

机非交互路段非机动车越线超车行为建模与仿真

刘启远, 孙 剑, 田 野, 倪 颖

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为了准确描述机非交互路段的非机动车越线超车行为, 在越线超车特征分析及关键指标定义的基础上, 提出了基于生存分析的超车时间预测模型, 对越线超车行为的持续时间进行预测, 并通过实测的 160 组非机动车越线超车轨迹数据对模型参数进行标定. 为验证模型在混合交通流的应用有效性, 整合非机动车纵向行驶模型、换道动机模型、间隙选择模型等, 将模型应用于团队自主研发的微观交通仿真软件 TESS NG 中, 并与经典的微观交通仿真软件 VISSIM 进行对比. 基于实际路段的仿真分析结果表明, 在非机动车越线超车持续时间方面, TESS NG 的仿真精度为 90.12%, 高于 VISSIM 的 67.4%; 在中位生存时间方面, TESS NG 仿真误差仅为 2.56%, 优于 VISSIM 的 43.58%.

关键词: 机非交互路段; 非机动车交通流; 越线超车行为; 交通仿真; 生存分析

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

Modeling and Simulation of Cross-Line Overtaking Behavior of Non-Motorized Vehicles at Mixed Flow Road Section

LIU Qiyan, SUN Jian, TIAN Ye, NI Ying

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To depict the cross-line overtaking behavior of non-motorized vehicles at mixed flow road section, this paper analyzed the characteristics of cross-line overtaking behavior and defined the key parameters first, and then proposes the overtaking elapsed time estimation model for non-motorized vehicles based on survival analysis. It utilizes 160 field trajectories of cross-line overtaking non-motorized vehicles to calibrate the proposed model. In order to verify the effectiveness of the model in mixed flow, it further applies the model and integrates it with the car-following model, the lane-changing motivation model, and the gap acceptance

model to the self-developed microscopic traffic simulation package TESS NG by adopting the classic micro-simulation model VISSIM as the evaluating benchmark. The result shows that the simulation accuracy of TESS NG is 90.12% in terms of estimating the overtaking elapsed time of non-motorized vehicles, which is far better than the 67.4% achieved by VISSIM and the relative error of median survival time is 2.56% which is 43.58% less than that of VISSIM.

Key words: mixed flow road section, non-motorized vehicle flow; cross-line overtaking behavior; traffic simulation; survival analysis

非机动车越线超车行为是机非交互路段较为典型和复杂的驾驶行为^[1], 同时随着近年来电动车使用量的增长^[2], 导致此类行为事件的发生频次增加^[3]. 准确地对机非交互路段非机动车越线超车行为进行建模, 对机非交互车道的安全评价、通行能力分析、管控方式设置以及智能驾驶车辆的辅助决策等方面均具有重要意义^[4-7].

非机动车越线超车行为具有交互对象多样(含电动车、自行车、机动车等)、交互过程复杂(包括超车动机产生、接受超车间隙、超越目标车辆、持续占用机动车道自由行驶、主动选择返回间隙、返回非机动车道等过程)两个典型特征^[8], 并且受驾驶者个人特征影响显著. 目前学者大多关注车辆的超车动机、超车及返回原车道间隙大小判断, 侧重于越线超车频次等指标的分析^[1,4-5,9], 超越目标车辆前、后的越线时间一般较为接近. 而实测数据表明, 在电动车比例较高的非机动车流中, 非机动车在超车后的越线持续时间远大于超车前的越线持续时间. 此因素导致非机动车的超车时间预测存在如下难点: ① 影响越线超车持续时间因素复杂, 即返回动机既受到相

收稿日期: 2019-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(U1764261); 上海曙光学者计划(18SG-21)

第一作者: 刘启远(1989—), 男, 工学博士, 主要研究方向为微观交通建模与仿真. E-mail: liuqiyan@tongji.edu.cn

通信作者: 孙 剑(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通流理论、交通仿真与实验.

E-mail: sunjian@tongji.edu.cn



扫码查看作者扩展介绍
开放科学(资源服务)标识码(OSID)

邻车道的机动车影响,也会受到周边其他非机动车状态的影响,即使在有返回间隙的情况下,也会有一定的越线超车车辆持续占用机动车道;② 中高密度情况下越线车辆的从众效应,以及越线超车车辆的自身速度等因素,均会影响非机动车持续占用机动车道时间,此类影响因素难以准确量化;③ 即使在较长观测区间,仍有部分越线超车车辆持续占用机动车道,此部分数据的处理对准确描述越线超车行为具有重要影响。

另一方面,由于越线超车为随机事件,在越线事件中,仍存在观测范围内非机动车未返回原非机动车道的实例,导致越线超车存在一定量的删失数据,如何合理有效利用样本数据是模型构筑的关键。近年来应用越来越广泛的生存分析,可以有效考虑信息相对缺失的非完全数据以及超出观测区间的删失数据,被广泛应用于生物统计、医疗等领域,目前逐步被引入交通运输领域,在交通流瓶颈失效持续时间,行人最大可忍受过街等待时间等方面得到一定的应用^[10-11],其在数据存在删失以及受多因素影响的不确定事件预测,具有较强优势。

基于此现状,本文建立了基于生存分析的越线行驶时间预测模型,在此基础上整合了纵向跟驰行为模型、变道动机模型及可接受间隙模型等,对非机动车超车行为进行建模与预测;进一步构建了系统的非机动车越线超车全过程仿真模型,并将模型应用于自主研发的微观交通仿真系统 TESS NG (Tongji nEtwork simulation system next generation) 中。最后以总的越线持续时间等为指标,与 VISSIM 仿真系统进行了效果对比评价。

1 模型构建

1.1 基于虚拟车道划分的模型构架

在机非交互路段中,机动车道与非机动车道间存在软隔离车道线。为了高效准确地描述非机动车的越线超车过程及交互对象,本研究将机非交互空间划分为准二维的虚拟车道空间(单个虚拟车道宽度为 0.8 m 且参数可调)。非机动车与机动车在虚拟车道间进行变道、超车。在非机动车越线超车的整个行为中,一般会有 3 个过程:① 越线开始至超越目标车辆;② 超越目标车辆后的越线自由行驶过程;③ 开始主动选择间隙返回原车道。非机动车道一般具体划分方式及越线超车的过程如图 1 所示。

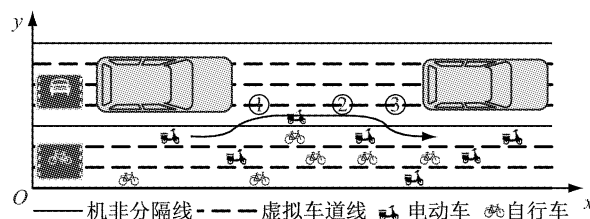


图 1 非机动车越线超车行为说明

Fig. 1 Illustration of cross-line overtaking behavior of non-motorized vehicles

1.2 越线超车时间组成

在非机动车越线超车的总过程中,车辆超车的总时间为

$$T = t_1 + t_2 + t_3 \quad (1)$$

式中: T 为非机动车越线超车的总时长; t_1 、 t_2 、 t_3 分别为图 1 中越线超车 3 个过程的越线时长。则对于任意的超车车辆 i 超越车辆 j 时,设其运行的所有时刻为 t_i ,其开始越线时刻 $t_{i,0}$,超越目标车辆 j 的时刻 $t_{i,1}$,开始执行选择间隙返回原车道时刻 $t_{i,2}$ 以及返回非机动车道时刻 $t_{i,3}$,上述 4 个时刻分别定义如下:

$$t_{i,0} = \{t_i \mid y_{i,t-1} < Y, y_{i,t} \geq Y\} \quad (2)$$

$$t_{i,1} = \min\{t_i \mid x_{i,t-1} < x_{j,t-1}, x_{i,t+1} > x_{j,t+1}\} \quad (3)$$

$$t_{i,2} =$$

$$\begin{cases} \min\{t_i \mid a_{i,t} < -b_x\}, & a_{i,t} < -b_x \\ \min\{t_i \mid y_{i,t} - y_{i,t-1} < a_y\}, & -b_x \leq a_{i,t} \leq a_x \\ \min\{t_i \mid a_{i,t} > a_x\}, & a_{i,t} > a_x \end{cases} \quad (4)$$

$$t_{i,3} = \{t_i \mid y_{i,t-1} \geq Y, y_{i,t} < Y\} \quad (5)$$

式(2)~(5)中: $x_{i,t-1}$ 、 $x_{j,t-1}$ 及 $x_{i,t+1}$ 、 $x_{j,t+1}$ 分别为非机动车 i 和 j 在沿行驶方向 $t-1$ 及 $t+1$ 时刻的横向位置; $y_{i,t-1}$ 、 $y_{i,t}$ 、 $y_{i,t+1}$ 分别为非机动车 i 在 $t-1$ 、 t 及 $t+1$ 时刻垂直行驶方向的纵向位置; Y 为机非隔离标线所在的纵向位置; $a_{i,t}$ 为非机动车 i 在 t 时刻的瞬时加速度; $a_{i,t4}$ 为返回原车道时刻的加速度; a_x 、 b_x 分别为车辆开始选择前、后间隙时横向临界加速度绝对值; a_y 为车辆选择当前间隙纵向临界加速度绝对值^[12]。 $t_{i,0}$ 、 $t_{i,1}$ 、 $t_{i,2}$ 及 $t_{i,3}$ 一般满足下式:

$$t_{i,0} < t_{i,1} \leq t_{i,2} < t_{i,3} \quad (6)$$

当 $t_{i,1} = t_{i,2}$ 时,表明越线超车非机动车在超越目标车辆后立刻执行返回原非机动车道决策。

1.3 车辆超越目标车辆前的驾驶行为模型

非机动车在超越前方非机动车时,一般处于无前方车辆影响时的自由、加速状态,或受当前虚拟车道前方机动车、非机动车影响的跟驰状态,其加速度计算公式如下:

$$a_{i,t} = \begin{cases} \min\{0, a_f\}, & v_{i,t} = v_i \\ \min\{a_i, a_f\}, & v_{i,t} < v_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: a_i 为非机动车 i 的期望加速度; v_i 为非机动车 i 的期望速度; $v_{i,t}$ 表示车辆 i 在 t 时刻的瞬时速度; a_t 为非机动车跟驰或超车时受所在虚拟车道前方的机动车、非机动车影响时的加速度大小. 为了建模有效性及便利性, 机动车及非机动车的跟驰加速度计算均采用 IDM(intelligent driver model)模型^[13], 其计算公式如下:

$$a_t = a_i \left[1 - \left(\frac{v_{i,t}}{v_i} \right)^\alpha - \left(\frac{S^*(v_{i,t}, \Delta v)}{S_a} \right)^\beta \right] \quad (8)$$

$$S^*(v_{i,t}, \Delta v) = S_0 + v_{i,t} T_i + \frac{v_{i,t} \Delta v}{2 \sqrt{a_i b_i}} \quad (9)$$

式中: $S^*(v_{i,t}, \Delta v)$ 表示跟驰前车时的期望跟驰距离; S_a 为当前虚拟车道的实际跟车距离; S_0 为安全停车距离; T_i 为车辆的跟车时距; Δv 表示车辆 i 与跟驰前车前速度差; a_i 与 b_i 分别为期望加速度和期望减速度; α 和 β 为待标定参数.

1.4 基于生存分析的超车行驶时间预测

当非机动车越过目标车辆后, 受当前虚拟车道前方或后方车辆影响时, 会让行后方机动车或避让前方车辆, 其返回原车道的动机可定义如下: 受前方车辆影响时

$$\{v_{i,t} \mid v_{fm,t} < v_{i,t}\} \quad (10)$$

$$\{(x_{i,t}, y_{i,t}) \mid x_{fm,t} - x_{i,t} < d_s, y_{fm,t} - y_{i,t} < d_1\} \quad (11)$$

受后方车辆影响时

$$\{v_{i,t} \mid v_{i,t} < v_{rm,t}\} \quad (12)$$

$$\{(x_{i,t}, y_{i,t}) \mid x_{i,t} - x_{rm,t} < d_s, y_{rm,t} - y_{i,t} < d_1\} \quad (13)$$

式(10)~(13)中: $v_{fm,t}$ 、 $v_{rm,t}$ 分别为超越目标车辆后, 所在虚拟车道前方车辆和后方车辆的当前速度; $x_{fm,t}$ 、 $y_{fm,t}$ 分别为虚拟车道前方车辆的横、纵向位置; $x_{rm,t}$ 、 $y_{rm,t}$ 分别为虚拟车道后方的车辆横、纵向位置; d_s 、 d_1 分别为影响横、纵向界限. 即非机动车受到当前前方车辆干扰或自身阻滞后方车辆运行时, 会主动返回原非机动车道.

而在更多的情况下, 非机动车越线超车时前、后方一定范围内均不受机动车干扰, 此时为了准确预测 t_2 所占用的时间, 这里采用生存分析法来分析车辆的越线生存时间.

在生存分析中, 有如下相关 6 类定义表征了研究事件的特征: ① 起始事件——反映研究对象开始生存的起始特征事件. 在非机动车越线超车的过程中, 非机动车开始越线即为起始事件. ② 死亡事件(终点事件)——出现研究者关注的终止事件. 在观测路段的整个过程中, 非机动车返回原非机动车道

即为终点事件. ③ 观察时间——从研究开始观察到观察结束的时间, 即观测在路段中非机动车运动全过程时间. ④ 生存时间——观察到对象存活时间, 即非机动车的越线时间. ⑤ 完全数据——从观察起始事件到死亡事件所经历的时间, 生存时间是完整的. ⑥ 删失数据——生存时间是不完整的, 事件不是由于终点事件而结束的, 而是由于失访、观察时间结束而对象仍存活等原因产生的. 由于在机非交互路段的观察区间内, 非机动车会在任意时刻产生越线超车, 同时在路段观测中, 无法观测整条路段(并且即使完全观测整条路段, 也有非机动车辆直至路段结束或驶至交叉口也未返回非机动车道而成为删失数据), 所以研究观测会在某个位置截止. 而研究截止时, 观测的越线超车非机动车没有返回原非机动车道的事件即为删失数据, 记为 0; 将观测结束时已返回原非机动车道的样本数据(终止样本)记为 1.

假设 $S(t_2)$ 为车辆决定持续自由行驶的生存时间大于给定某时间 t 的概率, 即生存函数; $F(t_2)$ 为死亡函数, 则有

$$S(t_2) = 1 - F(t_2) = \int_t^\infty f(t) dt, \quad \forall t \geq 0 \quad (14)$$

式中: $f(t)$ 为其自由行驶持续生存时间的概率密度函数. 风险概率 $h(t_2)$ 即在此时间 t_2 时刻发生事件的概率, 即

$$h(t_2) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t_2 \leq T_2 \leq t_2 + \Delta t \mid T_2 \geq t)}{\Delta t} \quad (15)$$

式中: T_2 为生存时间从 0 到最大值的分布; Δt 为数据分析的时间间隔. 同时由于在非机动车的实际应用中, Δt 即为统计的非机动车轨迹点的间隔. $h(t_2)$ 在实际计算时, 一般采用下式:

$$h(t_2) = N_{\hat{t}_2} / N_{T_2} \quad (16)$$

式中: N_{T_2} 为在越线持续时长至 T_2 时刻仍然越线的非机动车数目; $N_{\hat{t}_2}$ 为在此 Δt 区间返回非机动车道的数目(结束事件). 由于存在未返回的删失数据, 故 N_{T_2} 需要分时段进行矫正, 矫正值 N_{r,T_2} 计算式如下:

$$N_{r,T_2} = N_{T_2} - 0.5 N_d \quad (17)$$

式中: N_d 为删失的越线非机动车数据. 在进行生存分析时, N_d 的比例一般不宜过高.

在生存分析中, 由于时间变量 t_2 一般不满足正态分布和方差齐性的要求(存在删失数据), 采用一般的线性回归方法无法准确分析生存时间与影响因素之间的关系. 在生存分析的应用中, Cox 风险比例回归模型^[14]不需要事先知道生存时间的分布, 通过分析多个危险因素对生存时间的影响, 即可以建立生存时间与危险因素之间的关系, 属于一种半参数

模型. 采用此种方法, 越线超车的持续生存时间风险模型 $h(t_2/X)$ 可定义为

$$h(t_2/X) = h_0(t_2) \exp\left(\sum_{i=1}^m \alpha_i X_i\right) \quad (18)$$

式中: $h_0(t_2)$ 为基础的风险方程; X_i 、 α_i 分别为影响生存时间的风险因素及参数; X 为总的因素; m 为影响因素的个数. 在某个独立因素影响下的生存时间风险为

$$h(t_2/X_i) = h_0(t_2) \exp(\alpha_i X_i) \quad (19)$$

本研究选择的影响因素包括越线超车瞬间的机动车道及非机动车道的其他非机动车辆位置及状态详细信息, 共计 7 个影响因素: X_1 超车车辆速度, X_2 被超车车辆速度, X_3 超车时的速度差, X_4 超车时前方影响范围内非机动车道内的车辆数, X_5 超车时前方影响范围内越线的非机动车辆数, X_6 当前虚拟车道的前车距离, X_7 当前虚拟车道前车速度.

在某种因素 X_i 下, 个体持续时间风险相对于基础风险比例大小 $R(t_2)$ 可定义为

$$R(t_2) = h(t_2, X)/h_0(t_2) \quad (20)$$

在此基础上, 车辆超车的生存时间 t_2 为

$$t_2 = S_0(t_2) \exp\left(\sum_{i=1}^m \alpha_i X_i\right) \quad (21)$$

式中: $S_0(t_2)$ 为基准生存概率, 即相关自变量在无因素影响时的非机动车越线持续时间概率, 其一般服从负指数分布.

1.5 其他模型

接下来在构建可视化仿真系统时, 建模还需要考虑非机动车辆的超车动机模型及间隙选择模型, 用以完善超车过程描述, 具体如下.

1.5.1 变道动机模型

建模时引入了现有研究较为成熟的变道动机模型及间隙接受模型, 其中变道动机模型的具体形式如下^[15]:

$$\{v_{i,t} \mid v_t < v_{i,t} < v_i\} \quad (22)$$

式中: v_t 为当前虚拟车道的前车速度. 即当前车速度小于当前车速, 并且当前车速小于期望速度时, 非机动车产生变道动机.

1.5.2 间隙选择模型

车辆的间隙选择模型采用 NGSIM (next generation of simulation) 的非线性可接受间隙模型^[16], 并采用实测数据进行标定. 同时在原有模型基础上, 模型中增加了车型对接受间隙的影响, 间隙接受的具体模型形式如下式:

$$G_{\lambda,i} = \exp[\gamma_{\lambda,1} + \gamma_{\lambda,2} \max(0, \Delta v_{\lambda,i}) + \gamma_{\lambda,3} \min(0, \Delta v_{\lambda,i}) + \gamma_{\lambda,4} v_{\lambda,i} + \gamma_{\lambda,5} T_{\lambda,i}],$$

$$\lambda = \text{lead 或 lag} \quad (23)$$

式中: $G_{\text{lead},i}$ 、 $G_{\text{lag},i}$ 分别为超车非机动车在虚拟车道超车及返回原车道时的可接受前、后方临界间隙; $\Delta v_{\text{lead},i}$ 为非机动车 i 与间隙前方车辆的速度差; $\Delta v_{\text{lag},i}$ 为间隙后方车辆与非机动车 i 的速度差; $v_{\text{lead},i}$ 及 $v_{\text{lag},i}$ 分别为接受间隙前、后的车辆速度; $T_{\text{lead},i}$ 、 $T_{\text{lag},i}$ 分别为间隙前、后方车辆类型; $\gamma_{\text{lead},1}$ 、 $\gamma_{\text{lead},2}$ 、 $\gamma_{\text{lead},3}$ 、 $\gamma_{\text{lead},4}$ 、 $\gamma_{\text{lead},5}$ 、 $\gamma_{\text{lag},1}$ 、 $\gamma_{\text{lag},2}$ 、 $\gamma_{\text{lag},3}$ 、 $\gamma_{\text{lag},4}$ 、 $\gamma_{\text{lag},5}$ 均为待标定参数.

2 数据采集与模型标定

2.1 数据采集基本信息

研究选择了上海市典型机非交互车道, 即曹杨路(武宁路至枫桥路段)100 m 的机非交互车道进行分析. 此路段机非车道为软隔离标线分隔, 非机动车道宽度为 2.8 m, 单个机动车道宽度为 3.5 m. 高峰期的越线超车行为频繁, 是研究非机动车越线超车行为较理想的路段. 本研究采集了晚高峰 2 h (16:30—18:30) 的数据进行分析, 前 1 h 数据作为标定数据, 后 1 h 作为验证数据. 分析前, 利用 George 软件^[17]提取了路段上所有机动车与非机动车的轨迹数据. 轨迹精度为 0.1 m, 时间颗粒度为 0.12 s, 数据精度可以应用于非机动车越线行为的特征分析. 轨迹提取视频画面如图 2 所示.

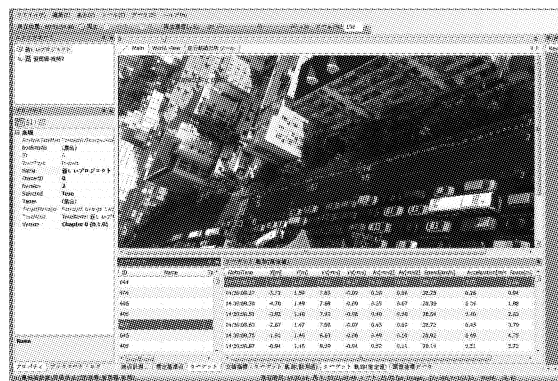


图 2 机非交互路段车辆轨迹提取画面

Fig.2 Screenshot of trajectory extraction software at mixed flow road section

2.2 非机动车越线超车的基本特征分析

在 2 h 的数据中, 非机动车通过共计 1 256 辆, 其中电动车占比为 83.60%. 非机动车发生越线超车现象共 312 次, 其中电动车占比为 100%, 没有自行车出现越线超车的现象. 312 辆越线超车非机动车中共计 252 个非机动车返回非机动车道, 占比为 80.77%; 其他 19.23% 的越线超车非机动车在观测

区间内持续占用机动车道,即删失数据。

在越线时间特征指标上,超车前的平均越线时间为 2.04 s,超车后的平均越线时间为 4.76 s。超车后的越线持续时间是超车前的 2.33 倍,超车前、后的越线时间体现出了较强的非对称性。

2.3 模型观测参数

在构建的越线超车模型中,部分参数为直接观测参数,统计后可直接应用于模型。统计的机动车、非机动车基本观测参数如表 1 所示。

表 1 基本参数统计表

Tab.1 Fundamental parameters

参数类型	均值	标准差
机动车期望速度/(m·s ⁻¹)	14.14	2.70
电动车期望速度/(m·s ⁻¹)	8.24	2.22
电动车期望加速度/(m·s ⁻²)	2.17	0.89
电动车期望减速度/(m·s ⁻²)	-1.57	0.69
自行车期望速度/(m·s ⁻¹)	6.21	2.01
自行车期望加速度/(m·s ⁻²)	1.75	0.63
自行车期望减速度/(m·s ⁻²)	-1.38	0.47
虚拟车道前方车辆数判断范围/m	20	—
非机动车跟车时距/s	1.67	0.42

2.4 模型参数标定

2.4.1 非机动车跟驰模型参数标定

由于机动车仅在机非交互路段执行基本的跟驰行为,无停车变道等驾驶行为,其模型参数对本研究影响较小,故仿真中仅需要设置其期望速度即可。研究重点关注非机动车的模型参数。本研究采用正交试验及遗传算法对非机动车运行的跟驰及变道模型参数进行标定,在跟驰模型中,以车辆在路段的运行总时间与仿真时间一致,对跟驰模型的式(8)、式(9)中 4 个参数 S_0 、 T_i 、 α 及 β 进行标定,车辆的期望加、减速度由表 1 的观测参数得出,标定的仿真步长为 0.125 s,标定时的目标函数 $Z(t)$ 为

$$Z(t) = \min \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{s,i} - t_i) \right] \quad (24)$$

式中: N 值为 158,即标定时的车辆数目; t_i 为实际采集 100 m 范围的车辆运动时间; $t_{s,i}$ 为仿真环境中的车辆运行时间。当迭代时的平均目标函数改变值小于 0.01% 时,迭代终止。最终跟驰模型的参数标定结

果如表 2 所示。

表 2 非机动车跟驰模型参数标定结果

Tab.2 Calibration parameters of car following model for non-motorized vehicles

参数名称	S_0	T_i	α	β
标定结果	0.53	1.54	3.12	1.87

2.4.2 非机动车变道模型参数

标定变道模型时,同样采用正交试验及遗传算法,本研究为便于计算,将超车时变道至机动车道的间隙及返回非机动车道的间隙统一标定,由于向机动车道变道时前、后方接受间隙车型会出现机动车,故两者的差异性通过车型 $T_{lead,i}$ 及 $T_{lag,i}$ 体现(非机动车取值为 0,机动车取值为 1),共标定 $\gamma_{lead,1}, \gamma_{lead,2}, \gamma_{lead,3}, \gamma_{lead,4}, \gamma_{lead,5}, \gamma_{lag,1}, \gamma_{lag,2}, \gamma_{lag,3}, \gamma_{lag,4}, \gamma_{lag,5}$ 10 个参数。标定时的目标函数如下式:

$$Z(G) = \min \left[\frac{1}{N_\lambda} \sum_{i=1}^{N_\lambda} (G_{\lambda,i,s} - G_{\lambda,i}) \right],$$

$\lambda = \text{lead 或 lag} \quad (25)$

式中: $G_{\lambda,i,s}$ 为不同参数下的前、后方间隙大小; $G_{\lambda,i}$ 为实际的前、后方间隙大小; N_λ 为实际采集的接受前后方间隙数目,标定的参数结果如表 3 所示。

表 3 非机动车变道模型的参数标定结果

Tab.3 Calibration parameters of lane changing model for non-motorized vehicles

参数名称	标定结果	参数名称	标定结果
$\gamma_{lead,1}$	0.28	$\gamma_{lag,1}$	0.31
$\gamma_{lead,2}$	0.07	$\gamma_{lag,2}$	0.08
$\gamma_{lead,3}$	0.11	$\gamma_{lag,3}$	0.10
$\gamma_{lead,4}$	0.04	$\gamma_{lag,4}$	0.06
$\gamma_{lead,5}$	0.11	$\gamma_{lag,5}$	0.13

2.4.3 危险函数的参数标定

在对生存函数的相关参数进行标定时,本文利用 SPSS 中 Forward LR 向前筛选的方法,对生存分析的参数进行估算。通过迭代,最终筛选出影响自由情况下的非机动车越线持续时间的两个因素分别为: X_1 超车车辆速度, X_5 超车时前方影响范围内越线的非机动车辆数。参数评估如表 4 所示。

表 4 危险函数参数估计结果

Tab.4 Estimation parameters for hazard-based analysis

影响因素	B	SE	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95.0% CI 于 Exp(B)	
							下界	上界
X_1	-0.026	0.011	5.954	1	0.015	0.974	0.954	0.995
X_5	-0.504	0.142	12.544	1	0.000	0.604	0.457	0.798

表 4 中, B 为危险函数式(19)的 α_i 的参数值, SE 为系数标准误差, Wald 为卡方值, df 为自由度,

Exp(B) 为此因素的相对危险度,最后一列为相对危险度 95% 置信区间的上下界。由表中结果可知,两个

因素的最大值 $Sig.$ 均小于 0.05, 表明两个因素均为越线的显著影响因素. B 均小于 0, 说明两个因素均对生存时间的危险程度具有负影响. 即超车车辆速度越快, 其在线外自由行驶的时间越长; 同时前方越线的非机动车辆数越多, 超车车辆自由行驶的时间越长, 表明非机动车具有一定的从众效应. 此特点在其他非机动车驾驶行为的研究中已经有所体现^[18]. 此因素对不受机动车影响下的越线超车影响最为显著.

同时本研究对不受参数影响下的生存概率进行了估算(速度按最低区间取值), 利用 MATLAB 工具箱, 采用指数函数拟合了不受以上两因素影响的基准生存概率, 具体公式如下:

$$S_0(t_2) = e^{-0.154t_2} \quad (26)$$

其中, 拟合参数 $R^2 = 0.723$. 则由式(21)及式(26), 即可计算出车辆的越线自由行驶时间.

3 TESS NG 仿真平台的系统构建与 VISSIM 仿真场景的搭建

3.1 TESS NG 仿真平台搭建

本研究将构建的上述系列模型应用于团队自主研发的微观仿真软件 TESS NG, 构建机非交互路段的非机动车越线超车模型, 仿真流程如图 3 所示.

3.2 TESS NG 软件中机非交互环境设置

在仿真设置中, 按照实际的数据设置机非交互路段环境. 在路段属性中, 选择设置长度为 100 m 的机非交互车道. 软件中的非机动车(含电动车及自行车)及机动车流量输入均按周期的绿灯相位时长为单位输入, 以保证车辆在一定时刻的到达密度, 从而有效产生越线行为. 非机动车的 IDM 跟驰模型及变道接受间隙模型按标定参数进行设置.

TESS NG 非机动车越线超车场景如图 4 所示. 场景为非机动车已超越线内车辆, 后受机动车影响正返回非机动车道.

3.3 VISSIM 仿真环境及参数设置

3.3.1 VISSIM 机非交互路段环境设置

VISSIM 是世界应用最为广泛的交通仿真软件, 其在混合交通流仿真中也得到一定的应用. 在 VISSIM 仿真软件中, 可分别设置非机动车道和机动车道作为机非交互路段. 非机动车辆在超车时可越过机非分隔线, 进行机非交互路段的仿真. 为与实际及 TESS NG 的场景保持一致, VISSIM 仿真中非机动车道宽度同样设为 2.4 m. 非机动车及机动车

道的驾驶行为设置为随意超车. 软件中的机动车仅对期望速度进行设置.

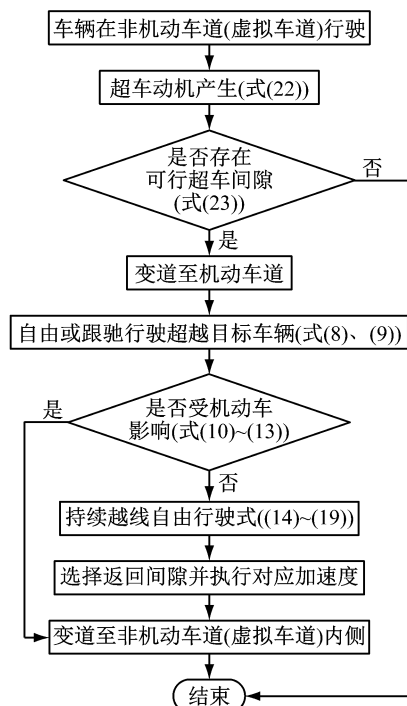


图 3 TESS NG 仿真系统的非机动车越线超车流程

Fig. 3 Process of cross-line overtaking behavior of non-motorized vehicle in TESS NG



图 4 TESS NG 机非交互路段非机动车越线场景

Fig. 4 Scene of over-line overtaking behavior of non-motorized vehicle in TESS NG

3.3.2 VISSIM 的跟驰及变道模型标定

非机动车的跟驰模型同样按式(24)采用遗传算法进行标定, 由于是城市道路, 跟驰模型采用 Wiedemann 74 模型. 需要标定的参数包括平均停车间距 a_x 、安全距离的附加参数 $b_{x,add}$ 、安全距离的倍数影响 $b_{x,mult}$ 共 3 个参数, 标定结果如表 5 所示.

表 5 VISSIM 非机动跟驰模型的参数标定结果

Tab. 5 Calibration parameters of car following model for non-motorized vehicles in VISSIM

参数名称	a_x	$b_{x,add}$	$b_{x,mult}$
标定结果	2.43	1.97	3.15

在 VISSIM 的变道模型中, 主要对影响变道的最重要参数即最大协调减速度进行设置, 此值为观测的统计均值, 为 $-2.61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

3.3.3 VISSIM 非机动车典型越线超车场景

VISSIM 软件中非机动车的越线超车场景如图 5 所示. 在 VISSIM 仿真系统中,越线的非机动车辆会持续占用机动车道,即使在后方机动车影响下,也不会主动返回非机动车道.

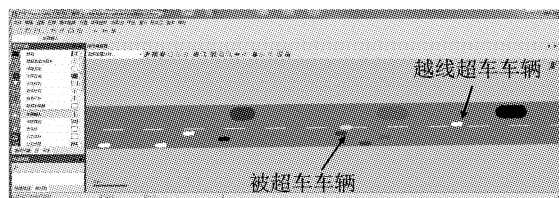


图 5 VISSIM 中机非交互路段越线场景

Fig.5 Scene of cross-line overtaking behavior of non-motorized vehicle in VISSIM

4 仿真结果分析

本研究将实地采集的 142 组验证数据分别与仿真软件 TESS NG、VISSIM 的输出结果进行比较. 比较指标包括越线超车次数、越线持续时间等微观指标,具体分析结果如下.

4.1 越线超车车辆及返回原车车辆数目

其中实测与仿真的越线超车非机动车数目,返回原车道非机动车道数目,持续占用机动车道的非机动车数目如表 6 所示.

表 6 越线超车及返回原车道的非机动车数目

Tab.6 Number of cross-line overtaking and returned non-motorized vehicles

数据源	越线超车非机动车数目	电动车占比/%	返回非机动车道数目	返回比例/%
实测数据	142	100	115	80.99
TESS NG	91	100	67	73.63
VISSIM	72	100	2	2.77

经仿真结果分析,TESS NG 及 VISSIM 的越线超车数目均远小于实际的越线超车数目. 主要原因包括:① 本研究侧重于对越线超车持续时间及间隙选择的比较,故本研究未对超车动机、超车时的横向距离等指标进行更细致的分析;② 在实际情况中,非机动车辆横向运行会具有更强的波动性,尤其在超车时,超车瞬间更倾向于与被超车车辆保持较大的横向间距(轻微越线即被计入越线超车). 而仿真中车辆超车过程的横向位置相对固定,一部分实际越线的超车车辆在仿真中不会体现出越线效果.

在返回原车道的比例上,TESS NG 与实测数据的比例更接近,百分比绝对误差为 7.36%. 而 VISSIM 的越线返回比例仅为 2.77%,与实际数据

差异巨大,其主要原因为 VISSIM 软件中,在机非交互车道,非机动车不会因后方机动车影响而返回原车道,也不会超车后主动返回原非机动车道,仅会在超车后在受前方车辆阻滞影响下,才会主动返回非机动车道,而在路段上,此种情况出现的概率较小,故导致车辆返回原车道的比例极低.

由于足够的越线超车次数样本是进行模型构建及特征分析的关键,本研究同时对模型应用的场景进行了分析. 通过对不同机动车、非机动车流量,异质非机动车流中电动车比例对越线超车的敏感性分析,结果表明:一般当非机动车流量高于 $1\,000\text{ 辆}\cdot\text{h}^{-1}$,机动车流量低于 $1\,600\text{ 辆}\cdot\text{h}^{-1}$,并且电动车比例在 0.3~0.9 区间时,非机动车越线超车频次一般高于 $50\text{ 次}\cdot\text{h}^{-1}$,此时模型具有较强的适用性.

4.2 车辆的越线超车时间生存概率

通过统计实际数据与 TESS NG、VISSIM 的车辆越线持续时间并添加完全数据与删失数据标签,按照式(14)~(17)计算生存概率,对比如图 6 所示.

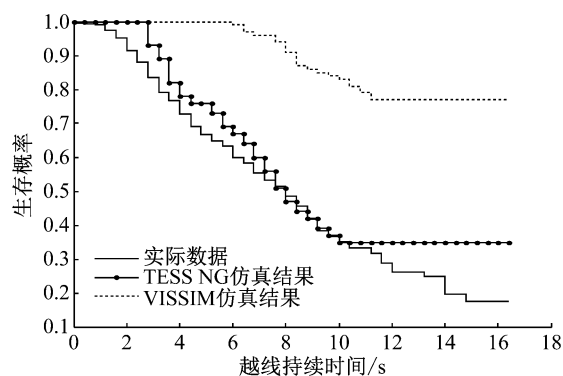


图 6 非机动车越线总持续时间生存概率

Fig.6 Survival probability of cross-line duration of non-motorized vehicles

在越线持续总时间的生存概率方面,具有以下特征:① 实际数据下降得较为平均,在每个区间均有分布,而 TESS NG 在 3~10 s 的区间下降得较为平均,VISSIM 在 6~11 s 下降得较为平均,这是由于在实际数据中,如 0~3 s,车辆有轻微的越线超车,即只在超越目标车辆的瞬间越线,存在分布与 0~3 s 持续时间的越线,而 TESS NG 及 VISSIM 仿真中,具有较为明确的横向位置划分,越线车辆往往在超越目标车辆前即已变道至越线位置,越线最短时间也需要 3 s 左右. ② 在删失生存概率的起点位置,实测数据为 14.8 s(生存概率为 0.17),TESS NG 为 10 s(生存概率为 0.35),VISSIM 数据为 11.2 s(生存概率为 0.77);TESS NG 在其删失终点的生存率绝对误差为 0.18,远低于 VISSIM 的 0.42. ③

在中位生存时间上,即生存概率为 0.5 的时刻,实测数据为 7.8 s,TESS NG 为 7.6 s,误差仅为 2.56%,而 VISSIM 由于无返回车辆,具有超车动机的非机动车进入路段前半段及开始越线,持续占用机动车道,其越线超车时间波动范围较小,70%以上均超过了 11.2 s,中位生存时间误差为 43.58%。④ 仿真模型的最大越线超车时间略小于实际数据的最大越线超车时间(14.8 s),这主要是由于车辆在自由行驶时会受到侧向机动车或其他因素影响,其自由状态下不一定会一直保持期望速度行驶,而仿真环境对侧向影响考虑较少,其仿真运行平均速度会略高于实际环境的平均期望速度。

4.3 越线超车前、后的时间对比

通过分析非机动车在越线开始至超越目标车辆的时间,越线后自由行驶的时间,返回原车道的的时间(含返回时执行加减速的时间),其各部分的平均持续时间对比如图 7 所示。

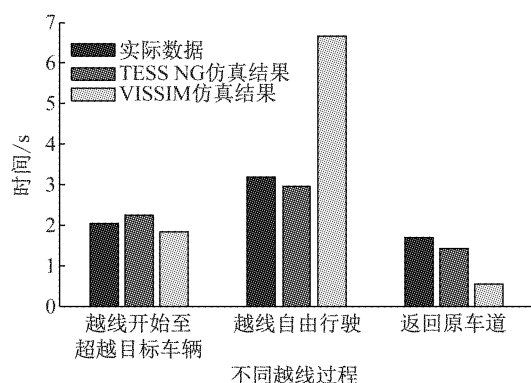


图 7 非机动车越线超车不同过程持续时间

Fig.7 Duration of different process of cross-line overtaking behavior of non-motorized vehicles

从越线开始至超越目标车辆的时间上,实际的平均时长为 2.04 s,TESS NG 的平均持续时长为 2.24 s,VISSIM 的平均持续时长为 1.83 s,相对误差百分比分别为 9.80%和 10.29%。从平均自由行驶时间上,实际时间为 3.18 s,TESS NG 数据为 2.95 s(相对误差 7.23%),VISSIM 数据为 6.67 s(相对误差为 109%)。其中返回原车道时间上,VISSIM 仅有 2 例自由返回的数据,并且其返回原车道持续时间极短。TESS NG 相比于 VISSIM 也可以更加精准地仿真出各部分的行程时间,其越线前、后的行程时间描述准确率为 90.12%,远高于 VISSIM 的 67.40%。

5 结论

本文针对机非交互路段非机动车越线超车行为

的研究缺陷,提出了基于生存分析的超车持续时间预测模型,完善了非机动车越线超车模型体系及实现框架,并将模型整合入自主研发的微观交通仿真系统 TESS NG 中。最后与实测数据及现有微观交通仿真 VISSIM 进行了对比。主要结论如下:

(1) 实际调查数据表明,在机非交互路段,非机动车的越线超车发生较为频繁,并且超车后的越线时间为超车前越线时间的 2.33 倍,超越目标车辆前、后的越线时间表现出了较强的非对称性。

(2) 在越线超车持续时间方面,TESS NG 的仿真准确度为 90.12%,高于 VISSIM 的 67.40%。

(3) 在越线超车的中位生存时间方面,TESS NG 仿真误差仅为 2.56%,优于 VISSIM 的 43.58%。

笔者未来进一步的工作是考虑机非交互路段的安全性建模,提高仿真模型对代理安全性指标模拟的有效性。

参考文献:

- [1] BAI L, LIU P, CHAN C Y, *et al.* Estimating level of service of mid-block bicycle lanes considering mixed traffic flow[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017, 101: 203.
- [2] 陈小鸿,岳李圣飒,杨奎. 混行非机动车道被超车自行车骑行安全评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 215. CHEN Xiaohong, YUE Lishengsa, YANG Kui. Safety evaluation of overtaken bicycle on a shared bicycle path[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(2): 215.
- [3] ZHAO F, GUO H, WANG W, *et al.* Modeling lateral interferences between motor vehicles and non-motor vehicles: a survival analysis based approach[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2015. DOI: 10.1016/j.trf.2015.07.005.
- [4] VAN DER HORST A R A, DE GOEDE M, DE HAIR-BUIJSSEN S, *et al.* Traffic conflicts on bicycle paths: a systematic observation of behaviour from video[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2014, 62: 358.
- [5] VASIC J, RUSKIN H J. Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2012, 391(8): 2720.
- [6] CHENG S, YAO D, ZHANG Y, *et al.* A CA model for intrusion conflicts simulation in vehicles-bicycles laminar traffic flow[C] // 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Beijing: IEEE, 2008: 633-638.
- [7] XIE D F, GAO Z Y, ZHAO X M. Combined cellular automaton model for mixed traffic flow with non-motorized vehicles[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2010, 21(12): 1443.

(下转第 1599 页)