

陈 鹏,余敬柳,谢静敏. 无人行横道过街处驾驶人避让决策建模[J]. 长安大学学报:自然科学版,2020,40(3):84-90.

CHEN Peng, YU Jing-liu, XIE Jing-min. Modelling driver yielding decision at unmarked roadway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2020, 40(3): 84-90.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.03.009

无人行横道过街处驾驶人避让决策建模

陈 鹏,余敬柳,谢静敏

(武汉理工大学 交通学院,湖北 武汉 430063)

摘 要:为了在驾驶人避让决策研究中考虑驾驶人认知不确定性,并获得确定性避让决策规则,提出一种基于云模型和粗糙集的无人行横道过街处驾驶人避让决策分析方法。首先,划分距离和速度等避让决策影响因素的分级概念,建立相应的数据序列,采用逆向云发生器提取表征影响因素分级概念的数字特征,再采用基于条件云发生器的隶属概念判别方法实现距离和速度等数据的离散化处理,进而构建了无人行横道过街处驾驶人避让决策表。然后,采用粗糙集理论中基于差别矩阵的属性约简算法和基于归纳的值约简算法,进行决策表约简和无人行横道过街处驾驶人避让决策规则提取;约简后的条件属性为欲到达车辆与行人间的距离、欲到达车辆的速度和行人的速度,提取出 23 条无人行横道过街处驾驶人避让决策规则,其中包括 17 条确定性规则和 6 条不确定性规则,并举例说明确定性规则和不确定性规则的含义。最后,通过预测正确率和 ROC 曲线下面积 2 个指标比较,分析该方法与现有研究中的决策树和 Logistic 回归方法的差异。研究结果表明:所提方法的预测正确率为 92.2%,分别比决策树和 Logistic 回归方法提高 3.9%和 1.3%;ROC 曲线下面积为 0.968,分别比 2 种方法提高了 1.1%和 3.2%;所提方法的预测性能较好,并能得到简单直观的无人行横道过街处驾驶人避让决策规则,可为交通安全仿真研究奠定基础。

关键词:交通工程;避让决策;云模型;驾驶人行为;无人行横道过街处;粗糙集

中图分类号:U491.25

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2020)03-0084-07

Modelling driver yielding decision at unmarked roadway

CHEN Peng, YU Jing-liu, XIE Jing-min

(School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: In order to consider driver cognitive uncertainty and obtain certainty yielding decision rules in the study of driver yielding decision, a method for driver yielding decision analysis at unmarked roadway based on cloud model and rough set was proposed. Firstly, the grading concepts of the factors affecting yielding decision such as distance and speed were divided, and the corresponding data sequence were established, then the reverse cloud generator was used to extract the digital features that characterize the grading concepts of the influencing factors, and then the membership concept discriminant method based on conditional cloud generator was used for the discretization of data such as distance and speed, and then the driver yielding decision

收稿日期:2019-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51208400)

作者简介:陈 鹏(1980-),男,湖北潜江人,副教授,工学博士,E-mail:seupc@163.com。

table at unmarked roadway was established. Then, attribute reduction based on discernibility matrix and value reduction based on induction in the rough set theory were applied to reduce the decision table and extract the driver yielding decision rules at unmarked roadway. After the reduction, the conditional attributes were the distance between the approaching vehicle and the pedestrian, the speed of the approaching vehicle and the speed of the pedestrian. Twenty-three driver yielding decision rules at the unmarked roadway were obtained, including seventeen certainty rules and six uncertainty rules. The meaning of certainty and uncertainty rules was illustrated. Finally, the proposed method was compared with the decision tree and Logistic regression method in the existing research by using the prediction accuracy rate and the area under the ROC curve. The results show that the prediction accuracy of the proposed method is 92.2%, which is higher than those of the two comparison methods by 3.9% and 1.3% respectively, and the area under the ROC curve of the proposed method is 0.968, which is higher than those of the two comparison methods by 1.1% and 3.2% respectively. The proposed method has good prediction performance and can obtain the simple and intuitive driver yielding decision rules at unmarked roadway, which can lay a foundation for traffic safety simulation.

4 tabs, 4 figs, 26 refs.

Key words: traffic engineering; yielding decision; cloud model; driver behavior; unmarked roadway; rough set

0 引言

混合交通是中国城市道路交通运行的显著特征,特别是在无人行横道过街处,由于没有人行横道和交通信号将人和车辆进行分离,过街行人与过往的车辆存在相互干扰,驾驶人在通行过程中需判断是否避让过街行人,从而对道路通行效率和交通安全造成影响。因此,构建相应的驾驶人避让行为决策模型,可用于交通微观仿真,为道路通行能力分析和交通安全改善奠定基础^[1-3]。

以往关于驾驶人避让行为决策模型的研究主要集中在确定临界间隙和分析驾驶人避让行为的影响因素^[4-7]。Guo等提出了4种计算临界间隙的方法,推导了拒绝间隙和接受间隙的概率密度函数,同时分析了这些函数变量之间的关系^[4]。McGowen等提出了一种无偏的替代模型,可以与自然数据配合使用估计临界间隙^[5]。Bertulis等评估了无控制人行横道处车速对驾驶人避让行人的影响,发现车速与避让率有很强的相关性^[6]。Sucha等研究了无信号控制人行横道处驾驶人与行人的决策,发现影响驾驶人避让行为的因素包括速度、交通密度、等待穿越的行人数量等^[7]。

总体来说,上述研究不能细致刻画驾驶人的决策行为。因此,一些学者在分析驾驶人避让行为影响因素的基础上,采用 Logistic 回归方法^[8-13]和决

策树方法^[14-15]建立了驾驶人的避让行为决策模型。Schroeder等探讨了无信号行人过街处驾驶人避让行为的影响因素,并通过 Logistic 回归建立了避让预测模型^[8]。Salamati等确定了影响驾驶人在两车道环形交叉口处避让行人的因素,进而采用 Logistic 回归模型分析了驾驶人避让可能性^[9]。Lu等调查了直行车辆驾驶人在无信号交叉口处穿越其他直行车辆的行为,并采用 Logistic 回归方法分析了穿越条件下直行车辆驾驶人的决策时刻,建立了穿越行为模型,确定了影响驾驶人决策的主要因素^[10]。Jiang等采用二元 Logit 模型分析了人行横道处驾驶人避让决策行为,并考虑了人车间距、车辆速度和行人速度等影响因素^[11]。Obeid等同样采用二元 Logit 模型分析了混合街道环境驾驶人避让决策行为,其结果表明,过街行人数量和接近速度对驾驶人避让决策有较大影响^[12]。时亚群等采用二元 Logistic 回归模型,分析人行横道处机动车让行行为及其影响因素,结果表明,行人的年龄、数量、等待位置和过街手势均会对机动车让行行为产生影响^[13]。Liu等使用决策树识别驾驶人的决策时刻和影响其决定的主要运动参数,结果表明,在无信号交叉口穿越过程中,从右侧直行穿越的驾驶人在达到交叉点之前的 0.9~1.3 s 做出决策,从左侧直行穿越的驾驶人在达到交叉点之前的 0.9~1.2 s 做出决策,两车之间的速度差异是影响驾驶人决策的最重要因

素^[14]。Liu 等还应用决策树分析了无信号交叉口合流车辆驾驶人的避让决策问题^[15]。

上述模型均无法反映驾驶人在判断过程中对相关因素认知的模糊性和随机性,同时 Logistic 回归方法不能提取确定的决策规则,决策树方法无法在理论上保证找出全部决策规则。因此,本文提出采用云模型^[16-18]来刻画驾驶人在避让决策中对相关因素的认知不确定性,从而离散化连续属性数据,为决策表构造奠定基础,进而采用粗糙集方法^[19-20]提取无人行横道过街处驾驶人避让决策规则,以期为交通安全分析提供理论和技术支撑。

1 驾驶人避让决策建模

以驾驶人避让决策影响因素作为条件属性集,以是否避让作为决策属性集,可以构建驾驶人避让决策表,从而可通过粗糙集理论进行决策表约简来提取规则。下文主要介绍驾驶人避让决策表离散化方法和驾驶人避让决策规则提取方法。

1.1 决策表离散化方法

参照已有相关研究,本文主要考虑以下驾驶人避让决策影响因素:车车间距、车辆速度、行人速度和行人数量^[8,10,14-15]。构建决策表时,需要将距离和速度等连续数据进行离散化预处理,对行人数量的离散数据也需进行合并(抽象)得到更高抽象层次的离散值,这样有利于减小问题的复杂度,提高获取决策规则的适应度。下文主要介绍对距离和速度等连续数据的离散化处理方法。

驾驶人进行避让决策时,对于距离和速度的判断具有一定的模糊性和随机性,主要体现在:距离和速度判断结果一般可采用自然语言来描述(如距离远近、速度快慢等),自然语言中的概念是定性的;驾驶人的主观差异性会导致相同数值属于某一概念的确度具有随机性。而云模型将定性概念的模糊性和随机性及二者的关联性有效集成在一起,构成定性概念与其定量表示之间的不确定性转换,因此可用于驾驶人避让决策影响因素中连续数据向定性概念的转换,实现数据离散化处理。

云的定义如下:设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念,若定量值 $x \in U$,且 x 是定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的确度 $u(x) \in [0,1]$ 是具有稳定倾向的随机数,则 x 在论域 U 上的分布称为云,每一个 x 成为一个云滴。云模型通过期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 共 3 个数字特征来整体表征一个定性概念。

本文首先采用逆向云发生器^[16-17],从对影响因素采集的数据序列中提取表征速度和距离分级概念的云模型数字特征,然后采用条件云发生器计算给定数据隶属于不同概念的确度,最后通过比较确度大小来判别其所属概念。具体过程如下。

1.1.1 构建影响因素分级数据序列

首先将速度分为快、中、慢 3 个级别,距离分为远、中、近 3 个级别,通过人车冲突视频提取速度和距离的定量数据;然后结合驾驶人问卷调查,划分影响因素不同级别对应的定量数据序列。对于影响因素某一级别的定量数据序列,可记为以下形式,即 $l = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n]$,其中, x_i 为影响因素某一级别的定量数据, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

1.1.2 提取影响因素分级概念数字特征

对于影响因素某一级别的定量数据序列,采用逆向云发生器进行数字特征提取,算法如下:

步骤 1,计算数据序列样本 x_i 的平均值,即可求得期望 E_x 。

步骤 2,计算 x_i 的标准差,即可求得熵 E_n 。

步骤 3,对每个数对 $(x_i, u(x_i))$,计算 E'_{ni} 。

$$E'_{ni} = \sqrt{\frac{-(x_i - E_x)^2}{2 \ln u(x_i)}} \quad (1)$$

其中,本文按下式计算样本 x_i 的确度 $u(x_i)$

$$u(x_i) = 1 - \frac{|x_i - E_x|}{\max x_i - E_x} \quad (2)$$

式中: $\max x_i$ 为 x_i 的最大值。

上式表明某样本值离样本期望值越近,该样本的确度越大,反之越小。

步骤 4,计算 E'_{ni} 的标准差,即可求得超熵 H_e 。

1.1.3 隶属概念判别

对于给定的速度或距离数据,采用以下算法来判别其隶属概念:

步骤 1,利用 X 条件云发生器计算特定值 z 属于定性概念 C_j (本文中速度和距离均划分为 3 个级别概念,故 $j = 1, 2, 3$) 的确度 $u_j(z)$,即首先生成以 C_j 的熵 E_{nj} 为期望值,以 C_j 的超熵 H_{ej} 为标准差的一个正态随机数 E'_{nj} ,然后按下式计算 $u_j(z)$

$$u_j(z) = \exp[-(z - E_{xj})^2 / (2(E'_{nj})^2)] \quad (3)$$

式中: E_{xj} 为概念 C_j 的期望。

步骤 2,将这些确度由大到小排列;选择前 2 个较大的确度,并从中以概率 p_j 随机选择一个作为最终的 $u_j(z)$,即 z 属于定性概念 C_j 。其中, $p_j = u_j(z) / \sum u_j(z)$ 。

1.2 决策规则提取方法

根据粗糙集理论,决策表中由各条件属性特定值到决策属性特定值的映射称为决策规则,决策规则的可信度表示某决策规则占包含相同条件属性特定值的全部规则的比例。

对于给定的驾驶人避让决策表,可以通过属性约简和值约简来得到决策表约简,然后从决策表约简求出其规则。具体可以分为以下 5 步:删除表中的重复对象;属性约简,删除冗余的条件属性;求值约简,删除每个对象的冗余属性值;决策表约简;根据其约简,求出决策规则。

本文采用粗糙集探索系统(rough set exploration system,RSES)软件进行决策表约简,以提取驾驶人避让决策规则。软件中提供了多种属性约简和值约简算法,本文选取基于差别矩阵的属性约简算法和基于归纳的值约简算法。所选属性约简算法的主要思想是:构造决策表的差别矩阵,并通过合取运算获取属性约简集合。所选值约简算法的主要思想是:将问题转化为分别求解各决策类的最小决策算法来实现,各决策类的最小决策算法则通过删除决策规则类中的冗余属性值及冗余规则来实现。有关算法的步骤不再赘述^[19-23]。

2 实例分析

2.1 数据采集与预处理

本文选取武汉市建设一路任家路中学附近无人行横道行人过街处作为观测点,使用摄像机采集人车冲突视频。该观测点所处路段为双向四车道。观测时段内(12:00~13:00,其中前 25 min 为行人过街高峰期)单向车流量平均约为 540 veh/h,过街行人流量平均约为 2 100 人/h。使用 Adobe Premiere 软件对视频分帧播放,1 s 影像可分解为 25 帧画面,从而可获取时间相关数据;采用直接线性变换方法^[24]可求解图像坐标对应的实地坐标,从而获取距离相关数据;根据距离和时间数据,可进一步获取速度数据。通过上述处理,共提取人车冲突数据 377 组,其中 300 组数据用于决策规则提取,77 组数据用于规则预测精度检验。

2.2 影响因素概念分级

根据第 1.1 节,对于过街行人的数量,可合并为以下 3 个级别概念:少(1 人)、中(2 人)、多(大于等于 3 人)。运用逆向云发生器可确定人车间距、车辆速度和行人速度分级概念的云模型参数,见表 1。各影响因素分级概念的云模型如图 1~图

3 所示。

表 1 影响因素的云模型参数
Tab. 1 Parameters of cloud model for influence factors

影响因素	定性概念	E_x	E_n	H_e
人车间距/m	近	17.00	6.33	1.54
	中	31.17	5.13	1.05
	远	45.75	5.90	1.49
车辆速度/(m·s ⁻¹)	慢	3.61	0.91	0.20
	中	5.75	1.14	0.24
	快	10.59	1.75	0.48
行人速度/(m·s ⁻¹)	慢	0.01	0.04	0.01
	中	0.47	0.28	0.07
	快	1.47	0.45	0.08

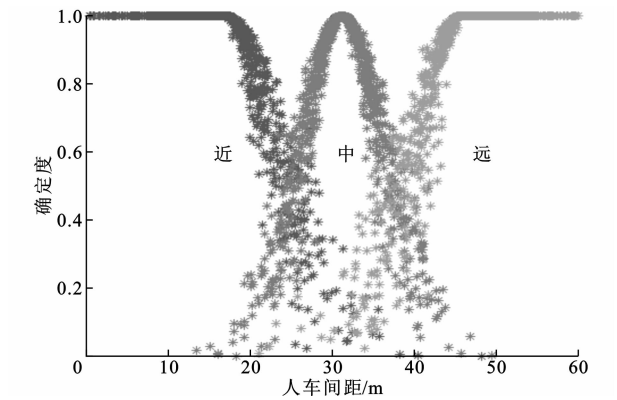


图 1 人车间距分级概念的云模型
Fig. 1 Cloud model for classification concept of distance between pedestrians and vehicles

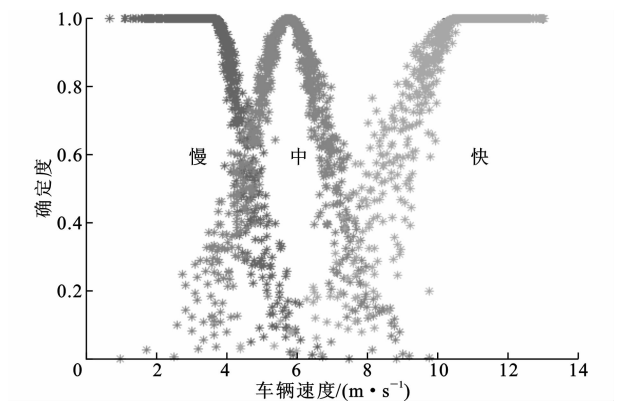


图 2 车辆速度分级概念的云模型
Fig. 2 Cloud model for classification concept of vehicles speed

2.3 避让决策表构建

采用第 1.1 节中隶属概念判别算法,将人车间距、车辆速度和行人速度等数据离散化处理,确定所属定性概念,从而可进一步构建驾驶人避让决策表。为了便于粗糙集理论计算,将条件属性人车间距、车辆速度、行人速度和行人数量分别用参数 a 、 b 、 c 、 d 代替,将决策属性穿越或避让用参数 e 代替;将定性

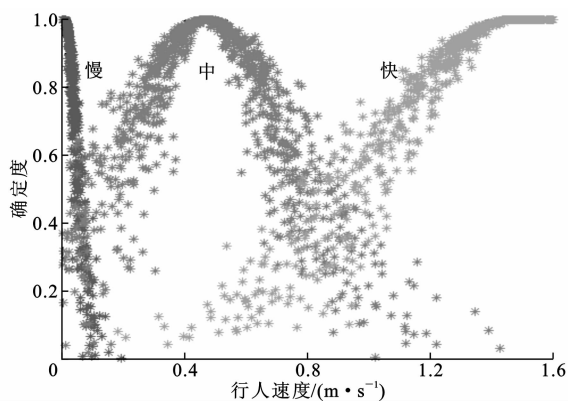


图3 行人速度分级概念的云模型

Fig. 3 Cloud model for classification concept of pedestrians speed

概念少、近、慢对应为特征值 1,将定性概念中对应为特征值 2,将定性概念多、远、快对应为特征值 3;将决策属性值穿越对应为特征值 1,将决策属性值避让对应为特征值 0。表 2 给出了避让决策样表。

表 2 避让决策

Tab. 2 Yielding decision

编号	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
1	1	1	3	2	0
2	2	2	1	2	1
3	3	2	1	2	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

2.4 避让决策规则提取

采用第 1.2 节中选取的 RSES 软件和相应的属性约简和值约简算法,得到一个约简为{*a*,*b*,*c*},即约简后的条件属性包括人车间距、车辆速度和行人速度,说明本文实例中行人数量对驾驶人避让决策的影响要小于其他 3 个属性,该属性约简后不影响避让决策表分类能力。根据约简结果,可提取驾驶人避让决策规则,共包含决策规则 23 条,其中确定性规则 17 条(可信度为 1),如表 3 所示。

现选取部分规则加以说明。

(1)确定性规则

$a=2 \wedge b=2 \wedge c=2 \rightarrow e=1$,该规则意味着人车间距、车辆速度和行人速度均为中等时,驾驶人选择穿越。

(2)不确定性规则

$a=2 \wedge b=1 \wedge c=2 \rightarrow e=0(0.5)$,该规则可信度为 0.5,表示当人车间距和行人速度为中等、车辆速度为慢时,驾驶人选择避让的概率为 50%。

2.5 方法比较

为了验证本文方法的有效性,同时采用 Logistic 回归和决策树方法作为对照,并运用 SPSS 19.0

统计分析软件实现 2 种对比方法。

表 3 驾驶人避让决策规则

Tab. 3 Yielding decision rules for drivers

序号	驾驶人避让决策规则
1	$a=2 \wedge b=2 \wedge c=2 \rightarrow e=1$
2	$a=1 \wedge b=1 \wedge c=1 \rightarrow e=1$
3	$a=3 \wedge b=1 \wedge c=3 \rightarrow e=0$
4	$a=2 \wedge b=1 \wedge c=1 \rightarrow e=1$
5	$a=2 \wedge b=1 \wedge c=3 \rightarrow e=0$
6	$a=3 \wedge b=1 \wedge c=2 \rightarrow e=0$
7	$a=3 \wedge b=2 \wedge c=1 \rightarrow e=1$
8	$a=1 \wedge b=2 \wedge c=3 \rightarrow e=1$
9	$a=2 \wedge b=2 \wedge c=1 \rightarrow e=1$
10	$a=1 \wedge b=2 \wedge c=1 \rightarrow e=1$
11	$a=1 \wedge b=2 \wedge c=2 \rightarrow e=1$
12	$a=3 \wedge b=2 \wedge c=3 \rightarrow e=0$
13	$a=2 \wedge b=3 \wedge c=2 \rightarrow e=1$
14	$a=3 \wedge b=3 \wedge c=2 \rightarrow e=1$
15	$a=2 \wedge b=3 \wedge c=1 \rightarrow e=1$
16	$a=1 \wedge b=3 \wedge c=2 \rightarrow e=1$
17	$a=3 \wedge b=3 \wedge c=3 \rightarrow e=0$
18	$a=2 \wedge b=1 \wedge c=2 \rightarrow e=0(0.50), 1(0.50)$
19	$a=1 \wedge b=1 \wedge c=3 \rightarrow e=0(0.67), 1(0.33)$
20	$a=1 \wedge b=1 \wedge c=2 \rightarrow e=0(0.33), 1(0.67)$
21	$a=3 \wedge b=2 \wedge c=2 \rightarrow e=0(0.20), 1(0.80)$
22	$a=2 \wedge b=2 \wedge c=3 \rightarrow e=0(0.75), 1(0.25)$
23	$a=3 \wedge b=3 \wedge c=1 \rightarrow e=0(0.33), 1(0.67)$

注:表中 \wedge 为逻辑合取符号,表示决策规则所对应的条件属性取值需同时满足。

在 SPSS 统计分析软件中,采用 LR(似然比)向前逐步法建立 Logistic 回归模型,得到模型中变量(人车间距、车辆速度、行人速度)系数和常量的估计值分别为-0.158、0.599、-3.278 和 5.299;采用卡方自动交互检测法(chi-squared automatic interaction detector,CHAID)建立决策树模型,并设置决策树模型父节点中的最小个案数为 10,子节点中的最小个案数为 5,最后共产生 8 个节点(含 5 个终端节点),同时模型中变量仅包括行人速度和人车间距。

本文采用正确率和 ROC 曲线下面积^[25-26] 2 个指标对 3 种方法进行比较,结果见表 4 和图 4。根据表 4 和图 4 可以看出,本文方法具有较高的指标值,预测正确率和较大的 ROC 曲线下面积分别为 92.2%和 0.968,其预测性能优于决策树方法和 Logistic 回归模型。与其他 2 种方法相比,本文方法的预测正确率分别提高 3.9%和 1.3%;ROC 曲线下

面积分别提高 1.1%和 3.2%。本文方法预测准确度较高,能够用于避让决策行为分析。

表 4 三种方法比较
Tab. 4 Comparisons of three methods

方法	正确率/%	ROC 曲线下面积
本文方法	92.2	0.968
Logistic 回归	90.9	0.936
决策树	88.3	0.957

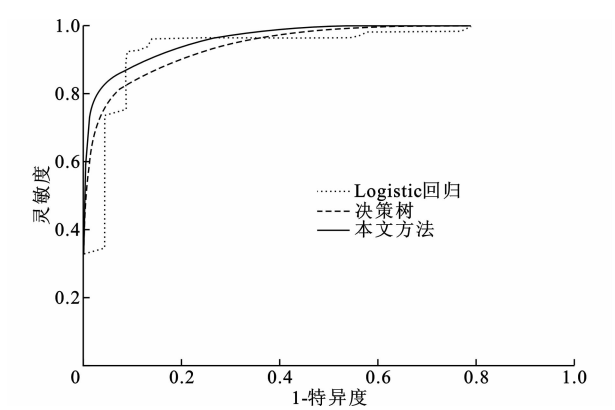


图 4 三种方法的 ROC 曲线
Fig. 4 ROC curves for three methods

3 结 语

(1)本文考虑了驾驶人在避让决策中对相关因素的认知模糊性和随机性,采用云模型实现了决策影响因素中连续数据的离散化处理,将连续数据转化为定性概念,进而构造无人行横道过街处驾驶人避让决策表;并采用粗糙集方法进行决策表属性约简,得到约简后的条件属性包括人车间距、车辆速度和行人速度,最后提取出无人行横道过街处驾驶人避让决策规则,包括 17 条确定性规则和 6 条不确定规则,本文研究可为行人穿越无人行横道道路场景下人车冲突仿真及安全分析奠定基础。

(2)通过与现有方法比较,本文方法不仅具有较高的预测正确率和较大的 ROC 曲线下面积,而且能够提取出明确清晰的避让决策规则,易于理解。

(3)后续研究可进一步将驾驶人与行人之间的动态博弈过程考虑进来,分析博弈过程对驾驶人避让决策的影响。另外,本文仅考虑了学校附近无人行横道过街处人车冲突场景,还可进一步扩充数据集,探讨不同区域场景是否具有差异性。

参考文献:

References:

[1] 肖永剑,杨建国,王兆安. 基于占先度的驾驶员冲突避

碰决策模型[J]. 交通运输工程学报,2009,9(5): 116-120.
XIAO Yong-jian, YANG Jian-guo, WANG Zhao-an. Driver's conflict avoidance decision model based on preemptive level[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2009,9(5):116-120.
[2] 刘小明,王秀英. 基于重复博弈的无灯控交叉口驾驶员行为模型[J]. 中国公路学报,2011,24(4):94-100.
LIU Xiao-ming, WANG Xiu-ying. Vehicle-cross action model in intersection without traffic light based on reduplicate game[J]. China Journal of Highway and Transport,2011,24(4):94-100.
[3] 唐克双,周楠,狄德仕,等. 基于风险收益平衡的驾驶员停止/通过决策行为[J]. 同济大学学报:自然科学版,2016,44(11):1687-1694.
TANG Ke-shuang, ZHOU Nan, DI De-shi, et al. Modeling of drivers'stop/go decision behavior based on trade off of risk and benefit[J]. Journal of Tongji University:Natural Science,2016,44(11):1687-1694.
[4] GUO R J, LIN B L. Gap acceptance at priority-controlled intersections[J]. Journal of Transportation Engineering,2011,137(4):269-276.
[5] MCGOWEN P, STANLEY L. Alternative methodology for determining gap acceptance for two-way stop-controlled intersections[J]. Journal of Transportation Engineering,2012,138(5):495-501.
[6] BERTULIS T, DULASKI D M. Driver approach speed and its impact on driver yielding to pedestrian behavior at unsignalized crosswalks[J]. Transportation Research Record,2014(2464):46-51.
[7] SUCHA M, DOSTAL D, RISSER R. Pedestrian-driver communication and decision strategies at marked crossings [J]. Accident Analysis and Prevention, 2017,102:41-50.
[8] SCHROEDER B J, ROUPHAIL N M. Event-based modeling of driver yielding behavior at unsignalized crosswalks[J]. Journal of Transportation Engineering,2011,137(7):455-465.
[9] SALAMATI K, SCHROEDER B J, GERUSCHAT D R, et al. Event-based modeling of driver yielding behavior to pedestrians at two-lane roundabout approaches[J]. Transportation Research Record, 2013(2389):1-11.
[10] LU G Q, LIU M M, WANG Y P, et al. Logit-based analysis of drivers' crossing behavior at unsignalized intersections in China[J]. Human Factors, 2015, 57

- (7):1101-1114.
- [11] JIANG X B, WANG W H, BENGLER K, et al. Analysis of drivers' performance in response to potential collision with pedestrians at urban crosswalks[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2017, 11(9): 546-552.
 - [12] OBEID H, ABKARIAN H, ABOU-ZEID M, et al. Analyzing driver-pedestrian interaction in a mixed-street environment using a driving simulator[J]. Accident Analysis and Prevention, 2017, 108: 56-65.
 - [13] 时亚群, 邓建华. 路段人行横道处机动车让行行为及其影响因素研究[J]. 交通科技与经济, 2018, 20(5): 18-24.
SHI Ya-qun, DENG Jian-hua. Factors affecting driver yielding behavior at a midblock zebra crossing[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2018, 20(5): 18-24.
 - [14] LIU M M, LU G Q, WANG Y P, et al. Analyzing drivers' crossing decisions at unsignalized intersections in China[J]. Transportation Research Part F, 2014, 24: 244-255.
 - [15] LIU M M, LU G Q, WANG Y P, et al. Preempt or yield? An analysis of driver's dynamic decision making at unsignalized intersections by classification tree[J]. Safety Science, 2014, 65: 36-44.
 - [16] XU C L, WANG G Y, ZHANG Q H. A new multi-step backward cloud transformation algorithm based on normal cloud model[J]. Fundamenta Informaticae, 2014, 133(1): 55-85.
 - [17] WANG G Y, XU C L, LI D Y. Generic normal cloud model[J]. Information Sciences, 2014, 280: 1-15.
 - [18] 何金平, 高 全, 施玉群. 基于云模型的大坝安全多层次综合评价方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(11): 2977-2983.
HE Jin-ping, GAO Quan, SHI Yu-qun. A multi-hierarchical comprehensive evaluation method of dam safety based on cloud model[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2016, 36(11): 2977-2983.
 - [19] JIA X Y, SHANG L, ZHOU B, et al. Generalized attribute reduct in rough set theory[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 91: 204-218.
 - [20] 许 彬. 基于分辨矩阵的交通拥堵关键影响因素提取及解析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(5): 91-96.
XU Bin. Extraction and analysis of critical influencing factors of traffic congestion based on discriminated matrix[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(5): 91-96.
 - [21] WANG C Z, SHAO M W, SUN B Q, et al. An improved attribute reduction scheme with covering based rough sets[J]. Applied Soft Computing, 2015, 26: 235-243.
 - [22] LI H, LI D Y, ZHAI Y H, et al. A novel attribute reduction approach for multi-label data based on rough set theory[J]. Information Sciences, 2016, 367: 827-847.
 - [23] HUANG C C, TSENG T L, FAN Y N, et al. Alternative rule induction methods based on incremental object using rough set theory[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(1): 372-389.
 - [24] 韩学源, 金先龙, 张晓云, 等. 基于视频图像与直接线性变换理论的车辆运动信息重构[J]. 汽车工程, 2012, 34(12): 1145-1149.
HAN Xue-yuan, JIN Xian-long, ZHANG Xiao-yun, et al. Vehicle movement information reconstruction based on video images and DLT theory[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(12): 1145-1149.
 - [25] RAVISHANKAR K V R, NAIR P M. Pedestrian risk analysis at uncontrolled midblock and unsignalised intersections[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition, 2018, 5(2): 137-147.
 - [26] XU C C, WANG W, LIU P. Identifying crash-prone traffic conditions under different weather on freeways[J]. Journal of Safety Research, 2013, 46: 135-144.