

基于碰撞动力学的高速公路线形与行驶安全研究^①

吴新烨^② 郭良谔 刘中华

(厦门大学建筑与土木工程学院 厦门 361005)

(福建省滨海土木工程数字仿真重点实验室 厦门 361005)

摘 要 为了减小不合理道路线形对车辆行驶安全性的影响,开展了道路线形与碰撞事故后的车辆行驶稳定性的研究。通过二维点碰撞动力学分析,建立车辆碰撞事故模型,推导车辆碰撞前后动力学参数的关系。通过建立碰撞后车路耦合动力学模型,以车辆侧翻为临界条件,推导圆曲线半径和超高的安全阈值关系式,提出基于碰撞后车辆行驶安全的道路线形设计建议方案。通过 PC-Crash 仿真模拟碰撞事故,验证了建议方案的合理性。

关键词 交通工程;安全行驶;碰撞动力学;高速公路;道路线形

0 引 言

随着我国经济快速发展,高速公路里程数稳步增长,汽车保有量逐年上升^[1]。与此同时,我国道路交通安全形势也比较严峻。据国家统计局公布的数据显示,2018 年我国道路交通事故发生次数超过 24 万;其中,涉及汽车的交通事故占了近 70%。而在高速公路上一旦发生事故,将导致道路拥堵甚至交通系统瘫痪,并造成人员伤亡和经济损失。

车辆间发生碰撞是交通事故中主要的发生类型。开展车辆碰撞力学的研究,探析车辆碰撞前后的运动情况,可为制订道路交通安全预防措施提供理论基础。Vera 等人^[2]建立了刚柔耦合的汽车碰撞模型,根据碰撞区域划分能量损失系数,计算碰撞前后的动力学参数。但是不同车辆的损失系数不同,分析模型不具有普适性。Vangi^[3]通过大量的实验并结合 Crash 软件,以车辆的形状因子、变形量、碰撞位置等因素的半经验方法评估车辆碰撞阶段的动能损失。曹弋等人^[4]提出基于经典力学与有限元的交通事故再现分析法,经典力学方法提供初始动力学参数,有限元分析方法实现碰撞过程与碰撞

变形更加微观细致的仿真再现。韩勇等人^[5]采用蒙特卡洛不确定性分析方法评估碰撞事故中电动二轮车驾驶人的头部损伤等级,但车速预测模型存在一定的误差。

道路线形的合理设计有助于提高车辆行驶安全性,通过线形设计提升对于提高道路的行车安全具有积极的意义。冯阳飞^[6]应用遗传算法以曲线半径和回旋参数作为组合参数进行基因编码,进行选择、交叉、变异的寻优计算。Hirpa 等人^[7]以土方成本和建设成本为相互矛盾的目标函数,提出同时优化水平和垂直路线的三维路线双目标优化方法,但是缺乏考量车辆的行驶安全性。Mishra 等人^[8]提出公路线形优化中考虑环境因素的经验模型,计算系统总排放量和环境对排放量的要求,使用成本最小化的优化设计标准。王博等人^[9]研究了基于蚁群算法的既有线平面多曲线整体整正优化设计方法,提高既有线路整正维修效率以及满足铁路快速发展对线路高平顺性的要求。此类数学模型分析方法未去探究车辆碰撞事故的过程,因而道路线形设计方案对于车辆行驶安全影响机理就无从考证。符锌砂等人^[10]从公路三维线形本质出发,采用空间曲率和

① 国家自然科学基金(11772277),福建省“2011 协同创新中心”(2016BJC019)和厦门市交通基础设施智能管养工程技术研究中心开放基金(TCIMI201803)资助项目。

② 男,1980 年生,博士,副教授;研究方向:道路交通安全,结构安全性及评价;联系人,E-mail: wuxinye@xmu.edu.cn。
(收稿日期:2022-02-16)

绕率对现有线形几何特性进行描述,研究表明,公路线形设计时平纵线形的叠加并不能保证组合线形在三维空间中的连续性。但该研究只建立了高速公路和双车道公路相邻路段平均曲率差、绕率差与事故率之间的关系模型,没能将车速与道路线形设计综合起来考虑。

美国于 20 世纪 40 年代率先提出公路的设计速度,通过设计速度来规定最小平曲线半径及其对应的超高、最大纵向坡度、停车视距等^[11]。但车辆行驶中,实际运行速度与设计速度有所差距。澳大利亚从事故预防的角度进行交通安全治理,对各路段进行运行速度预测,线形设计指标以运行速度为依据^[12]。1984 年,德国出版的公路线形设计规范提出以设计速度和第 85% 位车速 V_{85} 为设计依据,其中设有超高的最小圆曲线半径和最小停车视距采用 V_{85} 作为设计依据^[13]。

我国当前以设计速度理论为道路线形设计基础,线形设计指标极限取值可能导致道路设计不合理,缺少考量道路线形对碰撞事故后车辆行驶安全性的影响。因此,本文开展了基于交通事故碰撞动力学研究,提出道路线形设计建议方案,并通过仿真模拟验证方案的合理性,进而提高道路的通行效率,最终实现缓解道路交通事故压力。

1 一般二维点碰撞力学分析

1.1 碰撞模型建立

汽车的一般二维碰撞点碰撞,就是将碰撞区域视作点碰撞,分析车辆碰撞前后二维的平面运动和回转运动^[14]。图 1 为汽车一般二维点碰撞动力学分析模型,该模型适用于高速公路中发生的追尾碰撞和斜碰撞,相比于实验模拟的半经验方法计算

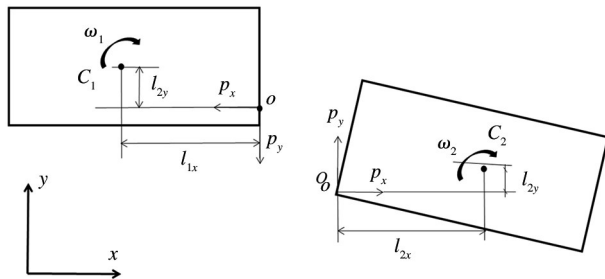


图 1 一般二维点碰撞动力学模型

碰撞前速度,不会受到实验条件的制约,分析模型具有普适性。

模型采用刚体运动学分析,车辆的运动分解为不同的碰撞阶段,其运动轨迹由质心位置随着时间而发生改变,由简化后的平面运动得到车辆的每一时刻所处位置。

假设事故车辆分别为车 1、车 2,两车质心分别为 C_1 、 C_2 ,以碰撞点处的切线方向为 x 轴,法线方向为 y 轴,建立平面直角坐标系,模型相关参数定义如表 1 所示。

表 1 一般二维点碰撞动力学模型相关参数

相关参数	车辆序号	
	车 1	车 2
质量 (kg)	m_1	m_2
碰撞前角速度 ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	ω_{10}	ω_{20}
碰撞后角速度 ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	ω_1	ω_2
碰撞前质心速度 x 轴投影 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	v_{10x}	v_{20x}
碰撞前质心速度 y 轴投影 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	v_{10y}	v_{20y}
碰撞点冲量 x 轴投影 ($\text{N} \cdot \text{s}$)	p_x	p_x
碰撞点冲量 y 轴投影 ($\text{N} \cdot \text{s}$)	p_y	p_y
绕质心的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	J_1	J_2
碰撞点相对质心 x 轴方向坐标	l_{1x}	l_{2x}
碰撞点相对质心 y 轴方向坐标	l_{1y}	l_{2y}

1.2 基本方程

将碰撞位置按照点碰撞来分析计算,建立碰撞阶段的基本方程,推导碰撞前未接触时的速度和碰撞后分离速度之间的关系。

以车 1 为研究对象,根据动能定理:

$$m_1(v_{1x} - v_{10x}) = -p_x \quad (1)$$

$$m_1(v_{1y} - v_{10y}) = -p_y \quad (2)$$

根据相对质心 C_1 的冲量矩定理,有:

$$J_1(\omega_1 - \omega_{10}) = -p_x l_{1y} + p_y l_{1x} \quad (3)$$

以车 2 为研究对象,根据动能定理,有:

$$m_2(v_{2x} - v_{20x}) = p_x \quad (4)$$

$$m_2(v_{2y} - v_{20y}) = p_y \quad (5)$$

根据相对质心 C_2 的冲量矩定理:

$$J_2(\omega_2 - \omega_{20}) = p_x l_{2y} - p_y l_{2x} \quad (6)$$

基本方程中有 8 个未知数,对一般二维点碰撞力学模型作出以下假定^[15]:

(1)弹性恢复条件。车辆发生碰撞后,车身恢复到本来形状的能力为

$$k = - \left(\frac{v_{rx}}{v_{r0x}} \right) \quad (7)$$

式中, k 表示在碰撞点 O 处的弹性恢复系数, v_{rx} 表示在碰撞点处 x 轴方向两车碰撞后相对速度, v_{r0x} 表示在碰撞点处 x 轴方向两车碰撞前相对速度。

(2)滑动摩擦条件。定义切线方向的相对滑动摩擦系数为切向与法向冲量的比值。 μ 表示在碰撞点 O 处相对滑动摩擦系数,可表示为

$$\mu = \frac{p_y}{p_x} \quad (8)$$

1.3 正推法计算碰撞后车辆速度

由基本方程和假定条件的8个方程、8个未知数,联立方程推导碰撞后车辆的速度和角速度与车辆参数、碰撞位置和滑动摩擦系数之间的关系,有

$$\begin{cases} v_{1x} = v_{10x} - \frac{1}{m_1 t} (1 + k) v_{r0x} \\ v_{1y} = v_{10y} - \frac{\mu}{m_1 t} (1 + k) v_{r0x} \\ \omega_1 = \omega_{10} - \frac{1}{J_1 t} (1 + k) (l_{1y} - \mu l_{1x}) v_{r0x} \\ v_{2x} = v_{20x} + \frac{1}{m_2 t} (1 + k) v_{r0x} \\ v_{2y} = v_{20y} + \frac{\mu}{m_2 t} (1 + k) v_{r0x} \\ \omega_2 = \omega_{20} - \frac{1}{J_2 t} (1 + k) (l_{2y} - \mu l_{2x}) v_{r0x} \end{cases} \quad (9)$$

式中:

$$v_{r0x} = (v_{10x} + \omega_{10} l_{1y}) - (v_{20x} + \omega_{20} l_{2y}) \quad (10)$$

$$t = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{1}{J_1} (l_{1y} - \mu l_{1x}) l_{1y} + \frac{1}{J_2} (l_{2y} - \mu l_{2x}) l_{2y} \quad (11)$$

其中,事故车辆质量、绕质心的转动惯量通过车辆物理参数获取;根据事故车辆的损坏情况,判断车辆的碰撞位置,以碰撞引起的变形较大位置为碰撞点,再由车辆几何尺寸计算碰撞点与质心的相对距离。

2 车辆碰撞后的运动特性与圆曲线线形指标关系的建立

圆曲线半径、超高的设置不仅影响车辆正常行

驶时的稳定性,同时影响碰撞后车辆行驶安全性。一般情况下,当车辆在直线路段正常行驶时,左右车轮各承担一半的垂直作用力。如果在圆曲线路段发生碰撞后制动,车辆受离心力和惯性力的横向作用,导致两侧轮胎垂直力发生转移,车辆容易发生侧翻。合理的超高设计,为车辆提供向心力,抵消部分离心力。

2.1 碰撞后车路耦合模型的构建

在设置超高的圆曲线路段上,建立沿路面中心线的行驶方向为 x 轴、路面的横断面方向为 y 轴、路面法线方向为 z 轴的空间直角坐标系。圆曲线路段的碰撞后车路耦合动力学分析模型如图2所示。路面与水平面的夹角为 θ ,路面超高即横向坡度 $i_h = \tan\theta$,平曲线半径为 R 。假设车辆碰撞后瞬时速度为 V ,驾驶员采取制动措施,车辆在碰撞点处沿着圆曲线路段的转弯半径行驶,直至停止;期间不发生二次碰撞,碰撞后阶段作匀减速运动;发生碰撞后车辆的制动系统不受破坏;车辆与路面持续接触,车轮存在垂直作用力。

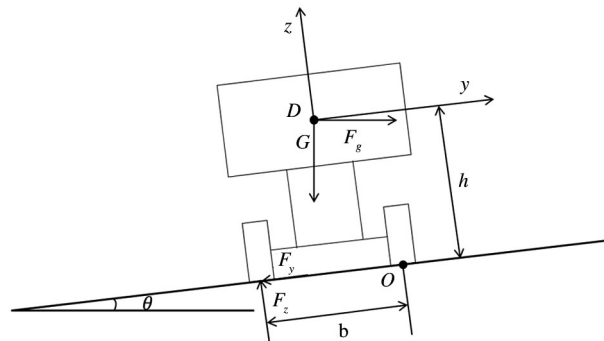


图2 设有超高的圆曲线路段碰撞后车辆力学分析模型

2.2 碰撞后车辆侧翻临界条件下的圆曲线最小半径的安全阈值

车辆发生侧翻的临界条件为汽车内侧车轮受到路面的支持力为0,此时车辆具有发生横向倾覆的危险。将碰撞后的整车视为刚体,不考虑车轮的侧偏角影响。

车辆在 z 轴方向和 y 轴方向受力为

$$F_z = mg \cos\theta + F_g \sin\theta \quad (12)$$

$$F_y = F_g \cos\theta - mg \sin\theta \quad (13)$$

车辆转弯时的离心力为

$$F_g = \frac{mv^2}{R} \quad (14)$$

式中, F_z 表示内侧车轮垂直力(N); F_y 表示内侧车轮横向力(N); F_g 表示离心力(N); m 表示整车的质量(kg); g 表示重力加速度, 取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; θ 表示横向坡度角($^\circ$); v 表示碰撞后车辆沿路面中心线切线方向的瞬时速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); R 表示圆曲线半径(m)。

在一般二维点碰撞分析模型中, 以碰撞点处的切线方向和法线方向建立平面直角坐标系, 所以碰撞后车辆沿路面中心线切线方向的瞬时速度为

$$v = v_{10x} - \frac{1}{m_1 t} (1 + k) v_{r0x} \quad (15)$$

则碰撞后车辆离心力为

$$F_g = \frac{m \left(v_{10x} - \frac{1}{m_1 t} (1 + k) v_{r0x} \right)^2}{R} \quad (16)$$

研究道路类型为设有超高的弯道, 研究对象为碰撞后车辆, 对车辆外侧车轮 O 取距:

$$\frac{b}{2} mg \cos \theta + h mg \sin \theta - h F_g \cos \theta + \frac{b}{2} F_g \sin \theta - F_z b = 0 \quad (17)$$

式中, v_{10x} 为碰撞前车辆的质心速度在碰撞点法线方向的投影($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v_{r0x} 为碰撞点法线方向两车碰撞前相对速度; b 为车辆的轮距(m); h 为车辆的质心高度(m)。

在设有超高的圆曲线路段中, 碰撞后车辆发生横向倾覆的临界条件为内侧车轮垂直力为 0, 则有:

$$\frac{b}{2} G + h G \tan \theta - h F_g + \frac{b}{2} F_g \tan \theta = 0 \quad (18)$$

$$F_g = \frac{bG + 2Ghi_h}{2h - bi_h} \quad (19)$$

联立式(16)、(19)得:

$$\frac{m \left(v_{10x} - \frac{1}{m_1 t} (1 + k) v_{r0x} \right)^2}{R} = \frac{bG + 2Ghi_h}{2h - bi_h} \quad (20)$$

得到碰撞后车辆侧翻临界条件下的圆曲线最小半径的安全阈值表达式:

$$R = \frac{m(2h - bi_h) \left(v_{10x} - \frac{1}{m_1 t} (1 + k) v_{r0x} \right)^2}{bG + 2Ghi_h} \quad (21)$$

碰撞后车辆横向稳定性与诸多因素有关, 主要

影响因素有车辆的参数、两车碰撞位置、圆曲线半径和超高。在我国公路工程技术标准中, 最小圆曲线半径的取值是根据车辆正常行驶下的横向安全性来确定的, 对于碰撞后车辆可能无法满足其横向安全性。如果在高速公路中车辆发生侧翻事故, 则会影响到高速公路的正常运行, 碰撞车辆造成严重的二次伤害, 甚至造成连环事故的恶劣后果。

2.3 横向荷载转移率

车辆发生碰撞事故后可能侧翻, 车辆的侧翻是最危险、后果最严重的交通事故之一。用于评价车辆发生侧翻的方法有: 横向荷载转移率(lateral-load transfer rate, LTR)法、侧翻时间预测的侧翻预警方法(time to rollover, TTR)、静态稳定系数(static stability factor, SSF)法等^[16]。本文选取横向荷载转移率来评价碰撞后车辆的侧翻安全性。在设有超高的弯道上发生车辆碰撞, 建立如图 3 所示的车辆准静态侧翻模型。

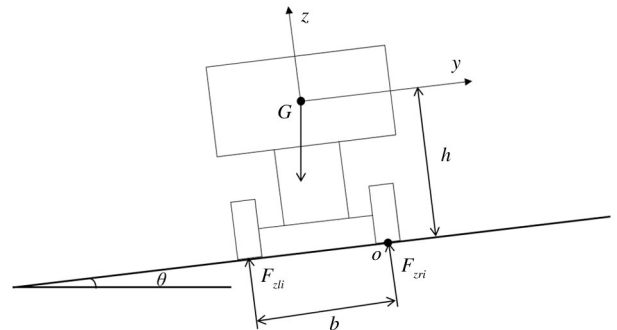


图 3 车辆侧翻准静态模型

车辆在弯道上行驶或者由于其他情况采取转向措施时, 车辆存在侧向加速度, 地面对车辆产生侧向力, 由于侧向力和离心力不在一个作用点上, 产生了使车辆向外侧发生侧翻的力矩。图 3 中, F_{zli} 、 F_{zri} 分别表示车辆内外侧车轮受到的垂直荷载, 横向荷载转移率(LTR)定义为内外车轮垂直荷载差与内外车轮垂直荷载之和的比值。

$$LTR = \frac{\sum F_{zli} - \sum F_{zri}}{\sum F_{zli} + \sum F_{zri}} \quad (22)$$

|LTR| 的取值范围为[0,1], 当|LTR| 计算值为 1 时, 车辆一侧车轮的垂直荷载为 0, 车辆处于侧翻的临界状态。

横向荷载转移率是反映车辆侧翻危险性的动力学指标,但在实际模拟计算中存在误差。根据 $|LTR|$ 的计算值,将车辆侧翻安全性划分为3个危险等级,如图4所示。

- (1)当 $0.8 < |LTR| < 1$ 时,车辆处于危险状态。
- (2)当 $0.6 < |LTR| \leq 0.8$ 时,车辆处于较危险状态。
- (3)当 $|LTR| \leq 0.6$ 时,车辆处于安全状态。

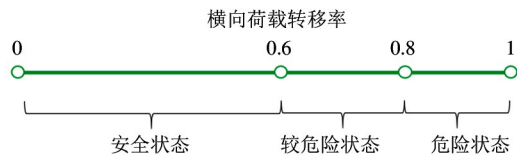


图4 车辆侧翻风险等级量化图

3 圆曲线路段的汽车碰撞事故仿真分析

3.1 汽车碰撞后侧翻临界的圆曲线最小半径

车辆模型选用一汽丰田卡罗拉车型,并根据一汽丰田的官方网站获取车辆参数。碰撞点相对质心位置是不确定的,车辆模型中车长为4.635 m,取碰撞点与质心相对距离(l_y)的步长为0.01 m,根据式(21)计算圆曲线最小半径的阈值,不同碰撞点的计算结果最小值就是最不利情形,见表2。其中,碰撞位置相对质心位置是可变化的,建立的车辆模型车长为4.635 m,取 l_y 的步长为0.01 m以计算车辆临界侧翻圆曲线半径最大值。

数值计算结果表明:设置相同超高,碰撞前行驶速度越大,车辆碰撞后需更为缓和的弯道避免汽车发生侧翻;碰撞前行驶速度相同情况下,设置的超高值越小,车辆碰撞后同样需更为缓和的弯道避免汽车发生侧翻。根据车辆碰撞动力学理论,计算侧翻临界条件下的圆曲线最小半径,符合圆曲线最小半径取值的基本原理。

对比圆曲线最小半径设计标准,汽车碰撞后侧翻临界条件下的圆曲线最小半径部分取值较为保守。比如碰撞前行驶速度为 $120\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,在设有超高为6%路段,最小半径计算值为607 m,比规范中710 m更小。半径过大会造成不必要的经济浪费,也会对道路设计规划、道路现场施工造成一定

程度的困扰。针对事故多发弯道路段的改扩建工程,可通过车辆碰撞后侧翻安全性分析来提升道路线形设计。

表2 汽车碰撞后侧翻临界条件下的圆曲线最小半径

圆曲线最小半径/m		碰撞前速度/(km·h ⁻¹)			
		120	100	80	60
超高/%	0	1063	738	472	265
	4	718	499	319	179
	6	607	422	270	152
	8	520	361	232	130
	10	451	313	200	113

3.2 圆曲线最小半径建议方案

在PC-Crash仿真平台建立车路耦合模型,汽车碰撞前行驶速度分别为 $120\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $100\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $80\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,对比数值计算结果和设计标准,在同一超高和车辆行驶速度下,取圆曲线半径的较大值。圆曲线路段的线形建议方案如表3所示。

表3 圆曲线最小半径建议方案

碰撞前速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	超高/%	圆曲线半径/m
120	4	718
	6	607
	8	520
	10	451
100	4	499
	6	422
	8	361
	10	313
80	4	319
	6	270
	8	232
	10	200

3.3 仿真流程

通过一般二维点碰撞动力学分析,以车辆不发生侧翻为临界条件,推导圆曲线最小半径的安全阈值。由于汽车碰撞事故的特殊性,如果开展汽车在规定圆曲线路段的碰撞实验,其实验设备、路况都不具备可操作性和可行性。因此,基于碰撞动力学的理论分析,通过PC-Crash软件仿真模拟,建立车路耦合模型,是验证圆曲线最小半径和超高建议方案

合理性的一个比较切实可行的评价方式。

首先,提出基于道路设计标准的圆曲线最小半径和超高的建议方案,建立相对应的道路模型。其次,根据车辆模型,设置车身尺寸、质量、轮胎参数、动力性能参数等,以道路设计速度为车辆的碰撞前

行驶速度,以数值计算中的最不利碰撞位置为碰撞点,在 PC-Crash 上建立车路耦合模型,进行汽车碰撞的仿真实验。最后,根据横向荷载转移率和横摆角速度评价车辆碰撞后的安全性。车辆碰撞事故的仿真模拟流程如图 5 所示。

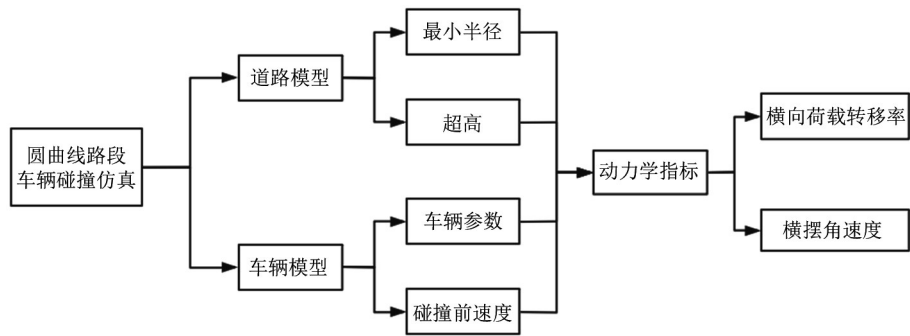


图 5 车辆碰撞仿真模拟流程图

3.3 结果分析

- (1) 碰撞前行驶速度 $V_{10} = 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 超高 i_h 为 4%、6%、8%、10% 对应的圆曲线最小半径取值分别为 718 m、607 m、520 m、451 m。
- (2) 碰撞前行驶速度 $V_{10} = 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 超高 i_h 为 4%、6%、8%、10%, 对应的圆曲线最小半径取值分别为 499 m、422 m、361 m、313 m。
- (3) 碰撞前行驶速度 $V_{10} = 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 超高 i_h 为 4%、6%、8%、10%, 对应的圆曲线最小半径取值分别为 319 m、270 m、232 m、200 m。

在 Pc-Crash 平台仿真模拟圆曲线路段建议方案下汽车发生碰撞,得到车辆碰撞后的横向荷载转移率和横摆角速度结果如图 6 ~ 图 11 所示。

由图 7、图 9 和图 11 可见,车辆在 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 行驶速度下,发生车辆碰

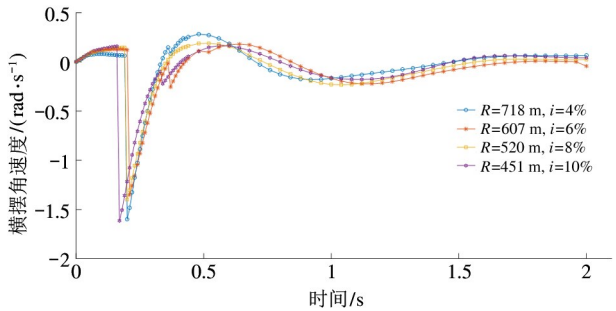


图 7 碰撞前行驶速度为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的横摆角速度仿真结果

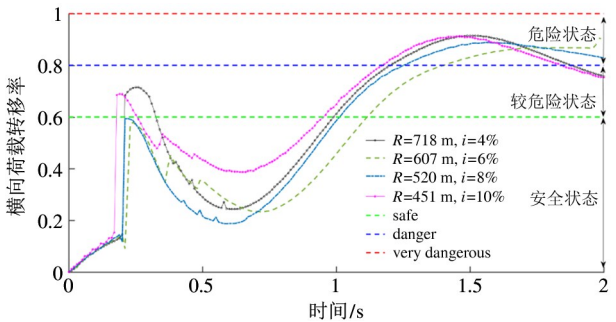


图 6 碰撞前行驶速度为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下横向荷载转移率仿真结果

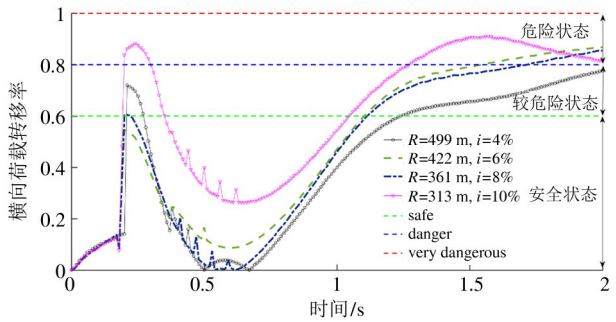


图 8 碰撞前行驶速度为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的横向荷载转移率仿真结果

撞事故。在碰撞阶段,车辆的横摆角速度发生突变,具有发生侧滑、甩尾漂移的危险。侧向失稳主要发生在两车碰撞阶段,此时车辆的横摆角速度急剧变化,车辆通过操作稳定性控制系统可实现对横摆角速度的控制。在碰撞后阶段,车辆的横摆角速度逐

渐趋于0,但也可能发生侧向失稳,驾驶员需要保持冷静并采取正确的控制措施以避免发生二次事故,尽可能地减小伤害。

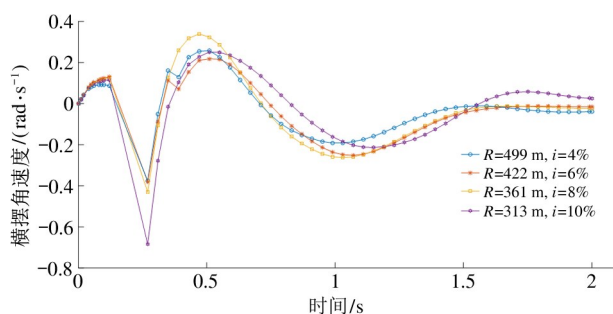


图9 碰撞前行驶速度为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的横摆角速度仿真结果

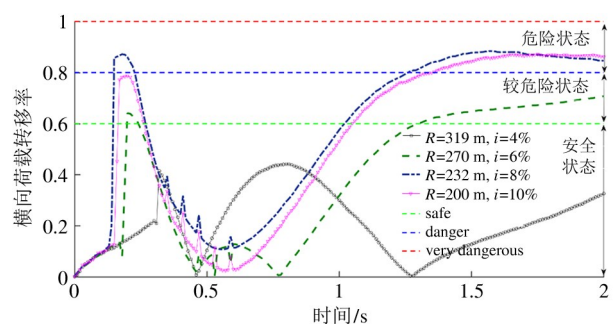


图10 碰撞前行驶速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的横向荷载转移率仿真结果

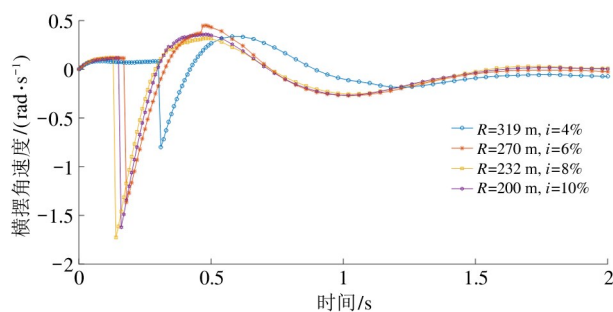


图11 碰撞前行驶速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的横摆角速度仿真结果

由图6、图8和图10可知,在车辆发生碰撞时(约 $t=0.2 \text{ s}$),车辆的横向荷载转移率急剧变化,横向荷载转移率处于极值状态,车辆发生侧翻的可能性基本处于较危险状态和危险状态。碰撞后车辆继续行进中横向荷载转移率又会上升至危险状态,3组仿真实验的横向荷载转移率变化情况相似。仿真

结果中,3种工况下的横向荷载转移率均小于1,事故车辆不会发生侧翻。但与此同时,横向荷载转移率也都接近于1,车辆处于发生侧翻的危险状态,与理论计算中侧翻临界下的最小半径基本相符。

因此,汽车发生碰撞时,建立圆曲线路段车路耦合安全动力学模型,提出的圆曲线最小半径和超高的建议方案满足汽车的侧翻安全性要求。

4 结 论

通过汽车的一般二维点碰撞动力学分析,建立了车辆碰撞事故后车路耦合动力学模型,得到碰撞后车辆侧翻临界条件下的圆曲线最小半径的安全阈值,并提出圆曲线最小半径的建议方案。通过 PC-Crash 对车辆在建议方案的圆曲线线形进行碰撞仿真模拟,验证了建议方案的合理性。本研究从车辆碰撞力学的角度提出道路线形设计建议方案,为道路线形设计的改善及提升提供参考依据,并对车辆行驶安全管理措施的制订具有较为重要的指导意义。

参考文献

- [1] 交通运输部. 2019年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2020-05-12(002)
- [2] VERA C, APARICIO F, SANROMAN J L. Theoretic model for the computer-analysis of vehicle collisions[J]. *Safety Science*, 1995, 19(2-3):179-189
- [3] VANGI D. Simplified method for evaluating energy loss in vehicle collisions[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2009, 41(3):633-641
- [4] 曹弋, 杨忠振, 左忠义. 基于经典力学与有限元的交通事故再现分析法[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(10):42-47
- [5] 韩勇, 徐甲芍, 石亮亮, 等. 电动二轮车驾驶人头部损伤再现不确定性方法[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1):172-180, 190
- [6] 冯阳飞. 基于遗传算法的道路平面线形组合设计参数优化[J]. 中外公路, 2020, 40(6):1-6
- [7] HIRPA D, HARE W, LUCET Y, et al. A bi-objective optimization framework for three-dimensional road alignment design[J]. *Transportation Research Part C*, 2016,

- 65(4): 61-78
- [8] MISHRA S, KANG M W, JHA M K. Empirical model with environmental considerations in highway alignment optimization [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2014, 20(4):1-12
- [9] 王博, 韩峰, 潘振兴, 等. 基于蚁群算法的既有铁路整正优化设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2452-2458
- [10] 符铎, 葛婷, 李海峰, 等. 基于公路三维线形几何特性的行车安全分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(9): 24-29
- [11] 刘子剑. 美国高速公路几何设计(上)[J]. 国外公路, 2001, 21(2):1-6
- [12] Austroad Publication Online. Guide to Road Design[R]. Sydney: Austroad Publication Online, 2008
- [13] 万国朝, 林正清. 德意志联邦共和国的公路线形设计规范[J]. 国外公路, 1988(6):2-11
- [14] 徐洪国, 刘宏飞. 道路交通事故分析与处理[M]. 北京:人民交通出版社, 2019
- [15] 姚文莉, 岳嵘. 有争议的碰撞恢复系数研究进展[J]. 振动与冲击, 2015, 34(19):43-48
- [16] 贺宜, 杨鑫炜, LU X Y, 等. 大型车辆侧翻预测和控制技术研究进展[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(4):1-9

Study on highway alignment and driving safety based on collision dynamics

WU Xinye, GUO Liangrong, LIU Zhonghua

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

(Fujian Key Laboratory of Digital Simulation for Coastal Civil Engineering, Xiamen 361005)

Abstract

In order to reduce the influence of unreasonable road alignment on vehicle driving safety, the research on road alignment and vehicle driving stability after collision accident is carried out. A collision model is established by two-dimensional point collision dynamics analysis, and the relationship of vehicle dynamic parameters before and after collision is deduced. The vehicle-road coupling dynamics model after the collision is established. Based on the vehicle rollover critical condition, the safety threshold is calculated through the relationship between circular curve radius and ultra-high. A road alignment design recommendation based on vehicle driving safety after the collision is proposed, and the rationality of the recommendation is verified by PC-Crash simulation.

Key words: traffic engineering, safe driving, collision dynamics, highway, road alignment