

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2022.04.002

考虑断点成本的长干线分段绿波控制方法

余佳洁¹, 季彦婕^{1,2,3}, 卜卿⁴, 郑岳标⁵

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 东南大学 现代城市交通技术协同创新中心和江苏智能交通重点实验室, 江苏 南京 211189; 3. 东南大学 道路交通工程国家级实验教学示范中心, 江苏 南京 211189; 4. 莱斯国际(明斯克)信息技术有限公司, 白俄罗斯 明斯克 220030; 5. 南京莱斯信息技术股份有限公司, 中国 南京 210000)

摘 要: 为了解决交叉口数量较多的长干线绿波控制中绿波带宽较小或无可行带宽的问题, 在经典双向绿波控制模型算法的基础上, 建立考虑断点成本的长干线分段绿波控制算法. 通过 0-1 状态变量描述各交叉口是否为绿波分段点, 根据同一子段内部交叉口与不同子段之间交叉口的带宽关系及绿波传递关系, 调整优化求解算法中的带宽约束与整环约束, 考虑绿波分段点处的带宽损失, 以不含子段首个交叉口带宽的实际长干线带宽总和为优化目标, 构建考虑断点成本的长干线分段绿波控制求解算法. 通过算例, 对比 MAXBAND-81 经典模型与所提方法的求解结果. 研究结果表明, 相对于 MAXBAND-81, 利用所提算法能够有效地提高长干线协调控制绿波带宽, 提升长干线主路的通行效率; 当无法确定分段数限制时, 利用所提方法可以在全局范围内求得最优的绿波分段划分方法与长干线最大带宽和.

关键词: 交通工程; 分段绿波控制; 混合整数规划; 干线协调控制; MAXBAND 模型

中图分类号: U 491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-973X(2022)04-0640-09

Partitioned green-wave control scheme for long arterial considering breakpoint cost

YU Jia-jie¹, JI Yan-jie^{1,2,3}, BU Qing⁴, ZHENG Yue-biao⁵

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Jiangsu Province Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies and Jiangsu Key Laboratory of Intelligent Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Road and Traffic Engineering Education, Southeast University, Nanjing 211189, China; 4. Les International (Minsk) Information Technology Limited Company, Minsk 220030, Belarus; 5. Nanjing Les International Information Technology Limited Company, Nanjing 210000, China)

Abstract: An algorithm was proposed to optimize the subsystems partition method and signal coordination scheme for the long arterial considering breakpoint cost based on the classical signal coordination scheme model in order to prevent the occurrence of few or infeasible bandwidth in a long arterial signal coordination progression. Whether each intersection is a green wave segmentation point was described by a series of binary variables. The bandwidth and loop integer constraints in the algorithm were revised according to the different coordination connection between two intersections which belong to a same subsystem or not. The actual bandwidth sum with the loss at the beginning of each subsystem was taken as the optimization objective by considering the bandwidth loss at the breakpoint between two subsystems. The subsystems partition and signal coordination scheme for long arterial considering breakpoint cost was proposed. Results show that proposed model can effectively increase the subsystem bandwidth and improve the main arterial efficiency by comparing the solutions of MAXBAND-81 with proposed model. The optimal subsystem partition method and the maximum bandwidth sum can be obtained by proposed model in the global scope when the limit number of subsystems cannot be determined before operation.

Key words: traffic engineering; partitioned green-wave control; mixed integer program; arterial signal coordination scheme; MAXBAND

收稿日期: 2021-05-20. 网址: www.zjujournals.com/eng/article/2022/1008-973X/202204002.shtml

基金项目: 国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作资助项目(2018YFE0120100).

作者简介: 余佳洁(1996—), 女, 博士生, 从事交通信号控制的研究. orcid.org/0000-0003-4952-5185. E-mail: jiajieyu@seu.edu.cn

通信联系人: 季彦婕, 女, 教授. orcid.org/0000-0002-7172-3818. E-mail: jiyanjie@seu.edu.cn

干线绿波控制是通过合理设定干线交叉口的相位差、相序等控制参数,使得车队能够在该干线上实现连续通行,是提升交通效率、缓解交通拥堵的关键交通控制方法之一^[1-2]. Little^[3]首次提出完整的双向干线协调控制的数学描述与优化模型 MAXBAND,通过求解公共周期时长、绿波速度和相位差来最大化双向带宽之和. Little 等^[4]对 MAXBAND 进行改进,加入了左转相位的放行顺序,使得模型能够更普遍地适用于各类交叉口. Zhang 等^[1,5]致力于松弛 MAXBAND 模型中的各种假设,以获得更大的干线控制效益. Gartner 等^[5]通过为每一交叉口设定独立的带宽参数,构造 MULTIBAND 模型,实现了干线单一绿波带宽到可变绿波带宽的转化,获得了更好的干线控制效益. 在 MULTIBAND 模型的基础上, Zhang 等^[1]通过取消 MULTIBAND 绿波带中心对称的性质,获得了非对称形式的绿波带宽,优化了绿波带宽和,提升了干线协调控制效率. 协调控制的规模从干线拓展到多路径及网络.

在干线绿波优化模型中,干线所包含的交叉口越多,约束条件越多,则带宽越小,甚至导致无可行解. Tian 等^[6]依据交叉口的空间位置、交通流特征和交叉口排队情况,将长干线划分为若干子段,利用 PASSERII 给每一子段进行绿波控制方案设计,验证了该方法与传统的绿波控制相比,效果更好,但分步的操作使得方案设计工作量较大,且无法保证获得全局最优方案. Zhang 等^[7-8]建立子段划分与带宽优化一体的模型,用于长干线的分段绿波协调控制,可以从全局的角度对控制方案进行优化,但需要提前确定子段划分数量或目标函数中的各项目标权重,在信息不够完备的场景下难以判断输入变量的值是否合理,且二者均未考虑绿波断点处的带宽损失,导致所求方案的带宽总和高于实际值,易造成优化过程中的决策失误.

综上所述,以 MAXBAND 模型为基础发展的干线绿波协调控制理论与方法已经较成熟,但关于长干线分段绿波控制的研究较少,对长干线分段方法与断点成本方面的研究不够全面. 本文通过对长干线每一交叉口标注状态变量的方式,使得相邻交叉口能够灵活组合,在带宽优化过程中综合考虑子段交叉口的组合形式,借助状态变量剔除断点处的绿波带宽,获得最优的长干线分段方法与实际绿波带宽总和.

1 方法论

1.1 问题描述

图 1 中, S 为距离, t 为时间. 如图 1(a) 所示,当需要进行绿波控制的交叉口数量较多时,受每个交叉口的交通状态约束,绿波带宽往往较小,难以实现理想的控制效果. 在适当的位置打断绿波带,将长干线划分为若干子段进行绿波控制,每个子段的带宽与长干线带宽总和均能够得到较大的提升,如图 1(b) 所示. 为了寻找最优的子段划分方法,以 MAXBAND 经典模型为基础,以实际绿波带宽总和最大为目标,建立子段划分求解算法. 将子段划分动作定义为带宽优化过程中的决策变量,对目标函数及约束条件进行修改,完成子段划分与绿波控制的同步优化求解.

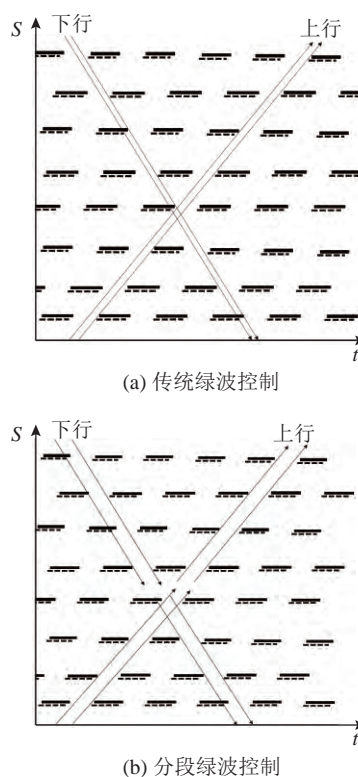


图 1 绿波控制对比时空图

Fig.1 Time-space diagram of green-wave control comparison

1.2 长干线分段划分方法

为长干线上每一交叉口设置状态变量 n_i , 用于记录子段划分信息. $n_i = 0$ 表示交叉口 i 为任意子段的首个交叉口; $n_i = 1$ 表示交叉口 i 不是任何子段的首个交叉口. 长干线被分段的数量与状态变量值为 0 的交叉口数量相等. 以包含 15 个交叉口的长干线为例,若各交叉口状态变量如图 2 所

交叉口编号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	12	13	14	15
状态变量 n_i	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1

子段 1
子段 2
子段 3

图 2 长干线划分示意图

Fig.2 Partition method of long arterial

示,则该长干线被分为 3 个子段,断点分别在交叉口 1、5、11 处,每个子段分别包含 4 个、6 个、5 个交叉口.状态变量为 0 的交叉口为每个分段绿波的首个交叉口,参与构成下游交叉口的绿波,并非单独独立出来.

长干线的第 1 个交叉口必然为第 1 个子段首个交叉口,如下所示:

$$n_1 = 0. \quad (1)$$

在绿波控制过程中,若长干线被分为过多子段,则会影响整条干线的控制效果.在信号设计时,限制可允许的最大分段数量为

$$\sum_{i=1}^N n_i \geq N - c. \quad (2)$$

式中: N 为长干线交叉口总数, c 表示长干线最多能被分为 c 个子段.

由于不同交叉口可能属于不同子段,即不属于同一条绿波带,带宽大小会产生差异,设置 b_i 和 \bar{b}_i 分别为交叉口 i 处的上行与下行绿波带宽.若 2 个相邻交叉口 i 和 $i+1$ 属于同一子段,则二者的带宽相等, $b_i = b_{i+1}$.若二者不属于同一子段,则带宽 b_i 和 b_{i+1} 之间无约束.为了将相邻交叉口之间的

这种带宽关系用数学方法进行表达,设定一个极大正常量 M .当交叉口 i 和 $i+1$ 属于同一子段时,交叉口 $i+1$ 必然不是任何一个子段的首个交叉口,状态变量 $n_{i+1} = 1$.当交叉口 i 和 $i+1$ 不属于同一子段时,交叉口 i 为某一子段最后一个交叉口,且交叉口 $i+1$ 为下一子段的第一个交叉口,有 $n_{i+1} = 0$.相邻交叉口之间的带宽关系可以表示为

$$-M(1 - n_{i+1}) \leq b_i - b_{i+1} \leq M(1 - n_{i+1}), \quad i = 1, 2, \dots, N-1; \quad (3)$$

$$-M(1 - n_{i+1}) \leq \bar{b}_i - \bar{b}_{i+1} \leq M(1 - n_{i+1}), \quad i = 1, 2, \dots, N-1. \quad (4)$$

当交叉口 i 和 $i+1$ 属于同一子段时,有 $n_{i+1} = 1$, $M(1 - n_{i+1}) = 0$,则式(3)可以转化为 $0 \leq b_i - b_{i+1} \leq 0$,即 $b_i = b_{i+1}$.当交叉口 i 和 $i+1$ 不属于同一子段时, $-M \leq b_i - b_{i+1} \leq M$,即 b_i 和 b_{i+1} 之间无约束.下行绿波带宽同理.

在 MAXBAND 经典模型中,整环约束(loop integer constraints)用来规定绿波在通过交叉口 i 后能够顺利在绿灯时间范围内穿过交叉口 $i+1$.原模型中的整环约束是利用上下行绿波带在图 3 中的几何关系进行构建的,通过图 3 中的各个变量分别表示 C 到 D 与 \bar{C} 到 \bar{D} ,如下所示^[4]:

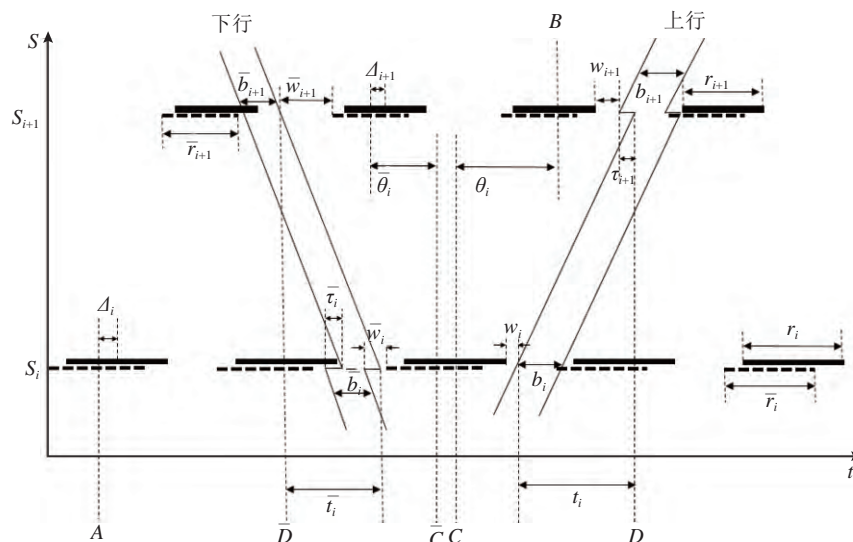


图 3 绿波控制的时空示意图

Fig.3 Time-space diagram of green-wave control

$$CD = \frac{1}{2}r_i + w_i + t_i = \tau_{i+1} + w_{i+1} + \frac{1}{2}r_{i+1} + \theta_i, \quad (5)$$

$$\bar{C}\bar{D} = \frac{1}{2}\bar{r}_i + \bar{w}_i - \bar{t}_i + \bar{l}_i = \bar{w}_{i+1} + \frac{1}{2}\bar{r}_{i+1} + \bar{\theta}_i. \quad (6)$$

式中: r_i 和 \bar{r}_i 分别为交叉口 i 的上行与下行红灯时长, w_i 为在交叉口 i 处上行绿波带最左侧距离最近的红灯终点的时间跨度, \bar{w}_i 为在交叉口 i 处下行绿波带最右侧距离最近的红灯起点的时间跨度, τ_i 和 $\bar{\tau}_i$ 分别为交叉口 i 处的上、下行排队清空时间, θ_i 和 $\bar{\theta}_i$ 分别为交叉口 i 和 $i+1$ 之间的上、下行相位差, t_i 和 \bar{t}_i 分别为绿波带从交叉口 i 到 $i+1$ 所需的上、下行时间. 相位差与周期之间的关系如下:

$$\theta_i + \bar{\theta}_i + \Delta_i - \Delta_{i+1} = m_i. \quad (7)$$

式中: Δ_i 为交叉口 i 处上下行红灯中点的偏移时长(见图 3); m_i 为周期长度的整数倍, 本文中时长相关的变量单位均为周期长度, 所以 m_i 为整数变量.

对式(5)~(7)进行初等变换, 可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(r_i + \bar{r}_i) + (w_i + \bar{w}_i) + (t_i + \bar{t}_i) &= (\tau_{i+1} + \bar{\tau}_i) + \\ (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1}) + \frac{1}{2}(r_{i+1} + \bar{r}_{i+1}) + m_i + (\Delta_{i+1} - \Delta_i). \end{aligned} \quad (8)$$

若交叉口绿波所覆盖的进口方向左转与直行不是同一相位或相位时长不同, 则需要判断左转相位在直行相位前端放行还是后端放行能够达到最优控制效果. 具体分析参见文献[4], 本文仅对关键结论进行罗列.

交叉口 i 的红绿灯时长之和等于一个完整的信号周期, 单位信号周期长度记为 1, 有 $r_i + g_i = 1$, $\bar{r}_i + \bar{g}_i = 1$, 其中 g_i 和 \bar{g}_i 分别为交叉口 i 处的上下行绿灯时长. 红灯时长可以分解为上下行公共红灯时长(即与绿波带垂直方向车流的放行时间)与对向左转时长, 即

$$r_i = R + \bar{l}_i, \quad (9a)$$

$$\bar{r}_i = R + l_i. \quad (9b)$$

式中: R 为上下行方向的公共红灯时长, l_i 和 \bar{l}_i 分别为上、下行车流在交叉口 i 处的左转绿灯放行时间.

定义 δ_i 与 $\bar{\delta}_i$ 分别表示左转相位在周期中位置的 0-1 变量, 且满足 $\delta_i + \bar{\delta}_i = 1$, 则有^[4]

$$\Delta_i = \frac{1}{2}[(2\delta_i - 1)l_i - (2\bar{\delta}_i - 1)\bar{l}_i]. \quad (9c)$$

根据式(9a)、(9b)和(9c), 式(8)可以转换为

$$\left. \begin{aligned} (w_i + \bar{w}_i) - (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1}) + (t_i + \bar{t}_i) + \delta_i l_i - \bar{\delta}_i \bar{l}_i - \\ \delta_{i+1} l_{i+1} + \bar{\delta}_{i+1} \bar{l}_{i+1} - m_i = (r_{i+1} - r_i) + (\bar{\tau}_i + \tau_{i+1}); \\ i = 1, 2, \dots, N-1. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

对于本文的研究对象, 同一子段内的相邻交叉口满足式(10)的约束, 但属于不同子段的相邻交叉口之间不受该约束, 所以对式(10)的约束进行修改, 可得

$$\left. \begin{aligned} -M(1 - n_{i+1}) \leq [(w_i + \bar{w}_i) - (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1}) + \\ (t_i + \bar{t}_i) + \delta_i l_i - \bar{\delta}_i \bar{l}_i - \delta_{i+1} l_{i+1} + \bar{\delta}_{i+1} \bar{l}_{i+1} - m_i] - \\ [(r_{i+1} - r_i) + (\bar{\tau}_i + \tau_{i+1})] \leq M(1 - n_{i+1}); \\ i = 1, \dots, N-1. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: M 为极大正常数.

除上述交叉口之间的约束关系, 须保证每一交叉口绿波带宽不超过该相位绿灯时长, 通过下式完成该约束:

$$w_i + b_i \leq 1 - r_i, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (12)$$

$$\bar{w}_i + \bar{b}_i \leq 1 - \bar{r}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

上下行绿波带宽之间的约束关系以及车流在相邻交叉口之间的路段上通行所花费时间的约束参照 MAXBAND 经典模型^[4], 如下所示:

$$(1 - k)\bar{b}_i \geq (1 - k)kb_i, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (14)$$

$$\frac{d_i}{f_i}z \leq t_i \leq \frac{d_i}{e_i}z, \quad i = 1, 2, \dots, N-1; \quad (15)$$

$$\frac{\bar{d}_i}{\bar{f}_i}z \leq \bar{t}_i \leq \frac{\bar{d}_i}{\bar{e}_i}z, \quad i = 1, 2, \dots, N-1; \quad (16)$$

$$\frac{d_i}{h_i}z \leq \frac{d_i}{d_{i+1}}t_{i+1} - t_i \leq \frac{d_i}{g_i}z, \quad i = 1, 2, \dots, N-2; \quad (17)$$

$$\frac{\bar{d}_i}{\bar{h}_i}z \leq \frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{i+1}}\bar{t}_{i+1} - \bar{t}_i \leq \frac{\bar{d}_i}{\bar{g}_i}z, \quad i = 1, 2, \dots, N-2. \quad (18)$$

式中: k 为下行绿波带宽相对于上行绿波带宽的权重; d_i 与 \bar{d}_i 分别为交叉口 i 到 $i+1$ 之间的上行距离和下行距离, 本文中两者相等; f_i 与 e_i 为上行车流在交叉口 i 到 $i+1$ 之间行驶速度的上限与下限; z 为周期时长的倒数; g_i^{-1} 和 h_i^{-1} 分别为上行绿波带在交叉口 i 处速度变化的上限与下限. 下行绿波带的相关参数同理.

据此, 可得将子段划分动作作为决策变量的绿波带宽优化模型 M1, 通过求解决策变量 b_i 、 \bar{b}_i 、 n_i 、 z 、 w_i 、 \bar{w}_i 、 t_i 、 \bar{t}_i 、 δ_i 、 $\bar{\delta}_i$ 、 m_i , 最大化长干线交叉口带宽总和.

$$\left. \begin{aligned} \text{M1: min } & \left[-\sum_{i=1}^N (b_i + k\bar{b}_i) \right]. \\ \text{s.t. 式(1)~(4), (11)~(18);} \\ & b_i, \bar{b}_i, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N; \\ & m_i \text{ 为整数变量, } n_i, \delta_i, \bar{\delta}_i \text{ 为 0-1 变量, } i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

M1 为混合整数线性规划 (mixed-integer linear program, MILP), 可以通过精确求解算法 (如分支定界法) 直接进行求解。

1.3 绿波断点成本

分析 M1 的划分原理可知, 当进行绿波控制的交叉口数量减少时, 绿波带宽优化过程中的约束减少, 相对于原情况, 求解结果会更好或不变。当绿波带断开时, 在每一子段绿波的首个交叉口处, 若车辆不是在绿波时间到达该交叉口, 则均需要等待才能够进入绿波带, 实现后续交叉口的连续通行。在每段绿波带的首个交叉口处应有带宽损失。

根据上述分析, 采用悲观方法对绿波断点处的带宽进行折减, 即假设断点处的带宽为 0。在实际中, 往往会有部分车队在绿波断点处恰好实现连续通行, 但因这个具有偶然性, 难以估计, 因此不纳入考虑。

由于每个交叉口都有状态变量 n_i , 当交叉口 i 为每个子段的首个交叉口时, $n_i = 0$, 其他情况 $n_i = 1$ 。剔除断点交叉口处绿波带宽的长干线带宽总和可以表示为

$$\sum_{i=1}^N n_i(b_i + k\bar{b}_i). \quad (20)$$

在约束条件不变的情况下, 将 M1 的目标函数替换为式 (20), 则模型转化为 M2。

$$\left. \begin{aligned} & \text{M2: } \min \left[- \sum_{i=1}^N n_i(b_i + k\bar{b}_i) \right]. \\ & \text{s.t. 式(1) ~ (4), (11) ~ (18);} \\ & b_i, \bar{b}_i, z, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N; \\ & m_i \text{ 为整数变量, } n_i, \delta_i, \bar{\delta}_i \text{ 为 0-1 变量, } i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

M2 是混合整数二次规划 (mixed-integer quadratic program, MIQP) 问题, 需要证明该优化模型的凸性。M2 中约束条件均为线性的, 为凸约束, 目标函数式 (21) 为多元二次函数, Hessian 矩阵半正定, 目标函数为凸函数; 因此, M2 为凸模型, 可以由 CPLEX 或 GUROBI 直接求得最优解。

2 算例分析

为了对比所提方法与 MAXBAND-81 模型的控制效果, 参考文献 [7] 的案例分析方法, 随机生成 20 个交叉口的流量数据进行算例分析。通过 Webster 理论获得每一交叉口的绿时分配情况, 相关流量数据如表 1 所示, 交叉口分布如图 4 所示。各路段行驶速度限速为 50 km/h, 交叉口为两相位信号控制, 东西向直行左转为同一相位、南北向直行左转为同一相位。交叉口处车道划分情况如图 5 所示, 东西向为双向三车道, 南北向为双向四车道, 各交叉口车道的划分情况一致。算例中的所有模型均通过 CPLEX 优化求解器进行求解。

表 1 长干线交叉口流量表

Tab.1 Traffic volume data of long arterial

交叉口编号	东进口流量/(pcu·h ⁻¹)			西进口流量/(pcu·h ⁻¹)			南进口流量/(pcu·h ⁻¹)			北进口流量/(pcu·h ⁻¹)		
	左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转
1	147	2523	297	30	534	63	60	1029	120	96	807	48
2	138	2328	273	30	519	60	72	1200	141	75	645	39
3	126	2163	255	30	489	57	57	945	111	129	1101	66
4	120	2043	240	27	438	51	78	1332	156	120	1014	60
5	117	1971	231	24	423	51	51	870	102	84	705	42
6	108	1833	216	24	408	48	45	750	87	90	771	45
7	102	1710	201	24	393	45	42	690	81	93	798	48
8	93	1602	189	24	390	45	36	636	75	69	582	33
9	87	1482	174	21	381	45	33	579	69	87	729	42
10	81	1392	165	24	384	45	33	537	63	72	600	36
11	75	1296	153	24	396	48	30	492	57	51	423	24
12	69	1194	141	24	411	48	27	450	54	57	489	30
13	66	1110	129	24	417	48	36	621	72	63	528	30
14	63	1056	123	24	420	48	33	585	69	72	609	36
15	60	1017	120	24	423	51	33	558	66	78	654	39
16	57	987	117	27	453	54	27	450	54	36	312	18

续表 1

交叉口编号	东进口流量/(pcu·h ⁻¹)			西进口流量/(pcu·h ⁻¹)			南进口流量/(pcu·h ⁻¹)			北进口流量/(pcu·h ⁻¹)		
	左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转
17	54	915	108	30	486	57	24	414	48	45	369	21
18	51	855	102	30	516	60	36	594	69	42	354	21
19	48	822	96	33	561	66	30	519	60	30	249	15
20	45	777	90	36	612	72	24	414	48	48	399	24

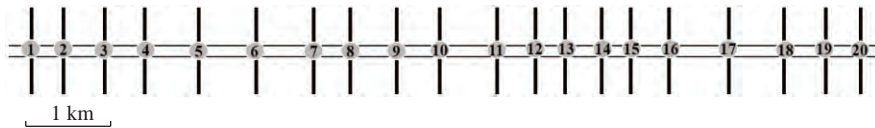


图 4 长干线交叉口分布

Fig.4 Distribution of long arterial intersections

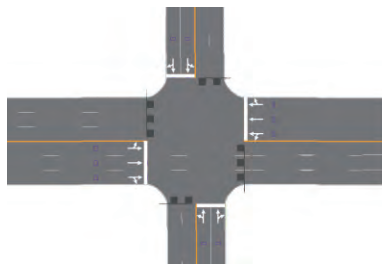


图 5 交叉口车道划分图

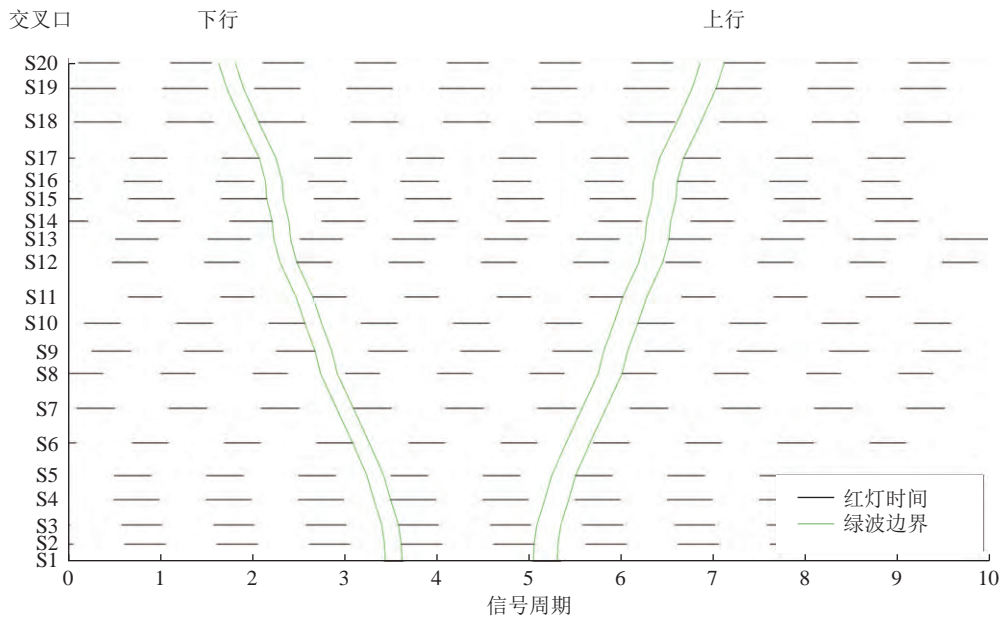
Fig.5 Lane division at intersection

MAXBAND-81 模型、本文模型($c=5$)的优化结果如表 2 所示,模型求解时间均小于 3 s. MAXBAND-81 模型的结果显示,上行和下行的绿波带宽分别为 0.26 和 0.18 个周期. 本文模型的结果显示,长干线被分为 5 段,分别包含 5 个、2 个、4 个、6 个和 3 个交叉口,子段双向绿波带宽分别为 0.51+0.29、0.59+0.28、0.58+0.19、0.51+0.30、0.49+0.08 个周期. 如图 6 所示,相对于 MAXBAND 求解结果,所提

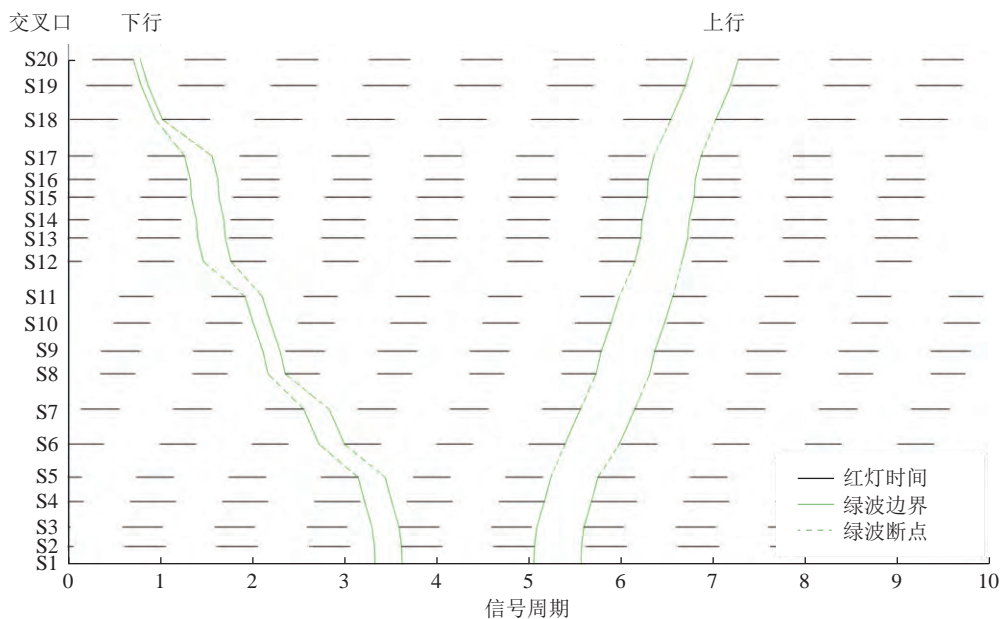
表 2 MAXBAND-81 及 M2 求解结果

Tab.2 Results of MAXBAND-81 and M2

交叉口序号	MAXBAND-81			M2($c=5$)			
	周期时长/s	相位差/周期	带宽/周期	周期时长/s	相位差/周期	子段编号	带宽/周期
1	150	—	0.26+0.18	80	—	1	0.51+0.29
2	150	0.05	0.26+0.18	80	0.05	1	0.51+0.29
3	150	0.01	0.26+0.18	80	0.08	1	0.51+0.29
4	150	0.99	0.26+0.18	80	0.16	1	0.51+0.29
5	150	0.90	0.26+0.18	80	0.14	1	0.51+0.29
6	150	0.08	0.26+0.18	80	0.38	2	0.59+0.28
7	150	0.49	0.26+0.18	80	0.55	2	0.59+0.28
8	150	0.37	0.26+0.18	80	0.72	3	0.58+0.19
9	150	0.67	0.26+0.18	80	0.77	3	0.58+0.19
10	150	0.55	0.26+0.18	80	0.88	3	0.58+0.19
11	150	0.99	0.26+0.18	80	0.91	3	0.58+0.19
12	150	0.84	0.26+0.18	80	0.14	4	0.51+0.30
13	150	0.95	0.26+0.18	80	0.20	4	0.51+0.30
14	150	0.19	0.26+0.18	80	0.19	4	0.51+0.30
15	150	0.13	0.26+0.18	80	0.27	4	0.51+0.30
16	150	0.99	0.26+0.18	80	0.28	4	0.51+0.30
17	150	0.05	0.26+0.18	80	0.25	4	0.51+0.30
18	150	0.55	0.26+0.18	80	0.53	5	0.49+0.08
19	150	0.49	0.26+0.18	80	0.68	5	0.49+0.08
20	150	0.52	0.26+0.18	80	0.70	5	0.49+0.08



(a) 双向绿波控制时空图



(b) 分段绿波控制时空图

图 6 模型结果对比时空图

Fig.6 Time-space diagram of MAXBAND and proposed model

模型的求解结果在绿波带宽方面有大幅度的提升.

对于本文模型,当 c 取不同值时,控制结果如表3所示.当 $c=4$ 时,长干线被分为4个子段,分别包含5个、6个、6个和3个交叉口.当 $c \geq 5$ 时,长干线的最优分段方法始终为5段,划分结果与绿波带宽均不再发生变化.结果表明,所提模型的控制结果不会随着绿波分段数量限制的增加而增加,而是在该范围内,寻找分段绿波带宽增大与断点成本增加之间的均衡点.在无法确定 c 值的情况下,可以将 c 设定为长干线交叉口总数,直接求得全局最优的长干线分段方法与带宽总和.

针对 MAXBAND 与所提模型($c=5$)的求解结果,通过 SUMO 对该控制方案进行仿真,如表4所示为主路的各项交通指标结果,包括平均速度 v_{avg} 、主路平均行程时间 t_{tr} 和所有通过主路的车辆总延误 D .仿真结果表明,相对于 MAXBAND 模型的控制效果,本文模型能够将主路行程时间和延误分别缩短了14.84%和29.15%,有效提升了长干线主路交通的运行效率.在 MAXBAND 与本文模型的控制下,主路各路段平均速度与总延误的对比如图7所示.

表 3 不同 c 取值下 M2 求解结果
Tab.3 Results of M2 with different c value

交叉口序号	$c = 4$			$c = 6$			$c = 10$		
	周期时长/s	子段编号	带宽/周期	周期时长/s	子段编号	带宽/周期	周期时长/s	子段编号	带宽/周期
1	150	1	0.51+0.29	150	1	0.51+0.29	150	1	0.51+0.29
2	150	1	0.51+0.29	150	1	0.51+0.29	150	1	0.51+0.29
3	150	1	0.51+0.29	150	1	0.51+0.29	150	1	0.51+0.29
4	150	1	0.51+0.29	150	1	0.51+0.29	150	1	0.51+0.29
5	150	1	0.51+0.29	150	1	0.51+0.29	150	1	0.51+0.29
6	150	2	0.56+0	150	2	0.59+0.28	150	2	0.59+0.28
7	150	2	0.56+0	150	2	0.59+0.28	150	2	0.59+0.28
8	150	2	0.56+0	150	3	0.58+0.19	150	3	0.58+0.19
9	150	2	0.56+0	150	3	0.58+0.19	150	3	0.58+0.19
10	150	2	0.56+0	150	3	0.58+0.19	150	3	0.58+0.19
11	150	2	0.56+0	150	3	0.58+0.19	150	3	0.58+0.19
12	150	3	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30
13	150	3	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30
14	150	3	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30
15	150	3	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30
16	150	3	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30
17	150	3	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30	150	4	0.51+0.30
18	150	4	0.49+0.08	150	5	0.49+0.08	150	5	0.49+0.08
19	150	4	0.49+0.08	150	5	0.49+0.08	150	5	0.49+0.08
20	150	4	0.49+0.08	150	5	0.49+0.08	150	5	0.49+0.08

表 4 主路交通运行指标
Tab.4 Main arterial performance

控制模型	$v_{\text{avg}}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	t_{tr}/s	$D/(10^4 \text{ s})$
MAXBAND	29.51	1287.02	47.13
分段绿波	31.47	1095.99	33.39

3 结 论

(1) 本文提出长干线分段绿波控制的求解算法, 该模型可以同时求解获得长干线的最优分段方法与分段绿波最大带宽总和. 通过为每一交叉口赋予 0-1 状态变量判断其是否为绿波分段点的方式, 将长干线分段步骤转化为决策变量, 调整

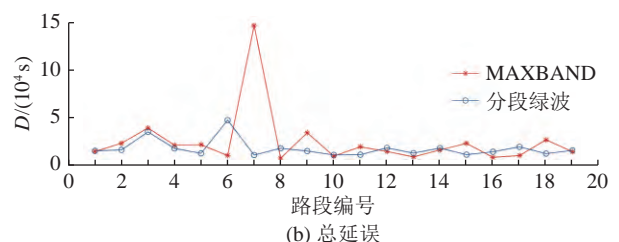
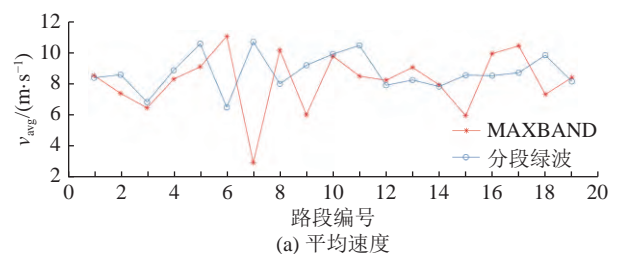


图 7 主路各路段交通运行指标的对比图

Fig.7 Travel characteristics of main outbound links

相关的约束条件, 获得完整的分段绿波优化控制方法.

(2) 本文在长干线分段绿波优化控制求解算法的基础上, 考虑绿波分段点的带宽损失. 通过交叉口状态变量与断点损失之间的关联, 对目标函数进行修正, 获得长干线分段绿波的实际带宽总和, 使得所提方法能够在全局范围内求得长干线最优分段数量与分段方法.

(3) 算例分析表明, 考虑断点成本的长干线分段绿波协调控制方法能够获得比经典 MAXBAND 模型更大的绿波带宽总和, 有效地提升主路交通运行效率, 在无法输入任何主观变量 (如 c 的取值) 的情况下, 通过所提模型可以求解获得合理的长干线分段方法.

(4) 本文模型求解结果的对比均处于理论的层面, 但在车辆的实际行驶过程中会出现许多不确定的因素, 后续需要对模型求解结果进行仿真验证.

参考文献 (References):

- [1] ZHANG C, XIE Y, GARTNER N H, et al. AM-band: an asymmetrical multi-band model for arterial traffic signal coordination [J]. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2015, 58: 515–531.
- [2] LE T, KOVÁCS P, WALTON N, et al. Decentralized signal control for urban road networks [J]. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2015, 58: 431–450.
- [3] LITTLE J D C. The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming [J]. **Operations Research**, 1966, 14(4): 568–594.
- [4] LITTLE J D C, KELSON M D, GARTNER N M. Maxband: a program for setting signals on arteries and triangular networks [J]. **Transportation Research Record**, 1981, 795: 40–46.
- [5] 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.
- [6] TIAN Z, URBANIK T. System partition technique to improve signal coordination and traffic progression [J]. **Journal of Transportation Engineering-ASCE**, 2007, 133(2): 119–128.
- [7] ZHANG L, SONG Z, TANG X, et al. Signal coordination models for long arterials and grid networks [J]. **Transportation Research Part C-emerging Technologies**, 2016, 71: 215–230.
- [8] MA W, ZOU L, AN K, et al. A partition-enabled multi-mode band approach to arterial traffic signal optimization [J]. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 2019, 20(1): 313–322.