

基于 GPS 的汽车横摆角速度和侧偏角工程测试方法^{*}

张小龙^{1,2} 吴敏² 宋健¹ 马德贵²

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

【摘要】 面向汽车动力学控制系统产业化开发中的冬季试验和夏季试验, 基于 GPS 技术设计了汽车横摆角速度和侧偏角工程测试系统和测试精度验证系统, 并给出了具体的数据处理方法。阐述了两套系统的硬件设计、试验方法, 并根据同步采集的试验数据对比分析了车身方位角、横摆角速度和侧偏角的测量精度。结果表明: 测试系统定位能力较差, 但横摆角速度和侧偏角测量精度与验证系统接近, 满足汽车性能道路试验的要求。

关键词: 汽车 道路试验系统 横摆角速度 侧偏角 GPS

中图分类号: U270.7

文献标识码: A

Engineering Test Method for Motor Vehicle Yaw Rate and Sideslip Angle Based on GPS Technology

Zhang Xiaolong^{1,2} Wu Min² Song Jian¹ Ma Degui²

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract

The engineering test system and its advanced precision verification system were designed for motor vehicle yaw rate and sideslip angle measurement based on the GPS technology, which were primarily utilized to the systematic winter and summer condition tests for the industrial research of the vehicle dynamic stability control system, i. e. DSC. Additionally, the main data processing methods were also put forth. The structures of the two systems and the test method were firstly introduced in detail, and then the test error of the vehicle azimuth angle, the yaw angle velocity and the sideslip angle were comparatively analyzed according to the same group of test data. The results showed that the positioning error of the test system is greater than the verification system's, but its test precision of the yaw rate and sideslip are in good agreement with the ones of the verification system, so the test system could be employed for the motor vehicle road way test.

Key words Vehicle, Road way test system, Yaw rate, Sideslip angle, GPS

引言

汽车横摆角速度和侧偏角能够有效表征汽车行驶稳定性, 是汽车动力学控制系统 DSC 进行控制决策的主要依据^[1~4]。两个参数的传统测量方法依赖于惯性传感器, 如陀螺、加速度计, 为了克服陀螺的随机漂移和加速度计的初始偏置影响, 现在普遍

采用 IMU/GPS 组合测量的方式^[5~6]。IMU/GPS 组合测量设备价格昂贵, 且在使用前必须进行很好的初始对准工作, 不便于现场快速安装使用。在 DSC 产业化开发中, 有必要构建一套现场简易可行的汽车测试系统。本文基于 GPS 全天候、无误差积累、快速测速定位的特点, 利用已有的 GPS 测量设备设计汽车横摆角速度和侧偏角测试系统。基于精

收稿日期: 2008-09-10 修回日期: 2008-09-25

^{*} 中国博士后科学基金项目(20080430429)、清华大学-中大集团博士后科学基金项目(20283600147)、安徽农业大学稳定与引进人才基金项目(yj2007-1)和安徽农业大学校长青年基金项目(2007qnr17)

作者简介: 张小龙, 博士后, 安徽农业大学讲师, 主要从事汽车测试技术研究, E-mail: sunshine.lzh@gmail.com

度更高的设备搭建验证系统,并根据同步采集的试验数据对测试系统的测试精度进行验证,分析测试方法的可靠性和可行性。

1 测试系统与试验方法

1.1 测试系统

测试系统结构如图 1 所示,由 2 台 VBOX III、1 台 Vector Crescent、1 台便携式计算机和电源等组成。VBOX III 是单天线系统,由英国 Racelogic 公司研制的面向汽车测试应用的仪器,其主要特点是数据更新速率高(100 Hz)、集成有多路 AD 接口、提供外部 CAN 通信接口、提供基于内部数据的数字或模拟信号接口给其他设备同步采集。其标称水平速度精度是 $0.1 \text{ km/h}^{[7]}$ 。Vector Crescent 是加拿大 hemisphere GPS 公司研发的双天线定向仪器,可以以 20 Hz 的数据更新速率给出两天线基座连线(基线)与真北方向的夹角,在基线长度为 2 m 时标称测量精度为 $0.10^\circ(1\sigma)^{[8]}$ 。

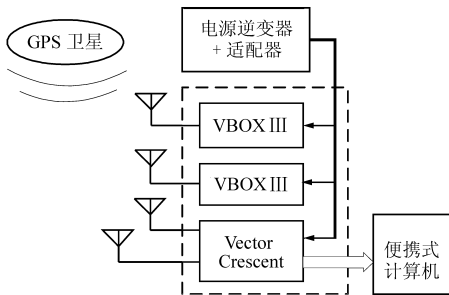


图 1 测试系统结构框图

Fig. 1 Diagram of the test system

系统中 2 台 VBOX III 由其自带的 CF 卡记录数据,而 Vector Crescent 须连接数据记录装置(如便携式计算机)通过串口实时记录数据。

1.2 验证系统

验证系统结构如图 2 所示,由车载和基站两部分组成,包括 3 台加拿大 novAtel 公司的 GPS 接收机、1 台英国 Oxford Technical Solutions 公司的 RT3100 仪器,以及相应的数传电台和电源。其中 Propak-V3 L1L2 和发送电台为基站部分,放在试验场地某一高处固定不动,其他为车载部分。

2 台 DL-V3 RT2 均工作在 RTK 模式,通过数传电台接收来自基站的载波相位差分信号,并实时解算输出天线位置、速度等信息,数据更新速率是 20 Hz。RTK 模式的标称定位精度是 $1 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}(1\sigma)$,速度精度是 $0.03 \text{ m/s}(1\sigma)^{[9]}$ 。RT3100 是基于 IMU/GPS 组合测量的单 GPS 天线系统,能够实时记录原始数据并实时输出解算结果,如车身姿态、轨迹、速度、线/角加速度等。RT3100 标称的横摆

角速度精度是 $0.01^\circ(1\sigma)^{[10]}$ 。

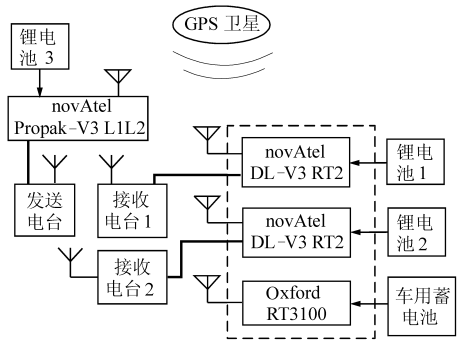


图 2 验证系统结构框图

Fig. 2 Diagram of the verification system

1.3 试验方法

道路试验在北京沙河机场拖机道进行,2 套系统 7 个车载 GPS 天线布置如图 3 所示。测试系统和验证系统共 6 台设备独立工作,试验数据处理依赖各台设备记录的数据中的 GPS 时间同步。

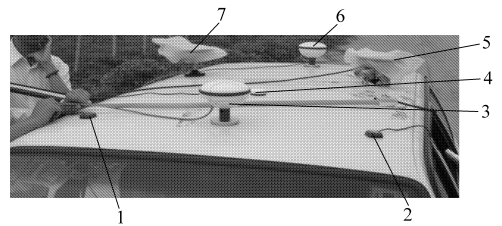


图 3 车载设备 GPS 天线车顶布置图

Fig. 3 Position allocation of GPS antenna on the top of the motor vehicle

1、2. VBOX III 天线 3、6. Vector Crescent 主副天线 4. RT3100 天线 5、7. DL-V3 RT2 天线

拖机道为直线车道,宽约 14 m。试验时进行了类似蛇形操纵稳定性试验的操作,以充分激励汽车,使其能够产生一定的横摆角速度和质心侧偏角。

测试系统中的 2 台 VBOX III 均可测量得到天线处的水平速度及其速度方向,由于是单频单天线系统,只能工作在标准定位模式(SPS),其测速是基于 Doppler 频移技术。根据刚体运动学理论,在两天线距离已知时可以求出车身天向横摆角速度。同理,验证系统中 2 台 DL-V3 RT2 也可以测出车身天向横摆角速度,但其是工作在 RTK 模式,具有更高的稳定性和精度,利用其可以对测试系统测量的横摆角速度进行验证。

利用验证系统中的 RT3100 解算数据,一方面对车身天向横摆角速度进行进一步的验证,由于横摆角速度是由垂直陀螺直接测量得到,因此具有更高的精度;另一方面对 Vector Crescent 测量得到的车身方位角进行验证。

2 数据处理与分析

2.1 小波滤波

VBOX III 提供的速度数据含有一定的噪声成分,其包含的有用信号频率较低,故利用小波分析对其进行滤波。小波降噪的实质是:首先对原始信号进行小波分解,然后对分解得到的高频信号小波系数采用阈值限定等方法进行抑制,最后利用处理后

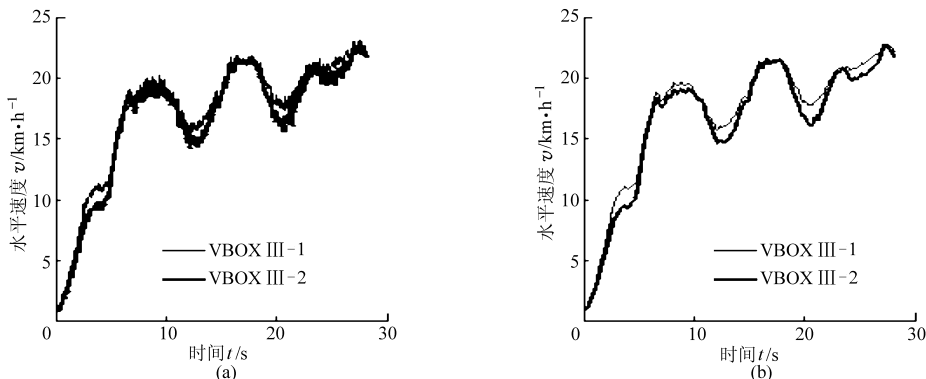


图 4 VBOX III 原始和小波滤波后速度曲线

Fig. 4 Initial and wavelet filtered velocity curves of VBOX III

(a) 原始数据曲线 (b) 小波滤波后曲线

2.2 车体方位角对比分析

测试系统中 RT3100 和 Vector Crescent 均可测量得到车体方位角,为了对比分析,选择一段试验数据绘制图形如图 5 所示。从图中可以看出,虽然轨迹相差较大(因为这两台设备都是单点定位),但所

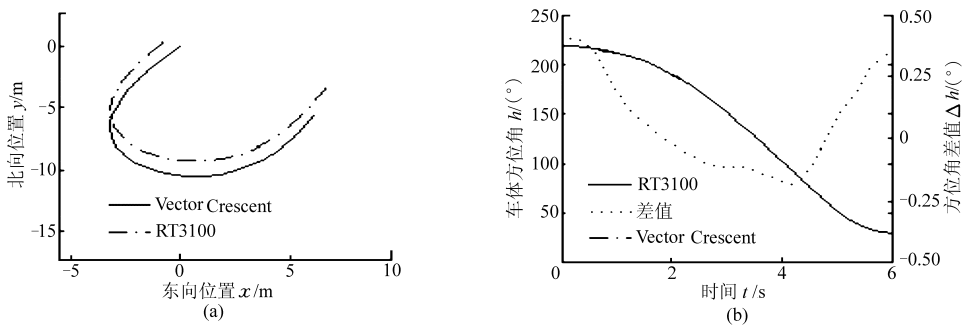


图 5 车体方位角测量曲线

Fig. 5 Comparative analyzing curves of vehicle body heading angle

(a) 轨迹曲线 (b) 车体方位角曲线

2.3 横摆角速度对比分析

图 6 是用于横摆角速度分析的试验轨迹曲线。进一步分析发现 DL-V3 RT2 两天线间的测量距离误差在 ± 2.5 cm 以内,和其标称的定位精度相符。而 VBOX III 的定位与其相差较大,且差值变化幅度较大,特别是在大的转向时,所以 VBOX III 的定位精度不能满足汽车性能测试的需要。

基于同样的一组数据,将由 2 台 VBOX III、2 台 DL-V3 RT2 和 RT3100 直接测量或计算得到的横

的小波系数实现信号重构。

经过多次调试,对 VBOX III 速度数据小波降噪采用下面的设定:小波函数为 db5,进行 5 层分解,降噪阈值函数选为 heursure,为最优预测变量阈值,阈值调整参数选为 mln,表示对各层噪声分别进行估计、调整。在 Matlab 中使用的函数是 wden()。图 4 是一组数据处理结果,从图中可以看出滤波后曲线的变化趋势和局部特征都得到了很好的保留。

测量得到的车体方位角很接近。其中 Vector Crescent 的车体方位角是直接测量得到的,RT3100 的方位角是经 GPS/IMU 组合测量解算得到的,二者的绝对误差在 $\pm 0.5^\circ$ 以内,可以认为 Vector Crescent 的定向精度满足试验要求。

摆角速度数据绘制成曲线,如图 7 所示。试验时 2 台 VBOX III 天线间的距离是 0.85 m,2 台 DL-V3 RT2 天线间的距离是 0.775 m,放置时它们对应天线间的连线尽量与车体纵轴垂直。

以 VBOX III 为例,横摆角速度计算过程如下:首先由 Vector Crescent 得到车体的方位角,然后分别将 2 个 VBOX III 天线处的速度对车体纵轴投影得到 v_1 和 v_2 ,则由刚体运动学理论得到

$$\omega_r = \frac{180(v_2 - v_1)}{0.85\pi} \quad (1)$$

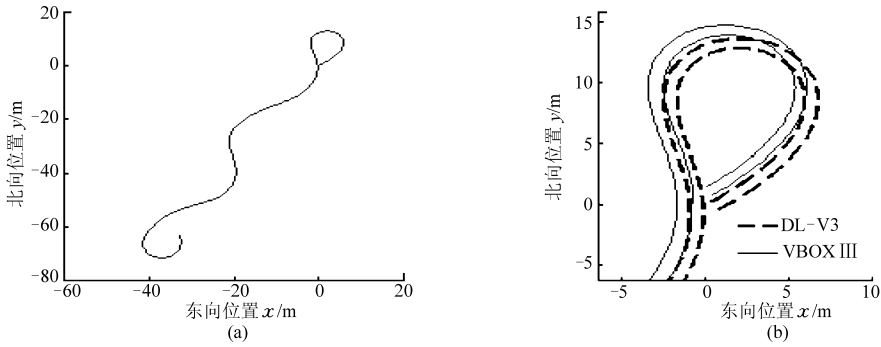


图6 试验轨迹曲线

Fig.6 Test path curves

(a) 轨迹曲线(DL-V3测得) (b)局部放大图

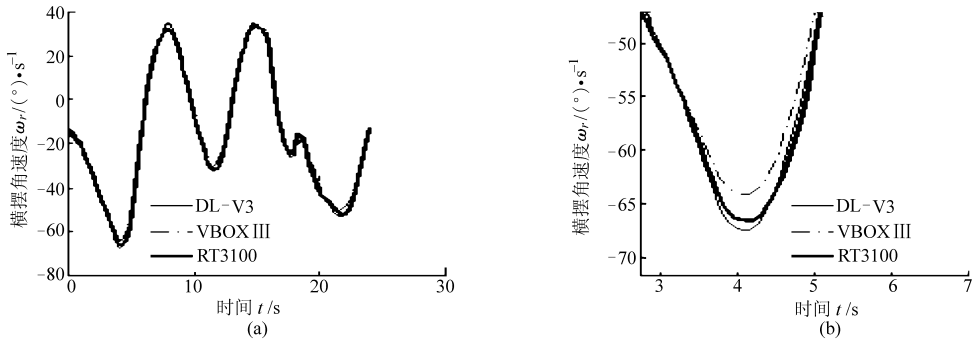


图7 横摆角速度曲线

Fig.7 Curves of the test yaw rate

(a) 横摆角速度曲线 (b)局部放大图

由图7中可以看出,由VBOX III、DL-V3 RT2和RT3100分别测量得到的横摆角速度曲线总体趋势一致,在拐点处出现不超过 $5(^{\circ})/s$ 的误差,可以认为精度满足汽车性能测试的要求。

2.4 汽车侧偏角对比分析

图8所示是计算B点处侧偏角的计算方法。A点为VBOX III的天线位置,B点为RT3100的天线位置。CD为汽车纵轴线,它与正北方向的夹角由Vector Crescent测量得到。车体的横摆角速度 ω_r 由2台VBOX III测量数据基于2.3节的方法计算得到。在AB已知的前提下,可以计算得到 v_{AB} ,其与 v_A 的矢量和即为B点处的速度矢量 v_B 。将 v_B 对汽车的纵轴和横轴投影即可得到 v_x 和 v_y ,则

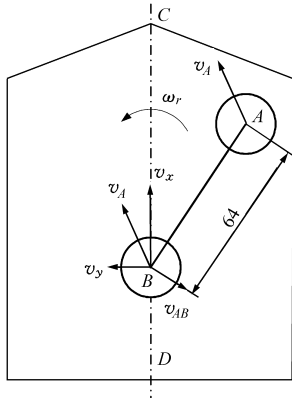


图8 汽车侧偏角计算方法示意图

Fig.8 Vehicle sideslip angle algorithm

B点处的侧偏角为

$$\beta = \arctan(v_y/v_x) \quad (2)$$

基于与图6相同的试验,绘制由VBOX III数据计算得到的侧偏角与RT3100解算得到的侧偏角曲线,如图9所示,其中由VBOX III数据计算得到的侧偏角数据经过了适当的小波滤波。由图中可以看出:两种方法得到的侧偏角曲线趋势一致,在汽车大的侧偏时二者差值明显,但差值在 1° 以内,可以认为基于VBOX III和Vector Crescent的侧偏角测量精度满足汽车性能测试的要求。

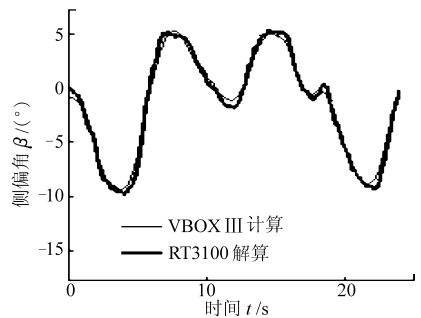


图9 侧偏角曲线对比分析

Fig.9 Comparative analyzing curves of vehicle sideslip angle

3 结论

(1)基于DSC产业化开发过程中进行实车道路试验的需要,运用GPS技术设计了汽车横摆角速度

和侧偏角工程测试系统,并通过实车试验数据分析了该方法的可靠性和可行性。

(2)测试系统中GPS设备均工作在单点标准服务模式,其直线定位精度一致性较好,但在弯道定位能力较差。

(3)测试系统中GPS设备是基于Doppler频移原理测量的速度,具有较高的精度。综合其与定向GPS设备得到的汽车方位角,计算得到的汽车横摆

角速度和侧偏角与验证系统测量得到的对应数据一致性好,最大偏差分别在 $5(^{\circ})/s$ 和 1° 以内,可以认为满足汽车道路性能试验的要求。从而避免了传统测量方法采用惯性传感器带来的安装、初始对准等不利于现场操作的困难。

(4)试验工况具有典型性,分析结果具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Van Zanten A T, Erhardt R, Landesfeind K, et al. VDC systems development and perspective[C]. SAE Paper 980235, 1998.
- 2 Van Zanten A T, Robert Bosch GmbH. Evolution of electronic control systems for improving the vehicle dynamic behavior [C]. AVEC'02, 20024481.
- 3 Simpson M D, Aleksander I. Estimation of vehicle side slip angle and yaw rate[C]. SAE Paper 2000-01-0696, 2000.
- 4 Fukada Y. Slip-angle estimation for vehicle stability control[J]. Vehicle Systems Dynamics, 1999, 32(4):375~388.
- 5 Ibrahim F, Al-holou N, Pilutti T, et al. Accurate INS position solution during GPS outages or degraded GPS[J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(9): 633~652.
- 6 Fukuba H, Adachi T, Yoshimoto A, et al. Measurement of vehicle attitude with RTK-GPS for analyzing the vehicle motion behavior[J]. JSAE Review, 2003, 24(3): 313~320.
- 7 Racelogic Limited. VBOX III 100 Hz with RTK RLVB3R2G2[M]. 2007.
- 8 Hemisphere GPS Inc. Crescent vector OEM board high performance GPS heading and positioning module[M]. 2007.
- 9 Novatel Inc. DL-V3 data sheet[M]. 2007.
- 10 Oxford Technical Solutions Limited. RT inertial and GPS measurement systems user manual (Rev. 080121)[M]. 2008.

(上接第5页)

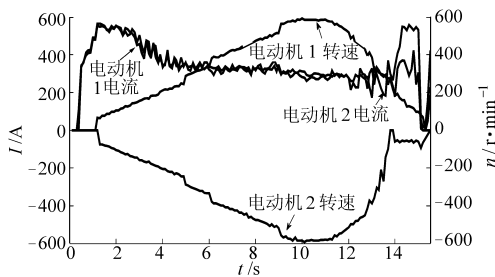


图13 中心转向电动机转速和电流特性

Fig. 13 Curves of speeds and currents of two motors at zero radius steering

4 结束语

履带车辆转向模型是关于 ω_c 、 R 以及 f 、 μ_{\max} 的多输入多输出非线性系统,采用电子差速履带车辆转向转矩ANNPID控制策略,利用模拟神经网络在线训练,实时更新控制系数,实现转向转矩协调分配和感应电动机的转矩控制,提高控制系统的鲁棒性。不同转向工况的试验结果表明,采用该策略可使电子差速履带车辆获得良好的转向低速操控性和稳定性。

参 考 文 献

- 1 邹渊,孙逢春,张承宁.电传动履带车辆双侧驱动转速调节控制策略[J].北京理工大学学报,2007,27(4):303~307. Zou Yuan, Sun Fengchun, Zhang Chengning. Dual-motor driving electric tracked vehicle speed-regulating control strategy [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007,27(4):303~307. (in Chinese)
- 2 孙逢春,陈树勇,郭汾.基于转矩控制策略的电传动履带车辆驱动特性研究[J].兵工学报,2007,28(2):129~133. Sun Fengchun, Chen Shuyong, Guo Fen. Research on driving performances of electric transmission tracked vehicles based on torque control strategy[J]. Acta Armamentarii, 2007,28(2):129~133. (in Chinese)
- 3 陈树勇,孙逢春.电传动履带车辆驱动系统建模与转向特性研究[J].系统仿真学报,2006,18(10):2 815~2 818. Chen Shuyong, Sun Fengchun. Study on modeling and turning performances for electric drive tracked vehicle propulsion system[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(10): 2 815~2 818. (in Chinese)
- 4 闫清东,张连第,赵毓芹,等.坦克构造与设计(下册)[M].北京:北京理工大学出版社,2007:222~236.
- 5 Thanh T D C, Ahn K K. Nonlinear PID control to improve the control performance of axes pneumatic artificial muscle manipulator using neural network[J]. Mechatronics, 2006, 16(9): 577~587.