

四旋翼无人机模型预测控制能量管理研究

杨浪洪¹, 刘岩松¹, 黎奥轩¹, 黄渭清¹
(1.北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

Research on energy management of quadrotor UAV based on model predictive control

YANGLanghong¹, LIUYansong¹, LIAoxuan¹, HUANGWeiqing^{1,*}

(1.School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Nowadays, as concerns about pollution and energy shortages continue to mount, improvement of energy efficiency is a pressing challenge that demands urgent attention. This paper presents two energy management strategies –fuzzy logic control strategy and model predictive control strategy (MPC)– designed for a hybrid quadrotor unmanned aerial vehicle. The strategies combine the ideal operating line of the engine and make real-time allocation of power between the engine system and battery. The ideal operating line is utilized to ensure that the engine operates at its optimal working point at all times, thereby improving the fuel economy of the system. Energy management strategy simulations were conducted under typical mission power demand for the UAV. Making result of dynamic programming algorithm as the benchmark, the simulation results demonstrate that the fuzzy control strategy considering the ideal operating line achieves an optimal fuel consumption of 87.35%, while the MPC strategy further considering the optimal SOC trajectory of the battery achieves an optimal fuel consumption of 92.09%. The feasibility of the proposed strategies was verified through the simulation results.

摘要:随着环境污染和能源短缺问题的日益加剧,提高能源效率已成为当前迫切需要解决的问题。本文针对串联式混合动力四旋翼无人机设计了模糊控制和模型预测控制(MPC)两种能量管理策略,所提策略在结合发动机理想操作线的基础上实时分配发动机系统和电池的功率输出,其中理想操作线用于控制发动机始终工作在最优工作点,以提高系统的油耗经济性。在无人机典型任务需求功率下进行了能量管理策略仿真验证,以动态规划算法结果作为对比基准,结果表明考虑发动机理想操作线的模糊控制策略能够达到最优油耗的87.35%,而进一步考虑电池最佳SOC轨迹的MPC策略能够达到最优油耗的92.09%。仿真结果验证了所提策略的可行性。

关键词:混合动力系统;无人机;理想操作线;能量管理;模糊控制;模型预测控制

Key words: hybrid powertrain system; unmanned aerial vehicle; ideal operating line; energy management; fuzzy control; model predictive control

中图分类号:TK411 文献标识码:A

0 概述

当今无人机的工作范围正不断扩大,在军事领域,其被广泛用于执行侦察,攻击,后勤等任务,在民用领域,其广泛用于农药喷洒,环境监测,灾害搜救,物流运输等工作^[1-3]。应用场景扩大使得无人机的工作任务难度和环境复杂度越来越高,这对无人机动力系统提出了更高要求,对于纯电动无人机,其受动力电池能量密度约束而续航时间不高,

调查^[4-5]表明当前纯电动无人机续航时间大部分在30min~2h;而对于纯油动无人机,其相比纯电系统虽然能显著提升续航时间,但在任务突变情况下发动机通常难以做出实时响应,导致其在恶劣工况下动力响应较差^[6-7]。结合电池和发动机优点的混合动力系统能够提供更好的动力性和更长的续航时间,提高无人机的工况适应性和系统效率,而由于发动机和电池的动态响应性能不同,在满足系统动力需

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 基础加强计划项目;军事科技领域青年人才托举工程(2022-JCJQ-QT-056)

作者简介: 杨浪洪(1999-),男,硕士生,主要研究方向为无人机能量管理,状态感知, E-mail:y18811368698@126.com;

黄渭清(联系人), E-mail:hwq@bit.edu.cn.

求的基础上, 如何设计能量管理策略控制混合动力系统功率输出、保证系统的稳定性和高效率已经成为当前研究的热点问题。当前对能量管理问题的研究多集中在混合动力车辆方面, 在无人机尤其是四旋翼无人机方面研究相对较少^[8-9], 因此对四旋翼无人机开展能量管理研究具有现实意义。

当前常用的能量管理策略主要分为基于规则的能量管理策略和基于优化的能量管理策略^[10]。基于规则的能量管理策略以状态机策略和模糊控制策略为代表, 因其控制规则简便, 实现效率高而得到了广泛应用^[11-12]。常用的基于规则的能量管理策略通常侧重于优化控制器的变量阈值^[13-15], 而这非常依赖于实际经验, 因此基于规则的能量管理策略虽然能够实现实时控制, 但其全局最优性程度较低^[16]。为解决基于规则的全局最优性弱的问题, 学者们提出了基于优化的能量管理策略, 将动态规划^[17-18]和最小值原理^[19-20]等算法应用到能量管理策略当中。基于优化的能量管理策略通常将问题抽象为数学模型, 然后使用相应的算法进行求解^[21]。基于优化的算法能够实现全局最优求解, 但全局搜索往往面临计算复杂度高, 实时性差的问题。由此, 一些实时性优化算法被用于能量管理中, 较为成熟的有等效油耗最小策略^[22-23]、自适应控制^[24-25]和MPC等, 其中, MPC具有优异的控制性能和良好的实时性而被广泛用于能量管理等非线性求解问题当中^[26-29], 然而当前基于MPC的能量管理策略更侧重于减少发动机燃油消耗, 而忽视了动力电池的电量变化状态, 可能会导致电池过充或过放而对电池造成不可逆转的损伤。

综上所述, 基于规则和基于MPC的能量管理策略均需要进一步改进, 提高基于规则的策略的效率是减少系统能耗的关键, 由于电池效率受工况变化影响较小, 因此提高发动机的效率成为提高基于规则策略效率的关键^[30], 而本文提出让发动机工作点跟随其理想操作线是一种可行方法。此外, 为兼顾动力电池的电量状态, 本文利用MPC的多目标优化能力控制发动机在其理想工作点工作, 并使电池SOC跟随最佳SOC轨迹, 以更好减少燃油消耗。

本文余下内容安排如下: 第1节构建了混合动力系统结构, 建立动力电池、发动机-发电机和四旋翼无人机模型; 第2节设计了无人机典型任务剖面, 在此基础上仿真得到了无人机的需求功率; 第3节对动态规划、模糊控制和MPC能量管理策略进行了设计; 第4节基于典型任务需求功率对设计的能

量管理策略进行了仿真结果分析; 第5节为本文研究结论以及对未来的研究展望。

1 混合动力系统结构

本文以油电混合动力系统为研究目标, 混合动力系统的结构组成如图1所示, 发动机与发电机同轴耦合形成的发动机-发电机系统(下文简称为发动机系统)与动力电池之间通过独立的DC/DC模块实现解耦控制, 二者通过DC总线相连共同为系统供电, 其中发动机系统用于提供系统需求功率的主要部分, 动力电池用于无人机瞬时功率需求的实时响应, 当动力电池电量较低时, 由发动机系统通过DCDC为其充电, 动力系统模块所有的控制操作均由能量管理系统(EMS)实现。

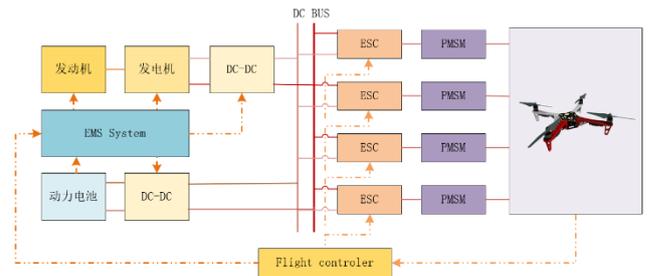


图1 混合动力系统结构

1.1 动力电池模型

在本研究中, 锂电池主要作为系统的辅助能源, 用于系统功率需求的‘削峰填谷’, 电池模型采用int模型, 其输出功率表示为:

$$P_b = V_{oc} I_b - I_b^2 R_{int} \quad (1)$$

其中 P_b 为电池输出功率, V_{oc} 为电池开路电压, I_b 为电池电流, R_{int} 为电池内阻。电池电流 I_b 可表示为:

$$I_b = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_{int} P_b}}{2R_{int}} \quad (2)$$

利用积分法求电池SOC, 表达式为:

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int I_b dt}{Q_b} \quad (3)$$

其中 SOC_0 为电池的初始SOC值, Q_b 为电池容量。该式求导可得:

$$\dot{SOC} = -\frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_{int} P_b}}{2R_{int} Q_b} \quad (4)$$

当 P_b 为正值时代表电池处于放电状态, P_b 为负值时电池为充电状态。

1.2 发动机-发电机模型

在本研究中，发动机仅作为系统分配功率输出的元件，因此其运行时内部的动态响应在本文中不予考虑，建立的发动机模型以转速、转矩为输入，发动机油耗率为输出，模型基于 3W-28i 发动机建立，其 map 特性如图 2 所示，同样的功率需求在不同的转速转矩搭配下，发动机油耗率相差很大。由于动力系统结构设计中发动机系统和动力电池系统之间已经实现了解耦控制，因此为了减少油耗，保证发动机工作在经济区，将发动机工作点控制在其理想操作线附近，理想工作点即相同功率下发动机油耗最小的点，利用

优化算法提取工作点得到发动机理想操作线如图 2 中黑色曲线所示。

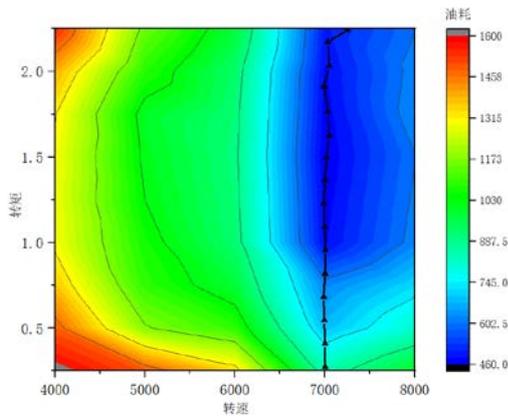


图 2. 3W-28i 发动机特性及其理想操作线

进一步得到发动机理想操作线上最佳工作点功率与油耗关系如图 3 所示。

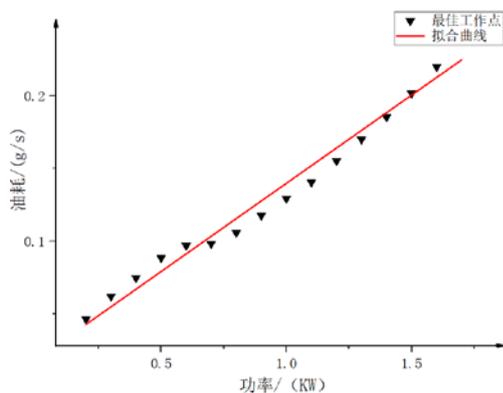


图 3. 理想操作线功率油耗图

用一次函数拟合最佳功率油耗点，得到油耗关于功

率的方程为：

$$\dot{m}_F = 0.0186 + 0.12124P(5)$$

式中 P 为需求功率， \dot{m}_F 为油耗率。在本文后续内容中，发动机的控制都遵循其理想操作线，即对于能量管理系统分配给发动机的一个输出功率，发动机输出符合理想操作线的转速和转矩值。

同样地，本文不考虑发电机内部的动态响应特性，只考虑其耦合的发动机端输入转速转矩下的工作效率，如上所述，本文发动机工作点选择控制在理想操作线附近，由发动机 map 特性图及理想操作线可看出，理想操作点均在 7000rpm 附近，本文选择的发电机为 DUALSKY eco3520 电机，其 7000rpm 转速下效率图如图 4 所示。

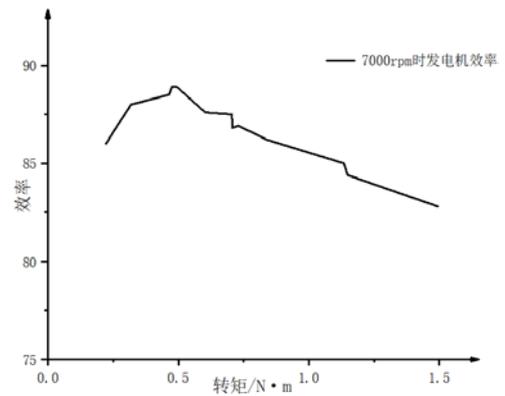


图 4. 7000rpm 下发电机效率

由图 4 可以看出，7000rpm 下发电机效率均在 85% 附近，发电机效率较高。

2 无人机模型

本文以 X 型四旋翼无人机为研究对象，模型基于以下假设：

1. 无人机是均匀对称的刚体。
2. 无人机飞行质量和转动惯量不发生改变。
3. 无人机几何中心与其重心重合。

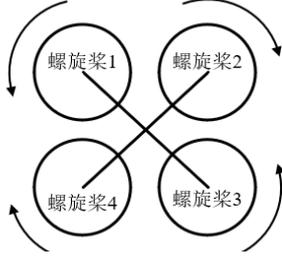


图 5.X 型无人机示意图

在上述假设基础上, 本文基于四旋翼无人机动力学方程和运动学方程^[31]建立了四旋翼无人机仿真模型, 所用仿真参数如表 1 所示。

表 1.四旋翼无人机仿真物理参数

参数名称	符号	参数值	单位
无人机质量	m	6.0	kg
绕 x 轴转动惯量	I_{xx}	4.65×10^{-2}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
绕 y 轴转动惯量	I_{yy}	4.65×10^{-2}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
绕 z 轴转动惯量	I_{zz}	7.19×10^{-2}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
电机及螺旋桨转动惯量	J_R	2.98×10^{-4}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
螺旋桨拉力系数	C_t	2.76×10^{-5}	
螺旋桨力矩系数	C_m	4.49×10^{-7}	

2.1 无人机典型任务设计

四旋翼无人机功率需求基本都来自四个螺旋桨, 其运动姿态也完全由四个螺旋桨的转速确定, 因此, 本文将四旋翼无人机螺旋桨的功率需求作为无人机整机的功率需求, 对需求功率做出估计。

螺旋桨功率与转速间的关系可表示为:

$$P = C_p^2 \rho N^3 D^5 \quad (6)$$

式中, ρ 为空气密度, N 为螺旋桨转速, D 为螺旋桨轴径, C_p 为螺旋桨功率系数, 本文使用基于 12x6E 螺旋桨建模, 其功率系数可由文献^[32]得到。

为研究的四旋翼无人机设计了循环任务工况, 其中子任务工况如图 6 所示, 将四个子任务工况合并作为总的任务工况, 其中第二、三、四个子任务均在前一阶段任务结束后无人机下降到 100 米高度

再进行, 在所有子任务执行完毕后, 无人机降落至地面。

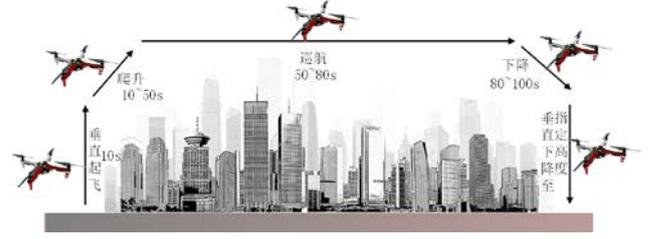


图 6.无人机飞行子任务剖面设计

基于任务工况得到需求功率如图 7 所示, 从图中看出, 无人机在上升和爬升阶段消耗功率最大, 在巡航时需求功率较少, 下降时需求功率最少, 其最大需求功率约是最小需求功率的四倍, 因此有必要对动力系统制定合适的能量管理策略, 保证动力系统的性能和效率。

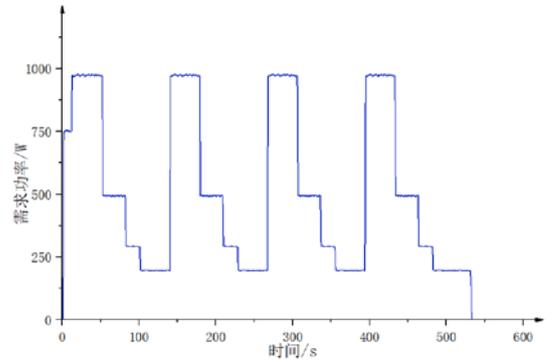


图 7.总任务需求功率

3 能量管理策略

合适的能量管理策略对提高系统的稳定性和燃油经济性起着至关重要的作用, 本文设计的算法应用数据均基于图 7 得到的需求功率。

3.1 动态规划算法

动态规划算法是一种常用的全局最优算法, 在本研究中, 以动态规划算法得到的能量管理结果作为后续算法效果的对比基准。

选择电池 SOC 作为动态规划算法的状态变量, SOC 的计算更新方法如式(3)所示, 将动态规划算法的目标函数设为等效油耗最小:

$$J = \sum_{i=0}^N m_F(SOC(i), Pe(i)). \quad (7)$$

其中 J 为等效油耗函数, N 为任务步长, 本文为 532, 系统的整体约束条件设置为:

$$\begin{cases} 0.8 \leq SOC \leq 1 \\ P_d = P_e + P_b \\ 0 \leq P_e \leq 1.2kW \\ 0 \leq P_b \leq 1.2kW \end{cases} \quad (8)$$

其中 P_d 为需求功率, P_e 为发动机系统输出功率, P_b 为电池输出功率。

首先将 SOC 离散化, 得到状态变量矩阵如下图所示。

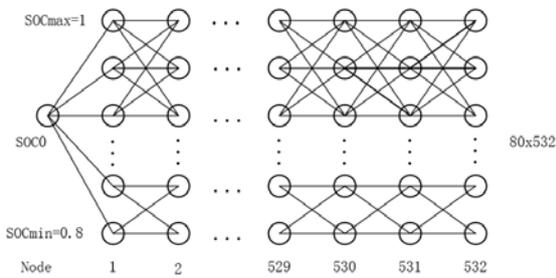


图 8.动态规划状态变量矩阵

动态规划算法先通过逆序遍历每一个时间节点的每一个状态变量得到最佳的控制表, 再正向求解得到最佳的控制序列, 其逆序过程可表示为:

$$\begin{aligned} f_k(soc_k) &= \underset{P_{ek} \in P_{ek}}{\text{opt}} \{m_F(soc_k, P_{ek}(soc_k)) + f_{k+1}(soc_{k+1})\}, \\ k &= N-1, N-2, \dots, 0 \\ f_N(soc_N) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中, P_{ek} 表示发动机系统输出功率可行集, $f_k(soc_k)$ 为第 k 个时间节点到时间序列最后节点 N 的最小等效油耗值。

3.2 模糊控制策略

本文为研究的混动模型搭建了模糊控制策略, 以需求功率 P_d 和电池 SOC 作为模糊控制器的输入变量, 输出变量为发动机系统输出功率 P_e , P_d 由图 7 给出, SOC 由式(3)计算得到, 当得到输入后, 模糊控制器通过模糊推理得到 P_e 。

由图 7 可知, 无人机在整个任务期间最大需求功率约 1kW, 最小需求功率约 200W, 为考虑无人机在降落时可能更小的需求功率, 将需求功率的可行域定为 $[0, 1kW]$ 。考虑无人机的多阶段功率需求状况, 将功率需求可行域划分为 5 个子集, 分别为 very low (VL), low (L), medium (M), high (H) and very high (VH), 记作 $[VL, L, M, H, VH]$ 。类似地,

将电池 SOC 划分为 3 个子集 (L, M, H)。为了提高系统的稳定性和动态性能, 为发动机系统输出功率设置 5 个模糊子集, 记为 $[VL, L, M, H, VH]$ 。

根据模糊子集设计 15 条模糊控制规则如表 2 所示, 对应模糊曲面设计如图 9 所示。

表 2.模糊规则设置

SOC	Pd				
	VL	L	M	H	VH
L	L	M	H	VH	VH
M	L	L	M	H	VH
H	VL	VL	L	M	H

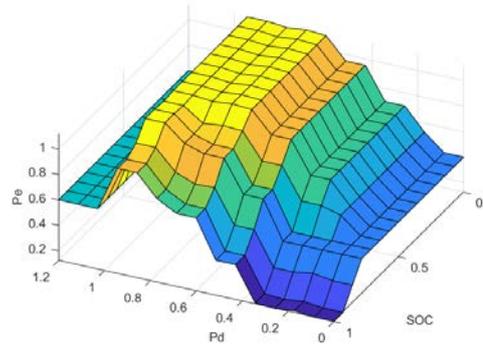


图 9 模糊曲面

3.3 模型预测控制策略

本文在搭建混合动力模型和无人机模型的基础上, 提出兼顾发动机理想操作线和电池最佳 SOC 轨迹的 MPC 能量管理方法, 其中发动机理想操作线由图 2 给出, 电池最佳 SOC 轨迹由 3.1 中动态规划算法策略得到的最优结果给出。

由于四旋翼无人机是一个强耦合系统, 其需求功率与飞行速度及环境工况间对应关系复杂, 难以进行精确计算, 因此本文对需求功率进行直接预测, 预测模型采用深度学习的长短期记忆网络 (Long Short-Term Memory, LSTM), 预测模型如图 10 所示:

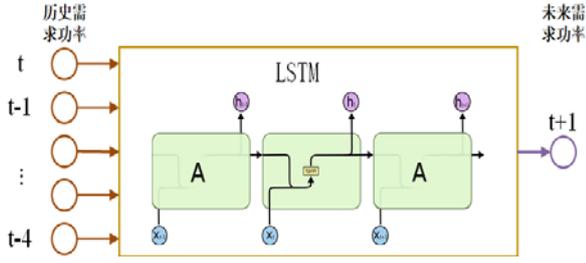


图 10. 需求功率 LSTM 预测模型

图中 t 表示当前时刻, 本文利用五个历史需求功率, 通过 LSTM 网络, 对未来 $t+1$ 时刻的需求功率做出预测, 并将预测功率用于后续 MPC 求解的输入。

选择电池 SOC 作为系统状态变量, 发动机系统输出功率 P_e 作为控制变量, 将(4)式改写为:

$$f(SOC, P_d, P_e) = \dot{SOC} = -\frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_{int}(P_d - P_e)}}{2R_{int}Q_b} \quad (10)$$

由于式(10)是非线性的, 为保证求解的实时性, 对其进行一阶泰勒展开可得:

$$\dot{SOC} = ASOC + B_e P_e + B_d P_d + F \quad (11)$$

式中 $ASOC$ 表示状态项, $B_e P_e$ 表示控制项, $B_d P_d$ 表示扰动项, F 为一阶近似的常数项。假设系统当前近似的目标点为 (SOC_0, P_{e0}, P_{d0}) , 则一阶近似的各项系数可计算为:

$$\begin{cases} A = \left. \frac{\partial f}{\partial SOC} \right|_{SOC=SOC_0, P_e=P_{e0}, P_d=P_{d0}} \\ B_e = \left. \frac{\partial f}{\partial P_e} \right|_{SOC=SOC_0, P_e=P_{e0}, P_d=P_{d0}} \\ B_d = \left. \frac{\partial f}{\partial P_d} \right|_{SOC=SOC_0, P_e=P_{e0}, P_d=P_{d0}} \\ F = f(SOC_0, P_{e0}, P_{d0}) - ASOC_0 - B_e P_{e0} - B_d P_{d0} \end{cases} \quad (12)$$

改写式(5), 将系统油耗作为输出量, 写为:

$$\dot{m}_F = D_e P + G \quad (13)$$

式中 $D_e = 0.12124$, $G = 0.0186$ 。

将式(11)离散得到系统 SOC 状态预测模型:

$$SOC(k+i+1|k) = ASOC(k+i|k) + B_e P_e(k+i|k) + B_d P_d(k+i|k) + F \quad (14)$$

同理由式(13)得系统输出量油耗预测模型为:

$$\dot{m}_F(k+1|k) = D_e P_e(k+1|k) + G \quad (15)$$

式(14)和(15)中, k 表示当前时刻, $(k+i|k)$ 表示当前 k 时刻下预测未来第 $k+i$ 步时的预测值。

设计优化求解的代价函数如下:

$$\min J = \int_{t_0}^{t_f} w_y \dot{m}_F^2 + w_x (SOC(t) - SOC_r)^2 + w_e (P_e(t) - P_{e0})^2 dt \quad (16)$$

式中 w_y 、 w_x 和 w_e 分别为各项的权重, SOC_r 为 SOC 参考轨迹, 式中第一项表示发动机油耗约束项, 第二项表示电池 SOC 变化量约束项, 最后一项为发动机功率变化量惩罚项。

结合式(14)、(15), 并将式(16)离散化, 可将优化问题化为如下二次规划问题:

$$\begin{aligned} \min_U f(U) &= \frac{1}{2} \bar{U}^T H \bar{U} + P \bar{U} \\ \text{s.t. } \psi \bar{U} &\leq \sigma \\ \psi &= \begin{bmatrix} I_{N \times N} \\ -I_{N \times N} \end{bmatrix}, \sigma = \begin{bmatrix} U_{\max} \\ U_{\min} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

式中 H 为正定或半正定矩阵, P 为梯度矢量, 二者均由二次规划标准型换算而来, U 即为系统控制量 P_e , U_{\max} 、 U_{\min} 分别为发动机系统最大最小输出功率, 转化为二次型后该问题可直接调用封装算法求解。

综上所述, 本文所设计 MPC 控制策略的实现流程为:

(1) LSTM 网络根据历史需求功率预测出未来时刻的需求功率, 将需求功率和参考 SOC 轨迹输入 MPC 求解器。

(2) MPC 控制器对当前无人机系统状态进行线性近似并假设在预测时域内模型不发生变化。

(3) 对模型进行离散化并结合代价函数构建成二次规划求解问题。

(4) 调用求解器对二次规划问题进行求解并得到一系列最优控制量(发动机输出功率, 按照理想操作线得到发动机转速和转矩)。

(5) 将第一组控制量作用于无人机, 用来控制发动机-发电机系统, 舍弃后续控制量。

(6) 重复步骤 1 至 5, 直至任务结束。

4 结果与分析

本文建立了基于动态规划、模糊控制和 MPC 的能量管理策略，其中基于动态规划的能量管理策略结果作为其余两种策略的对比基准，基于模糊控制的管理策略在考虑发动机理想操作线的基础上进行在线仿真，基于 MPC 的能量管理策略在兼顾发动机理想操作线和动态规划最佳 SOC 轨迹的基础上进行在线仿真，最终比较不同策略下的等效油耗结果。

本文动力学系统的仿真参数如表 3 所示：

表 3.动力学系统参数

组件	参数	值
发动机	最大转速	8500rpm
	标定功率	2.29kW@8500rpm
	工作经济区	0.8-1.8kW
发电机	整流电压	15V
	综合效率	85%
	额定电压	14.8V
	额定容量	5.3Ah
电池	充电倍率	2C
	放电倍率	35C
	内阻	0.02Ω

基于动态规划(DP)的能量管理策略对需求功率分配结果如图 11 所示,得到的 SOC 参考轨迹如图 12 所示:

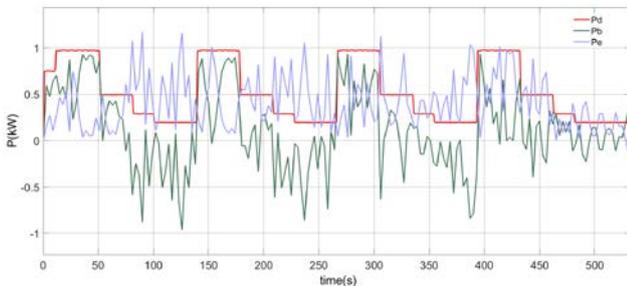


图 11.动态规划策略功率分配

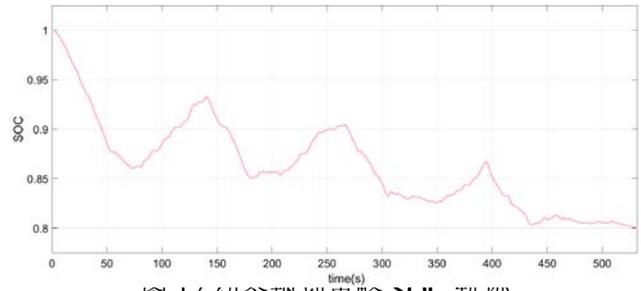


图 12.动态规划策略 SOC 轨迹

由图 11 和图 12 看出，无人机初始垂直起飞和爬升阶段 0~50s 系统需求功率较大，发动机系统和电池一起为系统提供输出功率，由于初始电池为满电状态(SOC=1)，因此在垂直起飞和爬升阶段电池的输出功率较大，甚至超过发动机系统的输出功率。因而其 SOC 下降也较快，在垂直起飞和爬升阶段结束后 SOC 下降到 0.88 左右；

当无人机进入 50~80s 巡航阶段时，其需求功率相比前一阶段有所降低，但由于电池 SOC 仍处于较高位状态，因此仍由发动机系统和电池一起为系统输出功率，当爬升阶段结束后，电池 SOC 降至 0.86 左右。

当无人机进入 80~100s 下降阶段和 100~140s 垂直下降阶段时，无人机的需求功率降至 0.3kW 以下，此时系统的需求功率基本全由发动机系统提供，同时发动机-发电机系统为电池充电补充电能，这一阶段结束后电池的 SOC 回复到 0.93 左右。

综上所述，无人机在执行一个子任务过程中，动力电池主要在无人机垂直起飞、爬升和巡航阶段为系统供能，而在下降和垂直下降阶段充电补充电能，为执行下一阶段子任务提前储能，后续的 2、3 和 4 阶段子任务动力系统的功率分配与第一阶段相似，电池在一个子任务中处于放电-充电状态循环，当整个任务执行完成后电池 SOC 到达目标值 0.8 附近。

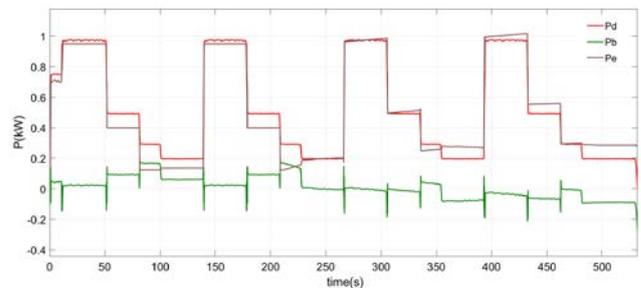


图 13.模糊控制功率分配

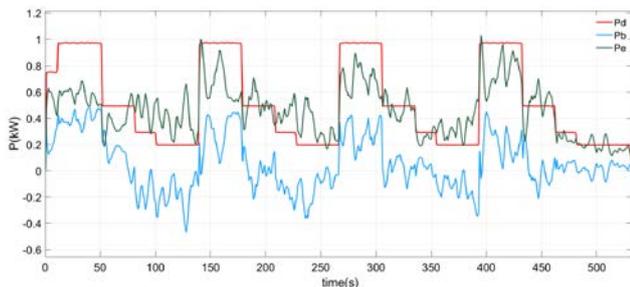


图 14.MPC 功率分配

模糊控制策略(Fuzz)和 MPC 策略下动力系统功率分配如图 13 和图 14 所示,在模糊控制策略中,发动机系统始终占据主导地位,其输出功率较为平稳,电池始终进行小功率输出,对动力系统需求功率的波动起到削峰填谷的作用,保证系统动力的稳定性。MPC 策略将动态规划得到的 SOC 轨迹作为控制参考轨迹,因此其发动机系统与电池间的功率分配与动态规划的分配结果近似,与动态规划不同的是,MPC 能够大大减少寻优的计算量,能够在得到近全局最优的结果上实现在线计算。

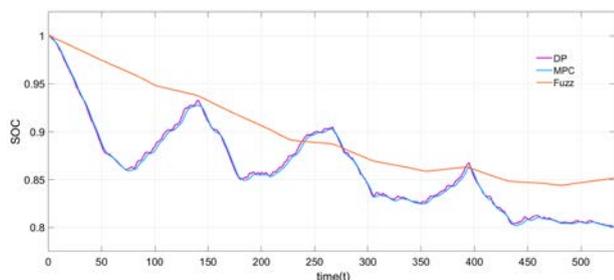


图 15.不同策略下 SOC 轨迹

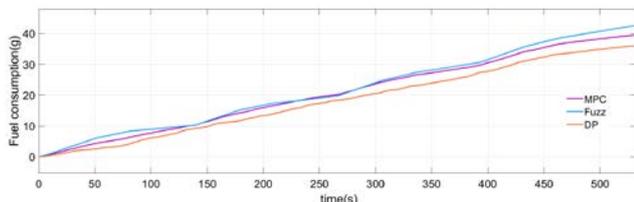


图 16.不同策略下油耗轨迹

由图 15 和图 16 所示,模糊控制策略下的 SOC 在任务结束时缓慢下降至 0.85 附近,而 MPC 策略的 SOC 轨迹与动态规划策略的 SOC 轨迹基本一致,表明所设计 MPC 对状态量跟踪达到要求。从油耗轨迹看出,在整个任务中动态规划策略所消耗油量最少,MPC 策略次之,模糊控制策略最多,但由于三种策略最终 SOC 并不完全相同,因此直接比较耗油量并不能准确看出那种策略经济性更优。为更好的比较策略经济性,将电池的 SOC 修正到一个相同目标值,在本文中取为 0.8,将修正目标值与实际值的差异计算为等效油耗,等效计算公式如下:

$$\Delta m_f = \frac{(0.8 - SOC_{\text{final}}) \cdot Q_b \cdot U_b \cdot \eta_b}{\eta_{\text{gen}} \cdot 3600} \cdot \overline{FC} \quad (18)$$

式中 Δm_f 表示修正 SOC 后系统等效的油耗, SOC_{final} 表示 SOC 最终的实际值, \overline{FC} 表示燃油平均热值,本文取 360g/kWh。修正后不同策略油耗对比如表 4 所示:

表 4.不同策略下等效油耗值对比

	动态规划	模糊控制	MPC
初始 SOC(%)	100	100	100
最终 SOC(%)	80	85.2	79.9
油耗(g)	35.97	42.66	39.12
修正后 SOC(%)	80	80	80
修正油耗(g)	35.97	41.18	39.09
油耗最优程度(%)	100	87.35	92.02

基于给定的任务剖面,动态规划策略产生的最优油耗为 35.97g,模糊控制策略所产生的等效总油耗为 41.18g,达到动态规划最优的 87.35%,MPC 策略产生的等效总油耗为 39.09g,达到动态规划最优的 92.02%。结果表明在考虑发动机理想操作线的基础上设计的模糊控制能量管理策略能够实现较好的燃油经济性,而在此基础上进一步考虑电池最佳 SOC 轨迹的 MPC 策略能够更好的综合考虑电池和发动机系统代价,实现更好的燃油经济性。

5 结论

本文针对四旋翼无人机典型任务剖面功率需求,对串联式电油混合动力系统进行了能量管理策略对比和优化,结合发动机理想操作线,提出了模糊控制能量管理策略和兼顾最佳 SOC 轨迹的 MPC 能量管理策略,并通过数值仿真得出以下结论:

1.通过 DC/DC 模块使得发动机-发电机系统与电池系统实现控制解耦,在此基础上结合发动机理想操作线能够使发动机始终工作在最优工作点,有利于能量管理中实现整体油耗最少。

2.四旋翼无人机在典型任务的不同飞行阶段具有不同的动力需求,以其巡航阶段需求功率作为对比,爬升阶段最大需求功率达到巡航时需求功率的两倍左右,而下降时最小需求功率不到巡航需求功

率的一半，混合动力系统能够提高系统的动力性和续航时间，通过合理设计控制策略对发动机系统和电池系统进行功率分配能够提高动力系统的整体效率。

3.结合发动机理想操作线，在初始电池满电起飞情况下，本文提出的模糊控制策略能够达到油耗最优的 87.35%，提出的兼顾 SOC 最优轨迹的 MPC 策略能够达到油耗最优的 92.02%，仿真结果验证了所提策略在线计算的可行性。

本文针对四旋翼无人机的混合动力系统设计模糊控制和 MPC 能量管理策略，并完成了仿真验证。在未来工作开展中，可以考虑将无人机轨迹规划和能量管理结合在一起，使任务要求和动力需求可以实现更好耦合，并结合实际试验进行验证，提高策略的实用性。

参考文献:

- [1] E. Saif, İ. Emnoğlu, Hybrid Power Systems in Multi-Rotor UAVs: A Scientific Research and Industrial Production Perspective[J]. IEEE Access, 2022, 11: 438-458.
- [2] M.A. Boon, Comparison of a fixed-wing and multi-rotor UAV for environmental mapping applications: A case study[J]. 2017.
- [3] H. Shen, Y. Zhang, J. Mao, Energy management of hybrid UAV based on reinforcement learning[J]. Electronics, 2021, 10(16): 1929.
- [4] F. Ahmed, J.C. Mohanta, A. Keshari. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(7): 7963-7984.
- [5] 王飞. 基于油电混合动力技术在无人机中的应用[J]. 内燃机与配件, 2021(22): 235-236.
- [6] Xu X, Lu Y, Wu X. Dynamic Modeling and Control Law Design of a Fuel-electric Hybrid Multi-rotor UAV[J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2022, 14: 17568293221078925.
- [7] J. Paska, P. Biczal, M. Klos, Hybrid power systems - An effective way of utilising primary energy sources[J]. Renewable energy, 2009, 34(11): 2414-2421.
- [8] L. Tao, Y. Zhou, Z. Lin, State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(6): 1488-1503.
- [9] 张晓辉, 燃料电池混合动力无人机电源管理研究[D], 2018, 北京理工大学.
- [10] X. Zhang, L. Li, Y. Dai, T. Lu, 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.
- [11] S. Zhou, Z. Chen, D. Huang, Model prediction and rule based energy management strategy for a plug-in hybrid electric vehicle with hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(5): 5926-5940.
- [12] N. Ding, K. Prasad, T. Lie, Design of a hybrid energy management system using designed rule - based control strategy and genetic algorithm for the series plug - in hybrid electric vehicle[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(2): 1627-1644.
- [13] B.V. Padmarajan, A. MCGordon, P.A. Jennings, Blended Rule-Based Energy Management for PHEV: System Structure and Strategy[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2016. 65(10): p. 8757-8762.
- [14] W. Tian, X. Zhang, D. Yang, Double-layer fuzzy adaptive NMPC coordinated control method of energy management and trajectory tracking for hybrid electric fixed wing UAVs[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(92): 39239-39254.
- [15] M.F. Mohd, K.A. Danapalasingam, M.F. Rahmat, Improved fuel economy of through-the-road hybrid electric vehicle with fuzzy logic-based energy management strategy[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2018, 20: 2677-2692.
- [16] N. Tobias, E. Philipp, F. Michael, O. Christopher, G. Lino, Convex Optimization for the Energy Management of Hybrid Electric Vehicles Considering Engine Start and Gearshift Costs[J]. energies, 2014(7): p. 834-856.
- [17] X. Wang, H. He, F. Sun, J. Zhang, Application Study on the Dynamic Programming Algorithm for Energy Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles[J]. Energies (Basel), 2015. 8(4): p. 3225-3244.
- [18] Yi. H.F, T. Yu, S. Zhuo, W. Shi, Z. Zhang, An Optimization Energy Management Strategy Based on Dynamic Programming for Fuel Cell UAV[C]//IECON 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2021: 1-6.
- [19] R. Ma, J. Song, H. Zhang, B. Zhang, A PMP Energy Management Strategy based on State Switching for a Fuel Cell UAV[C]//IECON 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2021: 1-6.
- [20] R. Schmid, J. Buerger, N. Bajcinca, Energy management strategy for plug-in-hybrid electric

- vehicles based on predictive PMP[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 29(6): 2548-2560.
- [21] J. Buerger, S. East, M. Cannon, Fast dual-loop nonlinear receding horizon control for energy management in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 27(3): 1060-1070.
- [22] S. Ahmadi, S. Bathaee, A.H. Hosseinpour, Improving fuel economy and performance of a fuel-cell hybrid electric vehicle (fuel-cell, battery, and ultra-capacitor) using optimized energy management strategy[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 160: 74-84.
- [23] J.K. Maherchandani, N. Jain, N.K. Garg, Optimal genetic algorithm-Pontryagin Minimum Principle approach for equivalent fuel consumption minimization in hybrid electric vehicle[J]. Journal of Electrical Systems, 2021, 17(2): 182-193.
- [24] W. Lin, C. Zheng, Energy management of a fuel cell/ultracapacitor hybrid power system using an adaptive optimal-control method[J]. Journal of Power Sources, 2011. 196(6): p. 3280-3289.
- [25] T. Liu, Y. Zou, D. Liu, F. Sun, Reinforcement Learning of Adaptive Energy Management with Transition Probability for a Hybrid Electric Tracked Vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. 62(12): p. 7837-7846.
- [26] J. Li, Q. Min, H. Sun, Fast Planning of Global SoC Trajectory for Hierarchical Predictive Energy Management in PHEVs[J]. DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences iceee, 2018.
- [27] C Xiang, F Ding, W Wang. MPC-based energy management with adaptive Markov-chain prediction for a dual-mode hybrid electric vehicle[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(5): 737-748.
- [28] W. Greenwell, A. Vahidi, Predictive Control of Voltage and Current in a Fuel Cell - Ultracapacitor Hybrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010. 57(6): p. 1954-1963.
- [29] Y. Zhou, A. Ravey, M. Péra, Real-time cost-minimization power-allocating strategy via model predictive control for fuel cell hybrid electric vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2021. 229: p.113721.
- [30] Y. Zhu, B. Zhu, X. Yang, Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy of Hybrid Electric Propulsion System for Fixed-Wing VTOL Aircraft[J]. Aerospace, 2022, 9(10): 547.
- [31] 贺有源, 四旋翼飞行器系统建模与控制方法研究[D], 2019, 杭州电子科技大学.
- [32] J.B. Brandt, R.W. Deters, G.K. Ananda, O.D. Dantsker, and M.S. Selig (insert date downloaded), UIUC Propeller Database, Vols 1-3, University of Illinois at Urbana-Champaign, retrieved-
from <https://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html>.