

文章编号:1001-7372(2015)06-0095-09

非对称通行条件下的双向绿波 协调控制数解算法

卢凯^{1,2}, 刘永洋¹, 吴焕¹, 黄江辉³(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 华南理工大学 自主系统与网络控制教育部
重点实验室, 广东 广州 510641; 3. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:为了解决现有绿波协调控制数解算法不适用于采用进口混合放行方式或双向通行条件不对称的干道交叉口群的问题,利用速度变换与相位组合的方法,给出了非对称通行条件下的双向绿波协调控制数解算法。该算法利用时距分析图计算理想交叉口间距,通过寻求与实际交叉口位置最为匹配的理想交叉口位置,对干道公共信号周期、交叉口信号相位组合和各交叉口相位差进行整体优化设计。理论与算例分析结果表明:该算法不会受到干道上交叉口信号相位设置方式、双向行驶速度及交叉口双向间距的限制,能较好地适应干道不同方向上的非对称通行条件,可以使理想交叉口间距取值具有更大的选取空间,易于取得更好的双向绿波协调控制效果,具有良好的通用性与广泛的适用范围。

关键词:交通工程;双向绿波;数解算法;非对称;信号相位;协调控制

中图分类号:U491.54 **文献标志码:**A

Algebraic Method of Bidirectional Green Wave Coordinated Control Under Asymmetric Traffic Conditions

LU Kai^{1,2}, LIU Yong-yang¹, WU Huan¹, HUANG Jiang-hui³

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China; 2. Key Laboratory of Autonomous Systems and Networked Control, Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China; 3. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: To solve the problem that the existing algebraic methods of green wave coordinated control were not suitable for the arterial road intersections in mixed entrance signal phase modes or under asymmetric bidirectional traffic conditions, a new algebraic method of bidirectional green wave coordinated control under asymmetric traffic conditions was presented by making use of velocity transformation and phase combination method. The ideal intersection spacing was calculated by time-space diagram in this method, and the common signal cycle, the signal phase combination and the signal offsets were wholly optimized through seeking the ideal intersection positions matching with the actual ones. The results show that the method not only gets rid of the restrictions of signal phase mode in arterial road intersections, bidirectional traffic velocity and bidirectional intersection spacing, but also adapts to the asymmetric traffic conditions in different

收稿日期:2014-07-25

基金项目:国家自然科学基金项目(61203164);广东省自然科学基金项目(S2012040007998);

广州市珠江科技新星专项项目(2013J2200066);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013ZZ0020)

作者简介:卢凯(1979-),男,湖南长沙人,副教授,工学博士, E-mail: kailu@scut.edu.cn。

directions of arterial road preferably. It can select the ideal intersection spacing in a larger range and can easily obtain better coordinated control effect of bidirectional green wave than others, which has good universality and extensive scope of application.

Key words: traffic engineering; bidirectional green wave; algebraic method; asymmetric; signal phase; coordinated control

0 引言

绿波协调控制是保证城市交通顺畅的一项重要举措,能够使干道上行驶的车辆获得尽可能不停顿的通行权。但针对干道不同方向上的差异性通行条件,如何确保干道双向行驶车流均能获得较为理想的绿波协调控制效果,是绿波协调控制技术推广应用应解决的一个实际问题。

现有的双向绿波协调控制设计方法主要分为图解法、数解法与模型法。图解法^[1-2]通过几何作图的方式确定绿波协调设计方案,可以对公共信号周期与相位差进行优化;数解法^[3-5]通过数值计算的方式求解绿波协调设计参数,可以对公共信号周期、相位差以及信号相序进行优化;模型法^[6-10](如 Maxband 方法、Multiband 方法)通过建立绿波协调数学模型实现信号配时参数的优化求解,可以对各种协调控制参数进行全局优化。其中,数解法具有可操作性强、设计简便、计算量较小、方案效果较优等优点,其整体综合性能好,能够满足干道绿波协调控制设计的要求,并已经在许多城市交通控制系统中得到成功应用。

然而现有的绿波协调控制数解算法,主要适用于统一采用进口对称放行方式或进口单独放行方式的干道交叉口群,且要求干道双向行驶速度对称及交叉口间距相等。当干道交叉口群采用进口混合放行方式、干道双向行驶速度不对称、干道交叉口双向间距不等时,现有算法则显得无能为力。姬丽娜等^[11]针对非对称放行方式给出了一种基于图解法的绿波设计方法,但需要通过反复调整才能对相位差进行初步优化。

本文拟提出的非对称通行条件下的双向绿波协调控制数解算法,将不会受到干道上交叉口信号相位设置方式、双向行驶速度、交叉口双向间距的限制,可以使理想交叉口间距取值具有更大的选取空间,从而易于取得更好的双向绿波协调控制效果。

1 算法流程

非对称通行条件下的双向绿波协调控制数解算

法,利用速度变换与相位组合的方法,通过寻求与实际交叉口位置最为匹配的理想交叉口位置,以确定各交叉口的最佳信号相位设置,优化干道协调控制系统的最佳公共信号周期与相位差取值。算法的具体步骤如下:

步骤 1:确定各交叉口干道方向的信号相位优化空间。根据各交叉口干道方向的车道渠化情况与实际交通状况,确定其信号相位允许设置方式,通常可包括对称放行、搭接放行与单独放行 3 种类型。

步骤 2:制定各交叉口在不同信号相位允许设置方式下的绿信比分配方案。针对交叉口的不同信号相位允许设置方式,在满足非协调方向车流通行需求基础上,根据交叉口干道方向信号相位总绿信比不变原则,将富余绿信比全部分配给协调相位。

步骤 3:利用速度变换方法对交叉口双向间距进行等价变换。依据路段行驶时间不变的原则,通过变换某个协调方向的行驶速度,使该方向的等价间距与对向交叉口间距相等。

步骤 4:确定干道交叉口公共信号周期变化范围。根据干道各交叉口的信号周期取值范围,取其交集作为公共信号周期的取值优化空间^[12]。

步骤 5:计算各种信号相位组合方式下的理想交叉口间距。针对基准交叉口与其他交叉口之间的不同信号相位组合,利用时距图推导出相应的理想交叉口间距。

步骤 6:确定干道交叉口的最佳信号协调控制配时设计方案。确定干道最佳公共信号周期和各交叉口的最佳信号相位设置方式,使理想交叉口位置与实际交叉口位置最为匹配;根据各交叉口的信号相位设置方式、最近理想交叉口位置以及协调方向放行相位的绿信比,确定各交叉口的绝对相位差。

步骤 7:求取双向绿波带宽度及时距图。对于某个行驶方向,根据各交叉口的偏移绿信比,分别算出其绿灯中心时刻线的上方与下方绿信比,从中选出上方与下方的最小绿信比,相加得到该行驶方向上的绿波带宽度。利用确定好的协调控制参数,可以画出相应的绿波协调控制时距图。

2 算法特点

与笔者所在的课题组先前提出的算法^[4]相比,本算法的具体改进之处体现在以下方面。

2.1 交叉口信号相位设置方式

事实上,在追求协调控制效益最大化前提下,绝大多数甚至所有交叉口的理想信号周期都将小于公共信号周期,此时以单交叉口运行效益作为设计目标所确定的信号相位意义不大,完全可以进一步扩展交叉口的相位优化空间,将交通信号协调的优化空间扩展到信号相位设置,实现从现有信号相序优

化上升到信号相位及其绿信比的优化。交叉口干道方向信号相位允许设置方式一般包括对称放行、搭接放行与单独放行3种。

例如,假设交叉口A与交叉口B为南北向干道相邻交叉口,交叉口A位于交叉口B以南,双向行驶速度为 v ,公共信号周期为 C 。当交叉口A的相位相序设置为南北东西,交叉口B的相位相序分别设置为对称放行方式、单独放行方式(北南东西/南东北西/南西北东/南北东西)、搭接放行方式(南北搭接/北南搭接)时,相应的理想交叉口间距如图1所示。

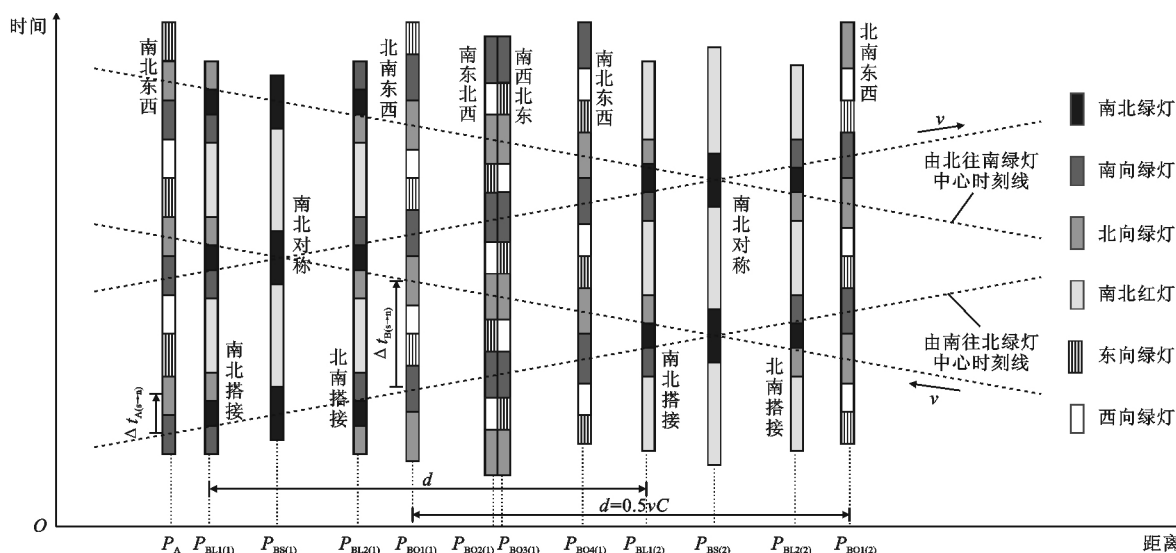


图1 理想交叉口间距分析

Fig. 1 Analysis of Ideal Intersection Spacing

图1中:点 P_A 表示交叉口A(基准交叉口)的实际所在位置,点 $P_{BS(1)}$ 表示交叉口B相位设置为南北对称时的第1个可选理想位置,点 $P_{BL(1)}$ 表示交叉口B相位设置为南北搭接时的第1个可选理想位置,点 $P_{BL(2)}$ 表示交叉口B相位设置为北南搭接时的第1个可选理想位置,点 $P_{BO(1)}$ 表示交叉口B相位设置为北南东西时的第1个可选理想位置,点 $P_{BO(2)}$ 表示交叉口B相位设置为南东北西时的第1个可选理想位置,点 $P_{BO(3)}$ 表示交叉口B相位设置为南西北东时的第1个可选理想位置,点 $P_{BO(4)}$ 表示交叉口B相位设置为南北东西时的第1个可选理想位置,点 $P_{BS(2)}$ 表示交叉口B相位设置为南北对称时的第2个可选理想位置,点 $P_{BL(2)}$ 表示交叉口B相位设置为南北搭接时的第2个可选理想位置,点 $P_{BL(2)}$ 表示交叉口B相位设置为北南搭接时的第2个可选理想位置,点 $P_{BO(2)}$ 表示交叉口B相位设置为北南东西时的第2个可选理想位置,下

文参数中的下标A和B分别表示交叉口A和交叉口B。南北搭接放行方式表示“首先放行南进口直左车流,然后放行南北进口直行车流,最后放行北进口直左车流”,北南搭接放行方式则表示“首先放行北进口直左车流,然后放行南北进口直行车流,最后放行南进口直左车流”。其他形式的搭接放行方式均可归结为南北搭接或北南搭接放行方式中的一种。

由图1可以看到:当交叉口A与交叉口B的相位相序完全固定时,在1个相邻理想交叉口位置间距 $d(d=0.5vC)$ 内,只有 1×1 个理想交叉口间距取值,这正是导致进口对称放行方式下协调效果有限的最主要原因;当交叉口A与交叉口B均采用进口单独放行方式且相序不受限时,在1个相邻理想交叉口位置间距内,将可能存在 4×4 个理想交叉口间距取值,这是进口单独放行方式下协调效果较好的原因所在;而当交叉口A与交叉口B的相位相序完

全不受限时,在 1 个相邻理想交叉口位置间距内,将可能存在 7×7 个理想交叉口间距取值,此时的协调控制效果必将更佳。

假设交叉口东、南、西、北 4 个进口直行与左转绿灯时间分别为 $t_{Ges}, t_{Gel}, t_{Gss}, t_{Gsl}, t_{Gws}, t_{Gwl}, t_{Gns}, t_{Gnl}$, 所有绿灯间隔时间为 I , 则可以列出交叉口 A 与交叉口 B 之间理想交叉口间距 a 的关系通式, 即

$$\frac{a}{v} + \Delta t_{B(s \rightarrow n)} + \frac{a}{v} = \Delta t_{A(s \rightarrow n)} + nC \quad (1)$$

由式(1)可以推导出 a 的数学表达式, 即

$$a = \frac{1}{2}v(\Delta t_{A(s \rightarrow n)} - \Delta t_{B(s \rightarrow n)}) + \frac{1}{2}vCn \quad (2)$$

式中: $\Delta t_{A(s \rightarrow n)}$ 为交叉口 A 的南进口直行相位绿灯中心时刻超前其北进口直行相位绿灯中心时刻的时间; $\Delta t_{B(s \rightarrow n)}$ 为交叉口 B 的南进口直行相位绿灯中心时刻超前其北进口直行相位绿灯中心时刻的时间; n 为任意整数。

交叉口 A 的相位取为南北东西, 则有

$$\Delta t_{A(s \rightarrow n)} = \frac{1}{2}t_{GAss} + \frac{1}{2}t_{GAns} + I$$

交叉口 B 取不同相位时, 有

$$\Delta t_{B(s \rightarrow n)} = \begin{cases} 0 & \text{相位: 南北对称} \\ \frac{1}{2}t_{GBsl} + \frac{1}{2}t_{GBnl} + I & \text{相位: 南北搭接} \\ -\frac{1}{2}t_{GBsl} - \frac{1}{2}t_{GBnl} - I & \text{相位: 北南搭接} \\ -\frac{1}{2}t_{GBss} - \frac{1}{2}t_{GBns} - I & \text{相位: 北南东西/北南西东} \\ \frac{1}{2}t_{GBss} + t_{GBes} + \frac{1}{2}t_{GBns} + 2I & \text{相位: 南东北西} \\ \frac{1}{2}t_{GBss} + t_{GBws} + \frac{1}{2}t_{GBns} + 2I & \text{相位: 南西北东} \\ \frac{1}{2}t_{GBss} + \frac{1}{2}t_{GBns} + I & \text{相位: 南北东西/南北西东} \end{cases}$$

利用时距图, 同样可以针对交叉口 A 的相位取为南北对称、南北搭接、北南搭接、北南东西、南东北西、南西北东 6 种情况, 分别推导当交叉口 B 的相位取为南北对称、南北搭接、北南搭接、北南东西/北南西东、南东北西、南西北东、南北东西/南北西东时, 理想交叉口间距 a 的计算公式。

由式(2)可知, 对于交叉口 A 与交叉口 B 的任意一种信号相位组合, 其相邻理想交叉口位置间距

d 均为 $0.5vC$ 。

2.2 双向行驶速度

当交叉口之间的双向行驶速度不等时, 理想交叉口间距 a 、相邻理想交叉口位置间距 d 、以及偏移绿信比 $\Delta\lambda$ 的计算公式将相应变化。

2.2.1 理想交叉口间距

图 2 为偏移绿信比的分析计算图示。图 2 中, 点 L 表示交叉口 A 的南进口绿灯(包括南向绿灯与南北绿灯)中心时刻点, 点 L' 表示交叉口 A 的北进口绿灯(包括南北绿灯与北向绿灯)中心时刻点。以图 2 所示情形为例, 假设交叉口 A 采用南北搭接放行方式, 交叉口 B 采用北南东西放行方式, 从交叉口 A 驶向交叉口 B 的平均行驶速度为 $v_{A \rightarrow B}$, 从交叉口 B 驶向交叉口 A 的平均行驶速度为 $v_{B \rightarrow A}$, 则可列出交叉口 A 与交叉口 B 之间理想交叉口间距 a 的关系通式, 即

$$\frac{a}{v_{A \rightarrow B}} + \Delta t_{B(s \rightarrow n)} + \frac{a}{v_{B \rightarrow A}} = \Delta t_{A(s \rightarrow n)} + nC \quad (3)$$

由式(3)可以推导出 a 的数学表达式, 即

$$a = \frac{v_{A \rightarrow B} v_{B \rightarrow A}}{v_{A \rightarrow B} + v_{B \rightarrow A}} (\Delta t_{A(s \rightarrow n)} - \Delta t_{B(s \rightarrow n)}) + \frac{v_{A \rightarrow B} v_{B \rightarrow A}}{v_{A \rightarrow B} + v_{B \rightarrow A}} Cn \quad (4)$$

2.2.2 相邻理想交叉口位置间距

由式(4)可知, 对于任意一种固定的信号相位组合, 交叉口 A 与交叉口 B 在同一相位设置方式下的相邻理想交叉口位置间距 d 的数学表达式为

$$d = \frac{v_{A \rightarrow B} v_{B \rightarrow A}}{v_{A \rightarrow B} + v_{B \rightarrow A}} C \quad (5)$$

2.2.3 偏移绿信比

偏移绿信比是指由于实际交叉口位置偏离理想交叉口位置而造成的实际交叉口绿灯中心时刻点相对于理想交叉口绿灯中心时刻线的上下偏移量。假设交叉口 A 的相位取为南北搭接, 交叉口 B 的相位取为北南东西, 分析计算交叉口 B 的双向偏移绿信比(图 2)。

在由南往北正方向上, 交叉口 B 的位置偏移量 Δa 所产生绿灯中心时刻点偏移中心时刻线的时间量为 \overline{PQ} , 由 $\triangle OPQ$ 相似于 $\triangle OXY$ 可以推知 $\frac{\overline{PQ}}{\overline{XY}} = \frac{\overline{OQ}}{\overline{OY}}$, 因此交叉口 B 的正向偏移绿信比 $\Delta\lambda_B$ 为

$$\Delta\lambda_B = \frac{\overline{PQ}}{C} = \frac{\Delta a \overline{XY}}{d \overline{OY}} \quad (6)$$

在由北往南反方向上, 交叉口 B 的位置偏移量

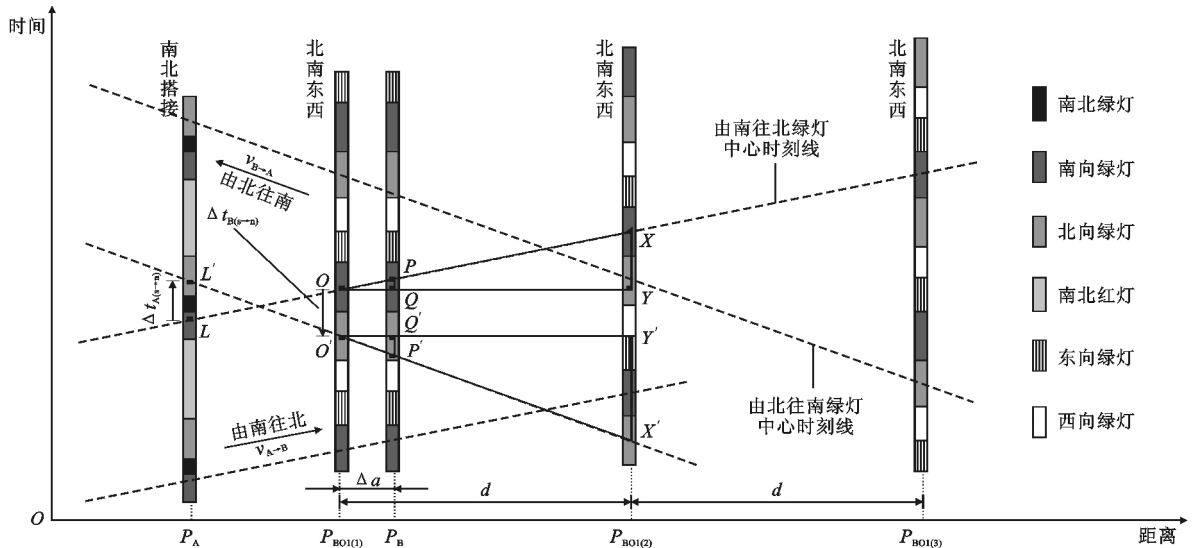


图2 偏移绿信比的分析计算

Fig. 2 Analysis and Calculation of Bias-split

Δa 所产生绿灯中心时刻点偏移中心时刻线的时间量为 $\overline{P'Q'}$, 由 $\triangle O'P'Q'$ 相似于 $\triangle O'X'Y'$ 可以推知 $\frac{\overline{P'Q'}}{\overline{X'Y'}} = \frac{\overline{OQ'}}{\overline{OY'}}$, 因此交叉口 B 的反向偏移绿信比 $\Delta\lambda'_B$ 为

$$\Delta\lambda'_B = \frac{\overline{P'Q'}}{C} = \frac{\Delta a \overline{X'Y'}}{d \overline{C}} \quad (7)$$

由图 2 可知: $\overline{PQ} = \frac{\Delta a}{v_{A \rightarrow B}}$, $\overline{P'Q'} = \frac{\Delta a}{v_{B \rightarrow A}}$, $\overline{XY} = \frac{d}{v_{A \rightarrow B}}$, $\overline{X'Y'} = \frac{d}{v_{B \rightarrow A}}$, $\overline{XY} + \overline{X'Y'} = C$ 。由此可以推导出交叉口 B 的正向偏移绿信比 $\Delta\lambda_B$ 与反向偏移绿信比 $\Delta\lambda'_B$ 分别为

$$\Delta\lambda_B = \frac{\Delta a \overline{XY}}{d \overline{C}} = \frac{\Delta a}{d} \frac{v_{B \rightarrow A}}{v_{A \rightarrow B} + v_{B \rightarrow A}} \quad (8)$$

$$\Delta\lambda'_B = \frac{\Delta a \overline{X'Y'}}{d \overline{C}} = \frac{\Delta a}{d} \frac{v_{A \rightarrow B}}{v_{A \rightarrow B} + v_{B \rightarrow A}} \quad (9)$$

由此可见, 偏移绿信比的计算公式具有一定的通用性, 即不受交叉口相位相序设置方式的影响, 能够适用于对称放行、搭接放行与单独放行 3 种相位类型。此外, $\Delta\lambda_B + \Delta\lambda'_B = \Delta a/d$, 即交叉口双向偏移绿信比之和相对稳定, 仅与位置偏移量 Δa 和相邻理想交叉口位置间距 d 有关, 且在一定范围内不受相位差设置的影响。

2.3 交叉口双向间距

当相邻交叉口双向间距不等时, 可以依据路段行驶时间不变的原则, 通过等价变换协调方向的行驶速度, 使交叉口之间的双向等价间距相等。

假设交叉口 A 与交叉口 B 之间的双向实际距离和平均行驶车速分别为 $s_{A \rightarrow B}$, $s_{B \rightarrow A}$, $v_{A \rightarrow B}$, $v_{B \rightarrow A}$, 双

向等价间距取为 $\tilde{s}_{(A,B)}$, 则交叉口 A 与交叉口 B 之间的等价行驶车速 $\tilde{v}_{A \rightarrow B}$ 与 $\tilde{v}_{B \rightarrow A}$ 分别为 $\tilde{v}_{A \rightarrow B} = \frac{\tilde{s}_{(A,B)}}{s_{A \rightarrow B}}$ 。

$v_{A \rightarrow B}, \tilde{v}_{B \rightarrow A} = \frac{\tilde{s}_{(A,B)}}{s_{B \rightarrow A}} v_{B \rightarrow A}$, 从而可以列出交叉口 A 与交叉口 B 之间理想交叉口等价间距 \tilde{a} 的关系通式, 即

$$\frac{\tilde{a}}{\tilde{v}_{A \rightarrow B}} + \Delta t_{B(s \rightarrow n)} + \frac{\tilde{a}}{\tilde{v}_{B \rightarrow A}} = \Delta t_{A(s \rightarrow n)} + nC \quad (10)$$

由式(10)可以推导出 \tilde{a} 的数学表达式, 即

$$\tilde{a} = \frac{\tilde{v}_{A \rightarrow B} \tilde{v}_{B \rightarrow A}}{v_{A \rightarrow B} + v_{B \rightarrow A}} (\Delta t_{A(s \rightarrow n)} - \Delta t_{B(s \rightarrow n)}) + \frac{\tilde{v}_{A \rightarrow B} \tilde{v}_{B \rightarrow A}}{v_{A \rightarrow B} + v_{B \rightarrow A}} Cn \quad (11)$$

3 算例分析

假设某条东西走向干道上有由东往西的 A, B, C 共 3 个信号交叉口, 在由东往西方向上, 相邻交叉口间距分别为 540 m 和 451 m, 在由西往东方向上, 相邻交叉口间距分别为 551 m 和 360 m, 交叉口 A 与交叉口 B 之间的绿波带速度为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 交叉口 B 与交叉口 C 之间的绿波带速度为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。各交叉口的东西进口信号相位设置方式均不受限制, 南北进口均采用进口单独放行相位, 各交叉口总的相位绿信比为 1, 相关信号配时要求见表 1。

按照第 1 节算法的各步骤, 依次分析如下:

(1) 由于各交叉口干道方向东西进口的信号相位允许设置方式不受限制, 因此可以分别为各交叉口东西进口选用搭接放行相位、对称放行相位或单

表 1 各交叉口信号配时要求

Tab. 1 Requirements of Each Intersection Signal Timing

交叉口	周期变化范围/s	东西进口总绿信比	南进口绿信比	北进口绿信比
A	[90,120]	0.64	0.18	0.18
B	[80,115]	0.60	0.22	0.18
C	[75,110]	0.68	0.18	0.14

独放行相位。

(2)在保证各交叉口南北相位总绿信比分配不变的基础上,针对东西进口采用搭接放行、对称放行、单独放行 3 种相位设计方式,分别进行绿信比分配,如表 2 所示。

表 2 各交叉口东西方向的绿信比

Tab. 2 Splits of Each Intersection in East-west Direction

交叉口	单独放行		搭接放行			对称放行	
	东进口	西进口	东直左	西直左	东西直	东西直	东西左
A	0.32	0.32	0.28	0.26	0.10	0.36	0.28
B	0.32	0.28	0.26	0.24	0.10	0.34	0.26
C	0.36	0.32	0.30	0.28	0.10	0.38	0.30

(3)依据路段行驶时间不变的原则,对交叉口东

表 4 交叉口 A 信号相位设计为东西对称时其他交叉口的理想间距

Tab. 4 Ideal Spacings of Other Intersections when Signal Phase of Intersection A Is East-west Symmetry

交叉口	信号相位	不同公共信号周期(s)下的交叉口理想间距/m										
		90	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110
B	东西搭接	324.0	331.2	338.4	345.6	352.8	360.0	367.2	374.4	381.6	388.8	396.0
	东西对称	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	西东搭接	108.0	110.4	112.8	115.2	117.6	120.0	122.4	124.8	127.2	129.6	132.0
	西东南北	129.6	132.5	135.4	138.2	141.1	144.0	146.9	149.8	152.6	155.5	158.4
	东南西北	207.4	212.0	216.6	221.2	225.8	230.4	235.0	239.6	244.2	248.8	253.4
	东北西南	224.6	229.6	234.6	239.6	244.6	249.6	254.6	259.6	264.6	269.6	274.6
	东西南北	302.4	309.1	315.8	322.6	329.3	336.0	342.7	349.4	356.2	362.9	369.6
C	东西搭接	312.0	318.9	325.8	332.8	339.7	346.6	353.6	360.5	367.4	374.4	381.3
	东西对称	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	西东搭接	127.4	130.3	133.1	135.9	138.8	141.6	144.4	147.2	150.1	152.9	155.7
	西东南北	149.4	152.7	156.0	159.4	162.7	166.0	169.3	172.6	176.0	179.3	182.6
	东南西北	210.9	215.6	220.3	225.0	229.7	234.3	239.0	243.7	248.4	253.1	257.8
	东北西南	228.5	233.6	238.6	243.7	248.8	253.9	259.0	264.0	269.1	274.2	279.3
	东西南北	290.0	296.5	302.9	309.3	315.8	322.2	328.7	335.1	341.6	348.0	354.5

(6)计算交叉口 B 和交叉口 C 的等效位置与左侧对应最近基准交叉口位置的间距,结果如表 5 所示。

利用表 4、5 中的相应数据,可以求出交叉口 A 信号相位设计为东西对称时,其他交叉口偏移绿信比、优选相位组合与最大偏移绿信比之和,如表 6 所示。表 6 中,基准交叉口 A 的偏移绿信比为 0,最大偏移绿信比之和的计算是对于不同公共信号周期,

西方向的间距与速度进行等价变换,如表 3 所示。

表 3 间距与速度的等价变换

Tab. 3 Equivalent Transformation of Spacing and Velocity

交叉 口对	方向	原始 距离/m	原始速度/ (m·s ⁻¹)	等价 距离/m	等价速度/ (m·s ⁻¹)
(A,B)	东→西	540	12.0	360	8.0
	西→东	360	12.0	360	12.0
(B,C)	东→西	451	11.0	451	11.0
	西→东	551	11.0	451	9.0
(A,C)	东→西	991	11.5	811	9.4
	西→东	911	11.4	811	10.1

(4)由表 1 可以确定干道公共信号周期的取值范围为[90 s,110 s]。

(5)将交叉口 A 选取为基准交叉口,设定公共信号周期的优化精度为 2 s,针对交叉口 A 的 7 种信号相位设置方式,计算交叉口 B 与交叉口 C 在不同信号相位设置方式下的理想间距。例如,当交叉口 A 的相位设计为东西对称时,在公共信号周期不同取值及信号相位不同设置方式下,交叉口 B 与交叉口 C 的理想间距如表 4 所示。

在各交叉口最小偏移绿信比取值集合中,求取最大值与最小值之差。

根据最大偏移绿信比之和最小的原则,由表 6 可以看出,当交叉口 A 的信号相位设计为东西对称时,交叉口 B、C 的最佳信号相位组合应设置为东西搭接和东西南北,最佳公共信号周期应取为 100 s。将交叉口 A 的所有 7 种信号相位设计方式计算结果汇总,如表 7 所示。

表 5 交叉口等效位置与左侧最近基准交叉口位置的距离

公共信号周期/s		90	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110
交叉 口 B	d/m	432.0	441.6	451.2	460.8	470.4	480.0	489.6	499.2	508.8	518.4	528.0
	偏离基准交叉口距离/m	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0
交叉 口 C	d/m	439.4	449.2	458.9	468.7	478.5	488.2	498.0	507.8	517.5	527.3	537.1
	偏离基准交叉口距离/m	371.6	361.8	352.1	342.3	332.5	322.8	313.0	303.2	293.5	283.7	273.9

表 6 交叉口 A 信号相位设计为东西对称时其他交叉口的偏移绿信比

Tab. 6 Bias-splits of Other Intersections when Signal Phase of Intersection A Is East-west Symmetry													
公共信号周期/s			90	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110
交叉 口 B	的偏 移绿 信比	东西搭接	0.083	0.065	0.048	0.031	0.015	0.000	-0.015	-0.029	-0.042	-0.056	-0.068
		东西对称	-0.167	-0.185	-0.202	-0.219	-0.235	-0.250	-0.265	-0.279	-0.292	-0.306	-0.318
		西东搭接	-0.417	-0.435	-0.452	-0.469	-0.485	0.500	0.485	0.471	0.458	0.444	0.432
		西东南北	-0.467	-0.485	0.498	0.481	0.465	0.450	0.435	0.421	0.408	0.394	0.382
		东南西北	0.353	0.335	0.318	0.301	0.285	0.270	0.255	0.241	0.228	0.214	0.202
		东北西南	0.313	0.295	0.278	0.261	0.245	0.230	0.215	0.201	0.188	0.174	0.162
		东西南北	0.133	0.115	0.098	0.081	0.065	0.050	0.035	0.021	0.008	-0.006	-0.018
	优选相位		东西搭接	东西搭接	东西搭接	东西搭接	东西搭接	东西搭接	东西搭接	东西南北	东西南北	东西南北	东西南北
交叉 口 C	的偏 移绿 信比	东西搭接	0.136	0.096	0.057	0.020	-0.015	-0.049	-0.081	-0.113	-0.143	-0.172	-0.200
		东西对称	-0.154	-0.194	-0.233	-0.270	-0.305	-0.339	-0.371	-0.403	-0.433	-0.462	-0.490
		西东搭接	-0.444	-0.484	0.477	0.440	0.405	0.371	0.339	0.307	0.277	0.248	0.220
		西东南北	-0.494	0.466	0.427	0.390	0.355	0.321	0.289	0.257	0.227	0.198	0.170
		东南西北	0.366	0.326	0.287	0.250	0.215	0.181	0.149	0.117	0.087	0.058	0.030
		东北西南	0.326	0.286	0.247	0.210	0.175	0.141	0.109	0.077	0.047	0.018	-0.010
		东西南北	0.186	0.146	0.107	0.070	0.035	0.001	-0.031	-0.063	-0.093	-0.122	-0.150
	优选相位		东西搭接	东西搭接	东西搭接	东西搭接	东西搭接	东西南北	东西南北	东西南北	东北西南	东北西南	东北西南
最大偏移绿信比之和			0.136	0.096	0.057	0.031	0.030	0.001	0.031	0.084	0.047	0.024	0.018

表 7 最佳相位组合与公共信号周期

Tab. 7 Optimal Phase Combination and Common Signal Cycle				
相位组合			公共信号 周期/s	偏移绿信比 之和
交叉 A	交叉 B	交叉 C		
东西对称	东西搭接	东西南北	100	0.001
东西搭接	东北西南	东南西北	94	0.017
西东搭接	东西对称	东西对称	96	0.051
西东南北	东西对称	东西对称	98	0.085
东南西北	西东南北	西东搭接	92	0.016
东北西南	西东南北	西东搭接	92	0.016
东西南北	东北西南	东北西南	90	0.012

由表 7 可以确定,交叉口 A,B,C 的最佳信号相位组合应设置为东西对称、东西搭接、东西南北,最佳公共信号周期应取为 100 s。

以由东往西行驶方向作为参考方向,选取交叉口 A 的东进口放行相位绿灯中心时刻作为相位差基准点,计算各交叉口的绝对相位差^[12],结果如表 8 所示。

(7)对于干道由东往西行驶方向,交叉口B位于

表 8 各交叉口相位差计算

Tab. 8 Calculation of Signal Offsets at Each Intersection			
交叉口	A	B	C
信号相位	东西对称	东西搭接	东西南北
等价距离/m	0.0	360.0	810.4
等价速度/(m·s ⁻¹)	0.0	8.0	9.4
东进口绿信比	0.36	0.36	0.36
绝对相位差/s	-18	27	68

相应理想交叉口位置处,交叉口 C 位于相应最近理想交叉口位置的下游,各交叉口的偏移绿信比和绿灯中心时刻线上下方绿信比计算结果如表 9 所示,其绿波带宽度为 17.94%+18.00%=35.94%,对应时间为 35.94 s。

对于干道由西往东行驶方向,交叉口 B 位于相应理想交叉口位置处,交叉口 C 位于相应最近理想交叉口位置的上游,各交叉口的偏移绿信比和绿灯中心时刻线上下方绿信比计算结果如表 10 所示,其绿波带宽度为 16.05%+15.95%=32.00%,对应时间为 32 s。

表 9 由东往西行驶方向各交叉口绿信比

Tab. 9 Splits for Each Intersection from East to West

交叉口	A	B	C
东进口绿信比	0.360 0	0.360 0	0.360 0
偏移绿信比	0.000 0	0.000 0	0.000 6
实际所处方位	正中	正中	下游
上方绿信比	0.180 0	0.180 0	0.179 4
下方绿信比	0.180 0	0.180 0	0.180 6

表 10 由西往东行驶方向各交叉口绿信比

Tab. 10 Splits for Each Intersection from West to East

交叉口	A	B	C
西进口绿信比	0.360 0	0.340 0	0.320 0
偏移绿信比	0.000 0	0.000 0	0.000 5
实际所处方位	正中	正中	上游
上方绿信比	0.180 0	0.170 0	0.160 5
下方绿信比	0.180 0	0.170 0	0.159 5

利用已确定好的公共信号周期、相位组合与相

位差,可以画出等价变换后的干道绿波协调控制时距图,如图 3 所示。同样可以画出实际干道绿波协调控制时距图,如图 4 所示。

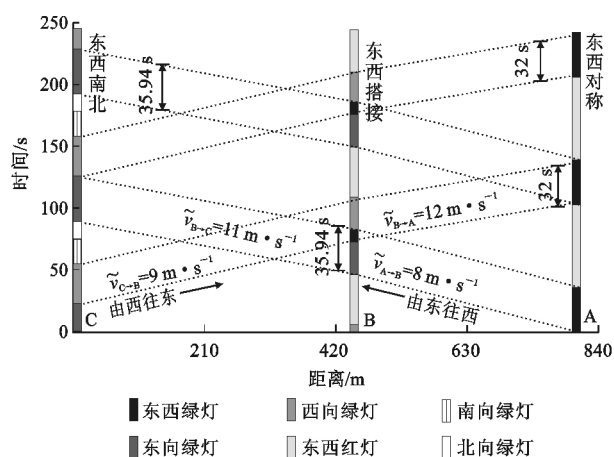
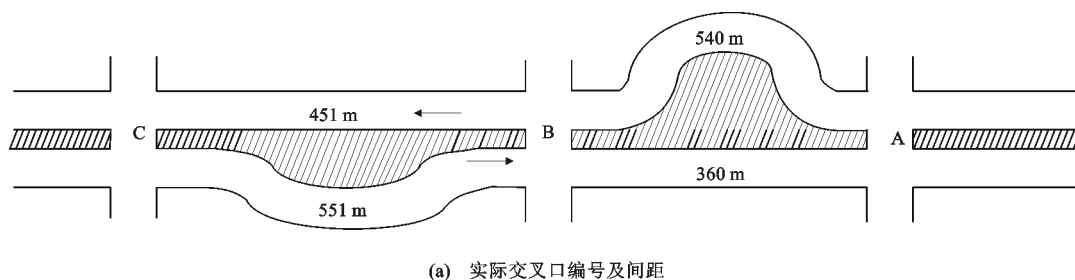
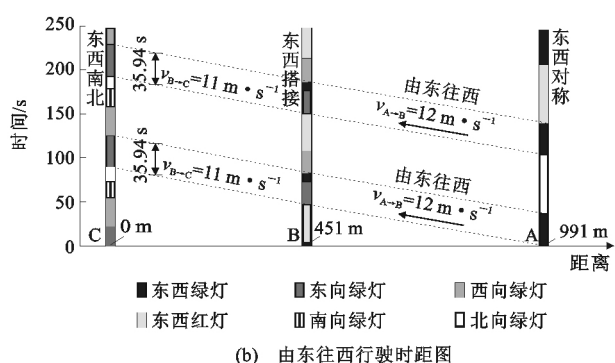


图 3 等效时距图

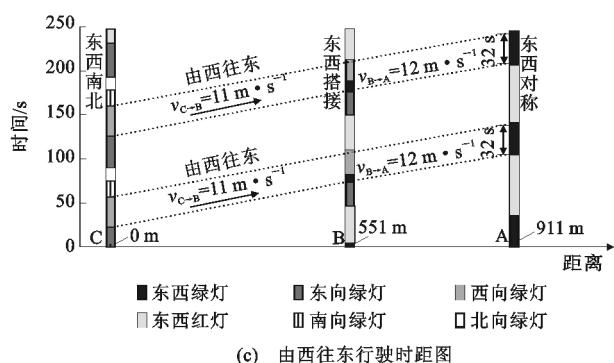
Fig. 3 Equivalent Time-space Diagram



(a) 实际交叉口编号及间距



(b) 由东往西行驶时距图



(c) 由西往东行驶时距图

图 4 实际交叉口及其时距图

Fig. 4 Actual Intersections and Their Time-space Diagrams

可以看出,本文设计方案在双向间距不等、各路行驶速度不一致的实际情况下,获得由东往西行驶方向的绿波带宽为 35.94 s,由西往东行驶方向的绿波带宽为 32 s,具有较为理想的双向绿波协调控制效果。

4 结 语

(1)与现有的绿波协调控制数解算法相比,本文算法的优点为:①可以根据干道双向实际通行条件,

综合各种信号相位设置方式,对干道交叉口的信号相位组合进行全面优化;②针对现实情况下双向间距不等与行驶速度不对称的绿波协调问题,通过等价变换实现了非对称通行条件下的双向绿波协调控制优化设计;③进一步扩大了双向绿波数解算法的适用范围,增大了绿波协调控制的优化空间,使得理想交叉位置的密度倍增,从而提升了干道双向绿波协调控制的实用效果。

(2)如何在本文算法的信号相位组合优化基础

上,对干道交叉口不同协调方向的绿信比进行深入优化,将是绿波协调控制数解算法后续研究的一个重要方向。

参考文献:

References:

- [1] 中国公路学会《交通工程手册》编委会. 交通工程手册[M]. 北京:人民交通出版社,1998.
Editorial Committee of *Traffic Engineering Manual* of Highway and Transportation Society of China. *Traffic Engineering Manual*[M]. Beijing:China Communications Press,1998.
- [2] 徐建闽. 交通管理与控制[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
XU Jian-min. *Traffic Management and Control*[M]. Beijing:China Communications Press,2007.
- [3] 卢凯,徐建闽,叶瑞敏. 经典干道协调控制信号配时数解算法的改进[J]. 公路交通科技,2009,26(1):120-124,129.
LU Kai, XU Jian-min, YE Rui-min. Improvement of Classical Algebraic Method of Signal Timing for Arterial Road Coordinate Control[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009,26(1):120-124,129.
- [4] 卢凯,徐建闽,李轶舜. 进口单独放行方式下的干道双向绿波协调控制数解算法[J]. 中国公路学报,2010,23(3):95-101.
LU Kai, XU Jian-min, LI Yi-shun. Algebraic Method of Arterial Road Coordinate Control for Bidirectional Green Wave Under Signal Design Mode of One-phase-one-approach[J]. *China Journal of Highway and Transport*,2010,23(3):95-101.
- [5] 王殿海,杨希锐,宋现敏. 交通信号干线协调控制经典数值计算法的改进[J]. 吉林大学学报:工学版,2011,41(1):29-34.
WANG Dian-hai, YANG Xi-rui, SONG Xian-min. Improvement of Classical Numerical Method for Arterial Road Signal Coordinate Control[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2011,41(1):29-34.
- [6] MORGAN J T, LITTLE J D C. Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth[J]. *Operations Research*,1964,12(6):896-912.
- [7] LITTLE J D C, KELSON M D, GARTNER N H. Maxband—A Versatile Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks[R]. Cambridge:Massachusetts Institute of Technology,1981.
- [8] GARTNER N H, ASSMANN S F, LASAGA F, et al. Multiband—A Variable-bandwidth Arterial Progression Scheme[J]. *Transportation Research Record*, 1990,1287:212-222.
- [9] GARTNER N H, ASSMANN S F, LASAGA F, et al. A Multi-band Approach to Arterial Traffic Signal Optimization[J]. *Transportation Research Part B*,1991,25(1):55-74.
- [10] 马楠,邵春福,赵熠. 基于双向绿波带宽最大化的交叉口信号协调控制优化[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(增2):19-24.
MA Nan, SHAO Chun-fu, ZHAO Yi. Optimized Modeling of Signalized Intersections Coordination Based on Two-way Bandwidth Maximization[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*,2009,39(S2):19-24.
- [11] 姬利娜,宋清华. 非对称放行方式下的干道双向绿波协调控制[J]. 公路交通科技,2011,28(10):96-101.
JI Li-na, SONG Qing-hua. Bidirectional Green Wave Coordinate Control for Arterial Road Under Asymmetric Signal Mode[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011,28(10):96-101.
- [12] 卢凯. 交通信号协调控制基础理论与关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
LU Kai. *Research on the Foundational Theory and Key Techniques of Coordinate Signal Control in Urban Traffic Network*[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2010.