

车辆弯道行驶侧倾稳定性分析与侧翻预警研究

余贵珍, 李 芹, 王云鹏, 王 迪

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 车辆在弯道上高速行驶易发生侧翻事故, 为此研究了车辆弯道防侧翻预警算法。首先分析车辆弯道行驶的侧倾稳定性, 进而导出车辆弯道行驶侧向加速度极限方程, 结合弯道半径等道路信息计算车辆进入弯道的安全车速。通过硬件在环驾驶模拟试验台对该预警算法进行验证, 结果表明: 该算法能对驶入弯道且具有侧翻风险的车辆进行预警, 以有效避免侧翻, 同时提高弯道车辆通行效率。

关键词: 侧翻; 侧倾稳定性; 预警; 安全车速

中图分类号: U 461. 91

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2014)04 - 0574 - 06

Roll Stability and Early-warning of Vehicle Driving in the Curve

YU Gui-zhen, LI Qin, WANG Yun-peng, WANG Di

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Vehicle has a high risk of rollover when it drives at a high speed in a curve. A rollover early-warning algorithm of vehicle in a curve was studied, which firstly analyzed the vehicle stability and then established vehicle lateral acceleration limit equation. Combining with the known road information, for example, the radius of the curve, safe speed and early-warning speed could be calculated before entering the curve. The algorithm had been verified by experiments on a driving simulator with hardware-in-the-loop. Results show that the algorithm can succeed in providing early-warning for vehicle which has the risk of rollover, thus avoiding rollover and improving the traffic efficiency in the curve.

Key words: rollover; roll stability; early-warning; safe speed

公路弯道是交通事故的多发路段, 其事故的发生概率大、事故严重程度高, 受到国内外相关研究机构的广泛关注和高度重视。以日本为例, 公路弯道路段发生交通事故的比例占全部路段发生交通事故的41.01%^[1]。相关统计表明, 我国70%以上的重特大公路交通事故发生在技术指标较低的弯道、陡坡、连续下坡、视距不良、路侧险要等路段上, 尤其是急弯路段在等级较低的公路中大量存在, 成为导致重特大交通事故发生的重要原因之一^[2]。美国公路交通安全管理局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)的统计数据表明, 在交通事故中, 汽车侧翻事故的危害程度仅次于汽车碰撞事

故, 居第2位^[3]。车辆在弯道行驶过程中容易发生侧翻主要有2方面原因: 车辆结构原因和驾驶员操纵原因。车辆结构原因主要包括车辆重心较高使得车辆转弯时容易发生侧倾, 严重时侧翻; 驾驶员操纵原因主要是车速过高和转向过急。

近年来, 国内外学者对车辆弯道行驶的侧翻预警也有研究, 侧翻的预警策略主要有侧翻时间 TTR (time to rollover)^[4-5]、侧翻风险预测^[6]以及利用侧向加速度和侧向载荷转移率作为预警指标判断车辆侧翻危险程度的预警^[7-8]等。实车试验需要在试验车上加装防侧翻保护杆^[9]。现存研究大多是在侧翻危险临近发生时进行预警, 往往不能提供给驾驶员

收稿日期: 2013-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61371076)

作者简介: 余贵珍(1974—), 男, 副教授, 主要从事车辆安全、智能交通方面的研究, E-mail: yugz@buaa.edu.cn

充足的反应及操纵时间,因而仍然较难避免侧翻事故的发生。

本文对车辆弯道行驶的侧向稳定性进行了分析,提出了一种弯道防侧翻的预警算法:该算法在进入弯道前即可预警,且计算量小、实时性好,能移植到单片机中形成小型预警终端。

1 车辆弯道行驶侧倾稳定性分析

1.1 侧翻过程分析

车辆侧翻指车辆在行驶过程中绕纵轴转动 90° 或更大的角度,以致车身与地面相接触的一种危险的侧倾运动。

图 1 表示车辆非绊倒型侧翻的过程,其中:CG 表示簧载质量质心;RC 表示侧倾中心。

如图 1(a) 所示,车辆直线行驶,如果没有受到其他侧向力或侧倾力矩作用,车身不会发生侧倾,此时左右两侧车轮受到的垂直载荷相等。

如图 1(b) 所示,车辆开始向左转向,或受到其他侧向力或侧倾力矩作用时,车身发生侧倾,侧倾角随着侧向加速度的增加而增大,内侧车轮轮胎垂直载荷变小,外侧轮胎垂直载荷变大。当侧向加速度增加到某一阈值时,如图 1(c) 所示,内侧车轮将离开地面。此时车辆的状态可以描述为相对侧倾不稳定(relative rollover instability)。

随着侧向加速度和侧倾角的继续增大,如图 1(d) 所示,车辆质心位置绕外侧轮胎接地点顺时针

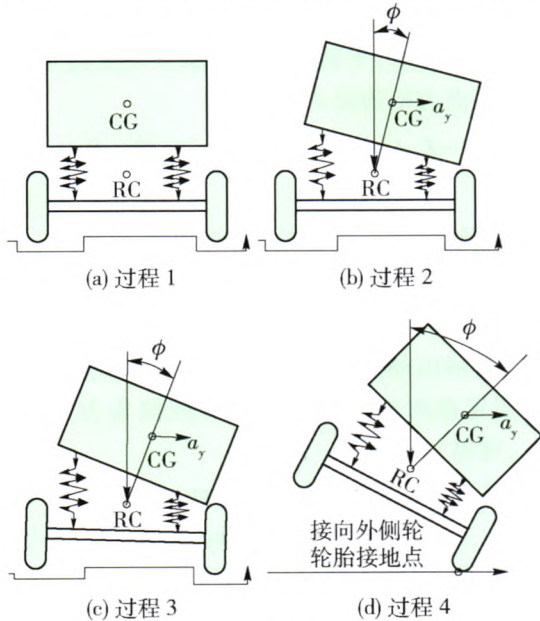


图 1 车辆侧翻过程

Fig.1 Vehicle rollover process

方向转动,此时重力产生的绕外侧轮胎接地点的力矩作用效果是阻止车辆进一步侧倾。但当车辆质心位置越过外侧轮胎接地点时,重力产生的绕外侧轮胎接地点的力矩也将加速车辆的侧翻过程,车辆将不可避免地发生侧翻。此时车辆的状态可以描述为绝对侧倾不稳定(absolute rollover instability)^[10]。

1.2 侧倾平面模型

在建模过程中,综合考虑悬架的影响、车辆的动态特性和道路横向坡度对车辆侧倾稳定极限的影响,对车辆的侧倾稳定性进行分析,计算用于侧翻预警算法的侧向加速度阈值,并由此加速度阈值推导计算得到弯道行驶过程中的安全车速。

图 2 所示为考虑悬架作用的车辆侧倾平面模型,其中: m_s 代表簧载质量; $H_{CG,s}$ 代表车辆簧载质量质心高度; H_{RC} 代表侧倾中心的高度; d 代表簧载质量质心 CG 相对于侧倾中心 RC 的高度; t_w 代表轮距; ϕ 代表侧倾角; $F_{y,RC}$ 和 $F_{z,RC}$ 分别代表侧倾中心处的侧向载荷和垂直载荷。可以得到如下力矩平衡方程:

$$\sum F_y = F_{y,RC} \cos \phi_B + F_{z,RC} \sin \phi_B - m_s a_y = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_z = -F_{y,RC} \sin \phi_B + F_{z,RC} \cos \phi_B - m_s g = 0 \quad (2)$$

$$\sum M_{RC} = m_s a_y d \cos \phi + m_s g d \sin \phi - K_\phi \phi = 0 \quad (3)$$

即

$$m_s a_y d \cos(\phi - \phi_B) + m_s g d \sin(\phi - \phi_B) = K_\phi \phi \quad (4)$$

根据图 2 表示的几何关系,可以得到

$$d = (H_{CG,s} - H_{RC}) / \cos \phi \quad (5)$$

考虑到侧倾角较小,式(4)和式(5)可以表示为

$$K_\phi \phi \approx m_s a_y d + m_s g d (\phi - \phi_B) \quad (6)$$

即

$$\phi / [(a_y/g) - \phi_B] \approx m_s g d / (K_\phi - m_s g d) \quad (7)$$

$$d \approx H_{CG,s} - H_{RC} \quad (8)$$

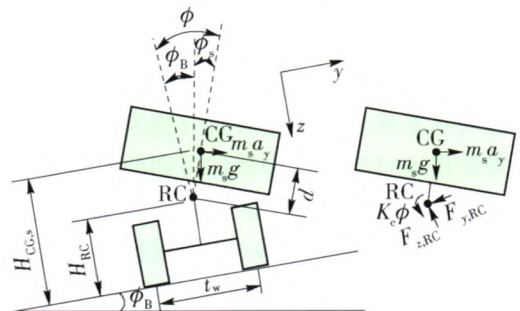


图 2 带横坡的车辆侧倾平面模型

Fig.2 Roll plane model with cross slope

式(7)中簧载质量侧倾角和侧倾角速度的比值通常被称为车辆的侧倾增益^[11-12],该比值在某些文献中也被称为侧倾率(roll rate)^[13]或侧倾梯度(roll gradient)^[14].侧倾增益还可以表示为

$$R_\phi = \frac{\phi}{(a_y/g) - \phi_B} = \frac{1}{K_\phi/[m_s g(H_{CG,s} - H_{RC})] - 1} \quad (9)$$

侧倾增益反映了作用在车身上的单位侧向角速度产生的侧倾角.普通汽车的簧载质量侧倾角与侧向加速度成正比例关系.根据大量的试验数据,日本汽车研究所给出的乘用车平均侧倾增益为7°/g左右^[15].需要指出的是,侧倾增益并不是一个固定的车辆参数. Breivik^[16]的研究表明,给定车辆的侧倾增益在一定的速度范围内是相对固定的,但是在发生一侧车轮离地直到侧翻这个过程除外.

由于SUV(sport utility vehicle)重心偏高,高速急转弯时更容易发生侧翻,因此采用车辆动力学软件CarSim提供的车辆模型.该模型考虑了包括横向、横摆以及侧倾方向的响应及其综合影响;同时,该模型能考虑汽车侧翻过程中引起的轮胎及悬架变形因素对车轮侧偏角的影响.在试验过程中,此高精度车辆模型能非常接近地模拟实车的行驶过程,同时可以为弯道预警模型提供所需要的准确的车辆参数(例如车辆质心高度)及运动参数(运动参数主要为车辆当前车速),以计算侧翻预警的阈值(即为后面提到的弯道行驶的安全车速值).

2 弯道防侧翻预警模型

本文提出一种基于临界车速的车辆侧翻预警算法.以重心较高的SUV为例,假设通过GPS导航和GIS系统等采集前方弯道相关信息,并能计算得到弯道半径和道路横坡角,且路面为已知附着系数的高附路面,以此基础来研究弯道侧翻预警模型.该预警算法包括分析决策和提示预警.其中分析决策主要指预警算法通过获取车辆运动参数和周围环境信息,分析计算车辆的安全车速极限,并根据车辆的当前运动状态确定车辆是否具有侧翻的可能性.提示预警是指通过弯道预警算法得到的预警车速与通过轮速估计的车辆车速(以下称为当前车速)进行对比,当前车速接近预警车速时,根据当前车速与预警车速的接近程度,使蜂鸣器以不同频率的警示音提示驾驶员减速,使车辆能安全地驶过弯道.

选用SUV车辆模型,并从车辆模型中引出四路轮速信号供预警模型使用.同时,需要向弯道预警

模型提供路面附着系数 μ 、弯道半径 R 及道路横坡 ϕ_B 值.如图3所示,在模型中运算最后确定车辆在当前运动状态下能保证车辆稳定行驶的最大侧向加速度值,通过与路面的附着状况对比确定车辆是否产生侧翻侧滑,并以不同频率的蜂鸣声向驾驶员予以提醒.在低附着系数的路面(例如附着系数为0.40的路面)转向行驶,随着车速的增加,通常SUV会首先发生侧滑;而在高附着系数路面(例如附着系数为0.85)通常SUV会首先发生侧翻.本文的研究重点是对车辆在高附着系数弯道行驶过程中容易出现侧翻危险进行预警.

如图3所示,其中 g 为重力加速度; $a_{y,max,\phi}$ 为车辆在带横坡的道路上行驶状态下允许的最大侧向加速度; η 为安全因子,其值为0~1,具体值则首先根据经验选取,并通过模拟仿真过程进行调整,其大小随车速的变化而不同.

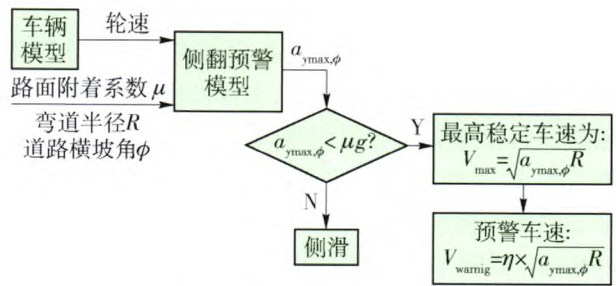


图3 弯道行驶预警逻辑

Fig. 3 Logic of early-warning in a curve

2.1 侧向加速度门限值确定

如图2所示,车辆绕右侧轮胎接地点侧倾,计算作用在该点力矩的公式为

$$\sum M_o = K_\phi \phi + F_{y,RC} H_{RC} - F_{z,RC} t_w / 2 + F_{i,z} t_w = 0 \quad (10)$$

考虑到侧倾角较小,式(1)(2)可以表示为

$$F_{y,RC} = m_s a_y - m_s g \phi_B \quad (11)$$

$$F_{z,RC} = m_s g + m_s a_y \phi_B \quad (12)$$

当车辆内侧轮胎离地时,内侧轮胎的垂向载荷为0,假定此时的侧向加速度和侧倾角为 $a_{y,max,\phi}$ 和 $\phi_{max,\phi}$,可得

$$K_\phi \phi_{max,\phi} = -(m_s a_{y,max,\phi} - m_s g \phi_B) H_{RC} + (m_s g + m_s a_{y,max,\phi} \phi_B) t_w / 2 \quad (13)$$

将式(7)式(8)代入式(13)中,可得

$$m_s a_{y,max,\phi} (H_{CG,s} - H_{RC}) + m_s g (H_{CG,s} - H_{RC}) \cdot (\phi_{max,\phi} - \phi_B) = -(m_s a_{y,max,\phi} - m_s g \phi_B) H_{RC} + (m_s g + m_s a_{y,max,\phi} \phi_B) t_w / 2 \quad (14)$$

带入式(9)表示的侧倾增益的表达式,可得

$$\frac{a_{y_{\max,\phi}}}{g}(H_{CC,s} - H_{RC}) + (H_{CC,s} - H_{RC}) \cdot \left[\left(\frac{a_{y_{\max,\phi}}}{g} - \phi_B \right) R_\phi - \phi_B \right] = - \left(\frac{a_{y_{\max,\phi}}}{g} - \phi_B \right) H_{RC} + \left(1 + \frac{a_{y_{\max,\phi}}}{g} \phi_B \right) \frac{t_w}{2} \quad (15)$$

进一步化为

$$\frac{a_{y_{\max,\phi}}}{g} = \frac{\phi_B [H_{CC,s} + (H_{CC,s} - H_{RC}) R_\phi] + (t_w/2)}{H_{CC,s} + (H_{CC,s} - H_{RC}) R_\phi - \phi_B (t_w/2)} \quad (16)$$

由此可计算得到带横坡角的车辆侧向加速度的最大值 $a_{y_{\max,\phi}}$ 。鉴于测量方便与可操作性方面的考虑,对推导出来的 $a_{y_{\max,\phi}}$ 进行了简化,取 $H_{CC,s} = H_{RC}$, 即

$$\frac{a_{y_{\max,\phi}}}{g} = \frac{\phi_B H_{CC,s} + (t_w/2)}{H_{CC,s} - \phi_B (t_w/2)} \quad (17)$$

2.2 预警车速计算

根据车辆允许的最大侧向加速度值和弯道半径值,可以将车辆的侧向加速度转化为车速形式,得到弯道行驶过程中的最高安全车速,在其基础上考虑安全因子,可得到预警车速。

根据侧向加速度、转弯半径以及速度之间的关系

$$a_y = \frac{V^2}{R} \quad (18)$$

可得在已计算出的最大侧向加速度值与安全车速及弯道半径之间的关系

$$V_{\max} = \sqrt{a_{y_{\max,\phi}} R} \quad (19)$$

加入安全因子 η , 即得到预警车速

$$V_{\text{warnig}} = \eta \times \sqrt{a_{y_{\max,\phi}} R} \quad (20)$$

通过将当前车速和预警车速进行对比,可以确定是否应该对驾驶员进行报警提示。

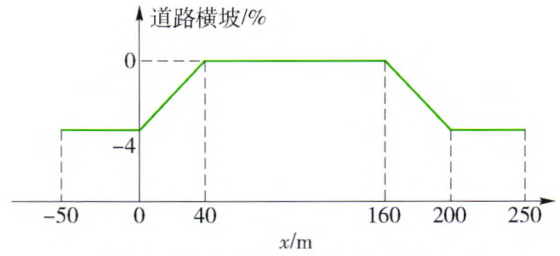
3 仿真试验及分析

采用 CarSim、Matlab/Simulink、NI/Veristand 软件及制动踏板、油门踏板、转向盘相关传感器等搭建了硬件在环仿真模拟试验台,采用单片机作为预警终端发出不同频率的蜂鸣音,并利用驾驶员在环对弯道行驶侧翻预警模型进行验证。

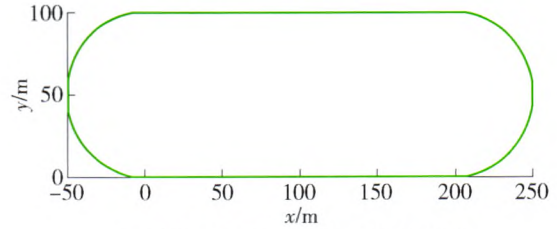
3.1 试验条件

车辆的物理参数为:质心高度 $H_{CC,s}$ 为 0.719 m; 轮距 t_w 为 1.575 m。试验道路的横向坡度、道路的尺寸关系如图 4 所示。

在仿真试验过程中,采用的是 50 m 半径 + 200 m 直道的长圆形道路,路面附着系数为 0.85。弯道部分横坡坡度为 4%,直道与弯道相连部分采用过



(a) 道路横坡与道路 x 坐标之间的关系



(b) 道路 x 坐标和 y 坐标之间的关系

图 4 仿真试验道路示意图

Fig.4 Simulation test road

渡的坡度,其余直道部分不设置横坡,各路段的横坡角 ϕ_B 与道路对应关系如图 4 所示。试验过程让车辆首先在直道上行驶 200 m,再进入 50 m 半径的弯道,并设置初始车速为 60 km/h。

3.2 在环仿真试验与分析

为了验证该弯道行驶预警模型的有效性,选取 15 个有一定驾驶经验的驾驶员进行驾驶模拟试验。驾驶模拟试验台和预警终端如图 5 所示。预警终端的输入为车辆的车速信号,此车速信号通过数据采集板的接口转换为可用信号后传递给预警终端。驾驶模拟试验台中间为驾驶员视野,预警终端中的蜂鸣器会根据实际车速与预警车速的关系发出不同频率(单位为 Hz)的警示音,其判定关系

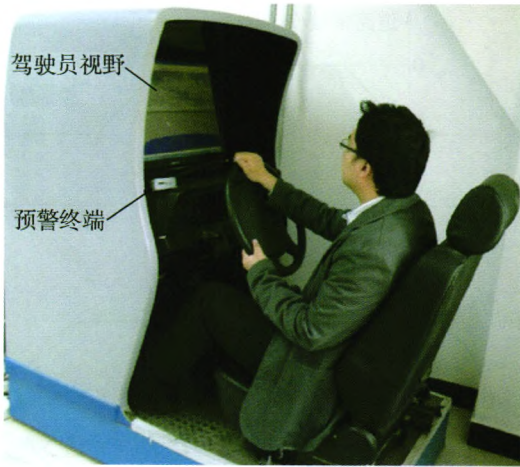
$$f = \begin{cases} 0, & V_x < 0.7V_{\text{warnig}} \\ 2, & 0.7V_{\text{warnig}} < V_x < V_{\text{warnig}} \\ 5, & V_x > V_{\text{warnig}} \end{cases} \quad (21)$$

试验过程中,15 位较熟练驾驶员在模拟器上进行带预警和无预警 2 次试验。同时记录下每次试验是否发生侧翻,并对应记录试验过程中的车速 V_x 、轮胎垂直力 F_z 、侧向加速度 a_y 。

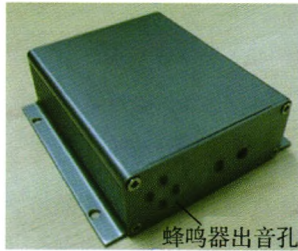
图 5 所示为驾驶模拟试验台及预警终端,预警终端从驾驶模拟器采集车速信号(电压信号形式),通过计算确定车辆的安全状态,从而判断是否发出蜂鸣预警信号。

3.2.1 弯道预警有效性分析

通过在弯道上进行模拟驾驶,采集到带预警和无预警的情况下,同一个驾驶员行驶过程中的车速



(a) 驾驶模拟试验台



(b) 预警终端

图5 驾驶模拟试验台及预警终端

Fig. 5 Driving simulator and early-warning terminal

V_x 、轮胎垂直力 F_z (此处选取车辆最先离地的轮胎的垂直力)、侧向加速度 a_y 。由于3个数据的数据级有差异,为了在同一张图形上显示,对加速度数据进行了放大100倍处理,对轮胎垂直力进行了缩小100倍处理,对蜂鸣器的频率进行了放大10倍处理(即图中车速的实际单位为 km/h,加速度的实际单位为 $g/100$,轮胎垂直力的实际单位为 100 N,蜂鸣器频率为 0.1 Hz)。从15位驾驶员的模拟驾驶试验中抽出一位的试验数据进行分析。

图6和图7所示为带预警和无预警的试验结果,车辆在约11s时开始转向(此时为即将进入弯道时刻),在14s左右车辆的侧向加速度达到最大,此时一侧轮胎开始离地,无预警的车辆由于没有任何提示而未进行减速操作,带预警的试验由于收到预警模型发出危险提示而进行了减速操作,车速有所下降;到达16s左右,无预警的车辆轮胎垂直载荷变为零,车辆发生侧翻,而带预警的车辆由于驾驶员在进入弯道前收到了预警蜂鸣提示,进行了制动操作,使得轮胎载荷有所升高,即侧翻的趋势被遏制,从而安全驶过弯道继续行驶。

3.2.2 带弯道预警的行驶效率分析

为了分析预警对车辆的通行效率的影响,对15

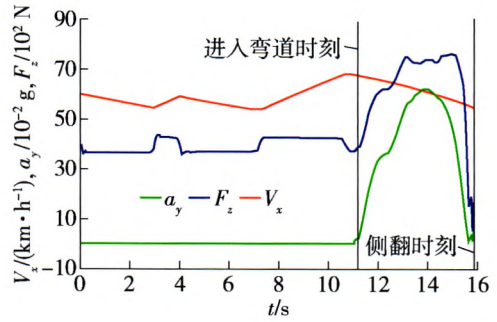


图6 无预警试验

Fig. 6 Test without early-warning

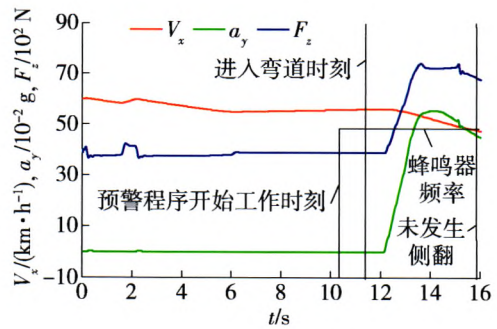


图7 带预警试验

Fig. 7 Test with early-warning

位驾驶员的试验结果进行了统计。图8为无预警和带预警的试验结果,从中可得出,15个试验人员中,无预警的情况下能安全通过弯道的人数为8人,而带预警的情况下安全通过弯道的人数上升至12人。同时2种情况下安全通过弯道的驾驶员的平均通过车速分别为35.4 km/h和47.2 km/h。这表明该预警模型能提高通行车辆通过速度,即能提高弯道通行效率。

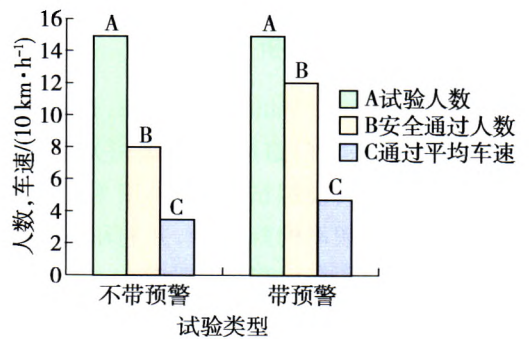


图8 试验结果统计

Fig. 8 Statistical results in experiments

通过对多个驾驶员的数据的统计分析可以看出,相比无预警提示的行驶过程,带有预警提示的行驶过程能让驾驶员更安全地通过弯道,且在通过弯

道的过程中能以更高的车速行驶,既保证了安全,又提高了通行效率。

4 结论

1) 对 SUV 车辆的侧倾及其稳定性进行了理论分析,并在已知车辆参数和弯道半径等信息的情况下得到弯道行驶的安全车速。与传统的静态侧翻稳定因子比较,本弯道预警模型提出的利用安全车速进行预警的方法更直观,且实时性与可操作性好,对于弯道中行驶车辆的防侧翻具有较好的预警效果。

2) 虚拟仿真试验结果表明,本预警模型能给予驾驶员危险警示,在一定程度上避免弯道行驶过程中车辆侧翻的可能。

参考文献:

- [1] 王春昱. 道路交通安全研究 [D]. 天津: 河北工业大学土木工程学院, 2002.
WANG Chun-yu. Research on road traffic safety [D]. Tianjin: School of Architecture and Construction, Hebei University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [2] 牛世峰. 公路弯道路段交通安全特性研究 [D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2005.
NIU Shi-feng. Research on traffic safety characteristics of curved section of highway [D]. Changchun: College of Traffic, Jilin University, 2005. (in Chinese)
- [3] 张先奎. 基于姿态监测的汽车侧翻预警及控制研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学能源与动力学院, 2007.
ZHANG Xian-kui. Vehicle rollover warning and control based on rollover position monitor [D]. Nanjing: Institute of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [4] 于志新, 宗长富, 何磊, 等. 基于 TTR 预警的重型车辆防侧翻控制算法 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(2): 258-261.
YU Zhi-xin, ZONG Chang-fu, HE Lei, et al. Algorithms of anti-rollover control for heavy vehicle based on TTR warning [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39 (2): 258- 261. (in Chinese)
- [5] YU H, GUYENC L, OZGUNER U. Heavy duty vehicle rollover detection and active roll control [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 7: 451-470.
- [6] 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 Yun-song, LI Zhi-gang, et al. A research on the rollover risk of motor vehicles based on simulation analysis [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(12): 1173-1176. (in Chinese)
- [7] LIU P. Analysis, detection and early warning control of dynamic rollover of heavy freight vehicles [D]. Montreal: School of Mechanical engineering, Concordia University, 1999.
- [8] 王健, 余贵珍, 张为, 等. 基于滑模观测和模糊推理的车辆侧翻实时预警技术 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 1-6.
WANG Jian, YU Gui-zhen, ZHANG Wei, et al. Real-time rollover prediction for vehicle based on principles of sliding mode and fuzzy inference system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2010, 41(6): 1-6. (in Chinese)
- [9] 王国业, 张彦如, 章娟丽, 等. 基于非平稳约束试验系统的汽车附着极限稳定性研究 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 1-6.
WANG Guo-ye, ZHANG Yan-ru, ZHANG Juan-li, et al. Vehicle stability under extreme adhesion conditions based on unsteady constraint test system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2012, 43(8): 1-6. (in Chinese)
- [10] 王健. 基于参数估计的汽车侧翻预警研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 2011.
WANG Jian. Research on vehicle rollover warning based on state estimation [D]. Beijing: School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, 2011. (in Chinese)
- [11] BERNARD J, SHANNAN J, VANDERPLOEG M. Vehicle rollover on smooth surfaces [EB/OL]. [2013-02-21]. <http://papers.sae.org/891991/>.
- [12] HAC A, BROWN T, MARTENS J. Detection of vehicle rollover [EB/OL]. [2013-02-22]. http://scholar.google.com/scholar?9=detection+of+vehicle+rollover&hl=zh-CN@as_sdt=0%2C5.
- [13] HAC A. Rollover stability index including effects of suspension design [J]. SAE Paper, 2012-01-0965.
- [14] DIXON J C. Tires, suspension and handling [M]. Warrendale: SAE, 1996: 8-92.
- [15] 余志生. 汽车理论 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2008: 179-205.
- [16] BREIVK T. Early detection of rollover in large vehicles [D]. Glasgow: Mechanical College, University of Glasgow, 2001.

(责任编辑 张蕾)