

汽车稳定性控制系统性能试验与数据处理方法*

张小龙^{1,2} 李亮² 宋健² 吴凯辉² 李红志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】 对美国汽车稳定性控制系统(ESC)性能试验法规 FMVSS 126 确定的 ESC 功能、过度转向特性和横向响应能力的客观测试和评价方法进行了系统分析。构建了先进的汽车道路试验系统,阐述了试验系统核心设备转向机器人的性能要求和结构,进行了系统的道路试验。采用小波降噪方法对试验数据进行了滤波处理,小波滤波无相位延时,且信号的局部特征都得到很好的保留,相比法规推荐的频域滤波方法,此方法更为精确。对 DGPS 方法和加速度方法处理得到的横向位移数据进行了对比,两种方法在转向开始后 2 s 内测试结果接近,误差小于 5%,法规推荐采用加速度方法测量转向开始后 1.07 s 时车身横向位移是可行的。对 3 组具有区别意义的试验结果进行了分析,结果表明法规基于横摆角速度信息对汽车稳定性程度进行评价是可行的,但汽车接近失稳和失稳时的稳定性需要依据横摆角速度和质心侧偏角信息共同表征。

关键词: 汽车 稳定性控制 评价 道路试验 数据处理方法

中图分类号: U461.6; U467.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)05-0001-06

Performance Test and Data Processing Method for Vehicle Electronic Stability Control System

Zhang Xiaolong^{1,2} Li Liang² Song Jian² Wu Kaihui² Li Hongzhi²

(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

According to FMVSS 126, the definition of ESC, the objective performance test and evaluation methods for over-steer characteristic and lateral responding ability were analyzed respectively. The advanced vehicle road way test system was developed, in which the key steer robot device was comprehensively introduced for its performance requirement and operating principle, then the systematical road way tests were conducted. The wavelet filtering method was employed to reduce the noise included in the initial sensor signal. Compared with the frequency-domain filter method suggested by FMVSS 126, the wavelet filtering was more precise for its zero phrase delay and good reservation of signal's local specificity. Vehicle lateral displacement was obtained respectively from differential GPS method and acceleration method. During 2 s after the beginning of steering, the results were almost identical and the error was less than 5%. So the acceleration method suggested by FMVSS 126 was feasible to test the lateral displacement at 1.07 s after the beginning of steering. Finally, the results of three group tests showed that it was feasible to evaluate the vehicle stability with yaw rate information when vehicle did not lose its stability, but when vehicle was approaching instability or the stability was lost, the vehicle slip angle information should be added to evaluate the vehicle stability.

Key words Vehicle, Electronic stability control, Evaluation, Roadway test, Data processing method

收稿日期: 2010-07-04 修回日期: 2010-09-03

* 国家自然科学基金资助项目(50905092)和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)

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

引言

汽车稳定性控制 (electronic stability control, 简称 ESC) 系统能有效预防汽车进入失稳区域, 提高汽车在极限非失稳工况下的稳定性和操纵性^[1~3], 该技术已被发达国家汽车行业广泛采用。目前, 各汽车厂家或组织对汽车 ESC 的功能定义和性能评价方法还未形成共识, 如美国 FMVSS 126 法规确定的汽车 ESC 是基于轮胎制动力调节的系统, 并制定测试程序和评价指标对系统性能进行客观评价^[4]; Delphi 公司主张通过主动转向等技术来实现汽车稳定性控制的目标; Bosch 公司倾向于采用汽车驾驶主观感受对 ESC 系统性能进行评价。

本文以 FMVSS 126 法规为基础, 构建道路试验系统对汽车 ESC 系统性能试验和数据处理方法进行试验研究, 为 ESC 控制策略的确定和验证提供客观依据。

1 美国 ESC 法规 FMVSS 126

美国交通安全管理局 2007 年 6 月颁布了 FMVSS 126 法规, 确定了 ESC 系统性能及对组件和测试设备的基本要求, 目的是减少因驾驶员失去对汽车方向控制导致的碰撞和侧翻事故中的伤亡数量。法规要求 2011 年 9 月以后生产总质量 4 536 kg 及以下的新车, 包括乘用车、MPV、卡车和公交车, 都必须装备符合法规要求的 ESC 系统。

法规确定的 ESC 系统是基于制动力调节的稳定性控制系统, 虽然许多汽车厂家和组织表示可以通过其他方式调节来实现法规的性能要求, 但法规认为除了发动机控制外, 所有其他 ESC 相关的技术缺少数据来评估它们的有效性和确定是否满足安全性需要。并定义了 ESC 应具备以下所有特征: 通过对各车轮制动力矩的独立调节以产生合适的横摆力矩来提高汽车行驶方向稳定性; 使用闭环控制算法来限制汽车过度和不足转向的计算机控制系统; 有方法来确定汽车的横摆角速度, 和估计汽车侧偏角或侧偏角速度; 有方法监控驾驶员的转向输入; 有算法判断是否有必要对发动机输出扭矩进行调节, 如果需要, 有方法对发动机扭矩实施调节, 以辅助驾驶员维持对汽车的控制能力; 除车速低于 15 km/h 和倒车外, 在汽车全速范围内都起作用。

法规要求试验在峰值附着系数为 0.9 以上的干燥、平整、坚实的路面上进行, 测试设备和配重总质量为 168 kg, 燃油装满燃油箱体积 75% 以上, 轮胎要求全新, 环境温度为 7~40℃, 风速对于乘用车小于 10 m/s, 对于 MPV、卡车和公交车小于 5 m/s。

法规确定的测试程序包括: 轮胎充气、指示灯检查、“ESC Off”控制功能检查、制动系统调试、轮胎调试、慢速增长转向速率测试、轮胎调试、转向过度干涉和响应能力测试、ESC 故障识别、数据后处理和性能计算。

图 1 所示是法规确定的测试转向盘输入历程 (图 1a) 和基于车身横摆角速度的评价参数确定 (图 1b) 示意图。图 1a 确定的转向盘输入曲线是将频率为 0.7 Hz 的正弦曲线的第 2 个峰值处以后的部分延时 500 ms 得到, 该曲线初始相位为 0, 周期约为 1.93 s, 峰值 δ 基于参考值 A 逐渐增大, A 值依据具体车型根据测试程序测试得到。

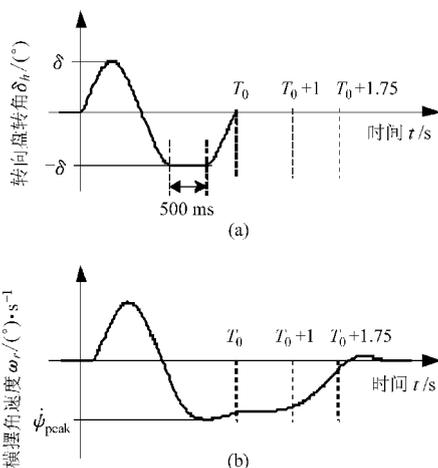


图 1 ESC 性能测试与评价方法

Fig. 1 Test and evaluation method for ESC performance

1.1 慢速增长转向速率测试

试验分两组, 一组转向盘顺时针转向, 另一组转向盘逆时针转向。在车速直线滑行到 (80 ± 2) km/h 时以 $13.5(^{\circ})/s$ 的速率转动转向盘, 直到侧向加速度达到 $0.5 g$ 。每组试验重复 3 次, 对 6 次试验数据分别回归插值得到侧向加速度为 $0.3 g$ 时的转向盘转角, 并进行平均, 最后得到 A 值, 精确到 0.1° 。每次试验时间间隔不超过 5 min。

A 值的确定方法消除了不同车型及其转向系统的差异, 得到的是归一化的转向盘转角的参考基准值。统计表明, 归一化 $5.0A$ 的平均转向盘转角约为乘用车 147° 、SUV 车 195° 、皮卡车 230° 。

1.2 转向过度干涉和响应能力测试

测试方法名称为 Sine with Dwell Test。首次测试, 应在确定 A 值试验之后 2 h 内进行。单次试验后汽车应静止 90~300 s 进行制动系统冷却。

试验分两组进行, 一组前半周期转向盘顺时针转向, 另一组前半周期转向盘逆时针转向。转向操作在汽车挂高档直线滑行至 (80 ± 2) km/h 时开始。每组试验中, 各次试验转向盘转角幅度按 $0.5A$ 逐次增加, 如果计算得到的转向盘转角幅度 $6.5A$ 不超过

300°,则最终试验转向盘转角幅度应大于 6.5A 或 270°。如果计算得到的 6.5A 已经超过 300°,则最终试验转向盘转角幅度应取 300°。

1.3 客观评价方法

法规基于横摆角速度和车身横向位移两个参数对 ESC 系统转向过度干涉和响应能力进行评价。

设转向开始时刻 $t = 0$ s,则转向结束时刻 $t \approx 1.93$ s,并记转向盘转向变方向后的横摆角速度峰值为 $\dot{\psi}_{peak}$,横向位移为 Y_{disp} 。从横摆角速度方面评价,在转向结束后 1 s,即 $t \approx 2.93$ s 时其横摆角速度 $\omega_r(2.93) \leq 0.35\dot{\psi}_{peak}$;在转向结束后 1.75 s,即 $t \approx 3.68$ s 时其横摆角速度 $\omega_r(3.68) \leq 0.20\dot{\psi}_{peak}$ 。从横向位移方面评价要在 $\delta \geq 5.0A$ 时进行,在 $\delta \geq 5.0A$ 时,取 $t = 1.07$ s 时的横向位移,应该 $Y_{disp}(1.07) > 1.83$ m (汽车的总质量小于等于 3 500 kg) 或 $Y_{disp}(1.07) > 1.52$ m (汽车总质量大于 3 500 kg)。

在 Sine with Dwell Test 中,所有各次试验均符合上面的限值要求,ESC 系统性能通过。

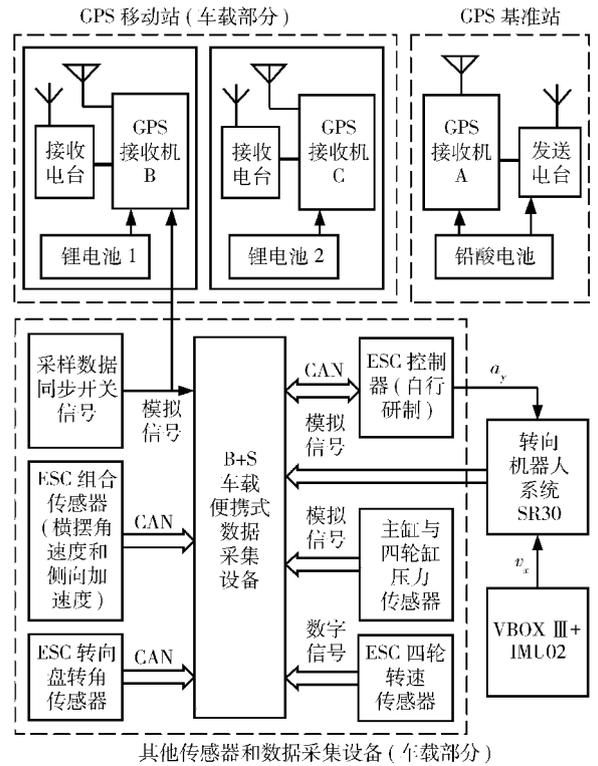
2 ESC 试验系统

2.1 试验系统结构

图 2 所示是面向 ESC 试验的道路试验系统。图中上方两个虚线框表示基于高精度 GPS 实现对车身位置和侧偏角的精确测量^[5]。图中下方左侧虚线框是基于德国 B + S 的车载道路数据采集系统^[6],完成对 ESC 配置传感器、自行开发的 ESC 控制器和转向机器人 SR30 等的数据采集。转向机器人系统用于实现对转向输入的精确控制;VBOX III + IMU02 主要用于对转向机器人提供车身速度信息,另外,对其数据后处理可得到车身侧倾角等信息。各测试系统间的数据同步处理参考文献^[7]。

VBOX III 和 IMU02 均是英国 Racelogic 公司开发的测试设备,其中 IMU02 是 6 测量自由度惯性测量单元,VBOX III 集成了 GPS 引擎、CAN、模拟和数字输出、模拟输入采集等功能,水平速度测量精度为 0.1 km/h^[8]。

转向机器人是试验系统中核心执行机构,其结构原理如图 3 所示^[9]。控制器根据转向角度传感器信号实现转向位置反馈控制,并提供转向力矩信号输出(由两路拉压力传感器换算得到)。PC 机通过 USB 与控制器相连,根据试验要求完成对控制器的设置,并在试验过程中实时采集、显示设定信息。电源模块由 12 V 电池供电,并经由其内部电路逆变成 60 ~ 65 V 给电动机供电。为提高试验的安全性和操作方便性,采用安全控制手柄切换决定转向是否



其他传感器和数据采集设备(车载部分)

图 2 ESC 道路试验系统结构框图

Fig. 2 Block diagram for ESC road way test system

由转向机器人控制。转向电动机为直流有刷型,其主要性能参数如表 1 所示^[9]。

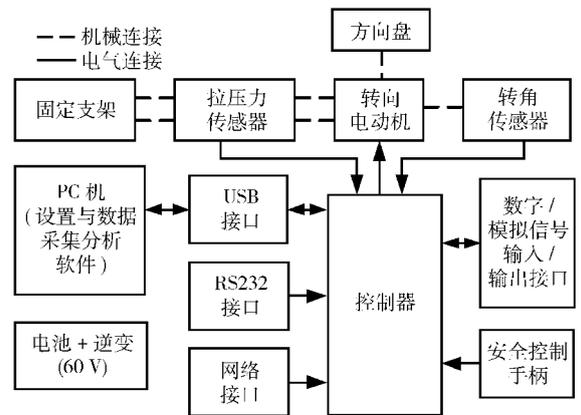


图 3 SR30 转向机器人结构原理图

Fig. 3 Block diagram of SR30 steer robot

表 1 SR30 转向电动机性能参数

Tab. 1 Parameters of SR30 electric engine

参数	数值
最大输出扭矩 $T_{max}/N \cdot m ((^\circ)/s)$	33 (850)
最大连续输出扭矩 $T_{max}^c/N \cdot m ((^\circ)/s)$	30 (1 000)
最大转速 $n_{max}/(^\circ) \cdot s^{-1} (N \cdot m)$	2 350 (7)
质量 m/kg	10

2.2 测试参数

法规中推荐的 ESC 性能测试试验中测试参数主要包括:转向盘转角、车身纵向、垂向和侧向加速

度、车身侧倾角和车速等。

车身侧倾角法规采用超声距离传感器测量车身左、右侧的测量位置处的离地高度来间接计算得到。本文没有采用这一方法,而是通过 VBOX III + IMU02 组合测量数据离线解算得到^[10]。这种方式的优点是测试参数多,系统简单,现场调试方便,同时避免了法规推荐方法中地面不平干扰的影响。另外,如果将 IMU02 的测量坐标系和汽车坐标系重合,则 IMU02 可直接测量得到汽车纵向、侧向和垂向 3 个方向的线加速度和角速度。

法规推荐采用实际测量的侧向加速度二次积分计算车身横向位移评价指标,这种方法虽然工程实现简单,但测试精度受车身姿态和航向变化的影响。为了量化这种测试误差,本文选用高精度 DGPS 方法测量车身的位置(精度为 $2\text{ cm } 1\sigma$),并对测试结果进行对比分析。

测试试验在特定车速下进行,VBOX III 提供汽车的水平速度信息,并通过一路模拟输出端子将车速信号 v_x 输送到转向机器人控制器。转向机器人控制器所需的车身侧向加速度 a_y ,由 ESC 组合传感器经自行开发的 ESC 控制器 CAN/DA 转换后提供。

车身速度由 DGPS 系统测量得到,转向盘转角由 ESC 转向盘转角传感器信号经 B + S 采样得到。

3 实车试验与数据处理

2010 年初在辽宁某军用机场进行了系统测试试验,试验车为国产未匹配 ESC 的轿车。采用图 2 所示的试验系统,路面附着、装载和环境等符合法规基本要求。

3.1 数据滤波方法和转向开始时刻

性能评价所依据的主要测试变量,如转向盘转角、侧向加速度和横摆角速度等均含有一定的噪声。本文采用小波滤波的方法对这些原始信号进行降噪处理,利用 Matlab 中的函数 wden 编程实现。经调试采用下面的设定: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,阈值调整函数参数选为 mln,表示对各层噪声分别进行估计、调整。小波滤波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,最后利用处理后的小波系数实现信号重构。

汽车垂向具有一定的角刚度和阻尼,经转向盘输入激励后车身横摆和侧向运动均具有一定的相位滞后。经调试发现小波降噪方法和法规推荐的基于频域的滤波器方法(如 12 极点 butterworth 滤波器,截止频率 6 Hz)相比,无相位滞后,且能将信号的局

部特征得到很好的保留。图 4 是一组试验中侧向加速度两种滤波方法的效果对比。

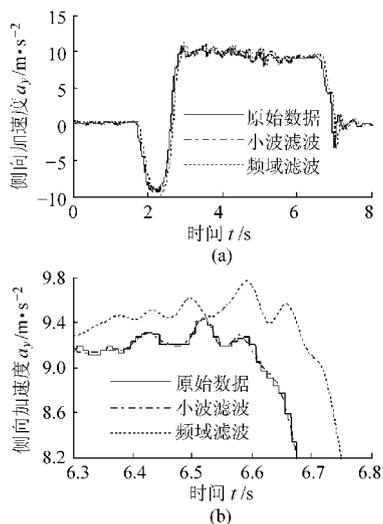


图 4 侧向加速度滤波效果对比($\delta > 150^\circ$)

Fig. 4 Filtering results comparison for lateral acceleration ($\delta > 150^\circ$)

(a) 完整曲线 (b) 局部放大曲线

法规中评价指标的确定基准是转向开始时刻,转向开始时刻是“零区间”结束后转向角首次达到 5° (初始顺时针转向)或 -5° (初始逆时针转向)的时刻。“零区间”结束点须满足两个条件:转向盘转向速率超过 $75^\circ/\text{s}$,且后续大于 $75^\circ/\text{s}$ 的时间至少持续 200 ms。如果第 2 个条件不满足,继续搜寻。“零区间”开始点为“零区间”结束点前 1 s。在确定转向开始时刻之前,需要对转向角信号进行滤波和偏置消除。

3.2 试验车 A 值

慢速增长转向速率测试中,保持车速 80 km/h 左右,转向盘转向速率 $13.5^\circ/\text{s}$,对应侧向加速度为 $0.3g$ 时的转向盘转角数据即为 A 值,一次试验曲线如图 5 所示。3 次转向盘左转试验 A 值分别为 29.84° 、 27.33° 和 33.78° ,3 次转向盘右转试验 A 值分别是 -32.10° 、 -30.51° 和 -31.36° 。试验车 6 次试验的 A 值平均值约为 30.8° 。

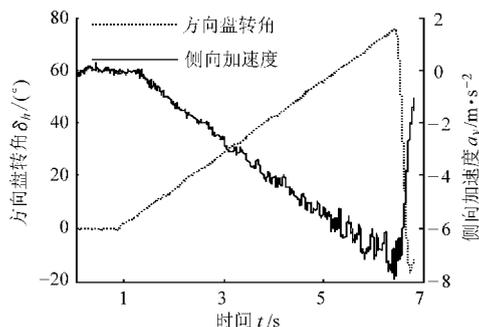


图 5 一组 A 值确定的试验曲线

Fig. 5 Example test curves for 'A' determination

3.3 横向位移测试方法比较

(1) 基于加速度的方法

基本原理是对经车身侧倾角和安装位置修正后的侧向加速度进行二次积分得到,积分开始时刻为有效转向开始时刻,设为0 s,积分结束时刻为转向开始后的1.07 s,计算公式为^[4]

$$s_{ya} = \int_0^{1.07} \left(\int_0^{1.07} a_{y_{cc}} dt \right) dt \quad (1)$$

其中 $a_{y_{cc}} = \left(a_{ym} - \frac{\sin\phi}{\cos\phi} \right) + d \dot{\omega}_r \Delta x \quad (2)$

式中 s_{ya} ——车身横向位移, m
 $a_{y_{cc}}$ ——计算得到的汽车质心处的横向加速度(指与汽车纵轴正交并且平行于路面的汽车加速度矢量的分量), g
 a_{ym} ——由与车身固联的加速度计测量得到的汽车侧向加速度, g
 ϕ ——车身相对地面的侧倾角, (°)
 $\dot{\omega}_r$ ——横摆角加速度, (°)/s²
 Δx ——加速度计和汽车质心间纵向距离, m
 d ——单位转换系数, 取 1.78×10^{-3}

(2) 基于 GPS 的方法

图6是基于DGPS直接测量的汽车车身位置信息经坐标旋转计算得到汽车横向位移方法示意图。直角坐标系 x_1Oy_1 是由直角坐标系 xOy 逆时针旋转 $(\pi/2 - \theta)$ 角度得到。图中, Ox 表示正东方向, Oy 表示正北方向, Ox_1 表示试验车试验前的直线行驶方向, 试验转向开始后的1.07 s汽车质心相对于 Ox_1 轴的垂直距离即为横向位移。

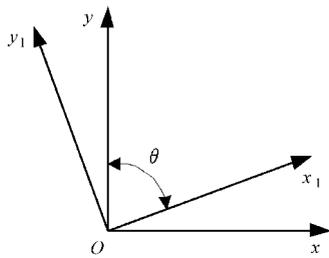


图6 基于DGPS位置数据确定横向位移方法
 Fig. 6 DGPS based lateral displacement determination method

由GPS接收机直接测量得到的是用经度和纬度表示的车身位置信息,需经高斯平面投影转换到原点在试验场附近确定点的局部坐标系 xOy 中^[10]。“零区间”中汽车保持直线平稳行驶,车身方向和其水平速度矢量方向 θ 一致,而 θ 可由GPS接收机直接测量得到。为了提高车身方向的测量精度,可取“零区间”采样得到 h 值进行平均。

坐标转换

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sinh & \cosh \\ -\cosh & \sinh \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

的 2×2 矩阵为 xOy 系向 x_1Oy_1 系旋转 $(\pi/2 - \theta)$ 角度的旋转矩阵。

(3) 试验数据对比

表2是一组转向盘右转测试试验中的车身横向位移两种测试方法结果对比。试验车没有装备ESC系统,在5A时汽车已经侧滑失稳。加速度方法积分采用梯形积分法。

表2 横向位移测试方法比较

Tab. 2 Comparison of lateral displacement test methods

转向盘转角 峰值 $\delta/(^\circ)$	加速度方法 s_{ya}/m	GPS方法 s_{yg}/m	差值 $\Delta s/m$
1.5A	1.37	1.30	0.07
2.0A	1.75	1.65	0.10
2.5A	2.01	1.98	0.03
3.0A	2.23	2.14	0.09
3.5A	2.50	2.59	-0.09
4.0A	2.76	2.79	-0.03
4.5A	3.16	3.01	0.15
5.0A	3.21	3.22	-0.01

从表中可以看出:两种测试方法结果较为接近,随着转向盘转角峰值的增加,横向位移也增加;在4.5A时两种方法结果相差较大,加速度方法测量值相对GPS方法偏差达5%。

图7是转向盘转角峰值为4.5A时的横向位移两种测试方法计算结果对比曲线。由图中可以看出,在转向开始后2 s内,两种测试方法结果很接近,随时间增长,两种测试结果偏差越来越大。说明加速度方法测量横向位移在转向开始后2 s以内测量精度能够得到保证。

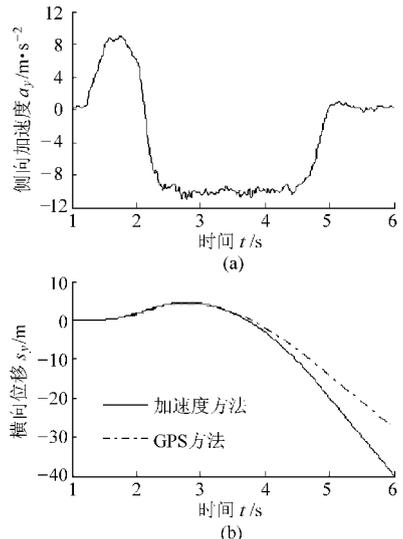


图7 侧向加速度和横向位移测试方法对比曲线($\delta = 4.5A$)
 Fig. 7 Comparison curves of lateral displacement test methods ($\delta = 4.5A$)
 (a) 侧向加速度 (b) 横向位移

3.4 典型试验与评价信息提取

横向位移测试结果如表2所示,图8给出了没有ESC控制时转向盘转角分别为3.0A、4.5A和5.0A时3组试验曲线。其中3.0A时汽车行驶稳定,4.5A时汽车接近侧向附着极限,5.0A时汽车失稳,3组曲线的起始点均为转向开始点。图8b曲线中的‘*’号为法规确定的测量点,分别为最大横摆角速度、转向结束后1s和1.75s时的横摆角速度。

4.5A转向试验中, $\omega_r(2.93)/\dot{\psi}_{peak}$ 和 $\omega_r(3.68)/\dot{\psi}_{peak}$ 分别为61.03%和10.66%。

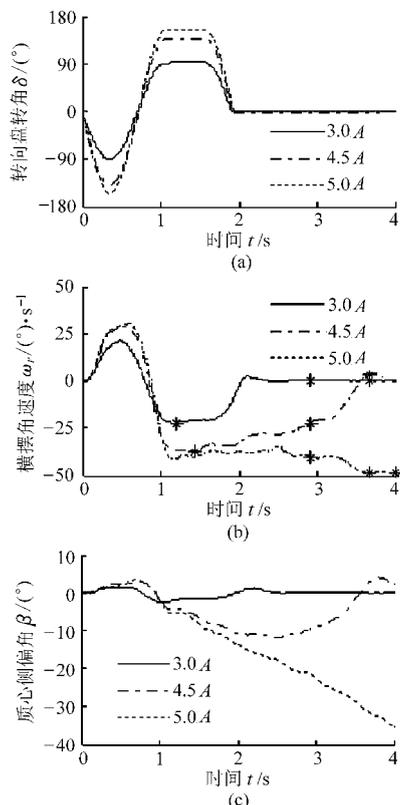


图8 横摆角速度和侧偏角试验曲线对比

Fig.8 Comparison of yaw rates and side slip angle curves

(a) 转向盘转角 (b) 横摆角速度 (c) 质心侧偏角

由图中可以看出,在转向盘转角较小时,横摆角速度和质心侧偏角变化趋势一致;在汽车接近失稳时,质心侧偏角的收敛速度慢于横摆角速度;在汽车失稳时,质心侧偏角的发散速度明显大于横摆角速度。所以汽车在接近失稳和失稳后的稳定性需要横摆角速度和质心侧偏角信息共同表征。

4 结论

(1)美国FMVSS 126法规确定了ESC系统的功能、过度转向特性和横向响应能力的测试和评价方法。对不足转向特性提出了定性的要求,但具体测试和评价方法需要进一步完善。

(2)搭建了先进汽车道路试验系统,除法规要求的核心设备转向机器人外,还增加了基于GPS的汽车位置姿态测试设备、基于VBOX III + IMU02的汽车姿态测量设备,以及自行开发的ESC控制器等,实车试验验证了系统工作的可靠性。

(3)采用DGPS方法和加速度方法对横向位移测试数据进行了对比分析,结果表明:在转向开始后2s内两种方法测试结果接近,在转向开始后1.07s时的测试结果偏差小于5%;随着时间增长,加速度方法受车身姿态变化影响测试误差逐渐增大;GPS方法在测试过程中的精度(2 cm 1 σ)均可得到保证,是一种理想的测试方法。

(4)设计了小波滤波器对试验原始数据进行了滤波处理,对法规规定的转向开始时刻确定方法进行了验证。小波滤波无相位延时,且信号的局部特征都得到很好的保留,相比法规推荐的频域滤波方法,此方法更为精确。3组具有区别意义的试验曲线表明,汽车在接近失稳和失稳后的稳定性需要横摆角速度和质心侧偏角信息共同表征。

参 考 文 献

- 1 Van Zanten A T. Bosch ESP system: 5 years of experience[C]. SAE Paper 2000-01-1633, 2000.
- 2 Neuhaus D, Willms J. Vehicle dynamics-continuous improvement in vehicle safety from ABS to electronic stability control [C]. SAE Paper 2005-26-065, 2005.
- 3 李亮,宋健,祁雪乐. 汽车动力学稳定性控制系统研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报,2006,37(2):141~144. Li Liang, Song Jian, Qi Xuele. Investigation and development of vehicle dynamics stability control system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2): 141~144. (in Chinese)
- 4 FMVSS 126. Electronic stability control systems[S]. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), DOT. Washington, DC, 2007.
- 5 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. Sideslip angle roadway test system for vehicle stability control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 1~5. (in Chinese)

各液压缸的流量比值关系。功率消耗随着平推作业的进行而增大,且负载力最大时为最大功率消耗处,其最大功率消耗值为 300 kW。

参 考 文 献

- 1 王国彪. 国外大型矿用挖掘机的现状与发展[J]. 矿山机械, 1999(11):8~13.
- 2 马鹏飞,田齐. 超大型液压挖掘机的发展与进步[J]. 建筑机械, 2000(3):21~22.
- 3 王新中. 国内外矿用挖掘机发展状况[J]. 矿山机械, 2004(9):52~53.
- 4 同济大学. 单斗液压挖掘机[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986:66~101.
- 5 Pyung Hun Chang, Soo-Jin Lee. A straight-line motion tracking control of hydraulic excavator system [J]. Mechatronics, 2002,12(1):119~138.
- 6 王冬云,管成,潘双夏,等. 液压挖掘机功率匹配与动力源优化综合控制策略[J]. 农业机械学报, 2009,40(4):91~95.
Wang Dongyun, Guan Cheng, Pan Shuangxia, et al. Control strategy of power matching and power sources optimization for hydraulic excavators [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(4):91~95. (in Chinese)
- 7 四川邦立重机有限责任公司. 液压挖掘机正铲作业装置水平推压机构:中国,ZL 200520035287.8[P]. 2006-09-06.
- 8 Hirokazu Araya, Masayuki Kagoshima. Semi-automatic control system for hydraulic shovel [J]. Automation in Construction, 2001,10(4):477~486.
- 9 Masakazu Haga, Watanabe Hiroshi, Kazuo Fujishima. Digging control system for hydraulic excavator [J]. Mechatronics, 2001,11(6):665~676.
- 10 白玉琳,陈进,李世六,等. 大型正铲液压挖掘机工作装置虚拟样机研究[J]. 建筑机械, 2008(7):81~84.
Bai Yulin, Chen Jin, Li Shiliu, et al. Virtual prototyping research of large hydraulic face-shovel working device [J]. Construction Machinery, 2008(7):81~84. (in Chinese)
- 11 郑建荣. ADAMS—虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- 12 刘静,潘双夏,冯培恩. 基于 ADAMS 的挖掘机液压系统仿真技术[J]. 农业机械学报, 2005,36(10):109~112.
Liu Jing, Pan Shuangxia, Feng Peien. Study on simulation technology of excavator hydraulic system based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(10):109~112. (in Chinese)
- 13 马乐,赵克利,翟洪岩. 大型矿用挖掘机工作装置仿真[J]. 计算机辅助工程, 2006,15(增刊1):361~363.
Ma Le, Zhao Keli, Zhai Hongyan. Simulation of working equipment of heavy mining excavator [J]. Computer Aided Engineering, 2006,15(Supp.1):361~363. (in Chinese)
- 14 张正兵,陈进,李晓娜. 基于正铲液压挖掘机挖掘轨迹的机构运动学分析[J]. 机械, 2008,35(5):9~12.
Zhang Zhengbing, Chen Jin, Li Xiaona. Mechanism movement analysis based on excavating track in hydraulic face-shovel excavators [J]. Machine, 2008,35(5):9~12. (in Chinese)

(上接第 6 页)

- 6 B+S Mutidata Gmb H. Measured-data acquisition software ME5 user guide (ver. 0201-100-A)[EB/OL]. [2009-02-10]. <http://www.bsmultidata.de/index.php?id=2>.
- 7 Zhang Xiaolong, Li Liang, Li Hongzhi, et al. Acquisition data synchronization mechanism of complex motor vehicle road way test system and its engineering implementation [C] // 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2010,3:390~394.
- 8 Racelogic Limited. VBOX III 100 Hz with RTK RLVB3R2G2 [M]. 2009.
- 9 Anthony Best Dynamics Limited. Robot controller (ver. 6.xx) software manual (ver. 6.01) [M]. 2008.
- 10 张小龙,冯能莲,宋健,等. 基于 SIMS/GPS 的汽车运动状态组合测量系统[J]. 农业机械学报, 2008,39(10):30~35.
Zhang Xiaolong, Feng Nenglian, Song Jian, et al. Measurement system for vehicle motion state based on SIMS/GPS integrated technologies [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(10):30~35. (in Chinese)