

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210916001

文章编号: 1674-599X(2023)01-0091-09

城市主干道短距离交叉口信号优化控制

许倩^{1,2}, 招晨¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.晋中学院 机械系, 山西 晋中 030619)

摘要:城市主干道短距离交叉口受进口道长度的限制, 交通流量较大, 极易发生排队溢出, 影响上游路口的车辆通行。为解决该问题, 本研究先从交通流运行和交通波传播的角度, 分析短距离进口道内车辆的到达-排队-驶离过程, 提出滞留排队的概念, 得到最长排队长度和滞留排队长度的计算公式。再据此和车辆到达驶离图得到短距离进口道单位周期延误的计算方法, 修正交叉口车均延误公式。然后, 以交叉口车均延误最小化为目标, 以短距离车道的最长排队长度不得超过路段长度和禁止车辆二次排队为约束条件, 建立短距离交叉口信号控制的优化模型, 并运用遗传算法对其进行求解。最后, 以长沙市的芙蓉路-城南路交叉口为例, 利用 Vissim 4.3 软件进行信号优化前后的仿真验证。研究结果表明: 与优化前的信号控制方案相比, 优化后的信号控制方案的短距离进口道平均排队长度降低了 36.9%, 最长排队长度减少了 42.3%, 交叉口车均停车次数减少了 21.2%, 通过车辆数增加了 19.8%, 车均延误减少了 25.8%, 这些结果均说明该方案能有效地防止短距离进口道的排队溢出, 大幅提高短距离交叉口的通行能力与运行效率。

关键词: 交通流; 短距离交叉口; 交通波理论; 信号优化

中图分类号: U491

文献标志码: A

Signal optimal control of short-distance intersections on urban arteries

XU Qian^{1,2}, ZHAO Chen¹

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jinzhong University, Jinzhong 030619, China)

Abstract: The traffic flow at short-distance intersections on urban arterial roads is large, and the traffic flow is limited by the length of the entrance road, which is prone to queue overflow. This traffic problem affects the vehicular traffic at the upstream intersection. In this paper, from the perspective of traffic flow operation and traffic wave propagation, the process of vehicle arrival-queuing-departure in short-distance entrance lanes was analysed; the concept of stranded queuing was put forward, and the models of maximum queuing length and stranded queuing length were established. According to the queuing length model and the vehicle arrival and departure diagram, a vehicle average delay model suitable for short-distance intersections was established. Taking the minimum delay of vehicles at the intersection as the goal, the maximum queuing length of the short-distance lane does not exceed the length of the road section and preventing the vehicles from queuing twice as the constraints, an optimization model of signal control at the short-distance intersection was established. Genetic Algorithms are used in the solving process. The intersection of Furong Road and Chengnan Road in Changsha was used as an example for application. The VISSIM software is used for the simulation verification before and after signal optimization. The results show that: the optimized signal control scheme reduces the average queuing at short-distance entrances by 36.9%, the maximum queuing by 42.3%, and the average number of stops at intersections by 21.2%. The number of passing vehicles

收稿日期: 2021-09-16

基金项目: 长沙理工大学实践创新与创业能力提升计划(CX2020SS18)

作者简介: 许倩(1997—), 女, 长沙理工大学硕士研究生。

increased by 19.8%, and the average vehicle delay decreased by 25.8%, which proves that the method proposed in this paper can effectively prevent the queue overflow phenomenon at the short-distance entrance, and improve the traffic capacity and operation efficiency of the intersection.

Key words: traffic flow; short-distance intersections; traffic wave theory; signal control optimization

随着我国城市化的快速发展,城市道路不断增加,路网内交叉口越来越密集,形成了许多进口道长度较短的交叉口。由于这些进口道的长度较短,在红灯期间排队车辆的队伍长度常超出进口道,形成排队溢出现象^[1],影响上游路口的车辆通行。另外,车辆在短距离进口道内频繁停车和启动,极易相互干扰,大幅增加了车辆延误^[2],导致城市道路通行能力下降。因此,对于这类交叉口,除通过拆迁改建等方式来改变交叉口的物理特征外^[3],还可以采用优化信号控制方案的方法^[4],节省成本、高效省时。

目前,许多学者对交叉口信号控制优化问题进行了研究。王秋平等^[5]将交叉口车辆延误和停车次数的加权平均函数作为目标函数,以饱和度为约束条件,得到了相应的信号配时优化方案。祁宏生等^[6]以减少路段排队长度为目标,构建了反映路段内时空资源利用情况的综合饱和度指标,以各相位综合饱和度相等为约束条件,构建了信号配时模型并进行优化,并证明了该模型能显著提高交叉口运行效率。丁靖等^[7]构建了采用矩阵来表示路口相位方案的配时模型。目前,对短距离交叉口信号控制优化设计的研究主要集中在防止排队溢出的问题上。游黄阳等^[8]根据高峰时段每小时平均排队车辆数,估算路段最长排队长度,以最长排队长度必须小于路段长度为约束条件,防止车辆溢出。李伟^[9]将红灯时间内驶入连线路段的车辆数作为排队车辆数确定最长排队车辆数,根据最长排队车辆数确定周期内最长排队长度,但由于最长排队的长度为预估值,计算结果具有不确定性。杨晓芳等^[10]运用交通波理论求排队车辆的拥挤消散时间,得到了路段内最长排队长度,并据此建立了短距离交叉口的信号控制优化模型,该研究建立在交叉口交通量较小的基础上,未考虑交通量接近饱和状态时交通波传播的影响。肖秀春等^[11]以两个近距离相邻交叉口为研究对象,以系统平均延误最小化为目标,以信号周期、有效绿灯时间这两者为约束条件,进行了优化设计。该研究采用稳态模型确定交叉口延

误,未考虑短距离限制对延误计算的影响。

本研究主要分析和讨论当城市主干道的短距离交叉口交通流量较大时,车道内交通流的运行规律及排队的形成过程。同时,结合车流运行规律,建立考虑进口道长度限制的车道延误计算公式,并以此对交叉口的车均延误公式进行修正。以交叉口车均延误最小化为目标函数,以最长排队长度不得超过短距离进口道长度和到达车辆不能发生二次排队为约束条件,对短距离交叉口信号控制方案进行优化设计。

1 短距离进口道排队模型

本研究根据实际交叉口交通布设情况,将交叉口进口道分为短距离进口道和普通进口道两种。普通进口道能够为车辆变道提供足够的空间,其长度通常在300 m以上,而短距离进口道长度范围为150~300 m。受路段长度的限制,短距离进口道的交通特性与普通进口道的有所区别,本研究分别从交通流运行特性和排队过程两个角度对其进行分析。

1.1 交通流运行特性

1.1.1 车流到达

短距离进口道内的单位时间内的通行车辆数与普通进口道单位时间内的通行车辆数区别并不大。但短距离进口道内车辆行驶空间受限,导致道内车流密度增大,车辆只能在车队中跟车行驶,很难进行超车、换道等行为,不同车流之间的相互干扰极小,在一个完整的信号周期内各股车流均可稳定到达停车线。

1.1.2 车辆排队

实地调查一个长度为200 m的短距离进口道,在其各周期内车辆排队随时间的变化情况如图1所示。从图1可以看出,由于路段长度的限制,红灯期间到达的排队车辆占据了超过70%长度的路段。当绿灯亮起后,由于道路排队空间不足,排队车辆会很快占满整个进口道,影响上游路口的车辆通行,极易形成排队溢出现象。

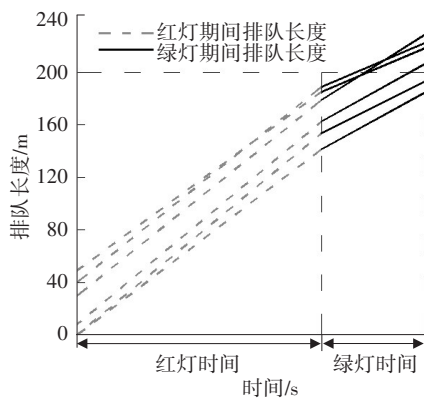


图 1 短距离进口道各周期排队长度

Fig. 1 Queue length in each cycle of short-distance entryway

1.1.3 车流驶离

由于通过短距离车道的交通量较大,红灯期间到达车辆在进口道内停车排队,绿灯开始后车辆依次从停车状态提速至行驶状态后驶离交叉口,造成较长的启动损失时间。同时新的到达车辆也无法驶入短距离进口道,导致短距离交叉口通行能力下降,车流很难以饱和流率驶离。因此,在绿灯结束后,仍存在一部分绿灯期间到达的车辆滞留在进口道内,形成滞留排队。

1.2 交通波传播过程

在短距离进口道内,车辆行驶状态变化(到达排队与启动驶离)都会在车队间传播,形成交通波。本研究运用交通波理论对短距离进口道内的车流排队过程进行分析,根据单位周期内车流状态的变化确定交通波的产生与传播过程,分析进口道内不同阶段的车辆排队,具体如图 2 所示。

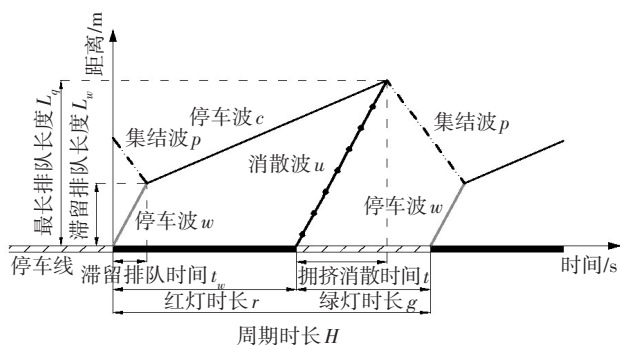


图 2 短距离进口道交通波传播过程图

Fig. 2 Propagation process diagram of traffic wave in short-distance entrance road

从图 2 可看出,当红灯亮起时,停车线后的车流由启动状态变为阻塞状态,形成停车波 w ;到达车辆行驶到排队尾端后加入排队,车流由到达状态变为阻塞状态,形成停车波 c 。当绿灯开始后,排队车辆依次启动,驶离交叉口,形成消散波 u ;在绿灯期间,

到达车辆转变为启动状态后继续向停车线行驶,形成集结波 p 。

1.2.1 滞留排队

当绿灯亮起时,排队车辆被清空,转变为驶离状态,驶离交叉口。后续到达的车辆在短距离车道内汇入驶离状态的车流,车流密度增大,形成集结波 p 。由于消散波 u 的传播占据了大部分绿灯时间,因此,在绿灯结束时刻,集结波 p 仍未能到达停车线,驶离状态的车流未能全部通过交叉口,其在停车线处依次停车等候,形成了停车波 w 。其传播距离即为滞留排队长度,在进口道内的停车波传播时间即为滞留排队时间。待短距离车道内驶离状态的车流全部转变为阻塞状态后,后续到达车流会在已有的滞留队伍末端停车排队。

1.2.2 最长排队

当绿灯亮起时,进口道内的排队车辆从第一辆车开始,依次加速驶离交叉口,消散波 u 开始向后传播。同时,绿灯期间到达的车辆仍在驶入交叉口,停车波 c 继续向后传播。由于消散波 u 的传播速度大于停车波 c 的速度,在某一时刻,消散波将恰好赶上停车波,后续的到达车流无需在路段内停车等待。此时,短距离车道内的排队长度达到最大值,形成最长排队。

1.3 排队模型建立

首先,从交通波传播距离和交通流通过量两个角度建立恒等关系,得到拥挤消散时间和滞留排队时间,再由对应的传播时间和传播速度分别确定滞留排队长度和最长排队的长度。

依据停车波与消散波在进口道内经过的最长距离必须相等这一事实建立恒等关系式。在单位周期内,红灯期间排队车辆逐渐增加,停车波的传播长度持续增加。在绿灯亮起后,消散波开始向排队尾部传播,此时,停车波并不会立即消失,在一段时间 t 后,两波将追平。此时,停车波 w 和停车波 c 传播的总长度与消散波 u 的传播长度相同,均为最长排队长度 L_q 。据此,可建立等式:

$$v_w t_w + v_c (H - g - t - t_w) = v_u t \quad (1)$$

式中: v_w 为停车波 w 的波速; t_w 为停车波 w 的传播时间,即滞留排队时间; v_c 为停车波 c 的波速; v_u 为消散波 u 的波速; t 为消散波 u 的传播时间,即拥挤消散时间; H 为交叉口的周期时长; g 为短距离进口道对应

相位的绿灯时间。

根据在单位周期内短距离进口道车辆的到发平衡建立恒等关系式。城市主干道在高峰时段内的交通流量较大,甚至可能会出现过饱和状态。此时,若在短距离交叉口内存在滞留排队,两者叠加会导致滞留排队车辆随周期逐渐累加,最终排队超出进口道长度,影响上游路口车流通行,形成死锁。因此,短距离进口道内车流正常行驶的前提是车辆的到发平衡。根据交通波传播过程分析,最长排队车辆包括拥挤消散时间 t 和红灯时间内的到达车辆和前一周期的滞留排队车辆。因此,利用最长排队车辆与滞留排队车辆的差值和剩余绿灯时间内的到达车辆,即可表示单位周期内到达的车辆总数,利用绿灯时间与驶出车流的流率可表示单位周期内的驶离车辆数,据此,建立等式:

$$v_u k_j t - v_w k_j t_w + (g - t)q_c = g \cdot q_u \quad (2)$$

式中: k_j 为阻塞状态的车流密度; q_c 为到达状态的车流流率; q_u 为驶离状态的交通流流率。

停车波 w 是车流从启动状态变为阻塞状态形成的,而消散波 u 是阻塞状态的车流启动所形成的,故消散波 u 与停车波 w 波前后的交通流状态相反。根据交通波波速计算公式,可知两者波速相同,代入等式(1)~(2),联立两式,可解得:

$$t = \left(1 - \frac{q_u}{q_c}\right)g + \frac{v_c(H - g)}{v_u - v_c} \quad (3)$$

$$t_w = \left(1 - \frac{q_u}{q_c}\right)g + (H - g) \left[\frac{v_c(v_u k_j - q_c)}{(v_u - v_c)v_u k_j} \right] \quad (4)$$

式中: $v_u = v_w$ 。

最后,根据对应交通波的波速,可分别确定滞留排队长度和最长排队长度,其表达式分别为:

$$L_w = t_w v_w \quad (5)$$

$$L_q = v_u t \quad (6)$$

式中: L_w 为滞留排队长度; L_q 为最长排队长度。

2 信号控制优化模型

短距离交叉口一方面因路段长度限制极易产生排队溢出;另一方面,大量车流在此处排队累积,当绿灯亮起后,各驾驶员需耗费大量反应时间进行

启动和驶离,造成交叉口处停车延误与反应时间延误大幅增加。因此,建立适用于短距离交叉口的车均延误模型,以交叉口车均延误最小化为目标,增加最长排队的长度不得超过路段长度的约束和禁止二次排队的约束,建立短距离交叉口信号控制优化模型,并利用遗传算法进行求解,达到防止排队溢出,提高交叉口通行效率的目的。

2.1 目标函数建立

常用的延误模型一般很少考虑路段长度的影响,默认滞留车辆将被很快释放。但在实际道路通行中,短距离交叉口受进口道长度的限制,当路段内的车辆排队长度与路段长度相等后,排队长度不能再增加,经典的延误模型无法适用于该种情形。故需建立适用于短距离进口道的延误模型。本研究先根据短距离进口道车辆的到达—驶离状况,绘制车辆排队的累积过程图,确定短距离进口道在单位周期内的延误。再采用Webster延误模型,确定其他进口道在单位小时内的总延误。然后,将两种延误的单位进行归一化处理,根据周期时长,计算短距离进口道在单位小时内的延误,两者相加得到交叉口在单位小时内的总延误。最后,根据交叉口的各进口道在高峰时段内的小时交通量,确定该交叉口的车均延误,为交叉口的整体运行效率提供评价依据。

2.1.1 短距离进口道单位周期总延误

根据短距离进口道车辆的到达—驶离状况和该处交通流的流率,绘制单位周期内车辆排队累积过程,如图3所示。

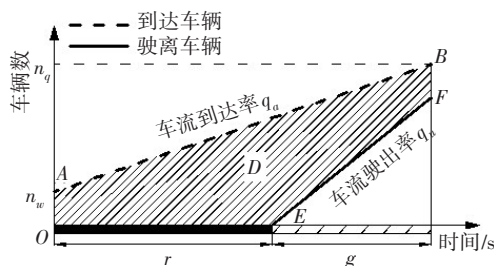


图3 短距离进口道车辆到达—驶离过程

Fig. 3 Vehicle arrival-departure process for short-distance entrance roads

在图3中, OA 、 OB 分别表示到达与驶离短距离进口道的车辆数,其斜率为对应的交通流流率; n_w 为滞留排队车辆数,由滞留排队长度 L_w 及阻塞密度

决定;阴影部分五边形 $OABFE$ 的面积即为短距离进口道在单位周期内的总延误,可将其分为 S_1 、 S_2 两个部分计算。其中, S_1 为到达车辆数折线与坐标轴围成的面积; S_2 为驶离车辆数折线与坐标轴围成的面积。短距离进口道在单位周期内总延误 D 的计算表达式为:

$$D = S_1 - S_2 = \frac{1}{2}(2t_u v_w k_j + q_c H) \cdot H - \frac{1}{2}(q_u g) \cdot g \quad (7)$$

2.1.2 其他进口道总延误

在其他进口道内的车流运行不受路段长度的限制,滞留车辆随机在某个周期内产生,一般短期内就会自行恢复原先的平衡状态。因此,采用 Webster 延误模型,计算进口道的总延误,其表达式为:

$$D' = \sum_i \sum_j \left[\frac{H \left(1 - \frac{g_i}{H}\right)^2}{2(1 - y_{ij})} \cdot q_{ij} + \frac{x_{ij}^2}{2(1 - x_{ij})} \right] \quad (8)$$

式中: D' 表示其他进口道单位小时内的总延误; g_i 表示相位 i 的有效绿灯时间; y_{ij} 表示第 i 相位在第 j 个进口道的流量比; q_{ij} 表示第 i 相位在第 j 个进口道的实际到达的交通量; x_{ij} 表示第 i 相位在第 j 个进口道的饱和度。

2.1.3 交叉口车均延误

将短距离进口道在单位周期内发生的延误换算为单位小时内的总延误,与其他进口道在单位小时内的总延误求和,即可得到在单位时间内的交叉口总延误。结合交叉口各进口道交通量,可得到短距离交叉口的车均延误 d ,具体表达式为:

$$d = \frac{\frac{3600D}{H} + D'}{\sum_i \sum_j q_{ij}} \quad (9)$$

2.2 约束条件选取

除常规的信号周期约束外,本研究增设了两个约束条件:① 对最长排队设置了长度约束,要求排队模型中的最长排队的长度不得超过短距离进口道的长度,防止车辆排队蔓延到上游路口,影响其车辆通行。② 对二次排队进行约束,禁止到达车辆

在进口道内进行二次排队,减少车辆的停车次数,提高短距离进口道的通行效率。

2.2.1 最大排队长度约束

在排队模型中,要求短距离进口道在单位周期内的最长排队长度不得超过进口道的长度,该约束条件的表达式为:

$$L_q = v_u t \leq L \quad (10)$$

2.2.2 二次排队约束

为避免到达车辆在路段内二次排队,最长排队尾端的最后一辆车如需在本相位的绿灯时间内驶离交叉口。因此,本相位绿灯时间要大于拥挤消散时间和车辆行驶过最长排队长度的时间之和,该约束条件的表达式为:

$$t + \frac{L_q}{v} \leq g \quad (11)$$

式中: v 为到达车流的平均行驶速度。

2.3 信号控制优化模型构建

本研究以信号周期和相位有效绿灯时长作为优化变量,以交叉口车均延误最小化为目标,以最长排队的长度不得超过进口道长度,到达车辆不得进行二次排队和各相位有效绿灯时间之和必需等于信号周期这三者为约束条件,建立短距离交叉口信号协调优化模型,其表达式为:

$$\min d = \frac{\frac{3600D}{H} + D'}{\sum_i \sum_j q_{ij}} \quad (9)$$

$$L_q = v_u t \leq L \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} t + \frac{L_q}{v} \leq g \end{cases} \quad (11)$$

$$\sum_i g_i = H \quad (12)$$

式中: g_i 表示第 i 相位的绿灯时间。

2.4 模型求解

本研究采用遗传算法对优化模型进行求解。遗传算法是一种迭代算法,它模仿生物在自然环境中的遗传和进化机理,反复将选择算子、交叉算子、变异算子作用于群体,最终得到问题的最优解或近似最优解。求解该数学模型的遗传算法步骤为:

step 1: 输入交叉口各进口道交通量 q_{ij} 、流量比 y_{ij} 等模型参数,以及种群规模 N 、最大迭代次数 E_m 等算法参数;

step 2:采用二进制编码,以数组形式随机生成 N 个个体 $x_i = (T_i, g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, N$ 。初始化种群;

step 3:根据式(3)~(4)分别计算种群内各个体的滞留排队时间 t_w 和拥挤消散时间 t ;

step 4:根据式(7)~(8)分别计算个体 x_i 对应的进口道延误 D 和 D' ;根据式(9)计算当前种群内个体的目标函数值 d ,将其作为适应度函数;

step 5:采用模拟二进制交叉互换和多项式变异的方法,由父代种群产生下一代的子代种群,进行遗传操作;

step 6:若达到进化终止条件,则停止循环,输出结果;否则转至step2。

进化终止后,输出历次迭代过程中得到的最优解所对应的决策变量值,即可得到短距离交叉路口的定时控制最优方案。

3 实例分析

3.1 交叉口现状

为验证该优化模型的有效性,本研究以长沙市的芙蓉路与城南路交叉口为依托,进行实例分析,如图4所示。该交叉口为城市主干道(芙蓉路)与次干道(城南路)相交而成,交叉口北侧存在另一条城市主干道,其与芙蓉路间隔较小,导致该交叉路口的北进口道全长仅为200 m。在高峰期间,北进口道的直行车辆经常发生排队上溯,影响上游主干道车辆的正常通行。本研究采用固定相机,拍摄2021年5月22日下午5:30—6:30时段内该交叉路口的交通流视频,通过图像数据获得各进口道在高峰时段的每小时交通量、各相位绿灯时长及流量比等现场参数,具体见表1。

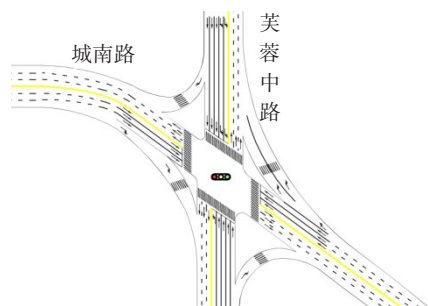


图4 芙蓉路与城南路交叉口

Fig. 4 The intersection of Furong Road and Chengnan Road

表1 交叉口交通运行现状

Table 1 Current status of traffic operation at intersections

信号相位	进口道	绿灯时长/s	交通量/pcu	流量比
东西直行	东	42	796	0.194
	西	42	682	0.166
南北直行	南	88	1 724	0.297
	北	88	1 516	0.348
南北左转	南	51	493	0.361
	北	51	549	0.201

利用图像采集数据得到该路段车流驶入和驶出阶段的平均车速,结合各车流的流率可计算不同阶段的交通波的波速,具体数据见表2。

表2 各交通波的波速

Table 2 The speed of each traffic wave

交通波	停车波 c	停车波 w	消散波 u	集结波 p
波速/($m \cdot s^{-1}$)	1.281	3.458	3.458	7.416

3.2 模型应用及求解

调用Python语言的geatpy工具箱进行编程,对模型进行求解。先将该交叉路口的实测交通流数据输入算法程序。再设定遗传算法参数,其中,初始种群规模 $N=100$,最大进化代数 $E=200$,交叉率 $\eta_c=20$,变异率 $\eta_m=20$ 。最后,运行程序。迭代过程如图5所示。

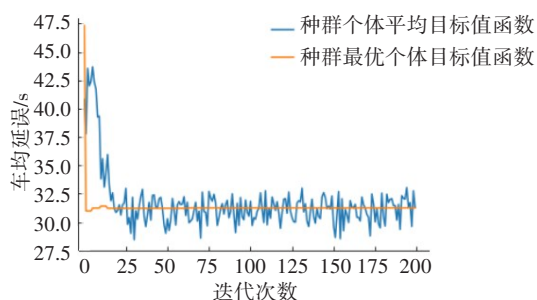


图5 遗传算法求解结果

Fig. 5 Genetic algorithm solution result graph optimization

从图5可以看出,种群最优目标函数值随迭代次数的增加而逐渐减小,最终收敛于最优解。其中,决策变量 x_0 为交叉口最优信号周期, x_1, x_2, x_3 分别为东西直行、南北直行和南北左转相位的有效绿灯时间,对其进行取整后,减去黄灯时间作为反应时间,最终得到各相位的绿灯显示时间。这就是该短距离交叉路口的最优信号控制方案。

4.3 仿真验证

4.3.1 仿真模型建立

利用 Vissim 4.3 软件,分别对优化前后的信号控制方案进行仿真分析。先根据城南路与芙蓉路交叉口的交通现状,输入交通流量、车辆速度等参数,建立该交叉口路网。然后,设置相关检测器,收集交叉口运行参数。在交叉口的北进口道停车线处设置排队检测器,检测该短距离进口道的平均排队和最长排队的长度。在交叉口的北进口道出入口位置设置行程时间检测器,将该交叉口作为节点 1 进行节点评价,获取交叉口的平均运行效率。最后,分别输入优化前后两种信号控制方案至信号控制机中进行仿真,优化前后的仿真对比如图 6 所示。

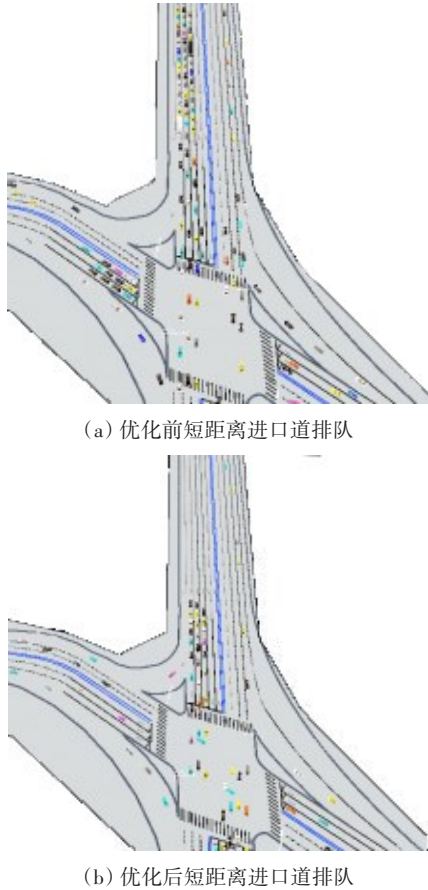


图 6 不同优化方案下交叉口仿真对比

Fig. 6 The simulation process of different intersection optimization schemes

3.3.2 仿真结果分析

仿真可得到短距离进口道优化前后的最长排队长度,该指标是交通运行效果的重要评价参数。车辆在短距离进口道内的排队情况和延误情况分别如图 7~8 所示。

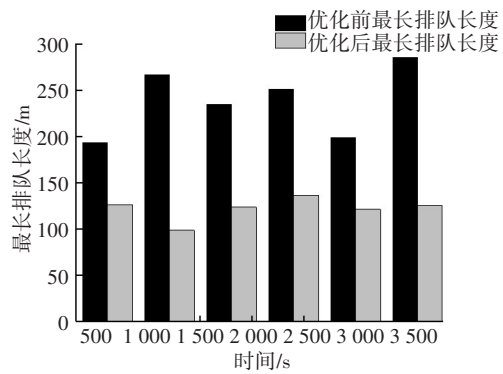


图 7 短距离进口道优化前后最长排队长度

Fig. 7 Comparison of maximum queue length before and after optimization of short-distance entrances

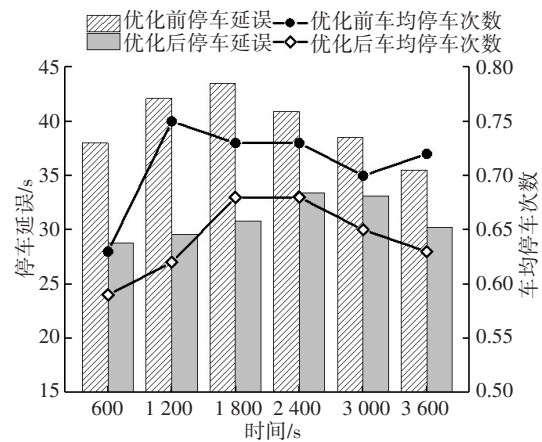


图 8 短距离进口道优化前后延误对比

Fig. 8 Comparison of delays before and after optimization of short-distance entrances

从图 6 可看出,优化后短距离进口道内的最长排队长度显著变短,始终小于进口道长度,有效地防止排队溢出。从图 7 可看出,在优化后的控制方案中,各仿真时段内的车均停车次数与停车延误时间均下降,车辆停车排队状况有所改善,交叉口运行效率得到了提高,模型的优化效果较好。

分别从短距离进口道和交叉口两处位置的运行效率对优化前后的两种信号控制效果进行对比分析。其中,针对短距离进口道的运行状况,选取平均排队、最长排队参数作为指标,反映排队溢出情况,见表 3。针对交叉口运行状况,选取车均延误、车均停车次数等参数作为指标,见表 4。

由表 3 可知,优化后的信号控制方案的平均排队长度较现状控制方案的降低了 36.9%,平均排队车辆减少了 12.0%,这表明优化后短距离进口道内车辆的二次排队状况得到了有效缓解。其次,优化前的车流最长排队长度超出了进口道长度。优化后的信号控制方案能够使周期内的最长排队长度

始终保持小于进口道长度,有效地防止了排队溢出现象的发生。此外,由于车辆在短距离进口道内停车延误时间减少,车辆通过进口道的行程时间减少了13.0%,进口道通行效率得到了提高。

由表4可知,优化后该交叉口的车均停车次数较优化前减少了21.2%,通过车辆数增加了19.8%,车均延误减少了25.8%。这表明本研究建立的模型能有效地减少车辆延误,大幅提高短距离交叉口的通行效率。

表3 优化前后短距离进口道运行指标

Table 3 Before and after optimization of short-distance entrance road operation indicators

配时方案	平均排队长度/m	平均排队车辆数/pcu	最长排队长度/m	行程时间/s
现状配时	48.3	167	213.8	38.6
优化配时	30.5	147	122.5	33.6

表4 优化前后交叉口运行效率

Table 4 Optimize front and rear intersection operation efficiency

配时方案	车均延误/s	车均停车次数	通过车辆数
现状配时	29.8	0.85	756
优化配时	22.1	0.67	943

4 结论

本研究分别从交通流运行和交通波传播的角度对短距离进口道内的车辆排队过程进行分析,解释了短距离进口道的滞留排队和最长排队的形成过程。根据短距离进口道车流的运行特点,得到了车道单位周期延误的计算公式,据此修正了短距离交叉口车均延误的表达式。以交叉口车均延误最小化为目标,短距离进口道车流不发生排队溢出和车辆二次排队为约束,建立了短距离交叉口信号控制优化模型,并运用遗传算法对其进行求解。实例仿真分析结果表明:该方法能防止短距离进口道发生排队溢出,大幅提高交叉口通行效率,具有较好的实用性。本研究以单点交叉口为研究对象,建立优化模型。在此基础上分析多个交叉口车流相互影响下的信号协调控制优化方法是后续研究的重要方向。

参考文献(References):

[1] MESSER C J. Simulation studies of traffic operations at

oversaturated, closely spaced signalized intersections [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1646(1):115-123.

[2] 姚荣涵,彭程,周红媚. 协调控制交叉口短车道长度和配时参数协同优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(4):1082-1087.

YAO Ronghan, PENG Cheng, ZHOU Hongmei. Synergistic optimization of short lane length and signal timing parameters for adjacent intersections with coordinated signals [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(4): 1082-1087.

[3] 李劲夫,胡少帅,向健. 多路畸形交叉口交通组织渠化设计研究[J]. 公路与汽运, 2019(6):30-33.

LI Jinfu, HU Shaoshuai, XIANG Jian. Research on channelization design of traffic organization at multi-lane intersection [J]. Highways & Automotive Applications, 2019(6):30-33.

[4] 张驰. 基于相位相序调整的双向绿波设置方法[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4):113-118.

ZHANG Chi. Bidirectional green band bandwidth setting method based on phase sequence adjustment [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 113-118.

[5] 王秋平,谭学龙,张生瑞. 城市单点交叉口信号配时优化[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2):60-64.

WANG Qiuping, TAN Xuelong, ZHANG Shengrui. Signal timing optimization of urban single-point intersections [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(2):60-64.

[6] 祁宏生,王殿海,陈松. 基于综合饱和度的单点信号控制方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(2):134-137.

QI Hongsheng, WANG Dianhai, CHEN Song. Isolated intersection control based on integrated saturation degree [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(2):134-137.

[7] 丁靖,周红媚,姚荣涵. 交叉口可变导向车道与信号配时协同优化模型[J]. 交通运输研究, 2015, 1(3):7-13.

DING Jing, ZHOU Hongmei, YAO Ronghan. A simultaneous optimization model of variable approach lane and signal timing at intersection [J]. Transport Research, 2015, 1(3):7-13.

[8] 游黄阳,许伦辉. 防止短连线交叉口溢流的单点信号配时优化[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(1): 147-152.

- YOU Huangyang, XU Lunhui. Optimization on signal timing for preventing urban isolated intersection which contains short sections from overflowing [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(1): 147-152.
- [9] 李伟. 短连线交叉口信号配时优化[J]. 公路, 2017, 62(1): 164-168.
- LI Wei. Optimization of signal timing for short line intersection[J]. Highway, 2017, 62(1): 164-168.
- [10] 杨晓芳, 芮丽丽. 基于车流无缝衔接的短连线交叉口协调控制方法[J]. 系统工程, 2010, 28(11): 116-122.
- YANG Xiaofang, RUI Lili. Control of coordination of short-linked intersections based on the seamless connection [J]. Systems Engineering, 2010, 28(11): 116-122.
- [11] 肖秀春, 徐建闽. 近距离相邻交叉口信号协调控制模型研究[J]. 公路与汽运, 2011(1): 56-59.
- XIAO Xiuchun, XU Jianmin. Research on signal coordination control model of adjacent intersections [J]. Highways & Automotive Applications, 2011(1): 56-59.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:刘至真)

(上接第75页)

- reinforcement method of rock pillars in soft rock small clear distance tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 373-379.
- [13] 扈萍, 马梁, 李萌, 王君鹏, 张西文. 小净距隧道后行洞开挖对先行洞的变形影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 246-251, 272.
- HU Ping, MA Liang, LI Meng, WANG Junpeng, ZHANG Xiwen. The influence of the excavation of the trailing hole of the small clear distance tunnel on the deformation of the leading hole [J/OL]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2022(3): 246-251, 272.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:李岳林)

(上接第90页)

- 892-899.
- LIANG Minfei, ZHANG Zhe, LI Ce, et al. Three-dimensional mechanical analysis model and verification of shield tunnels with double-layer linings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 892-899.
- [13] 黄戡, 詹艳云, 马启昂, 等. 基于正交设计的IV, V级围岩相似材料[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(1): 92-97.
- HUANG Kan, ZHAN Yanyun, MA Qi'ang, et al. Similar materials of IV, V grade rock based on orthogonal design [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(1): 92-97.
- [14] 邓衍, 刘辉, 刘耀坤, 等. 安平隧道顶端溶洞对其围岩稳定性的影响[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 82-86.
- DENG Yan, LIU Hui, LIU Yaokun, et al. The influence of hidden Karst cave at the top of Anping tunnel on the stability of surrounding rock in Karst area [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 82-86.
- (责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:刘至真)