



研究与开发

基于路口 V2P 的避撞算法与验证

张家波, 王超凡, 李哲

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 近年来交通事故数量逐渐攀升, 无信号灯路口的人车事故尤其严重。首先, 基于行人、车辆在路口的穿插延误支付、碰撞风险支付, 建立人车通行的博弈模型, 给予双方合理的优先通行决策; 进一步地, 在此基础上引入驾驶员的交通奖罚支付, 改进博弈模型, 并通过实例进行对比分析, 改进后的博弈模型增加了车辆的让行率, 更有利于道路交通安全; 此外, 改进传统的病毒传播模型, 分析交通参与者的违章心理, 通过数值模拟仿真, 证明了违章处罚的必要性。为今后过街行人与车辆避撞系统的开发提供了理论上的参考。

关键词: 交通安全; 支付; 博弈; 违章心理分析

中图分类号: TP311

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017276

Collision avoidance algorithm and validation based on V2P at intersection

ZHANG Jiabo, WANG Chaofan, LI Zhe

School of Communication and Information Engineering,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Traffic accidents have risen in recent years, especially in the case of traffic accidents without signal intersection. A pedestrian and vehicle prevailing game model was established based on the delay and the risk payoff of the pedestrian and the vehicle at the intersection, which could give pedestrians and vehicles a reasonable priority prevailing decision. Moreover, an improved game model was established on the basis of the introduction of the driver's reward and fine payoff. Practices proved that the improved model could increase the pass rate of pedestrian, which was more conducive to road traffic safety. In addition, the traditional virus transmission model was improved to analyze the psychology of traffic participants, which proved the necessity of illegal punishment by numerical simulation. The research provides a theoretical reference for the future development of pedestrian and vehicle collision avoidance system.

Key words: traffic safety, payoff, game, analysis of violation psychology

收稿日期: 2017-07-10; 修回日期: 2017-09-25

基金项目: 四川省高校重点实验室开放资助项目 (No.QXXCSYS201505, No.QXXCSYS201606); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No.2012YQ20022404); 重庆邮电大学教学改革资助项目 (No.XJG1301)

Foundation Items: Opened Project of Key Lab of Sichuan (No.QXXCSYS201505, No.QXXCSYS201606), The National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (No.2012YQ20022404), Education Reform Project of Chongqing University of Posts and Telecommunications (No.XJG1301)

1 引言

世界卫生组织全球道路安全状况报告显示, 每年有 124 万人死于交通事故, 5 000 万人伤残, 其中 22% 是行人, 约 20% 的交通事故发生在交叉路口, 而我国人口众多, 交通系统出现严重的人车混行现象, 更是加大了车辆与行人的交通冲突^[1,2]。

为了解决车辆与行人 (vehicle to pedestrian, V2P) 的冲突问题, 贝叶斯网络、隐马尔可夫、博弈等算法模型被广泛用于车辆与行人运动的研究。参考文献[3]中将车辆运动模型分为 3 个层次: 基于物理的运动模型、基于行为的运动模型和交互感知的运动模型。参考文献[4,5]中不仅考虑车辆自身, 又结合车辆与相邻车辆的关系, 预测车辆变道轨迹, 实现了碰撞风险的避免。参考文献[6]中提出了一种基于运动轮廓的支持向量机分类模型, 识别行人在交叉口的意图。参考文献[7]中基于动态贝叶斯网络, 考虑行人当时、历史、未来的运动状态, 再融合粒子滤波, 建立行人运动模型, 能够从行人的当前位置信息, 识别行人是否穿越马路的决定。车辆与过街行人信息交互的过程也是一个博弈过程, 参考文献[8]中利用重复博弈在无灯控交叉口建立驾驶员行为模型, 给予车辆合理的通行决策, 但重复博弈加大了碰撞风险且通行效率低下。参考文献[9]中提出了驾驶员与过街行人非合作的动态博弈模型, 博弈中考虑到了延误和风险支付 (收益), 但却没有量化。参考文献[10]中在驾驶员与过街行人博弈的过程中量化了延误支付, 但却忽视了风险因子。

为此, 本文首先将无信号路口影响 V2P 通行的因子量化, 建立博弈模型对 V2P 的通行决策进行指导, 然后, 引入奖罚支付到博弈中, 提高车辆对行人的让行率, 减少 V2P 之间的冲突, 最后, 改进病毒传播模型 (susceptible, infected, exposed,

recovered, SEIR)^[11,12] 分析交通参与者的违章心理, 证明引入交通奖罚支付后, 将会有更多的交通参与者为行人礼让, 从而保障道路交通安全。

2 基于延误和风险的 V2P 博弈模型

2.1 博弈的参与者、策略集以及支付

在无信号灯路口, 分析过街行人和车辆相互穿越的微观交通模型, 定义博弈的参与者为过街行人和驾驶员 (车辆), 将行人的策略集定为 $P=\{\text{等待, 通行}\}$, 驾驶员的策略集定为 $V=\{\text{等待, 通行}\}$ 。考虑到过街行人的特点, 行人的类型分定为 $P_c=\{\text{健壮者, 其他}\}$; 驾驶员的类型则可根据他们平时的驾车习惯做安全等级的划分, 将驾驶员的类型分定为 $V_c=\{\text{安全型, 一般型, 危险型}\}$ 。

V2P 双方采取策略的组合决定了他们相应的支付, 根据上述博弈的参与者及其策略集, 建立 V2P 的支付函数, 见表 1。

表 1 V2P 的支付函数

支付		驾驶员	
		等待	通行
行人	等待	(P_1, V_1)	(P_2, V_2)
	通行	(P_3, V_3)	(P_4, V_4)

其中, 行人和驾驶员都采取等待策略时, P_1 为行人的支付, V_2 为驾驶员的支付, 同理, P_2 、 P_3 、 P_4 、 V_2 、 V_3 、 V_4 分别为 V2P 双方不同策略组合下的支付, 本章以双方的通行延误、风险作为支付的衡量。

2.2 支付计算

2.2.1 延误支付

延误支付主要应用穿插理论来分析, 当行人穿越车辆间隙, 获得的时间支付为车辆的等待延误 D_p ^[8]:

$$D_p = \frac{\frac{1}{\rho_{p1}} - (t' + \frac{1}{\rho_{p1}}) \exp(-\rho_{p1}t') \exp(-\rho_{p2}t')}{\exp(-\rho_{p1}t') \exp(-\rho_{p2}t')} \quad (1)$$



$$t' = \frac{w}{v_p} + \frac{0.8v_v}{4.9} \quad (2)$$

其中, ρ_{p1} 、 ρ_{p2} 为道路中往返方各自的行人流量(人/s); 为车辆穿越行人的安全穿越间隙(s); w 为一条车道宽度 (m); v_p 为过街行人的速度 (m/s), 取 1~1.45 m/s; v_v 为车辆的速度 (m/s)。

n 条车道的公路, 当车辆穿越行人间隙, 获得的时间支付为行人的等待延误 D_v [8]:

$$D_v = \frac{\frac{1}{\rho_{v1}} - (t_1 + \frac{1}{\rho_{v1}}) \exp(-\rho_{v1}t_1) \cdots \exp(-\rho_{vn}t_n)}{\exp(-\rho_{v1}t_1) \cdots \exp(-\rho_{vn}t_n)} \quad (3)$$

$$t = \frac{w}{v_p} + t_s + t_l \quad (4)$$

其中, ρ_{vn} 为第 n 条车道车流量 (车/s); t_n 为第 n 条车道行人穿越车辆的安全间隙时间 (s); t_s 为行人决断时间 (s), 取 2.0 s; t_l 为车身长度通过的时间 (s); 一般取标准车 0.72 s。

2.2.2 风险支付

设 V2P 在决策点的速度、加速度分别为 v_v 、 v_p 、 a_v 、 a_p , 到冲突域的距离分别为 l_v 、 l_p , 两者以此状态通过冲突域的时间差为:

$$T = \begin{cases} \left| \sqrt{\left(\frac{v_v}{a_v}\right)^2 + 2\frac{l_v}{a_v} - \frac{v_v}{a_v}} - \sqrt{\left(\frac{v_p}{a_p}\right)^2 + 2\frac{l_p}{a_p} + \frac{v_p}{a_p}} \right| & (a_v \neq 0, a_p \neq 0) \\ \left| \frac{l_v}{v_v} - \sqrt{\left(\frac{v_p}{a_p}\right)^2 + 2\frac{l_p}{a_p} + \frac{v_p}{a_p}} \right| & (a_v = 0, a_p \neq 0) \\ \left| \sqrt{\left(\frac{v_v}{a_v}\right)^2 + 2\frac{l_v}{a_v} - \frac{v_v}{a_v} - \frac{l_p}{v_p}} \right| & (a_v \neq 0, a_p = 0) \\ \left| \frac{l_v}{v_v} - \frac{l_p}{v_p} \right| & (a_v = 0, a_p = 0) \end{cases} \quad (5)$$

若 $T < 1$ s, 则视双方的风险为无限大, 车辆必须给行人让行。若发生碰撞, 定义 V2P 对风险重视程度的支付函数为:

$$S_v = \delta_v \times B(v_v, n_p) \times \frac{1}{2} m v_v^2 \times n_p \exp\left(\frac{1}{T}\right) \quad (6)$$

$$S_p = \delta_p \times B(v_v, n_p) \times \frac{1}{2} m v_v^2 \times \frac{1}{n_p} \exp\left(\frac{1}{T}\right) \quad (7)$$

其中, m 为车辆质量 (kg), 取 1 500 kg; S_v 为驾驶员的风险支付; S_p 为行人的风险支付; δ_v 为车祸对驾驶员生命的威胁程度, 取 0.8; n_p 为单位批次过街行人的数量 (人); δ_p 为车祸对行人生命的威胁程度, 取 1; $B(v_v, n_p)$ 为车速与单位批次过街行人数量相对的势, 取值如式 (8), 其他各符号意义同上:

$$B(v_v, n_p) = \begin{cases} 1, & 0 < \frac{v_v}{n_p} \leq 1 \\ 0.8, & 1 < \frac{v_v}{n_p} \leq 2 \\ 0.6, & \frac{v_v}{n_p} > 2 \end{cases} \quad (8)$$

2.2.3 总支付

根据上述延误和风险支付的分析, 假设 V2P 任一方通行和等待的概率均为 1:1, 结合 V2P 的类型, 双方的支付见表 2。

V2P 博弈的结果是为了给予人车合理的通行策略, 因此, 表 2 中不考虑双方同为等待的策略。 D_p^* 、 D_v^* 、 S_p^* 、 S_v^* 为双方的延误支付和风险支付采用 min-max 标准化处理后的结果, 取值为 (0,1); α 、 β 为延误支付与风险支付的权重, 当行人类型为健壮者时, 驾驶员类型安全级别从高到低, α 分别取值 0.6、0.7、0.8; 当行人类型为其他时, 驾驶员类型安全级别从高到低, α 分别取值 0.7、0.8、0.9, $\beta = 1 - \alpha$ 。

2.3 实例分析

以重庆市南岸区江南大道和亚太路叉路口无灯 T 字型路口为例, 亚太路宽 10 m, 实测数据 1 h: 亚太路往返车流量约为 500 车/h, 双向行人流量各自约为 300 人/h, 在移动互联汽车数据共享的时代 [13], 这些数据将会很容易获得。若决策区 $v_v = 6$ m/s,

表 2 基于延误和风险的支付

支付		驾驶员	
		等待	通行
行人	等待	$(*, *)$	$(\alpha S_p^* - \beta D_v^*, -\alpha S_v^* + \beta D_v^*)$
	通行	$(-\alpha S_p^* + \beta D_p^*, \alpha S_v^* - \beta D_p^*)$	$(-\alpha S_p^* + \beta D_p^*, -\alpha S_v^* + \beta D_v^*)$

表 3 基于延误和风险的 V2P 博弈结果

支付			驾驶员					
			安全型		一般型		危险型	
			等待	通行	等待	通行	等待	通行
行人 健壮者	等待		$(*, *)$	$(-0.099, 0.165\ 8)$	$(*, *)$	$(-0.007, 0.085)$	$(*, *)$	$(0.084, 0.004)$
	通行		$(-0.075, 0.008\ 2)$	$(-0.075, 0.165)$	$(-0.123, 0.045\ 3)$	$(-0.123, 0.085)$	$(-0.171, 0.082)$	$(-0.171, 0.004)$
其他	等待		$(*, *)$	$(0.056, 0.033)$	$(*, *)$	$(0.141, -0.038)$	$(*, *)$	$(0.225, -0.110)$
	通行		$(-0.018, -0.071)$	$(-0.018, 0.033)$	$(-0.115, 0.013\ 2)$	$(-0.115, -0.038)$	$(-0.213, 0.097)$	$(-0.213, -0.110)$

$v_p=1.3\text{ m/s}$, $l_v=20\text{ m}$, $l_p=2\text{ m}$, $n_p=2\text{ 人}$, V2P 博弈结果见表 3。

表 3 中的加粗字体为博弈结果的最优组合, (若存在纳什均衡, 纳什均衡即最优策略组合, 若不存在纳什均衡, 则双方支付和最大的为最优策略组合) 即 V2P 的最优通行策略, 如安全型的驾驶员与健壮型的行人在路口相遇时, 分别给予他们通行策略, 既保障了交通安全, 又保证了通行效率。

3 引入奖罚支付的 V2P 博弈模型

交通安全法第四十四条规定: 机动车通过无信号灯路口时, 应让行人和优先通行的车辆先行。但现实中机动车在路口屡屡和行人抢道, 因此, 很有必要处罚抢道车辆, 本章首先在博弈模型中引入了对车辆的奖罚支付, 然后改进 SEIR 病毒传播模型证明引入交通奖罚更有利于整个交通环境的安全。

3.1 引入奖罚支付的博弈

3.1.1 奖罚支付

引入交通奖罚支付后, 驾驶员受交通奖罚的影响, 违章心理必然发生变化。首先, 定义驾驶

员的交通奖罚支付为分段函数, 如下:

$$F(v_v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v_v < 3 \\ 0.1(-0.2), & 4 \leq v_v < 6 \\ 0.3(-0.6), & 6 \leq v_v < 8 \\ 0.5(-1), & v_v \geq 8 \end{cases} \quad (9)$$

其中, v_v 表示驾驶员在决策区域的速度 (m/s); 车辆选择优先于行人通行时, $F(v_v)$ 取负值, 否则取正值。加入交通奖罚支付后, 驾驶员的违章心理发生变化, 设通行与等待的概率变为 1:2, 取通行支付为原来的 2/3 倍, 等待支付为原来的 4/3 倍, 总支付计算式如下:

$$V_v = \begin{cases} \frac{2}{3}[-\alpha S_v^* + \beta D_v^* + \gamma F(v_v)], & \text{通行} \\ \frac{4}{3}[\alpha S_v^* - \beta D_p^* + \gamma F(v_v)], & \text{等待} \end{cases} \quad (10)$$

其中, α 分别取值 0.45、0.5、0.55; 当行人类型为其他时, 驾驶员类型安全级别从高到低, α 分别取值 0.5、0.55、0.6, $\gamma=0.3$, $\beta=1-\alpha-\gamma$ 。行人的支付函数及 α 、 β 的取值不变。

3.1.2 实例分析

以第 2.3 节的场景实例代入新的博弈模型中, 计算结果见表 4。



表 4 引入奖罚的 V2P 博弈结果

支付			驾驶员					
			安全型		一般型		危险型	
			等待	通行	等待	通行	等待	通行
行人 健壮者	等待		(*,*)	(-0.099, -0.058 7)	(*,*)	(-0.007, -0.085)	(*,*)	(0.084, -0.112)
	通行		(-0.075, 0.142)	(-0.075, -0.058 7)	(-0.123, 0.166)	(-0.123, -0.085)	(-0.171, 0.192)	(-0.171, -0.112)
其他	等待		(*,*)	(0.056, -0.109)	(*,*)	(0.141, -0.132)	(*,*)	(0.225, -0.156)
	通行		(-0.018, 0.064)	(-0.018, -0.109)	(-0.115, 0.121)	(-0.115, -0.132)	(-0.213, 0.177)	(-0.213, -0.156)

比较表 3 和表 4 可以看出, 引入交通奖罚支付后, 行人的过街率、车辆的让行率都有提高。在此场景下, 当安全型的驾驶员与健壮型的行人在路口博弈时, 车辆以不同的速度驶过决策区, 双方采取通行或等待策略时, 获得的支付如图 1 所示。

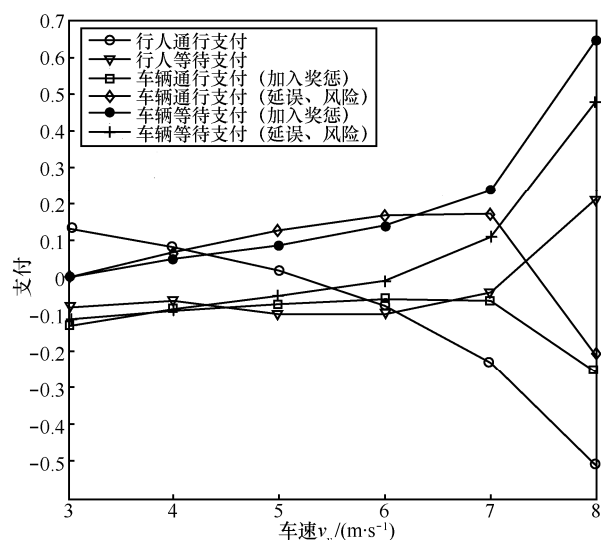


图 1 车辆在不同速度下的 V2P 支付

从图 1 中可以看出, 随着车速的增加, 行人通行的支付递减速度逐渐增大, 等待支付波动相对平稳, 说明在车速较快的情况下, 行人选择通行是一种很危险的策略; 加入奖罚支付后, 驾驶员的等待支付远高于未加入奖罚时的支付, 通行支付远低于未加入奖罚时的支付, 说明加入交通奖罚后驾驶员选择等待让行将是明智的选择。此外, 图 1 中显示, 当车速高于 7 m/s 时, 行人、驾

驶员的等待支付骤升、通行支付骤降, 这表明在决策区车速高于 7 m/s 时, V2P 必须有一方要选择等待策略。

3.2 违章处罚的必要性分析

3.2.1 IEVRI 模型

改进病毒传播模型 SEIR^[10,11], 建立新的模型 (ignorant exposed violated recovered ignorant, IEVRI) 进一步说明引入交通奖罚后, 交通参与者违章心理的变化, 证明引入对违章驾驶员的处罚后, 更多的驾驶员将会把握行人优先通行的规则, 从而保障道路的安全。模型中 I 为无知者, 代表未受到违章驾驶员影响的人; E 为潜伏者, 代表被违章者影响尚未决定是否效仿违章驾驶员的人; V 为违章者, 代表效仿违章驾驶员的人; R 为恢复者, 代表受过交通处罚后, 暂时不再违反规则的人。I(t)、E(t)、V(t)、R(t) 分别表示 t 时刻这 4 类人的总数量, 有:

$$I(t) + E(t) + V(t) + R(t) = 1 \quad (11)$$

IEVRI 模型如图 2 所示。

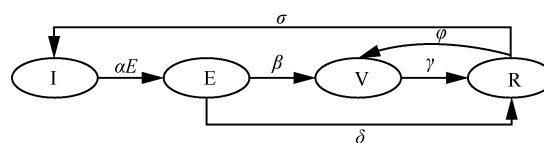


图 2 IEVRI 模型

图 2 中有如下规则: 一个无知者一旦与潜伏者接触, 必然有成为潜伏者的可能, 一个潜伏者有 α 倍的感染能力, 那么 t 时刻 I 将以 αE 的概率

成为 E, E 将以 δ 的概率成为 R, 以 β 的概率成为 V, V 将以 γ 的概率成为 R, R 以 σ 的概率成为 I, 且少数 R 可能忽视交通处罚, 以 ϕ 的概率成为 V, γ 某种程度上表征了交通处罚的力度, 理解为惩罚因子。

由此, 根据 IEVRI 模型建立如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = \sigma R - \alpha IE \\ \frac{dE}{dt} = \alpha IE - \beta E - \delta E \\ \frac{dV}{dt} = \beta E - \gamma V + \phi R \\ \frac{dR}{dt} = \gamma V + \delta E - \sigma R - \phi R \end{cases} \quad (12)$$

初始值为:

$$D = \{(I, E, V, R) | I, E, V, R \geq 0 \text{ 且 } I + E + V + R = 1\} \quad (13)$$

令方程 (12) 的右端为 0, 得到方程的平衡点 $P(I^*, E^*, V^*, R^*)$:

$$\begin{cases} I^* = \frac{\delta + \beta}{\alpha} \\ E^* = \frac{1 - \frac{\delta + \beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\gamma} + \frac{\phi(\delta + \beta)}{\lambda\sigma} + \frac{\delta + \beta}{\sigma}} \\ V^* = \frac{\left[\frac{\beta}{\gamma} + \frac{\phi(\delta + \beta)}{\lambda\sigma} \right] \left(1 - \frac{\delta + \beta}{\alpha} \right)}{1 + \frac{\beta}{\gamma} + \frac{\phi(\delta + \beta)}{\lambda\sigma} + \frac{\delta + \beta}{\sigma}} \\ R^* = \frac{\frac{\delta + \beta}{\sigma} \left(1 - \frac{\delta + \beta}{\alpha} \right)}{1 + \frac{\beta}{\gamma} + \frac{\phi(\delta + \beta)}{\lambda\sigma} + \frac{\delta + \beta}{\sigma}} \end{cases} \quad (14)$$

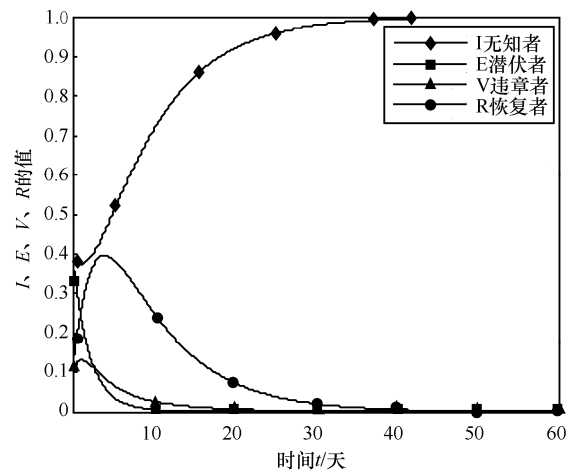
由式 (13) 和式 (14) 可知, $R_0 = \frac{\delta + \beta}{\alpha} \leq 1$ 时,

平衡点 P 在 D 内存在, 且局部渐进稳定; $R_0 > 1$ 时, 平衡点为 $P(1, 0, 0, 0)$ 。 R_0 决定了整个系统最终的演变趋势, 称 R_0 为违章驾驶行为的传播阈值, 其与 δ 、 β 、 α 相关。

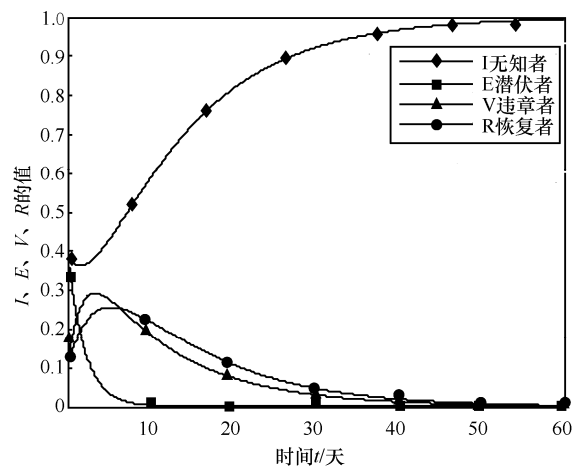
3.2.2 仿真分析

由上可知, R_0 直接影响违章驾驶行为传播的范围和态势, 分析 δ 、 β 、 α 、 γ 对系统总体的影响。采用数值模拟的方式来分析系统最终的演变趋势, 取 $I(0) = 0.4$ 、 $E(0) = 0.1$ 、 $V(0) = 0.1$ 、 $R(0) = 0.4$ 。

(1) 取 $\alpha = 0.6$ 、 $\beta = 0.6$ 、 $\gamma = 0.2$ 、 $\delta = 0.3$ 、 $\sigma = 0.2$ 、 $\phi = 0.05$ 、 $R_0 = 1.5$, 仿真结果如图 3(a) 所示, 增大惩罚因子 $\gamma = 0.8$, 潜伏者迫于惩罚则改变因子 $\beta = 0.4$ 、 $\delta = 0.5$, 仿真结果如图 3(b) 所示。



(a) $\delta = 0.3$ 、 $\beta = 0.6$ 、 $\gamma = 0.2$



(b) $\delta = 0.5$ 、 $\beta = 0.4$ 、 $\gamma = 0.8$

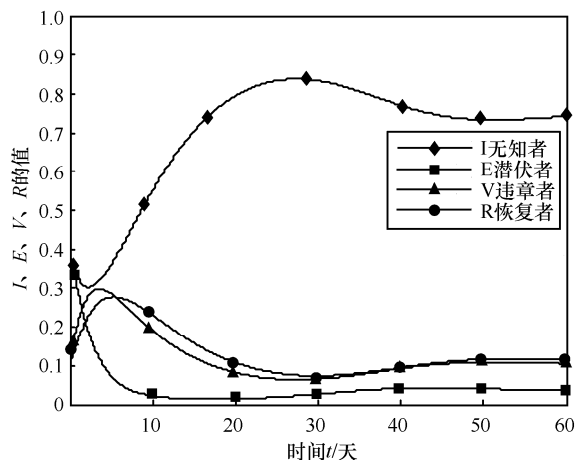
图3 $R_0 > 1$ 时, 系统的演变趋势

对比图 3(a) 和图 3(b), 当 $R_0 > 1$ 时, 平衡点为 $P(1, 0, 0, 0)$, 增大惩罚因子 γ , 违章者 V 能够更快地趋近于 0, 系统整体能够更快地趋于稳定, 演

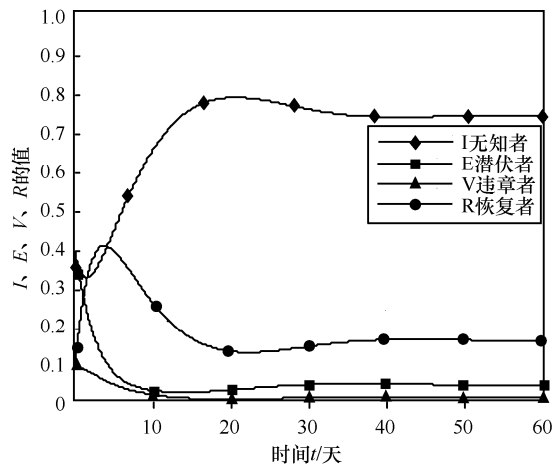


变为所有人都遵守交通规则。

取 $\alpha=0.8$ 、 $\beta=0.4$ 、 $\gamma=0.2$ 、 $\delta=0.2$ 、 $\sigma=0.2$ 、 $\varphi=0.05$ 、 $R_0=0.75$ ，仿真结果如图 4(a) 所示，增大惩罚因子 $\gamma=0.8$ ，潜伏者迫于惩罚则改变因子 $\beta=0.2$ 、 $\delta=0.4$ ，仿真结果如图 4(b) 所示。



(a) $\delta=0.2$ 、 $\beta=0.4$ 、 $\gamma=0.2$



(b) $\delta=0.4$ 、 $\beta=0.2$ 、 $\gamma=0.8$

图 4 $R_0 < 1$ 时，系统的演变趋势

对比图 4(a)和图 4(b)，当 $R_0 < 1$ 时，平衡点在 D 内，增大惩罚因子 γ ，违章者 V 能够更快地趋近于稳定状态，且稳定在更少的状态，遵守交通规则的人稳定在更多的状态。

由此可见，在交通规则中引入恰当的违章处罚，能够确保更多的驾驶员遵守交通规则，机动车通过没有交通信号灯交叉口时，与行人抢道的行为也应该纳入交通处罚之中。

4 结束语

本文重点研究了路口车辆和过街行人的优先通行问题，考虑交通流中的人流量、车流量，V2P 从决策区到冲突区域的距离、速度，单位批次过街行人数量相对的势，再加入交通奖罚等因素，建立 V2P 的博弈模型，给予路口 V2P 合理的通行策略，保证道路交通安全的同时保障通行效率。此外，改进 SEIR 病毒传播模型，建立分析交通参与者的违章心理模型 IEVRI，证明了加入违章处罚，不仅能够确保更多的车辆为行人让行，而且保证了整个交通系统更加优良。但是，研究中缺乏对路口 V2P 博弈中，车辆加速度的考虑，这将是下一步的研究重点。

参考文献：

- [1] World Health Organization. Global forum for road safety legislators launched in London[EB/OL]. (2016-11-28)[2017-07-07]. <http://www.ourglobalforum.org/about/>.
- [2] 李洁. 互联网汽车发展及关键技术分析[J]. 电信科学, 2016, 32(8): 34-38.
LI J. Introduction and critical technology analysis of internet of vehicle[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(8): 34-38.
- [3] LEFÈVRE S, VASQUEZ D, LAUGIER C. A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles[J]. Robomech Journal, 2014, 1(1): 1.
- [4] KOEHLER S, GOLDHAMMER M, BAUER S, et al. Stationary detection of the pedestrian intention at intersections[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2013, 5(5): 87-99.
- [5] KAMAL M A S, IMURA J I, HAYAKAWA T, et al. A vehicle-intersection coordination scheme for smooth flows of traffic without using traffic lights[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(3): 1136-1147.
- [6] IRYO-ASANO M, ALHAJYASEEN W K, NAKAMURA H. Analysis and modeling of pedestrian crossing behavior during the pedestrian flashing green interval[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(12): 958-969.
- [7] HASHIMOTO Y, GU Y, HSU L T, et al. A probabilistic model for the estimation of pedestrian crossing behavior at signalized intersections[C]//2015 International Conference on Intelligent Transportation Systems, Sept 15-18, 2015, Las Palmas, España. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1520-1526.
- [8] 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 X M, WANG X Y. Vehicle-cross action model in intersec-

- tion without traffic light based on reduplicate game[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(4): 94-100.
- [9] 刘博通. 驾驶员与过街行人非合作动态博弈模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- LIU B T. Non-cooperative dynamic game model between drivers and crossing pedestrian[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [10] 唐勃勃. 基于合作博弈的平面信号交叉口行人和机动车干扰研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- TANG Q Q. Research on pedestrian and motor vehicle interference at plane intersection based on cooperative game[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [11] PHILIP E P, CAROLYN L B, ANGELIA N. Stability analysis and control of virus spread over time-varying networks[C]// 2015 Conference on Decision and Control, Dec 15-18, 2015, Osaka, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2015: 3554-3559.
- [12] YOUNSI F Z, BOUNNEKAR A, HAMDADOU D, et al. SEIR-SW, simulation model of influenza spread based on the small world network[J]. Tsinghua Science and Technology, 2015, 20(5): 460-473.
- [13] 胡舜耕, 王志军, 张琳, 等. 移动互联汽车数据共享[J]. 电信科学, 2016, 32(12): 26-31.
- HU S G, WANG Z J, ZHANG L, et al. Data sharing of mobile internet vehicles[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(12): 26-31.

[作者简介]



张家波 (1974-), 男, 重庆邮电大学通信与信息工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为车联网通信技术、无线传输技术应用。



王超凡 (1992-), 男, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为车联网通信技术。



李哲 (1992-), 男, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为车联网通信技术。