

文章编号:1671-5896(2026)04-0799-09

基于智能模型车的操纵稳定性实验平台设计

彭思仑, 郝春光, 汪震, 肖峰, 卢延辉, 靳立强

(吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022)

摘要: 为适应线控底盘快速发展背景下人才培养的需求, 针对汽车操纵稳定性实验教学中存在的实施难度大、成本高及安全风险等问题, 设计并开发了一套操纵稳定性实验教学平台。该平台基于智能模型车底盘开发, 集成摄像头、陀螺仪、轮速等传感器, 可支持车辆极限状态下的实验测试。实验管理软件基于 Matlab 平台开发, 通过无线通讯实现远程配置和控制算法加载, 具备较高的灵活性和拓展性。基于该平台开展了多项操纵稳定性及底盘控制相关的实验验证, 实验结果表明, 虽然智能模型车在响应频率及相位延迟特性上与实车存在差异, 并且其表现出更高的动态响应能力和更低的相位延迟, 但其整体变化趋势与实车一致, 可有效验证理论教学中的相关内容。

关键词: 操纵稳定性; 实验教学平台; 无线控制; 智能模型车

中图分类号: TP23

文献标志码: A

Design of Experimental Platform for Handling Stability Based on Intelligent Model Vehicle

PENG Silun, HAO Chunguang, WANG Zhen, XIAO Feng, LU Yanhui, JIN Liqiang

(College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To meet the demand for talent cultivation in the context of the rapid development of drive-by-wire chassis, and to tackle issues such as high implementation difficulty, high costs, and safety risks in experimental teaching of vehicle handling and stability, an experimental teaching platform for handling and stability has been designed and developed. The platform is developed based on an intelligent model vehicle chassis, integrating sensors including cameras, gyroscopes, and wheel speed sensors, which enables experimental tests under extreme vehicle operating conditions. The experiment management software is developed on the Matlab platform, facilitating remote configuration and control algorithm loading through wireless communication, featuring high flexibility and scalability. A number of experiments related to handling stability and chassis control have been conducted based on this platform. The experimental results demonstrate that the intelligent model vehicle differs from real vehicles in terms of response frequency and phase delay characteristics, exhibiting higher dynamic response capability and lower phase delay. Its overall trend is consistent with that of real vehicles, which can effectively verify the relevant content in theoretical instructional.

Key words: handling stability; experimental teaching platform; wireless control; intelligent model vehicle

0 引言

随着新能源汽车行业智能化、电动化的不断发展, 分布式驱动系统、线控执行机构以及轮边角模块

收稿日期: 2025-07-08

基金项目: 吉林大学实验技术基金资助项目(SYXM2024b008); 吉林省高等教育教学改革课题基金资助项目(JLJY202397963817); 吉林大学本科教改工科集群重点基金资助项目(2023XZD050); 吉林省高教科研课题基金资助项目(JGJX2022C10)

作者简介: 彭思仑(1987—), 男, 湖北十堰人, 吉林大学高级工程师, 博士, 主要从事新能源汽车电控技术及传动系统测试技术研究, (Tel)86-15904421718 (E-mail) pengsilun@jlu.edu.cn; 通讯作者: 郝春光(1975—), 男, 吉林蛟河人, 吉林大学高级工程师, 硕士, 主要从事嵌入式系统设计与开发研究, (Tel)86-18604444322 (E-mail) haocong@jlu.edu.cn。

等新一代底盘技术逐步应用于量产车型,而如何基于这种全电的新型底盘架构实现更优的汽车操纵稳定性控制成为当前研究热点^[1]。因此,将汽车理论与先进控制算法验证相结合的汽车操纵稳定性实验教学逐渐成为培养新型工程人才的重要载体。然而,在进行实车操纵稳定性实验时,如稳态回转、转向角脉冲/角阶跃实验等,需要较高车速和宽阔场地,存在安全风险高、教学组织困难等问题^[2]。

为解决上述问题,部分高校引入了仿真技术,通过汽车动力学仿真模拟实车实验^[3]。例如,利用 Simulink 与 Carsim 联合仿真模拟实车实验^[4],或通过 ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) 建立整车多体动力学模型,以提高模型的非线性特性仿真精度^[5]。并且还有些高校引入驾驶模拟器,辅助实验教学,提升学生的实验感知力^[6]。但仿真模型通常简化了真实工程问题的复杂性,学生容易停留在“理想化模型”层面,制约了创造性能力的培养。

二自由度汽车模型是汽车操纵稳定性研究中的理论基础。其数学模型表明,对采用前轮转向并配备弹性橡胶轮胎的车辆,可推导出统一的理论模型。笔者针对实车实验教学中存在的不足,以前轮转向的小型智能模型车底盘为基础,开发了一套适用于汽车操纵稳定性的实验教学平台。由于智能模型车与实车具有相同的二自由度汽车模型,因此二者在汽车操纵特性分析方面具有相同理论。

该平台以小型智能车模型为实验载体,集成多种传感器,无需专用实验场地,具备较高的安全性,可在普通教室环境中进行实验。模型车采用后轮双电机驱动设计,适用于电动底盘架构下的控制算法验证。平台内置自动驾驶程序,支持多项汽车操纵稳定性实验,并开放控制接口供学生进行二次开发,从而有效提升学生解决工程实际问题的创新能力。该实验平台创新性地将实车操纵稳定性实验应用于小型智能车,克服了实车实验风险高、仿真实验过于理想化的局限,适用于汽车操纵稳定性及电动化底盘控制相关课程的实验教学。

1 操纵稳定性实验平台设计

1.1 总体设计方案

依托相关教学改革及实验技术项目,针对车辆工程专业实验教学中存在的问题,开发了如图 1 所示的操纵稳定实验平台。该平台主要由实验管理软件和智能模型车组成,实验管理软件通过电脑平台的 Wi-Fi 模块与智能模型车实现无线通信。

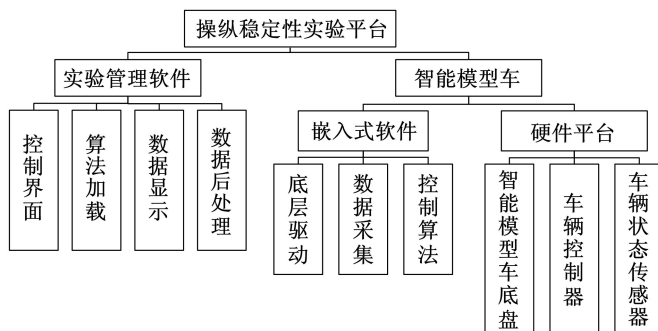


图 1 实验平台设计方案

Fig. 1 Design proposal for experimental platform

智能模型车底盘整体尺寸仅为 30 cm×20 cm,对实验场地要求较低。为满足操纵稳定性测试要求,同时兼顾新一代底盘技术的研究热点,前轮为阿克曼转向系统,由舵机控制转向,后轮为双电机驱动,支持横摆力矩控制,集成车辆控制器及相关车辆状态传感器。基于车辆控制器开发了一套嵌入式软件框架,该框架除了具备满足实验教学所需的底层驱动、数据采集模块以及自动工况控制模块外,还预留了控制接口,支持学生在此平台上进行创新开发。

1.2 智能模型车设计

智能模型车实物如图 2 所示,该模型车的 4 个车轮均配备了轮速传感器,基于 4 个车轮的参考车速估计算法能在极限工况下准确测量车速^[7]。同时,车辆还搭载了陀螺仪和转角传感器,以满足汽车操纵稳定性实验要求。主控模块基于英飞凌 TC264 芯片设计,采用双核架构,主频 200 MHz,具有较强的

计算能力, 满足学生基于该平台进行复杂控制算法测试验证的性能需求^[8]。

智能模型车采用双直流电机作为驱动单元, 通过脉冲宽度调制 PWM(Pulse Width Modulation)信号控制 H 桥功率电路, 对两侧电机进行独立控制, 从而实现电机的驱动与制动, 4 个车轮通过 512 线编码器实现高精度的转速测量。车辆搭载了一块 1.8 英寸(约 45.7 mm)的 OLED(Organic Light-Emitting Diode)显示屏, 实时显示车辆的状态信息, 便于系统调试与开发。

为实现智能模型车的远程控制, 车辆搭载了 ESP8266 无线通信模块。主控芯片通过 1Mbit/s 波特率的串口与 ESP8266 进行通信, 实验管理软件通过 Wi-Fi 无线网络对车辆进行实时监控与控制。ESP8266 模块集成了 TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)协议栈, 支持数据透传模式, 无需使用 AT(Attention)命令进行数据打包传输。经网络相关配置后, 实验车辆能直接发送状态数据, 并接收无线控制软件指令。该无线模块最多支持 5 个 TCP 客户端同时连接^[9], 能实现多个学生不同设备上同时监控和记录实验数据, 极大地增强了实验的协作性与互动性。

汽车横摆角速度与侧向加速度是评价车辆操纵稳定性的关键状态参数。为保障测量准确性, 需依据实验条件合理选择传感器性能指标。鉴于轮胎与地面间的附着系数一般不超过 1, 侧向加速度传感器的测量范围应大于 9.8 m/s^2 , 以适应车辆在极限工况下的动态响应。笔者采用的智能车模型最高车速约为 8 m/s , 最小转弯半径为 0.4 m , 据此估算其最大横摆角速度约为 $1\,200^\circ/\text{s}$ 。此外, 车辆横摆角速度的频率特性通常集中于 3 Hz 以下的低频段, 为避免显著幅值失真, 信号采集频率需不低于 30 Hz 。综合上述要求, 选用 InvenSense 公司推出的 MPU6050 六轴陀螺仪模块。该模块集成了三轴加速度计与三轴角速度传感器, 通过 200 kHz 的 IIC(Inter-Integrated Circuit)通信总线传输数据, 支持 $\pm 19.6\text{ m/s}^2$ 加速度与 $\pm 2\,000^\circ/\text{s}$ 角速度的测量范围, 数据更新速率可达 1 kHz , 完全满足实验教学对信号测量范围与采样频率的需求^[10]。

1.3 软件设计

软件设计主要包括基于智能模型车的嵌入式软件设计与电脑平台的无线实验管理软件设计。

1.3.1 嵌入式软件设计

嵌入式软件主要用于控制实验车辆, 实现车辆转向和驱动电机扭矩控制, 执行实验工况流程, 同时记录方向盘转角、车速、横摆角速度以及加速度等状态信息, 发送给实验管理软件进行显示和记录。嵌入式软件的架构如图 3 所示。

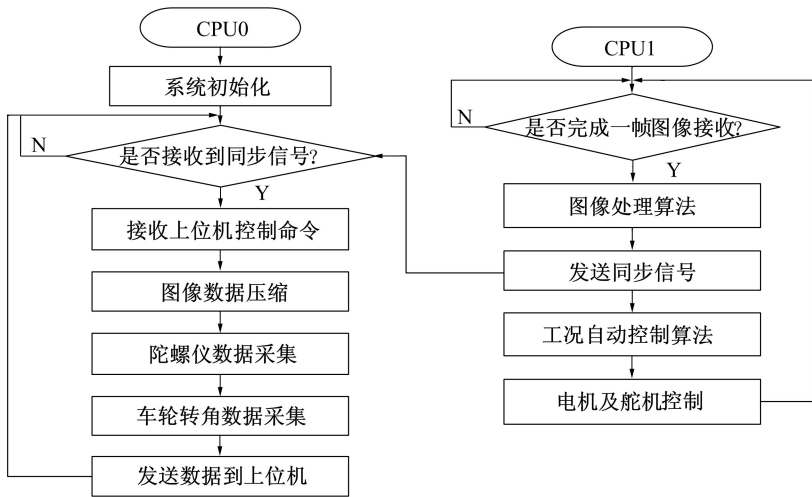


图 3 嵌入式软件架构

Fig. 3 Embedded software architecture

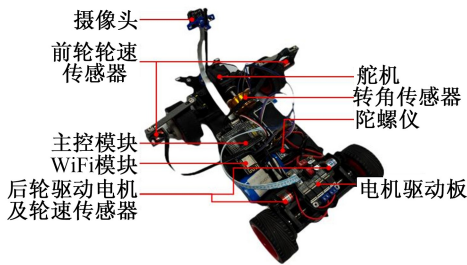


图 2 智能模型车

Fig. 2 Intelligent model vehicle

由于主控芯片 TC264 支持双核处理器,为提高系统的实时性,CPU0 主要负责各硬件模块初始化,车辆状态数据的处理以及与远程控制电脑的通信。CPU1 则主要执行车辆的控制算法,包括图像处理、工况控制以及电机和舵机控制等。CPU0 通过同步信号与 CPU1 协同工作,由图 3 可知,整个系统的控制节拍由摄像头的输出帧率决定,最高可达200 Hz。

考虑实验教学中的二次开发需求,图像处理、工况控制等算法模块均预留了相关接口函数。图像处理算法集成了滤波、二值化和车道识别等常用功能,工况自动控制模块则针对汽车稳态响应、瞬态响应及频率响应的 3 个汽车操纵稳定性评价核心指标,参考国标 GB/T 6323-2014 的试验方法^[11],开发了稳态回转、前轮角阶跃和前轮角脉冲实验的自动控制算法。同时,针对当前新能源汽车分布式驱动的研究热点,还开发了主动横摆力矩控制算法和基于电机控制的防抱死制动系统 ABS (Anti-lock Braking System)/牵引力控制系统 TCS(Traction Control System)控制算法。学生可基于上述算法框架进行修改和自主创新设计,并通过实验平台进行测试验证。

1.3.2 实验管理软件设计

实验管理软件基于 Matlab 软件平台进行开发。Matlab 具备强大的数据分析处理功能,具有可视化的程序开发界面,也是汽车行业中控制算法开发的主要工具之一。其集成的 App Designer 工具支持可视化组件布局功能,能高效设计人机交互界面,提高系统开发效率^[12]。

软件架构如图 4 所示。由 Wi-Fi 模块接收的报文经过循环冗余校验 (CRC: Cyclic Redundancy Check)、报文解析以及单位转换等数据预处理后,通过用户交互界面进行显示和控制。软件界面如图 5 所示,能实现车速、横摆角速度、侧向加速度等车辆状态信息的曲线显示,支持对车辆控制参数进行设置、加载所需的实验工况,实时记录实验数据。此外,利用 Matlab 强大的数学计算功能,开发了相应的实验数据处理模块,支持操纵稳定性实验教学中 3 个典型实验工况的数据处理,可一键生成数据曲线,方便实验教学与展示。

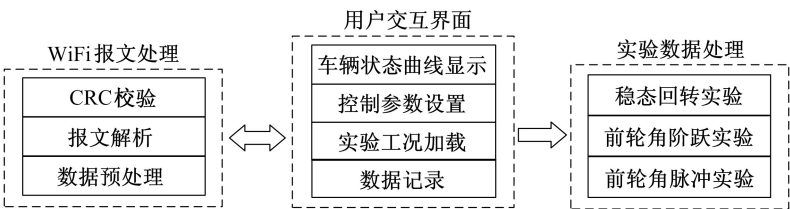


图 4 实验管理软件架构

Fig.4 Experimental management software architecture

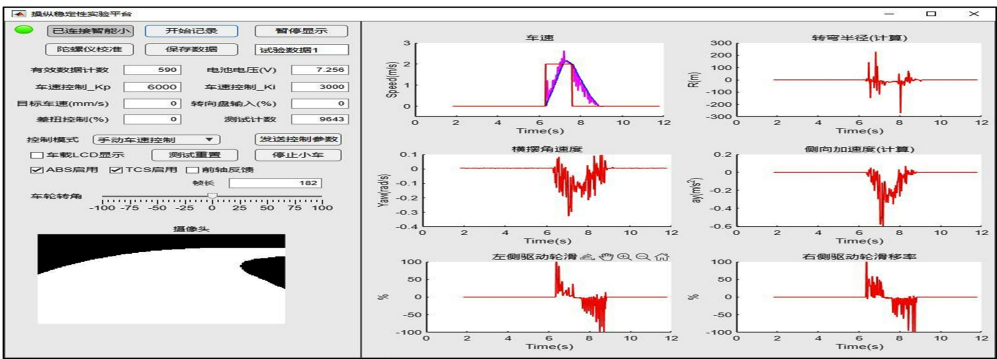


图 5 实验管理软件界面

Fig.5 Experimental management software user interface

2 操纵稳定性实验测试

汽车操纵稳定性是车辆工程专业《汽车理论》课程的核心教学内容,主要包括汽车稳态回转、前轮角阶跃与前轮角脉冲实验,分别对应汽车在前轮角输入下的稳态、瞬态以及频率响应特性分析。由于实验

时,实验车辆通常需在较高车速下转向,承受较大侧向加速度,容易导致失稳,且对试验场地要求较高。因此,传统教学通常仅能通过风险相对较低的稳态回转实验进行演示,难以全面覆盖操纵稳定性所涉及的动态响应特性。

笔者开发的实验平台凭借其小型的车身结构,可在常规实验场地内安全完成上述3项关键实验。学生能近距离观察车辆在失稳过程中的状态变化,并通过调整车辆参数与测试条件,深入分析影响汽车操纵稳定性的关键因素及相应控制策略,从而为理论教学奠定实践基础。

2.1 稳态回转实验

稳态回转实验是测试车辆稳态操纵特性的典型实验,在实验过程中,车辆先以最低稳定车速进行圆周行驶,最低稳定车速设为0.4 m/s。如果车速设置过低,受电机磁阻转矩影响,车速波动较大,从而影响转向半径计算。车辆以最低稳定车速行驶16 s后,开始缓慢加速行驶,为避免纵向力对侧向附着性能的影响,采用0.025 m/s²的加速度进行加速行驶,直到车辆出现失稳状态为止。

跟据记录的车速与横摆角速度数据,可以计算出车辆的转弯半径变化曲线,同时跟据

$$K = \frac{R - R_0}{R_0 u^2} \tag{1}$$

计算出表征汽车稳态响应的重要参数,即车辆稳定性因素 K ,从而绘制不同侧向加速度下的转弯半径比与 K 值曲线,结果如图6所示。其中 R 为实际转弯半径, R_0 为侧向加速度接近0时的初始转弯半径, u 为车速, K 为车辆稳定性因素。

从图6可看出,转弯半径比随着侧向加速度增加而增大,表现出明显的转向不足特性。当侧向加速度接近4 m/s²时,半径比迅速增加,表明此时车辆发生了侧滑,且主要发生在前轮。从 K 值曲线可看出,随着侧向加速度的变化, K 值呈小幅波动,符合车辆 K 值在不同侧向加速度下基本不变的特点。在3 m/s²时, K 值约为0.052 5 s²/m²,相对于实车 K 值偏大,智能模型车表现出了较大的不足转向特性。根据3 m/s²下的 K 值计算的特征车速为4.36 m/s,特征车速较低,此时车辆横摆角速度增益最大。综合上述分析可以看出,智能模型车表现出较强的不足转向特性,这主要是由于模型车前轮采用独立悬架,后轮与车身刚性连接,前轴侧偏刚度明显小于后轴侧偏刚度,实验结果较好验证了车辆结构特点。

车辆质心位置是影响汽车稳态响应的一个重要因素^[13],通过安装配重块改变质心位置,对比质心靠前和靠后的转向特性,如图7所示。

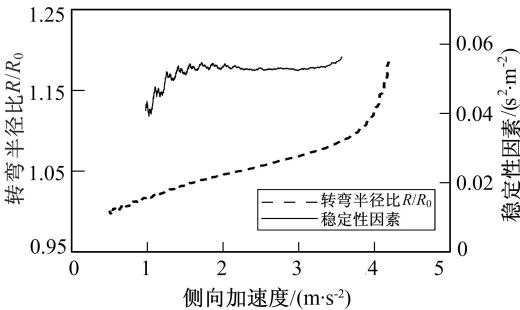


图6 车辆稳态响应曲线

Fig.6 Vehicle steady-state response curve

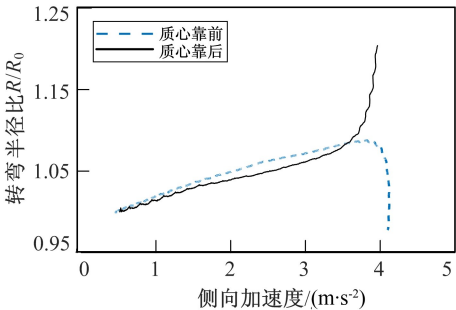


图7 不同质心位置的稳态响应曲线

Fig.7 Steady-state response curves at different center of gravity locations

由图7可看出,与质心靠前的车辆相比,质心靠后的车辆在转向不足特性上有所减弱。但由于后轴载荷较大,地面附着条件较好,随着侧向加速度增加,并接近4 m/s²时,前轴先发生侧滑,车辆转弯半径比迅速变大。相反,质心靠前的车辆由于后轴附着能力较差,侧向加速度接近4 m/s²时,后轴先发生侧滑,车辆转弯半径比迅速变小,车辆出现甩尾现象。学生通过车辆姿态的变化,能直观地观察到上述现象。

2.2 前轮角阶跃实验

前轮角阶跃的实验数据如图8所示。在1.3 m/s的行驶速度下,给实验车辆的前轮施加了一个 22° 的角阶跃激励。车辆的横摆角速度在0.32 s后达到稳定值,且未出现超调现象,最大侧向加速度约为 3.8 m/s^2 。实验数据表明,车辆瞬态响应的反应时间较短,且横摆角速度能迅速稳定,并未发生多余的振荡现象。跟据汽车理论前轮角阶跃输入下的横摆角速度瞬态响应理论模型分析可知,智能模型车质量较小,同时侧偏刚度相对较大,因此系统固有频率高,阻尼比也相对较大,从而瞬态响应表现出较为理想的低延迟、无超调现象。

2.3 前轮角脉冲实验

汽车横摆角速度的频率特性可以反应汽车的动态特性,一般需要给不同频率的方向盘正弦输入,以测试不同频率下横摆角速度与方向盘输入的幅值比和相位差,但该输入难以精确实现且耗时较多,因此通常用角脉冲输入代替。参考国标要求,前轮角脉冲实验采用脉宽为0.5 s,峰值转角为 28° 的三角脉冲激励,该激励的主要能量分布在3 Hz以内,输入的转角信号和输出的横摆角速度曲线如图9所示。

对图9中的转角和横摆角速度数据进行FFT(Fast Fourier Transformation)分析,得到输入输出信号的频域特性,计算不同频率下的幅值比和相位差得出车辆横摆角速度的频率响应特性,如图10中虚线所示。

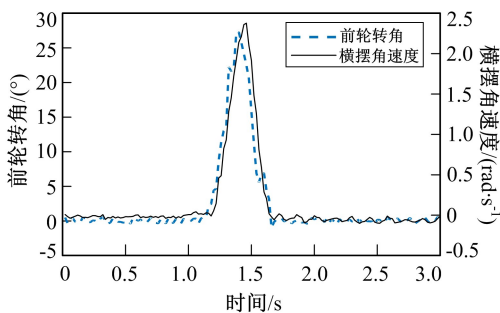


图9 前轮角脉冲实验曲线

Fig.9 Steering wheel angle pulse test curve

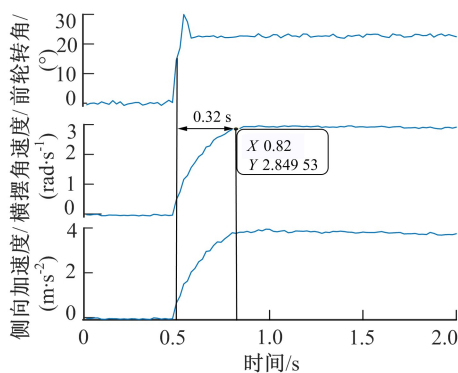


图8 前轮角阶跃实验曲线

Fig.8 Steering wheel angle step input test curve

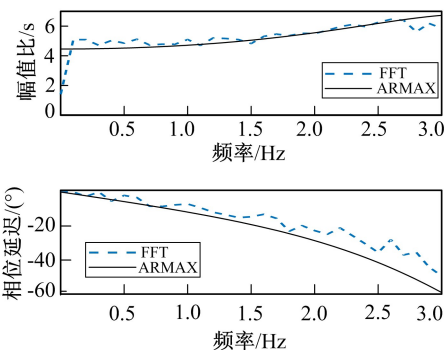


图10 横摆角速度频率响应特性

Fig.10 Yaw rate frequency response characteristics

分析幅值比曲线可知,在3 Hz的频率范围内,未出现明显的峰值,且幅值比随频率增加而逐渐增大,表明智能模型车具有着较高的共振峰频率,表现出良好的操纵稳定性。从相位延迟曲线可看出,在0.6 Hz的频率下,相位延迟仅为 -6° 左右,延迟较小,车辆横摆角速度响应迅速,与角阶跃实验结果一致。

汽车的横摆角速度频率响应也可通过ARMAX(Autoregressive Moving Average with Extra Input)模型进行分析^[14],该模型能较准确地反映汽车横摆角速度的频率特性,通常用在实验数据的后处理中。利用Matlab的工具箱对图9所示的数据进行ARMAX参数估计并绘制频率特性图,得到图10实线所示特性。可以看出,ARMAX模型分析结果与FFT基本一致,验证了ARMAX模型在智能模型车频率特性分析中的适用性。

3 底盘控制实验测试

笔者开发的智能模型车采用双电机后驱设计,可用于在电动化底盘架构下验证多种智能控制算法。例如,通过独立调节两侧电机扭矩实现主动横摆力矩控制,或利用电机快速响应的特性进行轮胎滑移率

控制。该实验平台适用于电动化底盘相关课程的配套实验教学,有助于验证电机扭矩控制对提升车辆操纵性与稳定性的作用,使学生掌握现代汽车底盘电控系统的核心原理,并与产业前沿技术保持同步。

3.1 主动横摆力矩控制实验

主动横摆力矩控制已成为新能源汽车领域的研究热点,并已应用于特斯拉、比亚迪等品牌的后轴双电机驱动车型。该技术通过精确调节左右侧车轮驱动扭矩,显著提升车辆操控性和稳定性^[15]。基于实验平台,学生可编写程序实时调节左右侧驱动扭矩,测试不同横摆力矩对操控特性的影响,进一步加深对该技术原理的理解。

图 11 给出了在施加不同横摆力矩控制后,通过稳态回转实验获得的汽车操纵特性,其中与车辆转向方向一致的横摆力矩定义为正值。由图 11 可看出,当侧向加速度小于 3 m/s^2 时,车辆未出现明显侧滑,转向特性主要受轮胎侧偏角和悬架变形影响。但因智能模型车质量小,侧偏刚度和悬架刚度相对较大,横摆力矩对转向特性影响有限,3 种横摆力矩控制均表现出明显的不足转向特性。随着侧向加速度超过 3 m/s^2 ,轮胎逐渐接近地面附着极限,横摆力矩对侧向力的再分配开始显著影响车辆的转向特性。并且随着侧向加速度的增加,正的横摆力矩会使后轴侧向力增大,从而导致后轴侧滑并引发甩尾现象;而负的横摆力矩则使前轴侧向力增大,前轴先发生侧滑,转弯半径迅速增大。

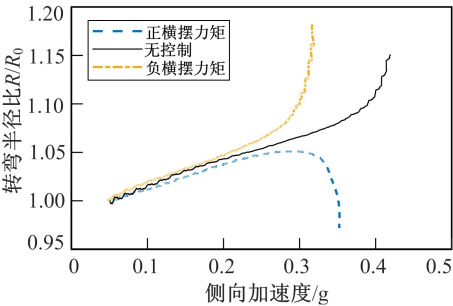


图 11 横摆力矩对操纵特性的影响
Fig. 11 Effect of yaw moment on handling characteristics

3.2 滑移率控制实验

基于电机的滑移率控制技术是线控底盘的关键技术,相较于传统的液压控制系统,电机系统具有更低的响应延迟和更高的控制精度,能显著提升车辆操控性能^[16]。基于实验平台,采用逻辑门限值策略开发了一套 ABS/TCS 控制算法,通过控制电机驱动力矩和制动力矩,有效防止了后轮驱动打滑和制动抱死现象的发生。图 12 给出了车辆加速和制动情况下,激活 ABS/TCS 功能后的轮速变化曲线。图 12 中实线是通过四轮轮速估算出的参考车速,表示车轮未抱死时应具有的轮速,点划线为右后轮的实际轮速。由图 12 可见,当 ABS/TCS 功能触发时,控制算法通过实时调节电机扭矩,确保轮速曲线始终贴着参考车速曲线波动,从而有效避免了车轮抱死现象的发生。

图 13 对比了启动和关闭 ABS/TCS 条件下车辆横摆角速度的变化曲线。可以看出,当关闭 ABS/TCS 功能时,车辆在加速和制动阶段,横摆角速度均发生较大幅度的波动。在加速阶段,车辆的最大横摆角速度达到 1.1 rad/s ,而在制动阶段,横摆角速度最高达到了 2.8 rad/s 。这表明在加速和制动过程中,车辆出现了明显的失稳现象。相比较,当开启 ABS/TCS 功能后,车辆横摆角速度得到了显著抑制,最大横摆角速度仅为 0.2 rad/s ,车辆的稳定性得了明显提升。

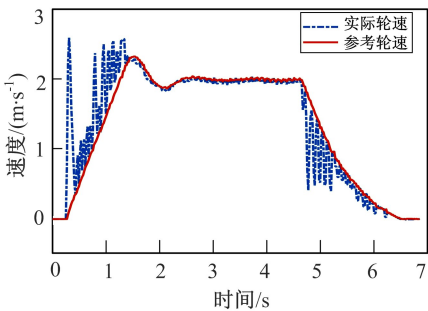


图 12 ABS/TCS 轮速控制曲线

Fig. 12 ABS/TCS wheel speed control curve

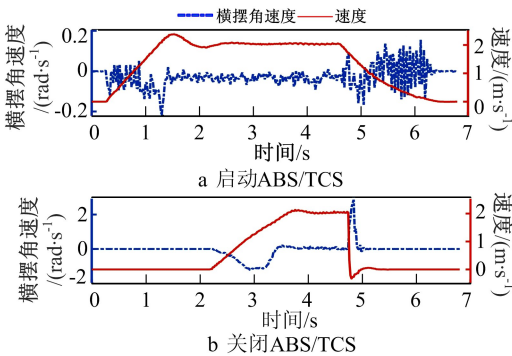


图 13 ABS/TCS 横摆角速度对比测试曲线

Fig. 13 Yaw rate comparison test curve of ABS/TCS

4 结 语

基于所开发的智能模型车底盘,笔者构建了一套用于汽车操纵稳定性测试的实验平台。利用该平台,完成了3项操纵稳定性实验。测试结果表明:在稳态响应方面,智能模型车表现出与实车相似的特性,稳定性因素的测量结果与车辆转弯半径变化趋势一致,同时车辆质心位置对转向特性具有显著影响。在瞬态响应与频率响应方面,智能模型车表现出较低的延迟与较高的动态响应能力,这与其质量较小、轮胎侧偏刚度相对较高的特性相符。此外,主动横摆力矩控制实验表明,扭矩分配对车辆的转向特性影响显著;而滑移率控制实验则验证了TCS/ABS系统在提升车辆行驶稳定性方面的有效性。

综合上述实验结果可得出,智能模型车与实车具有相似的操纵特性,基于该实验平台,可开展包括稳态响应、瞬态响应及频率响应在内的多项实验教学,完整覆盖了汽车操纵稳定性教学的核心内容。此外,该平台支持二次开发,可用于电动化底盘控制算法的验证,为学生开展自主研究提供了充分的创新空间。该实验平台具备操作简便、成本低、安全性高等优点,有效克服了传统实车实验对专用场地的依赖,可在教室、实验室等有限空间内实现极限工况下的测试,为车辆工程专业的实验教学提供了一种创新的解决方案。

参考文献:

- [1] 张雷,徐同良,李嗣阳,等. 全线控分布式驱动电动汽车底盘协同控制研究综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 261-280.
ZHANG L, XU T L, LI S Y, et al. Review on Cooperative Control of X-by-Wire Distributed Drive Electric Vehicle Chassis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 261-280.
- [2] 张丽霞,郑超艺,潘福全,等. 基于频率响应特性的汽车操纵稳定性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 96-104,115.
ZHANG L X, ZHENG C Y, PAN F Q, et al. Analysis of Vehicle Handling Stability Based on Frequency Response Characteristics [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 40(3): 96-104,115.
- [3] 王钰明,顾添翼,陈一泉,等. 虚拟仿真取代实车测试的高校教学研究[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(2): 79-82,130.
WANG Y M, GU T Y, CHEN Y X, et al. Research on Virtual Simulation Replacing Real Vehicle Test in University Teaching [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(2): 79-82,130.
- [4] 王威,宋玉玲,师帅兵. 从实际出发探索关于《汽车理论》教学改革的方法[J]. 教育教学论坛, 2019(19): 124-126.
WANG W, SONG Y L, SHI S B. Practical Exploration of Teaching Reform Methods for "Automobile Theory" [J]. Education Teaching Forum, 2019(19): 124-126.
- [5] 靳畅,周毅,万晓,等. 基于多体动力学模型的汽车操稳性和平顺性虚拟教学实验[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(3): 190-193,197.
JIN C, ZHOU Y, WAN X, et al. Virtual Teaching Experiment of Vehicle Handling Stability and Ride Comfort Based on Multi-Body Dynamics Model [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(3): 190-193,197.
- [6] 王艳丽,杨烁,吴兵. 基于驾驶模拟的本科实验教学内容设计[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(11): 171-174.
WANG Y L, YANG S, WU B. Design of Undergraduate Experimental Teaching Content Based on Driving Simulation [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(11): 171-174.
- [7] 李正华,辛玉林,任敏,等. 四轮驱动车辆纵向速度估计方法研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2025, 43(1): 49-57.
LI Z H, XIN Y L, REN M, et al. Study on Estimation Method of Longitudinal Velocity for Four-Wheel-Drive Vehicle [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2025, 43(1): 49-57.
- [8] 赖盛英,谢鑫鑫,樊伟征,等. 基于OpenMV图像识别的自主迷宫寻宝小车[J]. 现代电子技术, 2024, 47(5): 70-74.
LAI S Y, XIE X X, FAN W Z, et al. Autonomous Maze Treasure-Hunting Car Based on OpenMV Image Recognition [J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(5): 70-74.

[9]姚楷,王星博,黄坚,等. 基于全光接入网的智慧实验室管控系统[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2025, 43(3): 689-694.

YAO K, WANG X B, HUANG J, et al. Intelligent Laboratory Management and Control System Based on All Optical Access Network [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2025, 43(3): 689-694.

[10]王先云,王淑芬,王金波,等. 汽车稳态转向特性测试方法分析与对比[J]. 机械设计与制造, 2023(11): 295-299.

WANG X Y, WANG S F, WANG J B, et al. Analysis and Comparison of Test Methods for Vehicle Steady-State Steering Characteristics [J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(11): 295-299.

[11]郭孔辉,黄朝胜,吴振昕,等. 汽车操纵稳定性试验方法: GB/T6323-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

GUO K H, HUANG C S, WU Z X, et al. Test Methods for Automobile Handling Stability: GB/T 6323-2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

[12]刁庶,蒋川东,田宝凤,等. 误差理论与数据处理课程综合性实验平台设计[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2023, 41(6): 969-975.

DIAO S, JIANG C D, TIAN B F, et al. Design of Comprehensive Experimental Platform for Error Theory and Data Processing [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2023, 41(6): 969-975.

[13]陈齐平,田玥,王亮,等. 分布式驱动电动汽车操纵稳定性影响因素分析研究[J]. 现代制造工程, 2021(1): 12-16,21.

CHEN Q P, TIAN Y, WANG L, et al. Analysis of Influencing Factors on Handling Stability of Distributed Drive Electric Vehicles [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(1): 12-16,21.

[14]黄乾生,张彩萍,赵福全,等. ARMAX 模型在角脉冲试验数据后处理中的应用[J]. 汽车技术, 2011(6): 51-53.

HUANG Q S, ZHANG C P, ZHAO F Q, et al. Application of ARMAX Model in Post-Processing of Angle Pulse Test Data [J]. Automobile Technology, 2011(6): 51-53.

[15]谭子胡,龚贤武,赵轩,等. 分布式双电机后驱电动汽车的横摆稳定性控制策略[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(3): 318-326.

TAN Z H, GONG X W, ZHAO X, et al. Yaw Stability Control Strategy for Distributed Dual-Motor Rear-Wheel Drive Electric Vehicles [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(3): 318-326.

[16]张奇祥,王金湘,张伊晗,等. 智能电动汽车线控制动关键技术与研究进展[J]. 机械工程学报, 2024, 60(10): 339-365.

ZHANG Q X, WANG J X, ZHANG Y H, et al. Key Technologies and Research Progress of Brake-by-Wire for Intelligent Electric Vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(10): 339-365.

(责任编辑: 张洁)