

自动驾驶技术测试车控制系统设计

潘驰¹, 张志鹏¹, 陈忠言², 刘振革³, 廖国樑¹, 逯岳奇¹, 纪少波^{1,4*}

1. 山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东氢探新能源科技有限公司, 山东 济南 250100;
3. 山东技师学院智慧交通学院, 山东 济南 250200;
4. 汽车动力系统智能检测及高端装备山东省工程研究中心, 山东 济南 250357

摘要:为提高车辆自动驾驶测试时的安全性,降低测试成本,设计机械结构、硬件电路及上位机软件,开发一种满足自动驾驶技术测试要求的测试车样机,对测试车进行实地直线和曲线轨迹跟踪试验场景测试。试验结果表明:该测试车底盘低、防撞击,可以有效保护被测车辆的安全;测试车控制系统能够满足运行轨迹控制、运行状态实时显示、实时通信和数据处理等功能要求;测试车能满足自动驾驶技术的测试要求,设计的控制系统具有较高的轨迹跟踪精度。

关键词:自动驾驶;测试车;整车控制器;上位机

中图分类号:U467

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)05-0064-06

引用格式:潘驰, 张志鹏, 陈忠言, 等. 自动驾驶技术测试车控制系统设计[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(5):64-69.

PAN Chi, ZHANG Zhipeng, CHEN Zhongyan, et al. Design of control system for a autonomous driving test vehicle[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(5):64-69.

0 引言

自动驾驶技术有利于提高交通安全,提高交通效率,降低环境污染,是当前汽车领域研究热点之一^[1-3]。为了提高自动驾驶车辆的安全性,自动驾驶车辆出厂前需进行严格的测试验证,测试方法包括软件仿真测试、硬件在环测试、试验场景测试和实车道路测试等^[4-7]。测试环节中如果直接人工驾驶车辆测试,安全风险大、测试成本高,因此国内外研究人员积极开发采用满足自动驾驶技术测试要求的测试车进行自动驾驶测试,提高测试安全性,降低测试成本^[8-9]。

目前众多学者围绕满足自动驾驶技术要求的测试车开展了相关研究:李文礼等^[10]总结了车辆先进驾驶辅助系统(advanced driving assistant system, ADAS)测试的关键技术,实现了尽量减小或避免被试车辆的损伤、车辆动态性能和轨迹跟踪能力良好、测试成本较低、自我保护能力和快速修复能力较好的目的;袁琦等^[11]分析了测试车的外形结构,进行了材料选择和牵引装置设计,开发了一款自动驾驶技术测试车;张鹏程等^[12]基于欧洲经济委员会(economic commission for Europe, ECE)制定的 R131 标准提出了 3 种测试车开发方案,并比较了不同方案的优、缺点;张喜涛^[13]针对自动驾驶车辆性能测试,完成了测试车的结构及软硬件设计;高振铭等^[14]搭建了自动驾驶技术测试车,利用远程指令实现了对测试车的姿态矫正和速度控制;杨新鹏等^[15]根据自动驾驶车辆的测试需求设计测试车,通过差分定位模块实现了对测试车的定位和运行控制;罗慧超^[16]针对自动驾驶车辆的可靠性需求,设计了一种具有急停装置的自动驾驶测试车。

收稿日期:2024-09-11

基金项目:山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC2041);动力机械与工程教育部重点实验室开放课题项目(202302)

第一作者简介:潘驰(2001—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要研究方向为自动驾驶技术,E-mail:742726722@qq.com。

通信作者简介:纪少波(1979—),男,山东烟台人,教授,主要研究方向为新能源车辆测控技术研究,E-mail:jibo@sdu.edu.cn。

如果自动驾驶被测车失控时与测试车发生碰撞,会造成严重的经济损失。为减小碰撞损失,本文中设计一种低底盘自动驾驶测试车,开发相应的控制系统及上位机平台软件,通过试验场景测试验证了测试车及控制系统均满足设计要求。

1 测试车样车设计

1.1 结构设计

测试车设计包括样车设计和电气系统设计,测试车车框采用金属材料,能较好地承受被测车的碾压;测试车上部安装仿汽车外形泡沫,并在整个泡沫上粘贴车衣,方便被测车辆识别。为保证被测车与测试车不发生结构碰撞,测试车四周设计为角度较小的斜面,斜面最低点距地面 4 cm 左右。被测车迅速正确反应时,可快速避让测试车;若被测车不能迅速正确反应,会导致碰撞或其他事故发生,测试车上部的软质泡沫不会对被测车产生撞击,可保护被测车和测试车,降低测试成本。车体内部分割为若干安装槽,用于安装全球定位系统(global positioning system,GPS)接收机、数据传输单元(data transfer unit,DTU)、整车控制器等;安装槽上部安装金属板,防止被测车碾压测试车时损坏重要设备。GPS 接收机的天线固定在测试车前、后端,2 个天线的距离大于 1 m,且尽量保持在同一平面。测试车电气系统结构示意图如图 1 所示,微控制器是电气系统的核心部件,4 块锂电池(记为电源 1、2、3、4)为整个系统供电,4 个伺服电机在控制器的作用下,分别控制 4 个车轮的运行速度。

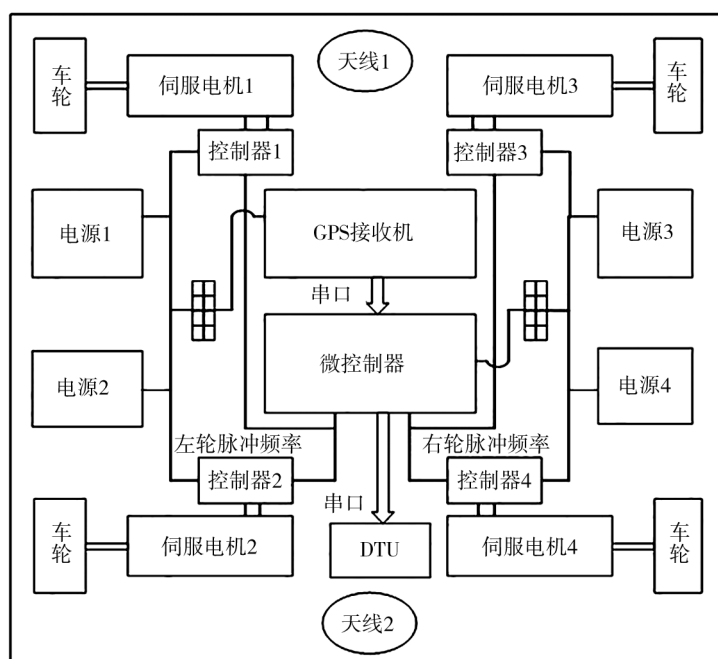


图 1 测试车电气系统结构示意图

1.2 控制方案

测试车样机总体控制方案如图 2 所示。测试车有 2 种控制模式:无线遥控方式和上位机设定轨迹自动运行方式。无线遥控方式通过操纵手柄设定车辆运行轨迹,将运行控制参数转化为脉宽调制(pulse width modulation,PWM)信号传送给微控制器,电机控制车辆按照需求轨迹行驶。以远程通信方式为例,上位机软件设定轨迹自动运行方式是指微控制器通过 GPS 设备实时接收测试车经纬度和航向角,通过串口发送到 DTU 设备,DTU 以无连接的用户数据报协议(user datagram protocol,UDP)的方式将数据发送到云服务器上位机。此外,微控制器通过传感器测量 4 个车轮的当前运行速度,并发送至上位机。上位机根据接收的 GPS 数据及轮速数据,利用轨迹跟踪算法计算当前测试车左、右两侧车轮的目标速度,通

过 DTU 设备将目标速度发送给微控制器,结合 RS485 通信方式发送控制指令给伺服电机控制器,控制左、右两侧的伺服电机转速,使测试车沿预定轨迹行驶。

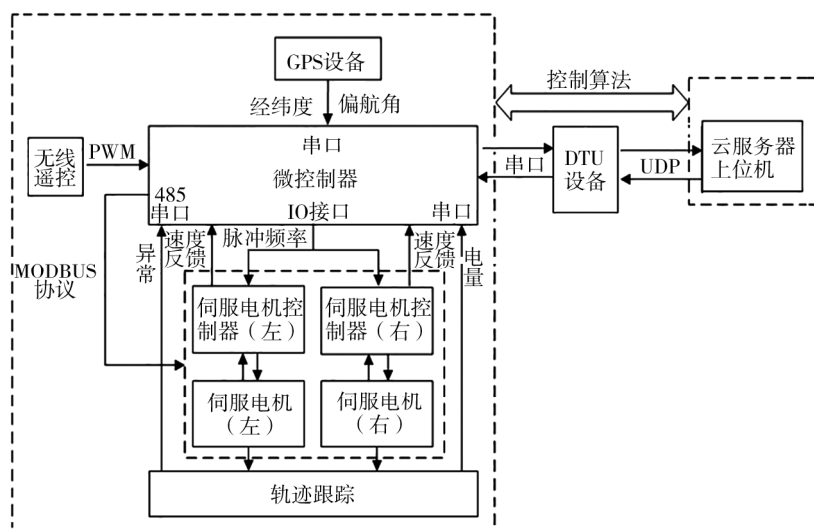


图2 测试车总体控制方案

1.3 硬件设计

为了实现对测试车的控制运行,整车控制系统设计方案如图3所示。控制系统主要电路包括电源电路、通信电路、伺服电机控制电路、输入捕获电路及电压采集电路。

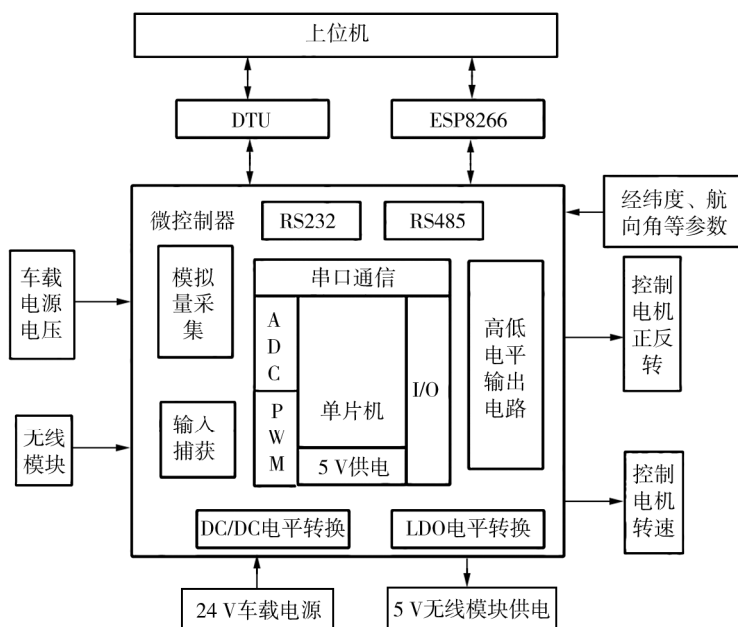


图3 控制系统设计方案

电源电路包括电压为24 V的车载电源及电压为5 V的供电电路,其中,24 V车载电源给测试车提供电源,用于驱动伺服电机运行;5 V供电电路通过直流电平转换器(direct current-direct current converter, DC/DC)将电源电压由24 V转换为5 V,用于给单片机等模块供电,并结合低压差线性稳压器(low dropout regulator, LDO)将电源电压由5.0 V转换为3.3 V,为无线模块ESP8266供电。

通信电路包括RS232、RS485两种远程方式及近程通信方式,微控制器通过RS485通信电路,实时接收测试车的经纬度和航向角,结合RS232通信方式将参数传输到DTU后传送到上位机;微控制器也可通

过 ESP8266 采用近程通信方式将数据传输到上位机。上位机采用轨迹跟踪算法计算控制信号(即测试车左、右两侧车轮的速度),并通过 DTU 采用远程通信或通过 ESP8266 采用近程通信发送至微控制器。微控制器通过输入/输出接口(input/output, I/O)电路改变输出电平,控制伺服电机正反转。伺服电机控制电路将微控制器信号通过 RS485 通信方式发送给伺服电机控制器,控制电机的转速。

输入捕获电路用于获取无线遥控模块发出的 PWM 信号,根据 PWM 占空比改变左、右两侧车轮的速度和方向,通过无线遥控方式实现车辆的运行控制。

电压采集电路用于采集车载电源电压,单片机通过模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)将采集的模拟信号转换成数字信号,判断电池的电量,当电量过低时,发出提醒信号,防止测试车电量不足,导致试验意外中断。

1.4 上位机软件及界面设计

由于轨迹跟踪算法计算量较大,单片机运算能力有限,影响轨迹跟踪效果,因此开发上位机,用于轨迹跟踪算法;上位机软件通过通信的方式获取微控制器上传的运行数据并通过图形界面实时显示,将轨迹跟踪算法计算结果发送至微控制器。上位机软件主要包括实时显示、通信方式及数据处理 3 大模块,设计方案如图 4 所示。实时显示模块显示测试车电池电量、各车轮运行速度、平面坐标行驶轨迹及电子地图行驶轨迹。通信方式模块包括 UDP、传输控制协议(transmission control protocol, TCP)及串口通信等功能,目前主要采用 UDP 通信方式与微控制器进行数据交互。数据处理模块包括数据解析、数据保存和计算控制量 3 部分,数据解析将微控制器获得的车辆位置信息(经纬度、航向角)、传感器测得的当前速度等参数进行保存,结合轨迹跟踪算法计算各车轮的运行速度及方向。

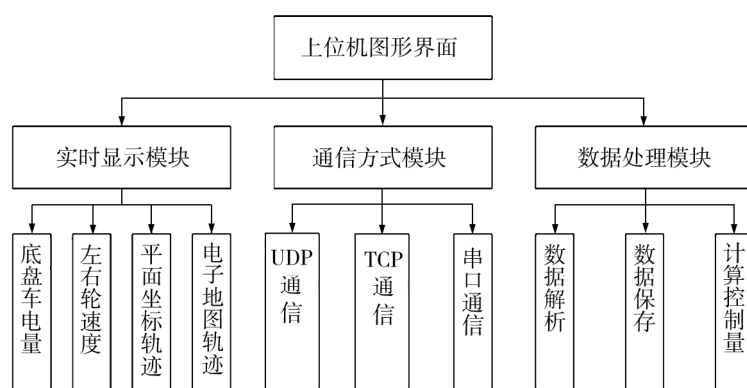


图 4 上位机软件设计方案

上位机软件运行界面可以通过启动和停止按钮控制测试车;测试车行驶过程中,可实时显示车辆电量、所处位置经纬度、左右两侧车轮速度、平面坐标行驶轨迹及地图行驶轨迹。

2 测试车实地试验

为检测测试车性能,进行直线和曲线轨迹实地跟踪试验,测试车位置及航向角为 (x_1, y_1, θ) ,表示测试车在 x 轴、 y 轴距离初始位置的距离及车辆航向角,定义测试车初始位置和航向角为 $(0, 0, 0)$,设置底盘车目标速度为 0.2 m/s ,直线轨迹跟踪试验预设轨迹为 y_2 (y 方向偏离初始位置的距离)为 3.5 m ,试验跟踪时间为 50 s 。曲线轨迹跟踪试验预设轨迹为圆心坐标为 $(0, 3)$ 、直径为 5 m 的圆形,试验跟踪时间为 80 s 。直线、曲线轨迹跟踪试验结果如图 5 所示。

由图 5 可知:直线轨迹跟踪试验时,测试车约在 $x_1 = 5.08 \text{ m}$, $y_1 = 3.49 \text{ m}$ 处跟踪到预设轨迹;曲线轨迹跟踪试验时,测试车约在 $x_1 = 2.10 \text{ m}$, $y_1 = 1.50 \text{ m}$ 处跟踪到预设轨迹;2 次试验中,测试车跟踪到预设轨迹后均能较为精确地沿着预设轨迹行驶。不同跟踪轨迹的位置偏差对比曲线如图 6 所示。

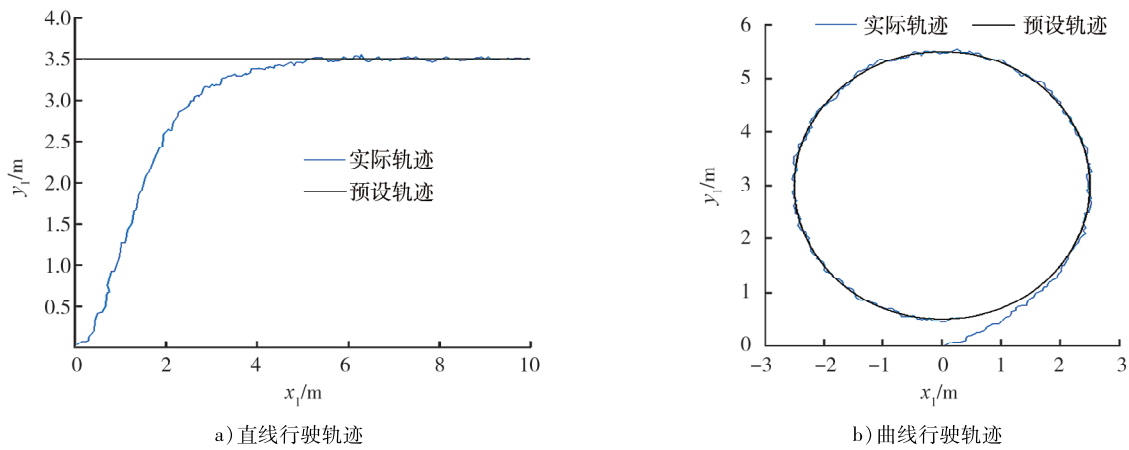


图5 直线及曲线轨迹跟踪试验结果

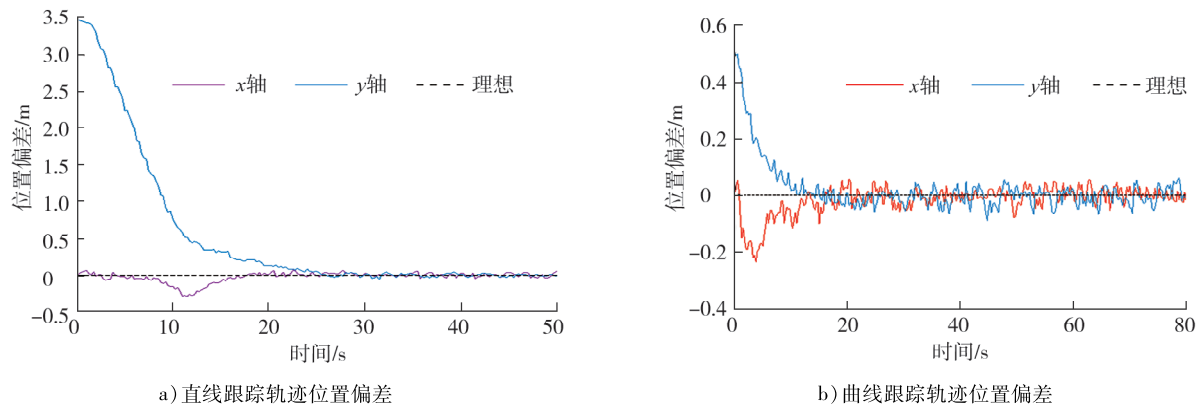


图6 不同跟踪轨迹的位置偏差对比

由图6a)可知:测试车开始行驶后, y 方向偏差迅速减小,行驶大约20 s后, y 方向偏差稳定在0附近; x 方向无初始偏差,但行驶大约10 s后,出现最大反向偏差,随后偏差逐渐减小,大约5 s后, x 方向偏差稳定在0附近。因为在跟踪试验刚开始时,测试车左、右侧的轮速都为0,由于 y 方向偏差较大, x 方向的偏差为0,为使测试车 y 方向偏差尽快减小,微控制器调节测试车左、右轮的轮速使车辆向 y 轴方向偏移,但 x 轴方向的速度较低,随着 y 轴方向偏差减小, y 轴方向速度降低, x 轴方向速度增加,出现小幅度的位置偏差,在轨迹跟踪算法作用下, x 轴方向偏差逐渐减小。由图6b)可知:曲线行驶轨迹跟踪试验时,前7 s测试车 y 方向偏差迅速减小, x 方向的行驶轨迹落后于预设轨迹, x 方向偏差逐渐增大;当测试车接近预设轨迹后, x 方向速度增加, x 轴方向偏差逐渐减小,大约第20秒时, x 方向和 y 方向位置偏差趋近于0。

3 结论

为了降低自动驾驶车辆的测试成本和风险,本文中对测试车样车机械机构及控制系统进行设计,并通过实地跟踪试验场景测试,验证车辆性能。

1)设计的测试车底盘低,车身四周为斜面结构,当被测车辆失控时,可以有效减小被测车辆的碰撞风险,降低测试成本。

2)根据测试车功能需求,确定了控制器硬件方案,实现了测试车行驶控制、实时通信等功能;开发了上位机软件,设计了实时显示模块、通信模块、数据处理模块,实现了轨迹跟踪算法运行、测试车运行数据实时展示和保存等功能。

3)测试车能快速、准确跟踪预设直线轨迹和曲线轨迹,满足自动驾驶技术测试要求。

参考文献:

- [1] 李研强. 智能网联汽车关键技术与应用[M]. 北京: 中国大地出版社, 2021.
- [2] LI X, XU N, GUO K, et al. An adaptive SMC controller for EVs with four IWMs handling and stability enhancement based on a stability index[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020, 59(10): 1–24.
- [3] 车晓波, 李超, 张子辉. 一种基于混合现实的自动驾驶车辆测试方法[J]. *山东科学*, 2022, 35(2): 89–95.
- [4] BENGLER K, DIETMAYER K, FARBER B, et al. Three decades of driver assistance systems: review and future perspectives[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2024, 16(1): 74–103.
- [5] ZHU Y, WANG J, MENG F Q, et al. Review on functional testing scenario library generation for connected and automated vehicles[J]. *Sensors*, 2022, 22(20): 1–25.
- [6] ZHENG Y, WANG J W, LI K Q. Smoothing traffic flow via control of autonomous vehicles[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(5): 3882–3896.
- [7] MANOHAR Y, KUMAR A S, BHARAT L. Extraction of road surface from mobile LiDAR data of complex road environment[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(15/16): 4655–4682.
- [8] LI Y, LI K Q, ZHENG Y, et al. Threat assessment techniques in intelligent vehicles: a comparative survey[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2021, 13(4): 71–91.
- [9] XU B, BAN X G J, BIAN Y G, et al. Cooperative method of traffic signal optimization and speed control of connected vehicles at isolated intersections[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(4): 1390–1403.
- [10] 李文礼, 李建波, 石晓辉, 等. 用于汽车 ADAS 系统测试的软目标车研究进展[J]. *汽车工程学报*, 2021, 11(4): 280–288.
- [11] 袁琦, 李文亮, 郭志平, 等. 汽车测试仿真靶车的研制[J]. *公路交通科技*, 2017, 34(增刊2): 86–91.
- [12] 张鹏程, 吴波勇, 汪祖国, 等. 基于 ECE R131 法规检测的移动目标车设计与验证[J]. *汽车科技*, 2017(2): 76–79.
- [13] 张喜涛. 车辆软目标电控系统开发与轨迹跟踪方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [14] 高振铭, 高华东, 耿晓珂, 等. 汽车碰撞测试靶向移动平台研制与试验[J]. *电子设计工程*, 2020, 28(14): 34–39.
- [15] 杨新鹏, 肖广宇, 张帅, 等. 基于 GPS 和惯性导航的主动安全试验装置[J]. *汽车实用技术*, 2023, 48(3): 122–125.
- [16] 罗慧超. 一种无人驾驶测试小车: 202111363925. 9[P]. 2022–02–01.

Design of control system for a autonomous driving test vehicle

PAN Chi¹, ZHANG Zhipeng¹, CHEN Zhongyan², LIU Zheng³, LIAO Guoliang¹,
LU Yueqi¹, JI Shaobo^{1,4*}

1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Fuel Cell Power in Technology Co., Ltd., Jinan 250100, China;

3. School of Intelligent Transportation, Shandong Technician Institute, Jinan 250200, China;

4. Intelligent Testing and High-end Equipment of Automotive Power Systems, Shandong Province Engineering Research Center, Jinan 250357, China

Abstract: In order to improve the safety of autonomous driving test and reduce the test costs, a mechanical structure, hardware circuit and upper computer software are designed to develop a test vehicle prototype that meets the requirements of autonomous driving technology testing. The test vehicle is subjected to on-site straight and curved trajectory tracking test scenarios. The test results show that the test vehicle has low chassis and anti-collision, which can effectively protect the safety of the tested vehicle. The test vehicle control system can meet the functional requirements of trajectory control, real-time display of operating status, real-time communication, and data processing. The test vehicle can meet the testing requirements of autonomous driving technology, and the designed control system has high trajectory tracking accuracy.

Keywords: autonomous driving; test vehicle; vehicle controller; upper computer

(责任编辑: 胡晓燕)