

高速公路出入口与邻接城市道路协同控制方法研究

李文勇, 秦宇哲, 廉冠*, 王元顺

(桂林电子科技大学 广西智慧交通重点实验室, 桂林 541004)

摘要:针对高峰时期高速公路出入口及周边区域交通需求过大和交通负荷分布不均而引起的区域交通拥堵问题,研究了高速公路出入口与邻接城市道路协同控制方法。首先通过研究高速公路出入口区域内各节点之间进出的交通需求和通行能力关系,以收费站及其衔接交叉口通行量最大为控制目标,构建高速公路出入口交通协同控制模型。其次,研究了城市道路区域边界节点与高速公路出入口之间进出的交通需求和通行能力关系,结合红波协调控制思想,构建城市路段交通信号协调控制模型。最后以南宁市石埠高速公路出入口及周边区域为例,通过开展 VISSIM 仿真试验验证方法的有效性和可行性。仿真结果表明:虽然协调区域上的边界节点交通负荷有所增加,但高速公路出入口衔接节点平均排队长度和平均延误分别降低了 22.36% 和 13.10%,其他节点总的平均排队长度降低了 18.54%,从区域路网的角度考虑,仿真结果表明了本文方法能有效缓解高速公路出入口及周边的区域性交通拥堵问题。

关键词:城市交通;协同控制;通行能力;区域交通拥堵;VISSIM 仿真

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)03-0132-10

Study on the collaborative control method of freeway entrance and exit and adjacent urban roads

LI Wenyong, QIN Yuzhe, LIAN Guan*, WANG Yuanshun

(Guangxi Key Laboratory of Intelligent Transportation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming to solve the problem of regional traffic congestion caused by excessive traffic demand and uneven distribution of traffic load during peak time, the collaborative control method of freeway entrance and exit and adjacent urban roads is studied. Firstly, after studying the relationship between the traffic demand and the traffic capacity from node to node in the area of freeway entrance and exit, a collaborative traffic control model of freeway entrance and exit is constructed, taking the maximum traffic volume of toll station and its connecting intersection as the control target. Secondly, after studying the relationship between the traffic demand and the traffic capacity from each boundary node of the urban road region to the freeway entrance and exit, a traffic signal coordination control model of urban section is constructed, combined with the idea of red wave coordination control. Finally, taking Shibufree Freeway in Nanning City and its surrounding areas as examples, the validity and feasibility of the method were verified by carrying out VISSIM simulation experiments. The simula-

收稿日期:2022-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61963011);广西科技重大专项项目(桂科 AA19254016)

作者简介:李文勇(1976—),男,河南南阳人。博士,教授,主要从事智慧交通方面的研究。E-mail:traffic@guet.edu.cn。

*通信作者:廉冠(1989—),男,河南焦作人。博士,副教授,主要从事智慧交通方面的研究。E-mail:lianguan@guet.edu.cn。

tion results show that although the traffic load of the boundary nodes on the coordination area has increased, the average queue length and the average delay at the freeway entrance and exit cohesion nodes are reduced by 22.36% and 13.10% respectively, and the total average queue length at other nodes is reduced by 18.54%. From the perspective of regional road network, the simulation results show that the proposed method can effectively alleviate the regional traffic congestion of freeway entrance and exit and the surrounding areas.

Key words: urban transportation; collaborative control; traffic capacity; regional traffic congestion; VISSIM simulation

交通运输部数据显示我国高速公路 ETC 使用率已经超过 65.98%,收费站通行效率显著提高,高速公路出入口交通拥堵状况明显改善。然而新交通环境下,随着收费站通行效率的提高和进出城交通需求增长,高速公路出入口及周边区域交通节点交通需求急剧上升,导致节点承载的交通量超过通行能力。由于进出城交通需求与道路通行能力不匹配,高速公路路网与城市路网衔接区域的交通节点出现过载,引发大范围交通拥堵,显著影响进出城车辆通行效率。

目前解决高速公路出入口交通拥堵问题的方法主要集中在交通控制和道路设计层面的优化。项昀等^[1]研究了高速公路主线与入口匝道之间的关系,通过协调控制模型调整入口匝道车辆流入量,以维持高速公路主线车辆占有率在期望水平,降低主线拥堵风险。SPILIOPOULOU 等^[2-3]为提高地面合流区通行效率,提出了实时控制算法。魏广奇等^[4]通过控制高速公路收费站栏杆机的起落,设计了不同状态下基于收费站栏杆机控制的入口匝道控流算法,有效地控制了汇入高速公路主线的车流量。崔洪军等^[5]基于节能减排目标提出了收费站拥堵车流交通控制系统,降低了高速公路收费站交通拥堵时的车辆燃油消耗。史煜阳^[6]利用交通流理论建立了收费站出口和下游衔接交叉口的协同控制模型,有效降低了排队长度和交叉口车辆延误。陈纲梅^[7]、宋文通^[8]为解决高速公路出入口路段车辆排队溢出问题,建立了交通协同控制模型,提高了出入口通行效率。

目前主要是从单点信号控制和几何设计的角度出发研究出入口交通拥堵问题,这些方法对于缓解当前高速公路路网和城市路网衔接区域的交通拥堵问题是有限的。由于该衔接区域受高速公路和城市道路交通需求影响,车辆在区域转换中需求与道路通行能力不匹配,导致交通拥堵。本文研究高速公路出入口及周边城市道路交通节点,通过分析拥堵成因,提出协同控制方法,并利用仿真试验验证其有效性和可行性。

1 问题描述

如图 1 中的节点 A 是高速公路出入口与城市路段的关键衔接节点,节点 A 的运行状况直接影响车辆在高速公路出入口的进出效率。为了使车辆快速完成高速公路路网和城市路网之间的区域转换,高速公路出入口路段通常采用快速放行模式。在快速放行模式下,若放行速率过高会使得关键节点 A 的交通负荷剧增从而降低车辆的进出城效率,若放行速率过低会使得上游路段产生车辆排队滞留引起大范围交通拥堵。为此,本文提出了包含上层模型和下层模型的高速公路出入口与邻接城市道路协同控制方法。

在高速公路出入口区域中构建高速公路出入口交通协同控制模型(上层模型),通过控制上游节点流出交通量使其不超过下游节点的通行能力,同时调控下游节点的通行能力使其满足上游的交通需求,实现高速公路匝道、收费站和衔接节点 A 之间交通需求和通行能力匹配。

在城市路段区域中构建城市路段交通信号协调控制模型(下层模型),基于高速公路出入口与边界节点之间的交通需求和通行能力大小,调整协调区域边界节点 E3、N2、S2 的信号方案,使得边界节点在出口方向上的通行能力满足高速公路出入口的出口交通需求,同时使边界节点在入口方向进入的交通流量不超过高速公路出入口的入口通行能力,实现高速公路出入口区域与城市道路区域之间交通需求和通行能力匹配。利用干线协调控制思想^[9]对协调区域内除边界节点以外的其他交通节点进行协调控制,通过增加车辆在节点 A 上游的停车次数和延误,间接降低由城市路段汇入节点 A 的交通流率^[10],同时尽可能地加快车辆在出口方向上的分流。

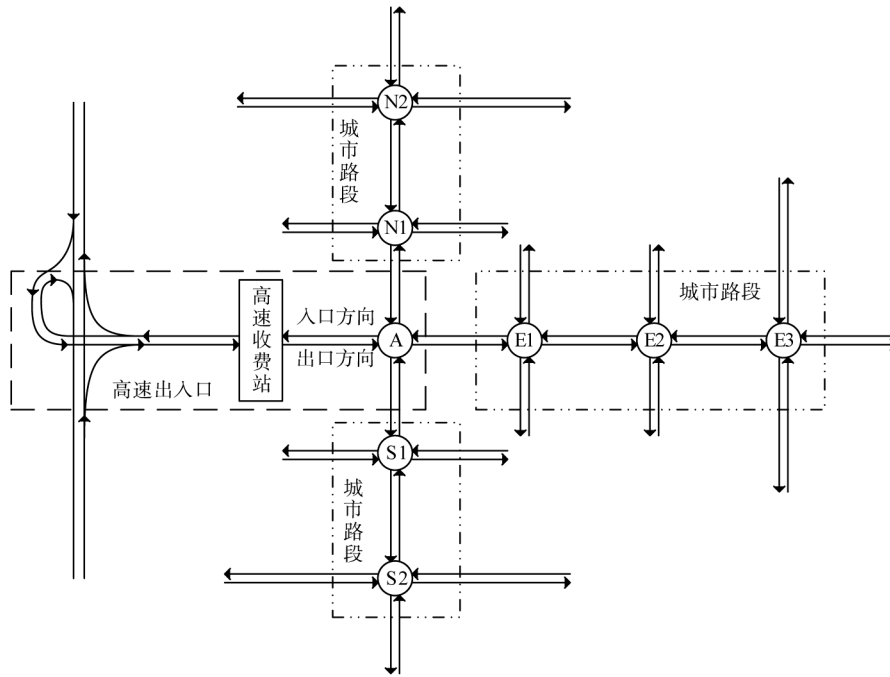


图1 高速公路出入口与邻接城市道路示意

2 高速公路出入口交通协同控制模型

高速公路出入口是高速公路路网和城市路网之间的关键连接点,尽管高速公路出口和入口的交通流相对独立^[11],但若上下游路段之间的交通流未协调,可能导致拥堵,进而影响整个出入口的通行效率。因此建立高速公路匝道、收费站和衔接交叉口的协同控制模型,调和路段内各节点的交通流,实现进出城方向的双向协同,降低高速公路出入口路段的拥堵风险。

2.1 协同控制模型目标

为尽可能提高出入口通行效率,以一定限制条件下目标收费站及其衔接交叉口的通行量 Q 最大为控制目标,将车辆在收费站出口和入口方向 ETC 通道和 MTC 通道逗留时间 $t_{etc,in}$ 、 $t_{etc,out}$ 、 $t_{mtc,in}$ 、 $t_{mtc,out}$ 和衔接交叉口绿信比 $\lambda_{A,1}$ 、 $\lambda_{A,2}$ 、 $\lambda_{A,3}$ 、 $\lambda_{A,4}$ 作为决策变量,并设置变量约束。

$$Q = Q_{etc,out} + Q_{mtc,out} + Q_{etc,in} + Q_{mtc,in} + \sum_{i=4}^4 p_{A,i} \lambda_{A,i} \quad (1)$$

其中,

$$Q_{etc,out} = \frac{3600}{t_{etc,out}} n_{etc,out}, t_{etc,out} \in [t_{etc,min}, t_{etc,max}] \quad (2)$$

$$Q_{mtc,out} = \frac{3600}{t_{mtc,out}} n_{mtc,out}, t_{mtc,out} \in [t_{mtc,min}, t_{mtc,max}] \quad (3)$$

$$Q_{etc,in} = \frac{3600}{t_{etc,in}} n_{etc,in}, t_{etc,in} \in [t_{etc,min}, t_{etc,max}] \quad (4)$$

$$Q_{mtc,in} = \frac{3600}{t_{mtc,in}} n_{mtc,in}, t_{mtc,in} \in [t_{mtc,min}, t_{mtc,max}] \quad (5)$$

$$\sum_{i=4}^4 p_{A,i} \lambda_{A,i} = p_{A,1} \lambda_{A,1} + p_{A,2} \lambda_{A,2} + p_{A,3} \lambda_{A,3} + p_{A,4} \lambda_{A,4} \quad (6)$$

式中: $Q_{etc,out}$ 、 $Q_{mtc,out}$ 、 $Q_{etc,in}$ 、 $Q_{mtc,in}$ 分别为收费站出口和入口方向 ETC 通道和 MTC 通道的实时最大通行量; $n_{etc,out}$ 、 $n_{mtc,out}$ 、 $n_{etc,in}$ 、 $n_{mtc,in}$ 分别为收费站收费通道数量; $\lambda_{A,i}$ 和 $p_{A,i}$ 分别为节点 A 在流向 i 的绿信比和交通流率,流向 $i=1,2,3,4$ 分别为东西直行、东西左转、南北直行、南北左转; $t_{etc,min}$ 、 $t_{etc,max}$ 、 $t_{mtc,min}$ 、 $t_{mtc,max}$ 分别为车辆在收费通道逗留时间的最小值、最大值。

2.2 协同控制模型及约束条件

2.2.1 高速公路出口方向约束

对收费站及其上下游衔接路段、衔接节点的通行能力进行匹配和约束,一定时间内驶离高速公路进入收费站的通行需求应小于收费站出口实时通行能力。

$$C_A D_m \leq \frac{C_A (Q_{\text{etc,out}} + Q_{\text{mtc,out}})}{3600} \quad (7)$$

同时,收费站出口理论最大放行量应不超过下游节点 A 的通行能力。

$$\frac{C_A (Q_{\text{etc,out}} + Q_{\text{mtc,out}})}{3600} \leq C_A p_{A,1} \lambda_{A,1} + C_A p_{A,2} \lambda_{A,2} + C_A p_{A,r} \quad (8)$$

式中: C_A 为衔接节点 A 的信号周期; D_m 为驶离高速公路的交通需求; $p_{A,r}$ 为节点右转车辆流率。

2.2.2 高速公路入口方向约束

一定时间内由衔接节点 A 驶入收费站入口的通行需求应小于收费站入口实时通行能力。

$$C_A p_{A,1} \lambda_{A,1} + C_A p_{A,4} \lambda_{A,4} + C_A p_{A,r} \leq \frac{C_A (Q_{\text{etc,in}} + Q_{\text{mtc,in}})}{3600} \quad (9)$$

同时,收费站入口理论最大放行量应不超过下游高速公路匝道通行能力。

$$\frac{C_A (Q_{\text{etc,in}} + Q_{\text{mtc,in}})}{3600} \leq C_A Z_{\text{ramp,in}} \quad (10)$$

式中: $Z_{\text{ramp,in}}$ 为收费站入口下游高速公路匝道通行能力。

2.2.3 决策变量约束

实际情况中,ETC 收费方式的通行效率远远高于 MTC 收费方式,因此为体现两种收费方式的差别,车辆在 ETC 通道逗留时间应短于 MTC 通道,即有以下约束:

$$t_{\text{etc,out}} < t_{\text{mtc,out}}, t_{\text{etc,in}} < t_{\text{mtc,in}} \quad (11)$$

带有行人过街的相位绿灯时间,应满足最短绿灯时间条件,因此有约束:

$$\lambda_{A,1} \geq \frac{g_{A,\min 1}}{C_A}, \lambda_{A,3} \geq \frac{g_{A,\min 3}}{C_A} \quad (12)$$

式中: $g_{A,\min i}$ 为 A 节点信号相位 i 的最短绿灯时间。

2.2.4 协同控制模型

综上所述,以式(13)为模型目标函数,以式(2)~式(12)为模型约束条件,构建高速公路出入口交通协同控制模型,该协同控制模型为单目标非线性方程,可用经典的遗传算法进行求解^[12]。

$$\text{Max } Q = Q_{\text{etc,out}} + Q_{\text{mtc,out}} + Q_{\text{etc,in}} + Q_{\text{mtc,in}} + \sum_{i=4}^4 p_{A,i} \lambda_{A,i} \quad (13)$$

3 城市路段交通信号协调控制模型

由于高峰时刻高速公路出入口及周边区域交通量较大且无法得到快速疏散,容易在路段和节点发生交通拥堵,严重时会上溯溢出蔓延至其他路段,扩大了交通拥堵范围^[13],阻断了路网车辆的正常通行。因此,需要对边界节点进行截流和卸载控制,减小进入高速公路出入口的车流量,同时利用红波控制理论实现干线交通资源时空调配,通过增加车辆在上游道路的滞留时间,降低下游路段的来车强度,在控制车流大小的同时尽可能地快速疏散出口方向的车流^[14]。

3.1 城市路段协调控制范围

为了提高控制效率,需明确定义合理的交通控制范围以达到最佳效果。从高速公路收费站衔接节点出发,往城市道路方向搜寻关联的交通节点并纳入控制范围,确定控制干线。本文协调控制范围划分的原则为:①与高速公路收费站衔接节点相邻的交通节点直接划入控制范围;②若节点之间距离小于 800 m,且关联度 $I \geq 0.4$,划入控制范围;③完成关联节点选取后,取最外侧关联节点下游相邻的第 1 个交通节点作为该控制干线的控制边界。采用美国《统一交通控制设施手册》中的关联度模型描述交通节点之间的关联度,见式(14)。

$$I = \frac{0.5}{1+t} \left(\frac{nq_{\max}}{\sum_{i=1}^n q_i} - 1 \right) \quad (14)$$

式中: I 为交通节点关联度; t 为车辆在节点之间的行程时间; n 为上游节点的车辆驶入分支的数量; q_{\max} 为上游节点的最大流率; q_i 为上游节点到下游节点的交通流率。

3.2 协调区域边界进出交通流控制

在辅助区域路网疏解交通拥堵时,协调边界区域的边界节点主要通过截流和卸载功能发挥作用,同时,通过交通诱导提前分流即将进入协调区域的车辆。以边界节点 E3 为例,根据高速公路出入口在出口方向上的交通需求,计算出节点 E3 在流出协调区域方向上的最小通行能力,以满足高速公路出入口在出口方向上的交通需求,见式(15)。

$$Z_{E3,out} = \sum_{i=1}^n C_{E3} \lambda_{E3,out i} p_{E3,out i} \geq D_{A,out} = C_A \lambda_{A,out i} p_{A,out i} \quad (15)$$

式中: $Z_{E3,out}$ 为边界节点 E3 在流出方向上的通行能力; $D_{A,out}$ 为由高速公路收费站衔接节点 A 至边界节点的交通需求; C_{E3} 为边界节点 E3 信号周期; $\lambda_{E3,out i}$ 和 $p_{E3,out i}$ 分别为边界节点 E3 在流出方向上相位 i 的绿信比和交通流率; $\lambda_{A,out i}$ 和 $p_{A,out i}$ 分别为节点 A 在流出方向上相位 i 的绿信比和交通流率。

根据高速公路出入口在入口方向上的通行能力大小,计算出由边界节点 E3 进入协调区域的最大可流入交通量,此最大可流入交通量应小于高速公路出入口在入口方向上的通行能力,见式(16)。

$$D_{E3,in} = \sum_{j=1}^n C_{E3} \lambda_{E3,in j} p_{E3,in j} \leq Z_{A,in} = C_A \lambda_{A,in j} p_{A,in j} \quad (16)$$

式中: $D_{E3,in}$ 为由边界节点 E3 流入协调区域的交通需求; $Z_{A,in}$ 为由高速公路收费站衔接节点 A 流入高速公路出入口方向上的通行能力; $\lambda_{E3,in j}$ 和 $p_{E3,in j}$ 分别为边界节点 E3 在流入方向上相位 j 的绿信比和交通流率。

在完成各边界节点交通流分配后,通过压缩或增加边界节点 E3 的相位绿灯时间,控制进出协调区域的交通流量大小,绿灯时间调整量计算见式(17)和(18)。

$$\Delta g_{E3,out} = \sum_{i=1}^n C_{E3} \lambda_{E3,out i} \frac{D_{A,out} - Z_{E3,out}}{Z_{E3,out}} \quad (17)$$

$$\Delta g_{E3,in} = \sum_{j=1}^n C_{E3} \lambda_{E3,in j} \frac{Z_{A,in} - D_{E3,in}}{D_{E3,in}} \quad (18)$$

式中: $\Delta g_{E3,out}$ 和 $\Delta g_{E3,in}$ 分别为边界节点 E3 在流出方向上和流入方向上关联相位的绿灯时间调整量。

3.3 协调区域内交通节点干线协调控制

以高速公路收费站衔接交叉口 A 为关键节点,在城市路段上游方向建立红波控制带,尽可能增加车辆在上游路段的停车次数和延误,降低衔接交叉口 A 的车辆到达率,间接地降低由城市路段驶入高速公路出入口的车流量。假设车辆协调速度为 v , 节点公共周期为 C , 任意节点 i 的相位红灯时间为 R_i , 节点 i 下游节点 j 的相位红灯时间为 R_j , 节点 i 至节点 j 的间距和相位差分别为 L_{ij} 、 O_{ij}^f , 分以下两种情况讨论红波协调控制相位差。

1) 相邻节点间车辆行驶时间 $\frac{L_{ij}}{v}$ 小于一个公共周期时间 C 时,相邻节点间红波协调相位差为

$$O_{ij}^f = \frac{L_{ij}}{v} + R_j \quad (19)$$

2) 相邻节点间车辆行驶时间 $\frac{L_{ij}}{v}$ 大于一个公共周期时间 C 时,根据相邻节点信号不同的起始状态,

可分为 a、b 两种情形计算。

情形 a: 当上游节点 i 绿灯亮起,下游节点 j 为红灯状态时,此时相邻节点相位差为

$$O_{ij}^f = \frac{L_{ij}}{v} - C \left\{ \frac{L_{ij}}{Cv} \right\} - C(C - R_j) \quad (20)$$

情形 b:当上游节点 i 绿灯亮起,下游节点 j 为绿灯状态时,此时相邻节点相位差为

$$O_{ij}^f = \frac{L_{ij}}{v} - C \left\lfloor \frac{L_{ij}}{Cv} \right\rfloor + R_j \quad (21)$$

其中, $\left\lfloor \frac{L_{ij}}{Cv} \right\rfloor$ 表示向下舍入取整。

4 案例仿真分析

南宁石埠收费站作为南宁市的“西大门”,主要承载南宁与百色、崇左方向大量的货运、客运需求,高峰时期交通压力大,高速公路出入口周边区域交通拥堵问题凸显,因此选取南宁石埠收费站及周边城市节点作为研究对象,对本文研究方法进行论证。

通过实地调查,获取了南宁石埠高速公路出入口及周边各节点的交通流量和信号控制方案数据。仿真对象区域如图 2 所示,相关交通流量数据见表 1,节点现状信号控制方案见表 2。



图 2 仿真区域

表 1 各交通节点交通流量数据

节点	东进口			西进口			南进口			北进口		
	左	直	右	左	直	右	左	直	右	左	直	右
收费站	—	1576	—	—	1798	—	—	—	—	—	—	—
石埠互通	471	—	1105	—	—	—	—	467	1031	1011	1482	—
节点 1	597	873	528	714	897	287	471	337	589	1261	189	241
节点 2	—	1926	—	—	1839	—	—	—	—	—	—	—
节点 3	—	1983	—	—	1904	—	—	—	—	—	—	—
节点 4	—	1772	443	372	1456	—	—	—	—	588	—	392
节点 5	—	2037	—	—	1961	—	—	—	—	—	—	—
节点 6	731	1464	244	429	1418	375	663	284	562	225	676	209
节点 7	683	1413	316	599	1463	359	542	628	719	311	897	364
节点 8	—	—	—	137	—	158	182	1412	—	—	1577	213

利用 VISSIM 仿真软件绘制路网模型,实时监测、收集收费站和节点进口道排队数据、车辆延误数据。南宁石埠收费站出口方向有 4 个 ETC 收费通道和 2 个 MTC 收费通道,入口方向有 2 个 ETC 收费通道和 2 个 MTC 收费通道。节点 1 信号配时采用固定信号周期 200 s,最小、最大绿灯时间分别设定为 25、55 s,直行饱和流率为 $p_{1,1} = p_{1,3} = 0.472$ 辆/s,左转、右转饱和流率为 $p_{1,2} = p_{1,4} = p_{1,r} = 0.431$ 辆/s, $D_m = 0.417$ 辆/s, $Z_{\text{ramp,in}} = 0.694$ 辆/s,各相位间隔时间 $L = 3$ s, $t_{\text{etc,min}} = 3$ s, $t_{\text{etc,max}} = 12$ s, $t_{\text{mtc,min}} = 8$ s, $t_{\text{mtc,max}} = 15$ s,将以上交通数据输入上层协同控制模型,利用遗传算法求解输出收费站调整控制方案以及衔接节点 1 的信号控制方案,输出结果如表 3 所示。

上层模型的输出结果经过初步仿真分析,验证了其控制方法的可行性。由图 3 和图 4 可观察到,通过提高收费站出口方向车辆在收费站逗留时间和调整衔接节点 1 的信号控制方案,上层模型有效降低了单位时间内收费站与衔接节点 1 之间的交通流量,平衡了交通压力。由于限制了收费站出口方向的交通流量,进城车辆减少,城市道路网节点的排队长度和车辆延误略有变化。上述仿真分析表明上层模型的控制手段有效可行,为更全面、有效地解决周边区域的交通拥堵问题,进一步引入城市路段交通信号协调控制模型。

根据上层协同控制模型输出方案,计算调控后高速公路出入口在出口方向上交通需求和入口方向上通行能力大小,高速公路出口方向的交通需求为 1800 辆/h,高速公路入口方向通行能力为 2454 辆/h。边界节点 7 中,东进口、南进口、北进口的行车方向为入口方向,西进口行车方向为出口方向;同理,边界节点 8 中,北进口、西进口为入口方向,南进口为出口方向。结合式(15)、式(16)计算边界节点 7、节点 8 分别在入口方向上最大的通行量和出口方向上应具备的最小通行能力,再利用式(17)、式(18)调整节点相应的相位绿灯时间,调整后节点 7、节点 8 的信号方案如表 4 所示。

表 2 各交通节点现状信号控制方案

节点	信号相位	红灯/s	绿灯/s	黄灯/s	信号周期/s
节点 1	东西直行	132	65	3	200
	东西左转	147	50	3	
	南直左	172	25	3	
	北直左	157	40	3	
节点 2	东西直行	62	75	3	140
	南北过街	82	55	3	
节点 3	东西直行	62	75	3	140
	南北过街	82	55	3	
节点 4	东西直行	102	80	3	185
	西左转	137	45	3	
	北左转	137	45	3	
节点 5	东西直行	62	75	3	140
	南北过街	82	55	3	
节点 6	东西直行	138	89	3	230
	东西左转	182	45	3	
	南北直行	157	70	3	
节点 7	南北左转	194	33	3	240
	东西直行	162	75	3	
	东西左转	190	47	3	
	南北直行	182	55	3	
节点 8	南北左转	194	43	3	140
	南北直行	67	70	3	
	南左转	107	30	3	
	西左转	112	25	3	

表 3 调整后高速公路出入口节点控制方案

节点	信号相位	红灯/s	绿灯/s	黄灯/s	信号周期/s
节点 1	东西直行	142	55	3	200
	东西左转	149	48	3	
	南直左	172	25	3	
	北直左	145	52	3	
收费站入口	ETC	11	1	0	12
	MTC	4	1	0	5
收费站出口	ETC	8	1	0	9
	MTC	12	1	0	13

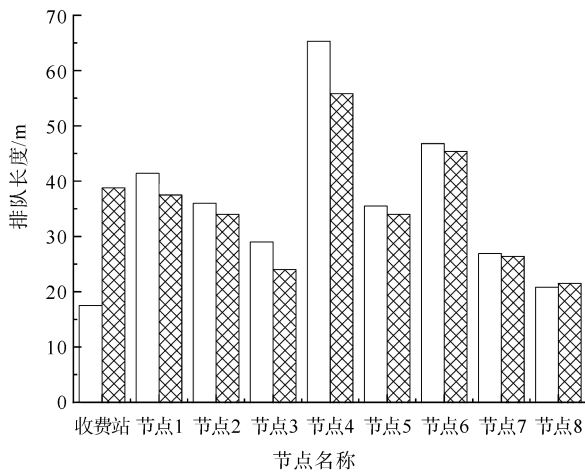


图 3 上层模型优化后节点排队长度变化
 □ 现状; ▨ 上层模型优化

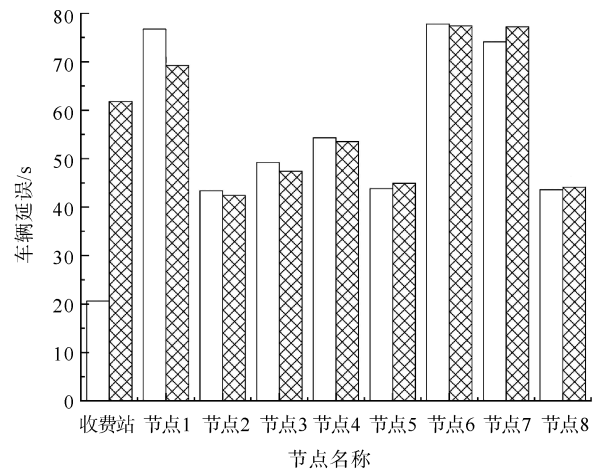


图 4 上层模型优化后节点车辆延误变化
 □ 现状; ▨ 上层模型优化

对节点 2—节点 6 以最大周期 200 s 为公共周期,结合式(19)—式(21)对各节点进行红波协调控制配时计算,取路段协调速度 $v = 40 \text{ km/h}$,协调路段红波控制配时方案如表 5 所示。

通过调整 VISSIM 仿真软件随机种子参数,反复多次对目标路网进行仿真,对比方案调整前后输出的平均排队长度和平均延误指标,如图 5、图 6 所示,由于对边界节点交通流进行控制,边界节点的平均排队长度和平均车辆延误有不同程度的上升。但是从图 7、图 8 中可以看出,在本文方法控制下,关键衔接节点 1 的平均排队长度和平均延误比现状分别降低了 22.36% 和 13.1%,在由节点 2—节点 6 组成的关键路径中,由于设置了“红波带”对该路径进行干线协调控制,路径上各节点的车辆延误有所增加,但是各节点总的平均排队长度比现状降低了 18.54%。从区域路网的角度考虑,本文方法在保障关键枢纽保持正常运行的同时,提高了路网通行效率,有效缓解了高速公路路网与城市路网衔接部分的区域性交通拥堵问题。

表 4 调整后边界节点信号控制方案

节点	信号相位	红灯/s	绿灯/s	黄灯/s	信号周期/s
节点 7	东西直行	142	42	3	187
	东西左转	137	47	3	
	南北直行	129	55	3	
	南北左转	161	23	3	
节点 8	南北直行	67	63	3	133
	南左转	100	30	3	
	西左转	105	25	3	

表 5 协调控制配时方案

节点	信号相位	红灯/s	绿灯/s	黄灯/s	相对相位差/s	信号周期/s
节点 6	东西直行	127	70	3	0	200
	东西左转	168	29	3		
	南北直行	141	56	3		
	南北左转	172	25	3		
节点 5	东西直行	88	109	3	151	200
	南北过街	116	81	3		
节点 4	东西直行	110	87	3	172	200
	西左转	148	49	3		
	北左转	148	49	3		
节点 3	东西直行	88	109	3	167	200
	南北过街	116	81	3		
节点 2	东西直行	88	109	3	174	200
	南北过街	116	81	3		

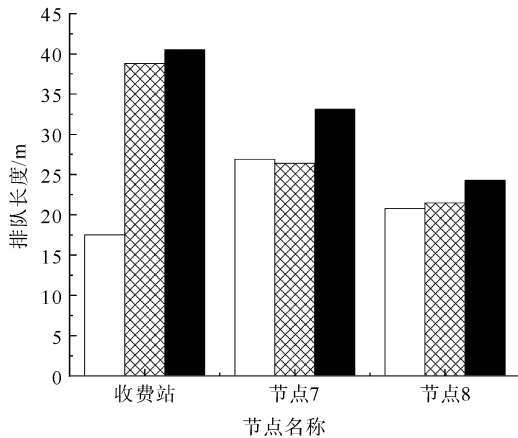


图5 边界节点平均排队长度变化

□ 现状; ▨ 上层模型优化; ■ 双层模型优化

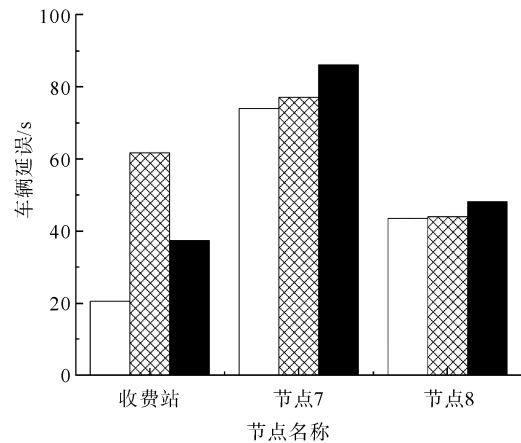


图6 边界节点平均车辆延误变化

□ 现状; ▨ 上层模型优化; ■ 双层模型优化

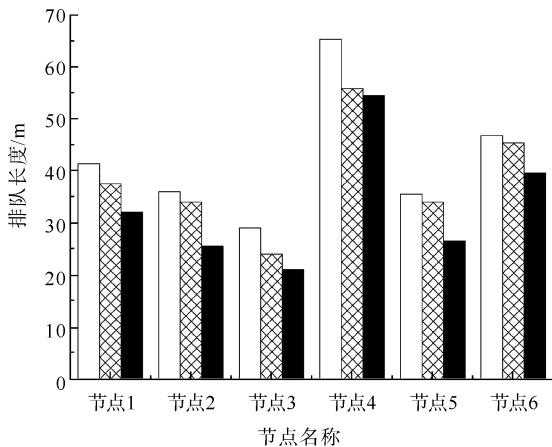


图7 协调区域内节点平均排队长度变化

□ 现状; ▨ 上层模型优化; ■ 双层模型优化

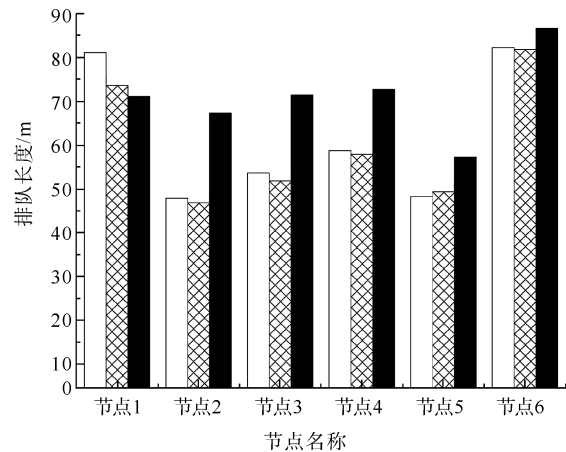


图8 协调区域内节点平均车辆延误变化

□ 现状; ▨ 上层模型优化; ■ 双层模型优化

5 结束语

本文研究了高峰时期高速公路出入口及周边区域交通需求过大和交通负荷分布不均而引起的区域交通拥堵问题,提出了一种基于交通需求和通行能力匹配的协同控制方法。通过 VISSIM 仿真验证,尽管边界节点交通负荷有所增加,但从整体路网角度考虑,该方法有效降低了协调区域内关键节点和关键路径的车辆排队长度,在保障路网关键节点、路径正常运行的同时,能够缓解高速公路出入口邻近区域的交通拥堵问题,为解决高速公路与城市道路衔接区域的交通拥堵提供参考。未来将进行城市绕城高速公路网络诱导策略研究,通过诱导车辆提前分流至各个高速公路出入口,以平衡绕城高速公路路网交通负荷,促进高速公路与城市道路供需平衡。

参考文献(References):

- [1] 项昫,邢璐,王昊,等. 客货分离式高速公路主线与匝道协同控制算法研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版),2015,39(6):631-636. XIANG Yun,XING Lu,WANG Hao,et al. Coordinated control of freeway mainline and ramp under separating truck from passenger vehicles condition[J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Sciences Edition),2015,39(6):631-636.
- [2] SPILIOPOULOU A,PAPAGEORGIU M,HERRERA J,et al. Real-time merging traffic control at congested freeway off-ramp areas[J]. Transportation Research Record,2016,2554:101-110.

- [3] SPILIOPOULOU A, KONTORINAKI M, PAPAGEORGIU M, et al. Macroscopic traffic flow model validation at congested freeway off-ramp areas[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 41: 18-29.
- [4] 魏广奇, 刘晓娟, 谭云龙. 基于收费站栏杆机控制的高速公路入口匝道控流算法设计[J]. *交通与运输*, 2020, 36(4): 61-65.
WEI Guangqi, LIU Xiaojuan, TAN Yunlong. Algorithm design for on-ramp traffic flow controlling of expressway based on toll gates[J]. *Traffic & Transportation*, 2020, 36(4): 61-65.
- [5] 崔洪军, 张志磊, 李霞, 等. 基于节能减排的高速公路收费站处拥挤车流控制技术[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(5): 125-129.
CUI Hongjun, ZHANG Zhilei, LI Xia, et al. Congestion flow control technology based on energy conservation and emission reduction at expressway toll stations[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(5): 125-129.
- [6] 史煜阳. 高速公路出口收费站与衔接交叉口协调优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
SHI Yuyang. Study on optimized coordination of the highway exit toll station and connected intersection[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [7] 陈纲梅. 收费公路出入口匝道与衔接信号交叉口的协同控制方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
CHEN Gangmei. Research on coordination control method for the exit and entrance ramps of freeway and the junction intersection[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [8] 宋文通. 城市高速公路收费站与衔接路段协同控制优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
SONG Wentong. Research on cooperative control optimization of urban expressway toll stations and connecting sections[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [9] 贾彦峰, 王进展, 王五林, 等. 基于相位相序优化的双向绿波协调控制模型[J]. *青岛理工大学学报*, 2018, 39(1): 91-95.
JIA Yanfeng, WANG Jinzhan, WANG Wulin, et al. Bi-directional green wave coordinated control model on phase sequence optimization[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2018, 39(1): 91-95.
- [10] 马亚锋, 刘澜. 干线局部拥堵的绿波带与红波带协调控制策略[J]. *城市交通*, 2017, 15(1): 66-71.
MA Yafeng, LIU Lan. Coordinated control of green wave and red wave band for arterials[J]. *Urban Transport of China*, 2017, 15(1): 66-71.
- [11] 梅丽, 王干. 浅析高速公路交通安全事故原因及对策研究[J]. *内燃机与配件*, 2018(17): 193-195.
MEI Li, WANG Gan. Analysis of freeway traffic safety accident reason and countermeasure research[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2018(17): 193-195.
- [12] 罗佳发. 基于移动互联网交通信息的城市交通诱导与信号控制协同优化研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2020.
LUO Jiafa. Research on cooperative optimization of urban control guidance and signal control based on mobile internet traffic information[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2020.
- [13] 赵宝新. 基于多源数据融合的城市交通拥堵扩散的研究及其应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
ZHAO Baoxin. Application and research of traffic congestion diffusion in metro-city scales based on multi source data fusion[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [14] 李晓燕. 面向城市交通拥堵疏导的节点分流策略研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
LI Xiaoyan. Strategy research of intersection division for urban traffic congestion[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)