储能系统与工程

基于动态平衡优先优化的燃料电池/锂离子电池能量管理策略

潘玉龙[1]，张德福[1]，季长涛[2]，申振宇[1]
（[1]天津理工大学海运学院，天津 300384；[2]青岛科而泰环境控制技术有限公司，山东 青岛 266101）

摘 要：为协调长航时燃料电池/锂离子电池混合动力无人机有限氢气与电池能量的消耗进度，避免单一能源提前耗尽，提出动态平衡优先的Pareto参数优化能量管理策略，构建“离线参数优化-在线规则执行”框架。建立考虑39 V恒压直流母线和等效内阻损耗的锂电池SOC更新模型，基于1 kW质子交换膜燃料电池性能数据拟合氢耗四阶多项式，其R^2、均方根误差和平均相对误差分别为0.9983、157.4 mL/min和2.61%。以SOC利用率、氢气消耗率及其绝对差值表征动态平衡，选取7个规则参数作为决策变量，以总氢耗、动态平衡差值和燃料电池相邻时刻功率变化量的均方根为目标，采用NSGA-II生成Pareto参数集，并按“先平衡、后经济、再平滑”原则筛选折中解；在线阶段依据实时SOC、剩余氢气比例和负载功率执行功率分配。600 s工况下，折中解的SOC利用率、氢气消耗率、动态平衡差值、总氢耗和功率变化均方根分别为75.66%、72.79%、2.87%、5.807 g和25.363 W，终止SOC为24.34%，高于20%的安全下限；与等效氢耗优先和模糊规则策略相比，动态平衡差值分别降低62.6%和35.1%。在5组随机种子下，总氢耗和动态平衡差值分别稳定在5.807~5.843 g和2.46%~2.87%，表明重复性良好。进一步对1200 s低波动巡航和600 s多次高功率机动工况重新优化，动态平衡差值分别为0.322%和1.733%，总氢耗量分别为6.385 g和6.025 g，终止SOC与剩余氢气均满足约束，且未触发3%阈值放宽。结果表明，该策略能以可接受的氢耗代价协调双源消耗路径，保持负载波动下的协同供能能力，并适配不同时长和负载特征的已知任务剖面。

关键词：燃料电池无人机；锂离子电池；能量管理；动态平衡；NSGA-II
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0570
中图分类号：TM 911　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-4239（2026）10-3970-16

Dynamic-balance-prioritized Pareto parameter optimization for energy management of fuel-cell/lithium-battery

PAN Yulong[1], ZHANG Defu[1], JI Changtao[2], SHEN Zhenyu[1]
([1]Maritime College, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; [2]Qingdao Create Environmental Control Technology Co., Ltd., Qingdao 266101, Shandong, China)

Abstract: It is necessary to coordinate the consumption of limited onboard hydrogenand battery energy in long-endurance fuel cell/lithium-ion battery hybrid unmanned aerial vehicles and prevent either energy source from being prematurely depleted. Toward this end, a dynamic-balance-prioritized Pareto-parameter-optimization energy management strategywas proposed in this study, and an "offline parameter optimization-online rule execution"

收稿日期：2026-07-02；**修改稿日期：**2026-07-14。
基金项目：天津理工大学教学基金项目（YB25-11）。
第一作者：潘玉龙（1995—），男，硕士，研究方向为燃料电池/锂电池混合电源能量管理，E-mail：1131960518@qq.com；**通信作者：**申振宇，博士，讲师，研究方向为混合动力与能源管理，船舶绿色动力，E-mail：shenzhenyu610@163.com。
引用本文：潘玉龙, 张德福, 季长涛, 等. 基于动态平衡优先优化的燃料电池/锂离子电池能量管理策略[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(10): 3970-3985.
Citation：PAN Yulong, ZHANG Defu, JI Changtao, et al. Dynamic-balance-prioritized Pareto parameter optimization for energy management of fuel-cell/lithium-battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(10): 3970-3985.

framework was established. A battery state-of-charge (SOC) update model with a 39 V constant-voltage DC bus and equivalent internal-resistance losses was developed, while a fourth-order polynomial hydrogen consumption model was fitted using the performance data of a 1 kW proton exchange membrane fuel cell. The coefficient of determination, root mean square error, and mean relative error of the fitted model were 0.9983, 157.4 mL/min, and 2.61%, respectively. The SOC utilization ratio, hydrogen consumption ratio, and their absolute difference were defined to characterize dynamic balance. Seven key rule parameters were selected as decision variables. Total hydrogen consumption, dynamic balance difference, and the root mean square of fuel-cell power variations between adjacent time steps were taken as optimization objectives. The nondominated sorting genetic algorithm II was employed to generate the Pareto parameter set. A compromise solution was selected from this parameter set according to the principle of "balance first, economy second, and smoothness third." During online operation, power was allocated according to the real-time SOC, remaining hydrogen ratio, and load power. Under the 600 s mission profile, the SOC utilization ratio, hydrogen consumption ratio, dynamic balance difference, total hydrogen consumption, and fuel-cell power-variation root mean square were 75.66%, 72.79%, 2.87%, 5.807 g, and 25.363 W, respectively. The terminal SOC remained at 24.34%, above the 20% safety limit. Compared with the equivalent-hydrogen-consumption priority and fuzzy-rule-based strategies, the dynamic balance difference decreased by 62.6% and 35.1%, respectively. Across five optimization runs with different random seeds, the total hydrogen consumption and dynamic balance difference remained within 5.807—5.843 gand 2.46%—2.87%, demonstrating good repeatability. Further optimization under a 1200 s low-fluctuation cruise profile and a 600 s high-power multi-maneuver profile yielded dynamic balance differences of 0.322% and 1.733%, respectively, and total hydrogen consumptions of 6.385 and 6.025 g, respectively. The terminal SOC and remaining hydrogen met the safety constraints without triggering any relaxation of the 3% threshold. The results show that the proposed strategy coordinates the relative depletion paths of hydrogen and battery energy at an acceptable hydrogen cost, preserves dual-source cooperative power-supply capability under subsequent load fluctuations, and exhibits adaptability to known mission profiles with different durations and load characteristics.

Keywords: fuel cell UAV; lithium battery; energy management; dynamic balance; NSGA-II

长航时无人机在巡检、应急通信、环境监测和特种作业等场景中的应用不断扩展，动力系统的能量密度与续航能力成为限制任务半径的关键因素[1]。传统锂离子电池供电方案响应快、控制简单，但受比能量限制，在长航时任务中难以兼顾载荷能力与续航时间[2]。燃料电池具有较高比能量、低噪声和近零排放等优点，被认为是提升中小型无人机续航能力的重要技术路线[3]。国内关于轻小型太阳能/氢能无人机的综述研究也指出，氢燃料电池无人机在长航时、低排放和任务适应性方面具有较好的发展前景[4]。围绕无人机与遥控飞行器的混合推进构型，相关研究表明燃料电池/电池混合系统具有较好的工程应用前景[5]。

然而，质子交换膜燃料电池受气体供给、湿热管理和辅助部件动态响应影响，其瞬态功率跟随能力通常弱于锂离子电池[6]。在无人机起飞、爬升、机动和着陆等阶段，负载功率变化较快，单独依靠燃料电池容易引起功率滞后或系统效率下降[7]。因此，燃料电池/锂离子电池混合电源通常采用燃料电池承担基载、锂离子电池承担峰值与瞬态补偿的分工方式[8]。近期针对燃料电池无人机混合能量架构的研究表明，氢燃料电池−锂离子电池混合动力

系统能够在满足任务功率需求的同时提高系统可靠性[9]。已有研究围绕燃料电池/锂离子电池无人机的功率分配与系统设计开展了大量探索[10-11]。

基于真实飞行数据的研究表明，合理的能量管理策略有助于降低氢耗并改善混合电源运行状态[12]。近年来，分层控制与自适应能量管理方法被进一步用于提升复杂任务剖面下的综合性能[13]。面向无人机推进场景，优化燃料电池与锂离子电池协同输出的研究仍在持续发展[14]。同时，也有研究开始将寿命因素引入燃料电池混合动力系统能量管理，以提高长期运行可靠性[15]。

从现有方法看，以氢耗最小为目标的优化策略仍占据重要地位，其核心思路是通过构建等效代价函数降低燃料消耗[16]。也有研究在代价函数中同时考虑内部损耗与氢耗，以改善系统综合经济性[17]。近期综述进一步指出，面向智能化与自主化飞行任务的燃料电池混合动力无人机能量管理正呈现多目标、分层化和自适应的发展趋势[18]。从更广义的航空氢能推进视角看，机载氢储量受质量、体积和安全性约束是长期存在的基本前提[19]。

围绕混合能源系统，相关研究通常将能量管理方法概括为基于规则与基于优化两大类[20]。相关综述指出，不同能量管理方法在最优性、实时性和工程实现复杂度方面存在差异，因此需要根据具体应用场景进行策略选择[21]。其中，基于规则的方法结构简单、实时性强，更便于在机载控制器上在线实现[22]。在航空电推进系统中，主动功率管理同样被证明有助于改善系统动态响应与供电稳定性[23]。针对低空与长航时飞行器，混合推进系统的策略设计还需兼顾负载波动、推进效率和任务持续时间等因素[24-25]。

在一般的燃料电池混合动力系统中，等效消耗最小化策略已被广泛用于权衡燃料消耗与储能系统输出[26-27]。国内关于燃料电池电动汽车动力系统的综述研究也表明，能量管理策略需要在氢耗、动力电池状态与系统效率之间进行综合协调[28]。相关研究还将该类方法扩展到轨道交通与多源混合动力系统，以协调不同储能装置之间的功率分配[29-30]。与此同时，部件协同优化与两层优化设计方法也被用于处理燃料电池系统中的尺寸匹配与能量管理耦合问题[31]。面向寿命与退化约束的能量管理研究也在不断增加，为多目标优化提供了新的约束视角[32-33]。退化感知的等效消耗最小化策略进一步表明，仅关注瞬时经济性并不足以支撑系统长期稳定运行[34]。近期，有研究通过优化燃料电池/锂电池混合动力系统的动态规则参数，综合协调氢耗、部件衰退与电能消耗，为规则型能量管理策略优化提供了参考[35]。

尽管已有研究为燃料电池无人机能量管理奠定了基础，但多数方法仍主要关注氢耗降低、效率提升或瞬态响应改善，对有限机载氢气与电池能量的协同利用关注不足。对于长航时无人机，任务过程中通常无法中途补能，若氢气与电池 SOC 消耗比例不匹配，可能导致一种能源提前耗尽，而另一种能源仍有剩余，从而影响任务完成能力。因此，能量管理策略不仅应追求单一能耗最优，还应协调两类能源的相对消耗路径。多目标优化可用于协调氢耗经济性、能源动态平衡性和燃料电池输出平滑性之间的折中关系[36-38]。已有研究表明，基于 Pareto 最优解集进行权衡筛选，有助于在能耗经济性与储能系统使用状态之间取得折中[39]。但若仅采用常规加权方式选取 Pareto 折中解，结果仍可能偏向低氢耗区域，并造成新的能源失衡。因此，本工作进一步引入动态平衡优先的 Pareto 折中解筛选机制。

基于上述分析，本工作的主要创新与贡献体现在以下三个方面：

（1）面向长航时无人机任务过程中机载氢气与锂电池能量均有限且难以中途补充的问题，构建动态平衡评价指标 $\Delta\eta$，用于表征燃料电池氢耗率与锂电池 SOC 利用率之间的匹配程度，从而将能量管理目标由单一氢耗最小化扩展为有限能源协同利用。

（2）提出一种动态平衡优先的 Pareto 折中解筛选机制。不同于直接选择最低氢耗解或采用常规加权评分方法，本工作首先在 Pareto 解集中筛选满足 $\Delta\eta\leqslant3\%$ 的候选解，再在候选集合内综合考虑总氢耗与燃料电池功率平滑代理指标，从而避免最终解偏向低氢耗、高能源失衡区域。

（3）建立“离线参数优化-在线规则执行”的能量管理框架。离线阶段采用非支配排序遗传算法 II（NSGA-II）对动态平衡策略关键参数进行多目标优化，在线阶段仅根据当前 SOC、氢气剩余量和负载功率执行规则型功率分配，使所提方法兼具多目标优化能力与工程实现便利性。

1　混合动力系统建模与动态平衡指标

1.1　飞行任务剖面与负载功率需求

为在优化计算之前明确仿真工况，本工作首先给出无人机典型飞行剖面，如图1所示。该任务剖面由起飞、爬升、巡航、任务执行、下降和着陆等阶段组成。其中，起飞和爬升阶段需要较高推进功率以完成离地和高度爬升；巡航与任务执行阶段飞行高度相对稳定，但仍可能受到任务动作、姿态调整及外界扰动影响；下降和着陆阶段负载需求功率逐步降低，直至任务结束。

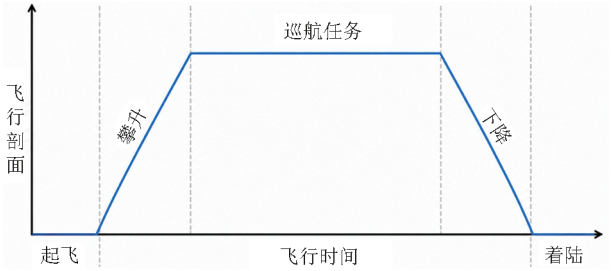

图1　无人机飞行任务剖面

Fig. 1　UAV flight mission profile

在上述飞行剖面基础上，本工作选取图2所示的600 s的无人机负载需求功率曲线作为代表性任务工况。该曲线用于描述完整任务过程中的瞬时功率需求，也是后续离线参数优化和在线规则执行仿真的输入量。由图2可知，负载功率在起飞/爬升阶段初期处于较高水平，随后进入波动明显的巡航与任务执行阶段，并在任务后段再次出现较高功率需求。该负载曲线同时包含高功率段、低功率段和频繁波动区间，能够体现燃料电池/锂离子电池混合电源在典型无人机任务中的功率分配需求。

在能量管理仿真中，燃料电池与锂电池共同承担图2所示的负载需求。为突出能量管理策略本身的作用，本工作暂不考虑DC/DC变换器效率和线路传输损耗，锂离子电池内阻损耗在荷电状态（SOC）更新模型中单独考虑。系统功率平衡关系表示为：

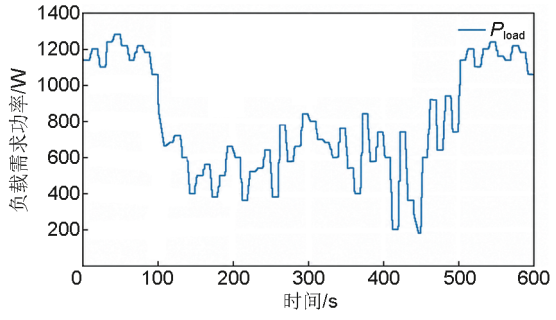

图2　负载功率曲线

Fig. 2　Load demand power profile

$$P_{load}(t) = P_{FC}(t) + P_{batt}(t) \tag{1}$$

式中，P_{load}为无人机负载功率，W；P_{FC}为燃料电池输出功率，W；P_{batt}为锂电池输出功率，W。当$P_{batt} > 0$时，锂电池处于放电状态；当$P_{batt} < 0$时，锂电池处于充电或回充状态。

1.2　锂电池SOC更新模型

本工作混合电源系统采用39 V恒压直流母线。现有研究多基于等效电路模型，并结合参数辨识与滤波算法提高动态工况下的SOC估计精度。尹康涌等[40]采用二阶RC模型和动态噪声自适应无迹卡尔曼滤波，验证了该方法在动态应力测试（DST）和联邦城市驾驶工况（FUDS）下的有效性。鉴于本工作重点为能量管理策略而非SOC在线估计，本工作采用文献[41]的等效电路与库仑计数方法，对电池模型进行简化：忽略端电压动态变化，并以等效内阻表征欧姆损耗。

$$I_{batt}(t) = \frac{P_{batt}(t)}{U_{bus}} \tag{2}$$

$$P_{loss,batt}(t) = I_{batt}^2(t)R_{batt} \tag{3}$$

$$P_{batt,eff}(t) = P_{batt}(t) + P_{loss,batt}(t) \tag{4}$$

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) - \frac{P_{batt,eff}(t)\Delta t}{3600\,U_{bus}Q_{batt}} \times 100\% \tag{5}$$

式中，U_{bus}为恒压直流母线电压，本工作取39 V；$P_{batt}(t)$为t时刻的锂电池输出功率，W；$I_{batt}(t)$为锂电池电流，A；$P_{loss,batt}(t)$为锂电池内阻损耗功率，W；R_{batt}为锂电池组等效内阻，Ω；$P_{batt,eff}(t)$为考虑内阻损耗后的锂电池等效输出功率，W；$SOC(t)$和$SOC(t + \Delta t)$分别为t时刻和$(t + \Delta t)$时刻的锂电池荷电状态，%；Δt为仿真时间步长，s；Q_{batt}为锂电池额定容量，Ah。

1.3　燃料电池氢耗模型

质子交换膜燃料电池（PEMFC）通过氢氧电化学反应将氢气的化学能转化为电能。氢气在阳极失去电子生成质子，质子经质子交换膜迁移至阴极，并与氧气和电子反应生成水。忽略副反应时，燃料电池的阳极反应、阴极反应和总反应分别如式(6)～式(8)所示：

$$\text{阳极：} H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \tag{6}$$

$$\text{阴极：} 1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \tag{7}$$

总反应: $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$ (8)

燃料电池在不同输出功率下的氢气消耗率不同。在化学能转化为电能的过程中，部分能量会以热量和辅助部件损耗的形式消耗，因此氢气化学能不能完全转化为输出电能。氢气低热值LHV表示不计水蒸气冷凝潜热时氢气可释放的有效化学能，本工作取LHV=241 kJ/mol。

以典型1 kW PEMFC系统为例，图中数据横坐标表示燃料电池输出功率，纵坐标分别表示不同功率下的氢气消耗量和系统效率。利用该数据绘制燃料电池氢耗曲线和系统效率曲线。考虑燃料电池风扇和控制器等外设平均功率损耗，本工作取辅助功率损耗P_{loss} = 80 W。系统效率可表示为：

$$\eta_{FC} = \frac{P_{FC}}{(C_{PFC} + C_{Ploss})LHV} \times 100\% \quad (9)$$

式中，η_{FC}表示燃料电池的效率；P_{FC}表示燃料电池输出功率，W；C_{PFC}表示与输出功率对应的氢气消耗率，%；C_{Ploss}表示辅助功率折算得到的等效氢气消耗率，W；LHV表示氢气低热值，kJ/mol。

在此基础上，燃料电池氢气消耗率与输出功率之间存在明显非线性关系。参考典型1 kW级PEMFC系统氢耗曲线[42]，本工作采用四阶多项式拟合燃料电池功率与氢耗的关系，如图3所示。

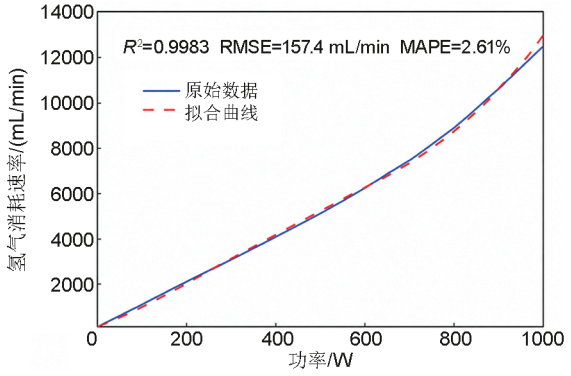

图3 PEMFC氢耗曲线

Fig. 3 Hydrogen consumption curve of the 1 kW PEMFC

氢耗拟合关系为：

$$C_{H_2}(P_{FC}) = 3.594 \times 10^{-9}P_{FC}^4 - 5.842 \times 10^{-6}P_{FC}^3 + 5.842 \times 10^{-3}P_{FC}^2 + 8.718P_{FC} \quad (10)$$

式中，$C_{H_2}(P_{FC})$表示对应燃料电池功率下的氢气消耗速率，mL/min。

为进一步评价式(10)的拟合精度，本工作将图3中的氢气消耗原始数据与四阶多项式拟合结果进行对比，并采用决定系数R^2、均方根误差（RMSE）和平均相对误差（MAPE）对拟合效果进行评价。由图3可知，拟合曲线与原始数据基本重合，其中R^2=0.9983，RMSE=157.4 mL/min，MAPE=2.61%。R^2接近1，说明拟合模型能够较好解释原始氢耗数据的变化规律；RMSE和MAPE均较小，表明拟合误差处于较低水平。因此，式(10)能够较准确地描述1 kW PEMFC氢气消耗量随输出功率变化的非线性关系，可满足后续能量管理策略仿真与参数优化分析的精度需求。

1.4 动态平衡评价指标与仿真参数

动态平衡能量管理策略关注的不是单一能源消耗最小，而是在任务过程中协调燃料电池氢气与锂电池SOC的相对消耗，使两类有限机载能源按接近比例释放，以避免一类能源提前耗尽而另一类能源剩余较多。定义锂电池SOC利用率η_{SOC}、燃料电池氢气消耗率η_{H_2}和动态平衡差值$\Delta\eta$分别为：

$$\eta_{SOC} = \frac{SOC_0 - SOC_{end}}{SOC_0 - SOC_{min}} \times 100\% \quad (11)$$

$$\eta_{H_2} = \frac{m_{H_2,0} - m_{H_2,end}}{m_{H_2,0}} \times 100\% \quad (12)$$

$$\Delta\eta = \left|\eta_{SOC} - \eta_{H_2}\right| \quad (13)$$

式中，η_{SOC}为锂电池的SOC利用率，%；SOC_0为锂电池的初始SOC值，%；SOC_{end}为锂电池结束时的SOC值，%；SOC_{min}为锂电池的最小SOC值，%；η_{H_2}为燃料电池氢气利用率，%；$m_{H_2,0}$为氢气的初始质量，g；$m_{H_2,end}$为燃料电池结束时的氢气质量，g；$\Delta\eta$为动态平衡差值，%。

$\Delta\eta$越小，说明锂电池和燃料电池两种能源在任务过程中的消耗程度越接近。与仅以氢耗量、末端SOC或瞬时功率误差为评价标准相比，$\Delta\eta$能够更直接反映混合电源系统在有限能源携带且任务中途不可补能条件下的协同利用能力。本工作采用的混合电源系统建模与仿真参数见表1。

需要说明的是，本工作的研究重点为动态平衡能量管理策略的参数优化机制，而非燃料电池电化学动态、电力电子变换器或电堆退化机理的精细建模。因此，为降低策略验证过程中的模型复杂度，本工作采用恒压母线约束下的锂离子电池模型，并基于1 kW级PEMFC性能曲线建立氢耗拟合模型。该模型能够反映燃料电池功率-氢耗关系以及锂电池SOC消耗趋势，适用于策略层面的离线优化与

表1　混合电源仿真参数

Table 1　Simulation parameters of the hybrid power system

类别	参数	数值
仿真设置	仿真时间	600 s
	时间步长	1 s
锂电池模型	初始SOC	100%
	SOC下限	20%
	恒压母线电压	39 V
	电池容量	1.5 Ah
	等效内阻	0.08 Ω
	内阻灵敏度范围	0.05~0.10 Ω
燃料电池与氢耗模型	初始氢气质量	8 g
	氢耗模型	四阶多项式拟合
功率约束	燃料电池功率范围	0~1000 W
	锂电池功率范围	−100~600 W

不同参数方案对比分析。需要指出的是，DC/DC变换器效率、燃料电池气体供给延迟、热管理动态、端电压瞬态变化以及电堆退化机理尚未在本工作中展开建模，后续研究将结合更精细的系统模型和实测数据进一步验证。

2　动态平衡优先的Pareto参数优化能量管理策略

2.1　动态平衡策略与优化变量

动态平衡策略以SOC剩余比例S_{SOC}和氢气剩余比例S_{H_2}之间的差值作为能源平衡状态变量：

$$S = S_{SOC} - S_{H_2} \tag{14}$$

式中，S为能源平衡状态变量，%；S_{SOC}为SOC值的剩余比例，%；S_{H_2}为氢气的剩余比例，%。

当S<0时，说明SOC剩余比例低于氢气剩余比例，锂离子电池消耗相对较快，应提高燃料电池承担功率；当S>0时，说明氢气消耗相对较快，应适当增加锂离子电池输出；当S接近0时，两种能源消耗基本均衡，可优先考虑燃料电池高效区运行。

动态平衡策略中的负态进入/退出阈值、正态进入/退出阈值、燃料电池偏好工作点、均衡态评价权重和正态调节增益等参数会直接影响功率分配结果以及两种能源的相对消耗路径。

为提高策略对不同任务工况的适应性，本工作将上述参数作为NSGA-II优化变量，获得覆盖不同性能偏好的Pareto参数集；随后再依据动态平衡优先原则筛选最终折中解。优化变量表示为：

$$\boldsymbol{x} = \left[S_{neg,enter}, S_{neg,exit}, S_{pos,exit}, S_{pos,enter}, P_{FC,pref}, w_{hybrid}, k_{pos}\right]^{T} \tag{15}$$

式中，$S_{neg,enter}$和$S_{neg,exit}$分别为负态进入和退出阈值；$S_{pos,exit}$和$S_{pos,enter}$分别为正态退出和进入阈值；$P_{FC,pref}$为燃料电池偏好工作点，W；w_{hybrid}为均衡态混合评价权重；k_{pos}为正态下锂电池期望放电调节增益。优化变量及参数初值见表2。

本工作优化变量为动态平衡规则策略中的关键控制参数，而不是每个时刻的燃料电池功率或锂离子电池功率。在线执行阶段，P_{FC}和P_{batt}由上述优化参数、当前负载功率、SOC状态和剩余氢气比例共同决定，因此属于策略输出量而非NSGA-II的直接决策变量。

表 2　动态平衡策略参数

Table 2　Optimized parameters of the dynamic-balance strategy

参数	含义	初始值/优化范围	优化作用
$S_{neg,enter}$	负态进入阈值	−3.5/[−8，−2]	决定SOC消耗偏快时的进入条件
$S_{neg,exit}$	负态退出阈值	−2.0/[-4，−0.2]	决定负态退出稳定性
$S_{pos,exit}$	正态退出阈值	2.0/[0.5，4]	决定正态退出稳定性
$S_{pos,enter}$	正态进入阈值	3.5/[2，8]	决定氢气消耗偏快时的进入条件
$P_{FC,pref}$	燃料电池偏好工作点	618 W/[400，850] W	影响均衡态下燃料电池工作区间
w_{hybrid}	均衡态评价权重	0.07273/[0.005，0.200]	影响效率项与偏好功率项折中
k_{pos}	正态调节增益	1.47145/[0.2，3.0]	影响正态下锂离子电池承担功率

2.2　多目标函数构建

燃料电池/锂离子电池无人机能量管理中存在多个相互制约的性能指标。降低氢耗有利于提高燃料经济性，但可能增加锂离子电池放电压力；减小动态平衡差值可提高SOC利用率与氢气消耗率的一致性，但可能牺牲局部经济性；降低燃料电池相邻时刻输出功率变化量有利于减弱频繁变载。为体现“动态平衡优先、兼顾经济性和平滑性”的研究

主线，本工作构建如下目标函数：

$$f_1(\boldsymbol{x}) = m_{\mathrm{H_2,cons}} = \sum_{k=1}^{N} C_{\mathrm{H_2}}\left[P_{\mathrm{FC}}(k)\right]\Delta t \tag{16}$$

$$f_2(\boldsymbol{x}) = \Delta\eta = \left|\eta_{\mathrm{SOC,end}} - \eta_{\mathrm{H_2,end}}\right| \tag{17}$$

$$f_3(\boldsymbol{x}) = J_{\mathrm{smooth}}(\boldsymbol{x}) = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{k=2}^{N}\left[P_{\mathrm{FC}}(k) - P_{\mathrm{FC}}(k-1)\right]^2} \tag{18}$$

式中，$f_1(\boldsymbol{x})$表征总氢气消耗量，g；$m_{\mathrm{H_2,cons}}$为任务周期内的总氢气消耗量，g；$P_{\mathrm{FC}}(k)$为第k个时刻燃料电池输出功率，W；$f_2(\boldsymbol{x})$表征两种能源利用程度的差异，%；$\Delta\eta$为任务结束时锂电池SOC利用率与燃料电池氢气消耗率之间的绝对差值，%；$\eta_{\mathrm{SOC,end}}$为任务结束时锂电池SOC利用率，%；$\eta_{\mathrm{H_2,end}}$为任务结束时氢气消耗率，%；$f_3(\boldsymbol{x})$为燃料电池功率平滑目标函数，W；J_{smooth}为燃料电池功率平滑代理指标，用于表征燃料电池相邻时刻输出功率变化的均方根水平，W；$P_{\mathrm{FC}}(k)$和$P_{\mathrm{FC}}(k-1)$分别为第k个和第$k-1$个时刻的燃料电池输出功率，W；N为仿真时间步数。

已有耐久性试验为上述关系提供了参考。Meng等[43]针对不同电流密度变化范围开展了2000次动态加载循环试验，结果表明，燃料电池性能衰减随循环次数和负载阶跃幅值增加而加剧；在电流密度于0.1～0.6 A/cm²之间循环时，2000次循环后在1.2 A/cm²测试点的性能衰减达到11.83%，且更大的负载变化幅值会造成更严重的催化层退化。Chandran等[44]在两种动态负载变化方式下分别进行了2000次循环试验，测得的总性能衰减分别为20.67%和10.72%，说明加载方式和功率变化速率会显著影响燃料电池性能衰减。

需要强调的是，J_{smooth}仅作为策略层面的功率平滑代理指标和折中解筛选依据，并不等同于燃料电池真实寿命衰减量或退化模型。综合多目标优化问题可表示为：

$$\min F(\boldsymbol{x}) = \min\left[f_1(\boldsymbol{x}), f_2(\boldsymbol{x}), f_3(\boldsymbol{x})\right] \tag{19}$$

2.3 动态平衡优先的Pareto折中解筛选机制

本工作的关键不在于简单采用NSGA-II，而在于对NSGA-II得到的Pareto参数集进行动态平衡优先筛选，使最终参数首先满足有限机载能源同步消耗需求。为保证策略运行安全性和参数可行性，优化过程中需要同时满足SOC安全约束、燃料电池功率约束、锂电池功率约束以及滞回阈值顺序约束：

$$\mathrm{SOC}_{\min} \leqslant \mathrm{SOC}(k) \leqslant \mathrm{SOC}_{\max} \tag{20}$$

$$0 \leqslant P_{\mathrm{FC}}(k) \leqslant 1000\ \mathrm{W} \tag{21}$$

$$-100\ \mathrm{W} \leqslant P_{\mathrm{batt}}(k) \leqslant 600\ \mathrm{W} \tag{22}$$

$$S_{\mathrm{neg,enter}} < S_{\mathrm{neg,exit}} < 0 < S_{\mathrm{pos,exit}} < S_{\mathrm{pos,enter}} \tag{23}$$

式中，$\mathrm{SOC}_{\min}$为锂电池的最小SOC值，%；$\mathrm{SOC}(k)$为锂电池对应k时刻的SOC值，%；$\mathrm{SOC}_{\max}$为锂电池的最大SOC值，%；$P_{\mathrm{FC}}(k)$为燃料电池对应k时刻的功率，W。

NSGA-II通过非支配排序将种群划分为不同Pareto等级，并利用拥挤距离保持解集分布多样性。优化得到的是一组Pareto最优参数解，而非单一解。若直接对所有Pareto点进行普通加权评分，可能出现总氢耗较低但$\Delta\eta$显著增大的情况，这与动态平衡能量管理的研究目标不一致。因此，本工作将折中解选择设计为“先平衡、后经济、再平滑”的动态平衡优先机制：首先筛选满足$\Delta\eta \leqslant \delta$的Pareto解；若候选解数量不足，则逐步放宽阈值；随后在候选解内综合比较总氢耗和功率平滑代理指标。候选解集合可表示为：

$$\Omega = \left\{\boldsymbol{x} \in P_{\mathrm{Pareto}} \middle| \Delta\eta(\boldsymbol{x}) \leqslant \Delta\eta_{\mathrm{lim}}\right\} \tag{24}$$

在候选集合内，对总氢耗、$\Delta\eta$和功率平滑代理指标J_{smooth}进行归一化处理，并建立综合评分$\mathrm{Score}=w_1f_1+w_2f_2+w_3J_{\mathrm{smooth}}$。本工作优先取$\delta$=3%，当可行解数量不足时可放宽至4%或5%。该综合评分仅用于Pareto解集生成后的后处理筛选，并不参与NSGA-II的种群进化过程，也不是将多目标优化问题转化为单目标优化问题。该处理使得最终参数并非由最低氢耗单独决定，而是首先满足能源动态平衡要求，再兼顾氢耗经济性和燃料电池输出平滑性，从而避免折中解偏向于低氢耗但高不平衡差值的区域。这一动态平衡优先筛选机制是本工作区别于普通加权Pareto筛选策略的核心。

本工作选取δ=3%作为动态平衡优先筛选的初始阈值，并非将其作为普适性固定常数，而是基于无人机有限机载能源同步利用需求所设置的任务级约束。该δ=3%阈值是结合长航时无人机任务剩余安全供能余量需求设置，当动态平衡差值超过5%时会存在单能源提前耗尽的风险。当$\Delta\eta$≤3%时，说明两类能源的相对消耗进度基本相同，可避免一种能源明显提前耗尽而另一种能源仍有较大剩余的情况发生。对于长航时无人机而言，任务过程中通常无法中途补充氢气或更换电池，因此能源消耗路

径的协调性直接关系到后续负载波动下的持续供能能力。与此同时，本工作将 δ=3% 作为优先筛选阈值，而非不可放宽的硬约束；当Pareto解集中满足该条件的候选解不足时，可依次放宽至 δ=4% 或 δ=5%，以保证筛选机制兼具动态平衡优先性与工程适应性。

2.4　算法流程与在线执行

本工作采用“离线参数优化-在线规则执行”的能量管理结构，而非在线优化结构。离线阶段基于完整任务负载工况与混合电源模型，采用NSGA-II对动态平衡策略中的关键参数进行多目标优化，获得Pareto参数集，并进一步按照动态平衡优先规则筛选出最终折中参数。在线阶段不再进行NSGA-II迭代搜索，而是直接采用离线筛选所得的参数，根据当前SOC、氢气剩余比例和负载功率执行动态平衡能量管理，实现燃料电池与锂电池之间的实时功率分配。该结构的优点在于：一方面，离线优化能够利用完整任务工况对策略参数进行全局寻优，提高参数选择的合理性；另一方面，在线执行阶段仅包含状态判断和功率分配计算，避免了进化算法在线运行所带来的计算负担，更适合机载控制器的实时实现。因此，该方法兼顾了多目标优化的参数寻优能力与规则型策略计算量小、工程实现方便的优点。算法流程如图4所示。

3　结果与讨论

3.1　NSGA-II搜索过程与Pareto前沿分析

本工作采用 MATLAB Global Optimization Toolbox 中的 gamultiobj 函数实现 NSGA-II 多目标优化。优化变量为表2中的7个策略参数，变量范围及滞回阈值顺序约束分别由表2和式(23)给出。NSGA-II的种群规模设置为100，最大进化代数设置为100，函数收敛容差设置为 1×10^{-4}。为保证主优化结果可复现，主Pareto前沿计算中随机种子设置为1；同时，为检验随机初始化对优化结果的影响，后续进一步采用 Seed=1～5 进行独立重复优化。本工作未对交叉算子和变异算子进行额外修改，相关遗传操作采用gamultiobj的默认设置。优化过程中记录所有被评价的候选参数组合，并最终输出Pareto非支配解集。对于得到的Pareto解集，本工作不直接采用最低氢耗解，而是按照动态平衡优先规则进行折中解筛选。对7个动态平衡策略参数进行离线优化后，优化器会在给定约束范围内持续评价候选参数组合。为展示算法搜索过程，图5给出了全部候选解在总氢耗、动态平衡差值 $\Delta\eta$ 和燃料电池功率平滑代理指标3个目标空间中的分布。可以看出，候选解主要集中在低氢耗和低功率波动区域，同时仍存在部分高波动解，说明多目标搜索过程能够覆盖不同性能偏好的参数组合。

在全部候选解的基础上，NSGA-II通过非支配排序和拥挤距离筛选得到Pareto前沿。图6给出了最新优化结果对应的三目标Pareto前沿，其中每个点代表一组互不支配的可行参数。该前沿反映了总氢耗、动态平衡差值和燃料电池功率平滑代理指标之间的折中关系：降低总氢耗通常会伴随动态平衡差值增大，而降低燃料电池功率波动RMS又可能限制其对负载变化的响应能力。

为便于比较动态平衡差值与总氢耗之间的关系，图7进一步给出了Pareto前沿的二维投影，并用颜色变化表示燃料电池功率波动RMS。由图7可见，Pareto解沿“低氢耗-高不平衡”和“高平衡-高氢耗”方向分布，说明不存在同时使所有目标达到最优的单一参数组。这一结果也说明，若仅选择最低氢耗解，可能偏离动态平衡能量管理的研究目标。

本工作折中解并非人工指定，也不是直接选取总氢耗最低点，而是依据第2.3节提出的动态平衡优先Pareto折中解筛选机制确定。具体而言，首先在NSGA-II得到的Pareto非支配解集中筛选满足 $\Delta\eta\leqslant3\%$ 的候选解，以优先保证锂电池SOC利用率与氢气消耗率之间具有较好的一致性；若满足条件的候选解数量不足，则将阈值依次放宽至4%和5%。随后，仅在满足动态平衡要求的候选集合内，对总氢耗、$\Delta\eta$ 和燃料电池功率波动RMS进行归一化处理，并通过综合评分选取最终折中解。

基于上述筛选原则，本工作选择的折中解位于较小且总氢耗适中的区域，其值为2.87%，总氢耗为5.807 g，燃料电池功率波动RMS为25.363 W。需要指出的是，该解并非总氢耗最低解。与普通加权Pareto筛选策略和等效氢耗优先基准策略相比，本工作方案可能付出少量氢耗代价，但其动态平衡差值明显降低。换言之，本工作方法并非以单纯降低氢耗为唯一目标，而是在氢耗增加较小或处于可接受范围内的前提下，优先改善锂电池SOC利用率与氢气消耗速率之间的匹配关系。该取舍对长航

时无人机具有实际意义，因为任务过程中若过度追求最低氢耗，可能导致锂电池 SOC 下降过快；而若过度依赖燃料电池，又可能导致氢气消耗偏快。本工作折中解通过上述限制，使两类有限机载能源在任务过程中保持更协调的消耗路径，从而提高后续负载波动下的双源协同供能能力。

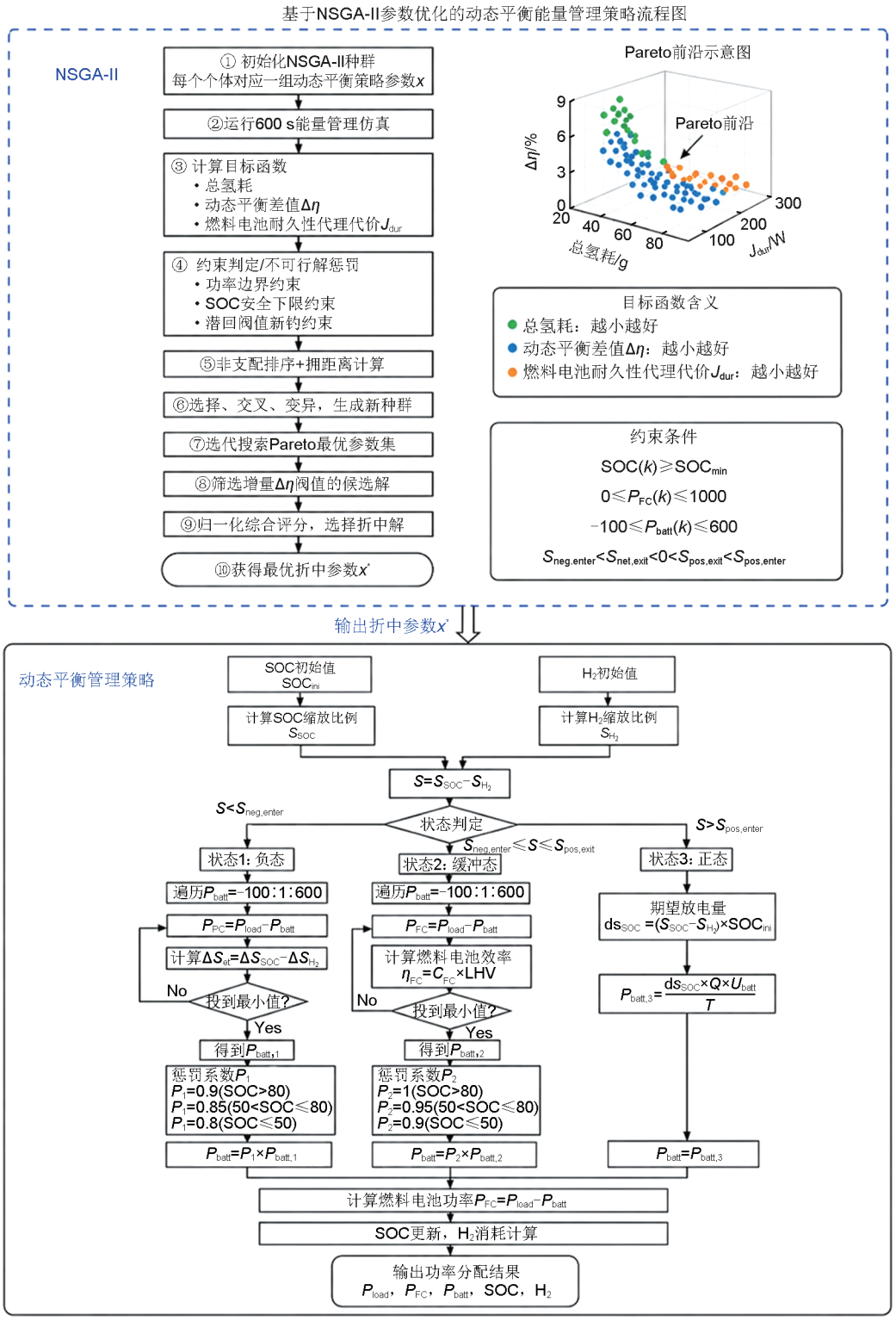

图 4　能量管理流程图

Fig. 4　Flowchart of the energy management strategy

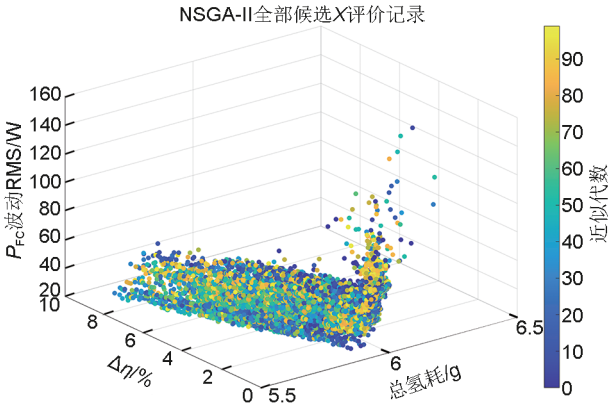

图5　候选解目标记录

Fig. 5　Objective-space records of candidate solutions

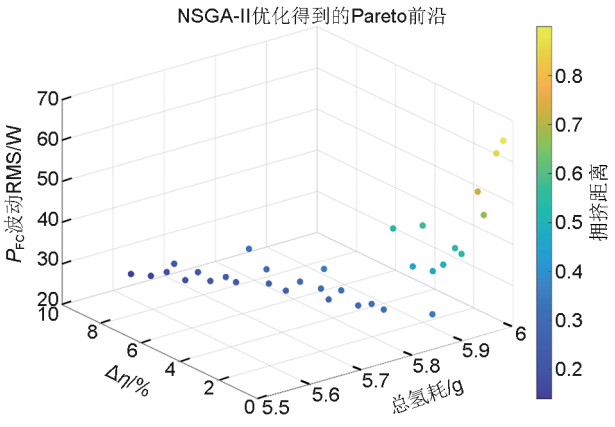

图6　三目标Pareto前沿

Fig. 6　Three-objective Pareto front

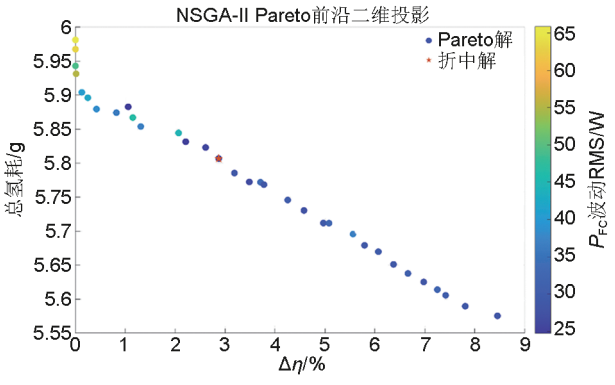

图7　折中解位置

Fig. 7　Location of the selected compromise solution

因此，本节主要从Pareto优化空间和折中解筛选角度说明最终参数的来源及其多目标取舍关系。为了进一步验证该折中参数在完整任务过程中的实际运行效果，下一节将其代入600 s负载工况，从功率分配、剩余氢气质量和SOC变化3个方面分析动态平衡优先策略的时间历程响应。

3.2　动态平衡优先策略的动态运行过程分析

3.1节已从目标空间角度说明了动态平衡优先折中解的选取依据，但Pareto前沿只能反映不同参数方案在任务结束后的综合指标差异，无法直接展示所选参数在任务过程中的动态功率分配行为。因此，本节进一步采用3.1节中确定的折中参数，并将其代入600 s负载工况，分析燃料电池和锂电池的瞬时功率分配、剩余氢气质量及SOC变化过程。与仅比较任务结束时的综合指标相比，时间历程结果能更直观地反映两类能源在负载波动条件下的协同供能过程。同时，结合功率平衡关系、燃料电池氢耗特性和锂电池SOC更新规律，可进一步揭示动态平衡优先策略对氢气消耗路径与电池能量释放路径的调节机理。

图8给出了动态平衡优先Pareto筛选策略下燃料电池与锂电池的功率分配结果。由功率平衡关系可知，负载功率由燃料电池输出功率P_{FC}和锂电池输出功率P_{batt}共同承担。由于燃料电池受气体供给、辅助系统和电化学响应过程的影响，不宜频繁跟随负载快速波动，因此在所提策略下主要承担相对平稳的基载功率；锂电池具有较快的功率响应能力，主要用于补偿起飞、爬升和任务后段高负载区间的瞬态功率需求。图中可以看出P_{FC}相较P_{load}变化更为平缓，而P_{batt}在负载快速变化区间波动更明显，说明锂电池承担了主要的峰值功率和波动补偿作用。在部分低负载区间，P_{batt}出现负值，表明燃料电池输出功率高于当前负载需求，剩余功率可用于回充锂电池，从而减缓SOC过快下降。该结果表明，所提策略不仅满足瞬时功率平衡，而且通过合理分配P_{FC}和P_{batt}，降低了燃料电池频繁变载程度，并发挥了锂电池的动态缓冲作用。

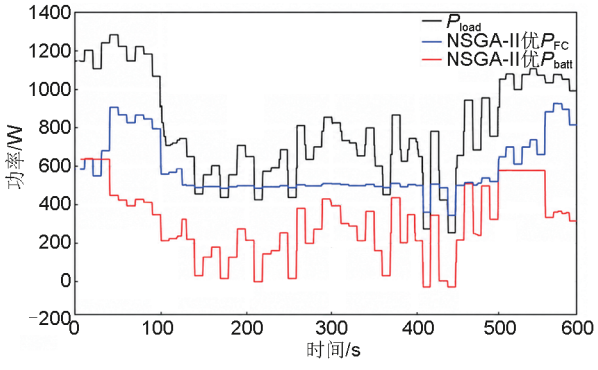

图8　功率分配结果

Fig. 8　Power allocation results

图9展示了优化参数下剩余氢气质量与锂电池SOC在600 s任务过程中的变化。由图9(a)可知，剩余氢气质量由初始8 g逐步下降至约2.19 g，对应总氢耗约5.807 g，氢气消耗率为72.79%。结合图8可以看出，剩余氢气质量的下降速率与燃料电池输出功率密切相关：当P_{FC}较高时，燃料电池氢气消耗速率增大，剩余氢气质量下降更快；当P_{FC}处于相对平稳的中等功率区间时，氢气消耗过程也表现出较为平缓的下降趋势。由图9(b)可知，锂电池SOC由初始100%下降至约24.34%，始终高于20%的安全下限，说明所提策略能够在满足负载功率需求的同时避免电池过放。SOC的下降过程主要受P_{batt}影响：当P_{batt}为正且数值较大时，锂电池处于放电状态，SOC下降较快；当P_{batt}较小或为负时，锂电池放电压力减小，SOC下降速度随之减缓。由此可见，氢气剩余量和SOC的变化并不是孤立结果，而是由燃料电池与锂电池的功率承担比例共同决定。本工作策略通过动态调节P_{batt}和P_{FC}，使燃料电池氢气消耗率与锂电池SOC利用率保持接近，最终得到η_{SOC}=75.66%、η_{H_2}=72.79%、$\Delta\eta$=2.87%。这说明所提方法并非单纯追求某一能源消耗最小，而是通过功率分配调节实现有限机载氢气与锂电池能量的同步释放，从而降低单一能源提前耗尽的风险。

3.3 动态平衡优先折中解指标对比

为验证本方法在有限机载能源协调利用方面的有效性，本工作设置了等效氢耗优先基准策略、模糊规则控制基准策略、普通加权Pareto筛选策略和本工作动态平衡优先Pareto筛选策略进行对比。其中，等效氢耗优先基准策略和模糊规则控制基准策略分别参考已有最低氢耗能量管理和模糊控制能量管理方法的基本思想[7-8,16]，并结合本工作研究对象进行统一建模与计算。需要说明的是，表3中各策略的结果并非直接引用已有文献中的仿真数据，而是在本工作相同的600 s负载工况、相同燃料电池氢耗模型、相同锂电池SOC更新模型、相同初始能源状态和相同功率约束条件下计算得到。表3进一步列出各策略对应的总氢耗，以便同时比较氢耗经济性和能源动态平衡性。这样处理可以避免不同文献之间由于系统参数、任务剖面和控制约束不一致造成的比较偏差，从而保证不同策略动态平衡指标的可比性。

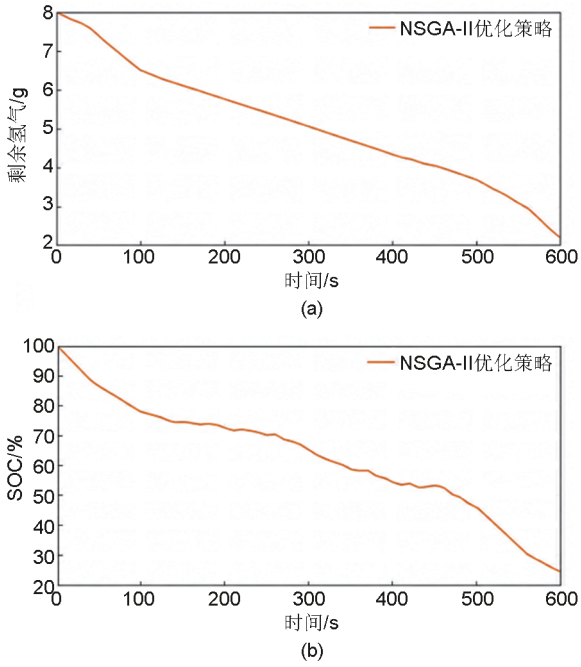

图9 运行过程中氢气剩余质量及电池SOC的变化规律
(a) 氢气；(b) SOC变化

Fig. 9 Changes inresidual hydrogen mass and battery SOC during operation (a) Variations of hydrogen mass; (b) Variations of SOC

表3 指标对比

Table 3 Comparison of dynamic-balance indicators

方案	η_{SOC}/%	η_{H_2}/%	$\Delta\eta$/%	$m(H_2)$/g
等效氢耗优先基准策略	80.00	72.33	7.67	5.786
模糊规则控制基准策略	80.00	84.42	4.42	6.754
普通加权Pareto筛选策略	79.26	71.51	7.75	5.721
动态平衡优先Pareto筛选策略	75.66	72.79	2.87	5.807

从表3可以看出，本工作动态平衡优先Pareto筛选策略得到的η_{SOC}和η_{H_2}分别为75.66%和72.79%，二者差值仅为2.87%，在各对比策略中最小。相较于等效氢耗优先基准策略，本工作方案的总氢耗略有增加，但$\Delta\eta$由7.67%降低至2.87%，降幅约为62.6%；相较于普通加权Pareto筛选策略，本工作方案同样付出一定氢耗代价，但$\Delta\eta$由7.75%降低至2.87%。这说明动态平衡优先筛选能够有效避免普通加权评分偏向低氢耗区域的问题。模糊规则控制基准策略的$\Delta\eta$为4.42%，动态平衡性虽优于等效氢耗优先策略，但仍弱于本工作方案。等效氢耗优先基准策略、模糊规则控制基准策略均在本工作统一的600 s负载工况、系统模型与初始能源约束下完成复现仿真。

上述结果说明，本工作策略并不是追求绝对最低氢耗，而是在氢耗经济性和能源同步利用之间进行任务导向的折中。对于长航时无人机而言，任务过程中氢气和锂电池均属于有限机载能源，若仅以最低氢耗为目标，可能造成锂电池SOC消耗过快，从而削弱后续负载波动下的瞬态补偿能力。相比之下，本工作动态平衡优先Pareto筛选策略首先约束$\Delta\eta\leqslant3\%$，再在满足能源同步利用要求的候选解中比较总氢耗和燃料电池功率波动RMS，最终获得$\Delta\eta=2.87\%$的折中解。该结果表明，动态平衡优先机制能够以较小的氢耗代价换取更协调的氢电消耗路径，更符合无人机有限机载能源、任务中途不可补能以及需要保持后续双源协同供能能力的任务需求。

3.4　不同随机种子下的优化稳定性分析

由于NSGA-II属于随机进化算法，其优化结果可能受到初始种群随机性的影响。为验证动态平衡优先Pareto参数优化结果的重复性，本工作设置Seed=1、2、3、4、5进行5次独立优化。各次运行保持种群规模、迭代代数、变量范围、约束条件、负载工况和折中解筛选规则一致，仅改变随机种子。每次运行结束后，均先按照$\Delta\eta\leqslant3\%$的动态平衡约束筛选候选Pareto解，再在候选集合内综合比较总氢耗和燃料电池功率波动RMS，最终得到该随机种子下的折中解。

由表4可知，5次随机种子下最终折中解的总氢耗均集中在5.807～5.843 g范围内，均值为5.832 g，标准差为0.015 g；动态平衡差值保持在2.46%～2.87%范围内，均值为2.586%，标准差为0.164%；燃料电池功率波动RMS的均值为33.165 W，标准差为5.707 W。与此同时，η_{SOC}和η_{H_2}的均值分别为75.710%和73.098%，标准差分别为0.231%和0.177%，说明不同随机初始种群下最终折中解的能源利用水平保持一致。上述结果表明，本工作动态平衡优先Pareto参数优化方法对随机初始化不敏感，最终折中解在氢耗经济性、能源动态平衡性和燃料电池功率平滑性方面具有较好的重复性，说明所选参数组合并非单次随机搜索的偶然结果。

3.5　不同任务剖面下的策略适应性验证

已有研究采用平飞、爬升和俯冲等不同无人机飞行状态，对电池模型在复杂飞行姿态下的适应性进行了验证[45]；同时，随机电流脉冲、平抑波动工况和大倍率脉冲工况也被用于评价电池模型在不同负载波动强度下的性能[46]。参考上述多工况验证思路，本工作在原600 s代表性任务剖面的基础上，进一步构建1200 s低波动长巡航工况分别和600 s多次机动高功率冲击工况，以验证所提能量管理方法对任务时长和负载特征变化的适应性。

表4　不同随机种子下的优化稳定性分析

Table 4　Stability analysis under different random seeds

Seed	$m(H_2)$/g	$\Delta\eta$/%	P_{FC}RMS/W	η_{SOC}/%	η_{H_2}/%
1	5.807	2.87	25.363	75.66	72.79
2	5.840	2.49	40.604	75.62	73.21
3	5.832	2.46	34.761	75.47	73.13
4	5.839	2.55	34.867	75.71	73.22
5	5.843	2.56	30.229	76.09	73.14
Mean	5.832	2.586	33.165	75.710	73.098
Std	0.015	0.164	5.707	0.231	0.177

注：PFC RMS表示燃料电池相邻时刻功率变化量的均方根值；5次运行均采用相同NSGA-II参数与相同动态平衡优先筛选规则。

为定量表征三种任务剖面的差异，分别计算任务持续时间、平均负载功率、最大负载功率、总需求能量以及相邻时刻负载功率变化量均方根。原600 s代表性工况的平均负载功率、最大负载功率和总需求能量分别为801.7 W、1284.0 W和133.6 Wh，均方根（RMS）为64.3 W。1200 s低波动长巡航工况的平均负载功率为450.4 W，最大负载功率为900.0 W，总需求能量为150.1 Wh，负载功率变化量RMS仅为7.4 W，较原600 s代表性工况降低约88.5%，能够体现任务持续时间延长且巡航负载变化较缓的特征。600 s多次机动高功率冲击工况的平均负载功率为802.3 W，总需求能量为133.7 Wh，与原600 s工况基本一致；其最大负载功率提高至1350.5 W，并在任务过程中设置多次超过1000 W的短时峰值高功率区间。该工况的负载功率变化量RMS为63.2 W，与原600 s代表性工况接近，因此其主要特征体现为峰值功率更高以及高功率区间出现次数更多，用于考察该工况下多次机动动作和瞬时峰值需求对混合电源功率分配的影响。

为保证不同任务剖面结果的可比性，三种工况均采用相同的初始SOC、初始氢气质量、燃料电池氢耗模型、锂电池SOC更新模型、部件功率约束、优化变量范围和NSGA-II参数设置。针对每一种任务剖面，针对各工况分别重新开展动态平衡策

略参数的离线多目标优化，并依据第2.3节所述动态平衡优先规则从Pareto前沿中筛选最终折中解。

由表5可知，在1200 s低波动长巡航工况下，动态平衡差值$\Delta\eta$为0.322%，任务结束时SOC为20.51%，剩余氢气质量为1.615 g，表明所提策略在任务时间延长的条件下仍能协调两类能源的相对消耗进度。在600 s多次机动高功率冲击工况下，动态平衡差值为1.733%，任务结束时SOC和剩余氢气质量分别为22.96%和1.975 g，均满足SOC和氢气能源安全约束，说明该策略在多次峰值功率需求下仍具有较好的氢电协调能力。

表5 不同任务剖面下的动态平衡优化结果

Table 5 Dynamic-balance optimization results under different mission profiles

任务工况	T/s	η_{SOC}/%	η_{H_2}/%	$\Delta\eta$/%	$m_{H_2,cons}$/g
原600 s代表性工况	600	75.660	72.790	2.870	5.807
1200 s低波动长巡航工况	1200	79.490	79.820	0.322	6.385
600 s多次机动高功率冲击工况	600	77.043	75.310	1.733	6.025

注：T为任务时长；η_{SOC}为锂电池SOC利用率；η_{H_2}为氢气消耗率；$\Delta\eta$为ηSOC与ηH_2的绝对差值；$m_{H_2,cons}$为任务周期内的总氢耗。

对于不同任务剖面，本工作首先采用动态平衡差值阈值δ=3%筛选Pareto候选解；当动态平衡差值3%阈值下无可行候选解时，再依次放宽至4%和5%。三种工况的动态平衡差值均小于3%，因此均未触发阈值放宽。上述结果表明，所提“离线参数优化-在线规则执行”能量管理方法对不同时长和负载特征的已知任务剖面具有良好的适配能力。

3.6 讨论

综合表3和图6～图10可知，不同策略体现出不同优化侧重点。等效氢耗优先基准策略侧重降低等效消耗，但η_{SOC}与η_{H_2}的差值达到7.67%，容易造成能源利用失衡；模糊规则控制基准策略结构简单、实时性强，但在本工作参数设置和工况下$\Delta\eta$为4.42%，动态平衡性仍不及本工作方案；普通加权Pareto筛选策略虽考虑多个指标，但结果仍可能受权重设置影响而偏向低氢耗区域。相比之下，本工作动态平衡优先Pareto筛选策略不追求总氢耗绝对最低，而是在总氢耗处于可接受范围内的前提下，优先约束$\Delta\eta$≤3%，再综合考虑氢耗经济性和燃料电池功率波动RMS，使$\Delta\eta$降至2.87%。同时，图8和图9的时间历程结果表明，燃料电池主要承担相对平缓的基载功率，锂电池承担高负载阶段和快速波动区间的功率补偿，SOC与氢气剩余量在任务过程中保持较协调的下降趋势，因此所提策略更适合作为兼顾任务完成能力、经济性和供能稳定性的综合折中方案。

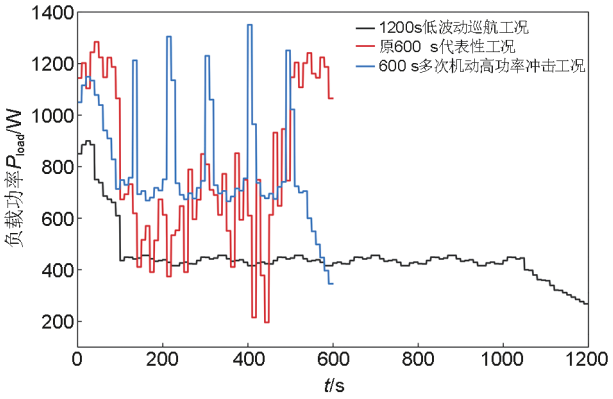

图10 不同任务剖面下的负载功率曲线

Fig. 10 Load power profiles under different mission scenarios

从能量流动角度看，本工作策略的作用机理可以理解为：燃料电池主要提供相对平稳的基载功率，锂电池承担负载快速波动和峰值功率需求；当SOC消耗相对较快时，策略提高燃料电池承担比例并降低电池放电压力；当氢气消耗相对较快时，策略适当增加锂电池输出，以减缓氢气消耗进度。通过这种动态调节，系统能够避免单一能源消耗过快，使氢气剩余量与SOC保持较协调的下降路径。因此，本工作方法的优势不仅体现在$\Delta\eta$数值降低，也体现在对混合电源能量流动过程的协调控制。

进一步从任务剖面适应性角度分析，1200 s低波动长巡航工况的负载功率变化量RMS仅为7.4 W，较原600 s代表性工况降低约88.5%。较平缓的负载变化有利于燃料电池维持相对稳定的基载输出，使氢气消耗与锂电池能量释放过程更易保持协调，最终动态平衡差值降至0.322%。在600 s多次机动高功率冲击工况下，尽管最大负载功率提高至1350.5 W，且任务过程中存在多次超过1000 W的短时高功率需求，锂电池仍能够承担瞬态峰值功率，动态平衡策略则通过调整燃料电池的基载承担比例维持两类能源的协调消耗，最终动态平衡差值为1.733%。两种新增工况下，任务结束时SOC和剩余氢气均满足安全约束，且均未触发3%动态平衡筛选阈值的放宽，表明所提方法能够适应任务时长延长、高功率需求次数增加等任务特征变化。需

要指出的是，各任务剖面均重新进行了离线参数优化，因此本工作验证的是所提优化框架对已知任务剖面的参数适配能力，而非同一组固定参数在不同工况下的直接迁移能力或在线自适应能力。

从创新性角度看，本工作的创新不在于单独使用NSGA-II，也不只是对固定规则策略进行参数寻优，而在于围绕长航时无人机有限机载能源同步消耗需求，构建了“动态平衡指标–Pareto参数优化–平衡优先筛选–在线规则执行”的完整能量管理框架。该框架通过$\Delta\eta$优先筛选机制避免最低氢耗解、经验规则或普通加权评分导致的能源利用偏向，并在候选Pareto解集中进一步考虑氢耗经济性和功率平滑代理指标，使最终参数具有明确的任务约束依据和较好的工程可解释性。

4　结　论

针对燃料电池/锂电池无人机在长航时任务中氢气与电池能量均有限且任务过程中通常无法中途补能的问题，本工作提出了一种动态平衡优先的Pareto参数优化能量管理策略。与传统最低氢耗导向方法不同，本工作将氢气消耗率与锂电池SOC利用率的同步匹配作为优先目标，建立燃料电池氢耗模型和锂电池SOC更新模型，并采用NSGA-II对动态平衡策略中的关键参数进行离线优化。在获得Pareto参数集的基础上，进一步提出“先平衡、后经济、再平滑”的折中解筛选机制。主要结论如下：

（1）本工作提出的动态平衡评价指标$\Delta\eta$能够反映燃料电池氢气消耗率与锂电池SOC利用率之间的匹配程度。与单独关注氢耗或末端SOC的评价方式相比，$\Delta\eta$能更直接地表征有限机载能源在任务过程中的协同利用状态，为能量管理目标由“单一氢耗最优”转向“有限能源同步利用”提供了评价基础。

（2）基于NSGA-II的离线参数优化能够获得覆盖不同性能偏好的Pareto参数集，从而揭示总氢耗、动态平衡差值和燃料电池功率平滑性之间的折中关系。结果表明，不存在同时使所有目标达到最优的单一参数组，因此最终参数选择需要在Pareto解集中结合任务需求进一步筛选。

（3）本工作提出的动态平衡优先筛选机制能够避免最终解单纯偏向最低氢耗区域。仿真结果表明，所选折中解的η_{SOC}、η_{H_2}和$\Delta\eta$分别为75.66%、72.79%和2.87%。与等效氢耗优先基准策略和模糊规则控制基准策略相比，动态平衡差值分别降低约62.6%和35.1%，说明该方法能够获得更均衡的氢电消耗路径。功率分配时间历程进一步表明，燃料电池输出相对平缓，锂电池能够承担高负载阶段和波动区间的功率补偿，从而增强后续负载波动下的双源协同供能能力。

（4）不同随机种子下的重复优化结果表明，本工作方法具有较好的稳定性。5次独立运行中，总氢耗集中在5.807～5.843 g，$\Delta\eta$保持在2.46%～2.87%范围内，说明动态平衡优先Pareto参数优化结果对随机初始化不敏感，最终折中参数并非单次随机搜索的偶然结果。

（5）不同任务剖面下的验证结果表明，所提策略具有一定的任务适配能力。在1200 s低波动长巡航工况与600 s多次机动高功率冲击工况下，重新优化得到的动态平衡差值分别为0.322%和1.733%，总氢耗分别为6.385 g和6.025 g。两种工况结束时的SOC和剩余氢气均满足安全约束，且均未触发3%筛选阈值的放宽条件，表明所提动态平衡优先优化框架能够适应任务时长与负载特征的变化，并实现有限机载氢气与锂电池能量的协调消耗。

（6）本工作采用“离线参数优化–在线规则执行”的结构，在离线阶段利用NSGA-II提高参数选择的合理性，在在线阶段仅执行规则型功率分配，消除了进化算法实时运行带来的计算负担。因此，该方法兼具了多目标优化的全局寻优能力与规则策略计算量小、易于工程实现的优点，可为燃料电池/锂电池无人机有限机载能源的协同利用提供参考。

未来研究将进一步结合燃料电池退化机理模型、典型飞行任务剖面及实验平台验证，分析燃料电池系统性能衰减特性及其对能量管理策略的影响，持续优化控制算法的在线自适应能力与鲁棒性，以进一步增强其工程实用性。

参 考 文 献

[1] LEI T, YANG Z, LIN Z C, et al. State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(6): 1488-1503. DOI:10.1016/j.cja.2019.03.013.

[2] BOUKOBERINE M N, ZHOU Z B, BENBOUZID M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy

management: Solutions, strategies, and prospects[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113823. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.113823.

[3] DUY V N, KIM H M. Review on the hybrid-electric propulsion system and renewables and energy storage for unmanned aerial vehicles[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15(6): 5296-5319. DOI:10.20964/2020.06.13.

[4] 刘莉, 曹潇, 张晓辉, 等. 轻小型太阳能/氢能无人机发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 1-28.
LIU L, CAO X, ZHANG X H, et al. Review of development of light and small scale solar/hydrogen powered unmanned aerial vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 1-28.

[5] ABDUL SATHAR EQBAL M, FERNANDO N, MARINO M, et al. Hybrid propulsion systems for remotely piloted aircraft systems [J]. Aerospace, 2018, 5(2): 34. DOI:10.3390/aerospace5020034.

[6] ZHANG X H, LIU L, DAI Y L, et al. Experimental investigation on the online fuzzy energy management of hybrid fuel cell/battery power system for UAVs[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(21): 10094-10103. DOI: 10.1016/j. ijhydene. 2018.04.075.

[7] XIE Y, SAVVARIS A, TSOURDOS A. Fuzzy logic based equivalent consumption optimization of a hybrid electric propulsion system for unmanned aerial vehicles[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 85: 13-23. DOI: 10.1016/j. ast.2018.12.001.

[8] LEI T, WANG Y B, JIN X Q, et al. An optimal fuzzy logic-based energy management strategy for a fuel cell/battery hybrid power unmanned aerial vehicle[J]. Aerospace, 2022, 9(2): 115. DOI: 10. 3390/aerospace9020115.

[9] 高怡宁, 颉文庆, 方淳, 等. 燃料电池无人机关键技术与混合能量架构[J]. 航空学报, 2026, 47(11): 161-187. DOI: 10.7527/S1000-6893.2025.32679.
GAO Y N, XIE W Q, FANG C, et al. Key technologies of fuel cell unmanned aerial vehicles and hybrid energy architecture[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2026, 47(11): 161-187. DOI: 10.7527/S1000-6893.2025.32679.

[10] CHENG Z B, LIU H Y, YU P R, et al. Energy management for fuel cell/battery hybrid unmanned aerial vehicle[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2021, 16(9): 210919. DOI: 10.20964/2021.09.13.

[11] LIU H Y, YAO Y M, WANG J, et al. Energy management and system design for fuel cell hybrid unmanned aerial vehicles[J]. Energy Science & Engineering, 2022, 10(10): 3987-4006. DOI: 10.1002/ese3.1262.

[12] BOUKOBERINE M N, ZIA M F, BENBOUZID M, et al. Hybrid fuel cell powered drones energy management strategy improvement and hydrogen saving using real flight test data[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 236: 113987. DOI:10.1016/j. enconman.2021.113987.

[13] TIAN W Y, LIU L, ZHANG X H, et al. Adaptive hierarchical energy management strategy for fuel cell/battery hybrid electric UAVs[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 146: 108938. DOI:10. 1016/j.ast.2024.108938.

[14] KIM Y, KANG S. Development of optimal energy management strategy for proton exchange membrane fuel cell-battery hybrid system for drone propulsion[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 258: 124646. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.124646.

[15] MA R, SONG J, ZHANG Y F, et al. Lifetime-optimized energy management strategy for fuel cell unmanned aircraft vehicle hybrid power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(9): 9046-9056. DOI:10.1109/TIE.2022.3206687.

[16] QUAN R, LI Z X, LIU P, et al. Minimum hydrogen consumption-based energy management strategy for hybrid fuel cell unmanned aerial vehicles using direction prediction optimal foraging algorithm[J]. Fuel Cells, 2023, 23(2): 221-236. DOI: 10. 1002/fuce.202200121.

[17] SUN H L, MA R, SONG J, et al. A novel energy management strategy considering internal loss and hydrogen consumption for fuel cell UAV[C]//2023 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). June 21-23, 2023, Detroit, MI, USA. IEEE, 2023: 1-6. DOI:10.1109/ITEC55900.2023.10186984.

[18] WU S N, LV M, NING Z, et al. Advancements in energy management strategies for hydrogen fuel cell hybrid UAVs: Towards intelligent, sustainable, and autonomous flight systems[J]. Aerospace, 2025, 12(12): 1097. DOI:10.3390/aerospace12121097.

[19] SOLEYMANI M, MOSTAFAVI V, HEBERT M, et al. Hydrogen propulsion systems for aircraft, a review on recent advances and ongoing challenges[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 91: 137-171. DOI:10.1016/j.ijhydene.2024.10.131.

[20] ERDINC O, UZUNOGLU M. Recent trends in PEM fuel cell-powered hybrid systems: Investigation of application areas, design architectures and energy management approaches[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 2874-2884. DOI:10.1016/j.rser.2010.07.060.

[21] 何洪文, 孟祥飞. 混合动力电动汽车能量管理技术研究综述[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(8): 773-783.
HE H W, MENG X F. A review on energy management technology of hybrid electric vehicles[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(8): 773-783.

[22] KARUNARATHNE L, ECONOMOU J T, KNOWLES K. Power and energy management system for fuel cell unmanned aerial vehicle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2012, 226(4): 437-454. DOI:10.1177/0954410011409995.

[23] LEE B, KWON S, PARK P, et al. Active power management system for an unmanned aerial vehicle powered by solar cells, a fuel cell, and batteries[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(4): 3167-3177. DOI: 10.1109/ TAES.2014.130468.

[24] ZHANG X H, LIU L, XU G T. Energy management strategy of hybrid PEMFC-PV-battery propulsion system for low altitude UAVs[C]//52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. July 25-27, 2016, Salt Lake City, UT. Reston, Virginia: AIAA, 2016: 5109. DOI:10.2514/6.2016-5109.

[25] OH T H. Conceptual design of small unmanned aerial vehicle with proton exchange membrane fuel cell system for long endurance mission[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 176: 349-356. DOI:10.1016/j.enconman.2018.09.036.

[26] NJOYA MOTAPON S, DESSAINT L A, AL-HADDAD K. A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1320-1334. DOI:10.1109/TIE.2013.2257152.

[27] LI H, RAVEY A, N'DIAYE A, et al. Online adaptive equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicle considering power sources degradation[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 192: 133-149. DOI:10.1016/j.enconman.2019.03.090.

[28] 武小花, 邹佩佩, 傅家豪, 等. 燃料电池电动汽车动力系统能量管理策略研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 89-96.
WU X H, ZOU P P, FU J H, et al. Research progress on energy management strategies of fuel cell electric vehicle power systems [J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2020, 39(4): 89-96.

[29] TORREGLOSA J P, JURADO F, GARCÍA P, et al. Hybrid fuel cell and battery tramway control based on an equivalent consumption minimization strategy[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19 (10): 1182-1194. DOI:10.1016/j.conengprac.2011.06.008.

[30] ZHANG W B, LI J Q, XU L F, et al. Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 134: 59-69. DOI:10.1016/j.enconman.2016.11.007.

[31] JIANG H L, XU L F, LI J Q, et al. Energy management and component sizing for a fuel cell/battery/supercapacitor hybrid powertrain based on two-dimensional optimization algorithms[J]. Energy, 2019, 177: 386-396. DOI:10.1016/j.energy.2019.04.110.

[32] LUCA R, WHITELEY M, NEVILLE T, et al. Comparative study of energy management systems for a hybrid fuel cell electric vehicle-A novel mutative fuzzy logic controller to prolong fuel cell lifetime[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47 (57): 24042-24058. DOI:10.1016/j.ijhydene.2022.05.192.

[33] GÓMEZ-BARROSO Á, ALONSO TEJEDA A, VICENTE MAKAZAGA I, et al. Dynamic programming-based ANFIS energy management system for fuel cell hybrid electric vehicles[J]. Sustainability, 2024, 16(19): 8710. DOI:10.3390/su16198710.

[34] KWON L, CHO D S, AHN C. Degradation-conscious equivalent consumption minimization strategy for a fuel cell hybrid system [J]. Energies, 2021, 14(13): 3810. DOI:10.3390/en14133810.

[35] 安楠楠, 崔秀芳, 曾杰熙, 等. 基于动态规则优化的船舶燃料电池混合动力系统能量管理方法[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(1): 210-219.
AN N N, CUI X F, ZENG J X, et al. A dynamic rule-based optimization method for energy management of ship fuel cell hybrid power systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(1): 210-219.

[36] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197. DOI:10.1109/4235.996017.

[37] SRINIVAS N, DEB K. Muiltiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248. DOI:10.1162/evco.1994.2.3.221.

[38] ZHOU A M, QU B Y, LI H, et al. Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2011, 1(1): 32-49. DOI:10.1016/j.swevo.2011.03.001.

[39] 林歆悠, 叶常青, 苏炼. 基于Pareto的电池容量衰退权衡优化控制策略[J]. 工程科学学报, 2022, 44(11): 1988-1997.
LIN X Y, YE C Q, SU L. Pareto-based optimal control strategy for battery capacity decline[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(11): 1988-1997.

[40] 尹康涌, 孙磊, 李浩秒, 等. 基于动态噪声自适应无迹卡尔曼滤波的锂离子电池SOC估计[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 4065-4077. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0546.
YIN K Y, SUN L, LI H M, et al. SOC estimation of lithium-ion batteries based on DN-AUKF[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 4065-4077. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0546.

[41] 蒋超宇, 王伟超, 杨学平. 混合动力汽车磷酸铁锂动力电池建模与SOC计算[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(5): 897-901. DOI:10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0056.
JIANG C Y, WANG W C, YANG X P. Modeling and SOC calculations of hybrid electrical vehicles(HEV) powered by lithium iron phosphate batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(5): 897-901. DOI: 10.12028/j. issn. 2095-4239.2018.0056.

[42] FAUZIAH K, KURNIAWAN, KURNIASARI A, et al. Performance test of 1 kW PEM fuel cell system to determine its empirical model [J]. Evergreen, 2023, 10(3): 1982-1990. DOI:10.5109/7151761.

[43] MENG K, ZHOU H R, CHEN B, et al. Dynamic current cycles effect on the degradation characteristic of a H_2/O_2 proton exchange membrane fuel cell[J]. Energy, 2021, 224: 120168. DOI:10.1016/j.energy.2021.120168.

[44] CHANDRAN M, PALANISWAMY K, KARTHIK BABU N B, et al. A study of the influence of current ramp rate on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 21888. DOI:10.1038/s41598-022-25037-0.

[45] 袁建华, 刘雅萍, 赵子玮, 等. 基于IGWO-PF算法的无人机锂电池SOC估计[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1601-1607.
YUAN J H, LIU Y P, ZHAO Z W, et al. SOC estimation of UAV lithium battery based on IGWO-PF algorithm[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1601-1607.

[46] 张少凤, 张清勇, 杨叶森, 等. 基于滑动窗口和LSTM神经网络的锂离子电池建模方法[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 228-239.
ZHANG S F, ZHANG Q Y, YANG Y S, et al. Lithium-ion battery model based on sliding window and long short term memory neural network[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 228-239.