

通用干道双向绿波协调控制模型及其优化求解

卢 凯, 徐建闽, 陈思溢, 李 林

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对干道交叉口进口不同放行方式的实际需求, 利用绿波协调控制中的时距分析方法, 建立了通用干道双向绿波协调控制模型, 设计了基于控制模型的信号配时优化流程, 并利用混合整数线性规划方法实现了控制模型的优化求解. 模型算法将不受进口放行方式与路段行驶速度的限制, 能够遍历所有存在的最佳信号配时设计方案, 且易于通过计算机编程实现其优化求解. 算例分析表明, 利用通用干道双向绿波协调控制模型进行交通信号协调配时设计, 能够获得更为精确完整的最佳信号配时设计方案, 具有较强的科学合理性.

关键词: 交通工程; 双向绿波; 时距图; 放行方式; 混合整数线性规划; 通过带宽度

中图分类号: U491.5+4 **文献标识码:** A

A general model of bidirectional green wave for coordinate control of arterial road and its optimization solution

LU Kai, XU Jian-min, CHEN Si-yi, LI Lin

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Considering the actual demand for different traffic released modes, we developed a general model of bidirectional green wave for the coordinate control of arterial road by using the method of time-space analysis. Signal timing optimization process based on the coordinate control model is designed, and the control model is solved by the method of mixed-integer linear programming(MILP). The algorithm is not constrained by either the traffic released mode or the link traffic speed; it finds out all possible optimal signal timing schemes by a simple computing programming. The example shows that the general model method can obtain optimal signal timing schemes more accurately and perfectly than the algebraic method.

Key words: traffic engineering; bidirectional green wave; time-space diagram; traffic released mode; mixed-integer linear programming (MILP); green wave bandwidth

1 引言(Introduction)

干道绿波协调控制是将干道上的多个交叉口以一定方式联结起来作为研究对象, 同时对各个交叉口进行相互协调的配时方案设计, 使得尽可能多的干道行驶车辆可以获得不停顿的通行权. 干道绿波带设计方法是通过追求绿波通行时间与公共信号周期比值的最大化, 从而确定干道协调控制系统的信号配时参数, 即以车辆连续通过带带宽作为评价指标来研究干道配时方案的协调控制效果.

常用的干道绿波协调控制算法有: 图解法、数解法、MAXBAND法等. 其中, 图解法^[1,2]是通过作图的方法, 确定协调控制系统的公共信号周期与相位差; 数解法^[1,3,4]是通过数值计算的方法, 寻求最小偏移绿信比, 求解协调控制配时参数; MAXBAND法^[5,6]则是通过建立绿波带宽度的线性规划模型, 利用混合整数线性规划方法实现信号配

时参数的优化求解. 然而, 上述绿波协调控制算法主要适用于采用单一放行方式的干道交叉口群, 即所有交叉口干道方向均采用进口对称放行方式或均采用进口单独放行方式, 对于采用混合放行方式的干道交叉口群, 即部分交叉口干道方向采用进口对称放行方式、部分交叉口干道方向采用进口单独放行方式, 以上绿波协调控制算法将无能为力. 此外, 文献[7]建立了基于混合整数规划的相邻交叉口信号协调控制模型, 但该模型仅适用于两交叉口间距较短的情况, 不能有效解决多交叉口的绿波协调控制问题; 文献[8]建立了可变带速的干道协调控制模型, 但其适用范围仍在MAXBAND法之内, 仅适用于采用进口对称放行方式的干道交叉口群; 文献[9]在基于多智能体的交通协调控制概念之上, 提出了一种新的干道动态双向绿波协调控制方法, 但其公共信号周期的优化尚未考虑对绿波协调控制效果的影

响,相位差的设置主要也是从保证相邻交叉口的绿波协调控制出发,缺少了干道绿波协调控制所要求的全局性考虑;文献[10]则利用绿波协调控制模型和模糊逻辑控制方法实现了对公共信号周期与相位差的优化补偿,但其选用的是已有绿波协调控制模型,且仅适用于两相位的信号控制方式。

进口对称放行方式与进口单独放行方式作为两种典型的交叉口信号相位设计方法各有所长^[11,12]。在交叉口几何条件对称的情况下使用进口对称放行方式,可以最大限度地提高交叉口通行能力、降低交叉口饱和度、减少交叉口行车延误,并有利于左转非机动车辆的通行;进口单独放行方式则可以最大限度地均衡各流向车道的利用率、饱和度与停车延误,能够利用左直合用车道实时调整直行流向与左转流向的通行能力以适应不同流向的实时交通需求。因此,干道上的各个交叉口应根据其平面几何特点与交通需求特性,选取合适的信号相位设计方式,研究混合放行方式下的干道双向绿波协调控制算法具有非常重要的现实意义。

本文将针对采用混合放行方式的干道交叉口群,建立通用干道双向绿波协调控制模型,给出一种进口混合放行方式下的干道双向绿波协调控制优化算法,通过算例分析验证模型算法的可行性与准确性。

2 双向绿波协调控制模型(Model of bidirectional green wave for coordinate control of arterial road)

对于干道上编号依次为1, 2, ..., n 的 n 个交叉口进行双向绿波协调控制,选取交叉口编号由小到大的方向作为干道上行方向、编号由大到小的方向作为干道下行方向。假若各交叉口的信号相序设计方案相对独立、相位绿信比分配保持固定,公共信号周期 C 的取值范围为 $[C_{\min}, C_{\max}]$,交叉口之间的相位差定义为其干道放行相位绿灯中心时刻差。以交叉口 i 与交叉口 j 的干道下行相位紧接其干道上行相位为例,进行干道双向绿波带宽计算分析如图1所示。

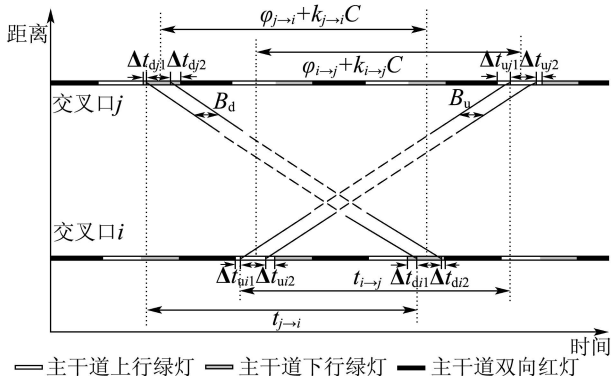


图1 干道双向绿波带宽计算时距图

Fig. 1 Calculation of bidirectional green wave bandwidth with time-space diagram

建立交叉口 i 与交叉口 j 所构成的模型关系式,如式(1)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{2}t_{Gu_i} + \Delta t_{ui1} + t_{i \rightarrow j} - \Delta t_{uj1} + \frac{1}{2}t_{Gu_j} = \\ \quad \varphi_{i \rightarrow j} + k_{i \rightarrow j}C, \\ \frac{1}{2}t_{Gu_i} - \Delta t_{ui2} + t_{i \rightarrow j} + \Delta t_{uj2} - \frac{1}{2}t_{Gu_j} = \\ \quad \varphi_{i \rightarrow j} + k_{i \rightarrow j}C, \\ \frac{1}{2}t_{Gd_i} - \Delta t_{di1} + t_{j \rightarrow i} + \Delta t_{dj1} - \frac{1}{2}t_{Gd_j} = \\ \quad \varphi_{j \rightarrow i} + k_{j \rightarrow i}C, \\ -\frac{1}{2}t_{Gd_i} + \Delta t_{di2} + t_{j \rightarrow i} - \Delta t_{dj2} + \frac{1}{2}t_{Gd_j} = \\ \quad \varphi_{j \rightarrow i} + k_{j \rightarrow i}C, \\ f_{s_i, s_j}(\varphi_{i \rightarrow j}, \varphi_{j \rightarrow i}) = 0, \\ \Delta t_{ui1} + \Delta t_{ui2} + B_u = t_{Gu_i}, \\ \Delta t_{di1} + \Delta t_{di2} + B_d = t_{Gd_i}, \\ 0 \leq \varphi_{i \rightarrow j} < C, 0 \leq \varphi_{j \rightarrow i} < C, \\ 0 \leq \Delta t_{ui1}, \Delta t_{ui2}, \Delta t_{uj1}, \Delta t_{uj2}, \\ \quad \Delta t_{di1}, \Delta t_{di2}, \Delta t_{dj1}, \Delta t_{dj2}, B_u, B_d \leq C, \\ \max\{(B_u + B_d)/C\}, \\ i, j = 1, 2, \dots, n, i < j. \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: t_{Gu_i} , t_{Gd_i} , t_{Gu_j} 与 t_{Gd_j} 分别表示交叉口 i 与交叉口 j 的干道上下行绿灯时间, Δt_{ui1} , Δt_{ui2} , Δt_{uj1} 与 Δt_{uj2} 分别表示上行绿波带距交叉口 i 与交叉口 j 上行相位绿灯始末时刻的最短时间差, Δt_{di1} , Δt_{di2} , Δt_{dj1} 与 Δt_{dj2} 分别表示下行绿波带距交叉口 i 与交叉口 j 下行相位绿灯始末时刻的最短时间差, $t_{i \rightarrow j}$ 与 $t_{j \rightarrow i}$ 分别表示车队从交叉口 i 行驶到交叉口 j 与从交叉口 j 行驶到交叉口 i 所需的行驶时间, $\varphi_{i \rightarrow j}$ 表示交叉口 i 上行相位绿灯中心时刻超前交叉口 j 上行相位绿灯中心时刻的时间, $\varphi_{j \rightarrow i}$ 表示交叉口 j 下行相位绿灯中心时刻超前交叉口 i 下行相位绿灯中心时刻的时间, $k_{i \rightarrow j}$ 与 $k_{j \rightarrow i}$ 分别表示相应整数解, B_u 与 B_d 分别表示上下行绿波带宽度, $f_{s_i, s_j}(\varphi_{i \rightarrow j}, \varphi_{j \rightarrow i}) = 0$ 表示当交叉口 i 与交叉口 j 的相序分别设置为 s_i 与 s_j 时, $\varphi_{i \rightarrow j}$ 与 $\varphi_{j \rightarrow i}$ 所应满足的关系等式,可简化表示如式(2)所示:

$$\varphi_{i \rightarrow j} + t_{(u \rightarrow d)j} + \varphi_{j \rightarrow i} + t_{(d \rightarrow u)i} = mC, \quad (2)$$

式中: $t_{(d \rightarrow u)i}$ 与 $t_{(u \rightarrow d)j}$ 分别表示交叉口 i 下行相位绿灯中心时刻超前上行相位绿灯中心时刻的时间与交叉口 j 上行相位绿灯中心时刻超前下行相位绿灯中心时刻的时间, m 表示相应整数解。

在式(1)(2)构成的双向绿波协调控制模型中, t_{Gu_i} , t_{Gd_i} , t_{Gu_j} , t_{Gd_j} , $t_{i \rightarrow j}$, $t_{j \rightarrow i}$ 为设定参数, s_i , s_j , $\varphi_{i \rightarrow j}$, $\varphi_{j \rightarrow i}$ 为优化变量, Δt_{ui1} , Δt_{ui2} , Δt_{uj1} , Δt_{uj2} , Δt_{di1} , Δt_{di2} , Δt_{dj1} , Δt_{dj2} , $k_{i \rightarrow j}$, $k_{j \rightarrow i}$, $t_{(d \rightarrow u)i}$, $t_{(u \rightarrow d)j}$, m 为中间变量, B_u 与 B_d 为性能指标。

可以看出,对于干道方向采用进口对称放行方式的交叉口,其干道上行相位与干道下行相位合为同一信号相位,不同的相序设置也不会影响干道绿波协调控制效果;而对于干道方向采用进口单独放行方式的交叉口,其干道上行相位与干道下行相位在不同信号相位,不同的相序设置将会生成不同的双向绿波协调控制模型,产生不同的干道绿波协调控制效果。

当交叉口*i*与交叉口*j*的干道方向均采用对称放行方式($t_{Gu_i} = t_{Gd_i} = t_{G_i}, t_{Gu_j} = t_{Gd_j} = t_{G_j}, t_{(d \rightarrow u)_i} = 0, t_{(u \rightarrow d)_j} = 0$)、相邻交叉口间上下行的行驶时间相等($t_{i \rightarrow j} = t_{j \rightarrow i} = t_{j \leftrightarrow i}$)时,要获取最大双向绿波带宽度就应该保证双向通过带具有对称特性,即

$$\begin{aligned} \Delta t_{ui1} &= \Delta t_{di2}, \Delta t_{ui2} = \Delta t_{di1}, \\ \Delta t_{uj1} &= \Delta t_{dj2}, \Delta t_{uj2} = \Delta t_{dj1}, \\ \varphi_{i \rightarrow j} &= \varphi_{j \rightarrow i} = \frac{kC}{2}, k \in \{0, 1\}, \\ k_{i \rightarrow j} &= k_{j \rightarrow i}, B_u = B_d = B. \end{aligned}$$

此时式(1)对应的绿波协调控制模型可简化为

$$\begin{cases} -\frac{1}{2}t_{G_i} + \Delta t_{ui1} + t_{i \rightarrow j} - \Delta t_{uj1} + \frac{1}{2}t_{G_j} = \\ \frac{1}{2}k_{i \leftrightarrow j}C, \\ \frac{1}{2}t_{G_i} - \Delta t_{ui2} + t_{i \rightarrow j} + \Delta t_{uj2} - \frac{1}{2}t_{G_j} = \\ \frac{1}{2}k_{i \leftrightarrow j}C, \\ \Delta t_{ui1} + \Delta t_{ui2} + B = t_{G_i}, \\ \Delta t_{ui1}, \Delta t_{ui2}, \Delta t_{uj1}, \Delta t_{uj2} \geq 0, k_{i \leftrightarrow j} \in \mathbb{Z}, \\ \max \frac{B}{C}, i, j = 1, 2, \dots, n, i < j. \end{cases} \quad (3)$$

利用关系式 $t_{G_i} + t_{R_i} = C$ 与 $t_{G_j} + t_{R_j} = C$,可以将式(3)进一步化为Little所提出的MAXBAND核心模型形式。

3 控制模型优化求解及应用(Optimization solution of the control model and its application)

当模型(1)的约束集为凸集(非空)时,由于可行域有界、约束条件为等式约束、且目标函数线性,此时模型在其可行域内必定存在最优解。模型变量 $k_{i \rightarrow j}, k_{j \rightarrow i}$ 与 m 被限制为整数,属于混合整数线性规划模型,可用混合整数线性规划方法进行优化求解。

当模型(1)的约束集为空集时,此时模型将无可行解存在,即找不到任何一个双向绿波协调控制解,而无法实现干道双向绿波协调控制。

3.1 控制模型的优化求解(Optimization solution of the control model)

LINGO^[13,14]是美国LINDO系统公司开发的一套专门用于求解最优化问题的软件包,可用于求解线性规划(LP)、二次规划(QP)与非线性规划(NLP)问题,同时也允许优化模型中的决策变量部分分量只取整数数值,即可用于混合整数规划(MIP)问题的求解。LINGO软件既包含了内置的建模语言,允许以简练直观的方式描述较大规模的优化问题,具有很快的执行速度,也提供了与其他数据文件和应用程序的接口,能通过动态链接库为VisualBasic, Delphi, Visual C++等应用程序所调用。因此利用LINGO软件编写通用干道双向绿波协调控制模型的求解算法,具有编程简单、执行高效、调用方便等优点。

为了确保LINGO软件能够快速得到高质量的最优解,在对实际问题建立优化模型时应注意尽量减少模型决策变量与约束条件的个数。例如对于由多个交叉口组成的通用干道双向绿波协调控制模型(1),模型中的第1~5项等式组可以进行相应简化,仅取 $i = 1, j = 2, 3, \dots, n$ 所对应的 $n - 1$ 组等式约束即可;模型中的第6,7项等式组则可以进行整体合并,将其合并为 $\Delta t_{u11} + \Delta t_{u12} + B_u = t_{Gu1}$ 和 $\Delta t_{d11} + \Delta t_{d12} + B_d = t_{Gd1}$ 这两个等式约束。

由于不同的相序设置将会生成不同的双向绿波协调控制模型,因此需要针对干道交叉口的不同相序组合,分别建立相应混合整数线性规划模型。在此采用VB编程语言编写协调信号配时优化主程序,通过调用LINGO动态链接库中的@POINTER()函数^[13],建立应用程序与LINGO解答器的直接存贮器链接,完成不同相序组合下的双向绿波协调控制模型优化求解。

需要使用@POINTER()函数输入的LINGO程序模型变量有 $C, t_{Gu_i}, t_{Gd_i}, t_{Gu_j}, t_{Gd_j}, t_{i \rightarrow j}, t_{j \rightarrow i}, t_{(d \rightarrow u)_i}, t_{(u \rightarrow d)_j}$,其中 $t_{(d \rightarrow u)_i}$ 和 $t_{(u \rightarrow d)_j}$ 与干道交叉口的相序组合密切相关;需要使用@POINTER()函数输出的LINGO程序模型解则包括 $\varphi_{i \rightarrow j}, \varphi_{j \rightarrow i}, B_u, B_d$ 。

3.2 干道信号配时优化流程(Signal timing optimization process)

考虑到公共信号周期的允许变化范围与交叉口相序组合的选取空间,并以双向绿波带宽度百分比之和最大作为优化目标,基于通用干道双向绿波协调控制模型的干道信号配时参数优化求解流程如图2所示。

图中,最终输出的干道最佳信号设计方案将包括最佳公共信号周期的选取、最优交叉口相序的组合以及最佳交叉口相位差的设置。

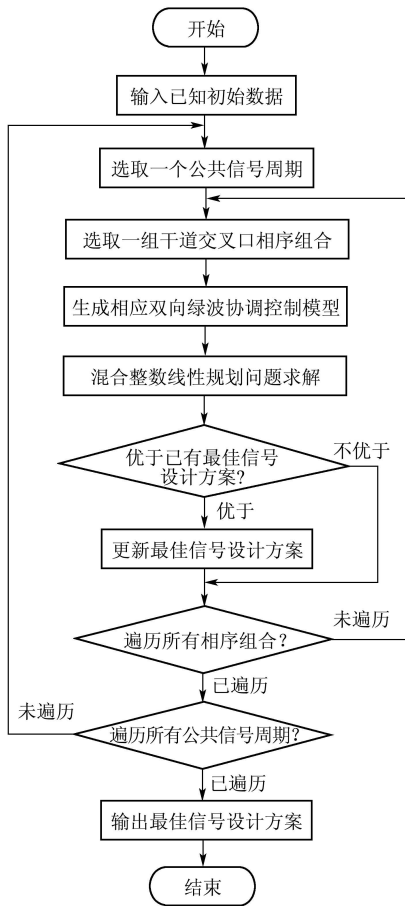


图2 基于协调控制模型的信号配时优化流程

Fig. 2 Signal timing optimization process based on the coordinate control model

4 算例分析(Example analysis)

为了便于与干道双向绿波协调控制数解算法^{4]}进行对比分析,在此引入同一算例:已知某一南北

向主干道上由南往北的A, B, C, D, E共5个交叉口,相邻交叉口间距依次为500 m, 380 m, 420 m, 140 m,通过带速度为10 m/s;各交叉口均采用进口单独放行方式,其信号配时设计的计算结果如表1所示(为计算方便,假设各相位的绿灯时间等于相位时间,即各相位的绿信比之和为1)。根据各单交叉口信号周期变化范围可知,公共信号周期的允许变化范围为[90, 110] s。

表1 各单交叉口信号配时设计的计算结果

Table 1 Results of intersection signal timing design

交叉口	信号周期 变化范围	进口绿信比			
		南	北	东	西
A	[80,110]	0.34	0.28	0.22	0.16
B	[85,115]	0.30	0.28	0.20	0.22
C	[90,120]	0.32	0.32	0.20	0.16
D	[90,115]	0.30	0.36	0.14	0.20
E	[85,110]	0.36	0.34	0.18	0.12

利用本文建立的通用干道双向绿波协调控制模型及其优化求解方法,求得的最佳信号配时设计方案如表2所示。其中,4个最佳相对相位差取值分别为交叉口A南进口相位绿灯中心时刻超前交叉口B, C, D, E南进口相位绿灯中心时刻的时间。可以看出,利用模型法求解得到的6种最佳信号配时设计方案均保证获得最大的双向通过带宽,也正由于能够获得最大的双向通过带宽因而可以找到多组不同信号周期、不同相序组合、不同相位差设置的最佳信号配时设计方案。

表2 模型法求解的最佳信号配时设计方案

Table 2 Optimal signal timing design schemes with model method

最佳公共 信号周期/s	交叉口A→E 最佳相序组合	最佳相对 相位差/s	通过带宽	
			由南往北	由北往南
97	南北东西、南北东西、南东北西、北南东西、南北东西	49, 86, 32, 49	30%	28%
97	南北东西、南北东西、南西北东、北南东西、南北东西	49, 88, 32, 49	30%	28%
98	南北东西、南北东西、南东北西、北南东西、南北东西	50, 87, 32, 49	30%	28%
99	南北东西、南北东西、南东北西、北南东西、南北东西	51, 88, 32, 49	30%	28%
100	南北东西、南北东西、南东北西、北南东西、南北东西	52, 91, 32, 49	30%	28%
100	南北东西、南北东西、南东北西、北南东西、南西北东	52, 89, 32, 43	30%	28%

利用干道双向绿波协调控制数解算法求得的最佳信号配时设计方案如表3所示,其双向通过带宽度计算如表4所示。由于各交叉口的各向干道放行相位绿灯时间彼此独立,制约双向通过带带宽的瓶颈交叉口也并非一致,因此可以考虑通过适当调整瓶颈交叉口的相位差,在不减少某一行驶方向通过带宽度的情况下增加另一行驶方向的

通过带宽度。例如通过增加瓶颈交叉口D的相位差 $0.007 \times 98 = 0.69$ s,可以使得由南往北行驶方向上交叉口D的上方绿信比与下方绿信比分别取值为0.15, 0.15,通过带宽度将相应调整至30%;与此同时,由北往南行驶方向上交叉口D的上方绿信比与下方绿信比也将相应变化为0.194, 0.166,通过带宽度仍可保持为28%。

表 3 数解法求解的最佳信号配时设计方案

Table 3 Optimal signal timing design scheme with algebraic method

最佳公共 信号周期/s	交叉口A→E 最佳相序组合	最佳相对 相位差/s	通过带宽	
			由南往北	由北往南
98	南北东西、南北东西、南东北西、北南东西、南北东西	50, 88, 31, 47	29.3%	28%

表 4 数解法计算双向通过带宽度

Table 4 Calculation of bidirectional green wave bandwidth with algebraic method

交叉口	由南往北			由北往南		
	上方	下方	通过	上方	下方	通过
	绿信比	绿信比	带宽度	绿信比	绿信比	带宽度
A	0.17	0.17		0.14*	0.14*	
B	0.15	0.15*		0.14*	0.14*	
C	0.157	0.163	29.3%	0.163	0.157	28%
D	0.143*	0.157		0.187	0.173	
E	0.191	0.169		0.159	0.181	

* 表示决定通过带宽度的相关数据。

算例分析表明, 与干道双向绿波协调控制数解算法相比, 本文建立的模型算法可获得更加齐全的最佳信号配时设计方案, 并能直接完成相位差的最优化设置, 得到协调控制配时设计的精确解。

5 结语(Conclusion)

本文建立的通用干道双向绿波协调控制模型算法能够适用于各种放行方式下的干道交叉口群绿波协调控制, 且不受同一路段不同方向行驶速度相等的限制; 可以获得所有的最佳公共信号周期解以及相应的最佳相序组合与相位差精确解; 为干道双向绿波协调控制设计提供了一套适用面广、实用性强、准确度高的新方法。

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.
(China Highway Association. *Traffic Engineering Manual*[M]. Beijing: China Communications Press, 1998.)

[2] 林晓辉, 徐建闽, 卢凯. 各进口单独放行条件下的双向绿波设计方法研究[J]. 交通与计算机, 2007, 25(5): 8 - 12.
(LIN Xiaohui, XU Jianmin, LU Kai. A design method of two way green wave of each phase for entrance[J]. *Computer and Communications*, 2007, 25(5): 8 - 12.)

[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.
(LU Kai, XU Jianmin, YE Ruimin. 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.)

[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 Jianmin, LI Yishun. Algebraic method of bidirectional

green wave for arterial road coordinate control under the signal design mode of one-phase-one-approach[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(3): 95 - 101.)

[5] DENOS C. GAZIS. *Traffic Theory*[M]. New York: Springer, 2002.

[6] LITTLE J D C. The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming[J]. *Operations Research*, 1966, 14(4): 568 - 594.

[7] 袁二明, 涂攀生, 蔡小强. 基于混合整数规划的相邻交叉路口信号协调控制[J]. 系统工程, 2006, 24(8): 32 - 37.
(YUAN Erming, TU Fengsheng, CAI Xiaoqiang. A mixed integer programming formulation for coordinated traffic control of adjacent intersections[J]. *Systems Engineering*, 2006, 24(8): 32 - 37.)

[8] 王俊刚, 于泉, 高颖, 等. 变带速干线协调控制模型研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(4): 108 - 111.
(WANG Jungang, YU Quan, GAO Ying, et al. Variable band speed arterial coordination control model research[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22(4): 108 - 111.)

[9] 沈国江, 许卫明. 交通干线动态双向绿波带控制技术[J]. 浙江大学学报, 2008, 42(9): 1625 - 1630.
(SHEN Guojiang, XU Weiming. Study on traffic trunk dynamic two-direction green wave control technique[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2008, 42(9): 1625 - 1630.)

[10] 李伟, 李彦, 何东之. 基于线性规划的干线模糊补偿控制[J]. 公路交通科技, 2007, 24(8): 110 - 114.
(LI Wei, LI Yan, HE Dongzhi. Arterial fuzzy compensated control based on linear programming[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 24(8): 110 - 114.)

[11] 张海军, 杨晓光, 张珏. 两种交叉口信号相位设计方法的比较[J]. 交通与计算机, 2005, 23(1): 3 - 7.
(ZHANG Haijun, YANG Xiaoguang, ZHANG Jue. Comparison between methods for two intersection signal phases[J]. *Computer and Communications*, 2005, 23(1): 3 - 7.)

[12] 陈喜群, 李瑞敏. 基于仿真的交通信号控制优化策略研究[J]. 交通与计算机, 2007, 25(5): 17 - 20.
(CHEN Xiqun, LI Ruimin. Traffic signal control optimization strategy based on simulation[J]. *Computer and Communications*, 2007, 25(5): 17 - 20.)

[13] LINDO SYSTEMS INC. *Lingo Users Manual*[M]. Chicago: LINDO Systems Inc, 2004.

[14] 谢金星, 薛毅. 优化建模与LINDO/LINGO软件[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
(XIE Jinxing, XUE Yi. *Optimization Modeling and LINDO/LINGO Software*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)

作者简介:

卢凯 (1979—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为交通信号控制、智能控制理论与应用, E-mail: kailu@scut.edu.cn;

徐建闽 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为交通信息工程及控制、控制理论与控制工程, E-mail: aujmxu@scut.edu.cn;

陈思溢 (1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通信号控制, E-mail: chensiyi0526@126.com;

李林 (1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通信号控制、智能交通系统, E-mail: linlee020@gmail.com.