

# 倾转旋翼无人机混合动力系统的建模与仿真研究

翟世杰,傅鑫

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**为了分析油电混合动力系统的工作性能,以燃气涡轮发动机为基础,建立倾转旋翼无人机的油电混合动力系统模型。根据倾转旋翼无人机的工作特点,给出油电混合动力系统的功率配置方案,计算分析混合动力系统在倾转旋翼无人机典型飞行任务剖面下的工作性能,为后续研究倾转旋翼无人机的动力系统奠定基础。

**关键词:**混合动力系统;燃气涡轮发动机;倾转旋翼无人机;功率分配

**中图分类号:**V279 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0105-04

## Modeling and Simulation Research on Hybrid Power System for Tilt Roto UAV

ZHAI Shijie, FU Xin

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to analyse the working performance of oil-electric hybrid system, the oil electric hybrid system model of rotary rotor UAV is established based on gas turbine engine. According to the working characteristics of tilt rotor UAV, the power configuration scheme of hybrid system is given, and the working performance of oil-electric hybrid system under the typical mission profile of tilt rotor UAV is calculated and analyzed, which lays the foundation for the reserch on the hybrid power system of tilt rotor UAV.

**Keywords:** hybrid power system; gas turbine engine; tilt rotor UAV; power allocation

## 0 引言

无人机的传统驱动方式有纯油驱动(动力装置为发动机)和纯电驱动(动力装置为电动机)。对于纯油驱动的无人机,因燃油具有更高的能量密度,所以其航程更远、航时更长。但是,发动机的效率较低,且温度、噪声信号明显,不利于无人机隐身。随着人们对环境污染和能源枯竭问题的重视,燃油必将被清洁能源取代。纯电驱动的无人机,其效率比较高,对环境的污染小,隐身性能也更具优势。但是,电动机的供电装置一般为低能量密度、低比能的电池,为确保无人机充足的能量供应,电池质量都比较大,这在一定程度上限制了电动无人机的航时和航程。因此,单纯使用发动机或电动机作为无人机的动力装置,很难使其满足高效、长航时及大推重比的要求<sup>[1]</sup>。

随着能源动力技术的发展,近些年在无人机动力领域出现了燃料电池、太阳能电池、油电混合等新型能源类型。燃料电池是以压缩氢气作为主要燃料源,将氢能转化为电能,其能量密度和能量转换效率高,可以解决电动无人机续航时间短的问题<sup>[2]</sup>。但是,氢气压缩的大空间存储系统需要修改无人机设计,这增加了燃料电池的研制成本,还带来了安全问题。太阳能电池零污染,但是其能量效率低,要求无人机具有很大的翼展面积,这就需要更改无人机的常规设计<sup>[3]</sup>。此外太阳能电池驱动无人机的飞行状态还会受到太阳辐射强度的影响,所以必须增加辅助动力源。油电混合动力系统是由燃油和电池两种能源提供动力的系统。这种动力系统可以大大降低油耗和有害物质

的排放,因此被广泛应用于汽车领域。将混合动力系统用在无人机上,既可以解决电动无人机的航程和航时的问题,也可以解决油动无人机推重比和效率低的问题。油电混合动力系统综合了发动机和电动机的优势,是一种高效、可靠的动力形式<sup>[4]</sup>。

本文对倾转旋翼无人机的油电混合动力系统的燃气涡轮发动机、电机及储能装置三个部分进行建模,完成混合动力系统的总体模型搭建,计算分析了油电混合动力系统在倾转旋翼无人机典型飞行任务剖面下的工作性能。

## 1 倾转旋翼无人机混合动力系统部件建模

### 1.1 燃气涡轮发动机模型

燃气涡轮发动机是油电混合动力系统的主要动力部件,它包括进气道、压气机、燃烧室、燃气涡轮、动力涡轮以及排气装置。为避免复杂的迭代计算,本文采用容腔法<sup>[5]</sup>对燃气涡轮发动机进行建模。

考虑容积动力效应的燃气涡轮发动机方框图如图1所示。

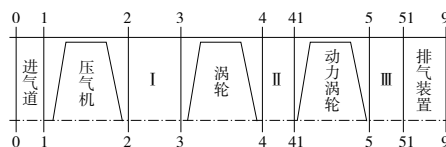


图1 考虑容积动力效应的燃气涡轮发动机方框图

在燃气涡轮发动机模型中,将压气机、燃烧室、燃气涡轮、动力涡轮之间的气动连接看作是串联的。在这些部件之间,都存在着一定体积的空腔,即容腔。在燃气涡轮发动机实际运行的动态过程中,容腔内气体的质量和能量也在不断变化,进而引起压力的波动,造成容腔进出口气流参数不再平衡,但满足容积动力学方程。容积动力学方程包括质量方程和能量方程,本文仅考虑质量方程。由于燃气涡轮发动机流路计算选用了3个压比(分别为 $\pi_c$ 、 $\pi_T$ 、 $\pi_{T,p}$ ),故选用燃烧室容腔 I、燃气涡轮和动力涡轮之间的容腔 II 以及动力涡轮和排气装置之间的容腔 III 求解。这3个容腔的容积动力学方程如下:

$$\text{容腔 I : } \dot{P}t_3 = \frac{(Wa_2 - Wa_3) \cdot R \cdot T_3}{V_I} \quad (1)$$

$$\text{容腔 II : } \dot{P}t_{41} = \frac{(Wa_4 - Wa_{41}) \cdot R \cdot T_{41}}{V_{II}} \quad (2)$$

$$\text{容腔 III : } \dot{P}t_{51} = \frac{(Wa_5 - Wa_{51}) \cdot R \cdot T_{51}}{V_{III}} \quad (3)$$

对于上述3个微分方程,给定积分初始条件便可求得  $Pt_3$ 、 $Pt_{41}$ 、 $Pt_{51}$ 。

由  $Pt_3$  可求得  $Pt_2 = Pt_3 / \sigma_B$ ;

由  $Pt_{41}$  可求得  $Pt_4 = Pt_{41}$ ;

由  $Pt_{51}$  可求得  $Pt_5 = Pt_{51}$ 。

3个旋转部件的压比 $\pi_c$ 、 $\pi_T$ 、 $\pi_{T,p}$ 由如下公式求得:

$$\pi_c = \frac{Pt_2}{Pt_1}, \pi_T = \frac{Pt_4}{Pt_2}, \pi_{T,p} = \frac{Pt_5}{Pt_4} \quad (4)$$

此外,还需考虑两个转子动力学方程:

$$\frac{dN_M}{dt} = \frac{\eta_M Q_T - Q_C}{\left[ N_M \cdot J_M \cdot \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 \right]}, \frac{dN_P}{dt} = \frac{\eta_P Q_{PT} - Q_{load}}{\left[ N_P \cdot J_P \cdot \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

式中: $Q_T$ 、 $Q_{PT}$ 分别为燃气涡轮和动力涡轮的输出功率; $\eta_M$ 、 $\eta_P$ 分别为发动机主轴和动力轴的机械效率; $Q_C$ 、 $Q_{load}$ 分别为压气机消耗功率和负载功率。已知 $\pi_c$ 、 $\pi_T$ 、 $\pi_{T,p}$ 、 $N_M$ 、 $N_P$ 就可进行燃气涡轮发动机的流路计算。

根据上述分析在 Simulink 中建立燃气涡轮发动机模型,如图2所示。

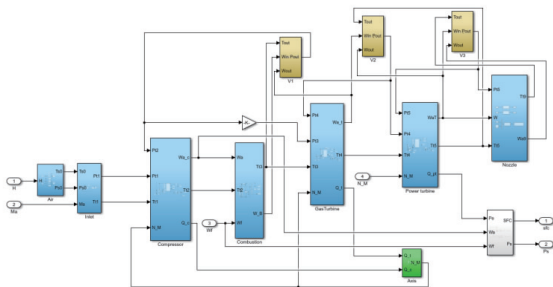


图2 燃气涡轮发动机模型 Simulink 图

## 1.2 电机模型

电机是实现机械能和电能相互转换的部件。电机的形式多样,但其工作原理都是基于电磁感应定律和电磁力定律。在进行电机建模时,通常都需要对电机的机械部分和电力部分分别建模,其工作量和计算量都很大,且本文

着重研究电机的功率、效率等总体性能,对电机内部结构和工作方式可忽略,故采取基于功率和转速 MAP 图的方法对电机进行建模。

通过电机的 MAP 图插值求得电机的效率

$$\eta = \begin{cases} f_g(N, P_{mech}) P_{mech} \geq 0 & (\text{驱动模式}) \\ f_m(N, P_{mech}) P_{mech} < 0 & (\text{发电模式}) \end{cases}$$

继而可求得电功率

$$P_{elec} = \begin{cases} P_{mech} / \eta & P_{mech} \geq 0 & (\text{驱动模式}) \\ P_{mech} \cdot \eta & P_{mech} < 0 & (\text{发电模式}) \end{cases}$$

电机的 Simulink 模型如图3所示。

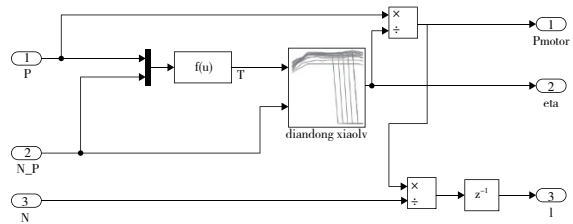


图3 电机模块 Simulink 方框图

## 1.3 储能装置模型

储能装置的充放电过程比较复杂,本文将其简化,仅针对储能装置的端电压和内阻等相关特性建模,其等效电路如图4所示。

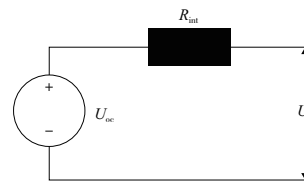


图4 储能装置等效电路

则有:

$$U_b = U_{oc} - I \cdot R_{int}$$

式中: $U_b$ 为储能装置端电压,V; $U_{oc}$ 为储能装置开路电压,V,与荷电状态有关(SOC); $I$ 为回路电流,A; $R_{int}$ 为储能装置内阻, $\Omega$ ,与荷电状态有关(SOC)。

储能装置荷电状态可由下式计算:

$$SOC = SOC_{0,0} - \frac{\int_0^t I dt}{Q_{bat}} \quad (6)$$

根据上述分析在 Simulink 中建立储能装置的计算模型如图5所示。

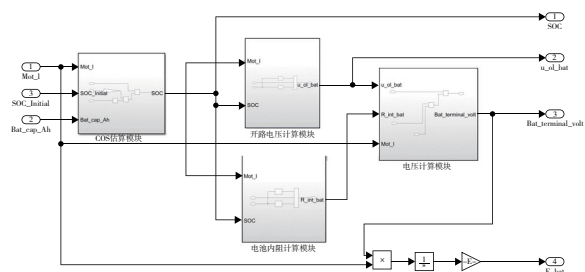


图5 储能装置等效电路模型

## 2 油电混合动力系统功率配置方案

### 2.1 油电混合动力系统工作模式

本文所建油电混合动力系统模型为并联式油电混合动力系统。该混合动力系统的工作模式有:混合驱动模式、驱动充电模式、纯油驱动模式。

**混合驱动模式:**当倾转旋翼无人机处于垂直起降、悬停或突然加速等功率需求较大的状态时,燃气涡轮发动机与电机共同输出动力,燃气涡轮发动机的能量来源于燃油,而电机的能量来源于储能装置,二者通过传动系统将动力输出至旋翼,从而驱动旋翼工作。

**驱动充电模式:**当倾转旋翼无人机达到一定高度后,进入固定翼巡航状态,且储能装置的电量不足时,燃气涡轮发动机的功率通过传动系统分为两条路线;一是通过齿轮直接输出至旋翼驱动无人机;二是输出到电机,驱动电机为储能装置充电。

**纯油驱动模式:**当倾转旋翼无人机在固定翼巡航状态,且储能装置电量充足时,燃气涡轮发动机输出的功率全部作用于旋翼。

### 2.2 飞行阶段功率需求分析

倾转旋翼无人机在飞行过程中,由于各个飞行阶段的飞行状态和飞行姿势存在差别,所以其对功率的需求也在不断变化。本文主要对垂直起降和固定翼巡航两种飞行状态下的功率需求进行分析,其他飞行状态可以看作这两种飞行状态的特殊情况。

倾转旋翼无人机在垂直起降模态下,由燃气涡轮发动机和电机共同带动旋翼产生垂直向上的拉力,从而具备在垂直方向运动的能力。在此种工作模态下,倾转旋翼无人机的所需功率可计算为

$$P_{VTOL} = \frac{\sigma \cdot M_{TO} \cdot g}{\zeta} \quad (7)$$

式中: $\sigma$ 是倾转旋翼无人机的拉力裕量(一般取1.4~1.8)<sup>[6]</sup>;  $M_{TO}$ 是无人机的起飞总质量; $g$ 是重力加速度; $\zeta$ 是旋翼产生拉力与功率之间的比值,本文取值为33 N/kW。

倾转旋翼无人机达到一定飞行高度后,动力系统部分装置倾转,无人机由垂直起降模态转换为固定翼巡航模态。此时,无人机主要受到自身重力、升力、空气阻力和动力装置推力。固定翼巡航模态的需求功率通过下式计算:

$$P_{cruise} = F_T \cdot v \quad (8)$$

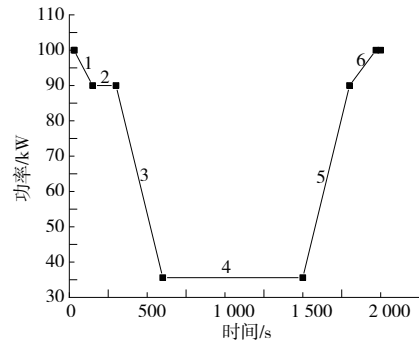
式中: $F_T$ 为动力装置提供的推力,N; $v$ 为飞行速度,m/s。其中 $F_T$ 的计算公式为

$$F_T = \frac{M_{TO} \cdot g}{C_L / C_D} \quad (9)$$

式中: $M_{TO}$ 为无人机质量; $C_L / C_D$ 为升阻比。

### 2.3 典型飞行剖面功率需求

根据实际经验,将倾转旋翼无人机的飞行状态分为垂直起飞、悬停、巡航过渡、固定翼巡航、过渡、垂直下降等阶段。各阶段总功率需求如图6所示。



1—垂直起飞;2—悬停;3—巡航过渡;  
4—巡航;5—过渡;6—垂直降落。

图6 典型飞行任务下的总功率需求曲线图

## 3 油电混合动力系统工作性能计算

将功率需求曲线导入油电混合动力系统模型,可得系统功率特性、油耗特性、电机效率特性以及储能装置电量变化特性。

图7为油电混合动力系统的功率曲线图,图8给出了电机的工作效率曲线。倾转旋翼无人机在垂直起飞1和悬停阶段2时,需求功率较大,此时由发动机和电机共同提供功率。此阶段,储能装置电量不断下降(图9)。

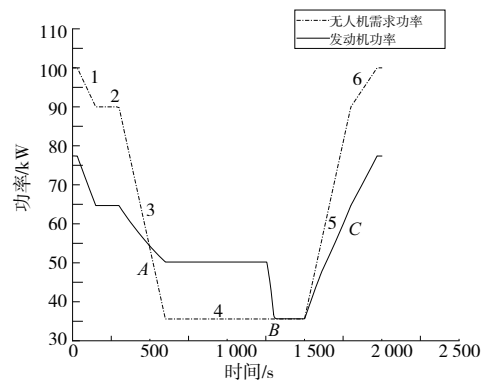


图7 功率曲线图

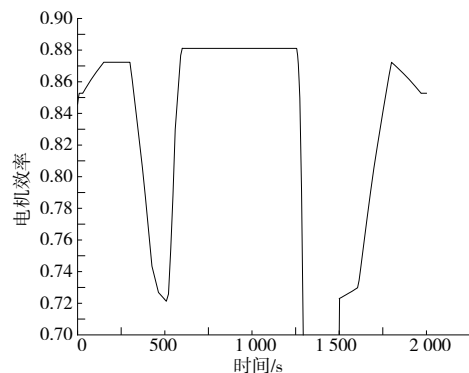


图8 电机效率特性图

随着无人机的垂直起飞的完成,无人机动力系统部分倾转,进入巡航阶段4,同时,无人机需求功率逐渐减小。巡航阶段的混合动力系统有两种工作模式,分别是驱动充电模式

和纯油驱动模式。如图 7 所示,从 A 点到 B 点,为驱动充电模式,此过程中,燃气涡轮发动机提供的功率一部分用于驱动无人机,另一部分用于驱动电机为储能装置充电,储能装置电量不断上升直至充满(图 9)。从 B 点到 C 点为纯油驱动模式,此时电机停止工作,发动机单独为无人机提供功率。最后无人机进入降落阶段,电机再次起动工作,与发动机一起为无人机提供功率,此时,储能装置电量不断下降(图 9)。

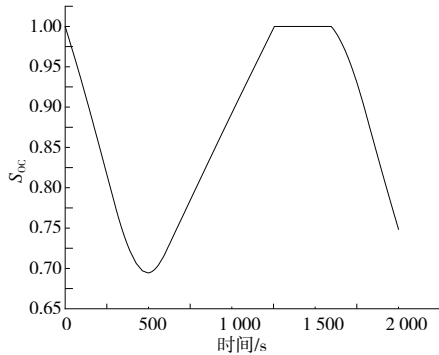


图 9 储能装置电量(SOC)变化曲线

在倾转旋翼无人机的飞行任务剖面内,油电混合动力系统的燃油流量和耗油率的变化曲线如图 10、图 11 所示。随着燃气涡轮发动机提供功率的减小,燃油流量逐步减小,而耗油率逐渐增加。这是因为当燃气涡轮的输出功率减小时,其核心机转速降低,压气机压比下降,同时涡轮前总温也在下降,这使得发动机经济性发生改变,因此耗油率增加。

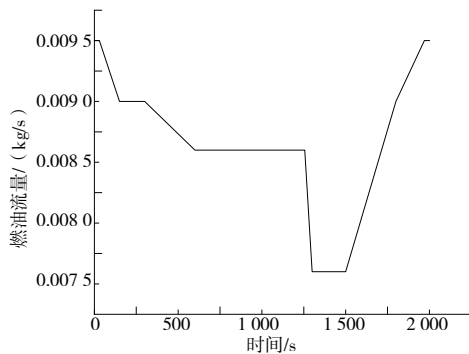


图 10 燃油流量变化曲线图

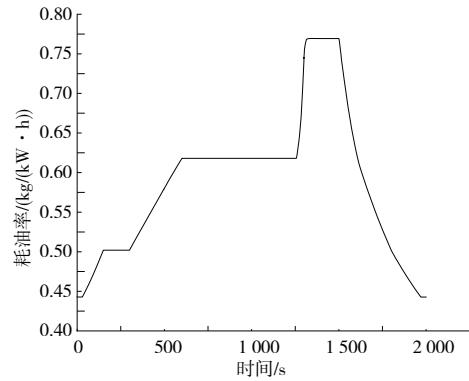


图 11 耗油率变化曲线图

## 4 结语

本文建立了基于微型燃气轮机的无人机用混合动力系统模型。在 MATLAB/Simulink 仿真平台上,建立发动机模块、电机模块以及储能装置模块,然后将其整合成并联式油电混合动力系统。结合倾转旋翼无人机的工作特点,给出了混合动力系统的功率配置方案,并计算分析了油电混合动力系统在倾转旋翼无人机典型飞行任务剖面下的工作性能,这为后续研究倾转旋翼无人机的动力系统奠定了一定的基础。

### 参考文献:

- [1] 卢旺. 倾转旋翼无人机油电混合动力系统的设计与实现[D]. 长沙:国防科技大学,2017.
- [2] 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.
- [3] ORKISZ M, WYGONIK P, WOŁOSZYŃ T. Prospective alternative propulsion systems for unmanned aerial vehicles [J]. Journal of KONES Powertrain and Transport, 2014,21(4):369-374.
- [4] 潘广纯,赵红,闫松,等. 插电式混合动力汽车控制策略硬件在环仿真研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(6):111-114.
- [5] 胡晓辰. 基于 MATLAB 仿真平台的动力与热管理系统建模及性能分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [6] JAEGER M, ADAIR D. Conceptual design of a high-endurance hybrid electric unmanned aerial vehicle [J]. Materials Today: Proceedings, 2017,4(3):4458-4468.

收稿日期:2021-11-05