doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.06.003

新一代储存式再生制动能量利用系统关键技术及示范应用

钟志宏[1]，赵亚杰[1]，林　飞[1]，杨中平[1]，孙月嘉[2]，刁传飞[1]
（1. 北京交通大学电气工程学院，北京 100044；2. 北京城建设计发展集团股份有限公司，北京 100045）

摘　要：针对城市轨道交通再生制动能量利用系统在容量配置、安全设计、能量管理、节能评估等方面的技术挑战，提出新一代储存式再生制动能量利用系统 eRAM。创新性地构建了：基于参数分解的容量优化模型和算法；考虑轨道交通应用场景的多级安全架构；基于关键参数辨识的区间能量动态分配算法；基于深度强化学习的分布式协同控制策略；基于数据驱动的储能元件状态监测与寿命预测。对各个重要组成部分的基本原理及其关键技术进行说明，并展示和分析这些技术在北京地铁八通线上应用示范的实际效果，以期为城市轨道交通再生制动能量吸收利用技术的发展提供有益的参考。

关键词：城市轨道交通；再生制动能量；容量配置；安全设计；能量管理；协同控制；寿命预测
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)06-0016-10

Key Technologies and Demonstration Applications of a New-Generation Stored Regenerative Braking Energy Utilization System

ZHONG Zhihong[1], ZHAO Yajie[1], LIN Fei[1], YANG Zhongping[1], SUN Yuejia[2], DIAO Chuanfei[1]
(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;
2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100045)

Abstract: To address technical challenges in capacity configuration, safety design, energy management, and energy-saving evaluation for urban rail transit regenerative braking energy utilization systems, this paper proposes the new-generation stored regenerative braking energy utilization system, eRAM. We develop: (1) capacity optimization model and algorithm based on parameter decomposition; (2) a multi-level safety architecture considering rail transit application scenarios; (3) an interval energy dynamic allocation algorithm based on key parameter identification; (4) distributed cooperative control strategy based on deep reinforcement learning; and (5) data-driven condition monitoring and life prediction of energy storage components based on data driven. We present the basic principles and key technologies of each major component and evaluate their demonstration performance on the Beijing Metro Batong Line, providing a useful reference for advancing regenerative braking energy recovery and utilization in urban rail transit.

Keywords: urban rail transit; regenerative braking energy; capacity configuration; safety design; energy management; collaborative control; life prediction

收稿日期：2025-03-12　修回日期：2025-08-01

第一作者：钟志宏，男，博士，讲师，从事轨道交通牵引控制和节能运行，zhzhong@bjtu.edu.cn

基金项目：国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2022YFB4301200)
引用格式：钟志宏，赵亚杰，林飞，等. 新一代储存式再生制动能量利用系统关键技术及示范应用[J]. 都市快轨交通，2025，38(6)：16–25.
ZHONG Zhihong, ZHAO Yajie, LIN Fei, et al. Key technologies and demonstration applications of a new-generation stored regenerative braking energy utilization system[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(6): 16–25.

近年来，随着城市轨道交通(以下简称“城轨交通”)线网规模的快速扩大，其能耗问题也日益突出。2023年，中国城轨交通总电能消耗高达249.77亿kWh，同比增长9.59%，其中牵引能耗129.34亿kWh，同比增长14.31%，而北京、上海的城轨交通年耗电量已超过25亿kWh[1]。在我国建设资源节约型、环境友好型社会的大背景下，对城轨交通进行节能降耗具有显著的经济效益和良好的生态效益。

目前，城市轨道交通普遍采用二极管整流机组供电，该整流方式存在直流电压不可控、电压波动范围大、能量只能单向流动等缺点[2]。当列车制动时，其再生制动能量若无法被附近的牵引列车吸收，则会使得牵引网电压上升，继而导致列车再生制动失效。传统的处理方式是将这部分能量通过车载制动电阻消耗，但这会导致能量的浪费，同时加剧隧道温升，引起能量的二次消耗[3]。

为高效利用列车再生制动能量并降低牵引能耗，近年来，超级电容、电池、飞轮等储存式再生制动能量利用装置已在北京、广州、青岛、无锡、苏州、武汉、香港等多个城市得到了广泛应用[4]。

从目前的研究和应用情况来看，在容量配置方面，实际应用的容量配置方法较为简单，普遍基于牵引整流机组的最大功率或平均功率进行配置[5]，导致配置冗余过大；而学术界提出的各类智能优化配置算法虽在理论上更为精确，但普遍存在2个局限性：一是未将能量管理关键参数纳入优化模型进行协同考虑，二是缺乏在实际运营线路中的验证与应用[6-7]。在安全设计方面，现有储能型再生能量利用装置基本沿用传统的BUCK/BOOST电路拓扑及保护[8]，未针对轨道交通场景的特殊需求(如存在负极轨电位等)开发专用拓扑结构和保护架构。在能量管理算法方面，当前应用层面的算法存在明显的局限性：或仅针对单套储能系统进行优化[8]，或最多扩展至2套储能系统的协调控制[9]，尚未建立起面向多储能单元协同运行的全局优化管理体系。在节能效果评估方面，学术研究多基于一个或多个发车间隔时间尺度下的能耗对比[10]，这种方法在实际工程中容易受多种因素影响。而工程实践中常用的回馈量统计或储能放电量计量方法[11]，又存在计量误差较大的问题，亟需开发更科学可靠的评估体系。

为推动储存式再生制动能量利用装置在城市轨道交通领域的高质量发展，以下关键问题亟待深入探讨与优化：容量配置与系统优化的平衡、契合行业特性的系统安全性设计、能量管理的动态优化与算法适应性，以及节能计量的精确性与可行性。

基于对系统容量、安全与能效等关键问题的深入研究，本文创新性地提出了新一代储存式再生制动能量利用系统eRAM。其核心创新点在于：应用参数分解法优化了容量配置；构建了“五横三纵”安全设计框架；提出了基于关键参数辨识的充放电控制策略；设计了基于深度强化学习的多储能协同控制算法。目前，该系统已在北京地铁八通线完成示范应用，验证了其可行性与先进性。

1 储存式再生制动能量利用关键技术

eRAM的实现，是一个从设计、控制到运维的综合系统工程，涉及容量配置与优化、多级安全设计、区间能量管理、分布式协同控制、关键器件的状态检测与寿命预测5大关键技术。

1.1 再生能量利用系统的容量配置与优化

容量配置的优化聚焦于2点：一是确定再生能量利用装置的最佳安装位置，二是精确设定每套再生能量利用装置的适宜容量。对于城市轨道交通系统而言，一个科学合理的再生能量利用装置选址与容量配置方案，不仅能够大幅度削减初期的投资成本，还能显著提升系统的节能效率，实现经济效益与环保效益的双重提升。鉴于牵引供电系统固有的非线性特征及其容量配置参数的高度复杂性，构建能够精确捕捉各节点电压电流动态变化的牵引供电模型，并开发一种能够高效引导多优化变量迅速收敛至全局最优解的容量配置优化算法，构成了解决这一问题的2大核心要素。

1.1.1 基于动态潮流的直流牵引供电仿真平台

精确且易于扩展的仿真模型是确保再生制动能量利用系统容量配置合理性的基石。为此，在传统静态潮流解析模型的基础上，对以下内容进行了优化：①对牵引供电系统中的列车、变电所以及再生能量利用装置模型进行全面优化，提升仿真精度；②保留系统中的电容、电感等非线性元件，能够更精准地描绘动态的电压和电流变化过程；③解决模型中的代数环问题，提升大规模仿真的正确收敛概率，确保仿真模型的稳定性；④支持多种储能元件和多种EMS(energy management system)算法选择，可对算法中的控制参数进行灵活调整。

为验证该仿真平台的准确性，将平台解析所得的电压、电流数据与北京地铁八通线现场实际记录的电压、电流等数据进行全面且深入的对比分析。对比结

果显示，该平台的解析精度达到 95%以上，有力地佐证了其在真实应用场景下的高可靠性及准确性，进一步确立了其在实践应用中的坚实地位。

1.1.2 基于参数分解的容量配置优化策略

随着再生能量利用装置应用规模的持续扩大，优化参数的数量亦呈现指数级增长，这无疑给直接优化过程带来了极大的算力挑战。具体而言，这可能导致优化算法难以收敛至全局最优解，且优化速度极为缓慢。为应对上述挑战，提出了一种基于参数分解的容量配置优化方法。该方法的核心在于，将原本复杂的优化参数合理地分解为若干相对独立的子部分，并针对每个子部分构建专门的优化模型。这些子模型之间通过相互迭代的方式进行协调与优化，从而在确保全局最优性的前提下，大幅度降低搜索空间的维度，进而显著提升优化效率。

以北京地铁八通线的再生能量利用系统为例，其优化逻辑图如图 1 所示。在该图中，优化参数被分解为等效容量、充放电阈值以及功率分配比例 3 大关键部分。通过对这 3 部分分别进行优化建模与迭代求解，最终得出既经济可行又高效节能的再生能量利用系统配置方案[12]。

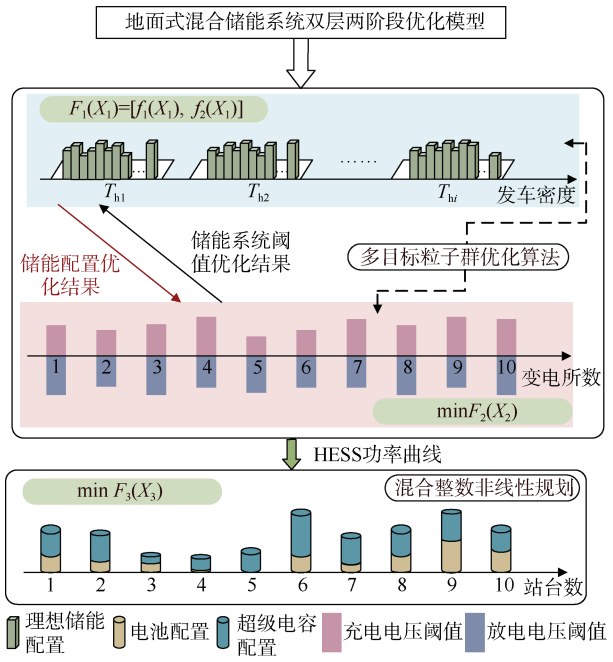


图 1 八通线再生能量利用系统容量配置优化策略

Figure 1 Capacity optimization strategy for regenerative energy utilization in the Batong Line

1.2 多级安全设计

安全可靠是产品的生命线，eRAM 采用了“五横三纵”的安全设计理念。具体而言，“五横”指的是在单体、模组、柜体、再生能量利用系统以及变电站系统这 5 个不同层级上，均进行全面的安全性考虑[13-14]。从最基本的单体层面出发，逐步向上扩展至整个变电站系统，每层级都融入预防、监测以及灾害控制的先进理念和技术手段。而“三纵”则是指贯穿于这 5 个层级之中的 3 条安全主线，即预防机制、监测手段以及灾害控制措施[15]。通过这 3 条主线的有机结合，实现对系统安全性的全方位、多层次保障。

以八通线示范工程为例，其“五横三纵”的安全性设计如图 2 所示。其中，值得注意的是，在主电路设计方面，在负母线上增设快速断路器，能够有效避免负对地短路后负极无法带电分断的情况；在放电安全电压设计方面，由于超级电容的回压特性，安全电压应按照比 36 V 更低的电压进行设计，具体电压值的选择应根据检修时间确定[16]。

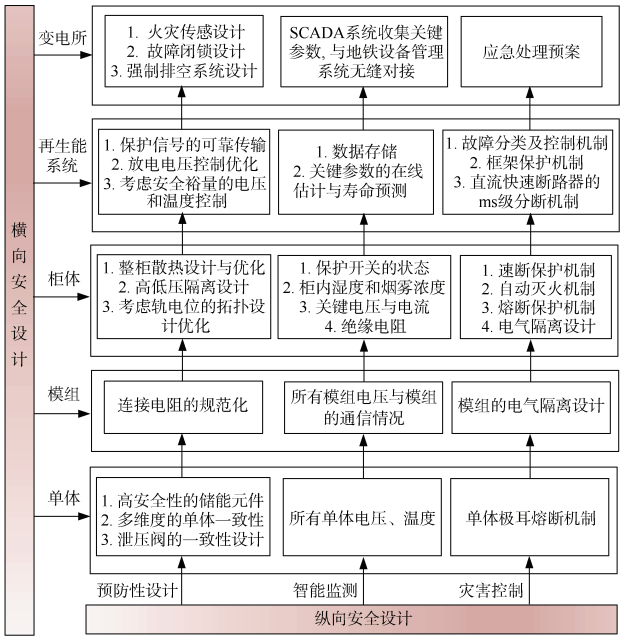


图 2 八通线示范工程的五横三纵安全性设计

Figure 2 Safety design of “five horizontal and three vertical” in the Batong Line demonstration project

1.3 区间能量管理策略

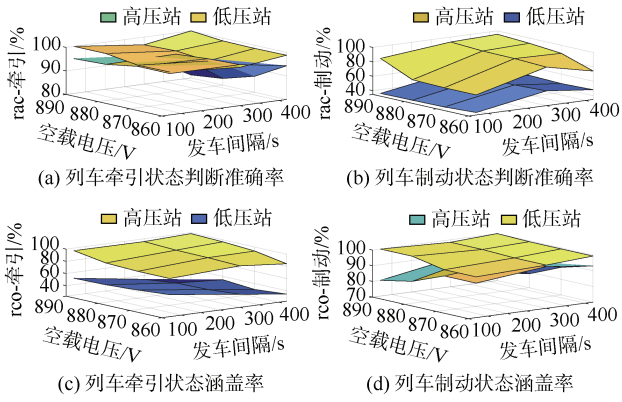
从节能优化的视角来看，列车间的能量交互是需要重点考虑的内容。若不考虑列车间能量交互，单纯以放电量为节能导向，会使充放电策略过度聚焦于增加充电与放电的频次，导致偏低的充电阈值和偏高的放电阈值，造成放电量与节能量严重不匹配，甚至带来牵引能耗上升的风险。

再生能量利用装置在不影响列车间能量交互的前提下，通过最大化其充电与放电能量，能够显著降低变电所的能耗水平[17]。列车间的能量交互，本质上是一个制动列车的制动能量向牵引列车转移的过程。若所有列车的功率数据能够实时获取，可将制动能量传输距离区间内所有列车的功率之和(其中牵引功率取正值，制动功率取负值)作为判断再生能量利用装置是否投入运行的关键条件。具体而言，当列车功率和大于 0 时，表明区间内存在剩余的牵引功率，此时制动列车的能量能够被完全吸收，并且再生能量利用装置可以向牵引列车提供所需的能量；而当列车功率和小于 0 时，则表明区间内存在剩余的制动功率，此时再生能量利用装置可以充电，以吸收制动能量。

然而，鉴于网络安全性及其他多维度因素的考量，目前国内大多数城轨交通系统中，实时采集列车功率数据仍面临困难。因此，为了有效提升节能效率，需从 2 大关键路径进行探索：①确定一个能够精确表征列车剩余功率状态的电压基准值；②依托当前可获取的数据资源，对列车功率进行辨识与预测。

1.3.1 基于空载电压辨识的基准值设定

图 3 为分别以相邻 2 个牵引变电站的不同空载电压为基准值时，列车剩余功率状态、发车间隔及空载电压的关系[18]。可以看到，以高空载电压站的空载电压为基准值，在各种发车间隔下，列车剩余功率状态的判断准确率都可以达到 90%以上。



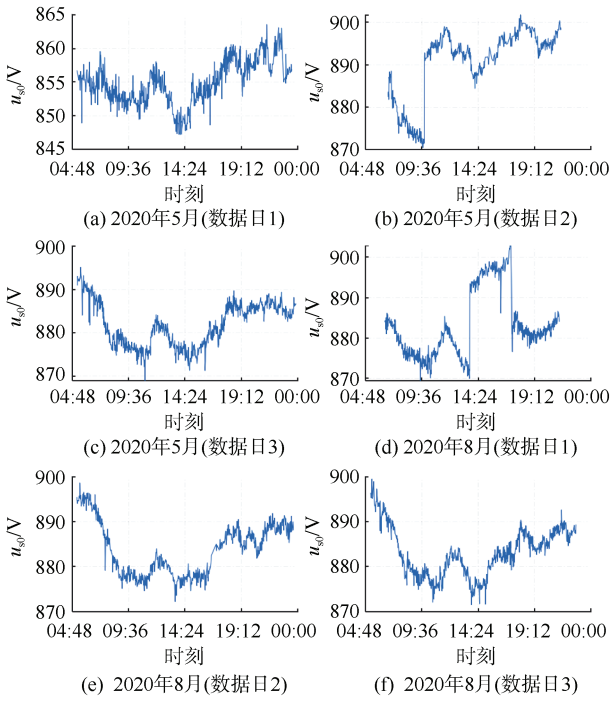
(a) 列车牵引状态判断准确率　(b) 列车制动状态判断准确率

(c) 列车牵引状态涵盖率　(d) 列车制动状态涵盖率

图 3　列车剩余功率状态、发车间隔及空载电压的关系

Figure 3　Relationship between train residual power status, departure interval, and no-load voltage

由于城市用电负荷存在的随机性以及中压交流电网电压调节的差异，分散式供电系统的每个牵引变电站的空载电压均存在差异且波动较大，图 4 为北京地铁某变电站的空载电压在不同日期测量的波动情况[2]。因此，为在所有工况下选择合适的电压基准值，需对每个牵引变电站的空载电压进行实时辨识，并选择一个能量管理区间内最高的空载电压值，作为当下的电压基准。



(a) 2020年5月(数据日1)　(b) 2020年5月(数据日2)

(c) 2020年5月(数据日3)　(d) 2020年8月(数据日1)

(e) 2020年8月(数据日2)　(f) 2020年8月(数据日3)

图 4　空载电压波动曲线

Figure 4　No-load voltage fluctuation curve

考虑到经典的公式计算法存在实时性高但参数鲁棒性差，而基于整流机组外特性拟合的方法精度较高但实时性较差[2, 19]，eRAM 采用了外推法和公式法融合的辨识策略。在该策略中，公式法的结果作为辨识的基础和主要依据。同时，也基于数据的采集，对外推法的结果进行计算。得到外推法的计算结果后，以 2 种方法的计算结果偏差为输入，对公式法中的参数进行校正，从而提升公式法的辨识鲁棒性。

随后，鉴于列车制动能量在 750 V 制式供电系统中的有效传输距离通常限制在 2～3 km 范围内，大致相当于相邻 2 个站点之间的距离，系统以每 2 个牵引变电站为一个管理单元，负责管理和优化 4 个牵引变电所覆盖区间内的能量流动，如图 5 所示。对于这 2 个管理单元内的再生能量利用装置，其基准电压值的设定均采用其中较高的空载电压值，以确保能量传输的效率和安全性。

1.3.2 基于功率辨识技术的充放电管理

首先采用聚类分析方法，将 2 个变电站的相关可测量数据作为输入信息，以此为基础辨识区间内列车的

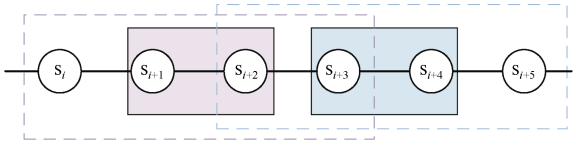


图 5　区间能量管理单元及管理范围

Figure 5　Section energy management unit and its control domain

剩余功率状态。具体而言，输入的特征参数包括：2 个牵引变电站的空载电压值、输出电流值和输出侧电压值，管理单元内部再生能量利用装置的功率总和，以及通过高压站空载电压所推断出的列车牵引或制动状态。经过聚类分析处理，系统输出的结果即为区间内列车的功率状态，如图 6 所示。辨识得到列车的功率后，首先对区间的牵引和制动状态进行判断，若处于制动状态，根据式(1)调节基准电压；若处于牵引状态，根据式(3)调节基准电压。

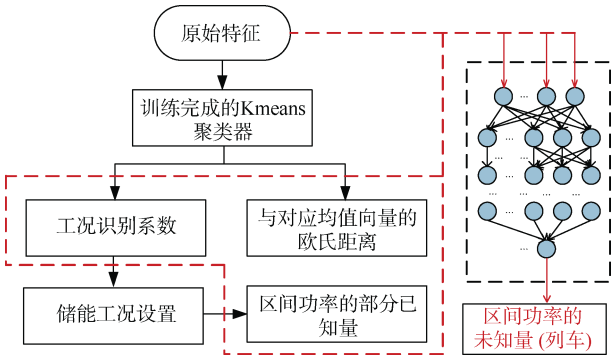


图 6　列车功率辨识策略

Figure 6　Train power identification strategy

式(1)中的$U_{高压}$和$U_{低压}$分别为高压站和低压站的基准值，K_1和K_3分别为高压站和低压站基准值的充电初始下降斜率，其初始值如式(2)所示。

$$\begin{cases} U_{高压} = u_{o1} - K_1 P_t \\ U_{低压} = u_{o1} - K_3 P_t \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} K_1 = 0 \\ K_3 = \dfrac{u_{o1} - u_{cri}}{P_{tmax}} \end{cases} \tag{2}$$

式中，u_{o1}为高压站的空载电压值；P_t与P_{tmax}分别为列车的制动功率与列车的最大设计制动功率；u_{cri}为产生环流的临界电压，其计算公式与电路拓扑有关[18]。

高压站的基准电压小于空载电压时，会产生环流，因此，初始斜率为 0，低压站的斜率则与产生环流的临界电压相关。

当列车处于牵引状态时，由于列车牵引功率越大，牵引网电压越低，因此，在再生能量利用装置能够将所储存能量完全释放的前提下，在牵引网电压越低时启动，降低峰值牵引功率的效果越好。牵引状态下，高压站和低压站的基准值变化为

$$\begin{cases} U_{高压} = u_{o1} - K_2 P_{tr} \\ U_{低压} = u_{o1} - K_4 P_{tr} \end{cases} \tag{3}$$

式中，K_2和K_4分别为高压站和低压站基准值的放电初始下降斜率，初值均为 0；P_{tr}为列车牵引功率。

考虑到列车功率辨识的精度问题，当辨识的列车功率偏低，可能导致牵引网电压过高。以北京地铁八通线为例，考虑到列车制动电阻启动电压为 900 V，采用 900 V 作为临界值进行判断，并对制动时的充电阈值基准值斜率进行在线校正。具体地，在固定时间段内，若判断到牵引网电压超过 900 V 且再生能量利用装置未达到额定充电功率，则以一定的比例增加基准值的下降斜率。另一方面，考虑到列车的实际牵引和制动之间存在一定的间隔。如果在放电之后，再生能量利用装置立即开始充电，说明存在牵引变电站给再生能量利用装置充电的情况，此时需要以一定的比例减小基准值的下降斜率。列车制动时基准值的斜率变化为

$$K_l = \begin{cases} K_l + \gamma_1 \dfrac{u_{o1} - u_{cri}}{P_{tmax}} & u_{si} > 900\ \text{V}, P_{sci} < P_{sci\text{-}rate} \\ K_l - \gamma_2 \dfrac{u_{o1} - u_{cri}}{P_{tmax}} & \Delta t_{dis\text{-}ch} < 1\ \text{s} \end{cases} \tag{4}$$

$$l = 1, 3$$

式中，K_l为高压站和低压站的充电基准值下降斜率；u_{si}为相应站的牵引网电压值；P_{sci}和$P_{sci\text{-}rate}$分别为相应站再生能量利用装置的充电功率与额定功率；$\Delta t_{dis\text{-}ch}$为放电和充电的时间间隔；γ_1和γ_2分别为下降斜率的增大和减小的变化率。

当列车处于牵引状态时，若辨识的牵引功率不准确，可能会导致放电阈值设置过低，再生能量利用装置无法释放吸收的能量，进而影响列车制动时的制动能量吸收效果。为了解决此问题，通过检测每次制动充电初始时刻的再生能量利用装置剩余能量进行调整。具体地，若每次制动充电初始时刻的再生能量利用装置的剩余能量大于设定的最低剩余能量阈值，则减小放电阈值的斜率。这样可以确保在牵引状态下，再生能量利用装置能够释放更多的能量，以提高制动能量吸收效果。此外，加入自恢复机制，若连续 N 个充放电周期内都没有多余的剩余能量，则自动以一定比例增加放

电阈值的斜率。列车牵引时基准值的斜率变化为

$$K_m=\begin{cases}K_m-\gamma_3\dfrac{u_{o1}-u_{o2}}{P_{trmax}} & \left(E_{sci}>E_{sci\text{-}min}\right)_{t_{cha0}}\\ K_m+\gamma_4\dfrac{u_{o1}-u_{o2}}{P_{trmax}} & N\text{周期内均不满足以上条件}\end{cases}\quad(5)$$

$$m=2,4$$

式中，K_m 为高压站和低压站的放电基准值下降斜率；E_{sci} 和 $E_{sci\text{-}min}$ 分别为相应站再生能量利用装置的剩余能量和最小剩余能量；t_{cha0} 为充电开始的时刻；γ_3 和 γ_4 分别为下降斜率的减小和增大的变化率。

1.4 多再生能量利用系统的协同控制技术

针对单一再生制动能量利用系统的区间能量管理的局限性，即只能达到当前局部最优而无法实现全局最优，同时无法在多套装置间实现最优配置的问题，eRAM 引入深度强化学习技术，从而实现在线全局最优控制。

基于深度确定性策略梯度算法(deep deterministic policy gradient，DDPG)框架的深度强化学习策略如图 7 所示。在算法框架中，状态部分选取了城轨牵引供电系统的可观测量，包括所有牵引变电所的空载电压、输出侧电压、输出电流，以及所有再生能量利用装置的电压、电流、SOC(荷电状态)等关键参数。这些参数为系统提供了全面的运行状态信息。

在奖励部分，传统的强化学习算法需要设计精确的奖励函数，但在复杂的工况下，这往往难以实现。新一代再生制动能量利用系统则采用了基于“专家经验”的模糊规则来设计奖励函数。通过可观量之间的能量关系，系统能够引导强化学习智能体进行有效的学习，从而在复杂的工况中保持良好的性能。

在动作控制上，系统采用了 DDPG 框架，实现对再生能量利用系统控制量(如阈值、功率等)的连续控制。DDPG 框架集成了 Actor-Critic 架构与深度神经网络强大的函数拟合能力，能够处理高维状态和动作空间，实现更精确和高效的控制。

最终，通过输出功率校正的方式，与区间级能量管理策略进行融合，如图 8 所示。

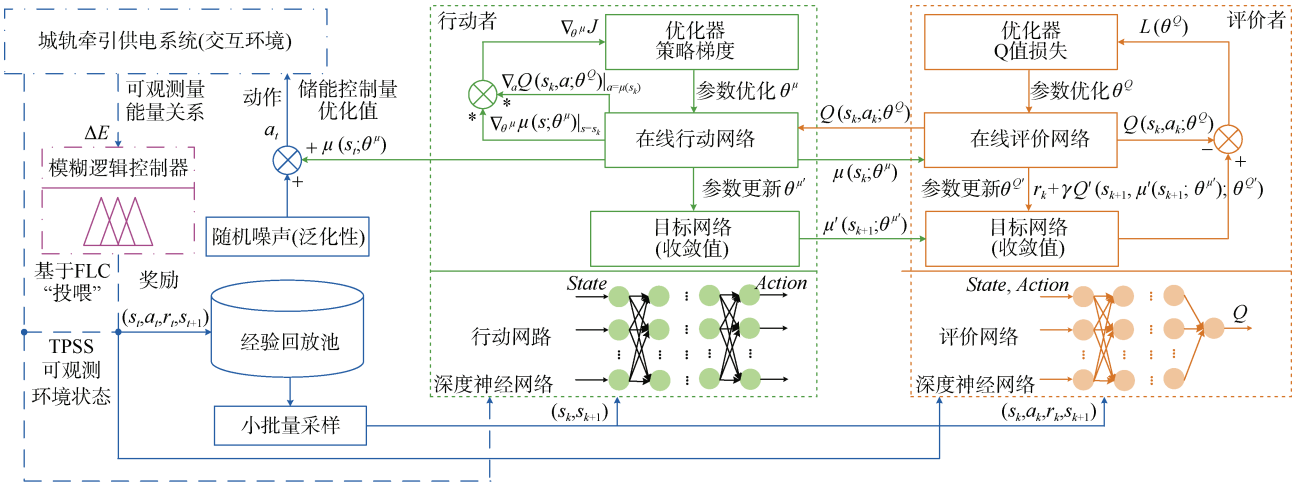


图 7　基于 DDPG 框架的深度强化学习策略

Figure 7　Deep reinforcement learning strategy based on DDPG framework

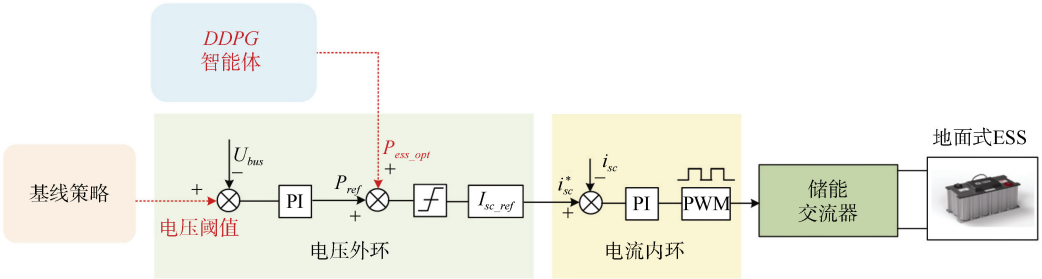


图 8　中央级决策量与区间级决策量的融合

Figure 8　Fusion of central-level and section-level decision quantities

1.5 储能元件的状态监测与寿命预测

状态监测模块专注于对储能单体容量的实时监测。其基本原理基于一个关键假设：储能单体的容值在正常状态下不应发生突变。为实现这一目标，该模块实时采集所有单体的电压信息及电流数据，并将这些信息传输至专用的控制板。在控制板上，系统通过监测电压变化率(dV/dt)的数值，进一步动态计算出储能单体的容值 C。当连续 10 组数据所计算的容值均超过预设的阈值时，系统将判定该储能单体为失效状态。

寿命预测模块则主要通过系统的充电测试预测储能系统的剩余寿命。具体而言，该模块设定每周固定时间(例如周日晚 11 点)对超级电容系统进行 1 次固定电流的充电测试。充电区间被设定为 $0.7U_R$ 至 $0.9U_R$，其中 U_R 代表超级电容系统的额定电压值。通过这一充电测试，系统能够计算出超级电容系统的总容值 C 以及等效串联电阻 Ω_{ESR}。随后，这些关键参数被记录在主控制器中，并形成数据集。利用该数据集进行线性外推分析，系统能够预测出当 C 和 Ω_{ESR} 衰减至预设阈值时所对应的时间，从而准确评估超级电容系统的剩余日历寿命。

2 北京地铁八通线示范应用

2020 年，国家“十三五”重点研发计划重点专项课题通过验收，其课题成果“城市轨道交通地面混合储能装置”于 2020 年在北京地铁八通线梨园站完成了挂网测试运行，取得了良好的节能效果。

作为课题成果的推广应用，北京地铁运营公司结合北京地铁八通线实际情况，在完成可行性研究和论证基础上，于 2021 年 12 月通过自筹方式立项公司级科研项目“八通线再生能量利用技术示范应用研究项目”，对地铁八通线 9 所牵引变电所进行改造加装新一代储存式再生制动能量利用装置，并于 2023 年 12 月完成实施。该示范应用项目获得了北京市科委和北京市国资委的专项支持。图 9 为新一代储存式再生制动能量利用装置安装位置和安装容量情况，其中 6 个牵引变电站安装 1.5 MW 的超级电容储能装置，3 个牵引变电站安装 1 MW 的混合储能装置，超级电容采用宁波中车新能源公司的产品，钛酸锂电池采用大连东芝公司的产品；图 10 为装置照片，每套 1.5 MW 的超级电容储能装置由 1 个控制柜、3 个变流器柜和 3 个超级电容柜组成；每套 1 MW 的混合储能装置由 1 个控制柜、3 个变流器柜、2 个超级电容柜和 1 个钛酸锂电池柜组成。表 1 和表 2 分别为 1.5 MW 超级电容储能装置参数和 1 MW 混合储能装置参数。

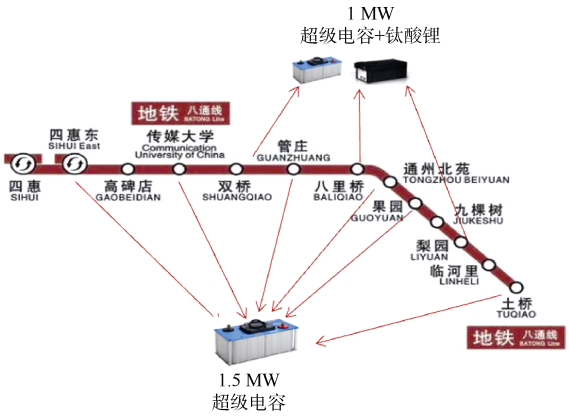


图 9 八通线再生制动能量利用系统配置情况

Figure 9 Configuration of regenerative braking energy utilization system on Batong Line



图 10 八通线再生制动能量利用装置

Figure 10 Regenerative braking energy utilization device for Batong Line

表 1 1.5 MW 超级电容储能装置主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of 1.5 MW supercapacitor energy storage device

项目	技术参数
牵引网侧电压	700 ~ 1 000 V
额定持续电流	3 000 A
最大储能量	9.75 kWh
可用储能量	7.56 kWh
能量循环效率	>92%
柜体尺寸和重量	控制柜：800 × 1 200 × 2 250 mm，<500 kg 变流器柜：600 × 1 200 × 2 250 mm，<700 kg 超级电容柜：1 000 × 1 200 × 2 250 mm，<1 400 kg

表 2 1 MW 混合储能装置主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of 1 MW hybrid energy storage device

项目	技术参数
牵引网侧电压	700 ~ 1 000 V
额定持续电流	2 400 A
最大储能量	57.2 kWh
可用储能量	45.64 kWh
能量循环效率	>92%
柜体尺寸和重量	控制柜：800 × 1 200 × 2 250 mm，<500 kg 变流器柜：600 × 1 200 × 2 250 mm，<700 kg 超级电容柜：1 000 × 1 200 × 2 250 mm，<1 400 kg 电池柜：1 200 × 1 200 × 2 250 mm，<1 600 kg

2.1 整体控制架构

eRAM采用集中优化-分散控制的3层能量管理架构，如图11所示。最上层为中央能量管理层，对应本文的1.4小节内容，对多套再生能量利用装置间的能量流动进行全局性的优化；中间层为变电站内的区间能量管理层，对应本文的1.3小节内容，通过对列车状态和列车功率进行辨识，实现区间能量的管理；下层为变流器控制层，其接受区间能量管理层的控制指令，对再生能量利用系统的电压和电流进行实时控制。

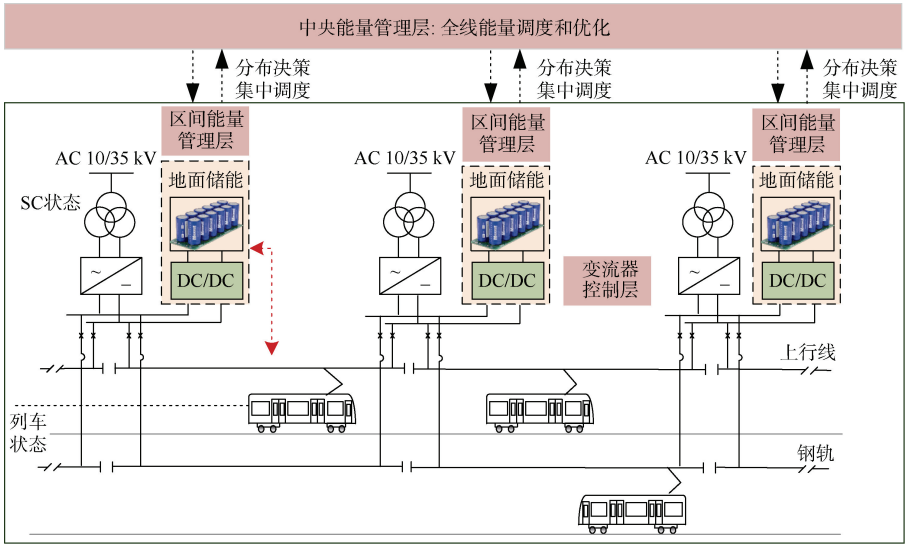


图11 eRAM控制架构

Figure 11 eRAM control architecture

2.2 节能评估方法

考虑到列车的牵引能耗主要受客流、发车间隔、季节的影响，客流和发车间隔又主要受周中、周末、节假日的影响，基于此选取了相同季节、非节假日的前后2周数据进行测算对比。具体的，选取了一周的周四、周五、周六、周日4天，投入再生能量利用系统，采集750 V牵引整流机组输出端的直流电压电流数据；选取后一周的周四、周五、周六、周日4天，不投入再生能量利用系统，以相同的采样间隔采集相同的数据，然后通过式(6)进行节能率的计算。

$$e\% = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{n}\int_0^T u^s_{ss,j} i^s_{ss,j} dt}{\sum_{j=1}^{n}\int_0^T u_{ss,j} i_{ss,j} dt}\right) \times 100\% \tag{6}$$

式中，n代表牵引变电所的数量；$u_{ss,j}$和$i_{ss,j}$分别代表第j个牵引变电所未投入再生能量利用系统时的牵引网电压和整流机组输出电流；$u^s_{ss,j}$和$i^s_{ss,j}$分别代表第j个牵引变电所投入再生能量利用系统后的牵引网电压和整流机组输出电流。

具体的采集点位如图12所示：①2组12脉波整流

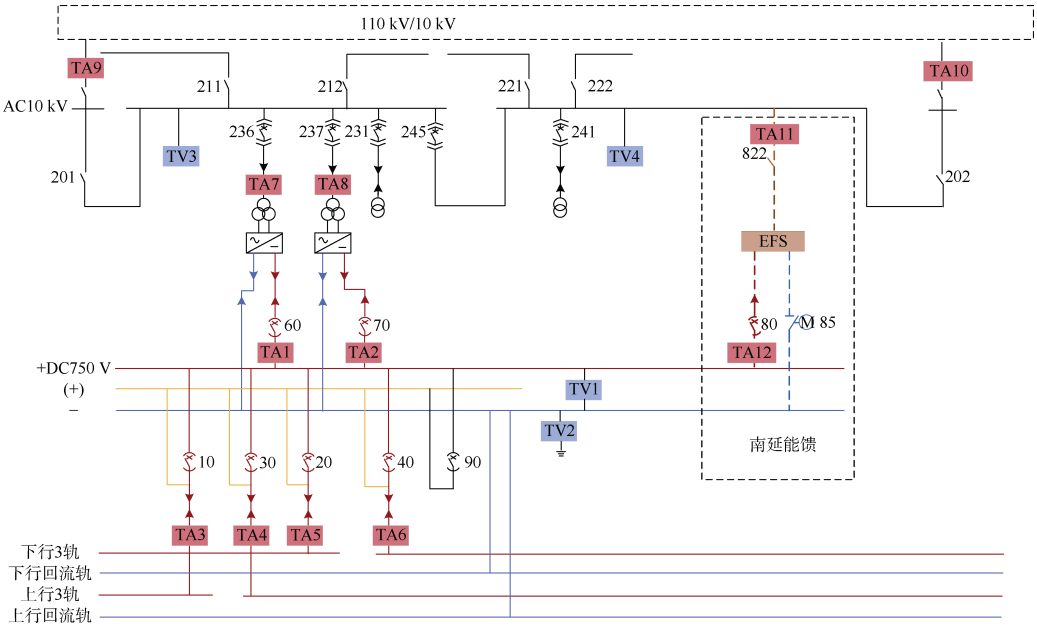


图12 数据测量点位

Figure 12 Data measurement point

机组输出电流(60/70)；②上行电流(10/30)和下行电流(20/40)；③变电所母线电压(60/70)。

2.3 节能效果及分析

基于采集的实际数据，对各站牵引能耗进行统计，表 3 为典型站点(传媒大学和双桥站为低空载电压站，通州北苑和梨园站为高空载电压站；传媒大学和通州北苑站安装 1.5 MW 超级电容储能装置，双桥和梨园站安装 1 MW 混合储能装置)的节能数据。其中，所有采集仪器和数据统计均由权威的第三方测试机构提供。

表 3 八通线典型站点节能数据统计

Table 3 Energy-saving data statistics for typical stations on the Batong Line

站点	投运日平均电耗/kWh	不投运日平均电耗/kWh	日均节能量/kWh	日均二氧化碳减排量/kg
传媒大学	6 231.2	8 019.1	1 787.9	1 782.5
双桥	7 549.3	9 495.8	1 946.5	1 940.7
通州北苑	9 974.5	10 902.1	927.6	924.8
梨园	12 401.0	13 512.2	1 111.2	1 107.9

经权威第三方机构测算，从八通线全线的节能数据表中可以得到以下结论：

1) 9 个站再生能量利用装置投运后每小时电压最高值相比于同一时段再生能量利用装置不投运时有所降低，投运后每小时电压最低值相比于同一时段再生能量利用装置不投运时有所升高。再生能量利用装置具有良好的稳压效果。

2) 根据采集数据可得，四惠东、传媒大学、双桥、管庄、八里桥、通州北苑、果园、梨园、土桥 9 个站在再生能量利用装置投运期间的平均日节能量为 10 996.6 kWh，总节能率为 13.9%。

3) 9 个站在再生能量利用装置投运期间的日均降低二氧化碳排放 10 963.6 kg，每年可降碳 4 002 t。

4) 低空载电压有利于再生制动能量的吸收和利用。

5) 在相同的空载电压条件下，混合储能装置的节能量略高于超级电容储能装置的节能量。

鉴于突出的节能效果，该示范工程项目入选了北京市生态环保局低碳试点项目，以及国家生态部《国家重点推广的低碳技术目录》，并且获得了国家发展改革委“最佳节能技术和最佳节能实践”奖项。

2.4 其他效益分析

再生能量吸收装置最直观且最核心功能为减少牵引能耗，其在列车制动时将剩余再生制动能量存储在储能介质中，并在列车牵引时释放回牵引网，在直流侧被高效利用，从而降低牵引能耗。根据不同线路的不同情况，其降低牵引能耗的节能潜力一般在 10%～20%之间。

然而，从更宏观的视角进行探讨，该装置远非单纯的节能工具，其在牵引供电系统中产生的附加效益同样显著，值得深入且定量的分析。这些附加效益包括但不限于：闸瓦磨耗的大幅减少，这对于延长机械制动系统寿命、减少维护成本具有重要意义；钢轨电位的降低，有助于提升系统的安全性与稳定性；峰值功率的削减，能够有效提升供电能力，助力通过缩小发车间隔实现运输能力的进一步提升；提高列车停车精度，这对于提升乘客舒适度与列车运行效率至关重要。

此外，随着再生能量利用装置的引入，地铁车辆的主电路结构、限流曲线的设定以及制动策略的制定均展现出进一步优化的潜力。主电路的优化可能涉及更高效的能量转换与更大的高速制动能力；限流曲线的调整有助于在保障安全的前提下，发挥更大的电制动效率；而制动策略的优化则可能包括更智能的能量回收与利用机制，从而进一步提升列车的整体性能。

3 结论

基于作者团队在城市轨道交通储能领域十余年的理论积淀与工程实践经验，依托与北京地铁运营公司建立的长期产业化合作平台，团队成功研制出新一代储存式再生制动能量利用系统(eRAM)。通过实际工程验证，该系统在技术创新与工程应用方面展现出以下显著优势：

1) 高效精准的容量配置。基于自主开发的精确仿真模型与优化配置算法，本系统创新性地采用“6 站 1.5 MW 功率型储能+3 站 1 MW 混合型储能”的差异化配置方案，在实现超高节能率的同时，系统配置冗余较国内同类项目显著降低，提升了设备利用效率与经济性。

2) 多重安全保障体系。针对轨道交通行业特殊工况，系统构建多层次安全防护体系。例如，增设负母线快速断路器，实现毫秒级负对地故障隔离；采用考虑反压的放电安全电压设计；集成实时状态监测与寿命预测功能等。形成从器件级到系统级的全方位安全保障。

3) 卓越的节能性能。实测数据表明，系统单站日均节电量超 1 200 kWh，全线牵引能耗降低率达 13.9%，远高于行业平均水准，创造了城市轨道交通再生能量回收领域的新标杆。

本系统的成功应用，为城市轨道交通绿色低碳发展提供了创新性解决方案，其技术路线和实施经验对推动行业技术进步具有重要示范意义。

随着该系统在福州、徐州等线路的规模化应用，其累积的运营大数据不仅为节能效益评估提供了实证基础，更开启了系统附加价值的深度挖掘窗口(如闸瓦磨

耗减少量评估、停车精度提升评估等），这为轨道交通运维决策提供了新的量化依据。进一步的，团队研发的车载式再生制动回收装置已在车辆段进行了装车试验，其与地面储能系统形成的车地协同能量回收系统，可完全吸收列车的再生制动能量，取消制动电阻，推动地铁车辆制动性能的进一步优化与升级。

参考文献

[1] 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告[R]. 中国城市轨道交通协会, 2024.
Statistical and Analysis Report on Urban Rail Transit in 2023[R]. China Association of Metros, 2024.

[2] 诸斐琴. 城市轨道交通地面式超级电容储能系统自适应协调控制与容量配置综合优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
ZHU Feiqin. Research on adaptive coordinated control and comprehensive optimization of capacity allocation of ground-based supercapacitor energy storage system in urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

[3] 钟志宏. 考虑车-地储能装置的城轨列车再生制动性能优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
ZHONG Zhihong. Research on optimization of regenerative braking performance of urban rail train considering vehicle-ground energy storage device[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[4] 金勇, 黄先进, 石春珉, 等. 城市轨道交通地面储能技术应用综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4568-4582.
JIN Yong, HUANG Xianjin, SHI Chunmin, et al. Review on wayside energy storage technology for urban rail transit[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2024, 39(15): 4568-4582.

[5] 迟晓娟, 邵远忠, 高鑫, 等. 无锡地铁 6 号线牵引变电所再生制动能量吸收装置设置方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(S2): 113-116.
CHI Xiaojuan, SHAO Yuanzhong, GAO Xin, et al. Analysis on setting scheme of regenerative braking energy absorber in traction substation of Wuxi metro line 6[J]. Urban mass transit, 2024, 27(S2): 113-116.

[6] 李志强. 城市轨道交通混合型再生制动能量利用技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
LI Zhiqiang. Study on energy utilization technology of hybrid regenerative braking in urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.

[7] 刘安邦, 陈曦, 赵千川, 等. 地铁线路储能装置与牵引装置联合优化配置方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(9): 1408-1414.
LIU Anbang, CHEN Xi, ZHAO Qianchuan, et al. Optimization method for allocations of energy storage systems and tractions for metro systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(9): 1408-1414.

[8] 刘继宗, 张祖涛, 王浩, 等. 城轨交通制动能量利用技术研究现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(6): 1322-1345.
LIU Jizong, ZHANG Zutao, WANG Hao, et al. Braking energy utilization in urban rail transit: status and prospects[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(6): 1322-1345.

[9] 孙凯琦, 杨中平, 林飞, 等. 一种城轨交通多储能装置能量管理方法、系统及装置: 202310064014.9[P]. 2023-06-23.

[10] 孙建军, 陈苏南, 孟勐, 等. 城市轨道交通可逆牵引变电所供电方案对比[J]. 机车电传动, 2025(2): 158-162.
SUN Jianjun, CHEN Sunan, MENG Meng, et al. Comparison of reversible traction substation power supply solutions for urban rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2025(2): 158-162.

[11] 孙振海, 刘双振, 陈鹰, 等. GTR 飞轮在城市轨道交通的工程应用[J]. 中国标准化, 2019(增刊 2): 309-316.
SUN Zhenhai, LIU Shuangzhen, CHEN Ying, et al. Engineering application of GTR flywheel in urban rail transit[J]. China standardization, 2019(S2): 309-316.

[12] 刘宇嫣. 城市轨道交通地面式混合储能系统自适应能量管理策略与容量配置研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
LIU Yuyan. Adaptive energy management and capacity configuration of stationary hybrid energy storage system in urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

[13] 邓谊柏, 黄家尧, 陈挺, 等. 城市轨道交通超级电容技术[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(6): 24-31.
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.

[14] 温书剑, 张熠霄, 陈阳, 等. 锂离子电池负极材料钛酸锂研究进展[J]. 功能材料, 2016, 47(12): 12038-12049.
WEN Shujian, ZHANG Yixiao, CHEN Yang, et al. The recent development of lithium titanate as anode materials for lithium-ion batteries[J]. Journal of functional materials, 2016, 47(12): 12038-12049.

[15] 北京市市场监督管理局. 电力储能系统建设运行规范: DB11/T 1893—2021[S]. 北京: 北京市市场监督管理局, 2021.

[16] 张海亮, 郭浩诚, 杨中平, 等. 放电电阻评估方法、装置、电子设备及存储介质: CN116660629A[P]. 2023-08-29.

[17] 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]. 都市快轨交通, 2021, 34(6): 9-17.
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.

[18] 钟志宏, 李炎, 米佳雨, 等. 基于牵引网电压和空载电压的多储能系统区间能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4583-4598.
ZHONG Zhihong, LI Yan, MI Jiayu, et al. Interval energy management strategy for multiple energy storage systems based on traction network voltage and No-load voltage[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2024, 39(15): 4583-4598.

[19] 赵亚杰, 夏欢, 王俊兴, 等. 基于动态阈值调节的城轨交通超级电容储能系统控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 427-433.
ZHAO Yajie, XIA Huan, WANG Junxing, et al. Control strategy of ultracapacitor storage system in urban mass transit system based on dynamic voltage threshold[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2015, 30(14): 427-433.

（编辑：傅依萱）