

# 基于合流视距的公路主线入口路段竖曲线最小半径研究

李洋,赵业梅,陈天幸

(湖北省交通规划设计院股份有限公司,湖北 武汉 430051)

**摘要:**针对目前关于入口路段主线竖曲线半径研究较少的现状,且在研究过程中不注重区分入、出口路段之间差别的问题,该文首先明确合流视距是入口路段主线竖曲线半径的主要影响因素,以合流视距为控制条件对入口路段的竖曲线半径展开研究。通过分析入口路段主线车辆的交通行为特征,结合驾驶员心、生理特点建立主线入口路段安全合流视距计算模型。视距模型中考虑了反应距离、车辆换道距离、减速距离3项指标,并以变道和减速行驶二者中的较小值作为控制依据计算满足减速需要的合流视距推荐值。分别考虑主线凸形竖曲线和凹形竖曲线两种不同的情况,分析凸形竖曲线变坡点顶部,以及凹形竖曲线夜间车前灯射距及主线上方跨线构造物对驾驶员视线的遮挡。根据立面几何关系分别建立满足合流视距的主线入口路段凸形、凹形竖曲线半径计算模型。将合流视距推荐值代入竖曲线半径计算模型中,得到满足合流视距的主线入口路段凸形、凹形竖曲线最小半径推荐值。结果表明:入口路段的要求低于出口路段,通过识别视距计算得到的竖曲线半径推荐值低于现行规范值。

**关键词:**道路工程;高速公路;入口路段;竖曲线半径;合流视距

**中图分类号:**U412.33

**文献标志码:**A

## 0 引言

中国经济建设持续快速发展,高速公路建设作为经济发展的基础也在不断加快。随着高速公路与汽车行业的发展,越来越多的学者开始对道路行驶安全进行更加深入的研究。高速公路主线出入口作为上、下行高速公路的主要路段,是路网中连接各条高速公路与地方道路及进出服务区停车区等沿线设施的重要组成部分。随着高速公路里程规模不断扩大,路网密集程度逐步增加,其出入口附近的安全问题也逐渐凸显出来。相关研究表明<sup>[1-4]</sup>,出入口是高速公路上交通事故与拥堵现象频发的地带,出入口路段的主线平纵线形指标对出入口处的交通安全及通行能力极为重要。通常情况下,高速公路入口一般出现在互通式立交、服务区、停车区、观景台、公共汽车停靠站、主线相互分岔与合流及收费广场等处,互通立交入口则是高速公路上最常见和最典型的出入口类型。同理可对入口路段的交通安全问题进行

分析,入口路段成为交通事故另一多发地的主要原因有:①合流车辆从加速车道换道并入主线后,与直行车辆之间会形成较大速差;②由于直行车辆驾驶员在高速行驶时对主线入口位置识别不清,未能及时发现即将驶入的车辆,直到接近合流鼻端,若此时车辆急剧减速,便容易与合流车辆相互碰撞;③若在逼近合流鼻端时车辆骤然变道,可能会与左后方来不及作出反应的内侧车道车辆之间存在追尾或挤撞的风险。综上,公路主线出入口路段的安全问题不容忽视,且影响入口路段安全水平最重要的方面是入口路段的线形指标。因此,亟需解决非平直线路段主线出入口因合流视距不足导致的交通事故问题。

近年来,关于主线入口路段平面线形指标的相关规定和研究较少,且通常默认入口位于互通式立交范围内,均与出口路段一同进行研究,单独针对入口的研究较少<sup>[5-6]</sup>。如美国AASHTO出版的《公路与城市道路几何设计》<sup>[7]</sup>(即《A policy on geometric design of highways and streets》,以下简称“绿皮书”)提

收稿日期:2021-09-11

基金项目:中交科基金资助项目(编号:[2018]05号)

作者简介:李洋,女,大学本科,高级工程师.E-mail:38601510@qq.com

出,立交范围内主线的道路线形指标宜比基本路段的标准高一些,以便抵消因护栏、桥墩或缘石等设施对视线的干扰,但并未给出具体参考值;澳大利亚《互通式立交设计指导》<sup>[8]</sup>提出,立交范围内主线的圆曲线长度不可短于 500 m,且理想的取值范围为 900~1 500 m。此外,主线线形应避免采用小半径 S 形曲线,或在反向曲线间设置短直线;杜尔特在《联邦德国道路设计》<sup>[9]</sup>中认为在立交范围内应具有易识别性、明显性、明确性。从视线角度出发,应避免主线入口设于右偏曲线上,将立交出入口设置于凹形竖曲线处可保证其有明显性;日本相关研究<sup>[10-11]</sup>提出,曲线路段检验视距时需要考虑道路横净距,且竖曲线路段设计参数主要影响因素也是视距;《高速公路设计要领》<sup>[11]</sup>中规定了合流端应保证的通视区域,但没有对该取值如何确定进行详细论述。当互通立交范围内设置平面交叉时,同样需要保证交叉区域的通视范围,需要考虑视距来计算判断距离。并提出出口匝道能看清连接交叉部分的匝道比临时停车线还远 5 m 的通视区。国外对相关方面研究普遍较少,加拿大 Ahammed 等<sup>[12]</sup>通过调查 23 处立交合流区的交通流特征数据,分析得出分流区附近的道路线形对合流时的车辆速度存在较大影响;Lederer<sup>[13]</sup>调查了 26 处立交合流区的车辆运行特性,采集了车辆速度、加速度及运转特征,按车型分析了车辆运行速度,认为影响车辆加速度和运行功率的主要因素是入口处坡度。

目前中国对关于主线出入口路段的平、纵面指标的理论研究较少。《公路路线设计规范》(JTGB20—2017)(简称《路线规范》)<sup>[14]</sup>采用的互通范围内主线技术指标主要借鉴日本规范中的规定值,给出了立交范围内主线平纵指标的选取范围,供设计人员参考,但并未对取值依据进行解释,因此在实际工程中的安全性还有待进一步验证。另外,该参考取值也不区分出口和入口。此外,中国学者的相关研究多集中于以力学手段及从停车视距(或几倍停车视距)角度对主线的出入口路段线形指标进行研究,但事实上主线入口路段所需的竖曲线半径与停车视距之间并不具有必然的联系;有些对视距曲线的理解或应用有误,将视距当作直线进行模型的建立和求解,造成最后得到的结果不可靠;有些只是根据规范从安全性角度对已建成立交的主线几何技术指标

进行验证,还有一些是提出当主要技术指标不足时可采取的安全保障措施<sup>[15-17]</sup>。

综上,中国学者的相关研究更侧重于出口或分流路段,而重点涉及入口路段的研究却十分有限。且无论是对于主线入口路段线形影响因素的分析,还是在关键参数的选取方面以及计算模型构造的具体过程方面,都存在一定的局限性。造成设计人员在选取设计指标时具有较大的盲目性。并不能完全满足主线入口路段上车辆行驶的安全性及流畅性,难以指导实际工程设计。因此,应对公路主线入口路段的竖曲线半径等几何线形设计指标进行进一步深入研究,得出与工程相关的结论,使设计人员在设计过程中有章可循。本文的主要研究内容包括公路主线入口路段合流视距研究和主线入口路段的竖曲线半径研究两方面。

## 1 公路主线入口路段合流视距研究

在高速公路合流区,匝道上行驶的驾驶员在汇入主线车道前,需要观察左后方主线车辆情况,寻找插入间隙进行变道操作。同时主线最外侧车道上行驶的驾驶员在观察到前方入口后会提高警惕,判断前方是否有汇入车辆影响自身行驶,从而选择合适的操作方式进行避让。因此,合流区主线与匝道均需要保证足够的安全通视长度<sup>[18]</sup>。《路线规范》对于合流区主线与匝道之间的通视三角形有相应的长度规定,如图 1 所示。

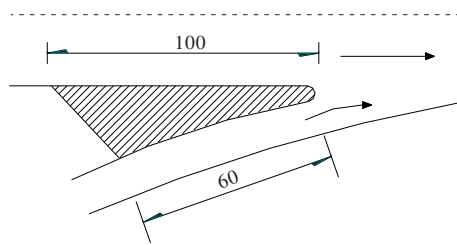


图 1 合流通视三角区的路线规定形式(单位:m)

《路线规范》中未提出合流视距与道路设计速度之间的关系,并且按图 1 中的规定,当主线设计速度为 120 km/h 时,100 m 的视距大约能满足 3 s 的车辆行程。当主线外侧车道上的驾驶人发现汇入车辆后,做出相应的操作措施之前首先需要 2.5 s 反应时间,而此时车辆已经行驶至鼻端附近,存在紧急制动和强行变道的安全隐患。此外,《路线规范》中有关

合流视距设置位置的描述也较为模糊,未指出合流终点是合流鼻端还是合流点。因此本节在分析合流区事故特征和驾驶行为的基础上,对不同设计速度下的合流视距进行研究。

### 1.1 合流过程交通行为特点

主线最外侧车道的安全视距与入口匝道的安全视距构成的视距三角形被称作合流区的通视三角区。匝道与主线的入口路段有别于一般的平面交叉,车辆无法停车等待让行,即将发生冲突时只能采取变道或减速措施进行避让,因此合流区必须具备充足的视距使主线和匝道车辆能够互相观察。并采取相应的驾驶操作。这个过程要求驾驶人能够从容地进行,若视距不足,驾驶人在临近冲突点

时才发现相邻路段车辆,会造成驾驶员过度紧张,极易引起过激操作,如紧急制动或紧急变道,这将影响附近其他车辆,增加事故发生概率。综上,从合流安全角度考虑,在设计时应保证合流点驾驶人具有足够的视野,从而具备充足的反应时间来应对不同事件。

入口路段的合流视距与出口识别视距不同。考虑主线与匝道的安全合流视距具体分析如图2所示。主线最外侧车辆自O点开始发现位于D点的匝道车辆之后,经过反应时间 $t_1$ 到达A点,记为反应距离 $l_1$ 。同时,经驾驶员对前方入口情况的观察与判断,一些驾驶员选择向内侧变道,而另一些驾驶员选择保持车道进行减速行驶。

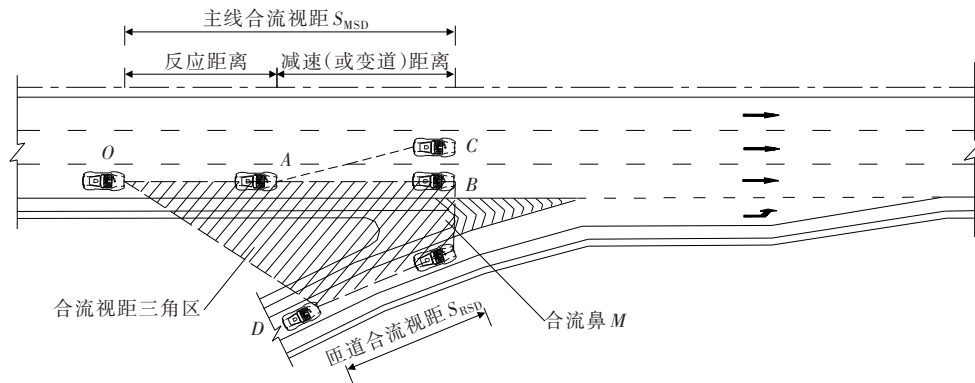


图2 合流视距过程分析

情况① 若驾驶员对当前车道的行驶状态不满意,会选择从A点开始向左侧变换车道,到C点完成整个换道过程,记为换道距离 $l_2$ 。

情况② 若驾驶员对当前车道的行驶状态较为满意,或者左侧车道没有可插入空隙而无法向左换道,则会保持在最外侧车道行驶并采取减速措施。从A点开始采取制动措施,到达B点时速度降至匝道设计速度,记为减速距离 $l_3$ 。

分析上述情况,可选择满足①、②任意一种情况下对应的车辆行驶距离,与反应距离相加后,作为入口路段主线合流视距 $S_{MSD}$ 。但从保证合流区安全的角度看,换道操作需要目标车道有可插入间隙,所以不一定能实现,并且由于等待可插入间隙,变道所需距离相比减速操作更长,则 $l_2 \neq l_3$ 。而减速则相对容易实现,且是最低的安全要求,只要保证了减速所需要的距离,就能避免在合流鼻端前外侧车道上的车辆与匝道上汇入的车辆发生碰撞。相关研究也表明:在合流鼻断面之后30 m内匝道车辆强行并入主

线的比例达14.04%<sup>[19]</sup>,降低主线最外侧车道上车辆的行驶速度可有效降低碰撞事故的风险。因此,合流视距最小值为反应距离与减速距离之和,采用式(1)计算:

$$S_{MSD} = l_1 + l_3 \quad (1)$$

式中: $S_{MSD}$ 为合流视距(m); $l_1$ 为反应距离(m); $l_3$ 为减速距离(m)。

### 1.2 合流端主线安全视距计算模型

#### 1.2.1 反应距离

根据上述对合流过程交通行为特点的分析,驾驶员对前方入口的反应与判断过程中,车辆的行驶距离采用式(2)计算:

$$l_1 = \frac{vt_1}{3.6} \quad (2)$$

式中: $v$ 为主线设计速度(km/h); $t_1$ 为行驶时间(s),根据相关研究反应时间取2.6 s,决策时间可取0.6 s<sup>[20]</sup>,总反应时间取3.2 s。

由此计算得到的反应距离见表1。

表 1 主线车辆所需的反应距离

速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	反应距离 $l_1$ / m	速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	反应距离 $l_1$ / m
120	106.7	80	71.1
100	88.9	60	53.3

### 1.2.2 主线车辆减速距离

研究表明:在合流鼻断面之后 30 m 内匝道车辆强行并入主线的比例达 14.04%<sup>[19]</sup>,降低主线最外侧车道上车辆的行驶速度可有效降低碰撞事故的风险,且主线车辆需在到达合流鼻端之前将速度降至匝道设计速度。根据停车视距模型中的汽车制动过程<sup>[21]</sup>,减速距离  $l_3$  采用式(3)计算:

$$l_3 = \frac{vt_3}{7.2} + \frac{v_m^2 - v_r^2}{25.92a_{\max}} \quad (3)$$

式中: $v_m$ 为主线设计速度(km/h); $v_r$ 为匝道设计速度(km/h); $t_3$ 为制动力增加所需时间(s),取 0.5 s; $a_{\max}$ 为制动减速度(m/s<sup>2</sup>),美国有关研究表明,减速度通常为 3.4 m/s<sup>2</sup>或者更大<sup>[22]</sup>,本文取减速度为 3.4 m/s<sup>2</sup>,保证安全余量。

当主线最外侧车辆发现匝道车辆后,选用减速操作避免碰撞时,在合流鼻段减速至匝道速度所需的长度见表 2。

表 2 主线车辆减速距离

主线设计速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	不同匝道设计速度(km/h)时主线车辆 减速距离 $l_3$ /m					
	80	70	60	50	40	30
120	99	116	131	143	154	162
110	72	89	104	117	127	135
100	48	65	80	92	102	110
90	26	43	57	70	80	88
80	—	23	37	50	60	68
70	—	—	20	32	42	50
60	—	—	—	17	27	35

由表 2 可知:主线车辆减速距离同主线和匝道的的设计速度均有关,并会随着主线与匝道之间速度差的增大而显著增大。

### 1.2.3 主线安全合流视距建议值

从表 2 可知:匝道上车辆的行驶速度对主线合流视距有一定的影响,即使匝道设计速度较高,在合流鼻附近的车辆行驶速度也可能较低,因此,选择较低

的匝道合流速度,将更有利于安全,因此取匝道设计速度最低时对应的减速距离为主线车辆减速距离。计算主线入口路段合流视距值如表 3 所示。

表 3 主线合流视距  $S_{\text{MSD}}$ 

主线设计速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	反应距离 $l_1$ /m	减速距离 $l_3$ /m	合流视距/m	
			计算值	推荐值
120	106.7	162	268.7	270
100	88.9	110	198.9	200
80	71.1	68	139.1	140
60	53.3	35	88.3	90

## 2 入口段主线凸形竖曲线半径计算模型

### 2.1 凸形竖曲线最小半径应满足的要求

当主线入口范围内存在凸形竖曲线路段(图 3),若入口位于小半径凸形竖曲线变坡点之后,驾驶员不能及时注意到合流鼻端匝道上的车辆,存在与匝道汇入车辆发生碰撞事故的可能。

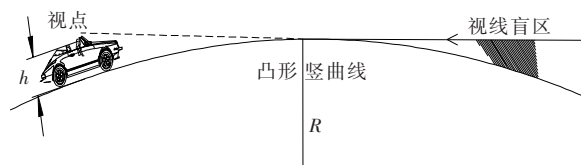


图 3 凸形竖曲线行车视距受限示意图

以驾驶员能看到主线入口合流鼻端为控制标准,按照竖曲线长度  $L$  和合流视距  $S_i$  之间的关系可分为“ $L < S_i$ ”和“ $L \geq S_i$ ”两种情况。为便于对这两种情况进行对比,将其绘于同一幅纵断面图中,见图 4。

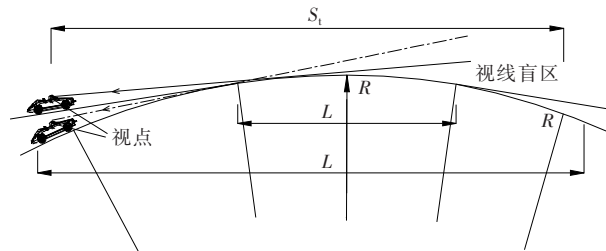


图 4 合流视距与凸形竖曲线长度关系

依据图 4 所示路线纵断面图中“竖曲线段”与相接“直坡段”的立面位置关系来比较“ $L < S_i$ ”和“ $L \geq S_i$ ”两种情况。后者在视点和注视点两端位置处,纵面线形向下的翘曲程度较前者更大,显然对驾驶员视线的影晌更为不利,因此第二种情况可作为有效控制的依据,即视距全长被包含在一个完整竖曲线长



度之内。同样,入口路段也以第二种情况作为控制依据。以1.2.4节所提出的合流视距为基础,建立主线入口路段凸形竖曲线计算模型。

2.2 凸形竖曲线半径计算模型

由于行车视距的界定是取路线的平面里程之差作为视距长,根据1.1节中对合流过程特点的分析可知,入口路段的合流视距仅涉及最外侧车道。图5反映的即为驾驶员视点高度( $h$ )刚好能沿切线看到合流鼻端时的临界情形。

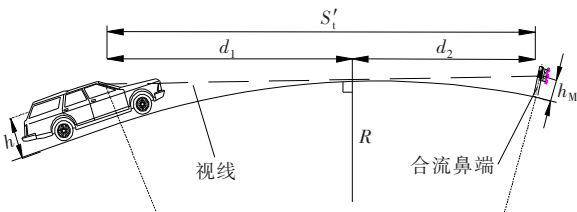


图5 入口凸形竖曲线最小半径计算图式

根据图5所示几何关系,可得:

$$d_1^2 = (R + h)^2 - R^2 \tag{4}$$

$$d_2^2 = (R + h_M)^2 - R^2 \tag{5}$$

则合流视距与凸形竖曲线半径的关系,如式(6)所示:

$$S'_i = \sqrt{(R + h)^2 - R^2} + \sqrt{(R + h_M)^2 - R^2} \tag{6}$$

化简得:

$$S'_i = \sqrt{h^2 + 2Rh} + \sqrt{h_M^2 + 2Rh_M} \tag{7}$$

或:

$$\cos\left(\frac{d_1}{R}\right) = \frac{R}{R + h}$$

$$\cos\left(\frac{d_2}{R}\right) = \frac{R}{R + h_M}$$

$$d_1 + d_2 = S'_i \tag{8}$$

式中: $R$ 为凸形竖曲线半径(m); $h$ 为目高,按小客车驾驶员视点高度,取 $h=1.2\text{ m}$ <sup>[23-24]</sup>;  $h_M$ 为目标物高度(m),为保证驾驶员辨清目标,取合流鼻底部高度,即0.1 m;  $d_1$ 为视点到曲线顶点的距离(m);  $d_2$ 为注视点到曲线顶点的距离(m);  $S'_i$ 为合流视距(m),其值参见表3的推荐值。其余字母和符号意义同前。

2.3 凸形竖曲线最小半径

由式(7)或式(8),结合合流视距,可计算出不同设计速度对应的主线入口路段凸形竖曲线半径(结果取为整100 m,见表4)。

从表4可看出,主线入口路段凸形竖曲线半径最小值具有如下特点:

表4 主线入口路段凸形竖曲线半径最小值

设计速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	合流视距 推荐值/m	竖曲线半径/m		《路线规范》值/m	
		计算值	推荐值	一般值	极限值
120	270	18 290.20	18 300	45 000	23 000
100	200	10 035.60	10 100	25 000	15 000
80	140	4 917.18	5 000	12 000	6 000
60	90	2 031.82	2 100	6 000	3 000

注:《路线规范》值为互通式立交范围内的凸形竖曲线半径最小值。

(1) 满足合流视距所需的主线入口路段凸形竖曲线最小半径(以下简称“推荐值”)与主线设计速度紧密相关,推荐值随着设计速度的增大而显著增大;当主线设计速度相同时,匝道设计速度越大,满足合流视距的竖曲线半径越小。

(2) 推荐值比《路线规范》中对互通范围内凸形竖曲线最小半径的规定值小很多。产生较大差异的原因为规范值采用1.25~2倍停车视距进行控制和计算,该视距值大于上文计算入口合流视距,且主要用于出口路段,因此《路线规范》中规定值不适宜应用于入口路段。

(3) 该计算过程均以小客车合流视距控制计算,原因是凸形竖曲线对视点高度较低的小客车更为不利。

3 入口段主线凹形竖曲线半径计算模型

3.1 凹形竖曲线最小半径应满足的要求

当主线入口处圆曲线半径平缓,且分流区范围内存在凹形竖曲线路段(图6)时,竖曲线长度和半径通常需要满足两种情况下的要求:凹形竖曲线上存在跨线桥时,不受跨线桥遮挡的视距应满足安全需要;夜间行车时,车辆前灯照射距离受凹形竖曲线的影响有所减少,车灯所能照射长度应满足安全行车的需要。

与上文计算凸形竖曲线半径时的控制标准一样,仍按照竖曲线长度 $L$ 与视距长 $S_i$ 之间的大小关系分“ $L < S_i$ ”和“ $L \geq S_i$ ”两种情况,如图7所示。

并结合前文2.1节对凸形竖曲线的相关分析经验来比较“ $L < S_i$ ”和“ $L \geq S_i$ ”两种情况,可得到与之相同的结论,“ $L \geq S_i$ ”为有效控制条件。因此凹形、凸形竖曲线所需的有效控制依据是一致的。

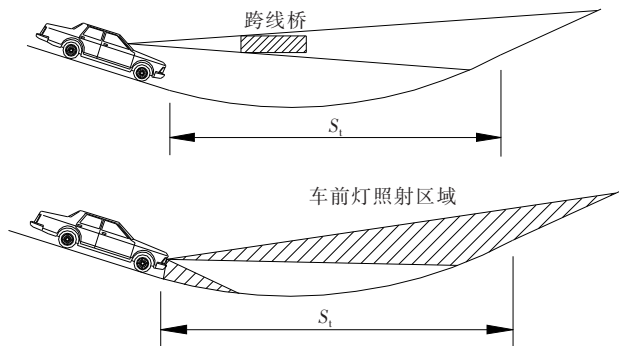


图 6 凹形竖曲线识别视距受限路段

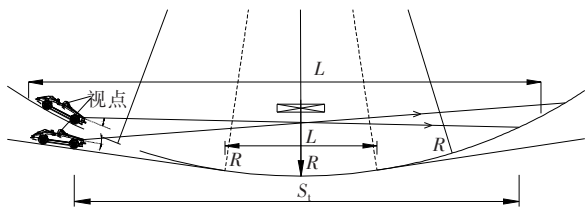


图 7 纵断面中凹形竖曲线长度与视距关系

### 3.2 夜间行车前灯照射距离要求

车辆在夜间行驶时,车前照灯( $h_D$ )以最大有效散射角所发出的一束光线恰好能照射到合流鼻端时的临界情况如图 8 所示。

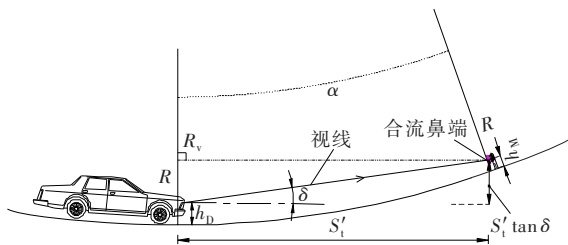


图 8 满足合流视距下的凹形竖曲线与车前灯照射距离关系计算图示

由于车前照灯水平散射角为 $8^\circ \sim 15^\circ$ <sup>[26]</sup>,经相关计算与论证,认为在一个合流视距长度范围内,足以保证最外侧车道的灯光照到合流鼻端位置。

根据图 8 所示几何关系,得:

$$\frac{R_v}{(R - h_M)} = \cos\left(\frac{S_i'}{R}\right) \quad (9)$$

$$h + S_i' \tan \delta + R_v = R$$

或:

$$R \cdot \alpha = S_i' \quad (10)$$

$$R_v = (R - h_M) \cdot \cos \alpha$$

$$R - R_v = h + (R - h_M) \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha$$

式中: $R$ 为凹形竖曲线半径(m); $h$ 为车前灯高度(m), $h=0.75 \text{ m}$ <sup>[25-26]</sup>;  $h_M$ 为目标物高度(m),为保证驾

驶员辨清目标,至少取合流鼻端护栏的半高位置,即 $0.6 \text{ m}$ ;  $\delta$ 为车前灯光束仰角( $^\circ$ ),考虑有效照度随扩散角的增大而急剧衰减,根据相关研究,取 $\delta=1.5^\circ$ <sup>[27-29]</sup>;  $S_i'$ 为合流视距长度(m),其值参见表 3 中推荐值;其余符号意义同前。

根据式(9)、(10),将合流视距推荐值等已知参数代入,可计算得到不同设计速度下满足夜间行车前灯照射距离要求的主线入口路段凹形竖曲线半径最小值(取为整 $100 \text{ m}$ ,见表 5)。

表 5 入口段凹形竖曲线最小半径(满足夜间行车安全)

设计速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	合流视距 推荐值/m	竖曲线半径/m	
		计算值	推荐值
120	270	5 043.88	5 100
100	200	3 709.08	3 800
80	140	2 565.55	2 600
60	90	1 613.81	1 700

### 3.3 跨线桥下入口合流视距要求

当驾驶员视点(高度 $h$ )恰好能紧贴桥底切线看到合流鼻端时的临界情形如图 9 所示。

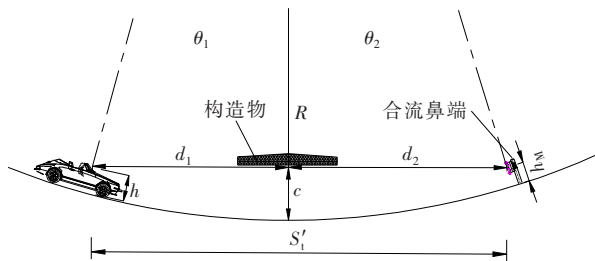


图 9 满足跨线桥下合流视距的凹形竖曲线计算图式

根据图 9 中几何关系可得到以下公式:

$$d_1^2 = (R - h)^2 - (R - c)^2$$

$$d_2^2 = (R - h_M)^2 - (R - c)^2$$

$$S_i' = d_1 + d_2 \quad (11)$$

或:

$$R \cdot \theta_1 = d_1$$

$$R \cdot \theta_2 = d_2$$

$$\cos \theta_1 = \frac{R - c}{R - h}$$

$$\cos \theta_2 = \frac{R - c}{R - h_M} \quad (12)$$

综合以上公式得到跨线桥下,合流视距与凹形竖曲线半径的关系式(13):

$$S'_i = \sqrt{(R_1 - h)^2 - (R_1 - c)^2} + \sqrt{(R_1 - h_M)^2 - (R_1 - c)^2} \tag{13}$$

式中: $h$ 为小客车驾驶员视点高度,依前所述,取1.2 m; $h_M$ 为物高(m),依前所述,取合流鼻端护栏半高位置,即0.6 m; $c$ 为构造物的桥下设计净空高度,高速、一级、二级公路的净空高度取值为5.0 m<sup>[30-31]</sup>;  $S'_i$ 为合流视距(m);其余符号意义同前。

根据式(12)、(13),结合合流视距值(表3),可以计算出不同设计速度满足跨线桥下视距的主线入口路段凹形竖曲线半径最小值(结果取为整100 m,见表6)。

表6 入口段凹形竖曲线最小半径(满足跨线桥下行车安全)

设计速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	合流视距 推荐值/m	竖曲线半径/m	
		计算值	推荐值
120	270	2 228.5	2 300
100	200	1 224.1	1 300
80	140	601.3	650
60	90	250.2	300

3.4 凹形竖曲线最小半径

为了同时满足车辆在凹形竖曲线上行驶时的夜间前车灯射距、桥下视距两种情况,应取上述两种情况下的较大值作为主线入口路段凹形竖曲线半径最小值的推荐值(表7)。

表7 主线入口路段凹形竖曲线半径最小值

设计速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	合流视距/ m	竖曲线半径 推荐值/m	《路线规范》值/m	
			一般值	极限值
120	270	5 100	16 000	12 000
100	200	3 800	12 000	8 000
80	140	2 600	8 000	4 000
60	90	1 700	4 000	2 000

由表7可知:

(1) 满足合流视距的主线入口路段凹形竖曲线半径最小值(以下简称“推荐值”)与主线设计速度紧密相关。随着设计速度增大,推荐值随之显著增大。且满足夜间车前照灯射距比满足跨线构造物下合流视距的要求更高。

(2) 对主线入口路段,在相同设计速度情况下,凹形竖曲线最小半径推荐值普遍比凸形竖曲线路段(表4)更低一些。且随着主线设计速度的降低,前者

的降低率与后者相比更为缓和。

(3) 入口路段竖曲线半径推荐值比相应的《路线规范》值低很多。据此结果,并充分考虑工程经济性,认为对入口和出口不加区分,而直接笼统地规定互通范围主线竖曲线半径的做法不尽合理,缺乏灵活性。

4 结论

为了降低主线出入口路段设计指标选取的盲目性、充分发挥处理工程问题的灵活性,本文以公路入口路段主线竖曲线最小半径为研究对象,在提出主线入口安全合流视距的基础上,通过建立基于合流视距的主线入口路段竖曲线半径几何计算模型,计算得出满足安全合流视距要求的主线入口路段竖曲线最小半径推荐值,并对其特点进行分析。论文创新点如下:

(1) 从保证合流车辆行车安全的角度出发,通过建立主线入口路段安全合流视距计算模型,提出了满足减速需求的合流视距推荐值,主线设计速度为120 km/h、100 km/h、80 km/h、60 km/h时,合流视距推荐值分别为270 m、200 m、140 m、90 m。可作为对现有规范值的补充和细化,同时为后续研究提供理论依据。

(2) 明确了入口路段主线竖曲线半径的主要影响因素是合流视距,分析了入口路段凸形竖曲线和凹形竖曲线半径应满足的要求。对于凸形竖曲线,应满足变坡点顶部不对驾驶员视线造成遮挡;对于凹形竖曲线,应满足夜间行车时车前灯照射距离及跨线桥下行车视距的共同要求。

(3) 在几何理论分析的基础上,建立了基于合流视距的主线入口路段凸形和凹形竖曲线最小半径几何计算模型,利用上述合流视距值,计算并提出了满足合流视距要求的主线入口路段竖曲线最小半径的推荐值,主线设计速度为120 km/h、100 km/h、80 km/h、60 km/h时,凹形竖曲线半径推荐值为5 100 m、3 800 m、2 600 m、1 700 m,凸形竖曲线推荐值为18 300 m、10 100 m、5 000 m、2 100 m。

(4) 根据本文的分析计算可知,对于公路主线入口路段来说,无论是凸形竖曲线最小半径还是凹形竖曲线最小半径,推荐值均比《路线规范》值小很多,

且入口路段的要求比出口路段更低。本文单独对高速公路入口路段的情况进行研究,旨在增强出入口路段线形指标选取的灵活性,尤其是对于分离式路基的公路。

(5) 本文计算模型的建立为工程设计人员在设计完成后利用图解法初步检验主线出合流路段的视距值是否满足要求提供了一种思路。

#### 参考文献:

- [1] 颌骥,何柏青.高速公路交通事故主要成因分析及解决方案研究[J].交通与运输(学术版),2013(2):144-146.
- [2] BAUER K M, HARWOOD D W. Statistical models of accidents on interchange ramps and speed-change lanes[Z]. 1998.
- [3] TORBIC D J, HARWOOD D W, GILMORE D K, et al. Safety analysis of interchanges[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2092(1): 39-47.
- [4] HE Y L, SUN X D, COAKLEY R C. Safety analysis of freeway interchanges[C]//Transportation and Development Innovative Best Practices 2008. Beijing, China. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2008.
- [5] 陈瑾.高速公路互通式立交出口和入口设置相关技术指标研究[D].西安:长安大学,2016.
- [6] 徐洋.互通式立交范围内主线主要技术指标研究[D].西安:长安大学,2014.
- [7] AASHTO. A Policy on geometric design of highways and streets[S]. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
- [8] FANNING R, VEITH G, WHITEHEAD M, et al. Guide to road design part 3: Geometric design[Z]. 2016.
- [9] (联邦德国)W. 杜尔特.联邦德国道路设计[M].景天然,译.北京:人民交通出版社,1987.
- [10] 日本道路协会.日本公路技术标准的解说与运用[M].王治中,译.北京:人民交通出版社,1980.
- [11] 日本道路公团.日本高速公路设计要领[M].西安:陕西省旅游出版社,1991.
- [12] AHAMMED M A, HASSAN Y, SAYED T A. Modeling driver behavior and safety on freeway merging areas[J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(9): 370-377.
- [13] LEDERER P R, COHN L F, GUENSLER R, et al. Effect of on-ramp geometric and operational factors on vehicle activity[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(1): 18-26.
- [14] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路路线设计规范:JTG B20—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [15] 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.
- [16] 田曦.高速公路互通式立交区视距分析及保障技术研究[D].西安:长安大学,2015.
- [17] 周海宇.山区高速公路小半径平曲线隧道交通安全保障技术研究[D].西安:长安大学,2018.
- [18] 裴玉龙,金英群,王宇.考虑主线车道数与匝道车速的快速路出入口最小间距计算方法[J].交通信息与安全,2019, 37(4): 59-66.
- [19] 袁中.高速公路合流区车辆运行模拟与评价研究[D].合肥:合肥工业大学,2004.
- [20] 张生瑞,邵春福,周伟.交通流理论与方法[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [21] 袁浩,史桂芳,黄晓明,等.停车视距制动模型[J].东南大学学报(自然科学版),2009,39(4): 859-862.
- [22] 赵永平,杨少伟,吴华金,等.山区高速公路螺旋展线隧道内平曲线最小半径[J].长安大学学报(自然科学版),2007, 27(6): 72-75.
- [23] 王维荣,张驰,杨少伟,等.匝道收费站平纵曲线技术指标探讨[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(3): 355-356.
- [24] 潘兵宏,韩雪艳,王云泽.中央分隔带凹形竖曲线防眩设施高度计算模型研究[J].中外公路,2016,36(6): 315-319.
- [25] 许金良.道路勘测设计[M].4版.北京:人民交通出版社,2016.
- [26] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值:GB 1589—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [27] 赵永平,杨少伟.保证夜间停车视距的公路平、竖曲线半径[J].交通标准化,2009,37(17): 56-59.
- [28] 潘兵宏.避险车道入口处竖曲线半径最小值研究[J].公路,2011,56(6): 35-38.
- [29] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.汽车及挂车外部照明和光信号装置的安装规定:GB 4785—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [30] 交通运输部公路局,中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路工程技术标准:JTG B01—2014[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.
- [31] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.