

# 100% 低地板现代有轨电车车载超级 电容储能系统配置设计\*

王安军<sup>1</sup> 汪 志<sup>2</sup> 夏 猛<sup>2</sup> 毕京斌<sup>2</sup> 申亮亮<sup>2</sup>

(1. 武汉光谷现代有轨电车运营有限公司, 430200, 武汉; 2. 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** 目的:为提升基于超级电容储能的现代有轨电车储能系统配置设计能力和车辆运营现场应用的时效性和经济性,需对有轨电车超级电容储能系统的容量配置、充放电策略和故障判断等关键技术进行深入研究。方法:结合实际商业运营线路特征,通过牵引计算与超级电容能量仿真计算,给出超级电容容量最优配置方法,并依据超级电容容量的配置设计以适应车辆的超容动力总成。根据超级电容储能型现代有轨电车车载储能系统到站充电的及时性需求和超级电容的大电流快速补电能力设计了超级电容的充放电策略,并基于此充电策略在充电过程中进行超级电容故障的判断。通过仿真进行剩余电量的校核,验证储能式有轨电车动力性能要求和充电的时效性和冗余能力。结果及结论:基于超级电容的高功率密度和高强度电流能力的优势,对超级电容容量进行合理配置,通过线路能量仿真与实际运营结果相互验证,证明了以超级电容为储能载体的无网供电系统方案,完全能满足全线路无接触网有轨电车的动力性能和能量需求。**关键词** 有轨电车; 超级电容; 牵引交流系统; 储能系统  
**中图分类号** TM535: U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.041

## Design of 100% Low-floor Modern Tram On-board Super-capacitor Energy Storage System

WANG Anjun, WANG Zhi, XIA Meng, BI Jingbin, SHEN Liangliang

**Abstract** Objective: To enhance the design capability of modern tram energy storage system based on super-capacitor energy storage and to improve the timeliness and cost-effectiveness of vehicle operation on-site application, it is necessary to conduct in-depth research on key technologies such as the capacity configuration, charging and discharging strategies, and fault diagnosis for the tram super-capacitor energy storage system. Method: Considering the characteristics of actual commercial operation lines, through traction calculation and super-

capacitor energy simulation calculation, an optimal configuration method for super-capacitor capacity is proposed. A super-capacitor powertrain system adaptable to the vehicles is designed based on this super-capacitor capacity configuration. To meet the timely charging requirements at stations and leverage the high-current rapid replenishment capability of supercapacitors, charging and discharging strategies for the super-capacitor energy storage system in modern trams are developed. Additionally, fault diagnosis is carried out on super-capacitors during the charging process. Simulation is conducted to validate the remaining energy capacity, ensuring compliance with the power performance requirements of energy storage trams and assessing the timeliness and redundancy capacity of the charging process. Result and Conclusion: Based on the advantages of super-capacitors in high power-density and high-intensity current capabilities, a reasonable configuration of super-capacitor capacity is achieved. The energy simulation results are cross-validated with actual operation outcomes, demonstrating that the super-capacitor-based non-catenary power supply scheme fully meets the power performance and energy requirements of the entire route for non-catenary tram systems.

**Key words** super-capacitor; tram; traction converter system; energy storage system

**First-author's address** Wuhan Optics Valley Modern Tram Operation Co., Ltd., 430200, Wuhan, China

现代有轨电车供电制式可分为传统架空接触网供电方式和新型无网供电方式2种。新型储能供电方式不再在车辆上方架设接触网,是未来有轨电车供电制式的发展趋势<sup>[1]</sup>。作为一种新型的储能装置,超级电容具有快速充电、高比能量、超高功率、宽使用温度、超长寿命和高安全(满电穿刺、挤压等不爆炸)等优势,其十分贴合城市轨道交通车

\* 中国中车“十四五”科技重大专项项目(2022CTA042)

辆在短时间内的高功率牵引及制动应用需求<sup>[2]</sup>。针对超级电容在城市轨道交通领域的应用,本研究以目前已经开通运营的武汉东湖有轨电车为例,对其车载超级电容系统(储能单元)进行容量配置设计分析,研究超级电容充放电策略以及故障判断处理方案,以期满足储能式有轨电车动力性能要求。这能适应用户在线路交通拥堵时,车辆的用能要求及用户线路越站不充电要求,可提升有轨电车的运行时效性和经济性。

## 1 有轨电车车辆基本参数

武汉东湖所有低地板有轨电车均采用 2 动 1 拖 2 悬浮的动力编组型式<sup>[3]</sup>:Mc1-F1-Tp-F2-Mc2(其中,Mc1、Mc2 为带司机室动车,Tp 为带受电弓拖车,F 为悬浮车)。列车编组示意图如图 1 所示。

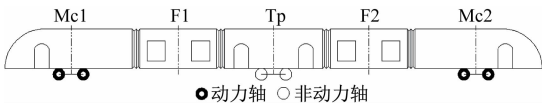


图 1 列车编组示意图

Fig. 1 Schematic diagram of train formation

全列车采用大功率储能电源——超级电容供电,供电电压为 DC 750 V,超级电容为全车提供动力电源,同时吸收列车电制动过程中所回馈的能量。超级电容依靠线路站台上设置的充电桩补充电量<sup>[4]</sup>。车辆总体技术要求如表 1 所示。

表 1 车辆总体技术要求

Tab. 1 Overall technical requirements for vehicles	
项目	参数值
最高持续运行速度/(km/h)	70
列车设计结构速度/(km/h)	≥80
起动加速度(车速为 0~30 km/h 时)/(m/s <sup>2</sup> )	≥0.95
平均加速度(车速为 0~70 km/h 时)/(m/s <sup>2</sup> )	≥0.60
常用制动减速度(车速为 70 km/h~0 时)/(m/s <sup>2</sup> )	≥1.10
紧急制动减速度(车速为 70 km/h~0 时)/(m/s <sup>2</sup> )	≥2.30
轮径/mm	600/550/500
供电方式	车载超级电容储能

## 2 车载超级电容系统的容量配置设计

车载超级电容的容量配置除了能保证有轨电车车辆在设计线路各区间上的连续运行,同时必须具有足够的冗余能力。在线路出现充电站故障的

情况下,储能系统的电量能保证车辆按正常运营计划进行运行。本文首先通过极端运营情况下的能耗计算对超级电容总能量进行配置,然后按照能量需求为整车设计超级电容系统,最后按照最严酷路段运营工况对超级电容的剩余电量进行分析,对容量配置进行校核,验证能量配置的合理性。

### 2.1 超级电容系统配置计算

按照任意一个路口停车等待 15 min(AW3(满座+9 人/m<sup>2</sup>超常载荷)超员、夏季空调制冷模式不间断工作)并保证车辆能够运行到下一站的原则,计算储能装置能量配置,仿真计算条件如下:① AW3 载荷;②牵引采用最大能力运行方式,不考虑惰行节能;③每站停车时间为 13 s,站间距最长路口停车等待 15 min;④整车辅助和空调系统有功功率为 60 kW,车辆行驶过程中辅助满功率运行;⑤再生制动能量回收(已考虑效率和车辆阻力)。

通过有轨电车车辆模拟运行仿真,在 DC 750 V、AW3 工况下,考虑线路包含最大站间距区间及线路最大坡道所在区间总能耗为 22.05 kWh;同时考虑区间任意路口堵车 15 min 的空调及辅助等耗能 15.00 kWh,实际耗能为 36.56 kWh;考虑 1.3 倍裕量配置,则整车最终按照 47.60 kWh 超级电容系统进行配置。

### 2.2 超级电容系统设计

根据实际情况,列车采用高能量超级电容器单体(28 000 F),通过科学合理的模块化设计,组装成超级电容器系统。为适应能量和车辆空间,分为 2 种不同结构:超级电容器总成 A 和 B,其总成性能参数如表 2 所示。

在工作电压区间内超级电容器总成 A 的有效电量为 9.5 kWh,超级电容器总成 B 的有效电量 14.3 kWh。因此,全列配置 4 台超级电容箱,A、B 型各 2 台,总电量 47.6 kWh。整车超级电容箱配置如表 3 所示。

#### 2.2.1 超级电容充放电特性

为获取超级电容箱充放电特性,本研究采用超级电容器总成按照典型充电电流进行充电的方法进行实际测试。

选取了 140 A、280 A、420 A、700 A、1 400 A、2 000 A 总共 6 种充电电流对超级电容进行充电,充电过程由 BMS(电池管理系统)对超级电容电压和能量进行实时监控和记录。获取了超级电容充放电特性即可对超级电容的充电策略进行设计。图 2

为超级电容器总成不同电流由充电电压-时间关系曲线。图 3 为超级电容器总成不同电流的充电能量-时间关系曲线。

表 2 超级电容总成性能参数

Tab.2 Performance parameters of super capacitor powertrain

参数名称	超级电容器 总成 A	超级电容器 总成 B
电容量/F	256	389
模块串并联方式	2 并 216 串	3 并 216 串
工作电压区间/V	616 ~ 820	616 ~ 820
工作电压区间内的 有效储存能量/(kWh)	9.5	14.3
标准充电电流/A	200	300
20 s 最大充电电流/A	340	510
标准放电电流/A	≤200	≤300
20 s 最大放电电流/A	340	510
浪涌电压/V	906	906
工作使用温度/℃	-25 ~ 55	-25 ~ 55
20 s 充电能量/(kWh)	0.8 (200 A 时)	1.2 (300 A 时)
	1.2 (300 A 时)	1.8 (450 A 时)
冷却方式	风冷	风冷

表 3 整车超级电容箱配置表

Tab.3 Configuration table of whole vehicle super capacitor box

设备名称	车辆构成					数量/套
	M <sub>C</sub>	F	T <sub>p</sub>	F	M <sub>C</sub>	
超级电容箱 A	1				1	2
超级电容箱 B	1				1	2

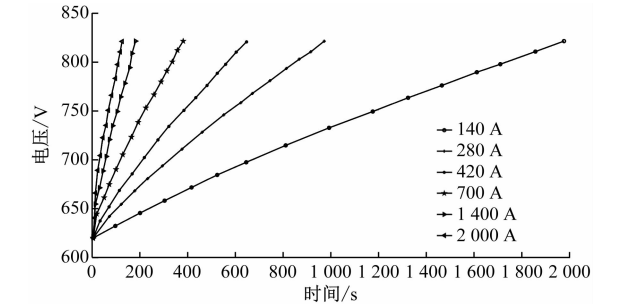


图 2 超级电容器总成不同电流的充电电压-时间关系曲线  
Fig.2 Super capacitor assembly charging voltage time relationship curve with different currents

2.2.2 超级电容系统充电策略

针对上述超级电容的电气特性,设计了如下的充电策略,整个充电过程共分为 5 个步骤,其示意图

如图 4 所示。

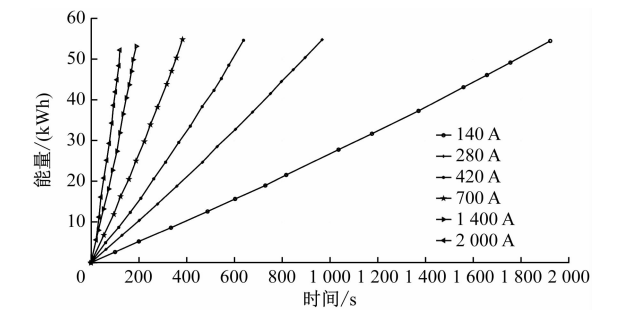


图 3 超级电容器总成不同电流的充电能量-时间关系曲线  
Fig.3 Charging energy time relationship curve with different currents for super capacitor assembly

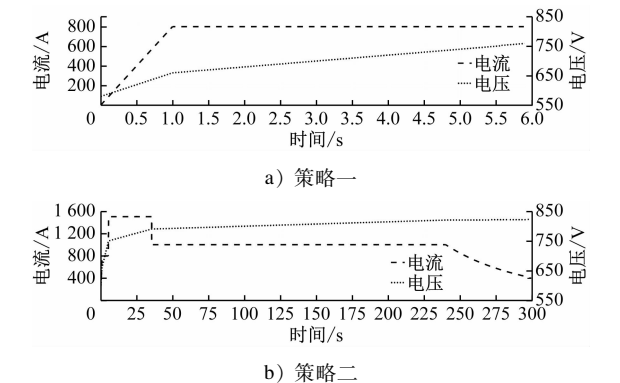


图 4 超级电容器充电策略

Fig.4 Charging strategy for super capacitors

步骤 1 0 至 800 A 充电( $dI/dt$  为恒定值,其中  $I$  为电流, $t$  为时间),充电时间为 1 s。

步骤 2 小电流 800 A 恒流充电,充电时间 4.5 s;本阶段的主要功能为计算超级电容的容量。

步骤 3 大电流 1 500 A 恒流充电,充电时间 ≤ 30 s。

步骤 4 中电流 1 000 A 恒流充电至最高电压 820 V。

步骤 5 820 V 恒压充电,恒压时间 60 s。

根据步骤 2 所采集到的数据计算其超级电容量,并作为以下故障判断的依据。

2.2.3 超级电容系统故障状态判断方法

超级电容系统作为整车的动力来源,其可靠性及安全性至关重要。现介绍东湖有轨电车超级电容系统故障状态判断方法及判断出故障后的对应措施如下。其将整个故障判断及后处理环节分为 3 个阶段。

阶段 A SOC(超级电容荷电状态)判断。在上述充电策略中,取步骤 2 的第 0.5 s、1.5 s、2.5 s

采集到的 3 个电压值 ( $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ ) 作为判断依据,判断其 SOC。SOC 和对应系统电压如表 4 所示。

表 4 SOC 和对应系统电压表

Tab.4 SOC and corresponding system voltmeter

SOC/%	系统电压/V
0	615.6
30	683.6
60	745.1
100	820.0

当该 3 个电压值中有 2 个或 3 个为同一 SOC 区间时,则判断为电容器系统处于该 SOC 区间,判定举例如表 5 所示。由表 5 可知:根据超级电容系统电压可判断超级电容系统所处的 SOC 范围。

表 5 SOC 取点判定方法举例

Tab.5 Example of SOC point selection judgement methods

超级电容器 总成类型	情况分析	SOC 判定
A	$U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 范围[0,30%]	0~30%
B	$U_1$ 、 $U_2$ 范围[0,30%], $U_3$ 范围[30%,60%]	0~30%

阶段 B 系统状态判断。根据阶段 A 所判断的 SOC,进一步用以下计算方法判断超级电容系统状态。在完成第一步 SOC 判断后,进行容量计算。容量计算公式为  $C = \Delta Q / \Delta U$  ( $Q$  为电量,  $U$  为电压),其中  $\Delta Q = Q_b - Q_a$ ;  $\Delta U = U_b - U_a$ 。为保证容量计算的准确性,在充电策略中取步骤 2 第 0.5 s 和第 4.5 s 两个点的电压和电量值进行计算。表 6 为超级电容系统状态判断依据。

表 6 超级电容系统状态判断依据

Tab.6 Basis for judging the status of super-capacitor systems

系统状态	电容 C/F		
	SOC 为 0 ~ <30% 时	SOC 为 30% ~ <60% 时	SOC 为 ≥60% 时
系统正常	≥505	≥565	≥635
一箱故障	$385 \leq C < 505$	$410 \leq C < 565$	$465 \leq C < 635$
两箱故障	$C < 385$	$C < 410$	$C < 465$

阶段 C 改变充电策略。根据阶段 B 所得到的超级电容系统状态,充电装置做出相应充电策略的改变,见表 7。

### 2.3 超级电容配置剩余电量校核

根据实际情况,有轨电车采用高能量超级电容

表 7 充电策略更改规则

Tab.7 Rules for charging strategy change

系统状态	步骤 3 中充电 电流/A	步骤 4 中充电 电流/A
系统正常	1 500	1 000
一箱故障	1 000	750
两箱故障	750	500

器单体(28 000 F),按照 47.6 kWh 的整车电量配置,其前提为每站设置充电桩,并按照上述超级电容充电能力进行补充电量。当有一站充电桩故障且发生故障时的充电桩所处区间包含了最长站区间及线路能耗较高区间段,则其剩余电量需要做进一步分析校核。

根据东湖有轨电车 T1 及 T2 示范线全线路实际情况,仿真选取单环线最严酷路段 T2 起点—T1 单环线—T2 起点路段进行能耗仿真分析。T2 起点为汤逊湖城铁站,T1 起点为华中科技大学站,同时汤逊湖北路充电桩不工作。线路仿真条件与本文 2.1 中仿真条件保持一致。

根据超级电容充放电特性制定了以下到站充电方式:列车到站后以 1 500 A 电流进行充电,充电时间为 20 s,若超级电容充满,则停止充电。单环线最严酷路段超级电容到站剩余电量仿真计算结果如表 8 所示。

由表 8 可知:列车在汤逊湖城铁站以 47.6 kWh 满电量出发,在含单环线最恶劣营运交路以 1 500 A 充电电流 20 s 的充电模式进行充电运行;运行过程在雄楚大道站剩余电量最低,为 32.31 kWh,剩余电量百分数为 67.9%,列车回到始发站还有 41.75 kWh 的剩余电量。这足以满足列车大坡道、大站间距及路口等待 15 min 的运营要求。

## 3 实际运营验证

目前东湖有轨电车示范线已开通运营,为验证容量配置合理性,同样以 T2 起点—T1 单环线—T2 起点线路为例,对超级电容以 1 500 A 充电 20 s 的充电模式的实际运营情况进行分析。如图 5 所示,列车正常运营到达终点时剩余电量 39.09 kWh,对应百分数为 82.11%,运行过程中最低电量为 35.93 kWh,与仿真计算整体接近。在此剩余电量下,遇到大坡道、大站间距及路口等待 15 min 情况时完全满足运行要求。因此,验证了本研究超级电容系统容

表 8 单环线最严酷路段超级电容到站剩余电量仿真计算结果

Tab.8 Simulation and calculation results of the remaining electricity of super capacitors arriving at the station on the most severe section of the single ring line

区间	S/km	W <sub>1</sub> / (kWh)	W <sub>2</sub> / (kWh /km)	W <sub>3</sub> / (kWh)	W <sub>4</sub> / (kWh)
汤逊湖城铁站站— 万科花园站站	2.84	17.93	6.31	53.99	36.28
万科花园站站— 华夏学院站站	1.93	9.86	5.11	12.76	39.17
光谷天地站站— 雄楚大道站站	2.12	13.25	6.25	6.39	32.31
雄楚大道站站— 步行街站站	2.13	13.15	6.17	25.60	44.76
步行街站站— 新竹路站站	1.83	10.79	5.90	11.19	45.16
新竹路站站— 关山茅店山站站	2.24	15.91	7.10	12.17	41.42
关山茅店山站站— 汤逊湖城铁站站	3.96	18.43	4.65	18.77	41.75
总计	17.05	99.32		140.87	41.75

注: S 为区间距离; W<sub>1</sub> 为区间总能耗; W<sub>2</sub> 为区间平均里程耗电量; W<sub>3</sub> 为区间充电桩补充电量; W<sub>4</sub> 为到站剩余电量。

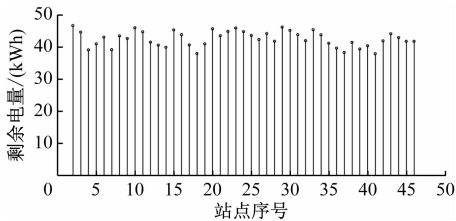


图 5 超级电容运营剩余电量

Fig.5 Remaining electricity during super capacitor operation

量配置的合理性。

4 结语

本研究以超级电容储能型现代有轨电车的供

电系统为主要研究对象,分析了超级电容储能系统的配置设计要点,并通过对超级电容系统充电特性研究及用户线路的仿真计算,实现了超级电容储能型现代有轨电车能量配置的验证。该车载超级电容储能系统具有高功率密度和高强度电流能力的优势,完全满足全线路无接触网有轨电车的动力性能和能量需求,并提升了用户线路成本、运行时效性。通过超级电容储能系统与低地板有轨电车的完美集成,符合有轨电车的“绿色环保”“环境友好”等特点,经实际运营表明,该有轨电车车辆动力性能良好,状态稳定,能量利用率高,储能系统的配置设计方案具有典型推广意义。

参考文献

[1] 胡斌. 超级电容储能型现代有轨电车供电系统设计要点分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 128.  
HU Bin. Analysis of the design essentials in modern tram power supply system with super capacitor[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(5): 128.

[2] 乔志军, 阮殿波. 超级电容在城市轨道交通车辆中的应用进展[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(2): 83.  
QIAO Zhijun, RUAN Dianbo. Application of supercapacitors in urban rail transit vehicles[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(2): 83.

[3] 胡活力, 田以涛, 夏猛, 等. 储能式现代有轨电车牵引系统设计[J]. 铁道车辆, 2020, 58(8): 20.  
HU Huoli, TIAN Yitao, XIA Meng, et al. Design of traction system on energy storage type modern tramcars[J]. Rolling Stock, 2020, 58(8): 20.

[4] 高义洋. 武汉光谷现代有轨电车无接触网供电方式分析[J]. 工程技术研究, 2017(2): 135.  
GAO Yiyang. Analysis of contactless power supply mode of modern trams in Wuhan Optics Valley[J]. Engineering and Technological Research, 2017(2): 135.

(收稿日期:2021-08-16)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com