

考虑行驶速度波动的进口单放绿波协调控制模型

荆彬彬¹, 鄢小文¹, 吴 焕¹, 徐建闽^{1,2}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640; 2. 东南大学 现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 南京 210096)

摘 要: 考虑车队实际行驶速度在一定范围随机波动的特性, 分析了满足车队队首车辆高速与队尾车辆低速行驶时均不受阻的约束条件, 给出了相应的速度波动百分比计算公式, 并以双向绿波带宽之和最大为一级目标, 以速度波动百分比之和最大为二级目标, 建立了一种绿波协调控制目标规划模型, 并设计了序贯式算法及遗传算法求解该模型。算例分析结果表明, 本文提出的模型能够较好地考虑行驶速度波动的特性, 能够直接生成适于行驶速度波动的协调控制方案, 能够使更多的车辆处在绿波带宽之内。

关键词: 城市交通; 行驶速度波动; MAXBAND模型; 序贯式算法; 遗传算法

Arterial Green Wave Coordination Control Model for the Mode of Split Phasing Considering the Fluctuation of Travel Speed

JING Bin-bin¹, YAN Xiao-wen¹, WU Huan¹, XU Jian-min^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Jiangsu Province Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Considering that the travel speed of platoons fluctuates in a range, the non-stop constraints that the lead vehicle of platoon travels at a higher speed and the trail vehicle of platoon travels at a lower speed are analyzed. The formulas of calculating fluctuation percentage of speed are proposed. An arterial coordination control model—a goal programming model, which firstly aims at maximizing the sum of the bidirectional green band and secondly maximizing the sum of the fluctuation percentage of speed, is developed. A sequential algorithm and genetic algorithm are designed to solve the proposed model. The analysis for the numerical example shows that the proposed model in this paper can consider the fluctuation of travel speed well, generate the coordinated control scheme suitable for the fluctuation of travel speed directly, and make more vehicles lie within green bands.

Keywords: urban traffic; fluctuation of travel speed; MAXBAND model; sequential algorithm; genetic algorithm

收稿日期: 2016-11-07

修回日期: 2016-12-22

录用日期: 2017-01-05

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(61203164, 61174184); 广东省科技计划项目/Science and Technology Planning Project of Guangdong Province(2016A030305001, 2015A030401024); 广州市南沙区科技计划项目/Science and Technology Planning Project of Nansha District(2014MS11); 中央高校基本科研业务费专项资金/Fundamental Research Funds for Central Universities(2015ZZ07).

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

0 引言

干道信号协调控制作为现代交通管理控制的重要手段,对于提高干道通行效率具有重要意义.根据优化目标的不同,干道信号协调控制方法通常分为两类:最小延误法与最大带宽法.由于最大带宽法能够直观地展示绿波带的宽度及协调效果,因此受到交通专家的青睐.在最大带宽方法中,MAXBAND模型与MULTIBAND模型则是最为经典的最大带宽模型.Little等^[1]利用干线绿波时距图,以双向绿波带宽最大为目标,建立了求解干道绿波协调控制的MAXBAND模型.针对MAXBAND模型在不同路段之间带宽保持不变的缺陷,Gartner等^[2]基于路段流量与带宽需求提出了可变带宽的绿波协调控制模型:MULTIBAND模型.Zhang等^[3]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.Yang等^[4]以MAXBAND模型为基准,提出了一种多路径最大绿波带宽模型,该模型能够为多股交通流提供绿波带宽.卢凯等^[5]考虑交叉口进口对称放行与单独放行两种方式,提出了一种通用的干道绿波控制模型.卢凯等^[6]利用MAXBAND模型生成协调控制方案集合,并从中选取期望带宽最大的方案作为最佳方案,该方法考虑了行驶速度区间波动的特性.

然而上述研究中均以固定行驶速度作为绿波带设计速度或最终得到一个最佳的固定绿波带速度.实际情况中车队行驶速度是在某一区间范围内波动,当车队行驶速度高于或低于绿波带设计速

度时,干道的绿波协调效果会受到一定破坏.有鉴于此,本文以满足车队队首高速、队尾低速行驶均不受到阻滞为优化目标,考虑车队实际行驶速度区间波动的特性,提出了一种考虑行驶速度波动的进口单放绿波协调控制模型.

1 问题描述

为分析行驶速度这一影响因素在制定绿波协调控制方案时对其的重要影响,现引入案例进行说明.已知某干道上有3个信号交叉口,交叉口编号分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 ,如图1所示.定义由交叉口 I_1 至交叉口 I_3 为干道上行方向,由交叉口 I_3 至交叉口 I_1 为干道下行方向.以上行方向为例,图1中相位差组合设置分别为 $(o_{1,2}^a, o_{1,3}^a)$ 、 $(o_{1,2}^b, o_{1,3}^b)$ 、 $(o_{1,2}^c, o_{1,3}^c)$.针对该3组相位差组合,每组相位差组合下均取得最大绿波带宽.当相位差组合设置为 $(o_{1,2}^a, o_{1,3}^a)$ 时,如果上下行方向车队行驶速度低于绿波带设计速度,则会出现车队队尾低速受阻的情况.图1(a)中上行车队低速队尾被阻滞于B点,下行车队低速队尾被阻滞于D点.当相位差组合设置为 $(o_{1,2}^b, o_{1,3}^b)$ 时,如果上下行方向车队行驶速度高于绿波带设计速度,则会出现车队队首高速受阻的情况.图1(b)中上行车队高速队首被阻滞于F点,下行车队高速队首被阻滞于H点.当相位差组合设置为 $(o_{1,2}^c, o_{1,3}^c)$ 时,如果上下行方向车队行驶速度高于或低于绿波带设计速度,上下行车队队首或队尾也不会受到阻滞.图1(c)中上行车队在速度区间 $[v_{u\max}, v_{u\min}]$ 及下行车队在速度区间 $[v_{d\max}, v_{d\min}]$ 行驶时均不会受阻.

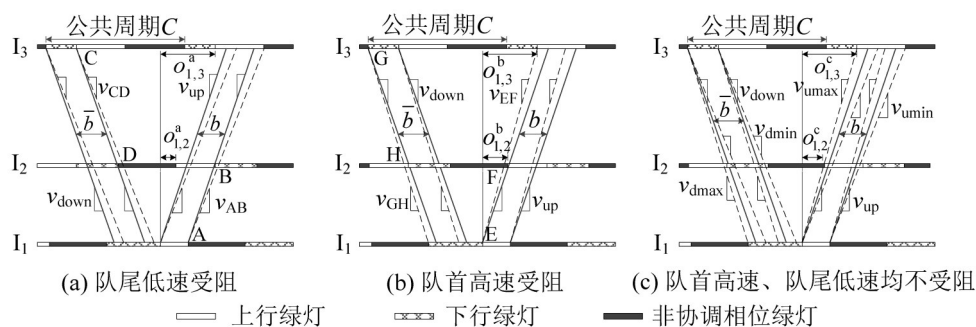


图1 相位差的速度区间适应性分析

Fig. 1 Adaptability analysis of the speed range for offsets

2 协调控制模型

2.1 不受阻滞的条件

如何设计合理的协调控制方案才能更好地考

虑车辆实际行驶速度区间波动的特性,满足队首高速与队尾低速行驶时均不受到阻滞在实际干道绿波协调控制中尤为关键.在对满足上述不受阻滞

所需要的条件进行分析之前,为清晰界定研究内容,做出以下前提假设.假定干道上各交叉口协调相位(上行协调相位、下行协调相位)采用进口单独放行;非协调相位的放行方式则不受限制,可采用

进口单独放行或对称放行或搭接放行.现对满足上述不受阻滞时所需要的条件进行分析,具体如图2所示.

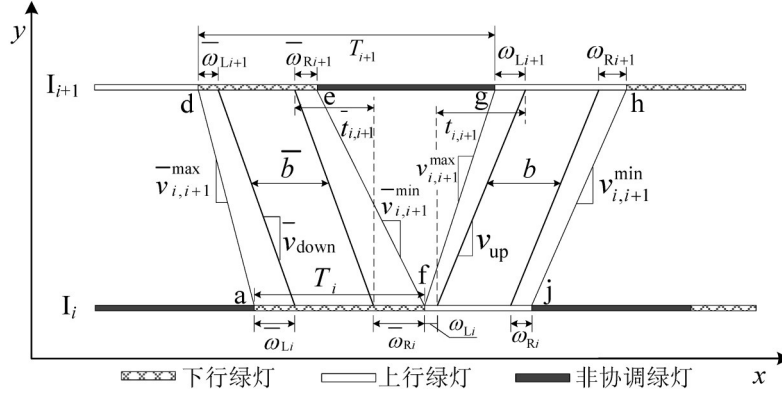


图2 约束条件分析及波动百分比计算

Fig. 2 Analysis of constraint condition and calculation of percentage

图2中,交叉口 I_i 相序设置为上行协调相位—非协调相位—下行协调相位,交叉口 I_{i+1} 相序设置为上行协调相位—下行协调相位—非协调相位,其他相序设置时可类似分析.图2中各变量定义如下: $b(\bar{b})$ 表示干道上行(下行)绿波带宽; $t_{i,i+1}(\bar{t}_{i,i+1})$ 表示干道上行(下行)车队由交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 至交叉口 $I_{i+1}(I_i)$ 的行驶时间; $\omega_{Li}(\omega_{Ri})$ 与 $\omega_{Li+1}(\omega_{Ri+1})$ 分别表示干道上行交叉口 I_i 与交叉口 I_{i+1} 绿波带左侧(右侧)边缘和绿波带所在绿灯的左侧(右侧)边缘之间的时间间隔; $\bar{\omega}_{Li}(\bar{\omega}_{Ri})$ 与 $\bar{\omega}_{Li+1}(\bar{\omega}_{Ri+1})$ 分别表示干道下行方向交叉口 I_i 与交叉口 I_{i+1} 绿波带左侧(右侧)边缘和绿波带所在绿灯的左侧(右侧)边缘之间的时间间隔; $v_{up}(\bar{v}_{down})$ 表示干道上行(下行)方向绿波带设计速度; $t_{Gi}^{up}(t_{Gi+1}^{up})$ 表示交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 上行协调相位的绿灯时间; $t_{Gi}^{down}(t_{Gi+1}^{down})$ 表示交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 下行协调相位的绿灯时间; $t_{Gi}(t_{Gi+1})$ 表示交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 非协调相位的绿灯时间; $T_i(T_{i+1})$ 表示以从交叉口 I_i 出发的两相邻非交叉上下行绿波带为基准,交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 靠近其上行绿波带左侧边缘的上行协调相位绿灯时间起点滞后于靠近其下行绿波带左侧边缘的下行协调相位绿灯起点的时间差.

由图2可知,当 $\omega_{Li+1} > \omega_{Li}$ 时,交叉口 I_i 队首车辆可以速度 $v_{i,i+1}^{max}$ 不受阻地高速通过交叉口 I_{i+1} ;当

$\omega_{Ri+1} > \omega_{Ri}$ 时,交叉口 I_i 队尾车辆可以速度 $v_{i,i+1}^{min}$ 不受阻地低速通过交叉口 I_{i+1} ;当 $\bar{\omega}_{Li+1} < \bar{\omega}_{Li}$ 时,交叉口 I_{i+1} 队首车辆可以速度 $\bar{v}_{i,i+1}^{max}$ 不受阻地高速通过交叉口 I_i ;当 $\bar{\omega}_{Ri+1} < \bar{\omega}_{Ri}$ 时,交叉口 I_{i+1} 队尾车辆可以速度 $\bar{v}_{i,i+1}^{min}$ 不受阻地低速通过交叉口 I_i .综上所述,车辆队首高速行驶与队尾低速行驶均不受阻时需满足的约束条件为

$$\begin{cases} \omega_{Li+1} > \omega_{Li} \\ \omega_{Ri+1} > \omega_{Ri} \\ \bar{\omega}_{Li+1} < \bar{\omega}_{Li} \\ \bar{\omega}_{Ri+1} < \bar{\omega}_{Ri} \end{cases} \quad (1)$$

由图2易知, $\omega_{Li} + b + \omega_{Ri} = t_{Gi}^{up}$, $\bar{\omega}_{Li} + \bar{b} + \bar{\omega}_{Ri} = t_{Gi}^{down}$. 则约束条件(1)可表示为

$$\begin{cases} \omega_{Li+1} > \omega_{Li} \\ t_{Gi+1}^{up} - \omega_{Li+1} > t_{Gi}^{up} - \omega_{Li} \\ t_{Gi+1}^{down} - \bar{\omega}_{Ri+1} < t_{Gi}^{down} - \bar{\omega}_{Ri} \\ \bar{\omega}_{Ri+1} < \bar{\omega}_{Ri} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 波动百分比计算

干道上行方向绿波带设计速度为 v_{up} 时,定义变量 $p_{i,i+1}^+$ 表示上行车辆由交叉口 I_i 行驶至交叉口 I_{i+1} 时不受阻的最高车速 $v_{i,i+1}^{max}$ 相对于绿波带速度 v_{up} 的波动增加百分比;变量 $p_{i,i+1}^-$ 表示上行车辆由交叉口 I_i 行驶至交叉口 I_{i+1} 时不受阻的最低车速 $v_{i,i+1}^{min}$ 相对于绿波带速度 v_{up} 的波动减少百分比.干道下行方向绿波带速度为 \bar{v}_{down} 时,定义变量 $\bar{p}_{i,i+1}^+$ 表示下行车辆由

交叉口 I_{i+1} 行驶至交叉口 I_i 时不受阻的最高车速 $\bar{v}_{i,i+1}^{\max}$ 相对于绿波带速 \bar{v}_{down} 的波动增加百分比;变量 $\bar{p}_{i,i+1}^-$ 表示下行车辆由交叉口 I_{i+1} 行驶至交叉口 I_i 时不受阻的最低车速 $\bar{v}_{i,i+1}^{\min}$ 相对于绿波带速 \bar{v}_{down} 的波动减少百分比。

图3中,假定交叉口 I_i 某上行协调相位绿灯时间起点 f 的坐标为 (x_0, y_0) ,则图3中其余点的坐标如式(3)所示。

$$\begin{cases} j = (x_0 + t_{Gi}^{\text{up}}, y_0), a = (x_0 - T_i, y_0) \\ g = (x_0 + \omega_{Li} + t_{i,i+1} - \omega_{Li+1}, y_0 + L_{i,i+1}) \\ h = (x_0 + \omega_{Li} + t_{i,i+1} - \omega_{Li+1} + t_{Gi+1}^{\text{up}}, y_0 + L_{i,i+1}) \\ d = (x_0 + \omega_{Li} + t_{i,i+1} - \omega_{Li+1} - T_{i+1}, y_0 + L_{i,i+1}) \\ e = (x_0 + \omega_{Li} + t_{i,i+1} - \omega_{Li+1} - T_{i+1} + t_{Gi+1}^{\text{down}}, y_0 + L_{i,i+1}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $L_{i,i+1}$ 表示交叉口 I_i 与交叉口 I_{i+1} 的间距。 T_{i+1} 可表示为

$$T_{i+1} = \bar{t}_{i,i+1} - \bar{\omega}_{Ri+1} + \bar{\omega}_{Ri} + \omega_{Li} + t_{i,i+1} - \omega_{Li+1} + t_{Gi+1}^{\text{down}} + T_i - t_{Gi}^{\text{down}} \quad (4)$$

由式(4)可知, T_{i+1} 与 T_i 存在递推关系即由 T_i 的数值可推导出 T_{i+1} 的取值。 T_i 的数值随交叉口 I_i 相位相序的不同设置相应变化。当交叉口 I_i 的协调方向均采用进口单独放行且上行协调相位紧接下行协调相位时, $T_i = t_{G1}^{\text{down}}$;当交叉口 I_i 的协调方向均采用进口单独放行且下行协调相位紧接上行协调相位时, $T_i = t_{G1} + t_{G1}^{\text{down}}$ 。

由图2可知, $p_{i,i+1}^+$ 可表示为

$$p_{i,i+1}^+ = \frac{v_{i,i+1}^{\max} - v_{\text{up}}}{v_{\text{up}}} \cdot 100\% = \left(\frac{k_{\text{fg}}}{v_{\text{up}}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (5)$$

由图2可知, k_{fg} 可表示为

$$k_{\text{fg}} = \frac{L_{i,i+1}}{x_g - x_f} = \frac{L_{i,i+1}}{x_0 + \omega_{Li} + t_{i,i+1} - \omega_{Li+1} - x_0} \quad (6)$$

式中: x_g 表示点 g 的横坐标; x_f 表示点 f 的横坐标。

联立式(5)和式(6), $p_{i,i+1}^+$ 可表示为

$$p_{i,i+1}^+ = \left(\frac{t_{i,i+1}}{\omega_{Li} + t_{i,i+1} - \omega_{Li+1}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (7)$$

同理,变量 $\bar{p}_{i,i+1}^-$ 、变量 $\bar{p}_{i,i+1}^+$ 与变量 $\bar{p}_{i,i+1}^-$ 可分别可表示为

$$p_{i,i+1}^- = \left(1 - \frac{t_{i,i+1}}{\omega_{Li} + t_{i,i+1} - \omega_{Li+1} + t_{Gi+1}^{\text{up}} - t_{Gi}^{\text{up}}} \right) \cdot 100\% \quad (8)$$

$$\bar{p}_{i,i+1}^+ = \left(\frac{\bar{t}_{i,i+1}}{T_{i+1} - T_i - \omega_{Li} - t_{i,i+1} + \omega_{Li+1}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (9)$$

$$\bar{p}_{i,i+1}^- = \left(1 - \frac{\bar{t}_{i,i+1}}{T_{i+1} - T_i - \omega_{Li} - t_{i,i+1} + \omega_{Li+1} + t_{Gi}^{\text{down}} - t_{Gi+1}^{\text{down}}} \right) \cdot 100\% \quad (10)$$

由式(7)和式(8)可知,当 ω_{Li} 取值固定时,随着 ω_{Li+1} 取值增大, $p_{i,i+1}^+$ 随之增大,而 $p_{i,i+1}^-$ 随之减小。同理,由式(11)和式(12)可知,当 $\bar{\omega}_{Ri}$ 取值固定时,随着 $\bar{\omega}_{Ri+1}$ 取值增大, $\bar{p}_{i,i+1}^+$ 随之增大,而 $\bar{p}_{i,i+1}^-$ 随之减小。为避免 $p_{i,i+1}^+$ 与 $p_{i,i+1}^-$ 、 $\bar{p}_{i,i+1}^+$ 与 $\bar{p}_{i,i+1}^-$ 其中之一取值过大而导致另外一变量取值过小,需对 ω_{Li+1} 、 $\bar{\omega}_{Ri+1}$ 的取值进行限定。设 k_{i+1} 、 \bar{k}_{i+1} 分别表示 ω_{Li+1} 、 $\bar{\omega}_{Ri+1}$ 取值的允许波动比例,则 ω_{Li+1} 、 $\bar{\omega}_{Ri+1}$ 的取值范围分别为

$$\begin{aligned} 0.5(t_{Gi+1}^{\text{up}} - b) \cdot (1 - k_{i+1}) &\leq \omega_{Li+1} \leq \\ 0.5(t_{Gi+1}^{\text{up}} - b) \cdot (1 + k_{i+1}) &\end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} 0.5(t_{Gi+1}^{\text{down}} - \bar{b}) \cdot (1 - \bar{k}_{i+1}) &\leq \bar{\omega}_{Ri+1} \leq \\ 0.5(t_{Gi+1}^{\text{down}} - \bar{b}) \cdot (1 + \bar{k}_{i+1}) &\end{aligned} \quad (12)$$

2.3 模型建立

选取干道上两相邻的交叉口 I_i 与交叉口 I_{i+1} 进行双向绿波协调控制时距分析,如图3所示。

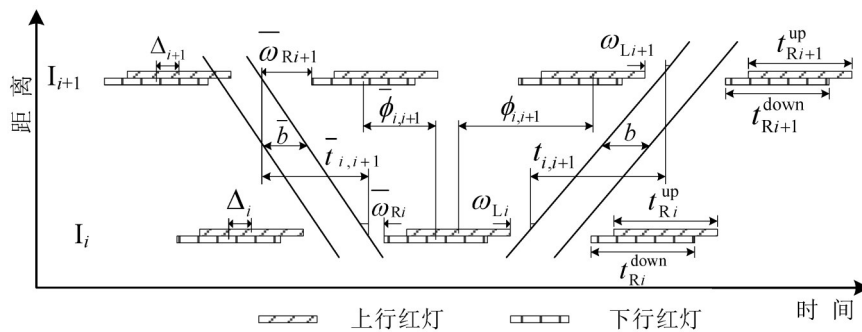


图3 双向绿波协调控制时距图分析

Fig. 3 Space-time analysis for bidirectional green wave coordinated control

图3中所有时间变量均以信号周期时长作为基本单位,图3中各时间个变量的含义如下: $\varphi_{i,i+1}(\bar{\varphi}_{i,i+1})$ 表示上行(下行)方向交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 红灯中心时刻点与至交叉口 $I_{i+1}(I_i)$ 红灯中心时刻点的时间间隔; $t_{Ri}^{up}(t_{Ri}^{down})$ 表示交叉口 I_i 上行(下行)方向的红灯时间; $t_{Ri+1}^{up}(t_{Ri+1}^{down})$ 表示交叉口 I_{i+1} 上行(下行)方向的红灯时间; $\Delta_i(\bar{\Delta}_i)$ 表示交叉口 $I_i(I_{i+1})$ 上行协调相位红灯中点至其相近下行协调相位红灯中点的时间间隔;图3中其余时间变量的定义如图2中对应变量的说明,这里不再赘述.变量 Δ_i 的取值与交叉口 I_i 的相序设置有关,当交叉口 I_i 采用进口单独放行且上行协调相位紧接下行协调相位时, $\Delta_i = 1 - \frac{t_{Ri}^{up} + t_{Ri}^{down}}{2}$;当交叉口 I_i 采用进口单独放行且下行协调相位紧接上行协调相位时, $\Delta_i = \frac{t_{Ri}^{up} + t_{Ri}^{down}}{2} - 1$.

以双向绿波带宽之和最大为第一级优化目标,以交叉口间的波动百分比之和最大为第二级优化目标,建立一种考虑车辆行驶速度区间波动特性的改进MAXBAND模型如式(13)所示.

$$\begin{aligned} \max z = & P_1(b + \bar{b}) + P_2 \sum_{i=1}^{n-1} (p_{i,i+1}^+ + p_{i,i+1}^- + \bar{p}_{i,i+1}^+ + \bar{p}_{i,i+1}^-) \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \omega_{Li} + b \leq 1 - t_{Ri}^{up}, i = 1, 2, \dots, n \\ \bar{\omega}_{Ri} + \bar{b} \leq 1 - t_{Ri}^{down}, i = 1, 2, \dots, n \\ (\omega_{Li} + \bar{\omega}_{Ri}) - (\omega_{Li+1} + \bar{\omega}_{Ri+1}) + t_{i,i+1} + \bar{t}_{i,i+1} + \Delta_i - \bar{\Delta}_{i+1} = \\ -0.5(t_{Ri}^{up} + t_{Ri}^{down}) + 0.5(t_{Ri+1}^{up} + t_{Ri+1}^{down}) + m_{i,i+1}, \\ i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \omega_{Li+1} > \omega_{Li}, i = 1, 2, \dots, n-1 \\ t_{Gi+1}^{up} - \omega_{Li+1} > t_{Gi}^{up} - \omega_{Li}, i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \bar{\omega}_{Ri+1} < \bar{\omega}_{Ri}, i = 1, 2, \dots, n-1 \\ t_{Gi+1}^{down} - \bar{\omega}_{Ri+1} < t_{Gi}^{down} - \bar{\omega}_{Ri}, i = 1, 2, \dots, n-1 \\ 0.5(t_{Gi}^{up} - b) \cdot (1 - k_i) \leq \omega_{Li} \leq 0.5(t_{Gi}^{up} - b) \cdot (1 + k_i), \\ i = 2, \dots, n \\ 0.5(t_{Gi}^{down} - \bar{b}) \cdot (1 - \bar{k}_i) \leq \bar{\omega}_{Ri} \leq 0.5(t_{Gi}^{down} - \bar{b}) \cdot (1 + \bar{k}_i), \\ i = 1, 2, \dots, n-1 \\ m_{i,i+1} \in \text{int} \\ b, \bar{b}, \omega_{Li}, \bar{\omega}_{Ri} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (13) \end{aligned}$$

式中: z 表示模型的目标函数.其中, P_1 表示第一级优化,首先优化绿波带宽; P_2 表示第二级优化,在完

成第一级优化后再进行第二级优化,优化波动百分比.另外, $m_{i,i+1}$ 表示交叉口 I_i 与交叉口 I_{i+1} 的相位差方程式系数,取整数值.

3 算例分析

已知城市某干道上有3个信号交叉口,交叉口编号分别为 I_1 、 I_2 和 I_3 ,定义车辆由交叉口 I_1 行驶至交叉口 I_3 为干道上行方向,车辆由交叉口 I_3 行驶至交叉口 I_1 为干道下行方向.交叉口 I_1 停止线与交叉口 I_2 停止线之间的距离为450 m,交叉口 I_2 停止线与交叉口 I_3 停止线之间的距离为590 m.干道上行绿波带设计速度为14 m/s,干道下行绿波带设计速度为13 m/s.各交叉口的单点信号配时方案如表1所示.干道上各交叉口的流量数据如表2所示.

表1 各交叉口单点信号配时
Table 1 Signal timing for each intersection

交叉口	绿信比			相序设置
	上行协调相位	下行协调相位	非协调相位	
I_1	0.20	0.39	0.41	上行—非协调—下行
I_2	0.26	0.32	0.42	上行—下行—非协调
I_3	0.35	0.22	0.43	上行—非协调—下行

根据式(7)~式(10),相邻交叉口之间的速度波动百分比为

$$\begin{aligned} p_{1,2}^+ &= \frac{\omega_{1,2} - \omega_{1,1}}{\omega_{1,1} - \omega_{1,2} + 0.192\ 857} \\ p_{1,2}^- &= \frac{\omega_{1,1} - \omega_{1,2} + 0.06}{\omega_{1,1} - \omega_{1,2} + 0.252\ 857} \\ p_{2,3}^+ &= \frac{\omega_{1,3} - \omega_{1,2}}{\omega_{1,2} - \omega_{1,3} + 0.280\ 952} \\ p_{2,3}^- &= \frac{\omega_{1,2} - \omega_{1,3} + 0.09}{\omega_{1,2} - \omega_{1,3} + 0.370\ 952} \\ \bar{p}_{1,2}^+ &= \frac{\omega_{1,1} - \omega_{1,2} + 0.050\ 549}{\omega_{1,2} - \omega_{1,1} + 0.157\ 143} \\ \bar{p}_{1,2}^- &= \frac{\omega_{1,2} - \omega_{1,1} + 0.019\ 451}{\omega_{1,2} - \omega_{1,1} + 0.227\ 143} \\ \bar{p}_{2,3}^+ &= \frac{\omega_{1,2} - \omega_{1,3} + 0.103\ 517}{\omega_{1,3} - \omega_{1,2} + 0.199\ 048} \\ \bar{p}_{2,3}^- &= \frac{\omega_{1,3} - \omega_{1,2} - 0.003\ 516}{\omega_{1,3} - \omega_{1,2} + 0.299\ 048} \end{aligned}$$

表2 干道上各交叉口的交通流量

Table 2 Traffic volume data of each intersection on the arterial

进口道	I ₁			I ₂			I ₃		
	左 转	直 行	右 转	左 转	直 行	右 转	左 转	直 行	右 转
西进口	186	468	52	186	608	60	106	818	34
东进口	224	912	50	206	748	38	176	514	83
南进口	138	234	183	238	257	180	211	222	34
北进口	203	245	25	170	234	200	56	280	267

根据式(13),建立考虑行驶速度波动的信号协调控制模型为

$$\begin{aligned}
 \max \quad & z = P_1(b + \bar{b}) + \\
 & P_2(p_{1,2}^+ + p_{2,3}^+ + p_{1,2}^- + p_{2,3}^- + \bar{p}_{1,2}^+ + \bar{p}_{2,3}^+ + \bar{p}_{1,2}^- + \bar{p}_{2,3}^-) \\
 \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \omega_{l1} + b \leq 0.2, \omega_{l2} + b \leq 0.26, \omega_{l3} + b \leq 0.35 \\ \bar{\omega}_{r1} + \bar{b} \leq 0.39, \bar{\omega}_{r2} + \bar{b} \leq 0.32, \bar{\omega}_{r3} + \bar{b} \leq 0.22 \\ \omega_{l1} + \bar{\omega}_{r1} - \omega_{l2} - \bar{\omega}_{r2} = m_{1,2} - 0.980\,549\,45 \\ \omega_{l2} + \bar{\omega}_{r2} - \omega_{l3} - \bar{\omega}_{r3} = m_{2,3} - 0.003\,516\,48 \\ \omega_{l2} - \omega_{l1} > 0, \omega_{l3} - \omega_{l2} > 0, \omega_{l1} - \omega_{l2} + 0.06 > 0 \\ \omega_{l2} - \omega_{l3} + 0.09 > 0, \bar{\omega}_{r2} - \bar{\omega}_{r1} < 0, \bar{\omega}_{r3} - \bar{\omega}_{r2} < 0 \\ \bar{\omega}_{r1} - \bar{\omega}_{r2} - 0.07 < 0, \bar{\omega}_{r2} - \bar{\omega}_{r3} - 0.1 < 0 \\ \omega_{l1}, \omega_{l2}, \omega_{l3}, \bar{\omega}_{r1}, \bar{\omega}_{r2}, \bar{\omega}_{r3}, b, \bar{b} \geq 0 \\ m_{1,2}, m_{2,3} \in \text{int} \end{cases}
 \end{aligned}$$

上述改进模型属于目标规划模型,利用序贯式算法的思想对上述优化目标进行分级优化.首先,利用最优化软件LINGO对第一级优化目标(带宽)进行求解,求得最优解 $b^* = 0.2, \bar{b}^* = 0.22, m_{1,2} = 1, m_{2,3} = 0$.其次,将上述最优解加入至第二级优化中,利用遗传算法对第二级优化目标(波动百分比)进行求解,遗传算法借助Matlab软件编程实现,主要步骤如下:

Step 1 确定问题的解空间.化简算例模型的约束条件,确定问题的解空间为

$$\begin{cases} \omega_{l1} = 0; 0.024 \leq \omega_{l2} \leq 0.036; 0.06 \leq \omega_{l3} \leq 0.09 \\ 0.068 \leq \bar{\omega}_{r1} \leq 0.102; 0.04 \leq \bar{\omega}_{r2} \leq 0.06; \bar{\omega}_{r3} = 0 \\ \bar{\omega}_{r1} - \omega_{l2} - \bar{\omega}_{r2} = 0.019\,455\,055; \omega_{l2} + \bar{\omega}_{r2} - \omega_{l3} = -0.003\,516\,48 \end{cases}$$

Step 2 种群初始化.在Step1的解空间中,采用实数编码的方式,随机生成10个个体作为初始种群.

Step 3 适应度评估.选择合适的适应度函数对当前个体进行评估,本算例中适应度函数选择第二级优化模型目标函数的负数,即适应度函数

为算例中相邻交叉口之间速度波动百分比之和的负数,表示为

$$f = -p_{1,2}^+ - p_{2,3}^+ - p_{1,2}^- - p_{2,3}^- - \bar{p}_{1,2}^+ - \bar{p}_{2,3}^+ - \bar{p}_{1,2}^- - \bar{p}_{2,3}^-$$

Step 4 适应度排序.根据适应度函数值按从小到大的顺序对当前种群进行排序,找出个体极值和全局极值.

Step 5 选择操作.随机生成5个新个体,并用5个新个体替换种群中适应度函数值较差的5个旧个体.

Step 6 交叉操作.以轮盘赌博方式,对种群中的部分个体进行交叉,当概率小于0.6时进行交叉操作.

Step 7 变异操作.以轮盘赌博方式,对种群中的部分个体进行变异,当概率小于0.1时进行变异操作.

Step 8 查看是否达到最大迭代次数(本算例中最大迭代次数为1 000),如果是则转Step9,否则转Step3.

Step 9 输出结果.

利用上述遗传算法的求解过程,第二级优化模型中的变量及交叉口间的速度波动百分比结果如下:

$$\begin{aligned} \omega_{l1} &= 0, \omega_{l2} = 0.036\,0, \omega_{l3} = 0.080\,1, \\ \bar{\omega}_{r1} &= 0.096\,0, \bar{\omega}_{r2} = 0.040\,6, \bar{\omega}_{r3} = 0 \end{aligned}$$

$$p_{1,2}^+ = 22.95\%, p_{1,2}^- = 11.07\%,$$

$$p_{2,3}^+ = 18.62\%, p_{2,3}^- = 14.04\%$$

$$\bar{p}_{1,2}^+ = 7.53\%, \bar{p}_{1,2}^- = 21.07\%,$$

$$\bar{p}_{2,3}^+ = 24.44\%, \bar{p}_{2,3}^- = 11.83\%$$

最优解的进化过程如图4所示.

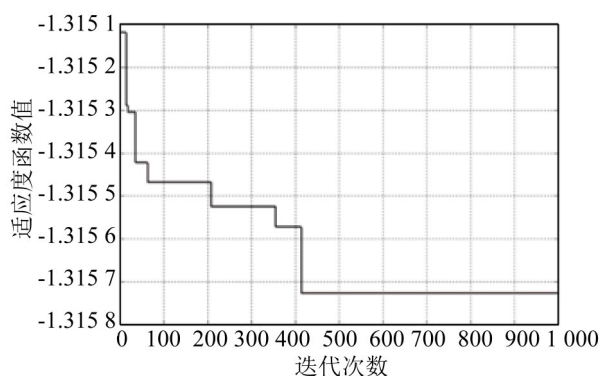


图4 最优解的进化过程

Fig. 4 Evolutionary process of the optimal solution

4 对比分析

4.1 时距图对比

分别利用本文模型与 MAXBAND 模型优化求解算例并分别绘制绿波时距图,如图5与图6所示.

由图5、图6可知,利用本文模型生成的协调控制方案能够确保高速行驶的头车与低速行驶的尾车不停车地通过交叉口,而利用 MAXBAND 模型生成的协调控制方案仅能确保上行低速行驶的尾车与下行高速行驶的头车不停车地通过交叉口. MAXBAND 模型在生成协调控制方案时具有盲目性,没有考虑行驶速度的波动性,无法直接生成最优的协调控制方案.

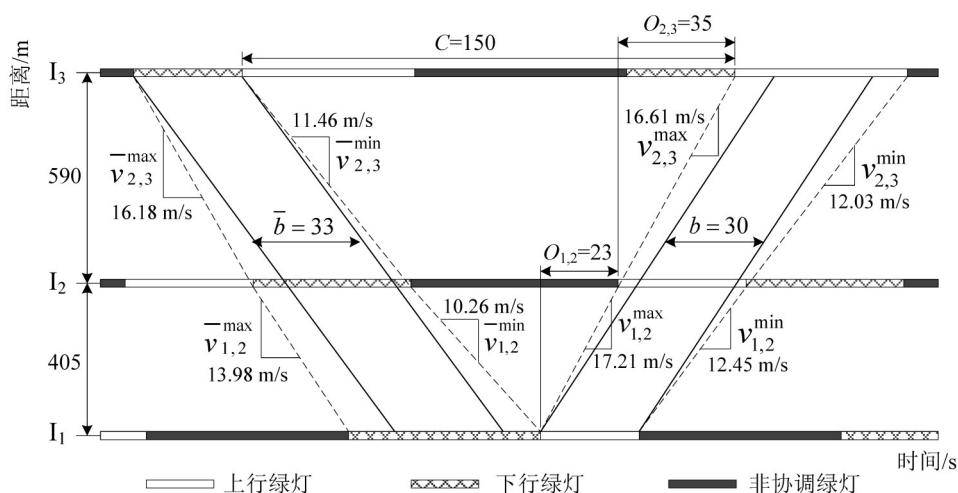


图5 本文模型生成的时距图

Fig. 5 Time-space diagram drawn by the proposed model

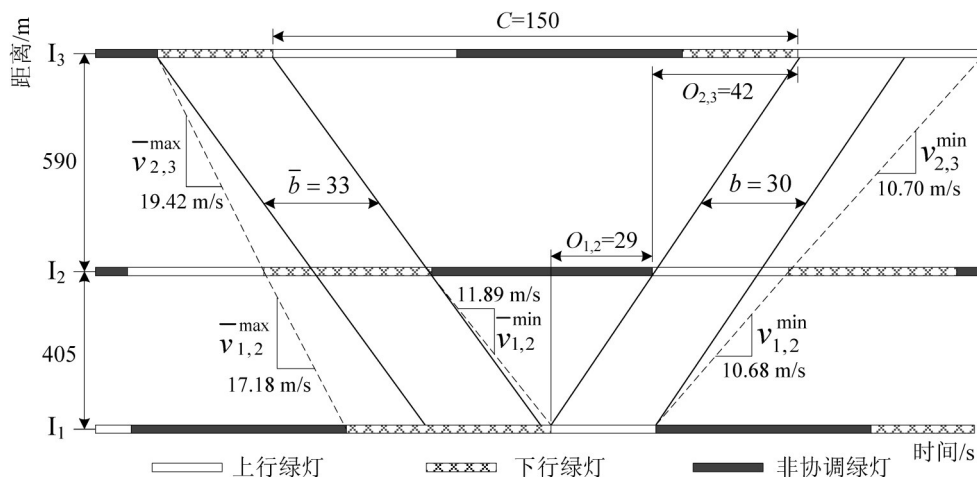


图6 MAXBAND 模型生成的时距图

Fig. 6 Time-space diagram drawn by MAXBAND model

4.2 仿真对比

为验证本文模型的有效性,选取 VISSIM 交通

仿真软件,以平均行程时间、平均延误时间、平均停车次数作为评价指标,对比分析利用本文模型

生成的协调控制方案与利用 MAXBAND 模型生成的协调控制方案的优劣. 分别将本文模型与 MAXBAND 模型生成的协调控制方案输入至 VISSIM 仿真软件中进行仿真评价. 为减少仿真中

的随机性, 设计 10 个随机数种子, 进行 10 次仿真, 并将多次仿真结果进行平均以得到最终仿真结果, 如表 3 所示.

表 3 本文模型与 MAXBAND 模型仿真结果对比

Table 3 Comparison of simulation results between MAXBAND and proposed model

评价指标	平均行程时间	平均延误时间	平均停车次数
MAXBAND 模型	184.70 s/辆	30.47 s/辆	0.33 次
本文模型	174.71 s/辆	20.55 s/辆	0.22 次
改进	5.41%	32.56%	34.44%

由表 3 可知, 相比于 MAXBAND 模型, 本文模型生成的协调控制方案能够减少平均行程时间、平均延误时间与平均停车次数, 分别为 5.41%、32.56% 与 34.44%, 这说明本文模型具有更有的优越性.

5 结 论

针对车辆实际行驶速度在一定范围内波动的特点, 建立了一种考虑车辆行驶速度区间波动的进口单放式绿波协调控制模型. 该模型能够直接生成满足行驶速度波动的绿波协调控制方案, 能够有效避免队首车辆高速受阻与队尾车辆低速受阻, 能够满足行驶速度区间内的车辆均处在绿波带宽之内, 从而提高了协调控制方案的适应性与可靠性. 本文模型假设交叉口协调相位采用进口单独放行的方式, 这在一定程度上限制了模型的应用范围. 当交叉口协调相位采用其他放行方式时, 如何设计满足行驶速度波动的协调控制方案是今后进一步研究的重点.

参考文献:

[1] LITTLE J D, MARK C, GARTNER D, et al.

MAXBAND: A versatile program for setting signals on arteries and triangular networks[R]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1981.

[2] GARTNER N H, ASSMANN S F, LASAGA F, et al. Multi-band—a variable-bandwidth arteries progression scheme[J]. Transportation Research Record, 1990 (1287): 212–222.

[3] ZHANG C, XIE Y C, GARTNER N H, et al. AM-Band: an asymmetric multi-band model for arterial traffic signal coordination[J]. Transportation Research Part C, 2015(58): 515–531.

[4] LIN L T, TUNG L W, KU H C. Synchronized signal control model for maximizing progression along an arterial[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(8): 727–735.

[5] 卢凯, 徐建闽, 陈思溢, 等. 通用干道双向绿波协调控制模型及其优化求解[J]. 控制理论与应用, 2011, 28 (4): 551–555. [LU K, XU J M, CHEN S Y, et al. A general model of bidirectional green wave for coordinate control of arterial road and its optimization solution[J]. Control Theory & Application, 2011, 28(4): 551–555.]

[6] 卢凯, 吴焕, 杨兴, 等. 绿波协调控制方案的速度区间适应性分析与评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 61–66, 83. [LU K, WU H, YANG X, et al. Analysis and evaluation of adaptability to velocity band for green wave coordination control scheme[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(5): 61–66, 83.]