

# 汽车道路试验测试方法研究进展\*

张小龙<sup>1,2</sup> 宋健<sup>1</sup> 冯能莲<sup>3</sup> 王继先<sup>2</sup>

(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;  
3. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022)

**【摘要】** 分析了汽车道路试验的特点和测试系统结构,总结了测试系统高可靠性、高集成度、同步数据采集、接口CAN化的发展趋势。结合汽车动力学控制系统产业化开发需求,详细阐述了3项汽车道路试验测试技术和方法:汽车位置姿态测量技术、车轮力测量技术和转向输入控制技术。今后汽车道路试验测试技术发展方向是基于GPS的汽车位置姿态测量、基于车轮力传感器的车轮力直接测量、GPS与转向机器人技术集成进行转向精确输入和路径跟随等规则化道路试验。

**关键词:** 汽车 道路试验 测试方法 综述

**中图分类号:** U467.1<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A

## Research Progress of Measurement Method for Vehicle Road Way Test

Zhang Xiaolong<sup>1,2</sup> Song Jian<sup>1</sup> Feng Nenglian<sup>3</sup> Wang Jixian<sup>2</sup>

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

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

3. College of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

### Abstract

The paper firstly analyzed the characteristic of vehicle road way test and the structure of the test system, and then brought up the development tendency of high reliability, high integration, synchronizing data acquisition, CAN communication interface, and so on. Thirdly, three key technologies were reviewed concretely in light of the industrialization requirement of vehicle dynamic stability control system, i. e. DSC, which include measurement method of the path and attitude of vehicle, the wheel force measurement technology and the steering input control method. The main stream of measurement technology for vehicle road way test in future may be the GPS only based measurement method of the path and attitude of vehicle, wheel force transducer based wheel force measurement method, the integration measurement of GPS devices and steer robot for the precisely steer control and path following road way tests.

**Key words** Vehicle, Road way test, Measurement method, Review

### 引言

汽车道路试验是在规则路面输入和典型驾驶输入下对汽车的动力性、主动安全性、平顺性、通过性等性能的不解体实车测试<sup>[1]</sup>。目前对制动防抱死系统(anti-lock brake system,简称ABS)<sup>[2~4]</sup>、动力

学稳定性控制系统(dynamic stability control,简称DSC)<sup>[5~7]</sup>、汽车底盘集成控制系统(integrated chassis control,简称ICC)<sup>[8~10]</sup>等的研究已成为热点。在研发的过程中对汽车道路试验系统的可靠性、测试方法、测试精度等提出了更高的要求,相关新型传感器和测试方法不断引入汽车测试领域。

收稿日期: 2008-10-16 修回日期: 2008-12-16

\* 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)和北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ200910005007)

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

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

结合汽车 DSC 产业化开发需要,对汽车位置姿态测量技术、车轮力测量技术,以及为解决客观评价引入的汽车道路试验转向机器人技术的国内外研究进展进行详细阐述。

### 1 汽车道路试验特点及测试系统架构

汽车道路试验测试系统为车载,而试验法规要求对汽车进行充分激励才能完成有效测试,故对测试系统的可靠性要求很高。传感器等的安装不能要求改变原车的结构,对传感器的安装位置、体积、质量等提出了更高的要求。另外,汽车信号属于低频信号(通常在 25 Hz 以下),且由于是短时测量,大多数变量对采样频率、测量精度等要求不高,但各信号采样需有较好的同步性。

基于以上特点构建的汽车道路试验测试系统是汽车道路试验的基础,图 1 所示是汽车道路试验系统的原理图,主要由传感、数据采集、数据记录和分

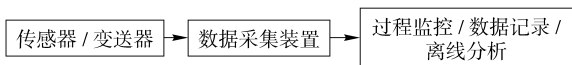
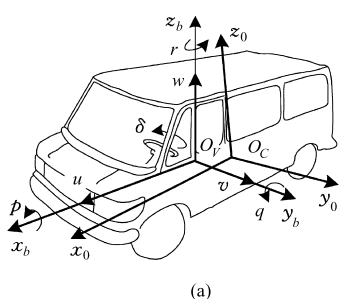
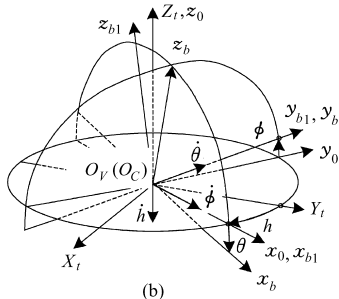


图 1 汽车道路试验测试系统原理图

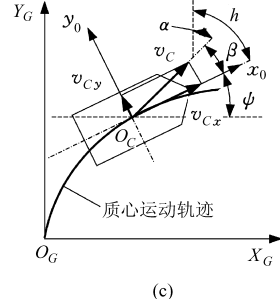
Fig.1 Scheme of vehicle road way test system



(a)



(b)



(c)

图 2 汽车运动学参数定义示意图

Fig.2 Definitions of vehicle kinematic parameters

(a) 坐标系 (b) 姿态角 (c) 汽车轨迹及汽车侧偏角

图 2 中选取了 3 个关键点,即  $O_G$ 、 $O_C$  和  $O_V$ 。其中  $O_G$  点选取在汽车试验场地附近,通常为试验车表示轨迹的起始点,以其为原点建立地面固定坐标系  $O_G X_G Y_G Z_G$ ,为表述方便, $O_G X_G$  水平指向东向, $O_G Y_G$  水平指向北向, $O_G Z_G$  垂直于  $O_G X_G Y_G$  平面指向天向。 $O_C$  点为汽车的质心,以其为原点定义了地理坐标系  $O_C X_t Y_t Z_t$ ,任意时刻该坐标系随汽车一同运动,但  $O_C X_t$  水平指向东向, $O_G Y_t$  水平指向北向, $O_C Z_t$  垂直于  $O_C X_t Y_t$  平面指向天向,即东北天坐标系。以  $O_C$  点为原心定义汽车运动坐标系  $O_C x_0 y_0 z_0$ , $O_C x_0$  为汽车的纵向对称面与通过  $O_C$  点的水平面的交线,沿汽车的主运动方向指向前方, $O_C y_0$  垂直于汽车的纵向对称面水平指向左方, $O_C z_0$  垂直于  $O_C x_0 y_0$  平面指向上方。 $O_V$  点为汽车

析 3 部分组成。根据可靠性和具体的测试方法不同,这 3 部分或集成在一起,或部分集成<sup>[11-12]</sup>。

具有 CAN 节点的车载测试传感器,集成 CAN 节点和数据存储、LCD 过程显示等功能的数据采集与处理装置是汽车道路试验测试系统的发展方向。

### 2 汽车运动学参数测量方法

#### 2.1 坐标系及运动学参数定义

汽车轨迹是汽车性能评价指标确定的主要依据之一,如制动性能试验中的制动距离,操纵稳定性试验中的稳态回转试验和双移线试验等。在汽车 DSC 开发中,汽车横摆角速度和质心侧偏角还是控制逻辑进行决策的依据。

汽车运动学参数主要包括质心运行轨迹和车身姿态,对其表述需要定义 4 个坐标系,并定义主要的运动学参数<sup>[13-14]</sup>,如图 2 所示。图 2a、图 2b 给出了地理坐标系  $O_C X_t Y_t Z_t$ 、运动坐标系  $O_C x_0 y_0 z_0$ 、汽车坐标系  $O_V x_b y_b z_b$ ,以及 3 个姿态角定义,即航向角  $h$ 、侧倾角  $\phi$  和俯仰角  $\theta$ ,图 2c 给出了地面固定坐标系  $O_G X_G Y_G Z_G$  和汽车轨迹、汽车方位角  $\psi$ 、汽车侧偏角  $\beta$ 、行进方向角( $v = \psi + \beta$ )的定义。

簧上部分质心,以其为原点定义了汽车坐标系  $O_V x_b y_b z_b$ ,该坐标系随同簧上质量一同运动和旋转,在静止状态下, $O_V x_b$  在水平平面内指向前方, $O_V y_b$  在水平平面内指向左方, $O_V z_b$  指向上方。

汽车位置用汽车质心运动轨迹表示并通常在地面固定坐标系中表出,也就是运动坐标系的原点位置变化。由地理坐标系到运动坐标系再到汽车坐标系经 3 次欧拉旋转: $O_C X_t Y_t Z_t \xrightarrow{-h} O_C x_0 y_0 z_0 \xrightarrow{\phi} O_C x_b y_b z_b$ ,对应依次旋转得到的欧拉角为航向角  $h$ 、侧倾角  $\phi$  和俯仰角  $\theta$ 。汽车的纵向速度  $u$ 、侧向速度  $v$ 、垂直速度  $w$ 、侧倾角速度  $p$ 、纵倾角速度  $q$ 、横摆角速度  $r$ ,以及对应的线加速度等都是汽车速度、加速度矢量和角速度矢量在汽车

坐标系中的投影。而汽车的前进和横向速度、加速度等都是汽车速度和加速度矢量在运动坐标系中的投影。在水平路面情况下,汽车质心侧偏角即为汽车横向速度  $v_{y0}$  和前进速度  $v_{x0}$  比值的反正切值,即

$$\beta = \arctan(v_{y0}/v_{x0}) \quad (1)$$

## 2.2 基于速度和横摆角速度的汽车质心轨迹传统测量方法

基于图 2c,对轨迹测试的传统方法为

$$\begin{cases} x_C = x_{C0} + \int_0^t v_C \cos(\beta + \psi) dt \\ y_C = y_{C0} + \int_0^t v_C \sin(\beta + \psi) dt \end{cases} \quad (2)$$

式中  $x_C$ 、 $y_C$ ——质心在地面固定坐标系  $O_G X_G Y_G Z_G$  中的坐标

$x_{C0}$ 、 $y_{C0}$ ——轨迹起始点坐标,如果起始点为坐标原点,其值为(0,0)

$v_C$ ——车速,汽车质心处速度矢量在  $O_C x_0 y_0$  平面上的投影

$t$ ——有效试验时间

由式(2)可以看出,轨迹测量最终归结为车速  $v_C$ 、质心侧偏角  $\beta$  和汽车方位角  $\psi$  的测量问题,而车速  $v_C$  和质心侧偏角  $\beta$  的测量可具体为汽车纵向速度  $v_{Cx}$  和侧向速度  $v_{Cy}$  的测量。

通常利用垂直陀螺或汽车操稳性测试仪直接测量得到的横摆角速度  $r$ ,经一次积分得到汽车方位角  $\psi$ 。汽车纵向速度  $v_{Cx}$  和侧向速度  $v_{Cy}$  通常采用双向非接触式光学速度传感器进行直接测量<sup>[15]</sup>,但由于安装位置的影响,需要利用横摆角速度  $r$  进行补偿。

进一步分析可以看出,上述测量方法存在以下不足:通过横摆角速度  $r$  积分得到汽车方位角  $\psi$ ,积分存在累积误差,且误差发散;忽略了地球自转角速度的影响;对横摆角速度没有进行姿态补偿,测量存在原理性误差,在转向制动等大的激励输入下测量误差较大。

## 2.3 基于 SIMS/GPS 的汽车质心轨迹和车身姿态组合测量方法

针对传统方法对汽车运动学参数测量的局限性,近年来有许多学者将惯性导航技术和卫星测量技术应用于汽车道路试验测试中,如路面附着系数识别<sup>[16]</sup>,速度、侧偏角、位置和姿态的精确测量<sup>[11,17~21]</sup>,汽车动力学控制应用<sup>[22]</sup>,以及测试系统同步机制实现<sup>[23]</sup>。其中捷联惯性测量系统(strapdown inertial measurement system,简称 SIMS)和 GPS 组合测量汽车轨迹姿态方法有效解

决了测量高精度和低成本间的矛盾。利用这种方法可以精确测量得到汽车的轨迹、姿态、质心侧偏角,以及运动坐标系和车体坐标系下的线(加)速度、角速度等重要的运动学参数,成为汽车运动学参数测量方法新的发展方向。

SIMS 包括 6 测量自由度的惯性测量单元(inertial measurement unit,简称 IMU)、数据采集装置和分析软件等,其核心部件是 IMU。IMU 安装时直接与簧上部分固联,在其每个测量坐标轴方向都布置了 1 个惯性加速度计和 1 个速率陀螺。如图 3 所示,IMU 直接测量输出簧上质量相对于惯性空间(通常取原点在地球质心的地心惯性坐标系)的角速度矢量和比力在车体坐标系中的投影,即  $\omega_{ib}^b$  和  $f_{ib}^b$ 。在正确初始对准后对这两类数据进行姿态、速度和位置解算<sup>[20]</sup>。

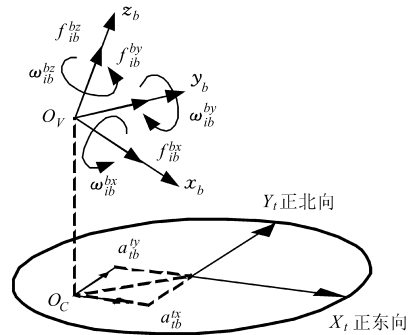


图 3 6 测量自由度 IMU 汽车位置姿态测量原理图

Fig.3 6-DOF IMU and its measurement principle for vehicle path and attitude

传统的应用于汽车测试的陀螺仪为机械转子式,最近光纤陀螺和微机电陀螺以其低成本和高可靠性等优势逐步得到广泛应用。陀螺仪的漂移误差和加速度计的零位偏置是影响 SIMS 定位精度的重要因素。采用组合测量技术是提高 SIMS 测量精度的有效途径。目前载波相位差分工作模式(carrier phase differential GPS,简称 CP-DGPS)GPS 接收机动态定位精度和速度精度已经能够满足汽车道路试验精确测量要求。工程上通常利用 GPS 接收机和 SIMS 经解算得到位置、速度和速度方向角信息,建立松散组合模式下系统测量误差状态方程和观测方程,并基于 Kalman 滤波器进行组合滤波输出<sup>[20~21]</sup>。英国 Oxford Solution Ltd. 研发的 RT3100,基于 SIMS/GPS 组合测量原理,数据更新速率 100 Hz。该仪器 IMU、GPS 引擎和电源等集成在一个仪表箱内,在实际应用中取得了较好的效果。

## 2.4 两种测量方法对比分析

汽车轨迹的传统测量方法在实际工程测试中应用较广,但需要针对具体应用进行改进,如基于汽车

直线行驶对积分初值归零的改进积分法<sup>[24~25]</sup>,基于双天线 GPS 定向接收设备直接对汽车方位角  $\psi$  测量。从 GPS 接收机输出数据中可提取出车速  $v_c$ 、车速方向角  $\alpha$  和车体航向角  $h$ ,如图 2c,则  $\beta = h - \alpha$ ,  $\psi = \pi/2 - h$ 。

基于 SIMS/GPS 的组合测量方法,可以为汽车运动控制系统开发提供包括车身姿态等更为详细精确的运动状态信息。国内高校对其大多集中在基于低成本传感器产业化研究,如初始对准、组合模式和组合法等,国外已有成熟产品面市,但价格昂贵。

SIMS/GPS 组合测量方法的关键技术是初始对准,对准的精度对后续解算影响很大,通常耗时较长,且每次试验或断电后都要重新对准初始化,实际使用很不方便。近年来基于多天线 GPS 技术进行车体姿态测量研究得到了更多的关注<sup>[19,26~27]</sup>,其设备现场安装方便、启动时间短、测量精度适中、成本较 SIMS 低,能较好满足汽车道路试验的需求。

### 3 汽车动力学参数测量方法

汽车运动主要由地面对车轮的作用力引起,车轮力直接测量技术为汽车底盘运动控制系统(包括轮胎模型和悬架控制)开发<sup>[4,28~32]</sup>和性能评价<sup>[33]</sup>、动力总成匹配、道路载荷谱采集和道路性能研究与评价<sup>[34~36]</sup>等提供了新的手段。

基于测力车轮对车轮力直接测量是一种有效的方式。测力车轮的核心部分为车轮力传感器(wheel force transducer,简称 WFT)。图 4 是 Kistler Instrument AG RWD 结构简图,其结构具有代表性<sup>[37]</sup>。对传统车轮轮辋改进后,通过两个连接法兰将 WFT 传感体串联在车轮轮辋和制动器轮毂之间,地面对车桥的作用力传递路线变为:地面→胎体→改制轮辋→轮辋调节法兰→传感体→轮毂调节法兰→制动器轮毂,所以测力车轮能够更为准确地测量地面和汽车对车轮的作用力。

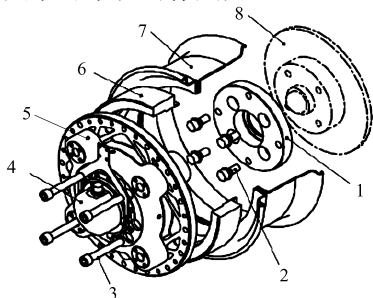


图 4 Kistler Instrument AG RWD 结构简图

Fig. 4 Scheme of Kistler Instrument AG RWD

1. 轮毂调节法兰 2. 轮胎螺栓 3. 装配螺栓 4. 信号耦合器
5. 传感体 6. 轮辋调节法兰 7. 改制轮辋 8. 轮毂

目前东南大学在进行 WFT 的产业化研究,研发的某型 WFT 实物车上安装如图 5 所示。所研发的 WFT 基于电阻应变式测量原理,采用八梁轮辐式传感体结构,在应变片布片组桥、非接触能量和信号传输、多分力信号结构解耦和标定、数据采集装置和数据分析等方面进行了深入研究。研制的产品先后被安徽江淮汽车集团、同济大学、交通部公路科研院所、南京林业大学等单位使用,填补了我国在这一领域的空白。



图 5 东南大学 WFT 车上安装图

Fig. 5 WFT developed by Southeast University

WFT 按测量原理分为电阻应变片测量和压电效应测量,其研发的关键技术包括传感体设计、信号传输、标定与解耦等<sup>[38~40]</sup>。其中对 WFT 的动态标定和解耦是研究的难点,需要借助轮胎试验设备<sup>[40~41]</sup>。利用轮胎试验设备模拟实际路况进行复合载荷加载标定,构造合适的算法进行维间耦合动态解耦和补偿可以显著提高 WFT 的测量精度。另外,针对汽车道路试验的特点,减小传感器体积、提高通用性和可靠性也是产业化过程中需要解决的重要问题。

### 4 汽车道路试验转向机器人技术

利用驾驶机器人替代人类驾驶员完成繁复而危险的汽车性能试验是汽车工业发展的必然需求。自从 1994 年日本小野测器株式会社研制成功世界上第一台自动驾驶机器人以来,德国 Schenck、大众公司,英国 Mira 公司、ABD 公司等都研制出用于汽车性能试验的驾驶机器人。其发展方向为:台架试验用驾驶机器人、自动驾驶机器人、道路试验用驾驶机器人。其中,道路试验用驾驶机器人在规则路面、特殊操作输入控制下短时对汽车操控。本文研究道路试验用转向机器人。

目前美国高速公路交通安全局(NHTSA)正式颁布了关于 DSC 系统的新法规 FMVSS 126(法规中称 DSC 为 ESC,即 electronic stability control),规定了装备 DSC 系统的车辆具体开环试验方法和性

能评价方法。试验为开环类型,转向角输入曲线是将 0.7 Hz 的正弦曲线的后 1/4 周期延迟 500 ms,有效转向时间是 1.93 s。峰值最大可达 300°,转向速率最大可达 1 381(°)/s,转向扭矩最大可达 40~60 N·m。人类驾驶员很难精确实现这样的转向输入。另外,法规中确定的评价方法均依赖于转向品质:如评价用横摆角速度取转向结束后的 1 s 和 1.75 s 时刻的横摆角速度,评价用侧向位移取转向开始到 1.07 s 时刻的侧向加速度的双重积分值,可见转向是否符合要求对试验结果影响很大。为了有效解决 DSC 产业化过程中道路试验方向盘转角精确控制问题,需要研究驾驶机器人代替人类驾驶员实现法规中要求的对转向速度、转向精度的精确控制。

DSC 产业化过程中需要完成很多路径重复对

比试验,如双移线时 DSC 打开/关闭对比试验。综合分析智能汽车各种路径导航方法优缺点和 DSC 试验的特点,选用基于差分技术的 GPS 定位设备为转向机器人实时提供路径反馈信息,实现路径闭环反馈转向控制对比道路试验。

图 6 所示是清华大学为满足 DSC 产业化开发而研制的转向机器人设计原理图。图中两虚线方框给出的是 GPS 定位测速系统,车载其余部分是转向机器人控制系统,其中 GPS 系统通过 RS232 接口为转向机器人系统实时提供精确的位置、速度等信息。

GPS 系统的接收机为加拿大 novAtel 公司的产品,均工作在载波相位差分模式,通过两电台实现差分数据由基站向移动站的实时传输,移动站 RTK 数据更新速率为 50 Hz。

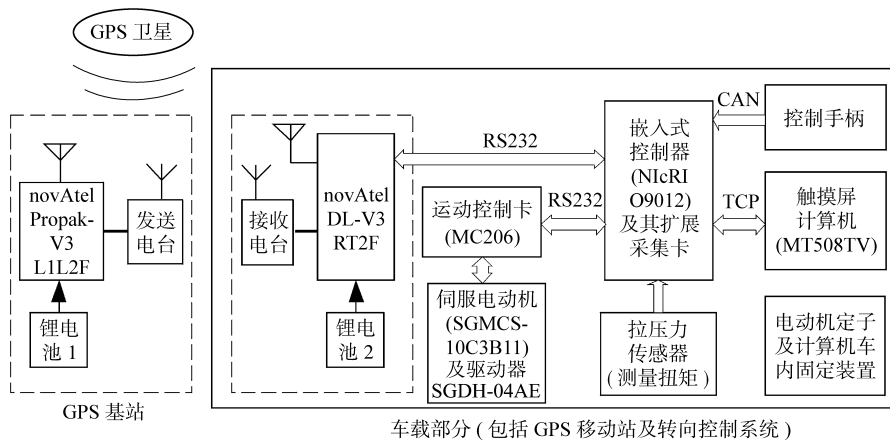


图 6 汽车道路试验路径闭环控制转向机器人原理图

Fig. 6 Scheme of closed-loop controlled steer robot for vehicle roadway test

转向机器人控制部分主要由交流伺服电动机及其驱动器运动控制卡、嵌入式控制器、测量电动机输出扭矩的拉压力传感器、控制手柄、带触摸输入功能的便携式计算机,以及固定支架和电源等组成。交流伺服电动机及其驱动器选用日本 YASKAWA 公司的产品,额定扭矩 10 N·m,额定转速 200 r/min。运动控制卡选用英国 Trio 公司产品。嵌入式控制器及其扩展数据采集卡选用美国国家仪器公司的产品,其中运行实时嵌入式操作系统,主要完成以下功能:实时接收汽车当前位置和速度信息;实时采集表征电动机输出扭矩的拉压力传感器信号;实时采集控制手柄传递过来的信号;实时接收来自计算机的试验操作控制指令;与运动控制卡进行通信、控制逻辑运算和发出电动机控制指令;将电动机状态信息等反馈到计算机进行显示。控制手柄通过 CAN 节点与控制器通信,主要用于汽车初始位置调整和过程控制。

汽车道路试验用转向机器人研究主要技术包括:转向机器人安装后不影响驾驶员驾驶操作,且在

适当的时候对其工作进行主动干预;硬件设计移植性好,现场可快速装配和拆卸;模拟真实人的转向操作,具有足够的转向力度和角度;构造可靠实时控制算法、路径跟踪准确和转向控制精确等。

## 5 结论

基于 DSC 产业化开发中道路试验测试要求,对汽车位置姿态、车轮力测量技术和转向机器人技术研究进行了综述。

(1) 汽车道路试验要求测试系统可靠性高,且具有较好的同步数据采集能力。

(2) SIMS/GPS 组合汽车位置姿态测量方法可以精确得到车身所有运动状态信息,其主要缺陷是初始对准工作比较繁琐。近年来多天线 GPS 测姿技术已较好的满足了汽车道路试验测试快速、可靠、精度适中的要求。

(3) 基于车轮力传感器的车轮力直接测量技术,为 DSC 开发中的轮胎力估计模型和制动系统控制模型等验证提供了新的手段。其研究的主要难点

是多维力动态标定和维间动态解耦和补偿。在专用轮胎试验台上进行复合力加载动态标定和解耦模型研究是一种可行的方法。

必需的设备。除了设计通用性好、现场可快速装配和拆卸的支架外,构造可靠精确转向控制算法和利用路径反馈系统实现路径跟随算法是其研究难点。

(4) 转向机器人是完成 DSC 法规规定试验所

### 参 考 文 献

- 1 《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.
- 2 Neuhaus D, Willms J. Vehicle dynamics-continuous improvements in vehicle safety from ABS to electronic stability control [C]. SAE Paper 2005-26-065, 2005.
- 3 孔磊. 面向产业化的 ABS 控制关键技术研究开发与开发[D]. 北京:清华大学,2006.  
Kong Lei. Key control technologies research and development of anti-lock braking system for industrialization[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
- 4 Masuda T, Kamada T, Fujita T. ABS control by measuring force between road surface and tires[J]. JSAE Paper 20055242, 2005.
- 5 Morgando A. Linear approach to ESP control logic design[C]. SAE Paper 2006-01-1017, 2006.
- 6 于良耀. 汽车动力学稳定性控制系统控制器开发平台研究[D]. 北京:清华大学,2007.  
Yu Liangyao. Research on the ECU development technology of dynamic stability control system[D]. Beijing: Tsinghua University,2007. (in Chinese)
- 7 Liebemann E, Fuehrer T. More safety with vehicle stability control[C]. SAE Paper 2007-01-2759, 2007.
- 8 Rengaraj C, Adgar A, Cox S C, et al. Integration of yaw control, active suspension and antilock brake system to improve ride and handling[C]. SAE Paper 2006-05-0500, 2006.
- 9 喻凡,李道飞. 车辆动力学集成控制综述[J]. 农业机械学报,2008,39(6):1~7.  
Yu Fan, Li Daoifei. Review on integrated vehicle dynamics control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6):1~7. (in Chinese)
- 10 Koleszár P, Voith A, Palkovics L, et al. Integrated commercial vehicle chassis control[C]. SAE Paper 2006-05-0453, 2006.
- 11 虞明,钱立军. 基于 RTK 五轮仪研制的汽车运动性能测试系统[J]. 汽车工程,2005,27(1):54~56,106.  
Yu Ming, Qian Lijun. A study on vehicle movement measurement based on RTK fifth wheel [J]. Automotive Engineering, 2005,27(1):54~56,106. (in Chinese)
- 12 Racelogic Limited. VBOX III 100Hz with RTK RLVB3R2G2, 2007.
- 13 GB/T 12549—90 汽车操纵稳定性术语及其定义[S].
- 14 ISO 8855—1991 Glossary of terms for road vehicle dynamics and road holding ability [S].
- 15 Chao Kainian. Path and other parameters in motor vehicle dynamics tests and their errors [J]. Vehicle System Dynamics, 1996, 26(5):321~342.
- 16 Hahn J O, Rajamani R, Alexander L. GPS based real-time identification of tire-road friction coefficient [J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 331~343.
- 17 Bevil D M, Daily R, Travis W. Estimation of critical tire parameters using GPS based sideslip measurements [C]. SAE Paper 2006-01-1965, 2006.
- 18 How J, Pohlman N, Park C W. GPS estimation algorithms for precise velocity, slip and race-track position measurements [C]. SAE Paper 2002-01-3336, 2002.
- 19 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.
- 20 张小龙,冯能莲,宋健,等. 基于 SIMS/GPS 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)
- 21 管欣,闫冬,高振海. 基于惯性导航和实时差分全球定位系统的汽车运动状态测试系统[J]. 吉林大学学报:工学版, 2006,36(1):14~19.  
Guan Xin, Yan Dong, Gao Zhenhai. Vehicle movement state test system based on INS/RTKD GPS [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006,36(1):14~19. (in Chinese)

- 22 Beiker S A, Gaubatz K H, Gerdes J C, et al. GPS augmented vehicle dynamics control [C]. SAE Paper 2006-01-1275, 2006.
- 23 Arnold J, Veggeberg K. GPS synchronization architecture for dynamic signal acquisition [C]. SAE Paper 2008-36-0591, 2008.
- 24 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)
- 25 高越,杨得军,宗长富,等. 汽车轨迹测量的速度积分方法及其实施技术[J]. 汽车技术,2002(9):23~25. Gao Yue, Yang Dejun, Zong Changfu, et al. Velocity integral method and its application technology for vehicle track measurements [J]. Automobile Technology, 2002(9):23~25. (in Chinese)
- 26 Fukuba H, Adachi T, Takahashi H, et al. Vehicle attitude measurement method with the vehicle rotational speeds and the positions of plural kinematic GPS [J]. JSAE Paper 20025193, 2002.
- 27 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)
- 28 Suzuki M, Nakano K, Miyoshi A, et al. Method for sensing tire force in three directional components and vehicle control using this method [C]. SAE Paper 2007-01-0830, 2007.
- 29 Nakano K, Suzuki M, Miyoshi A, et al. Tire force sensing and its application for ABS control [C]. JSAE Paper 20065040, 2006.
- 30 Ghosh S, Medepalli S. Effect of tire stiffness on vehicle loads [C]. SAE Paper 2005-01-0825, 2005.
- 31 Devarajan G, Dodds C J. Suspension testing using wheel forces on a 3 DOF road load simulator [C]. SAE Paper 2008-01-0223, 2008.
- 32 Haq S, Temkin M, Black L, et al. Vehicle road simulation testing, correlation and variability [C]. SAE Paper 2005-01-0856, 2005.
- 33 张小龙,冯能莲,张为公. 基于车轮力直接测量 ABS性能试验研究[J]. 中国机械工程,2008,19(6):751~755. Zhang Xiaolong, Feng Nenglian, Zhang Weigong. Experimental research on the ABS performance based on the wheel forces measured by roadway test [J]. China Mechanical Engineering, 2008,19(6):751~755. (in Chinese)
- 34 李忠国,张为公,周耀群,等. 谱减在基于动载的路面不平度识别中的应用[J]. 东南大学学报:自然科学版,2007,37(1):51~55. Li Zhongguo, Zhang Weigong, Zhou Yaoqun, et al. Application of spectral subtraction de-noising in road roughness recognition based on vertical dynamic load [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007,37(1):51~55. (in Chinese)
- 35 刘庆华,张为公,李忠国. 基于路面垂直动载自回归建模的 IRI 测量方法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2007,37(11):1096~1101. Liu Qinghua, Zhang Weigong, Li Zhongguo. Measurement of international roughness index based on vehicle vertical dynamic load modeling method [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007,37(11):1096~1101. (in Chinese)
- 36 Pang Han, Zhang Weigong, Wang Xia. FEM tire model oriented to virtual experiment of off-road vehicle trafficability [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2007, 23(4):540~544.
- 37 Weiblen W, Kockelmann H, Burkard H. Evaluation of different designs of wheel force transducers (Part II) [C]. SAE Paper 1999-01-1037, 1999.
- 38 Weiblen W, Hofmann T. Evaluation of different designs of wheel force transducers [C]. SAE Paper 980262, 1998.
- 39 张为公. 汽车车轮多维力测量关键技术[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2004,25(1):25~28. Zhang Weigong. Study on multi-component wheel force measurement technology [J]. Journal of Jiangsu University: Nature Science Edition, 2004,25(1):25~28. (in Chinese)
- 40 张小龙,冯能莲,张为公. 车轮多分力传感器静态解耦方法[J]. 农业机械学报,2008,39(4):18~23. Zhang Xiaolong, Feng Nenglian, Zhang Weigong. Research on static decoupling methods for self-developed multi-component wheel force transducer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(4):18~23. (in Chinese)
- 41 轮胎力学特性试验报告[R]. 吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室,2008.