

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.08.023

基于识别视距的互通式立交分流区竖曲线最小半径研究

潘兵宏¹, 李成财², 周锡滨¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要:为减少互通式立交分流区事故数, 提高分流区道路运行安全性, 考虑识别视距在分流区的重要性, 提出了满足识别视距的分流区主线竖曲线最小半径计算模型与推荐值。计算模型中假定道路中线竖曲线半径与识别视距曲线一致, 在几何理论分析的基础上, 分别考虑了凹形竖曲线、凸形竖曲线两种不同的情况。凹形竖曲线分别考虑了夜间车照前灯与跨线构造物两个控制因素, 凸形竖曲线则考虑视线将受到竖曲线最高顶点处的遮挡为控制因素, 从而提出了基于识别视距的分流区主线竖曲线最小半径计算模型。结合《公路路线设计规范》相关指标的推荐值, 基于分流区主线竖曲线最小半径计算模型, 推算得到了满足识别视距的凹形竖曲线与凸形竖曲线的最小半径推荐值, 并与《公路路线设计规范》的竖曲线最小半径规范值进行了对比。结果表明:凹形竖曲线的最小半径受夜间行驶时的车照前灯控制, 满足车照前灯控制的夜间行驶所需要的凹形竖曲线最小半径均大于满足跨线构造物所需求的凹形竖曲线最小半径值;互通式立交区主线满足同等的推荐识别视距的凸形竖曲线半径比凹形竖曲线半径大得多, 互通式立交范围内主线应尽量采用凹形竖曲线, 采用凹形竖曲线相对于凸形竖曲线更有利于识别高速公路出口。

关键词:交通工程; 竖曲线半径; 几何原理; 识别视距; 高速公路

中图分类号: U412.33

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 08-0170-07

Study on Minimum Radius of Vertical Curve of Interchange's Diverging Area Based on Recognition Sight Distance

PAN Bing-hong¹, LI Cheng-cai², ZHOU Xi-zhen¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

2. PowerChina Huadong Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 311122, China)

Abstract: In order to reduce the number of accidents and improve the road operation safety in the diverging area of interchange, considering the importance of recognition sight distance in the diverging area, the minimum radius calculation model and recommended value of the main line vertical curve of the diversion area that meet the recognition sight distance are proposed. In the calculation model, it is assumed that the radius of the vertical curve of the road centerline is consistent with the recognition sight distance curve. On the basis of the geometric theoretical analysis, the concave vertical curve and the convex vertical curve are considered respectively. The concave vertical curve considers the control factors of night headlights and flyover structures respectively, and the convex vertical curve considers that the sight line will be blocked by the highest vertex of the vertical curve as the control factor. Therefore, a calculation model of the minimum radius of the main line vertical curve in the diverging area based on recognition sight distance is proposed.

收稿日期: 2021-04-22

基金项目: 河北省高速公路交通安全评价成套技术及高风险路段甄别技术研究项目 (19275601D)

作者简介: 潘兵宏 (1974-), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授. (panbh@chd.edu.cn)

* 通讯作者: 周锡滨 (1995-), 女, 重庆人, 硕士研究生. (zhouxizhen@chd.edu.cn)

Combining with the recommended values of relevant indicators in *Design Specification for Highway Alignment* and based on the calculation model of the minimum radius of the main line vertical curve in the diverging area, the recommended minimum radius values of concave vertical curve and convex vertical curve meeting the recognition sight distance are calculated and compared with the minimum radius values of vertical curves in the *Design Specification for Highway Alignment*. The result shows that (1) The minimum radius of concave vertical curve is controlled by the headlights during night driving. The minimum radius values of concave vertical curve meets night driving controlled by headlights are greater than that required for flyover structures. (2) The radius of convex vertical curve for the main line in the interchange area meets the same recommended recognition sight distance is much larger than that of concave vertical curve. The concave vertical curve shall be used as far as possible for the main line in the interchange area, which is more conducive to recognize the exit of expressway than convex vertical curve.

Key words: traffic engineering; vertical curve radius; geometric principle; recognition sight distance; highway

0 引言

目前,我国高速公路出口互通式立交分流区事故数量急剧上升^[1],成为道路安全系统的关键制约段。相关调查研究表明,分流区事故占整个互通式立交区域的一半左右^[2-3]。沈强儒^[4]等基于识别视距,通过对特殊互通式立交出口区域主线线形指标分析发现,影响交通安全行驶的互通式立交出入口典型位置主要有:(1)受主线最小圆曲线半径影响的路段。(2)受主线平曲线出口识别视距影响的路段。(3)受主线竖曲线出口识别视距影响的路段。(4)受主线最大纵坡影响的路段。当车辆在主线线形为凸形竖曲线的出口匝道处行驶时,驾驶人视线会受到曲线顶点的遮挡,导致识别视距不足,影响驾驶人发现出口,进而错过驶出主线的最佳时机;当车辆在主线线形为凹形竖曲线的出口匝道上行驶时,夜间驾驶人视线受车照前灯的影响,白日或将受到跨线构造物的影响,从而影响驾驶人的识别视距,而识别视距是影响高速公路出口安全的重要因素^[5]。

国外关于互通式立交出口分流区视距的运用已取得广泛的成果。美国的 Hassan 等^[6]结合计算机模拟仿真试验,分析驾驶员的行为特性及道路线形等因素与行车视距的关系。《高速公路设计要领》^[7]与《日本公路技术标准的解说与运用》^[8]指出以横净距为关键参数对道路平面圆曲线半径进行检查,以视距大小为重要因素对竖曲线长度进行选择。Fambro 等^[9]创立高速公路停车视距计算模型,该模型以驾驶人和车辆性能为参数,并可以通过现场数据进行验证,为不同车型推荐不同的停车视距

参数。AASHTO 模型与 Canada 的 PVSD 模型均较好的体现了视距与道路线形之间的关系,且应用广泛^[10]。

国内学者方国涛^[11]以高速公路各设计速度的标准横断面为前提,分析了满足停车视距的临界圆曲线半径。王吉双等^[12]则根据汽车行驶的安全性、舒适性出发分析了平竖曲线的半径值,以及等于两倍停车视距的识别视距情况下,立交分流端前主线平纵半径的取值研究。刘向阳等^[13]则基于数字仿真模型技术,提出了以“视线棱体”为核心的,新的空间视距测算模型。包洋旺^[14]提出了根据《公路路线设计规范》(JTGD20—2006)(以下简称《路线规范》)规定的互通式立体交叉的识别视距值的检验方法,给出了在满足规定主线线形指标的情况下,也能同时满足识别视距要求的指标建议值。刘哲峰^[15]利用 VISSIM 仿真软件对匝道圆曲线半径与运行速度进行仿真研究,认为匝道圆曲线半径为 50 m,运行速度为 40 km/h 时,交通组织最优。吴朝阳^[16]通过研究发现车辆在互通式立交分流鼻端的实际运行速度大于匝道的设计速度,依据车辆在分流鼻端的实际运行速度得到匝道分流鼻端的最小半径。白浩晨等^[17]通过对不同路段不同车道的驾驶人横向视点位置进行统计分析,基于停车视距,对路段圆曲线最小半径进行了计算。

综上所述,目前关于视距运用的研究虽然很多,但是在对互通式立交分流区主线竖曲线半径的研究中,大部分学者都缺乏对识别视距这一重要因素的考虑。为解决这一问题,改善分流区道路的运行安全性,本研究将基于识别视距对互通式立交分流区主线竖曲线最小半径计算模型进行研究,拟提

出分流区满足识别视距的主线竖曲线最小半径建议值,以供道路设计人员、道路安全性评价人员参考。

1 纵断面线形对分流区行车安全的影响

我国山区高速公路由于受地形、地质、地貌等条件的约束,线形指标易受限制。而在山区高速公路上设置立交时,出口匝道又易受主线线形约束,从而无法避免将出口设置于主线平、纵面指标较低的路段,导致驾驶人不易识别高速公路出口。

当出口设置受主线纵面线形的约束时,(1)出口匝道设置在半径较小的凹形竖曲线后,此时驾驶人视线易受到跨线构造物的遮挡;或是夜间行驶,受汽车前照灯照明范围的影响,驾驶人无法及时识别高速公路出口,导致无法及时减速驶离主线。(2)当出口匝道设置在半径较小的凸形竖曲线后,此时驾驶人视线易受到凸形竖曲线最高顶点的遮挡,同样无法及时识别高速公路出口。(3)当出口设置在长大下坡路段的坡底位置时,驾驶人容易行驶速度过快,错过出口。已错过出口或即将错过出口的部分驾驶人采取不合理、甚至违法操作方式,强行变道驶出,也极易引发交通事故。

竖曲线是在道路的纵断面图中,以变坡点为交点,连接两个相邻坡段的曲线。根据坡度的方向分为凹形竖曲线与凸形竖曲线。在道路系统中,竖曲线半径的大小直接影响到驾驶人能否顺利识别前方路线走向。在高速公路出口处,为改善道路运营安全,应将识别视距纳入主线竖曲线设置的考虑范围内。驾驶人在凸形竖曲线上行驶时,视线将受到曲线顶点的遮挡,从而无法识别前方出口的位置。凸形竖曲线对于驾驶人的影响在白昼与夜晚是一致的。而当主线出口采用凹形竖曲线时,驾驶人夜间视线将受到车照前灯的照射范围的影响;且当凹形竖曲线设于跨线构造物下时,驾驶人视线亦受到跨线构造物的影响。

2 凹形竖曲线最小半径

车辆在凹形竖曲线上行驶时,若凹形竖曲线半径过小,将会导致夜间行驶时车照前灯的照射范围过小,距离过近。同时驾驶人行驶在跨线构造物下时,识别视距将受限。当车辆夜间在高速公路出口行驶时,主线出口处凹形竖曲线半径过小,将导致驾驶人在一定范围内无法及时识别高速公路出口。为保证夜间高速公路出口处的行驶安全,出口处凹

形竖曲线半径应考虑夜间前照灯范围与跨线构造物遮挡两个方面。

2.1 夜间车辆前照灯范围控制

当驾驶人在夜间行驶于线形为凹形竖曲线的道路上时,其视线将受到车辆前照灯的影响,其视野的有效范围如图1所示。考虑其车辆前照灯的仰角为 1.5° 时,将识别视距近似于同一竖曲线平面上进行建模,如图2所示。

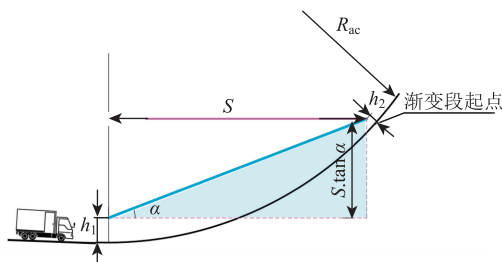


图1 夜间行驶驾驶人视野有效范围

Fig. 1 Effective range of driver's sight for night driving

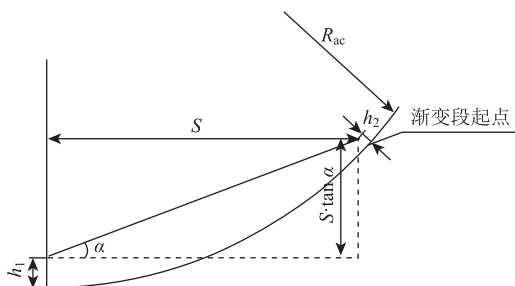


图2 凹形竖曲线半径计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation model of radius of concave vertical curve

由图2中的几何关系,根据几何原理进行建模,存在式(1)的几何关系:

$$S^2 + (R_{ac} - S \tan \alpha - h_1)^2 = (R_{ac} - h_2)^2, \quad (1)$$

式中, h_1 为视线高,取1.2 m; h_2 为物高,热熔型涂料标线厚度范围取0.7~2.5 mm,本研究取0.7 mm^[18];S为识别视距; R_{ac} 为凹形竖曲线半径; α 为车辆前灯仰角(1.5°)^[19]。

2.2 受跨线构造物控制

当驾驶人行驶在跨线构造物下,线形为凹形竖曲线的道路上时,其视线可能受到跨线障碍物的遮挡(图3)。为了保证高速公路出口处的运行安全,若出口处主线为凹形竖曲线时,需将跨线构造物的遮挡纳入竖曲线半径设置考虑因素,此时出口处的凹形竖曲线最小半径计算模型示意图4。

由图4中的几何关系,根据几何原理进行建模,存在式(2)~(4)的几何关系:

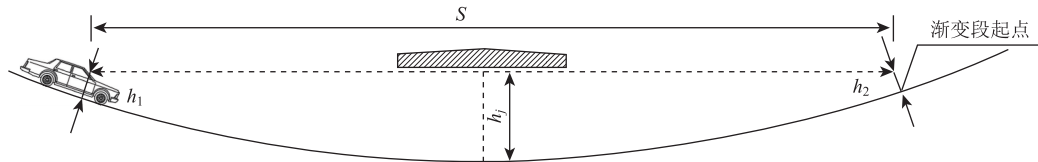


图3 跨线桥下行驶视野有效范围

Fig. 3 Effective range of driving sight under flyover

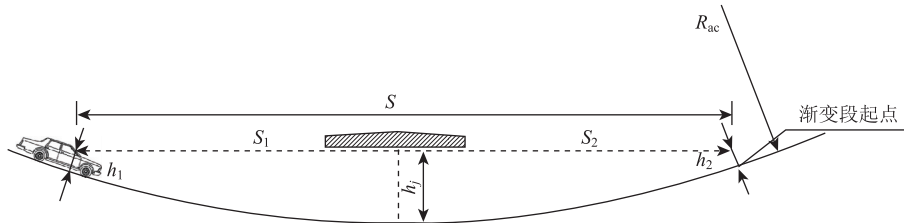


图4 凹形竖曲线半径计算模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of calculation model of radius of concave vertical curve

$$S_1^2 + (R_{ac} - h_j)^2 = (R_{ac} - h_1)^2, \quad (2)$$

$$S_2^2 + (R_{ac} - h_j)^2 = (R_{ac} - h_2)^2, \quad (3)$$

$$S_1 + S_2 = S, \quad (4)$$

式中, S_1 , S_2 为几何中间替换变量, 无物理意义; h_j 为构造物净空高度; 高速公路取 $5.0 \text{ m}^{[19]}$; 其他字符意义同前。

3 凸形竖曲线最小半径

当车辆在凸形竖曲线上行驶时, 视线将受到竖曲线最高顶点处的遮挡, 无法明确前方的线形走向与交通情况。而驾驶人在竖曲线上行驶时, 竖曲线被要求边坡点前后有足够的识别视距, 以给予驾驶人识别前方路况时, 能够及时采取措施, 防止事故发生。此时, 若

凸形竖曲线半径过小, 将对驾驶人的视线造成阻挡, 在遇到紧急情况时, 没有足够的距离及时采取措施。

在互通式立交出口处, 为保障分流区驾驶人行驶安全, 若主线采用凸形竖曲线, 需要保证在出口前一定范围内, 驾驶人能顺利识别出口, 并且在识别视距范围内安全换道至最外侧车道。目前关于在互通式立交出口处的凸形竖曲线半径主要都是将视距曲线直线化, 再利用相关的几何关系求得相应的竖曲线半径值, 并且在目前的研究中, 很少有学者在研究竖曲线半径时, 将识别视距考虑进去。为保证互通式立交分流区的行驶安全, 分流区主线的竖曲线半径应将识别视距纳入考虑范围内, 则出口处的线形简化模型如图5与图6所示。

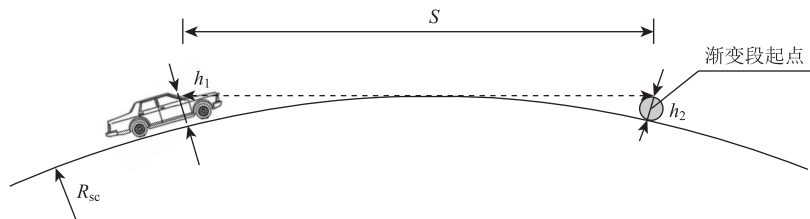


图5 凸形竖曲线上行驶视野示意图

Fig. 5 Schematic diagram of driving sight on convex vertical curve

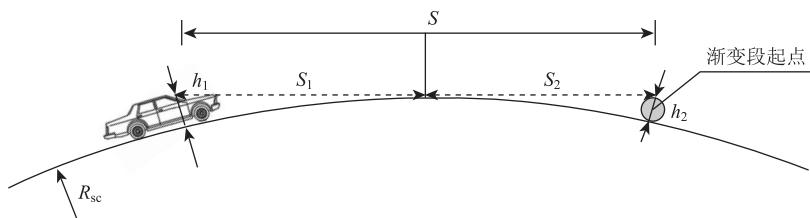


图6 主线凸形竖曲线线形计算模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of calculation model of main line convex vertical curve alignment

由图 6 中的几何关系, 根据几何原理进行建模, 存在式 (5)~(7) 的几何关系:

$$S_1^2 + R_{sc}^2 = (R_{sc} + h_1)^2, \tag{5}$$

$$S_2^2 + R_{sc}^2 = (R_{sc} + h_2)^2, \tag{6}$$

$$S_1 + S_2 = S, \tag{7}$$

式中, R_{sc} 为凸形竖曲线半径; 其他字符意义同前。

4 竖曲线最小半径推荐值

根据式 (1)~(7) 以及规范识别视距值分别求取了基于夜间车照前灯控制范围与受跨线构造物控制的, 满足识别视距的凹形竖曲线与凸形竖曲线的最小半径推荐值 (表 1), 计算结果取整 5 m。

表 1 满足规范识别视距的竖曲线最小半径推荐值 (单位: m)

公路等级			高速公路			一级公路	
设计速度 (km/h)			120	100	80	100	80
《路线规范》识别视距	一般值		350	290	230	290	230
	特殊值		460	380	300	380	300
《路线规范》凹形竖曲线最小半径	一般值		16 000	12 000	8 000	12 000	8 000
	极限值		(12 000)	(8 000)	(4 000)	(8 000)	(4 000)
《路线规范》凸形竖曲线半径	一般值		45 000	25 000	12 000	25 000	12 000
	极限值		(23 000)	(15 000)	(6 000)	(15 000)	(6 000)
	凸形竖曲线半径	极限值	48 665	33 410	21 015	33 410	21 015
		一般值	84 060	57 365	35 755	57 365	35 755
满足《路线规范》识别视距	夜间行驶	极限值	5 915	4 790	3 670	4 790	3 670
		一般值	7 995	6 585	4 975	6 585	4 975
	跨线构造物	极限值	3 500	2 405	1 515	2 405	1 515
		一般值	6 045	4 125	2 575	4 125	2 575
推荐竖曲线最小半径	凸形竖曲线	极限值	48 665	33 410	21 015	33 410	21 015
		一般值	84 060	57 365	35 755	57 365	35 755
	凹形竖曲线	极限值	5 915	4 790	3 670	4 790	3 670
		一般值	7 995	6 585	4 975	6 585	4 975

注: 括号中为相应的极限值。

由表 1 和图 7 可以看出:
(1) 对于凹形竖曲线最小半径, 满足车照前灯

控制的夜间行驶所需要的最小半径均大于满足跨线构造物所需求的最小半径值, 所以凹形竖曲线的最

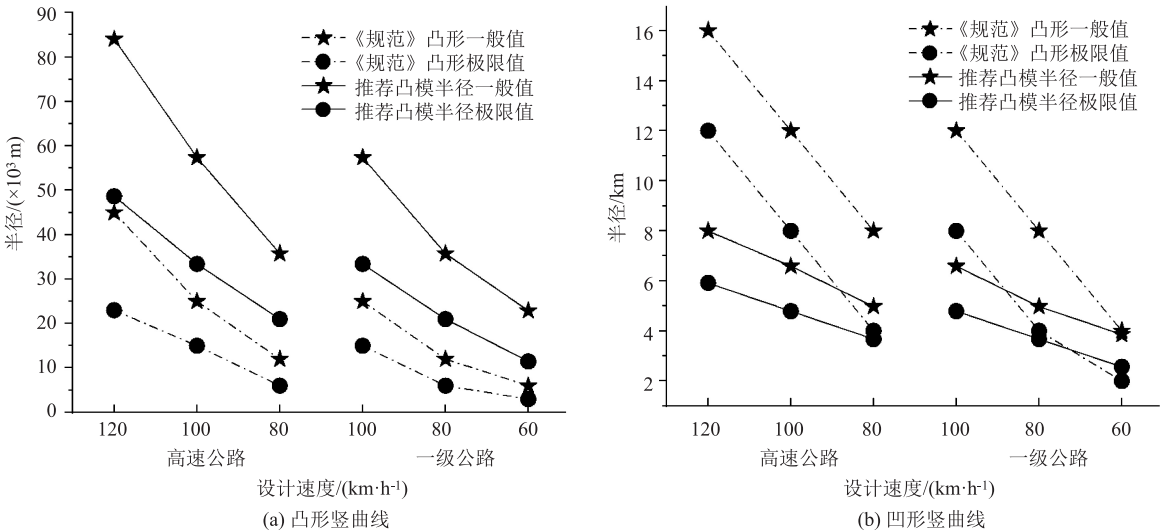


图 7 竖曲线规范值与推荐值对比
Fig. 7 Comparison of specified value and recommended value of vertical curve

小半径受夜间行驶时的车照前灯控制。

(2) 满足《路线规范》识别视距的凸形竖曲线最小半径均比《路线规范》中的值大得多。这也表明,目前互通式立交分流区凸形竖曲线最小半径若按照《路线规范》中的推荐值进行指导设计,可能会存在问题。

(3) 满足《路线规范》识别视距的夜间行驶车照前灯控制的凹形竖曲线半径比凸形竖曲线半径小得多;这表明在目前的互通式立交范围内,主线应尽量采用凹形竖曲线,这样更有利于驾驶人识别高速公路出口。在需要满足同等识别视距的情况下,凹形竖曲线需求半径比凸形竖曲线需求半径小得多。所以在进行互通式立交设计时,尽量避免采用主线以凸形竖曲线上跨匝道的情况。

5 结论

本研究基于识别视距,对互通式立交分流区主线竖曲线最小半径进行了研究。根据几何理论,分别考虑了凹形竖曲线与凸形竖曲线两种不同情况,并且依据凹形竖曲线与凸形竖曲线分别受夜间行驶车照前灯范围控制与受跨线构造物控制、凸形竖曲线顶点的影响,提出了基于识别视距的竖曲线最小半径计算模型。研究结论如下:

(1) 凹形竖曲线的最小半径受夜间行驶时的车照前灯控制。满足车照前灯控制的夜间行驶所需要的凹形竖曲线最小半径均大于满足跨线构造物所需的凹形竖曲线最小半径值。

(2) 满足识别视距的凹形竖曲线与凸形竖曲线最小半径均比《路线规范》中的值大得多。采取《路线规范》推荐值可能会存在设计不安全问题。

(3) 互通式立交范围内主线应尽量采用凹形竖曲线,这样更有利于驾驶人识别高速公路出口。在需要满足同等识别视距的情况下,凹形竖曲线需求半径比凸形竖曲线需求半径小得多。

本研究推荐的竖曲线最小半径一般值与极限值是依据《路线规范》中推荐识别视距的特殊值与一般值进行计算的,由于《路线规范》中对于识别视距特殊值的运用情况缺乏清晰描述,后续研究应对高速公路互通式立交分流区识别视距进行具体的探讨,以更新竖曲线最小半径值。

参考文献:

References:

- [1] 钟伟斌,曹骏驹,张江洪,等. 互通式立交主线同侧相邻入口最小间距研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (9): 148-158.
- [2] ZHONG Wei-bin, CAO Jun-ju, ZHANG Jiang-hong, et al. Study on Minimum Distance between Adjacent Entrances on Same Side of Mainline of Interchange [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (9): 148-158.
- [3] HAUER E. Statistical Road Safety Modeling [J]. Transportation Research Record, 2004, 1897: 81-87.
- [4] 刘亚非,杨少伟,潘兵宏. 基于交通心理学的高速公路出口匝道事故成因研究 [J]. 公路, 2011 (11): 104-108.
- [5] LIU Ya-fei, YANG Shao-wei, PAN Bing-hong. Research on Expressway Off-ramp Accident Causes Based on Traffic Psychology [J]. Highway, 2011 (11): 104-108.
- [6] 沈强儒. 高速公路互通式立交约束型出口安全保障技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [7] SHEN Qiang-ru. Research on Security Technology of Restricted Exit of Interchange for Expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [8] 潘兵宏,周锡滨,周廷文,等. 高速公路互通式立交出口识别视距计算模型 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48 (9): 1312-1319.
- [9] PAN Bing-hong, ZHOU Xi-zhen, ZHOU Ting-wen, et al. Decision Sight Distance Calculation Model of Expressway Interchange Exit [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48 (9): 1312-1319.
- [10] HASSAN Y, SAYED T, TABERNERO V. Establishing Practical Approach for Design Consistency Evaluation [J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127 (4): 295-302.
- [11] 日本道路公团著. 日本高速公路设计要领 [M]. 西安: 陕西省旅游出版社, 1991.
- [12] Japan Road Corporation. Design Essentials of Japanese Expressway [M]. Xi'an: Shaanxi Tourism Press, 1991.
- [13] 日本道路协会. 日本公路技术标准解说与运用 [M]. 王治中, 张文魁, 冯理堂, 译. 北京: 人民交通出版社, 1980.
- [14] Japan Road Association. Explanation and Application of Japanese Highway Technical Standards [M]. WANG Zhi-zhong, ZHANG Wen-kui, FENG Li-tang, translated. Beijing: China Communications Press, 1980.
- [15] FAMBRO D B, FITZPATRICK K, KOPPA R J. New Stopping Sight Distance Model for use in Highway Geometric Design [J]. Transportation Research Record, 2000, 1701: 1-8.
- [16] 刘生涛,侯志俊,江龙进. 平纵组合线形设计视距评价指标研究 [J]. 公路工程, 2008 (4): 92-95.

- LIU Sheng-tao, HOU Zhi-jun, JIANG Long-jin. The Sight Distance Evaluation Study of Combining Plane and Vertical Curves [J]. Highway Engineering, 2008 (4): 92-95.
- [11] 方国涛. 高速公路横净距与路线路基设计 [J]. 北方交通, 2010 (8): 15-17.
- FANG Guo-tao. Design on Lateral Clear-spacing and Route, Subgrade of Expressway [J]. Northern Communications, 2010 (8): 15-17.
- [12] 王吉双, 奚勇. 视距要求对路线平、竖曲线半径的影响 [J]. 公路交通科技, 2001, 18 (6): 31-33.
- WANG Ji-shuang, XI Yong. The Effects of Sight Distance on Highway Curves [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18 (6): 31-33.
- [13] 刘向阳, 周森, 郭腾峰. 公路行车视距分析与验证 [J]. 中国公路学报, 2010, 23 (增1): 36-41.
- LIU Xiang-yang, ZHOU Miao, GUO Teng-feng. Analysis and Verification of Highway Sight Distance [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (S1): 36-41.
- [14] 包洋旺. 识别视距对互通式立体交叉主线形指标选用的影响的研究 [J]. 公路, 2011 (8): 134-137.
- BAO Pan-wang. Research on Influence of Recognizing Sight Distance on Selection of Main Alignment Indicator of Interchange [J]. Highway, 2011 (8): 134-137.
- [15] 刘哲峰. 互通式立交匝道设计指标的研究 [J]. 交通世界, 2015 (5): 66-67.
- LIU Zhe-feng. Study on Design Indicator of Interchange Ramp [J]. Transpo World, 2015 (5): 66-67.
- [16] 吴朝阳. 互通式立体交叉分、合流端关键技术指标研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
- WU Zhao-yang. Study on Key Technical Indicators of Merging End and Diverging End of Interchanges [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [17] 白浩晨, 潘兵宏, 张江洪, 等. 基于停车视距的高速公路最小圆曲线半径研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (9): 60-67, 77.
- BAI Hao-chen, PAN Bing-hong, ZHANG Jiang-hong, et al. Study on Minimum Circular Curve Radius of Expressway Based on Stopping Sight Distance [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (9): 60-67, 77.
- [18] GB/T 16311—2009, 道路交通标线质量要求和检测方法 [S].
- GB/T 16311—2009, Specification and Test Method for Road Traffic Markings [S].
- [19] JTG D20—2017, 公路路线设计规范 [S].
- JTG D20—2017, Design Specification for Highway Alignment [S].

(上接第169页)

- LI Li, DENG Yu-tong, MOU Ling-ling. Path Optimization of Dangerous Goods Transportation Based on Improved NSGA-II Algorithm [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28 (1): 111-117.
- [21] 夏立新, 毕崇武, 梅潇, 等. 基于事件链的网络舆情事件演化研究 [J]. 情报理论与实践, 2020, 43 (5): 123-130.
- XIA Li-xin, BI Chong-wu, MEI Xiao, et al. Research on Evolution of Public Opinion in the Network Based on Chain of Events [J]. Information Studies: Theory & Application, 2020, 43 (5): 123-130.
- [22] 王国娟, 吕文红, 高歌, 等. 基于复杂网络的失效公交站点绕行方案研究 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (11): 107-117.
- WANG Guo-juan, LÜ Wen-hong, GAO Ge, et al. Study on Detour Scheme for Failure of Transit Station Based on Complex Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (11): 107-117.
- [23] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective Dynamics of "Small-world" Networks [J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [24] 宋亮亮, 邓勇亮, 袁竞峰, 等. 基于复杂网络理论的地铁运行干扰源分析 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2017, 47 (5): 1069-1073.
- SONG Liang-liang, DENG Yong-liang, YUAN Jing-feng, et al. Analysis of Metro Operation Disturbances Based on Complex Network Theory [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2017, 47 (5): 1069-1073.
- [25] 张玥, 帅斌, 尹德志, 等. 基于 STAMP-ISM 的铁路危险品运输系统风险-事故分析方法 [J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16 (9): 147-153.
- ZHANG Yue, SHUAI Bin, YIN De-zhi, et al. Risk-accident Analysis Method of Railway Dangerous Goods Transportation System Based on STAMP-ISM [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16 (9): 147-153.