

中文引用格式:李岩,邵进,刘林建,等.考虑异质交通流冲突的非机动车道宽度设计[J].中国安全科学学报,2024,34(10):80-87.
英文引用格式:LI Yan, SHAO Jin, LIU Linjian, et al. A methodology for non-motorized lane design considering heterogeneous traffic conflicts[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(10): 80-87.

考虑异质交通流冲突的非机动车道宽度设计*

李岩¹教授,邵进¹,刘林建²,梁淑娟¹,汪帆^{1,3}高级工程师

(1 长安大学 运输工程学院,陕西 西安 710064;2 常州市规划设计院,江苏 常州 213000;
3 中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710075)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.10.1652

【摘要】为降低超车过程中异质交通流间的冲突,在传统非机动车道宽度设计方法基础上,提出一种考虑异质交通流避让行为的设计方法。首先,采用减速群体占比和踏频值分析车辆的受干扰程度;其次,通过建立车-车作用力模型计算不同类型车辆间的作用力,拟合作用力与避让间距的关系求解安全避让距离,可得推荐非机动车道宽度为传统车道宽度及安全避让距离之和;然后,建立安全评价模型,评价不同宽度非机动车道的安全性,以验证该设计方法的合理性;最后,实例分析西安市4个路段非机动车道的骑行样本。结果表明:2车混行的非机动车道中,减速群体占比为传统非机动车道的0.93倍,骑行踏频值提高0.07圈/s,道路安全值是传统非机动车道的1.07倍,车道内的干扰更小,骑行者更为安全。

【关键词】异质交通流;非机动车道;宽度设计;车-车作用力;踏频值;安全避让距离

A methodology for non-motorized lane design considering heterogeneous traffic conflicts

LI Yan¹, SHAO Jin¹, LIU Linjian², LIANG Shujuan¹, WANG Fan^{1,3}

(1 School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;
2 Changzhou City Planning and Design Institute, Changzhou Jiangsu 213000, China;
3 First Highway Consultants Co., Ltd., China Communications Construction Company,
Xi'an Shaanxi 710075, China)

Abstract: In order to reduce conflicts between heterogeneous traffic flows during overtaking, a non-motorized lane width design method that considers avoidance maneuver in heterogeneous traffic was proposed. This method represents an improvement over the traditional design approach. Firstly, the conflict levels of non-motorized vehicles were analyzed through the deceleration group proportions and pedaling cadence. Secondly, a vehicle-to-vehicle force model was established to calculate the forces between different types of vehicles. The additional safety gap was determined based on the relationship between these forces and lateral width. The recommended non-motorized lane width was the sum of the traditional lane width and the additional safety gap. Then, the rationality of the proposed design method was evaluated based on the safety levels of non-motorized lanes with different widths, which was obtained from the safety evaluation model developed in this research. Finally, data from four non-motorized lanes in Xi'an city were analyzed as case studies. The research results show that the deceleration group proportion

is 0.93 times, pedaling cadence increases by 0.07 revolutions per second, and the road safety value is 1.07 times compared to traditional non-motorized lanes in non-motorized lanes accommodating heterogeneous traffic. These findings demonstrate that lanes meeting the design width have lower conflicts and greater safety.

Keywords: heterogeneous traffic-flow; non-motorized lane; width design; vehicle-vehicle force; pedaling cadence; additional safety gap

0 引言

随着低碳交通和共享交通的兴起,非机动车的出行需求持续增加。同时,由于电动车行业的飞速崛起,电动车使用者越来越多。因此,非机动车道常呈现出自行车、电动车混合行驶的情况,形成异质交通流^[1]。电动车的骑行速度接近自行车的 2 倍^[2],车辆混行时,常出现电动车快速超越自行车的情况,给自行车骑行者带来干扰^[3]。此时,骑行者会产生避让行为,若避让空间不够,则诱发事故的概率很高。因此,非机动车道宽度的设计应考虑到超车冲突时车辆所需的避让宽度^[4]。而传统的非机动车道宽度是由基于自行车在无干扰状态下所需的必要行驶空间^[5]确定的,不能满足异质交通流避让的需要。所以亟需提出考虑异质交通流避让行为的非机动车道设计方法,以保证骑行者安全。

存在异质交通流的非机动车道可从流量和安全 2 个角度进行优化设计。基于流量的方法通过车辆换算系数将混合车流换算成单一车流^[6],并依据自行车流量反推车道宽度^[7];基于安全的方法探究冲突时车辆间的相互作用机制,评估车辆在避让过程中受到的干扰程度,得到干扰最低时的道路宽度值^[8]。研究非机动车相互作用的理论模型主要包括元胞自动机模型^[9]和社会力模型^[10]。元胞自动机模型离散车辆的纵横向运动,计算效率高^[11];社会力模型通过分析排斥力和吸引力,描述车辆间的相互作用^[12-13]。基于安全的方法相比于基于流量的方法能更清晰地反映车辆间相互作用过程,但对异质交通流关注不足。因此,需考虑异质交通流的特性,从安全角度设计非机动车道。由于元胞尺寸和仿真步长的限制,元胞自动机模型在捕捉不同类型骑车者行为差异时存在局限性^[14];社会力模型能更全面地描述异质交通流间的相互作用^[15-16],但传统的社会力模型主要针对行人团体,应建立更能反映非机动车特性的作用力模型。骑行者的受干扰程度主要通过骑行者的横向位移、速度、加速度等时域指标评估^[17]。但避让过程中,骑行轨迹持续变化且

时域指标变化不明显,而频域分析可将时域数据转化成频域信号,从而更好地从微观层面体现车道内的干扰严重程度。

鉴于此,笔者拟在传统车道设计基础上增加考虑冲突时异质交通流所需的安全避让距离,从而优化非机动车道宽度,提高骑行安全性。通过建立车-车作用力模型,求解不同车辆类型间安全避让距离,并通过频域数据评估骑行者的受干扰程度,以期验证该方法的合理性。

1 考虑冲突的非机动车道设计方法

1.1 非机动车道设计思路

非机动车的骑行状态可分为自由骑行、并列骑行、超车骑行。当车辆超车时,车辆间会发生避让,避让行为如图 1 所示,这将导致超车骑行比其他骑行状态需要更多的横向空间以满足避让需求。同时,由于车辆超车时的轨迹持续变化,在超越瞬间,即 2 车并排时,所需的宽度最大,为最不利情景,如果该时刻车辆间的横向距离足够,车辆可安全超车,在其他骑行状态下也可安全行驶。由于城市中非机动车道宽度有限,多数车道宽度仅满足 2 车通行,且拥堵通常发生在交叉口处,非机动车道路段中拥堵情况较少,多是 2 车之间的避让。因此,主要针对 2 车超车时的最不利情景优化设计非机动车道,满足非机动车避让需求且避免过多占用道路资源。

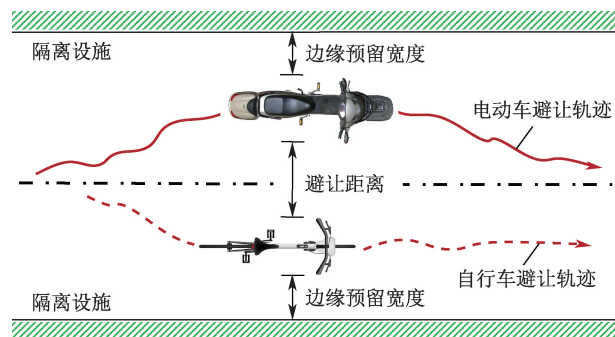


图 1 超车时非机动车的避让轨迹

Fig. 1 Trajectories for non-motorized vehicle avoidance during overtaking

传统非机动车道设计方法中满足2辆自行车并行时的宽度设计为2.5 m^[5]。通过分析车辆超车时的避让特性,判断出传统非机动车道是否满足车辆避让的需要。频域分析法可对自行车动力学参数进行频域分解,根据其自行车齿轮转动变化频率获取骑行者踏频值。对比骑行者在避让骑行与自由骑行时的踏频值,反映骑行者的受干扰严重程度,若骑行者受到严重干扰,则需要对其进行优化设计。

车道内部发生严重冲突时,则说明车辆间的横向间距不足,应考虑车辆间的安全避让距离。避让距离的产生主要由车辆间的作用力引起,建立车-车作用力模型可分析力与避让距离的关系,求解安全避让距离。传统设计中通常选用0.75 m作为机动车与非机动车隔离设施(简称机非隔离设施)边缘预留宽度的实际应用值,该宽度可通过统计分析不同隔离设施下的骑行样本数据改进。85%分位值相较于平均数更能反映出大多数样本的骑行状况。因此,可将其作为不同隔离设施下的机非隔离设施边缘预留宽度值。

为验证宽度设计方法的合理性,构建冲突环境下非机动车道安全评价模型,判断优化后车道的安全性。骑行者受到的干扰程度越大,安全性越低。可根据不同避让状态下的踏频值精确量化非机动车道的安全系数,以评估不同宽度车道的安全性。

综上所述,非机动车道宽度设计思路如图2所示。

1.2 避让行为特性的频域分析方法

频域分析法将时域信号通过傅里叶变换分解成频域信号,观察信号在不同频率上的表现,可揭示时域分析中难以察觉的新特征。对相应特征变量进行物理解释,能更全面地揭示事物的运行规律。

当信号的功率频谱密度和一个系数相乘会得到每单位频率对应的能量值,为该信号的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD),即单位频带内的信号功率值。信号功率一般用离散傅里叶变换得到的幅值平方度量。在分析避让影响时段内的加速度频谱过程中,加速度信号 $f(t)$ 在时间段 $t \in (-T/2, T/2)$ 内(T 为时间窗长度)用 $f_T(t)$ 表示,则 $f_T(t)$ 的傅里叶变换为 $F_T(\omega)$,此时,加速度信号的功率为 $|F_T(\omega)|^2$,其功率谱密度函数 $P(\omega)$ 见下式:

$$P(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|F_T(\omega)|^2}{2\pi T} \quad (1)$$

加速度功率谱密度函数反映了功率与频率的关

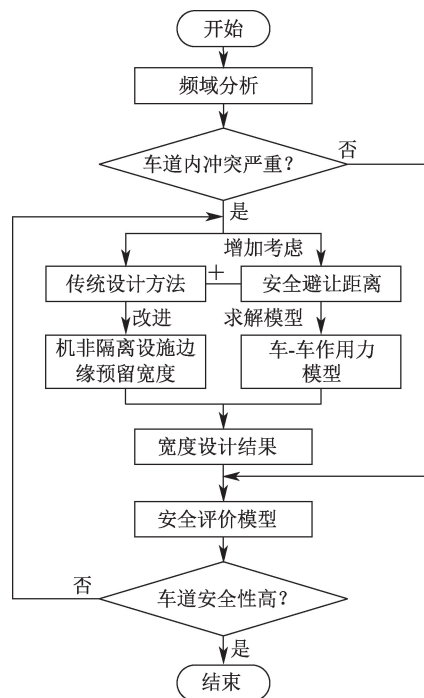


图2 非机动车道设计思路

Fig. 2 Framework of non-motorized lane design

系,最大功率对应的频率值即为自行车骑行者加速度的最频繁变换频率值 η_{\max} 。假设自行车前、后齿轮的齿数分别为 a 和 b ,自行车的加速由后轮驱动,所以后齿轮单位时间内加速次数与自行车的单位时间的加速次数相同,即 η_{\max} ,对应前齿轮单位时间内加速次数可由下式计算。假设正常情况下脚踏板转动一圈,即前齿轮转动一圈平均需要加速 δ 次,则单位时间内脚踏板转动的圈数,即踏频值,可由下式计算:

$$s = \eta_{\max} \cdot \frac{b}{a} \quad (2)$$

$$Q = \frac{s}{\delta} \quad (3)$$

式中: s 为自行车前齿轮单位时间内加速的次数; Q 为踏频值,r/s。

识别出避让过程的踏频值后,对比自由骑行群体的踏频变化,可分析骑行者在冲突时的避让行为,判断骑行者的受干扰程度。

1.3 考虑冲突的非机动车道设计

非机动车道设计时需考虑最不利情形,即超车时的并行瞬间。因此,计算获得车辆并行瞬间所需的道路宽度,将其作为非机动车道的设计宽度。为便于计算车道断面宽度,引入虚拟车道概念^[4]。假设非机动车道中有 x 条常规自行车道, y 条电动自行车道($x+y=2$),冲突环境下非机动车道断面的设计

可转化为确定如图 3 所示的虚拟车道宽度、安全避让距离以及隔离设施边缘预留宽度值。

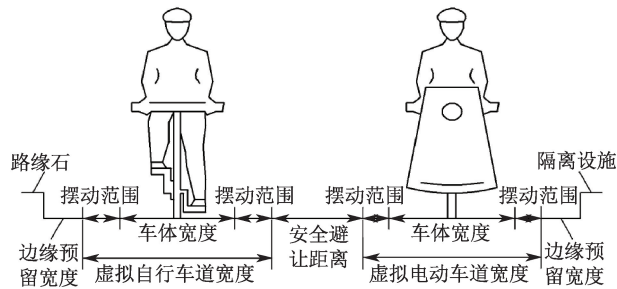


图 3 非机动车道设计断面

Fig. 3 Non-motorized lane design cross section diagram

非机动车道总宽度由下式计算:

$$w = d_1 \times x + d_2 \times y + g_i \times (x + y - 1) + h_j + z \quad (4)$$

式中: w 为冲突环境下的非机动车道设计宽度, m; d_1 、 d_2 分别为常规自行车和电动自行车的车体宽度与摆动范围, m; g_i 为车辆之间的安全避让宽度, m, $i = 1, 2, 3$, 分别表示常规-常规自行车、常规-电动自行车、电动-电动自行车; h_j 为机非隔离设施边缘预留宽度值, m, $j = 1, 2, 3$, 分别表示划线、护栏和绿化带隔离; z 为路缘石边缘预留宽度, m。

车体宽度和摆动范围的取值参照文献[5], 常规自行车的车体宽度为 0.6 m, 摆动范围左右两侧取 0.2 m, 电动自行车车体宽度为 0.68 m, 摆动范围比传统自行车偏小, 在 0.15 m 以内, 因此, d_1 、 d_2 分别取 1.0 和 0.98 m; z 通常取 0.25 m^[18]。

建立车-车作用力模型计算安全避让宽度。车辆间的作用力包括心理力和物理力, 由于不涉及车辆间的碰撞, 仅考虑心理力的作用。传统社会力模型主要针对行人, 与非机动车属性并不一致, 基于万有引力模型的思想对骑行者的心理力建模, 当骑行者距离越远时, 作用力越小; 心理感知越危险时, 作用力越大。但由于人的感知复杂多变, 较难直接量化, 因此, 采用排斥力作用参数修正人车质量表征心理感知。不同类型车辆间的车-车作用力 V_α^α 、 V_α^β 、 V_β^β 计算见下式:

$$V_\alpha^\alpha = k_{\alpha\alpha} \frac{m_\alpha \cdot m_\alpha}{D_{\alpha\alpha}^2} \mathbf{n}_{\alpha\alpha} \quad (5)$$

$$V_\alpha^\beta = k_{\alpha\beta} \frac{m_\alpha \cdot m_\beta}{D_{\alpha\beta}^2} \mathbf{n}_{\alpha\beta} \quad (6)$$

$$V_\beta^\beta = k_{\beta\beta} \frac{m_\beta \cdot m_\beta}{D_{\beta\beta}^2} \mathbf{n}_{\beta\beta} \quad (7)$$

式中: α 为常规自行车; β 为电动自行车; $k_{\alpha\alpha}$ 、 $k_{\alpha\beta}$ 、 $k_{\beta\beta}$

为不同类型车辆间的排斥作用力参数; m_α 和 m_β 为人车质量, kg; $D_{\alpha\alpha}$ 、 $D_{\alpha\beta}$ 、 $D_{\beta\beta}$ 为不同类型车辆间的距离, m; $\mathbf{n}_{\alpha\alpha}$ 、 $\mathbf{n}_{\alpha\beta}$ 、 $\mathbf{n}_{\beta\beta}$ 为单位方向向量, 表示作用力的方向。

需要标定的参数为 m_α 、 m_β 、 $k_{\alpha\alpha}$ 、 $k_{\alpha\beta}$ 、 $k_{\beta\beta}$, 通过规范以及实地测量数据标定 m_α 、 m_β , 利用遗传算法标定排斥作用力参数^[19]。

拟合车-车作用力和避让距离, 得到避让距离与作用力的表达式, 将所有骑行者间的平均作用力带入表达式, 得到的避让距离即为安全避让距离。

1.4 安全评价模型

冲突环境下的非机动车道安全评价指标可通过骑行者在该车道内避让时的受干扰程度表征。骑行者的踏频变化幅度反映了避让过程中的受干扰程度, 其值越大表示骑行者作出的加速或减速避让反应越明显, 采取的避让行为越紧急, 骑行状态越不稳定, 骑行安全性越低。不同避让行为的特性存在差异, 采取加速、减速、匀速避让的 3 类群体, 踏频变化幅度不同, 故需要在避让行为分类基础上进行非机动车道的安全评价。

踏频的变化幅度与骑行安全性成反比关系, 车道中所有骑行者的踏频变化幅度总和越小, 说明该车道的安全性越高。因此, 以 3 类避让群体踏频变化幅度之和的倒数为指标, 构建安全评价模型。踏频的变化幅度 q_r 可由下式计算, 由此建立安全评价模型。

$$q_r = Q_{85}^r - Q_{15}^r \quad (8)$$

$$M = \frac{1}{\sum_{r=1}^3 (\lambda_r \cdot q_r)} \quad (9)$$

式中: Q_{85}^r 与 Q_{15}^r 分别为避让群体踏频值的 85% 分位数和 15% 分位数, 即有效数据的上限与下限; $r = 1, 2, 3$, 分别为加速、减速、匀速避让群体; M 为道路安全值; λ_r 与 q_r 分别为 3 类避让群体的占比和踏频变化幅度。

2 非机动车骑行样本的数据采集

调查地点的设置应遵循如下规则: 非机动车道宽度应覆盖常见的设计, 便于研究不同宽度下非机动车运行特性; 隔离设施应包括标线、护栏、绿化带等; 以基本路段的非机动车道为主, 远离交叉口、建筑出入口和公交站; 道路整平, 没有坡度。结合上述原则, 选取西安市的 4 个路段如图 4 所示。

调查人员记录非机动车道的宽度及周边静态设施情况, 并在非机动车道上方架设摄像拍摄设备, 连

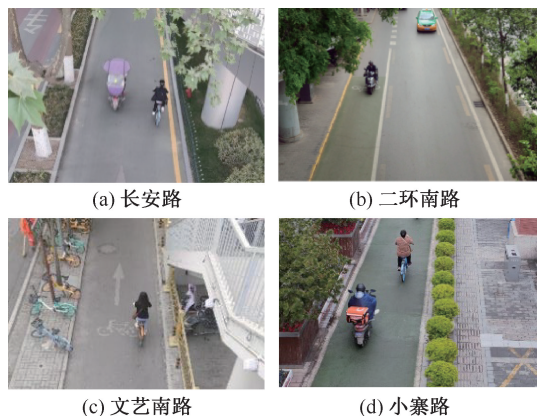


图4 调查地点

Fig. 4 Selected data collection road segment

表1 有效样本特性

Table 1 Characteristics of valid sample data set

路段名	宽度/m	机非隔离形式	流率/ (辆·h ⁻¹)	类型	采集样本 数/个	速度平均值/ (m·s ⁻¹)	加速度绝对平均 值/(m·s ⁻²)
长安路	3.2	绿化带隔离	982	自由骑行	120	3.26	0.375
				超车干扰	582	2.42	0.329
二环南路	2.8	划线隔离	942	自由骑行	120	3.23	0.371
				超车干扰	512	2.35	0.325
文艺南路	2.5	绿化带隔离	771	自由骑行	120	3.22	0.368
				超车干扰	455	2.31	0.322
小寨路	2.0	绿化带隔离 与护栏隔离	725	自由骑行	120	3.16	0.360
				超车干扰	386	2.26	0.318

3 非机动车道宽度设计

3.1 避让行为分析

不同道路中骑行者的踏频变化如图5所示。冲突时加速群体的踏频变化范围为0.90~1.20 r/s, 减速群体为0.40~0.86 r/s, 减速避让行为的踏频最大变化率比加速高23.7%。因此, 相对于加速避让群体, 冲突干扰对减速避让群体的影响更大。

长安路中选择减速避让的骑行者占比最少, 为45.2%, 减速群体的平均踏频相对于自由踏频下降14.6%。随着非机动车道宽度的降低, 其他道路的减速避让群体占比相对于长安路分别增加2.7%、6.4%和14.9%, 平均踏频值下降程度相对于长安路分别增加3.3%、6.6%和18.0%。非机动车道宽度小于2.5 m时, 选择减速避让的群体个数激增, 同时减速幅度明显变大, 证明存在较为严重的冲突, 需要优化设计传统非机动车道的宽度。

3.2 车-车作用力模型参数求解

3.2.1 安全避让宽度值

首先, 标定车-车作用力参数。对于 m_α 、 m_β , 测

续记录非机动车自由骑行以及超车或并行事件的发生过程。调查时间选择通勤早高峰7:00—9:00。

采用运动分析软件 Simi Motion 逐个分析骑行全过程的速度、位移变化、避让对象的车型、避让发生时间点、避让持续时间等。视频导入 Simi Motion 软件后, 同时追踪电动自行车和常规自行车, 从冲突开始至冲突完全结束为止。追踪完成后进行轨迹导出和数据获取, 导出目标自行车的骑行数据包括位移、横纵向的行驶速度、横纵向的行驶加速度等。最终采集到的有效样本共计2 415个, 其中, 480组为自由骑行样本, 1 935组为干扰骑行样本。不同道路的有效样本数据见表1。

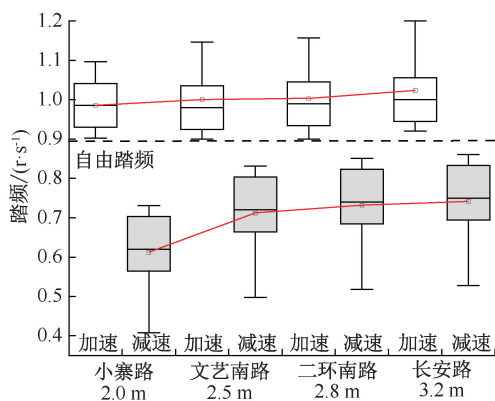


图5 不同宽度路段骑行者的踏频变化

Fig. 5 Variation of the Pedaling cadence among cyclists on various road widths

量各类自行车的平均质量约为15 kg; 新国标规定电动自行车标准质量为55 kg; 观测样本里不同群体的平均质量为60 kg, 因此, m_α 、 m_β 分别取75与115 kg。对于 $k_{\alpha\alpha}$ 、 $k_{\alpha\beta}$ 、 $k_{\beta\beta}$, 先确定参数的取值范围为[0.01, 1], 然后进行遗传算法迭代。采用基于轨迹的校核指标, 取测定坐标与实际坐标的绝对位置之差作为目标函数, 设最大迭代数为200, 交叉概率为

0.9, 变异概率为 0.01。多次迭代均得到相邻 2 次迭代的目标函数差值小于 0.01, 且无跌宕现象, 说明群体已趋于稳定。相关参数标定结果见表 2。

表 2 车-车作用力模型参数及标定结果

Table 2 Parameters and calibration results of the vehicle-vehicle force model

名称	值	描述
m_α	75	常规自行车人车质量/kg
m_β	115	电动自行车人车质量/kg
$k_{\alpha\alpha}$	0.019 8	常规-常规自行车作用力参数
$k_{\alpha\beta}$	0.021 2	常规-电动自行车作用力参数
$k_{\beta\beta}$	0.023 6	电动-电动自行车作用力参数

拟合 2 车间作用力值 V_α^α 、 V_α^β 、 V_β^β 和避让距离 g_i 的结果如图 6 所示。

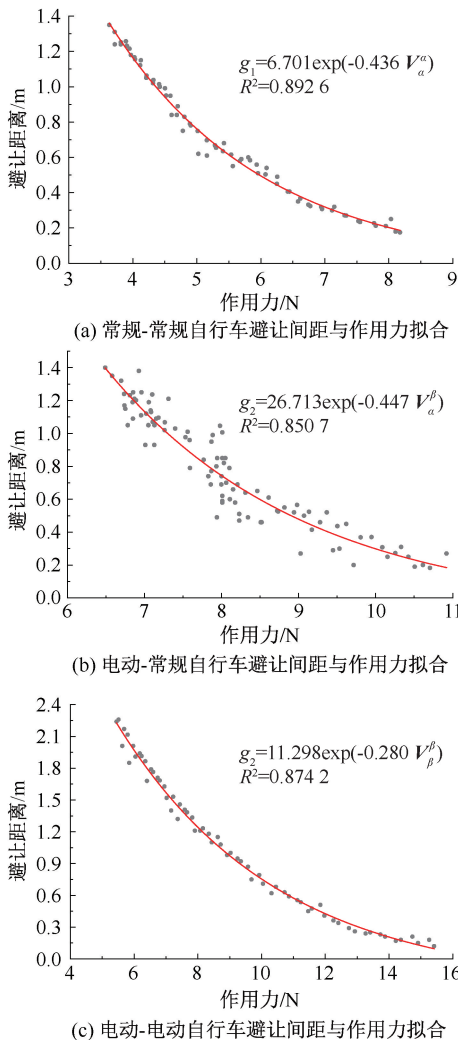


图 6 横向间距与作用力拟合图

Fig. 6 Lateral spacing and force fitting graph

由图 6 可知: 避让距离与作用力呈指数分布, 拟合度分别为 0.892 6、0.850 7 和 0.874 2, 均大于 0.85, 拟合效果较好, 表达式见下式。计算可得, 常

规-常规自行车的安全避让距离为 0.31 m; 常规-电动自行车的安全避让距离为 0.38 m; 电动-电动自行车的安全避让距离为 0.47 m。

$$g_i = \begin{cases} 6.701\exp(-0.436V_\alpha^\alpha), & i = 1 \\ 26.713\exp(-0.447V_\alpha^\beta), & i = 2 \\ 11.298\exp(-0.280V_\beta^\beta), & i = 3 \end{cases} \quad (10)$$

3.2.2 机非隔离设施边缘预留宽度值

不同机非隔离设施的边缘预留宽度值计算结果见表 3; 取 85% 分位数作为隔离设施预留宽度值。

表 3 机非隔离设施边缘预留宽度统计

Table 3 Statistics on reserved widths at the edges of separation facilities

机非隔离类型	m			
	均值	最小值	15% 分位数	85% 分位数
划线隔离	0.13	0.05	0.11	0.15
护栏隔离	0.28	0.12	0.21	0.30
绿化隔离	0.32	0.14	0.23	0.38

3.3 非机动车道宽度设计结果

根据冲突环境下的车道宽度计算公式, 设计不同道路设施条件的非机动车道宽度, 结果见表 4。研究表明: 冲突环境下满足 2 辆自行车避让需求的宽度设计范围为 2.71~2.94 m, 满足常规自行车与电动自行车避让需求和满足两辆电动车避让需求的宽度设计范围为 2.76~3.06 m。图 7 为冲突环境下非机动车道断面设计图。

3.4 非机动车道安全性分析

所选 4 条道路的非机动车道均存在常规自行车和电动自行车混行的情况。若满足 2 辆电动自行车的避让条件, 则其他车型组合均能安全超车, 因此, 车道宽度应满足电动-电动自行车避让下的车道设计宽度。长安路为 3.2 m, 满足隔离类型为绿化带时, 电动-电动自行车避让条件下的非机动车道宽度(3.06 m)。二环南路为 2.8 m, 基本满足隔离类型为划线时, 电动-电动车避让条件下的非机动车道宽度(2.83 m)。文艺南路和小寨路均不满足常规-常规自行车避让条件下的非机动车道宽度。

分析不同设计宽度的非机动车道安全性, 安全评价指标见表 5。4 条道路对应的安全值分别为 7.80、7.34、6.85 和 5.84。安全值越低, 说明发生冲突避让时的风险越大, 交通碰撞事故的概率也越大。4 条道路的平均安全值为 7.10, 其中, 二环南路和长安路的安全值相对于平均安全值分别提高 3.38% 和 9.86%。而文艺南路和小寨路的安全值相对于平均安全值分别降低 3.52% 和 17.7%。进一步验

表 4 非机动车道宽度设计

Table 4 Results of non-motorized lane widths design

满足条件	常规自行车虚拟车道宽度	电动自行车虚拟车道宽度	划线/护栏/绿化带隔离边缘宽度值	路缘石边缘宽度值	安全避让距离	总宽度
常规-常规自行车避让	1.0×2	—	0.15	0.25	0.31	2.71
			0.30			2.86
			0.38			2.94
常规-电动自行车避让	1.0	0.98	0.15	0.25	0.38	2.76
			0.30			2.91
			0.38			3.00
电动-电动自行车避让	—	0.98×2	0.15	0.25	0.47	2.83
			0.30			2.98
			0.38			3.06

表 5 非机动车道安全评价模型

Table 5 Safety evaluation indicators of non-motorized lanes

路段名	路段宽度/m	$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	P_1, P_2, P_3	道路安全值 M
长安路	3.2	0.429/0.452/0.119	0.108/0.178/0.012	7.80
二环南路	2.8	0.410/0.479/0.111	0.112/0.185/0.015	7.34
文艺南路	2.5	0.374/0.516/0.110	0.119/0.192/0.021	6.85
小寨路	2.0	0.290/0.601/0.109	0.125/0.218/0.037	5.84

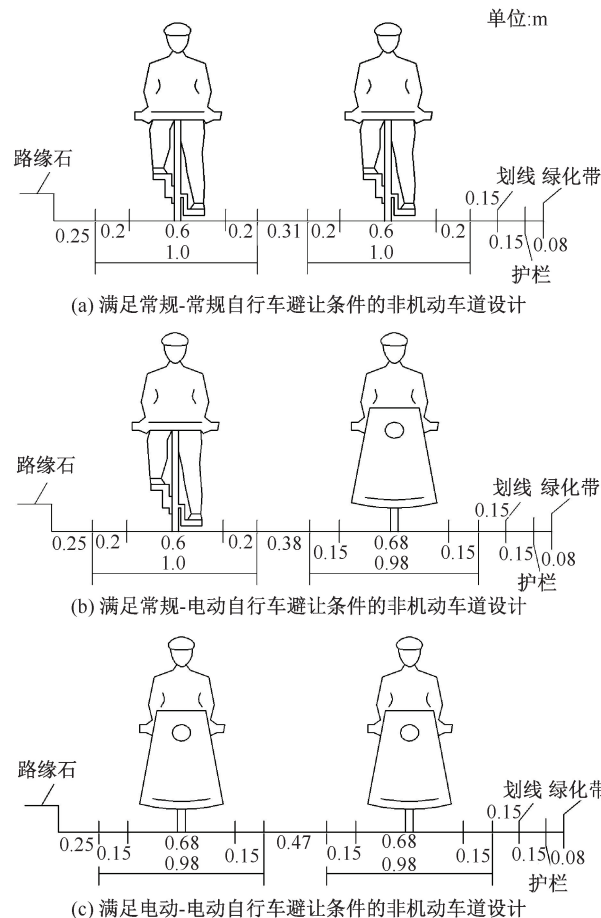


图 7 非机动车道断面设计

Fig. 7 Design of non-motorized lane cross-section

证了满足该设计宽度时,车辆受到干扰较小,安全性更高。

4 结 论

1) 针对传统非机动车道设计的限制,提出考虑冲突的非机动车道宽度设计方法。满足设计要求的车道中减速群体占比和踏频值变化程度均降低10%左右,表明骑行者的受干扰程度有所降低,所提出的方法可满足异质交通流避让的需要。

2) 常规-常规自行车、常规-电动自行车、电动-电动自行车之间的安全避让距离分别为0.31、0.38和0.47 m。满足两车避让的宽度范围为2.71~3.06 m。

3) 长安路、二环南路、文艺南路和小寨路对应的道路安全值分别为7.80、7.34、6.85和5.84,表明满足该宽度设计要求的车道安全性更高。

4) 本文主要以西安市4条代表性非机动车道的数据为基础,未考虑不同季节、天气、道路坡度等环境因素,后续研究中将进一步在其他城市不同道路条件下验证该宽度设计公式的适用性。

参 考 文 献

- [1] QIAN Zhen, LI Jia, LI Xiaopeng, et al. Modeling heterogeneous traffic flow: a pragmatic approach[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017,99:183-204.
- [2] 陈小鸿, 岳李圣飒. 混行自行车道超车干扰与车道设计[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2017,45(12):1810-1817.
CHEN Xiaohong, YUE-LI Shengsa. Overtaking interference on shared bicycle path and its influence on lane design[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2017,45(12):1810-1817.
- [3] 李岩, 南斯睿, 胡文斌, 等. 机非标线分隔道路电动自行车越线风险模型[J]. *重庆交通大学学报:自然科学版*, 2021,40(2):13-20.
LI Yan, NAN Sirui, HU Wenbin, et al. Lane transgressing risk model of electric bicycle on marking separation road section[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2021,40(2):13-20.
- [4] YAN Xingchen, WANG Tao, YE Xiaofei, et al. Recommended widths for separated bicycle lanes considering abreast riding and overtaking[J]. *Sustainability*, 2018,10(9):1-16.
- [5] LI Yan, ZHOU Wenhui, NAN Sirui, et al. Redesign of the cross-section of bicycle lanes considering electric bicycles[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, 2017,170(5):255-266.
- [6] JIN Sheng, QU Xiaobo, ZHOU Dan, et al. Estimating cycleway capacity and bicycle equivalent unit for electric bicycles[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015,77:225-248.
- [7] 叶晓飞, 陈峻, 顾姗姗. 城市道路路段电动自行车相对于自行车的换算系数[J]. *公路交通科技*, 2012,29(10):109-116.
YE Xiaofei, CHEN Jun, GU Shanshan. Conversion coefficient of electric-bike into bicycle on urban road section[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2012,29(10):109-116.
- [8] MALJKOVIC B, CVITANIC D. Improved horizontal curve design consistency approach using steady-state bicycle model combined with realistic speeds and path radii[J]. *Journal of Transportation Engineering Part A-Systems*, 2022,148(9):1-12.
- [9] 霍非舟, 李盈, 马亚萍, 等. 考虑环境熟悉度与疏散策略的元胞自动机模型[J]. *中国安全科学学报*, 2022,32(9):94-99.
HUO Feizhou, LI Ying, MA Yaping, et al. CA model considering environmental familiarity and evacuation strategy[J]. *China Safety Science Journal*, 2022,32(9):94-99.
- [10] QIN Jiaying, MA Sasa, ZHANG Lei, et al. Modeling and simulation for non-motorized vehicle flow on road based on modified social force model[J]. *Mathematics*, 2023,11(1):1-18.
- [11] LIU Yan, ALSALEH R, SAYED T. Modelling motorized and non-motorized vehicle conflicts using multiagent inverse reinforcement learning approach[J]. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2024,12(1):1-23.
- [12] 杨永刚, 王璟璟, 宋炜. 飞机客舱应急疏散的修正社会力模型[J]. *中国安全科学学报*, 2022,32(10):201-206.
YANG Yonggang, WANG Jingjing, SONG Wei. Modified social force model for aircraft cabin emergency evacuation[J]. *China Safety Science Journal*, 2022,32(10):201-206.
- [13] 杨明辉, 张蕊, 严巧兵, 等. 基于非机动车主动超越行为的社会力模型改进研究[J]. *系统仿真学报*, 2023,35(4):871-877.
YANG Minghui, ZHANG Rui, YAN Qiaobing, et al. Research on improvement of social force model based on non-motor vehicle active overtaking behavior[J]. *Journal of System Simulation*, 2023,35(4):871-877.
- [14] JIANG Hang, MA Yongjian, JIANG Lin, et al. Evaluation of the dispersion effect in through movement bicycles at signalized intersection via cellular automata simulation[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018,498:138-147.
- [15] LI Yixin, NI Ying, SUN Jian, et al. A modified social force model for high-density through bicycle flow at mixed-traffic intersections[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2021,108:1-17.
- [16] 崔洪军, 周启航, 朱敏清. 信号交叉口直行非机动车膨胀特性分析与风险评估[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024,24(1):138-148.
CUI Hongjun, ZHOU Qihang, ZHU Mingqing. Risk assessment and expansion characteristics of straight non-motorized vehicles at signalized intersections[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024,24(1):138-148.
- [17] RASCH A, BODA C N, THALYA P, et al. How do oncoming traffic and cyclist lane position influence cyclist overtaking by drivers? [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020,142:1-10.
- [18] GB/T 51439—2021, 城市步行和自行车交通系统规划标准[S].
GB/T 51439—2021, Standard for urban pedestrian and bicycle transport system planning [S].
- [19] 仵若琦, 杨德真, 任羿, 等. 人-车-智共享道路空间行人安全行为建模方法[J/OL]. *北京航空航天大学学报*: 1-10[2024-05-31]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0370>.
WU Ruoyu, YANG Dezhen, REN Yi, et al. A modeling method for pedestrian safety behavior in shared spaces of pedestrian-traditional vehicle-autonomous vehicle[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*: 1-10[2024-05-31]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0370>.

作者简介: 李岩 (1983—), 男, 河北衡水人, 博士, 教授, 主要从事交通安全、驾驶行为、交通信号控制等方面的研究。E-mail: liyan@chd.edu.cn.

