

# 基于 HIL 的线控底盘性能测试研究

吴长威，陈思宇，田汉，蒋治

东风汽车有限公司东风日产乘用车公司技术中心

**【摘要】** 线控底盘包含线控转向系统、线控制动系统、线控驱动系统、线控悬架系统等<sup>[1]</sup>。线控底盘的发展应用标志着底盘出入力模式将从助力向全动力方向发展。结合整车工况对底盘出入力的测试分析，在线控底盘导入后，仅在整车阶段进行操乘性能调测已经不能满足底盘测试的需求，亟须更加量化、准确的底盘出入力测试。本文提出了一种基于底盘 HIL 仿真测试，结合实际车辆工况的出入力变化，可用于测试车辆 ADAS 功能的底盘电控性能的可编程出入力测试系统。该系统可以实现底盘负载的可编程输入，以及根据故障负载数据再现故障入力条件。

**【关键词】** ADAS 底盘性能测试，出入力测试系统，HIL 测试台架

## Research of By-Wire Chassis Payload Test Platform System Based on HIL

Wu Changwei, Chen Siyu, Tian Han, Jiang Zhi

Dongfeng Nissan Technical Center of Dongfeng Motor Company Limited

**Abstract:** The application of the by-wire chassis means that the steering is turning to full power steering. The by-wire chassis includes steer-by-wire system, brake-by-wire system, drive-by-wire system, by-wire suspension system. In this way, commissioning the operation performance only at the vehicle stage can no longer meet the needs of the test, so we need a quantitative and accurate chassis payload test system. In this paper, we propose an Auto ADAS Chassis Payload Test Platform System based on HILs simulation test combined with the payload of actual vehicle working conditions. This system can test the chassis payload performance of the vehicle's ADAS function, program the load output, and reproduce the fault load according to the fault load record.

**Key words:** ADAS chassis performance test, payload test, HIL test platform

## 引言

线控底盘是当前汽车行业发展的热点，是汽车底盘由助力向全动力发展的一个标志。线控底盘提升了汽车底盘控制上限，同时也提升了汽车底盘测试难度。从汽车整车性能测试角度分析，电动助力转向（Electrical Power Steering, EPS）系统在相应的 EPS 控制器开发完成后，整车性能测试通过即可判断合格。对于助力转向，即使出现转向动力失效的情况，系统依然可以通过机械传动实现车辆转向，确保行车安全。但是如果是全动力转向出现动力失效的情况，由于没有机械传动结构，车辆将无法执行转向动作，出现车辆方向完全失控的危险工况。

针对上述问题，为了能够满足更高要求的底盘性能测试，本研究展示了一种基于底盘智能集成控制器（ONE-BOX）与 EPS 硬件系统的自动驾驶功能半实物硬件在环（Hardware-In-Loop, HIL）测试系统。该系统包括自动驾驶功能半实物测试平台架构、自动驾驶功能测试工况模拟、软硬件信息交互与控制指令通信、关键作动触发信息模拟以及自动驾驶功能测试等，可以实现底盘控制系统的早期功能验证、性能测试、FTA 故障注入分析等，增加底盘系统开发可靠性。

## 1 传统车辆底盘测试方法

传统车辆底盘测试内容分为两部分，一部分是供应商的单品级测试，一部分是主机厂的系统级测试。

### 1.1 底盘单品测试

底盘电控部品的单品测试通常由部品供应商根据主机厂提出的单品设计条件完成测试，并出具具有法律效力的试验报告书作为测试结果证明。测试内容主要是在单品开发完成后，针对单品设计式样测试单品功率、功能逻辑、运行稳定性、故障条件判定等。

### 1.2 整车底盘系统测试

整车系统级的底盘性能测试通常在主机厂完成。在整车装车完成后通过驾驶员操作车辆完成规定操作，在执行机构安装应变片等传感器，测试并记录对应机构的出入力变化情况，以此判断整车底盘出入力工况是否符合设计要求。

### 1.3 传统车辆底盘电控测试方法的不便

传统的单品测试+整车系统测试的方法，可以满足助力转向以及助力制动的传统底盘测试需求，但是对于导入全动力转向和制动的线控底盘，传统测试方法则可能存在测试项目检出不便的情况，特别是对于高阶辅助驾驶系统（Advanced Driver Assistance System, ADAS）相关功能的测试。例如 ADAS 功能中的主动制动功能，需要在突发危险工况中，在驾驶员未能及时输入制动信号的情况下，系统也能够及时辅助完成制动操作，将车辆状态导向安全工况。在此过程中，不仅要求车载环境感知系统能够及时感应周围环境变化，同时需要保证车辆底盘系统能够在短时间内完成制动机械操作。

单品性能测试主要在空载状态下进行，缺少系统层面的性能测试；整车阶段测试由于整体结构复杂，且试验需要人为输入测试变量，存在较大的操作难度，测试准确度、测试精度、测试可重复性较难控制。子系统级别的自动化测试，则可以实现高精度的变量输入、可重复的测试验证、快速导入测试条件等。

## 2 底盘系统测试

根据前文描述，为了能够在车辆开发前期对底盘进行相应的性能测试，我们需要搭建合适的底盘性能测试系统。底盘电控系统的子系统测试环境搭建包含两部分内容：一部分是功能级别的 HIL 测试数字环境，满足系统运行需要的基本功能逻辑条件；另一部分是性能级别的可编程出入力条件，实现系统整体需要的精准出入力实际测试条件环境。

### 2.1 HIL 功能测试环境

#### 2.1.1 功能测试硬件系统

如图 1 所示，HIL 功能测试环境主要的硬件系统是以车载硬件，如车载 12V 电源、制动踏板、智能集成控制器（ONE-BOX）、电子助力控制器、电子制动钳、轮速传感器、转角传感器、压力传感器等底盘电控硬件为基础，通过仿真器仿真模型注入系统交互通信，形成软硬件闭环的信息交互系统。同时，在监控主机上运行整车动力学参数化模型，构建完整的底盘电子 HIL 功能测试环境。

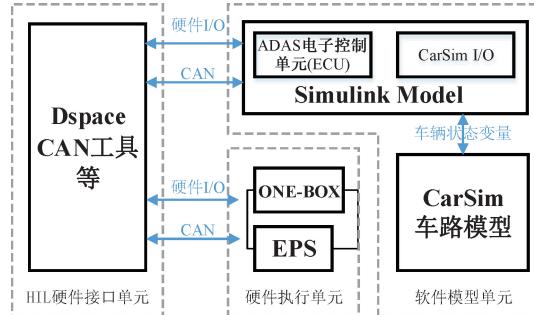


图 1 HIL 功能测试硬件架构

#### 2.1.2 功能测试仿真建模

功能测试模型建立的关键点在于底盘通信模型和整车动力学模型搭建。电控通信模型通常都是各主机厂的核心机密，所以该部分内容需要建立独立的模型，方便根据不同厂家的不同车型进行修改，确保底盘电控系统可以进入正确的运行工况。同时，测试需要准确搭建汽车动力学模型并在测试过程中及时更新模型参数，保持 HIL 功能测试的有效性。图 2 所示是车路模型仿真动画效果图。



图 2 车路模型仿真动画

## 2.2 底盘性能测试系统

### 2.2.1 系统性能测试需求

当前自动驾驶技术飞速发展，相关功能如自动驻车、自动巡航、自动泊车逐渐成为标配。底盘电控系统作为整车动态自动驾驶的直接执行层，集成了各项自动驾驶相关的执行层面功能。在传统测试模式中，自动驾驶功能的匹配验证以实车实验的方式进行，开始时间相对较晚，且危险性高，对试验场地要求高，测试覆盖度低，可重复性差。

汽车底盘 HIL 性能测试系统，不仅可以在整车测试开始前，进行自动驾驶功能匹配验证，还可以在整车测试出现故障后，精确地控制测试变量，进行对照试验解析故障。如图 3 所示，本研究的测试对象是底盘低压电控系统，围绕底盘低压电控系统，搭建底盘性能测试平台。

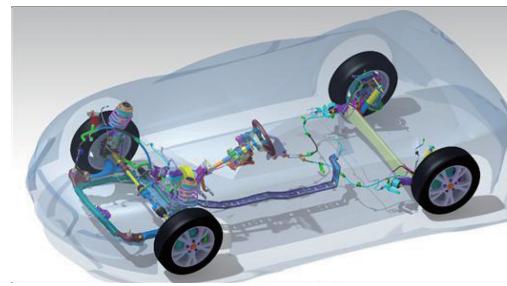


图 3 车辆底盘低压电控系统

### 2.2.2 性能测试载荷模拟

功能测试验证需要在系统功能逻辑验证没有问题的基础上进行。性能测试相较于功能测试的主要区别在于，实际环境存在的载荷变化。

图 4 所示是转向系统性能负载测试结构图，下半部分是由车辆控制器和车况仿真信号组成的功能测试系统；上半部分是由转向机构以及负载模拟模组构成的性能测试系统。性能测试部分的关键是负载模拟。为了使模拟的负载值尽可能地和实际负载一致，负载模拟部分需要具有响应快、量程广、精度高的特点。

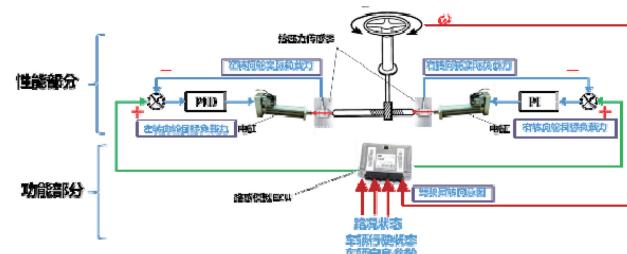


图 4 转向性能负载测试结构图

转向负载模拟量程范围方面，参考车辆 ADAS 功能对转向系统的设计量程，模拟负载的量程为 0~10kN。同时，根据测试精度要求，负载输出的误差范围小于 10N，模拟负载的精度要求不低于千分之一。为了满足系统响应时间测试需求，负载模拟要根据不同工况输出多种负载曲线以及瞬时冲击响应。本系统负载模拟，通过使用大功率伺服电动机缩短负载的响应时间，并实现可编程负载输出，同时加入伺服电动缸减速增矩，实现高负载输出，最后结合嵌入式系统算法

对负载输出进行优化，闭环控制提高负载输出精度。图 5 所示是方向盘以  $90^\circ/\text{s}$  的速率转向时负载测试实录曲线图。

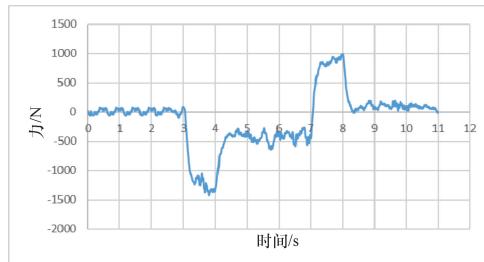


图 5  $90^\circ/\text{s}$  时的负载曲线

### 3 可编程出入力测试系统

综合上文所述，本文提出一种可以用于底盘性能测试的可编程出入力测试系统。目前本文研究方向主要是车载低压控制系统，包含转向系统以及制动系统。测试系统可以在车辆开发前期对转向系统以及制动系统的出入力精度、有效性、响应时间进行验证；在车辆开发后期，通过可编程输入属性，进行任意出入力输入，并且记录系统出力数据，用于车辆底盘控制故障分析以及故障再现。

#### 3.1 转向系统出入力测试

##### 3.1.1 转向系统出入力分析

如图 6 所示，对转向系统整体进行出入力分析，系统有两个不同分类的出入力：一个是方向盘转矩输入，一个是轮胎摩擦力输入。方向盘的输入转换为控制器对转向电动机的控制电信号，所以基于 ADAS 转向系统的出入力测试，本研究主要参考的出入力是轮胎摩擦负载出入力。

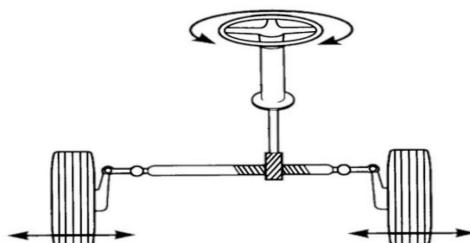


图 6 转向系统出入力分析

##### 3.1.2 转向系统出入力性能测试

转向系统出入力测试的主要目的是测试转向系统在不同出入力工况下的系统稳定性，以及受冲击时的系统响应速率。本出入力测试系统可进行车辆底盘作动过程中的转向平稳性测试，以及瞬时负载冲击扰动测试。

图 7 所示是系统在进行冲击负载模拟测试中，转向角的响应曲线，图中的三个峰值模拟的是冲击场景中基础应力施加、冲击负载产生、负载归零结束的三个阶段。图中纵轴是冲击过程中，方向盘转角偏移修正量。为了方便观测，对坐标轴进行了放大，放大后每单位的物理量为  $0.01^\circ$ ，横轴为时间轴，单位为 s。转向冲击试验模拟了实车在以一定的车速和方向盘转角进行转向时，遇到路面不平或者轮胎爆胎，导致转向系统受到瞬时冲击力的工况测试。

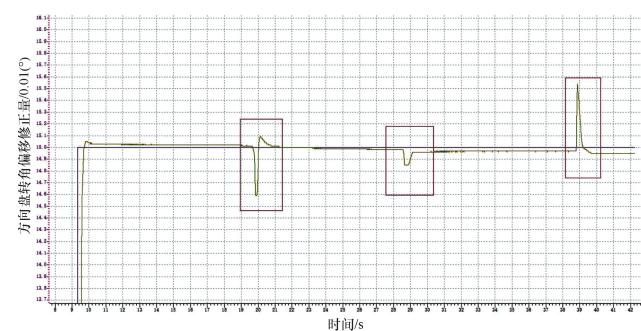


图 7 转向冲击响应曲线

此外，底盘性能测试还需要对转向系统转向过程进行测试。此测试过程中，信号交互仿真节点需模拟车辆转向操作通信，ADAS 执行转向指令，出入力系统根据输入的转向负载曲线，输出对应的载荷。ADAS 模型输入  $1^\circ/\text{s}$  的方向盘转速，如图 8a 所示，出入力系统按测试需求给转向机构注入载荷，转向电动机转矩输出曲线如图 8b 所示。为了方便观测，对坐标系进行了放大，纵轴每单位的物理量为  $0.01\text{N} \cdot \text{m}$ 。图 8c 和图 8d 所示则是对应  $50^\circ/\text{s}$  转角转速输入和相应的转向电动机转矩输出曲线。

#### 3.2 制动系统出入力测试

##### 3.2.1 制动系统出入力分析

车辆在道路上行驶时，需克服来自道路的滚动阻力、来自空气的空气阻力、因道路坡度而产生的坡道阻力以及因加速运动产生的惯性力，其受力分析如图 9 所示，图中符号含义见表 1。

表 1 车辆受力分析符号含义

符号	描述与单位
$g$	重力加速度/( $\text{m}/\text{s}^2$ )
$\beta$	坡道角度/rad
$m$	整车质量/kg
$h$	质心高度/m
$a, b$	前、后轴到质心的距离/m
$V_x$	车辆纵向速度/( $\text{m}/\text{s}$ )
$V_w$	风速/( $\text{m}/\text{s}$ )
$n$	前后轴的轮胎数
$F_{xf}, F_{xr}$	前后轮胎接地中心的纵向力/N
$F_{zf}, F_{zr}$	前后轮胎接地中心的法向力/N
$A$	迎风面积/ $\text{m}^2$
$C_d$	空气阻力系数
$\rho$	空气密度 ( $\rho = 1.18\text{kg}/\text{m}^3$ )
$F_d$	空气阻力/N

对车辆受力进行坐标系分解，可以得到装车状态下，底盘系统的受力见表 2，由于车辆重心到前后轴距离的差异，前后轮受到的法向力是不同的。

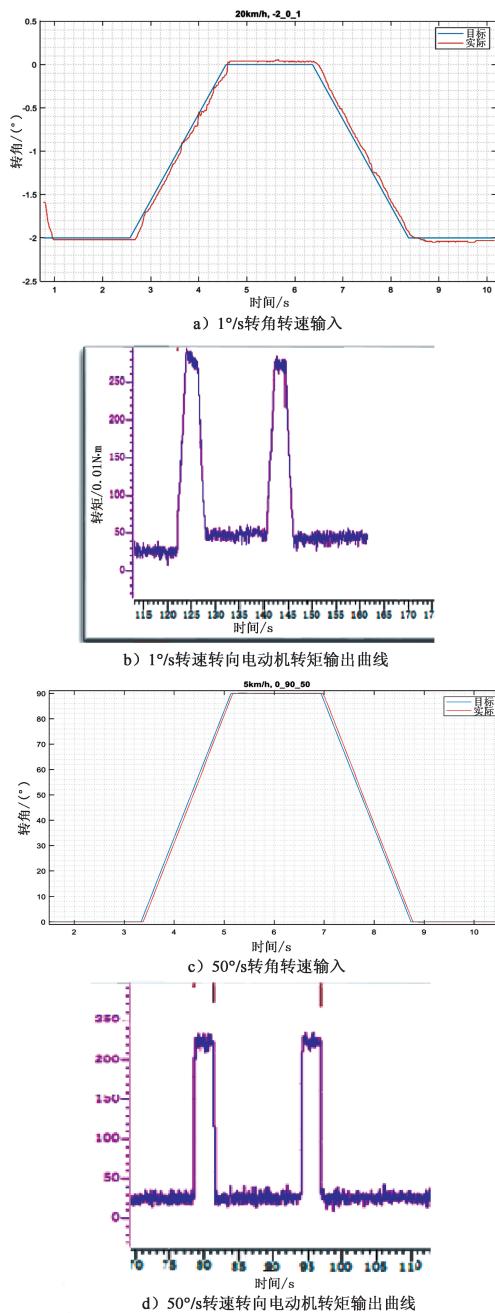


图 8 不同转角变化率负载曲线

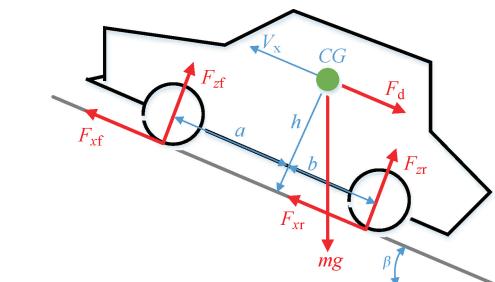


图 9 车辆受力分析

表 2 车辆受力分解

法向	$F_{zf} = \frac{-h(F_d + mg\sin\beta + m\dot{V}_x) + bmg\cos\beta}{n(a+b)}$
	$F_{zx} = \frac{+h(F_d + mg\sin\beta + m\dot{V}_x) + amg\cos\beta}{n(a+b)}$
切向	牵引力 $F_x = n(F_{zf} + F_{zx})$
阻力	$F_d = \frac{1}{2}C_d\rho A(V_x - V_w)^2 \times \text{sgn}(V_x - V_w)$

### 3.2.2 制动系统出入力性能测试

本研究对制动系统性能测试内容主要以 ADAS 功能为主, 如自动紧急制动 (AEB)、自适应巡航 (ACC)、制动能量回收等。

自动紧急制动是车辆主动安全的重要功能之一, 已经成为众多汽车的基本配置。其根据距离传感器, 以及自身的车速信号等决策得到一个主动制动指令, 制动系统主动制动, 实现提前减速, 从而避免追尾等危险情况的发生<sup>[2]</sup>。图 10 所示是模型输入车速为 30km/h 时, 从仿真节点 ADAS 发出 AEB 作动指令, 以减速度 0.1g 作为 AEB 的目标作动强度, 制动系统输出的响应曲线。

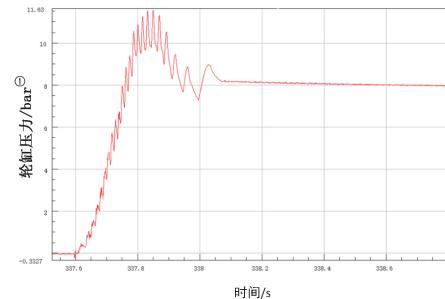


图 10 AEB 轮缸压力响应

制动系统性能评价, 以超出稳定值的部分作为超调量, 以误差第一次达到稳定值的 5%且接下来的误差始终小于稳定值的 5%的时间作为调整时间, 以从稳定值的 10%第一次达到稳定值的 90%的时间作为响应时间。

自适应巡航控制是一种主流的驾驶辅助系统, 其结合了定速巡航系统与车距保持控制功能。图 11 所示是模型输入车速为 50km/h 时, 从仿真节点 ADAS 发出 ACC 作动指令 (包括作动模式、目标减速度), 以减速度 0.1g 作为 ACC 的目标作动强度, 系统接收到作动指令执行相应动作时制动系

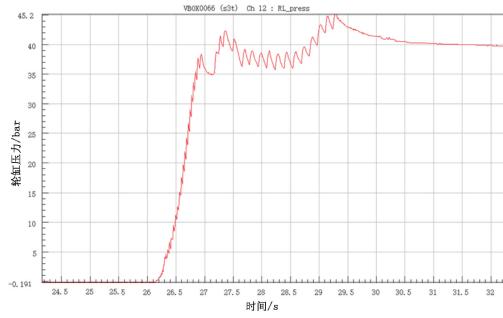


图 11 ACC 轮缸压力响应

统的响应曲线。根据实验结果判断，系统在预定操作指令下可以正常作动，并且液压响应正常，在车速低于设定值后，功能自动解除。

制动能量回收工作原理是在制动减速过程中将车辆的一部分动能转化成电能或者其他形式的能量，并将其储存在储能装置中，储存起来的能量也可以通过驱动装置转化为车辆动能<sup>[3]</sup>。为了能够提高能量回收效率，同时不影响车辆驾驶体验，需要制定相对应的能量回收策略，例如在松开加速踏板操作中，基于自适应模糊控制算法的加速踏板再生制动控制策略。在踩下制动踏板操作中，为复合制动系统提出了一个多目标优化的神经网络模型，控制模型被用来优化分配再生制动力和液压制动力，优化能源经济性和制动稳定性<sup>[4]</sup>。在能量回收过程中，根据再生制动力和液压制动力的分配比例，以及最后产生的综合制动力，也是制动系统出入力性能测试的重要指标。图 12 所示是制动系统再生制动测试的可视化测试界面。界面包含加速踏板开度、制动踏板行程、制动轮缸压力、再生制动减速力矩、车轮转速等可视化信息。

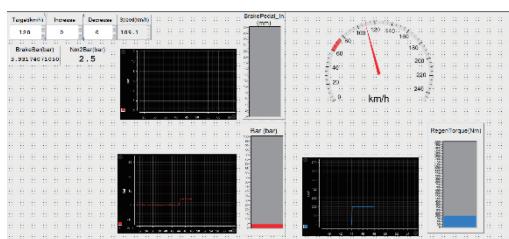


图 12 再生制动可视化测试界面

## 4 测试系统关键技术解析

本文展示的基于 HIL 的底盘性能测试系统的关键，在于对底盘系统的出入力环境搭建，如转向时横拉杆出入力环境、制动过程中的制动力分配等。

### 4.1 转向系统出入力环境模拟

对于转向系统测试的出入力环境模拟，由于实车环境复杂，影响载荷变化的变量参数繁多，进行定量实验测试以及故障排查存在测试结果不准确的可能性。所以在 ADAS 底盘子系统测试过程中，需要通过载荷模拟的方式，把不同工况的载荷曲线导入可编程出入力系统，模拟实际路况输出对应物理负载，进行性能测试，实现精准控制底盘系统工况的环境变量、提高测试的准确度和有效性目的。

如前文所述，模拟负载要求的量程为 0~10kN，输出精度是千分之一，为了能够不影响转向系统的转向动作，载荷模拟的是轮胎的摩擦阻力，要求在输出的同时，可以产生反向位移，最大位移距离 200mm。本文展示的测试系统中，负载模拟采用的是大功率伺服电动机配合相应的减速电动缸方案。图 13 所示是底盘性能测试系统实物。

电动机电动缸的力矩输出方案可以实现定力矩的大功率输出，但是该装置直接力矩输出的精度不能满足测试需求。因此，本系统的负载输出采用了闭环控制。图 14 所示是 PID 闭环控制理论图。图 15 所示是电动机负载输出控制逻辑框图。通过 PID 闭环反馈修正，使得系统输出负载维持在

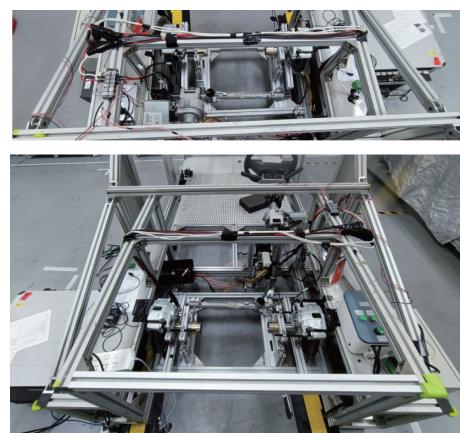


图 13 底盘性能测试系统实物

一个相对稳定的状态，以此提高系统负载输出的准确性和稳定性。

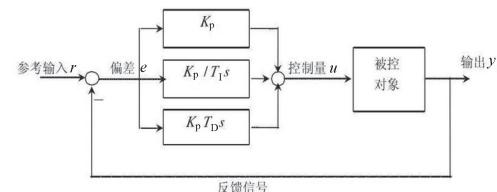


图 14 PID 闭环控制

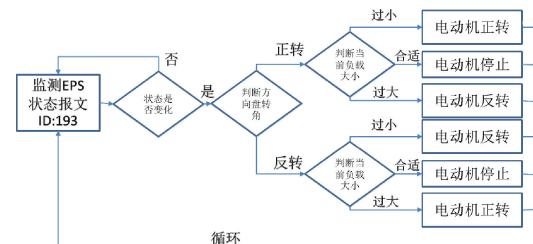


图 15 电动机输出控制框图

### 4.2 制动系统动力环境搭建

制动系统是汽车安全的关键部分，只有接收到准确的触发声作动逻辑条件时，硬件执行系统才能执行相应作动指令，例如发动机状态信息、变速器状态信息、车身状态信息、加速踏板误踩纠正系统状态信息、仪表状态信息、空调状态信息、控制面板状态信息、自动驾驶控制器状态信息、自动泊车控制器状态信息、硬件执行系统状态信息等。图 16 所示是制动系统控制界面。

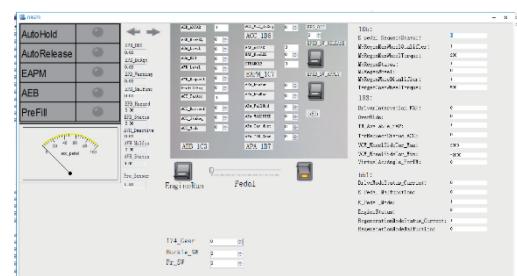


图 16 制动系统控制界面

制动系统正常运作接收的触发动信号，要满足对应的动力学逻辑。所以在制动系统测试过程中，需要引入相应的车路模型，保证制动系统接收到的信号符合车辆动力学模型逻辑。图 17 所示是制动系统测试的车路模型以及 HIL 系统框图。底盘系统的整车动力状态信息由车路模型注入，实现多种不同工况导入，并在动画上进行可视化演示。



图 17 制动系统测试环境框图

## 5 结论

本文展示了一种基于 ADAS 底盘功能测试的底盘出力性能测试系统。通过解读我国“十四五”发展规划，展望汽车行业自动驾驶发展前景，分析自动驾驶技术发展对车辆试验测试、底盘电控性能测试方面产生的影响。

基于自动驾驶 ADAS 功能测试，建立了一套可编程的出力测试系统，该系统可以根据测试的试验环境需要，输出任意负载曲线，满足自动驾驶 ADAS 测试的各类底盘负载测试要求。该测试系统在实际车型开发中得到了应用测试，并且在车型开发前期，完成了底盘控制器相关测试，在前期检出制动校验不匹配、ADAS 车道切换转向失效等问题，减少了整车故障。

## 参 考 文 献

- [1] 杨晔. 浅析无人驾驶汽车线控底盘结构原理与通讯 [J]. 时代汽车, 2022 (23): 157-159.
- [2] 田思波, 何鋆, 郭润清, 等. 自动驾驶汽车自动紧急避撞测试与评价方法研究 [J]. 汽车实用技术, 2019 (14): 42-46.
- [3] 王砾宇, 郭鹏, 徐振宁, 等. 汽车制动能量回收系统研究综述 [J]. 时代汽车, 2023, 402 (6): 105-108, 156.
- [4] HE H, WANG C, JIA H, et al. An Intelligent Braking System Composed Single-Pedal and Multi-Objective Optimization Neural Network Braking Control Strategies for Electric Vehicle [J]. Applied energy, 2020, 259 (Feb. 1): 114172. 1-114172. 14.