重载商用车 VCU 控制器硬件在环测试系统开发

邱　锐，郭献玮，刘　钊，何福臣

（万物工开智慧科技（淄博）有限公司，山东 淄博 255000）

摘要：汽车电子控制技术的快速发展，加之人们对商用车经济性和舒适性的需求，使得汽车电子控制系统的开发变得更加复杂，硬件在环（HIL）测试系统由此应运而生。文章探讨了 HIL 测试技术在重载商用车 VCU 控制器传统开发模式中的应用：HIL 测试技术不仅能提供有效的仿真和测试手段，还能降低开发成本并缩短研发周期，且可对重载商用车的电子控制系统进行全面检验。

关键词：VCU 控制器；硬件在环测试系统；重载商用车

中图分类号：TP273　**文献标志码**：A　**文章编号**：1672－349X(2025)06－0012－07

DOI：10.16160/j.cnki.tsxyxb.2025.06.003

Development of a Hardware-in-the-Loop Testing System for Heavy-Duty Commercial Vehicle VCU Controller

QIU Rui, GUO Xianwei, LIU Zhao, HE Fuchen

(Wankai Intelligent Technology (Zibo) Co., Ltd., Zibo 255000, China)

Abstract: The rapid advancement of automotive electronic control technology, coupled with demand for economy and comfort of commercial vehicles, has made the development of automotive electronic control system more complex. Hardware-in-the-loop (HIL) testing system has emerged accordingly. This paper explores the application of HIL technology to traditional development models of heavy-duty commercial vehicle VCU controller. HIL testing can not only provide effective simulation and testing means, but also reduce development costs and shorten R&D cycles, while enabling comprehensive verification of the VCU electronic control system for heavy-duty commercial vehicle.

Key Words: VCU controller; hardware-in-the-loop testing system; heavy-duty commercial vehicle

0　引言

重载商用车以其强大的运输能力与运输效率对国家经济发展和社会稳定起着至关重要的作用。一方面，它承担着各类物资的长途运输任务，另一方面还能提供大量就业机会。随着汽车电子控制技术的快速发展，加之人们对商

收稿日期：2024－12－24

作者简介：邱锐（1986－），男，山东聊城人，工程师，硕士，研究方向为车辆电控系统开发。

通讯作者：郭献玮（2001－），男，河北广平人，研究方向为汽车控制器的 HIL 测试。

用车的经济性与舒适性的要求越来越高，汽车电子控制系统的开发难度不断攀升[1]。在此背景下，重载商用车 VCU 控制器的开发显得尤为重要。传统汽车控制器的 V 模式开发流程凭借快速、准确、分工明确等优势被广泛应用，目前大部分汽车电子控制系统均基于这一流程来开发[2]。硬件在环（HARDWARE-IN-THE-LOOP，简称 HIL）测试技术是 V 模式开发流程中的关键环节，因而发挥着关键作用，在汽车电子控制系统中更是一种有效的仿真和验证手段[3−5]。该技术是一种被广泛应用于实时嵌入式系统开发的测试技术，本质是“真控制器连接假被控对象”。具体而言，它将部分实际被控对象或系统部件用高速运行的实时仿真模型代替，而控制系统则是实物（真实的控制器硬件），二者连接后构成硬件在环测试系统[6−8]。在实际应用中，硬件在环测试系统可对重载商用车的电子控制系统进行有效“欺骗”，让 VCU 控制器误以为正在控制真实被控对象，进而全面、有效地检验 VCU 控制器的各种功能。本文通过对硬件在环测试技术在重载商用车 VCU 控制器 V 模式开发流程中的应用进行研究，为应用硬件在环测试技术对 VCU 控制器进行开发提供全面深入的功能、故障测试及总线诊断测试，以达到缩短开发周期、降低开发难度的目的，并为相关领域的研究和实践提供理论支持和借鉴。

1　重载商用车 VCU 控制器的通信交互

1.1　整车通信

VCU 控制器是整车控制系统的核心。重载商用车 VCU 控制器与其他控制器交互的信号流向由图 1 所示。VCU 控制器通过 CAN0 与发动机控制器 ECU 进行交互，利用 CAN1 与 AMT 变速箱控制器 TCU 进行交互，与其他控制器或者传感器的报文通信主要通过 CAN2 和 CAN3 进行[9]。

1.2　VCU 针脚与板卡信号配置

VCU 控制器需要通过通信协议与其他系统或设备进行信息交换，从而实现对它们的协调和控制。图 2 是 VCU 控制器的部分针脚配置图，其中主要标注了油门信号、电子节温器信号等控制器针脚配置关系。

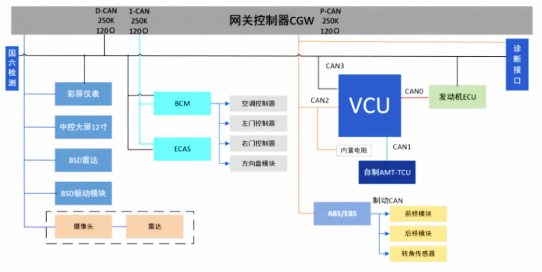

图 1　某重载商用车 VCU 控制器的实车信号交互图

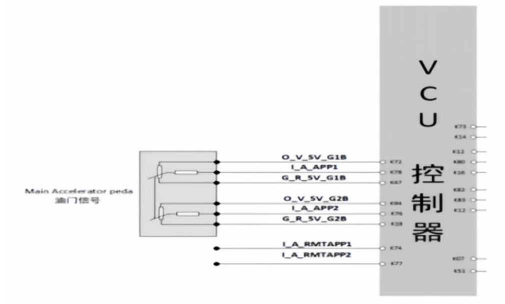

图 2　VCU 控制器部分针脚配置图

由 VCU 控制器的针脚配置图制定板卡信号配置总表，板卡信号配置总表的核心作用在于指导测试台架搭建过程中的电路连接和信号配置，表明 VCU 控制器与测试台架、板卡虚拟传感器信号通道之间的连接关系。板卡信号配置总表分为三大部分：VCU 控制器（包含 VCU 的针脚定义、PIN 针脚序号）、信号箱（BOB 信号箱所对应的线路序列）、板卡信号（含针脚对应的板卡类型、板卡序列等信息）。

1.3　VCU 控制器的 CAN 矩阵信息

VCU 控制器的 CAN 矩阵文件通常用于定义车辆网络中各个 ECU 之间的通信，图 3 所示为 VCU 控制器所对应的 VCAN 通道的 DBC 文件。

2　测试台架硬件的激励测试

2.1　测试台架的硬件构成

本文中的重载商用车 VCU 控制器硬件在环测试系统的硬件部分主要包括：信号板卡模块、上电控制模块、低压故障注入模块、RTPC

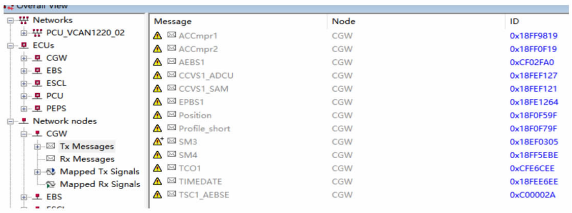

图 3 VCU 控制器的部分 DBC 文件

实时主机模块、RC 模块、台架信号接口模块等。而机柜作为测试台架的物理载体，需要具有良好的散热性能及稳定性和安全性，以确保硬件设备的正常运行。测试台架的实物如图 4 所示。

图 4 测试台架实物组装图

2.2 硬件实时交互与配置

硬件在环测试系统要与 VCU 控制器实现实时测试，在硬件方面其核心在于各类板卡与控制器之间的信号采集以及相关物理信号的输出和 CAN 报文的交互等。本文设计的测试台架通过 LAN 通信与上位机实现交互，将上位机的数据信号转化为被测控制器所需的物理信号，相应地将被测控制器发出的物理信号转化为数据信号发送至上位机以实现人机交互。其中，信号板卡模块是测试台架的硬件核心，本文所用板卡主要有 AD-PWM-IN 板卡、PWM-OUT 板卡、RelayIO 板卡、VCI 板卡。

2.3 激励测试

激励测试是对测试台架硬件进行测试的核心环节，其过程是将特定的模拟或数字信号作为激励信号输入被测设备，同时获得被测设备的响应信号，进而通过分析响应信号或与期望的信号进行对比来刻画被测设备的特性或进行故障判断。如图 5 所示，以第 1 张 Relay-IO 板卡为例，在上位机 VCarEM 软件中根据板卡配置得知第 1 张 Relay-IO 板卡第 1 个通道为 U-Ch1-Relay-outValue。

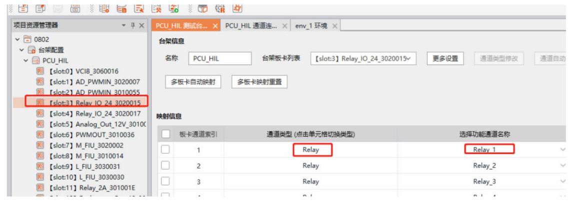

图 5 基于 VCarEM 的 Relay-IO 板卡设置

同时，在上位机 VCarEE 软件界面中调取并设置 IO 通道的状态，其 3 种状态分别为：输入状态为 0，此时电路开路，无信号输出；输入状态为 1，此时电路中控制低电压继电器吸合，板卡的 IO 输出端和地线接通，输出低电平；输入状态为 2，此时电路中控制器高电压继电器吸合，板卡的 IO 输出端和电源接通，输出高电平。在外接的通道 BOB 的针脚上由板卡信号配置总表信息，在 BOB 上分别找到要测量的 IO 通道针脚、地线（AGND）引脚和电源针脚。设置通道状态进行最终的测量和测试，用万用表笔测量相应的通道，并将测量结果与期望结果进行对比。如果实际测量结果与期望结果不一致则需分析原因。表 1 为通道状态所对应的期望结果。

表 1 Relay-IO 板卡激励测试状态表

通道状态	测量方法	期望结果
0	通道和地线的电阻	高阻
1	通道和地线的电阻	0
	通道和电源的电压	电源电压 VREF
2	通道和地线的电压	电源电压 VREF

以上为测试台架硬件激励测试的主要内容，由此可以评估硬件系统在不同工况下的性能表现，如响应速度、精度、适应能力等，为后续的改进和优化提供依据，同时有利于在开发过程中及早解决问题，从而减少修正成本。

3 硬件在环测试软件搭建

3.1 VCarsystem 实时软件系统

本文选用基于 VCarsystem 实时软件系统的仿真测试平台，整个测试过程中各类板卡的信号采集、输出和整车虚拟模型运行均基于此平台进行实时仿真模拟。图 6 为 VCarsystem

实时软件系统平台的界面展示，其中包含测试所需的一系列上位机软件。VCarsystem 实时软件系统实现了基于 Matlab/Simulink 的图形化编程环境和实时操作系统的巧妙结合。

图 6　VCarsystem 实时软件系统平台展示

3.2　整车仿真物理模型配置

本文采用 Matlab/Simulink 搭建整车仿真模型，图 7 为硬件在环测试所需的第三方物理模型解析图，其核心在于整车模块建模和驾驶员模块建模。整车模块中包含据实车的发动机、变速箱、缓速器等构建的物理仿真模型及其相对应的控制器的仿真模型；驾驶员模块包含实车状态下驾驶室内所有人机交互的信号开关。

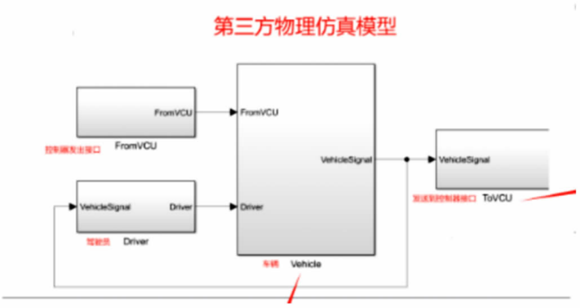

图 7　硬件在环测试所需的第三方物理模型

3.3　基于 VCarEM 的实时仿真环境搭建

虚拟环境的创建直接决定后续测试结果的准确性，实现虚拟仿真模型与实际硬件相互连接是整个 HIL 测试系统中不可或缺的一环。图 8 为基于 VCarEM 创建的部分网络模型，创建过程中需要明确所创建网络节点是处于虚拟状态还是待测状态。

图 8　基于 VCarEM 创建的网络模型

图 9 为 CAN 通信模型的信号连接配置图，要将所有模型的接收、发送通道正确连接，才能确保前后名称一致。

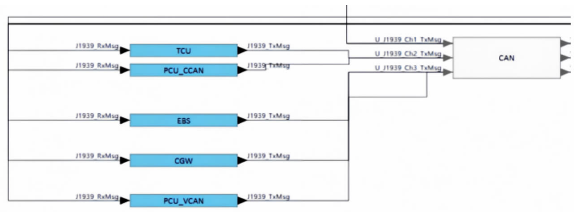

图 9　CAN 通信模型的信号连接配置图

3.4　基于 VCarEE 的实时操作环境搭建

图 10 为基于 VCarEE 针对 VCU 控制器创建的驾驶员平台，该平台能够让测试人员轻松地创建、修改和运行测试序列，其中包含真实环境下驾驶员所能接收、改变的所有数据信息，如油门信号、制动信号、发动机转速、车辆行驶速度、挡位开关、空调开关等一系列真实环境下驾驶员能够发出的指令，从而最大程度还原真实车辆的驾驶室环境，并尽可能做到对被测 VCU 控制器的完美“欺骗”，从而确保测试的真实性、有效性。

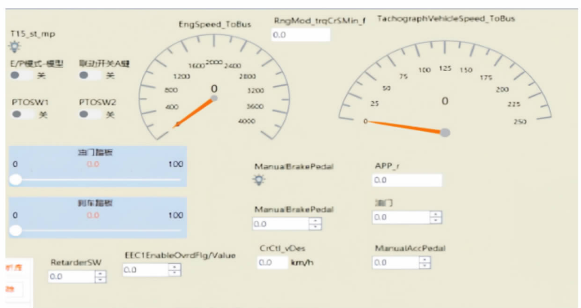

图 10　基于 VCarEE 创建的驾驶员平台(部分)

4　硬件在环测试实验及结果分析

4.1　基于测试工程的开环测试实验

4.1.1　硬件在环测试系统的开环测试

本文的开环测试是基于被测控制器展开的

无反馈测试。基于 VCU 控制器的针脚配置表和信号类型可分为硬线信号测试和 CAN 报文测试两部分，下面将分别对其展开开环测试。开环测试使用的测试用例划分为四级，主要内容包括测试用例的初始条件、测试步骤、输入信号路径、测试现象、输出信号以及测试结果。下面以发动机缸内制动预选开关的硬线信号为例完善此用例的测试内容。

首先，在控制器的针脚配置表中定位该硬线信号。从图 11 可知，发动机缸内制动预选开关的硬线信号对应被测控制器的 K38 针脚。

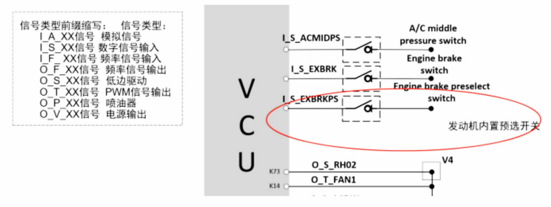

图 11　发动机缸内制动预选开关硬线信号在针脚图中的定位

其次，在已建好的 VCarEM 测试工程内，根据导入的第三方仿真模型，按照 TO-VCU 控制器发送接口中的 HW(硬线信号)模型定位该硬线信号的开关路径，已知开关路径为 EnginBrakePre-Sw。由图 12 可知，可通过测试工程调用物理模型中 TOCAN(仿真模型的输出模块)的 OVldFlg 和 OVldVal 信号作为信号控制。

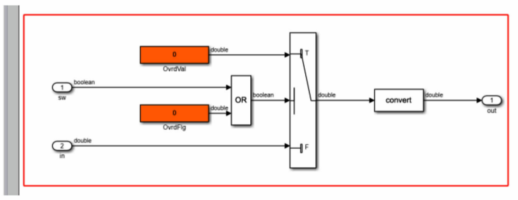

图 12　发动机缸内制动预选开关硬线信号的仿真模型内部逻辑图

最后，由信号配置总表可知，此硬线信号传输所用板卡类型为 Relay-IO 板卡；由图 13 信号配置总表可知，VCU 控制器 K38 针脚对应 Relay-IO 板卡序列号为 01，通道为 23。

本测试的初始条件为 T15 控制器上电，测试步骤如下。(1)信号状态为 0 时，电路开路，

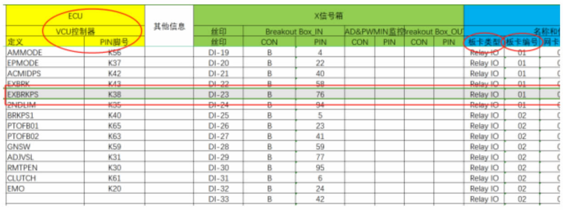

图 13　发动机缸内制动预选开关硬线信号配置总表

无信号输出；内部信号 Ebrk-stebrkPreSwt 是否置 0。(2)信号状态为 1 时，板卡的 IO 输出端和地线接通，输出低电平；内部信号 Ebrk-stebrkPreSwt 是否置 0。(3)信号状态为 2 时，板卡的 IO 输出端和电源接通，输出高电平；内部信号 Ebrk-stebrkPreSwt 是否置 1。

4.1.2　以测试用例为依据的可行性实验

依据开环测试用例展开开环测试，其目的在于核验测试用例的可行性，并检测测试用例的编写内容是否符合要求。图 14 为可行性实验框架图。

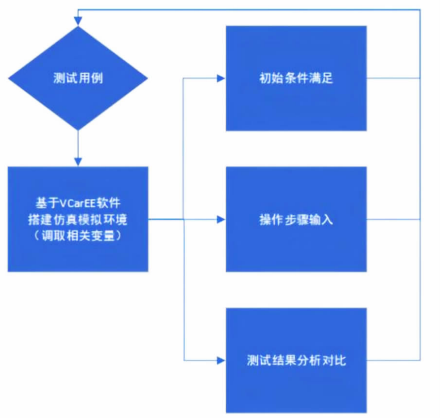

图 14　可行性实验框架图

首先，通过 VCarEE 软件按照测试用例调用测试所对应的输入信号和输出信号，在满足实验初始条件下进行操作步骤的手动输入。其次，采用 INCA 查看控制器内部是否为期望数值。根据 IO-can 双源开关信号列表调用的信号对应控制器内部标量，当 K38 针脚收到高电平信号时，继电器吸合，此时 INCA 内部信号 Ebrk-stebrkPreSwt 置 1 正确，01 序列的 Relay-IO 板卡的 23 通道指示灯亮起。开环测试硬件板卡通道如图 15 所示。

图 15　开环测试硬件板卡通道展示

4.2　VCU 控制器 ECAPU 功能的闭环测试实验

闭环测试是硬件在环测试的核心，其主要关注的是控制器与被控对象之间的交互，重点在于验证控制器在闭环环境当中的功能和性能，主要体现在信号模拟、功能验证、故障测试与预测、安全性与可靠性测试、成本控制以及开发流程规范化等[10]。

图 16 为 ECAPU 功能的测试用例编写系统流程图，其核心功能在于验证测试用例编写的相关内容。

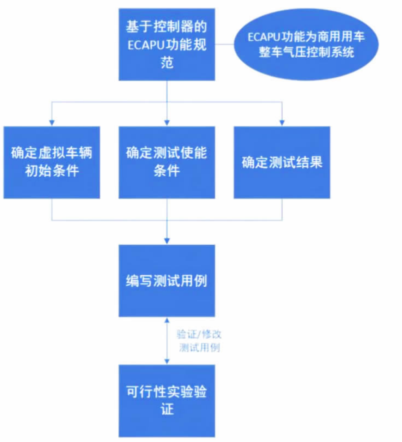

图 16　ECAPU 功能的测试用例编写系统流程图

本文对 VCU 控制器的 ECAPU 功能进行检验，需要明确性能指标、功能需求等关键影响参数，并需确定各参数的影响范围，包括正常实车操作场景、边界条件和极端场景。如图 17 所示，基于 ECAPU 功能设定的部分测试工况测试参数要使用边界值分析、等价类划、思维导图等方法，其中对存在滞回的条件进行验证时，要考虑进行退出再进入或进入再退出的反复验证。

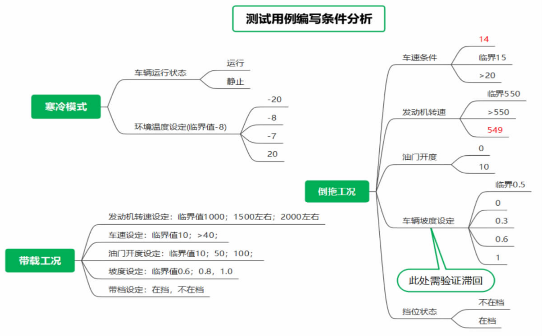

图 17　基于 ECAPU 功能设定的部分测试工况测试参数

图 18 为基于 VCarEE 搭建的 ECAPU 功能测试环境，其中包含 ECAPU 各工况所需的所有输入、输出测试信号和实验数据，以此达到全面测试 VCU 控制器 ECAPU 功能的实验目的，并确保测试过程中能够及时调整测试环境。

图 18　基于 VCarEE 搭建的 ECAPU 功能测试环境

下面针对倒拖工况第 1 条测试用例展开可行性实验。图 19 为倒拖工况第 1 条测试用例的相关内容。每一条测试用例进行可行性实验的步骤基本一致。

用例编号	测试用例概述	序号	用例描述		预期结果	
			测试步骤	输入信号	测试现象	输出信号
01-ECAPU功能						
01-倒拖工况功能						
VCU_01_01_01	车辆启动，手动挡模式，挂5挡，油门开度100%，车辆正常行驶；通过报文模拟发送车速=15，模拟发送发动机转速=550，油门开度设定0，坡度设定-1；车辆ECAPU功能进入倒拖工况模式；					
		1	初始条件，车辆启动，手动挡模式，挂5挡，油门开度100%，车辆正常行驶；	T15_st=1; T100_st=1; AutoManuButton=1; TransCurrentGear_ToBus=5; APP_r=100; Clth_st=1; ECAPU_stOvrRun=0;	ECAPU进入倒拖工况模式	ECAPU_stOvrRun=1;
		2	通过报文模拟发送车速=15	Com_vWhlVehSpd=15		
		3	模拟发送发动机转速=550	Epm_nEng_mp=550		
		4	油门开度设定0	APP_r=0;		
		5	坡度设定-1	Com_rPitchAngle=-1		

图 19　倒拖工况第 1 条测试用例内容

首先，了解倒拖工况第 1 条测试用例的详细内容（包含初始条件、测试步骤以及测试结果）。在对该测试用例具有一定理论认知后，需基于上位机的 VCarEE 平台满足该测试用例的初始条件。大部分测试用例的初始条件都可以

通过仿真的驾驶员平台进行操作设置。如图 20 所示满足的初始条件为：车辆启动，手动挡模式，挂 5 挡，油门开度 100%，车辆进入正常行驶状态。

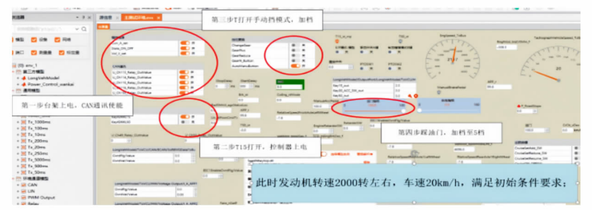

图 20　基于仿真驾驶员平台满足相关初始条件的操作图

其次，按照测试用例中的测试步骤进行相关信号的调整与输入，依据是倒拖工况测试用例的前 3 条，目的是验证坡度设定对倒拖工况产生的影响，因此第 1 条测试用例设定的坡度数据较高，与第 2，3 条形成对比。图 21 所示的操作步骤为：通过仿真模型发送报文车速 15 km/h(此处越过物理模型直接发送报文车速 15 km/h 的原因是，物理模型无法准确控制车速 15 km/h，报文输入控制器控制车速 15 km/h 是最有效、最准确的方法)，虚拟发送发动机转速 550 r/min(越过物理模型直接发送报文的原因同上)，油门开度设定 0，坡度设定−1。

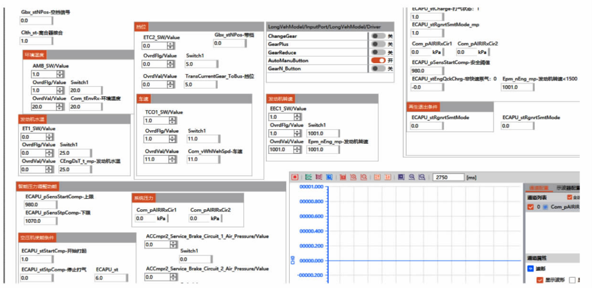

图 21　倒拖工况第 1 条测试用例的相关测试数据输入

最后，测试结果为 VCU 控制器的 ECAPU 功能进入倒拖工况，对应的输出信号 ECAPU-stOVrRun 置 1。

4.3　VCU 控制器油门功能的闭环测试实验

本文搭建的油门功能测试环境可涵盖油门各工况下所需的全部输入、输出测试信号以及实验数据，能够实现对 VCU 控制器油门功能的全面测试，如图 22 所示。

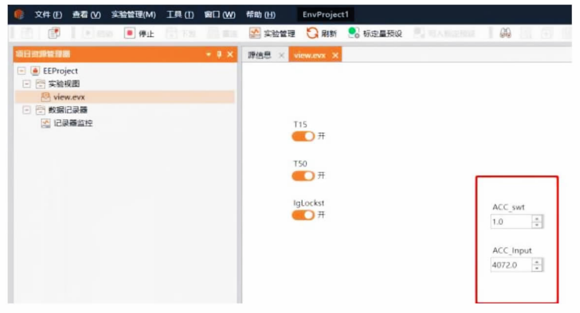

图 22　基于 VCarEE 搭建的油门功能测试环境

基于 INCA 监测的从 VCU 控制器输出的油门变量如图 23 所示。

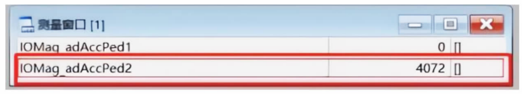

图 23　基于 INCA 监测的油门变量

最后，根据测试用例的要求，用 INCA 监测的油门电压为 4 072 mV，与输入油门开度一致。

以上为 VCU 控制器中 ECAPU 功能倒拖、油门功能工况的可行性实验，充分展现了硬件在环测试中测试用例设计规范的重要性，即直接影响后续测试过程的最终结果。

5　结论

(1)确定了重载商用车 VCU 控制器硬件在环测试系统的设计方案；对硬件在环测试系统的硬件部分进行设计，并确定硬件在环测试的工作原理；对测试台架的各个模块进行设计，并对组装好的测试台架进行激励测试，确保测试台架的性能参数达标。

(2)针对整个 VCU 控制器硬件在环测试系统进行了开环测试与闭环测试，编写了针对 VCU 控制器各功能的测试用例，并对测试用例进行了可行性实验，确保了测试用例的可靠性。

参考文献：

[1]　陈育彬.电动汽车整车控制器的检修[J].汽车维修与保养，2024(3)：44－46.(下转第 28 页)

多维特征空间,以增强相似设施的区分度;二是开发基于注意力机制的特征补偿模块,针对性提升局部残缺区域的表征能力;三是探索对比学习等自监督方法,突破有限标注样本对模型泛化性能的制约。

参考文献:

[1] 潘翔. 基于深度学习的道路场景典型地物分类研究[D]. 焦作:河南理工大学,2023.

[2] 胡舒. 基于车载 LiDAR 点云的城市道路两侧典型地物分类[D]. 武汉:武汉大学,2021.

[3] 李佳佳. 基于深度学习的车载 LiDAR 杆状地物点云分类研究[D]. 焦作:河南理工大学,2022.

[4] 普东东. 基于 LiDAR 点云数据的道路场景分类研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2022.

[5] 龙安洋. 基于车载激光点云的道路目标分类方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2023.

[6] WANG Y, BAI G, LIU H, et al. A PointNet++model with transformer network for pedicle segmentation[C]//东北大学,中国自动化学会信息物理系统控制与决策专业委员会. 第 34 届中国控制与决策会议论文集(4),2022:6.

[7] 李松,张安思,伍婕,等. 基于 PointNet++的邻域特征增强点云语义分割方法[J]. 激光杂志,2024,45(7):174-179.

[8] YOUNGH A S, KYUNGWAHN S, DONGCHEON L. Semantic segmentation and building extraction from airborne LiDAR data with multiple return using PointNet++[J]. Applied sciences,2022,12(4):1975.

[9] JIA I W, GAO H Y, ZHANG P R, et al. Multispectral LiDAR point cloud classification using SE-PointNet++[J]. Remote sensing,2021,13(13):2516.

[10] 龚国栋,李耀斌,花向红,等. 一种探讨点云深度学习决策的 PointNet++解析网络[J]. 测绘地理信息,2022,47(6):50-54.

(责任编校:白丽娟)

(上接第 18 页)

[2] 张智琳,王家富,李国兴. 基于 V 型开发模式的 FSAE 赛车传动系统开发[J]. 汽车实用技术,2024,49(1):75-80.

[3] 王迅佳. 构建针对车载汽车电子控制装置的硬件在环仿真测试平台[D]. 上海:上海交通大学,2012.

[4] CURIEL-RAMIREZ A L, RAMIREZ-MENDOZA A R, IZQUIERDO-REYES J, et al. Hardware in the loop framework proposal for a semi-autonomous car architecture in a closed route environment[J]. International journal on interactive design and manufacturing (IJIDeM), 2019, 13 (4): 1647-1658.

[5] TRAPH NER P, OLMA S, KOHLSTEDT A, et al. Hardware-in-the-Loop simulation for a multiaxial suspension test rig with a nonlinear spatial vehicle dynamics model[J]. IFAC papers on-line,2019,52(15):109-114.

[6] 易高. 基于驾驶模拟器汽车电子稳定程序的硬件在环仿真系统[D]. 长沙:湖南大学,2007.

[7] 黄胜龙. 汽车发动机 ECU 的自动化 HIL 仿真测试平台的研究与实现[D]. 长春:吉林大学,2013.

[8] 刘灵. 硬件在环(HIL)技术在动力集成开发中的应用研究[J]. 汽车零部件,2018(8):84-87.

[9] 陈元平. 浅谈电动挖掘机数字化施工技术原理与应用[J]. 工程机械与维修,2023(4):47-49.

[10] 刘宏波. 基于 CANoe 的车身网络通信设计[J]. 机电工程技术,2012,41(2):1-4.

(责任编校:白丽娟)