

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.06.007

## 多旋翼混合动力无人机自适应能量管理策略仿真

杨明堂<sup>1,2</sup>, 胡春明<sup>1,2</sup>, 徐胤泽<sup>1</sup>, 杜春媛<sup>2</sup>

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学内燃机研究所, 天津 300072)

**摘要:** 为提高多旋翼混合动力无人机的运行稳定性、输出动力性和能量利用率, 利用 GT-Power 和 Simulink 进行模型联合搭建, 对比基于规则的能量管理策略及等效燃油最小消耗能量管理策略 (Equivalent consumption minimization strategy, ECMS), 设计开发了基于 BP (Back propagation) 神经网络优化的自适应 ECMS (Adaptive-ECMS, A-ECMS)。仿真研究表明: A-ECMS 在运行稳定性上, 整体工况转速波动率为 7.74%, 较基于规则策略和 ECMS 都有明显降低; A-ECMS 在复合扰动下和随机紊流下转速波动率分别为 8.32%、7.18%, 与基于规则策略和 ECMS 相比在突发工况下运行更为稳定。A-ECMS 能有效提高混合动力系统动力性能, 使发动机处于经济工况 10 kW; 可根据荷电状态 (State of charge, SOC) 变化实时对电池功率进行调整。A-ECMS 平均燃油消耗率为 297.585 g/(kW·h), 整体燃油消耗量为 3 755.31 g, 与基于规则策略和 ECMS 相比明显较低, 在各工况下运行时发动机工况点集中于燃油经济区, 有效提高了系统经济性。

**关键词:** 多旋翼无人机; 混合动力; BP 神经网络; 自适应最小消耗能量管理策略; 能量管理

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)06-1004-12

## Simulation of Adaptive Energy Management Strategy for Multi-rotor Hybrid UAVs

YANG Mingtang<sup>1,2</sup>, HU Chunming<sup>1,2</sup>, XU Yinze<sup>1</sup>, DU Chunyuan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Internal Combustion Engine Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to improve the operating stability, output power and energy utilization of multi-rotor hybrid drones, GT-Power and Simulink are used to jointly build models, and rules-based consumption management strategy and equivalent consumption minimization strategy (ECMS) are compared. Adaptive-ECMS (A-ECMS) based on back propagation (BP) neural networks optimization is designed and developed. Simulation shows that in terms of operational stability of A-ECMS, the overall operating speed fluctuation rate is 7.74%, which is significantly lower than those of the rule-based strategy and ECMS. The speed fluctuation rate of A-ECMS under compound disturbance and random turbulence is 8.32%, 7.18%, respectively. Compared with rule-based strategy and ECMS, it operates more stably under emergency conditions. A-ECMS can effectively improve the power performance of the hybrid system, allowing the engine to operate at an economical operating condition of 10 kW, and the battery power can be adjusted in real time according to changes in the state of charge (SOC). The average fuel consumption rate of A-ECMS is 297.585 g/(kW·h), and the overall fuel consumption is 3 755.31 g, which is significantly lower than those of the rule-based strategy and ECMS. The engine operating points are concentrated in the fuel economy zone

**基金项目:** 国家自然科学基金(51476112)。

**收稿日期:** 2023-10-19; **修订日期:** 2023-11-30

**通信作者:** 胡春明, 男, 研究员, E-mail: cmhu@tju.edu.cn。

**引用格式:** 杨明堂, 胡春明, 徐胤泽, 等. 多旋翼混合动力无人机自适应能量管理策略仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(6): 1004-1015. YANG Mingtang, HU Chunming, XU Yinze, et al. Simulation of adaptive energy management strategy for multi-rotor hybrid UAVs[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(6): 1004-1015.

when running under various operating conditions. The proposed method can effectively improve system economy.

**Key words:** multi-rotor unmanned aerial vehicle; hybrid power; back propagation (BP) neural network; adaptive equivalent consumption minimization strategy (A-ECMS); energy management

无人机技术已经应用到军事、民用等诸多领域。作为无人机技术的核心,动力系统关乎无人机性能优劣。传统活塞式内燃机虽然动力性能好,可靠性高<sup>[1]</sup>,但是启动响应时间长,噪声、油耗、排放偏高。电动无人机相较于前者震动小、隐身性能优异,且零排放,能量利用率较高<sup>[2]</sup>,但是动力电池能量密度较低<sup>[3]</sup>,续航有限,应用领域受到限制。混合动力无人机同时兼备续航里程长、运行平稳可靠、低排放、低油耗等诸多优点,逐渐成为如今最具研发前景的新型航空动力系统之一。

混合动力无人机系统构型分为串联型、并联型及混联型。并联式结构中发动机直接驱动螺旋桨,限制了能量转换效率<sup>[4]</sup>。混联式结构较为复杂,成本和策略优化困难。而串联式系统发动机与螺旋桨实现解耦,使发动机运行在经济工作区<sup>[5]</sup>,因此采用串联构型。

能量管理策略是混合动力无人机具有动力性、低油耗、低排放的关键。控制策略的最优化,可以保障混合动力系统实现合理的工作模式切换和动力源输出分配<sup>[6]</sup>。国内外对混合动力无人机能量管理策略研究已取得诸多进展,Zhang等<sup>[7]</sup>为提高燃油率和电池寿命,提出了在线模糊能量管理策略。Lei等<sup>[8]</sup>提出一种改进模糊策略以提高动力系统的燃料利用率。Mohamed等<sup>[9]</sup>对无人机的电池配置和能量利用策略进行了全面研究。胡春明等<sup>[10]</sup>采用双模糊控制策略并使用遗传算法对控制参数进行优化。张晓辉等<sup>[11]</sup>研究了燃料消耗最小的能源管理与航迹规划耦合最优控制问题。

基于规则的控制策略包含确定规则和模糊逻辑,而该类控制策略无法充分发挥混合动力无人机的节能潜力。基于优化的控制策略分为全局优化和瞬时优化,全局优化如动态规划算法(Dynamic programming, DP)可解决混合动力最优分配问题,但是DP存在“维数灾”且计算烦琐,依赖于全局工况<sup>[12]</sup>。目前等效燃油消耗最小策略(Equivalent consumption minimization strategy, ECMS)<sup>[13]</sup>因其优化性能和实时控制的优势应用最为广泛。ECMS作为一种瞬时优化策略,可以将动力电池电量消耗等效为燃油消耗,通过寻优确定等效因子使总等效消耗最小。合适的等效因子可使ECMS获得接近全局最优解的控制效果,但是基于优选固定等

效因子的ECMS工程适用性差,因此需要找到一种可以根据实际工况实时对等效因子进行寻优的控制策略使ECMS实现自适应性。

本文针对多旋翼无人机串联式混合动力系统进行GT-Power和Simulink联合建模仿真,对比了基于规则的能量管理策略及ECMS,提出了基于BP(Back propagation)神经网络优化的等效因子自适应优化机制,建立自适应ECMS(Adaptive-ECMS, A-ECMS)能量管理策略。研究在不同工况下各算法在运行稳定性、动力系输出和能量利用率方面的表现,并验证A-ECMS的工程适应性。为多旋翼无人机混合动力构型实际工程化提供参考。

## 1 无人机混合动力系统

### 1.1 系统基本构型

无人机电油混合动力系统是指通过活塞发动机驱动发电机发电,联合动力电池一起为电动机提供电力,并由电动机通过传动装置驱动旋翼,用来提供无人机运行所需推力的新型推进形式。

所采用的无人机架构为四旋翼串联型,主要结构包括动力装置、智控及通讯系统、机械部件以及任务载重,如图1所示。

无人机动力装置主要作用是无人机系统提供飞行动力,是无人机系统起动、飞行、降落整个运行阶段中最核心的部件,包括航空发动机、启动/发电一体启动发电一体电机(Integrated starter generator, ISG)电机、AC/DC转换器、动力电池、电子调速器、螺旋桨以及旋翼电机。智控及通信系统是

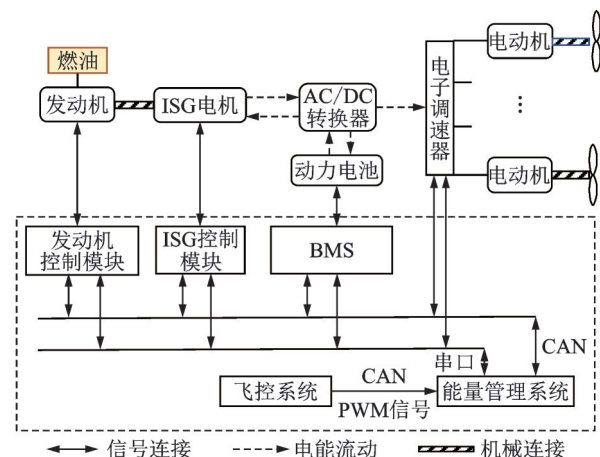


图1 无人机串联式混合动力系统架构

Fig.1 Tandem hybrid system architecture of unmanned aerial vehicles

为无人机提供飞行意图、与基站进行通信、能量管理和分配的中央处理单元,包括电子控制单元(Electronic control unit, ECU)、电池管理模块、动力装置控制模块以及通信总线。机械部件和任务载重主要是为无人机系统提供结构支撑和满足飞行任务需要。

在整个无人机系统运行过程中,ISG电机首先为发动机提供启动动力,能量管理系统根据动力电池荷电状态(State of charge, SOC)和螺旋桨轴上所需功率来分配合理的能量流以提供飞行器稳定飞行所需的动力,在低负荷时,螺旋桨所需功率由动力电池提供,必要时发动机为动力电池充电;在大负荷时,动力电池无法提供所需功率,此时输出功率由发动机与动力电池联合供给。在飞行过程中,能量管理系统可以使发动机始终稳定运行在最佳工况,以实现良好的燃油经济性和排放指标。

1.2 发动机、动力电池

混合动力无人机系统所选用的发动机为1台DA170型双缸水平对置二冲程航空发动机,该款发动机兼具运转平稳性和低噪音,还具有优异的功重比、可靠性和耐用性。满足系统高效率、稳定性、低噪音目标,其主要结构参数见表1。发动机万有特性参数由台架试验与GT-Power建模仿真标定得到,如图2所示。

表1 DA170航空发动机主要参数

Table 1 Main parameters of DA170 aero engine

参数	数值
缸径×行程/(mm×mm)	52×40.5
排量/ml	171.8
功率/kW	14.5
发动机质量/g	3 650
转速范围/(r·min <sup>-1</sup> )	1 100~9 000

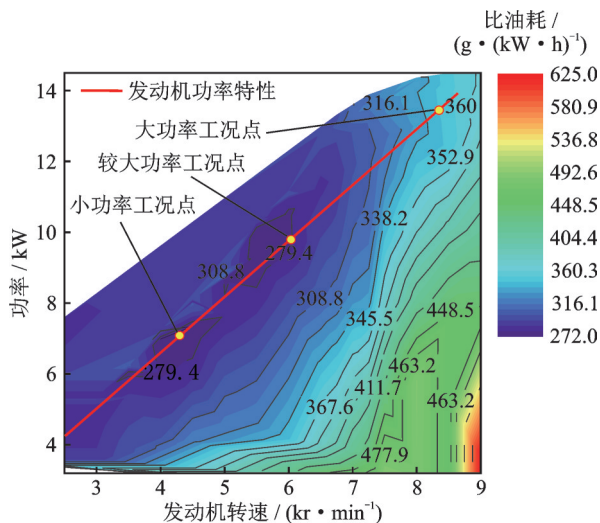


图2 发动机万有特性图

Fig.2 Engine universal characteristic diagram

选用的动力电池为锂电池,作为系统的蓄能装置,其充放电特性受多因素影响,如SOC、电池内阻、温度、开路电压等,且在不同因素下表现出不同的充放电特性<sup>[14-15]</sup>。电池模型分为RC模型、内阻模型以及Thevenin模型,采用内阻模型来建立理想的电池模型,如图3所示。

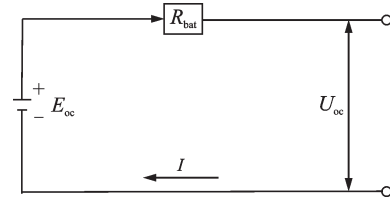


图3 电池等效电路模型

Fig.3 Battery equivalent circuit model

假设温度影响忽略不计,电池内阻和开路电压只是SOC的函数,由等效电路模型可得

$$U_{oc} = E_{oc} - R_{bat}I \tag{1}$$

$$P_b = U_{oc}I \tag{2}$$

式中: $U_{oc}$ 为电池端电压; $E_{oc}$ 为电池开路电压; $R_{bat}$ 为电池内阻,采用固定值 $0.04 \Omega$ ; $I$ 为电池电流; $P_b$ 为电池充/放电功率。

根据式(3)计算出电池电流

$$I = \frac{E_{oc} - \sqrt{E_{oc}^2 - 4R_{bat}P_b}}{2R_{bat}} \tag{3}$$

电池SOC计算方法有安时积分法、内阻法、电压法等,采用安时积分法计算

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_0^t I(t)dt}{Q_{bat}} \tag{4}$$

式中: $SOC(t)$ 为时刻 $t$ 的SOC值, $SOC_0$ 为初始SOC值, $Q_{bat}$ 为额定电池容量(Ah)。

动力电池主要参数如表2所示。

表2 动力电池参数

Table 2 Power battery parameters

参数	数值
标称电压/V	48
额定容量/(Ah)	30
标准充电电流/A	30
标准放电电流/A	150

1.3 ISG发电机、旋翼电机

无人机系统搭载ISG电机和无刷直流电机,ISG电机与航空发动机同轴相连,主要功能是为发动机启动提供动力以及将发动机扭矩转化为电能对电池充电和为无刷直流电机供电,根据系统工作状态,ISG电机在发电机与电动机之间切换,式(5,6)是ISG作为发电机和驱动电机功率输出计算公式,单位为kW。



$$P_g = \frac{\pi T_g n_g}{30\,000n} \eta_g \quad (5)$$

$$P_m = \frac{\pi T_m n_m}{30\,000} \eta_m \quad (6)$$

式中:下标g为ISG电机发电,下标m表示电动机动力输出, $T$ 为对应的转矩, $n$ 为转速, $\eta$ 为对应的效率。

无刷直流电机为螺旋桨提供驱动力,并为其配备了相应的电子调速器,不同于固定翼无人机,多旋翼无人机完全依靠电动机驱动产生推力为混合动力无人机系统提供飞行动力。

ISG电机效率及外特性曲线如图4所示,可通过插值法得到不同工作状态下的发动机效率及功率。

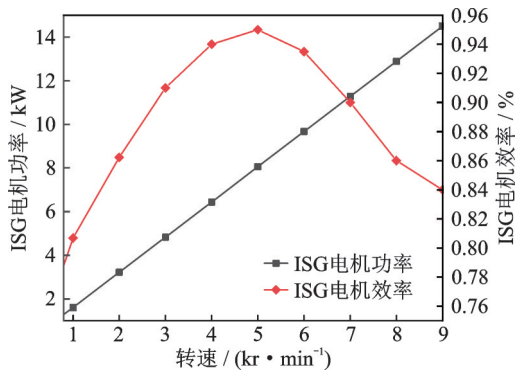


图4 ISG电机特性曲线图

Fig.4 Characteristic curves diagram of ISG motor

ISG电机具体参数如表3所示。

表3 ISG电机参数

Table 3 ISG motor parameters

参数	数值
转子直径/mm	201
转子厚度/mm	40
6 500 r/min 额定功率/kW	10.3
适用发动机排量/ml	150~690
功率密度/(W·kg <sup>-1</sup> )	2 575

无刷直流电机作为旋翼电机,等效电压和等效电流计算为

$$U_{\text{motor}} = \left( \frac{M_{\text{motor}} K_{V0} U_{m0}}{9.55(U_{m0} - I_{m0} R_{\text{motor}})} + I_{m0} \right) R_{\text{motor}} + \frac{U_{m0} - I_{m0} R_{\text{motor}}}{K_{V0} U_{m0}} N_{\text{motor}} \quad (7)$$

$$I_{\text{motor}} = \frac{M_{\text{motor}} K_{V0} U_{m0}}{9.55(U_{m0} - I_{m0} R_{\text{motor}})} + I_{m0} \quad (8)$$

式中: $M_{\text{motor}}$ 表示电机负载转矩, $N_{\text{motor}}$ 表示电机转速, $K_{V0}$ 为空载下标称 $K_V$ 值, $R_{\text{motor}}$ 为电机内阻, $U_{m0}$ 为电机空载下标称电压, $I_{m0}$ 为空载下标称电流值,具体参数见表4。

表4 旋翼电机参数

Table 4 Rotor motor parameters

参数	数值
旋翼电机直径/mm	110.4
旋翼电机厚度/mm	60.4
最大功率/kW	6.9
旋翼电机质量/kg	1.5
最大电流/A	138

#### 1.4 螺旋桨模型

螺旋桨在建模过程中,其参数特征主要分为几何特性、空气动力特性和运动特性<sup>[16]</sup>,其中几何特性决定了其尺寸和长度,包括直径、桨叶数、叶宽和螺距(表5);空气动力特性包括拉力、功率和效率;运动特性影响最大的是桨叶速度。

表5 螺旋桨模型参数

Table 5 Propeller model parameters

参数	数值
直径/m	0.76
桨叶数/个	2
叶宽/m	12
螺距/m	0.30

在无人机系统运行过程中,单个旋翼拉力和扭矩计算为

$$T = C_T \rho_{\text{air}} \left( \frac{n}{60} \right)^2 D_p^4 \quad (9)$$

$$M = C_M \rho_{\text{air}} \left( \frac{n}{60} \right)^2 D_p^5 \quad (10)$$

式中: $C_T$ 、 $C_M$ 为螺旋桨拉力系数和转矩系数, $\rho_{\text{air}}$ 为无人机周围的空气密度, $n$ 为螺旋桨转速, $D_p$ 为螺旋桨直径。由式(9,10)联立得到的旋翼电机转速和转矩相乘即可得单个旋翼输出轴功率<sup>[17]</sup>。

## 2 无人机系统能量管理策略

能量管理策略是混合动力系统多动力源之间实现能量合理分配的关键技术,主要体现在动力输出分配控制、电池系统管理、可靠性和控制优化等方面,策略的优劣对整个系统的燃油经济性、动力特性以及稳定性有较大影响,主要体现在:

(1)通过ISG电机带动航空发动机启动,避开发动机启动时出现的低效率区;

(2)发动机采用怠速停机的方式,降低发动机怠速油耗;

(3)通过对转矩、功率进行分配来修正发动机工作点,避免发动机运行在低效率区,提升系统整体效率。

以A-ECMS控制策略为研究对象,探究该策

略对混合动力系统能量合理分配问题,并通过BP神经网络对该策略进行进一步优化,实现优选等效因子的自适应性特征,并验证其有效性。作为对照,选用基于规则的逻辑门限策略和基于瞬时优化的ECMS作为评价算法,对比分析3种能量控制策略,为混合动力无人机实际运行控制提供参考。

### 2.1 基于规则的能量管理策略

基于规则的能量管理策略根据发动机的最佳工况点、SOC以及系统需求功率 $P_r$ 来进行能量分配<sup>[18]</sup>,使系统尽可能运行在高效率区间,无人机系统工作状态主要分为纯电驱动、运行充电、发动机单独驱动、混合驱动模式。在整个运行过程中,根据 $P_r$ 以及SOC得到ISG电机输出功率 $P_{isg}$ 后即可对发动机转速进行控制。

该策略模式切换规则与功率分配如表6所示,其中 $P_r$ 、 $P_{isg}$ 、 $P_b$ 分别为系统需求功率,ISG电机输出功率和电池输出/充电功率, $P_{isg,min}$ 、 $P_{isg,opt}$ 、 $P_{isg,max}$ 分别为ISG电机最小输出功率,发动机经济工况曲线对应的ISG电机输出功率和ISG电机最大输出功率,分别为5、10、12.6 kW。SOC<sub>low</sub>、SOC<sub>obj</sub>分别为电池充放电时的SOC最低阈值(30%)和运行充电阈值(50%),在各模式中系统单个旋翼需求功率由式(7)和式(8)相乘得到。

表6 基于规则的能量管理策略模式切换及功率分配

Table 6 Mode switching and power allocation of rule-based energy management strategy

工作模式	模式切换	功率分配
纯电驱动	$P_r < P_{isg,min}$ $SOC > SOC_{low}$	$P_{isg} = 0$ $P_b = P_r$
运行充电	$P_r < P_{isg,opt}$ $SOC < SOC_{obj}$ $P_{isg,opt} < P_r < P_{isg,max}$ $SOC < SOC_{obj}$	$P_{isg} = P_{isg,opt}$ $P_b = P_{isg,opt} - P_r$ $P_{isg} = P_{isg,max}$ $P_b = P_{isg,max} - P_r$
发动机单独驱动	$P_{isg,min} < P_r < P_{isg,max}$ $SOC > SOC_{obj}$	$P_{isg} = P_{isg,opt}$
混合模式	$P_r > P_{isg,max}$ $SOC > SOC_{low}$	$P_{isg} = P_{isg,max}$ $P_b = P_r - P_{isg,max}$

### 2.2 等效燃油最小消耗策略

基于规则策略模式切换简单,运算速度快,因此实际应用广泛。但经济性与稳定性相比于基于优化控制策略差距较为明显,且工程适用性较差。为满足对无人机系统在各工况下的实时性优化控制,开展了ECMS研究,其核心是将电池的电能消耗与存储等效为燃油消耗<sup>[19]</sup>,并根据庞特里亚金极小值原理(Pontryagin's minimum principle, PMP)计算出每一个周期中发动机与电池最优能量分配,以实现总油耗最小。该策略将全局优化问

题转化为瞬时优化问题,计算效率高,便于进行实车控制。

瞬时等效燃油消耗量

$$\dot{m}_{f,eq}(u(t), t) = \dot{m}_f(u(t)) + \dot{m}_{bat}(u(t)) \quad (11)$$

式中: $\dot{m}_{f,eq}(t)$ 为等效燃油消耗; $\dot{m}_f(t)$ 为发动机燃油消耗量; $\dot{m}_{bat}(t)$ 为电池等效燃油消耗量,其值大小与等效因子相关。

其中由动力电池提供的等效燃油消耗量为

$$\dot{m}_{bat}(u(t), t) = K_{SOC} s(t) \frac{P_{bat}(u(t), x(t))}{Q_{lhw}} \quad (12)$$

$$P_{isg} + P_{bat} = P_r \quad (13)$$

式中: $s(t)$ 为等效因子; $K_{SOC}$ 为惩罚因子,用以约束SOC处于安全范围; $P_{bat}$ 为电池充放电功率; $Q_{lhw}$ 为燃料低位热值。

$s(t)$ 的选取随着无人机飞行工况、发动机工况点以及 $P_r$ 的不同而改变,联合优选固定等效因子。 $K_{SOC}$ 用以约束SOC处于安全范围。选取ISG电机输出功率作为控制变量 $u(t)$ ,SOC作为状态变量 $x(t)$ ,其中惩罚因子的表达式为

$$K_{SOC} = \alpha \left( \frac{2(S_{OC,t} - S_{OC}(t))}{S_{OC,max} - S_{OC,min}} \right)^{2b+1} + 1 \quad (14)$$

式中: $\alpha$ 为比例系数,取值范围为 $[0, 1]$ ;  $b$ 为阶次系数, $b$ 取1; $S_{OC,t}$ 为目标SOC值, $S_{OC,t}$ 取0.5;SOC限定值为 $S_{OC,max}=0.8$ , $S_{OC,min}=0.3$ 。比例系数 $\alpha$ 为经验值,随着SOC限定值的不同而改变,当SOC= $S_{OC,max}$ 时,令 $K_{SOC}=0$ ,则 $\alpha=0.5787$ 。

根据选定参数,惩罚因子与SOC呈负相关,当SOC= $S_{OC,t}$ 时, $K_{SOC}=1$ ,不会影响等效燃油消耗量的比例;当SOC= $S_{OC,max}$ 时, $K_{SOC}=0$ ,此时电池等效燃油消耗量为0,优先电池功率输出;当SOC= $S_{OC,min}$ 时, $K_{SOC}>1$ ,电池等效燃油消耗量会明显偏大,倾向于发动机功率输出。最终ECMS根据当前的飞行工况并结合SOC、发动机功率、负载功率变化实时寻优得到最小燃油消耗量。

### 2.3 基于BP神经网络优化的ECMS

等效因子作为电能消耗与虚拟等效油耗的桥梁,对该策略至关重要,不同等效因子的选取会改变混合动力系统动力源分配,进而影响发动机和电池的工作状态。

BP神经网络是一种按照误差反向传播训练的多层前馈神经网络,通过对数据的训练和学习来调整网络中各层神经元权重和偏置,然后根据训练结果和真实输出之间的误差不断更新网络权重和偏置,使误差的均方差逐步减小<sup>[20]</sup>。由于网络的不断训练,使得BP神经网络具有强大的学习能力和综合分析能力。网络模型训练过程如图5所示。

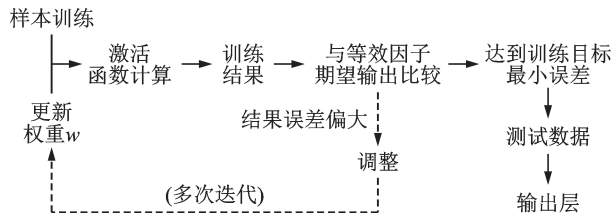


图 5 BP神经网络训练过程

Fig.5 BP neural network training process

根据无人机系统的特征参数,以发动机转速、SOC、 $P_r$ 以及当前节气门位置为BP神经网络的输入参数,以等效因子 $s(t)$ 作为输出参数,隐含层数为2层,将BP神经网络瞬时优化后的等效因子 $s(t)$ 应用于ECMS中,其原理图见图6<sup>[21]</sup>。

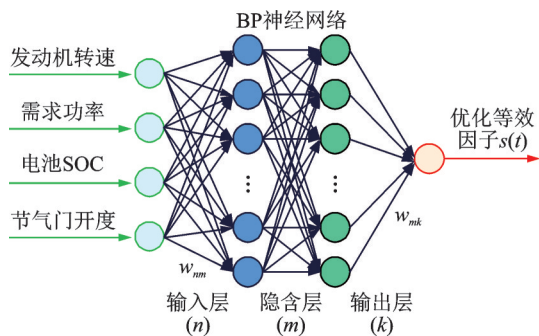


图 6 BP神经网络模型<sup>[21]</sup>

Fig.6 BP neural network model

取神经网络输出参数等效因子限定区间为 $[2.5, 6.5]$ ,通过实验仿真计算出发动机转速、电池SOC、需求功率以及当前节气门位置4个输入参数与不同等效因子的链接关系,并作为期望进行神经网络模型训练,最后通过拟合出来的神经网络模型就能根据4个输入量拟合任意非线性函数,实时预测修正后的等效因子。模型训练过程中参数设置见表7。

表 7 BP神经网络参数设置

Table 7 BP neural network parameterization

参数	数值
BP网络层数	4
样本数量	3 600
隐含层第1层节点数	50
隐含层第2层节点数	30
最大训练次数	1 000
训练目标最小误差	0.000 1
学习率	0.01

为防止神经元数目选取过少所导致的欠拟合以及选取过多导致的过拟合问题,采用双隐含层神经网络,将隐含层节点处理为较大的第1层并在其后跟随较小的第2层,在解决神经元拟合问题的前

提下使神经元性能得到更大的提升。

除隐含层层数的影响外,在模型训练中隐含层节点个数对BP性能也有很大影响,通过经验公式15进行迭代选用合适的隐含层节点数<sup>[22]</sup>。

$$\sum_{i=0}^n C_m^i > k \quad (15)$$

式中: $m$ 为隐含层节点个数, $n$ 为输入层节点数, $k$ 为样本数量。

在迭代结束前,计算误差函数来寻找其最小值,根据误差函数进行权重的迭代更新,其中误差函数和权重更新的公式为

$$\text{Loss} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - (\omega x_i + b))^2 \quad (16)$$

$$\omega_{(t+1)} = \omega_{(t)} - \eta \frac{\partial \text{Loss}}{\partial \omega} + a [\omega_{(t)} - \omega_{(t-1)}] \quad (17)$$

式中: $y_i$ 为训练结果, $\hat{y}_i$ 为期望值, $\omega$ 为权重, $b$ 为偏置, $a$ 为平滑因子。

在总样本中随机选取70%作为训练集数据,15%作为验证集数据,其余15%作为测试集数据。网络模型训练算法采用Levenberg-Marquardt,节点传递函数采用Purelin,反向传播采用梯度下降法进行迭代更新。根据上述流程对样本进行训练,训练后的均方误差如图7所示。

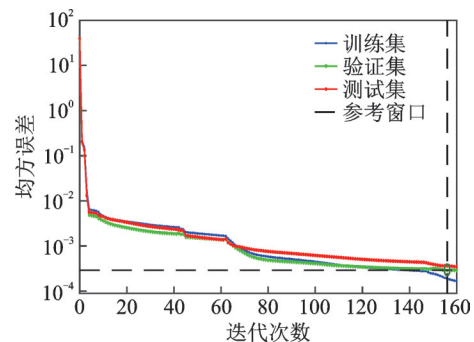


图 7 BP神经网络均方误差

Fig.7 BP neural network mean square error

图7中参考窗口根据验证集迭代后的均方误差确定,以寻找迭代更新后的权重最优值。训练集、验证集与测试集样本在进行神经网络迭代156次后达到训练精度,均方误差为0.000 29,此时网络输入与输出的均方误差已趋于稳定,达到良好的训练效果。

网络训练后的输入输出相关性和拟合度如图8所示,训练集、验证集和测试集数据都达到很好的拟合,满足训练精度。

BP神经网络根据飞行工况对等效因子进行动



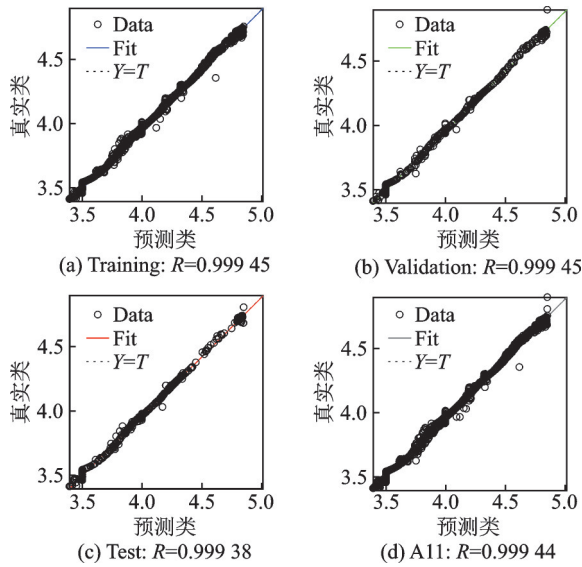


图8 BP神经网络训练拟合度  
Fig.8 BP neural network training goodness of fit

态调整,在整个飞行工况下优化后的等效因子轨迹如图9所示。

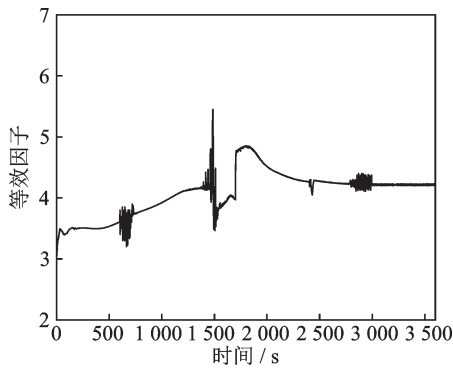


图9 等效因子优化轨迹  
Fig.9 Equivalent factor optimization trajectory

如图10所示为A-ECMS能量管理策略总体流程图,首先通过发动机转速、SOC、需求功率和当前节气门开度进行BP神经网络模型训练以输出动态等效因子,A-ECMS控制器根据当前运行工

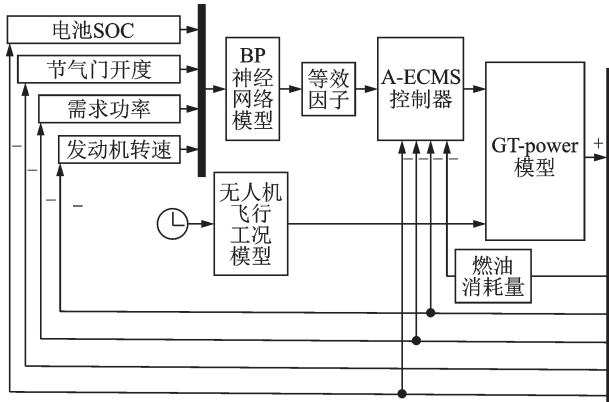


图10 A-ECMS能量管理策略总体流程图  
Fig.10 Overall flowchart of A-ECMS energy management strategy

况计算发动机功率与电池功率的最优分配实现等效最小油耗量来输出目标节气门开度,再通过GT-Power动力模型进行输出反馈调节,实现了自适应能量管理策略的闭环控制。

### 3 系统仿真与结果分析

#### 3.1 仿真模型

##### 3.1.1 无人机系统仿真工况

无人机仿真工况可分为:

(1)由于无人机工作环境的气象条件相差较大,因此在飞行时有着极其复杂的动力学特性,会遇到各种大气扰动如典型的随机紊流和离散突风<sup>[23]</sup>。

(2)自身由于发动机等动力部件运转的机动过程所产生的复合型扰动,该扰动被看作是正弦波和随机扰动的叠加,用来模拟无人机急加速急减速以及气流扰动过程,以及由于机械摩擦所造成的系统功率随机小幅度扰动。

(3)无人机系统在运行过程中的基础工况包括起飞、低速巡航、高速飞行3个基础阶段。

根据无人机实际飞行状态设置上述3种状态的飞行工况,在满足系统输出功率以及SOC维持在安全范围前提下,保证无人机长时间续航要求。设定最大起飞功率12 kW,高速飞行功率16 kW,低速巡航飞行功率维持在8~12 kW之间,总飞行时间1 h,研究混合动力无人机系统稳定性、动力性和经济性,如图11所示<sup>[10]</sup>。

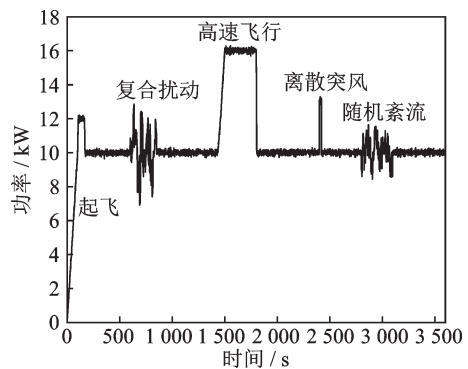


图11 无人机系统飞行工况<sup>[10]</sup>  
Fig.11 Flight conditions of the unmanned aerial vehicle

##### 3.1.2 无人机系统整体模型

利用一维模型软件GT-Power和MATLAB/Simulink,联合搭建无人机动力系统模型以及无人机能量控制器,包括发动机模型、ISG电机模型、动力电池模型、旋翼电机模型、螺旋桨模型以及能量管理控制模型,如图12所示。

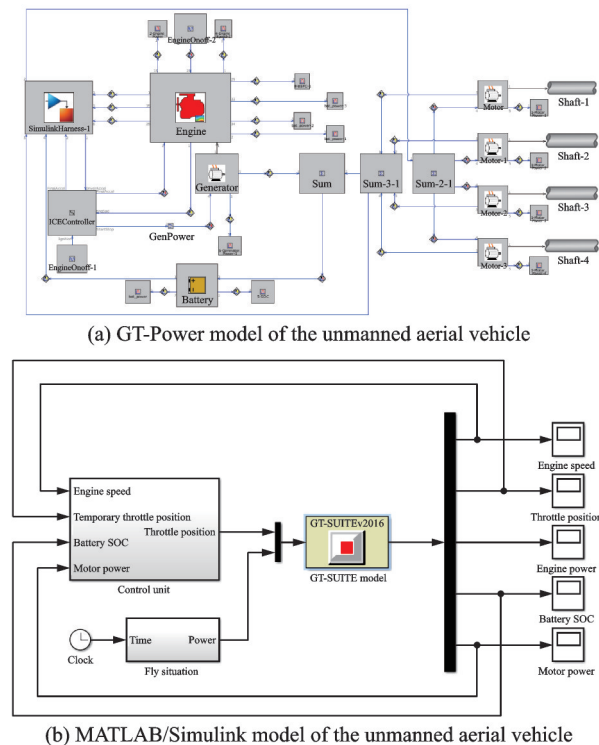


图 12 无人机系统整体模型

Fig.12 Overall models of the unmanned aerial vehicle system

3.1.3 系统模型验证

为验证 GT-Power 中活塞式航空发动机模型的准确性,本文根据发动机标定实验得到的外特性数据进行仿真模型验证,由仿真模型外特性工况下得到的发动机转速、功率与实际航空发动机实验数据进行对比分析,如图 13 所示,最终 GT-Power 模型数据与发动机实验数据的最大误差控制在 5% 以内,验证了模型的准确性。

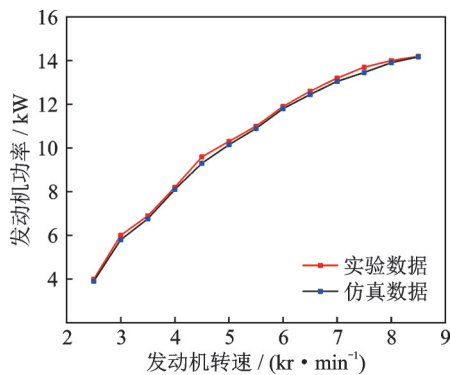


图 13 仿真与实验数据发动机功率对比

Fig.13 Comparison of engine power between simulation and experimental data

本文电池模型采用内阻模型,模型只计算了电池充放电与功率特性,且在大量工作中验证了该模型的模拟精度,其内阻参数常用于汽车与无人机电动力电池模型,适用于本文电池仿真研究。螺旋桨与

旋翼电机相连,模型准确与否主要表现为电机轴需求功率反馈上,因此对飞行工况取 180 个参数点作为需求功率输入,根据旋翼电机轴上功率公式进行计算得到理论需求功率,如图 14 所示,可以看出需求功率理论值与模拟值最大误差为 4.1%,满足仿真精度。为验证 ISG 电机模型的准确性,本文在 2 000~8 000 r/min 之间对应 200 个参数点进行 ISG 电机功率仿真验证,由仿真模型得到电机输出功率模拟值与理论值对比,如图 15 所示,可以看出模拟值与理论值最大误差为 3.8%,整体电机模型满足要求。

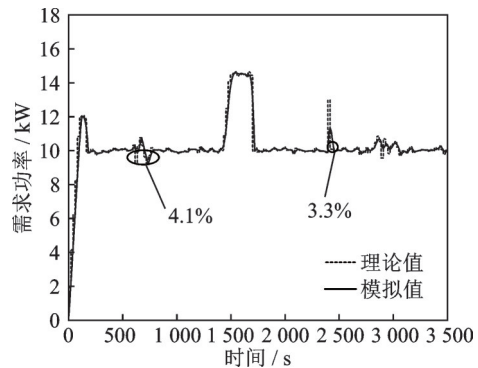


图 14 螺旋桨与旋翼电机模型验证

Fig.14 Propeller and rotor motor model validation

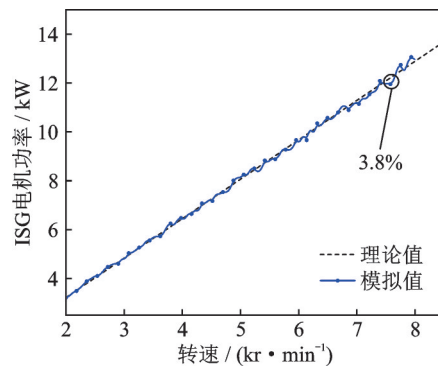


图 15 ISG 电机模型验证

Fig.15 ISG motor model validation

3.2 策略仿真对比分析

通过搭建 GT-Power 和 MATLAB/Simulink 模型,将基于规则的能量管理策略、ECMS 和 A-ECMS 能量管理策略进行仿真结果对比分析,并从无人机系统的稳定性、动力性、经济型等方面验证 A-ECMS 的实时控制效果。

3.2.1 无人机系统稳定性对比

图 16 为无人机系统不同控制策略下的 SOC 变化对比,可以看出在不同阶段电池功率下降趋势不同。基于规则策略在前期 SOC 较高的情况下电池输出功率过低,而到高负荷状态,在 SOC 较小时



电池处于高功率,整个过程不利于电池安全,动力输出模式调整过于机械。

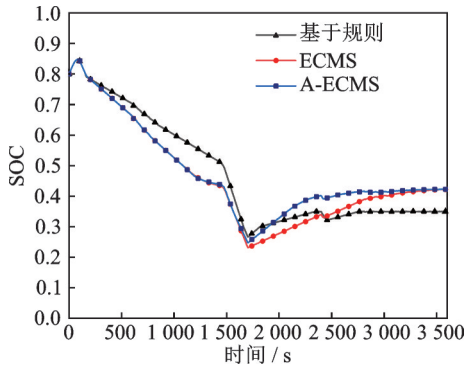


图16 不同能量管理策略下SOC对比

Fig.16 Comparison of SOC under different energy management strategies

而 ECMS 和 A-ECMS 对 SOC 变化过程调整较好,复合扰动下为减小发动机转速波动,电池持续放电,高速飞行工况下为满足工况变化电池功率增加,到达 SOC 充电阈值后, A-ECMS 可以对 SOC 变化迅速做出调整,电池进行充电且 SOC 回复较快,整个过程 A-EMCS 的 SOC 紧跟飞行需求功率变化,并随工况进行调整,达到削峰填谷的效果。

发动机转速是判断无人机系统稳定性的重要参数,不同控制策略下,转速波动也不同,对无人机系统稳定性有着重要影响。不同策略下发动机转速变化如图 17 所示,可以看出基于规则策略发动机转速波动范围最大,在 6 024~7 988 r/min 范围内波动,转速波动率为 32.60%,且波动频率较高。而其他两种控制算法随工况变化时转速波动较小,基本维持在 6 071~7 373 r/min 范围内,转速波动率为 21.45%,其中 A-ECMS 控制算法表现出明显的转速稳定控制效果,保持在 6 800 r/min 左右,转速波动率为 7.74%。

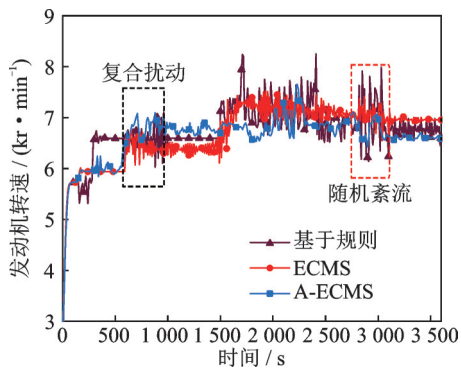
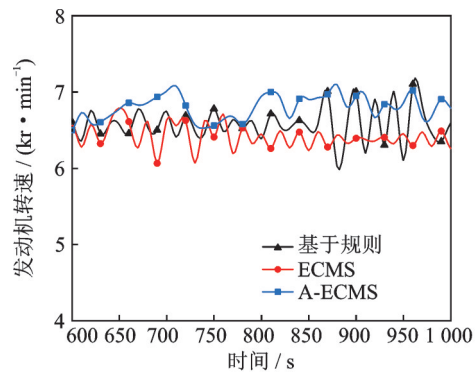


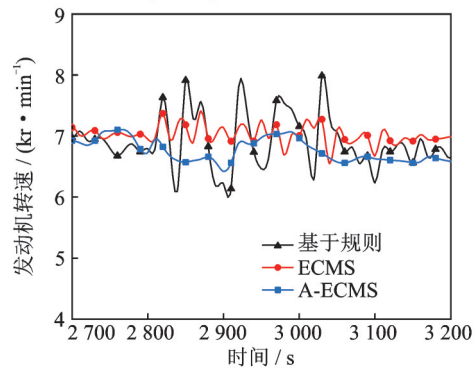
图17 不同管理策略下的发动机转速对比

Fig.17 Comparison of engine speed under different management strategies

图 18(a,b)给出了 3 种控制策略在复合扰动和紊流工况下发动机转速变化情况。复合扰动下不同策略发动机转速对比如图 18(a)所示,规则策略的发动机转速随工况变化呈现出明显的波动,转速差在 1 100 r/min 内,波动率达到了 18.26%,而 ECMS 和 A-ECMS 运行比较平稳,转速差分别在 721 r/min 和 543 r/min 内,转速波动率分别为 11.88% 和 8.32%。其中 A-ECMS 转速波动率较规则策略降低 54.44%,较 ECMS 降低 29.85%。



(a) Comparison of engine speed for different strategies under compound perturbation



(b) Comparison of engine speed for different strategies under turbulent flow

图 18 复合扰动和紊流下发动机转速对比

Fig.18 Comparison of engine speed under compound disturbance and turbulence

同样在紊流工况下 A-ECMS 仍然保持很好的控制效果,为了应对紊流扰动,提升系统运行稳定性, A-ECMS 下的发动机转速在小范围内波动,转速波动率维持在 7.18% 左右,相较于基于规则的 30.18% 与基于 ECMS 的 12.63% 有着非常明显的降低,保证了系统在紊流下运行的稳定性。

通过不同工况下发动机转速对比可以得出:相比于其他两种控制策略, A-ECMS 在整体工况下转速波动最小,并且在扰动和紊流工况下稳定性较好,在保证无人机系统动力输出的同时,提升了自身稳定性。在扰动和紊流下 3 种策略的转速波动率如表 8 所示。

表 8 扰动和紊流下转速控制效果对比

Table 8 Comparison of speed control effects under disturbance and turbulence

策略	基于规则	ECMS	A-ECMS
最大转速/(r·min <sup>-1</sup> )	7 124	6 788	7 171
复合 最小转速/(r·min <sup>-1</sup> )	6 024	6 071	6 528
扰动 差值/(r·min <sup>-1</sup> )	1 100	717	543
转速波动率/%	18.26	11.82	8.32
最大转速/(r·min <sup>-1</sup> )	7 988	7 373	7 034
随机 最小转速/(r·min <sup>-1</sup> )	6 136	6 546	6 563
紊流 差值/(r·min <sup>-1</sup> )	1 852	827	471
转速波动率/%	30.18	12.63	7.18

3.2.2 无人机系统动力性输出

功率输出是判断无人机系统动力性的重要标志,混合动力系统在应对不同工况时输出功率由发动机和动力电池共同提供。

图 19 给出了不同策略下发动机功率变化情况,规则策略在运行时根据既定规则进行功率输出分配,在 11 kW 左右,而 ECMS 和 A-ECMS 控制策略作为瞬时优化控制算法,可以根据工况变化实时调整发动机功率输出,在小范围内波动。在复合扰动和紊流工况下,相比于 ECMS, A-ECMS 发动机功率输出波动范围较小,且基本维持在发动机经济功率 10 kW 左右,证明了 BP 神经网络实时对等效因子做出调整进而对 ECMS 策略优化的合理性。

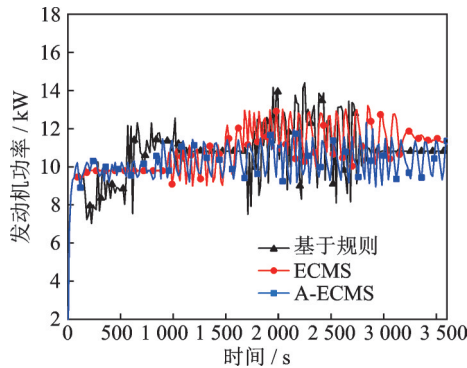


图 19 不同能量管理策略下发动机功率对比

Fig.19 Comparison of engine power under different energy management strategies

不同策略下电池输出功率对比如图 20 所示,规则策略在运行前期由于 SOC 较高,输出分配时优先使用电能,电池功率随工况变化。而其他 2 种策略可以根据工况进行调整,在复合扰动和高速飞行下,由于 SOC 较高,等效因子较小,系统优先使用电能,当 SOC 下降到充电阈值 0.3 后,电池功率降低,发动机功率增加以满足系统功率需求。从图 20 中可以看出 A-ECMS 在后期与 ECMS 控制策略相比较为平稳,是因为等效因子实时进行优

化,既可以在保证满足需求功率的前提下,改善动力性输出;也可以根据 SOC 变化实时作出调整,提升系统安全性。

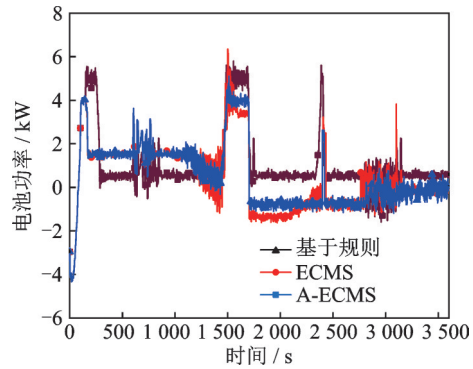


图 20 不同能量管理策略下电池功率对比

Fig.20 Battery power comparison under different energy management strategies

3.2.3 无人机系统经济性对比

降低发动机燃油消耗,提高系统运行经济性对混合动力系统至关重要,图 21 给出了不同策略下的发动机油耗对比,可以看出规则策略瞬时油耗相比于 ECMS 和 A-EMCS 控制策略明显偏高,波动幅度较大,平均燃油消耗率为 328.154 g/(kW·h); ECMS 策略为 311.689 g/(kW·h),较规则策略优化率为 5.01%, A-ECMS 与其他两种策略相比瞬时油耗较为平稳,波动较小,平均燃油消耗率为 297.585 g/(kW·h),较规则策略优化率为 9.32%。3 种控制策略平均燃油消耗率和全工况油耗量对比见表 9。

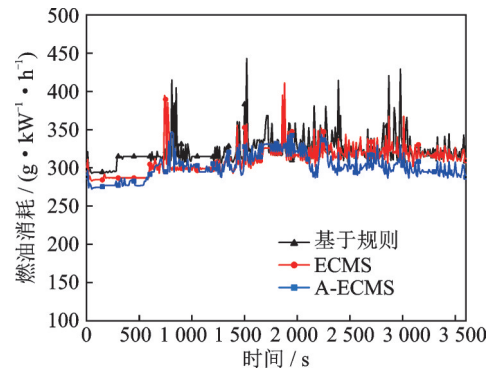


图 21 不同能量管理策略下油耗对比

Fig.21 Comparison of fuel consumption under different energy management strategies

表 9 不同策略下的发动机油耗对比

Table 9 Comparison of engine fuel consumption under different strategies

参数	基于规则	ECMS	A-ECMS
平均燃油消耗/(g·(kW·h) <sup>-1</sup> )	328.154	311.698	297.585
较规则优化率/%	—	5.01	9.32
整体燃油消耗量/g	4 216.78	3 854.94	3 755.31
较规则优化率/%	—	8.58	10.94

从表中看出,在整体运行工况上,ECMS整体燃油消耗量为3 854.94 g,较规则策略优化率为8.58%;A-ECMS整体燃油消耗量为3 755.31 g,较规则策略优化率为10.94%,表明该策略能明显提高发动机经济性。

图22为不同策略下发动机工况点对比,相比

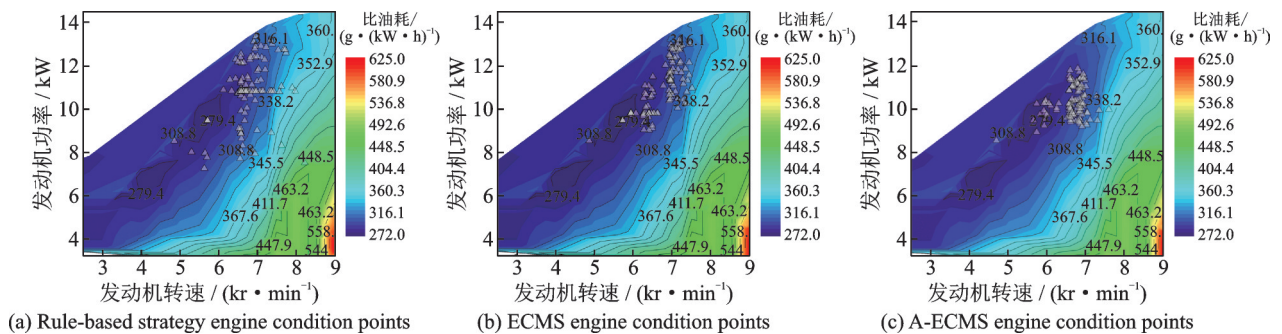


图22 不同策略下的发动机工况点对比

Fig.22 Comparison of engine operating points under different strategies

## 4 结 论

(1)根据GT-Power和MATLAB/Simulink联合搭建串联式混合动力无人机系统,设计了基于BP神经网络优化后的A-ECMS,并根据实际需求功率模拟飞行过程的各种工况,与基于规则和ECMS进行对比,突出体现A-ECMS的实时自适应。

(2)A-ECMS能有效提高混合动力系统的运行稳定性,研究结果表明A-EMCS的电池SOC能实时跟随工况变化。A-ECMS在整体工况下转速波动率为7.74%,优于规则策略的32.60%和ECMS的21.45%;在复合扰动下A-ECMS的转速波动率为8.32%,较规则策略降低54.44%,较ECMS降低29.85%;在随机紊流下A-ECMS的转速波动率为7.18%,较规则策略提升76.21%,较ECMS提升43.15%。

(3)A-ECMS能有效提高混合动力系统的动力性输出,使发动机输出较为平稳,维持在10 kW左右,且发动机功率输出波动范围较小;相比于规则和ECMS,A-ECMS可以根据电池SOC变化迅速对电池输出功率进行调整,在满足飞行工况前提下,改善动力性输出;也可以根据SOC变化实时作出调整,提升系统安全。

(4)在系统燃油经济性方面,A-ECMS平均燃油消耗率为297.585 g/kWh,较规则策略降低了9.32%,较ECMS降低了4.53%,且瞬时油耗波动较小;在整体运行工况上A-ECMS整体燃油消耗量为3 755.31 g,较规则策略降低了10.94%,较ECMS降低了2.58%,且在整体运行工况中发动机

于规则策略,其他两种策略由于自身瞬时优化的特点,工况点较为集中,更多运行在发动机经济工作区,其中A-ECMS控制策略中BP神经网络对等效因子实时优化后,发动机工况点进一步集中,这也是该策略燃油消耗较低的原因,提升了混合动力无人机系统燃油经济性。

工况点集中于燃油经济区,表明该策略能明显提高系统经济性。

## 参考文献:

- [1] 张红兴. 对置活塞二冲程内燃机用于无人机的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.  
ZHANG Hongxing. Study of an opposed-piston two-stroke internal combustion engine for unmanned aerial vehicles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [2] 刘莉,杜孟尧,张晓辉,等. 太阳能/氢能无人机总体设计与能源管理策略研究[J]. 航空学报,2016,37(1): 144-162.  
LIU Li, DU Mengyao, ZHANG Xiaohui, et al. Conceptual design and energy management strategy for UAV with hybrid solar and hydrogen energy[J]. Chinese Journal of Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 144-162.
- [3] RAJENDRAN P, SMITH H. The development of a small solar powered electric unmanned aerial vehicle systems[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 465/466: 345-351.
- [4] 胡雨. 通用飞机油电混合动力系统设计与优化[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2014.  
HU Yu. Design and optimisation of hybrid power systems for general purpose aircraft[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [5] 孔祥浩,张卓然,陆嘉伟,等. 分布式电推进飞机电力系统研究综述[J]. 航空学报,2018,39(1): 51-67.  
KONG Xianghao, ZHANG Zhuoran, LU Jiawei, et al. Review of electric power system of distributed elec-



- tric propulsion aircraft[J]. Chinese Journal of Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 51-67.
- [6] HUNG J Y, GONZALEZ L F. On parallel hybrid-electric propulsion system for unmanned aerial vehicles [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2012, 51: 1-17.
- [7] ZHANG Xiaohui, LIU Li, DAI Yueling, 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.
- [8] LEI T, WANG Y, JIN X, 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.
- [9] MOHAMED N B, ZHIBIN Z. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113823.
- [10] 胡春明,李诚,刘娜,等. 无人机增程式电推进系统双模糊能量管理策略仿真[J]. 航空动力学报, 2021, 36(12): 2652-2662.
- HU Chunming, LI Cheng, LIU Na, et al. Simulation on dual-fuzzy energy management strategy of UAV extended range electric propulsion system[J]. Chinese Journal of Journal of Aerospace Power, 2021, 36(12): 2652-2662.
- [11] 张晓辉,刘莉,戴月领. 燃料电池无人机能源管理与飞行状态耦合[J]. 航空学报, 2019, 40(7): 92-108.
- ZHANG Xiaohui, LIU Li, DAI Yueling. Coupling effect of energy management and flight state for fuel cell powered UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(7): 92-108.
- [12] 胡春明,闫丁洋,刘娜,等. 油电混合动力无人机能量管理策略的对比仿真研究[J]. 内燃机工程, 2022, 43(4): 74-83.
- HU Chunming, YAN Dingyang, LIU Na, et al. Comparison and simulation research on energy management strategies of oil-electric hybrid unmanned aerial vehicle[J]. Chinese Journal of Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2022, 43(4): 74-83.
- [13] DONATEO T, PASCALIS C, FICARELLA A. An application of the ECMS strategy to a Wankel hybrid electric UAV[C]//Proceedings of 9th International Conference on Innovation in Aviation & Space. [S.l.]: [s.n.], 2019.
- [14] 廖卫中,宗群,马亚丽. 小型四旋翼无人机建模与有限时间控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1343-1350.
- LIAO Weizhong, ZONG Qun, MA Yali. Modeling and finite-time control for quad-rotor mini unmanned aerial vehicles[J]. Chinese Journal of Chinese Control Theory & Applications, 2015, 32(10): 1343-1350.
- [15] 程智博. 四旋翼无人机燃料电池混合动力系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- CHENG Zhibo. Research on fuel cell hybrid power system for quadcopter UAVs[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [16] 项松,王吉,张利国,等. 一种高效率螺旋桨设计方法[J]. 航空动力学报, 2015, 30(1): 136-141.
- XIANG Song, WANG Ji, ZHANG Liguang, et al. A design method for high efficiency propeller[J]. Chinese Journal of Journal of Aerospace Power, 2015, 30(1): 136-141.
- [17] RAJENDRAN P, JAYAPRAKASH A. Numerical performance analysis of a twin blade drone rotor propeller[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 80: 492-498.
- [18] PENG J, HE H, XIONG R. Rule based energy management strategy for a series-parallel plug-in hybrid electric bus optimized by dynamic programming[J]. Applied Energy, 2017, 185: 1633-1643.
- [19] PAGANELLI G, GUERRA T M, DELPRAT S, et al. Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car[J]. Journal of Automobile Engineering, 2000, 214(7): 705-717.
- [20] 仇多洋. 基于行驶工况识别与预测的混合动力汽车能量管理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- QIU Duoyang. Research on energy management of hybrid electric vehicles based on driving condition recognition and prediction[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [21] 余胜威. MATLAB优化算法案例分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [22] 陈明. MATLAB神经网络原理与实例精解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [23] 杨跃能,郑伟,吴杰. 变化风场中无人机的动力学建模及飞行特性分析[J]. 飞行力学, 2011, 29(3): 8-11.
- YANG Yueneng, ZHENG Wei, WU Jie. Dynamics modeling and analysis of an unmanned aerial vehicle with wind effects[J]. Chinese Journal of Flight Dynamics, 2011, 29(3): 8-11.

(编辑:张蓓)