

文章编号:1671-1637(2012)06-0001-06

公路平曲线半径可靠性设计理论与方法

游克思^{1,3}, 孙璐^{1,2}, 顾文钧^{1,2}

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 美国天主教大学 土木工程系, 华盛顿特区 20064;
3. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要:将车辆运行速度、路面摩擦因数作为随机变量,分别构建了基于质点模型与考虑车辆侧倾作用的侧滑失效功能函数,分析了曲线路段行车安全可靠。计算了《公路工程技术标准》(JTG B01—2003)中规定的各极限最小半径下发生车辆侧滑的概率,并通过改变路面摩擦因数和车辆运行速度,对比研究了2种不同功能函数下的行车失效概率,提出了公路平曲线半径的可靠性设计流程。研究结果表明:考虑车辆侧倾作用计算的侧滑概率明显高于由质点模型计算出的侧滑概率;在同样道路环境下,卡车发生侧滑的概率会大于轿车;公路平曲线设计将车辆简化为质点,忽略侧倾作用以及车型间差异会导致对卡车行驶安全不利。

关键词:道路工程;平曲线半径;可靠性设计;运行速度;路面摩擦因数

中图分类号:U412.34

文献标志码:A

Reliability design theory and method of highway horizontal curve radius

YOU Ke-si^{1,3}, SUN Lu^{1,2}, GU Wen-jun^{1,2}

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. Department of Civil Engineering, The Catholic University of America, Washington DC 20064, USA; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Vehicle running speed and pavement friction coefficient were considered as random variables. Two performance functions of vehicle skidding failures based on quality point model and considering roll motion were proposed, and the safety reliability of vehicle moving on curve road was analyzed. The skidding probability of each horizontal curve with limiting minimum radius recommended by *Technical Standard of Highway Engineering* (JTG B01—2003) was calculated, the failure probabilities of two performance functions were compared by varying pavement friction coefficient and vehicle running speed, and the reliability design flow of horizontal curve radius was presented. Analysis result indicates that skidding probability calculated by the performance function considering roll motion is larger than that calculated by quality point model, and truck is more vulnerable to skid than car on the same road environment. Vehicle is simplified as quality point, roll motion and vehicle type difference are ignored in the horizontal curve design, these are adverse to truck safety. 5 tabs, 6 figs, 17 refs.

Key words: road engineering; horizontal curve radius; reliability design; running speed; pavement friction coefficient

Author resumes: YOU Ke-si(1985-), male, doctoral student, +86-25-83796518, youkesi1@yahoo.

收稿日期:2012-07-18

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG13A02);国家自然科学基金项目(51050110143, U1134206);美国国家自然科学基金项目(BCS-0527508)

作者简介:游克思(1985-),男,江苏盐城人,东南大学工学博士研究生,从事道路交通安全研究。

导师简介:孙璐(1972-),男,上海人,东南大学教授,长江学者,工学博士。

com.cn; SUN Lu(1972-), male, professor, PhD, +86-25-83796518, sunl@cua.edu.

0 引 言

交通事故一直是社会所关注的热点问题之一,每年全世界有成千上万的人死于交通事故,事故统计资料表明平曲线路段通常比直线路段有较高事故发生率^[1],例如,2002年,美国有42 185人死于交通事故,其中约25%的死亡事故发生在曲线路段上,曲线半径越小,事故发生率越高^[2],因此,完善曲线路段设计,改善行车安全,对提高道路安全水平具有重要意义。

现有道路线形设计均采用确定性设计方法,通常认为道路设计只要满足规范要求,就是安全的。然而有研究指出,在某些情况下,现行几何设计规范不能为道路使用者提供足够的行车安全保障^[3]。由于规范通常只规定设计参数的最小取值,因此,设计人员只能判断设计值是否满足规范,当采用的设计值与规范值存在偏差时(设计值高于规范值),对应的安全水平就无法获知^[4-5],设计目标和预期安全效果不明确。基于可靠性的设计方法考虑了设计参数随机性,能够有效克服确定性设计方法存在的不足。可靠性理论目前已经广泛应用于土木工程中的结构、岩土、水利等领域。Navin首次将可靠性理论应用于道路线形设计^[6],后续其他学者的研究主要将其应用于道路平曲线设计^[7-10]和停车视距分析两方面^[11-12]。

在中国,将可靠性理论应用于道路线形设计的研究较少,国外现有的平曲线可靠性分析研究中也存在一定不足:可靠性的功能函数是基于车辆质点模型推导而得,以控制车辆侧滑为设计目标,忽略了不同车型之间差异以及车辆侧倾作用对侧滑影响。本文针对存在的不足,以此为切入点,进一步考虑车辆侧倾作用下的侧滑失效模式,推导相应功能函数,分析曲线路段上的行车安全可靠,提出公路平曲线半径的可靠性设计流程,并通过实例予以说明。

1 可靠性功能函数建立

可靠性是指系统在规定时间以及条件下完成预定功能的能力。可靠性基本理论用于道路平曲线可靠性分析可以这样解释:当车辆以速度 V ,在半径为 R 的圆曲线上运动时,受离心力作用,产生侧向加速度,有向外运动趋势,速度越大,侧向加速度越大。在一定的路面摩擦因数下,要使车辆能稳定地在曲

线上行驶而不发生侧滑事故,就需要足够大的半径,这个半径即为车辆稳定行驶的需求值,可以理解为可靠性理论中的需求(类似于结构中的荷载效应);而曲线半径值为设计所提供值(类似于结构的抗力),因此,曲线路段上行车稳定性的可靠性分析功能函数描述为

$$Z = g(R_s, R_D) = R_s - R_D \quad (1)$$

式中: Z 为功能函数; R_s 为设计所提供的曲线半径值; R_D 为稳定行驶需求的半径值。

1.1 基于质点模型的侧滑失效功能函数

图1中,车辆在半径为 R 、超高为 e 的曲线路段上行驶,将其简化为质点,忽略车辆侧倾作用,根据牛顿第二运动定律,车辆稳定行驶所需半径为

$$R_{D1} = \frac{V^2}{g(e + \alpha f_y)} \quad (2)$$

式中: f_y 为侧向摩擦因数; α 为路面摩擦因数影响因子,反映了不同路面状况的摩擦因数; g 为重力加速度。在图1中, W 为车辆所受重力; F_{z0} 、 F_{zi} 分别为轮胎外侧、内侧垂直力; F_{yi} 、 F_{yo} 分别为轮胎内侧、外侧水平力。

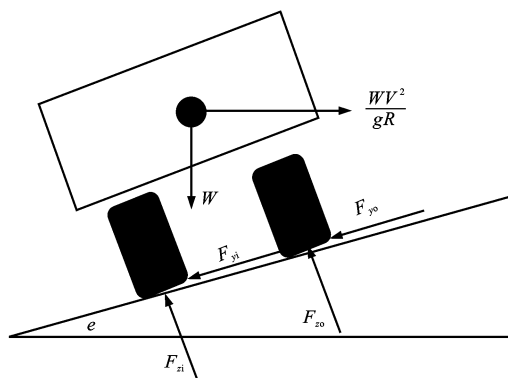


图1 车辆受力

Fig. 1 Forces acting on vehicle

基于质点模型的侧滑失效功能函数为

$$Z_1 = R_s - \frac{V^2}{g(e + \alpha f_y)} \quad (3)$$

1.2 考虑车辆侧倾作用的侧滑失效功能函数

车辆在弯道上行驶时,车身受到侧向加速度的作用,将绕侧倾中心产生转动,见图2。考虑在弯道上行驶时侧倾作用以及不同车型间的参数差异,根据牛顿第二运动定律,车辆稳定行驶所需半径为

$$R_{D2} = \frac{V^2}{g[(1 - h_r/h)e + \alpha f_y]} \left[1 + R' \left(1 - \frac{h_r}{h} \right) \right] \quad (4)$$

$$R' = \theta/a_y \quad (5)$$

式中: h 为重心高度; h_r 为在重心纵向位置上侧倾中心距地面高度; R' 为侧倾率; θ 为侧倾角度; a_y 为侧向加速度。

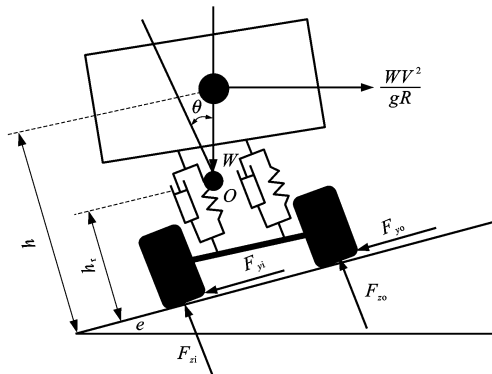


图2 考虑侧倾作用时车辆受力

Fig. 2 Forces acting on vehicle considering roll motion

考虑侧倾作用的侧滑失效功能函数为

$$Z_2 = R_s - \frac{V^2}{g[(1 - h_r/h)e + \alpha f_y]} \cdot \left[1 + R' \left(1 - \frac{h_r}{h} \right) \right] \quad (6)$$

2 平曲线行车安全可靠分析

2.1 设计变量随机性分析

与确定性设计方法相比,随机分析方法需要获取各设计变量的更多信息,如变量的概率分布、均值、方差等。本文根据以上提出的功能函数,将超高、车辆参数、设计半径等作为确定性变量,车辆运行速度和路面摩擦因数视为随机变量。车辆运行速度和路面摩擦因数等变量概率分布目前已有相关研究,本文所采用的车辆运行速度和路面摩擦因数概率分布就是基于现有研究成果,用于可靠性分析。

2.1.1 运行速度

运行速度是指一般条件下,驾驶人根据自身驾驶条件(主要指驾驶技术和车辆条件)和心理预期而采取的安全行车速度,它表征了道路上实际交通流运行状况,与地形、公路线形条件、交通流量、交通组成、驾驶群体素质、驾驶人期望速度、交通管理设施、交通安全设施、路侧环境等多重因素相关。研究发现,当道路设计速度小于 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,车辆运行速度通常高于设计速度,相反设计速度大于 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,则运行速度通常小于设计速度^[13],正态分布最适合描述车辆在平曲线上行驶的运行速度概率分布^[14]。本文通过曲线半径预测平均运行速度 V_{50} 和速度标准差 D ,模型分别为^[15]

$$V_{50} = 14.75 \ln(R) - 11.69 \quad (7)$$

$$D = 0.108 5 V_{50} + 0.99 \quad (8)$$

2.1.2 路面摩擦因数

良好的路面首先应该能够提供足够的路面摩擦因数,为车辆安全加、减速提供必要条件。路面摩擦因数受路面本身材料特性、车辆轮胎特性、车辆速度、冰雪天气作用等多方面因素影响,路面摩擦因数的分布情况见表1^[16]。

表1 路面摩擦因数分布

Tab. 1 Distribution of pavement friction coefficients

路面状况	运行速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	平均摩擦因数值	摩擦因数标准差
潮湿	80	0.419 2	0.091 3
	85	0.401 3	0.091 3
	90	0.382 6	0.091 3
	95	0.357 1	0.091 3
	99	0.349 8	0.091 3
干燥	任意速度	0.885 2	0.094 9

路面摩擦因数通常可以分解为沿车辆纵向和侧向2个方向,车辆在曲线路段行驶需要足够的侧向摩擦因数以避免侧滑。车辆侧向最大摩擦因数 $f_{R\max}$ 与纵向最大摩擦因数 $f_{T\max}$ 关系为^[17]

$$f_{R\max} = 0.925 f_{T\max} \quad (9)$$

2.2 可靠性求解

当功能函数只有2个变量且线性时,可以求得系统可靠度精确解,然而当变量较多且呈现非线性时,通常难以采用精确求解方法,在这种情况下可采用近似求解方法,如一次二阶矩法(FORM)、二次二阶矩法(SORM)、蒙特卡洛法(Monte-Carlo)以及其他方法。本文求解方法见图3,通过反复迭代求解出可靠度指标,最终获得行车失效概率。

图3中, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; $\phi(\cdot)$ 为服从标准正态分布随机向量的概率密度函数; μ_i^* 为第 i 个均值 u_i 标准化后的值; σ_i^* 为第 i 个标准差 σ_i 标准化后的值; x_i 为第 i 个随机变量; x_i^* 为 x_i 的标准化值; $F_{x_i}(\cdot)$ 为分布函数; $f_{x_i}(\cdot)$ 为概率密度函数; ϵ 为相对误差; β 为可靠度; p 为行车失效概率; β_k 为第 k 次迭代计算出的可靠度; α_i 为第 i 个变量的标准化修正系数。

2.3 极限最小半径下行车安全可靠分析

选取《公路工程技术标准》(JTG B01—2003)中规定各设计速度下的平曲线极限最小半径,分别计算其发生车辆侧滑失效概率。极限最小半径是指各级公路在采用允许最大超高和允许侧向摩擦因数情况下,能保证汽车安全行驶的最小半径,计算值为

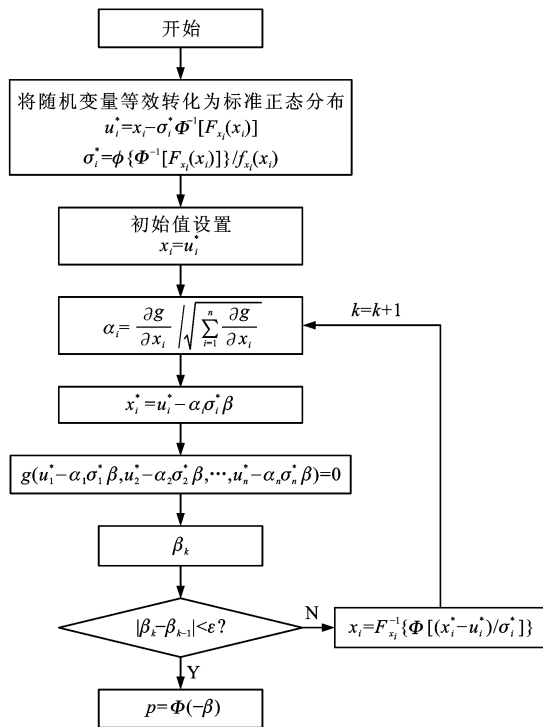


图 3 可靠性求解流程

Fig. 3 Flow of reliability solution

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127(e_{\max} + f_{\max})} \quad (10)$$

式中: R_{\min} 为极限最小半径; e_{\max} 为允许最大超高; f_{\max} 为允许侧向最大摩擦因数。

表 3 各极限最小半径对应的车辆侧滑失效概率

Tab. 3 Skidding failure probabilities of vehicle at different limiting minimum radii

设计速度/ (km · h ⁻¹)	$e_{\max}/\%$	f_{\max}	R_{\min}/m	预测运行速度均 值/(km · h ⁻¹)	预测运行速度标准 差/(km · h ⁻¹)	基于质点模型的侧滑概率		考虑侧倾作用的侧滑概率	
						轿车	卡车	轿车	卡车
20	8	0.17	15	28.25	4.06	2.9×10^{-3}	7.9×10^{-2}	9.3×10^{-3}	1.2×10^{-1}
30	8	0.16	30	38.48	5.16	6.1×10^{-4}	3.9×10^{-2}	2.5×10^{-3}	6.5×10^{-2}
40	8	0.15	60	48.70	6.27	9.3×10^{-6}	4.7×10^{-3}	6.9×10^{-5}	1.0×10^{-2}
60	8	0.15	125	59.53	7.45	6.4×10^{-9}	1.1×10^{-4}	1.1×10^{-7}	3.1×10^{-4}
80	8	0.13	250	69.75	8.56	1.5×10^{-12}	1.1×10^{-6}	4.8×10^{-11}	4.1×10^{-6}

2.4 不同路面摩擦因数和运行速度下的行车安全可靠分析

为研究路面摩擦因数与运行速度对车辆侧滑的影响以及进一步对比分析不同可靠性功能函数差异,以表 3 中设计速度 40 km · h⁻¹ 为例,分别改变路面摩擦因数和车辆平均运行速度,假设方差不变,采用上述 2 种功能函数计算车辆发生侧滑失效概率,其中路面摩擦因数的改变是通过设定不同的路面摩擦因数影响因子,见表 4。

图 4 表明随着路面摩擦因数降低,发生车辆侧滑失效概率急剧增加,以基于质点模型的轿车为例,

根据各极限最小半径值,采用式(7)、(8)预测平均运行速度和标准差,假设车辆运行速度服从正态分布。由表 1 获得路面干燥情况下平均摩擦因数数值为 0.885 2,标准差为 0.094 9,此时路面摩擦因数影响因子 α 为 1,根据式(9)获得侧向最大摩擦因数为 0.818 8,并假设路面摩擦因数服从正态分布。根据已有研究,卡车所受摩擦因数只有轿车的 70%^[16],因此,本文在计算时,卡车和轿车采用不同的路面摩擦因数。车辆参数见表 2。

表 2 车辆参数

Tab. 2 Vehicle parameters

车型	h_r/h	$R'/(rad \cdot g^{-1})$
轿车	0.50	0.10
卡车	0.25	0.05

在不同功能函数下各极限最小半径值对应发生车辆侧滑可能的失效概率见表 3,干燥路面状况时,轿车在极限最小半径曲线上按设计速度行驶时发生侧滑的概率很小,这是因为规范中允许侧向摩擦因数最大值仅为 0.17,而正常干燥路面摩擦因数达 0.80,因此,具有很大安全阈值(0.53),基本上避免了横向滑移危险,不同功能函数计算出的侧滑概率存在差异。在不同道路环境下可以计算出其对应的行车失效概率,这说明将可靠性理论应用于道路设计时,可以用概率来定量衡量道路的安全性能。

表 4 路面摩擦因数影响因子

Tab. 4 Influence factors of pavement friction coefficient

路面状况	α
干燥、经常性养护、施工质量好	1.0
轻微磨光	0.9
潮湿	0.7
路表宏观、微观纹理不足	0.5
潮湿、磨光	0.4
雪	0.3
冰	0.2

当路面从干燥变化至结冰状况时,侧滑失效概率从

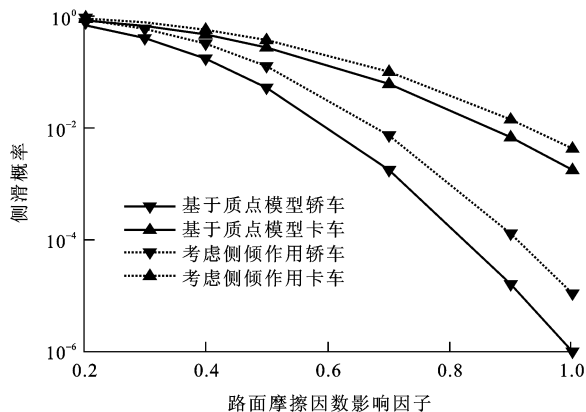


图4 不同摩擦因数影响因子下车辆失效概率

Fig. 4 Probabilities of vehicle failure at different friction coefficient influence factors

4. 90×10^{-6} 迅速增加至 0.68, 路面在积雪、结冰下极容易发生侧滑事故, 这说明路面摩擦因数对车辆侧滑有重要影响。通过改变平均运行速度, 分别计算不同运行速度下的车辆侧滑概率, 见图 5, 车辆发生侧滑失效概率随着运行速度的增加而显著增加, 如当运行速度从 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加至 $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 同样以基于质点模型的轿车为例, 车辆发生侧滑概率从 3.51×10^{-8} 迅速增至 0.83。对比基于质点模型和考虑侧倾作用计算的车辆侧滑失效概率, 表明考虑车辆侧倾作用后计算的失效概率显著大于由质点模型计算出的侧滑概率, 同时对轿车和卡车发生侧滑的概率, 表明在相同的道路环境下, 卡车发生侧滑概率要高于轿车, 这说明道路平曲线设计把车辆模型过度简化, 忽略车辆侧倾作用, 会导致设计偏危险, 同时忽略车型间的悬挂系统、轮胎等差异会导致在一定条件下设计出的道路对卡车等大车的行驶安全不利。

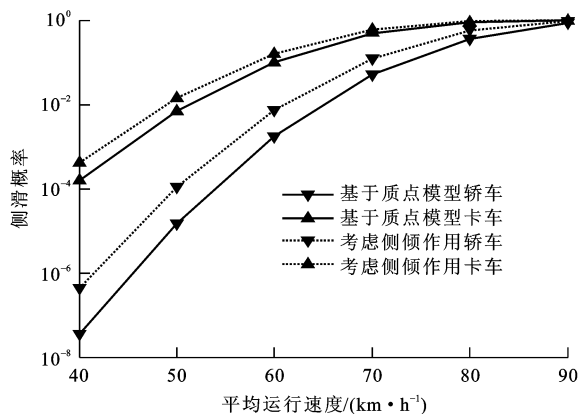


图5 不同运行速度下车辆失效概率

Fig. 5 Probabilities of vehicle failure at different running speeds

3 平曲线半径可靠性设计

上述通过建立功能函数, 根据已知车辆运行速度、路面摩擦因数等概率分布, 计算给定曲线半径下的行车失效概率属于可靠性分析过程, 而可靠性设计则是可靠性分析的逆过程。对于道路平曲线半径的可靠性设计就是如何设计曲线半径, 在已知车辆运行速度、路面摩擦因数等概率分布下, 计算失效概率, 使得其小于目标失效概率。目标失效概率的大小反映了对风险的接受程度, 也影响着工程造价, 它应该是一个综合考虑工程安全性与经济性的最优值。由于目前关于平曲线设计的目标失效概率还缺乏研究, 因此, 本文假定目标失效概率的取值, 以达到对平曲线可靠性设计方法说明目的。本文提出的平曲线半径可靠性设计流程见图 6, 具体步骤如下。

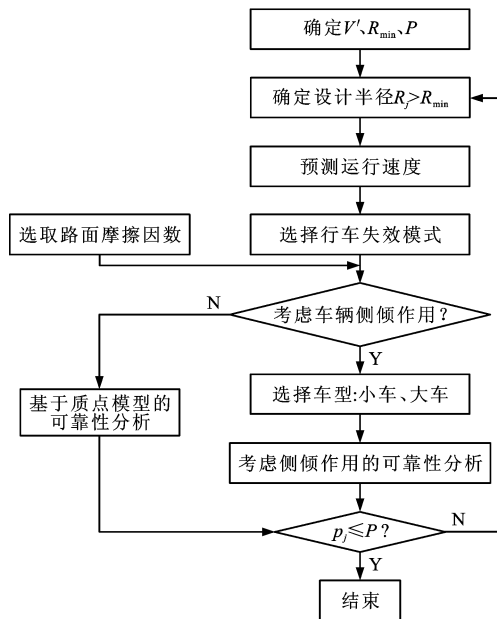


图6 平曲线可靠性设计流程

Fig. 6 Design flow of horizontal curve reliability

(1) 根据道路等级, 确定设计速度 V' , 查找规范对应的极限最小半径, 并设定目标失效概率 P 。

(2) 选择设计曲线半径, 第 j 次迭代半径为 R_j , 使得 $R_j > R_{\min}$, 满足规范最小半径要求。

(3) 根据曲线半径, 预测运行速度平均值和标准差, 选取路面摩擦因数平均值、标准差。

(4) 根据不同行车失效模式, 选择相应功能函数用于可靠性分析。

(5) 计算第 j 次迭代的行车失效概率 p_j , 并与目标失效概率比较, 当 $p_j \leq P$ 时, 停止计算, 否则重

复上述步骤(2)~(5)。

本文以双车道二级公路为例,其设计速度为

$60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,超高为 8%,最小曲线半径为 150 m,根

据不同设计要求,分别计算 3 种情况,结果见表 5。

表 5 平曲线半径可靠性设计

Tab. 5 Reliability design of horizontal curve radius

设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	最小曲线半径/m	目标概率	车型	路面类型	失效模式	设计半径/m	$(R_j - R_{\min}) \cdot R_{\min}^{-1} / \%$
60	150	1×10^{-5}	小车	干燥路面	基于质点的侧滑	150	0.0
60	150	1×10^{-5}	小车	潮湿路面	基于质点的侧滑	170	13.3
60	150	1×10^{-5}	小车	潮湿路面	考虑侧倾作用的侧滑	240	60.0

由表 5 可知,将可靠性理论运用于道路平曲线设计,可以通过事先设定目标失效概率,计算在不同预期设计目标下的道路曲线半径值,克服了确定性道路设计方法中设计预期安全效果不够明确的缺点,使得设计人员不仅能够保证设计符合规范,同时还可以考虑车辆、路面等多种因素,有目的性设计道路曲线半径值,减小人为主观因素,达到对预期设计效果的预测。

4 结 语

本文将可靠性理论运用于道路平曲线的行车安全分析及设计之中,分别构建了基于质点模型的侧滑失效功能函数和考虑车辆侧倾作用的侧滑失效功能函数。分析了《公路工程技术标准》(JTG B01—2003)中规定的极限最小半径下发生车辆侧滑失效概率,并通过改变路面摩擦因数和车辆运行速度,对比分析了不同功能函数的差异,表明道路曲线设计忽略车辆的侧倾作用以及车型间差异会导致设计偏危险,一定条件下设计出的道路对大车行驶安全不利。同时提出了道路平曲线半径的可靠性设计方法,克服了确定性设计方法中对预期安全效果不明确的缺点。本研究采用的运行速度、路面摩擦因数等概率分布是基于现有研究成果,建议今后应进一步对设计变量的概率分布等开展系统研究,以提高可靠性分析准确性。在平曲线可靠性设计时,目标失效概率如何确定也是今后需要研究的问题。

参 考 文 献 :

References :

- [1] GLENNON J C, NEUMAN T R, LEISCH J E. Safety and operational considerations for design of rural highway curves[R]. Washington DC: FHWA, 1985.
- [2] CHOUEIRI E M, LAMM R, KLOECKNER J H, et al. Safety aspects of individual design elements and their interactions on two-lane highways: international perspective[J]. Transportation Research Record, 1994(1445): 34-46.
- [3] LAMM R, SMITH B L. Curvilinear alinement: an important issue for more consistent and safer road characteristic[J]. Transportation Research Record, 1994(1445): 12-21.
- [4] LEISCH J E, LEISCH J P. New concepts in design-speed application[J]. Transportation Research Record, 1977(631): 4-14.
- [5] ISMAIL K, SAYED T. Risk-based framework for accommodating uncertainty in highway geometric design [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, 36(5): 743-753.
- [6] NAVIN F P D. Safety factors for road design: can they be estimated?[J]. Transportation Research Record, 1990(1280): 181-189.
- [7] EASA S M. Reliability-based design of sight distance at rail-road grade crossings[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1994, 28(1): 1-15.
- [8] RICHL L, SAYED T. Evaluating the safety risk of narrow medians using reliability analysis[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(5): 366-375.
- [9] EL KHOURY J, HOBEIKA A G. Assessing the risk in the design of passing sight distances[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(6): 370-377.
- [10] SARHAN M, HASSAN Y. Three-dimensional, probabilistic highway design: sight distance application[J]. Transportation Research Record, 2008(2060): 10-18.
- [11] FELIPE E L. Reliability-based design for highway horizontal curves[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1996.
- [12] ZHENG Z R. Application of reliability theory to highway geometric design[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1997.
- [13] MCLEAN J R. Speeds on curves: side friction factor considerations[R]. Victoria: Australian Road Research Board, 1978.
- [14] FAMBRO D B, KOPPA R J, PICHA D L, et al. Driver braking performance in stopping sight distance situations[J]. Transportation Research Record, 2000(1701): 9-16.
- [15] ANDJUS V, MALETIN M. Speeds of cars on horizontal curves[J]. Transportation Research Record, 1998(1612): 42-47.
- [16] OLSON P L, CLEVELAND D E, FANCHER P S, et al. Parameters affecting stopping sight distance[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 1984.
- [17] LAMM R, PSARIANOS B, MAILAENDER T. Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook[M]. New York: McGraw-Hill Companies, 1999.