

基于服务水平的高速公路改扩建施工区 限速方法研究

吴月磊,王 文,昌 颖,刘 凯,符传邦,吴育麒

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司,湖北 武汉 430010)

摘 要: 为克服高速公路改扩建施工区限速方法考虑因素单一、服务水平不全面的缺陷,提出了基于服务水平的高速公路改扩建施工区限速方法,该方法从服务水平的角度考虑效率性、安全性、舒适性选取车辆平均行程延误、平均车头间距、速度标准差作为评价指标,通过 VISSIM 仿真,以熵权-优劣解距离法建立了高速公路改扩建施工区限速评价模型,确定了高速公路改扩建施工区最优限速。以柳南高速为实例,计算结果表明:各饱和度 0.75、0.8、0.85、0.9 对应最优限速分别为 80、60、60、60 km/h,服务水平均高于其他限速方案。可见考虑服务水平的改扩建施工区限速方法结果更优,有利于提升高速公路改扩建施工区服务水平。

关键词: 高速公路;施工区限速;服务水平;VISSIM

中图分类号: U491.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0049-06

Research on Speed Limit Method of Expressway Reconstruction and Expansion Construction Area Based on Service Level

WU Yuelei, WANG Wen*, CHANG Ying, LIU Kai, FU Chuanbang, WU Yuqi

(China South Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to overcome the defects of the speed limit method in the construction area of expressway reconstruction and expansion, such as single consideration factors and incomplete service levels, the speed limit method in the construction area of expressway reconstruction and expansion based on the service level is proposed. From the perspective of service level, the efficiency, safety and comfort are considered, and the average vehicle travel delay, average headway and standard deviation of speed are selected as the evaluation indicators. Through VISSIM, the evaluation model of speed limit in construction area of expressway reconstruction and expansion is established by Entropy weight - Method of distance between superior and inferior solutions to determine the optimal speed limit in the construction area of expressway reconstruction and expansion. Taking Liunan Expressway as an example, the calculation results show that the optimal speed limits corresponding to each saturation (0.75, 0.8, 0.85 and 0.9) are 80, 60, 60, 60 km/h respectively. The level of service is better than that of other speed limit schemes. It can be seen that the speed limit method for the reconstruction and expansion construction area considering the service level has better result. And it is conducive to improving the service level of the construction area for the reconstruction and expansion of expressways.

Keywords: expressway; speed limit of construction area; service level; VISSIM

0 引 言

限速大小对高速公路改扩建施工区通行质量有较大影响^[1],限速较低时,施工区通行效率降低,造

成交通拥堵^[2];限速过高时,交通冲突增多,交通安全难以保障^[3]。合理的限速值选取对高速公路改扩建工程建设具有重要意义。

国内对施工区限速均有相关规范和标准作出规定,《公路养护作业安全规程》(JTG H30—2015)针对不同设计速度给出了相应限速值,《高速公路改扩建交通组织设计规范》(JTG/T 3392—2022)规定在高速公路改扩建期间,保通路段设计速度可采用 80、60 km/h 等。施工区作业形式多变、环境复杂,难以具有针对性选取限速。学者对于限速确定方法主要

收稿日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金,高速公路改扩建施工区交通冲突形成及时空演化机理(71771183)

作者简介: 吴月磊(1997—),男,工程硕士,助理工程师,从事道路设计工作。

通信作者: 王文(1981—),男,硕士,高级工程师,从事道路交通与桥梁工程设计工作。电子信箱: 65855734@qq.com

考虑交通安全因素,选取等效最小安全距离、交通冲突等交通安全指标^[4-7],通过仿真、数学模型手段对限速方案进行评价,将最优限速方案确定为限速值。部分学者考虑施工区通行效率因素,结合大型车影响^[8-10]和交通量^[11-13]进行限速方案评价。现有高速公路改扩建施工区限速研究方法多为单一考虑安全或者效率因素,未综合考虑服务水平质量。高速公路作为大型基础公共设施,本质属性是交通服务,服务水平表示交通流内的运行条件及其为驾驶人和乘客提供服务质量的一种综合服务质量量度,定性描述为排队长度、事故消散难度及行车舒适度,具体体现在效率性、安全性、舒适性3方面^[14]。

为了克服现有限速方法考虑因素单一、服务水平不全面的缺陷,本文从效率性、安全性、舒适性3方面因素出发,选取服务水平评价指标,提出基于服务水平的高速公路改扩建施工区限速方法,并以柳南高速为例进行实例分析,验证本文方法的可行性和有效性。

1 评价方法

本文通过 VISSIM 对不同饱和度(即交通量与通行能力的比值,以反映施工区交通压力大小)下的限速方案进行仿真^[15],获取服务水平评价指标数据,选取综合评价法对服务水平指标进行评价,将各饱和度方案下最高服务水平对应的限速值作为最优限速方案,具体仿真流程如图1所示。

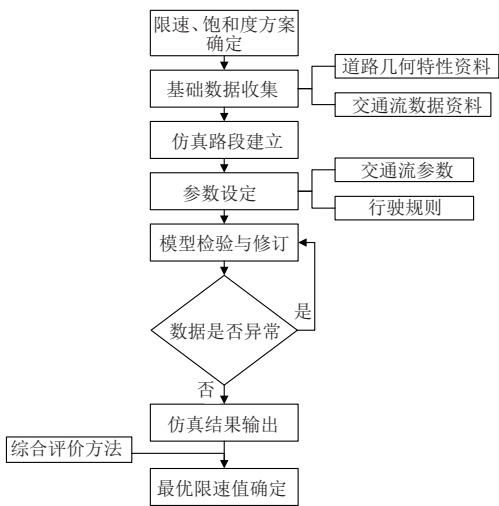


图1 VISSIM 仿真流程图

1.1 仿真实验设计

《高速公路改扩建交通组织设计规范》(JTG/T 3392—2022)规定高速公路改扩建期间保通路段设计速度可选用80、60 km/h,根据我国实际工程经验,仍存在许多施工区限速方案为40 km/h,因此结合我

国规范规定和实际情况,本文施工区限速方案分为80、60、40 km/h 三种。

《高速公路改扩建设计细则》(JTG/T L11—2014)规定:维持通车的施工路段,服务水平可较正常路段降低一级,高速公路设计服务水平一般不低于3级,因此施工区服务水平不应低于四级,施工区因车道数减少、施工作业活动等通行能力下降,服务水平往往处于较低状态,因此本文饱和度方案选取为3级服务水平下限到四级服务水平下限(0.75~0.9),级差为0.05,仿真实验架构如图2所示。

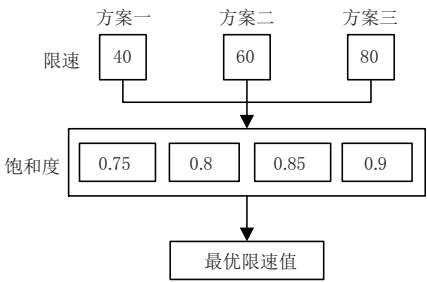


图2 施工区最优限速确定仿真实验

1.2 仿真模型建立

1.2.1 基础数据采集与分析

基础数据的采集主要包括道路几何特性资料和交通流特性资料。采集的道路几何特性资料主要包括车道宽度、硬路肩宽度、道路线形、道路长度、施工区布置方案等;采集的交通流特性资料主要包括交通量、交通组成、交通分布。

1.2.2 仿真路段的建立

根据收集的基础数据资料,在 VISSIM 软件中输入车道数、车道宽度、硬路肩宽度等基础数据,根据道路线形、道路长度和施工区布置方案建立路段仿真模型。

1.2.3 交通流参数及行驶规则设置

1.2.3.1 交通流参数设置

交通流参数主要包括车辆期望车速分布和驾驶行为参数。

在高速公路施工区受各种因素干扰,不同车辆会以不同速度进行行驶,因此需要对期望车速分布进行设置,仿真时根据车辆类型设置期望加速度和期望减速度,根据交通组成设置期望车速分布。

VISSIM 仿真的跟车模型采用的是心理-生理跟车模型^[16],本文跟车模型选取常用于高速公路交通的 Wiedemann99 模型。

1.2.3.2 行驶规则设置

行驶规则包括速度控制规则、优先规则、超车规

则,根据仿真路段实际情况确定行驶规则设置。

(1)速度控制规则

VISSIM 仿真速度控制规则有两种,一种是车辆在进入减速区前提前减速,一种是车辆到达减速区时开始进行减速。

(2)优先规则

VISSIM 中优先规则为通行车道的车辆优先行驶,封闭车道的车辆进行变道时,若车头间距小于最小车头间距,需在停车线处等待。

(3)超车规则

正常路段最左侧一般为超车道,右侧为行车道,在施工区上游路段,车辆需要变换至超车道,超车行为设置为右侧行车道超车;对于单车道通行道路,进入施工区后,超车行为设置为禁止超车;驶出施工区段后,超车行为设置为左侧超车道超车。

1.2.4 仿真模型的检验

通过对道路模型、交通流参数、驾驶行为的设置不同,仿真输出的结果会存在差异,因此需要对仿真模型进行检验,平均车速这一指标可直观反映交通流的状态,不同的交通流参数与驾驶行为设置均会对其产生影响,因此本文以平均车速作为检验指标,将仿真模型输出的平均车速与路段现场实际检测的平均车速进行对比,设定置信度为 90%,当检验误差在 10% 范围内,可接受仿真模型可靠的假设,否则对参数进行调整,具体计算见式(1):

$$\xi = \left| \frac{V_s - V_r}{V_r} \right| \quad (1)$$

式中: ξ 为检验误差; V_s 为仿真路段输出的平均车速,km/h; V_r 为路段现场实际检测的平均车速,km/h。

1.2.5 仿真结果的输出

本文从效率性、安全性、舒适性三方面考虑,选取车辆平均行程延误、平均车头间距、速度标准差 3 个指标,运行 VISSIM 仿真获取仿真结果,各指标定义及计算如下。

1.2.5.1 车辆平均行程延误

车辆平均行程延误指车辆由于道路条件、交通干扰与交通管理等无法控制的因素引起的行程时间的损失,是指车辆实际通行时间与理论通行时间之差^[17]的调和平均值,车辆平均行程延误越小,表明通行效率越高。具体计算见式(2)。

$$D_i = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{ri} - T_{si})}{n} \quad (2)$$

式中: D_i 为平均行程延误,s; n 为车辆数; T_{ri} 为第 i 辆车的实际通行时间,s; T_{si} 为第 i 辆车的理论通行时间,s。

1.2.5.2 平均车头间距

平均车头间距表示前后相邻两车车头之间的平均距离,平均车头间距越大,代表两车距离越远,越不容易发生碰撞,表明安全性越高^[18]。具体计算见式(3):

$$\overline{SF} = \frac{\sum_{i=1}^n SF_i}{n} \quad (3)$$

式中: $\overline{SF}$ 为平均车头间距,m; SF_i 为第 i 辆车的车头间距; n 为车辆数。

1.2.5.3 速度标准差

速度标准差表示车辆速度波动的大小,波动越小,车辆车速越均衡,稳定性越高,表明舒适性越高^[18]具体计算见式(4):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n}} \quad (4)$$

式中: σ 为速度标准差; v_i 为第 i 辆车的速度; $\bar{v}$ 为平均车速; n 为车辆数。

1.3 仿真结果综合评价

1.3.1 综合评价方法的选取

本文评价指标数量少且均为定量指标,评价目标为决策出最高服务水平,本文以优劣解距离法进行方案综合评价,同时选用熵权法确定指标权重,该方法仅依据数据本身进行权重赋值,可以有效减少权重赋值的主观性^[19-20]。

1.3.2 熵权—优劣解距离法评价步骤

假设有 m ($i=1,2,\dots,m$) 个方案, n 个评价指标($j=1,2,\dots,n$),则 X_{ij} 为第 i 个方案在第 j 个指标取值,决策矩阵为:

$$(X_{ij})_{mn} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.3.2.1 指标的归一化处理

本文选取的评价指标包含正向指标(指标与结果呈正相关,即指标越大,结果越优)和逆向指标(指标与结果呈负相关,即指标越小,结果越优),其中平均车头间距为正向指标,车辆平均行程延误、速度标准差为逆向指标,归一化处理如下:

$$X'_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij} - \min\{X_{1j}, \dots, X_{mj}\}}{\max\{X_{1j}, \dots, X_{mj}\} - \min\{X_{1j}, \dots, X_{mj}\}}, & \text{正向指标} \\ \frac{\max\{X_{1j}, \dots, X_{mj}\} - X_{ij}}{\max\{X_{1j}, \dots, X_{mj}\} - \min\{X_{1j}, \dots, X_{mj}\}}, & \text{逆向指标} \end{cases} \quad (6)$$

1.3.2.2 确定各指标权重

(1) 计算第*i*个方案在第*j*个指标下占该指标的比重:

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}}, 0 < P_{ij} < 1 \quad (7)$$

(2) 建立数据的比重矩阵:

$$(P_{ij})_{mn} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

(3) 计算第*j*个指标的熵值:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (9)$$

式中: $k = \frac{1}{\ln m}$, $k > 0$, 规定当 $P_{ij} = 0$ 时, $P_{ij} \ln P_{ij} = 0$ 。

(4) 计算信息熵差异程度:

$$D_j = 1 - E_j \quad (10)$$

(5) 计算各指标权重:

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^n D_j} \quad (11)$$

1.3.2.3 确定各指标加权值

$$Z_{ij} = W_j \times X'_{ij} \quad (12)$$

可得归一化和加权处理后的矩阵:

$$(Z_{ij})_{mn} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \dots & Z_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

1.3.2.4 确定最优方案和最劣方案

最优方案 Z^+ 由矩阵 Z 中各列指标最大值组成:

$$Z^+ = (\max Z_{i1}, \max Z_{i2}, \dots, \max Z_{in}) \quad (14)$$

最劣方案 Z^- 由矩阵 Z 中各列指标最小值组成:

$$Z^- = (\min Z_{i1}, \min Z_{i2}, \dots, \min Z_{in}) \quad (15)$$

1.3.2.5 计算各方案与最优方案和最劣方案的距离

各方案与最优方案 Z^+ 的距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij}^- - Z_{ij}^+)^2}, i = (1, 2, \dots, m) \quad (16)$$

各方案与最劣方案 Z^- 的距离:

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij}^- - Z_{ij}^-)^2}, i = (1, 2, \dots, m) \quad (17)$$

1.3.2.6 计算各方案与最优方案的贴近程度

各方案与最优方案的贴近程度为:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (18)$$

1.4 最优限速值确定

根据各方案与最优方案的贴近程度进行排序, C_i 越大, 则服务水平越高, 限速方案越优, 依次选出各饱和度下的最优限速方案作为对应的最优限速值。

2 实例分析

本文以柳南高速凤凰—来宾段为仿真对象, 按照本文提出的高速公路改扩建施工区限速方法建立仿真模型, 确定最优限速值。

2.1 收集基础资料

2.1.1 道路几何特性资料

凤凰—来宾段路基宽度为 28 m, 双向 4 车道 (3.75 m), 设置 3 m 中央分隔带, 0.75 m 左侧路缘带, 3.75 m 硬路肩, 0.5 m 土路肩。

2.1.2 交通流特性资料

不同饱和度方案 (0.75~0.9, 级差为 0.05) 和限速方案 (40、60、80 km/h) 下的交通量数据见表 1。

表 1 柳南高速施工区交通量

限速/(km·h ⁻¹)	饱和度	0.75	0.8	0.85	0.9
40	交通量/ (pcu·h ⁻¹)	1 315	1 402	1 490	1 578
60		1 479	1 578	1 676	1 775
80		1 643	1 753	1 863	1 972

交通组成见表 2, 交通分布系数为 0.5。

表 2 柳南高速路段车型构成比例

单位: %

路段	客车			货车				小计
	小汽	大客	小计	小货	中货	大货	拖挂车	
柳州—南宁	41.0	10.0	51.0	4.1	10.5	12.1	22.3	49.0

2.2 建立仿真路段

根据上述收集的道路几何特性资料和交通流特性资料, 使用 VISSIM 仿真模拟凤凰—来宾段道路线形和长度, 根据该路段实际施工区交通组织方案, 确定本文仿真路段的施工区布置形式为: 单向 2 车道高速公路, 封闭内侧 1 条车道, 外侧 1 条车道和硬路肩保持通行。

2.3 交通流参数及行驶规则设置

2.3.1 交通流参数设置

车辆期望车速分布设置参考《公路项目安全性评价规范》(JTG B05—2015) 进行车辆期望车速分布设置, 具体见表 3。

驾驶行为参数设置取值见表 4。

表 3 柳南高速车辆期望车速分布设置 单位: km/h		
车型	最小期望车速	最大期望车速
小汽车	100	120
大型客车	90	100
货车	70	80

2.3.2 行驶规则设置

本文仿真路段为凤凰一来宾基本路段,速度控制规则选用期望车速决策点;仿真路段为基本路段,且车道数没有减少,因此不需设置优先规则;超车规则为自由超车。

2.4 检验仿真模型

柳南高速已于2016年实施改扩建工程,同时受

实验条件和往年数据资料限制,无法开展路上实验调查实际数据。因此本文以仿真平均车速数据与期望车速进行实验误差的检验。将各项参数设置完成后(见表4),选取仿真方案(60 km/h, 1 479 pcu/h)检验仿真模型,运行仿真模型输出的结果为平均车速61.3 km/h,按式计算得到检验误差为2.1%,小于10%,因此可以接受仿真模型可靠的假设,进一步进行仿真实验。

2.5 输出仿真结果

运行仿真模型,输出不同饱和度方案(0.75~0.90, 级差为0.05)和限速方案(40、60、80 km/h)下的数据,并进一步整理得到表5。

表 4 柳南高速驾驶行为参数设置										
参数名称	CC0(停车间距)/m	CC1(车头时距)/s	CC2(跟车变量)/m	CC3(进入跟车状态阈值)	CC4(跟车状态阈值1)	CC5(跟车状态阈值2)	CC6(车速振动)	CC7(振动加速度)/(m·s ⁻²)	CC8(停车加速度)/(m·s ⁻²)	CC9(80 km/h的加速度)/(m·s ⁻²)
取值	1.5	0.9	4.0	-8.0	-0.35	0.35	11.44	0.25	3.5	1.5

表 5 柳南高速不同限速不同饱和度方案的仿真评价指标结果					
限速/(km·h ⁻¹)	评价指标	施工区饱和度			
		0.75	0.8	0.85	0.9
40	车辆平均行程延误/s	202.8	203.0	217.4	227.4
	平均车头间距/m	38.6	38.8	37.6	34.4
	速度标准差	3.5	3.0	2.7	2.5
60	车辆平均行程延误/s	51.0	58.8	60.2	61.1
	平均车头间距/m	45.3	44.6	43.8	43.0
	速度标准差	4.8	4.3	3.9	3.9
80	车辆平均行程延误/s	50.2	55.6	57.2	58.2
	平均车头间距/m	53.0	51.0	51.2	49.2
	速度标准差	5.5	5.1	4.8	4.7

2.6 综合评价仿真结果

本文共有3个评价方案(限速值分别为40、60、80 km/h),3个评价指标(车辆平均行程延误、平均车头间距、速度标准差),将表1数据代入式(5),可得各饱和度的决策矩阵,见式(19)~(22)。

$$(X_{ij})_{33}^{0.75} = \begin{bmatrix} 202.8 & 38.6 & 3.5 \\ 51.0 & 45.3 & 4.8 \\ 50.2 & 53.0 & 5.5 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$(X_{ij})_{33}^{0.8} = \begin{bmatrix} 203.0 & 38.8 & 3.0 \\ 58.8 & 44.6 & 4.3 \\ 55.6 & 51.0 & 5.1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$(X_{ij})_{33}^{0.85} = \begin{bmatrix} 217.4 & 37.6 & 2.7 \\ 60.2 & 43.8 & 3.9 \\ 57.2 & 51.2 & 4.8 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$(X_{ij})_{33}^{0.9} = \begin{bmatrix} 227.4 & 34.4 & 2.5 \\ 61.1 & 43.0 & 3.9 \\ 58.2 & 49.2 & 4.7 \end{bmatrix} \quad (22)$$

由式(6)对指标进行归一化处理,式(7)及(8)建

立数据的比重矩阵,式(9)~(11)计算各指标权重,见表6。

表 6 柳南高速不同限速下的各评价指标权重				
限速/(km·h ⁻¹)	指标	车辆平均行程延误	平均车头间距	速度服从率
40	权重	0.3	0.3	0.4
60		0.3	0.3	0.4
80		0.3	0.3	0.4

由式(13)建立归一化和加权处理后的矩阵,见式(23)~(26)。

$$(Z_{ij})_{33}^{0.75} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.37 \\ 0.29 & 0.16 & 0.13 \\ 0.29 & 0.34 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$(Z_{ij})_{33}^{0.8} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.37 \\ 0.29 & 0.16 & 0.14 \\ 0.29 & 0.34 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$(Z_{ij})_{33}^{0.85} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.36 \\ 0.29 & 0.16 & 0.15 \\ 0.30 & 0.35 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$(Z_{ij})^{0.9}_{33} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.38 \\ 0.29 & 0.17 & 0.14 \\ 0.29 & 0.33 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (26)$$

由式(14)及(15)确定最优方案和最劣方案,由式(16)~(18)计算各方案与最优方案的贴近程度,见表7。

表7 柳南高速各方案与最优方案的贴近程度

限速/(km·h ⁻¹)	饱和度	0.75	0.8	0.85	0.9
40	距离/m	0.34	0.31	0.27	0.34
60		0.65	0.70	0.75	0.71
80		0.66	0.69	0.73	0.66

2.7 最优限速方案确定

与最优方案贴近程度越大的方案服务水平越高,由表7可得,饱和度为0.75时,限速80 km/h贴近程度最大,服务水平最高,可作为最优限速方案,同理可确定其他饱和度的最优限速方案,结果见表8。

表8 柳南高速改扩建施工区最优限速方案 单位:km/h

饱和度	限速
0.75	80
0.8	60
0.85	60
0.9	60

3 结 语

(1)本文从服务水平的角度,考虑了效率、安全、舒适3个因素,以车辆平均行程延误、平均车头间距、速度标准差作为服务水平评价指标,通过VISSIM仿真输出不同限速(40、60、80 km/h)、不同饱和度方案(0.75、0.80、0.85、0.9)下的评价指标结果,以熵权-优劣解距离法评价限速方案,将服务水平最高的方案确定为最优限速方案,建立了基于服务水平的高速公路改扩建施工区限速方法,可更好地提升高速公路改扩建施工区服务水平。

(2)基于对柳南高速实例评价分析表明:各饱和度方案(0.75、0.80、0.85、0.9)对应的最优限速分别为80、60、60、60 km/h,相较于采用其他限速方案,服务水平均有不同程度提升。

(3)本文衡量服务水平考虑效率、安全、舒适3个因素,但仍存在一些不足,后续研究可进一步考虑通行成本和效益的因素,综合确定施工区最优的限速方案。

参考文献:

- [1] 何磊.道路施工对交通通行能力的影响分析[J].城市道桥与防洪,2018(5):223-225.
- [2] WALECZEK H, GEISTEFELDT J, CINDRIC-MIDDENDORF D, *et al.* Traffic Flow at a Freeway Work Zone with Reversible Median Lane[J]. Transportation Research Procedia, 2016(15): 257-266.
- [3] 陈卫霞,郑俞,孟祥海,等.双向四车道高速公路超车道封闭施工作业区交通运行特性研究[J].公路,2022,67(6):229-237.
- [4] 吴昊,朱彤,王长帅.服从率影响下高速公路施工区限速安全研究[J].交通科学与工程,2018,34(1):85-92.
- [5] 王强,王显璞.高速公路养护施工区限速控制研究[J].交通信息与安全,2010,28(1):124-129.
- [6] 燕蛟,郭延永,王磊.高速公路施工作业区车辆限速研究[J].中国安全科学学报,2014,24(6):74-79.
- [7] DU Shuming, RAZAVI Saiedeh. Variable speed limit for freeway work zone with capacity drop using discrete-time sliding mode control[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2019, 33(2): 04019001.
- [8] 孟祥海,史永义,王浩,等.高速公路施工作业区车速分布特征及限速研究[J].交通运输系统工程与信息,2013,13(1):149-155.
- [9] 赵福利,雷进,张昆仑.基于VISSIM仿真施工区路段速度推荐值研究[J].中外公路,2021,41(3):358-364.
- [10] 蒋若曦,朱顺应,王磊,等.基于交通冲突的高速公路施工区安全评价[J].中国安全科学学报,2019,29(6):116-121.
- [11] 于仁杰,马荣国,王俊凌,等.高速公路施工区层级限速问题研究[J].中国公路学报,2013,26(6):150-156.
- [12] 黄凯,何勇,唐健娟,等.公路施工区限速值大小研究[J].公路,2011(5):112-115.
- [13] 张志学.基于限速控制的基本路段通行效率优化方法[J].城市道桥与防洪,2015(5):20-25.
- [14] ZHOU R, ZHONG L, ZHAO N, *et al.* The Development and Practice of China Highway Capacity Research[J]. Transportation Research Procedia, 2016(15): 14-25.
- [15] Huimin Ge, Yousen Yang. Research on Calculation of Warning Zone Length of Freeway Based on Micro-Simulation Model[J]. IEEE Access, 2020(8): 312-322.
- [16] JOLOVIC D, STEVANOVIC A, SAJJADI S, *et al.* Assessment of Level-Of-Service for Freeway Segments Using HCM and Microsimulation Methods[J]. Transportation Research Procedia, 2016(15): 403-416.
- [17] 李怡冰,李鹏,王丹生.基于VISSIM仿真分析在城市旧路网改造中应用研究[J].城市道桥与防洪,2022(6):228-232.
- [18] GUO Mingming, WU Zheng, ZHU Hhuijing. Empirical study of lanechanging behavior on three Chinese freeways[J]. Plos One, 2018, 13(1): 410-419.
- [19] 邓亚娟,柯四平,胡绍荣.基于安全与效率的八车道高速公路车辆运行规则研究[J].公路,2017,62(10):149-155.
- [20] 吕能超,王玉刚,周颖,等.道路交通安全分析与评价方法综述[J].中国公路学报,2023,36(4):183-201.