

高速悬浮列车车载控制器综合试验台研制

苗欣¹, 闫德顺², 蔺元臣², 李广振², 贾台会²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266100;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 针对新一代高速磁浮列车车载控制器研制、试验、生产等环节的测试与故障诊断需求, 采用 PXI、LXI 混合总线以及自动测试程序集 (TPS) 技术, 设计研发了车载控制器综合试验台; 该试验台基于通用化、模块化、标准化的平台架构, 能够对多种型号车载控制器进行功能、性能测试、故障诊断和维修指导; 测试结果表明, 该试验台测试精度高、运行稳定可靠, 具有智能化、易操作、效率高、便于扩展等优点, 满足新一代高速磁浮列车车载控制器的自动化测试需求。

关键词: 高速磁浮列车; 车载控制器; 自动测试; PXI 总线

Development of On-board Controller Test-bench for High-speed Suspension Train

Miao Xin¹, Yan Deshun², Man Yuanchen², Li Guangzhen², Jia Zhaohui²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266100, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Corporation Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: For the testing and fault diagnosis requirements of new generation of high speed maglev train on-board controller during the development, experiment and production, an on-board controller integrated test-bench is designed based on PXI and LXI mixed bus, and automatic test program sets (TPS) technology. Based on the general, modular and standardized platform structure, the test-bench can be used for function and performance test, fault diagnosis and maintenance guidance of various types of on-board controllers. The test results show that the test-bench has the advantages of high accuracy, stable and reliable operation, intelligent, easy operation, high efficiency, easy expansion, etc., and meets the automatic test requirements of the new generation of high-speed maglev train on-board controller.

Keywords: high-speed maglev train; on-board controller; automatic testing; PXI bus

0 引言

高速磁浮列车作为一种新型尖端轨道交通工具, 具有速度高、噪音小、能耗低、清洁环保等优点^[1], 包括我国在内的众多国家都在研究其关键技术, 而列车运行控制系统在整个高速磁浮系统中起着列车进行自动控制及安全防护的核心作用, 是保证列车运行安全的核心装备^[2]。其中车载控制器作为列车运行控制系统的核心设备, 起着控制指令驱动放大、逻辑运算并收集列车状态信息的关键作用^[3], 所以研制一套车载控制器综合试验台显得尤为重要。

针对新一代高速磁浮列车车载控制器研制、生产、试验期间的测试以及故障诊断需求的需求, 研发一套综合试验平台, 为车载控制器功能性能验证提供基础数据和验证平台, 通过模拟各种故障以及异常工作状态, 验证控制系统对故障的处理能力, 也可作为车载控制器的出厂检测与检修维护的平台。

传统车载控制器的测试为手动方式, 测试效率低、测试准确率低、可重复性差、测试数据不方便管理。本文针

对车载控制器的功能特点, 基于自动测试关键技术, 研制开放式可裁剪、可灵活应用的车载控制器综合试验台^[4]。

1 测试需求分析

车载控制器由 8 个驱动器和 10 个与逻辑运算单元组成。在整个运行控制系统中位于车载计算机和悬浮/导向/制动控制器之间, 起到控制指令驱动放大及列车状态收集的作用。针对车载控制器的测试需求, 构建车载控制器功能与性能验证平台, 实现对控制器正常、异常工作状况的模拟, 验证控制器功能、性能指标以及故障处理能力, 满足车载控制器研制、出厂测试和检修维护测试需求, 详细测试需求如下:

1) 电气接口测试, 主要是车载控制器的接口。通过对车载控制器上施加不同的输入指令, 测量其输出端口的电压值, 以测试车载控制器的功能;

2) 控制器维持工作区域能力, 主要是最大、最小输入电压的测试以及故障工况下的测试。通过对车载控制器上施加设计的最大、最小电压以及故障工况 (短路、断路等) 下的电压测量其输出端口的电压值, 以测试车载控制器的输出是否满足设计要求;

3) 具备与悬浮/导向/制动控制器、电磁铁互联开展悬

收稿日期: 2020-02-04; 修回日期: 2020-03-08。

作者简介: 苗欣 (1973-), 女, 北京市人, 大学本科, 研究员, 主要从事磁悬浮控制技术方向的研究。

浮导向控制系统的系统级测试；

4) 综合试验台需对车载控制的 18 个 BLOCK 的所有排列组合进行测试, 据统计, 测试项点多达 2 万多, 传统测试需一周左右, 测试不够充分, 不能完全暴露问题, 所以要求综合试验台的测试速度要在一天内完成测试。

对车载控制器测试需求进行分析梳理后, 车载控制器测试项汇总如表 1 所示。

表 1 车载控制器测试项分析表

序号	测试项名称	测试方法	测试资源	测试参数
1	输入故障模拟	根据故障信号特征, 利用测试台发生故障信号输入到车载控制器相应管脚, 监测车载控制器的功能响应	程控电源 数字 I/O 矩阵开关 电子负载	车载控制器相应功能输出管脚
2	逻辑输入输出测试	对车载控制器输入各类逻辑电平组合, 测试车载控制器逻辑输出是否符合逻辑要求	程控电源 数字 I/O 矩阵开关 电子负载	车载控制器相应输出逻辑电平
3	供电电源测试	对车载控制器供电口接入不同电压等级, 在不同电压等级下, 测试车载控制器输出功能是否正常	程控电源 数字 I/O 矩阵开关 电子负载	车载控制器相应输出逻辑电平

2 系统结构及原理

针对车载控制器测试与诊断需求, 基于通用化、模块化、标准化设计思想, 采用 PXI、LXI 混合总线以及自动测试程序集技术等成熟的测试技术与测试框架, 构建车载控制器综合试验台。该试验台具有良好的扩展性与操作性, 能够完成对车载控制器的电气接口、极限工作能力、设备功能及性能指标的测试与验证, 确保满足实际使用要求。整个试验台由车载控制器试验台控制柜和安装台组成。

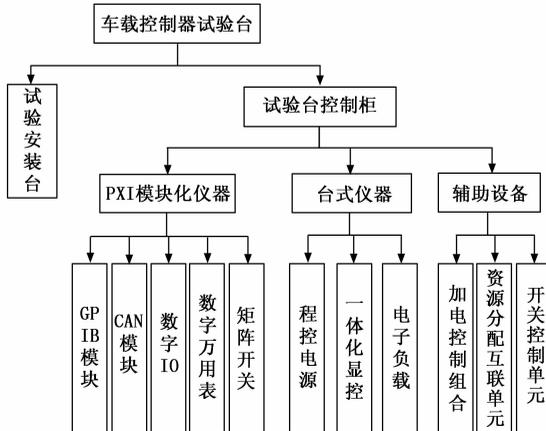


图 1 车载控制器综合试验台组成框图

其中, 车载控制器试验台控制柜以 PXI 模块化仪器为测试核心, 所有独立的仪器设备均采用基于以太网的控制方式, 通过柜内交换机与 PXI 零槽控制系统互连。其中 GP-IB 模块、CAN 总线通信模块、数字万用表模块和矩阵

开关模块选用 PXI 板卡, 程控直流电源、电子负载等选用标准上架台式仪器。加电控制组合组合主要实现系统的供电以及功能逻辑连锁, 资源分配互联单元完成资源分配、与车载控制器的机械和电气连接的功能。整个控制柜主要提供所需的程控电源、信号采集分析、负载模拟、信号对接等功能, 实现对车载控制器的自动测试; 试验安装台实现与车载控制器的机械与电气接口对接。

3 硬件设计

3.1 电气功能设计

试验台控制柜电气功能设计主要包括机柜内供电单元、安全配电单元、连锁控制电源和资源分配单元设计。电气设计的重难点在于资源分配单元的设计, 其中包含了万用表、程控直流电源、程控电子负载、I/O 模块、CAN 通信模块和矩阵开关等仪器资源互联及资源分配设计。

表 2 车载控制器电气功能设计

序号	电气功能名称	实现功能
1	供电单元	给机柜内部各仪器设备供电, 并具有短路过流保护功能
2	安全配电单元	具有系统上电和紧急情况下断掉系统和车载控制器电源功能
3	连锁控制单元	具备车载控制器安装接触好后, 程控直流电源和程控电子负载才能得电的功能, 防止试验过程中车载控制的带电插拔
4	资源分配单元	根据车载控制器测试需求, 实现程控直流电源和程控电子负载、万用表等测试资源在矩阵开关上扩展, 实现资源的合理分配

3.2 PXI 仪器组合

本试验台主要采用 PXI 总线形式实现系统仪器资源的控制调度。PXI 总线是比较成熟的总线形式, 国内市场占有率比较高, 由于 PXI 总线与以往的 GPIB、VXI 总线结构相比, 传输速率更高, 价格较低, 更容易满足测试仪器小型化, 高维护性的需求, 且更加适合于试验、测量与高速数据采集等场合^[5]; 同时, 多重的 PXI 模块选择, 搭配不同机箱, 使得 PXI 可以符合各种应用需求, 并且易于维护, 所以本试验台采用了 PXI 总线结构。本系统选用的 PXI 仪器组合如表 3 所示。

表 3 PXI 仪器组合型号列表

序号	板卡名称	板卡型号	主要指标
1	PXI 机箱	NI PXIe1085	18 槽
2	零槽控制器	NI PXIe-8840	i5 4400E(双核, 2.70 GHz)
3	GPIB 接口模块	NI PXI-GPIB	GPIB 总线模块
4	CAN 接口模块	NI-PXI8513	双端口 CAN 接口模块
5	数字量 IO 模块	NI-PXI6528	24 路漏极/源极输入, 24 路漏极/源极输出
6	数字量 IO 模块	NI-PXI6508	96 路双向 IO 输出, 信号为 TTL 电平
7	数字万用表	NI PXI-4065	6 位半
8	矩阵开关	Pickering 40-583	双线 4X64

3.3 加电控制组合设计

加电控制组合主要实现功能包括: 系统供配电、电气保护、电压电流显示以及+24 V、+15 V 二次电源的转换、车载控制器加电连锁等功能。电源供电及分配示意图如图 2 所示。

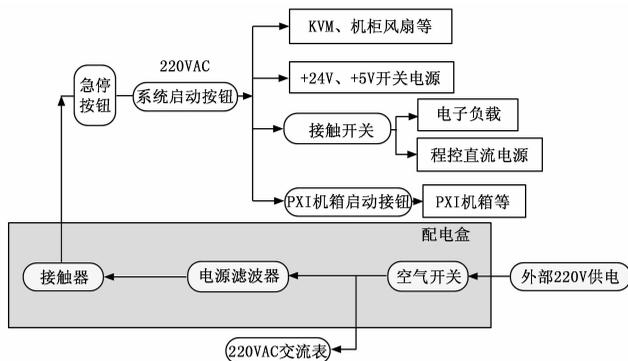


图 2 试验台系统组成框图

系统加电控制组合主要完成对整个试验台系统的加电、断电控制、电压状态监测, 并能够实现紧急状态下的快速断电。控制方式采用手动的方式, 具有过压、过流保护功能。

当测试过程中出现异常、需要紧急断电时, 拍击机柜上方前面板上的急停按钮, 可以快速切断供电电源。

车载控制器加电安全连锁电路实现车载控制器安装接触好后, 程控直流电源和程控电子负载才能得电, 防止试验过程中车载控制的带电插拔, 损坏设备。

系统加电控制组合充分考虑了人一机工程学, 便于操作, 显示醒目, 所选功能满足系统的使用要求。

外部输入的 220 V 交流电源经过配电箱内的滤波、整流、稳压、空气开关、漏电保护等器件, 最终分为多路电源输送至控制柜内的测量仪器。PXI 机箱的开关可通过远程控制接口引至加电控制组合前面板, 实现 PXI 控制系统的独立上电, 方便系统故障时的排查。

3.4 资源分配互联单元

资源分配互联单元是整个试验台设计核心, 主要思路是系统激励和测量资源分开, 分别挂接到矩阵开关上, 而在不同负载工况下, 利用试验台配置的多通道程控电源模拟控制器的各种输入组合, 实现控制器多达两万项的全面试验及测试。另外, 在两个矩阵模块之间将关键信号互联, 还可以实现系统的自检设计。

资源分配互联单元完成资源转接、信号互联, 实现与车载控制器电气和机械接口连接。左右两侧相应位置各布置一个接近开关, 一是用来判断车载控制器是否与试验台接触可靠, 二是实现控制器供电功能电气互锁, 也就是在只有在接触可靠的情况下才能实现对控制器的供电。

4 软件设计

车载控制器试验台基于虚拟仪器思想设计综合测试软

件系统。操作系统采用 Windows7 系统, 数据库管理系统采用 SQLite 软件, 开发环境采用 Visual Studio 2010, 由于硬件模块都带有符合 VISA 标准的驱动程序, 大大提高了系统开发效率。软件采用了模块化和开放化的设计思想, 便于维护和扩充。

软件系统主要由系统自检模块、系统级测试模块、车载控制器独立测试模块、用户管理和数据管理模块等组成。其中独立测试模块又分为输出信号检测、功能测试、诊断信号测试。软件功能如图 3 所示。

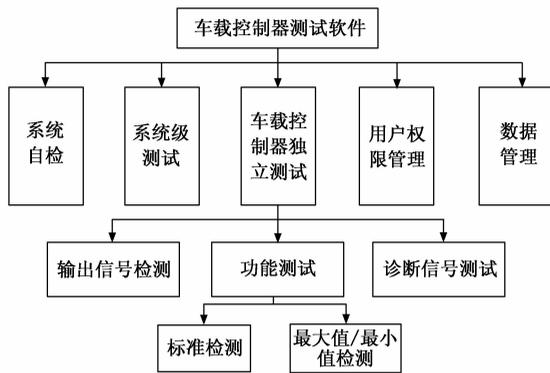


图 3 软件功能框图

系统软件实现的主要功能为:

- 1) 对门电路功能、驱动器功能和诊断功能进行顺序检测;
- 2) 对门电路和驱动器输出电压进行检测;
- 3) 对诊断信号进行检测;
- 4) 对每个检测步骤的所有的设置值(电压值, 输出负载等)、测量值、诊断数据、功能故障、诊断故障进行文件记录;
- 5) 具有在中央控制单元统一控制下, 与 MRE 试验台和电磁铁试验台进行系统级测试功能;
- 6) 可设置不同的权限, 供研究、功能测试、检修维护等不同模式下的应用;
- 7) 具有自检功能, 检测试验台各部件能否正常工作并可诊断出故障部件。

功能检测包括 18 个带有不同的输入信号和输出信号的功能块。所有 18 个功能块都用一个标准检测以及一个最小值/最大值检测来进行检测。

标准检测: 对于单个逻辑连接元件的功能, 只用 2 个不同的输入电压 (3 V, 22 V) 针对 2 个不同的负载电流 (用于门电路的 0 mA 和 60 mA; 用于驱动器的 0 mA 和 120 mA) 以及 1 个 25 V 的电源电压进行检测。对所有可能的组合进行检测。

最小值/最大值检测: 对于单个逻辑连接元件的功能, 用 4 个不同的输入电压 (0 V, 6 V, 21 V, 30 V) 针对 3 个不同的负载电流 (用于门电路的 0 mA、40 mA 和 100

mA; 用于驱动器的 0 mA、40 mA 和 130 mA) 以及 2 个不同的电源电压进行检测。对所有可能的组合进行检测。

表 4 车载控制器功能检测 TP 测试项数目表

序号	功能类型	测试项数目	
		标准检测	最大值/最小值检测
1	驱动器	16	216
2	驱动器	4	24
3	驱动器	4	24
4	驱动器	4	24
5	驱动器	4	24
6	驱动器	4	24
7	驱动器	4	24
8	驱动器	4	24
9	与逻辑连接元件	16	384
10	与逻辑连接元件	16	384
11	与逻辑连接元件	1 024	9 216
12	与逻辑连接元件	1 024	9 216
13	与逻辑连接元件	8	96
14	与逻辑连接元件	8	96
15	与逻辑连接元件	16	192
16	与逻辑连接元件	8	48
17	与逻辑连接元件	8	48
18	与逻辑连接元件	8	48
小计		2 180	20 112
总计			22 292

表 4 中的每个测试小项的测试流程基本相同, 基本测试流程如图 4 所示。

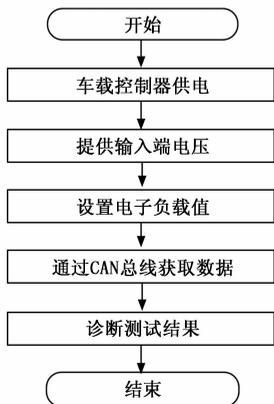


图 4 测试项点测试流程图

5 结构设计

控制柜采用 800 mm×800 mm×2100 mm (深×宽×高) 标准控制机柜, 内置 42U 标准上架安装立梁结构, 所有设备均采用上架安装方式, 便于更换和维护。内部布局从下往上依次是电子负载、程控电源、PXI 机箱、KVM 显

控组合和加电控制组合等组成。在右侧距离地面 1 m 高的位置放置 4U 高度的对外接口航插面板, 通过连接电缆与信号转接适配器连接, 试验台实物如图 5 所示。



图 5 测试验证结果图

BST 安装台导轨架采用标准铝合金材质型材搭建。导轨架根据车载控制器结构尺寸进行定制设计, 并采用与控制器配套的结构锁紧机构, 实现控制器的锁紧对接。

锁紧装置主要由闭合装置、定位夹板解锁键、组合定位夹板组成。实现车载控制器的锁紧对接。

6 测试验证

本试验台先后对多种型号的数十台车载控制器对接测试验证, 测试分为标准模式和最大值/最小值两种模式, 图 5 为两种模式连续测试的测试结果, 测试过程中试验台运行稳定, 测试精度高, 测试效果良好。

7 结束语

本文在测试需求进行综合分析的基础上, 对新一代高速磁浮列车车载控制器综合试验台的硬件、软件和结构设计进行了详细的论述。对接测试结果表明, 本试验台设计原理正确、运行稳定可靠、测试结果准确, 满足高速磁浮列车车载控制器自动化测试的需要。

参考文献:

- [1] 吴祥明 磁浮列车 [M]. 上海: 上海科学出版社, 2003.
- [2] 王丽丽 数据融合技术在磁浮运行控制系统故障诊断中的应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [3] 汤卓颖. 高速磁浮运控系统中车载安全计算机与车载控制单元的接口研究 [J]. 数字通信世界, 2017 (9): 62-63.
- [4] 李行善, 左毅, 孙杰. 自动测试系统集成技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [5] 杨云飞, 葛玉, 赵海燕, 等. 基于 PXI 总线的某型战车自动测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (4): 1017-1019.