

下一代地铁列车关键技术方案设计*

崔霆锐¹ 李 熙² 张勇慧³ 张 骄¹

(1. 北京市地铁运营有限公司地铁运营技术研发中心, 102208, 北京;

2. 北京市地铁运营有限公司, 100044, 北京; 3. 北京京城地铁有限公司, 101312, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为解决我国地铁列车相关技术及装备日益发展的需要, 设计了以智能化、节能环保、高可用性、高适应性及高安全性为特征的下一代地铁车辆关键技术研究方案, 提出了智能化信息服务技术、新能源技术、新一代工业以太网技术、新型牵引制动技术及减振技术等列车关键技术。通过相关研究以推动我国城市轨道交通相关产业的升级优化, 提高轨道交通装备制造业在国际上的竞争力。

关键词 地铁列车; 牵引传动技术; 辅助供电技术; 网络控制技术; 减振降噪技术; 智能维保技术

中图分类号 U266:U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.12.014

Critical Technical Scheme Design for the Next Generation Metro Vehicle

CUI Tingrui, LI Xi, ZHANG Yonghui, ZHANG Jiao

Abstract Aiming at solving the growing needs for technologies and equipment related to rail transit vehicles in China, a critical technical scheme is designed for the next generation metro vehicle, which is characterized by intelligence, energy-saving and environmental protection, high availability, high adaptability and high security. A series of advanced techniques are proposed, such as intelligent information service, new energy technology, new generation industrial Ethernet, new traction-braking technology, vibration damping technology, etc. These related studies will promote rail transit industry upgrading and optimization in China, at the same enhance the international competitiveness of the equipment manufacturing in rail transit industry.

Key words metro vehicle; traction-braking technology; auxiliary power supply technology; network control technology; vibration damping technology; intelligent maintenance technology

First-author's address Subway Operation Technology Center, Beijing Mass Transit Railway Operation Co., Ltd., 102208, Beijing, China

目前,我国城市轨道交通在智能控制、信息服务及节能环保技术等领域还处于发展时期,与国际先进水平还存在一定的差距。因此,突破和掌握下一代地铁车辆的核心设计和试验验证技术,对提升轨道交通装备制造业在国际上的竞争力,引领城市轨道交通列车的技术发展具有重要意义。

下一代地铁列车采用模块化设计,探索地铁车辆新架构、新结构、新材料及新能源的技术应用,同时在智能控制、节能环保、监控一体化、工业以太网及在途信息智能服务等关键技术方面要有一定突破。因此,研制下一代地铁车辆新型牵引传动、制动及列车控制等关键子系统,开发具备低噪声、低能耗、高可用性、高适用性特征的地铁车辆,可全面提升城市轨道交通装备水平及服务品质。

1 地铁列车新能源牵引传动及辅助供电技术

为解决制动能量的回收利用和应急条件下的自牵引,地铁车辆需要从能量密度、功率密度及工程实施的可行性等方面开展研究,设计和配置适合下一代地铁列车的供电及车载储能系统(见图1)。储能技术现已成为城市轨道交通领域的研究热点^[1-2]。下一代地铁车辆辅助系统设计采用基于高频隔离技术的高功率密度辅助逆变器;采用基于铜铟镓硒柔性衬底技术的车顶辅助太阳能供电,其柔性薄膜光伏电池厚度小于3 mm;综合考虑安全性、循环寿命及功率特性等优势,采用以钛酸锂电池作为储能元件的备用辅助电源电池组。

1.1 牵引传动技术

为符合我国新型城镇化和城市现代化的发展需求,下一代地铁车辆要适应多种供电制式,既可满足城区地铁交通DC 1 500 V/DC 750 V等直流供

* 科技部“十二五”国家科技支撑计划(2015BAG13B01, 2015BAG12B02)

电条件,又能适应城郊 AC 25 000 V 的供电制式,还可依靠车载储能系统等备用动力在无电网的条件下短时运行^[3],通过优化牵引传动系统工作模式的切换控制策略,实现下一代地铁车辆同时具备双源制供电与备用动力运行的能力。

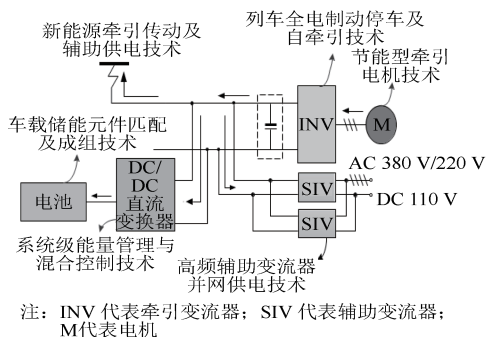


图1 应用车载储能技术的地铁列车供电系统

1.1.1 基于永磁直驱同步电机的牵引系统集成技术

永磁直驱同步电机具备重量轻、功率密度大、低速输出转矩大及效率高等优点^[4-5],其输出特性适用于直驱模式,可减少传动级别和效率损失。永磁直驱同步电机替代传统异步电机实现传动

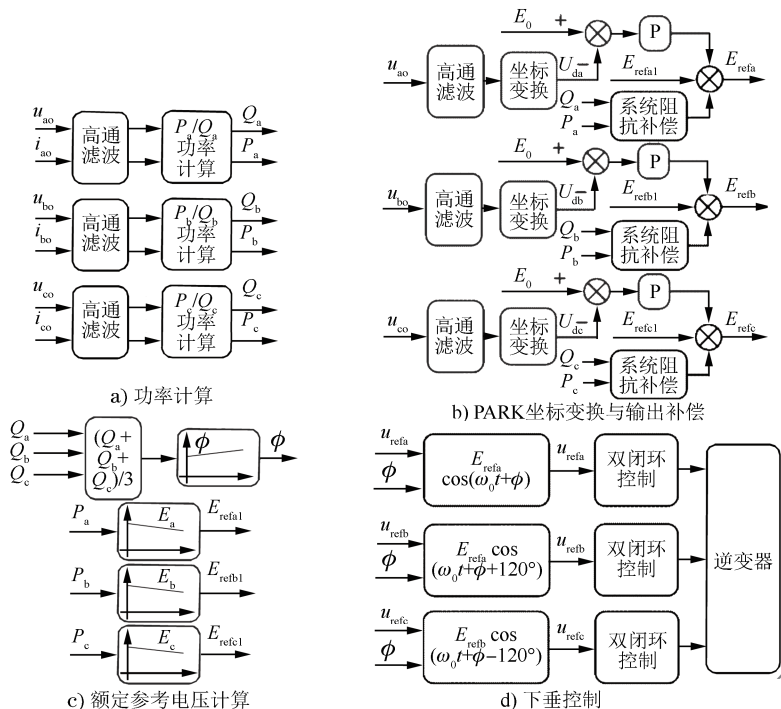
系统升级正在成为技术趋势。其关键技术包括:①基于轴控牵引系统供电转换的集成控制设计;②电机在空间和质量受限的高温振动环境下的绝缘技术与防失磁技术;③优化的电制动控制策略,配合车载和地面储能设备,实现全能馈动力制动功能。

1.1.2 全能馈动力制动技术

受控制算法、吸收能力等限制,既有地铁车辆不具备全电制动停车能力。而采用的下一代地铁列车制动系统优化控制策略,可直接采集减速度信号作为摩擦制动控制的反馈值。因此,开发基于闭环鲁棒减速度逻辑的控制策略,提高车辆减速度控制的实时性,配合可提升制动回馈能量吸收率的车载储能设备,可弥补传统控制方式的不足,以及实现电制动制停功能。

1.2 辅助供电技术

相比于现行的地铁列车辅助逆变器单台扩展供电模式,并网供电技术具有冗余度高、可靠性高、运行过程动态和静态性能良好等优势^[6]。实现并网供电技术需要研究新型辅助逆变器控制技术。基于下垂法的改进辅助逆变器控制技术如图2所示。无互联线的新型下垂控制技术可以避免逆变



注: u_{ao} 表示 a 相逆变器输出电压; i_{ao} 表示 a 相逆变器输出电流; P_a 表示 a 相有功功率; Q_a 表示 a 相无功功率; u_{bo} 表示 b 相逆变器输出电压; i_{bo} 表示 b 相逆变器输出电流; P_b 表示 b 相有功功率; Q_b 表示 b 相无功功率; u_{co} 表示 c 相逆变器输出电压; i_{co} 表示 c 相逆变器输出电流; P_c 表示 c 相有功功率; Q_c 表示 c 相无功功率; E_0 表示空载电压; U_{da} 表示坐标变换后 a 相电压幅值; E_{refa} , E_{refb} , E_{refc} 分别表示输出补偿后 a 相、b 相和 c 相电压幅值指令; E_a , E_b , E_c 分别表示 a 相、b 相和 c 相电压幅值; ϕ 表示电压相位; u_{refa} , u_{refb} , u_{refc} 分别表示输出补偿后 a 相、b 相和 c 相电压瞬时值指令; ω_0 表示电压角频率; t 表示时间

图2 改进的辅助逆变器控制技术

器间复杂的互联线和长距离通信带来的干扰,而辅助逆变器负载投切频繁,对控制的动态性能要求很高,因此需要研究动态响应快、稳定性高的下垂控制方法。

考虑到辅助逆变器的实际功率因数大于 85%,有功功率为其主要成分,若使额定功率下频率偏差控制在规定范围内,有功下垂系数将非常小,这将会影响辅助逆变器的均流性能;而采用无功功率下垂频率的方法可以在一定程度上提升均流性能,由于该方法需先将系统阻抗配置为阻性,因此在下垂控制技术中引入了主动输出阻抗控制技术。

2 新一代地铁列车网络控制技术

以太网作为一种局域网基本介质接入技术,由于其通信速率和灵活性较高,且实现亦较为简单,故近年来得到迅猛发展。与传统的 TCN(列车通信网络)相比,以太网设备成本更低、性能更高。目前正在研讨的新版 IEC 61375 标准包含工业以太网,且该标准对以太网的实时交互等相关内容进行了规定。

2.1 监控一体化的工业以太网

列车网络控制系统作为整车的“神经中枢”,对各部件及通信的安全性、可靠性和实时性有较高的要求,而工业以太网在传输机制上的特点,无法满足通信实时性的要求。因此需要从以太网硬件、以太网路由协议及软件协议等方面进行优化处理^[7],研究适合车辆通信形式的以太网拓扑结构,以提高通信的可靠性和实时性。

2.2 多网融合技术

多网融合技术是对车辆通信技术优化升级的优选方法。该技术研究应用于列车控制、监视及诊断的小容量实时信息与应用于旅客服务和视频传输的大容量非实时信息的并网传输技术,以及研究带宽介质有效分配和端口调度优化算法的多网融合技术。多网融合对以太网通信方式、控制方法及传输机制等方面提出了较高的要求,通过对通信形式的分类、优先级划分及优化调度算法等方法实现多网融合,从而建立可靠、安全的车辆网络通信技术。

2.3 列车黑匣子

列车黑匣子存储技术具备三防(防水、抗冲击、防火)功能,可以保障与列车安全相关的关键数据的可靠存储。列车黑匣子存储记录的数据不仅包

括列车运行中的视频、语音,以及列车运行状态关键数据等信息,还包括部分快速变化的控制信号数据,这些数据的分类存储以及事后检索是列车黑匣子存储技术的关键。另外,黑匣子数据记录是列车事故发生后,分析和追查事故原因的重要依据,同时考虑到防止事后人为修改的可能,因此引入关键数据的加密和签名技术也尤为重要。

3 地铁列车减振降噪技术

目前,城市轨道交通列车的噪声主要包括轮轨噪声、牵引电机噪声、空调噪声和辅助设备噪声^[8-10]。地铁列车轮轨噪声机理如图 3 所示。通过研究轮轨、电气设备及空调系统的噪声机理及控制技术,采用粘贴自由阻尼和约束阻尼,安装调谐质量阻尼器(TMD)和弹性车轮等,达到减振降噪目的,同时还要兼顾低噪声车轮对车辆系统动力学性能的影响。

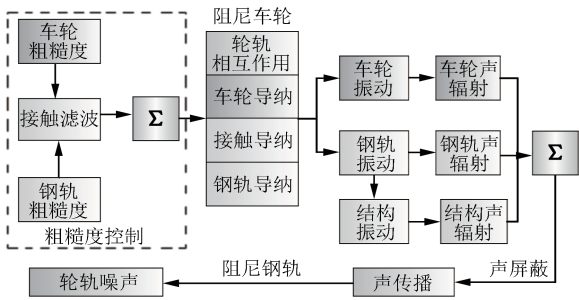


图 3 地铁列车轮轨噪声机理

在转向架结构传声技术方面,通过对轮轨激励下悬挂系统结构的传声路径和各悬挂部件的能量传递贡献量排序,确定影响转向架系统结构传声的关键悬挂部件。同时分析总结悬挂部件参数对悬挂系统隔振特性及转向架系统特性、振动能量传播与衰减的影响规律,确定关键悬挂部件结构传声的敏感参数。

4 地铁列车智能维保技术

现有的静态检测维保技术远远不能满足城市轨道交通的安全保障需求,因此需要运用系统的观点,从城市轨道交通体系的简洁高效维保、在途状态监测预警及专家诊断等方面开展技术研究。

下一代地铁在途智能监测预警与运维保障技术上将采用嵌入式 RTOS(实时操作系统)、多核计算、扁平网络及冗余备份设计,以构建系统的硬件平台和网络架构。采用基于实时状态融合的列车

安全状态故障特征因子提炼提取方法,研究列车安全状态典型故障的关键因子和关联关系,形成具有可重复性和验证性的列车安全状态故障成因推演技术,从而建立基于大数据隐患挖掘和安全预警的方法。结合历史故障链中的故障关键特征和实时状态的故障现场特征状态提取方法,建立基于时间窗融合与分析的现场特征状态的故障诊断数据模型,形成具有完备性和自主学习能力的故障诊断专家系统。

5 地铁线路试验验证及评估

下一代地铁列车的试验验证及评估包括常规地铁车辆性能,以及针对下一代地铁列车的主要技术特征,如全自动列车控制、新型制动技术、基于新能源应用的节能型牵引传动、智能化旅客信息服务等开展的新型试验。新型试验需要全面验证下一代地铁列车的相关技术指标,从而形成相应的技术标准和规范。

5.1 无人驾驶系统试验评估

智能无人驾驶系统的一般需求测试,包括自动投入运行、自动退出运行、自动停站、自动发车、自动折返以及自动运行时刻调整等自动驾驶功能以及相关的安全防护功能。此外,智能无人驾驶系统还包括无人驾驶条件下的侵入障碍物检测、防护检测、地面及车上侵入人员检测和防护检测测试、列车启动安全测试、车门智能监控与乘客防夹伤测试等。

5.2 双流制受电动态自侦测试验评估

该评估需要研究高压模块对交直流的通用性和适应性的影响、分析主电路的拓扑结构设计和关键电气设备、电压自诊断方式和切换方式以及牵引系统自适应调整技术等,并且需要分析相关评价指标和测试方法。

5.3 制动能量回馈存储率试验

针对地铁列车制动能量的回收和利用技术,采用针对回馈-储能型能量回收方法的效率试验技术,以及地铁列车制动能量的回馈率、存储率试验

及分析评价方法。

6 结语

当前城市轨道交通快速发展形势下,传统车辆已无法满足轨道交通装备对技术先进、安全可靠、经济适用、节能环保的实际运营需求。因此,开展下一代地铁车辆的研发和示范应用,对提升我国轨道交通装备自主创新能力,提高城市轨道交通车辆安全性和可用性,增强核心竞争力具有重要意义。

参考文献

- [1] 周新军.铁路利用新能源和可再生能源潜力分析[J].中外能源,2016(5):29.
- [2] 成建国,张一,文小龙.城市轨道交通新型车载储能系统的研制[J].城市轨道交通研究,2015(7):95.
- [3] 王志荣.双流制列车过中性段供电切换方案[J].都市快轨交通,2016(6):125.
- [4] PEROUTKA Z, ZEMAN K, KRUS F, et al. New generation of full low-floor trams: control of wheel drives with permanent magnet synchronous motors[C]//IEEE. Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, U. S.; IEEE, 2009: 1833-1840.
- [5] SIMANEK J, NOVAK J, CERNY O, et al. FOC and flux weakening for traction drive with permanent magnet synchronous motor[C]//IEEE. International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge, U.K.; IEEE, 2008: 753-758.
- [6] 唐朝辉,张丽勇.城轨车辆辅助供电方式比较分析与应用[J].科技创新与应用,2015(9):11.
- [7] 董继国,杨利强,李纯盛.城市轨道交通新型车载信号设备以太网网关的设计[J].城市轨道交通研究,2017(增刊1):22.
- [8] 张亚东,张继业,李田.高速列车整车气动噪声声源特性分析及降噪研究[J].都市快轨交通,2016(7):40.
- [9] THOMPSON D J, LATORRE I E, LIU X, et al. Recent developments in the prediction and control of aerodynamic noise from high-speed trains[J]. International Journal of Rail Transportation, 2015(3):119.
- [10] YU H H, LI J C, ZHANG H Q. On aerodynamic noises radiated by the pantograph system of high-speed trains[J]. Acta Mechanica Sinica, 2013(3):399.

(收稿日期:2018-01-31)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704