

基于多因素的公路弯道停车视距计算模型研究^{*}

张犇, 哈敏捷, 白琛琛

(汽车运输安全保障技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了厘清弯道路段相关线形参数对停车视距的影响, 在对弯道路段车辆行驶动力学分析的基础上, 建立以制动初速度、平曲线半径、弯道超高、弯道纵坡及道路附着系数为自变量的弯道路段车辆制动模型; 结合驾驶人和车辆的反应时间, 根据运动学原理, 构建弯道路段车辆安全停车视距修正模型, 通过数值分析, 提出弯道路段车辆停车视距计算方法, 并将弯道路段车辆停车视距计算结果与《公路路线设计规范》规定值进行对比。结果表明, 随着弯道纵坡坡度、超高的增大及弯道半径的减小, 停车视距逐渐增加; 模型计算值普遍大于规范规定值, 特别是在高车速时二者的差别较大。

关键词: 交通安全; 弯道路段; 停车视距; 制动模型; 数值分析

中图分类号: U491.21

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)01-0010-07

在道路交通突发情景中, 车辆驶入弯道时具有足够的停车视距才能保证遇到紧急情况时驾驶人有足够的反应时间来停车, 避免道路交通事故的发生。许多学者对弯道停车视距模型进行了研究。在平面视距方面, Wood J. S. 等根据 AASHTO 准则, 提出了一种计算最小水平视线偏移的方法, 指出驾驶人在接近水平曲线时停车视距不足的概率比在水平曲线内大得多, 设计时应使用超出曲线极限的水平视线偏移量, 为曲线附近的驾驶员提供额外的视距^[1-2]。在空间视距方面, 王佐等利用空间两点通视原理, 建立了空间视距计算和分析数学模型, 分析公路两侧附属设施对视距的影响^[3]; 王松等建立空间视距计算模型, 并通过数字仿真提出了视线棱体的概念^[4]; 郝会龙等通过航测影像对事故现场进行三维重建, 提出了一种空间视距计算方法, 通过判断视点引出射线是否与三维重建模型相交, 即视点与道路中心线上的点是否通视, 得到空间视距^[5]。上述计算模型都必须基于公路三维技术, 且更专注于视距计算过程和三维视距分析, 很少涉及视距模型本身的准确性和合理性。袁浩等针对模型本身的准确性、合理性提出了制动推导过程, 并研究了计算视距和现有视距的差值变化规律, 通过运动学原理对停车视距的制动模型进行了修正^[6]。在公路实际停车视距研究方面, 陈东升对比分析了中、美、法三国停车视距的规定, 指出了停车视距经典物理运动模

型、理论计算公式及相关参数选取方面的优缺点, 并进行了修正^[7]; 朱云升等在弯道路段停车视距模型分析的基础上, 研究了凝冰条件下安全行车控制车速, 得到了凝冰路面弯道停车视距的极限值^[8]; Sarhan M. 等对设有中央分隔带护栏的情况进行研究, 认为这类障碍物可能导致水平曲线上的可用视距显著减小, 尤其是距离障碍物最近的车道^[9]; 彭余华等认为护栏高度和横净距一定时, 可用视距取决于垂直线形的类型及重叠凸凹形竖曲线的曲率^[10]; Xia R. X. 等分析认为与直线制动相比, 曲线制动距离较长、稳定性较差, 并基于车辆动力学原理分析了曲线制动过程, 提出了曲线制动视距的一般值和极限值^[11]; 杨伟等认为汽车制动理论计算的制动距离小于相关规定值, 相较于紧急制动状态, 标准停车视距的规范值有较大富余, 需结合人、车、路和环境对停车视距模型进行修正^[12]; 王晓楠等提出动态停车视距的概念, 通过分析车辆实际行驶过程中的动态参数, 提出了不同设计速度下公路最小圆曲线半径建议值^[13]。但在探究弯道行车时仅考虑道路平曲线曲率的问题, 未考虑弯道超高与坡度的变化。实际行车过程中, 弯道停车视距的复杂程度取决于空间三个维度的变化, 需要多方位计算停车视距。

JTG D20—2017《公路路线设计规范》只对平面直线段停车视距进行了规定, 未考虑弯道路段相关参数对停车视距的影响, 不能有效保证车辆弯道行

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0807500); 国家自然科学基金面上项目(51978075)

驶安全性。为提高弯道路段车辆行驶安全性,本文通过对汽车弯道路段的动力学分析,分析弯道路段平曲线半径、纵坡、超高等因素对停车视距的影响,修正现有停车视距计算模型。

1 车辆弯道路段制动受力分析

将车辆简化为一个质点 m ,当车辆遇到前方有危险开始制动时,车轮产生制动效力,这个制动效力可分解为用以减速的切向制动力 F_y 和用以平衡离心力的侧向力 F_x [14],即:

$$F_x^2 + F_y^2 = F^2 \quad (1)$$

式中: F 为汽车制动时地面的摩擦阻力。

1.1 车辆在平曲线上制动受力分析

将车辆运动视为圆周运动,由车辆临界平衡条件,在侧向和汽车行驶方向上有:

$$mg\varphi \cdot \cos\beta = m \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

$$mg\varphi \cdot \sin\beta = ma \quad (3)$$

式中: m 为车辆质量; g 为重力加速度; φ 为路面附着系数; β 为车辆滑移轨迹线与向心力之间的夹角,其产生原因是车辆滑移时轮胎轨迹线方向与车辆行驶方向不共线; v 为汽车的瞬时速度(m/s); R 为道路平曲线半径(m); a 为纵向制动减速度(m/s²)。

联立式(2)、式(3),得:

$$a = g\varphi \sqrt{1 - \frac{v^4}{(Rg\varphi)^2}} \quad (4)$$

车辆在平曲线上制动的情况见图 1。在圆曲线上制动会受到横向稳定条件的限制,车辆将一部分纵向制动效能转化为横向稳定性。因此,在保证弯道制动横向处于稳态的前提下,减少纵向制动力,相应地停车视距将会延长。

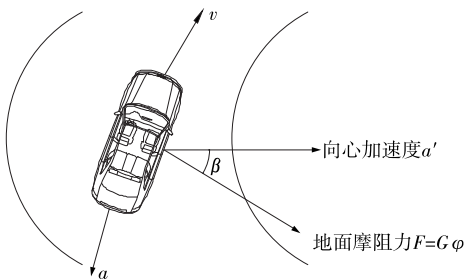


图 1 车辆在平曲线上制动的情况

1.2 考虑道路超高及纵坡时的受力分析

1.2.1 仅考虑超高对车辆的影响

车辆在圆曲线上行驶时,由于车辆本身惯性的

作用,突然改变车辆行驶偏移量,会增加一侧车轮的荷载,导致车辆横向倾覆[15]。图 2 为车辆在带有超高 α 的路面上行驶时的情况。

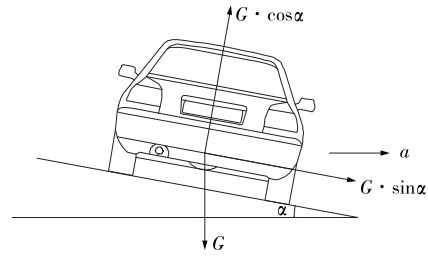


图 2 车辆在带有超高的路面(横断面)上行驶时的情况

图 3 为车辆在设有超高的路面上制动的情况。由于超高值一般较小,此时 $\cos\alpha \approx 1$, $\sin\alpha \approx \tan\alpha \approx i_h$ (i_h 为超高,下文中超高均用 i_h 表示)。分别对横向和纵向受力进行分析,分别有:

$$mg\varphi \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta + mg \cdot \sin\alpha = m \frac{v^2}{R} \cdot \cos\alpha \quad (5)$$

$$mg\varphi \cdot \sin\beta = ma \quad (6)$$

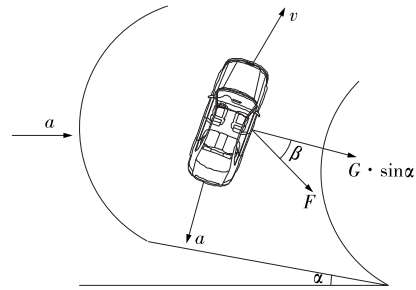


图 3 车辆在带有超高的路面上制动的情况

联立式(5)、式(6),得出加速度 a 的表达式:

$$a = g\varphi \sqrt{1 - \frac{(v^2/R - gi_h)^2}{g^2\varphi^2}} \quad (7)$$

1.2.2 考虑纵坡的车辆受力分析

公路纵断面设计时会出现许多竖曲线组合路段。同时考虑横坡、纵坡作用时,可将重力在 3 个方向进行分解。设 G_{x1} 为重力沿横坡方向的分力, G_{x2} 为沿纵坡方向的分力, G_{x3} 为垂直于道路平面的分力,纵坡角度为 γ 。根据正交分解原则,可得:

$$\begin{cases} G^2 = \sum G_{xi}^2 \\ G_{x1} = G \cdot \sin\alpha \cdot \cos\gamma \\ G_{x2} = G \cdot \sin\gamma \\ G_{x3} = G \cdot \cos\alpha \cdot \cos\gamma \end{cases} \quad (8)$$

车辆在横向、纵向稳态限制条件下,横向和纵向分别有:

$$mg \cdot \cos\alpha \cdot \cos\gamma \cdot \varphi \cdot \cos\beta + mg \cdot \sin\alpha \cos\gamma = m \frac{v^2}{R} \cdot \cos\alpha \quad (9)$$

$$mg \cdot \cos\alpha \cdot \cos\gamma \cdot \varphi \cdot \sin\beta + mg \cdot \sin\gamma = ma \quad (10)$$

此时超高倾角较小, $\cos\alpha \approx 1$, $\sin\alpha \approx \tan\alpha \approx i_h$; $\cos\gamma \approx 1$, $\sin\gamma \approx \tan\gamma = i_z$, 减速度 a 为:

$$a = g\varphi \cdot \sin\beta + gi_z = g\varphi \sqrt{1 - \frac{(v^2/R - gi_h)^2}{g^2 \varphi^2}} + gi_z \quad (11)$$

式中: i_h 和 i_z 分别为横坡和纵坡坡度。

比较式(4)、式(7)和式(11), 在超高 i_h 、纵坡坡度 i_z 趋于零且平曲线半径 R 趋于无穷大时, 可得到车辆在复杂道路上运动的基本表达式^[16]。

2 弯道停车视距计算及分析

当车辆在设有超高的弯坡组合路段上制动时, 纵向减速度不仅与平曲线半径、超高、纵坡及路面附着系数等道路参数有关, 还与车辆运动速度有关。在整个制动过程中, 随着车速的降低, 制动减速度发生变化, 无法直接计算。为此, 采用数值分析方法, 根据迭代原理, 研究弯道路段车辆制动距离计算方法。

2.1 车辆弯道制动距离计算

理想状态下, 车辆做单一直线匀减速运动, 驾驶员在反应时间段以初速度 v_0 行驶时间 t_0 , 根据运动学原理, 制动距离 S 为:

$$S = v_0 t_0 + \int_{t_1}^{t_n} v dt \quad (12)$$

式(12)即为弯道路段制动距离计算公式。该公式属于隐式, 制动减速度随车速变化而变化, 无法直接计算。为此, 采用微积分的思想, 将整个制动时间划分为多个 Δ_i 的小区间, 当 Δ_i 足够小时, 在每个区间内可近似认为车辆做匀减速直线运动^[17], 有:

$$v_i = v_{i-1} - a_i t \quad (13)$$

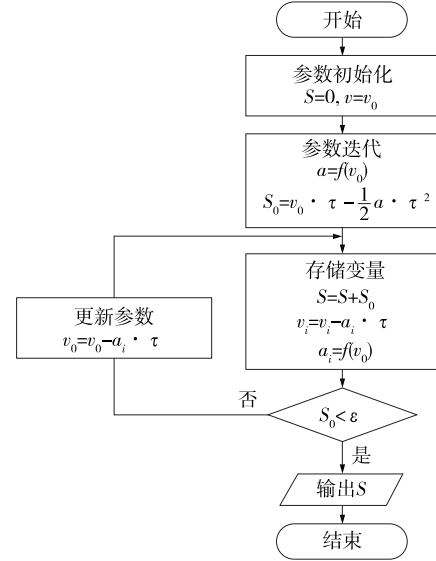
$$a_i = g\varphi \sqrt{1 - \frac{(v_i^2/R - gi_h)^2}{g^2 \varphi^2}} + gi_z \quad (14)$$

$$S_i = v_{i-1} \cdot \Delta_i - \frac{1}{2} a_i \cdot (\Delta_i)^2 \quad (15)$$

式中: v_i 为第 i 个区间的末速度; v_{i-1} 为第 i 个区间的初速度; a_i 、 S_i 分别为第 i 个区间的减速度和制动距离。

考虑到实际工程中视距计算不连贯, 将车辆制

动过程按照等时间间隔划分法以时间轴进行划分, 每个相同时间间隔 Δ_i 内所行走的位移记为 S_i , 即步长为 $\tau = \Delta_i$ 的小区间。给定初始速度 v_1 , 通过运动学公式, 在位移上进行数值积分, 得到停车视距。计算流程见图4。



τ 为划分的最小时间计量长度

图4 制动位移迭代流程

该计算方法基于迭代计算, 将上一区域 S_0 计算得到的 v_0 、 a_0 带入式(13)~(15)进行计算, 得到下一区域所需参数。判断条件为末段位移 S_0 是否小于一段微量位移 ϵ , 若小于, 则迭代结束, 此时输出的 S 即为所求制动距离。

$$S_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n S_i = S_1 + S_2 + S_3 + \cdots + S_n = v_1 \tau - \frac{1}{2} a_1 \tau^2 + v_2 \tau - \frac{1}{2} a_2 \tau^2 + \cdots + v_n \tau - \frac{1}{2} a_n \tau^2 \quad (16)$$

式中: $S_{\text{总}}$ 为制动总位移。

记迭代次数为 i 的一段位移为 $D_{\text{PM}}^{(i)}$ (微分后第 i 段微量位移), 则式(16)可简化为:

$$D_{\text{PM}} = D_{\text{PM}}^{(1)} + D_{\text{PM}}^{(2)} + D_{\text{PM}}^{(3)} + D_{\text{PM}}^{(4)} + \cdots = \sum D_{\text{PM}}^{(i)} \quad (17)$$

式中: D_{PM} 为制动力开始作用直到完全静止时车辆的位移。

2.2 弯道安全停车视距计算

在车辆制动初期, 由于驾驶员和车辆都需要一定的反应时间来对车辆的制动作出响应, 车辆继续以制动初速度行驶, 并未减速; 直到驾驶员和车辆反

应时间结束,车辆制动系统开始工作,车辆进行减速运动。另外,为确保安全,车辆制动停止后不宜紧靠前方障碍物,而应留出一定的安全距离。车辆安全停车视距一般由三部分组成:第一部分为驾驶人和车辆反应时间内车辆行驶的距离,即反应距离 S_1 ,反应时间 t 一般取 2.5 s,反应距离的计算公式见式(18);第二部分为制动开始作用于汽车到其静止所行驶的距离,即制动减速距离 S_2 ,其值为式(17)的计算结果;第三部分为安全距离 S_0 ,一般取 5~10 m,本文取 5 m。

$$S_1 = v_0 \cdot t \quad (18)$$

式中: v_0 为车辆运行速度(m/s)。

综上,安全停车视距计算公式为:

$$S_{SD} = S_1 + S_2 + S_0 = v_0 \cdot t + D_{PM} + S_0 \quad (19)$$

2.3 安全停车视距影响因素分析

在影响停车视距的 3 个参数中,起决定作用的是纵坡坡度。在其他条件不变的情况下,视距随下坡纵坡坡度的增加而增加。设计速度为 120 km/h 时,纵坡坡度每增加 1%,停车视距平均增加 6.01

m;设计速度为 40 km/h 时,纵坡坡度每增加 1%,停车视距平均增加 0.8 m。超高对视距的影响较小,在高车速时,每 1%的超高变化仅有不足 0.1 m 的视距变化,可忽略超高的影响。

在低车速时,每 300 m 的半径变化视距变化不足 0.1 m;在高车速时,每 300 m 的半径变化视距变化也仅有 0.6 m。研究发现高车速时存在视距突变的情况,这是由于弯道半径与车速的比值对车辆横向稳定性起决定作用。根据 1.2 节的分析,考虑超高时,路面需满足车辆横向稳定限制条件,即车辆所受横向力需提供足够的向心力[见式(7)]。 $v^2/R < g i_h$ 时,停车视距会发生突变,这种情况应当舍去。半径较大时,停车视距的波动范围较小;半径较小时,车辆超出道路附着极限,将不再受控,会发生侧翻侧滑现象。

实际计算过程中, v_0 为公路设计速度或根据速度模型计算出的运行速度, D_{PM} 根据公路几何设计参数计算得出。图 5 为公路几何参数值变化对 D_{PM} 的影响。

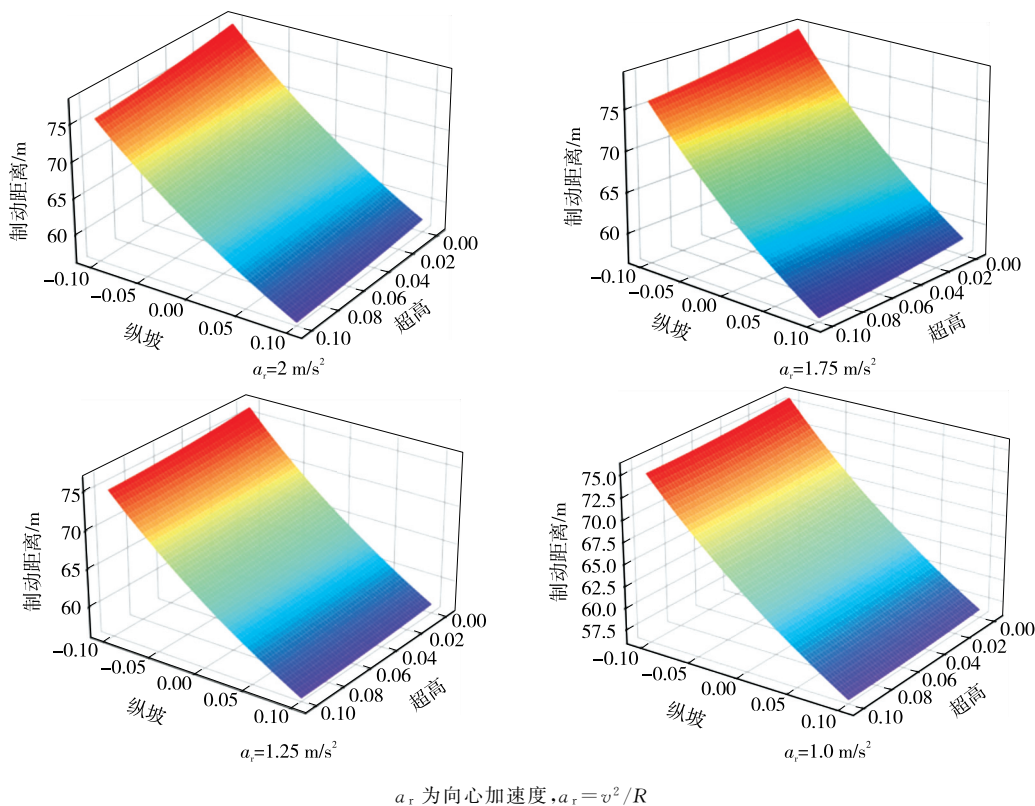


图 5 不同向心加速度下视距及纵坡、超高的关系

由图 5 可知:向心加速度越大,对停车视距的影响越大;车辆在弯道上制动时,相比超高,纵坡对停车视距的影响更大;超高一定时,纵坡坡度和制动距

离呈正相关。

综上,随着纵坡坡度降至负值,即车辆行驶至下坡路段,停车视距随超高的降低急剧增大;上坡路

段,超高对停车视距的影响在可控范围内。

3 安全停车视距计算结果分析

根据 JTG D20—2017《公路路线设计规范》,停车视距由驾驶人反应距离和制动距离组成^[18],计算公式如下:

$$S_{\text{停}} = \frac{v}{3.6}t + \frac{(v/3.6)^2}{2gf_1}$$
 (20)

式中: v 为制动初速度(km/h),设计速度为 80~120 km/h 时取设计速度的 85%,设计速度为 40~60 km/h 时取设计速度的 90%,设计速度在 40 km/h 以下时取设计速度; f_1 为纵向摩阻力系数。

由于潮湿路面摩阻力系数远低于正常路面,安全起见,应选择潮湿路面进行停车视距计算。潮湿路面的纵向摩阻力系数见表 1。

表 1 潮湿路面的纵向摩阻力系数 f_1

设计速度/ (km·h ⁻¹)	f_1	设计速度/ (km·h ⁻¹)	f_1
120	0.29	40	0.38
100	0.30	30	0.44
80	0.31	20	0.44
60	0.33		

为比较多因素弯道停车视距模型与式(20)的差异,分析公路纵坡、弯道半径及超高对停车视距的影响,以弯道半径、超高、纵坡坡度及车速作为输入变量,以表 1 所示纵向摩阻力系数为相应速度下路面附着系数,代入式(19)进行计算,将计算值与规范规定值进行比较,分析安全停车视距在 3 个参数不同取值的情况下与规范值的差异,结果见表 2。

表 2 不同参数值下模型计算停车视距与规范规定值的比较

设计速度/ (km·h ⁻¹)	运行速度/ (km·h ⁻¹)	阻力 系数	超高/ %	纵坡坡度/ %	弯道半径/ m	制动距离/ m	计算视距/ m	规范视距/ m
120	102	0.29	6	2	1 000	149.542	225.375	210
					700	149.731	225.564	
					400	154.123	229.956	
					1 000	155.334	231.167	
					700	155.537	231.370	
					400	160.292	236.125	
				3	1 000	161.575	237.408	
					700	161.793	237.627	
					400	166.955	242.788	
					1 000	150.011	225.844	
					700	149.879	225.713	
					400	153.240	229.073	
			7	2	1 000	155.845	231.678	
					700	155.673	231.506	
					400	159.335	235.169	
					1 000	162.156	237.989	
					700	161.972	237.805	
					400	165.939	241.772	
				3	1 000	150.719	226.552	
					700	150.215	226.048	
					400	152.614	228.448	
					1 000	156.582	232.415	
					700	156.063	231.896	
					400	158.657	234.490	
			8	4	1 000	162.960	238.793	
					700	162.367	238.201	
					400	165.177	241.010	

续表2

设计速度/ (km · h ⁻¹)	运行速度/ (km · h ⁻¹)	阻力 系数	超高/ %	纵坡坡度/ %	弯道半径/ m	制动距离/ m	计算视距/ m	规范视距/ m
80	68	0.31	6	4	800	66.410	118.632	110
					500	66.316	118.538	
					300	66.576	118.798	
				5	800	69.001	121.224	
					500	68.872	121.094	
					300	69.180	121.402	
					800	71.778	124.000	
				6	500	71.638	123.860	
					300	71.970	124.192	
					800	66.683	118.906	
			5	4	500	66.449	118.672	
					300	66.534	118.756	
					800	69.268	121.490	
				6	500	69.041	121.263	
					300	69.132	121.354	
					800	72.069	124.291	
					500	71.821	124.043	
					300	71.919	124.141	
				4	800	67.041	119.264	
					500	66.695	118.917	
					300	66.578	118.800	
			7	5	800	69.657	121.879	
					500	69.281	121.504	
					300	69.154	121.376	
					800	72.490	124.712	
				6	500	72.084	124.306	
					300	71.945	124.168	
				3	400	12.731	41.342	
					200	12.734	41.345	
					100	12.797	41.408	
				5	400	13.490	42.102	
					200	13.494	42.106	
					100	13.565	42.176	
40	34	0.38	3	7	400	14.390	43.001	40
					200	14.394	43.005	
					100	14.443	43.054	
				3	400	12.745	41.356	
					200	12.736	41.348	
					100	12.775	41.386	
				5	400	13.507	42.118	
					200	13.497	42.108	
					100	13.541	42.152	
				7	400	14.377	42.988	
					200	14.366	42.977	
					100	14.415	43.026	
				3	400	12.769	41.380	
					200	12.749	41.360	
					100	12.763	41.375	
			4	5	400	13.535	42.146	
					200	13.512	42.123	
					100	13.528	42.139	
				7	400	14.409	43.020	
					200	14.383	42.994	
					100	14.401	43.012	

注:规范视距通过式(20)计算取整后得到。

由表2可知:设计速度为40 km/h时,多因素弯道停车视距模型计算值比规范值大3 m。考虑到本文停车视距模型增加了5 m的安全距离,在低车速时二者相差较小,采用规范值设计对公路的运营安全影响较小。随着运行速度的提高,模型计算值与规范值的差异逐渐增大,设计速度为80 km/h时模型计算最大值超过规范值14 m,设计速度为120 km/h时模型计算最大值超过规范值31 m。随着运行速度的提高,弯道半径、超高、纵坡坡度对停车视距的影响增大,如果仍然按照JTGD20—2017《公路路线设计规范》进行公路设计,在运行速度较高时将不能满足驾驶人的实际停车视距需求,无法保证公路运营安全性。另外,根据规范,路面潮湿时车辆运行速度小于设计速度,但对于大多数公路,公路限速一般采用设计速度,实际情况是无法避免部分车辆仍以原有公路限速行驶,驾驶人需要的停车视距更长,如果仍以JTGD20—2017进行公路设计,会使以原有限速行驶的驾驶人的停车视距不能得到有效保证。

4 结语

本文针对JTGD20—2017《公路路线设计规范》中停车视距仅针对直线道路的状况,在车辆弯道路段行驶制动受力分析的基础上,构建以弯道半径、纵坡、超高和行驶速度等为自变量的弯道路段停车视距修正模型,通过数值分析得出弯道路段停车视距计算方法。利用上述计算模型分析弯道半径、纵坡、超高对弯道路段停车视距的影响,结果表明,随着纵坡(下坡)坡度的增大、弯道半径的减小、超高的增大,停车视距增大。说明与直线路段相比,在弯道路段行驶时驾驶人所需安全停车视距更长。多因素公路弯道视距计算模型能更有效地分析公路线形的安全风险,对公路安全设计及公路安全性评价具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] WOOD J S, DONNELL E T. Stopping sight distance and available sight distance; New model and reliability analysis comparison[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2638(1): 1—9.
- [2] WOOD J S, DONNELL E T. Stopping sight distance and horizontal sight line offsets at horizontal curves [J]. Transportation Research Record; Journal of the

Transportation Research Board, 2014, 2436(1): 43—50.

- [3] 王佐, 刘建蓓, 郭腾峰. 公路空间视距计算方法与检测技术[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, 27(6): 44—47+62.
- [4] 王松, 刘向阳, 郭腾峰. 双车道公路运行速度与空间视距测算方法研究[J]. 公路, 2014, 59(4): 17—21.
- [5] 郝会龙, 李平凡, 黄钢, 等. 基于航测数据的空间视距计算方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 40—44.
- [6] 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.
- [7] 陈东升. 高速公路停车视距计算理论模型研究[J]. 北方交通, 2018(12): 69—72.
- [8] 朱云升, 王世立, 龚娟, 等. 凝冰路面弯道路段停车视距计算方法[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 766—773.
- [9] SARHAN M, HASSAN Y. Consideration of sight distance in placement of concrete barriers on horizontal curves of roads[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2301(1): 9—16.
- [10] 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, 23(6): 33—35.
- [11] XIA R X, WU D H, HE J, et al. A new model of stopping sight distance of curve braking based on vehicle dynamics[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2016, 2016: 1—8.
- [12] 杨伟. 公路停车视距计算与分析[J]. 公路与汽运, 2019(3): 54—56.
- [13] 王晓楠, 王云泽, 苗慕楠, 等. 动态停车视距模型研究及应用[J]. 公路, 2015, 60(11): 151—155.
- [14] 杨永红, 吴传海, 葛婷, 等. 山区高速公路超车小客车停车视距安全性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(5): 42—48.
- [15] 何苗. 高原环境下公路停车视距模型研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [16] 袁浩, 程建川. 停车视距计算的物理模型修正[C]//交通部, 世界道路协会. 2004 国际公路安全研讨会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2004: 434—437.
- [17] 单慧敏. 多车道高速公路停车视距研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [18] 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: JTGD20—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.

收稿日期: 2022—06—12