

基于模糊逻辑的飞机电推进系统能量管理策略研究*

何燎磊, 陈 方

(上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

摘 要: 为了提升飞机电推进动力系统的性能, 需要设计和优化内部能量管理控制策略并实现功率合理分配。本文基于MATLAB/Simulink平台, 建立了电推进动力系统仿真模型, 并在能量管理系统模块中提出了基于模糊逻辑的能量管理策略(EMS), 其用于动力系统内部的功率分配和控制。针对从滑跑直到巡航稳定点的飞行任务段, 对电推进动力系统进行了时段级仿真实验, 研究了氢气消耗量等量化指标的表现。在此基础上, 基于遗传算法的优化方法, 对模糊控制系统的隶属度函数参数进行了寻优。计算结果表明, 在本文基于模糊逻辑的EMS作用下电推进动力系统的氢气消耗量减少9.27%, 而且氢燃料电池功率波动剧烈程度减少25.11%; 优化后, 主指标氢气消耗量进一步减少6.5%, 同时次要指标的变化被约束。

关键词: 电推进; 能量管理策略; 氢燃料电池; 模糊逻辑; 设计优化方法

中图分类号: V272 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2024) 03-2208058-11

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2208058

1 引 言

随着低碳环保的概念逐渐深入人心, 人们对“碳排放”问题日益重视。据统计, 在民用航空业中, 各类民航碳排放量占全球碳排放量的百分比为2.5%~4%, 并且随着国内外旅客数量的不断增加, 航空业的碳排放量还在逐年增长^[1]。费文鹏等^[2]指出我国的民航总油耗量预计在2040年达到峰值11 826万吨, 同时伴随着大量二氧化碳和氮氧化物的排放。低碳节能目标无疑给国内外的航空运输业带来了新挑战和新机遇。NASA提出了N+3目标, 即到2030年客机实现降噪71 dB、燃油消耗减少70%、氮氧化物排放减少80%。孙侠生等^[1]指出电动飞机相较于传统航空器能大幅度地节能、减排、降噪, 是航空业实现绿色发展的必然选择, 能量综合管理是关键技术之一。近年来, 功率范围从几十千瓦级到兆瓦级的各型电动飞机正被各国的企业和机构争相研发。

动力系统架构直接关联了动力系统的各项性能, 是电动飞机的基础研究内容之一, 按推力组成分类可分为全电推进和包含发动机推力的混合电推

进。近年来, 随着燃料电池、动力锂电池、超级电容器等储能元件的性能提升, 这些元件被国内外学者组合运用在各类场景中。除了已经普及的各型电动汽车, García等^[3]也将燃料电池、锂电池和超级电容器的组合应用在城市有轨电车上。在船舶领域, Han等^[4]将燃料电池和锂电池形成组合能源用于船舶; 孙晓军等^[5]针对内河船舶提出了并联气电混合动力系统改进方案。对于燃气轮机系统, 翁一武等^[6]在系统中加入固体氧化物燃料电池, 提出了SOFC-GT系统。而在航空领域, 无涡轮的固体氧化物燃料电池喷气推进系统被秦江等^[7]提出可用于大型无人机; 雷涛等^[8]通过基于飞行剖面的任务级仿真, 初步对比分析了不同类型的飞机电推进系统的性能。总体上来说, 在飞机上应用电推进动力系统的相关研究方兴未艾。

复杂动力系统须以合适的能量管理策略(EMS)来解决内部功率合理分配问题, 从而使各项指标(响应速度、燃料消耗量、电池寿命等)得到优化。传统的EMS大致上分为两类: 基于规则的和基于最优化的。基于规则的EMS依赖于专家知识, 在实际使用

* 收稿日期: 2022-08-20; 修订日期: 2023-02-20。

作者简介: 何燎磊, 博士生, 研究领域为电推进系统能量综合管理。

通讯作者: 陈 方, 博士, 研究员, 研究领域为高温气动、新概念推进。E-mail: fangchen@sjtu.edu.cn

引用格式: 何燎磊, 陈 方. 基于模糊逻辑的飞机电推进系统能量管理策略研究[J]. 推进技术, 2024, 45(3): 2208058.

(HE L L, CHEN F. Fuzzy logic-based energy management strategy for aircraft electric propulsion system[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(3): 2208058.)

中,往往计算量小但效果较差。在基于规则的EMS中,基于PID的能量管理策略计算量最小,容易调试参数,但处理非线性问题的能力较弱。基于滤波的能量控制策略的最大特色是可以确保主能源承接低频功率波动^[9],从而较好地平滑主能源的功率曲线。Caux等^[10]提出了基于模糊逻辑的电动汽车能量管理策略,丁明等^[11]则将其应用于储能电站。Li等^[12]提出模糊逻辑方法,可被优化至其最佳状态。不少群智能算法如遗传算法^[13]和粒子群算法^[14]等被用于模糊控制系统的优化。除此之外,在归于最优化的那一类方法中,国内外学者提出了包括基于模型预测控制^[15]、动态规划^[16]、神经网络^[17]、最优控制^[18]的EMS。然而这些方法通常需要以大量的计算为代价,与前一类方法相比有数量级的差别,而巨大的计算量拖累在线运作中的实时性,故常用于离线分析。Motapon等^[19]针对飞机应急电源系统对比了多种EMS的表现。

目前直接针对飞机电推进动力系统的EMS研究较少,而受不同飞行工况下需求功率变化的影响,飞机电推进动力系统内部存在高起伏、多频率的功率波动现象。针对此现象,需要研究和设计合适的EMS,将功率负载合理分配至各储能元件,从而优化飞机动力系统的性能。而为了缓解EMS算法功率分配效果与实时性的矛盾,本文采取了先建立基于模糊逻辑的EMS再对其参数进行寻优的方式。

本文以某轻型运动飞机为目标机型,构建全电架构的电推进动力系统,基于MATLAB/Simulink平台完成系统建模,提出基于模糊逻辑的在线能量管理策略。针对固定翼飞机滑跑、起飞、爬升直到巡航稳定点的一系列过程,进行高精度的时段级仿真实验,对比验证该EMS在处理动力系统内部功率分配问题中的性能表现。为实现优化系统主指标并均衡次要指标的目的,提出了基于遗传算法的EMS优化方法。

2 方法

2.1 基本架构

2.1.1 飞机飞行任务剖面

目标机型为单/双座轻型运动飞机,巡航速度100 km/h(约60 mile/h),巡航高度1 000m。本文所重点关注的是从滑跑直到巡航稳定点的具体过程,其基于高度和时间的飞行剖面如图1所示。

在大约200 s的时候飞行状态达到巡航稳定点,此时外部受力基本平衡,内部能量流动动态平衡。

由飞机动力学公式可计算关键节点的推力,再拟合曲线,可给出该飞行剖面对应的指令需求推力,如图2所示。

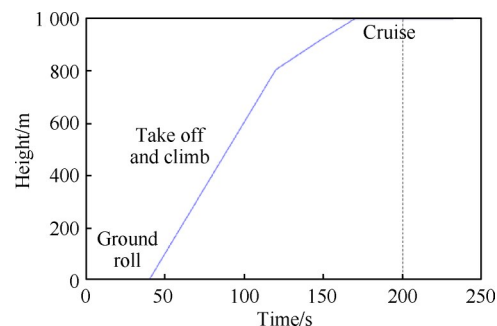


Fig. 1 Height-time flight profile

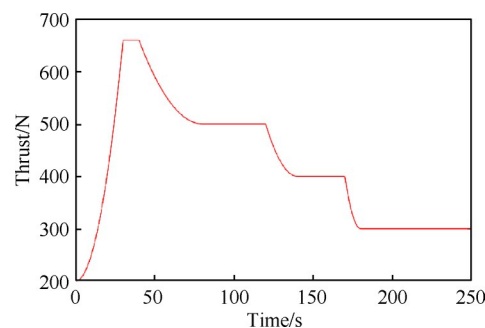


Fig. 2 Required thrust curve

规定动力系统的总推力应该尽可能地贴近上述曲线,这保证了对比内部任意能量管理策略时的严谨和公平。

2.1.2 动力系统架构

本文的电推进动力系统可以按照所属功能的不同分为3个子系统:储能子系统、推进子系统和能量管理子系统,如图3所示。3个子系统各司其职,但又联系紧密。

储能子系统由氢燃料电池、锂电池和超级电容器组成,负责储存能量并输出电能,严格意义上说,能量转化形式都是从化学能到电能并附带一定的热能。

推进子系统的主要功能是产生推力,本推进子系统采用永磁同步电机和螺旋桨的组合。螺旋桨采用并联双发的形式各联结一个电机,并假设电机的转速和螺旋桨的转速能始终保持一致。

能量管理子系统用于整个动力系统的控制和内部各元件的功率分配。控制指令的实际执行器是电子调速器和DC-DC变换器等。该系统是实现能量管理策略算法的基础。

从功率特性上看,地面滑跑、起飞与爬升到巡航

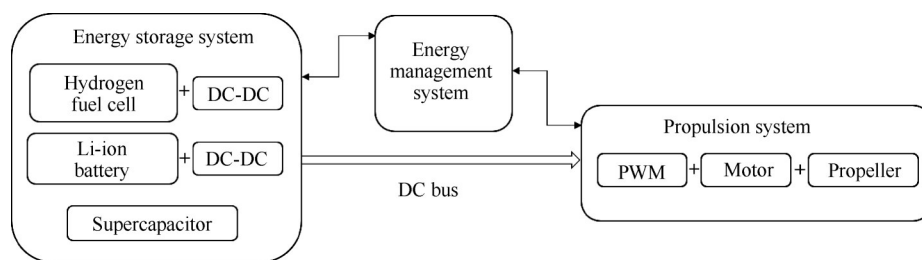


Fig. 3 General structure of power system

稳定点的过程中需求功率变化起伏极大,而在巡航阶段功率几乎恒定,在下降阶段功率平稳衰减(暂不考虑降落阶段依靠冲压空气涡轮或电磁刹车设备的能量回收问题)。故可知从滑跑直到巡航稳定点的过程是能量管理的重点,并可确定基本的策略:滑跑、起飞与爬升到巡航稳定点的过程中,主能源(氢燃料电池)和辅助能源共同作用;巡航阶段的需求功率可由主能源单独稳定提供。

整个系统的功率量级约为 20 kW,再考虑动力架构与基本策略可裁定氢燃料电池、电机等部件的参数。总线电压设定为 270 V,超级电容器组直连在总线上,这样的结构有利于超级电容器组承接小幅高频功率波动。

动力系统的架构总结为:储能系统通过总线(DC bus)输送电能到推进系统,推进系统产生所需机械功率及推力,能量管理系统在此过程中进行调制。本文暂忽略各元件的热管理问题,即假设各元件的温度能恒定在其预设工作温度上。

2.2 电推进动力系统建模

2.2.1 储能系统建模

在储能系统中,氢燃料电池是主能源,锂电池和超级电容器是辅助能源。三者的组合可以综合利用各自的长处,以达到平衡功率密度和能量密度的目的。

目前商用燃料电池系统的功率密度最大能超过 800 W/kg,而其能量密度主要与储氢系统相关,先进的储氢技术能使总能量密度超过 600 Wh/kg^[20]。氢燃料电池的种类很多,其中前景较好的是质子交换膜燃料电池(PEMFC)和固体氧化物燃料电池(SOFC)。PEMFC能在常温下工作,而且有相对不错的启动响应速度。本文采用质子交换膜燃料电池并使其在储能系统中起主导作用。

氢燃料电池的工作机理涉及较复杂的化学反应动力学,其反应机理不是本文的重点内容,故以下只简略地列出其基础方程组。

$$U = E_{oc} - U_{act} - U_r \quad (1)$$

$$U_{act} = A \ln \left(\frac{I_{fc}}{I_0} \right) \frac{1}{\frac{sT_d}{3} + 1} \quad (2)$$

$$U_r = r_{ohm} I_{fc} \quad (3)$$

$$U_{fc} = N \times U \quad (4)$$

式中 I_0 为交换电流(A), r_{ohm} 为电池和扩散电阻的组合(Ω), T_d 为电池到电流阶跃的稳定时间, A 为塔菲尔(Tafel)斜率, I_{fc} 为燃料电池电流(A), s 为传递函数中的固有符号, N 为电堆个数, U_{act} 是激活电压, U_r 是内阻电压, U_{fc} 是燃料电池总输出电压。采用基于上述公式的 Simulink SPS 工具包中的模块,设定参数,使氢燃料电池组的额定功率约为 20 kW,最高功率接近 25 kW。本文假设燃料电池工作温度恒定在 318 K,额定工况下空气压力设为 100 kPa,氢气压力为 116 kPa。本系统对燃料电池进行简单的控制:通过改变空气流量和燃料流量(氢气)来改变电流,使得输出电流接近参考电流,从而达到其所分担的指令功率。

目前商业动力锂电池的能量密度能达到 300 Wh/kg^[21],功率密度在 600~800 W/kg。本文主要讨论和采用的是磷酸铁锂电池,因为其有相对好的安全性。本节采用 Tremblay 等^[22]提出的数学模型,其将放电量作为基础变量,能够较好地反映锂电池的动态特性以及 SOC 数对电池性能的影响。为减少计算量,对本系统仿真影响较小的电池老化现象被暂时忽略。锂电池的充放电动态特性可以由两个方程来描述,分别为放电方程(5)和充电方程(6)。

$$U_{batt} = E_0 - RI - K \frac{Q}{Q - It} (It + I^*) + A \exp(-BIt) \quad (5)$$

$$U_{batt} = E_0 - RI - K \frac{Q}{It - 0.1Q} I^* - K \frac{Q}{Q - It} It + A \exp(-BIt) \quad (6)$$

式中 U_{batt} 为电池电压(V); E_0 为最大电动势(V); K 为极化常数(Ωh^{-1}); Q 为电池容量(Ah); It 为电池输出电荷量(Ah); A 为指数区电压幅值(V); B 为指数区容量($(Ah)^{-1}$); R 为电池内阻(Ohms); I 为电池电流(A); I^* 为过滤电流(A)。按照经典理论和经验知识,锂电池 SOC 较低会导致锂电池的放电特性曲线进入

电压急速下降区间,这将损害锂电池寿命并带来安全隐患。本文采用的锂电池标定电压为48 V,最高电压约56 V,电池容量为40 Ah,初始SOC(荷电状态)为70。

超级电容器的功率密度极高,具体数值超过2 000 W/kg,无记忆效应,适合承接高频功率波动,但能量密度较低。本文中的超级电容器模块是基于Stern模型^[23]的。单个超级电容器的标称电压为2.7 V,可将若干超级电容器串联形成电容器组,其初始总电压为270 V,理论电容值为21.6 F,且只有极小的电阻值和电感值。

2.2.2 电机及其附件建模

本文的电机采用永磁同步电机,具有较高的功率密度和较好的螺旋桨适配性。永磁同步电机的定子和转子由多匝线圈包裹的绕组和永磁体组成,电流通通常为三相电。方程(7)显示了电机基本机械原理,方程中, J 为转动惯量, F 为内部旋转摩擦阻力, T_f 为阻力矩, T_m 为负载力矩, T_e 为电磁力矩, ω_m 为旋转角速度。

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_f - F\omega_m - T_m) \quad (7)$$

本文采用Simulink工具包中的永磁同步电机模块,可设置各个参数,如图4所示,其输入为各线电压(A,B,C代表三相电)和负载扭矩,输出为电机的电磁转矩、转速等变量。

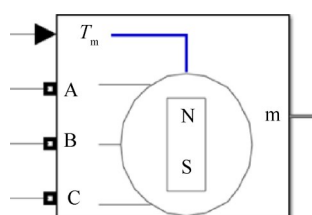


Fig. 4 Permanent magnet synchronous motor module

电机所需要的电路附件包括一个PWM(脉冲宽度调制)电压变换器和一个三相逆变器,这两个合起来成为电子调速器。电子调速器连接直流总线与永磁同步电机,其核心作用是可以使永磁同步电机可控地由直流电源驱动。

PWM电压变换器能生成一个高低电平交错的锯齿波,频率设置为2 000 Hz,其中高电平时间与周期的比称为占空比,通过调控占空比,能够使平均电压达到预期电压。三相逆变器则将直流电转化为三相电,输入到电机模块的A,B,C三相中。

2.2.3 DC-DC变换器建模

DC-DC变换器是本系统中实现功率分配的实际执行器之一,目前已经能够生产制造高性能低损耗的DC-DC变换器。DC-DC变换器按功能又可分为DC-DC Boost(实现直流升压),DC-DC Buck(实现直流降压),也有一些Buck与Boost一体化的DC-DC变换器。本文中DC-DC变换器采用平均值模型,相对于其他数学模型,其能在保证不错的精确度的同时产生较小的计算代价,平衡元件真实性和计算效率。

DC-DC变换器模块有两个输入指令端口,分别为目标电压和最大动态电流值。DC-DC装置本身会有较小的能量损耗,本文将DC-DC变换器平均效率设置为97%。

2.2.4 螺旋桨建模

螺旋桨的气动特性可以由实验或者CFD仿真计算得出,对气动特性最重要的2个几何特征是桨径和桨距^[24]。推进子系统中螺旋桨的桨径为27英寸(68.6 cm),螺距为13英寸(33.0 cm)。本文借助APC螺旋桨气动性能数据库,获取所需型号尺寸的螺旋桨的各项性能,依据该数据可建立螺旋桨气动性能的插值查表模型。APC数据库是螺旋桨厂家提供的开源数据库,具有权威性。将电机的转速输入所建立的插值表,再输出扭矩信息返回到电机,从而完成电机-螺旋桨耦合仿真。

将表中数据具象为图5,可以看到,在低速条件下该螺旋桨性能随空速变化很小,但在高速下性能随空速增大会急剧下降。本文的飞行速度区间不涉及高速情况。

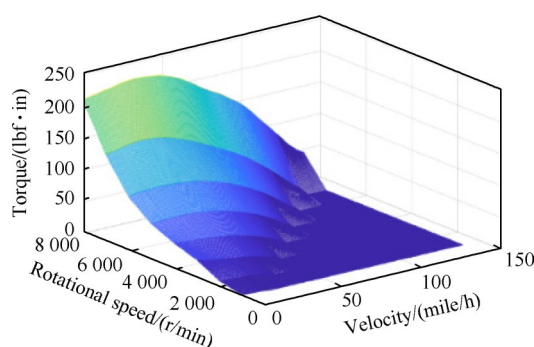


Fig. 5 Propeller torque data chart

2.2.5 基于Simulink的完整系统仿真平台

按照最初设定的动力系统架构,综合各个部件模型,构建基于Simulink的完整动力系统仿真平台。仿真求解器时间步长设为4 μ s,该步长下的测试结果

与最精确结果的平均相对误差不超过 2%。

2.3 能量管理控制策略

2.3.1 内外环控制结构

本节讲述系统的整体控制结构,控制结构可分为外环控制和内环控制,两者有一定联系但相对独立。

外环控制的核心目的就是使动力系统的实际推力贴合指令需求推力曲线。在仿真实验过程中,总线电压一定时,PWM 变换器的占空比与电机及螺旋桨的转速呈单值函数关系,其映射是近似线性的。所以可用 PWM 占空比控制信号去调控电机转速,进而产生预期推力。

内环控制其实就是内部功率分配,并对关键元件做必要的保护,其核心是能量管理策略。以下将分条阐述:

其一,以负载需求功率和锂电池 SOC 为输入,然后通过能量管理策略模块,得出燃料电池参考功率并作为输出,除以燃料电池电压,可得到燃料电池参考电流,进而控制燃料电池模块。

其二,当电压小于 270 V 时,超级电容器自发吸收能量,锂电池放电,高于 270 V 时则相反,这样可将总线电压稳定在 270 V。

其三,当电压过低(260 V)或者过高(280 V),锂电池 SOC 数过低(小于 58)等情况发生时应阻断实验。

2.3.2 基于模糊逻辑的能量管理策略

2.3.2.1 模糊逻辑推理系统设计

一个具体的模糊系统由模糊变量、隶属度函数和规则库等部分组成。

首先定义模糊变量,本文的模糊系统共有 3 个模糊变量:负载需求功率 P_{dem} ,定义域为 $[0, 22000]$,为输入变量;电池荷电状态 SOC,定义域为 $[0, 100]$,为输入变量;燃料电池指令功率 PFC,定义域为 $[0, 21000]$,为输出变量。

P_{dem} 的模糊子集: {VL, L, M, H};

SOC 的模糊子集: {L, M, H};

PFC 的模糊子集: {VL, L, M, H};

其中 VL, L, M, H 分别代表语义信息:很低,低,中等,高。

隶属度函数是模糊集合突破传统集合论局限的重要因素。三角形隶属度函数(trimf)和梯形隶属度函数(trapmf)被广泛使用,而本文的 SOC 采用梯形隶属度函数, P_{dem} 和 PFC 则采用更为平滑的广义钟型隶属度函数(gbellmf)。构建的隶属度函数如图 6 所示。

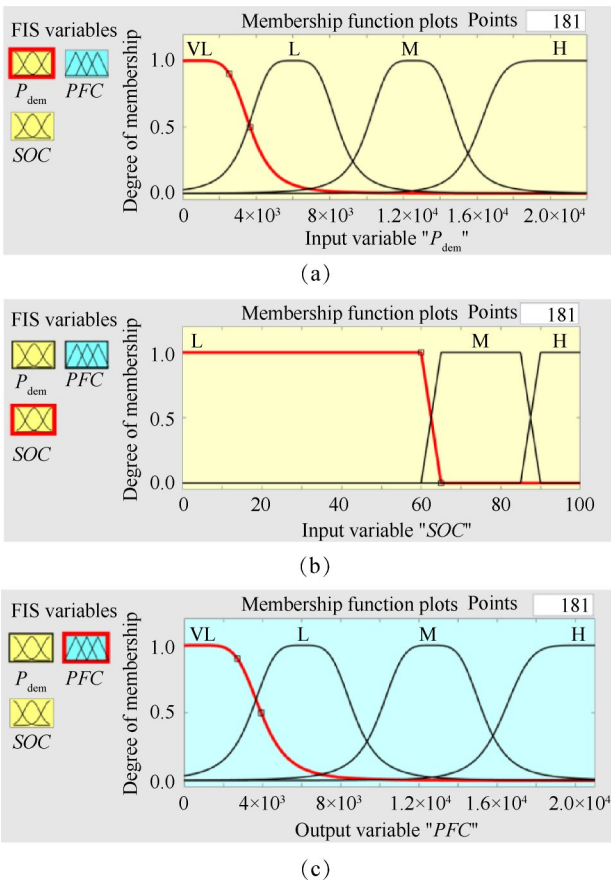


Fig. 6 Membership function

规则库中的模糊规则联结模糊系统中的各个变量,反映专家知识和经验规律。本系统中的模糊规则的核心设计思想是,合理调控燃料电池与锂电池在共同发挥作用时各自的功率占比,尽可能平滑氢燃料电池的功率曲线,并避免辅助能源过度充电或放电。表 1 归纳了所有的模糊规则,每个规则的权重默认为 1。

至此可构建出模糊逻辑推理系统,还可将该模糊系统具象成图 7。

Table 1 Schematic table of fuzzy rules

P_{dem}	SOC	PFC
VL	L	L
VL	M	L
VL	H	VL
L	L	M
L	M	L
L	H	L
M	L	H
M	M	M
M	H	L
H	L	H
H	M	M
H	H	M

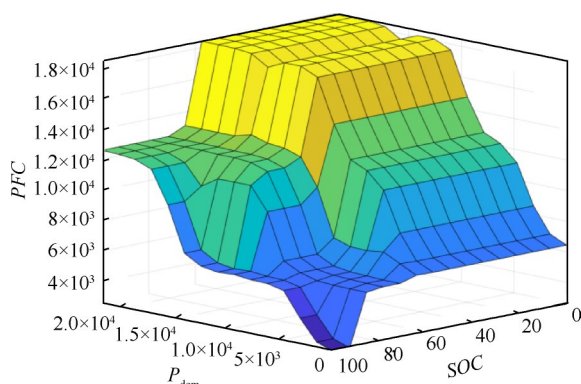


Fig. 7 Fuzzy logic system surface diagram

2.3.2.2 模糊逻辑EMS模块

在基于模糊逻辑的EMS模块中,数字信号经模糊化成为模糊变量“ P_{dem} ”和“ SOC ”,再经模糊推理转化为模糊变量“ PFC ”,最后解模糊为输出数字信号进入下一步(解模糊方法采用质心法),如图8所示。模糊逻辑EMS方法本质上是模仿人的思考决策过程,具有一定的智能性,其性能潜力相对其他方法更高。

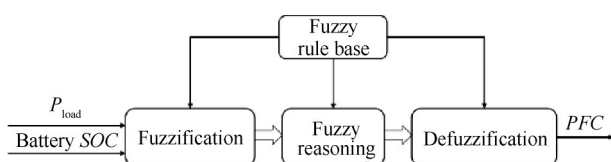


Fig. 8 Fuzzy logic EMS structure diagram

2.4 优化方法

2.4.1 量化指标设置

本文一共设置了6个量化指标,来评估电推进动力系统的性能表现,分别为氢气消耗量(单位为g)、锂电池SOC数、电效率(电机及其附件的效率)和氢燃料电池、锂电池、超级电容器各自功率变化剧烈程度 w_{fc} , w_{batt} , w_{sc} 。

氢气消耗量的定义为,氢气流量 L_{H_2} 在时间上的积分乘以系数 γ 就是消耗氢气的质量 C_{H_2} ,该指标被认为是重要指标,数学描述为式(8),即

$$C_{H_2} = \int_0^t \gamma L_{H_2} dt \quad (8)$$

锂电池SOC由锂电池模块计算并导出。可观测运行过程中是否会出现过低的SOC,并要求其最终能回归到初值附近。

电效率的定义是螺旋桨总机械功率在时间上的积分值除以储能系统总净输出能量的数值,实际上就是电机及其附件的平均效率 η ,借此表征不同情况下电机的性能表现。

功率曲线变化剧烈程度指标与电池性能和寿命

有密切关系。功率波动剧烈程度和电池内的复杂应力有联系^[25],而且高幅度高频次的波动对电池的性能有不利影响^[26],故该项指标应越小越佳。同时,其值越小储能元件(电池)的功率波动曲线直观感觉越平稳光滑。本文引入小波变换来得到该指标。这样做的目的是使表达曲线变化剧烈程度的指标能兼顾局部信息和全局信息,得到对工作应力(Operating stress)的一种估计。本文采用高阶db小波基进行离散小波变换(DWT)。db小波基由世界著名小波分析学者 Ingrid Daubechies 构造^[27]。然后再由分离后的各Level的标准差的加权和来定义功率波动剧烈程度 w_{fc} , w_{batt} , w_{sc} 。

$$w_i = \sum_{k=0}^N a_k \text{std}(L_{i,k}) \quad (9)$$

图9给出了一个示例,示例中将数据分割为两层。

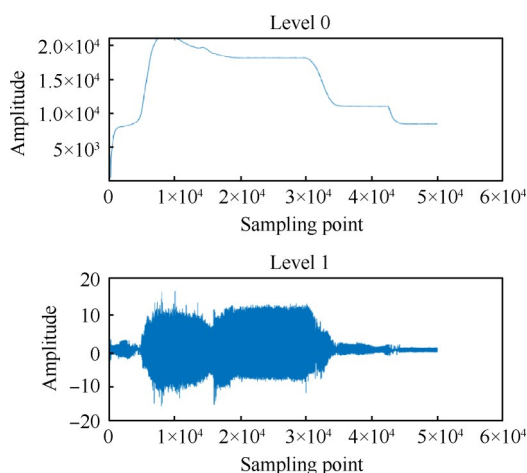


Fig. 9 Example with wavelet transform

2.4.2 遗传算法

本文所选用的优化算法核心是遗传算法,遗传算法本质上是一种群智能算法。遗传算法是通过生物遗传和进化过程中选择、交叉、变异机理的模仿来完成对问题最优解的自适应搜索过程^[28]。主要算子有选择算子、交叉算子和变异算子。本文的交叉概率取0.8,变异概率取0.001。适应度函数的作用是计算出个体的适应度,个体的适应度越高,则被选择的概率越高;适应度函数一般由目标函数变换得到,本文取目标函数的倒数为适应度函数。

可将重要量化指标如氢气消耗量作为优化主指标。在对主指标进行优化的同时,需保证次要指标不受太多影响,即约束次要指标的变化。而在实现过程中,这将带来对应的复杂非线性约束条件。为规避直接非线性约束条件下寻优的巨大计算量,“残疾”算子在本文中被提出。这里引入“残疾”的概念,

其定义是满足一定条件时个体会残疾,残疾的个体相比于任意非残疾个体有更差的适应度函数值。在目标函数中加权引入“残疾”算子,其表达函数 $D(x)$ 为阈值分段函数,其阈值激发条件就是之前提到的非线性约束,未激发时函数值为零,激发时函数值为 10^4 或更大。残疾的个体在初几代就大概率地被淘汰了,从而在实际上自然而然地达到了非线性约束的效果。总而言之,目标函数如式(10),优化目标即为寻找目标函数的最小值。

$$G(x)=\alpha C_{H_2}(x)+\beta D(x)$$

(10)

2.4.3 优化流程

对基于模糊逻辑的能量管理策略的优化实际上就是对其隶属度函数的参数进行优化,整个优化方法流程如图 10 所示。先从众多隶属度函数的参数中筛选出其中从性能表征上看重要的若干参数 $\{x_1, x_2, x_3 \cdots\}$,再加上边界条件等约束条件,进入遗传算法迭代,迭代中与仿真平台的数据交互,得到优化解,最后将优化解输入到仿真实验平台以验证是否达到期望的性能指标。但值得指出的是,此优化方法不一定能收敛到全局最优解。

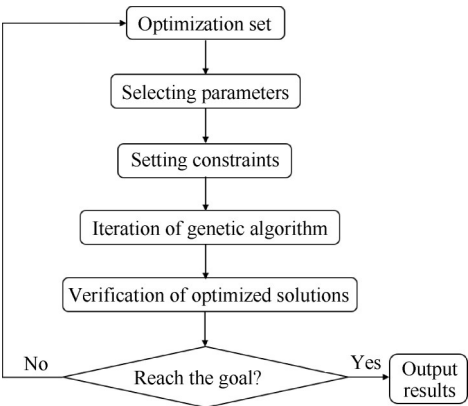


Fig. 10 Optimization flow chart

3 结果与讨论

3.1 推力曲线分析

将从螺旋桨模型的输出中得到的实际推力与指令需求推力对比,由图 11 所示,两条推力曲线基本重合,这是符合预期的。然而两者仍有细微的偏差,但最大相对偏差量只有约 2%。电子电力系统的动态特性和总线电压并不严格为 270 V 是引起偏差的主要原因。

3.2 功率曲线对比分析

功率曲线是本动力系统内部功率分配最直观的表达。本节通过对仿真过程中记录的各储能元件

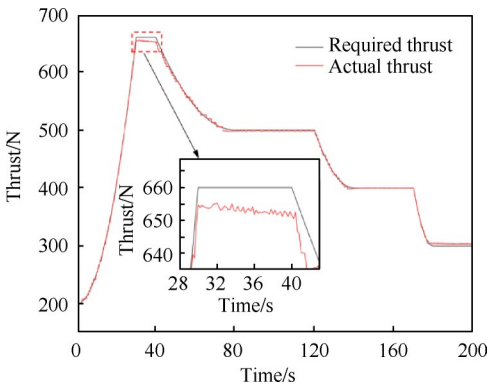
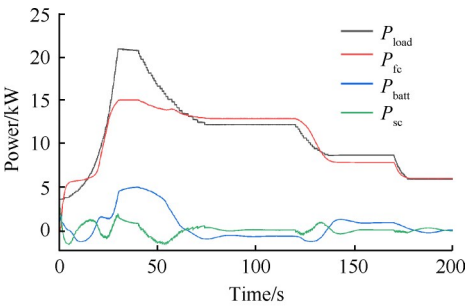


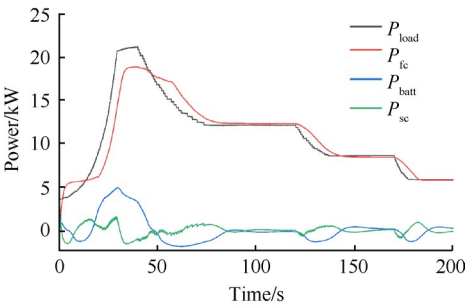
Fig. 11 Thrust result curve

的功率波动曲线的分析来展现能量控制策略的性能表现,见图 12,其中不同颜色的图例“ P_{fc} ”,“ P_{batt} ”,“ P_{sc} ”,“ P_{load} ”分别代表氢燃料电池、锂电池、超级电容器组的功率和总负载功率。

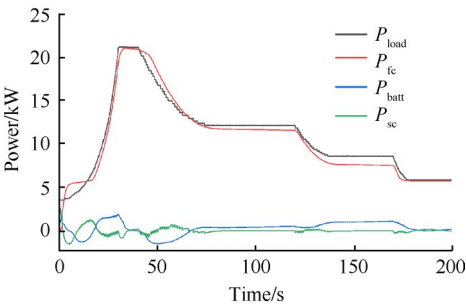
从图 12(a)可以看出,氢燃料电池总体来说起了主导作用,超级电容器组承接了绝大部分的高频波动。在最开始的几秒钟,氢燃料电池未完全启动,超级电容



(a) Fuzzy logic-based EMS



(b) Filter-based EMS



(c) PID-based EMS

Fig. 12 Power curve of components

器组提供了启动能量。在进入巡航工作状态后,氢燃料电池的功率贴合总负载功率,锂电池和超级电容器组的功率动态收敛至 0。总体上,氢燃料电池的功率峰值被大幅削弱,一定程度上转嫁为锂电池的功率峰值。

将基于滤波的 EMS 和基于模糊逻辑的 EMS 下的功率曲线进行对比,可以看到:两者的氢燃料电池功率曲线都一定程度上变平稳,但滤波方法的峰值削弱效果较差;锂电池功率峰值基本相同。两者最大的差别是,基于滤波的 EMS 将会附带较明显的相位延迟。再看基于 PID 的 EMS 下的功率曲线,氢燃料电

池的功率峰值几乎没有被削弱,该方法的削减效果是随时间慢慢增大的,故低功率区域反而被削减较多,同时锂电池和超级电容器组的功率波动相对较小。

3.3 重要指标对比分析

将仿真实验得出的各项指标记录在表 2, No-EMS 代表无 EMS 算法时的情况。其中氢气消耗量和氢燃料电池功率波动剧烈程度指标 w_{fc} 被认为是较重要指标,两者都是越小越佳。而无 EMS 的动力系统的氢气消耗量为 35.6 g, w_{fc} 指标为 274.51, 经计算可得出这两个指标的优化百分数,记录在表 3。

Table 2 Quantitative performance targets

Method	Hydrogen consumption/g	Efficiency/%	SOC/%	w_{fc}	w_{batt}	w_{sc}
Fuzzy	32.3	96.468	68.30	205.59	97.66	99.34
Filter	34.4	96.462	69.66	236.59	86.19	100.04
PID	33.7	96.466	69.04	254.71	56.86	88.55
No-EMS	35.6	96.463	69.55	274.51	48.41	94.64

因为不同算法中的实际输出推力基本一致,电机系统的效率理应一致,这与表 2 中三种方法的电效率相近是契合的。从表 2 中也可以看到:锂电池 SOC 数都在安全下限之上。基于 PID 的 EMS 的氢气消耗量相比基于滤波的 EMS 的较少,但 w_{fc} 的值相对较高。连同表 3 的数据可以得出,模糊逻辑方法在氢气消耗量指标和 w_{fc} 指标的表现都较好,然而 w_{batt} 和 w_{sc} 的值相对较高。总而言之,基于模糊逻辑的 EMS 在处理本动力系统内部功率分配问题上的性能表现较好。

响下, w_{sc} 增长了 6.3%, 而 w_{fc} 和 w_{batt} 的增长不超过 0.3%。

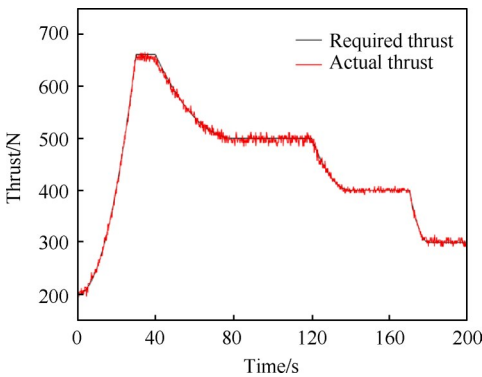


Fig. 13 Thrust curve with noise

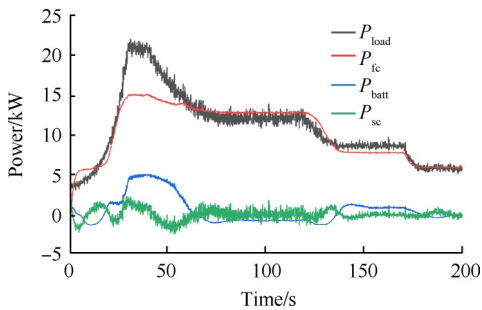


Fig. 14 Power curve with noise

3.4 噪声扰动影响分析

在实际工况下,往往存在复杂的噪声扰动,本节讨论噪声扰动对本动力系统的影响。本文通过加入高斯白噪声来模仿噪声扰动,能量管理策略仍采用模糊逻辑方法,在噪声影响下的输出动力曲线和内部功率曲线如图 13 和图 14 所示。推力曲线与图 11 相比增加了小幅的上下高频波动,但仍符合设计预期;在功率曲线中,氢燃料电池和锂电池的曲线基本不受噪声影响,同时可以明显地看到绝大部分噪声带来的高频功率波动由超级电容器承接。从功率波动剧烈程度 w_{fc} , w_{batt} , w_{sc} 指标来看,在噪声影

3.5 优化过程与结果

在 MATLAB 平台上通过编写代码可完成优化算法,将氢气消耗量设为优化主指标。其中 2 个表现在残疾算子中的非线性约束分别对应 $w_{batt} < 100$ 和 $w_{sc} < 105$, 这保证了优化过程对次要指标的影响是可控的。

算法的实际过程符合理论预期,见图 15,在前几代收敛速度较快,之后收敛速度减缓。总体运行速度和收敛速度较好。

最后将寻优结果代入仿真实验平台,进行测试和记录。测试结果表明氢气消耗量为 30.2 g,相比原模糊逻辑方法优化了 6.5%。同时, w_{batt} , w_{sc} 指标仍存在千分之几的约束裕度(99.26:100, 104.06:105),引起该现象的原因主要是仿真实验的精度误差与所设置的遗传算法最终迭代误差。将优化前的氢气消耗量增长曲线与优化后的进行比较,结果见图 16,其证实了氢气消耗量在全周期内的减少。

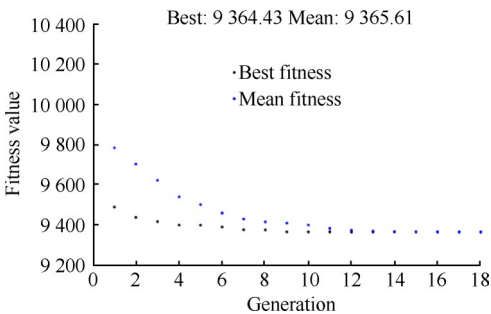


Fig. 15 Genetic algorithm generations chart

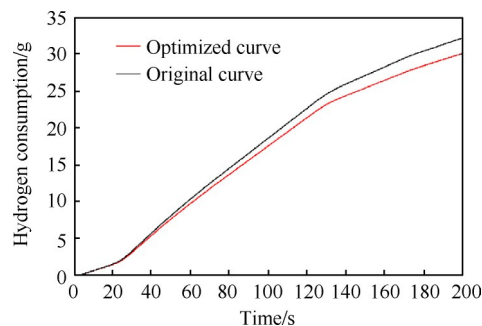


Fig. 16 Hydrogen consumption curve

进一步综合分析优化提升的原因。在算法参数层面,被寻优的参数中 PFC 的模糊子集 L, M 的相关参数在优化中较为敏感;在更本质的关键部件性能层面,一方面锂电池被更好地利用了,另一方面最关键部件氢燃料电池的平均效率得到了提升。燃料电池系统的平均效率为有效输出能量除以总能量,总能量为氢气热值与消耗量的乘积。表 4 给出了各方法的具体数据。

Table 4 Average efficiency of FC (%)

Method	Efficiency of FC
Filter	47.24
PID	47.61
Fuzzy	48.37
Fuzzy+Opt	49.32

4 结 论

本文在指定飞行任务段下对电推进动力系统及其能量管理策略进行了数值仿真,得到如下结论:

(1)全电架构动力系统与 EMS 配合时,推力响应速度快,绝大部分小幅高频功率波动能被引导至超级电容器组。

(2)基于模糊逻辑的能量管理策略在氢气消耗量和 w_{fc} 指标上表现较好,相对于无 EMS 的系统分别优化了 9.27% 和 25.11%,然而相应地, w_{batt} 和 w_{sc} 指标的值较高。

(3)基于遗传算法的优化方法,在次要指标(w_{batt} 和 w_{sc})受可控约束的前提下,将主指标(氢气消耗量)进一步优化了 6.5%,而且总计算代价被算法中的残疾算子缩减。

致 谢:感谢工业和信息化部科研项目“混合动力飞机设计与验证技术研究”的资助。

参考文献

[1] 孙侠生,程文渊,穆作栋,等. 电动飞机发展白皮书[J]. 航空科学技术, 2019, 30(11): 1-7.

[2] 费文鹏,熊聆利,欧阳斌,等. 中国民航飞机大气污染物排放测算及预测分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(2): 33-40.

[3] GARCÍA P, TORREGLOSA J P, FERNÁNDEZ L M, et al. Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37 (11): 9368-9382.

[4] HAN J, CHARPENTIER J F, TANG T. An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat[J]. Energies, 2014, 7(5): 2799-2820.

[5] 孙晓军,宋恩哲,姚 崇,等. 基于模糊逻辑推理的船舶并联气电混合动力系统能量最优分配研究[J]. 推进技术, 2022, 43(6): 210062. (SUN X J, SONG E Z, YAO C, et al. Optimal energy allocation of ship parallel gas electric hybrid power system based on fuzzy logic reasoning[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(6): 210062.)

[6] 李 杨,翁一武. 固体氧化物燃料电池-燃气轮机混合动力系统的性能及控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(35): 94-100.

[7] JI Z X, QIN J, CHENG K L, et al. Thermodynamic performance evaluation of a turbine-less jet engine integrated with solid oxide fuel cells for unmanned aerial vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 160: 114093.

- [8] 雷涛, 孔德林, 王润龙, 等. 分布式电推进飞机动力系统评估优化方法[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 44-63.
- [9] 张泽辉, 陈辉, 高海波, 等. 基于实时小波变换的燃料电池混合动力船舶能量管理策略[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(2): 127-136.
- [10] CAUX S, HANKACHE W, FADEL M, et al. On-line fuzzy energy management for hybrid fuel cell systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(5): 2134-2143.
- [11] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6.
- [12] LI C Y, LIU G P. Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2009, 192(2): 525-533.
- [13] 许兵, 张维刚. 纯电动汽车复合电源能量管理控制策略研究[J]. 机械设计与制造, 2021(2): 294-298.
- [14] 彭鹏菲, 姜俊, 黄亮. 基于粒子群优化的潜器深度自适应模糊控制[J]. 控制工程, 2017, 24(2): 441-445.
- [15] AMIN, TRILAKSONO B R, SASONGKO A, et al. Model predictive control of hybrid fuel cell/battery/supercapacitor power sources[C]. Bandung: 2012 International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), 2012.
- [16] KIM M J, PENG H. Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2007, 165(2): 819-832.
- [17] MORENO J, ORTUZAR M E, DIXON J W. Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 614-623.
- [18] LIN W S, ZHENG C H. Energy management of a fuel cell/ultracapacitor hybrid power system using an adaptive optimal-control method[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(6): 3280-3289.
- [19] NJOYA MOTAPON S, DESSAINT L A, AL-HADDAD K. A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1320-1334.
- [20] WANG Y, WANG Z, XAVIER C A, et al. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells—a review[J]. Materials Today, 2020, 32: 178-203.
- [21] 安富强, 赵洪量, 程志, 等. 纯电动车用锂离子电池发展现状与研究进展[J]. 工程科学学报, 2019, 41(1): 22-42.
- [22] TREMBLAY O, DESSAINT L A, DEKKICHE A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[C]. Arlington: 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007.
- [23] OLDHAM K B. A Gouy-Chapman-Stern model of the double layer at a(metal)/(ionic liquid) interface[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2008, 613(2): 131-138.
- [24] 王涛. 小型共轴双旋翼无人机的设计及研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [25] 时玮. 动力锂离子电池组寿命影响因素及测试方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [26] SAVOYE F, VENET P, MILLET M, et al. Impact of periodic current pulses on Li-ion battery performance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(9): 3481-3488.
- [27] DAUBECHIES I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1988, 41(7): 909-996.
- [28] 刘金琨. 智能控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.

(编辑:白鹭)

Fuzzy logic-based energy management strategy for aircraft electric propulsion system

HE Liaolei, CHEN Fang

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To enhance the critical performance of aircraft electric propulsion power systems, internal energy management control strategies need to be designed and optimized and power distribution needs to be achieved. Based on MATLAB/Simulink platform, an electric propulsion power system simulation model was established. And the fuzzy logic-based energy management strategy (EMS) was designed in the energy management system module, which was used for power distribution and control within the power system. For the mission segment from taxiing until the cruise stabilization point, time-scale simulations of the electric propulsion power system were conducted to study the performance of quantitative targets such as hydrogen consumption. On this basis, a genetic algorithm-based optimization method was used to find the optimal parameters of membership functions of the fuzzy control system. The calculation results show that the hydrogen consumption of electric propulsion power system is reduced by 9.27% and the hydrogen fuel cell power fluctuation is reduced by 25.11% under the effect of EMS based on fuzzy logic in this paper. After optimization, the hydrogen consumption is further reduced by 6.5%, while the changes of the secondary indicators are under the constraints.

Key words: Electric propulsion; Energy management strategy; Hydrogen fuel cell; Fuzzy logic; Design optimization method

Received: 2022-08-20; **Revised:** 2023-02-20.

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2208058

Corresponding author: CHEN Fang, E-mail: fangchen@sjtu.edu.cn