

智轨电车牵引系统设计与应用

谢斌, 李京, 文宇良, 郑汉峰

(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 智轨电车牵引系统采用一种高能量、高充电倍率的磷酸铁锂动力电池为车辆提供能源, 同时其永磁电机牵引的节能性与主电路设备的轻量化、可靠性设计保证了智轨电车续驶里程的最大化。文章概述了该牵引系统的组成及主要参数、牵引/电制动特性等, 并对其系统特点、参数计算方法及控制策略等进行了说明。

关键词: 智轨电车; 储能系统; 牵引系统; 永磁同步电机

中图分类号: U462; U260.13

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2020)01-0038-05

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2020.01.006

Design and Application of the Traction System for Autonomous-rail Rapid Tram

XIE Bin, LI Jing, WEN Yuliang, ZHENG Hanfeng

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In the traction system of autonomous-rail rapid tram, a kind of high-energy, high-charge-rate lithium iron phosphate power battery is used to provide energy for the tram. In addition, the energy-saving performance of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) and the lightweight, reliability of the main circuit equipment maximize the mileage of autonomous-rail rapid tram. This paper presented the composition and main parameters of the traction system, outlined its traction / electric braking characteristics. The calculation method, system characteristics, and the control strategies of the traction system were also introduced.

Keywords: autonomous-rail rapid tram; energy storage system; traction system; permanent magnet synchronous motor(PMSM)

0 引言

智轨电车由车载储能锂电池提供动力电源, 沿途不架设接触网, 采用首末站设置充电站方式进行补电, 因此车辆的续航能力与牵引系统的性能显得尤为重要。而永磁电机牵引系统具有损耗低、效率高、启动特性好、加速性能强及噪声低的优势, 成为了智轨电车牵引系统的首选方案^[1]。

本文从车辆的牵引性能需求出发, 介绍了采用车载锂电池的智轨电车牵引系统的设计方案; 根据车辆的参数设置, 计算了牵引系统的性能指标, 同时介绍了车辆主电路的拓扑结构与储能方式、辅助电源系统的电路结构及特点。

1 车辆参数及性能要求

智轨电车采用 100% 低地板型车体, 由胶轮驱动,

3 节编组 (=Mc1+Tp+Mc2=), 即 1 个带受电弓的拖车模块 (Tp) 和 2 个带司机室的动车模块 (Mc1 和 Mc2), 其相互之间通过铰接装置相连, 如图 1 所示。其主要技术参数如表 1 所示。



图 1 智轨电车编组示意

Fig. 1 Marshalling diagram of autonomous-rail rapid tram

表 1 智轨电车主要参数

Tab. 1 Main parameters of autonomous-rail rapid tram

参数	数值	参数	数值
车长/m	31.64	最高车速/(km·h ⁻¹)	70
车宽/m	2.65	最大爬坡能力/%	10
自重(AW0)/t	34	最小转弯半径/m	15
定员载重(AW2)/t	46	车辆减速比	7.385
满载车重(AW3)/t	51	车轮半径/m	0.446
最大载客人数/人	307		

收稿日期: 2019-12-10

作者简介: 谢斌(1976—), 男, 工程师, 从事智轨电车系统研发工作。

基金项目: 湖南省科技重大专项(2017GK1010)

1.1 动力性能

在平直干燥道路、新轮轮径、额定电压、额定载荷 (AW2) 工况下, 智轨电车的性能要求如表 2 所示。

表 2 智轨电车牵引性能参数

Tab. 2 Traction parameters of autonomous-rail rapid tram

性能参数	数值
车辆最高运行速度/(km·h ⁻¹)	70
平均加速度(0~40 km/h)/(m·s ⁻²)	≥ 1.0
平均加速度(0~70 km/h)/(m·s ⁻²)	≥ 0.7

在平直干燥道路、新轮轮径、额定电压、满员载荷 (AW3) 工况下, 智轨电车电制动力性能要求如表 3 所示。

表 3 智轨电车电制动力性能参数

Tab. 3 Electric braking parameters of autonomous-rail rapid tram

性能参数	数值
平均减速度(70 km/h~0)/(m·s ⁻²)	≥ 1.1

1.2 故障运行能力

车辆在空载 (AW0) 和正线 100% 最大坡道工况下, 当牵引动力损失 1/2 时, 能启动并以限速 20 km/h 维持运行到终点。车辆在 AW3 载荷和正线平直道路工况下, 当牵引动力损失 1/2 时, 可启动并以限速 20 km/h 维持运行到终点。

2 高压系统

智轨电车的高压部件通过功率电缆相连, 牵引系统高压主回路结构如图 2 所示。全车配备有 2 个电机控制器。每个模块配置 1 个电池组, 全车共配备 3 个电池组。行车过程中, 动力电池组输出的直流电通过电池高压箱、开关箱输送给电机控制器, 变换成频率、电压均可调节的三相交流电向永磁同步电机供电, 以驱动列车前进。Mc 车的电机控制器、辅助电源和直流空调均由开关箱完成配电, Tp 车厢的空调则由车顶高压箱供给。在充电站充电时, 通过司机室的“升弓”按钮及“无线充电”界面进入弓充模式。储能系统通过 WiFi/4G 与地面充电桩进行信息交互, 充电桩能实时响应储能系统的充电电压及电流需求, 通过射频定位使车辆与其对应的接触轨配对, 电流通过正负两根接触轨由受电弓依次进入 Tp 车的车顶高压箱和电池高压箱给电池充电。

在 Tp 车的车顶高压箱中设置有避雷、过流熔断保护和电能计量等装置。Tp 车的电池高压箱中有支路高压集电、故障支路冗余切断、支路电路检测、负载放电控制、过流熔断保护、手动维护开关 (MSD)、高压绝缘检测 (HVB) 及电池管理 (BMS) 等功能设备, Mc 车的开关箱中有母线滤波、各负载的配电及过流熔断保护等功能设备。

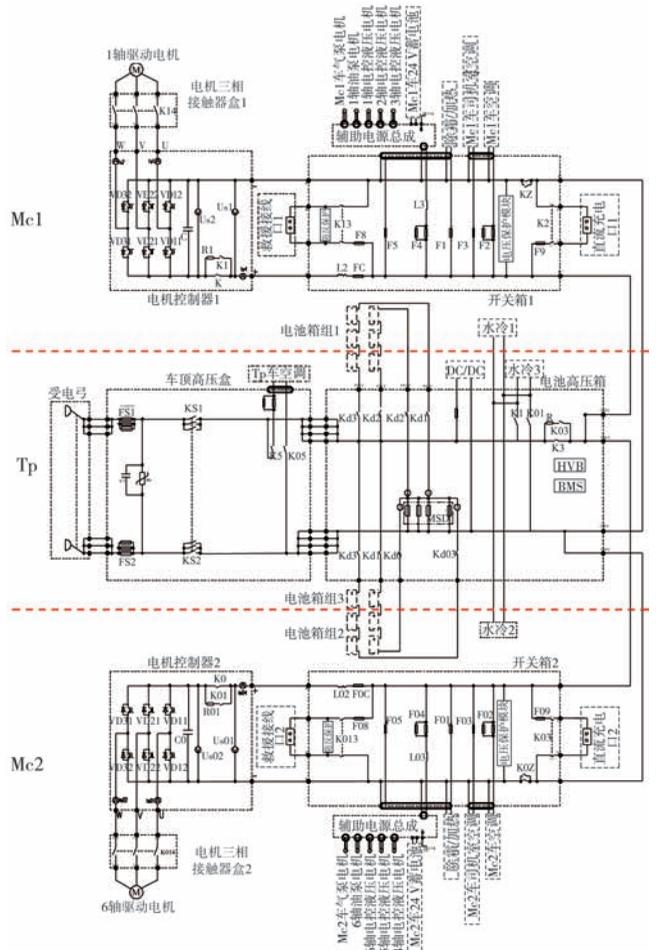


图 2 智轨电车牵引系统高压主回路
Fig. 2 High voltage main circuit of the traction system for autonomous-rail rapid tram

3 辅助电源系统

辅助电源系统的拓扑结构如图 3 所示, 其中辅助逆变器 (DC/AC) 为列车 1~6 轴的无轨导向电控液压机、转向油泵电机和制动风源空压机提供三相 380 V 交流电源; 直流充电机 (DC/DC) 采用高频变换为车辆提供稳定的 DC 24 V 电源, 以此作为列车直流照明、各系统控制回路以及车载信号系统和通信设备的直流电源, 同时为 DC 24 V 控制蓄电池组充电。

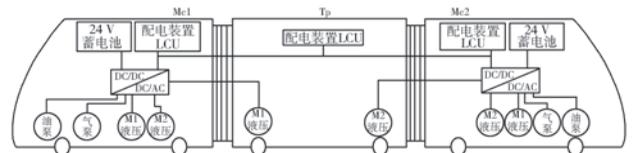


图 3 智轨电车辅助电源系统拓扑
Fig. 3 Topology of the auxiliary power supply system for autonomous-rail rapid tram

司机在一端开车时, 辅助电源通过激活信号为该司机室的方向助力油泵供电; 同时, 根据各负载的启动信号为 1~6 轴的液压机和空压机供电。由于车辆具有全轴转向特性, 在车辆行车过程中如果出现辅助电源供电故障, 将导致车辆失控等严重问题, 因此, 辅助电源的冗余策略就显得尤为重要。智轨电车辅助电源系统通过供电 AC 模

块及无轨导向负载的双重冗余，保证了车辆转向系统的可靠性。该辅助电源系统的冗余主电路如图4所示。

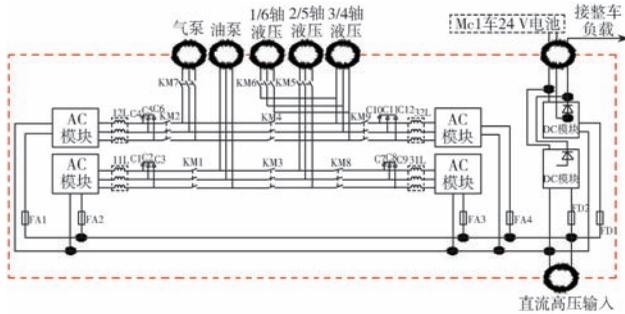


图4 辅助电源系统主电路

Fig. 4 Main circuit of the auxiliary power supply system

正常行车时，每个负载均由对应的AC模块完成供电；同时，在负载母线上设置冗余扩展接触器KM3和KM4，使得整车的每个负载均能通过冗余扩展供电接触器分别由对应的2个AC模块供电，实现冗余供电。此外，每个模块的无轨导向液压电机通过共用一个蓄能器实现液压电机的冗余；整车的风源管路的全贯通，也实现了两端空压机的负载冗余；整车DC 24 V电源则通过辅助电源的内部两个DC模块（DC/DC）并联与整车的贯通线实现双冗余。

4 储能系统

储能系统在车辆运行过程中提供动力源。由于智轨电车采用首末站充电方式，途中不架设接触网，为保证储能系统的电能及充放电功率能满足车辆的续航里程和运营的间隔距离要求，智轨电车采用了一种高能量、快充型磷酸铁锂电池作为储能装备，其基本参数如表4所示。

表4 智轨电车储能系统主要参数

Tab. 4 Main parameters of the energy storage system for autonomous-rail rapid tram

性能参数	数值
额定容量 / Ah	368
标称电压 / V	DC 643.2
工作电压 / V	DC 502.5~733.65
额定能量 / kWh	236.7
受电弓最大充电电流 / A	868
额定放电电流 / A	500
最大放电电流 / A	1 000
储能系统寿命	8年或60万公里

列车每个模块均配置一个电池组，通过电池高压箱并联后给车辆供电。系统配有电池管理系统，储能电池的各项信息能通过车辆控制诊断系统传输到网络系统。当任意一个电池组发生故障时，能通过电池高压箱中的并联接触器断开故障支路，实现储能系统的冗余供电。储能系统具备枪充及受电弓充电两种方式。在正式上线运营时，列车在充电站通过受电弓大电流充电，能达

到充电10 min至少行驶25 km的能力；在库内检修维护时，通过枪充方式对储能系统进行补电，枪充遵循国标GB/T 18487.1—2015《电动汽车传导充电系统 第1部分：通用要求》中的充电模式4要求，单枪充最大电流250 A。

电池管理系统（BMS）的主要功能包括：电池单体电压的检测、电池温度的检测、电池组支路工作电流的检测、电池组参数（SOC，SOH和SOP）的估测、电池故障分析与在线报警、各箱电池一致性评价、与车载设备/充电机和后台监控通信、数据的分析和数据库管理、绝缘检测及报警、电池电压均衡、电池热管理及火灾检测自动报警等功能^[2]。

5 永磁同步电机交流传动系统

智轨电车牵引系统采用高效节能永磁同步电机交流传动系统，其主要由受电弓、高压箱、电机控制器、储能系统、牵引电机及三相接触器盒等装置组成^[3]。

5.1 牵引特性

参照车辆动力性能要求，根据动力学中驱动力与各种行驶阻力平衡方程^[4]计算其列车牵引力：

$$\frac{T_{iq} i_g \eta_T}{r} = fG \cos \alpha + \frac{C_D A U_a^2}{21.15} + G \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt} \quad (1)$$

式中： T_{iq} ——电机转矩； i_g ——变速箱减速比（本车因无变速箱，取值为1）； η_T ——机械传动效率，本文 $\eta_T=0.93$ ； r ——滚动半径，本文 $r=0.446$ m； f ——滚阻系数，本文 $f=0.016$ ； G ——整车受到的重力； α ——坡道角度； C_D ——风阻系数，本文 $C_D=0.8$ ； A ——迎风面积，本文 $A=7.5$ m²； U_a ——车辆实时行驶车速； δ ——旋转质量系数，本文 $\delta=1.04$ ； m ——整车质量； du/dt ——车辆实时加速度。

车辆在不同速度、不同坡道下对应的电机转速 n 、转矩 T_{iq} 和功率 P 计算公式如下：

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{U_a \times i_o}{r \times 0.377} \\ T_{iq} &= \frac{(F_f + F_w + F_i) \times r}{i_o \times \eta_T} \\ P &= \frac{T_{iq} \times n}{9549} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： F_f ——行驶阻力； F_w ——空气阻力； F_i ——坡度阻力； i_o ——主减速比，本文 $i_o=7.385$ 。

根据式（1）和式（2）计算，当双电机最大转矩 T_{max} 为6 000 N·m，最大功率 P_{max} 为520 kW，并保持电机自然特性转速起点位于3 074.48 r/min（对应70 km/h车速的电机转速）之后时，满足平均加速度性能（0~40 km/h时，平均加速度 ≥ 1 m/s²；0~70 km/h时，平

紧急牵引模式下,牵引系统将不进行电制动,整车制动由气制动执行。牵引电机主要技术参数如表5所示,电机控制器主要技术参数如表6所示。

表5 牵引电机主要参数

Tab. 5 Main parameters of the traction motor

性能参数	数值
额定功率/kW	180
额定转矩/(N·m)	1 200
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 433
峰值功率/kW	260
峰值转矩/(N·m)	3 000
最高转速/(r·min ⁻¹)	3 500

表6 电机控制器主要参数

Tab. 6 Main parameters of the PMSM controller

性能参数	数值
额定输入电压/V	DC 640(DC 500~750 V)
额定容量/kVA	200
峰值容量/kVA	300

6 系统特点

智轨电车储能系统采用绿色环保的磷酸铁锂作为动力电池。磷酸铁锂电池具备能量密度高、使用寿命长、充放电平台稳定、安全性能优良等优势,使得智轨电车储能系统的能量密度大于140 W·h/kg,大约是超级电容器的15倍左右;其热失控温度达到500℃以上,相对于轨道交通常用的储能模式超级电容器,在能量密度、体积、成本方面均具有较大优势^[5];同时,由于智轨电车的“无轨”特性,高能量密度的磷酸铁锂电池带来的长续航里程使得智轨电车并不局限于现有道路的特点,能更好地发挥其性能,能够更灵活地应用。

车辆辅助电源系统在轻量化与高可靠性方面都有一定的提升。由于主电路与车体间的隔离,取消了隔离变压器,直流电流输入直接由DC/AC模块进行三相逆变、滤波。同时,Mc车的单台辅助电源内部能进行冗余扩展供电,减少了整车器件数量并缩短了冗余供电的时间,单个AC模块故障时的扩展冗余供电能在300 ms以内完成。

智轨电车所采用的永磁牵引系统相对于异步牵引系统,在牵引性能上具备多个优点^[1]。永磁牵引系统相对于异步牵引系统主要优势是节能,其综合节能指标达到30%以上^[6];其次,永磁牵引电机启动转矩大,特别是零速过载能力强,有利于列车重载坡道启动;最后,永磁电机由于谐波相对异步电机较小,且采用全封闭水冷结构,其在噪声方面性能也远优于异步牵引系统。

智轨电车采用高性能矢量控制策略^[7-8],低速段

采用异步SVPWM调制技术、中速段采用同步调制技术、高速段采用方波控制技术。在低速段,可充分利用IGBT的高开关频率特性(开关频率固定为2 000 Hz)来降低电机电流谐波;随着转速升高,在电机中速区,由于开关频率受限,采用同步调制技术可以保证输出电压脉冲对称,同样可以减少电机电流谐波,且输出电压开关频率与电机的运行频率保持严格的整数倍关系,依次为9分频、7分频和5分频;当电机处于高速区时,则采用方波控制技术,相对于普通的SVPWM调制,方波控制技术可以提高变流器的输出电压利用率10%,这样可以提高牵引系统的恒功率区域。智轨电车矢量控制策略如图8所示。

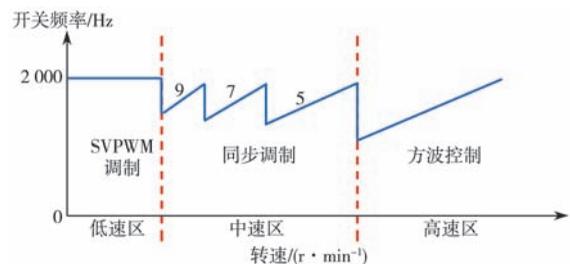


图8 智轨电车永磁电机控制策略

Fig. 8 Control strategy of the PMSM for autonomous-rail rapid tram

7 结语

智轨电车牵引系统为国内首次自主研发,目前已在株洲、宜宾、永修等地运行的列车上进行了载客运营考核,累计运行里程已经超过20万km。在运营过程中,该牵引系统表现稳定可靠,经受住了不同工况的考验,适应了无接触网供电和首末站充电的运营方式,运行情况良好;同时,还在2019年顺利通过了哈尔滨-20℃低温环境与卡塔尔50℃高温环境的试运行考验。

参考文献:

- [1] 冯江华. 轨道交通永磁电机牵引系统关键技术及发展趋势[J]. 机车电传动, 2018(6):9-17.
- [2] 许守平, 侯朝勇, 胡娟, 等. 大规模储能用锂离子电池管理系统[J]. 电力建设, 2014, 35(5):72-78.
- [3] 袁文焯, 陈文光, 夏文杰, 等. 集成式双向DC-DC储能低地板有轨电车牵引系统[J]. 机车电传动, 2016(4):73-76.
- [4] 郭千轶. 汽车动力性计算浅析[J]. 技术与市场, 2012, 19(6):207-208.
- [5] 胡志强, 游谭. 城市轨道交通车辆储能技术研究[J]. 科学技术创新, 2019(6):139-140.
- [6] 刘良杰, 陈文光, 刘雄, 等. 地铁永磁同步牵引系统节能技术研究[J]. 机车电传动, 2018(6):23-41.
- [7] 何亚屏, 文字良, 许峻峰, 等. 基于多模式SVPWM算法的永磁同步牵引电机弱磁控制策略[J]. 电工技术学报, 2012(3):92-99.
- [8] 文字良, 郑汉锋, 黄佳德, 等. 永磁同步电机方波控制技术探讨[J]. 机车电传动, 2018(6):26-32.