模糊评价。因此, E_n 计算式为

$$E_n=(X_{\max}-X_{\min})/2.3548 \quad (3)$$

式中: 2.3548 为隶属云在边界处隶属度为 0.5 时的计算值,此时 $x=E_x\pm 1.1774E_n$ 。边界处隶属度为 0.5 的意义在于边界处的数值可属于上一等级或下一等级,这种边界的模糊性可让评价结果更为准确。

(2)对双条件 (X_1, X_2) 每一条单规则,以 E_{nA_i}, E_{nB_j} 为期望、 H_{eA_i}, H_{eB_j} 为方差,生成随机值 E'_{nA_i}, E'_{nB_j} 。

(3)计算如下

$$u_{A_i}^{(p)}=\exp[-(X_1-E_{xA_i})^2/2(E'_{nA_i})^2] \quad (4)$$

$$u_{B_j}^{(p)}=\exp[-(X_2-E_{xB_j})^2/2(E'_{nB_j})^2] \quad (5)$$

$$u_{ij}^{(p)}=u_{A_i}^{(p)}u_{B_j}^{(p)} \quad (6)$$

式中: $u_{A_i}^{(p)}, u_{B_j}^{(p)}$ 分别为第 p 次刺激的 CG_{A_i}, CG_{B_i} 的隶属度,即激活强度。

(4)重复第(2)步~第(4)步,直到得到足够的云滴,即 $(X_1, u_{A_i}^{(p)})$ 和 $(X_2, u_{B_j}^{(p)})$ 。

(5)构成 \boldsymbol{u} 矩阵并检索出最大和次大值。

(6)用 Y 条件云发生器 CG_{C_k} 产生 4 个云滴 (y_q, \bar{u}_q) , 并选择最外侧的 2 个云滴 $(y_1, \bar{u}_1), (y_2, \bar{u}_2)$,结合式(7)和式(8)^[38] 计算得到虚拟云的期望值 E_{xc} 和熵不确定性值 E_{nc} ,从而得到整个推理系统的输出值 E_{xc} ,即

$$E_{xc}=\frac{y_1\sqrt{-2\ln\bar{u}_2}+y_2\sqrt{-2\ln\bar{u}_1}}{\sqrt{-2\ln\bar{u}_1}+\sqrt{-2\ln\bar{u}_2}} \quad (7)$$

$$E_{nc}=\frac{|y_1-y_2|}{\sqrt{-2\ln\bar{u}_1}+\sqrt{-2\ln\bar{u}_2}} \quad (8)$$

按表 1、式(2)和式(3)可得各评价指标的云数字特征,如表 3 所示。

表 3 各指标云模型参数
Tab.3 Cloud models of evaluation indicators

序	TTC 值	CS 值	SG 值
I	2.75,0.21,0.03	15,12.74,0.5	0.17,0.06,0.01
II	1.25,0.21,0.03	35,4.25,0.5	0.50,0.06,0.01
III	1.75,0.21,0.03	45,4.25,0.5	0.83,0.06,0.01
IV	1.25,0.21,0.03	55,4.25,0.5	
V	0.5,0.43,0.030	70,8.49,0.5	

由表 3 和式(1)可得各指标的云簇,并以其形成定性变量的激活区间,见图 4~图 6。

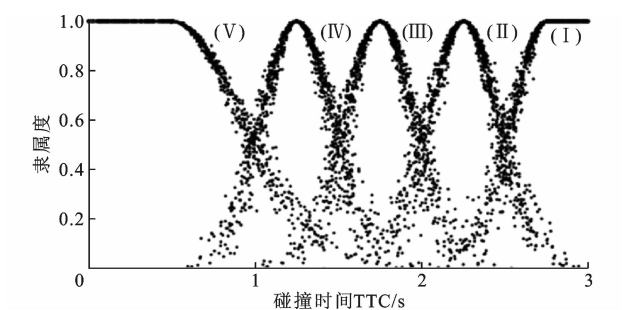


图 4 TTC 的云模型
Fig.4 Cloud model of TTC

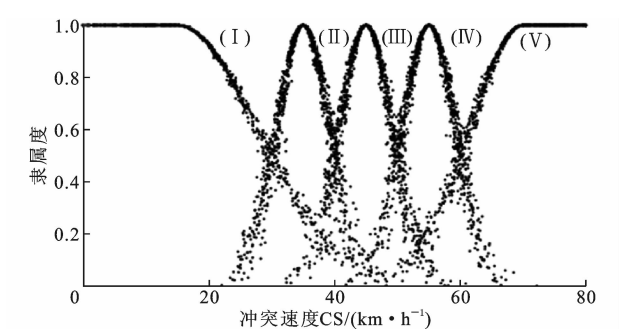


图 5 CS 的云模型
Fig.5 Cloud model of CS

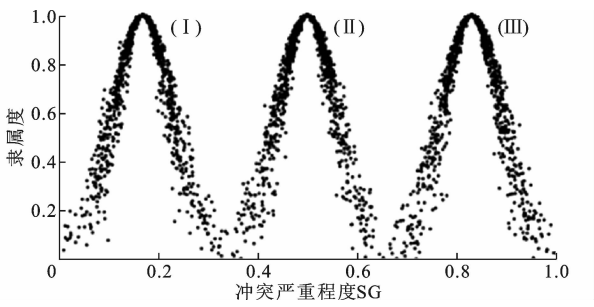


图6 SG的云模型

Fig. 6 Cloud model of SG

表2中构成了TTC、CS和SG之间的定性规则,总共有25个规则,其形式化描述为二维推理规则 r_{ij} :if CS_i and TTC_j then SG_k ($i=1,2,\cdots,5, j=1,2,\cdots,5, k=1,2,3$),同时通过矩阵形式表示25个推理规则如下

$$\mathbf{R}=\{r_{ij}\}=\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 2 & 3 & 3 \\ 2 & 3 & 3 & 3 & 3 \end{vmatrix} \quad (9)$$

$r_{ij}=1,2,3$ 时分别对应轻微、一般、严重。例如:当 $i=3, j=3$ 时, $r_{33}=2$ 表示规则为 if $CS=(\text{III})$ and $TTC=(\text{III})$ then $SG=(\text{II})$,然后按照云推理器和推理过程第(2)步~第(5)步即可得出人车冲突严重度。

3 算例分析

3.1 数据来源

人车冲突的验证数据来自于VISSIM仿真软件。VISSIM中的参数标定参考文献[4]、文献[12]。假设某一路段单向二车道,道路宽度7 m,人行横道宽度4 m,机动车交通量为800 veh/h,平均车速约为40 km/h,道路设计速度为60 km/h,过街人流量为250 人/h,平均行人速度约为5 km/h。在此基础上,建立VISSIM微观仿真平台,在距冲突区域(即人行横道)50 m的位置开始,每隔10 m在地面布置1个数据监测点记录车辆在运行过程中的车速变化规律和车辆的避险行为,通过读取车辆经过相邻2点的速度变化就可判断人车冲突TTC和CS,仿真路段见图7。仿真时长为600 s,取TTC阈值为3 s,共采集到10个交通冲突点,如表4所示。

3.2 人车冲突等级判别与结果分析

将表4中的数据分别输入各属性对应的人车冲突严重度的云推理器,结果如表5所示。

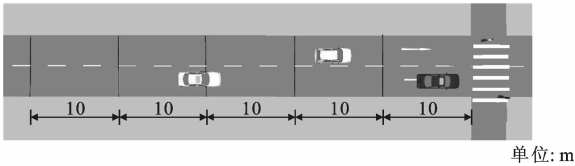


图7 路段的仿真界面

Fig. 7 Picture of simulation of road segment

表4 路段人车冲突中的TTC,CS值

Tab. 4 TTC and CS values of pedestrian-vehicle conflict on road segment

编码	CS 值/ (km · h ⁻¹)	TTC 值/s	编码	CS 值/ (km · h ⁻¹)	TTC 值/s
1	40.1	2.9	6	40.9	2.8
2	36.3	2.2	7	41.5	1.9
3	41.0	2.8	8	40.0	2.7
4	43.8	2.6	9	39.0	1.8
5	33.8	1.3	10	36.0	1.2

表5 各样本的人车冲突严重度

Tab. 5 Severe grades of pedestrian-vehicle conflict in each sample

编码	严重度 E_{xc}	不确定性 E_{nc}	等级	排序
1	0.253	0.131	I	5
2	0.222	0.191	I	1
3	0.243	0.136	I	3
4	0.236	0.144	I	2
5	0.554	0.205	II	9
6	0.244	0.136	I	4
7	0.390	0.160	II	8
8	0.256	0.130	I	6
9	0.387	0.174	II	7
10	0.556	0.224	II	10

以编码“1”为例,说明推理过程如下。首先按式(2)~式(6)和式(9)通过MATLAB软件中构建云规则发生器,然后给定冲突速度和碰撞时间为(41.1,2.9)输入至该云规则发生器中,进行1 000次仿真后得出与规则矩阵相对应的 \mathbf{u} 矩阵

$$\mathbf{u}=\{u_{ij}\}=\begin{vmatrix} 0.143\ 7 & 2.0\times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0.478\ 3 & 6.7\times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0.505\ 4 & 7.1\times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 2.5\times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

该 \mathbf{u} 矩阵中最大和次大元素依次为0.505 4(第I等级)和0.002 5(第II等级),其对应的推理规则为 $r_{31}=1$ 和 $r_{41}=2$,按照激活强度最大的规则,样本1的人车冲突严重度是I级。根据式(1),反算出4个云滴 $P_1\sim P_4$,依次为(0.100 1, 0.505 4)、

(0.239 9,0.505 4)、(0.292 6,0.002 5)、(0.707 4,0.002 5), 见图 8。选取 P_1 和 P_4 结合式(7)和式(8)算出虚拟云的期望为 $E_{xc}=0.253$ 和 $E_{nc}=0.131$ 。图 8 为样本 1 的虚拟云模型。 $E_{xc}=0.253$ 反映了冲突严重度为 I 级。从图 8 可知,样本 1 的虚拟云和 I 级的云相似度大于与其他的相似度。

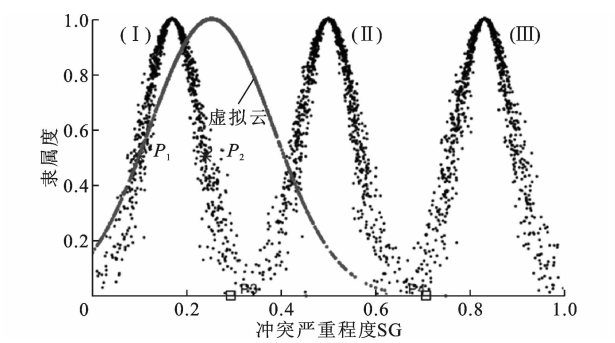


图 8 样本 1 的 SG 虚拟云模型
Fig. 8 Virtual cloud model of SG of Sample 1

由图 8 还可知,样本 1 的冲突严重度期望值为 0.253,其不确定性为 0.131,等级范围为(0,0.646),即结果体现了人车冲突本身的模糊性和随机性,以及冲突严重度辨别的不确定性。根据表 5 样本的严重度和级别进行排序,结合时空条件可知人车冲突严重性的变化规律,为安全对策制定提供基础。例如得出样本 1、2、3、4、5、6、8 的冲突严重为 I 级(轻微冲突);样本 5、7、9、10 的冲突严重为 II 级(一般),与 VISSIM 中交通运行状况相符合。上述估计结果与常用的单项评价指标法以及多项评价指标法相比差异显著,结果如表 6 所示。

表 6 不同方法的结果对比
Tab. 6 Comparison of results of different methods

方法	指标	冲突严重度排序		
		I	II	III
Brown 方法 ^[9] , Sayed 等方法 ^[10] , Wu 等方法 ^[11]	TTC	1,6,3,8, 4,2,7,9	5,10	
Hyden 方法 ^[24]	TTC,CS	1,6,8,3,4,2,9,7		5,10
模糊控制法 ^[25]	TTC,CS	3,1,6,2,8,4	7,9,5,10	
本文方法	TTC,CS	2,4,3,6,1,8	9,7,5,10	

由表 6 可知,单项评价指标法(TTC)与多项评价指标法(Hyden 法、模糊控制法、本文方法)相比,人车冲突等级和排序结果有着明显差异。虽然单项评价法判别较简单,但其本身存在单一性。人车冲突不仅是一个时间点,而是一个复杂过程,在人车冲突程度辨别的应用中单项指标法存在缺陷,用多项指标来衡量冲突程度更为精确。Hyden 法将冲突

程度只简单分为 2 个状态(非严重、严重),其不能反映人车混合交通复杂环境下交通冲突演变的复杂性,因此,人车冲突程度分为多个级别更适合。与多项模糊控制法相比,模糊控制和本文方法的冲突等级评价结果是相同的,但排序结果有一定差异。这里可以理解为模糊控制法考虑评价指标的本身模糊性但不考虑其随机性,因此,利用云模型估计得出的结果更合适。

4 结 语

(1)人车冲突严重度评估涉及大量的定性变量和定量变量。本文选取碰撞时间和冲突速度 2 个因子为评价指标,建立评价指标属性离散标准。在此基础上,通过云模型相关理论建立了人车冲突严重度判别模型。

(2)利用云模型定义各评价指标的属性值隶属于各分级的隶属度,解决了评价指标属性值处在分级边界范围时的模糊性问题,充分发挥定性分析和定量分析的云推理优势,得到了人车冲突严重度的隶属度,实现了冲突严重度预判。

(3)将人车冲突严重度判别模型应用于某路段人车冲突模拟的数据验证,所得冲突严重等级的评价结果与设定交通状况接近,同时与常用的评价方法进行比较,说明该模型具有较高的准确性和可靠性。

(4)该模型还存在一些限制,如现场数据、行人避让与车辆冲突等问题,下一步将对其进行完善。

参考文献:

References:

[1] World Health Organization. Global status report on road safety 2018[R]. Geneva: World Health Organization, 2018.

[2] 中华人民共和国公安部. 中华人民共和国道路交通事故统计年报(2015 年度)[R]. 北京:公安部交通管理局, 2016.

Management Bureau of Ministry of Public Security. Road traffic accident statistics' annual report of PRC (2015) [R]. Beijing: Traffic Management Bureau of Ministry of Public Security, 2016.

[3] SHA D, GUO Y, DING Y. Pedestrian safety diagnosis at signalized crosswalks using traffic conflict techniques[C]//ASCE. Proceedings of the 16th COTA International Conference of Transportation. Reston: ASCE, 2016: 1811-1823.

- [4] WU J, RADWAN E, ABOU-SENNA H. Determination if VISSIM and SSAM could estimate pedestrian-vehicle conflicts at signalized intersections[J]. Journal of Transportation Safety Security, 2018, 10 (6): 572-585.
- [5] ALMODFER R, XIONG S, FANG Z, et al. Quantitative analysis of lane-based pedestrian-vehicle conflict at a non-signalized marked crosswalk[J]. Transportation Research Part F, 2016, 42: 468-478.
- [6] CHEN Y, LIU F, BAI Q, et al. Analysis of conflict factors between pedestrians and right-turning vehicles at signalized intersections [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2019, 35(1): 118-124.
- [7] 孙重静, 辛飞飞. 人车冲突风险度评价指标计算研究综述[J]. 交通信息与安全, 2016, 34(2): 9-16, 38.
SUN Chong-jing, XIN Fei-fei. An overview of the conflict indicators between vehicles and pedestrians [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2016, 34(2): 9-16, 38.
- [8] GETTMAN D, HEAD L. Surrogate safety measures from traffic simulation models [J]. Transportation Research Record, 2003(1840): 104-115.
- [9] BROWN G R. Traffic conflicts for road user safety studies[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1994, 21(1): 1-15.
- [10] SAYED T, ZEIN S. Traffic conflict standards for intersections[J]. Transportation Planning Technology, 1999, 22(4): 309-323.
- [11] WU Q, XIANG Q J, LU C, et al. Traffic safety evaluation of highway intersection with the use of conflict severity concept[C]//IEEE. Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. New York: IEEE, 2008: 574-578.
- [12] HUANG F, LIU P, YU H, et al. Identifying if VISSIM simulation model and SSAM provide reasonable estimates for field measured traffic conflicts at signalized intersections[J]. Accident Analysis Prevention, 2013, 50: 1014-1024.
- [13] MATSUI Y, TAKAHASHI K, IMAIZUMI R, et al. Car-to-pedestrian contact situations in near-miss incidents and real-world accidents in Japan[C]//National Highway Traffic Safety Administration. Proceedings of the 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2011: 1-7.
- [14] ARCHER J. Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling: A study of urban and suburban intersections[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2005.
- [15] KWEON Y, KOCKELMAN K M. Safety effects of speed limit changes: Use of panel models, including speed, use, and design variables [J]. Transportation Research Record, 2005(1908): 148-158.
- [16] VADEBY A, FORSMAN A. Traffic safety effects of new speed limits in Sweden [J]. Accident Analysis Prevention, 2017, 114: 34-39.
- [17] World Health Organization. Managing speed[R]. Geneva: World Health Organization, 2017.
- [18] World Health Organization. Speed management: A road safety manual for decision-makers and practitioners[M]. Geneva: Global Road Safety Partnership, 2008.
- [19] ROSEN E, SANDER U. Pedestrian fatality risk as a function of car impact speed[J]. Accident Analysis & Prevention, 2009, 41(3): 536-542.
- [20] HAMIDUN R, ISHAK S, ENDUT I. The effect of speed on pedestrian crossing risk at signalized crossing facility[J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2014, 8(19): 138-142.
- [21] MARTIN J L, DAN W. Pedestrian fatality and impact speed squared: Cloglog modeling from French national data[J]. Traffic Injury Prevention, 2017, 19 (1): 94-101.
- [22] KONG C, YANG J. Logistic regression analysis of pedestrian casualty risk in passenger vehicle collisions in China[J]. Accident Analysis & Prevention, 2010, 42(4): 987-993.
- [23] LU G, LIU M, WANG Y, et al. Quantifying the severity of traffic conflict by assuming moving elements as rectangles at intersection[J]. Procedia—Social and Behavioral Sciences, 2012, 43: 255-264.
- [24] HYDEN C. The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish traffic conflicts technique[R]. Washington DC: TRB, 1987.
- [25] 李杰, 陈学武, 王炜. 交通冲突严重度模糊评价方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(2): 91-95.
LI Jie, CHEN Xue-wu, WANG Wei. Fuzzy evaluation method for the severity of traffic conflicts[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(2): 91-95.
- [26] 胡小平. 基于视频的交叉口交通冲突检测与判定[D]. 北京: 北方工业大学, 2013.
HU Xiao-ping. A video-based technology to identify and

- determine the traffic conflicts at the intersection[D]. Beijing:North China University of Technology,2013.
- [27] 胡宏宇,李志慧,魏巍,等.基于模糊逻辑的信号交叉口人车冲突判别方法[J].吉林大学学报:工学版,2014,44(3):637-641.
- HU Hong-yu,LI Zhi-hui,WEI wei,et al.Fuzzy logic based pedestrian-vehicle conflict discrimination at signalized intersection[J].Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2014,44(3):637-641.
- [28] ISMAIL K,SAYED T,SAUNIER N.Methodologies for aggregating indicators of traffic conflict[J].Transportation Research Record,2011(2237):10-19.
- [29] 任刚,顾程,陆丽丽,等.信号交叉口过街行人与机动车冲突危险[J].交通运输系统工程与信息,2012,12(5):76-81.
- REN Gang,GU Cheng,LU Li-li,et al.Modeling risk degree of conflicts between crossing pedestrians and vehicles at signalized intersections[J].Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2012,12(5):76-81.
- [30] 王洪利.灰色不确定性白化模型的扩展补充[J].数学的实践与认识,2013,43(16):231-236.
- WANG Hong-li.The extension and supplement of grey uncertain model[J].Mathematics in Practice and Theory,2013,43(16):231-236.
- [31] 牟瑞芳,蔡其杰.基于云模型及粗糙集理论的围岩稳定性分级方法研究[J].安全与环境学报,2018,18(4):1251-1257.
- MOU Rui-fang,CAI Qi-jie.Stability evaluation for the surrounding rock structure based on the normal cloud model and the rough set theory[J].Journal of Safety and Environment,2018,18(4):1251-1257.
- [32] 李德毅,孟海军,史雪梅.隶属云和隶属云发生器[J].计算机研究与发展,1995,32(6):15-20.
- LI De-yi,MENG Hai-jun,SHI Xue-mei.Membership cloud and membership cloud generators[J].Journal of Computer Research & Development,1995,32(6):15-20.
- [33] 陈永恒,刘芳宏,曹宁博.信控交叉口行人与提前右转机动车冲突影响因素[J].吉林大学学报:工学版,2018,48(6):1669-1676.
- CHEN Yong-heng,LIU Fang-hong,CAO Ning-bo.Analysis of conflict factors between pedestrians and channelized right turn vehicles at signalized intersections[J].Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2018,48(6):1669-1676.
- [34] PARKER M R,ZEGEER C V.Traffic conflict techniques for safety and operations:Observers manual[R].Washington DC:FHWA,1989.
- [35] 程国柱,吴立新,秦丽辉,等.城市道路人行横道处驾驶人决策行为规律及损失[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(9):63-67.
- CHENG Guo-zhu,WU Li-xin,QIN Li-hui,et al.Drivers' decision behavior rule and loss at urban road crosswalk[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2015,47(9):63-67.
- [36] LI D,DI K,LI D,et al.Mining association rules with linguistic cloud models[C]//WU X,KOTAGIRI R,KORB K B.Proceedings of Pacific-Asia conference on Knowledge Discovery and Data Mining.Berlin:Springer,1998:392-393.
- [37] 李晓松,王成志,陈庆华.基于云推理模型的武器装备研制风险评估研究[J].运筹与管理,2016,20(3):111-118,145.
- LI Xiao-song,WANG Cheng-zhi,CHEN Qing-hua.Research on weapon equipment risk assessment based on cloud reasoning model[J].Operations Research and Management Science,2016,20(3):111-118,145.
- [38] 柴日发,曾文华.定性规则的云表示[J].计算机工程,2002,28(7):161-164.
- CHAI Ri-fa,ZENG Wen-hua.Clouds representation of qualitative rules[J].Computer Engineering,2002,28(7):161-164.