DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.7.128 **中图分类号**：TM911 **文献标志码**：A

基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配方法

裴冯来[1]，张 岗[1]，周 苏[2]
(1.上海机动车检测认证技术研究中心有限公司氢能与燃料电池检测研究实验室，上海 201805；
2.同济大学汽车学院，上海 201804)

摘要：针对单堆燃料电池系统扩展到多堆燃料电池系统 MFCS(multi-stack fuel cell system)时面临的电堆分配问题，提出1种基于最小全生命周期成本 LCC(life-cycle cost)的 MFCS 电堆分配方法。首先建立以最小 LCC 为优化指标的 MFCS 电堆分配优化模型，然后求解特定应用场景下的 MFCS 电堆分配结果并对最优电堆分配方案下的电堆需求功率分配策略进行分析，最后对优化得出的 MFCS 电堆分配方案在氢气使用成本上的优势进行分析，结果表明所提出的基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配方案和相应的电堆需求功率分配策略相对于传统的 MFCS 电堆平均分配方案和电堆需求功率平均分配策略具有更低的氢气使用成本。

关键词：多堆燃料电池系统；电堆分配；全生命周期成本；数学优化

MFCS Stacks Allocation Method Based on Minimum LCC

PEI Fenglai[1], ZHANG Gang[1], ZHOU Su[2]
(1. Laboratory of Hydrogen and Fuel Cell Test & Research, Shanghai Motor Vehicle Inspection Certification & Tech Innovation Center Co., Ltd., Shanghai 201805, China; 2. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To address the stacks allocation problem when a single-stack fuel cell system is expanded to a multi-stack fuel cell system (MFCS), an MFCS stacks allocation method based on the minimum life-cycle cost (LCC) of stacks is proposed. First, an MFCS stacks allocation optimization model with the minimum LCC as an optimization index is established. Then, the MFCS stacks allocation results under specific application scenarios are solved, and a stacks demand power allocation strategy under the optimal stacks allocation scheme is analyzed. Finally, the advantages of the optimized MFCS stacks allocation scheme in hydrogen usage cost are analyzed. Compared with the traditional MFCS stacks average allocation scheme and the stacks demand power average allocation strategy, the proposed MFCS stacks allocation scheme based on minimum LCC and the corresponding stacks demand power allocation strategy have lower hydrogen usage cost.

Keywords: Multi-stack fuel cell system (MFCS); stacks allocation; life-cycle cost (LCC); mathematical optimization

质子交换膜燃料电池 PEMFC(proton exchange membrane fuel cell)[1]具有高效率、零排放、低噪音、高功率密度、短启动时间、低工作温度及响应时间短等特点，是最有前途的能量转换装置之一[2-4]。集成辅助系统的 PEMFC 系统一般与动力电池或其他储能设备协同工作，为负载提供能量。

从当前市场中技术成熟的电堆中选择并组合成高功率多堆燃料电池系统 MFCS(multi-stack fuel cell system)是1种有效提高燃料电池系统输出功率的方式[5]。对于载货车辆、客车和专用车辆等重型商用车来说，运行路径固定、续航里程长、加氢时间短和工况稳定的特点使得氢燃料电池相对于动

收稿日期：2023-10-19；**修回日期**：2023-11-28；**录用日期**：2023-12-15；**网络首发日期**：2024-02-26
基金项目：国家市场监督管理总局技术保障专项项目(2022YJ06)
This work is supported by the Special Technical Guarantee Project of State Administration for Market Regulation under the grant 2022YJ06

力电池更有优势[6]。燃料电池系统的全生命周期成本 LCC(life-cycle cost)是其商业化的主要限制因素之一[7]，特别是对于商用车来说，更低的 LCC 至关重要。

MFCS 在各个领域已被广泛研究应用[8-10]。工程应用中的 MFCS 一般由多个相同电堆构成，采用输出功率平均分配或者链式分配的方式满足系统的功率需求。不同的电堆分配方案具有不同的效率、寿命和 LCC，同时在实时运行过程中具有不同的能量管理策略。Zhou 等[11]针对具有不同功率等级电堆的 MFCS 提出以效率和寿命为综合优化指标的电堆分配方法，并与电堆平均分配方案进行对比，证明了基于优化的方法对电堆进行分配的必要性；尹章文等[12]基于规则的方法对燃料电池和超级电容混合动力系统的工作模式进行研究，用于确定各个电堆和超级电容的工作状态，从而尽可能使得混合动力系统工作在高效率区；Mert 等[13]基于遗传算法对车载燃料电池系统进行了以最大功率、最大能效和最小成本为目标的多目标优化，实现功率输出最大化和成本最小化；Moghadari 等[14]提出了 MFCS 多目标双层能量管理策略，第 1 层基于规则确定电堆的开启个数，第 2 层利用等效消耗最小策略确定各个电堆的输出功率，与具有相同能量管理策略的单堆燃料电池系统相比，结果证明 MFCS 的氢耗、电堆衰减速度和总成本低于单堆燃料电池系统。综上所述，目前对于 MFCS 的研究已经被广泛开展，但是没有针对基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配方案的分析研究，MFCS 的 LCC 仍然是阻碍其市场化的主要因素之一。降低 MFCS 的 LCC 是提高 MFCS 竞争力的重要途径，因此有必要对 MFCS 的 LCC 进行分析。

1　问题定义

1 种常见的单堆 PEMFC 系统结构如图 1 所示。在最小 LCC 的 MFCS 电堆分配方案中，基于以下假设对优化指标进行分析：(1)不同电堆产品的购置方式相同；(2)不考虑因交通事故、交通环境而产生的外部成本；(3)不考虑由于宏观经济政策、市场、产品革新、老化磨损等产生的价值损失；(4)具有不同电堆分配方案的相同功率等级的燃料电池系统使用相同功率等级的辅助系统。

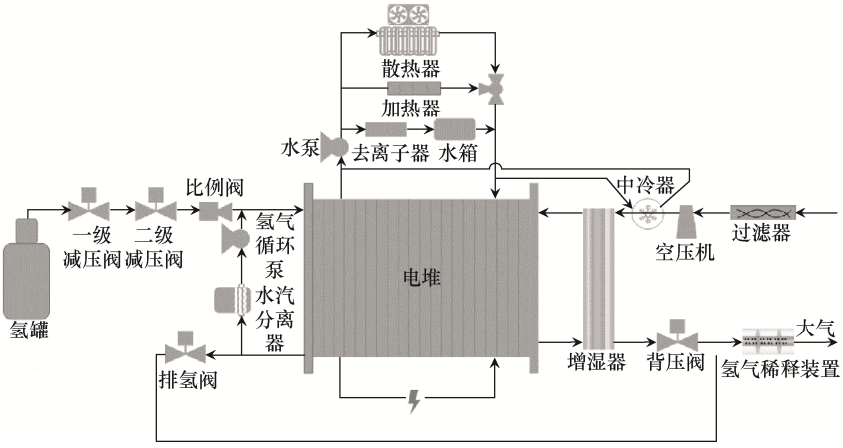


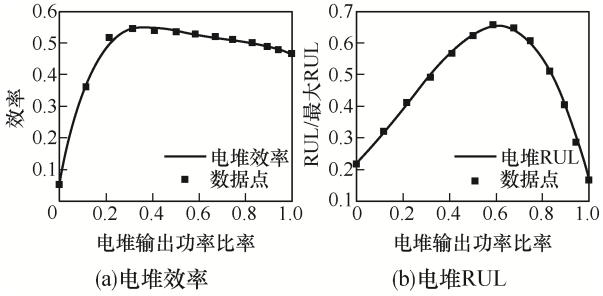
图 1　1 种单堆 PEMFC 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of single-stack PEMFC system

当采用同一套辅助系统时，MFCS 的 LCC 差异仅来源于电堆分配方案的不同，假设市场上有 m 种可用的电堆，则

$$\tilde{S}=\{\tilde{S}_j, j=1,2,\cdots,m\} \tag{1}$$

式中，$\tilde{S}$ 为市场上可用的成熟电堆产品的集合。该系列的电堆归一化后的效率和剩余使用寿命 RUL(remaining useful life)特性拟合曲线如图 2 所示。



(a)电堆效率 (b)电堆RUL

图 2 电堆效率和 RUL 特性拟合曲线

Fig. 2 Characteristic fitting curves for efficiency and RUL of stacks

假设在特定的应用场景中有 L 种不同的需求功率，需求功率的分布概率受约束于

$$\sum_{l=1}^{L} k(P_l^{\mathrm{d}}) = 1 \qquad l = 1,2,\cdots,L \tag{2}$$

式中：$k(P_l^{\mathrm{d}})$ 为第 l 个 MFCS 需求功率的概率；P_l^{d} 为应用场景中第 l 个 MFCS 需求功率。MFCS 设计有 n 个电堆，即

$$S = \{S_i \subset \tilde{S}, i = 1,2,\cdots,n\} \tag{3}$$

MFCS 电堆分配优化问题是在所有的输入中找到 1 个最优输入 S 使得目标函数达到最小，记为 $S^{\star}$，即

$$S^{\star} = \mathrm{argmin} J(S) \tag{4}$$

该优化问题用于推导特定应用场景下以 LCC 为优化指标的最优 MFCS 电堆分配方案，记为 $J_{\mathrm{eco}}(S)$。

2 模型建立

优化问题是基于市场上已有的成熟电堆产品，MFCS 由各种成熟电堆产品组合而成。当设计(实际)使用寿命(如 3 000 h)远小于产品的最大使用寿命时，LCC 分析可以转化为单位使用成本分析。在特定需求功率下的 MFCS 单位使用成本越小，表示以当前需求功率持续运行到寿命结束后的 LCC 越小。因此，MFCS 单位使用成本包括氢气单位使用成本和电堆单位折损成本。目标函数 $J_{\mathrm{eco}}(S)$ 可以表示为

$$\begin{cases} J_{\mathrm{eco}}(S) = \sum_{l=1}^{L} k(P_l^{\mathrm{d}}) J(P_l^{\mathrm{d}}) \\ J(P_l^{\mathrm{d}}) = \alpha_{\mathrm{h}} C_{\mathrm{h},l} + \beta_{\mathrm{p}} C_{\mathrm{p},l} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$C_{\mathrm{h},l}$ 为第 l 个 MFCS 需求功率时 MFCS 的氢气单位使用成本，元/s；$C_{\mathrm{p},l}$ 为第 l 个 MFCS 需求功率时的 MFCS 电堆单位折损成本，元/s；α_{h}、β_{p} 分别为优化指标 $C_{\mathrm{h},l}$、$C_{\mathrm{p},l}$ 的权重。

MFCS 相同功率输出时的氢气使用成本 C_{h} 越低，MFCS 的效率越高，电堆的折损成本 C_{p} 越低，MFCS 的 RUL 越长，即 MFCS 的 LCC 分析可以反映 MFCS 的效率和 RUL 因素。MFCS 效率的计算公式为

$$\eta_{\mathrm{MFCS}}(P_l^{\mathrm{d}}) = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{i,l}^{\mathrm{out}}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{P_{i,l}^{\mathrm{out}}}{\eta_i(P_{i,l}^{\mathrm{out}} / P_i^{\max})}} = \frac{\int_{t_{\mathrm{initial}}}^{t_{\mathrm{final}}} \sum_{i=1}^{n} P_{i,l}^{\mathrm{out}} \mathrm{d}t}{\int_{t_{\mathrm{initial}}}^{t_{\mathrm{final}}} \dot{m}_{\mathrm{H_2}}(-\Delta g_{\mathrm{rxn}}) \mathrm{d}t} \tag{6}$$

式中：$\eta_{\mathrm{MFCS}}(P_l^{\mathrm{d}})$ 为在第 l 个 MFCS 需求功率下 MFCS 的效率；$P_{i,l}^{\mathrm{out}}$ 为在第 l 个 MFCS 需求功率下 MFCS 的第 i 个电堆输出功率；$\eta_i(P_{i,l}^{\mathrm{out}} / P_i^{\max})$ 为在第 l 个 MFCS 需求功率下第 i 个电堆的效率；$P_i^{\max}$ 为第 i 个电堆的最大输出功率；Δg_{rxn} 为吉布斯自由能变化量，Δg_{rxn} =−237.3 kJ/mol，其绝对值代表在室内温度和压力(25 ℃，101.325 kPa)下，燃料电池电堆中单位氢气所能输出的最大电能，自由能变化量影响到 LCC 的取值，并不影响最优 MFCS 电堆分配方案的确定；$\dot{m}_{\mathrm{H_2}}$ 为氢的摩尔流量，mol/s。该过程中，每个功率持续的时间为 1 s，因此每个需求功率的氢气消耗量可以表示为

$$\dot{m}_{\mathrm{H_2}} = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{P_{i,l}^{\mathrm{out}}}{\eta_i(P_{i,l}^{\mathrm{out}} / P_i^{\max})} \right) \Big/ (-\Delta g_{\mathrm{rxn}}) \tag{7}$$

特定需求功率的氢气单位使用成本可计算为

$$C_{\mathrm{h},l} = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{P_{i,l}^{\mathrm{out}}}{\eta_i\left(P_{i,l}^{\mathrm{out}} / P_i^{\max}\right)} \right) \Big/ (-\Delta g_{\mathrm{rxn}}) \cdot M_{\mathrm{H_2}} C_{\mathrm{H_2}} \tag{8}$$

式中：$M_{\mathrm{H_2}}$ 为氢气的摩尔质量，$M_{\mathrm{H_2}}$=0.002 kg/mol；$C_{\mathrm{H_2}}$ 为氢气零售价格，$C_{\mathrm{H_2}}=30$元 / kg。

第 i 个电堆在第 l 个 MFCS 需求功率对应的输出功率的 RUL 可以表示为

$$T_{i,l}=\delta_i\left(\frac{P_{i,l}^{\mathrm{out}}}{P_i^{\max}}\right)T_{\max} \tag{9}$$

式中：$T_{i,l}$ 为第 l 个 MFCS 需求功率下第 i 个电堆的 RUL；$T_{\max}$ 为电堆的最大 RUL，$T_{\max}=25\,000$ h。第 i 个电堆在第 l 个 MFCS 需求功率下的电堆单位折损成本可以计算为

$$C_{i,l}=\frac{C_i}{T_{i,l}} \tag{10}$$

式中：$C_{i,l}$ 为在第 l 个 MFCS 需求功率下第 i 个电堆的单位折损成本，元/s；C_i 为第 i 个电堆购买价格，元。基于购买成本、最大 RUL 及电堆输出功率的 RUL 曲线，可以确定第 l 个 MFCS 需求功率时的电堆单位折损成本。因此，MFCS 电堆单位折损成本的计算方法可以描述为

$$C_{\mathrm{p},l}=\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{\delta_i T_{\max}\dfrac{P_{i,l}^{\mathrm{out}}}{P_i^{\max}}} \tag{11}$$

除了电堆的效率和 RUL 特性曲线外，MFCS 电堆分配优化问题还受到以下约束。

(1)MFCS 电堆需求功率应该为每个电堆输出功率的总和，即

$$\sum_{i=1}^{n}P_{i,l}^{\mathrm{out}}=P_l^{\mathrm{d}} \tag{12}$$

(2)每个电堆的可用输出范围应满足最小和最大界限，即

$$P_i^{\min}\leqslant P_{i,l}^{\mathrm{out}}\leqslant P_i^{\max}\qquad i=1,2,\cdots,n \tag{13}$$

式中，$P_i^{\min}$ 和 $P_i^{\max}$ 分别为第 i 个电堆的最小和最大输出功率，随时间不变。$P_i^{\min}$ 定义为 $P_i^{\max}$ 的百分比，取 $P_i^{\min}=0.1P_i^{\max}$。

(3)MFCS 中所有电堆的最大功率之和应满足不等式约束

$$\sum_{i=1}^{n}P_i^{\max}-P_{\max}\leqslant\Delta P \tag{14}$$

式中：$P_{\max}$ 为 MFCS 电堆在特定应用场景下的最大需求功率；ΔP 为 MFCS 的最大输出功率与应用场景的最大需求功率的偏差，本研究以 $\Delta P=0$ 为例。

使用电堆单位折损成本、氢气单位使用成本和其他边界条件，可以构建基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配数学模型。MFCS 电堆分配优化问题可以表述为

$$\begin{cases}S^{\star}=\operatorname{argmin}J_{\mathrm{eco}}(S),P_i^{\max}\in\tilde{S},[P_l^{\mathrm{d}},k(P_l^{\mathrm{d}})]\in K\\ \text{s.t.}\begin{cases}J_{\mathrm{eco}}(S)=\begin{cases}\min\displaystyle\sum_{l=1}^{L}k(P_l^{\mathrm{d}})(\alpha_{\mathrm{h}}C_{\mathrm{h},l}+\beta_{\mathrm{p}}C_{\mathrm{p},l})\\ \text{s.t.}\begin{cases}\alpha_{\mathrm{h}}+\beta_{\mathrm{p}}=1\\ C_{\mathrm{h},l}=\left(\displaystyle\sum_{i=1}^{n}\frac{P_{i,l}^{\mathrm{out}}}{\eta(P_{i,l}^{\mathrm{out}}/P_i^{\max})}\right)\Big/(-\Delta g_{\mathrm{rxn}})\cdot M_{\mathrm{H_2}}C_{\mathrm{H_2}}\\ C_{\mathrm{p},l}=\displaystyle\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{\delta_i T_{\max}\dfrac{P_{i,l}^{\mathrm{out}}}{P_i^{\max}}}\\ \displaystyle\sum_{i=1}^{n}P_{i,l}^{\mathrm{out}}=P_l^{\mathrm{d}}\\ 0.1P_i^{\max}\leqslant P_{i,l}^{\mathrm{out}}\leqslant P_i^{\max}\\ i=1,2,\cdots,n\\ \displaystyle\sum_{l=1}^{L}k(P_l^{\mathrm{d}})=1\end{cases}\end{cases}\\ \left|\displaystyle\sum_{i=1}^{n}P_i^{\max}-P_{\max}\right|\leqslant\Delta P\end{cases}\end{cases} \tag{15}$$

式中，K 为需求功率概率的集合。

由数学公式表示的优化模型可以通过各种算法求解，如序列二次规划算法和遗传算法等。当电堆数量较少时，可以使用遍历方法来求解优化模型，并在各种版本的系统和软件上进行计算，然而计算机的计算能力会影响到模型的求解时间。本文采用序列二次规划算法对最优电堆需求功率分配方案进行求解，算法的执行过程由二次规划算法求解器自动完成。电堆分配方案的迭代、存储和计算在 MATLAB 中进行。模型求解算法的 MATLAB 伪代码见表 1。

表 1 模型求解算法的 MATLAB 伪代码

Tab. 1 MATLAB pseudocode of model solving algorithm

MATLAB 算法
输入：$\tilde{S},n,K$
输出：S^*
从 $\tilde{S}$ 中生成所有可能的 MFCS 电堆分配方案，去除重复，生成新的矩阵 $\boldsymbol{B}$
$J=0$
for $i=1:\text{size}(\boldsymbol{B},1)$ do
$J_{\text{eco}}(S)=0$
for $l=1:L$ do
将 MFCS 电堆分配方案 $\boldsymbol{B}(i,1)$ 和需求功率概率 $K(1,l)$ 传递给二次规划算法求解器，等待计算结果
读取电堆需求功率分配方案优化指标最优值 $J_{\text{eco}}[P(1,l)]$，读取分布概率 $K(2,l)$
$J_{\text{eco}}(S)=J_{\text{eco}}(S)+K(2,l)\times J_{\text{eco}}[K(1,l)]$
end for
if $J_{\text{eco}}(S)>J$ then
$J=J_{\text{eco}}(S)$
end if
end for
返回 J 值最优时对应的 MFCS 电堆分配方案 S^*

3 结果与讨论

3.1 案例计算结果

在对基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配结果的讨论中，选择重型商用车作为 MFCS 的应用场景，车辆与动力系统基本参数见表 2。

表 2 车辆与动力系统基本参数

Tab. 2 Basic parameters of vehicle and powertrain

参数	数值/型号
车型	重型商用车
满载质量/t	40
MFCS 电堆最大输出功率/kW	240
电堆类型	PEMFC
整备质量/t	21.5
最高车速/(km/h)	87.7
典型工况	C-WTVC
动力源	动力电池+MFCS

在中国重型商用车瞬态工况 C-WTVC(China-world transient vehicle cycle)应用场景中，车辆的需求功率是使用车辆功率平衡方程确定的。采用对车辆需求功率进行平滑的方法确定 MFCS 的需求功率，不同平滑方法的效果略有不同，本节使用局部加权算法 LOWESS(locally weighted scatterplot smoothing)[15]确定。LOWESS 是 Savitzky-Golay 卷积平滑算法的改进，使用二阶多项式回归的方法对源数据进行平滑处理，并根据源数据对平滑点的影响程度设置权重确定当前位置的数据更新点。LOWESS 算法对车辆需求功率的处理结果如图 3 所示，进而得到 MFCS 需求功率分布直方图，将重型商用车的特定驾驶场景转换为与时间无关且具有统计意义的重型商用车应用场景，MFCS 需求功率分布直方图如图 4(b)所示。

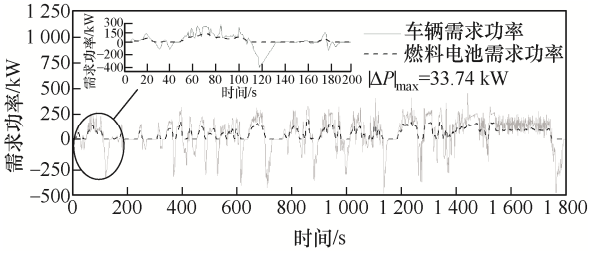
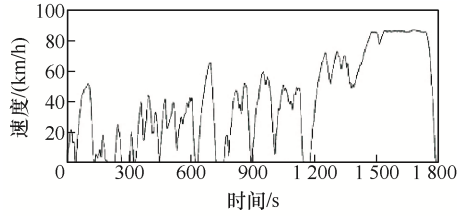


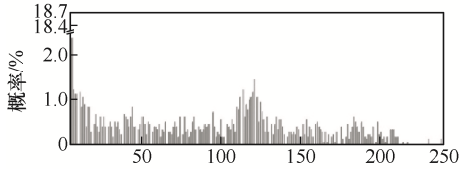
图 3 LOWESS 算法对车辆需求功率的处理结果

Fig. 3 Results of vehicle demand power processed using LOWESS algorithm

燃料电池电堆成本主要受其产量的影响，如果电堆产量增加，在短期内电堆成本会大幅降低。通



(a) C-WTVC应用场景描述

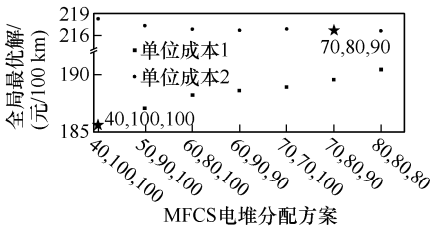


(b) MFCS电堆需求功率概率分布

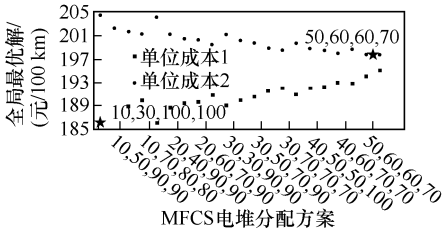
图 4　C-WTVC 应用场景描述和 MFCS 电堆需求功率概率分布

Fig. 4 C-WTVC application scenario description and MFCS stacks demand power probability distribution

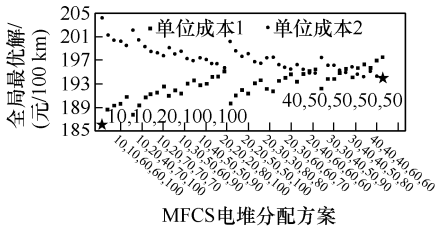
过市场调研，以平均电堆成本 1 550 元/kW 为例，假设电堆最大输出功率与单位成本的关系存在 2 种变化，一种是随着电堆最大输出功率的增加，单位成本相应减小，表示为单位成本 1；另一种是随着电堆最大输出功率的增加，单位成本相应增加，表示为单位成本 2。不同 MFCS 电堆分配方案的全局最优解如图 5 所示。可以看出，对 3 个堆到 5 个堆的所有 MFCS 电堆分配方案在不同电堆数量下的全局最优解进行求解，比较得出不同堆数的最优 MFCS 电堆分配方案，同时该求解方法也适用于具有更多电堆数量的 MFCS 最优电堆分配方案求解。



(a) 3个



(b) 4个

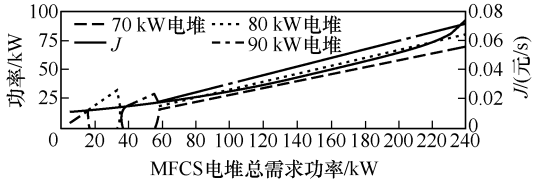


(c) 5个

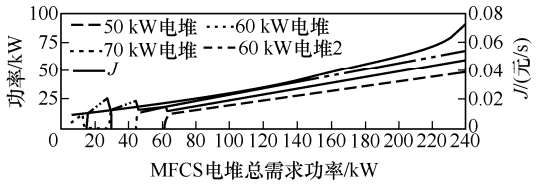
图 5　不同数量电堆时的 MFCS 电堆分配方案全局最优解

Fig. 5 Global optimal solution under MFCS stacks allocation scheme under different stacks

利用数学模型可以确定特定 MFCS 电堆分配方案下的 MFCS 电堆需求功率最优分配方案。以电堆的单位成本随功率增加而增加时的 3 个堆的 MFCS 最优电堆分配方案(70 kW, 80 kW, 90 kW)和 4 个堆的 MFCS 最优电堆分配方案(50 kW, 60 kW, 60 kW, 70 kW)为例，分别计算 MFCS 电堆输出功率最优分配方案，结果如图 6 所示。可以看出，当 MFCS 电堆需求功率较小时，优先采用单个或者部分电堆工作的方式以保障系统具有更低的氢气使用成本和电堆折损成本；当 MFCS 电堆需求功率逐渐增大时，各电堆需求功率趋向于等比例分配以保障系统具有更低的氢气使用成本和电堆折损成本。



(a) 70 kW, 80 kW, 90 kW



(b) 50 kW, 60 kW, 60 kW, 70kW

图 6　以最小 LCC 为优化指标，(70 kW，80 kW，90 kW)和(50 kW, 60 kW, 60 kW, 70 kW)最优电堆需求输出功率分配方案

Fig. 6 Optimal MFCS stacks output power allocation schemes for (70 kW, 80 kW and 90 kW) and (50 kW, 60 kW, 60 kW and 70 kW) with minimum LCC as optimization index

3.2 MFCS 氢气使用成本分析

将 C_h 的权重设定为 1 时，即只考虑氢气使用成本，忽略电堆折损成本，可以求出 MFCS 在某一场景下的氢耗和平均使用成本。经过计算，只考虑氢气的使用成本时，C-WTVC 应用场景下的最优 MFCS 电堆分配方案为(10 kW，20 kW，40 kW，80 kW，90 kW)。对不同 MFCS 电堆分配方案的氢耗和使用成本进行分析时，均是在同一个 MFCS 需求功率分布场景下进行的，负载需求功率和 MFCS 需求功率确定时动力电池充放电功率也是确定的，忽略动力电池时变参数的影响，在相同实验条件下，运行相同时间后电池荷电状态 SoC(state of charge)的变化范围也相同，不需要考虑由于 SoC 不同而折算的氢耗和氢气使用成本。

以氢气市场价格为 30 元/kg 为例，使用 MFCS 电堆分配方案(10 kW，20 kW，40 kW，80 kW，90 kW)的燃料电池系统在 C-WTVC 行驶工况的最优氢气使用成本(30 min，20.5 km)为 61.94 元，氢气消耗量为 2.060 kg。传统的 5 个堆平均分配方法得到的 MFCS 电堆分配方案为(40 kW，50 kW，50 kW，50 kW，50 kW)，C-WTVC 行驶工况(30 min，20.5 km)的氢气使用成本为 66.25 元，氢气消耗量为 2.208 kg。使用基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配方案和电堆需求功率分配策略与使用传统的电堆平均分配方案和电堆需求功率平均分配策略的氢气消耗和氢气使用成本结果见表 3。可以看出，基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配优化方案和电堆需求功率分配策略与使用电堆需求功率平均分配策略的电堆平均分配方案相比具有更低的氢气使用成本和氢气消耗。在这个例子中，循环 C-WTVC 行驶工况，相对于传统电堆平均分配方案和功率平均分配策略，基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配方案和功率分配策略每 100 km 可以节省 0.70 kg 的氢气。

表 3 不同 MFCS 电堆分配方案的氢气消耗和氢气使用成本

Tab. 3 Hydrogen consumption and hydrogen usage cost under different MFCS stacks allocation schemes

MFCS 电堆分配方案	氢耗/(kg/100 km)	氢气使用成本/(元/100 km)
(10 kW, 20 kW, 40 kW, 80 kW, 90 kW)	10.07	302.14
(40 kW, 50 kW, 50 kW, 50 kW, 50 kW)	10.77	323.17

4 结语

本文旨在以 MFCS 最小 LCC 为优化指标对 MFCS 的电堆分配方案进行优化设计，建立了带边界条件的基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配优化模型，以获得特定应用场景下的 MFCS 最优电堆分配方案。以重型商用车应用场景下的 MFCS 电堆分配方案优化设计为例对模型进行求解，结果显示不同的 MFCS 电堆分配方案具有不同的 LCC，不同的电堆单位成本趋势对基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配结果有影响。经验证，基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配方案和功率分配策略比传统电堆平均分配方案和功率平均分配策略每 100 km 可以节省 0.70 kg 的氢气。本文所提出的 MFCS 电堆优化分配方法可以为设计者在早期设计阶段获得综合性能更好的 MFCS 电堆分配方案提供指导。

参考文献：

[1] Wang Yun, Seo B, Wang Bowen, et al. Fundamentals, materials, and machine learning of polymer electrolyte membrane fuel cell technology [J]. Energy and AI, 2020, 1: 100014.

[2] Lamb W F, Wiedmann T, Pongratz J, et al. A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018 [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(7): 073005.

[3] 李佳琪, 徐潇源, 严正. 大规模新能源汽车接入背景下的电氢能源与交通系统耦合研究综述[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(3): 253-266.
Li Jiaqi, Xu Xiaoyuan, Yan Zheng. A review of coupled electricity and hydrogen energy system with transportation system under the background of large-scale new energy vehicles access [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(3): 253-266. (in Chinese)

[4] Fang Kai, Li Chenglin, Tang Yiqi, et al. China's pathw-

ays to peak carbon emissions: New insights from various industrial sectors [J]. Applied Energy, 2022, 306: 118039.

[5] 周苏, 王克勇, 文泽军, 等. 车用多堆燃料电池系统能量管理与控制策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 107-115.
Zhou Su, Wang Keyong, Wen Zejun, et al. Energy management and control strategy of multi-stack fuel cell system for automotive applications [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(1): 107-115. (in Chinese)

[6] Soltani A K, Kandidayeni M, Boulon L, et al. Modular energy systems in vehicular applications [J]. Energy Procedia, 2019, 162: 14-23.

[7] Wu Peng, Partridge J, Bucknall R. Cost-effective reinforcement learning energy management for plug-in hybrid fuel cell and battery ships [J]. Applied Energy, 2020, 275: 115258.

[8] Li Qi, Yang Hanqing, Han Ying, et al. A state machine strategy based on droop control for an energy management system of PEMFC-battery-supercapacitor hybrid tramway [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(36): 16148-16159.

[9] Yang Hanqing, Li Qi, Wang Tianhong, et al. A dual mode distributed economic control for a fuel cell: Photovoltaic-battery hybrid power generation system based on marginal cost [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(46): 25229-25239.

[10] Vivas F J, Segura F, Andújar J M. Fuzzy logic-based energy management system for grid-connected residential DC microgrids with multi-stack fuel cell systems: A multi-objective approach [J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2022, 32: 100909.

[11] Zhou Su, Zhang Gang, Fan Lei, et al. Scenario-oriented stacks allocation optimization for multi-stack fuel cell systems [J]. Applied Energy, 2022, 308: 118328.

[12] 尹章文, 张立炎, 陈启宏, 等. 多模块燃料电池混合动力系统功率分配研究[J]. 电源技术, 2018, 42(12): 1857-1860, 1868.
Yin Zhangwen, Zhang Liyan, Chen Qihong, et al. Research on power allocation of multi module fuel cell hybrid power system [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(12): 1857-1860, 1868. (in Chinese)

[13] Mert S O, Özçelik Z, Özçelik Y, et al. Multi-objective optimization of a vehicular PEM fuel cell system [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(13): 2171-2176.

[14] Moghadari M, Kandidayeni M, Boulon L, et al. Operating cost comparison of a single-stack and a multi-stack hybrid fuel cell vehicle through an online hierarchical strategy [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(1): 267-279.

[15] Lyu Zhiqiang, Gao Renjing, Li Xiaoyu. A partial charging curve-based data-fusion-model method for capacity estimation of Li-ion battery [J]. Journal of Power Sources, 2021, 483: 229131.



裴冯来

作者简介：

裴冯来(1983—　)，男，博士，高级工程师。研究方向：新型车辆动力系统。E-mail：fenglaip@smvic.com.cn。

张岗(1994—　)，男，通信作者，博士。研究方向：燃料电池系统建模。E-mail：gangz@smvic.com.cn。

周苏(1961—　)，男，博士，教授。研究方向：氢燃料电池系统故障诊断。E-mail：06999@tongji.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)