

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.03.017

# 超级电容与钛酸锂电池混合储能 在城轨再生制动能量回收中的特性分析

李 路, 赵亚杰, 林 飞, 杨中平

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

**摘 要:** 针对单一储能系统在城市轨道交通中再生制动能量中的低效回收、变电站供电能力受限以及列车紧急牵引应对不足等问题, 本文旨在研究超级电容-钛酸锂电池混合储能系统的应用方案与技术优势。通过对超级电容、钛酸锂电池和飞轮在功率密度、能量密度及成本等关键参数上的对比, 将储能介质分为功率型和能量型两类。通过仿真结果表明, 由超级电容和钛酸锂电池组成的混合储能, 在回收再生制动能量、提升变电站供电能力及列车紧急牵引方面比单一的储能系统方案具有更显著的优势。基于上述分析, 本文突出超级电容-钛酸锂电池混合储能系统在城市轨道交通中的应用潜力, 尤其是在再生能量利用技术中的显著优势。

**关键词:** 城市轨道交通; 储能技术; 再生制动能量; 超级电容; 钛酸锂电池; 混合储能

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)03-0123-08

## Characteristic Analysis of Supercapacitor-Battery Hybrid Schemes for Regenerative Braking Energy Utilization in Urban Rail Transit

LI Lu, ZHAO Yajie, LIN Fei, YANG Zhongping

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

**Abstract:** This paper addresses the issues of inefficient recovery of regenerative braking energy, limited substation power supply capacity, and insufficient response to emergency traction in urban rail transit when using single energy storage systems. The research focuses on the application scheme and technical advantages of a supercapacitor-lithium titanate battery hybrid energy storage system. First, by comparing supercapacitors, lithium titanate batteries, and flywheels in terms of key parameters such as power density, energy density, and cost, energy storage media are classified into two categories: power-type and energy-type. Then, simulation results demonstrate that the hybrid energy storage system composed of supercapacitors and lithium titanate batteries outperforms single energy storage solutions in terms of recovering regenerative braking energy, enhancing substation power supply capacity, and providing emergency traction capabilities for trains. Based on this analysis, the study highlights the application potential of the supercapacitor-lithium titanate battery hybrid energy storage system in urban rail transit, particularly its notable advantages in regenerative energy utilization technologies.

**Keywords:** urban rail transit; energy storage technology; regenerative braking energy; supercapacitor; lithium titanate battery; hybrid energy storage

收稿日期: 2024-07-30 修回日期: 2024-09-18

第一作者: 李路, 男, 硕士研究生, 从事城市轨道交通储能节能技术研究, 22121467@bjtu.edu.cn

通信作者: 林飞, 男, 教授, 博士生导师

基金项目: 国家重点研发计划资助(2022YFB4301203)

引用格式: 李路, 赵亚杰, 林飞, 等. 超级电容与钛酸锂电池混合储能在城轨再生制动能量回收中的特性分析[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(3): 123-130.

LI Lu, ZHAO Yajie, LIN Fei, et al. Characteristic analysis of supercapacitor-battery hybrid schemes for regenerative braking energy utilization in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(3): 123-130.

## 0 引言

截至 2023 年底,中国城市轨道交通运营线路地铁运营线路 8 543.11 km,总能耗 249.77 亿 kW·h,其中牵引能耗 129.34 亿 kW·h,同比增长 14.31%,总能耗和牵引能耗均达历史新高<sup>[1]</sup>。在 2020 年,中国提出了实现“碳达峰”的短期目标和“碳中和”的长期目标。在这样的宏观背景下,对城市轨道交通牵引能耗降低的研究具有显著的现实意义。

由于城市轨道交通站点之间的距离通常在 1~3 km 之间,列车在运行过程中需要频繁进行牵引和制动操作,由此产生的制动能量十分可观。相关研究表明,列车的再生制动能量约占牵引能耗的 35%至 56%<sup>[2]</sup>。然而,由于整流机组的能量流动具有单向性,目前城市轨道交通供电系统对再生制动能量的利用存在一定限制。另一方面,随着地铁运营规模的增加,对地铁运营的安全性也提出了较高的要求。如果城轨地铁牵引网供电发生故障,此时亟须备用电源将列车牵引回邻近车站,及时疏散乘客,而用于再生制动能量回收的储能装置可补足这一部分需求。

针对再生失效导致的再生制动能量浪费问题,当前研究主要聚焦于 3 个核心领域:多列车协同优化控制、逆变回馈技术以及能量存储系统。多列车协同控制策略主要通过调整列车的发车间隔、停站时长以及上下车时间差等关键参数,提高列车牵引与制动状态的重叠率<sup>[3]</sup>。逆变回馈技术则通过逆变器将再生能量转换并回馈至交流电网<sup>[4]</sup>,其可分为低压回馈与中压回馈两种形式。

能量存储型系统是一项重要的再生制动能量利用技术,其核心机制在于利用储能介质回收再生制动过程中产生的能量,在列车牵引时将这些能量重新释放回牵引电网<sup>[5]</sup>。此外,地面式储能系统能够在空间和时间上对再生制动能量进行有效转移,同时还能提升牵引电网的稳定性,且不会对交流电网造成负面影响。当储能电量充足时,地面式储能系统还能作为应急电源,支持列车紧急救援,以及降低变电所的峰值功率需求,具有广泛的应用前景<sup>[6]</sup>。

本文将详细探讨 3 种主要的地面式储能介质,并从功率密度、能量密度等角度进行分析。此外,阐述混合储能系统在城市轨道交通中的节能效果、提高变电站供电能力以及紧急牵引等应用功能,并特别指出超级电容与钛酸锂电池组合的混合储能系统相较于单一储能介质系统所具有的优势。

## 1 储能型再生能量吸收装置

在设计地面式储能系统时,选择适合城市轨道交通特性的储能元件是至关重要的,这将直接影响储能系统的性能。在配置过程中,需要综合考虑储能介质的多个关键参数,包括能量密度、功率密度、充放电倍率、循环寿命以及全生命周期成本等。目前,城市轨道交通领域常见的储能元件包括超级电容、锂离子电池和飞轮。

### 1.1 超级电容

超级电容是一种可逆的电化学储能装置,其电荷定向移动发生在电极与电解质的接触面上,超级电容循环寿命可达数十万次<sup>[7]</sup>。此外超级电容还具有高功率密度、长循环寿命、宽工作温度范围等特性,这些特性使其非常适合城市轨道交通系统中列车牵引制动功率大和频繁启停的应用场景<sup>[8]</sup>。

在对超级电容的分析中,通常采用等效模型描述其工作特性。当前研究中,超级电容器的等效模型主要分为 3 大类:经典模型、简化模型和多阶模型<sup>[9]</sup>。在如图 1 所示的等效模型图中,等效串联电阻  $ESR$ (equivalent series resistance)是决定超级电容器充放电速度和最大功率的关键因素; $EPR$ (equivalent parallel resistance)是等效并联电阻, $R_p$  是 RC 多阶模型电路的末端电阻,通常用来描述超级电容的自放电特性。对于城市轨道交通列车这类低频率负载,简化模型能够简单高效地描述超级电容器的电气特性。

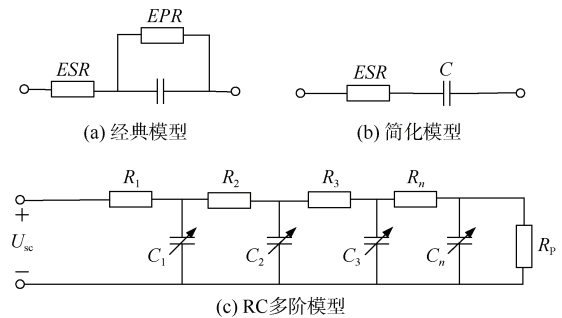


图 1 超级电容等效电路模型

Figure 1 Equivalent circuit model of supercapacitor

含超级电容的储能系统装置结构如图 2 所示:超级电容使用图 1 的简化模型,通过电阻  $R_c$  和电容  $C_{uc}$  串联来等效, $I_{uc}$  是超容侧充放电的电流; $T_1$ 、 $T_2$  是开关管,通过脉宽调制(pulse width modulation, PWM)升降来实现电压升降; $C_{dc}$  是直流母线支撑电容,用于稳定输出电压;牵引变电所建模为理想电压源  $U_{sub}$  与等效内阻  $R_{sub}$  串联的形式; $U_{dc}$  表示的是母线电压, $I_{net}$  表示的是牵引网侧电流。表 1 给出了某公司的超级电容模组参数。

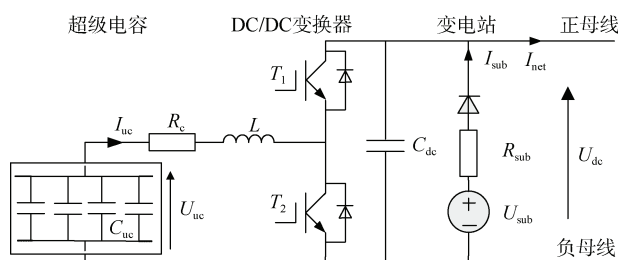


图2 含超级电容的储能装置结构

Figure 2 Structure of energy storage device with supercapacitor

表1 超级电容性能参数

Table 1 Performance parameters of supercapacitor

储能元件	超级电容
额定电容/F	165
额定容量/Ah	—
额定电压/V	48
储能量/Wh	52.8
最大持续电流/A	150
短时最大持续电流/A	—
功率密度/(W/kg)	7 783
能量密度/(Wh/kg)	3.6

## 1.2 锂电池

在城轨交通储能系统中,另一种常见的储能系统就是锂电池,锂离子电池种类较多。根据锂离子电池正极材料分类,有钴酸锂电池、锰酸锂电池、磷酸铁锂电池和三元电池等。根据锂离子电池负极材料分类,有石墨负极电池、钛酸锂电池、硅碳负极电池等。目前商用较多的是磷酸铁锂电池、镍钴锰三元电池和钛酸锂电池。这三种锂离子电池的性能参数如表2所示。

表2 三种锂电池性能参数对比

Table 2 Performance parameters comparison of three lithium battery types

指标	三元	磷酸铁锂	钛酸锂
能量密度/(Wh/kg)	400	150	80
充放电寿命/次	3 000	5 000	≥10 000
自放电率/(%/月)	5	5	5
安全性	中	良	优

尽管钛酸锂电池的能量密度低于三元锂电池和磷酸铁锂电池,但其在安全性、循环寿命和快速充放电性能方面具有显著优势,特别适用于安全性要求高、启停频繁的城市轨道交通系统<sup>[10]</sup>。

钛酸锂电池的循环稳定性极高,能够承受数千次

充放电而性能不显著下降。其负极材料  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  具有尖晶石结构,能够在锂离子嵌入和脱出过程中保持稳定,避免枝晶形成,增强电池安全性和循环寿命。同时,其工作电位为 1.55 V,远高于传统石墨电极,降低了金属锂析出的风险,减少热失控的可能性,并具备更宽的工作温度范围,适合低温下的大电流充放电。此外,钛酸锂电池的高锂离子扩散系数赋予其优异的倍率特性,适合大功率快速充放电场合<sup>[11]</sup>。

综上,钛酸锂电池以其长循环寿命、高倍率充放电性能和卓越的安全性,较其他锂电池更适合应用于城市轨道交通储能系统中。表3给出了某公司钛酸锂电池的具体性能参数。

表3 钛酸锂电池性能参数

Table 3 Performance parameters of lithium titanate battery

储能元件	钛酸锂电池
额定电容/F	—
额定容量/Ah	40
额定电压/V	27.6
储能量/Wh	1 104
最大持续电流/A	160
短时最大持续电流/A	350
功率密度/(W/kg)	276
能量密度/(Wh/kg)	69

## 1.3 飞轮

飞轮储能具有几乎零操作和零维护的突出优点,且设备寿命长达 20 年,对环境友好。相较于其他形式的储能,飞轮储能过程清洁无污染,系统稳定且不受温度等条件影响,无过充过放问题,功率密度高且装置寿命长。然而,与电池相比,飞轮储能仍存在一些缺点:能量密度较低,成本较高,对安装条件有一定要求以确保高速旋转的安全性,并且需要外部增设散热设备,导致体积和质量较大<sup>[12]</sup>。同时,飞轮储能系统的能量存储时间有限,长时间不使用可能会导致能量损失。

飞轮储能系统是一种高效的能源转换与存储技术,它能够在电动机和发电机两种模式下灵活切换。飞轮储能系统主要利用电能和机械能两种形式的能量进行充放电操作<sup>[13]</sup>。飞轮储能工作原理如图3所示。

国内目前主要的飞轮储能设备供应商,根据飞轮材料的不同,将其分为碳纤维飞轮和不锈钢飞轮。国内某公司作为其中的代表,推出两款主要的飞轮产品:功率型和能量型飞轮,这两款飞轮的额定功率均为 250 kW,最大储电量分别为 3 kWh 和 50 kWh,能够

提供从 30 s~9 min 的功率和能量支持。表 4 给出了某公司飞轮单机的具体性能参数。

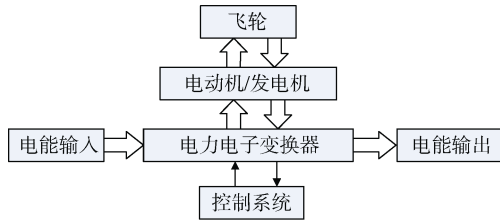


图 3 飞轮储能工作原理示意

Figure 3 Schematic diagram of the working principle of flywheel

表 4 飞轮性能参数表

Table 4 Performance parameters of flywheel

储能元件	飞轮
额定功率/kW	250
储能量/Wh	3 000
额定电压/V	400
最大工作电流/A	1 000
工作转速范围/(r/min)	4 000~10 500
功率密度/(W/kg)	125
能量密度/(Wh/kg)	1.5

## 2 混合储能系统的组成及其功能

根据储能元件的功率和能量特性，储能系统可分为功率型和能量型。单一储能系统在功率和能量特性上存在局限性，限制其应用范围。功率型器件提供短时间大功率支撑，能量型器件提供长时间高能量支撑。超级电容具有高功率密度，适合瞬时大功率需求；钛酸锂电池则以高能量密度著称，适合长时间能量支撑，而飞轮在功率和能量性能上均不如前两者。

因此，本文选取超级电容和钛酸锂电池作为分析对象。钛酸锂电池可用于变电站的“削峰填谷”和作为紧急备用电源；超级电容则能满足列车牵引制动过程中的瞬时功率需求，避免再生制动失效。将二者结合形成混合储能系统，能同时满足瞬时功率和长期能量需求，弥补单一储能元件的不足。

混合储能系统不仅能有效吸收再生制动能量、降低峰值负荷，还能在紧急情况下提供牵引力，并减少变电站扩容需求和降低建设成本。这种设计为轨道交通提供了一种兼具高效、经济与可靠性的储能解决方案。

### 2.1 组合结构

含混合储能系统的牵引供电结构示意图如图 4 所示，

混合储能系统主要安装在变电所内，根据本文对超级电容和锂电池的分析，采用表 1 和表 3 中的超级电容模组和钛酸锂电池模组作为研究对象。

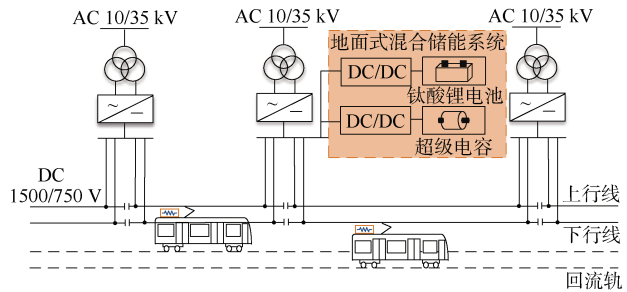


图 4 含混合储能系统的牵引供电结构示意图

Figure 4 Schematic diagram of traction power supply with hybrid energy storage system

含超级电容和钛酸锂电池的混合储能系统结构如图 5 所示。

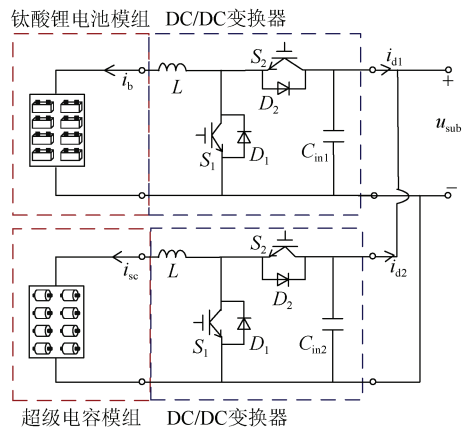


图 5 地面式混合储能系统结构

Figure 5 Structure diagram of ground-based hybrid energy storage system

在城市轨道交通地面储能系统的运作中，储能装置的充放电状态切换采用基于网压的分段控制策略。该策略分为 3 个阶段：充电、放电和待机状态<sup>[14]</sup>。储能系统通过监测直流牵引供电网的电压来判断并切换至相应的工作状态：当直流牵引供电网电压低于放电阈值时，储能装置自动进入放电模式，向牵引列车提供能量；若电压高于充电阈值，则储能装置转入充电模式。这 3 种工作状态的示意如图 6 所示。

### 2.2 性能对比分析

由上文可知，超级电容功率密度高，能够响应城轨列车大功率负荷，但是能量密度低，在满足功率需求的配置下能量等级不足，不能很好地吸收列车剩余

再生制动能量。同时，能量密度较低的纯超级电容系统，无法为供电故障列车紧急自牵引提供足够能量，也无法实现变电站峰值功率削减的高能量需求。

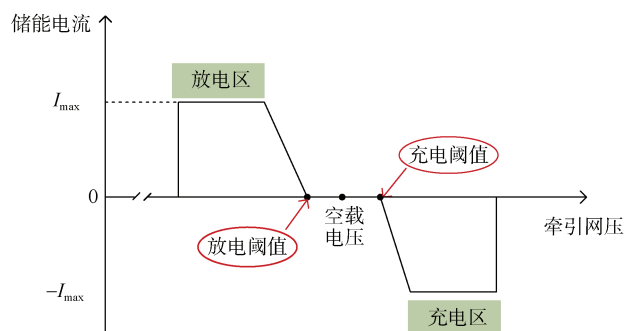


图6 地面式混合储能系统控制方式示意

Figure 6 Schematic diagram of control methods for ground-based hybrid energy storage systems

电池能量密度高，能够很好地为供电故障列车紧急自牵引提供能量，同时也能够代替牵引变电站为列车牵引提供能量，降低牵引变电站峰值功率。但是电池功率密度低，在满足能量需求的配置下功率等级不足，并且电池成本较高、循环寿命较短，不太适合大功率列车大功率、高频率再生能量吸收的场合。

为了突出混合储能系统方案的优势，根据工程实际，本文基于某地铁实际运行线路条件进行仿真，在相似占地面积的前提条件下对不同地面储能系统方案进行对比，分别为纯超级电容系统、纯电池储能系统和混合储能系统。仿真选取的地铁线路条件如表5所示。

表5 某地铁实际线路参数

Table 5 Actual line parameters of a subway system

车站名称	牵引变电所间距/m	牵引变压器容量/(kVA)
A	—	2×2 000
B	1 715	2×2 000
C	1 375	2×1 600
D	2 002	2×2 000
E	1 894	2×2 000
F	1 912	2×2 000
G	1 763	2×1 600
H	1 700	2×1 600
I	1 465	2×2 000
J	2 215	2×2 000
K	2 033	2×2 000

考虑对比的公平性，3种方案里每个站点变电所内部安装3套柜子，其中纯超级电容系统由3套500 kW电容柜组成1.5 MW纯超级电容系统，纯电池储能系

统由3套200 kW电池柜组成600 kW纯电池储能系统，混合储能系统由2套500 kW超级电容柜和1套200 kW电池柜组成混合储能系统。本文仿真线路条件选取国内某地铁实际运行线路参数作为仿真模型输入条件。

### 2.2.1 节能

混合储能系统最基本的功能是通过回收列车再生制动能量达到节能的目的。根据某条地铁线路实际数据仿真可以得到列车功率曲线，如图7所示，其中列车功率曲线对时间轴的积分即为列车在牵引/制动过程中产生的能量。

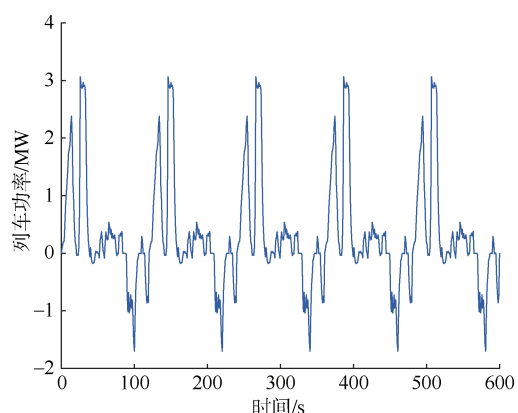


图7 高峰期上行列车功率曲线

Figure 7 Power curves of upbound train during peak hours

从图7中可以看到，列车功率曲线主要存在以下功率能量特征：一是列车功率比较小但是持续的时间长，此时虽然功率较小但是能量较大；二是列车功率比较大但是持续的时间短，此时虽然功率较大但是能量相对较小。在城市轨道交通系统中，如果仅投入功率等级较大的超级电容储能系统，那么在需要较完整地吸收再生制动能量时，纯超级电容系统可能就不足以应对。此时，若配置混合储能系统便显示出其优势。混合储能系统结合了超级电容系统的高功率特性和电池的高能量密度，更贴合城轨实际功率需求。

以国内某地铁线路的11站模型为例进行实际仿真，全站配备了1.5 MW的纯超级电容储能系统。由于超级电容的充放电迅速，储能装置在大多数情况下会处于满充满放的状态，这可能导致超级电容已充满而再生制动能量尚未完全回收的情况出现。从图8可见，在仿真时间约240 s时，超级电容的荷电状态SOC(state of charge)已达到最大值0.9并持续一段时间，表明此时超级电容已满，无法继续吸收再生制动能量。

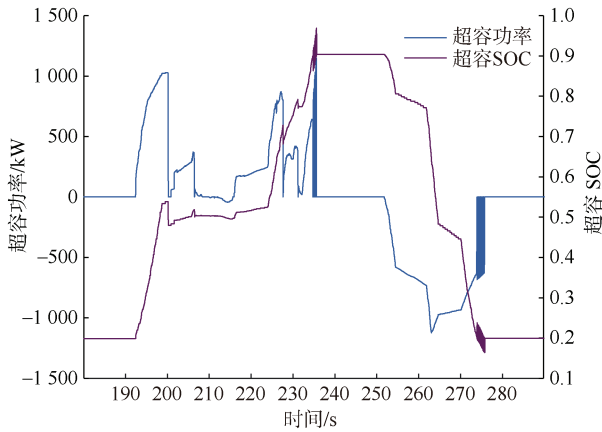


图 8 未投入电池时电容功率及 SOC 曲线  
Figure 8 Power and SOC curves of supercapacitor when the battery is not engaged

超级电容是功率型元件，功率密度大但能量密度小，在储能充放电过程中 SOC 变化较大。而电池是能量型元件，功率密度小但能量密度大，在投入储能过程中电池 SOC 变化较小，这使得电池能够应对超级电容在某些情况下的提前充满问题。

以上文提到的某地铁线路为例，当在仅配置纯超级电容储能的站点额外投入 200 kW 电池时，从图 9 可以看出，在仿真时间约 240 s 时，超级电容的功率降至 0，此时超容储能系统已充满，无法继续吸收再生制动能量。而由于电池能量密度大，投入过程中 SOC 变化较小，电池仍能正常工作，继续回收剩余的再生制动能量。

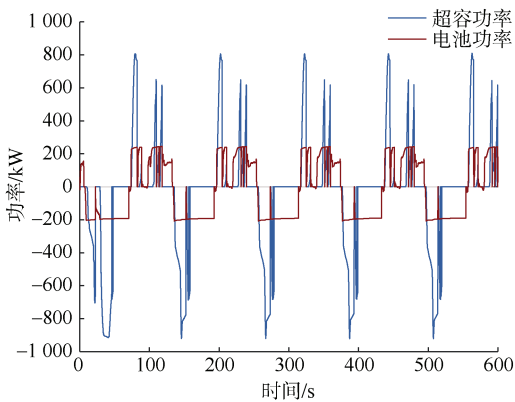


图 9 投入电池后超容及电池功率曲线  
Figure 9 Power curves of supercapacitor when the battery is engaged

如果在全线各站均配置 1.5 MW 纯超级电容储能系统的基础上，将每站三套超容系统中的一套 500 kW 超级电容替换成 200 kW 的电池储能系统，组成 1 MW

超级电容和 200 kW 的混合储能系统，那么新组成的混合储能系统的总充电量将比纯超级电容储能系统多出 14.72 kWh，同比提高了 53.96%，节能率提高了 5.95%。此外，由于能量型储能元件的加入，超级电容的功率峰值也在一定程度上得到降低，这不仅减少了超级电容的循环次数，还有助于延长混合储能系统的整体使用寿命。

由上文可知，在纯超级电容储能系统中适当投入电池储能系统能够提高再生制动能量利用率，混合储能系统方案对比纯超级电容方案较有优势。尽管增加电池储能系统的投入有益于节能率的提高，但是由于实际工程应用中配置电池柜的成本较为高昂，因此纯电池储能系统方案在成本方面不具有优势。以纯电池储能系统方案为例，若在每个站点均部署 3 套总功率达 600 kW 的纯电池储能系统，其成本相较于纯电容储能系统提高 125%，与混合储能系统相比也高出 59%。另一方面，电池储能系统的寿命通常低于超级电容储能系统，这意味着纯电池储能系统在使用寿命上不如纯超级电容储能系统和混合储能系统。综合考虑，纯电池储能系统会导致储能系统寿命缩短和投资成本显著增加。因此，与纯电池储能系统相比，混合储能系统方案具有更多的优势。

综上可知，混合储能系统方案在再生制动能量利用率和成本效益方面，相较于其他两种单一介质的储能方案具有明显的优势。在特定站点引入混合储能系统，可以有效解决由于超级电容快速充放电特性导致再生制动能量未能充分利用的问题，从而提高能量利用率，增强储能系统的整体节能效果，并能在一定程度上延长储能系统的使用寿命。

### 2.2.2 供电能力

由于混合储能系统中的钛酸锂电池能够实现能量的长时间存储，所以在变电所内安装混合储能系统后，钛酸锂电池储能系统能够在变电站输出功率较高时额外补充一定的功率输出，从而减小变电所的峰值功率，降低城市轨道交通系统对城市电网的负荷，提高牵引供电系统的运营能力，同时可以使变电所在不扩容的基础上增加发车密度。

当该线路各站增设混合储能型再生能量利用装置后，在各站再生装置运行正常的情况下，经过仿真计算，该线路投入混合储能前后的供电能力理论上可达到如下水平。当该线路处于高峰小时 1 min 45 s 发车间隔的大双边工况时，各站牵引整流机组承担的牵引

负荷情况如表 6 所示。

表 6 某线路投入混合储能后供电能力  
Table 6 Existing power supply capability of a line with hybrid energy storage

车站名称	纯超容储能系统 整流机组负荷/kW	混合储能系统 整流机组负荷/kW
A	—	—
B	2 230	2 110
C	3 872	3 744
D	1 654	1 527
E	1 517	1 410
F	3 793	3 657
G	3 080	3 046
H	2 977	2 890
I	3 755	3 598
J	2 780	2 682
K	5 207	5 186

由表 6 展示的整流机组承担负荷的情况可知，在投入混合储能系统后，该线路在正常运行工况下能够满足高峰时段 105 s 的发车间隔的运营需求。这意味着混合储能系统的投入，能够有效缓解变电站的容量压力。随着发车密度的增加，混合储能装置能够分担一部分负荷，提升变电站的供电能力。这不仅减轻了由于线路扩容或客流量增加所带来的变电站容量压力，还减少了牵引机组在高负载状态下的运行时间。这样的改进有利于降低变电站设备的故障率，并有助于延长变电站设备的使用寿命，为城市轨道交通系统的稳定运行提供有力保障。

### 2.2.3 紧急牵引

混合储能系统相较于纯超级电容系统还具备紧急牵引的功能，通过应急电源能够在供电网发生故障时将列车牵引至邻近车站，在避免运营事故发生的同时也能保护乘客安全。由于超级电容储能系统充放电迅速，无法保证超容储能系统 在发生广域性停电故障时的电量，因此紧急牵引时仅考虑电池储能系统的储能量。

紧急牵引计算的目的是确保在特殊情况下，应急电源的储能量足以支持列车安全返回至最近的车站。为此，需要对列车牵引回邻近车站的能耗进行估算，这涉及牵引能耗和辅助能耗的计算。在设计列车牵引回邻近车站的方案时，必须考虑最小启动加速度和牵引平均速度，以实现合理的能耗平衡。如果紧急牵引时列车速度过快，将导致牵引能耗显著增加；而速度过慢，则会增加列车的辅助能耗。

为了使电池储能系统在紧急牵引时能够发挥与常规救援拖车相似的效果，并避免因速度过慢而增加列车的辅助能耗，根据城轨救援列车的拖车速度，计算选取列车牵引回车站的平均速度为 20 km/h。紧急牵引时，列车的辅助功率设定为 50 kW。此外，设定列车处于 AW3 负载条件下，其中动车单车质量为 54.5 t，拖车单车质量为 49.77 t。考虑高峰期时上下行线路均有车，假定每个站间仅有一辆上行列车和一辆下行列车，则选取典型列车数量为 20 辆，以模拟紧急情况下的牵引需求。通过这些参数的合理设计和计算，可以确保紧急情况下列车能够安全、高效地返回最近的车站，同时优化应急电源的使用效率。以某条线路为例，线路运营的列车参数如表 7 所示。

表 7 某地铁运营列车参数  
Table 7 Operational parameters of a subway train

参数	数值	参数	数值
列车编组	3M3T	辅助功率/kVA	320
逆变器效率/%	98	质量(AW3)/t	312.81
齿轮效率/%	97.5	制动电阻阻值/ $\Omega$	0.205
电机效率/%	93	制动电阻启动电压/V	900
平均加速度/ $(m/s^2)$	0.82	制动电阻限制电压/V	970
平均制动减速度/ $(m/s^2)$	0.45		

根据列车紧急自牵引救援的设计要求，在满载 AW3 工况下，列车在 35‰坡道启动时的最小加速度需达到  $0.0833 m/s^2$ 。依据上文紧急牵引仿真的运行条件，列车应急牵引中的最大速度限制为 20 km/h。由于速度较低，制动时间较短，能耗计算中忽略制动过程，仅考虑牵引能耗和辅助能耗。在牵引计算仿真软件中，对上行线路中的列车能耗进行计算，结果如表 8 所示。

表 8 某线路能耗仿真运行结果  
Table 8 Energy consumption simulation results of a certain line

车站站间	总能耗/kWh	牵引能耗/kWh	辅助能耗/kWh
A—B	8.48	3.80	4.68
B—C	12.15	8.34	3.81
C—D	8.41	3.00	5.41
D—E	14.78	9.63	5.15
E—F	13.91	8.72	5.19
F—G	12.87	7.94	4.93
G—H	15.05	9.40	5.65
H—I	14.67	10.58	4.09
I—J	12.55	6.16	6.39
J—K	13.95	7.87	6.08
合计	126.82	75.44	51.38

根据表 8 考虑混合储能系统中电池对故障列车的紧急救援能力, 由于不能保证超级电容在发生广域性停电故障时的电量, 所以只考虑电池的储能量, 因此全线路储能系统中电池能量应满足牵引网故障时线路上下行所有运行列车的紧急救援所需能量, 若每个站间均有一辆车, 则上下行线路紧急牵引时总共需要电池提供 253.64 kWh 能量。

根据表 8, 若在两站之间存在故障列车需要返回至邻近车站时, 平均需提供约 12 kWh 能量。在混合储能系统中配置的单套 200 kW 电池储能系统, 其储能量约为 50.7 kWh。在电池 SOC 为 70% 时, 大约可以提供 35.49 kWh 能量, 这足以支持线路上 3 辆列车返回至邻近车站。为确保线路上下行一共 20 辆列车在紧急情况下能前进至下一车站, 全线至少需要配置 7 套 200 kW 电池储能系统。这样的配置能够提供必要的能量保障, 确保在紧急救援情况下, 列车能够安全、有效地完成救援牵引任务。

### 3 结论

本文通过对超级电容、钛酸锂电池和飞轮在功率密度、能量密度及成本等关键参数上的对比, 将储能介质分为功率型和能量型两类。仿真结果表明: 混合储能系统结合了超级电容的高功率密度与钛酸锂电池的高能量密度, 在回收再生制动能量、提升变电站供电能力及列车紧急牵引方面比单一的储能系统方案具有更显著的优势。基于上述分析, 本文展示了超级电容-钛酸锂电池混合储能系统在城市轨道交通中的应用潜力, 尤其是在再生能量利用技术中的显著优势。

### 参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会信息, 2024.
- [2] 许伶俐, 刘炜, 廖钧, 等. 城市轨道交通列车牵引和制动能耗实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(9): 1818-1824.
- [3] 杜昊. 城市轨道交通再生制动能量利用研究[J]. 高铁速递, 2022(11): 43-45.
- [4] 叶小雯. 城市轨道交通逆变回馈装置的系统优化设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018: 10-18.
- [5] 刘宇嫣, 林飞, 杨中平. 城轨交通地面储能系统的能量管理策略综述[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(6): 9-17.
- [6] LIU Yuyan, LIN Fei, YANG Zhongping. Overview of energy management strategies for wayside energy storage system of urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(6): 9-17.
- [7] 杨浩丰. 基于列车运行工况的城轨地面式混合储能系统容量配置与控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 22-26.
- [8] YANG Haofeng. Research on capacity configuration and control strategy of urban rail ground hybrid energy storage system based on train operation condition[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 22-26.
- [9] 邓谊柏, 黄家尧, 陈挺, 等. 城市轨道交通超级电容技术[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(6): 24-31.
- [10] DENG Yibo, HUANG Jiayao, CHEN Ting, et al. Supercapacitor technology for urban rail transit systems[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(6): 24-31.
- [11] VAZQUEZ S, LUKIC S M, GALVAN E, et al. Energy storage systems for transport and grid applications[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2010, 57(12): 3881-3895.
- [12] ABAZA A, EL SEHIEMY R A, EL-FERGANY A, et al. Optimal parameter estimation of solid oxide fuel cells model using bald eagle search optimizer[J]. International journal of energy research, 2022, 46(10): 13657-13669.
- [13] 吴健, 张言茹, 郑鑫杰. 钛酸锂电池在城市轨道交通的适用性研究[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(6): 39-46.
- [14] WU Jian, ZHANG Yanru, ZHENG Xinjie. Study on the applicability of lithium titanate battery in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(6): 39-46.
- [15] 谭毅, 薛冰. 锂离子电池负极材料钛酸锂的研究进展[J]. 无机材料学报, 2018, 33(5): 475-482.
- [16] TAN Yi, XUE Bing. Research progress on lithium titanate as anode material in lithium-ion battery[J]. Journal of inorganic materials, 2018, 33(5): 475-482.
- [17] XU Kai, GUO Youguang, LEI Gang, et al. A review of flywheel energy storage system technologies[J]. Energies, 2023, 16(18): 6462.
- [18] 赵思锋, 唐英伟, 王赛, 等. 基于飞轮储能技术的城市轨道交通再生能回收控制策略研究[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(3): 524-529.
- [19] ZHAO Sifeng, TANG Yingwei, WANG Sai, et al. The study of control strategy for urban mass transit based on flywheel energy storage system[J]. Energy storage science and technology, 2018, 7(3): 524-529.
- [20] 秦强强, 张骄, 李宇杰, 等. 基于列车运行状态的城轨地面混合储能装置分时段控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 2): 760-769.
- [21] QIN Qiangqiang, ZHANG Jiao, LI Yujie, et al. Research on time-phased control strategy of urban rail ground hybrid energy storage device based on train operation status[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2019, 34(S2): 760-769.

(编辑: 王艳菊)