

燃料电池混合动力系统多目标优化方法

宋大风¹,雷宗坤¹,曾小华^{1†},张峻恺¹,纪人桓¹,刘志茹²

(1. 吉林大学 汽车工程学院,吉林 长春 130025;
2. 深圳市科列技术股份有限公司,广东 深圳 518057)

摘要:为解决燃料电池混合动力客车经济性优化时将循环工况耗氢量作为单一经济性评价指标的局限性,通过建立等效氢耗模型及融合质量与寿命因素的多目标优化函数,对影响整车在全寿命周期内的经济性关键参数进行多目标优化.通过对超级电容和蓄电池的容量系数进行优化进而降低了动力系统的质量和成本,优化后超级电容仍能充分发挥“削峰填谷”作用,蓄电池无大电流冲击,优化前后其平均电流能够保持基本不变,燃料电池电压衰退值仅降低 $2\mu\text{V}$,其寿命衰减程度在优化前后变化可以忽略.本文所提出的多目标优化方法能够保证寿命及使用经济性基本不变的情况下,系统的总成本和总质量都得到了优化,对实际燃料电池混合动力系统的综合评价和方案设计提供理论指导.

关键词:燃料电池;三能量源系统;全寿命周期;经济性

中图分类号:U464.9

文献标志码:A

Multi-objective Optimization Method of Fuel Cell Hybrid Energy System

SONG Dafeng¹, LEI Zongkun¹, ZENG Xiaohua^{1†}, ZHANG Junkai¹, JI Renhuan¹, LIU Zhiru²

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;
2. Shenzhen Kiclear Technology Co Ltd, Shenzhen 518057, China)

Abstract: In order to solve the limitation of the hydrogen consumption as an economic evaluation index for the fuel cell hybrid bus, an equivalent hydrogen consumption model and a multi-objective optimization function combining quality and life factors were adopted, and the economical key parameters relevant to the whole life cycle were optimized in this paper. The total system cost and energy system mass were reduced by the optimization. The simulation results show that the super capacitor can still fully play the role of “shaving the peak and filling the valley”, the battery cannot output or input large current, the cycle equivalent hydrogen consumption and the average current of the battery remains basically unchanged before and after optimization, the output power of the fuel cell is stable, and the fuel cell voltage decay is only reduced by $2\mu\text{V}$. It should be noted that the degree of decay of the lifespan is little. The optimization method proposed can ensure the life and economic efficiency, the equivalent hydrogen consumption of the cycle conditions is basically the same, and the total cost and total mass of the system are optimized to a greater degree, accelerating the application of fuel cell hybrid energy system in bus.

Key words: fuel cells; system with three energy; life cycle; economics

* 收稿日期:2018-10-02

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0105300,2018YFB0105900),National Key Research and Development Program(2018YFB0105300,2018YFB0105900)

作者简介:宋大风(1977—),女,吉林长春人,吉林大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: zengxiaohua@126.com

燃料电池电动客车具备更广泛的应用前景,但是其整车经济性、寿命与成本制约了其商业化进程^[1-3]. 多目标优化算法通过对系统的合理配置以保证相互耦合的各项指标达到最优^[4]. 在燃料电池驱动系统中包括燃料电池及辅助能量源,设计与控制的自由度较多,且彼此之间存在强耦合关系,为提高整车经济性,动力系统的能量管理策略与参数解耦优化是其研究的关键^[5-7]. 叶东浩等^[8]提出基于多岛遗传算法的燃料电池混合动力系统参数自适应优化方法实现控制参数的全局最优从而降低循环工况的等效氢耗,提高整车经济性. 然而电池电动客车的评价指标不应仅局限于整车的动力性及循环工况的等效氢耗,还应该包括燃料电池混合动力系统寿命及使用成本等因素^[9-11]. 因此综合系统效率、使用寿命、质量、成本等指标,建立复合电源燃料电池混合动力系统的综合评价方法对关键设计参数进行多目标优化,以降低整车循环工况的等效氢耗、控制整车成本的同时保证其寿命,对研究燃料电池混合动力系统在全寿命周期内的整车经济性并加快实车应用至关重要.

本文建立带有燃料电池及其辅助能量系统的动力系统仿真模型,在系统能量管理策略方面,兼顾动力电池 SOC 状态保持与动力系统经济性输出,采用瞬时最优算法优化燃料电池与蓄电池需求功率;建立了融合寿命成本因素的燃料电池混合动力系统的多尺度经济性评价模型,制定目标函数集,对其循环工况氢耗、使用寿命、质量、成本等指标进行多目标优化,得到燃料电池混合动力系统的设计参数,并对优化前后结果进行对比分析以验证优化效果.

1 整车仿真模型

1.1 燃料电池混合动力系统整车构型

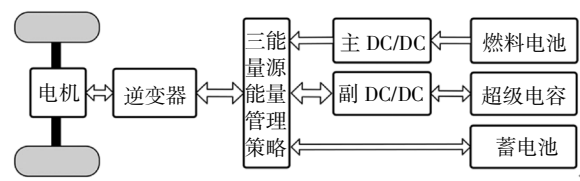
表 1 给出了整车及动力系统参数,图 1 给出了整车构型与能量管理策略架构. 整车动力系统包括作为主能量源的燃料电池以及作为辅助能量源的蓄电池和超级电容. 燃料电池在整个过程中以平稳输出为主,由于其只放电无法进行能量回收,因此为蓄电池配置单向 DC/DC;由于燃料电池的动态输出能力较弱,同时无法实现制动能量回收,故需要配置辅助能量源系统,即配置包括蓄电池和超级电容在内的辅助能量系统,用于及时补充大驱动制动功率需求,由于辅助能量系统具备再生制动能力,因此配置双向 DC/DC. 复合电源燃料电池电动客车采用分级

能量管理策略,如图 1(b)所示. 由电机需求的功率,首先依据燃料电池功率跟随控制策略实现一级功率分流,为了确定燃料电池的需求功率,通过二级分流确定蓄电池和超级电容的输出;再由分层瞬时最优的复合电源子系统能量管理策略进行二级功率分流,二级功率分流采用瞬时最优算法优化燃料电池与蓄电池功率需求,进而确定蓄电池功率需求与超级电容功率需求.

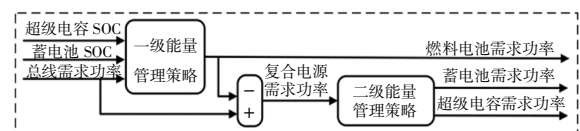
表 1 整车及动力系统参数

Tab.1 The parameters of vehicle and dynamical system

| 名称 | 参数 | 参数值 |
|--------|------------------------------|--------|
| 车体参数 | 整车总质量 m/kg | 18 000 |
| | 迎风面积 A/m^2 | 8.7 |
| | 风阻系数 C_D | 0.55 |
| | 轮胎滚动半径 R/mm | 478 |
| 电机参数 | 峰值功率 P_{max}/kW | 150 |
| | 峰值扭矩 $M/(N \cdot m)$ | 3 300 |
| | 最高转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$ | 2 316 |
| 燃料电池参数 | 额定功率 P_n/kW | 60 |
| | 额定电流 I/A | 288 |
| 蓄电池参数 | 单体容量 $/(A \cdot h)$ | 30 |
| | 串联数 | 180 |
| | 并联数 | 2 |
| 超级电容参数 | 单体容量/ F | 9 500 |
| | 串联数 | 142 |
| | 并联数 | 1 |



(a) 整车构型



(b) 能量管理策略架构

图 1 整车构型与能量管理策略架构

Fig.1 The structure of vehicle and energy management system

1.2 分级优化能量管理策略

燃料电池功率跟随控制策略基于电机需求功率、复合电源的荷电状态等指标,实现燃料电池的开

关机与输出功率的控制. 具体控制策略为:以整车需求功率、复合电源的 SOC和燃料电池的关机时间作为燃料电池开关机条件,当燃料电池在最小关机时间内,燃料电池处于关机状态. 当燃料电池关机时间满足最小关机时间,其是否启动取决于整车需求功率与复合电源的 SOC,当整车需求功率高时,燃料电池开机以满足整车功率需求;当整车需求功率中等或者功率需求低,且复合电源未出现亏电时,此时燃料电池开关机状态视上一时刻而定;当复合电源出现亏电时,需要燃料电池开机给复合电源充电. 燃料电池能量管理策略保证了燃料电池的稳定功率输出,减少变载与开关机次数,符合燃料电池输出特性.

基于分层瞬时最优的复合电源子系统能量管理策略,按照蓄电池与超级电容 SOC 将复合电源划分成顶层单一能量源工作模式和目标层复合电源寻优工作模式. 工作模式具体划分原则为:1)若超级电容

SOC 大于上限值 n , 蓄电池 SOC 小于下限值 m ,说明超级电容存储电量充足,蓄电池存储电量不足,此时,复合电源需求功率由超级电容提供;2)若超级电容 SOC 小于下限值 m , 蓄电池 SOC 大于上限值 n ,说明蓄电池电量充足,超级电容电量不足,此时,复合电源需求功率由蓄电池提供;3)若蓄电池 SOC 大于下限值 m 且小于上限值 n ,超级电容 SOC 大于下限值 m 且小于上限值 n ,此时,蓄电池和超级电容的电量均处于目标层状态,复合电源需求功率由蓄电池和超级电容联合提供,通过基于瞬时最优算法的复合电源控制器优化蓄电池和超级电容的功率分配,从而使复合电源的功率损失最小.

为了实现目标层复合电源输出功率的损失最小以达到较高的经济性,使用分层瞬时最优算法优化复合电源子系统的输出,图2给出了其具体的控制策略流程.

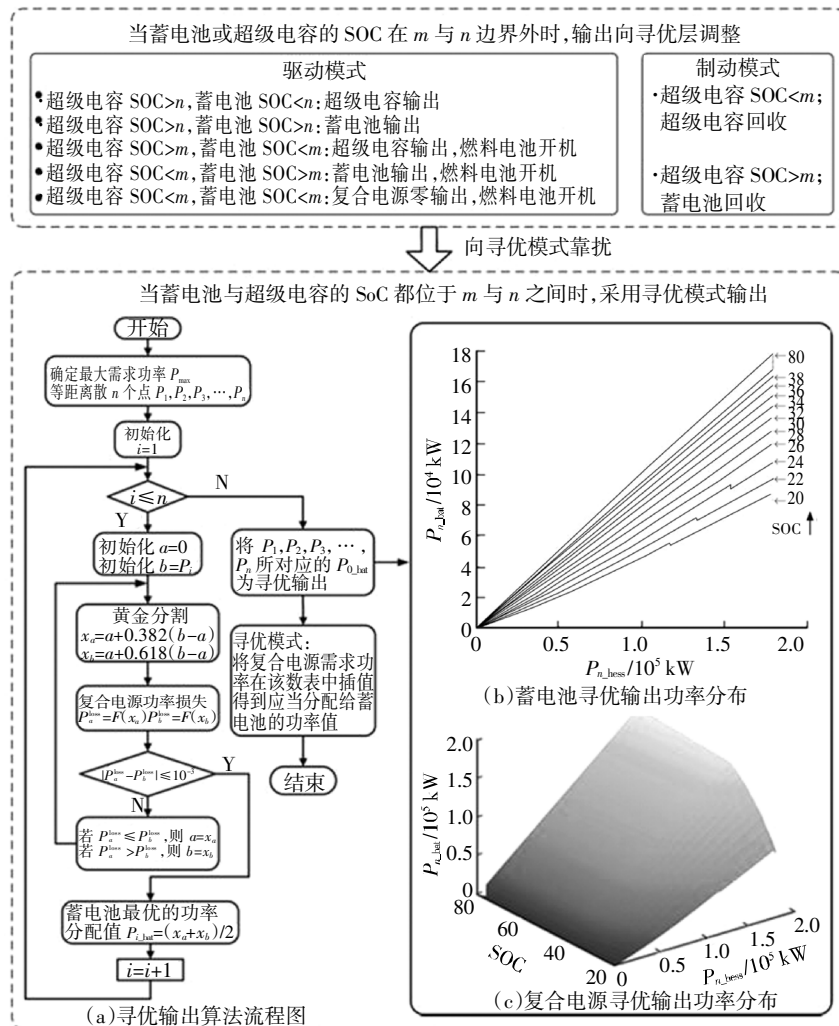


图2 基于分层瞬时最优的复合电源能量管理策略

Fig.2 Composite power energy management strategy based on layered instantaneous optimality

基于蓄电池与超级电容的内阻模型分别建立复合电源子系统的功率损耗模型. 蓄电池损耗模型中, E_{bat} 为蓄电池的开路端电压, R_{bat} 为蓄电池内部的等效电阻, P_{bat} 为蓄电池的输出功率; 超级电容损耗模型中, E_{uc} 为超级电容的开路端电压, R_{uc} 为超级电容等效电阻, P_{uc} 为超级电容输出的功率, 则蓄电池与超级电容的功率损耗 $P_{\text{bat}}^{\text{loss}}$ 、 $P_{\text{uc}}^{\text{loss}}$ 及复合电源功率损耗 $P_{\text{hess}}^{\text{loss}}$ 之间的关系分别为 $P_{\text{uc}}^{\text{loss}} = (E_{\text{uc}} - \sqrt{E_{\text{uc}}^2 - 4R_{\text{uc}}P_{\text{uc}}}) / 2R_{\text{uc}}$ 、 $P_{\text{bat}}^{\text{loss}} = P_{\text{bat}} - P_{\text{uc}}^{\text{loss}}$ 和 $P_{\text{hess}}^{\text{loss}} = P_{\text{bat}}^{\text{loss}} + P_{\text{uc}}^{\text{loss}}$, 同时复合电源子系统的输出功率 P_{hess} 满足约束条件 $P_{\text{hess}} = P_{\text{bat}} + P_{\text{cap}}\eta_{\text{DC/DC}}$. 复合电源输出过程中 P_{bat} 与 P_{uc} 分流比例不同, 对应的功率损失 $P_{\text{bat}}^{\text{loss}}$ 与 $P_{\text{uc}}^{\text{loss}}$ 也不同. 目标层寻优输出的含义是针对每一个复合电源输出功率 P_{hess} , 对应一组最优 P_{bat} 与 P_{uc} , 在满足输出功率 P_{hess} 约束条件下, 使得总功率损耗 $P_{\text{hess}}^{\text{loss}}$ 最小.

为实现目标层寻优输出, 引入瞬时最优算法的寻优函数 $f = \min P_{\text{hess}}^{\text{loss}}$, 首先确定复合电源需求功率 P_{hess} 的最大值 P_{max} , 在 0 与 P_{max} 之间等距离散出 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$, 同时初始化寻优边值 $a = 0, b = P_i$; 基于边值进行黄金分割, 其中: $x_a = a + 0.382(b-a), x_b = a + 0.618(b-a)$, 根据功率损耗模型, 计算当复合电源分配给电池的功率分别为 x_a, x_b 时, 复合电源的总功率损失为 $P_a^{\text{loss}}, P_b^{\text{loss}}$; 若 $|P_a^{\text{loss}} - P_b^{\text{loss}}| \geq 10^{-3}$, 则需更新寻优的边值; 当 $P_a^{\text{loss}} > P_b^{\text{loss}}$ 时, 取 $b = x_b$, 当 $P_a^{\text{loss}} \leq P_b^{\text{loss}}$ 时, 取 $a = x_a$, 再次计算复合电源总功率损失 $P_{\text{hess}}^{\text{loss}}$, 直到 $|P_a^{\text{loss}} - P_b^{\text{loss}}| \leq 10^{-3}$, 则边值相差足够小, 取 $P_{i\text{-bat}} = (x_a + x_b)/2$ 作为复合电源需求功率, 当电源需求功率为 P_i 时, 应当分配给电池功率值; 遍历在 0 与 P_{max} 之间的功率值, 分别计算电池的最优功率 $P_{1\text{-bat}}, P_{2\text{-bat}}, P_{3\text{-bat}}, \dots, P_{n\text{-bat}}$, 然后将其做出多维数表 $P_{n\text{-bat}} = F(P_{n\text{-hess}})$. 针对不同复合电源需求功率, 通过插值方法计算得到应当分配给蓄电池的功率, 进而得到蓄电池和超级电容的需求功率, 实现复合电源子系统的二级功率分流.

2 全寿命周期经济性多目标优化

本节建立了基于等效氢耗模型和融合质量与寿命因素的系统成本模型的多目标优化函数, 以优化复合电源燃料电池混合动力系统参数.

2.1 基于等效氢耗的经济性优化函数

在进行氢耗分析时, 如果 SOC 在整车运行一个工况后不能保持平衡, 则不能有效评价其经济性指

标. 因此, 需要对整车运行一个工况后的等效氢耗 C_{H_2} 以及蓄电池和超级电容的 SOC 变化量 $\Delta\text{SOC}_{\text{cap}}$ 做出相应的换算, 最后得到运行工况下的等效氢耗, 将折算后的等效氢耗作为循环工况氢耗最低的经济性目标函数 $\min f_1(x)$, 如式(1)所示.

$$\min f_1(x) = C_{\text{H}_2} + \frac{1}{J_{\text{H}_2}} \left(\frac{E_{\text{bat}} \cdot \Delta\text{SOC}_{\text{bat}}}{\eta_{\text{fc}} \cdot \eta_{\text{bat}} \cdot \eta_{\text{DC/DC}}} + \frac{E_{\text{cap}} \cdot \Delta\text{SOC}_{\text{cap}}}{\eta_{\text{fc}} \cdot \eta_{\text{cap}} \cdot \eta_{\text{DC/DC}}} \right) \quad (1)$$

式中: η_{fc} 、 η_{bat} 分别为燃料电池平均工作效率和蓄电池平均充电效率; η_{cap} 和 $\eta_{\text{DC/DC}}$ 分别为超级电容的平均充电效率和 DC/DC 的工作效率; E_{bat} 和 E_{cap} 分别为蓄电池和超级电容的能量储存; J_{H_2} 为氢气低热值.

为了减少寻优算法的计算量, 需要对优化变量进行约束, 在保证整车驱动需求情况下, 燃料电池及其辅助能量系统在其峰值输出时需要达到驱动电机的峰值功率需求. 其约束条件如式(2)所示.

$$P_m \geq P_{\text{fc}}\eta_{\text{DC/DC}} + P_{\text{cap}}\eta_{\text{DC/DC}} + P_{\text{bat}} \quad (2)$$

式中: P_m 为驱动需求的功率; P_{fc} 为主能量的输出功率; P_{cap} 和 P_{bat} 均为副能量的输出功率.

为了最大限度地减少在进行 SOC 校正过程中的误差, 在仿真过程中采取对 SOC 的状态保持, 尽量使辅助能量源的 SOC 在运行一个工况的过程中处于相对平稳状态. 约束条件如式(3)所示.

$$\begin{cases} |\Delta\text{SOC}_{\text{bat}}| < \varepsilon \\ |\Delta\text{SOC}_{\text{cap}}| < \varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

2.2 全生命周期经济性多目标优化函数

燃料电池混合动力汽车整车的能量源系统主要包含主能量源燃料电池以及包括超级电容和蓄电池的辅助能量源, 为了进行成本优化, 建立成本函数; 为了进行整车质量的优化, 建立质量函数. 通过调研知道目前市场燃料电池的质量密度为 3.5 kg/kW, 蓄电池的功率密度为 34 kg/(kW·h), 超级电容的能量密度为 137 kg/(kW·h), 需要说明的是, 所提出的质量函数和成本函数, 都是通过线性累加得到的. 表 2 给出了目前燃料电池混合动力能量源成本调研结果, 用于本研究成本的优化^[12].

表 2 燃料电池混合动力能量源成本

| Tab.2 Energy source unit cost | |
|-------------------------------|----------------------------|
| 优化对象 | 成本/(RMB·kW ⁻¹) |
| 燃料电池 | 9 000 |
| 蓄电池 | 2 000 |
| 超级电容 | 60 000 |

基于上述成本和质量分析,建立关于质量和成本的目标函数 $\min f_2(x)$,如式(4)所示.其中, $f_2(x)$ 为成本与质量线性加权后的综合目标函数, $f_{\text{cost}}(x)$ 为系统成本函数, $f_{\text{mass}}(x)$ 为系统质量函数, ω_1 、 ω_2 分别为系统成本函数与质量函数的权重系数,两者决定了成本函数与质量函数权值大小.

本文的研究对象为城市公交客车,由于其本身质量比较大且常处于满载状态,能量源质量对整车的影响较小,因此在选择成本质量函数的权重系数过程中会提高成本的权重系数,降低质量的权重系数.为了将目标函数 $\min f_2(x)$ 中成本函数与质量函数的归一化,分别对成本函数和质量函数设置折算因子 d_1 和 d_2 ,进而得到用于多目标优化的质量成本函数 $\min f_2(x)$.

$$\min f_2(x) = \frac{\omega_1}{d_1} f_{\text{cost}}(x) + \frac{\omega_2}{d_2} f_{\text{mass}}(x) \quad (4)$$

超级电容的工作特点是能够满足大功率瞬时充放电,因此变载开关对其影响不大,整车的运行工况对其寿命影响不大;但工作条件如服役温度、运行条件如最大电流以及放电深度等都会影响动力电池的寿命.

温度是由整车的热管理系统进行控制的,其放电深度可以通过整车能量管理使其在浅循环工作,基于以上分析,认为放电深度是优化过程中需要考虑的重要因素.由此确定蓄电池寿命的目标函数 $\min f_3(x)$ 如式(5)所示,其中 T 为仿真工况对应的时间, I_{bat} 为蓄电池充放电电流.

$$\min f_3(x) = \frac{1}{T} \int_0^T |I_{\text{bat}}| dt \quad (5)$$

当燃料电池以相对稳定功率输出时,其寿命可达 30 000 h,而作为车载能源,由于工况的变化导致的频繁启动与变载会大大降低其寿命.因此需要保证燃料电池的功率变化率在一定范围内,以保证其输出平稳,式(6)给出了其约束条件.

$$\frac{dP_{\text{fc}}}{dt} \leq P_{\text{fc_limit}} \quad (6)$$

当前研究表明,车载燃料电池寿命衰减影响因素主要包括启停次数、变载次数、怠速时间、高功率运行时间^[13],基于以上因素建立与燃料电池工作寿命相关的目标函数 $\min f_4(x)$,如式(7)所示.其中 ΔV 为燃料电池寿命范围内允许的电压压降; k_d 为燃料电池寿命衰退的加速系数; n_1 、 n_2 、 t_1 、 t_2 分别代表燃料电池工作过程中,平均每小时的开机次数、变载次数、怠速时间、高功率运行时间; V_1 、 V_2 分别代表

每次开机与变载的电压衰退率,由燃料电池系统的启停工况测试数据得到 $V_1 = 0.001\ 96$,由燃料电池系统的变载工况测试数据得到 $V_2 = 0.001\ 26$; U_1 、 U_2 分别代表怠速与高功率运行时每小时的电压衰退率,由燃料电池系统的怠速工况测试数据得到 $U_1 = 0.000\ 059\ 3$,由燃料电池系统的高功率运行工况测试数据得到 $U_2 = 0.001\ 47$.

$$\min f_4(x) = \frac{\Delta V}{k_d(n_1 V_1 + t_1 U_1 + n_2 V_2 + t_2 U_2)} \quad (7)$$

由上述确定的三能量源系统的优化函数及约束条件,认为燃料电池的功率水平、蓄电池的能量水平和超级电容的能量水平是优化的关键因素,因此,确定蓄电池容量值、超级电容容量值、燃料电池最大功率为待优化变量,在整车仿真模型中分别设置蓄电池容量、超级电容容量和燃料电池功率的比例环节得到三能量源各自的容量系数.上述三变量在整车仿真模型中通过优化对应的蓄电池容量系数、超级电容容量系数、燃料电池功率系数来实现.

多目标优化的目标函数之间会存在矛盾关系,因此最优解不是一个点,而是一个相对优化的解轨迹,这几个优化解能够相对改善每一个优化目标,将其称之为帕累托前沿,在求解多目标优化函数过程中采用遗传算法.同时考虑到所建立的优化函数值的数量水平,为每个优化函数确定一个归一化因子.各目标函数 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 、 $f_4(x)$ 的归一化因子如表 3 所示.

表 3 各目标函数的归一化因子

| Tab.3 Target function conversion factor | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|
| 目标函数 | $f_1(x)$ | $f_2(x)$ | $f_3(x)$ | $f_4(x)$ |
| 归一化因子 | 1 000 | 30 | 30 | 300 |

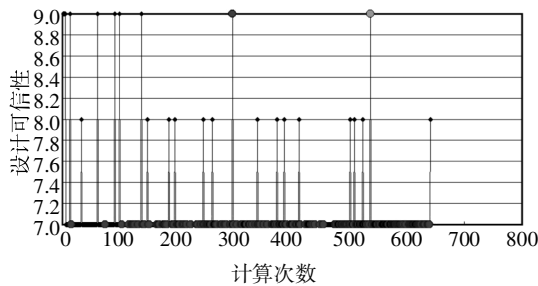
基于 Isight 中的 Optimization 控件建立多目标优化程序,在 Isight 软件的设计门户下调用 DOE 组件,完成各因子及其水平设置,并基于拉丁方的方法生成设计向量,再调用 Simcode 组件,与 DOE 组件构成一个计算环,以实现 Isight & MATLAB 平台的数据交互及 ADVISOR 软件平台的模型调用.

3 多目标优化结果与仿真分析

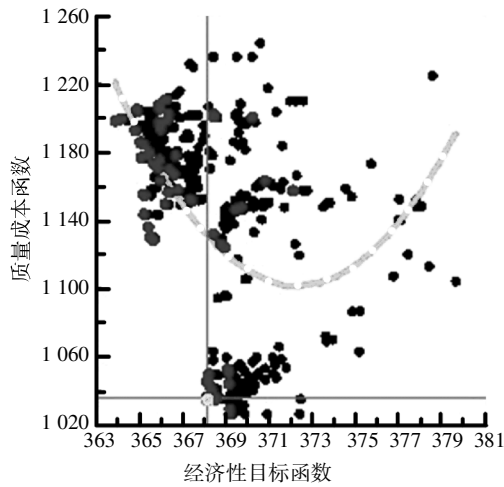
3.1 多目标优化结果

基于中国典型城市工况,采用 0- δ 方法保证辅助能量源在仿真前后的 SOC 平衡,通过求解多目标

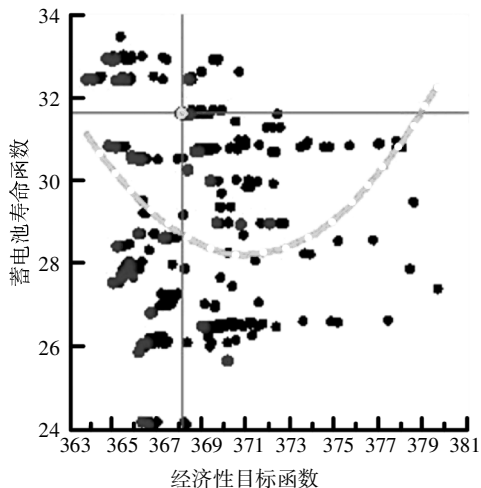
优化函数即可以得到帕累托解,如图 3 所示.不同目标函数组合下,帕累托解的分布情况分别如图 3(b)(c)(d)(e)所示,其中,虚线代表变化趋势线;在优化过程中,帕累托解个数较多,且各设计目标间存在复杂的非线性关系;根据设计目标进行更多权衡选择,最终确定多目标优化的优化结果如表 4 所示.由优化结果可知,多目标优化是通过降低蓄电池容量系数和超级电容容量系数同时提高燃料电池功率系数来实现的,由于超级电容成本最高,蓄电池和超级电容质量均大于燃料电池,因此降低蓄电池和超级电容容量可以有效控制其成本及质量.



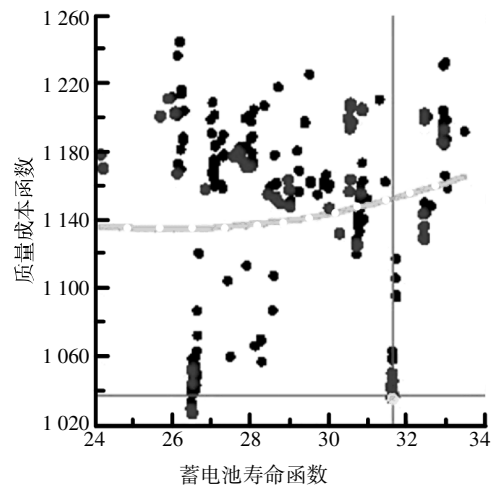
(a)设计可信性图



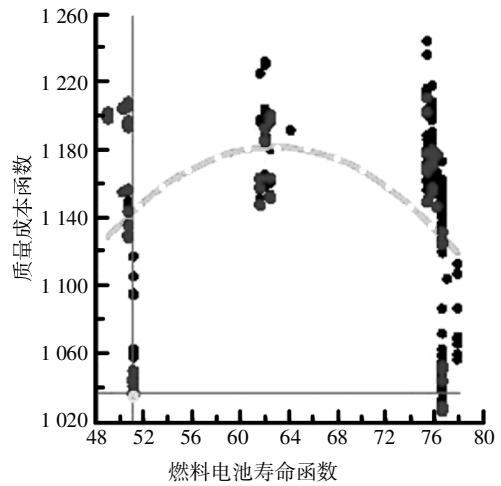
(b)经济性函数-质量成本函数交互帕累托分布



(c)经济性函数-蓄电池寿命函数交互帕累托分布



(d)蓄电池寿命函数-质量成本函数交互帕累托分布



(e)燃料电池寿命函数-质量成本函数交互帕累托分布

图 3 设计可行性图和各目标函数的帕累托解

Fig.3 Design feasibility map and Pareto solution distribution among objective functions

表 4 燃料电池混合动力系统优化结果

Tab.4 Optimization results of fuel cell hybrid system

| 参数名 | 优化结果 |
|----------|------|
| 燃料电池功率系数 | 1.16 |
| 蓄电池容量系数 | 0.89 |
| 超级电容容量系数 | 0.92 |

3.2 优化结果仿真分析

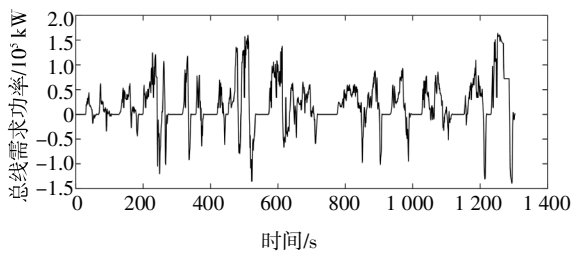
将优化前后的结果在中国典型城市工况下进行仿真,以分析多目标优化对整车全寿命周期内经济性的影响.表 5 给出了优化前后基于优化后数据得到的动力系统仿真结果.从燃料电池混合动力系统的经济性角度分析,本文提出的多目标优化方法能够在循环工况等效氢耗、燃料电池电压衰退值

和蓄电池平均电流基本相同的情况下,系统总成本和总质量得到较大程度的改善.从燃料电池混合动力系统寿命分析,其输出特性是影响其经济寿命的关键因素.图4给出了优化前后三能量源的功率分流曲线.

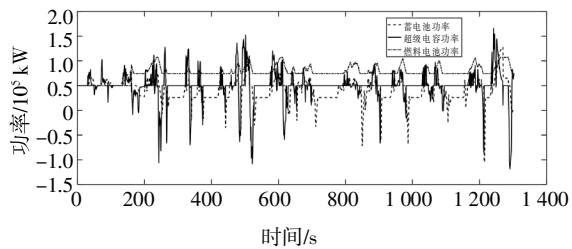
表5 多目标优化结果

Tab.5 Results of multi-objective optimization

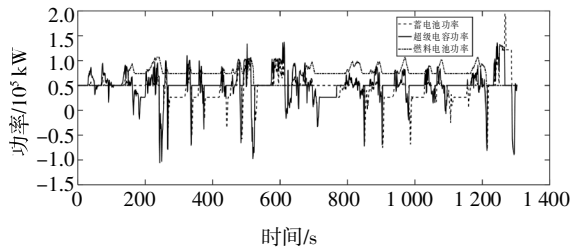
| 参数名 | 优化前 | 优化后 |
|------------------------|-------|-------|
| 燃料电池动力系统成本/万元 | 73.02 | 70.64 |
| 燃料电池动力系统质量/kg | 1 154 | 1 019 |
| 氢耗/g | 372 | 368 |
| 动力电池平均电流/A | 32 | 31 |
| 电堆电压衰退值/ μV | 47 | 49 |



(a)总线需求功率



(b)寿命优化功率分流结果



(c)融合寿命因素的经济成本多目标优化后功率分流结果

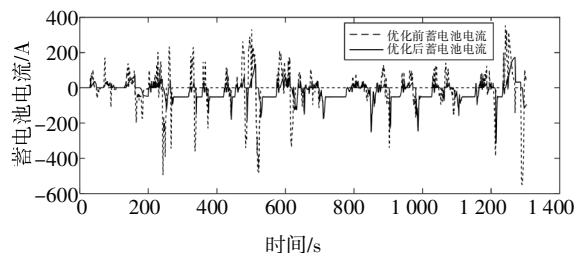
图4 三能量源功率分流曲线

Fig.4 Three energy source power split curves

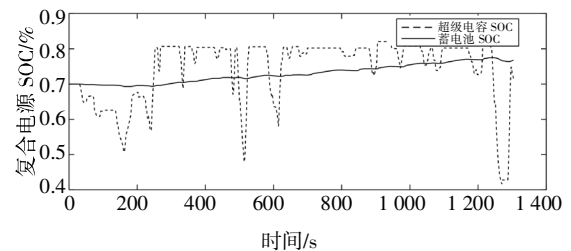
通过燃料电池寿命分析可知,开关机次数、变载及高功率运行是影响其寿命的主要因素.由图4可

知,多目标优化过程中通过对动力系统参数的合理配置,蓄电池与超级电容容量等级的减小未引起燃料电池自身更多的变载过程与启停过程,其输出功率稳定,进行经济性-寿命-质量成本多目标优化后燃料电池在整个循环工况仅开关机2次,且需求功率相对稳定,燃料电池的启停、变载和大功率输出均控制在合理范围内.同时,由于采用分级优化的能量管理策略,复合电源子系统的效率得以提高,燃料电池工作时间有一定降低,进行燃料电池经济性优化后在一个城市工况条件下其电压衰退值为 $47 \mu\text{V}$,在其基础上进行寿命成本优化后其电压衰退值为 $49 \mu\text{V}$,其寿命衰减程度在优化前后变化较小.

由复合电源子系统寿命分析可知,超级电容承担更多的高频分量,可以减少瞬时大功率对蓄电池冲击,进而降低其平均电流,提高蓄电池的寿命.图5给出了经济性、成本及寿命多目标优化后蓄电池电流变化曲线及优化后复合电源SOC随时间变化曲线.由优化前后的蓄电池电流曲线可以发现,优化后蓄电池电流更加平缓,超级电容能够减少蓄电池高频输出,其“削峰填谷”作用能够保证蓄电池在容量系数等级减小的情况下亦无大电流冲击,其平均电流在优化前后分别为32 A和31 A;由复合电源SOC变化曲线可以进一步证明超级电容“削峰填谷”的作用;从复合电源SOC变化曲线可以发现,所提出的分级优化能量管理策略进行成本寿命多目标



(a)优化前后蓄电池电流随时间变化曲线



(b)优化后复合电源SOC随时间变化曲线

图5 蓄电池电流及复合电源SOC随时间变化曲线

Fig.5 Current of battery and SOC of hybrid energy system with operating conditions curve

优化后亦能够保证由蓄电池来承担相对稳定需求功率分量,进而提高蓄电池的寿命。

通过以上分析,将燃料电池混合能量系统的整体容量降低后,其成本由 73.20 万元降低到 70.64 万元,在一个工况内,燃料电池电压衰退值仅增加 $2\ \mu\text{V}$,蓄电池平均电流降低 1 A,即本文提出的优化方法能够保证寿命及循环工况等效氢耗基本不变的情况下,能够降低系统成本,实现了燃料电池混合动力系统成本、寿命与经济性的多目标优化。

4 结 论

本文所提出的燃料电池混合动力系统多目标优化方法能够保证寿命及使用经济性基本不变的情况下,系统总成本和总质量得到较大幅度的优化。

1)从整车全寿命周期的经济性分析可知,本文所提出的多目标优化方法能够保证在循环工况等效氢耗大致不变的情况下,系统成本和质量得到较大幅度的改善。

2)从燃料电池混合动力系统寿命与成本的关系分析可知,超级电容和蓄电池能够在容量系数减少的情况下,超级电容仍能充分发挥“削峰填谷”作用,蓄电池无大电流冲击,同时能够将燃料电池寿命衰减程度控制在较低水平。

参考文献

- [1] 聂凯,谢丹凤,李巍. 新能源汽车城市物流碳排放模型的构建与分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(9):134—140.
NIE K, XIE D F, LI W. Modeling and analysis of the carbon emission of new energy vehicle in urban logistics industry[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(9):134—140. (In Chinese)
- [2] GOKCE K, OZDEMIR A. A rule based power split strategy for battery/ultracapacitor energy storage systems in hybrid electric vehicles[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016, 11(2):1228—1246.
- [3] 代才,王宇平,何晓光. 高维多目标问题的排序新方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版),2014,41(6):89—94.
DAI C, WANG Y P, HE X G. New ranking method for many-objective problems[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2014, 41(6):89—94. (In Chinese)
- [4] DOUCETTE R T, MCCULLOCH M D. A comparison of high-speed flywheels, batteries, and ultracapacitors on the bases of cost and fuel economy as the energy storage system in a fuel cell based hybrid electric vehicle [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(3):1163—1170.
- [5] WU W, BUCKNALL R W G. Downsizing fuel cell capacity in a hybrid hydrogen vehicle by regenerative energy capture with super capacitor[C]//Power Engineering Conference. Noida: IEEE, 2014:1—6.
- [6] 宋传学,周放,肖峰. 基于动态规划的复合电源能量管理优化[J]. 吉林大学学报(工学版),2017,47(1):8—14.
SONG C X, ZHOU F, XIAO F. Energy management optimization of hybrid energy storage system (HESS) based on dynamic programming [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(1):8—14. (In Chinese)
- [7] HU X, JOHANNESSEN L, MURGOVSKI N, *et al.* Longevity-conscious dimensioning and power management of the hybrid energy storage system in a fuel cell hybrid electric bus [J]. Applied Energy, 2015, 137:913—924.
- [8] 叶东浩,詹明,潘牧. PEM 燃料电池膜电极中的水传输行为[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(12):50—55.
YE D H, ZHAN M, PAN M. Water flow in and around the MEA of PEM fuel cell [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(12):50—55. (In Chinese)
- [9] IBRAHIM M, STEINER N Y, JEMEI S, *et al.* Wavelet-based approach for online fuel cell remaining useful lifetime prediction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8):5057—5068.
- [10] 章桐,牛文旭,陈会翠,等. X-in-the-loop 方法在燃料电池汽车动力系统测试上的应用[J]. 汽车工程,2018(1):107—113.
ZHANG T, NIU W X, CHEN H C, *et al.* Application of X-in-the-loop scheme to the test of vehicle fuel cell powertrain system [J]. Automotive Engineering, 2018(1):107—113. (In Chinese)
- [11] ALONSO E, RUIZ J, ASTRUC D. Power management optimization of an experimental fuel cell/battery/supercapacitor hybrid system [J]. Energies, 2015, 8(7):6302—6327.
- [12] 陈会翠. 影响燃料电池寿命的动态响应分析及经济性评价[D]. 北京:清华大学汽车工程系,2015:6—1
CHEN H C. Analysis of dynamic response affecting the fuel cell lifetime and economic evaluation of the fuel cell [D]. Beijing: Department of Automotive Engineering of Tsinghua University, 2015:6—1. (In Chinese)
- [13] PEI P C, CHANG Q F, TANG T. A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(14):3829—3836.