

# 山区高速公路隧道群路段安全评价

方守恩<sup>1</sup>, 邬洪波<sup>1,2</sup>, 廖军洪<sup>2</sup>, 王芳<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. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘要:** 为提高山区高速公路隧道群路段的行车安全性, 通过对隧道群路段特征断面车辆速率及驾驶员心理、生理指标变化特征的分析建立了隧道群路段结构物长度和几何线形指标对车辆速率差以及驾驶员心率增长率的影响关系模型。结果表明, 对于由2座隧道组成的隧道群, 隧道连接段小型车的最大速率差受前一隧道和连接段的长度影响较大, 大型车的最大速率差受连接段的长度以及纵坡影响较大; 在第1座隧道的出口, 驾驶员心率增长率受前一隧道和连接段长度的影响较大, 而在第2座隧道的进口, 驾驶员心率增长率受连接段长度以及隧道进口平纵线形综合指标的影响较大。在对关系模型进行验证分析的基础上, 结合国内外相关研究成果, 提出了基于速率差和心率增长率的隧道群路段安全评价方法。

**关键词:** 高速公路; 隧道群; 安全评价; 速率差; 心率增长率

**中图分类号:** U458.1

**文献标志码:** A

## Safety Evaluation of Freeway Tunnel Groups in Mountainous Areas

FANG Shouen<sup>1</sup>, WU Hongbo<sup>1,2</sup>, LIAO Junhong<sup>2</sup>, WANG Fang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Research Institute of Highway of the Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to improve the driving safety in freeway tunnel groups in mountainous areas, the effects of structure length and geometric alignment of tunnel groups on vehicle speeds and heart rate increments of drivers are quantified with the analyses of the vehicle speed changes at specific sections and psychology and physiology indices for drivers on tunnel group segments. For a tunnel group composed of two tunnels, the research results show that the effect of the lengths of the previous tunnel and the tunnel linkage section on maximum

speed difference of small vehicles at tunnel linkage section is relatively obvious, and the effects of length and grade of tunnel linkage section on maximum speed difference of large vehicles at tunnel linkage section is relatively large; heart rate increment of drivers at the exit of the first tunnel is largely affected by the length of previous tunnel and tunnel linkage section, and heart rate increment at the entrance of the second tunnel is largely affected by the length of tunnel linkage section and the combined influence of horizontal and vertical alignment of tunnel entrance. On the basis of the validation of prediction models, safety evaluation methods based on the speed difference and heart rate increments are provided.

**Key words:** freeway; tunnel group; safety evaluation; speed difference; heart rate increment

在山区高速公路中, 由于受地形限制, 出现了越来越多的相邻隧道, 其中一部分形成隧道群, 也就是数个隧道之间通过较短的桥梁或路基相连。由于隧道群路段隧道密集、隧道间距短, 连续进、出隧道口驾驶员将经历“暗适应”和“明适应”的快速转换以及速率的不断变换, 驾驶员心理的自我调节加剧, 紧张感随之产生, 使得隧道群路段成为高速公路上的敏感区, 并可能演变成为交通事故的多发路段, 影响行车安全。安全评价作为一种预防交通事故、减轻事故严重度的重要手段在国外得到了广泛推广<sup>[1]</sup>。在国内安全评价在高速公路上已经得到了较多应用, 然而到目前为止国内学者仅针对隧道进出口的安全问题及相应的安全评价开展了一些初步的研究<sup>[2-3]</sup>, 对于隧道群路段的安全评价尚未形成系统的理论与方法。为此本文通过对山区高速公路隧道群路段特征断面车辆速率观测数据和驾驶员实车试验数据的分析研究速率差和驾驶员心率增长率与隧道群路段结

收稿日期: 2012-04-12

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2009BAG13A02)

第一作者: 方守恩(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路规划与设计理论和道路交通安全。

E-mail: fangsek@tongji.edu.cn

构物长度和几何线形指标之间的量化关系,提出隧道群路段的安全评价方法和评价标准,以期为隧道群路段的安全评价提供理论支持,从而有效改善隧道群路段的行车安全性。

## 1 隧道群路段划分及基础数据采集

### 1.1 隧道群路段划分

根据国内相关研究结论<sup>[4-5]</sup>,在综合考虑隧道通风照明、交通安全、防火安全等因素的同时,结合线形连续性的考虑,本文将隧道群定义为公路路段上2座或2座以上间距在1 km之内的隧道总称。隧道群交通事故的统计数据及行车风险表明<sup>[6]</sup>,隧道群不

同区段事故发生率及行车风险是不相同的,隧道进出口和隧道之间的连接段为事故高发路段和高风险路段。由于国内对隧道进出口的安全评价已经开展了相应研究,因此将重点放在隧道之间的连接段(简称隧道连接段)。对于隧道连接段,如果连接段足够长,一般大于1 000 m时,在该路段上的交通流趋于稳定,交通事故发生率也就相对较低。如果连接段较短,路段上的交通流将受到隧道进出口车速率的影响,随着交通流的波动,驾驶员的操作将受到影响,导致发生不良的驾驶行为,进而引发交通事故。

为便于后续研究,将隧道群路段划分为如下区段:包括进口过渡段、隧道路段、隧道连接段和出口过渡段,如图1所示。

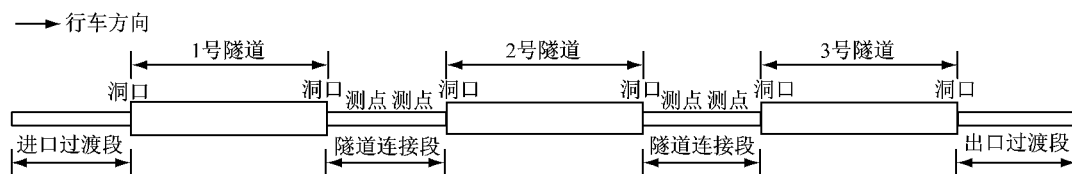


图1 隧道群区段划分示意

Fig.1 Division sketch of tunnel group segments

### 1.2 基础数据采集

为探讨在隧道群不同区段驾驶人员的心理、生理特征变化和速率变化规律,研究隧道群及几何线形对车辆交通行为的影响特征,本文依托西部某山区高速公路,主要采集驾驶员在隧道进出口、隧道连接段、隧道内及线形指标变化等特征点的心率指标和车辆速率值。

(1) 调研路段。调研路段为山区双向四车道高速公路,设计时速为  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,路基宽度为 24.5 m,平曲线最大半径为 8 000 m,平曲线最小半径为 320 m,最大直线长度为 2 185.706 m,同向曲线间最小直线长度为 540.875 m,反向曲线间最小直线长度为 161.953 m,最小凸曲线半径为 12 000 m,最小凹曲线半径为 12 000 m,最大纵坡坡度为 4.7%,最小纵坡坡度为零。

(2) 断面速率。在考虑功率质量比和车辆外廓尺寸的基础上将车辆划分为两大类:小型车和大型车<sup>[7]</sup>。断面车辆速率用雷达测速枪采集,为尽可能减少测速对驾驶员的影响,测速人员一般站在相对较远或比较隐蔽的地点进行测速。对于每个观测断面,为了保证统计结果的精度,需对每个断面速率调查所需观测的最小车辆数进行控制。根据统计理论,每个断面的样本量不少于 60 辆车。

(3) 心率数据。选取不同行业具有不同驾驶经历、职业、年龄和驾龄的 3 名男性驾驶员,要求驾龄年限均超过 5 年,持有 B 照以上驾驶执照资格,驾

驶技术娴熟,且有良好的驾驶习惯,视觉机能正常,无生理缺陷和重特大交通事故经历。选用普通小客车作为试验车,采用生物反馈仪实时记录驾驶员的心率值。

## 2 隧道群路段车辆速率变化分析

### 2.1 断面车辆速率

以某隧道群为例(其中 1 号隧道为长隧道,2 号隧道为短隧道,3 号隧道为特长隧道),车辆在特征断面的平均速率变化趋势如图 2 所示。

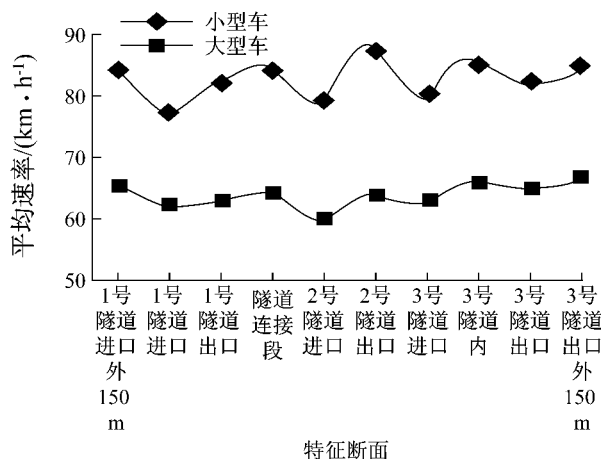


图2 隧道群路段车辆平均速率变化趋势

Fig.2 Change tendency of the vehicle average speed on tunnel group segments

由图2可以看出,隧道群路段车辆平均速率分布具有如下特点:①在隧道群的各个区段,小型车的速率明显高于大型车的速率,且小型车速率的变化幅度一般大于大型车速率的变化幅度,但速率变化趋势基本相同;②在隧道群路段,与短隧道同长隧道、特长隧道相同,车辆基本按照进隧道减速、出隧道加速的特征行驶,但在长隧道、特长隧道中的加减速趋势明显大于短隧道;③在隧道内,车辆速率同进出口处速率之间并无显著差异,而隧道连接段车辆速率较高,甚至高于一般路段,车辆处于比较剧烈的加减速过程中,危险性系数大;④隧道进出口的车辆速率一般低于隧道内及两相邻隧道连接段的速率。

## 2.2 连接段车辆速率

由前面的分析可以看出隧道群路段车辆在隧道

进出口的速率变化规律与单个隧道类似,因此,本文以2座隧道组成的隧道群为例着重分析隧道连接段车辆速率的变化规律。

在分析影响隧道连接段的车辆速率变化特征时,主要考虑的因素有前一隧道(1号隧道)长度 $L_1$ 、后接隧道(2号隧道)长度 $L_2$ 、连接段长度 $L_3$ 以及连接段的平纵线形指标。取连接段上相邻测点的最大速率差作为因变量来分析上述因素对连接段车辆速率影响的规律。

### 2.2.1 小型车

由图3可见,在隧道连接段小型车的最大速率差受前一隧道和连接段的长度影响较大,后接隧道长度对小型车的最大速率差有一定的影响,而连接段平曲线半径对小型车的最大速率差影响较小。

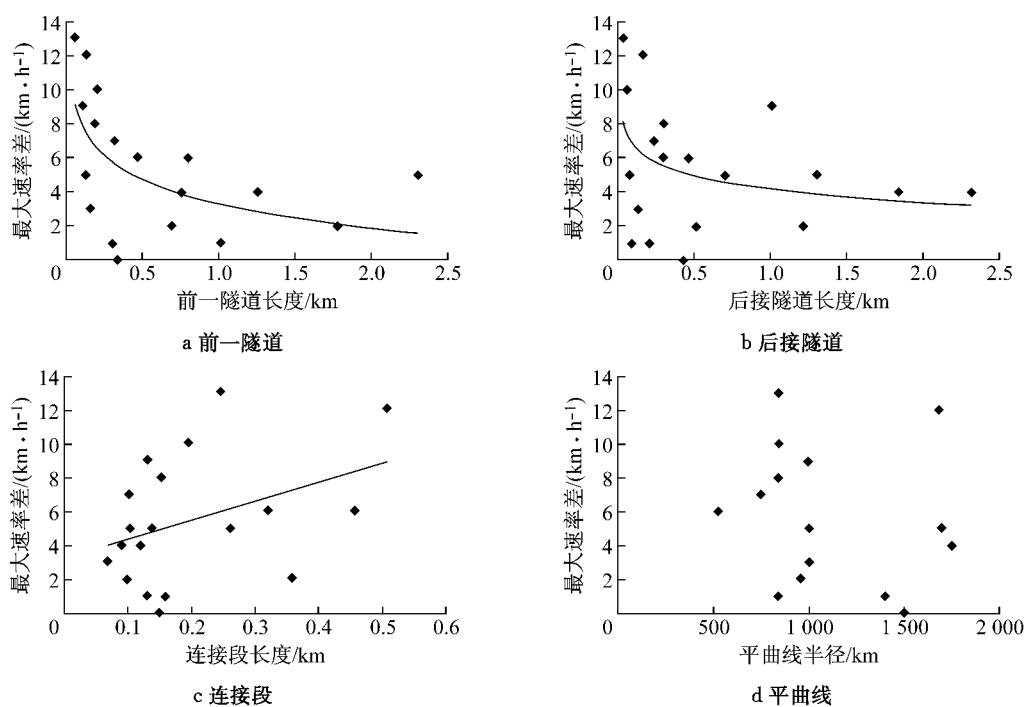


图3 隧道连接段小型车最大速率差与各影响因素的关系

Fig.3 The relationship between the maximum speed difference of small vehicles at tunnel linkage sections and the influencing factors

运用数理统计软件建立了隧道连接段小型车最大速率差与影响因素的关系模型,如式(1)所示:

$$\Delta V_{SV} = 1.058 + 0.572/L_1 + 9.159L_3, R^2 = 0.56 \quad (1)$$

式中: $\Delta V_{SV}$ 为隧道连接段小型车最大速率差,km·h<sup>-1</sup>。

根据式(1)可以得出,在隧道连接段,前一隧道越长最大速率差越小,这主要是由于驾驶员从较长隧道中出来时车辆速率保持在相对较低的水平,处于比较谨慎的驾驶阶段。随着隧道连接段的生长,驾驶员有加速行驶的趋势,导致最大速率差明显变大。

### 2.2.2 大型车

由图4可以看出,在隧道连接段,大型车的最大速率差受连接段的长度以及纵坡影响较大,后接隧道长度对大型车的最大速率差有一定的影响,而前一隧道长度对大型车的最大速率差影响较小。

同样,建立了隧道连接段大型车最大速率差与影响因素的关系模型,如式(2)所示:

$$\Delta V_{LV} = 2.968 + 20.645L_3 + 1.551G, R^2 = 0.62 \quad (2)$$

式中: $\Delta V_{LV}$ 为连接段大型车最大速率差,km·h<sup>-1</sup>;G为连接段纵坡坡度,%。

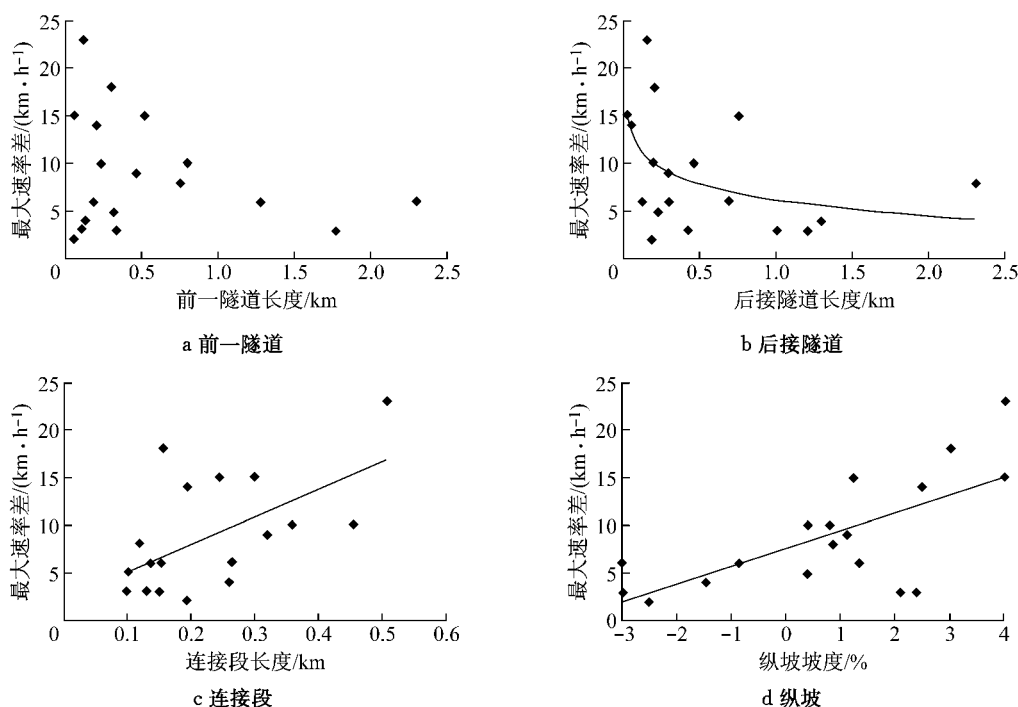


图4 隧道连接段大型车最大速率差与各影响因素的关系

Fig.4 The relationship between maximum speed difference of large vehicles at tunnel linkage sections and the influencing factors

由式(2)可以看出,在隧道连接段,随着连接段长度的增加,驾驶员有加速行驶的趋势,导致车辆速率差明显变大,且纵坡坡度的增大对大型车动力性能的影响愈发明显,速率显著降低。

### 3 隧道群路段心率变化分析

#### 3.1 特征点心率

由图5可以看出,隧道群路段驾驶员心率具有如下特点:①随着车辆进入第1座隧道(1号隧道),驾驶员心率逐渐增加,心率在隧道出口达到最大值;②当车辆驶离第1座隧道时,驾驶员心率有较大的回落;③随着驾驶员驶近第2座隧道(2号隧道),驾

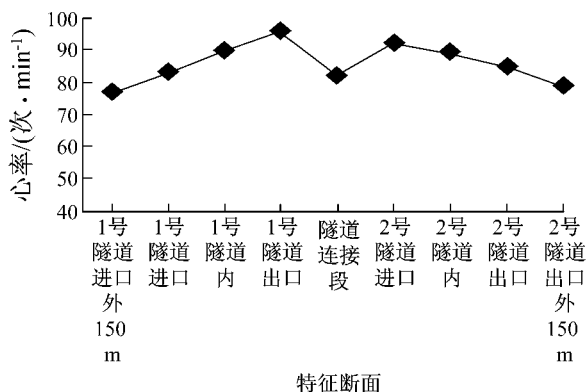


图5 隧道群路段驾驶员心率变化趋势

Fig.5 Change tendency of drivers' heart rate on tunnel group segments

驶员心率又以比较快的速度上升,在隧道进口达到较高的水平;④驾驶员驶入第2座隧道后,驾驶员的心率缓慢降低,在第2座隧道洞口外恢复到一个比较正常的水平;⑤如果隧道群包含3座以上的隧道,驾驶员的心率呈现类似的变化规律,且随着对隧道环境的适应,变化趋于平缓。

经统计,对于隧道群路段,驾驶员心率一般在第1座隧道出口和第2座隧道进口(该出口与进口分别记为  $T_{1EX}$  和  $T_{2EN}$ )达到最大。因此,主要分析驾驶员在这2个特征点的心率变化规律。

#### 3.2 驾驶员心率增长率

由于驾驶员存在个体差异性,因此简单比较驾驶员心率的增加次数不能完全反映隧道群特殊的环境对驾驶员心理、生理的影响,因此采用心率增长率来研究。隧道群路段心率增长率定义为驾驶员心率增量(驾驶员行驶在隧道群路段时的平均心率与驾驶员在一般路段上行驶时的平均心率之差)与驾驶员在一般路段上行驶时的平均心率之比。

分析驾驶员在  $T_{1EX}$  和  $T_{2EN}$  两个点心率增长率的影响因素时,主要考虑  $L_1, L_2, L_3$  以及连接段的平纵线形指标。

##### 3.2.1 第1座隧道出口

由图6可以看出,在第1座隧道的出口,驾驶员心率增长率受前一隧道和连接段长度的影响较大,而后接隧道长度及隧道出口的平纵线形综合指标对

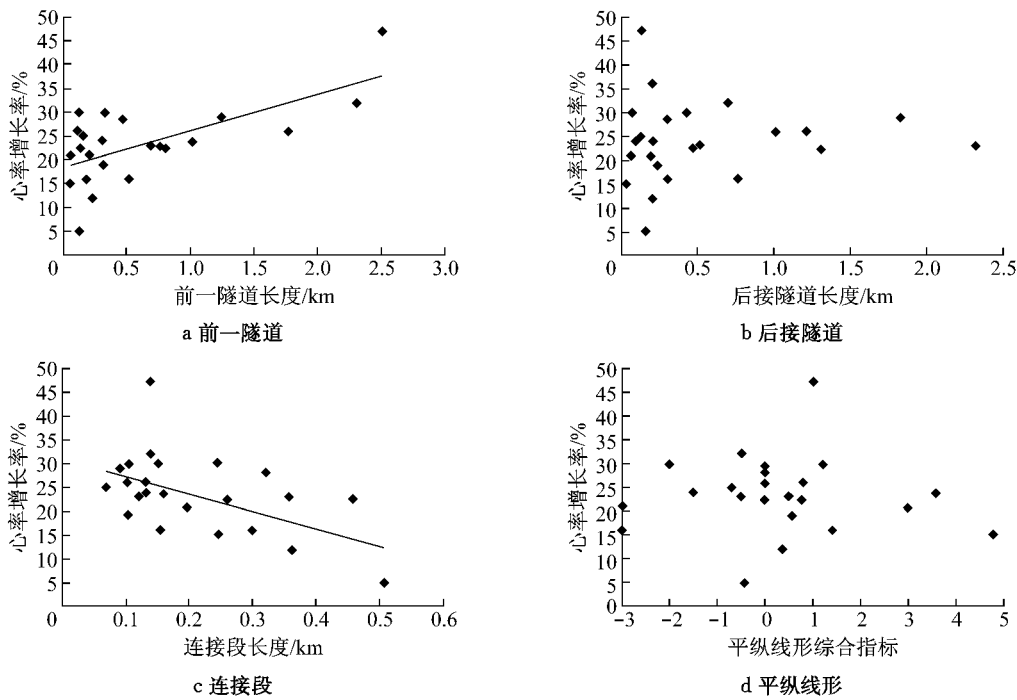


图6 隧道出口驾驶员心率增长率与各影响因素的关系

Fig.6 The relationship between drivers' heart rate increment at tunnel exit and influencing factors

驾驶员的心率增长率影响很小。

运用数理统计软件,建立了隧道出口驾驶员心率增长率与影响因素的关系模型,如式(3)所示:

$$n_{1EX} = 24.957 + 6.473L_1 - 27.513L_3, R^2 = 0.59 \quad (3)$$

式中:  $n_{1EX}$  为驾驶员在第1座隧道出口的心率增长率, %。

从式(3)可以看出,随着第1座隧道长度的增加,驾驶员心率增长率随之增加;随着连接段长度的增加,驾驶员心率增长率随之减少,且连接段长度的影响更为明显。

### 3.2.2 第2座隧道进口

由图7可以看出,在第2座隧道进口,驾驶员心率增长率受连接段长度以及隧道进口平纵线形综合

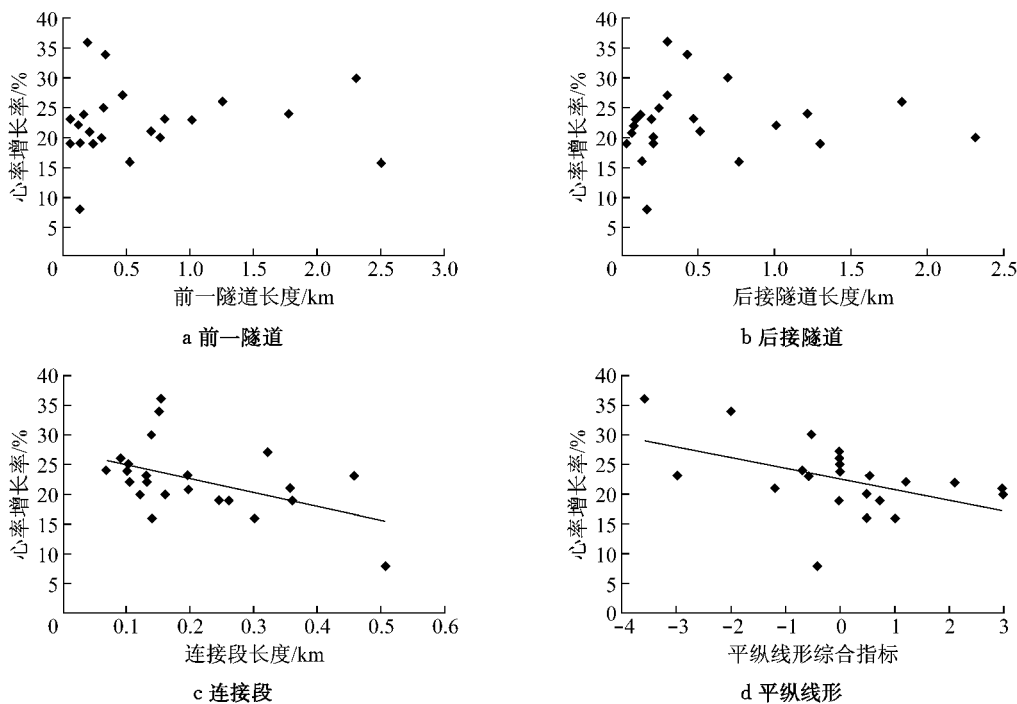


图7 隧道进口驾驶员心率增长率与各影响因素的关系

Fig.7 The relationship between drivers' heart rate increment at tunnel entrance and influencing factors

指标的影响较大,而前一隧道以及后接隧道长度对驾驶员心率增长率的影响不明显。

同样,建立了隧道进口驾驶员心率增长率与影响因素的关系模型,如式(4)所示:

$$n_{2EN} = 27.390 - 23.210L_3 - 1.823I, R^2 = 0.46 \quad (4)$$

式中:  $n_{2EN}$  为驾驶员在第2座隧道进口的心率增长率,%;  $I$  为隧道进口平纵线形综合指标,  $I = G/r$ ,  $G$  为隧道进口纵坡坡度,%,  $r$  为隧道进口平曲线半径, km。

从式(4)可以看出,随着隧道连接段长度的增加,驾驶员心率增长率随之降低;随着隧道进口平纵线形综合指标的增大,驾驶员心率增长率也呈现降低的趋势。

## 4 隧道群路段安全评价方法

国内外关于安全评价方法的研究大致可以分为2类<sup>[8]</sup>,其中,基于事故(绝对或相对)的安全评价方法是最直接的评价方法,另一类是间接相关分析法,即通过寻找与道路安全水平密切相关的中介指标,建立道路线形条件与中介指标的关系以及中介指标与交通安全的关系,从而间接分析道路条件与交通安全的关系。目前,常用的中介指标包括:车辆速率、交通冲突、驾驶员心理和生理指标、视距等。本文采用速率差和心率增长率作为研究隧道群路段安全性

的中介指标。

### 4.1 基于速率差的评价方法

(1) 预测模型验证。为验证上述车辆速率差预测模型(关系模型)的合理性,利用部分未用于建模的数据对预测结果与实测结果进行比较,如表1所示。预测结果与实测结果的绝对误差均保持在0~2 km·h<sup>-1</sup>以内,表明预测模型精度较高,可用于隧道连接段的安全评价。

表1 隧道连接段最大速率差预测模型验证

Tab.1 Validation of prediction models for maximum speed differences at tunnel linkage section

预测模型	(km·h <sup>-1</sup> )		
	预测结果	实测结果	绝对误差
$\Delta V_{SV} = 1.058 + 0.572/L_1 + 9.159L_3$	5	4	1
	7	8	1
	10	11	1
	13	12	1
	17	19	2
$\Delta V_{LV} = 2.968 + 20.645L_3 + 1.551G$	3	3	0
	8	9	1
	11	12	1
	13	11	2
	18	16	2

(2) 安全评价标准。车辆速率的突变,尤其是较大的速率差会使驾驶员措手不及、处置不当,从而导致行车事故。美国和欧洲一些国家在评价线形一致性时采用的方法就是依据该原理。根据国内外相关研究成果<sup>[9-10]</sup>,对于隧道连接段,基于速率差的安全评价标准如表2所示。

表2 基于速率差的安全评价标准

Tab.2 Safety evaluation criteria based on speed difference

安全水平	平均速率差 $\Delta V / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	评价标准描述
好	$\Delta V < 10$	隧道连接段安全水平较高,结构物长度及平纵线形组合良好
中	$10 \leq \Delta V \leq 20$	隧道连接段安全水平处于可接受的范围,结构物长度及平纵线形组合一般
差	$\Delta V > 20$	隧道连接段安全水平较差,应进一步对结构物长度及平纵线形组合进行优化

### 4.2 基于心率增长率的评价方法

(1) 预测模型验证。同样,为验证上述心率增长率预测模型的合理性,利用部分未用于建模的数据对预测结果与实测结果进行比较,如表3所示。预测结果与实测结果的相对误差绝大部分在10%以内,表明预测模型精度较高,能较好地应用于隧道连接段的安全评价中。

(2) 安全评价标准。心率的剧烈变化往往导致人的不安感、紧张感和焦躁感,导致精力不集中,注意力及判断力下降,是用来衡量人心理、生理负荷的重要指标。国内外研究表明<sup>[11-12]</sup>,驾驶员行车过程中心率增长率超过正常心率的20%驾驶员就会紧张,超过正常心率的40%驾驶员心理负荷过大极易发生

表3 隧道群路段心率增长率预测模型验证

Tab.3 Validation of prediction models for drivers' heart rate increment on tunnel group segment

预测模型	预测结果	实测结果	%
			相对误差
$n_{1EX} = 24.957 + 6.473L_1 - 27.513L_3$	8	9	11.10
	18	19	5.26
	24	22	9.09
	29	28	3.57
	37	40	7.50
$n_{2EN} = 27.390 - 23.210L_3 - 1.823I$	14	17	17.60
	22	20	10.00
	23	22	4.55
	25	27	7.41
	27	30	10.00

危险.因此,基于心率增长率的隧道连接段安全评价 采用表4所示的评价标准.

表4 基于心率增长率的安全评价标准

Tab.4 Safety evaluation criteria based on heart rate increment

安全水平	心率增长率 $n/\%$	评价标准描述
好	$n < 20$	隧道连接段安全水平较高,结构物长度及平纵线形组合良好
中	$20 \leq n \leq 40$	隧道连接段安全水平处于可接受的范围,结构物长度及平纵线形组合一般
差	$n > 40$	隧道连接段安全水平较差,应进一步对结构物长度及平纵线形组合进行优化

## 5 结语

(1) 针对山区高速公路隧道群路段存在的行车安全隐患及交通事故易发的特点,通过对隧道群路段特征断面车辆速率的观测,建立了隧道连接段小型车的最大速率差与隧道长度和连接段长度的关系模型以及大型车的最大速率差与连接段长度和纵坡坡度的关系模型.

(2) 隧道群路段驾驶员心理、生理指标的实车试验分析结果表明,对于隧道群路段,驾驶员心率一般在第1座隧道出口和第2座隧道进口达到最大,并建立了心率增长率与隧道长度、连接段长度和隧道洞口平纵线形指标之间的关系模型.

(3) 对预测模型进行了验证分析,并通过借鉴国内外相关研究成果,提出了基于速率差和心率增长率的隧道群路段安全评价方法,对于山区高速公路特殊路段的安全评价技术是有益的补充.

## 参考文献:

- [1] Austroads. Road safety audit [M]. 2nd ed. Sydney: Austroads Incorporated, 2002.
- [2] 阎莹, 张宇辉, 郭忠印. 基于运行速度的隧道进出口线形安全性评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(4): 72. YAN Ying, ZHANG Yuhui, GUO Zhongyin. Alignment safety evaluation at tunnel entrance and exit based on driving speed [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(4): 72.
- [3] 杨轸, 郭忠印. 隧道进出口车速变化研究[J]. 上海公路, 2006(1): 48. YANG Zhen, GUO Zhongyin. Research on speed alteration at entrance and exit of tunnel [J]. Shanghai Highway, 2006(1): 48.
- [4] 周娜. 高速公路隧道群交通运行环境分析与评价研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010. ZHOU Na. Study and analysis on traffic environment in freeway tunnels [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [5] 周忠业, 廖志高, 柳本民, 等. 高速公路隧道群行车特性及安全性分析[J]. 交通与计算机, 2008, 26(1): 27. ZHOU Zhongye, LIAO Zhigao, LIU Benmin, et al. Analysis of traffic property and safety in freeway tunnel group [J]. Computer and Communications, 2008, 26(1): 27.
- [6] 张生瑞, 李耘, 赵友功. 山区高速公路隧道群交通安全分析方法 [J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6): 94. ZHANG Shengrui, LI Yun, ZHAO Yougong. Analysis method for traffic safety of mountainous freeway tunnel group [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(6): 94.
- [7] 汪双杰, 周荣贵, 孙小端, 等. 公路运行速度设计理论与方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010. WANG Shuangjie, ZHOU Rongui, SUN Xiaoduan, et al. Highway design theory and method based on operating speed [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [8] 唐铮铮, 张铁军, 何勇, 等. 道路交通安全评价 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. TANG Chengcheng, ZHANG Tiejun, HE Yong, et al. Road safety assessment [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [9] Lamm R, Choueiri E. Recommendations for evaluating horizontal design consistency based on investigations in the state of New York [J]. Transportation Research Record 1122, Washington D C, 1987: 68.
- [10] 高建平, 郭忠印. 基于运行车速的公路线形设计质量评价 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(7): 906. GAO Jianping, GUO Zhongyin. Evaluation of highway alignment design quality based on operating speed [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(7): 906.
- [11] 阎莹, 刘浩学, 郭忠印. 不同交通流状态下驾驶员心理生理特性研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(10): 1372. YAN Ying, LIU Haoxue, GUO Zhongyin. Research on drivers' psychological and physiological characteristics in different traffic flow conditions [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(10): 1372.
- [12] 佐藤清, 骆巧珍. 在160km/h准高速运行时列车司机的生理负担 [J]. 国外内燃机车, 1997, 6: 19. ZUO Tengqing, LUO Qiaozhen. Train driver's physiological load at driving with 160 km · h<sup>-1</sup> high speed [J]. Foreign Diesel Locomotive, 1997, 6: 19.