

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.240201

不利线形匝道车辆行驶侧向稳定性仿真分析

祁文洋, 王作杰

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 基于Trucksim的模拟场景搭建, 研究车辆在苏州独墅湖南隧道NE匝道上行驶的车辆侧向行驶稳定性。构建车辆整体动力学模型、道路模型、驾驶人控制策略模型, 分析装载质量、附着系数对弯道安全速度的影响。结果表明: 为确保车辆在匝道(弯道)路段安全行驶, 道路路面的附着系数不宜低于0.7, 匝道(弯道)安全速度的阈值与车辆装载质量呈负相关。以期探究在最不利车辆工况下的行驶稳定及安全问题, 对不利线形工况下的设计与分析提供参考。

关键词: Trucksim; 侧向稳定性; 装载质量; 附着系数

中图分类号: U416.343

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0054-04

Simulation and Analysis on Lateral Stability of Vehicles on Adverse Linear Ramp

QI Wenyang, WANG Zuojie

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Based on the simulation scenario of TruckSim, the lateral stability of vehicles driving on the NE ramp of Dushu Hunan Tunnel in Suzhou is studied. The overall vehicle dynamics model, road model and driver control strategy model are built to analyze the influence of load quality and adhesion coefficient on the safe speed of the curve. The results show that the adhesion coefficient of the pavement should not be lower than 0.7 in order to ensure the safe driving of vehicles on ramp (curve) sections. The threshold of on-ramp (curve) safe speed is negatively correlated with vehicle loading mass. In order to explore the driving stability and safety problems under the most unfavorable vehicle driving conditions, the reference is provided for the design and analysis under the unfavorable linear driving conditions.

Keywords: Trucksim; lateral stability; loading mass; adhesion coefficient

0 引言

Trucksim软件是由MSC公司开发的汽车动态模拟仿真软件, 主要适用于大客车、轻型货车、重型半挂车、重型卡车、多轴军用汽车等, 是一种集成建模、分析和动态模拟的汽车整车动力学仿真软件^[1]。黄通等^[2]建立了包括整车参数、动力传动与制动系统、车桥与悬挂系统、转向系统和轮胎系统的五轴特种车辆动力学仿真试验模型。张娜等^[3]创建了Trucksim和Matlab联合的D级三维路面重构方法, 用此方法在Trucksim中对所研究路面进行了重构。刘彦平^[4]搭建了Car/Trucksim仿真平台, 包括车辆及道

路模型、驾驶模型, 分析表明长大下坡弯道处超高对车辆横向稳定性影响最强、路面附着系数影响最弱。潘兵宏等^[5]建立了不同附着系数下车辆转弯安全车速的侧滑模型, 为弯道上车辆行驶速度管控提供了参考。从装载货物重心高度、重心横纵向偏移、公路弯道转弯半径、弯道超高等方面对弯道路段安全速度进行了仿真研究^[6]。可见已有相关研究采用了Trucksim软件来构建车辆和路面模型, 继而分析了车路耦合作用行为, 但目前来说相关研究较少。

苏州独墅湖南隧道接线(NE匝道)受接线条件及建设用地限制, 纵坡为5%左右, 纵坡底部接一处 $R=175\text{ m}$ 的圆曲线半径, 设计速度为50 km/h。车辆在较大纵坡上行驶时运行速度较高, 而进入匝道后为一个较小半径的弯道, 需降低运行速度, 这对于行车安全是不利的, 车辆存在发生失稳侧滑和倾覆的可能行, 由此该线形组合属于对行车安全不利的线形。为此基于Trucksim仿真, 建立车辆整体及道路

收稿日期: 2024-02-27

基金项目: 苏州市住房和城乡建设局科研项目(苏住建科[2018]7号)

作者简介: 祁文洋(1985—), 男, 工学博士, 高级工程师, 从道路交通科研工作。

模型模型,分析卡车在NE匝道线形工况下车辆行驶的侧向稳定性以及卡车装载率、路面附着系数的影响。以期探究在最不利车辆工况下的行驶稳定及安全,对不利线形工况下的设计与分析提供参考。

1 仿真模型搭建

1.1 车辆整体模型

道路上发生侧翻事故的车辆多为特大型货车。考虑最不利工况,选取特大型货车中的典型车型开展研究,即车辆模型采用6轴半挂车,包括6×4的牵引车和3轴的挂车。建立的车辆整体仿真模型包括悬架系统、装载模型和车体模型,选择相对应的牵引车和挂车后依次分别建立模型。牵引车及挂车模型的基本参数如表1所示,并以此参数制作车辆整体动力学模型。

表1 牵引车、挂车基本参数

名称	牵引车	挂车
簧载质量/kg	4 455	5 500
车体侧倾惯量 $I_{xx}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2 283.9	8 997
车体俯仰惯量 $I_{yy}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	35 402.8	149 981
车体横摆惯量 $I_{zz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	34 802.6	150 000
车体对 X、Y 轴惯性积 $I_{xy}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0	0
车体对 X、Z 轴惯性积 $I_{xz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 626	0
车体对 Z、Y 轴惯性积 $I_{yz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0	0

车辆的货运载重,采用有规则的箱型装载进行建模。Trucksim 软件中卡车整体模型创建完成后,形成卡车整体外观图形,如图1所示。



图1 车辆建模外观

1.2 道路模型

地下快速路的匝道路段,其平面几何元素包括平直线和圆曲线,如表2所列。由于测试侧向稳定性时向左转弯和向右转弯具有对称性,在此建立NE匝道的镜像道路模型(见图2),图2中右侧为输入的表2中设计参数,左侧为软件生成的直线、圆曲线和缓和曲线线形外观。

车辆行驶速度设定为固定速度,通过变化该速度以分析车辆安全速度临界值。在弯道路段采用开

表2 平、纵线形设计参数

路段	长度/m	终点桩号	线形	坡度/%
NE	25	NE K0+430	直线段	-5
	60	NE K0+490	缓和曲线	-5
	20	NE K0+510	圆曲线 $R=175 \text{ m}$	-5
	115	NE K0+625	圆曲线 $R=175 \text{ m}$	-2
	60	NE K0+685	缓和曲线	-2
	32	NE K0+717	直线段	-2

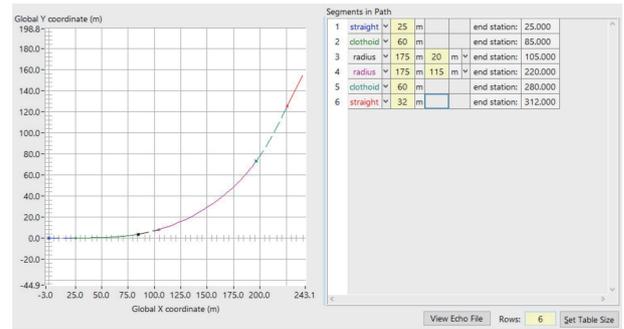


图2 NE匝道线形建立

环控制策略,自动换挡且不考虑制动,转向过程中车辆跟随道路中心线行驶。

1.3 车辆安全速度分析

车辆在弯道路段行驶时,车辆受到离心力的作用,通过力矩平衡分析判定车辆的行驶稳定性。如力矩不平衡,则车辆发生失稳倾覆。车辆围绕中心的力矩平衡如式1所示。

$$m a_y \cos \beta h_g - 0.5 m a_y \sin \beta - m g h_g \sin \beta + N_i B - 0.5 m g B \cos \beta = 0 \quad (1)$$

式中: m 为车辆质量, kg ; a_y 为车辆侧向加速度, m/s^2 ; β 为弯道超高, $^\circ$; N_i 内侧车轮支撑力, N ; B 为内外车轮轮距, m 。

此外,车辆与路面之间的附着力需大于车辆所承受的离心力,否则车辆则发生附着性不足导致的失稳侧滑。车辆承受的力学可用可按垂直(竖向)和平行车辆(横向)的方向进行分解,再根据受力平衡可得出式(2)、式(3)。

$$m a_y \cos \beta = F_{f_i} + F_{f_o} + m g \sin \beta \quad (2)$$

$$m a \cos \beta + m a_y \sin \beta = N_i + N_o \quad (3)$$

式中: F_{f_i} 为车辆内侧轮胎对路面施加的横向摩擦力, N ; F_{f_o} 为车辆外侧轮胎对路面施加的横向摩擦力, N ; N_i 为内侧车轮支撑力, N ; N_o 为外侧车轮支撑力, N ; f 为路附着系数。

当车辆处于发生侧滑的临界点时,内外侧轮胎对路面的摩擦力等于路面提供给轮胎的附着力,如式(4)所示。

$$(N_i + N_o) f = F_{f_i} + F_{f_o} \quad (4)$$

由式(2)、式(3)和式(4)可计算得到车辆侧滑临

界状态下车辆侧向加速度,如式(5)所示。

$$a_{\text{slide}} = \frac{fg \cos \beta + g \sin \beta}{\cos \beta - f \sin \beta} \quad (5)$$

依据上述公司,车辆安全速度采用两个标准进行判断:一是路面对车辆任一车轮的支撑力(垂直反力)达到0时,表现为车辆可能发生失稳倾覆;二是车辆的侧向加速度以0.4g为临界值,超过该值车辆可能发生失稳侧滑。装载质量主要影响的是车轮的支撑力,而路面附着系数主要影响的是车轮侧向加速度。

2 仿真试验与分析

2.1 装载质量对弯道安全速度的影响

现行车辆尺寸及载重规范《汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB 1589—2016)^[7]规定车辆总质量不大于49 t。为分析低于限制和超过限值的工况,仿真车辆模型中牵引车总质量设置为4.5 t、空载的挂车质量设置为5.5 t,装载质量依次设定为20、30、40、45、50、55、60 t,分别进行仿真分析。道路的附着系数设定为0.8,以某一适当速度进行仿真,若车辆不发生失稳侧滑或倾覆,则增加车辆速度重新进行仿真;若车辆发生失稳倾覆或倾覆,则停止仿真。

在进行仿真时,首先设定车辆装载质量为20 t、设定车辆速度为55 km/h,仿真模型运行后,检查并分析仿真动画和仿真曲线,主要分析对象为车辆所有车轮整个仿真过程的垂直反力分布,结果显示该仿真模型中,车辆行驶平稳。由于所建立的道路模型的是左弯,因此以左侧某车轮垂直反力为0时的车辆行驶速度为车辆的安全速度阈值。当车辆速度达到76 km/h时候,车辆第六轴垂直反力达到0,为临界状态,此时的侧向加速度为0.36g,由此以76 km/h为车辆发生倾覆时的安全速度阈值。不同装载质量的安全速度阈值如表3所示。可以看出,随着车辆装载质量的增加,车辆行驶安全速度呈下降趋势,在车辆运行过程中应严格控制载重,并进行限速。独墅湖第二通道NE匝道设计速度为50 km/h,可见当装载质量达到50 t时,车辆发生失稳倾覆。根据现行规范《汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB 1589—2016),独墅湖第二通道通行5轴、6轴汽车列车时,考虑一定的安全冗余度,其装载质量应限定在39 t以下。

表3 不同车辆装载质量的安全速度阈值

试验编号	装载质量/t	安全速度/(km·h ⁻¹)
1	20	76.0
2	30	67.0
3	40	56.0
4	45	51.0
5	50	48.5
6	55	46.5
7	60	44.0

2.2 附着系数对弯道安全速度的影响

根据装载质量的分析结果,车辆装载质量设定为装载限制,即39 t。道路附着系数分别为0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8。车辆侧向加速度达到0.4g时发生侧滑。仿真结果如表4所列。

表4 不同道路附着系数条件下的行驶安全速度阈值

试验编号	附着系数	安全速度/(km·h ⁻¹)
1	0.3	47.0
2	0.4	49.0
3	0.5	51.5
4	0.6	54.0
5	0.7	56.0
6	0.8	56.0

可以看出当附着系数不大于0.7时,随着道路附着系数的增加,车辆行驶安全速度阈值呈增大趋势。但当附着系数大于0.7之后,道路附着系数继续增大时,车辆行驶安全速度没有变化,表明此时车辆行驶安全速度不受到道路附着系数的影响。当道路附着系数不大于0.4时,满载车辆的安全速度小于NE匝道的设计时速50 km/h。而为了保障一定的安全设计余量,对于NE匝道而言,道路附着系数至少应不低于0.6,以确保车辆在NE匝道上的行驶安全性。考虑到降雨及雨雪等一些气候条件的影响,有可能出现道路湿滑的情况,此时的道路附着系数还会进一步下降,由此设计道路附着系数宜不低于0.7。此外,还可通过设置低附着系数警示标志、减速标线等,提醒驾驶人人员降低车速通行,或者采用排水抗滑、融冰雪路面或大构造高抗滑路面,以提升行驶安全性。

综上,对于不利线形匝道,行驶车辆应严格限定其装载质量和行驶速度;对于匝道路面应注重提升路面表面附着性,进行路面材料抗滑性能专项设计;在冰雪等极端天气下,应采取一定的管控措施并及时进行路面附着性的恢复,例如限制部分车辆通行,及时进行路面除冰雪,以免产生车辆失稳安全风险。

3 结 语

采用Trucksim仿真软件,建立了车辆、道路和驾驶模型,开展苏州独墅湖第二通道NE匝道上的车辆行驶侧向稳定性仿真分析,得出以下主要结论。

(1)随着车辆装载质量的增加,弯道上行驶安全速度阈值呈降低趋势,车辆装载应当严格按照《汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB 1589—2016)中各车型的装载限值进行装载,严禁超过最大限值,并严格执行车辆限速。对于独墅湖第二通道,装载质量超过50 t时,车辆发生失稳,考虑一定的安全冗余度,限制装载质量不超过39 t。

(2)对于不利线形匝道,为保证车辆安全平稳行驶通过该路段,匝道路面附着系数应不低于0.6。考虑到降雨、雨雪等恶劣气候条件,附着系数宜不低于0.7。此外,对于可能出现匝道弯道路段道路湿滑情况,此时可以设置低附着系数警示标志、减速标线,

提醒驾驶人降低车速,或者采用更高附着系数的防滑道路面层材料。

(3)在不利气候条件下,对于路面湿滑情况(附着系数0.3),重载车辆行驶速度应在40 km/h以下,以保障重载车辆行驶安全性。应设置可变限速标志,根据气候情况对车辆行驶速度进行动态调控,以保证道路运行安全。

参考文献:

- [1] 董志圣,田国富,王涛,等.基于Trucksim的重型清障车操纵稳定性分析[J].交通节能与环保,2019,15(2):21-25.
- [2] 张娜,纪成浩,陆泽通.基于Trucksim的路面模型的建立与重构[J].电子测试,2022,36(9):44-47.
- [3] 刘彦平.基于Carsim/Trucksim的长大下坡车辆安全模型及仿真[D].北京:北京交通大学,2021.
- [4] 万晓敏,邵敏华,孙立军.左进地下快速路合流区交通流特征研究[J].交通信息与安全,2016,34(2):117-122.
- [5] 李平.基于Trucksim的公路弯道路段车辆安全速度仿真研究[D].西安:长安大学,2017.
- [6] GB 1589—2016,汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值[S].

(上接第53页)

捷的运行,提高车站服务水平。设计过程中所采用的分析方法和技术手段对于其他城市轨道交通枢纽站的设计具有借鉴意义。

(1)在枢纽站设计研究时,应从线路走向、建设时序、客流特征、换乘效率等方面进行对比研究,选择换乘方案,提高换乘效率,降低施工风险。

(2)在换乘效率研判时,应充分考虑不同线路间的换乘比例来进行换乘时间折算,获得真实的换乘效率,作为换乘方式选择的依据。

(3)为了验证换乘方案的有效性,建议采用仿真软件来进行客流模拟,确保流线组织顺畅、便捷。

展望未来,随着城市轨道交通网络的不断扩展

和技术的不断进步,枢纽站的设计将面临更多的挑战和机遇。因此,有必要继续探索和创新枢纽站的设计理念和技术手段,以适应城市发展的需求,为乘客提供更加安全、便捷、舒适的出行环境。

参考文献:

- [1] 马波.城市轨道交通枢纽换乘研究[J].工程技术,2017(11):61-64.
- [2] 袁帅.轨道交通枢纽站换乘空间组织优化设计初探[J].建筑工程技术与设计,2018(17):1095-1098.
- [3] 马天生.苏州轨道交通5号线换乘车站形式的思考[J].中外建筑,2018(3):142-146.
- [4] 冒奇.轨道交通枢纽车站多线换乘方案的设计研究——以苏州中塘公园站为例[J].北方建筑,2019,4(3):46-50.