

城市轨道交通车辆的车载直流辅助供电^{*}

马颖涛^{1,2,3}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司机车车辆研究所, 100081, 北京;

2. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室, 100081, 北京;

3. 北京纵横机电科技有限公司, 100094, 北京//高级工程师)

摘要 目的:辅助供电系统是城市轨道交通车辆的重要子系统之一。传统的辅助供电系统为三相交流系统,辅助逆变器通常为三相逆变电源,为空调、空气压缩机、冷却风机等负载供电。近年来电力电子技术和信息技术的发展,电源和负载的性质都在发生变化,尤其是直流负载比例逐渐升高,直流供电的技术和经济优势正逐渐凸显。**方法:**为顺应直流供电的趋势,从轨道车辆辅助供电系统的基本需求出发,对比传统的交流辅助供电系统,讨论了直流辅助供电系统在节能方面的优越性。提出了一种直流辅助供电系统方案,并讨论该技术路线未来发展中的若干关键问题。**结果及结论:**设计了一种大功率直流变换器作为直流辅助供电系统的核心装置,搭建地面试验平台进行试验,验证了该大功率直流变换器的可行性。

关键词 城市轨道交通;直流辅助供电;直流变换器

中图分类号 U270.38⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.040

On-board DC Auxiliary Power Supply for Urban Rail Transit Vehicles

MA Yingtao

Abstract **Objective:** The auxiliary power supply system is a crucial subsystem of urban rail transit vehicles. Conventional auxiliary power supply system employs three-phase AC (alternating current) system, with three-phase inverter typically as the auxiliary inverter, providing power through air-conditioning, air-compressor, cooling fans. With the recent advancements in power electronics and information technology, both power and loads undergo significant changes. Particularly, as the proportion of DC loads gradually increases, the technical and economic advantages of DC power supply are gradually emerging. **Method:** Starting from the basic requirements of the rail vehicle auxiliary power supply system, compared with the conventional AC auxiliary power supply system, the superiority of the DC auxiliary power supply system in energy saving is

discussed. A DC auxiliary power supply system scheme is proposed and several key issues in the future development of this technology are explored. **Results and Conclusion:** A high-power DC converter is designed as the core device for the DC auxiliary power supply system. A ground test platform is established to experimentally validate the feasibility of this high-power DC converter.

Key words urban rail transit; DC auxiliary power supply; DC converter

Author's address Locomotive and Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., 100081, Beijing, China

随着中国城市轨道交通和城际铁路的快速发展,其对车辆装备需求也日益旺盛。辅助供电系统是车辆的重要子系统之一,其通过三相交流母线,为列车上空调、空压机、冷却风机和充电机等负载供电。

自2000年以来,交流系统以其变压方便等优势一直是车载供电系统的主流,但随着电力电子技术的发展,电源和负载都在发生显著变化,直流负载比例逐渐升高。直流供电的技术和经济优势正逐渐凸显^[1-2]:①可以有效地提高供电容量与电能质量;②减少电能变换的环节,降低电能损耗和运行成本;③不存在交流系统固有问题,如无功传递、频率稳定性问题、涡流与集肤效应问题及接入整流负载时交流电压畸变问题等。近年来多个工业领域^[5-8]也都在探索直流供电技术应用,取得了许多进展,为车载供电采用直流技术提供了借鉴。

中频化辅助变流技术在城市轨道交通车辆上的渗透率开始提升,空调等主要负载也开始采用变频技术^[9],车载辅助供电系统采用直流的条件逐渐

^{*} 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划重点课题(L2021J001)

成熟。为提升辅助供电的系统效率,城市轨道交通的运营商、制造商都在积极探索直流辅助供电的可行性。德国的克诺尔提出了一种直流架构的辅助供电系统解决方案。上海申通地铁也在预研直流辅助供电的可行性。

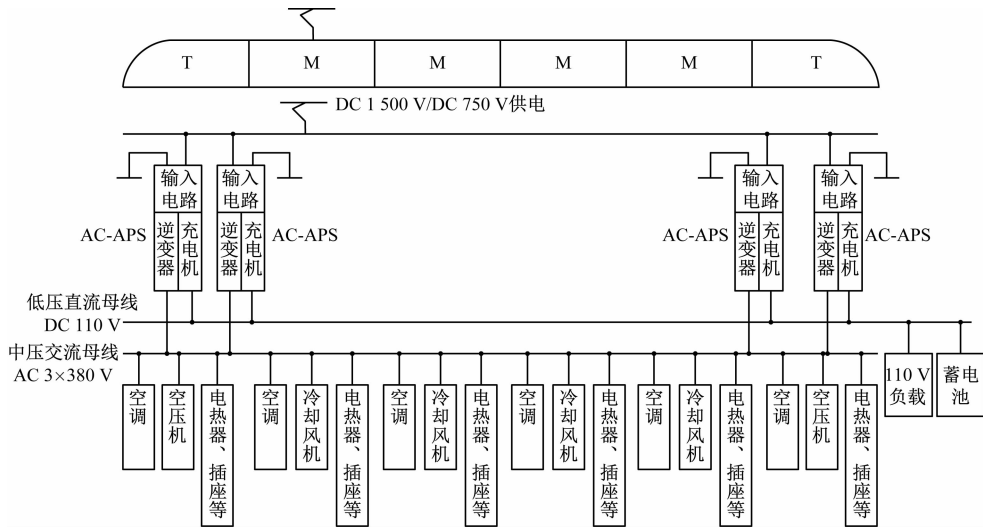
直流辅助供电系统中,辅助变流器将大范围变化的列车供电电压转换为稳定的直流电,并接入整车的直流母线并联运行。变频空调机组、充电机等直流类负载直接从直流母线取电,其他交流负载通过逆变器接入直流母线。

本研究首先介绍城市轨道交通列车上普遍采用的交流辅助供电系统,之后提出一种新型的直流

辅助供电系统,讨论其特点,提出若干关键问题。本研究研制了一种可用于直流辅助供电系统的大功率 DC(直流电)-DC 变流器,并在试验样机上进行了试验工作,验证了其可行性。

1 交流辅助供电系统

传统的交流辅助供电系统以 AC-APS(交流辅助变流器)为核心。列车通常需要多台 AC-APS,有多种方式对列车的负载供电,例如扩展供电、交叉供电和并网供电。不同的供电方式在可靠性、冗余性和系统复杂性上各有不同^[10]。目前并网供电已逐渐成为主流,如图 1 所示。



注:M 表示动车;T 表示拖车。

图 1 AC-APS 系统结构图

Fig. 1 AC-APS system structure diagram

以某 4 动 2 拖的典型地铁列车为例,AC-APS 中的逆变器将列车的直流供电转换为隔离的三相 380 V 交流输出,每台容量为 110 kVA。AC-APS 中集成了充电器,每台功率为 12 kW。列车上共有 4 个 AC-APS 单元,其交流输出通过贯穿整列的中压交流母线并联成网为负载供电,总容量为 440 kVA。4 台充电器直流输出 110 V,并联接入低压直流母线,总功率为 48 kW,足以满足列车 21 kW 的直流负载。

交流辅助供电系统的交流负载主要有空调机组(空调压缩机、冷凝风机、通风机),制动系统的空气压缩机,冷却风机(牵引逆变器风机、制动电阻风机),插座和电热系统等。最大负载为夏季时的 326 kVA。典型地铁列车负载容量分类情况如表 1 所示,空调机组的容量占比最大,高达 86%。

表 1 典型地铁列车负载容量

Tab. 1 Load capacity of a typical metro train

负载类别	容量
空调机组	282 kVA
空气压缩机	17 kVA
冷却风机	13 kVA
插座(220 V)	14 kVA
电热系统(选配)	61 kW

为实现节能效果和提升乘客舒适性,采用变频空调的列车逐渐增多。变频空调首先通过整流器将三相交流供电变为直流,然后再通过逆变器驱动空调压缩机和风机。其中整流器的效率通常在 97%。出于成本等因素的考虑,车载变频空调通常采用不控整流方案,即输入电流的谐波较大,会导

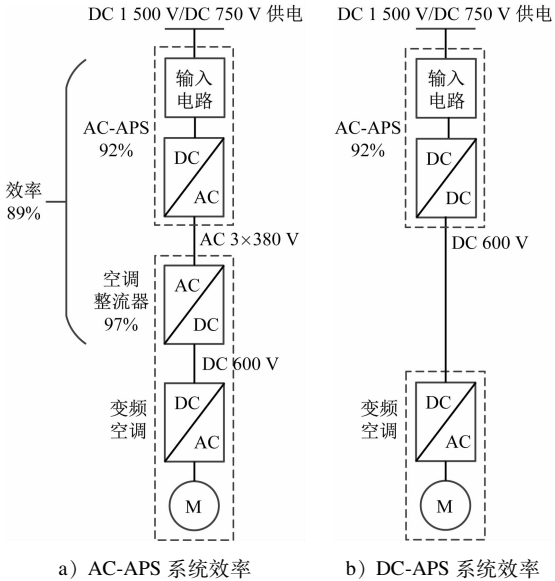
致交流电压出现明显畸变,对并网工作的 AC-APS 造成了负面影响,同时给交流母线的其他电机负载引入了附加损耗和转矩波动。但变频空调的整流器若采用功率因数校正的整流方式,功率半导体器件和输入电感的损耗会进一步降低整体效率。

AC-APS 的效率通常在 90% ~ 94% 之间。本研究取 AC-APS 的效率为 92%,则可以估算出 AC-APS 和空调整流器的总效率约 89%。辅助系统效率示意图如图 2 所示。

整列空调负载 282 kVA,按照功率因数 0.9 考虑,有功功率约 254 kW。这部分功率在通过 AC-APS 和变频空调中的整流器时,将产生近 31 kW 的损耗。若辅助变流器直接输出直流电给变频空调,系统效率可进一步提升。这不仅降低了变流器和负载损耗,也会显著降低设备自身的冷却需求,从而更有利于装备轻量化。

2 直流辅助供电系统

为实现车辆辅助供电系统的全局优化,从供电制式入手,对辅助变流器设备、用电负载、车载配电网络进行改造。本研究分析轨道交通车辆的车载电能需求,提出一种新型的直流辅助供电系统。



a) AC-APS 系统效率 b) DC-APS 系统效率
注:DC-APS 为直流辅助变流器。

图 2 辅助系统效率示意图
Fig. 2 Schematic diagram of auxiliary system efficiency

其电源装置采用 DC-APS(直流辅助变流器)。DC-APS 的主要功能是将列车的直流供电转换为可控的直流,并实现电气隔离。为提高供电可靠性,多台 DC-APS 并联成网,接入列车的中压直流母线。DC-APS 系统结构图如图 3 所示。

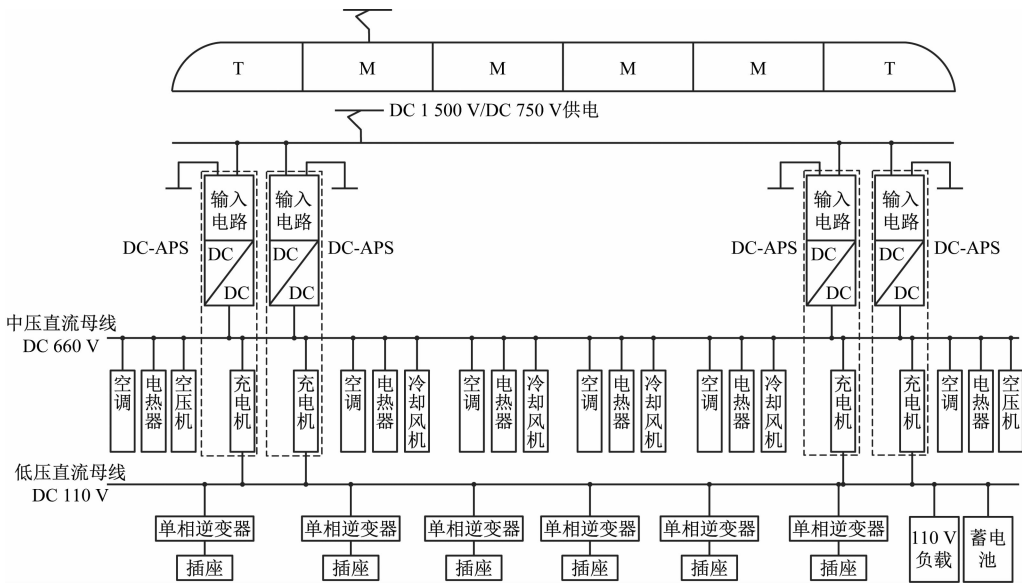


图 3 DC-APS 系统结构图
Fig. 3 DC-APS system structure diagram

列车上的中压直流母线为变频空调、电热系统、充电机、直流风机、制动系统的直流空气压缩机等直流负载供电。交流的冷却风机通过逆变器接入列车的直流母线。车厢内需要的方便插座,由单

相逆变器将低压直流母线 110 V 逆变为 220 V 单相交流电。

仍以某 4 动 2 拖的典型地铁列车为例,列车最大负载为 326 kVA、功率因数为 0.9,以 110 V 直流

负载 24 kW 为例,计算整车的变流器容量需求为 314 kW。列车上仍配置 4 台 DC-APS,则每台额定容量为 105 kW 即可满足整车的功率需求,即可具备单台 DC/DC 变流器故障时不影响负载正常运行的能力。

DC-APS 中通常采用高频软开关技术,效率可达 96% 以上,如图 2 b) 所示。和传统的交流辅助供电系统相比,APS 和空调负载的效率有望提高 7%。

直流辅助供电系统相比于交流系统减少了电能变换的环节,在效率、轻量化、系统稳定性等方面具有显著的优势,具体表现如下:

1) 更高效:减少电能变换的环节,降低电能损耗和运行成本。直流负载比例越高,节能效果越明显。

2) 更优的电能质量:规避了不控整流负载导致交流电压畸变所引起的一系列问题,包括降低系统效率、为其他交流负载引入谐波损耗和转矩脉动等。因此,直流供电系统可以提供更高的供电品质。

3) 系统轻量化:直流供电系统通过提升效率降低了变流器的容量需求。采用高频技术的 DC-APS,其功率密度相比于工频 AC-APS 能够实现显著提升,从而降低车重产生持续的节能效果。

4) 不存在交流系统的无功传输、频率稳定性等问题。

5) 便于动力电池储能、氢燃料电池等直流设备的接入,有助于为列车提供应急牵引和应急供电能力。

综上,直流辅助供电系统作为直流系统在轨道交通装备领域的应用,具备显著的性能优势,代表了未来发展方向。

3 若干关键问题

尽管直流辅助供电有上述一些优点,但是距离规模的工程应用仍有许多技术和工程问题需要作进一步研究,具体包括:

1) 电压等级的选择。电压等级选择涉及到因素很多,包括经济性、输电能力、可靠性和安全性等。因此直流辅助供电系统的电压等级是需要优先解决的问题。其基本原则是既应满足当前轨道交通车辆的辅助供电系统需求,也必须有利于直流辅助供电系统的产业化和推广。

综合输电功率、传输距离、供应链配套等各方面因素,初步比选直流电压的范围应该在 600 V 至

750 V 之间,额定电压选取是系统设计的首要问题,也是下一步研究的重点。

2) 电压质量问题。直流电压的波动包括了电压尖峰、电压跌落、低频波动、高频噪声等各种形式。直流电压的频率为 0,因此谐波畸变的概念不再适用。但是类比交流系统,可以考虑用直流电压的平均值除以直流电压的有效值,来衡量直流电压质量。

直流电压质量既与电源有关,也和所有的接入负载有关。装置的拓扑结构,开关频率,供电系统的拓扑,负载电流的纹波,电源之间的环流,都对直流电压的波动有直接影响。鉴于轨道交通车辆上的辅助供电系统是一个独立系统,可以由用户、整车制造商和部件供应商共同协商制定一个合理标准。辅助供电的电压质量不能影响列车和列车以外信号系统等的正常工作,同时也必须考虑系统的经济性。本研究建议,电压质量方面的设计原则是,对电源的电压性能提出指标要求,对负载的输入电流提出指标要求,进而保证直流母线的电压质量符合系统要求。

3) 稳定性问题。直流辅助供电系统中的电源和大部分负载都是电力电子装置,若阻抗不匹配,容易引起稳定性问题。需要针对该问题,对辅助供电系统的稳定性问题进行分析,通过合理的主电路参数设计和控制算法设计,确保该系统在所有工况范围内的稳定运行。并最终形成设计标准,对电源、负载的阻抗特性进行约束。

4 DC-APS 中的 DC-DC 变流器

直流辅助供电系统的电源设备中最关键的组成部分是大功率 DC-DC 变流器。本研究提出一种适用于城市轨道交通需求的大功率 DC-DC 变流器拓扑结构。移相全桥变换器和 LLC 型谐振变换器是目前广泛应用的 DC-DC 电路拓扑,两者均能实现变压器原边功率器件的软开关,可有效降低开关损耗。LLC 型谐振变换器除能实现原边器件零电压开通、低电流关断外,还能实现副边整流二极管零电流开关,且不需要输出滤波电感,具有更好的效率优势。本研究采用 LLC 型谐振变换器进行 DC-DC 变换。

中国的城市轨道交通供电通常采用 750 V 和 1 500 V 两种制式,为了提升产品的标准化水平,本研究提出了如图 4 和图 5 所示的 2 种电路拓扑。整

套电路分输入电路和 DC-DC 电路两部分,其中输入电路包括预充电模块、输入滤波模块和升压模块三部分,实现对输入电压的滤波和整形功能,以获得期望的 LLC 输入直流电压;DC-DC 电路为一套完整的全桥 LLC 型谐振变换器,包含单相逆变模块、谐振元件模块、变压器和不控整流模块共四部分,实现直流电压的变压隔离功能,并保证原副边开关管的软开关效果。仅需改变输入电路中的串并联结构即可灵活应对 750 V/1 500 V 供电制式的变化。

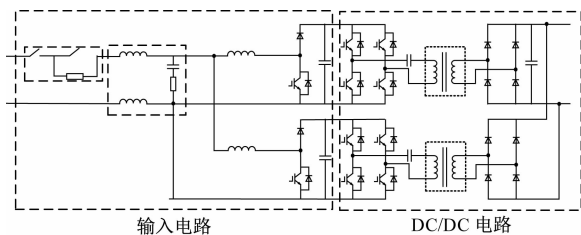


图 4 750 V 供电工况电路拓扑示意图

Fig. 4 Circuit topology under 750V power supply condition

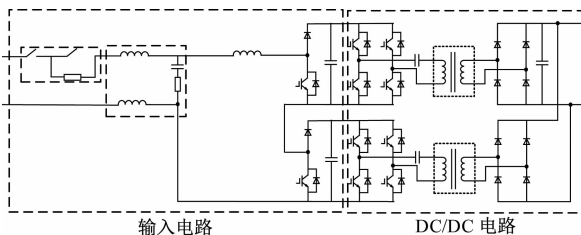


图 5 1 500 V 供电工况电路拓扑示意图

Fig. 5 Circuit topology under 1500V power supply condition

为了验证方案可行性,按照图 4 所示的电路拓扑搭建了样机并进行地面试验。试验样机的输入电压可以兼容 750 V 和 1 500 V 两种制式,输出电压为 700 V 可调,功率 120 kW。图 6 所示为 100 kW 负载下 DC-DC 变换器的工作波形。其中,CH1 为升压电路输入电流(50 A/div),CH2 为升压电路输出电压(200 V/div),CH3 为 LLC 电路原边方波电压(350 V/div),CH4 为 LLC 电路谐振电流(50 A/div)。综上可知,带大功率负载时,单台 DC-DC 变流器工作稳定,且能实现软开关效果。

图 7 为上、下两套 LLC 电路的工作波形,其中,CH1 和 CH2 分别为 2 套 LLC 电路谐振电流(50 A/div),CH3 和 CH4 分别为 2 套 LLC 电路原边方波电压(1 000 V/div)。由图 7 可知,2 套 LLC 型输出并联为负载供电时,输出特性一致,功率分配平衡;另外,2 套 LLC 电路采取相位交错控制,提高了

输出等效谐波频率,简化了输出滤波电容的设计。

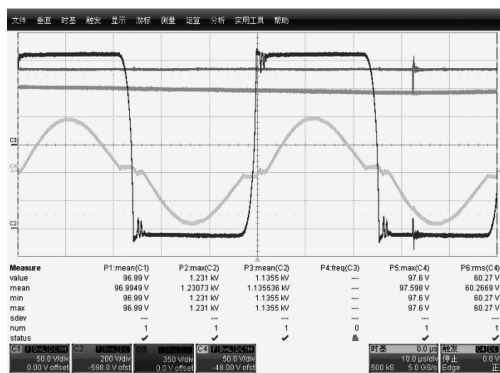


图 6 100 kW 负载下 DC-DC 变换器工作波形截图

Fig. 6 Screenshot of working waveform of DC-DC converter under 100 kW load

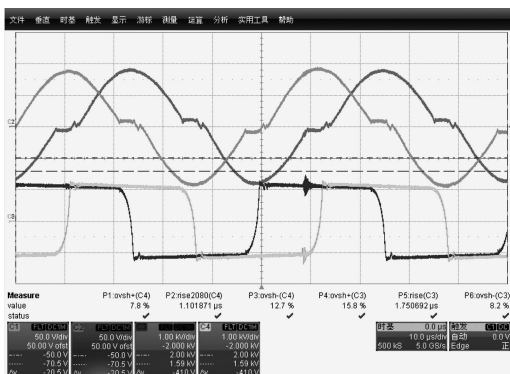


图 7 100 kW 负载下 2 套 LLC 型谐振变换器工作波形截图

Fig. 7 Screenshot of working waveform of the two LLC resonant converters under 100 kW load

5 结语

为顺应城市轨道交通车辆的技术发展趋势,进一步提升车辆装备节能水平,本研究提出了一种直流辅助供电系统。通过对直流辅助供电系统架构的优化,实现了系统效率和轻量化的提升。通过对比分析,讨论了直流辅助供电系统相比于传统交流辅助供电系统的优越性,并根据直流辅助供电系统方案的特点,提出若干亟待解决的关键技术问题。最后,开展了直流辅助变流器的方案设计和试验工作,验证了方案的可行性。

参考文献

- [1] 赵清良, 刘清, 曾明高. 城轨地铁车辆辅助电源系统研究与发展[J]. 机车电传动, 2012(1): 52.
ZHAO Qingliang, LIU Qing, ZENG Minggao. The development and research of auxiliary power supply system of the metro vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2012(1): 52.

- [2] 杜求茂, 陈中杰, 彭驹. 城轨车辆辅助供电系统的比较分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34(4): 53.
DU Qiumao, CHEN Zhongjie, PENG Ju. Comparison and analysis of auxiliary power supply systems for urban rail vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2011, 34(4): 53.
- [3] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy Internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133.
- [4] 郑欢, 江道灼, 杜翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3368.
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3368.
- [5] 赵彪, 赵宇明, 王一振, 等. 基于柔性中压直流配电的能源互联网系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4843.
ZHAO Biao, ZHAO Yuming, WANG Yizhen, et al. Energy internet based on flexible medium-voltage DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4843.
- [6] 付立军, 刘鲁锋, 王刚, 等. 我国舰船中压直流综合电力系统研究进展[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 72.
FU Lijun, LIU Lufeng, WANG Gang, et al. The research progress of the medium voltage DC integrated power system in China[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 72.
- [7] BROMBACH J, JORDAN M, GRUMM F, et al. Converter topology analysis for aircraft application[C]//International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Sorrento, Italy. New York: IEEE, 2012: 446.
- [8] 赖世能, 孙文波, 侯福平. 通信用 240 V 直流供电体系研究与发展策略[J]. 广东通信技术, 2013, 33(11): 2.
LAI Shineng, SUN Wenbo, HOU Fuping. Research and development strategy of 240 V DC power supply system for communication[J]. Guangdong Communication Technology, 2013, 33(11): 2.
- [9] 岳小鹤, 高博. 轨道车辆变频空调机组的应用及可推广性研究[J]. 铁路技术创新, 2011(5): 26.
YUE Xiaohe, GAO Bo. Study on application and popularization of variable frequency air conditioning unit for rail vehicles[J]. Railway Technical Innovation, 2011(5): 26.
- [10] 康亚庆. 地铁车辆辅助系统两种供电网络的分析[J]. 现代城市轨道交通, 2009(4): 27.
KANG Yaqing. Analysis of two power supply networks for metro vehicle auxiliary system[J]. Modern Urban Transit, 2009(4): 27.

(收稿日期:2022-09-29)

(上接第 226 页)

3 结语

目前支持三模态的城市轨道交通 ISCS 车站云节点的机制,已经成功地运用在深圳地铁 10 号线上。该机制通过车站云节点可运行多种模态,即能自由切换模态,并能满足正常运行、调试和降级等 3 种不同需求场景;降低了云平台故障或者控制中心和车站通信故障等给 ISCS 带来的灾害,极大地提升了基于云平台的 ISCS 的可用性和健壮性。

参考文献

- [1] 傅强. 城市轨道交通线路融合云平台方案探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(增刊 2): 40.
FU Qiang. Discussion on integration scheme of urban rail transit line with cloud platform[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(S2): 40.
- [2] 胡波, 路红娟, 李冰, 等. 基于云平台的综合监控系统建设方案[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(7): 158.
HU Bo, LU Hongjuan, LI Bing, et al. Development scheme of integrated supervisory control system based on cloud platform[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(7): 158.
- [3] 毛瑞, 毛蕊, 甄涛, 等. 轨道交通一站式云综合监控系统的实现[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(增刊 2): 50.
MAO Rui, MAO Rui, ZHEN Tao, et al. Implementation of integrated one-stop cloud monitoring system for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(S2): 50.
- [4] 秦佳宁. 基于城轨云的自动驾驶技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
QIN Jianing. Research on automatic driving technology based on urban rail cloud[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [5] 李冰, 肖声, 石琦, 等. 一种支持多态的轨道交通综合自动化系统车站辅节点的实现方法: CN202011039666. X [P]. 2020-09-28.
LI Bing, XIAO Sheng, SHI Qi, et al. A implementation method for supporting polymorphic station auxiliary nodes in rail transit integrated automation system: CN202011039666. X [P]. 2020-09-28.
- [6] 汤石男, 李冰. 基于云平台的城市轨道交通综合监控系统方案[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 76.
TANG Shinan, LI Bing. Integrated supervision control system scheme of urban rail transit based on cloud platform[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(5): 76.

(收稿日期:2021-06-30)