

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.10.001

汽车稳定性控制系统侧偏角道路试验测试系统*

张小龙^{1,2} 李亮² 李红志² 宋健²

(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】 汽车侧偏角是汽车动力学稳定性控制系统实现对汽车稳定性预估的主要依据,设计了“1+2”GPS侧偏角测试方案,即1个基准站和2个移动站,并搭建了道路试验系统。阐述了传感器选型、系统配置和侧偏角计算方法,进行了系统的实车道路试验,并基于光学侧偏角传感器同时测量的数据验证了GPS方案的可行性。汽车侧偏角道路试验系统能够实现高频率的精确定位、测速和侧偏角测量,兼顾车身和车轮位置姿态测量,现场安装快捷方便,可为稳定性控制系统开发中的侧偏角算法和控制逻辑验证提供试验依据。

关键词: 汽车 稳定性控制系统 侧偏角 测试系统

中图分类号: U467.1⁺1; U461.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)10-0001-05

Sideslip Angle Roadway Test System for Vehicle Stability Control

Zhang Xiaolong^{1,2} Li Liang² Li Hongzhi² Song Jian²

(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

Vehicle sideslip angle is employed by the vehicle stability control system (VSC) as the basis for predicting the vehicle maneuverability and stability. The scheme of sideslip angle test system based on the ‘1+2’ GPS technology, i. e. one base station and two roving stations, was proposed, and the corresponding system was developed. The paper firstly introduced the primary sensor matching and the devices installation, then described the computation method for the sideslip angle based on the GPS data. Finally, the systematical road way tests were conducted, and the effectiveness of GPS scheme was verified by the same group test data of sideslip angle obtained from the double-direction optical speed sensor. The sideslip angle test system was characterized of high frequency and accuracy for positioning, velocity and sideslip angle measurement for vehicle body and road wheels, and of convenient installation on the spot. It can provide the credible test ways for the verification of the sideslip angle estimation algorithm and the control logic of VSC.

Key words Vehicle, Stability control system, Sideslip angle, Test system

引言

汽车稳定性控制系统(vehicle stability control system,简称VSC)是汽车底盘动力学控制的核心技术,能够实现汽车极限工况下制动、驱动、转向稳定

性一体化控制。汽车质心侧偏角(以下简称侧偏角)是用来表征汽车稳定状态的重要变量^[1-3]。目前VSC系统通常将侧偏角作为重要的控制变量。但VSC标配传感器不能直接完成对侧偏角的测量,通常构建算法对其进行估计。清华大学进行了VSC

收稿日期: 2009-11-24 修回日期: 2009-12-22

* 国家自然科学基金资助项目(50905092)、清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目(KF09122)、安徽农业大学青年基金重点资助项目(2009ZD02)和中国博士后科学基金资助项目(20080430429)

作者简介: 张小龙,副教授,清华大学博士后,主要从事汽车测试技术研究,E-mail: sunshine.lzh@gmail.com

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

产业化研究^[3-7],为了更有效的验证侧偏角估计算法和控制策略,需要研制满足 VSC 道路试验需求的汽车质心和轮胎侧偏角道路试验测试系统。

汽车侧偏角测量点处于汽车质心附近,传感器难以布置,且侧偏角通常是一小值(高附路面汽车未失稳时通常小于 12°)。直接采用惯性陀螺类传感器进行测量,存在积分误差累计和初始对准问题^[8],一般不单独使用。国外进行汽车动力学性能研究道路测试通常采用惯性传感器和 GPS 组合方式^[9-10],可以得到较为精确的角度信息,位置精度主要取决于 GPS 系统,但存在价格昂贵和可靠性问题。

汽车是一个地面行走系统,VSC 开发中汽车姿态主要指车身侧偏角。本文利用 GPS 技术设备现场安装方便、测试灵活、可靠的特点,基于 GPS 技术构建侧偏角测试系统。但现有进行汽车姿态角测量的 GPS 设备功能存在不足:不能同时完成高精度位置测量(2 cm);姿态测量数据更新速率不高,目前最高为 20 Hz,在典型工况如高速双移线试验有效时间段内的曲线时域特征表达不充分。本文研究一种基于 GPS 技术的汽车侧偏角测试系统,兼顾高精度高采样点位置、速度和侧偏角输出,同时集成轮胎侧偏角测试传感系统,以满足 VSC 开发侧偏角测试试验要求。

1 试验系统硬件

1.1 测试系统结构

图 1 所示是侧偏角道路试验测试系统结构框图,图中上侧两虚线框内为 GPS 测试设备,下侧虚线框内为车载其他传感器和数据采集设备。

经过系统测试和数据分析,选用加拿大 NovAtel 公司的 GPS 设备。接收机 A 为 Propak V3 L1L2F,接收机 B 和 C 为 DL V3 R2F。为了兼顾位置、速度和姿态角的测量,GPS 设备采用“1+2”方案,即 1 个基准站和 2 个移动站:基准站部分固定在试验场附近,基准站通过发送电台对外实时发送由接收机实时解算得到的载波相位差分(简称 RTK)改正数;车载部分包括两台接收机,通过接收电台实时接收 RTK 差分改正数,并实时解算天线处的位置、速度值,解算结果存储在接收机自带的 CF 卡中。将接收机 B 和 C 的天线通过磁吸盘安装在车顶外侧。如果两天线安装与车身纵轴方向一致,则可以通过位置解算得到车身方向角(即航向角),通过数据处理可以得到车身在天线位置处的侧偏角。图中接收电台内部已集成电源,而 3 台 GPS 接收机和发送电台均需外置电源。

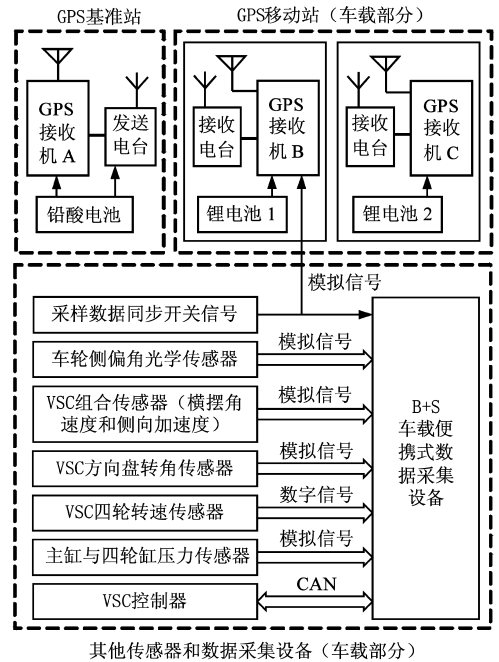


图 1 测试系统结构框图

Fig. 1 Scheme of road way test system

图中下虚线框中左侧为对应的传感器单元和自行研制的 VSC 控制器单元,右侧为通用车载数据采集设备,选用德国 B + S Multidata 公司的产品,并配置了模拟和数字信号采样模块及 CAN 采样模块。VSC 系统标配传感器包括:横摆角速度和侧向加速度组合传感器、方向盘转角传感器、四轮转速传感器和主缸压力传感器,共 6 路模拟信号和 4 路数字信号。选用德国 Datron 公司的双向光学速度传感器 S350 对车身或车轮侧偏角进行测量,该传感器配置的二次仪表可以将其 3 路测量值以模拟信号形式输出,与 B + S 的 3 路模拟输入端子相连。为了便于对轮胎力进行估计和验证,增加了测量制动缸压力的压力传感器,共 4 路模拟信号输出,与 B + S 的模拟输入端子相连。VSC 控制器的状态参数通过 CAN 接口实时输出。

1.2 传感器及系统性能指标

测试系统中 VSC 配置传感器选自某车型,其他传感器和系统性能指标如表 1 所示。

设置 GPS 基准站解算输出 RTCA 协议差分信号更新速率为 1 Hz(可设置成 10 Hz 以上)。GPS 移动站实时位置和速度同时解算输出更新速率为 20 Hz,仅实时位置或速度解算输出更新速率为 50 Hz。若实现 50 Hz 的位置和速度数据输出需离线处理,可由基准站和移动站 GPS 接收机记录下伪距观测值和卫星星历等,由后处理软件(如 waypoint GrafNav)解算得到。B + S 对侧偏角传感器和压力传感器等模拟信号采样频率设置为 1 kHz。

表 1 主要传感器性能指标
Tab.1 Main performance index of sensors

传感器名称及生产企业	主要精度指标		信号输出/存储	功能
	参数	数值, 量程	形式	
GPS 接收机, Propak V3 L1L2F, 加拿大 NovAtel 公司	水平位置/cm	$2(1\sigma)^*$	RS 232 输出广播差分信号	GPS 基准站接收机, 实时解算输出载波相位差分 and 伪距差分改正数信号
	速度/ $m \cdot s^{-1}$	$0.03(1\sigma), 515 m/s$		
	时间/ns	$20(1\sigma)$		
GPS 接收机, DL V3 R2F, 加拿大 NovAtel 公司	水平位置/cm	$2(1\sigma)$	接收机随机 CF 卡存储	GPS 移动站接收机, 实时进行载波相位差分解算, 并将结果存储到随机 CF 卡中, 同时记录同步信号触发时刻信息
	速度/ $m \cdot s^{-1}$	$0.03(1\sigma), 515 m/s$		
	角度/ $^\circ$	0.25^{**}		
	同步信号/ms	1^{***}		
	时间/ns	$20(1\sigma)$		
双向光学速度传感器, S350, 德国 Datron 公司	速度精度/%	$\pm 0.2, 0.5 \sim 250 km/h$	3 路模拟输出供	根据安装位置不同, 测量车身或车轮的侧偏角
	角度/ $^\circ$	$\pm 0.1, \pm 40^\circ$	B + S 采集	
	距离/mm	2.5		
	离地间隙/mm	350 ± 100		
压力传感器, AK-3, 中国航天科技集团七零一所	精度/%	$\pm 0.25, 20 MPa$	5 路模拟输出供 B + S 采集	测量制动系统主缸和轮缸压力信息

注: * GPS 在载波相位差分模式下测量的天线水平位置的圆概率误差, 具体为: 如果测量结果无偏, 测量值以 66.7% 的概率定位在以真实值为圆心、2 cm 为直径的圆内, 其他类同; ** 此处的角度是通过移动站两接收机精确测量得到的位置后处理计算得到的, 非 GPS 接收机直接输出, 其精度是在典型工况下标定得到; *** 此处的同步信号精度暂取为 1 ms。

2 数据处理

2.1 GPS 数据表示

NovAtel GPS 接收机提供标准的 NMEA - 0183 协议格式和 NovAtel 格式数据输出。NovAtel 格式数据稍长, 但信息充分, 便于使用。主要采用 NovAtel 格式中的 bestpos、bestvel、markpos 3 条指令。

bestpos 指令中的位置是基于 WGS - 84 坐标系表示的汽车 GPS 天线处位置, 即经度、纬度和当地海拔高度。通常采用高斯投影将经、纬度坐标转换到原点在试验场地附近的局部水平直角坐标, 该坐标系 x 轴水平朝东, y 轴水平朝北, z 轴垂直水平面向上。

bestvel 指令中的速度是汽车 GPS 天线处的速度在地理坐标系中的投影。通常选该地理坐标系为东北天坐标系, 即原点与 GPS 天线重合, x 轴水平朝东, y 轴水平朝北, z 轴垂直水平面向上。bestvel 指令中水平速度方向定义为水平速度矢量方向与正北方向的夹角, 在东北天坐标系中, 绕 z 轴顺时针为正, 量程 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

markpos 指令只有在触发条件有效时输出触发时刻 GPS 天线位置, 具体同 bestpos。

上述 3 条指令中均包括含有 GPS 协议时间的头字符串。GPS 时间是连续时间, 由协议零点开始

的 GPS 周数和周内秒数组成。为了表达方便, 将 GPS 时间转为世界协调时 (UTC), 需要进行 UTC 的跳秒 (leap second) 补偿, 目前的跳秒数是 15 s。

2.2 车身侧偏角计算方法

图 2 所示是由 GPS 测量数据计算汽车车身侧偏角的方法示意图。图中 $O_G x_G y_G$ 为高斯水平直角坐标系, 图中 AB 连线尽量位于汽车纵向对称平面, A 点尽量位于汽车质心上方, AB 间距离尽可能拉大, 称 AB 连线为基线, A 处放置的天线为主天线, B 处放置的天线为辅天线。 u_A, u_B 和 φ_f, φ_r 分别为 $A、B$ 天线处的水平速度及其与正北方向的夹角, 由

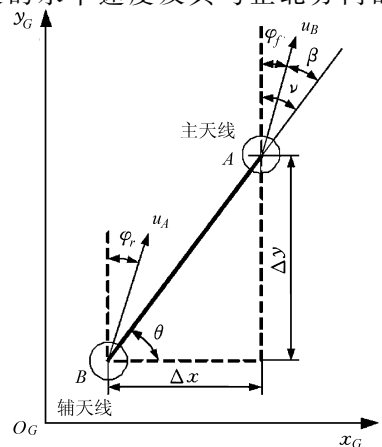


图 2 车身侧偏角计算示意图
Fig.2 Scheme of vehicle body sideslip angle calculation

GPS接收机分别测量得到。 θ 为基线与 $O_c x_c$ 轴的夹角, β 为汽车质心侧偏角,其定义为

$$\beta = v - \varphi_f \quad (1)$$

式中 v ——汽车纵轴线与正北方向的夹角

$$v = \pi/2 - \theta \quad (2)$$

通过GPS测量得到A、B处的位置 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) ,则

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) = \arctan\left(\frac{y_A - y_B}{x_A - x_B}\right) \quad (3)$$

此时 θ 角相对于 x_c 轴定义,逆时针为正,值域为 $(-\pi/2, \pi/2)$ 。 φ_f 相对于 y_c 轴定义,顺时针为正,定义域为 $(0, 2\pi]$ 。二者存在差异,对式(2)直接计算得到的 v 值进行修正,即

$$v = \begin{cases} v & (|\varphi_f - v| \leq \pi/2) \\ v + \pi & (|\varphi_f - v| > \pi/2) \end{cases} \quad (4)$$

然后代入式(1)进行计算。

实际道路试验现场进行GPS天线安装时,AB不一定位于汽车纵向对称平面或与其平行,需要对初始安装误差角进行补偿。试验前需要以尽量高的车速(大于25 km/h)直线行驶一短时间(通常大于5 s),取此段时间的数据由式(1)计算得到的值即为AB初始安装误差角。

3 试验验证

2009年6月在辽宁绥中县某机场进行了系统道路试验,对试验仪器性能进行测试并对汽车侧偏角试验方法进行验证。试验车为课题组VSC试验车。图3给出了某组方向盘左转转角固定连续加速试验的部分曲线,图中数据都基于同步开关信号进行了同步处理。

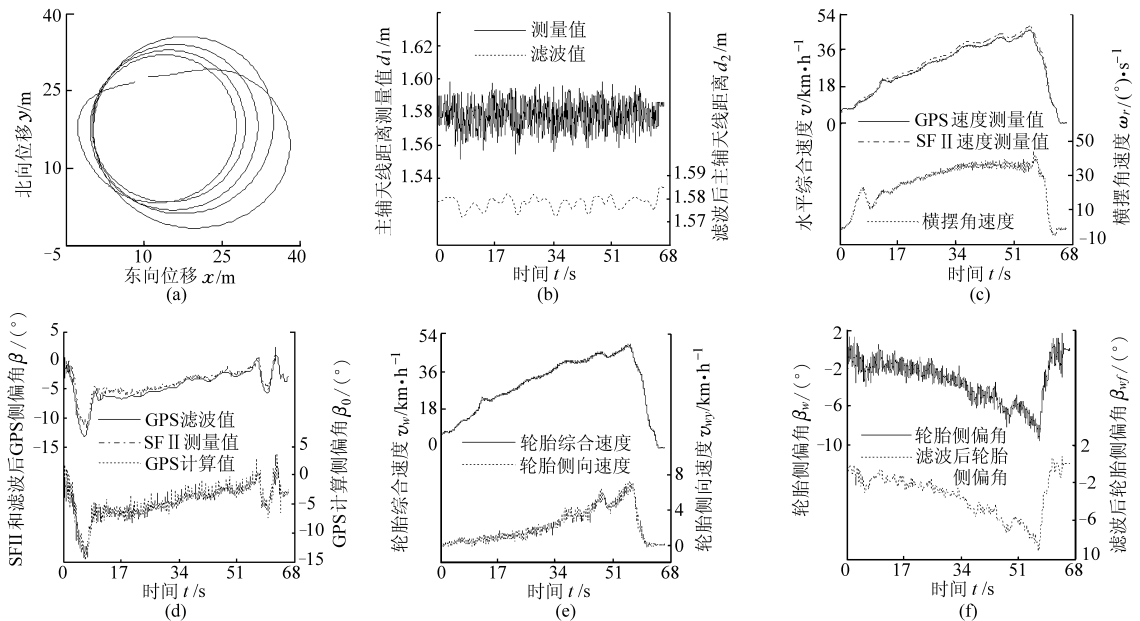


图3 测试系统性能和侧偏角测试方法验证试验部分曲线

Fig. 3 Part curves for verifying the test system performance and the sideslip angle test method

(a) 轨迹曲线 (b) 主轴GPS天线间距离曲线 (c) 速度曲线和横摆角速度曲线
(d) 侧偏角曲线 (e) S350测量的轮胎速度曲线 (f) S350测量的轮胎侧偏角曲线

图3a是GPS接收机测量得到的主天线处位置曲线,试验轨迹基本上是半径为20 m的圆。为了间接验证GPS接收机在RTK模式下的相对定位精度,图3b给出了根据GPS输出位置数据计算得到的两天线间距离,其值变化范围为 (1.58 ± 0.01) m,符合其标称定位精度。

为了验证“1+2”GPS汽车侧偏角测试方案,系统另外选用了Datron公司的双向光学速度传感器SF II,并联入图1所示系统。该传感器的精度与系统选用的S350传感器相当。SF II装于主天线右侧车门下沿。图3c给出了SF II和GPS主天线分别测

量得到的车身水平综合速度,以及VSC组合传感器提供的横摆角速度曲线,由于汽车逆时针转圈,SF II所测速度在横摆角速度较大时明显大于GPS测量值。图3d给出了两种方法分别测量得到的车身不同位置的侧偏角曲线,其中GPS方案直接计算值噪声较大,利用小波进行了去噪处理。同样由于安装位置的不同,SF II测量值比GPS计算值略小,但趋势完全相同。说明“1+2”GPS汽车侧偏角测试方案精度和可靠性均可得到保证。

VSC开发还需对车轮的运动状态进行估计,系统选用的传感器S350安装在轮辋上,可完成对车轮

侧偏角和纵、侧向速度的测量。图 3e 和 3f 给出了同组试验的测量曲线(右前轮)。

可见,基于 GPS 测量位置等信息进行汽车质心侧偏角测试方法可行,测试系统能够满足 VSC 开发侧偏角及相关参数的测试要求。

4 结束语

根据汽车动力学稳定性控制系统 VSC 产业化

开发的需要,设计了“1+2”GPS 测试方案,并搭建了道路试验系统。通过系统的道路试验和数据处理,验证了该系统的可靠性和工程实用性,能够满足高频率的精确定位、测速和侧偏角测量的要求,兼顾车身和车轮位置姿态的测量,为 VSC 开发中的侧偏角算法验证和性能评价提供准确的试验依据。

参 考 文 献

- 1 Van Zanten A T. Bosch ESP systems; 5 years of experience[C]. SAE Paper 2000-01-1633, 2000.
- 2 Shibahata Y, Shimada K, Tomari T. Improvement of vehicle maneuverability by direct yaw moment control[J]. Vehicle System Dynamics, 1993, 22(5~6): 465~481.
- 3 Li Liang, Song Jian, Wang Huiyi, et al. Fast estimation and compensation of the tire force in real time control for vehicle dynamic stability control system[J]. International Journal of Vehicle Design, 2008, 46(3~4): 208~229.
- 4 Li Liang, Song Jian, Yang Cai, et al. Prediction control algorithm based on dynamic stability matrix method for DSC[C]. SAE Paper 2007-01-0848, 2007.
- 5 李亮, 宋健, 于良耀, 等. 低附路面汽车动力学稳定性控制系统控制策略[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 229~235.
Li Liang, Song Jian, Yu Liangyao, et al. Control strategy of vehicle dynamic stability control system on low tire-road friction condition[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 229~235. (in Chinese)
- 6 郑智忠, 李亮, 杨财, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的汽车质心侧向速度观测器[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 1~5, 9.
Zheng Zhizhong, Li Liang, Yang Cai, et al. Vehicle lateral velocity observer using extended Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 1~5, 9. (in Chinese)
- 7 张小龙, 吴敏, 宋健, 等. 基于 GPS 的汽车横摆角速度和侧偏角工程测试方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 27~31.
Zhang Xiaolong, Wu Min, Song Jian, et al. Engineering test method for motor vehicle yaw rate and sideslip angle based on GPS technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 27~31. (in Chinese)
- 8 张小龙, 宋健, 冯能莲, 等. 汽车道路试验测试方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 38~44.
Zhang Xiaolong, Song Jian, Feng Nenglian, et al. Research progress of measurement method for vehicle road way test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 38~44. (in Chinese)
- 9 Hahn J, Rajamani R, Alexander L. GPS-based real-time identification of tire-road friction coefficient[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 331~343.
- 10 Ryu J. State and parameter estimation for vehicle dynamics control using GPS[D]. Stanford, CA: Stanford University, 2004.

(上接第 10 页)

- 4 《汽车工程手册》编辑委员会. 汽车工程手册: 试验篇[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- 5 高峰, 李克强, 王建强, 等. 车速控制系统自适应油门控制器设计[J]. 汽车工程, 2005, 27(4): 418~422.
Gao Feng, Li Keqiang, Wang Jianqiang, et al. The design of adaptive throttle controller for speed control[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(4): 418~422. (in Chinese)
- 6 Kobayashi K, Cheok K C, Watanabe K. Estimation of absolute vehicle speed using fuzzy logic rule-based Kalman filter[C] // Proc. of the American Control Conf., Seattle, USA, 1995: 3 086~3 090.
- 7 Kyongsu Yi, Ilki Moon. A driver-adaptive stop-and-go cruise control strategy [C] // Proceedings of the 2004 IEEE, International Conference on Networking, Sensing & Control, Taipei, 2004: 601~606.