

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.074

# 高速公路半幅单车道封闭作业区上游过渡区长度研究

雷进, 于春江, 赵福利

(安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088)

**摘要:** 鉴于芜合高速公路林头至陇西改扩建工程作业区施工时出现交通拥堵的现状, 该文以半幅单车道封闭作业区为研究对象, 结合现场实测数据, 对 VISSIM 仿真试验进行参数校准, 并以平均延误  $D$ 、行程时间  $T$ 、停车次数  $S$  以及平均速度  $V$  为指标, 研究了不同交通量和不同上游过渡区长度对作业区交通运行效率的影响。根据 VISSIM 仿真结果可知: 当交通量为 1 500~3 000 pcu/h 时, 随着交通量的增加, 道路的整体通行能力逐渐降低; 当交通量超过 3 000 pcu/h 时, 车辆的平均延误、停车次数以及行程时间增长较缓, 道路的交通量趋于饱和状态。当交通量在 1 800 pcu/h 以下时, 随着上游过渡区长度的增加, 车辆的延误平均值、停车次数和行程时间呈缓慢上升趋势; 当交通量超过 1 800 pcu/h 时, 随着上游过渡区长度的增加, 道路的通行能力先升高后逐渐降低。根据仿真结果分析得出, 对于该施工区域, 当上游过渡区长度采用 90 m 时, 能有效缓解交通拥堵现象, 提高道路通行能力。

**关键词:** 道路改扩建; VISSIM 仿真; 上游过渡区长度; 半幅封闭

## 1 前言

在高速公路改扩建阶段, 为保证施工期间现有道路的通行基本不受干扰, 改扩建工程常以单侧或双侧分阶段拼接的方式进行。然而, 在具体施工过程中, 部分路段会由于大型设备调度、作业高度增大等施工组织原因, 可能会采取短时间限制硬路肩停车或半幅未全封闭等措施, 来保证交通不会出现中断。对于半幅未全封闭又分为内侧车道封闭和外侧车道封闭两种, 其中内侧车道封闭形式适用于中心线偏移临时双向通

车路段等, 而外侧车道封闭形式则适用于外侧路基拼宽等情况。

当采用半幅车道封闭时, 半幅车道封闭施工段长度(图 1)一般分为警告区、上游过渡区、缓冲区、工作区、下游过渡区、终止区。其中上游过渡区是为防止车流在改变车道时发生突变, 使车流的变化一缓和平缓而设置, 由于半幅车道封闭后, 路段通行能力的降低必定会使交通流运行受到影响, 如造成车辆拥堵或交通事故等, 因此需要确定合理施工区上游过渡区长度, 以对车辆由全断面至半幅断面的平稳过渡进行引导, 避免车辆出现不合理的合流行为, 影响路段通行效率。

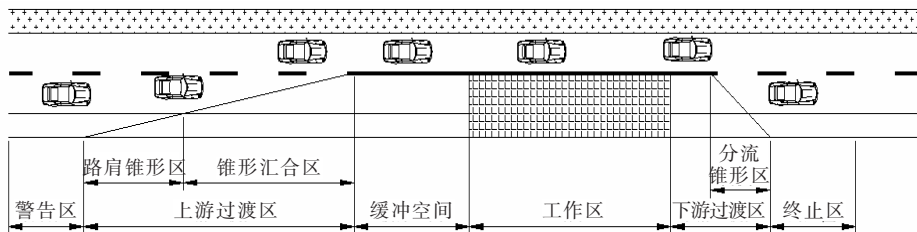


图 1 半幅未全封闭施工作业区长度分段

国外规范或部分学者早期对上游过渡区长度做过一定的规定和研究。Stephanie 等指出, 应该增加夜间工作区上游过渡区长度, 以减少潜在的碰撞事故; 新

加坡陆路运输管理局(LTA)则不建议使用太长的过渡区长度, 因为过渡区长度过长往往会导致缓慢驾驶从而增加交通延误; 美国统一交通管制设备手册

收稿日期: 2020-03-09

作者简介: 雷进, 男, 硕士, 高级工程师。E-mail: 511540135@qq.com

(MUTCD)规定,上游过渡区长度与车道变换所需宽度和路段车速有关,其长度  $L_s$  可按式(1)计算;由于巴基斯坦在作业区长度取值主要参考美国 MUTCD 规范,巴基斯坦学者 Khan 将主观舒适度划分为 5 级,对 108 名驾驶员展开了网络调查,研究当美国 MUTCD 推荐的作业区上游过渡区长度值减少 10%~40%(间隔 10%)时参与者的主观舒适度,并以上游过渡区长度减少 25%作为巴基斯坦的推荐值,然而其研究并没有考虑作业区车辆运行的安全性。

$$L_s = \begin{cases} \frac{S^2 W}{60} & (S \leq 40 \text{ mph}) \\ SW & (S > 45 \text{ mph}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S$  为养护维修工作区路段车速(mph); $W$  为所关闭车道的宽度(m)。

中国相关规范在计算上游过渡区长度时也借鉴和使用美国 MUTCD 的计算公式。而中国也有不少学者对施工作业区上游过渡区长度进行了研究。Jinxian Weng 认为,当作业区上游过渡区长度过短将不利于行车安全,过长则会增加交通延误,并利用避碰分析和理论计算的方法,在不同交通条件和道路几何形状下,分别计算了车道变换和紧急停车操纵的纵向距离,并选择纵向车道变换距离与紧急停止距离之间的较高值被视为期望上游过渡区长度;MH Ding 等借助 VISSIM 仿真技术,选取最小安全距离  $MSDE$  和行程时间分别作为安全性和流动性的衡量指标,分别回归出上游过渡区长度与上述两个指标的线性拟合关系式,并指出当上游过渡区长度越长,安全性越高,而流动性几乎不变;彭余华等同样基于 VISSIM 仿真试验,依托实际工程,在高速公路作业区限速为 40 km/h 并采用二次合流的半幅封闭形式时,以固定交通量输入下单次仿真内的车辆通过量为指标,研究了上游过渡区长度与作业区车辆通过量之间的变化关系,并得出结论:当上游过渡区长度取 80 m 时,作业区车辆通过量即通行能力最大;高雪钰则是取 VISSIM 仿真试验中上游过渡区和警告区末端的总冲突数为指标,在统一交通量输入值下,仿真出不同限速值下对应冲突数最小的上游过渡区长度,最后再通过改变交通量,选取排队长度为指标对仿真所得上游过渡区长度进行验证和优化。由此可见,中国学者处于安全和运行效率考虑,大多采用 VISSIM 仿真并结合实际工程的方法对作业区半幅未全封闭的上游过渡区长度进行了研究,其中最主要的差别在于评价指标的选取。

该文主要结合上述中国学者研究成果,结合实测

数据,并借助 VISSIM 仿真技术,以平均延误  $D$ 、停车次数  $S$ 、行程时间  $T$  和平均速度  $V$  为指标,依托安徽芜合高速公路林头至陇西段改建工程,在工程采取半幅单车道封闭作业区形式时,对单一限速条件,不同交通量和不同上游过渡区影响下作业区的通行效率进行研究。并结合工程交通现状,推荐出工程作业区上游过渡区的合理长度。

## 2 建模过程

### 2.1 工程现状

芜合高速公路现为双向四车道高速公路,设计速度为 120 km/h,但近些年由于中国经济快速发展,客、货运量及汽车保有量逐年大幅增长,部分路段(如林头至陇西段)现有车道数已难以满足该区域交通量增长的需要,因此需要对芜合高速公路林头至陇西段进行扩建处理,将原有的四车道扩建为双向八车道。然而,在实际扩建过程中,部分路段由于中分带需要施工,因而采用了半幅单车道封闭的作业区形式,使原有路段车流在运行至作业区时需要逐渐由双车道过渡为单车道,此种作业区形式必然会对交通流造成影响。通过对已封闭的现场进行实地调查,得到在进入作业区警告区前的高峰交通量为 2 234 pcu/h,在作业区段的限速为 60 km/h,现场采用的上游过渡区长度为 70 m,该交通现状下车流常常出现拥堵现象,大大降低了作业区的通行效率。结合前述已有研究,发现通过调整上游过渡区长度有利于改善作业区交通拥堵情况。

理想情况下,应在固定交通量下分别变换上游过渡区的长度,搜集实测数据,对改善前、后的数据进行比较分析,然而这在实际情况中很难做到,且需要花费大量的时间和成本。VISSIM 仿真技术经过 40 余年的发展,在交通流领域的应用和研究中已有不少成果,其在交通流模拟中的准确性也已得到认可,且利用 VISSIM 仿真技术可以节省大量的时间和成本。因此该文将借助 VISSIM 仿真软件对该工程半幅单车道封闭作业区的上游过渡段的合理长度进行研究。

### 2.2 指标计算

在进行 VISSIM 仿真试验后,拟采用平均延误  $D$ 、停车次数  $S$ 、行程时间  $T$  和平均速度  $V$  4 个指标来对作业区的上游过渡区长度进行研究。

平均延误  $D$  为每辆车实际行程时间与期望行程时间差值之和的平均值,包括停车延误和行程延误,平

均延误的计算公式如式(2)所示:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} (d_i^s + d_i^t)}{Q_i} \quad (2)$$

式中:  $Q_i$  为通过检测路段的车辆数(pcu/h);  $d_i^s$ 、 $d_i^t$  分别为每次仿真试验中检测路段每辆车的停车延误、行程延误(s/pcu)。

停车次数  $S$  为通过检测路段的所有车辆停车次数的平均值,其计算公式如式(3)所示:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} s_i}{Q_i} \quad (3)$$

式中:  $s_i$  为检测路段内测得的每辆车的停车次数(次/pcu)。

行程时间  $T$  为每辆车通过检测路段所需时间的平均值,按式(4)计算:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} t_i}{Q_i} \quad (4)$$

式中:  $t_i$  为每辆车通过检测路段所需时间(s/pcu)。

平均速度  $V$  为所有车辆通过检测路段的平均速度,其计算如式(5)所示:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{Q_i} \frac{L_c}{t_i}}{Q_i} \quad (5)$$

式中:  $L_c$  为检测路段长度(m)。

### 3 VISSIM 仿真试验

#### 3.1 模型校准

由于 VISSIM 是通过使用各种独立的参数来对交通运行的实际情况以及交通流表现出的特征和驾驶员的驾驶行为进行的仿真模拟,因此,各种参数的取值将会对仿真结果的可信度产生很大影响。该文建立半幅单车道封闭作业区的 VISSIM 仿真模型如图 2 所示。

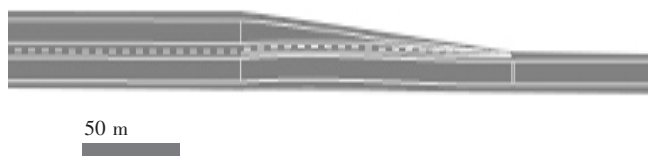


图 2 半幅单车道封闭作业区的 VISSIM 仿真模型

及几何参数来对模型进行校准,以提高 VISSIM 仿真试验的精确度。该文通过将实测的小客车与货车的比例、小客车与货车的速度分布、作业区上游过渡区长度输入 VISSIM 中进行仿真模拟,并使用平均绝对相对误差  $MAPE$  来评价其仿真效果的准确性。 $MAPE$  值越大,其仿真的可信度越低;反之仿真可信度越高。 $MAPE$  的计算公式如下:

$$MAPE = \left| \frac{C_v^i - C_f^i}{C_f^i} \right| \quad (7)$$

式中:  $C_v^i$  为仿真模拟得出的交通量(pcu/h);  $C_f^i$  为调查实测得到的交通量(pcu/h)。

通过交通仿真得到表 1 结果,  $MAPE = 8.1\%$ , 在工程可接受范围。

表 1 Vissm 仿真校准结果

实测交通量/ (pcu · h <sup>-1</sup> )	仿真交通量/ (pcu · h <sup>-1</sup> )	MAPE/ %
2 234	2 052	8.1

#### 3.2 仿真试验

该文关于 VISSIM 仿真试验的说明如下:① 几何参数:在对模型参数进行校准使其更符合实际状况后,该文结合相关规范以及工程实际状况,将上游过渡区长度  $L$  分成(30、60、90、120、150 m)5 组进行试验;② 交通量:为研究不同交通量对作业区通行效率的影响,该文以双车道基本通行能力为基准,按一定的  $V/C$  比将交通量输入值分为 7 组进行试验,分组情况如表 2 所示;③ 交通组成:此次试验交通车型主要为小客车和货车两种,车型比例为 7 : 3。④ 速度分布:根据现场实测数据,对仿真试验的速度分布进行校准,在速度累积分布形式不变的情况下,不同车型的速度分布(最低速度,期望速度,单位:km/h)为:小客车(60,85),货车(60,75);⑤ 检测路段:为保证仿真试验过程数据检测的可比性,此次仿真试验统一将上游过渡区起点上游 400 m 作为检测路段起点,向下游延伸 900 m 作为作业区检测路段,对数据进行采集。

表 2 不同仿真交通量输入值

V/C	交通量/(pcu · h <sup>-1</sup> )	V/C	交通量/(pcu · h <sup>-1</sup> )
0.35	1 540	0.75	3 300
0.45	1 980	0.85	3 740
0.55	2 420	0.95	4 180
0.65	2 860		

在调查期间通过采集现场的交通量、行车速度以

4 数据采集及分析

通过将不同的上游过渡区长度与不同的交通量组合进行仿真试验,获得 35 组数据。提取结果中的平均延误  $D$ 、停车次数  $S$ 、行程时间  $T$  和平均速度  $V$  4 个指标来对作业区上游过渡区长度进行分析。其中,固定上游过渡区长度,上述指标与交通量关系的仿真结果如图 3~6 所示。

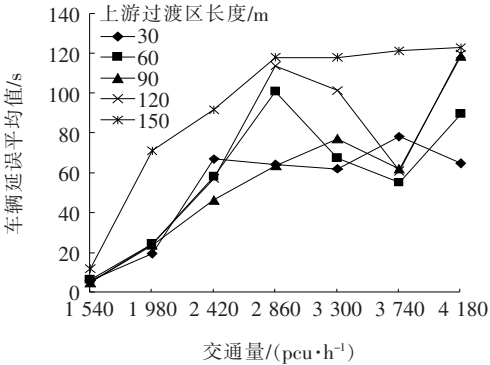


图 3 不同上游过渡区长度下,车辆延误平均值与交通量关系图

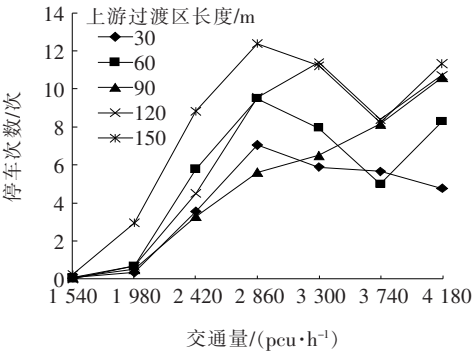


图 4 不同上游过渡区长度下,停车次数与交通量关系图

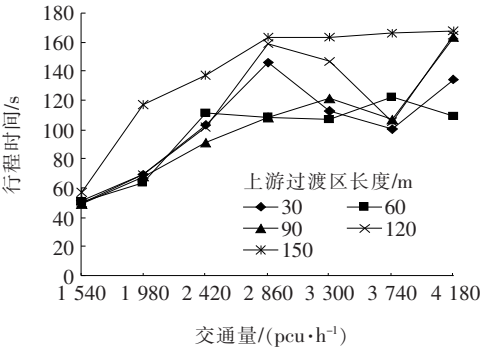


图 5 不同上游过渡区长度下,行程时间与交通量关系图

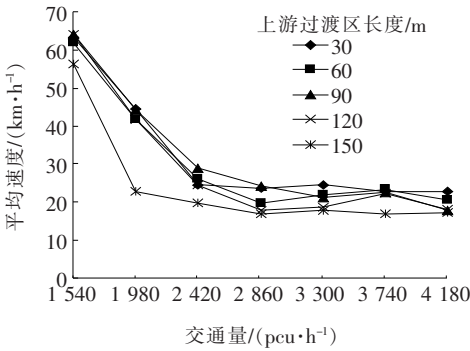


图 6 不同上游过渡区长度下,平均速度与交通量关系图

从图 3~6 可看出:

- (1) 随着交通量的不断增加,车辆延误平均值  $D$ 、行程时间  $T$  和停车次数  $S$  均不断增加,而平均速度  $V$  则不断降低,说明交通量的增加会降低作业区的通行效率。
- (2) 车辆平均延误值  $D$ 、停车次数  $S$  以及平均速度  $V$  变化趋势所对应的交通量区间一致,交通量从 1 500 pcu/h 增至 3 000 pcu/h 时,车辆延误平均值  $D$ 、停车次数  $S$  均增长较快,平均速度  $V$  降低相对较大;而当交通量从 3 000 pcu/h 增长至 4 400 pcu/h 时,三者变化相对较缓,说明交通量增长超过一定值时,对车辆延误  $D$ 、停车次数  $S$  及平均速度  $V$  影响会降低。
- (3) 随着交通量不断增加,对应的行驶相同距离所需的时间也不断上升。对于低交通量阶段,其行程时间  $T$  增长得较为缓慢。当交通量增大到 4 000 pcu/h 以上时,行程时间  $T$  急剧增长。说明高交通量下改扩建路段对车辆的正常行驶影响较大。

固定交通量,单独研究上游过渡区长度对交通运行的影响,结果如图 7~10 所示。

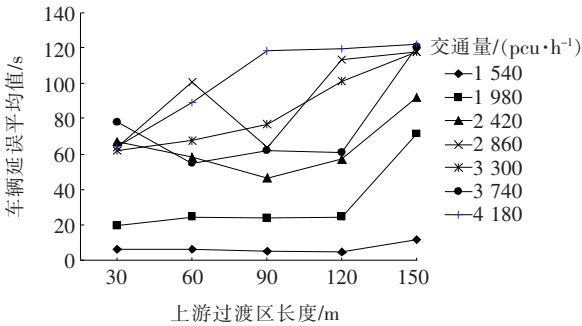


图 7 不同交通量下,车辆延误平均值与上游过渡区长度关系图

由图 7~10 可知:

- (1)行程时间  $T$ 、停车次数  $S$  以及平均延误  $D$  随着上游过渡区长度的增加大体呈现相同的变化趋势,



因此可将三者一并进行分析。当交通量为 1 800 pcu/h 以下时,  $T$ 、 $S$ 、 $D$  随着过渡区长度的增加呈现先缓慢后急剧增加的趋势, 尤其当上游过渡区长度大于 120 m 时, 行程时间增加较快; 而当交通量为 1 800 ~ 3 300 pcu/h 时,  $T$ 、 $S$ 、 $D$  随着上游过渡区长度的增加先减少后增加, 且根据仿真结果, 普遍在过渡区长度为 90 m 时达到最小值; 当交通量大于 3 300 pcu/h 时,  $T$ 、 $S$ 、 $D$  随着上游过渡区长度的增加而呈现先快后慢的增加趋势。

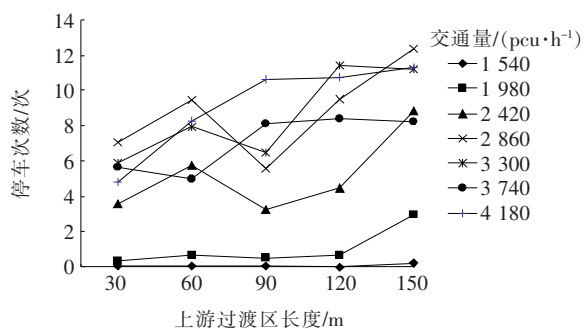


图 8 不同交通量下, 停车次数与上游过渡区长度关系图

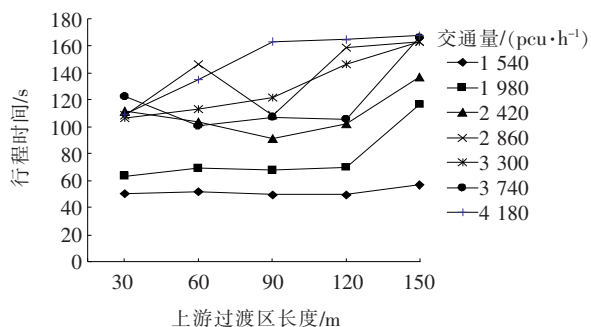


图 9 不同交通量下, 行程时间与上游过渡区长度关系图

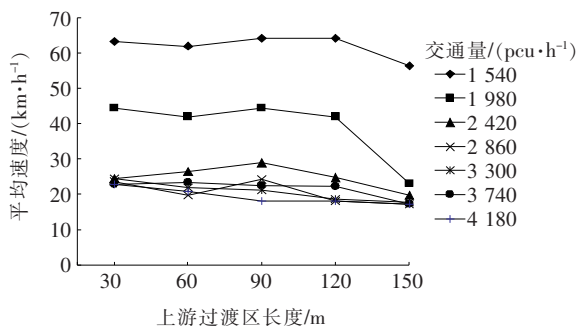


图 10 不同交通量下, 平均速度与上游过渡区长度关系图

(2) 对于平均速度  $V$ , 当交通量小于 1 800 pcu/h 时, 平均速度  $V$  随着过渡区长度的增加呈现先慢后快的降低趋势, 并在过渡区长度大于 120 m 后迅速降低; 当交通量为 1 800 ~ 2 800 pcu/h 时, 平均速度  $V$  随

着过渡区长度增加先升高后降低, 并在上游过渡区长度为 90 m 时达到最大值; 当交通量大于 2 800 pcu/h 时, 平均速度  $V$  基本不受上游过渡区长度的影响。

(3) 由前述分析可得, 当过渡区长度增大至一定值时, 尤其是大于 90 m 后, 车辆由双车道渐变至单车道所需的时间过长, 对交通流运行的干扰反而增大。

根据前期对施工现场实地调查, 得到交通量为 2 234 pcu/h, 上游过渡区长度为 70 m。结合上述对仿真试验结果的分析, 当交通量为 2 200 pcu/h, 上游过渡区长度采用 90 m 时, 其综合评价效果最优, 为验证其取值能否对交通状况有所改善, 现将施工现场实际状况与提出的改进方案分别在 VISSIM 中进行仿真模拟。仿真结果如图 11 所示。

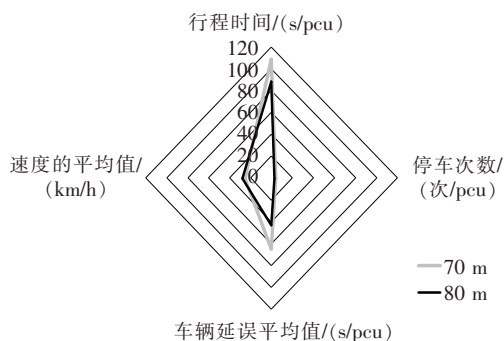


图 11 实际状况与改进方案对比图

由图 11 可以看出: 当把上游过渡区长度提升到 90 m 时, 行程时间和车辆平均延误值均有所下降, 车辆的平均速度有一定的提升。因此, 可以确定当上游过渡区长度为 90 m 时有利于缓解目前施工区的交通压力, 提高该路段的通行能力, 建议该施工区域的上游过渡区长度采用 90 m。

## 5 结论

通过对芜合高速公路改扩建施工现场数据的收集, 并使用实测数据对 VISSIM 仿真模型进行校准后, 将 5 种不同的上游过渡区长度与 7 组不同的交通量组合进行仿真模拟研究。得出以下结论:

(1) 交通量的大小对高速公路施工区域的通行能力有一定的影响, 通过模拟各种不同交通量下道路的通行能力状况, 得出随着交通量的增加, 通行能力逐渐降低。当交通量达到 3 000 pcu/h 时, 道路的拥堵状况较为严重。因此对于该施工区域建议合理安排不同的交通组织方式来控制其交通量, 以确保该路段的畅通。

(2) 当交通量低于 1 800 pcu/h 时,随着上游过渡区长度的增加,其通行能力会缓慢降低;而当交通量超过 1 800 pcu/h 时,随着上游过渡区长度的增加,其通行能力先呈现递增的趋势,然后缓慢降低。根据对仿真数据的分析得出,渐变段长度采用 90 m 时,道路的整体运行效率相对较优。

(3) 该文仅通过采用不同的交通量和不同的上游过渡区长度对施工区路段的通行状况进行了分析,实际上施工区域的通行能力还受到施工区限速的取值、限速区域长度的影响,在后续的研究中,应该综合考虑这些因素对道路通行状况的影响,以确定出一个合适的组合方案。

(4) 该文研究对象为高速公路施工区双车道向单车道过渡的情况,由于中国目前高速公路是单向三车道和四车道断面的情况,后续需要对施工区三车道或四车道向单车道断面过渡所需的上游过渡区长度进行研究,以使研究成果更为全面。

#### 参考文献:

- [1] JTG/T L11—2014 高速公路改扩建设计细则[S].
- [2] 于玲,葵丝雨,孙宝芸. 不同车道被占用时通行能力的影响因素分析[J]. 中外公路,2019(1).
- [3] Stephanie, P. G., Fosbroke, D. E., Marsh, S. M. Building Safer Highway Work Zones; Measures to Prevent Worker Injuries from Vehicle and Equipment. Washington, D. C. : US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control (NIOSH), 2001.
- [4] LTA. Code of Practice Traffic Control at Work Zone[S]. Singapore: Land Transport Authority, 2007.
- [5] Federal Highway Administration Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD) 2009[R]. Department of Transportation, Washington D. C. , 2009.
- [6] Khan, Riaz A. Driver's Comfort Level in Construction Zones with Reduced Transition Taper Length; Case Study for Pakistani Conditions[D]. University of Illinois at Urbana—Champaign, 2011.
- [7] JTG H30—2004 公路养护安全作业规程[S].
- [8] Weng J. Collision Avoidance Analysis for Transition Taper Length[J]. Transportation Planning & Technology, 2011, 34(8): 811—822.
- [9] Ding M H, Zhang C, Yan J, et al. Key Factors Analysis of Work Zone Safety and Mobility Based on Micro—Simulation[J]. Procedia — Social and Behavioral Sciences, 2013, 96: 582—590.
- [10] 彭余华, 王晓玉, 王玮, 等. 高速公路改扩建半幅封闭式交通组织方案参数设置方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016(6).
- [11] 高雪钰. 基于微观仿真的公路养护作业区安全研究[D]. 山东大学硕士学位论文, 2012.
- [12] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司. 芜湖至合肥国家高速公路安徽省林头至陇西段改扩建工程施工图设计说明书[Z], 2016.
- [13] PTV AG. PTV VISSIM 10 USER MANUAL[Z]. PTV AG: Karlsruhe, Germany, 2018.
- [14] Xiang Y, Li Z, Wang W, et al. Evaluating the Operational Features of an Unconventional Dual—Bay U—Turn Design for Intersections[J]. PLoS ONE, 2016, 11(7).
- [15] 张隼, 成卫. 城市涡轮式环形交叉口的设计及仿真研究[J]. 中外公路, 2018(5).
- [16] 杨文臣, 张轮, 王铮, 等. 基于黄金分割遗传算法的 VISSIM 仿真模型参数校正[J]. 华东交通大学学报, 2017(3).
- [17] 孙剑. 微观交通仿真分析指南[M]. 上海: 同济大学出版社, 2014.
- [18] 程学庆, 唐瑞雪, 朱海, 等. 基于 VISSIM 的高速公路交通事件仿真及数据处理[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010(4).
- [19] 邓建华. 道路交通系统仿真技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [20] 高建平, 朱贺贤, 张续光. 高速公路养护作业工作区车道保持行为安全性研究[J]. 中外公路, 2018(5).
- [21] 严亚丹, 陈志举, 王辉虎. 铺设钢板对道路交通运行的影响分析[J]. 中外公路, 2018(4).
- [22] 白浩晨, 柳银芳. 互通式立交出口匝道运行速度过渡段长度研究[J]. 中外公路, 2020(1).