

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.01.055

# 高架出口匝道下游交叉口信号控制方法研究

阳杰

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司,四川成都 610218)

**摘要:**城市高架快速路与地面道路,主要通过出口匝道及其下游交叉口进行交通转换,高峰时段出口匝道及下游交叉口交通拥堵频发。以元胞传输模型为基础,构建出口匝道及下游交叉口交通预测模型;采用动态调整周期时长和信号相位的控制策略,建立基于元胞传输模型的交叉口信号控制模型。以排队长度、绿灯和周期时长为约束条件,以各进口道加权平均延误为目标函数,进行信号配时动态优化。以成都市实例匝道和交叉口进行验证,表明本文提出信号控制策略可有效降低此类交叉口的饱和度、延误和排队长度,提升其通行效率。

**关键词:**出口匝道;交叉口;元胞传输模型;信号控制

中图分类号:U491.5<sup>+1</sup>

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)01-0226-04

## 0 引言

城市高架快速路作为城市主干路网的重要组成部分,以服务中长距离、通过性城市交通为主;高架快速路相对于常规城市道路,具有快速、相对封闭的特点,进出车辆主要经由进出匝道与地面道路进行交通转换。因城市建设空间的限制,以及快速交通转换的需求,高架出口匝道落地点往往与下游交叉口距离较近。龙科军对上海高架快速路出口匝道进行研究统计得出,其匝道落地点与下游交叉口距离小于一百米的情况,占其出口匝道总数的。高峰时段路口交通量较大,经常出现排队反堵至出口匝道和快速路主线的情况,因此,对该类型交叉口进行研究是极其必要的。

钱喆在考虑连续交通流和间断交通流的基础上,以交叉口连续和离散延误作为目标,通过优化使交叉口延误最小为优化目标,提出了两相位和多相位的交叉口信号控制优化模型。

王力以出口匝道、快速路辅路及下游连接的平交路口作为信号控制优化的研究对象,以交叉口及辅路的车辆排队长度作为优化模型的控制变量,采用交叉口的信号相位变换作为逻辑控制变量,提出了可用于区域信号协调控制的混合逻辑动态优化模型。

## 1 匝道及交叉口模型构建

### 1.1 CTM 基本原理

美国学者 Daganzo 于 1993 年提出了基于宏观

收稿日期:2023-01-03

作者简介:阳杰(1992—),男,硕士,工程师,从事道路设计工作。

交通流理论离散化而得到的元胞传输模型(CTM),该模型能覆盖经典交通流速度-密度-流量的全部范畴,并能形象地描述交通流的动态变化过程;经过较多学者的验证和应用,该模型能极好地适用于城市道路交通单点交叉口或区域路网的交通流的动态模拟。

CTM 模型采用离散化的方法交叉口进口道,将车道划分为多个相同长度的元胞,将时间离散为相等的仿真时间步长  $dt$ ,一个元胞的长度  $l_c$  即为自由流状态下,车辆以自由流速度  $v_f$  在一个时间步长内可行驶的距离,即  $l_c=v_f \cdot dt$ 。

相邻元胞之间的交通流量传输见图 1;根据元胞流量守恒的规定,元胞状态随仿真时间更新的关系见式(1);在第  $t$  个仿真时间步长,元胞  $i-1$  向元胞  $i$  传输的交通流量  $q_i(t)$  满足式(2)。

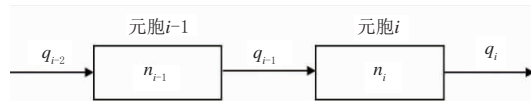


图 1 基础元胞传输示意图

$$n_i(t+1)=n_i(t)+q_i(t)-q_{i+1}(t) \quad (1)$$

$$q_i(t)=\min\{R_i(t),S_i(t)\} \quad (2)$$

式中:元胞的发送能力  $S_i(t)$  表示  $t$  时段元胞  $i$  能向下游元胞发送的车辆数;元胞的接收能力  $R_i(t)$  表示  $t$  时段元胞  $i$  能接收上游元胞发送的车辆数; $S_i(t)$  和  $R_i(t)$  满足如下关系:

$$S_i(t)=\min\{n_{i-1}(t),Q_i(t)\} \quad (3)$$

$$R_i(t)=\min\{Q_i(t),\delta[N_i(t)-n_i(t)]\} \quad (4)$$

$$\delta=\begin{cases} 1, & q_i(t)\leq N_i(t) \\ \frac{w}{v_f}, & q_i(t)> N_i(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i$  表示元胞  $i$ ;  $i+1$  表示元胞  $i$  下游的相邻元胞;

$n_i(t)$ 为第  $t$  个仿真时间步长,元胞  $i$  内的车辆数;  
 $N_i(t)$ 为元胞  $i$  能容纳的最大车辆数; $Q_i(t)$ 为第  $t$  个  
 仿真时间步长,从元胞  $i-1$  向元胞  $i$  可传输的最大车  
 辆数,即路段通行能力。

### 1.2 基于 CTM 的出口匝道及交叉口模型构建

#### 1.2.1 模型假设

本文以中间式出口匝道及下游交叉口为研究对象,假设如下:

(1)实际管理一般不对右转专用道进行信号控制,因此,模型中简化忽略右转专用道。

(2)将行驶方向相同的进口车道匀质化处理,将多条直行车道划分为一条流链,左转车道划分为一条流链,匝道及衔接的地面车道单独划为一条流链。

#### 1.2.2 出口匝道及交叉口区域整体模型

将交叉口右转进行简化以及同向车道匀质化处理后,出口匝道及连接的下游交叉口的 CTM 模型见图 2,从匝道流链开始进行编号,匝道流链编号为 0,西进口直行流链编号为 1,交叉口进出口道共计 13 条流链,即  $i \in (0, 12)$ 。

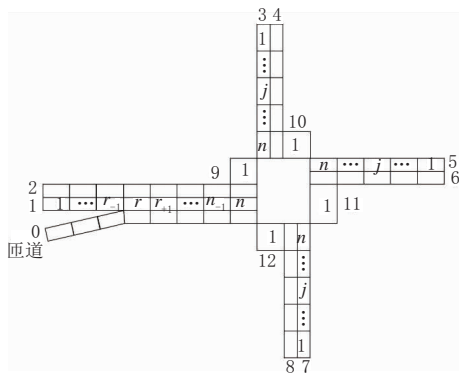


图 2 匝道及下游交叉口 CTM 模型

各个出口道均只设置一个元胞,其容量为无穷大, $N_{(i,j)}(t)=\infty, (i \in O, j=1)$ ,所有驶向该方向出口道的车辆均进入出口元胞。

## 2 交叉口信号控制模型

### 2.1 CTM 流量传输与信号控制

所有等待进入匝道和交叉口的车辆均存放于各进口流链的第一个元胞( $i, 1$ ),其向下游元胞输出的交通流量  $q_{i,1}(t)$ 即为交叉口直行或左转流链的实际交通需求。

进口链的最后一个元胞( $i, n$ )相当于现实中交叉口停止线前排队的导向车道,绿灯期间该元胞向对应的出口道元胞发送车辆,其发送的流量即为该进口道可通过的饱和流量,红灯期间,则该元胞发送的

车流量为 0。

$$S_{i,m}(t) = \begin{cases} S_{i,j}(t), & t \text{ 时刻为绿灯} \\ 0 & t \text{ 时刻为红灯} \end{cases}, (i \in I) \quad (6)$$

### 2.2 变周期变绿信比相位方案

假定匝道位于交叉口 CTM 模型的西进口,交叉口整体采用变周期变绿灯时长的控制策略,通过延长匝道连接进口道直行或左转绿灯时长,压缩对向进口道的直行绿灯的思路,提升其通行能力;该策略匝道进口道配时方案见图 3。

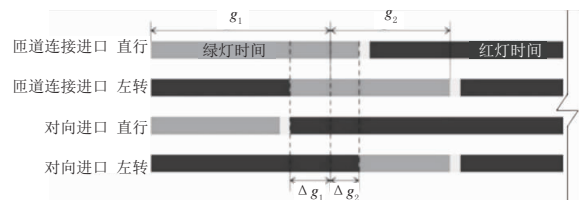


图 3 信号配时优化策略

匝道连接的进口道,其直行绿灯延长时间为  $\Delta g_1$ ;左转绿灯提前启亮时间为  $\Delta g_2$ ;  $\Delta g_1$ 、 $\Delta g_2$  在相序排列中是连续的,因此将  $\Delta g_1$  和  $\Delta g_2$  合并为匝道进口道直行和左转放行的专用相位。

### 2.3 基于 CTM 的信号控制策略

基于增加专用信号相位的控制策略,将匝道下游交叉口信号相位由常规四相位,转换为五相位组合,交叉口信号相位见图 4。

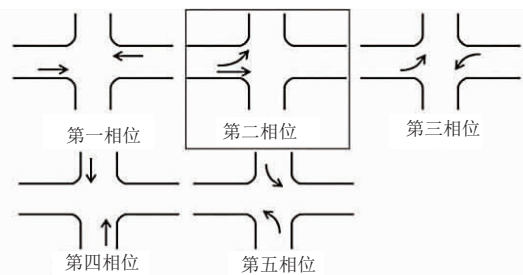


图 4 交叉口相位示意图

以交叉口信号周期  $C(x)$  和各相位的绿灯时长  $g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ 、 $g_3(x)$ 、 $g_4(x)$ 、 $g_5(x)$  作为交叉口信号优化模型的控制变量;其中专用相位绿灯时长为  $g_2(x) = \Delta g_1 + \Delta g_2$ 。

## 3 信号控制动态优化模型

### 3.1 目标函数

以交叉口所有进口流链的加权平均延误作为目标函数,分子项表示各进口流链延误与饱和度指数函数的加权总延误;在计算总延误时,引入进口道的饱和度指数函数作为进口流链延误的罚函数,若某进口道的饱和度大于 1,则在目标函数中以指数背放大该进口的延误,从而对过饱和的进口道进行优先优化。

分母项表示第  $x$  周期交叉口的总通行能力,由于每个信号周期时长可能不同,因此,其对应的通行能力也不尽相同,该项充分考虑在不同信号配时情况下交叉口空间效益的最优化;考虑交叉口各进口道交通状态的目标函数见式(7)。

$$Obj(x) = \frac{\sum_i D_i(x)(e^{f(Y_i(x))} \times Y_i(x))}{P^i(x)} \quad (7)$$

$$f(Y_i(x)) = \begin{cases} 0, & Y_i(x) < 1 \\ 1, & Y_i(x) \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $D_i(x)$ 为第  $x$  周期进口链  $i$  的车辆延误; $P^i(x)$ 为第  $x$  周期通过交叉口的车辆总数。

车道饱和度  $Y_i(x)$ 表示第  $t$  个仿真步长结束时,第  $i$  条进口流链内所有元胞的总交通量  $Q_i(x)$ 与该流链通行能力  $P_i(x)$ 之比。

$$Y_i(x) = \frac{Q_i(x)}{P_i(x)} \quad (9)$$

$$Q_i(x) = \sum_j n_{(i,j)}(t_0) + \sum_{t=t_0}^{t_0+C(x)} q_{(i,1)}(t) \quad (10)$$

式中: $n_{(i,j)}(t_0)$ 为初始周期  $t_0$  时刻元胞  $(i,j)$  内的车辆数; $q_{(i,1)}(t)$ 为  $t$  时刻,第  $i$  条进口流链的起始元胞  $(i,1)$  进入该进口流链的车辆数。

### 3.2 约束条件

#### (1) 绿灯及周期时长约束

为充分发挥交叉口通行效率和保障车辆、行人的通行安全,对交叉口各相位的最小和最大绿灯时长和周期时长进行限制。

$$g_{p \min} \leq g_p(x) \leq g_{p \max} \quad (11)$$

$$C(x) = \sum_{p=1}^5 g_p(x) \quad (12)$$

$$C_{\min} \leq C(x) \leq C_{\max} \quad (13)$$

式中: $g_{p \min}$ 、 $g_{p \max}$  为各相位最小、最大绿灯时长; $C_{\min}$ 、 $C_{\max}$  为交叉口最小、最大信号周期时长。

#### (2) 排队长度约束

在进行信号优化时,设定排队长度上限  $L_i$ ,避免排队反堵至快速路主线或上游交叉口。

$$l_i \leq L_i, i \in I \quad (14)$$

$$l_i = l_p \sum_j h_{(i,j)} \times n_{(i,j)}, i \in I \quad (15)$$

$$h_{(i,j)} = \begin{cases} 1, & S_{(i,j)} = 0 \\ 0, & S_{(i,j)} > 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $l_p$  为标准车长度; $h_{(i,j)}$  为元胞  $(i,j)$  的阻塞状态; $n_{(i,j)}$  为阻塞元胞内的车辆数。

## 4 实例验证

### 4.1 实例概况

以成都二环高架牛市口出口匝道为例,匝道及

下游交叉口见图5。

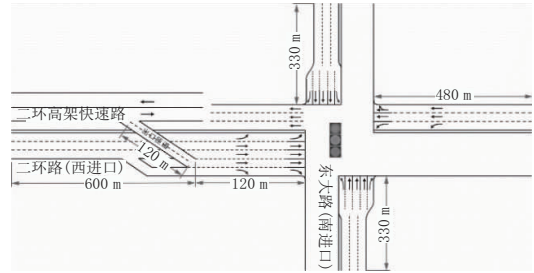


图5 实例交叉口渠化示意图

该出口匝道及交叉口早晚高峰拥堵频发,其工作日早晚高峰时段交通流量见表1。

表1 高峰时段出口匝道及交叉口交通流量

进口道	直行/(pcu·h <sup>-1</sup> )	左转/(pcu·h <sup>-1</sup> )	总流量/(pcu·h <sup>-1</sup> )
匝道	764	263	1 009
西进口	687	191	878
东进口	769	275	1 044
北进口	736	175	911
南进口	607	164	771

### 4.2 模型优化效果对比

#### (1) 排队长度分析

采用固定配时和动态优化控制方案,各仿真3 600 s 进行对比分析;匝道和西进口直行、左转交通流量最大,其排队长度对比见图6~图8。

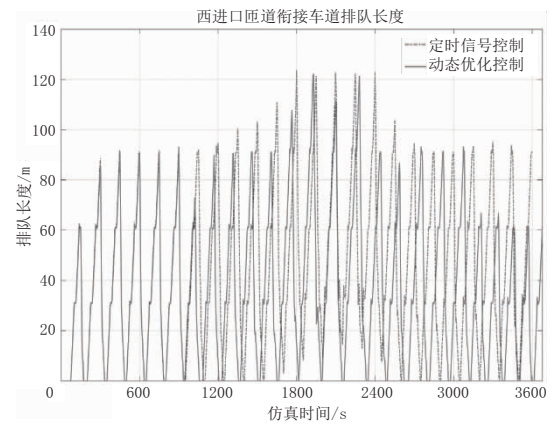


图6 匝道衔接车道排队长度对比

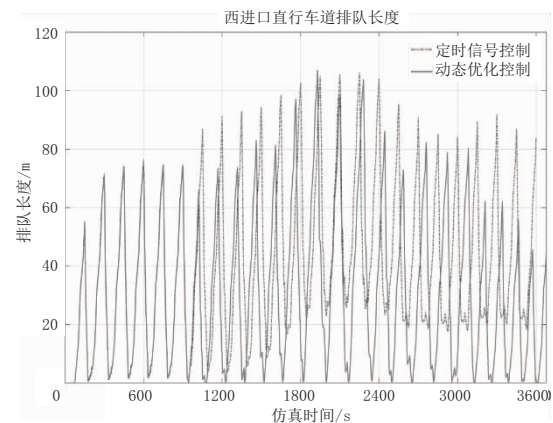


图7 西进口直行车道排队长度对比

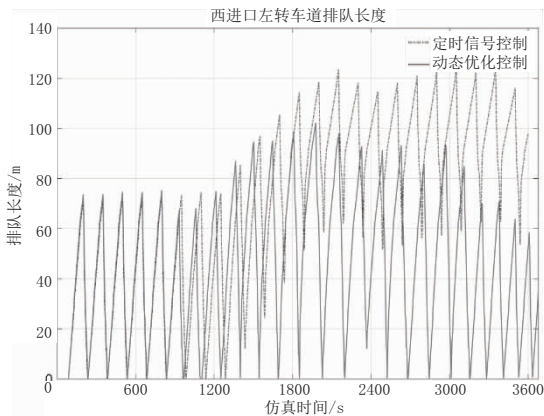


图8 西进口左转车道排队长度对比

在采用现状定时控制方案情况下,西进口过饱和状态下,匝道排队长度达126 m,左转排队长度达124 m,且后续车辆不断到达,匝道排队车辆将会溢出到高架主线。采用动态优化控制模型后,左转车道排队长度逐周期下降,排队长度维持在60 m左右。

(2) 交叉口饱和度对比

不同控制方案交叉口饱和度见图9。

采用定时信号控制方案,在第13~25周期,交叉口饱和度大于1,已处于过饱和状态。

利用本文提出的动态优化模型进行信号配时优化后,交叉口整体饱和度整体稳定在0.8左右,交叉口交通流处于非饱和的较为稳定状态。

5 结论

通过实例验证分析,本文所构建的匝道及下游

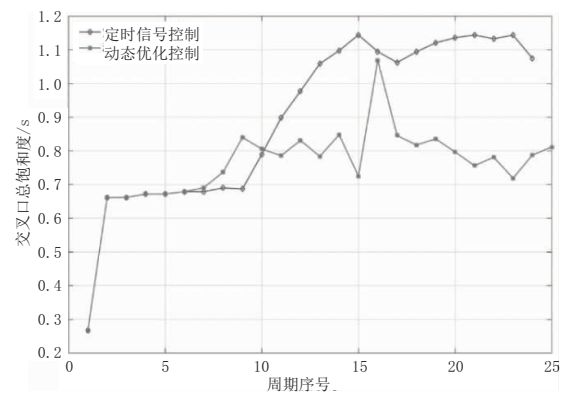
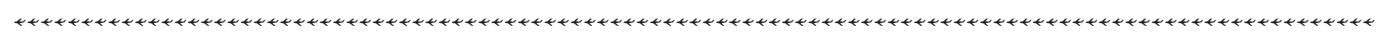


图9 各周期交叉口整体饱和度对比

交叉口CTM模型可实时仿真预测和同步更新交叉口的交通流,获取信号优化所需的各个指标;基于本文提出的交叉口的信号控制优化模型,可有效控制交叉口的整体饱和度,使其保持在相对稳定的状态,并有效降低了交叉口整体延误和各进口道及匝道的排队长度,减小了下游交叉口对匝道和快速路主线的交通影响,同时提升了该类型交叉口的整体通行效率。

参考文献:

- [1] 龙科军,杨晓光.城市高架道路出口匝道路边型接地纵向位置研究[J].交通信息与安全,2004,22(5):3-5.
- [2] 钱喆.过饱和和交通状态下的信号控制关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [3] 王力,李志军,修伟杰,等.基于MLD-MPC的快速路出口与辅路协调控制[J].控制工程,2014,21(4):487-490.
- [4] Daganzo C.The Cell Transmission Model. Part I: A Simple Dynamic Representation Of Highway Traffic[J].1993,288.



(上接第225页)

的概率分布及各参数之间的推导公式。在满足安全变道临界间隙的基础上,建立安全变道概率条件下的关系模型,得出以下结论:

(1)跟驰行驶安全约束条件下,考虑天气因素对驾驶反应时间的延迟、路面纵向附着系数、路线纵坡三方面因素对跟车行驶安全车头时距进行公式修正,更符合实际工程情况。

(2)车头时距分布采用二阶爱尔朗分布,代入完成安全变道所需要的车头时距后,可求得变道车辆所能完成安全变道的次数。反之,给定安全变道的次

数后,通过迭代法可以反算出临界交通量,作为养护工程中进行交通管制的预警值。

(3)由安全变道概率模型可求解变道所需总时长和既定变道成功概率条件下的安全变道提醒的最短距离。

参考文献:

- [1] JTG H30—2015,公路养护安全作业规程[S].
- [2] 曹荣吉,孙家驷.互通式立交匝道线形质量评价[J].重庆交通学院学报,1998,17(3):44-49.
- [3] 王炜,过秀成,等.交通工程学[M].2版.南京:东南大学出版社,2011.