

基于损失时间的单点交叉口信号相序优化模型

马万经¹, 聂磊², 杨晓光¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海交通投资咨询公司, 上海 200030)

摘要: 以定时控制交叉口混合交通流为对象, 重点研究如何通过相序优化降低交叉口损失时间的问题. 首先提出了基于信号灯组(包括机动车灯组 VG、非机动车和行人灯组 PG)的绿灯间隔矩阵、相位相序、相位最大间隔矩阵、相位间隔和矩阵, 以及矩阵之间元素相互关系的数学表达. 然后, 建立了以 VG 损失时间之和、VG 最大间隔时间之和、VG 和 PG 所有损失时间之和, 以及 VG 和 PG 最大损失时间之和等四类相位损失时间最少为目标的相序优化模型. 通过一个四相位信号控制十字交叉口的实际数据验证: 相序组合不同, 交叉口的损失时间不同; 是否考虑行人、自行车交通, 对于最佳相序的影响较大. 该模型可以求得面向混合交通流多种目标下的最佳相序解. 还进一步地分析了四类优化目标下信号损失时间的设置模式, 以及通过基于信号灯组设置信号间隔时间以降低交叉口损失时间的方法.

关键词: 损失时间; 单点交叉口; 信号相序; 信号灯组; 混合交通

中图分类号: U 491

文献标识码: A

Phase Sequencing Model for Signalized Isolated Intersection Based on Lost Time

MA Wanjing¹, NIE Lei², YANG Xiaoguang¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Traffic Investment Consultant Company, Shanghai 200030, China)

Abstract: The problem of phase sequencing with the objective of minimizing lost time was modeled based on mixed traffic characteristics. The matrixes of intergreen time, phase sequence, maximum intergreen time and sum of intergreen time were built and the mathematical relationship between matrixes was modeled based on signal groups including motor traffic signal groups (VG), pedestrian and bicycle signal groups (PG). The phase sequence optimization model was built based on the proposed matrixes and four kinds of objectives were considered: minimum total lost time of VG; lost time of VG; minimum total lost time of VG and PG,

maximum lost time of VG and PG. A case study of a signalized four-stage intersection of Zhangjiagang City validated the model. The results show that the lost time of intersection varies with different phase sequences. The PG dramatically affects the optimal phase sequence. The proposed model can output optimal solution of phase sequence based on different objectives with the consideration of mixed traffic characteristics. The intergreen modules under different objectives were analyzed and the signal group-based intergreen design method was proposed to minimize lost time of intersection.

Key words: lost time; isolated intersection; signal phase sequence; signal group; mixed traffic

在信号控制交叉口, 信号相序的选择与安排对交叉口的通行效率具有重要影响. 随着交通技术的发展和交通量的迅速增长, 通过优化相序提高交叉口的运行效益, 成为进一步提高交叉口时空资源利用率的重要手段^[1].

在很多研究中, 相序是单点信号控制中集战略性和战术性于一身的控制参数, 是周期和绿信比之间的一座桥梁, 同时又与这 2 个参数相互耦合. 其优化和设置的原则如下^[2]:

——安全性. 安全性应该是相位相序设计追求的第一目标, 因为相位相序设置的初衷就是为了避免或减少车流之间的相互交织与冲突, 以降低由此而导致的交通事故; 相位相序的设置要保证相位内所有交通实体的通行权.

——效率性. 相位相序设置应该支持跨相位车流和相位的跳变, 以求尽量减少损失时间并充分利用交叉口的时间资源.

——相对稳定性. 相位相序的设置在一时间段内应该具有相对的稳定性, 其稳定是相对于效率性而言的, 即在兼顾效率的同时不应该导致驾驶

收稿日期: 2009-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70631002, 5080142); 同济大学青年优秀人才培养行动计划资助项目

作者简介: 马万经(1980—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为交通系统与控制. E-mail: mawanjing@gmail.com

员的困惑.在单点实时自适应控制中,相位相序的相对稳定性非常重要,如果相位相序经常跳变,会给驾驶员提供错误信息,导致交通事故,降低安全性.

经典的 Webster 模型^[3]不能直接优化信号相序,在 HCM 延误模型等中亦没有体现相序的作用^[4],进而不能以其为目标优化相序.已有的相序优化研究大多集中于如何设置及动态调整机动车相序以提高交叉口的运行效率方面^[5-7],并采用模糊控制等多种方法.我国城市交叉口大多具有混合交通流特征,如何针对这种特征,综合考虑相序对机动车、非机动车及行人的影响,降低因相序设计不当带来的绿灯时间损失,已成为交叉口信号控制中亟待解决的关键问题之一.

本质上,定时控制条件下单点交叉口相序优化的关键在于不同相序条件下交叉口的损失时间不同以及绿灯时间的利用率不同.笔者以定时控制交叉口混合交通流为研究对象,重点分析如何通过相序优化降低交叉口损失时间的问题.首先,提出基于信号灯组包括机动车灯组(VG)、非机动车和行人灯组(PG)的绿灯间隔矩阵、相位相序、相位最大间隔矩阵、相位间隔和矩阵的数学表达;然后,建立以相位损失时间最少为目标的相序优化模型;最后,通过一个四相位十字交叉口的实际数据验证,本模型可以求解出面向混合交通流多种目标下的最佳相序.

1 基本假设

为将研究内容集中于重点解决的问题,假设:

——交叉口的几何参数和信号控制相位数已知.
——不同相序条件下,交叉口各车道的饱和和流量相同;在交叉口有短车道时,不同相序可能会影响饱和流量及通行能力^[8].本研究重点分析损失时间的变化,不对这一影响深入分析.

——交叉口的绿灯间隔时间能够代表损失时间,绿灯间隔时间(和)最小化目标可代替损失时间最小化目标.

2 相位相序的数学表达

2.1 绿灯间隔矩阵

绿灯间隔时间是一股交通流的绿灯结束时刻和下一股交通流的绿灯开始时刻之间的时间间隔.有两股车流通过的交叉口区域叫做冲突区域^[9].

绿灯间隔时间的计算须计算所有的冲突交通流的组合情况,精确到秒或者给定的时间间隔.因此,

即使采用共同的信号控制,所有的交通参与者(行人、自行车、公共交通、机动车辆)须考虑为独立的交通流.任意冲突车流所需要的最短绿灯间隔时间 t_z 由通过时间 t_u 、清空时间 t_r 与进入时间 t_e 决定^[9](见图2).如下式:

$$t_z = t_u + t_r - t_e = t_u(v_{\max,r}) + 3.6 \frac{s_r + l}{v_{\max,r}} - \frac{s_e}{v_{\max,e}} \quad (1)$$

式中: t_z 为最小绿灯间隔时间; s ; t_u 为通过时间(黄灯时间); s ; t_r 为清空时间; s ; t_e 为进入时间; s ; s_r 为清空距离; m ; s_e 为基本清空距离; m ; l 为车辆长度; m ; $v_{\max,r}$ 为清空速度, $m \cdot s^{-1}$; $v_{\max,e}$ 为进入速度, $m \cdot s^{-1}$,如果计算的绿灯间隔时间小于 t_u ,则令 $g_{ij} = t_u$ ^[9].

各个信号灯组的关键(最大)绿灯间隔时间构成绿灯间隔时间矩阵式(2).它可以用 $M \times M$ 的矩阵 G 来表达. M 为信号灯组数目,其行(横向)为清空车流灯组,列(纵向)为进入车流灯组.矩阵 G 的元素 g_{ij} 为清空车流 i 与进入车流 j 之间的绿灯间隔时间.如果两股车流没有冲突点,则令 $g_{ij} = -1$ (例如 $i = j$);如果车流冲突则所需要的最短绿灯间隔时间为 t_z .

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1M} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{M1} & g_{M2} & \cdots & g_{MM} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 相位相序表达

相序采用一个 $M \times N$ 维的 0-1 矩阵 P 来表达,行的编号为信号灯组的编号(总数为 M 行),列的编号为相位的编号(总数为 N 列).矩阵元素 p_{mi} 定义为

$$p_{mi} = \begin{cases} 1, & i \text{ 信号灯组在 } j \text{ 相位允许放行} \\ 0, & i \text{ 信号灯组在 } j \text{ 相位不允许放行} \end{cases} \quad (3)$$

任意列 n 中所有 $p_{mi} = 1$,表示在 n 相位这些信号灯组同时放行.是否可以同时放行,可以通过绿灯间隔矩阵校核.

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_{N-1} \quad p_N] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{M1} & p_{M2} & \cdots & p_{MN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

相序矩阵 Φ 可以用相位编号 $1, 2, \dots, N$ 的排列向量 δ_i 来表达(式(5)),相序个数 N_Φ 由式(6)决定

$$\Phi = \delta_m \quad (5)$$

$$N_{ps} = P_{N-1, N-1} = (N - 1)! \quad (6)$$

2.3 相位最大间隔矩阵

相位最大间隔矩阵 F 是一个 $N \times N$ 的矩阵(式 7),其元素 f_{pq} 为相位 p 内放行的信号灯组与相位 q 内放行的相位灯组绿灯间隔的最大值,见式(8).

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1N} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{N1} & f_{N2} & \cdots & f_{NN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$m_{pq} = \max\{g_{kl}\} \quad (p_{kp} = 1, p_{lq} = 1) \quad (8)$$

如果只考虑机动车,即矩阵中只考虑 VG,则可以得到机动车相位间隔矩阵 F_c ;如果同时考虑 VG 和 PG,即在矩阵中包括行人非机动车信号灯组,则可以得到机动车和行人非机动车相位最大间隔矩阵 F_{cp} .

2.4 相位间隔和矩阵

相位间隔矩阵 S 是一个 $N \times N$ 的矩阵,其元素 s_{ij} 定义为相位 i 和相位 j 之间所有信号灯组绿灯间隔之和.其公式如下:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1N} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{N1} & s_{N2} & \cdots & s_{NN} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $s_{ij} = \sum_{p_{ki}=1, p_{lj}=1} g_{kl}$. (10)

如果只考虑 VG,则可以得到机动车相位间隔和矩阵 S_c ;如果同时考虑 VG 和 PG,可以得到机动车和行人非机动车相位间隔和矩阵 S_{cp} .

3 相序优化模型与算法

本优化目标为交叉口相位总损失时间最少,相位损失时间 L 可以根据 F 或者 S 矩阵和相序方案得到.

目标函数 $\min PI = \sum_{i=1}^N L_i(p_i)$

根据是否考虑行人非机动车和是否对相位所有灯组损失时间求和,可以把目标函数损失时间分为四类(如表 1).

相序优化的算法如图 1 所示,其中虚线框内容为本算法的输入,实线框为算法流程.

4 实例分析

以张家港四相位控制的人民——长安四叉十字路口为案例,交叉口交通设计图及信号灯组(车流)的构成如图 2 所示.

表 1 目标函数类型

Tab.1 Class of objectives

目标	目标类型	相位损失时间公式
a	VG 和 PG 所有灯组损失时间之和	$L_i = s_{i, i+1}$ (如 $i+1=1 > N$, 则令 $i+1=1$)
b	PG 所有灯组损失时间之和	同目标 a, 但 S 只考虑 VG
c	VG 和 PG 相位最大间隔之和	$L_i = f_{i, i+1}$, (如 $i+1 > N$, 则令 $i+1=1$)
d	VG 相位最大间隔之和	同目标 c, 但 F 只考虑 VG

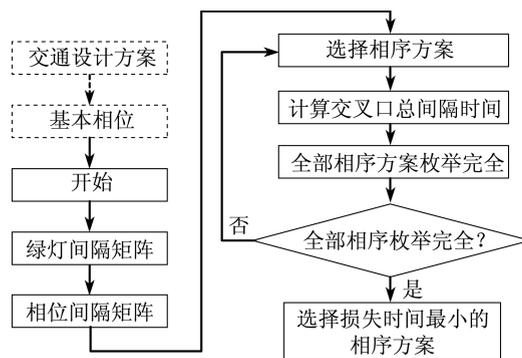
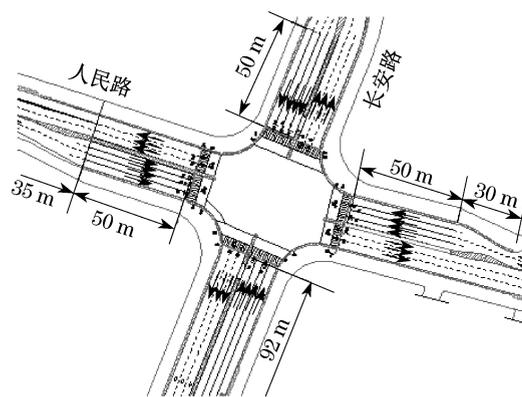
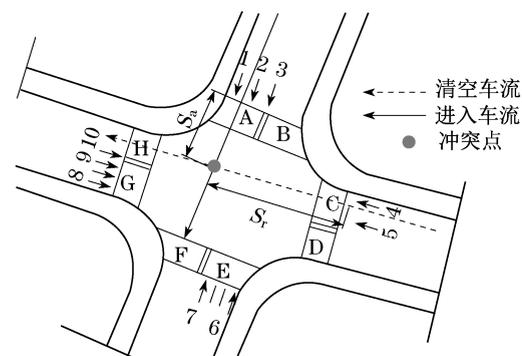


图 1 相序优化算法

Fig.1 Phase sequencing algorithm



a 交叉口布局



b 冲突车流分布

图 2 交叉口交通设计及信号灯组(车流)

Fig.2 Layout of intersection and signal groups (traffic flow)

图2中数字为机动车流编号(1~10).行人、自行车受同一灯组控制,且以二次过街的形式通过交叉口.即行人、自行车共同受A,B,C,D,E,F,G,H等8个信号灯组控制;交叉口总计18个信号灯组,其相位方案如图3.

流用-1表示).

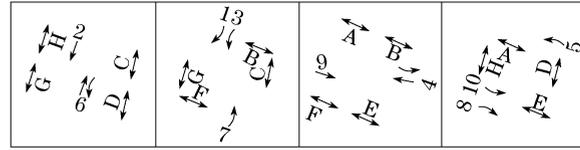


图3 交叉口相位相序方案

Fig.3 Intersection signal phase plan

人民路—长安路交叉口的绿灯间隔可以用 18×18 矩阵 G 表示(按前面规则,没有冲突的交通

$$G = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 3 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 4 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 & 4 & -1 & 4 & -1 & 5 & 4 & 4 & -1 & -1 & -1 & -1 & 10 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 4 & 5 & 5 & -1 & -1 & 3 & 3 & 4 & -1 & -1 & 10 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 8 & 7 & 6 & -1 & -1 & 4 & 5 & -1 & -1 & 5 & -1 & -1 & 4 & -1 & -1 & -1 & -1 & 11 \\ -1 & 5 & 4 & -1 & -1 & 5 & 6 & -1 & 5 & -1 & -1 & -1 & 4 & -1 & -1 & 10 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 5 & 7 & 5 & -1 & -1 & -1 & 3 & 4 & -1 & 9 & -1 & -1 & 4 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 5 & -1 & 4 & 3 & -1 & -1 & -1 & 3 & 5 & -1 & -1 & -1 & -1 & 4 & -1 & -1 & 10 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 4 & -1 \\ -1 & 4 & 6 & -1 & 5 & 7 & 6 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 11 & -1 & -1 & 4 & -1 \\ -1 & 5 & 6 & 5 & -1 & 5 & 4 & -1 & -1 & -1 & -1 & 10 & -1 & -1 & -1 & -1 & 4 & -1 \\ 12 & 12 & 12 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 6 & -1 & -1 & -1 & 5 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 10 & 10 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 3 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 12 & 12 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 6 & -1 & -1 & 6 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 10 & 10 & 10 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 & -1 & -1 & 4 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

该交叉口的相位结构可以矩阵 $P(4 \times 18)$ 表达

$$P' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

F_{cp} 和 F_c 如下:

$$F_{cp} = \begin{bmatrix} 0 & 10 & 10 & 10 \\ 10 & 0 & 10 & 10 \\ 12 & 12 & 0 & 11 \\ 12 & 12 & 10 & 0 \end{bmatrix}, \quad F_c = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 7 & 5 \\ 5 & 0 & 4 & 5 \\ 7 & 8 & 0 & 5 \\ 5 & 6 & 5 & 0 \end{bmatrix}$$

S_{cp} 和 S_c 如下:

$$S_{cp} = \begin{bmatrix} 0 & 36 & 71 & 55 \\ 42 & 0 & 49 & 89 \\ 88 & 75 & 0 & 43 \\ 56 & 96 & 36 & 0 \end{bmatrix}, \quad S_c = \begin{bmatrix} 0 & 9 & 18 & 17 \\ 10 & 0 & 17 & 16 \\ 22 & 31 & 0 & 10 \\ 20 & 20 & 10 & 0 \end{bmatrix}$$

根据相序优化算法,得到四类目标下的损失时间如图4.根据图4可以得出:根据a,b,d类型的目标优化出来的最优相序,都是 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$;根据c类型,为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ 和 $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2$.

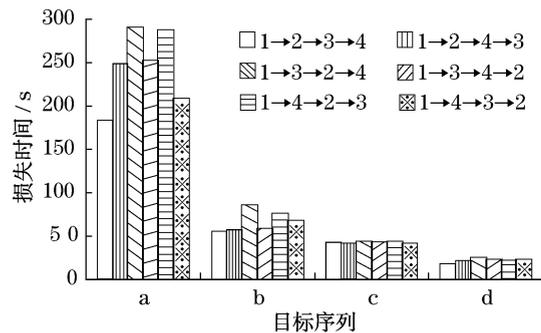


图4 交叉口相序方案的影响

Fig.4 Impacts of phase sequence of intersection

上述案例分析表明,不同的优化目标对应的最优相序不同.是否考虑混合交通,对相序优化有很大影响.目标a和c考虑了混合交通的影响,而b,d只

适应于没有混合交通(如设置天桥且不允许非机动车通行)的交叉口。

5 优化目标的选择

考察四个优化目标的特点可以发现,目标 a 和 b 考虑的是总损失时间,而 c 和 d 考虑的是最大间隔时间.这两种考虑代表了不同的间隔时间设置模式,如图 5 所示。

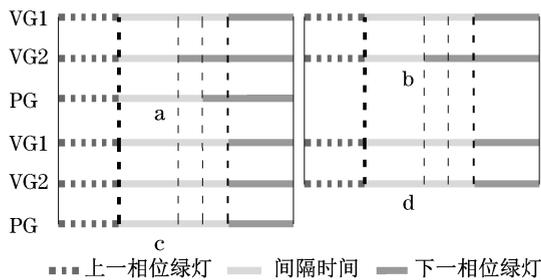


图 5 不同的间隔时间设置模式

Fig.5 Different intergreen types

在 a 和 b 模式下,前后相位的信号灯组可根据不同的间隔时间要求在不同的时间亮起;而在 c 和 d 模式下,前后两相位的信号灯组必须同时亮起,且间隔时间为最大的间隔时间.可见,相对于两个相位信号灯同时关闭和亮起,以基于每个信号灯组及其与前(后)相位信号灯组的间隔时间,来确定每一个灯组的亮起时刻,是一种有效降低交叉口总损失时间的方法.即在混合交通条件下,依据目标 a,优化相序更加合理;而在仅有机动车交通流条件下,选择目标 b,优化相序较合理。

6 结论

(1) 在以矩阵对绿灯间隔、相位相序、相位最大间隔、相位间隔和进行的数学表达基础上建立的相序优化模型,能够求解不同目标和条件下的最佳相序,显著降低交叉口损失时间。

(2) 不同相序对应的损失时间不同,是否考虑行人、自行车交通流,对最优相序有重要影响.由于清空速度低,考虑行人、自行车后,交叉口的损失时间相对于仅考虑机动车而言都会增加.这表明,在我国大多交叉口均存在混合交通的情况下,不考虑行人、自行车的特点,而仅仅按照机动车设置间隔时间,将不能满足行人、自行车的清空需求,会造成交

叉口秩序混乱和交通安全性的降低。

(3) 基于信号灯组(包括每一个 VG 和 PG)计算和设置间隔时间,相比采用相位间最大间隔时间作为相位的间隔时间,能够不同程度地降低交叉口的损失时间;具体效果取决于不同灯组之间间隔时间的对比情况。

本相序优化模型的前提条件是相位方案确定,没有把相位方案和相序一起优化;同时,相序还会对交叉口的通行能力产生影响,这种影响在交叉口有左转短车道的情况下更为显著.同时,考虑损失时间和通行能力的影响,并将相序优化整合在信号配时(周期、绿信比等)参数的优化中,更能够揭示相序的作用以及相序与其他配时参数、车道功能划分、流量不均衡性等的相互作用.这些是后续研究的重点。

参考文献:

- [1] Allsop R E. SIGSET: a computer program for calculating traffic signal settings [J]. Traffic Engineering and Control, 1971, 13 (2):58.
- [2] 聂磊. 考虑实时交通流状态反馈的交叉口信号控制方法研究 [D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2004.
NIE Lei. Feedback control method for isolated intersection using real-time traffic flow state [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transport Engineering, 2004.
- [3] Webster F V, Cobbe B M. Traffic signals [R]. London: Road Research Laboratory, 1966.
- [4] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2000 [R]. Washington D C: National Research Council, Federal Highway Administration, 2000.
- [5] 彭国雄, 王浩, 杨晓光. 诱导条件下信号灯相位相序设计 [J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 85.
PENG Guoxiong, WANG Hao, YANG Xiaoguang. Traffic signal phasing under the condition of route guidance system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(4): 85.
- [6] Al-Kaisy A F, Stewart J. A New approach for developing warrants of protected left-turn phase at signalized intersections [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2001, 35(6): 561.
- [7] Heydecker B G. Sequencing of traffic signals [M] // Mathematics in Transport and Planning and Control. Oxford: Clarendon Press, 1992: 57 - 67.
- [8] QI Yi, YU Lei, GUO Chenyan. Impacts of Signal Phasing Sequence on Left-Turn Operation [DB/CD]. Washington D C: Transportation Research Board, 2009.
- [9] Road and Transportation Research Association Steering Committee. Traffic control and traffic safety. Guidelines for traffic signal RILSA [R]. Cologne: Germany Road and Transportation Research Association, 1992.