

5-15-2024

## Research on Simulation Model of Double-layer Expansion Design of Expressway

Jiandong Qiu

*Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; Shenzhen Urban Transport Planning Center Co., Ltd, Shenzhen 518057, China, qiujd@sutpc.com*

Yi Tang

*Shenzhen Urban Transport Planning Center Co., Ltd, Shenzhen 518057, China, tangyi@sutpc.com*

Yuxiong Ji

*Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China*

Heng Liu

*Shenzhen Urban Transport Planning Center Co., Ltd, Shenzhen 518057, China*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Research on Simulation Model of Double-layer Expansion Design of Expressway

## Abstract

**Abstract:** Aiming at the problems that the traditional traffic simulation technology has insufficient evaluation accuracy and little application effect in the three-dimensional composite expansion scenario of expressway, a simulation model construction method for double-layer expansion design of expressway was proposed. The reconstruction and expansion project of Shenzhen Jihe Expressway is selected as the research object, the three simulation model modeling elements, including road network facilities, traffic demand data, and driving behavior model parameters, are sorted out, and the technical process of simulation modeling is proposed. The whole road network including key infrastructure such as interchange, toll station, ramp up and down will be simulated and modeled, and the travel OD matrix within the project scope will be obtained based on the traffic volume prediction model to complete the traffic demand modeling. The driving simulation technology is introduced to build the driving simulation scene of the three-dimensional composite expansion of the expressway, design and carry out the driving simulation test. The K-means clustering algorithm is used to divide the driving behavior into three categories: radical, conservative and normal, and the characteristics of the driving behavior are analyzed respectively, according to which the parameters of the simulated driving behavior model are calibrated to improve the accuracy of the simulation model. The simulation results show that the proposed simulation model construction method can effectively calibrate parameters such as expected speed, headway and critical clearance, thus improving the analysis accuracy of the simulation model. **Keywords:** expressway; double-layer expansion design; simulation model; VISSIM; driving simulation

## Keywords

expressway, double-layer expansion design, simulation model, VISSIM, driving simulation

## Authors

Jiandong Qiu, Yi Tang, Yuxiong Ji, Heng Liu, and Junsha Luo

## Recommended Citation

Qiu Jiandong, Tang Yi, Ji Yuxiong, et al. Research on Simulation Model of Double-layer Expansion Design of Expressway[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(5): 1072-1080.

## 高速公路立体复合扩容设计的仿真模型研究

丘建栋<sup>1,2</sup>, 唐易<sup>2\*</sup>, 暨育雄<sup>1</sup>, 刘恒<sup>2</sup>, 罗钧韶<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 深圳市城市交通规划设计研究中心股份有限公司, 广东 深圳 518057)

**摘要:** 针对传统交通仿真技术在高速公路立体复合扩容场景存在评估精度不足、应用效果甚微的问题, 提出了一种面向高速公路立体复合扩容设计的仿真模型构建方法。选取深圳市机荷高速改扩建工程为研究对象, 梳理路网设施、交通需求数据、驾驶行为模型参数等3大仿真模型建模要素, 提出仿真建模的技术流程; 对包含互通立交、收费站、上下匝道等重点基础设施的全路网进行仿真建模, 基于交通量预测模型获取项目范围的出行OD矩阵, 完成交通需求建模; 引入驾驶模拟仿真技术, 构建高速公路立体复合扩容的驾驶模拟场景, 设计并开展驾驶模拟实验, 采用K均值聚类算法将驾驶行为划分为激进、保守、正常3个类别, 并分别分析驾驶行为特征, 据此对仿真驾驶行为模型参数进行标定, 提升仿真模型精度。仿真结果表明: 该模型构建方法, 可以有效标定期望速度、车头时距、临界间隙等参数, 从而提升仿真模型分析精度。

**关键词:** 高速公路; 立体复合扩容设计; 仿真模型; VISSIM; 驾驶模拟

中图分类号: TP391; U491 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)05-1072-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0007

**引用格式:** 丘建栋, 唐易, 暨育雄, 等. 高速公路立体复合扩容设计的仿真模型研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(5): 1072-1080.

**Reference format:** Qiu Jiandong, Tang Yi, Ji Yuxiong, et al. Research on Simulation Model of Double-layer Expansion Design of Expressway[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(5): 1072-1080.

## Research on Simulation Model of Double-layer Expansion Design of Expressway

Qiu Jiandong<sup>1,2</sup>, Tang Yi<sup>2\*</sup>, Ji Yuxiong<sup>1</sup>, Liu Heng<sup>2</sup>, Luo Junshao<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shenzhen Urban Transport Planning Center Co., Ltd, Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** Aiming at the problems that the traditional traffic simulation technology has insufficient evaluation accuracy and little application effect in the three-dimensional composite expansion scenario of expressway, a simulation model construction method for double-layer expansion design of expressway was proposed. The reconstruction and expansion project of Shenzhen Jihe Expressway is selected as the research object, the three simulation model modeling elements, including road network facilities, traffic demand data, and driving behavior model parameters, are sorted out, and the technical process of simulation modeling is proposed. The whole road network including key infrastructure such as interchange, toll station, ramp up and down will be simulated and modeled, and the travel OD matrix within the project scope will be obtained based on the traffic volume prediction model to complete the traffic demand modeling. The driving simulation technology is introduced to build the driving simulation scene of the three-dimensional composite expansion of the expressway, design and carry out the driving

收稿日期: 2023-01-03 修回日期: 2023-03-08

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0604900)

第一作者: 丘建栋(1982-), 男, 正高级工程师, 博士生, 研究方向为大数据与交通仿真模型、智能交通。E-mail: qiujd@sutpc.com

通讯作者: 唐易(1992-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为智能交通。E-mail: tangyi@sutpc.com

simulation test. The K-means clustering algorithm is used to divide the driving behavior into three categories: radical, conservative and normal, and the characteristics of the driving behavior are analyzed respectively, according to which the parameters of the simulated driving behavior model are calibrated to improve the accuracy of the simulation model. The simulation results show that the proposed simulation model construction method can effectively calibrate parameters such as expected speed, headway and critical clearance, thus improving the analysis accuracy of the simulation model.

**Keywords:** expressway; double-layer expansion design; simulation model; VISSIM; driving simulation

## 0 引言

伴随都市圈空间联系的逐步加强,长距离、多功能交通出行需求增长迅速,高强度交通走廊的局部高速公路在通行能力与服务水平方面显现不足,导致拥堵常态化,其内部交通扩容迫在眉睫<sup>[1]</sup>。受到城市土地空间规划的限制,很多地区已没有足够可供平面拓宽的空间。双层立体扩容可以充分挖掘原有城市道路系统的通行能力,有效缓解城市交通拥堵,并且在减少征地拆迁和降低穿越重要限制条件工点的协调难度方面具有较大优势。因此,双层立体扩容设计是解决高强度土地开发空间限制与交通日益增长矛盾的有效途径<sup>[2-3]</sup>。

高速公路双层立体扩容的设计思路,可以有效增加通行能力、缓解常态化交通拥堵问题。但是交通量巨大、转换节点密集、空间分层的创新形式也带来了驾驶行为复杂特殊化、交通运行安全隐患的等诸多交通问题,迫切需要科学、精细的量化评估手段予以支撑,而仿真模型是量化评估的关键。交通仿真技术在高速公路领域已经被较广泛地应用,但往往在仿真建模过程缺乏对复杂驾驶行为规律深层次的考虑。因此,在驾驶行为极具复杂特殊的高速公路立体复合扩容场景中,传统仿真技术难免存在评估精度不足、应用效果甚微等问题。例如,运用微观交通仿真对高快速路平面扩容方案、互通立交改造方案进行模拟和预测,选取了车辆运行速度、通行能力、服务水平等交通运行效率指标进行量化评估分析以达到

比选方案的目的,但缺少对驾驶行为特征的分析与模拟<sup>[4-7]</sup>。

在大数据、智能信息化高速发展的新时期,高速公路立体复合扩容设计对交通仿真技术提出了更高的要求,大数据、驾驶模拟等技术的应用与推广为本文研究提供了新的思路<sup>[8-11]</sup>。本文借助VISSIM仿真软件,选取国内首条高速公路立体复合扩容工程—深圳市机荷高速公路立体改扩建工程(以下简称“机荷高速改扩建工程”)进行实例研究,对工程全线路网设施进行仿真建模,研究交通需求建模,以及基于驾驶模拟的驾驶行为参数标定方法,最大程度再现高速公路立体复合扩容场景的交通运行状况,为工程设计提供技术支撑与参考。

## 1 仿真建模方法

结合机荷高速改扩建工程方案,梳理仿真建模的关键要素,并提出规范化的仿真建模流程。

机荷高速改扩建工程西起深圳宝安鹤洲立交,西接深中通道,东至深圳龙岗荷坳立交,与惠盐高速相接,全长43 km。经可行性研究确定,机荷高速改扩建工程提出地面层+立体层复合的扩容模式,在土地资源稀缺、建设空间严重受限的条件下实现机荷高速双向16个车道规模的扩容。立体层新建通道承担长距离及过境交通,双向8车道标准,设计速度100 km/h;地面层扩建通道承担中、短距离及城市组团内部交通,双向8车道标准,设计速度100 km/h。沿线立体层新建立交4处,衔接高速路网;地面层改建立交14处,衔接

城市干道。其中，沿线布设3处“一接二”立交，机荷高速立体层与地面层同时与被交路衔接，布设3组6对上下匝道，实现立体层与地面层的车流转换<sup>[12]</sup>。

### 1.1 仿真建模要素

结合高速公路立体复合扩容仿真建模需求，借助VISSIM仿真软件进行仿真建模。需要设置的关键要素包括路网设施、交通需求数据、驾驶行为模型参数等3个方面。

路网设施即高速公路组成要素，可通过将工程设计图纸导入VISSIM，以此作为背景底图“临摹”各类设施的位置、线形、大小。同时，结合工程方案，对路网上的管控措施进行描述，包含了分合流区冲突区域、禁止变道、收费站停车标志、车辆禁行等。

交通需求数据包含了仿真模型的交通量、交通组成、路径比例等。针对高速公路立体复合扩容设计场景，需借助交通量预测模型获取高速公路出行OD矩阵，以此作为仿真模型的输入数据，描述交通量、交通组成、路径比例等特征。

驾驶行为模型主要包括跟车模型与换道模型，通过构建驾驶模拟场景，开展驾驶模拟实验，提取驾驶员驾驶行为特征指标，针对VISSIM仿真的驾驶行为模型参数进行标定。

### 1.2 仿真建模流程

结合上述要素分析，提出高速公路立体复合扩容设计的仿真模型构建流程如图1所示。

首先，借助前期资料调研，获取工程设计方案、交通管控措施等。其次，开展仿真模型初步构建工作，具体包含建立仿真路网设施模型以及交通需求数据建模。然后，开展驾驶模拟实验，提取驾驶行为特征并对仿真的驾驶行为参数进行标定。最后，完成上述仿真建模操作后运行仿真，输出仿真评估指标，并检查仿真特性与工程实际是否吻合，在确认符合后进行仿真评估，支撑工程方案设计与优化。

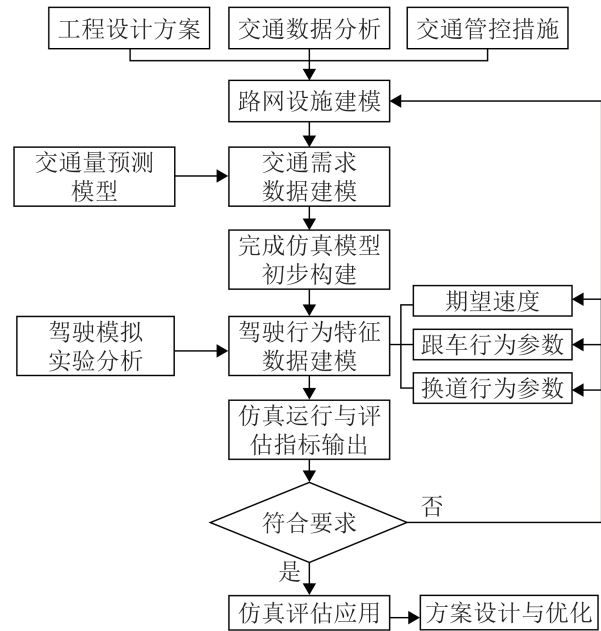


图1 仿真建模流程

Fig. 1 Simulation modeling process

## 2 仿真模型初步构建

仿真模型初步构建包含路网设施建模与交通需求建模两部分工作。

### 2.1 路网设施建模

结合机荷高速改扩建工程设计方案，采用设计图纸CAD文件作为底图，借助VISSIM仿真软件进行仿真路网构建，模拟还原改扩建工程的基本路段、分流/合流区、立交匝道、上下匝道、收费站等多类设施，具体仿真路网如图2所示。

收费站、上下转换匝道是机荷高速改扩建工程仿真路网建模的重点。机荷高速收费站采取ETC与MTC混合式的收费模式，ETC覆盖率不低于90%。因收费模式不同，车辆通过不同类型收费车道的的时间、速度也不一致。车辆在ETC车道可以实现不停车通过，车辆限速为20 km/h；车辆在MTC车道会被动停车排队依次通过。为了体现这一特性，针对仿真模型的ETC车道设置车辆限速，引导车辆以合理速度正常通行；针对仿真模型的MTC车道，基于各类收费站实际的过车数据分析停车时间分布特征，并以此设置MTC车道的停车属性。

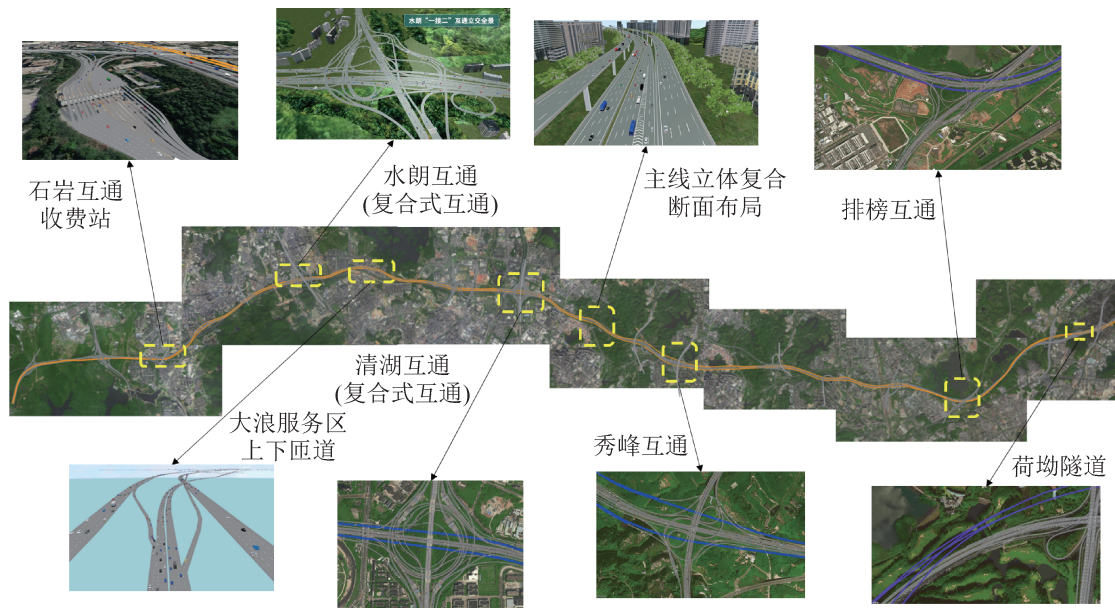


图2 机荷高速改扩建工程路网设施建模

Fig. 2 Modeling of road network facilities in reconstruction and expansion project of Jihe expressway

收费站建模仍需考虑车辆排队特征。现实收费站的车辆排队符合排队模型的概率分布特征, 驾驶员优先选择排队车辆少的收费车道排队等候, 同类型收费车道排队长度将达到均衡状态。为了保证收费站排队特征与实际相符, 在收费站建模的过程中, 需同时考虑ETC、MTC通行车辆比例, 以及车辆均衡选择收费车道的行为模式等因素。通过在仿真模型中添加局部路径, 均匀分配收费站同类型各条收费车道的相对流量比例, 实现同类型每条收费站流量与排队长度均衡。收费车道局部路径建模如图3所示。

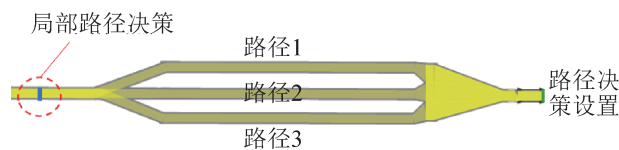


图3 收费车道局部路径建模示意图

Fig. 3 Schematic diagram of toll lane local path Modeling

上下匝道是实现高速公路立体层与地面层车流转换的重要通道。在仿真模型中, 上下匝道的构建方式是基于平面设计图纸绘制上下匝道的线形, 基于纵断面设计图纸在上下匝道适宜位置设置路段属性中的高程值, 并将上下匝道出入口分

别与立体层、地面层主线相连接, 实现上下车流转换的效果。以机荷高速改扩建工程中的大浪服务区上下匝道为例, 上下匝道的建模效果如图4所示。



图4 大浪服务区上下匝道建模

Fig. 4 Modeling of up and down ramps in Dalang service area

## 2.2 交通需求数据建模

交通需求是仿真模型的重要输入, 直接决定了仿真运行场景的交通量、交通组成及路径分配情况。高速公路立体复合扩容场景具备交通量巨大、交通功能多样化、分层空间的路径复杂化等特征, 交通需求数据建模对于仿真模型的精度尤为关键。“四阶段法”作为广泛应用于高速公路领域的交通量预测方法, 行业内已有许多专家学者

基于该方法或相关改进升级的方法，进行高速公路交通量预测，并对交通量构成及来源进行分析<sup>[13-15]</sup>。交通量预测模型与仿真模型的范围往往不一致，交通量预测结果，例如出行OD矩阵，并不能直接应用于仿真模型，需要经过子区域筛选与起终点匹配等中间处理步骤。

交通量预测模型与仿真模型交通需求衔接的具体流程为：基于“四阶段法”构建深圳市域范围的交通量预测模型，选取机荷高速改扩建工程范围作为分析子区域，子区域范围与仿真模型构建范围保持一致；建立子区域交通小区与仿真模型路网出入口编号的对应表；分析获取子区域高峰时段的出行OD矩阵，依据编号对应表将子区域的OD矩阵转换为仿真模型的OD矩阵，并导入仿真模型，完成交通需求加载。机荷高速改扩建

工程交通量预测模型的分析子区域如图5所示。

### 3 基于驾驶模拟的驾驶行为模型参数标定

本研究采用驾驶模拟实验，结合问卷调查对驾驶行为进行定量与定性相结合的分析，并对仿真模型的驾驶行为参数进行标定。

#### 3.1 驾驶模拟场景建模

依据机荷高速改扩建工程的平、纵、横设计图，交通标志标线设计图和其他设计资料与数据，利用专业的视景建模软件，建立道路、交通设施及周边地物的三维模型，完成虚拟视景设计，使得驾驶人能够在操纵汽车的过程中获得真实的驾驶感觉，建模流程如图6所示。

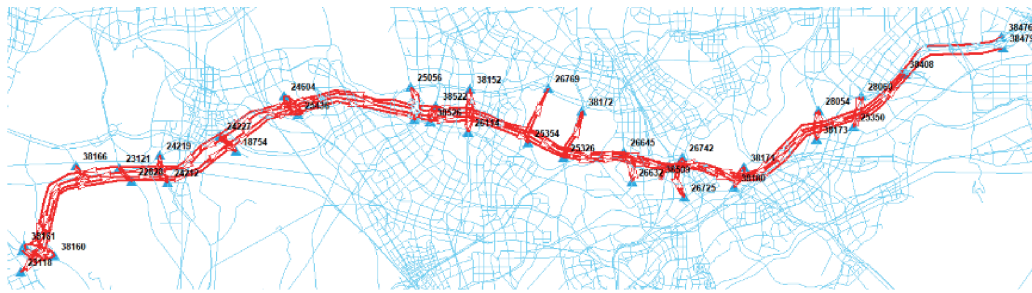


图5 交通量预测模型的分析子区域及出入口编号

Fig. 5 Analysis sub-area and access number of traffic volume prediction model

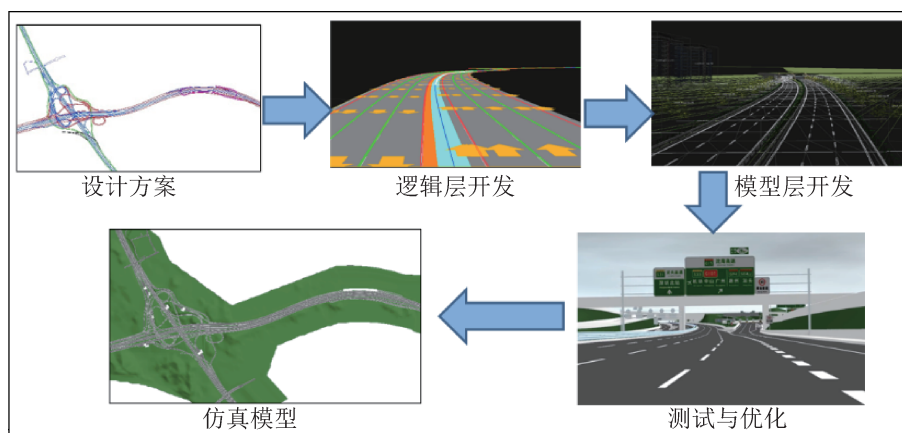


图6 驾驶模拟场景建模流程

Fig. 6 Driving simulation scene modeling process

### (1) 逻辑层开发

道路逻辑层的开发是整个建模工作的重点,也是难点之一。由于道路模型要应用于复杂驾驶条件下的驾驶安全、舒适性评价研究,逻辑层与实验过程中数据的采集息息相关,因此,在逻辑层开发时,需要精确地还原设计图中道路的平、纵设计以及道路超高的设计等,以提高道路模型的精确度。

### (2) 3D模型层开发

3D模型层开发主要是地形建模、道路建模、道路设施建模等工作。地形建模是根据等高线地形图生成地势,对三维地势进行轻量优化后将所有的地块拼接起来,并对拼接好的地形再次进行轻量优化及测试;道路建模主要依据逻辑层模型的数据,对道路模型进行轻量优化;道路设施建模主要包括各类交通标志标线、护栏、桥梁墩台、收费站等设施。道路设施建模如图7所示。

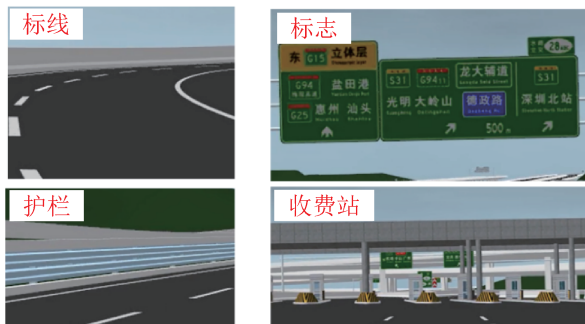


图7 驾驶模拟场景的道路设施建模

Fig. 7 Road facility modeling of driving simulation scene

## 3.2 驾驶模拟实验设计

### (1) 实验设备

采用同济大学8自由度驾驶模拟器开展驾驶模拟实验。驾驶模拟器具有8自由度运动系统,驾驶舱为封闭刚性结构,车辆置于球体中央,投影系统有5个投影仪内置于驾驶舱,场景投影到球形幕上,水平视角为250°,仿真车辆为Renault Megane III,后视镜为3块LCD屏幕。控制软件为商业软件SCANeR™。

### (2) 被试选取

共招募35名被试开展实验,平均年龄35.2岁。其中,男性驾驶人22名,女性驾驶人13名,6人的驾龄不足4年,19人的驾龄在4~10年之间,10人的驾龄大于10年。

### (3) 实验步骤

每名被试人员全程实验需约2.5 h。

1) 实验准备:填写知情同意书,驾驶人信息表,告知实验任务,并佩戴眼动仪。

2) 预实验:熟悉场景以及驾驶模拟器的操作。

3) 正式实验:依据道路线形与指路标志向目的地行驶,完成驾驶任务。

4) 实验后调查:填写问卷,即驾驶员主观感受。

## 3.3 驾驶行为特征分类

驾驶行为特征的差异不仅取决于驾驶员年龄、性别、驾龄等个体属性,更多的也可以从驾驶员行为特征指标结果上直接反映。本文将驾驶行为分为激进、保守、正常3类。借助SPSS统计软件,基于K均值聚类算法,将35名驾驶员进行分类,综合考虑驾驶员个体属性与驾驶行为指标,均匀合理聚类每组驾驶员。

首先,确定驾驶员聚类依据指标,选取驾驶员性别、年龄、驾龄、感知敏感程度、行程平均速度、行程最大速度、最大加速度、换道频率、可接受间隙等9项指标作为计算依据,并选定初始聚类中心。其次,依次计算每个驾驶员样本数据点到中心的欧式距离,按距离最短原则将所有样本进行分类,每个样本数据点到中心的距离计算如式(1)所示。最后,计算各类中变量的均值,并以均值数据点作为新的类中心点,如果类中心点的偏移量小于指定阈值,则停止搜索迭代,表明聚类算法已收敛,输出当前的聚类结果结合驾驶模拟实验被试人员属性及结果分析指标。

$$d(x, \mu) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_i)^2} \quad (1)$$



式中： $x$ 为一个样本数据点； $\mu$ 为聚类中心； $d(x, \mu)$ 为样本到聚类中心的距离； $n$ 为每个样本点中的特征数目； $i$ 为组成点 $x$ 的每个特征。

通过上述聚类过程，成功将本次驾驶模拟实验的 35 名驾驶员进行分类，各类驾驶员的分布结果如表 1 所示。

表 1 驾驶行为特征分类情况统计  
Table 1 Statistics on classification of driving behavior characteristics

| 分类 | 样本数量 | 特征  |
|----|------|---|
| 激进 | 14   | 年轻男性居多, 驾驶经验适中, 驾驶过程行驶速度较高, 车头时距较小时也会选择换道 |
| 保守 | 12   | 驾驶员年纪大, 驾驶经验较长, 驾驶过程行驶速度适中, 车头时距较大时选择换道   |
| 正常 | 9    | 年龄中等, 驾驶经验较短, 速度控制、换道经验介于激进与保守之间          |

### 3.4 驾驶行为特征分析与参数标定

跟车与换道是最常见的驾驶行为，本文结合驾驶行为特征分类结果，分析激进、保守、正常 3 类驾驶行为的跟车、换道特征，并将分析结果应用于仿真参数标定，参数主要包括期望速度、跟车行为模型的车头时距、换道行为模型的临界间隙。

#### (1) 期望速度

设计实验场景包含少量环境车辆，驾驶员可以在主线自由行驶，极少受周边车辆约束。在此场景下，以 5 min 为时间粒度，统计驾驶员行驶速度，并绘制 3 类驾驶行为的速度分布曲线，如图 8 所示。3 类驾驶行为的期望速度分布均符合正态分布的变化趋势，激进驾驶员的平均速度为 102 km/h，超速比例大约为 45%，保守驾驶员的平均速度为 87 km/h，超速比例大约为 8%，正常驾驶员的平均速度为 93 km/h，超速比例大约为 29%。3 类驾驶行为的期望速度分布如图 8 所示。

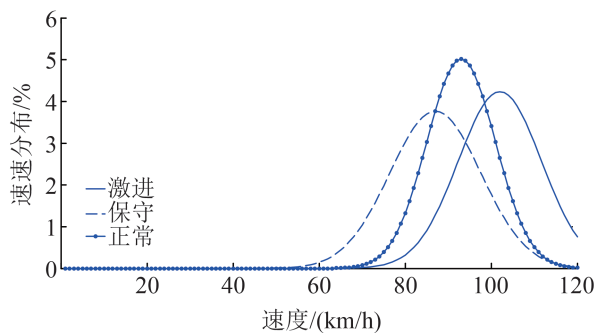


图 8 期望速度分布特征

Fig. 8 Expected velocity distribution characteristics

#### (2) 车头时距

跟车是指后车的速度与位置实时受到前方车辆影响的行驶状态。跟车行为中最重要的参数特征是跟车所保持的车头时距。基于驾驶模拟实验的驾驶行为轨迹数据，按照不同驾驶行为类型对所有跟车片段的车头时距进行统计分析，分析结果如图 9 所示。结果表明，高峰时段的车头时距近似服从对数分布，车头时距低于 5 s 的分布概率为 92%，激进驾驶员的平均车头时距为 2 s，保守驾驶员的平均车头时距为 2.7 s，正常驾驶员的平均车头时距为 2.3 s。3 类驾驶行为的车头时距分布如图 9 所示。

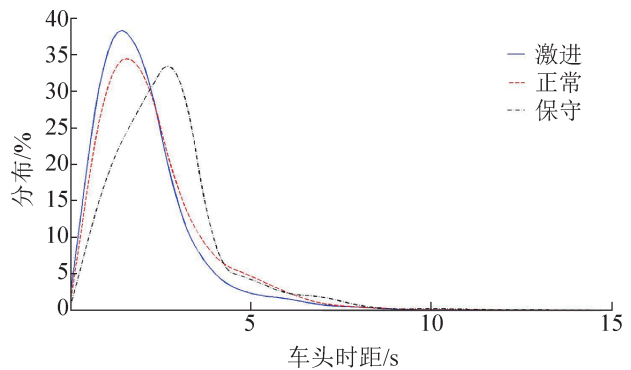


图 9 车头时距分布特征

Fig. 9 Distribution characteristics of headway

#### (3) 临界间隙

基于驾驶模拟实验的车道偏移量对车辆换道行为进行识别，提取不同类型驾驶员的临界间隙特征指标。其中，激进驾驶员在换道时的临界间隙为 2.12 s，保守驾驶员的临界间隙为 2.83 s，正

常驾驶员的临界间隙为2.65 s。

结合上述驾驶行为特征分析, 分别对仿真模型的期望速度及分布、跟车行为车头时距、换道行为临界间隙等参数进行标定, 标定值如表2所示。

表2 驾驶行为模型参数标定值  
Table 2 Calibration value of driving behavior model parameters

| 参数          | 激进   | 保守   | 正常   |
|-------------|------|------|------|
| 期望速度/(km/h) | 102  | 87   | 93   |
| 车头时距/s      | 2.0  | 2.7  | 2.3  |
| 临界间隙/s      | 2.12 | 2.83 | 2.65 |

## 4 结论

本文选取深圳机荷高速立体改扩建工程为案例, 阐述仿真建模关键要素与建模流程, 进行路网设施建模与交通需求数据建模, 引入驾驶模拟实验技术方法, 开展驾驶模拟实验, 将驾驶行为划分为激进、保守、正常3个类别, 并分别提取驾驶行为特征, 对仿真模型的驾驶行为模型参数进行标定, 最大程度提升仿真模型精度, 为同类高速公路立体复合扩容设计的仿真模型构建提供思路及参考。展望未来, 交通仿真技术将对接高速公路智慧化交通运营与管控等工作, 进一步完善与拓展交通仿真技术在工程运营期间的应用。

## 参考文献:

- [1] 袁翀, 田锋. 高度城市化地区高速公路的发展变革[C]//2016中国城市交通规划年会论文集. 深圳: 中国城市规划学会, 2016: 1-10.
- [2] 孙丹, 杨军超, 李星, 等. 高速公路互通式立交改扩建工程施工期交通组织研究[J]. 公路, 2022, 67(5): 75-81.  
Sun Dan, Yang Junchao, Li Xing, et al. Research on Traffic Organization of Expressway Interchange Reconstruction and Extension During Construction Period[J]. Highway, 2022, 67(5): 75-81.
- [3] 刘丽娜. 城市周边高速公路改扩建若干主要问题研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.  
Liu Li'na. Study on Some Main Problems of Reconstruction and Extension of Urban Peripheral Expressway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [4] 邵长桥, 马森, 罗凯, 等. 高速公路施工区中间带开口长度与交通运行特性研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37

- (10): 127-133.  
Shao Changqiao, Ma Sen, Luo Kai, et al. Study on Median Opening Length and Traffic Operation Characteristics of Expressway Construction Area[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(10): 127-133.
- [5] 贾献卓. 基于微观交通仿真的枢纽互通建设交通组织方案实例研究[J]. 公路, 2017, 62(2): 153-159.  
Jia Xianzhuo. Research on Traffic Organization Scheme of Hub Interchange Based on Microscopic Traffic Simulation[J]. Highway, 2017, 62(2): 153-159.
- [6] 韦勇球, 赵利苹, 袁春建, 等. 高速公路改扩建交通组织仿真[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(4): 38-43.  
Wei Yongqiu, Zhao Liping, Yuan Chunjian, et al. Traffic Organization Simulation of Expressway Rebuilding Project[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2012, 32(4): 38-43.
- [7] 符铨砂, 胡嘉诚, 何石坚. 基于交通状况及行驶速度的高速公路换道时间研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(4): 133-139.  
Fu Xinsha, Hu Jiacheng, He Shijian. Study on Expressway Lane-changing Time Based on Traffic Condition and Driving Speed[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(4): 133-139.
- [8] 丘建栋, 陈蔚, 宋家骅, 等. 大数据环境下的城市交通综合评估技术[J]. 城市交通, 2015, 13(3): 63-70, 94.  
Qiu Jiandong, Chen Wei, Song Jiahua, et al. Comprehensive Assessment of Urban Transportation Using Big Data[J]. Urban Transport of China, 2015, 13(3): 63-70, 94.
- [9] 刘群, 杨濯丞, 蔡蕾. 基于ETC门架数据的高速公路短时交通流预测[J]. 公路交通科技, 2022, 39(4): 123-130.  
Liu Qun, Yang Zhuocheng, Cai Lei. Predicting Short-term Traffic Flow on Expressway Based on ETC Gantry System Data[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(4): 123-130.
- [10] 王雪松, 孙平, 张晓春, 等. 基于自然驾驶数据的高速公路跟驰模型参数标定[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 132-142.  
Wang Xuesong, Sun Ping, Zhang Xiaochun, et al. Calibrating Car-following Models on Freeway Based on Naturalistic Driving Data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 132-142.
- [11] 赵晓华, 鞠云杰, 李佳, 等. 基于驾驶行为和视觉特性的长大隧道突起路标作用效果评估[J]. 中国公路学报, 2020, 33(6): 29-41.  
Zhao Xiaohua, Ju Yunjie, Li Jia, et al. Evaluation of the Effect of RPMs in Extra-long Tunnels Based on Driving

- Behavior and Visual Characteristics[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(6): 29-41.
- [12] 深圳市交通运输委员会, 深圳市城市交通规划设计研究中心股份有限公司. 深圳市高快速路网优化及地下快速路布局规划 [EB/OL]. (2022-03-28)[2022-11-16]. [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzI1NzA5MTUxNA==&mid=2654020004&idx=2&sn=aced8abf650e911233f9ba6848277e36&chksm=f1d93371c6aeba6797d17c29f3eda7a294241ab934438a7e31c1afb708df13142f085f5891d9&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI1NzA5MTUxNA==&mid=2654020004&idx=2&sn=aced8abf650e911233f9ba6848277e36&chksm=f1d93371c6aeba6797d17c29f3eda7a294241ab934438a7e31c1afb708df13142f085f5891d9&scene=27).
- [13] 丁志坤, 朱梦炼, 宋义勇. 基于改进"四阶段法"的高速公路交通量预测研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(5): 86-90.  
Ding Zhikun, Zhu Menglian, Song Yiyong. Traffic Forecast of Highway Based on Improved "Four-Stage Method"[J]. Journal of ChongQing JiaoTong University (Natural Science), 2017, 36(5): 86-90.
- [14] 葛梦雪, 宋国华, 王芃森, 等. 基于手机应用软件测算OD数据的区域交通需求预测[J]. 公路交通科技, 2019, 36(5): 152-158.  
Ge Mengxue, Song Guohua, Wang Pengsen, et al. Regional Traffic Demand Forecasting Based on OD Data Calculated by Mobile Phone Application Software[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(5): 152-158.
- [15] 孙朝云, 吕红云, 杨荣新, 等. 改进粒子群优化XGBoost模型的高速公路服务区交通量预测[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(5): 74-83.  
Sun Zhaoyun, Lü Hongyun, Yang Rongxin, et al. Traffic Volume Prediction for Highway Service Areas Based on XGBoost Model with Improved Particle Swarm Optimization[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(5): 74-83.