

# 基于累计曲线的出口道左转交叉口延误计算模型

殷宇婷<sup>1\*</sup>, 陈凯佳<sup>2</sup>, 付晶燕<sup>3</sup>, 赵靖<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学管理学院, 上海 200093; 2. 上海电科智能系统股份有限公司, 上海 200063;  
3. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

**摘要:** 为了准确评价出口道左转交叉口服务水平, 为优化设计提供通行效率评价的依据, 对其机动车延误计算进行了研究。基于车流累计到达曲线对不同工况下的延误进行准确描述, 建立出口道左转交叉口左转车辆延误计算模型。并利用 VISSIM 仿真对模型的准确性进行了验证, 在各种流量水平下误差均小于 2 秒。研究表明, 出口道左转交叉口左转延误受主预信号配时方案、综合功能区长度和左转车流到达率等因素影响。

**关键词:** 出口道左转交叉口; 延误; 累计曲线; 非常规交叉口

**中图分类号:** U491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 01—0152—03

为了提高交叉口的通行能力, 近年来, 一系列非常规交叉口的概念被提出, 出口道左转交叉口是其中一种, 已在我国济南、邯郸、深圳、武汉、南昌、重庆、大连等城市得到了实际应用, 并取得了较好的效果。

对于出口道左转交叉口的研究, Zhao<sup>[1]</sup> 最早对出口道左转交叉口的概念进行了介绍, 建立了一个包括车道功能划分、几何长度以及主、预信号控制参数的整体优化框架, 并通过算例分析发现在高流量情况下能显著提高交叉口通行能力。赵靖等<sup>[2-3]</sup> 基于实测数据, 对交叉口的饱和流率进行了研究, 结果表明车辆滞留、非正常驾驶行为、车道之间影响等多个因素都会对饱和流率产生负面影响。

在以往出口道左转交叉口优化研究中, 机动车延误作为最直接的交叉口通行效率评价指标<sup>[4]</sup>。但对于延误的计算, 主要沿用常规交叉口的延误计算模型(如 HCM 模型<sup>[5]</sup>、Webster 模型<sup>[6]</sup>等)。对于左转流向, 车辆进入出口车道在时间上受预信号控制, 在空间上受中央分隔带开口限制。因此, 左转车辆并不能像使用正常左转车道一样自由地选择出口车道进行左转, 这会对左转车辆延误造成影响。本研究将基于累计曲线, 对不同工况下的延误进行准确描述, 建立出口道左转交叉口左转车辆延误计算模型。

## 1 模型建立

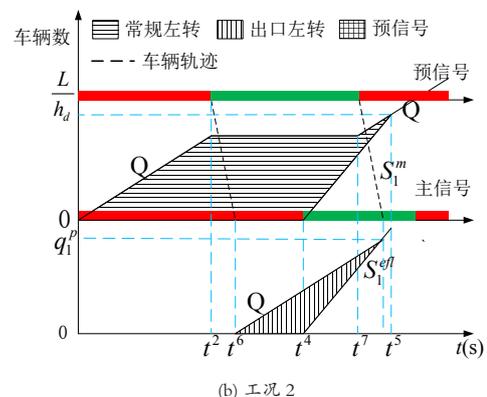
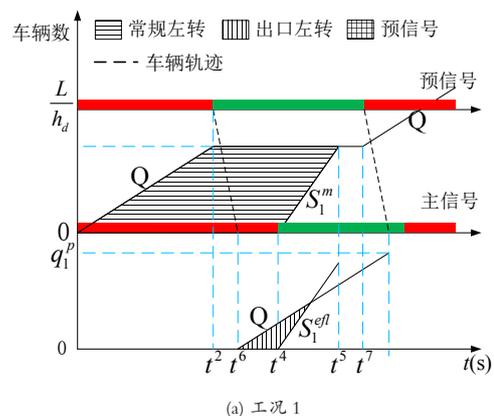
出口道左转交叉口左转车辆可分为使用常规左转弯道左转弯的车辆和使用出口道左转弯的车辆这两部分, 如式(1)所示。则总的车均延误可按式(2)所示。

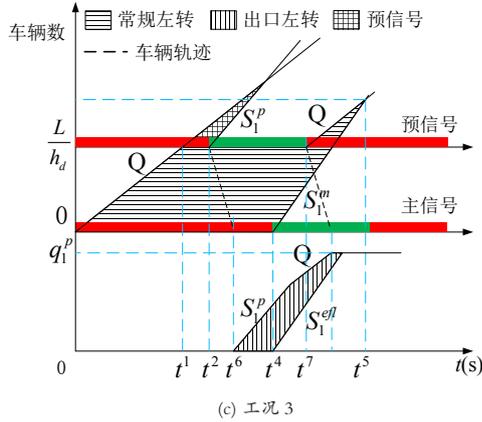
$$Q_{il} = q_{il}^p + q_{il}^m \quad (1)$$

式中:  $q_{il}^p$  表示  $i$  进口使用出口道左转的交通量, veh/h;  $q_{il}^m$  表示  $i$  进口使用常规左转弯道左转弯的交通量, veh/h。

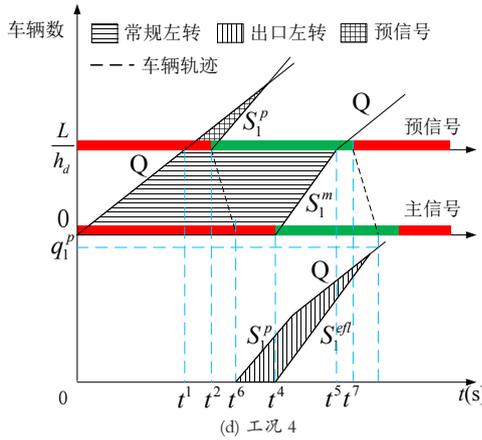
$$d_{il} = \frac{q_{il}^p(d_{il}^{en} + d_{il}^p) + q_{il}^m d_{il}^{norm}}{Q_{il}} \quad (2)$$

式中:  $d_{il}$  表示  $i$  进口左转车辆车均延误, s;  $d_{il}^{norm}$  表示  $i$  进口常规左转弯车均延误, s;  $d_{il}^{en}$  表示  $i$  进口采用出口道左转弯车辆的车均延误, s;  $d_{il}^p$  表示  $i$  进口预信号车均延误, s。

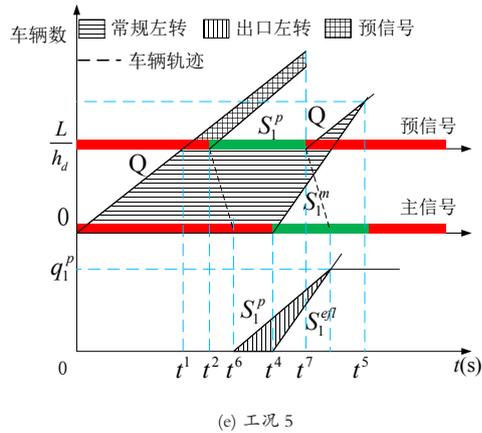




(c) 工况 3



(d) 工况 4



(e) 工况 5

图 1 左转车流累计曲线

在主预信号配时方案、综合功能区长度和左转车流到达率的共同作用下，左转交通流可能存在如图 1 所示的 5 种运行工况。

### 1.1 常规左转车道延误计算

根据图 1 的车辆累计曲线，可以发现，常规左转延误主要分为两种情况，第一种是主停止线消散时刻早于预信号结束时刻即  $t_i^5 \leq t_i^7$  的情况（工况 1 和 4），此时后续到达车辆不需要等待。相反当  $t_i^5 > t_i^7$  时（工况 2、3 和 5），预信号绿灯结束后后续到达车辆依然会发生

排队。两种情况下常规左转车辆延误计算公式如式（3）所示。

$$d_{i1}^{norm} = \begin{cases} \frac{\int_0^{q_{i1}^m} \frac{n}{S_i^{eff}} + t_i^4 - \frac{n}{q_{i1}} dn}{q_{i1}^m}, & t_i^5 \leq t_i^7 \\ \frac{t_i^2 q_{i1} t_i^4 + \int_0^{q_{i1}^m - (t_i^7 - t_i^4) S_i^{eff}} \left( \frac{n}{S_i^{eff}} + \frac{q_{i1}^m}{S_i^{eff}} - t_i^7 - \frac{n}{q_{i1}} \right) dn}{q_{i1}^m}, & t_i^5 > t_i^7 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $S_i^{eff}$  表示 i 进口出口道左转车道的饱和流率，veh/h。

### 1.2 出口道左转的延误计算

如图 1 所示，根据预信号车辆的排队情况，出口道左转车道的延误分为三种情况：①预停止线处车辆以交通量  $Q_{i1}$  进入综合功能区（工况 2）；②预停止线发生排队，首先以预停止线饱和流率  $S_i^p$  到达，当预停止线消散后再以  $Q_{i1}$  进入综合功能区（工况 3）；③预停止线始终未消散，车辆以预停止线饱和流率  $S_i^p$  进入综合功能区排队（工况 5）。三种情况下出口道左转延误计算公式如式（4）所示。

$$d_{i1}^{eff} = \begin{cases} \frac{\int_0^{q_{i1}^p} \max\left(\frac{n}{S_i^p} + t_i^4 - t_i^6 - \frac{n}{Q_{i1}}, 0\right) dn}{q_{i1}^p}, & t_i^2 \frac{Q_{i1}}{3600} \leq \frac{L_i}{h_d} \\ \frac{\int_0^{(q_{i1}^p - S_i^p) S_i^p} \max\left(\frac{n}{S_i^p} + t_i^4 - t_i^6 - \frac{n}{S_i^p}, 0\right) dn + \int_{(q_{i1}^p - S_i^p) S_i^p}^{q_{i1}^p} \max\left(\frac{n}{S_i^p} + t_i^4 - t_i^6 - \frac{n - (t_i^3 - t_i^2)(S_i^p - Q_{i1})}{Q_{i1}}, 0\right) dn}{q_{i1}^p}, & \frac{L_i}{h_d} < t_i^2 \frac{Q_{i1}}{3600} \leq \frac{S_i^p - Q_{i1}}{3600} G_{i1}^p + \frac{L_i}{h_d} \\ \frac{\int_0^{q_{i1}^p} \max\left(\frac{n}{S_i^p} + t_i^4 - t_i^6 - \frac{n}{S_i^p}, 0\right) dn}{q_{i1}^p}, & \frac{S_i^p - Q_{i1}}{3600} G_{i1}^p + \frac{L_i}{h_d} < t_i^2 \frac{Q_{i1}}{3600} \end{cases} \quad (4)$$

### 1.3 预停止线处延误计算

如图 1 所示，根据交通量以及主预停止线间距离的不同，预停止线处车辆延误也不一样。当预信号绿灯启亮时排队未达到预停止线时（工况 2），后续到达车辆无需排队直接进入综合功能区；相反当排队长度过长时（工况 5），车辆需要停车等待，从而产生延误。预停止线处延误计算公式如式（5）所示。

$$d_{i1}^p = \begin{cases} 0, & t_i^2 \frac{Q_{i1}}{3600} \leq \frac{L_i}{h_d} \\ \frac{\int_0^{q_{i1}^p} \max\left(\frac{n}{S_i^p} + t_i^2 - t_i^1 - \frac{n}{Q_{i1}}, 0\right) dn}{q_{i1}^p}, & t_i^2 \frac{Q_{i1}}{3600} > \frac{L_i}{h_d} \end{cases} \quad (5)$$

## 2 模型检验

本研究采用 VISSIM 微观仿真来对模型进行验证。其中仿真通过 python 进行二次开发，根据交通状况实

时变更车辆路径，模拟出采用出口道左转的设计方式。在进口前以及出口后的相应位置设置行程时间检测器，测量车辆的通过量以及延误数据。

模型检验所使用的交叉口几何布置如图 2 所示，南进口为出口道左转设置，综合功能区长度 L 设置为 60m。以南进口的左转为研究对象，设置预信号绿灯开始和结束时刻分别为 1s 和 45s；主信号左转绿灯开始和结束时刻分别为 33s 和 67s；周期时长以 10s 为间隔从 90s 取至 160s，共八种情况；南进口左转流量取 300veh/h、500veh/h 和 700veh/h 三种情况；即仿真共  $3 \times 8 = 24$  种输入条件。

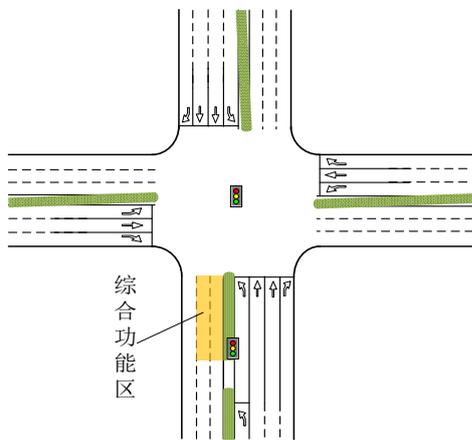


图 2 模型检验交叉口

对上述 24 种仿真条件进行五次重复试验，分别对使用预信号延误以及出口道左转延误的计算模型进行检验。

表 1 所示，出口道左转的延误在不同流量水平下平均延误差分别为 1.77s、1.23s 和 1.65s，误差都小于 2 秒，因此可以说明延误模型具有较高的准确性。

表 1 检验结果

误差	300 veh/h	500 veh/h	700 veh/h
出口道左转延误差	1.77s	1.23s	1.65s
预信号延误差	1.54s	1.2s	1.7s

### 3 结论

本文针对出口道左转交叉口，基于车流累计到达曲线对不同工况下的延误进行准确描述，建立出口道左转交叉口左转车辆延误计算模型，并利用 VISSIM 仿真对模型的准确性进行了验证。这能更准确地评价交叉口的服务水平，从而为优化设计提供了依据。研究结果表

明：出口道左转交叉口左转延误受主预信号配时方案、综合功能区长度和左转车流到达率等因素影响；所建立的延误计算模型具有较高的准确性，在各种流量水平下误差均小于 2s。

#### 参考文献：

- [1] Zhao J, Ma W, Zhang H M, et al. Increasing the Capacity of Signalized Intersections with Dynamic Use of Exit Lanes for Left-Turn Traffic [J]. Transportation Research Record, 2013,2355(1):49-59.
- [2] 赵靖, 丁神健, 马晓旦, 等. 基于实测数据的出口车道左转交叉口饱和流率修正 [J]. 公路交通科技, 2018,35(7):107-113.
- [3] 赵靖, 马万经, 韩印. 出口车道左转交叉口几何及信号组合优化模型 [J]. 中国公路学报, 2017,30(2):120-127.
- [4] Dion F, Rakha H, Kang Y S. Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2004, 38(2): 99-122.
- [5] TRB. Highway Capacity Manual 2010 [M]. Washington, DC: Transportation Research Board, 2010.
- [6] Webster F V. Traffic signal settings[R]. London: H.M.S.O., 1958.

基金项目：国家自然科学基金资助项目 (71971140)。

