

DOI:10.11918/202203092

信控交叉口公交专用车道动态共享实时控制方法

刘嘉晖¹, 陈科², 陈群¹

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 长沙 410200)

摘要: 针对目前交叉口拥堵、公交专用车道利用率低的问题, 提出一种信控交叉口公交专用车道动态共享实时控制方法。利用 GPS 定位实时获取交叉口处公交车的位置, 并通过交通检测设备获取专用道内小汽车车辆数, 结合主信号显示情况综合计算当前时刻公交专用道共享前后交叉口车辆总延误。将延误大小判断结果反馈给车道信号, 车道信号显示红灯或绿灯以提醒司机是否能够进入公交专用道。引入受影响车辆概念, 建立以减少交叉口车辆总延误为目标的公交专用车道共享控制模型。通过对当前时刻主信号显示红灯和显示绿灯两种情况分析, 提出一种综合考虑车辆司乘系数、受影响车辆的交叉口延误计算方法, 得到共享公交专用道前后交叉口车辆总延误差值的表达式。利用示例数值模拟在多种不同场景下车道信号的显示情况, 分析了专用道内已有车辆、公交车位置以及主信号显示情况对车道共享的影响。结果表明: 该控制方法较符合实际情况, 并能有效提高公交专用车道利用率, 能够充分利用交叉口绿灯时间, 为解决公交专用车道的动态共享、缓解道路拥堵提供了一种新的思路。

关键词: 交通运输工程; 车道共享方案; 建模仿真; 公交专用车道; GPS 观测; 交叉口延误

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)03-0098-12

Dynamic bus lane sharing real-time control method at signal-controlled intersections

LIU Jiahui¹, CHEN Ke², CHEN Qun¹

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Hunan Provincial Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: Aiming at the problems of current intersection congestion and low utilization rate of bus lanes, this paper proposes a real-time sharing control method for dynamic bus lanes based at signal-controlled intersections. This method uses GPS to obtain real-time information on the locatin of the bus at the intersection, and obtains the number of vehicles in the bus lane through traffic detection equipment. Combined with the main signal display, the method comprehensively calculates the total delay of vehicles at the intersection before and after the bus lane sharing at the current moment. Based on the comparison results of the delay size feeding back, the lane signal shows red or green lights to tell drivers if they can enter the bus lane. This paper introduces the concept of affected vehicles, and establishes the bus lane sharing control model aiming at reducing the total vehicle delay at the intersection. Through the analysis of the two situations where the main signal showing red and green light at the current moment, this paper proposes a comprehensive calculation method for intersection delay of affected vehicles, considering the driver-occupant coefficient and the affected vehicles. The expression of the total delay difference of vehicles at the intersection before and after the bus lane sharing has been obtained. This paper numerically simulates the display of the lane signal in various scenarios to analyze the impact of factors on lane sharing, such as existing vehicles in the dedicated lane, the position of buses, and the status of the main signal display. The results demonstrate that the control method aligns well with real-world situations and effectively improves the utilization rate of the bus lane, making full use of green light time at the intersection. This method provides a new idea for dynamically sharing of bus lanes and alleviating road congestion.

Keywords: transport engineering; lane sharing scheme; model and simulation; bus lane; GPS observations; intersection delays

收稿日期: 2022-03-25; 录用日期: 2022-06-01; 网络首发日期: 2024-03-07

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240306.1755.002>

基金项目: 湖南省社科基金智库专项(19ZWC03)

作者简介: 刘嘉晖(1997—), 男, 硕士研究生; 陈科(1977—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 陈群, chenqun631@csu.edu.cn

在城市道路资源有限的情况下,如今城市中路面行驶的大量的小汽车已经造成严重的道路交通拥堵。鼓励居民乘坐公交,可以降低私家车出行,缓解拥堵,降低环境污染。高载客量的公交车已经成为城市公共交通的重要组成部分^[1],一些公交优先措施很好地解决了公交车准点率差、通行效率低的问题^[2-4]。其中,公交专用道为公交车提供独立路权在拥挤路段效果更好^[5-7]。但路网的复杂性、公交车的周期性导致公交专用车道利用率低,而限时共享专用道这种静态共享方案难以适用于多样、复杂的道路网络环境。

目前,主要有间歇性公交车道(intermittent bus lane, IBL)、具有间歇性优先权的公交车道(bus lanes with intermittent priority, BLIP)以及预信号这3种动态共享方案。IBL在公交车接近时为专用道,公交车离开时为普通车道^[8-9]。IBL通过信号调整清空专用道内车辆保证公交优先,能够减少车辆的延误^[10-13],BLIP则是利用可变信息标志(variable message sign, VMS)提醒车辆离开专用车道^[14-15]。而预信号是通过在交叉口上游处设置预信号来控制共享专用道,为交叉口提供额外的车辆通行能力^[16-18]。

然而 IBL 的信号调整会给主干道更多的绿灯时间,在主干道需求低时会增加其他道路的延误;在面

对不同路段长度清空专用道内车辆时,BLIP 可能会需要大量的信息标志,部署成本较高;预信号增加的额外信号会强制车辆队列末端向后移动。而且这3种策略均无法适应多种路段长度。随着GPS技术的不断发展,在未来环境中GPS可以实现对车辆精确定位。以此为基础,本文提出一种动态公交专用车道共享实时控制方法(以下简称控制方法),建立以减少交叉口车辆总延误为目标的公交专用车道共享控制模型,以实现公交专用车道灵活性、持续性共享。

1 问题描述

控制方法是利用GPS定位实时获取交叉口处公交车的位置,并通过交通检测设备获取专用道内小汽车车辆数,结合当前时刻交叉口主信号显示对专用道共享前后交叉口车辆总延误进行比较。比较结果实时反馈给车道信号,当共享公交车道的总延误小于不共享公交车道的总延误时,车道信号显示绿灯,普通车道的车辆可以在到达车道信号之前进入专用道;反之,车道信号显示红灯,普通车道的车辆不允许进入专用道,同时专用道内未到达车道信号的车辆要通过交织区域驶离专用道。其中,交织区域是车道信号与交叉口车道分割实线之间的路段,以保证公交车道内的车辆变换车道时的安全,避免对普通车道的干扰,如图1所示。

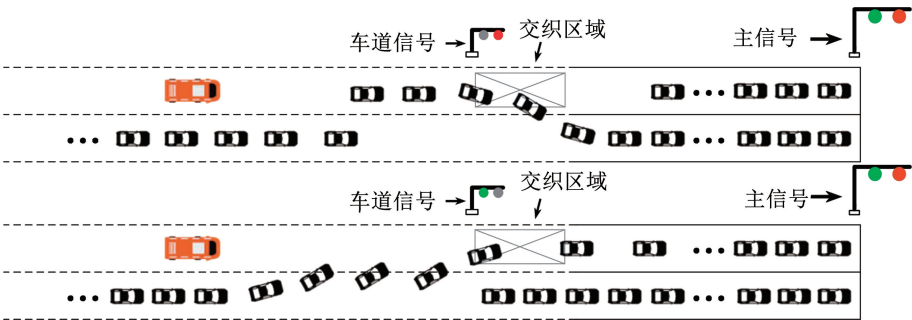


图1 控制原理

Fig.1 Control principle

在当前时刻,如果离交叉口最近的第 n 辆公交车已经到达或者通过车道信号,则此次车道信号的

显示情况由相邻的第 $n+1$ 辆公交车为判断标准,如图2所示。

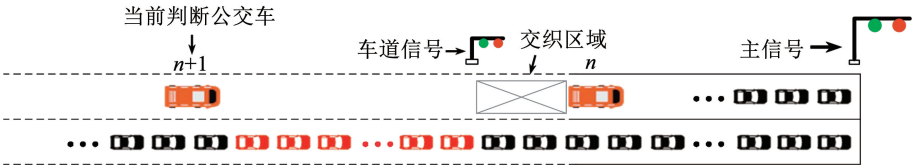


图2 公交车的判断标准

Fig.2 Criteria of selecting buses

2 建立控制方法模型

2.1 模型假设

- 1)左转公交车流量很少,少量左转公交车可以进入普通左转车道完成左转。
- 2)在交叉口路段内公交车以一个平均速度行驶。
- 3)考虑到车辆不能及时在主信号显示红灯前刹车,以及车辆一般在显示绿灯时会有起步损失时间,主信号的黄灯时间是绿灯时间的延续,而部分绿灯时间作为红灯时间的延续。
- 4)专用道内的车辆都能够顺利通过交织区域进入普通车道,不会对其他车辆造成干扰。

2.2 符号说明

参数符号说明见表 1。其中,小汽车和公交车平均司乘系数代表小汽车和公交车每辆车内的平均人数;公交专用车道内 i 辆车通过交叉口的时间 $h_i = \tau \cdot i$;交叉口主信号红灯和绿灯剩余时间与交叉口主信号显示时间满足如下关系:

$$\begin{cases} l_r = r - t, 0 \leq t \leq r \\ l_g = C - t, r < t \leq C \end{cases} \quad (1)$$

2.3 受影响车辆分析

在当前主信号周期内,无法从普通车道通过交叉口的车辆在公交专用车道共享后可以从专用车道通过交叉口,本文将这种车辆定义为受影响车辆(如图 3 中的红色车辆)。

表 1 参数符号说明

Tab. 1 Parameter symbol description

参数	实际含义	单位
C	交叉口主信号周期	s
r	交叉口主信号红灯时长	s
g	交叉口主信号绿灯时长	s
t	交叉口主信号显示时间, $t \in [0, C]$	s
l_r	当前时刻交叉口主信号红灯剩余时间	s
l_g	当前时刻交叉口主信号绿灯剩余时间	s
S	交叉口普通车道饱和流量	pcu/h
τ	交叉口饱和车头时距	s/veh
K	普通车道车流密度	veh/km
n	受影响车辆编号	
N	当前时刻受影响车辆数	veh
$\bar{N}$	已在公交专用车道的普通车辆数	veh
V	公交车平均速度	km/h
V_1	普通车辆在普通车道的行驶速度	km/h
V_2	普通车辆在公交专用车道行驶速度	km/h
e	公交车与普通车辆安全距离	m
d_B	当前时刻公交车距离交叉口距离	m
d_0	交叉口车道分割线长度	m
d_1	交织区域长度	m
d_n	当前时刻第 n 辆普通车辆距离交叉口的距离	m
Z	共享公交车专用道前后的交叉口车辆总延误差值	
α	小汽车平均司乘系数	
β	公交车平均司乘系数	
h_i	公交专用车道内 i 辆车通过交叉口的时间	s

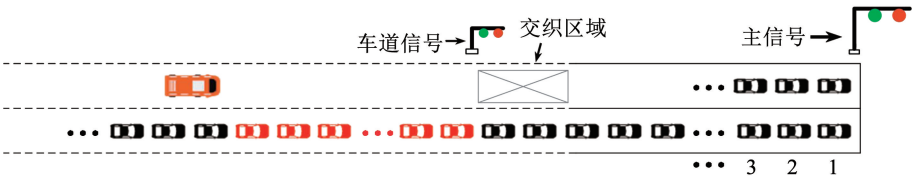


图 3 受影响车辆

Fig. 3 Affected vehicles

由于交叉口处的车流密度较大并且车辆运行状态相对均匀,本文认为交叉口处的车辆是均匀排列的。根据当前时刻交叉车辆的队伍,从交叉口停车线开始对普通车道上的车辆进行编号(停车线后的车辆为第 1 辆,依次向后编号)。车辆离交叉口的距离和序号满足如下关系:

$$d_n = (n - 1) / K \quad (2)$$

一个主信号周期绿灯剩余时间内能够通过交叉口的车辆数有限,受影响车辆的序号是位于当前周期能通过交叉口车辆的序号之后,即 $n \geq [S \cdot l_g] + 1$ 。在共享公交专用车道之后,受影响车辆能够从公交专用车道通过交叉口,则进入专用道的受影响车辆离交叉口的距离不能超过其在绿灯剩余时间内的行

驶距离,即 $d_n \leq V_2 \cdot l_g$ 。而且受影响车辆数与公交专用道内已有车辆数之和不能超过绿灯剩余时间能够通过交叉口的车辆数,即 $N + \bar{N} \leq [S \cdot l_g]$ 。为保证车辆变道安全,受影响车辆要在交织区域之后且在当前时刻距离交叉口最近的公交车之前,即 $d_0 + d_1 \leq d_n \leq d_B - e$ 。其中, e 表示公交车与小汽车之间的安全车距,通常 $e = 5$ m。结合式(2),可以计算出受影响车辆的第 1 辆车的编号 $n_{\min}$,最后一辆车的编号 $n_{\max}$ 以及受影响车辆数:

$$n_{\min} = \text{Max}([S \cdot l_g] + 1, [(d_0 + d_1) \cdot K] + 1) \quad (3)$$

$$n_{\max} = \text{Min}([K \cdot V_2 \cdot l_g] + 1, [(d_B - e) \cdot K] + 1) \quad (4)$$

$$N = n_{\max} - n_{\min} + 1 \quad (5)$$

$$N \leq [S \cdot l_g] - \bar{N} \quad (6)$$

根据实际意义,受影响车辆为正整数。如果专用道内已有车辆数超过绿灯剩余时间所能通过的车辆数,或者编号 $n_{\max}$ 小于 $n_{\min}$ 时,则不存在受影响车辆(取 $N=0$),无论是否共享专用车道均不会减少交叉口的总延误。

2.4 控制模型

交叉口的总延误包括公交车的延误、受影响车辆的延误以及非受影响车辆的延误,其中非受影响车辆包括在普通车道的车辆以及已在公交专用车道的普通车辆,即

$$D = \alpha \cdot D_N + \beta \cdot D_B + \alpha \cdot D_M \quad (7)$$

$$Z = D_r - D_g \quad (8)$$

$$D_r = \alpha \cdot D_{Nr} + \beta \cdot D_{Br} + \alpha \cdot D_{Mr} \quad (9)$$

$$D_g = \alpha \cdot D_{Ng} + \beta \cdot D_{Bg} + \alpha \cdot D_{Mg} \quad (10)$$

其中: D 为交叉口车辆总延误, D_N 为受影响车辆延

误, D_B 为离交叉口最近公交车的延误, D_M 为非受影响车辆延误, D_r 为假设车道信号显示红灯时的交叉口总延误, D_g 为假设车道信号显示绿灯时的交叉口总延误。

共享公交专用车道不会对非受影响车辆造成干扰,则共享前后非受影响车辆的延误相等。由此可以计算出公交专用车道共享前后交叉口总延误差值:

$$Z = \alpha \cdot (D_{Nr} - D_{Ng}) + \beta \cdot (D_{Br} - D_{Bg}) \quad (11)$$

综合上述分析,车道信号显示情况 I 与当前时刻交叉口共享公交专用车道前后车辆总延误的差值、离交叉口最近的公交车的位置以及受影响车辆有关,由此建立动态公交车道共享实时控制模型(12)。控制方法的流程如图4所示。

$$I = \begin{cases} \text{Green}, & Z > 0 \\ \text{Red}, & Z \leq 0 \text{ 或 } N = 0 \end{cases} \quad (12)$$

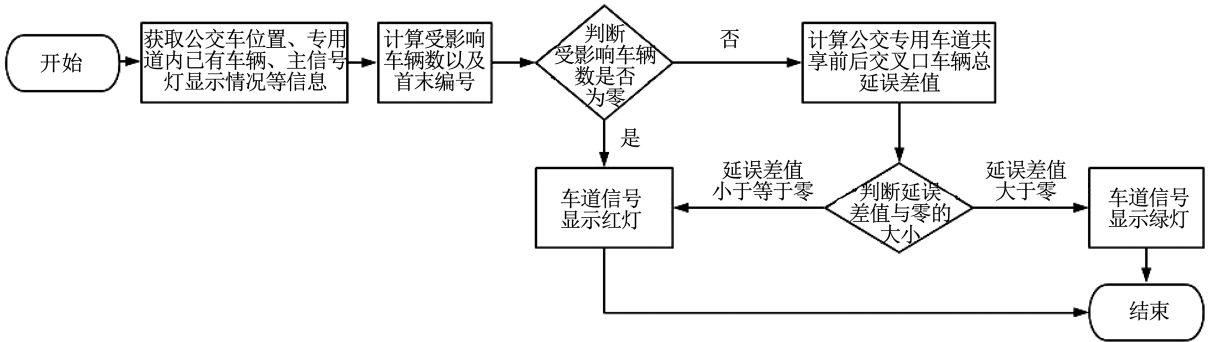


图4 整体控制过程

Fig. 4 Overall control process

3 交叉口车辆总延误计算

在控制模型中最关键的因素就是当前时刻交叉口共享公交专用车道前后的车辆总延误差值,而车辆总延误与当前时刻主信号灯显示情况有着密不可分的关系。当前时刻不同的主信号显示情况以及不同的公交车离交叉口距离都会影响受影响车辆数的大小,对车辆总延误的分析与计算也是不同的。

3.1 当前时刻主信号显示红灯

3.1.1 计算车道信号显示红灯时的延误

1) 受影响车辆延误。受影响车辆不仅经历了当前周期的剩余红灯时间,也受到了相邻周期红灯时间的影响,经历额外的延误如图5所示。而且每辆受影响车辆的延误都与当前周期的红灯剩余时间、车辆从当前位置到达交叉口的行驶时间、前一车辆离开交叉口的时间等因素有关,受影响车辆的总延误是每辆受影响车辆延误的总和,即

$$D_{Nr} = \sum_{i=n_{\min}}^{n_{\max}} (r + g + l_r + h_{i-n_{\min}} - d_i/V_1) \quad (13)$$

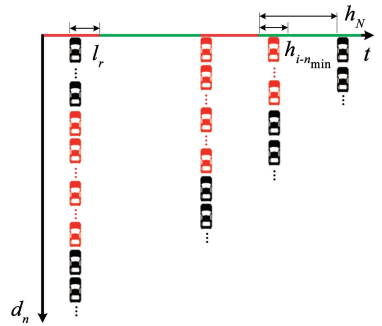


图5 在主信号显示红灯情况下车道信号显示红灯时受影响车辆运行状态

Fig. 5 Operating status of affected vehicle when lane signal is red and main signal is red

2) 公交车延误。离交叉口最近的公交车到达交叉口停车线的行驶时间 t_B (以下简称公交车行驶时间)会导致主信号显示、专用道内车辆情况的不同,这些因素直接影响公交车的延误。因此,本文针对公交车行驶时间分析如下。

$$t_B = d_B/V \quad (14)$$

在 $t_B \geq C$ 的情况下,当前时刻在专用道内已有

车辆在公交车到达交叉口停车线之前已离开交叉口,不会对公交车造成干扰。为了便于情况分析,本文引入 m 和 $\gamma \in (0, C]$ 来描述公交车行驶时间与交叉口主信号周期之间的关系。其中, m 表示公交车行驶时间与主信号周期的比值, γ 则反应了公交车行

驶时间与主信号周期比值的余数。 m 并不会改变公交车到达交叉口停车线时主信号显示情况,而 γ 的变化会导致公交车到达交叉口停车线时主信号显示情况改变,如图 6 所示。

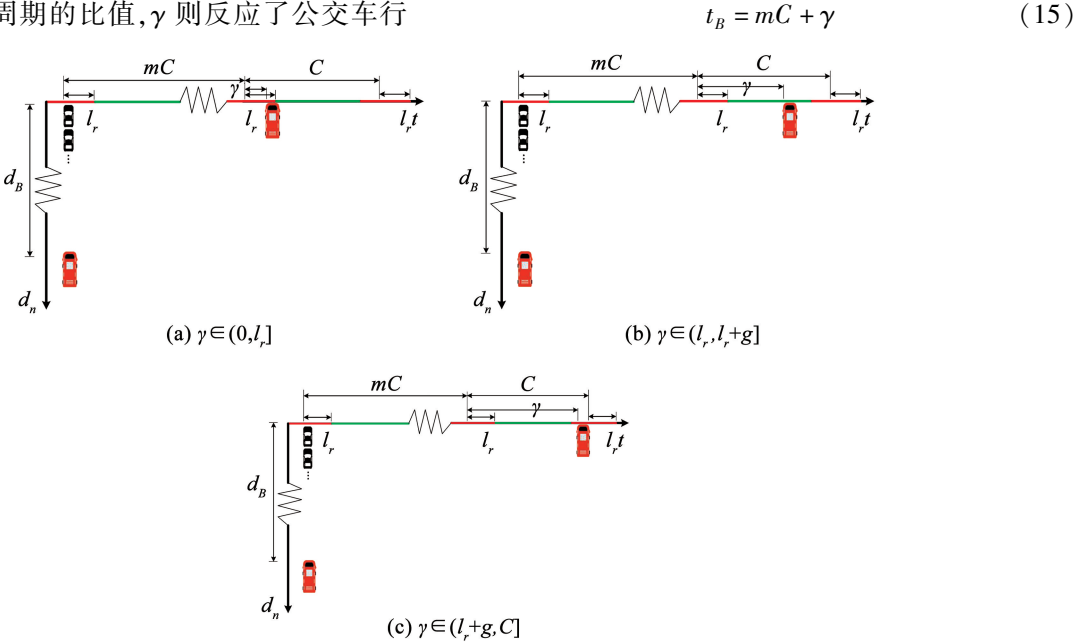


图 6 在主信号显示红灯情况下车道信号显示红灯及 $t_B \geq C$ 时公交车运行状态

Fig. 6 Operating status of bus when lane signal is red and main signal is red with $t_B \geq C$

当公交车到达交叉口停车线时,主信号可能显示红灯(图 6(a),图 6(c)),主信号也可能显示绿灯(图 6(b))。显然,不同的主信号显示情况会影响公交车的延误,随着 γ 的变化公交车延误也在变化。

$$D_{Br} = \begin{cases} l_r - \gamma, \gamma \in (0, l_r] \\ 0, \gamma \in (l_r, l_r + g] \\ C + l_r - \gamma, \gamma \in (l_r + g, C) \end{cases} \quad (16)$$

在 $l_r + g \leq t_B < C$ 的情况下,公交车到达交叉口停车线时主信号显示红灯,专用道内已有车辆全部通过交叉口(如图 7(a)所示)。公交车延误是公交车到达交叉口停车线时下一个主信号周期红灯剩余时间。

$$D_{Br} = r - [t_B - (l_r + g)] \quad (17)$$

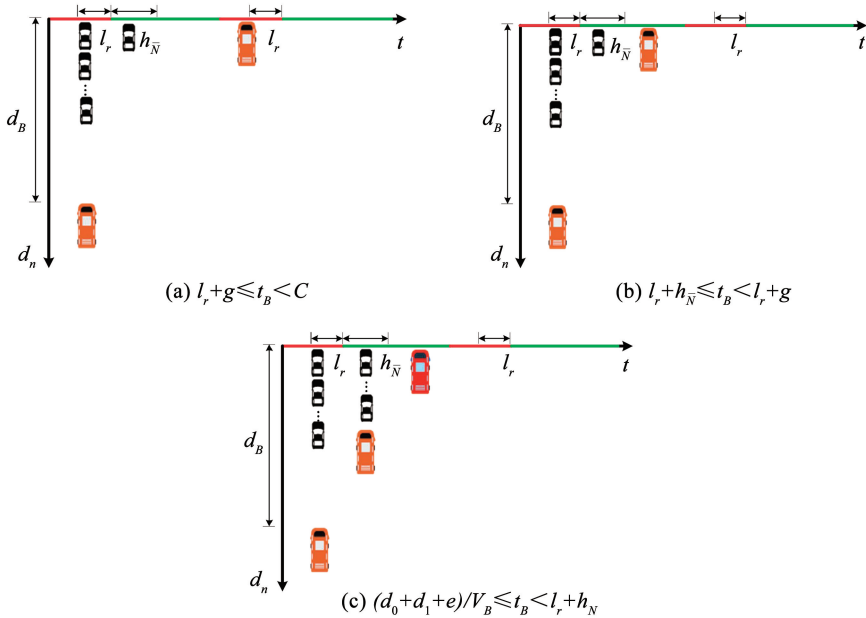


图 7 在主信号显示红灯情况下车道信号显示红灯时公交车运行状态

Fig. 7 Operating status of bus when lane signal is red and main signal is red

在 $l_r + h_{\bar{N}} \leq t_B < l_r + g$ 的情况下,公交车到达交叉口停车线时主信号显示绿灯,专用道内已有车辆已经全部通过交叉口(如图7(b)所示)。公交车不存在延误。

$$D_{Br} = 0 \quad (18)$$

在 $(d_0 + d_1 + e)/V_B \leq t_B < l_r + h_{\bar{N}}$ 的情况下,理论上公交车到达交叉口停车线时主信号显示绿灯(图7(c)中的红色公交车)。然而实际上,由于专用道内已有车辆在公交车接近时并未全部驶离交叉口,导致公交车排在了车辆队伍末端。公交车延误是剩余车辆驶离交叉口的时间。

$$D_{Br} = l_r + h_{\bar{N}} - t_B \quad (19)$$

在 $t_B < (d_0 + d_1 + e)/V_B$ 的情况下,该公交车已经到达车道信号或者通过车道信号,则当前时刻车道信号的显示情况是由相邻的下一辆公交车(以下简称相邻公交车)进行判断。因此,公交车延误是由离交叉口最近的公交车与相邻公交车的延误共同组成,并且受影响车辆的分析也是以相邻公交车为判断标准。其中,离交叉口最近的公交车延误是专用车道内已有车辆驶离交叉口的时间(与式(19)相等),并且可将离交叉口最近的公交车视为专用道内已有车辆之一。然而相邻公交车延误还需要进一步分析,相邻公交车距离交叉口的距离为 $\hat{d}_B$,则相邻公交车行驶时间为 $\hat{t}_B = \hat{d}_B/V$ 。

当 $\hat{t}_B \geq C$ 时,相邻公交车的运行状态与离交叉口最近公交车类似(如图6所示),相邻公交车延误

与这种情况下离交叉口最近公交车的延误相等(式(16))。

$$D_{Br} = l_r + h_{\bar{N}} - t_B + \begin{cases} l_r - \gamma, \gamma \in (0, l_r] \\ 0, \gamma \in (l_r, l_r + g] \\ C + l_r - \gamma, \gamma \in (l_r + g, C) \end{cases} \quad (20)$$

当 $l_r + g \leq \hat{t}_B < C$ 时,相邻公交车到达交叉口停车线时主信号显示红灯,专用道内所有车辆全部通过交叉口(如图8(a)所示)。相邻公交车延误是其到达交叉口停车线时下一个主信号周期红灯剩余时间。

$$D_{Br} = l_r + h_{\bar{N}} - t_B + r - [\hat{t}_B - (l_r + g)] \quad (21)$$

当 $l_r + h_{\bar{N}+1} \leq \hat{t}_B < l_r + g$ 时,相邻公交车到达交叉口停车线时主信号显示绿灯,专用道内所有车辆已经全部通过交叉口(如图8(b)所示)。相邻公交车不存在延误。

$$D_{Br} = l_r + h_{\bar{N}} - t_B \quad (22)$$

当 $(d_0 + d_1 + e)/V_B \leq \hat{t}_B < l_r + h_{\bar{N}+1}$ 时,理论上相邻公交车到达交叉口停车线时主信号显示绿灯(图8(c)中的红色公交车)。然而实际上,由于专用道内已有车辆以及离交叉口最近的公交车在相邻公交车接近时并未全部驶离交叉口,导致相邻公交车排在了车辆队伍末端。相邻公交车延误是剩余车辆驶离交叉口的时间。

$$D_{Br} = l_r + h_{\bar{N}} - t_B + l_r + h_{\bar{N}+1} - \hat{t}_B \quad (23)$$

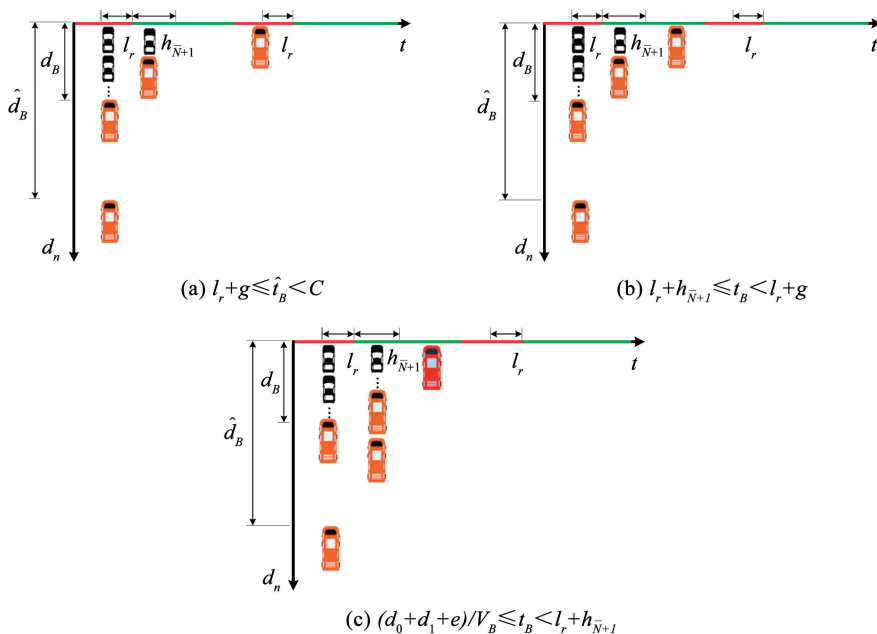


图8 在主信号显示红灯情况下车道信号显示红灯时相邻公交车运行状态

Fig. 8 Operating status of adjacent bus when lane signal is red and main signal is red

如果 $\hat{t}_B \leq (d_0 + d_1 + e)/V_B$, 这说明相邻公交车在当前时刻也已经到达或者驶过车道信号, 即两辆公交车紧邻。在这种情况下, 车道信号的显示情况就由再下一辆相邻的公交车进行判断, 且当前时刻下的公交车延误是这 3 辆公交车延误共同组成。前两辆公交车可以视为专用道内已有车辆之一, 其延误是前车离开交叉口的时间, 第 3 辆公交车延误分析方法与前文类似, 本文不再重复研究。

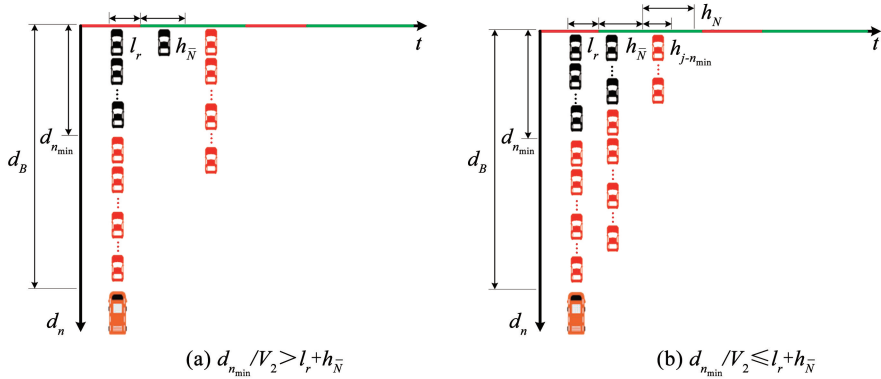


图 9 在主信号显示红灯情况下车道信号显示绿灯时受影响车辆运行状态

Fig. 9 Operating status of affected vehicle when lane signal is green and main signal is red

在 $d_{n_{\min}}/V_2 > l_r + h_{\bar{N}}$ 的情况下, 编号 $n_{\min}$ 的受影响车辆到达交叉口停车线时, 专用道内已有车辆已经全部离开交叉口 (如图 9 (a) 所示), 受影响车辆不存在延误; 在 $d_{n_{\min}}/V_2 \leq l_r + h_{\bar{N}}$ 的情况下, 编号 $n_{\min}$ 的受影响车辆接近交叉口停车线时, 专用道内已有车辆并未全部驶离交叉口 (如图 9 (b) 所示), 受影响车辆延误是前车驶离交叉口的时间。

$$D_{Ng} = \begin{cases} 0, d_{n_{\min}}/V_2 > l_r + h_{\bar{N}} \\ N \cdot (l_r + h_{\bar{N}}) + \sum_{j=n_{\min}}^{n_{\max}} (h_{j-n_{\min}} - d_j/V_2), \\ d_{n_{\min}}/V_2 \leq l_r + h_{\bar{N}} \end{cases} \quad (24)$$

2) 公交车延误。同样地, 仍然需要对公交车行驶时间进行深入分析。在 $t_B \geq C$ 的情况下, 公交车的运行状态与主信号显示红灯情况下车道信号显示红灯时一致 (如图 6 所示), 公交车延误与主信号显示红灯情况下车道信号显示红灯时的延误相等 (式 (16))。

$$D_{Bg} = D_{Br} = \begin{cases} l_r - \gamma, \gamma \in (0, l_r] \\ 0, \gamma \in (l_r, l_r + g] \\ C + l_r - \gamma, \gamma \in (l_r + g, C) \end{cases} \quad (25)$$

在 $l_r + g \leq t_B < C$ 的情况下, 公交车到达交叉口停车线时主信号显示红灯, 专用道内已有车辆全部通过了交叉口 (如图 10 所示)。公交车延误是公交车到达交叉口停车线时下一个主信号周期红灯剩余

3.1.2 计算车道信号显示绿灯时的延误

1) 受影响车辆延误。受影响车辆可以进入公交专用车道, 但可能会受到专用道内已有车辆的干扰。受影响车辆是从编号 $n_{\min}$ 开始的车辆队列, 如果专用道内车辆在编号 $n_{\min}$ 的车辆接近时没有全部驶离交叉口, 则整个受影响车辆队列均会受到干扰。因此, 针对编号 $n_{\min}$ 的车辆是否被干扰进行分析 (如图 9 所示)。

时间。

$$D_{Bg} = r - [t_B - (l_r + g)] \quad (26)$$

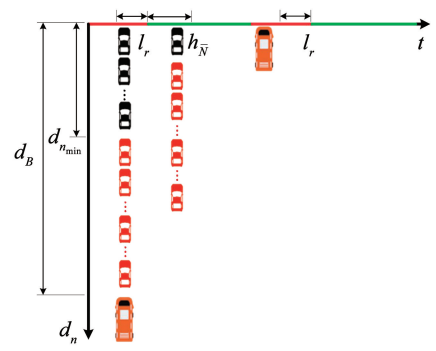


图 10 在主信号显示红灯情况下车道信号显示绿灯及 $l_r + g \leq t_B < C$ 时公交车运行状态

Fig. 10 Operating status of bus when lane signal is green and main signal is red with $l_r + g \leq t_B < C$

在 $(d_0 + d_1 + e)/V_B \leq t_B < l_r + g$ 的情况下, 该公交车到达交叉口停车线时主信号显示绿灯。由于公交车位于受影响车辆队列之后 ($d_B > d_{n_{\max}} > d_{n_{\min}}$), 受影响车辆的运行状态可能会影响公交车的运行状态, 而专用道内已有车辆会干扰受影响车辆的运行状态。当公交车接近交叉口时, 专用道内已有车辆或受影响车辆可能全部离开交叉口, 公交车不存在延误 (如图 11 (a)、11 (b) 所示); 专用道内已有车辆和受影响车辆可能并未完全离开交叉口, 导致公交车排在了车辆队伍末端 (如图 11 (c) 所示)。

$$D_{Bg} = \begin{cases} 0, (d_0 + d_1 + e)/V_B \leq t_B < l_r + g, d_{n_{\min}}/V_2 > l_r + h_{\bar{N}} \\ 0, l_r + h_{\bar{N}} + h_N \leq t_B < l_r + g, d_{n_{\min}}/V_2 \leq l_r + h_{\bar{N}} \\ l_r + h_{\bar{N}} + h_N - t_B, (d_0 + d_1 + e)/V_B \leq t_B < l_r + h_{\bar{N}} + h_N, d_{n_{\min}}/V_2 \leq l_r + h_{\bar{N}} \end{cases} \quad (27)$$

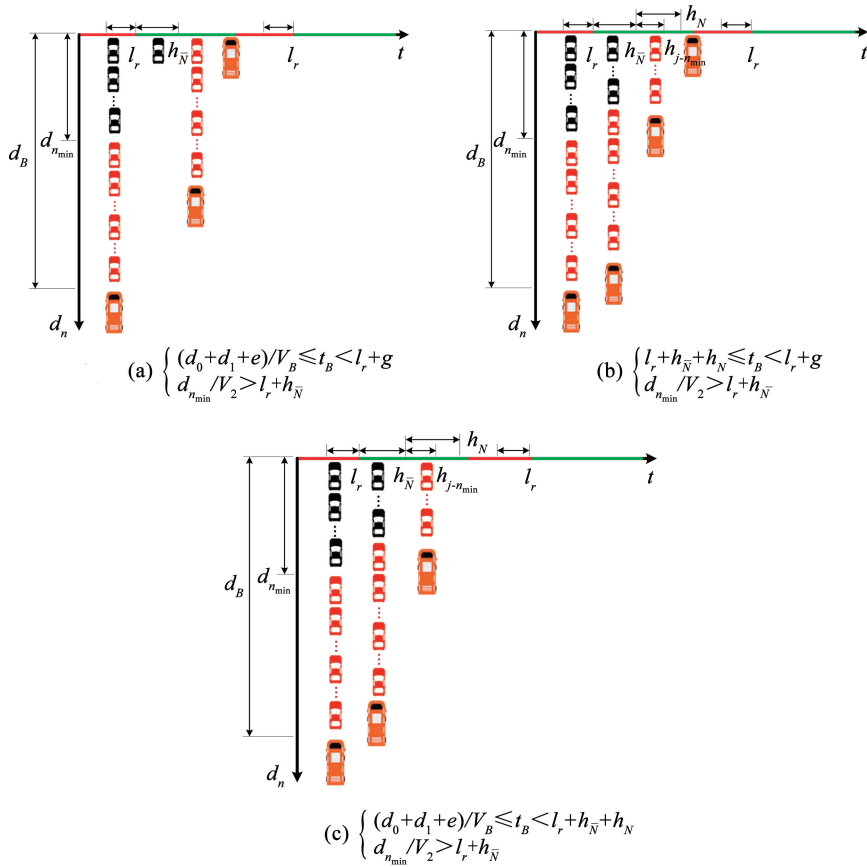


图 11 在主信号显示红灯情况下车道信号显示绿灯及 $(d_0 + d_1 + e)/V_B \leq t_B < l_r + g$ 时公交车运行状态

Fig. 11 Operating status of bus when lane signal is green and main signal is red under the case of $(d_0 + d_1 + e)/V_B \leq t_B < l_r + g$

在 $t_B < (d_0 + d_1 + e)/V_B$ 的情况下,与主信号显示红灯情况下车道信号显示红灯时一样,当前时刻车道信号的显示情况以及受影响车辆的分析是由相邻公交车进行判断,且公交车延误是包含离交叉口最近公交车的延误和相邻公交车的延误。其中,离交叉口最近的公交车延误是专用车道内已有车辆驶离交叉口的时间(与式(19)相等),并且可将离交叉口最近的公交车视为专用道内已有车辆之一。因此,仍然需要进一步分析相邻公交车延误。

当 $\hat{t}_B \geq C$ 时,相邻公交车的运行状态与离交叉口最近公交车类似(如图 6 所示),相邻公交车延误与离交叉口最近公交车的延误相等(式(16))。

$$D_{Br} = l_r + h_{\bar{N}} - t_B + \begin{cases} l_r - \gamma, \gamma \in (0, l_r] \\ 0, \gamma \in (l_r, l_r + g] \\ C + l_r - \gamma, \gamma \in (l_r + g, C) \end{cases} \quad (28)$$

当 $l_r + g \leq \hat{t}_B < C$ 时,相邻公交车到达交叉口停车线时主信号显示红灯,专用道内所有车辆全部通

过交叉口(如图 12 所示)。其中, $\hat{d}_{n_{\min}}$ 表示以相邻公交车为标准下的受影响第一辆车距离交叉口的位置。因此,相邻公交车延误是其到达交叉口停车线时下一个主信号周期红灯剩余时间。

$$D_{Br} = l_r + h_{\bar{N}} - t_B + r - [\hat{t}_B - (l_r + g)] \quad (29)$$

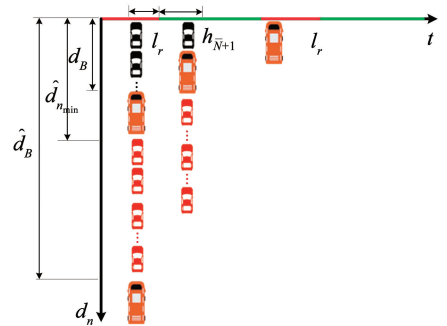


图 12 在主信号显示红灯情况下车道信号显示绿灯及 $l_r + g \leq \hat{t}_B < C$ 时相邻公交车运行状态

Fig. 12 Operating status of adjacent bus when lane signal is green and main signal is red with $l_r + g \leq \hat{t}_B < C$

当 $(d_0 + d_1 + e)/V_B \leq \hat{t}_B < l_r + g$ 时,相邻公交车到达交叉口停车线时主信号显示绿灯。由于受影响车辆的分析也是以相邻公交车为判断标准,离交叉口最近公交车位于受影响车辆队列之前,而相邻公交车位于受影响车辆队列之后($\hat{d}_B > \hat{d}_{n_{\max}} > \hat{d}_{n_{\min}} > d_B$)。其中, $\hat{d}_{n_{\max}}$ 表示以相邻公交车为标准下的受影响最后一辆车距离交叉口的位置。因此,专用道内已有车辆以及离交叉口最近公交车会干扰受影响车

辆队列,且受影响车辆队列可能会影响相邻公交车的运行状态。当相邻公交车接近交叉口时,专用道内已有车辆或受影响车辆可能全部离开交叉口,则相邻公交车不存在延误(如图 13(a)、13(b)所示);专用道内已有车辆和受影响车辆可能并未完全离开交叉口,导致相邻公交车排在了车辆队伍末端(如图 13(c)所示)。

$$D_{Bg} = \begin{cases} l_r + h_{\bar{N}} - t_B, & (d_0 + d_1 + e)/V_B \leq \hat{t}_B < l_r + g, \hat{d}_{n_{\min}}/V_2 > l_r + h_{\bar{N}+1} \\ l_r + h_{\bar{N}} - t_B, l_r + h_{\bar{N}+1} + h_N \leq \hat{t}_B < l_r + g, \hat{d}_{n_{\min}}/V_2 \leq l_r + h_{\bar{N}+1} \\ 2l_r + h_{2\bar{N}+1} + h_N - t_B - \hat{t}_B, & \frac{(d_0 + d_1 + e)}{V_B} \leq \hat{t}_B < l_r + h_{\bar{N}+1} + h_N, \hat{d}_{n_{\min}}/V_2 \leq l_r + h_{\bar{N}+1} \end{cases} \quad (30)$$

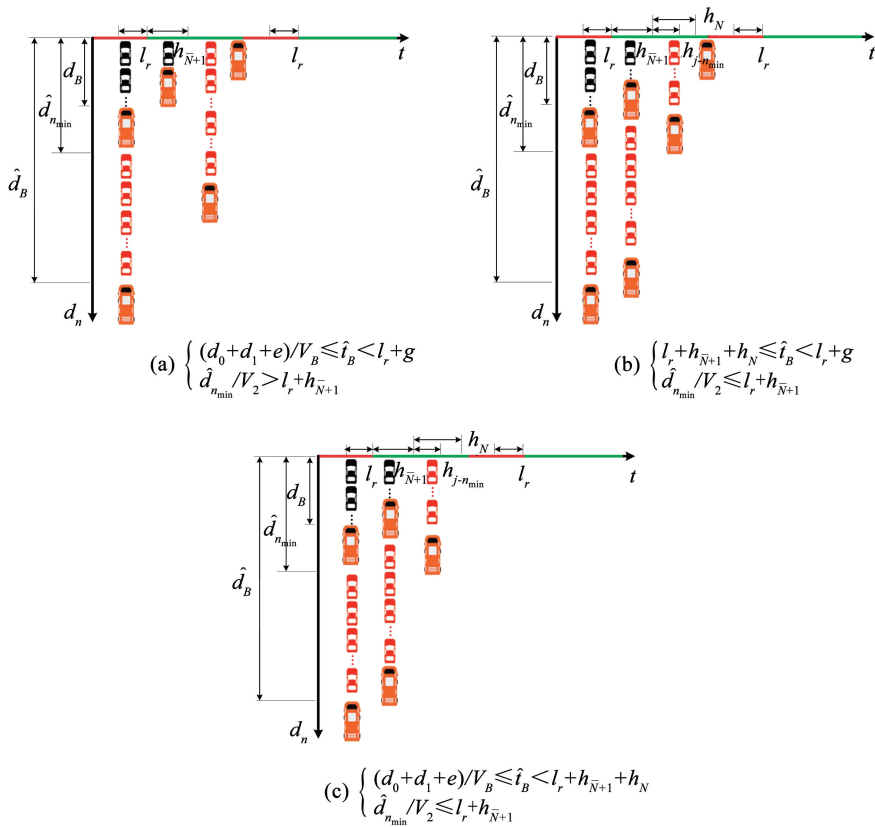


图 13 在主信号显示红灯情况下车道信号显示绿灯及 $(d_0 + d_1 + e)/V_B \leq \hat{t}_B < l_r + g$ 时相邻公交车运行状态

Fig. 13 Operating status of adjacent bus when lane signal is green and main signal is red with $(d_0 + d_1 + e)/V_B \leq \hat{t}_B < l_r + g$

3.1.3 共享公交专用车道前后交叉口车辆总延误差值

根据车道信号显示红灯以及绿灯两种情况下求得的受影响车辆延误、公交车延误,可以计算出共享公交专用车道前后交叉口车辆总延误的差值。

离交叉口最近的公交车未驶过车道信号:

1) $d_{n_{\min}}/V_2 > l_r + h_{\bar{N}}$ 时,

$$Z = \alpha \cdot [N \cdot (C + l_r) + \sum_{i=n_{\min}}^{n_{\max}} (h_{i-n_{\min}} - d_i/V_1)] \quad (31)$$

2) $d_{n_{\min}}/V_2 \leq l_r + h_{\bar{N}}$ 时,

$$Z = \begin{cases} \alpha \cdot p, l_r + h_{\bar{N}} + h_N \leq t_B \\ \alpha \cdot p - \beta \cdot (l_r + h_{\bar{N}} + h_N - t_B), l_r + h_{\bar{N}} \leq t_B < l_r + h_{\bar{N}} + h_N \\ \alpha \cdot p - \beta \cdot h_N, (d_0 + d_1 + e)/V_B \leq t_B < l_r + h_{\bar{N}} \end{cases} \quad (32)$$

$$p = N \cdot (C - h_{\bar{N}}) - \sum_{k=n_{\min}}^{n_{\max}} (d_k/V_1 - d_k/V_2) \quad (33)$$

离交叉口最近的公交车驶过车道信号:

1) $\hat{d}_{n_{\min}}/V_2 > l_r + h_{\bar{N}+1}$ 时,

$$Z = \alpha \cdot [N \cdot (C + l_r) + \sum_{i=n_{\min}}^{n_{\max}} (h_{i-n_{\min}} - \hat{d}_i/V_1)]$$

(34)

2) $\hat{d}_{n_{\min}}/V_2 \leq l_r + h_{\bar{N}+1}$ 时,

$$Z = \begin{cases} \alpha \cdot \hat{p}, l_r + h_{\bar{N}+1} + h_N \leq \hat{t}_B \\ \alpha \cdot \hat{p} - \beta \cdot (l_r + h_{\bar{N}+1} + h_N - \hat{t}_B), \\ l_r + h_{\bar{N}+1} \leq \hat{t}_B < l_r + h_{\bar{N}+1} + h_N \\ \alpha \cdot \hat{p} - \beta \cdot h_N, (d_0 + d_1 + e)/V_B \leq \hat{t}_B < l_r + h_{\bar{N}+1} \end{cases}$$

(35)

$$\hat{p} = N \cdot (C - h_{\bar{N}+1}) - \sum_{k=n_{\min}}^{n_{\max}} (\hat{d}_k/V_1 - \hat{d}_k/V_2)$$

(36)

3.2 当前时刻主信号显示绿灯

本部分关于车道信号显示红灯和绿灯两种情况下,受影响车辆延误和公交车延误的分析方法与主信号显示红灯时分析方法一致,共享公交专用车道前后交叉口车辆总延误的差值计算结果如下。

离交叉口最近的公交车未驶过车道信号:

1) $d_{n_{\min}}/V_2 > h_{\bar{N}}$ 时,

$$Z = \alpha \cdot [N \cdot (r + l_g) + \sum_{i=n_{\min}}^{n_{\max}} (h_{i-n_{\min}} - d_i/V_1)]$$

(37)

2) $d_{n_{\min}}/V_2 \leq h_{\bar{N}}$ 时,

$$Z = \begin{cases} \alpha \cdot q, h_{\bar{N}} + h_N \leq t_B \\ \alpha \cdot q - \beta \cdot (h_{\bar{N}} + h_N - t_B), h_{\bar{N}} \leq t_B < h_{\bar{N}} + h_N \\ \alpha \cdot q - \beta \cdot h_N, (d_0 + d_1 + e)/V_B \leq t_B < h_{\bar{N}} \end{cases}$$

(38)

$$q = N \cdot (r + l_g - h_{\bar{N}}) - \sum_{k=n_{\min}}^{n_{\max}} (d_k/V_1 - d_k/V_2)$$

(39)

离交叉口最近的公交车驶过车道信号:

1) $\hat{d}_{n_{\min}}/V_2 > h_{\bar{N}+1}$ 时,

$$Z = \alpha \cdot [N \cdot (r + l_g) + \sum_{i=n_{\min}}^{n_{\max}} (h_{i-n_{\min}} - \hat{d}_i/V_1)]$$

(40)

2) $\hat{d}_{n_{\min}}/V_2 \leq h_{\bar{N}+1}$ 时,

$$Z = \begin{cases} \alpha \cdot \hat{q}, h_{\bar{N}+1} + h_N \leq \hat{t}_B \\ \alpha \cdot \hat{q} - \beta \cdot (h_{\bar{N}+1} + h_N - \hat{t}_B), h_{\bar{N}+1} \leq \hat{t}_B < h_{\bar{N}+1} + h_N \\ \alpha \cdot \hat{q} - \beta \cdot h_N, (d_0 + d_1 + e)/V_B \leq \hat{t}_B < h_{\bar{N}+1} \end{cases}$$

(41)

$$\hat{q} = N \cdot (r + l_g - h_{\bar{N}+1}) - \sum_{k=n_{\min}}^{n_{\max}} (\hat{d}_k/V_1 - \hat{d}_k/V_2)$$

(42)

4 示例分析

结合控制模型和交叉口总延误差值表达式可以看出,车道信号显示情况与当前时刻公交车离交叉

口的距离、主信号显示情况以及专用道内已有车辆数有关。本文引入示例探究在不同场景下车道信号的显示情况,模型参数设置见表 2。

表 2 模型参数设置

Tab. 2 Model instance parameter settings

参数	实际含义	取值
S	交叉口饱和流量	1 800 pcu/h
τ	交叉口饱和车头时距	2 s/veh
K	普通车道车流密度	100 veh/km
V	公交车行驶速度	18 km/h
V_1	普通车辆在普通车道的行驶速度	20 km/h
V_2	普通车辆在公交专用车道行驶速度	25 km/h
d_0	交叉口车道分割线长度	50 m
d_1	交织区域长度	30 m
α	普通车辆平均司乘系数	1.5
β	公交车平均司乘系数	30

本文以主信号周期 50 s(绿灯 28 s,红灯 22 s)为例。图 14 展示在公交专用车道内已有车辆数为 4 辆(图 14(a))、8 辆(图 14(b))、12 辆(图 14(c))、16 辆(图 14(d))的情况下,当前时刻公交车离交叉口不同的距离、交叉口主信号显示情况对车道信号显示的影响。其中, x 轴表示交叉口主信号显示时间,用以反映主信号显示情况(0 ~ 22 s 显示红灯,22 ~ 50 s 显示绿灯); y 轴表示公交车离交叉口的距离。灰色区域表示车道信号显示绿灯的情况,黑色区域表示车道信号显示红灯的情况,区域面积的大小反映了车道信号显示情况的多少。

绿灯剩余时间内能够通过交叉口的车辆数有限,专用道内已有车辆数是影响车道共享的关键因素。如果当前时刻下专用道内车辆数较多,一方面导致受影响车辆数较少,会影响交叉口总体延误;另一方面也增加了公交车接近交叉口时专用道内车辆未能全部驶离交叉口的风险,会干扰公交车正常行驶且增加交叉口延误。整体上,公交专用车道内已有的车辆数越多,黑色区域的面积越大。当专用道内车辆数超过主信号绿灯时间所能允许通过交叉口的车辆数时,车道信号只显示红灯(如图 14(d)所示)。车道信号的控制能有效避免专用道内已有车辆过多的同时,也充分利用专用道减少交叉口总体延误。

公交车离交叉口越远,其到达交叉口的行驶时间越长,共享后车辆有充足的时间驶离交叉口,能够有效减小交叉口车辆延误;在主信号显示红灯的情况下,绿灯剩余时间最大且等于主信号绿灯时间,允许通过交叉口的车辆数也是最大,减少的车辆延误

最多。灰色区域主要集中在图像的左上角,符合实际情况。车道信号的控制减少了因公交车距离交叉口较远时专用道的资源浪费,并实现了交叉口当前周期的通过率饱和。

为进一步探究主信号配时对车道信号显示情况的影响,结合前文对主信号周期为 50 s(绿灯 28 s,

红灯 22 s)的分析,本部分以公交车道内已有 8 辆车为例,增加交叉口主信号周期为 60 s(绿灯 34 s,红灯 26 s)、70s(绿灯 40 s,红灯 30 s)以及 80 s(绿灯 46 s,红灯 34 s)。图 15 展示了在不同主信号配时方案下车道信号的显示情况。

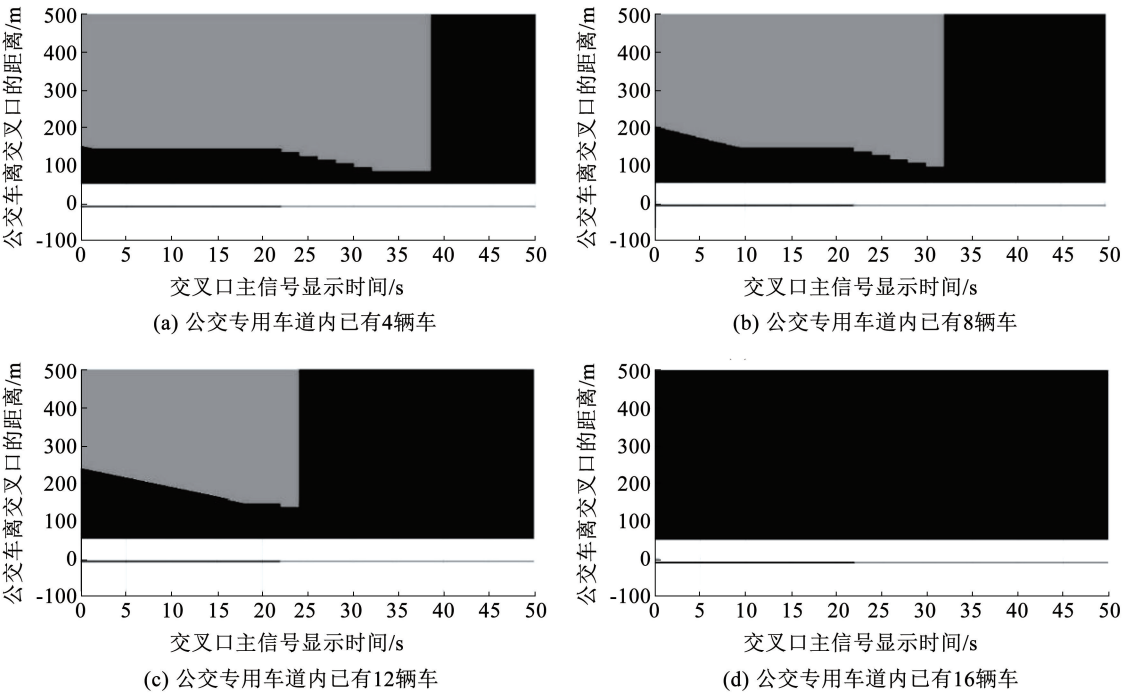


图 14 专用道内车辆数不同的情况下某时刻车道信号的显示情况

Fig. 14 Lane signal display conditions at a certain moment with different number of vehicles in the dedicated lanes

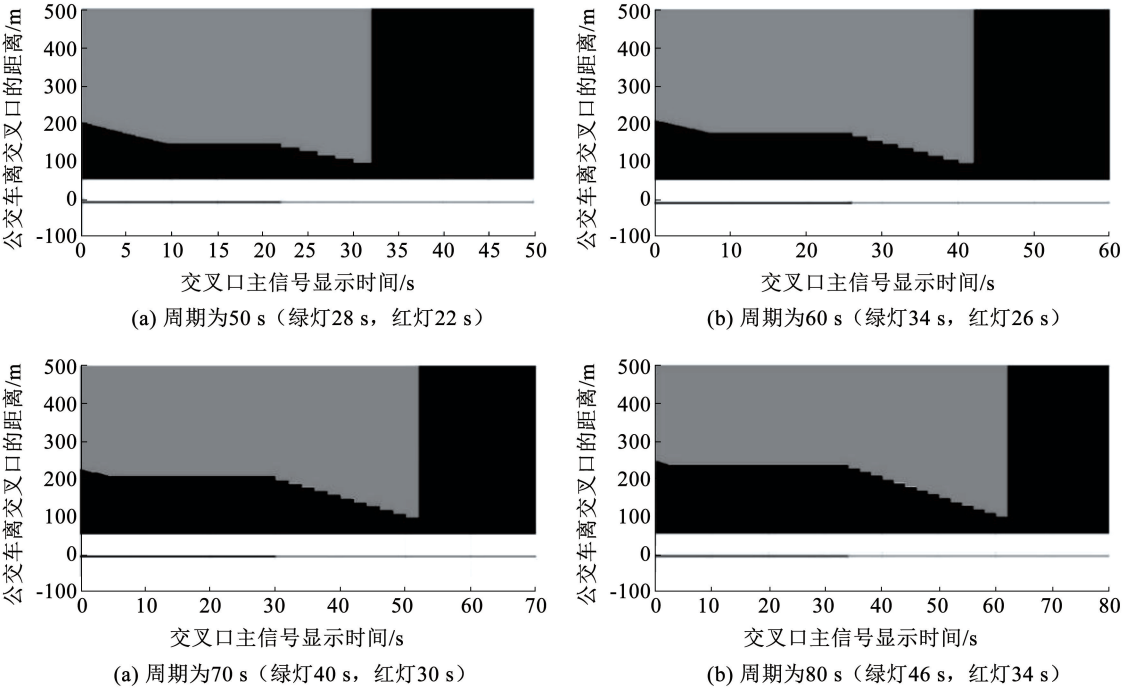


图 15 不同主信号配时方案情况下的车道信号显示

Fig. 15 Lane signal display conditions under different main signal timing plans

在不同主信号配时方案下,灰色区域仍然是集中在图像的左上角,这说明车道信号在公交车离交叉口较远,绿灯剩余时间较长时显示绿灯的情况较多,与前文分析结论一致。从整体上看,在主信号显示红灯部分,随着主信号周期的增加,灰色与黑色区域分界线的位置在增加,这也从数据上印证了主信号红灯时间的增加使得在主信号显示红灯部分更难共享专用车道。而在主信号显示绿灯部分,由于公交专用车道内已有车辆数一定,即使主信号配时方案不同,车道信号在绿灯剩余时间小于18 s时也只显示红灯(如图15所示)。因为此时公交专用车道内已有车辆数已经超过绿灯剩余时间所能通过交叉口的最大车辆数,这从侧面证明了车道信号控制能够充分利用交叉口绿灯时间以减少交叉口延误。

5 结 论

交叉口拥堵、公交专用车道利用率低是城市交通的重要问题,在考虑未来GPS技术成熟的基础上,本文针对信控交叉口公交专用车道共享问题进行了研究,得出以下结论:

1)提出一种动态公交专用车道实时共享控制方法。利用GPS定位实时获取交叉口处公交车的位置,并通过交通检测设备获取专用道内小汽车数量,结合主信号显示情况对这些数据进行技术分析,综合判断当前时刻下公交专用道共享前后交叉口整体车辆延误的大小关系,并将判断结果反馈给车道信号。

2)引入受影响车辆的概念,建立以减少交叉口车辆总延误为目标的车道共享控制模型。针对主信号显示红灯和绿灯两种情况下的交叉口延误进行详细分析,提出一种综合考虑车辆司乘系数、受影响车辆延误、公交车延误以及非受影响车辆延误的交叉口延误计算方法,得出共享公交专用车道前后交叉口车辆总延误差值的表达式。

3)通过实例数值模拟在不同场景下车道信号的显示情况,可以发现当前时刻下公交专用车道内已有车辆数对专用道共享的影响最大,公交车离交叉口距离以及主信号显示情况对专用道共享的影响相对较小。模拟结果符合客观实际,本文为解决公交专用车道的持续性共享提供了一种新的思路。

为了便于问题分析,本文在示例分析中将交织区域的长度取为一个定值。交织区域是保证车辆变道以及车道共享的关键因素,其长度是需要根据实际情况等综合确定的,这需要今后进一步的研究。

参考文献

[1]余建平. 论公交专用道系统建设的必要性[J]. 中国公共安全(综合版), 2018(9): 67

YU Jianping. On the necessity of the construction of the bus-only lane system[J]. Chinese Public Security (Comprehensive Edition), 2018(9): 67

[2]WU Kan, LU Muyang, GULER S. Modeling and optimizing bus transit priority along an arterial: a moving bottleneck approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 121(5): 102873

[3]COLOMBARONI C, FUSCO G, ISAENKO N. A simulation-optimization method for signal synchronization with bus priority and driver speed advisory to connected vehicles[J]. Transportation Research Procedia, 2020, 45: 890

[4]李津, 孙雨彤, 魏小忠, 等. 考虑柔性车道设置的公交优先信号设计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(2): 448

LI Jin, SUN Yutong, WEI Xiaozhong, et al. Design of bus priority signal considering flexible lane setting[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2023, 53(2): 448. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20210639

[5]BEN-DOR G, BEN-ELIA E, BENENSON I. Assessing the impacts of dedicated bus lanes on urban traffic congestion and modal split with an agent-based model[J]. Procedia Computer Science, 2018, 130: 824

[6]邵春福, 郭润航, 董春娇, 等. 基于HOV理念的公交专用道交通组织优化[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(1): 61

SHAO Chunfu, GUO Runhang, DONG Chunjiao, et al. Optimization of bus lane traffic organization based on HOV concept[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(1): 61

[7]陈伟. 基于车路协同的公交专用道交通管理设施设置[J]. 重庆交通大学学报(社会科学版), 2022, 22(1): 60

CHEN Wei. The setting of traffic management facilities for bus-only lanes based on vehicle-road coordination[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Social Science Edition), 2022, 22(1): 60

[8]VIEGAS J, LU Baichuan. Traffic control system with intermittent bus lanes[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1997, 30(8): 865

[9]VIEGAS J, LU Baichuan. The intermittent bus lane signals setting within an area[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2004, 12(6): 453

[10]ZHU Huibing. Numerical study of urban traffic flow with dedicated bus lane and intermittent bus lane[J]. Physic A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2010, 389(16): 3134

[11]ZYRYANOV V, MIRONCHUK A. Simulation study of intermittent bus lane and bus signal priority strategy[J]. Procedia Social & Behavioral Sciences, 2012, 48: 1464

[12]谢秋峰, 李文权, 贾晓欢, 等. 设置间歇式公交专用进口道的流量条件研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2012, 10(2): 117

XIE Qiufeng, LI Wenquan, JIA Xiaohuan, et al. Research on flow conditions for setting up intermittent bus-only entrances[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 10(2): 117

[13]CHIABAUT N, BARCET A. Demonstration and evaluation of an intermittent bus lane strategy[J]. Public Transportation, 2019, 11(3): 443

[14]EICHLER M, DAGANZO C. Bus lanes with intermittent priority: strategy formulae and an evaluation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2006, 40(9): 731

[15]WU Wei, HEAD L, YAN Sanghuiyu, et al. Development and evaluation of bus lanes with intermittent and dynamic priority in connected vehicle environment[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, 22(4): 301

[16]WU Jianping, HOUNSELL N. Bus priority using pre-signals[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1998, 32(8): 563

[17]GULER S, MENENDEZ M. Analytical formulation and empirical evaluation of pre-signals for bus priority[J]. Transp Res Part B: Methodol, 2014, 64: 41

[18]HE Haitao, GULER S, MENENDEZ M. Adaptive control algorithm to provide bus priority with a pre-signal[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 64(3): 28