

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L70661

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

诸斐琴 杨中平 林 飞 夏 欢

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要 电池寿命过短和配置空间有限是现代有轨电车储能系统应用存在的重要问题, 给其能量管理策略和容量配置方法的设计带来了挑战。该文首先对影响电池寿命的因素进行了分析, 建立了寿命估计模型。针对电池与超级电容混合储能系统, 提出了基于加速时间预测的能量管理策略: 根据车辆加速时间计算超级电容的实际可用功率, 进而决定电池和电容的功率分配。该策略基于有轨电车运行周期性确定加速时间预测窗口, 并充分考虑超级电容放电时间。仿真和实验验证了该策略具有充分利用超级电容能量和减弱电池寿命衰减的良好效果。同时, 分别基于基本阈值策略和加速时间预测控制策略进行优化容量配置, 分析不同控制策略对容量配置结果的影响。结果表明该文的策略通过降低超级电容的配置要求以及延长电池寿命实现了全寿命周期成本的降低。

关键词: 有轨电车 混合储能 加速时间预测 能量管理 容量配置

中图分类号: TM921

Research on Acceleration-Time-Prediction-Based Energy Management and Optimal Sizing of Onboard Energy Storage System for Modern Trams

Zhu Feiqin Yang Zhongping Lin Fei Xia Huan

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

Abstract Short battery life and limited spacing are key problems in the application of energy storage system for modern trams, bringing challenges to the energy management design and capacity configuration. This paper firstly analyzes the influence factors of battery life, building an life estimation model based on depth of discharge(DOD). An acceleration-time-based control strategy considering is proposed for battery-supercapacitor hybrid energy storage system, in which the actual available power of supercapacitor is calculated based on the predicted acceleration time, so as to determine the power distribution between battery and supercapacitor. The proposed strategy determines the acceleration-time -prediction window based on the periodicity of tram's operation and takes the discharge time of supercapacitor into consideration. Both simulation and experiment verify that the proposed strategy maximizes the capacity utilization of supercapacitor, as a result of which the battery degradation is significantly reduced. In addition, this paper makes optimal capacity configurations based on the general rule-based strategy and the proposed strategy respectively to analyze the effect of control strategies on sizing results. Results show that the proposed strategy remarkably reduces the life cycle cost by decreasing supercapacitor configuration and prolonging battery life.

Keywords: Modern tram, hybrid energy storage, acceleration-time-prediction, energy management, capacity configuration

收稿日期 2016-08-20 改稿日期 2017-01-05

0 引言

现代有轨电车具有速度高、弹性灵活（模块化设计）、乘坐舒适、造价低、工期短等优点，将在城市交通中扮演越来越重要的角色，为缓解交通压力做出贡献。由于传统的架空接触网方式存在建设维护成本高、破坏城市美感的缺点，无网供电方式将得到更广泛的应用，其中车载储能供电方式投入成本低，且具有再生能量回收的功能，是未来有轨电车供电方式的重要选择。

在无网运行方式下，储能系统需要同时满足列车的全部功率和能量需求；而超级电容与电池混合储能系统结合了超级电容的快充快放和电池的高能量密度特点^[1]，相比于单一储能方式具有明显的优势。但是电池寿命过短以及车辆配置空间有限是制约储能式有轨电车性能的重要因素，因此需要同时从控制策略和容量配置两个方面进行优化设计。在能量管理策略方面，研究人员从储能器件、控制策略和负载特点的角度出发，提出了不同的控制方法。从储能器件特性的角度，提出了电池提供平均功率、超级电容提供峰值功率的阈值分配方法^[2]以及电池提供低频分量、电容提供高频分量的频域分配方法^[3,4]。然而这些方法仅依据直观经验，其控制效果不是最优的，并且对不同的负载不具有普适性。从控制策略的角度，文献^[5]依据分配准则的不同（直观/最优），以及控制实时性差异等特点对经典的控制策略进行了分类。然而这些经典策略都存在一定的缺陷，需要根据应用场合进行策略的改进与结合；而不失实时性的前提下改进优化效果是研究的难点。在动力车辆应用中，学者们依据位置、速度、动能等物理参数提出了针对车辆的 ESS 能量管理方法。文献^[6]提出了一种基于位置的模糊功率管理方法，进行短期和长期能量预测，输入模糊控制器中，决定 ESS 最终功率。但该方法中基于位置的预测窗口长度是一定的，而实际车辆的加速、惰行和制动距离随着线路条件和车辆级位而改变，因此预测的能量峰值与实际存在偏差。文献^[7,8]将车辆的动力学方程与超级电容的输出特性相结合，并根据车速来确定超级电容的荷电状态（State of Charge, SOC）参考值/电压参考值。然而，牵引能量和制动能量不仅与车速有关，在不同阻力下其需求的能量也不相同，因此仅依据车速难以确定超级电容 SOC 的最佳值。

以上文献虽然考虑了电池、超级电容以及负载车辆的一些特点，但是都没有从负载持续时间和储能器件 E/P 参数匹配的角度进行控制策略设计。对现代有

轨电车而言，加速/制动时间是综合了车速、级位、阻力等参数得到的结果，具有更大的参考价值。因此，本文提出了一种基于加速时间预测的混合储能系统能量管理策略：以每次车辆启动至下一站为预测窗口，进行加速时间预测，并根据预测的时间值进行功率分配。这种方法依据有轨电车功率周期性调整预测窗口，对能量波动具有更完整的预测；并且充分考虑了超级电容的充放电时间对其实际最大功率的影响，可实现对超级电容能量更为合理的利用。

在容量配置方面，关键在体积与寿命、节能效率（损耗、再生能量回收）之间的权衡，而控制策略对容量配置结果也会产生重要的影响。文献^[9,10]表明，控制策略设计不合理将导致储能系统过配置的问题；而改进/优化的策略可以有效减少配置重量和成本。因此，为设计长寿命、低成本的混合储能系统，控制策略优化、容量配置优化以及两者的合理匹配都是不可或缺的。本文以全寿命周期为优化目标，设计容量配置优化算法进行求解，并对不同控制策略下的配置结果进行比较分析。

1 能量管理对电池寿命影响分析

1.1 电池寿命估算

电池寿命衰减可根据其供电能力衰减、内阻增加和容量衰减程度来定义。对于高能量密度电池，通常认为当其实际容量衰减为初始容量的 80% 时，寿命终止。电池寿命衰减受到多种因素的影响^[11]，如温度、充放电倍率、放电深度、SOC 范围等^[12]。对于不同电池其影响程度也各有不同，因此难以建立精确的寿命模型。然而，可以通过一些指标来作为电池寿命衰减的度量，本文重点对电池方均根（RMS）电流和放电深度进行分析。

1) RMS 电流。

电池电流的 RMS 定义如式（1）所示，其大小反映了电池的发热程度，因此可作为衡量寿命衰减的一个因素。

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_b^2(t) dt} \quad (1)$$

式中， I_{rms} 为电池方均根电流； T 为时间； i_b 为电池电流瞬时值。

2) 放电深度（Depth of Discharge, DOD）。

电池放电深度为电池在使用过程中放电容量占其额定容量的百分比，如式（2）所示。

$$\text{DOD} = \frac{C_{\text{dis}}}{C_{\text{rate}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中， C_{dis} 为电池放电容量； C_{rate} 为电池额定容量。

3) 电池寿命估算模型。

为更加准确地计算电池寿命，人们提出了许多不同的计算方法，包括循环计数法、安时输入法、电化学模型方法等。本文采用循环计数法对电池寿命进行估计，重点考虑放电深度对电池寿命的影响^[13]。表 1 列出了电池在不同放电深度下的可循环次数^[14]。

表 1 电池最大循环次数与放电深度的关系

Tab.1 The relationship between battery's maximum cycle number and depth of discharge(DOD)

DOD(%)	N_{cft}
10	70 000
20	31 000
30	18 100
40	11 800
50	8 100
60	5 800
70	4 300
80	3 300
90	2 500

对表 1 的数据进行拟合，得到电池最大循环次数 (N_{cft}) 与放电深度的关系为

$$N_{cft}(DOD) = 8.927 \times 10^5 \times DOD^{-1.076} - 4877 \quad (3)$$

用雨滴计数法计算不同放电深度下的循环次数

$N_{cyc}(DOD)$ ，代入式(4)计算电池的寿命衰减 LOL_{batt} 。

$$LOL_{batt} = \sum \frac{N_{cyc}(DOD_{batt})}{N_{ctf}(DOD_{batt})} \quad (4)$$

假设有轨电车每年运行 360 天，每天运行 10 h，每小时来回一次，则电池使用寿命为

$$Life_{batt} = \frac{1}{2 \times 10 \times 360 \times LOL_{batt}} \quad (5)$$

1.2 基于加速时间预测的能量管理策略

在混合储能系统能量管理策略中，基于规则的阈值分配策略由于简单实用，得到人们的认可。其基本分配原理是将电池的充放电功率限制在允许范围内，由超级电容提供负载的峰值功率，以减小对电池的冲击，即当 $|P_{train}| \leq |P_{th}|$: $P_b = P_{train}, P_{sc} = 0$; 当 $|P_{train}| > |P_{th}|$: $P_b = P_{th}, P_{sc} = P_{train} - P_{th}$ 。其中， P_{train} 、 P_b 、 P_{sc} 分别为列车功率、电池功率和超级电容功率； P_{th} 为功率分配阈值。

然而，这种方法存在的问题是超级电容的能量变化是被动的：如果负载峰值功率持续时间长或超级电容的初始 SOC 低，则其供电能力不足；反之，负载峰值功率持续时间短，造成电容能量的浪费。因此，有必要结合超级电容的 SOC 状况和负载工况预测，设计能量管理策略，对超级电容的能量进行合理地利用。本文提出一种基于加速时间预测的混合储能系统能量管理策略，其原理框图如图 1 所示，主要由加速时间预测模块和功率分配模块两部分组成。

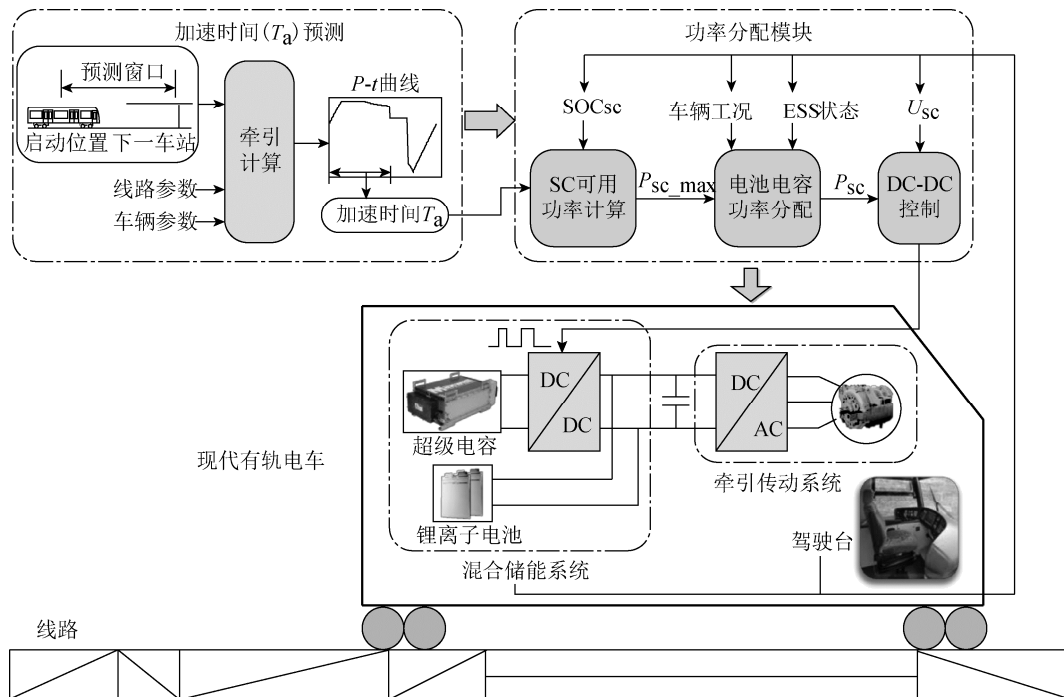


图 1 基于加速时间预测的能量管理策略结构原理框图

Fig.1 Schematic diagram of acceleration-time-prediction-based energy management strategy

1) 加速时间 (T_a) 预测模块

(1) 预测窗口

有轨电车在每个站间运行工况相似，具有一定的周期性。而由于站间距、线路坡度、弯道的差异，其不同区间的加速时间也存在较大差别，因此在正常行驶情况下，以从出发站到下一站为预测窗口，在每一站出发前进行加速时间预测并存表。此外，考虑到有轨电车路权不统一，可能出现意外停车等情况，此时以车辆重新启动的位置到下一站为一个预测窗口，进行预测结果的更新。

(2) 加速时间预算

有轨电车属于城市公共交通，其线路条件固定，因此基于已知的车辆、线路参数，根据车辆的动力学方程，在当前的预测窗口内进行牵引计算，可以得到车辆的功率—时间曲线，进而得到加速时间 T_a 。

2) 功率分配模块

(1) 超级电容可用功率计算

不同于脉冲式的短时高功率负载特性，有轨电车在加速时间内 (30~50 s) 都处于高功率牵引工况，为减小电池的放电倍率和放电深度，需要超级电容持续以一定放电功率工作。图 2 体现了负载时间变化对超级电容实际最大放电功率的影响^[15]。因此，超级电容实际最大放电功率由其剩余能量与放电时间所决定，即

$$P_{sc_max} = \frac{E_{sc_remain}}{T_{dis}} \quad (6)$$

式中， E_{sc_remain} 为超级电容剩余能量； T_{dis} 为放电时间； P_{sc_max} 为实际最大放电功率。

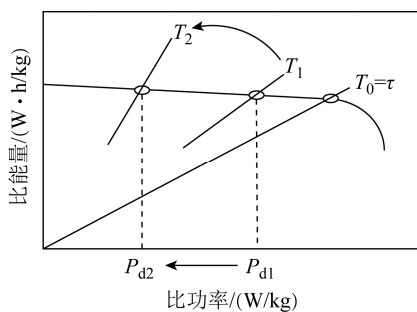


图 2 超级电容 Ragone 图

Fig.2 Ragone plot of supercapacitor

(2) 电池电容功率分配

电池电容的功率分配根据列车的运行工况进行调整。

车辆加速时， $t_{js_st}(k) \leq t \leq t_{js_end}(k)$ ，将超级电容实际最大放电功率作为功率分配阈值，如式 (7) 所示。

$$P_{sc}(t) = \min \left\{ \frac{E_{sc_tot} (SOC_{init}(k) - SOC_{min})}{T_{js}(k)}, P_{js}(t) \right\} \quad (7)$$

式中， $t_{js_st}(k)$ 和 $t_{js_end}(k)$ 分别为第 k 站加速起始和终止时间； E_{sc_tot} 为超级电容总储能量； SOC_{init} 为初始 SOC； SOC_{min} 为 SOC 下限； $T_{js}(k)$ 为第 k 站加速时间； $P_{js}(t)$ 列车加速功率。

在车辆匀速工况下， $t_{ys_st}(k) \leq t \leq t_{ys_end}(k)$ ，其功率需求较小，可完全由电池提供，即

$$\begin{cases} P_{sc}(t) = 0 \\ P_{bat}(t) = P_{ys}(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中， $P_{ys}(t)$ 为列车匀速运行功率； $t_{ys_st}(k)$ 、 $t_{ys_end}(k)$ 分别为第 k 站匀速工况起始、结束时间。

在制动工况下， $t_{zd_st}(k) \leq t \leq t_{zd_end}(k)$ ，为使超级电容在下次牵引时充分发挥作用，让超级电容首先以最大功率吸收再生能量，电池在其允许充电功率内补充剩余功率。

$$\begin{cases} P_{sc}(t) = -P_{sc_max}(t) \\ P_{bat}(t) = \max \{ P_{zd}(t) - P_{sc}(t), -P_{bat_max}(t) \} \end{cases} \quad (9)$$

式中， $t_{zd_st}(k)$ 和 $t_{zd_end}(k)$ 分别为第 k 站制动起始和终止时间； P_{bat_max} 为电池最大功率。

(3) DC-DC 控制

混合储能系统电路结构为半主动式，即电池直接与直流母线连接；而超级电容通过双向 DC-DC 连到直流母线上。根据上一级得到的超级电容功率指令以及电容当前电压计算电流参考值，经过电流环输出占空比指令，进而控制超级电容侧 DC-DC 实现功率的实时分配。

1.3 仿真分析

本节通过仿真分析混合储能系统的控制策略对电池寿命的影响。以 1.1 节中电池寿命影响因素及估算模型为指标，分别基于基本阈值策略和本文提出的基于加速时间预测的能量管理策略，在给定容量配置 (表 2) 和负载功率曲线 (图 3) 下，进行仿真计算，得到电池电容的运行曲线如图 4 所示，电池寿命相关参数见表 3。其中表 2 的储能系统配置为车重约束、功率平衡约束和两种分配方式下电池、超级电容正常工作条件约束 (充放电电流和 SOC 限制) 区域内的一个可行解。图 3 的车辆功率曲线是在牵引计算软件中利用最小时分算法计算所得，其车辆、线路参数与 2.2.1 节相同。仿真中车辆平均加速时间为 39 s；而加速时间最长在第 8 个区间，为 78 s。

表2 仿真给定储能系统配置

Tab.2 ESS configuration for simulation

名称	配置方式
电池	12P202S(160 kW·h)
超级电容	9P183S(5 kW·h)

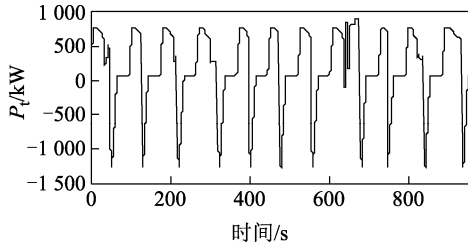
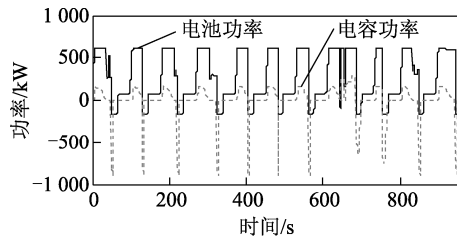
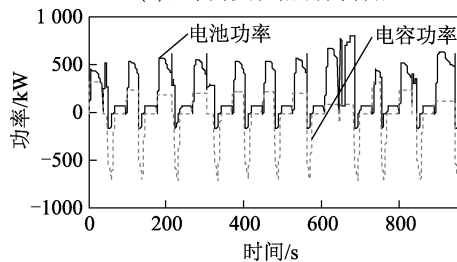


图3 仿真给定负载功率曲线

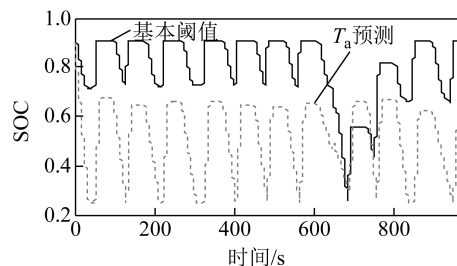
Fig.3 The power profile for simulation



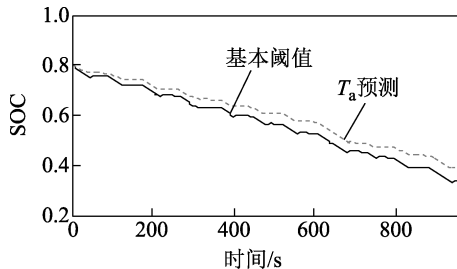
(a)基本阈值策略的功率分配



(b) T_a 预测的功率分配



(c)超级电容SOC曲线



(d)电池SOC曲线

图4 不同分配策略下电池电容的运行曲线

Fig.4 The running curves of battery and supercapacitor under different strategies

表3 电池寿命计算结果

Tab.3 Calculation results of battery life

计算指标	纯电池配置	基本阈值 功率分配	T_a 预测的功率分配
最大DOD(%)	55.4	46.7	41
RMS 电流/A	468	420	387
电池寿命/年	0.96	1.3	1.6

从图4c可以看到,在基本阈值策略下,超级电容起到满足峰值功率的辅助作用,除了第八个区间外,其SOC变化范围窄(0.7~0.9),能量未得到充分的利用;而在基于加速时间预测的控制策略下,超级电容的功率随着SOC大小和车辆加速时间而不断调整,因此在每个区间内超级电容都能在保证不过充过放的前提下释放/回收更多的能量,进而有效减小了电池的负担,有利于电池寿命的提升。

表3为纯电池配置、阈值分配策略下以及 T_a 预测功率分配下电池的最大放电深度、RMS电流和寿命估计值(考虑终点站充电过程)。可以看到,电池与电容混合配置相比于纯电池配置方式对电池寿命更为有利。而在混合配置下,基于加速时间预测的分配方式有效减小了电池的放电深度和RMS电流,电池寿命相比于基本阈值分配方式延长了0.3年。

2 储能系统容量配置

第1节通过仿真验证了所提出的基于加速时间预测的控制策略对延长电池寿命具有积极的作用。而由于电池、电容的配置容量也会影响其放电深度和充放电倍率,因此需要进一步考虑储能系统配置容量与寿命之间的权衡问题。本节综合考虑储能系统寿命、配置容量以及能量效率,以全寿命周期成本为目标,设计容量配置优化算法,对具体算例进行求解,并分析不同控制策略对容量配置结果的影响。

2.1 容量配置优化问题描述

优化问题由目标函数 $f(x)$ 、约束区域 Ω 和决策变量 x 组成,可表述为

$$\begin{aligned} \min & f(x) \\ \text{s.t.} & x \in \Omega \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $\Omega = \{x \in R^n \mid h(x) = 0, g(x) \geq 0\}$ 。

1) 优化目标。

容量配置的优化目标为系统全寿命周期成本,包括10年内电池配置成本、超级电容配置成本和车辆耗电成本,储能系统价格与工业用电价格见表4。

表 4 储能系统与用电价格

Tab.4 The price of ESS and electricity

类型	电池	超级电容	电费
价格/(元/kW·h)	3 000	2 200 000	0.79

2) 决策变量。

容量配置的决策变量为电池、电容串并联数量，即

$$\mathbf{x} = [N_{bp}, N_{bs}, N_{scp}, N_{scs}]$$

式中， N_{bp} 、 N_{bs} 分别为电池并联数和串联数； N_{scp} 、 N_{scs} 分别为超级电容串联数和并联数。

3) 约束条件。

需要满足的约束条件有列车全线运行任意时刻的功率平衡方程、储能系统的工作条件约束以及车辆轴重限制^[16]。

功率平衡方程，即列车牵引时电池、电容的总功率输出满足列车运行的功率需求。

$$P_{bat}(t) + P_{sc}(t) = P_{need}(t) \quad P_{need}(t) \geq 0 \quad (11)$$

储能系统工作条件约束，即电池、电容的能量、电流、电压都在正常工作范围内。

$$\begin{cases} SOC_{bat/sc_min} \leq SOC_{bat/sc}(t) \leq SOC_{bat/sc_max} \\ I_{bat/sc_min} \leq I_{bat/sc}(t) \leq I_{bat/sc_max} \\ V_{bat/sc_min} \leq V_{bat/sc}(t) \leq V_{bat/sc_max} \end{cases} \quad (12)$$

式中， SOC_{bat/sc_min} 、 SOC_{bat/sc_max} 、 I_{bat/sc_min} 、 I_{bat/sc_max} 、 V_{bat/sc_min} 、 V_{bat/sc_max} 分别为电池/超级电容 SOC、电流、电压的下限和上限； $SOC_{bat/sc}$ 、 $I_{bat/sc}$ 、 $V_{bat/sc}$ 分别为电池/超级电容 SOC、电流和电压实时值。

车辆轴重限制，即配置储能系统后车辆的总重在允许范围内。

$$M_b + M_{sc} + M_{AW3} \leq nM_{axle} \quad (13)$$

式中， M_b 、 M_{sc} 分别为电池、超级电容重量； M_{AW3} 为 AW3 载客列车重量（不含储能系统）； n 为轴数； M_{axle} 为列车轴重。

4) 优化算法。

由于优化变量（电池、电容的串并联数量）为整数，电池和超级电容电路模型、寿命模型都是非线性的，因此该问题属于非线性离散规划问题，解析方法和数值梯度方法都不适用。遗传算法是属于随机搜索算法，通用性强，对函数的连续性、可微性没有要求^[17]，因此本文采用遗传算法进行容量配置优化问题的求解。

遗传算法模拟种群自然进化的过程，通过选择、交叉和变异算子，生成新一代的种群。根据优胜劣汰的原理，新一代种群与上一代种群相比，具有更高的适应度函数值。经过多次迭代，可以得到所求的优化方案。

2.2 容量配置算例分析

本节结合实际有轨电车线路和车辆参数，选取一定型号的电池和超级电容单体，分别基于基本阈值分配策略和加速时间预测策略进行优化容量配置。

2.2.1 算例参数

1) 储能系统参数

电池和超级电容参数见表 5。电池型号为 A123 公司的 AMP20M1HD-A 磷酸铁锂电池；超级电容选用 MAXWELL 公司的 BCAP3000 单体。

表 5 电池与超级电容基本参数

Tab.5 Parameters of battery and supercapacitor

参数	数值	
	电池	超级电容
额定电压/V	3.3	2.7
额定容量	20 A·h	3 000 F
最大连续电流/A	200(放电), 20(充电)	210
单体质量/kg	0.495	0.51
成组质量	加倍	加倍

2) 车辆与线路参数

算例选用的有轨电车车辆参数见表 6。选用的有轨电车线路全长 8.35 km，共有 12 个车站，最大坡度 40‰。在车辆限速为 70 km/h，AW2 负载下进行牵引计算，得到功率—时间曲线如图 5 所示。

表 6 有轨电车车辆参数

Tab.6 Vehicle parameters

名称	值
列车编组	Mc1+T+M+Mc2
空车重量/t	53
载客量(AW2)/人	309
车轴数	8
最大轴重/t	10

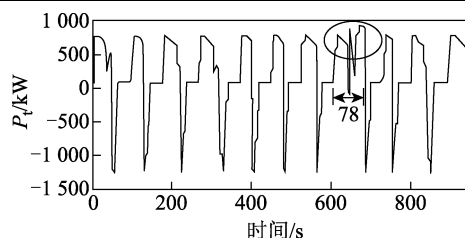


图 5 车辆功率—时间曲线

Fig.5 Vehicle's power profile

2.2.2 优化结果

表7为基于基本阈值分配策略和基于 T_a 预测分配策略下的容量配置优化方案。从表7可以看到，基于两种不同控制策略的最优配置结果存在较大的差异：在基本阈值策略下，电池放电功率受到阈值(4C)的限制，而第8个区间由于存在长大坡道，车辆功率一直较大(图5)，导致峰值能量高，超级电容过配置。在 T_a 预测策略下，超级电容最佳配置近似于其在车辆制动时回收的再生能量：在无中间充电站的条件下，其容量在每站都得到充分的发挥，实现站间能量均衡。并且适当地增大了电池容量使得在相同负载功率下放电深度和充放电倍率低，延长了电池的寿命。

表7 两种功率分配方式下的容量配置优化方案

Tab.7 The optimal configuration results under the two strategies

功率分配策略		基本阈值	加速时间预测
配置方案	电池	8P224S (118.3 kW·h)	15P215S (213 kW·h)
	超级电容	16P190S (9.2 kW·h)	9P194S (5.3 kW·h)
储能系统寿命	电池	1.1年	2.5年
	超级电容	10年	10年

表8为两种功率分配方式下的十年配置成本：基于 T_a 预测控制的全寿命周期配置成本比基于基本阈值控制的全寿命周期成本低136万元。虽然基于 T_a 预测分配策略下电池初次配置容量大，但是由于其寿命得到了延长，大大减小了更换次数，降低了配置成本。而在基本阈值策略下超级电容出现过配置，并且其能量除了第八个区间外都未能充分利用，电池负载强度大，寿命短，因此造成储能系统十年配置成本非常高。从电价来看，两种策略下大部分再生能量得到回收，耗电成本相当。

表8 两种功率分配方式下的十年配置成本

Tab.8 Ten-year Cost under the two strategies

	(单位: 万元)			
	电池成本	超级电容成本	电价	总成本
基本阈值策略	319	203	356	878
T_a 预测策略	255	116	371	742

从以上优化结果可以看到：一方面，不同的能量管理策略下电池和超级电容的功率、能量约束条件发生变化，不合理的分配方式将导致苛刻的约束

条件；另一方面，储能系统寿命受到控制策略和容量配置共同影响，在配置空间有限的条件下改进控制策略将对电池寿命延长带来显著的帮助，进而降低其更换成本。本文在所提出的基于加速时间预测的控制策略下设计容量配置优化算法，仿真结果有效验证了其降低全寿命周期配置成本的良好效果。

3 实验验证

对本文提出的基于加速时间预测的能量管理策略进行试验验证。实验平台如图6所示，由超级电容模组、电池模组、双向DC-DC变流器以及列车模拟系统组成。双向DC-DC用于连接超级电容与直流母线，实现对超级电容的电流控制。列车模拟系统由PWM整流器和调压器组成，通过控制PWM整流器电流大小与方向来模拟列车的不同运行工况。本实验中的列车电流曲线如图7所示，其中加速时间为40s。实验平台的电路参数和储能器件参数见表9。

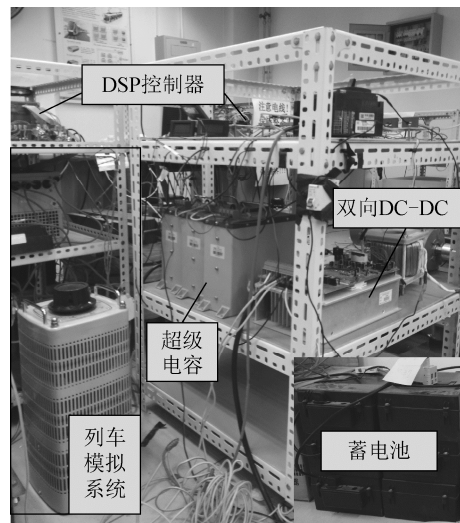


图6 混合储能系统实验平台

Fig.6 The experimental platform of hybrid energy storage system

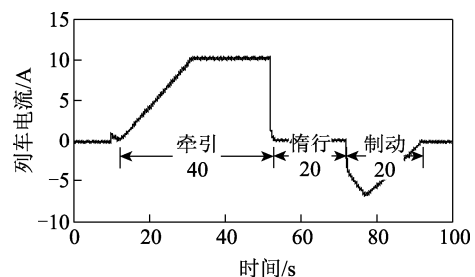


图7 列车电流曲线

Fig.7 The simulated train's current curve

表 9 实验平台参数

Tab.9 Parameters of the experimental platform

参数	数值	
电路	母线电压/V	300
	DC-DC 开关频率/kHz	5
储能系统	额定电压(电池)/V	300
	额定电压(超级电容)/V	250
	额定容量(电池)/(A·h)	20
	额定容量(超级电容)/F	9.6

图 8 分别为基本阈值分配策略和基于加速时间预测的分配策略下电池、超级电容的电流曲线、超级电容的电压曲线。可以看到，相比于基本阈值分配策略，基于加速时间预测的分配策略下的超级电容能量得到了更加充分的利用。表 10 对比了两种策略下的超级电容 SOC 变化范围、电池 RMS 电流和电池放电深度。在加速时间预测的控制策略下，电池的 RMS 电流和放电量都有显著的降低，对延缓电池寿命衰减起到有效的作用。

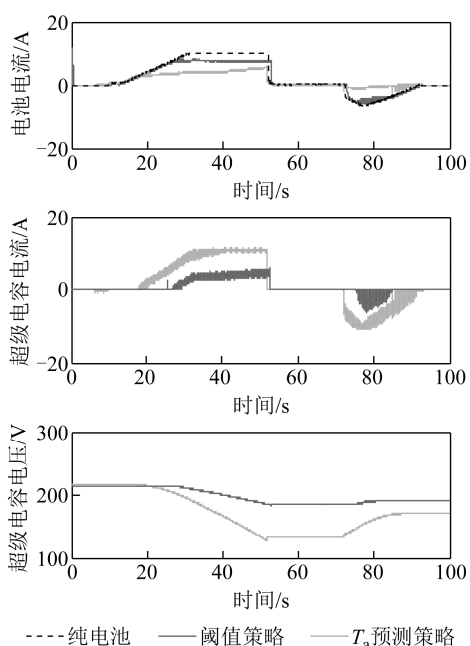


图 8 电池、电容运行曲线

Fig.8 The running curves of battery and supercapacitor

表 10 实验结果对比

Tab.10 Comparison of experimental results

参数	纯电池	基本阈值控制策略	加速时间预测策略
超级电容 SOC 变化范围	—	0.21	0.49
电池 RMS 电流/A	5.6	4.5	2.5
电池放电量/(A·h)	0.086 2	0.069 3	0.041 6

4 结论

本文提出了一种基于加速时间预测的现代有轨电车混合储能系统能量管理方法，通过预测车辆站间加速时间，对超级电容的放电功率进行调整。仿真表明，相比于基本阈值分配策略，该策略通过合理利用超级电容能量，减小电池充放电深度和充放电倍率，使得电池寿命延长约 0.3 年。本文设计了容量配置优化算法，分析了不同控制策略对储能系统容量配置的影响。优化结果表明，相比于基本阈值分配策略，基于本文的控制策略得到的配置方案减少了电容配置成本和电池更换次数，使得全寿命周期成本降低了 136 万元。后续研究中将考虑有轨电车司机目视驾驶模式下的功率随机性，通过提高预测窗口更新的频率（每隔时间 dT 更新为新的预测窗口 $v(t_0) \rightarrow v_{max}$ ）来实现更加准确的加速时间预测和超级电容可用功率调整。

参考文献

[1] 张川, 杨雷, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.
Zhang Chuan, Yang Lei, Niu Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154.

[2] Mesbahi T, Rizoug N, Bartholome P, et al. A new energy management strategy of a battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicular applications[C]//7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2014: 1-7.

[3] Akli C R, Roboam X, Sareni B, et al. Energy management and sizing of a hybrid locomotive[C]//2007 European Conference on Power Electronics and Applications, 2007: 1-10.

[4] 李武华 徐驰, 禹红斌, 等. 直流微网系统中混合储能变频协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 84-92.
Li Wuhua, Xu Chi, Yu Hongbin, et al. Frequency dividing coordinated control strategy for hybrid energy storage system of DC micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,

- 31(14): 84-92.
- [5] Lino G, Antonio S. Vehicle propulsion systems[M]. Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [6] Talla J, Streit L, Peroutka Z, et al. Position-based T-S fuzzy power management for tram with energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3061-3071.
- [7] Ciccarelli F, Iannuzzi D, Tricoli P. Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 24: 36-49.
- [8] Ming Tingyou, Deng Weiwen, Wu Jian, et al. A hierarchical energy management strategy for battery-supercapacitor hybrid energy storage system of electric vehicle[C]//2014 Asia-pacific IEEE Transportation Electrification Conference & Expo, 2014: 5.
- [9] Shen J, Dusmez S, Khaligh A. Optimization of sizing and battery cycle life in battery/ultracapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2112-2121.
- [10] Araujo R E, De Castro R, Pinto C, et al. Combined sizing and energy management in EVs with batteries and supercapacitors[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(7): 3062-3076.
- [11] Stroe D I, Swierczynski M, Stan A I, et al. Accelerated lifetime testing methodology for lifetime estimation of lithium-ion batteries used in augmented wind power plants[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 4006-4017.
- [12] 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, et al. 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.
- [13] 娄素华, 易林, 吴耀武, 等. 基于可变寿命模型的电池储能容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 265-271.
Lou Suhua, Yi Lin, Wu Yaowu, et al. Capacity configuration optimization of battery energy storage based on lifetime predication[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 265-271.
- [14] Herrera V I, Gazta H, Milo A, et al. Optimal energy management of a battery-supercapacitor based light rail vehicle using genetic algorithms[C]// 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2015: 1359-1366.
- [15] Christen T, Carlen M W. Theory of Ragone plots[J]. Journal of Power Sources, 2000, 91(2): 210-216.
- [16] Ostadi A, Kazerani M. A comparative analysis of optimal sizing of battery-only, ultracapacitor-only, and battery-ultracapacitor hybrid energy storage systems for a city bus[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10): 4449-4460.
- [17] Arora J S. Introduction to optimum design [M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2004: 531-542.

作者简介

诸斐琴 女, 1993 年生, 博士研究生, 研究方向为城市轨道交通储能系统。

E-mail: 15117405@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牵引传动技术和节能技术。

E-mail: zhpyang@bjtu.edu.cn

(编辑 赫蕾)