

北京地铁八通线列车牵引系统自主化改造设计

王 博 马法运 周双雷 王旭阳 曾凡飞

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛//第一作者, 工程师)

摘 要 北京地铁八通线原有列车牵引系统设备为日本东洋公司制造, 设备日常检修维护过程中存在检修费用高、周期长的缺点, 在对信号系统进行ATO(列车自动运行)改造时, 牵引核心设备需进行相关接口的修改, 这使得进口设备成本与用户需求的矛盾突出。对北京地铁八通线既有东洋牵引系统进行自主化改造设计, 在兼容原有牵引设备机械接口与电气接口的基础上提出了优化改造方案, 并在实际产品中进行了功能验证, 实现了对北京地铁八通线原列车牵引系统的替换和功能优化。

关键词 地铁; 列车牵引系统; 自主化改造; 兼容接口

中图分类号 TM922.3; U231

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.03.039

Independent Reconstruction Design of Train Traction System for Beijing Metro Batong Line

WANG Bo, MA Fayun, ZHOU Shuanglei, WANG Xuyang, ZENG Fanfei

Abstract The original traction system equipment of Beijing Metro Batong Line is manufactured by Toyo Corporation of Japan, which has shortcomings of high overhaul cost and long maintenance period. Therefore, in ATO (automatic train operation) transformation of the signal system, the modification of relevant interface for the core traction equipment is required, but contradictions between the cost of imported equipment and the demand of users become prominent. In the independent reconstruction design of imported equipment for Beijing Metro Batong Line, based on the compatibility with the mechanical and electrical interfaces of the original traction equipment, an optimization scheme is put forward, functions of the design are verified by actual products, thus the replacement and functional optimization of the original traction system for Batong Line has been achieved.

Key words metro; train traction system; independent reconstruction; compatible interface

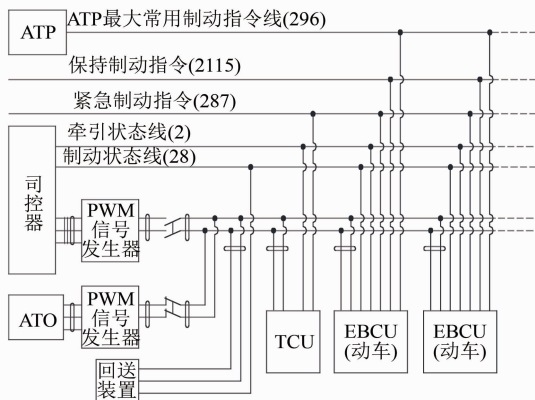
Author's address CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China

北京地铁八通线列车采用B型地铁车辆, 其牵引系统为日本东洋公司提供。列车自2003年投入使用, 陆续进入厂修期, 且地铁既有线路信号系统受早期信号技术发展水平的限制, 已无法满足现代地铁高密度运营和信号系统安全性的要求。为提升地铁线路运行效率、提高列车准点率、节约能源、降低设备维修及改造成本, 本文结合北京地铁八通线车辆厂修完成了对于牵引系统的自主化改造。

对原有牵引设备在使用过程中存在的问题进行了规避, 提出了适应ATO(列车自动运行)信号系统改造的指令传输方案、牵引制动特性优化方案、辅助电源系统拓扑改进及容量优化方案等改进项点, 并对改造后的系统进行了地面型式试验验证。自主化改造后的牵引系统在检修周期、检修成本、系统性能等方面均优于进口系统设备。

1 列车牵引系统指令传输方案优化

原有车辆牵引系统指令传输方案如图1所示。正常时ATO信号系统级位信息与司控器级位信息分别通过断路器QF1、QF2的互斥通断实现两种信息的切换控制, 但当QF1、QF2切换不及时而出现两者同时导通时, 将导致信号系统与司控器输出的级位信息叠加, 使级位信息的输出出现异常故障, 牵



注: ATP表示列车自动保护; PWM表示脉冲宽度调制; TCU表示牵引控制单元; EBCU表示电子制动控制单元

图1 原有列车牵引系统指令传输方案

引系统设备与制动系统设备接收到故障级位信息后无法完成固有功能,使列车在运行过程中存在风

险。针对该问题的自主化列车牵引系统形成了如图 2 所示的自主化指令传输优化方案。

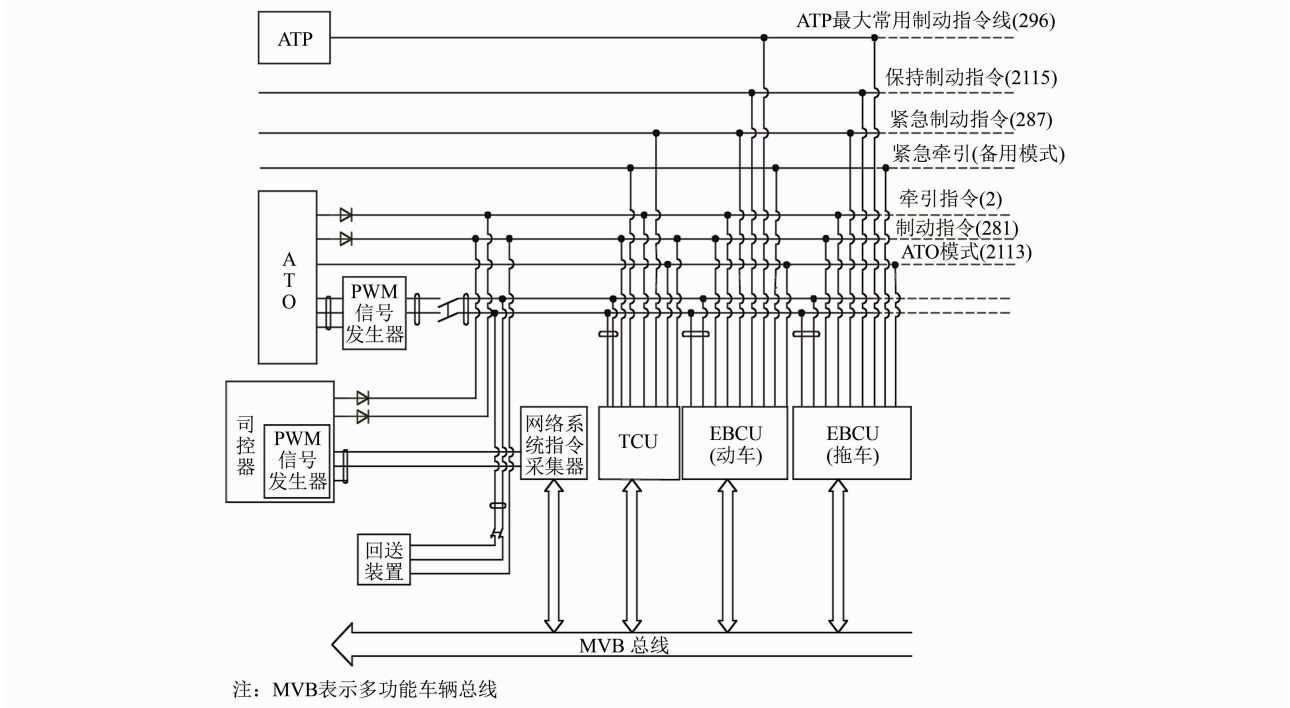


图 2 自主化列车牵引系统指令传输方案

自主化改造方案中,增加了网络 MVB 总线,ATO 信号系统级位信息仍通过 QFI 控制通断,但司控器的级位信息首先通过网络系统采集,通过 MVB 总线协议转发到牵引制动系统的相关设备。在物理路径上将两种指令信息的传输路径完全分离,避免了两种信息物理叠加带来的风险。同时,由于增加了 MVB 总线,网络系统可传输的数据量和速率将大大提高,牵引与制动系统的混合制动控制指令信息也均可通过网络系统进行传输,在保证电空混合制动性能的前提下节省了列车线和牵引制动系统间硬线的数量。

在优化方案改造中,为了避免因网络系统故障带来的风险,增加了列车紧急牵引指令线。当网络系统出现故障时,通过启动应急牵引模式保证列车能够自主运行回库。表 1 给出了牵引制动部分系统指令的传输方式和优先级的分析说明。

2 列车牵引系统自主化改造

北京地铁八通线列车牵引系统的技术参数如下。

1) 最高运行速度为 80 km/h,平均旅行速度≥37 km/h(平均站停时间为 30 s)。

表 1 系统指令传输方式与优先级分析

指令名称	指令来源	传送方式	指令优先级
牵引指令	① ATO 信号系统; ② 司控器手柄	硬线	①<②
制动指令	① ATO 信号系统; ② 司控器手柄	硬线	①<②
紧急牵引	紧急牵引模式按钮	硬线	无
级位指令	① 由司控器发出; ② ATO 模式下,由信号系统发出; ③ 回送模式下,由回送装置发出	① MVB 传输; ② 硬线; ③ 硬线	③>①>②

2) AW3(超常载荷)下,在平直线路上列车从 0 加速到 40 km/h 的平均加速度 $\geq 0.84\text{ m/s}^2$;列车从 0 加速到 80 km/h 的平均加速度 $\geq 0.5\text{ m/s}^2$ 。

3) AW2(额定载荷)下,在平直线路上,列车从最高运行速度到停车时,最大常用制动减速度 $\geq 1\text{ m/s}^2$,紧急制动减速度 $\geq 1.2\text{ m/s}^2$ 。

为保证 ATO 信号系统程序同时兼容自主化牵引系统和原有系统,牵引特性与原车既有牵引系统牵引特性保持完全一致,电制动特性在保证制动系统整体与原车制动系统参数一致的前提下,自主化系统优化了电制动特性曲线(全电制动区间由 5~60 km/h 提升至 5~63 km/h)。优化后的牵引制动特性曲线如图 3 所示。

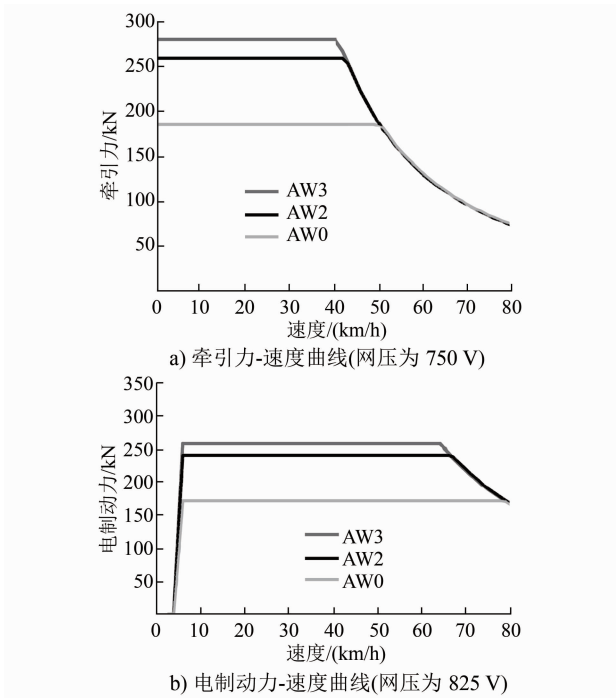


图3 自主化牵引系统牵引制动特性曲线

为适应电制动区间的提升,制动电阻的瞬时功率需要由 638 kW 提升至 696 kW。在兼容原制动电阻机械安装接口的基础上,自主化系统针对制动电阻进行优化改进,采取了优化电阻带材质、增加内部电阻带材的散热面积、降低制动电阻阻值等措施,提高了制动电阻吸收系统瞬时和整体能量的能力,同时为制动电阻增加了二次绝缘结构,保证了制动电阻具备足够的爬电距离。

通过 Flotherm 软件对电阻进行仿真分析,仿真结果见图 4。由图 4 可知,极端工况下电阻带的最高温度达到 550 ℃,小于电阻带正常使用的 600 ℃ 要求;当在电阻顶部增加隔热板时,仿真计算得到的制动电阻外围温度约为 50 ℃,这是由于电阻热量上移,行车过程中热量均通过隔热板与电阻带的缝隙进行耗散所致,优化改进的制动电阻完全满足设计要求。

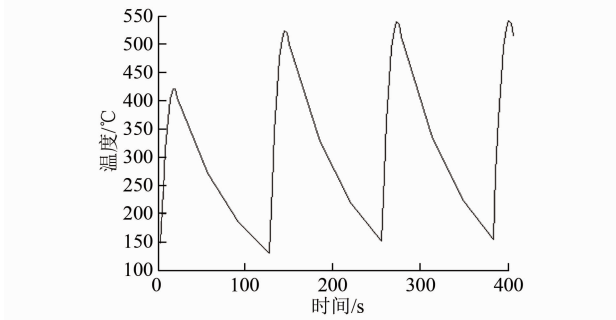


图4 制动电阻热仿真计算结果

为提升电空混合制动效率,对电空混合制动控制方式进行了优化改进。原有牵引系统不采集制动指令及制动级位信息,在电制动过程中牵引系统接收制动系统发送的制动力请求值,根据收到的电制动力请求值进行电制动力的输出,这种控制方式存在着由制动系统发送给牵引系统的电制动力请求的延时。自主化牵引系统方案中,牵引系统独立采集制动指令及制动级位信息,并依据采集到的信息采用与制动系统相同的制动力计算方法输出电制动力,并将实际输出的电制动力反馈给制动系统。信息传输方式如图 5 所示。

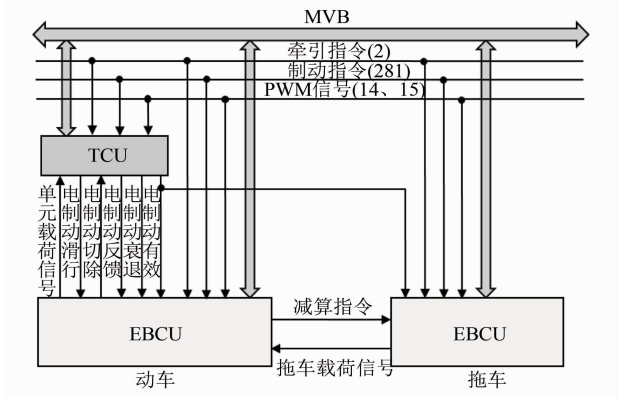


图5 牵引制动指令传输示意图

这种方式节省了制动系统发送给牵引系统的电制动力请求时间,提高了电空混合制动的效率,同时也避免了由于制动系统电制动力请求异常造成的故障,提高了牵引系统整体的可靠性。

通过以上改造项点,自主化牵引系统在完成了应具备功能的基础上,系统设备与原有设备相比质量有所减少,功率有了提升。相关的参数对比见表 2。

表2 自主化牵引系统设备与原有设备参数对比

项目	质量/kg		制动电阻功率/kW
	VVVF 逆变器	制动电阻	
自主化设备	783	200	60
原车设备	945	170	55

注: VVVF 表示变压变频

为保证自主化改造方案与原车系统性能的一致性,对自主化改进的牵引系统技术方案进行试验验证,分别在 AW3 载荷下牵引满级位运行至最高速和电制动满级位由最高速减至零速两种工况下进行试验。试验结果表明:

1) AW3 载荷牵引满级位运行情况下,恒转矩区域中,每台电机对应的牵引转矩约为 1 245.7

Nm,恒功率区电机牵引功率为 264.5 kW,列车在最高设计时速 80 km/h 时,电机转速为 4 054 r/min。当网压大于牵引额定电压 750 V 时,列车牵引特性不变;当网压小于 750 V 时,功率转折点随网压呈正比下降关系。

2) AW3 载荷电制动满级位运行情况下,每台电机在电制动时的最大转矩约为 1 106.6 Nm,最大电制动功率为 375.8 kW;此时列车电制动粘着系数为 0.174,电制动和基本阻力制动不足部分,由空气制动补充,以实现设计中的 1.0 m/s² 的最大常用平均减速度要求。当网压大于制动额定网压 825 V 时,电制动特性曲线与 825 V 一致;当网压低于 825 V 时,功率转折点与网压呈一次方比例下调关系。

自主化牵引系统在牵引和制动试验过程中电机速度变换平稳,输出电压电流无冲击,较好地验证了系统的可靠性。

3 辅助电源系统改造

自主化改造后,辅助电源变流器技术参数如表 3 所示。整流装置/充电机技术参数如表 4 所示。

表 3 辅助电源变流器技术参数	
参数	取值
直流电额定电压/V	750
额定容量/kVA	160
交流电输出电压/V	380(1±5%)
效率/%	≥90

表 4 整流装置/充电机技术参数	
参数	取值
额定电压/V	750
额定容量/kW	18
直流电输出电压/V	110(±3%)
纹波系数/%	≤5.0
效率/%	≥90

对于原车的辅助电源系统,辅助变流器采用 DC 750 V 直流母线,经过逆变单元、交流滤波单元、变压器单元输出 AC 380 V 交流电,容量为 140 kVA;整流装置采用 AC 380 V 交流电作为输入电源,经过变压器调压、不控整流桥(整流二极管)整流输出 DC 110 V 直流电,功率为 18 kW。其原理如图 6 所示。

自主化改造方案中辅助变流器仍采用 DC 750 V 直流电,通过逆变输出 AC 380 V 交流电,但容量提升至 160 kVA;通过优化控制算法,将辅助变流器的开关频率降低至1kHz,在保证输出电压波形质

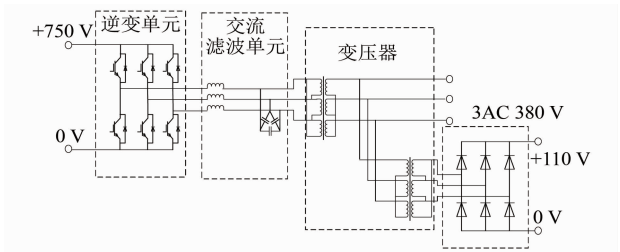


图 6 原有辅助电源系统拓扑图

量满足要求的基础上,提高了辅助变流器的整机效率。原车整流装置自主化后改造为充电机,亦采用 DC 750 V 直流电输入,功率为 18 kW。从而自主化的辅助系统在不改变既有设备机械安装接口的基础上,输出的总容量提升至 180 kVA,容量提升了 12.5%。自主化的辅助电源系统的原理如图 7 所示。

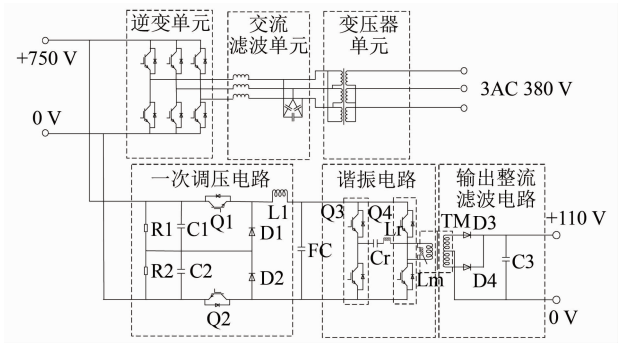


图 7 自主化辅助电源系统拓扑图

自主化的辅助电源系统的充电机独立于辅助变流器工作,使系统可靠性大大提高。充电机采用软开关技术,经过一次降压调压电路^[2]、二次 DC/DC 谐振电路^[3-4]组成的两级级联电路,输出电压可调的 DC 110 V 直流电,可在全负载范围内实现开关管的零电压开通(ZVS)和整流二极管的零电流关断(ZCS),降低了开关器件的开关损耗,充电机的输出效率有了较大提升,并对改造后的充电机进行了充分的试验。其输出波形如图 8~10 所示。

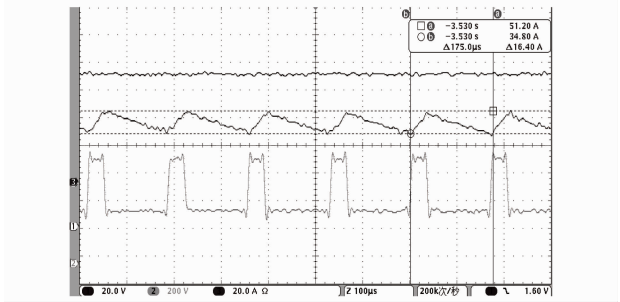


图 8 自主化充电机输出电压、输入滤波电抗器电流、BUCK 电路输出电压的波形实景图

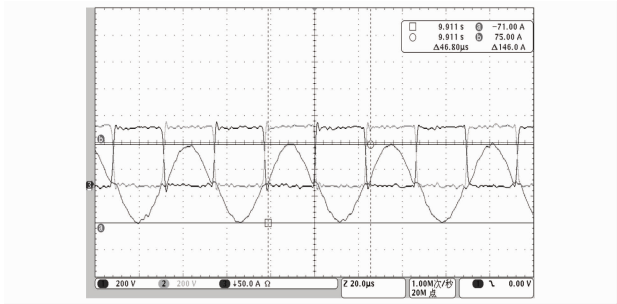


图9 DC/DC 谐振电路电压电流波形实景图

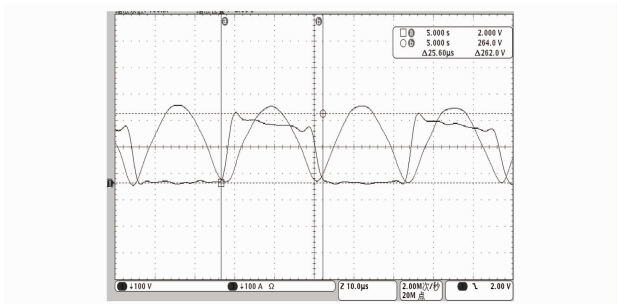


图10 整流二极管电压电流波形实景图

自主化的辅助电源系统设备相关技术参数与原车既有设备的相关参数对比如表5所示。

表5 自主化的辅助系统设备与原有设备参数对比

项目	质量/kg		效率/%		容量/kVA	
	辅助变流器	充电机或整流装置	辅助变流器	充电机或整流装置	辅助变流器	充电机或整流装置
自主化设备	978	955	92.56	94.3	160	180
原车设备	1 111	1 285	>90.00	91.00	140	160

在完全适应原车设备接口的基础上,由表5中的数据可知,自主化改造后的辅助电源系统整体

(上接第166页)

4 结语

本文通过对城市轨道交通车辆车门系统门控器电机驱动电路的控制原理、元器件功能进行分析,找到因驱动电路故障引起手动无法关门故障的根本原因,并提出提高门控器元器件质量、对门控器元器件进行合理选型,以及增加电机与门控器之间的开关等有效改进措施。为今后城市轨道交通车辆车门系统门控器的设计提供了一定的技术参考和依据。

容量、效率均有了较大提高,系统整体质量降低,也间接降低了牵引系统的整体能耗;且自主化改造后的充电机在满足既有负载用电需求的同时,提升了输出电压的品质,输出电压可跟随蓄电池的电压实时调整,降低了输出电压与蓄电池电压差对蓄电池造成的电流冲击,提高了蓄电池的使用寿命。

4 结语

对既有北京地铁八通线列车牵引系统进行自主化改造,在保证既有安装接口和电气接口的基础上,自主化后牵引系统提升了设备的容量、可靠性、效率,降低了设备体量和优化了既有设备。自主化设备在保留了与原信号系统的接口的同时,增加了ATO信号系统改造的相关接口与功能。系统整体方案已得到了试验验证,充分证明了自主化后的列车牵引系统能兼容、优化、替换既有进口系统的可行性。

参考文献

[1] 陈文光,丁荣军.国产化北京地铁列车牵引电传动系统设计[J].机车电传动,2006(7): 31.

[2] 薛雅丽.Buck 三电平直流变换器的研究[M].南京:南京航空航天大学,2003.

[3] 张静.基于FPGA的SPWM 逆变电源控制器研究[M].成都:西南交通大学,2013.

[4] DENG J J, LI S Q, HU S D, et al. Design methodology of LLC resonant converters for electric vehicle battery chargers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014(4): 1581.

(收稿日期:2019-01-18)

参考文献

[1] 隋德磊,李运国,尹亮,等.一种基于AD2S1200的永磁同步电机解码电路设计[J].铁道机车与动车,2018(3): 8.

[2] 高琦.地铁车辆车门安全联锁回路故障判断方法[J].城市轨道交通研究,2014(6): 138.

[3] 潘文海.广州地铁3号线列车车门控制器离线检测装置的设计与应用[J].城市轨道交通研究,2016(3): 141.

[4] 丁心凡.北京地铁4号线列车车门故障的改进分析[J].铁道机车车辆,2016(6): 101.

(收稿日期:2018-05-07)