



混合动力电推进系统能量管理与分层优化控制策略研究

李建奇 孙健 杨涛 曹斌芳 唐一文 鲁建权

Research on Energy Management and Hierarchical Optimization Control Strategy for Hybrid Electric Propulsion System

LI Jian-Qi, SUN Jian, YANG Tao, CAO Bin-Fang, TANG Yi-Wen, LU Jian-Quan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16383/j.aas.c250174>

您可能感兴趣的其他文章

混合动力电动汽车的跟车控制与能量管理

Tracking Control and Energy Management of Hybrid Electric Vehicles

自动化学报. 2022, 48(1): 162–170 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c200136>

智能网联电动汽车节能优化控制研究进展与展望

Energy-saving Optimization Control for Connected Automated Electric Vehicles: State of the Art and Perspective

自动化学报. 2023, 49(12): 2437–2456 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220819>

基于分布式策略的直流微电网下垂控制器设计

Design of Droop Controller for DC Microgrid Based on Distributed Strategy

自动化学报. 2021, 47(10): 2472–2483 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190628>

基于分层控制策略的六轮滑移机器人横向稳定性控制

Lateral Stability Control of Six-wheeled Skid-steering Robot Based on Hierarchical Control Strategy

自动化学报. 2023, 49(7): 1421–1432 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220326>

基于强化学习的综合能源系统管理综述

Reinforcement Learning Based Integrated Energy System Management: A Survey

自动化学报. 2021, 47(10): 2321–2340 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c210166>

基于混合双端事件触发机制的协同控制策略研究

Cooperative Control Strategy Research Based on Hybrid Dual-terminal Event-triggered Mechanism

自动化学报. 2025, 51(4): 792–803 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240354>

混合动力电推进系统能量管理与分层优化控制策略研究

李建奇^{1,2} 孙健^{1,2} 杨涛³ 曹斌芳^{1,2} 唐一文^{1,2} 鲁建权²

摘要 为提高混合动力飞行器经济性并改善动力系统的动态性能,提出一种混合动力分层控制的能量管理策略。首先在顶层提出基于改进等效燃油消耗最小化的能量管理策略,根据发电机组的燃油消耗特性、储能电池组的荷电状态以及等效惩罚因子动态调整发电机组的最优工作曲线,从而获得最佳的燃油经济性。在底层提出一种基于电流反馈的改进下垂控制策略,负责管理电池组的充放电状态和维持直流母线电压的动态平衡,同时实现飞行器经济性与动态响应的协同控制,达到对混合电推进飞行器能量动态优化管理的目的。最后,通过基于 RT-LAB 的混合动力系统硬件在环实验平台验证该能量管理策略的有效性。

关键词 混合动力飞行器, 分层能量管理, 改进下垂控制, 等效燃油消耗优化

引用格式 李建奇, 孙健, 杨涛, 曹斌芳, 唐一文, 鲁建权. 混合动力电推进系统能量管理与分层优化控制策略研究. 自动化学报, 2025, 51(12): 2703–2712

DOI 10.16383/j.aas.c250174 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250174

Research on Energy Management and Hierarchical Optimization Control Strategy for Hybrid Electric Propulsion System

LI Jian-Qi^{1,2} SUN Jian^{1,2} YANG Tao³ CAO Bin-Fang^{1,2} TANG Yi-Wen^{1,2} LU Jian-Quan²

Abstract To enhance the economic efficiency and dynamic performance of hybrid aircraft, an energy management strategy based on hybrid-powered hierarchical control is proposed. Firstly, at the upper layer, an energy management strategy based on the improved equivalent fuel consumption minimization is proposed, which dynamically adjusts the optimal operating curve of the generator set based on its fuel consumption characteristics, the state of charge of the energy storage battery pack, and the equivalent penalty factor to achieve optimal fuel economy. At the lower layer, an improved droop control strategy incorporating current feedback is proposed. This strategy manages the charging and discharging states of the battery pack and maintains the dynamic balance of the DC bus voltage, thereby achieving cooperative control of economic efficiency and dynamic response. Consequently, it realizes dynamic optimization management of the energy in hybrid electric propulsion vehicles. Finally, the effectiveness of this energy management strategy is validated through a hardware-in-the-loop experimental platform for hybrid power systems based on RT-LAB.

Key words Hybrid aircraft, hierarchical energy management, improved droop control, equivalent fuel consumption optimization

Citation Li Jian-Qi, Sun Jian, Yang Tao, Cao Bin-Fang, Tang Yi-Wen, Lu Jian-Quan. Research on energy management and hierarchical optimization control strategy for hybrid electric propulsion system. *Acta Automatica Sinica*, 2025, 51(12): 2703–2712

收稿日期 2025-04-23 录用日期 2025-08-09

Manuscript received April 23, 2025; accepted August 9, 2025

国家自然科学基金 (62273142), 湖南省自然科学基金 (2023JJ30437, 2023JJ50052), 湖南省教育厅科学研究项目 (23A0498) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62273142), Hunan Provincial Natural Science Foundation (2023JJ30437, 2023JJ50052), and Scientific Research Project of the Hunan Provincial Department of Education (23A0498)

本文责任编辑 李繁斌

Recommended by Associate Editor LI Fan-Biao

1. 湖南文理学院计算机与电气工程学院 常德 415000 中国 2. 分布式电推进飞行器控制技术湖南省重点实验室 常德 415000 中国 3. 英国诺丁汉大学 诺丁汉 NG7 2RD 英国

1. School of Computer and Electrical Engineering, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Distributed Electric Propulsion Vehicle Control Technology, Changde 415000, China 3. University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK

随着全球航空业的快速发展,通用航空的需求日益广泛^[1]。与此同时,飞行器尾气与噪音排放大幅增加,造成的环境污染问题愈发凸显^[2],因此,飞行器动力系统的创新尤其受到重视^[3]。受限于当前储能电池能量密度水平,同等重量的情况下,传统燃油动力系统在航程与航时上明显优于纯电推进系统^[4]。混合电推进系统通过将发动机-发电机和储能电池组合在一起,利用较高能量密度燃油和更高效的电能转换来达到更高效的能量利用率,大大提高了飞行器的续航时间^[5]。因此,在储能电池能量密度得到突破之前,长航时飞行器上应用混合动力电推进系

统具有巨大潜力^[6]. 在民用方面, 混合动力飞行器可以替代传统长航时飞行器, 更适用于完成环境监测、高分辨率测绘、电力巡检及公共安全等任务^[7-10]. 同样地, 因为混合动力飞行器具备噪声低、长航时等优点, 在军事方面通常用于执行长时间侦察任务^[11].

混合动力系统使用电能作为二次能源, 为推进系统产生的功率达到总功率的 90% 以上^[12], 因此需要根据不同飞行工况对混合动力系统进行能量管理, 以优化发电机和电池组的能量分配, 提升系统燃油利用效率, 实现燃油消耗量最优的目标^[13]. 文献 [14] 中采用滚动动态规划算法对混合动力系统各源实时优化控制, 实现能量的高效利用. 文献 [15] 中针对混合电推进系统设计一种基于模糊逻辑的能量管理策略, 从而提升系统的燃油经济性与飞行器航程. 文献 [16] 针对太阳能电池、燃料电池和锂电池相结合的混合能源系统, 构建一种基于规则的能源管理策略, 可兼顾锂电池的高比功率和燃料电池的高比能量, 在保证起降机动性的同时提高飞行器续航能力. 文献 [17] 中以优化发动机工作区、最小化发动机爬坡功率和储能电池荷电状态 (State of charge, SOC) 优化管理为目标, 提出一种基于多目标模型预测的混合动力系统能量管理策略, 从而充分发挥各种能源的优势. 上述方法可有效降低飞行器燃油消耗, 但由于动力系统容量相较于负载功率需求裕度不大, 当过度追求燃油经济性而导致某一种能源先耗尽时, 飞行器将无法完成紧急任务与迫降的动力需求.

由于电推进飞行器是由电力电子设备组成的低惯性系统^[18], 负载功率的大范围变化以及脉冲性和阶跃性功率负载的存在, 将对动力系统造成冲击, 导致母线电压发生较大的波动^[19]. 因此能量管理策略也可用于改善系统的动态响应性能, 提升供电系统的可靠性^[20]. 文献 [21] 中基于复合下垂的自主能量管理策略, 动态分配由电池、光伏和燃料电池组成的飞行器供电系统的能量, 每个电源的操作都可以自动进行协调, 以保持发电量与消耗量之间的平衡. 文献 [22] 中为将负载功率合理分配到飞行器各个电源, 确保脉冲功率负载运行和系统稳定性, 提出一种改进的虚拟阻抗下垂控制, 并研究了电池 SOC 状态和直流母线电压的恢复. 文献 [23] 中提出一种针对电推进飞行器动力系统单元的多时间尺度能量管理策略, 该动力系统由超级电容器、电池和燃料电池组成, 在负载快速变化的瞬态期间, 该策略有效地将低频、中频和高频域功率分配给不同的供电单元. 文献 [24] 中提出一种基于人工智能的多电机供电系统下垂系数优化设计方法, 实现各

源功率共享和母线电压的补偿. 上述研究可有效提升混合动力系统的动态性能, 但在不同工况下的整体经济性仍可进一步优化.

通过上述分析可以看出, 现有关于电推进飞行器能量管理的研究存在以下两点问题: 1) 没有考虑燃油和储能电池能量消耗的动态平衡, 导致复杂工况下出现某种电源能量先耗尽的情况, 从而无法满足动力峰值需求; 2) 对于飞行器飞行全程的经济性与暂态动态响应的优化往往独立进行. 因此本文提出一种电推进飞行器能量分层动态优化控制策略, 实现发电机组与储能电池组之间的最优功率动态分配. 本文的主要贡献如下:

1) 通过提出分层能量管理策略, 可同时达到提升飞行器经济性与改善电推进系统动态性能的目的;

2) 根据储能电池 SOC 动态调节发电机组的最优输出功率, 使燃油和储能电池的能量消耗相对平衡, 保障电推进系统的动力性能;

3) 提出一种基于反馈电流的改进下垂控制方法, 可自动调节母线电压, 从而提升动力系统的供电质量, 各储能单元不需要额外的电压调节控制器, 也不需要通信, 易于实施.

本文的组织结构如下: 第 1 节介绍混合动力系统的结构和各个能源的输出特性. 第 2 节给出分层能量管理策略, 包括顶层基于改进等效燃油消耗的能量管理和底层基于改进下垂的动态控制方法. 第 3 节搭建混合动力系统硬件在环的缩比半实物实验平台, 验证了所提分层能量管理策略的有效性. 最后, 第 4 节对本文进行总结并对未来研究方向进行展望.

1 系统建模

本文研究的混合动力系统采用串联式结构^[25],

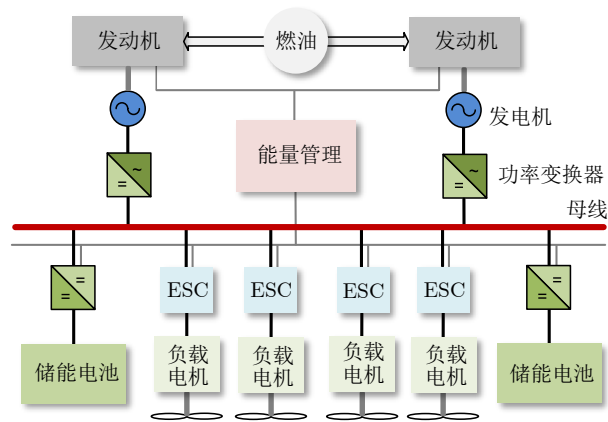


图 1 串联式混合动力系统结构图

Fig. 1 Serial hybrid power system structure diagram

如图 1 所示, 主要包括发动机驱动的永磁同步发电机 (Permanent magnet synchronous generator, PMSG)、储能电池以及相应的功率变换器. 通过用电子调速器 (Electronic speed controller, ESC) 和电机驱动推进器, 使推进器与传动系统完全解耦, 发电机组则可持续运行在燃油高效利用区间. 尽管串联式混合动力系统增加了较多的电气元件数量, 但通过提升燃油利用效率, 并且使飞行器具有更好的内外部流场耦合, 降低飞行器的推进功率需求, 从而可以提升飞行器的航程与航时.

1.1 储能电池等效电路模型

储能电池的等效电路如图 2 所示^[25], 其中, 左半部分用于模拟 SOC 的动态变化过程, 表示充电状态与端口电流之间的相互作用, 右半部分则用于模拟储能电池内部电压的变化. 储能电池的状态方程如下:

$$\begin{cases} \frac{dv_s(t)}{dt} = \frac{1}{c_s} \left(i_B(t) - \frac{v_s(t)}{r_s} \right) \\ \frac{dv_f(t)}{dt} = \frac{1}{c_f} \left(i_B(t) - \frac{v_f(t)}{r_f} \right) \\ \frac{dv_{SOC}(t)}{dt} = \frac{1}{c_b} \left(-i_B(t) - \frac{v_{SOC}(t)}{r_{sd}} \right) \\ v_B(t) = v_{oc}(t) - v_s(t) - v_f(t) - r_0 i_B(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i_B(t)$ 和 $v_B(t)$ 分别代表储能电池的输出电流和输出电压, 当电流值为正时, 表示放电, 反之, 则表示充电; r_s 、 r_f 、 r_{sd} 、 r_0 代表储能电池的内阻; c_s 、 c_f 、 c_b 代表储能电池的内部电容; $v_{oc}(t)$ 代表储能电池的开路电压; $v_{SOC}(t)$ 表示储能电池的电量状态, $v_{SOC}(t) \in [0, 1]$; $v_s(t)$ 和 $v_f(t)$ 表示储能电池模型中的两个电容端电压, 反映储能电池内部状态的变化.

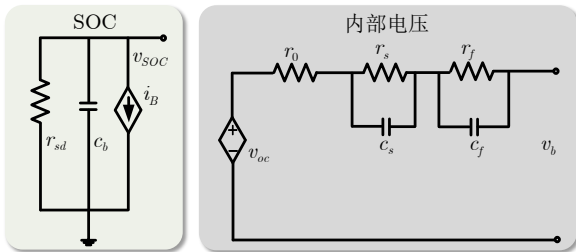


图 2 储能电池等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of energy storage battery

1.2 发电机组

本文采用 PMSG 作为发电机组, 具有重量轻、

功率密度高的优势. 通过恒幅变换, 可得到 PMSG 在 d - q 两相同步旋转坐标系中的方程如下:

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - R_s i_d + \omega L_q i_q \\ L_q \frac{di_q}{dt} = u_q - R_s i_q - \omega L_d i_d - \omega \psi_f \end{cases} \quad (2)$$

其中, u_d 和 u_q 是端电压的 d 轴分量和 q 轴分量, i_d 和 i_q 是定子电流的 d 轴分量和 q 轴分量, L_d 、 L_q 分别是定子直轴、交轴电感, R_s 是定子电阻, ω 是电动机的角速度, ψ_f 是转子磁链.

永磁同步发电机的电磁功率为:

$$P_{en} = \frac{3}{2} \psi_f i_q \omega \quad (3)$$

其中, P_{en} 是发电功率.

2 分层控制策略

在本文提出的分层能量管理控制中, 顶层能量管理优化分配储能电池组和发电机组之间的输出功率, 保障混合动力系统持续稳定和经济高效运行. 在底层控制层面, 不同输出特性的发电机组与储能电池组采用不同的控制方法进行控制, 以实现混合动力系统的稳定运行. 顶层能量管理的时间尺度为分钟级, 底层能量管理的时间尺度可达毫秒级.

2.1 底层动态控制

在本文提出的分层能量管理控制中, 储能电池组在混合动力系统的功率平衡和直流母线电压调节中起着重要作用. 在本研究中, 采用电压下垂控制方法来维持直流母线电压的稳定以及电池的自动充放电. 利用 V-I 下垂特性, 根据分支输出直流电流, 生成直流电压参考值 v_{dc}^* , 如下式所示.

$$v_{dc}^* = v_0 - k i_{dc} \quad (4)$$

$$k = \begin{cases} k^* \text{SOC}, & \text{充电} \\ \frac{k^*}{\text{SOC}}, & \text{放电} \end{cases} \quad (5)$$

其中, i_{dc} 是各分支的输出电流, v_0 是额定电压, k^* 是下垂系数初始值.

在稳态条件下, 各储能电池组的输出电流按如下方式分配:

$$\frac{i_i}{i_j} = \frac{k_j}{k_i} \quad (6)$$

其中, i_i 、 i_j 是不同储能电池组的输出电流, k_i 、 k_j 是对应储能的下垂系数.

由于下垂控制是有差控制, 根据 V-I 特性母线电压会产生偏差. 假设各电池组应用了较高的下垂

增益, 即线路阻抗远小于下垂增益, 那么对于任何电池组分支, 可以用下式表示:

$$v_b = v_0 - i_1 k_1 = v_0 - i_2 k_2 = \dots = v_0 - i_n k_n \quad (7)$$

其中, i_1, i_2, \dots, i_n 是各分支电流; k_1, k_2, \dots, k_n 是各下垂增益; v_b 是母线电压。

因此, 可得到总储能电池电流 i_{Lb} :

$$i_{Lb} = i_1 + i_2 + \dots + i_n = (v_0 - v_b) \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \quad (8)$$

根据式 (8), 可以将其重写为:

$$v_b = v_0 - i_{Lb} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}} \quad (9)$$

根据式 (9), 母线的电压 V-I 特性可以通过以下下垂增益来定义:

$$k_{Lb} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}} \quad (10)$$

其中, k_{Lb} 被称为全局电压下降增益. 整体电压下降增益与单个电压下降增益之间的关系如图 3 所示. 可以看出, 当多组储能蓄电池并联工作时, 母线电压会下降更多.

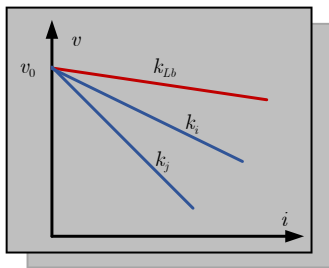


图 3 母线下垂特性
Fig. 3 Bus droop characteristics

为解决这一问题并确保适当的电压调节, 本文提出一种电压补偿方法. 在储能系统的电压参考值中加入一个前馈项 v_{adj} , 如式 (11) 所示. 根据储能电池的总负载电流调整电源参考值, 在前馈作用下, 储能电池的出口电压将自动调整至额定值.

$$v_{adj} = k_{Lb} i_{Lb} \quad (11)$$

储能电池的控制结构图如图 4 所示. u_{bat} 为储能电池端电压, C 为储能电池靠近母线侧电容. 除电压和电流双闭环控制外, 还增加了一个基于 SOC 的下垂控制环节, 并在参考值中加入一个前馈项以纠正电压偏差, 从而获得电压环的给定值 u_{dc}^* . 输入的 u_{dc}^* 和输出电压实际值 u_{dc} 经过电压和电流双闭环控制器, 最终生成双向 DC-DC 的占空比信号 d . 由

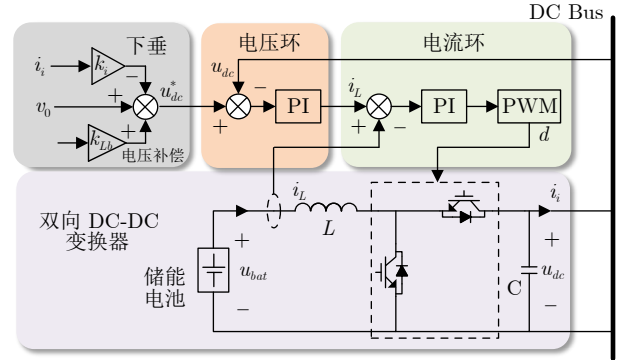


图 4 储能电池控制框图

Fig. 4 Control block diagram of energy storage battery

于这种方法不需要额外的控制器, 因此易于实施.

针对发电机组, 本文采用 $i_d = 0$ 的控制方法, 根据顶层的能量管理策略式 (3) 和式 (26), 可以得到发电机组 i_q 的参考电流. 输入的 d, q 轴电流给定值 i_{d_ref}, i_{q_ref} 与三相电流经坐标变换转换得到的 d, q 轴电流实时值 i_d, i_q , 分别经过电流环 PI 控制器, 输出 d, q 轴电压参考值 u_{d_ref}, u_{q_ref} . 再经过 Park 逆变换得到两相静止坐标系下的电压分量 u_{α}, u_{β} , 转子位置角为 θ . 最后通过空间矢量脉宽调制 (Space vector pulse width modulation, SVPWM) 得到触发 PWM 整流器的开关信号, 从而实现发电机组的动态控制, 发电机组的控制框图如图 5 所示.

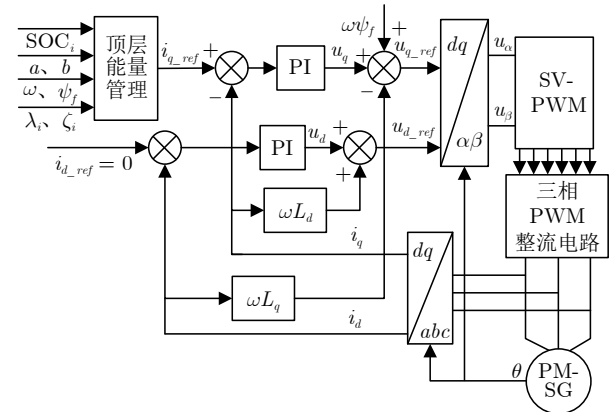


图 5 永磁同步发电系统控制框图
Fig. 5 Control block diagram of PMSG

2.2 顶层能量优化管理

在混合动力系统运行过程中, 发电机组为负载提供电能以满足功率需求, 这将消耗燃油. 同时, 发电机组为储能电池组充电, 将储能电池 SOC 保持在适当的范围内, 这也需要额外的燃油消耗. 为提高系统运行效率, 提出改进等效燃油消耗最小策略, 使发电机组的实际燃油消耗量和维持电池组 SOC

所需的等效燃油消耗量之和最小化. 等效燃油消耗最小化可以表示为:

$$J = \arg \min \omega = \omega_{en} + \lambda \omega_{bat}$$

$$\begin{cases} P_{enmin} \leq P_{en} \leq P_{enmax} \\ P_{chgmax} \leq P_{bat} \leq P_{dismax} \\ SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \\ |\dot{P}_{en}| \leq \Delta P \end{cases} \quad (12)$$

其中, ω_{en} 是发电机组的实际燃油消耗, ω_{bat} 是储能电池组的等效燃油消耗, λ 是线性惩罚系数, P_{en} 和 P_{bat} 是发电机组和储能的输出功率, \dot{P}_{en} 是发电机组功率变化率. 此外, 最优问题还会受到以下约束, 发电机组的最小输出功率和最大输出功率 P_{enmin} 、 P_{enmax} , 储能电池组最大充电和最大放电功率 P_{chgmax} 、 P_{dismax} , 储能电池组 SOC 的下界和上界 SOC_{min} 、 SOC_{max} , 发电机组的爬坡功率最大值 ΔP .

由于动力系统容量相较于负载功率需求裕度不大, 因此储能电池组需与发电机组共同承担紧急任务或紧急迫降等峰值功率. 当过度追求燃油经济性而导致某一种电源能源先耗尽时, 飞行器将无法满足峰值功率的动力需求. 因此, 应用等效燃油消耗最小化策略于混合动力系统时, 需要维持储能电池的电量. 为将储能电池 SOC 保持在指定范围内并且接近目标 SOC, 本文设计惩罚函数如式 (13) 所示^[26]:

$$\lambda = 1 - \left[\frac{SOC(t) - SOC_{target}}{(SOC_{max} - SOC_{min})/2} \right]^n \quad (13)$$

其中, SOC_{target} 是储能电池的预期荷电状态. 惩罚函数与 SOC 之间的关系曲线见图 6. 当 SOC 值大于目标 SOC 时, 惩罚因子小于 1, 这意味着储能电池释放较少的电能等效燃料, 系统趋向于储能电池更多地参与放电. 当 SOC 值小于目标 SOC 时, 惩罚因子大于 1, 这意味着电池释放较多的电能等效燃料, 系统趋向于储能电池较少地参与放电.

发动机的燃油消耗率为发动机的转速和功率的

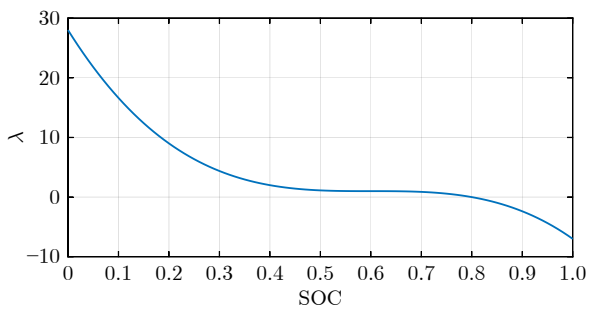


图 6 惩罚函数

Fig.6 Penalty function

函数, 由发动机台架试验获得. 针对发动机-发电机组的燃油消耗率计算, 需要在对发动机燃油消耗特性分析的基础上, 考虑发电机和整流器功率损耗后得到新的燃油消耗特性, 其形式相同, 只需要重新对系数进行修正. 当电机速度恒定时, 发电机组的实际燃油消耗量 (g/h) 可表示为输出功率 P_{en} 的线性函数^[27]:

$$\omega_{en} = aP_{en}^2 + bP_{en} + c \quad (14)$$

其中 a 、 b 和 c 是拟合系数, 通过实验数据拟合燃油消耗效率曲线, 从而获得曲线相关的参数.

储能电池组的等效燃油消耗量可以通过电池组的输出功率以及充放电效率来实时计算, 其表达式为^[28]:

$$\omega_{bat} = \begin{cases} \frac{P_{bat}}{\eta_{bdc}\eta_{dis}\eta_{chgavg}} \cdot \frac{\omega_{enavg}}{P_{enavg}}, & P_{bat} \geq 0 \\ \frac{P_{bat}\eta_{chg}\eta_{disavg}}{\eta_{bdc}} \cdot \frac{\omega_{enavg}}{P_{enavg}}, & P_{bat} < 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, η_{chgavg} 和 η_{disavg} 是电池组平均充放电效率; η_{bdc} 是储能电池组的双向直流/直流变换器的效率; ω_{enavg} 和 P_{enavg} 分别为发电机组平均油耗速率和平均输出功率.

储能电池组的充放电效率可表示为:

$$\begin{cases} \eta_{dis} = \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{dis}P_{bat}}{v_{oc}^2}}}{2} \\ \eta_{chg} = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{4R_{chg}P_{bat}}{v_{oc}^2}}}{2} \end{cases} \quad (16)$$

其中, η_{chg} 和 η_{dis} 分别为储能电池组的充电和放电效率; R_{chg} 和 R_{dis} 分别为储能电池组的充电和放电电阻. 储能电池的等效燃油消耗如图 7 所示.

根据动力系统的功率平衡关系, 可以得到:

$$P_{en} + P_{bat} = P_{load} \quad (17)$$

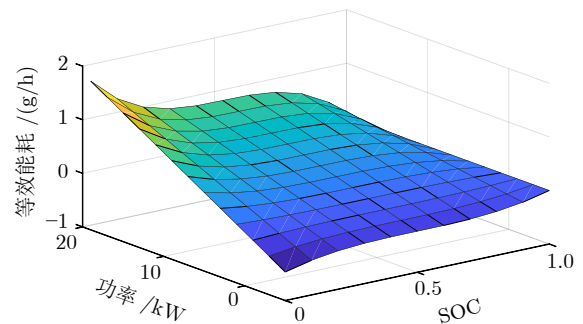


图 7 储能电池的等效燃油消耗

Fig.7 Equivalent fuel consumption of energy storage battery

其中, P_{load} 为负载功率.

混合动力系统的等效燃油消耗量可以表示为:

$$J = \arg \min \omega = aP_{en}^2 + bP_{en} + c + \lambda\zeta(P_{load} - P_{en}) \quad (18)$$

$$\zeta = \begin{cases} \frac{\omega_{enavg}}{\eta_{bdc}\eta_{dis}\eta_{chgavg}P_{enavg}}, & P_{load} \geq P_{en} \\ \frac{\eta_{dis}\eta_{chgavg}\omega_{enavg}}{\eta_{bdc}P_{enavg}}, & P_{load} < P_{en} \end{cases} \quad (19)$$

其中, ζ 为储能等效油耗系数. 在由该方程定义的最小化问题中, P_{load} 和 c 可以被视为常数, 等效燃油消耗最小可以重新表示为求解 ω' 的最小值, 即:

$$J' = \arg \min \omega' = aP_{en}^2 + bP_{en} - \lambda\zeta P_{en} \quad (20)$$

根据式 (20), 解决最小等效燃油消耗问题的关键在于, 储能电池在不同 SOC 的条件下求解发电机组的最优功率, 该问题可通过式 (21) 得出:

$$P_{enopt} = \frac{\lambda\zeta - b}{2a} \quad (21)$$

根据式 (21), 可以得到发电机组每单位做功的燃油消耗率 (g/kWh) 为

$$l_{en} = aP_{en} + b + \frac{c}{P_{en}} \quad (22)$$

在不考虑极端工况条件下, 本文将发电机组正常工作的工作点限制在高效工作区域 $[P_{opt1}, P_{opt2}]$ 内. 图 8 显示了发电机组的最优输出功率曲线.

对于具有多储能装置并联运行的混合动力系统, 系统的等效燃油消耗量由永磁同步发电系统引起的实际燃油消耗量和各电池组引起的等效燃油消耗量组成. 最小等效燃油消耗量可以表示为:

$$J = \arg \min \omega = \omega_{en} + (\lambda_1\omega_{b1} + \dots + \lambda_n\omega_{bn}) = aP_{en}^2 + bP_{en} + c + (\lambda_1\zeta_1P_{b1} + \dots + \lambda_n\zeta_nP_{bn}) \quad (23)$$

其中, λ_i 、 ζ_i 、 P_{bi} 、 ω_{bi} ($i = 1, \dots, n$) 分别为第 i 组储能的惩罚系数、等效油耗系数、输出功率、消耗量.

在底层控制中采用下垂控制来分配多个储能设

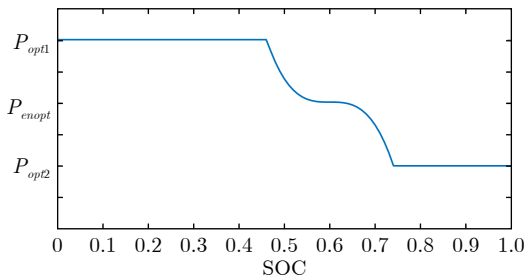


图 8 发电机组的最佳工作曲线

Fig.8 Optimal working curve of generator set

备的电流. 在理想条件下, 储能设备分配的功率与其降压系数成反比, 因此式 (23) 可以修改为如下形式:

$$J = \arg \min \omega = aP_{en}^2 + bP_{en} + c + \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_1}{k_i} \lambda_i \zeta_i \right) P_{b1} = aP_{en}^2 + bP_{en} + c + \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_1}{k_i} \lambda_i \zeta_i \right) \frac{P_{load} - P_{en}}{\sum_{i=1}^n \frac{k_1}{k_i}} = aP_{en}^2 + bP_{en} + c + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i \zeta_i}{k_i} \right) \frac{P_{load} - P_{en}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}} \quad (24)$$

其中, ζ_i ($i = 1, \dots, n$) 为第 i 组储能等效油耗系数. 考虑到式 (24) 定义的优化问题中, P_{load} 和 c 可以被视为常数, 等效燃油消耗最小可以表示为求解 ω' 的最小值, 即

$$J' = \arg \min \omega' = aP_{en}^2 + \left(b - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i \zeta_i}{k_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}} \right) P_{en} \quad (25)$$

根据式 (5)、(25), 可以得到发电机组的最优功率,

$$P_{enopt} = \begin{cases} \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i \zeta_i}{SOC_i} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{SOC_i} \right)} \right] - b}{2a}, & \text{充电} \\ \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (SOC_i \lambda_i \zeta_i)}{\sum_{i=1}^n (SOC_i)} \right] - b}{2a}, & \text{放电} \end{cases} \quad (26)$$

3 实验结果与分析

本文通过搭建混合动力系统硬件在环实验平台, 对所提能量分层动态优化控制算法在不同运行条件下的有效性进行了实验与分析. 如图 9 所示, 由发动机、发电机、整流器组配合两组储能电池组和 DC-DC 功率变换器共同组成混合动力系统缩比模型, 由电阻箱和电机共同模拟飞行器推进负载. 采用 Opal4510 作为控制器, 将本文所提算法下载到 RT-LAB 实时仿真软件中, 通过端子模块采集动力系统各部件参数并分析处理, 输出控制信号至整流器和 DC-DC 变换器, 从而调节发电机组和储能电池组的输出电流. 系统参数如表 1 所示.

如图 10 所示, 发电机组输出功率为 P_{en} , 两组储能电池输出功率分别为 P_{bat1} 和 P_{bat2} , 负载功率

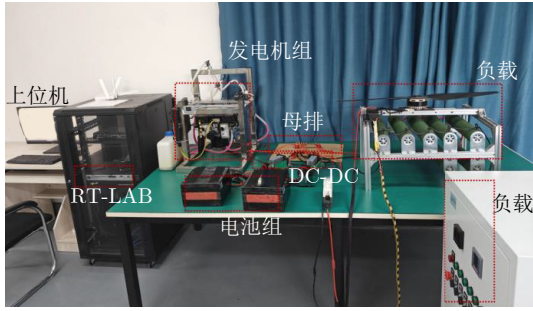


图 9 混合动力系统硬件在环实验平台

Fig.9 Hybrid power system hardware in the loop experiment platform

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameter

子系统	描述	值
储能电池组	储能电池额定电压	100 V
	储能电池额定容量	36 Ah
	储能电池组初始 SOC	0.35、0.45; 0.5、0.6; 0.8、0.9
发电机组	发电机组功率上界	15 kW
	发电机组功率下界	5 kW
	发电机组最优功率输出	10 kW
负载系统	母线电压	270 V
	负载	9 ~ 15 kW

为 P_L , 对应初始 SOC 分别为 SOC_1 和 SOC_2 . 分层能量管理方法能够兼顾效率和燃油消耗, 在不同运行条件下实现混合系统的合理功率分配和稳定运行. 在整个过程中, 每个储能组根据 SOC 自动调整功率输出比例. 在放电状态下, 高 SOC 电池组的功率较高; 在充电状态下, 低和高 SOC 电池组的功率较高. 在不同工作条件下, 系统管理将控制发电机和储能电池的组合, 以分配其运行功率.

在情景 1 下: 应尽可能多地对低 SOC 状态的储能电池组进行充电, 以提高其 SOC 至合理的运行范围; 发电系统为储能电池组和直流负载提供电能. 在情景 2 下: 正常 SOC 状态的储能电池组将其 SOC 维持在合理的运行范围内; 能量管理系统通过控制发电系统来维持系统发电和消耗的平衡. 在情景 3 下: 高 SOC 状态的储能电池组应尽可能多地放电, 以降低其 SOC 至合理的运行范围; 发电机继续高效工作以节省燃油消耗. 同时, 可看出对于具有不同初始荷电状态的能量存储电池组, 它们的放电与荷电状态成正比, 充电与荷电状态成反比. 此外, 随着充放电过程的进行, 不同能量存储电池的荷电状态将趋于一致, 充放电功率也将趋于一致.

为分析分层优化能量管理方法的控制效果, 分

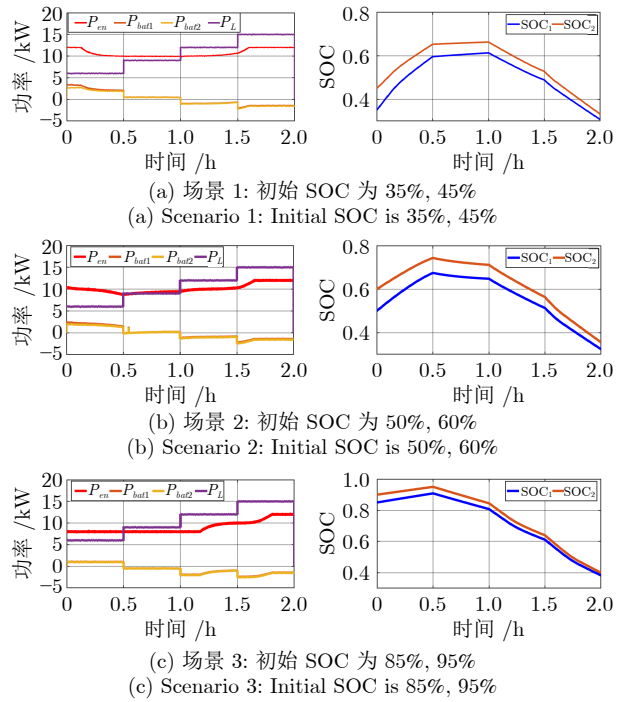


图 10 本文所提能量管理方法

Fig.10 The energy management method proposed in this paper

别将基于传统等效消耗最小策略 (Equivalent consumption minimization strategy, ECMS) 和状态机控制的两种方法应用于混合动力系统. 状态机控制是一种经典的基于规则的控制策略, 如图 11 所示, 通过滞后比较, 将储能电池组的荷电状态分为三个等级: 高、中和低, 其中 SOC_{min1} 和 SOC_{min2} 是低状态界限值, SOC_{max1} 和 SOC_{max2} 是高状态界限值. 在不同荷电状态和所需功率的情况下, 本文采用状态机控制方法通过划分六种运行状态来实现混合动力系统的能源管理, 其控制决策如表 2 所示, 其中 $P_{opt-effi}$ 是发电机组最优输出功率.

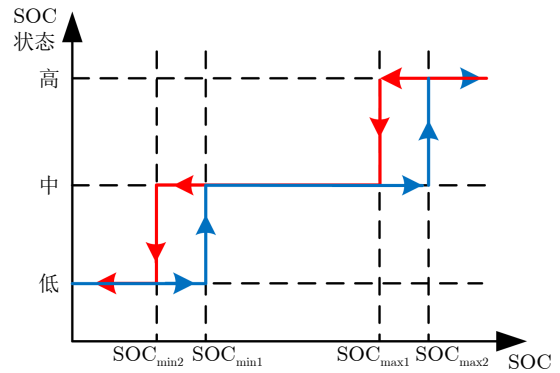


图 11 SOC 状态划分

Fig.11 SOC status division

表 2 基于状态机的能量管理方法
Table 2 Energy management method based on state machine

状态	SOC 水平	特征	运行模式
1	Low	$P_{load} \leq P_{opt-effi}$	$P_{en} = P_{opt-effi}$ $P_{bat} = P_{load} - P_{opt-effi}$
2	Low	$P_{load} > P_{opt-effi}$	$P_{en} = P_{load}$ $P_{bat} = 0$
3	Middle	$P_{load} \leq P_{opt-effi}$	$P_{en} = P_{opt-effi}$ $P_{bat} = P_{load} - P_{opt-effi}$
4	Middle	$P_{load} > P_{opt-effi}$	$P_{en} = P_{opt-effi}$ $P_{bat} = P_{load} - P_{opt-effi}$
5	High	$P_{load} \leq P_{opt-effi}$	$P_{en} = P_{load}$ $P_{bat} = 0$
6	High	$P_{load} > P_{opt-effi}$	$P_{en} = P_{opt-effi}$ $P_{bat} = P_{load} - P_{opt-effi}$

储能电池不同初始 SOC 条件下的实验结果如图 12 ~ 14 所示. 可以看出, 上述方法能实现系统的功率平衡和稳定, 不同能量管理方法的目标不同, 导致系统运行的指标也不同. 如表 3 所示, 传统 ECMS 在不同运行条件下的等效燃油消耗较低; 状态机控制方法以发电机组的最优工作效率作为控制决策的边界条件, 使得混合动力系统展现出更好的系统工作效率. 而本文所提兼顾效率和燃油消耗的能量管理方法表现出更佳的系统运行经济性, 与上述两种方法相比, 它在不同运行条件下能够消耗更少的燃料.

本文通过加载和卸载实验, 验证混合动力系统底层控制的有效性, 如图 15 所示. 图 15(a) 中 V_1 是调整后的电压, 而 V_2 作为比较是调整前的电压. 可以看出, 在 0.5 h 之前, 由于发电机组功率低于负载, 储能蓄电池采用降压控制放电; 随着负载的增加, 会进一步导致母线电压下降, 与额定值偏差增

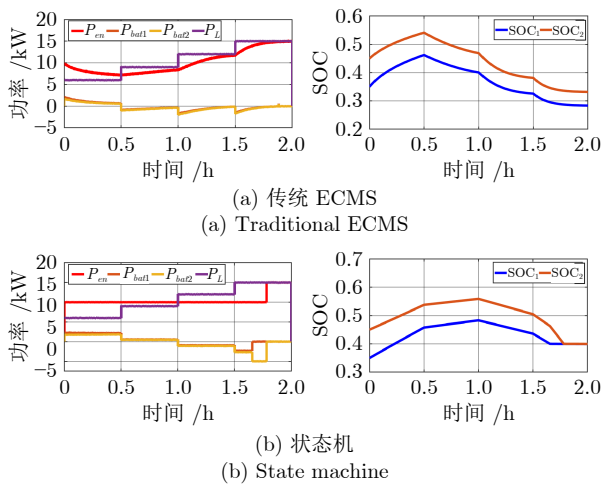


图 12 场景 1: 初始 SOC 为 35%, 45%
Fig. 12 Scenario 1: Initial SOC is 35%, 45%

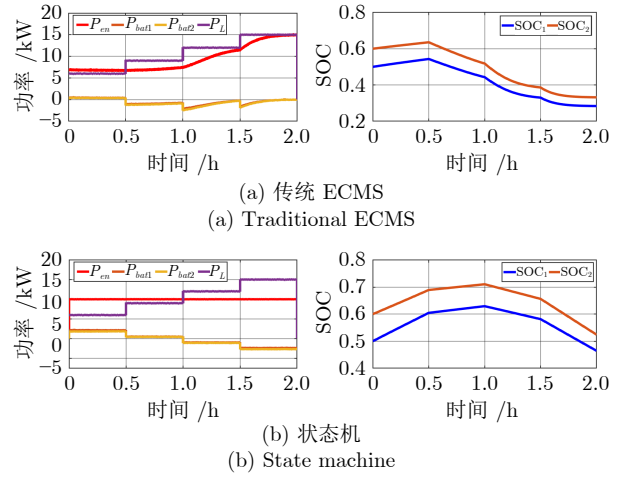


图 13 场景 2: 初始 SOC 为 50%, 60%
Fig. 13 Scenario 2: Initial SOC is 50%, 60%

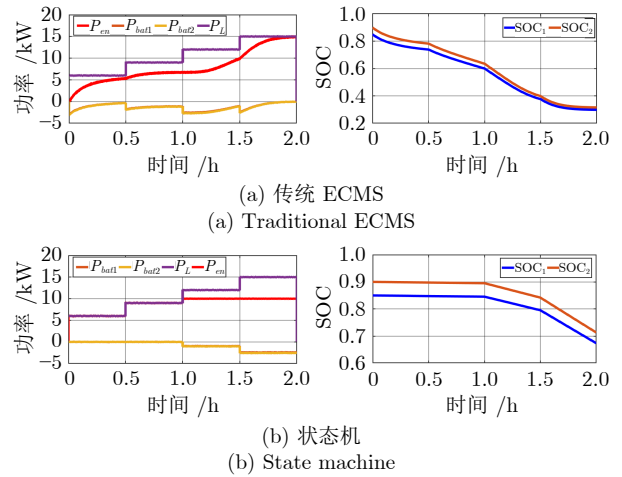


图 14 场景 3: 初始 SOC 为 85%, 95%
Fig. 14 Scenario 3: Initial SOC is 85%, 95%

表 3 不同方法性能比较
Table 3 Performance comparison of different methods

方法	场景	燃油消耗 (kg)	SOC ₁	SOC ₂
本文所提	1	4.78	0.31	0.335
	2	4.35	0.33	0.365
	3	4.18	0.38	0.410
ECMS	1	4.90	0.282	0.325
	2	4.55	0.283	0.326
	3	4.41	0.288	0.325
状态机	1	5.01	0.399	0.399
	2	4.69	0.399	0.398
	3	4.42	0.399	0.399

大. 从图 15(b) 中的 V_2 可以看出, 负载减少后, 发电机组功率高于负载, 储能蓄电池采用降压控制充电, 使得母线电压略高于 270 V. 当使用改进下垂

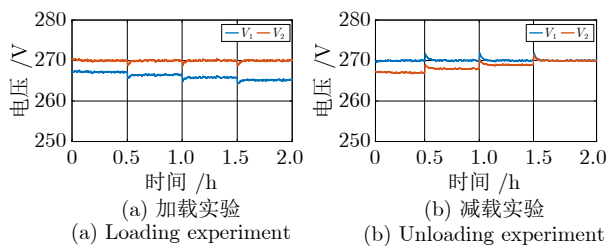


图 15 直流母线电压

Fig. 15 DC bus voltage

方法后, 可以将母线电压稳定调节至额定值 270 V. 加载实验中, 调整前电压的绝对误差积分为 13 923 V·h, 而调整后电压的绝对误差积分为 482 V·h. 减载实验中, 调整前电压的绝对误差积分为 5 443 V·h, 而调整后电压的绝对误差积分为 509 V·h. 可见, 通过采用本文所提方法提高了母线电压的控制精度, 改善了动力系统的供电质量.

4 结束语

首先, 本文所提分层能量管理策略方法通过顶层的发电机组最优工作曲线优化与底层的改进下垂设计, 不仅能提升系统的经济性, 还可对快速负载进行动态响应, 从而维持系统的稳定性. 其次, 所提方法根据储能电池的荷电状态可保障不同能源的消耗处于平衡, 在复杂工况下可维持系统的动力性能, 从而提升系统的稳定可靠性. 通过搭建基于 RT-LAB 的混合动力系统硬件在环半实物实验平台, 对混合动力飞行器的分层能量动态优化控制算法进行验证, 实验结果验证了所提方法在不同飞行工况下的有效性. 未来研究中可进一步分析混合电推进系统在长期运行条件下的衰退特性、能源转换效率波动及寿命管理等问题, 提高控制策略在实际应用场景中的精准性与可靠性. 后续可引入基于数据驱动的智能控制机制, 以提升系统在参数产生误差时的适应性.

References

- Zhang J, Roumeliotis I, Zolotas A. Model-based fully coupled propulsion-aerodynamics optimization for hybrid electric aircraft energy management strategy. *Energy*, 2022, **245**: Article No. 23239
- Bergero C, Candelaria G. Pathways to net-zero emissions from aviation. *Nature Sustainability*, 2023, **6**(4): 404–414
- Li S Q, Gu C H, Xu M H, Li J W, Zhao P F, Shuang C. Optimal power system design and energy management for more electric aircrafts. *Journal of Power Sources*, 2021, **512**(4): Article No. 230473
- Wheeler P, Sirimanna T S, Bozhko S. Electric/hybrid-electric aircraft propulsion systems. *Proceedings of the IEEE*, 2021, **109**(6): 1115–1127
- Zong Jian-An. Design and Energy Management of Hybrid All-electric Propulsion System for Aircraft [Master thesis], National University of Defense Technology, China, 2021. (宗建安. 飞行器混联式全电推进系统设计及能量管理研究 [硕士学位论文], 国防科技大学, 中国, 2021.)
- Thonemann N, Eleonore P, Katarzyna M D, Karen S R, Anna L S, Tromer D, et al. Towards sustainable regional aviation: Environmental potential of hybrid-electric aircraft and alternative fuels. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, **45**: 371–385
- Zhang Dong-Xiao, Chen Ya-Zhou, Cheng Er-Wei, Gao Shu-Kun. Environmental monitoring system suitable for electromagnetic interference adaptation of UAV's datalink. *High Voltage Engineering*, 2020, **46**(6): 2106–2113 (张冬晓, 陈亚洲, 程二威, 高书坤. 适用于无人机数据链电磁干扰自适应的环境监测系统. 高压电技术, 2020, **46**(6): 2106–2113)
- Zhao Xing-Ke, Li Ming-Lei, Zhang Gong, Li Ning, Li Jia-Song. Object detection method based on saliency map fusion for UAV-borne thermal images. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(9): 2120–2131 (赵兴科, 李明磊, 张弓, 黎宁, 李家松. 基于显著图融合的无人机载热红外图像目标检测方法. 自动化学报, 2021, **47**(9): 2120–2131)
- Xiao You-Gang, Man Xiang-Na, Wu Guo-Hua, Luo Qi-Zhang. Surveying and mapping path planning method for UAV-borne SAR considering terrains. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, **44**(17): 218–234 (肖友刚, 满香娜, 伍国华, 罗启章. 考虑地形起伏的机载 SAR 测绘航线规划方法. 航空学报, 2023, **44**(17): 218–234)
- Xiang Jin-Wu, Dong Xi-Wang, Ding Wen-Rui, Suo Jin-Li, Shen Lin-Cheng, Xia Hui. Key technologies for autonomous cooperation of unmanned swarm systems in complex environments. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, **43**(10): 333–365 (向锦武, 董希旺, 丁文锐, 索津莉, 沈林成, 夏辉. 复杂环境下无人集群系统自主协同关键技术. 航空学报, 2022, **43**(10): 333–365)
- Skraparlis A N, Nathanasios K S, Klimis S N, Tsapatsoulis N. A novel framework to intercept GPS-denied, bomb-carrying, non-military, kamikaze drones: Towards protecting critical infrastructures. *Defence Technology*, 2024, **40**: 225–241
- Kong Wu-Bin, Liu Di, Fan Xing-Gang, Pei Xue-Jun, Hao Sheng-Qiao, Cui Ying, et al. Source-grid-load architecture and key technologies of aero-engine multi-electrical control system. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, **46**(2): 6–44 (孔武斌, 刘迪, 范兴纲, 裴雪军, 郝圣桥, 崔颖, 等. 航空发动机多电控制系统源-网-荷架构与关键技术. 航空学报, 2025, **46**(2): 6–44)
- Liu Pei-Song. Research on Energy Management of Multi-electric Aero Engines Based on Predictive Control [Master thesis], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, China, 2021. (刘佩松. 基于预测控制的多电航空发动机能量管理研究 [硕士学位论文], 南京航空航天大学, 中国, 2021.)
- Zhao Xiu-Chun, Guo Ge. Tracking control and energy management of hybrid electric vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(1): 162–170 (赵秀春, 郭戈. 混合动力电动汽车的跟车控制与能量管理. 自动化学报, 2022, **48**(1): 162–170)
- Zhu Bing-Jie, Zhu Ying-Tao, Li Jian-Qi. Fuzzy logic control for hybrid electric propulsion energy management system. *Journal of National University of Defense Technology*, 2023, **45**(6): 32–39 (朱炳杰, 朱莹涛, 李建奇. 混合电推进能源管理系统模糊逻辑控制. 国防科技大学学报, 2023, **45**(6): 32–39)
- Meng J H, Ma N, Meng F M, Zhang X H, Liu L. Energy management strategy of hybrid energy system for a multi-lobes hybrid air vehicle. *Energy*, 2022, **255**: Article No. 124539
- Sum J, Li Z W, Li J Q, Wu G P, Xia Y X. Hybrid power system with adaptive adjustment of weight coefficients multi-objective model predictive control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, **153**: Article No. 109296
- Song Qing-Chao. Study on Dynamic Power Distribution Control and Large Signal Stability of Multi-electric Aircraft Hybrid Power Supply System [Ph.D. dissertation], Chongqing Uni-

versity, China, 2022.

(宋清超. 多电机混合供电系统的动态功率分配控制及大信号稳定性研究 [博士学位论文], 重庆大学, 中国, 2022.)

- 19 Cheng Long. Research on Power Ripple Suppression Technology of Multi-electric Aircraft Based on Hybrid Energy Storage System [Ph.D. dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, China, 2020.
(程龙. 基于混合储能系统的多电机功率脉动平抑技术研究 [博士学位论文], 南京航空航天大学, 中国, 2020.)
- 20 Hosseinipour A, Hojabri H. Small-signal stability analysis and active damping control of DC microgrids integrated with distributed electric springs. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, **11**(5): 3737–3747
- 21 Li X, Wu X. Autonomous energy management strategy for a hybrid power system of more-electric aircraft based on composite droop schemes. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, **129**: Article No. 106828
- 22 Gao P, Li Y, Zheng X, Liu W, Yao W, Hua Z. A decentralized power allocation method based on virtual impedance droop control for pulsed power load in aircraft electrical power system. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, **10**(4): 9016–9030
- 23 Wen Q D, Zhang L S, Liang Z, Liang D L, Liang Y, Yang S Z. Optimized multi-timescale energy management strategy of a novel all-electric aircraft power system unit based on decentralized control. *Journal of Energy Storage*, 2023, **73**: Article No. 108903
- 24 Hussaini H, Yang T, Bai G. Artificial intelligence-based hierarchical control design for current sharing and voltage restoration in DC microgrid of the more electric aircraft. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, **10**(1): 566–582
- 25 Liu Jian-Hong. Research on Energy Management Strategy of UAV Extended-range Hybrid Power Based on Fuzzy Control [Master thesis], Chongqing Jiaotong University, China, 2024.
(刘建宏. 基于模糊控制的无人机增程式混合动力能量管理策略研究 [硕士学位论文], 重庆交通大学, 中国, 2024.)
- 26 Gao Feng-Yang, Zhang Hao-Ran. Adaptive instantaneous equivalent energy consumption optimization of hydrogen fuel cell hybrid electric tram. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, **59**(6): 226–238
(高锋阳, 张浩然. 氢燃料电池混合动力有轨电车的自适应瞬时等效能耗优化. 机械工程学报, 2023, **59**(6): 226–238)
- 27 Recalde A A, Atkin J A, Bozhko S V. Optimal design and synthesis of MEA power system architectures considering reliability specifications. *IEEE transactions on Transportation Electrification*, 2020, **6**(4): 1801–1818
- 28 Han Y, Chen W, Li Q. Two-level energy management strategy for PV-Fuel cell-battery-based DC microgrid. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, **44**(35): 19395–19404



李建奇 分布式电推进飞行器控制技术湖南省重点实验室教授. 主要研究方向为飞行器能量管理与变换控制技术, 传感与检测技术.

E-mail: jianqi_li@126.com

(**LI Jian-Qi** Professor at the Hunan Provincial Key Laboratory of Distributed Electric Propulsion Vehicle Control Technology. His research interests include aircraft energy management and conversion control technology, sensing and detection technology.)

His research interests include aircraft energy management and conversion control technology, sensing and detection technology.)



孙健 分布式电推进飞行器控制技术湖南省重点实验室讲师. 主要研究方向为飞行器能量管理技术. 本文通信作者.

E-mail: hnwlsj0108@huas.edu.cn

(**SUN Jian** Lecturer at the Hunan Provincial Key Laboratory of Distributed Electric Propulsion Vehicle Control Technology. His main research interest is aircraft energy management technology. Corresponding author of this paper.)



杨涛 英国诺丁汉大学教授. 主要研究方向为电力电子技术, 电机与控制技术.

E-mail: tao.yang@nottingham.ac.uk

(**YANG Tao** Professor at the University of Nottingham, UK. His research interests include power electronics technology, motor and control technology.)



曹斌芳 分布式电推进飞行器控制技术湖南省重点实验室教授. 主要研究方向为传感与检测技术, 信号处理技术.

E-mail: cao_bf@163.com

(**CAO Bin-Fang** Professor at the Hunan Provincial Key Laboratory of Distributed Electric Propulsion Vehicle Control Technology. Her research interests include sensing and detection technology, and signal processing technology.)



唐一文 分布式电推进飞行器控制技术湖南省重点实验室讲师. 主要研究方向为多电机技术, 电机控制技术.

E-mail: tangyiwen@foxmail.com

(**TANG Yi-Wen** Lecturer at the Hunan Provincial Key Laboratory of Distributed Electric Propulsion Vehicle Control Technology. His research interests include more-electric-aircraft technology, and motor control technology.)



鲁建权 分布式电推进飞行器控制技术湖南省重点实验室博士研究生. 主要研究方向为飞行器控制技术.

E-mail: luffyzik@gmail.com

(**LU Jian-Quan** Ph.D. candidate at the Hunan Provincial Key Laboratory of Distributed Electric Propulsion Vehicle Control Technology. His main research interest is aircraft control technology.)