

互通式立交与隧道出入口安全净距研究

吕纪云¹, 陈瑾², 章坤鹏³

(1.中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430056; 2.湖北省交通规划设计院股份有限公司;
3.武汉市政工程设计研究院有限责任公司)

摘要:针对高速公路的建设特点和现有互通式立交与隧道出入口之间净距过小的现状,在分析车辆运行轨迹的基础上,构建了互通式立交与隧道出入口之间的净距计算模型。通过分析明适应距离、读取标志距离、换道距离、安全距离等因素,提出了隧道出入口与互通式立交之间最小净距的推荐值与极限值。结合净距分析与工程实践经验,提出了小净距路段下隧道出入口与互通式立交之间的安全保障措施,并针对变异式互通工程实例做了BIM模型检验,以期工程设计提供参考。

关键词:互通式立交;隧道出入口;净距;缓和曲线换道模型;保障措施;BIM模型

伴随基础设施建设的蓬勃发展,高速公路建设进一步向西部山区延伸。鉴于山区特殊的走廊带与复杂的地形地质条件,在设计中出现了诸多互通式立交与隧道出入口之间距离过小的路段。JTG D20—2006《公路路线设计规范》中规定:隧道出口至前方互通式立交减速车道渐变段起点的距离不应小于1 000 m,这在部分山区高速公路设计中很难实现。基于此现状,在确保车辆安全运行的前提下,构建立交与隧道出入口净距计算模型,从而确定一个合理的安全净距,为今后的道路设计提供参考。

1 互通式立交与隧道出口净距分析

以单向双车道为例,分析车辆的行驶轨迹可发现,隧道出口与立交之间的净距 L (图1)主要由以下6部分构成:出隧道洞口后驾驶员所需的明适应距离 L_1 、读取预告标志所行驶的距离 L_2 、等待与判断可插入间隙所行驶的距离 L_3 、 L_4 、变换车道所需距离 L_5 、安全距离确认 L_6 。采用式(1)计算:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 \quad (1)$$

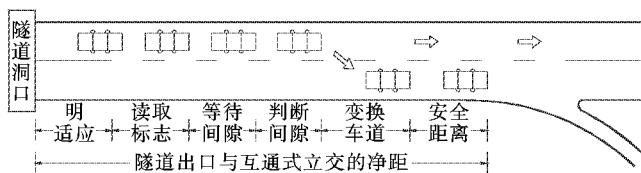


图1 隧道出口与互通式立交净距示意图

1.1 明适应距离

在车辆驶出隧道洞口后,周围环境亮度凸增,驾驶员瞳孔面积变化速率迅速增加,驾驶负荷急剧增大,从而导致驾驶员产生眩光与视觉疲劳等生理现象,容易影响正常驾驶,诱发交通事故。所以,为保证车辆安全行驶,驾驶员在驶出隧道洞口后需要一个“明适应”时间。研究发现人的视觉恢复能力与光照强度、光源特征、持续时间、驾驶员年龄相关,存在个体差异性。驾驶员的锥体细胞与杆体细胞在感光能力方面存有差异,对明暗适应的时间也有所不同。车辆由暗处驶往明处1~3 s便可逐渐适应,1 min左右便可以完全适应。为确保行驶安全,计算隧道出口与互通式立交之间的净距时,明适应时间取为3 s,不同速度下所需距离如表1所示。

表1 明适应所需距离

速度/ (km·h ⁻¹)	距离 L_1 / m	速度/ (km·h ⁻¹)	距离 L_1 / m
120	100	80	66.667
100	83.333		

1.2 读取预告标志所行驶的距离

驾驶员在明适应过后读取预告标志所行驶的距离 L_2 包含两部分,认读距离 L_{21} 与反应距离 L_{22} :

$$L_2 = L_{21} + L_{22} = \frac{vt_1}{3.6} + \frac{vt_2}{3.6} \quad (2)$$

式中: v 为车辆速度(km/h); t_1 为认读时间(s); t_2 为反

应时间(s)。

认读时间取决于出口预告标志牌上文字的类别与个数,采用式(4)计算:

$$t_1 = txy \tag{3}$$

式中: x 为文种修正系数; y 为文字复杂性修正系数。

x 、 y 及 t_1 的对应结果如表 2~4 所示。

表 2 文种修正系数

文字类别	文种修正系数	文字类别	文种修正系数
汉字	2.0	片假名	1.2
平假名	1.3	拉丁字母	1.0

表 3 文字复杂性修正系数

笔划数	文字复杂性修正系数
<10	1.0
10~15	1.1
>15	1.2

表 4 认读所需时间

字数	时间/s	字数	时间/s
25	3.2	10	1.5
20	2.5	5	1.3
15	1.9		

《公路设计指南》给出的反应时间如表 5 所示,为保障安全,取理想状态下的上限值 2.5 s。

表 5 反应时间

设计速度/(km·h ⁻¹)	理想值/s	最小值/s
120	2.5	2.0
100	2.5	2.0
80	2.4	1.9

根据上述取值得出驾驶员读取预告标志所行驶的距离 L_2 。此外,车辆行驶中存在另一种情形,驾驶员在隧道内已提前获知前方立交出口,完成了预告标志的读取。所以,在计算净距时便可不考虑该部分距离,进而可以得出两种不同情形下的净距值。

1.3 等待可插入间隙所行驶的距离

车辆完成预告标志读取后,等待可插入间隙所行驶的距离,采用式(4)计算:

$$L_3 = \frac{vt_3}{3.6} \tag{4}$$

式中: t_3 为平均等待时间(s)。

可插入间隙的平均等待时间与道路上车辆之间的

车头时距分布密切相关。车头时距随道路交通流的变换而变化,采用负指数分布计算,如式(5)所示。

$$P(h > t) = e^{-\lambda(t_1 - t_2)} \tag{5}$$

式中: λ 为车辆平均到达率, $\lambda = Q/3\ 600$ (辆/s); t_1 为车辆临界间隙(s),取 4 s; t_2 为最小车头时距(s),取 1.2 s。

JTG B01—2014《公路工程技术标准》规定高速公路采用第 3 级服务水平,通过最大服务交通量可以得到车辆的平均到达率,进而得出车辆等待可插入间隙所行驶的距离(表 6)。

表 6 等待可插入间隙所行驶的距离

设计速度/ (km·h ⁻¹)	最大服务交通量/ [pcu·(h·ln) ⁻¹]	平均达到率/ (pcu·s ⁻¹)	行驶距 离/m
120	1 650	0.458 3	96.386
100	1 600	0.444 4	76.660
80	1 500	0.416 7	57.712

1.4 判断可插入间隙所行驶的距离

L_4 为驾驶员判断是否可以安全插入所行驶的距离,判断时间 t_3 取 2.5 s,采用式(6)计算(表 7):

$$L_4 = \frac{vt_4}{3.6} \tag{6}$$

表 7 判断可插入间隙所行驶的距离

设计速度/ (km·h ⁻¹)	行驶距离/ m	设计速度/ (km·h ⁻¹)	行驶距离/ m
120	83.333	80	55.556
100	69.444		

1.5 变换车道所行驶的距离

理想情况下,车辆在变换车道过程中,驾驶员匀速转动方向盘并以恒定速度行驶所形成的轮胎轨迹是一条曲率连续变化的线形。结合国内外对于车辆换道行为与运行轨迹的研究,高速公路适用于缓和曲线换道模型,换道运行轨迹如图 2 所示。

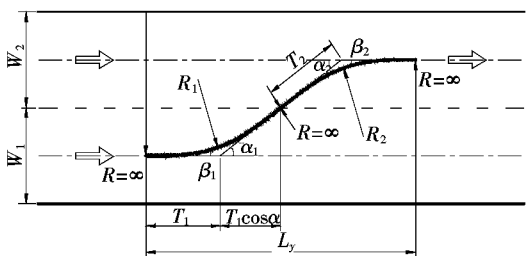


图 2 缓和曲线换道模型轨迹图

设当前车道宽度为 W_1 , 目标变换车道宽度为 W_2 , 两段缓和曲线连接处的半径分别为 R_1 、 R_2 。根据图 2 可得如下关系:

$$W_1/2 = T_1 \cdot \sin\alpha_1 \quad (7)$$

其中: $\alpha_1 = L_{s1}/R_1$ 。

根据缓和曲线几何要素中内移值、切线长度和切线增长值的计算公式, 代入式(7)可得:

$$\frac{W_1}{2} = (R_1 + \frac{L_s^2}{24R_1} - \frac{L_s^4}{2 \cdot 384R_1^3}) \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{L_{s1}}{R_1}\right) \right] + \left(\frac{L_{s1}}{2} - \frac{L_{s1}^3}{240R_1^2} \right) \cdot \sin\left(\frac{L_{s1}}{R_1}\right) \quad (8)$$

式中: L_s 为缓和曲线长度(m); R_1 为曲线连接处半径(m); α 为转角($^\circ$)。

其中, 车道宽度 W_1 为 3.75 m, 曲线半径 R_1 由车辆行驶的受力平衡方程而得。根据式(8)便可得出切线长度 T_1 、 T_2 , 相应的变换车道所行驶的距离如式(9)所示。

$$L_5 = (T_1 + T_2) \cdot (1 + \cos\alpha) \quad (9)$$

其中: $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ 。

1.6 安全距离确认

车辆在进入减速车道前所需的安全距离 L_s 一般取 100 m。

根据上述计算结果便可得出隧道出口与互通式立交之间所需的最小净距值, 同理亦可计算出单向三车道与单向四车道的最小净距值, 如表 8、9 所示。

表 8 未包含读取预告标志行驶距离的最小净距值

设计速度/ (km · h ⁻¹)	单向四 车道/m	单向三 车道/m	单向两 车道/m
120	1 114.160	934.147	750.470
100	809.440	683.876	555.869
80	585.937	483.127	395.227

表 9 包含读取预告标志行驶距离的最小净距值

设计速度/ (km · h ⁻¹)	单向四 车道/m	单向三 车道/m	单向两 车道/m
120	1 263.338	1 028.411	816.412
100	1 034.352	845.618	677.190
80	769.271	635.905	517.449

参照表 8、9 的计算结果, 给出 3 级服务水平下隧道出口与互通式立交之间最小净距的推荐值, 建议将包含读取预告标志所行驶距离的计算结果作为一般值, 将未包含读取预告标志所行驶距离的计算结果作为极限值, 如表 10 所示。

表 10 隧道出口与互通式立交之间的最小净距推荐值

设计速度/ (km · h ⁻¹)	一般值/m			极限值/m		
	单向四车道	单向三车道	单向两车道	单向四车道	单向三车道	单向两车道
120	1 300	1 050	850	1 150	950	750
100	1 050	850	700	850	700	560
80	800	650	550	600	500	400

2 互通式立交与隧道入口净距分析

车辆从加速车道汇入主线后, 相对容易就可以发现隧道入口位置, 不存在显著的安全隐患。实际调研可发现大多数驾驶员会自主减速以平稳驶入隧道, 故在计算互通式立交与隧道入口净距时, 给驾驶员留足反应距离与调整车速的距离即可, 如图 3 所示。

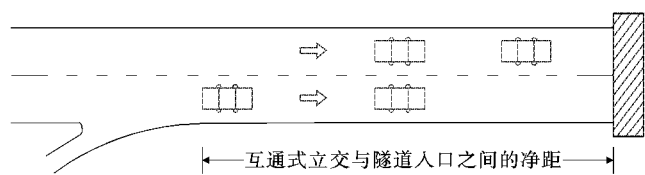


图 3 互通式立交与隧道入口净距示意图

根据国外的有关研究, 驾驶员的反应时间与处理的信息量相关, 采用式(10)计算。实际情况下, 驾驶员需要明确两个信息: ① 是否驶入前方隧道; ② 是否调整车速。所以, 信息容量取值为 2, 进而可以得出互通式立交与隧道入口之间的净距值。

$$\begin{cases} t = 1.878 \ 384 e^{0.261 \ 087 x} \\ L = \frac{vt}{3.6} \end{cases} \quad (10)$$

式中: L 为互通式立交与隧道入口之间的净距(m); v 为车辆速度(km/h); t 为反应时间(s); x 为信息容量。

根据上述计算结果, 不同设计速度下互通式立交与隧道入口的最小净距值如表 11 所示。

此外, 上述计算值可同样适用于服务设施与隧道出入口之间净距的控制值。

表 11 互通式立交与隧道入口最小净距推荐值

设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	计算值/m	推荐值/m
120	105.533	110
100	87.944	90
80	70.356	75

3 安全保障措施研究

当隧道出口与互通式立交出口渐变段起点净距不满足要求时,可以从以下几方面入手加以改善:

(1) 优化立交方案,采取变异式互通方案,以满足净距要求。在平凉至绵阳国家高速公路(G8 513)平凉(华亭)至天水段施工图设计中,天水北互通布设困难,主交通流方向隧道出口与减速车道渐变段起点不满足净距需求。结合地形该互通便采用了变异式立交方案,从而满足了安全距离需求。同时,通过 BIM 检验了该互通的安全性,保证了互通的安全运营(图 4)。

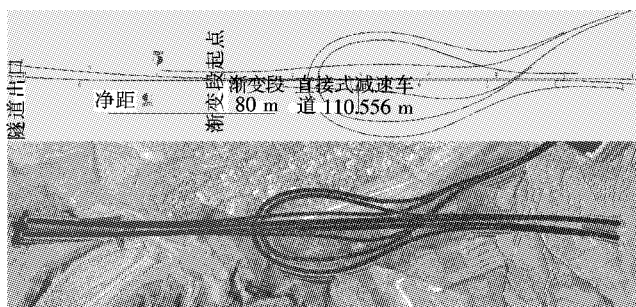


图 4 天水北互通 BIM 模型

(2) 对于隧道结构进行特殊处理,即在距离出洞处一定范围内拓宽一个车道作为辅助车道,并且通过交安设施的设置及时把驶出交通流诱导到该车道上,达到提前分流的效果。

(3) 加强洞内外照度监测,根据照度自动调整隧道出口段和过渡段的照明亮度,减少明适应所需时间。

(4) 在小净距路段,除了在路基路段正常设置的出口预告标志外,建议在隧道前设置指向每个车道的地点、方向标志,同时隧道内出口预告标志采用主动发光式标志,以引起驾驶员注意。此外,在隧道出口外路面上设置路面文字标记“××出口”及导向箭头,保证车辆平稳驶出。

(5) 在隧道出口前 200 m 至隧道出口段设置震动

减速标线,提醒驾驶员减速并控制车速。在隧道出口设置相应振动标线,提醒驾驶人注意前方路况,同时在互通出口三角端处设置黄闪灯和可导向防撞垫,以提升运营安全水平。

当互通式立交入口渐变段终点至隧道入口净距不满足要求时,可以从以下几方面入手加以改善:

(1) 从互通入口匝道渐变段终点开始主线内侧车道与外侧车道的车道分界线采用白色实振动标线,禁止匝道驶入车辆变换车道。

(2) 在隧道洞口侧墙端面设置立面标记,隧道洞口上贴反光膜,以清晰勾勒出隧道轮廓。

(3) 在匝道渐变段终点至隧道入口处铺设彩色防滑路面,以提高路面抗滑性并警示驾驶者安全行车。

(4) 加强隧道入口路段和过渡段的照明,减少暗适应所需时间。

4 结论

(1) 通过分析车辆的行驶轨迹,构建了隧道出口与互通式立交之间的净距计算模型。通过分析明适应距离、标志读取距离、等待与判断可插入间隙距离、换道距离、安全距离等因素,提出了不同设计速度与不同车道数下隧道出口与互通式立交之间最小净距的推荐值与极限值。

(2) 通过信息量处理模型,提出了互通式立交与隧道入口之间净距的推荐值。

(3) 结合净距计算值与工程实例,提出了小净距路段下隧道出入口与互通式立交之间的安全保障措施,以便为今后的设计实施提供参考。

参考文献:

- [1] JTG D20—2006 公路路线设计规范[S].
- [2] 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(3).
- [3] 何勇.公路安全设计指南[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [4] 史静.互通式立交最小安全净距及变速车道长度研究[D].长安大学硕士学位论文,2011.
- [5] JTG B01—2014 公路工程技术标准[S].
- [6] 沈强儒,赵一飞,陈璋勇,等.高速公路互通式立交约束型出口识别视距分析[J].中外公路,2012(6).