

交叉口可变车道最佳车道功能及信号转变方法

赵 靖, 周溪召

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 为了保障交叉口车道功能动态控制的效果,并在确保行车安全的前提下,减少车道功能转变过程中对交叉口通行能力所造成的损失和对驾驶员所造成的不适应性,对交叉口动态车道功能划分的实施方法进行了研究.实施方法分为两个步骤,首先基于二进制优化判断模型,确定实施方案;在此基础上,根据信号相位变化的类型,考虑安全、效率及快捷等因素,确定方案实施的时刻.研究表明,并不是所有最优的车道功能方案都有必要实施,此外,方案实施时刻也会根据转变前后车道功能和信号控制情况而变化.

关键词: 交通工程; 可变车道; 实施方法; 交叉口

中图分类号: U 491.5 **文献标志码:** A

Optimal Switching Method for Lane Assignment and Signal Control for Variable Lanes at Intersections

ZHAO Jing, ZHOU Xizhao

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to enhance the effect of the dynamic lane assignment technology, and reduce the negative impact on traffic capacity and the inadaptation on drivers during the changing of lane assignment, an implementation method was proposed. The method consists of two steps. The first step is to identify a suitable implementation scheme by determining a binary-type threshold. The second step is to obtain the best changing time of the optimal lane assignment scheme in consideration of safety, efficiency, and speediness. The results of numerical examples show that not all the optimal schemes of the dynamic lane assignment are necessary to be used. Moreover, the proposed method could find a suitable changing time according to the optimization and the status quo lane assignments as well as the signal phase schemes.

Keywords: traffic engineering; variable lane; implementation method; intersections

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安全高效地运行是交通研究人员面临的一大难题.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,是保障城市道路交通畅通与安全的关键.

车道功能划分是影响交叉口空间资源分配的重

收稿日期: 2015-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273042);上海市高校青年教师资助计划(ZZsl15015)

第一作者: 赵 靖(1983-),男,讲师.研究方向:交通管理与控制、交通系统设计. E-mail: jing_zhao_traffic@163.com

要因素^[1-2],针对潮汐交通、紧急救援、突发事件等特殊需求,快速应对交叉口交通供需关系的结构性不匹配,交叉口车道功能的动态控制技术应运而生。

虽然交叉口车道功能动态控制已在我国北京、上海、杭州等地的实际控制管理中得到了应用,但在理论层面,以往主要研究动态车道功能划分的优化算法,而对于具体实施方法的研究较少。如何将优化算法结果转化为具体实施方案,是动态控制需要解决的一大问题。本文针对上述问题,从方案制定(即判断是采用优化方案还是保持现状)和方案实施(即确定车道功能和信号控制切换的时刻)两个方面研究动态车道功能划分的实施方法,以保障交叉口通行安全,减少变化过程中通行能力的损失。

1 研究综述

1.1 交叉口车道功能划分模型算法

车道功能划分是信号配时的基础^[3-4],其优化方法可分为静态和动态两种。其中,静态优化方法从单一参数的优化(如关键流量比^[5]),向车道功能划分与信号控制的组合优化方法^[6-9]的方向发展,根据优化目标的不同,建立了一系列混合整数线性规划模型或混合整数非线性规划模型。但由于需同时求解的变量较多,模型计算复杂,往往难以满足动态控制要求。

为了快速有效地应对交通供需结构性变化,信号控制交叉口车道功能动态控制应运而生。为了满足动态控制的实时性要求,需要简化模型,提高算法的计算速度。Zhong等^[10]将研究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^[11]和李丽丽等^[12]提出了基于检测数据的动态车道功能控制流程和算法,该方法也以单个进口为研究对象,采用逻辑判断的方法,简洁实用,但存在优化结果非最优解的不足。为了解决模型优化结果的准确性与计算速度之间的矛盾,赵靖^[13]从研究对象、优化目标和模型算法这3个方面进行分析,提出最优化方法与逻辑判断相结合的动态车道功能划分优化方法。

1.2 交叉口动态车道功能划分实施方法

理论层面,李丽丽等^[14]提出了基于双停车线的主可变车道诱导方法,在渠化区上游再设置一条停车线并配以相应的预信号。当需要切换车道功能时,预信号红灯提前起亮,确保2条停车线间的车辆能

全部清空,然后再切换车道功能,下一周期该进口便可按调整后的车道功能划分运行。该方法安全性较高,但2条停车线间的距离需满足车道变换的要求,并且由于在预信号处未对车道功能进行划分,可能造成预信号绿灯期间大部分或全部车道被禁止通行的流向所阻塞,影响了进口道通行效率。

实践层面,实施方法主要有以下4种:a.分时段车道功能调整,将一天时间划分成若干时间段(如早高峰、晚高峰、平峰),在各时间段内采用不同的固定车道功能划分方案;b.实时调整,实时切换;c.实时调整,对可变车道在绿灯相位结束前,提前切换车道功能,确保车道功能转变前所属流向车辆在本周期内清空;d.实时调整,在车道功能切换过程中插入车道关闭的阶段,其目的是使已进入可变车道的车辆回到应当行驶的车道里,然后再显示变化后车道功能,以保障通行安全。将交叉口车道功能划分从静态发展到动态,是交通控制与管理的一大进步。但上述4种实施方法中,方法1实施风险性较小,但还是比较低层次的动态控制;方法2虽然实现了实时动态控制,但安全性差;方法3为了减少滞留车辆对下一信号周期的影响,将车道功能提前切换,但在绿灯期间切换车道功能,不利于车辆运行的安全性;方法4考虑了车道功能切换过程中的安全性因素,但通行效率又会受到一定影响,并且要求已进入可变车道的车辆回到应当行驶的车道的做法,也是产生交通秩序混乱的隐患。

1.3 综合评述

以往动态车道功能划分的研究主要集中于优化算法的层面,而对于具体实施方法的研究较少。虽然在我国多个城市已有了一定的实践经验,但遇到车道功能切换过程中通行秩序混乱、安全性和运行效率难以协调等问题。对于车道功能动态划分,如何更好地将优化结果得以实施,是目前面临的一大问题。

本文在对交叉口动态车道功能划分总体框架进行描述的基础上,从方案制定和方案实施2个方面研究其实施方法,以保障交叉口通行安全,减少变化过程中通行能力的损失。

2 总体框架

交叉口动态车道功能划分的总体分析顺序如图1(见下页)所示,包括优化算法和实施方案2个部分。前者依据实时输入条件的变化,给出理论最优方案,目前已有较为深入的研究。本论文将重点对动

态实施方法进行讨论,在理论最优方案的基础上进行综合考量,确定最终实施方案,并制定具体实施方法.

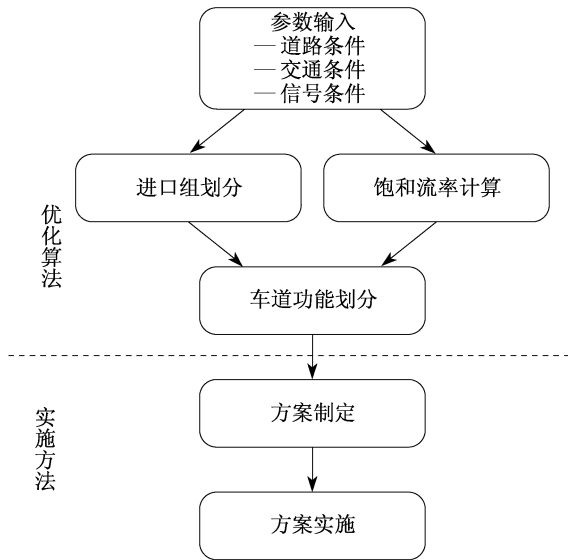


图1 总体框架

Fig.1 Outline of the operation procedure

3 方案制定

根据动态车道功能划分模型,对于每个优化周期 T ,均可计算得出一个车道功能划分优化方案 $A(T)$.当优化方案 $A(T)$ 与当前运行方案 $F(T)$ 不一致时,决策者需要判断采用优化方案还是保持现状.并不是每次生成不同的车道功能方案都需要实施.这是因为一方面,当交通需求变化较小时,信号控制也能很好地应对这些波动,车道功能优化所带来的效益可能很少;另一方面,改变车道功能需要花费更多的代价,可能造成驾驶员的困惑,从而引发安全隐患.因此,在动态车道功能优化中,作为交叉口控制系统中是一个较为稳定部分(慢变量)的车道功能在变化频率上应与信号控制这种更易改变的参数(快变量)有所区分.车道功能的优化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.一般需要考虑以下几个方面的因素:

a. 方案变化频率约束.

车道功能动态控制与信号控制的动态优化不同,前者是对交叉口的空间资源进行重新分配,后者是对交叉口的时间资源进行重新分配,车道功能的变化会给驾驶员造成直观的感受,对其驾驶行为产

生直接的影响.因此,车道功能作为交通控制中较为稳定的部分,应限制其变化频率,这里设定最高的变化频率为 10 min,如式(1)所示.

$$\begin{cases} \text{如果 } t > 600, & f_1 = 1 \\ \text{其他,} & f_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 表示当前运行方案的持续时间, s ; f_1 表示方案变化频率约束条件, 1 表示满足, 0 表示不满足.

b. 交通需求变化稳定性约束.

由于交通需求的小幅波动在实际运行中十分常见,只有当交叉口各流向交通需求有较为明显的发展趋势或当前交通需求已有了较为稳定的变化特征时,变换车道功能才能起到较好的效果.这里限定至少连续 3 个分析周期车道功能的优化方案相同,如式(2)所示.

$$\begin{cases} \text{如果 } A(T) = A(T-1) = A(T-2), & f_2 = 1 \\ \text{其他,} & f_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $A(T)$ 表示在优化周期 T 计算得出的车道功能划分优化方案; f_2 表示交通需求变化稳定性约束条件, 1 表示满足, 0 表示不满足.

c. 优化方案实施效益约束.

由于自适应的信号控制能根据交通需求实时调整信号配时,因此,当交通需求波动较小时,完全可以通过信号控制的调整来保障交叉口的运行效率.只有当交叉口交通供需关系发生显著变化时,车道功能的动态控制才能起到较好的效果.可采用交叉口运行效益指标(如延误)来判断是否有必要改变车道功能,如式(3)所示.

$$\begin{cases} \text{如果 } D_{A(T)} \leq 0.90 D_{F(T)}, & f_3 = 1 \\ \text{其他,} & f_3 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D_{A(T)}$ 表示采用优化方案 $A(T)$ 情况下的交叉口车均延误, s ; $D_{F(T)}$ 表示采用当前运行方案 $F(T)$ 情况下的交叉口车均延误, s ; f_3 表示运行效益约束条件, 1 表示满足, 0 表示不满足.

d. 特殊需求约束.

当紧急救援、突发事件等特殊需求发生时,为了对其作出快速有效的应对,可通过人为干预参数,切换车道功能方案,如式(4)所示.

$$\begin{cases} \text{如果发生特殊需求,} & f_4 = 1 \\ \text{其他,} & f_4 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, f_4 表示特殊需求约束, 1 表示满足, 0 表示不满足.

综合上述约束条件,可按式(5)决定下一周期所采用的车道功能方案.

$$F(T+1) = \max(f_1, f_2, f_3, f_4) A(T) +$$

$$(1 - \max(f_1 f_2 f_3, f_4)) F(T) \quad (5)$$

式中, $F(T)$, $F(T+1)$ 分别表示当前、下一时段的运行方案。

4 方案实施

若采用优化方案作为下一周期所采用的车道功能方案,则需要对方案进行实施,由于车道功能改变后,信号控制也需要作相应调整。现主要讨论何时对车道功能划分和信号控制进行调整最为合理的问题,可表述为将车道功能和信号控制调整过程对交叉口交通运行带来的不利影响最小化,应考虑安全、效率和快捷等因素。与变化前后信号相位方案有关,进口信号相位变化的类型可根据表1确定。为便于讨论,定义原车道功能允许通行流向为A、新车道功能允许通行流向为B。

表1 信号相位变化类型

Tab.1 Changing types of the signal phase for the dynamic lane assignment control

变化前	变化后	
	保护型左转相位	单口放行或许可型左转相位
保护型左转相位	工况2	工况1
单口放行或许可型左转相位	工况3	工况1

4.1 工况1的情况

若信号相位变化类型为工况1,则车道功能转变后进口信号相位采用单口放行或许可型左转相位,在变化后进口道各流向享有通行权的时间段相同。因此,车道功能切换的时刻主要考虑左转保护相位期间的安全性。可在A、B流向绿灯均结束后切换车道功能,如式(6)所示,信号控制同时作相应调整,如式(7)所示。

$$\theta = \begin{cases} T_{Brb} + \delta, & |T_{Agb} - T_{Brb}| - |T_{Bgb} - T_{Arb}| > 0 \\ T_{Arb} + \delta, & |T_{Agb} - T_{Brb}| - |T_{Bgb} - T_{Arb}| \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\rho = \theta \quad (7)$$

式中: θ 表示车道功能切换时刻, s; T_{Arb} 为A流向红灯开始时刻, s; T_{Agb} 为A流向绿灯开始时刻, s; T_{Brb} 为B流向红灯开始时刻, s; T_{Bgb} 为B流向绿灯开始时刻, s; ρ 为信号控制参数调整时刻, s; δ 为安全间隔, s, 一般可取3 s。

4.2 工况2的情况

若信号相位变化类型为工况2,则变化前后左转车道的功能是唯一的,即不存在左直合用车道。

从安全性角度分析,车道功能切换后,若仅仅是在原车道功能基础上增加车道功能,则可变车道内A流向车辆无需变换车道,对交叉口运行安全不会产生太大影响,可在任意时刻切换车道功能。若是在原车道功能基础上减少或改变车道功能,则在A流向绿灯期间切换车道功能,会对行驶环境造成突然变化,驾驶员需快速作出应对反应,这对交通安全极为不利。这种情况应在红灯期间切换车道功能,因为,一方面,对于准备进入进口道的车辆由于其车速不高,有时间作出反应并变换车道,另一方面,对于已在可变车道内排队的A流向车辆有机会在下一个绿灯信号期间通过交叉口,无需变换车道,安全性较好。因此,考虑安全性因素,车道功能切换时刻应满足式(8)。

$$m_1 = MD \max[(T_{Arb} - T_{Agb}) \cdot (T_{Arb} - \theta)(\theta - T_{Agb}), 0] \quad (8)$$

式中: m_1 表示安全性参数; M 表示充分大的正数; D 表示车道变化类型参数,新车道功能是在原车道功能基础上增加车道功能时取0,新车道功能是在原车道功能基础上减少或改变车道功能时取1。

由安全性约束分析发现,若要保障交叉口的运行安全,就应使车道功能切换后可变车道内A流向车辆无需变换车道。但由于可变车道的车道功能已从A流向变为了B流向,此时,在可变车道内的前若干辆车为滞留的A流向车辆,这些车辆存在造成下一信号周期B流向车流阻塞的隐患,从而降低交叉口的通行效率。因此,应选择合适的车道功能切换时刻,使可变车道内滞留的A流向车辆能在B流向取得通行权前清空。下面根据不同的信号相位情况分类讨论。

情况1 A流向先于B流向放行的信号相位设置情况,可在B流向绿灯结束后切换车道功能同时调整信号配时。由于A流向先于B流向放行,因此,可变车道停车线前的若干辆A流向排队车辆可在下一周期A流向绿灯信号期间通过交叉口,而不会对B流向产生影响。

情况2 B流向先于A流向放行的信号相位设置情况,可在A流向红灯末期切换车道功能同时调整信号配时。由于可变车道停车线前的若干辆A流向排队车辆可在随后的A流向绿灯信号期间通过交叉口,而不会对下一周期的B流向交通产生影响。同时,切换的时刻处于B流向对应的红灯或绿灯末期,对其排队车辆,由于先前车道功能未改变,所以,不会选择该可变车道,对绿灯末期离散到达的

车辆,由于可变车道排队较长(均为A流向车流),B流向车辆欲通过交叉口也不会选择变道,因此,不会对交叉口通行效率产生影响.

因此,考虑效率因素,车道功能切换时刻应满足式(9)和式(10).

$$m_2 = M\max[(T_{Brb} - T_{Agh})(T_{Brb} - \theta)(\theta - T_{Agh}), 0],$$

$$|T_{Agh} - T_{Brb}| - |T_{Bgb} - T_{Arb}| > 0 \quad (9)$$

$$m_2 = M\max[(T_{Agh} - \theta)(\theta - T_{Agh} + \delta), 0],$$

$$|T_{Agh} - T_{Brb}| - |T_{Bgb} - T_{Arb}| \leq 0 \quad (10)$$

式中, m_2 表示效率参数.

在不影响交通安全及运行效率的条件下,应尽早实施车道功能划分的优化方案,如式(11)所示.

$$m_3 = \theta \quad (11)$$

式中, m_3 表示快捷性参数.

综合上述三方面考虑,车道功能和信号控制调整过程对交叉口交通运行带来的不利影响最小化,应满足式(12).

$$\min(m_1 + m_2 + m_3) \quad (12)$$

由优化目标函数式(12)及约束条件式(9)~(11),计算得到车道功能切换时刻 θ ,信号控制同时作相应调整,如式(13)所示.

$$\rho = \theta \quad (13)$$

4.3 工况3的情况

对于单口放行或左转许可相位变为左转保护相

位的情况,左转和直行两个流向的车流在合用车道内无法区分,为了保障交通秩序,必须使这两股车流同时放行.可在A,B流向绿灯均结束后切换车道功能,但保留原配时方案,信号控制延后一个周期再作相应调整,可解决无法区分合用车道内各流向车辆的问题,从而保障了运行的安全性和效率.如式(14)和式(15)所示.

$$\theta = T_{ABrb} + \delta \quad (14)$$

$$\rho = \theta + C_0 \quad (15)$$

式中: T_{ABrb} 表示A,B流向绿灯结束时刻,s; C_0 表示原信号周期时长,s; δ 表示安全时间间隔,取3 s.

5 算例分析

针对上述方法中的3种信号相位变化的类型,分别通过算例1—3分析方案实施的可行性.

5.1 信号相位变化类型为工况1的情况

所选择案例的交叉口在岔口1内侧第2条车道为可变车道,车道功能需要由直行车道(图2(a))变为左转弯道(图2(b)),岔口1的信号相位相序由保护型左转相位(图3(a))变为单口放行(图3(b)),该进口的信号配时方案由图4(a)变为图4(b).采用上述方法来确定最佳的车道功能和信号控制转变时刻.

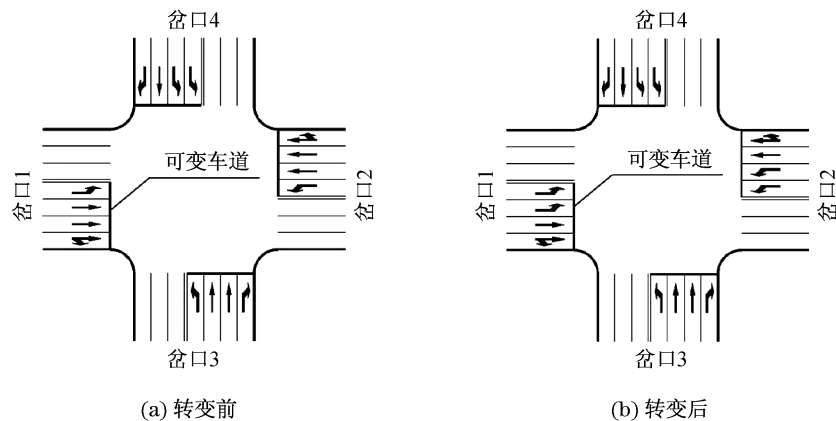


图2 算例1交叉口车道功能
Fig.2 Lane assignment in numerical example 1

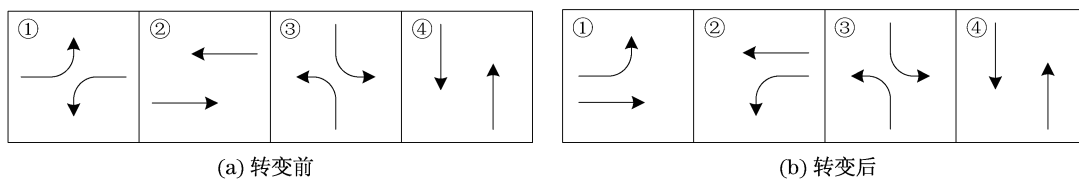


图3 算例1交叉口信号相位相序
Fig.3 Signal phase plan in numerical example 1

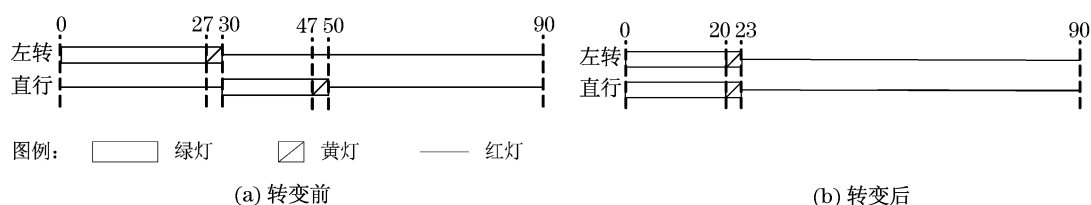


图4 算例1中岔口1的信号配时

Fig.4 Signal timing of arm 1 in numerical example 1

根据图5确定车道功能转变前进口信号相位变化的类型为工况1,则由式(6)确定车道功能切换时刻, $\theta = 53$ s;由式(7)确定信号控制调整时刻, $\rho = 53$ s. 因此,确定车道功能和信号控制转变时刻为车道功能转变前所在周期的第53 s.

5.2 信号相位变化类型为工况2的情况

将上述算例中车道功能转变后的信号配时方案改为图5. 根据表1确定车道功能转变前进口信号相位变化的类型为工况2,由优化目标函数式(12)及约束条件式(8)~(11),计算得到车道功能和信号控制转变时刻, $\theta = \rho = 26$ s. 因此,确定车道功能和信号控制转变时刻为车道功能转变前所在周期的第25 s.

5.3 信号相位变化类型为工况3的情况

将上述算例中岔口1的信号相位相序由许可型左转相位(图6(a))变为保护型左转相位(图6(b)),

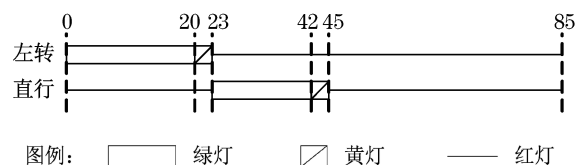


图5 算例2车道功能转变后岔口1的信号配时

Fig.5 Signal timing of arm 1 in numerical example 2

该进口的信号配时方案由图7(a)变为图7(b). 采用上述方法来确定最佳的车道功能和信号控制转变时刻.

根据表1确定车道功能转变前进口信号相位变化的类型为工况3,则由式(14)确定车道功能切换时刻, $\theta = 46$ s;由式(15)确定信号控制调整时刻, $\rho = 136$ s. 因此,确定车道功能切换时刻为所在周期的第46 s,信号控制调整时刻为所在周期的第136 s,即为车道功能切换后下一周期的第46 s.

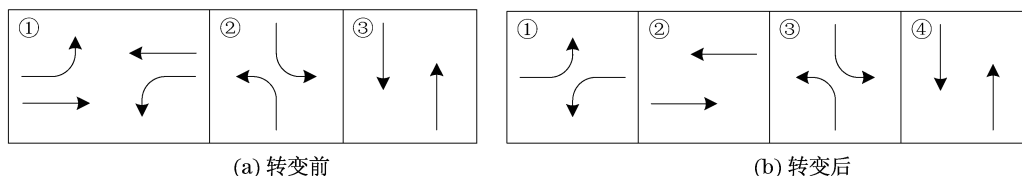


图6 算例3交叉口信号相位相序

Fig.6 Signal phase plan in numerical example 3

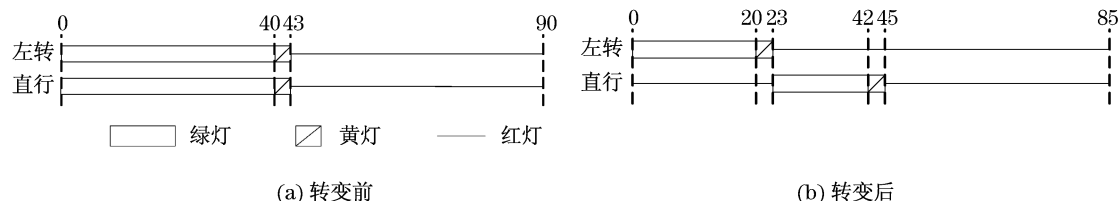


图7 算例3中岔口1的信号配时

Fig.7 Signal timing of arm 1 in numerical example 3

6 结论

提出了一种两步骤的交叉口动态车道功能划分实施方法. 先基于二进制优化判断模型,确定实施方

案;再综合考虑交通安全、通行效率和实施快捷性,给出具体的车道功能和信号配时切换时刻. 该方法可实现:

a. 可在车道功能优化方案实施前根据方案变化频率、交通需求变化稳定性、实施效益、特殊需求

等方面判断优化方案实施的必要性,未必所有的最优方案都需要实施;

b. 可根据不同的信号相位、相序和车道转变情况,确定最优的车道功能和信号控制实施时刻.特别地,对于单口放行或左转许可相位变为左转保护相位的情况,车道功能应先行调整,信号控制相隔一个周期后再作调整.

本研究基于驾驶员均遵守信号控制的假设条件,对于存在不熟悉或恶意违反通行规则的驾驶员的情况,有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 杜春燕,周溪召,智路平,等.基于系统动力学的交叉口通行能力测算模型的仿真与分析[J].上海理工大学学报,2014,36(5):449-455.
- [2] 汪涛,赵靖,杨晓光.提高交叉口通行能力的特殊宽度车道设计方法[J].上海理工大学学报,2016,38(2):198-204.
- [3] 慕飞飞,张惠珍.基于遗传算法的单点交叉口信号配时优化[J].上海理工大学学报,2015,37(6):600-604.
- [4] 姚佼,范海雁,韩印,等.基于车载数据的城市道路交叉口自适应控制研究[J].上海理工大学学报,2014,36(3):239-244.
- [5] 吴兵,李晔.交通管理与控制[M].4版.北京:人民交通出版社,2009.
- [6] LAM W H K, POON A C K, MUNG G K S. Integrated model for lane-use and signal-phase designs [J]. Journal of Transportation Engineering, 1997, 123(2): 114-122.
- [7] WONG C K, WONG S C. Lane-based optimization of signal timings for isolated junctions[J]. Transportation Research Part B, 2003, 37(1): 63-84.
- [8] 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(4): 667-681.
- [9] 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,2010.
- [10] ZHONG Z J, LIU H D, MA W J, et al. An optimization method of dynamic lane assignment at signalized intersection[C] // Proceedings of 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha, China: IEEE, 2008: 1277-1280.
- [11] 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,2008.
- [12] 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(S1):98-103.
- [13] 赵靖,付晶燕,杨晓光.信号控制交叉口动态车道功能优化方法[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(7):996-1001.
- [14] 李丽丽,曲昭伟,王殿海.可变车道诱导方法研究[J].交通与计算机,2008,26(5):53-56.

(编辑:石 瑛)