

基于风险矩阵的城市道路交叉口交通安全研究^{*}

王羿童, 张爱红, 鲍瀚涛, 寿任祯

(公安部交通管理科学研究所 道路交通安全公安部重点实验室, 江苏 无锡 214151)

摘要: 为探寻城市道路交叉口交通事故预防重点, 更好地预防城市道路交叉口交通事故, 提取交通事故双方交通方式、行驶方向、碰撞方式三要素, 将城市道路交叉口因交通参与者之间发生交通事故导致的交通事故细化为 3 个大类、18 个小类, 并制定命名规则分别对 18 种事故类型进行命名; 分别以事故实际发生频率和事故危险性作为风险矩阵中风险概率和风险影响的定量衡量指标, 提出一种将风险矩阵方法与有序样品聚类方法相结合的事故风险分级方法, 分别对无信号控制交叉口和信号控制交叉口 18 种事故类型的风险进行分级, 梳理出无信号控制交叉口 6 种中等风险以上交通事故类型、信号控制交叉口 3 种中等风险以上交通事故类型, 并分别提出相应预防对策。

关键词: 城市交通; 交通管理; 交通安全; 交叉口; 风险矩阵; 有序样品聚类

中图分类号: U491.23

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)04-0028-07

交叉口作为城市道路的重要节点, 承担了城市车流及人流的汇集、转向、疏散功能, 交叉口处各方向车流、人流间的交通冲突难以避免。城市道路交叉口的交通安全正引发越来越多的关注, 其交通安全风险防控成为道路交通安全研究中关键一环。以往学者对城市道路交叉口的研究主要集中在效率提升方面, 随着城市道路交叉口安全问题的凸显, 交叉口安全研究引起广泛关注, 相关研究越来越细化, 研究内容也越来越深入。部分学者运用交通冲突技术对城市道路交叉口的交通安全风险进行了解析, 如王雪松等分析了上海市部分信号控制交叉口的交通冲突类型和冲突点空间分布规律, 揭示了交通冲突的致因^[1]; 王玉全等针对机动车间冲突、机动车与非机动车冲突、机动车与行人冲突分别建立模型, 通过对交通参与者的流线研究, 分析了机动车、非机动车、行人三者之间的主要冲突类别^[2]; 巫诚诚等引入极值理论构建城市交叉口机动车与非机动车冲突极值预测模型, 从时间维度实现了交叉口非机动车的安全分析^[3]; 刘辉等运用广义有序 Logit 模型, 分析了车、路和环境等因素对无控制交叉口交通安全的影响^[4]。一些学者将研究重点确定为某一特定的冲突类型, 如行人与右转车之间的冲突^[5]、机动车与左转非机动车之间的冲突^[6]、非机动车与右转机动车间的冲突^[7]、电动自行车交通冲突^[8]等。还有部分

学者从真实交通事故数据入手对城市道路交叉口的事故特征进行研究, 如 Yan X. D. 等对佛罗里达州信号交叉口的追尾事故数据进行研究, 得到了与信号交叉口追尾事故相关的风险影响因素^[9]; Mitra S. 等对新加坡西南部的交通事故数据进行分析, 提出了能有效减少车辆间侧面碰撞和追尾碰撞的交通管控措施^[10]; 谢晓莉等对交叉口行人死亡事故进行研究, 分析了摩托车直行、汽车直行、汽车左转 3 类事故机理, 并对事故主要影响因素进行了归纳^[11]; 谷旭佳对不同控制方式交叉口进行分类, 分析了不同控制方式交叉口行人事故风险的主要影响因素^[12]; 张一驰对长春市部分交叉口货运车辆交通事故数据进行分析, 结合交通冲突理论提出了城市交叉口货运车辆运行安全评价指标^[13]; Yang N. 等对山东省电动两轮车交通事故数据进行分析, 探究导致两轮电动车在交叉口发生致命伤害的主要因素^[14]。前人对城市道路交叉口的交通安全风险已开展了较广泛的研究, 但仍存在不足之处: 一是基于交通冲突技术的研究居多, 其对指导中国城市道路交叉口事故预防是否有实际应用价值缺少权威性验证; 二是基于交通事故的研究样本量较小, 大多为某地数个交叉口数据, 研究结论不具备普适性; 三是城市交叉口交通安全风险研究往往是针对某一类或某几类风险类型, 缺乏对交叉口全部事故类型的梳理与总结, 也

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1600500)

缺少不同事故类型之间的横向对比,不能识别交叉口最突出的交通安全风险。本文基于中国城市道路交叉口交通事故数据,借鉴安全风险分级管控相关概念^[15],对交叉口内由交通参与者之间的交通冲突引发的交通事故风险进行全面梳理,并对其进行分级。

1 城市道路交叉口事故分类

城市道路交叉口中最常见、最易造成人员伤亡的事故按事故双方交通方式可分为三类,分别为机动车之间事故(以下简称机—机事故)、机动车与非机动车之间事故(以下简称机—非事故)、机动车与行人之间事故(以下简称机—人事故)。这三类事故的事故一方均为机动车,另一方的交通方式不同。不同交通方式之间发生事故,事故形态和事故严重程度截然不同。

要使用完整的信息描述一种事故类型,除碰撞双方的交通方式外,还可根据事故发生时事故双方的行驶方向及碰撞方式对事故进行进一步细分,并采用一定的命名规则对其命名,可使用交通方式、行驶方向、碰撞方式三要素制定命名规则。事故类型三要素的编号见表 1。

表 1 事故类型三要素的编号

事故要素		编号
交通方式	机—机事故	V
	机—非事故	B
	机—人事故	P
行驶方向	直行	1
	左转	6
	右转	7
碰撞方式	同向碰撞	1
	对向碰撞	2
	侧面碰撞	3

命名规则的三要素中,交通方式用来描述碰撞双方的交通方式,包含机动车、非机动车、行人;行驶方向表示事故中机动车的行驶方向,主要包含直行、左转、右转,机—机事故中,表示两辆机动车的行驶方向的数字中间以冒号分隔;碰撞方式表示事故双方以何种角度发生碰撞,主要包含同向碰撞、对向碰撞、侧面碰撞,其中同向碰撞指相同方向行驶车辆间的碰撞,对向碰撞指相对方向行驶车辆间的碰撞,侧面碰撞指呈直角或近乎直角方向行驶车辆间的碰撞。使用这种命名方式能将交叉口中涉及机动车的

全部交通事故类型表征出来。如图 1 所示,V 表示机—机事故,1:1 表示事故中两辆机动车的行驶方向均为直行,3 表示两辆机动车发生侧面碰撞,则 $V_{1:1,3}$ 表示直行机动车一直行机动车之间的侧面碰撞。

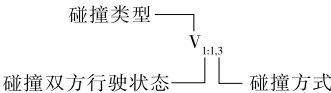


图 1 事故类型命名示例

根据上述命名规则对城市交叉口常见的 8 种机—机事故、7 种机—非事故、3 种机—人事故进行命名,将城市交叉口因交通参与者之间发生交通冲突导致的事故分为 18 种类型(见表 2)。

表 2 城市交叉口常见事故类型命名

事故类型	事故类型	事故类型编号
事故类型 1	直行机动车一直行机动车同向碰撞	$V_{1:1,1}$
事故类型 2	直行机动车一直行机动车对向碰撞	$V_{1:1,2}$
事故类型 3	直行机动车一直行机动车侧面碰撞	$V_{1:1,3}$
事故类型 4	左转机动车一直行机动车同向碰撞	$V_{1:6,1}$
事故类型 5	左转机动车一直行机动车对向碰撞	$V_{1:6,2}$
事故类型 6	左转机动车一直行机动车侧面碰撞	$V_{1:6,3}$
事故类型 7	右转机动车一直行机动车同向碰撞	$V_{1:7,1}$
事故类型 8	右转机动车一直行机动车侧面碰撞	$V_{1:7,3}$
事故类型 9	直行机动车一非机动车同向碰撞	$B_{1,1}$
事故类型 10	直行机动车一非机动车对向碰撞	$B_{1,2}$
事故类型 11	直行机动车一非机动车侧面碰撞	$B_{1,3}$
事故类型 12	左转机动车一非机动车对向碰撞	$B_{6,2}$
事故类型 13	左转机动车一非机动车侧面碰撞	$B_{6,3}$
事故类型 14	右转机动车一非机动车同向碰撞	$B_{7,1}$
事故类型 15	右转机动车一非机动车侧面碰撞	$B_{7,3}$
事故类型 16	直行机动车—行人碰撞	P_1
事故类型 17	左转机动车—行人碰撞	P_6
事故类型 18	右转机动车—行人碰撞	P_7

2 城市道路交叉口风险矩阵分级模型

风险矩阵是一种综合考虑风险概率(可能性)和风险影响(事故危险性)两方面因素,通过定性和定量分析对系统要素进行细化的风险评价方法^[16],能将系统风险进行等级划分,识别出系统内的关键风险,实现系统关键风险防范,已在安全生产风险分析中得到广泛应用。

城市道路交叉口风险矩阵的两个关键要素中,

风险概率 R_p (可能性) 可用事故的历史实际发生频率代替, 某类事故的风险概率 R_p 为该类事故在某时段内发生的事故数量 N_a 占该时段内全部类型事故数量 N 的比例, 即 $R_p = N_a/N$; 某类事故的风险影响 R_i (事故危险性) 可用该类事故平均致死率来衡量, 为该类事故导致的死亡人数 N_d 与该种事故导致的全部死伤人数 N_i 的比值, 即 $R_i = N_d/(N_d + N_i)$ 。

根据风险概率和风险影响的不同等级, 可将城市道路交叉口各事故类型分为 1 个极高风险区、2 个高风险区、3 个中等风险区和 3 个低风险区。如图 2 所示, 若某事故类型的风险影响等级和风险概率等级均为高, 则判断该类事故落在事故风险矩阵的右上方, 具有极高风险。在防控城市道路交叉口交通事故时, 应对中等风险以上的事故类型给予重点关注。

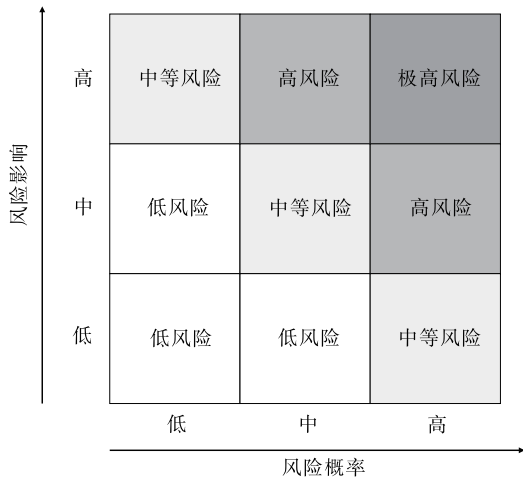


图2 城市道路交叉口交通事故风险矩阵分级模型

交通信号控制对于改善交叉口不同方向车流间的冲突有显著作用, 有、无信号控制交叉口各事故类型发生频率差异明显, 须分别对有、无信号控制城市交叉口建立风险矩阵。以 2019—2020 年中国城市道路交叉口交通事故数据为依据, 对城市信号控制交叉口和无信号控制交叉口的交通事故进行分级。

3 基于有序样品聚类方法的交叉口交通安全分级

对风险影响、风险概率两项指标进行合理分级是风险矩阵构建的核心, 可使用有序样品聚类方法实现两项指标的分级。

3.1 有序样品聚类方法

有序样品聚类的实质是找一些分割点, 对一组有序样品数据进行分割, 使各段内部样品之间的差

异最小, 而各段样品之间的差异较大, 所以又称为最优分割^[17]。设有 n 个有序样品 $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$, 其中每个样品有 m 个指标, 即 $X_{(i)} (i=1, \dots, n)$ 为 m 维向量。

(1) 定义类的直径。设某一类样品 G 包含的样品有 $\{X_{(i)}, X_{(i+1)}, \dots, X_{(j)}\} (j > i)$, 记为 $G = \{i, i+1, \dots, j\}$ 。该类的均值向量 \bar{X}_G 按式(1)计算。用 $D(i, j)$ 表示这一类的直径, 常用直径见式(2)。当 $m=1$ 时, 也可以将直径定义为式(3)。

$$\bar{X}_G = \frac{1}{j-i+1} \sum_{t=i}^j X_{(t)} \quad (1)$$

$$D(i, j) = \sum_{t=i}^j (X_{(t)} - \bar{X}_G)' (X_{(t)} - \bar{X}_G) \quad (2)$$

$$D(i, j) = \sum_{t=i}^j |X_{(t)} - \bar{X}_G| \quad (3)$$

(2) 定义分类的损失函数。用 $b(n, k)$ 表示将 n 个有序样品分为 k 类的某一种方法, 常记分类方法 $b(n, k)$ 见式(4), 其中分点为 $1=i_1 < i_2 < \dots < i_k < n=i_{k+1}-1$ (即 $i_{k+1}=n+1$)。将上述分类方法的损失函数定义为式(5), 当 n, k 固定时, $L[b(n, k)]$ 越小, 表示各类的离差平方和越小, 分类较合理。因此, 要找到一种分类方法 $b(n, k)$ 使分类损失函数达到最小、对样本的分类达到最优, 最优分类记为 $P(n, k)$ 。

$$\begin{cases} G_1 = \{i_1, i_1+1, \dots, i_2-1\} \\ G_2 = \{i_2, i_2+1, \dots, i_3-1\} \\ \dots \\ G_k = \{i_k, i_k+1, \dots, n\} \end{cases} \quad (4)$$

$$L[b(n, k)] = \sum_{i=1}^k D(i, i_{i+1}-1) \quad (5)$$

(3) 损失函数的递推公式。有序样品聚类的核心是递推公式[见式(6)、式(7)], 这两个公式由式(5)及 $P(n, k)$ 的定义即可证明。根据式(7), 将 n 个样品分为 k 类的最优分类方法应建立在将 $j-1$ 个样品分为 $k-1$ 类的基础上 ($j=2, 3, \dots, n$)。

$$L[b(n, 2)] = \min_{2 \leq j \leq n} \{D(1, j-1) + D(j, n)\} \quad (6)$$

$$L[b(n, k)] = \min_{k \leq j \leq n} \{L[P(j-1, k-1)] + D(j, n)\} \quad (7)$$

(4) 最优解的求解。若分类数 $k (1 < k < n)$ 已知, 则使损失函数最小的分类方法 $P(n, k)$ 的求解步骤如下: 首先找分点 j_k , 使递推公式达到极小, 即 $L[P(n, k)] = L[P(j_k-1, k-1)] + D(j_k, n)$, 得到第 k 类 $G_k = \{j_k, j_k+1, \dots, n\}$; 然后找 j_{k-1} , 使它

满足 $L[P(j_{k-1}, k-1)] = L[P(j_{k-1}-1, k-2)] + D(j_{k-1}, j_k-1)$, 得到第 $k-1$ 类 $G_{k-1} = \{j_{k-1}, j_{k-1}+1, \dots, j_k-1\}$; 依此类推, 得到所有类 G_1, G_2, \dots, G_k 。损失函数最小的最优解为:

$$P(n, k) = \{G_1, G_2, \dots, G_k\} \tag{8}$$

3.2 无信号控制交叉口的交通事故风险概率和风险影响分级

根据 2019—2020 年中国城市无信号控制交叉口的交通事故数据计算 18 种事故类型的风险概率和风险影响, 结果见表 3。

表 3 无信号控制交叉口的交通事故风险概率和风险影响

事故类型	风险概率	风险影响	事故类型	风险概率	风险影响
$V_{1,1,1}$	0.118 3	0.107 0	$B_{1,2}$	0.045 1	0.091 9
$V_{1,1,2}$	0.049 4	0.086 3	$B_{1,3}$	0.153 3	0.100 4
$V_{1,1,3}$	0.098 3	0.067 7	$B_{6,2}$	0.006 2	0.049 2
$V_{1,6,1}$	0.012 1	0.076 9	$B_{6,3}$	0.019 0	0.034 8
$V_{1,6,2}$	0.019 1	0.075 0	$B_{7,1}$	0.012 1	0.141 0
$V_{1,6,3}$	0.052 2	0.077 7	$B_{7,3}$	0.023 5	0.079 1
$V_{1,7,1}$	0.011 2	0.095 2	P_1	0.237 1	0.196 8
$V_{1,7,3}$	0.017 8	0.068 4	P_6	0.016 2	0.106 7
$B_{1,1}$	0.083 7	0.113 5	P_7	0.006 9	0.140 8

分别将各事故类型的风险概率和风险影响按升序排列, 构造有序数列并对其进行分级。以风险概率为例, 分级过程如下:

(1) 构造有序数列。为方便突出后续各分类方法损失函数的差异, 将各事故类型的风险概率值统一放大 100 倍, 使其损失函数能处在一个正常可观察的区间。将 18 种事故类型的风险概率按升序排列, 构造有序数列如下:

$$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}\} = \{0.62, 0.69, 1.12, 1.21, 1.21, 1.62, 1.78, 1.90, 1.91, 2.35, 4.51, 4.94, 5.22, 8.37, 9.83, 11.83, 15.33, 23.71\}$$

(2) 计算直径 $D(i, j)$ 。因每个样品只有一个指标, 即 $m=1, D(i, j)$ 按式(3)计算, 得到的样本直径矩阵见表 4。例如计算 $D(3, 6)$, 此时分类 G 中包含 4 个样品 $\{x_3, x_4, x_5, x_6\}$, 故有:

$$\bar{X}_G = \frac{1}{4}(1.12+1.21+1.21+1.62) = 1.29$$

$$D(3, 6) = (1.12-1.29)^2 + (1.21-1.29)^2 + (1.21-1.29)^2 + (1.62-1.29)^2 = 0.150\ 6 \approx 0.2$$

表 4 无信号控制交叉口交通事故风险概率样本直径矩阵

事故类型 j	事故类型 i																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0.0																	
2	0.0	0.0																
3	0.1	0.1	0.0															
4	0.3	0.2	0.0	0.0														
5	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0													
6	0.7	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0												
7	1.1	0.8	0.4	0.3	0.2	0.0	0.0											
8	1.6	1.1	0.6	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0										
9	2.0	1.4	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0									
10	2.9	2.2	1.3	1.0	0.7	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0								
11	12.0	10.0	8.9	8.1	7.2	6.1	5.4	4.8	4.0	2.4	0.0							
12	22.0	19.0	17.0	16.0	14.0	12.0	11.0	9.1	7.1	4.0	0.1	0.0						
13	31.0	29.0	25.0	23.0	21.0	18.0	15.0	13.0	9.8	5.2	0.3	0.0	0.0					
14	67.0	63.0	58.0	54.0	49.0	44.0	39.0	34.0	28.0	19.0	9.6	7.5	5.1	0.0				
15	116.0	109.0	102.0	95.0	88.0	79.0	72.0	63.0	52.0	38.0	23.0	18.0	11.0	1.1	0.0			
16	189.0	179.0	167.0	157.0	146.0	133.0	121.0	107.0	91.0	70.0	47.0	36.0	24.0	6.2	2.0	0.0		
17	320.0	305.0	288.0	272.0	255.0	235.0	215.0	194.0	168.0	136.0	102.0	82.0	59.0	28.0	16.0	6.3	0.0	
18	683.0	658.0	630.0	603.0	574.0	540.0	505.0	467.0	422.0	368.0	308.0	266.0	217.0	154.0	116.0	77.0	36.0	0.0

(3) 计算最小分类损失函数。 $\{L[P(n, k)], 2 \leq n \leq 18, 2 \leq k \leq 17\}$, 将 n 个样品分成 k 类, 按照递推规则计算每种分割类型的损失函数。如将 3 个样品分为 2 类, 将 4 个样品分为 3 类的最优分割的损失函数均为零[见式(9)、式(10)]。最优分割的损失函数计算结果见表 5。

$$L[P(3, 2)] = \min\{D(1, 1) + D(2, 3), D(1, 2) + D(3, 3)\} = \min\{0.1, 0\} = 0 \quad (9)$$

$$L[P(4, 3)] = \min\{L[P(2, 2)] + D(3, 4), L[P(3, 2)] + D(4, 4)\} = \min\{0, 0\} = 0 \quad (10)$$

(4) 确定最优分类。将 18 个样品数据分为 3 类,

表 5 各分类方法最小损失函数计算结果

样品数	分类 k																
量 n /个	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
2	0.0																
3	0.0	0.0															
4	0.0	0.0	0.0														
5	0.0	0.0	0.0	0.0													
6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0												
7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0											
8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0										
9	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0									
10	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0								
11	2.9	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0							
12	3.0	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
13	3.2	0.9	0.6	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
14	13.0	3.2	0.9	0.6	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
15	26.0	4.3	2.0	0.9	0.6	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
16	38.0	9.4	4.3	2.0	0.9	0.6	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
17	59.0	29.0	9.4	4.3	2.0	0.9	0.6	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
18	183.0	59.0	29.0	9.4	4.3	2.0	0.9	0.6	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

即计算 $L[P(18, 3)]$, 根据最优分类的确定方法可知最优分点为 x_{13} 、 x_{17} , 即:

$$L[P(18, 3)] = L[P(17, 2)] + D(18, 18) = D(1, 13) + D(14, 17) + D(18, 18) \quad (11)$$

根据式(11), 损失函数最小的分类方法为 $\{x_1 \sim x_{13}\}, \{x_{14} \sim x_{17}\}, \{x_{18}\}$, 分别对应风险概率的低、中、高 3 个等级。将有序数列对应到具体事故类型, 得到无信号控制交叉口各事故类型的风险概率分级(见表 6)。

针对无信号控制交叉口各事故类型事故风险影响样本构造有序数列, 按上述步骤进行计算, 得到无信号控制交叉口各事故类型的风险影响分级(见表 6)。

综合风险概率和风险影响的分级结果, 构造图 3 所示无信号控制交叉口的交通事故风险矩阵。由图 3 可知: 无信号控制交叉口有 1 项极高交通安全风险事故类型, 为 P_1 ; 5 项中等交通安全风险事故

类型, 分别为 $B_{7,1}$ 、 P_7 、 $V_{1:1,1}$ 、 $B_{1,1}$ 、 $B_{1,3}$ 。

表 6 无信号控制交叉口各事故类型的风险概率和风险影响分级

事故类型	风险概率等级	风险影响等级	事故类型	风险概率等级	风险影响等级
$V_{1:1,1}$	中	中	$B_{1,2}$	低	中
$V_{1:1,2}$	低	中	$B_{1,3}$	中	中
$V_{1:1,3}$	中	低	$B_{6,2}$	低	低
$V_{1:6,1}$	低	低	$B_{6,3}$	低	低
$V_{1:6,2}$	低	低	$B_{7,1}$	低	高
$V_{1:6,3}$	低	低	$B_{7,3}$	低	低
$V_{1:7,1}$	低	中	P_1	高	高
$V_{1:7,3}$	低	低	P_6	低	中
$B_{1,1}$	中	中	P_7	低	高

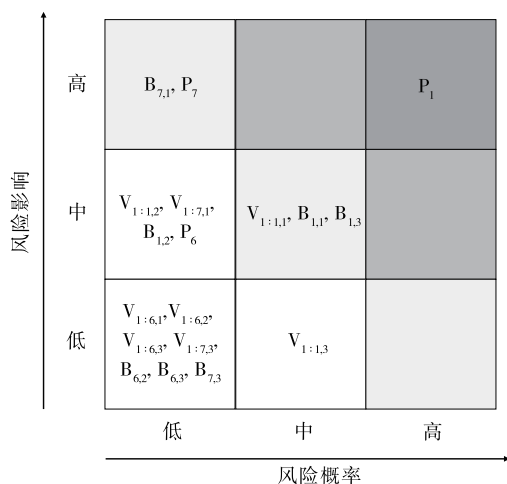


图3 无信号交叉口交通事故风险矩阵

3.3 信号控制交叉口的交通事故风险概率和风险影响分级

根据 2019—2020 年中国城市信号控制交叉口的交通事故数据计算 18 种事故类型的风险概率和风险影响,结果见表 7。

表7 信号控制交叉口的交通事故风险概率和风险影响

事故类型	风险概率	风险影响	事故类型	风险概率	风险影响
$V_{1:1,1}$	0.131 7	0.090 6	$B_{1,2}$	0.037 3	0.113 9
$V_{1:1,2}$	0.021 3	0.086 2	$B_{1,3}$	0.223 6	0.102 5
$V_{1:1,3}$	0.120 0	0.085 3	$B_{6,2}$	0.016 2	0.047 1
$V_{1:6,1}$	0.009 4	0.101 6	$B_{6,3}$	0.045 1	0.054 0
$V_{1:6,2}$	0.035 0	0.059 1	$B_{7,1}$	0.033 8	0.293 3
$V_{1:6,3}$	0.063 4	0.069 2	$B_{7,3}$	0.055 1	0.166 3
$V_{1:7,1}$	0.010 6	0.173 8	P_1	0.084 8	0.190 8
$V_{1:7,3}$	0.016 2	0.104 4	P_6	0.036 8	0.119 8
$B_{1,1}$	0.048 4	0.122 8	P_7	0.010 1	0.152 0

分别将信号控制交叉口各类交通事故的风险概率和风险影响样本按升序排列构造有序数列,采用有序样品聚类方法对各事故类型的风险概率和风险影响进行分级(分级过程与 3.2 节所述过程类似,不再赘述),结果见表 8。

综合风险概率和风险影响的分级结果,构造图 4 所示信号控制交叉口的交通事故风险矩阵。由图 4 可知:信号控制交叉口存在 3 项中等交通安全风险事故类型,分别为 $B_{7,1}$ 、 P_1 、 $B_{1,3}$ 。

表8 信号控制交叉口各事故类型的风险概率和风险影响分级

事故类型	风险概率等级	风险影响等级	事故类型	风险概率等级	风险影响等级
$V_{1:1,1}$	中	低	$B_{1,2}$	低	低
$V_{1:1,2}$	低	低	$B_{1,3}$	高	低
$V_{1:1,3}$	中	低	$B_{6,2}$	低	低
$V_{1:6,1}$	低	低	$B_{6,3}$	低	低
$V_{1:6,2}$	低	低	$B_{7,1}$	低	高
$V_{1:6,3}$	低	低	$B_{7,3}$	低	中
$V_{1:7,1}$	低	中	P_1	中	中
$V_{1:7,3}$	低	低	P_6	低	低
$B_{1,1}$	低	低	P_7	低	中

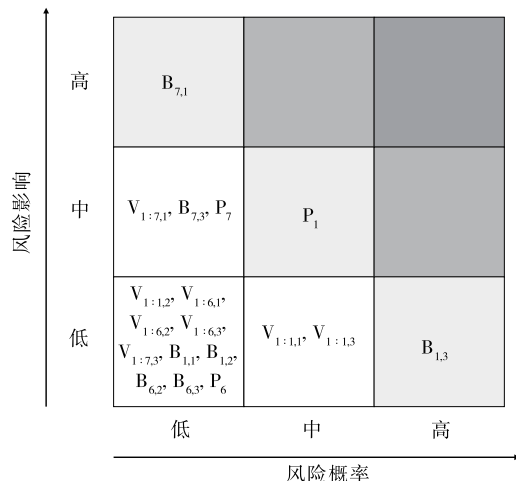


图4 信号控制交叉口交通事故风险矩阵

4 结论

(1) 将有序样品聚类和风险矩阵相结合,分别对无信号控制交叉口、信号控制交叉口交通事故类型进行分级,得出无信号控制交叉口中 P_1 为极高交通安全风险事故类型, $B_{7,1}$ 、 P_7 、 $V_{1:1,1}$ 、 $B_{1,1}$ 、 $B_{1,3}$ 为中等交通安全风险事故类型;信号控制交叉口中 $B_{7,1}$ 、 P_1 、 $B_{1,3}$ 为中等交通安全风险事故类型。

(2) 相比信号控制交叉口,无信号控制交叉口的交通冲突更激烈,须关注的事故类型也更多。 P_1 为无信号控制交叉口中高风险概率、高风险影响的极高风险事故类型,这类交叉口应采取限速、减速控制及让行预警等措施,减少 P_1 类事故的发生。 $B_{7,1}$ 和 P_7 属于高风险影响、低风险概率的事故类型,虽然其发生概率不高,但极易致人死亡,应采取控制车速、限制大型车辆通行、督促非机动车驾驶人佩戴头

盔等措施,降低事故的严重程度。 $V_{1,1,1}$ 、 $B_{1,1}$ 、 $B_{1,3}$ 属于中等风险影响、中等风险概率的事故类型,预防这类事故应同时降低其发生概率和严重程度,可采取设置机动车-非机动车分离护栏、交叉口进口道拓宽、设置交通信号等方式减少车辆间的冲突。

(3) 信号控制交叉口3种需要关注的事故类型中,除 $B_{7,1}$ 事故的发生机理与无信号控制交叉口相似外, P_1 、 $B_{1,3}$ 事故大多由事故中的一方未遵守信号规则而引发,防范此类事故,一方面可通过调整信号时间适配过街习惯,另一方面可通过查处、教育、警示等手段提高交通参与者的信号遵守率。

参考文献:

- [1] 王雪松,罗棟.信号控制交叉口交通冲突特征与影响因素[J].城市交通,2016,14(6):60-66.
- [2] 王玉全,邢芳,郭伟伟.信号交叉口混合交通冲突研究[J].中国安全科学学报,2016,26(6):47-51.
- [3] 巫诚诚,陈大伟.交叉口非机动车冲突易发点空间预测模型[J].中国安全科学学报,2021,31(8):165-171.
- [4] 刘辉,章国鹏,王羿童,等.无控制交叉口交通安全影响因素分析[J].公路交通科技,2019,36(9):110-116.
- [5] 孙重静.城市交叉口行人与右转车冲突风险评估[J].交通与运输(学术版),2018(2):64-67.
- [6] 周智文,马健霄,王冠森.信号交叉口左转非机动车交通冲突分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(1):95-100.
- [7] 于瑞康.信号交叉口右转机动车与非机动车冲突行为分析[D].北京:北京交通大学,2018.
- [8] 张开冉,邱谦谦.平面交叉口电动自行车交通冲突模型研究[J].安全与环境学报,2017,17(2):422-425.
- [9] YAN X D, RADWAN E, ABDEL-ATY M. Characteristics of rear-end accidents at signalized intersections using multiple logistic regression model[J]. Accident Analysis & Prevention, 2005, 37(6): 983-995.
- [10] MITRA S, CHIN H C, QUDDUS M A. Study of intersection accidents by maneuver type[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1784(1): 43-50.
- [11] 谢晓莉,刘洪启,李平生.无信号控制公路交叉口行人死亡事故特征及机理[J].中国安全科学学报,2013,23(8):96-101.
- [12] 谷旭佳.交叉口人车事故风险及伤害程度统计分析方法[D].北京:北京交通大学,2021.
- [13] 张一驰.城市道路交叉口货运车辆交通事故成因分析及预防对策[D].长春:吉林大学,2016.
- [14] YANG N, LI Y, LIU T, et al. Analysis of fatal factors influencing accidents involving two-wheel electric vehicle drivers at intersections [J]. Legal Medicine, 2020, 45: 101696.
- [15] 罗聪,徐克,刘潜,等.安全风险分级管控相关概念辨析[J].中国安全科学学报,2019,29(10):43-50.
- [16] 朱启超,匡兴华,沈永平.风险矩阵方法与应用述评[J].中国工程科学,2003,5(1):89-94.
- [17] 高惠璇.应用多元统计分析[M].北京:北京大学出版社,2005:252-258.

收稿日期:2022-09-28

(上接第27页)

- [10] 刘鑫,肖乐,金思雨.基于NAIS的高速公路严重交通事故特征及致因分析[J].公路与汽运,2022(5):32-37.
- [11] 王文成.考虑时空效应的道路交通事故建模及其影响因素分析[D].北京:北京交通大学,2020.
- [12] 由冰玉.高速公路交通事故影响因素研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [13] 魏凌峰,姜文龙.基于支持向量机的交通事故影响因素分析[J].山东交通科技,2022(1):84-87.
- [14] 孙轶轩,邵春福,岳昊,等.基于SVM灵敏度的城市交通事故严重程度影响因素分析[J].吉林大学学报(工学版),2014,44(5):1315-1320.
- [15] 杨文臣,周燕宁,田毕江,等.基于聚类分析和SVM的二级公路交通事故严重度预测[J].中国安全科学学报,2022,32(5):163-169.
- [16] 侯树展,孙小端,贺玉龙,等.高速公路交通事故严重程度与交通流特征的关系研究[J].中国安全科学学报,2011,21(9):106-112.
- [17] 何泊延.基于GBDT的数据分类方法的研究及其应用[D].吉林:东北电力大学,2021.
- [18] ZHENG M, LI T, ZHU R, et al. Traffic accident's severity prediction: A deep-learning approach-based CNN network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 39897-39910.

收稿日期:2022-09-09