

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.002

基于 CAN 的汽车低附路面稳定性控制测试系统*

张小龙^{1,2} 李亮² 曹成茂¹ 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】 基于汽车稳定性控制系统现场快速测试和控制策略调试的需要, 搭建了由车身位置姿态模块、汽车稳定性控制器模块和 CAN 节点数据采集模块组成的低附路面试验测试系统。各模块间基于 GPS 接收机输出的秒脉冲同步信号完成数据同步, 并通过 CAN 方式进行数据传输。详细给出了汽车侧偏角测试方法、惯性测量单元车上安装和初始对准方法、GPS 惯性测量单元数据转换和传输延迟补偿方法, 以及串口转 CAN 的快速实现方法。系统的道路试验验证了系统工作的可靠性。该测试系统构建 CAN 节点或基于车身 CAN 总线方式获取基于 ESC 和发动机管理系统配置传感器的信息, 对了解汽车极限工况下的状态提供了真实数据, 为汽车稳定性控制分析提供了有效手段。

关键词: 车辆 CAN 稳定性控制 低附路面 道路试验

中图分类号: U461.6; U467.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0007-06

Vehicle Stability Control Test System Applied on Low Friction Road Based on CAN Technology

Zhang Xiaolong^{1,2} Li Liang² Cao Chengmao¹ 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

In order to measure and debug control strategy for vehicle stability on the low friction road, the vehicle stability control test system was developed, which were composed of the vehicle body path and attitude model, the vehicle stability controller model and the double CAN nodes data acquisition model. The data synchronism among each model was resorted to the signal of pulse per second, which was output by the GPS receiver. The CAN bus was employed to transfer data between models. More than four technology methods were introduced in details. They were the test method of vehicle side slipangle, the installing and initial alignment of inertial measurement unit (IMU), the time delay compensation of signal transforming and data transmission for GPS receiver and IMU, and the quickly transmission realization from serial input to CAN output. The systematic road way tests verified the functional reliability of the proposed system. The test system developed CAN nodes or employed the vehicle CAN bus to achieved the information of standard sensors included in ESC and engine management system. The real data was provided for understanding the vehicle's state on the extreme operation conditions. So the developed test system provides an effective means to analyze vehicle stability control strategy.

Key words Vehicle, CAN, Stability control, Low friction road, Road way test

收稿日期: 2012-04-08 修回日期: 2012-04-15

* 国家自然科学基金资助项目(51105001)和安徽省高等学校省级自然科学研究重点资助项目(KJ2011A101)

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: 曹成茂, 教授, 博士, 主要从事智能检测与控制技术研究, E-mail: caochengmao@163.com

引言

汽车动力学稳定性精确控制干预的实现依赖于对轮胎力的精细调节^[1]。复杂非线性联合滑移区域内,轮胎处于动态载荷输入和时变滑移率状态,4个动力学特征各异的轮胎纵向力按照各自传递特性耦合作用到整车运动中,对某一轮胎力的精确调控则涉及到各轮胎力与整车运动的耦合作用机制以及解耦控制的实现等难题^[2-4]。需要研究一种能够实现汽车动力学稳定性控制系统(简称ESC)配置传感器信息、ESC控制指令、发动机电控单元信息、车身姿态信息等实时采集和现场快速分析的道路试验系统。基于该系统实现现场对控制器编程(控制策略修改)和调试。本文是对先期进行道路试验测试系统研究的总结。

本文首先阐述测试系统硬件架构及其原理,然后从数据同步、侧偏角测试方法、数据传输实时性以及惯性传感器安装和数据融合等方面展开分析,最后通过实车试验验证系统的可靠性。

1 硬件系统架构

图1是基于CAN的测试系统结构框图,包括车身位置姿态模块、ESC及现场调试模块、CAN总线

信息采集模块等3部分。主要传感器性能指标如表1所示^[5-7]。

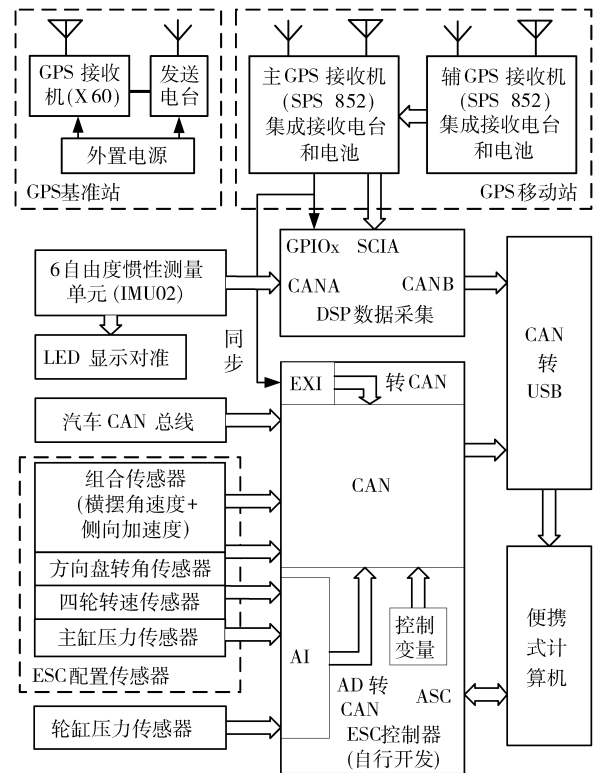


图1 基于CAN的测试系统结构框图

Fig.1 Block diagram of test system based on CAN technology

表1 主要传感器性能指标
Tab.1 Parameters of main sensors

传感器	精度	数据输出 物理接口	数据更新 速率/Hz
车身 位置 姿态 模块	GPS 车载接收机 美国 Trimble SPS 852	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°(天线距离 2 m)	SCIA (UART) 20
	GPS 地面基站接收机 中国华测 X60	为车载接收机提供 RTK CMR 格式差分改正信息, 主要信息 1 帧/s	
	IMU02 英国 Racelogic IMU02	加速度量程 ±1.7g, 非线性度 ±0.5% F.S., 角速度量 程 ±150(°)/s, 非线性度 ±0.1% F.S., 内部温度补偿	CAN UART 100
ESC 模块	组合传感器 德国 Bosch	横摆角速度: 量程 ±100(°)/s, 灵敏度 18 mV/(°)/s, 非线性度 1% F.S., 分辨率 <0.1(°)/s 侧向加速度: ±1.8g, 灵敏度 1 000 mV/g, 非线性度 3% F.S.	CAN 100
	方向盘转角传感器 德国 Bosch	方向盘转角: 量程 ±780°, 分辨率 0.1° 转向角速度: 量程 1 200(°)/s, 分辨率 4(°)/s	CAN
	轮速传感器 德国 Bosch	频率 20 ~ 7 000 r/min	模拟
	压力传感器 中国航天科技集团七零一所	量程 20 MPa, 非线性度 ±2.5% F.S.	模拟

1.1 车身位置姿态模块

车身位置姿态模块由双天线差分 GPS(简称 DDGPS)、惯性测量单元 IMU02 及基于 DSP 的数据采集与处理板卡组成。图1中左上侧虚线框内为 DDGPS 的基准站,放置在实验场地地面。右上侧虚

线框内为2套车载GPS接收机及天线(简称为移动站),选用美国 Trimble 公司的 SPS 852 接收机及 GA 810 GPS 双频天线。2台接收机均开通了双频功能,其内部集成了电池和数据接收电台。移动站可独立完成定向和速度测量,在地面基准站提供载波相位

差分信息时可同时实现高精度的位置测量。

为了高频率地获得车身姿态信息,系统中选用了英国 Racelogic 公司的 6 自由度惯性测量单元 IMU02,它可以在独立工作模式下通过 CAN 接口实时输出其测量坐标系 3 个方向的线加速度和角速度信息。

实际应用中惯性测量单元直接输出信息需要经过捷联解算得到车身姿态角信息,存在积分误差累计和初始对不准(积分初值)问题^[8]。通常情况下采用单天线 GPS 与 IMU 组合方式航向角收敛速度慢,且误差较大。系统中采用双天线 GPS 与 IMU 组合,较好地解决了这个问题。

基于 TI DSP 28335 开发了对 DDGPS/IMU02 数据接收、侧偏角解算和 CAN 实时输出的数据采集与处理板卡,其原理框图如图 2 所示。DSP 28335 主频最高达 150 MHz,片上资源和管脚功能丰富,制板和编程方便。具有 256 KB 的 Flash 和 18 KB 的 SRAM,以及 2 个独立的 CAN 控制器、3 个独立的异步串口控制器(SCI),支持 32/64 位浮点运算。SPS 852 数据输出通过串口收发器与 28335 板卡 SCIA 控制器相连,IMU02 通过 CAN 收发器与 eCANA 控制器相连。1 PPS 是 SPS 852 输出的秒脉冲同步信号,GPS 接收机输出数据有滞后,系统基于 1 PPS 信号实现 GPS 与 IMU02 数据的精确同步(见 2.2 节)。

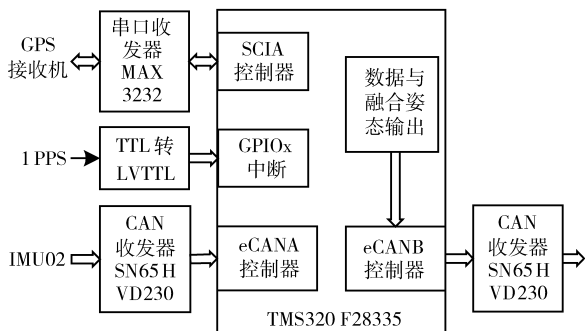


图 2 基于 DSP 的汽车位置姿态数据采集与处理板卡原理

Fig. 2 Block diagram of data acquisition board for vehicle path and attitude based on DSP

1.2 ESC 及现场调试模块

本模块主要包括自行开发的 ESC 控制器及 ESC 配置传感器、汽车 CAN 总线和轮缸压力传感器等。其中 ESC 控制器主要完成配置传感器信号的采集和对电液执行机构的控制输出以实现控制策略(图 1 中未给出驱动电路结构)。研究中为了量化制动压力观测精度,系统中增加了 4 个轮缸压力传感器。控制器同时采集汽车 CAN 总线上的数据流,与控制变量一同通过另一个 CAN 控制器对外输出。

图 1 中左下侧虚线框内为 ESC 配置传感器,其

中选用的组合传感器和方向盘转角传感器均为 Bosch 公司产品,其带有 CAN 输出接口,可以与 ESC 控制器 CAN 收发器直接相连。系统中选用了磁电式轮速传感器,其输出为正弦信号,频率与轮速呈正比,在 ESC 控制器中设计了比较器将其转换成数字信号,通过片上 AD 对其进行采集和上升下降沿判断计数。主缸压力传感器主要性能指标如表 1 所示,4 个轮缸压力传感器技术指标同主缸压力传感器。

系统在汽车 CAN 总线上获取的信息主要包括发动机扭矩及其增减信息、加速踏板和节气门开度及制动踏板状态等。

ESC 控制器选用 infenion XC164CS 芯片,其外设丰富,控制和计算功能强大,可靠性高。片上有 2 个 CAN 控制器,一个兼用于接收组合传感器和方向盘转角传感器的 CAN 数据,一个兼用于对外发送数据。片上全双工异步串口(ASC)有 2 个,其中有一个用于 PC 机下载程序到芯片中,进行实时调试。

1.3 CAN 总线信息采集模块

图 1 中 CAN 转 USB 设备选用了瑞士 Kvaser II 设备,接收两节点的高速 CAN 数据,并通过 USB 接口输送到便携式计算机中^[9]。Kvaser 在 PC 机上驱动装好后,可以基于 Kvaser CanKing 软件将两个通道的数据以文件形式实时写入到硬盘中。基于 CanKing 对 CAN 节点的配置主要包括总线波特率、接收数据帧的 ID,以及数据显示窗口显示方式和显示内容等。对记录的数据文件,基于 Matlab 语言编程对其分析和参数提取。

2 测量原理与数据处理

2.1 汽车侧偏角测试方法

图 3 所示为车载双 GPS 接收机配合完成汽车航向角测量,并间接得到汽车侧偏角的测量原理图。2 台 SPS 852 均具有定向计算功能,其中一台具有载波相位差分(RTK)定位功能,另一台具有伪距差分(DGPS)定位功能。为了综合得到汽车质心位置上方 GPS 天线处的高精度位置、速度和侧偏角信息,将具有 RTK 定位功能的 GPS 接收机(下文称航向机)放在汽车质心上方对应的车顶外侧,将具有伪距差分定位功能的 GPS 接收机(下文称移动基站)放在汽车纵向对称平面与车顶交线后侧,并尽可能地拉大两 GPS 天线间的距离。理论上,两 GPS 天线间距离越远定向观测精度越高。

可以通过 GPS 接收机主面板按键或其后端扩展的网络接口中基于网络浏览模式监控接收机功能配置和状态。接收机的网络配置通过 Trimble 公司

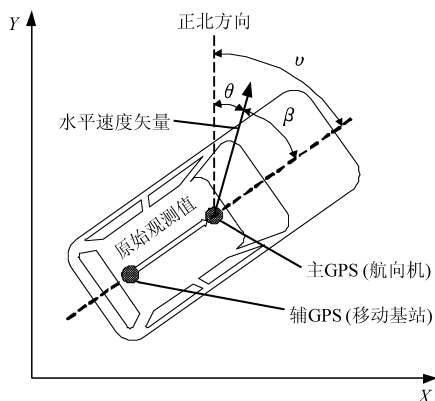


图3 双GPS汽车侧偏角测量原理图

Fig.3 Measurement scheme of vehicle side slipangle based on double GPS

的 WinFlash utility 工具进行,此时接收机与计算机通过串口方式对连。

Trimble GPS 接收机有 3 个串口,仅需对输出模式进行设置。配置为移动基站的接收机要设置其一个串口对外输出 10 Hz 的 CMR 格式原始卫星观测值,2 台接收机对连要保证航向机能够实时收到移动基站发送过来的数据,其通信串口波特率可配置为 115 200 b/s。

高精度的位置、速度和航向信息由航向机的 lemo 串口输出,具体配置 NEMA 格式语句包括 GPGGA、GPVTG、GPHDT、GPGST、GPUTC 五条,其中经纬度信息包含在 GPGGA 中,水平速度及水平速度矢量与正北方向的夹角信息包含在 GPVTG 中,定向信息包含在 GPHDT 中,GPS 时间信息包含在 GPGGA 和 GPGST 中,关于定位精度误差信息包含在 GPGST 中,1 PPS 信息包含在 GPUTC 语句中。

汽车侧偏角为汽车行驶过程中汽车质心位置水平速度矢量方向与汽车纵向平面的夹角。实际测量时,汽车质心位置不易精确确定,通常将观测点选为驾驶员右侧上方车顶外侧,数据处理时给与补偿。图3的汽车侧偏角为

$$\beta = v - \theta$$

式中 v ——2 台 GPS 天线连线与正北方向的夹角
 θ ——航向机 GPS 天线处水平速度矢量与正北方向的夹角

2.2 系统数据同步方法

由上位机记录各通道采样数据应同步,主要包括如下 3 个方面:

(1) 车身位置姿态模块内部数据同步

该模块中的 GPS 接收机采用 GPS 协议时 (GPST) 或世界协调时 (UTC) 作为时间基准,IMU02 惯性测量单元采用独立的内部晶振电路组成的定时器作为时间基准,二者不同步。另外,GPS 接收机

从 GPS 天线传感到车体信息到对应的数据输出存在延时,依据不同的 GPS 板卡运算速度,有的长达 10 ms 以上。IMU02 采用 CAN 模式对外发送数据,同样存在传感信息计算延时 (3 ~ 4 ms) 和数据传输延时。二者独立工作,由 DSP 数据采集板卡采集的各通道信息需要精确同步,以减小后续数据融合误差。

基于系统选用的 GPS 接收机和 IMU02 惯性测量单元,设计的数据同步方法如图 4 所示。SPS 852 航向机开通了秒脉冲同步信号 (1 PPS) 功能,在该接收机后部多功能 D 型接口的第 20 管脚每 1 秒钟对外输出幅值为 3.3 V、宽度为 8 ms 的高电平^[5]。对接收机进行配置可实现该脉冲上升沿时刻对应的 UTC 帧语句输出,一般提前 0.5 s。设计中将 1 PPS 管脚与 DSP 的 1 个通用管脚连接,并开通对应的上升沿触发外部中断功能,在该中断服务程序中形成同步 CAN 信息包与 UTC 帧同时发送给上位机,建立 GPS 接收机与 DSP 板卡的数据同步关联。

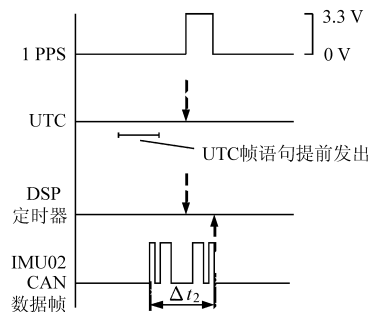


图4 车身位置姿态模块采样数据同步方法

Fig.4 Data synchronism of vehicle path and attitude model

IMU02 惯性测量单元基于其数据到达 DSP 后的时刻反推其对应数据发生时刻。IMU02 数据传输延时可以通过其设置的波特率和固定的 8 字节数据帧长度计算得到。

(2) 车身位置姿态模块与 ESC 控制器数据同步

将 GPS 航向机的 1 PPS 信号引入到 ESC 控制器的一个外部中断输入管脚 (PIH. x),并开通对应的上升沿触发中断,在中断服务程序中对外发送同步 CAN 信息包。

(3) 基于 kvaser 的双 CAN 节点数据同步

kvaser 设备内部有系统定时器,其记录的 2 个 CAN 节点数据文件中的每帧数据都有时间信息。如果考虑传输延时的话,所有通道在相同波特率下延时相同,对数据后处理没有影响。但在处理数据时,要把 GPS 中的 GPGGA、GPVTG、GPHDT、GPGST 到达时间与 GPUTC 到达时间等同,以及对 IMU02 数据中 IMU02 到 DSP 的传输延时进行补偿。

2.3 SCI 转 CAN 的实现方法

SCI 转 CAN 主要是指车身位置姿态模块中 GPS 航向机串口输出数据到 DSP 板卡, 然后由 DSP 处理后通过 CAN 节点输出。在转换过程中, 要求数据不能丢包且实时性高。为了提高实时性, 航向机串口波特率设置为 115 200 b/s。航向机输出语句设置为 nema 格式的 GPGGA、GPVTG、GPHDG、GPGST 和用于同步信号输出的 GPUTC, 均是 ASCII 码格式输出。GPS 数据更新速率为 20 Hz, 100 ms 内 GPS 发送出来的 ASCII 码字符个数在 450 ~ 500 之间。系统设计时在 DSP 中定义了一块长达 800 字节长度的空间用于接收 GPS 数据缓冲用 FIFO, 同时定义了指向该 FIFO 的读写字符型指针。设置控制器串口接收为单字节中断接收方式, 在串口中断服务程序中每次中断读取串口接收缓冲区中的字符并写入 FIFO 中, 同时调整写指针。

在 DSP 主程序中, 定义了一个函数用于读取 FIFO 数据并提取主要信息打包成 CAN 数据帧实时发送出去。在读写指针距离大于 15 的时候调用该函数, 在函数体中, 首先搜索 5 条语句的对应的头标志, 在头标志确定之后, 提取相应字符并进行打包发送。NEMA 格式语句中每个域的分割符为 ‘,’ 号, 在函数中每次读字符直到读取到 ‘,’ 号为止, 并根据 ‘,’ 号出现的次序确定读取的字符的物理意义, 此方法大大提高了 SCI 到 CAN 的转换效率。

2.4 IMU 安装与 DDGPS/IMU 融合方法

IMU02 惯性测量单元本身有自己的测量坐标系, 一般安装 IMU02 时要将其测量坐标系与汽车坐标系重合。图 5a 为 IMU02 在车上的安装位置图, 图 5b 为自行设计的 IMU02 的安装支架。安装支架不可以调整 IMU02 X 轴方向, 其由安装支架与车体的连接方式唯一固定, 其与汽车前进方向的偏差可由双天线定向值进行补偿。IMU02 的水平位置(侧倾角和俯仰角)可通过调节安装支架螺栓进行小角度调整, 调整时可将 IMU02 与 LCD 显示装置相连(Racelogic 公司的多功能显示器 RLVBDSP03), 通过观察 3 个加速度计输出值, 确定最终是 Z 轴向加速度最大, X 轴和 Y 轴向加速度调平为最小 0。

DDGPS 与 IMU02 的数据通过 kvaser 采集设备发送到计算机后, 在计算机上利用 Matlab 编写的程序进行离线处理。系统中处理时采用了文献[10]的方法。

3 试验研究

2012 年 2 月在黑龙江省北安市极地测试试验场对某乘用车进行了测试, 该车已匹配了 ESC 系

统。采用了图 1 所示的试验系统, 试验在压实的雪路面上进行。转向操作由人类驾驶员完成。

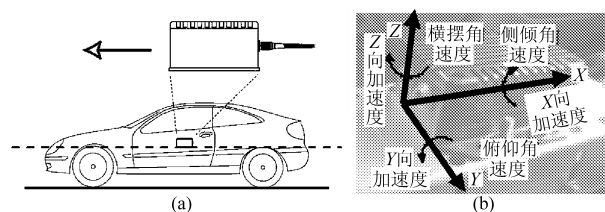


图 5 IMU02 测量坐标系与车上安装方法
Fig. 5 Measurement axis system and installing method of IMU02

(a) 车上安装方法 (b) 测量坐标系

图 6 是一组移线试验曲线。汽车开始直线加速行驶 12 s 左右约 30 km/h 时开始转向移线(图 6a ~ 6c)。移线过程中方向盘转角达到 200°(图 6g), 最大侧偏角达到 8°(图 6b), 加速度和横摆角速度分别达到 0.4g 和 20(°)/s(图 6e)。在移线开始前, 左前轮在 6 s 左右开始滑转, ESC 控制器主要采用发动机降扭的方式进行控制(图 6c ~ 6h), 在滑转得到控制后, 发动机扭矩继续回升以提高动力性。在整个移线过程中, 发动机转速控制在比较低的转速(图 6f), 制动器主动增压控制采用得比较少(图 6d)。整个移线过程前期得到很好的控制, 在移线后期发生了侧滑(图 6a 和图 6b), 最后制动停车(图 6d 和图 6i)。

这些试验数据中汽车运行轨迹、质心侧偏角和车速(图 6a ~ 6c)由车身位置姿态模块完成, 其他由 ESC 控制器模块完成。采用文中的数据同步方法, 数据后处理方便高效。

4 结论

(1) 搭建了汽车稳定性控制研究道路试验用的现场快速测试和控制策略调试试验系统, 经过系统的低附路面试验测试, 验证了系统工作的可靠性。

(2) 提出的惯性测量单元(IMU02)车上安装和初始位置调节方法具有通用性。双天线 GPS 具有定向功能, 基于双天线 GPS 接收机与 IMU02 的组合测量, 能够有效解决快速传递对准难题和提高后数据处理的准确性。

(3) 测试系统采用 GPS 接收机的秒脉冲同步信号进行车身位置姿态内部数据同步和其与 ESC 控制器模块间的数据同步, 有效解决了多设备集成工作时的数据同步问题。

(4) 测试系统构建 CAN 节点或基于车身 CAN 总线方式获取基于 ESC 和发动机管理系统配置传感器的信息, 对了解汽车极限工况下的状态提供了真实数据, 为汽车稳定性控制分析提供了有效手段。

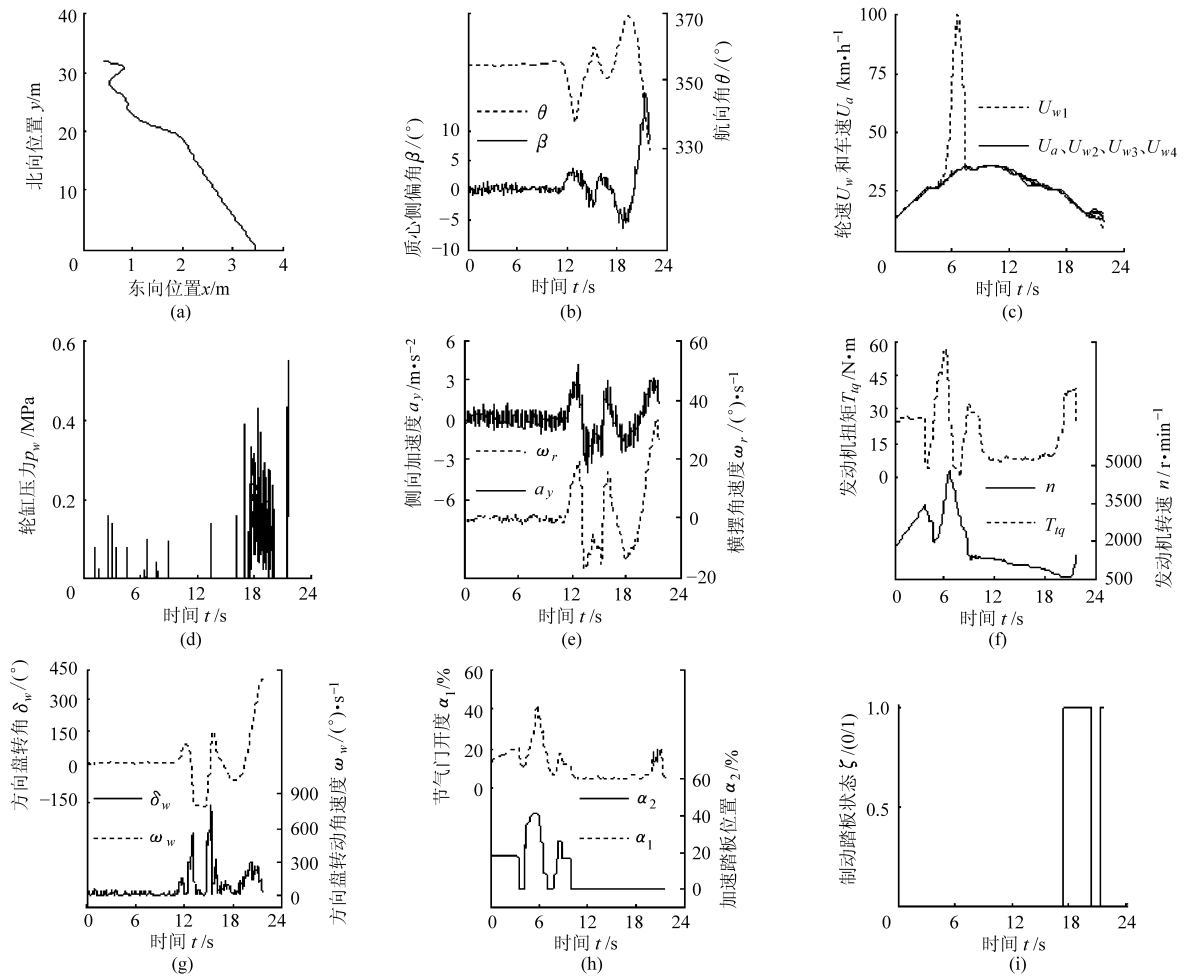


图6 压实雪路面一组移线部分曲线

Fig.6 Curves of testing on compact snow road

- (a) 质心位置表示的行驶轨迹 (b) 质心侧偏角 (c) 4轮速和车速 (d) 4轮缸压力 (e) 车身侧向加速度和横摆角速度
(f) 发动机扭矩和转速 (g) 方向盘转角与转动角速度 (h) 节气门开度与加速踏板位置 (i) 制动踏板状态

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 Riccardo, Scalzi Stefano. Asymptotic sideslip angle and yaw rate decoupling control in four-wheel steering vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(9):999~1019.
- 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]. Int. J. of Vehicle Design, 2008, 46(3~4): 208~229.
- 4 Li Daofei, Du Shangqian, Yu Fan. Integrated vehicle chassis control based on direct yaw moment, active steering and active stabiliser [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(Supp.1): 341~351.
- 5 Trimble Navigation Limited. Getting started guide—Trimble SPS 852 modular GPS receiver [M]. ver 4.41A, 2011.
- 6 Racelogic Limited. IMU02 & YAW03 inertial sensors user guide [M]. 2009.
- 7 Robert Bosch GmbH. Sensors [M]. 2002.
- 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 Kvaser A B. Kvaser USBcan II user's guide [M]. 2010.
- 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)