

文章编号:1000-582X(2013)03-025-07

车辆侧翻指标与侧翻风险因素分析

徐中明^{a,b}, 于海兴^b, 伍小龙^b, 张志飞^b

(重庆大学 a. 机械传动国家重点实验室; b. 机械工程学院, 重庆 400044)

摘要:为了明确侧翻预警与防侧翻控制所需的侧翻指标和考察侧翻风险因素的影响程度,利用 CarSim 建立了 SUV 车辆的整车非线性动力学模型,基于仿真分析方法进行了鱼钩转向侧翻试验设计,并对试验结果进行了数理统计与分析。仿真试验结果表明:侧翻指标方面,轮胎载荷转移率指标在表征车辆侧翻方面具有较高的可信度;车辆的侧滑甩尾和转向能力与侧翻之间的关系取决于路面的附着情况;所提出的新的侧翻风险度量指标适于车辆复杂输入条件下分析了多个侧翻风险因素对侧翻风险的影响。

关键词:车辆;动态仿真;试验设计;侧翻;侧翻指标

中图分类号:U461.91

文献标志码:A

Analysis on rollover index and rollover risk factors of vehicles

XU Zhongming^{a,b}, YU Haixing^b, WU Xiaolong^b, ZHANG Zhifei^b

(a. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission;

b. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to make clear the rollover index used in rollover warning and anti-rollover control and the influence degree of rollover risk factors, CarSim is used to establish a nonlinear dynamics model for SUVs. Experimental design on fishhook rollover tests based on simulation method is conducted, and the experimental results are analyzed by mathematical statistics methods. The simulation results show that: tire load transfer rate index in the characterization of vehicle rollover has higher reliability; the relations among vehicle skidding, steering ability and rollover mainly depend on the road adhesion situation; the newly proposed rollover risk evaluation index suitable for vehicle complex input conditions is able to analyze the influence of rollover risk factors on rollover risk.

Key words: vehicles; dynamic simulation; experimental design; rollover; rollover index

据 NHTSA 数据统计显示,车辆侧翻发生率约 5%,但侧翻事故所造成的死亡率高达 30%^[1]。由于车辆侧翻是瞬时危险工况,是人车路相互作用的结果,因而车辆侧翻风险与路面附着条件、车辆高宽比及驾驶员的操作输入等因素息息相关,而侧翻预警和主动防侧翻控制的一个关键在于所选取侧翻指标能否准确表征车辆的侧翻危险。到目前为止,尽管有侧向加速度^[2-3]、侧倾角^[4-5]、轮胎载荷转移

率^[6-8]及 RPER^[9-10]等侧翻指标被提出,但少有在指标确定方面进行比较和分析。另外,人们对侧翻风险因素的认识主要来源于驾驶经验,对于侧翻风险因素的影响程度等也并不清楚。这就使得对车辆防侧翻控制研究具有一定的盲目性。

由于世界各国侧翻事故统计数据库不完善,很难得到车辆发生侧翻危险的车辆状态信息,而开展大量真实的侧翻试验代价昂贵,因而仿真分析^[11]成

收稿日期:2012-10-18

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2010019111004)

作者简介:徐中明(1963-),男,重庆大学教授,博士生导师,研究方向为车辆系统动力学及其控制,(E-mail) xuzm@cqu.edu.cn。

为研究侧翻安全的首选。笔者利用 CarSim 和 Matlab/Simulink 进行鱼钩转向联合仿真试验,对同一车辆进行了大量驾驶员不同操纵输入的仿真试验,利用数理统计方法研究了侧翻指标数据的分布规律和车辆的行驶状态;提出了适于仿真分析和复杂输入条件下的侧翻风险度量指标,并基于正交试验方法考察了多个侧翻风险因素的影响程度。

1 侧翻及其试验评估方法

汽车侧翻指汽车在行驶过程中绕其纵轴线转动 90° 或更大角度以致车身与地面相接处的一种极其危险的侧向运动。汽车侧翻一般可分为两类,一类是操稳型侧翻,另一类是绊倒型侧翻。前者是由于激烈的转向行为引起的,而后者是在车辆行驶轨迹失控如侧滑后侧向撞击路面障碍物而“绊倒”。车辆若能响应与跟随驾驶员的操纵意愿在道路上正常行驶,一般就不会发生侧翻,即汽车的操纵稳定性也是汽车侧翻安全的基础,因而操稳型侧翻研究是其他侧翻形式研究的出发点。

当前评价车辆防侧翻能力的试验标准与法规仅有美国 49CFR Part575,该法规结合在现实中两类侧翻发生的概率统计规律,针对这两种侧翻提出了以静态稳定系数 SSF 测试为主、鱼钩转向动态试验为辅的星级评价体系^[12]。

鱼钩转向试验模拟车辆一侧车轮行驶至路肩上后,为了使车辆尽快回到正常行驶轨道上,驾驶员在慌张情况下飞快转动方向盘,但车辆往往过多矫正以致发生侧翻。为了更为细致了解车辆侧翻危险发生的时间阶段,这里对鱼钩转向进行了细致划分,如图 1,共包含 5 个时间阶段:①直线行驶时间②正转向输入过程时间③正转向输入保持时间④逆转向输入过程时间⑤逆转向输入保持时间。

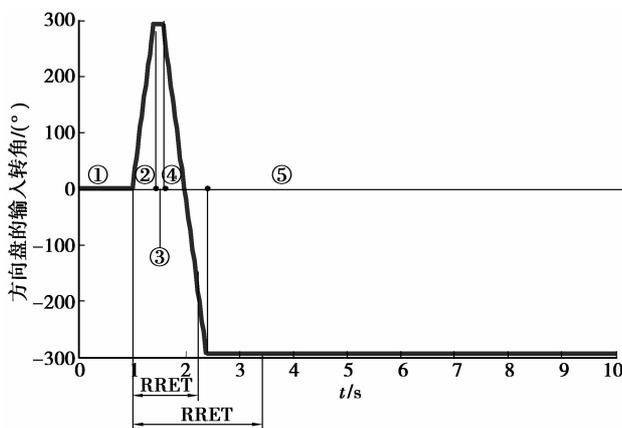


图 1 鱼钩转向与侧翻风险度量时间

由于侧翻在②~⑤的任一阶段都可能发生,这里定义了侧翻风险度量时间 RRET (Rollover Risk Evaluation Time),分两种情况:侧翻发生时,RRET 为从正转向开始输入到任一侧翻时刻的时间;未发生侧翻时,RRET 为从正转向开始输入到逆转向输入保持了 1 s 后某时刻的时间。这里 1 s 的时间长度可由试验车辆阶跃响应的调节时间确定。

2 车辆侧翻联合仿真算法

2.1 CarSim 整车非线性模型

为了达到实车侧翻动态仿真的精度,必须建立接近车辆实际行驶状况的整车动力学模型,特别是在侧翻这种极限行驶状态下,应该充分考虑到轮胎、悬架、转向及路面附着条件等非线性特性对车辆动力学的影响。CarSim 是由 MSC 公司开发的专用车辆动力学仿真软件,由于其建立在密西根大学公路交通研究所多年的理论和试验基础上,具有较高的仿真精度,因而得到了丰田、通用及一汽等国内外厂商和研究机构的广泛应用。这里以面向特性的参数化建模方法,以某前轴为独立悬架、后轴为非独立悬架配置且具有高质心特征的 SUV 车辆为对象,定义并设置了包括车体、转向系、传动系、轮胎及悬架等 7 个子系统模型的具体参数,忽略空气动力学的影响,建立了该 SUV 车辆的整车非线性动力学模型,以用于操稳型侧翻动力学的实车仿真分析。

2.2 CarSim 和 Matlab/Simulink 联合仿真算法

由于仿真试验次数较多,试验数据庞大,因而需要编制简洁有效的算法和优化试验数据的存储结构以方便后续的数理统计与分析。如图 2 所示,在 Matlab 的 M 文件中首先定义驾驶员的操作输入包括鱼钩转向输入中方向盘最大转角 θ 、方向盘角速度 ω 、目标车速 v_x ,然后对 Simulink 工作空间的常量进行初始化;在 Simulink 中生成鱼钩转向信号和速度信号并输入至 CarSim 中进行侧翻动力学仿真试验,CarSim 运行所得的车辆状态数据实时地输出至 Simulink,Simulink 根据仿真条件(如仿真时间、是否有侧翻危险或是否已经侧翻)控制仿真的运行与终止,仿真结束后 Simulink 将试验结果返回 M 文件并进行试验数据的整理与存储,从而得到所关心的样本信息。根据该联合仿真算法进行了两个方面的计算,将分别在下面 3、4 节中指出。

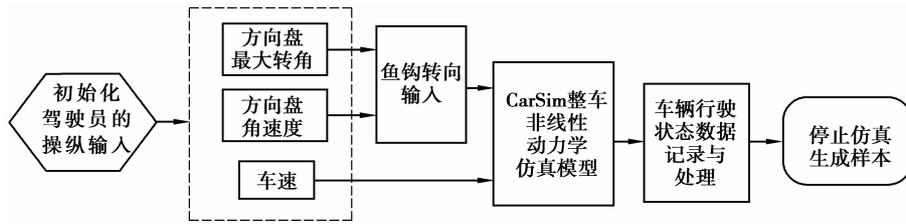


图 2 联合仿真与数据处理框图

3 侧翻危险时车辆状态统计与分析

仿真试验条件如表 1 所示,在一定附着系数为 f 的路面上进行了 864 次仿真计算,在 CarSim 中修改道路模型后再依次仿真,即总体样本为 6 048 个。

表 1 总体样本

名称	$v_x / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$\theta / (^{\circ})$	$\omega / [(^{\circ}) \cdot \text{s}^{-1}]$	f
最小值	40	100	100	0.65
最大值	120	600	1 600	0.96
间距	10	100	100	0.05

在 49CFR Part575 动态试验中要考察车轮是否离地,这里将轮胎载荷转移率的绝对值 $|LTR|$ 为 1 视为车辆有侧翻危险。当 $|LTR| = 1$ 时,记录下此刻车辆的侧向加速度、车身侧倾角、车身侧偏角及 4 个车轮的侧偏角数据。而在仿真分析中,当车身侧倾角达到 70° ,便视为车辆发生了侧翻。数据后处理中,计算得到侧向加速度的绝对值 $|a_y|$ 、车身侧倾角的绝对值 $|\varphi|$ 、车身侧偏角的绝对值 $|\beta|$ 、前后轴等效侧偏角之比的绝对值 $|\alpha_f / \alpha_r|$,其中:

$$\alpha_f = a \cot\left(\frac{\cot(\alpha_{fl}) + \cot(\alpha_{fr})}{2}\right),$$

$$\alpha_r = a \cot\left(\frac{\cot(\alpha_{rl}) + \cot(\alpha_{rr})}{2}\right)。$$

根据联合仿真试验结果,在 SPSS 中进行了数理统计计算与分析。

3.1 侧翻指标统计与分析

对不同路面附着系数 f 下车辆侧翻状况进行了统计,设出现侧翻的危险次数为 N ,实际侧翻次数为 n ,则侧翻危险概率 P_N 、实际侧翻概率 P_n 和 LTR 指标的准确度 P_{LTR} 分别如表 2 所示。从实际侧翻情况看,在附着系数为 0.65 和 0.70 路面上没有侧翻发生,即使在附着良好的路面上发生侧翻的概率也较低,当仿真的路面附着系数较大时侧翻发生的概率很高。这种变化趋势与 NHTSA 对实际侧翻事故的统计数据基本吻合。仿真试验中出现车轮抬起次数和概率较实际侧翻的统计情况偏大,这主要是由于

试验条件相比实际情况恶劣,但两者规律基本一致。

表 2 不同路面附着系数下车辆侧翻状况统计

f	N	$P_N / \%$	n	$P_n / \%$	$P_{LTR} / \%$
0.65	46	5	0	0	0
0.70	104	12	0	0	0
0.75	174	20	26	3	15
0.80	343	39	121	15	35
0.85	604	70	396	46	66
0.90	735	85	661	77	90
0.95	755	87	742	86	98

说明: $P_N = N/864, P_n = n/864, P_{LTR} = n/N$

从侧翻指标的精确度来看,LTR 指标正确表征车辆侧翻危险的程度与路面附着系数有很大关系,

路面附着系数越高其精确度也越高。在附着良好的路面上,LTR 指标的精确度约为 35%。

对仿真试验记录的侧向加速度、侧倾角进行数理统计计算发现,这两个侧翻指标服从正态分布,当所得侧翻危险样本越多,正态分布规律越明显。不同路面附着系数下侧翻指标 $|a_y|$ 、 $|\varphi|$ 的均值和标准差如表 3 所示。

表 3 侧翻指标 $|a_y|$ 和 $|\varphi|$ 的分布规律

f	正态分布统计量			
	$\mu_{ a_y } / g$	$\sigma_{ a_y } / g$	$\mu_{ \varphi } / (^{\circ})$	$\sigma_{ \varphi } / (^{\circ})$
0.65	0.612	0.021	5.325	0.361
0.70	0.655	0.035	5.466	0.386
0.75	0.704	0.031	5.572	0.448
0.80	0.737	0.048	5.758	0.479
0.85	0.742	0.048	6.126	0.286
0.90	0.758	0.041	6.300	0.323
0.95	0.782	0.036	6.120	0.345

当前车辆侧翻预警与控制中,以 $|a_y|$ 、 $|\varphi|$ 为侧翻指标时需标定其阈值。以 $|a_y|$ 为例,如图 3,建议先以大量试验仿真方法求取 $|a_y|$ 指标的正态分布参数。为了适应路面环境的变化进行必要的差值或拟合,以 3σ 原则选择合理的 $|a_y|$ 阈值。另外,与 LTR 指标相比,当 $|a_y|$ 阈值为 $\mu_{|a_y|} - 3\sigma_{|a_y|}$ 或 $|\varphi|$ 的阈值为 $\mu_{|\varphi|} - 3\sigma_{|\varphi|}$ 时, $|a_y|$ 、 $|\varphi|$ 在表征车辆侧翻危险时

会有同等的准确度。

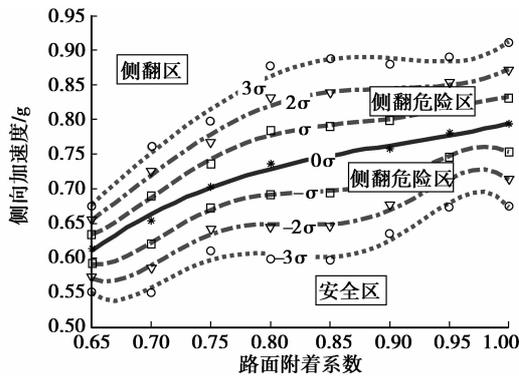


图 3 侧翻指标 $|a_y|$ 阈值的确定

3.2 侧滑甩尾和不足转向统计与分析

如图 4 所示,在附着系数为 0.65 路面上车辆的侧偏角普遍较大即车辆很容易发生侧滑甩尾情况,在附着系数为 0.80 的路面上车辆出现较大侧偏角的频率较低,而在附着系数为 0.95 的路面上车辆侧

偏角均较小,基本不会发生侧滑甩尾情况。这就说明,在低附着路面上操稳型侧翻少有发生,驾驶员的急转向行为主要首先导致车辆的侧滑甩尾,然而这增加了绊倒型侧翻发生的可能性;高附着路面上,一般不会发生侧滑甩尾情况,驾驶员的急转向行为主要导致车辆首先发生操稳型侧翻。因而,主动防侧翻安全系统只对操稳型侧翻有作用,有较大大局性;ESP、ESC 等车辆电子稳定控制系统对于低附着路面上可能发生的绊倒型侧翻有较好的抑制作用。因而两者应该有效结合,应对复杂多变的路面环境和有效响应驾驶员的操纵要求。

正常情况下 $|\alpha_f/\alpha_r| \leq 1.5$, 当 $|\alpha_f/\alpha_r| \geq 1.5$ 即转向不足,且其值越大表明车辆转向不足趋势越强^[14]。如图 5 所示,在附着系数为 0.65 的路面上 $|\alpha_f/\alpha_r|$ 普遍较小,在附着系数为 0.80 的路面上出现较大 $|\alpha_f/\alpha_r|$ 的频率有所增加,在附着系数为 0.95 路面上增加得更加明显。即高附着路面上,尽管急转向有导致操稳型侧翻危险,车辆仍然表现为转向不足。

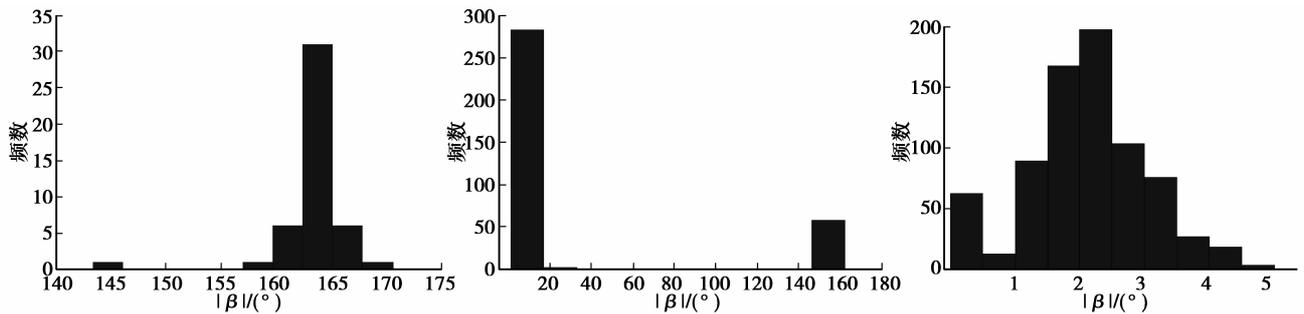


图 4 在附着系数 0.65、0.80 和 0.95 路面上侧翻危险时车身侧偏角 $|\beta|$ 的直方图

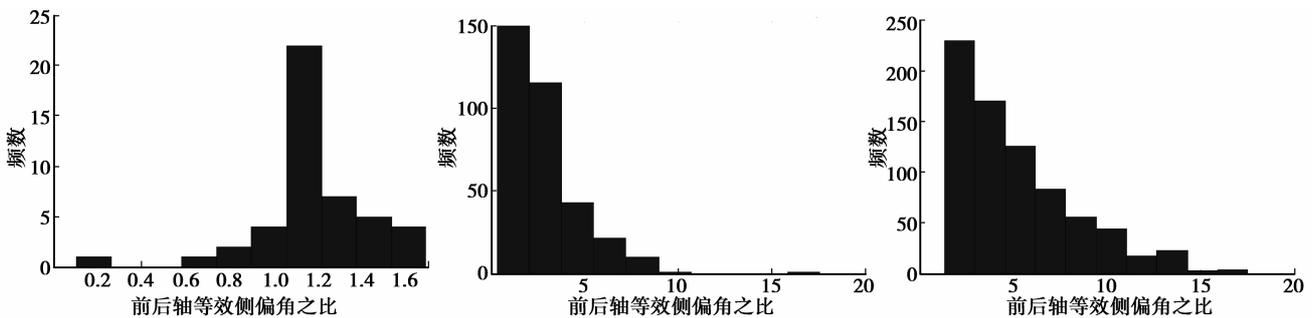


图 5 在附着系数 0.65、0.80 和 0.95 路面上侧翻危险时前后轴等效侧偏角之比的直方图

4 侧翻风险因素分析

4.1 侧翻风险度量指标

前面的研究表明,以 LTR 为车辆侧翻指标具有较高可信度,为了更好地度量车辆的侧翻风险

和车辆侧翻影响因素的作用,提出了如下侧翻风险度量指标(Rollover Risk Evaluation Index):

1)侧翻风险度量时间内轮胎载荷转移率绝对值的一次积分平均,其物理意义为平均电流

$$RREI_1 = \frac{\int_{t_s}^{t_h} |LTR| dt}{t_h - t_s}。$$

2)侧翻风险度量时间内轮胎载荷转移率绝对值的二次积分平均,其物理意义为平均功率

$$RREI_2 = \frac{\int_{t_s}^{t_h} |LTR|^2 dt}{t_h - t_s},$$

其中, $t_h - t_s$ 为侧翻风险度量时间。

由于 $0 < LTR < 1$, 显然有 $0 < RREI_2 < RREI_1 < 1$ 。

4.2 正交试验设计

正交试验设计是研究多因素和多水平问题的一种试验设计方法,可通过较少的试验次数考察各因素的主次关系和各因素对试验结果是否有显著作用^[15-16]。这里选取了5个因素,路面环境因素A为附着系数 f , 车辆结构因素B为车辆侧翻阈值 ($T/2h_g$), 驾驶员因素C、D、E分别为车速 v_x 、鱼钩转向输入的方向盘最大转角 θ 、方向盘角速度 ω , 并

将各因素的水平分散在合理范围内,如表4所示。采用 $L_{25}(5^5)$ 正交表,忽略因子间的交互作用,在SPSS中生成正交试验方案,如表5所示,其中误差空列用来对其他因素和因素间交互作用的影响进行误差估计。依据该正交试验方案,利用联合仿真模型逐一进行仿真试验,记录试验结果。

表4 正交试验因素水平表

水平	A	B	C	D	E
	f	$T/(2h_g)$	$v_x /$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$\theta / (^\circ)$	$\omega /$ [$(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}$]
1	0.70	0.716	40	90	60
2	0.75	0.786	60	180	180
3	0.80	0.875	80	270	300
4	0.85	0.983	100	360	420
5	0.90	1.123	120	450	540

表5 正交试验方案与结果

试验标识	A	B	C	D	E	F	考核指标	
	f	$T/(2h_g)$	$v_x / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$\theta / (^\circ)$	$\omega / [(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}]$	误差空列	RREI ₁	RREI ₂
1	0.70	0.875	60	360	300	2	0.568	0.349
2	0.90	0.875	120	90	540	4	0.678	0.561
3	0.70	0.716	40	90	60	1	0.231	0.069
4	0.75	1.123	120	450	300	1	0.494	0.258
5	0.70	0.983	120	270	420	5	0.523	0.299
6	0.85	0.875	80	270	180	1	0.691	0.526
7	0.90	0.983	80	450	60	2	0.658	0.464
8	0.85	0.716	60	450	540	5	0.838	0.796
9	0.75	0.875	100	180	60	5	0.615	0.424
10	0.80	1.123	60	270	60	4	0.480	0.266
11	0.80	0.875	40	450	420	3	0.601	0.401
12	0.70	1.123	80	180	540	3	0.445	0.225
13	0.85	1.123	100	90	420	2	0.497	0.295
14	0.90	1.123	40	360	180	5	0.479	0.280
15	0.90	0.786	60	180	420	1	0.734	0.630
16	0.85	0.786	120	360	60	3	0.832	0.731
17	0.75	0.786	40	270	540	2	0.629	0.457
18	0.90	0.716	100	270	300	3	0.774	0.719
19	0.80	0.983	100	360	540	1	0.578	0.367
20	0.70	0.786	100	450	180	4	0.659	0.455
21	0.85	0.983	40	180	300	4	0.384	0.181
22	0.80	0.786	80	90	300	5	0.598	0.427
23	0.80	0.716	120	180	180	2	0.782	0.725
24	0.75	0.716	80	360	420	4	0.786	0.687
25	0.75	0.983	60	90	180	3	0.358	0.156

4.3 正交试验数据处理与分析

车辆的转向行驶过程中必然会发生一定的轮胎载荷转移,但车辆有侧翻危险时轮胎载荷转移率会相比正常安全转向行驶时偏高。如图 6 所示,相比 $RREI_1$, $RREI_2$ 能够进一步放大试验数据的相对大小,这有利于区分侧翻危险与正常的轮胎载荷转移,也有利于区分不同侧翻的危险程度。因而 $RREI_2$ 在度量车辆侧翻风险方面更有优势。

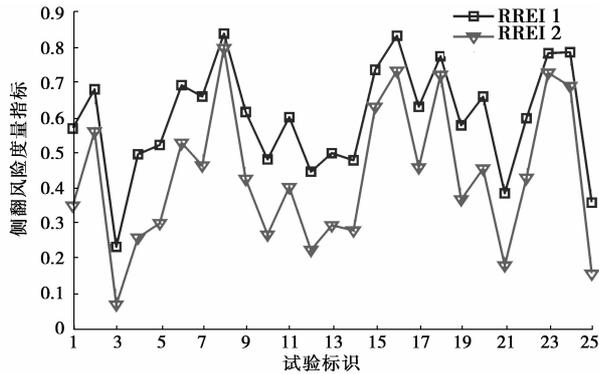


图 6 $RREI_1$ 和 $RREI_2$ 的比较

以 $RREI_2$ 为目标函数,对正交试验结果进行极差分析,如表 6 所示。在影响车辆侧翻风险的 5 个因素中,侧翻阈值影响最大,其次为路面附着系数和车速,再次为方向盘最大转角,方向盘角速度因素影响最小。

表 6 极差分析

统计量	因素					
	A	B	C	D	E	F
\bar{K}_j^1	0.279	0.599	0.278	0.302	0.391	0.370
\bar{K}_j^2	0.279	0.540	0.439	0.437	0.429	0.458
\bar{K}_j^3	0.437	0.452	0.466	0.453	0.387	0.446
\bar{K}_j^4	0.506	0.293	0.452	0.483	0.462	0.430
\bar{K}_j^5	0.531	0.265	0.515	0.475	0.481	0.445
极差 R_j	0.251	0.335	0.237	0.181	0.095	0.088
主次因素	BACDE					

极差分析方法清晰明显、计算量小,能得到因素的主次影响,但却不能区分因素各个水平所对应试验结果的差异究竟是由于因素水平不同引起的还是由于试验误差引起的,也不能提出一个标准来判断所考察因素作用是否显著。方差分析能将数据的总变异分解为因素引起的变异和误差引起的变异两部

分,通过构造 F 统计量并作 F 值检验,即可判断因素作用是否显著。

方差分析结果如表 7 所示,查询 F 表显然有:

1) $F_B > F_{0.01}(4, 4)$, 即侧翻阈值因素分布水平的改变对试验结果有高度显著性影响。这说明,车辆轮距和质心高度参量对侧倾力矩大小的直接影响,将会显著增加操稳型侧翻和绊倒型侧翻的事故发生率。因而在车辆设计研发中应高度重视车辆轮距和质心高度因素对车辆侧翻风险的影响。

2) $F_{0.01}(4, 4) > F_C > F_A > F_{0.05}(4, 4)$, 即路面附着系数因素和车速因素水平的改变对试验结果有显著性影响。即路面因素偏高是车辆操稳型侧翻发生的重要外在条件,而车速的变化会对车辆系统的固有特性有显著性影响。

3) $F_{0.05}(4, 4) > F_D > F_{0.1}(4, 4)$, 即方向盘最大转角因素水平的改变对试验结果有一定影响。转角大小可以反映驾驶员对系统输入的幅值情况,若输入幅值较大,对一个固定的车辆系统而言,其输出幅值也将增大。为了防止侧翻,驾驶员应该从转角大小和车速角度分别控制系统的输入和适当改变系统的固有特性,从而使车辆的侧倾运动得到控制或改善。

4) 方向盘角速度因素水平改变对试验结果较小,是发生侧翻危险的一个必要条件,然而低附着路面上发生的车辆甩尾侧滑主要是由于方向盘角速度偏大引起的,这增加了绊倒型侧翻的可能性。即驾驶员安全驾驶方面,车辆高速行驶时无论低附着路面还是高附着路面切记方向盘转角不能过大、过急,转向行驶过程中一定要减速慢行。

表 7 对主体间效应检验的方差分析

源	III型平方和	自由度	均方	F 值	Sig.
校正模型	0.941	20	0.047	7.705	0.03
截距	4.620	1	4.620	756.581	0
A	0.199	4	0.050	8.128	0.033
B	0.436	4	0.109	17.870	0.008
C	0.161	4	0.040	6.608	0.047
D	0.109	4	0.027	4.469	0.088
E	0.035	4	0.009	1.447	0.364
F	0.024	4	0.006		
总计	5.585	25			
校正的总计	0.965	24			

5 结 论

1)侧翻指标方面,LTR 指标相比侧向加速度、侧倾角指标可信度要高,以侧向加速度、侧倾角为指标进行车辆侧翻预警与控制时建议对其适当修正。

2)车辆的侧翻风险和侧翻类型与地面附着系数有很大关系。低附着路面,易首先出现侧滑甩尾,侧翻主要为绊倒型侧翻;高附着路面上,侧翻主要为操稳型侧翻,转向不足趋于明显。

3)提出了适于仿真分析的侧翻风险度量指标 RREI,通过上述建模仿真与数理统计分析方法,可以有效评估车辆的侧翻风险和考察侧翻风险因素的影响程度。

仿真分析结果表明,侧翻阈值对侧翻风险有高度显著性影响,在车辆设计研发中应予以高度重视。路面附着系数、车速对侧翻风险有显著性影响,方向盘转角大小有一定影响。方向盘角速度影响较小,一定大小的方向盘角速度是操稳型侧翻发生的一个必要条件。但在今后研究中应该进行实车试验以进一步验证仿真试验结果。

参考文献:

- [1] National Highway Traffic Safety Administration(NHTSA). National automotive sampling system[EB/OL]. <http://www.nhtsa.gov/NASS>.
- [2] Hernandez W. Optimal estimation of the relevant information coming from a rollover sensor placed in a car under performance tests[J]. *Measurement*, 2008, 41(1):20-31.
- [3] Rogers S, Zhang W B. Development and evaluation of a curve rollover warning system for trucks [C] // *Proceedings of the 2003 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, June 9-11, 2003, Palo Alto, CA, USA. Piscataway:IEEE Press, 2003:294-297.
- [4] Schofield B, Haggglund T, Rantzer A. Vehicle dynamics control and controller allocation for rollover prevention [C] // *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications*, October 4-6, 2006, Munich, German. Piscataway: IEEE Press, 2006:149-154.
- [5] Chen B C, Peng H. Differential-braking-based rollover prevention for sport utility vehicles with human-in-the-loop evaluations[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2001, 36(4/5):359-389.
- [6] Xia J J, Hu C. Analyze of vehicle active rollover control on air spring[J]. *Advanced Materials Research*, 2011,383:2618-2621.
- [7] 朱天军,宗长富,吴炳胜,等.基于改进 TTR 算法的重型车辆侧翻预警系统[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(10):88-94.
ZHU Tianjun, ZONG Changfu, WU Bingsheng, et al. Rollover warning system of heavy duty vehicle based on improved TTR algorithm [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011,47(10):88-94.
- [8] Yu H, Guvenc L, Ozguner U. Heavy duty vehicle rollover detection and active roll control [J]. *Vehicle System Dynamics*,2008, 46(6):451-470.
- [9] Schofield B. Vehicle dynamics control for rollover prevention[D]. Sweden:Lund University, 2006.
- [10] Johansson B, Gafvert M. Untripped SUV rollover detection and prevention[C]// *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, December 14-17, 2004, Atlantis, Paradise Island, Bahamas. Piscataway:IEEE Press, 2004, 5:5461-5466.
- [11] 沈明,王赞松,李志刚,等.基于仿真分析的汽车侧翻风险研究[J]. *汽车工程*, 2009,31(12):1173-1176.
SHEN Ming, WANG Yunsong, LI Zhigang, et al. A research on the rollover risk of motor vehicles based on simulation analysis[J]. *Automotive Engineering*, 2009, 31(12):1173-1176.
- [12] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). 49 CFR part 575:rollover resistance[EB/OL]. <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/Rulemaking/Rules/Associated%20Files/RolloverResistance.pdf>.
- [13] 李志魁.基于 CarSim 的整车动力学建模与操纵稳定性仿真分析[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2007.
- [14] Kiencke U, Nielsen L. *Automotive control systems: for engine, driveline, and vehicle* [M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2005.
- [15] Ma S H, Wang H, Wang Y, et al. Bio-hydrogen production from cornstalk wastes by orthogonal design method[J]. *Renewable Energy*, 2011,36(2):709-713.
- [16] Kim S J, Cho Y G, Oh C S, et al. Development of a dual phase steel using orthogonal design method[J]. *Material & Design*, 2009, 30(4):1251-1257.

(编辑 张 苹)