

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80191

# 基于庞特里亚金极小值原理的混合储能 有轨电车能量管理策略

李峰 杨中平 王珣 安星锬 林飞

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

**摘要** 混合储能型有轨电车的能量管理策略对于列车的运行性能和经济效益等有很大影响。该文提出基于极小值原理的能量管理策略的优化方法,首先介绍混合储能型有轨电车储能系统拓扑的选择,并对储能元件的模型和参数进行选择,基于某条既有线路条件,利用粒子群优化算法得到合适的容量配置的结果。在此基础上建立有轨电车运行损耗成本模型,并利用庞特里亚金极小值原理对混合储能系统的能量管理策略进行优化,通过 Matlab/Simulink 仿真模型开展仿真分析,并在 90kW 混合储能实验平台上进行实验验证。仿真结果表明,优化后的控制策略对比与优化前的能量管理策略经济成本可以降低 8% 左右,实验证明了该策略的灵活性和有效性。

**关键词:** 混合储能系统 能量管理策略 容量配置 庞特里亚金极小值原理

**中图分类号:** TM921

## Energy Management Strategy of Tram with Hybrid Energy Storage System Based on Pontryagin's Minimum Principle

Li Feng Yang Zhongping Wang Yu An Xingkun Lin Fei

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

**Abstract** The energy management strategy (EMS) of tram with hybrid energy storage system has a great influence on the running performance and economic benefits of the tram. This paper proposed an optimization method for EMSs based on the principle of minimum values. Firstly, the topology selection of trams' energy storage system had introduced, and the models and parameters of the energy storage components were selected. Then, based on an existing line condition, the paper used particle swarm optimization algorithm to obtain the appropriate capacity configuration results. On this basis, a cost model of operating loss was established, and the EMS of the hybrid energy storage system was optimized using the Pontryagin's minimum principle (PMP). The simulation verification work was performed through the Matlab/Simulink, and the test was carried out on the 90kW hybrid energy storage test platform. The simulation results show that the economic cost can be reduced by about 8% compared with the energy management strategy before optimized. The experiment proves the flexibility and effectiveness of the strategy.

**Keywords:** Hybrid storage system, energy management strategy (EMS), capacity allocation, Pontryagin's minimum principle (PMP)

## 0 引言

能量管理策略对于有轨电车储能系统正常运行影响较大,合适的能量管理策略可以大幅度降低储能系统运行成本<sup>[1-3]</sup>。

现有能量管理策略可分为在线能量管理策略和离线能量管理策略两大类。在线方法包括基于规则的控制策略<sup>[4-5]</sup>、模糊控制法<sup>[6-7]</sup>和截止频率法<sup>[8-10]</sup>等;离线方法主要包括动态规划<sup>[11-12]</sup>和极小值原理<sup>[13-15]</sup>等智能算法。

目前关于有轨电车的在线能量管理策略的研究较少,有些能量管理策略没有充分考虑有轨电车的运行特性。对于全局最优控制来说,必须根据未来驾驶条件进行参数调整,这对求得全局最优解至关重要。本文基于庞特里亚金极值原理,建立以运行实时成本为优化目标的目标函数,对电池-超级电容混合储能型有轨电车进行研究,求得实时最优控制结果,应用于混合储能型有轨电车,最后通过仿真与实验验证了该策略的经济性与可行性。

## 1 混合储能系统建模分析

### 1.1 储能系统拓扑选择与计算

混合储能型有轨电车的混合储能系统是由锂电池与超级电容组合起来的,拓扑结构将直接影响各装置性能的发挥,在不同的应用场合下,可以采用不同拓扑结构的混合储能方式。

有轨电车可使用的混合储能系统的拓扑共分为三类,如图 1 所示。

城市轨道交通中,图 1a 和图 1b 两种拓扑的应用相

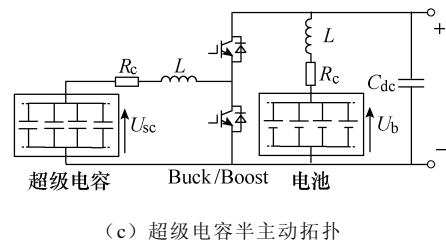
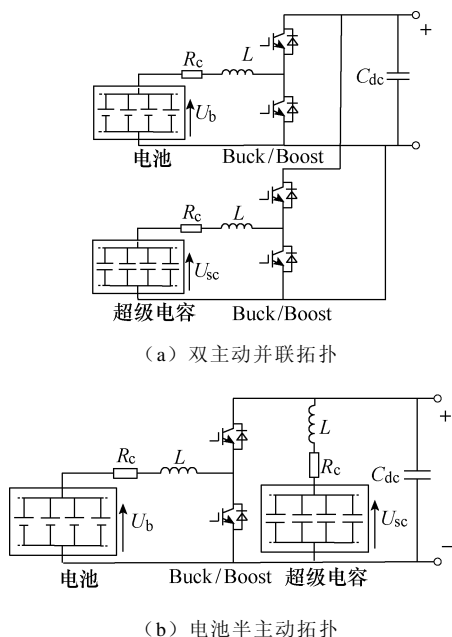


图 1 混合储能系统拓扑结构

Fig.1 Topology of hybrid energy storage system

对较多,图 1a 中超级电容和蓄电池分别通过一个双向 DC-DC 进行控制。由于 DC-DC 具有变流和调压的功能,使用 DC-DC 分别调控,有利于进行能量管理策略的优化。但是与直接并联相比,使用 DC-DC 会产生功率损耗,同时增加了储能系统的成本,并导致储能系统的效率降低。

图 1b 中,只有蓄电池接 DC-DC,超级电容直接并联在直流母线上。该拓扑结构中蓄电池的功率可控,可以优化控制电池的充放电电流,延长其使用寿命;由于超级电容功率密度大,反应速度快,直接根据母线电压的变化出力。缺点是当需求侧的电压较高时,超级电容需要很多单元串联以获得较高的电压值,这就造成了体积、质量、成本的提高。

为了方便储能系统的控制以及充电桩充电方式的设计,本文采用图 1a 双电源半主动拓扑结构。

### 1.2 储能元件拓扑选择

电池模型的研究已经非常多,不同模型有着不同的优势。文献[16]提出,等效电路模型对电池电压波动范围较低的情况下的外特性表现较好,而实际运行中,电池电压变化波动很小,同时为了使计算速度足够快以满足在线能量管理策略,因此选用结构相对简单的降阶 Thevin 等效电路模型进行分析。

文献[17]对比了三种不同的超级电容模型,提出 Miller 模型能够更好地满足动态和静态特性,误差相对较小。为满足实时性要求,降低模型阶数,采用如图 2 所示模型进行计算。

上述电池模型满足

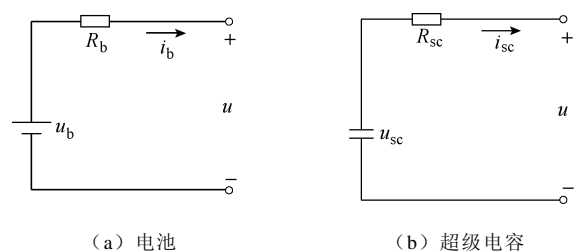


图 2 储能元件模型

Fig.2 Energy storage element model

$$P_b = U_b I_b - I_b^2 R_b \quad (1)$$

式中,  $U_b$  为电池端电压;  $I_b$  为电池电流;  $R_b$  为电池内阻;  $P_b$  为电池输出功率。

由式(1)可得到当锂电池输出功率为  $P_b$  时的电流为

$$I_b = \frac{U_b - \sqrt{U_b^2 - 4R_b P_b}}{2R_b} \quad (2)$$

由于在混合储能系统中, 锂电池经由 DC-DC 变换器提供或吸收负载电机的能量, 因此

$$I_b = \frac{U_b - \sqrt{U_b^2 - 4R_b P_b / \eta}}{2R_b} \quad P_b > 0 \quad (3)$$

$$I_b = \frac{U_b - \sqrt{U_b^2 - 4R_b P_b \eta}}{2R_b} \quad P_b < 0 \quad (4)$$

式中,  $P_b$  为电池通过 DC-DC 变换器在直流母线侧释放或吸收的功率;  $\eta$  为 DC-DC 变换器的工作效率, 通过实际实验取值 97%。

由于锂电池在全线运行中电压基本一致, 为方便计算, 忽略电池电压变化。

超级电容始终发生的是物理变化, 寿命长, 非常适用于城轨交通这种站间距离短、起停频繁的特点。其模型要求其满足一定的动态特性。

上述超级电容模型满足

$$P_{sc} = U_{sc} I_{sc} - I_{sc}^2 R_{sc} \quad (5)$$

$$SOC_{sc} = \frac{U_{sc}^2}{U_{scm}^2} \quad (6)$$

式中,  $P_{sc}$  为超级电容通过 DC-DC 变换器在直流母线侧释放或吸收的功率;  $SOC_{sc}$  为超级电容的 SOC;  $U_{scm}$  为超级电容的额定电压。

因此, 超级电容的电流为

$$I_{sc} = \frac{\sqrt{U_{sc}^2 \cdot SOC_{sc} - \sqrt{U_{sc}^2 \cdot SOC_{sc} - 4R_{sc} P_{sc} / \eta}}}{2R_{sc}} \quad P_{sc} > 0 \quad (7)$$

$$I_{sc} = \frac{\sqrt{U_{sc}^2 \cdot SOC_{sc} - \sqrt{U_{sc}^2 \cdot SOC_{sc} - 4R_{sc} P_{sc} \eta}}}{2R_{sc}} \quad P_{sc} < 0 \quad (8)$$

## 2 基于庞特里亚金极小值原理的能量管理策略的实现

对于能量管理策略的优化, 首先需要确定的是优化目标, 即建立一个合适的目标函数。很多学者

基于列车运行实时控制提出了不同的目标函数, 主要方向为损耗和成本<sup>[18-19]</sup>。

### 2.1 哈密顿函数建立

满足庞特里亚金极小值原理的条件是必要条件, 而非充分条件。在实际应用中, 可根据系统的物理意义进行判断。如果求解的系统具有唯一的最优解, 且根据极小值原理只能求出一个极值解, 则该解就是最优解。混合储能型有轨电车的能量管理系统显然具有这样的特点, 因此可以采用极小值原理求得最优解。

本文以等效经济消耗成本为优化目标进行求解, 经济损耗共分为四个部分, 分别为储能元件内阻上的损耗、双向 DC-DC 变换器的损耗、电池寿命损耗的折算以及超级电容寿命损耗的折算。

#### 1) 储能元件上的损耗

$$P_{bloss} = I_b^2 R_b \quad (9)$$

$$P_{scloss} = I_{sc}^2 R_{sc} \quad (10)$$

#### 2) DC-DC 变换器的损耗

$$P_{dcloss} = P(1-\eta) \quad (11)$$

#### 3) 电池寿命的损耗

对于电池寿命的损耗采用安时积分法进行折算。某一时刻的损耗为

$$C_b = \frac{|I_b| dt}{2N_b Q_{bm}} \quad (12)$$

式中,  $N_b$  为电池最大循环次数;  $Q_{bm}$  为单次循环电荷量最大值。

#### 4) 超级电容某一时刻的损耗

$$C_{sc} = \frac{U_{sc} |I_{sc}| dt}{2E_{sc} N_{scm}} \quad (13)$$

式中,  $E_{sc}$  为超级电容在 SOC 限制范围下, 可使用的能量总和;  $N_{scm}$  为超级电容最大循环寿命。

所以, 有轨电车运行过程中, 其运营成本损耗即目标函数  $M$  为

$$M = \int (P_{loss} m_e + C_b m_b + C_{sc} m_{sc}) dt \quad (14)$$

式中,  $m_e$  为单位电价;  $m_b$  为混合储能系统中锂电池整组价格;  $m_{sc}$  为混合储能系统中超级电容整组价格。

由式(9)~式(13)可列写所需的哈密顿函数为

$$H(u, M, \lambda_1, \lambda_2) = P_{\text{loss}} m_e + C_b m_b + C_{sc} m_{sc} + \lambda_1 \dot{\text{SOC}}_b + \lambda_2 \dot{\text{SOC}}_{sc} \quad (15)$$

式中， $\dot{\text{SOC}}_b$  和  $\dot{\text{SOC}}_{sc}$  分别为锂电池和超级电容的 SOC 变化率。

### 2.2 协态方程

由哈密顿函数及庞特里亚金极小值原理的必要条件构建协态方程为

$$\dot{\lambda}_1 = \frac{\partial H}{\partial \text{SOC}_b} \quad (16)$$

$$\dot{\lambda}_2 = \frac{\partial H}{\partial \text{SOC}_{sc}} \quad (17)$$

锂电池和超级电容 SOC 变化率为

$$\dot{\text{SOC}}_b = -\frac{I_b}{Q_{bm}} \quad (18)$$

$$\dot{\text{SOC}}_{sc} = -\frac{I_{sc}}{CU_{scm}} \quad (19)$$

式中， $Q_{bm}$  为电池最大电量。

综合式 (2) 可得，由于电池开路电压和内阻均视为常值，因此  $\lambda_1$  的变分为 0，即  $\lambda_1$  为常数。而通过推导，可得  $\lambda_2$  的一个推导公式，由于过于复杂，这里不详细列写，其形式为

$$\dot{\lambda}_2 = a - b\lambda_2 \quad (20)$$

### 2.3 约束条件

有轨电车运行过程中，出于对储能系统寿命以及正常工作状态的保护，设计约束条件为

$$0.4 < \text{SOC}_b < 0.8 \quad (21)$$

$$0.25 < \text{SOC}_{sc} < 1 \quad (22)$$

$$0 < \frac{P_b}{P_{sc}} < 1 \quad (23)$$

## 3 案例分析

### 3.1 容量配置确定

根据电池能量密度大、超级电容的功率密度大等特点，对不同型号电池和超级电容进行比较，本文选用的电池和超级电容的具体参数见表 1。

对于所选双向 DC-DC 拓扑，选取以上锂离子电池与超级电容作为混合储能系统的单体元件，因为本文设计的能量管理策略是基于东湖线有轨电车的实际数据作为实验目标的，因此对于有轨电车的混合储能系统的容量配置也采用东湖线数据。依据线路条件、车辆条件以及合理的限制条件，功率分

表 1 储能元件参数

Tab.1 Parameters of energy storage element

| 参数      | 东芝 30A·h 电池 | BCAP3300 超级电容 |
|---------|-------------|---------------|
| 额定容量    | 30A·h       | 3 300F        |
| 额定电压/V  | 2.3         | 3.8           |
| 单体内阻/mΩ | 1.2         | 0.29          |
| 工作电流/A  | 60(3C)      | 210           |
| 寿命/次    | >10 000     | 1 000 000     |
| 单体质量/g  | 515         | 510           |
| 成组质量    | 加倍          | 加倍            |

配策略采用电池和超级电容功率占比为 3:7 进行功率分配，采用粒子群算法，取得的配置结果见表 2，应用于后续的能量管理策略的研究中。

表 2 容量配置结果

Tab.2 Capacity configuration result

| 参数  | 电池  | 超级电容 |
|-----|-----|------|
| 串联数 | 198 | 237  |
| 并联数 | 14  | 33   |

### 3.2 仿真条件

本文针对武汉东湖线有轨电车进行能量管理策略的研究，列车运行时所需功率值采用既有数据进行模拟列车运行全程工况。容量配置采用表 2 所示的电池和超级电容的串并联配置进行仿真。仿真边界条件见表 3。仿真得到输入功率曲线如图 3 所示。

表 3 仿真边界条件

Tab.3 Boundary condition

| 边界条件        | 限制值     |
|-------------|---------|
| 功率需求/MW     | 1       |
| 电池额定电压/V    | 450     |
| 电池额定功率/kW   | 400     |
| 电池 SOC      | 0.4~0.8 |
| 超级电容额定电压/V  | 832     |
| 超级电容额定功率/kW | 800     |
| 超级电容 SOC    | 0.25~1  |

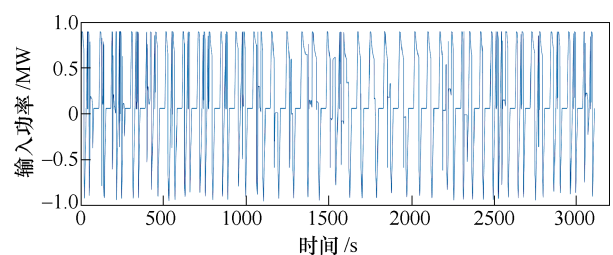


图 3 仿真时的输入功率

Fig.3 Input power of simulation

对于混合储能型有轨电车来说，在运行的过程中消耗储能元件的能量，因此，当列车进站时，有些站点需要安装充电桩对储能系统进行充电补充能量，以便之后的运行。

按照东湖线线路条件，总共设置 23 个车站，其中有 17 个带有充电桩，车辆进站后采取恒流方式充电 20s。能量配比按照电池和超级电容 3:7 进行吸收。

为了进行计算，对于整个过程离散化，将每个时刻的功率值视为一个离散时间点进行计算，如图 4 所示。

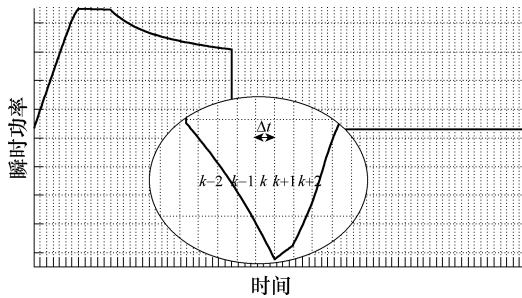


图 4 离散示意图

Fig.4 Discrete schematic

图 4 中  $\Delta t$  为单位时间（本文中采样间隔周期为 1s）， $k$  代表有轨电车运行的第  $k$  阶段。整个过程可以划分为  $n$  个阶段，其中  $n=t/\Delta t$ 。

$$\Delta t = t(k) - t(k-1) \quad (24)$$

此外，关于协态变量的求解也离散化，根据式 (18) 的推导可知，协态变量  $\lambda_1$  为常数，而在离散状态下  $\lambda_2$  满足

$$\dot{\lambda}_2(k) = \frac{\lambda_2(k) - \lambda_2(k-1)}{\Delta t} \quad (25)$$

再根据式 (20)，可推得

$$\lambda_2(k) = \frac{a\Delta t + \lambda_2(k-1)}{1 + b\Delta t} \quad (26)$$

所以，为求解每一阶段的协态变量，需要先确定  $\lambda_1(0)$  与  $\lambda_2(0)$  的取值。不同的协态变量初值组会使庞特里亚金极小值原理的计算得到完全不同的结果。最终选择的协态变量初值组是满足系统约束条件，并且哈密顿函数计算达到极小值。

### 3.3 仿真结果及分析

依据以上介绍的原理及公式，对武汉东湖线有轨电车实际运行数据进行仿真分析。控制变量，即电池功率占比优化结果如图 5 所示。

电池功率占比相对较小，起始时刻超级电容能量较高的时候，电池提供的功率值仅占 20% 左右，随着超级电容能量的下降，电池提供的功率值逐渐

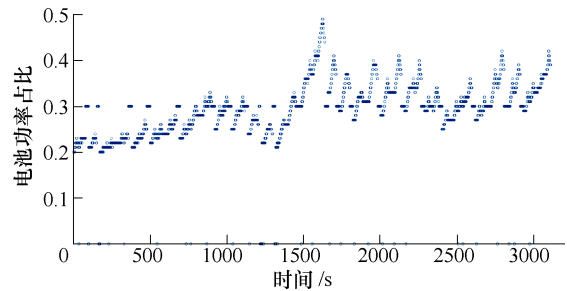


图 5 仿真优化结果

Fig.5 Simulation optimization results

上升，波动范围在 0.2~0.5 之间，中间部分恒定 0.3 的过程是有轨电车进站充电的过程，此时按照充电桩设计原则，始终让电池和超级电容按照 3:7 的功率比例进行充电。

电池和超级电容的功率分配情况按照控制变量的优化结果进行，其结果如图 6 所示。

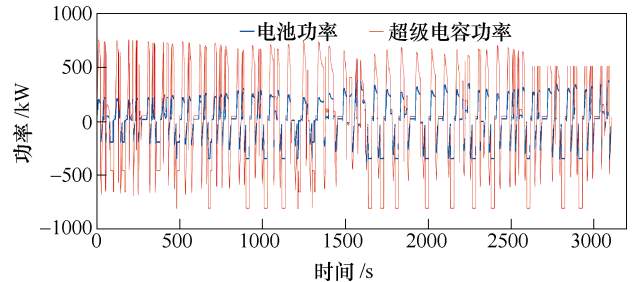


图 6 功率分配示意图

Fig.6 Power distribution diagram

可以看出，峰值总需求功率最大为 1MW，电池初始时刻提供的功率大概为 200kW，超级电容提供剩余的大部分能量值。随着超级电容能量降低，电池提供的功率值不断上升。

超级电容的电压波动如图 7 所示，其电压波动范围为 450~900V，且波动较快，符合超级电容功率密度高的特点。电压变化快的特性使其能在城市轨道交通中发挥巨大作用。

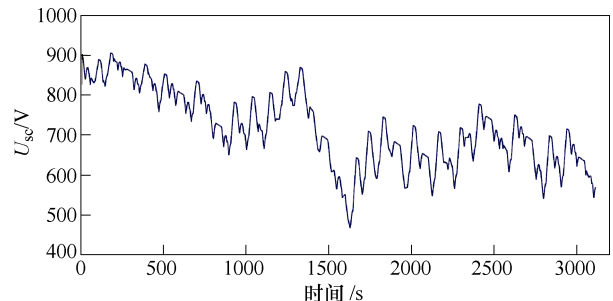


图 7 超级电容电压

Fig.7 Voltage of super capacitors

电池和超级电容 SOC 的变化情况如图 8 所示，其波动范围满足限制条件要求的范围，符合约束条件要求。

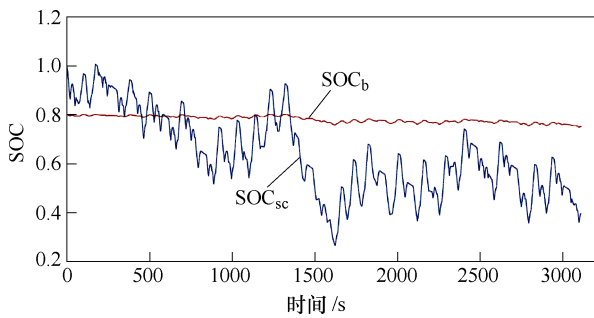


图 8 超级电容 SOC

Fig.8 State of charge of super capacitors

将最终优化结果与恒比例能量管理策略进行对比，结果见表 4。

表 4 结果对比

Tab.4 Comparison of results

| EMS 方法 | PMP | $u=0.3$ | $u=0.4$ |
|--------|-----|---------|---------|
| 经济损耗/元 | 52  | 57      | 68      |

一辆有轨电车按照本文提出的能量管理策略运行，全线总损耗的经济成本为 52 元，若采用恒定比例电池功率占总功率 30%进行功率分配，全线运行成本为 57 元，相比之下，可以成本降低 8%左右；若采用恒定比例电池功率占总功率 40%进行功率分配，全线运行损耗成本为 68 元，相比之下，可以降低成本 22%左右，若电池提供功率更高，则降低的更多。结果表明，利用庞特里亚金极值原理对混合储能型有轨电车进行能量管理策略的优化对成本降低有着一定的优势。

3.4 实验验证

为了验证优化后的结果满足实时控制的要求，利用 90kW 混合储能实验平台进行实验验证，实验平台如图 9 所示。具体参数见表 5 和表 6。

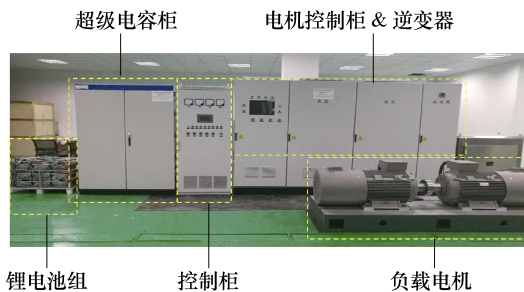


图 9 实验平台

Fig.9 Test Platform

实验模拟了三个有轨电车完整的牵引制动过程，由于平台功率限制，将功率缩小，进行 50kW 实验，输入功率曲线如图 10 所示。

表 5 实验平台超级电容参数

Tab.5 Supercapacitor parameters of the experimental platform

| 参 数        | 数 值      |
|------------|----------|
| 配置方式       | 48S×4    |
| 额定电容       | 63F/4    |
| 额定电压/V     | 125×4    |
| 总能量/(kW·h) | 0.56     |
| 最大持续电流/A   | 140(15℃) |
| 最大持续功率/kW  | 70       |

表 6 实验平台电池参数

Tab.6 Battery parameters of the experimental platform

| 参 数        | 数 值    |
|------------|--------|
| 配置方式       | 216S2P |
| 额定容量/(A·h) | 20     |
| 额定电压/V     | 496.8  |
| 总能量/(kW·h) | 9.94   |
| 最大持续电流/A   | 60     |
| 最大持续功率/kW  | 29.8   |

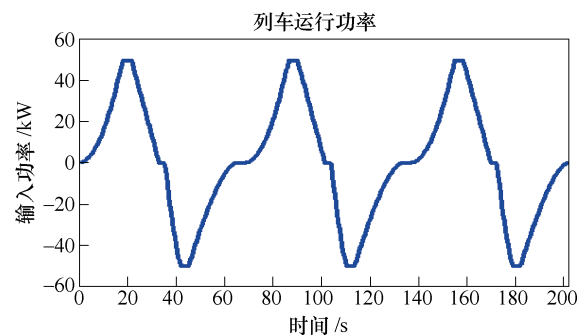


图 10 实验时的输入功率

Fig.10 Input power of experiment

Matlab/Simulink 计算得到利用庞特里亚金极值原理的优化能量管理策略为图 11 所示，其值代表电池功率占比总功率的值。

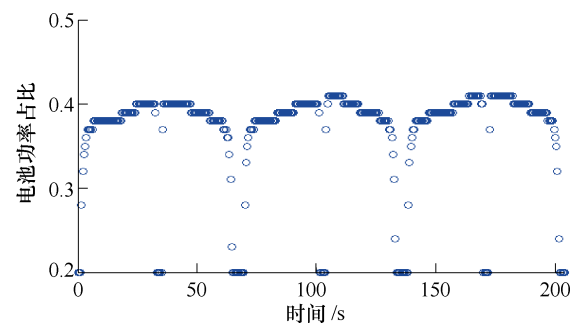


图 11 实验优化结果

Fig.11 Experimental optimization results

依次结果进行实验,得到电池和超级电容波形如图12和图13所示。经计算,其电池比例值满足仿真结果,证明在计算速度满足要求的情况下,基于庞特里亚金极小值原理是可以进行在线能量管理策略的优化的。优化后的经济成本降低8.75%。

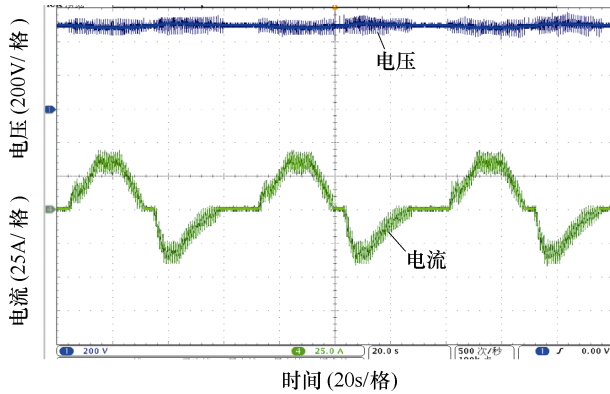


图12 电池电压电流波形

Fig.12 Waveforms of batteries' voltage and current

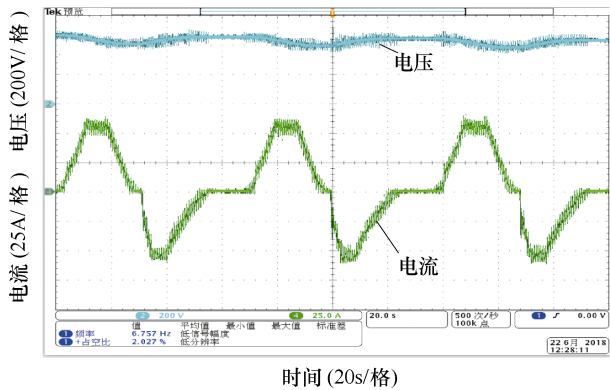


图13 超级电容电压电流波形

Fig.13 Waveforms of super capacitors' voltage and current

## 4 结论

基于有轨电车运行工况相对固定的特点,本文利用庞特里亚金极小值原理对混合储能型有轨电车储能系统进行能量管理策略的优化,得到以下结论:

1)对比于普通逻辑门限控制中的恒比例能量管理策略可以降低8%以上。

2)通过90kW的实验平台进行模拟运行,观察电池和超级电容的电压电流变化情况,与仿真所得的实时比例值变化一致,验证了本文提出的在线能量管理策略的有效性。

## 参考文献

[1] 李雪飞,王占国,马泽宇.基于锂离子电池的双动力动车组电池系统设计[J].中国铁路,2013(7):

73-77.

Li Xuefei, Wang Zhanguo, Ma Zeyu. Design of battery system for dual-power EMU based on lithium ion battery[J]. China Railway, 2013(7): 73-77.

[2] 田睿,康轶男.国内外混合动力机车的发展(上)[J].内燃机车,2012(9):1-3.

Tian Rui, Kang Yinan. The development of hybrid locomotives at home and abroad[J]. Diesel Locomotive, 2012(9): 1-3.

[3] 陈彦秋,张继业,宋鹏云,等.混合动力列车运行控制的研究[J].铁道学报,2013,35(8):22-28.

Chen Yanqiu, Zhang Jiye, Song Pengyun, et al. Study on the operation control of hybrid trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(8): 22-28.

[4] 王月强.PHEV城市客车复合电源系统研究[D].北京:北京理工大学,2015.

[5] Wang Hongyu, Li Zhiming, Fang Yong. Study on high voltage power up down control strategy of pure electric vehicles[C]//Proceedings of 2015 IEEE 6th International Conference on Software Engineering and Service Science(ICSESS 2015), Beijing, 2015: 624-628.

[6] 王庆年,曲晓冬,于远彬,等.复合电源式混合动力公交车功率分配策略研究[J].汽车工程,2014,36(4):389-393.

Wang Qingnian, Qu Xiaodong, Yu Yuanbin, et al. Research on power allocation strategy of hybrid power bus with composite power supply[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(4): 389-393.

[7] 胡春花.纯电动大客车复合电源系统能量管理关键技术研究[D].镇江:江苏大学,2012.

[8] Erdinc O, Vural B, Uzunoglu M. A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system[J]. Journal of Power Sources, 2009, 194(1): 369-380.

[9] Zhang Xi, Mi C C, Masrur A, et al. Wavelet-transform-based power management of hybrid vehicles with multiple on-board energy sources including fuel cell, battery and ultracapacitor[J]. Journal of Power Sources, 2008, 185(2): 1533-1543.

[10] Dusmez S, Khaligh A. A supervisory power-splitting approach for a new ultracapacitor-battery vehicle deploying two propulsion machines[J]. IEEE Transa-

- ctions on Industrial Informatics, 2014, 10(3): 1960-1971.
- [11] 张潇华. 插电式混合动力汽车复合电源系统集成优化方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [12] Bracco S, Delfino F, Pampararo F, et al. A dynamic optimization-based architecture for polygeneration microgrids with tri-generation, renewables, storage systems and electrical vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 96: 511-520.
- [13] Xu Liangfei, Yang Fuyuan, Li Jianqiu, et al. Real time optimal energy management strategy targeting at minimizing daily operation cost for a plug-in fuelcell city bus[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37: 15380-15392.
- [14] Kim N, Cha S, Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on pontryagin's minimum principle[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(5): 1279-1287.
- [15] Dib W, Serrao L, Sciarretta A. Optimal control to minimize trip time and energy consumption in electric vehicles[C]//2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago, IL, USA, 2011: 1-8.
- [16] Miniguano H, Raga C, Barrado A. A comparative study and parameterization of electrical battery models applied to hybrid electric vehicles[C]//IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Toulouse, France, 2017: 12-17.
- [17] Miniguano H, Raga C, Barrado A, et al. A comparative study and parametrization of electrical battery models applied to hybrid electric vehicles[C]//2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Toulouse, France, 2017: 1-6.
- [18] Garcia P, Torreglosa J P, Fernandez L M, et al. Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(11): 9368-9382.
- [19] Stockar S, Marano V, Canova M A, et al. Energy-optimal control of plug-in hybrid electric vehicles for real-world driving cycles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(7): 2949-2962.

---

#### 作者简介

李峰 男, 1994年生, 硕士研究生, 研究方向为混合储能系统能量管理策略。

E-mail: 17126003@bjtu.edu.cn (通信作者)

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、节能、高速列车系统优化设计等。

E-mail: zhpyang@bjtu.edu.cn

(编辑 赫蕾)