

基于能量闭环的太阳能无人机能源管理

户艳鹏^{1,2}, 郭金^{1,2}, 周蒙³, 王翔宇^{4,*}

(1. 北京科技大学 自动化学院, 北京 100083; 2. 工业过程知识自动化教育部重点实验室, 北京 100083;
3. 中国电子科技集团公司第四十八研究所, 长沙 410111; 4. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190)

摘 要: 临近空间作为地球空间新的认知领域和重要的安全空间受到世界主要大国的重视, 临近空间太阳能无人机是世界航空科技领域的研究热点, 传统的设计方法中, 能源、动力、飞控、载荷等独立设计, 无法有效减轻结构质量, 也难以达到总体性能最优。基于此, 从能源系统可靠性和能源动力飞控一体化设计 2 个角度对临近空间太阳能无人机能源管理开展研究, 以达到结构质量减重与总体性能优化的目的。采用双余度能源管理方案设计, 通过双向固态功率控制器 (SSPC) 进行隔离与控制, 实现单次故障状态下的安全返回; 开展能源动力飞控一体化设计, 将储能电池控制、电机控制、电源控制和飞行控制一体化设计, 在硬件上减轻质量, 软件上达到协同控制的目的; 采用改进蚁群优化算法进行太阳能无人机的三维航迹规划, 并将规划航迹作为能源系统地面模拟综合试验的输入进行一体化控制方案的仿真验证, 实现了能源管理、动力控制与飞行控制的协同控制。

关 键 词: 能量闭环; 能源管理; 协同控制; 蚁群优化算法; 航迹规划

中图分类号: V221⁺.3; TK01⁺.8

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)08-2624-08

临近空间是距离地面 20 ~ 100 km 的空间区域, 包括大气平流层区域、中间大气层区域和部分热层区域, 具有大气密度小、受云雨天气影响小、太阳辐射强等特点^[1], 非常适合太阳能类飞行器飞行。太阳能无人机具有续航时间长和在目标区域上空永久驻留的优势, 是国内外临近空间飞行器研究的热点之一^[2-4]。

太阳能电池、电源管理系统、储能电池组成了能源系统, 为太阳能无人机动力系统、载荷及飞控设备等提供可靠、充足的能量。电源管理系统是能源系统的控制中心, 实现太阳能电池输出功率控制及储能电池充放电管理^[3]。目前, 受限于储能电池能量密度和太阳能电池效率, 太阳能无人机能源系统还无法很好地兼顾能量平衡、功率平衡、力平衡, 严重制约着太阳能无人机的进一步发展。在太

阳能无人机设计制造过程中, 为保证能源系统对多种载荷用电需求的支持, 大量采用了变流器、储能电池等, 造成系统质量增加, 效率降低。具体来说, 存在如下缺点^[5]: 能源系统尺度大, 载荷种类多样, 且安装位置分散, 导致线路损耗大; 过多的电池放电安全余量、动力系统输出安全余量增加了能源系统的质量, 降低了飞行控制效率, 进而对能源系统提出了更高要求。基于上述问题, 近年来国内外学者针对能源载荷一体化设计开展了广泛的研究, 主要集中在光伏天线方面, 包括间隙型光伏天线、贴片型光伏天线、集成太阳翼的平面反射阵天线、透明太阳能平面反射阵天线、超材料光伏天线和偶极子光伏天线等^[6-8]。

在减少系统质量进而减少能源消耗的基本前提下, 还需对飞行器的飞行控制及能源管理策略提

收稿日期: 2022-08-31; 录用日期: 2022-12-06; 网络出版时间: 2023-01-04 13:32
网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230103.2025.009
基金项目: 国家自然科学基金 (62173030); 北京市自然科学基金 (4222050)
*通信作者. E-mail: wangxiangyu@iet.cn

引用格式: 户艳鹏, 郭金, 周蒙, 等. 基于能量闭环的太阳能无人机能源管理 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (8): 2624-2631.
HU Y P, GUO J, ZHOU M, et al. Energy management of solar-powered UAV based on energy closed loop [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (8): 2624-2631 (in Chinese).

出更高的要求。文献 [9] 综合考虑无人机运动状态和能量获取、存储、消耗之间的耦合关系, 建立了三维航迹优化模型, 采用高斯伪谱法在离散点上近似状态变量和控制变量, 且在一系列配平点上满足动力学方程约束, 进而将最优控制问题转化为非线性规划问题, 结果表明, 通过调整飞行姿态和改变飞行高度能够提高净吸收能量和储能电池剩余电量。文献 [10] 以能量为核心建立了太阳能飞行器的能量获取模型, 并基于飞行器飞行剖面特点建立了飞行过程中各阶段的能量消耗模型, 基于能量获取模型和能量消耗模型建立储能模型, 完成了能源闭环模型的设计, 通过参照 Zephyr 7 太阳能无人机的结构参数进行了仿真分析, 表明通过对太阳能飞行器昼夜飞行高度及姿态角的优化, 可以实现跨昼夜飞行。文献 [11] 根据太阳能飞机起飞-爬升-巡航阶段和持续跨昼夜飞行阶段的飞行剖面 and 能量需求, 分别建立了各阶段的能量平衡模型, 给出了各时段的能量特性计算方法。文献 [12] 综合考虑太阳能电池和氢燃料电池特性, 提出了一种考虑全机质量-能量耦合关系的总体设计方法和任务剖面驱动的能源管理策略, 并进行了仿真验证。

本文针对传统能源控制系统进行了优化设计, 将能源、动力、飞控一体化设计, 在硬件上实现减重设计, 在控制算法上做到协同控制, 解决了传统太阳能无人机方案中能源、动力、飞控相互独立, 进而容易造成能源系统过度放电、动力系统输出过大导致自我保护的问题。此外, 本文在能源动力飞控一体化设计的基础上进一步提升能源系统效率, 进行太阳能无人机在复杂工况下的模式分析, 以能量平衡及能流高效为优化目标, 建立系统的拓扑模型和能流模型, 分析多目标优化问题, 设计基于能量闭环的飞行任务规划策略和基于改进蚁群算法的三维航迹规划, 通过一体化能源动力飞行控制, 解决了能源、动力与飞行控制协同配合与控制问题。通过能源系统闭环控制的模拟验证实现了能源动力飞控一体化的高可靠性能源管理验证。

1 改进的一体化控制方案

1.1 常规能源系统方案及存在的问题

太阳能无人机能源系统主要由太阳能电池阵、储能电池和电源管理系统组成, 如图 1 所示。通过功率变换和控制器实现各个环节的匹配、功率和能量的控制, 为太阳能无人机飞行提供稳定的能源^[13-14]。基本原理是: 通过最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 将光伏转换为电能。太阳能电池阵主要承担动力系统及其他用电设备在光照

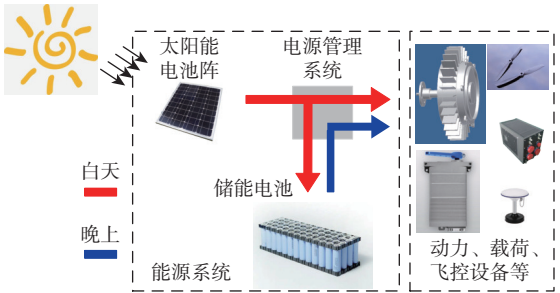


图 1 太阳能无人机能源系统示意图
Fig. 1 Energy system for solar-powered UAV

条件良好时的能源供给, 当其能源供给大于系统能量需求时, 同时给储能电池充电, 在夜间及光照条件不佳时, 由储能电池单独或联合太阳能电池阵提供能源供给^[15]。

常规的能源系统方案如图 2 所示。通过一组贯穿机翼的高压母线将太阳能电池阵、储能电池、电机及配电器等高压设备相连, 配电器输出的 28 V 直流电为飞控计算机、导航设备、伺服机构等供电, 储能电池内部 DC 模块将高压电转换为 28 V 供给储能电池控制器使用, 电机内部 DC 模块将高压电转换为 28 V 供给电机控制器使用。在飞行控制、能源管理和电机控制与保护上, 能源、飞控、动力进行独立控制, 地面控制人员综合飞行任务需求、能源状态、动力输出等信息分别上传对应的控制指令。

由于飞行控制没有与动力系统及能源系统开

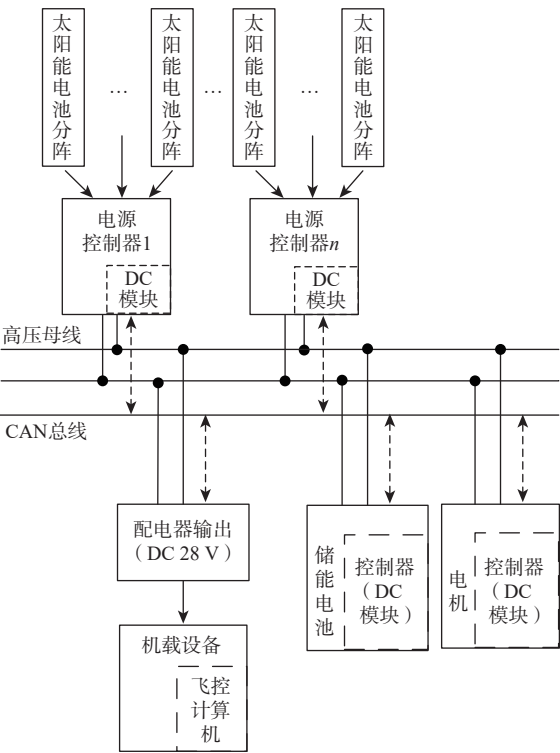


图 2 常规能源、动力与飞行控制方案
Fig. 2 Conventional scheme of energy, power, and flight control

展有效匹配,在飞行试验中,尤其首飞时,极易出现飞机爬升过程中放电电流过大、电机输出功率受限甚至电机保护等情况,威胁飞行安全。

图 3 为笔者团队在 2018 年开展的一次缩比太阳能无人机飞行测试中的电机指令及响应。在图 3 对应的飞行试验中,由于爬升率过大,在 80~110 s 出现了电机超扭的情况,导致电机出现输出功率保护,转速下降。电机的保护虽然避免了电机破坏的发生,但给飞机的飞行安全带来了严重的安全隐患。

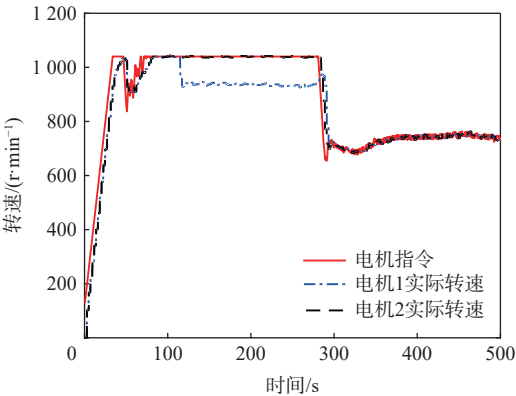


图 3 电机指令及跟踪(2018 年测试)

Fig. 3 Motor command and tracking(testing in 2018)

图 4 为笔者团队在 2020 年开展的另一次太阳能无人机飞行测试中的电机指令及响应。与图 3 相似,由于爬升率过大,电机持续大功率输出,导致太阳能无人机一侧电机保护,扭矩输出减小,受保护电机推力的减小会导致另一侧电机转速指令增大,输出扭矩增加,进而也进入电机保护程序,转速下降,扭矩减小。在电机保护后,由于惯量较大,电机加速过程缓慢,无法及时输出所需的扭矩,进一步导致另一侧电机扭矩指令增加,进而再次进入保护程序,交替的电机输出保护导致飞机高度的起伏变化及飞机航向运动的失控,给飞行安全带来了很大影响。

综合上述数据及分析,在常规太阳能无人机方

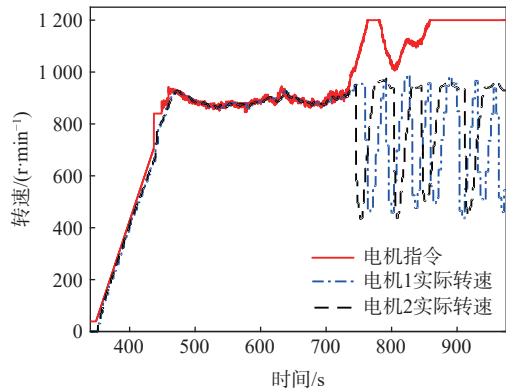


图 4 电机指令及跟踪(2020 年测试)

Fig. 4 Motor command and tracking(testing in 2020)

案中,因为能源系统、动力系统及飞行控制均为单独设计,所以,协同控制考虑的较少。尤其在首次飞行测试中,极易因飞行控制的爬升率较大,导致电机输出功率过大。一方面,导致电机输出保护,无法及时响应飞行控制指令,造成飞行安全隐患;另一方面,在快速爬升过程中,储能电池的过度放电同样容易带来安全隐患。因此,需要对能源管理、动力控制和飞行控制进行协同控制。

1.2 改进后控制方案

1.2.1 高可靠性电源管理

针对能源系统、动力系统及飞行控制系统相互独立带来的问题,本文对其进行改进,采用一体化控制方案。其中,电源管理方案如图 5 所示。双向固态功率控制器(solid state power controller, SSPC)的主要作用是实现系统故障隔离和配电重构。SSPC 通过采用并联功率 MOSFET 实现直流配电网络的双向导通和关断功能。其中,过流保护功能根据电路中的电流结合反延时特性曲线进行。通过缓开通方式控制负载电压缓慢变化。考虑在不同位置发生短路时电路中的电流特征,制定相应的短路电流检测和隔离方案。由电流信息采集电路得到功率电路中电流的信息,结合与之相邻的 SSPC 信息交互,进行短路情况的检测与隔离。

通过双向 SSPC 对左右高压母线进行隔离与控制,实现单次故障状态下的单侧能源系统正常工作。通过将左右高压母线接入双余度配电器为导航设备、飞控设备等进行供电,实现关键设备的双余度供电。对于电机、舵机等分布式机载设备,采用就近配电器供电,能够有效减轻设备质量,同时,分布式动力形式的无人机在局部设备失效情况下能够通过飞行控制进行有效补偿,满足安全返回与着陆要求。

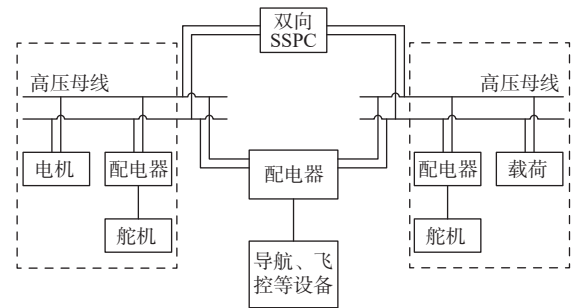


图 5 高可靠性电源管理方案

Fig. 5 High-reliability power management scheme

1.2.2 能源动力飞控一体化设计

改进的能源动力飞控一体化控制方案如图 6 所示,其特征在于将电源控制器、储能电池控制、电机控制与飞行控制集成起来,解决太阳能无人

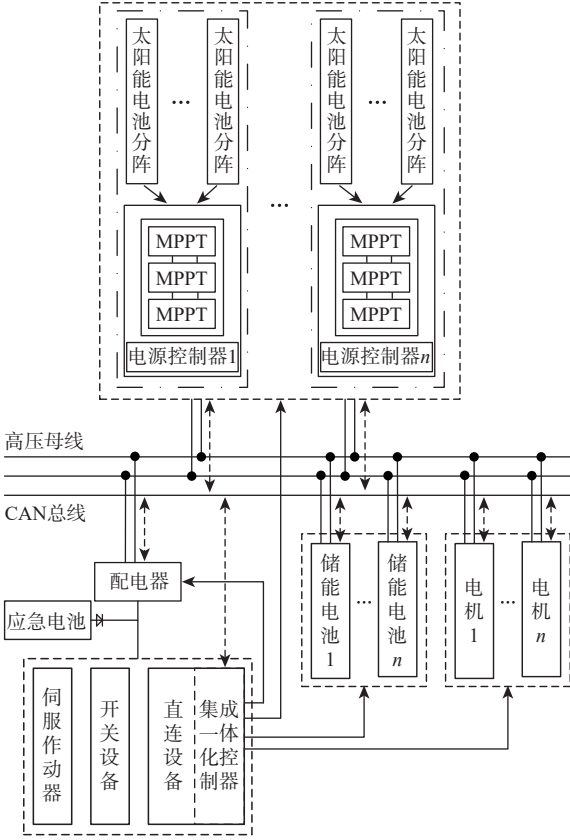


图 6 能源动力飞控一体化控制设计

Fig. 6 Integrated control design of energy, power, and flight control

对质量的严苛要求问题,同时满足能源、动力与飞行协同控制要求。

储能电池控制器、电机控制器、电源控制器和飞行控制与管理集成一体化设计包括硬件设计和软件设计。在硬件上,采用一套集成控制器能够有效减轻结构质量。另外,采用一套控制器,在供电方面,某些非关键设备可以由一组 DC 模块供电,相比传统的各子系统采用单独供电 DC 模块,能够减轻控制器和供电模块质量,提高可靠性。在软件上,通过综合飞行任务、飞行状态、储能电池状态、电源控制器信息及电机输出,将飞行控制与飞行任务、能源状态、动力系统状态结合起来。通过电机输出与飞行控制结合保证电机安全及飞行安全。将飞行控制与电机控制结合还能减少不必要的多层级保护冗余,提高电机效能。动力系统与能源系统一体化控制可以将动力系统的需求考虑到能源系统设计中,从能量平衡角度开展电源控制器设计。飞控与能源系统一体化设计,依靠飞控调节飞机航向角、爬升角/下滑角,提高光照入射角,增加发电功率。

通过综合储能电池存储及输出、动力系统功率需求等信息,并分解飞行任务,明确太阳能无人机运动状态与能量存储、消耗之间的耦合关系,本文

建立了三维航迹优化模型,开展基于一体化控制方案的能源系统半物理仿真,来验证本文提出的一体化控制方案。

2 一体化控制方案验证

为验证本文提出的一体化控制方案,先建立相应的仿真模型,再采用文献 [16] 中提出的太阳能无人机航迹规划算法,根据所提飞行区域约束进行航迹规划,将航迹规划的结果作为输入开展一体化控制方案的半物理仿真试验,通过试验验证该方案的有效性。

2.1 仿真模型

2.1.1 能量模型

在任意时刻,由太阳能无人机上的光伏模块转换的总功率 P_{in} 可以表示为 [17]

$$P_{in} = \sum_{i=1}^{N_{sm}} (\eta_s I_t \cos(n_s, n_{pm}) A_{sm})_i \tag{1}$$

式中: I_t 为太阳的辐照强度; A_{sm} 为每个光伏模块的平面面积; N_{sm} 为光伏模块的总数; η_s 为光伏模块的效率; n_s 为光伏模块指向太阳的单位向量; n_{pm} 为光伏模块的法向量。

$$\begin{cases} n_s = \begin{bmatrix} \cos \alpha_s \cos \gamma_s \\ \cos \alpha_s \sin \gamma_s \\ -\sin \alpha_s \end{bmatrix} \\ n_{pm} = - \begin{bmatrix} \cos \psi_b \sin \theta_{pm} \cos \varphi_{pm} + \sin \psi_b \sin \varphi_{pm} \\ \sin \psi_b \sin \theta_{pm} \cos \varphi_{pm} - \cos \psi_b \sin \varphi_{pm} \\ \cos \theta_{pm} \cos \varphi_{pm} \end{bmatrix} \end{cases}$$

其中: α_s 和 γ_s 分别为太阳高度角和太阳方位角,由当地纬度、太阳辐照角和照射时间决定; θ_{pm} 、 ψ_b 和 φ_{pm} 分别为光伏模块的倾角、方位角和旋转角。

因此, t_0 时刻到 t_f 时刻总能量输入为

$$E_{in} = \int_{t_0}^{t_f} P_{in} dt \tag{2}$$

太阳能无人机消耗的能量包括机载设备和载荷的功耗及推进系统的功耗 [17], 可以表示为

$$P_{out} = P_{av} + \frac{TV_{air}}{\eta_{prop}\eta_{mot}} \tag{3}$$

式中: P_{av} 为无人机上航电设备及载荷的功率; T 为推力; V_{air} 为空速; η_{prop} 为螺旋桨效率; η_{mot} 为电机效率。

通过定义电池总能量 E_{bat} 和电池效率 η_c , 能够通过以下方式更新充电状态 Q_{SoC} :

$$\frac{dQ_{SoC}}{dt} = \eta_c \frac{P_{in} - P_{out}}{E_{bat}} \tag{4}$$

式中: $0 < Q_{SoC} < 1$ 。

2.1.2 动力学及运动学模型

太阳能无人机飞行迎角 α 较小, φ 为发动机推力与

机体轴安装角,因此,有 $\cos(\alpha+\varphi)\approx 1$, $\sin(\alpha+\varphi)\approx 0$ 。太阳能无人机的动力学方程和运动学方程可以表示为^[17]

$$\begin{cases} m\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=T\cos\beta-D-mg\sin\gamma \\ mV\cos\gamma\frac{\mathrm{d}\chi}{\mathrm{d}t}=-T\sin\beta\cos\mu+C\cos\mu+L\sin\mu \\ -mV\frac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}t}=-T\sin\beta\sin\mu+C\sin\mu-L\cos\mu+mg\cos\gamma \\ \frac{\mathrm{d}x_g}{\mathrm{d}t}=V\cos\gamma\cos\chi \\ \frac{\mathrm{d}y_g}{\mathrm{d}t}=V\cos\gamma\sin\chi \\ \frac{\mathrm{d}z_g}{\mathrm{d}t}=-V\sin\gamma \end{cases}$$

(5)

式中: g 为重力加速度; $T=(P_{\text{out}}-P_{\text{av}})\eta_{\text{prop}}\eta_{\text{mot}}/V_{\text{air}}$ 为电机推力; x_g 、 y_g 、 z_g 为太阳能无人机位置; D 、 L 、 C 分别为无人机阻力、升力和侧力; β 为侧滑角; m 为飞机质量; V 为飞行速度; χ 、 γ 、 μ 分别为航迹偏角、航迹倾角、速度滚转角。

2.2 基于改进蚁群优化算法的三维航迹规划

旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)^[18]是典型的 NP 问题,利用蚁群优化算法采取闭合路径规划能够很快地计算该类问题,并且蚁群优化算法已被证明在解决 TSP 问题时具有较大的优势^[19-21]。本文将太阳能无人机的航迹规划问题转化为区域约束的航点最优排序问题,而 TSP 问题本身也是一个节点最优排序问题,2 个问题在解决思路上是非常相似的。因此,本文采用文献 [17] 中提出的改进蚁群优化算法来解决太阳能无人机依赖于任务约束的最优节点排序问题,通过在蚁群优化算法中的信息素更新中引入太阳辐照的变化影响,用于指引向太阳辐照更多的路径飞行,找到结合任务路径与最省能量飞行的全局最优路径。

设蚁群中蚂蚁的数量为 s ,节点的数量为 n ,蚂蚁 $k(k=1,2,\cdots,s)$ 根据节点之间连接路径上的信息素浓度来确定下一个访问的节点,在某一个时刻 t 时,蚂蚁 k 从节点 i 移动到节点 j 的概率为 P_{ij}^k ,计算公式为

$$P_{ij}^k=\begin{cases} 0 & s\notin B_k \\ \frac{(\tau_{ij}(t))^{\alpha'}(\eta_{ij}(t))^{\beta'}}{\sum_{s\in B_k}(\tau_{ij}(t))^{\alpha'}(\eta_{ij}(t))^{\beta'}} & s\in B_k \end{cases}$$

(6)

$$\eta_{ij}(t)=1/d_{ij}$$

式中: α' 和 β' 分别为信息素因子和启发函数因子; $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数; d_{ij} 为节点到节点之间的距离; B_k 为蚂蚁 k 待访问的城市集合; $\tau_{ij}(t)$ 为信息素浓度,

可以表示为

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+1)=(1-\rho)\tau_{ij}(t)+\Delta\tau_{ij} & 0<\rho<1 \\ \Delta\tau_{ij}=\sum_{k=1}^n\Delta\tau_{ij}^k \\ \Delta\tau_{ij}^k=\begin{cases} \frac{1}{E_{\text{total}}Q} & \text{蚂蚁}k\text{个体从节点}i\text{到节点}j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{cases}$$

(7)

其中: E_{total} 为路径中无人机飞行过程中的耗能; ρ 为信息素挥发因子; Q 为信息素常数。当所有蚂蚁完成一个闭合路径后,信息素浓度会更新。

因此,上述问题可以表述为

$$\min:f_p=E_{\text{total}}$$

(8)

所使用蚁群优化算法的参数如表 1 所示。

表 1 蚁群优化算法参数

Table 1 Parameters of ant colony optimization algorithm

参数	数值
最大迭代次数	200
蚂蚁数量	50
城市数量	19
信息素重要程度因子	1
启发函数重要程度因子	5
信息素挥发因子	0.1

为验证在特定航线下的电源技术可靠性,采用半物理仿真的方式。通过算法求解满足任务约束的三维航迹,根据该航迹进行基于储能电池长时间工作的半物理仿真验证。飞机的模型参数如表 2

表 2 飞机参数

Table 2 Aircraft parameters

参数	数值
机翼面积/m ²	14.8
质量/kg	75
翼展/m	15
展弦比	15.5
奥斯瓦尔德因子	0.9
零升阻力系数	0.016
升力系数	0.741
推进系统效率	0.80
太阳能电池效率	0.181
航电功率/W	28
载荷功率/W	2
变速器效率	0.95
控制器效率	0.95
电机效率	0.90
最大迎角/(°)	10
电机功率/kW	3(最大)

所示, 仿真设置条件如表 3 所示。太阳能无人机初始高度为 20 km, 飞行任务为在 20 km×5 km 的矩形区域进行下滑飞行, 飞行任务约束如图 7 所示, 采用基于改进蚁群算法的任务最优规划算法在该约束下进行计算, 结果如图 8 所示。

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

参数	数值
飞行高度范围/km	0~22
初始高度/km	20
航线范围/(km×km)	20×5(矩形航线)
最终高度/km	0

注: 地点为包头, 时间为6月1日, 开始时间为上午9:00。

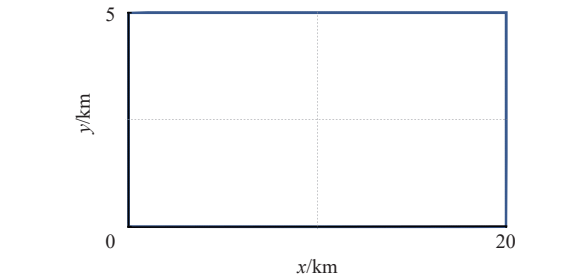


图 7 飞行任务区域

Fig. 7 Flying mission area

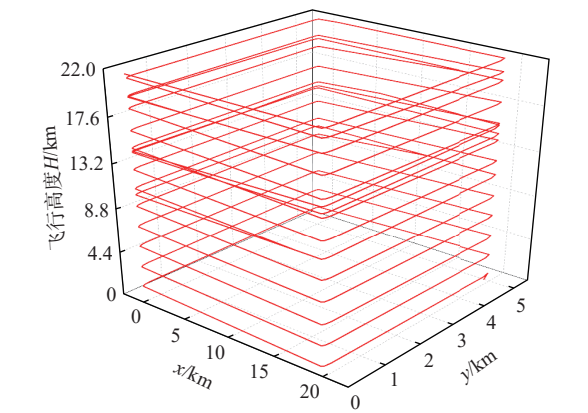


图 8 航迹规划结果

Fig. 8 Flight route planning results

2.3 基于航迹优化结果的能源管理验证

基于 2.2 节中得到的航迹规划结果, 以该航迹为输入进行地面模拟的能源系统性能综合试验, 来验证本文提出的一体化控制方案。通过试验考核系统设计方案正确性、产品之间接口协调匹配性、冗余措施有效性等。

试验设备包括本文提出的一体化能源动力飞行控制器、MPPT、PCU 电源控制器、储能电池、电子负载及万用表。其中, PCU 电源控制器 3 台, 用于模拟飞行过程中的太阳能辐照, 储能电池 2 组, 用电子负载模拟飞行过程中的动力系统和航电系

统功耗。

根据所输入航迹计算出的太阳能输出功率和全机功耗数据对 PCU 电源控制器和电子负载进行实时设置, 开始航迹功率仿真测试。PCU 电源控制器及储能电池的电压和电流变化如图 9~图 12 所示。

在长时间的持续工作下, 随着 PCU 电源控制器电压和电流变化, 母线电压值正常, 蓄电池电压值正常; 储能电池充电过程中, 充电电流正常, PCU 电

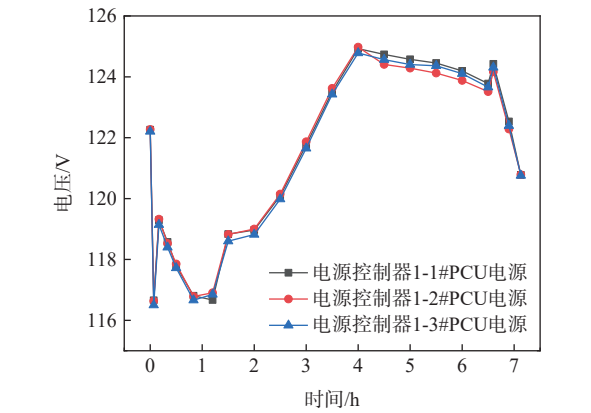


图 9 PCU 电源控制器电压

Fig. 9 Voltage of PCU controller

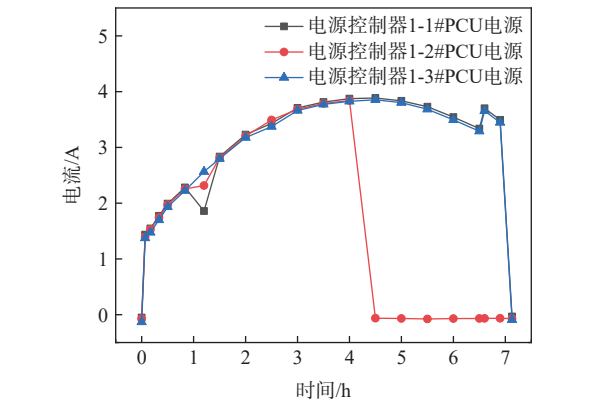


图 10 PCU 电源控制器电流

Fig. 10 Current of PCU controller

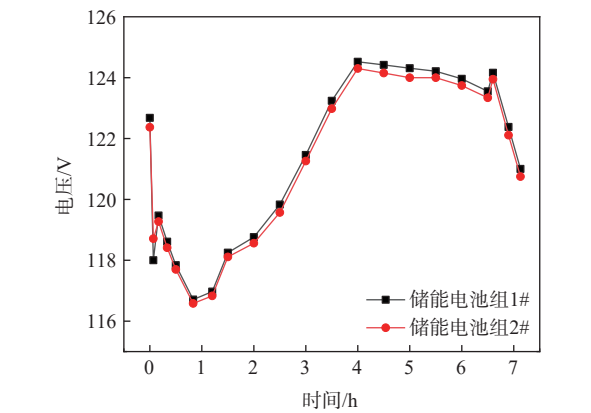


图 11 储能电池放电电压

Fig. 11 Discharge voltage of storage battery

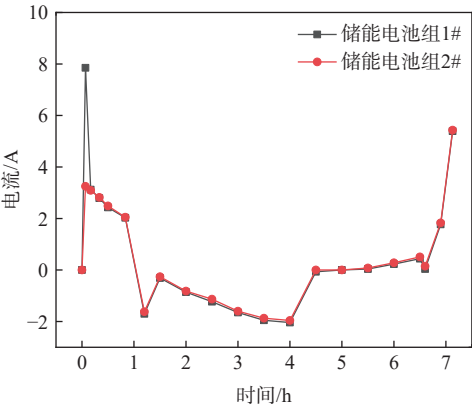


图 12 储能电池放电电流

Fig. 12 Discharge current of storage battery

源控制器进行自主调控时,可通过采集的母线电压与预置的上下限电压比较后,自主进行 MPPT 模块串的通断电控制,实现母线功率平衡。整个联试系统工作正常,储能电池充电过程工作正常。因此,通过一体化能源动力飞行控制,能够解决能源、动力与飞行控制协同配合与控制问题。通过能源系统闭环控制的模拟验证能够实现能源动力飞控一体化的高可靠性能源管理验证。

3 结 论

本文提出了一种基于能源、动力与飞控协同控制的高可靠性能源管理方案,通过双向 SSPC 将左右 2 套动力母线连接在一起,正常工作时触点为常开状态,在单侧发生故障时触点切换为闭合状态。

1) 针对常规的能源管理方案开展了分析,并提出改进的能源动力飞行控制一体化方案。2 套母线通过双向 SSPC 进行保护与隔离,能够保证在单次故障的情况下飞机安全返回与着陆。

2) 通过一体化设计能源、动力与飞行控制,能够解决太阳能无人机对质量的严苛要求问题,同时综合能源、动力、飞行状态信息,实现能源、动力与飞行控制协同配合与控制,并通过能源系统地面模拟综合试验实现了能源动力飞控一体化的高可靠性能源管理验证,达到太阳能无人机最佳总体性能。

参考文献 (References)

[1] 王亚飞, 安永旺, 杨继何. 临近空间飞行器的现状及发展趋势[J]. 国防技术基础, 2010(1): 33-37.
WANG Y F, AN Y W, YANG J H. Present situation and development trend of near-space vehicles[J]. Technology Foundation of National Defence, 2010(1): 33-37(in Chinese).
[2] 陶于金. 临近空间超长航时太阳能无人机发展及关键技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(18): 26-30.
TAO Y J. Development and key technology on near space long voy-

age solar unmanned aerial vehicle[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(18): 26-30(in Chinese).
[3] QINETI Q. Solar aircraft achieves longest unmanned flight[J]. Reinforced Plastics, 2010, 54(5): 9.
[4] 李晨飞, 姜鲁华. 临近空间长航时太阳能无人机研究现状及关键技术[J]. 中国基础科学, 2018, 20(2): 22-31.
LI C F, JIANG L H. Research status and key technology of near space long endurance high altitude solar-powered unmanned air vehicle[J]. China Basic Science, 2018, 20(2): 22-31(in Chinese).
[5] 朱立宏, 孙国瑞, 呼文韬, 等. 太阳能无人机能源系统的关键技术与发展趋势[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 623503.
ZHU L H, SUN G R, HU W T, et al. Key technology and development trend of energy system in solar powered unmanned aerial vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 623503(in Chinese).
[6] MOHARRAM M A, KISHK A A. Optically transparent reflect-array antenna design integrated with solar cells[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(5): 1700-1712.
[7] TA S X, LEE J J, PARK I. Solar-cell metasurface-integrated circularly polarized antenna with 100% insolation[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2675-2678.
[8] O'CONCHUBHAIR O, MCEVOY P, AMMANN M J. Dye-sensitized solar cell antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 16: 352-355.
[9] 王少奇, 马东立, 杨穆清, 等. 高空太阳能无人机三维航迹优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(5): 936-943.
WANG S Q, MA D L, YANG M Q, et al. Three-dimensional optimal path planning for high-altitude solar-powered UAV[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(5): 936-943(in Chinese).
[10] 朱炳杰, 杨宇丹, 杨希祥, 等. 太阳能飞行器能源昼夜闭环仿真分析[J]. 宇航学报, 2019, 40(8): 878-886.
ZHU B J, YANG Y D, YANG X X, et al. Energy closed-loop simulation and analysis for solar powered aircraft round the clock[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(8): 878-886(in Chinese).
[11] 张德虎, 张健, 李军府. 太阳能飞机能量平衡建模[J]. 航空学报, 2016, 37(增刊 1): 16-23.
ZHANG D H, ZHANG J, LI J F. Energy balance modeling for solar powered aircrafts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(Sup 1): 16-23(in Chinese).
[12] 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 L, DU M Y, ZHANG X H, et al. Conceptual design and energy management strategy for UAV with hybrid solar and hydrogen energy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 144-162(in Chinese).
[13] 刘莉, 曹潇, 张晓辉, 等. 轻小型太阳能/氢能无人机发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 623474.
LIU L, CAO X, ZHANG X H, et al. Review of development of light and small scale solar/hydrogen powered unmanned aerial vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 623474(in Chinese).
[14] NOTH A. Design of solar powered airplanes for continuous flight[D]. Zurich: Eidgenssische Technische Hochschule Zurich, 2008.

- [15] 陆运章, 郭进, 程文进, 等. 太阳能无人机能源控制器研究与设计[J]. 电子工业专用设备, 2017, 46(3): 45-50.
LU Y Z, GUO J, CHENG W J, et al. Research and design of power management controller of solar unmanned aerial vehicle[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2017, 46(3): 45-50(in Chinese).
- [16] WANG X Y, YANG Y P, WU D, et al. Mission-oriented 3D path planning for high-altitude long-endurance solar-powered UAVs with optimal energy management[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 227629-227641.
- [17] 王翔宇. 太阳能动力的球载投放无人机总体设计及能效优化设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
WANG X Y. Overall design and energy efficiency optimization design of solar-powered ball-borne unmanned aerial vehicle[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021(in Chinese).
- [18] SHELOKAR P S, JAYARAMAN V K, KULKARNI B D. An ant colony classifier system: application to some process engineering problems[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, 28(9): 1577-1584.
- [19] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Positive feedback as a search strategy: 91-016[R]. Milano: Laboratorio di Calcolatori, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, 1999.
- [20] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colonies for the traveling salesman problem[C]//Proceedings of the International Conference on Bio-inspired Information and Communication Technologies. Berlin: Springer, 1997: 73-81.
- [21] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: a co-operative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53-66.

Energy management of solar-powered UAV based on energy closed loop

HU Yanpeng^{1, 2}, GUO Jin^{1, 2}, ZHOU Meng³, WANG Xiangyu^{4, *}

- (1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of Knowledge Automation for Industrial Processes of Ministry of Education, Beijing 100083, China;
3. The 48th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Changsha 410111, China;
4. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: As a newly recognized domain of geospace and an important area for national security, near space has gradually attracted the attention of major countries worldwide. Solar-powered UAVs in near space have become a research hotspot in aerospace technology. However, in conventional designs, energy, power, flight control and payloads are designed independently, which making it difficult to reduce structural weight and optimize overall performance. This paper researched the energy management of solar-powered UAVs from the perspectives of energy system reliability and the integrated design of energy, power, and flight control, aiming to achieve structural weight reduction and overall performance optimization. The specific contents are as follows. A dual-redundancy energy management scheme was designed, incorporating a bidirectional solid state power controller (SSPC) for isolation and control, realizing safe return under single-failure conditions. An integrated design was proposed, combining battery control, motor control, power control, and flight control. This design reduced hardware weight and enabled collaborative control through software. An improved ant colony optimization algorithm was adopted to generate a three-dimensional flight route for the solar-powered UAV, and the planned route was taken as an input for a comprehensive ground simulation test of the energy system. The proposed integrated control scheme was validated through simulation experiments, showing effective collaborative control of energy management, power control, and flight control.

Keywords: energy closed loop; energy management; collaborative control; ant colony optimization algorithm; route planning