

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.11.061

城市快速路入口匝道与关联交叉口协调控制分析

周 强

(武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 为了提高快速路匝道与关联交叉口运行效率,以快速路-交叉口协调控制影响因素为关键,建立基于交通状态指数、匝道入口影响因子的匝道与关联交叉口协调控制模型。以实际区域进行仿真验证。结果显示,模型能够明显改善系统运行情况,匝道总通过交通量增加 8.7%,交叉口延误降低 11%。

关键词: 交通工程;匝道控制;信号协调控制;快速路;调节率

中图分类号: U491.1+3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)11-0232-04

0 引言

快速路作为城市最高等级的道路,主要满足大容量、远距离的出行需求。密集的分合流匝道提高快速路利用率,也降低了快速路的通行效率。匝道控制是一种有效的保证快速路系统运行的方法,通过控制匝道进出流量的大小来保证主线不受较大影响。这种转移交通压力的方法虽然一定程度上提高了快速路的运行效率,但是往往造成关联交叉口的拥堵,影响交通系统整体运行效率^[1]。

目前,快速路与关联交叉口的研究主要是在保证快速路主线运行的基础上,提出快速路与关联交叉口的协调控制方法,对关联交叉口的详细研究较少,大多将交叉口简化为单个点或者简单交叉口进行处理。乔彦甫等^[2]通过遗传算法预测快速路交通流量,优化 ALINEA 匝道控制算法;曹俊强等^[3]通过调整入口匝道调节率的大小,完成入口匝道及其衔接交叉口的协调控制;Linglong HU^[4]以匝道调节率为控制变量,提出了匝道 MPC 调节方法,能够改善路网总体运行效率;Xuewen Chen^[5]针对城市快速路交通流的复杂性、不确定性等特点与交叉口拥堵等问题,提出了一种信号交叉口多相位模糊控制方法,以排队长度和相位延迟为优化目标,对绿灯延时和相位顺序进行了优化,并通过 Matlab 进行仿真,以验证模型的有效性。

当交叉口交通组织简单且流量较小时,这类方法往往能够取得较好效果,但是当关联交叉口的形

式复杂、交通量大时,模型往往不能适应复杂的交叉口信号控制方式,从而降低协调控制效果。

1 快速路与关联交叉口概述

1.1 道路形式及控制方式

在我国大城市,由于设计原因,快速路与主干路往往形成特定形式:快速路主路与主干路形成立交,其分离式辅路在桥下两侧与主干路形成两个距离极小的平交路口,造成快速路横跨交叉口,并将其一分为二。这种相邻交叉口的信号控制较为复杂,主干路双向车流通过桥下时需要经过两个交叉口,交叉口的协调控制程度较低时容易造成车辆二次停车,在桥下形成排队,高峰时期极易造成拥堵,如图 1 所示。

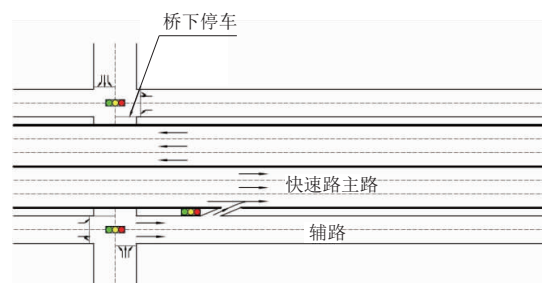


图 1 快速路入口匝道与关联交叉口示意图

关联交叉口一个重要的特性是有桥下信号相位,桥下相位周期时长与交叉口时长相同,桥下两个方向的车流相位各对应桥梁一侧所有跨桥相位时间,并需要延后释放,延后释放时间与交叉口信号提前时间相同^[6]。

当提前释放时间过短时,前一相位车流已经清空,但是下一相位车辆还未到达桥下停车线处,造成相位时间的浪费,并且过早结束相位,导致过桥车辆在桥下停车,等候下一周期通行;而当提前释放时间

收稿日期: 2021-12-06

作者简介:周强(1992—),男,硕士,工程师,从事道路交通设计研究工作。

过长时,会导致前一相位车辆还未清空,而下一相位车辆已到达桥下停车线,在桥下二次停车,降低车辆通行效率。本文根据停车线距离和车辆速度给出提前或延时释放时间的计算方法^[7]:

$$t' = t_s + L_s / V_i \tag{1}$$

式中: t' 为相应相位提前/延后时间,s; t_s 为车辆平均启动时间,s; L_s 为从启动停车线到桥下停车线的路程,m; V_i 为车辆平均速度,m/s。

在无提前信号的各相位时间计算方法的基础上,给出有提前信号的相应各相位时间:

$$g_i' = g_i + \frac{t'}{2} - (-1)^i \frac{t'}{2} \tag{2}$$

式中: g_i' 为有提前信号的第*i*相应相位时间,s; g_i 为无提前信号的第*i*相位时间,s; t' 为相应相位提前/延后时间,m。

1.2 协调控制影响因素

考虑快速路与关联交叉口的影响因素,需要解决一些关键问题。

一是统一衡量快速路与交叉口交通状态的指标。目前研究主要是通过占有率来确定主线交通状况,如何在统一指标下确定两者之间的交通状态关系是协调控制模型的关键。

二是快速路入口匝道与交叉口进入辅路的流量关系存在不确定性。现实条件下,各个位置的关联交叉口进入辅路的车流与辅路进入主线的车流比例是各不相同的。决定匝道调节率的主要影响因素是由匝道进入主线的车流量,而非由交叉口各进口道进入辅路的车流量。

针对以上问题,本文通过确定以下参数重新构建模型。

(1)交通状态指数

快速路与关联交叉口的协调控制研究需要将快速路与城市道路交叉口的交通状态在同标准、同量级下进行一致性比较。国内学者以平均车辆速度、时间占有率以及全局流光平均值等判断交通拥堵状态^[7-11]。时间占有率可以较好地反映路段的交通状态,且容易由检测器测量所得。本文以时间占有率为快速路、交叉口的交通状态的判别标准^[12-13]。快速路与交叉口的结构设计有较大差别,因此两者的时间占有率的计算方式也有差异。根据两者结构特性,对快速路与交叉口的时间占有率分别计算。快速路主线时间占有率:

$$O_i^k = \frac{\sum_{k=1}^n t_k}{T} = \frac{\sum_{i=1}^m l_i / v_i}{T} = \sum_{i=1}^m N_i \times \frac{\bar{Q}_i}{V_i} = \bar{L}_i \times \bar{K}_i \tag{3}$$

式中: O_i^k 为快速路在第*k*周期的时间占有率; T 为检测器测定的时间,s; t_k 为车辆通过检测器的时间,s; n 为检测的车辆数,veh; m 为检测的各长度车辆数,veh; \bar{L}_i 为车辆的平均长度,m; \bar{K}_i 为检测时间内车辆密度,veh/m。

根据本文的研究目的,将交叉口的时间占有率简化为:与快速路相关的交叉口各车道时间占有率的相应比例之和。计算方法如下:

$$O_{cross}^k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_i \beta_j c_j^k \tag{4}$$

式中: O_{cross}^k 为交叉口在第*k*周期的时间占有率; n 为相位数; α_i 为第*i*相位占周期的比值; m 为车道数; β_j 为第*j*相位第*j*股车流的权重; C 为车道占有率, c_j^k 为第*k*周期第*j*股车流经时的车道占有率。

为了对快速路主线及交叉口的交通状态进行同水平比较,可以根据两者时间占有率进行分析比较。当交叉口时间占有率大于快速路时间占有率时,可以认为交叉口的交通拥堵状况较为严重;当交叉口时间占有率小于快速路时间占有率时,可以认为快速路的交通状态更为拥堵。

(2) 匝道转向比例

匝道转向比例(Ramp Steering Ratio)是指一定时间内进入匝道的交通量占辅路交通量的比例,反映与辅路相连交叉口的交通流与快速路主线交通流之间的关系。

H Rakha 等^[14]以匝道短距离出入口交织段为研究区域,建立不同道路环境下的出入口流量、交织率、快速路通行能力的关系模型。在快速路匝道入口模型中,当匝道转向比例为0时,代表由交叉口进入快速路的车辆几乎为0,此时快速路与交叉口之间的联系程度极小,不需要考虑快速路与关联交叉口的信号协调控制;而当匝道的转向比例为1时,表示由交叉口进入辅路的车辆全部进入快速路,此时快速路匝道控制调节率对交叉口的交通流敏感度最大。

转向比例是快速路与关联交叉口相互联系程度的参数,为便于研究,可以通过现场调查及数据分析确定转向比例,或者由检测数据计算所得。

$$\delta_k = \begin{cases} q_r^k / q_t^k & \vec{q}_r > 0 \\ q_r^k / q_{cross}^k & \vec{q}_r < 0 \end{cases} \tag{5}$$

式中: δ_k 为匝道转向比例($0 \leq \delta_k \leq 1$); q_t^k 为单位时间内快速路进入辅路的交通流量,pcu/h; q_{cross}^k 为单位时

间内交叉口的交通流量,pcu/h; q_i^k 为单位时间内由交叉口进入辅路的交通流量,pcu/h; \vec{q}_r 表示由快速路进入交叉口的方向为正向。

2 协调控制模型

以快速路入口匝道调节率为关键参数,根据快速路与交叉口的交通状况对其进行调整,进而根据调节率对快速路关联交叉口的信号控制进行优化,达到协调控制的目的。图2为控制模型构架图。

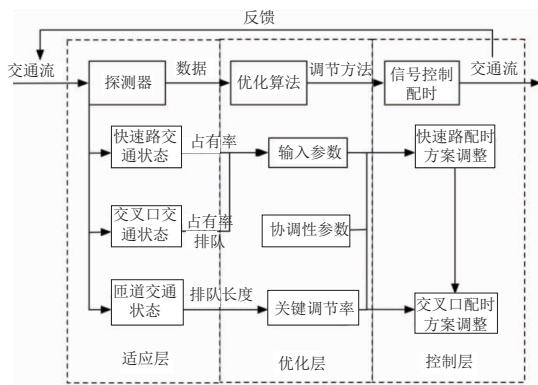


图2 控制模型构架图

模型的控制步骤分为三步:第一步,通过快速路主线的交通状态确定快速路匝道入口的调节率;第二步,根据本周期检测的快速路与关联交叉口交通数据,确定两者拥堵关系,对下一周期匝道入口调节率进行优化;第三步,根据下一周期匝道入口调节率,以及交叉口信号相位与快速路之间的联系,调节相关信号相位时间。

先对快速路入口匝道调节率^[15]进行分析:

$$R_{in}^k = \begin{cases} R_{in}^{k-1} - 1/\partial_{in}^{k-1} \times E_f^{k-1} \times (R_{in}^{k-1} - R_{min}) & O_f^{k-1} \geq O_{cross}^{k-1} \\ R_{in}^{k-1} + 1/\partial_{in}^{k-1} \times E_f^{k-1} \times (R_{max} - R_{in}^{k-1}) & O_f^{k-1} < O_{cross}^{k-1} \end{cases} \quad (6)$$

$$C = \frac{3600 n_k}{R_{in}^k} \quad (7)$$

式中: R_{in}^k 为第 k 周期入口匝道调节率,其中初始匝道调节率为初始时刻快速路主线匝道口下游剩余通行能力; ∂_{in}^{k-1} 为第 $k-1$ 周期上游交叉口转进入口匝道交通量比例; E_f^{k-1} 为第 $k-1$ 周期快速路剩余能力百分比,%; O_f^{k-1} 为第 $k-1$ 周期内快速路的时间占有率; O_{cross}^{k-1} 为第 $k-1$ 周期内交叉口的时间占有率; R_{max} 为入口匝道调节率的最大允许值,veh/h; R_{min} 为入口匝道调节率的最小允许值,veh/h; n_k 为每周期内进入匝道的车辆数,veh; C 为匝道调节率更新周期,s,可以根据交叉口周期时间更新,也可由入口调节率公式求得。

信号调节方案基于以下3个假设:

(1)为了可能存在的城市主干路的绿波带系统,避免调节交叉口周期长度^[16];

(2)尽可能地减少固定某个相位时间调整,以保证各进口道的交通状态均衡;

(3)交叉口各相位时间是依据相应进口流量的比例进行设置的,即通行需求大的相位相应占据有效绿灯时间长。

通过假设,联系上文对入口匝道信号交叉口进行计算,可得:

$$R_{in}^k = \frac{S_{s1} g_1^k \partial_s + S_{s2} g_2^k \partial_s}{T} \quad (8)$$

$$\frac{g_1^k}{g_2^k} = \frac{g_1^{k-1} \partial_s}{g_2^{k-1} \partial_1} \quad (9)$$

式中: R_{in}^k 为第 k 周期入口匝道信号灯调节率,veh/h; S_{s1} 为1进口道的直行饱和流量,veh/h; S_{s2} 为2进口道的左转饱和流量,veh/h; g_1^k 为第 k 周期1进口道有效绿灯时间,s; g_2^k 为第 k 周期2进口道有效绿灯时间,s; ∂_s 为1进口道进入匝道车辆比例; ∂_1 为2进口道进入匝道车辆比例; T 为交叉口周期时间长度,s。

根据式(8)、(9)求解,最终得到1进口道、2进口道的调整相位时间如下:

$$g_1^k = \frac{g_1^{k-1} \partial_s TR_{in}^k}{S_{s1} g_1^{k-1} \partial_s^2 + S_{s2} g_2^{k-1} \partial_1^2} \quad (10)$$

$$g_2^k = \frac{g_2^{k-1} \partial_1 TR_{in}^k}{S_{s1} g_1^{k-1} \partial_s^2 + S_{s2} g_2^{k-1} \partial_1^2} \quad (11)$$

相应的3、4进口道的相位时间如下:

$$g_3^k = \frac{T - g_1^k - g_2^k}{T - g_1^{k-1} - g_2^{k-1}} g_3^{k-1} \quad (12)$$

$$g_4^k = \frac{T - g_1^k - g_2^k}{T - g_1^{k-1} - g_2^{k-1}} g_4^{k-1} \quad (13)$$

如果快速路拥堵程度高于交叉口,则本周期入口匝道调节率降低,此时需要减少1进口道和2进口道有效绿灯时间,调整方式可以为:提前终止绿灯和延后开始绿灯。减少的相位时间由相邻相序相位补充,且此时 t' 时间不变,保证整个相位周期时长不变,尽量避免因调节信号相位时间导致同一相位二次绿灯。调整方案如图3所示。

3 模型验证

为了检验所建模型的有效性能否提高系统运行效率,需要对所建立的模型进行验证。以北京西四环四季青桥交叉口与下游匝道路段为研究对象进行Vissim仿真,对实施协调控制策略前后的系统运行参数和特定路径的车流运行指标进行对比^[17]。

在匝道入口设置排队检测器,对匝道排队情况

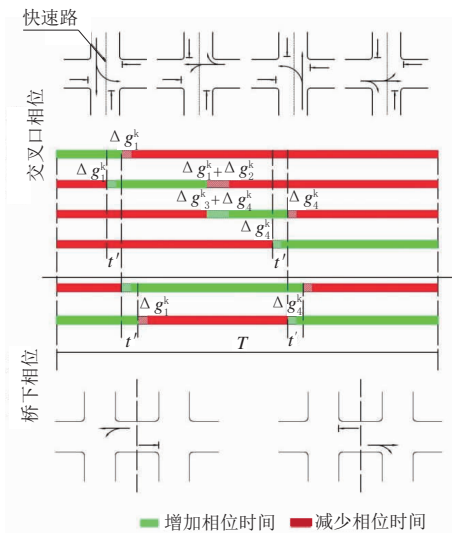


图 3 调整后交叉口各相位时间示意图

进行检测,以周期时长为检测间隔,入口匝道对比情况进行见表 1。

表 1 快速路入口匝道相关参数对比

对比方案	排队长度 /m	延误时间 /s	通过车辆数 /veh
原方案	322.80	155.97	792
协调方案	142.67	76.71	861
优化程度	55.80%	50.81%	8.71%

图 4 为入口匝道排队长度时变图。

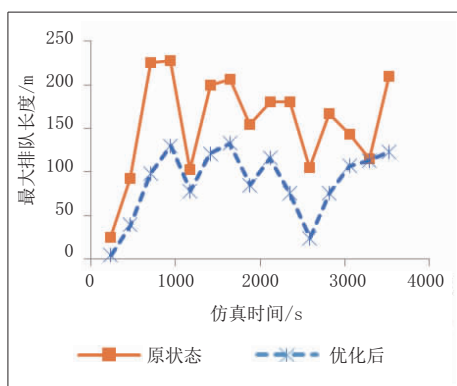


图 4 入口匝道排队长度时变图

选取研究区域内 6 条路径的车流进行延误分析,对各路径车流延误、行程时间、停车时间、停车次数等进行对比,结果见表 2。

通过 vissim 仿真分析,对比协调控制前后研究区域内交通状态各指标变化情况,协调控制方案实施后:入口匝道的排队延误时间降低了 50.81%,排队长度降低一半,证明快速路入口匝道的排队拥塞现象得到改善;交叉口区间行程时间降低 8.81%,延误时间降低了 11.05%,协调控制一定程度上缓解了交叉口的交通状况;快速路主线由于入口匝道的车流增多,主线交通流有较小波动;快速路、交叉口和

表 2 各区间行车延误指标对比表

区域	方案	延误	行程时间	平均停车时间	平均停车次数
交叉口区间	原方案	76.30 s	129.67 s	67.00 s	0.79 次
	协调方案	67.87 s	118.24 s	62.47 s	0.77 次
	优化程度	11.05%	8.81%	6.77%	2.12%
整体区域	原方案	281.50 s	345.10 s	147.35 s	6.79 次
	协调方案	165.85 s	237.76 s	86.40 s	3.06 次
	优化程度	41.08%	31.10%	41.36%	54.90%

入口匝道的整体占有率降低 2.79%。

4 结论

本文对快速路与关联交叉口的信号协调控制机理进行研究,确定交叉口信号协调控制的基本原则;在匝道控制模型优化结果的基础上,确定了关联交叉口信号协调控制的优化方案。

不同于单纯转移交通压力的匝道控制模型,该协调控制方式能够较好地适应城市交通流特性,能兼顾干道绿波交通,且明显缓解快速路及交叉口的拥堵排队水平。

参考文献:

- [1] 李晓文.快速路匝道控制优化方法研究[D].长春:吉林大学,2015.
- [2] 乔彦甫,赵斌,方传武,等.基于 ALINEA 算法的城市快速路匝道控制方法[J].西南交通大学学报,2017,52(5):1001-1007.
- [3] 曹俊强.城市高架路相邻出入口匝道及其衔接交叉口协调控制[D].成都:西南交通大学,2016.
- [4] Linglong Hu, Weili Sun, Hui Wang. An Extended Model Predictive Control Approach to Coordinated Ramp Metering [C]//2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation:ICCA 2013,Hangzhou,China.
- [5] Xuewen Chen.Traffic Signal Control and Simulation at Isolated Intersection Downstream Off-ramp of Urban Expressway [C]//Third International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. IEEE Computer Society, Chengdu,China, 2012:2703-2706.
- [6] 王沈平,蔡家明.多相位交通信号配时的模糊控制方法[J].上海工程技术大学学报,2009,32(4):312-316.
- [7] 李瑞敏,章立辉.城市交通信号控制[M].北京:清华大学出版社,2015.
- [8] 赵有婷,李熙莹,余永业,等.基于视频全局光流场的交通拥堵检测[J].计算机应用研究,2010,27(11):4355-4357.
- [9] 王川童.基于视频处理的道路交通拥堵判别技术研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- [10] 贾顺平,彭宏勤,刘爽.基于居民出行特性与路网承载力的城市交通状态研究[J].交通运输系统工程与信息,2011,11(5):81-85.
- [11] 李佳.基于图像的交通拥堵状态识别系统的研究与实现[D].成都:

(1)委托相关咨询单位开展生态保护、建设用地、城镇发展影响三个专题的研究工作:委托具有环评业务的单位开展生态保护专题,委托具有用地预审业务的单位开展建设用地专题,委托具有规划选址业务的单位开展城镇发展影响专题。

(2)专题单位与自然资源与规划、生态环境等部门对接,收集“三区三线”基础数据资料。

(3)基于“三区三线”基础数据资料,与建设方案研究互动,参与其方案拟定、方案比选、方案优化等环节,从环境影响、用地影响、城镇发展影响的角度对拟定的方案进行分析评价:分析路线线位与“三区三线”的空间关系,评价不同方案的优劣,提出优化路线方案的建议及降低不利影响或“无害化通过”的相关措施,论证穿越或占用的可行性及合理性,等等。

(4)归纳形成专题研究结论,主要包括:规划建设

项目与“三区三线”的空间关系,穿越或占用可行性及合理性分析结论,降低不利影响或“无害化通过”的相关措施,对“三区三线”相关规划的调整建议。

4 结语

随着我国国土空间管控越来越严,编制公路国土空间规划是实现公路空间资源有效储备和高效利用、保障公路行业健康可持续发展的关键所在。本文根据相关政策文件对公路国土空间控制规划的要求,结合笔者近几年规划编制工作经验,总结出编制公路国土空间控制规划的工作程序、主要关键性工作及相关工作方法,从而指导相关从业人员高效率、高质量完成公路国土空间控制规划的编制工作。

参考文献:

[1]中华人民共和国交通运输部.关于做好交通基础设施国土空间控制规划有关工作的通知[Z].北京.中华人民共和国交通运输部,2018.

~~~~~  
(上接第 235 页)

四川师范大学,2010.

[12] Rakha H. Validation of Van Aerde's simplified steady-state car-following and traffic stream model[J]. Transportation Letters the International Journal of Transportation Research, 2009, 1(3):227-244.  
[13] 廖涌泉,孙晓亮,贾利民,等.基于道路负荷度的北京城市快速路交通状态评价[J].物流技术,2012,31(3):87-89.  
[14] Rakha H, Zhang Y, Zhang R. Analytical Procedures for Estimating

Capacity of Freeway Weaving, Merge, and Diverge Sections [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(8):618-628.

[15] 保丽霞,杨晓光.快速路进口匝道及其衔接交叉口的协调优化控制模型[J].中国公路学报,2009,22(2):82-86.  
[16] 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.  
[17] 王文博,周继彪,陈红,等.基于 VISSIM 仿真的事故路段通行能力估算方法[J].公路交通科技,2015,32(12):120-127.