

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.10.021

基于 ADAMS/Car 的车辆侧翻风险因素研究

时晓杰¹, 何杰²

(滁州学院 机械与电子工程学院, 安徽 滁州 239000; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了研究车辆侧翻风险因素对车辆侧翻的影响程度, 运用 ADAMS/Car 软件建立了某轿车的多体动力学模型, 基于仿真分析的方法进行了鱼钩转向侧翻试验设计, 并选取横向载荷转移率作为度量车辆侧翻风险的指标。通过正交试验的方法, 研究了路面摩擦系数、车辆行驶速度、方向盘角速度以及质心高度对车辆侧翻的影响程度。结果表明, 在给定的水平下影响车辆侧翻的因素按其影响的强弱程度依次为: 车辆行驶速度、路面摩擦系数、质心高度、方向盘角速度, 其中车辆行驶速度对车辆的侧翻具有显著性影响。

关键词: 汽车工程; 车辆侧翻; 仿真试验; 正交试验; 车辆行驶速度

中图分类号: U461.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2014) 10-0130-04

Study on Rollover Risk Factors of Vehicles Based on ADAMS/Car

SHI Xiao-jie¹, HE Jie²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Chuzhou University, Chuzhou Anhui 239000, China;

2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: In order to study the influence degree of rollover risk factors on vehicle rollover, a multi-body dynamics model of a car is built by using ADAMS/Car software. The fishhook rollover test is designed based on simulation method, and lateral load transfer ratio is selected to measure vehicle rollover risk. The influence degrees of road friction coefficient, vehicle speed, angular velocity of the steering wheel and centroid height on vehicle rollover are studied by using the orthogonal experiment method. The results show that under the given level, the significance of the influencing factors can be ranked as follows: vehicle speed, road friction coefficient, centroid height of vehicle and angular velocity of steering wheel, among them vehicle speed has great influence on vehicle rollover.

Key words: automobile engineering; vehicle rollover; simulation test; orthogonal test; vehicle speed

0 引言

据美国公路交通安全局 (NHTSA) 统计, 车辆侧翻事故的发生率约占总交通事故的 5%, 但由于侧翻事故而造成的死亡率却高达 30%^[1]。车辆侧翻事故是一种恶性交通事故, 其严重程度明显高于其他交通事故, 是造成人员伤亡和财产损失的重要事故类型。

车辆侧翻是人-车-路等因素共同耦合作用的结果, 因而车辆的侧翻风险与驾驶员的操作、车辆

的质心高度、轮距、路面附着系数、道路线形等因素密切相关。围绕影响车辆侧翻的因素, 国内外有部分学者展开了研究, 文献 [2-4] 对车辆本身的因素和车辆侧翻之间的关系进行了系统的研究; 文献 [5] 研究了道路因素对车辆侧翻的影响。目前虽然国内外有众多学者对车辆侧翻的影响因素进行了研究, 但对于各因素对车辆侧翻的影响程度则鲜有报道。

由于世界各国的侧翻事故数据统计并不完善, 很难得到车辆侧翻的完整统计信息, 而开展实车侧

收稿日期: 2013-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51078087); 滁州学院科学研究项目 (2012kj006B)

作者简介: 时晓杰 (1987-), 女, 山东临沂人, 硕士. (xiaojie1102@163.com)

翻试验代价较高, 因此仿真试验成为研究车辆侧翻风险的首选方法^[6]。本文利用 ADAMS/Car 软件建立了车辆模型, 在不同的仿真条件下进行了大量的鱼钩转向仿真试验, 选取车轮的横向载荷转移率作为度量车辆侧翻风险的指标, 并采用正交试验的方法, 研究了路面摩擦系数、车辆行驶速度、方向盘角速度以及质心高度对车辆侧翻的影响程度。

1 车辆模型的构建

本文运用 ADAMS/Car 软件, 以某型号的轿车为基础建立了相应的仿真模型。仿真模型中的前悬架采用麦弗逊独立悬架, 后悬架为双横臂式悬架, 轿车模型中采用整体式驱动桥、齿轮齿条转向机构以及前盘后鼓式制动器。轮胎模型采用了包含轮胎的纵向及侧向松弛效应的 UA 轮胎模型, 车身模型是通过将车身数据转换成 .shl 格式的文件导入到 ADAMS 中, 并附于含有车身质量特性参数的质点上而形成的。整车模型及其主要参数如图 1 和表 1 所示。

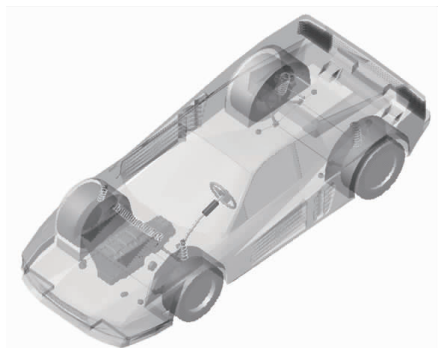


图 1 整车系统的多体动力学模型

Fig. 1 Multi-body dynamics model of vehicle system

表 1 仿真模型的主要参数

Tab. 1 Main parameters of simulation model

参数	变量符号	数值
长 × 宽 × 高/mm	$L \times W \times H$	4 870 × 1 834 × 1 472
轴距/mm	L_1	2 803
前后轮距/mm	B_1/B_2	1 520/1 594
前后悬架弹簧刚度/(N · mm ⁻¹)	K_1/K_2	16.5/11.2
前后悬架弹簧质量/kg	M_1/M_2	3.67/3.51
空载质心坐标/mm	(x, y, z)	(1 749, -1.4, 450)
整车整备质量/kg	M	1 528
最高车速/(km · h ⁻¹)	$V_{\max}$	200
最小转弯半径/mm	R	5 800
轮胎自由半径/mm	r	289
径向刚度/(N · mm ⁻¹)	C_N	190
侧偏刚度/(N · rad ⁻¹)	C_A	60 000
外倾刚度/(N · rad ⁻¹)	C_G	3 000

2 侧翻试验的评估方法

车辆侧翻是车辆在行驶过程中绕其纵向轴的轴线旋转 90° 或者更大的角度, 以至于车身与路面相互接触的一种极其危险的侧向运动^[7]。根据车辆的侧翻机理, 侧翻事故一般分为两类, 一类是绊倒型侧翻, 另一类是非绊倒型侧翻, 前者是由于车辆行驶时产生一定的侧向偏移量而导致与路面的障碍物撞击引起的“绊倒”, 后者则是由于车辆的曲线运动而引起的侧翻, 研究绊倒型侧翻是研究其他侧翻形式的基础。

目前国内外并没有统一的标准试验对车辆的侧翻进行评估, 仅美国提出了评价车辆防侧翻能力的试验标准与法规 (49CFR Part575)。该法规通过对现实中的两类侧翻事故的发生率进行统计, 提出了以静态稳定系数 SSF 测试为主、鱼钩转向试验为辅的评价体系^[8-9]。

鱼钩试验是研究车辆高速瞬态转弯特性的一种试验方法, 用于评价车辆的侧倾稳定性和道路保持能力。该试验是由美国 NHTSA 针对汽车的侧翻稳定性而提出的试验, 主要用于检验车辆在极限转弯工况下的侧翻稳定性^[10]。在仿真试验前, 鱼钩试验需要确定方向盘的基准转角, 确定方法如下^[11]: 车辆处于满载状态, 并以 80 km/h 的速度直线行驶达到稳定状态后, 以 13.5(°)/s 的速度迅速转动方向盘, 直到方向盘转角从 0° 变为 270°, 记录下车辆的侧向加速度为 0.3g 时的方向盘转角, 以此方法测出的角度作为方向盘转角的基数。如图 2 所示, 确定出鱼钩试验中方向盘转角的基数。通过图 2 可以得出, 当车辆的侧向加速度为 0.3g 时的方向盘转角 29.8° 为将此基准角作为后续仿真试验的基础。

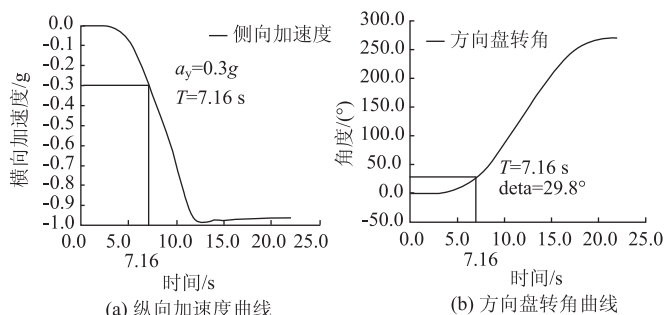


图 2 侧向加速度为 0.3g 时方向盘转角确定曲线

Fig. 2 Curves of steering wheel angle when lateral acceleration is 0.3g

鱼钩试验涉及到两个转向工况, 首先车辆以某

一固定的速度直线行驶达到稳定状态后,以某一速度转动方向盘进行第一次急速转弯,转向幅度是基准角的6.5倍,即 194° ,保持330 ms,然后以同样的速度向另外一个方向进行第二次转弯,达到 387° ,保持467 ms。采用已建立的轿车模型进行鱼钩试验,得到的方向盘转角曲线如图3所示。

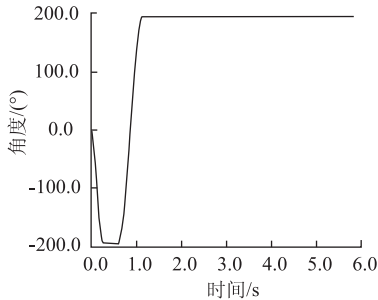


图3 鱼钩试验方向盘转角曲线

Fig. 3 Curve of steering wheel angle in fishhook rollover test

3 车辆侧翻风险因素的仿真研究

3.1 车辆侧翻风险度量指标

车辆在弯道上行驶时,速度越大,受到的侧向加速度越大,车轮内侧的垂直载荷越小,当内侧载荷减小到0时,这时车辆很容易发生侧翻。本文选取车辆的横向载荷转移率 LTR (Lateral-Load Transfer Rate)的最大值的绝对值作为评价指标^[12]得到:

$$LTR_{\max} = \max \left| \left(\frac{F_L - F_R}{F_L + F_R} \right) \right|,$$

式中, F_L 为左侧车轮的垂直反力; F_R 为右侧车轮的垂直反力。

当行驶中的车辆即将发生侧倾时,内侧车轮的载荷急剧减小为0,这时 LTR 的值为1,此时认为车辆侧翻倾向性较大。

3.2 正交试验设计

本文采用正交试验的方法分析车辆行驶速度 A ,路面摩擦系数 B ,方向盘角速度 C 以及质心高度 D 四个因素对车辆侧翻的影响,各因素对应的水平如表2所示。

表2 因素及其水平表

Tab. 2 Table of factors and levels

水平	A	$B/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$C/[(^\circ)/\text{s}]$	D/mm
1	0.9	60	600	450
2	0.8	80	720	500
3	0.7	100	840	550

试验中的4个因素不考虑交互作用,可以选用 $L_9(3^4)$ 正交表,试验因素可以任意安排在正交表的

各列,具体试验设计及得到的结果如表4所示。

表3 $L_9(3^4)$ 正交设计表

Tab. 3 $L_9(3^4)$ orthogonal design table

试验号	因素				试验指标 $LTR_{\max}$
	A	$B/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$C/[(^\circ)/\text{s}]$	D/mm	
1	0.9	60	600	450	0.586
2	0.9	80	720	500	0.690
3	0.9	100	840	550	0.870
4	0.8	60	720	550	0.629
5	0.8	80	840	450	0.705
6	0.8	100	600	500	0.803
7	0.7	60	840	500	0.683
8	0.7	80	600	550	0.784
9	0.7	100	720	450	0.875

表4 基于横向载荷转移率的极差分析表

Tab. 4 Range analysis table based on lateral load transfer ratio

分析变量	试验因素			
	A	B	C	D
K_1	2.146	1.898	2.173	2.166
K_2	2.137	2.179	2.194	2.176
K_3	2.342	2.548	2.258	2.283
k_1	0.715	0.633	0.724	0.722
k_2	0.715	0.726	0.731	0.725
k_3	0.781	0.849	0.753	0.761
极差 R	0.066	0.216	0.029	0.039
主次顺序	$B > A > D > C$			
最优组合	$A2B1C1D1$			

由表4中的极差分析结果可知,在给定的试验水平下,各试验因素对车辆侧翻的影响程度为 $B > A > D > C$,即车辆行驶速度对车辆侧翻的影响程度最大,路面摩擦系数次之,方向盘转动角速度的影响程度最低。根据试验结果可以看出质心较低的车辆以低速行驶在路面摩擦系数较大的道路上时,车辆侧翻的可能性相对较低。

为了进一步明确各试验因素对试验指标影响的显著程度,本文采用方差分析对试验结果进行分析。

由表5可以看出,车辆行驶速度对车辆侧翻的影响是显著的,由于道路摩擦系数、质心高度、方向盘转动角速度在上述试验中变化范围较小,因此对车辆侧翻的影响不显著,各试验因素的影响显著程度 $B > A > D > C$,其分析结果与极差分析法的结果一致。

4 结论

本研究采用ADAMS/Car软件建立某轿车的多体

表 5 基于横向载荷转移率的方差分析表
Tab. 5 Variance analysis table based on lateral load transfer ratio

分析变量	试验因素				试验指标 J
	A	B	C	D	
K_{1j}	2.146	1.898	2.173	2.166	$T = 6.625$
K_{2j}	2.137	2.179	2.194	2.176	
K_{3j}	2.342	2.548	2.258	2.283	
K_{1j}^2	4.605	3.602	4.722	4.692	$T_2 = 43.891$
K_{2j}^2	4.567	4.748	4.814	4.735	
K_{3j}^2	5.485	6.492	5.099	5.212	
SS_j	0.009	0.071	0.001	0.003	4.877
变异来源	平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著水平
A	0.009	2	0.429	3.110	不显著
B	0.071	2	3.381	3.110	显著
C	0.001	2	0.048	3.110	不显著
D	0.003	2	0.143	3.110	不显著
误差 e	0.008	8			

动力学模型,进行了闭环鱼钩仿真试验,并选取横向载荷转移率作为度量车辆侧翻风险的指标。通过正交试验的方法,研究了路面摩擦系数、车速、方向盘角速度以及质心高度对车辆侧翻的影响程度,结果表明,在给定的水平下影响车辆侧翻的因素按其影响的强弱程度依次为:车速、路面摩擦系数、质心高度、方向盘角速度,其中车辆行驶速度对车辆的侧翻具有显著性影响。该研究结果对风险预测及其道路交通事故的减少具有重要的意义。然而影响因素的敏感性分析受度量车辆侧翻风险指标的影响,本文所选取的指标能否真实反映车辆的侧翻风险还需进一步的证实。

参考文献:

References:

- [1] National Highway Traffic Safety Administration. An Analysis of Motor Vehicle Rollover Crashes and Injury Outcomes [R]. Washington, D. C.: National Highway Traffic Safety Administration, 2007.
- [2] WHZTEHEAD R. TRAVISW, BEULYDM, et al. A Study of the Effect of Various Vehicle Properties on Rollover Propensity [C] // 2004 SAE World Congress. Detroit: [s. n.], 2004: 1-11.
- [3] 何锋, 杨宁, 郑秉康. 影响载重汽车倾翻的主要汽车因素分析 [J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2011, 30 (4): 92-95.
HE Feng, YANG Ning, ZHENG Bing-kang. Analysis of Main Vehicle Factors Affecting Heavy Vehicle Rollover [J]. Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 30 (4): 92-95.
- [4] 高新华, 马开献, 陈伟. 基于多体力学模型的车辆侧翻仿真研究 [J]. 机械设计与制造, 2006 (12): 46-48.
- [5] GAO Xin-hua, MA Kai-xian, CHEN Wei. Research of Vehicle Rollover Based on Muti-body Dynamics Model [J]. Machinery Design and Manufacture, 2006 (12): 46-48.
- [6] 孙璐, 游克思, 王易阳, 等. 道路因素对车辆侧翻的影响分析 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43 (3): 644-648.
- [7] SUN Lu, YOU Ke-si, WANG Yi-yang, et al. Influence Analysis of Road Conditions on Vehicle Rollover [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43 (3): 644-648.
- [8] 徐中明, 于海兴, 伍小龙, 等. 车辆侧翻指标与侧翻风险因素分析 [J]. 重庆大学学报, 2013, 36 (3): 25-31.
- [9] XU Zhong-ming, YU Hai-xing, WU Xiao-long, et al. Analysis on Rollover Index and Rollover Risk Factors of Vehicles [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36 (3): 25-31.
- [10] 余志生. 汽车理论 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [11] YU Zhi-sheng. Theory of Automobile [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [12] National Highway Traffic Safety Administration. 49 CFR Part 575: Rollover Resistance [R]. Washington, D. C.: NHTSA, 2010.
- [13] 李志刚, 沈明, 邹猛, 等. 基于多体动力学的微型客车急转弯侧翻倾向性仿真 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50 (8): 1286-1289.
- [14] LI Zhi-gang, SHEN Ming, ZOU Meng, et al. Multi-body Dynamics Simulations for Mini-bus Rollover Tendency during Sharp Turns [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 2010, 50 (8): 1286-1289.
- [15] 汤敏. 运动型多功能汽车防侧翻控制与评价方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [16] TANG Min. Research on Anti-rollover Control and Evaluation Method for Sport Utility Vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [17] YOON J, CHO W, KANG J, et al. Design and Evaluation of a Unified Chassis Control System for Rollover Prevention and Vehicle Stability Improvement on a Virtual Test Track [J]. Control Engineering Practice, 2010 (18): 585-597.
- [18] 金智林, 翁建生, 胡海岩. 汽车侧翻预警及防侧翻控制 [J]. 动力学与控制学报, 2007, 5 (4): 365-369.
- [19] JIN Zhi-lin, WENG Jian-sheng, HU Hai-yan. Rollover Warning and Anti-rollover Control for Automobiles [J]. Journal of Dynamics and Control, 2007, 5 (4): 365-369.