

基于视频数据的城市隧道交通运行特征与安全研究*

王雪松¹ 副教授 石琦² 高珍³

(1 同济大学 交通运输工程学院 上海 201804

2 中佛罗里达大学 土木与环境工程系 美国佛罗里达州奥兰多市 32816

3 同济大学 软件学院 上海 201804)

学科分类与代码:6206010(安全管理工程)

中图分类号:X951;U491

文献标志码:A

资助项目:上海市浦江人才计划(09PJ1409900);同济大学“十二五”教学改革与研究(交通统计分析课程建设研究);
教育部新教师(20090072120016)。

【摘要】 为降低城市隧道交通事故率,提高车辆出行安全,以上海市翔殷路跨江隧道为研究对象,利用视频采集技术、车辆跟踪调查采集隧道交通运行数据,分析城市隧道交通运行特征及驾驶员在隧道内驾驶行为特征,并进一步研究其与隧道交通事故的关系。对隧道内车辆的速度、密度分布,变道行为进行分析,发现隧道南线入口处内外断面平均车速的显著差异可以解释该处追尾事故高发,隧道内车辆频繁变换车道导致隧道侧碰事故占较大比例。为改善城市隧道交通安全,在隧道内进行限速和限制车辆变道是必要的。

【关键词】 快速路隧道; 事故特征; 视频数据; 运行特征; 驾驶特征

Urban Tunnel Traffic Operating Characteristics and Its Safety Study Based on Surveillance Camera Data

WANG Xue-song¹ SHI Qi² GAO Zhen³

(1 School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China

2 Civil and Environmental Engineering, University of Central Florida, Orlando 32816, US

3 School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to enhance traffic safety in urban tunnels, the traffic operational and safety characteristics of Xiangyin tunnel in Shanghai were investigated. By means of video data from the tunnel operation monitoring camera and vehicle tracking survey, the average speed and vehicle density of different sections, the average speed of different lanes for the same section and the lane changing behaviors in Xiangyin Tunnel were analyzed in this study. The results indicate that the considerable speed difference near the tunnel entrance of south line might be responsible for the rear-end crash occurrence of this area. Frequent lane changes cause sideswipe collisions. Appropriate speed limit and prohibition of lane-changing behaviors are necessary. This study aids the understanding of traffic operations and driving characteristics in urban tunnels.

Key words: urban expressway tunnel; crash patterns; video camera data;
traffic operational features; driving characteristics

* 文章编号:1003-3033(2011)08-0129-09; 收稿日期:2011-05-21; 修稿日期:2011-07-28

0 引言

城市越江隧道具有引道短、拆迁量小、不妨碍江河航运、交通通行不受气候状况影响等优点。随着城市人口增加、规模扩大,在一些跨江发展的城市,越江隧道已成为解决城市交通问题的重要手段。南京玄武湖隧道通车后,通行时间由原来的0.5 h缩短为3~4 min,并使地面主干道的车流容量增大1倍。武汉长江隧道建成后,长江大桥、长江二桥的交通压力大为缓解。杭州原规划建设钱江十桥,但考虑大桥建造影响钱塘江景观,最终改为隧道方案。上海市已建成13条越江隧道,规划建设的隧道还有8条。连接上海浦西和浦东新区的翔殷路隧道是我国“十五”期间建设的直径最大、距离最长、行车速度最快的城市越江隧道,总长度2.6 km,设计最高行车速度80 km/h,双向4车道(图1)。自2005年通车至今,车流量持续上升(增加13倍),交通事故和车辆抛锚事件呈上升态势。

国内外学者对公路隧道已进行过大量研究,主要包括基于事故数据分析公路隧道施工特征,结合事故数据和公路隧道特征建立隧道安全评估模型,基于驾驶模拟器分析驾驶员在公路隧道特殊行车环境下生理、心理反应。实际运行表明,城市隧道交通事故发生频率高,且由于隧道的封闭性和躲避空间的局限,一旦发生事故,往往造成多车相撞,中断隧道交通,人员财产损失严重。但是,国内外鲜有学者针对城市隧道,深入研究其交通运行状况和交通安全。为监测隧道内违规驾驶、预防交通事故及火灾,一般城市隧道都安装了完备的视频交通监控系统,如翔殷路隧道南、北线分别有25个、24个探头,但迄今没有研究利用隧道内视频监控数据分析车辆在隧道内的运行状况与交通安全。利用交通监控设备获取大量实时数据,研究车辆在隧道实际行驶状况、驾驶行为与交通安全的关系。研究有助于深入了解隧道交通运行状况和车辆行驶特征,为改进隧道交通运行状况和隧道交通安全提供基础。

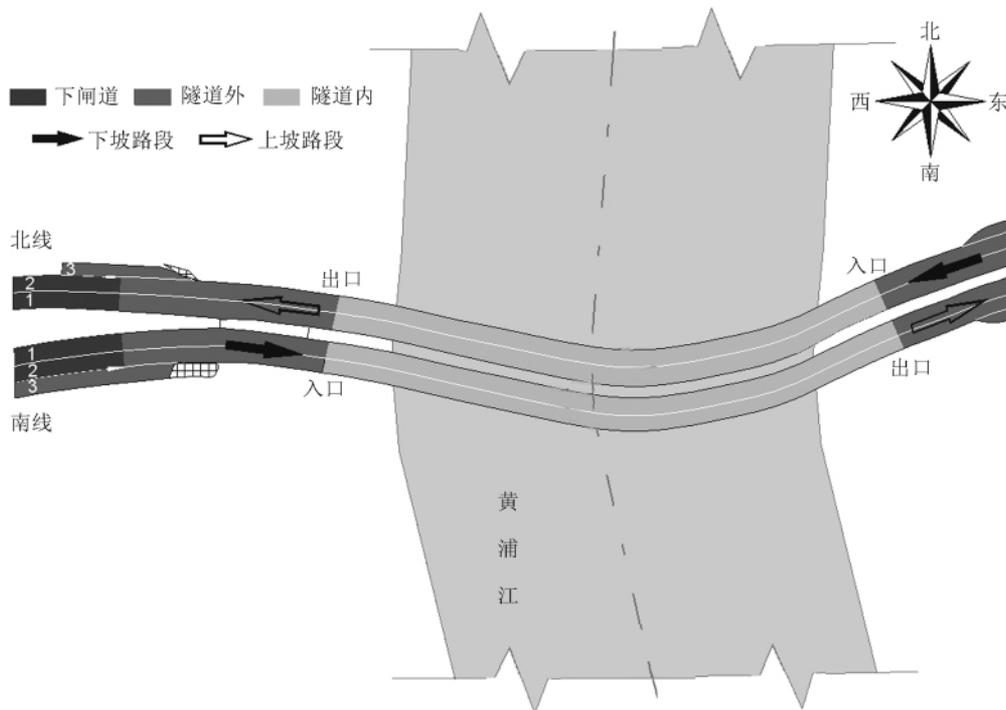


图1 翔殷路隧道区位示意图

Fig.1 Xiangyin road tunnel

1 翔殷路隧道事故特征

翔殷路隧道事故工作日多、周末少。工作日翔殷路隧道事故集中于早晚高峰时段。图2为翔殷路隧道日小时交通量及事故分布。其中,平均早晚事故高峰分别占到全天事故的13.1%和12.3%。隧

道每日早晚高峰分别发生在南线和北线,交通流表现出明显的方向性,反映出城市隧道受到整个城市交通特征,市民通勤出行的显著影响。事故分布变化与小时交通量变化不完全一致。早高峰时事故发生率最大时段迟于交通量最大时段,晚高峰时事故发生率最高时段也是晚高峰交通量最大时段。

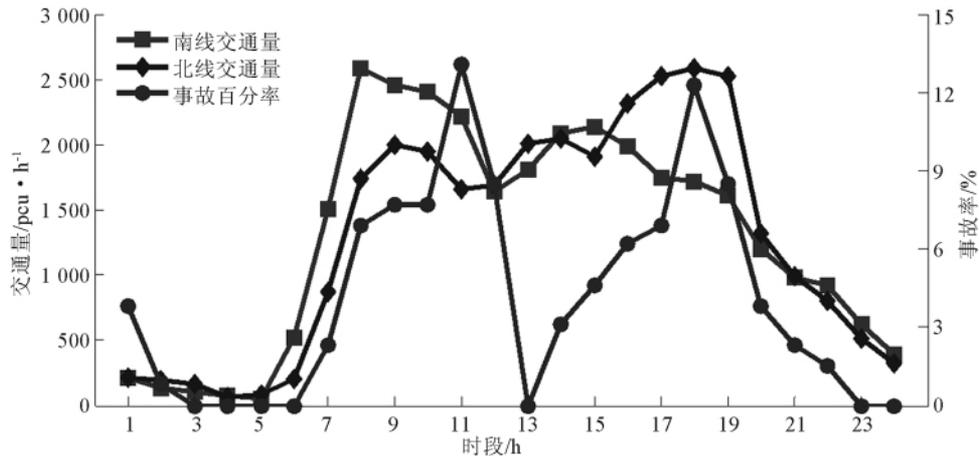


图 2 翔殷路隧道交通量、事故率日分布

Fig. 2 Daily distribution for traffic volume and crash percentage

从事故统计中可知,翔殷路隧道南线入口处范围事故数最多,占事故数的 56%,其次为北线出口处,占总事故数的 23%。翔殷路隧道事故形态主要是追尾碰撞(73%)、侧向碰撞(6%)。事故报告显示,这些事故的主要原因是前后车距不足(72%)和车辆变道不当(20%)。

2 隧道安全相关研究

国内对隧道交通安全的研究主要集中于公路隧道,对城市隧道的研究较少。已有的城市隧道交通安全研究主要包含了隧道事故分析、隧道火灾防护、隧道安全评价、预警体系的建立等方面的研究。胡锡岭^[1]从驾驶员、车辆、道路和交通量方面定性分析了城市道路隧道交通事故发生的一般原因,提出隧道水泥路面的防滑措施。张伟等人^[2]根据城市隧道特点,分析了隧道内火灾产生的原因,并提出了相应的防火措施。肖劲夫等人^[3]对城市公路隧道预警指标的选择进行了研究,提出了预警系统的基本配置以及预警指标设立的依据。西南交通大学的王云^[4]利用层次分析法建立城市交通隧道安全系统评价指标体系,进而用模糊数学方法为城市交通隧道安全系统建立了二级模糊综合评价模型,对城市交通隧道运营安全性进行综合评价。

国外的研究不特别区分公路隧道或城市道路隧道。研究内容包括:隧道内车辆起火、有毒气体排放等问题,事故时、空间分布特征,驾驶员心理对交通安全的影响,利用驾驶模拟器分析驾驶员在隧道内的具体行为。Haack^[5], Vuilleumier^[6]以及 Mashimo^[7]的论文中都介绍了关于隧道起火带来的问题和相应的预测模型与对策。Amundsen, F. H.^[8]的

研究详细分析了挪威隧道的安全状况,对发生的交通事故进行了仔细的分类,并分析了隧道长度、车道宽度、路况、光照情况和交通量与事故时空分布的关系。Vashitz, Shinar 等人^[9]从驾驶员心理角度分析了隧道行车的安全问题,指出车载信息系统可提高隧道行车的安全性。Tomros^[10]使用瑞典国家道路交通研究院驾驶模拟器进行了隧道内的驾驶研究,发现在驾驶模拟环境下车速要高于真实隧道行驶环境下的车速,车辆行驶的位置也更靠近隧道壁。Manser^[11]运用驾驶模拟器研究了隧道内壁的纹理、装饰等特征对驾驶安全性的影响,认为逐渐变窄的纹理能有效降低驾驶员选择的车速,使驾驶员选择偏安全的低车速通过隧道。

国内外对于城市隧道的安全研究大都集中于利用事故数据对隧道安全特性进行研究,建立安全、预警的评估模型,利用模拟设备对驾驶员的行为和心理进行探究。没有文献研究车辆在隧道内实际行驶状况、驾驶行为与交通安全的关系。现有的交通监控设备提供了车辆通过隧道时运行状况的大量数据,了解车辆进出隧道、在隧道中的行驶状况有助于深入了解事故原因。

3 数据采集与处理

翔殷路隧道内密布视频采集设备,是利用视频技术进行隧道安全研究的理想场所。选择南北两侧间隔大致相等处的探头(编号按行车顺序从断面 1~断面 7)录取视频数据。利用采集的视频,获取不同类别车辆在整个隧道行驶过程中各个区间的车速、车头时距等基本参数,并通过标准车换算,得到各断面交通密度,与隧道内交通事故的空间分布做

相关分析,并分析事故发生原因和常见形态。

各种车型的车头时距:将同类型车辆的车头时距整理在一起,用样本标准偏差的2倍来剔除异常数据,车头时距应在平均值 $\bar{h} \pm 2s$ (\bar{h} 为车头时距, s 样本偏差),算出各种车型的平均车头时距。车辆换算系数:在混合车流中有大、中、小3种车型,以小轿车为标准车,将大车及中车乘以各自换算系数,成为当量小车的^[12]。

$$\alpha_m = \frac{\bar{h}_m}{\bar{h}_s} \tag{1}$$

$$\alpha_l = \frac{\bar{h}_l}{\bar{h}_s} \tag{2}$$

上两式中: α_l α_m 为大车及中车换算成当量小车的换算系数, \bar{h}_l \bar{h}_m \bar{h}_s 为大车、中车、小车平均车头时距。

正常情况下,车辆通过翔殷路隧道用时约2 min。翔殷路隧道并未禁止车辆在隧道内行驶时由一条车道转换至另一车道,每当发生一次上述行为,记为一次变道行为。通过车辆跟踪调查的方法,分析各类车辆在隧道中行驶过程中的变道行为,研究变道行为对隧道内交通安全的影响。此次调查总共跟踪了105辆车,其中南线60辆,北线45辆。翔

$$H_1 = \left\{ (x_1 \dots x_m \ y_1 \dots y_n) : t = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{s_w \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n}}} > t_{1-\frac{\alpha}{2}}(m+n-2) \right\} \tag{3}$$

式中: x y 为不同车道的样本, m n 分别为 x y 的样本大小, i 代表任一观测值序号, s 为检验 t 分布标准差,其表达式为:

$$s^2 = \frac{1}{m+n-2} \left[\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right] \tag{4}$$

4.1 车速空间分布的不一致性

4.1.1 相邻测速断面车速一致性检验

断面速度分布如图3显示,隧道南线从入口较远处(断面1)至隧道入口处(断面3)的不同断面,车速降低;车辆驶入隧道后,速度显著提高;在整个隧道内部速度较高,在隧道中甚至超过限速(80 km/h);车辆在驶离隧道时速度又逐渐降低。在隧道北线,车辆在进出隧道的整个过程中速度变化规律与南线相似,隧道内部车速高,在进入隧道前和离开隧道后车速较低。但与南线不同的是,北线

殷路隧道禁止货车通行,因此,将车辆类型分为小客、中客、大客、公交、出租车这5类。利用视频跟踪调查的方法得到车辆的变道行为特征,深入了解翔殷路隧道的交通运行特征,理解该隧道事故的成因。

4 隧道交通特征分析

利用视频检测数据分析交通运行特征,分析事故发生的原因,探究交通特征和驾驶员在隧道内驾驶行为对事故发生的潜在影响。车速是了解车辆在隧道内行驶状态的重要依据。当相同车道前方车辆速度显著小于后方车速时,容易引起追尾事故;当相邻车道车速差异显著时,则会引起驾驶员心理紧张,若伴有车辆变道,则相邻车道容易引起侧碰等事故。因此,分别从同一车道前后相邻测速断面车速一致性和相同测速断面相邻车道车速一致性2个方面,对车辆在隧道内的速度分布进行检验。

对视频资料中的大量样本进行统计分析,采用T-test方法检验相邻测速断面/相同测速断面相邻车道车速是否相同,驾驶车速分布均服从正态分布,且方差相等。显著性水平 α 为0.10。评价条件如下:

车辆在进入隧道前车辆减速并不显著。这是由于南线从中环高架进入隧道的过程中距离入口处有一驶入匝道,主线车流受匝道车辆影响。北线入口汇车处较为开阔,主线车流不需要明显减速。北线出口处有一驶出匝道,主线车辆发生了明显的减速。由此可见,城市环线与越江隧道结合时,环线出入口对于隧道交通具有显著影响。

车辆在穿越隧道时的安全行车原则为慢进快出。在隧道出入口处由于隧道与外界环境的明暗变化,驾驶员受到暗效应和明效应的影响,驾驶行为会发生改变。车辆在隧道出入口速度较慢,隧道内部速度较快。另外,车辆在隧道入口和出口处的速度变化,表明暗效应对于驾驶员的影响强于明效应,这可能是隧道入口处事故比隧道出口处更多的重要原因。

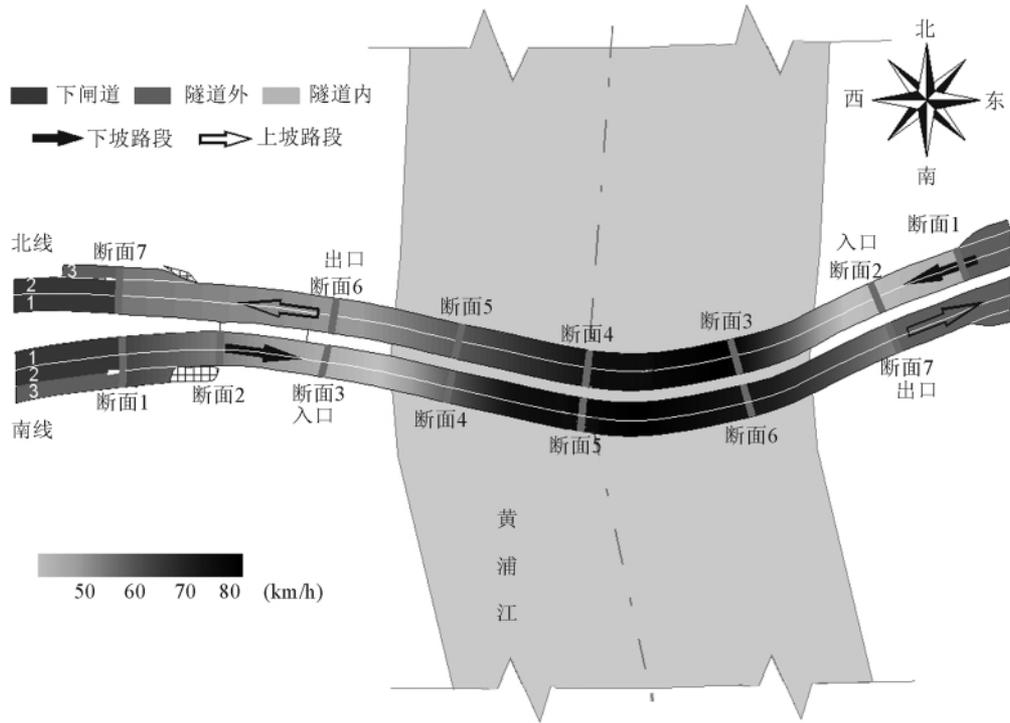


图 3 翔殷路隧道断面速度图示

Fig. 3 Zonal average speed in Xiangyin tunnel

表 1 翔殷路隧道断面车速

Table 1 Zonal average speed in Xiangyin tunnel

km/h

测速断面	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4	断面 5	断面 6	断面 7
北线	51	48	77	73	63	54	58
南线	67	55	46	77	83	74	56

车辆在驶入隧道入口时, 驾驶员会提前减速以适应环境变化。而根据大量隧道事故报道, 隧道入口处的事故常常是驾驶员在驶入隧道之前没有对暗效应做好准备(未摘太阳镜或未提前减速), 以较高的车速进入隧道后视觉受到影响, 与前方已经减速的车辆发生追尾事故。在隧道出口处, 由于车辆在隧道内速度较高, 驾驶员不重视明效应的影响, 未提前减速, 造成追尾。因此, 应对慢进快出的原则作出适当调整, 在隧道出口仍应谨慎减速。

车辆进入隧道后, 在隧道内部行驶的速度较高, 甚至超过限速。根据 Manser 与 Hancock 的隧道模拟驾驶研究, 在仿真环境中, 驾驶员的驾驶速度在

没有仪表盘的情况下会大于有仪表盘的情况, 认为驾驶员在隧道内驾驶时感受到的速度要低于车辆实际运行的速度^[11]。在隧道环境中, 光线较暗, 驾驶员极有可能忽略仪表盘而依据自己所感觉到的速度驾驶, 造成车辆在隧道内高速接近甚至超过限速。

将翔殷路隧道 7 个测速断面的车速样本数据进行 T-test 检验。检验结果(表 2)表明, 车辆在翔殷路隧道行驶时在不同区域速度的差异非常明显, 缺乏连贯性。由进入隧道至离开隧道的过程中会反复出现减速和加速, 对于驾驶员驾驶的连续性产生不利影响, 车速的不一致性可能导致事故发生。

表 2 相邻断面速度差异性检验

Table 2 Speed difference test

km/h

相邻测速断面		断面 1-2	断面 2-3	断面 3-4	断面 4-5	断面 5-6	断面 6-7
北线	T 值	2.886	-20.449	2.063	6.826	7.846	3.085
	(p 值)	(0.005)	(0.000)	(0.042)	(0.001)	(0.000)	(0.003)
南线	T 值	8.604	11.391	-36.802	-9.104	6.885	11.208
	(p 值)	(0.001)	(0.001)	(0.000)	(0.000)	(0.001)	(0.000)

从交通密度的变化来看(图4),南北线车辆在隧道入口及出口处交通密度大于隧道内部不同断面。反映出当驾驶员周围环境发生变化时,驾驶员

的驾驶行为也会发生显著地变化。北线出口附近最大交通密度明显小于北线入口处,可以看出驾驶员在离开隧道时受环境影响比进入隧道时要小。

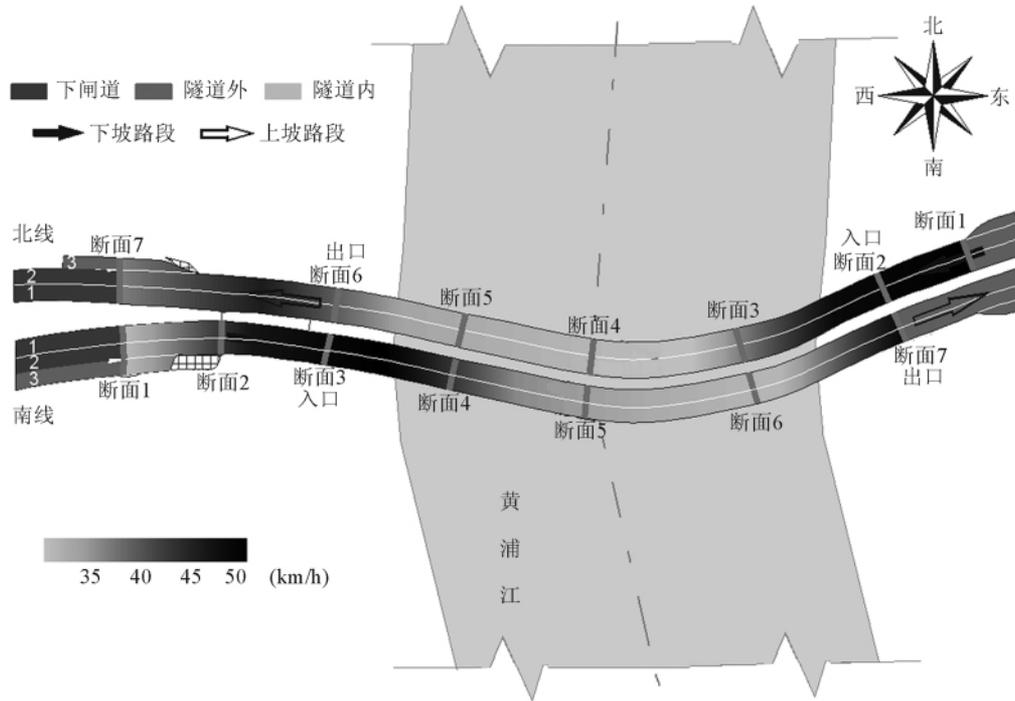


图4 翔殷路隧道断面交通密度图示

Fig.4 Traffic density in Xiangyin tunnel

表3 翔殷路隧道断面交通密度

Table 3 Traffic density in Xiangyin tunnel

km/h

观测断面	断面1	断面2	断面3	断面4	断面5	断面6	断面7
北线	37.4	48.6	33.8	31.9	30.1	52	54.4
南线	26.5	46.8	51.3	33.3	29.5	27.7	50.7

4.1.2 相同测速断面不同车道车速一致性检验

翔殷路隧道为双向双车道隧道,分别对南线、北线的相同测速断面进行不同车道的 T-test 一致性检验。检验结果说明,车辆在进入隧道前或刚刚进入隧道的阶段相邻车道上车速趋于一致,而在即将离开隧道前或者离开隧道后不同车道上的车辆会不一

致(表4)。相同断面车速不一致说明该区域易出现超车现象,超车现象会给驾驶员造成心理压力。在断面7,断面相邻车道车速不一致是由车辆分流造成。在这一区域由于前后车辆车速不一致和相邻车道车速不一致同时发生,大大增大了发生追尾或侧碰事故的风险。

表4 各断面车速一致性检验

Table 4 Speed consistency test

km/h

测速断面	断面1	断面2	断面3	断面4	断面5	断面6	断面7
北线	T 值	0.211	1.583	0.052	5.037	-1.829	1.350
	(p 值)	(0.834)	(0.122)	(0.959)	(0.999)	(0.071)	(0.181)
南线	T 值	0.858	-0.277	1.258	0.760	-3.144	0.805
	(p 值)	(0.398)	(0.784)	(0.216)	(0.449)	(0.002)	(0.423)

4.2 车辆在隧道内变道行为

车辆在行驶过程中,常由于超车或避险改变自

己的车道,发生变道行为。与公路隧道不同,公交车和出租车均为城市隧道特有的车种,相对稳定的占据了一部分交通量。在记录隧道内车辆变道情况的

时候,除了大、中、小客外,还将公交和出租车单独列出来。整理各类型车辆的变道情况(图 5)。

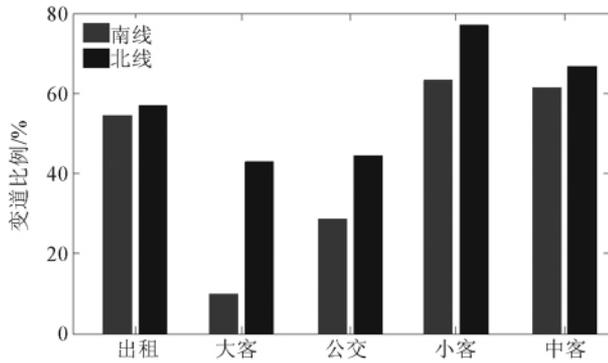


图 5 各类车辆变道情况

Fig. 5 Lane-changing according to vehicle types

从车型角度,大客车和公交车是最少变道的车型;相反,小客车是最常出现变道情况的车型。出租

车的变道次数明显少于其他小客车。大客和公交大多由职业驾驶员驾驶,载客量大,行驶速度一般低于小客车、中客车,基于车辆本身动力特性、安全考虑往往不会选择变道。小客车动力性能较好,在隧道内行驶速度较快,与大客和公交驾驶员相比,小客车驾驶员会更多作出变道超车的行为,减少通过隧道的的时间。出租车和中客介于公共和私人汽车之间。因此,出租车和中客驾驶员很可能在保证安全的条件下争取快速,在隧道内变道情况高于公交,大客低于小客。车辆在隧道内行驶,变道选择包括由内道变向外道或由外道变向内道,对隧道内车辆的变道选择进行统计,结果整理入表 5。可以看到,车辆变道时更倾向由内道变向外道,沿右侧车道行驶,尤其是公交。

表 5 隧道内车辆变道选择

Table 5 Preferred lane when changing lanes

车型		出租车	大客车	公交车	小客车	中客车	总计
变道次数	外道→内道	16	11	8	32	22	89
	内道→外道	20	13	19	38	25	115

南北两线分别安装有 25 个、24 个大约等距的探头机位,当车辆在隧道内变道时,被安装在该区域的探头记录,相应位置用南、北线与机位编号共同表示。调查中,对车辆发生变道时的隧道位置进行统

计(图 6)。北线各段的变道数都比较平均,而南线则在南线 16 和南线 21 的两区域内变道次数比较多,但总体而言,车辆在隧道内变道的空间分布并没有明显特征。

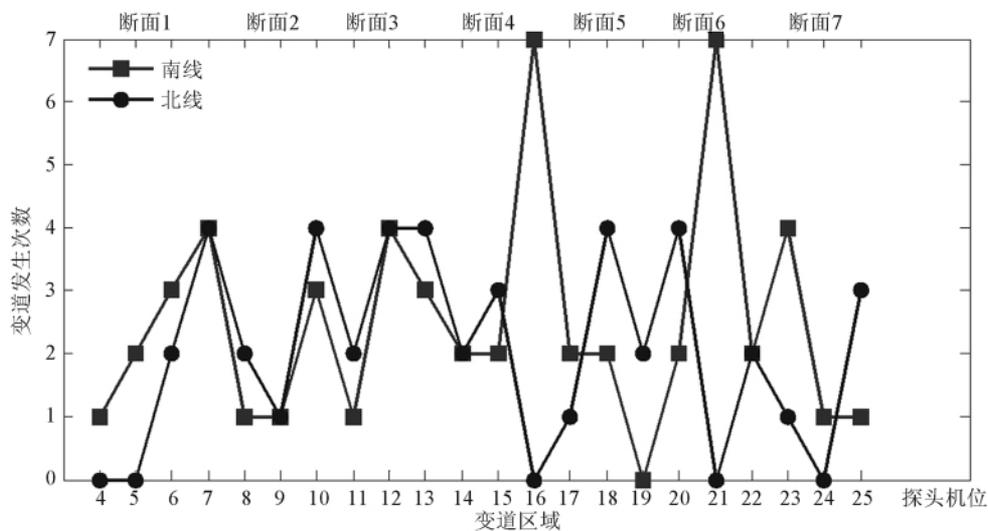


图 6 变道区域统计

Fig. 6 Cross section for lane-changing

隧道内车辆变道尤其是突然变道是引发隧道交通事故重要原因。根据隧道事故的报道,发现隧道内车辆变道往往是为了超车。尽管翔殷路隧道作为双管双向隧道,不存在车辆由于超车而与对向行使

的车辆发生碰撞的隐患,但仍会对同向车辆造成很大的安全威胁。在隧道内车速分析中,车辆在隧道内行驶时速度较高,并会出现超速行驶的现象。当车速较高,前后车距不足时,驾驶员变道最容易引起

交通事故。一方面,隧道内部为封闭空间,没有路肩,尽管不少隧道内部已经设置紧急停车带,但侧向闪避空间有限,对于驾驶员纠正错误驾驶行为和紧急避让都不利。另一方面,驾驶员在转向时如果存在违章操作(不打转向灯),会使旁道后方车辆突然减速或紧急转弯,容易引起追尾、侧碰或与隧道壁相撞。隧道内车辆变道既容易引起侧碰,也容易导致追尾事故的发生,是隧道交通安全的主要隐患之一。

5 隧道安全改善建议

通过对翔殷路隧道的交通运行、驾驶特征和事故特征进行分析发现,隧道交通事故多集中于早晚交通高峰时段。此时交通量大,且主要以通勤交通为主,因此,驾驶员要小心驾驶,控制车速,少做或不做变道。相应的改善措施如下:

1) 照明。隧道出入口是事故的高发区段,主要原因是隧道环境对驾驶员的视觉影响,因此,要尽量缩短驾驶员适应隧道环境的时间。隧道内车辆排出的尾气以及车辆经过带起的扬尘中的悬浮颗粒物超标,不仅降低了能见度也影响了照明设备的正常使用。改善隧道内空气流通状况和照明设施是改善视觉条件的重要手段,在很多城市中LED光源已经得到广泛使用。驾驶员在进入隧道前不应佩戴太阳镜,在驶入和驶离隧道前都应提前减速。

2) 限速。翔殷路隧道是国内行车速度最快的城市越江隧道。但是,车辆在进入隧道前的实际车速与限速有很大差距,导致车辆进入隧道后速度变化幅度较大,引发追尾事故。针对这种情况,可以考虑降低限速。对于限速的设定,要根据车辆进入隧道时的实际速度设置,可通过一定时间范围内的统计结果确定,通常取85%分位速。或根据天气、交通量等采用可变限速,减少车辆在短距离内发生大的速度变化的情况出现,增强驾驶过程中的连贯性和一致性,降低出现紧急操作的可能性。限速的显示,可采用电子屏幕,并在隧道内外多处设置,以反复提醒驾驶员保证安全车速。此外,对于隧道内超速行驶的现象,根据 Manser 与 Hancock 的隧道模拟驾驶研究发现:隧道内驾驶员视觉范围,隧道墙壁的

材料、图案对于驾驶员的驾驶速度均有影响。当隧道两壁采用逐渐变窄的条纹装饰时,驾驶员趋于降低车速,以较安全的速度通过隧道。

3) 限制变道。减少隧道内侧碰和追尾事故的发生,需限制隧道内车辆变道的行为,武汉和厦门等地都已经采取了行政措施禁止隧道内随意变道^[13-14]。

6 结论

通过隧道内现有的视频监控设备采集的大量实时数据,对隧道内车辆行驶特点和交通状况特点利用统计分析技术进行了系统研究,得出如下结论:

1) 车辆在隧道行驶整个过程的行驶特征。在隧道入口处由于暗效应驾驶员有明显减速行为,导致隧道入口处前后相邻断面间速度差异显著;在隧道内部车速较高甚至超速;在驶出隧道时由于明效应,伴随着减速,但减速小于驶入隧道时。车辆在隧道行车的整个过程中速度经历几次变化,且不同断面间车速变化显著。

2) 车辆在隧道行驶时的变道行为。车辆在隧道内部常伴有变道行为,小客车的变道行为最为频繁,变道以内道变至外道居多。基于同一断面相邻车道的车速差异分析表明隧道多个断面相邻车道之间速度差异显著。相邻车道间速度的显著差异可能诱发了变道行为。

3) 车辆在隧道内的速度变化以及变道行为易导致追尾和侧碰事故的发生,特别是在隧道入口及出口处。隧道追尾和侧碰事故接近事故总数的80%。因此,保持不同断面间车速的平顺和同一断面不同车道间车速的一致是减少事故发生的前提。

中国的城市化近几十年来一直保持高速发展,上海、南京、武汉、重庆等城市的发展已经突破江河限制,跨江隧道的发展就成为沟通沿江两岸的必要通道。保证城市隧道交通安全对于一个城市的和谐发展有着重要的社会和经济意义。利用隧道内现有设备对隧道交通安全进行研究,不仅有利于减少事故的发生,也有助于其他隧道安全研究的开展,有着良好的推广意义和前景。

参考文献

[1] 胡锡岭,陈立道.城市道路隧道交通事故的分析[J].中国市政工程,2003(6):5-7.
HU Xi-ling, CHEN Li-dao. Analysis on traffic accidents in urban roads and tunnels [J]. China Municipal Engineering, 2003(6): 5-7.

- [2] 张伟, 姜韡, 张卫国. 城市地下交通隧道火灾的防护[J]. 地下空间 2002 (3):268 - 270.
ZHANG Wei, JIANG Wei, ZHANG Wei-guo. Fire prevention in urban underground traffic tunnels [J]. Under Ground Space, 2002 (3):268 - 270.
- [3] 肖劲夫, 胡群芳, 黄宏, 等. 城市公路隧道预警指标体系调研与分析[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(8):144 - 151.
XIAO Jing-fu, HU Qun-fang, HUANG Hong, etc. Investigation and research on the early-warning index system of urban road tunnel [J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(8):144 - 151.
- [4] 王云. 城市交通隧道安全评价体系及方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2005.
WANG Yun. Study on the Safety Evaluation System and Method of Urban Traffic Tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [5] Haack A. Current safety issues in traffic tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology 2002, 17(2):117 - 127.
- [6] Vuilleumier F., Weatherill A., Crausaz B. Safety aspects of railway and road tunnel: example of the Lotschberg railway tunnel and Mont-Blanc road tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology 2002, 17(2): 153 - 158.
- [7] Mashimo H. State of the road tunnel safety technology in Japan[J]. Tunneling and Underground Space Technology 2002, 17(2):145 - 152.
- [8] Amundsen F H. and Ranæs G. Studies on traffic accidents in Norwegian road tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15(1):3 - 11.
- [9] Vashitz G., Shinae D. and Blum Y. In-vehicle information systems to improve traffic safety in road tunnels [J]. Transportation Research Part F, 2008, 11(1):61 - 74.
- [10] Tornros J. Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel - a validation study [J]. Accident Analysis and Prevention, 1998, 30(4):497 - 503.
- [11] Manser M P. and Hancock P A. The influence of perceptual speed regulation on speed perception, choice, and control: Tunnel wall characteristics and influences [J]. Accident Analysis and Prevention, 2007, 39(1): 69 - 78.
- [12] 周商吾. 交通工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987.
ZHOU Shang-wu. Traffic Engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1987.
- [13] 李亦中. 武汉长江隧道周日通车 车辆单双号限行定时关闭 [EB/OL]. [2008 - 12 - 23]. <http://news.sohu.com/20081223/n261362821.shtml>.
LI Yi-zhong. Wuhan Yangtze River Tunnel Opens on Sunday, Traffic Control will be Imposed on Vehicles [EB/OL]. [2008 - 12 - 23]. <http://news.sohu.com/20081223/n261362821.shtml>.
- [14] 徐景明. 翔安隧道 26 日 10 时开通 [EB/OL]. [2010 - 04 - 23]. http://www.xmnn.cn/dzkb/xmrb/20100423/201004/t20100423_1402312.htm.
XU Jing-ming. Xiang'an Tunnel Opens to Traffic at 10 a. m. on June 26th [EB/OL]. [2010 - 04 - 23]. http://www.xmnn.cn/dzkb/xmrb/20100423/201004/t20100423_1402312.htm.



作者简介: 王雪松 (1977 -), 男, 山西忻州人, 同济大学副教授、博士生导师。2006 年获美国中佛罗里达大学交通工程方向博士学位。目前主要从事交通安全研究、交通统计分析、交通规划、驾驶模拟器的应用研究。E-mail: wangxs@tongji.edu.cn.



作者简介: 石琦 (1988 -), 男, 山西太原人, 美国中佛罗里达大学交通工程方向博士研究生, 同时本科就读于同济大学交通运输工程学院, 主要研究方向为交通安全、交通规划与管理。E-mail: shiqi@knights.ucf.edu.