

文章编号:1005-0523(2016)02-0093-07

信号交叉口人车通行博弈分析

覃 鹏¹,王 正¹,单晓芳²,赵祖菊³

(1.上海海事大学交通运输学院,上海 201306;2.同济大学经济与管理学院,上海 200092;
3.贵州财经大学工商管理学院,贵州 贵阳 550025)

摘要:交叉口是交通事故多发地点之一。为合理引导交叉口处人-车流有序安全通行,论文引入博弈论,对交叉口人车流的博弈进行分析。通过利用博弈论知识,针对直行车流讨论不同的人-车流量比情况,创建连锁博弈矩阵,分析人车流彼此可能的策略组合,并给出一般人车流量比下的均衡策略组合,给通行参与者策略选择提供借鉴以规范人车通行秩序。分析结果表明,在直行车流流量较小且保持不变时,行人闯红灯的可能性会随着人车流量比的增大而呈现较快的上升趋势;在直行车流流量逐渐增大时,行人闯红灯的可能性则随着人车流量比的增大呈现较缓的上升趋势。

关键词:博弈论;均衡策略组合;人-车流比;连锁博弈矩阵;交叉口安全;信号交叉口

中图分类号:U491

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.02.014

交叉口是交通事故多发地点之一。据不完全统计,在全国总交通事故中交叉口交通事故所占比例不低于30%^[1]。针对交叉口安全,诸多学者研究了交叉口的安全评价方法^[2-4],导致交叉口交通事故主要因素^[5-6],以及交叉口交通流的组织和控制^[7]等。而对于改善的方法的研究方面,以往的方法主要有加设行人信号灯、隔离栏、天桥、地下道和交通警察(或者协警)以维持通行秩序和改善交叉口安全。但是,这些措施手段都仅仅是从管理者的角度出发,并没有从通行参与者的角度出发。

本文提出利用博弈论^[8]的分析方法对交叉口通行参与者的博弈进行分析,帮助通行参与者理性地选择自己的行为(即策略),以改善交叉口人车通行秩序。

1 信号交叉口人车通行秩序分析

1.1 交叉口冲突分析

交叉口交通事故由存在的冲突点导致。以图1和图2所示的十字交叉口为例,各进出口道都是3车道,左直右各1条,不考虑非机动车导致的冲突点。交叉口内部存在的冲突点如图1,信号相位方案如图2。由图1可知,在行人信号灯为红色期间,在人行横道上通行的行人必然与直行,左转以及右转车流产生冲突点。其中,与直行车流所产生的冲突点最为严重;因为直行车流速度较快,所产生的伤害也是最大的。

1.2 交叉口通行秩序分析

行人在交叉口处闯红灯的基本前提是法律未对闯红灯行人加以惩罚,所以行人闯红灯就无法管制。而车流量少及行人红灯时间长,是导致行人等红灯不耐烦的直接原因。因为车流量少,行人认为闯红灯过街应该安全,且红灯时间长,闯红灯就可节约等待时间;因此,行人认为闯红灯是一笔很合算的“交易”。由此导致行人选择闯红灯,侵犯绿灯相位车流的通行权利。具有通行权利的车流基本上不会任由行人强行通过,也会以享受自己的权利驶出停车线作为抗议,这就为交通事故发生埋下了伏笔。

收稿日期:2015-10-07

基金项目:上海市哲学社会科学规划课题(2008BZH006)

作者简介:覃鹏(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为交通规划管理与设计。

通讯作者:王正(1964—),男,副教授,博士,主要研究方向为城市综合交通规划,城市公共交通规划,交通成本,物流系统规划。

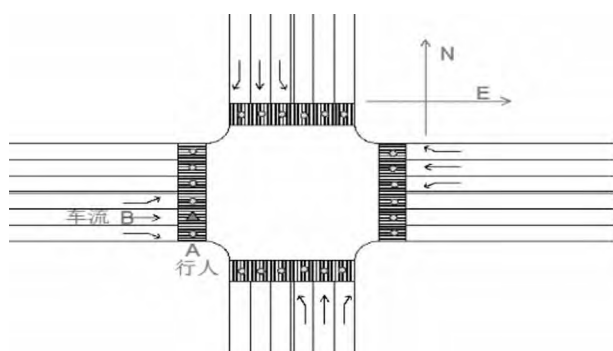


图 1 交叉口冲突示意图
Fig.1 The conflict at the intersection

相位方案

信号周期=120 s

$g_{\text{左}}=24\text{ s}$

$g_{\text{直}}=36\text{ s}$

相位	相位
相位 1	→ ←
相位 2	↗ ↘ ↙ ↚
相位 3	↑ ↓
相位 4	↖ ↗ ↘ ↙

图 2 交叉口相位方案
Fig.2 The phase scheme of the intersection

如图 1,交叉口各向车流与行人所产生的冲突点以绿圆团表示。以图中红三角代表的直行车流与行人冲突点为例,在 A 处的行人欲在行人信号灯红灯期间强行通过人行横道,而在 B 处的直行车流为夺回属于自己的通行权利会驶出停车线,则交通事故很有可能就此发生;因此,有必要引导行人遵守交通规则地通过交叉口,并对自己闯红灯的行为及其结果进行反思。利用博弈论对交叉口人车博弈进行分析,从参与者的角度,深度分析参与者各种行为及其代价,以规范交叉口通行秩序。

2 交叉口人车博弈分析

2.1 基本规定和介绍

限于篇幅,关于博弈论的相关知识不作介绍。

本文主要分析直行车流与行人冲突博弈,其余的左转或右转车流与行人的冲突博弈可类比分析。以图 1 所示的交叉口为研究对象。针对该交叉口,建立模型前作几点规定:

规定 1:右转车流受控,直行相位时禁止同向车流右转;

规定 2:每周最大直行车流流量与直行绿灯期间最大行人流量的比 $n > 3$ 倍;

规定 3:直行绿灯期间不闯红灯的行人,接下来的各相绿灯期间均不闯红灯;

规定 4:直行绿灯期间同时进入人行横道的行人人数不大于 3 人。

规定 1 很容易做到的,只需根据交叉口各进口道各流向流量比就可以确定一个右转车流受控的信号控制方案;对于规定 2,由于在常用的直行绿灯长度(以 30 s 为例)期间内闯红灯行人数量一般不大于 6 人,而一条自行车道在在此期间的流量最多 20 辆,所以比值一般在区间(2,4)之间,可以取其中间值作为规定值;对于规定 3,由于常用的信号相位相序为直左直左,且多数情况下(不排除一些情况下刚好相反)左转绿灯时间不会大于直行绿灯时间,如果行人在直行绿灯期间不闯红灯,那么其在左转绿灯期间闯红灯基本属于小概率事件;对于规定 4,考虑人行横道的宽度以及直行绿灯期间行人中选择闯红灯人数的概率,可以认为同一次闯红灯的人数一般在 3 人左右,更多的时候都是以离散状态进行闯红灯。

基于以上规定,再对交叉口相关时空设计简要说明:

1) 交叉口采用四相位的信号控制方案,相关参数如图 2;

2) 交叉口进口道宽度为 $B=3.5+3.5+3.25=10.25\text{ m}$;

3) 行人过街步行速度为 $V=1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2 模型建立

利用博弈论分析,需要给出博弈论三要素:

1) 参与者 i : $i=1$ 表示行人, $i=2$ 表示直行车流;

2) 参与者策略空间 S_i : $S_1=(\text{闯红灯}, \text{不闯红灯}), S_2=(\text{抗议}, \text{不抗议})$;

3) 参与者策略效用(支付)函数 $u_i:u_i(s_1,s_2)$ 。

以下建立效用函数模型

$$u_{ij} = a_i T_{ij} + b_i D_{ij} \quad (1)$$

其中: T_{ij}, D_{ij} 和 u_{ij} 分别为参与者 i 所采取策略 j 的时间节约效用(简称节约度),威胁感受效用(简称安全度)和总的加权效用; a_i 和 b_i 分别为参与者 i 节约度及安全度的权重系数。

对于行人,规定时间节约度为节约的时间与所需等待时间之比;安全度为行人所感觉到的威胁感程度,与直行车流流量以及同时期(指直行车流的绿灯期间)行人流量有关。因此

$$\begin{cases} T_{11} = 1 \\ D_{11} = V_1/V_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_{12} = 0 \\ D_{12} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_2 为直行绿灯期间直行车流的流量,单位:辆; V_1 为直行绿灯期间行人流量,单位:人; T_{11} 为参与者 1(行人)采取策略 1(闯红灯)时的节约度,对参与者 2 类同; D_{11} 为参与者 1(行人)采取策略 1(闯红灯)时的安全度,对参与者 2 类同; T_{12} 为参与者 1(行人)采取策略 2(不闯红灯)时的节约度,对参与者 2 类同; D_{12} 为参与者 1(行人)采取策略 2(不闯红灯)时的安全度,对参与者 2 类同。

同样,对于直行车流,规定时间节约度为浪费的时间与绿灯时间之比;安全度为驾驶员所感受到的威胁感程度,与直行车流流量以及同时期(指直行车流的绿灯期间)行人流量有关。因此

$$\begin{cases} T_{21} = 0 \\ D_{21} = V_2/(V_1 n) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} T_{22} = k g_{\min}/g \\ D_{22} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_m 为人车流最大比值,与表 1 中人车流量比(R)同为无量纲; k 为参与者 2 的时间节约度修正系数; $g_{\min}$ 为行人步行通过进口道人行横道所需最小步行时间,单位:s,可由交叉口进口道宽度(B)行人过街步行速度(S)求得; g 直为直行车流的绿灯时间,单位:s; $T_{21}, T_{22}, D_{21}, D_{22}$ 解释类同前文。

对节约度、安全度以及相关权重的决定进行解释:对行人,由规定 3,知行人闯红灯时节约度为 1 表示其节约的时间等于其不闯红灯所需等待的时间长度,同理解释节约度为 0 的原因,安全度为 1 表示行人不闯红灯不会感受到威胁,同理解释闯红灯时的安全度原因;对驾驶员,节约度为 0,表示他不必为等待行人通行而浪费可通行绿灯时间,同理解释其不抗议时所需浪费时间的节约度,安全度为 1 表示驾驶员不抗议(即驾驶员会等待行人通过后再通过)时,其不会感受到威胁,不需担心与行人相撞,同理解释抗议(不等待行人通过,自己通过交叉口)时的安全度。

行人和驾驶员分别对于时间节约度和安全度的权重,是一个相对值。对于行人,其在决定是否闯红灯时主要考虑安全问题,因此可取 $a_1=1, b_1=3$ 。而对驾驶员,由于其受车辆保护,但撞伤行人也需负一定责任,所以相较行人,则可取 $a_2=1, b_2=2$ 。

关于修正系数:式中对 D_{21} 除以修正系数是为了保证安全度不出现非常规值。由于安全度行人流量和车流量比值有关,所以如果没有修正系数,车流的安全度可能会大于不抗议时的安全度 $D_{22}=1$ 。同理,对 T_{21} 进行修正(修正系数为 k ,化为无量纲),因为当行人流量大于 3 人时,闯红灯的行人不是一个一个断续的闯红灯,而是组成队一起闯红灯,但是受限于人行横道的宽度以及行人到达交叉口的随机性,所以人行横道上一次可通行的行人流量根据实际确定。可以规定每次行人流量大于 3 时,每次可同时通过 3 人,如果不足 3 人的,视为一次通过,以减少车流因等待行人闯红灯过街所浪费的时间。 k 可利用高斯函数表示

$$k = -(V_1/3 + 1) \quad (6)$$

本文中考虑交叉口相位方案如图 2 的情况,由于对右转车流进行了控制,行人与直行车流的通行博弈不受右转车流的影响,便于分析和建模以及计算。

2.3 连锁博弈矩阵求解

根据交叉口相关时空设置参数,现给出交叉口直行绿灯期间直行车流流量和行人流量变动连锁表。详见表 1。

表 1 直行绿灯期间人车流量变动连锁表
Tab.1 The chain change of pedestrian-vehicle volume during the straight green light period

参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_1 /人	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_2 /辆	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
R	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
T_{11}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
D_{11}	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
T_{12}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D_{12}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
T_{21}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D_{21}	1.00	1.00	1.00	0.83	0.67	0.56	0.48	0.42	0.37	0.33
T_{22}	-0.31	-0.39	-0.47	-0.55	-0.63	-0.71	-0.79	-0.87	-0.94	-1.02
D_{22}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
k	-1	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-4	-4	-4
参数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
V_1 /人	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
V_2 /辆	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
R	0.50	0.44	0.40	0.36	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.24
T_{11}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
D_{11}	0.50	0.44	0.40	0.36	0.33	0.31	0.29	0.27	0.25	0.24
T_{12}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D_{12}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
T_{21}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D_{21}	0.67	0.75	0.83	0.92	1.00	1.00	1.17	1.25	1.33	1.42
T_{22}	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55
D_{22}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
k	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2

续表 1

参数	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
V_1 /人	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
V_2 /辆	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
R	0.55	0.58	0.62	0.64	0.67	0.69	0.71	0.72	0.74	0.75
T_{11}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
D_{11}	0.55	0.58	0.62	0.64	0.67	0.69	0.71	0.72	0.74	0.75
T_{12}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D_{12}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
T_{21}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D_{21}	0.61	0.57	0.54	0.52	0.50	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44
T_{22}	-0.71	-0.79	-0.87	-0.94	-1.02	-1.10	-1.18	-1.26	-1.34	-1.42
D_{22}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
k	-3	-3	-4	-4	-4	-5	-5	-5	-6	-6

在表 1 中,对驾驶员抗议时安全度值大于 1 的值进行了修正,使其不大于 1。因为驾驶员不抗议时是最安全的,其安全度值仅为 1。

表 1 中,从序号 1~10,先控制直行车流流量在一个最大可能值处保持不变,而行人流量不断增大;在序号 11~20,控制行人流量在最大可能值处保持不变,而不断增大直行车流流量;在序号 21~30,同时增加行人流量和直行车流流量。部分利用控制变量法来研究不同人车流量比情况下行人和驾驶员的行动策略变化,同时部分不对变量加以控制来研究人车流同时增大和减小(反向来看增大就是减小)情况下人车流量比变化导致的策略组合变化。

根据表 1 计算出相对应的不同人车流量比 R ,进一步计算出行人节约度 T_1 ,行人安全度 D_1 ,修正系数 k ,驾驶员节约度 T_2 和驾驶员安全度 D_2 。

根据计算所得到的行人和驾驶员各自不同人车流量比值下的时间效用(节约度)和安全感效用(安全度),利用式(1)及给定的行人和驾驶员各自的节约度和安全度的权重,计算并创建连锁博弈矩阵,见表 2。

表 2 直行绿灯期间人车博弈连锁矩阵转换表

Tab.2 Transposed chain matrix of pedestrian-vehicle game during the straight green light period

参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
u_{11}	1.30	1.60	1.90	2.20	2.50	2.80	3.10	3.40	3.70	4.00
u_{12}	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
u_{21}	2.00	2.00	2.00	1.67	1.33	1.11	0.95	0.83	0.74	0.67
u_{22}	1.69	1.61	1.53	1.45	1.37	1.29	1.21	1.13	1.06	0.98
参数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
u_{11}	2.50	2.33	2.20	2.09	2.00	1.92	1.86	1.80	1.75	1.71
u_{12}	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
u_{21}	1.33	1.50	1.67	1.83	2.00	2.00	2.33	2.50	2.67	2.83
u_{22}	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
参数	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
u_{11}	2.64	2.75	2.85	2.93	3.00	3.06	3.12	3.17	3.21	3.25
u_{12}	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
u_{21}	1.22	1.14	1.08	1.04	1.00	0.97	0.94	0.92	0.90	0.89
u_{22}	1.29	1.21	1.13	1.06	0.98	0.90	0.82	0.74	0.66	0.58

由连锁博弈矩阵,可知策略组合会随着人车流量比的变化而发生改变。如,在序号为1时,对应人车流量比 R 为0.1,此时策略组合(不闯红灯,抗议);而序号为5时,对应 R 变为0.5,策略组合变为(不闯红灯,不抗议);当序号为12时,对应 R 为0.44,此时策略组合变为(不闯红灯,抗议);序号为26时,对应 R 为0.69,策略组合为(闯红灯,抗议);序号为25时,发现有两个均衡组合,即(不闯红灯,抗议)或者(闯红灯,抗议)。

2.4 结论

由表2所示连锁博弈矩阵,得出以下几点结论:

结论1:在直行车流流量保持不变而不断增加行人流量的情况下,会不断增加行人闯红灯的可能性。行人的策略从不闯红灯慢慢变为闯红灯,而驾驶员的策略则从抗议逐渐转变为不抗议策略,即策略组合变化为由开始的策略组合(不闯红灯,抗议)(序号1)变为策略组合(不闯红灯,不抗议)(序号5),最后变为变为策略组合(闯红灯,不抗议)(序号7)。

结论2:在行人流量保持不变而直行车流流量不断增加的情况下,会不断增加驾驶员抗议的可能性。驾驶员的选择策略从不抗议变为抗议策略,而行人一直保持不闯红灯的策略,即策略组合变化为由(不闯红灯,不抗议)(序号11)转变为策略组合(不闯红灯,抗议)(序号12-20)。

结论3:在行人流量和直行车流流量同时增加(或者同时减小)下,总体上会逐渐增加行人选择闯红灯而驾驶员选择不抗议的可能性。首先行人的策略是不闯红灯,接着慢慢变为闯红灯,驾驶员的策略也是首先不抗议,后来变为抗议,所以策略组合变化过程为:首先是(不闯红灯,不抗议)(序号21),其次是(闯红灯,抗议)(序号25)或者是(不闯红灯,抗议)(序号25),最后是(闯红灯,抗议)(序号26)。

以下对以上3条结论进行简要分析:

结论1表明,当车流量适中且保持不变时,随着人车流量比不断增大时,行人选择闯红灯的可能性会越来越大。这是因为行人越来越多,相互壮胆子,于是大家都闯红灯。这也解释了所谓的中国式过马路——欲过街行人等行人达到一定数量,其不管行人信号灯是否绿灯,依然闯红灯过街。

结论2表明,当行人流量适中且保持不变时,随着人车流量比的减小,驾驶员策略选择会有不抗议向可以逐渐转变。这是因为车流量增大,一方面可以威胁到打算闯红灯的行人,行人会选择不过街,另一方面是驾驶员感觉到自己队伍力量增加,可以“匹敌”。

结论3表明,在参与者双方流量达到某个比值时,彼此因为害怕发生过大负面安全效用,所以都选择保守行为,即行人不闯红灯,驾驶员不抗议。但是,随着人流量增大,行人先,打算闯红灯,而驾驶员还是,依旧不抗议。然而行人越多,其浪费的时间越多,加之自身队伍壮胆,驾驶员最后也开始抗议了,所以策略组合发生了以上的变化。但大多数情况下,一般直行绿灯期间行人人数为4~5人,直行车流为12~14辆,所以这种情况下的通行参与者最优策略组合是(不闯红灯,抗议)。

同时以上结论也说明,行人不是天生就有闯红灯的本性,而是根据不同的双方力量对比,进行策略选择的。同样,驾驶员也并不一定都是抗议的(或者不抗议的)本性,他们也是根据参与者双方力量对比来执行策略行动的。

由以上结论及结论分析可知,如果交通管理部门将这种基于博弈论的分析方法向交通参与者进行讲授,参与者掌握方法以后,学会了分析交叉口处人车的博弈,知道何时自己应该选择什么策略,才会使得自己所受损失最小。而事实上,由于交叉口处直行绿灯期间行人和直行车流的实际数量更加接近于表1中序号为11~20的情形,即此时的车流比更适合驾驶员选择抗议,而行人选择不闯红灯,也即最优策略组合为(不闯红灯,抗议)。可以在一定程度上引导行人放弃闯红灯的行为,从而改善交叉口交通安全和交通秩序。

3 结语

通过使用博弈论对交叉口不同人车流量比情况下人车博弈进行了深入分析,得到一些重要结论。结论表明,在不同的人车流量比情况下,行人选择闯红灯的意愿和趋势会发生变化。这些结论既支持了以往的一

些现象规律,也为相关学者和专家提高了一种分析交通及其相关现象的重要方法。通过帮助通行参与者理性地选择自己的行为(即策略),可以改善交叉口人车通行秩序。

参考文献:

- [1] 温安文,胡辉,李想. 道路交叉口与交通安全的关系[J]. 交通标准化,2010(13):108-110.
- [2] 陈贤哲,尹静波. 交叉口安全评价方法评述[J]. 科技致富向导:2013(24):233.
- [3] 王铨登. 基于综合的交通冲突技术的城市道路交叉口安全评价方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [4] 刘涛. 基于交通冲突技术的西安市长安区十字交叉口安全评价研究[D]. 西安:长安大学,2012.
- [5] 赵金宝,邓卫,王建. 基于贝叶斯网络的城市平面交叉口交通事故分析[J]. 交通信息与安全,2012(2):88-91.
- [6] 郑润玉,符铨砂. 道路平面交叉口交通事故主成因分析研究[J]. 公路与汽运,2012(6):53-57.
- [7] 李克平,倪颖. 信号控制交叉口行人过街交通组织与控制[J]. 城市交通,2011(9):65-71.
- [8] DREW J. 博弈论[M]. 北京:中国人民大学出版社,2010.

Analysis on Pedestrian-Vehicle Traffic Game at Signal Intersection

Qin Peng¹, Wang Zheng¹, Shan Xiaofang², Zhao Zuju³

(1.College of Transport and Communication, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;
2. College of Economic and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of
Business and Administration, Guizhou University of Finance and Economics, Guizhou 550020, China)

Abstract: Signal intersection is the location where traffic accidents happen often. To guide pedestrians and vehicles to cross intersections in an orderly and secure way, this paper introduces the game theory to analyze the game of pedestrians and vehicles. By using game theory and according to the pedestrian-vehicle ratio under different conditions, it establishes a chain game matrix to explore feasible strategy combinations, and probes into the balanced strategy combination for the intersection participants, which can provide suggestions for regularizing the traffic order. Results show that when volume of straight traffic flow is slow and fixed, the possibility of pedestrian running a red light would be on a faster trend with the increase of pedestrian-vehicle ratio; and the trend will be slower with the increase of pedestrian-vehicle ratio when the straight flow is rising.

Key words: game theory; equilibrium strategy combination; pedestrian-vehicle ratio; chain game matrix; intersection safety; signal intersection

(责任编辑 姜红贵)