

基于交通波理论的干线协调优化及速度诱导策略

王少杰¹, 姚 静¹, 张文明²

(1. 天津市道路运输事业发展服务中心, 天津 300384; 2. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525)

摘要:为实现干线协调控制,提升道路通行效率,减少交通延误,提出了干线协调控制方法。分析了周期时长、相位相序、绿信比及相位差等影响干线协调控制的控制参数,剖析了基于交通波理论的车辆排队特性。基于交通波理论确定相位差,在车路协同环境下对干线车辆进行车速诱导控制,为减少交通延误提高绿波协调效率提供理论依据。选取青岛市漓江西路 3 个交叉口为仿真场景,利用 VISSIM 进行仿真验证,优化后平均排队长度减少 82.57%,延误减少 32.25%。结果表明该控制方法明显减少了平均排队长度和延误。利用 MATLAB 对车速诱导模型进行仿真验证,结果表明车速诱导可提高通行效率。

关键词:干线协调控制;交通波;车路协同;车速诱导

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)05-0143-08

Arterial coordination optimization and speed guidance strategy based on traffic-wave theory

WANG Shaojie¹, YAO Jing¹, ZHANG Wenming²

(1. Tianjin Road Transportation Business Development Service Center, Tianjin 300384, China;
2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In order to realize the arterial coordinated control, improve traffic efficiency and reduce traffic delays, an arterial coordinated control method is proposed. The control parameters including cycle duration, signal phase, split and phase difference that affect the arterial coordinated control are analyzed, and the queuing characteristics of vehicles are also analyzed based on traffic-wave theory. In order to provide a theoretical basis for reducing traffic delays and improving green wave coordination efficiency, the phase difference is determined according to the traffic-wave theory, and the speed of mainline vehicles is guided and controlled in a cooperative vehicle infrastructure environment. Three intersections on Lijiang West Road in Qingdao are selected as the simulation scenarios, and simulation verification is carried out by using VISSIM. The average queue length is reduced by 82.57% after optimization, and the delay is reduced by 32.25%. The results indicate that the proposed control method significantly reduces the average queue length and delay. MATLAB is used to simulate and verify the speed guidance model, and the results indicate that the speed guidance can improve the traffic efficiency.

收稿日期: 2024-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(52272311)

作者简介: 王少杰(1996—), 男, 回族, 河北定州人。硕士, 助理工程师, 主要从事交通系统分析及优化控制方面的研究。

E-mail: 1134846009@qq.com.

Key words: arterial coordinated control; traffic-wave; cooperative vehicle infrastructure; speed guidance

随着社会不断进步,交通需求与供给不协调的问题日益明显,造成严重的交通拥堵。干线作为城市交通网络命脉,承受着大部分的城市交通,提高干线通行效率可有效减缓拥堵问题。JOHN^[1]调节干线信号配时的参数,从而得出基于最大绿波带宽的干线协调控制模型。HU等^[2]提出了一种干线模糊控制系统,可有效提高通行效率。陈秀锋等^[3]总结分析了车辆排队消散规律,并运用于干线协调控制中。贾彦峰等^[4]应用重叠相位创建干线绿波模型。张靖思等^[5]考虑动态车速进行多目标双周期干线信号协调控制。王昊等^[6]提出了基于冲击波理论的干线双向信号协调控制方法。田翠等^[7]研究左转待转区对干线协调控制的影响。仇沛喆等^[8]基于电警数据进行干线自适应协调信号控制。余佳洁等^[9]考虑断点成本实现长干线分段绿波控制。邓明君等^[10]提出一种基于车速引导和感应控制的干线协调优化方法。

上述研究以最大绿波带宽为目的,从减少延误和排队长度的角度,进行干线协调控制,有效缓解了干线拥堵,但大都以传统交通环境为背景,考虑车速诱导的研究较少。本文在车路协同环境下,依据交通波理论,分析车辆排队特性,提出了基于交通波理论的干线协调控制方法与车速诱导策略,求解诱导速度,并通过仿真进行了验证。

1 车路协同环境下的干线协调控制

1.1 干线协调控制

进行干线协调控制时,根据交通流特性,需协调周期时长、相位相序、绿信比及相位差等。首先需要对干线交叉口进行渠化设计,调整干线交叉口最佳周期时长,进行相位相序优化,考虑整个干线以及相邻交叉口供需关系进而计算绿信比,然后对相位差进行确定。

1.2 车速诱导方法

智能终端实时得到车辆的行驶状态及交通流信息,控制中心对信息进行处理,通过双向通信将信息传递给车辆。将相邻交叉口之间的路段作为车速诱导区域,车辆驶入后,车载单元与路侧单元获取车辆实时速度,处理后将信息传输至控制中心,控制中心根据下游交叉口的信号控制方案计算该车诱导车速,保证该车可以平稳驶过停止线,而后将诱导方案发送至车辆。

2 干线协调控制参数

2.1 周期时长确定

首先确定关键交叉口,以关键交叉口周期时长作为干线公共周期时长。干线各交叉口周期时长通过单点定时信号配时方法计算得出,目的是使干线延误最小。周期时长计算方法如下^[11]:

$$C_i = \frac{1.5l_s + 5}{1 - Y_i} \quad (1)$$

式中: C_i 为交叉口 i 的周期时长, s; l_s 为总损失时间, s; Y_i 为交叉口 i 的流量比总和。

为得到理想干线交叉口周期时长,须保证绿灯时间内通过的车流在 1 个周期内可到达下游交叉口停止线,此距为交叉口间距,则周期时长为

$$C'_i = \frac{2 \times 3600L(i, i+1)}{vm} \quad (2)$$

式中: C'_i 为交叉口 i 周期时长, s; $L(i, i+1)$ 为交叉口 i 、 $i+1$ 间的距离, m; v 为平均车速, m/s; m 为非负整数。

对 C'_i 赋予权重,则干线公共周期时长计算如下^[12]:

$$C = \gamma \frac{1.5l_s + 5}{1 - Y_i} + (1 - \gamma) \frac{2 \times 3600L(i, i+1)}{vm} \quad (3)$$

式中: C 为干线公共周期时长, s; γ 为权重,取 0~1。

2.2 相位相序优化

相位相序优化的目的是合理分配车流的通行权,保障大流量车流顺畅通行,同时保障小流量车流的通行权,方法有搭接和设置虚相位。

搭接是合理组合无冲突点的车流,使某一车流通行权更大,提升大车流的通行效率,也保障小流量的通行权,减少了交叉口冲突点。搭接可分为对向搭接与单向搭接 2 种。

虚相位是指将绿灯相位开始后或结束前的几秒设置为本方向通行,适度错开直行方向与左转方向放行时间,保证绿灯结束通过停止线的直行车辆通过交叉口。

2.3 绿信比计算

计算绿信比需考虑交通量与周期损失时间、进口道渠化设计等因素,干线协调时还应将相邻交叉口以及整个干线进口与出口的供求关系考虑在内。

干线协调所考虑的车辆大都为直行车辆,且一直保持直行。在计算上下游交叉口的供给与需求问题时,应考虑直行车道数与直行绿灯时长等因素,如式(4)所示:

$$\lambda_1 k_1 \approx \lambda_2 k_2 \tag{4}$$

式中: λ 为直行绿灯时长, s; k 为直行车道数; 1、2 分别为上、下游交叉口。

为增强干线协调效果,减少拥堵现象,可以调整首末交叉口的绿信比,减少进口的绿信比可减少输入车辆,增加出口的绿信比可增加输出车辆,增减数值通常为 0~10 s^[12]。

2.4 基于交通波理论的相位差

2.4.1 基本描述

本文基于车路协同环境进行双向干线绿波协调,设交通干线交叉口数量为 N 个,均为直行车流。相邻交叉口间距为 $L(i, i+1)$, $i=1, 2, \dots, N-1$,进口道距离停止线 L_s 处设置检测器。为保证车流的连续性,忽略行人与非机动车的干扰,车辆为网联车辆,输入与输出流量近似相等,均为直行车流,不计黄灯时间,不考虑车辆换道行为。

2.4.2 基于交通波理论的排队特性分析

车流抵达交叉口存在的情况如下:①需求小于或等于供给,红灯相位停留的车辆可以在绿灯相位通过;②需求略大于供给,红灯相位停留的车辆在一个绿灯相位内无法通过,出现二次排队,可以完全消散,排队不会传递到上游;③需求严重大于供给,出现二次排队,排队不能完全消散,并向上游传递,造成路段的交通阻塞。

依据交通流及车流连续性理论,可知波速方程 $v = \frac{q_1 - q_2}{k_1 - k_2}$,其中, q_1 、 q_2 为两种不同交通状态下的交通量; k_1 、 k_2 为两种不同交通状态下的车流密度。根据运动学理论,对停车波与启动波的传播进行分析,两种波的波速方程分别如式(5)、式(6)^[13-14]所示:

$$v_b = -\frac{v_0}{h_0 k_j v_0 - 1} \tag{5}$$

$$v_d = -\frac{v_1}{h_1 k_j v_1 - 1} \tag{6}$$

式中: v_b 为停车波速, m/s; k_j 为阻塞密度, veh/km; v_0 为路段车速, m/s; h_0 为路段车头时距, s/veh; v_d 为启动波速, m/s; v_1 为启动车速, m/s; h_1 为启动后的车头时距, s/veh。

通常,干线协调控制可分为 3 种,分别是同步式、交互式、续进式^[8],前 2 种控制方式可看作第 3 种的特别情况。以续进式协调控制为例,取相邻 2 个交叉口为研究对象,路段上设有排队检测器。车辆排队过程如图 1 所

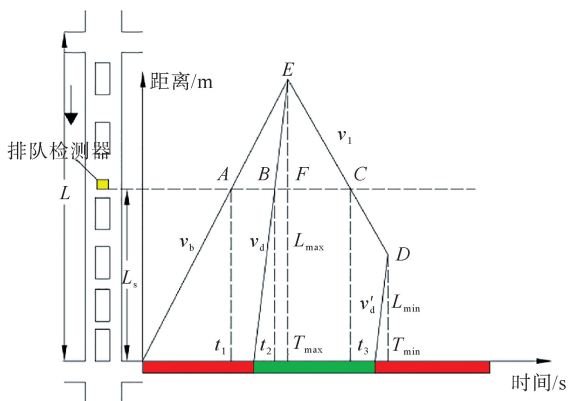


图 1 车辆排队时距

示,图中红绿色块为信号灯颜色。

由图1可知:

1) 假设下游交叉口A在历史信号周期排队全部消散,在信号周期*i*, $T_{A,r}^i$ 时刻红灯亮起,以交叉口A停止线为起点,车辆开始排队,后续车辆依次减速停车,形成速度为 v_b 的停车波并向上游传播,到达排队检测器时间记为 t_1 。

2) 在信号周期*i*, $T_{A,g}^i$ 时刻下游交叉口A绿灯亮起,此时,停止线的车辆开始启动行驶,后车依次启动,形成速度为 v_d 的启动波向上游传播,到达排队检测器时间记为 t_2 。

3) 启动波与停车波相遇,可视为排队消散^[15],即最大排队位置,记作 L_{\max} ,时间记作 T_{\max} 。车辆排队消散形成速度为 v_1 的行驶波向下游传播,队尾车辆行驶至检测器时间记为 t_3 。

2.4.3 确定相位差

选择第3种协调控制方式即续进式协调控制,构建相位差模型。排队完全消散,即排队尾车可在绿灯时间内通过路口,讨论*T*(排队尾车到达停止线的时间)与 $T_{A,r}^n$ (下游交叉口第*n*个周期绿灯结束的时间)之间的关系。

1) $T < T_{A,r}^n$, 绿灯相位,车辆均可顺利驶过停止线。

2) $T \geq T_{A,r}^n$, 红灯相位,车辆不能全部顺利驶过停止线,未驶过停止线的车辆依次排队,形成速度为 v'_d 的停车波并传播至上游,停车波与行驶波相遇之处即为最小排队位置,记作 L_{\min} ,相遇时间记作 T_{\min} 。

L_{\max} 、*T*及 L_{\min} 计算如下^[12]:

$$L_{\max} = L_s + \frac{(t_2 - t_1)v_b v_d}{v_d - v_b} \quad (7)$$

$$T = t_1 + \frac{L_{\max}}{v_d} + \frac{L_{\max}}{v_1} \quad (8)$$

$$L_{\min} = \frac{(t_1 + \frac{L_{\max}}{v_d} + \frac{L_{\max}}{v_1} - T_{A,r}^n)v'_d v_1}{v'_d + v_1} \quad (9)$$

根据车辆排队特性,求解相位差模型(式(10))并得到其合理区间,通过TDP绿波工具调整相位差使绿波带宽最大,求得最优相位差。绿波协调优化目标是使车辆驶至每个交叉口时,停止线前无排队,构建了干线相位差模型,其合理区间为^[12]

$$\frac{L + L_j - L_{\max}}{\bar{V}} - \frac{L_{\max}}{v_d} \leq O \leq \frac{L + L_j}{\bar{V}} - \frac{L_{\min}}{v_d} - \frac{L_{\min}}{v_1} \quad (10)$$

式中:*O*为相位差,s;*L*为交叉口之间路段长度,m; L_j 为上游交叉口长度,m; \bar{V} 为路段车辆平均速度,m/s。

3 车速诱导模型

基于车路协同环境进行车速诱导,车流中均为网联车辆,执行车速诱导方案。进行车速诱导时,应在诱导车速的合理范围内,并不超过干线的最大限制车速,选取合适的诱导车速进行干线绿波协调。

假设上、下游交叉口分别为*i*、*i*+1,可依据车辆行驶至下一交叉口的相位情况分别计算诱导车速,如图2所示。

情况1:*i*+1此时是绿灯相位,停止线前没有车辆,可不停车通过。此时适当诱导车辆加速,可提高通行效率与绿灯利用率。

考虑交叉口*i*绿灯相位通过的车辆时,应考虑刚好在绿灯时通过停止线的车辆,后续通过车辆进行同样车速诱导方案。最大、最小诱导车速分别如下:

$$v_{\max} = \frac{L(i, i+1)}{O} \quad (11)$$

$$v_{\min} = \frac{L(i, i+1)}{O + t_g} \quad (12)$$

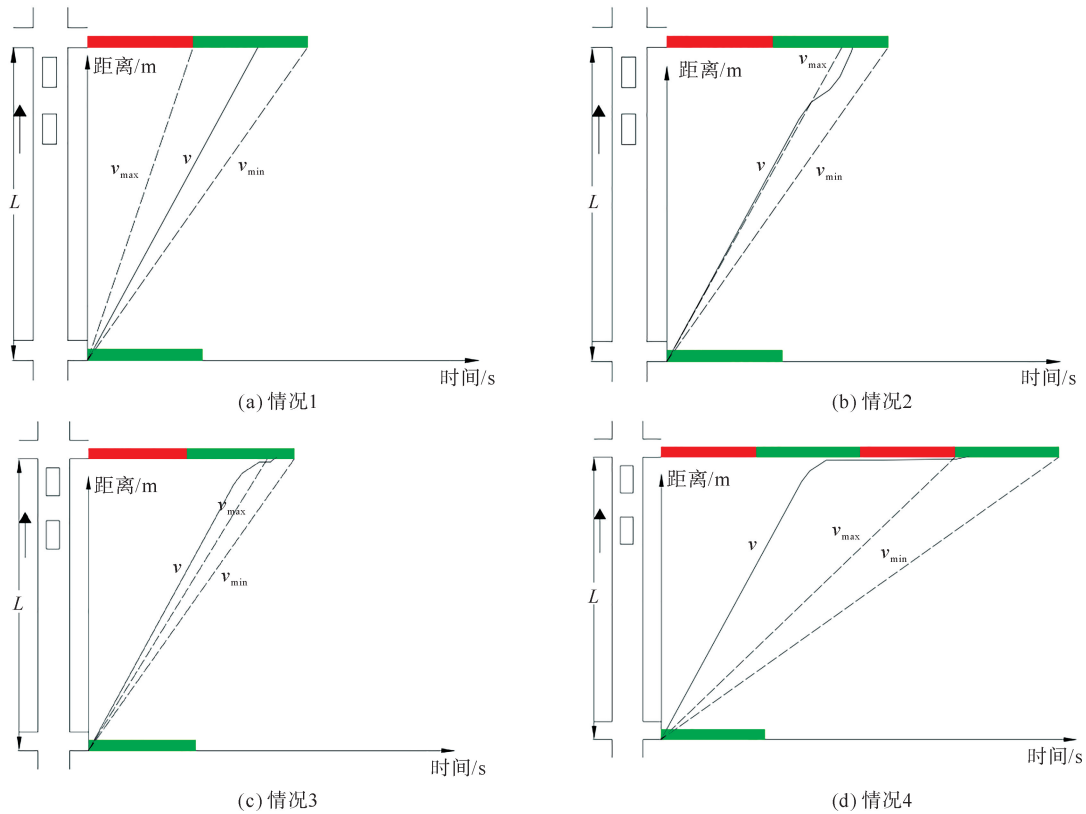


图 2 车速诱导

式中: v_{\max} 为最大诱导车速, m/s; v_{\min} 为最小诱导车速, m/s; O 为相位差, s; t_g 为交叉口 $i + 1$ 的绿灯时间, s。

情况 2: $i + 1$ 此时是绿灯相位, 停止线前有少量车辆排队, 车辆行驶受前方排队消散的影响, 车辆减速通过 $i + 1$ 。通过诱导车辆在路段上提前减速, 以稳定的车速驶过停止线, 此时车速应不小于式(12)的最小诱导车速。

情况 3: $i + 1$ 此时是绿灯相位, 停止线前有大量车辆排队, 若以正常车速行驶, 需停车等候排队消散, 排队消散后 $i + 1$ 仍为绿灯相位, 可启动驶过停止线。诱导车辆减速, 使其在排队尾车通过停止线后通过。诱导车速计算如下。

基于交通波车流排队特性得到位于 L_{\max} 处车辆通过停止线的时间 T_s [12] 为

$$T_s = t_1 + \frac{L_{\max}}{v_d} + \frac{L_{\max}}{v_1} \quad (13)$$

位于 L_{\max} 处车辆通过停止线时间相对于 i 绿灯相位结束时刻的时间 t 为

$$t = T_s - t_r + O \quad (14)$$

式中: t_r 为交叉口 $i + 1$ 红灯相位时间。

最大诱导车速 v_{\max} 为

$$v_{\max} = \frac{L(i, i + 1)}{t_1 + \frac{L_{\max}}{v_d} + \frac{L_{\max}}{v_1} - t_r + O} \quad (15)$$

计算最小诱导车速时, 因排队消散后交叉口 $i + 1$ 依然为绿灯相位, 需满足以下条件:

$$t - O \leq t_g \quad (16)$$

v_{\min} 由式(12)可得。

情况 4: $i + 1$ 此时是绿灯相位, 停止线前有大量车辆排队, 若以正常车速行驶, 受车辆排队消散的影

响,需减速慢行,行驶至停止线时 $i + 1$ 已是红灯相位,车辆需停车等待下一个绿灯相位。诱导车辆减速,车辆平稳行驶至停止线时,交叉口 $i + 1$ 信号相位变为下一个周期绿灯相位。

排队消散后交叉口 $i + 1$ 变为红灯相位,需满足以下条件:

$$t - O > t_g \tag{17}$$

最大、最小诱导车速分别如下:

$$v_{\max} = \frac{L(i, i + 1)}{O + t_g + t_r} \tag{18}$$

$$v_{\min} = \frac{L(i, i + 1)}{O + 2t_g + t_r} \tag{19}$$

4 数值仿真与验证分析

4.1 信号方案

选取青岛市黄岛区漓江西路的3个交叉口为研究对象,信号方案如表1所示。取 $\gamma = 0.5$,由式(3)取整得周期时长 $C = 130$ s,将直行相位结束前的3 s设置为虚相位,按照上文求得相邻2个交叉口的相位差。

表1 信号方案

交叉路段口	原信号方案			优化信号方案			绝对相位差/s
井冈山路							79
	73 s	27 s	30 s	73 s	27 s	30 s	
武夷山路							0
	30 s	70 s	30 s	27 s	73 s	30 s	
阿里山路							60
	73 s	27 s	30 s	27 s	73 s	30 s	

应用 VISSIM 对3个研究路口进行仿真分析,以平均排队长度和延误为评价指标,分别对原方案以及优化后的方案仿真分析,得出评价指标数据。

仿真结果表明,优化前平均排队长度为36.02 m,优化后平均排队长度变为6.28 m,减少82.57%;优化前延误为17.89 s/veh,优化后延误变为12.12 s/veh,减少32.25%。

4.2 车速诱导策略

应用 MATLAB 开展车路协同环境下速度诱导策略的仿真分析,从而验证车速诱导策略有效性。设置2个交叉口为仿真场景,交叉口中间路段为车速诱导区,为方便仿真计算,取车速诱导区长度为300 m。假设车辆均以相同的初始车速驶入诱导区,获得信号相位配时信息,分别对由速度诱导的车辆和无速度诱导的车辆进行仿真分析。

以车路协同环境为仿真场景,同时设置一组匀速行驶的数据,作为无速度诱导的对照组,具体参数设置如下:初始车速50 km/h,最高车速80 km/h,最低车速10 km/h,最大加速度 2.5 m/s^2 ,车长4.5 m,停车间距1.5 m。

利用 MATLAB 进行仿真,4种场景分别对应车速诱导模型的4种情况,对车速诱导方法有效性进行验证,仿真结果如图3所示。

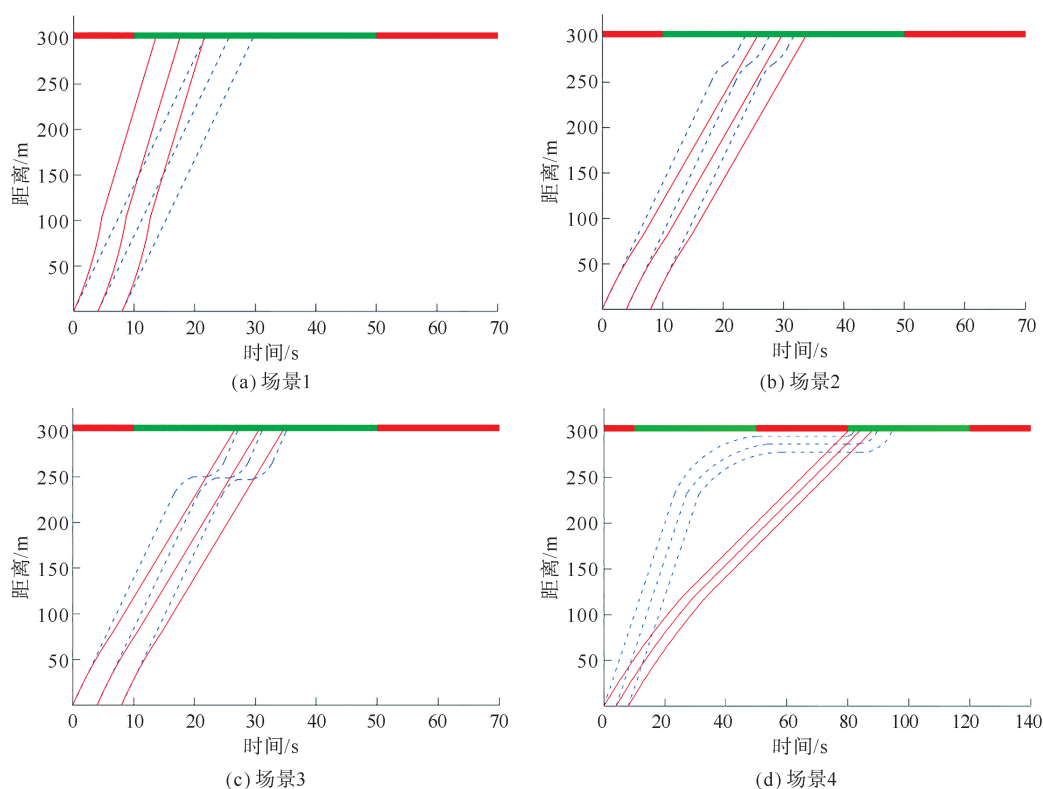


图3 速度诱导仿真示意

— 速度诱导车辆; - - - 无速度诱导车辆

由图3可知,场景1中无速度诱导车辆可匀速通过交叉口;速度诱导车辆加速,以诱导车速平稳通过。场景2中无速度诱导车辆到达停止线前受排队消散影响减速通过交叉口;速度诱导车辆减速,以诱导车速匀速通过。场景3中无速度诱导车辆到达交叉口前受排队影响,减速停车,而后跟随排队车辆启动通过交叉口;速度诱导车辆减速,而后以诱导车速匀速通过。场景4中无速度诱导车辆到达交叉口后受排队影响,减速停车,等待下一个绿灯相位启动时行驶通过停止线;速度诱导车辆减速,而后以诱导车速匀速通过。通过速度诱导,可以减少车辆因减速及停车对交通流造成的影响,提高通行效率,验证了速度诱导的有效性。

5 结束语

本文提出了车路协同环境下的干线绿波协调控制策略,基于交通波理论,分析车辆排队特性,建立了车速诱导模型。选取青岛市实际路网中的3个交叉口进行仿真分析,平均排队长度和延误明显减少。对速度诱导策略进行仿真分析,通过车速诱导方法可减少干线的延误,提高绿灯相位的利用率,为交通干线协调控制提供新思路。同时,对路段车速进行诱导,会进一步影响整个干线的车辆速度和干线的公共周期,速度诱导策略需要考虑驾驶人对速度诱导方案的执行效果,未来值得进一步研究。

参考文献(References):

- [1] JOHN D C L. The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming[J]. *Operations Research*, 1966, 14(4): 568-594.
- [2] HU Y, THOMAS P, STONIER R J. Traffic signal control using fuzzy logic and evolutionary algorithms[C]//*IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Singapore, 2007: 1785-1792.
- [3] 陈秀锋, 田家斌, 石英杰, 等. 基于排队消散模型的干线协调控制[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(10): 279-283.
CHEN Xiufeng, TIAN Jiabin, SHI Yingjie, et al. Arterial coordination control based on queuing dissipation model[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(10): 279-283.
- [4] 贾彦峰, 王进展, 王五林, 等. 基于相位相序优化的双向绿波协调控制模型[J]. *青岛理工大学学报*, 2018, 39(1): 91-95.
JIA Yanfeng, WANG Jinzhan, WANG Wulin, et al. Bi-directional green wave coordinated control model on phase sequence optimization[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2018, 39(1): 91-95.

- [5] 张靖思,李振龙,邢冠仰. 考虑动态车速的双周期干线信号协调控制多目标优化[J]. 交通信息与安全,2021,39(3):60-67.
ZHANG Jingsi,LI Zhenlong,XING Guanyang. Multi-objective optimization for coordinated control of double-cycling arterial signals considering dynamic vehicle speeds[J]. Journal of Transport Information and Safety,2021,39(3):60-67.
- [6] 王昊,彭显玥. 临界饱和状态交通干线协调控制模型[J]. 中国公路学报,2022,35(7):228-240.
WANG Hao,PENG Xianyue. Signal coordination control model for near saturated arterial intersections[J]. China Journal of Highway and Transport,2022,35(7):228-240.
- [7] 田翠,王道斌. 左转待转区对干线协调信号控制的影响分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(2):225-229.
TIAN Cui,WANG Daobin. Analysis of influence of left turn waiting area on arterial coordination signal control[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering),2022,46(2):225-229.
- [8] 仇沛喆,张承志,吴浩,等. 基于电警数据的干线自适应协调控制优化方法[J]. 中国公路学报,2023,36(10):251-268.
KANG Peizhe,ZHANG Chengzhi,WU Hao,et al. Optimization method for adaptive arterial coordinated signal control based on E-police data[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(10):251-268.
- [9] 余佳洁,季彦婕,卜卿,等. 考虑断点成本的长干线分段绿波控制方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2022,56(4):640-648.
YU Jiajie,JI Yanjie,BU Qing,et al. Partitioned green-wave control scheme for long arterial considering breakpoint cost[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2022,56(4):640-648.
- [10] 邓明君,胡辛瑕,李响,等. 基于车速引导和感应控制的干线协调优化方法[J]. 系统仿真学报,2024,36(6):1309-1321.
DENG Mingjun,HU Xinxia,LI Xiang,et al. Arterial coordination optimization method based on vehicle speed guidance and inductive control[J]. Journal of System Simulation,2024,36(6):1309-1321.
- [11] 王伟,过秀成. 交通工程学[M]. 南京:东南大学出版社,2011.
WANG Wei,GUO Xiucheng. Traffic engineering[M]. Nanjing:Southeast University Press,2011.
- [12] 曲大义,万孟飞,李娟,等. 基于交通波理论的干线相位差优化及其控制方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2017,47(2):429-437.
QU Dayi,WAN Mengfei,LI Juan,et al. Offset optimization of arterial traffic based on traffic-wave theory and its control method[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2017,47(2):429-437.
- [13] 姚荣涵,曲大义,王殿海. 基于运动学方程的停车波模型[J]. 吉林大学学报(工学版),2007,37(5):1049-1052.
YAO Ronghan,QU Dayi,WANG Dianhai. Stop-wave model based on kinematic equation[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2007,37(5):1049-1052.
- [14] 曲昭伟,王殿海,姚荣涵. 信号交叉口起动脉的运动学模型[J]. 吉林大学学报(工学版),2008,38(2):268-272.
QU Zhaowei,WANG Dianhai,YAO Ronghan. Kinematic model of start wave at signalized intersection[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2008,38(2):268-272.
- [15] 徐建闽. 交通管理与控制[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
XU Jianmin. Traffic management and control[M]. Beijing:China Communication Press,2007.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

(上接第 142 页)

- [9] 郑保力,杨逢肃. 交叉口相位自适应信号控制优化方法[J]. 公路交通科技,2023,40(7):200-206.
ZHENG Baoli,YANG Fengsu. A method for optimizing adaptive signal control of phase at intersection[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2023,40(7):200-206.
- [10] LI X G,HAN S F,ZHAO L,et al. New dandelion algorithm optimizes extreme learning machine for biomedical classification problems[J]. Computational Intelligence and Neuroscience,2017,1:4523754.
- [11] 王滔. 蒲公英智能优化算法研究[D]. 银川:北方民族大学,2018.
WANG Tao. Research on dandelion intelligent optimization algorithm[D]. Yinchuan:North Minzu University,2018.
- [12] ZHU H H,LIU G J,ZHOU M C,et al. Dandelion algorithm with probability-based mutation[J]. IEEE Access,2019,7:97974-97985.
- [13] HAN S F,ZHU K,WANG R. Improvement of evolution process of dandelion algorithm with extreme learning machine for global optimization problems[J]. Expert Systems with Applications,2021,163:113803.
- [14] LIU X J,QIN X L. A probability-based core dandelion guided dandelion algorithm and application to traffic flow prediction[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2020,96:103922.
- [15] ZHAO Y X,DONG J W,LI X B,et al. A binary dandelion algorithm using seeding and chaos population strategies for feature selection[J]. Applied Soft Computing Journal,2022,125:109166.
- [16] 陈秀锋,郭玉彤,吴阅晨,等. 基于蒲公英算法的多目标信号配时优化方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(11):3122-3129.
CHEN Xiufeng,GUO Yutong,WU Yuechen,et al. Multi-objective optimization of traffic signal timings based on dandelion algorithm[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2023,53(11):3122-3129.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)