

# 汽车高速公路横坡转向稳定性分析

李松珏,谢欣然,吴明虎,冯清,杨弘毅,魏登,杨鑫  
(成都理工大学工程技术学院,四川 乐山,614000)

**摘要:**为分析某型汽车轴距和轮距设计值对横坡转向稳定性的影响,建立了在高速公路上横向坡道转向行驶的汽车转向动力学模型及仿真模型。其转向稳定性评价指标包括横摆角速度、侧向加速度、质心侧偏角等参数。通过仿真得到该型汽车以不同速度在不同横向坡道转向行驶工况下的评价指标参数时域响应;分析各评价指标参数响应的超调量、峰值、峰值响应时间以及该型汽车在高速公路横向坡道转向稳定性,以判断该型汽车轴距轮距设计是否符合转向稳定性。

**关键词:**横向坡道转向;动力学模型;仿真模型;时域响应;稳定性

**中图分类号:**U462.3<sup>+</sup>3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)04-0082-04

## Analysis of Automobile Steering Stability on Highway Transverse Slope

LI Songjue, XIE Xinran, WU Minghu, FENG Qing, YANG Hongyi, WEI Deng, YANG Xin

(Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, China)

**Abstract:** To analyze the influence of wheelbase and wheel track design values of a designated automobile on steering stability at highway transverse slope, the steering dynamic model of automobile steering situation on highway transverse slope is established and simulated, whose evaluation index of steering stability includes yaw rate, lateral acceleration and sideslip angle. Through the simulation, the time domain response of the evaluation index parameters of the automobile steering conditions at different speeds and transverse slope with different transverse gradients are obtained. The overshoot, peak value and peak response time of parameter response of each evaluation index, and the steering stability of the automobile steering on the highway transverse slope are analyzed to determine if wheelbase and wheel track designs of the automobile meet the steering stability as required.

**Keywords:** transverse slope steering; dynamic model; simulation model; time domain response; steering stability

## 0 引言

转向稳定性是汽车研究的重点,区别于常见转向稳定性研究,本文根据特定行驶工况,建立了含轴距和轮距的汽车横向坡道转向行驶工况的动力学和数学模型。通过对该数学模型的仿真,可以得到所设计的轴距和轮距是否使汽车转向稳定性变差,从而预测轴距和轮距设计是否合理。这缩短了汽车设计周期,降低汽车的设计成本,提高了设计效率。

## 1 横向坡道转向行驶汽车动力学模型的建立

要分析汽车转向稳定性,首先要建立相应的汽车力学模型<sup>[1]</sup>。在本文中,忽略汽车悬架弹性变形和轮胎垂直路面的弹性变形,只考虑汽车轮胎的弹性侧偏。现代汽车常在高速公路行驶,而高速公路为便于排水,或在转弯处为避免转向运动产生的离心力导致汽车侧翻要设立超高,即有横向坡度。由此建立汽车在横向坡道转向行驶的动力学模型,如图1所示。

横向坡道坡度  $\alpha$  根据国标《JTG-B01-2014-公路工

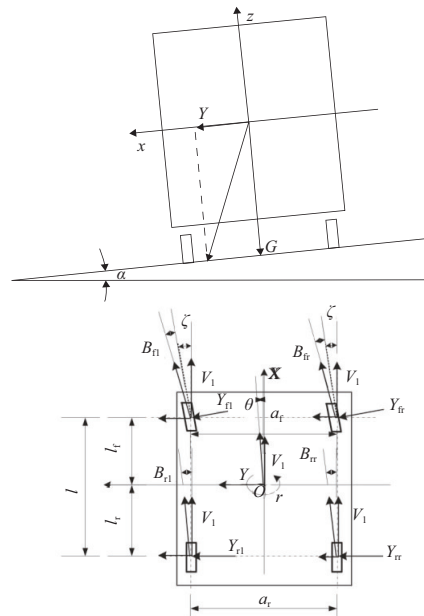


图1 汽车横向坡道转向行驶动力学模型

程技术标准》中的规定,由表1确定。本文取横向坡道坡度分别为  $0^\circ$ 、 $3.43^\circ$ 、 $5.71^\circ$ 。

第一作者简介:李松珏(1980—),男,四川内江人,工程师,本科,研究方向为汽车设计。

表 1 横向坡道超高值

设计速度/(km/h)	横向力系数	超高值/%
120	0.10	
100	0.12	6 8 10
80	0.30	

## 2 根据力学模型建立数学模型

根据图 1 的汽车横向坡道转向行驶动力学模型可以逐步分析后建立数学模型。

汽车在横向坡道转向行驶时,过质心的横向截面内,重力分力为  $Y$ 。

汽车车轮还受到方向为侧向的侧偏力的作用。4 个车轮共 4 个侧偏力,分别为:  $Y_{fl}$ 、 $Y_{fr}$ 、 $Y_{rl}$ 、 $Y_{rr}$ 。

从力学模型图 1 可以看出,汽车转向轮航向即速度方向与  $x$  轴即汽车的纵向有一个夹角  $\zeta$ ,该夹角是转向轮的转向角,同时也是汽车转向轮速度方向与其在  $x$  轴上速度分量的夹角。

分析图 1,  $Y_{fl}$ 、 $Y_{fr}$ 、 $Y_{rl}$ 、 $Y_{rr}$  作用于轮胎,其方向基本垂直于汽车航向,即和汽车横向方向  $y$  轴方向基本一致。同时,汽车在横向斜坡上行驶,汽车重力在过质心的横向截面内的分力  $Y$  也和汽车航向基本垂直,也和汽车横向方向  $y$  轴方向基本一致。 $Y$  构成了汽车在横向坡道转向行驶的对汽车转向稳定性的侧向干扰力。

汽车转向稳定性可以分别用质心侧偏角和横摆角速度响应来评价<sup>[2]</sup>。

由上分析,建立汽车侧向(横向)运动方程如下:

$$mV_1 \left( \frac{d\theta}{dt} + r \right) = Y_{fl} + Y_{fr} + Y_{rl} + Y_{rr} + Y \quad (1)$$

$Y_{fl}$ 、 $Y_{fr}$ 、 $Y_{rl}$ 、 $Y_{rr}$  会产生作用在汽车上的绕坐标系  $z$  轴的横摆力矩。据此分析,建立汽车横摆运动方程如下:

$$I_z \frac{dr}{dt} = l_f(Y_{fl} + Y_{fr}) - l_r(Y_{rl} + Y_{rr}) \quad (2)$$

式中  $I_z$  为汽车绕  $z$  轴的转动惯量。

根据式(1)、式(2),可得如下方程:

$$mV_1 \left( \frac{d\theta}{dt} + r \right) = -\gamma_{fl} \left( \frac{V_1 \theta + l_f r}{V_1 - \frac{a_{fl} r}{2}} - \xi \right) - \gamma_{fr} \left( \frac{V_1 \theta + l_f r}{V_1 + \frac{a_{fr} r}{2}} - \xi \right) - \gamma_{rl} \left( \frac{V_1 \theta - l_r r}{V_1 - \frac{a_{rl} r}{2}} \right) - \gamma_{rr} \left( \frac{V_1 \theta - l_r r}{V_1 + \frac{a_{rr} r}{2}} \right) + G \sin \alpha \quad (3)$$

$$I_z \frac{dr}{dt} = l_f \left( -\gamma_{fl} \left( \frac{V_1 \theta + l_f r}{V_1 - \frac{a_{fl} r}{2}} - \xi \right) - \gamma_{fr} \left( \frac{V_1 \theta + l_f r}{V_1 + \frac{a_{fr} r}{2}} - \xi \right) \right) - l_r \left( -\gamma_{rl} \left( \frac{V_1 \theta - l_r r}{V_1 - \frac{a_{rl} r}{2}} \right) - \gamma_{rr} \left( \frac{V_1 \theta - l_r r}{V_1 + \frac{a_{rr} r}{2}} \right) \right) \quad (4)$$

式(3)、式(4)成为描述汽车在横向坡道上转向行驶

的数学模型。式中同时包含了参数轴距和轮距。从这两式可以看出,转向轮转向输入任意角度  $\zeta$ 、汽车的运动与地面坐标系的位置和汽车航向无关。汽车的轴距、轮距以及轮胎的侧偏刚度、质量、高速公路的横向坡度将会影响汽车的运动。汽车质心侧偏角  $\theta$  以及横摆角速度  $r$  导致汽车产生的角度组成汽车转向轮转向角  $\zeta$ <sup>[3]</sup>。其中,  $\theta$  和  $r$  是评价汽车转向稳定性的主要参数<sup>[4]</sup>。

## 3 汽车横向坡道转向行驶仿真

### 3.1 运用 Matlab/simulink 建立仿真模型

Matlab 是一款功能强大的应用软件。Matlab 中的 simulink 工具箱用于仿真分析,可以获得可视化数据用于分析,十分方便快捷。本文运用 simulink 工具箱构建汽车横向坡道转向行驶 simulink 仿真模型。对于类似的与横向动力学相关的设计方法理念,近年来的研究很多。WARTH G 等在 Matlab/simulink 中建立 14 自由度的非线性整车模型,通过该模型,论证了所设计的控制器的有效性<sup>[5]</sup>。RUBIÓ-MASSEGÚ J 等运用仿真的方法验证了所设计的悬架静态输出反馈控制器性能良好<sup>[6]</sup>。JAVANSHIR I 等人利用仿真软件对越野车悬架进行建模仿真并优化悬架几何参数,同时根据仿真结果,分析了悬架几何参数优化前后对越野车转向稳定性的影响<sup>[7]</sup>。AOUADJ N 等设计了车辆动力学控制系统,并通过仿真证明了该控制系统的有效性和对整车转向稳定性的提高<sup>[8]</sup>。崔勇等运用仿真软件对整车转向稳定性做出了分析<sup>[9]</sup>。

### 3.2 仿真分析数据和转向轮转向角阶跃输入

simulink 建模仿真所需数据为某车型数据,如表 2 所示。

表 2 仿真所需数据

数据名称/单位	符号	数值
汽车质量/kg	$m$	1 300
质心到前轴距离/m	$l_f$	1.02
质心到后轴距离/m	$l_r$	1.60
汽车绕 $z$ 轴转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	$I_z$	1 530
前轮轮距/m	$a_{fl}$	1.5
后轮轮距/m	$a_{rl}$	1.5
前轮侧偏刚度/(N/rad)	$\gamma_{fl}$	75 100
后轮侧偏刚度/(N/rad)	$\gamma_{rl}$	56 200
汽车质心高度/m	$h$	0.5
汽车轴距/m	$l$	2.6

本文根据表 2 的数据,通过对所建的 simulink 模型的仿真,分析该型汽车在道路不同横向坡度和不同车速两方面的转向稳定性,从而分析该车型的轴距和轮距对转向稳定性的影响,最后得出该车型的轴距和轮距设计是否满足汽车转向稳定性的结论。

仿真输入采用转向盘的角阶跃输入。角阶跃输入试验是路上试验中最典型的试验<sup>[10]</sup>。汽车对转向盘输入的瞬态响应能够通过阶跃试验反映<sup>[11]</sup>。本文中,转向盘的角阶跃为转向轮的转向角阶跃输入。

### 3.3 转向轮角阶跃输入 final 值为定值的仿真结果

转向轮转向角阶跃输入时间为 10s,同时也是仿真时间。

转向轮转向角阶跃输入按如下工况:由于汽车的转向盘存在自由行程,因此,转向轮的转向角阶跃输入 initial 值在 0.5 s 前为 0。0.5 s 的时间意味着转向盘转过自由行程。阶跃输入的 final 值为 0.01 rad。

汽车横向坡道转向行驶工况如下:该型汽车在横向坡度为 0°、3.43°、5.71°的横向坡道,分别以速度为 80 km/h、100 km/h、120 km/h 速度转向行驶。阶跃输入仿真结果如图 2 所示;横摆角速度、质心侧偏角、侧向加速度仿真结果如图 3 所示。

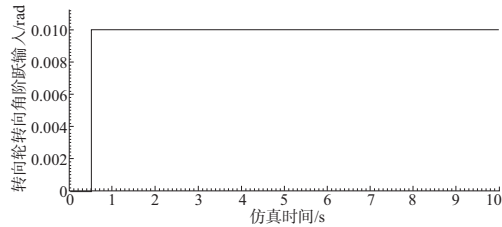


图 2 阶跃输入曲线

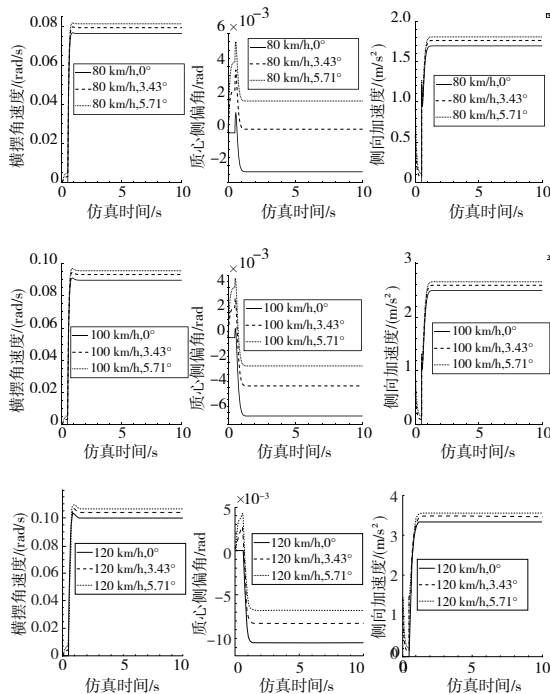


图 3 横摆角速度、质心侧偏角、侧向加速度响应曲线

## 4 仿真结果分析

根据图 3 的仿真结果,该型汽车分别在横向坡度为

0°、3.43°、5.71°的横向坡道,阶跃输入 final 值为 0.01 rad 时,分别以速度为 80 km/h、100 km/h、120 km/h 速度转向行驶,侧向加速度峰值和稳定值均小于该车在相应横向坡度的侧翻阈值,这意味着该型汽车在此阶跃输入下不会发生侧翻。

图 3 中该型汽车在不同坡度以不同速度转向行驶时,横摆角速度超调量最大为 103.27%,最小为 100.5%。超调量较小且变化不大,该型汽车能够迅速从横摆角速度峰值回到稳定状态,说明该型汽车转向稳定较好。横摆角速度、侧向加速度各自的峰值响应时间能够反映汽车对转向响应的灵敏程度<sup>[12]</sup>。质心侧偏角和侧向加速度峰值时间较小,说明该型汽车瞬态响应迅速,转向灵敏。

根据本文表 2 数据,计算出  $l_f \gamma_f - l_r \gamma_r < 0$ 。即该型汽车有不足转向特性。该型汽车特征速度  $v_{ch} = 50$  km/h。当速度为 80 km/h、100 km/h、120 km/h 时,均大于特征速度  $v_{ch}$ 。故该型汽车质心侧偏角稳态值在同一横向坡度上随速度的增加而减小,直至为负值。在速度 120°、横向坡度为 5.71°时,质心侧偏角达到  $-0.006762$  rad。当该型汽车以同一速度在不同坡度上转向行驶时,不同横向坡度导致的侧向力  $Y$  大小随横向坡度不同而不同,横向坡度为 5.71°时, $Y$  最大。所以当该型汽车以同一速度在不同横向坡度的横坡上行驶时, $Y$  与车轮的侧偏力共同平衡离心力,质心侧偏角随横向坡度的增加而减小。在横向坡度为 5.71°时,质心侧偏角最小。说明该车型在横向坡道行驶时转向稳定性较好。汽车的侧向力越大,汽车抵抗干扰的能力越强,侧向偏移越小<sup>[13]</sup>。

## 5 结语

本文建立了考虑某车型横向坡道转向行驶的动力学模型,并建立了相应的数学模型。根据此数学模型建立了仿真模型。仿真结果为该车型以 80 km/h、100 km/h、120 km/h 的速度,在不同横向坡度转向行驶时的横摆角速度、质心侧偏角、侧向加速度的数据视图。根据这些数据视图分析了该车型在横向坡道上转向行驶的转向稳定性。

分析结果说明该型汽车轴距、轮距设计符合汽车转向稳定性。

### 参考文献:

- [1] 潘公宇,张明梅. 高速转向工况下汽车操纵稳定性和平顺性研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(3): 674-683.
- [2] KHAN M M, AWAN A U, LIAQUAT M. Improving vehicle handling and stability under uncertainties using probabilistic approach[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(25): 242-247.
- [3] 刘文营,刘伟,崔晓川. 二自由度车辆动力学模型的扩展研究[J]. 中国测试, 2016, 42(增刊 2): 76-79.
- [4] 刘秋生,徐延海,陈启,等. 4WID 轮毂电机式电动汽车横摆稳定性滑模控制研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(5): 1080-1091.
- [5] WARTH G, FREY M, GAUTERIN F. Design of a central feedforward control of torque vectoring and rear-wheel steering to beneficially use tyre information[J]. Vehicle System Dynamics,

- 2020, 58(12):1789-1822.
- [6] RUBIÓ-MASSEGÚ J, PALACIOS-QUIÑONERO F, ROSSELL J M, et al. Static output - feedback controller design for vehicle suspensions; an effective two - step computational approach [ J ]. IET Control Theory & Applications, 2014, 8(15):1566-1574.
- [7] JAVANSHIR I, MASELENO A, TASOUJIAN S, et al. Optimization of suspension system of heavy off - road vehicle for stability enhancement using integrated anti - roll bar and coiling spring mechanism [ J ]. Journal of Central South University, 2018, 25(9):2289-2298.
- [8] AOUADJ N, HARTANI K, FATIHA M. New integrated vehicle dynamics control system based on the coordination of active front steering, direct yaw control, and electric differential for improvements in vehicle handling and stability [ J ]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2020, 4(2):119-133.
- [9] 崔勇,陶德清,沙莎,等.基于ADAMS/Car整车操纵稳定性仿真分析[J].机械制造与自动化,2017,46(6):110-113.
- [10] 张洪昌,丁建完.基于Modleica的操纵稳定性实时仿真方法研究[J].计算机工程与应用,2015,51(3):31-34,108.
- [11] 陈焕明,郭孔辉.轮胎性能对车辆操纵稳定性影响的仿真研究[J].汽车工程,2015,37(5):491-494,505.
- [12] 徐刚,庞赞,周毅,等.轮毂电机对汽车瞬态操纵稳定性的影响[J].计算机辅助工程,2016,25(4):29-32,39.
- [13] 李洋,张建伟,郭孔辉,等.四轮驱动电动汽车轴间驱动力和制动力分配[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(3):703-710.

收稿日期:2021-03-30

(上接第59页)

2)随着速度水平的增大,尾传动轴系的等效阻尼比则逐渐减小,在试验中减小了12.4%,反映了其非线性阻尼特性。

通过这种方法建立的尾传动轴系的等效固有频率和等效阻尼比随着激励水平的变化关系可以进一步为研究尾传动轴系的非线性动力学特性、建立更加精确的非线性动力学模型并进行预测设计提供支撑。

#### 参考文献:

- [1] 航空航天工业部科学技术研究院.直升机动力学手册[M].北京:航空工业出版社,1991.
- [2] 倪德,朱如鹏,靳广虎,等.机动飞行时直升机尾传动轴的横向振动建模与特性[J].振动与冲击,2014,33(7):215-220.
- [3] 陆凤霞,朱如鹏,倪德.直升机机动飞行对尾传动轴临界转速的影响[J].振动与冲击,2016,35(11):109-115.
- [4] 许兆棠,朱如鹏.直升机尾传动系扭转振动的分析[J].航空学报,2007,28(2):425-431.
- [5] 聂峻峰.直升机传动轴系结构及动力学特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [6] 朱自冰,朱如鹏,鲍和云.直升机尾传动系统扭转振动建模与特性[J].航空动力学报,2013,28(2):432-438.
- [7] 朱自冰,朱如鹏,鲍和云,等.刚度对直升机尾传动系统弯曲振动固有频率影响的分析[J].航空动力学报,2009,24(1):176-180.
- [8] KERSCHEN G, WORDEN K, VAKAKIS A F, et al. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics [ J ]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(3):505-592.
- [9] GÖGE D, SINAPIUS M, FÜLLEKRUG U, et al. Detection and description of non - linear phenomena in experimental modal analysis via linearity plots [ J ]. International Journal of Non - Linear Mechanics, 2005, 40(1):27-48.
- [10] ARSLAN Z, H Nevzat zgiiven. Modal identification of non - linear structures and the use of modal model in structural dynamic analysis [ C ]. Proceedings of the 26th International Modal Analysis Conference (IMAC). Orlando, USA: 2008.
- [11] ZANG C P, SCHWINGSHACKL C W, EWINS D J. The influence of nonlinearity on uncertainty and variability for dynamic models [ C ]. Proceedings of the 1st International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics. Sheffield, UK: 2007:311-319.
- [12] ZHANG Genbei, ZANG Chaoping. Identification and verification of structural nonlinearities based on vibration tests [ C ]. Proceedings of international conference on noise and vibration engineering (ISMA2012). Leuven, Belgium:2012:2611-2623.
- [13] 张根辈,臧朝平.基于振动测试的非线性参数识别方法[J].振动与冲击,2013,32(1):83-88.
- [14] 杨稀,臧朝平,周标,等.基于恒位移测试的转子系统非线性支承刚度参数辨识研究[J].机械制造与自动化,2019,48(5):29-33.
- [15] CARRELLA A, EWINS D J. Identifying and quantifying structural nonlinearities in engineering applications from measured frequency response functions [ J ]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(3):1011-1027.
- [16] 单卫东,臧朝平,张根辈,等.基于频响函数识别直升机尾传动轴系非线性的方法[J].振动与冲击,2020,39(14):102-108.
- [17] 邹亚晨,王平,倪德,等.直升机尾传动轴系的非线性刚度参数辨识方法[J].动力学与控制学报,2020,18(6):77-83.
- [18] 单卫东.基于频响函数的某直升机尾传动轴系非线性模态分析[D].南京:南京航空航天大学,2019.

收稿日期:2021-01-07