

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.07.026

交叉口相位自适应信号控制优化方法

郑保力, 杨逢肃*

(华蓝设计(集团)有限公司, 广西 南宁 530011)

摘要: 目前对交叉口信号控制问题的研究大多基于固定的相位相序方案,或在几种特定的相位相序方案中进行选择,难以适应交通流的时变特性,在交叉口交通流不均衡的情况下无法充分发挥交叉口的运行效率。针对该问题,提出一种交叉口相位自适应信号控制方法。首先根据交叉口交通流之间的冲突关系,构建了交叉口信号相位集。结合信号控制领域知识,形成了对交叉口相位相序方案、绿灯时长方案及相关约束的数学描述。在此基础上,建立了交叉口相位自适应信号控制的双层规划模型。上层规划以车辆的释放量最大为目标,以相位唯一性约束、车流连续性约束、周期完整性约束为约束条件,对相位相序方案进行优化。下层规划以车辆释放效率最大为目标,以车流最小、最大绿灯时长为约束,对相位绿灯时长进行优化,并将结果返回上层规划。通过上、下层之间的交互,实现对相位相序及绿灯时长的同步优化。为验证方法的有效性,在交叉口非饱和、饱和、过饱和状态下,将该方法与定相位控制、NEMA双环相位结构控制、基于排队长度的贪心控制等方法进行了对比。结果表明:在交叉口不同状态下,与其他方法相比,该方法在车辆释放效率、平均停车延误、平均停车次数、交叉口排队长度等方面均表现出一定的优越性。

关键词: 智能工程; 交通信号控制; 双层规划; 相位相序方案; 绿灯时长

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 07-0200-07

A Method for Optimizing Adaptive Signal Control of Phase at Intersection

ZHENG Bao-li, YANG Feng-su*

(Hualan Design & Consulting Group Co., Ltd., Nanning Guangxi 530011, China)

Abstract: The researches on controlling intersection signals is mostly based on fixed phase sequence schemes or selection from several specific phase sequence schemes at present, which is difficult to adapt to the time-varying characteristics of traffic flow and cannot fully utilize the operational efficiency of intersection in the case of imbalanced traffic flow. In view of this issue, a phase adaptive signal control method for intersection is proposed. First, the signal phase set for intersection is established based on the conflict relationship between traffic flows at intersection. Combining the knowledge of signal control domain, the mathematical description of the phase sequence scheme, green light duration scheme and related constraints for intersection is formed. On this basis, a bi-level programming model for adaptive signal control of intersection phase is established. The upper level programming aims to maximize the release of vehicles, and optimizes the phase sequence scheme with constraints of phase uniqueness, continuity of traffic flow and periodic integrity. The lower level programming aims to maximize vehicle release efficiency, and optimizes the phase green light duration with minimum traffic volume and maximum green light duration as constraints, and returns the result to the upper level programming. By interacting between the upper and lower layers, synchronous optimization

收稿日期: 2020-12-30

基金项目: 2018年度南宁市创新创业领军人才“邕江计划”项目(2018-01-13)

作者简介: 郑保力(1980-),男,湖北孝感人,博士研究生,教授级高级工程师。(24555750@qq.com)

* 通讯作者: 杨逢肃(1985-),男,广西来宾人,硕士,高级工程师。(297005845@qq.com)

of phase sequence and green light duration is achieved. To verify the effectiveness of the proposed method, it is compared with fixed phase control, NEMA dual-loop phase structure control and greedy control based on queue length under unsaturated, saturated and oversaturated conditions at intersection. The result shows that compared with other methods in different states of intersection, this method exhibits certain advantages in terms of vehicle release efficiency, average parking delay, average number of stops and intersection queue length.

Key words: ITS; traffic signal control; bi-level programming; phase sequence scheme; green light duration

0 引言

近年来城市交通拥堵问题日益严重,在经济、能源、环境等方面均造成了巨大的损失。交叉口是城市道路网络的关键节点,合理的信号控制方案对缓解交通拥堵、提升路网的通行效率至关重要。

目前在交叉口信号控制方面已经开展了大量的研究,主要集中在绿灯时长优化及相位相序优化两方面。在绿灯时长优化方面,WEBSTER^[1]、HCM^[2]等方法以交叉口进口道小时交通量为依据,按照等饱和度原则,为各信号相位分配绿灯时间。为适应交叉口交通流的时变特性,Yin等^[3-4]通过分析交叉口进口道的车辆到达信息,采用动态规划方法对各相位绿灯时长进行实时优化。García-Nieto等^[5]采用粒子群算法优化交叉口各相位的绿灯时长。Li等^[6-7]借助深度强化学习方法,以交叉口车辆排队长度、等待时间等交通信息为输入,构建了基于深度强化学习的信号控制模型。考虑到交叉口过饱和状态下的运行特性,李瑞敏等^[8]以通行能力最大作为交叉口过饱和状态下的控制目标,基于动态规划理论,建立了过饱和交叉口的信号控制模型。李凯龙等^[9-10]通过增加溢流方向车流的绿灯时长、压缩溢流方向相邻交叉口相关相位的绿灯时长,缓解进口道车辆排队上溯的问题。为防止交叉口出口道车辆排队溢出至交叉口,李萌萌^[11]等借助公交优先信号控制思想,提出一种基于出口道剩余排队容量的信号控制方法。

然而上述研究集中于固定相位下的绿灯时长优化,在相位内部交通流不平衡的情况下难以充分发挥交叉口的运行效率,为此,目前双环相位结构^[4,12]已广泛应用在信号控制研究中。此外聂磊等^[13]提出一种两阶段优化模型,进行交叉口相位自动生成及相序优化。卢凯等^[14]构建了交叉口相位绿灯时间优化的基础模型,并在此基础上进行相位相序方案选择。Yao等^[15]列举了16种四路交叉口典型的相位组合方案,按照控制目标,从中选取最优方案。Wong等^[16]通过继承函数描述信号相位的次序,并对信号控

制过程中给定非兼容相位的相序进行优化。Jin等^[17-18]将交叉口各转向车流作为智能Agent,根据感知到的交通信息,通过强化学习更新知识并进行决策,生成信号控制方案,实现交叉口信号相位和绿灯时间的优化。

尽管目前在交叉口相位及绿灯时长优化方面开展了大量研究,但是这些研究缺乏对交叉口交通流组合、搭接、次序及其与绿灯时长之间关系的描述,未完全实现交叉口相位相序和绿灯时长的同步优化。针对该问题,首先对交通流之间的组合、搭接、次序等关系以及相应的绿灯时长方案进行描述。在此基础上建立了交叉口相位自适应控制的双层规划模型,通过上下层之间的交互实现相位相序和绿灯时长的同步优化。

1 相位相序及绿灯时长描述

1.1 相位相序方案描述

根据交叉口相位相序的定义^[19],交叉口非冲突车流之间能够组合形成相位,相位在一个信号周期内的有序切换将构成交叉口的相位相序方案。因此本研究将根据交叉口交通流之间的冲突特性,构建交叉口相位集,在此基础上形成对相位相序方案的数学描述。

令 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 为交叉口的交通流; f_i , $f_j \in F$ 为交通流 i 与交通流 j ; n 为交叉口的交通流方向数。利用冲突矩阵 $CF = (cf_{ij})_{n \times n}$ 描述交叉口交通流之间的关系,其中 $cf_{ij} = 1$ 表示交通流 i 与 j 相互冲突,不能出现在同一相位中; $cf_{ij} = 0$ 表示交通流 i 与 j 相互兼容,能够组合形成相位。

将交叉口所有可能的相位组成的集合定义为相位集,根据交叉口冲突矩阵可构建其相位集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$,如算法1所示。

根据相位集 P ,将交叉口相位相序方案表示为式(1)。

$$SP = \{sp_1, sp_2, \dots, sp_e\}, \quad (1)$$

式中, sp_i 为第 i 个相位, $\forall sp_i \in SP, sp_i \in P$ 。 e 为一个相位相序方案中包含的相位数目, e 不是一个定值。

交叉口相位相序方案中包含两种相位关系,即相位的搭接与切换。对于 SP 中的相位 $sp_i (i=1, 2, \dots, e-1)$, 当相邻相位之间至少存在同一股交通流时, 相位之间为搭接关系, 即 $\exists f \in sp_i, f \in sp_{i+1}$ 时, 相位 sp_i 与 sp_{i+1} 之间为搭接关系; 否则为切换关系, 即 $\forall f \in sp_i, f \notin sp_{i+1}$ 时, 相位 sp_i 与 sp_{i+1} 之间为切换关系。相位的搭接与切换关系的示意图见图 1。

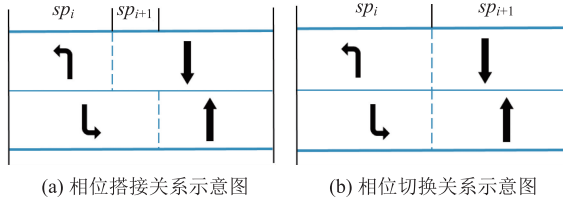


图 1 信号相位的搭接与切换关系

Fig. 1 Overlap and switching relationship of signal phases

根据信号控制相关知识, 交叉口相位相序方案必须满足如下约束。

(1) 相位唯一性约束

为保证交通流释放的公平性, 要求同一相位在一个周期内不能重复出现, 如式 (2) 所示。

$$\forall sp_i \in SP, sp_i \notin \{sp_1, sp_2, \dots, sp_{i-1}\}。 \quad (2)$$

(2) 车流连续性约束

不同相位中可以包含同一股车流, 但在相位放行时, 必须使其连续, 即一股车流在单位周期内最多只能有一次通行权, 如式 (3) 所示。

$$\forall sp_i \in SP, \forall f \in sp_i, f \notin sp_1 \cup sp_2 \dots \cup sp_{i-2}。 \quad (3)$$

(3) 周期完整性约束

为保证信号周期的完整性, 要求在一个周期内所有的车流必须轮流放行一次, 如式 (4) 所示。

$$\forall f_i \in F, f \in sp_1 \cup sp_2 \dots \cup sp_e。 \quad (4)$$

算法 1: 构建交叉口相位集 P

```

P = { }      pf = { }
for i ← 1 to n do
  pf ← pf ∪ {f_i}
  for j ← 1 to n do
    if f_j ∉ pf and ∀ f_k ∈ pf, cf_jk = 0 then
      pf ← pf ∪ {f_j}
    end
  end
  if pf ∉ P then
    P ← P ∪ {pf}
  end
end
end。
```

1.2 绿灯时长方案描述

与交叉口相位相序方案 SP 相对应, 交叉口绿灯

时长方案 G 表达为式 (5)。

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_e\}。 \quad (5)$$

交叉口各交通流的绿灯时长必须满足最小绿灯时间和最大绿灯时间的约束, 下面将分别在相位之间存在搭接关系和切换关系的情况下, 对绿灯时长约束进行描述。

当相位 sp_{i-1} 与 sp_i 之间为切换关系时, 交通流的绿灯时长约束等价于对相位 sp_i 的绿灯时长约束, 如式 (6) 所示。

$$\text{当 } \forall f \in sp_{i-1}, f \notin sp_i \text{ 时, } g_{\min} \leq g_i \leq g_{\max}, \quad (6)$$

式中, $g_{\min}$, $g_{\max}$ 分别为交通流的最小绿灯时间和最大绿灯时间约束; g_i 为相位 sp_i 的绿灯时间。

当相位 sp_{i-1} 与 sp_i 之间为搭接关系时, 若相位 sp_i 与 sp_{i+1} 之间仍为搭接关系, 为满足非搭接车流的绿灯时长约束并保证 sp_{i-1} 与 sp_i 之间的搭接关系, 将相位 sp_i 的绿灯时长约束表示为式 (7)。

$$\text{当 } \exists f \in sp_{i-1}, f \in sp_i \text{ 且 } \exists f \in sp_i, f \in sp_{i+1} \text{ 时,} \\ g'_{\min} \leq g_i \leq g'_{\max}, \quad (7)$$

式中, $g'_{\min} = \max(lt+h, g_{\min}-g_{i-1})$, $g'_{\max} = g_{\max}-g_{i-1}$, lt 为交通流切换时的损失时间, 为黄灯时间和启动损失时间之和; h 为车辆释放时的饱和车头时距。

当相位 sp_{i-1} 与 sp_i 之间为搭接关系时, 若相位 sp_i 与 sp_{i+1} 之间为切换关系, 为满足非搭接车流及搭接车流的绿灯时长约束, 相位 sp_i 的绿灯时长约束表示为式 (8)。

$$\text{当 } \exists f \in sp_{i-1}, f \in sp_i \text{ 且 } \forall f \in sp_i, f \notin sp_{i+1} \text{ 时,} \\ g'_{\min} \leq g_i \leq g'_{\max}, \quad (8)$$

其中,

$$g'_{\min} = g_{\min} + Y, \quad (9)$$

$$g'_{\max} = g_{\max} - g_{i-1}, \quad (10)$$

式中 Y 为黄灯时长。

2 相位自适应信号控制模型

交叉口绿灯时长方案的优化需要基于一定的相位相序方案, 同时相位相序设置受各交通流绿灯时长的影响, 因此相位相序和绿灯时长之间存在着相互影响的关系, 是一个典型的双层规划问题。本研究建立了交叉口相位自适应信号控制的双层规划模型, 上层规划根据下层规划的反馈结果, 以交叉口车辆释放量最大为目标, 对相位相序进行优化; 下层规划根据上层规划的优化结果, 以车辆释放效率最大为目标, 对相位绿灯时长进行优化。通过上、

下层之间的交互实现相位相序和绿灯时长之间的作用关系, 并在保证周期车辆释放效率最大的情况下实现周期车辆释放量最大。

上层规划以周期车辆释放量最大为目标, 以相位唯一性约束、车流连续性约束、周期完整性约束为约束条件, 对相位相序方案 SP 进行优化, 如式 (11) 所示。

$$\begin{aligned} \max \quad & \Phi_1 = \sum_{i=1}^n \int_{t_0}^{t_0+C} R_i(t) dt, \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \forall sp_k \in SP, sp_k \notin \{sp_1, sp_2, \dots, sp_{k-1}\} \\ \forall sp_k \in SP, \forall f \in sp_k, f \notin sp_1 \cup sp_2 \dots \cup sp_{k-2} \\ \forall f \in F, f \in sp_1 \cup sp_2 \dots \cup sp_e \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

下层规划以周期车辆释放效率最大为目标, 以

$$R_i(t) = \begin{cases} s & [f_i \in sp_{k-1} \& f_i \notin sp_k \& t_{k-1,r} + lt \leq t \leq t_{k,r} \& q_i(t) + A_i(t) \geq s] \\ q_i(t) + A_i(t) & [f_i \in sp_k \& f_i \in sp_{k+1} \& t_{k-1,r} \leq t \leq t_{k,r} \& q_i(t) + A_i(t) \geq s] \\ q_i(t) + A_i(t) & [f_i \in sp_k \& f_i \notin sp_{k+1} \& t_{k-1,r} + lt \leq t \leq t_{k,r} \& q_i(t) + A_i(t) < s] \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (15)$$

式中, s 为车辆饱和释放率; $A_i(t)$ 为车辆到达率随时间的变化量; $q_i(t)$ 为排队长度随时间的变化量,

$$\begin{aligned} g'_{\min} &= \begin{cases} g_{\min} & \text{若 } \forall f \in sp_{k-1}, f \notin sp_k \\ \max(lt + h, g_{\min} - g_{k-1}) & \text{若 } \exists f \in sp_{k-1}, f \in sp_k \text{ 且 } \exists f \in sp_k, f \in sp_{k+1} \\ g_{\min} + Y & \text{若 } \exists f \in sp_{k-1}, f \in sp_k \text{ 且 } \forall f \in sp_k, f \notin sp_{k+1} \end{cases} \\ g'_{\max} &= \begin{cases} g_{\max} & \text{若 } \forall f \in sp_{k-1}, f \notin sp_k \\ g_{\max} - g_{k-1} & \text{否则} \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

3 试验及结果

试验过程中采用动态规划方法对上述模型进行求解。为验证算法的有效性, 利用 VISSIM 进行仿真试验, 在交叉口非饱和、饱和、过饱和交通状态下, 将本研究提出的算法与定时控制 (Webster 控制方法)^[1]、NEMA 双环相位结构控制^[4,12]、基于排队长度的贪心控制^[20]等方法进行对比; 并选取车辆释放效率、车辆平均延误、平均停车次数、交叉口最大排队长度、平均排队长度作为评价指标。

3.1 试验参数设置

选取图 2 所示的四路交叉口作为仿真交叉口, 交叉口有专用的左转、直行相位, 且左转、直行车流各占 1 条车道。由于交叉口右转车流与其他车流没有冲突, 并且在实际交叉口的运行过程中常常不对右转车流进行控制, 因此本研究在试验过程中暂不考虑右转车流。

车流最小、最大绿灯时长为约束条件, 对相位绿灯时长 G 进行优化, 如式 (13) 所示。

$$\max \quad \Phi_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{t_0}^{t_0+C} R_i(t) dt}{C}, \quad (12)$$

$$\text{s. t.} \quad \forall g_k \in G, g_k \in [g'_{\min}, g'_{\max}], \quad (13)$$

式中, t_0 为优化周期的起始时刻; C 为周期时长, $C = t_{e,r} + Y - t_0$, $t_{e,r}$ 为当前信号周期最后一个相位的绿灯结束时间; $t_{k,r}$ 为相位 k 的绿灯结束时刻, $t_{k,r} = t_{k,s} + g_k$, $t_{k,s}$ 为相位 k 的绿灯起始时刻。

$$t_{k,s} = \begin{cases} t_{k-1,r} + Y & \text{若 } \forall f \in sp_{k-1}, f \notin sp_k \\ t_{k-1,r} & \text{若 } \exists f \in sp_{k-1}, f \in sp_k \end{cases}, \quad (14)$$

式中 $R_i(t)$ 为车辆释放率随时间的变化量。

$q_i(t+1) = q_i(t) + A_i(t) - R_i(t)$; G 为 G 对于每一个确定的 SP 是下层规划问题的解。

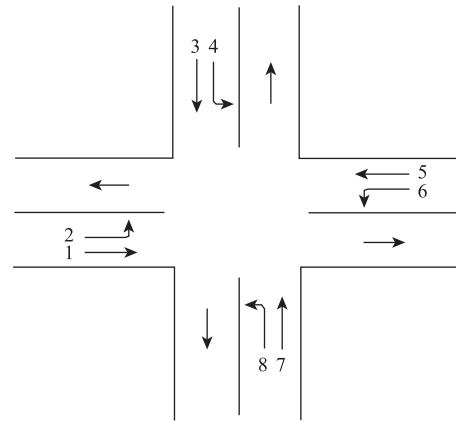


图2 交叉口示意图

Fig.2 Schematic diagram of intersection

仿真过程中交叉口各进口道的小时交通流量如表 1 所示。

针对图 2 所示交叉口, 试验过程中相位集包含的相位如图 3 所示。本研究算法及基于排队长度的贪心控制方法均基于图 3 所示的相位集对交叉口进行优化控制。NEMA 的双环相位结构如图 4 所示,

表 1 交叉口各进口道交通流量 (单位: pcu/h)

Tab. 1 Traffic volume of intersection approaches
(unit: pcu/h)

交通流	1	2	3	4	5	6	7	8
非饱和	370	270	300	200	430	280	400	250
饱和	430	340	450	300	530	370	480	300
过饱和	550	400	490	390	580	430	480	380

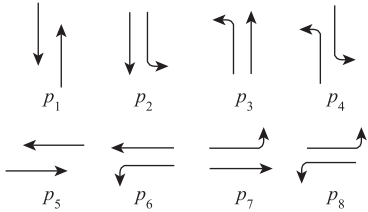


图 3 相位集中的相位

Fig. 3 Phases in phase set

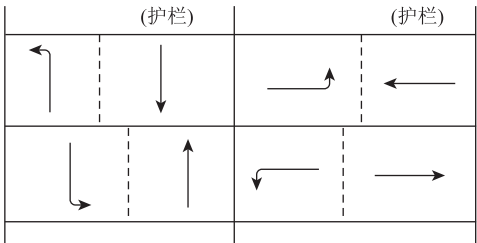


图 4 NEMA 双环相位结构

Fig. 4 NEMA dual-ring phase structure

Webster 方法基于常规的无搭接四相位方案进行绿灯时长优化。

3.2 试验结果分析

表 2~表 6 给出了试验结果, 由于 Webster 方法在过饱和状态下不适用, 所以没有给出过饱和状态下 Webster 方法的试验结果。

表 2 不同交通状态下车辆释放效率 (单位: pcu/h)

Tab. 2 Vehicle release efficiencies in different traffic states (unit: pcu/h)

交通状态	非饱和	饱和	过饱和
Webster	2 470	2 890	—
双环控制	2 468	3 064	3 370
贪心控制	2 496	3 054	3 252
本研究方法	2 498	3 112	3 426

表 2~表 4 为不同交通状态下车辆释放效率、停车延误、停车次数的试验统计结果, 表 5 为本研究方法相对于其他方法的指标相对变化量。由表 2 和表 5 可知, 本研究方法在车辆释放效率上较其他方法虽然有一定的提升, 但提升并不高。非饱和状态下, 不同方法的车辆释放效率非常接近; 饱和状态

表 3 不同交通状态下车辆平均排队延误 (单位: s/pcu)

Tab. 3 Average queue delays of vehicles in different traffic states (unit: s/pcu)

交通状态	非饱和	饱和	过饱和
Webster	32.8	128.7	—
双环控制	31.9	41	85.1
贪心控制	15.5	38.7	95.7
本研究方法	12.7	23.3	56.3

表 4 不同交通状态下车辆平均停车次数 (单位: times/pcu)

Tab. 4 Average number of stops of vehicles in different traffic states (unit: times/pcu)

交通状态	非饱和	饱和	过饱和
Webster	1.00	1.00	—
双环控制	1.11	1.09	1.10
贪心控制	0.88	0.97	1.07
本研究方法	0.85	0.94	0.94

表 5 本研究方法相对于其他方法的指标变化量 (单位: %)

Tab. 5 Changes in indicators by proposed research method compared to other methods (unit: %)

评价指标		车辆释放效率	平均排队延误	平均停车次数
非饱和	本研究方法-Webster	1.1	-61.3	-15.0
	本研究方法-双环控制	1.2	-60.2	-23.4
	本研究方法-贪心控制	0.0	-18.1	-3.4
饱和	本研究方法-Webster	7.7	-81.9	-6.0
	本研究方法-双环控制	1.6	-43.2	-13.8
	本研究方法-贪心控制	1.9	-39.8	-3.1
过饱和	本研究方法-Webster	—	—	—
	本研究方法-双环控制	1.7	-33.8	-14.5
	本研究方法-贪心控制	5.4	-41.2	-12.1

表 6 不同交通状态下交叉口最大排队长度和平均排队长度 (单位: m)

Tab. 6 Maximum and average queue lengths at intersection in different traffic states (unit: m)

交通状态	非饱和		饱和		过饱和	
	最大排队	平均排队	最大排队	平均排队	最大排队	平均排队
Webster	95	19	342	99	—	—
双环控制	120	19	219	32	327	80
贪心控制	96	10	138	30	332	91
本研究方法	95	8	132	19	259	53

下, 本研究方法较 Webster 方法、双环控制和贪心控制在 1 h 内分别能够多释放 222, 48, 58 辆车; 过饱和状态下, 本研究方法较双环控制和贪心控制在 1 h 内分别能够多释放 56, 174 辆车。由表 3 和表 5 可

知,本研究方法能够显著降低车辆的停车延误。在非饱和、饱和状态下,本研究方法的平均排队延误较 Webster 方法分别减少 20.1, 105.4 s; 在非饱和、饱和、过饱和与双环控制相比本研究方法的平均排队延误分别降低 19.2, 17.7, 28.8 s, 与贪心控制相比分别降低 2.8, 15.4, 39.4 s。此外从表 4 和表 5 可知,本研究提出的方法在车辆停车次数上也有一定的改善。在非饱和状态下,本研究方法平均停车次数与 Webster 方法、双环控制和贪心控制相比分别减少 15%, 23.4%, 3.4%; 在饱和状态下,本研究方法与其他三种方法相比分别减少了 6%, 13.8%, 3.1%; 过饱和状态下,本研究方法与双环控制、贪心控制相比减少了 14.5%, 12.1%。

表 6 为 3 种状态下,不同控制方法的交叉口最大排队长度和平均排队长度。可见,本研究方法在不同交通状态下的交叉口最大排队长度和平均排队长度都最短。特别是在饱和状态下,最大排队长度较 Webster 方法、双环控制和贪心控制分别减少 210, 87, 6 m, 平均排队长度分别减少 80, 13, 11 m; 过饱和状态下,最大排队长度较双环控制和贪心控制分别减少 68, 73 m, 平均排队长度分别减少 27, 38 m。

4 结论

(1) 本研究利用冲突矩阵描述交叉口交通流之间的冲突关系,并建立了交叉口相位集;在此基础上,结合信号控制领域知识,建立了对相位相序方案的数学表达;实现了对相位切换、搭接关系、相位绿灯时长及相关约束的统一描述。

(2) 本研究建立了交叉口相位自适应信号控制的双层规划模型,上层规划以交叉口车辆释放量最大为目标,对相位相序进行优化;下层规划以车辆释放效率最大为目标,对相位绿灯时长进行优化。通过上、下层之间的交互实现了相位相序和绿灯时长的同步优化,能够充分发挥交叉口的运行效率。

(3) 本研究通过大量试验验证了所提方法的有效性。在交叉口非饱和、饱和、过饱和等交通状态下,将提出的方法与定相位控制、NEMA 双环相位结构控制、基于排队长度的贪心控制进行了对比。结果表明,在交叉口不同交通状态下,与其他方法相比,本研究方法在车辆释放效率、平均停车延误、停车次数、排队长度等方面均有一定的提升。

参考文献:

References:

- [1] WEBSTER F V. Traffic Signal Setting [R]. London: Stationary Office, 1958.
- [2] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual 2000 [R]. Washington, D. C.: National Research Council, 2000.
- [3] YIN B, DRIDI M, EL MOUDNI A. Forward Search Algorithm Based on Dynamic Programming for Real-time Adaptive Traffic Signal Control [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2015, 9 (7): 754-764.
- [4] CHEN S, SUN D. An Improved Adaptive Signal Control Method for Isolated Signalized Intersection Based on Dynamic Programming [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2016, 8 (4): 4-14.
- [5] GARCÍA-NIETO J, ALBA E, CAROLINA O A. Swarm Intelligence for Traffic Light Scheduling: Application to Real Urban Areas [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25 (2): 274-283.
- [6] LI L, LV Y S, WANG F Y. Traffic Signal Timing via Deep Reinforcement Learning [J]. IEEE-CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3 (3): 247-254.
- [7] 孙浩, 陈春林, 刘琼, 等. 基于深度强化学习的交通信号控制方法 [J]. 计算机科学, 2020, 47 (2): 169-174.
SUN Hao, CHEN Chun-lin, LIU Qiong, et al. Traffic Signal Control Method Based on Deep Reinforcement Learning [J]. Computer Science, 2020, 47 (2): 169-174.
- [8] 李瑞敏, 唐瑾. 过饱和交叉口交通信号控制动态规划优化模型 [J]. 交通运输工程学报, 2015, 15 (6): 101-109.
LI Rui-min, TANG Jin. Traffic Signal Control Optimization Model of Over-saturated Intersection Based on Dynamic Programming [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15 (6): 101-109.
- [9] 李凯龙. 基于深度学习的城市交叉口反溢流控制方法研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2019.
LI Kai-long. Research on Overflow Control Method of Urban Intersection Based on Deep Learning [D]. Beijing: North China University of Technology, 2019.
- [10] 孙辉. 排队长度约束下的瓶颈交叉口协调控制方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
SUN Hui. Research on Coordination Control Methods of Bottleneck Intersection under Queue Length Restriction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [11] 李萌萌. 预防交叉口排队溢出的交通信号控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
LI Meng-meng. Research on Traffic Signal Control Method to Prevent Queue Overflow of Intersection [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [12] 张健, 吴坤润, 杨敏, 等. 智能网联环境下交叉口双

- 环自适应控制模型 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2021, 51 (2): 541-548.
- ZHANG Jian, WU Kun-run, YANG Min, et al. Double-ring Adaptive Control Model of Intersection during Intelligent and Connected Environment [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51 (2): 541-548.
- [13] 聂磊, 马万经. 信号控制交叉口相位相序自动生成和优化模型 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2020, 50 (4): 1370-1379.
- NIE Lei, MA Wan-jing. Novel Model for Generation and Optimization of Signal Phase and Phase Sequence at Isolated Intersection [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50 (4): 1370-1379.
- [14] 卢凯, 田鑫, 林观荣, 等. 交叉口信号相位设置与配时同步优化模型 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2020, 54 (5): 921-930.
- LU Kai, TIAN Xin, LIN Guan-rong, et al. Simultaneous Optimization Model of Signal Phase Design and Timing at Intersection [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54 (5): 921-930.
- [15] YAO R H, ZHOU H M, GE Y E. Optimizing Signal Phase Plan, Green Splits and Lane Length for Isolated Signalized Intersections [J]. Transport, 2018, 33 (2): 520-535.
- [16] WONG C K, WONG S C. Lane-based Optimization of Signal Timings for Isolated Junctions [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37 (1): 63-84.
- [17] JIN J C, MA X L. A Group-based Traffic Signal Control with Adaptive Learning Ability [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2017, 65: 282-293.
- [18] JIN J, MA X. Hierarchical Multi-agent Control of Traffic Lights Based on Collective Learning [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2018, 68: 236-248.
- [19] 马万经, 聂磊, 杨晓光. 基于损失时间的单点交叉口信号相序优化模型 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2010, 38 (7): 1007-1011.
- MA Wan-jing, NIE Lei, YANG Xiao-guang. Phase Sequencing Model for Signalized Isolated Intersection Based on Lost Time [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38 (7): 1007-1011.
- [20] KARI D, WU G, BARTH M. Using Connected Vehicle Technology for Advanced Signal Control Strategies [R]. Riverside: National Center for Sustainable Transportation, 2016.
- ~~~~~
- (上接第 190 页)
- [8] OH C, PARK S, RITCHIE S G. A Method for Identifying Rear-end Collision Risks Using Inductive Loop Detectors [J]. Accident Analysis and Prevention, 2006, 38 (2): 295-301.
- [9] 刘朝阳, 吕永波, 刘步实, 等. 高速公路桥梁施工过程安全评估及预警研究 [J]. 北京交通大学学报, 2019, 43 (2): 131-136.
- LIU Zhao-yang, LÜ Yong-bo, LIU Bu-shi, et al. Study on Safety Evaluation and Early Warning of Highway Bridge Construction Process [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43 (2): 131-136.
- [10] CASSIDY M J. Predicting Vehicle Delays, and Queue Lengths on Two-lane Highways during Maintenance Activity [C] // Proceedings of TRB 71st Annual Meeting. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1992.
- [11] ROUPHAIL N M, YANG Z S, FAZIO J. Comparative Study of Short and Long Term Urban Freeway Work Zones [J]. Transportation Research Record, 1988, 1163: 4-14.
- [12] KRAMMERS R A, LOPEZ G O. Updated Capacity Values for Short-term Freeway Work Zone Lane Closures [J]. Transportation Research Record, 1994, 1442: 49-56.
- [13] BOARNET M, KIM E, PARKANY E. Measuring Traffic Congestion [J]. Transportation Research Record, 1998, 1634: 93-99.
- [14] TURNER S, MARGIOTTA R, LOMAX T. Monitoring Urban Freeways in 2003: Current Conditions and Trends from Archived Operations Data [R]. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 2004.
- [15] SCHRANK D, EISELE B, LOMAX T, et al. 2015 Urban Mobility Scorecard [R]. College Station: Texas A&M Transportation Institute, 2015.
- [16] JIANG X M, ADELI H. Object-oriented Model for Freeway Work Zone Capacity and Queue Delay Estimation [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2004, 19 (2): 144-156.
- [17] GB/T 29107—2012, 道路交通信息服务 — 交通状况描述 [S].
- GB/T 29107—2012, Road Traffic Information Service — Traffic Condition Description [S].
- [18] 钟连德, 孙小端. 高速公路安全与交通流特征参数关系 [J]. 北京工业大学学报, 2013, 39 (2): 251-256.
- ZHONG Lian-de, SUN Xiao-duan. Relationship between Traffic Flow and Safety on Freeway [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39 (2): 251-256.