

文章编号:1005-0523(2019)01-0059-07

# 考虑行人过街因素的环形交叉口配时优化方法研究

马庚华<sup>1</sup>,何 瑞<sup>2</sup>,郑长江<sup>2</sup>,方雅君<sup>2</sup>,许晟鑫<sup>3</sup>

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098;2. 河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098;  
3. 东北林业大学机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:**环形交叉口大多位于城市的中心区域,有着美化城市景观和交通疏导的重担。然而环形交叉口存在普遍的交通堵塞问题,给城市中心区域交通通行能力带来重创,并且大量的过街交通流导致严重的人车冲突,给环形交叉口的交通安全带来极大的隐患。本文通过分析道路人行横道行人过街的交通特性等,构建信号控制多目标优化模型,选取遗传算法求解,结合实例表明该模型能有效提高我国环形交叉口通行能力,缓解交通冲突。

**关键词:**环形交叉口;行人过街;通行能力;多目标优化;交通安全

**中图分类号:**U491.4

**文献标志码:**A

近几年环形交叉口的交通堵塞等问题加剧,导致人车冲突,交通安全问题日益严峻。所以当前解决环形交叉口道路通行能力的问题变得刻不容缓。国内外学者对环形交叉口各方面进行的研究,主要集中在“位置选取”,“道路通行的安全性”,“道路通行能力的计算方法”等几个方面。Rahim F B等对于环形交叉口的地址选择,展开了深入地分析研究,指出了地址选择应当深入思考4个方面的影响因素<sup>[1]</sup>。Scott R指出了有些对于环形交叉口设置的道路交通安全问题<sup>[2]</sup>。Fouladvand M E等使用元胞自动机实验模型,对环形交叉口的交通流动实际情况,展开了模拟仿真,列出了环形交叉口展开引导信号控制管理的临界点位<sup>[3]</sup>。我国项乔君等列出了一类无指示信号环形交叉口的车辆通行水平运算模式<sup>[4]</sup>。任福田等指出了1个环形交叉口在交织地区的交通流动模型,应用车队分析研究方法,运算环形交叉口交织段的车辆通行水平<sup>[5]</sup>。谢军等假定环形交叉口内的车头时距服从Erlang分布规律,使用几率研究分析模式推算出1个环形交叉口车辆通行水平的实验模型<sup>[6]</sup>。本文从维护过街行人的权益出发,在行人与机动车之间找到平衡,同时保证双方的交通效率。考虑行人因素的环形交叉口多目标配时优化方法,对于缓解环形交叉口人车冲突、提高行人穿越街道的效率与安全、促进环形交叉口的交通通行能力的提升有着至关重要的影响,也为后来的交通管理者提供了新的思路。

## 1 模型建立

### 1.1 交通配时模型参数分析

#### 1.1.1 机动车延误

1) 机动车固有延误。机动车固有延误是指机动车在交叉口本身固有的平均延误,表达形式

$$D_i = \sum_j \frac{C(1-\lambda_i)^2}{2(1-\gamma_{ij})} + \sum_j \frac{N_{ij}x_{ij}}{q_{ij}} \quad (1)$$

收稿日期:2018-06-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51608171)

作者简介:马庚华(1966—),女,讲师,主要研究方向为城市规划的研究。

通讯作者:郑长江(1966—),男,教授,博士,主要研究方向为交通规划运输与管理。

式中: $D_i$ 是第*i*相位交叉口的机动车平均延误,s/veh, $C$ 是环形交叉口的信号控制周期时长,s; $\lambda_i$ 是交叉口第*i*相位的绿信比, $\lambda_i=\frac{g_i}{C}$ , $g_i$ 是第*i*相位的绿灯有效时间长度,s; $y_{ij}$ 是第*i*相位*j*进口道的机动车流量比, $y_{ij}=\frac{q_{ij}}{s_{ij}}$ ;  $q_{ij}$ 是相位*j*进口道的机动车流量,veh/s; $S_{ij}$ 是第*i*相位*j*进口道的机动车饱和流量,veh/s; $x_{ij}$ 是第*i*相位*j*进口道的饱和度, $x_{ij}=\frac{q_{ij}}{CAP_{ij}}$ ;  $CAP_{ij}$ 是第*i*相位*j*进口道的通行能力 veh/s; $CAP_{ij}=\sum_k \lambda_i S_{ijk}$ ,其中*k*代表进口车道数; $N_{ij}$ 是第*i*相位*j*进口道单位时间内过剩滞留的机动车的数量,reh/s;它的表达式是

$$N_{ij}=\begin{cases} \frac{CAP_{ij}}{4} \left[ (x_{ij}-1)+\sqrt{(x_{ij}-1)^2+\frac{12(x_{ij}-x_{ij0})}{CAP_{ij}}} \right], & x_{ij}>x_{ij0} \\ 0, & x_{ij}\leq x_{ij0} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x_{ij}=0.67+\frac{S_{ij}g_i}{600}$ 。

则环形交叉口机动车车辆平均延误模型为

$$D(C, g_i)=\frac{\sum_i^n D_i q_i}{\sum_i^n q_i} \quad (3)$$

其中: $D$ 为机动车在交叉口的平均延误,reh/s; $q_i$ 为第*i*相位机动车流量,reh/s, $q_i=\sum_j q_{ij}$ 。

2) 机动车因行人违章造成的延误。关于行人在过街等待区域等待的时间和其违章过街概率的关系<sup>[1]</sup>,我们可以运用仿真方法来表示,如下

$$P_{ped,C}=\tanh\left(\frac{\beta t_{ped,C}}{V}\right)+Z+\Delta p \quad (4)$$

式中: $P_{ped,C}$ 是因为行人等待时间而造成的违章的概率; $\beta$ 表示相关的敏感值; $t_{ped,C}$ 是行人在过街信号灯为红灯时行至过街横道处并等待下一个绿灯的时长,s; $V$ 是机动车靠近过街横道时行驶的速度,这里为了简化计算,采纳实际测量的机动车平均驶近交叉口的速度约为5.55 m/s; $Z$ 指地区范围之内对于模型影响的修正系数, $\Delta p$ 表示行人自身的不确定性方面,包括突发事件、行人性格不同等等。这里 $Z$ 和 $\Delta p$ 均取0。 $\beta$ 经最小二乘定理标定约等于0.055 3。运用数理统计对后文实例收集到的样本数据进行分析我们得出平均值为

$$D^p=\frac{m \times N_m}{\sum_m N_m}=3.633 \quad (5)$$

式中: $D^p$ 为行人闯红灯对机动车造成延误的平均值; $m(m=1,2,\dots,13)$ 为样本延误值; $N_m$ 为样本延误值*m*出现的次数,s。

行人抵达交叉口遵循离散分布,一般情况下行人交通流是正常的态势,且行人之间互相的影响比较小,所以我们当行人到达符合参数是 $\lambda$ 的泊松分布

$$p(k)=\frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (k=0,1,\dots) \quad (6)$$

式中: $p(k)$ 为行人在计时段*t*内抵达过街横道处的概率; $\lambda$ 是过街行人在单位时间内的平均抵达率; $t$ 为计时间隔时长。

所以 $t_{ped,c}$ 也应该遵循泊松分布,参数为 $\lambda g$ ,因为每个相位的行人红灯时长和行人流量不同导致不同相位行人红灯时抵达过街处等待过街时间 $\overline{t_{ped,C,i}}$ 也同,且与泊松分布中的期望值 $\lambda g_i$ 相同。综合以上所述,我们可以简化因为行人闯红灯而导致的每个相位机动车的平均延误为

$$D_i^p(C, g_i) = p_{ped, c, i} D_i^p = 3.633 p_i \tan(0.001 \overline{t_{ped, C, i}}) \quad (7)$$

整合两个部分可得, 机动车平均延误为  $D = D_i + D_i^p$ 。

### 1.1.2 停车率

停车率是指因为信号灯的控制而导致机动车在抵达交叉口时停车的次数。这里我们可以继续使用阿克塞力克的计算方法, 即车辆完全停车的停车次数, 如下所示

$$H_i = \sum_j 0.9 \left( \frac{1 - \lambda_i}{1 - \gamma_{ij}} + \frac{N_{ij}}{q_{ij} C} \right) \quad (8)$$

$$H(C, g_i) = \frac{\sum_i H_i q_i}{\sum_i q_i} \quad (9)$$

式中:  $H_i$  是第  $i$  相位内机动车停止行驶的平均次数;  $H$  是交叉口机动车停止行驶的平均次数。

### 1.1.3 行人延误

行人于交叉口过街横道处在信号控制以外其他因素的干扰下产生的延误便是行人延误, 其表达式为

$$P_i = \frac{\gamma_i C (1 - \lambda_i)^2}{2(\gamma_i - r_i)} \quad (10)$$

式中:  $P_i$  是第  $i$  相位通过过街横道的行人穿越街道的平均延误, s/ped;  $\gamma_i$  是第  $i$  相位过街横道上过街行人的饱和流量, s/ped; 其中,  $\gamma_i = \frac{k_i}{l t_{gh}}$ ,  $k_i$  是过街横道的宽度, m;  $l$  为过街行人穿过街道需要的横向宽度;  $t_{gh}$  为行人穿过横道时前后随行的两个人相互之间的时间距离, s;  $r_i$  是第  $i$  相位过街横道上过街行人的到达流率, ped/s。

行人的总延误与行人的总交通量的比值便是行人在交叉口的平均延误

$$P(C, g_i) = \frac{\sum_i P_i r_i}{\sum_i r_i} \quad (11)$$

### 1.1.4 机动车通行能力

交叉口每个相位的进口机动车通行能力综合即是交叉口的总通行能力, 如下式

$$Q_i = \sum_j S_{ij} \left( \frac{g_i}{C} \right) \quad (12)$$

则  $Q = \sum_i Q_i$ , 式子里,  $Q_i$  是第  $i$  相位机动车的通行能力;  $Q$  是交叉口机动车的总通行能力。

## 1.2 构建多目标配时优化模型

以机动车延误、行人延误、停车率、交叉口通行能力为评价指标, 以延误时间最短为前提, 将四个模型整合成为统一的环形交叉口的多目标优化配时模型, 模型如下

$$\begin{aligned} \min F(C, g_i) &= \min [D(C, g_i) + H(C, g_i) + P(C, g_i) - Q(C, g_i)] \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_i g_i + L = C \\ 15n \leq C \leq 160 \\ g_{\min} \leq g_i \leq g_{\max} \\ g'_{\min} \leq g_i + l \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $L$  为周期内总损耗时间, 表达式为  $L = \sum_i (l + I - A)$ 。  $l$  为启动损耗时间;  $I$  为绿灯之间的间隔时长;  $A$  为黄灯时长, 即除去绿灯之外的时间, 通常情况下黄灯时长为 3 s, 不考虑全红的时间。

## 2 模型求解

### 2.1 目标函数的处理

因为每一个子目标的单位并不一致,将单位统一是对模型运算求解的前提,所以对模型进行无量纲化处理便是将  $D', H', P', Q'$  设为在韦伯斯特算法中求得的机动车延误、停车率、行人延误和交叉口总通行能力的值代入模型中,多目标优化模型经过无量纲化处理之后变为

$$\min F_1(C, g_i) = \min \left[ \frac{D(C, g_i)}{D'} + \frac{H(C, g_i)}{H'} + \frac{P(C, g_i)}{P'} - \frac{Q(C, g_i)}{Q'} \right] \quad (14)$$

将上述模型与约束条件整合在一起,得到如下式

$$\min F_1(C, g_i) = \min \left[ w_i^{11} \frac{D_i(C, g_i)}{D'} + w_i^{12} \frac{P_i(C, g_i)}{P'} + w_i^2 \frac{H_i(C, g_i)}{H'} - w_i^3 \frac{Q_i(C, g_i)}{Q'} \right]$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_i g_i + L = C \\ 15n \leq C \leq 160 \\ \max |g_{\min}, g_{\min}^p - I| \leq g_i \leq 60 \end{cases} \quad (15)$$

### 2.2 处理复杂的约束条件

用惩罚函数<sup>[7]</sup>将非确定数值的约束条件转化为无约束条件,可以简化模型便于运算,转化后如下所示

$$\min F_2(C, g_i) = F_1(C, g_i) + M \left\{ \left( \sum_{i=1}^n g_i + L - C \right) \left[ \min(0, g_i - g_{\min}^p + I) \right]^2 \right\} \quad (16)$$

其中  $M$  为无限大的惩罚系数,本文中取 10 000 000。

### 2.3 遗传算法求解

针对求解多目标优化模型的最优解,当前有多类根据遗传算法的求解运算方法。权重参数转化法是本文所用的方法。本文基于 MATLAB 平台对算法进行程序的编程。基于遗传算法的 GATBX 工具箱,用 MATLAB 的程序语言来表达上文构建的多目标优化模型的程序。在此之前,还需将多目标函数最小化问题转化为最大化问题。

## 3 实例应用

为了分析本文所建模型的可行性和有效性,本文将南京市鼓楼区鼓楼广场的信号控制五路环形交叉口作为我们的研究分析对象运用构建的多目标配时优化模型来优化鼓楼环交的配时参数,以达到降低行人延误、尽量减少机动车延误与停车率的优化效果。南京市鼓楼环形交叉口是信号控制的五路环形交叉口,由两条正交的主干道(北京东路—北京西路和中山路—中央路)以及另一条与二者斜交的主干道(中山北路)构成。如图 1 所示。

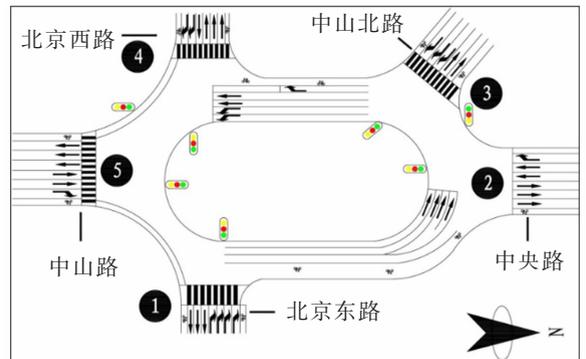


图 1 鼓楼环交平面图

Fig.1 Circular plan of the Gulou roundabout

在经过我们实地调查和数据样本采集后,我们发现在早晚高峰阶段环形交叉口的交通流量无论是机动车还是行人都是相对而言很大的,并且发现了相当普遍甚至严重的行人违章过街现象,环形交叉口的实际运行效率不是很理想。利用美国 HCM 方法代入测量数据,得到机动车各进口车道饱和流量和各进口人行横道饱和流量,如表 1 所示。

表 1 机动车饱和流量和行人饱和流量  
Tab.1 Saturated flow of vehicles and pedestrian saturation flow

饱和流量	进口道				
	1 进口	2 进口	3 进口	4 进口	5 进口
机动车饱和流量/(veh/h)	1 920	1 680	1 440	2 040	1 560
人行横道饱和流量/(ped/h)	7 200	-	7 200	7 200	7 200

各进口道机动车流量和行人流量如表 2 所示。

表 2 机动车流量和行人流量  
Tab.2 Motor vehicle flow and pedestrian flow

进口道		流量	
		机动车流量/(veh/h)	行人流量/(ped/h)
1 进口	右	1 080	576
2 进口	直	600	-
	右	216	
3 进口	右	744	720
4 进口	直	504	696
	右	192	
5 进口	直	480	648
	右	168	

因为该交叉口为五路交叉口,相位相互交织,用传统相位定义不太好区分。所以将鼓楼环形交叉口的信号配时用时间段来划分各相位,共 5 个相位,信号周期  $C=150\text{ s}$ ,周期开始阶段定为中山北路方向即 3 号进口道的绿灯启亮阶段,相序图参照图 2。

基于交叉口机动车流量、行人流量等各项数据,计算机动车延误、机动车停车率、行人延误和道路通行能力的权重系数,而且每个相位的权重系数要被归一化的处理,相加得到的总和为 1,每个相位的机动车、行人流量之比和各控制指标的权重系数如表 3 所示。

机动车相位						
行人相位						
相位	0~30 s		31~52 s	55~90 s	93~143 s	
序号	第一相位		第二相位	第三相位	第四相位	

图 2 鼓楼环形交叉口信号相位

Fig.2 Signal phase of the Gulou roundabout

表 3 各相位机动车行人流量比和控制指标权重系数

Tab.3 Pedestrian flow ratio and weight coefficient of control index for different phases of motor vehicle

相位	系数						
	机动车流量比	机动车流量比之和	行人流量比	机动车延误权重系数	行人延误权重系数	停车率全系数	通行能力权重系数
第一相位	0.214	0.874	-	0.054	0	0.041	0.905
第二相位	0.156		-	0.032	0	0.036	0.932
第三相位	0.176		0.24	0.074	0.029	0.016	0.881
第四相位	0.328		0.16	0.085	0.032	0.022	0.861

经过实地的观察测量,第三相位、第四相位的抵达率在数据拟合之后分别服从参数为 $\lambda_3=0.66$ 和 $\lambda_4=0.73$ 的泊松分布所以它们的行人红灯阶段抵达过街横道处需要等待穿过过街横道的平均时间分别为 $\overline{t_{ped,C,3}}=0.66 \times 35=23.1$  s,  $\overline{t_{ped,C,4}}=0.73 \times 50=36.5$  s。

首先用我们收集到的环形交叉口的基本数据计算出韦伯斯特配时方法的具体配时,并得到相应的机动车延误、停车率、行人延误和交叉口通行能力,构建环形交叉口的多目标配时优化模型以及确立相应的约束条件。求解多目标函数时,我们运用遗传算法在编程软件 MATLAB2016a 上来实现,算法的种群规模  $N=50$ ,交叉概率  $p_c=0.93$ ,变异概率  $p_m=0.06$  经过试算确定,然后确立 150 次为总的迭代次数。并运用 Webster 算法、交叉口原数据计算各指标值进行比较,最终结果如表 4 所示。

表 4 环形交叉口信号配时方案结果对比  
Tab.4 Comparison of signal timing schemes at the roundabout

方案	C/s	相位时长/s				机动车延误/(s/veh)	行人延误/(s/ped)	停车率	通行能力/(veh/h)
		第一相位	第二相位	第三相位	第四相位				
原方案	150	30	21	35	50	43.85	57.15	0.564	3 230
韦伯斯特方案	166	37	25	37	53	48.02	62.67	0.578	3 413
优化方案	133	28	15	29	47	37.43	49.61	0.523	3 654

最终信号配时优化如图 3 所示。

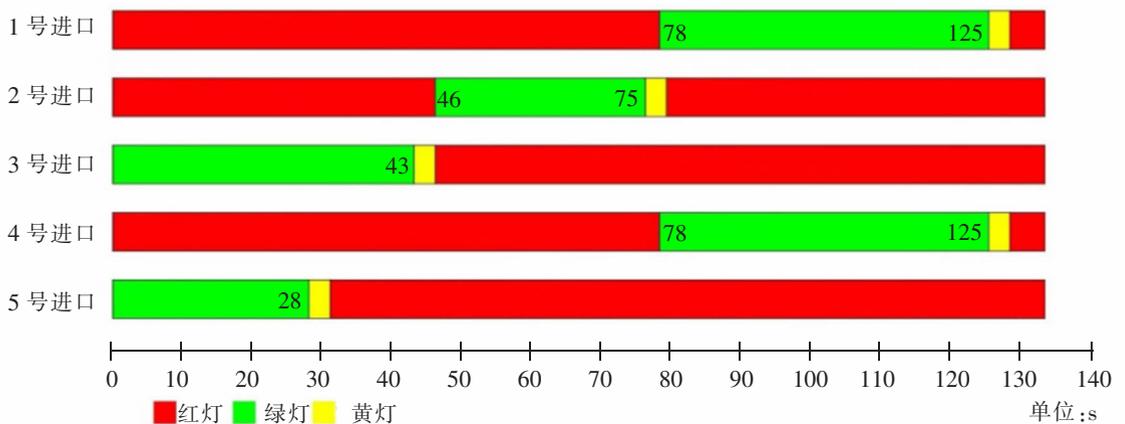


图 3 鼓楼环形交叉口信号配时优化  
Fig.3 Signal timing optimization at the Gulou roundabout

将三个方案进行对比,韦伯斯特方法与本文优化方案均提升了交叉口的通行能力。但是细看我们发现,韦伯斯特方案提升通行能力是以牺牲机动车、行人、环境的权益为前提的,它的机动车延误、行人延误、停车率相比较原方案分别增涨了 9.5%,9.7%,2.5%。但是本优化方案不仅提升了交叉口通行能力,同时兼顾了机动车、行人、环境的权益,相比较韦伯斯特方案,机动车延误、行人延误、停车率分别降低了 22.1%,20.1%,9.5%;相比较原方案,机动车延误、行人延误、停车率分别减少了 14.6%,13.2%,7.3%,交叉口通行能力提升 13.1%,说明每项控制指标均得到明显改善。从对比结果可以得出,本文构建的多目标配时优化模型在环形交叉口是可行的,并且设计的求解算法是有效果的,比原方法与韦伯斯特方法都要有效。

#### 4 结论

本文的研究对象为环形交叉口,而对于环形交叉口而言,因为穿越横道的行人的过街行为会影响机动车在环形交叉口进口处的正常行驶,给交通带来隐患,所以在顾及机动车相位的同时也要给予行人相位更

多的权重。将优化模型的约束条件确定为行人过街需要的最大可以忍耐的等待过街时间与穿越横道需要的最短的时间,并且将行人违章可能给机动车带来延误的不好影响纳入研究之中,统筹人车权益,将最能代表各因素的指标纳入优化模型中。在求解多目标模型时选取遗传算法,通过 MATLAB 得出结果。接着通过选取的实例来测验模型在实际中的有效性。本文构建的模型从行人的角度出发,充分考虑了行人过街的需求,在保证道路通行能力尽量高效的基础上给予行人过街的安全保障并保证过街的效率,改善我国环形交叉口综合效益与交通冲突有着一定的作用。

### 参考文献:

- [1] RAHIM F B, VARUN A. Roundabout evaluation and design: A site selection procedure[R]. Department of Civil and Environmental Engineering, 2009: 16–25.
- [2] SCOTT R. High speed approaches at roundabouts[C]. TRB National Roundabout Conference, 2005.
- [3] FOULADVAND M E, SADJADI Z, SHAEBANI M R. Characteristics of vehicular traffic flow at a roundabout[J]. American Physical Society, 2004, 70(42): 046132.
- [4] 项乔君, 王炜, 等. 低渠化环形交叉口通行能力理论模型及其应用[J]. 公路交通科技, 2000, 17(1): 42–45.
- [5] 任福田, 杨峰, 荣建, 等. 北京市环形交叉口通行能力分析[J]. 公路交通科技, 2005, 18(3): 64–66.
- [6] 谢军, 严宝杰, 张生瑞, 等. 城市环形交叉口通行能力理论模型[J]. 长安大学学报, 2007, 27(4): 75–78.
- [7] 龚纯, 王正军. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 179–19.

## Research on Roundabout Timing Optimization Method in View of Pedestrian Overpass

Ma Genghua<sup>1</sup>, He Rui<sup>2</sup>, Zheng Changjiang<sup>2</sup>, Fang Yajun<sup>2</sup>, Xu Shengxin<sup>3</sup>

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University Nanjing 210098, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Roundabout is mostly located in the downtown area, which can beautify the urban landscape and alleviate traffic. However, there is a widespread traffic jam in the ring intersection, which brings heavy traffic capacity in the central area of the city, and a large number of traffic flows lead to serious human and car conflicts, resulting in great hidden danger to the traffic safety of the roundabout. By analyzing the traffic characteristics of pedestrian crossing in road crosswalk, this paper constructs a multi-objective optimization model of signal control and selects genetic algorithm. It shows that the model can effectively improve the traffic capacity of the roundabout and alleviate traffic conflicts in China.

**Key words:** roundabout; pedestrian crossing; capacity; multi-objective optimization model; traffic safety