

# 信号控制交叉口动态车道功能优化方法

赵靖<sup>1</sup>, 付晶燕<sup>2</sup>, 杨晓光<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中国城市规划设计研究院, 北京 100037)

**摘要:** 为了应对交叉口交通供需关系发生显著变化的情况, 合理分配交叉口空间资源, 对信号交叉口动态车道功能优化方法进行研究. 基于优化对象、优化参数和优化模型 3 个方面的分析, 建立了以进口组为基础的动态车道功能优化模型. 它可由整数非线性规划模型来描述, 其优化目标为关键流量比之和最小. 通过算例分析, 对该方法的优化结果和计算速度进行了检验. 研究表明, 以进口组为优化对象可在保证优化结果准确性的基础上显著减少须同时进行优化的变量数, 提高求解效率, 以此为基础建立的优化模型可满足动态控制计算准确性和计算速度的要求.

**关键词:** 交通工程; 整数非线性规划; 动态车道功能划分; 可变车道

**中图分类号:** U491.5

**文献标志码:** A

## Optimization Model of Dynamic Lane Assignment for Isolated Signalized Intersections

ZHAO Jing<sup>1</sup>, FU Jingyan<sup>2</sup>, YANG Xiaoguang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China)

**Abstract:** In order to deal with the significant variation of the relationship between the supply and demand of the signalized intersection, the method to allocate a dynamic lane-use was discussed. Based on the analysis of the optimization objective, optimization variables and the optimization model, a dynamic lane assignment optimal method was proposed based on the approach-group concept. The method was formulated as an integer-non-linear-programming model. To minimize the sum of the critical flow ratio was the most important design objective. The accuracy and the computation time of the method were tested by numerical examples. Results show that

the approach-group concept can reduce the number of control variables significantly without reducing the accuracy of the optimization results and the proposed model can achieve the goal of real-time dynamic lane assignment control.

**Key words:** traffic engineering; integer-non-linear-programming; dynamic lane assignment; variable lane

随着交通供需矛盾的日益突显, 如何在有限的道路空间内, 实现交通高效地运行是城市交通面临的一项挑战. 交叉口作为城市道路交通的重要转换节点, 对其进行时空优化, 是保障城市道路畅通的关键. 车道功能是影响交叉口空间资源分配的重要因素之一, 以往一般将其作为静态的控制变量, 车道功能一经确定, 在较长的一段时间内不会改变, 交通需求的波动主要依靠信号控制来调节. 但信号优化的效果是有限的, 在潮汐交通、紧急救援、突发事件等特殊需求情况下, 交通供需关系往往会发生较大变化, 这时仅通过信号优化措施常难以有效快速地应对. 由此, 信号交叉口车道功能的动态控制技术应运而生.

虽然信号交叉口车道功能动态控制已在我国实际控制管理中得到了应用; 但由于在优化方法上存在优化结果准确性与计算速度之间的矛盾, 目前主要通过通过对历史数据分析, 制定分时段的车道功能方案, 难以根据实时的交通状况进行动态控制.

针对上述问题, 本文从优化对象界定、优化参数选择以及优化模型建立 3 个方面入手, 建立适用于单个信号控制交叉口动态车道功能划分的优化方法, 在保障优化结果准确性的基础上, 提高模型求解的效率和实用性, 以满足动态控制的需求.

收稿日期: 2013-03-18

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2011AA110305)

第一作者: 赵靖(1983—), 男, 工程师, 博士生, 主要研究方向为交通管理与控制、交通系统设计. E-mail: angeletzhao@hotmail.com

通讯作者: 杨晓光(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为复杂交通运输系统分析与优化设计以及管理与控制理论和技术. E-mail: yangxg@tongji.edu.cn

## 1 研究综述

最简单的车道功能划分方法是对划分结果进行阈值判断,文献[1]提出车道功能划分结果应保证交叉口关键流量比之和不大于0.9.该方法最为简单明确,但仅能得到可行解,而无法得到最优解.

为追求最优的管理控制效果,有研究提出将车道功能划分与信号控制相结合的组合优化方法. Lam<sup>[2]</sup>以整个交叉口为优化对象,采用混合整数线性规划模型,建立了组合优化模型. Wong<sup>[3-5]</sup>同样以整个交叉口为优化对象,以通行能力最大、信号周期最短和延误最小为优化目标,分别建立了优化模型.这类组合优化方法将车道功能划分和信号配时一同考虑,并同步优化求解,可得到不同优化目标情况下的最优解.但由于需同时优化车道功能组合及信号配时方案,控制变量较多,模型计算时长较大,难以运用于动态控制之中.

实时性是动态控制的基本要求,由于上述静态优化模型的控制变量过多,导致求解过程繁琐,难以达到实时动态控制的目标.对此,以往有研究试图通过减少优化变量数来简化模型,提高算法的计算速度.

Zhong<sup>[6]</sup>将优化对象从整个交叉口简化为单个进口,这虽能起到简化模型的作用,但导致结果非最优解,无法达到交叉口整体运行水平最优的效果.梁潇<sup>[7]</sup>和李丽丽<sup>[8]</sup>分别采用车道占有率加排队长度和饱和度作为可变车道控制的触发条件,提出了基于检测数据的动态车道功能控制方法.该方法以单个进口为研究对象,采用逻辑判断的方法,算法简洁,但该研究同样以单个进口为研究对象,优化结果非最优解,并且该方法仅适用于进口道只有1条车道为可变车道的情况.曾滢<sup>[9-10]</sup>为了简化模型,对车道功能与信号控制组合优化模型中的信号配时部分,引用 Webster 信号控制模型及其优化目标,使周期时长和绿灯时长成为确定性的参数,降低模型求解的复杂程度.然而目前单点信号控制有着丰硕的研究成果,信号控制优化目标也多种多样,该方法直接引用 Webster 信号控制模型及其优化目标,使模型在实际应用中缺乏灵活性.

综上所述,由于交叉口静态车道功能划分可较少地考虑模型计算的复杂程度,为取得最优的控制效果,现有研究主要以整个交叉口为研究对象,将车

道功能划分与信号控制结合,建立组合优化模型.对于动态车道功能划分的研究,由于需要考虑控制策略的实时性,现有研究成果均尽可能减少控制变量,但准确性和灵活性难以保障.

为了能在保障优化结果准确性的基础上,提高模型求解效率和实用性,本研究将在优化对象、优化参数和优化模型3个方面进行探讨,建立能满足动态控制要求的车道功能优化方法.

## 2 优化对象

以往研究在优化对象的选择上,多针对1个进口道或整个交叉口,前者导致优化结果为非最优解,后者使模型计算复杂.实际上,交叉口某进口的车道功能优化方案并非与其余进口都相关.例如,对于对称放行的四相位控制交叉口,某进口的车道功能仅与对向进口有关,而与相邻进口无关.对此,本研究提出以“进口组”为研究对象,根据需要可按交叉口的1个进口、对向2个进口或整个交叉口作为1个进口组,进行车道功能设计.下面给出进口组划分的方法:

(1)1个进口构成1个进口组.当进口道各流向在同一相位内通行时,可将该进口作为1个进口组.例如,采用单口放行或左转许可相位的进口.

(2)对向2个进口构成1个进口组.当进口采用保护型左转相位,且存在与对向进口同时放行的流向,则在车道功能划分中该进口与对向进口有着极大的相关性.因为,分配给某一流向的车道数(如左转)不仅会影响分配给该进口其他流向的车道数(如直行),还会影响对向进口车道功能的合理划分.但并不会影响两侧相邻进口的车道功能的划分方案.因此,应将这2个对向进口作为1个进口组.

(3)交叉口的所有进口构成1个进口组.这主要针对进出口车道数会发生变化的情况.但出于安全考虑,动态车道功能控制中一般不考虑将交叉口的进口和出口车道进行互换.因此,后文不考虑这种情况,主要对前两种情况进行探讨.

当所分析的进口组包含2个或2个以上进口时,在以后所有的分析中都要将这些进口看成一个整体.如此,可在保证优化结果为最优解的前提下,减少了须同时进行优化的变量数,提高了求解效率.针对4种常用的信号相位,图1给出了与之对应的进口分组.

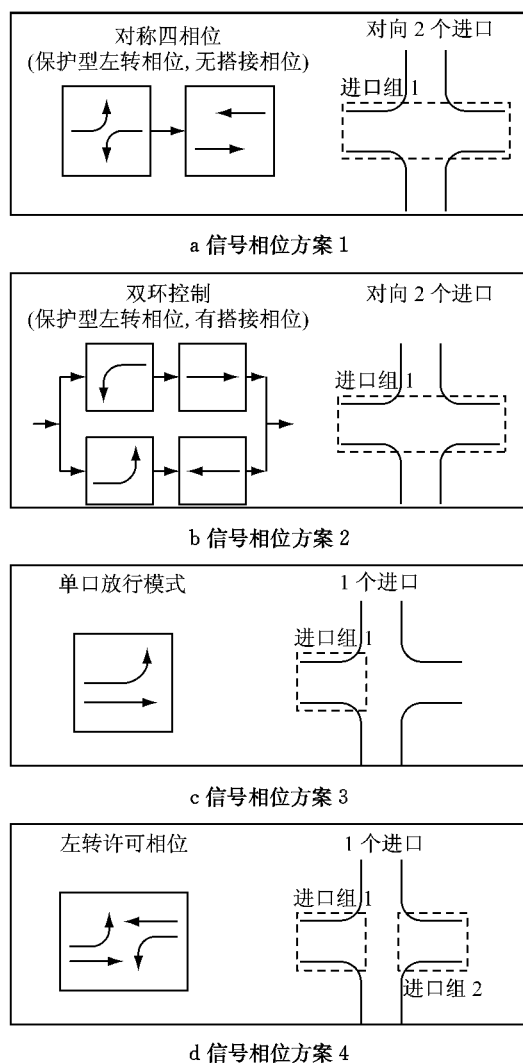


图1 典型进口组划分

Fig.1 Typical arm grouping for analysis

### 3 优化参数

对于交叉口静态车道功能划分,不少研究将车道功能划分与信号控制结合,建立组合优化模型.这对于静态的交叉口设计而言固然十分必要,但对动态控制并不合适.这不仅仅是出于计算时间的考虑.更重要的是车道功能在交叉口控制系统中是一个较为稳定的部分(慢变量),不应与信号控制这种更易改变的参数(快变量)同时优化.它应当主要在交叉口供需关系发生显著变化的情况下才使用,如潮汐交通、紧急救援或突发事件等,而对于一般的交通需求波动可通过信号控制来调节.所以在动态控制中,两者不应在同一模型中进行优化调整,否则将无法区分两者的不同作用.因此,本研究中,模型的优化参数包括车道功能以及信号相位方案,而不对信号配时参数进行优化.具体应用中只需在本模型优化

结果的基础上,灵活运用现有的动态信号控制成果,对信号配时参数进行优化,即可输出最终的动态控制方案.

## 4 优化模型

### 4.1 目标函数

由于优化参数中不包含信号配时,因此在优化过程中不可选用通行能力最大、饱和度最小或延误最小等目标.本研究将采用关键流量比之和最小作为主要的优化目标,这主要是由于在以等饱和度为原则进行绿灯时间分配的条件下,交叉口关键流量比之和最小与饱和度最小等价;同时,根据信号配时的基本理论(如 Webster 配时理论),关键流量比之和是表征交叉口供需关系的关键参数,关键流量比之和越小,表示交叉口的整体供需矛盾越缓和.但关键流量比之和最小在某些特殊情况下,不能保证最优解的惟一性.因此,引入优化的次目标,非关键流向流量比与关键流量比之比的差值最小,即非关键流向流量比与关键流向流量比最匹配,并将其乘以一个充分小的正数  $u$ ,使其不会对优化的主要目标造成影响,如下式:

$$\min (Y_t + u\delta_t) \quad (1)$$

式中:  $Y_t$  表示分析周期  $t$  的关键流量比之和;  $u$  表示充分小的正数,可取 0.001;  $\delta_t$  表示分析周期  $t$  非关键流向流量比与关键流量比之比的差值.

### 4.2 约束条件

#### 4.2.1 确定 $Y_t$ 和 $\delta_t$

$Y_t$  和  $\delta_t$  的计算公式与信号相位有关,公式如下:

$$-M|H_t - h| \leq Y_t - Y_h \leq M|H_t - h|, \quad \forall h = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

$$-M|H_t - h| \leq \delta_t - \delta_h \leq M|H_t - h|, \quad \forall h = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

式中:  $M$  表示充分大的数,可取 1 000;  $H_t$  表示分析周期  $t$  的信号相位;  $h$  表示信号相位方案编号,  $h=1, 2, 3, 4$  分别对应图 1 中 4 种信号相位方案;  $Y_h$  表示分析周期  $t$  采用第  $h$  种信号相位情况下的  $Y_t$  值;  $\delta_h$  表示分析周期  $t$  采用第  $h$  种信号相位情况下的  $\delta_t$  值.

(1)若  $H_t=1$ ,即信号相位采用传统四相位,则关键流量比之和等于左转相位的关键流量比与直行相位的关键流量比之和,即

$$Y_{t1} = \max[y_{t1,d}, y_{t2,d}] + \max[y_{t1,e}, (1 - n_{t14})],$$

$$y_{i1, \text{tr}} n_{i14}, y_{i2, \text{et}} (1 - n_{i24}), y_{i2, \text{tr}} n_{i24}] \quad (4)$$

式中:  $y_{ij}$  表示分析周期  $t$ 、进口  $i$ 、车道组  $j$  的流量比; 下标 el, et, tr 分别表示单独左转、单独直行、直右车道组;  $n_{ip}$  表示分析周期  $t$ 、进口  $i$  使用车道功能  $p$  的车道数。

$$\delta_{i1} = \left| \frac{\min[y_{i1, \text{el}}, y_{i2, \text{el}}]}{\max[y_{i1, \text{el}}, y_{i2, \text{el}}]} - \frac{\min[y_{i1, \text{et}}(1 - n_{i14}), y_{i1, \text{tr}} n_{i14}, y_{i2, \text{et}}(1 - n_{i24}), y_{i2, \text{tr}} n_{i24}]}{\max[y_{i1, \text{et}}(1 - n_{i14}), y_{i1, \text{tr}} n_{i14}, y_{i2, \text{et}}(1 - n_{i24}), y_{i2, \text{tr}} n_{i24}]} \right| \quad (5)$$

(2) 若  $H_i = 2$ , 即信号相位采用双环控制, 则关键流量比之和等于上半环各流向流量比之和与下半环各流向流量比之和中的大值, 即

$$Y_{i2} = \max[y_{i1, \text{el}} + y_{i2, \text{et}}(1 - n_{i24}) + y_{i2, \text{tr}} n_{i24}, y_{i2, \text{el}} + y_{i1, \text{et}}(1 - n_{i14}) + y_{i1, \text{tr}} n_{i14}] \quad (6)$$

由于上下半环中的两个流向都属于不同的进口, 进口组各进口的车道功能都能由关键流量比之和最小来优化确定, 不存在最优解不惟一的情况, 因此  $\delta_i$  可直接取 0。

(3) 若  $H_i = 3$ , 即信号相位采用单口控制, 关键流量比为各流向流量比的最大值。但由于单口控制的进口其对向进口也应采用单口控制, 且在不同相位内通行, 为了与前两种信号相位具有可比性, 计算中应当计算对向 2 个进口的关键流量比之和, 即

$$Y_{i3} = \sum_{i=1}^2 \max[y_{i, \text{el}}(1 - \max[n_{i2}, n_{i5}, n_{i6}]), y_{i, \text{et}}(1 - \max[n_{i2}, n_{i4}, n_{i6}]), y_{i, \text{lt}} n_{i2}(1 - n_{i4}), y_{i, \text{tr}} n_{i4}(1 - n_{i2}), y_{i, \text{lr}} n_{i5}, y_{i, \text{ltr}}(n_{i2} n_{i4} + n_{i6})] \quad (7)$$

式中: 下标 lt, ltr 分别表示直左、左直右车道组。

这种情况也不存在最优解不惟一的情况,  $\delta_i$  可直接取 0。

(4) 若  $H_i = 4$ , 即信号相位采用左转许可相位, 进口组中只包含 1 个进口, 关键流量比等于各流向流量比的最大值, 计算式为

$$Y_{i4} = \max[y_{i, \text{el}}(1 - \max[n_{i2}, n_{i5}, n_{i6}]), y_{i, \text{et}}(1 - \max[n_{i2}, n_{i4}, n_{i6}]), y_{i, \text{lt}} n_{i2}(1 - n_{i4}), y_{i, \text{tr}} n_{i4}(1 - n_{i2}), y_{i, \text{lr}} n_{i5}, y_{i, \text{ltr}}(n_{i2} n_{i4} + n_{i6})] \quad (8)$$

这种情况也不存在最优解不惟一的情况,  $\delta_i$  可直接取 0。

#### 4.2.2 进口车道数约束

对于任意进口  $i$ , 动态控制中进口道和出口道的车道数都应为固定的输入变量, 进口道各种功能的车道数之和应等于总进口车道数, 即

$$\sum_{p=1}^7 n_{ip} = \alpha_i, \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (9)$$

当左转相位与直行相位的关键流向属于同一进口时, 其对向进口可能存在多个车道功能划分方案, 同时具有相同的  $Y_i$  值, 即最优解不惟一。因此, 需要计算次目标, 非关键流向流量比与关键流量比之比的差值为

式中:  $\alpha_i$  表示进口  $i$  进口道车道数;  $N$  表示交叉口进口数。

#### 4.2.3 各种功能的车道数计算

对于任意进口  $i$ , 采用车道功能  $p$  的车道数数量, 可由下式计算:

$$n_{ip} = \sum_{k=1}^{\alpha_i} \Delta_{ik} / p, \quad \Delta_{ik} = p \quad (10)$$

式中:  $\Delta_{ik}$  表示分析周期  $t$ 、进口  $i$ 、车道  $k$  优化的车道功能;  $p$  表示车道功能编号,  $p=0$  表示可变车道,  $p=1$  表示左转车道,  $p=2$  表示左直车道,  $p=3$  表示直行车道,  $p=4$  表示直右车道,  $p=5$  表示左右车道,  $p=6$  表示左直右车道,  $p=7$  表示右转车道;  $k$  表示进口车道的编号, 编号规则为车道  $k$  位于车道  $k+1$  的左侧。

#### 4.2.4 出口车道数约束

为保障通行顺畅, 对于任意进口  $i$  中的任意流向, 其车道数不应大于与之对应的出口车道数, 对于左转、直行和右转流向分别如下式:

$$\beta_{i, l} \geq \sum (n_{i1} + n_{i2} + n_{i5} + n_{i6}) \quad (11)$$

$$\beta_{i, t} \geq \sum (n_{i2} + n_{i3} + n_{i4} + n_{i6}) \quad (12)$$

$$\beta_{i, r} \geq \sum (n_{i4} + n_{i5} + n_{i6} + n_{i7}) \quad (13)$$

式中:  $\beta_{i, m}$  表示进口  $i$ 、流向  $m$  对应的出口车道数, 流向  $m$  包含 3 种类型, l 表示左转, t 表示直行, r 表示右转。

#### 4.2.5 独立左转车道的设置要求

当采用保护型左转相位时, 必须设置独立左转车道, 其公式如下:

$$n_{i1} + (H_i - 1)(H_i - 2) \geq 1 \quad (14)$$

#### 4.2.6 消除进口各车道间潜在冲突的约束

为消除进口各车道间潜在冲突, 必须满足下列 4 个约束条件:

(1) 对于任意进口, 每种组合车道最多在进口道的 1 条车道使用

$$n_{ip} \leq 1, \quad \forall i = 1, \dots, N; p = 2, 4, 5, 6 \quad (15)$$

(2) 任意两种组合车道不能在同一进口使用(除了左直车道与直右车道这两种功能车道的组合)

$$(n_{ip} + n_{ip'}) \left[ \frac{p + p' - 6}{p + p' - 5.9} \right] \leq 1, \quad \forall i = 1, \dots, N;$$

$$p = 2, 4, 5, 6; p' = 2, 4, 5, 6; p \neq p' \quad (16)$$

(3) 对于任意进口, 独立直行车道与左右车道或左直右车道这两种组合车道不可同时使用

$$n_{i3} n_{ip} = 0, \quad \forall i = 1, \dots, N; p = 5, 6 \quad (17)$$

(4) 对于任意两条相邻的车道, 如果车道  $k+1$  采用了车道功能  $p$ , 那么车道  $k$  就不可采用  $p+1, p+2, \dots, p+7$  这几种车道功能, 除非信号相位使用了传统四相位 ( $H_t = 1$ )

$$(\Delta_{ik} - \Delta_{i(k+1)})(H_t - 1) \leq 0, \\ \forall i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, \alpha_i - 1 \quad (18)$$

#### 4.2.7 固定功能车道的约束

并不是所有车道的功能都能动态地优化, 对于固定功能的车道, 在优化中必须保持其初始输入的车道功能, 即

$$(\Delta_{ik} - p_k)p_k = 0, \\ \forall i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, \alpha_i - 1 \quad (19)$$

式中:  $p_k$  表示进口  $i$ 、车道  $k$  的初始车道功能。

#### 4.2.8 信号相位约束

本模型中, 信号相位既可作为初始输入参数, 也可作为模型优化的控制变量。管理者可直接在 4 种常用的信号相位中进行选择 ( $H = 1, 2, 3, 4$ ), 否则, 模型将信号相位也作为控制变量进行优化, 即

$$(H_t - H)H = 0 \quad (20)$$

式中:  $H$  表示初始信号相位,  $H=0$  表示信号相位为优化变量,  $H=h$  表示信号相位为固定的输入参数。

#### 4.3 求解方法

信号控制交叉口动态车道功能优化模型可由上述整数非线性规划模型描述, 其目标函数为式(1), 约束条件为式(2)~(20)。由于这是个非线性规划问题, 没有很好的求解方法。但分析发现, 考虑了“进口组”和上述约束条件后, 可行解的范围已十分有限, 对于各种信号相位, 优化所需的最大计算次数(即可

行解数)如表 1 所示。因此采用枚举法求解上述动态车道功能优化模型可满足动态控制的要求。

表 1 车道功能划分方案数

Tab.1 Number of lane assignment schemes of an arm

| 信号相位  | 进口组车道功能划分方案数                        | 交叉口优化所需计算次数                                  |
|-------|-------------------------------------|--|
| $H=1$ | $(\alpha_1 - 1)^2 (\alpha_2 - 1)^2$ | $(\alpha_1 - 1)^2 (\alpha_2 - 1)^2 \times 2$ |
| $H=2$ | $(\alpha_1 - 1)^2 (\alpha_2 - 1)^2$ | $(\alpha_1 - 1)^2 (\alpha_2 - 1)^2 \times 2$ |
| $H=3$ | $(2\alpha_1^2 - 2\alpha_1 + 1)$     | $(2\alpha_1^2 - 2\alpha_1 + 1) \times 4$     |
| $H=4$ | $(2\alpha_1^2 - 2\alpha_1 + 1)$     | $(2\alpha_1^2 - 2\alpha_1 + 1) \times 4$     |

## 5 算例分析

为检验模型计算结果的准确性, 同时便于与以往研究成果进行对比, 选用 Wong<sup>[4]</sup>中的算例。为便于讨论, 饱和流率模型沿用原文中的计算方法<sup>[4,11]</sup>。该算例采用左侧通行规则, 交叉口几何条件及交通需求条件分别如表 2 和表 3 所示, 并假设所有车道均为可变车道(所需优化的变量数最多, 即对计算时间而言为最不利情况)。优化结果如图 2 和表 4 所示。

表 2 交叉口几何条件

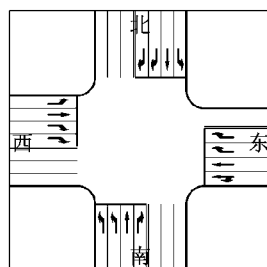
Tab.2 Geometric layout of the example intersection

| 方向 | 进口车道数 | 出口车道数 |
|----|-------|-------|
| 南  | 4     | 3     |
| 西  | 4     | 3     |
| 北  | 4     | 3     |
| 东  | 4     | 1     |

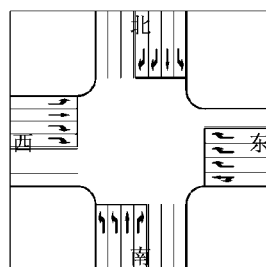
表 3 交叉口交通量需求条件

Tab.3 Traffic demand for the example intersection

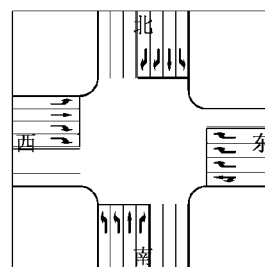
| 方向 | 出口编号 |     |     |     |
|----|------|-----|-----|-----|
|    | 南    | 西   | 北   | 东   |
| 南  |      | 500 | 200 | 100 |
| 西  | 100  |     | 100 | 500 |
| 北  | 300  | 300 |     | 300 |
| 东  | 100  | 400 | 400 |     |



a 原文<sup>[4]</sup>割平面法优化结果



b 原文<sup>[4]</sup>启发式算法



c 本文优化结果

图 2 车道功能划分优化结果

Fig.2 Optimization results of the lane assignment

表4 算例优化结果分析

Tab.4 Optimization results analysis for the example

| 优化算法                    | 车均延误/s | 求解变量/个 | 计算时间/s  |
|-------------------------|--------|--------|---------|
| 原文 <sup>[4]</sup> 割平面法  | 26.1   | 252    | 244 800 |
| 原文 <sup>[4]</sup> 启发式算法 | 26.0   | 252    | 2 400   |
| 本文优化结果                  |        | 18     | 1       |

从计算结果的准确性方面分析,原文分别采用割平面法和启发式算法两种求解方法,延误对比发现原文启发式算法的求解结果为最优解,且其车道功能划分优化方案与本文计算结果相同,说明本文建立的模型能保持优化结果的准确性.从计算速度分析,本文模型优化计算时间大大减少,能满足动态控制的要求.但由于模型输出结果为车道功能和信号相位方案,不包括信号配时,因此实际应用中只需在本模型优化结果的基础上,灵活运用现有的动态信号控制成果,对信号配时参数进行优化,即可输出最终的动态控制方案.

## 6 结论

(1)将进口组作为研究对象,可在保证优化结果准确性的基础上,显著减少需同时优化的控制变量数,提高了求解效率.

(2)基于车道功能在交叉口控制系统中是一个较为稳定的部分(慢变量)的考虑,应当在交叉口供需关系发生显著变化的情况下才使用.因此在动态控制中,建议车道功能与信号控制两者不应在同一模型中优化调整.

(3)采用整数非线性规划建立了交叉口动态车道功能优化模型,并通过算例分析,验证了模型的准确性和计算速度能满足动态控制的要求.

本研究适用于单个信号控制交叉口的动态车道功能划分.对于由多个交叉口组成连线、通道或网络的情况,有待进一步研究.

### 参考文献:

[1] 吴兵,李晔. 交通管理与控制[M]. 4版. 北京:人民交通出版

社,2009.

WU Bing, LI Ye. Traffic management and control[M]. 4th ed. Beijing: China Communications Press, 2009.

[2] Lam W, Poon A, Mung G. Integrated model for lane-use and signal-phase designs [J]. Journal of Transportation Engineering, 1997, 123(2): 114.

[3] Wong C K, Wong S C. Lane-based optimization of signal timings for isolated junctions[J]. Transportation Research Part B, 2003, 37: 63.

[4] Wong C K, Wong S C. A lane-based optimization method for minimizing delay at isolated signal-controlled junctions[J]. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, 2003, 2: 379.

[5] Wong C K, Heydecker B G. Optimal allocation of turns to lanes at an isolated signal-control junction [J]. Transportation Research Part B, 2011, 45: 667.

[6] ZHONG Zhangjian, LIU Haode, MA Wanjing, et al. An optimization method of dynamic lane assignment at signalized intersection[C]//2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha: IEEE, 2008: 1277-1280.

[7] 梁潇. 信号交叉口渠化区可变车道设计原理研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2008.

LIANG Xiao. Research on signal intersection channeling area variable lane design theorem [D]. Changchun: College of Traffic of Jilin University, 2008.

[8] 李丽丽,曲昭伟,陈永恒,等. 可变车道的控制方法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(1): 98.

LI Lili, QU Zhaowei, CHEN Yongheng, et al. Control strategy of variable lane[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(1): 98.

[9] 曾滢,杨晓光,马莹莹. 交叉口动态车道功能与信号控制协同问题研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2009, 37(7): 903.

ZENG Ying, YANG Xiaoguang, Ma Yingying. Study on synergy problem of dynamic lane-use assignment and signal control at intersections [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(7): 903.

[10] 曾滢. 城市道路信号控制交叉口群交通设计方法研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2010.

ZENG Ying. Signal group based traffic design method for urban intersections [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2010.

[11] Kimber R M, McDonald M, Hounsell N. The prediction of saturation flows for road junctions controlled by traffic signals [R]. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory, 1986.