

# 山区高速公路隧道群—互通路段安全间距研究

尚婷<sup>1</sup>, 吴鹏<sup>1</sup>, 盛启锦<sup>2\*</sup>

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆市 400074; 2. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:**为研究山区高速公路隧道与互通式立交出口之间间距偏小情况下,出口预告标志设置于隧道内时隧道群—互通路段所需的最小安全距离,该文首先基于驾驶员眼动特性、换道行为和道路服务水平等要素构建安全间距计算模型;其次,设计实车试验采集不同隧道环境下驾驶员的眼动数据并利用聚类分析计算隧道长度与明适应距离的关系;再次,基于车辆换道特性计算在不同道路服务水平下的车辆换道距离;最后,根据模型计算不同隧道类型、不同服务水平的隧道群—互通最小安全间距。结果表明:同一服务水平下,隧道长度越长,所需的最小安全距离越大,但隧道长度超过3 000 m后,所需的最小安全距离趋于定值;同一隧道类型下,道路服务水平越高,所需的最小安全距离越小。

**关键词:**交通工程;隧道—互通路段;眼动特性;明适应距离;最小安全间距

**中图分类号:** U412.3

**文献标志码:** A

山区高速公路行车风险较高的一个原因在于:规划和设计时各项指标均能满足规范要求,但是部分指标仅满足相关规范的极限值,多种极限状态在耦合作用下给行车安全带来隐患<sup>[1]</sup>。并且,山区高速公路桥隧比例高,互通立交的设置又不可避免,当隧道群紧连互通立交时,发生交通事故的概率更高<sup>[2]</sup>。因此,在条件受限时隧道群—互通之间合理的间距能最大程度保证公路运营安全。

美国《公路与城市道路几何设计》<sup>[3]</sup>是对互通立交与其他设施之间最小距离研究的基础,其中详细阐述了如何科学设计高速公路互通式立体交叉。德国《联邦德国道路设计》<sup>[4]</sup>中详细给出了互通立交之间的最小间距,其基本原则是基于交织区的车辆驾驶行为、道路交通量和前置指路标志等多个主要因素。日本《高速公路设计要领》<sup>[5]</sup>中给出了隧道与互通式立交的最小间距推荐值。吕纪云等<sup>[6]</sup>在分析车辆分合流过程运行轨迹的基础上提出了互通立交与隧道出入口的净距计算模型;赵一飞等<sup>[7]</sup>将公路隧道出口与互通式立交之间的间距分成多个部分,并对每个组成部分进行分析计算,构建了高速公路隧道与互通立交最小安全距离计算模型;廖军洪等<sup>[8]</sup>根据中国现行规范和相关文献资料,采用驾驶模拟器进行模拟仿真试验,给出条件受限时高速公路隧道与互通立交的最小间距推荐值;

姚晶<sup>[9]</sup>考虑了道路条件、交通条件、驾驶行为3个因素,研究不同车型所需的最小安全距离。

目前对隧道—互通出口最小安全间距计算模型都默认交通标志设置在隧道外,即驾驶员在驶出隧道后进行交通标志辨认、读取和换道决策。该文研究在山区高速公路隧道群—互通路段间距较短时所需的最小安全距离,此时可将前置指路标志设置在隧道群最后一个隧道的内部,这样交通标志认读过程和决策过程将在隧道内发生,基于此类情况,构建隧道群—互通路段最小间距计算模型。

## 1 隧道出口明适应时间试验

### 1.1 试验目的

利用实车试验测试驾驶员在某高速公路上不同隧道路况下的眼动数据,分析不同隧道长度下驾驶员的瞳孔面积变化规律,从而进行基于驾驶员眼动特性的隧道群划分以及隧道群—互通路段最小安全间距的计算。

### 1.2 试验仪器

试验选用SMI眼镜式眼动仪,采样频率为60 Hz。该眼动仪具有便携、易操作的特点,能与计算机相连,自带的软件(Begaze)可以记录并分析试验员在试验过程中头部、眼睛注视、瞳孔扩张和眼皮状态,试

收稿日期:2021-08-17(修改稿)

基金项目:重庆市科技局基础研究与前沿探索项目(编号:2019jcyj-msxmX0695);重庆市教委青年科技项目(编号:KJQN201900722)

作者简介:尚婷,女,博士,副教授。E-mail:335304854@qq.com

\*通信作者:盛启锦,男,工程师。E-mail:940852570@qq.com

验过程中驾驶员的头部运动不受限制或干扰能适应多种测试场景。

1.3 试验人员与试验路段

实车试验尽可能地选择不同驾龄、不同年龄和不同性别的试验员,并根据驾驶员对试验路段的驾驶经历划分路况熟悉程度。试验员的相关信息如表 1 所示。试验过程中要求驾驶员在隧道内以 80 km/h 的车速行驶。由于试验路段较长,为了保证试验中驾驶人员精力充沛和数据的多样性,多名驾驶员每次行车时间为 2 h 左右,并保证驾驶员各进行一次往返试验。

表 1 实车试验试验员信息

编号	性别	驾照	驾龄/ 年	年龄/ 岁	对路况熟 悉程度
1	男	C1	5	27	一般
2	男	C1	4	26	陌生
3	女	C1	4	25	熟悉
4	男	C1	2	25	一般
5	女	C2	3	28	一般
6	男	C1	10	34	熟悉
7	男	A2	25	43	熟悉

试验路段起点为重庆市水江服务区,终点为黔江西互通,该路段全长约 160 km,其中短隧道 8 座;中隧道 6 座;长隧道 15 座;特长隧道 8 座。隧道全长 73 182 m,

占比为 45.7%,是典型的山区高桥隧比路段。

2 隧道出口明适应距离

2.1 隧道出口明适应时间

驾驶员的瞳孔大小因人而异,对隧道出口亮度环境变化的反应程度也有所不同<sup>[10]</sup>。拟定某时刻驾驶员的瞳孔面积为  $S_i$ ,将隧道出口前明适应时间起始点的瞳孔面积  $S$  作为衡量瞳孔直径变化的基准,选取隧道出口前、外各 5 s 范围内的瞳孔变化比率  $Q$ ,计算公式如式(1)所示。将  $t_i$  时刻驾驶员的瞳孔变化比率记作  $Q_i$ ,后一时刻  $t_{i-1}$  对应的瞳孔变化比率记作  $Q_{i-1}$ 。将瞳孔变化率的差值与变化时间的比值定义为比率变化率,记作  $P$ ,计算公式如式(2)所示。

$$Q=\frac{S_i-S_{起}}{S_{起}}\times100\%$$

(1)

$$P=\frac{Q_i-Q_{i-1}}{t_i-t_{i-1}}$$

(2)

取隧道出口后第一次出现瞳孔变化比率  $Q$  图形上的某一点,在其之前的变化趋势为递减,在其之后的变化趋势为平缓,且该点对应的比率变化率  $P$  趋近于 0,该点对应的时间  $t$  即为驾驶员在隧道出口后的明适应持续时间  $t_1$ 。表 2 为隧道出口后明适应时间。由于篇幅受限,该文选取 4 个隧道进行说明,如图 1 所示,图中虚线所对应的横坐标即为明适应持续时间  $t_1$ 。

表 2 隧道信息及隧道出口后明适应时间汇总

隧道名称	出城方向(右线)			进城方向(左线)		
	长度/m	间距/m	时间/s	长度/m	间距/m	时间/s
石会隧道	2 286	140	1.13	2 226	299	1.08
沙坝隧道	2 727	249	1.42	2 736	3 509	1.00
贺家堡隧道	1 990	755	1.17	2 004	3 805	1.54
王家堡隧道	694	3 846	1.17	667	213	1.71
鱼泉隧道	253	170	0.88	260	13 116	0.25
钟山隧道	706	3 469	0.75	725	4 285	0.63
长滩隧道	3 276	4 298	1.29	3 215	485	1.29
彭水隧道	2 785	392	2.13	2 754	1 388	1.38
下塘口隧道	1 705	1 389	1.42	1 707	501	1.21
董家湾隧道	1 055	380	1.04	1 065	79	1.29
柿子坪隧道	669	519	0.96	688	1 455	0.88
共和隧道	4 749	1 430	1.67	4 745	809	2.17
佛仙寺隧道	1 199	825	1.00	1 188	2 158	0.84
银盘隧道	1 117	2 192	1.09	1 149	27	0.59
长坝隧道	710	8 108	0.96	643	2 627	1.13
白云隧道	7 140	2 522	1.54	7 098	—	1.58

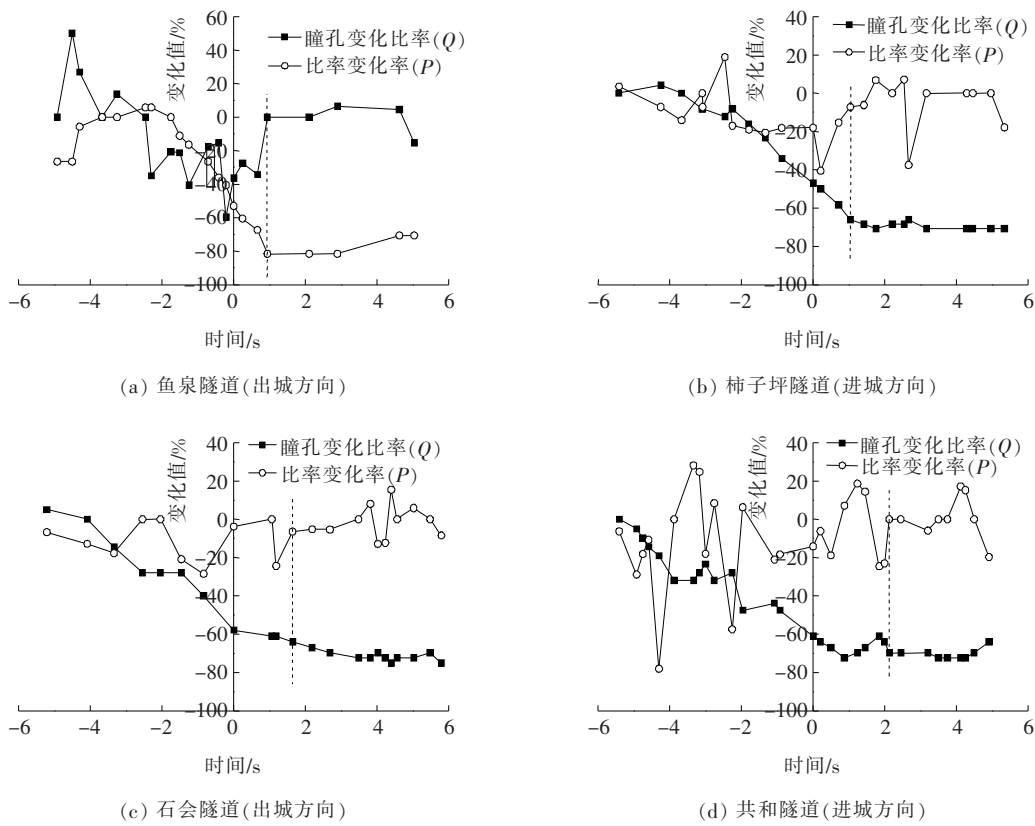


图1 不同类型隧道出口处驾驶员瞳孔变化比率Q和比率变化率P图

2.2 隧道长度与明适应时间关系分析

为了明确隧道长度与明适应时间的关系,采用K—Means聚类分析<sup>[10]</sup>对数据进行分析。K—Means算法的聚类过程如下:

第一步:选择数据集X,指定聚类个数k,指定初始聚类中心。设置迭代终止条件,迭代过程的相似度计算公式如式(3)所示:

$$s(x_i,c_j)=\frac{1}{d(x_i,c_j)} \tag{3}$$

式中: $c_j$ 为第j个聚类中心; $d(x_j,c_j)$ 为聚类中心 $c_j$ 与样本 $x_j$ 间的距离,如式(4)所示:

$$d(x_i,c_j)=\sqrt[p]{|x_i^l-c_i^l|^p+|x_i^k-c_i^k|^p+|x_i^d-c_i^d|^p} \tag{4}$$

第二步:进行迭代。

第三步:更新聚类中心。

第四步:重复上述第二和第三步骤。根据K—Means聚类的常见划分数量,将表2得到的数据利用K—Means聚类的流程划分成6类。隧道出口后K—Means聚类的图形如图2所示,最终的聚类结果如表3所示。

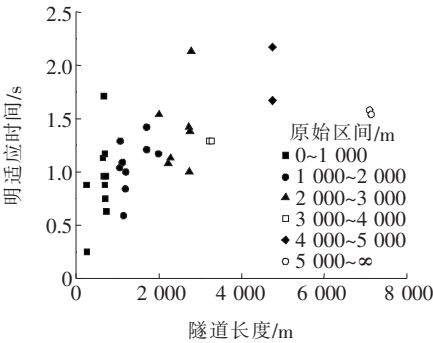


图2 不同类型隧道出口后明适应时间K—Means聚类

表3 K—Means聚类最终聚类中心

隧道长度区间/ m	隧道长 度/m	明适应时间/s		
		隧道出 口前	隧道出 口后	总时 间
0~1 000	601.50	3.77	0.93	4.70
1 000~2 000	1 128.83	3.88	0.98	4.86
2 000~3 000	1 986.33	6.94	1.26	8.20
3 000~4 000	2 915.50	6.71	1.42	8.13
4 000~5 000	4 747.00	9.30	1.92	11.22
5 000~∞	7 119.00	6.49	1.56	8.05

2.3 隧道出口明适应距离计算

山区高速公路隧道群一互路段主线设计速度一般为 80 km/h,根据表 2 可以计算出在不同隧道类型下驾驶员的明适应距离范围,如表 4 所示。

表 4 不同隧道类型的明适应距离

隧道类型	隧道长度/ m	明适应时间/ s	明适应距离/ m
短隧道	$L \leq 500$	$t \leq 0.93$	0~18
中隧道	$500 < L \leq 1\,000$	$0.93 < t \leq 0.98$	18~22
长隧道	$1\,000 < L \leq 3\,000$	$0.98 < t \leq 1.42$	22~32
特长隧道	$L > 3\,000$	$1.42 < t \leq 2$	22~45

3 基于驾驶员眼动特性的隧道群划分

在隧道数量多、距离近的路段,驾驶员频繁进出隧道反复经历“暗适应”与“明适应”过程,在隧道群连接段驾驶人视觉负荷最为明显。根据驾驶员的视觉特性对隧道群进行划分,如图 3 所示,隧道群的临界值  $D$  包含驾驶员在隧道出口处受明适应的影响而行驶的距离  $D_1$  和“明适应”过程结束后驾驶人能够辨识前方隧道洞口的最小距离  $D_2$  两个部分,当两座隧道的间距小于该临界值  $D$ ,即认为这两座隧道形成一个隧道群。若有隧道与隧道 1 或隧道 2 具有此类性质,即认为多个隧道形成一个隧道群环境。

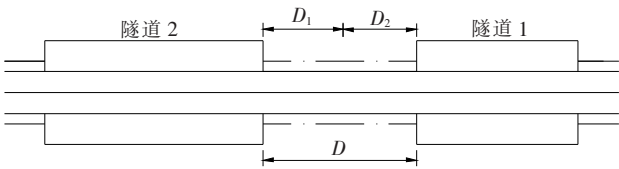


图 3 隧道连接段间距示意图

$$D = D_1 + D_2 \tag{5}$$

式中: $D_1$  为明适应距离; $D_2$  为驾驶人注视点落在下一隧道洞口的距离。

(1) 明适应距离  $D_1$ :根据实车试验结果,不同隧道的明适应距离范围如表 4 所示。

(2) 驾驶人注视点距离  $D_2$ :中国学者对隧道出口的车速特性进行研究,得到表 5 所示的驾驶员注视点距离与车速的关系。

研究发现注视点距离  $D_2$  受驾驶人在第二座隧道入口前暗适应的影响,但暗适应影响范围远小于注视点距离  $D_2$ ,因此该文根据表 5 给出的  $D_2$  值,采用线

性内插法对速度为 80 km/h 时驾驶员注视点距离进行确定,最终得到隧道群连接段最小间距  $D$  见表 6。

表 5 驾驶员注视点距离

车速/(km·h <sup>-1</sup> )	运行时间/s	$D_2$ /m
40	17.0	190
72	18.0	360
85	20.6	500
105	21.1	600

表 6 高速公路隧道群最小间距

隧道 2 的类型	隧道 2 的长度/ m	两隧道最小 间距 $D$ /m
短隧道	$L \leq 500$	442~460
中隧道	$500 < L \leq 1\,000$	460~464
长隧道	$1\,000 < L \leq 3\,000$	464~474
特长隧道	$L > 3\,000$	474~487

4 车辆换道距离与安全确认距离

驾驶员换道操作是一个十分复杂的过程,换道过程受道路条件、交通条件以及驾驶员自身的影响。如图 4 所示,将换道操作简化为 4 个阶段:① 等待距离  $L_{21}$ :驾驶员寻找换道机会而行驶的距离;② 判断距离  $L_{22}$ :驾驶员判断可插入间隙能否满足换道要求行驶的距离;③ 调整距离  $L_{23}$ :驾驶员进行换道前操作而行驶的距离;④ 侧向横移距离  $L_{24}$ :驾驶员换道过程中向内侧车道横移行驶的距离。

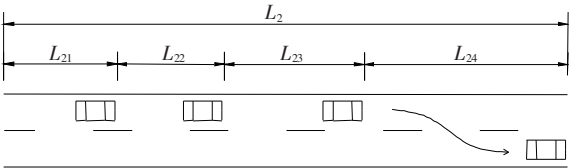


图 4 车辆换道过程示意图

目前对驾驶员的换道过程研究较多,根据相关研究基础<sup>[9,11]</sup>,选择 M3 分布概率模型并引入道路服务水平计算驾驶员的等待距离。当设计速度为 80 km/h 时,高速公路服务水平分级如表 7 所示。

在进行隧道出口明适应试验时,测得了试验路段上多个隧道出口后 200 m 范围内车辆的运行速度,部分隧道出口运行速度如表 8 所示。

表7 高速公路服务水平分级

服务水平	V/C	最大服务交通量/ [pcu·(h·ln) <sup>-1</sup> ]	车速/ (km·h <sup>-1</sup> )
一级	0.33	700	≥78
二级	0.67	1 400	≥66
三级	0.86	1 800	≥62

注:V/C指在理想条件下,最大服务交通量与基本通行能力之比。

表8 不同隧道类型出口200 m范围的V<sub>85</sub>

隧道名称	长度/ m	隧道 类型	V <sub>85</sub> /(km·h <sup>-1</sup> )	
			出口处	出口后200 m
白云隧道	7 103	特长	87	90
特长隧道	752	中	79	87
大湾隧道	2 820	长	91	103
黄草岭隧道	3 219	特长	80	92
枫香垭隧道	1 022	长	77	85
柿子坪隧道	354	短	114	116
柿子坪隧道	688	中	98	102
胡家湾隧道	1 174	中	100	95
董家湾隧道	1 055	长	94	99
长滩隧道	3 215	特长	86	95

由表8可知:不同隧道长度对车辆实际运行速度存在一定的影响,取多个隧道的V<sub>85</sub>进行均值处理,可以得到车辆在隧道出口处以及出口后200 m处的速度均值,并根据车辆换道过程的不同阶段所对应的速度以及相应的计算公式可求得各阶段的距离,如表9所示。

5 隧道群一互通最小安全间距

5.1 隧道群一互路段最小安全距离计算模型

山区高速公路隧道群一互通出口间距较短时可将出口预告标志设置在隧道群最后一个隧道内部,驾驶员对出口标志辨认、识读以及决策过程在隧道内完成。因此隧道群出口至减速车道渐变段起点之间所需的间距分为明适应距离、车辆换道距离、安全确认距离,如图5所示。

图5中:L<sub>1</sub>为明适应距离;L<sub>2</sub>为换道距离;L<sub>21</sub>为等待可插入距离;L<sub>22</sub>为判断是否为可插入间隙的距离;L<sub>23</sub>为调整距离;L<sub>24</sub>为向内侧车道横移距离;L<sub>3</sub>为安全确认距离。

5.2 隧道群一互路段最小安全间距

结合上述研究,出口预告标志设置在隧道内时,隧道群一互通最小安全间距L=L<sub>1</sub>+L<sub>2</sub>+L<sub>3</sub>。根据明

表9 不同服务水平下驾驶员换道距离L<sub>2</sub>和安全确认距离L<sub>3</sub>

服务水平	等待距离 L <sub>21</sub> /m	判断距离 L <sub>22</sub> /m	调整距离 L <sub>23</sub> /m	横移距离 L <sub>24</sub> /m	变换车道总 距离L <sub>2</sub> /m	安全确认 距离L <sub>3</sub> /m
一级	29.419	42.222	48.889	42.864	163.394	55.555
二级	84.608	50.666	48.889	42.864	227.027	66.666
三级	144.497	59.111	48.889	42.864	295.361	77.777

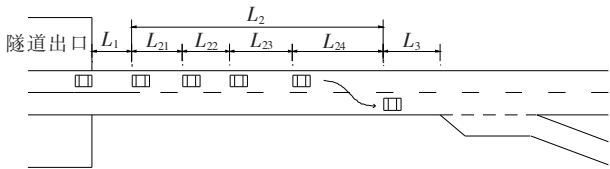


图5 隧道群出口一互通的间距组成示意图

适应距离L<sub>1</sub>、换道距离L<sub>2</sub>和安全确认距离L<sub>3</sub>计算隧道群一互通最小安全距离,结果如表10所示。

为了更加清晰简洁地说明道路服务水平和隧道长度与最小安全距离的关系,以中隧道为例,服务水平为一级时该隧道类型下最小安全距离取值为237~241 m,由表10可以看出隧道的长度越长,所需的最小安

全距离越大,但是具体的增长并非线性关系且差值较小。该文取最大值作为该服务水平和隧道类型对应的最小安全距离,如表11所示。

表10 隧道群一互通最小安全距离范围

最后一个隧道的长度/m	不同服务水平的最小安全距离/m		
	一级	二级	三级
L≤500	≤237	≤311	≤391
500<L≤1 000	(237,241]	(311,315]	(391,395]
1 000<L≤3 000	(241,251]	(315,325]	(395,405]
L>3 000	(251,264]	(325,338]	(405,418]



表 11 简化后的隧道群一互通最小安全距离

最后一个隧道的 长度/m	不同服务水平的最小安全距离/m		
	一级	二级	三级
$L \leq 500$	237	311	391
$500 < L \leq 1\,000$	241	315	395
$1\,000 < L \leq 3\,000$	251	325	405
$L > 3\,000$	264	338	418

6 结论

构建了在隧道内设置出口预告标志时隧道群至互通出口最小安全间距计算模型,通过实车试验采集驾驶员的眼动特性,并结合驾驶员的换道行为理论计算不同服务水平以及道路条件下的最小安全距离,得出以下结论:

- (1) 运用隧道进出口的驾驶员瞳孔面积变动规律,计算隧道出口前后的明适应时间。隧道出口后的明适应时间在中短隧道时接近 1 s,当隧道为长、特长隧道时接近 2 s。
- (2) 同一服务水平下,隧道长度越长所需的最小安全距离越大,但隧道长度超过 3 000 m 后,所需的最小安全距离趋于定值;同一隧道类型下,道路服务水平越高所需的最小安全距离越小。在高速公路二级服务水平下,短隧道、中隧道、长隧道、特长隧道与互通出口的最小安全间距分别为 311 m、315 m、325 m、328 m。
- (3) 隧道群一互通最小安全间距主要基于眼动特性和换道行为进行计算,因试验条件受限,隧道样本数量偏少、试验气候状况不够丰富、隧道出口车辆行驶状

态数据获取较少,未来的研究要更为全面地进行试验设计,以求准确地揭示道路条件与隧道群一互道路段最小安全距离的关系。

参考文献:

[1] 白浩晨,柳银芳. 互通式立交出口匝道运行速度过渡段长度研究[J]. 中外公路,2020,40(1):262—267.

[2] 邓国忠,曹帆,吴勇,等. 互通式立交与隧道出口小间距路段事故影响因素分析[J]. 中外公路,2019,39(4): 283—287.

[3] WALLMAN C G. Simulation of Traffic Flow at Grade-Separated Interchanges[J]. Traffic Engineering & Control,1976,17(10):406—409.

[4] 景天然. 联邦德国道路设计[M]. 北京:人民交通出版社,1987.

[5] MINE H, MIMURA T. Highway Merging Problem with Acceleration Area[J]. Transportation Science,1969,3(3): 205—213.

[6] 吕纪云,陈瑾,章坤鹏. 互通式立交与隧道出入口安全净距研究[J]. 中外公路,2019,39(2):294—297.

[7] 赵一飞,陈敏,潘兵宏. 隧道与互通式立交出口最小间距需求分析[J]. 长安大学学报(自然科学版),2011,31(5): 69—71.

[8] 廖军洪,王芳,邬洪波,等. 高速公路互通立交与隧道最小间距研究[J]. 公路,2012,57(1):1—7.

[9] 姚晶. 主线分合流与隧道及主线出入口最小间距研究[D]. 西安:长安大学,2017.

[10] 杨俊闯,赵超. K—Means 聚类算法研究综述[J]. 计算机工程与应用,2019,55(23):7—14,63.

[11] 杨文臣,田毕江,胡澄宇,等. 山区高速公路隧道路段运行速度分析与预测[J]. 中外公路,2018,38(6):308—313.