机车电传动 2017 年第 6 期 (2017-11-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №6, 2017(Nov. 10, 2017)

文章编号：1000–128X(2017)06–0096–05

自主化超级电容低地板有轨电车牵引系统

夏文杰，陈文光，袁文烨，许义景，应　婷

（中车株洲电力机车研究所有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：介绍了自主化超级电容低地板有轨电车性能参数及主要特点，阐述了牵引电制动特性、高压系统、储能系统、牵引主电路及关键参数，根据功率型超级电容特点对牵引系统进行了匹配性设计，分析了自主化牵引系统与进口牵引系统的对比情况。该车已完成线路型式试验，各项性能指标满足设计要求。

关键词：低地板有轨电车；牵引系统；牵引逆变器；超级电容

中图分类号：U482.1　　**文献标识码：**A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.021

Traction System for Supercapacitor Low-floor Light Rail Vehicle with Independent Intellectual Property Rights

XIA Wenjie, CHEN Wenguang, YUAN Wenye, XU Yijing, YING Ting

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

Abstract: Parameters and performance requirements of supercapacitor low-floor light vehicle was introduced, and T/B characteristic of electric traction system, high-voltage system, energy-storage system, main circuit and key parameters of the drive system were expounded. Matching design was carried out for the traction system to meet the supercapacitor' s characteristics. Moreover, traction system with independent intellectual property rights was compared with the imported electric traction system. The vehicle had passed the type approval test, which satisfied design requirements.

Keywords: low-floor light rail vehicle; traction system; traction converter; supercapacitor

0　引言

低地板有轨电车作为最新一代城市轨道交通工具，具有方便快捷、新颖时尚的特点，而以超级电容为代表的储能技术作为前沿科技在全世界范围内迅速发展，将超级电容与低地板有轨电车结合，实现全线无接触网运行，具有环境友好、资源节约的特点，是未来城市轨道交通的一个主要发展方向。本文介绍的自主化超级电容低地板有轨电车系国内首次完全自主开发，其中牵引系统由株洲中车时代电气股份有限公司研制。

1　车辆参数及性能

1.1　车辆基本参数

车辆采用3动1拖的编组形式(=Mc1+T++M+Mc2=)，车体采用模块化设计，为铰接形式的四模块单车型车体，车辆两端均设有驾驶室，如图 1 所示。车辆动力转向架采用纵向耦合驱动转向架，该转向架取消了车轴，牵引电机置于转向架左右两侧，每个电机驱动前后车轮。车辆牵引系统采用分布式架构，分别由 3 个超级电容储能电源及 3 个独立的牵引逆变单元构成。车载电气设备及储能装置安装在车顶，电气牵引系统防护等级为 IP55。

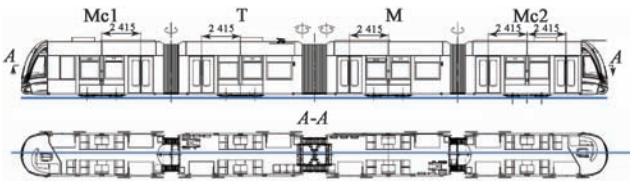


图 1　四模块低地板编组示意图

1.2　车辆动力性能

车辆动力性能具体指标如下：

收稿日期：2017–06–07
基金项目：国家重点研发计划资助项目（2017YFB1201004）

车辆最高运行速度	70 km/h
设计结构速度	80 km/h

在平直道，车轮半磨耗，AW2 载荷，网压范围 DC 750~900 V 条件下：

平均启动加速度（0~40 km/h）	≥ 1.0 m/s^2
平均加速度（0~70 km/h）	≥ 0.7 m/s^2

在平直道，车轮半磨耗，网压范围 DC 620~900 V 条件下：

常用制动平均减速度 AW2（70 km/h~0）	1.1 m/s^2
紧急制动平均减速度 AW3（70 km/h~0）	2.5 m/s^2

1.3　车辆运行能力

车辆在 AW2 载重状态下，正线连续运行中间站不充电，能续航 2 站以上。

车辆在 AW2 载荷和正线最大坡道状态下，当损失 1 个储能电源时，能运行到下一站，清客回库。

车辆在 AW2 载荷和正线最大坡道状态下，当损失 1 个动力单元时，能启动并维持运行到终点。

2　高压系统

图 2 为高压电路原理图。车辆配置 3 组超级电容，超级电容组与车载电气系统母线直连。DC 750 V 通过受电弓进入 Tp 车的高压箱，在受电弓下设置有避雷器。高压箱中有牵引系统熔断器、充电机系统熔断器、空调系统熔断器，DC 750 V 经过高压箱内熔断器分线至牵引逆变器、DC 24 V 充电机、直流空调等。牵引逆变器为牵引电机提供电源，DC 24 V 充电机为车辆控制负载提供 DC 24 V 电源。每个牵引逆变器前端设置一个熔断器保护。整车取消三相 AC 380 V 母线供电，客室空调及司机室空调采用直流供电制式。

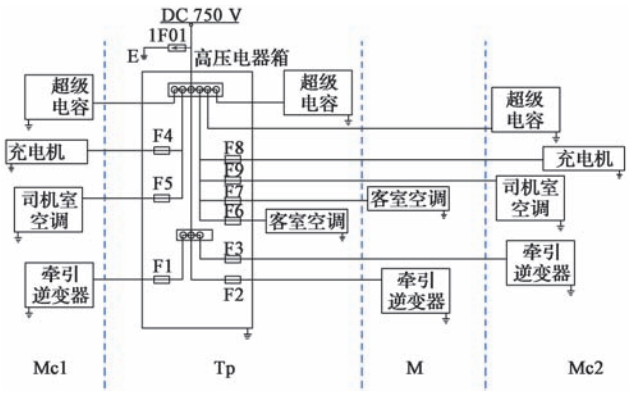


图 2　高压系统电路图

当列车进站充电时，站内地面充电机通过高压箱同时给 3 组超级电容进行充电，3 组超级电容始终保持均压；当列车出站运行时，超级电容组并联给牵引系统、辅助系统供电，列车电制动能量由超级电容吸收再利用。

3　超级电容储能系统

自主化储能式低地板有轨电车采用车载超级电容储能供电，全线路不设置架空接触网，在每个停车站设置地面充电机给超级电容充电，采用功率型超级电容。功率型超级电容具有放电倍率大，储存能量适中的特点，能满足储能式低地板车短时大电流快速充放电的需求，可在 30 s 内将超级电容充满，可吸收绝大部分电制动能量。超级电容参数如下：

工作电压范围	DC 300~900 V
额定电压	DC 750 V
额定充放电电流	600 A
最大充放电电流	800 A
超级电容容值	55 F
每组电容可用电量	5.5 kW·h

4　牵引电传动系统

低地板牵引电传动系统具有设备集成化、小型化、轻量化的特点，采用集成式 VVVF 逆变器 - 鼠笼式异步牵引电动机构成的交流电传动系统。牵引电传动系统需要满足车辆动力性能、运行性能等，并综合考虑系统各参数匹配和满足储能式低地板车辆的运行工况以及电气性能要求。

4.1　牵引电制动特性

车辆运行过程中，超级电容供电母线电压会逐渐降低，牵引电制动特性重点针对功率型超级电容电压软特性进行匹配设计。

4.1.1　牵引特性

在 DC 750~900 V 网压，AW0/AW2/AW3 载荷工况，车轮处于半磨耗状态下，列车最大启动轮缘牵引力 F_{st2}=96 kN（或每动轴 16 kN），恒牵引力速度范围 0~35 km/h，恒功速度范围 35~50 km/h，自然特性速度范围 50~80 km/h。

车辆在运行过程中，当网压低于 DC 750 V 时，牵引特性根据网压的下降，其恒力矩终止点与网压成线性下降，恒功终止点对应速度保持不变，使得列车牵引性能不会随着超级电容电压降低出现较大幅度的降低。

为充分发挥车载超级电容性能，提高列车续航能力，牵引系统在输入电压范围 DC 300~500 V 之间仍然能实现牵引动车，网压低于 DC 500 V 时，牵引特性根据网压的下降，其恒牵引力与网压成线性下降，恒力矩终止点与网压成线性下降，如图 3 所示。

4.1.2　电制动特性

在 DC 620~900 V 网压，AW0/AW2/AW3 载荷工况，车轮处于半磨耗状态下，列车最大轮缘制动力 F_{b2}=102 kN（或每动轴 17 kN），恒电制动力速度范围 56~3 km/h，自然特性速度范围 80~56 km/h，电制动力减小的起始速度点为 3 km/h（可调）。在网压 U_s 小于 DC 620 V 时，电制动特性根据网压的下降，其恒力矩终止点与网压成线性下降；在网压 U_s 大于 DC 620 V 时，电制动特

性不变。

通过特性计算仿真，列车常规电制动回馈最大电流低于超级电容最大充电电流，常规电制动能量可全部回馈至超级电容，当遇到超级电容故障或持续下坡等特殊情况导致无法完全吸收电制动能量时，列车降特性运行，电制动力不足部分由液压制动补充。

低地板车在地面与汽车混跑，对紧急制动的要求很高，因此紧急制动情况下需要进行电制动。紧急制动采用加大的电制动特性，列车紧急制动最大轮缘电制动力 F_{b3}=156 kN（或每动轴 26 kN），恒电制动力速度范围 65~3 km/h，自然特性速度范围 80~65 km/h。

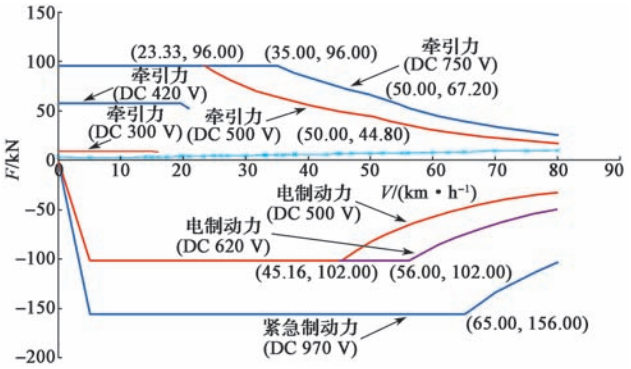


图 3　车辆牵引 / 电制动特性曲线

4.2　主电路及功能单元

4.2.1　主电路匹配仿真

车辆牵引系统主电路采用二电平电压型直交逆变电路，采用 1C2M（1 convert 2 motor）驱动电路，以实现纵向耦合动力转向架电机驱动一致性。牵引逆变器将超级电容输入的直流电变换成频率、电压均可调的三相交流电，驱动三相交流异步电机，主电路原理图如图 4 所示。超级电容直连母线供电制式下电气牵引系统模型如图 5 所示，支撑电容参数 C_d 取值 7.8 mF，超级电容 C_s 取值 55F， 70 mm^2 机车电缆单位电感 1 μH/m，120 mm^2 机车电缆单位电感 0.7 μH/m。选取不同线路电抗器参数：不设置线路电抗器，线路电抗器分别为 1 mH、2 mH、3 mH，对这 4 种情况进行如下仿真分析。

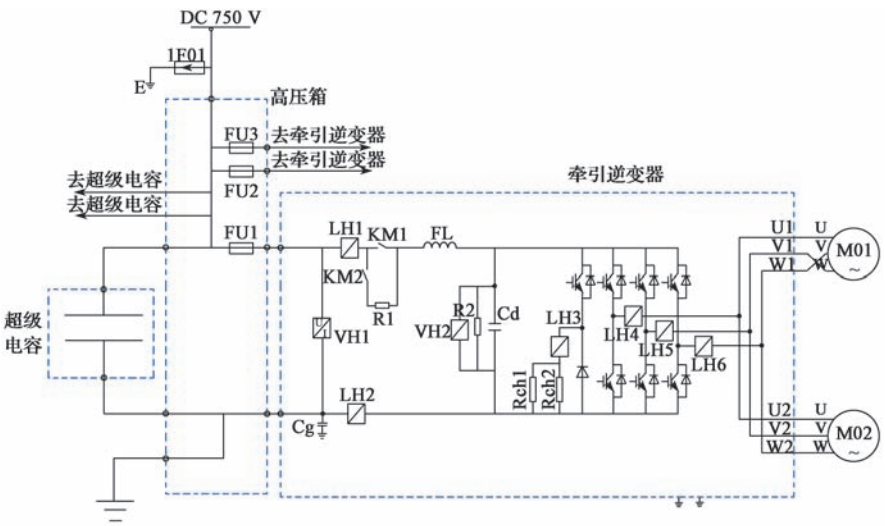


图 4　牵引系统主电路图

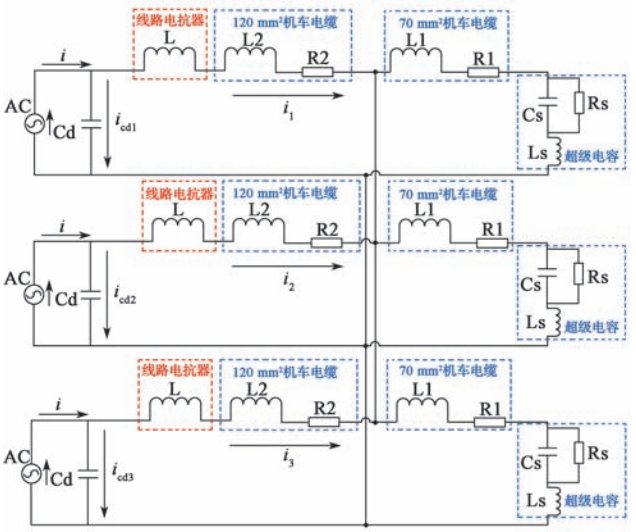
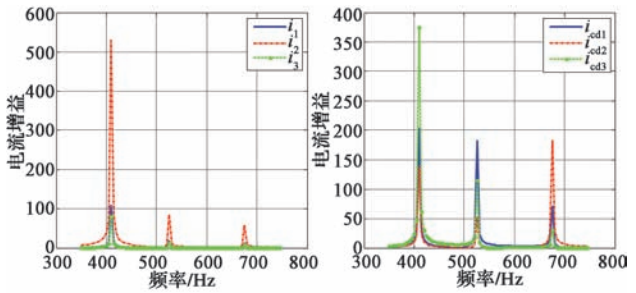


图 5　牵引系统等效主电路模型

1）不设置线路电抗器

各支路电流增益（即支路电流与电流源有效值之比）与电源频率的关系曲线如图 6 所示，可以看出系统出现 3 个谐振频率，分别为 410 Hz、525 Hz、675 Hz。



（a）i_1、i_2、i_3　　（b）i_{cd1}、i_{cd2}、i_{cd3}

图 6　不设置线路电抗器支路电流增益

2）线路电抗器为 1 mH

各支路电流增益（即支路电流与电流源有效值之比）与电源频率的关系曲线如图 7 所示，从图 7 可以看出系统出现 1 个谐振频率 (56 Hz 左右)。

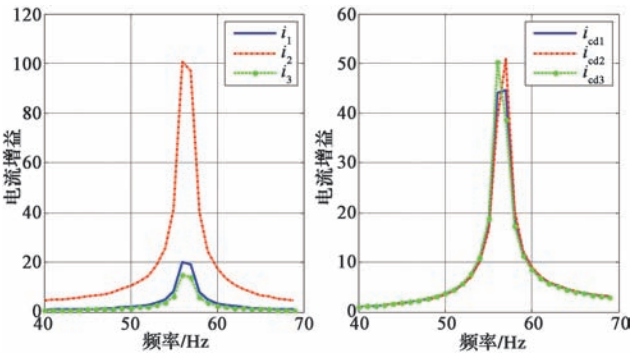
3）线路电抗器为 2 mH

各支路电流增益（即支路电流与电流源有效值之比）与电源频率的关系曲线如图 8 所示，从图 8 可以看出系统出现 1 个谐振频率（40 Hz 左右）。

4）线路电抗器为 3 mH

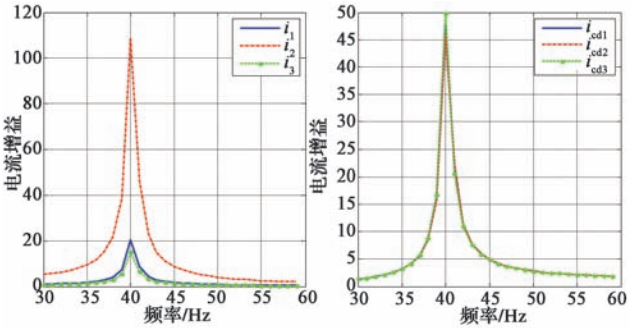
各支路电流增益（即支路电流与电流源有效值之比）与电源频率的关系曲线如图 9 所示，从图 9 可以看出系统出现 1 个谐振频率（33 Hz 左右）。

由上述各支路电流增益（即支路电流与电流源有效值之比）与电



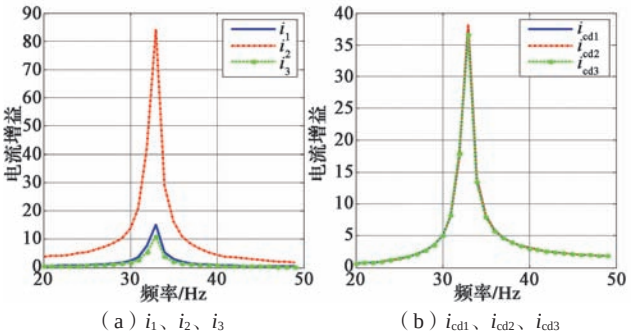
（a）i_1、i_2、i_3　　（b）i_{cd1}、i_{cd2}、i_{cd3}

图 7　线路电抗器为 1 mH 支路电流增益



（a）i_1、i_2、i_3　　（b）i_{cd1}、i_{cd2}、i_{cd3}

图 8　线路电抗器为 2 mH 支路电流增益



（a）i_1、i_2、i_3　　（b）i_{cd1}、i_{cd2}、i_{cd3}

图 9　线路电抗器为 3 mH 支路电流增益

源频率的关系曲线可见，主电路中将存在谐振现象，且存在 1 个以上谐振点；谐振点处的各支路电流有效值远大于电流源有效值；谐振点的分布受到线路电抗器值的影响，即随线路电抗器值变化发生移动。加入 1 mH 的线路电感，LC 谐振频率约为 56 Hz，逆变控制可以很好地进行功率补偿，避免其振荡。若进一步增大线路电感（如 2 mH，3 mH），谐振频率将降低为约 40 Hz、33 Hz，逆变补偿效果将可能稍微增加，但电感的体积和重量同样将增大较多。综合主电路仿真及小型化、轻量化选型要求，线路电抗器选型 1.5 mH，支撑电容选型 7.8 mF，能较好地实现与功率型超级电容的匹配。

4.2.2　功能单元

1）高压电器箱

高压电器箱由避雷器、牵引系统熔断器、充电机回路熔断器、直流空调回路熔断器等组成，主要完成高压分线及保护功能。采用熔断器取代高速断路器保护牵引系统的方式，牵引主电路熔断器采用 170M2089 型熔断器，进行主电路接地等严重故障的电路保护。主电路熔断器额定电压 DC 1 000 V，额定电流 630 A，功耗 160 W，I^2t 为 7.4×10^5 A^2s（时间常数为 15 ms）。

高压箱的主要技术参数如下：

输入电压范围	DC 300~1 000 V
总最大输入电流	1 800 A（30 s）
总额定输入电流	1 200 A
牵引额定输入电流	300 A
超级电容额定输入电流	360 A
直流空调额定输入电流	33 A
防护等级	IP55

2）牵引逆变器

牵引逆变器采用模块化集成化设计，由预充电输入单元、滤波单元、牵引逆变单元、制动斩波单元组成，主电路原理如图 4 所示。

预充电输入单元由接触器 KM2 及充电电阻 R1 等组成，用于主电路支撑电容器 Cd 的充电。线路接触器 KM1 用于主电路隔离保护，当牵引系统发生严重故障，如过压、过流、主电路接地、管故障、控制电源失电等情况时，传动控制单元（DCU）封锁脉冲，并控制线路接触器 KM1 断开，以实现牵引系统隔离。

滤波单元由电抗器（L）及直流回路支撑电容器（Cd）组成。电抗器及支撑电容器使主电路直流侧电容电压保持稳定并将电压波动限制在允许范围内，抑制牵引逆变器电流波动并满足逆变器开关元件换相的要求等。

牵引逆变器采用 IGBT 模块，为二电平逆变电路，逆变器模块集成三相逆变器的三相桥臂及斩波桥臂并驱动 2 台牵引电机。逆变器控制装置（DCU）采用高性能直接转矩控制实现纵向耦合独立轮电机驱动，主要完成对 IGBT 逆变器和三相异步牵引电机的实时控制、制动斩波控制，同时具备完整的牵引变流系统故障保护功能、模块级的故障自诊断功能和一定程度的故障自复位功能以及部分车辆级控制功能，具备完善的空转 / 滑行保护功能，具有轮对加速度保护、轮对加速度微分保护、蠕滑速度保护、轮对速度差保护、轮对擦伤保护等功能。

制动斩波单元由 2 个 IGBT 斩波模块及紧急制动电阻（Rch1、Rch2）等组成，每个斩波模块驱动一个紧急制动电阻。IGBT 斩波模块与逆变模块集中在一起，组成逆变器模块。紧急制动电阻包含 2 个功能：在正常工况下，作为过压吸收电阻功能使用；在紧急制动工况下，作为制动电阻功能使用。牵引系统常用电制动所转换的能量均直接反馈回超级电容再生利用，紧急制动只有在较为特殊的情况下触发，因而紧急制动电阻可以实现小型化、轻量化设计，紧急制动电阻额定功率 2×13 kW，集成在牵引逆变器中。

牵引逆变器主要技术参数如下：

额定输入电压	DC 750 V
额定工作点效率	0.97
额定输出电流	500 A（基波有效值）
最大输出电流	1 000 A（基波有效值）
防护等级	IP55
冷却方式	强迫风冷

3）充电机

车辆辅助系统采用 DC 24 V 供电，取消三相 AC 380 V 输出功能。DC 750 V 直流电输入充电机，通过高频逆变、变压器隔离和全波整流成直流电压 DC 24 V，为蓄电池及其他 DC 24 V 负载提供电源，如图 10 所示。

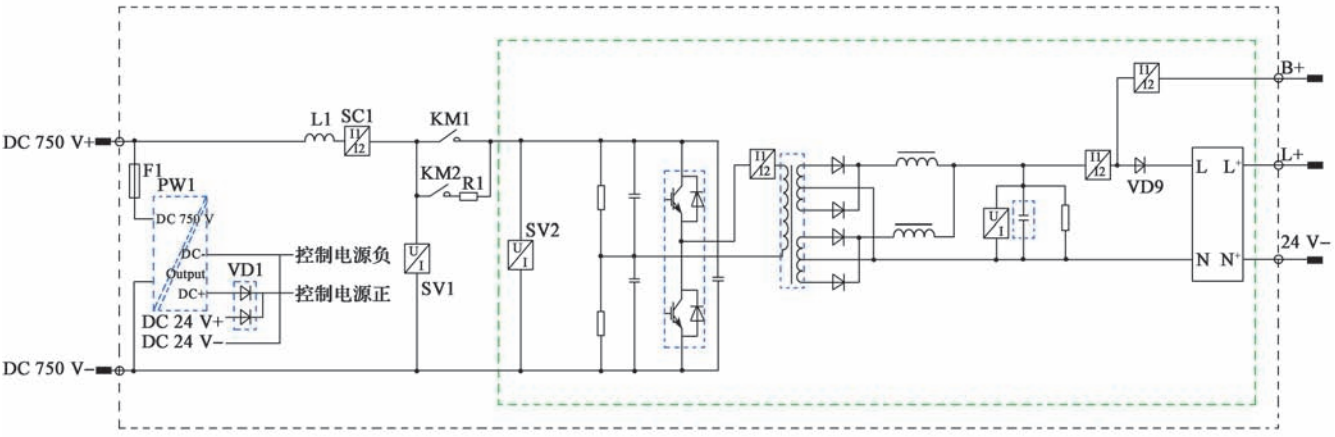


图 10　充电机主电路图

在蓄电池亏电的情况下，充电机能够完成自启，且具有温度补偿功能。

充电机的主要技术参数如下：

额定输入电压	DC 750 V
额定输出容量	12 kW
额定输出电压	27(1 ± 1%)V
额定工作点效率	>80%
输出纹波含量	<5%
瞬间电压变化范围	± 20%以内
防护等级	IP55
冷却方式	强迫风冷

5　自主化牵引系统对比

自主牵引系统从系统架构层面进行了优化设计，相对于进口牵引系统，牵引电制动特性优化，电制动能量回收再利用率高，电路更简洁，体积更小，质量更小。系统对比如表 1 所示。

表 1　自主化牵引系统对比

项目	进口牵引系统	自主化牵引系统
高压电路	1 个高速断路器保护 3 个牵引逆变器	3 个熔断器分别保护 3 个牵引逆变器，符合动力分散原则，可靠性更高
主电路	具有制动电阻	取消常用制动电阻，代之以小型化紧急制动电阻，更节能环保
特性	牵引最低网压 420 V	牵引最低网压 300 V，续航能力更强
充电机	额定输出 8 kW	额定输出 12 kW
体积质量	主辅一体牵引变流器，包含牵引逆变器、辅助变流器、蓄电池、部分网络和继电模块：3 390 mm × 2 030 mm × 720 mm，1 200 kg	牵引逆变器：1 100 mm × 1 700 mm × 530 mm，430 kg 充电机：500 mm × 1 300 mm × 530 mm，198 kg 蓄电池（含部分继电模块）：900 mm × 1 800 mm × 530 mm，260 kg 实现系统整体减重 25% 左右

6　结语

本文所述自主化超级电容低地板牵引系统针对功率型超级电容进行了匹配设计，研制了小型化、轻量化、集成化低地板牵引系统，简化了系统主电路，总体性能相对进口牵引系统具有一定优势。该系统为国内首次完全自主研发，目前已完成装车并完成了 AW0、AW2、AW3 载荷线路型式试验，系统运行状态良好，并在多个城市得到推广应用，取得了较好的经济效应和社会效应。

参考文献：

［1］陈新溅，陈中杰，陈超录，等．储能式电力牵引轻轨车电气牵引系统研制［J］．机车电传动，2013(1)：73–80.

［2］袁文烨，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.

［3］索建国，邓谊柏，杨颖，等．储能式现代有轨电车概述［J］．电力机车与城轨车辆，2015(4)：1–6.

［4］何志新．现代有轨电车牵引供电方式选择［J］．城市轨道交通研究，2013(7)：105–108.

［5］Hirai J，Kim T W. Study on Intelligent Battery Charging Using Inductive Transminision of Power and Information［J］. IEEE Transactions On Power Electronics, 2000, 15(2)：335–345.

作者简介：夏文杰（1988–），男，工程师，主要从事低地板有轨电车、磁浮列车电气牵引系统的研发工作。