

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106783

下一代地铁列车数字式司机控制器设计*

李宏¹ 谭南林² 苏树强² 王山石¹ 李国正²

(1. 西安沙尔特宝电气有限公司 西安 710100; 2. 北京交通大学 北京 100044)

摘要: 地铁列车司机控制器是车辆的核心控制设备,是地铁列车牵引与控制的主令电器。针对现有司控器结构复杂,数字化水平较低,无法与地铁列车控制和诊断系统进行数据交互的问题,提出一种基于 STM32 的数字式司机控制器设计方案,并研制了样机。新方案采用 2 路 9 通道编码器检测牵引手柄位置,12 路光电隔离器检测司机控制器 IO 节点的开关状态,测得的手柄位置信息和节点状态信息互为印证,满足误差方为有效;同时,设计了符合 TRDP 通信协议的工业以太网接口,可实时输出司机控制器状态;最后,为了验证系统的可行性进行了型式试验、网络一致性试验和实际装车调试。结果表明,所设计的数字式司机控制器结构紧凑、可靠性高、功能性强,基本满足了实际装车需要。该设计提高了地铁列车司机控制器的数字化水平,可实现多种类型故障自诊断和记录,提高了系统可靠性。

关键词: 司机控制器;数字式;编码器;光电隔离

中图分类号: U260 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.3030

Next-generation digital driver controller design for metro trains

Li Hong¹ Tan Nanlin² Su Shuqiang² Wang Shanshi¹ Li Guozheng²

(1. Xi'an Schaltbau Electric Co., Ltd., Xi'an 710100, China; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The driver controller of the subway train is the core control equipment of the vehicle and is the main command appliance for subway train traction and control. Aiming at the problem that the existing driver controller has a complex structure and low digitalization level and cannot interact with the data of metro train control and diagnostic system, a digital driver controller design scheme based on STM32 is proposed and a prototype is developed. The new design adopts two 9-channel encoders to detect the position of traction handle and 12 opt isolators to detect the switching status of driver controller IO nodes, and the measured handle position information and node status information are mutually corroborated to satisfy the error to be valid; meanwhile, a 2-way industrial Ethernet interface is designed to comply with TRDP communication protocol, which can output the driver controller status in real-time. Finally, in order to verify the feasibility of the system was carried out type test, network consistency test and actual loading debugging, the results show that the designed digital driver controller is compact, highly reliable, functional and basically meets the needs of the actual loading. The design improves the digital level of the subway train driver controller, enables self-diagnosis and recording of many types of faults, and improves system reliability.

Keywords: driver controller; digital; encoder; opt isolation

0 引言

司机控制器是地铁列车的主令电器,安装在列车首尾两端,可控制车辆的运行速度,转换车辆牵引与制动工况,改变车辆行进方向^[1]。现有司控器采用多根线缆引出凸轮触头开关和编码器状态,以此反映当前手柄操纵位置,进而将司机的操作指令转换为电信号传递给车辆控制单元,数字化程度低。其机构复杂、体积庞大,内部凸轮机构和开关

电器占用大量空间,严重影响了司机控制器的通用性和可维护性。随着地铁列车智能化、信息化程度的进一步提升,迫切需要设计可与车辆网络系统进行数据交互,实时输出控制指令状态、自诊断信息的新型司机控制器。

针对传统司机控制器存在的问题,许多学者开展了研究工作,主要集中在如下 3 个方面:1)分析司机控制器的发展现状和原理^[2-3],以此指导司控器的选型与设计。其中,王重阳等^[4]对城市轨道交通车辆三大系列司机控制器的基

收稿日期:2021-05-26

* 基金项目:国家自然科学基金(61527812)项目资助

本结构、操作模式、电气参数等方面展开分析,结合车辆对司机控制器的机械和电气要求进行选型分析。2)针对司控器现有缺陷或故障展开分析以此优化设计^[5-8],其中,缪仲萃等^[9]以 AT89C51 单片机为核心,利用光电开关传感器、光电耦合器等电子元器件实现了窄轨交流电机车智能无触点司控器的设计。历洋等^[10]采用非接触式绝对值型光电编码器检测手柄位置,通过软件控制方式代替传统的凸轮组控制开关方式,设计了基于 RS-485 通讯接口的数字式司控器。3)针对司控器的测试和检测的需求,设计了大量的检测装置与系统^[11-15],其中王翼星等^[16]等设计了一套基于 LabVIEW 和 DSP 的司机控制器测试系统,结合电压、电平采集电路获取司机控制器中档位闭合数据和电位器电压值,实现了司控器检测与寿命测试。刘云飞等^[17]分析了司机控制器工作原理,搭建硬件系统,在 Windows CE 操作系统下的控制平台上实现了便携式司机控制器测试仪。

上述研究推动了司机控制器技术进步,但仍未建立起与列车通信网络的数据交互通道,智能化程度低,难以满足网络化和大数据分析的需要。为此,本文针对现有司机控制器故障判定难、数字化水平低、无法与地铁列车控制和诊断系统(TCMS)进行数据交互的问题,提出了一种基于实时以太网(TRDP 协议)^[18]的嵌入式司机控制器设计方案,提高了司机控制器的数字化水平,结构紧凑,工作稳定可靠。

1 数字式司机控制器方案与功能研究

1.1 总体方案

下一代地铁列车司机控制器的操作手柄采用牵引/制动一体式结构,设有牵引控制区、惰行位、制动控制区、紧急制动位;方向选择开关,设有前进、“0”位、后退。司机控制器的牵引、制动控制信号采用光电编码器输出(格雷码)。司机控制器手柄设有司机警惕装置。新扩展出的实时以太网通信接口,可与地铁车辆网络系统进行数据传输。在编码器、控制器 IO 节点状态检测方面采用冗余设计,若网络通信异常时,TCMS 系统仍可通过原有配线采集司控器的牵引位状态、制动位状态、惰行位状态以及编码器 1 和编码器 2 的级位输出信号,确保可靠性。司控器的触点信号、电源和编码器的信号对外连接器采用 HARTING 连接器,防护等级 IP63 以上,以太网口输出采用 M12D 连接器。

数字式司机控制器以 ARM 控制器为核心,采用模块化设计思想,实现手柄位置判定、状态自诊断、事件记录和信息交互等功能。从其结构来看,地铁列车数字式司机控制器在原有机械组件的基础上新增了控制电路部分。前者主要包括操作手柄、旋钮、齿轮机构、光电编码器等部件。所设计的司机控制器总体结构如图 1 所示。

控制电路由 ARM 控制器、光电隔离器、以太网协议芯片、调理电路等部分组成,并采用 3 层叠式结构以减少尺寸占用,控制电路部分的原理如图 2 所示。

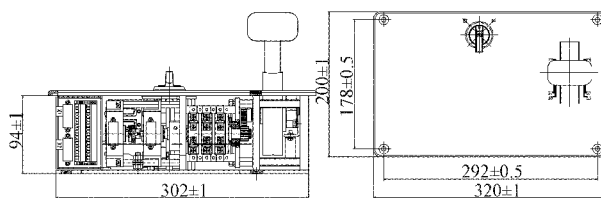


图 1 数字式司机控制器结构

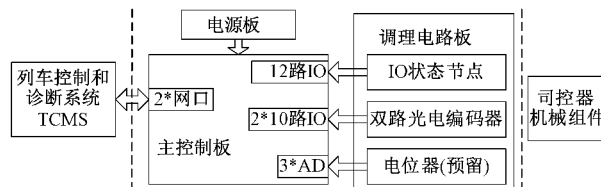


图 2 数字式司机控制器原理

其中,电源板将 DC110V 两级转变成 24 V 和 5 V,提供给调理电路板和主控制板;调理电路板将 110 V 和 24 V 开关量信号通过稳压管、光电隔离器转换为 3.3 V 信号,实现电平匹配和电信号隔离并提供给主控制板检测,主控制板实现信号采集、以太网通信、设备自诊断等逻辑控制功能。

1.2 主要功能模块

下一代地铁列数字式司机控制器主要实现如下功能。

1)主控制板根据司控器的操作手柄的位置,通过实时以太网向 TCMS 发出“牵引级位”、“制动级位”、“牵引状态”、“制动状态”以及“惰行”等指令后,TCMS 将实现相应等级的牵引或者制动。

2)主控制板在接收到 TCMS 发出的“自检开始”(相应位为高电平)以及“自检项目”的指令后,将进行自检。当“自检开始”为低电平后,停止司控器自检。当司控器手柄在某一档位时,自检内容包括:

(1)编码器的输出级位检测,包括“制动 B1~B7 级”、“牵引 P1~P4 级”、“惰行”是否在规定的范围内(输出误差范围应 $\leq \pm 6$),同时将此时 2 个编码器的输出值提供给 TCMS。

(2)检测该档位的 2 个编码器的同步误差,当二者的输出值 > 2 ,认为此时编码器的同步误差超限。

(3)司控器接点输出电平检测,根据司控器接点的闭合表,检测司控器接点高低电平是否符合闭合表的要求。同时将此时所有接点输出提供给 TCMS。其中,应急牵引和应急制动检测需要在应急模式下进行。

(4)自检完毕后子系统将自检的结果:“故障”、“超限”、“正常”以及自检项目(即手柄档位)反馈给 TCMS 系统。

手柄档位与编码器输出的对应关系,如图 3 所示。

2 数字式司机控制器硬件与软件设计

2.1 数字式司机控制器硬件设计

1)控制器 CPU 选型

综合考虑新型司机控制器对运算能力、稳定性和接口

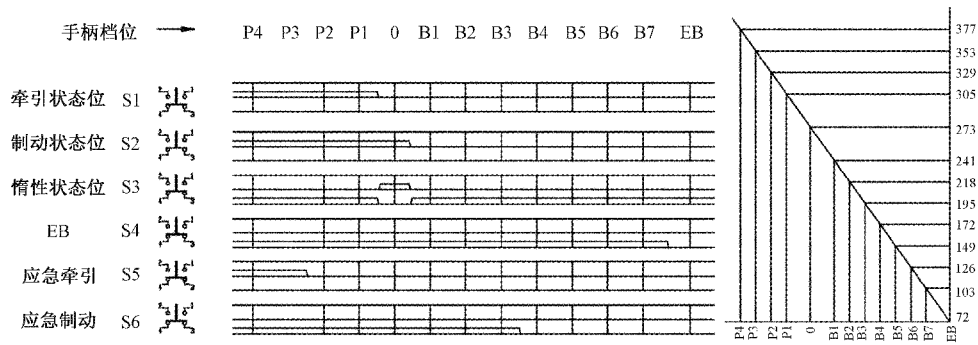


图 3 手柄档位与编码器输出对应关系

的相关要求,选用 ST 公司 STM32F407ZET6 微处理器进行设计^[19]。该处理器基于 Cortex-M4 内核的 32 位处理器,具有如下优点:(1)具有 1 MBytes 的 Flash 和 192 kBytes 的内存,最高工作频率可达到 168 MHz,满足大内存和大数据的存储需要;(2)具有以太网、FSMC、I²C、USART 等接口,可以根据需要进行扩展;(3)芯片封装小、管脚资源丰富、技术成熟、性价比高、应用广泛,非常适合于嵌入式应用。

2) 以太网接口电路

以太网通信接口是新型司机控制器与 TCMS 之间数据传输的通道。由于所选用控制器 STM32F407 内部已经包含了介质访问控制器(MAC),可通过介质独立接口(MII)或简化独立接口(RMII)的方式与外部物理层 PHY 芯片相连,结合网络变压器实现网络通信。本设计该部分接口电路选用低功耗 LAN8720Ai 芯片作为以太网 PHY 层芯片,结合网络变压器 HX1188NL 搭建,如图 4 所示。

图 4 中,LAN8720Ai 芯片选用 25 MHz 外部时钟,其复位管脚由主控制器控制,内置 10BASE-T/100BASE-TX 全双工传输模块,支持 10 Mbit/s 和 100 Mbit/s 通信速率。MDIO 和 MDC 为站管理接口(SMI)的数据线和时钟线,STM32F407 通过此接口访问芯片内部寄存器。网络变压器 HX1188NL 连接 PHY 芯片和对外网络接口 M12D,不仅提高了传输距离,减少外部串扰,同时起到电压匹配和隔离保护的作用。

3) IO 接口电路

IO 接口电路应用于 12 路 110 V 输入通道和 20 路(2 路预留)24 V 双路编码器的信号采集,基本接口电路采用光电隔离器 PC3H710NIP 进行内外电路隔离和电压匹配。该芯片只需要 0.5 mA 的输入电流即可实现信号的开关控制,有效减少了对限流电阻和 R₃₅ 和稳压二极管 WD10 的功率要求。当 24 V 信号接入时,稳压管工作在反向击穿状态。若应用于 110 V 输入信号检测时,只需要对限流电阻阻值和稳压二极管的稳定电压参数适当调整。

4) 状态数据存储

控制器通过 I²C 接口扩展了 EEPROM 芯片 AT24C128,该芯片提供了 16 kByte 的状态数据存储空间,用于 IP 地址相关的配置信息、控制器软件版本信息和各 IO 通道开关的计数信息等数据的存储。

5) 电源转换

为了使控制器设计符合 GB/T 24338.4-2009《轨道交通:电磁兼容机车车辆设备》中的相关要求。电源转换电路采用 VICOR 电源模块将车辆提供的 110 V 电源转换成光电编码器所需的 24 V 电源,并进一步采用金升阳模块电源将其转换为 5 V 电源,提供给控制器。VICOR 的 DC-DC 电源模块前后端加入了保险管、压敏电阻、TVS 管等元器件进行保护,共模电感、磁珠、电容等器件进行 EMI 滤波^[20]。能够完全满足标准中的相关要求。

2.2 数字式司机控制器软件设计

本控制器软件基于 TRDP 标准,结合 LWIP 协议栈,实现司控器与 TCMS 之间的数据交互与控制。二者之间的通信数据帧长度设定为 128 Bytes,周期为 500 ms。

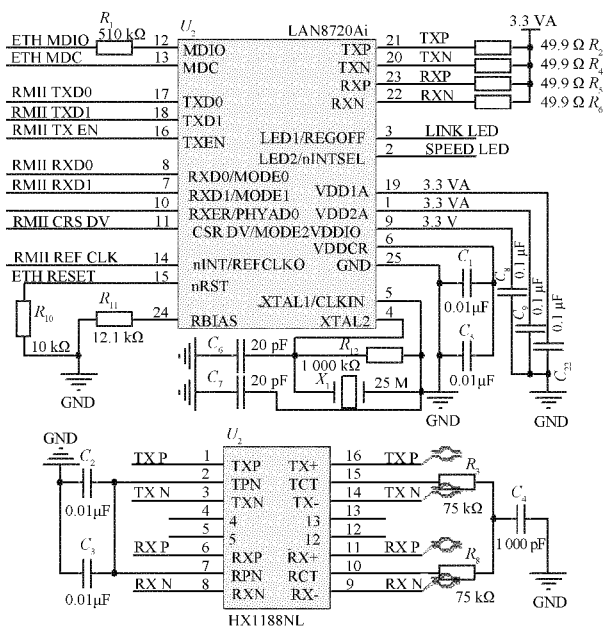


图 4 以太网通信电路

TCMS 发送给司控器的内容包括生命信号、时间日期、自检启动位、自检项目类型；司控器发送给 TCMS 的内容包括生命信号、编码器数据、IO 状态数据、自检时编码器数据、自检结果、故障报警、软件版本等信息。

整体功能的实现参照如下流程：

1) 控制器读取 EEPROM 中存储的配置信息，并以此初始化网络接口，判定网络通信是否存在异常。首次接入网络时初始化静态 IP 地址：10.3.0.210，DNS 地址：10.3.0.1。向 DNS 服务器发送 COMID=140 的 DNS 请求帧，其中包含了 VCU 的域名，获取 COMID=141 的 DNS 回复帧，包含了 VCU 的 IP 地址。并根据该 IP 地址发送 PD-PDU 通信帧。

2) 采用自由收发模式，TCMS 与司控器通过 PD-PDU 数据帧交互数据。控制器根据操作手柄的位置，向 TCMS 发出“牵引级位”、“制动级位”、“牵引状态”、“制动状态”以及“惰行”等指令，TCMS 将实现相应等级的牵引或者制动。

3) 控制器根据手柄动作记录不同 IO 状态的变化次数并分通道进行记录，为司控器后续的状态检修提供数据支持。

4) 控制器在接收到 TCMS 发出的“自检开始”（相应位为高电平）以及“自检项目”的指令后，将开始进行自检。若“自检开始”为低电平，停止司控器自检。当司控器手柄在某档位时，自检内容包括：(1) 编码器的输出级位检测，包括“制动 B1~B7 级”、“牵引 P1~P4 级”、“惰行”是否在规定的范围内，同时将此时 2 个编码器的输出值提供给 TCMS。(2) 检测该档位的 2 个编码器的同步误差，当二者的输出值大于 2，则认为此时编码器的同步误差超限。(3) 司控器接点输出电平检测，根据司控器接点的闭合表，检测司控器接点 S1~S7 的高低电平是否符合闭合表的要求。同时将此时所有接点的输出提供给 TCMS。其中，应急牵引和应急制动检测需要在应急模式下进行。

自检后将自检结果：“故障”、“超限”、“正常”以及自检项目（即手柄档位）反馈给 TCMS 系统。

5) 若检测结果出现故障，司控器应立即更换进行检修。

6) TCMS 接收到两个编码器的网络输出值后，对其进行比较，当两个值不同时（正常情况下两个值之间的误差 ≤ 2 ），TCMS 取 2 个编码器输出值中的较小值。

3 实验验证

为了验证系统的可行性，基于本文系统设计方案，制作了地铁列车数字式司机控制器样机，进行了实验验证和实车安装，如图 5 所示。

首先，针对样机开展了动作性能试验，检验了手柄动作、触头闭合、机械定位与连锁、手柄操作力、编码器输出、以太网输出；然后，进行了绝缘性能试验，包括绝缘电阻测



图 5 司控器样机和安装位置

试、工频耐受电压试验、冲击耐受电压等试验；随后，进行了交变湿热试验、高低温试验、冲击振动试验、温升试验、工作性能试验、通断能力等试验；最后，完成了电磁兼容实验，包括浪涌抗扰度、静电放电抗扰度、电快速瞬变脉冲群抗扰度、射频场感应的传导骚扰抗扰度和射频电磁场辐射抗扰度等项目。上述各项测试中，实验样机均满足 GB/T 24338.4-2009 中对车载设备的相关要求。

为了检验所研制设备的网络接口性能，参照网络设备基准测试(RFC2544)进一步开展了所设计样机的网络数据通信一致性实验，所测得的数据如表 1 所示。

表 1 网络接口性能测试数据

速度	IP 版本	传输	模式	吞吐量
100 Mbit/s	IPv4	UDP	远端环回	100 Mbit/s
延迟	抖动	帧丢失	链路断开	持续时长
4 μ s	0 μ s	无	无	100 min

实验结果表明，所设计的下一代地铁列车数字式司机控制器可靠性高、功能性强，实际装车调试时以太网通信接口符合 TRDP 通信协议，可实现多种类型故障自诊断和记录，与 TCMS 通信正常，实时输出司机控制器状态。

4 结 论

本文针对现有地铁列车司机控制器数字化水平低，缺少数据交互通道的问题，提出一种基于 STM32 的数字式司机控制器设计方案，完成了各部分的接口电路设计，研制了司控器样机，通过了型式试验、网络一致性测试和实车安装调试，实验结果表明所设计的数字式司机控制器实现了与 TCMS 系统的数据交互和设备自诊断功能，结构紧凑、可靠性高、功能性强，基本满足了实际装车需要。

参考文献

- [1] 马林森. 轨道交通列车司机控制器概述[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11(8): 73-76.
- [2] 郑勇涛, 田军. 中国机车司机控制器的发展[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(4): 94-96.
- [3] 武苏永. CRH_5 型动车组司机控制器原理浅析及维护

- 建议[J]. 机车电传动, 2012(1):85-87.
- [4] 王重阳, 欧阳月光, 强飞. 城市轨道交通车辆司机控制器选型方案的分析[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(1):109-112.
- [5] 魏兴舟. 机车司机控制器电位器故障分析及改进[J]. 机车电传动, 2005(6):66-67.
- [6] 彭宝林, 林平, 粟谦, 等. M3919b型司机控制器摩擦机构问题分析及解决方案[J]. 机车电传动, 2012(2):40-42, 45.
- [7] 郑勇涛. 司机控制器“警惕装置”优化设计[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(11):132-134.
- [8] 裴剑, 徐文彬. 地铁列车司机控制器故障分析及检修策略[J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(3):116-118.
- [9] 缪仲翠, 张海明, 徐保生. 基于 AT89C51 单片机的窄轨交流电机车智能无触点司控器的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2010(1):45-47.
- [10] 历洋, 彭宝林, 林平, 等. 数字式司机控制器的研究[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(6):87-92.
- [11] 唐明安, 黎英豪, 涂新初. 通用型司机控制器测试装置[J]. 机车电传动, 2006(6):58-60, 77.
- [12] 杜连超. 地铁车辆司机控制器性能检测装置[J]. 机车电传动, 2012(2):43-45.
- [13] 袁虎林. 深圳地铁3号线车辆司机控制器试验装置的研制[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(9):63-66.
- [14] 袁碧珍, 赵怀林, 王苏晓, 等. 基于 LabVIEW 的列车司机控制器的寿命测试系统[J]. 机车电传动, 2015(6):98-101.
- [15] 史富强. 西安地铁一号线车辆智能司机控制器测试台装置[J]. 电子设计工程, 2016, 24(18):75-78.
- [16] 王翼星, 朱建新, 和卫星, 等. 基于 LabVIEW 和 DSP 的司机控制器测试系统[J]. 测控技术, 2017, 36(10):117-121.
- [17] 刘云飞, 车军. 便携式通用型司机控制器测试仪的研制[J]. 测控技术, 2017, 36(10):114-116.
- [18] 罗峰, 徐金鹏. 基于车载环境的时间同步协议优化[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2):96-104.
- [19] 吕亮, 孙尚民, 史红梅. 便携式制动盘螺栓裂纹检测装置研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(1):48-56.
- [20] 李捷, 武文广, 李坤, 等. 适用于电动汽车电池管理系统的隔离 DC-DC 变换器[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(9):85-89.

作者简介

李宏, 高级工程师, 主要研究方向为电气及电子产品研发。

E-mail: hli@xian-schaltbau.com

谭南林, 教授, 主要研究方向为信号处理与分析、故障诊断技术。

E-mail: nltan@bjtu.edu.cn

苏树强, 博士, 主要研究方向为传感检测技术。

E-mail: shqsu@bjtu.edu.cn

王山石, 工程师, 主要研究方向为电气及电子产品研发。

E-mail: shshwang@xian-schaltbau.com

李国正, 副教授, 主要研究方向为信号处理与分析、传感检测技术。

E-mail: liguo Zheng@bjtu.edu.cn