

基于博弈理论的自主性车道变换探究

摘要

本文提出了基于博弈理论的双车道自主性车道变换决策模型。首先根据 Stackelberg 模型、Gipps 模型以及智能驾驶员模型建立自主性车道变换模型，在两辆车安全距离均符合约束的情况下，对两者收益进行博弈，获得最优对策。其次，在 MATLAB 下基于元胞自动机理论建立 NaSch 模型仿真，直观感受变道决策过程，并分析不同车辆密度下的总换道率、不同驾驶员类型的车道换道率以及各类型速度差不同时的车道换道率，验证模型的合理性。然后，将所建立的模型与 VISSIM 仿真模型以及玉古路实际情况对比，进一步验证模型的合理性和正确性。最后，对本文研究内容进行总结，提出对未来研究内容的展望。

关键词：自主性车道变换 博弈论 智能驾驶员模型 元胞自动机

Abstract

This paper presents a game theory based on dual lane autonomous lane change decision model. First of all, referring to the Stackelberg model, Gipps model and Intelligent Driver Model, autonomy lane change model is established. When the safe distance complies with certain constraints, calculate game payoff matrixes of two drivers to obtain the optimal plan. Then, in accordance with the theory of cellular automata, we use MATLAB to emulate NaSch model in order to make the lane change decision-making process more intuitive. Besides, we analyze the influence of the debut density of vehicles, the driver types and the velocity gradient to the lane change rate. Furthermore, by comparing theoretic data with practical data, VISSIM simulation model and the actual condition of yugu road, rationality and validity of our model was further validated. Finally, this paper summarizes the research content of our model and puts forward the prospect of future research .

Key words: Autonomous lane change; Game theory; Intelligent driver model; Cellular automaton

目录

1	引言.....	1
2	理论基础.....	2
2.1	基于 Stackelberg 模型的车道变换博弈.....	2
2.2	自主性车道变换的约束条件.....	3
2.2.1	基于 Gipps 可接受间隙模型的换道约束.....	3
2.2.2	基于 MITSIM 模型的自主性车道变换.....	4
2.3	基于智能驾驶员模型的决策收益.....	4
2.3.1	智能驾驶员系统.....	4
2.3.2	车辆换道的决策收益.....	5
2.3.3	驾驶员类型分类.....	5
2.4	元胞自动机框架下的模型运行.....	6
3	模型建立.....	7
4	模型仿真.....	8
4.1	单车道模型.....	8
4.2	双车道模型.....	9
5	模型检验.....	10
5.1	模型分析.....	10
5.1.1	车流密度与总换道率.....	10
5.1.2	驾驶员类型与换道率.....	11
5.1.1	速度差与总换道率.....	11
5.2	模型对比.....	12
5.2.1	VISSIM 仿真验证.....	12
5.2.2	玉古路实地调查验证.....	13
5.2.3	模型对比分析.....	14
6	总结与展望.....	14
6.1	模型结论.....	14
6.2	应用展望.....	15
	参考文献.....	16
	附录	

1 引言

伴随着生产力的发展和社会转型,发展智能城市、智慧交通已经成为提升城市竞争力的核心工作之一。提高交通运输系统的效率和可靠性、解决城市交通拥挤和交通事故是全球城市道路交通所面临的共同问题。因此,应用现代高新技术将交通需求与车辆和道路联系起来系统地解决交通问题,成为智慧交通的核心思想和发展趋势。

车道变换过程经常伴随交通冲突的发生,如果驾驶人的操控技术不熟练、判断决策水平及事件处置能力较低,极易诱发交通事故。据相关统计显示,2016 年我国直接的车道变换事故约占事故总量的 6%,由此造成的交通延误超过交通事故所致总延误时间的 10%,给人们的生命及财产安全带来了巨大的威胁。而在所有的车道变换事故中,由于驾驶人判断决策失误诱发的事故约占事故总量的 75%,由此可见决策阶段对整个车道变换过程的安全性具有决定性影响。[1]对驾驶员行为建模是智能交通管理和辅助系统的基础和核心。

国内外众多学者对驾驶员车道变换行为进行了深入研究。Salvucci 等[2]基于仿真实验认为驾驶人变道前会轻微减速,变道过程中再加速,直至车道变换结束,首次对车道变换过程中速度变化趋势进行了深度剖析,不足之处是与真实交通环境下的实路试验相比,仿真实验结果的准确性受到限制;Bando 等[3]在 1995 年提出了最优速度模型 (Optimal Velocity Model, OVM);Treibe 等[4]提出了一个只包含少数有明确物理意义的参数且易于标定、校正,计算负担小的智能驾驶员模型 (Intelligent Driver Model, IDM),成功地用统一的模型形式表述自由流、拥堵流之间的相变。

国内对车道变换的研究始于 21 世纪初,魏丽英等[5]运用线性跟驰理论对相邻车辆之间的距离、速度和加速度进行分析,判定路段上的车道变换行为,得到驾驶人车道变换路径选择的基本规律,开启了国内对车道变换行为的研究进程,但其考虑因素忽视了驾驶人自身特性对车道变换行为的影响,过于单一;王荣本等[6]结合相对速度、距临界碰撞点时间等参数得出了最小安全车道变换距离的计算方法,为量化研究驾驶员车道变换安全性提供了重要依据。

基于以上文献综述可以看出,国外对车道变换的建模研究比较领先,但研究多集中于车道变换的实施阶段,而缺少对决策阶段的深入研究;国内主要进行微观交通流仿真,但也同样忽略了驾驶员在车道变换行为中的决定性作用,或是多注重目标车辆驾驶员的决策过程,忽略了目标车与目标车道后随车之间的相互影响,具有一定的局限性。

博弈论可以为两组决策人之间的相互作用与影响建模提供有力的框架。为了从驾驶员的主体角度,综合考虑目标车与目标车道后随车之间的相互影响决策车道变换行为,本文引入 Stackelberg 策略理论,提出一种基于 Stackelberg 策略理论的自主性车道变换模型。本文建立了双车道目标车自主性变道模型,基于 MITSIM 模型中换道车辆与其周围车辆之间的最小安全距离设置了变道约束条件,用智能驾驶员模型定义目标车的变道收益,在元胞自动机的框架下模拟真实道路上的车辆变道情况,并与真实路况下的变道情况及 Vissim 仿真结果进

行对比，验证模型的精确性；深入分析了车道变换决策阶段相关车辆的竞争关系，从而明确了车道变换决策以及交通冲突的形成机制，并为相关交通规划、无人驾驶、智能导航方案制定提供理论支持。

2 理论基础

2.1 基于 Stackelberg 模型的车道变换博弈

斯塔克尔伯格模型（Stackelberg Leadership Model）是由德国经济学家斯塔克尔伯格（H. Von Stackelberg）在上世纪 30 年代提出。该模型的最初假定是：在经济市场中，竞争厂商之间的地位并不是对称的，市场地位的不对称引起了决策次序的不对称。通常，小企业先观察到大企业的行为，再决定自己的对策。大企业知道小企业一定会对它的决策作出反应，因而当它在确定产量时，把小企业的反应也考虑进去了。因此这个模型也被称为“主导企业模型”。^[7]

Stackelberg 模型与车道变换中的驾驶员变换车道决策过程有相似的地方。车辆变换过程中，目标车与目标车道的后随车是相互影响的。一般来说车辆换道会对后随车辆产生影响，而目标车在做出变换车道的决策前也会根据后随车的行驶情况来决策是否变换车道。因此，本文基于 Stackelberg 模型对车道变换进行建模。为了简化模型，本文选择对双车道情况下的车道变换进行建模。

如下图 1 所示， T 为当前车道目标车， $L1$ 为目标车道的前导车， $L2$ 为当前车道的前导车， F 为目标车道的后随车。 l 为目标车长， $d1$ 、 $d2$ 分别为目标车 T 与 F 、 $L1$ 的实际距离，约束条件为不小于临界安全距离 $d1_min$ 、 $d2_min$ （不发生碰撞的最小安全距离，由车辆性能、驾驶人行为特性、车辆瞬时速度等确定，下一节进一步阐述）。对于双车道情况，目标车仅有两种选择：跟驰或变道。图中涉及目标车欲行驶至左侧快车道的经典车道变换场景。

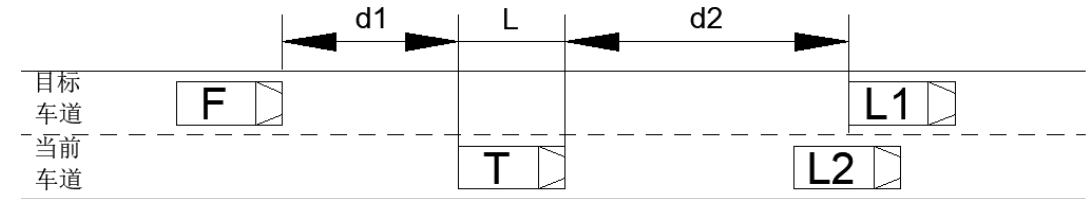


图 1 车道变换示意图

行车过程中，当对象车的驾驶人感知所处驾驶环境无法满足自身的驾驶期望时，为获取更高的速度及空间满意度，产生车道变换意图。从目标车道跟随车的角度分析，对象车变道成功后， F 的前导车由 $L1$ 变成了 T 从而导致 F 驾驶员的速度及空间满意度降低。驾驶员本能上都有使自身利益最大化的心理趋势，因而 F 的选择包括忍受自己的收益缩减跟驰 T 以及换道至 $L2$ 后面来避免空间缩减，二者从而形成博弈关系。假定目标车 T 与目标车道前导车 $L1$ 的实际距离充分大，可以忽略 $L1$ 对 T 车道变换行为的影响，此时车道变换决策可以简化为 T 与 F 驾驶员为争夺冲突临界点追求各自速度及空间满意度而进行的策略选择和博弈过程。

基于 Stackelberg 模型，在双车道环境中有两个决策者 F 和 T 。设 S 为直走， C 为变换车道，决策空间为 $Z = \Gamma_1 \times \Gamma_2$ ， Γ_1, Γ_2 分别是 F 和 T 所有决策的集合， $\Gamma_1, \Gamma_2 = \{S, C\}$ 。设 g_1 为 F 的收益， g_2 为 T 的收益，则基于 Stackelberg 模型的问题变成求下式的极值问题。

$$\Gamma_2'(\alpha_1) \triangleq \{\alpha_2' \in \Gamma_2 : g_2(\alpha_1, \alpha_2') \geq \quad (1)$$

$$g_2(\alpha_1, \alpha_2), \forall \alpha_2 \in \Gamma_2, \alpha_1 \in \Gamma_1\}$$

$$\alpha_1^* = \arg \max_{\alpha_1 \in \Gamma_1} (g_1(\alpha_1, \alpha_2^*)) \quad (2)$$

$$\alpha_2^* = \arg \max_{\alpha_2 \in \Gamma_2} (g_2(\alpha_1^*, \alpha_2)) \quad (3)$$

式中 $\alpha_1 \in \Gamma_1$ 是 F 的决策， $\alpha_2 \in \Gamma_2$ 是 T 的决策， $\Gamma_2'(\alpha_1)$ 是基于 F 决策 α_1 时 T 能做出的决策的集合； α_1^* 和 α_2^* 是 F 和 T 基于 Stackelberg 模型所做出的最终的决策。对于此动态非零和博弈问题的求解，在决策空间维数较小时可以通过遍历解出最优决策。

2.2 自主性车道变换的约束条件

2.2.1 基于 Gipps 可接受间隙模型的换道约束

首先要考虑的问题是车道变换的可行性，具体来说目标车与目标车道上的前导车和后随车的距离都应该满足一定的要求。Gipps 模型是最早提出的换车道模型，由 Gipps P. D. (1986) 提出的，建立在有障碍（信号灯、障碍物等）情况下。整个过程为：（1）当前地点堵塞或是有大车，存在可以变换的车道，驾驶员产生换道的意图。（2）检测换道条件，采用可接受间隙模型，即在进行换道的时候换道车辆与目标车道的前车、后车之间必须要有足够的间隙以保证不会发生事故，换道才有可实施的可能性。（3）只有前面的条件都满足的时候，才能进行换道的行为。

本文采用 Gipps 的可接受间隙模型定义 d_1 、 d_2 的临界安全距离：

$$d_1 \geq \max\{d_{1_min}, d_{1_min} + \beta_{11}v_F + \beta_{12}(v_F - v_T)\} \quad (4)$$

$$d_2 \geq \max\{d_{2_min}, d_{2_min} + \beta_{21}v_F + \beta_{22}(v_T - v_{L1})\} \quad (5)$$

式中， d_{1_min} 为在低速情况下目标车 T 与目标车道后随车 F 之间的最小距离； d_{2_min} 为在低速情况下目标车 T 与目标车道前导车 $L1$ 之间的最小距离； v_T 为目标车 T 车速，取决于该车驾驶员类型（下一节详细阐述）； v_F 为目标车道后随车 F 车速，取决于该车驾驶员类型； v_{L1} 为目标车道前导车 $L1$ 车速，取决于该车驾驶员类型； β_{11} 、 β_{12} 、 β_{21} 、 β_{22} 相应参数，可根据实际情况调整参数大小。^[8]

第二个要考虑的问题是是否需要变换车道。驾驶员做出车道变换的决策是由很多因素决定的。显然 Gipps 模型只考虑了有障碍的情况下的换道行为，在实际换道行为中除了有障碍的情况还有无障碍的情况下驾驶员也会实施换道行为。这种情况在 MITSIM 模型中被首次提出，并对换车道行为方式提出了一个相对较好的划分。

2.2.2 基于 MITSIM 模型的自主性车道变换

MITSIM(Microscopic Traffic SIMulator)模型是 Q. Yang 和 H. N. Koutsopoulos(1996)提出的。该模型框架基于 Gipps 模型框架,同时对 Gipps 进行了一个补充和发展。

在 MITSIM 模型中一个重要的发展就是首次把换道行为分为强制性换车道(Mandatory Lane Changing , MLC)和判断性换车道(Discretionary Lane Changing , DLC)两种。强制性换车道定义为当车辆进入出口匝道, 经过一个堵塞路段、避免进入禁止使用路段以及断头路等情况下发生的换车道行为; 对判断性换车道采用期望速度, 也就是在换道车前方有车辆的情况下, 目标车达不到理想的期望速度时, 如果通过换道可以达到期望速度, 则目标车驾驶员就会产生换道的意图。^[9]

MITSIM 模型提出的换车道行为的分类从实际情况来看有一定的合理性, 本文提及的双车道情况下的车道变换都是 DLC, 属于自主性车道变换。

2.3 基于智能驾驶员模型的决策收益

驾驶员决策的收益是采用 Stackelberg 策略进行车道变换建模的重要参数, 该收益决定了在自主性车道变换情况下, 驾驶员是否变换车道或继续保持原道。本文采用智能驾驶员模型(Intelligent Driver Model, IDM)进行车道变换收益计算。

2.3.1 智能驾驶员系统

智能驾驶员模型以统一的形式同时描述车辆在从自由行驶到换道决策之间的相变, 考虑了相邻车辆的速度差、车辆间距, 其离散化加速度方程为:

$$\frac{dv_n}{dt} = f(v_n, s_n, \Delta v_n) = a_{max}^{(n)} \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_{max}^{(n)}} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right] \quad (6)$$

其中: 公式中下标 n 表示车辆编号, $a_{max}^{(n)}$ 是车辆 n 的最大加速度, $v_{max}^{(n)}$ 是车辆 n 在自由行驶状态下的期望速度, δ 是加速度指数(当 $\delta \rightarrow \infty$ 时, 加速度恒定; 通常 δ 取 1 到 5 之间), v_n 为车辆 n 的速度, $\Delta v_n = v_n - v_{n-1}$ 为车辆 n 与前车 ($n-1$) 的速度差, $s_n = x_{n-1} - x_n - l_{n-1}$ 为车辆 n 与前车的净间距, x_n 为车辆 n 的位置, l_{n-1} 为车辆 ($n-1$) 的长度。

IDM 的加速度方程由自由流加速度与拥堵流减速度两部分组成, 分别写成:

$$a_{free} = a_{max}^{(n)} \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_{max}^{(n)}} \right)^\delta \right] \quad (7)$$

$$a_{break} = -a_{max}^{(n)} \left(\frac{s^*}{s_n} \right)^2 \quad (8)$$

其中, s^* 是当前状态下驾驶员的期望间距, 定义如下:

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_{min}^{(n)} + \max \left\{ T_n v_n + \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_{max}^{(n)} b_n}}, 0 \right\} \quad (9)$$

式中, $s_{min}^{(n)}$ 为静止安全距离, T_n 为反应时间, b_n 为舒适减速度^[10]。

尽管车辆跟驰模型的形式多种多样, 但是基本上都可以概括为目标车辆 n 的加速度与自

身速度、与前车间距以及与前车速度差的某种关系，一般的表达式为

$$a_n = f(v_n, s_n, \Delta v_n). \quad (10)$$

本文需要计算目标车 T 和后随车 F 的 a_{IDM} ，用于计算车辆变道决策收益。将 IDM 模型中的式子整理化简后列出：

$$a_{IDM} = a[1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^4 - \left(\frac{s^*}{s}\right)^2] \quad (11)$$

$$s^* = s_0 + vT' + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \quad (12)$$

式中， a_{IDM} 为目标车的速度收益； a 为目标车最大加速度； v 为目标车当前速度，要求小于等于理想速度； v_0 为目标车理想速度，与驾驶员类型有关； s^* 为目标车与前导车最小理想距离； s 为目标车与前导车当前距离； s_0 为低速情况下，目标车与前导车的相对静止安全距离； T' 为目标车驾驶员反应时间； Δv 为目标车与前导车的相对速度； b 为目标车的舒适减速度。

驾驶员自主性变换车道的目的是能够得到更接近理想速度的速度，同时满足一定的车距要求。驾驶员在车距满足要求的情况下，希望通过变换车道得到更大的加速度，使得目标车速度能够更加接近理想速度。因此采用 IDM 模型计算得出的加速度计算车道变换中驾驶员的收益。

2.3.2 车辆换道的决策收益

驾驶员在做出变换车道决策时还会考虑其他一些因素，通常情况下驾驶员不希望因为变换车道而使得目标车道的后随车严重减速。在这里我们用后随车由于前车变道而造成的速度收益缩减来代表其减速度。因此，进行车道变换决策的收益应该包含两个组成量：目标车的加速度和后随车的减速度。一般情况下，驾驶员更加注重自身加速度，同时参考后随车的减速情况。因此可引入两个权重系数 k_T 、 k_F ，通过下式 (13) 计算决策收益：

$$U = k_T a_{IDM} - k_F |a_{F_IDM}| \quad (13)$$

式中 a_{F_IDM} 是后随车的速度收益缩减量；参数 k_T 、 k_F 是加速度 a_{IDM} 和 a_{F_IDM} 所占的权重。一般来说 $k_T > k_F$ ，具体数值需要根据具体的交通情况进行标定。为了简化模型，本文中设定目标车驾驶员只会考虑后随车由于变道而速度收益衰减的情况，因此 a_{F_IDM} 要满足式 (14)；且在没有后随车的情况下，设定 $a_{F_IDM} = 0$ 。

$$a_{F_IDM} = \begin{cases} 0, & a_{F_IDM} \geq 0 \\ a_{F_IDM}, & a_{F_IDM} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

在进行车道变换建模前，注意到 v_0 、 s_0 、 T' 等参数受驾驶员的性格、驾驶风格影响较大，因此，本文进一步根据驾驶员性格将驾驶员进行分类，并分别对每一类的参数进行设定。

2.3.3 驾驶员类型分类

不同驾驶员具有不同的特点，本文将驾驶员分为保守型、普通型和冲动型。不同类型的

驾驶员有不同的理想速度 v_0 、临界安全距离 d 等。越冲动的驾驶员具有更大的理想速度 v_0 、更小的临界安全距离 d 、更小的换道阈值，以及小的减速系数 k_F 。

由于车道变换存在事故风险，所以在自主性车道变换中，驾驶员并不是只要变换车道的收益 U_C 大于不变换车道的收益 U_S 就一定会变换车道。因此，本文在建模过程中设置了一个阈值，当变道收益 U_C 大于该阈值时，驾驶员才进行车道变换。同时，不同类型驾驶员的阈值也会不同：一般情况下，冲动型驾驶员会更加容易变换车道，而保守型驾驶员会倾向于不变道。

根据上述驾驶员类型，本文设定下表参数：

表 1 驾驶员类型参数

驾驶员类型	理想速度 $v_0(m/s)$	换道阈值	减速系数 k_F （对后车收益缩减的考虑程度）
保守型	15+rand(3)	2	0.6
普通型	20+rand(4)	1.5	0.4
冲动型	25+rand(5)	1	0.2

rand：绝对值最大值为 1 的随机数，本文中取括号内参数。

由于在车道变换中，驾驶员无法知道对方的类型是保守型、普通型还是冲动型，因此驾驶员通常会假设对方是普通型。为简化模型，本文设定驾驶员在决策时，都基于预测对方是普通型驾驶员。

2.4 元胞自动机框架下的模型运行

元胞自动机是一种时空离散的局部动力学模型，是研究复杂系统的一种典型方法，特别适合与空间复杂系统的时空动态模拟研究。元胞自动机的核心在于更新规则，对于在空间网格中的每一个元胞取有限的离散状态，依据规则进行更新。

基于上述模型方法，为了分析目标车和后随车在不同驾驶员类型、不同车速、不同车流密度时的变道情况，本文借鉴元胞自动机的结构框架，使用了一个模拟车辆交通的元胞自动机模型——NaSch 模型。

在该模型中，时间、空间和车辆速度都被整数离散化，道路被划分为等距离的离散的格子，即元胞；每个元胞有两种状态，或者是空，或者是被一辆车占据；车辆的速度可以在 $0 \sim v_0$ 之间取值。对于车流密度的计算，采用密度=车辆数/路长，流量=密度*平均速度的计算方法，也可在道路的某处设置虚拟探测计，统计时间 T 内通过的车辆数 N ，流量 $flux=N/T$ 。

该模型的运行规则如下：

在时刻 T 到时刻 $t+1$ 的过程中按照下面的规则进行更新：

(1) 加速： $v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{max})$

规则（1）表明司机倾向于以尽可能大的、接近理想的速度行驶的特点。

(2) 减速： $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n)$

规则（2）确保车辆不会与前车发生碰撞

（3）随机慢化：以随机概率 p 进行慢化，令： $v_n \rightarrow \min(v_n - l, 0)$

规则（3）引入随机慢化来体现驾驶员的行为差异，即不同种类的驾驶员类型。这样既可以反映随机加速行为，又可以反映减速过程中的过度反应行为。这一规则也是车道堵塞自发产生的关键因素。

（4）位置更新： $v_n \rightarrow x_n + v_n$ ，车辆按照更新后的速度向前运动。

其中， v_n 、 x_n 分别表示第 n 辆车位置和速度； $l(l \geq 1)$ 为车辆长度； $d_n = x_{n+1} - x_n - l$ 表示 n 车和前车 $n+1$ 之间的空元胞数； p 表示随机慢化概率； v_0 为理想速度。

按照该模型，结合前述模型对模型参数来设定，本文对双车道车辆变道问题进行了仿真。

3 模型建立

基于上述理论，建立基于 Stackelberg 自主性车道变换博弈模型的过程如下：

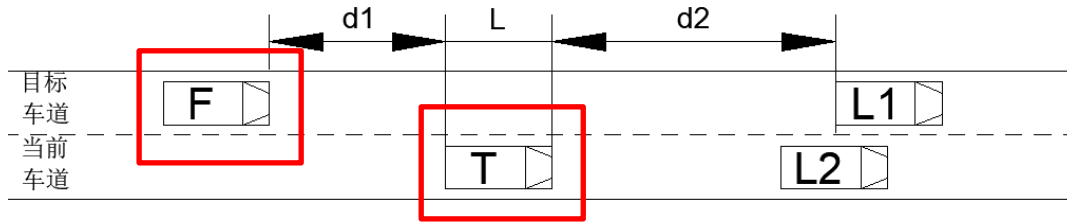


图 2 车道变换示意图

在第一步，对目前车道上的每辆车都进行能否满足换道安全距离的判断，过程如下：

1. 根据 Gipps 模型判断目标车辆 T 是否满足最小变道距离 $d1, d2$ 的要求；
2. 若不满足，则保持对 $L2$ 的跟驰；
3. 若满足，则进行下一步变道判断。

在第二步，对能够安全变道的车辆，判断其变道所带来的纯速度收益 a_{IDM} ，过程如下：

1. 分别计算车辆 T 在变道与跟驰情况下的 a_{IDM} 并比较大小；
2. 若变道情况下 a_{IDM} 更大，则进行变道下一步判断；
3. 若变道情况下 a_{IDM} 较小，则保持跟驰。

在第三步，通过变道能够获得更大纯速度收益的车辆即开始与目标车道的后随车进行博弈。首先判断后随车能够变道。若后随车不能变道，则决策空间只有一维，此时根据收益 U 便可以做出决策。过程如下：

1. 根据 Gipps 模型，对目标车道后随车 F 进行能否变道的安全距离判断；
2. 若 F 能够满足 Gipps 判据，则进入下一步变道判断；
3. 若不满足，则 F 保持跟驰， T 根据判断进行变道或跟驰。

在第四步，开始根据 Stackelberg 模型进行博弈，其收益矩阵和具体过程如下：

进行车辆 F 和车辆 T 的 Stackelberg 博弈，收益矩阵如下所示：

表 2 收益矩阵

(T, F)	S_1	C_1
S_2	(a_2, a_4)	$(a_1 - k_F \Delta a, a_3)$
C_2	$(a_2 - k_F \Delta a, a_3)$	(a_1, a_5)

括号中前后项分别为 T 车与 F 车的收益。 $a_{1\sim 5}$ 为由前后车状态确定的纯速度收益。 $a_{IDM} =$

$a[1 - (\frac{v}{v_0})^4 - (\frac{s^*}{s})^2]$, $\Delta a = a_4 - a_3$. 即为后车收益衰减. 车辆 F 和车辆 T 以最优对策执行。

4 模型仿真

为评估提出的 Stackelberg 自主性换道决策模型对交通流的影响, 并且, 将提出的换道决策模型与 VISSIM 仿真模型以及玉古路实际模型进行对比, 研究小组使用 MATLAB 设计并进行了交通流仿真实验, 包括单车道 Ns 模型和基于此的双车道自主性车道模型。

4.1 单车道模型

该仿真模型主要是用 MATLAB 仿真元胞自动机框架下的交通流模型, 随着元胞自动机规则的更新, 汽车的状态发生改变, 即位置和速度都发生变化。单车道 Ns 模型的仿真结果如下图所示, 其中白色部分为车道, 蓝色部分为正在行驶中的汽车。

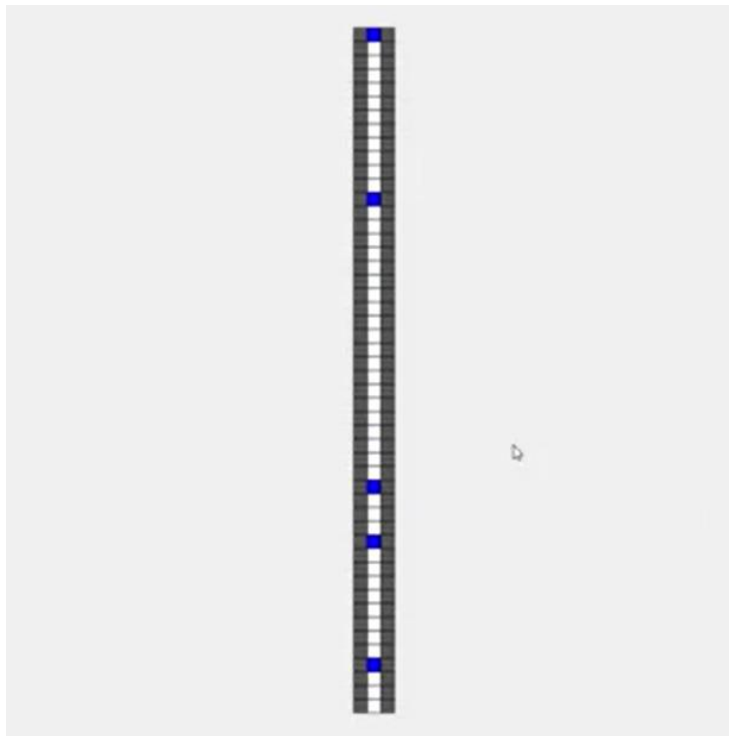


图 3 单车道 Ns 模型仿真结果图

4.2 双车道模型

对于两车道模型来说，除了规则更新时，汽车的位置和状态发生变化外，汽车会根据博弈模型计算的增益来判断是否变换车道，从而形成一段路程上的完整连续的交通流。如下图所示，白色部分代表两条车道，其中墨绿色车为普通驾驶员类型，黑色车为冲动型驾驶员类型，而天蓝色车为保守型驾驶员类型。

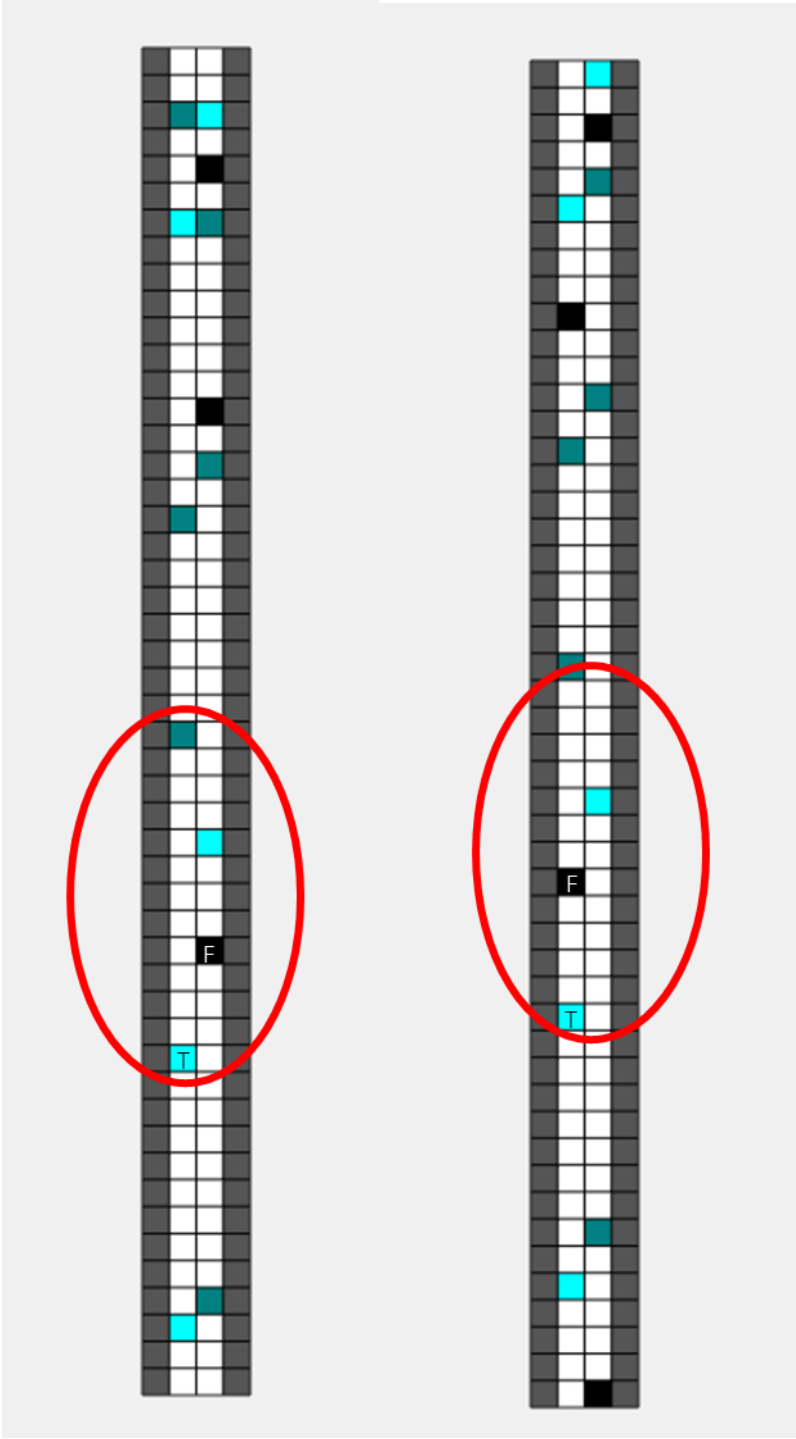


图 4 双车道 Ns 模型仿真结果图

由于完整汽车流中汽车数目较多，车道变换情况较复杂，拟选择某两辆车的车道变换情

况为例进行说明。根据上文中提到的 Stackelberg 博弈模型的收益矩阵计算，结果如下：

表 3 收益矩阵

(T, F)	S_1	C_1
S_2	(0.75,0.41)	(0.44,0.61)
C_2	(0.92,0.61)	(0.51,0.33)

从收益矩阵中来看，两辆目标车获得最大收益时选择的最优策略应为T跟驰，而F换道，根据图 3，仿真结果与理论相符。

5 模型检验

为了探究本文建立模型的合理性，首先，研究小组对不同车辆密度下的总换道率、不同驾驶员类型的车道换道率以及各类型速度差不同时的车道换道率进行探究，对模型进行分析，判断其合理性。

其次，研究小组分别统计了 VISSIM 软件的仿真结果及玉古路（求是路—浙大路）真实城市道路环境一段时间内的自主性车辆换道率，与所建模型的车辆换道率形成验证对照组。经验证，三个变道率间存在合理差异，进一步证明了该模型的正确性。

5.1 模型分析

5.1.1 车流密度与总换道率

首先，在 MATLAB 中改变车流密度，探究不同车辆密度下总换道率的差异，结果如下图所示。

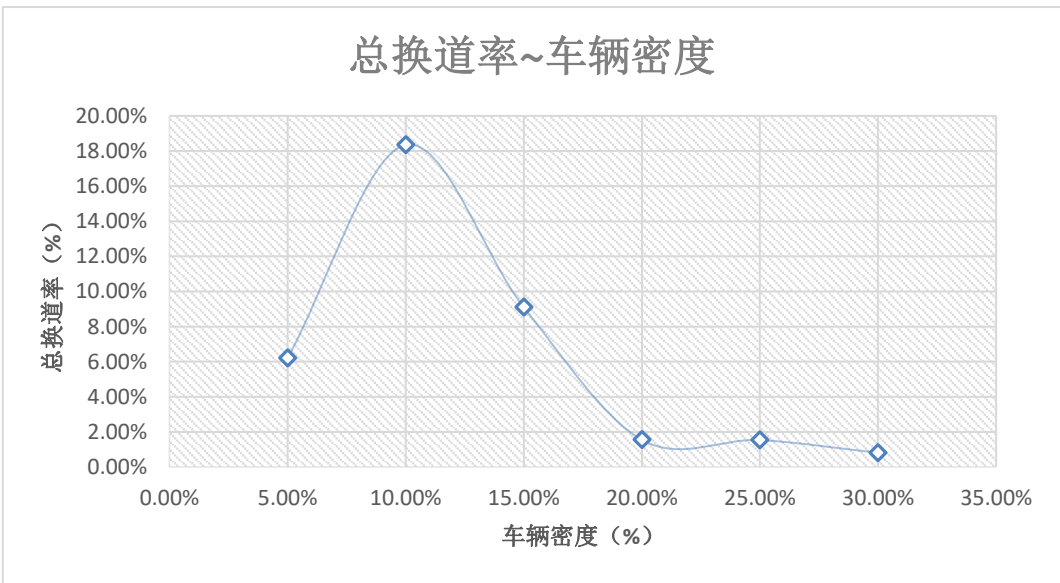


图 5 总换道率与车辆密度的关系

由上图可以看出，总换道率随车辆密度增加呈现为先增大后减小的状况，两端最小，中间存在峰值。结合实际情况可以发现，这与实际情况相符合。车流量密度很小时，没有更换车道的必要，而车流量密度很大时，对于每辆车来讲都很难满足换道的要求。其余情况由于路况随着车辆的密度增加，复杂程度增加，便会导致车主的变道需求增加，换道率增加，与实际情况相符。

5.1.2 驾驶员类型与换道率

其次，对各驾驶员类型的车辆换道率分别进行统计，观察车辆换道率与不同类型车之间的关系，结果如下图所示。

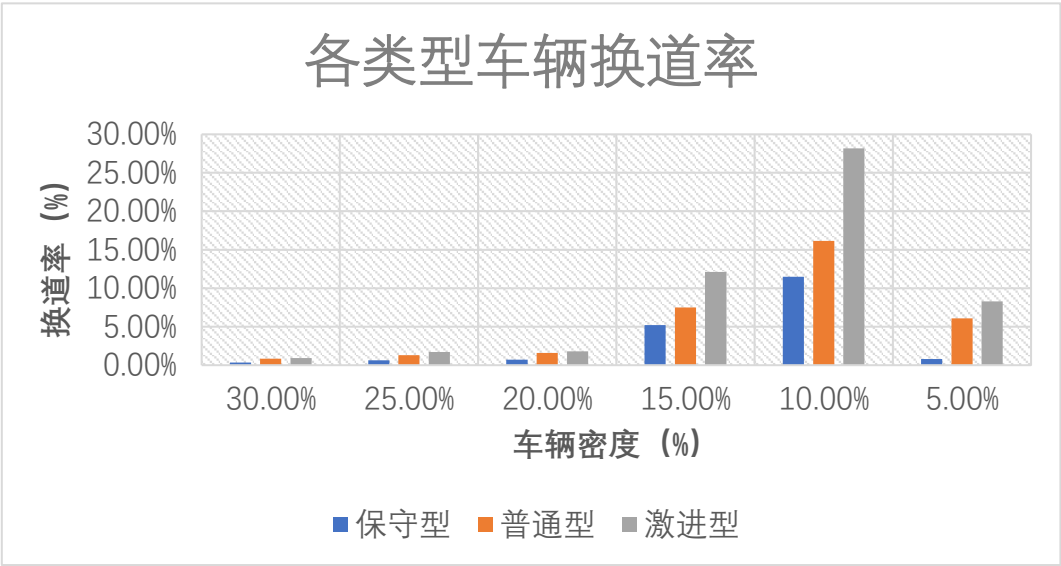


图 6 各类型车辆换道率

由上图可看出，不同驾驶员类型间的换道率也存在明显差异。随着各种车辆的理想最大速度的增加，换道率也逐步增加。由于对于各个车辆来说都有逐步逼近自己理想最大速度的趋势，因此随着理想最大速度的增加，换道需求随着增加，换道率也逐渐变大，与实际驾驶习惯相符。

5.1.1 速度差与总换道率

最后，对各驾驶员类型的速度差不同时的车辆换道率分别进行统计，即车道上的车速度相差较大时，观察速度差与车道换道率之间的关系，结果如下图所示。

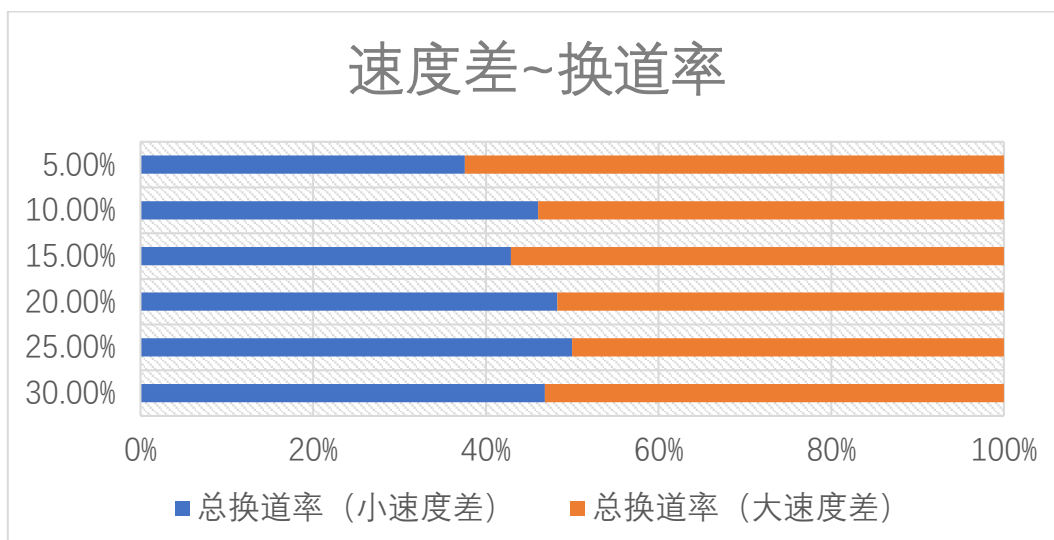


图 7 总换道率与不同类型车速度差的关系

如图所示，速度差异越大，整体的换道率对应增加。随着三种驾驶员类型间的速度差异增大，在车辆总数保持基本不变并且三种车型的数量比例固定的情况下，整体的期望最大速度增加，导致整体的换道率对应增加。

5.2 模型对比

5.2.1 VISSIM 仿真验证

VISSIM 是一种微观的、基于时间间隔和驾驶行为的仿真建模工具，所采用的 urban 机动车驾驶模型为 Wiedemann 在 1974 年提出的跟驰模型，用以城市交通和公共交通运行的交通建模。它可以分析各种交通条件下，如车道设置、交通构成、交通信号、公交站点等，城市交通和公共交通的运行状况，是评价交通工程设计和城市规划方案的有效工具。VISSIM 平台在交通仿真所广泛应用，在此作为对模型效果的验证对照组。



图 8 VISSIM 仿真平台

仿真中，设置双行道公路长 502m，共通过 197 辆车。分别以不同颜色的车辆代表不同驾驶员类型，其中黄色为普通车辆，红色为激进车辆，黑色为保守车辆；设置三类驾驶员比例为 5:3:2。根据保守型、普通型和冲动型驾驶员的驾驶特点，设置车辆速度分别为 15km/h、20km/h、25km/h。对自由换道次数进行统计，共记录到 14 次自由换道，所得到的自主性换道率为 7.11%。

同时，在统计中观察到，所记录到的 14 次变道过程中有 9 次为激进车辆造成的，而被变道超过的车也大多是黑色所代表的保守车。

5.2.2 玉古路实地调查验证

为了更好地探究所建模型与实际路况的匹配度，探究小组针对 6 月 23 日下午 16:30 的玉古路进行了实地调查。调查时段的单向车流量约为 900 辆/h。

在调查时间段内，共统计得到 312 辆机动车驶经该路段。首先，统计了 15 辆车经过路段采样点的时间，得到平均时间为 1 分 26 秒，推断此路段此时的平均车速约为 21.22km/h。经过统计，在 312 辆机动车中，共发生了 43 次变道，其中 29 次为强制性变道，18 次为自然变道，由此计算得到的自主性变道率为 5.77%。



图 9 玉古路实地调查

5.2.3 模型对比分析

本文将自主性变道率作为对比标准，模型对比结果如下表所示。

表 4 自主性变道率对比验证

自主性变道率	
博弈变道模型	9.11%
VISSIM 仿真	7.11%
实际路段统计	5.77%

本文提出的基于博弈理论的自主性车道变换模型的自主性变道率略高于 VISSIM 仿真平台和实际路段统计结果，但差异处于可以接受的合理区间内。本文对略高的原因进行了相应的分析：首先，由于实际路段统计时间有限，样本数据随机性较大；同时对于变道行为中的自主性变道车辆的判断也存在一定的不准确性；在实际的路段调查中，调查路段中部有两条斑马线，结合杭州市“车让人”的交通规则，很多车辆会在中间路段减速或停下礼让行人，从而造成实际统计到的变道率比较低。再者，由于 VISSIM 仿真中所建立的模型已经比较长，因此与实际的车道模型存在着一定的不匹配性。在本文的建模以及 VISSIM 仿真中，所设置的保守车辆：激进车辆：普通车辆的比例为 2:3:5。这样的设置比例中激进车辆的比例是偏大的，而在实际的行车过程中，大部分驾驶员是以出行安全为首要考虑的，以保守型和普通型驾驶员为主，从而导致统计的博弈变道模型和 VISSIM 仿真的自主性变道率高于实际路段统计。

6 总结与展望

6.1 模型结论

换道是车辆的主要驾驶行为之一，合理的选择换道或跟驰有利于提高道路利用率，同时也能减少交通事故的发生。本文对不同驾驶员类型的两车道自主性车道变换决策进行研究，构建了基于博弈理论的自主性车道变换决策模型，主要研究成果如下：

1. 对两车道的自主性车道变换决策机制进行分析和合理假设，设计了两辆车进行博弈并最终得到最大收益的最优决策流程。流程包括判断目标车一是否满足安全距离要求、获得目标车一的决策、判断目标车二是否满足安全距离要求、进行两辆目标车的协同决策。
2. 基于 Stackelberg 博弈模型，构建自主性车道决策模型，在模型中考虑前导车和后随车的影响，从换道的安全性和效益两方面分析换道决策。根据安全准则，约束换道后，由两辆车是否换道的收益矩阵中满足驾驶员的意愿的选择来确定最优对策，使得局部交通最优。收益的计算则根据智能驾驶员模型的加速度确定，而不同的驾

驶员类型期望的最大速度也不同，直接影响他们的换道意愿。

3. 基于元胞自动机理论，构建交通流模型，设定演化规则来模拟单车道和双车道交通流。演化规则主要包括加速、安全刹车、随机慢花以及位置更新四个方面，通过更新规则实现对车辆状态的更新，包括速度和位置的更新。
4. 利用 MATLAB 软件设计和搭建仿真实验。从不同车辆密度下的总换道率、不同驾驶员类型的车道换道率以及各类型速度差不同时的车道换道率进行探究，仿真实验结果表明，换道频率合理，提出的两车道自主性车道变换模型具有合理性和正确性。
5. 统计 VISSIM 的仿真结果及玉古路（求是路—浙大路）真实城市道路环境一段时间内的自主性车辆换道率，与所建模型的车辆换道率形成验证对照组。经验证，三个变道率间存在合理差异，进一步证明了该模型的正确性。

6.2 应用展望

本文提出了基于博弈理论的自主性车道变换模型，最终获得合理的换道频率，模型具有正确性，对减少交通事故、提高道路利用率有促进作用。但研究中考虑的是人工驾驶的情况，与驾驶员的类型有关。而随着智能交通的发展，在经过一定的过渡期时，智能网联汽车将成为道路上的主要车辆，其具有先进的传感器、控制器、执行器，并且能进行车与车、车与人、车与路的信息交换共享，对于这类汽车，上述自主性车道变换模型不能适用。需对模型进行改进，有待今后进一步研究：

1. 获得整条道路的全局决策。当所有汽车之间具有通信功能时，便不仅仅局限于局部策略，可根据道路总体情况进行最优决策，提高整条道路交通流的效率、安全性和舒适性，减少不必要的换道行为。
2. 基于大数据预测换道行为。获取大量的实际交通数据，对其进行分析，再结合当前驾驶过程中的实际情况提前做出是否需要换道的预测，防止因通信系统延误、信息传输误差等带来的滞后性和随机性，提高系统的实时性。
3. 在人工驾驶和无人驾驶的过渡阶段，采用混合决策。此时，通信没有完全覆盖，且人工驾驶存在不同的驾驶习惯。在换道决策过程中既要协同决策取最优策略，又要考虑个别车的局部最优。

参考文献

[1] 中华人民共和国公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报 (2016 年度) [R]. 北京: 中华人民共和国公安部交通管理局, 2017.

[2] Salvucci D D, Liu A. The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2002, 5(2):123-132.

[3] Bando M, Hasebe K, Nakayama A, and et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical-simulation. Physical Review E, 1995, 51(2):1035~1042

[4] Treibe M, Kesting A, and Helbing D. Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2006, 360(1): 71~88

[5] 魏丽英, 隽志才, 田春林. 驾驶员车道变换行为模拟分析[J]. 中国公路学报, 2001,14(1): 78~80.

[6] 王荣本,游峰,崔高健,等. 车辆安全换道分析[J]. 吉林大学学报:工学版,2005,33(2): 179~182.

[7] 百度百科“斯塔克尔伯格模型”词条.

[8] 徐英俊. 城市微观交通仿真车道变换模型研究[D]. 吉林大学, 2005.

[9] 谢寒. 换车道模型研究[J]. 知识经济,2010(17)5

[10]陈喜群. 智能驾驶员模型及稳定性分析[A]. 全国智能交通系统协调指导小组、全国清洁汽车行动协调领导小组、中国智能交通协会、深圳市人民政府. 第五届中国智能交通年会暨第六届国际节能与新能源汽车创新发展论坛优秀论文集(上册)——智能交通[C]. 全国智能交通系统协调指导小组、全国清洁汽车行动

附录一：小组分工

本次大作业,我们小组一起进行了多次线上、线下的讨论,共同确定了主题并深入探究,最终完成了本次课程大作业,也留下了愉快的回忆。以下以表格的形式进一步说明本次大作业的分工情况。

序号	工作内容	成员 1	成员 2	成员 3	成员 4	成员 5	成员 6
1	模型建立	20%	20%	20%	20%	20%	
2	模型仿真	30%	30%	30%	5%	5%	
3	模型验证	30%	30%	30%	5%	5%	
4	PPT 制作	10%	10%	10%	30%	40%	
5	文档撰写				50%	50%	
6	PPT、文档 校正						100%
7	展示	30%	30%	30%	10%		

附录二：代码

附录三：视频

详见附件文件夹“视频”。

文件名	说明
单车道交通流.mp4	单车道 MATLAB 仿真结果
双车道交通流.mp4	单车道 MATLAB 仿真结果
Vissim.mp4	Vissim 仿真结果

附录四：风采展示