

多车道匝道视距评价与优化方法研究*

张 驰^{1,2,▲} 罗昱伟^{1,3} 白浩晨² 李 泉^{1,4}

(1. 长安大学公路学院 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 西安 710075;
3. 长安大学道路基础设施数字化教育部工程研究中心 西安 710064;
4. 陕西省交通基础设施建设与管理数字化工程研究中心 西安 710000)

摘 要:为从视距角度分析多车道匝道上小车超车引发交通事故的致因,建立基于视距分析的多车道匝道视距评价与优化模型,并将该模型应用于实际立交的多车道匝道评价与优化。分析匝道上小车超车过程中停车视距指标的变化情况,并找出最不利状态进行研究;建立多车道匝道视距评价与优化模型,对该模型中匝道圆曲线半径、圆曲线长度、圆曲线与缓和曲线组合这3个关键要素进行深入研究,并提出满足视距要求的匝道平面线形要素推荐值;结合交通安全设施提出一套综合性的视距优化方案;利用该模型对四川省某高速公路的互通立交进行检验。研究结果表明,该模型可较好地解决多车道匝道视距不足的问题。在设计速度小于40 km/h的匝道,使用“平面线形优化法”效果较好。匝道圆曲线半径需要平均增大18.4%,圆曲线长度与缓和曲线长度均为3s行程长度。在设计速度大于40 km/h的匝道,“交通工程设施优化法”中的限速措施能更好的解决问题,其中设计速度与限速值的差值为15 km/h。

关键词:交通安全;匝道;车道数;视距模型;圆曲线半径;圆曲线长度;超车

中图分类号:U412 文献标志码:A doi:10.3963/j.issn.1674-4861.2019.06.004

Evaluation and Optimization of Sight Distance of Multi-lane Ramp

ZHANG Chi^{1,2} LUO Yuwei^{1,3} BAI Haochen² LI Xiao^{1,3}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd, Xi'an 710075, China;
3. Engineering Research Center of Highway Infrastructure Digitalization of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
4. Transportation Infrastructure Construction and Management Digital Engineering Research Center of Shanxi Province, Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to analyze causation of traffic accidents caused by cars on multilane ramp from a viewpoint of sight distance, an evaluation and optimization model of sight distance on multilane ramp based on sight distance analysis is established. The model is applied for evaluation and optimization of multilane ramp in interchange. It is necessary to analyze variation indices of stopping sight distance in a process of overtaking one car on the ramp and to find out the most unfavorable state. The model is established, and three key factors in the model including curve radius of ramp circle, length, and combination with mitigation curve are studied in depth. Recommended values of plane linear factors which meet requirements of ramp visibility are proposed. A set of comprehensive sight distance about the optimize program is put forward in combination with traffic safety facilities. The model is verified by a case study of an interchange of a highway in Sichuan province. The results show that this model can solve the problems of lacking sight distance on multi-lane ramp. When designed ramp speed is less than 40 km/h, the effect of using “the plane linear optimization method” is better. The circular curve radius of the ramp needs to increase by 18.4% on average. The length of the curve radius of ramp circle and the length of transition curve are both the lengths as 3s. When the designed ramp speed is more than 40 km/h, the speed limit measures of “the traffic engineering facility optimization method” can solve it better, and the difference between the designed speed and the speed limit value is 15 km/h.

Key words: traffic safety; ramp; number of lanes; sight distance model; radius of circular curve; length of circular curve; overtaking

0 引言

高速公路互通立交匝道,因其设计指标受到用地限制,往往成为行车事故易发点之一。近年来,由于高速车流量增大,设计人员为满足驾驶员超车需求以及增大立交的通行能力,设计了较多的多车道匝道。在多车道匝道上,若小车驾驶人员在外侧车道对内侧大车进行超车,由于内侧大车遮挡视线,小车视距下降;若小车行驶前方出现障碍物,车辆减速不及时,很容易发生车辆追尾、冲撞护栏、冲出路基等危险情况。为使车辆能够安全地通过匝道,多车道匝道的设置必须满足超车车辆具有足够的停车视距的要求。根据已有统计,立交匝道范围内事故占立交总事故的 $2/5^{[1]}$,且多车道匝道事故占比大。应综合考虑平面线形、通行能力、超车需求等指标设计多车道匝道;将现有的多车道匝道进行视距评价并优化匝道上的交安设施对车辆的安全运营具有重要的意义。

针对多车道匝道,国内外学者开展了一定的研究。国外对多车道匝道的研究大多数运用跟车模型,研究其交通流特性^[2-3]。德国与日本^[4]早期车道数和横断面型式选择的方法,主要考虑匝道基本路段的交通量和超车需求 2 个方面的因素。目前国内对多车道匝道设置条件的研究最为系统的是刘子剑^[5]提出的多因素综合分析匝道车道数理论,该理论以观测调查资料及理论计算为基础,提出基于基本路段、运行速度、连接部通行能力以及超车需求等多因素匝道车道数的选择方法。在此基础上张复明^[6]分析了多车道匝道横断面各部分的宽度,提出了满足未来发展趋势及设计要求的多车道匝道横断面综合确定方法。张铁英^[7]考虑了寒冷地区互通立交可能出现路面结冰的情况,提出了能保证运行安全与效率的匝道横断面优化方法。高健强^[8]依据客货混行的立交环境,提出了适应未来发展的客货分离小客车专用匝道的横断面设计指标。梁中岚^[9]运用主客观组合赋权法研究多车道匝道的平面、纵断面、横断面指标,对立交匝道的安全性、舒适性进行了评价,并将此方法运用于实例。中国现行 JTG/TD21—2014《公路立体交叉设计细则》^[10]对多车道匝道

的设置条件进行了规定。

已有的多车道匝道相关的研究大多针对超车需求和提升匝道通行能力进行研究,缺乏对视距指标的研究。规范中多车道匝道的设置条件与视距指标也不存在相关性,较难指导设计人员设计出满足视距指标要求的多车道匝道。然而匝道事故的发生往往是由于匝道平面线形指标较低,但设计人员不合理地选择了多车道匝道的设计方案,且未使用交通安全设施对匝道进行优化,造成小车在超车过程中由于视距不足引发交通事故。本研究从视距角度出发,以保障小客车在超车过程中拥有安全的停车视距为研究目的,建立多车道匝道视距评价与优化模型。首先分析多车道匝道小车超车过程视距的变化,并确立视距最不利情况;其次运用模型中的匝道圆曲线半径改善法、圆曲线长度改善法、圆曲线与缓和曲线组合改善法这 3 种方法对不合理的线形指标进行改善,计算出不同设计速度下满足视距要求的多车道匝道线形指标;然后结合交安优化方法,综合地分析出多车道匝道的设置条件并提出其安全性优化方案;最后将视距评价与优化模型运用于实例。

1 多车道匝道小车超车视距不足现象

1.1 视距不足现象

在客货混行的互通立交中,小车驾驶员由于忍受不了低速行驶,极易产生超车需求^[5]。然而在超车过程中,由于右侧大车对小车的视线遮挡,小车会存在视距不足的现象。

如图 1 所示,在匝道远处 1 点,此时驾驶员视线与内侧护栏相切,且交大车于 A 点,则拥有最大的停车视距 a_1a ;当车辆行驶至点 2 至点 3 之间时,驾驶员视线与大车弧 AB 相切,此时小车的停车视距从 a_1a 下降至 b_1b ;则匝道点 2 至点 3 也是小车视距最不利路段;小车在点 4 时,视线再次与内侧护栏相切,且交大车于 B 点,此时再次达到最大视距 c_1c ($c_1c = a_1a$)。小车驾驶员在超车过程的视距变化情况,见图 2。

1.2 视距不足验算

为获取超车过程中小客车在最不利段实际的

收稿日期:2019-04-03

* 国家重点研发计划项目(2017YFC0803906)资助

▲第一作者(通信作者)简介:张 驰(1981—),博士,教授,研究方向:交通安全与道路仿真. E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

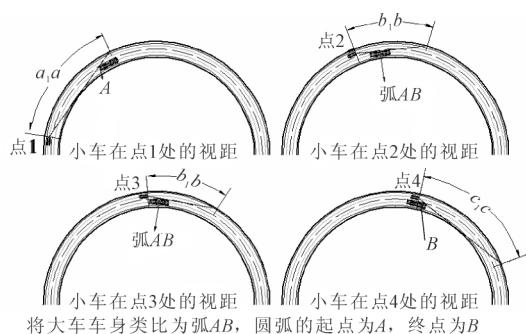


图1 在点1~点4处小车停车视距

Fig. 1 Stopping sight distance from point 1 to 4

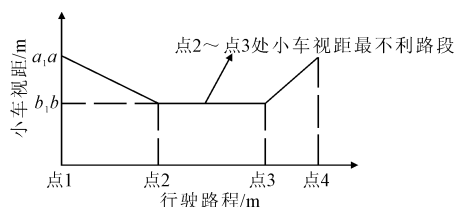


图2 小车视距变化情况

Fig. 2 Change of sight distance of the car

视距数值,本研究查找了现有的视距计算模型。对于二维视距计算方法,国外学者 Essa^[11]和 Lovell^[12-13]对平曲线存在连续横向障碍物的路段视距计算方法进行了研究与补充;国内学者彭金华等^[14]和赵永平等^[15]也在平面视距计算进行了

深入研究。对于三维视距计算方法,K. Amiri-dis^[16];廖军洪等^[17];Ismail 和 Syed^[18]、潘兵宏等^[19]、陈雨人等^[20]都提出了各自的三维视距计算方法。

本文的研究对象是匝道的平面视距,选用较为成熟的二维横净距视距计算模型分析多车道匝道小车超车视距变化状态。其函数式见式(1)~(3)。

$$S_1 = \frac{\arccos\left(1 - \frac{H}{R_{\text{left}}}\right) \times R_{\text{left}}}{28.65} \quad (1)$$

式中: S_1 为小客车的停车视距,m; H 为横净距值,m; R_{left} 外侧车道中心线圆曲线半径,m。

$$R_{\text{left}} = R + B \quad (2)$$

式中: R 为匝道圆曲线半径,m; B 为半个车道宽度,m。

$$\Delta S = S_1 - S \quad (3)$$

式中: ΔS 为停车视距规范值与计算值的差值,m。

以Ⅱ型双车道匝道标准横断面为例,图3为车辆超车过程中具体的横断面参数信息。

验算图1中最不利路段实际的视距数值,带入式(1)~(3)计算得到表1。

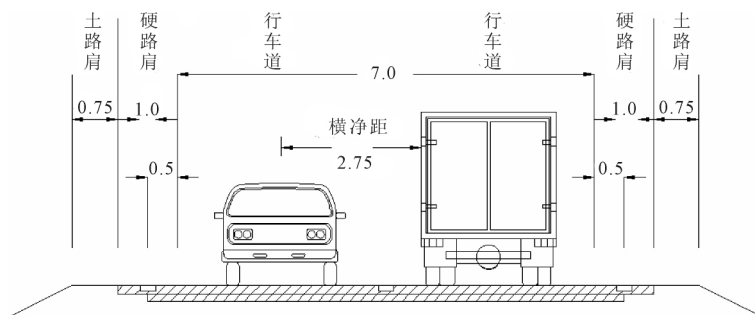


图3 Ⅱ型双车道匝道标准横断面(单位:m)

Fig. 3 Type II standard cross section of two lane-ramp

表1 多车道匝道视距评价表

Tab. 1 Evaluation table of sight distance on multi-Lane ramp

$v/(km/h)$	R_1/m	R_{left}/m	H/m	S_1/m	S/m	$\Delta S/m$	视距评价结果
30.0	30.0	31.8	2.8	26.6	30.0	-3.4	不合格
35.0	40.0	41.8	2.8	30.5	35.0	-4.5	不合格
40.0	60.0	61.8	2.8	37.0	40.0	-3.0	不合格
50.0	100.0	101.8	2.8	47.4	65.0	-17.6	不合格
60.0	150.0	151.8	2.8	57.9	75.0	-17.1	不合格
70.0	210.0	211.8	2.8	68.4	95.0	-26.6	不合格
80.0	280.0	281.8	2.8	78.8	110.0	-31.2	不合格

2 多车道匝道视距评价与优化模型

2.1 多车道匝道视距评价与优化模型基本理论模型的流程图见图4。

总结上文中视距计算值可得出结论:右侧大车对小车的视线遮挡是造成车辆在超车过程中的停车视距显著降低的主要原因。本研究将建立多车道匝道视距评价与优化模型,对影响平面线形

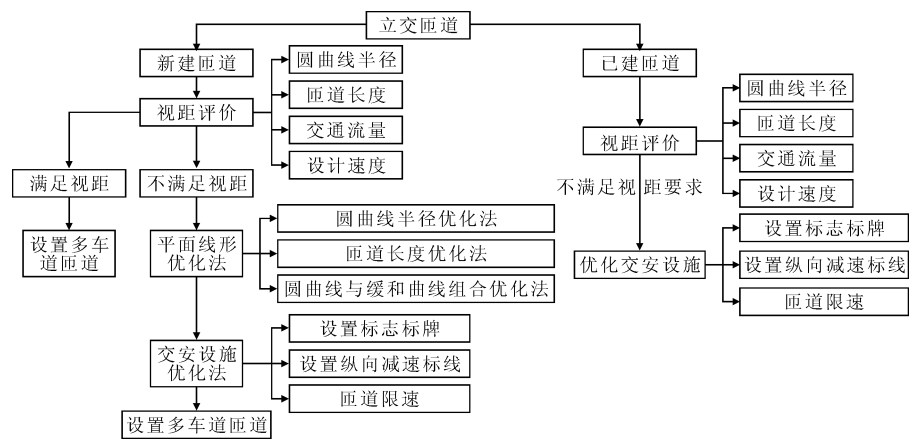


图 4 视距评价模型的流程图
Fig. 4 Flow chart of sight distance evaluation model

视距的:圆曲线半径、圆曲线长度、圆曲线与缓和曲线组合 3 个关键要素进行深入分析,得出满足设置多车道的匝道平面线形指标。最后综合匝道交通流量、超车需求 2 个指标,给出新建多车道匝道的设置条件;结合交安设施给出已建匝道安全优化方法。

2.2 平面线形优化法

2.2.1 圆曲线半径优化法

从视距计算已知,规范中的圆曲线半径一般值不能使得小车在匝道上超越大车时拥有安全的停车视距,若要选择多车道作为匝道横断面形式,并且保证足够的视距值,需要将匝道的圆曲线半径从 R 增加到 R_2 。

利用已知的横净距值、规范要求的最小视距值,通过牛顿迭代法反算出满足小车超车视距要求的圆曲线半径计算值 R_2 ,见式(4)~(9)。

$$H = R_{\text{left}} \left[1 - \cos \left(\frac{28.65 S_1}{R_{\text{left}}} \right) \right] \quad (4)$$

$$R_{\text{left}} = f(H, S_1) \quad (5)$$

$$F(x) = f(H, S_1) - R_{\text{left}} \quad (6)$$

$$\begin{cases} y = F(x_0) + F'(x_0)(x - x_0) \\ y = F(x_1) + F'(x_1)(x - x_1) \\ \vdots \\ y = F(x_n) + F'(x_n)(x - x_n) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - \frac{F(x_0)}{F'(x_0)} \\ x_2 = x_1 - \frac{F(x_1)}{F'(x_1)} \\ \vdots \\ x_{n+1} = x_n - \frac{F(x_n)}{F'(x_n)} \end{cases} \quad (8)$$

$$R_2 = R_{\text{left}} - B \quad (9)$$

式中: R_2 为满足小车视距指标的匝道圆曲线半径;通过计算可得表 2。

表 2 多车道匝道满足视距要求的圆曲线半径表
Tab. 2 Radius of the radius of the curve in the multi-lane ramp meeting the line of sight requirements

$v/(km/h)$	H/m	S_1/m	R_{left}/m	R_2/m	$P/\%$
30.0	2.8	30.0	31.8	38.7	21.8
35.0	2.8	35.0	41.8	53.4	28.0
40.0	2.8	40.0	61.8	70.5	14.1
50.0	2.8	65.0	101.8	189.7	86.4
60.0	2.8	75.0	151.8	253.3	66.9
70.0	2.8	95.0	211.8	407.7	92.5
80.0	2.8	110.0	281.8	547.3	94.3

注: P 代表匝道半径增大的百分比

计算结果表明,“圆曲线半径改善法”对改善小车在超车过程中的视距问题有着积极的作用,通过增大圆曲线半径,在任意设计速度条件下小车存在的视距问题均能够得到解决。从表 2 中也可以看出:当匝道的设计速度越大,圆曲线半径规范值需要增加的量也越大,在低于 40 km/h 时,圆曲线半径平均需要增大 21.27%,而在高于 40 km/h 时,圆曲线半径平均需要增大 85.01%。由此可得出结论:此优化方法在设计速度较低的普通型立交适用条件更好,在速度较高的枢纽型立交,此方法存在着一定的缺陷。由于半径增大较多,导致占地过度增加,在一些特殊地区,由于地形的限制无法将圆曲线半径扩大至满足视距要求的圆曲线半径值,甚至会导致优化方案无法实施。

2.2.2 圆曲线长度优化法

“圆曲线长度改善法”从降低圆曲线长度的角度解决多车道匝道的视距不足问题。相比于圆曲线,缓和曲线的曲率不断在变化,其视线条件优于圆曲线。“圆曲线长度改善法”在不增大圆曲线半

径的情况下,通过缩小圆曲线的长度,降低小车驾驶员在圆曲线上的行驶时间,将驾驶员视线尽快过渡到缓和曲线上,从而改善多车道匝道上的视距问题。

建立平面直角坐标系,见图5。

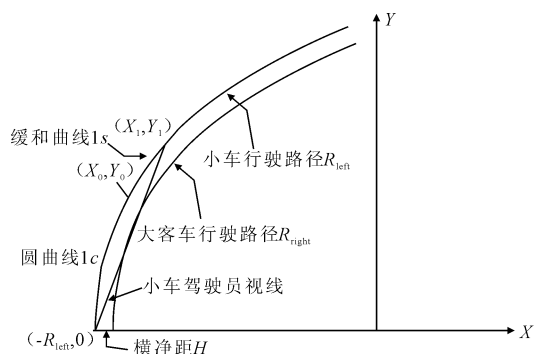


图5 视距计算示意图

Fig. 5 Diagram of sight distance calculation

内侧大车的行驶轨迹为

$$X^2 + Y^2 = R_{\text{right}}^2 \quad x \in (-R_{\text{right}}, -X_0 + H) \quad (10)$$

外侧车道的小车的行驶轨迹为

$$X^2 + Y^2 = R_{\text{left}}^2 \quad x \in (-R_{\text{left}}, X_0) \quad (11)$$

$$L_{s \min} = \min(L_{3s}, L) \quad (12)$$

$$\begin{cases} X(x) = X_0 + \int_{X_0+H}^x \cos[\theta(x)] dx = \\ X_0 + \int_{X_0+H}^x \cos\left[\theta_0 + \int_{X_0+H}^x k(\tau) d\tau\right] dx \\ Y(x) = Y_0 + \int_{X_0+H}^x \sin[\theta(x)] dx = \\ Y_0 + \int_{X_0+H}^x \sin\left[\theta_0 + \int_{X_0+H}^x k(\tau) d\tau\right] dx \end{cases} \quad (13)$$

式(10)为小车超车过程中的圆曲线段,式(11)~(13)为小车超车过程中的缓和曲线段; (X_0, Y_0) 为缓和曲线段起点,在缓和曲线段 θ_0 为路线起点处角度; $\theta(x)$ 为某点处的角度; $k(x)$ 为由曲率图给出的某点处曲率,为分段线性函数在点 $(-R_{\text{left}}, 0)$ 处小车驾驶员视点,驾驶员视线为

$$y = k(x + R_{\text{left}}) \quad x \in (-R_{\text{left}}, \infty) \quad (14)$$

由于小客车视线与内侧大车的行驶轨迹相切,即

$$x^2 + [k(x + R_{\text{left}})]^2 = R_{\text{right}}^2 \quad (15)$$

将直线方程与缓和曲线方程联立,用图解法解出视线与缓和曲线交点 (X_1, Y_1) ,并求出缓和曲线起点 (X_0, Y_0) 至 (X_1, Y_1) 的缓和曲线长度 L_s ,加上圆曲线段长度

$$L_c = 2R_{\text{left}} \arcsin\left(\frac{\sqrt{(X_0 - R_{\text{left}})^2 + (Y_0)^2}}{2R_{\text{left}}}\right) \quad (16)$$

可得小车实际视距值

$$S_2 = L_s + L_c \quad (17)$$

《规范》中匝道的平面线形单元长度不宜低于车辆的3s行程^[10],所以各设计速度下的圆曲线长度最小值 $L_{c \min}$ 应取3s行程长度;而对于缓和曲线,曲线的长度与视距过渡速度呈反比,故缓和曲线的长度应取最小值。

$$A^2 = L_{s \min} \times R_{\text{left}} \quad (18)$$

L_{3s} 为缓和曲线上的3s行程长度, L 为规范要求的最小缓和曲线长度,根据

$$L_{s \min} = \min(L_{3s}, L) \quad (19)$$

确定缓和曲线最小长度后,缓和曲线参数 A 值根据式(18)~式(20)求得,最终取值见表3。

$$A^2 = L_{s \min} \times R_{\text{left}} \quad (20)$$

表3 平面曲线单元取值表

Tab. 3 Value table of plane curve element

$v/(\text{km/h})$	R_1/m	R_{left}/m	$L_{c \min}/\text{m}$	$L_{s \min}/\text{m}$	A/m
30.0	30.0	31.8	25.0	25.0	27.4
35.0	40.0	41.8	30.0	30.0	34.6
40.0	60.0	61.8	34.0	35.0	45.8
50.0	100.0	101.8	42.0	42.0	64.8
60.0	150.0	151.8	50.0	50.0	86.6
70.0	210.0	211.8	59.0	59.0	111.3
80.0	280.0	281.8	67.0	67.0	137.0

将取值带入式(10)~(17)计算,可得在最小圆曲线长度下小车超车过程中的实际视距值,见表4。

表4 视距评价表

Tab. 4 Evaluation table of sight distance

$v/(\text{km/h})$	H/m	S_2/m	S/m	$\Delta S/\text{m}$	视距评价结果
30.0	2.8	27.0	30.0	-3.0	不合格
35.0	2.8	30.8	35.0	-4.2	不合格
40.0	2.8	37.3	40.0	-2.7	不合格
50.0	2.8	47.7	65.0	-17.3	不合格
60.0	2.8	58.1	75.0	-16.9	不合格
70.0	2.8	68.5	95.0	-26.5	不合格
80.0	2.8	79.0	110.0	-31.0	不合格

计算结果表明:“圆曲线长度改善法”在不增加圆曲线半径的情况下,仅缩小圆曲线的长度并不能使得小车在超车过程中停车视距得到满足。其原因在于:为了保证车辆在各个曲线单元上的拥有3s行程,提供视距过渡的缓和曲线段只占整个视距曲线的很小的一部分,这一部分长度并不能让小车的视距得到有效的过渡,并达到规范要求的最小视距值。

2.2.3 圆曲线缓和曲线组合优化法

综合上述 2 种方法的优点,提出“圆曲线缓和曲线组合改善法”。该方法圆曲线长度取“3s 行程长度”,缓和曲线长度取规范值与“3s 行程长度”的最小值;再此基础上计算出满足视距要求的 R_4 。该状态下的圆曲线长度、圆曲线半径以及缓和曲线长度是满足视距条件下的最优平面线形组合。

以设计速度 30 km/h 的匝道为例,首先根据公式 $R_3 = (R_1 + R_2)/2$ 计算出 R_3 ,再根据式(4)~(13)计算出在 R_3 条件下,小客车的视距值 S_3 。利用点 $(R_1, S_1), (R_2, S_2), (R_3, S_3)$ 与式(21)~(23)计算拉格朗日插值多项式(24)。最后根据插值多项式求出满足规范停车视距取值 S 状态下的圆曲线半径 R_4 。

$$l_1 = \frac{(R - R_2)(R - R_3)}{(R_1 - R_2)(R_1 - R_3)} \quad (21)$$

$$l_2 = \frac{(R - R_3)(R - R_1)}{(R_2 - R_1)(R_2 - R_3)} \quad (22)$$

$$l_3 = \frac{(R - R_1)(R - R_2)}{(R_3 - R_1)(R_3 - R_2)} \quad (23)$$

$$L(R) = f(R_1)l_1(R) + f(R_2)l_2(R) + f(R_3)l_3(R) \quad (24)$$

其他不同设计速度的匝道同理求出 R_4 ,最后可得表 5。

表 5 圆曲线缓和曲线组合优化法匝道曲线要素取值表
Tab.5 Value table of ramp curve elements in the combined improvement method of circular curve transition curve

$v/(\text{km/h})$	$L_s/\text{min}/\text{m}$	A/m	$L_c/\text{min}/\text{m}$	R_4/m	$P/\%$	$P_1/\%$
30.0	25.0	27.4	25.0	37.5	18.1	3.0
35.0	30.0	34.6	30.0	52.0	24.6	2.7
40.0	35.0	45.8	34.0	69.5	12.6	1.4
50.0	42.0	64.8	42.0	180.0	76.9	5.1
60.0	50.0	86.6	50.0	245.0	61.5	3.3
70.0	59.0	111.3	59.0	385.0	81.8	5.6
80.0	67.0	137.0	67.0	525.0	86.3	4.1

注: P_1 -匝道半径 R_4 相比于 R_2 减小的百分比。

计算结果表明,“圆曲线缓和曲线组合优化法”能够解决小车超车过程中存在视距不足的问题,且此优化方法,在一定程度上改进了“圆曲线半径优化法”中存在的圆曲线半径过大的问题,特别是设计速度低于 40 km/h 的多车道匝道,平面线形优化法已经能够较好的解决普通型立交中,多车道匝道视距不足的问题。但在大于 40 km/h 的枢纽型立交匝道中,相比于“圆曲线半径优化法”的 R_2, R_4 半径平均减少了 4.5%,匝道半径过大问题改善仍然不够明显,需要搭配交通安全设施综合解决。

2.3 交通工程措施优化法

由于匝道平面线形优化法对枢纽型立交中高于 40 km/h 的多车道匝道视距优化效果不够理想,需要综合交通工程措施进行二次优化。

2.3.1 限速

利用插值法,将表 5 中设计速度大于 35 km/h 的 R_4 进行细化,得到表 6。

计算结果表明,采用限速优化方案,能够解决多车道匝道视距不足的问题。当匝道的设计速度为 50 km/h 应限速至 40 km/h;设计速度为 60 km/h 应限速至 45 km/h;设计速度为 70 km/h 应限速至 55 km/h;设计速度为 80 km/h 应限速至 60 km/h。当设计速度与限速差值呈正相关,为了避免速差过大,所以在设计速度为 50 km/h 与 60 km/h 的多车道匝道采用限速的优化方案较为合理。

表 6 圆曲线缓和曲线组合优化法匝道曲线要素细化取值表
Tab.6 Refine value table of ramp curve elements in the combined improvement method of circular curve transition curve

$v/(\text{km/h})$	$L_s/\text{min}/\text{m}$	A/m	$L_c/\text{min}/\text{m}$	R_4/m	R_1/m
40.0	35.0	45.8	34.0	69.5	60.0
45.0	38.5	55.3	38.0	124.8	80.0
50.0	42.0	64.8	42.0	180.0	100.0
55.0	46.0	75.7	46.0	212.5	125.0
60.0	50.0	86.6	50.0	245.0	150.0
65.0	54.5	99.0	54.5	315.0	180.0
70.0	59.0	111.3	59.0	385.0	210.0
75.0	63.0	124.1	63.0	455.0	245.0
80.0	67.0	137.0	67.0	525.0	280.0

2.3.2 设置纵向减速标线

根据《规范》^[10],在一般地区路面摩擦系数为 0.29~0.44。若匝道路面设置纵向减速标线则可以增加路面的摩阻力,从而降低车辆的制动距离与停车视距 S 。拥有减速标线的匝道,路面摩阻力系数取值为 0.44,利用式(25),计算出不同设计速度下停车视距 S_r 。再结合表 5 的计算方法,计算出多车道匝道在设置了减速标线的情况下,其平面线形要素的取值,见表 7。

$$S_r = \frac{v}{3.6}t + \frac{1}{2gf}(\frac{v}{3.6})^2 \quad (25)$$

计算结果表明:设置减速标线在设计速度大于 40 km/h 的匝道路段拥有更好的适用性。当匝道设计速度低于 40 km/h 时,减速标线不能通过减少车辆制动距离从而降低停车视距。其原因在于低速行驶的车辆受到的摩阻力较大,路面摩阻力系数已经接近 0.44。然而在高于 40 km/h 的匝道,减速标线能增加车辆与地面间的摩阻力,从

表7 纵向减速标线优化法匝道曲线要素取值表
Tab.7 Value table of ramp curve elements in the
Optimization method of longitudinal deceleration marking

$v/(km/h)$	S_r/m	$L_{s\ min}/m$	A/m	$L_{c\ min}/m$	R_5/m
30.0	30.0	25.0	27.4	25.0	37.5
35.0	35.0	30.0	34.6	30.0	52.0
40.0	40.0	35.0	45.8	34.0	69.5
50.0	55.0	42.0	64.8	42.0	145.0
60.0	70.0	50.0	86.6	50.0	192.5
70.0	90.0	59.0	111.3	59.0	346.0
80.0	100.0	67.0	137.0	67.0	473.0

注: R_5 —运用纵向减速标线后,满足视距要求的匝道圆曲线半径。

而降低了车辆所需的停车视距,拥有较好的适用性。尤其是在设计速度为 50 km/h 的匝道,减速标线的适用性最好,制动距离降低值最大,对视距优化效果最好。但是当匝道设计速度大于 50 km/h,减速标线的适用性会下降,其原因在于公式中的速度与视距呈二次正相关,摩阻系数与视距呈一次负相关,所以当速度过大时仅通过增加路面摩阻力不能有效地降低车辆制动距离。在此条件下,限速的交通工程措施更为有效。

3 实例分析

以四川省境内某4车道高速公路为例,选取

表9 匝道视距优化表
Tab.9 Optimization table of Ramp sight distance

$v/(km/h)$	$L_{s\ min}/m$	A/m	$L_{c\ min}/m$	R_5/m	限速优化	标线优化
50.0	35.0	45.8	34.0	69.5	限速 40 km/h	减速标线
60.0	38.5	55.3	38.0	124.8	限速 45 km/h	减速标线

4 结束语

1) 本文通过建立多车道匝道视距评价与优化模型,提取“圆曲线半径”“圆曲线长度”“圆曲线缓和曲线组合”3个关键要素,从视距指标切入,研究出一种针对多车道匝道设置与优化的方法。模型的输入端是将多车道匝道的平面线形指标、匝道设计速度及车流量3类参数进行筛选与优化,输出端是多车道匝道的平面线形指标优化值与交安设施建议值。通过视距计算,模型能够完全发现多车道匝道中存在视距不足的问题,使用模型中的“平面线形优化法”可以很好的解决多车道匝道视距不足的问题。在设计速度为 30~40 km/h 的匝道,匝道圆曲线半径平均增大了 21.7%;在设计速度 50~80 km/h 的匝道,匝道圆曲线半径平均增大了 79%。故在设计速度 50~80 km/h 的匝道还需要增加限速与布置纵向减速标线等交

整条高速中的 8 个互通立交进行分析,普通型立交设计速度均为 40 km/h,枢纽型立交设计速度为 50,60 km/h。根据互通立交的设计文件资料,统计出共有 8 条多车道匝道。根据文中的评价方法,对多车道匝道的视距问题进行评价,见表 8。

表8 视距评价表
Tab.8 Evaluation table of sight distance

$v/(km/h)$	R_{left}/m	S_1/m	S/m	$\Delta S/m$	视距评价结果
50.0	100.0	47.0	65.0	-18.0	不合格
60.0	200.0	65.8	75.0	-9.2	不合格

所分析的 8 个互通立交中,共有枢纽型立交 1 座,普通型喇叭立交 6 座,双半 T 形立交 1 座。所有立交的 18 条多车道匝道中,共有 2 条匝道的视距指标不满足规范要求,不满足率为 11.1%,其视距不满足率分别为 58%与 21.8%。所有不满足视距的匝道均在枢纽型立交中,且设计速度大于 40 km/h。由此可得视距问题在速度较高的枢纽型互通的多车道匝道较为明显,在普通型立交中,视距问题并不明显。

根据分析出的问题,运用平面线形优化法、交安设施优化法,将立交中不满足视距的多车道匝道进行优化,优化后的平面线形指标见表 9。

安设施,以便满足视距要求。可以认为模型能够比较好的解决车道数分析选择问题。

2) 利用多车道匝道分析模型,对四川某高速公路中 8 个互通立交进行了检验,发现立交的 18 条多车道匝道中,共有 2 条匝道的视距指标不满足规范要求,不满足率为 11.1%,其视距不满足率为 58%与 21.8%。所有不满足视距的匝道均在枢纽型立交中,且设计速度大于 40 km/h。由此可得视距问题在速度较高的枢纽型互通的多车道匝道较为明显,在普通型立交中,视距问题并不明显。

3) 未来可研究在保证视距满足条件下,如何进一步的减小占地面积的匝道指标优化方法。可以综合纵断面指标、横断面指标,以及驾驶员的驾驶行为特征进行深入分析,建立综合度更高的多车道匝道分析模型。

参考文献

References

- [1] 李新伟. 高速公路事故预测模型及应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
LI Xinwei. Research on expressway accident prediction model and application [D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese)
- [2] LECLERCQ L. Capacity drops at merges analytical expressions for multilane freeways[J]. Transportation Research Record, 2016(62):171-181.
- [3] ANNE T. Types and characteristics of ramp-related motor vehicle crashes on urban interstate roadways in Northern Virginia [J]. Journal of Safety Research, 2003,48(1):18-22.
- [4] 交通部工程管理局. 日本高速公路设计要领[M]. 西安: 陕西旅游出版社, 2001.
Engineering Management Department of Ministry of Transport. Japanese highway design essentials [M]. Xi'an: Shannxi Tourism Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 刘子剑. 匝道车道数多因素选择方法的研究[J]. 公路, 2012(5):1-6.
LIU Zijian. Study on multi factor selection method of ramp lane number [J]. Highway, 2012(5):1-6. (in Chinese)
- [6] 张复明. 高速公路互通式立交匝道横断面宽度研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
ZHANG Fuming. Study on the cross section width of expressway interchange ramp[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [7] 张铁英. 基于运行安全与效率保障的互通式立交匝道横断面布置及形优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
ZHANG Tieying. Research on cross section layout and shape optimization of interchange ramp based on operation safety and efficiency assurance [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [8] 高健强. 客货分离高速公路互通式立交小客车专用匝道几何设计指标研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
GAO Jianqiang. Study on geometric design index of ramp for passenger and freight separation expressway interchange bus[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [9] 梁中岚. 高速公路互通式立交安全性评价方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
LIANG Zhonglan. Study on safety evaluation method of expressway interchange [D]. Guangzhou: South China University of technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国交通部. 公路立体交叉设计细则: JTG/TD21—2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
Ministry of Transport, people's Republic of China. Detailed rules for design of highway interchange: JTG/TD21—2014[S]. Beijing: People's Communications Press, 2014. (in Chinese)
- [11] EASA S M, HASSAN Y. Development of transitioned vertical curve II sight distance[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2000,34(7):565-584.
- [12] LOVELL D J. Automated calculation of sight distance from horizontal geometry[J]. Journal of Transportation Engineering, 1999,125(4):297-304.
- [13] LOVELL D J, JONG J C, CHANG P C. Improvement to sight distance algorithm[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001,127(4):283-288.
- [14] 彭余华, 杨少伟, 石飞荣. 道路横净距计算的新方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003(6):33-35.
PENG Yuhua, YANG Shaowei, SHI Feirong. A new method for calculating the transverse clear distance of roads[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2003(6):33-35. (in Chinese)
- [15] 赵永平, 杨少伟, 赵一飞. 具有中央分隔带公路弯道外侧超车车道的视距[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004(5):31-34.
ZHAO Yongping, YANG Shaowei, ZHAO Yifei. Sight distance of overtaking lane outside the curve of highway with median[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004(5):31-34. (in Chinese)
- [16] AMIRIDIS K, PSARIANOS B, STAMATIADIS N. Generic methodology for 3-D available sight distance calculation[C]. International Conference on Transportation and Development, Houston: American Society of Civil Engineers, 2016.
- [17] 廖军洪, 邵春福, 邬洪波. 公路三维动态视距计算方法及评价技术[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013,43(3):640-645.
LIAO Junhong, SHAO Chunfu, WU Hongbo. Calculation method and evaluation technology of 3D dynamic sight distance of highway[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2013,43(3):640-645. (in Chinese)

(下转第 78 页)

