

# 市域 D 城际动车调试试验台的设计与试验

张宇昕<sup>1</sup>, 张丽芳<sup>1\*</sup>, 张春光<sup>1</sup>, 杨 硕<sup>1</sup>, 毛 俊<sup>2</sup>

(1. 大连交通大学 自动化与电气工程学院, 辽宁 大连 116028;

2. 大连科技学院 交通与电气工程学院, 辽宁 大连 116036)

**摘要:**160 km/h 动力集中动车组安全舒适、编组灵活, 是我国现有普速线路上运营的主型车。目前动车组出厂前是通过连接车端的简易工装完成测试工作, 测试结果通过人工在纸质文件上进行记录, 数据不能自动保存且无法保证数据的客观准确性和可追溯性。采用 SpringBoot + Vue 框架和基于 arm 的嵌入式技术设计了一套智能调试试验台, 通过软件控制模拟连挂车辆的 IO 测试信号, 完成车端硬线信号测试; 通过模拟车电信息集中单元, 采集并解析以太网数据对硬线信号辅以网络状态判定, 实现车辆出厂前的全部单车试验, 同时能够进行调试数据的存档、查询和自动生成测试报告等功能。通过对某主机厂的 160 动车进行实测, 调试效率大大提升, 调试数据实时保存, 是列车调试阶段数字化改革和创新的重要尝试, 同时对高铁、城轨车辆的单车调试具有重要的借鉴意义。

**关键词:**动力集中动车组; SpringBoot; 嵌入式; 车电信息集中单元; 以太网

**中图分类号:**U266.2

**文章编号:**1000-0682(2024)02-0106-07

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.019

## Design and test of commissioning test bed for city D intercity dynamic train

ZHANG Yuxin<sup>1</sup>, ZHANG Lifang<sup>1\*</sup>, ZHANG Chunguang<sup>1</sup>, YANG Shuo<sup>1</sup>, MAO Jun<sup>2</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Liaoning Dalian 116028, China;

2. School of Traffic and Electrical Engineering, Dalian University of Science and Technology, Liaoning Dalian 116036, China)

**Abstract:**The primary type of vehicle operating on the existing general-speed lines in China is the 160 km/h power centralized rolling stock, which is secure and comfortable with flexible grouping. Currently, before leaving the factory, the rolling stock is connected to the vehicle end of the simple tooling to complete the test work, using the buttons and indicators to simulate the IO signals connected to the vehicle. The test results are manually entered on paper documents, however, making it impossible to guarantee the data's objectivity and traceability. This paper uses the SpringBoot + Vue framework and arm-based embedded technology to design a set of intelligent debugging test benches, which simulates the IO test signals of the connected vehicle under software control and completes the testing of hard-wired signals at the end of the vehicle. Through the simulation of the vehicle electrical information centralized unit, collects and parses the Ethernet data on the hard-wired signals to supplement with the network status determination. Additionally, it has the ability to archive, query, and automatically create test reports from the debugging data. The debugging efficiency is significantly increased through the actual testing of 160 dynamic vehicles from a host factory, and the debugging data is saved in real time. This represents a significant attempt at digital reform and innovation in the debugging stage of the train, and it also serves as a significant point of reference for the single-vehicle debugging of high-speed rail and urban rail vehicles.

**Keywords:**power-centralized rolling stock; springboot; embedded; vehicle electrical information centralization unit; ethernet

## 0 引言

收稿日期: 2023-10-26

第一作者: 张宇昕(1999—), 女, 河北卢龙人, 硕士研究生, 研究方向为综合自动化与先进控制技术。

时速 160 千米动力集中动车组是铁路运输的重要运载工具, 能够提高普速线路旅客出行的舒适性

和安全性,构建完整的客运产品体系。在列车投入运行前,需要通过调试对各系统功能进行验证与调整,以确保列车的性能、可靠性和稳定性符合要求。然而一列车具有上万多个试验项点,调试过程数据量庞大,流程复杂,对于操作人员来说,还需要人工录入测试结果,打印多页纸质文件,耗费大量的人力和物力<sup>[1]</sup>,不能满足当前 160 km/h 动力集中动车组检修基础设施的要求。

文献[2]设计了一款通过 MVB 车辆总线和单车建立网络通信的智能调试设备。文献[3]对动集动车组网络做出进一步优化,将拖车、动力车和控制车中的 MVB/LonWorks 网关升级为 ETH/MVB + ETH 网关,动集动车组的安全及监测信息采用 ETH 一体化设计,解决全列网络系统架构给运用检修带来的不便。该文在上述优化后的网络系统基础上,采用 SpringBoot 和 Vue 相结合的前后端分离框架,设计了一款调试试验台,能够模拟车电信息集中单元 VECU 实现列车网络控制,模拟连挂车辆的 IO 测试信号实现列车硬线控制,实时快速监测错误数据,实现列车部分重要功能的调试试验。为方便操作人员开展调试工作,增加了人机交互触摸显示系统,可以采用手持终端在车厢内随意移动,实时对被测车辆进行调试。市域 D 城际动车调试试验台的开发设计,保证了数据录入的准确性和规范性,提高车辆调试整体产品质量,为后续数字化调试奠定了物质

基础和技术基础。

## 1 调试系统整体设计

### 1.1 动车组网络拓扑结构

根据运营需求,160 动力集中动车组具有长编组、短编组和灵活编组 3 种形式,短编组由动力车、拖车及控制车组成,可采用连挂方式重联运行<sup>[4]</sup>。单车调试阶段主要涉及到控制车、拖车和二等座车/餐车,每种车型内均设有车辆电气监控系统和行车安全监控系统。车辆电气监控系统由车辆控制单元、供电系统、电源装置、轴温、烟火、塞拉门、防滑器和车厢监控屏等组成。行车安全监控系统实时监测故障进行防范,对于列车的安全稳定运行有着关键性的作用。

列车网络控制系统拓扑如图 1 所示。控制车内设有交换机,采用 ETH 方式实现 TCDS 与网络控制系统通信。餐车的车电集中单元 VECU 接收到拖车通过车辆电气监控系统收集到的烟火、塞拉门、轴温、供电等子系统信息,数据经整合后被传送至列车控制、监测与诊断系统 TCDS<sup>[5]</sup>。各行车安全监控系统采集的信息通过 TCDS 主机交由列车级主机,经处理后发送到集中信息显示屏,最后传递给控制车的 MVB/ETH 网关,运用无线通信技术,实现对拖车运行状态的监视和工况的控制。

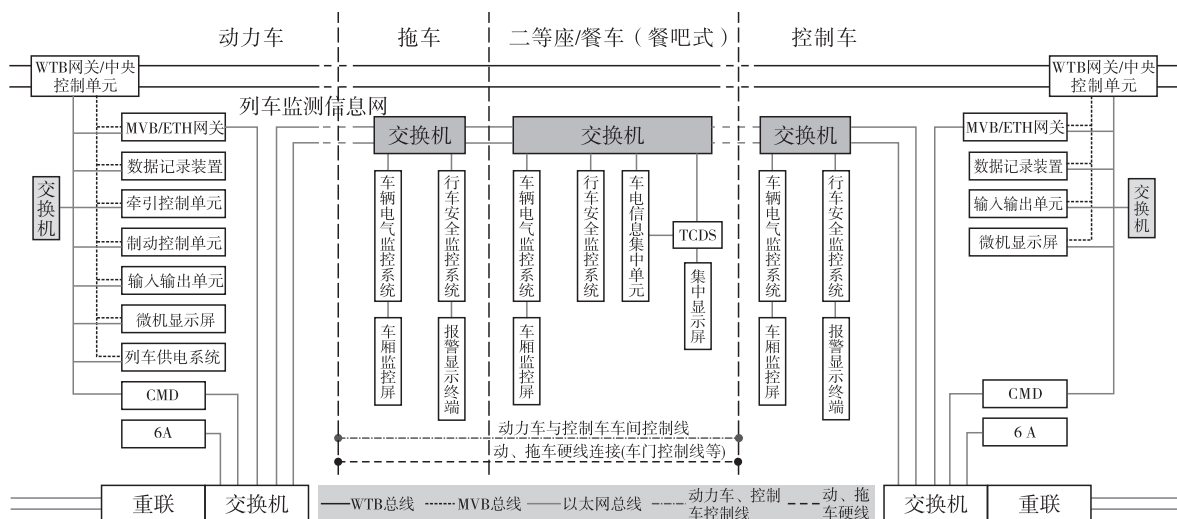


图 1 160 动集网络拓扑图

### 1.2 调试系统架构

市域 D 城际动车调试系统整体结构如图 2 所示,由测试主机、配套连接器连接线、供电电源线等组成。人机交互触摸显示系统通过无线连接至测试

主机,负责测试动作的显示、执行、确认及数据记录。配套连接器将调试试验台和待测单车车体相连,模拟被测车体两端控制线实现与车辆的硬线连接。输入输出模块 IOM 通过以太网或 WIFI 模块与操作主

机进行通信,借助无线路由器实现上位机的实时双向数据传输,模拟待测单车的车电信息集中单元 VECU 实现网络通讯连接<sup>[6]</sup>。

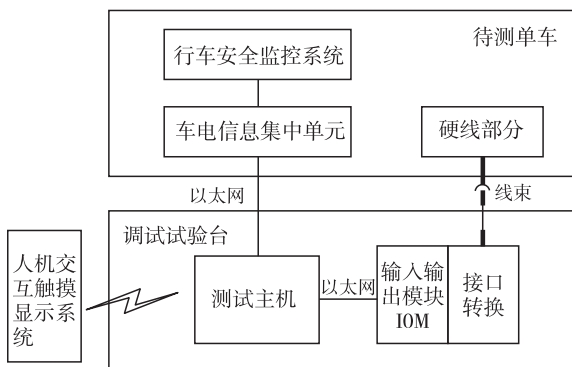


图2 系统结构图

系统主要完成的功能包括:实时监测并控制现场硬线、网络数据;用户通过操作页面对动车组部分重要功能进行调试试验;实现无纸化留档记录,能够自动录入各项功能测试结果并生成测试报告。调试试验台遵循开放的软件体系架构,支持采集不同数据源的数据,并对其进行分析提取,设计满足系统所需功能的用户界面,方便故障人工诊断分析。

## 2 调试系统硬件设计

### 2.1 功能架构

该系统硬件部分使用输入输出模块 IOM,与操作程序界面连锁进行程序控制,按照设定逻辑要求输出。采用 ARM 架构的中央处理器直接控制 DI、DO 接口电路<sup>[7]</sup>,使设备具有实现自动操作和测量功能。

输入输出模块 IOM 通过内部 CPU 单元实现有线与无线两种方式的数据共享,具有以太网及 RS485 通讯串口的同时,增加了无线 WIFI 传输方式。其功能模块布局如图 3 所示。

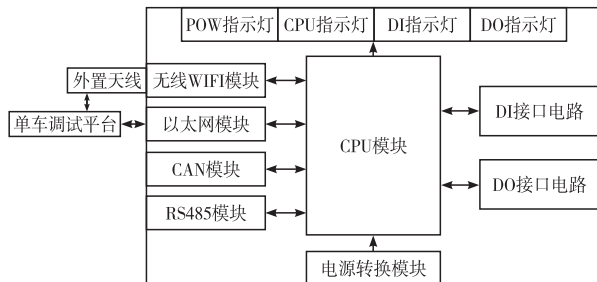


图3 输入输出模块 IOM 布局图

### 2.2 DI 和 DO 通道设计

数字量输入输出接口电路是实现输入输出模块 IOM 与车辆交互的关键部分,每个输入输出模块控制

单元拥有两组 40 个数字量输入输出调试端口,主控芯片通过 I<sup>2</sup>C 总线连接拓展芯片,外接两个 5.1 kΩ 的上拉电阻拉至高电平。输入输出模块的每个通道都串接自恢复保险丝、熔断器和压敏电阻,能够在电流较大时自动切断电路,实现对后续电路的保护。

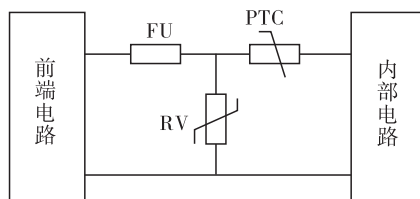


图4 通道保护电路图

市域 D 城际动车调试试验台可以通过线缆连接到单车的控制插头,模拟列车车间连挂,实现部分子系统硬线的控制及状态监测。各测试分项关联通道统计如表 1 所示。

表 1 控制连接器功能通道统计

序号	测试分项	关联 DO 数量	关联 DI 数量
1	开关门测试	7	8
2	安全环路测试	2	5
3	停放制动测试	2	2
4	全半灯测试	2	2
5	供电允许测试	3	3
6	压力波测试	1	1
7	110V 绝缘测试	0	1
8	电源控制	5	1
9	合计	22	23

## 3 调试系统软件设计

### 3.1 软件架构

系统采用便于部署维护的 B/S 架构,遵循 MV-VM 设计逻辑将软件架构分为 6 层,如图 5 所示。单独部署前后端项目,通过接口传递数据,实现应用的解耦合,提升系统性能。使用易于管理的 MySQL 数据库存储数据,具备高扩展性,为后台数据操作提供持久化平台。

后端架构包括数据持久层、业务逻辑层和控制层,使用 SpringBoot 框架快速构建基于 Maven 管理的项目,通过 http 协议请求 Web 层完成业务处理。数据持久层采用 MyBatis 中 Mapper 接口或 XML 映射文件与数据库进行交互,依靠 druid 连接池对数据进行增删改查;控制层通过 SpringMVC 接收客户端请求,结合前端传来的数据调用业务层进行业务逻辑处理,实现系统权限管理、功能测试等核心业务<sup>[8]</sup>。

Web 前端采用轻量级框架 Vue 构建单页面应用的用户交互界面,使用 Vue - cli 脚手架来快速创建项目<sup>[9]</sup>。超级管理员和操作员通过不同终端设备访问视图层,登陆页面后,通过封装的 Axios 与服务端后端进行 POST、GET 等请求参数的通信<sup>[10]</sup>,完成对各项功能数据状态监测、生成测试报告等操作。

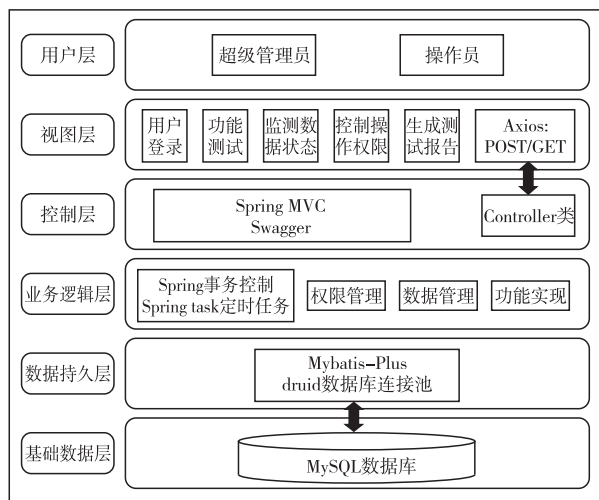


图 5 系统技术架构图

### 3.2 系统功能模块设计

市域 D 城际动车调试系统主要功能需求包含如下内容:

(1) 权限管理:实现对不同角色的访问、操作权限进行分级管理和控制,系统管理员账号可以控制不同用户对所有接口的访问权限。

(2) 硬线数据:设计程序界面实时显示输入电平情况,根据功能逻辑进行显示分区,可快速查看硬线状态。硬线 DO 输出应具备维护并强制输出功能,方便故障诊断与线路排查。

(3) 网络数据:需匹配网络协议及数据底层,实现网络数据正确解析、显示与发送。数据解析后按照功能块进行整合显示,具备不同状态下数据点的不同色块显示,快速判断监测错误数据。

(4) 工步管理:统计测试功能所需的所有工步信息并对其实现增删改查操作,能够为工步分配对应的数据点。

(5) 数据管理:自动读取数据库中所有硬线数据和网络数据的信息,可以通过类型对数据模糊查询,具有增添、删除、修改功能。

(6) IOM 管理:具备当前连接 IOM 的启动和停止功能,提供弹窗页面判断 IOM 连接状态。

(7) 功能测试:具备手动测试功能,按照功能块人工选择测试项点,通过点击具体点位来发出控制指令,根据操作界面中给出的当前功能合格条件判断是否合格。

(8) 测试报告:根据各项功能实时确认结果自动生成测试报告,具备保存功能,方便后续问题的查找与分析。

结合上述功能需求分析,将系统功能划分为权限设置、数据一览、数据管理和功能测试四大模块。系统功能架构如图 6 所示。

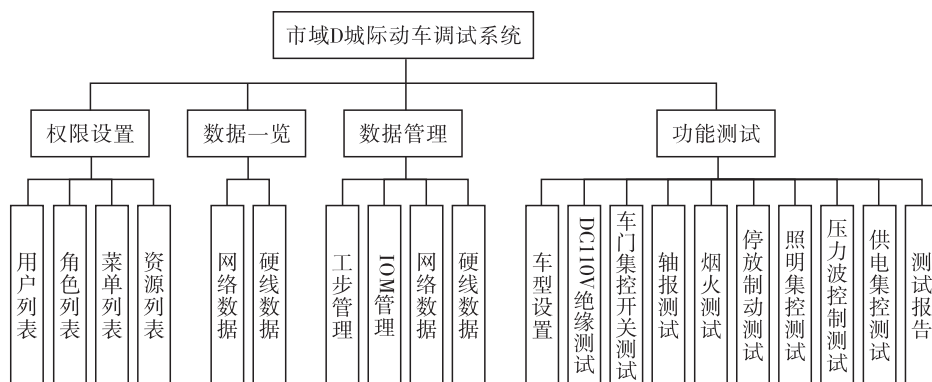


图 6 系统功能模块设计架构图

### 3.3 数据库设计

该系统针对功能测试模块,设计了大量工步信息,为了保证数据的完整性和安全性,采用现阶段最受欢迎的开源数据库 MySQL 进行系统的数据存储。

基于第三范式原则设计数据库表结构<sup>[11]</sup>,共建立 16 张表,主要表的详细信息见表 2,各实体间的关系如图 7 所示。



表 2 数据库主要表信息

序号	表名	详细信息
1	工步信息表	存有功能测试需要的全部工步信息(工步、要求、操作、条件等),通过 Id 与系统菜单表产生关联
2	硬线数据表	存有列车的全部硬线数据(位置、针位、类型、字偏、位偏等),通过 Id 与工步信息表产生关联
3	网络数据表	存有列车的全部网络数据(变量名、类型、端口、字偏、位偏等),通过 Id 与工步信息表产生关联
4	系统用户表	存有所有用户的基本信息(用户名、密码、邮箱等),用字段 status 区分账号启用状态, status = 0 为禁用, status = 1 为启用
5	用户角色表	存有用户对应的所有角色信息(名称、后台用户数量、创建时间等)
6	系统菜单表	存有所有菜单信息(菜单名称、级数、前端隐藏等),用字段 has_children 区分是否包含子节点, has_children = 1 为是, has_children = 0 为否

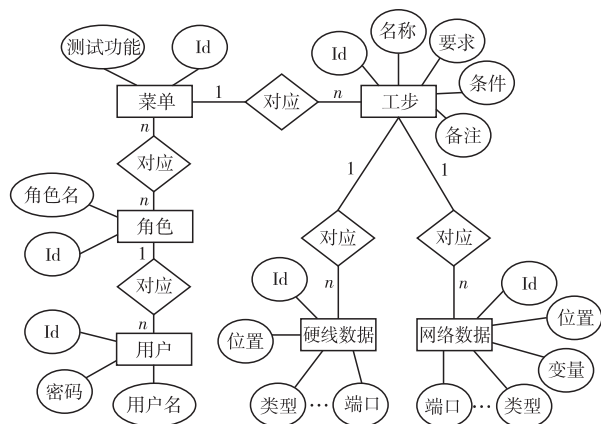


图 7 系统数据库 E-R 模型图

### 3.4 接口设计

#### 3.4.1 输入输出模块通信协议

输入输出模块 IOM 通过开关量状态报文和开关量控制报文向软件平台传输数据,设备与软件之间的传输层采用高可靠性的 TCP 协议,在数据链路层通过三次握手来建立面向连接,将数据分成多个包后进行数据传输,收发频率和应答方式按需求设定。自定义输入输出模块的通信报文,保障通讯安全,提高交互实时性,其结构如表 3 所示。

表 3 输入输出模块通信报文定义结构

帧的组成	字节数
帧头 1	1
帧头 2	1
生命信号	1
数据长度	1
数据内容	由数据长度决定
帧尾 1	1
帧尾 2	1
SUM	1

帧头 1 定义状态报文为 0x52,控制报文为 0x43;帧头 2 定义状态报文为 0x50,控制报文为 0x46;生命信号分配 1 字节,循环从 0 至 F 的计数;每一帧状态报文和控制报文的数据长度均为 95 个字节,数据内容长度为 88 个字节,每个单元为 22 个字节;帧尾 1 为回车字符 0x0D;帧尾 2 为换行字符 0x0A;报文接收端对接收报文的帧头 1 至帧尾 2 的数据进行累加,并校验是否与发送来的原报文 SUM 一致<sup>[12]</sup>。

#### 3.4.2 列车网络数据通信协议

该系统通过无需连接的 UDP 协议,采集并解析以太网数据,实现对列车网络数据状态的监测。报文格式适用于车电网络数据,定义结构如表 4 所示,每个数据帧大小共计  $n + 10$  个字节,对于两个以上字节表示的数字,采用小端模式存储与传输。

表 4 列车网络数据通信报文定义结构

帧的组成	字节数
报文头	2
生命信号	1
类型	1
有效长度	2
过程数据	由数据长度决定
校验码	2
报文尾	2

在实际通信过程中,分配 2 字节 0xAAAA 作为报文头;1 字节为生命信号,循环使用,每发出一包不同数据就加 1;1 字节为类型,接收报文时为 0x41,发送报文时为 0x46;2 字节为有效长度;2 字节为校验码,校验前所有字节的 CRC16 校验;2 字节 0xB BBBB 作为接收报文的报文尾,0xCCCC 为发送报文的报文尾。过程数据实际请求的字段内容,会根据命令定义的具体格式分别记录于  $n$  个单字节字段之中。

## 4 调试平台测试

调试平台系统测试分为实验室测试和现场联调。实验室测试需要利用开关和指示灯等硬线测试工装对控制线束进行测试,将采集到的单车数据按

照适用于车电网络数据的协议重新编译,通过有线以太网传给测试主机,实现网络数据的收发测试,其硬件架构如图 8 所示。现场联调则是通过专用适配线缆将柜体与待测车辆相连,实现对系统各功能的测试,确保性能安全稳定运行。

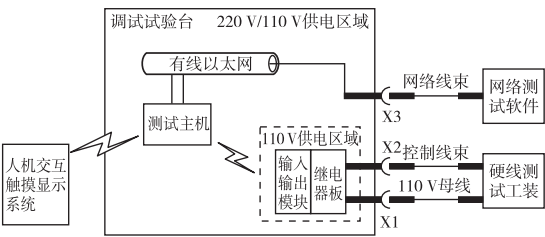


图 8 功能测试硬件架构图

4.1 实验室测试

实验室测试包括控制线束的硬线输入输出测试和网络线束的数据输入输出测试。测试时利用试验台内有线 IP 地址与网络测试机组成有线局域网,模拟车辆的网络环境;利用无线 IP 地址和输入输出模块的无线 IP 地址,与人机交互触摸显示系统组成无线局域网,实现交互作业。

试验台采用航空插头接通 220 V 电源,通过操作电源正端子排点是否闭合来验证与设备对应模块间接线是否正常,将 220 VAC 转 110 VDC 电源后,进行列车各项功能调试试验。其中,车门系统作为高速动车组的重要组成部分,承载着乘客上下通行的主要功能<sup>[13]</sup>,图 9 为开一位侧左门功能的测试流程图,其他功能测试与其类似。

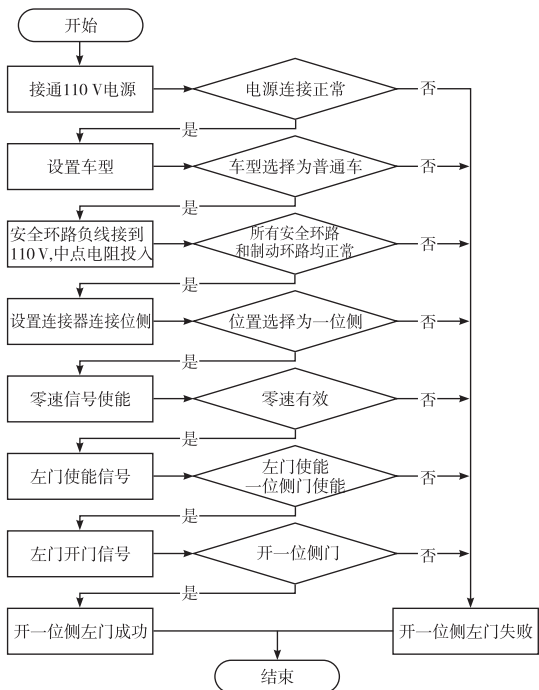


图 9 开一位侧左门流程图

在测试过程中,通过手动操作页面上 DO 点按钮来控制该条线路加电,观察对应 DI 点状态是否随之发生变化,软件操作界面如图 10 所示。



图 10 软件操作界面

该功能涉及的 DI 通道详细功能见表 5,IOM 实际亮灯状态如图 11 所示。根据操作界面中给出的合格条件,判断该功能是否合格,实时更新确认结果并自动生成测试报告,为操作人员提供便利。

表 5 开一位侧左门功能 DI 通道

通道	功能	是否为 1
DI1	1 = 左门使能	是
DI3	1 = 110 V 电源正常	是
DI5	1 = 一位侧门使能	是
DI7	1 = 开一位侧门,为脉冲信号	是
DI9	1 = 零速有效	是
DI11	1 = 轴报安全环路正常	是
DI12	1 = 火灾安全环路正常	是
DI13	1 = 制动安全环路正常	是
DI22	1 = 中点电阻投入	是
DI24	1 = 停放制动环路正常	是



图 11 一位侧左门开门 IOM 亮灯状态

测试结果表明,IOM 实际亮灯状态和控制连接器功能设计要求完全一致,验证了市域 D 城际动车调试试验台功能的正确性和可靠性。

4.2 现场联调

现阶段对市域 D 城际动车调试试验台进行了两次完整的连车测试,利用单车 YZ71(昆)模拟普通车,单车 CB06(青)模拟餐车。柜体采用 220 VAC 和 110 VDC 供电的互斥空气开关,以实现普通车/餐车两种模式的供电切换。测试时先对网络数据进行抓包监视,观察网络数据能够正常接收后,再进行

硬线信号测试判断。试验结果表明普通车和餐车的各项功能均正常运行。



图 12 现场连车测试

## 5 结论

市域 D 城际动车调试试验台在出厂前完成了实验室测试,并在运抵现场后进行了两次完整的连车功能测试,其硬线功能和网络功能均实现了预期目标。调试试验台涉及到通信协议的制定、数据接口的沟通等多个方面,通过自开发上位机软件,采集并解析列车数据,在操作界面实时显示通信数据和控制状态,避免重复操作和测试过程中产生的人为误差,把工艺平台、物联网、智能调试设备有机地整合到一起,具有创新性,且有较好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 王伟,矫德余,李哲,等. 160 km/h 动力集中动车组动力车通信数据联调试验台研究[J]. 智慧轨道交通, 2023, 60(02): 15-20+44.
- [2] 党聪,刘洋. 标准动车组单车网络智能调试设备设计与应用[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(08): 1-3+6.
- [3] 刘威. 时速 160 km 动力集中动车组网络控制系统优化[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(01): 80-84.
- [4] 田向阳. 动力集中型动车组运用检修模式及检修设施设计[J]. 机车电传动, 2021(02): 19-25.
- [5] 陈波. 国外动力集中动车组网络系统的发展与借鉴[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(01): 7-14.
- [6] 孙盼盼. 基于以太网的列车通信网络承载业务建模与性能监测[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [7] 万伟军. Python 在智能 IO 模块上的应用[J]. 通信电源技术, 2019, 36(03): 97-98.
- [8] 贾黎,刘忠超,李英玲. 基于 SpringBoot + Vue 新冠疫苗接种全过程管理系统[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2022, 48(02): 181-189.
- [9] 郭建卫. 基于 SpringBoot + Mybatis + Vue 的学生德育量化考核系统设计与实现[J]. 现代信息科技, 2023, 7(01): 18-22.
- [10] 徐小辉,刘江涛,高涵,等. 基于 SpringBoot + Vue 框架的采气方案系统开发[J]. 计算机仿真, 2021, 38(06): 248-250+382.
- [11] 余鹏翔,石军锋. 基于 SpringBoot 框架的群养母猪饲料站管理系统设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(03): 149-155+241.
- [12] 任祥臣,石磊. 基于工业以太网的动车组列车通信网络设计[J]. 铁路计算机应用, 2023, 32(08): 43-51.
- [13] 薛秀丽,胡小芳,余永纪,等. 动车组塞拉门控制系统故障监测与响应策略的时效研究[J]. 中国设备工程, 2023(09): 202-204.
- [6] 李欣. 多热源耦合供热系统运行策略研究[J]. 节能与环保, 2023(07): 41-43.
- [7] 赵笑言,郑立军,林海卫,等. 基于机器自学习的供热系统热负荷预测[J]. 节能, 2023, 42(08): 81-84.
- [8] Sahana, Kodimoole AnindityaKaur. Artificial intelligence and machine learning: The new frontier of digital dentistry[J]. Journal of Dental and Orofacial Research. 2020, 16(1): 58-63.
- [9] 刘晶,李超然,张建楠,等. 基于融合驱动的余热阀门控制优化方法[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 176-186.
- [10] LIU Y X, HONG H P. Data-driven approach for generating tricomponent nonstationary non-gaussian thunderstorm wind records using continuous wavelet transforms and S-transform[J]. Journal of Structural Engineering, 2023, 149(12).
- [11] KACIROTI N A. Letter to the editor in response to "Z-score burden metric: a method for assessing burden of injury and disease"[J]. American journal of preventive medicine, 2023, 64(2): 301.
- [12] 李明飞,吴军超. 基于混合核函数的 LSSVM 在 GNSS 高程拟合中的应用[J]. 工程勘察, 2019, 47(12): 64-68.
- [13] 杨朝,何明浩,韩俊,等. 一种新的支持向量机核函数评估方法[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(06): 630-634.
- [14] 杨亮,王谊. 应用改进 RBF 神经网络的室内环境舒适度评价[J]. 微型电脑应用, 2021, 37(07): 86-89.
- [15] 翟莹莹,左丽,张恩德. 基于参数优化的 RBF 神经网络结构设计算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(02): 176-181+187.

(上接第 53 页)