



电工技术学报  
*Transactions of China Electrotechnical Society*  
ISSN 1000-6753, CN 11-2188/TM

## 《电工技术学报》网络首发论文

题目: 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  
作者: 秦强强, 张骄, 李宇杰, 林飞, 杨中平  
DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80400  
收稿日期: 2018-07-01  
网络首发日期: 2019-04-01  
引用格式: 秦强强, 张骄, 李宇杰, 林飞, 杨中平. 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/OL]. 电工技术学报.  
<https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80400>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80400

# 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

秦强强<sup>1</sup> 张 骄<sup>2</sup> 李宇杰<sup>3</sup> 林 飞<sup>1</sup> 杨中平<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院 北京 100044 2. 北京市地铁运营有限公司地铁运营技术研发中心  
北京 100000 3. 北京市地铁运营有限公司 北京 100044)

**摘要** 城轨交通地面混合储能装置兼顾吸收列车剩余再生制动能量与作为备用电源驱动供电故障列车的功能。本文根据城轨交通供电系统实际运行状况，建立牵引供电系统仿真模型，分析在列车不同发车间隔下牵引网潮流变化情况，并由此提出了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。该控制策略在发车间隔较大时因列车剩余再生制动能量与功率较大，采用电池优先响应模式，保证超级电容有足够容量响应大功率负载，避免制动电阻不必要的启动；发车间隔较小时因列车剩余再生制动能量与功率较小采用超级电容优先响应模式，减少电池使用容量，以提高电池的使用寿命。本文利用北京地铁实际线路参数，通过牵引供电仿真平台与混合储能实验平台对本文提出的控制策略的有效性进行了仿真与实验验证。结果表明，此控制策略能够有效地提高混合储能装置吸收剩余再生制动能量能力并增大电池的使用寿命。

**关键词：**城轨交通 混合储能装置 发车间隔 控制策略

**中图分类号：**TM315

## Research on Time-Phased Control Strategy of Urban Rail Ground Hybrid Energy Storage Device Based on Train Operation Status

Qin Qiangqiang<sup>1</sup> Zhang Jiao<sup>2</sup> Li Yujie<sup>3</sup> Lin Fei<sup>1</sup> Yang Zhongping<sup>1</sup>

(1. Beijing Jiaotong University School of Electrical Engineering Beijing 100044 China  
2. Beijing Metro Operation Co. Ltd. Metro Operation Technology R&D Center Beijing 100000  
China 3. Beijing Subway Operation Co. Ltd. Beijing 100044 China)

**Abstract** The ground hybrid energy storage device of urban rail transit takes into account the functions of absorbing the remaining regenerative braking energy of the train and driving the power failure train as a backup power source. Based on the actual operation status of the urban rail transit power supply system, the paper establishes a simulation model of traction power supply system and analyzes the changes of the traction network power flow at different departure intervals of trains. Then a time-phased control strategy of urban rail ground hybrid energy storage device based on train operation status is proposed. The control strategy uses a battery priority response mode when the departure interval is large because the remaining regenerative braking energy and power of the train is large, so that the super capacitor has sufficient capacity to respond to the high power load, avoiding unnecessary starting of the braking resistor; When it is small, the super-capacitor priority response mode is adopted due to the remaining regenerative braking energy and power of the train, which reduces the battery usage capacity to improve the service life of the battery. Using the actual line parameters of the Beijing Subway, the traction power supply simulation platform and the hybrid energy storage test platform were used to simulate and verify the effectiveness of the proposed control strategy. Simulation and experimental results show that this control strategy can effectively improve the ability of hybrid energy storage device to absorb the remaining regenerative braking energy and increase the lifetime of the battery.

**Keywords:** Urban rail transit, hybrid energy storage device, departure interval, control strategy

## 0 引言

城市轨道交通具有运量大、人均能耗低、污染少、安全可靠等特点，在近几年得到了飞速发展。同时越来越多的储能装置被安装到城轨牵引供电系统中，目的是回收列车剩余再生制动能量和抑制直流网压波动<sup>[1-3]</sup>。用于城市轨道交通储能装置的储能元件主要有超级电容（Supercapacitor, SC）、电池（Battery, Bat）和飞轮。目前电池储能系统、飞轮储能系统和超级电容储能系统在城市轨道交通中均得到了实际应用，比如在马德里运行的西门子 SITRAS-SES 超级电容储能系统，日本 Seishin-Yamate 线安装的锂电池储能系统，美国洛杉矶地铁使用的 2MW 飞轮储能装置等。统筹超级电容与电池两者特性优势，研发了混合储能系统，在充分吸收列车剩余再生制动能量的同时为供电故障列车紧急自牵引提供能量，在国内外轨道交通牵引供电领域也被广泛关注<sup>[1-3]</sup>。

近年来，国内外很多学者对储能装置的能量管理策略开展了广泛而深入的研究。文献[4]提出了一种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，根据牵引变电站空载电压波动实时调整充放电阈值，此方法有效地提高了储能系统节能和稳压效果。文献[5]提出了一种基于直流网电流变化率控制的能量管理策略，超级电容与电池承受不同电流变化率情况下的负载，充分利用超级电容与电池的不同特性，提高了系统工作效果。文献[6]提出了一种利用滤波方法将功率按照高频和低频分量进行提取的控制策略，根据不同的参考值分别对电池和超级电容进行控制。文献[7]提出了一种基于电压分级的协调控制策略，以直流牵引网电压作为首要控制参数的基础上，考虑了锂电池功率密度和使用寿命的约束，在混合储能系统功率控制中优先使用超级电容，尽量减少锂电池组充放电次数并避免大倍率充电，同时通过制动电阻辅助分流来减少系统容量冗余，提高了混合储能系统整体储能效果和性价比。

上述文献所陈述的能量管理策略并未考虑到城轨列车实际运行过程中发车间隔变化的影响。实际线路中列车会根据乘客出行规律，设定不同的发车间隔。发车间隔不同，线路中同时运行的车辆数就会不同，继而影响列车间能量交互过程，造成牵引

网中剩余再生制动能量变化，采用传统单一功率分配模式，不能充分发挥混合储能装置的最优效果。本文根据列车发车间隔时间表，总结出牵引网剩余再生制动能量变化规律，混合储能装置分时段动态选择不同的功率分配模式，达到稳压节能效果的同时，减少制动电阻消耗能量与电池充放电容量，提高储能装置整体寿命。

## 1 城轨交通供电系统建模分析

城轨列车目前多采用交直交的供电方式，高压 35kV/10kV 交流电，通过 24 脉波不控整流方式得到 1500V/750V 城市轨道交通直流牵引网，能量通过第三轨或者受电弓流向列车，车载三相逆变器将直流电逆变得三相交流电控制牵引电机运行。列车制动时能量流动恰恰相反，由电机反馈至直流牵引网中，由于牵引变电站采用的是 24 脉波不控整流方式，不能将能量反馈至交流电网，所以多余能量只能供其他牵引列车利用。为了分析城轨运行特点，本文搭建了包含储能系统的牵引供电系统模型，并根据仿真模型得到的数据对不同发车间隔下剩余再生制动能量分布特点进行了总结。

### 1.1 含有储能系统的牵引供电系统建模

根据城轨供电系统实际情况搭建仿真模型，具体结构如图 1 所示，整个模型包括列车运行模块 TPS、直流线网潮流仿真模块 DC-RLS、包含超级电容储能装置以及电池储能装置的模块 HESS、制动电阻。其中 TPS 根据输入的线路参数、车辆参数输出上、下行列车的位置及电功率等，HESS 模块可设置储能系统的能量管理策略和容量配置方案，DC-RLS 可设置直流网参数，同时此模块主要是模拟线路上多列车的运行工况。通过直流线网潮流解析得到每个时刻变电所的电压电流、储能系统的充放电功率，为混合储能装置容量配置、能量管理策略设计提供数据基础。

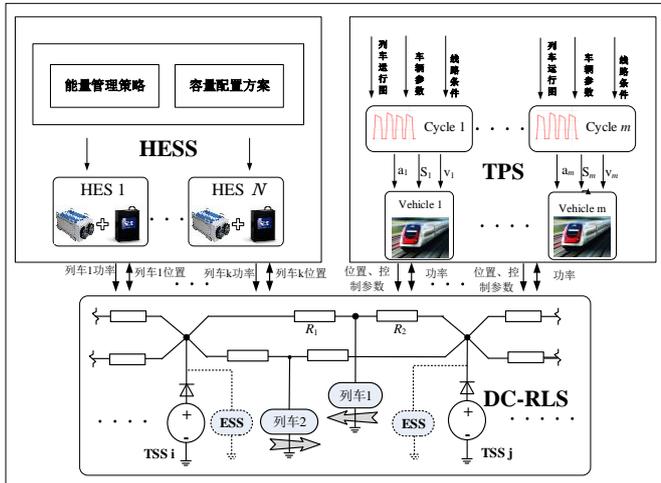


图 1 城轨列车供电系统仿真平台

Fig.1 Urban rail train power supply system simulation platform

### 1.2 不同发车间隔下剩余再生制动能量分析

实际线路中列车会根据乘客出行规律，设定不同的发车间隔。最大发车间隔为 600s，最小发车间隔为 180s，以上行线为例，每隔一个发车间隔  $T_d$ ，便会有一列车  $V_n$  从起始站发出，当线路上列车分布满后同时运行的列车数  $n = \text{floor}(T/T_d) \sim \text{ceil}(T/T_d)$ ，其中  $\text{floor}$  表示向下取整， $\text{ceil}$  表示向上取整，列车间的距离和功率与列车运行曲线有关，线路上所有列车的功率需求是以发车间隔  $T_d$  为周期变化的。列车的发车间隔  $T_d$  在一天内的变化曲线示意图如图 2a 所示。列车分布情况如图 2b 所示， $d$  为列车所在位置，当  $t=0$  时假设线路上列车分布满，间隔发车间隔时间  $T_d$  后， $V_1$  进库， $V_{n+1}$  进入线路，线路运行工况将成周期性规律变化。

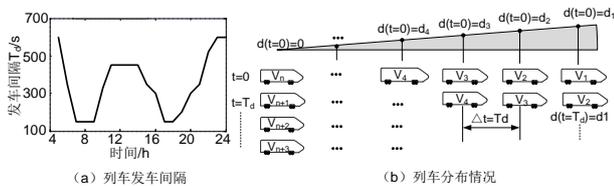


图 2 列车发车间隔及列车分布情况

Fig.2 Train departure intervals and train distribution

由图 2 分析可得，城轨交通系统经常处于多列车运行工况，图 3 为列车处于牵引、制动工况时，直流线网的能量流动情况。当列车制动时，列车的再生制动能量一部分供给临近列车牵引利用，一部分被消耗在线路阻抗上，一部分被混合储能装置吸收，剩余部分通过空气制动或制动电阻以热能的形式消耗；当列车牵引时，混合储能装置释放能量，

剩余所需能量由邻近制动车辆和牵引变电所提供 [8]。

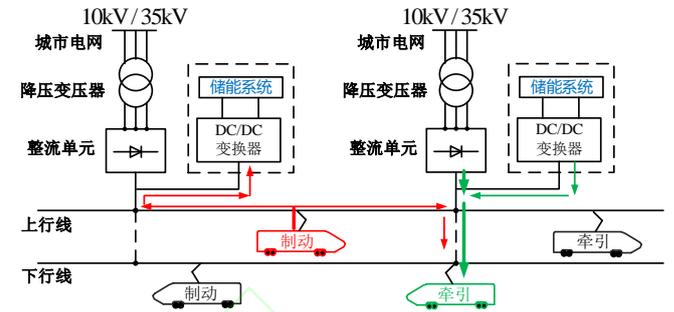


图 3 城轨交通能量流动图

Fig.3 Energy flow diagram of urban rail traffic

在不同发车间隔下，线路中同时运行的车辆数不同，继而影响列车间能量交互过程，总体来看，当列车发车间隔较小时，线路中同时运行的车辆数较多，列车所需总的牵引能量以及列车间交互能量较多，对应的混合储能系统可以回收的剩余再生制动能量相对较少。当发车间隔较大时，线路中同时运行的车

辆数较少，列车所需总的牵引能量较少，列车间交互能量较少，牵引网电压波动范围就比较大，对应混合储能系统投入次数增多，回收的列车再生制动能量也就增多。

## 2 储能装置系统结构与控制策略

### 2.1 储能装置系统结构

混合储能系统主要包括储能元件和双向 DC-DC 变换器。超级电容和电池分别通过双向 DC-DC 变换器与直流线网连接，提高了储能元件控制的灵活性。

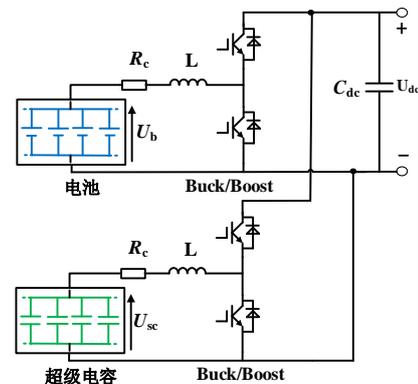


图 4 混合储能系统拓扑结构

Fig.4 Hybrid energy storage system topology

### 2.2 传统阈值双环控制策略

混合储能装置充放电控制采用分段控制模式，

根据空载电压的变化将直流网压分为三段，在不同电压段内混合储能装置采取不同的工作模式，具体如图 5 所示。混合储能系统实时监测直流网电压  $U_{net}$ ，当其高于充电阈值  $U_{char}$  时，混合储能系统处于充电模式；当其低于放电阈值  $U_{dis}$  时，混合储能系统处于放电模式；当其处于充放电阈值之间时，混合储能系统处于静止模式，不进行充放电动作。

$$\begin{cases} U_{net} < U_{dis} & \text{放电模式} \\ U_{dis} < U_{net} < U_{char} & \text{静止模式} \\ U_{net} > U_{char} & \text{充电模式} \end{cases} \quad (1)$$

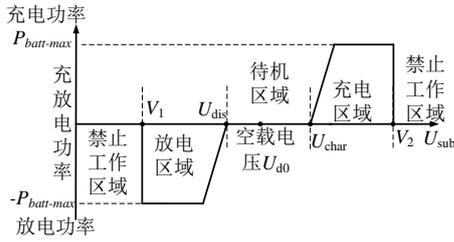


图 5 充放电分段控制模式

Fig.5 Segmented control mode in charging and discharging process

双向 DC-DC 变换器的控制采用传统的双环控制<sup>[9]</sup>，电压外环稳定直流网压，电流内环调节储能元件充放电电流，具体结构如图 6 所示。为了减小控制复杂性和提高控制稳定性，混合储能装置共用一个电压环，两个电流环。其中  $P^*$  为储能元件充放电功率指令， $U$  为储能元件电压， $U_{net}$  为直流网压， $U_{char}$  为充电阈值， $U_{dis}$  为放电阈值， $I^*$  为混合储能装置电流指令， $I$  为实际储能装置电流，PWM 为控制输出。

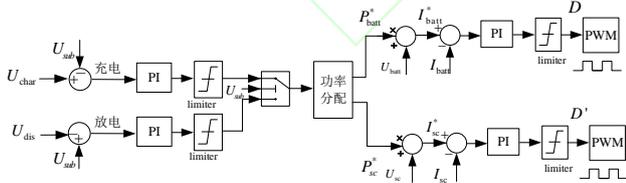


图 6 双环能量管理策略

Fig.6 Double-loop energy management strategy

### 2.3 基于列车运行状态的分时段控制策略

不同发车间隔下列车间能量交互不同，列车剩余再生制动能量与功率也不同。总体来看，当列车发车间隔较小时，列车间交互能量较多，对应的混合储能系统可以回收的再生制动能量相对较少。而当发车间隔较大时，列车间交互能量较少，牵引网电压波动范围比较大，对应混合储能系统投入次数增多，回收的列车再生制动能量也增多。根据此规

律本文提出基于列车运行状态的分时段控制策略，按照列车的发车间隔不同，将列车运行工况分为高峰期与低峰期。在两种工况下针对剩余再生制动能量与功率的情况，采用不同的能量管理策略。

两种功率分配策略的切换即列车运行高低峰时期划分会根据发车间隔不同时列车剩余再生制动能量以及实际配置混合储能装置超级电容能量决定，如式 (2) 所示。

$$\begin{cases} E_{sc} \leq E_L & \text{电池优先响应模式} \\ E_{sc} > E_L & \text{电容优先响应模式} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $E_{sc}$  为储能装置中配置的超级电容可吸收的能量； $E_L$  为当前发车间隔剩余再生制动能量。

当剩余再生制动能量大于超级电容配置的能量时，采用低峰期电池优先响应的能量管理策略，电池充分吸收剩余制动能量，保证超级电容吸收大功率能量时有足够容量，减少制动电阻不必要的启动；当剩余再生制动能量小于超级电容配置的能量时，采用高峰期电容优先响应的能量管理策略，尽可能减少电池使用，提高其使用寿命。在双环控制策略中增加控制模式选择模块，如图 7 所示。列车运行过程中控制系统采集储能装置超级电容配置容量，并且实时采集列车当前发车间隔  $T_d$  以及当前发车间隔的剩余持续时间  $T_h$ ，实时调用发车间隔与储能装置模式对应表，选择混合储能装置具体的工作模式。

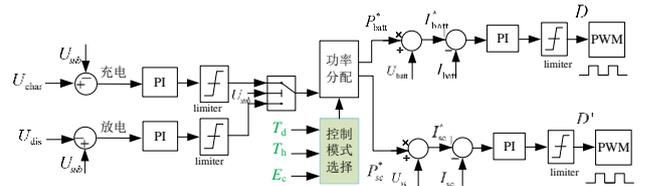


图 7 分时段双环能量管理策略

Fig.7 Time-phased double-loop energy management strategy

混合储能装置主要作用是吸收列车剩余再生制动能量，所以本文主要以混合储能装置充电为例进行理论分析。

#### 1) 低峰期。

由于电池能量密度高，在吸收剩余再生制动能量时，电池容量 SOC 值一般不会超过限定值；超级电容虽然功率密度高但是能量密度低，在吸收剩余再生制动能量时会存在 SOC 值超过限定值的情况<sup>[10-11]</sup>。

$$SOC_{bat} = \frac{Q_{int} - \int i_{bat} dt}{Q_0} \quad (3)$$

$$SOC_{sc} = \frac{0.5 \times CU_{sc}^2}{0.5 \times CU_{sc \max}^2} = \frac{U_{sc}^2}{U_{sc \max}^2}$$

其中  $Q_{int}$  为电池满状态下的电荷量,  $i_{bat}$  为电池充放电电流,  $U_{sc}$  为当前超级电容端电压,  $U_{sc \max}$  为超级电容最大端电压。

当列车发车间隔较大, 即列车处于低峰期时, 列车能量交互较小, 剩余再生制动能量和功率都较高。此时为了保证列车制动时超级电容有足够容量响应大功率负载, 采用电池优先响应的功率分配策略, 尽可能让电池吸收功率较小负载的能量, 避免因超级电容过早响应使其容量不足后期大功率负载电池无法满足而导致制动电阻不必要的启动, 降低储能装置储能效果。低峰期电容优先响应的分配策略主要如图 8 和式 (4) 所示, 电池优先响应充放电功率指令, 当电池功率达到上限后超级电容与制动电阻补充剩余功率需求。

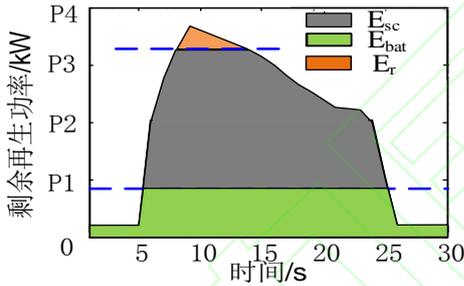


图 8 低峰期功率分配示意图

Fig.8 Power distribution diagram during off-peak hours

$$\begin{cases} P_{bat} = P_L, \\ P_{sc} = 0, \quad P_L \leq P_{bat \max} \\ P_r = 0, \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{bat} = P_{bat \max}, \\ P_{sc} = P_L - P_{bat \max}, \quad P_{bat \max} < P_L \leq P_{all} \quad (4) \\ P_r = 0, \\ P_{all} = P_{sc \max} + P_{bat \max}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{bat} = P_{bat \max}, \\ P_{sc} = P_{sc \max}, \quad P_L < P_{sc \max} + P_{bat \max} \\ P_r = P_L - P_{all}, \end{cases}$$

其中  $U_{sc \max}$  为超级电容最高电压,  $Q_0$  为电池总的电荷量,  $i_{bat}$  为电池工作电流,  $P_L$  为储能元件充放电功率指令,  $P_{bat}$  为电池功率,  $P_{sc}$  为超级电容功率,

$P_r$  为制动电阻功率。

2) 高峰期。

超级电容循环寿命长, 而电池循环寿命较短, 电池的寿命问题严重制约了混合储能装置的使用效益<sup>[12-13]</sup>。电池的循环寿命一般通过充放电容量表征, 通常用电池寿命系数  $n$  进行衡量,  $n$  越小代表电池剩余寿命越短。

$$n = \frac{N \times 2 \times Q_0}{\int |i_{bat}| dt} \quad (5)$$

式中,  $N$  为电池总的循环使用次数;  $n$  为电池寿命系数。

混合储能装置能量管理策略设计过程中, 要在满足稳压节能效果的前提下尽可能减少电池使用次数与容量, 提高电池的使用寿命。当列车发车间隔较小, 即列车处于高峰期时, 列车能量交互较多, 剩余再生制动能量和功率都较少, 超级电容容量基本可以满足稳压节能效果, 采用超级电容优先响应的功率分配策略, 尽可能减少电池充放电容量, 提高储能装置整体寿命。高峰期超级电容优先响应的分配策略主要如图 9 和式 (6) 所示, 超级电容优先响应充放电功率指令, 当超级电容功率达到上限后电池与制动电阻补充剩余功率需求。

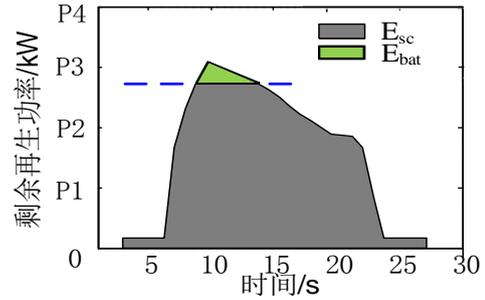


图 9 高峰期功率分配示意图

Fig.9 Power distribution diagram during peak hours

$$\begin{cases} P_{sc} = P_L, \\ P_{bat} = 0, \quad P_L \leq P_{sc \max} \\ P_r = 0, \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{sc} = P_{sc \max}, \\ P_{bat} = P_L - P_{sc \max}, \quad P_{sc \max} < P_L \leq P_{all} \quad (6) \\ P_r = 0, \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{sc} = P_{sc \max}, \\ P_{bat} = P_{bat \max}, \quad P_L < P_{all} \\ P_r = P_L - P_{all}, \end{cases}$$

由于超级电容能量密度比较低，在充放电过程中很容易造成超级电容容量超限，当超级电容容量达到限制值后，无论列车在高峰期还是低峰期，超级电容都会退出工作，所有剩余再生制动能量都将由电池与制动电阻响应，具体分配逻辑如式(7)所示。

$$(7) \quad \begin{cases} P_{bat} = P_L, \\ P_{sc} = 0, \quad P_L \leq P_{bat \max} \\ P_r = 0, \end{cases} \quad \begin{cases} P_{bat} = P_{bat \max}, \\ P_{sc} = 0, \quad P_{bat \max} < P_L \\ P_r = P_L - P_{bat \max}, \end{cases}$$

### 3 仿真实验

#### 3.1 仿真条件

本文基于北京地铁实际线路数据，建立了包含5个牵引变电所1储能装置的多列车运行模型，如图10所示。牵引变电所的位置见表1，仿真中参数设置见表2。列车实际运行过程中，列车上下行同时运行，列车的发车间隔随着客流量的变化而变化，经统计北京地铁某线路其中约5.0h处于600s低峰工况，约7.5h处于180s高峰工况。仿真过程中将这两个典型发车间隔为例，进行功率分配策略的分析验证。

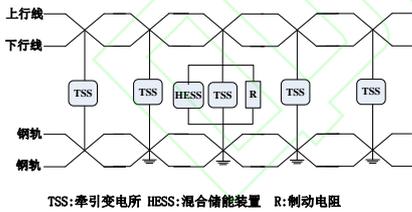


图10 仿真模型示意图

Fig.10 Simulation model diagram

表1 牵引变电所位置

Tab.1 Locations of traction substations

变电站	1	2	3	4	5
站间距/km	0	1.72	3.09	5.09	6.99

表2 仿真参数

Tab.2 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
空载电压/V	830	SC 功率/MW	1.6
充电阈值/V	850	Bat 功率/MW	0.4
放电阈值/V	800	SC 容量/kWh	12.1

#### 3.2 仿真结果

为了得到列车剩余再生制动能量，确定列车高低峰时期划分的发车间隔时间，从而得到两种模式的切换时间。首先利用仿真模型对不同发车间隔下剩余再生制动能量与功率进行仿真，图11为仿真结果，可以看出仿真与理论分析基本吻合，剩余再生制动能量和功率随发车间隔增大呈上升趋势。

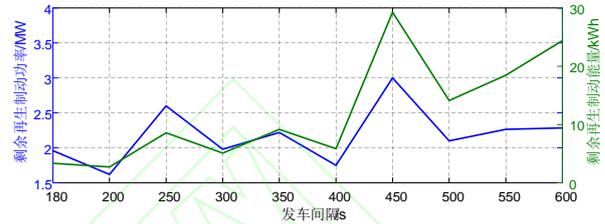
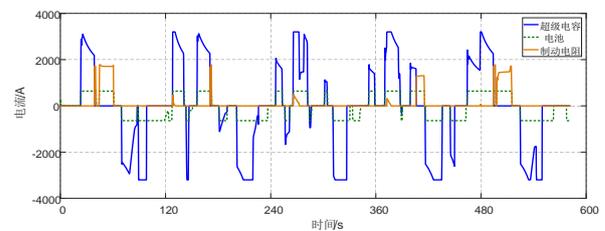


图11 不同发车间隔下剩余再生制动能量

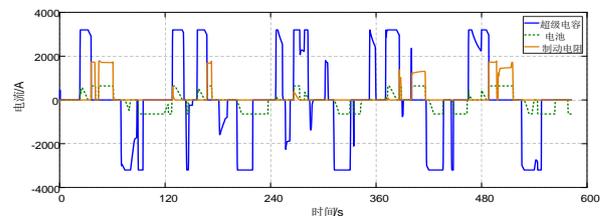
Fig.11 Remaining regenerative braking energy at different departure intervals

混合储能系统中超级电容配置的总容量约为12.1kWh，在充放电过程中，超级电容SOC使用范围为0.2~1<sup>[14-15]</sup>，所以超级电容可用容量约为9.68kWh。通过图11可以看出，当发车间隔小于400s时，列车剩余再生制动能量小于10kWh，当发车间隔大于400s时，列车剩余再生制动能量大于10kWh，所以功率分配模式将以400s发车间隔为界限，发车间隔低于400s时为低峰期，采用电容优先响应的功率分配模式，发车间隔大于400s时为高峰期，采用电池优先响应的功率分配模式。

在不同发车间隔下对电池先响应和电容先响应分别进行仿真。仿真工况选择典型的发车间隔600s和180s代表低峰时期与高峰时期，仿真结果如图所示。



(a) 电池优先响应

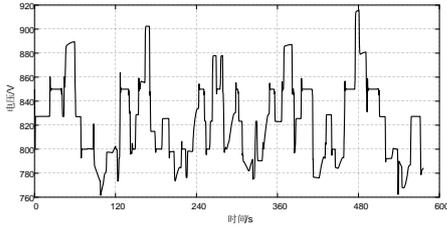


(b) 电容优先响应

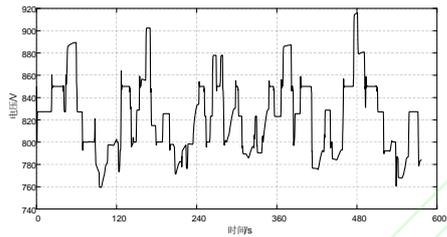
图 12 低峰期功率分配结果

Fig.12 Power distribution results during off-peak hours

由图 12 可以看出在低峰期列车制动时，两种模式下超级电容基本都已达到容量限制并退出工作，此时采用电池先响应的工作模式会减少制动电阻能量的消耗。



(a) 电池优先响应

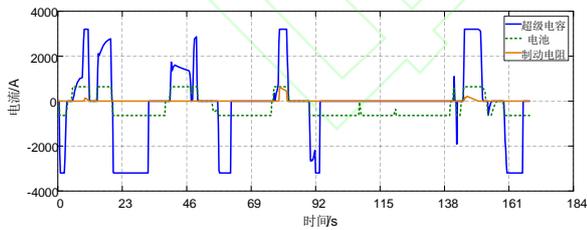


(b) 电容优先响应

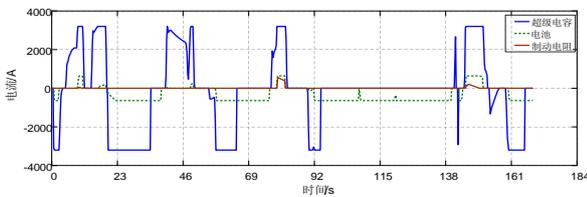
图 13 低峰期直流网压

Fig.13 DC network voltage during off-peak hours

低峰期两种能量管理策略下，牵引网直流网压波动变化基本相同，并且由图 13 可以看出 2MW 混合储能装置能够很好的吸收剩余再生制动能量，基本能够将电压稳定在 900V 以下。



(a) 电池优先响应



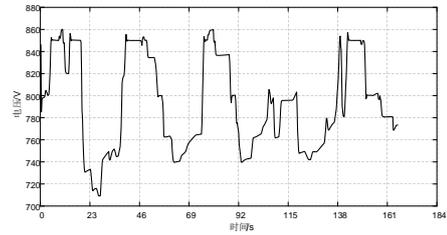
(b) 电容优先响应

图 14 高峰期功率分配结果

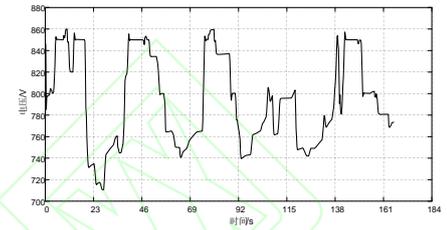
Fig.14 Power distribution results during peak hours

由图 14 可以看出在高峰期列车制动时，两种模式下超级电容基本都未达到容量限制，此时采用电

容先响应的工作模式会减少电池与电阻的启动。



(a) 电池优先响应



(b) 电容优先响应

图 15 高峰期直流网压

Fig.15 DC network voltage during peak hours

在高峰期，两种能量管理策略下牵引网直流网压波动变化基本相同，并且由图 15 可以看出 2MW 混合储能装置能够完全吸收剩余再生制动能量，基本能够将电压稳定在 850V 以下，但是由于此时车多，牵引网压跌落比较明显。

分别对分时段控制策略与传统单一电容先响应控制策略进行对比，同时为了考虑全面性，增加了与单一电池先响应的控制策略的比较。比较内容主要为 180s 发车间隔和 600s 发车间隔两种工况总的制动电阻消耗能量  $E_r$ 、电池充放电能量  $E_{bat}$ 、电容充放电能量  $E_{sc}$  和电池充放电电荷量  $Q_{bat}$ ，比较结果见表 3。

表 3 仿真结果对比

Tab.3 Comparison of simulation results

参数	$E_{sc}/(\text{kW h})$	$E_{bat}/(\text{kW h})$	$E_r/(\text{kW h})$	$Q_{bat}/(\text{A h})$
分时段策略	113.57	56.3	14.92	0.095
单一电容优先	117.5	39.26	21.07	0.0685
单一电池优先	106.69	60.54	14.95	0.101

通过表 3 可以看出，分时段控制策略模式相较于传统单一电容优先响应的工作模式，储能装置充放电电量增加 12.24kW h，储能效果提高 7.8%；相较于单一电池优先响应策略，储能量几乎相同，但是电池使用寿命提高了 6.3%，提高了储能装置的整体经济效益。

## 4 实验验证

模拟实际城轨供电系统的实验平台如图 16 所示，主要包括四个部分：牵引变电所模拟部分、列车模拟部分（负载电机）、地面式混合储能系统以及整个系统的控制平台。

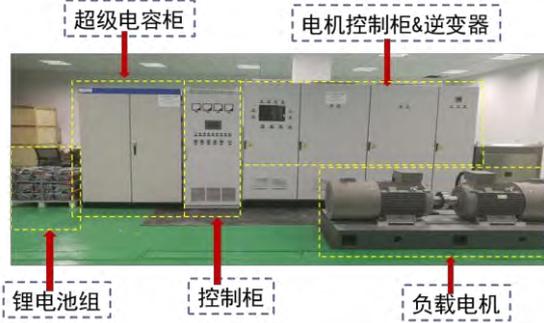


图 16 实验平台结构图

Fig.16 Experimental platform structure

### 4.1 实验条件

实验平台通过负载电机模拟列车运行，由于只有一台对托电机，所以通过设计输入不同的功率曲线模拟多车运行列车高低峰时期工况，不同工况功率曲线如图 17 所示。功率曲线是按照列车高低峰时期运行功率特点进行设计，工况一曲线，模拟列车低峰时期的列车功率曲线，此时线上列车数较少，制动功率较大、总的牵引功率较小；工况二曲线，模拟列车高峰时期的列车功率曲线，此时线上列车数较多，制动功率较小、总牵引功率较大。实验过程中参数设置见表 4。

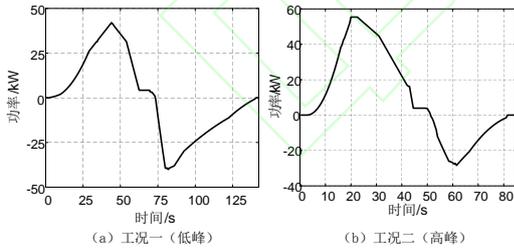


图 17 电机运行功率曲线

Fig.17 Operating power curve of the motor

表 4 实验相关参数

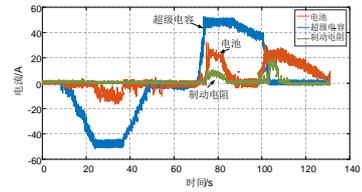
Tab.4 Related parameters of the test

参数	数值	参数	数值
空载电压/V	830	SC 功率/kW	16
充电阈值/V	860	Bat 功率/kW	4
放电阈值/V	800	SC 容量/kWh	0.18

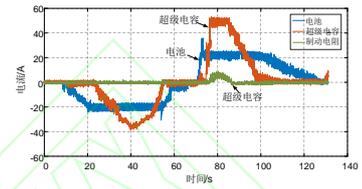
### 4.2 实验结果

实验的目的主要是验证两种控制策略在不同工况下的可行性与有效性。工况一曲线，模拟列车低

峰时期的列车工况，此时采用电池优先响应的功率分配模式。实验结果如图 18 所示。



(a) 电容优先响应



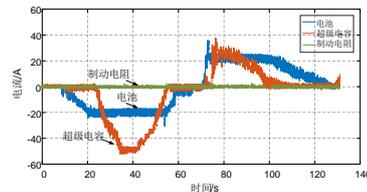
(b) 电池优先响应

图 18 低峰期功率分配结果

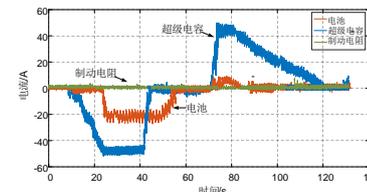
Fig.18 Power distribution results during off-peak hours

根据实验结果看出采用电池优先响应的能量分配策略系统能够正常运行，并且相较于电容先响应的控制策略，能够明显减少制动电阻的启动，提高储能装置的储能效果。

工况二曲线，制动功率较小、牵引功率较大，模拟列车高峰时期的列车功率曲线，此时采用电容优先响应的功率分配模式。实验结果如图 19 所示。



(a) 电池优先响应



(b) 电容优先响应

图 19 高峰期功率分配结果

Fig. 19 Power distribution results during peak hours

根据实验结果得到采用超级电容优先响应的能量分配策略系统能够正常运行，并且可以看出在设定功率曲线高峰期下一定程度上能够减少电池充放电容量，增加了电池使用寿命，提高了储能装置的整体性能。

## 5 结论

本文充分考虑列车运行规律与能量流动特点,结合超级电容与钛酸锂电池自身特性,提出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。模型分析与仿真平台软件结果表明,列车在低峰期再生制动能量较大,高峰期再生制动能量较少。提出的分时段控制策略,低峰期电池优先响应,高峰期电容优先响应,相较于传统单一电容优先响应的工作模式储能效果提高 7.8%,相较于单一电池优先响应策略,电池使用寿命提高了 6.3%,整体提高了储能装置的经济效益。后续,将根据本文所提的控制策略,对储能装置容量配置进行的优化,进一步提高混合储能系统的性能。

### 参考文献

- [1] Khaligh A, Li Zhihao. Battery, supercapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2806-2814.
- [2] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Energy storage systems characteristics and comparisons[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(5): 1221-1250.
- [3] 诸斐琴, 杨中平, 林飞, 等. 基于加速时间预测的现代有轨电车储能系统能量管理与容量配置优化研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 158-166. Zhu Feiqin, Yang Zhongping, Lin Fei, et al. Research on Energy Management and Capacity Allocation Optimization of Modern Tram Energy Storage System Based on Acceleration Time Prediction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 158-166.
- [4] 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. Research on control strategy of urban rail transit supercapacitor energy storage system based on dynamic threshold adjustment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 427-433.
- [5] Dutta O, Saleh M, Mohamed A. HESS in DC rail transit system: optimal sizing and system design[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 43(6): 169-175.
- [6] 桑丙玉, 陶以彬, 郑高, 等. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 1-6. Sang Bingyu, Tao Yibin, Zheng Gao, et al. Supercapacitor-battery hybrid energy storage topology and control strategy [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 1-6.
- [7] 林仕立, 宋文吉, 冯自平, 等. 地铁混合储能系统及其功率动态分配控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 19-24. Lin Shili, Song Wenji, Feng Ziping, et al. Metro hybrid energy storage system and its power dynamic distribution control method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 19-24.
- [8] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 335-340. Zhang Chunjiang, Dong Jie, Liu Jun, et al. Control strategy of battery and super capacitor hybrid energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 335-340.
- [9] 夏欢, 杨中平, 杨志鸿, 等. 基于列车运行状态的城轨超级电容储能装置控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 16-23. Xia Huan, Yang Zhongping, Yang Zhihong, et al. Control strategy of urban rail supercapacitor energy storage device based on train running state[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 16-23.
- [10] Sadakiyo M, Nagaoka N, Ametani A. An optimal operating point control of lithium-ion battery in a power compensator for DC railway system[C]//2007 International Universities Power Engineering Conference, Brighton, UK, 2007: 681-686.
- [11] 胡斯登, 梁梓鹏, 范栋琦, 等. 基于 Z 源变换器的电动汽车超级电容-电池混合储能系统[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 247-255. Husideng, Liang Zipeng, Fan Dongqi, et al. Electric vehicle super capacitor-battery hybrid energy storage system based on Z source converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 247-255.
- [12] Ciccarelli F, Pizzo A D, Iannuzzi D. Improvement of

---

energy efficiency in light railway vehicles based on power management control of wayside lithium-ion capacitor storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(1): 275-286.

- [13] 刘诗涵, 周羽生, 许振华, 等. 基于超级电容蓄能的永磁同步海上风电低电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 9-15.

Liu Shihan, Zhou Yusheng, Xu Zhenhua, et al. Research on low voltage ride-through of permanent magnet synchronous offshore wind power based on super capacitor energy storage[J] Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 9-15.

- [14] Rufer A, Hotellier D, Barrade P. A supercapacitor based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 19(2): 629-636.

- [15] 毕恺韬, 孙力, 安群涛, 等. 基于模块化多电平直流变换器的储能系统分布式能量均衡控制策略[J].

电工技术学报, 2018, 33(16): 3811-3821.

Bi Kaitao, Sun Li, An Quntao, et al. Distributed energy balancing control strategy for energy storage system based on modular multilevel DC-DC converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3811-3821

---

#### 作者简介

秦强强 男, 1992 年生, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通储能技术研究。

E-mail: 17121483@bjtu.edu.cn.com

林 飞 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为轨道交通电力牵引传动、节能、高速列车系统优化设计等。

E-mail: flin@bjtu.edu.cn.com (通讯作者)

(编辑 赫蕾)