

文章编号:1671-1637(2015)03-0109-09

## 山区圆曲线路段半挂汽车列车行驶安全性分析

姜 康,张梦雅,陈一锴

(合肥工业大学 交通运输工程学院,安徽 合肥 230009)

**摘 要:**根据山区圆曲线路段的特点,分析了轮胎的受力和变形情况,建立了半挂汽车列车与山区圆曲线路段的耦合动力学模型。以牵引车和半挂车的轮胎侧偏角和折叠角为指标,运用提出的动力学仿真法分析了不同车速下圆曲线路段半径、超高、滑动附着系数对半挂汽车列车行驶安全性的影响,并与运行速度法和理论极限速度法的计算结果进行对比。仿真结果表明:当圆曲线半径为125 m,路面超高为2%,滑动附着系数分别为0.20、0.35、0.50、0.80时,运用动力学仿真法求得的临界安全车速分别为20、35、55、72  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,运用运行速度法求得的临界安全车速均为50  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,运用理论极限速度法求得的临界安全车速分别为18、20、25、30  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;当圆曲线半径为250 m,滑动附着系数为0.35,超高分别为0、2%、4%、6%时,运用动力学仿真法求得的临界安全车速分别为35、38、25、20  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,运用运行速度法求得的临界安全车速均为60  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,运用理论极限速度法求得的临界安全车速分别为30、31、32、33  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;当路面超高为6%,滑动附着系数为0.50,圆曲线半径分别为125、250、400、650 m时,运用动力学仿真法求得的临界安全车速分别为58、62、70、72  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,运用运行速度法求得的临界安全车速分别为50、60、68、71  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,运用理论极限速度法求得的临界安全车速分别为28、37、48、60  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。可见,提出的动力学仿真法考虑了车辆悬架动力学特性、天气与路面条件,可以准确描述半挂汽车列车的运行状态。

**关键词:**交通规划;山区公路;圆曲线路段;半挂汽车列车;行驶安全性

中图分类号:U491

文献标志码:A

## Driving safety analysis of semi-trailer train at circular curve section in mountain area

JIANG Kang, ZHANG Meng-ya, CHEN Yi-kai

(School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

**Abstract:** According to the characteristics of circular curve section for mountain area, the stress and deformation conditions of tire were analyzed, and the dynamics coupling model of semi-trailer train and the circular curve section in mountain area was established. The tire slip angles and articulation angle of tractor and semi-trailer were taken as indexes, the influences of the radius, superelevation and sliding adhesion coefficient of circular curve section on the driving safety of semi-trailer train under various speeds were analyzed by using the proposed dynamics simulation method, and the calculation results among running speed method, theoretic limit speed method and dynamics simulation method were compared. Simulation result shows that when the circular curve radius is 125 m, the superelevation is 2%, the sliding adhesion coefficients are 0.20, 0.35, 0.50 and 0.80 respectively, the critical safe speeds are 20, 35, 55, 72  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  by using

收稿日期:2015-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51308177);中国博士后科学基金项目(2013M530230);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130111120031)

作者简介:姜 康(1974-),男,山东文登人,合肥工业大学副教授,工学博士,从事道路运输规划研究。

dynamics simulation method, all the critical safe speeds are  $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  by using running speed method, and the critical safe speeds are 20, 35, 55,  $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  by using theoretic limit speed method respectively. When the circular curve radius is 250 m, the sliding adhesion coefficient is 0.35, the superelevation are 0, 2%, 4% and 6% respectively, the critical safe speeds are 35, 38, 25,  $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  by using dynamics simulation method respectively, all the critical safe speeds are  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  by using running speed method, and the critical safe speeds are 30, 31, 32,  $33 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  by using theoretic limit speed method respectively. When the superelevation is 6%, the sliding adhesion coefficient is 0.50, the circular curve radii are 125, 250, 400, 650 m respectively, the critical safe speeds are 58, 62, 70,  $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  by using dynamics simulation method respectively, the critical safe speeds are 50, 60, 68,  $71 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  by using running speed method respectively, and the critical safe speeds are 28, 37, 48,  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  by using theoretic limit speed method respectively. In the proposed dynamics simulation method, the vehicle suspension dynamics characteristic, weather and road conditions are considered, and the running state of semi-trailer train can be described accurately. 3 tabs, 23 figs, 18 refs.

**Key words:** traffic planning; mountain road; circular curve section; semi-trailer train; driving safety

**Author resume:** JIANG Kang(1974-), male, associate professor, PhD, +86-551-63831825, kangj@hfut.edu.cn.

## 0 引 言

半挂汽车列车在山区公路行驶时,由于道路线形复杂、驾驶人经常超速,在恶劣天气下容易导致车辆横向失稳,从而引发重、特大道路交通事故。在中国 2007~2013 年一次死亡 10 人以上的 179 起特大道路交通事故中,仅半挂汽车列车超速、失稳造成的事故就有 20 起,共死亡 294 人,受伤 252 人,分别占事故总数、死亡总人数和受伤总人数的 11%、11% 和 9%<sup>[1]</sup>,因此,国内外学者对于限速开展了一系列研究。Carlson 等构建了不同天气下交通流量较大路段的车辆跟驰特性与交通拥堵、交通事故的关系模型,基于启发式算法与最优控制策略提出可变限速方案<sup>[2-4]</sup>,然而中国多数山区公路交通流量较小,该方案的适用性有待进一步探讨;李松龄等综合考虑山区公路圆曲线路段的几何线形与路面条件,基于车辆动力学分析模型,提出以临界侧滑与转向速度作为车辆的动态限速方案<sup>[5]</sup>;Bowman 等根据美国联邦公路局开发的 GSRS 系统与美国典型半挂汽车列车的鼓式制动器升温模型,提出了半挂汽车列车在不同坡度、坡长路段的可变限速计算方法<sup>[6]</sup>;翟润平等分析了不同能见度、交通流量、道路线形、滑动附着系数等条件下的速度计算修正系数,为现实应用限速控制提供了理论依据<sup>[7]</sup>;孙会元等在对分析车速限制与行车安全距离关系的基础上,量化各种影响行驶安全因素下的视距值,通过控制视距来制

定安全限速值<sup>[8]</sup>;李长城等通过调查分析南友公路的车辆运行速度,提出了一种修正的限速确定方法,将一般路段的初始限速值定为某个限定速度,然后根据道路几何特征、地理环境特点、道路交通事故、用户需求和期望,对初始限速值进行修正<sup>[9]</sup>;何杰等在 ADAMS/Car 软件模块中分别模拟了晴天、雨天、雪天和结冰条件下的路面状况,通过单移线、阶跃转向仿真试验得出车辆的侧向位移、航向角与轮胎的侧向反力动态响应,分析了不同天气路面条件对行车安全的影响<sup>[10]</sup>;Young 等通过分析车辆侧翻响应结果的临界风速,得到了在特定等级风速下不同车型的具体计算结果<sup>[11]</sup>;彭佳等依据高速公路与山体的空间位置关系以及常见车型的风压中心高度,采用 Fluent 软件定量研究了山体坡度与山体周围高速公路路面环境(风速)的关系<sup>[12-13]</sup>;Ambroz 等基于路面参数的测试结果绘制出三维路面,并应用于 ADAMS、PC-Crash 和 3D-Drive 三种仿真软件<sup>[14]</sup>;何杰等将路面高程描述为平稳的 Gaussian 随机过程,基于不同等级路面的功率谱函数,分别采用白噪声法、谐波叠加法、PSD 离散采样法与离散时序法生成多种路面不平度随机激励单点、单轮辙多点与双轮辙多点时域模型<sup>[15-16]</sup>;彭佳等基于单点 FFT 路面时域模型,采用三角网格法构建了通用的三维路面模型,基于车辆行驶平顺性完成三维路面下的虚拟样机仿真<sup>[17]</sup>。

本文基于多体动力学软件 TruckSim 构建半挂汽

车列车与山区圆曲线路段的耦合动力学模型,总结不同车速下圆曲线路段超高与滑动附着系数对半挂汽车列车行驶安全性的影响机理,提出不同天气条件与圆曲线路段几何参数下的临界安全车速。

## 1 半挂汽车列车与山区圆曲线路段的耦合动力学模型

### 1.1 轮胎模型

考虑制动力和侧向力,假定只有轮胎胎面橡胶发生弹性变形,轮胎变形分析见图1<sup>[18]</sup>。

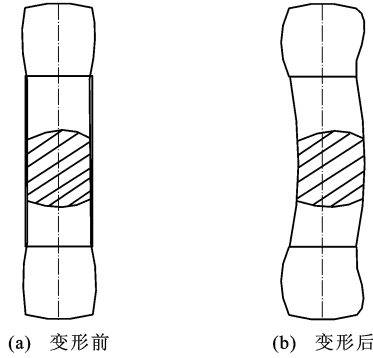


图1 轮胎变形分析

Fig.1 Tire deformation analysis

当半挂汽车列车发生侧滑时,轮胎发生侧向变形,轮胎胎面接地印迹的中心线与车轮中心面不再重合。在接地部的前端,轮胎表面与路面接触,胎面粘着于路面移动。通过对半挂汽车列车轮胎在圆曲线路段上转弯时的受力分析,得到2种情况下的轮胎侧向力与制动力关系模型。

#### 1.1.1 轮胎滑移域和粘着域构成接地面

在轮胎与地面的接触面长度范围内沿纵向可分为滑移域和粘着域。当由滑移域和粘着域构成接地面(条件1),有

$$F_x = -\frac{\lambda_1^2 b l^2 K_x s}{2(1-s)} - (1-3\lambda_1^2 + 2\lambda_1^3) \mu F_z \cos(\theta) \quad (1)$$

$$F_y = -\frac{\lambda_1^2 b l^2 K_y \tan(\alpha)}{2(1-s)} - (1-3\lambda_1^2 + 2\lambda_1^3) \mu F_z \sin(\theta) \quad (2)$$

$$\lambda_1 = 1 - \frac{\lambda_2 b l^2 K_x}{6 \mu F_z (1-s)} > 0$$

$$\lambda_2 = \sqrt{s^2 + \left(\frac{K_y}{K_x}\right)^2 \tan^2(\alpha)}$$

式中: $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 均为纲量为1的参数; $b$ 为轮胎宽度; $l$ 为轮胎接地长度; $K_x$ 为单位面积轮胎的纵向刚度; $\mu$ 为地面与轮胎胎面之间的摩擦因数; $F_z$ 为条件1下的轮胎垂向力; $s$ 为滑移率; $F_x$ 为条件1下的轮胎纵向力; $F_y$ 为条件1下的轮胎侧向力; $K_y$ 为单位面

积轮胎的侧向刚度; $\theta$ 为接地面的滑动方向角; $\alpha$ 为轮胎侧偏角。

设 $\theta$ 与滑动开始位置的方向一致,即

$$\tan(\theta) = \frac{K_y \tan(\alpha)}{K_x} \quad (3)$$

$$\cos(\theta) = \frac{s}{\lambda_2} \quad (4)$$

$$\sin(\theta) = \frac{K_y \tan(\alpha)}{K_x \lambda_2} \quad (5)$$

将式(4)、(5)分别代入(1)、(2)可得半挂汽车列车制动时轮胎相对应的纵向力和侧向力分别为

$$F_x = -\frac{\lambda_1^2 b l^2 K_x s}{2(1-s)} - \mu F_z \frac{s}{\lambda_2} (1-3\lambda_1^2 + 2\lambda_1^3) \quad (6)$$

$$F_y = -\frac{\lambda_1^2 b l^2 K_y \tan(\alpha)}{2(1-s)} - \mu F_z \frac{K_y \tan(\alpha)}{K_x \lambda_2} \cdot (1-3\lambda_1^2 + 2\lambda_1^3) \quad (7)$$

#### 1.1.2 轮胎滑移域构成接地面

当全部为轮胎滑移域构成接地面(条件2)时,有

$$F'_x = -\mu F_z \cos(\theta) \quad (8)$$

$$F'_y = -\mu F_z \sin(\theta) \quad (9)$$

将式(4)、(5)分别代入(8)、(9)可得半挂汽车列车制动时轮胎相对应的纵向力和侧向力分别为<sup>[19]</sup>

$$F'_x = -\frac{\mu F'_z}{\lambda_2} \quad (10)$$

$$F'_y = -\frac{\mu F'_z K_y \tan(\alpha)}{K_x \lambda_2} \quad (11)$$

式中: $F'_x$ 、 $F'_y$ 、 $F'_z$ 分别为条件2下轮胎的纵向力、侧偏力与垂向力。

构建的轮胎模型对整车的行驶特性有直接影响,需在TruckSim整车仿真软件中输入轮胎模型,以体现符合实际情况的半挂汽车列车的行驶特征。

### 1.2 半挂汽车列车模型

选取中国山区典型的半挂汽车列车(图2),半挂车、牵引车的主要参数分别见表1、2。



图2 半挂汽车列车

Fig.2 Semi-trailer train

在TruckSim仿真软件中,运用Lagrange乘数

表 1 半挂车主要参数

Tab. 1 Main parameters of semi-trailer

参数	数值	参数	数值
长度/m	13.00	各轴非簧载质量/kg	$6.90 \times 10^2$
宽度/m	2.55	满载时货物质量/kg	$1.83 \times 10^4$
高度/m	3.95	货物质心距地面高度/m	2.3
轮距/m	1.85	各轴钢板悬架刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$2.5 \times 10^5$
轴距/m	1.31	各轴减震器阻尼/ ( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$3.0 \times 10^4$
车轴单侧车轮 数量	2	单个轮胎刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$9.8 \times 10^5$
拖车簧载 质量/kg	$5.50 \times 10^3$	单个轮胎最大容许 载荷/N	$1.0 \times 10^6$

表 2 牵引车主要参数

Tab. 2 Main parameters of tractor

参数	数值	参数	数值
长度/m	3.900	转向轴非簧载质量/kg	$5.70 \times 10^2$
宽度/m	2.438	驱动轴非簧载质量/kg	$7.35 \times 10^2$
高度/m	3.200	转向轴钢板悬架刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$2.5 \times 10^5$
轮距/m	2.030	转向轴减震器阻尼/ ( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$1.5 \times 10^4$
轴距/m	3.900	驱动轴悬架刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$7.0 \times 10^5$
转向轴单侧车轮 数量	1	驱动轴悬架阻尼/ ( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$3.0 \times 10^4$
驱动轴单侧车轮 数量	2	单个轮胎刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$9.8 \times 10^5$
牵引车簧载 质量/kg	$4.46 \times 10^3$	单个轮胎最大容许 载荷/N	$1.0 \times 10^6$

法建立微分运动方程为

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial (T-V)}{\partial \dot{r}_j} \right] - \frac{\partial (T-V)}{\partial r_j} + \frac{\partial D}{\partial \dot{r}_j} = Q_j \quad (12)$$

式中： $r_j$  为第  $j$  个车轴的广义坐标； $\dot{r}_j$  为第  $j$  个车轴的广义速度； $Q_j$  为第  $j$  个车轴的广义力； $T$ 、 $V$ 、 $D$  分别为系统的动能、势能与耗散能； $t$  为转向时间。

### 1.3 山区圆曲线路段模型

依据中国山区公路的特点可知，影响山区公路行驶安全性的影响因素(图 3)是相互关联的。在圆曲线路段上，车辆的侧向抗滑稳定性决定了车辆的行驶安全稳定性，避免车辆在圆曲线超高路面上发生横向滑移，车速、潮湿程度与路面类型可以用来衡量侧向抗滑稳定性。根据在圆曲线路段上行驶时的车辆受力分析，要保证车辆在圆曲线上行驶时不出现滑移，应满足

$$\varphi \geq \frac{v^2}{127R} - \xi \quad (13)$$

式中： $\varphi$  为滑动附着系数； $v$  为车速； $R$  为圆曲线半

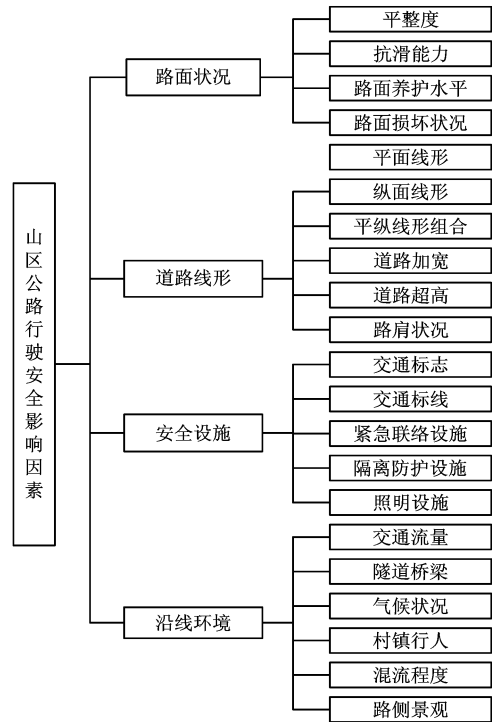


图 3 影响因素

Fig. 3 Influence factors

径； $\xi$  为超高横坡度。

本文选取山区公路圆曲线路段为研究对象，通过在 TruckSim 仿真软件中模拟不同的圆曲线半径、超高和滑动附着系数，分析道路几何线形、路面附着条件对行车安全性的影响。选取的 2 条仿真试验路分别见图 4、5，路段 1~4 均为有超高路段，对应的半径分别为 600、125、400、250 m。圆曲线是山区公路最常见且对行车安全密切相关的线形之一，对于制动良好的半挂汽车列车，圆曲线路段纵坡的

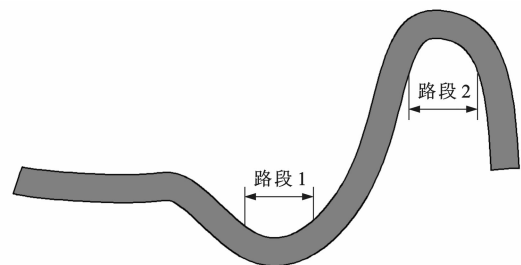


图 4 试验路 1

Fig. 4 Test road 1

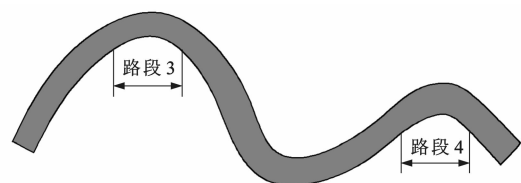


图 5 试验路 2

Fig. 5 Test road 2

大小对车辆的行驶稳定性并无直接影响,依据《公路工程技术标准》(JTG B01—2014),设计速度为  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的山区公路最大纵坡为  $3\%$ ,因此,本文的纵坡取  $3\%$ 。依据《公路路线设计规范》(JTG D20—2006),当设计速度分别为  $60$ 、 $80$ 、 $100$ 、 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,选择相应最小半径分别为  $125$ 、 $250$ 、 $400$ 、 $650 \text{ m}$  的圆曲线路段进行研究。当山区公路交通组成中大型车比率较高时,圆曲线路段最大超高应控制在  $6\%$ ,因此,本文的超高设置为  $0 \sim 6\%$ 。结冰、积雪、湿润和干燥路面下滑动附着系数的区间分别为  $[0.1, 0.3)$ 、 $[0.3, 0.4)$ 、 $[0.4, 0.6)$  和  $[0.6, 1.0)$ 。

## 2 路面附着条件与超高对半挂汽车列车行驶安全性的影响

半挂汽车列车的非线性强,横向稳定性差,掌握路面附着条件与超高对半挂汽车列车行驶安全性的影响规律,是分析圆曲线路段半挂汽车列车行驶安全性的基础。运用动力学仿真法分析影响规律的过程见图6。

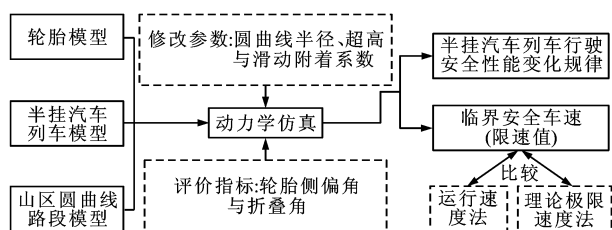


图6 分析过程

Fig. 6 Analysis process

### 2.1 半挂汽车列车行驶安全性评价指标

半挂汽车列车在高速转向时易出现侧滑、折叠与甩尾等横向失稳现象,本文选取半挂车第3轴左侧外轮侧偏角、牵引车第2轴左侧外轮侧偏角、牵引车与半挂车的折叠角作为行车安全评价指标,安全阈值分别为  $5^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 。

### 2.2 半挂汽车列车行驶安全性变化规律

当半挂汽车列车行驶在半径为  $125 \text{ m}$ 、超高为  $6\%$  的圆曲线路段时,取滑动附着系数分别为  $0.20$ 、 $0.35$ 、 $0.50$ 、 $0.80$  (分别对应结冰、积雪、湿润和干燥路面),车速对牵引车行驶安全性的影响规律分别见图7~10。在相同车速下,随着滑动附着系数的增加,牵引车轮胎侧偏角减小。在不同车速下,当滑动附着系数分别为  $0.20$ 、 $0.35$ 、 $0.50$  时,牵引车轮胎侧偏角突然增大时的车速分别为  $30$ 、 $40$ 、 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,而当滑动附着系数为  $0.80$  时,牵引车轮胎侧偏角保

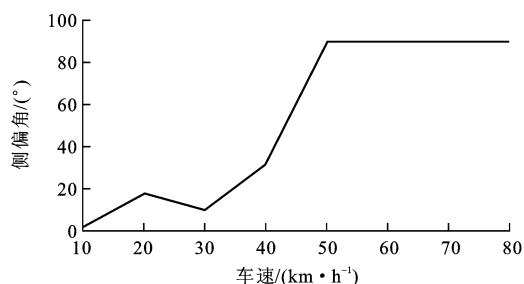


图7 滑动附着系数为0.20时的牵引车轮胎

侧偏角与车速的关系

Fig. 7 Relationship between tire slip angle of tractor and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.20

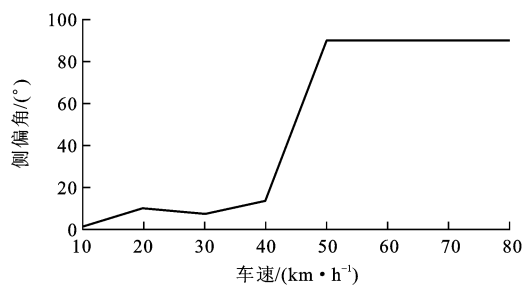


图8 滑动附着系数为0.35时的牵引车轮胎

侧偏角与车速的关系

Fig. 8 Relationship between tire slip angle of tractor and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.35

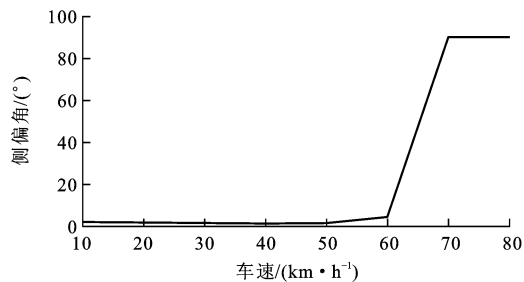


图9 滑动附着系数为0.50时的牵引车轮胎

侧偏角与车速的关系

Fig. 9 Relationship between tire slip angle of tractor and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.50

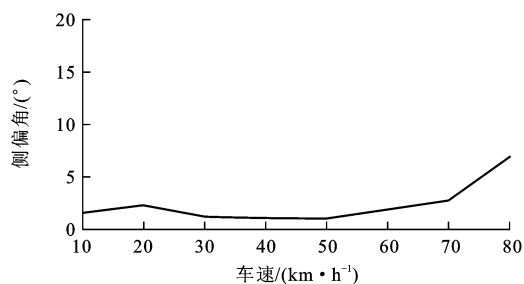


图10 滑动附着系数为0.80时的牵引车轮胎

侧偏角与车速的关系

Fig. 10 Relationship between tire slip angle of tractor and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.80

持稳定增加,不会发生突然增加的情况,且一直维持在安全阈值以下,此时的牵引车能安全通过弯道。牵引车轮胎侧偏角发生突然增大是因为此时半挂汽车列车发生了侧滑或侧翻现象,牵引车轮胎侧偏角超过了安全阈值。

在相同圆曲线路段上,不同车速下滑动附着系数对半挂车行驶安全性的影响规律分别见图 11~14。随着车速从  $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  增加到  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,半挂车轮胎侧偏角在结冰和积雪路面上的波动更加剧烈。在结冰路面上,半挂车轮胎侧偏角曲线斜率最大,增长幅度最剧烈。在积雪路面上,拖车轮胎侧偏角有 2 个快速增加的拐点,分别发生在车速为  $50, 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,这是由于半挂车载质量较大,转向时更容易受路面条件的影响。在湿润路面上,当车速小于  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,半挂车保持稳定安全的行驶,随着车速的增大,半挂车轮胎侧偏超过安全阈值发生侧滑。在干燥路面上,当车速一直在  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  以内时,半挂车轮胎侧偏角一直小于安全阈值。

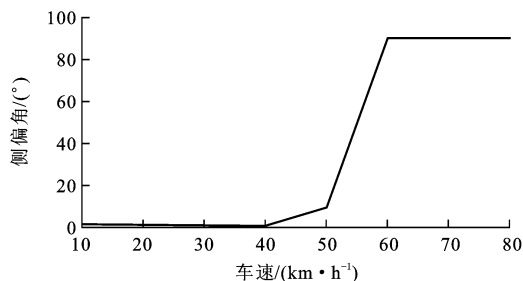


图 11 滑动附着系数为 0.20 时的半挂车轮胎侧偏角与车速的关系

Fig. 11 Relationship between tire slip angle of semi-trailer and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.20

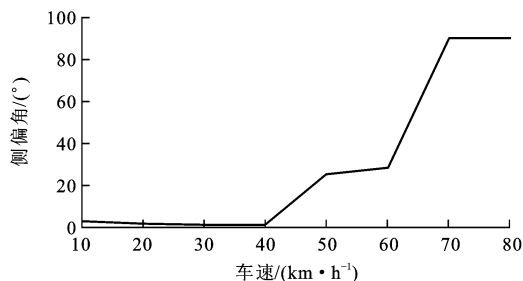


图 12 滑动附着系数为 0.35 时的半挂车轮胎侧偏角与车速的关系

Fig. 12 Relationship between tire slip angle of semi-trailer and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.35

在相同圆曲线路段上,不同车速下滑动附着系数对半挂汽车列车整车行驶安全性和稳定性的影响规律分别见图 15~18。在不同滑动附着系数下,折叠角的变化与牵引车轮胎侧偏角的变化相近,当滑

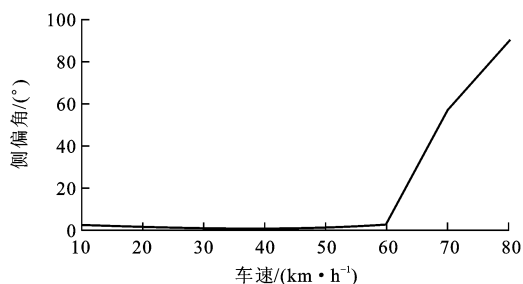


图 13 滑动附着系数为 0.50 时的半挂车轮胎侧偏角与车速的关系

Fig. 13 Relationship between tire slip angle of semi-trailer and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.50

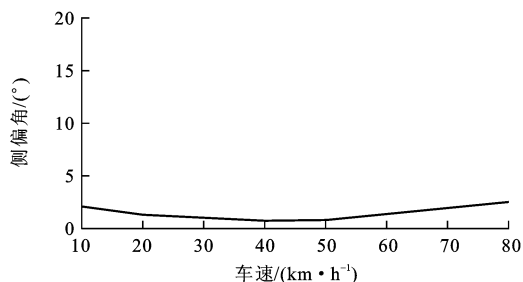


图 14 滑动附着系数为 0.80 时的半挂车轮胎侧偏角与车速的关系

Fig. 14 Relationship between tire slip angle of semi-trailer and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.8

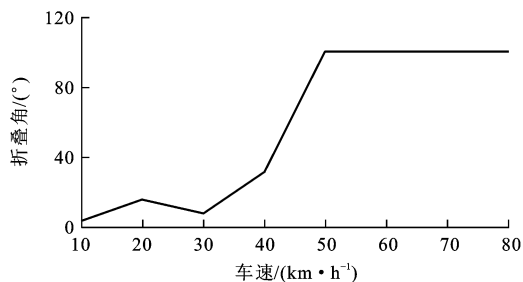


图 15 滑动附着系数为 0.20 时的折叠角与车速的关系

Fig. 15 Relationship between articulation angle and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.20

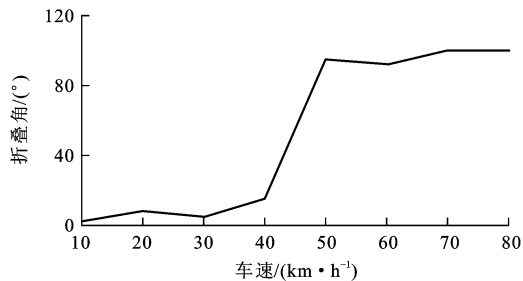


图 16 滑动附着系数为 0.35 时的折叠角与车速的关系

Fig. 16 Relationship between articulation angle and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.35

动附着系数分别为 0.20、0.35、0.50 时,折叠角的增长趋势趋于平缓,波动减少。在干燥路面上,折叠角始终保持在安全阈值以下,半挂汽车列车在转弯时

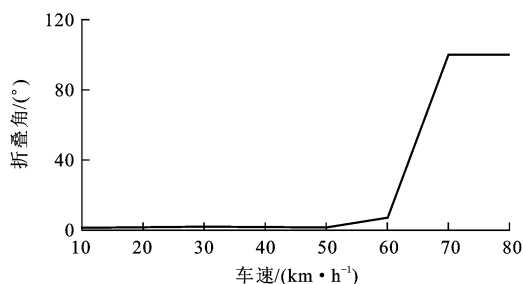


图17 滑动附着系数为0.50时的折叠角与车速的关系

Fig. 17 Relationship between articulation angle and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.50

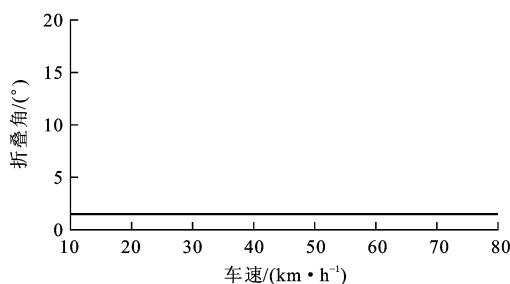


图18 滑动附着系数为0.80时的折叠角与车速的关系

Fig. 18 Relationship between articulation angle and vehicle speed when sliding adhesion coefficient is 0.80

的行驶安全性较高。

由以上分析可知,滑动附着系数对于半挂汽车列车弯道行驶安全影响显著。取牵引车轮侧偏角、半挂车轮胎侧偏角与折叠角中任一指标首先达到安全阈值时的车速为临界安全车速。当圆曲线半径为125 m、超高为0时,滑动附着系数与临界安全车速的关系见图19。当滑动附着系数分别由0.1增加到0.3、0.6增加到0.8时,临界安全车速分别增加了13、6 km·h<sup>-1</sup>。当滑动附着系数由0.3增加至0.5时,临界安全车速增加了29 km·h<sup>-1</sup>。可见,当滑动附着系数较低或较高时,滑动附着系数的变化对临界安全车速的影响较小,而当滑动附着系数为0.3~0.6时(对应积雪或降雨),其变化对临界安全车速的影响较大。

当圆曲线半径、滑动附着系数固定时,可得到超高与临界安全车速的关系,见图19。由于路面积雪或结冰时,公路管理部门往往加以清除或封闭公路,所以以同样对行车安全影响较大的降雨天气为例,研究超高对临界安全车速的影响。从图20可知,超高从0增加到6%时,临界安全车速增加了6 km·h<sup>-1</sup>,且变化率较稳定。

### 3 三种限速方法的比较

目前,国内外广泛使用的2种限速方法为运行

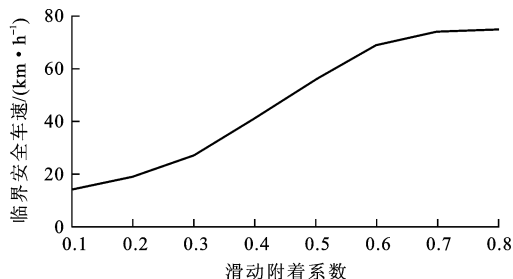


图19 滑动附着系数与临界安全车速的关系曲线

Fig. 19 Relationship of sliding adhesion coefficient and critical safe speed

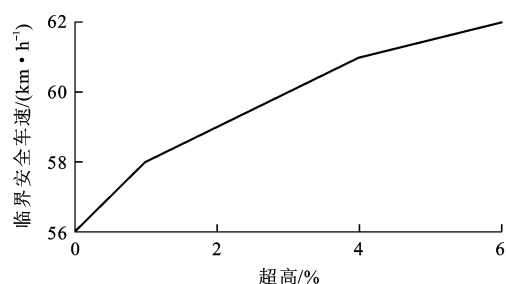


图20 超高与临界安全车速的关系

Fig. 20 Relationship between superelevation and critical safe speed

速度法和理论极限速度法,将本文所采用的基于TruckSim软件的动力学仿真法与这2种方法进行比较。运行速度法是对在典型公路上行驶车辆进行实际行驶速度观测,然后通过统计、分析与总结数据分布规律,最终得到第85位行驶速度,并回归其计算模型。依据《公路路线设计规范》(JTG D20—2006),对最常用的线性组合进行了研究,在运行速度法中,有<sup>[2]</sup>

$$v_m = -9.432 + 0.963v_0 + 1.522\ln(R) \quad (14)$$

式中: $v_m$ 为圆曲线中部的车速,即为整个圆曲线路段的限速; $v_0$ 为初始车速。

应用运行速度法与本文中的山区圆曲线路段半径数据,计算结果见表3。

表3 运行速度法的计算结果

Tab. 3 Calculation result by using running speed method

设计速度/(km·h <sup>-1</sup> )	60	80	100	120
初始速度/(km·h <sup>-1</sup> )	55	65	75	75
临界安全车速/(km·h <sup>-1</sup> )	50	61	71	72
半径/m	125	250	400	650

理论极限速度法通过分析超高路面车辆转弯时的受力情况,建立车辆2自由度动力学模型<sup>[5]</sup>,整理得到车速与圆曲线半径和超高的关系模型,以此得到半挂汽车列车临界安全速度模型为

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{B_1 \sin(\gamma) - B_2 \sin(\delta - \gamma)}{R \{ B - [\sin(\gamma) + \sin(\delta - \gamma)] h \varphi \}} \cdot$$

$$[Rg \cos(\xi) + \sin(\xi v_1)^2] \varphi = \left\{ B[v_1^2 \cos(\xi) - Rg \sin(\xi)] - \varphi [Rg \cos(\xi) + v_1^2 \sin(\xi)] \cdot \right.$$

$$\left. [B_2 \cos(\delta - \gamma) + B_1 \cos(\gamma)] \right\} \cdot$$

$$\left\{ R \varphi h [\cos(\gamma) - \cos(\delta - \gamma)] \right\}^{-1} \quad (15)$$

式中:  $v_1$  为理论极限速度法求得的车速;  $B$  为轴距;  $B_1$ 、 $B_2$  分别为车辆质心至前、后轴的距离;  $\delta$  为前轴中点速度方向与纵轴夹角;  $\gamma$  为车辆质心的速度方向与纵轴夹角;  $h$  为质心高度。

在不同天气条件下,当采用不同的限速方法时,半挂汽车列车的临界安全车速不同。当圆曲线半径为 125 m,路面超高为 2% 时,3 种方法下的临界安全车速比较见图 21。当圆曲线半径为 250 m,滑动附着系数为 0.35(积雪路面)时,3 种方法下的临界安全车速比较见图 22。当路面超高为 6%,滑动附着系数为 0.50(湿润路面)时,3 种方法下的临界安全车速比较见图 23。

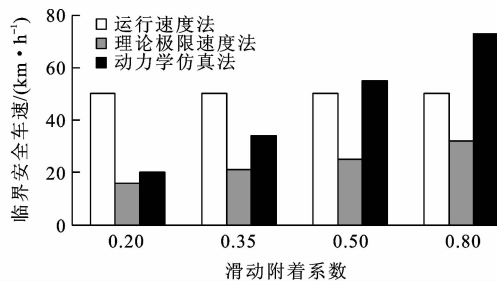


图 21 不同滑动附着系数下 3 种方法临界安全车速的比较  
Fig. 21 Comparison of critical safe speeds for three methods under different sliding adhesion coefficients

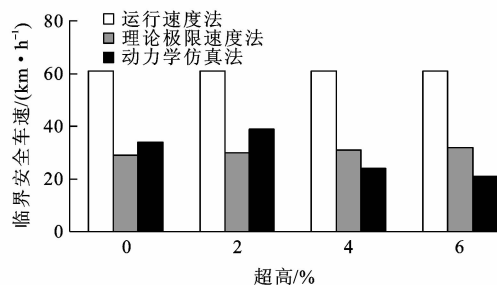


图 22 不同超高下 3 种方法临界安全车速的比较  
Fig. 22 Comparison of critical safe speeds for three methods under different superelevations

在运行速度法中,临界安全车速是指一个中等水平的驾驶人可以在良好的天气条件下,根据道路路线和交通量安全驾驶的最高速度。从图 21 看出,在结冰和积雪路面上,运行速度法的临界安全车速

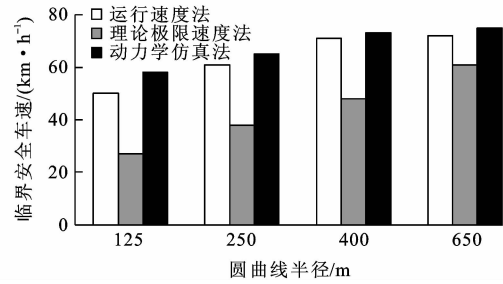


图 23 不同圆曲线半径下 3 种方法临界安全车速的比较  
Fig. 23 Comparison of critical safe speeds for three methods under different circular curve radii

分别比动力学仿真法高 60% 和 32%。当圆曲线半径为 250 m,路面条件为结冰或积雪时,运行速度法的临界安全车速为  $61 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,实际上,在此速度下半挂汽车列车发生折叠,因此,  $61 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的临界安全车速偏大。当出现降雨时,运行速度法的临界安全车速与动力学仿真法的临界安全车速相当,后者比前者大 10%。当在干燥路面上,运行速度法的临界安全车速过于保守,比动力学仿真法的临界安全车速小 46%。可见运行速度法的临界安全车速仅可以保证在干燥和潮湿路面上车辆的稳定性。

当在积雪路面上,超高分别为 0%、2%、4% 和 6% 时,运行速度法的临界安全车速比动力学仿真法的临界安全车速分别大 56%、64%、39% 和 34%,随着超高的增加,临界安全车速的差距减小,说明运行速度法没有考虑路面条件对临界安全车速的影响,设置超高能够增强半挂汽车列车的行驶安全性。当在湿润路面上,圆曲线半径分别为 150、250、400、650 m 时,运行速度法的临界安全车速比动力学仿真法的临界安全车速分别小 16%、7%、3%、4%。当在结冰、积雪路面上,理论极限速度法的临界安全车速与动力学仿真法的临界安全车速相当。但对于降雨路面、干燥路面,理论极限速度法过于保守,分别比动力学仿真法的临界安全车速小 55% 和 56%,这主要是因为理论极限速度法以完全侧滑作为车辆失稳的边界条件,而且这种方法下的轮胎横向非线性特性过于简单化。当超高分别为 0%、2% 时,理论极限速度法的临界安全车速比动力学仿真法的临界安全车速分别小 15%、23%,当超高分别为 4% 和 6% 时,理论极限速度法的临界安全车速比动力学仿真法的临界安全车速高 29% 和 52%。随着圆曲线半径的减小,2 种方法临界安全车速的比率逐渐增大,这是因为随着圆曲线半径的减小和滑动附着系数的增大,半挂汽车列车发生侧翻的倾向逐渐增加,而悬架系统对于抑制车辆侧翻具有积极作用,因此,未考虑悬架



动力学特性的理论极限速度法临界安全车速较低。

## 4 结 语

本文基于半挂汽车列车的力学参数,采用 TruckSim 仿真软件构建车辆多体动力学模型,分析了圆曲线路段超高与滑动附着系数对半挂汽车列车行驶安全性的影响,对不同天气状况下3种限速方法进行了对比分析。对于半挂汽车列车的行驶安全性,本文仅考虑了路面特性的变化,未考虑交通流量与驾驶人对于车辆安全行驶的影响,因此,对交通流量和驾驶人对行驶安全的影响有待进一步研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 公安部交通管理局. 2013 年道路交通事故统计年报[R]. 北京:公安部交通管理局,2014.  
Traffic Management Bureau of Public Security Ministry. Road traffic accident statistics annual report in 2013[R]. Beijing: Traffic Management Bureau of Public Security Ministry, 2014. (in Chinese)
- [2] CARLSON R C, PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIOU M. Comparison of local feedback controllers for the mainstream traffic flow on freeways using variable speed limits[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 2013, 17(4): 268-281.
- [3] LUO Zhen-ke, LIU Yue, GUO Chen. Operational characteristics of mixed traffic flow under bi-direction environment using cellular automaton[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(6): 383-392.
- [4] WEI Da-li, LIU Hong-chao, CHEN Feng. Analysis of asymmetric driving behavior using a self-learning approach[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 47(1): 1-14.
- [5] 李松龄,裴玉龙. 冰雪路面公路平曲线路段限速仿真[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(10): 66-69.  
LI Song-ling, PEI Yu-long. Speed limit simulation on highway horizontal curve section under the condition of ice and snow pavement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(10): 66-69. (in Chinese)
- [6] BOWMAN B L, COLEMAN J A. Grade severity rating system[J]. ITE Journal, 1990, 60(7): 19-24.
- [7] 翟润平,周彤梅,安荷萍. 高速公路限速控制研究[J]. 公安大学学报:自然科学版, 2001(6): 34-38.  
ZHAI Run-ping, ZHOU Tong-mei, AN He-ping. The speed control research for highway[J]. Journal of Chinese People's Public Security University: Natural Science, 2001(6): 34-38. (in Chinese)
- [8] 孙会元,孙 黎,韦干全. 公路车速限制与行车安全视距关系研究[J]. 公路, 2002(2): 72-74.  
SUN Hui-yuan, SUN Li, WEI Gan-quan. Study on the relationship between highway speed limit and traffic safety distance[J]. Highway, 2002(2): 72-74. (in Chinese)
- [9] 李长城,张高强,刘兴旺. 南友公路限速方法研究[J]. 公路, 2009(10): 141-146.  
LI Chang-cheng, ZHANG Gao-qiang, LIU Xing-wang. A study on speed limits setting for Nanning-Youyiguan Expressway[J]. Highway, 2009(10): 141-146. (in Chinese)
- [10] 何 杰,刘 霞,陈一锴,等. 恶劣天气路面条件对行车安全的影响[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(1): 58-63.  
HE Jie, LIU Xia, CHEN Yi-kai, et al. Influence of road condition on running safety in atrocious weather[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(1): 58-63. (in Chinese)
- [11] YOUNG R K, LIESMAN J. Estimating the relationship between measured wind speed and overturning truck crashes using a binary logit model[J]. Accident Analysis and Prevention, 2007, 39(3): 574-580.
- [12] 彭 佳,何 杰,赵池航,等. 山体坡度对山体周围高速公路路面风速及行车安全的影响[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2010, 40(1): 201-206.  
PENG Jia, HE Jie, ZHAO Chi-hang, et al. Influence of terrain slope of hilly freeway on surface wind velocity and driving safety[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(1): 201-206. (in Chinese)
- [13] WEI Da-li, LIU Hong-chao. An adaptive-margin support vector regression for short-term traffic flow forecast[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 2013, 17(4): 317-327.
- [14] AMBROZ M, ŠUŠTERŠIĆ G, PREBIL I. Creating models of road sections and their use in driving dynamics simulations[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(10): 911-924.
- [15] 何 杰,彭 佳,李旭宏,等. 路面随机激励时域模型特性的仿真研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2009, 33(5): 919-922.  
HE Jie, PENG Jia, LI Xu-hong, et al. Study on the characteristics of domain models of road irregularity excitation by simulation[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2009, 33(5): 919-922. (in Chinese)
- [16] YOHIMURA T. A semi-active suspension of passenger cars using fuzzy reasoning and the field testing[J]. International Journal of Vehicle Design, 1998, 19(2): 150-166.
- [17] 彭 佳,何 杰,丛 颖,等. 三维随机路面通用模型建立与仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 1-4, 25.  
PENG Jia, HE Jie, CONG Ying, et al. Modeling and simulation of general 3D virtual stochastic road model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 1-4, 25. (in Chinese)
- [18] 郭孔辉,卢 荡. 动态载荷下轮胎侧偏特性的理论及试验研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(1): 89-92.  
GUO Kong-hui, LU Dang. The theoretical and experimental study on tire cornering properties under dynamic vertical load[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(1): 89-92. (in Chinese)