



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2303580

引用格式:张钰锋,李京阳,宝音贺西.飞行汽车混动系统动力电池和增程器的协调控制[J].科学技术与工程,2024,24(16):6943-6950.

Zhang Yufeng, Li Jingyang, Baoyin Hexi. Coordination and control of power batteries and processors in the flight car hybrid system [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(16): 6943-6950.

航空、航天

飞行汽车混动系统动力电池和增程器的 协调控制

张钰锋¹, 李京阳^{1,2*}, 宝音贺西³

(1. 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387; 2. 北京清航紫荆装备科技有限公司, 北京 102101;
3. 清华大学航空航天学院, 北京 100084)

摘要 城市空中交通(urban air mobility, UAM), 是近期解决当前地面交通拥堵困境的有效方法。因此, 研究飞行汽车典型飞行任务剖面下的动力系统工作特性至关重要。由于电池能量密度的限制以及纯电动飞行汽车的里程限制, 因此使用油电混合作为飞行汽车的动力系统更为合理。总结垂直起降飞行汽车(vertical takeoff and landing, VTOL)任务剖面下混动系统运行性能的相关研究。基于 MATLAB Simulink, 提出一种混合动力的协调方法, 其中同时考虑两种操作模式。根据实际操作条件, 预设垂直起降和平飞两种工况下不同的操作模式。在此基础上, 研究作为主要电源的增程器调节功率流和提高增程器工作效率的电池协调。直流母线电压由 DC/DC 转换器调节, 有利于电池组的整体寿命, 实现了充电和放电状态期间的功率共享。仿真结果表明: 可以很好地控制直流母线电压, 并且增程器和电池之间的功率共享遵循设计。

关键词 飞行汽车; 多源混动系统; 功率分配

中图分类号 V272; 文献标志码 A

Coordination and Control of Power Batteries and Processors in the Flight Car Hybrid System

ZHANG Yu-feng¹, LI Jing-yang^{1,2*}, BAOYIN He-xi³

(1. School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;
2. Beijing TsingAero Armament Technology Co., Ltd., Beijing 102101, China;
3. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] Urban air mobility (UAM) represents a promising solution for alleviating contemporary ground traffic congestion challenges. Consequently, a comprehensive analysis of power system operational characteristics within typical flight mission profiles for flying cars is of utmost importance. Due to constraints associated with battery energy density and the limited range of all-electric flying cars, the adoption of an oil-electric hybrid power system for flying cars is a more pragmatic choice. An overview of pertinent research concerning the operational performance of hybrid systems in vertical takeoff and landing (VTOL) vehicles was provided. Utilizing MATLAB Simulink, a hybrid power coordination method was proposed that accounted for both operational modes. Distinct operational modes were predefined in accordance with actual operational conditions, encompassing vertical take-off and landing as well as level flight scenarios. Building upon this foundation, the coordination of the battery was explored, serving as the primary power source, to regulate power flow and enhance the efficiency of the range extender. The DC bus voltage was subject to regulation through a DC/DC converter. To promote the overall longevity of the battery pack, power sharing mechanisms were introduced during both charging and discharging phases. Simulation results underscore the proficient control of the DC bus voltage, and power distribution between the range extender and the battery aligns with the predetermined design parameters.

[Keywords] flying cars; multi-source hybrid systems; power distribution

收稿日期: 2023-05-16 修订日期: 2024-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(11602123); 内蒙古自治区杰出青年培育基金(2019JQ002)

第一作者: 张钰锋(1999—), 男, 汉族, 河南信阳人, 硕士研究生。研究方向: 飞行器动力系统。E-mail: 2130050657@tiangong.edu.cn。

* 通信作者: 李京阳(1987—), 男, 汉族, 山西吕梁人, 博士, 教授。研究方向: 飞行器总体设计、无人机系统与工程、飞行器动力学与控制。
E-mail: lijingyang.thu@hotmail.com。

由于人口和汽车拥有量的迅速增长,未来地面交通拥挤的严峻情况不容忽视。传统的修高架桥和地下隧道等举措已难以有效解决城市拥堵的交通问题。飞行汽车可以在城市道路条件下实现起降,可以适应复杂环境下的交通状况,可以将地面交通路面扩展到低空,从而有效地利用城市的三维空间。

美国、韩国、中国等国家相继发布了关于未来城市空中机动性的报告。随着这一趋势,许多公司开始研究飞行汽车。传统的航空巨头如贝尔直升机德事隆、空中客车公司、波音公司已经启动了电动飞行汽车的研究项目。电动汽车和智能联网汽车的不断发展为飞行汽车的发展提供了强大的技术支持和产业保障。飞行汽车也将成为电气化和智能发展后的里程碑^[1]。

目前对于固定翼垂直起降飞行器的总体设计研究主要集中在纯电驱动方式,而固定翼垂直起降飞行器与混电系统的结合研究相对较少。受限于动力电池能量密度,对于相同重量的飞行器,燃油动力系统在航程和续航时间上明显优于电力系统。与电力系统相比,混合动力电力推进系统在能量密度方面具有明显优势。在包括内燃机、发电机和电池组在内的系统设计前提下,其能量密度约为电力系统的3倍^[2-3]。

混合动力系统能量管理策略是研究飞行汽车的关键。能量管理策略可以分为两类:基于规则的能量管理策略和基于优化算法的能量管理策略。

基于规则的能量管理策略通过设定规则,根据需求功率、动力电池工作状态等信息,来实现对混合动力系统的控制。Zhu等^[4]采用模糊控制策略优化发电机与电池组的功率分配,采用理想工作线(ideal operating line, IOL)控制器优化内燃机工作点,建立了详细的飞行器模型和能源系统模型,模拟了100 kg级垂直起降飞机在典型任务剖面下的飞行过程。宗建安等^[5]基于固定翼飞行器的设计要求以及最大起飞重量的估计值,构造混电系统设计区间进而得出推进系统的设计参数。徐楷等^[6]在串联混动飞行器模型基础上实现基于规则的能量管理策略和最小等效油耗的策略模拟,并就节油效果方面与动态规划算法得到的全局最优控制策略进行了比较。基于规则的能量管理策略优点在于控制逻辑简单可靠,易于应用到实际工程中。

基于优化算法的能量管理策略采用动态规划、深度学习与模型预测控制等算法设计能量管理策略。Donateo等^[7]基于Agusta Westland A109飞行器探讨动态规划策略在混合动力飞机能量管理策略中

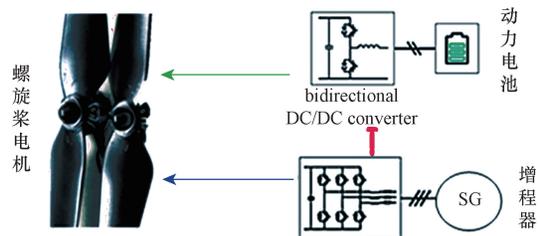
的应用,通过对比非混合动力状况,评价了发动机的效率,评估了任务数据的适用性。Huang等^[8]围绕基于状态预测的驾驶员行为采集方法和动态模型对模型预测控制(model predictive control, MPC)进行了分类和阐述,提出影响MPC算法精度和性能的因素。Yang等^[9]基于飞行汽车地面和空中双模式下电气和发动机的协调工作,提出了一种基于深度强化学习的混合动力飞行汽车能量管理策略并进行有效性验证。然而,优化算法的复杂度较高,只能适用于已知工况下的计算,较难用于实际控制中。

综上所述,目前飞行汽车大多以纯电运行,考虑到飞行里程以及续航时间的需求,需要采用混合动力系统。但现阶段对飞行汽车混合动力系统的成熟控制方案较少,主要聚焦于解决功率分配问题,而未考虑母线电压维稳以及动力电池充放电等动态工作情况。鉴于此,基于飞行汽车混合动力系统提出一种基于低频滤波方法的能量管理策略,合理进行增程器与动力电池的功率分配,并设计各部件的控制策略以实现飞行汽车混合动力系统的优化控制,并构建仿真模型,对该能量管理策略进行验证。研究成果可为后续对飞行汽车混合动力系统的开发提供一定的工程借鉴和参考。

1 混合动力系统数学模型建立

1.1 总体方法

飞行汽车混合动力系统模型架构如图1所示。该设计的垂直起降飞行汽车构型是由8个电机带动8个螺旋桨以及固定翼构成的。动力总成构架是采用混合动力系统框架,即动力电池和增程器混合驱动模式和增程器驱动模式。由于飞行汽车没有标准的运行条件,因此首先设定飞行任务剖面,包括设计垂直爬升、平飞、垂直下降三段运行工况^[6]。参考现有飞行汽车产品和直升机的参数,提出该飞行汽车性能参数,如表1所示。建立增程器模型,动力电池模型,电机模型,双向DC-DC变换器模型以及AC-DC变换器模型。通过建立这些模型,预设两



bidirectional DC/DC converter 为双向 DC/DC 变换器

图1 飞行汽车混合动力系统图

Fig. 1 Flying car hybrid power system diagram

表1 飞行汽车参数

Table 1 Flying car parameters

参数	数值
飞行高度/m	1 000
最大起飞重量/kg	1 200
最大前进速度/(km·h ⁻¹)	200
最大里程/km	200

种模式。最终得到飞行任务剖面下飞行汽车的混动动力系统的工作特性。

1.2 动力电池模型

不考虑配件损耗,增程器的输出功率加上电池输出功率等于电动机的电功率。根据动力电池的输出功率,可以计算出工作电流,工作电压和荷电状态^[7]。动力电池仿真方程为

$$P_{generator} + P_{bat} = P_{motor} \quad (1)$$

$$I_{bat} = \frac{V_{ocv} - \sqrt{V_{ocv}^2 - 4P_{bat}R_{bat}}}{2R_{bat}} \quad (2)$$

$$V_{bat} = V_{ocv} - I_{bat}R_{bat} \quad (3)$$

$$SOC = SOC_{ini} - \int_0^t \frac{\eta_c I_{bat}}{Q_{bat}} dt \quad (4)$$

式中: $P_{generator}$ 、 P_{bat} 、 P_{motor} 分别为增程器的输出功率、动力电池功率以及螺旋桨电机的需求功率; V_{bat} 、 I_{bat} 分别为电池组的电压和电流;动力电池荷电状态(state of charge, SOC),用来反映电池的剩余容量;SOC_{ini}为动力电池SOC初始值; η_c 为动力电池的库仑效率; Q_{bat} 为动力电池容量; V_{ocv} 为动力电池的开路电压; R_{bat} 为充放电内阻;

如表2所示,通过对比各种电池材料的功率/能量密度、循环寿命和成本可以看出,虽然锂电池的成本相对较高,但与其他电池相比,该技术代表了最高的能量密度和较长的循环寿命。这就是在这项工作中选择三元锂电池的原因。

根据作业任务所需的功率需求和增程器的输出功率,电池组输出功率应该为56 kW。最大能量变化 $\Delta E_{max} = 36 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。这意味着需要一个最低可用能量为36 kW·h的电池组。假设电池组中完全存储能量的90%是可用的(即工作电池SOC为0.1~1),在这种情况下,电池组的最小能量容量为40 kW·h。

各种等效电路锂电池模型比较研究表明,一个电池单元的一阶RC等效电路模型对于在能量管理规模上对锂电池行为进行建模是足够有效的。

表2 电池参数

Table 2 Battery parameters

电池材料	能量密度/(W·h·kg ⁻¹)	循环寿命
磷酸铁锂电池	171	3 000次
三元锂电池	245	2 000次
氢燃料电池	701	2 000 h

锂电池组模型如式(1)~式(4)所示。

表3为用于模拟的电池模型中使用的参数并且满足作业任务的功率需求^[8-9]。

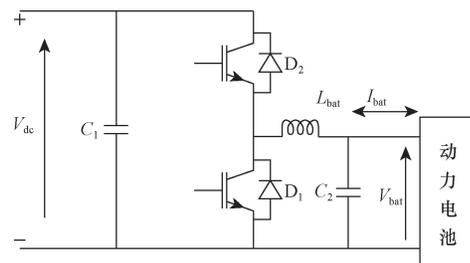
表3 三元锂电池参数

Table 3 Parameters of ternary lithium battery

参数	数值
单电池电压(最小电压~最大电压) $V_{min} \sim V_{max}/V$	2.8~4.2
串联电池数 N_s	120
并联电池数 N_p	8
串联电池内阻 R/Ω	1.96
极化电阻 R_c/Ω	0.869
等效电容 C_e/F	90 000

1.3 双向DC-DC升降压变换器模型

DC-DC升降压变换器适合控制动力电池充电,其结构如图2所示。动力电池电压设置为400 V,通过双向DC-DC变换器与650 V的直流母线进行连接。双向DC-DC变换器的控制策略采用电压环和电流环双环控制^[10]。双向DC-DC变换器采用半桥式,并进行计算选取储能电感和滤波电容的参数如表4^[10]所示。



V_{dc} 为直流母线电压; C_1 为直流母线端电容; C_2 为电池端电容; D_1 、 D_2 为绝缘栅双极晶体管; L_{bat} 为电池端电感; I_{bat} 为电池输出电流; V_{bat} 为电池电压

图2 双向DC-DC升降压变换器

Fig. 2 Bidirectional DC-DC buck-boost converter

表4 双向DC-DC升降压变换器参数^[10]Table 4 Parameters of bidirectional DC-DC buck-boost converter^[10]

参数	数值
母线电压 V_{bus}/V	650
动力电池电压 V_{bat}/V	400
直流母线侧电容 C/F	5.088×10^{-5}
动力电池侧电容 C_{bat}/F	4.3767×10^{-6}
动力电池侧电感 L/H	1.098×10^{-4}

1.4 增程器模型

增程器内部的永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)是增程器稳压系统的核心部分,在三相静止坐标系下,体现为一个强耦合、非线性、时变的数学模型,需要把三相静止坐标系下的模型转换为两相,建立同步旋转坐标系下

的数学模型,即将 PMSG 三相定子电流等效为磁场定向的直流电流和与之正交的交轴电流。

在每个增程器装置中,PMSG 直接与发动机耦合,PMSG 在 dq 轴上的动态模型可表示为

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{d}{dt}(I_d) - \omega_e L_q I_q \quad (5)$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{d}{dt}(I_q) + \omega_e L_d I_d + \omega_e \Psi_m \quad (6)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p [\Psi_m + (L_d - L_q) I_d] I_q \quad (7)$$

$$J \frac{d}{dt}(\omega_m) = T_m - T_e - f_B \omega_m \quad (8)$$

式中: V_d 、 V_q 分别为发电机 d 轴和 q 轴电压; R_s 为定子电阻; I_d 、 I_q 分别为发电机 d 轴和 q 轴电流, ω_e 为发电机电磁转速; ω_m 为发电机的机械转速; L_q 、 L_d 分别为发电机 d 轴和 q 轴的电感; Ψ_m 为发电机转子磁通; f_B 为摩擦系数; T_e 为 PMSG 的电磁转矩; T_m 为发动机的机械转矩; J 为 PMSG 的旋转部件的总惯性矩。

通过调研,选用一款增程器,其参数如表 5 所示。

表 5 发电机规格参数

Table 5 Generator specification parameters

参数	数值
额定功率/kW	200
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
发动机冲程数	4
定子电阻/ Ω	0.087
定子电感/mH	3.3
转子磁通/Wb	1.37
发电机总转动惯量/(kg·m ²)	9.374

2 控制策略

2.1 动力电池侧双向 DC-DC 升降压变换器控制策略

双向 DC-DC 升降压变换器设计为两种模式^[10-12]。

(1)BUCK 模式(模式 1)。BUCK 模式控制框图如图 3 所示。在模式 1 下,由于飞行汽车已经处于平飞状态,增程器输出的功率大于平飞状态所需要的功率,此时 DC-DC 变换器设置为降压模式,增程器在满足平飞所需的功率的情况下,用多输出的功率用于对动力电池进行充电。

$$\alpha_{\text{buck}} = \frac{V_{\text{bat}}}{V_{\text{dc}}} \quad (9)$$

式(9)中: α_{buck} 为 BUCK 模式下 DC-DC 变换器占空比。

(2)BOOST 模式(模式 2)。BOOST 模式控制框图如图 4 所示。在模式 2 下,由于飞行汽车正处于垂直起降阶段,增程器输出功率小于垂直起降状态所需要的功率,此时 DC-DC 变换器设置为升压模式,

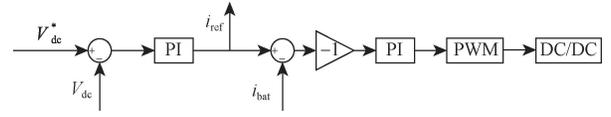


图 3 BUCK 模式控制框图
 V_{dc}^* 为参考电压; V_{dc} 为直流母线电压; i_{ref} 为参考电流; i_{bat} 为电池电流; PWM 为脉宽调制 (pulse width modulation, PWM)

图 3 BUCK 模式控制框图

Fig. 3 BUCK mode control block diagram

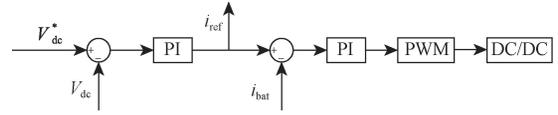


图 4 BOOST 模式控制框图

Fig. 4 BOOST mode control block diagram

增程器和动力电池同时输出功率,满足垂直起降阶段 8 个电机所需功率。

$$\alpha_{\text{boost}} = 1 - \frac{V_{\text{bat}}}{V_{\text{dc}}} \quad (10)$$

式(10)中: α_{boost} 为 BOOST 模式下 DC-DC 变换器占空比。

(3)在增程器故障时,此时 DC-DC 变换器设置为升压模式(模式 3),动力电池进行单独供电,使 8 个电机能够正常工作,从而让飞行汽车能安全降落。

为了控制电池的电流和母线电压,双向 DC-DC 转换器的等效占空比可由上式进行计算,然后将这些占空比与三角波形进行比较以获得用于电池侧 DC/DC 升降压转换器的 PWM 开关信号。

Boost 模式下传递函数 bode 图如图 5(a) 所示。Buck 模式下传递函数的 bode 图如图 5(b) 所示。由图 5 可知,双向 DC-DC 变换器在 Boost 模式和 Buck 模式都处于稳定状态。

设计双向 DC-DC 升降压变换器控制器参数如表 6 所示。

表 6 双向 DC-DC 升降压变换器控制器参数

Table 6 Controller parameters of bidirectional DC-DC Buck-Boost converter

控制器	参数	数值
电流环 PI 控制	$K_{\text{pbuck},e} \setminus K_{\text{ibuck},e} \setminus$	0.1, 0.005, 100, 10
	$K_{\text{pboost},e} \setminus K_{\text{iboost},e}$	
电压环 PI 控制	$K_{\text{pbuck},v} \setminus K_{\text{ibuck},v} \setminus$	0.5, 10, 10, 50
	$K_{\text{pboost},v} \setminus K_{\text{iboost},v}$	

注: $K_{\text{pbuck},e}$ 、 $K_{\text{ibuck},e}$ 分别为 BUCK 模式下电流环 PI (proportional integral, PI) 模块的比例增益和积分增益参数; $K_{\text{pboost},e}$ 、 $K_{\text{iboost},e}$ 分别为 BOOST 模式下电流环 PI 模块的比例增益和积分增益参数; $K_{\text{pbuck},v}$ 、 $K_{\text{ibuck},v}$ 分别为 BUCK 模式下电压环 PI 模块的比例增益和积分增益参数; $K_{\text{pboost},v}$ 、 $K_{\text{iboost},v}$ 为 BOOST 模式下电压环 PI 模块的比例增益和积分增益参数。

2.2 增程器电压控制策略

基于矢量控制的增程器稳压系统的控制策略,可以很好地稳定直流母线电压,避免较大波动。

$i_d=0$ 是矢量控制其中的一种,这种控制策略易

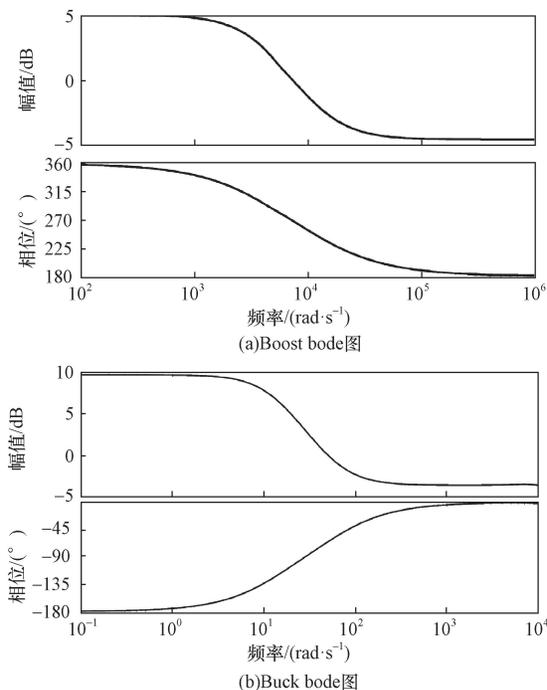


图5 2种模式下传递函数的 bode 图

Fig.5 Bode diagram of transfer function in two modes

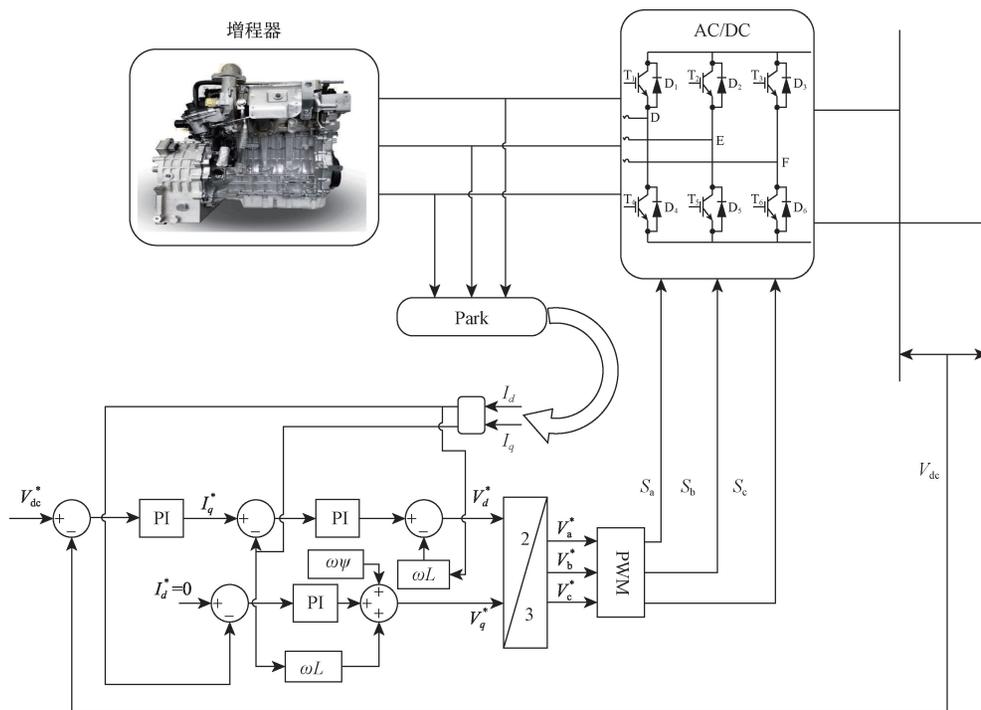
于控制与实现,可以降低铜耗,提高效率,主要体现在电压外环-电流内环的双闭环控制。

如图6所示,增程器系统 $i_d=0$ 矢量控制的具体过程为:给定电压值与反馈电压值作差得到的误差经过 PI (proportional integral, PI) 调节,可得到永磁同步发电机运行状态下的交轴电流给定值 i_q^* ,令直轴电流给定值 i_d^* 为 0。实测电流后经过 Park 坐标变换得到实际的 i_q 和 i_d ,再与相应的给定值作差得到给定的 u_q 和给定的 u_d ,经过反 Park 变换后再经过调制可以得到 PWM 整流器所需的开关信号^[17]。

2.3 负载分配策略

由于飞行汽车的飞行剖面有多个阶段,如垂直起飞、平飞、垂直降落等。因此需要设计一种能够满足各飞行阶段性能要求变化的混合动力的协调方法。

通过给出图7中飞行汽车在其飞行剖面下的需求功率,分析需求功率。功率分配策略如图8所示,使用频率分析法和低通滤波器结合^[14-16],结合增程器和动力电池的频率特性,设计低通滤波器的截止频率,将负载功率需求分为高频分量和低频分量,从而将低频分量分配给增程器,高频分量分配给动力电池,充分发挥动力电池的优势,从而使增程器功率和电池功率得到合理的分配。



V_{dc}^* 为参考电压; V_{dc} 为实际电压; I_q^* 为 q 轴参考电流; I_d^* 为 d 轴参考电流; V_a^* 、 V_b^* 、 V_c^* ; a 、 b 、 c 轴参考电压; S_a 、 S_b 、 S_c 为 AC/DC 变换器开关信号; L 为发电机电感; ω 为线圈角速度; ψ 为发电机转子磁通; D 、 E 、 F 为增程器 a 、 b 、 c 三相线输出 AC-DC 变换器的联接点; $T_1 \sim T_6$ 为 6 个 IGBT 全控开关器件; $D_1 \sim D_6$ 为 6 个续流二极管

图6 增程器稳压策略

Fig.6 Range extender voltage stabilizing strategy

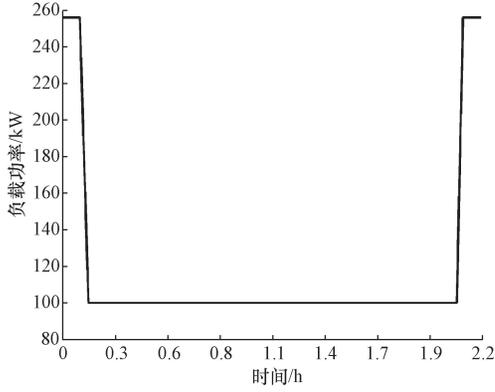
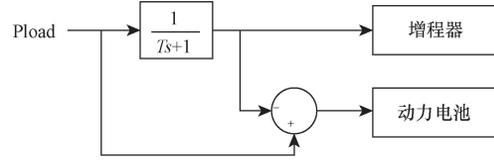


图7 飞行汽车需求功率

Fig. 7 Flying car demand power

3 混合动力飞行汽车仿真

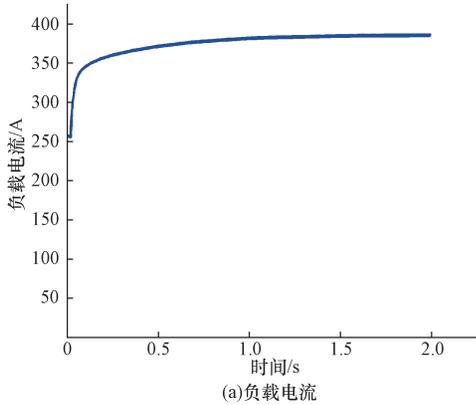
根据上述内容,使用 Simulink 搭建模型。首先对飞行汽车在垂直起降模式时进行仿真,结果如图9所示。在垂直起降模式下负载电流和负载电压



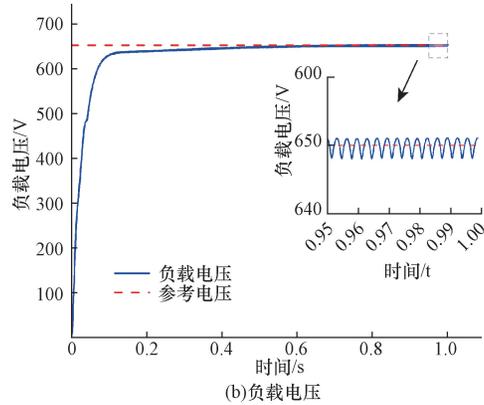
Pload 为负载功率; T 为滤波时间常数; s 为拉普拉斯算子

图8 功率分配策略

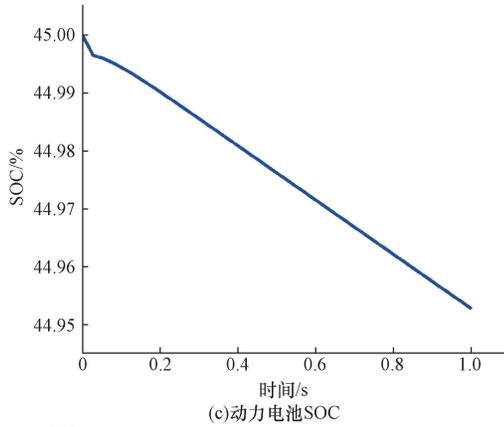
Fig. 8 Power allocation strategy



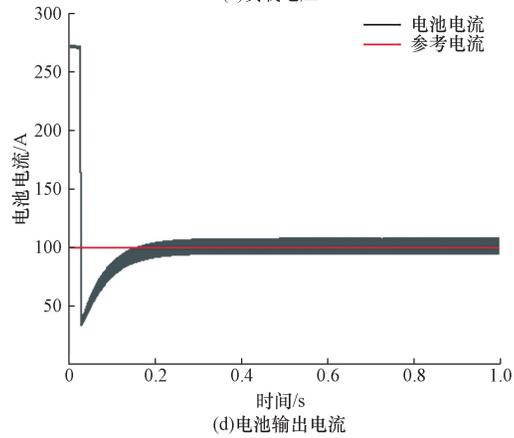
(a)负载电流



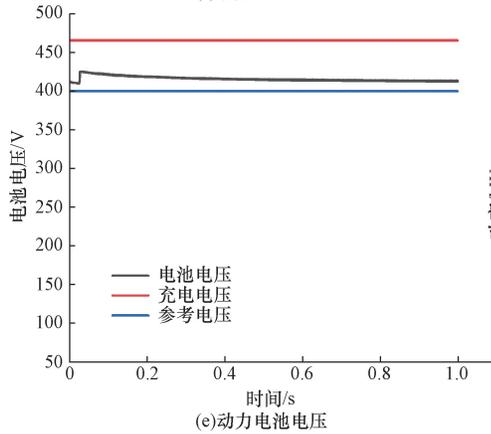
(b)负载电压



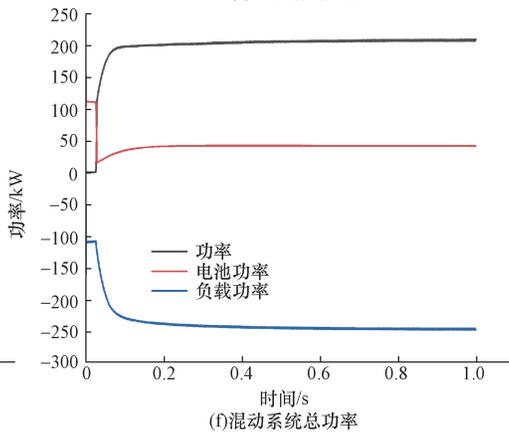
(c)动力电池SOC



(d)电池输出电流



(e)动力电池电压



(f)混动系统总功率

图9 垂直起降模式时仿真结果

Fig. 9 Simulation results in vertical takeoff and landing mode

可以在图 9(a)和图 9(b)中观察到,在 2 s 时趋于稳定值,并将负载电压保持在 650 V。同时负载电流与负载电压波动幅度均小于 5%。满足设计的要求。所提出的直流母线电压控制策略能够使 V_{dc} (直流母线电压)保持在 650 V 的设定值附近。如图 9(c)所示,在此模式下动力电池 SOC 持续下降。电池输出电流如图 9(d)所示,稳定在 100 A,其误差在可接受的范围内。如图 9(e)所示,动力电池持续放电,因此电压逐渐减小。从图 9(f)中可以看出,在混动系统中,增程器功率和电池功率能够满足飞行汽车垂直起降时所需的 256 kW 负

载功率。

对飞行汽车在平飞模式下进行仿真,结果如图 10所示。要满足 200 km/h 的速度,负载所需功率为 75 kW。如图 10(a)和图 10(b)所示,可以观察到负载电流和电压均保持稳定,两者的误差不大。如图 10(c)所示,由于电池不断充电,其 SOC 持续上升。从图 10(d)和图 10(e)可以看出,电池的充电电流和电压也均保持稳定,其中电池的充电电流保持在 50 A。由图 10(f)可知,在平飞时,增程器功率满足负载所需功率和电池功率之和。因此能够实现所设计的控制策略。

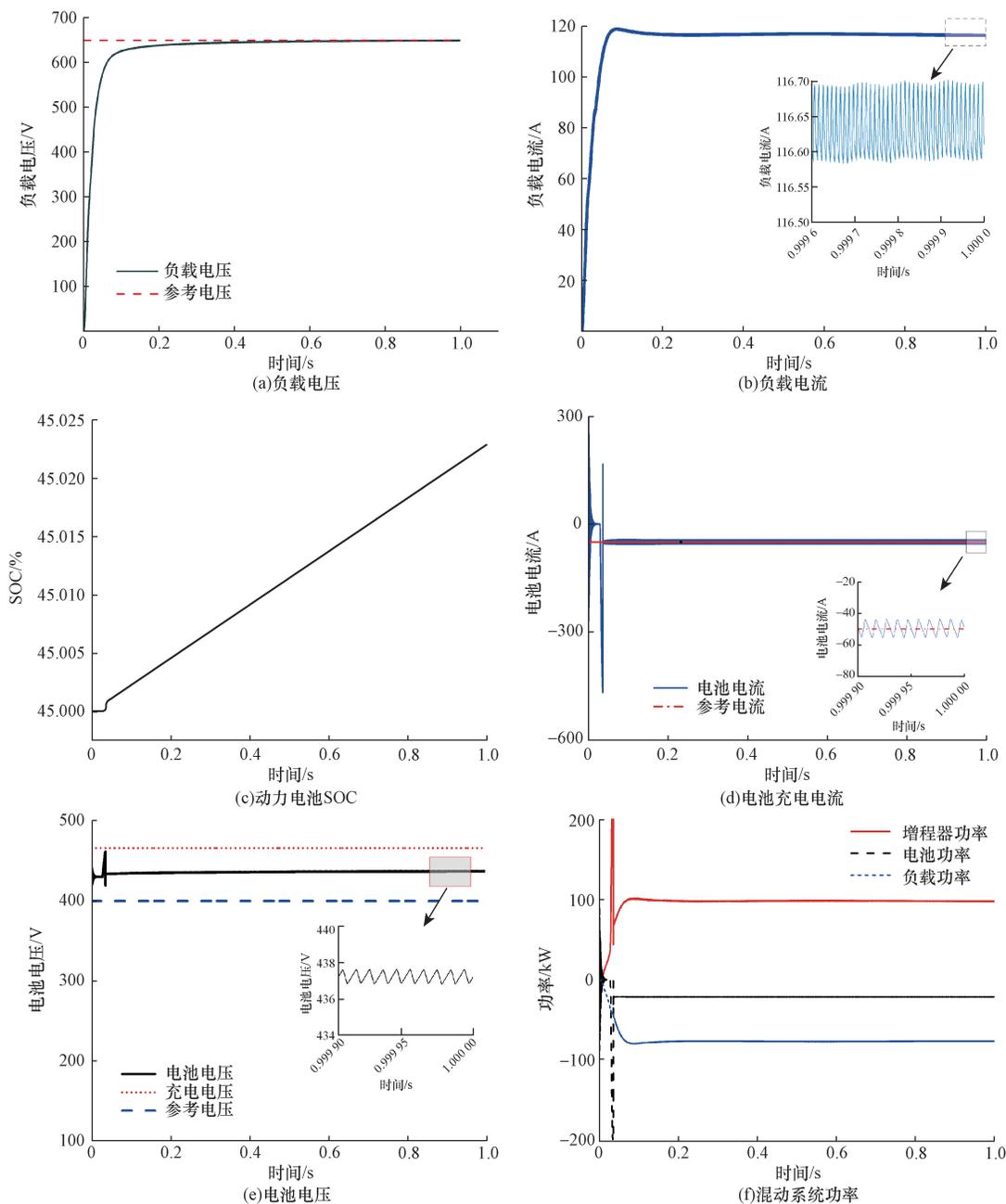


图 10 平飞模式下仿真结果

Fig. 10 Simulation results in level flight mode

4 结论

在油电混合动力飞行汽车的基础上对其混动系统进行分析,得出如下结论。

(1) 建立动力电池、发电机、双向 DC-DC 升降压变换器等部件模型,对动力电池类型和容量选择以及对双向 DC-DC 升降压变换器参数进行设计。

(2) 在飞行汽车飞行任务剖面即垂直起降和平飞阶段,提出了直流母线电压维稳,动力电池充放电以及负载功率分配的控制方法,通过建立模型进行仿真验证。

(3) 仿真结果表明,所提出的协调功率管理方案能够在垂直起降任务阶段,所提出的方法能够实现将高频分量分给动力电池,将低频分量分给增程器,并且增程器贡献总负载分配的 78%。在平飞阶段,负载需求低时,增程器在满足负载需求的同时,用来恢复动力电池 SOC。

参 考 文 献

- [1] 张扬军, 钱煜平, 诸葛伟林, 等. 飞行汽车的研究发展与关键技术[J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(1): 1-16.
Zhang Yangjun, Qian Yuping, Zhuge Weilin, et al. Progress and key technologies of flying cars[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2020, 11(1): 1-16.
- [2] Oelberg E. A hybrid optimal control approach to maximum endurance of aircraft[D]. Montreal: Concordia University, 2018.
- [3] Patrick W, Thusara S, Serhiy B, et al. Electric/hybrid-electric aircraft propulsion systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(6): 1115-1127.
- [4] Zhu Y T, Zhu B J. Fuzzy logic-based energy management strategy of hybrid electric propulsion system for fixed-wing VTOL aircraft[J]. Aerospace, 2022, 9(10): 547.
- [5] 宗建安, 朱炳杰, 侯中喜, 等. 固旋翼垂直起降混电飞行器推进系统设计[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 379-390.
Zong Jian'an, Zhu Bingjie, Hou Zhongxi, et al. Design of hybrid-electric fixed-wing VTOL aircraft propulsion system[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 225395-225395.
- [6] 徐楷, 王步宇, 帅石金. 多旋翼无人机串联混合动力系统能量管理仿真[J/OL]. (2022-09-01) [2023-10-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2297.v.20220830.1803.003.html>.
Xu Kai, Wang Buyu, Shuai Shijin. Multi-rotor UAV series hybrid power system energy management simulation[J/OL]. (2022-09-01) [2023-10-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2297.v.20220830.1803.003.html>.
- [7] Donato T, Ficarella A, Spedicato L. Applying dynamic programming algorithms to the energy management of hybrid electric aircraft[C]// ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Oslo: International Gas Turbine Institute, 2018: 1-11.
- [8] Huang Y, Wang H, Khajepour A, et al. Model predictive control power management strategies for HEVs: a review[J]. Journal of Power Sources, 2017, 341: 91-106.
- [9] Yang C, Lu Z X, Wang W D, et al. An efficient intelligent energy management strategy based on deep reinforcement learning for hybrid electric flying car[J/OL]. (2023-06-13) [2023-10-20]. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128118>.
- [10] 丁鑫权. 增程式混合动力系统仿真与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
Ding Xinquan. Simulation and experimental research of extended-range hybrid power system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [11] Zhou Z, Camara M B, Dakyo B. Coordinated power control of variable-speed diesel generators and lithium-battery on a hybrid electric boat[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(7): 5775-5784.
- [12] 李军, 李虎林. 电动汽车锂离子电池荷电状态估算方法综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2147-2158.
Li Jun, Li Hulin. Review of state of charge estimation methods for electric vehicle lithium-ion batteries[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(6): 2147-2158.
- [13] 姜康, 郭硕, 吴钱昊. 燃料电池观光汽车动力系统参数的匹配与优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 351-356
Jiang Kang, Guo Shuo, Wu Qianhao. Matching and optimization of power system parameters parameters of fuel cell sightseeing vehicle[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(32): 351-356.
- [14] 李赫, 郝欣, 赵千淇, 等. 全桥 DC-DC 变换器中 SiC 器件损耗分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11216-11223.
Li He, Hao Xin, Zhao Qianqi, et al. Loss analysis of SiC devices in full-bridge DC-DC converter[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(26): 11216-11223.
- [15] Montoya G O D, Ruiz A G, Velázquez I O, et al. Passivity-based control for battery charging/discharging applications by using a Buck-Boost DC-DC converter[J]. IEEE Green Technologies Conference Austin, 2018, 6: 89-94.
- [16] 彭鑫焱. 多电源混合供电协同控制策略的研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
Peng Xinyao. Research on collaborative control strategy of multi-power hybrid power supply[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.
- [17] 吴翊铭. 基于 PWM 整流的永磁同步发电机系统稳压控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
Wu Yiming. Research on voltage regulation control for permanent magnet synchronous generator system based on PWM rectification[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [18] 蔡坤城. 多源混合动力系统的分散式动态功率分配控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
Cai Kuncheng. Research on decentralized dynamic power allocation control strategy of multi-source hybrid power system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [19] 程龙. 基于混合储能系统的多电飞机功率脉动平抑技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Cheng Long. Research on power pulsation flattening technology of multi-electric aircraft based on hybrid energy storage system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [20] 孙纯军, 倪春花, 窦晓波. 基于 SOC 状态反馈的混合储能功率优化策略[J]. 电测与仪表, 2016, 53(15): 81-88.
Sun Chunjun, Ni Chunhua, Dou Xiaobo. Hybrid energy storage power optimization strategy based on SOC state feedback[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15): 81-88.