

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80182

# 有轨电车车载混合储能系统动态比例分配策略

王 琦 杨中平 林 飞 李 峰 安星锟  
(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

**摘要** 能量管理策略是混合储能有轨电车动力系统设计的关键环节,其结果直接影响了有轨电车的运行性能和经济效益。本文提出基于列车运行状态的有轨电车车载混合储能系统动态比例分配策略,首先对超级电容不同初始电压范围下的混合储能系统进行效率最优功率分配路径的求解,获得全局最优解后,通过对离散时间的优化获得保留动态规划效果下的动态比例分配结果,将规则复杂的功率分配策略转换为单规则,并证明混合储能系统在该策略下运行效率高,有效地降低了寿命损耗。仿真对比和实验结果验证了该策略的灵活性和有效性。

**关键词:** 有轨电车 混合储能系统 能量管理 动态比例

**中图分类号:** TM921

## Dynamic Ratio Distribution Strategy for Hybrid Storage System of Tram

Wang Yu Yang Zhongping Lin Fei Li Feng An Xingkun

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

**Abstract** Energy management strategy is the crucial part of the design of tram's hybrid power system and the result has directly influenced the operation performance and economic benefit of tram. This paper put forward the dynamic ratio distribution strategy for hybrid storage system of tram. Firstly, the power distribution paths of optimal efficiency with different voltage range was worked out, secondly, the discrete time was optimized based on the maintained effects of dynamic programming, and the complicated power distribution strategy was transformed into the simple rules that power ratios change over discrete time, and the strategy was validated to make the hybrid storage system be with high efficiency and thus decreased life loss caused by heating. Lastly, the strategy was proved to be flexible and effective through simulation and experimental verification.

**Keywords:** Tram, hybrid storage system, energy management, dynamic ratio

## 0 引言

现代有轨电车作为轨道交通系统中重要的组成部分,近年来获得了较快发展。出于安全性和美观性的考虑,车载储能技术成为取代牵引网供电的选择之一。由于当前各储能单体在性能上仍有不足<sup>[1]</sup>,有轨电车使用单储能系统供电的效果不尽如人意。

为了设计出高性能的储能系统,许多研究人员使用电池-超级电容混合储能系统作为有轨电车的动力来源,目前已有许多应用<sup>[2]</sup>。

作为有轨电车的唯一动力来源,混合储能系统需要提供牵引能量并充分吸收制动能量,能量管理策略对储能系统的输出特性起决定性作用。能量管理策略可以分为基于规则的能量管理策略和优化的能量管理策略两大类。基于规则的能量管理策略是根据工程经验和简单公式得来的分配策略,常见有固定阈值的能量管理策略<sup>[3-4]</sup>,以电压、功率等阈值量作为标志位来切换储能系统的工作状态;滤波器

中央高校基本科研业务费专项资金(2018YJS153)、国家重点研发计划项目(“十三五”计划)(2017YFB1201105)资助。

收稿日期 2018-06-28 改稿日期 2018-11-21

分频法<sup>[5-6]</sup>,通过滤波器将需求功率分为高频与低频两部分,分别由电池和超级电容提供;基于模糊控制的能量管理策略<sup>[7-8]</sup>,根据模糊规则对运行状态进行分类。基于规则的策略优点是控制策略简单,易于实现,应用范围广,缺点是严重依赖工程经验,策略无法根据环境和储能系统输出特性等因素变化来调整,无法满足更高要求的优化。近年来研究人员提出了许多与优化算法相结合的能量管理策略,常见的策略分为全局优化策略和实时优化策略。动态规划是常用的全局优化算法,该方法应用贝尔曼原理,将复杂的多阶段过程转换为单阶段问题,利用各个阶段之间的关系逐个求解,达到全局最优。该方法在混合动力系统的能量管理策略中广泛使用。动态规划应用于多种储能系统功率分配路径的寻优中。文献[9]中混合动力汽车的寻优目标是燃油消耗量最低。而对于其他类型的混合储能系统,如文献[10]中的电池-超级电容型混合动力车辆,其动态规划的寻优为系统的功率损耗与电池电流变化率的多目标寻优,既考虑了系统效率又考虑了电池寿命。动态规划全局寻优的优势必然导致计算量大的缺点,所以动态规划适合于对时间不敏感的离线寻优。实时优化策略多为全局最优算法的简化,如使用简化的线性模型,将非线性寻优转换为线性寻优<sup>[11]</sup>,或基于数据分析预测,使用人工智能方法<sup>[12-13]</sup>或马尔科夫链<sup>[14-15]</sup>与全局最优算法相结合,均能够提高运算效率,但寻优的效果会有所下降。优化算法控制策略复杂,在大功率的实时应用中受到限制。

为了保证混合储能系统在工作区间内高效、安全运行,减少储能系统损耗,延长系统寿命,同时简化控制规则,提高系统的稳定性,本文提出了基于有轨电车运行状态的动态比例分配策略。

本文首先对现代有轨电车车载混合储能系统进行介绍,然后提出基于有轨电车运行状态的动态比例分配策略,通过动态规划求得超级电容不同初始电压范围内使系统效率最高的功率分配路径,随后通过离散时间的寻优简化功率分配策略,使其保留动态规划的效果。最后通过仿真与实验验证了该策略的有效性。

## 1 现代有轨电车混合储能系统

本文中所有有轨电车如图1所示,有轨电车的动力系统主要包括电池系统、超级电容系统、直流-直流(DC-DC)变换器、直流-交流(DC-AC)变换器和负载电机五个部分。有轨电车在充电站充电时,

受电弓会与充电装置连接为混合储能系统充电,在有轨电车离开充电站运行的过程中,受电弓与牵引网断开,混合储能系统是其唯一动力来源。混合动力系统的拓扑如图1所示。

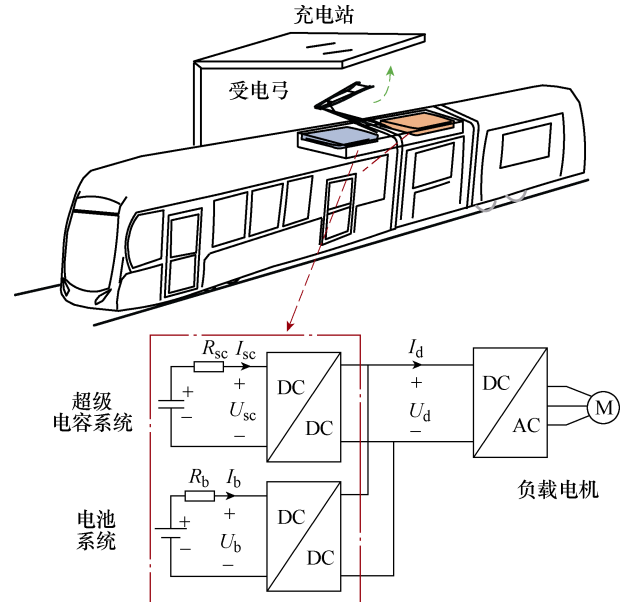


图1 系统拓扑结构

Fig.1 Topology of hybrid storage system

该拓扑中,电池和超级电容分别通过DC-DC并联在直流母线上,储能系统控制较为精确,且母线电压波动较小,系统稳定。其中,电池使用的是“Rint”模型<sup>[16]</sup>,超级电容使用的是“RC”模型,内阻 $R_b$ 和 $R_{sc}$ 均为定值。

混合动力系统的损耗主要包括储能器件电阻热损耗和DC-DC变流器损耗。文中假设DC-DC效率为定值 $\eta_{dc}$ ,混合动力系统输出功率和需求功率的关系可由化简后的非线性公式表示为

$$P_{req}(k) = \begin{cases} (I_b(k)U_b(k) + I_{sc}(k)U_{sc}(k))\eta_{dc} & P_{req}(k) > 0 \\ \frac{I_b(k)U_b(k) + I_{sc}(k)U_{sc}(k)}{\eta_{dc}} & P_{req}(k) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_{req}$ 为母线端需求功率,包括牵引电机用电和辅助用电; $I_b$ 、 $U_b$ 和 $I_{sc}$ 、 $U_{sc}$ 分别为电池端电流、端电压和超级电容端电流、端电压; $k$ 为离散时间常数, $k=1,2,\dots,N$ 。

分析可得储能系统牵引时的功率损耗 $P_{loss}$ 、系统效率 $\eta_{HEV}$ 和能量损耗 $E_{loss}$ 分别为

$$P_{loss}(k) = \begin{cases} P_{req}(k) \left( \frac{1}{\eta_{dc}} - 1 \right) + P_{rloss}(k) & P_{req}(k) > 0 \\ |P_{req}(k)| (1 - \eta_{dc}) + P_{rloss}(k) & P_{req}(k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{\text{rloss}}(k) = I_b^2(k)R_b + I_{\text{sc}}^2(k)R_{\text{sc}} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{HEV}}(k) = 1 - \frac{P_{\text{loss}}(k)}{P_{\text{req}}(k) + P_{\text{loss}}(k)} \quad (4)$$

$$E_{\text{loss}}(k) = \sum P_{\text{loss}}(k) \cdot \Delta t(k) \quad (5)$$

式中,  $P_{\text{rloss}}$  为混合储能系统中的内阻损耗功率;  $\Delta t$  为时间间隔。为了保护储能系统, 电池和超级电容的充放电电流不应超过电流限值, 且超级电容需工作在合理的电压范围内。

$$\begin{cases} I_{\text{bmin}} < I_b(k) < I_{\text{bmax}} \\ I_{\text{scmin}} < I_{\text{sc}}(k) < I_{\text{scmax}} \\ U_{\text{scmin}} < U_{\text{sc}}(k) < U_{\text{scmax}} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $I_{\text{bmin}}$ 、 $I_{\text{bmax}}$  分别为电池电流的最小、最大值;  $I_{\text{scmin}}$ 、 $I_{\text{scmax}}$  分别为超级电容电流的最小、最大值;  $U_{\text{scmin}}$ 、 $U_{\text{scmax}}$  分别为超级电容电压的最小、最大值。

在混合储能系统工作中, 若超级电容能量提前耗尽, 为达到预定功率需使电池高倍率放电, 会导致电池寿命的缩减<sup>[17]</sup>。同理, 由于超级电容能量密度低, 储能量少, 电池不能正常工作时也会导致有轨电车降速甚至故障。因此, 合适的能量管理策略是有轨电车正常运行的重要保障。

## 2 基于动态规划的动态比例分配策略

本文所提出的基于列车运行状态的动态比例分配策略通过将动态规划中无序的规则转变为随离散时间而变化的有序的规则, 实现了在线和离线能量管理策略的结合。

动态规划是一种求解过程最优化的方法, 将多阶段过程转换为一系列单阶段问题, 利用各阶段的关系逐个求解, 得到全局最优解。其基本步骤如下: 确定决策变量; 根据决策过程划分阶段, 对各阶段确定状态变量; 根据状态变量确定目标函数, 建立各阶段状态变量的转移方程。

由于有轨电车线路条件不变, 工况较为固定, 可以通过列车牵引仿真计算得到该线路下的列车运行功率曲线, 为动态规划提供了优化条件。

本优化以混合储能系统损耗最小作为优化目标, 状态变量  $x(k)$  为超级电容的电压  $U_{\text{sc}}(k)$ , 决策变量  $u(k)$  为超级电容的输出功率  $P_{\text{sc}}(k)$ 。

在动态规划寻优的过程中, 通过对每个采样时间中超级电容的输出功率进行对比选择, 求出使目标量全局最优的功率值。所有离散时间下的输出功

率所组成的路径即为动态规划求得的最优路径。

本次优化以有轨电车某一站为优化目标, 距离较短, 在该段时间内电池电压变化不大, 此处设定电池电压为固定值, 其中状态转移公式和电流计算公式为

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) - \frac{I_{\text{sc}}(k) \cdot \Delta t(k)}{C} \\ I(k) = \frac{x(k) - \sqrt{x^2(k) - 4R_{\text{sc}}u(k)}}{2R_{\text{sc}}} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $C$  为超级电容的容量。

优化后的功率分配策略是随时间动态变化的, 为简化公式, 忽略系统损耗, 使用功率比例的形式可表示为

$$\begin{cases} P_{\text{sc}}(k) = P_{\text{req}}(k) \cdot p_{\text{sc}}(k) \\ P_b(k) = P_{\text{req}}(k) \cdot (1 - p_{\text{sc}}(k)) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $P_{\text{sc}}$ 、 $P_b$  分别为超级电容、电池的输出功率;  $p_{\text{sc}}$  为超级电容的功率分配比例。

影响动态规划结果的重要因素是储能系统的初始状态, 但是超级电容的电压波动较大, 会影响系统效率。因此数据库中需要根据不同的超级电容初始状态进行规划, 有轨电车使用时选取该电压范围内的动态比例模型工作。

为达到全局最优, 动态规划在每个离散时间下的功率分配均为变化的, 没有固定的规则, 离散时间过短使有轨电车在实时运行的过程中很难进行路径的再现。本文提出了基于有轨电车运行状态的动态比例分配策略, 将离散时间变为采样时间的若干倍, 将实时动态的无规则路径变为每隔一段较长的离散时间变化一次的规则路径。原理用公式表示为

$$p_{\text{sc}}(k) = \frac{\sum_{i=\text{DT} \cdot (k-1)+1}^{k \cdot \text{DT}} \text{abs}(P_{\text{req}}(i) \cdot p_{\text{sc}}(i) \cdot \Delta t(i))}{\sum_{i=\text{DT} \cdot (k-1)+1}^{k \cdot \text{DT}} \text{abs}(P_{\text{req}}(i) \cdot \Delta t(i))} \quad (9)$$

式中,  $\text{DT}$  (Discrete Time) 表示离散时间, 为动态规划采样时间  $T$  的整数倍;  $\text{abs}(\cdot)$  为绝对值函数。动态比例模型的离散过程如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 离散时间越短, 与动态规划的结果越相近, 对于全局优化的效果保留越好。但离散时间越短混合储能系统运行规则越复杂。为了简化策略, 需要尽可能地保留动态规划的效果的同时延长离散时间, 离散时间的选择尤为重要。

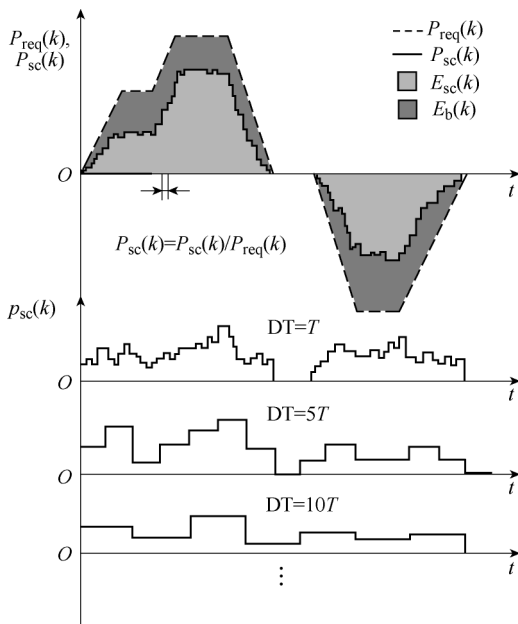


图2 基于有轨电车运行特性的动态比例分配策略离散过程

Fig.2 Discrete process of dynamic ratio distribution strategy based on running state of tram

### 3 案例分析

#### 3.1 车辆和线路条件

车辆和全线路条件是进行牵引计算、容量配置和能量管理策略的前提<sup>[18]</sup>, 本文以我国某条有轨电车线为研究目标, 其重要的车辆和线路条件见表1。

表1 重要的车辆、线路参数

Tab.1 Important parameters of vehicle and line

参数	数值
编组	2M3T
车重/t	75(AW3)
输入电压/V	DC750
线路长度/km	9.44
停车站数	10
充电站数	9
最高速度/(km/h)	70
平均旅行速度/(km/h)	25

根据车辆条件和完整的全线路条件, 对有轨电车的混合储能系统进行容量配置<sup>[19]</sup>, 得到的电池和超级电容的配置见表2。

仿真使用该线路中某一站, 全长为805m, 其限速条件和坡道条件如图3所示。

根据车辆条件和线路条件进行牵引仿真计算可得有轨电车的功率曲线和速度曲线分别如图4和图5所示。

表2 混合动力系统容量配置

Tab.2 Sizing of hybrid power system

参数	数值	
	电池	超级电容
容量	200A·h	243F
总电量/(kW·h)	101.1	8.44
端电压/V	506	500
持续最大电流/A	1 200	1 500
总质量/t	1.3	1.4

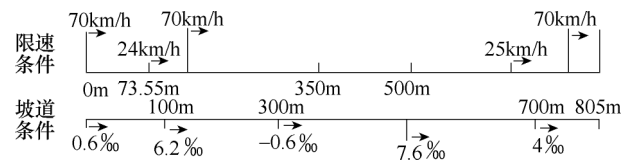


图3 线路条件

Fig.3 Line conditions

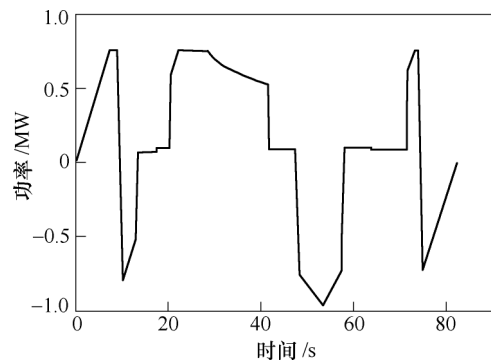


图4 功率需求曲线

Fig.4 Curve of power demand

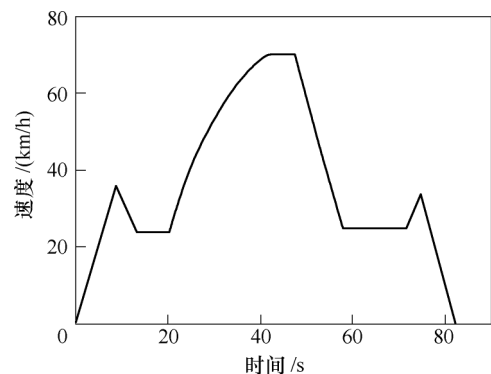


图5 速度曲线

Fig.5 Curve of velocity

由图4可得, 有轨电车运行的峰值功率约为800kW, 通过功率数据积分计算求得牵引耗能共6.23kW·h, 制动回收能量共2.52kW·h。

#### 3.2 仿真与分析

根据第2节所述使用动态规划算法对图4所示功率曲线进行功率分配路径的优化, 离散时间为

0.1s, 电池电压为 523V 保持不变。由于动态规划中初始电压值会对动态规划的最优解产生较大影响, 为了使动态规划结果更准确, 本次优化将超级电容初始 SOC 范围划分为(25%, 40%)、[40%, 60%]、[60%, 80%]、[80%, 100%]四个区间分别求解。优化得到的超级电容不同初始状态下的超级电容功率输出曲线如图 6 所示。

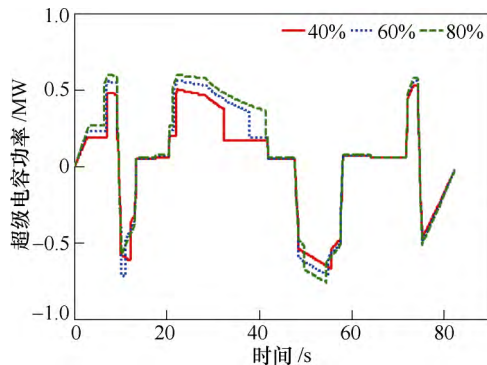


图 6 超级电容功率输出曲线

Fig.6 Output power curves of supercapacitor

当超级电容 SOC 低于 40%时, 动态规划无法取得最优结果。这是由于电池输出功率有限, 当有轨电车的需求功率较大时, 超级电容能量不足导致其无法提供高功率的输出, 所以储能系统不能继续按照该功率曲线运行。当超级电容的初始电压高于 40%时, 由图 6 可得, 在不同的初始电压下, 超级电容的功率分配曲线区别较大, 主要体现在牵引时刻。初始电压越高, 超级电容在牵引时输出功率及能量越高; 反之, 初始电压越低, 超级电容在牵引时输出功率及能量越低。该规则能够防止电压下降过快导致超级电容提前耗光电量的问题, 而在超级电容电压较高的情况下能够充分发挥超级电容的优点, 减少电池的使用量, 延长电池寿命。

为了进一步评估储能系统的性能, 了解储能系统在不同状态下的工作效果, 本文引入电池损耗指数  $L_b$  的概念评估电池寿命, 该指数越高, 电池寿命损耗越严重。计算公式为

$$L_b = \frac{\sum \text{abs}(I_b(k) \cdot \Delta t(k))}{10^4} \quad (10)$$

计算可得有轨电车在该站运行中超级电容不同初始 SOC 下电池的损耗指数和系统效率如图 7 所示。

由图 7 可知, 超级电容初始 SOC 越高, 系统效率越高, 电池损耗指数越小。这是因为超级电容的初始电压影响了工作中的平均电压值, 也就影响了平均电流值, 初始电压越高, 平均电流越低, 损耗

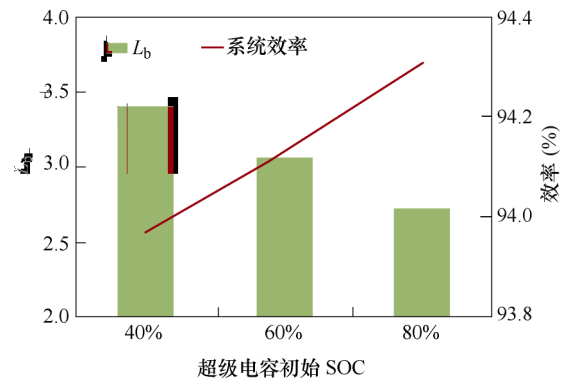


图 7 超级电容不同初始 SOC 下电池的损耗指数和系统效率

Fig.7  $L_b$  and system efficiency of different SOC of supercapacitor

越小, 系统效率越高。进一步地, 超级电容初始值越低, 由图 6、图 7 可得, 超级电容输出越少, 电池输出越多, 电池损耗越严重。

若将动态规划的结果使用超级电容功率比例  $p_{sc}$  的形式表达, 则由图 7 中的功率分配结果转换为的超级电容功率比例如图 8 所示。

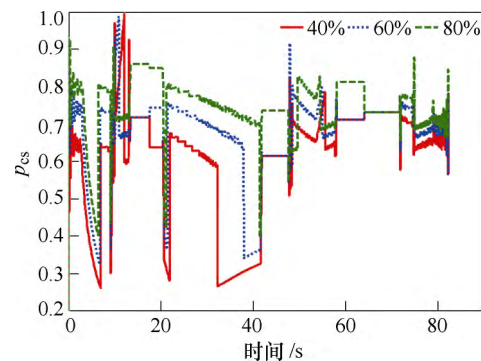


图 8 超级电容功率比例曲线

Fig.8 Curves of supercapacitor power ratio

由图 8 可知, 动态规划的功率分配曲线中超级电容的功率比例是实时变化的, 超级电容初始 SOC 越高, 平均功率比例越高, 输出能量越大。在有轨电车制动时超级电容功率高于牵引功率, 使超级电容在短暂的大功率制动过程中吸收更多的能量用于下一步的牵引, 同时提高系统效率。

超级电容功率比例实时变化, 在实际应用中有一定的限制。接下来以超级电容初始电压 387V (SOC 为 60%) 为例对离散时间不同的情况进行损耗和效率的分析, 结果如图 9 所示。

离散时间越长, 系统损耗越高, 效率越低。这是因为离散时间越长, 其功率分配的结果对于实时功率的作用越不敏感, 与最优功率分配曲线的偏差越大。从图 9 中可以看出, 储能系统的效率从动态

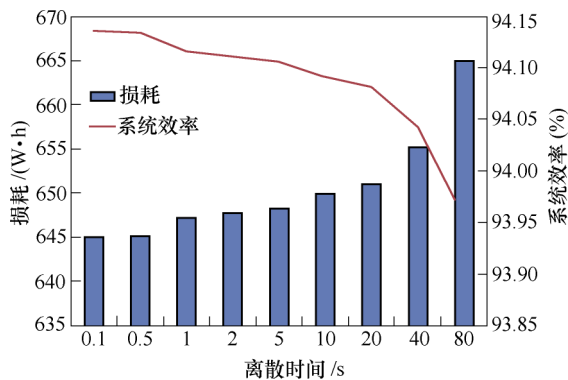
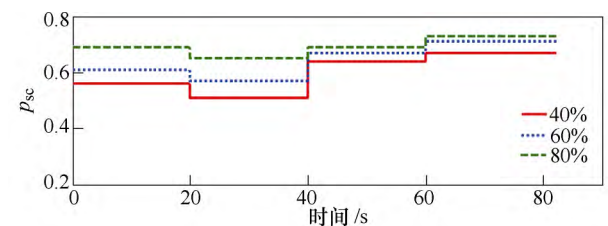


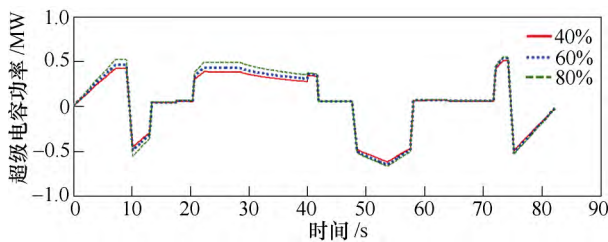
图9 系统损耗和效率

Fig.9 System loss and efficiency

规划得出的 94.14% 下降到 93.95%，在储能系统中效率的下降、损耗的增加会造成储能设备发热严重，耗能增加，进一步缩短设备寿命，增加成本。由图 9 可以看出，离散时间在小于 20s 损耗时增加不明显，系统效率变化不到 0.06%，但继续延长倍数后损耗增加较快，系统效率下降较大。因此离散时间选择为 20s。在 20s 的离散时间下得到的超级电容功率比例和功率分配曲线如图 10 所示。



(a) 功率比例曲线



(b) 功率分配曲线

图 10 超级电容功率比例和功率分配曲线

Fig.10 Supercapacitor's power ratio and power distribution curves

由于该策略是根据输出能量之间的关系所得，运行过程中包括牵引、惰行和制动过程。当离散时间过长时，该策略失去动态特性，无法表现运行过程中电池与超级电容输出随运行需求功率变化的特点。由于该线路运行时间约为 80s，所以当离散时间为 80s 时，该策略变为固定比例分配策略，即  $p_{sc}(k)$  为固定值。当根据式 (8) 得出储能系统在超级电容初始 SOC 范围为 [40%, 60%] 时  $p_{sc}$  为 0.58。通过仿

真可得离散时间为 20s 和离散时间为 80s 条件下经过分配所得超级电容电压曲线如图 11 所示。

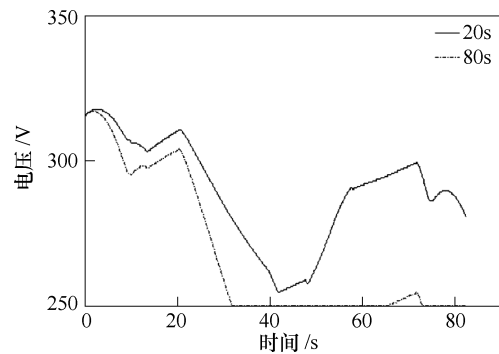


图 11 超级电容电压曲线

Fig.11 Voltage curves of supercapacitor

从图 11 中可以看出，当离散时间为 20s 时，超级电容能够根据动态功率比例为全站运行提供能量。而当离散时间为 80s 时，超级电容的电量在 30s 处已经耗光，无法继续为储能系统提供牵引。这是由于在固定功率比例分配策略中，牵引和制动均在同样的规则下进行，不能够根据功率曲线做出阶段性调整，导致超级电容在牵引过程中能量提前耗尽。在该情况下，由于电池提供功率有限，有轨电车无法得到足够的牵引功率，平均速度下降。通过仿真的对比可以得出，动态比例分配策略能够更好地适应离散时间内有轨电车运行特点，灵活性更强。固定比例的分配策略则会缩小储能系统的工作区间，实用性差。

### 3.3 实验验证

为了验证基于有轨电车运行状态的动态比例分配策略的效果，在如图 12 所示的 90kW 电池-超级电容混合储能系统实验平台上进行实验。实验平台的储能系统基本参数见表 3。

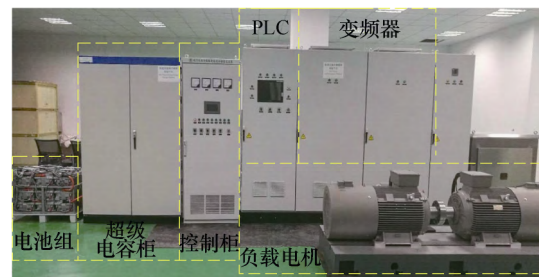


图 12 混合储能实验平台

Fig.12 Platform of hybrid storage system

本实验旨在验证有轨电车在不同的超级电容初始 SOC 范围下使用基于有轨电车运行特性的动态比例模型的工作效果，所使用的负载曲线需要根据仿真所得的功率曲线等比例缩放。实验时需要考虑实

表 3 混合储能平台参数

Tab.3 Parameters of hybrid storage platform

参数	电池系统	超级电容系统
品牌	微宏	Maxwell
型号	MV0620312	BCAP3000
串并联数	216S2P	184S1P
能量/(kW·h)	14	0.5
最大持续电流/A	60(3C)	200
端电压/V	496.5	500

验平台与表 2 中容量配置的差异。功率曲线被等比例缩放 30 倍，最大功率约为 33kW。

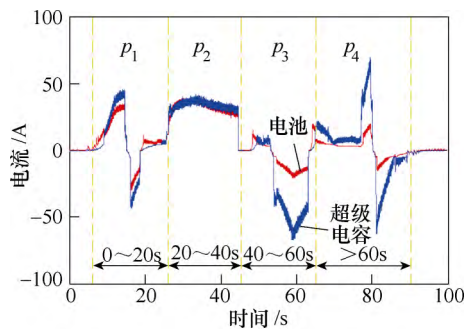
实验模拟三种超级电容初始电压值，分别属于不同范围，储能系统自动检测并匹配相应的动态规划动态比例模型并进行功率分配。本次实验中电池初始电压均为 510V 左右，超级电容的初始电压、SOC 以及应遵守的动态比例模型 SOC 范围见表 4。

表 4 超级电容初始值

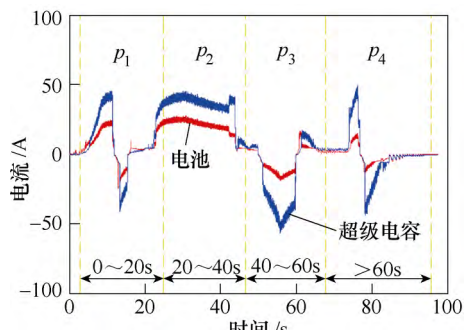
Tab.4 Initial values of supercapacitor

初始电压/V	初始 SOC(%)	遵守动态比例范围
349.8	48.9	[40%, 60%)
410	67.2	[60%, 80%)
468.6	87.8	[80%, 100%]

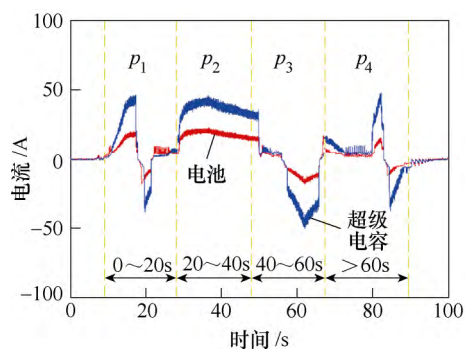
根据以上三组数据进行能量管理策略的验证实验，得到电池和超级电容系统的电流和电压分别如图 13、图 14 所示。



(a) 349.8V



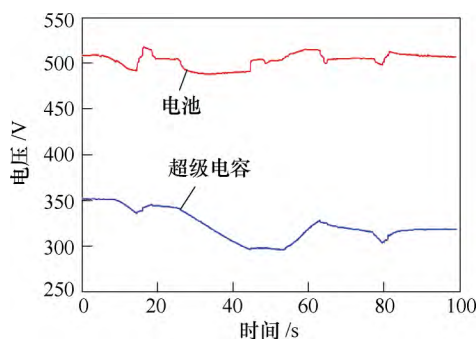
(b) 410V



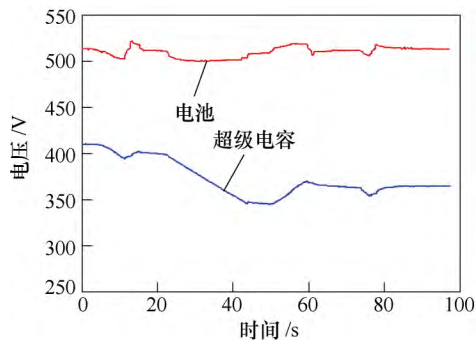
(c) 468.6V

图 13 实验电流波形

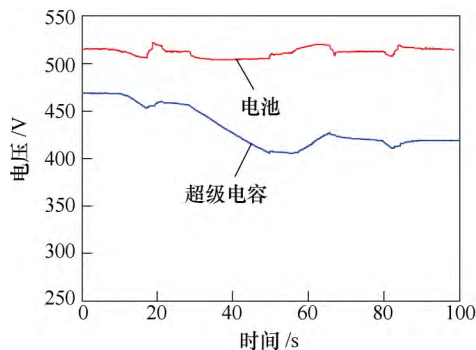
Fig.13 Current curves of the experiments



(a) 349.8V



(b) 410V



(c) 468.6V

图 14 实验电压波形

Fig.14 Voltage curves of the experiments

图 13 中,  $p_1 \sim p_4$  分别表示每组动态比例模型中的 4 个功率比例值。可以看出, 储能系统自动识别不同的超级电容初始电压所在范围并根据图 10a 所示的动态比例模型进行了变功率比例的分配。从实验结果可以看出, 超级电容初始电压高时功率比例较大, 超级电容用电量多, 电压下降快, 使超级电容得到了充分的利用; 但初始电压低时功率比例较小, 超级电容电压波动较小, 保证了储能系统的正常运行。以上验证了基于有轨电车运行状态的动态比例分配策略在实际运行中的优越性。

## 4 结论

基于有轨电车运行工况的稳定性, 本文提出了基于有轨电车运行特性的动态比例分配策略, 将超级电容初始状态分为若干区间, 分别通过动态规划提前优化功率分配路径, 并通过离散时间的寻优使动态规划的效果得到较好的保留, 能够有效地提高系统效率, 延长储能系统寿命, 降低更换成本; 同时简化规则, 使用离线策略指导在线优化。通过与固定比例分配策略的仿真对比, 验证了该策略能够通过灵活的功率比例变化扩大储能系统的工作区间。通过 90kW 实验平台对不同电压范围的动态比例策略进行验证, 证明了该策略在混合储能系统实际运行中的有效性。但离散时间固定导致控制的灵活性降低, 只能根据离散区间段整体输出特性进行设计, 无法实时地随工况的变化来控制功率分配。下一步的研究即为基于有轨电车运行模式的识别, 在动态离散时间下研究动态比例分配策略。

### 参考文献

- [1] 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): 334-340.  
Zhang Chunjiang, Dong Jie, Liu Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [2] Herrera V I, Gaztañaga H, Milo A, et al. Optimal energy management and sizing of a battery-supercapacitor-based light rail vehicle with a multiobjective approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 3367-3377.
- [3] Carter R, Cruden A, Hall P J. Optimizing for efficiency or battery life in a battery/supercapacitor electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(4): 1526-1533.
- [4] Fu Zhumu, Wang Bin, Zhou Pengge. An improved logic threshold approach of energy management for a power-split hybrid electric vehicle[C]//International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Luoyang, China, 2013: 244-248.
- [5] 李逢兵. 含锂电池和超级电容混合储能系统的控制与优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [6] 丁若星, 董戈, 吴和平, 等. 混合储能系统功率分配效果的表征参数研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 1): 184-189.  
Ding Ruoxing, Dong Ge, Wu Heping, et al. Research on power sharing results parameterization of hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society 2016, 31(S1): 184-189.
- [7] 张坤, 吴建东, 毛承雄, 等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 235-241.  
Zhang Kun, Wu Jiandong, Mao Chengxiong, et al. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 235-241.
- [8] 柴炜, 李征, 蔡旭, 等. 基于使用寿命模型的大容量电池储能系统变步长优化控制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 58-66.  
Chai Wei, Li Zheng, Cai Xu. Variable step-size control method of large capacity battery energy storage system based on the life model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 58-66.
- [9] Gong Qiuming, Li Yaoyu, Peng Zhiongren. Trip-based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(6): 3393-3401.
- [10] Shen Junyi, Khaligh A. Predictive control of a battery-ultracapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles[C]//2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Dearborn, MI, USA, 2016: 1-6.
- [11] Bashash S, Fathy H K. Cost-optimal charging of plug-in hybrid electric vehicles under time-varying electricity price signals[J]. IEEE Transactions on



- Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 1958-1968.
- [12] Murphey Y L, Park J, Kiliaris L, et al. Intelligent hybrid vehicle power control—part II: online intelligent energy management[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(1): 69-79.
- [13] Yi L M, Chen Zhihang, Kiliaris L, et al. Neural learning of driving environment prediction for vehicle power management[C]//IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Hong Kong, 2008: 3755-3761.
- [14] Liu Jichao, Chen Yangzhou, Zhan Jingyuan, et al. An on-line energy management strategy based on trip condition prediction for commuter plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, DOI: 10.1109/TVT.2018.2815764.
- [15] Sun Chao, Hu Xiaosong, Moura S J, et al. Velocity predictors for predictive energy management in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(3): 1197-1204.
- [16] Johnson V H. Battery performance models in ADVISOR[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 321-329.
- [17] Omar N, Mierlo J V, Verbrugge B, et al. Power and life enhancement of battery-electrical double layer capacitor for hybrid electric and charge-depleting plug-in vehicle applications[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(25): 7524-7531.
- [18] 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 acceleration-time-prediction-based energy management and optimal sizing of onboard energy management system for modern trams[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 158-166.
- [19] 颜宁, 厉伟, 邢作霞, 等. 复合储能主动配电网中的容量配置[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 180-186.  
Yan Ning, Li Wei, Xing Zuoxia, et al. Capacity allocation method in active distribution network based on hybrid energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 180-186.

---

#### 作者简介

王 琦 女, 1992 年生, 博士研究生, 研究方向为城市轨道交通车载储能技术。

E-mail: ywangelec@bjtu.edu.cn

杨中平 男, 1970 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为轨道交通电力牵引传动和节能技术。

E-mail: zhpyang@bjtu.edu.cn (通信作者)

(编辑 赫 蕾)