

无信号交叉口直行电动自行车合流区避让模型研究

韦凌翔¹, 郭延永^{2,3}, 张俊杰¹, 程 陆¹, 庄 帅¹, 张成浩¹

- (1. 盐城工学院 材料科学与工程学院, 江苏 盐城 224051;
2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 21009;
3. 英属哥伦比亚大学 应用科学学院 土木工程系, 加拿大 温哥华 V6T1Z4)

摘要:无信号交叉口电动自行车合流区违规行为是交叉口电动自行车交通事故的关键成因之一。为减少无信号交叉口电动自行车交通事故,构建了基于元胞自动机的无信号交叉口电动自行车合流区避让模型,并借助 MATLAB 软件,采用固定变量法仿真研究合流区车辆避让比例对直行电动自行车交通流的影响。仿真结果表明:当直行电动自行车车流的平均密度小于 0.23 辆/m² 时,其速度变化平缓,此时如果左转电动自行车比例增多,则其速度降低明显;当直行电动自行车车流平均密度大于 0.23 辆/m² 时,直行电动自行车可利用间隙和自由行驶的空间越来越小,导致其跟随、加减速等情况越来越多,运行速度逐渐减小。

关键词:交通安全;无信号交叉口;电动自行车;元胞自动机

中图分类号:U491.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2018)03-0048-05

随着人们生活水平的不断提高,电动自行车正以其便利、灵巧、环保等特点成为越来越多中短距离出行者的主要选择^[1-3]。随着电动自行车保有量的增加,电动自行车抢行、侵占机动车行驶空间、占用机动车道行驶等降低了城市路网通行能力、诱发了大量的交通事故^[4-6]。在无信号交叉口,由于电动自行车车流分散性强、行车曲线不规则、无电动车左转导游线、与左转机动车近距离行驶等原因,电动自行车合流区违规行为成为交叉口电动自行车交通事故的关键成因之一。因此,开展无信号交叉口电动自行车合流区避让模型研究可为降低电动自行车交通事故提供一定的理论依据和数据支撑。

国内外对电动自行车的研究基本上是近十年才开始的。Cherry 等^[7]根据我国昆明和上海两大城市的电动自行车数据说明电动自行车车流遵循一定规律性;Inagaki 等^[8]通过分析某城区自行车的租赁数据,发现电动自行车出行提高了出行距离,且电动自行车的行驶速度受到斜坡的影响比

较小;马国忠等^[9]对电动自行车的安全特性进行了详细的研究,发现电动自行车的设计车速和质量是影响其安全特性的主要因素;石臣鹏^[10]对电动自行车的基本交通特性进行了详细的研究,发现速度和质量是导致电动自行车交通事故严重程度主要因素;韩宝睿等^[11]以交通调查为基本手段,深入研究电动自行车有关交通特性(包括车辆特性、速度特性、流量与密度关系等),提出以摄影法为基础的时空结合法计算电动车与自行车之间折算系数的方法;贾海亮^[12]选取成都市 10 个路段交叉口电动自行车的速度特征,通过回归分析法得出电动自行车不同速度下的最小安全视距。以上研究多从电动自行车基本特性和交通效率入手,缺乏考虑合流区相互干扰等因素的影响。我国大部分城市电动自行车合流区相互干扰广泛存在,研究无信号交叉口直行电动自行车合流区避让行为对减少交叉口电动自行车交通事故具有重要意义。

元胞自动机是 20 世纪 50 年代初由计算机之

收稿日期:2017-10-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71701046);江苏高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY2015A025)

作者简介:韦凌翔(1991—),男,山东曲阜人,助教,硕士,主要研究方向为非机动车交通数据建模与分析。

通信作者:郭延永(1985—),男,河北邢台人,博士,主要研究方向为交叉口交通安全分析。

父冯·诺依曼为了模拟生命系统所具有的自复制功能而提出来的^[13]。元胞自动机采用离散的空间布局和离散的时间间隔,将元胞分成有限种状态,元胞个体状态的演变仅与其当前状态及其某个局部邻域的状态有关^[14-15]。元胞这一特性可以借鉴到电动自行车合流区避让模型中,交叉口处每辆电动自行车可以看作是小的元胞,其前进、避让演变仅与其当前状态及其周边局部邻域其他车辆的状态有关。

本文在文献[2-3]电动自行车避让特性基础上,构建基于元胞自动机的无信号交叉口电动自行车合流区避让模型,借助 MATLAB 软件采用固定变量法仿真研究合流区避让比例对电动自行车直行交通流的影响,并与现场调查结果进行对比分析,验证模型的有效性。

1 直行电动自行车合流区避让行为分析

在城市的无信号交叉口,合流冲突、分流冲突和交叉冲突可以导致电动自行车之间的碰撞,进而发生交通事故。其中,电动自行车合流冲突是指电动自行车从不同方向驶来,合并到同一行驶路线上的情形。本文主要针对无信号交叉口直行电动自行车与转弯直行电动自行车的合流过程进行研究。

直行电动自行车合流过程可以分为合流感知、合流决策、合流执行3个过程。合流感知指直行电动自行车骑行者感知合流区交通信息,如与转弯电动自行车距离、转弯电动自行车车速等;合流决策指直行电动自行车骑行者依据自己的行驶经验对合流感知的结果进行决策;合流执行指直行电动自行车骑行者对合流决策的执行。如果合流决策是先行合流,那么直行电动自行车骑行者将执行加速行为先行驶过合流点,转弯电动自行车跟随直行电动自行车行驶;如果合流决策是让行合流,那么直行电动自行车骑行者将执行减速行为,让转向电动自行车先行通过合流点,直行电动自行车跟随转向电动自行车行驶。无信号交叉口直行电动自行车合流区决策行为如图1所示。

2 无信号交叉口直行电动自行车合流区避让模型

为了让模型尽量与实际相符,同时也为了研究方便,特进行如下假设:(1)电动自行车都具有相同的尺寸,不考虑特殊型号的电动自行车;(2)

非机动车道没有行人等干扰因素,骑行环境良好;(3)模型中道路状态与车辆的速度、方向、位置等随着时间变化而变化;(4) t 时刻电动自行车的位置、行驶方向与 $t+1$ 时刻电动自行车的速度共同决定了 $t+1$ 时刻电动自行车的位置。

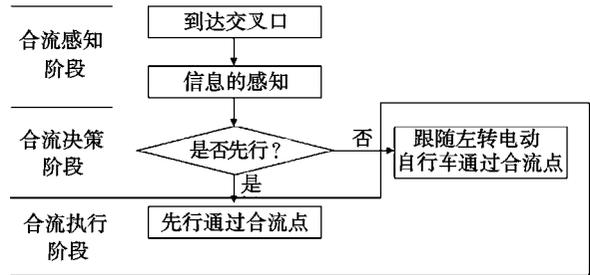


图1 无信号交叉口直行电动自行车合流区决策
Fig.1 Decision making of straight-running electric bicycle confluence zone at the unsignalized intersection

2.1 模型基本参数的定义

根据电动自行车的物理和行驶特性,对元胞自动机模型的各要素定义如下:

(1) 元胞尺寸的定义

根据对电动自行车物理特性的调查,电动自行车长度在 $1.7 \sim 2$ m,宽度在 $0.6 \sim 0.7$ m;电动三轮车比例较少,本文暂不考虑。因此单位元胞长度定义为 2 m,宽为 1 m,电动自行车的元胞尺寸为 1 个单位元胞大小。

(2) 元胞状态

依据对电动自行车速度的调查,正常行驶的电动自行车速度多集中在 $3 \sim 5.5$ m/s(占总数的 79.5%),最大速度为 5.94 m/s,即 3 cell/s;同时考虑电动自行车骑行者的谨慎心理,在到达无信号交叉口前大部分直行电动自行车都会选择减速行驶。据此将无信号交叉口直行电动自行车的速度最大值设置为 2 cell/s。

(3) 元胞空间

根据《城市道路交通规划设计规范(GB50220—95)》^[16]和《城市道路工程设计规范(CJJ37—2012)》^[17],自行车道路单条车行道宽度宜为 1 m,如果电动自行车参照自行车道路规定,结合上述规范,为体现不同位置情况下无信号交叉口直行电动自行车的行驶行为,设置 3 条非机动车道,每条车道宽度定义为 1 m。在信号的放行下由于机动车干扰较小,因此不考虑机动车道的设置,只设置 3 条非机动车道,如图2所示。

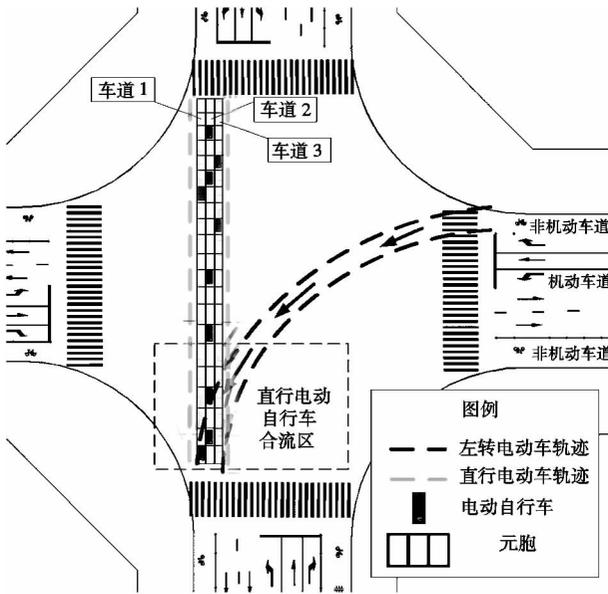


图 2 无信号交叉口直行电动自行车元胞自动机模型示意图

Fig. 2 The schematic diagram of cellular automaton model of straight-running electric bicycle confluence zone at the unsignalized intersection

2.2 直行电动自行车换道避让规则

电动自行车骑行者产生换道行为一般需要满足两个条件:一个是需要有足够的安全换道空间,第二就是前方车辆车速过慢等原因阻碍车辆的正常行驶。根据无信号交叉口直行电动自行车合流区避让决策行为分析,不同决策行为下的非机动车换道避让规则如下:

(1) 在满足避让行为的前提下,正常行驶的直行电动自行车更倾向于在远离合流区外侧的车道上骑行,即当正常行驶的直行电动自行车在车道 2 上时,进入合流区前一般优先考虑换道至车道 1;当正常行驶的直行电动自行车在车道 3 上时,进入合流区前一般会优先考虑换道至车道 2。

(2) 直行电动自行车和左转电动自行车合流相遇时,一般是正常行驶的直行电动自行车主动向外侧避让,即直行电动自行车由车道 3 避让至车道 2,由车道 2 避让至车道 1。

2.2.1 直行电动自行车变量定义

元胞自动机模型中变量定义如下: $v_n(t)$ 为 t 时刻直行电动自行车 n 的速度, m/s ; $v_n^{df}(t)$ 为 t 时刻直行电动自行车 n 所在车道上前方电动自行车的速度, m/s ; $l_n^f(t)$ 为 t 时刻直行电动自行车 n 与其所在车道上前方直行电动自行车的距离, m ;

lane 为车道数,取值为 $1 \sim 3$; $C_n^f(t) = 0$ 或 1 , $C_n^f(t) = 0$ 时表示 t 时刻直行电动自行车 n 正前方车为左转电动自行车, $C_n^f(t) = 1$ 时表示 t 时刻直行电动自行车 n 正前方车为正常行驶的直行电动自行车; $s_n^{xy}(0)$ 为左转电动自行车与左转电动自行车之间的最小纵向安全避让距离, m 。

2.2.2 直行电动自行车换道条件

综合考虑无信号交叉口直行电动自行车合流区避让决策行为,直行电动自行车合流区换道条件总结如下:(1)前方同向车辆的距离过小,无法加速行驶;(2)前方车辆为左转电动自行车,相距的距离小于最小横向安全换道距离;(3)直行电动自行车为保持平衡,摆幅过大进行换道(小概率)。

2.2.3 直行电动自行车换道规则

直行电动自行车换道规则如下:车道 3 上的直行电动自行车满足上面合流区换道条件(1)~(3)中的任何一个,即以 P_{change} 的概率向车道 2 换道;车道 2 上的直行电动自行车满足上面换道条件(1)~(3)中的任何一个,即以 P_{change} 的概率向车道 1 换道。

2.3 直行电动自行车前进规则

(1) 加速规则

$$\text{if } (C_n^f(t) = 0) \text{ and } (l_n^f(t) > S_n^f(0)) \\ \text{then } v_n(t + 1) = \min(v_n(t) + 1, v_n \text{ max})$$

(2) 减速规则

$$\text{if } (C_n^f(t) = 1) \text{ or } (l_n^f(t) < S_n^f(0)) \\ \text{then } v_n(t + 1) = \max(0, v_n(t) - 1)$$

(3) 随机慢化规则

$$\text{if } \text{rand}() < P \\ \text{then } v_n(t + 1) = \max(0, v_n(t + 1) - 1)$$

(4) 位置更新规则

$$x_n(t + 1) = x_n(t) + v_n(t + 1)$$

式中: $v_n(t + 1)$ 为 $t + 1$ 时刻直行电动自行车 n 的速度, m/s ; $x_n(t)$ 和 $x_n(t + 1)$ 分别为直行电动自行车 n 在 t 和 $t + 1$ 时刻的位置, m ; $v_{n \text{ max}}$ 为直行电动自行车 n 的最大速度, m/s ; $S_n^f(0)$ 为直行电动自行车的最小横向安全换道距离, m 。

3 仿真流程与仿真结果

3.1 仿真流程

借助 MATLAB 仿真软件,对无信号交叉口直行电动自行车合流区避让行为,按照直行电动自行车换道避让规则、前进规则等演化规则进行不

断的迭代更新,采用固定变量法仿真研究左转电动自行车的比例对非机动车交通流的影响,每次仿真运行4 000 s。为了保证仿真结果是仿真系统运行的正常情况,选取最后1 000 s的仿真数据进行分析。其中固定的仿真参数设置为:随机慢化概率 P 为0.2,换道概率 P_{change} 为0.8。仿真流程如图3所示。

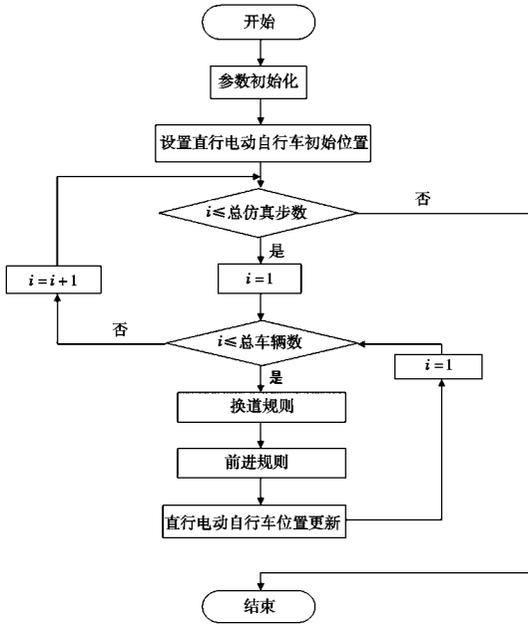


图3 仿真流程图

Fig.3 Simulation flow chat

3.2 仿真结果分析

根据仿真实验数据得到不同左转电动车比例下的直行电动自行车速度-密度关系如图4所示。

对图4进行分析,可以得出以下结论:

(1) 整体上看,直行电动自行车的速度与密度呈现负相关。当平均密度小于0.23 辆/m²时,直行电动自行车的速度变化平缓;当平均密度大于0.23 辆/m²时,其速度降到了6 m/s以下。原因是:随着电动车密度的增大,直行电动自行车间的可利用间隙和自由行驶的空间越来越小,直行

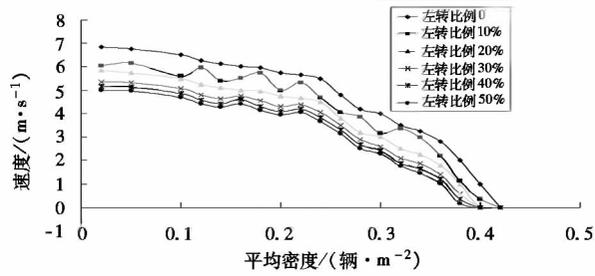


图4 不同左转电动车比例下的直行电动自行车速度-密度图

Fig.4 The speed-density map of straight-running electric bicycle under the proportion of different left turn electric vehicles

电动自行车跟随、加减速等情况越来越多,运行速度也逐渐减小。

(2) 从左转电动自行车比例变化看,随着左转电动自行车比例的增加,直行电动自行车速度也在逐渐降低,直行电动自行车平均密度为0.2 辆/m²时,随着左转电动自行车比例由0 增长至50%,直行电动自行车的速度降低32%。原因是:左转电动自行车的增加,导致其相向避让的情况逐渐增加,为了避免产生两车相撞,直行电动自行车的速度也相应降低。

4 结论

(1) 当直行电动自行车车流的平均密度小于0.23 辆/m²时,其速度变化平缓;但当其平均密度大于0.23 辆/m²时,直行电动自行车间可利用间隙和自由行驶的空间越来越小,直行电动自行车跟随、加减速等情况越来越多,运行速度也逐渐减小。

(2) 直行电动自行车车流平均密度为0.2 辆/m²时,随着左转电动自行车比例由0 增长至50%,直行电动自行车的速度降低32%。左转电动自行车的增加,导致其相向避让的情况逐渐增加,为了避免产生两车相撞,直行电动自行车速度也相应降低。

参考文献:

[1] TAI I, CIUBOTARU B, MUNTEAN G M. Vehicular-communications-based speed advisory system for electric bicycles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016,65(6):4129-4143.

[2] 韦凌翔,王永岗,钟栋青,等. 电动自行车路段横向驾驶行为特性研究[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),2016,29(4):11-15.

[3] 韦凌翔,王永岗,李文文,等. 城市道路交叉口电动自行车左转安全特性分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),

- 2017,30(2):11-15.
- [4] LIM D K, CHO Y S, RO J S, et al. Optimal design of an axial flux permanent magnet synchronous motor for the electric bicycle[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016,52(3):1-4.
- [5] YAO L, WU C X. Traffic safety for electric bike riders in China attitudes, risk perception, and aberrant riding behaviors [J]. Transportation Research Record, 2012,2314:49-56.
- [6] DOZZA M, FERNANDEZ A. Understanding bicycle dynamics and cyclist behavior from naturalistic field data (november 2012)[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014,15(1):376-384.
- [7] CHERRY C R, WEINERT J X, YANG X M. Comparative environmental impacts of electric bikes in China[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2009,14(5),281-290.
- [8] INAGAKI T, MIMURA Y, ANDO R. An analysis on excursion characteristics of electric assist bicycles by travel behavioral comparison based on trajectory data[C]//2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2012:433-437.
- [9] 马国忠,明士军,吴海涛. 电动自行车安全特性分析[J]. 中国安全科学学报,2006,16(4):48-52.
- [10] 石巨鹏. 电动自行车交通现状分析及对策研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2007.
- [11] 韩宝睿,马健霄,仲小飞. 电动自行车的交通特性研究[J]. 森林工程,2008,24(6):29-32.
- [12] 贾海亮. 电动自行车交通特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [13] KARI J, TAATI S. Statistical Mechanics of Surjective Cellular Automata[J]. Journal of Statistical Physics, 2015,160(5):1198-1243.
- [14] LI X C, YU L, SOHL T, et al. A cellular automata downscaling based 1 km global land use datasets (2010-2100)[J]. Science Bulletin, 2016,61(21):1651-1661.
- [15] BARRIO-PARRA F, RODRÍGUEZ-SANTALLA I. Cellular automata to understand the behaviour of beach-dune systems: Application to El Fangar Spit active dune system (Ebro delta, Spain)[J]. Computers & Geosciences, 2016,93:55-62.
- [16] 中华人民共和国建设部. 城市道路交通规划设计规范[M]. 北京:中国计划出版社,1995.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路工程设计规范[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

Research on Avoidance Model of Straight-running Electric Bicycle Confluence Zone at the Unsignalized Intersection

WEI Lingxiang¹, GUO Yanyong^{2,3}, ZHANG Junjie¹, CHENG Lu¹, ZHUANG Shuai¹, ZHANG Chenghao¹

(1. School of Material Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China;
2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 21009, China;
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Applied Science, University of British Columbia,
Vancouver, BC, V6T1Z4, Canada)

Abstract: The illegal behavior of the electric bicycle confluence zone at the unsignalized intersection is one of the key causes of the electric bicycle traffic accident at the intersection. In order to reduce the traffic accidents of electric bicycle at the unsignalized intersection, a cellular automaton based avoidance model of the electric bicycle confluence zone at the unsignalized intersection is constructed. With the aid of MATLAB software, the fixed variable method is used to simulate the impact of confluence zone avoidance ratio on the straight-running electric bicycle traffic flow. The simulation results show that when the average density of the straight-running electric bicycle flow is less than 0.23 vehicles per square meter, its speed changes gently. At this time, if the proportion of left-turn electric bicycles increases, the speed will decrease significantly. When the average density of the straight-running electric bicycle flow is more than 0.23 vehicles per square meter, the space that can be used for clearance and free driving among the straight-running electric bicycles is getting smaller and smaller. It leads to more and more cases of following, acceleration and deceleration, and the running speed is decreasing gradually.

Keywords: traffic safety; unsignalized intersection; electric bicycle; cellular automata

(责任编辑:李华云)