



侧倾角;  $\varphi_s$  为簧载质量的侧倾角;  $G_s$  为簧载质量的重力;  $h_u$  为非簧载质量质心距地面的高度;  $h_s$  为簧载质量质心距地面的高度;  $h_r$  为侧倾中心距地面的高度;  $h$  为簧载质量侧倾力臂;  $K_r$  为悬架的组合侧倾角刚度;  $a_y$  为侧向加速度.

由式(1)~(4)整理可得

$$\varphi_s = \frac{\varphi_u + \frac{a_y}{g}}{\frac{K_r}{Gsh} - 1} \quad (5)$$

汽车稳态转向时, 由于侧倾力矩的作用, 垂直载荷在内、外侧车轮上不相等, 作用于内、外侧车轮上的地面垂直反作用力可由轮胎垂直刚度定义, 且轮胎变形量与非簧载质量的侧倾角有关. 则有:

$$F_i = K_t(\delta_0 - \delta), \quad (6)$$

$$F_o = K_t(\delta_0 + \delta), \quad (7)$$

$$\delta = \frac{1}{2}B\varphi_u. \quad (8)$$

式中:  $F_i$  为作用于汽车内侧轮胎上的地面垂直反作用力;  $F_o$  为作用于汽车外侧轮胎上的地面垂直反作用力;  $K_t$  为轮胎的垂直刚度;  $\delta_0$  为  $\varphi_u = 0$  时, 轮胎的变形量;  $\delta$  为  $\varphi_u \neq 0$  时, 轮胎的变形量;  $B$  为轮距.

由公式(6)~(8)及  $F_i + F_o = G_u + G_s$  可得

$$F_i = \frac{1}{2}(G_u + G_s) - \frac{1}{2}K_t B \varphi_u. \quad (9)$$

式中,  $G_u$  为非簧载质量的重力.

对接地点  $C$  取矩:

$$F_i B + (G_s h_s + G_u h_u) \frac{a_y}{g} - \frac{B}{2}(G_s + G_u) + G_s(h_s \varphi_s + h_s \varphi_u) + G_u h_u \varphi_u = 0. \quad (10)$$

由公式(5)、(9)、(10)整理并联合求解可得

$$\frac{a_y}{g} = \frac{\frac{K_t}{2}B^2 - G_s h_s - G_u h_u - \frac{G_s h}{\frac{K_r}{Gsh} - 1}}{\frac{K_t}{2}B^2} \left( \frac{K_r}{Gsh} - 1 \right) \varphi_s, \quad (11)$$

$$\varphi_s = \frac{G_s h_s + G_u h_u + \frac{G_s h}{\frac{K_r}{Gsh} - 1}}{\frac{K_t}{2}B^2 - G_s h_s - G_u h_u - \frac{G_s h}{\frac{K_r}{Gsh} - 1}} \cdot \frac{a_y}{g}, \quad (12)$$

$$F_i = \frac{1}{2}(G_u + G_s) - \frac{1}{2}K_t B \varphi_u. \quad (13)$$

## 2 计算机模拟分析

计算机模拟时, 给定  $\varphi_s$  一个初始值 0, 在循环计算中每次增加 0.01 rad. 不断计算式(11)~(13)的值, 当  $F_i = 0$  时停止. 此时可以得到汽车的侧翻阈值  $a_y$ , 簧载质量的最大侧偏角  $\varphi_s$ , 非簧载质量的最大侧偏角  $\varphi_u$ . 由于计算是连续的, 所得的参数的变化也是连续的, 它们代表了每一个状态的参量值的变化. 因此, 这个模型就模拟了汽车从开始到即将侧翻时的状态变化, 达到对汽车侧翻真实模拟的目的.

计算机模拟按要求输入不同的参数, 通过计算机编程运算, 得到此模型的侧翻阈值; 也可以通过该模型不同参数的变化, 得到参数变化对汽车侧翻阈值的影响. 具体模拟的参数如表 1. 由表 1 得  $a_y = 0.270 \text{ g}$ ,  $\varphi_u = 0.235 \text{ rad}$ ,  $\varphi_s = 0.238 \text{ rad}$ .

## 3 参数分析

参数敏感性分析可以明确汽车各参数对侧翻阈值的影响. 从而在设计上进行改进和优化, 在不影响其它整车性能的情况下, 使得汽车的侧翻稳定性达到最优值.

本模型输入参数较少, 但是考虑的因素比较充分. 如果忽略了各轴参数的差异, 这个模型可以描述大多数汽车的侧倾特性. 因此在参数敏感性分析中<sup>[10]</sup>, 主要考虑如下几个因素的影响<sup>[11]</sup>: 质心高度  $h_s$ , 侧倾中心高度  $h_r$ , 悬架组合角刚度  $K_r$ , 轮距  $B$ , 轮胎垂直刚度  $K_t$ . 由计算机编程做出这几个参数与侧翻阈值变化的关系曲线(图 2~ 6).

由图 2 中可以看出, 质心高度变化对侧翻阈值有很大影响, 这是对侧翻阈值最敏感的参数之一. 美国的调查发现<sup>[12]</sup>, 具有 0.4 g 倾翻阈值的满载重型货车发生倾翻事故的频率约是倾翻阈值为 0.65 g 的空载重型货车的 10 倍, 可见重型货车倾翻阈值受质心高度的

表 1 模拟的参数值

Tab. 1 Parameter value of simulation

参数	$B/m$	$h_s/m$	$K_t/(N \cdot \text{rad}^{-1})$	$h_u/m$	$h_r/m$	$h_s/m$	$G_u/N$	$G_s/N$	$K_r/(N \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$
数值	1.7	1.7	200000	0.5	0.9	1.7	20000	60000	150000

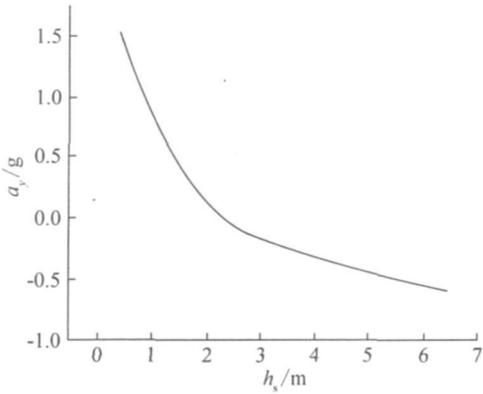


图2 质心高度变化对侧翻阈值的影响

Fig. 2 The rollover threshold based on centroid height variation

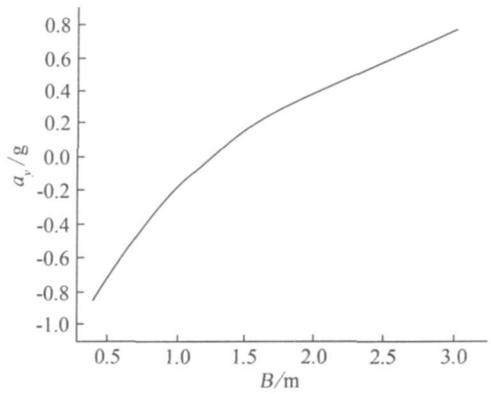


图5 轮距变化对侧翻阈值的影响

Fig. 5 The rollover threshold based on track change

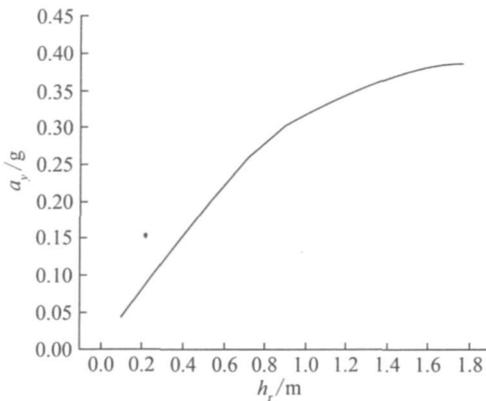


图3 侧倾中心高度变化对侧翻阈值的影响

Fig. 3 The rollover threshold based on roll center height change

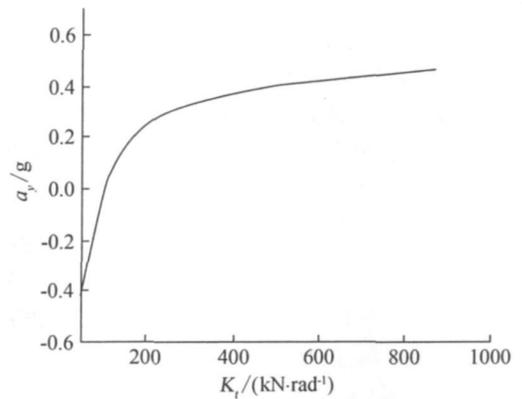


图6 轮胎垂直刚度变化对侧翻阈值的影响

Fig. 6 The rollover threshold based on tire vertical stiffness change

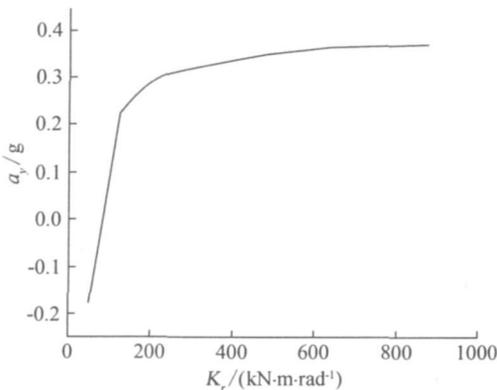


图4 悬架组合角刚度变化对侧翻阈值的影响

Fig. 4 The rollover threshold based on suspension combined angle stiffness change

动都会导致汽车的侧翻. 因此, 降低质心高度, 对提高汽车的稳定性尤其是抗侧翻性能, 有显著的作用.

由图3中可以看出, 增大汽车的侧倾中心高度可以增大汽车的侧翻阈值. 但是当汽车的侧倾中心高度增大到一定程度(约1.60 m)时, 它对汽车的侧翻阈值的影响已经很小了, 甚至侧翻阈值不会再增大. 同时, 侧倾中心的高度受到汽车的底盘结构影响, 只能在汽车的综合性能上加以考虑.

由图4可以看出, 增大悬架组合角刚度, 可以增大汽车的抗侧翻性能.  $K_r$  在 50~ 214 kN·m/rad 时, 汽车的侧翻阈值随  $K_r$  的增大而急剧增大. 但是当  $K_r$  超过 270 kN·m/rad 时,  $K_r$  对侧翻阈值的影响已经不明显, 甚至可以说, 当汽车的  $K_r$  值超过此界限时,  $K_r$  相对于汽车侧翻阈值的影响可以忽略了.

由图5中可以看出, 轮距是影响汽车侧翻阈值最敏感的参数之一. 轮距的增大会一直增大汽车的侧翻阈值. 当轮距的值小于 1.2 m 时, 汽车的状态极其不稳定, 此时的侧翻阈值几乎为零. 因此, 理论上的汽车

影响很大. 一般来说, 汽车的侧翻阈值在 0.2~ 0.8 g 居多, 因此, 汽车的质心高度应控制在 0.8~ 1.8 m. 当  $h_s$  达到 2.5 m 时, 汽车的稳定性极差, 车身的微小晃

轮距都不应该小于此值. 由于轮距的大小受到最大车宽限制, 因此需要综合考虑各种因素如汽车的外观、布置和整车性能, 才能最大的提高的汽车的抗侧翻能力.

由图6可以看出, 轮胎的垂直刚度的增大也可以增大汽车的侧翻阈值. 同汽车的悬架角刚度类似, 在 $K_t$ 很小时, 其增大可以令汽车的侧翻阈值迅速增大. 但当其值达到270 kN/rad时,  $K_t$ 的影响已经不再重要了. 同时 $K_t$ 的增大使得汽车侧翻阈值增大的同时, 也使非簧载质量的侧倾角减少, 这不利于汽车的稳定性. 因此要综合考虑的汽车的整体性能来限定 $K_t$ 的值,  $K_t$ 的值也不是越大越好.

## 4 结 论

汽车侧翻是导致生命财产严重损失的重大交通事故. 本文根据汽车侧翻理论, 建立起汽车侧翻模型, 进而对汽车的侧翻进行模拟, 并具体分析影响侧翻的汽车因素. 这些主要因素是质心高度、侧倾中心高度、悬架组合角刚度、轮距和轮胎垂直刚度. 为使参数对侧翻阈值的影响更加明晰, 一并进行计算模拟, 模拟结果可为优化汽车结构并提高汽车侧翻稳定性提供科学依据.

### 参考文献:

- [1] Frimberger M, Wolf F, Scholpp G, et al. Influences of parameters at vehicle rollover[C]// International Body Engineering Conference & Exposition. Detroit: SAE, 2000.
- [2] Nagai M, Taniguchi T, Takano S, et al. Study on vehicle

dynamics model for improving roll stability[J]. JSAE Review, Elsevier, 2003, 24: 149-156.

- [3] Chen B C, Peng H. A real time rollover threat index for sports utility vehicles[C]// Proceedings of the American Control Conference. San Diego, California: IEEE Press, 1999.
- [4] Kim H J, Park Y P. Investigation of robust roll motion control considering varying speed and actuator dynamics[J]. Mechatronics, 2004, 14: 35-54.
- [5] 金智林, 翁建生, 胡海岩. 汽车侧翻及稳定性分析[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(3): 355-358.
- [6] 花家寿, 刘合法, 范桦, 等. 车辆静态侧翻试验方法的分析研究[J]. 传动技术, 2000, 21(3): 36-46.
- [7] Sampson D J M, Cebon D. Active roll control of single unit heavy road vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(4): 229-270.
- [8] 耶尔森·赖姆帕尔. 汽车底盘基础[M]. 张洪欣, 等译. 北京: 北京科学普及出版社, 1992.
- [9] 何峰, 张永德. 汽车静态侧翻阈值的计算方法[J]. 贵州工业大学学报, 1997, 26(6): 88-92.
- [10] 郑安文, 宋健, 吴凯辉, 等. 汽车的力学参数与稳态转向特性[J]. 汽车工程, 1999, 21(5): 269-274.
- [11] 何峰, 杨宁, 郑秉康. 影响载重汽车侧翻的主要汽车因素分析[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2001, 30(4): 92-95.
- [12] Germano S, Isermann R. Determination of the center of gravity of a vehicle with parameter estimation[C]// In IFAC Symposium on Identification. Copenhagen: Pergamon Press Inc, 1994.

## Study on Stability of Rollover of Vehicle

WU Xir ye<sup>\*</sup>, GE Xiaohong, LUO Shuyou, HUANG Hongwu

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Rollover is one of the main traffic accident forms for vehicle. According to the datas recently, rollover has become the second most serious accident. However, the study of rollover in China is at the beginning. The study of vehicle rollover is based on the theories of rollover. In order to optimize vehicle configuration, enhance vehicle rollover stability, and ensure the road safety, rollover models are proposed and simulated in computer. Besides, the reasons that have effect on rollover are analyzed in detail. The final result can provide a scientific basis for the optimization of the vehicle's structure and improving the stability of vehicle rollover.

**Key words:** rollover; roll angle; simulation; vehicle rollover stability