

纯电动客车集中式低压数字配电系统设计

周舟, 卢雄, 王全, 杨杰君, 罗彬仁

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:针对目前电动客车低压配电系统存在的问题,设计一种整车集中式低压数字配电系统,解决传统分散式配电系统的线束复杂、高功率损耗、可扩展性有限和维护复杂等问题,并满足汽车智能化对配电系统的要求。

关键词:电动客车;集中式;低压配电;数字配电

中图分类号:U469.72⁺2

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)04-0032-07

Design of Centralized Low-voltage Digital Power Distribution System for Pure Electric Buses

ZHOU Zhou, LU Xiong, WANG Quan, YANG Jiejun, LUO Binren

(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Aiming at the problems existing in the low-voltage power distribution system of current electric buses, this paper designs a centralized low-voltage digital power distribution system for the vehicle to solve the problems including wire harness complexity, high power loss, limited scalability, and maintenance complexity of traditional distributed power distribution system and to meet the requirements of vehicle intelligent to the power distribution system.

Key words: electric bus; centralized; low voltage power distribution; digital power distribution

随着电动汽车三化(电动化、智能化、网联化)技术的发展,传统的分布式低压配电系统暴露出了一系列显著的问题,如线束布局复杂度高、能耗损失大、维护作业繁重、缺乏实时监控与集中智能管理能力、与智能驾驶技术融合的不适应性^[1-2]等。本文在汲取近年来相关文献^[3-4]关于集中式低压数字配电系统演进历程和实践经验的基础上,选用森鹏 SDCF100/SDCR100 系列前后数字配电盒及英飞凌 TC234 高性能整车域控制器,设计一套适用于纯电动客车的集中式低压数字配电系统,以满足高效智能维护的新需求。

1 传统的分布式低压配电方案

1.1 方案架构

目前电动客车的低压配电系统普遍采用串联双低压蓄电池与双总电源手闸开关相结合的方案,其架构如图1所示。其中,低压检修手闸用于全面断开所有低压回路,以保障维护安全;总电源手闸则专为长时间停车所用,切断大部分主用电器电源,仅为必要监控设备供电。一级配电盒多为传统机械配电盒,其内集成慢速熔断保险丝、快速熔断保险丝、继电器及单极接触器等组件,可直接分配电能及通过继电器实现部分简单逻辑控制。

收稿日期:2024-03-11。

第一作者:周舟(1979—),女,工程师;主要从事新能源汽车数字化转型工作。E-mail:21127556@qq.com。

通讯作者:卢雄(1996—),男,工程师;主要从事新能源汽车整车控制与辅助驾驶控制软件开发工作。E-mail:925096526@qq.com。

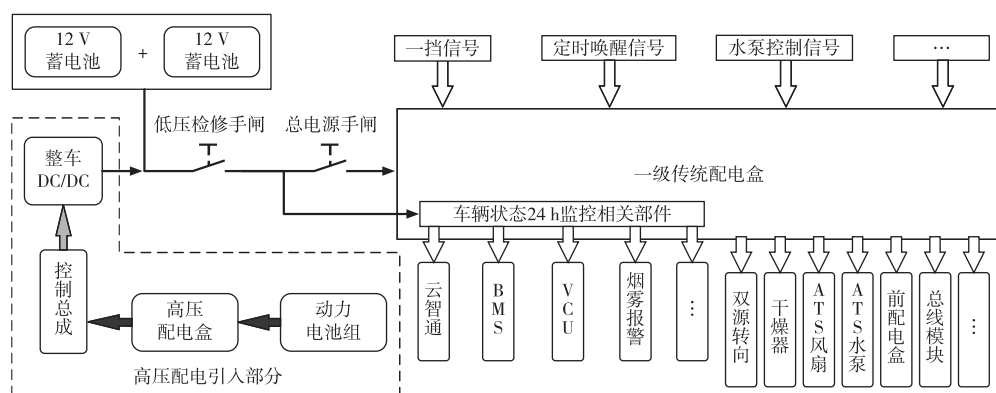


图1 传统低压配电架构示意图

1.2 实际应用的局限性

传统的分布式低压配电方案的技术相对成熟,具有良好的稳定性和可靠性。该方案已在市场上应用多年,相关的配套设施和零部件供应体系相对完善,系统成本较低,在故障维修和更换故障部件时有更多的选择。但随着汽车电子技术的快速发展与电动化趋势的深化,其局限性逐渐显现,具体表现为:

1) 集成度低。不利于实现高度的电子集成和智能化控制,难以适应和满足未来汽车电子技术的发展需求^[5-6]。

2) 扩展灵活性受限。车型改款升级时无法灵活扩展,导致设计、制造成本增加,且设计周期延长。

3) 故障排查与维护复杂。分散的电气架构使故障诊断和维护效率低下。

4) 能量损耗较高。线束布置冗长且繁杂,增加了车重,降低了有效载荷和续航里程,不符合轻量化和高效能趋势。

2 新型集中式低压配电方案

2.1 配电架构总体设计

总体架构采用单低压检修手闸,全车数字化配电;SDCF100、SDCR100 分别作为系统的前、后数字配电盒,分别负责前、中车身和后车身部件的配电;TC234 作为中央整车域控制器,基于其静态功耗极低的特性,设计为常高常低唤醒,负责对各个子系统进行唤醒管理和控制。新型低压配电架构如图2所示。

2.2 配电系统设计原则

1) 整套系统采用单低压检修手闸设计。该手闸

负责控制整车所有部件低压电的通断,检修手闸只有在整车低压检修时才断开,因此在非检修状态工况下,检修手闸处于常闭合状态。

2) 数字配电盒内部没有保险片和继电器。系统设计为全数字配电,由大功率 MOS 管直接输出电源,可灵活实现各种复杂逻辑控制,同时可大量降低线束线径,减少线束长度和重量。

3) 具备唤醒功能的车身电气部件,统一由前数字配电盒或者后数字配电盒的输出管脚为其提供低压工作电源(部件布置的位置遵循就近原则),再由中央整车域控制器输出管脚控制其唤醒与休眠。不具备唤醒功能的车身电气部件,只需前数字配电盒或者后数字配电盒的输出管脚为其提供低压工作电源即可。

4) 前、后数字配电盒与中央整车域控制器连接至同一路 CAN 网络,用于配电信息的交互。

5) 基于点火锁 ACC 挡与 ON 挡信号为整车配电重要的触发信号,为确保配电安全,点火锁 ACC 挡与 ON 挡信号同时硬线连接至前、后数字配单盒及中央整车域控制器。

6) 基于中央整车域控制器静态功耗较低(静态电流约为 20 mA)的特性,其采用常火常低有效唤醒工作模式,可实时监测整车系统状态。当低压检修手闸闭合且车辆低压下电后,实现定时唤醒车辆监控相关部件(如 BMS、云智通),并将国标需要的整车数据上传至国家云平台。

7) 当低压检修手闸闭合且车辆低压下电后,为

防止车辆因长时间停放而出现 24 V 蓄电池亏电问题,中央整车域控制器实时监测蓄电池电压。当蓄电

池快亏电时,中央整车域控制器会控制总成中 DC/DC 系统自动给蓄电池补电。

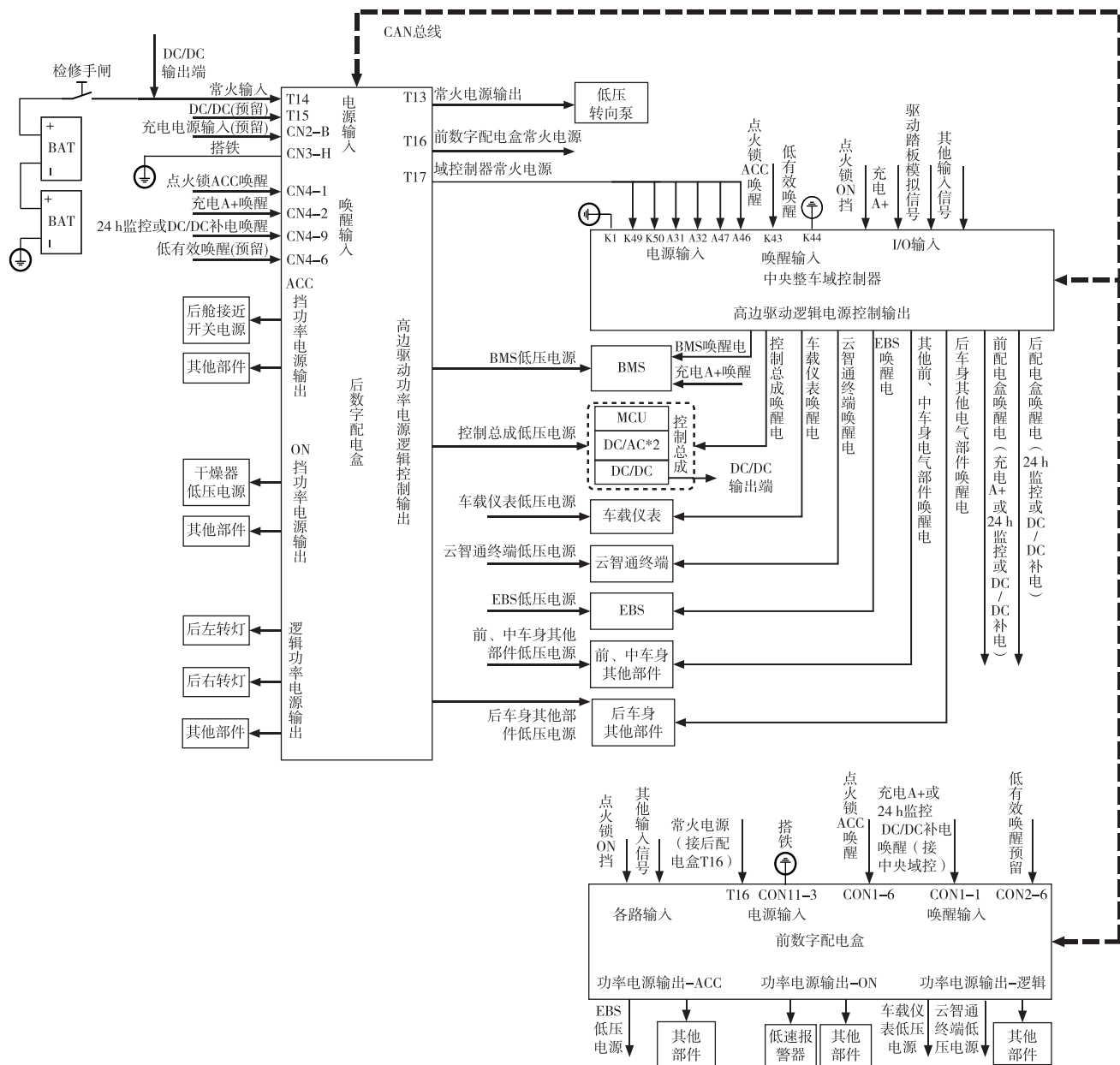


图2 新型低压配电架构示意图

2.3 配电系统详细设计

前、后数字配电盒及中央整车域控制器在布局上根据车辆电气系统分布的不同分工合作,共同构成一个完整的车内电力管理系统。下面详细介绍3个核心部件的配电设计。

2.3.1 后数字配电盒配电设计

后配电盒又称一级配电盒,是连接24 V蓄电池和整车DC/DC输出端与各低压用电系统的桥梁,负

责直接或间接地将整车的低压电能合理、安全地分配给全车各种低压电器和电子控制单元。该配电盒可实时监测各分支电路的电流和电压,其内部的保护装置确保各分支电路出现过载、短路等情况时能够及时切断故障电路,防止损坏低压电气部件及引发安全隐患。还可通过CAN接口与车辆其他系统通信,实现配电信息的交互。其配电原理如图3所示。

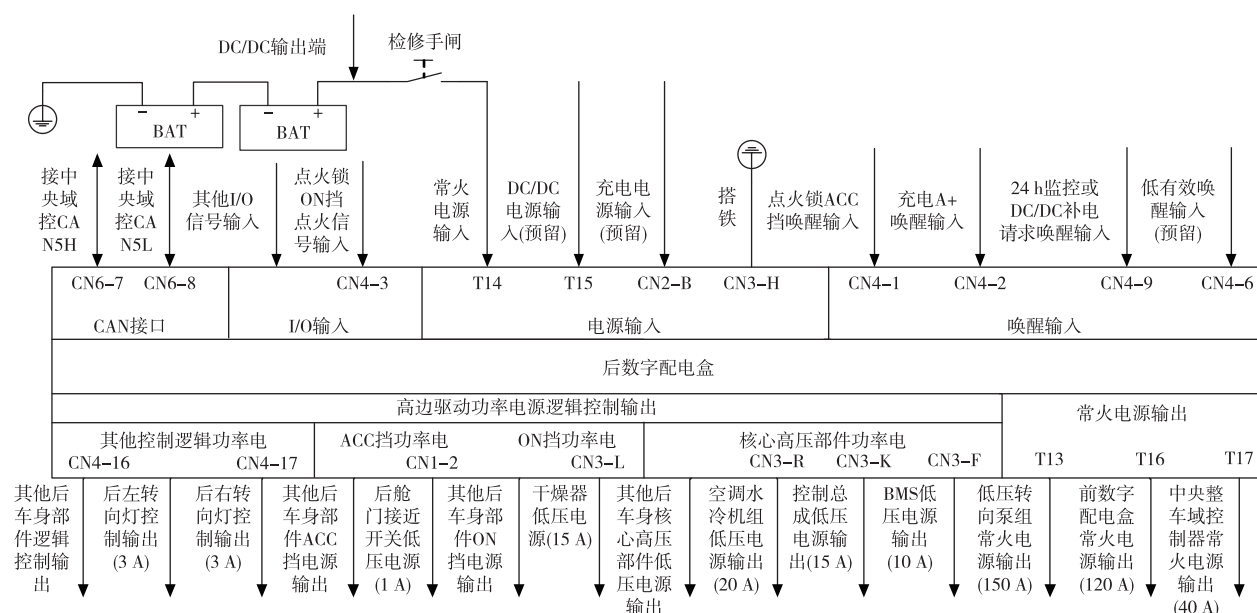


图3 后数字配电盒配电原理示意图

1) 电源输入。后数字配电盒采用常火供电设计,电源输入口与检修手闸的后端直接相连,共有3路电源输入。其中T15与CN2-B为预留接口,以满足系统冗余设计需求或未来扩容需求。

2) 唤醒输入。后数字配电盒不仅需要提供电源,还需要提供唤醒信号方能正常工作,共有4路唤醒源。行车时,唤醒源来源于CN4-1接口对应的点火锁ACC挡位信号;充电时,唤醒源来源于CN4-2接口对应的A+信号;24 h监控模式或DC/DC请求自动补电模式时,唤醒源来源于CN4-9接口对应的24 h监控或DC/DC补电请求唤醒信号(信号来源于中央整车域控制器K48);CN4-6接口为预留冗余设计。

3) I/O输入。后数字配电盒具备丰富的I/O输入接口,这些接口与车身后部车载传感器、执行器及控制系统相连。通过采集、处理这些输入信号,配电盒能够作出相应的响应,确保系统正常运行并安全进行智能功率分配,满足不同场景下的安全高效需求,设有专用于ACC挡及ON挡全车功能启动的输出管脚。此外,可根据实际需要,配置灵活多样的控制逻辑和设定高边驱动输出接口,以保证整个配电系统的可靠性和灵活性。

4) 电源输出。在后数字配电盒中,设计有多路

电源输出接口,每一路都配备有先进的电源管理模块和保护机制,以满足多样化负载设备的供电需求。低压配电关键输出包括常火电源与高边驱动两类管脚。其中,T13为低压助力转向泵提供持续供电;T16通过前后配电盒互联实现高效联动;T17确保中央整车域控制器稳定运行,协调全车电子系统。高边驱动输出针对BMS、控制总成等核心部件进行智能功率分配,以满足不同场景下的安全高效需求,并设有专用于ACC挡及ON挡全车功能启动的输出管脚。此外,可根据实际项目需要,配置灵活多样的控制逻辑和设定高边驱动输出接口,以保证整个配电系统的可靠性和灵活性。

5) CAN接口。后数字配电盒CAN接口连接至前配电盒与中央域控制器CAN接口,用于与中央域控制器、前配电盒进行数据交互和控制命令传输。整车配电系统的协调运行和信息共享,确保各个系统之间的正常通信和数据传输。

2.3.2 中央整车域控制器配电设计

在集中式低压配电架构设计中,中央整车域控制器是实现智能化、网联化和电动化的核心组件。中央整车域控制器负责将原本分散的各个子系统和功能模块整合到一个统一的架构下进行唤醒管理和控制。根据整车实际状态合理控制各电气系统的休眠与唤

醒,降低功耗,延长部件寿命;同时其承担了软件更新和新功能拓展的任务,使整个配电架构可根据未来需

求进行灵活升级和调整。其配电原理如图4所示。

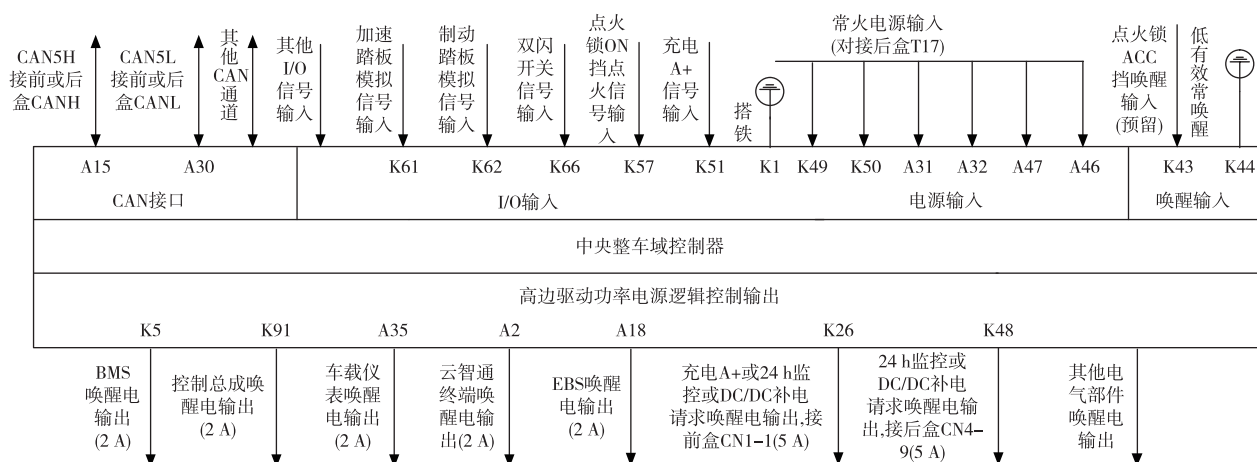


图4 中央整车域控制器配电原理示意图

1) 电源输入。中央整车域控制器采用常火供电设计,电源输入口与后数字配电盒 T17 直接相连。

2) 唤醒输入。中央整车域控制器配备 2 路唤醒源。其中,K44 常低唤醒接口负责实现 24 h 监控功能,确保车辆关键部件(如 BMS、云智通)被定时唤醒并上传符合 GB/T 32960.3—2016^[7]的整车数据至国家云平台。同时中央整车域控制器实时监测低压蓄电池电量,一旦检测到电池电量不足,启动 DC/DC 自动补电机机制防止蓄电池亏电。K43 则作为唤醒输入冗余设计预留口。

3) I/O 输入。中央整车域控制器配备的各 I/O 输入端口,其核心功能为实时捕获并处理各类车载传感器信号。根据实际应用场景与系统需求灵活配置接口定义,通过精准解析这些输入信息,实现对全车电气系统的智能休眠唤醒控制机制,从而达到集中化、高效化的唤醒管理及操作控制目标。

4) 电源输出。中央整车域控制器的高边驱动输出管脚专为具备唤醒功能的电气部件提供 24 V 电压唤醒信号,以确保其正常运作。各管脚功能各异,如 K5 负责唤醒 BMS,K91 负责唤醒控制总成,A35 负责唤醒车载仪表,A2 负责唤醒云智通终端,A18 负责唤醒 EBS。在特定模式下,K26 和 K48 分别对应唤醒前、后数字配电盒。其他部件的唤醒脚位也按需设计。这些输出管脚实现了整车系统的有效唤醒与协

调,提升了系统的工作效率。

5) CAN 接口。中央整车域控制器 CAN5 连接至前配电盒与后配电盒 CAN 接口,用于与前、后配电盒进行数据交互和控制命令传输。

2.3.3 前数字配电盒配电设计

前配电盒位于车头或驾驶舱附近,作为全车电气系统的核心分配节点,负责为车辆前端及中部区域的电气设备(如车载娱乐、灯光、雨刮和 ADAS 系统)提供低压电源,并根据车型配置智能调整供电方案。其与中央整车域控制器、后配电盒紧密协作,处理信号传输与控制指令,确保了车辆前方及中部区域电气设备的高效运作。其配电原理如图 5 所示。

1) 电源输入。前数字配电盒采用常火供电设计,共有 2 路电源输入。其中,T16 与后数字配电盒 T16 直接相连;T15 为预留接口,以满足系统冗余设计需求或未来扩容需求。

2) 唤醒输入。前数字配电盒不仅需要提供电源,还需要提供唤醒信号方能正常工作,共有 2 路唤醒源。行车时,唤醒源来源于 CN1-6 接口对应的点火锁 ACC 挡位信号;充电或 24 h 监控模式或 DC/DC 请求自动补电模式时,唤醒源来源于 CN1-1 接口对应的充电或 24 h 监控或 DC/DC 补电请求唤醒信号(信号来源于中央整车域控制器 K26);CN2-6 接口为预留冗余设计。

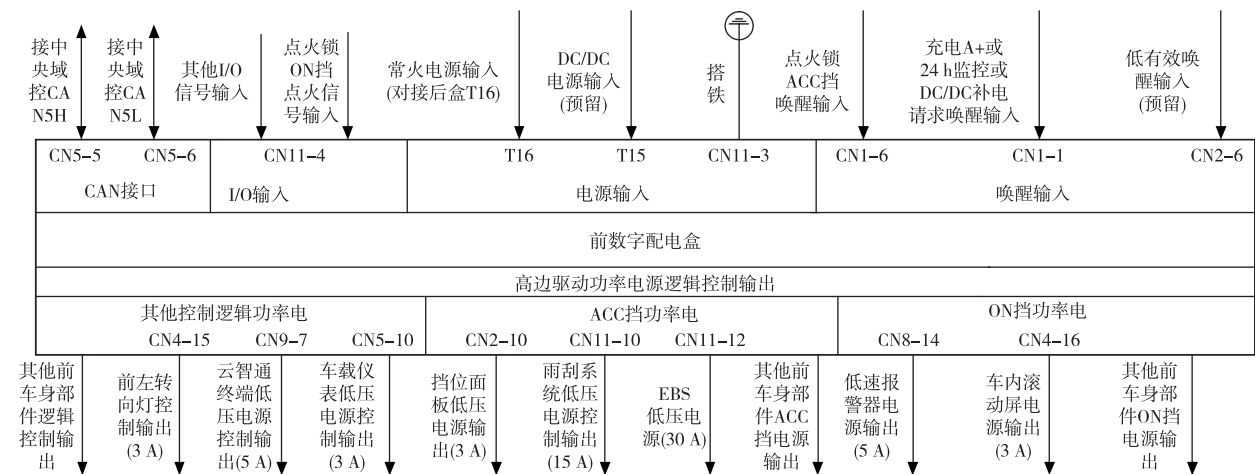


图 5 前数字配电盒配电原理示意图

3) I/O 输入。前数字配电盒具备丰富的 I/O 输入接口,这些接口与各类车身前部和车身中部位位置车载传感器、执行器及控制系统相连。通过采集、处理这些输入信号,配电盒能够作出相应的响应,确保系统的正常运行和安全保护功能的有效实施。具体接口定义可根据实际需求而定。

4) 电源输出。前数字配电盒设计有多路电源输出接口,每路均配备先进的电源管理模块和保护机制,针对前车身电气部件实现智能、安全且高效的功率分配。低压配电输出主要为高边驱动输出,特别为 ACC 挡及 ON 挡全车功能启动配置专用管脚。此外,可根据项目实际需求灵活定制控制逻辑,确保高边驱动输出接口既能满足多样化负载设备供电需求,又能保证整个配电系统的可靠性与灵活性。

5) CAN 接口。前数字配电盒的 CAN5 连接至后配电盒与中央整车域控制器 CAN 接口,用于与后配电盒、中央整车域控制器进行数据交互和控制命令传输。

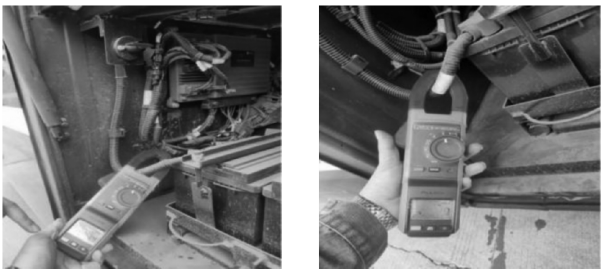
3 验证与分析

为验证本文提出的集中式低压数字配电系统的性能优势和可行性,选取 2 辆型号规格相同的 10.5 m 纯电动客车作为试验对象。这 2 辆车在低压配电系统方面分别采用本文提出的新型集中式配电方案(对应 1 号车)与传统分布式配电方案(对应 2 号车),其余参数均保持一致。

1) 系统集成与功能验证。对 1 号车进行了深度

的功能完整性测试,系统内部各组件之间的通信稳定可靠,能实时准确地采集和控制包括电压、电流在内的关键电气参数,并能有效地执行各类预设配电策略。在此基础上,针对不同工况模拟进行了验证,证实了该集中式低压数字配电系统在实际应用中响应迅速,能灵活适应不同的负载需求,实现了预期的智能化管理和控制效果。

2) 能效对比分析。首先在车辆熄火待机(关闭 ACC 挡位后静置 2 min)状态下,通过钳形电流表分别测量 2 辆试验车低压电池正极线路的输出电流,测试状态如图 6 所示。然后根据 GB/T 38146.2—2019^[8]中的测试方法,对 2 辆试验车的 DC/DC 转换器百公里能耗进行实测。具体测试结果见表 1。



(a) 1号车 (b) 2号车

图 6 静态电流测试图

表 1 静态电流与低压能耗测试数据

测试样车	静态电流/A	整车 DC/DC 百公里能耗/kW·h
1 号车	0.62	2.82
2 号车	1.12	3.69

3) 智能维护与故障诊断对比分析。在车辆保持静止状态下,同步对 2 辆试验车注入电池系统、电驱动系统、高低压电气系统以及辅助系统在内的多种常见故障。统计数据显示,在故障诊断速度方面,1 号车定位所有故障原因的时间比 2 号车至少快 40 min。此外,在故障定位准确性上,1 号车也展现出了明显优势,其准确率比 2 号车高 8.6%。

4) 稳定性与耐久性对比分析。基于 GB/T 38146.2—2019^[8]中的测试方法,对 2 辆车分别进行 8 000 km 的耐久测试,重点监控配电相关故障。测试结果显示,2 辆车在全程运行中均未发生任何配电系统故障,显示出良好的稳定性与耐久性。

通过以上对比试验表明,本文设计的新型集中式低压数字配电系统成功解决了传统架构的局限性问题,纯电动客车的配电效率、智能维护能力和整体可靠性得到了显著提高。

4 结束语

本文提出的集中式低压数字配电架构方案,通过采用森鹏 SDCF100/SDCR100 系列前后数字配电盒与英飞凌 TC234 整车域控制器构建的核心低压配电网络,成功解决了新能源客车配电环节中的线束复杂、能耗高、扩展性差和维护难等主要问题。但当前研究还面临着诸如系统成本效益平衡控制、智能化技术融合以及标准体系构建等挑战。为进一步提升方案的竞争力,未来工作将着重于三方面:一是通过创新材料选用、工艺改进、规模化生产等方式降低成本;二是研发适用于更复杂配电网络的高级算法,提升系统响应与决策能力;三是深化模块化与标准化设计,

使架构能够灵活适应不同车型和应用场景^[9]。旨在构建一个既高效、安全又可持续的新能源客车低压配电解决方案。

参考文献:

- [1] 吴成加. 电动客车智能低压配电系统集成设计[J]. 客车技术与研究, 2020, 42(1): 31-33.
- [2] 廖吉春, 林茜, 段卓琳, 等. 车辆低压配电系统断电故障分析[J]. 移动电源与车辆, 2023, 54(4): 41-45.
- [3] 《客车用半导体式低压配电设备安全技术条件》标准研讨会在郑州召开[J]. 城市公共交通, 2023(4): 103-104.
- [4] 曹炬, 钟晓蓉, 黄斌超, 等. 汽车智能低压配电系统[DB/OL]. 浙江中科正方信息技术有限公司[2017-06-13]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=z-1yOu6aphNIHjLE-5SUwixhG1kNqqK1chF8HVIbmN6T7trGh1aHoMq-tOwCp7OnvH7YuW4GBrw2cerLBbAFAR280NMxRv_CA0mClki2U_OFVKYNRh9qLBobcCDqZruOTgZ1ZuKV6duVArUGqmgww=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [5] 黄少华. 低压配电运行的应用范围及前景[J]. 企业技术开发, 2011, 30(19): 58-59.
- [6] 史凯萌. 智能低压配电系统中集中供电方法研究与设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车远程服务与管理系统技术规范 第3部分: 通信协议及数据格式: GB/T 32960.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 4-14.
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部. 中国汽车行驶工况 第2部分: 重型商用车辆: GB/T 38146.2—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 3-5.
- [9] 张瑾, 张鹏贤. 集中供热高低压配电监控系统[J]. 甘肃科技, 2011, 27(24): 74-76.