

面向通勤路径上下游节点辨识及通行能力匹配研究

姚 佼^{1,2*}, 王 银^{1,2}

¹上海理工大学管理学院, 上海

²上海理工大学智慧城市交通研究院, 上海

收稿日期: 2025年2月17日; 录用日期: 2025年3月31日; 发布日期: 2025年4月9日

摘 要

针对城市道路高峰小时通勤路径中车辆排队累积并溢出至上游节点, 导致上下游节点通行能力折损的问题, 研究在分析四类典型通勤路径场景的基础上, 综合考虑上下游间距等静态因素, 以及流量流向与信号参数等动态因素, 提出了上下游流量流向匹配辨识模型; 进一步通过调节信号配时、相位相序及可变车道等策略, 建立了上下游节点通行能力匹配模型。案例结果表明, 上游直行、下游直行或左转的路径一、二匹配度均在0.79以上, 效果显著; 四类路径实施匹配策略后, 整体通行能力匹配率提升了5.8%, 其中上游直行下游左转的路径二、上游左转下游直行的路径三, 通行能力匹配率提升均超过20%。因此, 本研究提出的路径通行能力匹配模型具有较强的工程应用价值。

关键词

交通工程, 通勤路径, 上下游节点, 匹配辨识模型, 通行能力匹配率

Study on Capacity Matching of Upstream and Downstream Node Identification for Commuter Paths

Jiao Yao^{1,2*}, Yin Wang^{1,2}

¹Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Smart Urban Mobility Institute, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 17th, 2025; accepted: Mar. 31st, 2025; published: Apr. 9th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 姚佼, 王银. 面向通勤路径上下游节点辨识及通行能力匹配研究[J]. 运筹与模糊学, 2025, 15(2): 350-362.
DOI: 10.12677/orf.2025.152089

Abstract

The issue of vehicle queues accumulating and spilling over to upstream nodes during peak commuting hours on urban roads leads to reduced capacity at both upstream and downstream nodes. The study analyzed four typical commuter path scenarios and proposed a flow-direction matching identification model. This model considers both static factors, such as upstream-downstream spacing, and dynamic factors, like flow direction and signal parameters. Further, by adjusting signal timing, phase sequence, and variable lanes, a capacity matching model for upstream and downstream nodes was developed. Case results show that the matching degree for paths with upstream straight and downstream straight or left turns (Path 1 and 2) is above 0.79, indicating significant improvement. After implementing the matching strategy, the overall capacity matching rate increased by 5.8%. In particular, Path 2 (upstream straight, downstream left turn) and Path 3 (upstream left turn, downstream straight) saw capacity matching improvements exceeding 20%. Therefore, the proposed path capacity matching model has strong engineering application value.

Keywords

Traffic Engineering, Commuter Paths, Upstream and Downstream Nodes, Matching Identification Model, Capacity Matching Rate

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市通勤交通需求的快速增长, 加剧了道路拥挤, 特别是在主干路上, 单个节点的堵塞往往会向上游节点转移, 导致多个交叉口连锁堵塞, 其根本原因在于道路供给能力与通勤需求的不匹配。一方面, 由于上下游节点间距、车道数量及信号配时等因素的限制, 下游节点的通行能力难以满足上游驶入车辆的通行需求; 另一方面, 城市通勤交通路径通常由多条干线构成, 而非单一直行路径, 路径较为复杂。这些都会加剧不同功能车道相互堵塞, 造成车辆排队累积并溢出至上游交叉口, 使路径整体通行能力丧失, 甚至路网瘫痪等问题。因此, 在通勤高峰时段, 研究上下游交叉口通行能力的匹配性, 可以有效减少通勤交通在途时间, 提高路径通勤效率, 对实现城市路网“畅通工程”尤为重要。

首先, 针对单个节点通行能力的匹配, 研究关注不同功能车道的流量分配和优化方案。聂磊等[1]分析进口道不同流量流向与功能车道的相互关系, 提出了一种基于车道布置的优化方案, 在考虑车道匹配和流量均衡等约束条件下, 验证了模型的实用性。Wu 等[2]进一步从下游节点排队溢出类型入手, 利用冲击波理论, 以上下游节点通行能力匹配作为约束条件, 提出了过饱和和节点通行能力优化模型。

然后, 在相邻交叉口通行能力匹配的研究中, 重点考虑了车道数量和信号配时的不匹配。Wu 等[3]通过分析流量约束、信号配时及饱和度等因素, 构建了交叉口通行能力差值最小化、干线通行能力最大化的综合优化模型, 并通过敏感性分析验证了模型的有效性。基于此, 进一步提出了禁左策略的优化模型, 在考虑禁限绕行范围、周期等约束条件的基础上, 以干线通行能力最大和上下游通行能力相匹配为目标, 拓展了模型的适用场景[4]。此外, 针对展宽车道存在的情形, Yao [5]在分析左转弯展宽车道间距和信号配时方案的基础上, 修正了功能车道的通行能力模型, 对相邻交叉口均为展宽车道的场景, 提出了将节点通行能力和车辆延误作为优化目标的协同模型[6]。

最后, 上下游流量流向的匹配路径多以上下游直行为主, 聚焦于路径关联度模型的优化研究。Zhang [7]在传统路径关联度模型的基础上, 进一步引入转向流量比例和信号相位等因素, 对模型进行修正; 考虑相位差, 齐立群等[8]在分析短连线交叉口排队溢出长度与相位差关联性的基础上, 提出了上下游交叉口相位差动态优化模型; 相位相序设计上, 王浩等[9]深入探讨了相位相序设置与交叉口内路径流量、转向导流线、待行区、展宽车道及车道功能等因素之间的关联性。

综上所述, 研究多集中于单个节点不同功能车道的通行能力匹配, 对上下游交叉口整体通行能力进行综合匹配, 还有待进一步深入研究; 同时, 路径流量聚焦于上下游直行的场景, 对转向场景仍需继续探讨。因此, 本研究在分析上下游流量流向场景的基础上, 结合路径关联度模型, 考虑上下游间距、流量流向及信号参数, 建立了上下游流量流向匹配辨识模型, 基于此进一步通过调节信号配时、相位相序及可变车道等匹配策略, 消散拥挤路段, 提出了上下游节点通行能力匹配模型, 实现了干道沿线交叉口通行能力匹配。

2. 路径上下游节点匹配辨识模型

2.1. 上下游流量流向场景分析

通勤交通从上游节点驶入到驶离下游节点的过程中, 根据其所处路径不同路段的差异性, 其通勤状态的通行能力影响因素亦有差别, 故将车流分为四个状态[10]进行分析, 如图 1。

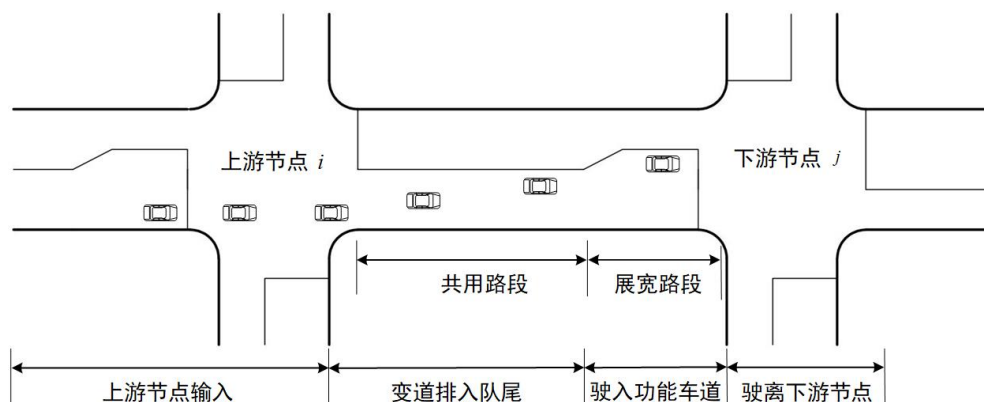


Figure 1. Commuter vehicle status upstream and downstream

图 1. 上下游通勤车辆状态

(1) 上游节点输入: 通勤车辆位于上游节点进口道时, 包含了左转、直行、右转三种转向行为, 其通行效率受相位信号、展宽车道影响较大;

(2) 共用路段变道行驶至队尾: 通过上游输入到达共用路段时, 由于通勤车辆在下游进口道转向需求的不同, 有些车辆需要进行二次变道, 才能行驶到下游对应的功能车道, 该阶段车流间相互干扰加剧, 影响着通勤车辆效率;

(3) 驶入功能车道: 若下游节点展宽路段足够长, 排队车辆未发生溢出, 那么共用路段输入的通勤车辆可驶入不同功能车道进行转向或者等待通行, 反之上下游间距将直接影响高峰小时车流, 通常表现为不同功能车道车流相互堵塞;

(4) 驶离下游节点: 通勤车辆经历排队候车后, 驶入对应的转向车道, 等待相位绿灯完成转向需求, 该阶段主要受展宽路段长度与相位信号影响。

上下游通行能力的影响因素包括: 展宽路段长度、通勤流量流向需求及信号配时等, 考虑到高峰小

时通勤交通具有单向性, 即通勤车辆行驶方向存在着不均匀分布, 因此研究仅对通勤流量较大的通行方向进行研究, 进一步分析不同路径流量流向的转向比重, 选取流量比例较高的路径作为后续通行能力匹配的研究对象。

上游节点的通勤车流可以进行左转、直行、右转三种行为, 驶入下游共用路段, 同时下游节点亦有左转、直行、右转三种转向需求, 那么通过分析车流行驶状态的通行能力影响因素和上下游转向的需求, 将通勤交通从上游节点驶入, 到下游节点驶离的过程, 划分为九条路径, 如表 1。

Table 1. Upstream and downstream node traffic paths

表 1. 上下游节点流量路径

场景	上游流量转向	下游流量转向	路径流量流向
场景一	直行	直行	上游直行, 下游直行
		左转	上游直行, 下游左转
		右转	上游直行, 下游右转
场景二	左转	直行	上游左转, 下游直行
		左转	上游左转, 下游左转
		右转	上游左转, 下游右转
场景三	右转	直行	上游右转, 下游直行
		左转	上游右转, 下游左转
		右转	上游右转, 下游右转

考虑到右转通勤交通的需求与左转、直行车辆的冲突较小, 并且通常信号交叉口对右转车辆不设信号控制, 故在分析通勤流量短时高峰交通需求冲击等特性的基础上, 选取路径流量的场景一、二进行研究分析, 考虑通勤车辆不同状态下通行能力影响的因素, 提出了路径上下游流量流向匹配辨识模型。

2.2. 上下游流量流向匹配辨识

为分析上下游节点各路径流量流向的匹配程度, 进而依据匹配度实施调整策略, 研究提出了匹配辨识模型, 与路径关联模型的区别在于进一步考虑到了节点进口处转向通勤流量、展宽路段长度、上下游节点相位差以及相位相序等静、动态因素结合, 建立了路径上下游节点流量流向匹配辨识模型, 如下:

$$R_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n} = a\delta_{i \rightarrow j,1}^{m \rightarrow n} + b\delta_{i \rightarrow j,2}^{m \rightarrow n} + c\delta_{i \rightarrow j,3}^{m \rightarrow n} \quad (1)$$

式中: $R_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n}$ 为路径上下游的匹配度, 作为选取路径通行能力匹配研究对象的参考依据; $\delta_{i \rightarrow j,1}^{m \rightarrow n}$ 为上下游间距的贡献度; $\delta_{i \rightarrow j,2}^{m \rightarrow n}$ 为上下游通勤流量流向的贡献度; $\delta_{i \rightarrow j,3}^{m \rightarrow n}$ 为信号参数的贡献度; a, b, c 分别为上下游间距、流量流向和信号参数的权重系数, 其满足 $a+b+c=1$, 通过熵权法确定三个权重系数。

2.2.1. 上下游间距

通勤交通在上下游节点间行驶的距离包含: 上游节点距离、上下游节点间路段距离和下游节点展宽路段长度, 三者的距离和为上下游间距, 如图 2。

上下游间距直接影响着通勤交通的通行效率。若间距小于规定的标准值, 则上下游节点通勤车流关联性较强, 车辆没有缓冲时间, 可能会直接以上游相同的转向行为通过下游节点, 不能及时行驶至对应的功能车道; 如果间距超过标准值, 则通勤车流在路段行驶的时间过长, 车辆离散性显著, 上下游流量流向的相关性减弱, 对匹配辨识模型影响小, 贡献度低。

进一步, 增加展宽路段长度的影响因素, 建立了上下游间距对匹配辨识模型的贡献度, 其模型如下:

$$\delta_{i \rightarrow j,1}^{m \rightarrow n} = \alpha_{11} L_{i \rightarrow j,1}^{m \rightarrow n} + \beta_{12} L_{i \rightarrow j,2}^{m \rightarrow n} \quad (2)$$

式中: $L_{i \rightarrow j,1}^{m \rightarrow n}$ 为上下游节点间的路段距离对辨识模型的影响度; $L_{i \rightarrow j,2}^{m \rightarrow n}$ 下游节点展宽段长度对辨识模型的影响度; α_{11}, β_{12} 为两个距离参数的权重系数, 由实际观察的长度比例确定。

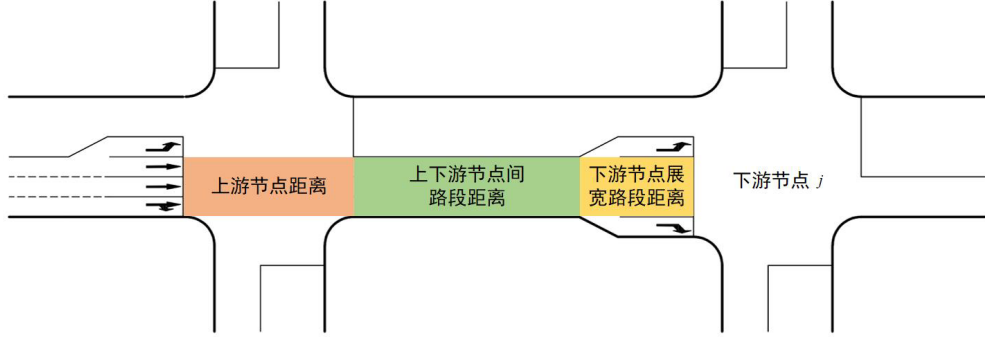


Figure 2. Schematic diagram of distance between upstream and downstream nodes

图 2. 上下游节点间距离示意图

(1) 上下游节点距离

上下游节点距离为上游节点与上下游节点间路段距离之和, 通勤交通在该距离上行驶时, 通常是从停车等待状态逐步加速为一定速度行驶, 因此考虑以速度衡量距离对上下游间距的影响程度, 如下:

$$V = \frac{L_i + L}{\Delta T} \quad (3)$$

$$L_{i \rightarrow j,1}^{m \rightarrow n} = \begin{cases} 1, & \bar{V} \geq V_{\max} \\ \frac{\bar{V}}{V_{\max}}, & V_{\min} \leq \bar{V} < V_{\max} \\ 1 - \frac{\bar{V}}{V_{\max}}, & \bar{V} < V_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

式中: L_i 为上游节点的间距, km; L 为上下游节点的间距(不包括展宽段), km; ΔT 为通勤车辆在此距离下行驶的时间, h; V_{\max} 为通勤交通在上下游节点行驶的最大路段速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; \bar{V} 为通勤交通在上下游节点行驶的路段速度均值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; V_{\min} 为通勤交通在上下游节点行驶的最小路段速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(2) 展宽路段长度

通勤交通行驶在该路段区域时, 容易发生不同流量流向相互堵塞, 定义量化参数为展宽路段堵塞状态与未堵塞状态通勤车辆通行的时间最值, 当节点为短连线交叉口时, 其展宽路段与共用路段相同, 那么不同堵塞程度下展宽路段长度对上下游间距的影响度模型, 如下:

$$T_1 = \frac{3600L_0}{Sh_d} \quad (5)$$

$$L_{i \rightarrow j,2}^{m \rightarrow n} = \frac{\max(T_1, T_0) - T_j}{\max(T_1, T_0) - \min(T_1, T_0)} \quad (6)$$

式中: T_1 为展宽段内最大排队长度消散所需要的时间, s; \bar{s} 为车道的平均饱和流量, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; L_0 为

下游节点的展宽长度, m ; h_d 为平均车头空距, m ; T_j 为车流通过下游节点 j 的时间均值, s 。

2.2.2. 上下游流量流向

上下游节点的流量流向是影响匹配辨识模型的关键因素, 其中路径流量流向的分布决定了该路径作为通行能力匹配研究的对象。为了量化上游周期输入流量在下游不同功能车道的分布情况, 研究考虑了上游通勤交通驶入的转向比例及相位的有效通行率, 建立流量流向对匹配辨识模型[11]的贡献度, 如下:

$$q_{i \rightarrow j, p}^{m \rightarrow n} = \sum_{m=1}^M q_m^i \cdot \lambda_{i, p}^m \cdot \eta_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n} \quad (7)$$

$$\delta_{i \rightarrow j, 2}^{m \rightarrow n} = \frac{\max(q_{i \rightarrow j, p}^{m \rightarrow n}) - q_{i \rightarrow j, k}^{m \rightarrow n}}{\max(q_{i \rightarrow j, p}^{m \rightarrow n}) - \min(q_{i \rightarrow j, p}^{m \rightarrow n})} \quad (8)$$

式中: $q_{i \rightarrow j, p}^{m \rightarrow n}$ 为相位 p 内节点 i 车道 m 的车流, 驶入下游节点 j 车道 n 的流量, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; q_m^i 为节点 i 车道 m 车流的总流量, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; $\lambda_{i, p}^m$ 为在相位 p 内节点 i 车道 m 车流的通行比例, $\lambda_{i, p}^m = 0$ 表示非相位 p 通行; $\eta_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n}$ 为节点 i 车道 m 车流, 驶入到节点 j 车道 n 流量与车道 m 车流的流量比例; $q_{i \rightarrow j, k}^{m \rightarrow n}$ 为相位 k 内上游节点 i 车道 m 的车流, 驶入下游节点 j 车道 n 的流量, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.2.3. 信号参数

信号参数作为动态因素, 对通勤交通的通行效率影响最大, 同时也是能较快调节拥挤路段消散的变量, 研究针对上下游场景的特点, 综合分析了信号周期、相位相序和相位差对上下游路径流量的影响, 建立了其对匹配辨识模型的贡献度, 如下:

$$\delta_{i \rightarrow j, 3}^{m \rightarrow n} = \alpha_{21} c_{i, 1}^{m \rightarrow n} + \beta_{22} c_{i, 2}^{m \rightarrow n} + \gamma_{23} c_{i, 3}^{m \rightarrow n} \quad (9)$$

式中: $c_{i, 1}^{m \rightarrow n}$ 为上下游节点信号周期对信号参数的影响度; $c_{i, 2}^{m \rightarrow n}$ 为上下游节点相位差对信号参数的影响度; $c_{i, 3}^{m \rightarrow n}$ 为上下游节点相位相序对信号参数的影响度; $\alpha_{21}, \beta_{22}, \gamma_{23}$ 为三个信号参数对应的权重系数, 其满足 $\alpha_{21} + \beta_{22} + \gamma_{23} = 1$, 由熵权法确定权重系数。

(1) 信号周期

定义以上下游节点的周期差距, 描述其对信号参数模型的影响度, 如下:

$$c_{i \rightarrow j, 1}^{m \rightarrow n} = \frac{\max(c_i, c_j) - c_k}{\max(c_i, c_j) - \min(c_i, c_j)} \quad (10)$$

式中: c_i, c_j 分别为上游、下游交叉口的信号时间最值, s ; c_k 为上下游最佳公用周期时间, s 。

(2) 相位差

定义为通勤交通在上下游节点驶入驶出的时间差, 决定一个信号周期内路段上可能通过的最大交通量。通过分析上下游相位差的最值, 确定了相位差对信号参数模型的影响度[12], 如下:

$$O_{i \rightarrow j, \min}^{m \rightarrow n} = \frac{L + L_i - L_{\max}}{\bar{V}} - \frac{L_{\max}}{v_d} \quad (11)$$

$$O_{i \rightarrow j, \max}^{m \rightarrow n} = \frac{L + L_i}{\bar{V}} - \frac{L_{\max}}{v_d} - \frac{L_{\min}}{v_l}$$

$$c_{i \rightarrow j, 2}^{m \rightarrow n} = \frac{O_{i \rightarrow j, \max}^{m \rightarrow n} - O_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n}}{O_{i \rightarrow j, \max}^{m \rightarrow n} - O_{i \rightarrow j, \min}^{m \rightarrow n}} \quad (12)$$

式中: $O_{i \rightarrow j, \min}^{m \rightarrow n}$ 为上下游节点相位差的最小值, s ; $O_{i \rightarrow j, \max}^{m \rightarrow n}$ 为该上下游节点相位差的最大值, s ; \bar{V} 为路段

平均行驶速度, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$; L_i 为上游交叉口长度, m ; v_0 为启动波波速, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$; v_1 为启动后的行驶速度, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, $O_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n}$ 为上下游节点相位差的最佳取值, s 。

(3) 相位相序

考虑到干线相位相序的设计, 一般由左转、直行及右转三种信号组成, 通常右转不设置信号控制, 定义参数 $X_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n}$ 为下游排队长度, 用于分析上下游节点相位相序组合的影响程度。

当 $X_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n}$ 小于 0.5 时, 说明上游流入量基本能在下游节点相位时间内通行, 该相位相序组合方案为最优; 参考值处于 0.5~1 范围内时, 下游节点不能完全疏散上下游流入量, 该相位相序组合方案不一定为最优; 当参考值大于 1, 下游节点一直在产生车辆排队累积, 到某个时间点排队将溢出至上游节点, 因此相位相序对信号参数模型的影响度模型, 如下:

$$c_{i \rightarrow j,3}^{m \rightarrow n} = \begin{cases} 1, & X_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n} \leq 0.5 \\ 1 - \frac{\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P q_{jp}}{C_j}, & 0.5 < X_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n} \leq 1 \\ \frac{q_{jp}}{C_j}, & X_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n} > 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $X_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n}$ 为下游节点车道的平均饱和度, $\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$; C_j 为下游节点的通行能力, $\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$; q_{jp} 下游节点相位 p 的实际流量, $\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$; P 为上游交叉口所有流入下游交叉口车流通行的相位总数。

3. 路径通行能力匹配模型

上下游节点路径流量以上游直行, 下游左转为例, 如图 3。为判别上游节点输入流量在共用路段与展宽路段通行能力的差异性, 定义路径通行能力匹配率, 指下游不同功能车道流量与上游输入共用车道流量的比值, 将其作为匹配策略实施的分析参数, 使上下游节点路径流量的通行能力差值最小化, 如下:

$$\lambda_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n} = \frac{C_j^n}{\eta_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n} C_i^m} \quad (14)$$

式中: $\lambda_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n}$ 为车流从上游节点 i 车道 m , 驶入下游节点 j 车道 n 的路径通行能力匹配率; C_i^m 为上游节点 i 车道 m 的总流量, $\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$; C_j^n 为下游节点 j 车道 n 的实际流量, $\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$; $\eta_{i \rightarrow j}^{m \rightarrow n}$ 为上游节点 i 车道 m 的流量, 驶入下游节点 j 车道 n 的转向比例。

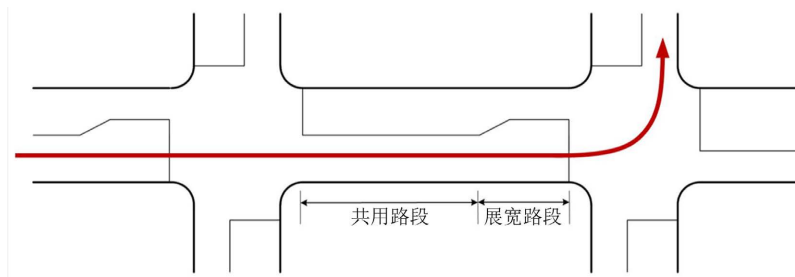


Figure 3. Schematic diagram of upstream and downstream node path flow
图 3. 上直下左示意图

3.1. 不同路段通行能力分析

通过分析确定上下游节点的路径流量类型, 但在通勤高峰期间, 路径不同路段都会发生通勤车辆相

互干扰, 进而发生堵塞现象, 当展宽路段不同流向车流相互堵塞时, 可能导致排队车辆溢出, 加剧共用车道堵塞; 当共用路段不同转向需求的车辆相互影响时, 可能造成严重拥挤, 上游车辆停滞在交叉口内。

因此, 本研究将针对路径上下游中共用路段和展宽路段建立通行能力分析模型, 进一步基于匹配度, 通过调节信号时间、相位相序及车道功能可变等匹配策略, 消散不同路段的堵塞点, 提出路径上下游节点通行能力匹配模型。

(1) 共用路段车道通行能力

由于行驶速度、节点间距及变道等因素影响, 通勤交通在共用路段发生二次变道等行为, 造成不同转向需求车辆相互冲突, 发生共用路段堵塞; 也可能是上个周期到达下游节点不同功能车道的车辆排队溢出造成展宽路段拥挤, 这两个路段的堵塞都会对共用车道通行能力都会产生影响。

故本研究考虑的共用车道通行能力受两个方面影响: 一是左转展宽车道排队溢出; 二是共用路段车流相互干扰, 结合概率统计理论和展宽车道, 建立了上下游节点共用车道通行能力模型[13], 如下:

$$s_1 = \frac{3600}{c} \left(\bar{X}_L + N \right) + \frac{g_2 + t_s}{c} S \quad (15)$$

$$C_{ij} = P_{LbT} c_1 + P_{TbL} c_2 \quad (16)$$

式中: C_{ij} 为共用路段单车道的通行能力, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; P_{LbT} 为发生左转堵塞直行车辆的概率; P_{TbL} 为发生直行堵塞左转的概率; c_1 为受共用路段拥堵的共用车道的通行能力, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; c_2 为受左转展宽车道排队溢出影响时, 共用车道的通行能力, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; \bar{X}_L 为左转展宽车道内平均排队的车辆数; N 为左转展宽车道的最大容量; t_s 为车辆的启动损失时间, s; S 为一条共用车道的饱和和流率, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; g_2 为展宽段内排队车辆全部消散后, 相位剩余有效绿灯时间, s。

(2) 展宽路段车道通行能力

基于展宽车道通行能力模型, 进一步考虑了车辆启动延误及相位转换延误对通行能力影响的修正模型, 同时对饱和状态下车道可通行的车流比例进行更加完善的考虑, 具体模型[5] [14]如下:

$$C_i^n = \begin{cases} \frac{S_{i1}^n \cdot \sum_{p=1}^{P_i} (\phi_{ip}^n \cdot g_{ip}) + S_{i2}^n \phi_i^n \frac{L_i^n h_i}{h_s}}{\sum_{p=1}^{P_i} g_{ip} + D_i}, & \sum_{p=1}^{P_i} (\phi_{ip}^n \cdot g_{ip}) \geq \frac{L_i^n h_i}{h_s} \\ \frac{(S_{i1}^n + S_{i2}^n \phi_i^n) \cdot \sum_{p=1}^{P_i} (\phi_{ip}^n \cdot g_{ip})}{\sum_{p=1}^{P_i} g_{ip} + D_i}, & \sum_{p=1}^{P_i} (\phi_{ip}^n \cdot g_{ip}) < \frac{L_i^n h_i}{h_s} \end{cases} \quad (17)$$

式中: C_i^n 为节点 i 进口车道 n 的通行能力; S_{i1}^n 为节点 i 车道 n 的饱和流量, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; S_{i2}^n 为驶入展宽车道 n 的饱和流量, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; ϕ_{ip}^n 为 0-1 变量, 判断车道 n 的车流能否在相位 p 通过节点 i , 若是则为 1, 反之则为 0; ϕ_i^n 为 0~1 变量, 判断节点 i 车道 n 是否为展宽车道, 若是则为 1, 反之为 0; g_{ip} 为节点 i 处相位 p 的有效绿灯时间, s; D_i 为节点 i 处的总损失时间, s; L_i^n 为节点 i 处车道 n 的展宽长度, m; h_i 为连续车辆间的平均饱和车头时距, s; h_s 为连续车辆间的平均车头空距, m。

3.2. 通行能力匹配模型

针对堵塞点发生的区域不同, 考虑实施匹配策略的方式也有差异, 当堵塞发生在展宽路段时, 通过采取调节信号时间、相位相序及车道功能可变的组合匹配策略, 消散堵塞点; 当共用路段发生拥挤时, 实施分时共用车道的匹配策略, 疏散阻塞区域。因此, 本研究针对路径的展宽路段、共用路段堵塞进行

分别建立匹配模型。

(1) 展宽路段匹配模型

考虑调节绿灯时间、可变车道功能及相位顺序等匹配策略,对展宽路段的堵塞点进行疏散[15],如下:

$$C_{ij}^n = \begin{cases} M_i^n S_{i3}^n g_{ip}^E, & \lambda < \alpha \\ M_i^n S_{i3}^n (g_{ip}^E - W_i^n), & \alpha \leq \lambda < \beta \\ M_i^n S_{i3}^n g_{ie}, & \lambda \geq \beta \end{cases} \quad (18)$$

式中: C_{ij}^n 为实施匹配策略后车道 n 可能的通行能力, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; M_i^n 为节点 i 展宽车道 n 的数量; S_{i3}^n 为实施匹配策略后车道 n 的饱和流量, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; g_{ip}^E 为相位 p 延长后的有效绿灯, s ; g_{ip}^E 为相位 p 初始的有效绿灯, s ; W_i^n 为节点 i 车道 n 最早可能发生排队堵塞,到完全阻塞相邻车道的的时间, s ; g_{ie} 为实施单口放行策略后,进口道的有效绿灯时间, s ; α 、 β 为触发匹配策略的阈值; λ 为路径的匹配度。

(2) 共用路段匹配模型

考虑以分时共用车道组织方法,对共用车道堵塞进行消散,其思路为将节点共用路段的车道改为共用车道。其通行权并非所有不同流向车辆都能够驶入,而是在分时情形下,左转与直行车辆才可共用车道。一般在共用车道的进口道前设置一个预信号灯,提醒左转、直行车辆有目的地驶入分时共用车道,如下:

$$C_{ij}^{k'} = \sum_{k=1}^K [\rho_k S_L (\Delta t_L + T_L) + (1 - \rho_k) S_T (\Delta t_T + T_T)] \quad (19)$$

式中: $C_{ij}^{k'}$ 为共用车道拥挤疏散后车流 k 的匹配通行能力, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$, $K = \text{L}, \text{T}$ 表示共用车道中左转、直行的车流; ρ_k 为判断左转、直行车流的变量,等于 1 表示左转,反之直行; Δt 为分时共用策略预信号与主信号的相位差, s ; T 为分时共用车道有效绿灯时间, s 。

最后,定义路径的匹配通行能力为共用、展宽的基本通行能力与堵塞消散后的可能通行能力之和,其模型如下:

$$C_{i \rightarrow j}^{n \rightarrow m} = \omega_1 (C_i^n + C_{ij}^n) + \omega_2 (C_{ij}^{k'} + C_{ij}^n) \quad (20)$$

式中: $C_{i \rightarrow j}^{n \rightarrow m}$ 为上游 n , 下游 m 路径的匹配通行能力, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; ω_1, ω_2 为权重,根据通勤车流流向的比例确定。

4. 案例仿真分析

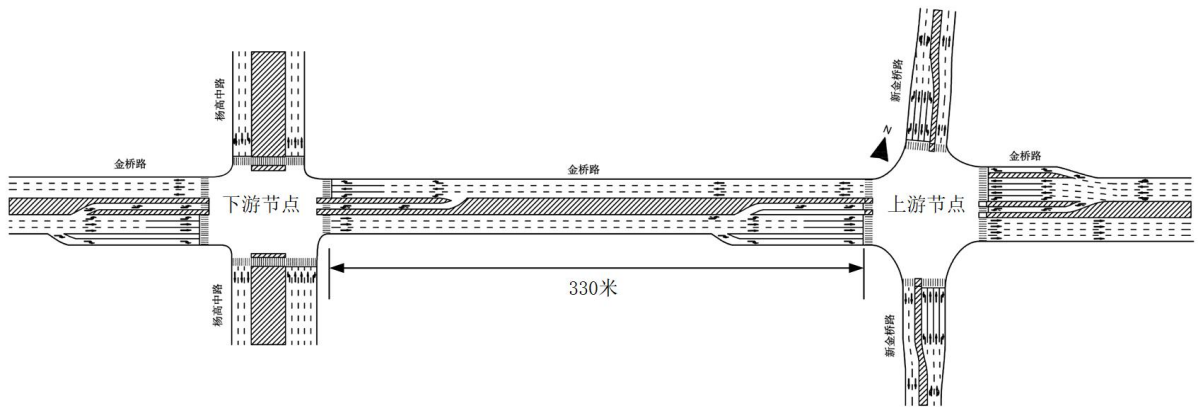


Figure 4. Schematic diagram of lane functions and spacing at upstream and downstream nodes

图 4. 上下游节点车道功能及间距示意图

为验证路径上下游通行能力匹配模型的可行性, 选择上海市浦东新区金色中环核心区域金桥路-新金桥路交叉口、金桥路-杨高中路交叉口作为上下游节点进行案例分析, 其中金桥路-新金桥路交叉口为主-次相交, 金桥路-杨高中路交叉口为主-主相交, 上下游交叉口的车道功能以及间距如图4。通过调查确定上下游节点间距为330米, 下游节点进口道展宽段长度为65米。

4.1. 上下游交叉口数据

定义通勤高峰小时7:00~8:00, 通过调查获取了流量和信号配时数据, 整理后结果如表2、表3。通过分析整体流量流向分布, 确定金桥路-新金桥路为上游节点, 金桥路-杨高中路为下游节点, 选取该车流行驶方向作为路径上下游通行能力匹配的对象。

Table 2. Distribution of flow in inlet channels of upstream and downstream nodes

表2. 上下游节点进口道流量分布

上游节点(金桥路-新金桥路)流量/(pcu·h ⁻¹)				下游节点(金桥路-杨高中路)流量/(pcu·h ⁻¹)		
进口道	左转	直行	右转	左转	直行	右转
东进口	168	1027	203	217	590	90
西进口	180	559	111	229	437	108
北进口	201	715	195	188	199	207
南进口	305	542	262	74	226	290

其主要原因是该上下游节点作为通勤交通枢纽, 周边连接着商区、企业及居住群体, 学校密集, 如金领之都、产业园区等, 金桥国际、啦啦宝都等商区, 以及碧云社区, 金杨、金桥社区等居民区。

高峰小时承载着大量通勤需求, 上下游节点在串联各功能区通勤车流的同时, 其通勤效率也面临着极大交通压力。特别是从新金桥路到杨高中路方向的通勤流量, 其不仅承受浦东新区附近工业园区的通勤车流, 还承担着向杨浦区、黄埔区等市中心输送通勤车辆。

Table 3. Signal timing scheme for upstream and downstream nodes

表3. 上下游节点信号配时方案

相位顺序	第一相位(s)	第二相位(s)	第三相位(s)	第四相位(s)	周期(s)
上游节点	东西直右/56	东西左转/28	南北直右/63	南北左转/27	189
下游节点	东西直右/57	东西左转/32	南北直右/54	南北左转/31	189
绿灯间隔/(s)	5				

4.2. 基于上下游节点通行能力匹配模型的仿真分析

4.2.1. 仿真实验设计

通过分析路径上下游通勤流量流向的特点, 确定了九种上下游路径类型, 因右转车流不受信号控制, 且该上下游节点中通勤流量多以左转和直行为主, 故暂不考虑右转车流。因此, 仿真实验设置了四类路径, 如图5, 以验证路径通行能力匹配模型的效益性。

- 1) 路径一, 上直下直: 上游节点通勤车流以直行为主, 下游节点转向以直行为主;
- 2) 路径二, 上直下左: 上游通勤交通以直行为主流向, 并在下游以左转为主流向;
- 3) 路径三, 上左下直: 上游流向以左转为主, 在下游以直行为主流向;
- 4) 路径四, 上左下左: 上游主要流向为左转, 并在下游以左转为主流量流向。

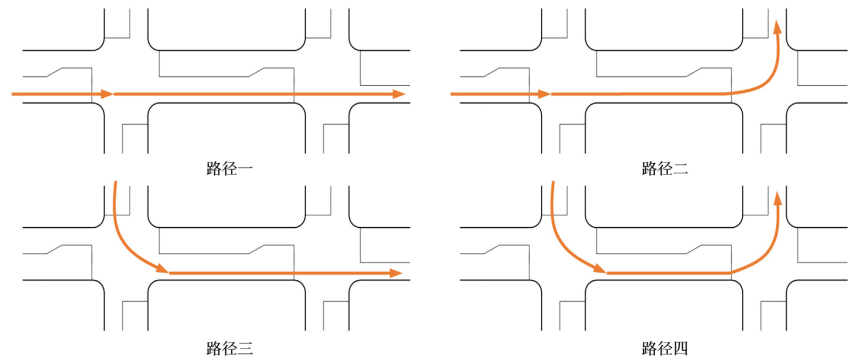


Figure 5. Upstream and downstream path types
图 5. 上下游路径类型

4.2.2. 匹配辨识结果分析

依据 2.2 中的流量流向匹配辨识模型，分别计算节点间距、路径流量流向及信号参数的贡献度，得出了匹配辨识的结果，如表 4、图 6。

整体而言，上下游四类路径的匹配度，均受 3 个相关参数的影响呈现不同程度的变化，路径一、二的匹配度最高，两者均超过了 0.79。具体而言，受流量流向因素影响较大，四条路径均在 0.5 以上，信号参数次之，特别是路径一和路径二，受 3 个参数影响较大，均超过了 0.7。

其结果说明了通勤路网中，上下游通勤交通需求多以直行、左转为为主，通勤交通受信号影响较大。路径一、二是后续通行能力匹配需要重点关注的对象。

Table 4. Upstream and downstream traffic flow direction identification results
表 4. 路径上下游流量流向辨识结果

路径类型	节点间距	流量流向	信号参数
路径一	0.58	0.88	0.78
路径二	0.72	0.92	0.50
路径三	0.29	0.52	0.39
路径四	0.29	0.62	0.25

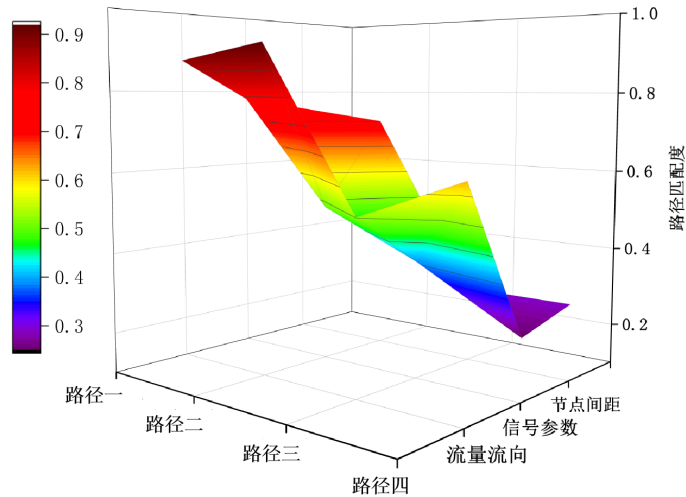


Figure 6. Path matching parameter analysis
图 6. 路径匹配参数分析

通过仿真试验发现, 路径一、二在展宽路段堵塞严重, 主要是左转与直行通勤流量相互阻塞诱发的, 进一步加剧了共用路段堵塞; 而路径三、四堵塞现象较少, 主要发生在共用路段。

因此, 结合匹配度对四类路径采取了以下的匹配策略:

1) 路径一、二: 针对展宽路段堵塞, 首先是考虑调节信号配时, 观测仿真过程的堵塞区域再考虑车道功能组合策略, 最后若共用路段发生堵塞, 进一步考虑实施分时共用车道策略, 对通行能力进行优化。

2) 路径三、四: 堵塞区域主要以共用路段为主, 先考虑调节信号配时, 缓解相邻直行车流排队溢出的影响, 之后再考虑采用分时共用车道的匹配策略。

4.2.3. 路径通行能力匹配率

以路径二, 上直下左的路径流量为例, 初始状态通行能力匹配率仅为 48%, 仿真过程发现, 该路径堵塞路段包含展宽路段车流相互阻塞、共用车道车辆换道干扰拥堵两部分, 其中进口道不同流向流量堵塞较严重, 特别是上游直行, 抵达下游节点进行直行时, 远大于左转需求, 所以造成下游进口道有左转车辆被直行堵塞, 在左转绿灯时间内, 无法驶入左转展宽车道。

因此, 为验证上下游节点通行能力匹配模型的效益性, 在实际流量比的基础上, 考虑采取增加下游直行相位有效绿灯时间, 同时结合车道功能可变以及优化上下游节点相位相序组合方式等策略, 对共用车道与展宽车道交集处的堵塞进行疏散, 并根据 3.2 节中路径通行能力匹配模型进行计算, 结果如图 7。

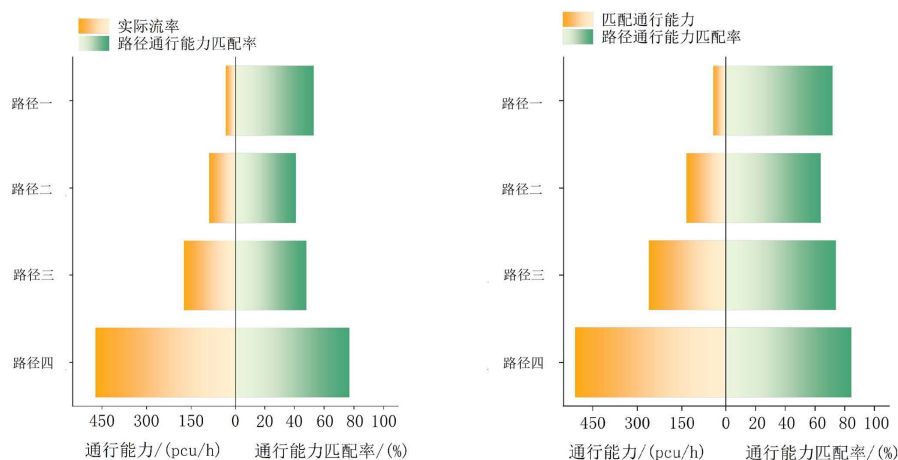


Figure 7. Path capacity matching results
图 7. 路径通行能力匹配结果

遵循初始上游直行输入下游节点的转向比例直行、左转分别为 0.6 和 0.35, 实施针对性的匹配策略后, 发现路径二、路径三的通行能力提升效果最明显。

其中, 路径三的通行能力匹配率提高了 20%, 路径二提升了 24%, 匹配效果最明显, 主要原因是左转展宽段受直行堵塞影响较大, 对直行车流堵塞点进行疏散后, 上游输入下游直行和左转的流量都得到了提升。

5. 结论

针对路径上下游节点流量流向的特征进行分析, 在考虑上下游节点间距、流量流向及信号参数三个关键因素的基础上, 建立了上下游流量流向匹配辨识模型, 进一步设计了上直下直、上直下左、上左下直及上左下左四类路径作为通行能力匹配的研究对象, 结合匹配度, 分析共用路段、展宽路段堵塞的差异性, 通过实施绿灯时间、相位相序及车道可变等调整策略, 提出了路径上下游通行能力匹配模型。

经过实例分析, 对比四类路径的通行能力匹配率, 验证了匹配模型的效益性。通过实施调节绿灯时间、车道功能及相位相序等匹配策略, 对比了匹配前后四种路径的匹配率, 结果表明, 上直下左的路径二受影响较大, 其匹配效果提升更明显。

然而, 该模型在不同路网结构以及不同城市的普适性仍需进一步探讨。当城市道路中多个相邻交叉口的通行能力不匹配时, 特别是在面临通勤需求激增的情况下, 仅考虑上下游节点的通行能力匹配存在一定的局限性, 难以满足区域性路径通行能力匹配。因此, 需要关注不同子路径间的通行能力匹配研究, 通过建立子路径匹配模型实现路径间的通行能力匹配, 进一步实现不同路网结构的通行能力匹配。

基金项目

教育部人文社会科学规划基金项目(22YJAZH131): 大数据环境下城市路网通勤交通路径协调控制机理解析研究。

参考文献

- [1] 聂磊, 马万经. 基于车道等饱和度的交叉口车道功能优化模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 42-50.
- [2] Wu, A., Qi, L. and Yang, X. (2013) Mechanism Analysis and Optimization of Signalized Intersection Coordinated Control under Oversaturated Status. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, **96**, 1433-1442. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.163>
- [3] Wu, W., Ma, W. and Long, K. (2015) Capacity Matching Based Model for Protected Left Turn Phases Design of Adjacent Signalized Intersections along Arterial Roads. *PROMET—Traffic & Transportation*, **27**, 13-21. <https://doi.org/10.7307/ptt.v27i1.1392>
- [4] 吴伟, 刘洋, 马万经, 等. 考虑上下游通行能力匹配的干线禁左模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(6): 157-163.
- [5] Yao, R., Guo, W. and Zhou, H. (2017) Integrative Design of Left-Turn Lane Space and Signal Coordination for Two Adjacent Intersections. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **44**, 274-285. <https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0331>
- [6] 姚荣涵, 彭程, 周红媚. 协调控制交叉口短车道长度和配时参数协同优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1082-1087.
- [7] Zhang, Q., Guo, X.C. and Liang, H. (2014) Correlation Degree Model of Urban Signalized Intersection Group Based on Turning Flows. *Applied Mechanics and Materials*, **641**, 839-847. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.641-642.839>
- [8] 齐立群, 云美萍, 杨晓光. 短连线交叉口饱和条件下相位差优化设计研究[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(2): 128-133.
- [9] 王浩, 彭国雄, 杨晓光. 相位相序安排与交叉口设计之间的关系[J]. 公路交通科技, 2004, 21(2): 92-94.
- [10] 刘树青. 城市交通拥堵主动防控与快速疏导控制方法研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [11] 杨胜德. 基于交叉口群协调路径链的区域交通信号控制研究[D]: [硕士学位论文]. 金华: 浙江师范大学, 2022.
- [12] 曲大义, 万孟飞, 王兹林, 等. 基于交通波理论的干线绿波协调控制方法[J]. 公路交通科技, 2016, 33(9): 112-119.
- [13] 张保硕. 短车道信号交叉口通行能力及组织优化分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020.
- [14] 马万经, 陆艳, 安琨, 等. 短车道信号控制交叉口通行能力概率模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(11): 1641-1646.
- [15] 姚佼, 赵靖, 王银, 等. 一种信控交叉口不同功能车道通行能力匹配方法和装置[P]. 中国专利, 2024102701442. 2025-02-14.