【交通物流 / Transportation Logistics】

新型非常规 U 型转弯交叉口的运行效率研究

潘兵宏^{1,2}, 单慧敏¹, 任 卉¹, 胡 炜¹

1) 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2) 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西西安 710064

摘 要: 左转车辆对交叉口运行效率影响很大, 通过设置 U 型转弯能够很好的解决主交叉口的交通冲突. 针对常规的 U 型转弯交叉口对中央分隔带宽度的特殊要求, 设计一种新型非常规 U 型转弯交叉口 (new unconventional U-turn intersections, NUUT), 通过将常规的 U 型掉头改造为分车道分车型的 U 型转弯交叉口, 来解决道路空间利用以及大小车转弯之间的冲突问题. 通过 Vissim 仿真, 对比 NUUT、直接左转 (direct left turn, DLT)、无专用车道 U 型转弯 (U-turn, UT) 以及有 1 条专用车道 U 型转弯 (one lane U-turn, OLUT) 4 种交叉口设计中的车辆运行效率. 结果表明, 在相同的适用交通量条件下, NUUT 路网的平均延误率比 DLT 交叉口降低 5.64% ~ 85.73%, 停车次数降低 6.17% ~ 94.22%, 排队长度减少了 6.44% ~ 95.38%. 在相同的适用交通量和大型车比例变化条件下, 相比 UT 和 OLUT, NUUT 的设置使路网平均延误分别降低了 1.45% ~ 98.00% 和 0.30% ~ 97.97%. 当道路上的大型车比例增加时, NUUT 能够有效改善路网的运行效率. 与 U 型交叉口对比, NUUT 所适用的最大交通量均呈线性分布, 随着主干路交通量的增加, 次干路交通量逐渐降低. NUUT 设计能够有效提高不同交通量、不同大型车比例情况下的路网运行效率. NUUT 在实际交叉口应用中的效果明显, 有效降低了交叉口延误.

关键词: 交通工程; 新型非常规 U 型转弯交叉口; Vissim 仿真; 延误; 停车次数; 排队长度

中图分类号: U491

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.03305

Operational efficiency of new unconventional U-turn intersection

PAN Binghong^{1,2}, SHAN Huimin¹, REN Hui¹, and HU Wei¹

1) School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi Province, P. R. China

2) Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University,
Xi'an 710064, Shaanxi Province, P. R. China

Abstract: Left-turning vehicles have a significant impact on the traffic operation efficiency at intersections. However, the traffic conflicts at main intersections can be well solved by setting U-turn intersections. For the traditional U-bend intersections which have special requirements for the width of the central separation belt, a new type of unconventional U-turn intersections (NUUT) is proposed to improve the utilization of road space and to solve the conflict between large and small vehicles in the case of turning. The vehicle operating efficiency of the NUUT is analyzed by VISSIM simulation. NUUT is compared with direct left turn (DLT) lane, no lane U-turn (UT), and one lane U-turn (OLUT). The evaluation results show that the setting of NUUT reduces the average delay-rate of the

Received: 2019-01-10; **Revised:** 2019-04-28; **Accepted:** 2019-06-14

Foundation: Livelihood Scientific Special Foundation of Hebei Province (19275601D)

Corresponding author: Associate professor PAN Binghong. E-mail: kc20@GL.chd.edu.cn

Citation: PAN Binghong, SHAN Huimin, REN Hui, et al. Operation efficiency of new unconventional U-turn design intersection [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(3): 305-313. (in Chinese)

network by 5.64% ~ 85.73%, the number of stops is decreased by 6.17% ~ 94.22%, and the queue length is cut 6.44% ~ 95.38%, compared with the DLT in the same applicable traffic volume. And it decreases the average delay rate of the network by 1.45% ~ 98.00% and 0.30% ~ 97.97%, compared with UT and OLUT under the same applicable traffic volume and the same large vehicle proportion change. In conclusion, the NUUT can effectively improve the operational efficiency of road network when the proportion of large road vehicles increases. The maximum traffic volume applicable for the comparison with U-shaped intersection is in linear distribution. With the increase of the traffic volume in the main road, the secondary road gradually decreases. The design of NUUT can effectively improve the operational efficiency of road network under different traffic volumes and different large vehicle ratios.

Key words: traffic engineering; new unconventional U-turn intersection (NUUT); Vissim simulation; delay; number of stops; the queue length

平面交叉口(以下简称交叉口)左转车辆的存在会大幅增加交叉口的拥堵,为更好地解决交叉口直接左转车辆带来的冲突问题,研究人员提出了各种措施.彭飞等^[1]通过考虑延误和排队等因素建立交叉口信号配时优化模型. SHAIK 等^[2]建立左转车道仿真模型,给出单左转车道和双左转车道的适用条件.张野等^[3]提出在交叉口的出口道设置左转专用可变车道的交通组织方法. KOEPKE 等^[4-6]分别提出 U 型、扇形、菱形及左转漂移等新型交叉口设计.其中,交通组织优化仍然是解决该问题的重要途径.为消除左转对交叉口处的不利影响,研究人员设计了各类左转方式.利用左转目标道路的中央分隔带开口和相邻交叉口,通过右转加掉头的方式来实现左转也是常用的交叉口左转组织措施,此方式被称为 U 型转弯. U 型转弯可显著减少交叉口冲突以及车辆的平均延误,提高交叉口的通行能力^[7].但常规利用中央分隔带的 U 型转弯要求中央分隔带具有足够的宽度(典型的利用中分带 U 型转弯交叉口,如密歇根 U 型转弯,宽度一般要超过 18 m^[8]),以满足左转车辆掉头要求,这限制了该方法的应用.对于中央分隔带非常狭窄的道路,很难设计成常规 U 型转弯来实现车辆左转.此外,在

有大量左转交通且中央分隔带较窄的地方,若要设计成常规 U 型转弯,需考虑小型车和大型车转弯对行驶车辆的影响.本研究提出一种新型非常规 U 型转弯(new unconventional U-turn intersection, NUUT)设计,即分车道分车型的双湾 U 型转弯交叉口,以放宽对道路中央分隔带宽度的要求.

1 NUUT 几何结构分析

NUUT 的几何结构如图 1,本研究考虑 NUUT 的应用环境为城市道路.从安全行车和保障效率两方面考虑,路段中用于掉头的中央分隔带开口前,必须设置专用左转车道.在常规 U 型转弯交叉口的基础上,对主干路上游路段局部拓展出两条专用掉头车道(内侧为小型车,外侧为大型车),避免大小车型转弯时的冲突,有利大型车转弯.同时采用逐级渐变的方式,达到减少车道浪费,避免排队长度过长的目的.大车在靠近中央分隔带的第 2 条车道转至对向车道,可更好的满足 U 型转弯车辆所需要的转弯半径,减少大型车掉头对同向直行车造成的延误.尽管 NUUT 仍对中央分隔带宽度有要求,但比常规的 U 型转弯设计要求要窄得多.

图 1 新型非常规 U 型交叉口 (NUUT) 示意图

Fig. 1 New unconventional U-turn diagram for intersection

本研究拟针对不同交通情况下, NUUT 的延误、停车次数和排队长度 3 个指标, 分析车辆左转对交叉口的影响, 评估 NUUT 的运行效率。

NUUT 适用于常规交叉口, 评估时预设条件为:

① 该交叉口禁左, 且至下游信控交叉口的距离满足长度要求, 可在路段中间设置开口, 既能保证交织完成, 也能保证信控交叉口正常运行; ② 交叉口与上、下游的邻近信控交叉口之间无其他出入口接入。《城市道路工程设计规范》(CJJ37—2012)^[9]规定主干路的设计速度为 40 ~ 60 km/h, 次干路的设计速度为 30 ~ 50 km/h, 交叉口内的右转弯设计速度宜为路段的 0.5 ~ 0.7 倍, 车道宽度均取 3.5 m, 主干路至少为双向 6 车道, 次干路取双向 4

车道。

2 NUUT 模型建立

2.1 交通变量

NUUT 主要交通变量如图 2。其中, $i = 1, 2, 3, 4$, 分别为东南西北 4 个进口方向; o 为车辆在交叉口处目标行驶方向, $o = 1, 2, 3, 4, 5$, 分别为左转、直行、右转、在 U 型转弯处转弯以及 U 型转弯处的交织车辆; a 为进入交叉口处车道的编号, 从最内侧算起; n_{ia} 为某一方向进口道车道数; e 为交叉口出口处车道的编号; n_{ie} 在某一方向出口道车道数; N 为目标路段车道数。

图 2 交通变量分布示意图

Fig. 2 Transportation variable distribution diagram

交叉口处每个方向的进口交通流量 Q_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 是该方向目标行驶交通流量之和, 即

$$Q_i = \sum_{o=1}^3 Q_{io} \quad (1)$$

进口方向 i ($i = 1, 2, 3, 4$) 的左转弯比例为

$$\delta_i = \frac{Q_{i1}}{\sum_{o=1}^3 Q_{io}} \quad (2)$$

以东进口方向为例, 掉头混合车道交通流量为

$$Q_{14} = \sum_{o=1}^2 Q_{3o}\delta_3 + \sum_{o=1}^2 Q_{2o}\delta_2 \quad (3)$$

i 方向 ($i = 1, 2, 3, 4$) 各进口道 a 的交通量为

$$q_i = \begin{cases} Q_{i1} + Q_{i2}\delta_i, & a = 1 \\ Q_{i2}(1 - \delta_i), & a = 2 \\ Q_{i3}, & a = 3 \end{cases} \quad (4)$$

2.2 几何尺寸

2.2.1 掉头位置与交叉口之间的间距 L

为防掉头车辆过多, 在交叉口处溢出, L 应大于进入交叉口处的排队长度^[10], 即

$$L \geq \frac{1}{3600} \frac{Q_i}{n_{ia}} (C - t_{i2}) s, \quad i = 1, 3 \quad (5)$$

其中, t_{io} 为在交叉口的某一方向中车辆行驶方向的绿灯时间 (单位: s); C 为信号周期时长 (单位: s); s 为车头间距 (单位: m)。

在实际应用中若无可计算 L 的基础参数, 可采用图 3 的开口间距计算模型。其中, L_p 为感知反应距离; L_w 为换道所需的等待可插入间隙的距离; L_c 为车辆横移距离; L_{g1} 和 L_{g2} 为大型车和小型车专用车道的展宽渐变段长度; L_{d1} 和 L_{d2} 分别为展宽等待段的要求长度。由图 3 可知, L 应满足车辆换道至最内侧车道所需距离 $L_p + L_w + L_c$ 、 L_{g1} 、 L_{g2} 、 L_{d1} 和 L_{d2} 的要求。

图 3 开口间距 L 计算示意图

Fig. 3 Open space L calculation diagram

1) 换道至最内侧车道所需距离 $L_p + L_w + L_c$: 为尽量让掉头车辆在第 1 次渐变段前进入最内侧车道以减少对直行车辆的影响, 该段距离应满足 L_p 、 $L_w^{[11]}$ 及 L_c 各自的要求, 如式(6)至式(9).

$$L_p = \frac{v}{3.6} t_p \quad (6)$$

其中, t_p 为感知反应时间, 本研究根据文献[12]设 $t_p = 2.5$ s; v 为次干路车辆在进入主干路后车辆需要连续换道进入内侧车道时的运行速度 (单位: km/h). 为保证足够的距离和行车安全, 在计算感知反应距离时, v 取本研究中次干路的设计速度 40 km/h.

$$L_w = \frac{v_1}{3.6} t_w \quad (7)$$

其中, v_1 为等待可插入间隙期间车辆的运行速度 (单位: km/h), 取主干路设计速度的 70%, 本研究中主干路速度取 50 km/h; t_w 为等待一个可插入间隙的时间, 计算式为

$$t_w = \frac{1}{\lambda} [e^{\lambda(t_c - \tau)} - \lambda(t_c - \tau) - 1] \quad (8)$$

其中, λ 为单位时间内的平均到达率 (单位: pcu/s), $\lambda = Q/3\ 600$, Q 为最大服务交通量 (单位: pcu/h), 根据《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012), 本研究取 $Q = 1\ 350$ pcu/h; t_c 为车辆临界间隙, 取值 3.5 ~ 4.0 s, 本研究取 4.0 s; τ 为最小车头时距, 取值为 1.0 ~ 1.5 s, 本研究取 1.2 s^[11].

L_c 为横移换道距离, 计算式为

$$L_c = \frac{v_2}{3.6} t_c \quad (9)$$

其中, t_c 为换道时间, 取 $t_c = 3$ s; v_2 为主干路设计速度 (单位: km/h).

经计算, 当主干路为双向 6 车道, 次干路为双向 4 车道时, 换道距离为 $L_p + 2L_w + 2L_c = 156$ m.

美国国家高速公路和交通运输协会 (American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO) 建议交叉口和掉头位置之间的最小间距取值为 122 ~ 183 m. 因此, 本研究计算的距离与 AASHTO 建议距离基本一致.

2) 展宽渐变段长度 L_g 和展宽段长度 L_d : NUUT 通过逐级渐变方式, 拓宽出两条专用的左转车道. 由于中国现阶段并无对应的规范, 本研究参照《城

市道路交叉口设计规程》相关规定, 令主干路展宽渐变段 $L_{g1} = L_{g2} = 30$ m, 展宽段长度 $L_{d1} = 70$ m, $L_{d2} = 42$ m, 则小车 $L = 328$ m.

2.2.2 掉头处中央分隔带的最小宽度

满足小客车和大型车掉头的中央分隔带的宽度分别为 5.3 ~ 6.4 m 和 7.7 ~ 9.4 m^[13]. 远引车辆在中央分隔带处掉头时, 车辆的行驶轨迹半径与车辆的大小和内外轮转角等有关, 小客车和大型车的转弯半径 R 分别取 4 m 和 9 m^[12]. 远引掉头处的主路中央分隔带的宽度 E 应满足

$$E \geq 2R - NW_L - 2W_b \quad (10)$$

其中, W_L 为跨越的车道宽度; W_b 为路缘带宽度, 根据《城市道路路线设计规范》要求, 本研究取 $W_L = 3.50$ m, 取 $W_b = 0.25$ m.

由式(10)计算得到, 当中央分隔带的最小宽度为 4 m 时, 小客车可直接掉头到对向车道第 1 条车道 (靠近中间带) 上. 大客车可直接掉头至最外侧行车道.

3 仿真环境设定

采用 Vissim 交通流仿真系统对 NUUT 运行效率进行仿真分析. 以双向 6 车道和双向 4 车道为研究对象, 研究不同的交通情况下 NUUT 和直接左转交叉口 (direct left turn, DLT)、无专用车道 U 型转弯 (U-turn, UT) 以及有 1 条拓宽车道的 U 转弯 (one lane U-turn, OLUT) 设计的差异.

本研究根据道路自身条件及输出结果比较的需要, 提供不同预设交通量, 并在仿真前对模型进行校准, 使结果更接近实际情况^[14-15]. 为得到稳定交通流, 每次仿真时间定为 3 600 s, 而对应每一水平、每一因素都平行地进行 8 次仿真试验^[16]. VISSIM 仿真模型的输入参数为:

1) 通过现场实际观察多个城市道路交叉口, 大车比例占 1% ~ 8%, 本研究取 2% ~ 10%, 以 2% 的梯度增加.

2) 主路单向交通量为 800 ~ 2 100 veh/h, 次干路上单向交通量为 100 ~ 1 100 veh/h, 梯度均为 100 veh/h, 次干路交通量要低于主干路交通量.

3) 由于 U 型转弯对主干道直行需求较高, 左转需求较低, 因此本研究假定左转、直行和右转的交通量之比为 0.3:0.5:0.2.

4) 根据文献[10]的调查结果, 小客车的转弯

速度为 12.3 km/h, 行驶速度为 7.1 ~ 18.7 km/h; 大型车的转弯速度为 9.7 km/h, 行驶速度为 7.2 ~ 10.8 km/h.

5) 东西路的车辆初始速度为 50 km/h (大部分车辆的行驶速度为 48 ~ 58 km/h), 南北路的车辆速度为 40 km/h (大部分车辆的行驶速度为 40 ~ 45 km/h).

4 运行评价指标对比分析

4.1 NUUT 与 DLT 对比分析

为说明 NUUT 的适用交通量范围, 本研究将其与 DLT 在设定的仿真环境下进行对比. 将假定的交通参数输入到仿真模型中, 其中大型车比例固定为 2%, 只改变交通量的取值. 根据道路交通参数利用交通信号配时软件 SYCHRO 计算出 DLT 的最佳信号配时.

4.1.1 路网平均延误对比

不同交通情况下 NUUT 较 DLT 的路网平均延误降低率 D 如式(11), 仿真对比结果如图 4.

$$D = - \left(\frac{d_{\text{NUUT}} - d_{\text{DLT}}}{d_{\text{DLT}}} \right) \times 100\% \quad (11)$$

其中, d_{NUUT} 与 d_{DLT} 分别为 NUUT 与 DLT 的延误.

图4 NUUT 与 DLT 路网平均延误降低率

Fig. 4 Average delay reduction rate on NUUT and DLT network

在给定的交通组成中, 红色区域为 NUUT 适用的最佳交通量范围, 适用的次干路交通量最高达到 800 veh/h, 并在之后逐渐降低. 在主、次干路交通量组合为 (2 100, 100) veh/h 时, 平均延误超过 2 min 时适用性较小, 则主干路交通量超过 2 100 veh/h 时不再作为适用交通量考虑.

仿真结果表明, 在适用的交通量范围内路网的平均延误为 2.20 ~ 117.32 s, 降低了 5.64% ~

85.73%. 其中, 主、次干路交通量组合为 (1 900, 200) veh/h 时延误降低最小, 主、次干路交通量组合为 (900, 100) veh/h 时延误降低最大. 当主干路或次干路交通量不断增加时, 车辆延迟将急剧增加, 并且交叉口变的非常拥挤. 图 4 中仅红色部分 NUUT 对 DLT 的改善效果明显, 其余部分远超相同交通量组合下 DLT 的车辆延误, 延误增长了 5.69% ~ 495.84%. 当主干路交通量小于 1 800 veh/h, 且不能改善 DLT 时, 对 U 型转弯处进行信号控制. 在次干路为 700 veh/h 和 900 veh/h 车辆延误将降低到 DLT 以下. 次干路交通量为 1 100 veh/h 或主干路交通量超过 1 800 veh/h, 信号控制不再能够解决此时车辆拥堵的问题.

4.1.2 停车次数对比

不同交通情况下 NUUT 较 DLT 的路网平均停车次数降低的百分率 S 如式(12), 仿真对比结果如图 5.

$$S = - \left(\frac{s_{\text{NUUT}} - s_{\text{DLT}}}{s_{\text{DLT}}} \right) \times 100\% \quad (12)$$

其中, s_{NUUT} 与 s_{DLT} 分别为 NUUT 和 DLT 的停车次数.

图5 NUUT 与 DLT 路网平均停车次数降低率

Fig. 5 Average reduction rate of number of stops on NUUT and DLT network

与路网平均延误类似, 随着主干路交通量的增加, 适用的次干路交通量逐渐降低, NUUT 适用的次干路交通量最高约达 800 veh/h.

由仿真结果可知, 在适用的交通量范围内路网的平均停车次数为 0.03 ~ 2.24 次, 降幅 6.17% ~ 94.22%. 延误降低率的最小值和最大值对应的主、次干路交通量组合分别为 (1 600, 500) veh/h 和 (800, 100) veh/h.

4.1.3 排队长度对比

不同交通情况下 NUUT 较 DLT 的路网平均排队长度降低的百分率 L_q 如式(13), 仿真对比结果如

图 6.

$$L_q = - \left(\frac{l_{q, \text{NUUT}} - l_{q, \text{DLT}}}{s_{q, \text{DLT}}} \right) \times 100\% \quad (13)$$

其中, $l_{q, \text{NUUT}}$ 与 $l_{q, \text{DLT}}$ 分别为 NUUT 和 DLT 的平均排队长度.

图 6 NUUT 与 DLT 路网平均排队长度降低率
Fig. 6 Average reduction rate of queue length
on NUUT and DLT network

分析排队长度发现, NUUT 所适用的交通量范围要较路网平均延误和平均停车次数两个指标更广. 在给定的交通组成中, 仅红色部分 NUUT 能够改善 DLT 的运行性能. 在适用的交通量范围排队长度降低了 6.44% ~ 95.38%. 主干路交通量为 1 400 veh/h, 次干路交通量为 600 veh/h 时延误降低最小, 主干路交通量为 900 veh/h, 次干路交通量为 100 veh/h 时延误降低最大.

综合上述 3 种指标^[17], NUUT 比 DLT 具有更好的改善交叉路口运行性能的潜力. NUUT 适用的主干路交通量所对应的最大次干路交通量 (以主干路双向 6 车道, 次干路双向 4 车道为例), 如表 1.

表 1 NUUT 适用的交通量

Table 1 Traffic volume applicable to NUUT veh/h

主干路 交通量	最大次干路 交通量	主干路 交通量	最大次干路 交通量
800	700	1 500	500
900	800	1 600	500
1 000	800	1 700	400
1 100	700	1 800	400
1 200	600	1 900	300
1 300	600	2 000	200
1 400	600		

4.2 NUUT 与 U 型转弯交叉口不同车辆组成下运行特点比较

通过分析 NUUT 与 DLT 的运行效率指标, 得到 NUUT 适用的交通量组合, 并在此基础上进一步研究大型车比例变化情况下 NUUT 与 U 型转弯交叉口 (UT 和 OLT) 之间的差异. NUUT 的几何结构如图 1, U 型转弯交叉口的小客车掉头位置与 NUUT 一致.

通过对比 NUUT 与 DLT 的路网平均延误、车辆平均停车次数和路网车辆的平均排队长度, 发现它们的变化规律类似. 其中, 路网的平均延误包含平均行程时间延误、平均停车延误和平均排队延误等, 在一定程度上反应了车辆的总体运行特点. 因此, 以下仅针对路网平均延误进行分析.

4.2.1 NUUT 与 UT 不同车辆组成下运行特点比较

对 NUUT 与 UT 在不同车辆组成 (大型车比例分别占 2%、4%、6%、8% 和 10%) 条件下进行仿真对比, 结果发现, 在给定的交通量组成下, NUUT 能明显降低路网延误, 而在不同交通组成情况下, NUUT 与 UT 的路网平均延误规律类似. 限于篇幅, 本研究仅给出在大型车比例为 8% 时的图示, 见图 7, 其他车辆组成条件下的路网延误降低率图示请扫描论文末页右下角二维码见图 S1.

图 7 NUUT 与 UT 路网平均延误降低率
(大型车比例 8%)

Fig. 7 Average delay reduction rate on NUUT and UT network (the ratio of heavy vehicles is 8%)

分析大型车比例变化的 5 种情形下延误指标. 在相同大型车比例下, 随着主干路和次干路交通量的增加, NUUT 路网的平均延误始终小于 UT 的. 路网延误的降低率增到最大值后增幅变缓.

在主干路交通量增加到一定值时, 路网延误降低率呈大范围高值. 路网平均延误降低率达到 80% 以上时, 随着大型车比例增大, 所适用的主干路交通量范围变小. NUUT 比 UT 的路网延误降低了

1.45%~98.00%。主次干路交通量组合为(800, 300) veh/h 且大型车比例为2%时延误降低率最小;主次干路交通量组合为(1 700, 300) veh/h 且大型车比例为8%时延误降低率最大。

4.2.2 NUUT 与 OLUT 不同车辆组成下的运行特点比较

当道路上掉头车辆较多时,许多道路会拓宽出1条专用掉头车道。通过仿真得到 NUUT 较 OLUT 的路网平均延误降低率,同样仅给出大型车比例为8%时的图示,如图8,其他车辆组成情况下 NUUT 和 OLUT 路网的平均延误降低率图示请扫描论文末页右下角二维码见图 S2。

图8 NUUT 比 OLUT 路网的平均延误降低率
(大型车比例8%)

Fig. 8 Average delay reduction rate on NUUT and OLUT network (the ratio of heavy vehicles is 8%)

同 NUUT 与 UT 的运行效率对比类似,除大型车比例为2%时的个别交通量组成,NUUT 路网的平均延误总是低于 OLUT 的。路网延误的降低率逐渐增加,达到最大值时,路网延误降低率开始减少。

对比 NUUT 与 OLUT,二者的路网延误降低率范围为0.30%~97.97%。主次干路交通量组合为(1 000, 700) veh/h,且大型车比例为2%时延误降低率最小;主次干路交通量组合为(1 800, 200) veh/h,且大型车比例为8%时延误降低率最大。

4.2.3 NUUT 与 UT 对比最佳运行效率组合

以 NUUT 与 DLT 运行特点对比下的最佳交通量为基础,进一步对比在不同大型车比例下 NUUT 的运行效率做。结果发现,不同大型车比例下所适用的次干路交通量相近。取其均值并对运行效率最佳时的交通量按照式(14)进行多项式线性拟合,结果如图9。

$$g(x) = -0.5272x + 1196 \quad (14)$$

其中, x 为主干路交通量, $x \geq 800$ veh/h; $g(x)$ 为 NUUT 与 U 型交叉口对比下最佳次干路交通量。

图9 运行效率最佳交通量

Fig. 9 Corresponding traffic volume when operating efficiency is optimal

式(14)中自变量系数的95%置信区间为(-0.6148, -0.4395),截距的95%置信区间为(1 069, 1 323),二者在统计学上都显著,且拟合度 $R_2 = 0.9409$,说明该方程能解释95%的变异,拟合度较好。

NUUT 交通量组合位于 $g(x)$ 下方时呈最佳运行效率。最佳交通量组合的变化规律为:随主干路交通量的增加,次干路交通量逐渐降低。当位交通量组合位于 $g(x)$ 上方时,NUUT 将不再适用。

以上分析表明,NUUT 与 U 型交叉口的对比所适用的最大交通量呈线性分布,随着主干路交通量的增加,次干路交通量渐降。同时,NUUT 设计能有效提高不同交通量、不同大型车比例情况下的路网运行效率。

5 实例验证

对中国西安市西部大道与博士路交叉口进行调查,交叉口东西方向为双向8车道,南段为双向4车道,北段进口道为3车道,出口道为2车道。小车转弯速度为(12, 42) km/h, 大车转弯速度为(11, 37) km/h。交叉口交通量及信号配时如表2和表3。

表2 交叉口交通量

Table 2 Traffic volume of crossing							veh/h	
方向	东		西		南		北	
	小	大	小	大	小	大	小	大
左转	236	20	430	32	96	2	298	16
直行	522	56	574	60	590	68	444	12
右转	454	32	140	0	50	0	338	22

表 3 交叉口信号配时 (周期 $T=141$ s)
Table 3 Signal timing at intersections ($T=141$ s) s

方向	绿灯	黄灯	红灯
南直左	42	3	55
北直左	38	2	55
东西左转	35	3	55
东西左转	55	3	55

基于采集到的基本参数, 分别建立 DLT、UT、OLUT 和 NUUT 的仿真模型, 并对比 4 种交叉口的路网平均时间. 利用 SYCHRO 对 U 型转弯重新配时, 得到周期为 56 s, 中央分隔带开口位置距交叉口 210 m. 为保证获取的样本数量为大子样, 改变随机种子, 对每个模型仿真 50 次. 取置信水平为 95%, 对交叉口母体平均值 μ_{1m} 和 μ_2 进行假设检验分析, 结果如表 4.

表 4 样本延误统计分析表
Table 4 Statistical analysis of sample delays

交叉口类型	中央分隔带宽度/m	样本平均值/s	样本标准差/s	假设检验
DLT	—	127.45	14.35	
UT	14.0	77.85	81.62	原假设 $H_0: \mu_{1m} \leq \mu_2$
	4.0	43.86	11.49	
OLUT	14.0	59.89	22.18	备选假设 $H_1: \mu_{1m} > \mu_2$
	4.0	66.68	44.76	
NUUT	—	40.02	7.71	

交叉口统计量 $U = \frac{\bar{X}_{1m} - \bar{X}_2}{\sqrt{S_{1m}^2/n_{1m} + S_2^2/n_2}}$, 服从标准正态分布 $N(0, 1)$. 在显著性水平 $\alpha = 5\%$ 的条件下, 有

$$P\left\{\bar{X}_{1m} - \bar{X}_2 \geq u_\alpha \sqrt{S_{1m}^2/n_{1m} + S_2^2/n_2}\right\} = \alpha \quad (15)$$

其中, $\bar{X}_{1m}$ 为常规交叉口延误的样本平均值, $m = 1, 2, 3$, 分别表示 DLT、UT 和 OLUT; $\bar{X}_2$ 为 NUUT 的延误平均值; u_α 为标准正态分布的上侧分位数; S_{1m} 为常规交叉口延误的样本标准差; S_2 为 NUUT 的延误的样本标准差; n_{1m} 为常规交叉口的样本数量; n_2 为 NUUT 的样本数量; $n_{1m} = n_2 = 50$.

对延误的样本平均值进行大子样条件下的 U 检验, 得到样本平均值满足

$$\bar{X}_{1m} - \bar{X}_2 \geq u_\alpha \sqrt{S_{1m}^2/n_{1m} + S_2^2/n_2} \quad (16)$$

此时, U 检验结果落在拒绝域内, 即拒绝 H_0 , 接受 H_1 . 因此, 当 $\alpha = 5\%$ 时, NUUT 的平均延误要小于 DLT、UT 和 OLUT, 表明 NUUT 设计的运行效率要更优.

实际交叉路口的中央分隔带为 14.0 m 通过改建成 NUUT 的形式使道路两侧分别缩减 1.5 m. 对于 UT 和 OLUT 保持道路建筑红线不变, 中央分隔带宽度分别取 4.0 m 和 14.0 m 时, 比 NUUT 的道路用地更大且运行效率更低.

结 论

1) 为降低常规 U 型交叉口对中央分隔带宽度的要求, 提出一种新型非常规 U 型交叉口 (NUUT), 并设置相关几何参数. NUUT 解决了大小车转弯半径的冲突、车道浪费以及排队长度过长等问题. 同时, NUUT 不必设计较宽的中央分隔带, 减少空间浪费.

2) 利用 Vissim 软件进行仿真, 通过比较 NUUT 与 DLT 的运行指标, 得出 NUUT 适用的交通量组合. NUUT 的设计使路网平均延误降低了 5.64% ~ 85.73%, 停车次数降低了 6.17% ~ 94.22%, 排队长度降低了 6.44% ~ 95.38%, 有效提高了路网的运行效率.

3) 在适用的交通量范围及不同的车辆组成条件下, 比较 NUUT、UT 和 OLUT 的运行特点, 发现 NUUT 能够更好的改善道路运行效率, 当道路大型车比例增加时, 运行效率改善效果更好.

4) 将 NUUT 应用到实际交叉口, 与 DLT、UT 和 OLUT 交叉口设计相比, NUUT 有效减少了交叉口延误和建筑用地.

但是, 本研究仅将交叉口置于一个孤立的点, 下一步可基于周边路网来更精确地评估 NUUT 的运行效率.

基金项目: 河北省科学技术厅民生科技专项基金资助项目 (19275601D)

作者简介: 潘兵宏 (1974—), 长安大学副教授、博士. 研究方向: 互通式立交工程与道路安全. E-mail: kc20@GL.chd.edu.cn

引 文: 潘兵宏, 单慧敏, 任 卉, 等. 新型非常规 U 型转弯交叉口的运行效率研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(3): 305-313.

参考文献 / References:

[1] 彭 飞. 城市道路平面交叉口信号配时优化与仿真研

- 究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- PENG Fei. Optimization and simulation research of signal [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [2] SHAIK R A, GRAHAM J R. Efficiency of dual left-turn lane intersections in Charlotte: a study using TRAF-NETSIM [J]. ITE Journal, 1996, 66(4): 26-33.
- [3] 张野,袁振洲. 信号交叉口左转专用可变车道设置研究[J]. 交通信息与安全, 2014, 32(4): 26-30.
- ZHANG Ye, YUAN Zhenzhou. Design of the left-turn variable lane at signalized intersection [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2014, 32(4): 26-30. (in Chinese)
- [4] KOEPKE F J, LEVINSON F J. Access management guidelines for activity centers: NCHRP report 348 [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1992.
- [5] MAJI A, MISHRA S, JHA M K. Diverging diamond interchange analysis: planning tool [J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(12): 1201-1210.
- [6] CHLEWICKI G. New interchange and intersection designs: the synchronized split-phasing intersection and the diverging diamond interchange [C]// The 2nd Urban Street Symposium. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academies, 2003: 2-11.
- [7] MAJI A, BHATTACHARYA P, MAURYA KUMAR A. Developing unconventional intersection configuration: planning tool [C]// The 11th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies. [S. l.]: Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2015: 2543-2557.
- [8] Turner-Fairbank Highway Research Center. Alternative intersections/interchanges: informational report (AIIR) [R]. Washington D C: U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2009: 73-110.
- [9] CJJ 37—2012 城市道路工程设计规范 [S]. 2016 版. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部.
- CJJ 37—2012 Code for design of urban road engineering [S]. 2016 ed. Beijing: Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China.
- [10] XIANG Yun, LI Zhibin, WANG Wei, et al. Evaluating the operational features of an unconventional dual-bay U-turn design for intersections [J]. PLoS ONE, 2016, 11(7): e0158914.
- [11] 李赞勇,冯焘. 分离式立交与平面交叉口合理间距研究[J]. 中外公路, 2018, 38(3): 326-328.
- LI Zanyong, FENG Tao. Study on reasonable spacing of separated interchange and plane intersection [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(3): 326-328. (in Chinese)
- [12] 张卫华,陈靖生,董瑞娟. 道路平面交叉口次路远引几何参数设置及通行效率研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(10): 121-128.
- ZHANG Weihua, CHEN Jingsheng, DONG Ruijuan. Study on geometrical parameter setup and efficiency of secondary road in intersection [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(10): 121-128. (in Chinese)
- [13] 闫志蕊. 远引左转掉头中央分隔带开口间距的研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- YAN Zhirui. Research cited left U-turn median strip away the opening pitch [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [14] SHAO Yang, HAN Xueyan, WU Hua, et al. Evaluating signalization and channelization selections at intersections based on an entropy method [J]. Entropy, 2019, 21(8): 808.
- [15] 王晨,夏井新,陆振波,等. 基于微观仿真与极值理论的城市交叉口安全评价方法[J]. 中国公路学报, 2018, 31(4): 288-295, 303.
- WANG Chen, XIA Jingxin, LU Zhenbo, et al. Safety evaluation method based on traffic simulation and extreme value theory [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4): 288-295, 303. (in Chinese)
- [16] 孙剑. 微观交通仿真分析指南[M]. 上海: 同济大学出版社, 2014.
- SUN Jian. Guideline for microscopic traffic simulation analysis [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2014. (in Chinese)
- [17] SHAO Yang, HAN Xueyan, WU Hua, et al. Evaluating the sustainable traffic flow operational features of an exclusive spur dike U-turn lane design [J]. PLoS ONE, 2019, 14(4): e0214759.

【中文责编: 英子; 英文责编: 淡紫】

补充材料

<http://journal.szu.edu.cn>