

信号交叉口左转待行区综合效益评估^{*}

李静, 王占永, 蔡铭

(中山大学智能工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 结合微观交通仿真技术、道路交通事故预测模型 (HSM)、尾气排放模型 (CMEM)、机动车噪声排放和衰减模型以及道路交通外部成本, 实现了对信号交叉口在有左转待行区和无左转待行区条件下的动态交通仿真; 从通行效率、燃油消耗、交通安全、空气污染、温室效应以及噪声污染六个方面评价左转待行区对信号交叉口综合效益的影响。最后, 将方法应用于广州市典型干路交叉口。结果显示, 建设左转待行区后交叉口平均综合成本下降了近 25%。左转待行区虽能够有效提高交叉口行车效率, 但是会导致该区域的尾气、噪声污染加剧。因此, 提出的评价方法可以有效、全面地评估左转待行区, 为城市交叉口优化改造提供一定的参考。

关键词: 城市交通; 综合评价; 社会成本; 左转待行区; 交通仿真

中图分类号: U4-9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2019) 03-0110-08

Comprehensive benefit evaluation of the left-turn waiting zone on signalized intersection

LI Jing, WANG Zhanyong, CAI Ming

(School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Combined with microscopic traffic simulation software, HSM road traffic accident prediction model, the Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM) and vehicle noise emission model and the attenuation model, in addition to a consideration of social cost, a comprehensive method was proposed to establish the dynamic traffic simulation model of signal intersection with and without left-turn waiting zone (LWZ), and then quantitatively evaluate the LWZ from the aspect of traffic efficiency, fuel consumption, traffic safety, air pollution, greenhouse effect and noise pollution. At last, the method was applied to a real intersection of Guangzhou, and the results show that the average comprehensive cost of the intersection with the LWZ is reduced by nearly 25%. The example had proved that setting LWZ can effectively promote traffic efficiency at the intersections, but leads to the increase of air pollution and noise pollution. The method can evaluate the value of LWZ comprehensively and effectively, and be a consultation for road planning.

Key words: urban traffic; comprehensive evaluation; social cost; the left-turn waiting zone; traffic simulation

信号交叉口是城市道路交通通行的瓶颈, 而交叉口的左转车流是影响交叉口效率和安全的因素之一^[1]。在交叉口设置左转待行区作为一种

新型的改善左转车辆通行效率的方法, 引起了国内外广大学者关注^[2-4]。国内已有一些关于左转待行区的评价研究, 倪颖^[5]等采用停车线法计算了交

* 收稿日期: 2018-06-05

基金项目: 国家自然科学基金 (41701552); 广州市科技计划项目 (201704020142)

作者简介: 李静 (1994 年生), 女; 研究方向: 交通环境工程; E-mail: lijing259@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 蔡铭 (1977 年生), 男; 研究方向: 交通环境工程; E-mail: caiming@mail.sysu.edu.cn

叉口通行能力，探讨了左转待行区对交叉口通行能力的影响。Ding W^[6] 等介绍了左转待行区和直行待行区的设置形式，讨论了待行区的设置条件以及方式。季彦捷^[7] 等对左转待行区的设置方法和设置长度进行了初步分析，对设置左转待行区前后的交通效益进行了研究。陈晖^[8] 建立了左转待行区的仿真模型，采用微观交通软件 Vissim 进行了交叉口交通运行状况的模拟，分析了设置左转待行区前后的左转交通量。可以发现，目前大部分的左转待行区评价方法往往只关注左转待行区对交通通行能力的影响，而忽略了对其他因素的影响。在能源和环境污染问题日益严重的情况下，这种单一的评价结果则显得不是十分全面。成本效益分析是评估道路交通基础设施的综合价值影响的重要方法，HEATCO 和 NEEDS 曾对欧洲各国的道路交通的交通事故、空气污染和交通污染等外部成本进行了社会成本效益分析^[9-10]。在国内，蔡铭等^[11] 对道路交通的外部成本的不同评估方法的优缺点及其适用情况进行了对比和分析；贾丰源等评价了上海五角场换新交叉口后的尾气排放情况，并基于此优化了交叉口的信号配时^[12]。本文基于道路交通外部成本，综合分析了左转待行区产生的各类影响；应用所建立的评估模型，对广州市天河东路十字路口左转待行区进行了案例分析，探讨了左转待行区对信

号交叉口的影响，并对交叉口进行了全面评估。

1 基本原理与方法

本文建立的左转待行区综合效益评估方法主要分成两部分：微观交通仿真模型和基于社会成本的交通综合评价体系。第一部分主要是利用微观交通仿真软件 Paramics 构建路网模型，将交通事故预测模型、机动车油耗、尾气排放预测模型、机动车噪声排放与传播模型集成在 API（application programming interface）函数中实现二次开发，计算左转待行区使用前后的机动车总行程时间、总油耗量、各类尾气污染物的总排放量、路网等效噪声值及其事故频率。这一部分的输入数据主要包括：道路结构（路网结构、车道数、车道宽度等）、交通流（OD 矩阵、路段流量数据等）以及信号控制数据（信号控制方式、相位等信控参数）。基于社会成本的道路交通综合评价体系由出行时间成本、燃油消耗成本、交通事故成本、空气污染成本、噪声污染成本、温室效应成本六种社会成本评价构成。将微观交通仿真中获取的行程时间等六种交通影响值货币化，可得到道路交通总社会成本。将此总社会成本作为评价指标，对信号交叉口左转待行区的影响进行综合评价。

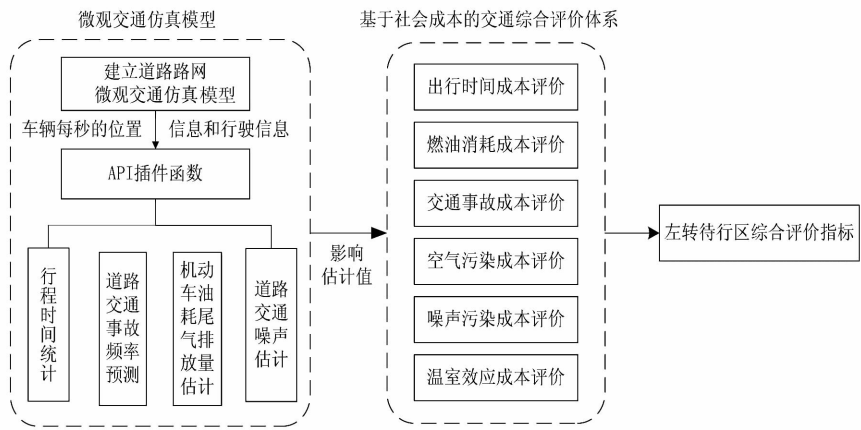


图 1 基本原理及方法结构图

Fig. 1 The basic principle structure

1.1 微观交通仿真模型

仿真模型在 Paramics 微观仿真平台中实现，主要包括三部分：路网模型、信号控制模型以及综合影响估计模块。

1.1.1 路网模型 路段、交叉口、OD 小区以及交

通量等基础路网的建模完成之后，对交叉口进行渠化，确定左转专用车道，并将左转专用车道的停车线前移到靠近交叉口的中央处，形成左转待行区。值得注意的是，当左转车辆到达交叉口时，根据信号灯的状态判别是否放行车辆的情形有三种：1)

左转灯处于红灯状态、直行灯处于绿灯状态, 车辆驶入左转待行区等候; 2) 左转方向处于绿灯状态, 放行左转待行的车辆; 3) 左转灯与直行灯均红灯状态, 车辆需停于“原停车线”。在前两种状态中, 不需要采取其他措施, 就可以实现路网仿真; 但对于第三种状态, 由于将左转车道的停车线前移, 按照 Paramics 的车辆行驶模型, 车辆仍会驶向左转待行区。因此, 需要在左转灯要绿转黄瞬间, 对停车线后第一辆车的速度进行处理, 使其逐渐减速至原停车线处完全停止。

$$a = \frac{V_0^2}{2S} \quad (1)$$

$$V = V_0 - at \quad (2)$$

式中, a 和 V 为下一仿真步长车辆加速度与速度, S 为原停车线后第一辆车与原停车线的距离, V_0 为车辆当前速度。依据 Paramics 跟驰模型, 第一辆车后的左转车辆也会逐渐减速, 形成排队。

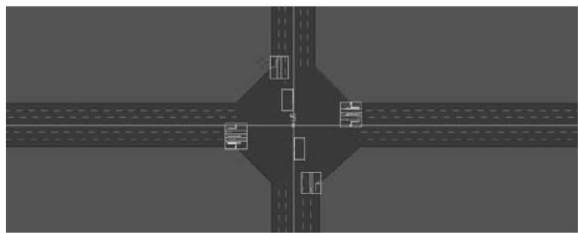


图2 左转待行区 Paramics 仿真效果图

Fig. 2 Simulation diagram of left-turn waiting zone

1.1.2 综合影响估计模块 综合影响估计模块主要用于计算左转待行区对研究区域通行效率、交通安全、燃油消耗、空气污染、温室效应以及噪声污染方面的影响。整个模块包括 4 个子模块: 行程时间统计、道路交通事故频率预测、机动车燃油消耗和尾气排放评估以及道路交通噪声评估模块。

1) 行程时间统计模块用于预测左转待行区对通行效率的影响, 主要以仿真过程中总机动车行程时间来衡量, 取值通过 Paramics 自带的 API 函数进行统计;

2) 道路交通事故频率预测模块用于预测左转待行区对交通安全产生的影响, 以仿真区域的平均交通事故频率预测值来衡量, 其取值通过美国公路安全手册 (HSM) 中的预测模型进行计算。HSM 提供了城市和乡村不同类型路段及交叉口的交通事故预测模型。其中, 城市道路方面定义了五种基本路段类型和四种基本交叉口类型, 对每种类型的路段或交叉口都定义了其相应的基本场景, 标定了每

一个场景对应的参数, 并提供了大量事故修正参数。路段和交叉口机动车事故年发生频率预测值 N_{br} 和 N_{bi} 的预测公式如公式 (3) 和 (4) 所示:

$$N_{br} = (N_{brmv} + N_{brsv}) \times (AMF_{1r} \times \cdots \times AMF_{5r}) \quad (3)$$

$$N_{bi} = (N_{bimv} + N_{bisv}) \times (AMF_{1i} \times \cdots \times AMF_{6i}) \quad (4)$$

式中, N_{brmv} 为该路段多车碰撞事故年发生频率预测值, N_{brsv} 为该路段单车碰撞事故年发生频率预测值, N_{bimv} 为该交叉口多车碰撞事故年发生频率预测值, N_{bisv} 为该交叉口单车碰撞事故年发生频率预测值, 在计算这四个值时需要利用 Paramics API 获取基本场景交通事故预测模型所需的数据 (如: 路段长度、交通量等) 来计算路段年平均日交通量和路段长度, $AMF_{1r} \cdots AMF_{5r}$ 和 $AMF_{1i} \cdots AMF_{6i}$ 分别为路段和交叉口事故修正参数, 涉及的因素包括是否存在左转车道、是否存在左转相位、是否存在右转车道、红灯能否允许右转、夜间照明情况和是否存在闯红灯监控摄像。

3) 机动车油耗与尾气排放估计模块用于预测左转待行区对燃油消耗、空气污染和温室效应的影响, 分别以交通仿真时总机动车油耗、各类空气污染物排放 (HC、 NO_x 和 PM 排放量) 和温室气体 CO_2 排放的变化量来衡量, 这三者的估计皆可利用 CMEM 微观排放模型进行。其中, 机动车的燃油消耗量用于计算信控交叉口的燃油消耗成本; CO、HC、 NO_x 和 PM 四种尾气污染物排放量则用于计算空气污染成本; 而 CO_2 的排放量则用于计算温室效应成本。

4) 道路交通噪声水平估计模块主要基于机动车单噪声排放模型和噪声的传播衰减模型, 计算仿真过程中动态变化的交通噪声值。小中大型车型在沥青路面的机动车噪声排放模型, 见公式 (5) ~ (7):

$$L_{os} = 12.60 + 33.66lgV \quad (5)$$

$$L_{om} = 4.80 + 43.70lgV \quad (6)$$

$$L_{ol} = 18.00 + 38.10lgV \quad (7)$$

1.2 基于社会成本的道路交通综合评价体系

本文的评价体系包括对出行时间、燃油消耗、交通事故、空气污染、温室效应和噪声污染六种社会成本的评价。

1.2.1 出行时间成本 出行时间是衡量道路交通通行效率的重要因素。在交通经济学中, 出行时间价值是出行者在旅途中花费时间的机会成本。出行时间成本利用出行者为节省该出行时间而愿意支付

的成本来评价，由个人出行时间成本和交通延误外部成本两部分组成：

$$TTC = PTTC + ECC \tag{8}$$

式中，PTTC 为个人出行时间成本（元）；ECC 为交通延误外部成本（元）。

交通仿真过程中，根据出行目的的不同，可将出行分为工作出行和非工作出行两种方式。两种出行方式的单位时间成本 VOT_{work} 和 $VOT_{non-work}$ 取值参考世界银行的建议^[13]。个人出行时间成本和交通延误外部成本可通过公式（9）和（10）分别计算：

$$PTTC = T \times \left(\sum_j^M p_j \cdot pax_j \right) \times \left(r_{work} \cdot VOT_{work} + r_{non-work} \cdot VOT_{non-work} \right) \tag{9}$$

$$ECC = DT \times \left(\sum_j^M p_j \cdot pax_j \right) \times \left(r_{work} \cdot VOT_{work} + r_{non-work} \cdot VOT_{non-work} \right) \tag{10}$$

式中， p_j 和 pax_j 分别为第 j 种车型的比例及该车型的平均载客量， M 为车型种类， $T \times \left(\sum_j^M p_j \cdot pax_j \right)$ 和 $DT \times \left(\sum_j^M p_j \cdot pax_j \right)$ 即为仿真过程中所有出行者的总行程时间和总延误时间； r_{work} 和 $r_{non-work}$ 分别为工作出行和非工作出行占总出行的平均比例， VOT_{work} 和 $VOT_{non-work}$ 分别为工作出行和非工作出行的时间价值（元/小时）。

1.2.2 燃油消耗成本 机动车的燃油消耗成本能够方便地通过油价来衡量。即，燃油消耗成本 FC 为：

$$FC = M_F \times AFP \tag{11}$$

式中， M_F 为仿真过程机动车产生的总油耗量（kg）；AFP 为国内平均油价。

1.2.3 交通事故成本 美国公路安全手册 HSM^[14] 提供了不同类型事故的成本估计，使用该手册提供的方法和事故成本因子来计算道路交通事故产生的社会成本 AC：

$$AC = N_{FI} \times C_{FI} + N_{PDO} \times C_{PDO} \tag{12}$$

式中， N_{FI} 和 N_{PDO} 分别为仿真时间内死亡或受伤、仅车辆损坏事故发生的频率； C_{FI} 和 C_{PDO} 分别为上述两种事故的成本因子（元/次）。值得注意的是，因为 HSM 对死亡或受伤事故成本因子的估计较为保守，所以死亡或受伤事故成本因子统一使用死亡事故、重伤事故、轻伤事故和疑似受伤事故成本的加权平均值来估计^[14]。另外，HSM 的成本因子考虑的是美国市民生命价值，并以 2001 年的美元计价。在实际使用中，需要对其进行调整才可应用于

我国的交通事故成本计算。本文中，采用中美两国 2011 年的人均 GDP 比值、2011 与 2001 年 CPI 比值来对其进行调整，

1.2.4 空气污染成本 污染物的成本因子结合人的生命价值等的经济成本，反映了每种尾气污染物浓度对哮喘、气管炎等呼吸道疾病的死亡率或发病率、建筑物表面的损失等因素的影响^[15-16]。使用尾气污染物的成本因子来确定空气污染成本 APC：

$$APC = \sum_{e=1}^E M_e \times C_e \tag{13}$$

式中， M_e 为仿真过程中第 e 种空气污染物的总排放量（kg）； C_e 为第 e 种污染物的成本因子（元/kg）； e 为污染物种类数。污染物的成本因子，可根据 ExtenE 项目中得到的污染物成本因子，依照我国与欧洲的人均 GDP 比值加以调整后使用。经调整后，有害尾气的成本因子如表所示。

表 1 我国城市地区机动车有害空气污染物成本因子

Table 1 Cost factors of air pollutants from motor vehicles in urban areas of China	
有害空气污染物	成本因子/（元·kg ⁻¹ ）
HC	3.79
NO _x	16.68
PM	1 111.00

1.2.5 温室效应成本 类似地，温室效应成本 GEC 通过二氧化碳成本因子来反映：

$$GEC = M_{CO_2} \cdot C_{CO_2} \tag{14}$$

式中， M_{CO_2} 为二氧化碳的总排放量（kg）； C_{CO_2} 为二氧化碳的成本因子（元/kg），采用碳排放交易所中地区碳排放权的均衡价格来进行取值^[16]。

1.2.6 噪声污染成本 基于 Bickel^[9] 等学者的研究，噪声的烦恼远大于其对个人健康的影响。因此，以噪声的烦恼成本来估计噪声污染成本 NPC：

$$NPC = \frac{(L_{eq} - L_{limit}) \times (0.11 \times L_{eq} - 3.05) \times N_{House} \times T_{Sim}}{720} \tag{15}$$

式中， L_{eq} 为仿真过程中研究区域所有观测点的平均等效噪声值（dB）； L_{limit} 为研究区域的噪声限值，取值参照《声环境质量标准》^[17]； N_{House} 为受噪声影响的家庭数； T_{Sim} 为仿真时间长度（h）；WTP 为在该种噪声水平下每户家庭每月为减轻噪声烦恼的支付意愿（yuan × （dB × month × House）⁻¹）。

1.2.7 道路交通综合成本 将上述六种成本相加

并进行综合，得到道路交通综合成本 AVGC：

$$AVGC = \frac{TTC + FC + AC + APC + GEC + NPC}{N_{veh}}$$

(16)

式中， N_{veh} 为仿真时间内路网的机动车车辆数。本文基于此道路交通综合成本对左转待行区的价值进行综合评价。

2 实例分析

2.1 微观仿真模型

以广东省广州市天河东路十字交叉口的左转待行区为例，构建仿真模型时需要输入以下四种数据：1) 路网几何结构。该路网为一个由南北向主干道和东西向次干道交汇而成的平面交叉口。两条道路均为双向六车道，每条车道宽 3 m，限速 50 km/h。该路口在南北主干道的两个方向上设计了两个左转待行区。2) 交通流数据。本实例的数据是该十字路口在 2015 年 6 月 17 日早高峰（7:00–8:00）期间的流量数据，如表 2 所示。路段的流量存在一定的规律性，由该天的数据也容易看出该十字路口各进道口均存在较大的左转车流量。3) 噪声接收点布设位置。噪声接收点将以交叉口中心为坐标原点（0，0），沿着东西向和南北向的道路，在交叉口中心的东南西北四个方向每隔 25 m 均匀设置噪声接收点，共布设 40×40 个。4) 信号配时方案。具体如图 3 所示。

首先，对实际路网情况进行建模；并且在保持路网 OD 流量不变的情况下，建立该路口不设置左转待行区时的路网仿真模型作为对照组；最后，进

行对比验证，得到左转待行区的设置对该十字交叉口的影响。为了能够输出有效的仿真结果，仿真时的各项参数采用李喆等^[18]的参数校正结果进行设置。

2.2 评价结果

2.2.1 仿真结果 仿真输出的结果如表 3 所示：

表 2 交通量矩阵

Table 2 The traffic volume of the road

	东	西	南	北
东	0	372	293	0
西	421	0	0	81
南	0	220	0	83
北	119	0	169	15

表 3 有无左转待行区的仿真结果

Table 3 The capacity of the simulation with or without the left-turn waiting area

	无左转待行区	有左转待行区
通过车辆数	1 809	1 910
总行程时间/s	107 742	75 735
总延误时间/s	60 671	31 311
CO ₂ 排放量/g	994 304	257 813
CO 排放量/g	46 674	57 764
HC 排放量/g	1 936	4 240
NO _x 排放量/g	1 594	6 010
PM 排放量/g	68	40
平均燃油消耗量/g	335 405	224 408
噪声值/dB	44	53

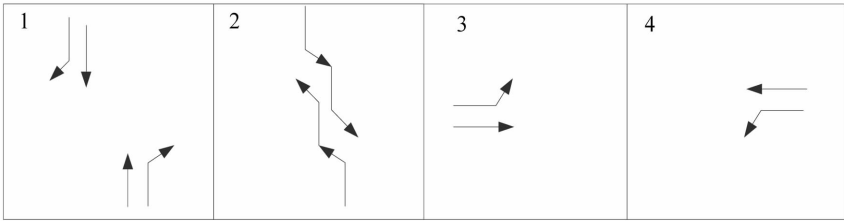


图 3 信号配时图

Fig. 3 The time distribute of the signal light

由表 3 可知，信号交叉口中设置了左转待行区后，在相同的信号时长下通过左转车辆更多，交叉口通行能力增加，仿真时间内通过的车辆数增加了近 5%，总行程时间、总延误时间也相应减少了。然而，另一方面，路网 CO₂ 排放量、NO_x 排放量、CO 排放量以及噪声值出现了不同程度的增加。汽

车的排放量受多种因素的影响，比较重要的三个因素是：车辆性能（使用时间、发动机状况、行驶里程、保养情况、燃油品质等）、实际工况（加减速、怠速等）以及环境条件（温度、湿度、风度等）。左转待行区的存在对汽车的行驶工况有很大的影响。汽车低速行驶时尾气排量较高，随着速度

的增加，排放量明显下降；汽车高速行驶时，排放量相对较低，且随着汽车速度的变化呈现不明显变化；汽车怠速及减速、加速频繁时，排放量相对较高。整个左转待行区的利用过程，进入左转待行区排队等候的左转车辆，由汽车的“怠速-加速-减速-怠速-再加速-匀速通过”几个步骤组成。相比不设置左转待行区，多了“加速-减速-怠速”3个步骤，左转待行区的设置导致左转车停车次数显著增加，并且会随着待行区内等待车辆数的增加而增加。从表中可以看出，CO 排放量、HC 排放量以

及 NO_x 排放量均有不同程度的增加。所以，左转待行区可能会加重尾气污染和噪声污染等负面问题。尤其是噪声值从 44 dB 上升到 53 dB，接近《声环境质量标准》（GB 3096 - 2008）的二类混合区噪声限值 55 dB，可能使周边居民受到更大的交通噪声烦扰。

2.2.2 各项成本分析 采用基于社会成本的左转待行区综合评价方法，得到有左转待行区、无左转待行区十字路口的各项社会成本如表 4 所示。

表 4 有无左转待行区交叉口的各项成本

	无左转待行区(a)/元	有左转待行区(b)/元	成本变化量(c = a - b)/元	成本变化百分比(c/a)
出行时间成本	0.484 24	0.291 51	0.192 72	39.80%
燃油消耗成本	1.912 51	1.211 93	0.700 58	36.63%
交通事故成本	0.040 79	0.043 34	-0.002 55	-6.26%
空气污染成本	0.255 02	0.477 13	0.222 11	-46.55%
温室污染成本	0.028 19	0.006 92	0.021 26	75.44%
噪声污染成本	0	0	0	0
平均综合成本	2.720 74	2.030 84	0.689 90	25.35%

很容易看出，设左转待行区后，各项成本都发生了较大的变化了。其中应该注意的是，由于研究区域所有观测点的平均等效噪声值低于该地区噪声限值，未超过人们的容忍限度，所以其成本接近于零。

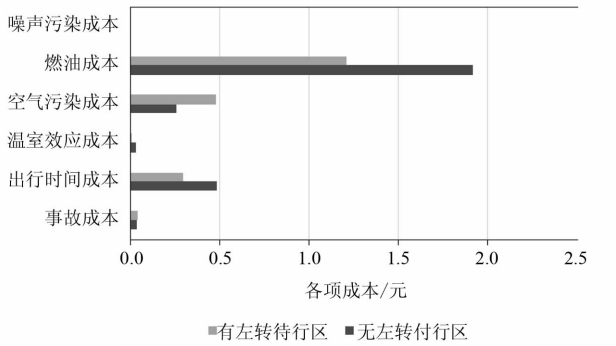


图 4 有无左转待行区时十字交叉口的各项社会成本
Fig. 4 The social cost of the intersection with or without the left-turn waiting area

图 4 中，左转待行区的存在能充分利用交叉口的路口区域，有效提高单位时间通过交叉口的车辆数，从而提高通行效率，车辆的延误时间减少

48%，出行时间成本减少了近 40%；由于燃油消耗量减少了，燃油消耗成本降低 33.09%；虽然 CO 和 HC 的排放量增加了，但是 NO_x 的排放量大大地减少了，所以空气污染成本降低了 52.48%；同样的，CO₂ 的排放量减少了，所以温室效应成本减少了 74.07%。由于左转待行区增加了交叉口内车停车次数和蓄车辆，交通事故成本和噪声污染成本分别增加了 6.88% 和 1.41%。

2.2.3 平均综合成本 交叉口的平均综合成本如图 5 所示。在本实例中，有左转待行区和无左转待行区的每辆车平均综合成本分别为 2.03 元和 2.72 元。对比后发现，有左转待行区的平均综合成本下降了 25%。这说明有左转待行区的交叉口在路网的综合表现优于无左转待行区的交叉口。

燃油消耗成本和出行时间成本是两种占比较大的社会成本，在无左转待行区时约占 70% 和 18%，在有左转待行区时约占 60% 和 14%。这主要是因为国内燃油价格水平和工资水平较高。其次交通事故成本和空气污染成本次于油耗和出行时间成本。值得注意的是，在交叉口建设左转待行区后，空气污染成本由原本的 9% 上升到 23%。这说明：增设左转待行区后，空气污染对平均污染成本有较显著

的影响，而占比最少的两种社会成本为温室效应成本和噪声污染成本，占比均低于 1%，对平均污染成本的影响较小。

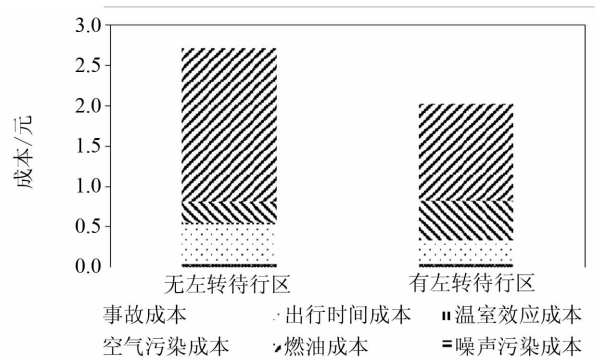


图 5 有无左转待行区时交叉口的平均综合成本
Fig. 5 The comprehensive cost of the intersection with or without the left-turn waiting area

3 总结

本文利用微观交通仿真软件 Paramics，结合 CMEM 微观排放模型、道路交通事故预测模型、尾气排放模型、机动车噪声排放和衰减模型，建立了一个信号交叉口左转待行区综合效益评估体系。进而，从交通效率、燃料消耗、空气污染、温室效

应、噪声污染六个角度分析评价左转待行区对交叉口的影响。该评价体系考虑因素全面，且具有适用性，可以预测不同形式的交叉口（十字、T 字）在不同车道数、交通组织、配时方案、交通强度等情形下设置左转待行区后所产生的影响，对交叉口优化设计和城市道路规划有一定指导作用。研究表明：

1) 左转待行区是一种较好的提高交叉口通行能力的改善策略，但是设置左转待行区也是有条件的。在衡量一个十字路口是否应该设置左转待行区时，需对左转交通流较大的路口进行充分调研、考虑多方面的因素，对不同的交叉口根据其实际情况进行选用。

2) 案例表明，左转待行区的设置导致左转弯停车次数显著增加，导致区域尾气和噪声污染加重，还在一定程度上增加了交通事故频率。考虑到左转待行区带来的负面影响，在交通平峰时段或者夜间时段，左转待行区可以不再利用，通过设置辅助表示牌的形式规定左转待行区的使用时段。

3) 本文较侧重评价体系的构建，只初步讨论了一个十字路口在工作日早高峰时的情景。而，在不同流量下左转待行区的设置可能会对交叉口的通行效率产生不同的影响。在今后的工作中，可完善实验场景设计，在不同交通条件及道路条件下，综合分析左转待转区的综合效率。

参考文献：

[1] 沈家军,王群,曹志铭. 基于微观特性的左弯待转区对交叉口通行能力影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 158-162.
SHEN J J, WANG Q, CAO Z M. Impact of left-turn waiting area on capacity of intersection based on microscopic characteristics[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2016, 35(4): 158-162.

[2] 周欢欢,陈硕,杨倩,等. 基于 VISSIM 的左转弯待行区仿真研究[J]. 中国公共安全(学术版), 2016, 52(2): 70-73.
ZHOU H H, CHEN S, YANG Q, et al. Simulation study of turning left waiting zone based on VISSIM software[J]. China Public Security, 2016, 52(2): 70-73.

[3] 孙冰清,陈景雅. 城市信号交叉口左转待行区设置及效益评价研究[J]. 公路交通技术, 2014(4): 144-147.
SUN B Q, CHEN J Y. Study on left turning waiting area setting and benefit evaluation of urban signalized intersection[J]. Journal of Highway and Transportation Technology, 2014(4): 144-147.

[4] YANG Z, LIU P, CHEN Y, et al. Can left-turn waiting areas improve the capacity of left-turn lanes at signalized intersections[J]. Procedia Social and Behavioral Sciences, 2012, 43(2): 192-200.

[5] 倪颖,李克平,徐洪峰. 信号交叉口机动车左转待行区的设置研究[J]. 交通与运输(学术版), 2006, 56(2): 32-36.
NI Y, LI K P, XU H F. Research on the setting of left turning waiting area of motor vehicles at signalized intersection[J]. Journal of Transportation and Transportation (Academic Edition), 2006, 56(2): 32-36.

[6] DING W, YANG Y G, YANG X L. Set methods of left-turn waiting zone at signalized intersection[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 16(3): 318-321.

[7] 季彦婕,邓卫,王伟. 信号交叉口左转机动车等待区设置方法研究[J]. 公路交通科技. 2006, 23(3): 135-138.

- JI Y J, DENG W, WANG W. Research on setting method of left-turning vehicle waiting area at signalized intersection[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(3): 135 – 138.
- [8] 陈晖. 信号交叉口左转待转区的仿真实现与评价[J]. 交通与运输, 2012, 51(2): 132 – 134.
- CHEN H. Simulation implementation and evaluation of left-to-transition zone at signalized intersection[J]. Transportation and Transportation, 2012, 51(2): 132 – 134.
- [9] BICKEL P. Developing harmonised european approaches for transport costing and project assessment (heatco) deliverable 5 proposal for harmonised guidelines [R]. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2005.
- [10] DESAIGUES B. New energy externalities development for sustainability (NEEDS) deliverable D6.7: final report on the monetary valuation of mortality and morbidity risks from air pollution [R]. Paris: University of Paris, 2007.
- [11] 蔡铭, 周展鸿. 道路交通外部成本评估研究综述[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(4): 1 – 7.
- CAI M, ZHOU Z H. A review of external cost assessment of road traffic[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2015, 54(4): 1 – 7.
- [12] 贾丰源, 严凌, 董洁霜, 等. 基于环境质量的城市道路环形交叉口信号配时优化研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(2): 161 – 164.
- JIA F Y, YAN L, DONG J S, et al. Signal timing optimization of urban road roundabout based on environmental quality[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(2): 161 – 164.
- [13] GWILLIAM K M. The value of time in economic evaluation of transport projects: lessons from recent research [R]. Washington DC: World Bank, 1997.
- [14] National Research Council (US), Transportation Research Board, Task Force on Development of the Highway Safety Manual, et al. Highway safety manual [M]. Washington, D. C. : AASHTO, 2010.
- [15] BICKEL P, FRIEDRICH R. Externe externalities of energy: methodology 2005 update [R]. Luxembourg: European Commission, 2005.
- [16] MAIBACH M, SCHREYER C, SUTTER D, et al. Handbook on estimation of external costs in the transport sector Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT) [R]. Delft: CE Delft, 2008.
- [17] 中华人民共和国环境保护部. GB3096 – 2008: 声环境质量标准[S]. 中国环境科学出版社, 2008.
- [18] 李吉吉, 蔡铭, 何兆成, 等. 微观交通仿真系统参数校正流程及应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2008(5): 144 – 148.
- LI J J, CAI M, HE Z C, et al. Parameter correction process and application of microscopic traffic simulation system[J]. Journal of Highway and Transportation Research(Applied Technology Edition), 2008(5): 144 – 148.

(责任编辑 王海蓉)