

文章编号:1671-8879(2018)02-0094-09

# 城市道路干线信号协调控制与车速引导集成优化

龙科军<sup>1</sup>,高志波<sup>1</sup>,吴伟<sup>1</sup>,韩科<sup>2</sup>,段熙<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 智能道路与车路协同湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114; 2. 伦敦帝国学院 土木与环境工程系,伦敦 SW7 2AZ; 3. 佛罗里达大学 土木与海岸工程系,佛罗里达 盖恩斯威尔 FL32611)

**摘要:**针对当前干线信号协调控制为基于车辆到达驱动的被动响应型控制的特点与不足,提出一种车联网环境下干线信号协调控制与车辆速度主动引导的协同优化方法。优化原理为:考虑车辆-信号控制系统双向通信的环境下,在干线协调控制的基础上引入速度引导来调节车辆到达交叉口时刻,以避免车辆在红灯期间到达交叉口,减少停车次数并提高协调控制系统通行效率。首先,选择双向绿波带宽模型作为协调控制方案的基础;依据下游交叉口当前信号灯色和剩余时长,将车辆引导分为红灯引导和绿灯引导,分别给出最佳车速方程;基于最佳车速给出车辆到达交叉口时刻、交叉口延误和停车次数的估计方法。然后,以车辆引导速度和干线绿波相位差为控制变量,以绿波带宽最大、车辆延误与停车次数最小为目标,建立集成车速引导和干线绿波的优化模型;应用粒子群算法的多目标搜索算法对优化模型求解。选择长沙市湘江中路 4 个连续交叉口开展案例研究,分别应用普通干线绿波 Maxband 模型和提出的集成模型设计信号控制方案,并以 VISSIM 仿真平台进行效率评价。结果表明:集成模型能同时调节相位差和车辆速度,增大绿波带宽,减少停车次数;仿真周期内与 Maxband 模型相比,集成模型的上行和下行方向平均延误分别降低了 24.8% 和 31.1%,平均停车次数分别减少了 37.6% 和 41.7%,基于车速引导的集成模型能显著提高干线协调控制的效率。

**关键词:**交通工程;信号协调;粒子群算法;速度引导;车路协同

**中图分类号:**U491.2 **文献标志码:**A

## Integrated optimization for urban arterial traffic signal coordination and vehicle active speed guidance

LONG Ke-jun<sup>1</sup>, GAO Zhi-bo<sup>1</sup>, WU Wei<sup>1</sup>, HAN Ke<sup>2</sup>, DUAN Xi<sup>3</sup>

(1. Hunan Key Laboratory of Smart Highway and Cooperative Vehicle Infrastructure System, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK; 3. Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, Gainesville FL32611, Florida, USA)

**Abstract:** In light of the characters and the deficiencies of passive response control based on vehicle arrival driven by the signal coordination control of present trunk lines, a collaborative optimization method for signal coordination control of trunk lines and active guidance of vehicle speed under the environment of vehicle network was proposed. The optimization principle was as follows, under the environment of two-way communication of vehicle-signal system,

收稿日期:2017-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51678076,61773077,71701023);湖南省研究生科研创新项目(CX2016B394)

作者简介:龙科军(1974-),男,湖南双峰人,教授,工学博士,E-mail:longkejun@csust.edu.cn.

speed guidance was introduced on the basis of coordination control of trunk lines to adjust vehicles' arrival time at intersection, so as to avoid vehicles arriving at intersection during red light, reduce the number of parking and improve the efficiency of coordination control system. Firstly, the two-way green wave bandwidth was chosen as the basis of coordination control scheme, and according to the present signal color and the remaining time of the downstream intersection, the vehicle guidance was divided into red light guidance and green light guidance, and the optimal speed equations were given respectively; based on the optimal speed, the estimation method of vehicles' arrival time, intersection delay and stopping number were given. Then the optimization model of integrated vehicle speed guidance and arterial green wave was established, in which the guiding speed and the phase difference of arterial green wave were taken as control variables, the maximization of bandwidth of green wave and the minimization of delays and stops phase difference of arterial green wave were taken as controls. The multi-objective search algorithm of particle swarm optimization was used to solve the optimization model. Four consecutive intersections of Xiangjiang Middle Road in Changsha City were selected to carry out case studies. The signal control scheme was designed by using the green wave Maxband model of the common arterial and the proposed integrated model respectively, and the efficiency was evaluated on the basis of VISSIM simulation platform. The results show that the proposed integrated model can adjust the phase difference and vehicle speed at the same time, increase the green wave bandwidth and reduce the parking times. In the simulation cycle, the average delay of uplink and downlink is reduced by 24.8% and 31.1% respectively, and the average parking times are reduced by 37.6% and 41.7% respectively, compared with Maxband model. The integrated model based on speed guidance can significantly improve the efficiency of coordination control of arterial lines. 4 tabs, 7 figs, 21 refs.

**Key words:** traffic engineering; signal coordination; particle swarm optimization; speed guidance; cooperative vehicle infrastructure

## 0 引 言

干线信号协调控制是提高城市道路通行效率、减少停车的重要工具。Little 提出求解最大绿波带宽的混合整数规划模型(Maxband)后<sup>[1]</sup>,国内外许多学者以降低交叉口延误、减少停车次数或提高绿波带宽等为目标<sup>[2]</sup>,分别提出了基于数学规划<sup>[3-4]</sup>和基于交通流动态演化<sup>[5-6]</sup>的信号协调控制模型,并成功应用于 SCOOT、SCATS 和 RHODES 等交通协调控制系统中。然而,传统控制环境下,数据采集与信息交互具有单向被动响应的局限性,协调控制模型大都将协调路径、初始排队长度、路段车速等作为固定参数输入,进行绿波优化<sup>[7-9]</sup>。这种优化方法存在明显缺陷,如 Abu-Lebdeh 等指出,其无法克服车辆到达的波动性、初始排队长度的随机性以及车辆车速的随机变化对协调控制效果的不利影响<sup>[10]</sup>。

在车路联网环境下,车辆与控制系统之间可双向信息通信与交互,使交通控制实现从对交通流的

被动响应到主动引导的转变。Abu-Lebdeh 等还利用信息手段引导车辆的行驶速度,但其优化过程中,车辆引导速度和信号控制参数分别独立优化,即先确定控制参数,再优化车辆的引导速度,导致其无法获得最优解<sup>[11-12]</sup>;李鹏凯等在单车速度引导的基础上,建立了以交叉口整体效益最大为目标函数的多车协同车速引导模型<sup>[13-14]</sup>;张存保等将相位饱和度作为表征信号控制效果的指标,在考虑速度引导对车辆运行状态影响基础上,建立了车路协同环境下交叉口信号控制优化模型<sup>[15]</sup>;Yang 等提出了一种基于速度引导的干线交叉口信号控制方法,通过引导车辆加减速避免停车,从而减少车辆的行程时间<sup>[16]</sup>;吴伟等建立了双向协调路径、车辆动态车速和交叉口配时参数的集成优化模型,但其方案优化时容易出现计算量过大、计算时间过长等问题,不能满足实时性要求<sup>[17]</sup>。为此,本文在车路协同环境下,实时获取车辆位置和速度信息,以车辆引导速度与信号配时参数(相位差)作为控制变量,综合考虑

绿波带宽、延误和停车次数拟定目标函数,优化得到信号配时参数(相位差)和车辆引导速度,并通过语音、画面提示甚至自动驾驶等方式诱导驾驶人以适宜的速度在最佳时刻到达交叉口,达到主动控制的目的。

## 1 问题描述与模型假设

### 1.1 问题描述

以相邻的2个交叉口为例(图1),如果车辆在绿灯尾通过交叉口*i*,保持当前车速 $V_0$ 行驶,将在 $T_a$ 时刻到达下游交叉口*i+1*,依据原有信号控制方案,交叉口*i+1*将在 $T_r$ 时刻切换为红灯,当前车辆将遇到红灯信号停车。若希望车辆能够不停车通过交叉口*i+1*,可调整信号控制参数(相位差、绿灯时长等)来实现;也可通过调整车速改变车辆到达交叉口时刻,如根据已有的车速诱导模型<sup>[18]</sup>,在不改变现有信号方案的前提下,通过动态调节车辆的行驶速度,诱导其速度从 $V_0$ 加速至 $V_1$ 或者从 $V_0$ 减速至 $V_2$ ,则可以使车辆在绿灯期间到达交叉口。

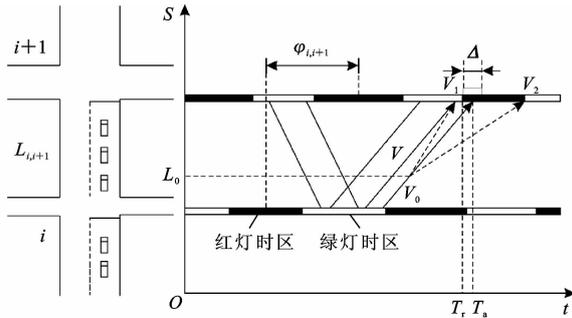


图1 绿波协调问题分析

Fig. 1 Problem analysis for green wave coordinated control

图1中: $L_{i,i+1}$ 为交叉口*i*与*i+1*的间距; $L_0$ 为车辆引导区域长度; $V$ 为绿波带速度; $\varphi_{i,i+1}$ 为以红灯中点为标准定义的相位差; $\Delta$ 为信号参数调整量; $t$ 为时间; $S$ 为距离。

为使车辆不停车通过交叉口,可以选择优化相位差,也可以调节车辆速度以改变到达交叉口的时刻,这是当前大多数研究的优化思路,模型复杂度相对较低,但因为受到绿灯时长上下限、行车速度上下限约束,其优化空间有限。为此,本文将同时优化相位差和行车速度。在车速可调节和相位差可变的前提下,以协调交叉口的整体效益最大化为目标,协同优化得到车辆最佳引导速度与最优相位差。

### 1.2 模型假设

为简化问题,拟采用以下假设:

(1)车辆均严格服从车速诱导策略;

(2)车辆进入引导区域后,或者在当前周期通过交叉口,或者在下一周期通过交叉口,不考虑2个周期以外的车辆引导;

(3)为避免车辆换道对其他车辆造成较大影响,车辆在进入引导区域前已经完成路径决策,只允许在引导区域上游变换车道;

(4)不考虑公交车停靠、行人和非机动车的影响。

## 2 优化模型

### 2.1 绿波带宽模型

假定主干道上有*n*个拟协调的信号控制交叉口,编号分别为 $1, 2, \dots, i, i+1, \dots, n$ ,定义由交叉口*i*至*i+1*为上行方向,相反为下行方向,所有协调交叉口拥有共同周期,绘制其绿波控制时空图,如图2所示。

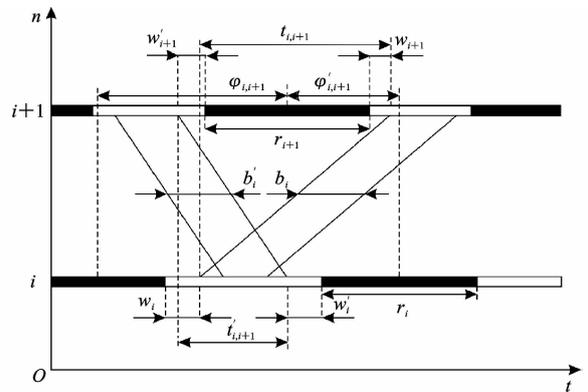


图2 绿波协调控制时空图

Fig. 2 Space-time diagram for green wave coordinated control

图2中: $b_i, b'_i$ 分别为交叉口*i*上行、下行绿波带宽; $r_i, r_{i+1}$ 分别为交叉口*i, i+1*协调相位红灯时长; $w_i, w_{i+1}$ 分别为交叉口*i, i+1*上行方向绿灯开始时刻到绿波带左侧边缘之间的时间间隔; $w'_i, w'_{i+1}$ 分别为交叉口*i, i+1*下行方向绿灯结束时刻到绿波带右侧边缘之间的时间间隔; $t_{i,i+1}, t'_{i,i+1}$ 分别为交叉口*i*至*i+1*路段上行、下行的行程时间; $\varphi_{i,i+1}, \varphi'_{i,i+1}$ 分别为上行、下行方向交叉口*i*与*i+1*以红灯中点为标准定义的相位差。

由于本文以红灯中点为标准定义相位差,则可建立以下等式约束

$$\begin{cases} \varphi_{i,i+1} = 0.5r_i + w_i + t_{i,i+1} - w_{i+1} - 0.5r_{i+1} \\ \varphi'_{i,i+1} = 0.5r_i + w'_i + t'_{i,i+1} - w'_{i+1} - 0.5r_{i+1} \\ \varphi_{i,i+1} + \varphi'_{i,i+1} = m_{i,i+1}C \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C$ 为公共周期时长; $m_{i,i+1}$ 为交叉口*i*和*i+1*的相位差方程式系数,取正整数。

绿波带边界和与其相近红灯边界之间的时间间隔  $w_i, w'_i, w_{i+1}, w'_{i+1}$  既要满足初始排队清空时间需求约束, 还需满足有效绿灯时间约束, 即

$$\begin{cases} \tau_i \leq w_i \leq g_i - b_i \\ \tau'_i \leq w'_i \leq g_i - b'_i \\ \tau_{i+1} \leq w_{i+1} \leq g_{i+1} - b_i \\ \tau'_{i+1} \leq w'_{i+1} \leq g_{i+1} - b'_i \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\tau_i, \tau_{i+1}$  分别为上行方向交叉口  $i, i+1$  协调相位排队清空时间;  $\tau'_i, \tau'_{i+1}$  分别为下行方向交叉口  $i, i+1$  协调相位排队清空时间;  $g_i, g_{i+1}$  分别为交叉口  $i, i+1$  协调相位的有效绿灯时间。

排队清空时间  $\tau_i$  主要由两部分构成: 第一部分是启动波传递到最大排队长度点所需的时间; 第二部分是从最大排队长度点行驶, 直至通过交叉口所需的时间, 可以表示为

$$\tau_i = L_i/W_i + L_i/V_i^s \quad (3)$$

同理, 对于其他方向和其他交叉口也有

$$\begin{cases} \tau_i = L_i/W_i + L_i/V_i^s \\ \tau_{i+1} = L_{i+1}/W_{i+1} + L_{i+1}/V_{i+1}^s \\ \tau'_{i+1} = L'_{i+1}/W_{i+1} + L'_{i+1}/V_{i+1}^s \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $L_i, L'_i$  分别为交叉口  $i$  上行、下行方向协调相位的初始排队长度;  $L_{i+1}, L'_{i+1}$  分别为交叉口  $i+1$  上行、下行方向协调相位的初始排队长度;  $W_i, W_{i+1}$  分别为交叉口  $i, i+1$  的启动波传递速度;  $V_i^s, V_{i+1}^s$  分别为交叉口  $i, i+1$  的饱和车流通过交叉口的速度。

## 2.2 速度引导模型

速度引导的目的是使车辆在最佳时刻到达交叉口, 根据当前信号与交通状态, 提出不同的引导方程, 主要包括以下 2 种情形。

**红灯引导:** 车辆进入引导区域, 当前相位为黄灯或红灯, 或虽为绿灯, 但排队仍未消散, 在此情形下的车速引导为红灯引导。

**绿灯引导:** 车辆进入引导区域, 当前相位为绿灯, 且排队已经消散, 在此情形下的车速引导为绿灯引导。

下文以交叉口上行方向协调相位为例, 分析车辆速度引导模型。

### 2.2.1 红灯引导模型

**引导策略:** 车辆行驶至排队队尾时, 启动波正好传递至排队队尾, 即队尾车辆开始启动, 车辆能跟随排队队尾通过交叉口。据此, 红灯引导模型公式为

$$V_t(i, j) = \frac{L_d(i, j) - \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i, j_1)}{t(i, k) + \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i, j_1)(V_i^s - t_n)^{-1}} \quad (5)$$

式中:  $V_t(i, j)$  为交叉口  $i$  协调相位车辆  $j$  的理论最佳车速;  $L_d(i, j)$  为交叉口  $i$  协调相位车辆  $j$  距交叉口的距离;  $L_s(i, j_1)$  为交叉口  $i$  协调相位排队车辆  $j_1$  的车身长度;  $t(i, k)$  为交叉口  $i$  协调相位在第  $k$  个周期的绿灯启亮时刻;  $t_n$  为当前时刻。

### 2.2.2 绿灯引导模型

绿灯引导原理如图 3 所示, 图 3 中虚线为引导后的车辆行驶轨迹, 车辆可以加速在当前周期通过, 或减速在下一周期通过, 均可以不停车通过交叉口。据此, 绿灯引导模型公式为

$$V_t(i, j) = L_d(i, j) / \left\{ \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i, j_1) / V_a(i, j) \cdot \delta(i, j, k) + [t(i, k+1) - t_n + \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i, j_1) / V_a(i, j)] \delta(i, j, k+1) \right\} \quad (6)$$

式中:  $V_a(i, j)$  为交叉口  $i$  协调相位车辆平均行驶车速;  $\delta(i, j, k)$  为二元变量,  $\delta(i, j, k) = 1$  表示车辆在当前周期通过交叉口,  $\delta(i, j, k) = 0$  表示车辆在下一个周期通过交叉口, 即  $\delta(i, j, k+1) = 1$ 。

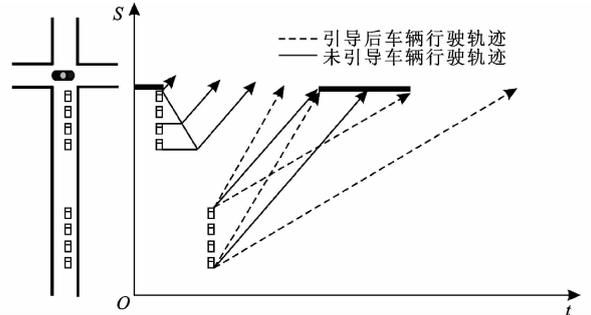


图3 绿灯引导时空图

Fig. 3 Space-time figure for vehicle guidance during green

不论红灯引导还是绿灯引导, 引导之后的车速  $V_g(i, j)$  需满足最大车速  $V_{\max}$  和最小车速  $V_{\min}$  约束

若  $V_{\min} \leq V_t(i, j) \leq V_{\max}$ , 则

$$V_g(i, j) = V_t(i, j) \quad (7)$$

若  $V_t(i, j) > V_{\max}$ , 则

$$V_g(i, j) = V_{\max} \quad (8)$$

若  $V_t(i, j) < V_{\min}$ , 则

$$V_g(i, j) = V_{\min} \quad (9)$$

## 2.3 车辆到达时刻估计

### 2.3.1 红灯引导-车辆到达时刻

若  $V_g(i, j) = V_t(i, j)$ , 则说明车辆能以理想车

速通过交叉口,当行驶至最大排队长度时,最后1辆排队车辆正好开始前进,车辆将跟随前面车辆通过交叉口,不需停车,此时车辆到达时刻  $T(i,j)$  为

$$T(i,j) = t(i,k) + \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i,j_1)/V_i^s + \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i,j_1)/V_a(i,j) \quad (10)$$

若  $V_g(i,j) = V_{\max}$ ,说明当前车辆以最高限速行驶,也无法追赶排队队尾,车辆行驶至交叉口时,排队已完全消散,其到达时刻  $T(i,j)$  可估计为

$$T(i,j) = t_n + L_d(i,j)/V_{\max} \quad (11)$$

若  $V_g(i,j) = V_{\min}$ ,说明当前车辆以最低限速行驶,也会提前到达最大排队长度点处而经历停车,在此情况下,车辆到达时刻可同样用式(10)计算。

### 2.3.2 绿灯引导-车辆到达时刻

若  $V_g(i,j) = V_t(i,j)$ ,说明车辆能以理想车速通过交叉口,不需停车。如果车辆在本周期剩余的绿灯时间通过交叉口,则车辆的到达时刻可同样采用式(10)计算;如果车辆在下一周期的绿灯通过,则车辆的到达时刻  $T(i,j)$  可估计为

$$T(i,j) = t(i,k+1) + \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i,j_1)/V_i^s + \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i,j_1)/V_a(i,j) \quad (12)$$

若  $V_g(i,j) = V_{\max}$ ,说明当前车辆以最高限速行驶,在当前周期也无法赶上前面车辆,其到达时刻表达式可采用式(11)计算,即到达时刻等于当前时刻加上以最高限速行驶至停车线的时长。

如果  $V_g(i,j) = V_{\min}$ ,说明当前车辆以最低限速运行,将在下一周期通过交叉口,则车辆到达时刻可用式(12)估计。

## 2.4 延误估计

交叉口延误主要包括三部分:①红灯引导(减速)引起的延误,为控制延误;②排队车辆占据空间引起的延误,为排队延误;③红灯信号引起的延误,为信号延误。

### 2.4.1 控制延误

在红灯引导下,以最大排队长度点为参照点进行车速引导,则速度变化引起的延误  $d_c(i,j)$  为

$$d_c(i,j) = \frac{L_d(i,j) - \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i,j_1)}{V_g(i,j)} - \frac{L_d(i,j) - \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i,j_1)}{V_a(i,j)} \quad (13)$$

绿灯引导下,以停车线为参照点进行车速引导,则速度变化引起的延误  $d_c(i,j)$  为

$$d_c(i,j) = L_d(i,j)/V_g(i,j) - L_d(i,j)/V_a(i,j) \quad (14)$$

### 2.4.2 排队延误和信号延误

若  $V_g(i,j) = V_t(i,j)$  或  $V_g(i,j) = V_{\max}$ ,车辆都能顺利通过交叉口而不需停车,则排队延误和信号延误为0。如果  $V_g(i,j) = V_{\min}$ ,在红灯引导下,排队延误和信号延误如图4所示。

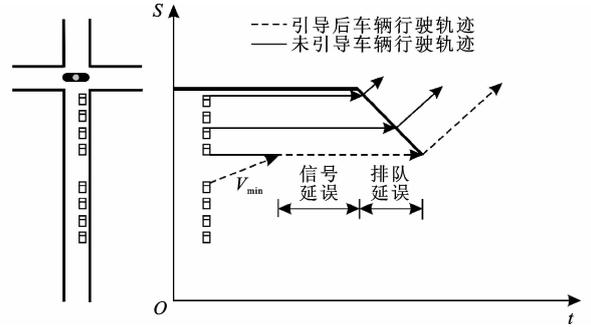


图4 排队延误和信号延误

Fig. 4 Queue delay and signal delay of signal control

信号延误  $d_s(i,j)$  和排队延误  $d_q(i,j)$  分别为

$$d_s(i,j) = t(i,k) - t_n - \left[ L_d(i,j) - \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i,j_1) \right] V_{\min}^{-1} \quad (15)$$

$$d_q(i,j) = \sum_{j_1=1}^{j-1} L_s(i,j_1)/V_i^s \quad (16)$$

在绿灯引导情况下,排队延误和信号延误的计算式与红灯引导类似,区别在于时间起点为下一周期的绿灯开始时刻点  $t(i,k+1)$ ,此处不再赘述。

## 2.5 停车次数估计

如果引导车速  $V_g(i,j) \neq V_{\min}$ ,则表示车辆不需停车而通过交叉口,停车次数  $s(i,j) = 0$ ;如果引导车速等于最低限速,则说明该车辆将经历一次停车,有若  $V_g(i,j) = V_t(i,j)$ ,则  $s(i,j) = 0$ ;若  $V_g(i,j) = V_{\max}$ ,则  $s(i,j) = 0$ ;若  $V_g(i,j) = V_{\min}$ ,则  $s(i,j) = 1$ 。

## 2.6 干线绿波控制与车速引导集成优化模型

目标函数包括三部分:实际绿波带宽最大,总延误、停车次数最小,即

$$\begin{cases} \max B = b_i + b'_i \\ \min N = \sum_{i=1} \sum_{j=1} s(i,j) \\ \min D = \sum_{i=1} \sum_{j=1} d(i,j) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $B$  为干线双向绿波带宽之和; $N$  为停车总次数; $D$  为车辆总延误; $d(i,j)$  为单车延误,由速度变化引起的控制延误  $d_c(i,j)$ 、排队延误  $d_q(i,j)$  和信

号延误  $d_s(i, j)$  组成, 即

$$d(i, j) = d_c(i, j) + d_q(i, j) + d_s(i, j) \quad (18)$$

控制变量为: 相位差参数  $\omega_i, \omega'_i, \omega_{i+1}, \omega'_{i+1}$ ; 周期选择参数  $\delta(i, j, k)$ ; 引导车速  $V_g(i, j)$ ; 约束条件为式(1)~式(18)。

### 3 求解算法

#### 3.1 基于粒子群的多目标搜索算法

由于决策变量为多维变量<sup>[19]</sup>, 其维数随着协调交叉口数量的增加而增大, 传统的枚举法、数解法、图解法等计算过程繁琐, 效率低, 不能满足实时优化的要求。粒子群算法(PSO)是一种群体智能的优化算法, 采用高效群集并行对非劣解进行搜索, 在寻优过程中具有很好地收敛性和全局搜索能力。在求解多目标优化问题时, 常用方法是将 Pareto 排序机制和粒子群算法相结合, 通过粒子之间的支配关系来确定其历史最优解并更新非劣解集<sup>[20]</sup>。本文引入混合多样性策略<sup>[21]</sup>, 用于支配解的排序, 从而提高算法收敛性和增加 Pareto 的多样性, 具体步骤如下所述。

步骤 1, 初始化。随机生成  $M$  个粒子, 并将其存储于位置  $P_0$  中, 将粒子的个体最优位置  $P_x$  设置为当前位置  $Y_x$ , 设初始非支配解集  $A_0 = \emptyset$ , 并给定非支配解集的规模  $A$ , 令迭代次数  $K=0$ 。

步骤 2, 将  $P_0$  中的非支配解集更新到  $A_0$  中, 并依据混合多样性策略对  $A_0$  排序, 形成  $A_1$ , 令  $P_1 = P_0$ ; 令  $K=K+1$ , 开始循环迭代。

步骤 3, 粒子最优更新。通过更新粒子的速度  $v_x^K$  和位置  $Y_x^K$ , 获取更新后粒子的个体最优位置  $P_x^K$  和全局最优解  $P_g^K$ , 其中粒子  $x$  的全局最优解  $P_g^K$  是在前 20% 的非支配解中随机取值, 将产生的子代种群  $Q_K$  与  $P_x^K$  合并, 并将其存储于  $R_K$  中, 此时  $R_K$  中存在  $2M$  个粒子。

步骤 4, 非劣解集更新。依据混合多样性策略对  $R_K$  进行排序, 选取前  $M$  个粒子组成的下一代种群  $P_{K+1}$ , 更新  $P_{K+1}$  中各粒子的位置  $y_x$ , 并将  $R_K$  中的非支配解更新到  $A_K$  中。

步骤 5, 局部搜索。对  $A_K$  进行局部搜索<sup>[21]</sup>, 删除其中的被支配解, 依据混合多样性策略对  $A_K$  进行排序。若  $|\bar{A}_K| > \bar{A}$ , 则取前  $\bar{A}$  个粒子来构成  $A_{K+1}$ ; 否则, 令  $A_{K+1} = A_K$ 。

步骤 6, 判断是否满足算法终止条件。若达到最大迭代次数  $K_m$ , 程序结束, 输出  $A_{K+1}$  的支配解;

否则, 返回步骤 3 继续迭代。

#### 3.2 算法流程

本文采用滚动时间窗的优化办法, 即依据车辆所在位置和速度动态引导车辆的到达时刻, 进而计算延误与停车次数, 优化相位时间等参数。滚动时间窗优化方法的基本原理如图 5 所示。



图 5 滚动时间窗优化原理

Fig. 5 Optimization theory of sliding time window

本文计算基于 VISSIM4.3 仿真软件和 MATLAB2014a 编程环境, VISSIM 软件与 MATLAB 编程环境的连接通过 VISSIM 自带的 COM 接口实现。在仿真开始前设置初始信号配时参数, 在仿真运行中通过 MATLAB 编写的优化算法程序实时修改信号控制参数; 为了对车辆进行车速引导, 使用 MATLAB 程序动态修改 VISSIM 仿真软件中车辆速度 Speed 和期望车速 Desire Speed。主要步骤如下所述。

(1) 初始化。包括优化算法的参数设置和仿真路网的建立。优化算法相关参数, 群体规模  $M=20$ , 最大迭代次数  $K_m=100$ , 惯性权重  $\omega=0.4$ , 加权因子  $c_1=c_2=1.5$ ; 在 VISSIM 软件中建立交叉口模型, 输入交通流量, 并设置信号控制机的初始控制参数 Cycle Time、Offset、Red/Amber、Amber、RE-DEND、GREENEND。

(2) 仿真运行。使用 MATLAB 程序, 利用 COM 接口, 连接 VISSIM 软件, 并运行仿真。如果仿真运行至滚动时间窗的滚动步距点, 执行下一步。

(3) 记录交叉口进口道车辆的编号、位置与速度, 记录当前相位的信号状态, 包括当前灯色(VISSIM 软件默认 1 为红灯, 3 为绿灯, 4 为黄灯)和当前信号已经执行的时间。

(4) 优化求解。调用粒子群优化算法子程序, 计算满足约束的支配解, 选取第 1 个解做作为本文方案的最优解, 并将结果返回到主程序。

(5) 方案执行。包括信号控制方案与车速引导方案。信号控制方案的执行通过 MATLAB 程序修

改 VISSIM 的 COM 接口中信号属性 Offset 来实现;车速引导方案的执行通过 MATLAB 程序修改 VISSIM 的 COM 接口中车辆属性 Desire Speed 和 Speed 实现;执行完毕后转至步骤(2)。

## 4 实例分析

### 4.1 实例现状

选取长沙市湘江中路 4 个连续交叉口进行测试检验,湘江中路是长沙中心城区南北向的一条重要主干路,沿线各交叉口均为 T 形路口,交叉口平面布局如图 6 所示:主干线为双向六车道,设置了中央分隔栏和机动车与非机动车分隔带,限速 50 km/h;沿线各交叉口在进口道均有展宽,设置了左转或掉头专用车道。



①湘江中路-白沙路交叉口 ②湘江中路-劳动西路交叉口  
③湘江中路-西湖路交叉口 ④湘江中路-人民西路交叉口

单位:m

图 6 湘江中路各协调交叉口地理位置

Fig. 6 Geographic locations of intersections along Xiangjiang Middle Road

采集沿线各交叉口高峰小时流量,调查时段为 2017 年 9 月 27 日晚高峰 18:00~19:00,各交叉口流向流量如表 1 所示。

表 1 各交叉口流量调查结果

Tab. 1 Survey results of traffic volume of

different intersections

Pch/h

交叉口	东进口		南进口		北进口	
	左转	右转	直行	右转	左转	直行
①	312	281	1 307	234	287	1 653
②	351	507	1 677	260	384	2 125
③	238	513	1 203	194	290	1 791
④	504	726	1 805	447	571	2 205

根据流量及目前车道功能划分情况,采用 Webster 公式求解各交叉口的最佳周期,得到交叉口④为关键交叉口,最佳周期时长为 140 s;将其他交叉口的周期也相应调整为 140 s,得到各交叉口的

相位绿灯时间,如表 2 所示。

表 2 各交叉口信号配时方案

Tab. 2 Signal timing schemes of different intersections

交叉口	各相位绿灯时长/s	周期时长/s
①		140
②		140
③		140
④		140

### 4.2 优化结果

为了检验本文提出的基于车速引导的协调控制的有效性,并与常规协调控制方案(Maxband方案)进行对比。

本文优化方案:设定车速引导区间为进口道上游 300 m;车辆最小引导速度为 4.7 m/s,最大引导速度为 12.5 m/s,启动波的传递速度为 4.8 m/s;直行车流饱和和流率为 1 650 pch/h,其他车道饱和和流率为 1 550 pch/h;排队车辆的平均车头时距为 2 s,优化滚动步距为 10 s。

2 种方案均采用 VISSIM 进行仿真,仿真参数设置为:仿真周期为 4 500 s,仿真精度为 1 步/s,随机种子为 50。考虑到仿真初期的不稳定性,前 900 s 为仿真预热期,将 900~4 500 s 的仿真输出数据用于评价。

为了检验方案优化计算的中间过程,提取某周期的仿真结果,如下页表 3 和下页图 7 所示。

由表 3 可以看出:与 Maxband 方案相比,本文模型的相位差得到了优化,车速为动态车速;上行方向的绿波带宽增大了 14.3%,下行方向的绿波带宽增大了 6.2%,双向绿波带宽增大了 9.5%;上行和下行方向的不停车车辆数均有不同程度的增加。表明本文优化方案能通过调节相位差和车速,有效增大绿波带宽,减少停车次数。

为了检验优化方案的整体效益,选取高峰时段每小时内的平均行程时间、平均延误、平均停车次数作为评价指标,对 2 个方案进行比较,如下页表 4 所示。

表 3 某周期优化结果对比

Tab. 3 Comparison of results in one optimization cycle

方案	绝对相位差/s	上行方向			下行方向		
		车速/(m·s <sup>-1</sup> )	绿波带宽/s	不停车车辆数/pch	车速/(m·s <sup>-1</sup> )	绿波带宽/s	不停车车辆数/pch
Maxband	2→49→113→131	12.5	48	14	12.5	76	18
本文模型	2→47→111→139	11.7	56	17	11.1	81	24

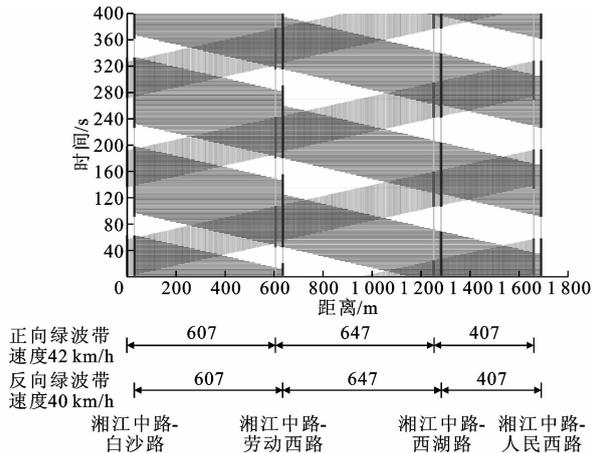


图 7 本文模型计算得到的绿波时空图

Fig. 7 Space-time diagram of green wave control based on the proposed model

表 4 不同模型的仿真结果对比

Tab. 4 Comparison of simulation results for different models

方案	上行方向			下行方向		
	平均行程时间/s	平均延误/s	平均停车次数	平均行程时间/s	平均延误/s	平均停车次数
Maxband	227.7	54.8	2.29	187.6	23.8	1.63
本文模型	214.1	41.2	1.43	180.2	16.4	0.95

由表 4 可看出,与 Maxband 方案相比,本文模型在平均行程时间、平均延误、平均停车次数均有改善。上行方向的平均行程时间由 227.7 s 减少为 214.1 s,降低 6.0%;平均延误由 54.8 s 减少为 41.2 s,降低 24.8%;平均停车次数由 2.29 减少为 1.43,减少 37.6%。下行方向的平均行程时间由 187.6 s 减少为 180.2 s,降低 3.9%;平均延误由 23.8 s 减少为 16.4 s,降低 31.1%;平均停车次数由 1.63 减少为 0.95,减少 41.7%。双向合计的平均行程时间降低 5%,平均延误降低约 28%,平均停车次数降低约 40%。

## 5 结语

(1)提出的城市干线信号协调控制与车速引导集成模型,以绿波带宽最大、车辆延误最小和停车次数最小为目标,同时优化车辆引导速度和交叉口信号配时参数,改善了当前协调控制策略中信号配时

被动适应车辆到达变化的不足,提高了交通控制的主动性。

(2)针对模型决策变量多维特性和优化方案实时性的要求,设计了基于粒子群的多目标搜索算法,并借助 VISSIM 与 MATLAB 搭建的仿真平台,以长沙市湘江中路 4 个连续交叉口为例,对本文模型进行了仿真实验。结果表明,相比于 Maxband 方案,本文模型能够减少平均延误约 28%,减少平均停车次数约 40%。

(3)本文假设所有车辆都能实现车辆-信号控制系统双向通信,而当前车联网技术仍处于初步发展阶段,后期也将经历自然车辆与网联汽车混行阶段。因此,下阶段必须研究不同车联网市场占有率下的控制问题。此外,本文选取的多个目标函数之间是否存在一致性或相互影响,也需要进一步研究。

## 参考文献:

### References:

- [1] LITTLE J D C. The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming[J]. Operations Research, 1966, 14(4): 568-594.
- [2] LIU Y, CHANG G L. An arterial signal optimization model for intersections experiencing queue spillback and lane blockage[J]. Transportation Research Part C, 2011, 19(1): 130-144.
- [3] 于德新, 田秀娟, 杨兆升, 等. 改进的干线协调信号控制优化模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2017, 51(10): 2019-2029.  
YU De-xin, TIAN Xiu-juan, YANG Zhao-sheng, et al. Improved arterial coordinated signal control optimization model[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2017, 51(10): 2019-2029.
- [4] PARR S A, KAISAR E. Critical intersection signal optimization during urban evacuation utilizing dynamic programming[J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2011, 3(1): 59-76.
- [5] 曲大义, 王孟飞, 李娟, 等. 基于交通波理论的干线相位差优化及其控制方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2017, 47(2): 429-437.  
QU Da-yi, WAN Meng-fei, LI Juan, et al. Offset opti-

- mization of arterial traffic based on traffic-wave theory and its control method[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2017, 47(2): 429-437.
- [6] HE Q, HEAD K L, DING J. PAMSCOD: Platoon-based arterial multi-modal signal control with online data[J]. Transportation Research Part C, 2012, 20(1): 164-184.
- [7] HAJBABAIE A, MEDINA J C, BENEKOHAL R F, et al. Traffic signal coordination and queue management in oversaturated intersection[R]. Illinois: University of Illinois, 2011.
- [8] ZHAO Y. Influence of signal phasing sequence and spacing on signal coordination[J]. Traffic Engineering & Control, 2012, 53(3): 120-126.
- [9] 唐克双, 孔涛, 王奋, 等. 一种改进的多带宽干线协调控制模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(7): 1002-1008.  
TANG Ke-shuang, KONG Tao, WANG Fen, et al. A modified MULTIBAND model for urban arterial coordinate control[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(7): 1002-1008.
- [10] ABU-LEBDEH G. Integrated adaptive-signal dynamic-speed control of signalized arterials[J]. Journal of transportation engineering, 2002, 128(5): 447-451.
- [11] ABU-LEBDEH G. Exploring the potential benefits of intelligidrive-enabled dynamic speed control in signalized networks[C]//TRB. Proceedings of 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC: TRB, 2010: 10-30.
- [12] CHEN S Y, SUN J, YAO J. Development and simulation application of a dynamic speed dynamic signal strategy for arterial traffic management[C]//ITSC. Proceedings of 14th IEEE Conference. New York: IEEE, 2011: 1349-1354.
- [13] 李鹏凯, 杨晓光, 吴伟, 等. 车路协同环境下信号交叉口车速引导建模与仿真[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(3): 136-140, 156.  
LI Peng-kai, YANG Xiao-guang, WU Wei, et al. Modeling vehicle speed guidance at signalized intersections under intelligidriverSM[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2012, 30(3): 136-140, 156.
- [14] 李鹏凯, 吴伟, 杜荣华, 等. 车路协同环境下多车协同车速引导建模与仿真[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(2): 134-139, 148.  
LI Peng-kai, WU Wei, DU Rong-hua, et al. Modeling and simulation of multi-vehicles cooperative speed guidance under connected vehicles[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2013, 31(2): 134-139, 148.
- [15] 张存保, 冉斌, 梅朝辉, 等. 车路协同下道路交叉口信号控制优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(3): 40-45.  
ZHANG Cun-bao, RAN Bin, MEI Chao-hui, et al. An optimization method of traffic signal control based on cooperative vehicle infrastructure system[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(3): 40-45.
- [16] YANG B W, WANG Y Z, HU J M, et al. A traffic efficiency promotion algorithm for urban arterial roads based on speed guidance[C]//ICCVE. Proceedings of 2013 International Conference on IEEE. New York: IEEE, 2013: 869-873.
- [17] 吴伟, 马万经, 杨晓光, 等. 车路协同环境下基于路径的信号协调优化模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2014, 44(2): 343-351.  
WU Wei, MA Wan-jing, YANG Xiao-guang, et al. Route based signal coordination control model within vehicle infrastructure integration environment[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(2): 343-351.
- [18] HEAD L, GETTMAN D, WEI Z P. Decision model for priority control of traffic signals[J]. Transportation Research Board, 2006(1978): 169-177.
- [19] 吴恩, 杨晓光, 吴震, 等. 基于遗传算法的干线协调控制参数共同优化[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(7): 921-926.  
WU En, YANG Xiao-guang, WU Zhen, et al. Parameters co-optimization for artery coordinated control based on genetic algorithm[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(7): 921-926.
- [20] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405-3411.  
WU Xiao-gang, LIU Zong-qi, TIAN Li-ting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3405-3411.
- [21] 贾树晋, 杜斌, 岳恒. 基于局部搜索与混合多样性策略的多目标粒子群算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(6): 813-818, 826.  
JIA Shu-jin, DU Bin, YUE Heng. Local search and hybrid diversity strategy based multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Control and Decision, 2012, 27(6): 813-818, 826.