

## 结合平流层飞艇姿态的太阳辐射强度分布\*

王旭巍<sup>1,2</sup>, 李兆杰<sup>1</sup>, 张衍奎<sup>1</sup>, 王岩<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**平流层飞艇上表面太阳辐射强度的分布是影响光伏阵列输出性能的重要因素。为分析平流层飞艇飞行姿态对其上表面太阳辐射强度分布特征的影响,并建立飞艇动力学模型与太阳辐射物理模型交互耦合的计算模型。使用该模型对算例飞艇进行计算分析,量化得出飞艇偏航角和俯仰角耦合变化对飞艇表面太阳辐射强度分布影响的结果,并比较分析了太阳辐射强度受飞艇飞行姿态影响的特性。研究结果可用于指导太阳能电池阵在平流层飞艇上的优化布局和阵列构型。

**关键词:**平流层飞艇;太阳辐射;飞行姿态;布局优化;太阳能电池阵列配置

**中图分类号:**TK514 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2486(2022)06-030-08

## Solar radiation intensity distribution combined with stratospheric airship flying gesture

WANG Xuwei<sup>1,2</sup>, LI Zhaojie<sup>1</sup>, ZHANG Yanlei<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1,2</sup>

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The distribution of solar radiation intensity on the upper surface of the stratospheric airship is an important factor affecting the output performance of photovoltaic arrays. In order to analysis the influence of the dynamic change of the flight attitude of the stratospheric airship on its upper surface solar radiation intensity distribution characteristics and establish a calculation model of interactive coupling between the airship dynamics model and the solar radiation physical model was established. By using this mode, a certain airship example was calculated, the solar radiation intensity distribution on the upper surface of the stratospheric airship was also proposed under flight yaw and pitch angle change, and the characteristics of solar radiation intensity affected by airship flight attitude. The result can be used to guide the optimized layout and array configuration of the solar array on the stratospheric airship.

**Keywords:** stratospheric airship; solar radiation; flight gesture; layout optimization; solar cell array configuration

平流层飞艇一般工作在距地面 20 km 左右的平流层底部,可携带一定的载荷在高空持续驻空工作数天至数月,是国内外竞相研究的一种新型信息平台<sup>[1-2]</sup>。目前,平流层飞艇的研发已经进入较为成熟的阶段,可实现数十天以上的驻空飞行。

平流层飞艇实现长时间驻空,需要有持续不断的能源供应<sup>[1]</sup>。数年内,采用光伏循环能源是可实现的途径之一,也是绝大多数平流层飞艇驻空飞行所采用的能源供应方式。太阳电池阵一般布局于飞艇上表面的设计区域内,电池阵的输出能量与其接收的太阳辐射强度直接相关。对于特定的飞艇,在其设计的飞行日期内,电池阵可接收的太阳辐射强度与飞艇飞行姿态直接相关。因

此,开展基于飞艇飞行姿态的太阳辐射强度分布特性研究是进行电池阵优化布局及准确量化电池阵输出能量的前提和基础。

现阶段,相关学者对太阳辐射强度分布特性的研究多是基于飞艇曲面外形的特征,研究太阳辐射强度在飞艇表面分布的不一致性、受此影响的太阳电池阵布局分析、太阳电池阵工作特性分析以及太阳电池阵输出能量的分析等<sup>[3-9]</sup>。这些研究多是将飞艇的飞行姿态假设为某种固定飞行模式,未涉及飞行姿态持续动态变化对太阳辐射强度的影响分析。然而,实际飞行试验数据表明,除飞艇滚转角基本不变外,其他飞行姿态角是持续动态变化的,表现在飞艇偏航角在 0°~360°之间动态变化,飞艇俯仰角在 0°~10°之间动态变

\* 收稿日期:2021-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707189);中科院先导 A 资助项目(XDA17040400)

作者简介:王旭巍(1988—),男,山西晋中人,博士研究生,E-mail:wangxw100854@aircas.ac.cn;

张衍奎(通信作者),男,高级工程师,博士,E-mail:zhangyanlei@aoe.ac.cn

化。飞行姿态动态变化的工况对飞艇表面太阳辐射强度分布特性的影响是不能忽略的。飞行姿态动态变化的工况耦合了飞艇曲面外形的特征,更是增加了太阳辐射强度分布特性计算分析的复杂性。

本文基于平流层飞艇的曲面特性,重点分析飞行姿态对太阳辐射强度分布的影响,建立数学模型,计算分析飞艇偏航角及其与俯仰角耦合变化对飞艇表面太阳辐射强度分布的影响。本文的计算模型可根据需要调整飞行日期和飞行地理位置等输入条件进行太阳辐射量分布的计算分析,用以指导太阳能电池阵布局和构型的优化设计。

### 1 模型建立

当前主流设计的平流层飞艇几何外形如图1所示。它是一种椭球流线型的曲面外形结构,其中部区域为垂直截面直径最大的区域<sup>[1]</sup>。研究飞艇飞行姿态对其上表面太阳辐射强度的分布情况,需要建立飞艇几何模型、飞艇运动学模型、太阳位置计算模型、太阳辐射物理模型、飞艇坐标系及地平坐标系的坐标转换关系模型等。对于飞艇几何模型,文献[6]建立了如图1所示的三维四边形网格划分模型,文献[8]建立了太阳位置计算模型。

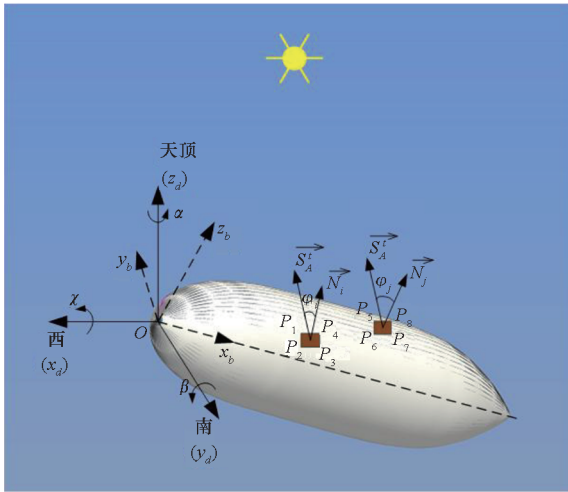


图1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

$$A_b^d = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\chi & \sin\chi \\ 0 & -\sin\chi & \cos\chi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\chi + \sin\alpha\cos\chi & -\cos\alpha\sin\beta\cos\chi + \sin\alpha\sin\chi \\ -\sin\alpha\cos\beta & -\sin\alpha\sin\beta\sin\chi + \cos\alpha\cos\chi & \sin\alpha\sin\beta\cos\chi + \cos\alpha\sin\chi \\ \sin\beta & -\cos\beta\sin\chi & \cos\beta\cos\chi \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 1.1 飞艇运动学模型

建立坐标系进行飞艇的相关计算,包括飞艇坐标系和飞艇运动导航坐标系两类<sup>[10]</sup>,两类坐标系的相互关系如图2所示。

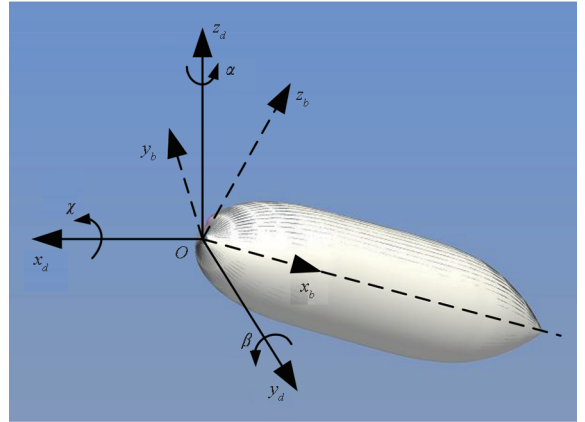


图2 坐标系和运动参数标示

Fig. 2 Coordinate system and motion parameter map

飞艇坐标系  $ox_b y_b z_b$  是与飞艇固联,坐标系的原点  $o$  取在飞艇的艇头, $x$  轴( $ox_b$  轴)沿飞艇轴线指向飞艇尾, $z$  轴( $oz_b$  轴)在飞艇纵对称面内,与  $ox_b$  轴垂直并指向上方, $y$  轴( $oy_b$  轴)垂直于飞艇纵对称面,与  $ox_b$  轴、 $oz_b$  轴构成右手系。

飞艇运动(导航)坐标系  $ox_d y_d z_d$  是描述飞艇姿态的参考系,该坐标系是飞艇动力学运动方程建模的基准坐标系。坐标系的原点  $o$  取在飞艇的艇头, $x$  轴( $ox_d$  轴)位于当地水平面指向正西向, $z$  轴( $oz_d$  轴)通过沿  $o$  点的铅垂线(椭球面法线)指向上方, $y$  轴( $oy_d$  轴)与  $ox_d$  轴、 $oz_d$  轴构成右手系,指向当地正南向。

飞艇坐标系  $ox_b y_b z_b$  相对于飞艇运动坐标系  $ox_d y_d z_d$  之间的关系,用飞艇偏航角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$  和滚转角  $\chi$  表示。飞艇运动坐标系  $ox_d y_d z_d$  按  $\alpha$ (绕  $z_d$ ) $\rightarrow$   $\beta$ (绕  $y_d$ ) $\rightarrow$   $\chi$ (绕  $x_d$ )的顺序经三维转动后与飞艇坐标系  $ox_b y_b z_b$  重合,二者之间的转换矩阵关系为:

其中

式中,  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\chi$  的值由飞艇携带的惯导设备测量得出或通过飞行轨迹规划仿真计算得出, 本研究作为计算输入参数引用, 再根据所建立的坐标转换关系进行计算。

## 1.2 飞艇坐标系中的太阳辐射物理模型

太阳直接辐射强度  $G$  是大气层上界太阳辐射强度  $G_0$  与太阳直接辐射衰减系数  $\tau_{\text{Atm}}$  的乘积:

$$G = G_0 \cdot \tau_{\text{Atm}} \quad (3)$$

计算方法见德国学者 Werner<sup>[11]</sup> 的分析结果和美国 1976 年的标准大气。

为方便计算飞艇表面在任意飞行角度下可接收的太阳辐射强度, 建立飞艇坐标系下的太阳辐射物理模型。

飞行方向影响飞艇外表面接收太阳辐照的时间和辐照度, 对其可接收的辐射量有很大影响。因此在计算可接收的太阳辐射强度时要计入飞艇飞行方向的影响, 将地平坐标系下的太阳辐射物理量转换到飞艇坐标系下进行计算。

向量法通过建立飞艇坐标系中太阳方向向量  $S'_A$  与地坪坐标系中的太阳方向向量  $S$  的几何关系来实现坐标转换。图 1 所示的飞艇椭球状几何模型上建立了飞艇坐标系和地平坐标系, 定义了太阳方向向量  $S'_A$ 。  $S'_A$  的求解可通过飞艇坐标系与地平坐标系的角度关系  $A'_b$  来计算得出。

由此坐标转换关系可得飞艇坐标系下的太阳方向向量:

$$S'_A = S \cdot A'_b \quad (4)$$

## 1.3 具体时刻具体网格可接收辐射量的计算方法

具体时刻具体网格接收太阳辐射强度的大小与网格点对应的太阳入射角  $\varphi'_i$  相关。

$$G'_i = G \cdot E \cdot \cos\varphi'_i \quad (5)$$

其中, 角  $\varphi'_i$  为飞艇坐标系下太阳方向向量与网格外法向量之间的夹角, 定义其为网格太阳入射角。

$$\cos\varphi'_i = (S'_A \cdot N_i) / (|S'_A| \cdot |N_i|) \quad (6)$$

式中,  $S'_A$  即为飞艇坐标系下某时刻的太阳方向向量,  $N_i$  表示飞艇表面某位置处的外法向量。

某时刻某网格可接收辐射量的计算与网格的单位辐射通量密度  $Q'_i$  和网格面积  $A_i$  相关, 其计算公式如下:

$$Q'_i = G'_i \cdot A_i \quad (7)$$

网格面积为:

$$A_i = \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left| \begin{array}{cc} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{array} \right| \right]^2 + \right.$$

$$\left. \left[ \left| \begin{array}{cc} z_2 - z_1 & x_2 - x_1 \\ z_3 - z_1 & x_3 - x_1 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} z_3 - z_1 & x_3 - x_1 \\ z_4 - z_1 & x_4 - x_1 \end{array} \right| \right]^2 + \left[ \left| \begin{array}{cc} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 \end{array} \right| \right]^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

上式的求解与第  $i$  个网格的四个节点坐标相关, 如图 1 所示的第  $i$  个网格, 四个节点为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$ , 其坐标分别为  $P_1: (x_1, y_1, z_1)$ ;  $P_2: (x_2, y_2, z_2)$ ;  $P_3: (x_3, y_3, z_3)$ ;  $P_4: (x_4, y_4, z_4)$ 。

## 1.4 飞艇表面接收太阳辐射强度的计算方法

将飞艇表面每个网格单元的计算进行累加, 获取飞艇表面所接收的太阳辐射强度。

1) 某时刻飞艇表面接收太阳辐射强度的计算方法。将每个网格接收的太阳辐射强度加和即可得到某时刻整个飞艇表面可接收的辐射总量  $Q_t$ 。

$$Q_t = \sum_{i=1}^n Q'_i \quad (9)$$

其中,  $n$  为划分的四边形网格总数。

计算中需注意的是, 由于太阳运动轨迹、飞艇的巡航区域和飞艇表面接收太阳辐射强度的几何外形等因素的影响, 飞艇表面各部分通常不可能同时接收到太阳辐射。对于飞艇上表面给定网格, 可以根据该网格的太阳入射角  $\varphi_i$  确定它是否被遮挡。当入射角  $\varphi_i$  为锐角时, 该网格可以被太阳照到, 当入射角是直角或钝角时, 该网格被飞艇遮挡住, 不能接收到太阳辐射。因为飞艇表面是光滑的凸曲面, 此条件可以用凸性分析中的凸集分离定理和支撑超平面理论来解释<sup>[12]</sup>。

2) 飞艇表面全天接收太阳辐射强度的计算方法。将某时刻飞艇表面可接收的太阳辐射强度进行时间段(自日出到日落的整个时间段)上的加和即可得到飞艇表面全天的辐射量  $Q$ 。

$$Q = \sum_{t=T_{\text{sunrise}}}^{t=T_{\text{sunset}}} Q_t \cdot \Delta t \quad (10)$$

式中,  $\Delta t$  是计入飞艇表面辐射量  $Q_t$  的时间步长,  $T_{\text{sunrise}}$  与  $T_{\text{sunset}}$  分别表示每天的日出与日落时刻。

## 2 算例设计

本节针对算例飞艇进行计算, 算例飞艇采用传统流线型设计理念, 为软式飞艇, 设计长度为 73 m, 体积为 14 158 m<sup>3</sup>, 储能电池组容量为 40 kW·h, 太阳能电池阵额定功率为 15 kW。主要计算输入参数如表 1 所示。

表 1 主要输入参数

Tab. 1 Main input parameters

项目	设计参数
体积/m <sup>3</sup>	14 158
长度/m	73.1
直径/m	21.3
驻空海拔高度/km	18.3
推进电机功率/kW	>2
储能电池组容量/(kW·h)	>40
太阳电池额定功率/kW	>15
巡航速度/(m/s)	>10
驻空时长/d	>15
工作纬度/(°)	北纬 41

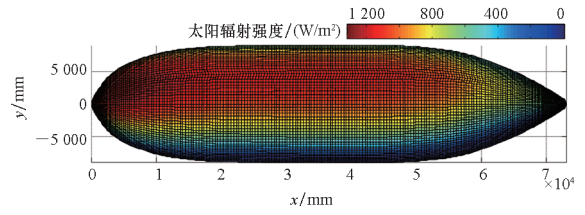
### 3 计算结果分析

针对算例飞艇,结合前述太阳辐射物理模型和飞艇表面接收太阳辐射强度模型的建模方法,建立此算例飞艇上表面接收太阳辐射强度的计算模型,量化分析飞艇不同飞行姿态对其上表面太阳辐射强度分布规律的影响结果。

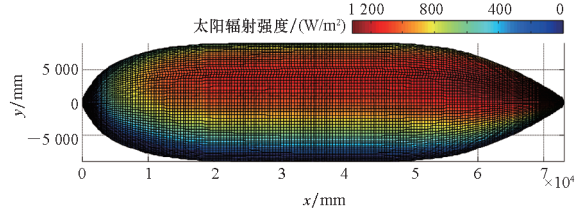
因在飞艇飞行过程中,滚转角基本没有变化,本节主要对飞艇偏航角变化和综合飞行姿态(俯仰角耦合偏航角动态变化)两类不同姿态变化对飞艇上表面太阳辐射强度分布规律的影响进行了量化分析。设定飞艇的飞行日期为 3 月 21 日,驻空纬度为北纬 25°,将计算分析结果描述如下。

#### 3.1 偏航角对飞艇上表面接收太阳辐射强度分布的影响分析

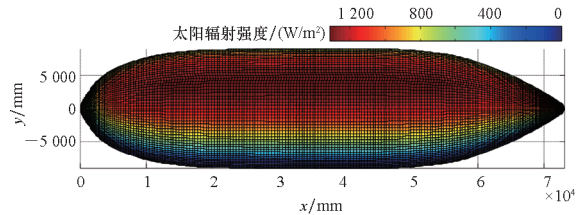
针对飞艇正东、正西、正南和正北水平飞行的工况,分别计算了其在 8:00、10:00、12:00、14:00 和 16:00 飞艇上表面的太阳辐射强度分布云图,如图 3~6 所示。



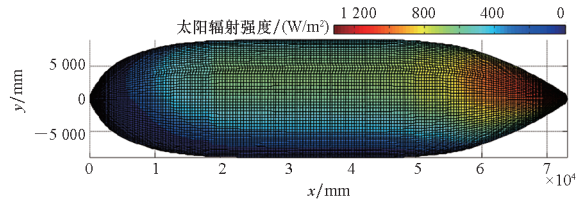
(b) 10:00



(c) 12:00



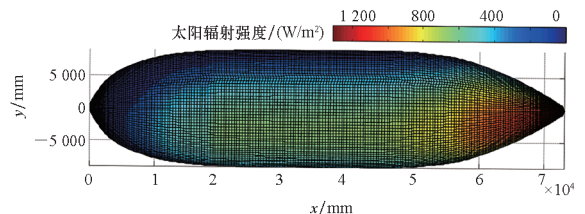
(d) 14:00



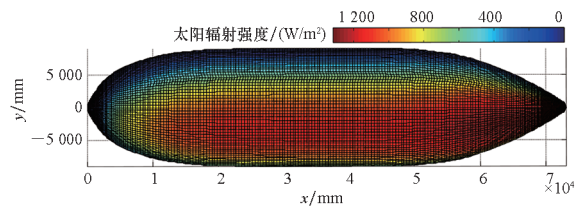
(e) 16:00

图 3 北纬 25° 3 月 21 日水平正东飞行太阳辐射分布云图

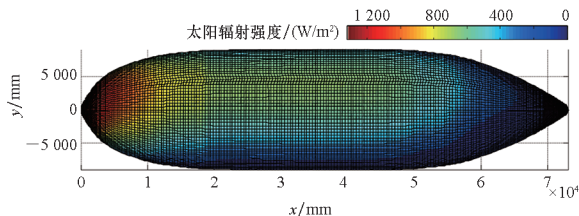
Fig. 3 Solar radiation distribution map of level due east flight on March 21, 25° N



(a) 8:00



(b) 10:00



(a) 8:00

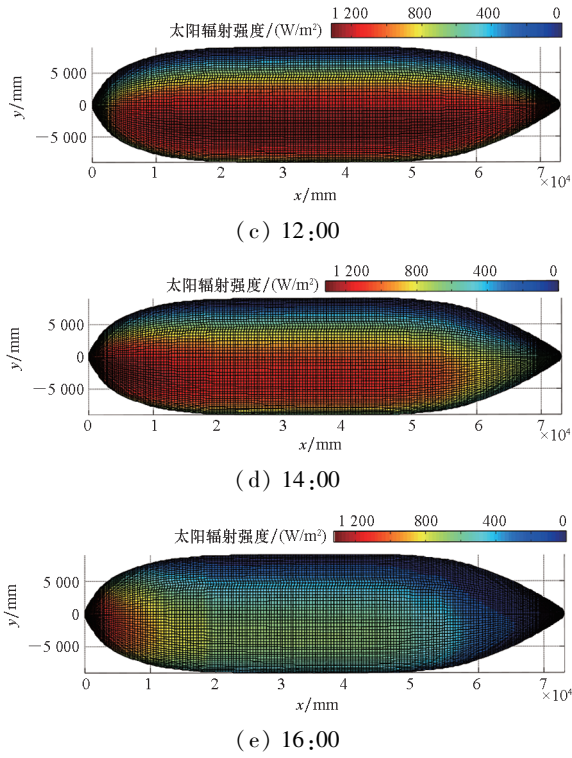


图 4 北纬 25° 3 月 21 日水平正西飞行  
太阳辐射分布云图

Fig. 4 Solar radiation distribution map of  
level due west flight on March 21, 25° N

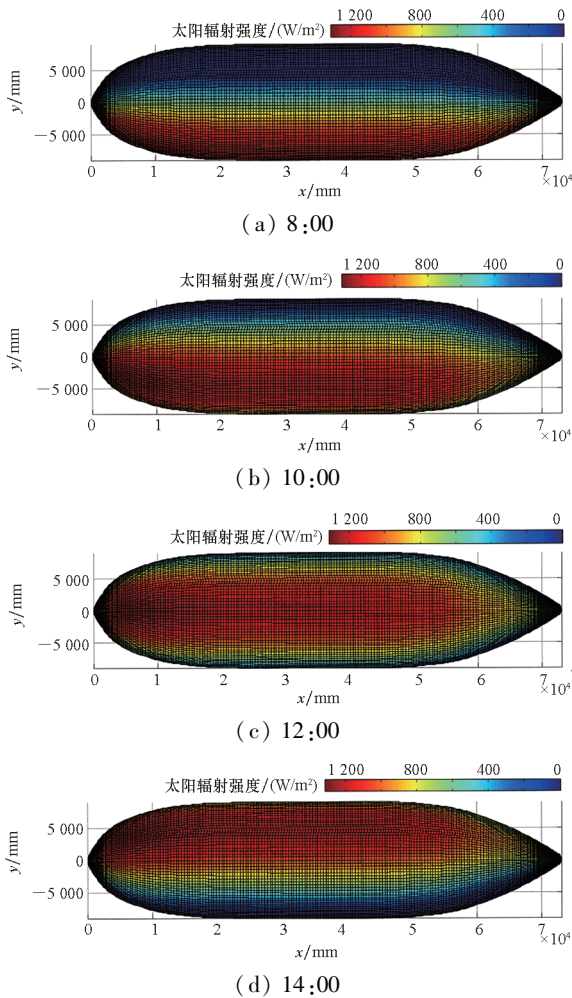


图 5 北纬 25° 3 月 21 日水平正南飞行  
太阳辐射分布云图

Fig. 5 Solar radiation distribution map of  
level due south flight on March 21, 25° N

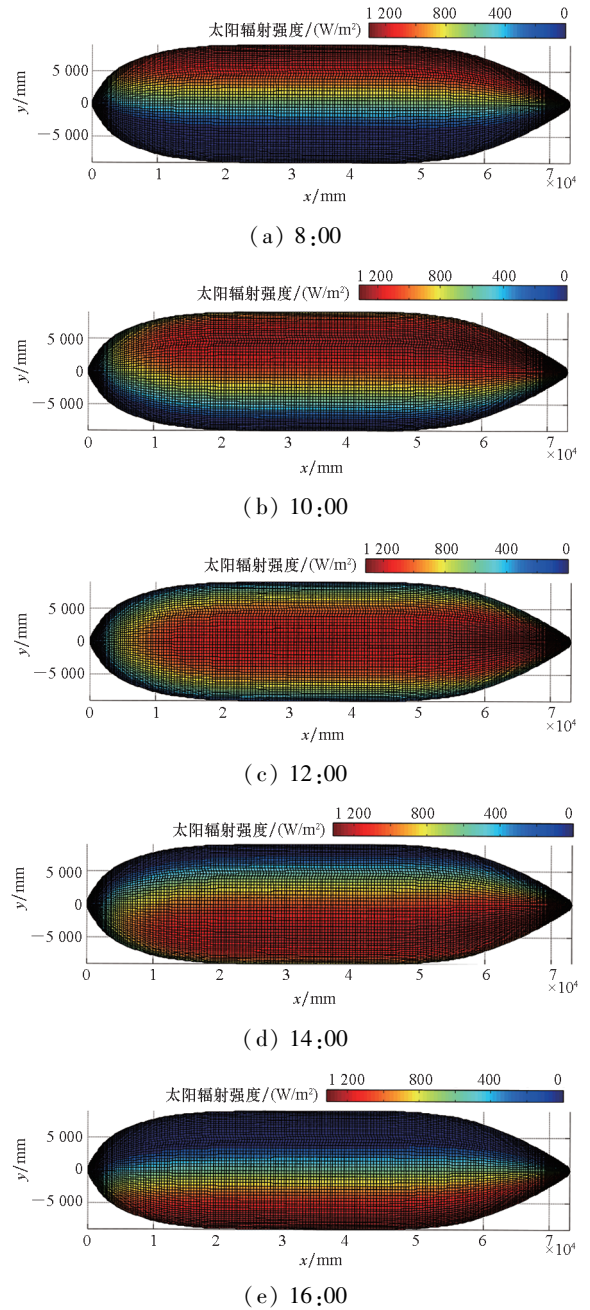


图 6 北纬 25° 3 月 21 日水平正北飞行  
太阳辐射分布云图

Fig. 6 Solar radiation distribution map of  
level due north flight on March 21, 25° N

如图3所示,水平正东飞行的姿态,太阳辐射强度分布自8:00在艇头右侧的位置出现较强的分布(图中红色区域)逐渐向艇身扩展,至12:00基本占据了整个上表面的右侧部分,随时间推移太阳辐射较强的分布逐渐减少,至16:00仅在艇尾右侧位置存在少量较强的分布。如图4所示,水平正西飞行的姿态,太阳辐射强度分布自8:00在艇尾左侧的位置出现较强的分布(图中红色区域)逐渐向艇身扩展,至12:00基本占据了整个上表面的左侧部分,随时间推移太阳辐射较强的分布逐渐减少,至16:00仅在艇头左侧位置存在少量较强的分布。如图5所示,水平正南飞行的姿态,太阳辐射强度分布自8:00在飞艇上表面左侧靠下的位置出现较强的分布(图中红色区域)逐渐向艇身扩展,至12:00基本占据了整个上表面的上部,随时间推移太阳辐射较强的分布逐渐减少,至16:00在飞艇上表面右侧下部存在一些较强的分布。如图6所示,水平正北飞行的姿态,太阳辐射强度分布自8:00在飞艇上表面右侧靠下的位置出现较强的分布(图中红色区域)逐渐向艇身扩展,至12:00基本占据了整个上表面的上部,随时间推移太阳辐射较强的分布逐渐减少,至16:00在飞艇上表面左侧下部存在一些较强的分布。

总结以上图3~6的太阳辐射强度分布规律,主要呈现以下几个特征:

1) 飞艇上表面是光滑连续的曲面,受此影响,太阳辐射强度在飞艇上表面分布强的区域至分布弱的区域中太阳辐射强度值呈现连续变化的趋势。

2) 飞行方向影响太阳辐射强度在飞艇表面的分布状态,在同一时刻,不同飞行方向情况下,受飞艇表面不同位置点太阳入射角变化的影响,太阳辐射强度在飞艇表面的强弱分布区域有着明显的差别,表现在太阳辐射强度强弱分布区域位置的不同和强弱区域面积占比的不同。

3) 飞行时刻影响太阳辐射强度在飞艇表面的分布状态,同一飞行方向,不同飞行时刻情况下,受太阳高度角变化的影响,太阳辐射强度在飞艇表面的强弱分布区域有着明显的差别,太阳辐射强度较强的区域面积占比呈现先增大后减少的趋势(由上午—中午—下午的时段内)。

4) 对任意飞行方向和飞行时刻,在飞艇中部

位置(自距离艇头为 $1/7$ 飞艇长度至距离艇头为 $6/7$ 飞艇长度范围内),沿飞艇长度方向,相同 $y$ 坐标区域(对应飞艇坐标系)各网格的法向量基本相同,其在同一时刻对应的太阳入射角基本相等,因此,这一区域对应的全天累积太阳辐射强度值基本一致(差值小于2%)。

### 3.2 俯仰角耦合偏航角动态变化对飞艇上表面接收太阳辐射强度分布的影响分析

本节设定飞艇飞行日期为3月21日,飞行纬度为北纬 $25^\circ$ 。对比研究了飞艇水平飞行(俯仰角为 $0^\circ$ )、 $5^\circ$ 仰角飞行和 $10^\circ$ 仰角飞行工况下全天累积的太阳辐射强度在飞艇上表面分布的情况。

为不失一般性,对于每种飞行俯仰角的飞行工况,将偏航角的变化视为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内动态变化(转圈飞行),设定其变化频率为每15 min完成 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的角度变化一次(每15 min转一圈)。

设定俯仰角分别为 $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 和 $10^\circ$ 飞行工况,计算所得的太阳辐射强度在飞艇上表面分布的强弱变化云图和全天接收太阳辐射强度的功率变化曲线绘图如图7~10所示。

对比分析如图7~10所示的太阳辐射强度分布规律,主要呈现以下几个特征:

1) 对应不同飞行俯仰角,太阳辐射强度分布呈现由飞艇上表面中部区域至外围区域逐渐减弱的趋势,全天累积的太阳辐射强度在飞艇表面的分布是有明显的强弱分区。

2) 对于不同的飞艇俯仰角,在飞艇中部位置(自距离艇头为 $1/7$ 飞艇长度至距离艇头为 $6/7$ 飞艇长度范围内),沿飞艇长度方向,相同 $y$ 坐标区域(对应飞艇坐标系),各网格的法向量基本相同,其在同一时刻对应的太阳入射角基本相等,因此,这一区域对应的全天累积太阳辐射强度值基本一致(差值小于2.5%)。

3) 如图10所示,对于不同飞行俯仰角对应的全天接收太阳辐射强度功率变化而言,在6:00—12:00时段内,飞艇上表面接收的太阳辐射功率相对于飞艇俯仰角由大至小的排序为 $10^\circ$ 、 $0^\circ$ 和 $5^\circ$ ;在12:00—18:00时段内,飞艇上表面接收的太阳辐射功率相对于飞艇俯仰角由大至小的排序为 $5^\circ$ 、 $0^\circ$ 和 $10^\circ$ 。

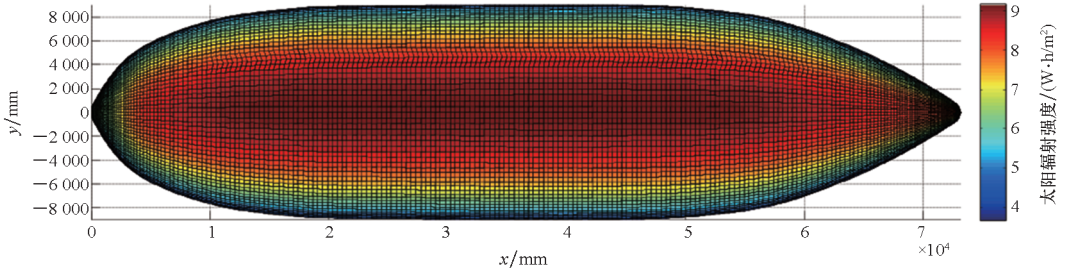


图 7 俯仰角为 0° 工况飞艇上表面全天累积辐射强度分布云图

Fig. 7 Cloud chart of the whole day cumulative radiation intensity distribution on the upper surface of airship at a pitch angle of 0°

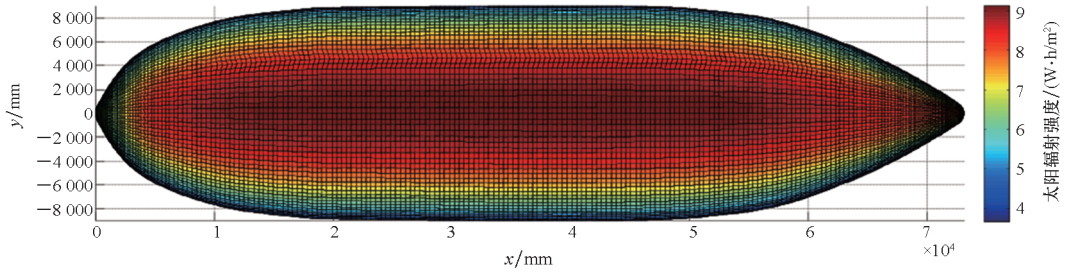


图 8 俯仰角为 5° 工况飞艇上表面全天累积辐射强度分布云图

Fig. 8 Cloud chart of the whole day cumulative radiation intensity distribution on the upper surface of airship at a pitch angle of 5°

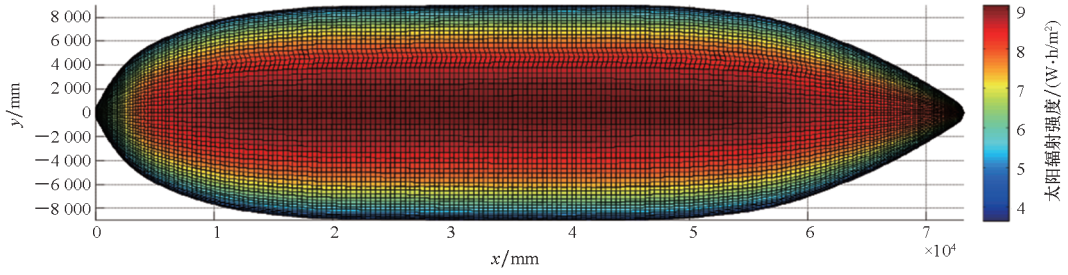


图 9 俯仰角为 10° 工况飞艇上表面全天累积辐射强度分布云图

Fig. 9 Cloud chart of the whole day cumulative radiation intensity distribution on the upper surface of airship at a pitch angle of 10°

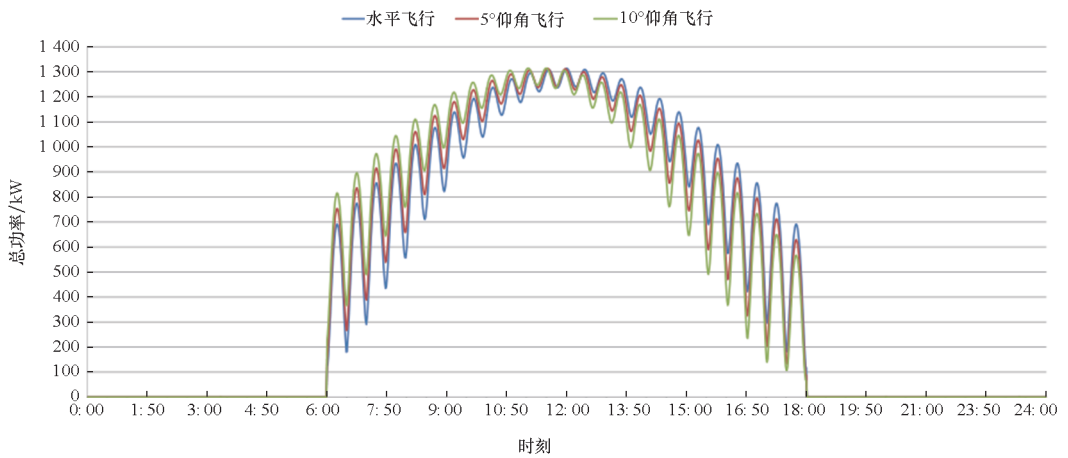


图 10 不同俯仰角对应飞艇上表面全天接收太阳辐射强度功率变化曲线

Fig. 10 Power curve of the whole day solar radiation intensity received on the upper surface of airship with different pitch angles

## 4 结论

根据本文对于算例飞艇上表面太阳辐射强度分布的分析计算结果,得出以下特点:

1)在飞艇中部位置,沿飞艇长度方向,相同 $y$ 坐标区域(对应飞艇坐标系)对应的太阳辐射强度值基本一致。

2)偏航角的变化对飞艇上表面太阳辐射存在较大影响,若飞艇飞行朝向固定(定点飞行条件下保持迎风状态)应结合飞行任务情况进行布局优化。

3)俯仰角的变化对飞艇上表面太阳辐射区域分布强弱分区不大,若飞艇飞行朝向不固定(区域巡航条件下转圈飞行)耦合偏航角后对全天接收太阳辐射强度功率存在一定影响。

针对上述太阳辐射强度分布的特点,可用于指导太阳电池在飞艇上表面布局区域的选择,得出以下两个方面的参考结论:

1)对于太阳电池阵串并联组合构型而言,总体原则是将工作电流一致的电池组件进行串联连接,将工作电压一致的电池组件进行并联连接。而太阳辐射强度的分布主要影响电池组件的工作电流,因此,对于飞艇应用,沿飞艇长度方向,相同 $y$ 坐标区域(对应飞艇坐标系)布局相互串联的电池组件,可获取最佳的构型方式。

2)根据飞行任务需求和飞行姿态预估,计算太阳辐射强度分布后,针对细节部分进行优化,可得到最优的太阳电池串并联布局方案。

## 参考文献 (References)

- [1] COLOZZA A J, DOLCE J. Initial feasibility assessment of a high altitude long endurance airship [R]. Ohio: NASA, 2013.
- [2] SCHMIDT D K, STEVENS J, RONEY J. Near-space station-keeping performance of a large high-altitude notional airship[J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(2): 611–615.
- [3] 高阳, 徐国宁, 王生, 等. 平流层飞艇能源系统建模与小信号稳定性分析[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(8): 50–57.  
GAO Y, XU G N, WANG S, et al. Modeling and small signal stability analysis of stratospheric airship energy system[J]. *Acta Energae Solaris Sinica*, 2022, 43(8): 50–57. (in Chinese)
- [4] 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): 13–18.  
ZHU B J, YANG X X, MA Z Y, et al. Power analysis of stratospheric airship's solar array system [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2019, 41(1): 13–18. (in Chinese)
- [5] ZHU W, XU Y, LI J, et al. Research on optimal solar array layout for near-space airship with thermal effect [J]. *Solar Energy*, 2018, 170: 1–13.
- [6] 张衍垒, 李兆杰, 王生, 等. 平流层飞艇太阳能电池布设区域的计算与仿真[J]. *计算机仿真*, 2011, 28(8): 76–79, 371.  
ZHANG Y L, LI Z J, WANG S, et al. Calculation and simulation of thin film solar cells region arrangement on stratosphere airship [J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(8): 76–79, 371. (in Chinese)
- [7] 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]. *宇航学报*, 2010, 31(4): 1224–1230.  
ZHENG W, SONG Q, LI Y, et al. Computation and analysis of power generated by the solar cell array of a stratospheric airship[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(4): 1224–1230. (in Chinese)
- [8] 张衍垒, 李兆杰, 张向强. 平流层飞艇光伏能源系统总体参数设计与计算[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(2): 283–288.  
ZHANG Y L, LI Z J, ZHANG X Q. General parameter design of PV power energy system of stratospheric airship[J]. *Acta Energae Solaris Sinica*, 2013, 34(2): 283–288. (in Chinese)
- [9] 程雪涛, 徐向华, 梁新刚. 太阳电池在平流层中的工作性能分析[J]. *宇航学报*, 2010, 31(3): 925–930.  
CHENG X T, XU X H, LIANG X G. Analysis of the performance for the solar cells in near space [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3): 925–930. (in Chinese)
- [10] 杨跃能, 郑伟, 吴杰, 等. 临近空间对地观测平台的矢量化建模及稳定性分析[J]. *国防科技大学学报*, 2011, 33(3): 28–32.  
YANG Y N, ZHENG W, WU J, et al. Vector modeling and stability analysis of a near-space earth observation platform [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 33(3): 28–32. (in Chinese)
- [11] WERNER T. Physiological climates of California [J]. *Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers*, 1996, 28: 55–73.
- [12] KASIMBEYLI R, KARIMI M. Separation theorems for nonconvex sets and application in optimization [J]. *Operations Research Letters*, 2019, 47(6): 569–573.