

基于驾驶模拟技术的公路隧道车道宽度运行影响分析

王雪松 教授 王 婷 陈亦新

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

学科分类与代码: 6202740 (安全模拟与安全仿真学)

中图分类号: X913.4

文献标志码: A

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金资助(51522810)。

【摘要】 对于设计车速为80 km/h的双管6车道高速公路盾构隧道,受盾构机及资金限制,内侧车道设计宽度为3.5 m,相比一般高速公路路段规定减小了0.25 m。以上海市沿江特大高速公路隧道为研究对象,分析车道宽度的这种变化对车辆运行的影响。依照隧道设计方案,分别建立内侧车道宽度为3.75 m和3.5 m的2种模拟场景,基于同济大学高仿真驾驶模拟器展开对比试验。通过试验采集同一驾驶员在2种场景下的车速、轨迹偏移等参数,绘制隧道路段平均车速、平均轨迹偏移分布图,比较2种场景下运行参数平均值差异,发现2种场景下的车速、轨迹偏移变化趋势基本一致。利用配对 t 检验方法验证参数差异的显著性,结果显示,内侧车道宽度由3.75 m减小为3.5 m,对于车辆速度、轨迹偏移没有显著影响。

【关键词】 高速公路隧道; 车道宽度; 驾驶模拟; 运行车速; 轨迹偏移; 配对 t 检验

Influence of lane width on driving behavior on freeway tunnel: driving simulator study

WANG Xuesong WANG Ting CHEN Yixin

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineer, Ministry of Education, Tongji University,
Shanghai 201804, China)

Abstract: For 6 lane highway tunnel whose design speed is 80 km/h, limited by the shield machine and economic factors, the width of inside lane is decreased from 3.75 m to 3.5 m. The effect on driving behavior caused by the decrease is unknown. A super long freeway tunnel in Shanghai named Yuejiang tunnel was studied in this paper. Based on Tongji University's driving simulator, two tunnel models were established according to the design scheme. The inside lane widths of the two tunnels are 3.75 m and 3.5 m respectively. Data on operating speed, trajectory offset of the same driver in two different scenarios were collected. By drawing diagrams for the tunnel road average speed, average trajectory deviation distribution, an average driving parameters comparison was made between the two scenarios. Paired t test method was used to examine whether the parameters differ significantly between the two scenarios. Analysis shows that the vehicle speed and trajectory are not significantly affected by the decrease in the width of the inside lane from 3.75 m to 3.5 m.
Keywords: freeway tunnel; lane width; driving simulator; driving speed; trajectory deviation; paired t -test

0 引言

国内最大直径盾构机外径为15.0 m，在进行双管6车道隧道高速公路建设时，受机械设备及资金条件限制，一般将内侧车道由3.75 m调整为3.5 m，其余2车道为3.75 m，如上海市沿江隧道与钱塘江越江隧道。对于隧道单向3车道中增加第3个车道的宽度，国内现行规范中的标准并不统一。《公路工程技术标准》^[1]第3.0.2条规定：设计速度为80 km/h时，车道宽度采用3.75 m；《公路隧道设计规范》^[2]第4.4条规定：设计速度为80 km/h时，车道宽度采用3.75 m，但3车道隧道增加车道的宽度不得小于3.5 m。因此，在设计阶段，需要论证车道宽度变化对车辆运行的影响。

车道宽度变化时，许多反映车辆运行特征的因素会随之变化^[3]，如车辆行驶速度等。在评价车辆运行特征时，车速与行驶轨迹偏移是2个常用指标。VANDER等^[4]通过事故率与车辆运行数据的相关性分析，发现车速和轨迹是引起路侧事故与单车事故的主要因素；BELLA^[5]评估了不同平曲线设计要素对车速的影响；YANG等^[6]通过对比不同场景下车速、轨迹的差异，分析了路肩设计对于车辆运行的影响。隧道车道设计宽度对于车辆运行的影响，目前缺乏研究，其中数据获取难是一个主要原因。近几年，越来越多的研究者开始利用驾驶模拟器分析道路设计中的问题，BELLA^[7]的成果已经证实，先进的驾驶模拟器是研究道路设计问题的有效工具；BELLA^[8]采集现实乡村公路车速数据，通过对比模拟试验，肯定了数据的相对有效性。YAN等^[9]通过对比现实数据和驾驶模拟数据，指出模拟器可以支持交通工程分析研究。

鉴于此，笔者将利用同济大学8自由度高仿真驾驶模拟器的试验平台，建立内侧车道宽度不同的2个隧道模型，运用配对t检验方法，研究隧道内侧车道宽度对车辆运行的影响。

1 驾驶模拟试验

1.1 试验设备

同济大学驾驶模拟器具有8自由度的运动系统，横、纵向活动范围为5 m × 20 m。驾驶模拟车

辆是一辆小型客车Renault Megane III，内饰齐全，去除发动机，加载了力反馈系统。投影系统的水平视角为250°，有5个投影仪内置于驾驶舱，每个投影仪的分辨率为1 400 × 1 050，刷新率为60帧/s，投影效果逼真。后视镜由3块LCD屏幕组成。

1.2 隧道建模

驾驶模拟隧道建模是依据道路所在位置的地形数据和道路的设计数据，建设一个与现实接近的虚拟道路环境，使参与者通过驾驶模拟器操作，模拟现实道路中的驾驶行为。隧道虚拟现实模型开发工作流程如图1所示。

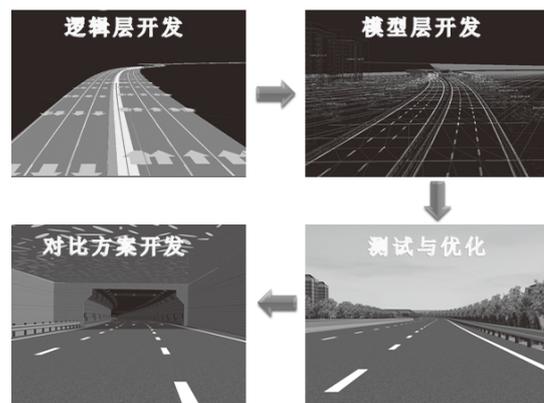


图1 隧道模型开发流程

Fig.1 Tunnel model development process

道路逻辑层的开发需精确地还原设计图中道路平、纵线形设计及道路超高。模型层开发主要包括建立道路场景、绘制地形3D效果图、建立隧道内环境设施。测试与优化阶段是为了让隧道模型更顺畅地在驾驶模拟器引擎中运行，并提供一个接近真实的虚拟环境。

隧道照明按照沿江隧道照明设计方案进行设置，满足《公路隧道通风照明设计规范》^[10]和《公路照明技术条件》^[11]的相关要求。隧道洞口及景观的建模严格依照隧道设计文本。为消除进出隧道洞口时的黑洞效应及白洞效应，确保行车安全，在隧道两端洞口内外设置了光过渡段。隧道洞口均采用自然光过渡，全长80 m。模拟场景中隧道侧墙装修与设计一致。隧道墙面基色采用乳白色，单块板采用长方形，部分板材做成有色板材，以减少驾驶环境的单调性。

开发对比方案是为满足对比试验的要求，根据设计图的详细数据，采用控制变量的方法，共

设置2种道路场景，2种场景对应2种设计方案。方案1为内侧车道3.75 m，方案2为内侧车道3.5 m，其余设施及设计参数均保持一致（图2）。

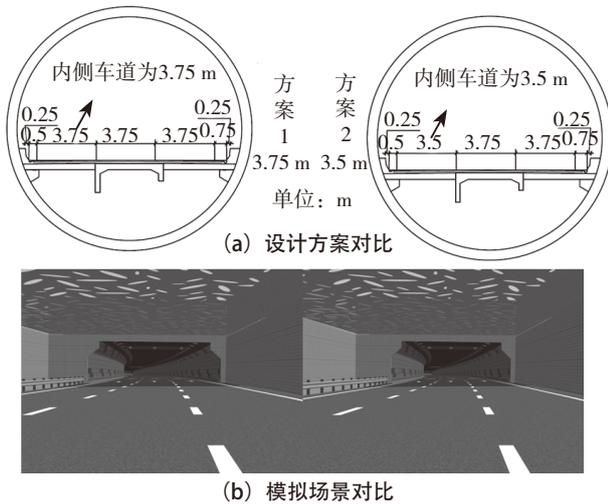


图2 隧道横断面设计方案对比
Fig.2 Cross section designs of two tunnels

1.3 试验设计与数据采集

试验时段为白天，隧道外部开放路段天气状况良好，路面干燥，能见度好。

为提高模拟场景真实性，尽量减小环境车辆对驾驶行为的影响，内侧车道在驾驶车辆前后设置少量驾驶限速为60~90 km/h的小客车。其余2车道根据工程可行性预测结果，设置的交通量为6 000 pcu/h，客货比为3:7。

试验总共分为3部分：试验前准备、试驾以及正式试验。

1) 试验前准备：工作人员向试验人员介绍试验内容与模拟器操作，包括启动、制动，方向盘、油门、刹车的使用。并对试验人员进行问卷调查：包括个人信息、驾驶经验，尤其是隧道驾驶经验的基本信息。

2) 试驾：测试驾驶员进入驾驶舱，根据自身情况调节座椅等，熟悉驾驶舱环境。进入试驾环节，场景包含直线路段、转弯、超车、刹车等，在试驾场景中驾驶5 min，熟悉驾驶环境和各项基本驾驶操作。

3) 正式试验：进入正式测试环节，车辆起始位置在内侧车道。屏幕上出现限速80 km/h的提示标志，驾驶员启动车辆，驾驶车辆完成研究路段行驶任务。行驶中会通过2个测试的隧道，对应

2种设计方案。在驾驶时工作人员不会告知驾驶员2个隧道的差异。

试验共招募8名驾驶员。考虑样本的代表性，选择不同类别驾驶经验的测试人员进行试验（表1）。主要包括驾龄小于4年的新手驾驶员、驾龄在4~10年之间的经验驾驶员以及驾龄在10年以上的熟练驾驶员。原始数据以每隔0.1 s的频率记录。每一位试验人员完成所有驾驶任务后，从控制软件中读取驾驶员在2种隧道场景中车速以及轨迹偏移数据。

表1 试验样本分类
Tab.1 Different types of participants

驾驶员分类特征	分类标准	人数	所占比例/%
性别	男	6	75
	女	2	25
年龄	<30	4	50
	30~40	3	37.5
	>40	1	12.5
驾龄	<4 (新手驾驶员)	3	37.5
	4~10 (经验驾驶员)	3	37.5
	>10 (熟练驾驶员)	2	25
执照类型	B2 (大型货车)	2	25
	C1 (手动挡小型车)	6	75
驾驶经历	有模拟器驾驶经历	6	75
	有游戏机驾驶模拟器的驾驶经历	6	75
	驾驶中发生过较大的交通事故 (有人受伤或财产损失严重)	0	0
	驾驶中发生过轻微的交通事故 (无人受伤且财产损失不严重)	2	25
隧道开车频率	在隧道驾车时发生交通事故	0	0
	从不	2	25
	偶尔	2	25
	经常	4	50

2 车辆运行分布特性分析

车辆运行特性分析主要包括驾驶员平均车速分布、平均轨迹偏移分布。研究范围包括隧道路段以及隧道出入口影响路段，即隧道入口前300 m和隧道出口后300 m范围。以路段5 m长度为一个间隔，整理车辆的运行数据，在计算所有驾驶员各断面的平均车速、平均轨迹偏移基础上，绘制运行数据分布图，分析2种场景下运行数据分布的异同。

2.1 车速分布对比分析

统计驾驶员在每个断面的平均车速值，比较不同场景车速大小、车速变化的差异性。分析内侧车道宽度由3.75 m减小到3.5 m是否会导致车速的显著提高。分析车道宽度的减小是否会导致车

速剧烈变化，引起车辆行驶混乱。沿江隧道除进出口路段外纵坡平缓，影响车辆运行的主要是平面线形。绘制不同车道宽度下平均车速-平曲线曲率图，如图3所示。

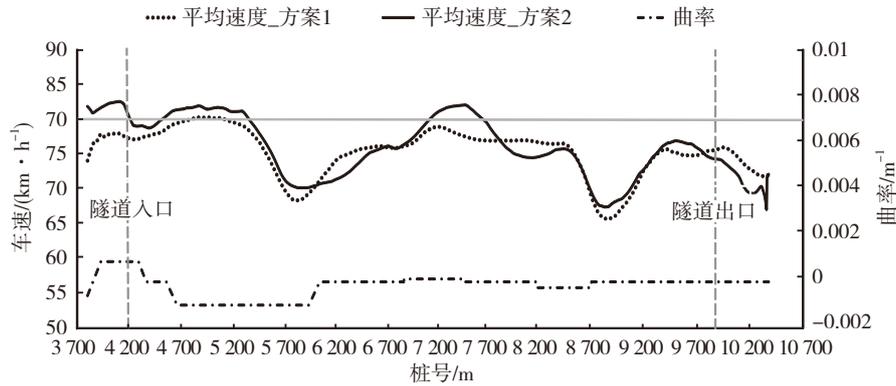


图3 隧道路段车速分布对比
Fig.3 Speed distribution for two different tunnel sections

不同车道宽度设计方案下，各路段车速分布基本保持一致。2个方案下平均车速基本一致，速度分布差异基本保持在5 km/h以内，说明车道宽度的减小，没有对车速及车速的离散性造成影响，驾驶员依然能保持接近限速行驶。

平均车速分布无法完全反映车道宽度的减小对每一位驾驶员运行车速的影响，需要运用统计学方法对比各驾驶员在2种方案下运行车速影响的显著性。

2个方案下，整个隧道路段车速变化趋势基本保持一致，在隧道内部线形变化位置，行驶车速有轻微波动，波动幅度均在10 km/h之内。说明车道宽度的轻微调整对于隧道路段车速变化趋势影响甚微，2种车道宽度设计方案下，驾驶员驾驶习惯保持一致。

2.2 轨迹分布对比分析

在所有驾驶员轨迹偏移平均值的基础上，比较2种场景下轨迹偏移绝对值以及轨迹偏移波动性的差异。进而判断车道宽度的减小是否会引起轨迹偏移的明显增大而影响车辆之间的安全距离，分析车道宽度的减小是否会引起轨迹波动幅度或者波动频率的增大，导致隧道路段驾驶混乱现象。绘制不同车道宽度下轨迹偏移-平曲线图，如图4所示。

2个方案下，不同断面平均车速有一定微小的差

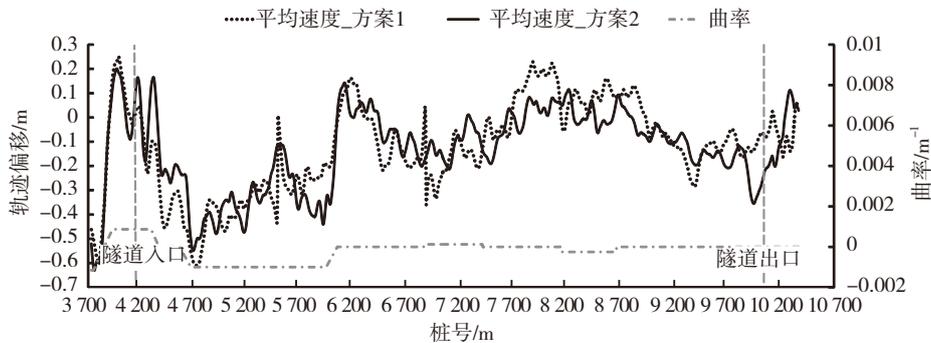


图4 2种方案下隧道路段轨迹偏移分布对比
Fig.4 Trajectory deviation distribution for two tunnel sections

2种方案下各路段轨迹偏移平均值基本保持一致，绝对值保持在0.5m以内，说明车道宽度的变化没有导致轨迹偏移绝对值增加，即车道宽度对车辆轨迹偏移没有产生明显影响。

2种方案下轨迹偏移的变化趋势基本保持一致，说明车道宽度的轻微调整没有对驾驶员的驾驶行为造成影响，从而没有导致驾驶路径的较大变化。

2种方案下轨迹偏移分布图并不完全重合，因

此车道宽度减小对于轨迹偏移的量化影响无法从分布图反映。轨迹偏移离散性变化规律在不同路段有所差异，规律不明显。直观分布图无法准确反映车道宽度对于轨迹偏移大小的影响，需应用统计学工具，检验车道宽度对于轨迹偏移的影响。

3 运行数据配对t分布检验

配对t检验是指样本成对比较时，检验研究因素对结果的影响，是一种常用的检验2类样本差异

显著性的统计学工具。用t分布理论来推论差异发生的概率，从而比较2组数据是否存在显著差异。

基于配对t分布方法，以个体驾驶员在不同场景下的运行数据为配对样本，研究车道宽度的减小对于驾驶数据影响的显著性。从平均车速、轨迹偏移分布图可以发现，在相同平面线形路段，运行数据有一定的相似性。因此，基于平曲线要素，将隧道路段分为图5所示的7个路段（LD1—LD7）。

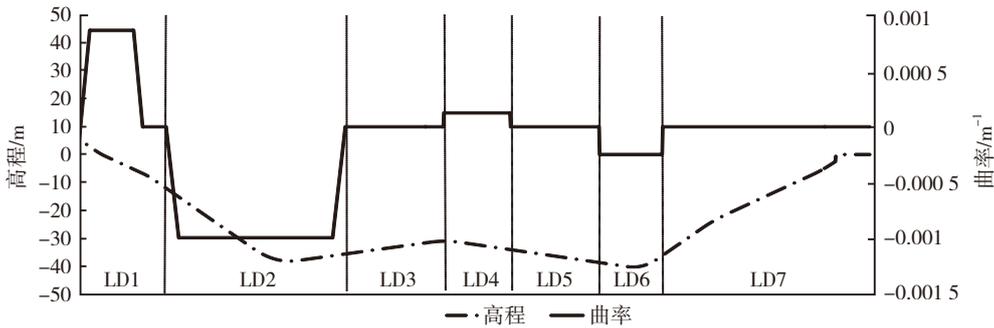


图5 隧道路段分段
Fig.5 Segment distribution of tunnel

统计个体驾驶员在不同方案下每个路段的平均车速、平均轨迹偏移，通过配对t分布统计方法，比较2种设计方案下每个驾驶员在车速选择以及轨迹控制的差异性，分析车道宽度设计对车辆运行影响的显著性。公式如下：

$$t = \frac{\bar{d}}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\gamma\sigma_1\sigma_2}{n-1}}} \quad (1)$$

式中： \bar{d} 为2种方案下所有路段的观测值平均值之差； σ_1 和 σ_2 分别为2种方案下，不同路段的样本方差； γ 为样本相关系数； n 为样本量。

利用配对t分布方法，检验2种车道宽度下，车速及轨迹偏移变化的显著性（表2、表3）。

表2 隧道各路段车速差异性检验
Tab.2 Paired t-test of speed on each segment

路段	LD1	LD2	LD3	LD4	LD5	LD6	LD7
t值	-1.25	-1.64	1.29	-2.20	-0.01	0.17	-0.03
p值	0.25	0.144	0.239	0.064	0.993	0.871	0.979

表3 隧道各路段平均轨迹偏移差异性检验
Tab.3 Paired t-test of trajectory deviation on each segment

路段	LD1	LD2	LD3	LD4	LD5	LD6	LD7
t值	-0.51	0.32	0.97	1.12	0.93	0.80	1.78
p值	0.624	0.755	0.366	0.071	0.382	0.449	0.117

2种方案下，车辆在各路段车速与轨迹偏移均没有显著差异，p值均大于0.05。检验结果表明，3车道隧道内车道宽度由3.75 m减小到3.5 m，不会导致运行车速的显著增大与显著减小，也不会导致轨迹偏移的显著减小或增大。

4 结论

对于采用盾构工艺的设计车速为80 km/h的双管6车道高速公路隧道，基于驾驶模拟试验，从运行车速、轨迹偏移2个角度对比分析不同隧道车道宽度对于车辆运行特征的影响。采用分布对比图以及配对t检验方法展开研究，得出如下结论：

1) 内侧车道宽度为3.75 m和3.5 m的隧道路段，驾驶员平均车速的变化趋势基本保持一致，平均车速没有明显的增大或减小，断面车速差异不超过5 km/h。

2) 内侧车道宽度为3.75 m和3.5 m的隧道路段，驾驶员平均驾驶轨迹的变化趋势基本保持一致，各断面平均驾驶轨迹值总体差异不大。

3) 统计分析表明，车道宽度由3.75 m减小至3.5 m，对于每一位个体驾驶员的运行车速、轨迹偏移没有显著的影响。

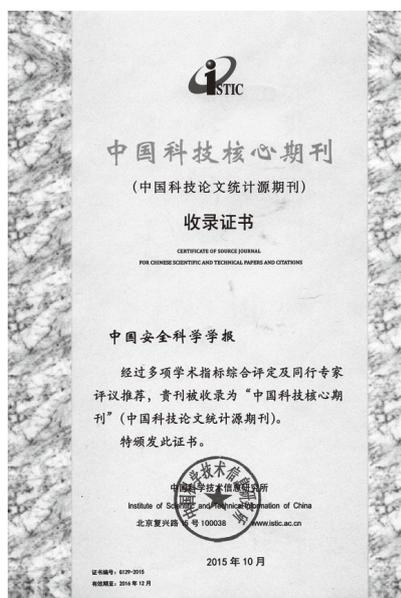
参考文献

- [1] JTG B01—2003, 公路工程技术标准[S].
JTG B01-2003, Technical standard of highway engineering[S].
- [2] JTG D70—2004, 公路隧道设计规范[S].
JTG D70-2004, Code for design of road tunnel[S].
- [3] 彭桔志. 钱塘江隧道车道宽度设置分析[J]. 交通标准化, 2007(5):218-220.
PENG Jiezh. The width setting between roadways in tunnel of Qiantangjiang river[J]. Communication Standardization, 2007(5):218-220.
- [4] VANDER H R, DE R S. Influence of roadside infrastructure on driving behavior: driving simulator study [J]. Transportation Research Record, 2007, 2018 (1): 36 - 44.
- [5] BELLA F. Coordination of horizontal and sag vertical curves on two-lane rural roads: driving simulator study[J]. IATSS Research, 2015, 39(1): 51-57.
- [6] YANG Q, RYAN O, LEE D H. The influence of curbs on driver behaviors on four-lane rural highways-a driving simulator based study [J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 50:1 289-1 297.
- [7] BELLA F. Can driving simulators contribute to solving critical issues in geometric design[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2138(1):120-126.
- [8] BELLA F. Driving simulator for speed research on two-lane rural roads [J]. Accident Analysis and Prevention, 2008, 40(3):1 078-1 087.
- [9] YAN X D, ABDEL-ATY M, RADWAN E, et al. Validating a driving simulator using surrogate safety measures[J]. Accident Analysis and Prevention, 2008, 40(1):274-288.
- [10] JTJ 026.1—1999, 公路隧道通风照明设计规范[S].
JTJ 026.1-1999, Specifications for design of ventilation and lighting of highway tunnel[S].
- [11] GB/T 24969—2010, 公路照明技术条件[S].
GB/T 24969-2010, Specification for highway lighting[S].



作者简介：王雪松（1977—），男，山西忻州人，教授、博士生导师，主要从事道路交通安全方面的研究。E-mail: wangxs@tongji.edu.cn。

《中国安全科学学报》再次被收录为 中国科技核心期刊



《2015年版中国科技期刊引证报告（核心版）》以“中国科技论文与引文数据库”（CSTPCD）为基础，在各学科领域中选择学术质量较高、影响较大的重要期刊作为来源期刊，即“中国科技核心期刊”。从2015年开始，数据库覆盖的范围扩展到社会科学领域，学科类别增加到153个。交叉学科和跨学科期刊复分到2个或3个学科分类。

《中国安全科学学报》再次被收录为中国科技核心期刊，同时，《中国科技期刊引证报告（核心版）》显示，2014年《学报》的主要指标如下：核心总被引频次为2522，在7种安全科学技术类期刊中排名第一；核心影响因子为0.911，在7种安全科学技术类期刊中排名第三；综合评价总分为66.5，在7种安全科学技术类期刊中排名第三；学报扩散指标为64.86，学科影响指标为0.86。