

# 储能式有轨电车能量管理策略多目标优化

杨继斌<sup>1</sup>,张继业<sup>1</sup>,宋鹏云<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室,成都 610031;

2. 西南民族大学电气信息工程学院,成都 610041)

**摘要:**研究了以电网、动力电池和超级电容为动力电源的储能式混合动力有轨电车。首先介绍该类有轨电车的混合动力系统结构,提出一种基于系统工作模式的逻辑门限式能量管理策略,通过多个控制参数实现工作模式的切换。针对能量管理策略中控制参数的不确定性,将整车车载电源的最小配置成本以及列车运行的能耗、准时性、准地点停车作为优化目标,应用多目标遗传算法对影响列车动力性能的主要能量管理策略控制参数进行了优化分析。结果表明,优化后列车的牵引运行能耗减少了约6.8%,再生制动能量的回收率提高了约2.4%。同时,通过优化得到了电源的最小配置,为电源的冗余配置提供参考。

**关键词:**储能式有轨电车;能量管理;多目标优化;遗传算法

## Multi-objective Optimization of Energy Management Strategy for A Tramway with Onboard Energy Storage System

YANG Jibin<sup>1</sup>, ZHANG Jiye<sup>1</sup>, SONG Pengyun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. College of Electrical & Information Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** A tramway with an onboard energy storage system is studied with catenary, battery and ultracapacitor as power supply. The structure of tramway hybrid system is introduced, an energy management strategy is proposed based on system operation mode, switching from a number of control parameters. Due to the uncertainty of the control parameters in the energy management strategy, the multi-objective genetic algorithm(GA) is applied to optimize the control parameters in the control strategy, the minimum cost of energy storage system, the energy consumption of tramway operation, punctuality and tramway precision stop are taken as the optimization goals. Optimization results show that the traction operation energy consumption of the optimized tramway is reduced by about 6.8%, and the recovery rate of regenerative braking energy is increased by about 2.4%. Meanwhile, the minimum configuration of the energy storage system is obtained by optimization, which provides the reference for the redundant configuration of the power system.

**Keywords:** tramway with energy storage system; energy management strategy; multi-objective optimization; genetic algorithm(GA)

近年来现代有轨电车经过技术改革和创新,成为解决城市交通问题的重要交通工具<sup>[1-2]</sup>。储能式有轨电车将储能设备作为动力电源,采用区间内架空接触网或部分区段架设接触网的供电方式,解决

了有轨电车无接触网运行的供电方式,提升了城市的美观,同时回收了大量的再生制动能量<sup>[2-4]</sup>。

由高比能量的动力电池和高比功率的超级电容组成的车载储能系统 ESS(energy storage system)已得到了大量的研究与应用<sup>[4-7]</sup>,多能源增加了列车电源容量的同时,增加了系统工作模式和控制复杂性。为实现各种工作模式的切换、提高电源系统的工作效率,达到列车的整体性能最优,需要通过

收稿日期:2017-05-29;修回日期:2017-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572264)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(11572264)

合理的能量管理策略来完成<sup>[7-8]</sup>。近年来国内外学者对混合动力轨道车辆的能量管理策略进行了相关的研究与应用<sup>[4,7,9-15]</sup>,文献[3-4]分别提出了基于模糊控制和基于逻辑门限的储能式混合动力列车能量管理策略,但未对其参数进行优化;文献[7]考虑车载 ESS 的寿命成本,对能量管理策略的控制参数进行了优化分析;文献[10-11]提出了应用于内燃/动力电池机车的能量管理策略;文献[12-15]对一类燃料电池混合动力有轨电车的能量管理策略进行了研究分析。在这些储能式有轨电车的能量管理策略研究中,均没有将有轨电车运行的准时性、准地点停车等轨道交通车辆运行目标进行考虑并优化。

本文针对以电网、动力电池和超级电容为动力源的储能式有轨电车,通过介绍该类有轨电车的混合动力系统结构及运行特点,提出了基于系统工作模式的能量管理策略,考虑车载 ESS 的最小配置成本以及列车运行的能耗、准时性、准地点停车目标,应用多目标遗传算法,对能量管理策略的控制参数进行优化,最后以某国产在研储能式有轨电车为原型车进行了优化分析。

## 1 混合动力系统结构

本文研究的储能式有轨电车混合动力系统结构如图 1 所示。系统主要由受电弓、动力电池、超级电容、双向 DC/DC 直流变换器、DC/AC 牵引变流器、牵引电机、辅助变流器以及系统能量管理控制器组成。

在该混合动力系统中,当列车在有网区时,列车通过受电弓接入电网为列车提供能量,同时可通过双向 DC/DC 直流变换器分别为动力电池和超级电容充电;当列车在无网区时,动力电池和超级电容通过双向 DC/DC 直流变换器接入直流母线提供列车所需的能量;当列车制动时,可通过动力电池和超级电容回收再生制动能量。该混合动力系统拓扑结构的可控性较好<sup>[3-4]</sup>,可实时控制动力电池和超级电容的输入输出,各动力源的输入输出均通过能量管理控制器中合理的能量管理策略来实现。

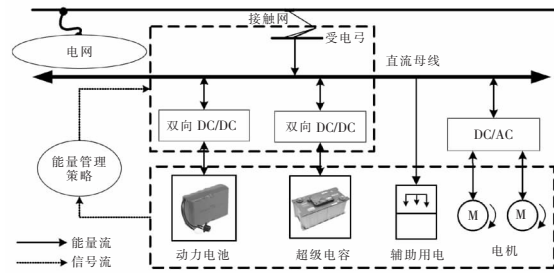


图 1 混合动力系统结构

Fig.1 Configuration of hybrid system

## 2 基于系统工作模式的能量管理策略

根据列车牵引运行的需求功率大小、有无接触网、车载 ESS 的最大输入输出功率以及车载 ESS 的工作状态,定义了混合动力系统的 5 个工作模式。为便于分析,定义  $P_{bus}$  为传递至直流母线的车载 ESS 实际牵引功率或制动功率; $P_{bus}^*$  为直流母线端车载 ESS 的需求牵引功率或制动功率; $P_{net}$  为电网的实际输出功率; $P_{uc}$ 、 $P_{batt}$  分别为超级电容和动力电池的实际输出功率,值为正时表示放电状态,值为负时表示充电状态; $\eta_{dc}$  为 DC/DC 直流变换器的效率;在有网区制动时,动力电池和超级电容不通过电网充电,只回收再生制动的能量,即有网区和无网区制动时的工作模式相同。工作模式定义如下。

**模式 A:** 有网牵引模式,列车受电弓接入接触网为列车提供动力源,同时为车载 ESS 充电。假设电网能完全满足直流母线的牵引需求功率,此时  $P_{bus}=P_{net}=P_{bus}^*$ 。

**模式 B:** 低功率牵引模式,列车在区间内无网运行,且牵引需求功率较低,由动力电池单独提供需求功率,此时  $P_{bus}=P_{batt}\eta_{dc}$ 。

**模式 C:** 高功率牵引模式,列车在区间内无网运行,且牵引需求功率较大,动力电池和超级电容共同提供需求功率,此时  $P_{bus}=(P_{batt}+P_{uc})\eta_{dc}$ 。

**模式 D:** 低功率制动模式,列车制动功率较低,优先给超级电容回馈充电,此时  $P_{bus}=P_{uc}/\eta_{dc}$ 。

**模式 E:** 高功率制动模式,列车制动功率较大,同时给超级电容和动力电池充电,此时  $P_{bus}=(P_{uc}+P_{batt})/\eta_{dc}$ 。

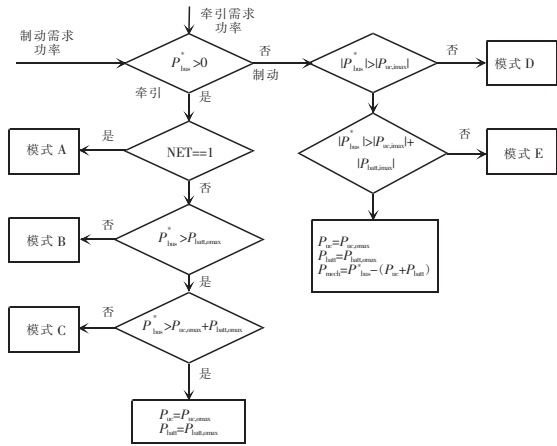


图 2 基于系统工作模式的能量管理策略控制流程

Fig.2 Flow chart of energy management strategy based on system operation mode

基于上述系统工作模式的能量管理策略的控制流程如图 2 所示。图中,NET 为电网信号,1 为有网,否则无网, $P_{uc,max}$  为超级电容最大输出功率, $P_{uc,max}$  为超级电容最大输入功率, $P_{batt,max}$  为动力电池最大输出功率, $P_{batt,max}$  为动力电池最大输入功率, $P_{mech}$  为机械制动功率。其他主要控制参数还包括:动力电池的荷电状态 SOC (state of charge) 上、下限阈值  $SOC_{max}$  和  $SOC_{min}$ ; 超级电容的能量状态 SOE (state of energy) 上、下限阈值  $SOE_{max}$  和  $SOE_{min}$ 。这些控制参数均由车载 ESS 的特性和工程经验确定。

### 3 基于多目标遗传算法的控制参数优化

在基于系统工作模式的能量管理策略中,控制参数根据经验设定,常比较保守,且不考虑整车运行的全局性因素。基于多目标能量管理策略优化的方法在混合动力系统中已得到了大量的研究,主要应用的方法有序列二次规划算法、模拟退火算法、粒子群优化算法和遗传算法等<sup>[6]</sup>。本文应用遗传算法,对基于系统工作模式的能量管理策略控制参数进行优化分析。

#### 3.1 优化目标

本文考虑车载 ESS 的最小配置成本以及列车

运行的能耗、准时性、准地点停车目标,对储能式有轨电车的能量管理策略控制参数进行多目标优化。优化中各目标间存在相互竞争、相互冲突的关系,如列车运行能耗的降低可能会导致列车动力性能的降低。优化的数学模型表示为

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{x}) = \left[ \frac{f_{cost}(\mathbf{x})}{f_{cost,max}}, \frac{f_{energ}(\mathbf{x})}{f_{energ,max}}, \frac{f_{time}(\mathbf{x})}{f_{time,max}}, \frac{f_{place}(\mathbf{x})}{f_{place,max}} \right] \\ \text{s.t.} \begin{cases} g_i(\mathbf{x}) \geq 0 & i=1,2,\dots,q_1 \\ h_j(\mathbf{x}) = 0 & j=1,2,\dots,q_2 \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}=(x_1,x_2,\dots,x_n) \in X \subset R^n$  为优化变量; $f_{cost}(\mathbf{x})$  和  $f_{cost,max}$  分别为车载 ESS 的成本函数和其最大值; $f_{energ}(\mathbf{x})$  和  $f_{energ,max}$  分别为有轨电车运行的能耗评价函数和其最大值; $f_{time}(\mathbf{x})$  和  $f_{time,max}$  分别为满足有轨电车运行的准时性评价函数和其最大值; $f_{place}(\mathbf{x})$  和  $f_{place,max}$  分别为满足有轨电车运行的准地点停车的评价函数和其最大值。其中, $f_{cost,max}$  根据列车重量、放置空间等约束条件所允许的最大配置确定;在假设动力源完全满足的情况下, $f_{energ,max}$  为列车以其最大加速能力、最大速度运行完全程的能耗; $f_{time,max}$  根据列车在一条线路上运行的最小运行时间和最大运行时间确定; $f_{place,max}$  为列车到站停车的实际位置和准确位置之间的最大累积误差; $g_i(\mathbf{x})$  和  $h_j(\mathbf{x})$  均为评价函数分别需满足  $q_1$  个不等式约束和  $q_2$  为等式约束条件。

能量管理策略中动力电池和超级电容的输出功率门限值决定了功率分配的比例,最优门限值决定了车载 ESS 的最小容量配置。则车载 ESS 成本函数为

$$f_{cost} = C_{ost,bat} N_{bat,Box} E_{bat,u} + C_{ost,uc} N_{uc,Box} E_{uc,u} \quad (2)$$

式中: $C_{ost,bat}$  和  $C_{ost,uc}$  分别为单体动力电池和超级电容的成本, $\text{¥/kW} \cdot \text{h}^{[7]}$ ;  $N_{bat,Box}$  和  $N_{uc,Box}$  分别为整车动力电池和超级电容的总单体数量,根据优化变量迭代求解; $E_{bat,u}$  和  $E_{uc,u}$  分别为动力电池和超级电容单体存储的能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

在整车运行过程中,能耗评价函数为

$$f_{energ} = E_{cat,trc} + E_{bat,trc} + E_{uc,trc} - \left( \frac{E_{bat,rec}}{\eta_{bat}} + \frac{E_{uc,rec}}{\eta_{uc}} \right) \quad (3)$$

式中, $E_{cat,trc}$ 、 $E_{bat,trc}$  和  $E_{uc,trc}$  分别为电网、动力电池和超

级电容的牵引能耗,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $E_{\text{bat,rec}}$  和  $E_{\text{uc,rec}}$  分别为动力电池和超级电容回收的再生制动能量  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $\eta_{\text{bat}}$  和  $\eta_{\text{uc}}$  分别为动力电池和超级电容的充电效率。

在有轨电车运行中,需满足准时性的要求。准时的评价函数为

$$f_{\text{time}} = |T_{\text{act}} - T_{\text{plan}}| \quad (4)$$

式中,  $T_{\text{act}}$ 、 $T_{\text{plan}}$  分别为列车到站的实际运行时间和列车的准点时间,  $\text{s}$ 。

准时性约束条件为:最小运行时间  $\leq$  实际运行时间  $\leq$  最大运行时间,即

$$g_1(x) = \begin{cases} T_{\text{act}} - T_{\text{max}} \leq 0 \\ T_{\text{min}} - T_{\text{act}} \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $T_{\text{max}}$ 、 $T_{\text{min}}$  分别为列车允许的最大运行时间和最小运行时间,  $\text{s}$ 。

有轨电车运行中要求列车在精确位置停车,停车位置的误差需要在允许的范围。准地点停车的评价函数为

$$f_{\text{place}} = |S_{\text{act}} - S_{\text{plan}}| \quad (6)$$

式中,  $S_{\text{act}}$ 、 $S_{\text{plan}}$  分别为列车实际停车位置和列车准确停车的位置,  $\text{m}$ 。

准地点停车的约束条件为

$$g_3(x) = |S_{\text{act}} - S_{\text{plan}}| - e_{\text{place}} \leq 0 \quad (7)$$

式中,  $e_{\text{place}}$  为列车允许的停车最大误差,  $\text{m}$ 。

### 3.2 优化变量的确定

在多目标优化中,优化参数的数量越多,优化问题就越难求解。本节中考虑基于系统工作模式的能量管理策略中控制参数的确定,选择  $P_{\text{bat,max}}$ 、 $P_{\text{uc,max}}$  和  $\text{SOE}_{\text{uc,min}}$  作为影响整车性能的能量管理控制参数进行优化。其中,对于确定的动力电池单体,其持续放电倍率和最大充电倍率是确定的,进而可通过  $P_{\text{bat,max}}$  计算  $P_{\text{bat,min}}$ ,超级电容的最大输入、输出功率相同。本文待优化参数的取值范围分别为: $P_{\text{bat,max}}$  为 100~400  $\text{kW}$ ;  $P_{\text{uc,max}}$  为 100~600  $\text{kW}$ ;  $\text{SOE}_{\text{uc,min}}$  为 30%~60%。

### 3.3 优化算法

本文采用实数编码的方式来表示遗传算法 GA (genetic algorithm) 中染色体的基因<sup>[6]</sup>,进化算法中逐渐淘汰适应度较小的个体,总体的适应度函数设计为  $\text{Fit} = 1/J$ 。在优化算法的实现中,采用模型在环

调用方法对控制策略参数进行优化,有轨电车系统仿真模型基于能量流的混合建模方法建立<sup>[17]</sup>,包括多质点的列车动力学模型及系统各部件模型,通过该系统模型,计算列车的能耗、运行里程、运行时间等。多目标优化设计的流程如图 3 所示。

(1)初始化混合动力有轨电车仿真模型、种群规模  $N$ 、最大进化代数  $G$ 、交叉概率  $p_c$  和变异概率  $p_m$ 。

(2)随机生成个体  $x_i (i=1,2,\dots,N)$  的初始种群  $P_1$ ,即随机产生取值范围内的  $P_{\text{bat,max}}$ 、 $P_{\text{uc,max}}$  和  $\text{SOE}_{\text{uc,min}}$ 。

(3)将  $P_1$  的个体代入有轨电车仿真模型中进行仿真,计算完成后,计算各优化目标值,最后求解适应度函数  $\text{Fit}$ ,依次迭代计算得到种群的  $\text{Fit}$ 。

(4)淘汰适应度较小的个体,将适应度最大的个体进行下一步的操作。

(5)交叉操作,采用单点交叉的方法以概率  $p_c$  进行交叉操作。

(6)变异操作,采用均匀变异的方法进行变异操作。

(7)精英保持策略,对所有个体完成交叉和变异操作后形成新的种群,保留在进化过程中曾经出现的好个体。

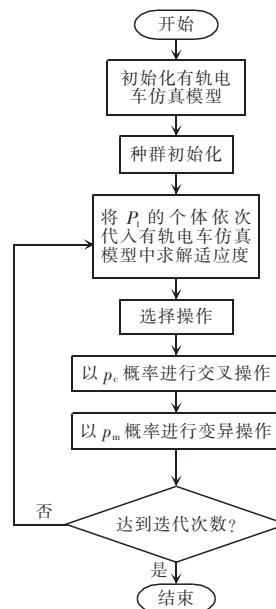


图 3 基于遗传算法优化流程

Fig.3 Flow chart of optimization based on GA

(8)以进化代数作为程序终止的条件,若没有达到终止条件,返回(2),若满足终止条件,则停止计算并输出优化结果。

### 4 优化结果与分析

以国内研发的某储能式有轨电车为原型车,分析本文能量管理策略优化方法的适用性,该车型采用“3 动 1 拖”的编组结构。整车配置 2 套混合动力系统,并以国内某规划线路为仿真线路进行优化仿真分析。

列车的主要仿真参数如表 1 所示。仿真线路总共 23 个站台,各站台中心位置依次为: 32, 805, 1 231,1 796,2 249,2 948,3 638,4 110,5 053, 5 515,6 217,7 014,7 870,8 966,10 215,10 970, 11 687,12 424,13 450,14 067,14 628,15 226, 15 658 m,线路总长 15 626 m,在各站台内架设电网,站台长度为 64 m,站内停车 30 s,最大坡度为 47.3‰,最小弯道半径为 35 m。动力电池采用某型号额定电压为 3.2 V、额定容量为 40 Ah 的单体电芯作为最小单体进行配置,超级电容采用 Maxwell 电压为 48 V、容量为 165 F 的模块为最小单体进行配置。动力电池和超级电容的串联电压均为确定的 480 V,动力电池的最大放电倍率为 3C,最大充电倍率为 1C,超级电容的最大输出、输入电流为 200 A。

图 4 为优化前仿真得到的列车运行速度和加速度曲线。图中,列车参考车速是以表 1 中的列车

主要参数和上述线路为依据,并考虑多种因素约束来计算生成<sup>[4]</sup>;列车实际车速是基于系统工作模式能量管理策略的优化前仿真车速。

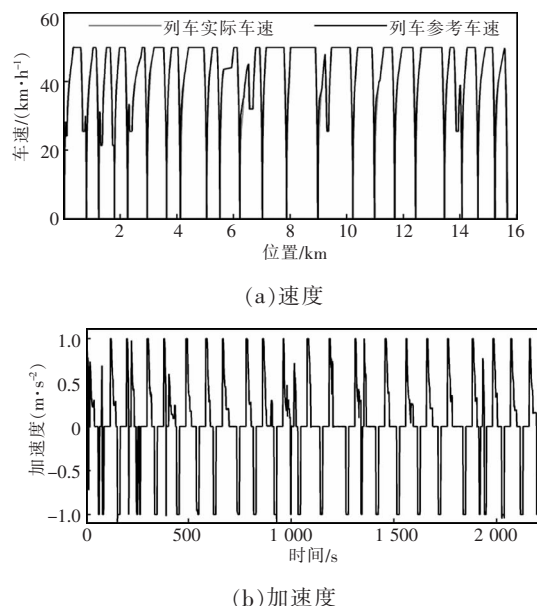


图 4 优化前列车运行速度和加速度曲线  
Fig.4 curves of speed and acceleration tramway before optimization

在图 4 的列车运行速度曲线工况下,以图 3 所示的优化方法对有轨电车的动力性能进行多次仿真。设置进化种群数为 100、最大进化代数为 100、交叉概率为 0.9、变异概率为 0.01~0.10 进行优化计算。通过加权系数法整合各评价函数,多次优化后,选取两组最优解,其中,优化结果 1 为保证优化前列车动力性能指标的优化结果;优化结果 2 为列车动力性能指标降低一定范围的优化结果,该范围以式(4)中的列车运行时间评价函数为参考指标,本文取最大运行时间变化范围为 10 s,约束最大平均运行速度变化范围为 1 km/h。其优化结果如表 2 所示,表中,电网总能耗包括了用于列车牵引运行的能耗和用于车载 ESS 充电的能量;能量回收率为车载 ESS 回收的总再生制动能量与车轮端制动产生的总能量的比值,表示了制动能量的利用效率。

由表 2 可以看出,优化结果 1 与优化前的列车平均速度和列车运行时间相同,即优化结果 1 与优化前的列车动力性能是相同的。在同样的动力性能条件下,优化后的列车运行能耗和能量回收率几乎

表 1 列车主要仿真参数

Tab.1 Main simulation parameters of tramway

参数	取值	参数	取值
列车总重/t	80	最高运行速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	50
齿轮箱传动比	6.28	最大加速度/ (m·s <sup>-2</sup> )	1
惯性质量系数	0.09	最大减速度/ (m·s <sup>-2</sup> )	-1
基本阻力系数 A <sub>0</sub>	1.59	辅助功耗/kW	40
基本阻力系数 B <sub>0</sub>	0.009 21	DC/AC 效率	0.90
基本阻力系数 C <sub>0</sub>	0.000 262	DC/DC 效率	0.92

表 2 多目标优化结果

Tab.2 Comparison of optimization results

目标参数	优化前	优化后	
		结果 1	结果 2
$P_{\text{batt,omax}}/\text{kW}$	345.6	287.6	244.9
$P_{\text{uc,omax}}/\text{kW}$	576.0	508.2	509.3
动力电池并联数/个	6	5	5
超级电容并联数/个	6	6	6
$\text{SOE}_{\text{min}}/\%$	30.0	30.7	31.6
列车运行时间/s	2 207	2 207	2 215
列车平均速度/(km/h)	35.73	35.73	35.55
电网总能耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}$	61.3	60.8	53.7
电网牵引能耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}$	29.3	28.9	27.1
动力电池能耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}$	63.0	56.5	53.2
超级电容能耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}$	26.0	32.8	32.9
车载 ESS 回收总能量/ $\text{kW}\cdot\text{h}$	31.9	31.3	32.7
能量回收率/%	42.3	42.1	44.7
$f_{\text{cost}}/\text{¥}$	433 440	362 040	362 040
$f_{\text{energ}}/\text{kW}\cdot\text{h}$	86.4	86.9	80.5
$f_{\text{place}}/\text{m}$	26	24	24

相同,但优化后的参数  $P_{\text{batt,omax}}$  和  $P_{\text{uc,omax}}$  均减小,减少了动力电源以优化前参数设置时的大功率输入输出时刻,得到了一组较优的控制参数  $P_{\text{batt,omax}}$  和  $P_{\text{uc,omax}}$ 。同时相对于优化前的配置,减少了一组动力电池,减少了车载 ESS 的配置成本。相对于优化结果 1、优化结果 2 在同样的配置下,列车的运行时间增加了约 8 s,列车的平均运行速度降低了约 0.18 km/h,但电网的总能耗减少了约 11.7%,列车运行的能耗减少了约 7.4%,再生制动能量的回收率提高了约 2.6%。相对于优化前,在列车的平均运行速度降低了约 0.5%的前提下,列车运行的能耗减少了约 6.8%,再生制动能量的回收率提高了约 2.4%,大大提高了能源的利用效率。

由上所述,针对一条具体的运行线路,考虑多个目标,在保证列车动力性能的前提下,通过优化可得到能量管理策略的最优控制参数及电源的最小配置;在列车动力性能降低一定程度的前提下,通过优化控制参数,可大大减少整车的运行能耗;通过优化后得到的电源最小配置,在实际车辆配置中可参考该优化结果进行冗余配置。

## 5 结语

本文首先提出了基于系统工作模式的储能式有轨电车能量管理策略,工作模式的切换通过多个控制参数来实现,应用多目标遗传算法,对影响列车动力性能的主要控制参数进行了优化分析,优化结果表明,在保证列车动力性能的前提下,通过优化得到了能量管理策略的最优控制参数;在列车动力性能降低一定程度的前提下,优化后列车的牵引运行能耗减少了约 6.8%,再生制动能量的回收率提高了约 2.4%;超级电容 SOE 最小阈值的设定对列车的动力性能的影响较大,应综合考虑其过充和过放的因素设置;同时通过优化得到了车载电源的最小配置。通过计算机的离线优化分析,可为储能式有轨电车能量管理策略控制参数的设计、车载电源的冗余配置提供理论方法和参考。

### 参考文献:

- [1] 叶芹禄. 有轨电车的现状与未来[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(5): 1-5.  
Ye Qinlu. Present situation prospect of city trams[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(5): 1-5(in Chinese).
- [2] 彭飞. 基于 PEMFC 的现代有轨电车混合动力系统关键技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.  
Peng Fei. Research on critical technologies about hybrid power system of modern tram based on PEMFC[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014(in Chinese).
- [3] Herrera V, Milo A, Gaztañaga H, et al. Adaptive energy management strategy and optimal sizing applied on a battery-supercapacitor based tramway [J]. Applied Energy, 2016, 169:831-845.
- [4] 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): 25-28.  
Chen Yanqiu, Zhang Jiye, Song Pengyun, et al. Study on operation control of hybrid electric train[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(8):25-28(in Chinese).
- [5] 韦绍远, 姜久春, 张维戈, 等. 有轨电车车载混合储能系统效率优化控制[J]. 电源学报, 2017, 15(2):77-84.  
Wei Shaoyuan, Jiang Jiuchun, Zhang Weige, et al.

- Optimization control for efficiency of on-board hybrid energy storage system in tramway [J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2):77-84(in Chinese).
- [6] Ratniyomchai T, Hillmansen S, Tricoli P. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways [J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2014, 4(1):9-20.
- [7] 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.
- [8] Sabri M F M, Danapalasingam K A, Rahmat M F. A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 53:1433-1442.
- [9] 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.
- [10] Guo Liping, Yedavalli K, Zinger D. Design and modeling of power system for a fuel cell hybrid switcher locomotive[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(2):1406-1413.
- [11] 张昕, 田毅, 张欣. 混合动力机车动力系统建模及能量管理研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(5): 20-25.  
Zhang Xin, Tian Yi, Zhang Xin. Modeling and energy management strategy of hybrid locomotive[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(5):20-25(in Chinese).
- [12] Torreglosa J P, García P, Fernández L M. Predictive control for the energy management of a fuel-cell-battery-supercapacitor tramway[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014, 10(1):276-285.
- [13] Li Qi, Yang Hanqing, Han Ying, et al. A state machine strategy based on droop control for an energy management system of PEMFC-battery-super capacitor hybrid tramway [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(36):16148-16159.
- [14] Li Qi, Chen Weirong, Liu Zhixiang, et al. Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway[J]. Journal of Power Sources, 2015, 279:267-280.
- [15] Zhang Wenbin, Li Jianqiu, Xu Liangfei, et al. Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy[J]. Energy Conversion & Management, 2017, 134:59-69.
- [16] 李少波, 杨观赐. 进化算法与混合动力系统优化[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [17] 杨继斌, 宋鹏云, 张继业, 等. 混合动力现代有轨电车仿真系统研究[J/OL]. 机械工程学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20170426.0824.030.html> Yang Jibin, Song Pengyun, Zhang Jiye, et al. Research on simulation system of hybrid modern tramway[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20170426.0824.030.html>(in Chinese).

---

#### 作者简介:



杨继斌

杨继斌(1989-),男,通信作者,博士研究生,研究方向:混合动力车辆控制与优化,E-mail:jibin\_yang@qq.com。

张继业(1965-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向:高速列车流固耦合动力学、复杂系统的稳定性与控制 and 混合动力车辆,E-mail:jyzhang@home.swjtu.edu.cn。

宋鹏云(1985-),男,博士,研究方向:混合动力车辆,E-mail:songpy23@fox mail.com。