

文章编号:1005-0523(2019)03-0046-09

# 基于信号控制的左转车道等候段长度研究

王爽<sup>1</sup>, 卫翀<sup>1</sup>, 陈景雅<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**左转弯专用车道等候段的设计能够明显改变交叉口的运行效率,但目前国内外的设计规范以及现有研究文献并未建立通用的等候段长度计算模型,这会导致实际的设计可能不合理或存在危险性。基于车辆到达分布情况和排队论方法,分析不同情况下左转弯专用车道的最不利条件,确定在保护相位和许可相位下左转弯车道等候段长度计算模型,并利用C语言将计算模型程序化,便于设计人员使用。最后以北京某交叉口为例,利用VISSIM仿真验证新建模型的合理性,结果表明相比于设计规范和已有研究模型,该模型能够有效地减少在交叉口排队车辆的延误时间,提高交叉口的运行效率。因此该左转弯专用车道等候段长度计算模型可以有效地应用于实际交叉口左转弯专用车道的设计中。

**关键词:**信号控制;排队论;程序实现;VISSIM;交通仿真

**中图分类号:**U412.35

**文献标志码:**A

选择合理、有效的交通设计模型可提高信号控制交叉口的通行效率和车辆的行驶安全<sup>[1]</sup>。而在信号控制交叉口处,左转交通流是影响交叉口通行能力、安全运行的关键因素。国外研究表明设置左转弯专用车道能够有效降低18%~77%的交通事故率<sup>[2]</sup>,因此合理设置左转弯专用车道是改善信号控制交叉口运行状态的关键。国内外相应规范将左转弯专用车道分为渐变段、减速段和等候段进行计算,其中等候段的设计对平面交叉口的通行能力和安全水平至关重要,若等候段长度设计不足,一方面左转车辆可能会占用直行车道排队通过交叉口,影响直行车辆通过交叉口,增加交叉口延误时间,另一方面也可能由于直行车辆排队长度过长而左转弯车道等候段过短,直行车辆阻碍左转弯车辆进入专用车道;但受经济情况、实际设计情况等条件的限制,等候段也不宜过长。因此等候段长度成为专用车道设计的关键。

国内外设计规范及研究学者都对左转弯车道等候段长度的设计进行了较为深入的研究。美国<sup>[3]</sup>、德国<sup>[4]</sup>和日本<sup>[5]</sup>等设计规范认为等候段长度设计与一个信号周期内停车等待车辆数、平均车头间距及修正系数有关;我国现行规范《城市道路交叉口设计规程》<sup>[6]</sup>将等候段长度设计为高峰15 min内每信号周期左转弯车辆排队数的9倍。国内外部分学者也借用类似的计算方法,着重对修正系数进行研究<sup>[7-8]</sup>;Oppenlander J C等<sup>[9-10]</sup>利用蒙特卡洛模拟算法分别确定保护相位和许可相位下左转弯车道的等候段长度,王京元等<sup>[11-12]</sup>将车辆排队等待视为M/M/1排队系统,利用到达率和服务率计算保护相位和许可相位下左转弯车道等候段长度;此外赵巍等<sup>[13]</sup>还针对特殊的左转弯车道(如分离式左转弯专用车道、苜蓿叶型左转弯专用车道和双左转弯专用车道)进行研究。

综上所述,国内学者分别从排队特性、概率分布、车道类型等几个方面对左转弯车道等候段长度进行研究,但关于一个周期内停车等待车辆数如何计算并未进行详细研究,并且不同的信号控制周期下发生的最不利情况存在不同,排队长度也不相同。基于排队论的等候段长度模型虽然满足车道长度要求,但车辆通过

收稿日期:2018-12-22

作者简介:王爽(1995—),女,硕士研究生,研究方向为交通网络建模以及智能交通。

通讯作者:卫翀(1981—),男,副教授,博士生导师,研究方向为交通网络建模以及智能交通。

交叉口的过程并不完全符合排队系统的特性。本文以一条左转专用车道为例,根据不同的信号控制周期确定左转车道等候段长度,并利用实例验证设计的合理性,最后利用C语言将计算模型程序化,便于研究人员的使用。

## 1 交通特性分析

### 1.1 车辆到达分布情况

信号控制交叉口处车辆到达一般呈现出2种不同的分布类型:一种是车辆独立到达该交叉口,不受上游交叉口的影响或者影响较小;另一种是车辆到达该交叉口的分布情况与上游交叉口信号控制有关。一般可以认为信号控制交叉口车辆到达情况服从离散型分布,常用的离散型分布主要有泊松分布、二项分布和负二项分布<sup>[4]</sup>。

基于已知的观测数据假定其服从某一分布,利用卡方检验通过拟合优度进行验证,从而确定信号控制交叉口处车辆到达分布情况,为建立左转弯车道等候段计算模型提供依据。基于实际道路等级和交叉口车辆情况,确定时间 $t$ 内到达车辆数不大于 $x$ 的概率,即为置信度。利用置信度可以确定当红灯结束时红灯期间到达交叉口的排队车辆数。

### 1.2 车辆通过情况

在该车道行驶方向信号相位为绿灯信号时,一条车道可视为单通道服务模型,绿灯期间的排队长度可以利用排队论模型进行计算。本文利用在绿灯期间到达的车辆以及剩余绿灯时间(红灯期间排队等待的所有车辆通过后剩余的绿灯时间)内车辆的通行能力计算车辆在绿灯期间通过时的排队长度。系统的到达率 $\lambda$ 为绿灯时间内到达车辆数,系统的服务率 $\mu$ 即为理想条件下剩余绿灯时间内平均通过车辆数,交通强度 $\rho=\lambda/\mu$ ,只有当 $\rho<1$ 时排队系统才能够保持平衡。根据实际调查可以发现在较为合理的信号配时条件下,信号控制交叉口基本不会存在排队长度无限增大的情况,因此可以利用排队论模型求解绿灯时段的排队长度。在绿灯信号开始初期,红灯期间排队等待的车辆通过交叉口,通过车辆数远大于此时到达交叉口的车辆数,因此不需要考虑“此时车道上排队长度大于红灯期间的排队长度”这种情况。

当绿灯结束时,一条车道上有 $n$ 辆车排队等待通过交叉口的概率为

$$P_n = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为绿灯期间到达交叉口的车辆数; $\mu$ 为剩余绿灯期间理论上能够通过交叉口的车辆数。

则车道上 $n$ 辆排队等待通过交叉口的车辆数不大于给定排队车辆数 $N$ 的概率为

$$P = 1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{N+1} \quad (2)$$

基于实际道路等级和交叉口车辆情况,确定排队车辆数不大于 $N$ 的概率,即为置信度 $\alpha$ 。利用置信度可以确定当绿灯结束时等待通过交叉口的排队车辆数为

$$n = \frac{\ln(1-\alpha)}{\ln(\lambda/\mu)} - 1 \quad (3)$$

根据绿灯结束时的排队车辆数以及红灯期间到达交叉口的排队车辆数,可以确定红灯结束、绿灯开始即为该车道排队最长的最不利状态,因此左转弯专用车道等候段长度应按照该时刻的排队长度进行计算。

## 2 等候段长度计算模型

### 2.1 许可相位下等候段长度计算模型

#### 2.1.1 车辆到达时排队长度计算模型

许可相位下可以将信号相位分成2个阶段,第一阶段为左转和直行为绿灯的情况 $t_1$ ,第二阶段为左转和直行为红灯的情况 $t_2$ 。车辆在许可相位下到达交叉口排队等待长度如图1所示。从图1中可以看出,当左转和直行均为红灯时,左转车道的排队车辆以及直行车道的排队车辆都会影响等候段长度的设计。基于给定

的置信度  $\alpha$ , 根据车辆到达分布情况相应的概率公式, 可以确定红灯期间左转车道上的最大排队车辆数  $N_1$  和直行车道上的最大排队车辆数  $N_2$ , 到达车辆排队长度取两者中的最大值。

### 2.1.2 车辆通过时排队长度计算模型

左转专用车道等候段长度不仅受到其本身左转车辆排队的影响, 也会因直行车辆排队过长而受到影响。需要对绿灯状态下左转车辆和直行车辆的排队长度分别进行研究, 取两者中的最大值作为等候段长度设计的依据。

1) 左转车道。通过将排队论模型应用于计算信号控制交叉口绿灯期间车辆的排队情况, 可以确定排队系统中的到达率为绿灯时间  $t_1$  内在一定置信度下左转车辆的最大值, 排队系统中的服务率应为在剩余绿灯时间  $t_0$  内通过交叉口的左转车辆数。国内相应研究结果<sup>[15]</sup>表明许可相位下左转车辆可利用初始绿灯时间、对向直行车辆的可接受间隙以及绿灯间隔时间通过交叉口, 但由于剩余绿灯内左转车辆无法利用初始绿灯时间通过交叉口, 剩余绿灯时间内左转车辆的通行能力计算公式如下

$$\mu = \frac{V_s e^{-(AV_s+1.95\gamma)}}{1 - e^{-1.92\gamma}} \times t_0 + 2 \quad (4)$$

式中:  $V_s$  为对向直行交通量, veh/s;  $A$  的取值随车道宽度和类型而变化;  $t_0$  为剩余绿灯时间, s;  $\gamma = \frac{e^{-AV_s^2}}{1 - 1.95V_s}$ 。

根据排队论模型, 给定置信度  $\alpha$  时, 左转车道上最大的排队车辆数为

$$N_3 = \frac{\ln(1-\alpha)}{\ln\left[\frac{\lambda(1-e^{-1.92\gamma})}{V_s e^{-(AV_s+1.95\gamma)} + 2(1-e^{-1.92\gamma})}\right]} - 1 \quad (5)$$

2) 直行车道。直行车道上排队系统的到达率计算方式与左转车道相同, 到达率与车辆到达分布情况有关; 排队系统的服务率则为剩余绿灯时间内理论上通过交叉口的直行车辆数。根据停车线法<sup>[15]</sup>对直行车道通行能力的规定, 剩余绿灯时间内通过交叉口的直行车辆数计算公式如下

$$\mu = \frac{t_0}{t_g} \times \frac{t_g - t_a}{t_i} \quad (6)$$

式中:  $t_g$  为一个周期内的绿灯时间, s;  $t_a$  为绿灯亮后第一辆车启动并通过停车线的时间, 可取 2.3 s;  $t_i$  为直行车辆通过停车线的平均时间, s。

根据排队论模型, 给定置信度  $\alpha$  时, 直行车道上最大的排队车辆数为

$$N_4 = \frac{\ln(1-\alpha)}{\ln\left[\frac{t_g t_i \lambda}{t_0(t_g - t_a)}\right]} - 1 \quad (7)$$

综上所述, 许可相位下等候段排队车辆数  $N = \max(N_1, N_2) + \max(N_3, N_4)$ , 等候段长度依据通过车辆的类型比例进行确定。

## 2.2 保护相位下等候段长度计算模型

### 2.2.1 车辆到达时排队长度计算模型

保护相位下的信号相位可分为 2 种情况, 即先直后左相位和先左后直相位。两种情况的左转车辆排队

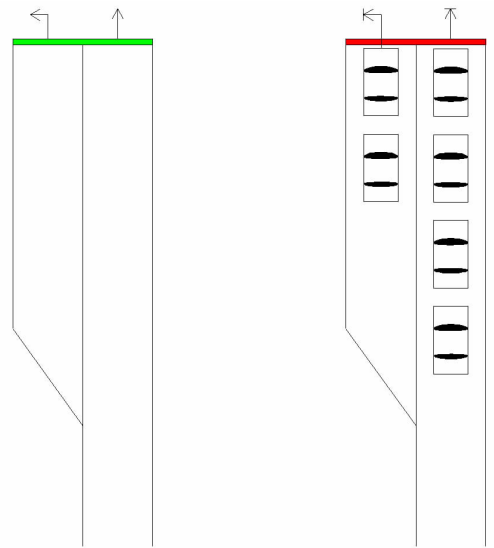


图1 许可相位下车辆排队长度示意图  
Fig.1 Queuing scenario for left-lanes with permitted phasing

情况分别如图 2 和图 3 所示。从图 2 中可以看出,信号周期可分为 3 个阶段,即左转红灯直行绿灯  $t_1$ 、左转绿灯直行红灯  $t_2$  以及左转直行全红  $t_3$ , 其中  $t_1, t_3$  时段内左转车辆的排队长度和  $t_2, t_3$  时段内直行车辆的排队长度都会影响等候段长度的设计。基于给定的置信度  $\alpha$ , 根据车辆到达分布情况相应的概率公式, 可以确定红灯期间左转车道上的最大排队车辆数  $N_1$  和直行车道上的最大排队车辆数  $N_2$ , 到达车辆排队长度取两者中的最大值。

从图 3 中可以看出, 信号周期可分为 3 个阶段, 即左转绿灯直行红灯  $t_1$ 、左转红灯直行绿灯  $t_2$  以及左转直行全红  $t_3$ , 其中  $t_3, t_1$  时段内直行车辆的排队长度和  $t_2, t_3$  时段内左转车辆的排队长度都会影响等候段长度的设计。基于给定的置信度  $\alpha$ , 根据车辆到达分布情况相应的概率公式, 可以确定红灯期间左转车道上的最大排队车辆数  $N_1$  和直行车道上的最大排队车辆数  $N_2$ , 到达车辆排队长度取两者中的最大值。

### 2.2.2 车辆通过时排队长度计算模型

1) 左转车道。先直后左相位和先左后直相位两种情况在车辆绿灯通过时均不受其他方向车辆的干扰, 因此在考虑绿灯期间车道的排队长度时两种相位方案计算原理相同。根据排队论模型, 左转车道排队系统中为绿灯时间  $t_1$  内在一定置信度下左转车辆的最大值, 排队系统中的服务率应为在剩余绿灯时间  $t_0$  内理论上通过交叉口的左转车辆数。根据相关研究<sup>[16]</sup>结果, 保护相位下剩余绿灯时间内通过交叉口的左转车辆数计算公式如下

$$\mu = \frac{t_g - t_a}{t} \times \frac{t_0}{t_g} \tag{8}$$

式中:  $t_g$  为一个周期内的绿灯时间, s;  $t_a$  为绿灯亮后第一辆车启动并通过停车线的时间, 可取 2.3 s;  $t$  为左转车辆连续通过交叉口时的平均车头时距。

根据排队论模型, 给定置信度  $\alpha$  时, 左转车道上最大的排队车辆数为

$$N_3 = \frac{\ln(1-\alpha)}{\ln\left[\frac{t_g \lambda t}{t_0(t_g - t_a)}\right]} - 1 \tag{9}$$

2) 直行车道。直行车道上排队系统的到达率计算方式与左转车道相同, 到达率与车辆到达分布情况有关; 排队系统的服务率则为剩余绿灯时间内理论上通过交叉口的直行车辆数, 同理也可以根据停车线法计算直行车道的通行能力。根据排队论模型, 给定置信度  $\alpha$  时, 直行车道上最大的排队车辆数为

$$N_4 = \frac{\ln(1-\alpha)}{\ln\left[\frac{t_g t_i \lambda}{t_0(t_g - t_a)}\right]} - 1 \tag{10}$$

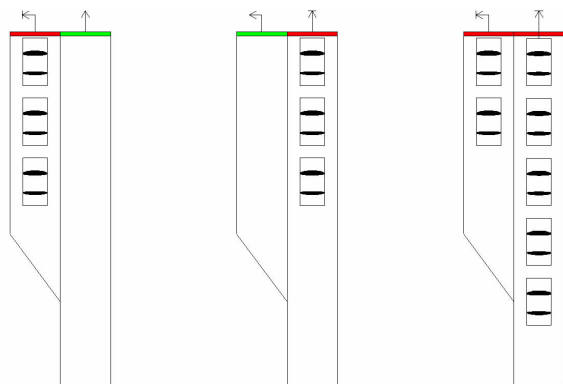


图 2 保护相位下先直后左排队长度示意图  
Fig.2 Queuing scenario for left-lanes with the lagging protected left-lane phasing

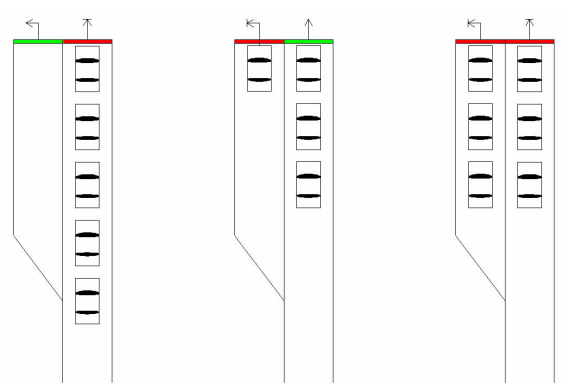


图 3 保护相位下先左后直排队长度示意图  
Fig.3 Queuing scenario for left-lanes with the leading protected left-lane phasing

综上所述,保护相位下等候段排队车辆数  $N=\max(N_1, N_2)+\max(N_3, N_4)$ , 等候段长度依据通过车辆的类型比例进行确定。

### 3 程序实现及实例分析

#### 3.1 程序实现

为了便于设计人员的参考和使用,本文利用 C 语言对新改进的左转弯车道等候段长度设计模型编制了相应的计算程序。设计人员只需相关参数即可得出特定情况下左转弯车道等候段长度设计值,无需查阅规范和进行数值计算。计算左转弯车道等候段长度程序流程图如图 4 所示。

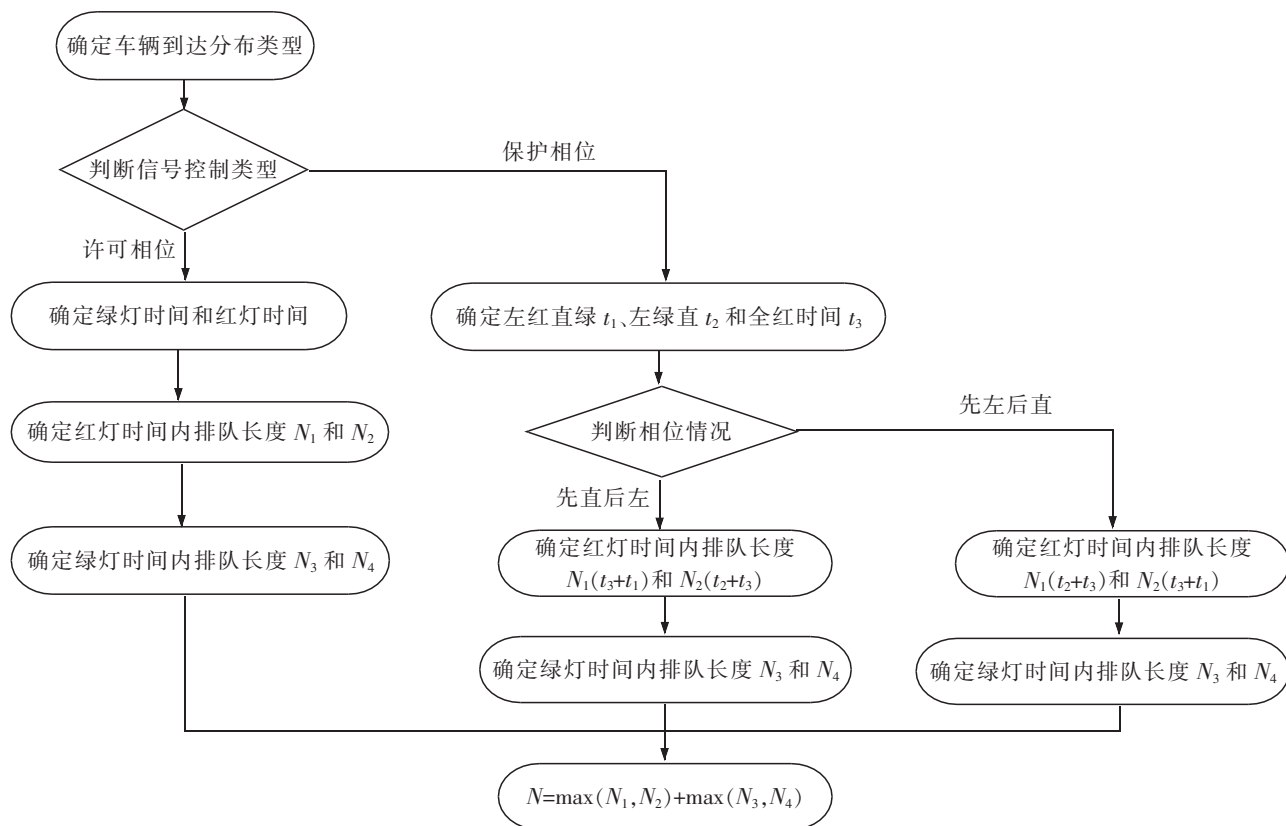


图 4 设计程序运行流程图  
Fig.4 Programming flow chart

#### 3.2 实例分析

本文以北京市海淀区中关村南大街与学院南路的交叉口为例,利用新建立的左转弯车道等候段长度模型计算该交叉口的北进口左转弯车道等候段长度,并利用 VISSIM 仿真进行分析。VISSIM 包含交通仿真器和信号状态发生器 2 部分,交通仿真器基于在同一车道上排队行车的跟车模型和车道变换模型模拟实际道路情况,信号状态发生器通过步长从交通仿真器反馈给采集器,得到测量值,进而达到仿真模拟的目的。仿真模型考虑车辆在设置左转弯专用车道处进行换道决策,并记录仿真时间内交叉口处的车辆排队情况和延误情况,以便进行后续的分析 and 验证新建模型的合理性。

该交叉口北进口有 1 条左转弯车道、3 条直行车道和 1 条右转弯车道,该交叉口施行三相位信号控制方案,如图 5 和图 6 所示。该交叉口南北进口道为主路方向,配有左转专用相位,交叉口周期时长为 156 s,黄灯时长为 3 s,全红时长为 2 s。第一相位为东西向通行,包括车辆左转、直行和右转,绿灯时长为 55 s;第二相位为南北向直行和右转车辆通行,绿灯时长为 52 s;第三相位为南北向左转弯车辆通行,绿灯时长为 34 s。

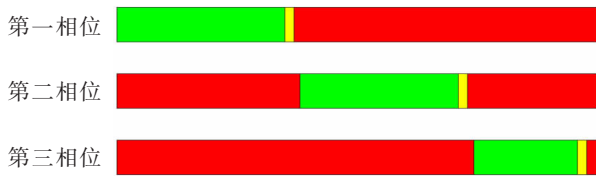


图5 交叉口信号配时示意图

Fig.5 Signal timing diagram of the intersection

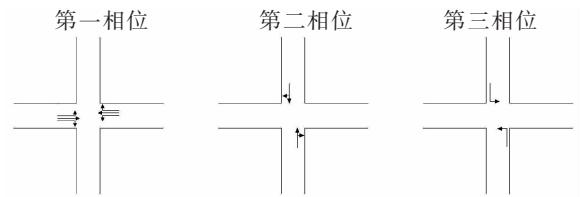


图6 交叉口各相位交通示意图

Fig.6 Traffic situation of different signal phasing

根据对该信号控制交叉口晚高峰流量的观测(如表1所示),确定车辆到达情况服从泊松分布,并利用本文提及的左转弯车道等候段长度计算模型确定该交叉口北进口左转车道等候段长度。利用 VISSIM 仿真并通过改变仿真中的随机种子数来增加试验次数,如表2至表5所示,从排队情况、延误情况以及燃油消耗等方面比较新建模型、设计规范以及已有研究模型所设计的左转弯车道的不同之处。

表1 各进口道高峰小时交通量情况

Tab.1 Traffic volumes in peak hour at entrance

进口道	veh/h							
	北进口		南进口		东进口		西进口	
	左转	直右	左转	直右	左转	直右	左转	直右
流量	308	1 538	185	1 258	592	437	216	473

表2 交叉口排队情况

Tab.2 Queue results at intersections

试验 编号	新建模型			设计规范			已有研究模型		
	平均排队 长度/m	最大排队 长度/m	排队次数/ 次	平均排队 长度/m	最大排队 长度/m	排队次数/ 次	平均排队 长度/m	最大排队 长度/m	排队次数/ 次
1	36.56	98.79	189	44.05	123.98	203	44.43	124.01	207
2	58.14	133.11	277	54.94	143.68	234	54.53	136.69	233
3	41.09	120.22	204	65.15	156.01	339	55.12	122.33	258
4	46.12	117.96	218	49.87	134.56	255	50.44	128.24	246
5	58.58	130.42	284	49.02	121.17	245	48.17	134.19	232
6	51.63	130.56	226	54.42	145.09	265	51.97	116.84	263
7	48.03	99.49	236	37.87	90.55	180	37.87	90.55	180
8	46.57	98.75	213	47.17	118.42	234	47.74	124.11	227
9	38.69	85.73	190	42.25	95.55	203	39.46	87.43	192
10	41.43	115.13	232	50.65	129.91	254	50.19	123.15	233

如表2所示,通过分析 VISSIM 仿真下的交叉口排队情况,可以发现利用新建模型设计的左转弯车道所在交叉口在多数情况下平均排队长度、最大排队长度以及排队次数都能达到最小,而利用设计规范设计的左转弯车道等候段排队情况均不理想,说明新建模型能够有效缓解交叉口车辆的排队情况。

表3 交叉口延误情况  
Tab.3 Delay results at intersections

s

试验 编号	新建模型		设计规范		已有研究模型	
	车辆平均延 误时间	总延误时间	车辆平均延 误时间	总延误时间	车辆平均延 误时间	总延误时间
1	36.14	30 788.06	37.44	31 900.69	37.58	32 018.17
2	41.53	37 084.28	39.42	35 203.58	39.09	34 906.09
3	33.92	27 411.07	42.08	33 999.87	38.26	30 915.44
4	36.87	30 307.44	37.99	31 230.76	37.95	31 191.64
5	42.72	33 491.62	39.66	31 095.75	39.10	30 650.52
6	36.82	32 289.05	39.17	34 353.34	38.5	33 760.16
7	38.46	30 923.53	36.28	29 167.37	36.28	29 167.51
8	36.66	29 658.07	37.31	30 185.44	37.31	30 104.54
9	35.17	29 223.34	34.54	28 706.63	34.54	28 706.62
10	36.98	29 918.01	37.12	30 030.34	36.91	29 857.73

如表3所示,通过分析 VISSIM 仿真下的交叉口延误情况,可以发现利用新建模型设计的左转弯车道等候段和利用已有研究模型设计的左转弯车道等候段均能够使交叉口处车辆总延误时间以及车辆平均延误时间达到最小,而设计规范设计的左转弯车道等候段延误时间较长。

表4 北进口直行情况  
Tab.4 The results of straight lane at north entrance

试验 编号	新建模型			设计规范			已有研究模型		
	服务水平	车辆平均延 误时间/s	燃油消耗 量/gallon	服务水平	车辆平均延 误时间/s	燃油消耗 量/gallon	服务水平	车辆平均延 误时间/s	燃油消耗 量/gallon
1	C	32.02	3.725	D	39.19	4.089	D	39.78	4.029
2	D	44.31	4.863	D	39.76	4.844	D	38.46	4.767
3	C	33.84	4.126	E	59.98	5.734	D	44.22	4.914
4	D	40.46	4.610	D	44.53	4.942	D	44.55	4.928
5	E	62.78	4.961	D	49.04	4.648	D	47.25	4.493
6	D	38.30	4.502	D	47.82	4.857	D	44.01	4.636
7	D	38.57	3.472	D	35.40	3.519	D	35.40	3.518
8	D	37.86	4.271	D	38.69	3.930	D	38.36	3.934
9	C	34.32	4.152	C	33.27	3.816	C	33.25	3.814
10	D	39.24	3.813	D	42.48	4.304	D	41.82	4.255

如表4所示,通过分析 VISSIM 仿真下的交叉口北进口道直行情况,可以发现利用新建模型设计的左转弯车道所在路段直行车道在多数情况下服务水平较高,北进口直行车辆平均延误时间较短以及燃油消耗量较少,仿真结果表明新建模型能够有效提高左转弯车道所在路段直行车道的服务水平以及减少环境污染。

表5 北进口左转情况  
Tab.5 The results left-turn lane at north import

试验 编号	新建模型			设计规范			已有研究模型		
	服务水平	车辆平均延 误时间/s	燃油消耗 量/gallon	服务水平	车辆平均延 误时间/s	燃油消耗 量/gallon	服务水平	车辆平均延 误时间/s	燃油消耗 量/gallon
1	D	48.04	0.628	E	49.40	0.732	E	59.36	0.747
2	E	58.24	1.059	D	47.34	0.930	D	48.21	0.943
3	D	49.32	0.806	E	64.88	1.385	E	63.48	1.324
4	D	52.99	0.842	E	55.03	0.954	D	54.22	0.936
5	E	63.32	1.014	E	68.97	0.838	E	62.36	0.848
6	E	55.59	1.015	E	57.82	1.033	E	61.25	1.038
7	E	72.74	1.286	D	51.71	0.817	D	49.96	0.799
8	E	59.64	0.856	E	61.41	0.951	E	58.78	0.945
9	D	51.41	0.799	D	53.97	0.858	D	53.73	0.851
10	D	54.82	0.816	D	50.18	1.125	D	50.00	1.105

如表5所示,通过分析 VISSIM 仿真下的交叉口北进口道左转情况,可以发现利用新建模型设计的左转弯车道在多数情况下服务水平较高,平均延误时间较短以及燃油消耗量较少,仿真结果表明新建模型能够有效提高左转弯车道的服务水平,降低车辆延误时间以及减少燃油消耗。

综上所述,通过分析 VISSIM 仿真下的交叉口排队情况、延误情况,左转弯车道所在路段直行车道情况以及左转弯车道车辆情况,可以发现新建模型更有利于缓解交叉口的排队和车辆延误情况,提高道路的服务水平,减少能源消耗,从而提高交叉口的运行效率。

## 4 结论

本文利用交叉口处车辆到达情况以及车辆通过时的排队论方法,确定出一种基于信号控制的单左转弯车道等候段长度计算模型。通过以北京市海淀区中关村南大街与学院南路的交叉口交通情况为例,比较新建模型、设计规范以及已有研究模型设计的左转弯车道对于交叉口的影响,实例结果表明新建模型相比于其他两种模型能够有效缓解交叉口的排队情况和车辆延误情况,提高交叉口的运行效率,设计模型符合实际,具有一定的合理性和可行性。因此,该模型可以为合理设计交叉口左转弯车道提供一定的参考依据。

## 参考文献:

- [1] 姚宇,邓明君. 综合等待区用于交叉口的优化设计与仿真[J]. 华东交通大学学报,2018,35(2):80-88.
- [2] 刘洪启,吴云,沈涛,等. 公路平面交叉口左转弯车道安全设计研究[J]. 中外公路,2009,29(4):246-250.
- [3] AASHTO. A policy on geometric design of highways and streets[S]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials,2004:941-1072.
- [4] 道路与交通工程研究学会. 交通信号控制指南——德国现行规范(RiLSA)[M]. 李克平,译. 北京:中国建筑工业出版社. 2006:32-51.



- [5] 交通工程研究会. 平面交叉路口的规划与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988: 128-134.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ 152-2010 城市道路交叉口设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [7] 张兰芳, 毛应萍, 方守恩. 平面交叉口左转车道的几何设计方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 49-52.
- [8] 汪慧君, 程名. 论平交口左转车道几何设计参数的合理取用[J]. 道路工程, 2002(3): 61-64.
- [9] OPPENLANDER J C, OPPENLANDER J E. Simulation of left-turn storage lengths without separate signal phase[J]. ITE Journal, 2002, 72(5): 34-38.
- [10] OPPENLANDER J C, OPPENLANDER J E. Simulation of left-turn lanes with separate phase control[J]. ITE Journal, 1994, 64(1): 22-26.
- [11] 王京元, 王炜. 保护相位下左转车道存储段长度计算[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(4): 852-859.
- [12] 王京元, 王炜. 许可相位下左转车道存储段长度计算[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 114-123.
- [13] 赵巍, 段绪斌, 杜立平. 平面交叉口左转车道设计研究[J]. 交通工程, 2012(15): 112-114.
- [14] 邵春福, 魏丽英, 贾斌. 交通流理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 23-38.
- [15] 林栋. 信号交叉口左转车流通行能力研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 33-38.
- [16] 陈宽民, 严宝杰, 任福田. 道路通行能力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 163-169.

## Calculation of Storage Lengths for Left-Turn Lanes Based on Signal Control

Wang Shuang<sup>1</sup>, Wei Chong<sup>1</sup>, Chen Jingya<sup>2</sup>

(1. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Designing the storage lengths for left-turn lanes can significantly influence the operational efficiency of the intersection. However, current design specifications and existing research do not establish a general calculation model of storage lengths, which may produce an unreasonable and hazardous left-turn lane. Based on vehicle arrival distribution and queuing theory, this paper analyzed the most unfavorable queuing condition of the left-turn lanes and established the calculation models of storage lengths for left-turn lanes with protected phases and permitted phases. And the calculation models were programmed by C-language which is convenient for designers to master. Finally, taking an intersection in Beijing as an example, this paper validated the rationality of the novel models by VISSIM. The simulation results showed that the novel models effectively reduced the delay time of queuing vehicles and improved the operational efficiency of the intersection. Therefore, the calculation models of storage lengths for left-turn lanes may be efficiently applied to the design.

**Key words:** signal control; queuing theory; program implementation; VISSIM; traffic simulation