

交通控制中展宽段设计与信号配时的优化

王殿海^{2,1}, 郭伟伟¹, 宋现敏¹, 路 婷¹

(1. 吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 针对展宽段设计与信号配时之间互相影响和制约的问题, 本文提出了优化配时依据和相位相序的解决方法. 分析了展宽段设计与信号控制之间的内在联系; 提出了交叉口无空间限制条件下展宽段的设计思想, 既应满足信号控制需求又要保证排队车辆不发生溢出, 且要尽量减少对对向出口道车辆通行的影响, 基于此思想综合运用交通控制理论及交通流理论建立了展宽段长度的计算模型; 当交叉口空间受限制时, 针对直左车流间无相互干扰的情况, 提出了以当量饱和流率作为信号配时依据的控制思路, 而对于直左车流间存在相互干扰较严重的情况, 提出了优化相位相序的控制策略, 结合韦伯斯特理论建立了以延误最小为目标的非线性优化模型, 并采用遗传算法求解相关参数. 最后利用VISSIM仿真软件对提出的方法和模型进行了模拟验证.

关键词: 展宽段设计; 信号控制; 当量饱和流率; 相位优化; 遗传算法; 交通仿真

中图分类号: U491 **文献标识码:** A

Optimization of stretching-segment design and signal timing in traffic control

WANG Dian-hai^{2,1}, GUO Wei-wei¹, SONG Xian-min¹, LU Ting¹

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun Jilin 130022, China;

2. College of Construction, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310058, China)

Abstract: To deal with the interaction between the stretching-segment design and signal timing, we optimize the timing warrants, the phase and the phase sequence. By the intrinsic link between the stretching-segment and the signal control, we design the stretching-segment without considering the constraint for intersection space. This design not only meets the requirements in signal control, but also ensures no overflow for the queue vehicles and minimal impact on the opposite exit-lane traffic. By using the traffic control theory and traffic flow theory, we build the computational model for the stretching-segment length. When the intersection space is constrained, the equivalent saturation flow rate is used as the warrant for the signal timing in the control strategy, if there is not interference between the straight traffic flow and the left-turn traffic flow. On the other hand, if serious interference exists between these two traffic flows, the control strategy is to optimize the phase and phase sequence. By this strategy, we build a nonlinear optimization model based on Webster theory to minimize the delay and use genetic algorithm for determining associated parameters. The proposed methods and models are simulated for validity by using the simulation software VISSIM.

Key words: stretching segment design; signal control; equivalent saturation flow rate; phase optimization; genetic algorithm; traffic simulation

1 引言(Introduction)

在信号交叉口进口道的设计中拓宽进口道以增加车道数是提高交叉口通行能力的有效方法. 进口道拓宽部分常称为展宽段, 其设计与信号控制之间是否相互适应直接影响交叉口的运行效率. 关于展宽段的设计, 1967年Leisch^[1]提出了3种不同设计速度下的展宽段长度建议值, 但没有做相应的分析, Guell^[2]从理论和实验的角度对上述建议值进行了分析, 但没有本质上的改进. 经过不断的研究探索,

目前国内外均已形成相关规范或标准. 国内从防止左转车溢出的角度, 制定了相应的指标^[3]. 美国、日本等国家以周期内左转车的最大排队长度为设计依据. 然而, 单纯考虑左转车辆的溢出在实际应用中存在一些问题, 如直行车辆溢出导致堵塞, 饱和流率变化降低绿灯利用率等等. 实际中展宽段的设计常无法满足信号设计的需求. 展宽段长度受限条件下交叉口的通行能力得到关注, 美国通行能力手册HCM2000^[4]和加拿大通行能力手册CCG等^[5]采用

不同的车道利用率计算通行能力, Lee^[6]通过模拟手段分析了进口拓宽的交叉口通行能力, 但未考虑溢出拥堵问题; Tian^[7]、杨晓光^[8]、程国柱等^[9]从概率角度研究了展宽段长度受限下的交叉口通行能力. 全永荣^[10]总结了绿灯期间饱和流率下降的配时方法, 主要以迭代的思想获取配时参数. 以上研究主要侧重于展宽段受限对交叉口通行能力的影响, 但对于展宽段受限时如何优化配时方案较少研究. 交叉口渠化设计一旦完成不易改动, 所以适应信号控制的展宽段设计十分必要. 同时展宽段受限条件下, 需要相应优化信号配时参数以改善控制效果.

2 适应信号控制的展宽段设计(Stretching segment design to adapt to signal control)

展宽段的设计主要包括横向和纵向两个方面. 横向设计主要指车道数和车道属性, 可根据实际观测的交通流数据划分车道并确定车道属性, 已有较为成熟的方法, 不再赘述. 纵向设计主要指展宽段的长度, 如图1所示交叉口的进口道W, 展宽段长度为 d , 为方便研究忽略展宽渐变段.

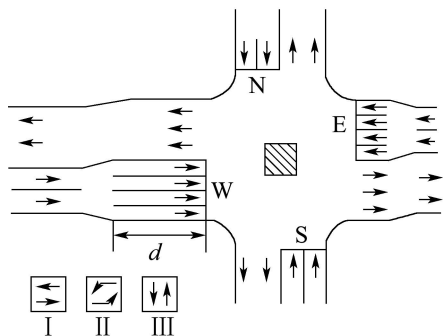


图1 交叉口几何图示及相位相序

Fig. 1 The geometrical chart and the phase of the intersection

2.1 设计思想(Design idea)

展宽段的功能是为信号控制服务, 以图1所示信号交叉口及相位相序为例, 相位I红灯期间, 车道 $l_2 \sim l_4$ (进口道W由内侧向外侧车道依次为 $l_1 \sim l_4$)累积足够的排队车辆, 相位I绿灯期间, $l_2 \sim l_4$ 的车流以饱和流率释放, 从而提高交叉口通行能力. 所以展宽段应具有适应信号控制的容纳能力. 另外, 相位I绿灯期间, 如果 l_1 排队车辆溢出展宽段, 可能导致路段到达直行车辆无法顺利进入 $l_2 \sim l_4$, 形成阻塞; 同理, 相位II绿灯期间, 如果 $l_2 \sim l_4$ 排队车辆溢出展宽段, 也会干扰路段左转车辆顺利进入 l_1 . 所以展宽段的长度还应保证排队车辆不发生溢出. 通常展宽段在拓宽时占用了对向出口道的空间, 展宽段越长越影响对向出口车流的通行效率, 所以展宽段不可以无限延长.

2.2 设计方法(Design method)

根据设计思想, 对于新建交叉口或者空间范围充足的交叉口, 展宽段的长度需要具有适应信号控制的容纳能力. 假设车辆均匀到达、配时方案合理, 以图1进口道W为例, 展宽段长度需满足式(1):

$$d \geq g_{e1} \cdot (S_1 - q_1) \cdot d_c, \quad (1)$$

其中: g_{e1} 为相位I的有效绿灯时间(s); S_1 为相位I的饱和流率(veh/s); q_1 为相位I的到达流率(veh/s); d_c 为安全停车车头间距(m).

为了减少对对向出口车流的影响, 对式(1)取等号, 即可获得展宽段长度. 在确定展宽段长度后, 需对其是否能保证最大排队长度不溢出展宽段进行验证, 建议采用模拟验证方法.

通常在低饱和度时, 合理的配时方案会保证相位绿灯时间有一定富余, 按照式(1)设计展宽段长度能够满足需求. 在高饱和度时, 可能会有二次排队现象出现, 此时能否满足需求取决于实际流量及配时方案. 验证结果如果不满足需求则应根据具体情况调整展宽段设计方案甚至信号配时方案, 重新验证. 展宽段的设计与信号配时设计之间实际上是一个反复迭代的过程, 二者互为依据才能获取最佳效益.

3 展宽段受限的优化控制方法(Optimization control methods to restrained stretching segment)

由于交叉口几何空间限制, 常使展宽段长度无法满足信号控制需求. 此时, 需根据实际情况局部优化配时参数甚至整体调整控制方案, 以达到提高交叉口运行效率的目标.

3.1 问题分析及解决思路(Problem analysis and solution ideas)

采用图1所示交叉口的渠化形式及相位相序作为案例进行分析. 假设进口道W展宽段长度限制为 d_1 , 其他进口道展宽段长度均无限制. 进口道W, E均渠化成4条车道, 属性如图, 忽略右转(右转车辆对本文研究影响较小, 进口道N, S均渠化成2条车道, 属性如图1, 其对本文研究影响较小, 为方便叙述及分析, 忽略左右转. 此外, 假设对向车流对称分布. 实际中可能仅左转车道或直行车道的展宽段不足, 也可能左转车道或直行车道的展宽段均不足, 下面分别针对这2种情况进行分析.

1) 仅左转车道或直行车道展宽段不足.

以直行车道展宽段不足为例进行分析. 相位I绿灯初期, 直行车流以 $l_2 \sim l_4$ 3车道饱和流率 S_1 通行, 排队车辆消散完毕后, 路段车辆补充到展宽段继续通行, 由于路段车道数通常少于展宽段车道数, 所

以 S_1 下降至 S_{11} , 直至绿灯结束. 车流通过交叉路口的运动特性如图2所示.

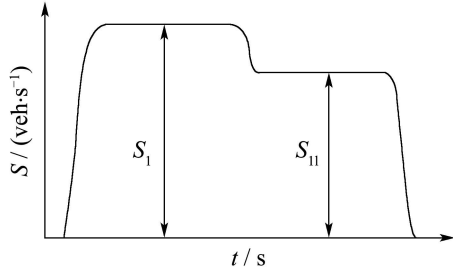


图2 车流运动情况示意图

Fig. 2 The diagram of the vehicle flow movement

饱和流率 S_1 持续的时间为

$$g_{eS_1} = \frac{d_1}{(S_1 - q_1) \cdot d_c} \quad (2)$$

其中 $g_{eS_1}(s)$ 为饱和流率 S_1 持续的时间; 其余同上.

同理, 左转车道展宽段不足情况类似, 不再重复分析.

2) 左转车道和直行车道均不足.

相位I绿灯初期, 直行车流以 $l_2 \sim l_4$ 3车道饱和流率 S_1 通行, 排队车辆消散完毕后, 后续到达直行车辆受 l_1 排队车辆溢出的干扰, 不能及时补充进入展宽段, 饱和流率持续下降, 直至为0, 车辆无法在有效绿灯时间内完全消散, 可能导致拥塞出现. 饱和流率 S_1 持续的时间 g_{eS_1} 同式(2). 相位II绿灯期间情况雷同不再赘述.

3.2 第1种情况的优化方法(Optimization method to the first condition)

为方便分析, 将图2简化为图3, $g_{eS_{11}}(s)$ 为车流以非饱和流率 $S_{11}(\text{veh/s})$ 释放的时间, 其余参数同前.

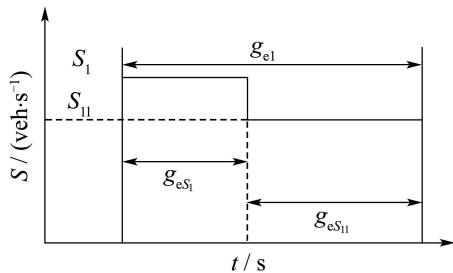


图3 车流运动情况简化图

Fig. 3 The simplified diagram of the vehicle flow movement

为了获取恒定的饱和流率作为信号配时依据, 假设直行车流在有效绿灯时间 g_{e1} 内以恒定的饱和流率通行, 称其为当量饱和流率 $S_{1D}(\text{veh/s})$, 则有:

$$S_{1D} = \frac{S_1 g_{eS_1} + S_{11} g_{eS_{11}}}{g_{e1}} \quad (3)$$

将式(2)带入式(3),

$$S_{1D} = \frac{S_1 \cdot d_1 / d_c (S_1 - q_1) + S_{11} g_{eS_{11}}}{g_{e1}} \quad (4)$$

以 S_{1D} 作为信号配时依据进行设计. 由韦伯斯特最佳周期理论^[10]确定基本配时参数, 如式(5)~(8):

$$C = \frac{1.5L + 5}{1 - Y} = \frac{1.5L + 5}{1 - (\sum_{j=1}^3 y_j)} \quad (5)$$

$$y_1 = \frac{q_1}{S_{1D}} \quad (6)$$

$$y_j = \frac{q_j}{S_j}, j = 2, 3, \quad (7)$$

$$g_{ej} = \frac{(C - L) \cdot y_j}{Y} \quad (8)$$

其中: L 为周期损失时间(s); Y 为交叉口总流量比; y_j 为相位 j 的流量比; q_j 为相位 j 的到达流率(veh/s); S_j 为相位 j 的饱和流率(veh/s); g_{ej} 为相位 j 的有效绿灯时间(s); 其余参数同前. 以当量饱和流率 S_{1D} 作为配时依据, 可以为展宽段受限进口道所在相位提供合理的有效绿灯时长, 公平分配通行权利, 但其前提是直左车流间相互干扰较小, 非饱和流率 S_{11} 存在并能够持续一定时间, 文献[12]给出了定量依据.

3.3 第2种情况的优化方法(Optimization method to the second condition)

针对第2种展宽段受限情况, 减少直行、左转车流间的相互干扰从而降低延误是控制的主要目标. 将进口道W作为独立相位实行单口释放, 采取每周周期2次放行措施. 实际应用中可根据交通状况采取每周周期1~2次放行或2个周期3次放行等策略.

设计相位相序如图4所示, 其中相位I, III为进口道W所在相位.

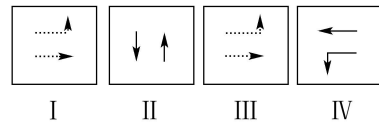


图4 相位相序图

Fig. 4 The phase and phase sequence diagram

假设相位I, III的到达流量分别为 q_{11} , q_{13} , q_{11} 和 q_{13} 之和为进口道W的总流量, 则有

$$q_1 = q_{11} + q_{13} \quad (9)$$

车流均匀到达, 则 q_{11} 为从相位III绿灯结束时刻到相位I绿灯结束时刻之间到达的车辆数, q_{13} 为从相位I绿灯结束时刻到相位III绿灯结束时刻之间到达的车辆数, 所以 q_{11} 和 q_{13} 在时间上存在式(10)所示关

系:

$$\frac{q_{11}}{q_{13}} = \frac{g_{e1} + L_1 + g_{e4} + L_4}{g_{e3} + L_3 + g_{e2} + L_2}, \quad (10)$$

其中: g_{ej} 为相位 j 的有效绿灯时间(s), $j = 1, 2, 3, 4$; L_j 为相位 j 的损失时间(s); 其余同上.

基本配时参数为

$$C = L + \sum_{j=1}^4 g_{ej}, \quad (11)$$

$$x_j = \frac{q_j}{CAP_j} = \frac{q_j}{S_j} \cdot \frac{C}{g_{ej}}, j = 1, 2, 3, 4, \quad (12)$$

其中: x_j 为相位 j 的饱和度; 其余同上. 由式(12)可知, x_j 实为关于有效绿灯时间 g_{ej} 的函数, 为表述方便, 用式(13)表示:

$$x_j = f_x(g_{ej}), j = 1, 2, 3, 4. \quad (13)$$

采取各相位等饱和度的原则分配绿灯时间.

$$x_1 = x_2 = \cdots = x_4. \quad (14)$$

通常在流量不是很大的情况下, 可由韦伯斯特延误模型计算延误, 则车道 i 的延误 d_i 为

$$d_i = \frac{C(1 - \lambda_i)^2}{2(1 - y_i)} + \frac{x_i^2}{2q_i(1 - x_i)}, i = 1, 2, \cdots, m, \quad (15)$$

其中: $\lambda_i = g_{ei}/C$, 为车道 i 的绿信比; y_i 为车道 i 的流率比; x_i 为车道 i 的饱和度; q_i 为车道 i 的到达流率(veh/h); m 为车道总数; 其余同上.

交叉口平均延误 $\bar{d}$ 为

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^m d_i q_i / \sum_{i=1}^m q_i. \quad (16)$$

由式(9)~(16)可知, 交叉口平均延误 $\bar{d}$ 为有效绿灯时间的函数, 为表述方便, 用式(17)表示.

$$\bar{d} = f_{\bar{d}}(g_{ej}), \quad (17)$$

由前述分析, 本优化方法的目的是获取展宽段限制下的延误最小的信号配时方案, 所以建立以延误最小为目标的非线性优化模型, 如式(18)(19)所示.

目标函数:

$$\min \bar{d} = f_{\bar{d}}(g_{ej}); \quad (18)$$

约束条件:

$$f_x(g_{e1}) = f_x(g_{e2}) = \cdots = f_x(g_{e4}). \quad (19)$$

采用遗传算法^[11]可以求解最优函数值及各相位有效绿灯时间. 通过对相位相序进行优化, 能够有效改善直左车流间互相阻碍的现象, 有效绿灯时间内车流以饱和流率释放, 提高了绿灯利用率. 另外, 如果进口道 **W** 流量较大, 在绿灯期间内, 车流可能先以展宽段多车道饱和流率通行, 然后以非饱和流率继续

通行, 此时可综合使用优化方法1. 另外优化方法2可能使相位增加, 导致周期损失时间增大, 但在展宽段不足条件下, 消除直左车流间的相互干扰更加重要.

4 模拟验证(Simulation and verification)

为检验上述展宽段设计方法及展宽段受限的优化控制方法的控制效果, 本文使用VISSIM仿真软件进行模拟验证.

4.1 展宽段长度设计方法验证(Verification of design method to stretching segment length)

4.1.1 仿真条件及参数设置(Simulation conditions and parameters setting)

采用图1所示交叉口及相位相序作为案例进行模拟, 以进口道 **W** 为主要研究对象, 进口道 **N**, **S** 输入流量恒为400 veh/h, 进口道 **W**, **E** 输入流量如表1第2列所示, 周期损失时间9 s, 其余仿真参数参考韦伯斯特周期模型设置, 如表1所示. Vissim仿真环境中, 车型设置为小型车, 以减少车长波动对模拟的干扰. 仿真时间设置为4800 s, 采集1200~4800 s的数据, 以周期为采集间隔. 分别对表1所示14组数据进行模拟, 每组数据模拟10次.

表 1 模拟输入参数

Table 1 The input parameter of simulation

序号	流量/(veh·h ⁻¹)	周期/s	λ_1	λ_2	λ_3
1	100	22	0.1	0.1	0.4
2	200	24	0.16	0.16	0.31
3	300	26	0.19	0.19	0.26
4	400	28	0.23	0.23	0.23
5	500	30	0.25	0.25	0.2
6	600	33	0.27	0.27	0.18
7	700	37	0.29	0.29	0.17
8	800	42	0.31	0.31	0.16
9	900	48	0.33	0.33	0.15
10	1000	56	0.35	0.35	0.14
11	1100	67	0.37	0.37	0.13
12	1200	83	0.38	0.38	0.13
13	1300	111	0.4	0.4	0.12
14	1400	167	0.41	0.41	0.12

4.1.2 结果分析(Result analysis)

根据以上参数设置和展宽段长度理论计算模型式(1)可得到展宽段长度的理论计算值, 将其与模拟值对比, 结果如图5所示. 由图5可知, 在低流量时理论计算值高于模拟值, 在中间流量状态时与模拟值较为接近, 而在高流量时低于模拟值, 与前述1.2节分析吻合. 理论计算值与模拟值的平均绝对误差为9 m, 平均相对误差为22%, 误差在可以接受的范

围内.

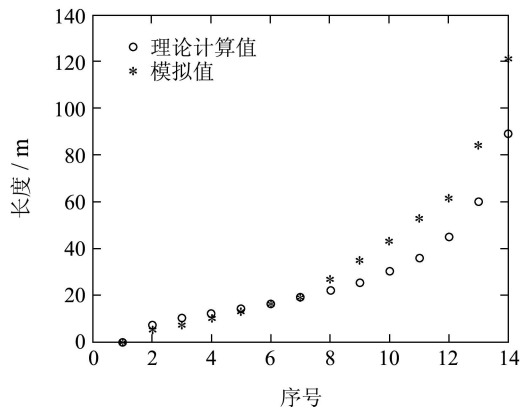


图5 理论计算值与模拟值对比

Fig. 5 The contrast between the theoretical value and the analog value

模拟结果表明, 本文提出的展宽段设计方法具有一定的实用性, 在流量处于中间状态时效果最佳.

4.2 展宽段受限的优化控制方法验证

(Verification of optimization control method to restrained stretching segment)

4.2.1 仿真思路及参数设置(Simulation idea and parameters setting)

以图1所示交叉口作为背景进行模拟. 为了模拟展宽段不足的效果, 将进口道W展宽段长度限制为24 m, 其他各口展宽段均不受限制. 为了验证以当量饱和和流率作为配时依据的有效性, 首先设置合适的流量使进口道W直行车流展宽段不足, 而左转车流展宽段充足, 即无直左干扰, 然后逐渐增加左转车流量, 会出现直左干扰并随着流量增加而逐渐严重, 此时验证第2种情况的优化控制方法. 以进口道W为主要研究对象. 进口道N, S输入流量恒为500 veh/h, 进口道W, E直行流量恒为900 veh/h, 左转流量如表2第2列所示. 以饱和流率 S_1 进行配时设计的各项参数如表2所示, 以下称其为“原方法”; 以当量饱和和流率 S_{1D} 进行信号设计的各项参数如表3所示, 称其为“方法1”. 分别对表2、表3各组数据进行仿真. 仿真环境设置同4.1.1节.

4.2.2 仿真结果分析(Simulation results analysis)

模拟结果如图6~9所示. 其中图6、图7为进口道W的平均车辆延误和平均最大排队长度, 由图可知, 方法1的平均车辆延误和平均最大排队长度显著低于原方法, 分别降低了9%, 23%. 说明以当量饱和和流率进行配时设计更加合理. 整个交叉口的平均车辆延误和平均最大排队长度如图8、图9所示. 由于当量饱和和流率 S_{1D} 小于饱和流率 S_1 , 周期随略有增大, 但方法1的交叉口平均车辆延误及交叉口平均最

大排队长度未见显著变化. 说明以当量饱和和流率作为进口道W的配时依据对交叉口其他进口道的车流未造成显著影响, 且能有效改善展宽段受限进口道的运行效果.

表2 原方法模拟输入参数

Table 2 The input parameter of the original simulation method

序号	左转流量/(veh·h ⁻¹)	周期/s	λ_1	λ_2	λ_3
1	0	27	0.36	0	0.3
2	50	28	0.34	0.06	0.28
3	100	29	0.32	0.11	0.27
4	150	30	0.3	0.13	0.26
5	200	32	0.29	0.19	0.24
6	250	33	0.27	0.23	0.21
7	300	35	0.26	0.26	0.22
8	350	37	0.25	0.29	0.21
9	400	39	0.24	0.32	0.2

表3 方法1模拟输入参数

Table 3 The input parameter of the simulation method 1

序号	左转流量/(veh·h ⁻¹)	周期/s	λ_1	λ_2	λ_3
1	0	30	0.38	0	0.32
2	50	31	0.35	0.06	0.3
3	100	32	0.33	0.11	0.25
4	150	32	0.31	0.15	0.26
5	200	34	0.29	0.2	0.25
6	250	35	0.31	0.21	0.23
7	300	37	0.27	0.27	0.22
8	350	39	0.28	0.28	0.21
9	400	42	0.29	0.31	0.19

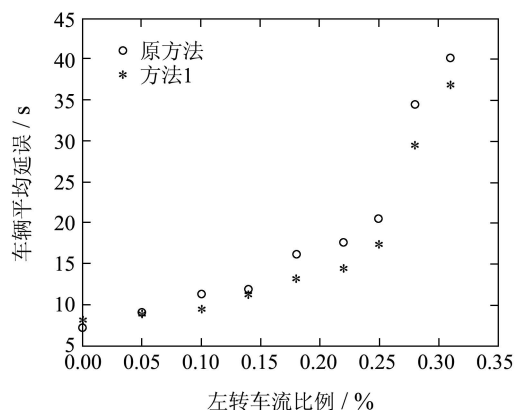


图6 进口道W平均车辆延误

Fig. 6 The average vehicle delay of the approach W

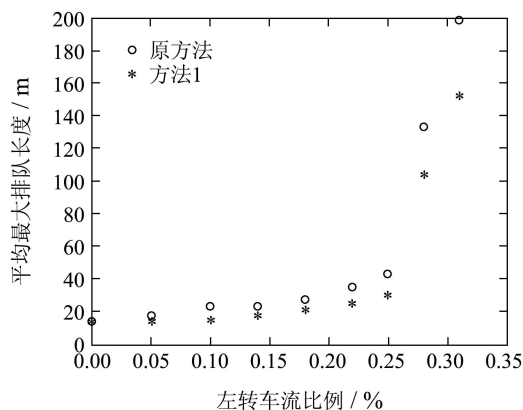


图 7 进口道W平均最大排队长度

Fig. 7 The average maximal queue length of the approach W

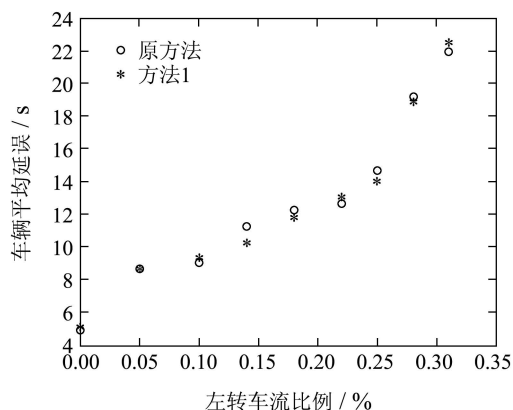


图 8 交叉口平均车辆延误

Fig. 8 The average vehicle delay of the intersection

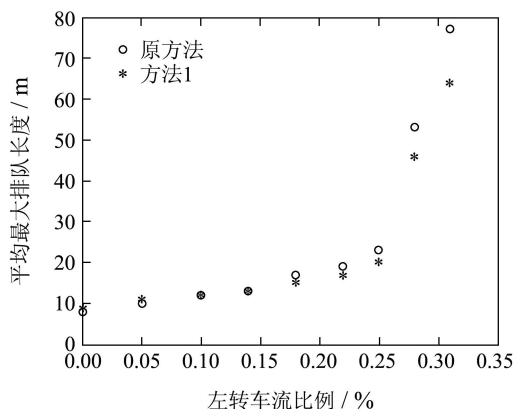


图 9 交叉口平均最大排队长度

Fig. 9 The average maximal queue length of the intersection

由图6~9不难发现, 当左转车比例高于25%时, 进口道W和整个交叉口的平均车辆延误和平均最大排队长度迅速增加. 这是由于进口道W的左转车流和直行车流相互干扰且越来越严重, 降低了通行效率. 当左转车流比例增加到31%时(即第9组仿真数据), 平均车辆延误和平均最大排队长度急剧增加, 进口道W的排队车辆已经上溯到路段形成拥堵, 出

现了仿真条件预置的直左车流严重干扰现象. 此时采取方法1已经失效, 采用第2种情况的优化控制方法重新进行模拟. 根据2.3节中提出的方法及模型(以下简称方法2), 对上述第9组数据重新优化相位相序及配时参数, 得出配时参数如表4所示.

表 4 方法2信号配时方案

Table 4 The signal timing program of method 2

周期/s	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
54	0.15	0.30	0.15	0.19

模拟结果如表5、表6所示, 采用方法2时, 进口道W和交叉口的平均车辆延误分别降低了23%, 10%, 平均最大排队长度分别降低了32%, 27%. 平均车辆延误和平均最大排队长度之所以显著降低, 是因为采用方法1时已经出现了排队上溯的拥堵现象, 而方法2有效减少了进口道W的直左车流间干扰, 使进口道W恢复正常通行, 从而降低了进口道W和交叉口的平均车辆延误及平均最大排队长度, 改善了整个交叉口的运行效率.

表 5 平均车辆延误

Table 5 The average vehicle delay

类别	方法1/s	方法2/s	降低/%
进口道W	36.80	28.26	23
交叉口	22.45	18.30	10

表 6 平均最大排队长度

Table 6 The average maximal queue length

类别	方法1/m	方法2/m	降低/%
进口道W	152	103	32
交叉口	64	47	27

5 总结(conclusion)

分析了展宽段与信号控制间的关系, 明确了展宽段需要为交叉口聚集车辆提供空间的功能, 展宽段的设计既要考虑信号控制需求又要避免排队溢出, 基于此提出了展宽段长度设计方法及计算模型. 当展宽段的功能受到限制时, 针对直左车流有无干扰的情况, 分别提出了以当量饱和流率作为配时依据和优化相位相序的控制思路, 最后通过VISSIM仿真软件模拟验证了优化方法和模型的有效性.

参考文献(References):

- [1] LEISCH J E. Capacity analysis techniques for design of signalized intersections[J]. *In Public Roads*, 1967, 34(9): 171 – 210.
- [2] GUELL L D. Additional through lanes at signalized intersections[J]. *Transportation Engineering*, 1993, 109(4): 499 – 505.

- [3] 杨晓光. 城市道路交通设计指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
(YANG Xiaoguang. *Manual of Urban Traffic Design*[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.)
- [4] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. *Highway Capacity Manual 2000*[M]. Transportation Research Board, Washington DC, American: National Research Council, 2000.
- [5] TEPLY S, ALLINGHAM D I, RICHARDSON D B, et al. *Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections*[M]. Second Edition. Canada: Canadian Institute of Transportation Engineers, 1995.
- [6] LEE JAE JOON. *Impact of lane drops on intersection capacity*[D]. North Carolina: North Carolina State University, 2005.
- [7] TIAN Z Z, WU N. Probabilistic model for signalized intersection capacity with a short right-turn lane[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2006, 132 (3): 205 – 212.
- [8] 杨晓光, 赵靖, 曾滢, 等. 短车道对信号交叉口通行能力应先研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(12): 151 – 156.
(YANG Xiaoguang, ZHAO Jing, ZENG Ying, et al. Research on impact of short lane on signalized intersection capacity[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008, 25(12): 151 – 156.)
- [9] 程国柱. 路口拓宽条件下信号交叉口通行能力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
(CHENG Guozhu. *Research on the capacity of widened signal-ized intersection*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002.)
- [10] 全永森. 城市交通控制[M]. 北京: 中国城市出版社, 1989.
(QUAN Yongsen. *Urban Traffic Control*[M]. Beijing: China City Press, 1989.)
- [11] 刘智勇, 李水友. 基于免疫遗传算法的区域交通自适应协调控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 119 – 125.
(LIU Zhiyong, LI Shuiyou. Immunity genetic algorithms based adaptive control method for urban traffic network signal[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 119 – 125.)
- [12] 尚斌. 基于信号交叉口渠化段长度的配时参数优化方法[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
(SHANG Bin. *Optimal method of signal parameters based of channelization length at signalized intersections*[D]. Changchun: Jilin University, 2007.)

作者简介:

王殿海 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为交通控制与管理、交通流理论, E-mail: wangdianhai@sohu.com;

郭伟伟 (1983—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为交通控制、交通组织, E-mail: cynthiaww@foxmail.com;

宋现敏 (1978—), 女, 工学博士, 目前研究方向为交通控制, E-mail: songxianmin0708@163.com;

路婷 (1986—), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为交通控制与管理、智能交通控制系统, E-mail: tinglu_1986@yahoo.com.cn.