

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-07

混合动力小型飞机模型预测控制策略研究

满毅

(上海飞机设计研究院 大型客机集成技术与模拟飞行全国重点实验室, 上海 201210)

摘要: 相比于传统燃油飞机或单一电池来源的电动飞机, 小型飞机采用混合动力将降低碳排放、减少能源消耗或增加续航时间, 因此成为越来越热门的研究方向。由于飞机运行工况复杂、负载变化剧烈, 仅凭燃料电池无法满足其功率需求, 需增加锂电池或超级电容等储能元件作为其辅助电源。因此开展以燃料电池为主电源的混合动力系统能量管理策略研究对于解决小型飞机续航时间问题具有重要意义。围绕基于燃料电池-锂电池-超级电容的小型飞机混合动力系统, 提出基于等效氢耗量最小算法的模型预测控制能量管理策略, 将等效氢耗量最小策略应用到模型预测控制框架中, 与基于规则的状态机能量管理策略进行仿真对比。结果表明: 本文提出的策略在满足系统负载需求的同时提高了燃料经济性, 有效降低了系统氢耗量, 实现了系统最优功率分配。

关键词: 混合动力系统; 能量管理策略; 模型预测控制; 等效氢耗量最小算法

中图分类号: V272

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Research on model predictive control strategy of hybrid electric UAV

MAN Yi

(State Key Laboratory of Airliner Integration Technology Flight Simulation, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Compared with conventional fuel aircraft or electric aircraft with a single battery source, the adoption of hybrid power in UAVs has become an increasingly popular research direction because it will reduce carbon emissions and consumption or increase flight time. However, due to the complex operating conditions and drastic load changes of UAV, the power demand cannot be satisfied by fuel cell alone. It is necessary to add energy storage elements such as lithium battery or super capacitor as its auxiliary power supply. Therefore, the research on energy management strategy of hybrid power system with fuel cell as the main power supply is of great significance to solve the problem of UAV endurance time. Focusing on the UAV hybrid system based on fuel cell-lithium battery-super capacitor, a model predictive control energy management strategy based on the minimum equivalent hydrogen consumption algorithm is proposed and applied to the model predictive control framework, and compared with state machine energy management strategy based on rule. The results show that the proposed strategy can not only meet the system load demand, but also improve the fuel economy. The hydrogen consumption of the system is reduced effectively and the optimal power distribution is realized.

Key words: hybrid power system; energy management strategy; model predictive control; equivalent consumption minimum strategy

收稿日期: 2024-03-01; 修回日期: 2024-05-28

通信作者: 满毅(1985-), 男, 学士, 高级工程师。E-mail: reneisaint@163.com

引用格式: 满毅. 混合动力小型飞机模型预测控制策略研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-7.

MAN Yi. Research on model predictive control strategy of hybrid electric UAV[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-7. (in Chinese)

0 引言

随着通信技术、信息技术、控制技术等的飞速发展,小型飞机因其具有体积小、造价低、隐蔽性强等特点,更适合承担肮脏、枯燥、危险的任务,逐渐在诸多领域发挥了自身独特的作用^[1]。小型飞机续航时间和可活动范围对小型飞机信息获取、执行任务等有着重要影响,而燃料是决定小型飞机续航时间和可活动范围的关键因素,提升燃料的利用率会对减小小型飞机尺寸和提高航程产生积极的作用^[2-3]。

燃料电池是一种电化学电池,具有较高的转换效率。同时,其反应产物只有水和热能,理论上对环境几乎无污染,并且运行时噪音极小,热红外特性较低,执行军事任务时不易被探查。燃料电池的以上特性为小型飞机进一步缩小体积,提升续航时间提供了新的解决途径^[4-5]。其在航空领域开始作为飞行器的能源逐步取代传统的燃油化石能源。但是由于燃料电池输出特性较软,响应速度较慢,难以满足飞行过程中复杂多变的外部环境以及飞行姿势变换所需的瞬时大功率,因此需要配合储能元件(如动力电池,超级电容等)形成氢燃料混合动力系统,由储能元件提供瞬时大功率,实现电源优势互补^[6]。

能量管理策略是混合动力系统研究的核心技术,其依据小型飞机不同工作模式,实时计算不同电源应输出的功率,从而合理地控制混合动力系统中的燃料电池、电池组和超级电容运行状态,动态分配多种能量源输出功率,满足系统动力性和经济性^[7]。目前,多种应用前景较为广泛的氢燃料混合动力系统能量管理策略,根据其工作原理,可分为以下两类:基于规则的能量管理策略与基于优化算法的能量管理策略^[8-9]。基于规则的能量管理策略是根据已有经验预先制定一些基本规则或模糊规则,在系统运行时进行规则匹配进而得出子能量源分配的参考功率。Harmon等^[10]设计了逻辑门限控制策略对混合动力系统进行能源管理,既满足小型飞机飞行需求又降低了燃油消耗,但频繁开关会减少电池使用寿命;Fu Z等^[11]提出了一种模糊控制策略,考虑了燃料电池功率波动和氢气消耗的约束,采用遗传算法对模糊控制器进行了优化,通过仿真和实验证明了该策略能有效降低氢气消耗。

国内外研究者提出了基于优化算法的能量管理策略,可分为全局优化型策略和瞬时优化型策略。Moura等^[12]基于全局优化的能量管理策略针对插电式混合动力车辆采用随机动态规划算法进行优化求解,在求解过程中对电池SOC进行约束,使得电池SOC下降的更加缓慢,从而提高车辆燃油经济性,但是存在具有较大的计算量,在线实时应用受到限制。为了解决这些问题,研究者提出了一些瞬时优化能量管理策略,如等效消耗最小策略、模型预测策略、神经网络控制等。Han Jihun等^[13]基于等效能耗的思路提出一种闭环解的最小等效消耗策略,实现燃料电池混合动力汽车的一种最优解,不仅考虑燃料电池本身的氢气消耗,同时对燃料电池寿命进行量化估计,降低系统整体上的损耗,而基于燃料电池的混合动力系统也是目前小型电动飞机所采用的主流技术方案。

综上所述,目前多数能量管理策略的研究存在着系统优化精度与实时性不足的问题,而小型飞机飞行状况较为复杂且无标准工况。因此,本文面向混合动力电推进小型飞机,研究一种基于等效氢耗量最小算法的适用于氢燃料混合动力系统的模型预测控制能量管理策略,并与基于规则的状态机能量管理策略进行仿真对比。

1 混合动力系统建模

本文参考某轻型电动飞机的功率参数,设定了所模拟的小型飞机任务剖面,如图1所示,主要包括地面任务、爬升、巡航、空中任务、巡航、下降、悬停7个阶段。

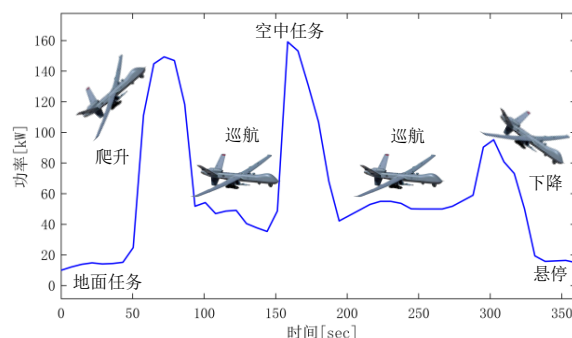


图1 小型飞机飞行任务剖面图
Fig. 1 Flight mission profile of UAV

考虑到小型飞机的实际使用需求,本文采用质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane

Fuel Cell, 简称 PEMFC) 作为小型飞机混合动力系统的主电源, 通过 BUCK 变换器与直流母线连接; 锂离子电池和超级电容共同作为辅助电源, 分别通过各自的双向 DC/DC 变换器连接到直流母线上, 通过能量管理系统进行各电源的能量分配, 在满足系统功率需求的前提下, 提高系统性能。基于燃料电池-锂离子电池-超级电容的混合动力系统拓扑结构如图 2 所示。

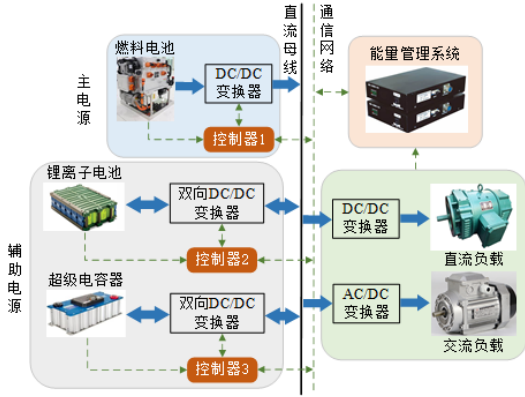


图 2 混合动力系统拓扑结构

Fig. 2 Hybrid system topology

$$\begin{cases} E_{nernst} = 1.229 + \frac{\Delta S}{2F} (T - 298.15) + \left(\frac{RT}{2F}\right) \ln \left[\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right] & T \leq 100^\circ C \\ E_{nernst} = 1.229 + \frac{\Delta S}{2F} (T - 298.15) + \left(\frac{RT}{2F}\right) \ln [P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}] & T > 100^\circ C \end{cases} \quad (2)$$

式中: R 为通用气体常数; T 为电池工作的绝对温度; P_{H_2} 、 P_{O_2} 、 P_{H_2O} 分别为氢气、氧气和水蒸气的分压。

对于质子交换膜燃料电池而言, 一般情况下, 氢气的氧化反应较氧气的还原反应轻松很多, 因此阳极产生的活化过电压相对于阴极而言非常小, 可以忽略, 仅计算阴极侧产生的活化电压损失即可。

$$V_{act} = -(\xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln C_{O_2} + \xi_4 T \ln I) \quad (3)$$

式中: I 为 PEMFC 输出电流; ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 、 ξ_4 分别为经验参数。

在电池内部的各个部分均存在阻抗, 为了便于计算和分析, 仅考虑对氢离子和电子的两部分阻抗, 其余部分的阻抗很小, 可忽略不计, 因此欧姆极化过电压的表达式如下:

$$V_{ohm} = iR_{ohm} = i(R_m + R_c) \quad (4)$$

在 PEMFC 内反应物气体易形成浓度梯度, 并

1.1 燃料电池模型

本文根据质子交换膜燃料电池机理公式^[14], 进行质子交换膜燃料电池输出电压的数学模型构建。在 PEMFC 的实际工作过程中, 电池实际的输出电压总是低于理想电压, 电极电位偏离其平衡值, 该现象称之为燃料电池的极化现象^[15-16]。

PEMFC 单体的输出电压为能斯特电压减去燃料电池三个极化过电压, 如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} V_{fc} = n_{cell} V_{cell} \\ V_{cell} = E_{nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_{nernst} 为能斯特电压; V_{act} 为活化过电压; V_{ohm} 为欧姆过电压; V_{conc} 为浓差过电压。

PEMFC 的能斯特电压与工作温度、氢气压力、氧气压力和水蒸气的压力有关, 对于非标准状态条件, 可采用能斯特方程进行特定情况下的最大输出电压计算:

且无法及时排除的水也会累积在双极板上, 这些均阻碍了带电粒子的扩散运动, 引起电池电动势急剧下降的现象称之为浓差极化现象。浓差极化过电压与电流密度的关系式如下:

$$V_{con} = -\frac{RT}{2\alpha F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (5)$$

1.2 锂离子电池模型

等效电路模型具有简单直观、精确度高、物理意义明确等优点, 但是在模型参数辨识过程中, 无论是离线还是在线辨识, 都会存在误差并且会不断积累, 从而影响模型准确度。自回归各态历经 (Autoregressive Exogenous, 简称 ARX) 模型利用了过去的输入输出来得到当前时刻的线性模型, 不再需要依赖等效电路模型具体的参数值, 可有效提高锂电池的模型精度。

ARX 模型的表达式为

$$A(q)U(k) = B(q)I(k) + \varepsilon(k) \quad (6)$$

式中： $U(k)$ 和 $I(k)$ 分别为 ARX 模型输出量和输入量； q 为延迟算子； $\epsilon(k)$ 为高斯白噪声。

$$\begin{cases} A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_mq^{-m} \\ B(q) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_nq^{-n} \end{cases} \quad (7)$$

模型阶数 m, n 由 AIC 准则变形而来的遗传算法得到, 模型系数 $a_1, a_2 \dots a_m, b_1, b_2 \dots b_n$ 通过递推最小二乘法得到。

1.3 超级电容模型

经典 RC 等效电路模型的拓扑结构如图 3 所示, 经典模型不仅可以直接反映超级电容的电气特性, 而且其参数可以直接从数据手册获得, 有着良好的工程价值, 本文选用该电路模型作为超级电容的等效电路模型。

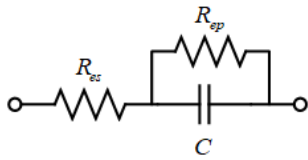


图 3 经典 RC 模型

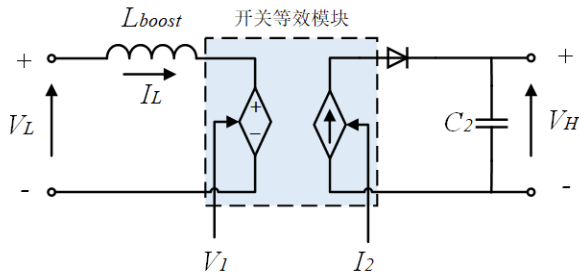
Fig. 3 Typical RC model

经典 RC 模型的状态空间表达式为

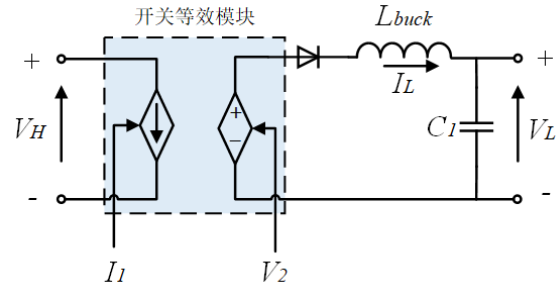
$$\begin{cases} \frac{du_c}{dt} = +\frac{1}{C}i_c \\ U = u_c + i_c R_{es} \end{cases} \quad (8)$$

1.4 DC/DC 变换器

DC/DC 变换器平均值模型电路图如图 4 所示, 模型中的开关器件由受控电压/电流源替代, 虽然开关谐波无法表现出来, 但是变换器的动态特性仍保持不变, 因此, 仿真模型可以使用毫秒级的采样时间, 减少耗时。



(a) Boost 电路



(b) Buck 电路

图 4 DC/DC 平均值模型

Fig. 4 DC/DC average model

Boost 和 Buck 平均值模型中开关等效模块的受控电压/电流源的计算公式为

$$\begin{cases} \text{Boost:} \begin{cases} V_1 + (1-D)V_H \\ I_2 = \eta(1-D)I_L \end{cases} \\ \text{Buck:} \begin{cases} V_2 + DV_L \\ I_1 + DI_L/\eta \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

2 基于等效氢耗量最小算法的模型预测控制

等效氢耗量最小算法的目标是使得系统等效氢耗量最小。等效氢耗量是一种把电量转换为氢气量的计量方式, 以直观地用于燃料经济性分析。而基于模型预测控制的能量管理策略是通过将预测时域内的目标函数最小化, 对燃料电池、锂离子电池和超级电容的输出/输入功率进行控制, 实现对小型飞机混合动力系统的能量管理优化。本文设计的能量管理策略除了考虑飞行包线中爬升、下降等各类变速工况能满足系统的动力性需求外, 其主要的优化目标是将混合动力系统的能量消耗降到最小。因此, 本文结合等效氢消耗最小算法和模型预测控制算法, 利用 ECMS(等效消耗最小)算法对 MPC(模型预测控制)进行求解, 形成一种高效的瞬时优化能量管理策略。

2.1 建立预测模型

在当前采样时刻 k , 选取燃料电池、锂离子电池和超级电容的输出功率作为控制变量。

$$u(k) = [P_{fc}(k), P_{batt}(k), P_{sc}(k)] \quad (10)$$

对于小型飞机混合动力系统来说, 燃料电池氢耗量速率、锂电池和超级电容 SOC 可以反映整

个飞行过程中小型飞机的状态变化,因此,本文选取的状态变量为

$$x(k) = [m_{fc}(k), SOC_{batt}(k), SOC_{sc}(k)] \quad (11)$$

小型飞机混合动力系统的输出量为燃料电池、锂电池和超级电容的输出功率之和,因此本文的预测模型为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (12)$$

式中: k 为当前采样时刻; $y(k)$ 为输出变量; $u(k)$ 为燃料电池的输出功率; A 、 B 、 C 分别表示状态、控制和输出矩阵。

2.2 优化目标函数设计

本文所设计的能量管理策略的主要优化目标是使得混合动力系统在整个运行过程的总耗量最小,因此,利用等效氢消耗最小算法进行优化目标函数的设计。

优化目标函数表达式为

$$J = \min [m_{fc}(t) + s_1(t)m_{batt} + s_2(t)m_{sc}(t)] \quad (13)$$

式中: $m_{fc}(t)$ 为燃料电池氢耗量速率; $m_{batt}(t)$ 为锂离子电池等效氢耗量速率; $m_{sc}(t)$ 为超级电容等效氢耗量速率。

燃料电池的氢耗量速率可以采用功率估算法进行计算。

$$m_{fc} = \frac{P_{fc}}{LHV\eta_{fc}} \quad (14)$$

式中: P_{fc} 为燃料电池的输出功率; η_{fc} 为燃料电池当前的工作功率; LHV 为氢气的低热值。

$$m_{batt} = \begin{cases} \frac{2P_{batt}}{1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{batt_dis}P_{batt}}{U_{batt_ocv}^2}}} \cdot \frac{m_{fc,avg}}{P_{fc,avg}} & (P_{batt} \geq 0) \\ \frac{2P_{batt}}{1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{batt_char}P_{batt}}{U_{batt_ocv}^2}}} \cdot \frac{m_{fc,avg}}{P_{fc,avg}} & (P_{batt} \leq 0) \end{cases} \quad (15)$$

锂离子电池的等效氢耗量速率可以通过燃料电池平均氢耗量速率与平均输出功率的比值间接计算得出,考虑到锂离子电池的充放电迟滞现象,等效氢耗量速率的计算包括充电和放电两种

情况。

超级电容的等效氢耗量速率计算公式与锂电池相同,但是其内阻相较锂电池很小,因此将其充放电内阻等效为同一个常数,计算公式进一步简化为

$$m_{sc} = \frac{2P_{sc}}{\left(1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{sc}P_{sc}}{U_{sc_ocv}^2}}\right)} \cdot \frac{m_{fc,avg}}{P_{fc,avg}} \quad (16)$$

在基于ECMS的模型预测控制算法中,等效因子的选取对能量管理策略的优化效果有着重大影响。小型飞机飞行状态复杂,固定的等效因子无法较好的维持储能元件SOC的平衡,因此,引入惩罚函数,进行等效因子的动态修正。

$$\begin{cases} s_1(t) = k_1 \left(1 - 2 \cdot \frac{SOC_{batt}(t) - SOC_{batt_E}}{SOC_{batt_max} - SOC_{batt_min}}\right) \\ s_2(t) = k_2 \left(1 - 2 \cdot \frac{SOC_{sc}(t) - SOC_{sc_E}}{SOC_{sc_max} - SOC_{sc_min}}\right) \end{cases} \quad (17)$$

式中: SOC_{batt_E} 、 SOC_{sc_E} 分别为锂电池和超级电容的SOC平衡点。

2.3 约束条件

在对优化目标函数进行最优化求解的过程中,燃料电池、锂电池和超级电容因自身电源特性的限制,存在充放电功率和SOC的约束条件。

1) 系统输出功率约束条件

$$P_{load}(k) = P_{fc}(k) + P_{batt}(k) + P_{sc}(k) \quad (18)$$

2) 充放电功率约束条件

$$\begin{cases} 0 \leq P_{fc}(k) \leq P_{fc_max} \\ P_{batt_min} \leq P_{batt}(k) \leq P_{batt_max} \\ P_{sc_min} \leq P_{sc}(k) \leq P_{sc_max} \end{cases} \quad (19)$$

3) 荷电状态约束条件

$$\begin{cases} SOC_{batt_min} \leq SOC_{batt}(k) \leq SOC_{batt_max} \\ SOC_{sc_min} \leq SOC_{sc}(k) \leq SOC_{sc_max} \end{cases} \quad (20)$$

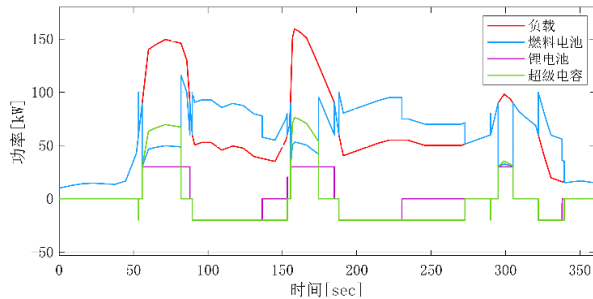
3 仿真分析

3 仿真分析

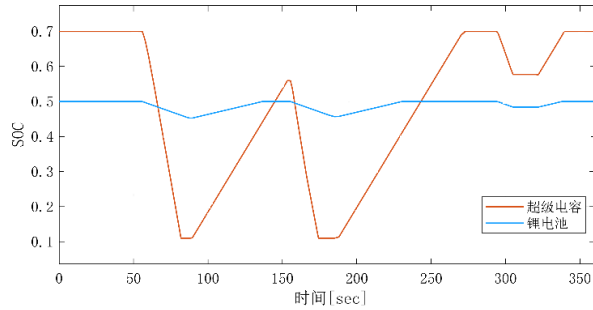
为了验证本文所设计的基于等效氢耗量最小的模型预测控制能量管理策略的优化性能,基于前文所研究建立完成的小型飞机氢燃料混合动力系统仿真模型,进行基于规则的状态机控制器和

基于 ECMS 的 MPC 控制器的对比分析。

仿真设定锂离子电池和超级电容的初始 SOC 值分别为 50% 和 70%，燃料电池始终处于氢气和氧气的气体分压均为 2 bar，工作温度 323.15 K 的工作环境中，运行时长 360 s，基于规则的状态机能量管理策略的仿真结果如图 5 所示。基于 ECMS 的 MPC 管理策略的仿真结果如图 6 所示。



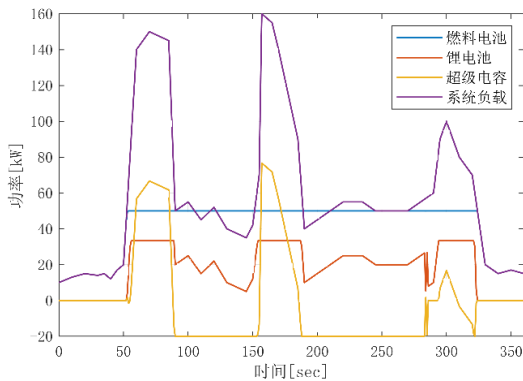
(a) 负载、燃料电池、锂电池、超级电容的功率时间曲线



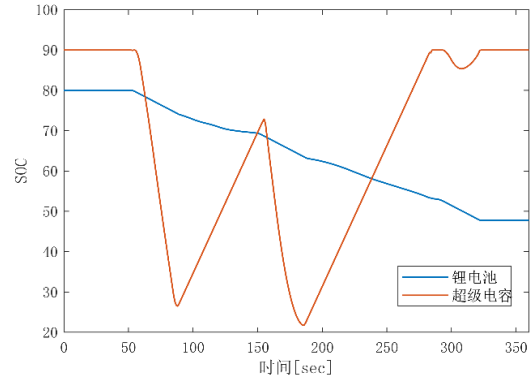
(b) 锂电池和超级电容同一时刻的 SOC 变化值

图 5 基于规则的状态机能量管理策略仿真结果：

Fig. 5 Simulation results of rule-based state machine energy management strategy



(a) 负载、燃料电池、锂电池、超级电容的功率时间曲线



(b) 锂电池和超级电容同一时刻的 SOC 变化值

图 6 基于 ECMS 的 MPC 控制能量管理策略仿真结果

Fig. 6 Simulation results of MPC control energy management strategy based on ECMS

从图 5~图 6 可以看出：两种能量管理策略均可满足系统负载功率需求，锂电池和超级电容 SOC 始终处于安全工作范围内。在相同的仿真条件下，基于状态机的混合动力系统等效氢耗量为 0.346 kg，燃料电池平均效率为 53.99%，基于 ECMS-MPC 的系统等效氢耗量为 0.328 kg，燃料电池平均效率为 64.4%。由此可见，相较于状态机，基于 ECMS 的模型预测控制能量管理策略节约了 5.2% 的氢气，燃料电池的平均工作效率提高了约 10%。

4 结 论

1) 基于 ECMS-MPC 的能量管理策略能够满足系统功率需求。

2) 相较于基于规则的状态机能量管理策略，基于 ECMS-MPC 的能量管理策略，可以提高燃料电池整体的工作效率。

3) 该策略能更好地发挥锂电池和超级电容的辅助作用，并有效地降低系统氢耗量，提高系统的经济性，实现系统最优功率分配。

参 考 文 献

- [1] 陶于金, 李沛峰. 无人机系统发展与关键技术综述[J]. 航空制造技术, 2014 (20): 34-39.
TAO Yujing, LI Peifeng. Development and key technology of UAV[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014 (20): 34-39. (in Chinese)
- [2] 邹宁, 姚小秩, 梁爽, 等. 天翼 1 无人机电动化改造可行性分析[J]. 航空工程进展, 2020, 11(2): 214-219.
ZOU Ning, YAO Xiaoyi, LIANG Shuang, et al. Feasibili-

- ty analysis on electric transformation of sw1 unmanned aerial vehicle[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2020, 11(2): 214-219. (in Chinese)
- [3] 戴月领, 贺云涛, 刘莉, 等. 燃料电池无人机发展及关键技术分析[J]. *战术导弹技术*, 2018(1): 65-71.
DAI Yueling, HE Yuntao, LIU Li, et al. Development of fuel cell UAV and analysis of key technology[J]. *Tactical Missile Technology*, 2018(1): 65-71. (in Chinese)
- [4] 王珂, 陈维荣, 李奇, 等. 基于燃料电池的无人飞机混合动力系统设计[J]. *电源技术*, 2023(2): 214-217.
WANG Ke, CHENG Weirong, LI Qi, et al. Fuel cell battery hybrid system for UAV[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2023(2): 214-217. (in Chinese)
- [5] 李开省. 电动飞机核心技术研究综述[J]. *航空科学技术*, 2019, 30(11): 8-17.
LI Kaisheng. Summary of research on core technology of electric aircraft[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2019, 30(11): 8-17. (in Chinese)
- [6] SAVVARIS A, XIE Y, MALANDRAKIS K, et al. Development of a fuel cell hybrid-powered unmanned aerial vehicle[C]// 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation. US: IEEE, 2016: 1242-1247.
- [7] 雷涛, 闵志豪, 付红杰, 等. 燃料电池无人机混合电源动态平衡能量管理策略[J]. *航空学报*, 2020, 41(12): 293-307.
LEI Tao, MIN Zhihao, FU Hongjie, et al. Dynamic balanced energy management strategies for fuel-cell hybrid power system of unmanned air vehicle[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(12): 293-307. (in Chinese)
- [8] RAVEY A, BENJAMIN B, ABDELLATIF M. Control strategies for fuel-cell-based hybrid electric vehicles: From offline to online and experimental results[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(6): 2452-2457.
- [9] SU W, WANG J. Energy management systems in micro-grid operations[J]. *The Electricity Journal*, 2012, 25(8): 45-60.
- [10] HARMON F G, FRANK A A, CHATTOT J J. Conceptual design and simulation of a small hybrid-electric unmanned aerial vehicle[J]. *Journal of Aircraft*, 2006, 43(5): 1490-1498.
- [11] FU Z, ZHU L, TAO F, et al. Optimization based energy management strategy for fuel cell/battery/ultra capacitor hybrid vehicle considering fuel economy and fuel cell lifespan[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(15): 8875-8886.
- [12] MOURA S J, FATHY H K, CALLAWAY D S, et al. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(3): 545-555.
- [13] HAN Jihun, KUM D, PARK Yo. Synthesis of predictive equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicles based on closed-form solution of optimal equivalence factor[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(7): 5604-5616.
- [14] 衣宝廉. 燃料电池——原理·技术·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
YI Baolian. Fuel cell: theory and technology and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [15] 胡卫华, 谢起成, 田光宇, 等. 质子交换膜燃料电池电压模型研究[J]. *汽车技术*, 2002(10): 8-10.
HU Weihua, XIE Qicheng, TIAN Guangyu, et al. Study on electric pressure models of proton exchanging film fuel cells [J]. *Automobile Technology*, 2002(10): 8-10. (in Chinese)
- [16] 汪钰皓. 燃料电池无人直升机混合动力系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
WANG Yuhao. Design of fuel cell unmanned helicopter hybrid power system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)