

车载储能低地板有轨电车牵引传动系统设计与应用

夏 猛¹ 董先鹏² 马法运¹ 毕京斌¹ 田以涛¹ 李骄松¹

(1. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266111, 青岛;

2. 济南轨道交通集团建设投资有限公司, 250101, 济南//第一作者, 工程师)

摘 要 为实现低地板有轨电车在路口无接触网运行,设计开发了一种列车车载储能牵引传动系统。对车辆技术要求、列车牵引特性计算和设计、牵引传动系统主电路设计、牵引传动系统设计、列车车载储能装置能量管理策略等进行了介绍,并采用装车试验进行了验证。试验表明,该牵引传动系统可有效对列车车载储能装置进行能量管理,以及对列车车载储能装置的充放电电压及电流进行限制,可高效地利用整车在制动过程中的再生制动能量,提高了能量的利用率。

关键词 低地板有轨电车; 牵引传动系统; 车载储能

中图分类号 U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.035

Design and Application of a Traction System Based on Energy Storage Low-floor Tram

XIA Meng, DONG Xianpeng, MA Fayun, BI Jingbin, TIAN Yitao, LI Jiaosong

Abstract In order to realize the non-catenary operation of low-floor tram at intersections, a traction power system with on-board energy storage is designed and developed. In this paper, the technical requirements of vehicles, calculation and design of traction characteristics, main circuit design of traction system, design of traction power transmission system, energy management strategy of the on-board energy storage device are introduced and verified by loading test. The test result shows that the designed traction power transmission system can perform effective energy management of the on-board energy storage device, limit its charging and discharging voltage and current, and effectively use the regenerative braking energy of the whole vehicle in the braking process, improve the utilization rate of energy.

Key words low-floor tram; traction system; vehicle on-board energy storage

First-author's address CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

低地板有轨电车具有节能环保、乘车方便、舒适美观和造价较低等优点,属于中低运量的城市轨

道交通系统^[1-2]。为了降低架空供电线路对城市景观带来的影响,目前的解决方案是在主干路采用接触网供电,在路口取消接触网,采用车载储能装置供电,为车辆提供动力^[3]。

基于接触网+车载储能装置的供电方式中,目前车辆牵引传动系统所用储能装置的关键设备为充放电控制器,一般设置1台。该装置可为2台逆变单元提供能量。单台储能装置故障将使得2台牵引逆变单元无法通过储能装置进行能量的释放和吸收,导致牵引传动系统的冗余性较差。且车载储能装置进行充放电的DC(直流电)/DC控制器与牵引逆变器是2个独立且不同的设备,系统相对复杂,综合成本较高。此外,车载储能装置DC/DC控制器需要单独的控制器进行充放电控制,牵引和制动工况下与牵引逆变器能量管理控制的实时性和可靠性相对较低。

为解决上述问题,本文提出一种车载储能低地板有轨电车牵引传动系统方案。该系统可实现对牵引电机、制动电阻和储能装置的集中控制,亦可实现对储能装置的安全放电,确保检修安全。

1 低地板有轨电车车辆技术要求

低地板有轨电车车辆的基本配置为5辆编组。整列列车采用“2动+1拖+2悬浮”的动力编组型式:Mc1-F1-T-F2-Mc2(其中,Mc为带司机室的动车,T为拖车,F为悬浮车)。车辆总体技术要求如表1所示。

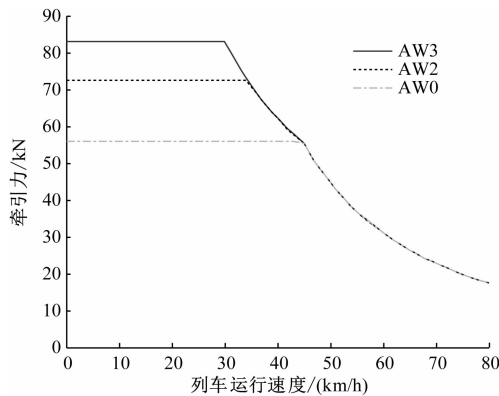
2 低地板有轨电车牵引特性计算和设计

结合低地板有轨电车车辆的总体技术要求,进行牵引特性计算和设计。不同载荷工况下列车的牵引、制动特性曲线如图1~2所示。

图1~2中,在牵引工况下,AW3时恒转矩区每台电机对应的牵引转矩约为957 Nm,恒功率区电机

表 1 低地板有轨电车车辆总体技术要求^[4]
Tab.1 General technical requirements for low-floor tram^[4]

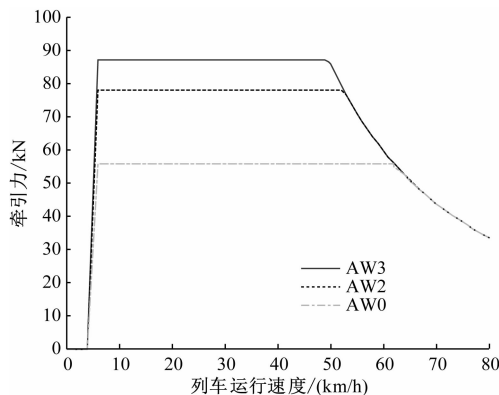
参数	取值或说明
列车最高运行速度/(km/h)	70.00
列车构造速度/(km/h)	≥80.00
列车运行速度为 0~40 km/h 时的 启动加速度/(m/s ²)	≥0.95
列车运行速度为 0~70 km/h 时的 平均加速度/(m/s ²)	≥0.60
列车运行速度为 70~0 km/h 时的 常用制动减速度/(m/s ²)	≥1.10
轴重/t	≤11.00
轮径/mm	580 或 540 或 500
供电方式	接触网 DC 750 V+车载储能



注:牵引额定电压为 750 V; AW0 为空载; AW2 为额定载荷; AW3 为超载。

图 1 低地板有轨电车牵引特性曲线

Fig.1 Traction characteristic curve of low-floor tram



注:制动额定电压为 825 V。

图 2 低地板有轨电车制动特性曲线

Fig.2 Brake characteristic curve of low-floor tram

牵引功率为 178 kW;在制动工况下,AW3 时恒转矩区每台电机对应的牵引转矩约为 944 Nm,恒功率区

电机牵引功率为 289 kW。

3 低地板有轨电车牵引传动系统主电路设计

车载储能低地板有轨电车中的 2 辆动车设置 2 个动力单元。每个动力单元包括 1 台牵引变流器、2 台牵引电机、8 套超级电容、2 台制动电阻和超级电容充放电控制装置。牵引传动系统主回路原理如图 3 所示。

牵引变流系统包括预充电单元、线路滤波单元、电流电压检测单元、2 组牵引逆变单元及牵引控制单元。每组牵引逆变单元均包括集成为一体的斩波模块和逆变模块,斩波模块包括制动斩波单元和 DC/DC 斩波单元。牵引变流单元为集成一体化结构,实现了 DC/DC 斩波单元的集成,简化了硬件电路并降低了成本。

DC/DC 斩波单元为双向 Buck-Boost 结构拓扑,可实现能量的双向流动。当处于 Buck 工作状态时,超级电容吸收外部能量;当处于 Boost 工作状态时,超级电容对外输出能量。

为了降低超级电容模组和车顶其他设备的检修风险,本系统在超级电容充放电控制装置内设置放电接触器。当车辆断电后,放电接触器闭合,自动将超级电容的能量通过制动电阻进行释放。

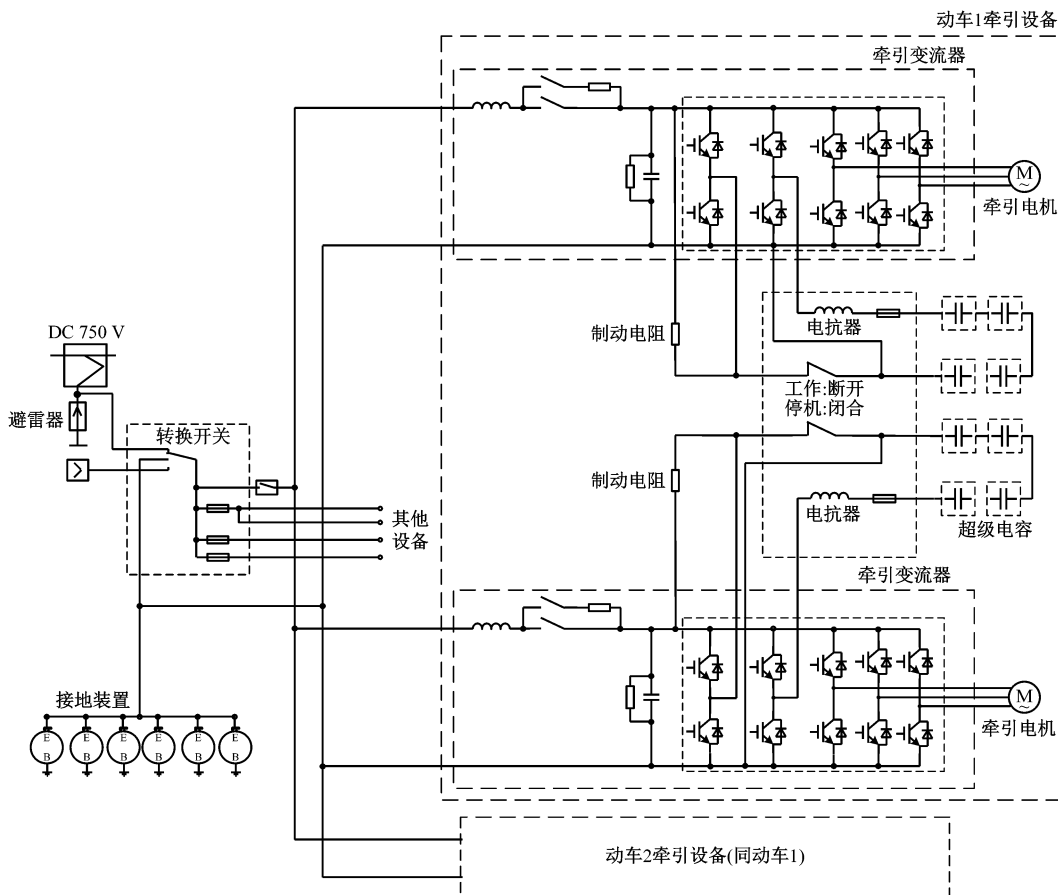
4 低地板有轨电车牵引传动系统设计

4.1 牵引变流器设计

每辆动车装有 1 台牵引变流器箱,变流器箱体内装有 2 个模块,每个模块分别驱动 1 个转向架上的 1 台电机。变流器模块采用强迫风冷。牵引变流器箱体内包含牵引控制单元(TCU)、控制变流器,并与列车进行通信。

变流模块集成了 5 个 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)元件,其可作为三相逆变器的三相桥臂、制动斩波相桥臂和 DC/DC 桥臂。变流模块还包括散热器、温度传感器、IGBT 驱动、驱动电源、电压传感器、支撑电容和低感母排等部件。变流模块具有强迫风冷、无吸收电路、结构紧凑、体积小、质量轻等优点。

变流器设置有 LC(电感电容)滤波电路。滤波电路可抑制或滤除电网电压、电流尖峰,并使电压保持稳定,将电压波动限制在允许范围内。牵引变流器主要技术参数如表 2 所示。



注:图中2个牵引变流器为集成的1个设备。
图3 低地板有轨电车牵引传动系统主回路原理

Fig.3 Main circuit schematic diagram of low-floor tram traction system

表 2 牵引变流器的主要技术参数

Tab.2 Main technical parameters of traction inverter	
参数	取值或说明
输入电压/V	DC 750(500 ~ 900)
额定输出容量/(kVA)	2 × 180
最大输出容量/(kVA)	2 × 360
输出电压/V	0 ~ 520
额定输出电流/A	2 × 220
10 s 最大输出电流/A	2 × 480
冷却方式	强迫风冷

4.2 车载储能装置设计

车辆通过无网区时限速运行。考虑 3 次起停工况,经计算,车辆通过 650 m 无电区的能耗为 0.95 kWh。考虑到电网电压为 DC 750 V,最低工作电压为 DC 500 V,且有停车后需要将储能装置的电能全部释放的需求。因此,选择最高工作电压为 DC 500 V、有效储能为 1.6 kWh 的超级电容组(4 组 4 串)作为车载储能装置。所选超级电容的主要技术参

数如表 3 所示。

表 3 超级电容的主要技术参数

Tab.3 Main technical parameters of super capacitor	
参数	取值或说明
串联数量/个	4
额定容量/F	63
额定电压/V	125
最大持续电流/A	240
冷却方式	强迫风冷
循环寿命/次	1 000 000

注:表中最大持续电流取值时的超级电容温度为 40 ℃。

4.3 双向 DC/DC 电抗器设计

Buck 模式下 1 个开关周期电流脉动(峰峰值)计算如下:

$$\Delta I_{p,Buck} = \int_0^{t_1} \frac{U_s - U}{L_{Buck}} dt = \frac{U_s D(1 - D)}{L_{Buck} f_s} \tag{1}$$

$$\Delta I_{n,Buck} = \int_{t_1}^t \frac{U}{L_{Buck}} dt = \frac{U_s D(1 - D)}{L_{Buck} f_s} \tag{2}$$

$$\Delta I_{p,Buck} = \Delta I_{n,Buck} = \Delta I_{Buck} \quad (3)$$

由式(1)一式(3)可得 Buck 模式下电感最小取值为:

$$L_{Buck} = \frac{U_s D(1-D)}{\Delta I f_s} \quad (4)$$

Boost 模式下 1 个开关周期电流脉动(峰峰值)计算如下:

$$\Delta I_{p,Boost} = \int_{t_1}^t \frac{U}{L_{Boost}} dt = \frac{UD}{L_{Boost} f_s} \quad (5)$$

$$\Delta I_{n,Boost} = \int_0^t \frac{U_s - U}{L_{Boost}} dt = \frac{UD}{L_{Boost} f_s} \quad (6)$$

$$\Delta I_{p,Boost} = \Delta I_{n,Boost} = \Delta I_{Boost} \quad (7)$$

由式(5)一式(7),得到 Boost 模式下的电感最小取值为:

$$L_{Boost} = \frac{UD}{\Delta I f_s} \quad (8)$$

式中:

$\Delta I_{p,Buck}$ 、 $\Delta I_{n,Buck}$ 、 ΔI_{Buck} ——分别为 Buck 模式下的充电电感电流增量、放电电感电流减量、电流脉动峰峰值;

$\Delta I_{p,Boost}$ 、 $\Delta I_{n,Boost}$ 、 ΔI_{Boost} ——分别为 Boost 模式下的充电电感电流增量、放电电感电流减量、电流脉动峰峰值;

U_s 、 U ——分别为电网电压和输出电压;

L_{Buck} 、 L_{Boost} ——分别为 Buck、Boost 模式下电感电流计算值;

f_s ——开关频率;

D ——占空比;

t_1 、 t ——分别为器件开通时间和开关周期。

稳态电流取 200 A, 电流纹波率取 0.2, D 取 0.5。根据式(4)和式(8)计算可得, L_{buck} 最小值为 1.875 mH, L_{boost} 最小值为 2 mH。综合考虑牵引传动系统电抗器设计取值为 2 mH。

5 列车车载储能装置能量管理

对列车车载储能装置进行能量管理时,首先为储能装置设定充电极限和放电极限。充电极限分为主动充电极限 $U_{cmax,act}$ 和被动充电极限 $U_{cmax,pass}$, 分别对应主动充电速度极限 $V_{max,act}$ 和被动充电速度极限 $V_{max,pass}$, 且 $U_{cmax,act} > U_{cmax,pass}$, $V_{max,act} > V_{max,pass}$ 。放电极限分为主动放电极限 $U_{cmin,act}$ 和被动放电极限 $U_{cmin,pass}$, 分别对应主动放电速度极限 $V_{min,act}$ 和被动放电速度极限 $V_{min,pass}$, 且 $U_{cmin,act} >$

$$U_{cmin,pass}, V_{min,act} > V_{min,pass}$$

当列车车载储能装置的电压 $U \geq U_{cmax,act}$ 时,则强制对储能装置放电;当 $U \geq U_{cmax,pass}$, 则停止对储能装置充电;当 $U \leq U_{cmin,pass}$, 则禁止储能装置放电;当 $U \leq U_{cmin,act}$, 则强制对储能装置充电。

列车车载储能装置主动充电和被动充电曲线见图 4, 主动放电和被动放电曲线见图 5。

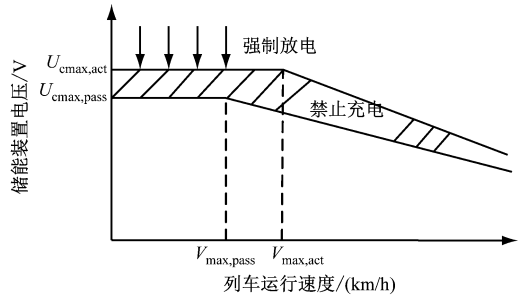


图 4 列车车载储能装置主动充电和被动充电曲线

Fig. 4 Active and passive charging curves of train on-board energy storage device

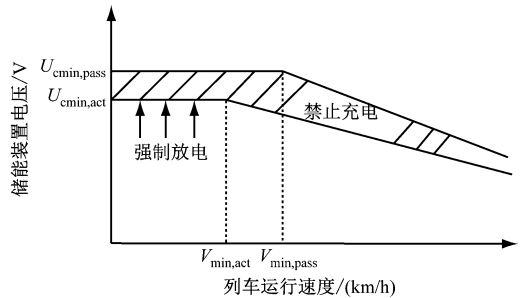


图 5 列车车载储能装置主动放电和被动放电曲线

Fig. 5 Active and passive discharge curves of train on-board energy storage device

6 试验验证

为了验证车载储能低地板有轨电车牵引传动系统能正常发挥牵引力和制动力,应控制超级电容和制动电阻工作,以满足车辆的技术要求。因此,对低地板有轨电车牵引传动系统进行了装车试验。试验结果如图 6~7 所示。其中,图 6 为有网区牵引传动系统运行波形,图 7 为无网区牵引传动系统运行波形。由图 6~7 可知,在有网区和无网区,牵引传动系统运行良好,超级电容两端电压和充放电电流应按照能量管理策略作适时调整。同时,经超过 10 万 km 的载客运行考核,牵引传动系统工作稳定,进一步验证了系统设计的正确性和可靠性。

7 结语

低地板有轨电车牵引传动系统的牵引逆变单元

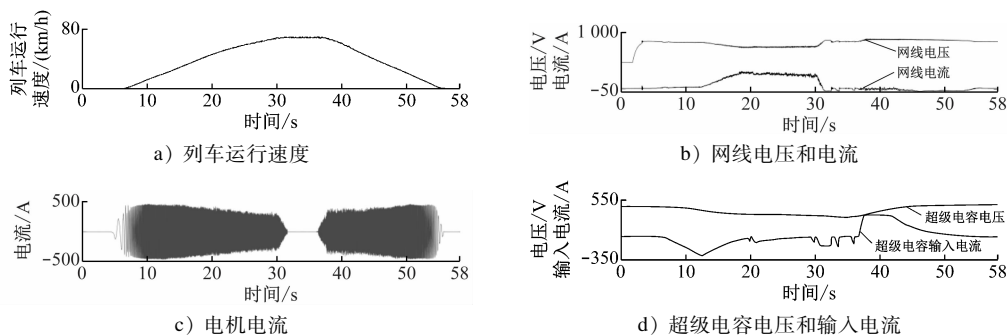


图6 有网区牵引传动系统运行波形

Fig. 6 Operation waveform of traction system in power supply area

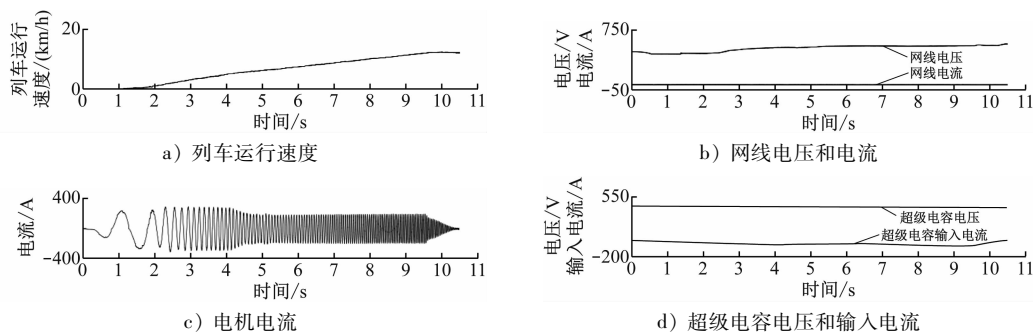


图7 无网区牵引传动系统运行波形

Fig. 7 Operation waveform of traction system in area without power

为集成一体化结构,实现了DC/DC斩波单元的集成,简化了硬件电路并降低了成本。且其控制单元可实现对整个逆变器的集中控制,不需为每个功能模块设计单独的控制器,以实现牵引电机、制动电阻和储能装置的集中控制,提高了控制的实时性和可靠性。对储能装置进行安全放电,确保了检修安全。本文按照有轨电车技术要求,设计开发了一种车载储能牵引传动系统,实现能量高效、安全的管理,并通过试验验证了方案的合理性。

参考文献

- [1] 张海军. 对我国现代有轨电车发展应用的思考[J]. 城市轨道交通研究,2015(7): 119.
ZHANG Haijun. Prospect of modern tram application in China [J]. Urban Mass Transit,2015(7): 119.
- [2] 韩志彬,李芾,黄运华. 我国有轨电车的发展现状与应用前景

[J]. 机车电传动,2018(2): 7.

HAN Zhibin, LI Fu, HUANG Yunhua. Development status and application prospect of domestic tram[J]. Electric Drive for Locomotives,2018(2): 7.

- [3] 周传河,马艳波,刘洪涛. 长客现代有轨电车的发展[J]. 现代城市轨道交通,2013(5): 11.

ZHOU Chuanhe, MA Yanbo, LIU Hongtao. Development of modern tram in Changchun Railway Vehicle Co. Ltd. [J]. Modern Urban Transit,2013(5): 11.

- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 低地板有轨电车车辆通用技术条件:CJ/T 417—2012[S]. 北京:中国质检出版社,2012.

Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. General technical specifications for low floor tramcar: CJ/T 417—2012[S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd., 2012.

(收稿日期:2019-11-26)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com