

极限工况下汽车轮胎侧偏角测试方法研究*

张小龙¹ 陈彬¹ 宋健² 王启永¹

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 轮胎侧偏特性识别是汽车动力学稳定性控制的基础,而极限工况下因侧倾转向和变形转向的影响,基于动力学模型的轮胎侧偏角估计方法精度变差。提出一种基于直接视觉测量转向轮转角和车身姿态的轮胎侧偏角测试方法,为极限工况下转向轮转角和轮胎侧偏角观测模型研究提供技术手段。首先分析了侧偏角测试原理,基于高精度定位定向差分 GPS 和图像实时处理器 CVS 1456 等构建了实车试验系统。在对试验车转向系统传动比进行标定的基础上,原地转向和小侧向加速度行驶试验表明:基于图像获取转向轮转角与基于转向盘转角方法一致性好。圆周加减速行驶试验表明,在侧向加速度约 0.8 g 时,汽车达到极限工况,基于图像方式获取的转向轮转角曲线体现了侧倾转向和变形转向的影响,试验车具有不足转向特性。实车试验表明所提出方法是有效、可行的。

关键词: 汽车 极限工况 轮胎侧偏角 测试方法

中图分类号: S219.1; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0031-06

引言

轮胎侧偏特性是现代汽车操纵稳定性研究的基础,左右侧车轮决定了车轴的侧偏特性,前后轴侧偏特性组合决定了整车的转向特性,汽车动力学稳定性控制系统需要实时识别汽车的转向特性并通过制动器制动力或发动机输出扭矩调节,以保证整车具有适度的不足转向特性^[1-2]。汽车转向特性可以基于前后轴侧偏角之差来量化表述。侧偏角是轮胎接地点水平速度方向与轮胎旋转平面的夹角。汽车直线行驶时转向轮旋转平面与汽车纵向平面间的夹角为转向角。汽车在小侧向加速度下(小于 0.4 g)前轮转向角和转向盘转角基本保持线性关系,而在极限工况下(侧向加速度大于 0.4 g),前轮转向角还叠加了悬架变形转向和车身侧倾转向角,导致基于转向盘转角来获取转向轮转角存在较大的误差^[3]。此外,汽车极限工况一般伴随整车载荷向前后或外侧车轮转移,导致单个轮胎的侧偏特性工作区域发生转移,弱化了车轴侧偏特性,从而改变了整车的转向特性。所以准确观测汽车极限工况下的转向特性(轮胎侧偏角)是一个难题。

基于整车动力学模型对汽车侧偏角进行观测的方法在实际动力学稳定性控制中广泛采用,具体包括模糊逻辑估计方法^[4]、Kalman 滤波方法^[5]、综合

方法(积分法和状态观测器法组合)^[6]等。这些方法主要对车身侧偏角进行观测,对轮胎侧偏角观测精度不高,特别是极限工况下,且观测精度和实时性取决于观测模型的复杂程度。笔者曾根据汽车稳定性控制系统配置传感器信息建立神经网络模型来观测轮胎和汽车侧偏角^[7-8],该方法如需移植到其他车型需要通过系统测试以获取网络学习样本。瑞士 Kistler 公司的光学双向速度传感器 SF II 可以对轮胎侧偏角直接测量^[9],但其不能同步输出转向轮转角位置而无法体现极限工况下的侧倾转向和变形转向角信息,给动力学观测模型建立带来不便。

本文提出一种基于直接视觉测量转向轮转角和车身姿态的轮胎侧偏角测试方法。该方法成本较低,精度满足应用需求,为极限工况下转向轮转角和轮胎侧偏角观测模型研究提供技术手段。

1 测试原理

1.1 轮胎侧偏角测试原理

图 1 是汽车轮胎侧偏角的测试方法示意图。 $X_gO_gY_g$ 是地面固定坐标系,其中 O_gX_g 指向正东, O_gY_g 指向正北,原点 O_g 可设在测试试验场地附近某一固定点。 X_lBY_l 为原点 B 固定在汽车质心上方对应车身顶部的地理坐标系, BY_l 轴位于汽车左右对称平面内且水平朝前, BX_l 轴水平指向车身右侧

收稿日期: 2014-03-10 修回日期: 2014-04-08
* 国家自然科学基金资助项目(51105001)和汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目(KF14022)
作者简介: 张小龙,副教授,博士,主要从事汽车轮胎力传感与动力学控制研究,E-mail: xlzhang@ahau.edu.cn
通讯作者: 宋健,教授,博士生导师,主要从事汽车动力学与控制研究,E-mail: daesj@tsinghua.edu.cn

并与 BY_i 轴垂直, X_iBY_i 平面始终与地面平行。B 点建议位于汽车质心上方, A 点位于车身顶部且在汽车纵向对称面内, 为了便于 GPS 测试系统完成航向角的准确测量, 建议 B 点和 A 点距离保持 1 m 以上。 u_b 为 B 点水平速度。C 点为左前轮旋转中心, cc' 为轮胎平面, u_c 为 C 点水平速度。

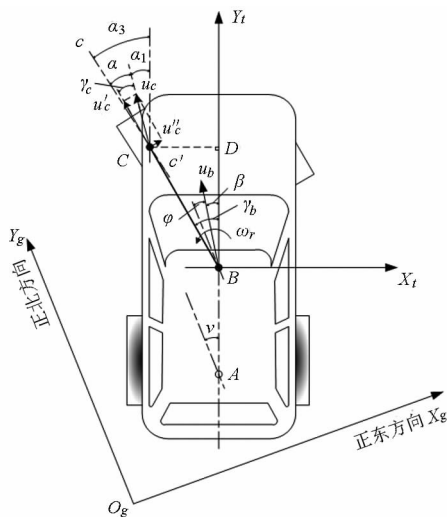


图1 轮胎侧偏角测试原理图

Fig. 1 Test principle of tire side slip angle

汽车行驶过程中轮胎侧偏角 α 为 u_c 与轮胎平面 cc' 间的夹角, 计算式为

$$\alpha = \alpha_3 - \alpha_1 \quad (1)$$

式中 α_3 ——车轮转向角, 通过图像方法直接测量获取, 测量原理见 1.2 节

α_1 —— u_c 与汽车纵向对称平面间的夹角, 通过 C 点与 B 点间的运动学关系计算得到

图1中忽略 B 点和 C 点的高度差异, 由几何关系, 可知

$$\alpha_1 = \gamma_b - \gamma_c \quad (2)$$

其中 $\gamma_b = \arctan(l_{CD}/l_{BD})$

式中 γ_b ——BC 连线与汽车纵向对称面间夹角, CD 和 BD 的长度 l_{CD} 和 l_{BD} 通过 GPS 测试系统静态测试得到, 定位精度优于 0.5 cm

γ_c ——BC 连线与水平速度 u_c 间夹角

$$\begin{cases} \gamma_c = \arctan(u''_c/u'_c) \\ u''_c = u_b \sin(\gamma - \beta) + \omega_r b \\ u'_c = u_b \cos(\gamma - \beta) \end{cases} \quad (3)$$

式中 u''_c ——水平速度 u_c 在垂直于 BC 方向上投影

u'_c ——水平速度 u_c 在 BC 方向上投影

ω_r ——汽车横摆角速度, 由传感器或底盘电控单元输出

β ——B 点汽车侧偏角

b ——B 点和 C 点间水平距离, 由 GPS 测试系统测得

汽车侧偏角 β 计算式为

$$\beta = \nu - \varphi \quad (4)$$

式中 ν ——车身航向角, 即汽车纵向对称平面与正北方向 O_gY_g 轴间的夹角, 通过双天线 GPS 测试系统可以直接测量得到

φ —— u_b 与正北方向 O_gY_g 轴间的夹角, 由 GPS 测试系统直接测取

1.2 轮胎转向角测试原理

转向盘转角和前转向轮转角间传动比不是常值, 特别是在极限工况下, 前转向轮转角叠加有悬架变形转向角和车身外倾转向角^[10]。此时, 基于转向盘转角传感器来获取前转向轮转角存在一定的误差, 且不易准确建模消除。本文研究一种基于机器视觉的转向轮转角直接测量方法, 具体如图2所示。

设计的装置具体结构如图2a所示, 通过夹紧卡爪6与轮胎螺栓连接, 并由螺栓4紧固。法兰盘1和检测盘2应平行, 可通过选择相同长度的夹紧套管5基本保证检测盘2和轮胎旋转平面保持平行。由摄像头获取检测盘2的边缘3的图像, 边缘3先后相对位置变化即表征了转向轮转角。摄像头及检测盘装置车上安装示意如图2b所示。

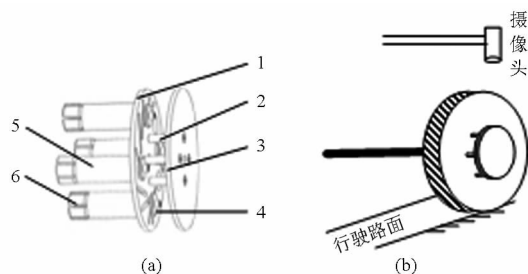


图2 基于图像的转向轮转角测试装置

Fig. 2 Image method test bracket for steer wheel angle

(a) 检测盘装置 (b) 安装示意图

1. 法兰盘
2. 检测盘
3. 检测盘边缘
4. 螺栓
5. 夹紧套管
6. 夹紧卡爪

2 测试系统构建

2.1 测试系统硬件结构

测试系统结构如图3所示, 主要由传感器、数据采集器和便携式计算机组成。传感器部分包括实现高精度定位、测速和定向的双天线 GPS 测试系统、基于图像检测的转向轮转角测试系统、惯性测量单元, 以及汽车底盘控制单元通过 CAN 输出的车载传感信号等。数据采集器具有两路高速 CAN 接口, 分别将 CAN 总线上的报文接收并发送到便携式计算机中实时分析和数据保存。主要传感器和设备技

术参数如表 1 所示^[11-13]。

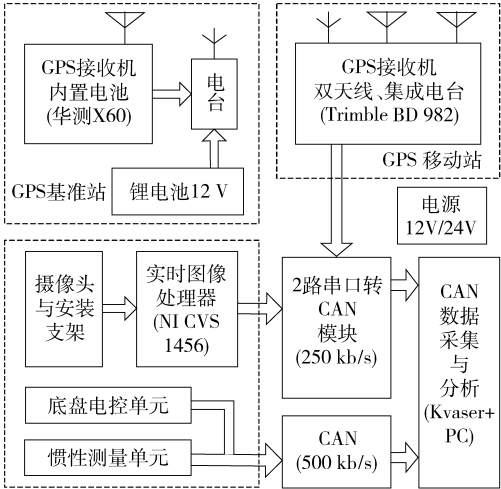


图 3 道路试验测试系统结构框图
Fig.3 Structure scheme of roadway test system

表 1 主要传感器与设备性能参数

传感器与设备		精度与性能	数据输出 物理接口	数据更新 速率	功能
高精度定位、测速和定向 GPS 测试系统	美国 Trimble BD 982 (移动站), 华测 X60 (基准站)	RTK 水平定位精度 8 mm RMS, 速度精度 0.1 km/h RMS, 定向精度 0.1° (天线间距大于 1 m)	串口 ×1 TCP/IP ×1	50 Hz (最高)	获取汽车行驶轨迹、速度大小及方向、车身航向角, 以及点 B、C、D 的准确位置等
	德国 Basler 摄像头 SCA1390-17fc, 美国 NI 嵌入式图像处理器 CVS 1456	摄像头像素 1 394 × 1 040, 实时图像处理器, 100 帧/s 处理速度, 支持 FPGA 编程, LabVIEW 开发环境, 转向轮转角测量精度 0.05°	图像处理器 支持 1394b ×3 串口 ×1	15 Hz	
转向轮转角测试系统					
惯性测量单元	英国 Racelogic 公司 IMU02	加速度量程 ± 1.7 g, 角速度量程 ± 150 (°)/s, 非线性度 ± 0.1% F. S., 内部温度补偿	CAN ×2	100 Hz	标定汽车底盘电控单元 CAN 输出信息, 标定转向轮转向角测试 0° 位置

句^[14]。GGA 语句中主要包含定位信息和解算模式等,VTG 语句中包含水平速度矢量信息,HDT 中包含车身航向角信息,GST 中包含定位精度信息。在 Matlab 中编程实现对 Kvaser 采集器输出的转换成 GPS 的 CAN 报文信息进行提取和保存。具体步骤如下:首先,对相同 ID 的 CAN 数据帧报文打印成文本文件,GPS 语句以回车换行符结束,所以打印成的文本文件是一条语句一行;然后,分别对每个文本文件进行信息提取并打印成文本文件,GPS 语句中的域通过“,”分开,基于此进行信息提取;最后将提取后形成的文本数据转换成 mat 文件。试验结束后利用 GGA 语句中的时间信息判断 GPS 数据有无丢包,以及利用 GST 语句信息判断定位精度。

图像实时处理器 CVS 1456 获取摄像头传递过来的图像信息后进行处理,并将提取的角度信息通过串口发送出去。程序包括图像实时采集和实时计算转角两部分。在编程中运用队列 (Queue) 结构,

GPS 测试系统采用载波相位差分模式,设定 GPS 基准站 1 Hz 频率实时产生载波相位差分信号并通过电台发送给移动站接收机,移动站接收机基于差分信号对输出信息进行修正。试验时 GPS 基准站设在试验场地附近。

基于美国 TI 公司的 TMS320F28335 DSP 芯片设计了串口转 CAN 模块,用于将移动站 GPS 数据和嵌入式图像实时处理器解算出的转向轮转角数据转成 CAN 接口方式输出。通过不同的 ID 标识符区别,如对应两路串口使用了两个 CAN 邮箱,配置 ID 标识符分别为 0xBA0 和 0xB0A。设置位时间配置寄存器 CANBTC,使其波特率为 250 kb/s,并配置每帧发送 8 个字节数据,提高发送效率。

2.2 测试系统软件编程

配置 GPS 接收机输出 GGA、VTG、HDT、GST 语

以保证图像采集和计算有序进行。计算得出的转向角数据格式为双精度类型,将其转换为字符串类型后输出。

3 试验与结果分析

3.1 图像获取前轮转向角试验

利用惯性测量单元输出的侧向加速度和横摆角速度测量值,对汽车底盘控制单元通过 CAN 输出的转向盘转角偏移值进行标定。以转向轮下垫凸盘传感器方式对转向系统传动比进行标定,并且拟合出转向轮转角曲线。汽车在小侧向加速度 (小于 0.4 g) 下行驶同步采集图像方法获取的前转向轮转角和底盘控制单元通过 CAN 输出的转向盘转角信息,一组曲线如图 4 所示,其中对图像输出信息采用了小波滤波方法^[8],由图中可以看出二者一致性好。

3.2 实车试验

根据图 3 搭建了如图 5 所示的实车测试系统,

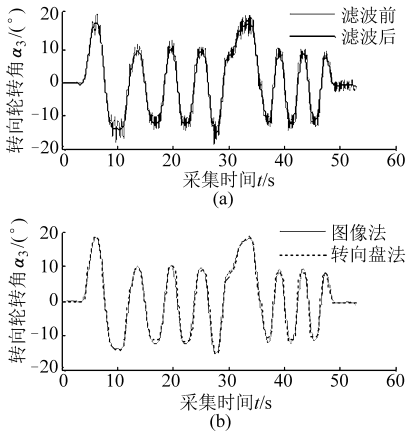


图4 转向轮转角测量试验曲线

Fig.4 Test curves of hand-wheel steering angle

(a) 图像法转向轮转角曲线 (b) 图像法与转向盘法曲线对比

在合肥市机场高速附近一平整沥青路面完成测试试验。基站放置于试验场地附近,并保证整个试验过程中具有良好的可视性。移动站 GPS 天线布置在试验车顶,并尽可能位于试验车的对称面上^[15]。其中,GPS 移动基站天线尽可能布置在试验车质心位置垂直上方车顶外侧。前转向轮转角测试系统中的摄像头安装在右前轮的垂直上方,法兰盘安装在右前轮轮辋的外侧。

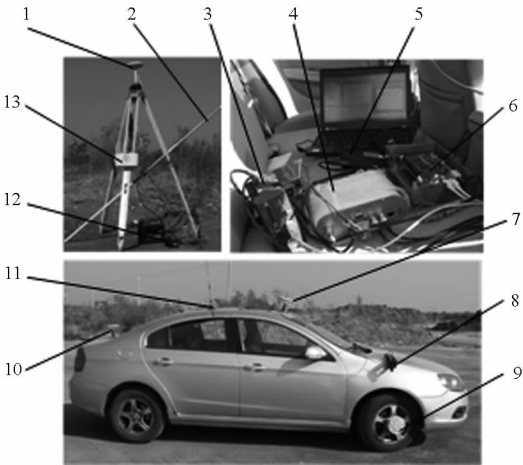


图5 实车测试系统

Fig.5 Vehicle test system

- 1. X60 GPS 天线 2. 基站电台天线 3. NI 图像处理器 CVS 1456
- 4. GPS 接收机 BD 982 5. CAN 收发器 Kvaser II 6. 自行研制的 DSP 板卡
- 7. GPS 移动站主天线 8. Basler 摄像头 9. 法兰盘
- 10. GPS 定向天线 11. 移动站电台接收天线 12. 基站电台
- 13. 基站 X60 GPS 接收机

试验开始前,通过调节光圈和焦距使摄像头采集的图像保持在最佳状态。打开基准站 GPS 接收机并进行配置,然后打开车载 GPS 接收机,待搜到卫星正常工作信号时,开始整个试验。

试验中,首先进行直线行驶,然后进行转圈,最后再次直线行驶。由于场地限制转圈时保持较小的

转弯半径,连续加速直至一轴车轮侧滑。共进行了 7 组试验,每次试验结束后现场分析检测数据的有效性和是否存在丢包现象。7 组数据未发现系统工作不稳定及数据丢失现象。

其中一组试验数据曲线如图 6 所示。图 6a 为由车载 GPS 接收机输出的经纬度信息经高斯投影得到的试验车行驶轨迹图,起点从(0,0)开始,包括 2 个直线段和 3 个整圈。图 6b 是图像法获取的前转向轮转角及其滤波后的曲线图,采用小波滤波方法^[8]。图 6c 是图像法与转向盘法获取的转向轮转角曲线对比图,在 0~30 s 试验车的侧向加速度小于 0.4 g 的条件下,两者的一致性较好,当试验车进入回转弯行驶状态且侧向加速度大于 0.4 g 时,两条曲线偏离,出现明显的不足转向特性,从而表明极限工况下通过转向盘法间接得到的前转向轮转角与实际转向轮转角间存在一定的偏差。图 6d 为试验车的侧向加速度曲线,最大达到约 0.8 g。图 6e 是试验车的横摆角速度信息和行驶速度曲线,横摆角速度最大达 40 (°)/s。图 6f 为轮胎侧偏角曲线,在 30~60 s 试验车进入回转弯试验时,轮胎侧偏角保持在 -6°左右。图 6g 是 GPS 接收机输出的 GST 语句中提取的定位精度信息,可看出试验过程中东向定位精度在 0.6 cm 以内,北向定位精度在 0.5 cm 以内,GPS 工作在高精度定位载波相位差分定位模式。图 6h 是质心侧偏角及其滤波后的曲线图,其形状特征和轮胎侧偏角不一致,也进一步说明直接获取轮胎侧偏角对整车动力学控制的重要性。图 6i 是车载 GPS 接收机输出的速度与正北夹角和航向角曲线对比图,在 0~30 s 试验车朝正北方向行驶时,存在 0°~359°间跳动现象,65 s 之后,试验车再次直线行驶时两条曲线重合。

综合来看,试验曲线正确量化了测试变量变化趋势,给出了转向轮转角和侧偏角曲线,为轮胎侧偏特性观测建模提供了有效依据。

4 结论

(1)提出一种基于直接视觉测量转向轮转角和车身姿态的轮胎侧偏角测试方法,给出了测试原理,搭建了实车试验系统,实车试验验证了方法的有效性和可行性。为极限工况下转向轮转角和轮胎侧偏角观测模型研究提供了技术手段。

(2)采用图像方法直接获取转向轮转角,综合考虑了侧倾转向和变形转向对轮胎侧偏角的影响,是当前轮胎侧偏角传感器,如光学速度传感器所不能实现的。

(3)文中搭建的实车测试系统和测试方法具有

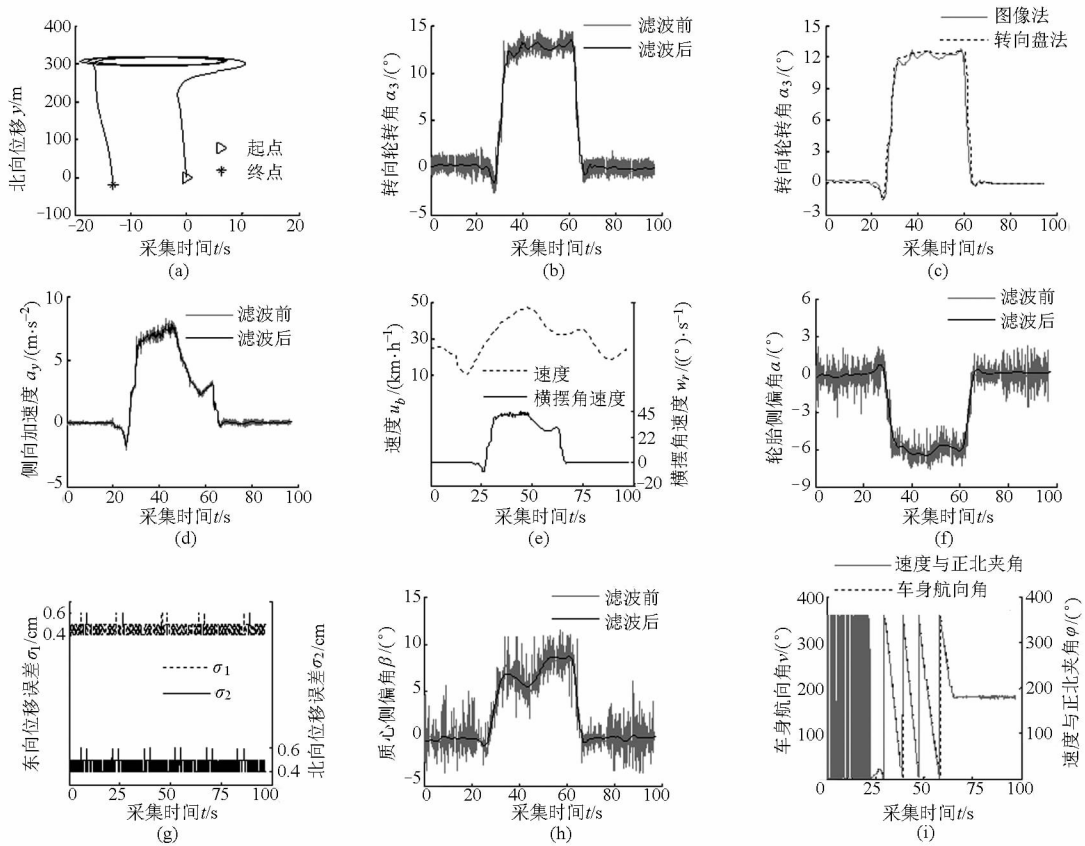


图6 部分试验结果曲线
Fig.6 Part of road way test curves

(a) 行驶轨迹 (b) 前转向轮转角曲线 (c) 前转向轮转角对比曲线 (d) 车身侧向加速度曲线
(e) 横摆角速度和速度曲线 (f) 轮胎侧偏角曲线 (g) 定位误差 (h) 质心侧偏角曲线 (i) 航向角、速度方向角曲线

通用性,能够同步测试出转向轮转角和侧偏角,车身横摆角速度、速度、加速度,以及汽车轨迹等精确信息,为汽车动力学行为精确表述和动力学控制算法验证提供了准确依据。

参 考 文 献

- 1 Van Zanten A T. Bosch ESP system: 5 years of experience[C]. SAE Paper 2000-01-1633, 2000.
- 2 Marino R, Scalzi S. Asymptotic sideslip angle and yaw rate decoupling control in four-wheel steering vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(9):999-1019.
- 3 Zhang Xiaolong, Li Liang, Pan Deng, et al. Experimental model and analytic solution for real-time observation of vehicle's additional steer angle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(2): 340-347.
- 4 施树明, Lupker H, Bremmer P, 等. 基于模糊逻辑的车辆侧偏角估计方法[J]. 汽车工程, 2005, 27(4): 426-430.
Shi Shuming, Lupker H, Bremmer P, et al. Estimation of vehicle side slip angle based on fuzzy logic [J]. Automotive Engineering, 2005, 27(4): 426-430. (in Chinese)
- 5 Venhovens P J T, Naad K. Vehicle dynamics estimation using kalman filters [J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 32(2-3): 171-184.
- 6 张勇, 殷承亮, 张建武. 车辆质心侧向速度实时估计方法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 219-222.
Zhang Yong, Yin Chengliang, Zhang Jianwu. Real-time estimation algorithm of vehicle lateral speed [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 219-222. (in Chinese)
- 7 张小龙, 李亮, 李红志, 等. 汽车稳定性控制系统侧偏角道路试验测试系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 1-5.
Zhang Xiaolong, Li Liang, Li Hongzhi, et al. Roadwaytest system for vehicle stability control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 1-5. (in Chinese)
- 8 张小龙, 李亮, 李红志, 等. 基于改进 RBF 网的汽车侧偏角估计方法试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 105-110.
Zhang Xiaolong, Li Liang, Li Hongzhi, et al. Experimental research on vehicle sideslip angle estimation basd on improved RBF neural networks [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 105-110. (in Chinese)
- 9 Kistler Group AG. Correvit® SFII sensors non-contact optical sensors CSF2A_000-812e-01.12[M]. Kistler Group AG, 2010.
- 10 郑宏宇, 宗长富, 田承伟, 等. 基于理想转向传动比的汽车线控转向控制算法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37

(6): 1229 – 1235.

Zheng Hongyu, Zong Changfu, Tian Chengwei, et al. Control algorithm for steer-by-wire system with ideal steering ratio [J]. Journal of Jinlin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(6): 1229 – 1235. (in Chinese)

11 Trimble Navigation Limited. Trimble BD982 datasheet [M]. Trimble Navigation Limited, 2014.

12 National Instruments Corporation. NI CVS – 1450 series user manual [M]. National Instruments Corporation, 2003.

13 Racelogic Limited. IMU02 & YAW03 inertial sensors user guide [M]. Racelogic Limited, 2009.

14 NovAtel Inc. OEMV family installation and operation user manual (OM – 20000093) [M]. NovAtel Inc., 2007.

15 张小龙, 李亮, 曹成茂, 等. 基于 CAN 的汽车低附路面稳定性控制测试系统 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 7 – 12.

Zhang Xiaolong, Li Liang, Cao Chengmao, et al. Vehicle stability control test system applied on low friction road based on CAN technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 7 – 12. (in Chinese)

Test Method Research on Vehicle’s Tire Side Slip Angle in
Extreme Driving Conditions

Zhang Xiaolong¹ Chen Bin¹ Song Jian² Wang Qiyong¹

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Identification of tire cornering properties is the base of vehicle dynamics stability control, however, tire side slip angle estimation accuracy based on dynamic model goes worse because of the effects of roll steering and compliance steer under the extreme driving conditions. In order to provide technical means for research on steering wheel angle and wheel side slip angle observation model under the extreme conditions, this paper presents a test method for tire side slip angle based on the direct vision measurement of steering wheel angle and the vehicle body attitude. The test principle of the side slip angle was firstly analyzed, then the roadway test system was established based on the high-precision, double antenna differential GPS and the real-time image processing device CVS 1456. On the basis of the calibration of the test vehicle steering system gear ratio, both the pivot steering test and the small lateral acceleration test showed the good consistency of the results of the steering wheel angle based on image acquisition with the hand-wheel angle. In addition, the circular acceleration-deceleration tests showed that the test vehicle reached the extreme conditions while the lateral acceleration was more than 0.8 g, and at this time the steering wheel angle curve with image acquisition method fluctuates and reflects the effects of roll steering and compliance steer, so comprehensively the test vehicle has understeer characteristics. The roadway tests indicate that the method proposed is effective and practicable.

Key words: Motor vehicle Extreme conditions Tire side slip angle Test method