

# 基于交叉口可靠性的公交优先信号配时优化模型

乔文鑫<sup>a</sup>, 王 锐<sup>b</sup>

(北京交通大学 a. 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室; b. 交通运输学院, 北京 100044)

**摘 要:** 公交信号优先被广泛应用于提高道路通行能力和服务水平等方面,但是,公交信号优先经常会破坏路网,从而导致交叉口可靠性降低.因此,交叉口可靠性是交通信号设计中需考虑的一个重要问题.本研究针对单点交叉口提出了基于可靠性的公交信号优先配时优化模型,将人均延误最小化作为目标函数,将交叉口相位清空可靠度指标作为一个重要约束条件,该模型在优化信号配时的过程中不仅降低了人均延误,并且保证了交叉口的可靠性.本研究将该优化模型应用于单点交叉口,通过分析影响参数得到:仅提高可靠性要求,延误时间会非线性增加;若一味地降低总延误会导致低可靠性.最后,通过案例分析将传统模型与本研究模型进行对比分析,验证了本研究所提出模型的实用性.

**关键词:** 智能交通;可靠性;信号优化模型;信号交叉口

## A Transit Signal Priority Optimizing Model Based on Reliability

QIAO Wen-xin<sup>a</sup>, WANG Ding<sup>b</sup>

(a. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology; b. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Transit signal priority (TSP) is widely used to improve the traffic capacity and service level. However, TSP strategy often destroys the reliability of road network, thus unreliability at signalized intersection is an important problem need to be addressed in TSP strategy. This paper proposes a TSP optimization model at signalized intersection. The objective function is minimizing average person delay and phase clearance reliability is taken as an important constraint in the model. This optimization model can reduce average person delay while ensuring the reliability at signalized intersection. The sensitivity analysis in case study shows that increasing the reliability requirement will cause the delay time to increase nonlinearly, meanwhile, reducing only the person delay may cause lower reliability level. Thus, it is necessary to consider both of delay and reliability in the signal optimizing model. By comparing the experimental results obtained by the conventional approach and optimizing model based on reliability, this paper proves the efficient performance of the proposed model.

**Keywords:** intelligent transportation; reliability; signal optimizing model; signalized intersection

## 0 引 言

随着城市规模的不断扩大和城市人口的迅速

增长,城市居民的出行问题显得越来越突出,而优先发展公共交通正是解决这一问题的有效途径.公

收稿日期: 2016-07-25

修回日期: 2016-11-21

录用日期: 2016-12-19

基金项目: 基本科研业务费/Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015JBM048); 北京市教育委员会共建项目/Beijing Municipal Education Commission Research Fund (T13H100020).

作者简介: 乔文鑫(1984-),女,北京人,副教授,博士.

\*通信作者: wxqiao@bjtu.edu.cn

交优先作为一种交通发展策略,已成为我国许多城市解决交通拥堵问题的必然选择.运用先进的交通信号控制技术优化信号配时是增加已有路网运行效率的有效途径,许多研究者在以降低延误为目标信号优化配时方面都取得了显著成就.然而,这些方法经常会破坏路网以导致路网可靠性降低.许多实现条件都局限于在一个方向提供优先,导致对一部分路网使用者的不公平.因此,交叉口的不可靠性是交通信号设计不可避免的一个问题.

现已有许多有关路网可靠性的研究,例如连接可靠性(Bell, et al. 1997),通行能力可靠性(Wong, et al. 1997),旅行时间可靠度(Iida, 1999),服务水平可靠性等等.Lo<sup>[1]</sup>提出相位清空可靠度(Phase Clearance Reliability, PCR),用来描述某相位的绿灯时间能够放行所有该周期内到达交通流的概率.为了保证单点交叉口的可靠度,本文采用指标分析交叉口可靠度的大小.本文根据交叉口相位清空可靠度的定义,考虑信号交叉口机动车到达率的随机特性,研究相位清空可靠度与人均延误、周期时长、绿灯时间的定量关系,通过数值分析方法推导得到了求解给定相位清空可靠度指标与其他未知函数之间的代数关系,并通过案例对相位清空可靠度与人均延误、周期时长之间的关系进行分析.

目前,大多数城市交叉口信号控制的研究都是以小汽车作为研究对象,但在我国的许多城市道路上公交车流量占有相当大的比重.然而,现有研究中的交叉口信号配时优化通常以降低小汽车延误为主要目标,但公交车载客量远大于小汽车,因此以人均延误为目标函数更能反映公平对待公交车乘客与小汽车乘客;并且,以人均延误作为优化目标符合以人为本的交通理念.本研究根据最新版HCM2010<sup>[2]</sup>中的交叉口延误计算公式,将交叉口的人均延误最小化作为优化模型的目标函数,将给定的交叉口可靠度指标作为一个约束条件,针对单点交叉口提出了基于交叉口可靠度的公交优先信号优化控制模型.该模型在优化信号配时的过程中不仅降低了人均延误,并且保证了交叉口的可靠性,可以得到路网最理想状态下的信号配时.

## 1 目标函数及基本约束条件

### 1.1 目标函数:人均延误最小化

HCM2010中对交叉口平均信号延误进行了定义,公式为

$$d = d_1 + d_2 + d_3 \quad (1)$$

$$d_1 = \frac{0.5C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - [\min(1, X)g/C]} \quad (2)$$

$$d_2 = 900T \left[ (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kIX}{c_A T}} \right] \quad (3)$$

此公式由3项组成,分别是均匀延误( $d_1$ )、增量延误( $d_2$ )、初始延误( $d_3$ ).其中 $d_1$ 适用于车辆均匀到达,交通流为稳定流,且无初始排队现象的情况,即饱和度 $X$ 的值不大于1的情况; $d_2$ 适用于车辆非均匀到达和暂时性的信号周期故障(随机延误),持续过饱和,以及在分析时段( $T$ )开始时没有初始排队的情况,即增量延误对于所有的 $X$ 值都适用,包括高度饱和的车道组.如果没有初始排队, $d_3$ 一般不作考虑.其中, $C$ 指信号周期时长, $g$ 为一个信号周期内某相位的绿灯时长.

人均延误计算公式为

$$D_p = \frac{d_1(v_{B1}\gamma_B + v_{C1}\gamma_C) + d_2v_2\gamma_C}{v_{B1}\gamma_B + v_{C1}\gamma_C + v_2\gamma_C} \quad (4)$$

式中: $D_p$ 为人均延误; $v_{B1}$ 为公交优先方向公交车流量; $v_{C1}$ 为公交优先方向小汽车流量; $v_2$ 为非优先方向小汽车流量(假设非优先方向无公交车); $\gamma_C$ 小汽车平均载客人数; $\gamma_B$ 公交车平均载客人数.

### 1.2 基本约束条件

#### (1) 绿灯时间.

由于行人过街所需最短时间通常大于车辆安全通过交叉口所需最短时间,所以此处以行人过街所需最短时间即为最短绿灯时间,即

$$g_{i,n}^{\min} = g_{WALK}^{\min} \quad (5)$$

根据HCM2010,有

$$g_{WALK}^{\min} = WALK + FDW, \quad FDW = \frac{L_c}{S_{15}^p} \quad (6)$$

式中: $WALK = 7$  s;  $FDW$ 为行人闪时间或称行人清空时间(Flashing DON'T WALK)(s); $L_c$ 为行人穿越的长度(m); $S_{15}^p$ 为行人15%位平均速度(m/s).

## (2) 周期长度.

信号周期过长会存在以下缺陷:当周期过长后,通行能力反而提高缓慢甚至减小,而延误却增长很快;周期过长后,各相位红灯时间也会相应增加,每个相位红灯期间排队等待的车辆也会相应增多,因此需要设置较长的进口车道,而这在实际往往难以实施;较长的红灯等待时间往往会使得交通参与者失去耐心,容易出现交通参与者尤其是行人和非机动车违章通行的情况.因此,限制周期的最大时长是十分必要的.资料表明,当周期时长超过 120 s 时,交叉口通行能力提高缓慢<sup>[3]</sup>,因此我们规定最大周期时长  $C_{\max} = 120$  s.

周期时长也不宜过短,限制最短周期时长的因素有:车辆能安全通过交叉口所需最短时间;行人过街所需最短时间;所以,最短周期由各相位最短绿灯时间决定,即

$$C_n^{\min} = \sum_{j=1}^n g_{i,n}^{\min} + L \quad (7)$$

式中: $L$ 为总损失时间.

## 2 基于交叉口可靠性的公交信号优化模型

Lo<sup>[1]</sup>提出相位清空可靠度(Phase Clearance Reliability, PCR),用来描述某相位的绿灯时间能够放行所有该周期内到达交通流的概率.为了保证单点交叉口的可靠度,本文采用 PCR 指标分析交叉口可靠度的大小.

PCR 定义为:相位  $i(i=1,2,\dots,n)$  在规定绿灯时间内可以放行该周期内所有到达车流的概率  $\alpha_i$ ,  $\alpha_i$  可以用公式表达为

$$\alpha_i = pr(v_i C \leq g_i S_i) \quad (8)$$

式中: $v_i$ 为相位  $i$  车辆到达率; $C$ 为交叉口周期时长; $g_i$ 为相位  $i$  的绿灯时间; $S_i$ 为相位  $i$  饱和流率.

现有研究中通常认为车辆到达率对饱和流率并无影响,车辆到达率与通行能力相互独立<sup>[4]</sup>.因此,本研究饱和流率为常数.若给定信号配时方案,

车辆到达率则直接影响着相位清空可靠度.为了说明本文的研究方法,假定车辆到达率服从正态分布  $(\mu, \sigma^2)$ ,基于正态分布的性质可以将式(8)转化为标准正态分布形式.

$$P\left\{\frac{v_i - \mu_i}{\sigma_i} \leq \frac{\frac{g_i S_i}{C} - \mu_i}{\sigma_i}\right\}, \frac{v_i - \mu_i}{\sigma_i} \sim N(0,1) \quad (9)$$

根据正态分布表可知

$$\alpha_i \in [0.5, 1], \frac{\frac{g_i S_i}{C} - \mu_i}{\sigma_i} = \Phi^{-1}(\alpha_i);$$

$$\alpha_i \in [0, 0.5], \Phi^{-1}(\alpha_i) = \Phi^{-1}(1 - \alpha_i)$$

于是可以得到

$$\alpha_i \in [0, 1], C = \frac{g_i S_i}{\mu_i + \sigma_i \Phi^{-1}(\alpha_i)} \quad (11)$$

式中: $\Phi^{-1}(\alpha_i)$ 为标准正态分布函数  $\Phi(\alpha_i)$  的反函数.

基于周期时长与绿灯时间之间的关系式: $\sum_i g_i + L = C$ ,  $L$  为总损失时间,相位  $i$  的绿灯时间可以通过式(12)和式(13)计算得到.

$$\sum_i g_i - \frac{g_i S_i}{\mu_i + \sigma_i \Phi^{-1}(\alpha_i)} = -L \quad (12)$$

$$\begin{cases} (1-B_1)g_1 + g_2 + \dots + g_i + \dots + g_m + L = 0 \\ g_1 + g_2 + \dots + g_i + \dots + (1-B_m)g_m + L = 0 \\ \vdots \\ g_1 + g_2 + \dots + g_i + \dots + (1-B_m)g_m + L = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $B_i = \frac{S_i}{\mu_i + \sigma_i \Phi^{-1}(\alpha_i)}$ ,  $i=1,2,\dots,m$ ,  $i \in M$  ( $M$  为所有相位的集合).

对于线性方程组式(13)而言,其解法是有一定规律可循的.因此,本研究将基于矩阵结构提出一种简易的计算方法.

$$\begin{bmatrix} (1-B_1) & 1 & \dots & 1 & L \\ 1 & (1-B_2) & \dots & 1 & L \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & (1-B_m) & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

将该矩阵方程组的系数矩阵作为矩阵  $A$ ,对其进行初等行变换将得到

$$\begin{bmatrix} (1-B_1) & 1 & \dots & 1 & L \\ 1 & (1-B_2) & \dots & 1 & L \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & (1-B_m) & L \end{bmatrix} \xrightarrow[\text{operation}]{\text{matrix elementary}} \begin{bmatrix} -B_1 & B_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -B_2 & B_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & (1-B_m) & L \end{bmatrix} \quad (15)$$

将右侧行变换的结果代入矩阵方程式(14)中  
可得到

$$\begin{cases} -B_1g_1+B_2g_2=0 \\ -B_2g_2+B_3g_3=0 \\ \vdots \\ -B_{i-1}g_{i-1}+B_ig_i=0, 1<i\leq m, i\in M \\ \vdots \\ -B_{m-1}g_{m-1}+B_mg_m=0 \\ g_1+g_2+\cdots+g_i+\cdots+(1-B_m)g_m+L=0 \end{cases} \quad (16)$$

通过将式(16)中所有方程的等号两边分别累加,我们就可以通过一个简单的数学相关关系计算相位2到m的绿灯时间为

$$-B_1g_1+B_ig_i=0 \rightarrow g_i=\frac{B_ig_1}{B_i}, 1<i\leq m, i\in M \quad (17)$$

将  $g_i=\frac{B_ig_1}{B_i}$  带 入  $g_1+g_2+\cdots+g_i+\cdots+(1-B_m)g_m+L=0$ 中可得

$$B_1g_1\left(\frac{1}{B_1}+\frac{1}{B_2}+\cdots+\frac{1}{B_{m-1}}+\frac{1-B_m}{B_m}\right)+L=0 \quad (18)$$

对式(18)求解可得各相位绿灯时间为

$$g_1=\frac{-LB_1}{\sum_{i=1}^{m-1}\frac{1}{B_i}+\frac{1-B_m}{B_m}}; g_i=\frac{g_1B_i}{B_i}, 1<i\leq m, i\in M \quad (19)$$

而对比高斯消元法<sup>[5]</sup>所得到的结果:

$$g_1=\frac{L\prod_{i=2}^m B_i}{\prod_{i=1}^m B_i - \prod_{i=2}^m B_i - \sum_{k=2}^m \prod_{i=1, i\neq k}^m B_i}, \text{大大降低了计算}$$

量.结合前文的研究讨论,本研究所提出的基于交叉口可靠性的公交优先信号配时优化模型为

$$\min D_p = \frac{d_1(v_{B1}\gamma_B + v_{C1}\gamma_C) + d_2v_2\gamma_C}{v_{B1}\gamma_B + v_{C1}\gamma_C + v_2\gamma_C}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} pr(v_iC \leq g_iS) \geq \alpha_i \\ C = \frac{g_iS_i}{\mu_i + \sigma_i\Phi^{-1}(\alpha_i)} \\ g_1 = \frac{-L}{\sum_{i=1}^{m-1}\frac{1}{B_i} + \frac{1-B_m}{B_m}} \\ g_i = \frac{g_1B_i}{B_i} \\ B_i = \frac{S_i}{\mu_i + \sigma_i\Phi^{-1}(\alpha_i)} \\ g_i^{\min} \leq g_i \leq g_i^{\max} \\ C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \end{cases}$$

### 3 模型求解

模型求解需要根据模型的特点设计合理的求解算法,以提高求解的效率和精度.传统最优化方法求解多变量非线性优化模型是非常困难的<sup>[6]</sup>,随着计算机技术的迅速发展,智能算法在解决非线性优化问题时有着求解精度高、收敛速度快等优点,例如:神经网络、遗传算法和协同计算.遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和遗传机制的高度并行、随机、自适应的全局优化概率搜索算法,并且遗传算法是在求解单目标或者多目标非线性优化问题中有良好的应用,同时在交通控制模型求解中也有广泛的应用,因此本文采用遗传算法求解模型.遗传算法求解模型的计算步骤如下:

Step 1 初始化.

Step 2 定义GA 参数.

染色体编码与解码方案,种群大小,交叉概率等.

Step 3 计算适应度.

遗传算法一般为在给定区间内寻求最大值,本文模型的目标函数为最小化,因此本文将适应度函数转换为

$$F = \frac{1}{D^p} \quad (20)$$

Step 4 选择操作.

本文选用轮盘赌法,个体的适应度越高选中的概率就越大.NI为个体总数,个体被选中的概率为

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^N F_i} \quad (21)$$

Step 5 杂交及变异操作.

Step 6 输出最优个体作为最优解.

### 4 案例分析

#### 4.1 影响参数分析

为了说明问题,取两相位信号控制十字路口中两条垂直进口道作为分析对象,其中一个方向作为公交优先方向,另一个为非公交优先方向.各相位的机动车到达率均服从正态分布,并且各个进口道的车道饱和流率分别为1 800 vph/h,每个相位的损失时间为3 s.

(1) 车辆到达率的方差及PCR对周期时长的影响.

假设两个相位的期望流量值都为800 vph/h,



即  $\text{Mean}_1 = \text{Mean}_2 = 800$ ; 给定非优先方向清空可靠度为 0.7, 即  $\text{PCR}(\alpha_2) = 0.7$ ; 公交优先方向公交车比例为 20%, 即  $\text{Transit proportion} = 0.2$ . 分析优先方向不同车辆到达率方差  $\text{Var}_1$  及清空可靠度  $\text{PCR}(\alpha_1)$  对交叉口信号周期时长的影响, 结果如图 1 所示.

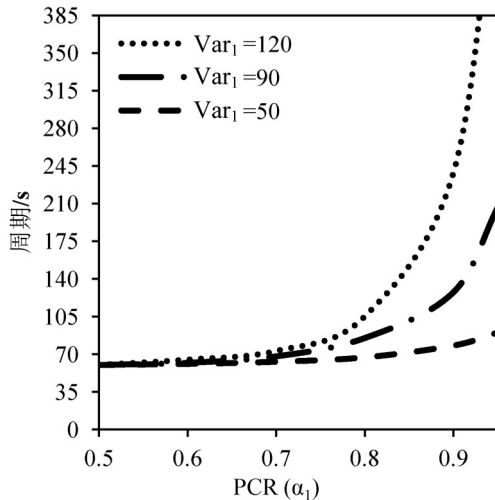


图 1 不同方差下周期与  $\text{PCR}(\alpha_1)$  之间的关系

Fig. 1 Cycle time versus  $\text{PCR}(\alpha_1)$  in different variance level

图 1 为信号周期时长与相位清空可靠度在不同车流到达率方差下的变化趋势. 当车流到达率的方差较小时, 将  $\text{PCR}(\alpha_1)$  的值从 0.5 增加到 0.95, 可以看出求解所得的信号周期长度缓慢增加; 而当车流到达率的方差较大时, 所得的信号周期长度增加速率非常快. 总的来看, 增加  $\text{PCR}(\alpha_1)$  的值会使信号周期时长呈现非线性增长. 当车流到达率的方差为 90,  $\text{PCR}(\alpha_1)$  为 0.7 时, 信号周期时长为 70.5 s;  $\text{PCR}(\alpha_1)$  为 0.9 时, 信号周期时长为 127.4 s;  $\text{PCR}(\alpha_1)$  为 0.95 时, 信号周期时长为 206 s, 显然这已经超出了正常值的范围.

#### (2) 人均延误与 $\text{PCR}$ 之间的关系.

同上, 假设两个相位的期望流量值都为 800 vph/h, 即  $\text{Mean}_1 = \text{Mean}_2 = 800$ ; 给定非优先方向清空可靠度为 0.7, 即  $\text{PCR}(\alpha_2) = 0.7$ ; 公交优先方向公交车比例为 20%, 即  $\text{Transit proportion} = 0.2$ . 为了更好地分析人均延误与  $\text{PCR}$  之间的关系, 假设公交优先方向车辆到达率的方差为 90, 即  $\text{Var}_1 = 90$ ; 非优先方向车辆到达率的方差为 0, 即  $\text{Var}_2 = 0$ . 分析公交优先方向清空可靠度  $\text{PCR}(\alpha_1)$  的增加对交叉口人均延误的影响, 结果如图 2 所示 (其中  $D_1$  为公交优先方向,  $D_2$  为非公交优先方向).

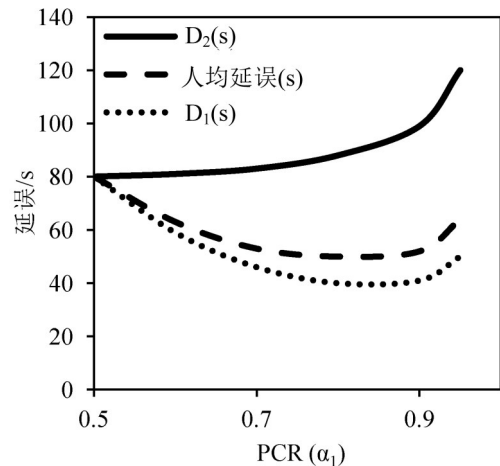


图 2 人均延误与  $\text{PCR}(\alpha_1)$  之间的关系

Fig. 2 Delay time versus  $\text{PCR}(\alpha_1)$

从图 2 中我们可以得知延误与相位清空可靠度之间的关系, 同样也呈现非线性相关关系. 将  $\text{PCR}(\alpha_1)$  的值从 0.5 增加到 0.95, 交叉口总的人均延误和各个方向的人均延误都呈现先减少后增加的趋势. 从这个结果我们可以得到: 仅提高可靠性要求, 延误时间会非线性增加; 若一味地降低总延误会导致低可靠性.

#### 4.2 与传统模型对比分析

本研究同时也考虑了传统 Webster 信号配时方法及人均延误最小化信号优化模型所得到的配时方案的可靠性. Webster 信号配时方案的交叉口可靠性借鉴于 Lo<sup>[1]</sup>. Webster 的最优周期及绿灯时间计算方法为

$$C_0 = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_i \frac{v_i}{s_i}}, g_i = \frac{(C_0 - L) \frac{v_i}{s_i}}{\sum_i \frac{v_i}{s_i}} \quad (22)$$

本文将非公交优先方向的平均流量设置为 200~800 vph, 公交优先方向的平均流量为 800 vph. 总损失时间为 6 s, 各方向每个车道饱和流率为 1 800 vph. Webster 方法的绿灯时间及周期时长计算结果如表 1 所示.

将 Webster 配时方案带入  $\text{PCR}$  计算方法中, 为了突出反映  $\text{PCR}$  变化趋势, 再次将两个方向的车流到达率方差都设为 150 vph. 图 3 为 Webster 配时方案中可靠度随着非优先方向流量变化下两个方向的  $\text{PCR}$  变化趋势. 由图 3 可以看出, 当非优先方向的流量从 200 增加到 800 时, 优先方向的可靠度

值较非优先方向下降更快。

表1 Webster信号配时方案

Table 1 Webster timing plan

进道口1 流量/vph	进道口2 流量/vph	C/s	$g_1/s$	$g_2/s$
800	200	33	21	5
800	400	44	25	13
800	600	65	34	25
800	800	131	62	62

为了验证本文所提出的优化模型的实用性,以两相位十字信号交叉口为例,在给定交叉口参数的情况下,对本文所提出的模型进行求解并与传统模型进行对比.在此我们选取 Webster 信号配时方法及人均延误最小化模型为对比方案.假设该两相位十字交叉口的交通流到达率都服从正态分布,到达率的期望值均为 800 vph 并且方差均为 90,两相位总损失时间为 6 s,各方向每个车道饱和流率为 1 800 vph.其次,给定该交叉口的两个相位清

空可靠度: $PCR(\alpha_1)>0.75$ 、 $PCR(\alpha_2)>0.7$ ,其中 $PCR(\alpha_1)$ 作为公交优先方向的相位清空可靠,  $PCR(\alpha_2)$ 作为非公交优先方向的相位清空可靠度;以及优先方向公交车所占比例为 20%,所得模型计算结果如表 2 所示.

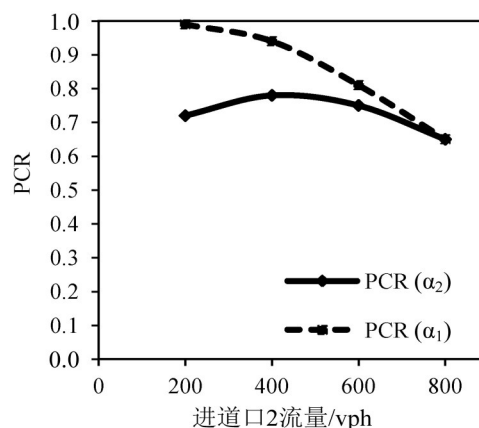


图3 非优先方向不同流量下 PCR 的变化

Fig. 3 PCR with different volume of approach 2

表2 优化结果与传统方案对比

Table 2 The optimizing result comparing with the conventional method

模 型	C/s	$g_1/s$	$g_2/s$	$PCR(\alpha_1)$	$PCR(\alpha_2)$	人均延误/s
Webster	131.00	62.00	62.00	0.74	0.74	58.98
人均延误最小化模型	94.00	46.00	42.00	0.82	0.52	47.92
本文模型	119.00	57.00	56.00	0.75	0.70	52.90

与 Webster 计算结果相比,本文所提出的模型降低了 10% 的人均延误并且确保了 PCR 在可接受范围内.同时,从表 2 中可得,人均延误最小化模型所得到的非优先方向进口道的 PCR 仅有 0.52,显然是远小于可接受水平的.因此,本研究所提出的基于交叉口可靠度的模型是有显著效果的.

## 5 结 论

本研究应用遗传算法,建立了基于交叉口可靠度的公交信号优先控制优化模型,同时,本研究对人均延误、相位清空可靠度、周期时长及车辆到达率的方差之间的关系进行了分析.最后,本研究通过案例分析将传统模型与本研究模型所得到的信号控制方案进行对比,明确各种控制方案的异同,以供道路交通及管理者根据不同的需要选择不同的控制模型和方法.

本研究通过分析相位清空可靠度与人均延误、周期时长、绿灯时间的定量关系,运用数值分析方法推导得到了求解给定相位清空可靠度指标下的其他未知函数之间的代数关系,大大降低了现有计算方法的计算量.虽然本研究中假设交通流的到达率均服从正态分布,但读者可根据其他到达率分布特征应用本文所建模型.

## 参考文献:

- [1] LO H K. A reliability framework for traffic signal control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(2): 250-260.
- [2] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2010[R]. Washington D C: National Research Council, 2010.

下转第 67 页

- signal phase and timing estimation from low-frequency transit bus data[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 19–28.
- [12] SUN Z, BAN X. Vehicle trajectory reconstruction for signalized intersections using mobile traffic sensors[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2013, 36(11): 268–283.
- [13] KWONG K, KAVALER R, RAJAGOPAL R, et al. Arterial travel time estimation based on vehicle re-identification using wireless magnetic sensors[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2009, 17(6): 586–606.

---

上接第46页

- [8] 金盛,王殿海. 考虑前方交通状态的车辆跟驰模型与数值仿真[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(8): 1236–1241. [JIN S, WANG D H. Car following model and simulation considering front traffic situation[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(8): 1236–1241.]

---

上接第59页

- [3] 张卫华,陆化普,石琴,等. 公交优先的信号交叉口配时优化方法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 49–53. [ZHANG W H, LU H P, SHI Q, et al. Optimal signal planning method of intersections based on bus priority[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 49–53.]
- [4] 吕斌,牛惠民. 信号控制交叉口可靠性建模与仿真[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(6): 45–50. [LV B, NIU H M. Reliability modeling and simulation of signalized intersections[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(6): 45–50.]
- [5] 吕斌. 随机条件下单点交叉口信号配时优化[J]. 交通运输工程学报, 2010(6): 116–120. [LV B. Signal timing optimization at isolated intersections under random condition[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010(6): 116–120.]
- [6] 郭旭明,李瑞敏,张雄飞. 基于遗传算法的交叉口信号控制可靠性优化模型研究[J]. 公路工程, 2012(4): 44–46. [GUO X M, LI R M, ZHANG X F. Traffic signal control reliability optimization based on genetic algorithm[J]. Highway Engineering, 2012(4): 44–46.]