

一种改进的多带宽干线协调控制模型

唐克双, 孔 涛, 王 奋, 李克平

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对经典的多带宽干线协调控制模型——MULTIBAND 中绿波带按照一条中心线严格对称造成的求解范围小和绿波带在绿灯时段内的位置不合理造成的绿波不稳定两个问题, 从取消绿波带中心线对称和增加绿波带位置约束两方面入手, 提出一种改进的 MULTIBAND 干线协调控制模型。改进后的模型提出了非对称式绿波的概念, 允许不同路段上的绿波具有一定的灵活性, 不拘泥于与其他路段绿波构成连续对称; 同时增加了绿波带位置的约束, 使得求解出的绿波带会尽量靠近上下游绿灯的中间位置, 提高绿波运行的稳定性。以临沂市沂蒙路 8 个相邻交叉口的干线协调控制设计为例, 用 VISSIM 仿真软件对改进后的模型进行了仿真测试和评价。结果表明, 改进后的模型在绿波带宽与绿灯时间比值方面增加了 7.1%, 在延误和停车次数方面分别减少了 20.8% 和 30.8%。

关键词: 城市道路交通; 干线协调控制; 多带宽干线协调控制模型; 非对称式绿波

中图分类号: U491.54

文献标志码: A

A Modified MULTIBAND Model for Urban Arterial Coordinate Control

TANG Keshuang, KONG Tao, WANG Fen, LI Keping

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This study presents a modified MULTIBAND model to address the defects of the conventional MULTIBAND model, the restricted solution scope due to the constraint of symmetric green-wave and the unstable green-wave performance due to improper location of green-wave within the whole green interval. The proposed model overcomes the constraint of the symmetric green-wave to acquire a more flexible green-wave and establishes another constraint on the green-wave location to allow the green-wave to be in the middle of the upstream/downstream green intervals as much as possible, the optimization model is modified accordingly. A simulation model based on the empirical data collected at 8

intersections along Yimeng road in the city of Linyi, China, is established to assess the performance of the proposed model. Results show that the proposed model is able to increase the total green-wave band width by 7.1%, and reduce the average delay and number of stops by 20.8% and 30.8% respectively, as compared with the conventional MULTIBAND model.

Key words: urban road traffic; arterial coordinate control; MULTIBAND model; asymmetrical green-wave

干线协调控制是指通过对主路上各个交叉口进行相互协调的配时方案设计, 使得干道上按规定车速(通过带速度)行驶的车辆获得尽可能不停顿的通行权^[1]。干线协调控制主要有如下优点: ①减少主路车辆的停车次数及延误, 提高主路的服务水平; ②交通流运行更加平稳, 可以提高最大交通通过量; ③车辆间的速度大小较为统一, 速度差较小, 提高了安全性; ④减少排队溢出的情况发生, 特别是交叉口间距较小的情况^[2]。

目前, 城市干线协调控制方法主要有两大类, 一种是基于延误最小的系统控制方法, 代表性模型有: TRANSYT-7F (traffic net-work study tool), SIGOP-III (traffic signal optimization program III) 等。最小延误法是基于对车队行驶中延误时间、停车次数的计算, 建立起实际路网中信号参数与交通性能指标的关系, 通过计算不同的信号参数组合下产生的车辆延误, 对比得到最小延误下的最佳信号配时。另一种是干线绿波带最大法。相比于延误最小法, 这种方法可以更直观地从绿波带看出协调控制的好坏, 并且需要的条件少, 为许多交通工程师所青睐。传统的绿波带最大法有两种: 一是图解法, 二是数解法。这两种方法原理简单, 使用广泛。20 世纪 60 年代以来, 国外学者对干线协调控制进行了大量的

研究. 1966年, Little等人最早提出了一种求解最大带宽的数学模型, 即混合整数线性规划模型^[3]. 在此基础上, 1981年 Little等人将此模型发展成更为成熟的绿波带最大模型——MAXBAND. 该模型可以自动产生使带宽达到最大的最优周期、相位顺序、相位差和绿波速度. 1988年, Chang等人将该模型发展为可以用于多条干路的路网协调控制模型, 即MAXBAND-86^[4]. 为了克服MAXBAND模型中所有路段采用同一带宽的问题, 1991年 Gartner等人 在MAXBAND的基础上开发了多带宽干线协调控制模型——MULTIBAND, 该模型允许不同的路段上可以有 不同的带宽, 并且将带宽与路段上的交通需求 联系起来^[5]. 1996年, Gartner等人 将MULTIBAND模型发展为一种可以用于网络协调 控制的模型, 即MULTIBAND-96^[6]. 2004年, Gartner等人又提出针对这一模型的优化算法, 该算 法可以大大缩短模型在用于大型网络时的计算 时间^[7].

国内一些学者也对MAXBAND模型提出了一些改进. 2008年卢守峰等人考虑了交通流的离散性, 将Robertson交通流离散模型引入到MAXBAND模型中去^[8]. 2009年陈宁宁等人考虑了动态红灯排队消散时间, 提出了一种针对简单两相位情况下的排队时间消散模型^[9]. 2010年Liang-Tay Lin等人在MAXBAND的基础上将模型的目标函数改为最大不停车次数, 得到一种新的混合整数非线性规划模型^[10].

1 问题描述及研究目的

虽然很多学者对MAXBAND模型和MULTIBAND模型做了很大的改进, 但是以上方法仍然存在不足.

1.1 绿波带中心对称

传统的MULTIBAND模型将参数 w 定义为上行绿灯启亮时刻到绿波带中心线之间的距离, 如图1所示. 交叉口是其上游绿波带和下游绿波带的连接点, 仅定义一个参数 w , 导致同一个交叉口的上游绿波带和下游绿波带在交叉口处有相同的中心点, 因此整条干路上绿波带的中心线是连续的, 即绿波带是以中心线左右对称. 这种连续的中心线可以保证绿波的连续性, 但是这也大大限制了模型的求解范围, 甚至造成无解的情况. 另外, 如果绿波带的一侧还有可用绿灯时间, 但由于中心线受到上下游两个

绿波带的限制, 这段时间并不能计算在绿波带范围内, 如图1中 b_2 右侧的绿灯时间. 因此造成计算绿波带宽与实际绿波带宽不一致的问题. 图1中: S_i 表示第 i 个交叉口, w_i 表示第 i 交叉口上行方向绿灯开始到绿波带中心线的距离, b_i 表示交叉口 S_i 和交叉口 S_{i+1} 之间的上行绿波带带宽, r_i 为第 i 交叉口的上行方向红灯时长.

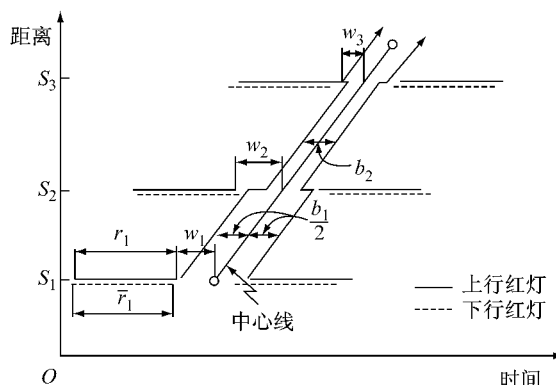


图1 传统MULTIBAND模型的绿波时间—距离示意图

Fig. 1 Time-space diagram of green-wave in the conventional MULTIBAND model

1.2 绿波带位置不当

MULTIBAND模型在计算绿波带的时候并没有考虑绿波带在上下游交叉口所处于绿灯时段内的位置, 如图中绿波带 b_2 所示. 在交叉口 S_2 处, 绿波带位于绿灯的中后期, 而在交叉口 S_3 处, 绿波带位于绿灯的前期. 交叉口 S_2 绿灯前期的车辆到达交叉口 S_3 时会因为红灯而停车排队, 造成后面绿波带内的车辆不能顺利通过下游交叉口. 这也给清空时间的设定带来了很大困难, 造成清空时间不足或者浪费等问题.

因此, 本文的研究目的是: 针对以上问题, 在MULTIBAND的基础上, 取消绿波带关于中心线对称的约束, 增加对绿波带在绿灯时段内的位置约束, 从而求得更大的带宽和更合理的绿波带; 采用实证数据构建交通仿真模型, 对改进的MULTIBAND干线协调控制模型进行测试和评价.

2 模型改进

2.1 取消绿波带的中心对称约束

为取消这种中心线连续的约束, 这里对参数进行重新定义, 如图2所示. 图中: w_i 为第 i 个交叉口上行绿灯开始到绿波带 b_{i-1} 中心线的时间, \overline{w}_i 为第 i 个交叉口下行绿灯结束到绿波带 \overline{b}_{i-1} 中心线的时间,

w'_i 为第 i 个交叉口上行绿灯开始到绿波带 b_i 中心线的时间, \overline{w}_i 为第 i 个交叉口下行绿灯结束到绿波带 \overline{b}_i 中心线的时间, b_{i-1} 和 \overline{b}_{i-1} 分别为第 $i-1$ 个交叉口与第 i 个交叉口之间上行和下行的绿波带。

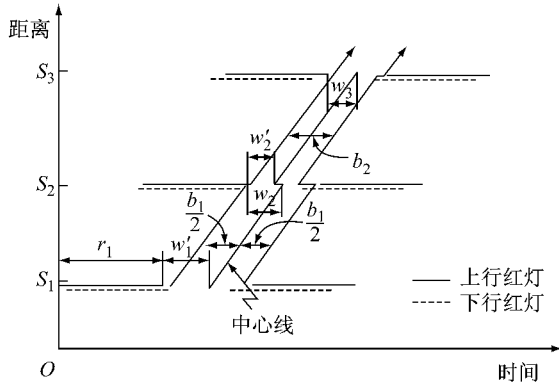


图 2 改进 MULTIBAND 模型的绿波时间—距离示意图
Fig. 2 Time-space diagram of green-wave in the modified MULTIBAND model

相应的约束方程改为

$$(w'_i + \overline{w}_i) - (w_{i+1} + \overline{w}_{i+1}) + (t_i + \overline{t}_i) + \delta_i l_i - \overline{\delta}_i \overline{l}_i - \delta_{i+1} l_{i+1} + \overline{\delta}_{i+1} \overline{l}_{i+1} - m_i = (r_{i+1} - r_i) + (\overline{\tau}_i + \tau_{i+1})$$

式中: t_i 和 \overline{t}_i 分别为第 i 交叉口与第 $i+1$ 交叉口之间上行和下行的车辆行程时间; δ_i 和 $\overline{\delta}_i$ 为一组 0-1 变量; l_i 和 \overline{l}_i 分别为上行和下行主路左转相位的绿信比; τ_i 和 $\overline{\tau}_i$ 分别为第 i 交叉口上行和下行的排队清空时间; r_i 和 \overline{r}_i 分别为第 i 交叉口上行和下行方向的红灯时长; m_i 为整数变量。

为了保障绿波带连续性, 这里增加如下约束条件:

$$\begin{aligned} u_i &\leq w'_i - w_i \leq v_i \\ \overline{u}_i &\leq \overline{w}_i - \overline{w}_i \leq \overline{v}_i \end{aligned}$$

式中: u_i 和 v_i 分别为第 i 个交叉口上行方向前后两个绿波带中心点允许的位置差的最小值和最大值; \overline{u}_i 和 \overline{v}_i 分别为第 i 个交叉口下行方向前后两个绿波带中心点允许的位置差的最小值和最大值。取值过大或者过小会影响带宽的连续性, 如果接近于 0 则增加带宽的效果不明显, 文中分别取 -3.5 s 和 3.5 s。

2.2 增加绿波带位置约束

如前所述, 传统的 MULTIBAND 模型不对绿波带在绿波时段中的位置进行约束。考虑到红灯期间交叉口排队的存在以及车速的波动性, 理想的带宽是绿波带尽量位于上下游交叉口绿灯时段中心的两侧, 避免车辆到达下一个交叉口时进行排队或者等待下一个周期的绿灯, 如图 3 所示。图中: G_i

和 \overline{G}_i 分别为第 i 交叉口上行和下行方向绿灯时长; 线 1 是过 G_i 中心点与绿波带平行的线, 线 2 是 G_i 和 G_{i+1} 中心点的连线; η_i 和 $\overline{\eta}_i$ 分别为 G_{i+1} 和 \overline{G}_i 的中心点到线 1 的水平距离。根据图 3, 则有如下等式成立:

$$\eta_i = w_{i+1} - w'_i + \frac{1}{2}(G_i - G_{i+1})$$

$$\overline{\eta}_i = \overline{w}_{i+1} - \overline{w}_i + \frac{1}{2}(\overline{G}_i - \overline{G}_{i+1})$$

令 x_i, y_i 和 $\overline{x}_i, \overline{y}_i$ 分别为 η_i 和 $\overline{\eta}_i$ 的上下界, 则有

$$x_i \leq w_{i+1} - w'_i + \frac{1}{2}(G_i - G_{i+1}) \leq y_i$$

$$\overline{x}_i \leq \overline{w}_{i+1} - \overline{w}_i + \frac{1}{2}(\overline{G}_i - \overline{G}_{i+1}) \leq \overline{y}_i$$

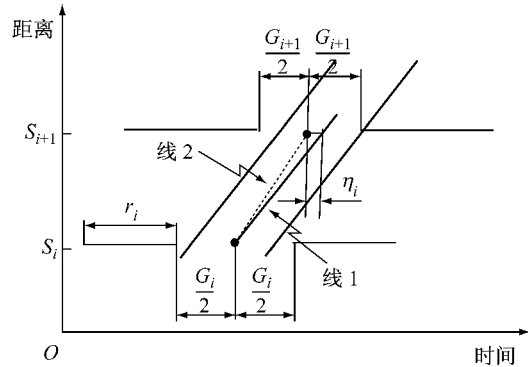


图 3 绿波带位置约束示意图

Fig. 3 Illustration of green-wave location constraint

2.3 优化模型

根据以上讨论, 在 MULTIBAND 模型的基础上, 取消绿波带对称的约束, 增加绿波带位置约束, 可得到改进后的干线协调优化求解模型, 具体如下:

$$\max B = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (a_i b_i + \overline{a}_i \overline{b}_i)$$

$$\text{s. t. } (1 - k_i) \overline{b}_i \geq (1 - k_i) k_i b_i, \quad i = 1, \dots, n-1$$

$$1/C_2 \leq z \leq 1/C_1$$

$$\left. \begin{aligned} (1/2)b_i &\leq w'_i \leq (1-r_i) - (1/2)b_i \\ (1/2)b_i &\leq w_{i+1} \leq (1-r_{i+1}) - (1/2)b_i \\ (1/2)\overline{b}_i &\leq \overline{w}_i \leq (1-\overline{r}_i) - (1/2)\overline{b}_i \\ (1/2)\overline{b}_i &\leq \overline{w}_{i+1} \leq (1-\overline{r}_{i+1}) - (1/2)\overline{b}_i \end{aligned} \right\},$$

$$i = 1, \dots, n-1$$

$$(w'_i + \overline{w}_i) - (w_{i+1} + \overline{w}_{i+1}) + (t_i + \overline{t}_i) + \delta_i l_i - \overline{\delta}_i \overline{l}_i -$$

$$\delta_{i+1} l_{i+1} + \overline{\delta}_{i+1} \overline{l}_{i+1} - m_i = (r_{i+1} - r_i) + (\overline{\tau}_i + \tau_{i+1}),$$

$$i = 1, \dots, n-1$$

$$\left. \begin{aligned} (d_i/f_i)z &\leq t_i \leq (d_i/e_i)z \\ (\overline{d}_i/\overline{f}_i)z &\leq \overline{t}_i \leq (\overline{d}_i/\overline{e}_i)z \end{aligned} \right\}, \quad i = 1, \dots, n-1$$

$$\left. \begin{aligned} (d_i/h_i)z &\leq (d_i/d_{i+1})t_{i+1} - t_i \leq (d_i/g_i)z \\ (\overline{d}_i/\overline{h}_i)z &\leq (\overline{d}_i/\overline{d}_{i+1})\overline{t}_{i+1} - \overline{t}_i \leq (\overline{d}_i/\overline{g}_i)z \end{aligned} \right\},$$

$$\begin{aligned}
& i = 1, \dots, n-2 \\
& \left. \begin{aligned} x_i &\leq w_{i+1} - w'_i + (1/2)(G_i - G_{i+1}) \leq y_i \\ \overline{x_i} &\leq \overline{w_{i+1}} - \overline{w'_i} + (1/2)(\overline{G_i} - \overline{G_{i+1}}) \leq \overline{y_i} \end{aligned} \right\} \\
& i = 1, \dots, n-2 \\
& \left. \begin{aligned} u_i &\leq w'_i - w_i \leq v_i \\ \overline{u_i} &\leq \overline{w'_i} - \overline{w_i} \leq \overline{v_i} \end{aligned} \right\}, i = 1, \dots, n-2 \\
& b_i, \overline{b_i}, z, w_i, \overline{w_i}, w'_i, \overline{w'_i}, t_i, \overline{t_i}, \tau_i, \overline{\tau_i} \geq 0 \\
& \delta_i, \delta_{i+1} \text{ 为 } 0-1 \text{ 变量} \\
& m_i \text{ 为整数变量}
\end{aligned}$$

式中: n 为交叉口数量; a_i 和 $\overline{a_i}$ 分别为上行和下行第 i 个带宽的权重系数, 一般根据交叉口间的路段饱和度和速度来确定; k_i 为下行带宽相对于上行带宽的目标比率, 一般用于考虑到早晚高峰潮汐现象, 而希望偏向某一个方向的带宽; C_1, C_2 为周期的下限和上限; d_i 和 $\overline{d_i}$ 分别为上行和下行方向交叉口 S_i 与交叉口 S_{i+1} 停车线间的距离; e_i 和 f_i 分别为交叉口 S_i 和交叉口 S_{i+1} 间路段上允许的上行最小和最大行驶车速; $\overline{e_i}$ 和 $\overline{f_i}$ 分别为交叉口 S_i 和交叉口 S_{i+1} 间路段上允许的下行最小和最大行驶车速; g_i 和 h_i 分别为上行相邻路段间允许的速度变化范围的下界和上界; $\overline{g_i}$ 和 $\overline{h_i}$ 分别为下行相邻路段间允许的速度变化范围的下界和上界; z 为周期的倒数。

改进后的模型共有 $26n-32$ 个约束方程, $8n-5$ 个连续变量, $n-1$ 个整数变量, $2n$ 个 0-1 变量。

3 计算实例及分析

3.1 调查地点

本论文选择临沂市沂蒙路 8 个相邻交叉口的干线协调控制来进行测试。沂蒙路为承担市区南北向通勤交通的一条主干路, 包括两个 T 型交叉口(开阳路、红旗路)和一个含有单行道的交叉口(洗砚池路西进口只有出口道, 没有进口道), 各交叉口间距如图 4 所示。其中主路上下行均有 3 条直行或者直右车道, 且均设有左转专用车道和中央分隔栏, 路段限速为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

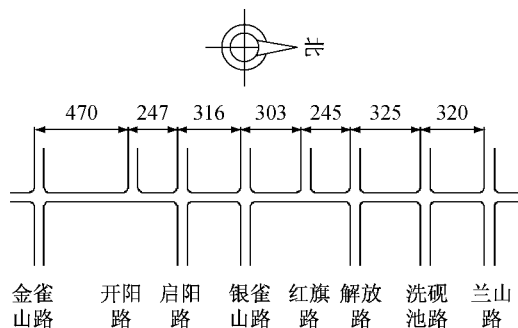


图4 沂蒙路干线协调控制交叉口示意图(单位:m)

Fig.4 The arterial coordinate control intersections along Yimeng Road (unit:m)

采用人工调查法对各交叉口进行交通量调查, 调查时间为 2011 年 8 月 18 日上午 9:00 到 10:00, 属于平峰时段, 各交叉口的调查流量如表 1 所示。

表1 沂蒙路各交叉口流量

交叉口	东进口			西进口			南进口			北进口		
	左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转
兰山路	68	75	120	116	94	139	200	1 483	122	206	1 665	158
洗砚池路	204	173	138	0	0	0	153	1 667	153	154	1 501	220
解放路	549	0	349	267	349	145	0	1 357	296	258	1 446	0
红旗路	0	0	0	447	0	246	319	1 207	0	0	1 377	764
银雀山路	215	304	240	253	251	198	209	1 032	287	174	1 211	238
启阳路	55	15	80	72	15	106	217	1 377	71	154	1 387	82
开阳路	0	0	0	224	0	263	285	1 442	0	0	1 396	151
金雀山路	244	1 024	631	264	941	311	281	831	263	487	838	336

根据调查流量以及车道功能划分情况, 利用 Webster 最佳周期公式对各交叉口进行信号配时。求得周期最大交叉口为银雀山路交叉口, 周期为 140 s。将之确立为关键交叉口, 将其他交叉口周期调整到 140 s, 得到各交叉口的各相位阶段的绿信比情况, 如表 2 所示。

主路方向信号设置允许搭接相位的存在, 相位搭接的 4 种基本结构如图 5 所示。

3.2 约束条件的计算

3.2.1 周期约束

根据计算得到的关键交叉口的周期 140 s, 这里确定周期的可取值范围为 $130 \sim 150 \text{ s}$, 即 $0.00667 \leq z \leq 0.00769$ 。

3.2.2 速度约束

根据沂蒙路路段限速 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 结合道路等级, 这里确定路段上允许的速度范围为 $36 \sim 54 \text{ km}$ 。

$\cdot \text{h}^{-1}$, 即 $e_i = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $f_i = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

表 2 各交叉口各相位绿信比

Tab.2 Phase splits of different intersections

交叉口	主路 直行	主路 左转	支路 相位 1	支路 相位 2	相位 搭接
兰山路	0.488	0.172	0.275		
洗砚池路	0.423	0.160	0.353		
解放路	0.353	0.086	0.183	0.264	
红旗路	0.338	0.249	0.349		
银雀山路	0.253	0.139			0.494
启阳路	0.531	0.245	0.16		
开阳路	0.471	0.191	0.253		
金雀山路	0.207	0.220	0.252	0.207	

注:支路只有 1 个相位的时候表中只存在支路相位 1,支路有 2 个相位的时候存在支路相位 1 和支路相位 2,其中银雀山路支路存在相位搭接情况。

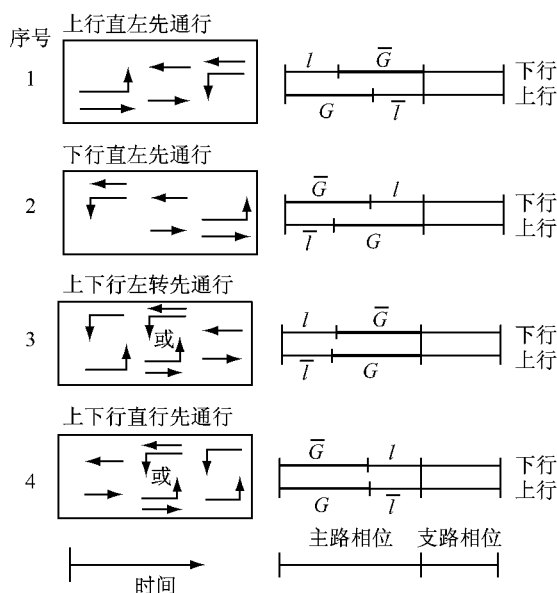


图 5 相位搭接的 4 种基本相位结构图

Fig.5 Four possible overlapping phase patterns

3.2.3 速度变化约束

虽然路段上允许的速度为 $36 \sim 54 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,但是车辆在运行中要求一定的平稳性,相邻路段间的速度波动范围不能超过一定的阈值.这里限定相邻路段间的速度变化范围是 $6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,即 $-1/h_i = 1/g_i = 0.0089 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$.

3.2.4 绿波带中心线约束

传统的 MULTIBAND 模型的绿波带中心线是连续的,即交叉口上游绿波带和下游绿波带的中心线的偏差为 0.改进的模型打破了中心线连续这一约束条件,同时为了保障绿波带的连续性,设定一个可允许的偏差范围.通过对 $1 \sim 7 \text{ s}$ 不同的偏差值进行测试,发现当偏差值大于 3.5 s 时,延误开始增大,如图 6 所示.因此,这里设置为 3.5 s ,即 $-u_i = v_i =$

0.025 .

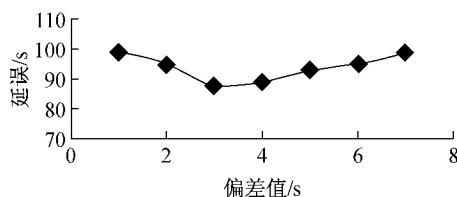


图 6 延误与偏差值的关系

Fig.6 Relationship between the estimated delay and deviation values of $u_i (v_i)$

3.2.5 绿波带位置约束

为了减少路段上一些小的出入口和非机动车的干扰,理想的绿波带应该位于绿灯时段的两端,但是实际的路网中并不一定能满足这种要求.因此过于严格的约束会导致无解的情况;而过于宽松的约束达不到好的约束效果.这里根据各交叉口的绿灯时长来确定约束的阈值.对于一般的路段,相邻交叉口绿灯中心连线与绿波带偏差允许的范围是 15 s ,即 $-x_i = y_i = 0.11, i = 1, 3, 4, 5, 6$,由于交叉口 2 和 3, 7, 8 的绿灯时间较长,较大的偏差量也能取得较大的带宽,因此为了减少对其他绿波带的影响取 $-x_i = y_i = 0.14, i = 2, 7$.

下行方向的取值与上行方向一致.

3.2.6 带宽系数

绿波带各路段的带宽系数的确定,除了考虑路段的饱和度情况以外,还综合考虑了道路条件以及现状交通情况.由于红旗路和解放路之间间距较小,交通运行条件较差,取 $a_5 = \bar{a}_5 = 2$,取 $\bar{a}_1 = 1.5$,其他带宽系数均取值为 1.

3.3 模型求解

利用 lingo 软件进行计算求解,目标函数为各路段带宽的加权和.这里分别对原模型和改进的模型求解,根据计算求得的各参数值计算相位差 φ .相邻交叉口相位差计算公式为

$$\varphi_i = \overline{w_{i-1}} + t_{i-1} - w_i - \tau_i$$

改进前后的两种方案计算得出的参数分别如表 3 所示,其中周期均为 131 s .8 个交叉口的饱和度均小于 0.9,平均饱和度在 0.75 左右,比较适合采用双向绿波的协调控制.以金雀山路南进口直行相位为基准,求其他交叉口对应相位的相位差.

原模型求解得到的绿波时空图如图 7 所示.改进的模型求解的绿波时空图如图 8 所示.

3.4 仿真测试与验证

为了检验模型是否有效,这里对计算结果用 Vissim 5.2 进行仿真分析.首先建立仿真模型并进

表 3 两种模型的信号控制方案参数
Tab.3 Signal control parameters of the two models

交叉口	饱和度	南北向 行人最短 绿灯时间/s	南北向 绿灯 时间/s	传统 MULTIBAND 模型				改进 MULTIBAND 模型			
				相位 结构	相位差	上行速度/ (km·h ⁻¹)	下行速度/ (km·h ⁻¹)	相位 结构	相位差	上行速度/ (km·h ⁻¹)	下行速度/ (km·h ⁻¹)
兰山路	0.71	33	66	1	0	54	46	1	0	50	43
洗砚池路	0.82	17	57	2	1	48	41	2	9	44	39
解放路	0.89	28	47	1	46	45	44	1	38	40	36
红旗路	0.76	28	45	4	72	44	40	2	80	43	39
银雀山路	0.89	33	34	2	86	40	36	1	112	48	43
启阳路	0.53	17	71	1	120	42	39	1	120	54	48
开阳路	0.57	20	64	2	130	38	36	2	3	48	43
金雀山路	0.76	27	29	1	46			1	31		

注:相位结构根据图 5 中的顺序进行编号,上行指由南向北,下行指由北向南.相邻交叉口间的速度放在前一个交叉口对应的一行,如兰山路与洗砚池路之间上行速度 54 km·h⁻¹对应兰山路一行.

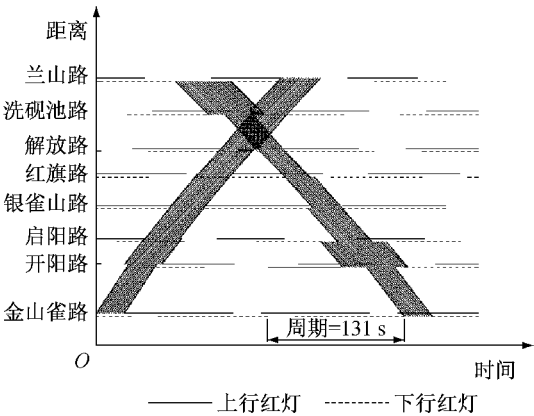


图 7 传统 MULTIBAND 模型求解得到的绿波时空图
Fig.7 Green-wave scheme based on the conventional MULTIBAND model

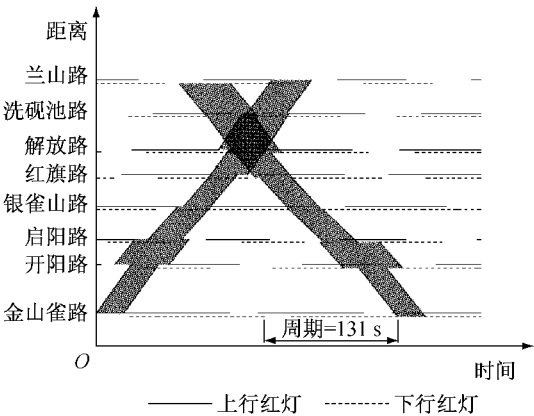


图 8 改进的 MULTIBAND 模型求解得到的绿波时空图
Fig.8 Green-wave scheme based on the modified MULTIBAND model

行有效性检验,如图 9 所示.对仿真模型进行检验的指标有路段断面流量、路网 OD 流量和车速分布情况^[11-12].图中数据采集点 1 和数据采集点 2 分别采集仿真模型中相应路段的流量,而延误检测器可以采集到经过延误检测区段的 OD 流量.OD 流量可以

通过各交叉口的调查流量用宏观 VISUM 软件进行反推得出.将模型中采集到的流量与实际调查和 OD 反推流量进行对比,如表 4 所示.

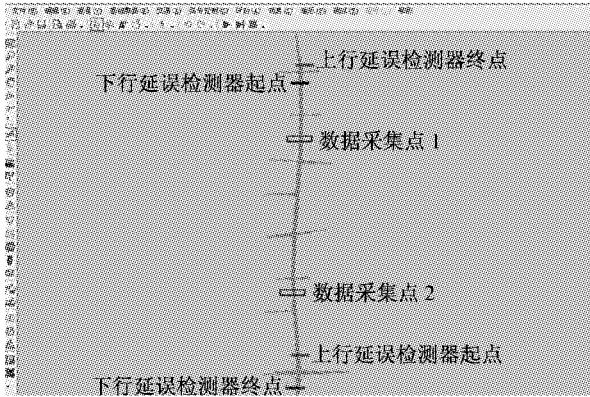


图 9 Vissim 仿真模型
Fig.9 Vissim simulation model

表 4 仿真模型交通流量有效性检验结果
Tab.4 Traffic volume validation results of the simulation model

流量	采集点 1		采集点 2		OD	
	上行	下行	上行	下行	上行	下行
采集流量/pcu	1 924	1 765	1 702	1 577	299	313
调查流量/pcu	1 973	1 704	1 665	1 547	315	336
误差/%	-2.48	3.58	2.22	1.94	-5.08	-6.85

仿真模型检验的结果表明,流量误差均在可接受范围内.另外,沂蒙路限速为 50 km·h⁻¹,实际观测的路段车流速度分布在 40~60 km·h⁻¹,仿真模型中设定的速度范围为 36~54 km·h⁻¹,与实际路网接近.流量和速度的检验结果表明仿真模型可靠.

用仿真模型来分析改进模型的效果,进行分析的主要指标为主路车辆的停车次数和延误,仿真时间为 5 000 s,分析指标数据取 600 s 到 4 200 s 之间的数据,随机种子为 42.仿真模型中测量延误和停车

次数的区间为第 1 个交叉口的出口道至第 8 个交叉口的出口道,即车辆连续通过 7 个交叉口的延误和停车次数。根据模型计算出来的各路段带宽值,计算实际带宽总和 B' ,带宽总和的计算公式为

$$B' = \sum_{i=1}^7 (b_i + \bar{b}_i)$$

计算及仿真结果如表 5 所示,结果表明两种模型产生的系统周期均为 131 s,改进的 MULTIBAND 模型和传统的 MULTIBAND 模型相比,在系统周期一致的前提下,绿波带宽与绿灯时间比值增加了 7.1%,延误和停车次数分别减少了 20.8%和 30.8%。

表 5 计算及仿真结果

Tab.5 Calculation and simulation results

两种模型及比较	绿波带宽/ 绿灯时间	延误/ s	停车次数/ 次
传统的 MULTIBAND 模型	0.649	110.0	2.14
改进的 MULTIBAND 模型	0.696	87.1	1.48
改善效果/%	7.1	20.8	30.8

注:由于每个交叉口的绿灯时间和绿波带宽度都不同,第 2 列中的绿波带宽与绿灯时间的比值为主路方向所有路段绿波带宽总和除以所有交叉口主路方向绿灯时长总和。

4 结论

本文通过取消绿波带中心对称约束,增加相邻绿波带中心点位置差的约束,扩大了模型的求解范围,同时保障了绿波带的连续性。通过增加绿波带位置约束,使求出的绿波带位置更加合理。增加约束条件后的模型,带宽所占绿灯时间的比例依然可以增加 7.1%,从而更能适应于交叉口较多的干线协调控制。改进后的模型,主路车辆的延误和停车次数分别减少 20%和 30%以上,说明模型可以有效地提高干线协调控制效果。

由于改进后的模型对绿波带位置进行了约束,能够一定程度上减少红灯期间排队车辆对绿波效果的影响。然而,这并不能避免排队车辆较多的情况下,对主路绿波的影响。模型中虽然存在清空时间参数 τ ,但是 τ 的大小需要事先确定才能代入模型计算,且给定的值并不能保证与模型计算出的结果一致。因此,做好干线协调控制还需要解决清空时间与模型统一的问题,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨佩昆,张树升. 交通管理与控制[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社,1999.
YANG Peikun, ZHANG Shusheng. Traffic management and control[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [2] Institute of Transportation Engineers. Transportation and traffic engineering handbook[M]. 2nd ed. Uppersaddle River: Prentice-Hall, 1982.
- [3] Little J D C. The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming[J]. Operations Research, 1966, 14:568.
- [4] Chang E C P, Cohen S L, Liu C C, et al. MAXBAND-86: program for optimizing left turn phase sequence in multi-arterial closed networks[J]. Transportation Research Record 1181, 1988: 61.
- [5] Gartner N H, Assmann S F, Lasaga F, et al. A multi-band approach to arterial traffic signal optimization [J]. Transportation Research, 25B, 1991:55.
- [6] Stamatiadis C, Gartner N H. MULTIBAND-96: a program for variable-bandwidth progression optimization of multi-arterial traffic networks[J]. Transportation Research Record 1554, 1996: 9.
- [7] Gartner N H, Chronis Stamatiadis. Progression optimization featuring arterial-and route-based priority signal networks[J]. Intelligent Transportation System, 2004, 8(2):77.
- [8] LU Shoufeng, LIU Ximin, DAI Shiqiang, et al. Revised MAXBAND model for bandwidth optimization of traffic flow dispersion [C]//2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control and Management, Guangzhou: [s.n.], 2008:862-866.
- [9] 陈宁宁,何兆成,余志. 考虑动态红灯排队消散时间的改进 MAXBAND 模型[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2009, 33(5): 843.
CHEN Ningning, HE Zhaocheng, YU Zhi, Revised MAXBAND model considered variable queue clearance time[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2009, 33(5): 843.
- [10] Lin Liangtay, Tung Liwei, Ku Hsinchuan. Synchronized signal control model for maximizing progression along an arterial[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(8): 727.
- [11] 孙剑,刘好德,李克平. 城市干道交通信号协调控制仿真优化[J]. 同济大学学报:自然科学版,2009, 37(11): 1467.
SUN Jian, LIU Haode, LI Keping. Simulation optimization for urban arterial coordinate control [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(11):1467.
- [12] 孙剑,李克平. 微观交通系统仿真模型可信性评价[J]. 计算机仿真, 2010, 27(1): 275.
SUN Jian, LI Keping. Credibility evaluation for micro traffic simulation model[J]. Computer Simulation, 2010, 27(1): 275.