

文章编号: 1674-599X(2022)02-0109-08

基于匹配性最优的过江通道入口匝道控制方法

王静¹, 张曙光², 张生¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.五矿营口中板有限责任公司, 辽宁 营口 115005)

摘 要: 为优化过江通道入口匝道交通组织, 运用双层规划模型计算最佳入口匝道分流比例, 上层规划目标为路网匹配性最大, 并采用粒子群算法求解; 下层模型为用户均衡模型, 采用F-W算法求解。以长沙市湘府路大桥为例, 从行程时间、畅通性、路段交通状态和交叉口交通状态评价过江通道与疏解路网的匹配性, 给出不同交通需求下的匝道交通分流方案。研究表明: 基于匹配性最优的过江通道入口匝道控制方法可以有效缓解局部拥堵, 可操作性强。

关键词: 疏解路网优化; 路网匹配性; 双层规划; 粒子群算法; F-W算法

中图分类号: U491.4

文献标识码: A

On-ramp control method of river crossing channel based on optimal matching

WANG Jing¹, ZHANG Shuguang², ZHANG Sheng¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Minmetals Yingkou Plate Co., Ltd., Yingkou 115005, China)

Abstract: In order to optimize the traffic organization of the cross-river channel at entrance ramp, the two-layer planning model was used to calculate the optimal diversion ratio of the entrance ramp. The upper planning target was the road network with the greatest matching, and particle group algorithm was used to solve. The lower model was the user equilibrium model, which was solved by F-W algorithm. Taking the Xiangfu Road Bridge in Changsha City as an example, The travel time, smoothness, road traffic state and intersection traffic state were utilized to evaluated the matching between the river-crossing channel and the road network. The traffic diversion scheme of the ramp under different traffic needs is released. The result shows the ramp control method for river crossing channel based on optimal matching can effectively alleviate local congestion, that has has strong operability.

Key words: dredging road network optimization; road network matching; two-layer planning; particle group algorithm; F-W algorithm

随着城市车辆的剧增, 许多城市通过建立快速干线网络加强各组路网之间的联系。由于城市过江通道承担着快速路和其他城市道路交通流的双重压力, 成为了路网“瓶颈”, 因此需要对过江通道交通流进行系统的分析。由于入口匝道的交通流和快速路主线的交通流发生交织, 交织区通

过能力降低, 容易发生拥堵, 影响主线的通行效率。从路网整体管控的角度考虑, 必须对入口匝道进入车流进行控制以保证快速路主线的通行效率。

匝道交通的控制方法主要有信号控制、匝道设计和交通组织等3个方面。庞明宝等人^[1]研究了

收稿日期: 2021-11-17

基金项目: 湖南省交通科技进步与创新项目(202140)

作者简介: 王静(1996—), 女, 长沙理工大学硕士生。

不同交通状态下,在拥堵点的上游根据驾驶行为调整不同入口匝道数量和协调信号控制的方法。PAPAMICHAIL等人^[2]针对占有率,以最大吞吐量为目标,提出了启发式匝道计量协调策略。孙长乐^[3]考虑天气和限速因素对交通流参数的影响,提出了基于模型预测的可变限速协同控制方法。无论是调节相序或红绿灯的信号控制方法,还是匝道宽度设计或动态限速的匝道控制方法,都无法根据实时交通状态灵活调节。将交警作为执行者的实时交通组织管理方法可以弥补这缺陷。快速路入口匝道进入流量的控制是匝道交通组织的核心内容,目的是最大化提高过江通道主线的通过能力,又不导致过多车辆绕行,充分利用周边疏散路网和过江通道的通过能力,使其互相协调。称此时的入口匝道进入交通量比例为最优匝道进入比例。

在匝道交通组织优化的理论方法与实践,基于匝道排队信息反馈的信号控制^[4],以及基于匝道及主线交通流密度的匝道放行调节^[5]等方法,都是仅考虑了快速路方面,忽视了过江通道与疏散路网二者间相辅相成、相互制约的关系。以匹配性评价过江通道交通流优化的研究成果鲜见。本研究拟以长沙市湘府路大桥为例,从行程时间、畅通性、路段和交叉口交通状态4个维度研究疏散路网的匹配性,以最大化疏散路网匹配性为目标,以道路通行能力为约束条件,建立双层优化模型,对过江通道入口匝道分流比例进行优化。以期为城市过江通道疏散路网优化、过江通道交通组织提供借鉴。

1 过江通道疏散路网匹配性

1.1 疏散路网匹配性定义

车流经过过江通道后进入的两侧城市路网,被称为疏散路网。一个与过江通道相匹配的疏散路网,不仅要承载自身交通需求,而且要在路网容量上满足过江通道带来的新交通需求,并保持较高的服务水平。

本研究定义疏散路网的匹配性是指疏散路网与过江通道之间的配合情况。交通流可以流畅地进入过江通道,在驶离过江通道时无拥堵现象,

疏散路网和过江通道利用程度相当,既没有过饱和,也没有道路资源浪费,即为疏散路网与过江通道匹配性好。如果匝道出现拥堵排队,甚至回溯的现象,即为匹配性差。

1.2 疏散路网结构示意及符号定义

由交叉口和路段组成的区域路网模型可描述为: $G = \{N, L\}$ 。其中, N 为区域路网中交叉口集合, $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$, N_n 为第 n 个交叉口; $L = \{l_{ij} | l_{ij} = (l_i, l_j), i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j\}$ 为相邻节点间路段集合, l_{ij} 为路口 l_i 到路口 l_j 的长度。

典型的区域路网如图1所示,其中,路段 $N_6-N'_4$ 为过江通道,路段 $N_3-N'_1$ 和 $N_9-N'_7$ 为其他过江通道,路网A为过江通道由东向西方向车流的疏散路网,路网B为过江通道由西向东方向车流的疏散路网。

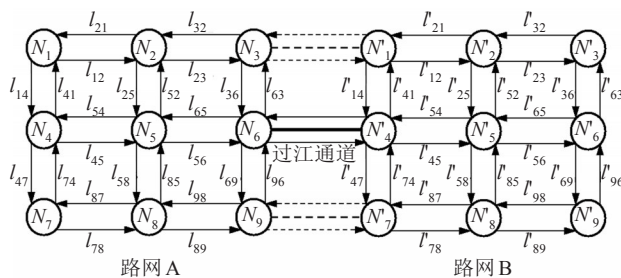


图1 典型区域路网结构

Fig. 1 Road network structure at interesting regional

1.3 符号定义

P_1^L : 路段行程时间匹配性; P_2^L : 路段畅通性; P_3^L : 路段交通状态; P_4^L : 交叉口交通状态; x_i : 路段 i 的流量, pcu/h; C_i : 路段 i 的通行能力, pcu/h; α, β : 模型参数, 取 α 为 0.2, β 为 2; $E(T_i)$: 路段的行程时间 T_i 的均值; $D(T_i)$: 路段行程时间 T_i 的方差; Φ : 标准正态分布; $t_{i,0}$: 路段 i 的自由行驶时间, s; λ_i : 路段 i 每分钟到达路段的平均流量; α', β' : 模型参数, 取值范围为 $[0,1]$, 且 $\alpha' + \beta' = 1$; V_i^M : 路段 L_i 的最高限速, m/s; v_i : 路段 L_i 的最大平均速度, m/s; R_n : 交叉口关键路段入口道最大饱和度; m_n : 交叉口 i 的关键路段数; Q : 进口道的实际交通流量, pcu/h; C : 交叉口通行能力, pcu/h; S : 信号相位饱和流量, pcu/h; c : 信号周期时长, s; g : 有效绿灯时间, s; P_j^R : 路径匹配性指标; P_j^{OD} : OD 对匹配性指标; W : 路网匹配性; P_1 : 路网行程时间匹配性; P_2 : 路网畅通性;

P_3 : 路网包含的路段交通状态; P_4 : 路网包含的交叉口交通状态; a_1 : 路网行程时间匹配性 P_1 权值; a_2 : 路网畅通性 P_2 权值; a_3 : 路段交通状态 P_3 权值; a_4 : 交叉口交通状态 P_4 权值; W' : 分流后路网匹配性; P'_1 : 分流后路网行程时间匹配性; P'_2 : 分流后路网畅通性; P'_3 : 分流后路网包含的路段交通状态; P'_4 : 分流后路网包含的交叉口交通状态; q_f : 分流交通量, pcu; q_A : 匝道 A 分流交通量, pcu; q_B : 匝道 B 分流交通量, pcu; q_r : 快速路主线交通量, pcu; q_z : 匝道交通量, pcu; Q_{ZA} : 入口匝道 A 的通行能力, pcu/h; Q_{ZB} : 入口匝道 B 的通行能力, pcu/h; Q_B : 合流区通行能力, pcu/h; r : 起点; s : 终点; q_{rs} : r 到 s 的交通需求量, pcu; t_a : 弧 a 上的阻抗, s; f_k^{rs} : r 到 s 之间路径 k 上的流量, pcu/h; $\delta_{a,k}^{rs}$: 弧 a 是否在 r 到 s 的路径 k 上, 是则取 1, 否则取 0。

2 过江通道疏解路网匹配性评价

由于一个疏解路网包含多个 OD 对, 每个 OD 对间存在多条路径, 每个路径由路段和交叉口组成。路段的匹配性包含行程时间、路段饱和度、路段平均行驶速度和交叉口的交通状态评价, 可反映具体指标上的交叉口饱和度^[6]。因此, 本研究选取行程时间匹配性^[7]、畅通性^[8]、路段交通状态及交叉口交通状态^[9]作为评价路段匹配性的指标进行优选路径、OD 对和路网匹配。

2.1 路段各匹配性指标计算

出行时间稳定性用行程时间匹配性来描述。用正态分布拟合行程时间分布概率, 路段行程时间匹配性 P_1^L 计算参考罗霞等人^[10]的研究。

$$P_1^L = P(T_i \leq \alpha\mu) = \Phi \frac{0.2E(T_i)}{\sqrt{D(T_i)}} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{aligned} E(T_i) &= E\left(t_{i_0} [1 + \alpha(x_i/C_i)^\beta]\right) \\ &= t_{i_0} + \frac{0.2t_{i_0}}{C_i^2} (\lambda_i + \lambda_i^2) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} D(T_i) &= D\left(t_{i_0} [1 + \alpha(x_i/C_i)^\beta]\right) \\ &= \frac{0.04t_{i_0}^2}{C_i^4} (4\lambda_i^3 + 6\lambda_i^2 + \lambda_i) \end{aligned} \quad (3)$$

车辆在较高服务水平下, 通过路段的概率用路段畅通性来描述。路段畅通性 P_2^L 的计算参考杜华兵^[11]的研究。

$$P_2^L = \begin{cases} 1, & \frac{x_i}{c} < 0.1 \\ 1 - x_i/C_i, & 0.1 \leq \frac{x_i}{c} \leq 0.9 \\ 0, & \frac{x_i}{c} > 0.9 \end{cases} \quad (4)$$

路段和交叉口的饱和度与速度用交通状态指标来描述。交通状态包括路段交通状态 P_3^L 和交叉口交通状态 P_4^L , 参考文献[9]对交通状态进行计算。

路段交通状态为:

$$P_3^L = \alpha' \frac{V_i^M - v_i}{V_i^M} + \beta' \frac{x_i}{C_i} \quad (5)$$

交叉口交通状态为:

$$P_4^L = \frac{1}{m_n} \sum_{n=1}^{m_n} R_n \quad (6)$$

交叉口关键路段入口到最大饱和度为:

$$R_n = \frac{Q}{C} = \frac{Q \times c}{S \times g} \quad (7)$$

2.2 路径各匹配性指标计算

若将路段作为基本单元, 那么可认为路径是各路段串联形成的系统。因此, 路径的匹配性可参考串联系统的匹配性^[12], 按式(8)计算, $j=1,2,3,4$ 分别为行程时间匹配性、畅通性、路段交通状态、交叉口交通状态。

$$P_j^R = \prod_{i \in I} P_j^L, j = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

2.3 OD 对各匹配性指标计算

路网每个 OD 对间均存在多条路径, 路径之间是并联的关系。因此, OD 对的匹配性可参考并联系统^[12], 按式(9)进行计算。

$$P_j^{OD} = 1 - \prod_{j \in J} (1 - P_j^R), j = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

2.4 路网各匹配性指标计算

计算出 OD 对匹配性后, 对路网匹配性进行评价, 但路网中各 OD 对的重要程度不同 (即 OD 对间的流量不同)。因此, 加入修正因子 ρ_k , 路网匹配性的计算式为:

$$P_j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \rho_k P_j^{OD}(k), j = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

2.5 疏解路网总体匹配性评价

根据式(10), 分别计算疏解路网的行程时间匹

配性 P_1 、畅通性 P_2 、路段交通状态 P_3 和交叉口交通状态 P_4 。根据式 (11) 计算疏解路网总体匹配性, 其计算式为:

$$W = a_1 \times P_1 + a_2 \times P_2 + a_3 \times P_3 + a_4 \times P_4 \quad (11)$$

3 过江通道上游路网优化控制模型

长沙市湘府路大桥过江通道和疏解路网如图2所示。城市快速路上的车流由右往左行驶进入过江通道, 城市主干路南、北2个方向各有一定比例的车流量由立交桥匝道驶入过江通道。匝道车流与城市快速路车流在H处交织, 不同类型驾驶员在交织区换道行驶^[13], 这制约了过江通道的通过能力。当过江通道及其衔接路段过饱和时, 周围路网未充分利用。为保证主线畅通, 对入口匝道A、B点实行流量控制, 适当限制从入口匝道进入的车辆。

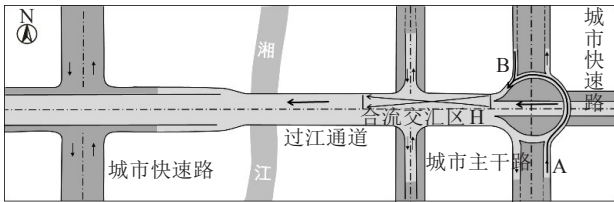


图2 湘府路大桥过江通道示意

Fig. 2 The diagram of the cross-river passage

过江通道交通流状态不同, 入口匝道分流比例也会不同。当过江通道车流处于自由流时, 车辆运行顺畅平稳, 无需限制入口匝道的流量。当过江通道交通量逐渐增加, 快速路和入口匝道车流总量超过合流区H最大通行能力时, 车辆运行受阻引起排队, 此时需要限制入口匝道的流量。在A、B点被限制进入匝道的车辆, 须绕行至其他路段, 降低过江通道的饱和度和行程时间, 其他路段的饱和度和行程时间会有所增加, 其匹配性有一定程度的提升。如果被分流车辆过多, 就会引起其他路段过饱和, 增加路网的总体延误。因此, A、B点的被分流交通量需要一个合理比例, 才能够将整个疏解路网的匹配性达到最高。

快速路系统与城市其他路网的整合优化控制, 一般通过建立双层规划模型求解。现有研究大多以总延误和行程时间最短为目标函数^[14-15], 考虑因素较为单一。本研究考虑行程时间匹配性、畅通

性和交通状态等指标作为上层规划模型的目标函数, 下层规划模型为符合用户平衡准则的交通流分配模型。

3.1 模型假设

1) 系统内道路通行能力恒定不变, 各路段交通量始终不大于自身容量。

2) 交叉口下游快速主路车流运行顺畅, 没有阻塞现象。

3) 不仅交叉口周边存在未被完全利用的城市道路, 而且周边路网车道有剩余容量可供匝道分流车辆汇入。

3.2 模型建立

上层模型的规划目标是疏解路网的匹配性最大化。通过确定合适的匝道流量, 使得疏解路网整体的匹配性增加。分流交通量 q_f , 包括匝道A、B分流的交通量 q_A 、 q_B , 禁止其驶入匝道, 通过其他道路行驶到达目的地。

上层模型的规划目标:

$$\max W' = a'_1 P'_1(x_i, q_f) + a'_2 P'_2(x_i, q_f) + a'_3 P'_3(x_i, q_f) + a'_4 P'_4(x_i, q_f) \quad (12)$$

下层模型是交通流分配模型。上层规划里各路段的交通量 x_i 是通过交通分配产生的OD对间交通量。下层模型的目标函数为路网阻抗最小化, 找出平衡状态下对应的各路段交通流量, 计算OD间的最短路径, 使其阻抗最小。疏解路网匹配性总优化模型为:

1) 上层模型

$$\begin{aligned} \max W' & \\ a'_1 P'_1(x_i, q_f) + a'_2 P'_2(x_i, q_f) + & \\ a'_3 P'_3(x_i, q_f) + a'_4 P'_4(x_i, q_f) & \\ \text{s.t. } x_i &\leq C_i \\ 0 \leq q_A &\leq Q_{zA} \\ 0 \leq q_B &\leq Q_{zB} \\ q_r + q_z &\leq Q_H \\ f_k^{rs} &\geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

2) 下层模型

$$\begin{aligned} \min Y(x) &= \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw \\ \text{s.t. } \sum_k f_k^{rs} &= q_{rs} \\ f_k^{rs} &\geq 0 \\ x_a &= \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{ak}^{rs} \end{aligned} \quad (14)$$

不同交通需求下的OD交通量,根据最短路径原则分配到路网中.通过模型求解,获得分流交通量。

下层模型用 Frank-Wolfe (F-W) 算法求解,获得各路段初始交通量,再利用公式(1)~(11)计算初始疏解路网匹配性。

上层模型用粒子群算法^[6]求解,得到初始化粒子的位置和速度。初始疏解路网匹配性作为上层模型的初始适应值。根据算法更新粒子速度和最优位置,直至达到最小允许误差后停止计算。最后输出全局最优解及对应的最优位置,即最佳匹配性和最佳分流量。

4 算例分析

湘府路高架桥由西向东的交通流疏解路网建立如图3所示。其中,路段5为过江通道路段,交叉口3为进入过江通道立体交叉口,节点1为起点,节点8、10为终点,包含2个OD对,分别为 $q_{1,8}$ 、 $q_{1,10}$,见表1,各路段参数见表2。

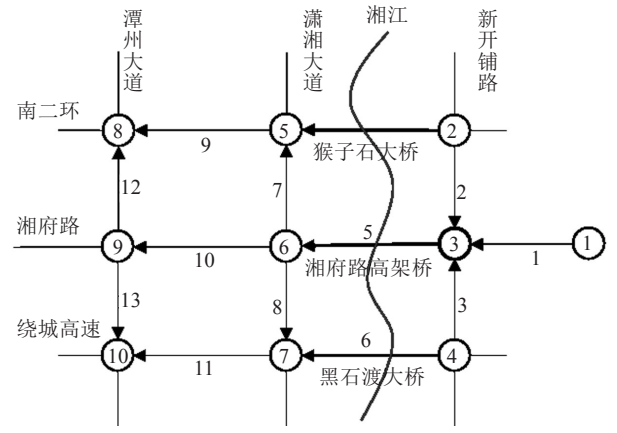


图3 道路网络示意
Fig. 3 Example of the road network

表1 路径列表
Table 1 Path list

OD 对	路径编号	包含路段
(1,8)	1	1,2,4,9
	2	1,5,7,9
	3	1,5,10,12
(1,10)	4	1,3,6,11
	5	1,5,8,11
	6	1,5,10,13

表2 各路段参数

Table 2 Parameter of each segment

编号	设计车速/ (km·h ⁻¹)	路段通行能力/ (pcu·h ⁻¹)	平均行驶速度/ (km·h ⁻¹)	交叉口通行能力/ (pcu·h ⁻¹)
1	60	3 816	55	4 472
2	40	3 717	35	3 222
3	40	3 717	35	4 472
4	30	2 736	25	3 222
5	60	3 816	55	3 222
6	30	2 736	25	4 472
7	60	3 816	55	3 222
8	60	3 816	55	3 222
9	30	2 736	25	4 472
10	60	3 816	55	3 222
11	30	2 736	25	—
12	40	3 717	35	—
13	40	3 717	35	—

4.1 计算路段初始流量

根据用户均衡原则,使用F-W算法对网络交通流初次分配后,得各路段流量,见表3。

表3 各路段流量

Table 3 Traffic of each segment

路段名	pcu		
	工作日	节假日	休息日
1	2 000	2 400	2 240
2	1 676	1 934	1 788
3	1 646	1 904	1 584
4	1 548	1 738	1 664
5	1 458	1 676	1 844
6	1 196	1 386	1 812
7	702	806	1 312
8	672	776	1 248
9	1 414	1 592	720
10	1 652	1 896	752
11	1 136	1 314	1 526
12	1 622	1 860	1 768
13	1 684	1 922	1 828

4.2 计算路段、路径、OD对以及路网的匹配性

以工作日的路网状态为例,根据式(1)~(7),可计算各路段行程时间匹配性 P_1^L 、路段畅通性 P_2^L 、路段交通状态 P_3^L 和交叉口交通状态 P_4^L ,见表4。

表 4 各路段匹配性
Table 4 The matching of each segment

路段名/交叉口名	P_1^L	P_2^L	P_3^L	P_4^L	路段名/交叉口名	P_1^L	P_2^L	P_3^L	P_4^L
1	0.999 9	0.476	0.554	—	8	0.999 9	0.824	0.130	0.706
2	0.999 9	0.549	0.288	0.632	9	0.994 6	0.483	0.342	0.623
3	0.999 9	0.557	0.284	0.755	10	0.999 9	0.567	0.258	0.639
4	0.994 6	0.434	0.366	0.621	11	0.994 6	0.585	0.291	—
5	0.999 9	0.618	0.233	0.571	12	0.999 9	0.564	0.281	—
6	0.994 6	0.563	0.302	0.550	13	0.999 9	0.547	0.289	—
7	0.999 9	0.816	0.134	0.465					

根据式(8)计算路径行程时间匹配性 P_1^R 、畅通性 P_2^R 、路段交通状态 P_3^R 及交叉口交通状态 P_4^R 指标, 根据式(9)计算 OD 对匹配性指标值 P_1^{OD} 、 P_2^{OD} 、 P_3^{OD} 、 P_4^{OD} , 见表 5。

表 5 路径和 OD 对的匹配性计算结果
Table 5 A matching calculation table for path and OD pairs

OD 对	路径编号	包含路段	P_1^R	P_1^{OD}	P_2^R	P_2^{OD}	P_3^R	P_3^{OD}	P_4^R	P_4^{OD}
(1,8)	1	1,2,4,9	0.989 0		0.055		0.020		0.192 3	
	2	1,5,7,9	0.994 3	1.000	0.134	0.258	0.006	0.035	0.167 3	0.450 4
	3	1,5,10,12	0.999 6		0.094		0.009		0.182 8	
(1,10)	4	1,3,6,11	0.989 0		0.087		0.014		0.139 0	
	5	1,5,8,11	0.989 0	1.000	0.142	0.288	0.005	0.028	0.124 0	0.370 5
	6	1,5,10,13	0.999 6		0.091		0.010		0.139 0	

在式(10)中加入修正因子, 可计算出路网行程时间匹配性 P_1 为 0.99, 路网畅通性 P_2 为 0.27, 路网包含的路段交通状态 P_3 为 0.10, 路网包含的交叉口交通状态 P_4 为 0.58。

4.3 计算权重和初始路网匹配性

通过对路网行程时间匹配性 P_1 、畅通性 P_2 、路段交通状态 P_3 及交叉口交通状态 P_4 4 个不同的评价指标的赋权, 基于熵权法能对许多不确定的系统进行客观综合评价。

通过计算指标的离散程度来计算各个指标的权重熵值。熵值越大, 表示指标包含的信息量越小, 不确定性越大, 指标的离散程度越大, 指标对综合评价的影响也越大。标准化原始数据矩阵 $X=(x_{ij})_{mn}$ 后, 得到矩阵 $Y=(y_{ij})_{mn}$ 。可得到 x_j 的信息熵值 $e_j = -k \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}$ 。根据式(10), P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 所占权重分别为 0.24、0.25、0.26、0.25, 路网匹配性计算结果为 0.48。

4.4 高架入口匝道分流

匝道 A 分流交通量为 q_A , 匝道 B 分流交通量为 q_B , 分流后各路段流量见表 6。

表 6 分流后各路段交通量
Table 6 Traffic volume for each section after diversion

路段名	分流前交通量	分流后交通量
1	2 000	x_1
2	1 676	x_2+q_A
3	1 646	x_3+q_B
4	1 548	x_4+q_A
5	1 458	$x_5-q_A-q_B$
6	1 196	x_6+q_B
7	702	x_7
8	672	x_8
9	1 414	x_9+q_A
10	1 652	$x_{10}-q_A-q_B$
11	1 136	$x_{11}+q_B$
12	1 622	$x_{12}-q_A$
13	1 684	$x_{13}-q_B$

上层模型使用粒子群算法,得到快速路主线交通量、匝道交通量和分流比例的三维关系,如图4所示。

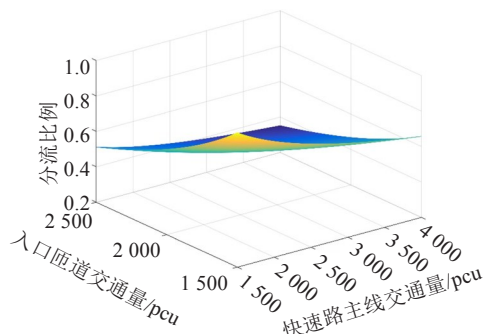


图4 不同交通需求下匝道分流比例

Fig. 4 The proportion of diversion under different traffic need

从图4中可以看出,匝道分流比例与快速路主线交通量、入口匝道交通量之间呈负相关。当快速路主线交通量与入口匝道交通量为2 500辆左右时,交通量较大时,周围路网未饱和,剩余通行能力尚足。为保证快速路主线交通流的优先通行,匝道分流比例可达0.6以上,随着交通需求的增加,快速路主线交通量、入口匝道交通量以及周围路网交通量均增加。由于周围道路容量限制,分流比例降低。

根据道路服务水平,得到湘府路高架桥出入口匝道控制方案,见表7。

表7 湘府路大桥入口匝道分流方案

Table 8 The entrance diversion scheme for the Xiangfu Road Bridge

服务水平	饱和度	主线交通量/pcu	匝道交通量/pcu	分流比例
C	0.60~0.75	2 300	1 800	0.66
D	0.75~0.90	3 000	2 000	0.52
E	0.90~1.00	3 500	2 300	0.34

当湘府路高架桥入口主线交通需求达到2 300 pcu时,匝道交通量约为1 800 pcu,此时匝道分流比例为0.66,即每100当量小汽车进入匝道,其他车辆则通过其他道路到达目的地。同理,当主线交通需求为3 000、3 500 pcu时,分流比例分别为0.52、0.34。

根据调整后的路网流量分配情况和粒子群算法,得出路网匹配性收敛过程,如图5所示,路网匹配性指标值为1.27,高于初始的0.48。

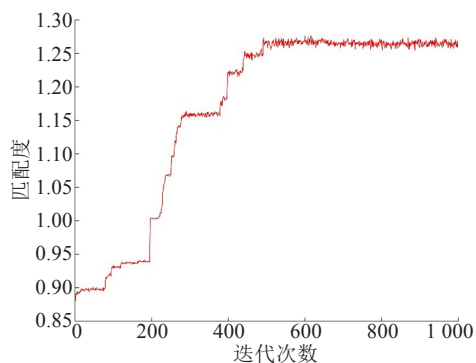


图5 优化后匹配性

Fig. 5 The match after optimization

5 结论

以城市过江通道与周边疏散路网匹配性最大为上层目标,通过采取流量控制,在充分利用周边道路资源的同时,可以避免过江通道主线交通流受到过度扰动,甚至失效现象的发生。相较于拥堵发生后采取“被动”措施,这种“主动”控制措施更具有先进性,并以长沙市湘府路大桥为例证明了模型的有效性。

本研究从城市过江通道与周边疏散路网的匹配性角度,分析了过江通道入口匝道交通组织优化问题,优化了在不同交通需求下的过江通道入口分流比例。优化方案不仅能解决局部的拥堵问题,而且能够使过江通道与周边疏散路网在行程时间、畅通性和交通状态等方面达到最优匹配。所建立的双层规划模型,适用于路网整体最优与出行者选择之间出现矛盾的情况。

参考文献(References):

- [1] 庞明宝,夏泽民,栾燕海.城市快速路多匝道协调控制信号施加策略仿真[J].系统仿真学报,2018,30(8):3050-3057. (PANG Mingbao, XIA Zemin, LUAN Yanhai. Inputting strategy simulation of multi-ramp coordinated control signal for urban expressway[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3050-3057.(in Chinese))
- [2] PAPAMICHAIL I, PAPAGEORIOU M, VONG V, et al. Heuristic ramp-metering coordination strategy implemented at monash freeway, Australia[J]. Transportation Research Record: Journal of the

- Transportation Research Board, 2010,2178(1):10-20.
- [3] 孙长乐. 雾天高速公路匝道控制与可变限速控制方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020. (SUN Changle. Research on ramp metering and variable speed limit control method in freeway under foggy weather conditions[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese))
- [4] 贵舒玥, 何烈云, 金石磊. 城市快速路入口匝道交通信号模糊控制算法[J]. 交通科技, 2021(5): 105-110. (GUI Shuyue, HE Lieyun, JIN Shilei. Fuzzy control algorithm of import ramp traffic signals on urban expressway[J]. Transportation Science & Technology, 2021(5): 105-110. (in Chinese))
- [5] 郑淑晖, 郑国荣, 尚春琳. 基于可拓决策的城市快速路入口匝道控制方法研究[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S2): 58-59. (ZHENG Shuhui, ZHENG Guorong, SHANG Chunlin. Research on control method of urban expressway entrance ramp based on extension decision [J]. Application Research of Computers, 2020, 37(S2): 58-59. (in Chinese))
- [6] 赵庆迁, 王亚萍, 雷建明, 等. 基于饱和度的路网交通态势实时辨识[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(4): 104-110. (ZHAO Qingqian, WANG Yaping, LEI Jianming, et al. Real-time identification of the road network traffic state based on saturation[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 104-110. (in Chinese))
- [7] ZHENG F F, LI J, VAN Zuylen H, et al. Urban travel time reliability at different traffic conditions[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2018, 22(2): 106-120.
- [8] 徐旭, 付蓉. 基于畅通可靠度的道路网络结构可靠度[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2012, 18(5): 448-453. (XU Xu, FU Rong. Road network structural reliability based on mobility reliability[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2012, 18(5): 448-453. (in Chinese))
- [9] 黄艳国, 宋二猛, 钟建新. 城市区域路网交通状态分析与评价方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(12): 91-96, 109. (HUANG Yanguo, SONG Er'meng, ZHONG Jianxin. Analysis and evaluation method for traffic state of urban regional road network[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2017, 36(12): 91-96, 109. (in Chinese))
- [10] 罗霞, 曹阳, 刘博, 等. 基于浮动车数据的城市道路行程时间估计[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(2): 1-8. (LUO Xia, CAO Yang, LIU Bo, et al. Travel time estimation for urban roads based on floating car data[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2018, 16(2): 1-8. (in Chinese))
- [11] 杜华兵. 基于畅通可靠度的城市道路网络改扩建优化[D]. 北京: 北京工业大学, 2002. (DU Huabing. The urban road network optimization basing on unblocked reliability [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2002. (in Chinese))
- [12] 胡继华, 杨媛媛, 程智锋, 等. 基于浮动车数据的城市路网OD连通可靠度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 105-109. (HU Jihua, YANG Yuanyuan, CHENG Zhifeng, et al. Research on connectivity reliability of OD in urban road network based on floating car data[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(2): 105-109. (in Chinese))
- [13] 刘思源, 喻伟, 刘洁莹, 等. 考虑驾驶风格的车辆换道行为及预测模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(1): 28-35. (LIU Siyuan, YU Wei, LIU Jieying, et al. Characteristics analysis and prediction model of lane changing behavior under different driving styles[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(1): 28-35. (in Chinese))
- [14] 武可心, 傅白白, 岳贤飞. 基于双层规划的快速路与周边路网协调优化[J]. 山东建筑大学学报, 2017, 32(1): 33-38. (WU Kexin, FU Baibai, YUE Xianfei. Expressway and surrounding road network coordinated optimization based on bi-level programming[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2017, 32(1): 33-38. (in Chinese))
- [15] 杨晓芳, 付强, 杨晓光. 城市快速路与地面道路交通整合控制分析[J]. 交通与计算机, 2005, 23(5): 4-7. (YANG Xiaofang, FU Qiang, YANG Xiaoguang. Study of integrated control of urban expressway traffic systems and traffic signal control[J]. Computer and Communications, 2005, 23(5): 4-7. (in Chinese))
- [16] 赵志刚, 王伟倩, 黄树运. 基于改进粒子群的双层规划求解算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(S2): 115-119. (ZHAO Zhigang, WANG Weiqian, HUANG Shuyun. Bi-level programming problem based on improved particle swarm algorithm[J]. Computer Science, 2013, 40(S2): 115-119. (in Chinese))