

采用 NSGA-II 算法的车载复合电源参数匹配

周 放¹, 宋传学¹, 梁天唯², 肖 峰¹

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要: 提出了一种主动并联式车载复合电源的参数匹配/能量管理联合优化方法。首先, 根据整车性能指标确定电池组和超级电容组的容量范围, 并针对部件性能制定能量管理策略, 然后, 以复合电源替换成本和日均电耗最小为目标建立多目标优化函数, 采用受控精英多目标遗传算法(Controlled elitist NSGA-II)在不同的日均里程下对复合电源参数和能量管理策略同时进行优化, 得到对应的 Pareto 解集, 作为备选。综合考虑备选集的初始成本、百公里总成本和电池组寿命里程, 优选电池组和超级电容组参数。优化结果表明: 日均里程在 48 km 以内时, 匹配 22 kW·h 电池组, 超过 48 km 后, 里程越大, 匹配电池组容量越大; 在不同的日均里程下, 不同容量的电池组匹配一个 60 W·h 左右的超级电容组可以达到综合性能最优。与电池单独优化相比, 电源替换成本平均降低 11.5 %, 寿命里程平均提高 19.8 %, 日均总成本平均降低 13.2 %。

关键词: 车辆工程; 复合电源; 受控精英多目标遗传算法; 替换成本; 多目标优化

中图分类号: U461.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2017)05-1336-08

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201705002

Parameter matching of on-board hybrid energy storage system using NSGA-II algorithm

ZHOU Fang¹, SONG Chuan-xue¹, LIANG Tian-wei², XIAO Feng¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: An integrated parameter matching/energy management optimization method is proposed for active on-board Hybrid Energy Storage System (HESS). The optimization model with two indicators, HESS replacement costs and energy consumption, was set up and solved using controlled elitist NSGA-II algorithm to obtain Pareto sets as alternatives. After comparing the initial cost, daily total cost and battery pack mileage of lifetime of the alternatives, HESS parameters and corresponding energy management were selected. When the daily range is within 48 km, the optimal battery pack capacity is 22 kW·h, when the daily range exceeds 48 km, the optimal battery pack capacity increases with the daily range. An ultracapacitor pack around 60 W·h is adequate for various daily range. Compared with the optimization results of battery only, using the proposed optimization

收稿日期: 2016-08-24.

基金项目: 吉林省科技重点攻关项目(20150204017GX).

作者简介: 周放(1988-), 男, 博士研究生。研究方向: 车载复合电源关键技术。E-mail: zhoushang13@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 肖峰(1986-), 男, 助理研究员, 博士。研究方向: 汽车系统动力学。E-mail: xiaofeng4206@126.com

method, the replacement cost is reduced by 11.5% in average, the battery pack mileage of lifetime is raised by 19.8% in average, the daily total cost is reduced by 13.2%. The proposed optimization method ensures that the main indicators are optimal and the secondary indicators are satisfactory.

Key words: vehicle engineering; hybrid energy storage system(HESS); controlled elitist NSGA-II; replacement cost; multi-objective optimization

0 引言

电动汽车能够降低燃油消耗,并且具有零排放和环境友好的特点,是应对能源和环境危机的有效解决方案。但电池作为电动汽车动力源往往存在功率密度低和循环寿命短的问题,在车辆行驶过程中的峰值功率需求和瞬态功率会加速电池组的老化,从而增加了电源在质保期内的替换成本。超级电容具有功率密度高和循环寿命长的优点,由超级电容和电池组成的复合电源可以克服上述缺点,充分发挥两者在功率密度和能量密度方面的优势。

超级电容的加入旨在延长电池组寿命、降低成本,同时保证经济性,参数匹配和能量管理策略制定是以上目标能否达到预期的核心问题,也是近年来的研究热点。Rui 等^[1]以复合电源成本和使用成本加权和最小为目标对电源参数进行优化匹配。王庆年等^[2]基于目标工况对功率需求进行解耦,并以经济性、效率、寿命和成本为参考,对 HEV 的发动机、电池和超级电容进行了匹配。Hu 等^[3]以复合电源初始成本和使用成本加权和为优化目标,采用凸优化对电源参数和功率分配进行优化。Shen 等^[4]以复合电源质量和电池工况衰减加权最低为优化目标,采用 DIRECT 算法对复合电源参数和控制策略参数进行优化。Song 等^[5]以复合电源成本和工况下电池容量衰减最小为目标,采用多次动态规划对超级电容参数和功率分配策略进行了优化。

本文以车载主动并联式复合电源构型为研究对象,以整车性能为约束,以复合电源的替换成本和车辆日均电耗为优化目标建立优化函数,针对不同的日均里程工况,采用受控精英快速非支配遗传算法(Controlled elitist NSGA-II)进行优化求解,并根据电池组寿命里程等性能指标对求解结果进一步优选,进行复合电源的多目标优化匹配设计。

1 复合电源构型选择

复合电源构型包括直接并联和主动并联。直接并联结构中电流不可控;电池组主动并联结构中,电机控制器直接和超级电容组连接,电压范围波动大,控制难度增加^[6]。超级电容组主动并联结构中,母线电压波动范围小,DC/DC 工作时间短,负荷较小,不易出现发热问题,选为本文目标构型,如图 1 所示。

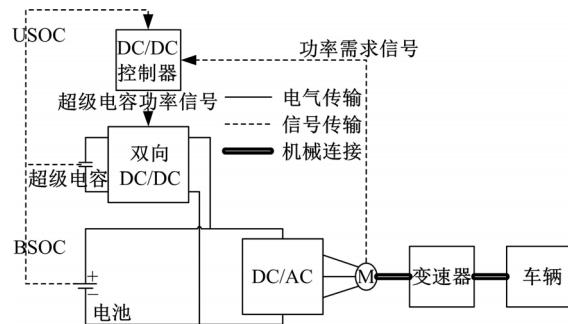


图 1 复合电源构型

Fig. 1 HESS topology

2 参数匹配目标

复合电源的构型确定后,需要确定电池组串、并联数 n_{bs} 、 n_{bp} , 超级电容组串、并联数 n_{ucs} 、 n_{ucp} , 以及 DC/DC 的功率等级 P_{DC} 。复合电源的参数优化匹配任务就是在满足整车性能需求的前提下,寻找一组参数集 $X = [n_{bs}, n_{bp}, n_{ucs}, n_{ucp}, P_{DC}]$, 使目标性能指标达到最优^[7]。

本文选择复合电源替换成本和整车经济性作为待优化指标,建立多目标优化框架,寻找最优参数集 X。

3 参数优化匹配流程

用于匹配优化的电池类型选取松下 18650B, 超级电容选取 Maxwell 的 BCAP 3000, 单体参数如表 1 所示。

电机峰值功率 55 kW, 峰值转矩 190 N·m, 最大转速为 9000 r/min, 电压等级 312 V, DC/DC

表 1 单体参数

Table 1 Cell parameter

类型	内阻/mΩ	容量	电压/V	能量密度/(W·h·kg⁻¹)	功率密度/(kW·kg⁻¹)
电池	50~100	3.3 Ah	2.5~4.2	243	0.486
超级电容	0.29	3000 F	0~2.7	6	5.9

功率不小于电机峰值功率, P_{DC} 定为 55 kW。超级电容单体容量较大, 并联数选为 1, 即 n_{ucp} 为 1。

3.1 容量范围

车载电源需要满足车辆能量需求, 受续驶里程限制。电池组容量应满足车辆在许用荷电状态(SOC)范围内达到续驶里程, 能量需求为:

$$E_b \geq \frac{E_{100} L}{100(SOC_H - SOC_L)} \quad (1)$$

式中: $E_{100} = 12.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 为车辆百公里电耗; $L = 120 \text{ km}$, 为续驶里程; $SOC_H = 90\%$, 为电池组 SOC 上限; $SOC_L = 20\%$, 为电池 SOC 下限。

根据式(1)计算得到: 电池组能量不小于 21.4 kW·h; $n_{bp} \geq 21.4 \times 1000 / n_{bs} / Q = 21.19$, 其中 Q 为电池单体容量, 11.88 W·h; n_{bp} 不小于 22。

整车能量需求分为循环能量和耗散能量^[8], 其中循环能量包括车辆的动能和势能, 这部分能量可以通过再生制动回收, 并在超级电容组中循环, 超级电容应该满足循环流动的能量需求。图 2 为 UDDS 工况下车辆的循环功率和耗散功率需求, 其中循环功率在子工况(相邻停车之间的工况)内积分为 0。

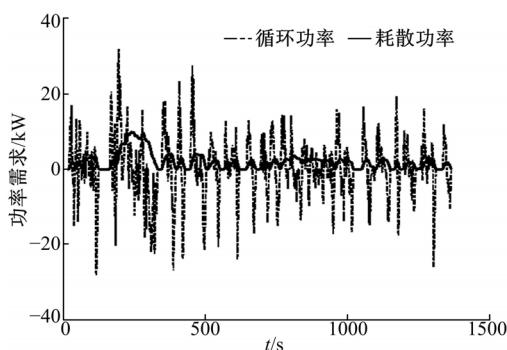


图 2 功率需求分离

Fig. 2 Power demand separation

定义车辆制动回收能量与循环能量的比值为制动效率, 电池组提供平均充放电功率, 剩余功率由超级电容承担, 据此求出超级电容组的充电和放电总能量, 然后求出每个子工况下的超级电容组平均能量需求, 最后根据许用电压范围以及超级电容组和 DC/DC 效率计算超级电容组的容量范围:

$$E_{UC} \geq \frac{\int_{t \in \text{cycle}} |P_{UC}(t)| dt}{n_{subcycle} \left(\frac{U_H^2 - U_L^2}{U_{max}^2} \right) \eta_{UC} \eta_{DC}} \quad (2)$$

式中: P_{UC} 为超级电容功率, kW; $n_{subcycle}$ 为子工况数; U_H 、 U_L 分别为超级电容电压上限和下限, V; U_{max} 为超级电容最大电压, V; η_{UC} 为超级电容组效率; η_{DC} 为 DC/DC 平均效率。

根据式(2)计算得到: 超级电容组容量不小于 44.3 W·h, n_{ues} 不小于 15。

3.2 能量管理策略

本文制定了逻辑门限策略并对其参数进行优化, 以保证结果能够近似最优且能实际应用。

控制逻辑如下: 再生制动功率不超过 $P_{UC,limit}$ 时, 电池充电, 超过后, 超级电容充电, 同时电池为超级电容以恒功率 P_{ch} 供电; 功率需求不超过 P_{low} 时, 电池单独供电; 功率需求在 P_{min} 和 P_{high} 之间时, 电池以 P_{min} 供电, 超级电容补足剩余需求; 功率需求超过 P_{high} 之后, 电池以 P_{max} 供电, 超级电容补足剩余需求; 功率需求为正, 如果 USOC 小于 0.5, 则电池单独供电, 并且向超级电容充电; 在电池功率输出上加入一阶低通滤波防止振荡, 滤波常数为 tau。控制策略共有 6 个待定参数: $\text{Para}_{EMS} = [P_{UC,limit}, P_{min}, P_{max}, P_{high}, P_{ch}, \tau]$ 。

再生制动策略表述如下: 在满足 ECE 法规和 I 线限制的要求下, 前、后制动力分配尽量使前轮制动力最大; 机电制动力分配中, 电机转速低于 160 r/min 或电池组 SOC 大于 0.9 时, 电机不回收能量^[9]。

3.3 行驶-充电工况

以 UDDS 工况为目标工况, 根据 NHTS 统计数据^[10], 选择 12、24、36、48、72 和 96 km 为不同的日均里程, 并与充电工况结合, 组成行驶消耗-充电工况。工况初始 SOC 为 0.9, 充电方式为每天晚上充电, 交流电 220 V, 30 A, SOC 达到 0.9 时, 充电停止。

3.4 多目标优化

3.4.1 优化模型

优化目标是质保期内的替换成本 C_{total} 和日

均电耗 E_{total} , 优化模型表示为:

$$\begin{cases} F(x) = \min\{C_{\text{total}}(x), E_{\text{total}}(x)\} \\ x = [n_{\text{bp}}, n_{\text{ucs}}, \text{Para}_{\text{EMS}}] \\ x \in [x_{\text{L}}, x_{\text{H}}] \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 为优化参数集; x_{L} 、 x_{H} 分别为优化参数集下限和上限。

3.4.2 复合电源替换成本

复合电源的替换成本定义为复合电源各部件的初始成本和质保期内替换次数的乘积。其中 DC/DC 和超级电容组循环寿命很长, 在质保期内不用替换, 只计算电池组替换成本:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{UC}} n_{\text{ucs}} + C_{\text{DC}} P_{\text{DC}} + n_{\text{replace}} C_{\text{B}} n_{\text{bs}} n_{\text{bp}} \quad (4)$$

式中: C_{UC} 为超级电容单体价格, 万元; C_{DC} 为 DC/DC 单位功率价格, 万元; C_{B} 为电池单体价格, 万元; n_{replace} 为电池组替换次数。

根据工信部《关于免征新能源汽车车辆购置税的公告》规定^[11], 对新能源汽车动力电池、电机、电控等关键零部件提供不低于 5 年或 10 万公里(以先到者为准)质保, 因此, 对车辆行驶 10 万公里的复合电源替换成本进行计算。

当电池组中单体可用容量衰减至初值的 80% 时, 电池组进行替换, 用加权电荷流通量表示电池容量衰减, 当单体的加权电荷流通量达到标准工况下的可用安时流通量时, 电池组进行替换, n_{replace} 根据下式计算:

$$n_{\text{replace}} = \frac{100000 A_{\text{h,eff,day}}}{L_{\text{day}} n_{\text{bp}} A_{\text{h,life}}} \quad (5)$$

式中: $A_{\text{h,eff,day}}$ 为电池组加权安时流通量, $\text{A} \cdot \text{h}$; $A_{\text{h,life}} = 1492 \text{ A} \cdot \text{h}$, 为电池安时寿命; L_{day} 为日均里程, km。

根据式(6)计算加权安时^[12,13], 包括循环和充电工况:

$$A_{\text{h,eff,day}} = \int_{t \in \text{cycle}} w(t) |i(t)| dt + \int_{t \in \text{charge}} w(t) |i(t)| dt \quad (6)$$

式中: $w(t)$ 为老化因子; $i(t)$ 为电池实时电流, A。

老化因子代表温度和工况变化引起的老化加速速率, 根据电池组实时温度和电流查表得出, 温度根据均质对流换热模型计算得出^[14]:

$$Q_{\text{bat}} = kA_{\text{bat}}(T_{\text{bat}} - T_{\text{amb}}) + c_{\text{bat}} m_{\text{bat}} \frac{dT_{\text{bat}}}{dt} \quad (7)$$

式中: Q_{bat} 为电池产热率(内阻消耗功率), W; k 为

对流传热系数; A_{bat} 为电池表面积, m^2 ; T_{bat} 为电池温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{amb} 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; c_{bat} 为电池比热容; m_{bat} 为电池质量, kg。

3.4.3 复合电源日均电耗

对行驶消耗工况下的电池组和超级电容组功率积分, 计算日均电耗, 如下式所示:

$$E_{\text{total}} = \int P_{\text{B}}(t) dt + \int P_{\text{UC}}(t) dt \quad (8)$$

式中: $P_{\text{B}}(t)$ 为电池组功率, kW。

3.4.4 优化算法

上述优化问题具有多目标、多变量以及高度非线性的特点, 多目标遗传算法非常适合于求解此类问题。Controlled elitist NSGA-II 算法在 NSGA-II 算法的基础上对精英保留策略进行了改进。受控精英保留策略保证每次迭代中精英个体和非精英个体按一定的比例保留下来, 改善了种群在非支配集垂向的探索能力, 提高了全局收敛性^[15,16]。

受控精英保留策略表示如下: 在通过精英策略从合并种群 R_i 选择新种群 P_{i+1} 个体时, 第 i 个前沿 F_i 允许的个体数量 n_i 和第 $i-1$ 个前沿 F_{i-1} 允许的个体数量 n_{i-1} 有下面的关系:

$$n_i = r n_{i-1} \quad (9)$$

式中: r 为几何分配参数。

假设 R_i (个体数量为 $2N$) 共有 K 个前沿, n_i 的计算式为:

$$n_i = N \frac{1-r}{1-r^K} r^{i-1} \quad (10)$$

通过几何分配, 新种群 P_{i+1} 在每个 F_i ($i=1, 2, \dots, K$) 上都以一定比例分布了个体, 保证了解集多样性, 提高了优化向最优解集收敛的能力。

Controlled elitist NSGA-II 算法参数如表 2 所示, 流程及 Simulink 模型调用步骤如图 3 所示。

表 2 NSGA-II 参数设置

Table 2 NSGA-II parameters

初始种群	120	
选择算子	Tournament	
遗传操作	交叉算子	Intermediate(Ratio=0.8)
	变异算子	Gaussian($N(0,1)$)
受控精英参数	最优 Front 占比	0.5
	几何分配参数	0.8
终止条件	迭代次数	≥ 100
	Pareto 平均变化	$\leq 1 \times 10^{-4}$

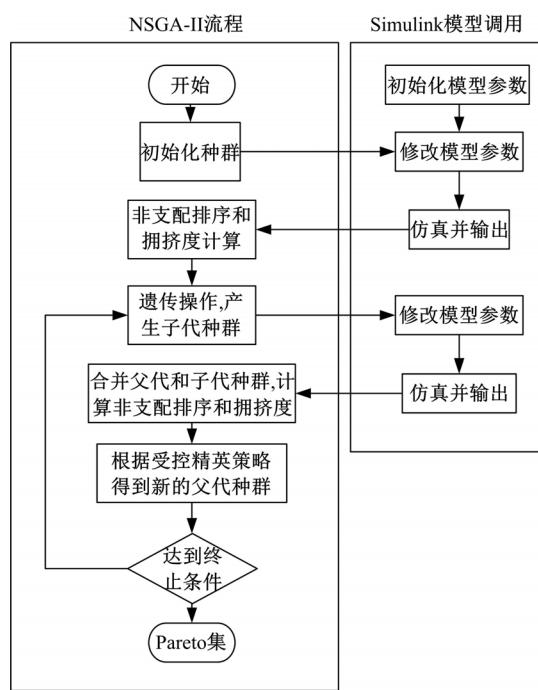


图 3 NSGA-II 流程

Fig. 3 NSGA-II process

3.5 优化结果分析

3.5.1 Pareto 解集

优化结果用非支配集(Pareto 集)表示,48 km 日均里程对应的 Pareto 集如图 4 所示,图中每个点都表示一组备选方案。替换成本和日均电耗呈现了明显的冲突,两者无法同时达到最优。由于降低替换成本倾向于延长电池寿命,电池的使用被最大限度的限制,超级电容组应对更多的电流负荷。由于超级电容组的低压大电流和 DC/DC 的高损耗,总体增加了电耗量,从而引起了两个目标之间的冲突。

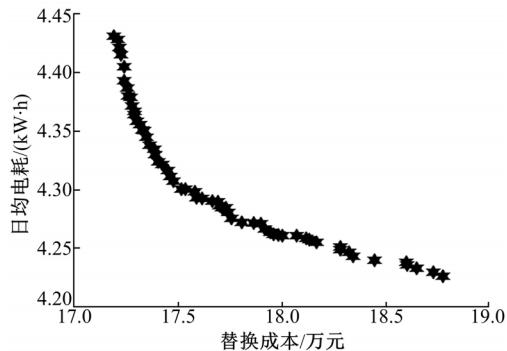


图 4 48 km 日均里程的 Pareto 集

Fig. 4 Pareto sets with 48 km daily range

Pareto 集中各个方案之间无法量化地比较哪个更好,只能根据经验选择。当倾向于提高经济

性时,选择备选集中右侧的参数;当倾向于降低电源替换成本时,选择备选集中左侧参数。

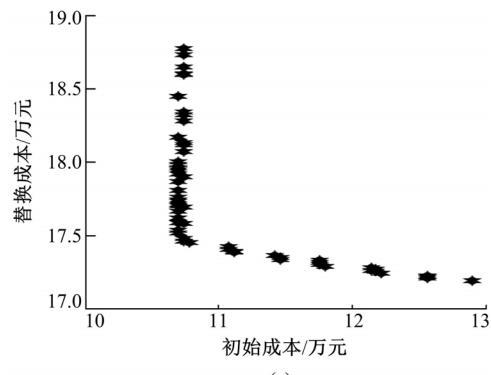
3.5.2 备选方案优选

进一步考察备选方案的电源初始成本 C_{init} 、日均总成本 $C_{\text{total,day}}$ (日均替换成本和电耗成本的和)以及池组寿命里程(电池组寿命终结时的车辆总里程) $L_{B,\text{life}}$ 三者的大小:

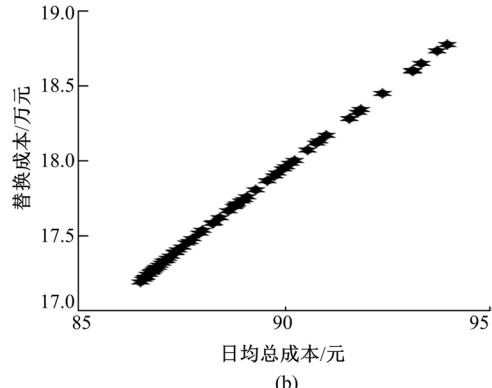
$$\begin{cases} C_{\text{init}} = C_{UC} n_{ucs} + C_{DC} P_{DC} + C_B n_{bs} n_{bp} \\ C_{\text{total,day}} = \frac{C_{\text{total}}}{100000/L_{\text{day}}} + P_{elec} E_{\text{total}} \\ L_{B,\text{life}} = \frac{10}{n_{replace}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{elec} 为电价,元/(kW·h)。

图 5(a)(b)(c) 分别为初始成本、日均总成本和电池组里程寿命与替换成本的关系。初始成本直接影响车辆售价,应该选择尽可能低的方案,图 5(a)明显分为两部分,在左侧垂直部分的方案,初始成本基本不变,替换成本大幅度下降,这是能量管理策略调控的结果,右侧部分的方案,随着初始成本增加,电源容量增加,替换成本缓慢下降;日均总成本应选择尽可能小的方案;电池组寿命里程显著影响消费者对整车的印象,随初始成本增加而增加,应该尽可能选择大的方案。由于初始成本低和寿命里程高两个目标相互冲突,首先选择初始成本分布中拐点右侧部分作为备选方案,



(a)



(b)

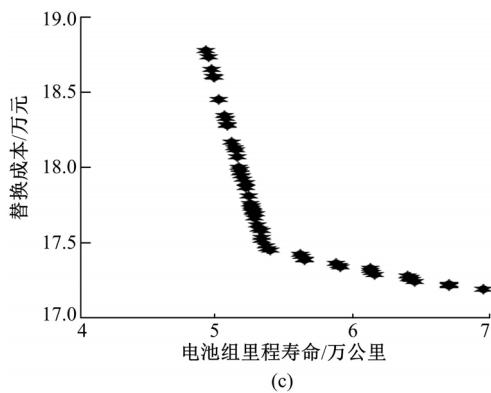


图 5 Pareto 集成本、里程对比

Fig. 5 Pareto sets costs and life range comparison

然后根据尽量少替换电池组的原则,在寿命里程大于 5 万公里的备选集中选择初始成本最低的方案。

同理,从 12、24、36、72 和 96 km 日均里程的备选方案中优选出参数集,列于表 3 中。可以看出,日均里程在 48 km 以内时,电池组最优匹配为 22 kW·h 左右,日均里程超出 48 km 后,随着里程增加,电池组容量增加;超级电容组容量基本维持在 60 W·h 左右。

表 3 不同日均里程优选结果

Table 3 Optimal results with different daily range

日均里程 /km	电池组容量 (kW·h)	超级电容组容量 (W·h)
12	22	63
24	22	78
36	23	54
48	23	57
72	25	60
96	26	54

4 对比分析

与电池组单独供电优化结果进行对比,图 6 为替换成本对比。在不同的日均里程下,复合电源相较于电池组替换成本减小 2~3 万元。随着日均里程的增加,替换成本减少的比例增加,这是因为日均里程越大,电池单独工作时温度上升越高,加速电池老化,而复合电源中超级电容减缓了电池组的温升趋势,且里程越长,效果越明显,进而缓解电池组老化趋势,发挥更大的优势。

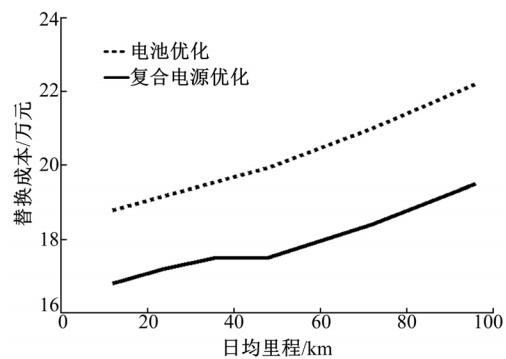


图 6 替换成本对比

Fig. 6 Replacement costs comparison

图 7 为日均电耗对比,复合电源日均电耗相较于电池组单独供电基本没有变化,这说明超级电容组的低压和 DC/DC 的效率引起的电耗增加被最大限度的削弱,优化在两个目标上都达到了令人满意的结果。

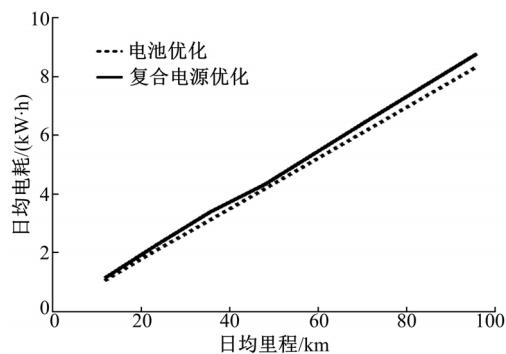


图 7 日均电耗对比

Fig. 7 Daily power consumption

计算优化对应的电池组初始成本、寿命里程和日均总成本,列于表 4 中。可以看出,匹配方案在多个目标之间取得了良好的平衡,主要性能指标替换成本平均降低 11.5%,寿命里程平均增加 19.8%,日均总成本平均降低 13.2%。此外,电池单独供能时电池组除了在日均里程 48 km 时替换一次,其他里程下都替换两次,而复合电源在所有里程下都只替换一次电池组。

根据对比结果,所匹配的复合电源使车辆在多个性能指标上得到了优化,多目标遗传算法在降低替换成本的同时保证了整车经济性,基于 Pareto 集的优选方法既保证了主要性能指标最优,也使其他性能指标达到理想结果,证明了匹配方法的有效性。

表 4 性能指标对比

Table 4 Performance comparison

日均里程 /公里	替换成本/万元			寿命里程/万公里			初始成本/万元			日均总成本/元		
	复合电源	电池	降低/%	复合电源	电池	提高/%	复合电源	电池	增加/%	复合电源	电池	降低/%
12	16.8	18.7	11.3	5.4	4	35	10.5	7.48	40	21.2	23.5	9.8
24	17.2	19.2	10.4	5.4	3.9	38	10.7	7.48	43	43.3	47.9	9.6
36	17.5	19.6	10.7	5.4	4.8	13	10.8	8.84	22	66.2	73.7	10.2
48	17.5	19.9	12.1	5.4	5.1	6	10.8	10.2	6	87.7	102.1	14.1
72	18.4	21.0	12.4	5.5	4.9	12	11.5	10.2	13	138.4	166.5	16.9
96	19.5	22.2	12.2	5.3	4.6	15	11.8	10.2	16	195.5	239.2	18.3

5 结束语

提出了一种电动汽车复合电源的参数优化匹配方法。在性能约束下,以复合电源替换成本和整车经济性为目标建立多目标优化函数,并在不同的日均里程工况下对多目标问题进行求解,得到 Pareto 集,作为备选方案。然后,以电源初始成本、日均总成本和电池组寿命里程为参考依据,从备选方案中优选得到匹配结果。结果表明,日均里程在 50 km 以内时,匹配 22 kW·h 的电池组,里程超过 50 km 时,电池组容量随里程增加;不同里程下不同容量电池组匹配 60 W·h 左右的超级电容组,综合性能达到最优:替换成本平均降低 11.5%,寿命里程平均增加 19.8%,日均总成本平均降低 13.2%。从成本角度来看,复合电源与电池组单独供电相比具有明显的优势,非常适合应用于电动汽车,且日均里程越大,复合电源的优势越大。后期控制策略的开发可以进一步改进复合电源的性能。

参考文献:

- [1] Rui E A, Castro R D, 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.
- [2] 王庆年,曲晓冬,于远彬. 基于目标工况的复合电源混合动力客车优化匹配[J]. 吉林大学学报:工学版, 2013, 43(5): 1153-1159.
Wang Qing-nian, Qu Xiao-dong, Yu Yuan-bin. Optimal matching of HEV with composite electric power supply[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2013, 43(5): 1153-1159.
- [3] Hu X S, Murgovki N, Johannesson L M, et al. Comparison of three electrochemical energy buffers applied to a hybrid bus powertrain with simultaneous optimal sizing and energy management[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(3): 1193-1205.
- [4] Shen J Y, 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.
- [5] Song Z Y, Hofmann H, Li J Q, et al. Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programming approach[J]. Applied Energy, 2015, 139: 151-162.
- [6] 米勒. 超级电容的应用[M]. 韩晓娟,李建林,田春光,译. 北京:机械工业出版社,2014:97-98.
- [7] 张抗抗,徐梁飞,华剑锋,等. 基于多目标优化的纯电动车动力系统参数匹配方法[J]. 汽车工程, 2015 (7): 757-765.
Zhang Kang-kang, Xu Liang-fei, Hua Jian-feng, et al. A parameter matching method for the powertrain of battery electric vehicle based on multi-objective optimization[J]. Automotive Engineering, 2015(7): 757-765.
- [8] Ott T, Zurbriggen F, Onder C, et al. Cycle-averaged efficiency of hybrid electric vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2013, 227(1): 78-86.
- [9] 叶敏,郭金刚. 电动汽车再生制动及其控制技术[M]. 北京:人民交通出版社,2013:128-135.
- [10] Department of Transportation. National Household Travel Survey [EB/OL]. [2016-04-02]. <http://nhts.ornl.gov/>.
- [11] 中华人民共和国工业和信息化部. 关于免征新能源汽车车辆购置税的公告[EB/OL]. [2016-03-05]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n4509607/c4512240/content.html>.
- [12] Onori S. A new life estimation method for lithium-

- ion batteries in plug-in hybrid electric vehicles applications[J]. International Journal of Power Electronics, 2012, 4(3):302-319.
- [13] Marano V, Onori S, Guezenec Y, et al. Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles[C]// Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE, 2009:536-543.
- [14] Huria T, Ceraolo M, Gazzarri J, et al. High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells[C]// Electric Vehicle Conference(IEVC), IEEE, 2012;1-8.
- [15] Deb K, Goel T. Controlled Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Better Convergence [M]. Berlin : Springer, 2001:67-81.
- [16] Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II[C]// International Conference in Parallel Problem Solving from Nature, Berlin : Springer-Verlag, 2000:849-858.