

临近空间太阳能无人机巡航剖面各阶段能量影响

邓小龙^{1,*}, 高显忠¹, 杨民生², 王玉杰¹, 朱炳杰¹

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 长沙 410073; 2. 分布式电推进飞行器控制技术湖南省重点实验室, 常德 415000)

摘 要: 昼夜能量平衡是临近空间太阳能无人机 (UAV) 具备高空长航时飞行能力的重要前提之一, 设计合理的巡航飞行剖面是实现该目标的关键。基于此, 通过分析太阳能无人机在巡航飞行剖面中滑翔、爬升、日间平飞和夜间平飞等各阶段的能源供应模式, 建立发电、储能、耗能和动力学的模型, 重点讨论巡航飞行剖面各阶段工作特性对能源循环的影响。研究结果表明: 滑翔和爬升策略对于储能电池的最低电量影响较小; 提高日间巡航高度可增加储能电池最低电量, 且日间巡航结束时间会影响储能电池最低电量; 降低夜间巡航高度可大幅增加储能电池的最低电量。

关 键 词: 太阳能无人机; 临近空间; 飞行剖面; 能量分析; 巡航飞行

中图分类号: V221

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)08-2615-09

临近空间是传统空、天之间的过渡区域, 具有独特的高度和大气环境资源, 在人类科技进步与需求拓展的双重推动下, 已成为大国竞争博弈的战略新兴领域^[1]。低速临近空间飞行器主要以平流层飞艇和太阳能无人机为代表, 通过利用临近空间环境的有利特征, 实现月、年量级的超长航时区域保持飞行能力, 可填补传统天基信息与空基信息之间的空白区域, 为地基、天基等信息网络系统提供有效补充, 可广泛应用于通信导航、遥感测绘、侦察预警等方向, 被形象地称为“平流层卫星”^[2]。

临近空间太阳能无人机是以太阳能为能量来源、螺旋桨为推进系统、依靠气动升力飞行、飞行高度多位于 18 km 以上临近空间领域的无人驾驶飞行器^[3]。各军事强国都争相开发以临近空间太阳能无人机为平台的高空伪卫星项目, 如美国 Helios 系列、英国的 Zephyr 系列等^[4-5]。近年来, 临近空间太阳能无人机技术取得巨大突破, Zephyr S 于 2018 年实现 25 天持续飞行, 日间巡航高度 21 km、夜间巡航高度 16.7 km, 该机改进型 Zephyr 8 于 2022 年

8 月完成 64 天持续飞行^[6]。国内, 中国航天科技集团公司第十一研究院研制的彩虹太阳能无人机于 2017 年完成临近空间飞行试验。

由于目前储能电池的能量密度普遍较低, 昼夜能量平衡是临近空间太阳能无人机实现真正意义上的高空长航时飞行的关键^[6-7]。为此, 科研人员从系统设计、任务规划等方面提出了大量创新思路, 并开展了大量研究^[8]。

风梯度滑翔是一种典型增加无人机飞行航时的方法, 其工作原理是使飞行器持续从梯度风场环境中获取能量, 延长续航时间, 研究人员通过理论方法和低空试验对该方法进行了大量研究^[9]。风梯度滑翔在临近空间太阳能无人机应用上面临一定的局限性, 一方面, 高空风场的梯度变化尺度较小, 受时间、位置的变化性强^[10], 且风场预测难度高, 而动态滑翔对风场环境要求高, 使其普适性受到限制; 另一方面, 具有极大展弦比的临近空间太阳能无人机机体受力形变大, 非线性变形带来的气动弹性效应可能严重减弱的操纵效率^[11], 以及动态滑翔

收稿日期: 2022-09-15; 录用日期: 2022-11-04; 网络出版时间: 2023-01-05 17:14

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230104.1642.005

基金项目: 国家自然科学基金 (61903369, 52172410)

* 通信作者. E-mail: xiaolong.deng@outlook.com

引用格式: 邓小龙, 高显忠, 杨民生, 等. 临近空间太阳能无人机巡航剖面各阶段能量影响 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (8): 2615-2623. DENG X L, GAO X Z, YANG M S, et al. Energy influence of stages in cruise profile for near space solar powered unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (8): 2615-2623 (in Chinese).

对超大展弦比的低动态太阳能无人机的结构和控制提出的进一步要求,增加了系统复杂性^[12]。

由于飞行迎角、太阳能电池铺装等因素,太阳能无人机飞行时,太阳能电池阵的输出表现出动态变化^[12]。通过对飞行航向和姿态的飞行航线的优化,在飞行过程中结合升降运动,使太阳能电池阵法线与太阳光线矢量的夹角最小,实现太阳能电池阵的最大发电状态^[13]。在另一种临近空间低速飞行器平台——平流层飞艇上,采用类似思路设计了旋转式的太阳能电池阵,以提升发电能力^[14]。但是,研究认为理想航线跟踪难以实现,在实际飞行中应综合考虑风场环境对飞行的影响^[15];同时,飞行器上增加太阳能电池阵的活动部件将带来质量、功耗、外形等方面的不利影响^[16]。

为此,工程上主要采用对结构和技术要求更低的差异化巡航高度飞行剖面来降低能量消耗,通过对重力势能的综合利用实现能源闭环和优化^[17]。文献[16]针对持续驻空的能量平衡问题,提出一种剩余充电能量预测方法,在下滑过程中利用全部光伏输出,降低能量综合损失。文献[18]通过对太阳能飞机各阶段的飞行剖面和能源的需求分析,讨论了巡航阶段能量特性计算方法。文献[12]从能量建模、续航评估和能量管理策略等方面对太阳能无人机巡航阶段任务规划的影响进行了综述,指出大气模型、气动构型、地理位置、分段滑翔约束等因素对于持久驻空能力有重要影响。Ma等^[19]通过深度强化学习方法研究了太阳能无人机最优能源的区域驻留路径策略,指出通过调节巡航各阶段的工况可显著增加其驻空时长。

本文针对太阳能无人机巡航阶段的循环能源工作特点,通过对巡航飞行剖面的爬升、滑翔、平飞等各阶段的工作特点进行建模分析,研究各阶段对循环能源的影响,为工程实践提供科学依据。

1 太阳能无人机工作特征

1.1 能源供应模式

临近空间太阳能无人机采用“太阳能电池阵+储能电池组”构建的循环能源系统为系统供电。白天,铺设在机翼上表面的太阳能电池阵将太阳能转换为电能,为飞行器工作提供能量,并将多余能量为储能电池充电;夜间,太阳能电池停止工作,储能电池单独为飞行器工作提供能量。需要注意,一天中,太阳入射角的时刻变化导致太阳能电池阵的输出特性时变。当太阳能电池阵有输出功率,但输出功率小于飞行器所需功率时,由太阳能电池阵和储能电池组联合供电。图1给出了太阳能无人机的能源供应模式。图中,实线表示完全独立供电,虚线表示联

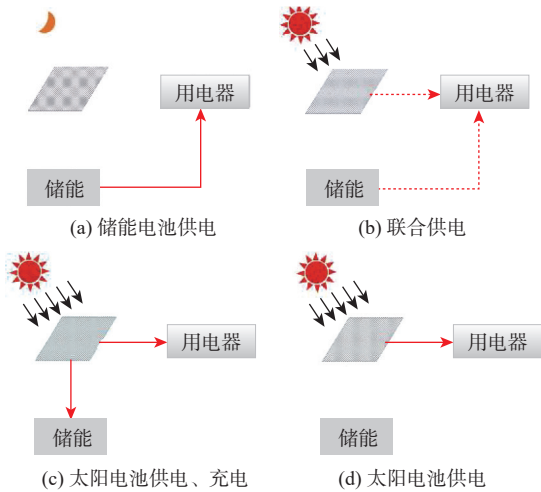


图1 临近空间太阳能无人机能源供应模式

Fig. 1 Energy supplying modes of near-space solar powered unmanned aerial vehicles

合共同供电。由图1可知,能源供应模式主要包括储能电池组独立供电(见图1(a))、联合供电(见图1(b))、太阳能电池阵独立供电(见图1(c)、(d))。

需要注意,临近空间太阳能无人机实际飞行中,实际的能源供应情况复杂。例如,如果储能电池被充满,且太阳能电池的发电功率充足,则平台完全由太阳能电池供电(见图1(d))。因此,在时间序列上,由于太阳能电池的工作状态变化,临近空间太阳能无人机从夜间开始的一天中能源供应模式序列可由图1中各供电模式表示为:(a)→(b)→(c)→(d)→(b)→(a)。

1.2 巡航飞行剖面的能源特点

临近空间太阳能无人机可铺设太阳能电池阵的机翼面积大,太阳能电池阵的总发电量能够满足无人机的用电总需求,其能源循环能力主要受限于储能电池的能量。昼夜能源循环是太阳能无人机长航时巡航的核心能力要求,为降低对储能电池能量供应需求以提高昼夜能源循环能力,设计合适的巡航飞行剖面是重要途径。

临近空间太阳能无人机的能源特性与具体的巡航飞行剖面有关。临近空间太阳能无人机的巡航飞行剖面可分为3个阶段:起飞-爬升-巡航阶段、持续跨昼夜飞行阶段、下滑着陆^[17]。如图2所示,为降低持续跨昼夜飞行阶段对夜间能源需求,临近空间太阳能无人机通常采用昼夜差异化巡航方式,设计不同的日间巡航高度和夜间巡航高度。图中: H_{crd} 和 H_{cm} 分别为日间巡航高度和夜间巡航高度, P_{crd} 、 P_{cm} 、 P_{climb} 、 P_{glide} 分别为日间巡航功率、夜间巡航功率、爬升功率、滑翔功率。白天,太阳光照充足,太阳能无人机以高功率工作在高巡航高度;夜间,以较低功率工作在低巡航高度,降低对储能电池需求。

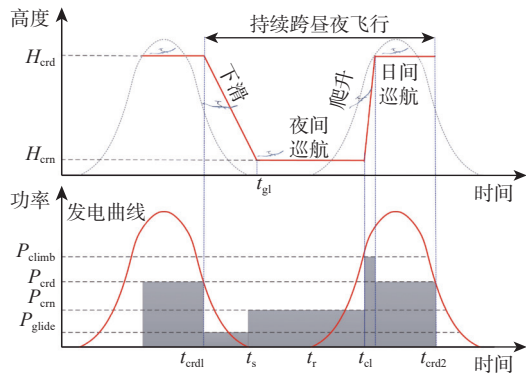


图 2 跨昼夜飞行阶段典型巡航飞行剖面与能源特性
Fig. 2 Typical cruise flight profiles and energy property of diurnal endurance flight stages

由能源供应模式序列可知,从降低能量的角度,主要策略包括降低储能电池供电功率、缩短储能电池供电时长、增加联合供电时长、增加太阳能电池供电时长等多种因素。从巡航飞行剖面角度,能量优化应重点关注夜间巡航高度、爬升和下滑的策略。

1.3 巡航飞行剖面各阶段的飞行策略

由 1.2 节分析可知,采用差异化巡航高度飞行剖面的临近空间太阳能无人机,其巡航飞行剖面的工作主要分为 4 个阶段:滑翔、爬升、日间平飞和夜间平飞。

滑翔阶段的主要目的是降低飞行高度,根据动力推进装置是否工作,下滑可分为无动力滑翔和有动力滑翔 2 类。在研究滑翔阶段的能源特性时,无动力滑翔应考虑起止时间的影响,有动力滑翔还应考虑滑翔策略及其供能方式。图 3 为 2 种典型滑翔策略的功率特性示意图。其中,图 3(a)为无动力滑翔或有动力固定功率滑翔的功率特性,滑翔过程中无人机的能源消耗为定值;图 3(b)为有动力的变功率滑翔功率特性,从开始滑翔时刻起,通过匹配滑翔时推进系统需用功率与太阳能电池发电功率,实现太阳能电池发电功率的完全利用。

对于爬升阶段,与滑翔阶段类似,根据动力推

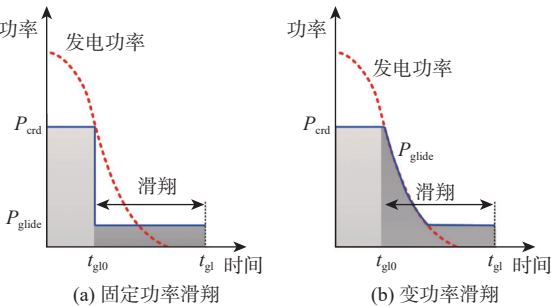


图 3 2 种滑翔策略的功率特性示意图
Fig. 3 Schematic of power characteristics of two gliding strategies

进系统的工作特点,可分为定功率爬升和变功率爬升。图 4 为典型爬升策略的功率特性示意图。其中,图 4(a)为常用的定功率爬升,当太阳能电池的发电功率大于爬升需用功率时进入爬升阶段;图 4(b)为变功率爬升,当太阳能电池的发电功率大于夜间巡航功率时进入爬升阶段,通过匹配推进系统需用功率与太阳能电池发电功率,实现太阳能电池发电功率的完全利用。

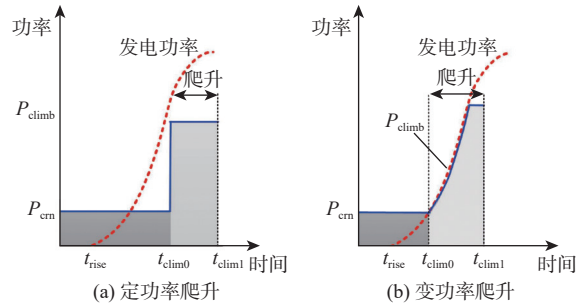


图 4 2 种爬升策略的功率特性示意图
Fig. 4 Schematic of power characteristics of two climbing strategies

平飞阶段包括日间平飞和夜间平飞,飞行高度和时长是影响平飞能量需求的主要因素。因此,太阳能无人机主要策略是充分利用日间能量,并降低夜间能量消耗。图 5 为不同系统质量的临近空间太阳能无人机巡航平飞时推进需用功率随高度变化的关系。可知,降低巡航高度可明显减小功率需求。从能量需求角度,巡航高度越低越有利,但在巡航飞行剖面设计时,应考虑任务要求和环境特征。

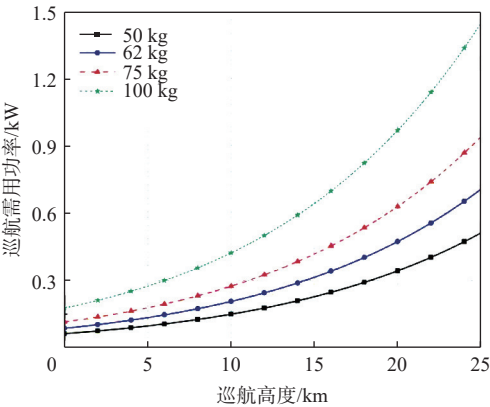


图 5 巡航需用功率随高度变化
Fig. 5 Power required for cruising varies with altitude

2 动力学与能源模型

2.1 太阳辐射与发电模型

2.1.1 太阳辐射模型

太阳的直射辐射强度表示为

$$I_{DN} = I_0 f \tau_{atm} = I_0 (1 + 0.033 \cos(2n\pi/365)) \tau_{atm} \quad (1)$$

式中: I_0 为太阳常数,取 $1\,367\text{ W/m}^2$; f 为地日距离修

正系数; n 为当日在一年中的日期序号; τ_{atm} 为大气透过率。

太阳散射辐射强度为

$$I_d = f \frac{I_0 \sin h}{2} \cdot \frac{m(1 - \tau_{\text{atm}})}{m - 1.4 \ln \tau_{\text{atm}}} \quad (2)$$

式中: h 为太阳高度角; m 为大气质量。

水平面上总太阳辐射强度为

$$I_{\text{sun}} = I_{\text{DN}} \sin h + I_d \quad (3)$$

2.1.2 太阳电池产能模型

太阳电池发电输出功率为

$$P_{\text{solar}} = I_{\text{sun}} S_{\text{PV}} \eta_{\text{PV}} \eta_{\text{MPPT}} \quad (4)$$

式中: S_{PV} 为太阳电池阵有效面积; η_{PV} 为太阳电池阵光电转换效率; η_{MPPT} 为最大功率点追踪控制器(maximum power point tracking, MPPT)效率。式(4)未考虑温度损耗。

太阳电池输出能量为

$$E_{\text{solar}} = \int P_{\text{solar}} dt \quad (5)$$

2.2 动力学模型与能量消耗模型

2.2.1 平飞阶段动力学与能量模型

平飞是太阳能无人机的主要飞行状态。巡航时, 升重平衡和推阻平衡为

$$\begin{cases} L = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L S_w = W \\ D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D S_w = T \end{cases} \quad (6)$$

式中: ρ 为大气密度; v 为巡航速度; C_L 为升力系数; S_w 为翼面积; C_D 为阻力系数; L 为升力; W 为重力; D 为阻力; T 为推力。

飞行器巡航时推进系统需用功率为

$$P_{\text{cr_need}} = T v = L \frac{C_D}{C_L} v = L \frac{C_D}{C_L} \sqrt{\frac{W}{\frac{1}{2} \rho S_w C_L}} = W \sqrt{\frac{W}{\frac{1}{2} \rho S_w}} \cdot \frac{C_D}{C_L^{3/2}} \quad (7)$$

需要注意, 在跨昼夜飞行阶段, 白天和夜间的巡航高度不同, 其对应的大气密度和巡航速度均不同。

对于 $11.019 \text{ km} < H \leq 20.063 \text{ km}$ 和 $20.063 \text{ km} < H \leq 32.161 \text{ km}$ 这 2 个不同高度范围, 其对应的大气密度随高度的函数可分别表示为^[20]

$$\rho = \begin{cases} 0.158 \, 98 \rho_{\text{SL}} \exp\left(\frac{14.964 \, 7 - H}{6.341 \, 6}\right) \\ 0.327 \, 22 \rho_{\text{SL}} \left(1 + \frac{H - 24.902 \, 1}{221.552}\right)^{-35.162 \, 9} \end{cases} \quad (8)$$

式中: ρ_{SL} 为海平面大气密度。

巡航能量需求为

$$E_{\text{cr}} = \int \left(\frac{P_{\text{cr_need}}}{\eta_{\text{thrust}}} + P_{\text{avia}} + P_{\text{pld}} \right) dt \quad (9)$$

式中: η_{thrust} 为推进系统效率; P_{avia} 为航电系统功率; P_{pld} 为载荷系统功率。

2.2.2 滑翔阶段动力学与能量模型

为降低夜间巡航能量, 需通过滑翔降低巡航高度。滑翔通过利用重力势能, 可有效降低能量消耗, 根据是否开启动力, 滑翔分为无动力滑翔和有动力滑翔。

设太阳能无人机的推力线沿着飞机迎角基准线, 根据稳定滑翔的受力分析, 得到滑翔过程动力学方程为

$$\begin{cases} L - W \cos \theta = 0 \\ W \sin \theta + T - D = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: θ 为下降角, 表示飞行方向下水平线之间的夹角。

太阳能无人机的下降率为

$$v_{\text{sink}} = v \sin \theta \quad (11)$$

对于无动力下滑, 下降角为

$$\tan \theta = D/L \quad (12)$$

此时, 太阳能无人机通过重力滑翔方式, 推进系统功率为 0:

$$P_{\text{gl}} = 0 \quad (13)$$

对于有动力下滑, 下降角为

$$\sin \theta = (D - T)/W \quad (14)$$

对于采用太阳电池富余功率, 动态调整推进系统输入功率进行动力下滑, 其推进系统功率为

$$P_{\text{gl}} = P_{\text{solar}} - (P_{\text{avia}} + P_{\text{pld}}) \quad (15)$$

滑翔能量需求为

$$E_{\text{glide}} = \int \left(\frac{P_{\text{gl}}}{\eta_{\text{thrust}}} + P_{\text{avia}} + P_{\text{pld}} \right) dt \quad (16)$$

2.2.3 爬升阶段动力学与能量模型

根据太阳能无人机的受力分析可知, 爬升阶段与滑翔阶段类似, 爬升过程动力学方程为

$$\begin{cases} L - W \cos \theta = 0 \\ T - D - W \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (17)$$

对于定功率爬升情况, 推进系统功率 P_{cl} 为定值。对于变功率爬升情况, 推进系统功率为

$$P_{\text{cl}} = P_{\text{solar}} - (P_{\text{avia}} + P_{\text{pld}}) \quad (18)$$

太阳能无人机的爬升率为

$$v_{\text{rise}} = v \sin \theta = v \frac{T - D}{W} \quad (19)$$

爬升能量需求为

$$E_{cl} = \int \left(\frac{P_{cl}}{\eta_{thrust}} + P_{avia} + P_{pld} \right) dt \quad (20)$$

3 仿真分析

3.1 基本特性

以空客防务 Zephyr S 的公开数据为基础, 基于表 1 中基本参数和文献 [21] 的无人机气动参数开展仿真研究。如图 6 所示, 该型临近空间太阳能无人机采用常规气动布局, 采用 2 套“电机-螺旋桨”推进系统, 使用 MicroLink 提供的基于外延层剥离技术 (epitaxial lateral overgrowth, ELO) 的高效多结太阳能电池进行日间供电, 使用 Amprius 公司提供的锂离子电池供电, 可搭载 5 kg 的光电载荷进行全天时高分辨率观测。

表 1 仿真分析使用的参数

参数	数值
总质量/kg	62
载荷质量/kg	5
储能电池能量密度/(Wh·kg ⁻¹)	400
储能电池放电深度/%	90
翼展/m	25
太阳能电池面积/m ²	15
太阳能电池比功率/(W·kg ⁻¹)	1 000
太阳能电池功率密度/(W·m ⁻²)	250
航电与载荷功耗/W	50
日间巡航高度/m	21 000
夜间巡航高度/m	16 000



图 6 Zephyr S 太阳能无人机示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Zephyr S solar powered unmanned aerial vehicles

基于长沙地区的环境特征开展太阳能无人机的能源特性分析。图 7 给出了一年中无人机太阳能电池阵的每日最大发电功率和每日总需求能量。结合太阳能无人机每日需求能量可知, 当太阳能无人机以日间巡航高度设计点工作, 从第 44~300 天的时间段内, 太阳能电池发电量均可满足能量需求。

在此基础上, 太阳能无人机要在能源上满足跨昼夜飞行需求, 重点是如何合理使用储能电池, 使

其满足跨昼夜巡航要求。结合 1.2 节可知, 太阳能无人机巡航阶段的飞行剖面与能源供应模式密切相关。

图 8 和图 9 对比分析了春分日 (3 月 21 日) 太阳能无人机在 3 种典型工作剖面中的能源循环情况

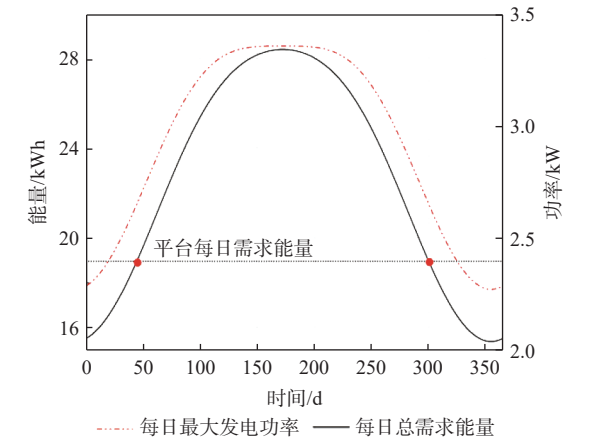


图 7 太阳能无人机每日发电情况

Fig. 7 Daily energy generation in solar powered unmanned aerial vehicles

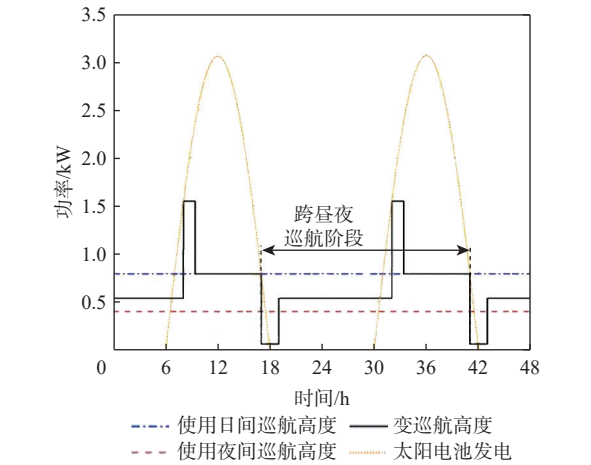


图 8 典型工作剖面的功率

Fig. 8 Powers of typical flight profiles

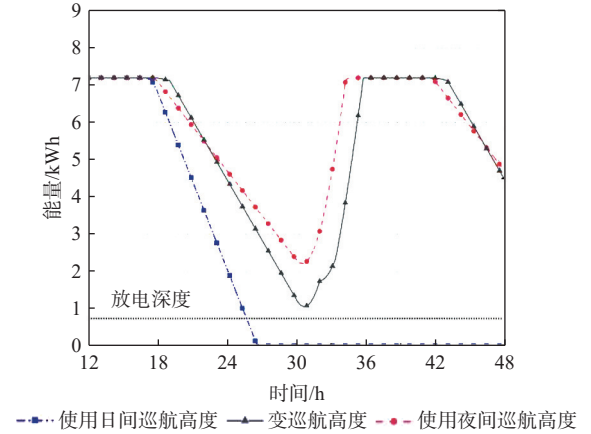


图 9 典型工作剖面的储能电池能量

Fig. 9 State of battery energies for typical flight profiles

况:使用日间巡航高度、使用夜间巡航高度和日夜巡航变高度。如图 8 所示,前 2 种巡航飞行剖面对应于恒定的巡航高度和巡航功率,第 3 种巡航飞行剖面包括下滑、夜间巡航、爬升和日间巡航 4 种工况,相应存在 4 种不同的工作功率。

图 9 为太阳能无人机在 3 种典型巡航飞行剖面中对应储能电池的能量特性。显然,对于使用日间巡航高度的飞行剖面,其储能电池会快速完成全部放电,无法持续至次日太阳电池工作;根据图 9 的分析可知,使用日间巡航高度上的太阳能无人机在春分日的总发电量大于总用电需求,但由于夜间飞行由储能电池供电,夜间能源消耗过大,而日间太阳电池的发电量未能充分存储,导致太阳能无人机难以跨昼夜飞行。对于使用夜间巡航高度的飞行剖面,储能电池可支持太阳能无人机的夜晚飞行,但此时飞行高度仅为 16 km。对于变巡航高度飞行,滑翔不仅缩短了夜间巡航时间,而且降低功率消耗,从而降低了对储能电池的用电需求。这也是目前太阳能无人机设计变巡航高度飞行剖面的主要原因。

3.2 滑翔阶段的影响分析

滑翔主要用于降低夜间巡航高度。对于滑翔阶段,其对飞行器能源特性的影响主要体现在滑翔的时长及滑翔功率需求。本文对无动力滑翔和有动力滑翔 2 种典型情况进行分析。

图 10 为上述 2 种典型滑翔策略的功率曲线。可知,当太阳电池发电功率与日间巡航功率相等时,无人机进入滑翔状态。对于无动力滑翔策略,无人机采用与滑翔机类似策略,动力系统暂停工作,通过最小下降率进入下滑,平台功率仅包括航电与载荷功率。对于有动力滑翔,其实质上是先启用动力系统,但动力系统功率与太阳电池发电量相

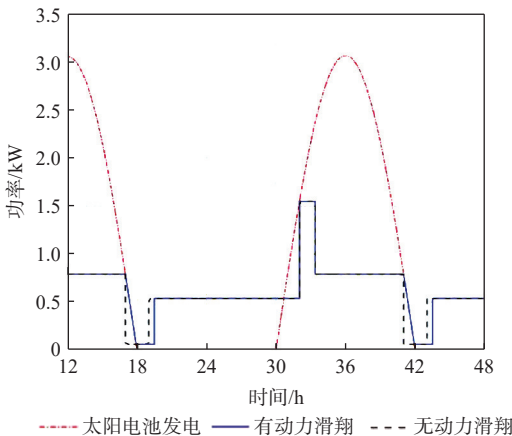


图 10 2 种典型滑翔策略的功率特性

Fig. 10 Power properties of two typical glide strategies

匹配,再采用无动力滑翔。由图 10 可知,有动力滑翔的时间相对较长,滑翔时长约增加 31 min。

图 11 为上述 2 种典型滑翔策略的能量和高度曲线。对于有动力滑翔,由于利用富余的太阳能进行滑翔,其启动下滑时的下降率更低。从电池电量曲线可知,有动力滑翔时的最低能量比无动力滑翔时约多 120 Wh。因此,二者之间的差异并不大,对于储能系统的影响较小。

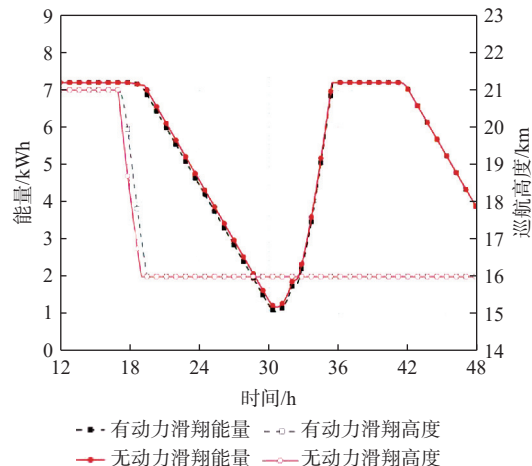


图 11 2 种典型滑翔策略的能量

Fig. 11 State of battery energies for two typical glide strategies

3.3 爬升阶段的影响分析

爬升主要用于提高日间巡航高度。为消除对储能电池的供电需求,通常在太阳电池的发电功率大于爬升需用功率时进入爬升阶段。本节对定功率爬升和变功率爬升 2 种典型情况进行分析。

图 12 给出了太阳能无人机在 2 种典型爬升策略时的功率曲线。可知,无人机在 2 种策略中进入爬升阶段的时间不同。变功率爬升的进入阶段更早,且完成爬升更早,较定功率爬升提前约 48 min。

图 13 为上述 2 种典型爬升策略的能量和高度曲线。在高度变化方面,变功率爬升初期功率较

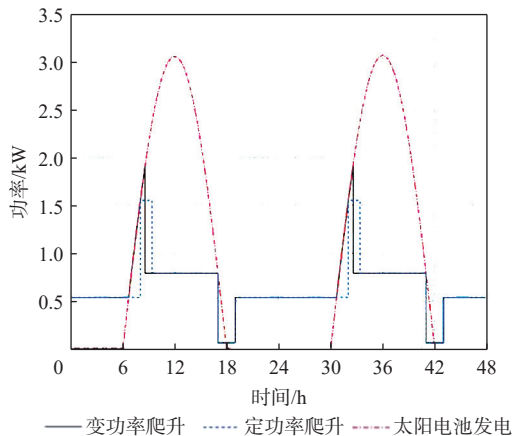


图 12 2 种典型爬升策略的功率特性

Fig. 12 Power properties of two typical climb strategies

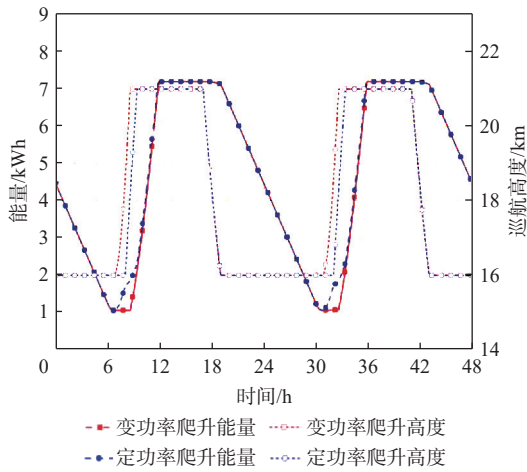


图 13 2 种典型爬升策略的能量

Fig. 13 State of battery energies for two typical climb strategies

低, 爬升较慢, 而随着功率提升而爬升加速。在能量方面, 由于变功率爬升的进入阶段早, 只有当爬升完成后才开始充电, 其储能电池的最低电量维持时间更长; 而在定功率爬升策略中, 太阳能电池功率大于夜间巡航功率后就开始为储能电池充电, 因此其储能电池的最低电量是瞬态值。

3.4 巡航阶段的影响分析

图 14 和图 15 分别为太阳能无人机在不同日间巡航高度和夜间巡航高度时的储能电池剩余电量情况。1.3 节分析指出, 巡航需用功率随其飞行高度升高而快速增加, 由于昼夜巡航时能源供应模式不同, 日间和夜间巡航高度对于储能电池的影响也存在差异。

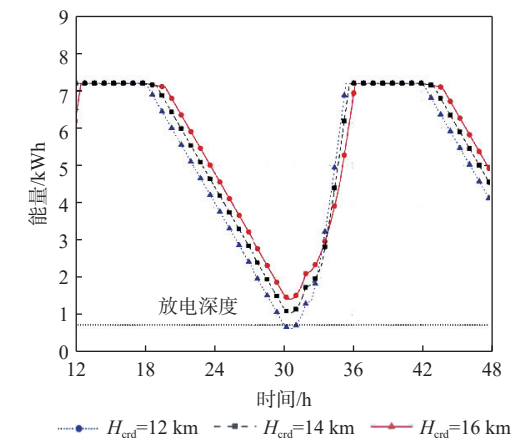


图 14 不同日间巡航高度时储能电池能量

Fig. 14 State of battery energies for different daily cruise altitudes

图 14 显示了不同日间巡航高度时储能电池的能量变化, 随着日间巡航高度增加, 储能电池的最低电量将增加。当日间巡航高度从 18 km 增加至 25 km 时, 电池的最低电量将从 626 Wh 增加至 1 430 Wh。即日间巡航高度在 18 km 时, 储能电池

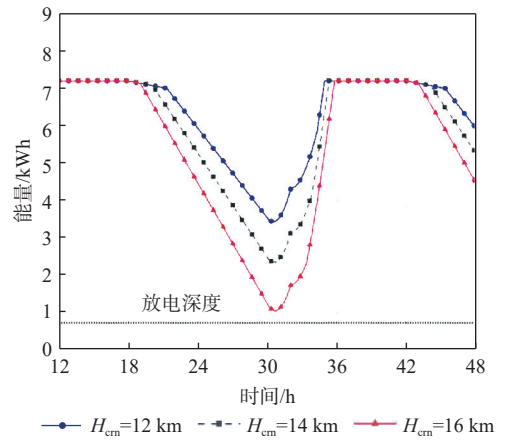


图 15 不同夜间巡航高度时储能电池能量

Fig. 15 State of battery energies for different night cruise altitudes

最低电量将低于其放电深度对应电量, 此时无法持续飞行。虽然在 25 km 巡航飞行的需用功率较 18 km 要大, 但其日间主要通过太阳能电池阵供电, 而 25 km 的滑翔时长约 3.1 h, 而 18 km 的滑翔时长约 0.9 h, 因此, 通过高位的巡航获得长滑翔时长, 是降低其储能电池供电的有效手段。

图 15 显示了不同夜间巡航高度时储能电池的能量变化, 显然, 降低夜间巡航高度可明显降低夜间用电, 大幅提高储能电池的最低电量值。具体对于本文研究对象, 当夜间巡航高度从 16 km 降低至 12 km 时, 夜间储能将从 1 056 Wh 提升至 3 447 Wh。需要注意, 在实际应用中, 还应综合考虑执行夜间任务对驻空高度的需求。

日间巡航结束后, 太阳能无人机进入滑翔阶段, 由于滑翔阶段的供电模式较复杂, 依次经历太阳能电池供电、联合供电和储能电池供电, 因此, 巡航结束时刻对于能源循环有一定影响。图 16 给出了太阳能无人机在 25 km 日间巡航高度的巡航结束时刻对于储能电池最低能量的影响。可知, 储能电池的最低能量随 t_{crd} 时刻的变化存在最大值, 在 t_{crd}

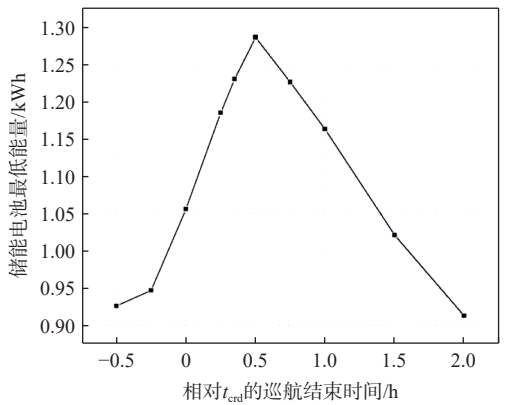


图 16 巡航结束时刻对储能电池最低能量影响

Fig. 16 Effect of cruise end time on minimum battery energy

之后约 30 min 进入滑翔时, 储能电池将达到最大 1 280 Wh。其主要原因是: 常规日间巡航转滑翔的供电模式可表示为图 1 中的 (d)→(b)→(a), 而在 t_{crd} 之后增加巡航时长, 其供能模式由太阳电池进入联合供电, 进入滑翔后可再次进入太阳电池充电模式, 可表示为图 1 中的 (d)→(b)→(d)→(b)→(a), 实现了对太阳能的进一步充分利用。

4 结 论

昼夜能量平衡是临近空间太阳能无人机实现高空长航时飞行的关键。本文通过对巡航飞行剖面中滑翔、爬升、日间平飞和夜间平飞等阶段的能源供应模式分析, 基于发电、储能、耗能和动力学的模型, 重点讨论了巡航飞行剖面各阶段工作特性对能源循环的影响, 主要结论如下:

- 1) 基于典型临近空间太阳能无人机设计参数的研究表明, 采用合理差异化巡航高度的飞行剖面是太阳能无人机实现能源循环的重要手段。
- 2) 有动力滑翔策略可增加一定的滑翔时长, 但对储能电池能量的影响较小。
- 3) 变功率爬升可使太阳能无人机更快进入日间巡航阶段, 但将使储能电池维持一段时间的最低能量。
- 4) 提高日间巡航高度可以在一定程度上增加储能电池最低电量, 而降低夜间巡航高度可大幅增加储能电池的最低电量。

由于储能电池的最低电量和巡航高度分别代表了临近空间太阳能无人机巡航飞行的能源巡航能力和任务执行能力, 在实际飞行中, 应根据平台特点、飞行时间位置和任务要求进行巡航飞行剖面设计。

参考文献 (References)

[1] 侯中喜, 高显忠, 郭正, 等. 太阳能飞机: 高空长航时飞行关键问题[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
HOU Z X, GAO X Z, GUO Z, et al. Solar-powered aircraft[M]. Beijing: Science Press, 2021(in Chinese).

[2] XU Y M, ZHU W Y, LI J, et al. Improvement of endurance performance for high-altitude solar-powered airships: a review[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 167: 245-259.

[3] 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).

[4] 赵炜, 赵钱, 黄江流, 等. 临近空间太阳能无人机在现代战争中的应用[J]. *空天防御*, 2020, 3(2): 85-90.
ZHAO W, ZHAO Q, HUANG J L, et al. Application of near space solar powered UAV in modern war[J]. *Air & Space Defense*, 2020,

3(2): 85-90(in Chinese).

[5] 石文, 李广佳, 仪志胜, 等. 临近空间太阳能无人机应用现状与展望[J]. *空天技术*, 2022(1): 83-90.
SHI W, LI G J, YI Z S, et al. Current status and prospect of solar-powered unmanned aerial vehicle application in near space[J]. *Aerospace Technology*, 2022(1): 83-90(in Chinese).

[6] 高显忠, 邓小龙, 王玉杰, 等. 临近空间太阳能飞机能量最优飞行航迹规划方法展望[J]. *航空学报*, 2023, 44(8): 027265.
GAO X Z, DENG X L, WANG Y J, et al. General planning method for energy optimal flight path of solar-powered aircraft in near space[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(8): 027265(in Chinese).

[7] 马东立, 张良, 杨穆清, 等. 超长航时太阳能无人机关键技术综述[J]. *航空学报*, 2020, 41(3): 623418.
MA D L, ZHANG L, YANG M Q, et al. Review of key technologies of ultra-long-endurance solar powered unmanned aerial vehicle [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 623418 (in Chinese).

[8] GAO X Z, HOU Z X, GUO Z, et al. Reviews of methods to extract and store energy for solar-powered aircraft[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 96-108.

[9] GAO X Z, HOU Z X, GUO Z, et al. Research on characteristics of gravitational gliding for high-altitude solar-powered unmanned aerial vehicles[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 227(12): 1911-1923.

[10] RONEY J A. Statistical wind analysis for near-space applications [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, 69(13): 1485-1501.

[11] ARNE V, VEGA H, CHRISTIAN W, et al. Results from loads and aeroelastic analyses of a high altitude, long endurance, solar electric aircraft[J]. *Journal of Aeroelasticity and Structural Dynamics*, 2022, 9(1): 1-22.

[12] 吴健发, 王宏伦, 黄宇. 大跨时空任务背景下的太阳能无人机任务规划技术研究进展[J]. *航空学报*, 2020, 41(3): 623414.
WU J F, WANG H L, HUANG Y. Research development of solar powered UAV mission planning technology in large-scale time and space spans[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 623414(in Chinese).

[13] KLESH A T, KABAMBA P T. Solar-powered aircraft: energy-optimal path planning and perpetual endurance[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(4): 1320-1329.

[14] ZHU W Y, XU Y M, LI J, et al. Performance analysis of rotatable energy system of high-altitude airships in real wind field[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 98: 105689.

[15] CRAIG L N, MARK D G, LISA L K, et al. High altitude long endurance UAV analysis of alternatives and technology requirements development[R]. Washington, D. C.: NASA, 2007.

[16] LEE J S, YU K H. Optimal path planning of solar-powered UAV using gravitational potential energy[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1442-1451.

[17] 仲维国, 郭有光, 张凯. 太阳能飞机循环飞行的高度剖面能量策略[J]. *航空学报*, 2020, 41(3): 623429.
ZHONG W G, GUO Y G, ZHANG K. Energy strategy on altitude profile for cycle flight of solar powered aircraft[J]. *Acta Aeronau-*

- tica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 623429(in Chinese).
- [18] 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).
- [19] NI W J, WU D, MA X P. Energy-optimal flight strategy for solar-powered aircraft using reinforcement learning with discrete actions [J]. [IEEE Access](#), 2021, 9: 95317-95334.
- [20] 杨炳尉. 标准大气参数的公式表示[J]. 宇航学报, 1983, 4(1): 83-86.
- YANG B W. Formulization of standard atmospheric parameters[J]. Journal of Astronautics, 1983, 4(1): 83-86(in Chinese).
- [21] 杨宇丹, 朱炳杰, 郭正, 等. 太阳能无人机能源系统参数的敏感度分析[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(10): 1045-1052.
- YANG Y D, ZHU B J, GUO Z, et al. The sensitivity analysis of energy system parameters of solar powered unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(10): 1045-1052(in Chinese).

Energy influence of stages in cruise profile for near space solar powered unmanned aerial vehicles

DENG Xiaolong^{1,*}, GAO Xianzhong¹, YANG Minsheng², WANG Yujie¹, ZHU Bingjie¹

- (1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory for Control Technology of Distributed Electric Propulsion Aircraft, Changde 415000, China)

Abstract: The diurnal energy balance is one of the most important factors for near-space solar-powered unmanned aerial vehicle (UAV) to perform high-altitude long-duration missions. To achieve this goal, the design of a reasonable cruise flight profile is significant. In this work, the energy supplying modes of stages in cruise flight profile, including gliding, climbing, daytime level flight and night level flight, were analyzed respectively. Then the models of power generation, energy storage, energy consumption and dynamics were established. The effects of each stage's operational characteristics in the flight profile were then thoroughly examined. The findings demonstrated that the climbing and gliding tactics had no impact on the lowest battery energy. The end time of daytime level flight had an impact on the energy storage battery's minimum power, and increasing the daytime cruise altitude may, to some extent, raise the battery's minimum energy. The reducing of the night cruise altitude could greatly increase the minimum battery energy.

Keywords: solar powered unmanned aerial vehicle; near space; flight profile; energy analysis; cruise flying