

基于侧向稳定性的圆曲线路段设计指标研究*

张 航^{1▲} 储泽宇¹ 吕能超² 段和柱¹

(1. 武汉理工大学交通学院 武汉 430063; 2. 武汉理工大学智能交通系统研究中心 武汉 430063)

摘 要: 车辆在附着系数较小的圆曲线路段转向时, 轮胎会处于非线性区内工作, 此时基于线性理论的侧向稳定性分析方法会产生较大误差。建立 6 自由度非线性车辆系统模型, 分析其处于非线性域与线性域下不同的特性状态, 得到不同车速、路面附着系数下使车辆系统处于临界状态的圆曲线路段半径、超高设计指标。对线性域与非线性域内的车辆系统分别采用基于线性理论的根轨迹法与基于非线性理论的相平面法分析侧向稳定性, 得到综合考虑 2 种状态下车辆临界失稳状态的圆曲线路段指标。结果表明, 车速为 60 km/h, 路面附着系数为 0.24, 超高小于 6% 时, 车辆发生侧向失稳时轮胎处于非线性域, 此时使用相平面法分析得到侧向失稳临界指标; 车速为 60 km/h, 路面附着系数为大于 0.4, 超高处于 4% 到 10% 之间时, 车辆发生侧向失稳时轮胎处于线性域, 此时使用根轨迹法分析得到侧向失稳临界指标。

关键词: 交通安全; 圆曲线路段; 侧向稳定性; 相平面法; 根轨迹法; 仿真

中图分类号: U412.34 **文献标识码:** A **doi:**10.3963/j.jssn.1674-4861.2021.02.004

Design Indices of Circular Curve Section Based on Lateral Stability

ZHANG Hang^{1▲} CHU Zeyu¹ LYU Nengchao² DUAN Hezhu¹

(1. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: When a vehicle turns in a circular curve section with a small adhesion coefficient, its tires work in a nonlinear zone, and the lateral stability analysis method based on the linear theory would generate large errors. This paper focuses on the different characteristics of the 6-DOF nonlinear vehicle system model in nonlinear and linear domains. Under different speed and road adhesion coefficients, the radius and superelevation design indices of the circular curve section with the critical state of the vehicle system are calculated. The root locus method based on the linear theory and the phase plane method based on the nonlinear theory are used to analyze the lateral stability of vehicle systems in linear and nonlinear domains, respectively. Then, a sectional index of the circular curve considering the critical instability state of vehicles in both states is obtained. The results show that when the vehicle speed is 60 km/h, with the road adhesion coefficient of 0.24, and the super-elevation less than 6%. The tires are in the nonlinear domain when the vehicle lateral instability occurs. Besides, a critical index of lateral instability is obtained using the phase plane method. When the vehicle speed is 60 km/h, the road adhesion coefficient is greater than 0.4, and the superelevation is between 4 and 10%. The tires are in the linear domain when the vehicle lateral instability occurs, and the root system is used. Then a critical index of lateral instability is obtained by trajectory analysis.

Keywords: traffic safety; circular curve section; lateral stability; phase plane method; root locus method; simulation

0 引 言

公路圆曲线路段是交通事故多发路段, 科学合

理的设置设计指标是保障行车安全的关键。国内外学者针对圆曲线路段设计指标进行了大量研究, 岳雷等^[1]以事故临界状态为限制建立安全模型, 得到弯

收稿日期: 2020-11-24

* 国家自然科学基金项目(52072290)资助

▲ 第一作者(通信作者)简介: 张 航(1967—), 博士, 副教授。研究方向: 道路规划与设计、路线设计理论与方法、道路交通安全设计与评价。E-mail: zhanghang1999@sina.com

道最小半径与超高、横向附着系数等参数的关系;孙川等^[2]以侧滑和侧翻稳定性为指标评价弯道路段的行驶安全;Bilgana等^[3]分析了侧向摩擦系数与车辆运行速度、减速度特性的关系,得到曲线段最小半径;Donnell等^[4]以横向力系数与路面摩擦系数来评价汽车侧向失稳。以上研究并未考虑到车辆处于低附着路面转向时,轮胎会处于非线性域内工作,此时车辆系统整体受力与其受力后产生的动力学响应并非呈现线性关系,基于线性理论的侧向稳定性分析方法会产生较大误差。

针对车辆处于非线性状态分析其侧向稳定性的情况,陈一锴等^[5]建立7自由度非线性车辆模型,进行仿真拟合圆曲线路段超高、半径、路面附着系数与车辆安全边界的关系;姜康等^[6]使用动力学仿真的方法计算不同圆曲线路段半径、超高、滑动附着系数下半挂汽车列车的安全车速;刘飞等^[7]针对车辆非线性特征,提出五特征值菱形稳定区域划分 β 相平面的方法,进行车辆稳定性判定;韦超毅等^[8]在线性域内基于根轨迹法,在非线性域内基于相平面法研究三轴车辆的操作稳定性。以上研究中,使用动力学仿真的方法考虑到轮胎非线性工作的影响,但对非线性域车辆系统的机理特性并未深入研究分析;相平面法与根轨迹法主要应用于车辆主动安全控制中,对设有超高的圆曲线路段需要对相关车辆系统模型进行修改。

本文针对上述情况,首先建立以车辆质心侧偏角和横摆角速度为系统变量的6自由度非线性车辆系统模型^[9]。其次,分析车辆系统处于非线性域与线性域下不同的特性状态,得出不同车速、路面附着系数下使车辆系统处于临界状态的圆曲线路段半径、超高值。再次,对线性域与非线性域内的车辆系统分别采用根轨迹法与相平面法分析侧向稳定性,综合得到临界失稳状态下的圆曲线路段指标。最后,使用Carsim仿真验证不同工况下上述圆曲线路段临界值的准确性。

建立的车辆动力学模型中,车辆的质心侧偏角 β 可以很好的反映车辆的轨迹保持能力^[10],用以作为侧滑失稳的评价指标;车辆的横摆角速度 γ 则反映了车辆的转向稳定性。本文主要研究对象是小汽车,质心较低,发生侧翻失效前就已经失去了轨迹保持能力,发生侧滑失效,故下文中并未考虑侧翻失稳。

1 车辆动力学模型

为了得到车辆的侧向稳定性与圆曲线设计指标

半径、路面横向倾角以及路面附着系数的关系。本文以车辆质心侧偏角和横摆角速度作为侧向稳定性的评价指标,对车辆侧向运动、横摆运动和4个车轮的旋转运动进行动力学分析^[11]。

建模前作出如下假设:忽略空气阻力;假设轮胎滚动阻力矩为定值,并且没有轮胎变形引起的回正力矩;车轮半径为定值;将每个车轮简化为具有转动惯量、只有转动的单自由度系统;4个车轮的机械特性完全相同,不考虑载荷的转移。

1.1 整车模型

车辆侧向运动过程中简化的受力分析见图1。

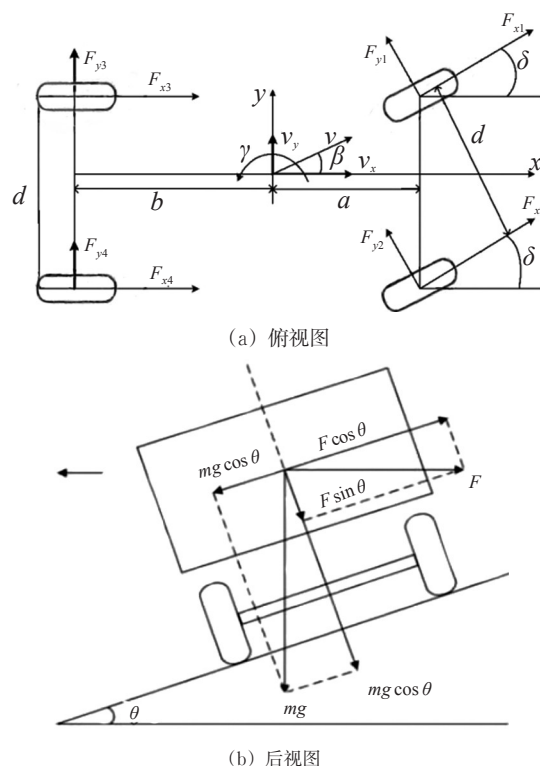


图1 整车受力分析图

Fig. 1 Force analysis of the whole vehicle

图1中: v_x 为纵向速度,km/h; v_y 为侧向速度,km/h; β 为质心侧偏角, $^\circ$; γ 为横摆角速度, $^\circ$ /s; δ 为前轮转角, $^\circ$; θ 为路面横向倾角, $^\circ$; F_{xi} 为车轮轮纵向力,N; F_{yi} 为车轮侧向力,N; a 为质心到前轴的距离,m; b 为质心到后轴的距离,m; d 为轮距,m。

分析车辆的侧向稳定性,主要考虑沿 y 轴的侧向运动方程以及绕 z 轴的横摆运动方程,经典的线性2自由度模型便是由车辆侧向运动及横摆运动方程构成,为了分析圆曲线路段设计指标超高对侧向稳定性的影响,对经典的线性2自由度模型进行修正,在车辆侧向运动方程中引入超高 θ ,见式(1)~(2)。

$$m(dv_y/dt + v_x\gamma) = (F_{x1} + F_{x2})\sin \delta + (F_{y1} + F_{y2})$$

$$\cos \delta + F_{y3} + F_{y4} + mg \sin \theta \quad (1)$$

$$I_z \frac{d\gamma}{dt} = (F_{y1} + F_{y2})a \cos \delta + (F_{y1} - F_{y2})\frac{d}{2} \sin \delta - (F_{y3} + F_{y4})b + (F_{x1} + F_{x2}) \times a \sin \delta - (F_{x1} - F_{x2})\frac{d}{2} \cos \delta - (F_{x3} - F_{x4})\frac{d}{2} \quad (2)$$

式中: I_z 为车辆绕 z 轴的转动惯量。

引入4轮运动方程,见式(3)。

$$J_w \frac{d\omega_i}{dt} = -r_w F_{xi} + T_{di} - T_{bi} \quad (3)$$

式中: J_w 为轮胎转动惯量, $\text{kN} \cdot \text{m}^2$; ω_i 为4个车轮转动角速度, $(^\circ)/\text{s}$; r_w 为车轮滚动半径, m ; T_{di} 为4个车轮的驱动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; T_{bi} 为4个车轮的制动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

Dugoff 轮胎模型中给出轮胎力 F_{xi} , F_{yi} 的计算表达式,其他相关整车参数见表1。

表1 整车参数
Tab. 1 Vehicle parameters

车辆参数	数值
整车质量/kg	1 416
转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1 523
质心-前轴距/m	1.016
质心-后轴距/m	1.562
轮距/m	1.534
轮胎半径/m	0.310

1.2 轮胎模型

采用Dugoff 轮胎模型^[12]来计算4个车轮的受力, Dugoff 轮胎模型的纵向轮胎力与侧向轮胎力计算公式为

$$F_{xi} = \frac{K_{\lambda_i} \lambda_i f(\zeta_i)}{1 + \lambda_i} \quad (4)$$

$$F_{yi} = \frac{K_{\alpha_i} \tan \alpha_i f(\zeta_i)}{1 + \lambda_i} \quad (5)$$

$$\zeta_i = \frac{\mu F_{zi} (1 + \lambda_i)}{2 \sqrt{(K_{\lambda_i} \lambda_i)^2 + (K_{\alpha_i} \tan \alpha_i)^2}} \quad (6)$$

$$f(\zeta_i) = \begin{cases} (2 - \zeta_i) \zeta_i, & \zeta_i < 1; \\ 1, & \zeta_i \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: K_{λ_i} , K_{α_i} 分别为轮胎的纵向刚度和侧偏刚度; λ_i 为轮胎滑移率; ζ_i 是描述轮胎状态的参数; μ 为路面附着系数; α_i 为轮胎侧偏角, $(^\circ)$ 。

1.3 车辆系统模型

将Dugoff 轮胎模型中的轮胎力 F_{yi} 计算式(5)代入式(1)~(3)中,即可得到表征6自由度车辆系统在

圆曲线路段侧向行驶状态的一阶微分方程组。

$$\begin{cases} \frac{d\beta}{dt} = f_1(\beta, \gamma) \\ \frac{d\gamma}{dt} = f_2(\beta, \gamma) \end{cases} \quad (8)$$

根据式(7)在Matlab/Simulink中建立车辆系统模型,以质心侧偏角 β 和横摆角速度 γ 为系统变量,其他相关参数包括超高 θ 、车速 v 、前轮转角 δ 、路面附着系数 μ ,整车参数见表1。

2 车辆系统工作域状态判定

车辆系统处于线性域还是处于非线性域取决于轮胎状态,当轮胎状态参数 $\zeta_i \geq 1$ 时,表示轮胎侧向力 F_{yi} 与轮胎侧偏角 α_i 呈线性关系; $\zeta_i < 1$ 时表示轮胎侧向力 F_{yi} 与轮胎侧偏角 α_i 呈非线性状态。

由于篇幅所限,以超高 θ 为2%、车速 v 为60 km/h、路面附着系数 μ 为0.3为例,将上述参数代入车辆系统模型,选取不同的前轮转角 δ ,计算得到对应的侧向轮胎力 F_{yi} ,见图2。

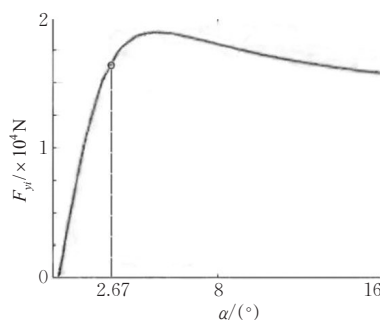


图2 轮胎侧向力

Fig. 2 Lateral force of tires

由图2可知,超高 θ 为4%、车速 v 为60 km/h、路面附着系数 μ 为0.4的条件下,当前轮转角 δ 小于2.67°时,侧向轮胎力呈线性变化,当前轮转角 δ 大于2.67°时,侧向轮胎力呈非线性变化。

在速度一定的情况下,车辆的前轮转角 δ 主要受转向半径和车辆型号参数的影响,车辆型号参数见表1,在Carsim中建立车辆模型并设置好仿真工况、车速取60 km/h,将道路模型中圆曲线路段的半径从200 m逐渐减小,得到其对应的前轮转角 δ ,见表2(未列出所有对应值)。

由此可以得到车速 v 为60 km/h、路面附着系数 μ 为0.4的条件下,使车辆系统保持在非线性域状态的圆曲线路段临界超高 θ 为4%,半径为63 m。

速度 v 取60 km/h,路面附着系数 μ 分别取不同气候下对应值0.24(冰雪)、0.4(潮湿)、0.6(干

燥)^[13],圆曲线路段临界指标值见表3。

表2 部分半径值对应的前轮转角

Tab. 2 Front wheel turning angle corresponding to some radius values

编号	半径 r/m	前轮转角 $\delta/(\circ)$
1	200	0.79
2	150	1.05
3	120	1.31
4	100	1.56
5	80	1.97
6	67	2.47
7	60	2.84
8	40	4.08

表3 车辆系统非线性域临界指标

Tab. 3 Critical index of the vehicle system in the nonlinear domain

车速/ (km/h)	路面附着系 数 μ	超高 $\theta / \%$	非线性域临界 半径 R_1/m
60	0.24	4	127
		6	109
		8	89
		10	76
	0.4	4	63
		6	54
		8	49
		10	42
	0.6	4	48
		6	45
		8	41
		10	37

3 车辆系统线性域稳定性分析

当车辆处于路面附着系数较大,半径较大的圆曲线路段转向时,轮胎侧偏角 α 较小,由式(7)可得轮胎状态参数 $\zeta_i \geq 1$,轮胎处于线性区域工作,此时基于线性理论的根轨迹法^[14]可以很好的分析车辆的侧向稳定性。

3.1 根轨迹法

对式(8)进行拉普拉斯变化^[15],将含参数 t 的式(8)变换为含参数为复数 s 的函数,得到关于质心侧偏角和横摆角速度的传递函数,求出该闭环传递函数的极值点,即为车辆系统的特征根 s_i , $s_i = -\omega_n \zeta + j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$,以实部 $-\omega_n \zeta$ 为横坐标,以 $j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ 为纵坐标,绘制表示车辆系统特征根变化的复平面,见图3。

改变系统相关参数(路面横向倾角 θ 、前轮转角 δ 、路面附着系数 μ)时,特征根在复平面上的位置随之改变,随位置改变在复平面上形成的轨迹即根轨迹,根轨迹上不同坐标对应了不同车辆系统参数

下的特征根,其到虚轴的距离大小也就代表了车辆系统的稳定程度,当与虚轴相交即表示车辆系统处于极限失稳状态。

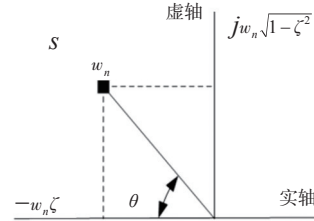


图3 复平面

Fig. 3 Complex plan

3.2 线性域临界失稳状态

为了分析圆曲线路段相关指标对车辆侧向稳定性的影响,分别以圆曲线半径 r (半径 r 与车辆前轮转角 δ 的对应关系见表2)、路面横向坡度 θ 、路面附着系数 μ 为变量,其余车辆系统参数为定值(见表1),代入车辆系统的传递函数中求解特征值,绘制随圆曲线半径、路面横向坡度、路面附着系数变化的根轨迹图。

3.2.1 线性域侧向失稳状态分析

取 $\mu = 0.4$, $v = 60$ km/h, $\theta = 6\%$,将半径 r 从 200 m 逐渐减小,按表2取对应的 δ 值,绘制根轨迹图,当取 $\mu = 0.4$, $v = 60$ km/h, $\theta = 6\%$, $r = 62$ m 时,根轨迹交于虚轴,车辆处于侧向极限稳定状态,见图4。

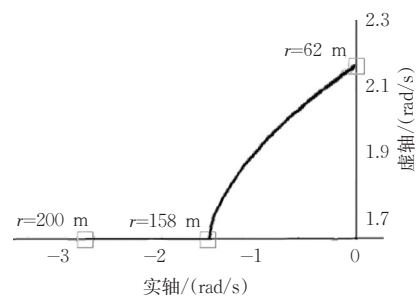


图4 随半径变化的根轨迹图

Fig. 4 Root locus with variable radius

为了分析超高对车辆侧向稳定性的影响,取 $\mu = 0.24$, $v = 60$ km/h, $r = 80$ m,路面横向倾角 θ 取值范围为 $10\% \sim 4\%$,绘制根轨迹图,当取 $\mu = 0.24$, $v = 60$ km/h, $\theta = 6\%$, $r = 80$ m 时,根轨迹交于虚轴,车辆处于侧向极限稳定状态,见图5。

为了分析路面附着系数 μ 对车辆侧向稳定性的影响,取 $\theta = 6\%$, $v = 60$ km/h, $r = 70$ m,路面附着系数 μ 取值范围为 $0.24 \sim 0.6$,绘制根轨迹图,当取 $\mu = 0.32$, $v = 60$ km/h, $\theta = 6\%$, $r = 70$ m 时,根轨迹交于虚轴,车辆处于侧向极限稳定状态,见图6。

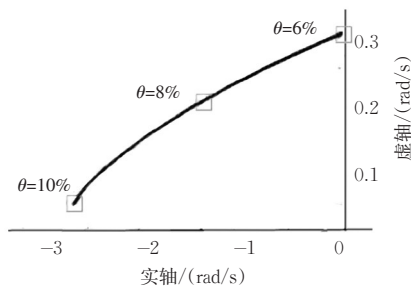


图5 随超高变化的根轨迹图

Fig. 5 Root locus varying with the cross slope of the road

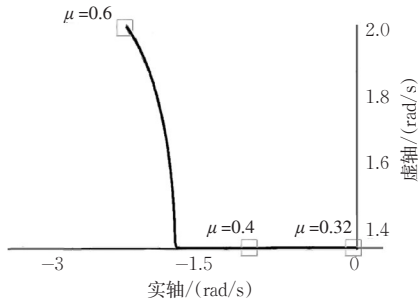


图6 随路面附着系数变化的根轨迹图

Fig. 6 Root locus with the variable adhesion coefficients of the road

3.2.2 线性域侧向失稳状态临界指标

按照上述根轨迹图分析的方法,得到更多的临界失稳状态对应的圆曲线路段超高、半径指标值,见表4。

表4 车辆系统侧向失稳状态临界指标

Tab. 4 Critical index of the laterally unstable state of a vehicle system

路面附着系数 μ	超高 θ /%	失稳状态临界半径 R_1 /m	非线性域临界半径 R_2 /m
0.24	4	86	127
	6	82	109
	8	77	89
	10	74	76
0.4	4	64	63
	6	62	54
	8	57	49
	10	55	42
0.6	4	52	48
	6	48	45
	8	45	41
	10	40	37

由表4可得,路面附着系数为0.4和0.6时,根轨迹法得到的失稳状态临界半径 R_1 大于非线性域临界半径 R_2 ,此时车辆系统处于线性域内,基于线性理论的根轨迹法更适于分析车辆侧向稳定性。路面附着系数为0.24时,处于非线性域内的车辆系统稳定性分析见下文。

4 车辆系统非线性域稳定性分析

当车辆系统处于低附着转向时,轮胎处于非线

性区域工作,此时基于非线性理论的相平面法^[16]可以很好的分析车辆的侧向稳定性。

4.1 相平面法

对于非线性系统,如根轨迹法一样的系统解析解很难求出,即车辆系统处于极限稳定状态时的具体值 β , γ 很难求出,而相平面法通过给定系统变量 β , γ 的初始值,代入车辆系统模型解出1组连续变化的 (β, γ) 值,初值代表的是车辆系统初始状态的 β , γ 的大小,代入初值求出的1组解 (β, γ) ,代表车辆系统在受到圆曲线路段相应参量约束后 β , γ 的变化过程,将该动态过程绘制成相平面图,即可通过相平面图分析非线性车辆系统的稳定性。

取 $\mu=0.4$, $v=60$ km/h, $\theta=4\%$, $\delta=1.56$,取系统初值 $\beta(0)$ 在 $(-0.5, 0.5)$ 间变化, $\gamma(0)$ 在 $(-1, 1)$ 间变化,迭代计算给定范围内的所有初值,以质心侧偏角 β 和横摆角速度 γ 为横、纵坐标,将得到的解 (β, γ) 绘制在坐标系上,即可得到 $(\beta \sim \gamma)$ 相平面图,每个初值对应的1组解在相平面上的轨迹即相轨迹,见图7。

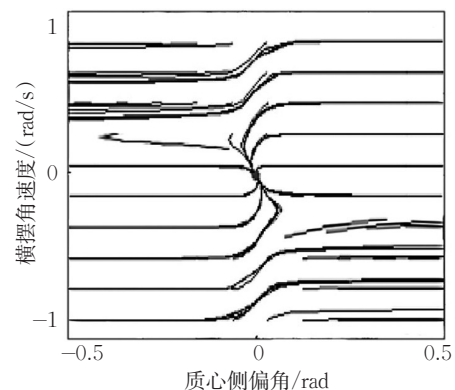
图7 $(\beta \sim \gamma)$ 相平面图1Fig. 7 $(\beta \sim \gamma)$ phase plan 1

图7中的平衡点 $(0, 0)$,表示车辆系统未出现任何侧向偏移与侧向偏移倾向,处于理想的稳定状态。图7中的相轨迹可以收敛到平衡点,即取 $\mu=0.4$, $v=60$ km/h, $\theta=6\%$, $\delta=1.56$ 时,车辆系统的质心侧偏角 β 和横摆角速度 γ 逐渐趋于稳定状态,系统处于侧向稳定状态^[17]。

4.2 非线性域临界失稳状态

分别以车辆前轮转角 δ 、路面横向坡度 θ 、路面附着系数 μ 为变量,其余车辆系统参数为定值,代入车辆系统模型式(8),给定不同初值 $(\beta(0), \gamma(0))$,求解对应的相轨迹,绘制随圆曲线半径、路面横向坡度、路面附着系数变化的相平面图。

4.2.1 非线性域侧向失稳状态分析

取 $\mu=0.4$, $v=60$ km/h, $\theta=6\%$,将半径 r 从200 m

逐渐减小,按表2取对应的 δ 值,绘制相平面图,在 $\mu=0.4$, $v=60$ km/h, $\theta=6\%$, $r=79$ m时,车辆系统

的质心侧偏角和横摆角速度逐渐难以收敛于平衡点(0,0),车辆处于侧向极限稳定状态,见图8。

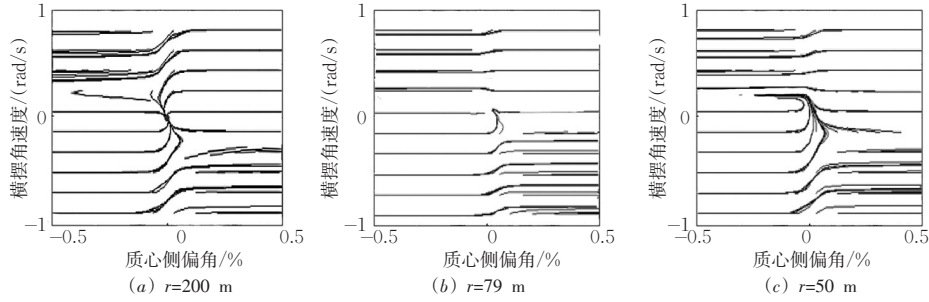


图8 $(\beta \sim \gamma)$ 相平面图2

Fig. 8 $(\beta \sim \gamma)$ Phase plan 2

为了分析超高对车辆侧向稳定性的影响,取 $\mu=0.4$, $v=60$ km/h, $r=80$ m,超高 θ 取值范围为10%~4%,绘制相平面图,当取 $\mu=0.4$, $v=60$ km/h,

$r=80$ m, $\theta=6\%$ 时,车辆系统的质心侧偏角和横摆角速度逐渐难以收敛于平衡点(0,0),车辆处于侧向极限稳定状态,见图9。

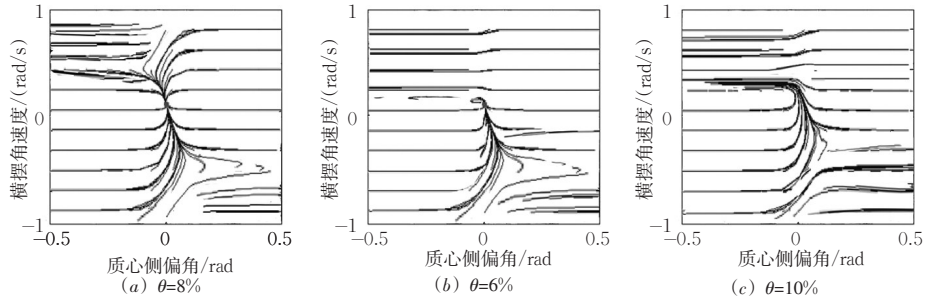


图9 $(\beta \sim \gamma)$ 相平面图3

Fig. 9 $(\beta \sim \gamma)$ Phase plan 3

为了分析超高对车辆侧向稳定性的影响,取 $\theta=6\%$, $v=60$ km/h, $r=80$ m,路面附着系数 μ 取值范围为0.24~0.6,绘制相平面图,当取 $\mu=0.39$, $v=60$ km/h,

$r=80$ m, $\theta=6\%$ 时,车辆系统的质心侧偏角和横摆角速度逐渐难以收敛于平衡点(0,0),车辆处于侧向极限稳定状态,见图10。

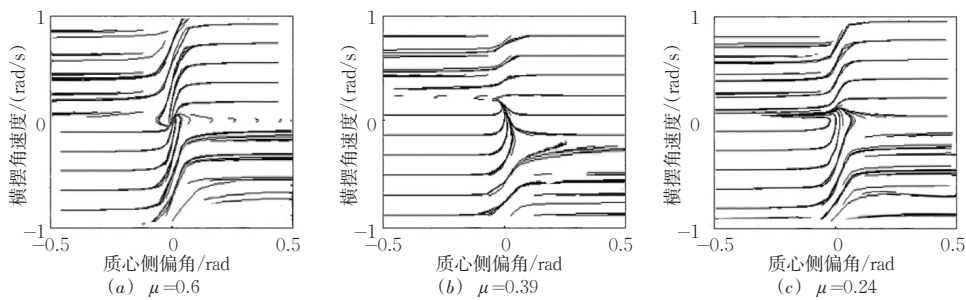


图10 $(\beta \sim \gamma)$ 相平面图4

Fig. 10 $(\beta \sim \gamma)$ Phase plan 4

4.2.2 非线性域侧向失稳状态临界指标

按照上述相平面法,得到更多的临界失稳状态对应的圆曲线路段指标值,见表5。

由表5可得,路面附着系数为0.24,超高为4%和6%时,相平面法得到的失稳状态临界半径 R_1 小于非线性域临界半径 R_l ,此时车辆系统处于非线性域内,基于非线性理论的相平面法更适于分析车辆侧向稳定性。综合根轨迹法分析得到的极限失稳

半径,得到极限失稳临界半径 R_4 ,见表6。

5 仿真验证

为了验证失稳状态临界指标的准确性,在Carsim/Simulink中建立驾驶员-车-道路闭环仿真模型^[18]进行仿真验证。驾驶员模型采用轨迹预瞄跟踪模型^[19],预瞄时间设置为2 s,使用模糊PID控制器^[20]进行补偿矫正;整车模型选用E型小汽车,具体参数

见表 1;道路模型按照山区二级沥青混凝土公路建立三维虚拟路面模型,道路线形选取圆形环道。

表 5 非线性域侧向失稳状态临界指标

Tab. 5 Critical index of lateral instability in the nonlinear domain

路面附着系数 μ	超高 $\theta / \%$	失稳状态临界半径 R_1/m	非线性域临界半径 R_2/m
0.24	4	103	127
	6	107	109
	8	116	89
	10	124	76
0.4	4	74	61
	6	71	54
	8	84	49
	10	92	42
0.6	4	68	48
	6	71	45
	8	82	41
	10	87	37

表 6 侧向稳定性分析准确性验证

Tab. 6 Verification of the accuracy of lateral stability analysis

路面附着系数 μ	超高 $\theta / \%$	仿真得到的极限失稳半径 R_1/m	相平面法极限失稳半径 R_2/m	根轨迹法极限失稳半径 R_3/m	侧向失稳临界半径 R_4/m
0.24	4	105	103	86	103
	6	97	107	82	107
	8	91	116	77	77
	10	85	124	74	74
0.4	4	67	74	64	64
	6	64	71	62	62
	8	61	84	57	57
	10	58	92	55	55
0.6	4	47	68	52	52
	6	45	71	48	48
	8	44	82	45	45
	10	42	87	40	40

超高为 8%和 10%时,根轨迹法与相平面法得到的结果与仿真结果差值均较大,分析可能的原因:上文车辆系统的非线性特征仅考虑轮胎的影响,车辆悬架等其他系统构件在路面附着系数较小,超高较大的情况下的响应特征并未考虑,有待后续研究。

2) 超高与路面附着系数较大时,车辆系统非线性域临界半径较小,根轨迹法分析得到的失稳临界半径处于线性域内,与仿真结果接近,相平面法分析得到的与仿真得到的差值较大,此时基于线性理论的根轨迹法稳定性分析结果准确性高于相平面法,反之使用相平面法更优。

3) 超高、路面附着系数、半径与车辆侧向稳定性呈正相关,但是上文的侧向稳定性考虑的是侧滑失稳与转向失稳这 2 种失稳模式,增大超高对侧翻失稳的影响并未考虑,有待后续研究。

6 结束语

所得到的曲线路段侧向失稳临界指标综合考虑

速度 v 取二级公路设计速度 60 km/h,选取圆形环道的超高 θ 分别为 4%,6%,8%,10%,路面附着系数 μ 分别取 0.24,0.4,0.6,以得到路面横向倾角、路面附着系数对车辆稳定性的影响,然后取半径初始为 200 m,逐渐减小半径值,观察 Carsim 中车辆的运动状态,出现车轮激转、车辆驶出预设车道这 2 种失稳状态时,对应的圆曲线半径即为仿真得到的失稳极限半径 R_1 ; R_2 为相平面法分析得到的极限失稳半径; R_3 即为根轨迹法分析得到的极限失稳半径; R_4 为综合上述 2 种方法的侧向失稳临界半径临界半径,具体数值见表 6。

由表 6 可以得到以下结论。

1) 综合 2 种方法得到的侧向失稳临界半径与仿真验证的结果相近,但是在路面附着系数为 0.24,

到了车辆系统侧向运动过程中的线性特性与非线性特性,为圆曲线路段设计指标选取提供了有益参考。

1) 建立车辆系统模型,在不同的路面附着系数、道路半径、超高下,对车辆系统中轮胎状态进行分析,得到圆曲线路段非线性域临界指标。

2) 采用基于线性理论的根轨迹法与基于非线性理论的相平面法对车辆系统进行稳定性分析,得到车辆系统侧向失稳临界状态对应的超高、半径值,根据圆曲线路段非线性域临界指标对上述 2 种方法得到的侧向失稳临界指标是否适用进行判定,得到综合的侧向失稳状态圆曲线路段临界指标。

3) 文中提出的稳定性分析方法充分考虑了小汽车侧向运动的非线性特征以及圆曲线路段的实际影响因素,可作为圆曲线设计指标选取的有益补充。

本文仅探讨了小汽车的侧向稳定性,对于质心较高的大客车、货车等,应结合车辆侧倾运动,建立能表征侧倾运动的车辆系统模型,从而准确分析质心较高汽车的侧向稳定性。

参考文献

References

- [1] 岳 雷,杜豫川,姚红云.基于行驶稳定性的山区公路弯道最小半径优化[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(5):204-210.
YUE Lei, DU Yuchuan, YAO Hongyun. Optimization of the minimum radius index of mountain road curve based on driving stability[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(5):204-210. (in Chinese)
- [2] 孙 川,吴超仲,褚端峰,等.基于车辆侧向稳定性分析的弯道行驶安全评价[J].交通信息与安全,2014,32(6):95-100.
SUN Chuan, WU Chaozhong, CHU Duanfeng, et al. Safety evaluation of driving on curves based on analysis of vehicle lateral stability[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2014, 32(6):95-100. (in Chinese)
- [3] BILGANA M, DRAZEN C. Evaluation of design consistency on horizontal curves for two-lane state roads in terms of vehicle path radius and speed[J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2016, 11(2):54-58.
- [4] DONNELL E, WOOD J, HIMES S, et al. Use of side friction in horizontal curve design: A margin of safety assessment [J]. Transportation Research Record, 2016(1):61-71.
- [5] 陈一锴,史 婷,石 琴,等.侧向安全边界理论在圆曲线路段限速中的应用[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(3):179-185.
CHEN Yikai, SHI Ting, SHI Qin, et al. Setting speed limit for horizontal circular curve of mountain highway using lateral safety boundary theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3):179-185. (in Chinese)
- [6] 姜 康,张梦雅,陈一锴.山区圆曲线路段半挂汽车列车行驶安全性分析[J].交通运输工程学报,2015,15(3):109-117.
JIANG Kang, ZHANG Mengya, CHEN Yikai. Driving safety analysis of semi-trailer train at circular curve section in mountain area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(3):109-117. (in Chinese)
- [7] 刘 飞,熊 璐,邓律华,等.基于相平面法的车辆行驶稳定性判定方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(11):63-70.
LIU Fei, XIONG Lu, DENG Lühua, et al. Vehicle stability criterion based on phase plane method[J]. Journal of South China University of Technology: (Natural Science Edition), 2014, 42(11):63-70. (in Chinese)
- [8] 韦超毅,谢美芝,盘朝奉,等.根轨迹法在汽车操纵稳定性研究中的应[J].农业机械学报,2007(9):19-22.
WEI Chaoyi, XIE Meizhi, PAN Chaofeng, et al. Integrated root locus method and stability factor to study handling stability of automobile[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007(9):19-22. (in Chinese)
- [9] 钱宇彬,肖凌云,王婉秋.双车道公路驾驶人-车辆-弯道(环境)系统模型[J].汽车技术,2019(8):32-38.
QIAN Yubin, XIAO Lingyun, WANG Wanqiu. Driver-Vehicle-Curve (Environment) system model in two-lane highway[J]. Automobile Technology, 2019(8):32-38. (in Chinese)
- [10] 金 辉,李世杰.基于极限车速的车辆稳定性控制研究[J].汽车工程,2018,40(1):48-56.
JIN Hui, LI Shijie. A research on vehicle stability control based on limited speed[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(1):48-56. (in Chinese)
- [11] 许 建,张 政,李 翔,等.独立驱动电动汽车横摆力矩的模糊控制算法[J].西安交通大学学报,2014,48(7):83-89.
XU Jian, ZHANG Zheng, LI Xiang, et al. A fuzzy control system for the direct yaw moment of 4WD electric vehicles[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(7):83-89. (in Chinese)
- [12] PACEJKA H B. Tire and vehicle dynamics[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [13] 张先勇.公路平曲线横向力系数的研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
ZHANG Xianyong. Research on the coefficient of lateral force of highway horizontal curve[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [14] OMORODION I I, OBINABO C E, EVBOGBAI M J E. Modeling, design and simulation of active suspension system root locus controller using automated tuning technique[J]. Mathematical Theory and Modeling, 2016, 6(1):52-56.
- [15] 张志达,李韶华,刘 星,等.全轮转向多轴车辆性能分析及侧翻前馈预警研究[J].北京理工大学学报,2018,38(1):142-146.
ZHANG Zhida, LI Shaohua, LIU Xing, et al. Performance analysis and rollover feed-forward warning for multi-axle vehicle with all wheel steering[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(1):142-146. (in Chinese)
- [16] 李 静,王子涵,王宣锋.基于相平面法的制动方向稳定性分析[J].汽车工程,2014,36(8):974-979.
LI Jing, WANG Zihan, WANG Xuanfeng. An analysis on braking directional stability based on phase-plane technique[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(8):974-979. (in Chinese)
- [17] VON V A, LU Haiyan, KIENCKE U. Detection of critical driving situations using phase plane method for vehicle lateral dynamics control by rear wheel steering[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2):5694-5699.
- [18] ZHANG Lizeng, GUAN Hsin, JIA Xin, et al. A study on the effect of driver model parameters on the performance of driver-vehicle-road closed-loop system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 470(1):604-608.
- [19] LI Haiqing, ZHAO Youqun, WANG Haoyu, et al. Design of an improved predictive LTR for rollover warning systems[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(10):3779-3791.
- [20] MENESES H, ARRIETA O, PADULA F, et al. PI/PID control design based on a fractional-order model for the process[J]. IFAC PapersOnLine, 2019, 52(1):976-981.