文章编号:1007 - 4252(2024)03 - 0003 - 113　　DOI:10.20027/j.gncq.2024.0023

太阳能无人机光伏输出功率预测模型研究

许坦奇[1,2],吕冬翔[3],虞祥瑞[4],赵东明[4],李钏[3],呼文韬[3],肖平[4],
张丽平[1,2],刘文柱[1,2],孟凡英[1,2],刘正新[1,2,*]
(1. 中科院上海微系统与信息技术研究所,上海 201800; 2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 中国电子科集团第十八研究所,天津 300384; 4. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司,北京 102209)

摘要:本文针对高空长航时太阳能无人机的曲面形状的机翼和飞行姿态,提出了一种光伏阵列发电功率预测模型,实现太阳能无人机光伏发电系统输出功率的准确预测。首先将机翼曲面上表面分为三段,根据每段的光伏组件铺设仰角分别计算其发电功率。通过具体算例,计算了海拔高度和纬度在全年内对光伏阵列日水平输出能量的影响。同时通过算例,分析了无人机的飞行姿态,包括偏航角、俯仰角以及滚转角对无人机光伏发电系统输出功率的影响。结果表明光伏输出功率预测模型能够实现对无人机光伏发电系统输出功率的准确预测,对无人机的航迹优化,能源系统控制具有重要的意义。

关键词:高空长航时太阳能无人机;太阳辐照度计算;光伏发电功率预测
中图分类号:(T)　　**文献标志码**:A

Study on Prediction Model of Photovoltaic Array Output on Solar - powered Unmanned Aerial Vehicle

XU Tanqi[1,2], LV Dongxiang[3], YU Xiangrui[4], ZHAO Dongming[4], LI Chuan[3], HU Wentao[3], XIAO Ping[4], ZHANG Liping[1,2], LIU Wenzhu[1,2], MENG Fanying[1,2], LIU Zhengxin[1,2,*]

(1. The Research Center for New Energy Technology, State Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology (SIMIT) Chinese Academy of Sciences (CAS), Shanghai 201800, China;
2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. The Eighteenth Research Institute of China Electronics Group, Tianjin 300384, China
4. Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: This paper proposed a prediction model for photovoltaic array power generation on the curved wings of solar - powered unmanned aerial vehicle (UAV) at different attitude, accurate prediction of out-

收稿日期:2024 - 04 - 09;　　**修订日期**:2024 - 04 - 24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62004208; No. 62074153); 上海自然科学基金项目(No. 22ZR1473200); 国家重点研发计划(No. 2022YFC2807104); 高效超薄异质结太阳电池及组件关键技术研究(No. HNKJ22 - H154).
作者简介:许坦奇, 男, 博士研究生, 主要研究方向为微电网控制(E - mail:xutanqi@mail.sim.ac.cn).
通信作者:刘正新, 男, 博士, 教授, 主要研究方向为太阳电池材料与器件(E - mail:z.x.liu@mail.sim.ac.cn).

put power was achieved. First, the surface of the wing was divided into three sections, and the power generation of each section was calculated based on the pitch angle of the photovoltaic module installation. The impact of altitude and latitude on the daily output power throughout the year was calculated through specific examples. At the same time, the influence of the flight attitude of the UAV, including yaw angle, pitch angle, and rolling angle, on the output power was analysed. The results indicated that the proposed model could accurately predict the output power, and was of great significance for the optimization of UAV trajectories and energy system control.

Key words: Solar - powered unmanned aerial vehicle; Solar irradiance calculation; Photovoltaic output power prediction

0 引言

高空长航时太阳能无人机是一种飞行高度在20km以上,持续飞行时间可达数周甚至数月的飞行器。其在情报收集、气象观测、通讯中继、火灾预警等任务方面具有较大的应用价值[1,2]。太阳能无人机的能源系统一般是由光伏发电系统、储能系统、电力电子变换器、直流负载以及能源管理系统等组成的独立直流微电网。通过能量管理策略实现机载微电网的各个单元的协调控制,实现能量的产生、存储、传输以及利用的高效稳定控制,是解决无人机长航时飞行的关键手段。太阳能无人机的能量管理策略主要可以分为基于能源系统优化的能量管理策略、基于航迹优化的能量管理策略以及利用环境能量的能量管理策略三种[3,4]。而通过建立无人机光伏发电系统输出功率预测模型,实现对无人机光伏输出功率的准确预测,可以对无人机的航迹规划和能源系统控制提供重要的数据支撑。

截至目前,研究人员已对高空太阳能飞行器的光伏功率预测进行了大量的研究。文献[5]通过研究不同温度、辐照度以及倾角条件下的太阳电池相关参数,对现有的太阳电池模型进行修正,建立了太阳电池的输出模型,实现光伏发电量预测。文献[6]通过对太阳能无人机的日均净面功率特性的研究,设计了一种采用主动式光伏组件的太阳能无人机布局方案,可以显著地提高无人机的日均净面功率。文献[7-9]都对飞艇太阳电池系统进行了分析,根据飞艇的形状改进平面光伏组件的功率预测模型,从而得到更准确的光伏发电功率计算模型。文献[10]中分析了飞行器表面曲率对光伏发电系统功率的影响,结果表明:当曲面太阳电池面积超过总面积的15%时,就需要考虑电池曲率对发电功率的影响。

在以往的研究中,研究人员对于飞艇的光伏发电功率预测时往往都考虑到了飞艇表面曲率的影响,而在高空太阳能无人机的光伏功率预测时,一般都将机翼表面近似为一整个平面来进行处理,没有考虑机翼曲面对光伏输出功率的影响。本文为了对太阳能无人机机翼光伏发电系统输出功率进行更加准确的预测,根据无人机的机翼形状以及光伏组件的铺设方式,将无人机的机翼光伏阵列分为三段,分别预测输出功率。并基于该预测模型分析了无人机的纬度、海拔、飞行姿态对发电特性的影响,给出了更准确的输出功率预测模型。

1 太阳辐照度计算模型

1.1 太阳辐射角度计算模型

如图1所示为太阳辐射角度计算模型。对于处于地球表面的一个光伏组件,首先建立以光伏组件表面一点O为原点的地表坐标系,正南方向为x轴;正西方向为y轴;垂直指向地心为z轴。$\mathbf{n}_s$为地心指向日心的单位矢量,此时相对地日距离来说,可以将光伏组件、地球视为同一点,因此$\mathbf{n}_s$也可以看做由O点指向日心。α为太阳高度角,即$\mathbf{n}_s$与xOy平面的夹角,且当太阳在天顶时α取最大值90°。β为太阳方位角,即$\mathbf{n}_s$在xOy平面上投影与y轴的夹角,$\mathbf{n}_s$投影指向正南方向时为0°,向西为正,向东为负,指向正北方时为180°,且与-180°等价。$\mathbf{n}_{pv}$为光伏组件平面的法向单位矢量[11]。

在Oxyz坐标系中$\mathbf{n}_s$可以表示为:

$$\mathbf{n}_s = [\cos\alpha\cos\beta \quad \cos\alpha\sin\beta \quad -\sin\alpha]^T \tag{1}$$

其中太阳高度角α和太阳方位角β可以由无人机所在地纬度φ、太阳赤纬角δ和太阳时角θ决定[12]:

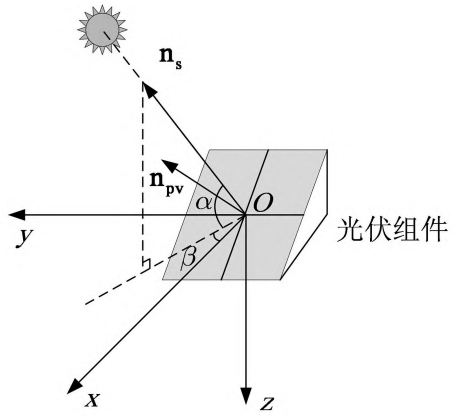

图 1　太阳辐射角度计算模型

Fig. 1 Model for solar radiation angle computation

$$\sin\alpha = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\theta \tag{2}$$

$$\sin\beta = \frac{\cos\delta\sin\theta}{\cos\alpha} \tag{3}$$

$$\delta = 23.45\sin\left[\frac{360(n_d + 284)}{365}\right] \tag{4}$$

太阳时角 θ 可以由下式确定:

$$\begin{cases} \theta = 15(H_s - 12) \\ H_s = H_c + \dfrac{L_s - L_c}{15} + \dfrac{E_t}{60} \\ E_t = 0.0172 + 4.28\cos B - 7.35\sin B - \\ 3.35\cos 2B - 9.732\sin 2B \\ B = \dfrac{360}{365}(n_d - 1) \end{cases} \tag{5}$$

式中:H_s为太阳时,h;H_c为当地标准时间,h;L_s为制定当地标准时间所用的标准经度;L_c为当地经度;E_t为 H_s与 H_c之间的修正值,主要由地球公转引起。

1.2　太阳辐照度计算模型

太阳总辐照度 I 由直接辐照度 I_D、散射辐照度 I_S和反射辐照度 I_R等构成,但由于高海拔没有云层且杂质颗粒较少,因此可以忽略反射辐照度,即:

$$I = I_D + I_S \tag{6}$$

其中直接辐照度可以表示为:

$$I_D = I_0\exp\left\{-\frac{c_s\exp(-\frac{h}{h_s})}{\left[\sin(\frac{\alpha + \alpha_d}{1 + \alpha_d/90})\right]^{s_s+\frac{h}{h_b}}}\right\} \tag{7}$$

式中:c_s和 h_s为常数,$c_s = 0.357$,$h_s = 0.678$;h 为太阳能无人机的飞行高度,km;h_s和 h_b为常量,$h_s = 7\text{km}$,$h_b = 40\text{km}$;I_0为外大气层太阳辐照度,W/m^2,可以表示为:

$$I_0 = G_{sc}\left(1 + 0.033\cos\frac{360n_d}{365}\right) \tag{8}$$

α_d为太阳高度角的修正系数

$$\alpha_d = 0.57 + \arccos\left(\frac{R_e}{R_e + h}\right) \tag{9}$$

式(8)、(9)中:

G_{sc}为标准太阳辐照度,$G_{sc} = 1367 W/m^2$;

n_d为日序数,即当日在全年中的排序;

R_e为地球半径,$R_e = 6371km$。

式(6)中散射辐照度 I_S是由地球大气对太阳辐射的散射作用产生的辐照度分量[13]。在模型中可以将其近似为任意方向上与直接辐照度成线性关系,即 I_S可以表示为:

$$I_S = 0.08I_D\exp\left(-\frac{h}{h_s}\right) \tag{10}$$

1.3　光伏组件法向量计算模型

由于无人机光伏组件为曲面,为了计算其法向单位矢量,首先取机翼光伏组件的一个微元,近似为平面进行计算。其次需要建立无人机坐标系 $O_a x_a y_a z_a$以及光伏组件坐标系 $O_p x_p y_p z_p$。其中无人机坐标系是以机头为坐标原点 O_a,沿着机体轴线指向前方为 $O_a x_a$轴方向,$O_a z_a$轴在无人机对称面内,垂直于 $O_a x_a$轴指向下方,$O_a y_a$轴垂直于无人机对称面指向右翼方向。光伏组件坐标系以光伏组件上一点为圆心 O_p,由于组件铺设时上边缘于机体 $O_a y_a$轴平行,因此 $O_p y_p$轴与 $O_a y_a$轴平行,且 $O_p x_p z_p$平面与 $O_a x_a z_a$平面平行,$O_p x_p$轴与光伏组件平面平行,$O_p z_p$轴与光伏组件平面垂直且指向组件背面。如图 2 所示,给出了地表坐标系、无人机坐标系以及光伏组件坐标系的示意图:

在地表坐标系 $Oxyz$ 中,光伏组件的外法向量 $\mathbf{n}_{pv}$由无人机的飞行姿态以及光伏组件的铺设角度决定。其中无人机的飞行姿态可以根据无人机坐标系与地面坐标系之间的角度关系来描述,包括偏航角 ψ_a、俯仰角 θ_a以及滚转角 φ_a;光伏组件的铺设角度可以根据光伏组件坐标系与无人机坐标系之间的角度关系来描述,包括侧偏角 ψ_p、仰角 θ_p以及滚偏角 φ_p。无人机坐标系到地面坐标系的转换矩阵 $\mathbf{L}_{ga}$可以表示为:

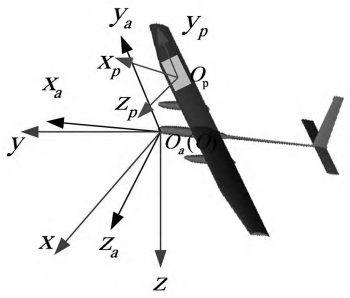

图 2 地面坐标系、无人机坐标系以及光伏组件坐标系

Fig. 2 Ground coordinate system, aircraft coordinate system, and photovoltaic module coordinate system

$$L_{ga} = \begin{bmatrix} \cos\psi_a\cos\theta_a & \cos\psi_a\sin\theta_a\sin\varphi_a - \sin\psi_a\cos\varphi_a & \cos\psi_a\sin\theta_a\cos\varphi_a + \sin\psi_a\sin\varphi_a \\ \sin\psi_a\cos\theta_a & \sin\psi_a\sin\theta_a\sin\varphi_a + \cos\psi_a\cos\varphi_a & \sin\psi_a\sin\theta_a\cos\varphi_a - \cos\psi_a\sin\varphi_a \\ -\sin\theta_a & \cos\theta_a\sin\varphi_a & \cos\theta_a\cos\varphi_a \end{bmatrix} \tag{11}$$

其中，ψ_a 以机头指向正南为 0°基准，东偏为正，西偏为负；θ_a 为 O_ax_a 与 Oxy 平面的夹角，机头抬起为正，低下为负；φ_a 为 O_ay_a 轴与 Oxy 平面的夹角，无人机绕 O_ax_a 轴右滚为正，左滚为负。

光伏组件坐标系到无人机坐标系的转换矩阵 $\mathbf{L}_{ap}$ 可以表示为：

$$L_{ap} = \begin{bmatrix} \cos\psi_p\cos\theta_p & \cos\psi_p\sin\theta_p\sin\varphi_p - \sin\psi_p\cos\varphi_p & \cos\psi_p\sin\theta_p\cos\varphi_p + \sin\psi_p\sin\varphi_p \\ \sin\psi_p\cos\theta_p & \sin\psi_p\sin\theta_p\sin\varphi_p + \cos\psi_p\cos\varphi_p & \sin\psi_p\sin\theta_p\cos\varphi_p - \cos\psi_p\sin\varphi_p \\ -\sin\theta_p & \cos\theta_p\sin\varphi_p & \cos\theta_p\cos\varphi_p \end{bmatrix} \tag{12}$$

其中，ψ_p 以垂直于无人机对称面为 0°基准，组件前缘右偏为正，前缘左偏为负；θ_p 以平行于 $O_ax_ay_a$ 平面为 0°基准，组件前缘向上为正，前缘向下为负；φ_p 以垂直于无人机对称面为 0°基准，组件绕 O_ax_p 轴右滚为正，左滚为负。且上述偏航角 ψ_a、俯仰角 θ_a、滚转角 φ_a、侧偏角 ψ_p、仰角 θ_p 以及滚偏角 φ_p 均在 -180°～180°之间变化。当光伏组件铺设前缘方向与 O_ay_a 轴平行时，$\psi_a = 0°$，且忽略机翼与 $O_ax_ay_a$ 平面的夹角，可以近似的认为 $\psi_p = 0°$，则 $\mathbf{L}_{ap}$ 可以表示为：

$$L_{ap} = \begin{bmatrix} \cos\theta_p & 0 & \sin\theta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_p & 0 & \cos\theta_p \end{bmatrix} \tag{13}$$

本文针对无人机曲面的机翼形状，提出了一种分段计算机翼光伏输出功率的策略。如图 3 所示为无人机机翼截面图：

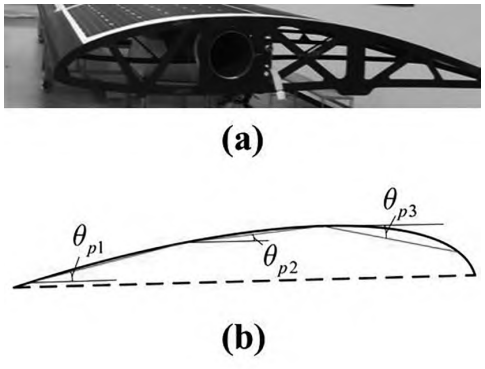

图 3 机翼截面图，(a) 实际无人机截面；(b) 截面示意图

Fig. 3 Section diagram of the wing, (a) actual cross - section of the aircraft; (b) cross - section model of the aircraft

从图中可以看出机翼截面上分布有三个光伏子阵，每个子阵与机体的仰角都不一样，为了更精确的计算整机的光伏发电功率，分别对三个不同仰角的子阵进行功率计算，每个子阵对应的转换矩阵可以表示为：

$$L_{api} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{pi} & 0 & \sin\theta_{pi} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{pi} & 0 & \cos\theta_{pi} \end{bmatrix} (i = 1,2,3) \tag{14}$$

光伏组件的外法向单位矢量 $\mathbf{n}_{pv}$ 可以表示为：

$$\mathbf{n}_{pv} = \mathbf{L}_{ga}\mathbf{L}_{ap}[0 \quad 0 \quad -1]^T \tag{15}$$

代入式(11)、(14)，得到 $\mathbf{n}_{pv}$ 的最终表达式为：

$$\mathbf{n}_{pv} = \begin{bmatrix} -\cos\psi_a\cos\theta_a\sin\theta_{pi} - \cos\theta_{pi}(\cos\psi_a\sin\theta_a\cos\varphi_a + \sin\psi_a\sin\varphi_a) \\ -\sin\psi_a\cos\theta_a\sin\theta_{pi} - \cos\theta_{pi}(\sin\psi_a\sin\theta_a\cos\varphi_a - \cos\psi_a\sin\varphi_a) \\ \sin\theta_a\sin\theta_{pi} - \cos\theta_a\cos\varphi_a\cos\theta_{pi} \end{bmatrix} \tag{16}$$

根据 $\mathbf{n}_s$ 和 $\mathbf{n}_{pv}$ 的内积可以得到太阳辐射入射角

γ_i的余弦值：

$$\begin{aligned}\cos\gamma_i &= n_s \cdot n_{pv} \\ &= -\cos\alpha\cos\beta[\cos\psi_a\cos\theta_a\sin\theta_{pi} + \cos\theta_{pi}(\cos\psi_a\sin\theta_a\cos\varphi_a + \sin\psi_a\sin\varphi_a)] - \cos\alpha\sin\beta[\sin\psi_a\cos\theta_a\sin\theta_{pi} + \cos\theta_{pi}(\sin\psi_a\sin\theta_a\cos\varphi_a - \cos\psi_a\sin\varphi_a)] - \sin\alpha[\sin\theta_a\sin\theta_{pi} - \cos\theta_a\cos\varphi_a\cos\theta_{pi}]\end{aligned} \tag{17}$$

由于不同角度的入射光线在照射组件表面时会存在不同的反射损失，一般采用入射角修正系数（IAM，Incidence Angle Modifier）来反映不同角度入射光线的损失比率，IAM 可以表示为：

$$\mathrm{IAM}(\gamma_i) = 1 - b_0\left(\frac{1}{\cos\gamma_i} - 1\right) \tag{18}$$

其中经验参数 $b_0 = 0.05$。

由此可以得到截面上第 i 个子阵所在平面的辐照度为：

$$I_{\gamma i} = I\cos\gamma_i \mathrm{IAM}(\gamma_i) \tag{19}$$

2　算例设计

以一个代表性无人机为例，设计了相关的计算算例，用以验证所提出的针对太阳能无人机的光伏分段发电功率预测模型的可行性。该算例中的相关输入参数如表 1 所示。

表 1　无人机机翼光伏发电功率计算算例相关参数

Table1 Parameters of photovoltaic power generation calculation examples

参数名	参数符号	参数值
组件铺设仰角	θ_{p1}	15o
	θ_{p2}	7o
	θ_{p3}	-15o
组件铺设面积	S_{pv}	$65m^2$
组件效率	η	22.3%

3　结果分析

3.1　飞行高度、纬度对日水平面输出能量的影响

在研究无人机的光伏输出功率之前，为了分析海拔高度和无人机飞行地的纬度对光伏发电系统输出功率的影响，先分析了在不同飞行高度和不同纬度时的全年日水平面输出能量。考虑水平面时，$\mathbf{n}_{pv} = [0\ 0\ -1]^T$。

选取无人机飞行高度为 20 km，分别在纬度为 0°、15°N、30°N、45°N 和 60°N 时，计算了全年的日水平面输出能量。以及在无人机飞行纬度在 45°N 时，分别在海拔高度 10 km、15 km、20 km、25 km 和 30 km 时，计算了无人机全年的日水平面输出能量。计算结果如图 4 所示。

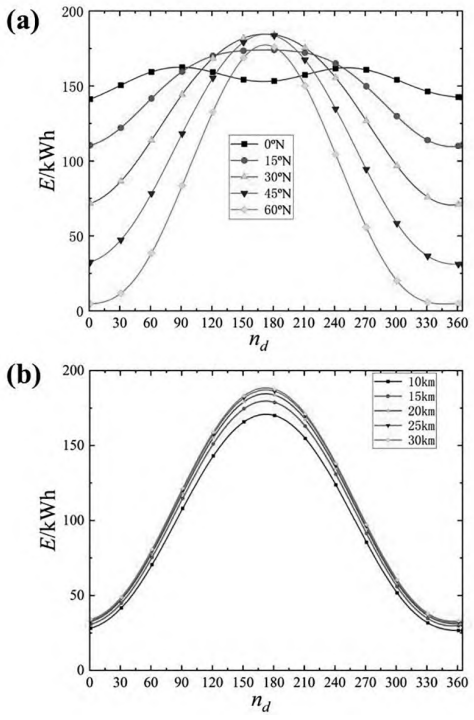

图 4　无人机飞行高度为 20 km 时，不同纬度（a），以及纬度在 45°N 时，不同海拔高度（b）对光伏发电系统日水平面输出能量的影响

Fig. 4 The influence of latitude at the altitude of 20 km (a) and altitude at the latitude of 45°N (b) on the daily horizontal energy of PV system

从图 4 中可以看出，在夏季纬度对日水平面输出能量影响相对较小，而在秋冬季，纬度对日水平面输出能量造成巨大的差异，纬度越高，日水平面输出能量越低。而海拔高度对日水平面输出能量影响相对较低，海拔越高，日水平面输出能量越高，这是因为海拔越高，大气造成辐照度的衰减越少。

3.2　飞行姿态对无人机输出功率的影响

在北纬 45°，海拔 20 km，夏至日当天，即日序数 $n_d = 172$，分别考虑无人机偏航角 ψ_a、俯仰角 θ_a 以及滚转角 φ_a 对飞机输出功率的影响。首先设置俯仰角 $\theta_a = 0°$ 以及滚转角 $\varphi_a = 0°$，分析无人机偏航角 ψ_a

对光伏发电系统对输出功率的影响,结果如图 5 所示。

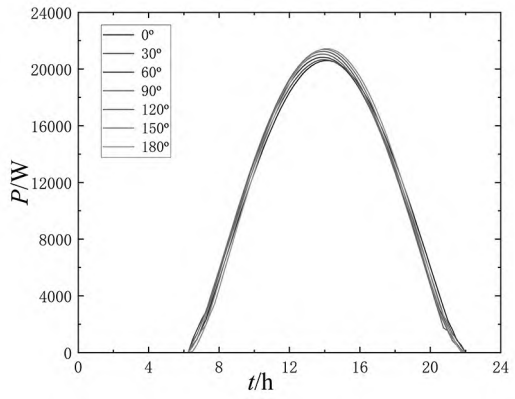

图 5 俯仰角 $\theta_a=0°$ 以及滚转角 $\varphi_a=0°$ 时,无人机偏航角 ψ_a 对光伏发电系统输出功率的影响

Fig. 5 The influence of yaw angle ψ_a on power generation with the pitch angle $\theta_a=0°$ and rolling angle $\varphi_a=0°$.

从图 5 中可以看出偏航角越大,无人机的光伏输出功率最大值越大,这是因为偏航角越大,无人机机头越偏离正南方向,当达到 180°时,机头朝向正北,由于机翼结构,在后缘处的仰角大于 0°光伏组件面积要大于前缘仰角小于 0°的光伏组件面积,当飞机朝正北飞行时,在北半球的飞机光伏组件法向量会与太阳辐射方向的夹角更小,因此会有更大的输出功率。但是由于无人机光伏组件的仰角值并不大,因此偏航角对光伏输出功率最大值的影响十分有限。

设置偏航角 $\psi_a=0°$ 以及滚转角 $\varphi_a=0°$,分析无人机俯仰角 θ_a 对光伏发电系统对输出功率的影响,结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出无人机俯仰角越低,在正午时刻无人机的发电功率越高,其中俯仰角为 -30°时发电功率最大值相对于俯仰角为 30°是的放电功率最大值提高了约 76%;而在日出和日落时刻无人机发电功率越低。这是因为此时飞机是向正南飞行,俯仰角越低,光伏组件外法向量与太阳辐射的夹角越小,有效辐照度越强。同时可以看到当俯仰角在 0°以上时,在日出和日落时刻会出现光伏输出功率迅速增大的情形,这是因为无人机在太阳高度角由 $0°_-$ 变为 $0°_+$ 时,机身因为存在俯仰角,会导致光伏组件法向量与辐照矢量的夹角并不为 90°。这可以对无人机的航迹进行规划指导,即在日出时刻无人机爬升高度和日落时刻下降高度时可以将偏转角设置为 0° ~90°,即向西南方向飞行来提高俯仰角对光伏输出功率的加成。

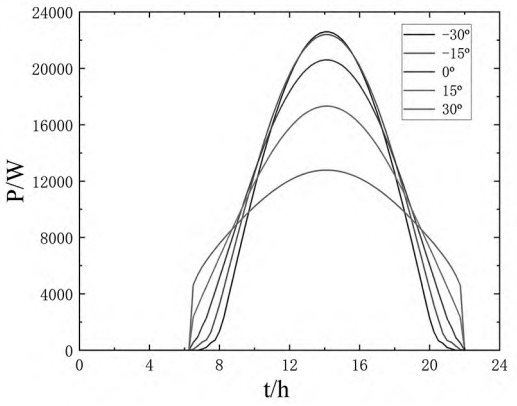

图 6 偏航角 $\psi_a=0°$ 以及滚转角 $\varphi_a=0°$ 时,无人机俯仰角 θ_a 对光伏发电系统输出功率的影响

Fig. 6 The influence of pitch angle θ_a on power generation with the yaw angle $\psi_a=0°$ and rolling angle $\varphi_a=0°$.

设置偏航角 $\psi_a=0°$ 以及俯仰角 $\theta_a=0°$,分析无人机滚转角 φ_a 对光伏发电系统对输出功率的影响,结果如图 7 所示。

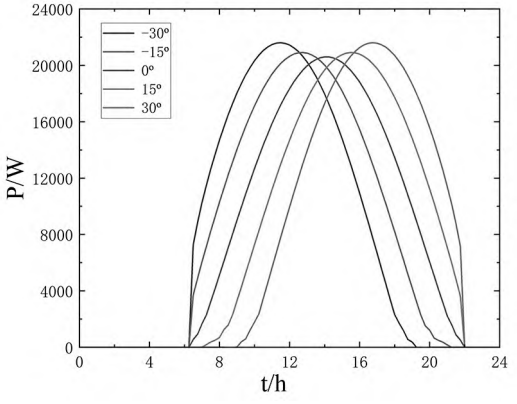

图 7 偏航角 $\psi_a=0°$ 以及俯仰角 $\theta_a=0°$ 时,无人机滚转角 φ_a 对光伏发电系统输出功率的影响

Fig. 7 The influence of rolling angle φ_a on power generation with the yaw angle $\psi_a=0°$ and the pitch angle $\theta_a=0°$.

从图 7 中可以看出无人机的滚转角对发电功率的最大值基本没有影响,但是会影响无人机最大发电功率在一天中到来的时刻,无人机滚转角越大,最大发电功率到来的越迟,这同样可以对无人机的航迹进行优化。即在光伏输出时间段内可以通过不断

增加无人机的滚转角来延长最大输出功率所占的时间。

通过上述算例计算结果验证了本文所提出的基于太阳能无人机机翼曲面形状的光伏分段发电功率预测模型能够实现对无人机的光伏发电功率的准确预测。

4　结论

本文针对太阳能无人机机翼曲面形状,提出了一种光伏分段发电功率预测模型。通过该模型研究了纬度和海拔高度对无人机日水平面输出能量的影响。通过计算结果得知,在夏季,纬度对日水平面输出能量影响相对较小,而在秋冬季,纬度对日水平面输出能量造成巨大的差异。且纬度越高,日水平面输出能量越低。同时海拔越高,日水平面输出能量越高,这是因为海拔越高,大气对辐照度的衰减越小。同时研究了无人机的飞行姿态对光伏发电功率的影响。无人机的偏航角对光伏发电系统的输出功率影响较小。而无人机的俯仰角和滚转角则会对无人机的光伏输出功率产生显著的影响。在无人机朝正南飞行且滚转角为 0°时,俯仰角越低,在正午时刻无人机的发电功率越高,而在日出和日落时刻无人机发电功率越低;而无人机的滚转角则会影响无人机最大发电功率在一天中到来的时刻,当偏航角和俯仰角都为 0°时,无人机滚转角越大,最大发电功率到来的越迟。通过对飞行姿态对无人机光伏发电功率影响的研究,可以指导无人机在飞行过程中的姿态控制和航迹规划,最大化的利用光伏的能量。本文所提出的光伏功率预测模型对无人机能源系统控制策略的研究也具有十分重要的意义。

参考文献:

[1]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.

[2]Zhu X F, Guo Z, Hou Z X. Solar – powered airplanes: A historical perspective and future challenges[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 71: 36 – 53.

[3]Gao X Z, Hou Z X, Guo Z, et al. The equivalence of gravitational potential and rechargeable battery for high – altitude long – endurance solar – powered aircraft on energy storage [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 76: 986 – 995.

[4]郭林, 刘飞, 李佳钰, et al. 基于能量管理策略的太阳能无人机航迹跟踪控制[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(02): 409 – 418.

[5]高阳, 徐国宁, 王生, 等. 临近空间太阳电池模型修正与发电量预测研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 80 – 87.

[6]昌敏,周洲,成柯,等. 高空驻留太阳能飞机主动式光伏组件面功率特性研究[J]. 航空学报, 2013, 34(2):9. DOI:10.7527/S1000 – 6893.2013.0031.

[7]朱炳杰, 杨希祥, 麻震宇,等. 平流层飞艇太阳电池系统产能分析[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1):6. DOI:CNKI:SUN:GFKJ.0.2019 – 01 – 003.

[8]郑威, 宋琦, 李勇, 等. 平流层飞艇太阳电池阵发电功率计算及分析[J]. 2022(4).

[9]王旭巍, 李兆杰, 张衍垒, 等. 结合平流层飞艇姿态的太阳辐射强度分布[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(6):30 – 37.

[10]Wang H , Song B , Zuo L . Effect of High – Altitude Airship's Attitude on Performance of its Energy System[J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(6):p.2077 – 2080.

[11]Khoury G A. Airship technology[M]. UK:Cambridge University Press, 2012.

[12]王炳忠, 刘庚山. 日射观测中常用天文参数的再计算[J]. 太阳能学报, 1991(01): 27 – 32.

[13]Duffie J A, Bechman W A. Solar Engineering of Thermal Processes [M]. New Jersey: JOHN WILEY & SONS, 2006.