

燃料电池有轨电车能量管理 Pareto 多目标优化

张 晗^{1,2} 杨继斌³ 张继业^{1,2} 宋鹏云^{1,4} 徐晓惠³

摘 要 节能环保的出行方式得到政府的大力推广, 其中燃料电池混合动力有轨电车由于可无网运行且节能环保而备受关注. 为了改善燃料电池/超级电容/动力电池大功率有轨电车的燃料经济性与系统耐久性, 提出一种有轨电车能量管理策略 (Energy management strategy, EMS) 的多目标优化方法. 首先以氢燃料消耗量和能量源性能衰减率作为评价指标, 建立多目标成本函数. 由于两个指标很难在同一个等式中评价, 设计了基于状态机与非支配排序的能量管理 Pareto 多目标优化方法, 获得了有轨电车能量管理策略 Pareto 非劣解集, 并分析了能量管理策略的目标功率参数对性能指标的影响规律, 进而遴选出兼顾燃料经济性与系统耐久性的综合最优解. 结果表明, 与功率跟随策略和基于遗传算法优化策略相比, 该能量管理优化方法的燃料经济性分别提高了 29.4% 和 2.4%.

关键词 混合动力有轨电车, 燃料电池, 能量管理, Pareto, 多目标优化

引用格式 张晗, 杨继斌, 张继业, 宋鹏云, 徐晓惠. 燃料电池有轨电车能量管理 Pareto 多目标优化. 自动化学报, 2019, 45(12): 2378–2392

DOI 10.16383/j.aas.c190044



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Pareto-based Multi-objective Optimization of Energy Management for Fuel Cell Tramway

ZHANG Han^{1,2} YANG Ji-Bin³ ZHANG Ji-Ye^{1,2} SONG Peng-Yun^{1,4} XU Xiao-Hui³

Abstract The environment-friendly transportation has been greatly promoted by governments. Because of non-polluting and being operated without nets, fuel cell hybrid tramway has attracted much attention. In order to improve the fuel economy and system durability of fuel cell/supercapacitor/power battery high-power hybrid electric vehicles, a multi-objective optimization method of energy management strategy for tramway is proposed. Firstly, the multi-objective cost function is established by using the hydrogen fuel consumption and the performance degradation rate of each energy source as performance indices. These two performance indices are difficult to evaluate in one equation, so a Pareto multi-objective optimization method based on the state machine and non-dominated sorting is designed. The Pareto non-inferior solution set of the energy management strategy is obtained, and the influence law of the target power parameters of the energy management strategy on the performance index is revealed, and then the comprehensive optimal solution considering both fuel economy and system durability is selected. The results show that the fuel economy of the energy management optimization method is improved by 29.4% and 2.4% respectively, compared with the power following strategy and the genetic algorithm based optimization strategy.

Key words Hybrid tram, fuel cell, energy management, Pareto, multi-objective optimization

Citation Zhang Han, Yang Ji-Bin, Zhang Ji-Ye, Song Peng-Yun, Xu Xiao-Hui. Pareto-based multi-objective optimization of energy management for fuel cell tramway. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(12): 2378–2392

收稿日期 2019-01-18 录用日期 2019-07-30

Manuscript received January 18, 2019; accepted July 30, 2019

国家自然科学基金 (11572264), 四川省科技厅重大科技专项 (2019ZDZX0002), 流体机械及工程四川省重点实验室开放基金 (szjj2019-015) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (11572264), Science and Technology Major Project of Sichuan Province (2019ZDZX0002), and the Open Research Subject of Key Laboratory of Fluid and Power Machinery (szjj2019-015)

本文责任编辑 董海荣

Recommended by Associate Editor DONG Hai-Rong

1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031 2. 西南交通大学信息科学与技术学院 成都 611756 3. 西华大学汽车与交通学院 成都 610039 4. 西南民族大学电气信息工程学院 成都 610041

1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiao-

随着城市交通需求的激增, 交通拥堵、矿物资源 and 环境保护问题日益严重^[1-4]. 为了解决这些问题, 政府大力发展大运量和绿色环保的公共交通系统, 而现代有轨电车具有安全舒适和绿色低碳的特点, 已逐渐成为各国所倡导的出行方式. 在各类有轨电车中, 燃料电池混合动力有轨电车可实现无网

tong University, Chengdu 610031 2. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756 3. School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu 610039 4. College of Electrical and Information Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041

运行, 具有基建成本低, 行驶里程长和零排放等优点. 近年来, 国内高校与相关厂商合作, 研制出可商业化运行的燃料电池/超级电容/动力电池有轨电车^[5-6].

保证运行性能, 同时降低能量消耗是有轨电车设计者的主要目标^[7]. 因此, 能量管理策略 (Energy management strategy, EMS) 常用于分配和管理电车各能量源在不同运行状况下的功率输出, 以降低运行成本并保证电车性能^[8]. 相比于成熟的电动汽车和混合动力汽车 EMS 研究, 以轨道交通为背景的 EMS 研究方兴未艾^[9]. 依据结构特点, EMS 可分为两类: 基于规则的策略和基于优化的策略^[10-11]. 基于状态机的 EMS 是一种典型的规则型 EMS, 具有实时性好、控制效果稳定、工程应用广泛等特点. Garcia 等^[12] 定义了 8 种列车运行状态, 设计了基于状态机的控制策略. 该策略利用双滞环控制法控制动力电池荷电状态 (State of charge, SOC) 等级的切换, 燃料电池可工作在恒定功率和变功率两种状态下. 杨继斌等^[13] 根据列车牵引需求功率、能量源状态和目标功率值, 定义了 10 种工作状态, 并基于此设计 EMS. 该策略使燃料电池工作在高效运行区, 工况适应性较强. 然而, 这类策略的控制效果依赖于工程经验, 无法保证性能指标最优^[14].

基于优化的 EMS 通常需要定义含多个性能指标的目标函数, 并利用各种优化或最优控制方法设计 EMS, 使目标函数达到最优或近似最优. Zhang 等^[6] 以氢燃料消耗和电池等效氢消耗为性能指标, 针对燃料电池有轨电车设计了等效氢耗最小化策略, 该策略能实时改善列车的驾驶性能和经济性, 但无法保证全局最优. Xu 等^[15] 设计了基于动态规划的策略, 用于降低电车的燃料成本和电力成本. 该策略全局优化性能较好, 但实时性较差, 且很难应用于实际工程中. 杨继斌等^[16] 和 Li 等^[17] 分别利用遗传算法 (Genetic algorithm, GA) 对燃料电池有轨电车的 EMS 进行优化, 最终降低了电车的配置成本和能耗.

对于上述 EMS 优化问题, 研究者通常为每个性能指标分配某种形式的权重值, 将多个目标转化为单个目标, 但合适的权重值是很难确定的^[18-19]. 另一种解决方案是基于 Pareto 多目标优化方法, 如非支配排序遗传算法 (Non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA), 得到 Pareto 非劣解集^[19-20]. 然而, NSGA 无法最终确定一个兼顾所有性能的解. 此外, 当前 EMS 多目标优化的研究主要集中于寻找一个最优方案, 而 EMS 目标功率参数的变化对性能指标的影响往往分析不足. 随着混合动力技术

的发展, 混合动力电车运行对 EMS 的要求日益提高, 参数的设置对电车运行性能具有重要影响. 因此, 亟需对目标功率参数如何影响混合动力系统的性能指标进行分析, 从而遴选出满足工程实际需求的解决方案.

为此, 本文针对燃料电池/超级电容/动力电池混合动力有轨电车, 构建前向 - 后向电车能量流模型, 并建立以燃料经济性和系统耐久性为性能指标的目标函数模型. 提出一种基于状态机与非支配排序的双循环优化方法, 对 EMS 进行 Pareto 多目标优化. 该方法不仅能得到 Pareto 非劣解集, 还可对不同目标功率参数下的 EMS 进行性能指标分析, 揭示参数对电车性能的影响规律, 进而遴选出兼顾燃料经济性与系统耐久性的可行解. 本文所提方法实现了从电车模型建立、Pareto 多目标优化到性能指标分析整个过程的有效集成, 并获得了燃料电池有轨电车 EMS 的多目标 Pareto 解集和满足性能需求的综合可行解.

1 燃料电池有轨电车系统模型

1.1 有轨电车组成架构

本文研究对象为燃料电池混合动力有轨电车. 由于燃料电池动态性能较差, 电车需要增加辅助能量源, 对燃料电池系统进行补充. 辅助能量源主要用于延长电车续航里程, 在车辆加速时提供能量, 以及吸收车辆制动时产生的回馈能量. 电车主动力源为质子交换膜燃料电池 (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC), 辅助能量源包含超级电容和动力电池. 混合动力系统拓扑结构如图 1 所示, 主动力源和辅助能量源分别通过单向直流 - 直流变换器 (DC-DC converter, DC-DC) 和双向 DC-DC 连接至直流母线.

为了对有轨电车 EMS 进行优化, 基于前向仿真与后向仿真结合的混合仿真方法^[21], 建立燃料电池有轨电车能量流模型. 该仿真方法对车轮、传动系统、电机、能量源等模块进行建模, 并以有轨电车目标速度曲线作为运行目标, 利用后向信号流传递各模块的需求功率, 利用前向能量流传递各模块的实际输出功率, 具有仿真精度高, 仿真速度快的优点^[22].

1.2 有轨电车能量流模型

燃料电池有轨电车的能量流模型如图 2 所示. 图中, P_{fc} , P_{sc} , P_{bat} 分别为燃料电池系统、超级电容、动力电池的输出功率, P_d 为直流母线需求功率,

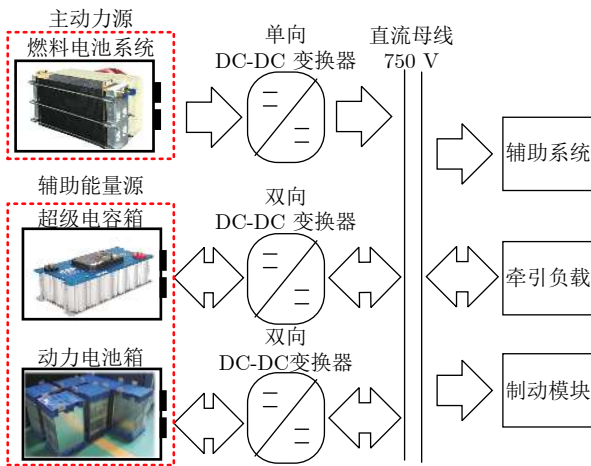


图1 混合动力系统拓扑结构

Fig. 1 Hybrid power system topology

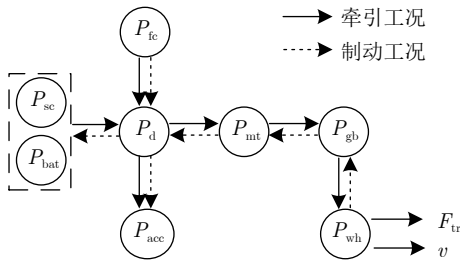


图2 燃料电池有轨电车能量流模型

Fig. 2 The energy flow model of fuel cell tramway

P_{acc} 为辅助设备需求功率, P_{mt} 为电机需求功率, P_{gb} 为传动系统需求功率, P_{wh} 为车轮需求功率, F_{tr} 和 v 分别为有轨电车需求牵引力和速度。根据运行工况的不同, 有轨电车的能量主要分为两种流向:

流向1. 在牵引工况下, 能量流向为: 混合动力系统→直流母线→电机→齿轮箱→车轮, 如图2实线箭头所示。

流向2. 在制动工况下, 能量流向为: 车轮→齿轮箱→电机→直流母线→辅助能量源 (超级电容和动力电池), 如图2虚线箭头所示。

下面介绍各模块的功率计算方法。

1.3 燃料电池模型

混合动力系统是牵引工况下有轨电车能量流的起点, 其模型包含 PEMFC、超级电容和动力电池三部分。PEMFC 在任何工况下均释放能量, 模型的输出功率为^[23]

$$\begin{cases} P_{fc} = U_{fc} \times I_{fc} \\ U_{fc} = E_{foc} - U_{fa} - U_{fohm} \\ E_{foc} = K_{fc} \times \frac{\Delta G^0}{2F} + \left((T_{fc} - T^0) \times \right. \\ \quad \left. - \frac{44.43}{2F} + \frac{R \times T_{fc}}{2F} \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}) \right) \\ U_{fa} = N A \ln\left(\frac{I_{fc}}{I_0}\right) \frac{1}{s \frac{T_d}{3} + 1} \\ U_{fohm} = R_{fohm} \times I_{fc} \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_{fc} 和 I_{fc} 分别为 PEMFC 的输出电压和电流, E_{foc} 为 PEMFC 开路电压, U_{fa} 为激活过电压, U_{fohm} 为欧姆过电压, K_{fc} 为额定运行条件下的电压常数, ΔG^0 为标准状态 (25 °C, 一个标准大气压) 下的吉布斯自由能的变化值, F 为法拉第常数, T_{fc} 为 PEMFC 的运行温度, T^0 为参考温度, R 为通用气体常数, P_{H_2} 和 P_{O_2} 分别为氢气和氧气的分压力, N 为单电池数量, A 为塔菲尔斜率, I_0 为交换电流, T_d 为燃料电池激活响应时间, R_{fohm} 为燃料电池的欧姆等效内阻。燃料电池的效率曲线通过查阅电池生产商的产品手册获得, 如图3所示。由图可知, 在输出功率约为 25 kW 时, 燃料电池系统得到最大效率 59.7%。当输出功率大于 25 kW 时, 效率随着输出功率的增加而降低。

1.4 动力电池模型

动力电池在牵引工况下向外释放能量, 并在制动工况下吸收回馈制动能量。其模型采用 Rint 模型, 包含一个开路电压源和一个等效内阻。单体电池输出功率计算模型为^[24]

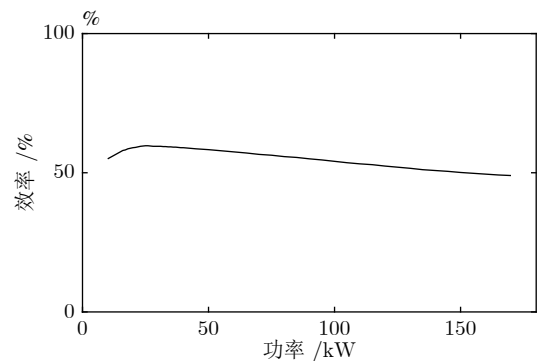


图3 燃料电池效率-功率曲线

Fig. 3 The power-efficiency curve of fuel cell

$$\begin{cases} P_{\text{bat}} = U_{\text{bat}} \times I_{\text{bat}} \\ U_{\text{bat}} = E_{\text{boc}} - I_{\text{bat}} \times R_{\text{bat}} \\ E_{\text{boc}} = E_0 - K \frac{Q}{Q - I_{\text{bat}} t} \times \\ \quad (I_{\text{bat}} t + I_{\text{bat}}^*) + A e^{(-B I_{\text{bat}} t)}, \quad I_{\text{bat}} \geq 0 \\ E_{\text{boc}} = E_0 - K \frac{Q}{I_{\text{bat}} t - 0.1 Q} I_{\text{bat}}^* - \\ \quad K \frac{Q}{Q - I_{\text{bat}} t} I_{\text{bat}} t + A e^{(-B I_{\text{bat}} t)}, \quad I_{\text{bat}} < 0 \\ SOC_{\text{bat}} = SOC_{\text{bat}0} - \frac{1}{Q} \int_0^t I_{\text{bat}} dt \end{cases} \quad (2)$$

其中, U_{bat} 和 I_{bat} 分别为单体动力电池的输出电压和电流, E_{boc} 为电池开路电压, R_{bat} 为等效内阻值, E_0 为电池电压常数, Q 为电池额定容量, K 为极化内阻, I_{bat}^* 为滤波电流, A 为指数区域振幅, B 为指数区域时间常数的倒数, SOC_{bat} 和 $SOC_{\text{bat}0}$ 分别为电池当前 SOC 和初始 SOC.

1.5 超级电容模型

与动力电池相比, 超级电容比功率更高, 在母线需求功率较大时优先分担燃料电池系统的工作压力. 模型由一个理想等效电容、一个等效并联内阻和一个等效串联内阻三部分组成. 单体超级电容的输出功率为^[25]

$$\begin{cases} P_{\text{sc}} = U_{\text{sc}} \times I_{\text{sc}} \\ U_{\text{sc}} = E_{\text{so}} - R_{\text{ss}} \times I_{\text{sc}} \\ I_{\text{sc}} = I_{\text{so}} + I_{\text{sp}} \\ I_{\text{so}} = -C_{\text{sc}} \frac{dE_{\text{so}}}{dt} \\ I_{\text{sp}} = \frac{E_{\text{so}}}{R_{\text{sp}}} \end{cases} \quad (3)$$

其中, U_{sc} 和 I_{sc} 分别为单体超级电容的输出电压和电流, E_{so} 为等效电容电压, R_{ss} 为等效串联内阻值, I_{so} 和 I_{sp} 分别为流过等效电容和等效并联内阻的电流值, C_{sc} 为等效电容的容量, R_{sp} 为等效并联内阻值. 超级电容 SOC 计算方法为

$$SOC_{\text{sc}} = \frac{U_{\text{sc}} - U_{\text{scmin}}}{U_{\text{scmax}} - U_{\text{scmin}}} \quad (4)$$

其中, U_{scmin} 和 U_{scmax} 分别表示超级电容的最低允许电压和最高电压.

动力电池与超级电容模型均考虑处于常温下 (25 °C). 此外, 动力电池和超级电容的电流与功率均可取正 (代表释放能量) 或取负 (代表吸收能量).

1.6 辅助系统 / 直流母线模型

在牵引工况下, 直流母线汇聚混合动力系统释

放的能量, 并将其输出至电机和辅助系统中; 在制动工况下, 直流母线将来源于电机的回馈制动能量输送至辅助能量源. 考虑 DC-DC 和牵引逆变器的效率损耗, 牵引工况下直流母线的功率平衡方程为

$$P_{\text{d}} = P_{\text{fc}} \eta_{\text{dcdc}} + P_{\text{sc}} \eta_{\text{dcdc}} + P_{\text{bat}} \eta_{\text{dcdc}} = \frac{P_{\text{mt}}}{\eta_{\text{dcac}}} + P_{\text{acc}} \quad (5)$$

制动工况下的功率平衡方程为

$$P_{\text{d}} = P_{\text{fc}} \eta_{\text{dcdc}} + |P_{\text{mt}}| \eta_{\text{dcac}} = \frac{|P_{\text{sc}}|}{\eta_{\text{dcdc}}} + \frac{|P_{\text{bat}}|}{\eta_{\text{dcdc}}} + P_{\text{acc}} \quad (6)$$

其中, η_{dcdc} 和 η_{dcac} 分别为 DC-DC 和牵引逆变器的效率. P_{fc} , P_{sc} 和 P_{bat} 的分配由 EMS 控制.

1.7 电机模型

在牵引工况下, 电机将来自直流母线的电能转化为机械能, 并输出至传动系统. 在制动工况下, 电机将来自传动系统的机械能转化为电能, 并输出至直流母线. 考虑工作时的损失功率, 电机需求电功率为

$$P_{\text{mt}} = T_{\text{mt}} \times \omega_{\text{mt}} + P_{\text{ml}} \quad (7)$$

其中, T_{mt} 和 ω_{mt} 分别为电机需求转矩和转速, P_{ml} 为电机的工作损失功率, 计算方法为

$$\begin{cases} T_{\text{mt}} = T_{\text{gb}} + J_{\text{mt}} \frac{d\omega_{\text{mt}}}{dt} \\ \omega_{\text{mt}} = \omega_{\text{gb}} \\ P_{\text{ml}} = \frac{(1 - \eta_{\text{mt}}) \times T_{\text{mt}} \times \omega_{\text{mt}}}{\eta_{\text{mt}}} \end{cases} \quad (8)$$

其中, T_{gb} 和 ω_{gb} 分别为传动系统的需求转矩和转速, J_{mt} 为电机转动惯量, η_{mt} 为电机效率. 由式 (8) 可知, T_{mt} , ω_{mt} 和 P_{ml} 均与 T_{gb} 或 ω_{gb} 有关. 将式 (8) 代入式 (7), 并考虑传动系统需求功率 $P_{\text{gb}} = T_{\text{gb}} \times \omega_{\text{gb}}$, P_{mt} 最终可由 P_{gb} 和 ω_{gb} 表征

$$\begin{aligned} P_{\text{mt}} &= \left(T_{\text{gb}} + J_{\text{mt}} \frac{d\omega_{\text{mt}}}{dt} \right) \omega_{\text{gb}} + P_{\text{ml}} = \\ &= \left(1 + \frac{1 - \eta_{\text{mt}}}{\eta_{\text{mt}}} \right) \left(P_{\text{gb}} + J_{\text{mt}} \omega_{\text{gb}} \frac{d\omega_{\text{gb}}}{dt} \right) = \\ &= \frac{1}{\eta_{\text{mt}}} \left(P_{\text{gb}} + J_{\text{mt}} \omega_{\text{gb}} \frac{d\omega_{\text{gb}}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

1.8 传动系统模型

传动系统在电机和车轮之间传递机械能. 传动系统的需求功率为

$$P_{gb} = T_{gb} \times \omega_{gb} \quad (10)$$

考虑机械摩擦损失, T_{gb} 与 ω_{gb} 的计算方法为

$$\begin{cases} T_{gb} = \frac{T_{wh}}{i_{gb}} + T_{gl} \\ \omega_{gb} = \omega_{wh} \times i_{gb} \\ T_{gl} = |T_{wh}| \times \frac{1 - \eta_{gb}}{i_{gb} \times \eta_{gb}} \end{cases} \quad (11)$$

其中, T_{wh} 和 ω_{wh} 分别为车轮需求转矩和转速, T_{gl} 为传动系统的机械摩擦损失转矩, i_{gb} 为传动比, η_{gb} 为传动效率. 将式 (11) 代入式 (10), 并考虑车轮需求功率 $P_{wh} = T_{wh} \times \omega_{wh}$, 综合得知, P_{gb} 可由 P_{wh} 表示

$$\begin{aligned} P_{gb} &= \left(\frac{T_{wh}}{i_{gb}} + T_{gl} \right) (\omega_{wh} \times i_{gb}) = \\ &P_{wh} + \frac{|T_{wh}| \times (1 - \eta_{gb}) \times (\omega_{wh} \times i_{gb})}{i_{gb} \times \eta_{gb}} = \\ &P_{wh} + \frac{1 - \eta_{gb}}{\eta_{gb}} |P_{wh}| \end{aligned} \quad (12)$$

1.9 车轮 / 车轴模型

在牵引工况下, 混合动力系统输出的电能最终转化为车轮上的机械能, 驱动有轨电车运行. 该模块根据列车需求牵引力和目标速度, 获得车轮需求功率

$$\begin{cases} P_{wh} = T_{wh} \times \omega_{wh} \\ T_{wh} = F_{tr} \times r_{wh} \\ \omega_{wh} = \frac{v^*}{r_{wh}} \end{cases} \quad (13)$$

其中, r_{wh} 为车轮半径, v^* 为目标速度.

1.10 列车模型

该模块根据有轨电车纵向动力学、当前车速和目标车速, 考虑基本阻力、坡道附加阻力和曲线附加阻力, 得到电车需求牵引力

$$\begin{cases} F_{tr} = mgw_{resis} + \frac{m}{3.6} \frac{dv^*}{dt} \\ w_{resis} = A_0 + B_0 v + C_0 v^2 + i_{sp} + \frac{600}{R_{tra}} \end{cases} \quad (14)$$

其中, m 为列车质量, w_{resis} 为列车的单位阻力, A_0 , B_0 和 C_0 为基本阻力系数, v 为列车当前速度, i_{sp} 为坡道坡度, R_{tra} 为线路曲线半径.

综合式 (9), (11) ~ (14), 电机需求电功率 P_{mt} 最终可化为有轨电车目标速度 v^* 和当前速度 v 的函数关系式

$$\begin{aligned} P_{mt} &= \frac{P_{gb} + J_{mt} \omega_{gb} \frac{d\omega_{gb}}{dt}}{\eta_{mt}} = \\ &\frac{P_{wh}}{\eta_{mt}} + \frac{|P_{wh}| (1 - \eta_{gb})}{\eta_{gb} \eta_{mt}} + \\ &\frac{J_{mt} \omega_{wh} i_{gb}}{\eta_{mt}} \times \frac{d(\omega_{wh} i_{gb})}{dt} = \\ &\frac{P_{wh}}{\eta_{mt}} + \frac{|P_{wh}| (1 - \eta_{gb})}{\eta_{gb} \eta_{mt}} + \frac{J_{mt} i_{gb}^2 v^*}{r_{wh}^2 \eta_{mt}} \frac{dv^*}{dt} = \\ &\frac{F_{tr} v^*}{\eta_{mt}} + \frac{1 - \eta_{gb}}{\eta_{gb} \eta_{mt}} \times |F_{tr}| v^* + \frac{J_{mt} i_{gb}^2}{r_{wh}^2 \eta_{mt}} \times \frac{v^* dv^*}{dt} = \\ &\frac{mgw_{resis} v^*}{\eta_{mt}} + \frac{m}{3.6 \eta_{mt}} \times \frac{v^* dv^*}{dt} + \\ &\frac{mgw_{resis} (1 - \eta_{gb}) v^*}{\eta_{gb} \eta_{mt}} + \\ &\frac{(1 - \eta_{gb}) m v^*}{3.6 \eta_{gb} \eta_{mt}} \times \left| \frac{dv^*}{dt} \right| + \frac{J_{mt} i_{gb}^2}{r_{wh}^2 \eta_{mt}} \times \frac{v^* dv^*}{dt} = \\ &mg \left(A_0 + B_0 v + C_0 v^2 + i_{sp} + \frac{600}{R_{tra}} \right) \frac{v^*}{\eta_{gb} \eta_{mt}} + \\ &\frac{m r_{wh}^2 + 3.6 J_{mt} i_{gb}^2}{3.6 \eta_{mt} r_{wh}^2} \times \frac{v^* dv^*}{dt} + \\ &\frac{(1 - \eta_{gb}) m}{3.6 \eta_{gb} \eta_{mt}} \times v^* \left| \frac{dv^*}{dt} \right| \end{aligned} \quad (15)$$

2 问题描述与 Pareto 多目标优化

能量管理策略是决定混合动力电车性能的关键技术之一. 合理的 EMS 能降低燃料消耗, 并延长储能部件的使用寿命. 对于燃料电池有轨电车, 实际工程中常采用基于状态机的 EMS, 根据车辆运行状态的变化, 使用不同策略进行控制. 这种策略实时性好, 反应速度快, 但控制效果依赖于设计者的经验, 无法保证燃料消耗和储能设备寿命等性能指标达到最优.

2.1 基于状态机的能量管理策略

基于状态机的 EMS 根据燃料电池混合动力电车的运行特点, 定义了十种运行状态, 如表 1 所示^[16]. 表中, P_{mb} 为机械制动功率.

该策略将能量源的目标功率值和荷电状态作为状态切换的依据, 其状态机体系如图 4 所示. 通过状态的切换, 超级电容与动力电池在制动时吸收回馈制动能量, 并在列车加速时辅助燃料电池系统对列车供电. 基于状态机的策略能够保证混合动力电车完成预定工况, 易于工程实现. 从图 4 可以看到, EMS 参数, 即燃料电池目标功率 P_{fcmax} 、超级电容目标功率 P_{scmax} 和动力电池目标功率 P_{batmax} 是设计策略的关键. 这些目标功率即为受 EMS 控制的

表 1 电车运行状态和对应策略
Table 1 Operating state and strategy of tramway

运行状态	策略
S1: FC 牵引	$P_d = P_{fc}$
S2: FC + SC 牵引	$P_d = P_{fc} + P_{sc}$
S3: FC + SC + BT 牵引	$P_d = P_{fc} + P_{sc} + P_{bat}$
S4: 低功率 SC 充电	$P_d = P_{fc} - P_{sc} $
S5: 低功率 BT 充电	$P_d = P_{fc} - P_{bat} $
S6: 惰行/停车 SC 充电	$P_d = P_{fc} - P_{sc} $
S7: 惰行/停车 BT 充电	$P_d = P_{fc} - P_{bat} $
S8: 再生制动 + 机械制动	$ P_d + P_{fc} = P_{sc} + P_{bat} + P_{mb} $
S9: 高功率再生制动	$ P_d + P_{fc} = P_{sc} + P_{bat} $
S10: 低功率再生制动	$ P_d + P_{fc} = P_{sc} $

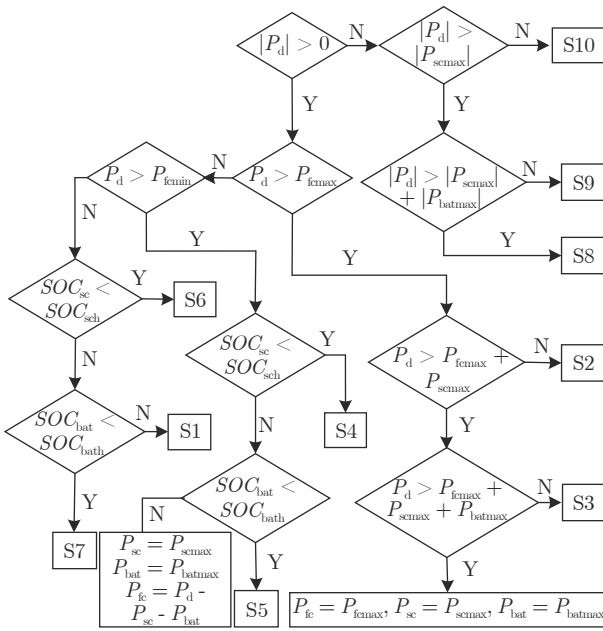


图 4 状态机体系图

Fig. 4 State machine system

各功率源最大允许功率值. 本研究对这些 EMS 参数进行优化, 改善有轨电车性能.

2.2 多目标优化函数

实际工程问题通常包含多个物理含义不同且需要同时优化的目标. 这类多目标优化问题的数学描述为^[26-27]

$$\begin{cases} \min_{X \in \Omega} F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)] \\ \text{s.t.} & g_j(X) > 0, & j = 1, 2, \dots, n \\ & h_l(X) = 0, & l = 1, 2, \dots, e \end{cases} \quad (16)$$

其中, $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 为一个 N 维空间的变向量, Ω 为可行解空间, $f_m(X)$ 为第 m 个性能指标,

$g_j(X)$ 为第 j 个不等式约束函数, $h_l(X)$ 为第 l 个等式约束函数.

对于燃料电池有轨电车, 其动力系统的运营成本主要包括两方面: 燃料电池工作所需的燃料成本和因能量源寿命终结而进行更换的设备成本, 两个成本可分别用燃料经济性和系统耐久性来评价. 因此, 本文多目标优化函数 (目标函数) 定义为

$$\min_{X \in \Omega} J = [J_{FE}, J_{PD}] \quad (17)$$

其中, J_{FE} 为燃料经济性指标, J_{PD} 为系统耐久性指标. X 为优化向量, 包含三个 EMS 参数 P_{fcmax} , P_{scmax} 和 P_{batmax} . Ω 为可行解空间, 服从以下约束

$$30\% \leq SOC_{sc} \leq 100\% \quad (18)$$

$$30\% \leq SOC_{bat} \leq 100\% \quad (19)$$

$$10 \text{ kW} \leq P_{fc} \leq 170 \text{ kW} \quad (20)$$

$$-400 \text{ kW} \leq P_{sc} \leq 400 \text{ kW} \quad (21)$$

$$-250 \text{ kW} \leq P_{bat} \leq 250 \text{ kW} \quad (22)$$

电车的燃料经济性由燃料电池系统的氢燃料消耗量来评价, 氢燃料消耗量越低, 燃料经济性越好. 氢燃料消耗量的计算模型为

$$m_{H_2} = \frac{1}{E_{H_2}} \int \frac{P_{fc}}{\eta_{fc}} dt \quad (23)$$

其中, m_{H_2} 为氢燃料消耗量, E_{H_2} 为氢气低热值, 取 120 kJ/g , P_{fc} 为 PEMFC 系统输出功率, η_{fc} 为 PEMFC 效率. 可以看到, 氢燃料消耗量随 P_{fc} 的增大而上升.

系统耐久性由储能部件 (包括燃料电池、超级电容和动力电池) 的性能衰减率评价, 性能衰减率越低, 系统耐久性越好. 针对有轨电车应用场景, 本文基于面向事件的寿命估计方法计算性能衰减率. 该方法首先定义使部件寿命衰减的事件, 然后对发生这些事件的次数进行累加, 从而估计性能衰减率^[26]. 对于燃料电池有轨电车运行, 长时间以较大或较小功率工作、频繁启停和功率变化等事件的发生, 都将导致燃料电池系统性能衰减^[28]. 因此, 燃料电池性能衰减率定义为当前由于性能衰减导致的电压降与最大允许电压降的比值

$$\varphi_{FC} = \frac{k(\bar{n}_1 V'_1 + \bar{t}_1 U'_1 + \bar{n}_2 V'_2 + \bar{t}_2 U'_2)}{\Delta V} \quad (24)$$

其中, ΔV 为燃料电池从开始使用至寿命结束允许的电压衰减值; k 为实际工况修正系数; V'_1 , U'_1 , V'_2 , U'_2 分别为启停、低功率、单位负载功率变化、高功率工况下引起的电压衰减值, 其数值在表 2 中给出^[29]. $\bar{n}_1$ 为平均启停周期数, $\bar{t}_1$ 为平均低功率负载运行时

表 2 燃料电池电压衰减值
Table 2 Fuel cell voltage degradation rates

运行状态	符号	衰减值
启停	V_1'	$23.91 \mu\text{V}\cdot\text{周期}^{-1}$
空转	U_1'	$10.17 \mu\text{V}\cdot\text{h}^{-1}$
负载变化	V_2'	$0.0441 \mu\text{V}\cdot\Delta\text{kW}^{-1}$
高功率运行	U_2'	$11.74 \mu\text{V}\cdot\text{h}^{-1}$

间, $\bar{n}_2$ 为平均负载功率变化, $\bar{t}_2$ 为平均高功率负载运行时间.

当超级电容与动力电池工作时, 放电深度 (Depth of discharge, DOD) 和充放电循环次数将影响设备的性能衰减率^[26]. 因此, 超级电容与动力电池的性能衰减率定义为不同 DOD 范围下, 已经进行的充放电循环次数与最大允许循环次数的比值

$$\Delta\varphi_{ESS} = \sum_{i=1}^9 \left(\frac{N_{ESSdi}}{LC_{ESSi}} \right) \quad (25)$$

其中, ESS 可对应动力电池 (bat) 或超级电容 (sc) 两种不同场景; N_{ESSdi} 为不同 DOD 范围下已经进行的循环次数; LC_{ESSi} 为不同 DOD 范围下最大允许循环次数, 其数值在表 3 中给出^[26].

本文考虑有轨电车能够完成工况, 并准时到站, 因此在多目标函数中引入惩罚函数

$$f_{\text{pen}}(X) = \xi_1 (\Delta t) + \xi_2 (\Delta s) \quad (26)$$

其中, ξ_1, ξ_2 为惩罚系数, 式中第 1 项为未按时到站的惩罚; 第 2 项为无法完成工况的惩罚. 惩罚系数越大, 惩罚越严厉.

2.3 Pareto 优化与非支配排序算法

多目标优化问题的解决思路主要分为两类: 将多目标转化为单目标后进行优化, 以及通过 Pareto 方法直接优化多目标问题. 前者方法利用加权法将

表 3 不同 DOD 范围下允许消耗的循环次数
Table 3 DOD ranges and lifespan cycles

DOD _i 范围	LC_{bati}	LC_{sci}
DOD ₁ (10 %)	70 000	10^6
DOD ₂ (20 %)	31 000	10^6
DOD ₃ (30 %)	18 100	10^6
DOD ₄ (40 %)	11 800	10^6
DOD ₅ (50 %)	8 100	10^6
DOD ₆ (60 %)	5 800	10^6
DOD ₇ (70 %)	4 300	10^6
DOD ₈ (80 %)	3 300	10^6
DOD ₉ (90 %)	2 500	10^6

多目标转化为单目标, 虽然降低了计算成本, 但加权法具有一定的主观性, 无法适用于不同场合及不同决策偏好. 后者方法利用非支配排序算法和智能算法优化多目标问题, 得到一组 Pareto 非劣解, 且这组非劣解中也包含了前者方法的解^[30]. 这些非劣解之间没有优劣之分, 专家可根据不同决策需求, 从中选取一个最优解.

在 Pareto 多目标优化问题中, 每个解向量与其他相邻解之间通常用支配关系描述. 对于函数最小值问题, 如果以下条件成立^[18]

$$\begin{cases} \forall l = 1, 2, \dots, L, f_{i,l} \leq f_{j,l} \\ \exists h = 1, 2, \dots, L, f_{i,h} < f_{j,h} \end{cases} \quad (27)$$

则称解 i 支配解 j , 或解 j 被解 i 支配. 对于某一个解, 若不存在其他解支配该解, 则该解被称为 Pareto 非劣解. 整个可行域内 Pareto 非劣解的集合称为 Pareto 非劣解集, 其对应的目标向量集构成 Pareto 前沿. Pareto 前沿示意图如图 5 所示.

本文利用非支配排序算法获得 Pareto 非劣解集, 算法过程为^[31]:

步骤 1. 假定 x 与 y 为可行解空间中任意两个不同的解, 对应第 k 个目标的目标值分别为 $f_k(x)$ 和 $f_k(y)$. S_x 表示被 x 支配的所有解的集合, n_x 表示支配 x 的解的个数.

步骤 2. 首先令 S_x 为空集, n_x 为 0. 根据式 (27), 判断 x 是否支配 y . 如果 x 支配 y , 则将 y 放入 S_x 中; 如果 y 支配 x , 则 n_x 加 1. 最终, 得到每个解对应的 S_x 与 n_x .

步骤 3. 定义解集 F , 将所有 n_x 为 0 的解放入 F 中, F 即为 Pareto 非劣解集.

2.4 基于状态机与非支配排序的 Pareto 优化

式 (17) 定义了一种典型的 EMS 多目标优化问题, 它包含两个性能指标: 燃料经济性和系统耐久性. 这两个指标具有不同的量纲, 且很难在同一个

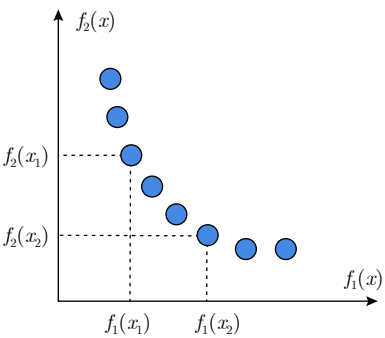


图 5 Pareto 前沿

Fig. 5 Pareto front

等式中进行评价. 因此, 该问题可以转化为一个 Pareto 多目标优化问题, 即寻找 Pareto 非劣解 X^* , 使燃料电池有轨电车的性能指标最优.

为了寻找 Pareto 非劣解, 并得到可行解的变化对性能指标的影响规律, 本文设计一种基于状态机与非支配排序的 Pareto 优化方法. 该方法包含两个循环, 共 9 个步骤. 方法结构如图 6 所示.

步骤 1. 定义可行解空间 Ω , Ω 包含 m 个可行解

$$\Omega = \{X_n | X_n = (x_{1,n}, x_{2,n}, x_{3,n}); n = 1, \dots, m\} \quad (28)$$

其中, X_n 为第 n 个可行解, $x_{1,n}$, $x_{2,n}$, $x_{3,n}$ 为 X_n 中的 3 个元素.

步骤 2. 从 Ω 中提取可行解 X_n , 将其对应的 3 个元素按照式 (29) 代入图 4 所示的 EMS 中

$$\begin{cases} P_{fcmax} = x_{1,n} \\ P_{scmax} = x_{2,n} \\ P_{batmax} = x_{3,n} \end{cases} \quad (29)$$

则 X_n 对应的基于状态机的 EMS 可描述为:

1) 电机处于牵引状态下 ($P_d > 0$), 主要考虑三种情况:

a) 当 $P_d - P_{fcmax} < 0$ 时

$$\begin{cases} P_{fc} = P_d \\ P_{sc} = 0 \\ P_{bat} = 0 \end{cases} \quad (30)$$

b) 当 $P_d - P_{fcmax} \geq 0$ 且 $P_d - P_{fcmax} - P_{scmax} \leq 0$ 时

$$\begin{cases} P_{fc} = P_{fcmax} \\ P_{sc} = P_d - P_{fc} \\ P_{bat} = 0 \end{cases} \quad (31)$$

c) 当 $P_d - P_{fcmax} - P_{scmax} > 0$ 时

$$\begin{cases} P_{fc} = P_{fcmax} \\ P_{sc} = P_{scmax} \\ P_{bat} = P_d - P_{fc} - P_{sc} \end{cases} \quad (32)$$

2) 电机处于制动状态下 ($P_d < 0$), 主要考虑三种情况:

a) 当 $|P_d| + P_{fcmin} < P_{scmax}$ 时

$$\begin{cases} P_{fc} = P_{fcmin} \\ P_{sc} = P_d - P_{fcmin} \\ P_{bat} = 0 \end{cases} \quad (33)$$

b) 当 $|P_d| + P_{fcmin} \geq P_{scmax}$ 且 $|P_d| + P_{fcmin} \leq P_{scmax} + P_{batmax}$ 时

$$\begin{cases} P_{fc} = P_{fcmin} \\ P_{sc} = -P_{scmax} \\ P_{bat} = P_d - P_{fcmin} + P_{scmax} \end{cases} \quad (34)$$

c) 当 $|P_d| + P_{fcmin} > P_{scmax} + P_{batmax}$ 时

$$\begin{cases} P_{fc} = P_{fcmin} \\ P_{sc} = -P_{scmax} \\ P_{bat} = -P_{batmax} \\ P_{mb} = P_d - P_{fcmin} + P_{scmax} + P_{batmax} \end{cases} \quad (35)$$

步骤 3. 将 X_n 对应的 EMS 代入列车模型, 进行工况仿真. 仿真完成后, 获得计算性能指标所需的变量

$$P_{fc,n} = U_{fc,n} \times I_{fc,n} \quad (36)$$

$$SOC_{bat,n} = 1 - \frac{1}{Q} \int I_{bat,n} dt \quad (37)$$

$$SOC_{sc,n} = \frac{U_{sc,n}^2}{U_{scn,n}^2} \quad (38)$$

步骤 4. 通过上述变量, 计算 X_n 对应的性能指标

$$J_{FE,n} = \frac{1}{E_{H2}} \int \frac{P_{fc,n}}{\eta_{fc}} dt \quad (39)$$

$$J_{PD,n} = (\varphi_{fc,n}(P_{fc,n}), \varphi_{bat,n}(SOC_{bat,n}), \varphi_{sc,n}(SOC_{sc,n})) \quad (40)$$

步骤 5. 以步骤 2~4 为循环, 获得所有可行解及其对应的性能指标, 并将这些数据放入空间 R 中.

步骤 6. 从空间 R 中取可行解 p_i , 再任取另一个可行解 q_k , 根据条件

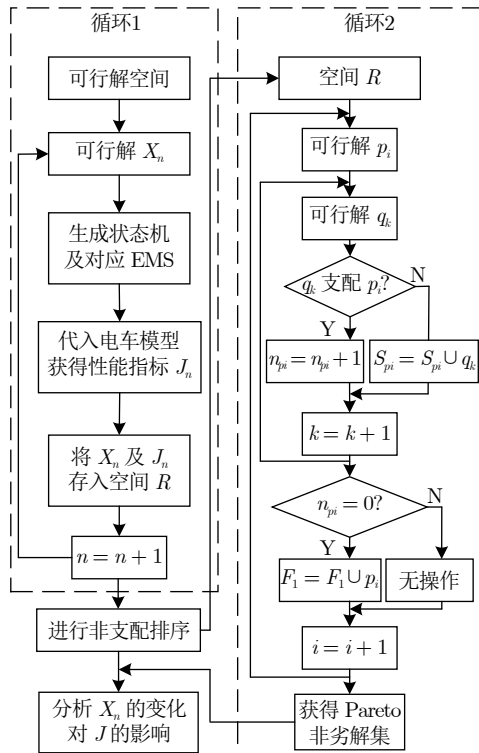


图 6 基于状态机与非支配排序的 Pareto 优化方法

Fig. 6 Pareto optimization based on state machine and non-dominated sorting

$$\begin{cases} J_{FE,q_k} \leq J_{FE,p_i} \\ J_{PD,q_k} \leq J_{PD,p_i} \end{cases} \quad (41)$$

是否同时满足, 判断 q_k 是否支配 p_i .

步骤 7. 根据式 (41), 判断 R 中支配 p_i 的解的数量 n_{pi} .

步骤 8. 以步骤 6 和步骤 7 为循环, 遍历所有 R 中的可行解 p_i , 获得其对应的 n_{pi} . 将 $n_{pi} = 0$ 的可行解放入空间 F_1 中, F_1 即为 Pareto 非劣解集.

步骤 9. 分析 X_n 三个元素 $x_{1,n}$, $x_{2,n}$, $x_{3,n}$ 的变化对 J_{FE} 和 J_{PD} 的影响, 并以此为依据, 从 F_1 中选择一个兼顾燃料经济性与系统耐久性的可行解. 具体分析过程见第 3 节.

3 仿真与分析

为了验证所提方法的有效性, 基于第 1 节的能量流模型和 MATLAB/Simulink 仿真平台建立前 - 后向燃料电池有轨电车仿真模型. 与国内某试运营的燃料电池有轨电车的试验数据对比, 模型误差在 1% 以内^[16]. 列车参数如表 4 所示. 动力电池箱和超级电容箱的串联电压为 480 V, 储能设备参数如表 5 和表 6 所示. 仿真工况为国内某条已运营的有轨电车线路, 线路全长 15 km, 共 23 个站台. 有轨电车在该线路上运行的目标速度曲线如图 7 所示. 仿真考虑储能设备在恒定常温 (25 ℃) 下工作.

基于本文所述优化方法, 燃料电池有轨电车 EMS 的 Pareto 前沿如图 8 所示, 横坐标与纵坐标分别为一次完整工况下电车的氢燃料消耗量和系统性能衰减率, 圆圈代表 Pareto 非劣解对应的目标向量. 由图中 Pareto 前沿可知, 氢燃料消耗量和性能衰减率成反比例关系, 这意味着燃料经济性与系统耐久性是一对相互矛盾的指标, 一个性能的提高必然导致另一个性能的下降. 这些 Pareto 非劣解并无优劣之分. 为了从中选择一个兼顾燃料经济性与系统耐久性的可行解, 需要分析可行解 (即 EMS 的目标功率参数) 的变化对性能指标的影响. 由图 4 可知, 动力电池的优先级最低, 因此假设性能指标对

表 4 列车主要仿真参数
Table 4 The main simulation parameters of tramway

参数	取值	参数	取值
列车质量 (t)	66	最高车速 ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	50
机械传动比	6.28	最大加速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1
惯性质量系数	0.09	最大减速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1
基本阻力系数 A_0	2.59	整车辅助功耗 (kWh)	30
基本阻力系数 B_0	0.0917	DC/DC 效率	92%
基本阻力系数 C_0	0.000775	DC/AC 效率	90%

表 5 PEMFC 系统参数
Table 5 The PEMFC system parameters

参数	取值
额定电压 (V)	540
额定功率 (kW)	150
最大功率 (kW)	170
单电池数量 (个)	735
最大电流 (A)	320

表 6 辅助能量源单体参数
Table 6 The parameters of auxiliary power units

动力电池参数	取值	超级电容参数	取值
额定电压 (V)	3.2	额定电压 (V)	2.7
额定容量 (Ah)	40	额定容量 (F)	3 000
工作温度 (℃)	-20 ~ 45	工作温度 (℃)	-40 ~ 60
内阻 ($\text{m}\Omega$)	≤ 2	内阻 ($\text{m}\Omega$)	0.29

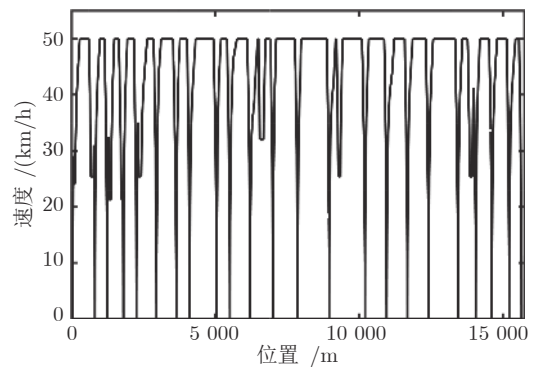


图 7 有轨电车目标速度曲线
Fig. 7 The target speed curve of tramway

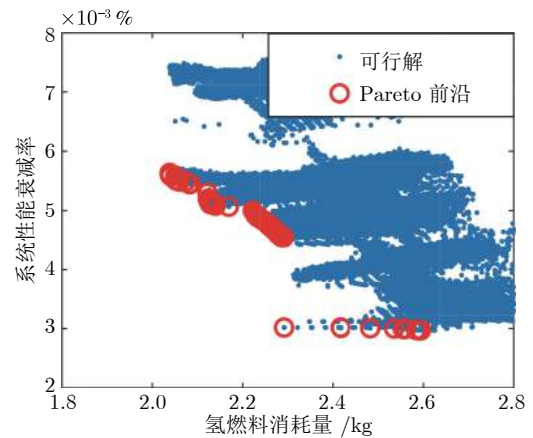


图 8 燃料电池电车 EMS Pareto 前沿
Fig. 8 EMS Pareto front of fuel cell tramway

动力电池目标功率 P_{batmax} 的变化最不敏感, 首先分析 P_{batmax} 恒定时的情况.

当 $P_{batmax} = 150$ kW 时, 燃料电池目标功率 P_{fcmax} 与超级电容目标功率 P_{scmax} 的变化对电车燃料消耗的影响如图 9 所示. 图 9(a) 为三维曲面图, x 轴为 P_{fcmax} , y 轴为 P_{scmax} , z 轴为氢燃料消耗量. 为了更清晰地展示, 图 9(b) 为图 9(a) 的曲面投影在 P_{fcmax} - P_{scmax} 面的等值线图. 与 P_{scmax} 相比, P_{fcmax} 的变化对燃料电池经济性的影响更加明显, 原因是燃料电池系统作为电车的主能量源, 不仅使用优先级最高, 而且在必要时对超级电容和动力电池进行充电, 这些工作都受到 P_{fcmax} 的影响. 随着 P_{fcmax} 的增大, 燃料电池在储能系统输出功率中所占的比重增加, 因此燃料消耗上升, 列车燃料经济性变差. 当 $P_{fcmax} \leq 130$ kW 时, P_{scmax} 越小, 有轨电车燃料经济性越好, 这是因为 P_{scmax} 减小使燃料电池对超级电容的充电功率降低, 充电所需燃料也会减少. 当 $P_{fcmax} \geq 130$ kW 时, P_{scmax} 在约 200~280 kW 的区间和约 300 kW 处有两处向燃料消耗上升方向的凸面, 意味着这两个区域的燃料经济性较好.

图 10 为 P_{fcmax} 与 P_{scmax} 对燃料电池系统耐久性的影响. 随着 P_{fcmax} 的增大, 燃料电池系统的高功率运行时间增加, 而且更易发生功率变化, 这些均使得燃料电池性能衰减率 φ_{FC} 上升. 当 $P_{scmax} \leq 280$ kW 时, 超级电容无法有效分担燃料电池工作压力, 燃料电池随着 P_{scmax} 的增加需要输出更多功率

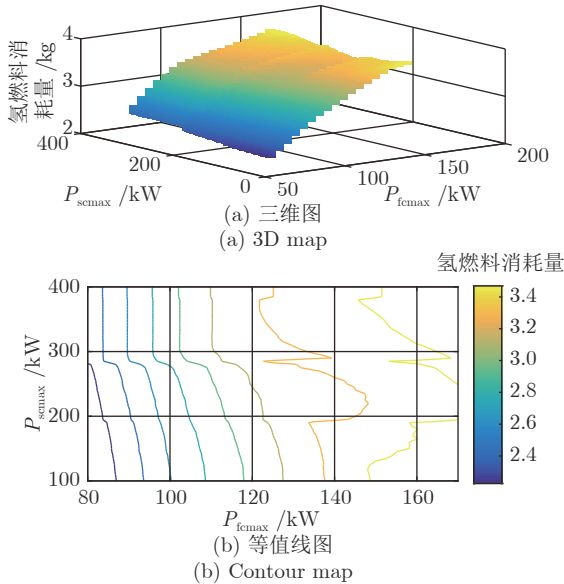


图 9 P_{fcmax} 与 P_{scmax} 变化对燃料消耗的影响 ($P_{batmax} = 150$ kW)

Fig. 9 The effect of P_{fcmax} and P_{scmax} change on fuel consumption ($P_{batmax} = 150$ kW)

对超级电容进行充电, 因此 φ_{FC} 随着 P_{scmax} 的增加而略微上升. 当 $P_{scmax} > 280$ kW 时, 超级电容能有效平复燃料电池的输出功率波动, 并减少燃料电池在高功率状态下的工作时间, 因此燃料电池系统耐久性得到改善.

P_{fcmax} 与 P_{scmax} 对超级电容耐久性的影响如图 11 所示. P_{fcmax} 增加使超级电容的性能衰减率增加, 这是因为根据表 3 的数据可知, 超级电容性能衰减率与充放电循环次数有关, 而与 DOD 范围无关. 当 P_{fcmax} 较小时, 超级电容 DOD 范围较大, 但同时燃料电池对超级电容的充电功率较小, 因此充放电循环次数较少; 当 P_{fcmax} 较大时, 超级电容 DOD 范围较小, 但超级电容能被更快充电至满状态, 充放电循环次数更多, 导致其性能衰减率较高. 当 P_{scmax} 增大时, 超级电容的性能衰减率减小. 这是因为电车模型会根据 P_{scmax} 决定超级电容的容量, P_{scmax} 上升将导致超级电容容量上升. 在输出功率变化不大的情况下, 容量的上升会减小超级电容的充放电循环次数, 因此其耐久性得到提升.

P_{fcmax} 与 P_{scmax} 对动力电池耐久性的影响如图 12 所示. P_{fcmax} 与 P_{scmax} 的增大都能使动力电池耐久性得到提升, 这是因为燃料电池与超级电容均优先于动力电池工作, 两者的目标功率越大, 意味着动

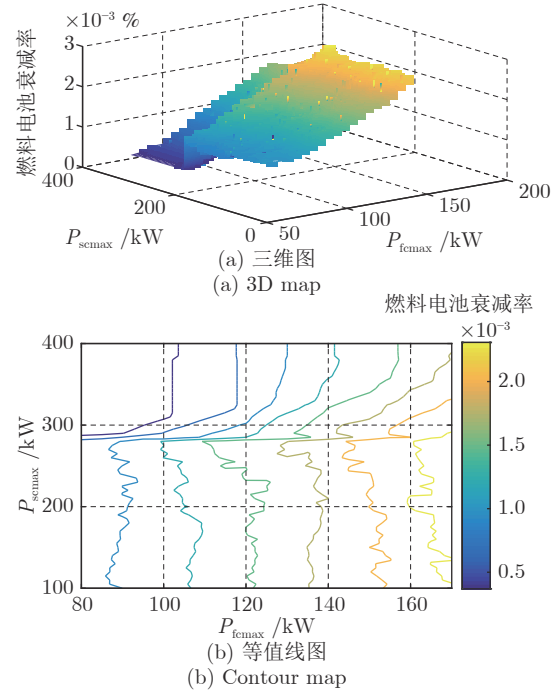


图 10 P_{fcmax} 与 P_{scmax} 变化对燃料电池耐久性的影响 ($P_{batmax} = 150$ kW)

Fig. 10 The effect of P_{fcmax} and P_{scmax} change on fuel cell durability ($P_{batmax} = 150$ kW)

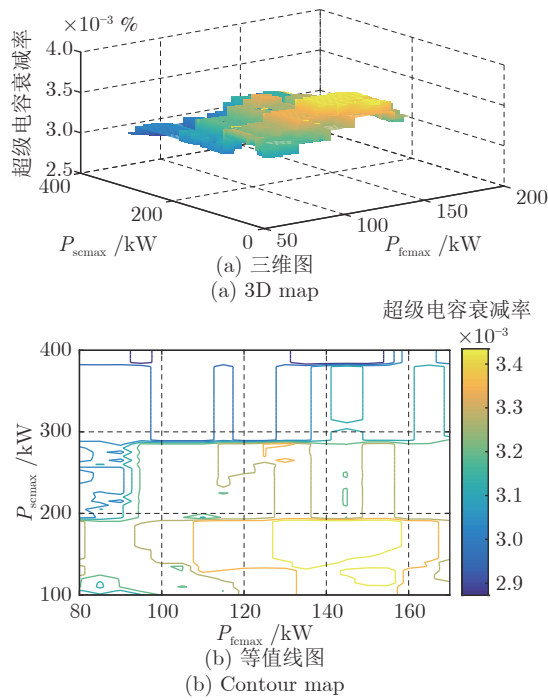


图 11 P_{fcmax} 与 P_{scmax} 变化对超级电容耐久性的影响 ($P_{batmax} = 150$ kW)

Fig. 11 The effect of P_{fcmax} and P_{scmax} change on SC durability ($P_{batmax} = 150$ kW)

力电池的工作时间越少, 其性能衰减率也越低. 从图中还可看到, 存在一个 P_{scmax} 随 P_{fcmax} 减小而增大的凹面, 在这一区域内动力电池耐久性较好.

接下来分析动力电池目标功率的变化对性能指标的影响. 图 13 为 $P_{scmax} = 300$ kW 时, P_{fcmax} 与 P_{batmax} 对燃料电池经济性的影响. 随着 P_{batmax} 的下降, 燃料消耗量也在下降. 这是因为燃料电池作为主动力源, 需要为动力电池充电, P_{batmax} 降低使动力电池的充电功率降低, 燃料电池系统也能以更低的功率进行工作, 因此燃料消耗量减小. 由图还可得知, P_{fcmax} 越高, 降低 P_{batmax} 对燃料经济性的改善越明显.

P_{fcmax} 与 P_{batmax} 对燃料电池耐久性的影响如图 14 所示. 随着 P_{batmax} 的增加, 燃料电池性能衰减率增大. 这是因为动力电池的充电功率由 P_{batmax} 决定, P_{batmax} 增大使动力电池的充电功率也随之上升, 燃料电池需要输出更高功率为动力电池充电, 因此燃料电池耐久性变差.

P_{fcmax} 与 P_{batmax} 对超级电容和动力电池耐久性的影响分别如图 15 和图 16 所示. 由图可知, 由于燃料电池是主动力源, 而动力电池是辅助功率源, 且优先级较低, 因此动力电池目标功率 P_{batmax} 的变化对超级电容和动力电池的性能衰减率的影响较

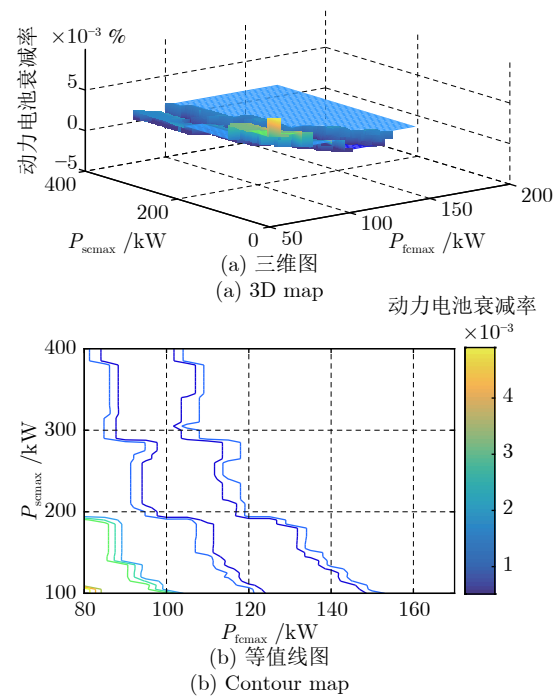


图 12 P_{fcmax} 与 P_{scmax} 变化对动力电池耐久性的影响 ($P_{batmax} = 150$ kW)

Fig. 12 The effect of P_{fcmax} and P_{scmax} change on battery durability ($P_{batmax} = 150$ kW)

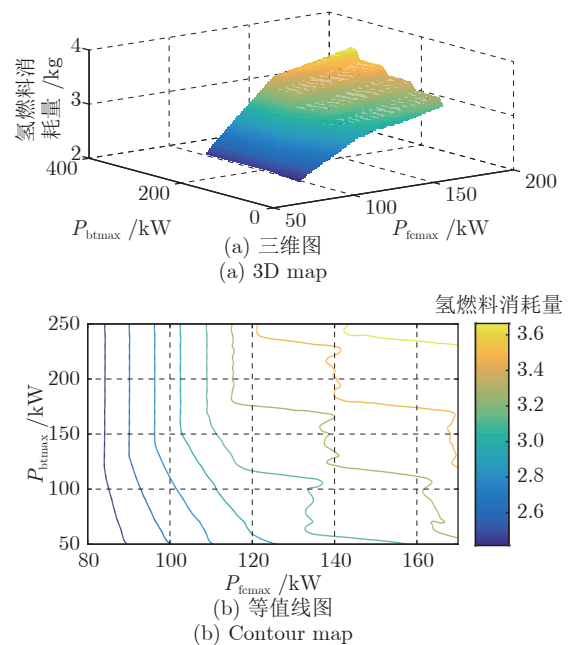


图 13 P_{fcmax} 与 P_{batmax} 变化对燃料经济性的影响 ($P_{scmax} = 300$ kW)

Fig. 13 The effect of P_{fcmax} and P_{batmax} change on fuel consumption ($P_{scmax} = 300$ kW)

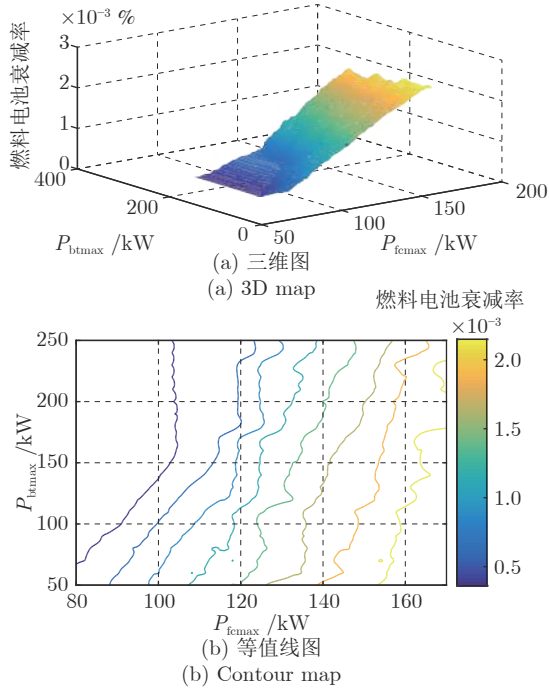


图 14 P_{fcmax} 与 P_{batmax} 变化对燃料电池耐久性的影响 ($P_{scmax} = 300$ kW)

Fig. 14 The effect of P_{fcmax} and P_{batmax} change on fuel cell durability ($P_{scmax} = 300$ kW)

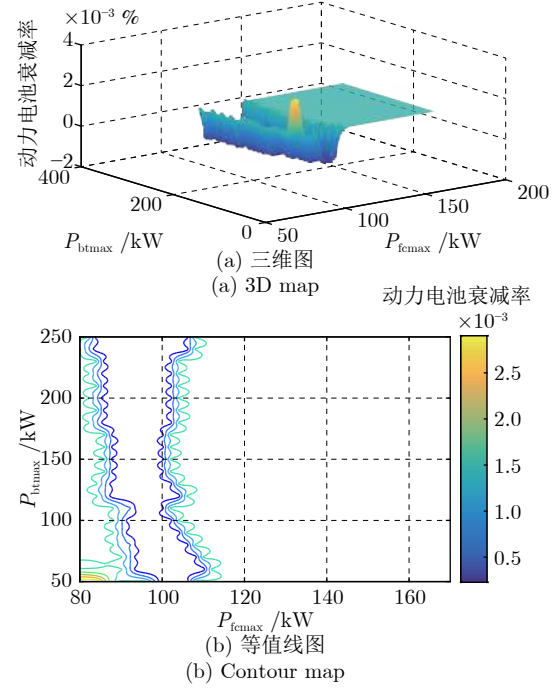


图 16 P_{fcmax} 与 P_{batmax} 变化对动力电池耐久性的影响 ($P_{scmax} = 300$ kW)

Fig. 16 The effect of P_{fcmax} and P_{batmax} change on battery durability ($P_{scmax} = 300$ kW)

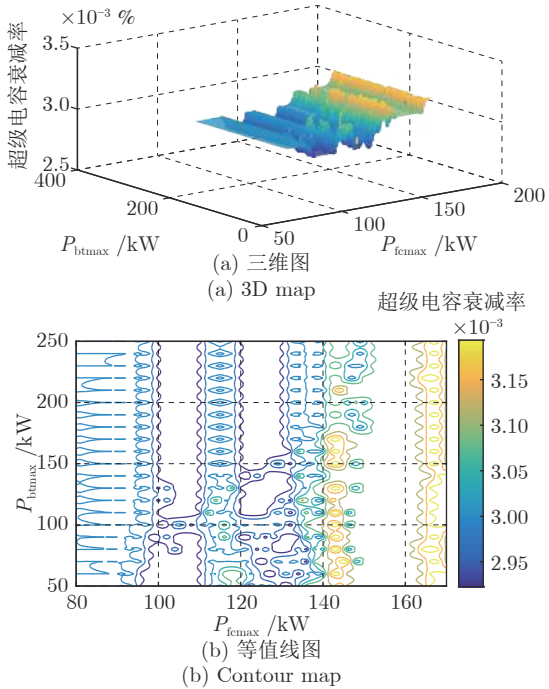


图 15 P_{fcmax} 与 P_{batmax} 变化对超级电容耐久性的影响 ($P_{scmax} = 300$ kW)

Fig. 15 The effect of P_{fcmax} and P_{batmax} change on SC durability ($P_{scmax} = 300$ kW)

小. 综上所述, 总结 EMS 目标功率参数对有轨电车性能指标的影响规律, 如表 7 所示. 表中的“↗”和“↘”分别代表增大和减小.

基于以上分析, 可选定一个兼顾燃料经济性和储能系统耐久性的 Pareto 非劣解. 最终, 燃料电池目标功率 P_{fcmax} 的值被选定为 84 kW. 如图 9 所示, 当 P_{fcmax} 在 80~84 kW 区间内, 有轨电车燃料经济性较好. 在储能系统耐久性方面, $P_{fcmax} = 84$ kW 均能达到较优的性能衰减率 (如图 10~12 所示). 当 P_{scmax} 在 385~400 kW 区间内, 超级电容耐久性达到最优 (如图 11 所示). 因此选择超级电容目标功率 $P_{scmax} = 385$ kW. 此时, 燃料电池与动力电池耐久性亦达到最优 (如图 10 和图 12 所示), 燃料经济性也较好 (如图 9 所示). 当 $P_{fcmax} = 84$ kW 时, P_{batmax} 在 50~125 kW 区间内燃料经济性较好 (如图 13), 在 100~250 kW 区间内燃料电池耐久性较好, 且燃料电池耐久性随着 P_{batmax} 增加而上升 (如图 14), 因此选择 $P_{batmax} = 125$ kW.

将上述所选的 Pareto 非劣解代入燃料电池有轨电车模型, 依据图 7 所示工况进行仿真, 各能量源实际输出功率曲线如图 17 所示. 由图可知, 所有能量源均可稳定的工作, 列车按照预定功率完成工况. 燃料电池系统工作状态平稳, 功率波动小, 超级

电容与动力电池得到充分利用,这有利于电车燃料经济性和系统耐久性的提升.

将本文所得结果与功率跟随 EMS 和基于 GA 优化的 EMS 进行对比^[17],结果如表 8 所示. 基于 GA 的 EMS 能优化功率跟随策略的燃料经济性和燃料电池耐久性,电车氢燃料消耗降低了 27.7%,燃料电池性能衰减率降低了 51.2%. 然而,这一优化牺牲了超级电容和动力电池的耐久性能. 相比 GA 优化策略,基于状态机与非支配排序 Pareto 优化方法可降低 2.4% 的氢燃料消耗,并分别降低了 90.3%、12.1% 和 55.7% 的燃料电池、超级电容与动力电池性能衰减率,燃料电池系统效率也提高了 0.1%. 本文所提策略相比功率跟随策略能降低 29.4% 的燃料消耗量.

表 7 性能指标分析总结			
Table 7 Analysis and summary of performance index			
性能指标	P_{fcmax} ↗	P_{scmax} ↗	P_{batmax} ↗
燃料消耗量	↗ (图9)	↗ (图9)	↗ (图13)
燃料电池性能衰减率	↗ (图10)	↗ (图10) 在 280 kW 处 ↘	↗ (图14)
超级电容性能衰减率	↗ (图11)	↘ (图11)	影响较小 (图15)
动力电池性能衰减率	↘ (图12)	↘ (图12)	影响较小 (图16)

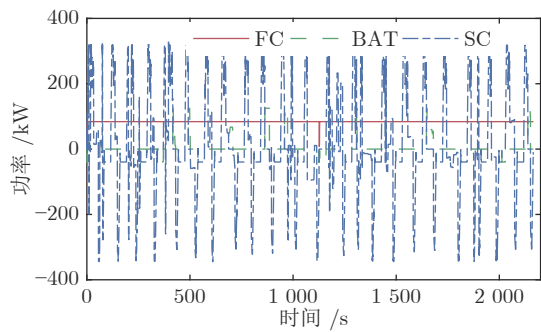


图 17 各能量源输出功率曲线

Fig. 17 The output power curves of power sources

表 8 不同策略下的性能指标对比			
Table 8 The performance index of different EMS			
性能指标	功率跟随策略	基于 GA 优化	基于Pareto 多目标优化
燃料消耗量 (kg)	3.43	2.48	2.42
燃料电池性能衰减率 (%)	2.42×10^{-3}	1.18×10^{-3}	1.15×10^{-4}
超级电容性能衰减率 (%)	3.2×10^{-3}	3.3×10^{-3}	2.9×10^{-3}
动力电池性能衰减率 (%)	1.43×10^{-3}	3.23×10^{-3}	1.43×10^{-3}
燃料电池系统效率 (%)	53.3	55.6	55.7

4 结论与下一步工作

为了改善燃料电池/超级电容/动力电池有轨电车的燃料经济性与系统耐久性,以氢燃料消耗量和各能量源性能衰减率作为性能指标,对电车能量管理进行多目标优化. 由于两种性能指标相互矛盾且很难找到合适权重将其转化为单目标优化问题,因此设计了基于状态机与非支配排序的能量管理 Pareto 多目标优化方法. 该方法可获得 Pareto 非劣解集,并通过分析 EMS 参数变化对性能指标的影响,遴选出兼顾燃料经济性与系统耐久性的 Pareto 非劣解. 所述方法可有效降低列车燃料消耗量和储能设备性能衰减率,并提高燃料电池系统效率. 对比功率跟随策略和基于遗传算法优化的策略,该方法获得的 EMS 使动力电车达到最优的燃料经济性和储能系统耐久性. 同时,该方法揭示了混合动力电车的 EMS 目标功率参数对电车性能指标的影响规律,为今后进一步研究燃料电池混合动力电车的能量管理奠定了基础.

在未来工作中,本文仍有以下问题需要进一步考虑: 智能算法的引入可提高对真实 Pareto 前沿的趋近程度,获得精确度更高的优化成果. 如何在本文算法中引入更加高级的智能算法,是我们未来的一个研究方向. 此外,充放电电流倍率和工作温度对储能设备的工作状态及性能衰减率影响较大. 未来我们将在储能设备模型和性能指标中考虑工作温度等更多因素,进一步提高仿真结果的准确性. 另外,由于仿真与实际系统的差异所带来的问题应加以考虑.

References

1 Kasimalla V K R, G N S, Velisala V. A review on energy allocation of fuel cell/battery/ultracapacitor for hybrid electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 2018, **42**: 4263–4283

2 Scheepmaker G M, Goverde R M P, Kroon L G. Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*, 2017, **257**(2): 355–376

3 Wu Tie-Zhou, Wang Yue-Yang, Xu Yu-Shan, Guo Lin-Xin, Shi Xiao, He Shu-Ting. Energy optimal control strategy of HEV with PMP algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(11): 2092–2102
(吴铁洲, 王越洋, 许玉珊, 郭林鑫, 石肖, 何淑婷. 基于 PMP 算法的 HEV 能量优化控制策略. 自动化学报, 2018, **44**(11): 2092–2102)

4 Ye Pei-Jun, Lv Yi-Sheng, Ji Jing-Chu. Literature analysis for traffic simulation and computational experiments based on social networks. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(9): 1402–1412

- (叶佩军, 吕宜生, 吉竟初. 基于社会网络视角的交通仿真和计算实验研究分析. 自动化学报, 2013, **39**(9): 1402–1412)
- 5 Han Y, Li Q, Wang T H, Chen W R, Ma L. Multi-source coordination energy management strategy based on SOC consensus for a PEMFC–Battery–Supercapacitor hybrid tramway. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, **67**(1): 296–305
 - 6 Zhang W B, Li J Q, Xu L F, Ouyang M G. Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy. *Energy Conversion and Management*, 2017, **134**: 59–69
 - 7 Dong H R, Zhu H N, Gao S G. An approach for energy-efficient and punctual train operation via driver advisory system. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2018, **10**(3): 57–67
 - 8 Olatomiwa L, Mekhilef S, Ismail M S, Moghavvemi M. Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **62**: 821–835
 - 9 Lin Hong-Tao, Jiang Jiu-Chun, Jia Zhi-Dong, Cheng Long, Qi Hong-Feng, Wei Shao-Yuan. Multi-objective model predictive control for hybrid energy storage system with adaptive adjustment of weight coefficients. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2018, **38**(18): 5538–5547
(林泓涛, 姜久春, 贾志东, 程龙, 齐洪峰, 韦绍远. 权重系数自适应调整的混合储能系统多目标模型预测控制. 中国电机工程学报, 2018, **38**(18): 5538–5547)
 - 10 Zhang P, Yan F, Du C Q. A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **48**: 88–104
 - 11 Zhang H, Yang J B, Zhang J Y, Song P Y, Xu X H. A firefly algorithm optimization-based equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid light rail vehicle. *Energies*, 2019, **12**(14): 2665
 - 12 Garcia P, Fernandez L M, Torreglosa J P, Jurado F. Comparative study of four control systems for a 400-kW fuel cell battery-powered tramway with two dc/dc converters. *International Transactions on Electrical Energy System*, 2013, **23**: 1028–1048
 - 13 Yang Ji-Bin, Song Peng-Yun, Zhang Ji-Ye, Chen Yan-Qiu, Wang Guo-Liang. Research on modeling and operation Control of fuel cell hybrid power train. *Journal of the China Railway Society*, 2017, **39**(9): 40–47
(杨继斌, 宋鹏云, 张继业, 陈彦秋, 王国梁. 燃料电池混合动力列车建模与运行控制研究. 铁道学报, 2017, **39**(9): 40–47)
 - 14 Wang Qin-Pu, You Si-Xiong, Li Liang, Yang Chao. Survey on energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, **53**(16): 1–19
 - (王钦普, 游思雄, 李亮, 杨超. 插电式混合动力汽车能量管理策略研究综述. 机械工程学报, 2017, **53**(16): 1–19)
 - 15 Xu L F, Ouyang M G, Li J Q, Yang F Y. Dynamic programming algorithm for minimizing operating cost of a PEM fuel cell vehicle. In: Proceedings of the 21st IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Hangzhou, China: IEEE, 2012. 28–31
 - 16 Yang Ji-Bin, Xu Xiao-Hui, Zhang Ji-Ye, Song Peng-Yun. Multi-objective optimization of energy management strategy for fuel cell tram. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, **54**(22): 153–159
(杨继斌, 徐晓惠, 张继业, 宋鹏云. 燃料电池有轨电车能量管理策略多目标优化. 机械工程学报, 2018, **54**(22): 153–159)
 - 17 Li M G, Li M, Han G P, Liu N, Zhang Q M, Wang Y O. Optimization analysis of the energy management strategy of the new energy hybrid 100% low-floor tramcar using a genetic algorithm. *Applied Sciences*, 2018, **8**(7): 1144
 - 18 Su Zhao-Pin, Zhang Guo-Fu, Jiang Jian-Guo, Yue Feng, Zhang Ting. Multi-objective approach to emergency resource allocation using none-dominated sorting based differential evolution. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(2): 195–214
(苏兆品, 张国富, 蒋建国, 岳峰, 张婷. 基于非支配排序差异演化的应急资源多目标分配算法. 自动化学报, 2017, **43**(2): 195–214)
 - 19 Jain M, Desai C, Khanna N, Williamson S S. Optimal powertrain component sizing of a fuel cell plug-in hybrid electric vehicle using multi-objective genetic algorithm. In: Proceedings of the 35th Annual Conference of IEEE. Porto, Portugal: IEEE, 2009. 3741–3746
 - 20 Li Lian-Sheng, Deng Lou-Lou, Mei Zhi-Wu, Lv Zheng-Xin, Liu Ji-Hong. Pareto-based multi-objective optimization of focusing X-ray pulsar telescope and multi-physics coupling analysis. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, **54**(23): 174–184
(李连升, 邓楼楼, 梅志武, 吕政欣, 刘继红. 聚焦型 X 射线脉冲星望远镜 Pareto 多目标优化与多场耦合分析. 机械工程学报, 2018, **54**(23): 174–184)
 - 21 Yang J B, Xu X H, Peng Y Q, Zhang J Y, Song P Y. Modeling and optimal energy management strategy for a catenary-battery-ultracapacitor based hybrid tramway. *Energy*, 2019, **183**: 1123–1135
 - 22 Yang Ji-Bin, Song Peng-Yun, Zhang Ji-Ye, Wang Guo-Liang, Zhang Han. Research on simulation system of hybrid modern tramway. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, **53**(18): 161–168
(杨继斌, 宋鹏云, 张继业, 王国梁, 张晗. 混合动力现代有轨电车仿真系统研究. 机械工程学报, 2017, **53**(18): 161–168)
 - 23 Spiegel C. *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB*. New York: Academic Press, 2008. 335–364
 - 24 Tremblay O, Dessaint L A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electric Vehicle*

Journal, 2009, **3**(2): 289–298

- 25 Ehsani M, Gao Y, Longo S, Ebrahimi K. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design (Second Edition)*. Boca Raton: CRC Press, 2018. 337–370
- 26 Herrera V I, Gaztanaga H, Milo A, Saez-de-Ibarra A, Etxeberria-Otadui I, Nieva Txomin. Optimal energy management and sizing of a battery-supercapacitor-based light rail vehicle with a multiobjective approach. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, **52**(4): 3367–3377
- 27 Fang L C, Qin S Y, Xu G, Li T L, Zhu K M. Simultaneous optimization for hybrid electric vehicle parameters based on multi-objective genetic algorithms. *Energies*, 2011, **4**(3): 532–544
- 28 Chen H C, Pei P C, Song M C. Lifetime prediction and the economic lifetime of proton exchange membrane fuel cells. *Applied Energy*, 2015, **142**: 154–163
- 29 Fletcher T, Thring R, Watkinson M. An energy management strategy to concurrently optimise fuel consumption & PEM fuel cell lifetime in a hybrid vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**(46): 21503–21515
- 30 Qu Kai-Ping, Li Hao-Fei, Yu Tao. Adjoin uniform axes method and its application to the Pareto optimal operation of electric and natural gas combined systems. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2018, **38**(7): 1990–2000
(瞿凯平, 李昊飞, 余涛. 临近邻近均分轴线法及其在电-气互联系统帕累托优化运行中的应用. 中国电机工程学报, 2018, **38**(7): 1990–2000)
- 31 Deb K. Multiobjective genetic algorithms: problem difficulties and construction of test functions. *Evolutionary Computation*, 1999, **7**(3): 205–230

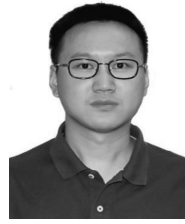


张 晗 西南交通大学信息科学与技术学院博士研究生. 主要研究方向为新能源车辆功率控制, 多目标优化, 电池管理系统, 交通流模拟.

E-mail: h.zhang.phd@foxmail.com

(**ZHANG Han** Ph.D. candidate at the School of Information Science

and Technology, Southwest Jiaotong University. His research interest covers new energy vehicle power control, multi-objective optimization, battery management system, and traffic flow simulation.)

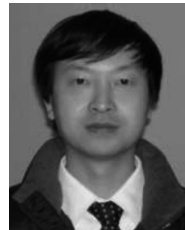


杨继斌 西华大学汽车与交通学院讲师. 主要研究方向为车辆混合动力系统控制与优化.

E-mail: yangjibin08@163.com

(**YANG Ji-Bin** Lecturer at the School of Automobile and Transportation, Xihua University. His research

interest covers hybrid power system control and optimization of vehicle.)



张继业 西南交通大学牵引动力国家重点实验室教授. 主要研究方向为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. 本文通信作者.

E-mail: jyzhang@home.swjtu.edu.cn

(**ZHANG Ji-Ye** Professor at the

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University. His current research interest covers fluid-solid coupling dynamics of high speed trains, complex system stability and control, and hybrid vehicle. Corresponding author of this paper.)



宋鹏云 西南民族大学电气信息工程学院讲师. 主要研究方向为动力学与控制 and 电力电子技术.

E-mail: songpy23@foxmail.com

(**SONG Peng-Yun** Lecturer at the College of Electrical and Information Engineering, Southwest Minzu

University. His current research interest covers dynamics and control and power electronics technology.)



徐晓惠 西华大学汽车与交通学院车辆工程系副教授. 主要研究方向为非线性关联系统的稳定性分析和控制, 包含人工神经网络, 车辆自动跟随控制系统, 混沌系统.

E-mail: xhxu@163.com

(**XU Xiao-Hui** Associate professor

at the School of Automobile and Transportation, Xihua University. Her current research interest covers stability theory and control of nonlinear interconnected systems, including artificial neural networks, automatic vehicle following system, and chaotic systems.)