

# 适于双周期的干道绿波信号协调控制模型

荆彬彬, 徐建闽\*, 鄢小文

(华南理工大学土木与交通学院, 广州 510640)

**摘要:** 针对现有双周期干道绿波信号协调控制方法存在的不足, 首先推导了适于双周期协调控制的等式约束条件, 其次详细分析了现有研究成果存在的缺陷, 再次以双向权重绿波带宽之和最大为优化目标, 建立了适于双周期协调控制的绿波协调控制模型; 最后以义乌市望道路为例, 利用 VISSIM 仿真平台对比本文模型与改进 MULTIBAND 模型生成的协调控制方案之间的优劣。仿真结果对比表明, 相比于改进 MULTIBAND 模型, 本文模型生成的协调控制方案在高、中、低交通需求下均能够有效减少平均延误时间与停车次数, 从而验证了本文所建模型的有效性与实用性。

**关键词:** 城市交通; 双周期; 绿波带宽; 协调控制

## Arterial Signal Coordination Control Model for Double-cycle Signal Control

JING Bin-bin, XU Jian-min, YAN Xiao-wen

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to solve the deficiency of the existing arterial signal coordination control methods based on double-cycle, Firstly, a new loop integer constraint suitable for double-cycle is derived. Secondly, the deficiencies of the existing methods are analyzed thoroughly. Thirdly, a double-cycle signal coordination model with maximizing the sum of weighting bi-directional progression bandwidths is established. Finally, taking Wangdao road in Yiwu city as an example, the VISSIM simulation software has been used to make contrastive analysis of advantages and disadvantages between the signal coordination plan generated by the established model and the signal timing plan generated by revised MULTIBAND model. The simulation results show that compared to the signal timing plan generated by revised MULTIBAND model, the signal coordination plan generated by the proposed model can efficiently decrease the average delay and stops in high, medium and low traffic demand, which indicates that the proposed model is effective and practicable.

**Keywords:** urban traffic; double-cycle; progression bandwidth; coordination control

## 0 引言

干道绿波信号协调控制是指将干道上各个交叉口以一定方式联结起来, 通过设置合适的相位差, 形成干道“绿波带”, 使得车辆尽量能够不停车或少停车地通过整条干道, 对缓解城市干道交通压力, 提升干道通行效率具有重要作用, 因此受到

相关专家学者、城市交通管理者的青睐, 并在城市交通信号控制实践中得到广泛应用。Morgan等<sup>[1]</sup>是最早研究干道绿波信号协调控制问题的专家之一, 并首次提出了“绿波带宽”(Progression Bandwidth)的概念。随后, Little等<sup>[2]</sup>对先前的研究成果进行了更为深入的研究与分析, 以双向带宽最

收稿日期: 2017-07-27

修回日期: 2017-09-08

录用日期: 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China (61773168); 广东省科技计划项目/Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2016A030305001, 2014B090904059); 广东省交通运输厅项目/Project of Department of Transportation of Guangdong Province (科技-2015-02-070)。

作者简介: 荆彬彬(1989-), 男, 山东济宁人, 博士生。

\*通信作者: [aujmxu@scut.edu.cn](mailto:aujmxu@scut.edu.cn)

大为优化目标,以信号周期、行驶速度、相位相序、相位差等为决策变量,建立了求解绿波信号协调问题的混合整数线性规划模型——MAXBAND模型。MAXBAND模型在不同路段之间生成的带宽是相同的,而实际情况下,不同路段的交通流量与饱和流量是不相同的,换句话说,不同路段对绿波带宽的需求也是不一样的。因此,针对MAXBAND模型存在的局限,Gartner等<sup>[3]</sup>提出了可变绿波带宽模型——MULTIBAND模型,该模型能够在不同路段之间生成不同的绿波带宽。由于MAXBAND与MULTIBAND模型是研究干道绿波信号协调控制的经典模型,因此近几年相关学者也是基于上述2种模型对绿波信号协调问题进行了改进研究。如卢凯等<sup>[4]</sup>以MAXBAND模型为基础,以交叉口车流放行方式为优化对象,提出了一种同时适用对称放行与单独放行的通用绿波协调控制模型。Yang等<sup>[5]</sup>以MAXBAND模型为基准,提出了一种多路径最大绿波带宽模型,该模型能够为干道上多股交通流提供绿波带宽。Zhang等<sup>[6]</sup>针对MULTIBAND模型中限定绿波带中心线两侧须对称的缺陷,提出了一种非对称式的绿波协调控制模型——AM-BAND模型。

总结来说,上述现有绿波信号协调控制模型是以干道上各个交叉口均采用同一个信号周期(公共信号周期)为研究前提的。然而,笔者在交通信号优化实践中常发现:干道上某些交叉口流量较小、交通流较为简单,其实际所需信号周期时长接近干道公共信号周期的一半,而当其采用公共信号周期时往往会造成绿灯时间空放、行人过街等待时间过长等现象。此时,该交叉口宜采用公共信号周期的一半作为其实际信号周期时长,从而形成了双周期绿波信号协调控制。李林<sup>[7]</sup>针对双周期协调控制给出了相应的等式约束条件,但其等式约束未经严格推导及详细说明,存在歧义模糊问题;其次,其等式约束与MAXBAND模型中等式约束相一致,然而MAXBAND模型是以公共周期为研究前提的,而以双周期为研究前提必定会产生不同于公共周期的等式约束条件(下文已有推导)。鉴于此,本文首先严格推导了适于双周期协调控制

的等式约束条件,其次仔细分析了现有研究成果存在的不足,再次建立了适于双周期协调控制的最大绿波带宽模型。最后,以义乌市望道路为例,通过对比MULTIBAND模型,利用VISSIM仿真平台验证了本文所建双周期协调控制模型的有效性与实用性。

## 1 适于双周期协调的等式约束推导

由于MAXBAND或MULTIBAND模型是以干道上各交叉口采用同一个信号周期(公共信号周期)为建模前提的,因此MAXBAND或MULTIBAND模型中的等式约束条件无法直接应用至双周期绿波信号协调控制中,适于双周期绿波信号协调控制的等式约束条件需要重新进行推导,下面给出具体推导过程。假设干道上连续相邻的交叉口 $I_i$ 、 $I_{i+1}$ 与 $I_{i+2}$ 分别采用公共信号周期、双周期与公共信号周期控制,并定义车队由交叉口 $I_i$ 行驶至交叉口 $I_{i+2}$ 为干道上行方向,反之则为干道下行方向。根据交叉口 $I_{i+1}$ 与交叉口 $I_i$ 、 $I_{i+2}$ 之间的位置关系(位置不同,等式约束也不相同),适于双周期信号协调控制的等式约束推导分为2种情况。

### 1.1 交叉口 $I_i$ 与交叉口 $I_{i+1}$ 等式约束推导

当交叉口 $I_{i+1}$ 位于交叉口 $I_i$ 干道上行方向时,通过绘制两者之间的干道时距图推导其等式约束条件,推导过程如图1所示。

图1中, $\varphi_{i,i+1}(\bar{\varphi}_{i,i+1})$ 表示上行(下行)方向交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 绿波带左侧(右侧)相近红灯中点与交叉口 $I_{i+1}(I_i)$ 绿波带左侧相近(右侧)红灯中点之间的时差; $\Delta_i(\Delta_{i+1})$ 表示交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 上行红灯中点与其相近下行红灯中点之间的时差,若上行红灯中点在下行红灯中点右侧则取正值,反之取负值。

由图1可以看出,当交叉口 $I_i$ 与 $I_{i+1}$ 之间的距离改变时,两者之间的时距图形式也随之改变,如当交叉口 $I_i$ 的位置固定时,而交叉口 $I_{i+1}$ 的位置变化时可以看出两者之间的时距图存在多种情形。不同情形下(如图1中情形1~情形4)对应着不同的等式约束条件。由图1可知,线段 $\overline{AB}$ 的长度为交叉口 $I_i$ 的信号周期,即 $\overline{AB} = C_i$ 。以线段 $\overline{AB}$ 的长度为基准,情形1~情形4条件下式(1)成立。

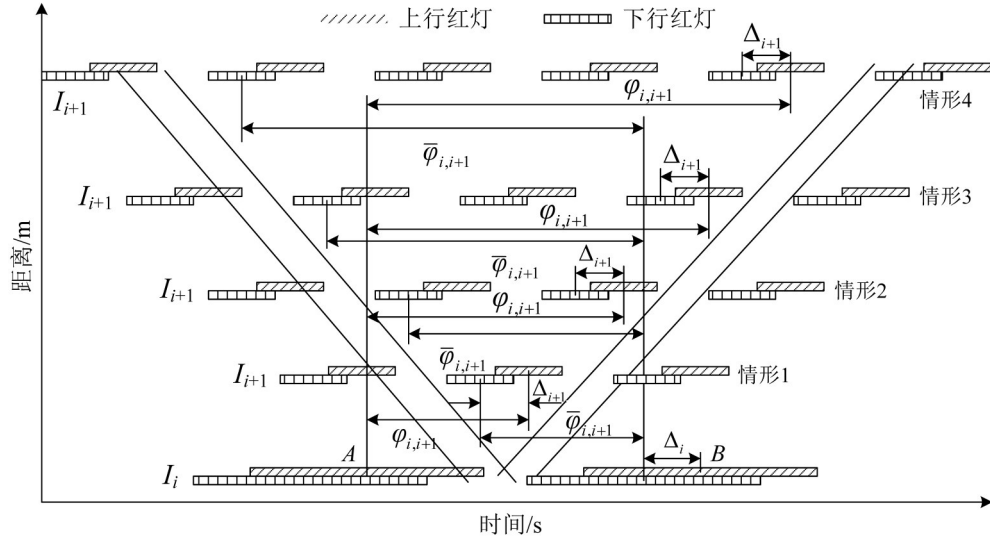


图1 交叉口 $I_i$ 与交叉口 $I_{i+1}$ 等式约束条件推导

Fig. 1 Deduction of the loop integer constraint between  $I_i$  and  $I_{i+1}$

$$\begin{cases} (\varphi_{i,i+1} - \Delta_{i+1}) + \bar{\varphi}_{i,i+1} + \Delta_i = \overline{AB} = C_i \\ (\varphi_{i,i+1} - \Delta_{i+1} - C_{i+1}) + \bar{\varphi}_{i,i+1} + \Delta_i = \overline{AB} = C_i \\ (\varphi_{i,i+1} - \Delta_{i+1} - 2C_{i+1}) + \bar{\varphi}_{i,i+1} + \Delta_i = \overline{AB} = C_i \\ (\varphi_{i,i+1} - \Delta_{i+1} - 3C_{i+1}) + \bar{\varphi}_{i,i+1} + \Delta_i = \overline{AB} = C_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\varphi_{i,i+1} + \bar{\varphi}_{i,i+1} + \Delta_i - \Delta_{i+1} = (m_{i,i+1} + 2)C_{i+1} \quad (3)$$

式中： $m_{i,i+1}$ 取值自然数0, 1, 2, ..., 时间变量以s为单位长度。

通过上述分析可归纳总结出,交叉口 $I_i$ 与交叉口 $I_{i+1}$ 之间的通用等式约束条件可表示为

### 1.2 交叉口 $I_{i+1}$ 与交叉口 $I_{i+2}$ 等式约束推导

$$(\varphi_{i,i+1} - \Delta_{i+1} - m_{i,i+1}C_{i+1}) + \bar{\varphi}_{i,i+1} + \Delta_i = \overline{AB} = C_i \quad (2)$$

交叉口 $I_{i+2}$ 位于交叉口 $I_{i+1}$ 上行方向时,通过绘制两者之间的干道时距图推导其等式约束条件,推导过程如图2所示。

式(2)进一步化简为

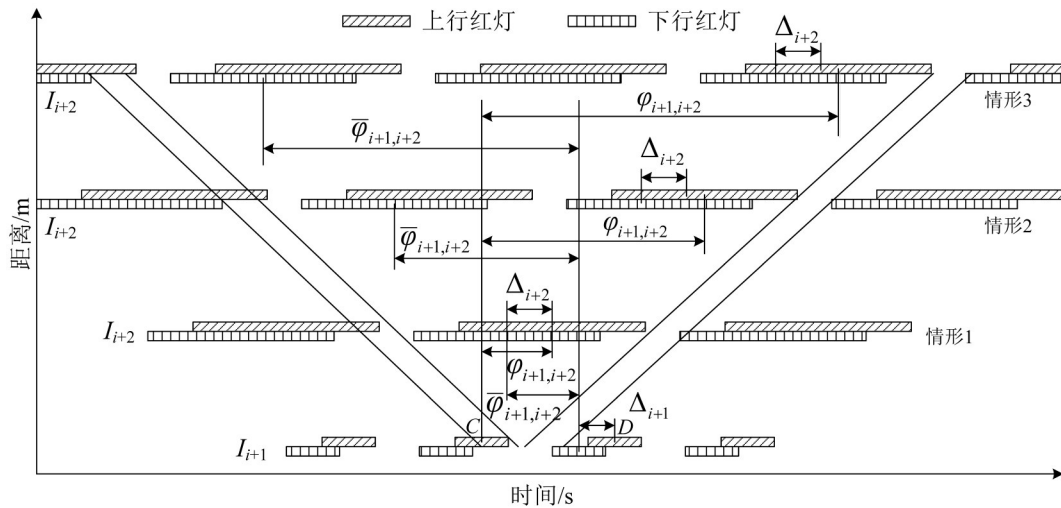


图2 交叉口 $I_{i+1}$ 与交叉口 $I_{i+2}$ 等式约束条件推导

Fig. 2 Deduction of the loop integer constraint between  $I_{i+1}$  and  $I_{i+2}$

图2中,对变量 $\varphi_{i+1,i+2}$ 、 $\bar{\varphi}_{i+1,i+2}$ 及 $\Delta_{i+2}$ 的定义分别类似变量 $\varphi_{i,i+1}$ 、 $\bar{\varphi}_{i,i+1}$ 及 $\Delta_{i+1}$ ,这里不再重复说明.由图2可知,线段 $\overline{CD}$ 的长度为交叉口 $I_{i+1}$ 的信号周期,即 $\overline{CD} = C_{i+1}$ ,以线段 $\overline{CD}$ 的长度为基准,情形1~情形3

条件下,式(4)成立.

$$\begin{cases} \varphi_{i+1,i+2} - \Delta_{i+2} + \bar{\varphi}_{i+1,i+2} + \Delta_{i+1} = \overline{CD} = C_{i+1} \\ \varphi_{i+1,i+2} - \Delta_{i+2} + \bar{\varphi}_{i+1,i+2} - C_{i+2} + \Delta_{i+1} = \overline{CD} = C_{i+1} \\ \varphi_{i+1,i+2} - \Delta_{i+2} + \bar{\varphi}_{i+1,i+2} - 2C_{i+2} + \Delta_{i+1} = \overline{CD} = C_{i+1} \end{cases} \quad (4)$$

通过上述分析可归纳总结出,交叉口 $I_{i+1}$ 与交叉口 $I_{i+2}$ 之间的通用等式约束条件可表示为

$$\varphi_{i+1,i+2} - \Delta_{i+2} + \bar{\varphi}_{i+1,i+2} - m_{i+1,i+2}C_{i+2} + \Delta_{i+1} = \overline{CD} = C_{i+1} \quad (5)$$

式中: $C_{i+2}$ 表示交叉口 $I_{i+2}$ 的信号周期, $C_{i+2} = 2C_{i+1}$ .式(5)进一步化简为

$$\varphi_{i+1,i+2} + \bar{\varphi}_{i+1,i+2} + \Delta_{i+1} - \Delta_{i+2} = (2m_{i+1,i+2} + 1)C_{i+1} \quad (6)$$

式中: $m_{i+1,i+2}$ 取值自然数 $0, 1, 2, \dots$ ,时间变量以s为单位长度.

## 2 对比说明及问题分析

为分析文献[7]中等式约束存在的不足,在此引出文献[7]给出的等式约束条件,交叉口 $I_i$ 与交叉口 $I_{i+1}$ 、交叉口 $I_{i+1}$ 与交叉口 $I_{i+2}$ 之间的等式约束条件分别如式(7)和式(8)所示.

$$\bar{\varphi}_{i,i+1} + \Delta_i + \varphi_{i,i+1} - \Delta_{i+1} = n_{i,i+1} \quad (7)$$

$$\bar{\varphi}_{i+1,i+2} + \Delta_{i+1} + \varphi_{i+1,i+2} - \Delta_{i+2} = n_{i+1,i+2} \quad (8)$$

问题1:由式(7)和式(8)的形式可知,该表达式中时间变量应是以信号周期为单位长度,即 $n_{i,i+1}$ 与 $n_{i+1,i+2}$ 应是信号周期的整数倍.然而,由于交叉口 $I_{i+1}$ 采用双周期,而交叉口 $I_i$ 与 $I_{i+2}$ 采用公共周期,因此信号周期取值存在2种情况 $C_i$ 与 $C_{i+1}$ ( $C_{i+2} = C_i$ ,信号周期 $C_i$ 与 $C_{i+1}$ 是并不相等),但文献[7]并未指明时间变量的取值单位是以 $C_i$ 或是 $C_{i+1}$ ,存在不准确或歧义问题,此为存在的问题1.

问题2:式(7)和式(8)中, $n_{i,i+1}$ 与 $n_{i+1,i+2}$ 表示整数变量,但文献[7]并未说明变量 $n_{i,i+1}$ 与 $n_{i+1,i+2}$ 的初始值如何取值、是否为连续整数变量(整数变量的初值、是否连续取值对等式约束的准确性至关重要,交叉口位置与信号周期之间的关系能否准确表达则依赖于此),此为存在的问题2.

问题3:由上文可知,本文推导出的等式约束(式(3)和式(6))与文献[7]给出的等式约束(式(7)和式(8))是不相同的.文献[7]根据干道时距图直接给出了等式约束条件的表达式,并未给出详细推导过程.实际上,文献[7]中给出的等式约束与MAXBAND模型中的等式约束在变量定义、表现形式上是相同的,但MAXBAND模型是以公共信

号周期为研究前提并未涉及双周期信号协调,而以双周期为研究前提必定会产生不同于公共周期的等式约束条件(上文已有推导验证),此为存在的问题3.

## 3 模型建立与说明

以交叉口 $I_i$ 、 $I_{i+1}$ 与 $I_{i+2}$ 构成的线控系统为建模对象,分别分析交叉口 $I_i$ 与 $I_{i+1}$ 、交叉口 $I_{i+1}$ 与 $I_{i+2}$ 之间的绿波时距图,分别如图3和图4所示.首先对建模过程中涉及到的变量解释说明如下: $b_i(\bar{b}_i)$ 表示交叉口 $I_i$ 与 $I_{i+1}$ 之间上行(下行)绿波带宽; $t_{i,i+1}(\bar{t}_{i,i+1})$ 表示上行(下行)方向车辆由交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 行驶至交叉口 $I_{i+1}(I_i)$ 的平均时间; $w_i(w_{i+1})$ 表示上行方向交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 绿波带 $b_i(b_{i+1})$ 左侧边缘与其相近红灯右侧边缘之间的时差; $\bar{w}_{i+1}(\bar{w}_{i+2})$ 表示下行方向交叉口 $I_{i+1}(I_{i+2})$ 绿波带 $\bar{b}_i(\bar{b}_{i+1})$ 右侧边缘与其相近红灯左侧边缘之间的时差; $w_{i+1,i+2}(w_{i+1,i+2})$ 表示上行方向交叉口 $I_{i+1}(I_{i+2})$ 绿波带 $b_i(b_{i+1})$ 左侧边缘与其相近红灯右侧边缘之间的时差; $\bar{w}_{i+1,i}(\bar{w}_{i+2,i+1})$ 表示下行方向交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 绿波带 $\bar{b}_i(\bar{b}_{i+1})$ 右侧边缘与其相近红灯左侧边缘之间的时差; $r_i(\bar{r}_i)$ 与 $r_{i+1}(\bar{r}_{i+1})$ 分别表示交叉口 $I_i$ 与 $I_{i+1}$ 上行(下行)红灯时间; $g_i(\bar{g}_i)$ 与 $g_{i+1}(\bar{g}_{i+1})$ 分别表示交叉口 $I_i$ 与 $I_{i+1}$ 上行(下行)绿灯时间.

由图3可知, $\varphi_{i,i+1}$ 与 $\bar{\varphi}_{i,i+1}$ 可分别由式(9)和式(10)表示.

$$\varphi_{i,i+1} = 0.5r_i + w_i + t_{i,i+1} - w_{i,i+1} - 0.5r_{i+1} \quad (9)$$

$$\bar{\varphi}_{i,i+1} = 0.5\bar{r}_i + \bar{w}_{i+1,i} + \bar{t}_{i,i+1} - \bar{w}_{i+1} - 0.5\bar{r}_{i+1} \quad (10)$$

由图4可知, $\varphi_{i+1,i+2}$ 与 $\bar{\varphi}_{i+1,i+2}$ 可分别由式(11)和式(12)表示.

$$\varphi_{i+1,i+2} = 0.5r_{i+1} + w_{i+1} + t_{i+1,i+2} - w_{i+1,i+2} - 0.5r_{i+2} \quad (11)$$

$$\bar{\varphi}_{i+1,i+2} = 0.5\bar{r}_{i+1} + \bar{w}_{i+2,i+1} + \bar{t}_{i+1,i+2} - \bar{w}_{i+2} - 0.5\bar{r}_{i+2} \quad (12)$$

以干道双向权重绿波带宽之和最大为优化目标,建立适于双周期的干道绿波信号协调控制模型为

$$\max B = \sum_{j=i}^{i+1} \alpha_j b_j + \bar{\alpha}_j \bar{b}_j \quad (13)$$

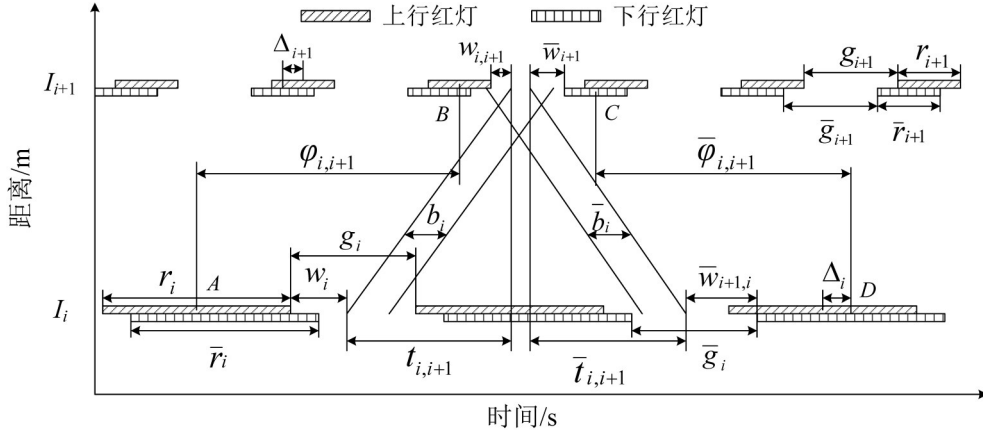


图3 交叉口 $I_i$ 与交叉口 $I_{i+1}$ 的绿波时距图

Fig. 3 Time-space diagram of  $I_i$  and  $I_{i+1}$

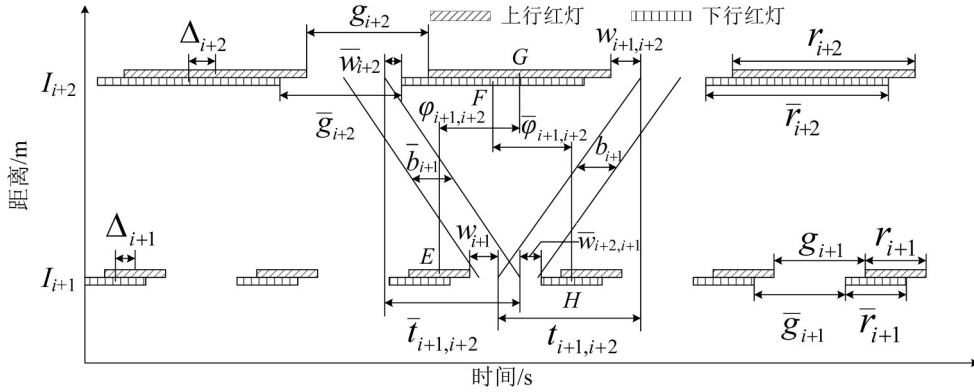


图4 交叉口 $I_{i+1}$ 与交叉口 $I_{i+2}$ 的绿波时距图

Fig. 4 Time-space diagram of  $I_{i+1}$  and  $I_{i+2}$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & 0.5(r_j + \bar{r}_j) + (w_j + \bar{w}_{j+1,j}) + (t_{j,j+1} + \bar{t}_{j,j+1}) - \\ & (w_{j+1} + \bar{w}_{j+1}) - 0.5(r_{j+1} + \bar{r}_{j+1}) + \\ & \Delta_j - \Delta_{j+1} = \begin{cases} (m_{j,j+1} + 2)C_{j+1}, j = i \\ (2m_{j,j+1} + 1)C_j, j = i + 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{cases} w_j + b_j \leq g_j, j = i, i + 1 \\ \bar{w}_{j+1,j} + \bar{b}_j \leq \bar{g}_j, j = i, i + 1 \\ w_{j+1} + b_j \leq g_{j+1}, j = i, i + 1 \\ \bar{w}_{j+1} + \bar{b}_j \leq \bar{g}_{j+1}, j = i, i + 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} b_j, \bar{b}_j, t_{j,j+1}, \bar{t}_{j,j+1}, w_j, w_{j+1}, \bar{w}_{j+1,j}, \bar{w}_{j+1} \geq 0, j = i, i + 1 \\ m_{j,j+1} \in Z, j = i, i + 1 \end{cases} \quad (16)$$

式(13)表示目标函数,以双向权重带宽最大为目标,其中 $\alpha_i(\bar{\alpha}_i)$ 表示绿波带宽 $b_i(\bar{b}_i)$ 的权重因子.式(14)是适于双周期协调控制的等式约束,它是由联立式(3)、式(6)与式(9)~式(12)而来.式(15)是不等式约束,是为确保绿波带的左右边线均在绿灯时间内,防止其与红灯时间有交点.式(16)是用来限定变量取值非负数或者取值整数.

## 4 案例分析

### 4.1 干道基本参数

为验证本文所建模型的有效性,以义乌市望道路上的3个交叉口:雪峰路一望道路( $I_1$ )、四季路一望道路( $I_2$ )、北苑路一望道路( $I_3$ )作为实例进行验证,如图5所示.交叉口 $I_1$ 与 $I_2$ 、交叉口 $I_2$ 与 $I_3$ 之间的平均行驶速度分别为35 km/h与40 km/h.望道路南北直行方向为干道协调方向.干道上各个交叉口不同交通状态下的交通流量如表1所示.

根据图5交叉口车道功能划分和表1交叉口流量数据,限定不同交通状态下关键车流饱和度取值(高交通需求限定取值0.84,中交通需求限定取值0.7,低交通需求限定取值0.56)如表2所示,同时假定饱和流量为1 800 pch/h,计算各个交叉口的信号配时方案,如表3所示.需要注意的是由于交叉口 $I_2$ 东西方向流量较低,此时按照机动车流量计算东西通行相位时间是不合理的,该时间无法满

足行人过街需要,应根据行人过街需要计算东西 通行相位时间.

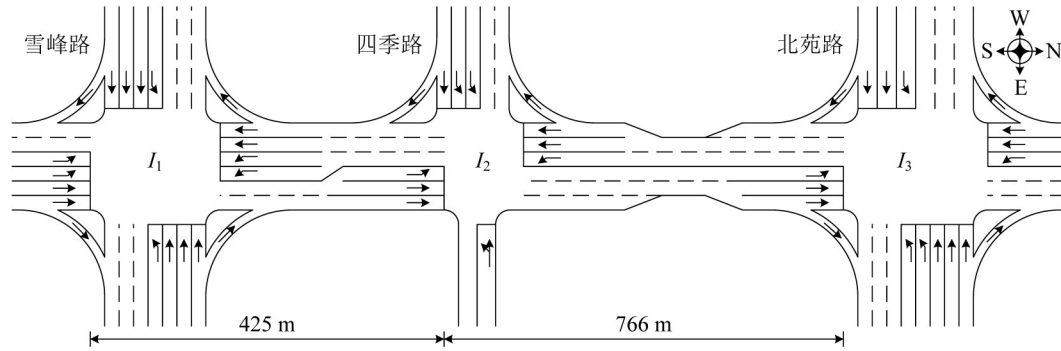


图5 道路交叉口几何条件

Fig. 5 Geometric conditions of intersections on the arterial

表1 干道上各交叉口不同交通状态下的交通流量

Table 1 Traffic volume data of each intersection under different traffic demands (pcu/h)

交通状态	进口道	交叉口								
		$I_1$			$I_2$			$I_3$		
		左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转
高	西进口	486	1 620	78	282	12	192	378	1 080	132
	东进口	480	1 608	450	12	6	0	756	1 620	90
	南进口	426	540	84	612	858	0	270	624	246
	北进口	432	534	102	648	864	24	264	648	102
中	西进口	405	1 350	65	235	10	160	315	900	110
	东进口	400	1 340	375	10	5	0	630	1 350	75
	南进口	355	450	70	510	715	0	225	520	205
	北进口	360	445	85	540	720	20	220	540	85
低	西进口	324	1 080	52	188	8	128	252	720	88
	东进口	320	1 072	300	8	4	0	504	1 080	60
	南进口	284	360	56	408	572	0	180	416	164
	北进口	288	356	68	432	576	16	176	432	68

表2 不同交通状态下各交叉口车流饱和度

Table 2 Degree of saturation of traffic flows on the each intersection under different traffic demands

交通状态	进口道	交叉口					
		$I_1$		$I_2$		$I_3$	
		左转	直行	左转	直行	左转	直行
高	西进口	0.84	0.84	0.28	0.02	0.84	0.84
	东进口	0.83	0.83	0.02	0.01	0.84	0.84
	南进口	0.83	0.84	0.79	0.83	0.84	0.80
	北进口	0.84	0.83	0.84	0.84	0.82	0.84
中	西进口	0.70	0.70	0.23	0.02	0.70	0.70
	东进口	0.69	0.69	0.02	0.01	0.70	0.70
	南进口	0.69	0.70	0.66	0.69	0.70	0.67
	北进口	0.70	0.69	0.70	0.70	0.68	0.70
低	西进口	0.56	0.56	0.18	0.02	0.56	0.56
	东进口	0.55	0.55	0.02	0.01	0.56	0.56
	南进口	0.55	0.56	0.53	0.55	0.56	0.54
	北进口	0.56	0.55	0.56	0.56	0.54	0.56

表3 各交叉口单点信号配时  
Table 3 Signal timing for each intersection on the arterial (s)

交叉口	信号相位					信号周期
	南北直行	南北左转	东西直行	东西左转	东西通行	
I <sub>1</sub>	25	20	50	45	/	140
I <sub>2</sub>	20	30	/	/	20	70
I <sub>3</sub>	30	25	50	35	/	140

注:相位时间包含黄灯时间,“/”表示无该信号相位.

4.2 仿真对比验证

由于现有双周期协调控制方法在理论上存在模糊或不甚准确的缺憾,因此未将本文所建协调控制模型与之进行仿真对比,而是将其与改进MULTIBAND模型<sup>[8]</sup>进行对比.利用式(13)~式(16)建立适于本实例的双周期协调控制模型,同时利

用改进MULTIBAND模型建立适于本实例的公共周期协调控制模型,其中以直行流量比作为带宽权重因子,并利用最优化求解工具LINGO对所建模型求解,将求解后的带宽、相位差以时距图的形式表现出来,分别如图6和图7所示.

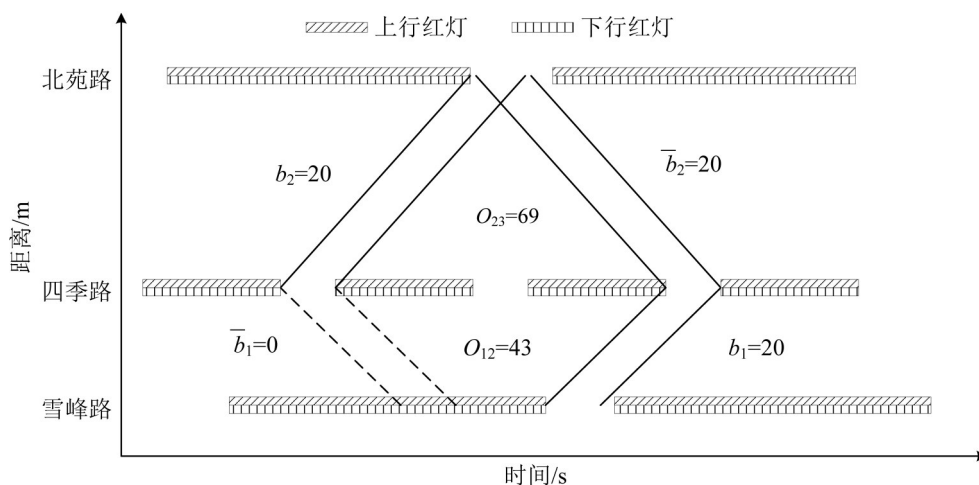


图6 本文模型干道时距图

Fig. 6 Time-space diagram generated by the proposed model

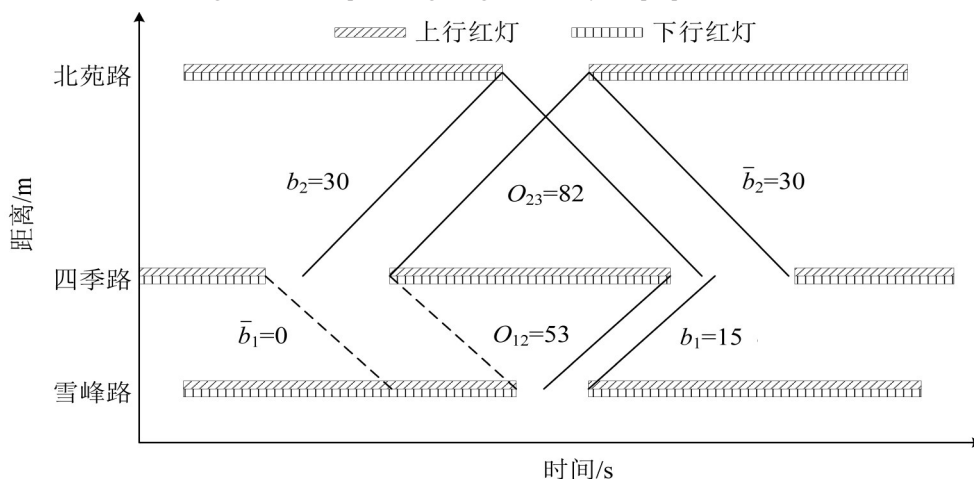


图7 改进MULTIBAND干道时距图

Fig. 7 Time-space diagram generated by revised MULTIBAND model

根据图5绘制VISSIM仿真底图,将交叉口流量(表1)输入至仿真路网中,分别将本文所建模型

生成的协调控制方案与MULTIBAND生成的协调控制方案输入至VISSIM中,以干道上的直行、左

转车流作为评价对象(右转车流不受信号控制,未纳入评价对象中),进行仿真评价.为避免1次仿真带来的随机性,采用10个随机数种子进行10次仿

真,并对该10次仿真结果求取平均值,将本文模型与MULTIBAND模型的仿真结果进行对比,如图8所示.

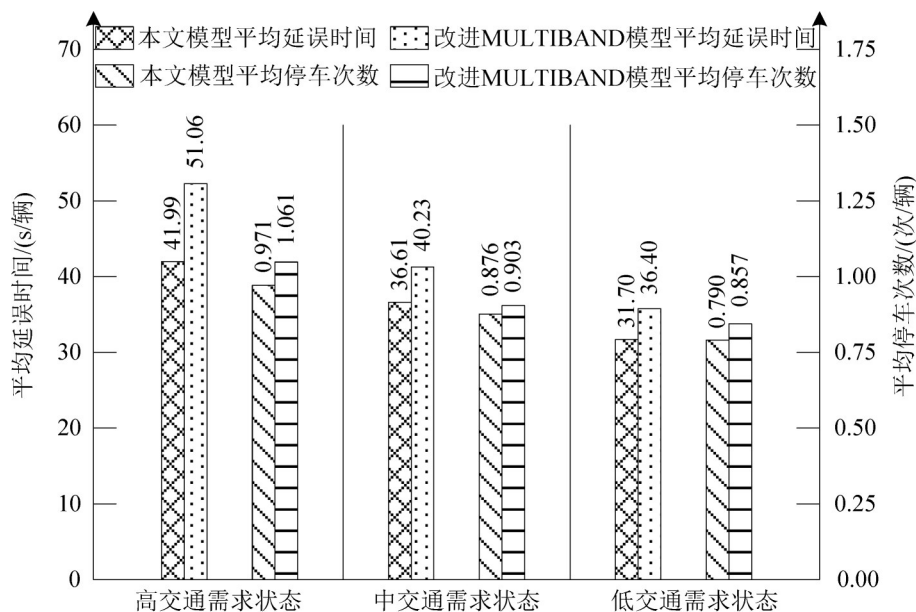


图8 仿真对比结果

Fig. 8 Comparison of simulation results

由图8可知,相比于改进MULTIBAND模型,在高、中、低交通需求状态下,本文模型生成的协调控制方案能够减少的平均延误时间与平均停车次数分别为17.76%、8.90%、12.91%,8.48%、2.99%、7.82%。这表明本文所建模型生成的协调控制方案能够获得更好的控制效果,从而验证了本文所建双周期协调控制模型的有效性与实用性。

需要补充说明的是,本实例中与协调干道(望道路)相交道路上的交通流(北苑路、四季路与雪峰路)并未纳入仿真评价中,这可能会引起些许疑问,即仿真评价不全面.对此,原因说明如下:以北苑路为例,望道路实施信号协调控制后并不影响北苑路上的协调控制效果,北苑路实施绿波信号协调控制时可根据望道—北苑交叉口的相位差推断出北苑路上其他交叉口的相位差,即对北苑路上交通流的仿真评价工作应放到北苑路上,其他同理可分析。

## 5 结论

(1) 相比于现有双周期协调控制方法中等式约束存在的不足,本文首先严格推导了适于双周

期协调控制的等式约束,并进一步详细分析了现有方法存在的问题,然后在此基础上建立了适于双周期协调控制的最大绿波带宽模型。

(2) 相比于MULTIBAND模型中干道上所有交叉口均采用相同公共信号周期的情形,本文所建模型能够更好地处理干道上采用双周期信号控制的交叉口,并且相比于MULTIBAND模型,能够获得更好的控制效益(更少的延误时间与停车次数),这一点通过义乌市望道路进行了仿真对比验证。

(3) 本文对初始排队清空时间进行了略去处理,如何精确计算交叉口初始排队清空时间是今后研究的重点与方向。

## 参考文献:

- [1] MORGAN J T, LITTLE J D. Synchronizing traffic signals for maximal bandwidth[J]. Operations Research, 1964, 12(6), 896-912.
- [2] LITTLE J D, MARK C, GARTNER N H, et al. MAXBAND: A versatile program for setting signals on arteries and triangular networks[R]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1981.