

## 平流层飞艇太阳能电池系统产能分析\*

朱炳杰, 杨希祥, 麻震宇, 邓小龙

(国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**平流层飞艇曲面太阳能电池的产能与飞艇所在位置、驻空时间、飞行姿态、太阳能电池布局等有着密切的关系。通过对太阳辐照模型的分析,结合平流层飞艇驻空期间方位角的变化,采用投影法分别计算曲面太阳能电池各投影面的产能,从而计算出太阳能电池在驻空过程中的动态发电功率。分析结果表明:曲面太阳能电池在水平面内的投影部分是主要产能部分,受飞艇方位角的影响较小;垂直面内的投影部分产能较少,受飞艇方位角影响较大。

**关键词:**平流层飞艇;太阳能电池;投影法;方位角

**中图分类号:**TK514 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)01-013-06

## Power analysis of stratospheric airship's solar array system

ZHU Bingjie, YANG Xixiang, MA Zhenyu, DENG Xiaolong

(College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The power of airship's curved solar array is closely related to the position of airship, time of flight, flight of attitude, layout of solar array and so on. Through the analysis of solar radiation model, and combined with the variation of azimuthal angle in the course of stratospheric airship's flight, the projection was used to calculate the power of curved solar array, thus the dynamical power generation of the airship was calculated. The analysis results show that the projection in horizontal is the main component of curved solar array's power, which is little influenced by airship's azimuthal angle; the power of projections in vertical is smaller, which is more easily affected by airship's azimuthal angle.

**Keywords:** stratospheric airship; solar cell; projection; azimuthal angle

近年来,随着空间科学技术的进步,临近空间独特的资源优势已经成为各国争夺和竞争的焦点<sup>[1]</sup>。平流层飞艇在20 km左右的高度运行,依靠空气静浮力驻空,具有驻空时间长、载重量大、覆盖区域广、可重复使用、可定点和机动巡航等特点,在环境监测、城市安全监控、高分辨率实时区域监视、区域防灾减灾、预警和导弹防御、区域通信等方面具有独特的优势<sup>[2-5]</sup>。平流层飞艇长期驻空产生的能源短缺问题,是当前一个严重制约飞艇技术发展应用的瓶颈。平流层飞艇在驻空过程中主要依靠太阳能电池获取能量,分析和计算太阳能电池阵列的产能,对优化平流层飞艇能源系统设计、延长平流层飞艇驻空时间具有十分重要的意义。

在太阳能电池能源获取建模方面,文献[6]采用优化太阳能电池布局的方法,分析了飞艇曲面太阳能电池圆心角对太阳能电池能量输出的影响;在文献[7]中,飞艇被简化成圆柱体模型,太阳能电池附

属在圆柱体表面,分析驻空时间、经纬度以及布局特点对太阳能电池输出功率的影响,这种方法对计算太阳能获取具有一定的效果。文献[8]计算发现当曲面太阳能电池面积超过了飞艇表面积的15%时,计算太阳能电池输出功率必须考虑电池面曲率的影响,文中提出了一种采用曲面微元计算太阳能电池输出功率的方法,这种方法计算精度较高,但需要建立复杂的有限元模型,当曲面网格划分不够精确时,计算精度会受到一定的限制。这些研究方法和成果对本文的研究具有一定的借鉴作用。

平流层飞艇的驻空过程是一个动态变化过程,飞艇驻空区域的纬度、季节、电池铺装的形状、飞艇运行的姿态等都与太阳能电池阵列的产能密切相关。根据平流层飞艇驻空的飞行特征,本文结合太阳能电池布局、太阳能电池类型、转化效率、飞艇飞行姿态、工作日期等,对太阳能电池阵能量的实时输出进行综合分析。

\* 收稿日期:2018-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61703414)

作者简介:朱炳杰(1985—),男,湖南双峰人,讲师,博士,E-mail:jackerzhu@163.com

## 1 太阳辐照模型

### 1.1 太阳空间位置

建立太阳空间位置模型,如图 1 所示。太阳光线指向向量与天顶  $Z$  的夹角定义为天顶角,用  $\theta_z$  表示;太阳光线与地平面的夹角定义为太阳高度角,用  $\alpha_s$  表示;太阳光线在地面的投影线与南北方向线之间的夹角为太阳方位角,用  $\gamma_s$  表示; $Q$  为平流层飞艇的方位角, $C$  为平流层飞艇所在位置的高度角。

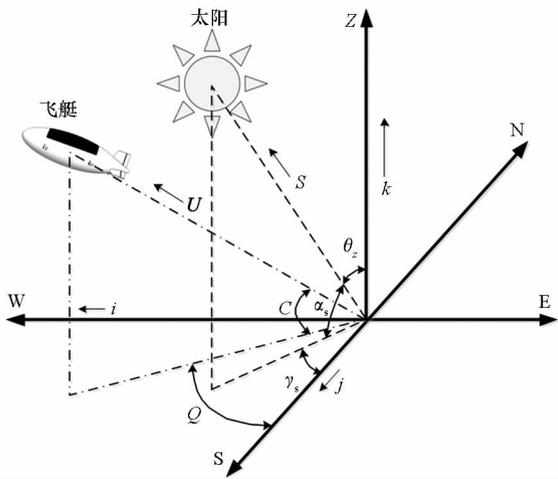


图 1 太阳与飞艇空间位置<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Spatial location of the sun and the airship<sup>[9]</sup>

图 1 中,太阳高度角  $\alpha_s$ <sup>[10]</sup> 可表示为:

$$\sin \alpha_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (1)$$

式中: $\omega$  是时角,地球运动形成的太阳光线与当地子午线的东西方向夹角,每小时变化  $15^\circ$ ,上午为负、下午为正、正午为  $0^\circ$ ; $\varphi$  是纬度,北纬为正,其取值范围为  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ ; $\delta$  是赤纬角,太阳直射在当地子午线上时与赤道面的夹角,北纬为正,取值范围为  $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ , $\delta$  可按照式(2)进行求解。

$$\delta = 23.45 \sin \frac{2\pi(n+284)}{365} \quad (2)$$

太阳方位角  $\gamma_s$  可以表示为:

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s} \quad (3)$$

式(1)~(3)给出了与太阳空间位置密切相关的三个角度的表达式。

### 1.2 太阳直接辐照强度

在一天内任一时间点,太阳的直接辐照强度可由式(4)求解。

$$I_{\text{sol}} = I_{\text{sc}} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta) \quad (4)$$

式中: $I_{\text{sc}}$  是太阳常数,一般为  $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$ ;  $n$  为一年中的第  $n$  天;表达式  $\left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right)$  可视为日地修正系数。

每小时太阳的辐照量可以通过式(5)求解,假设这一小时的开始和结束时刻对应的时角分别是  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 。

$$I_1 = \frac{12 \times 3600 I_{\text{sc}}}{\pi} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cdot \left[ \cos \varphi \cos \delta (\cos \omega_2 - \cos \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta \right] \quad (5)$$

一天内累计的太阳辐照量为:

$$I_{\text{day}} = \frac{12 \times 3600 I_{\text{sc}}}{\pi} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{2\pi n}{365} \right) \cdot \left( \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad (6)$$

式中, $\omega_s$  是日出时角,可由式(7)进行求解。日出日落时太阳高度角  $\alpha_s$  为  $0^\circ$ ,由式(1)可得日出时角的表达式为:

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta \quad (7)$$

由于  $\omega$  每小时变化  $15^\circ$ ,因此一天内的日出时间  $T_N$  可以表示为:

$$T_N = \frac{2}{15} \arccos(\tan \varphi \tan \delta) \quad (8)$$

真太阳时  $t_s$  可按式(9)进行计算。

$$t_s = t \pm \frac{(L - L_s)}{15} + e \quad (9)$$

式中: $t$  为当地地区的标准时间,单位为 h; $L$  为当地的地理经度; $L_s$  为当地地区标准时间位置的地理经度,东八区为  $120^\circ$ ;东半球取“+”,西半球取“-”; $e$  为时差,其精确计算公式如式(10)所示。

$$e = -0.0002786409 + 0.1227715 \cos(W + 1.498311) - 0.1654575 \cos(2W - 1.261546) - 0.005353830 \cos(3W - 1.1571) \quad (10)$$

式中, $e$  的单位为 h, $W = 2n\pi/360$ , $n$  为一年中的第  $n$  天。

结合式(2)、式(6)、式(7)可求得一天内某一位置点的太阳辐照总和。对于移动的太阳电池而言,结合其位置的变化即可求得移动目标一天内所获得的太阳辐照总和。

### 1.3 大气透射率模型

地球上不同海拔高度的太阳辐照强度受到大气透射率的影响,大气的透射率<sup>[11]</sup>可表示为:

$$\tau = 0.56 \times (e^{-0.65m} + e^{-0.095m}) \quad (11)$$

式中, $m$  表示大气对地球表面接收太阳光的影响

程度,无量纲,可表示为:

$$m = \left[ \sqrt{1229 + (614\sin\alpha_s)^2} - 614\sin\alpha_s \right] \cdot \left[ (288 - 0.0065z)/288 \right]^{5.256} \quad (12)$$

式中,  $\alpha_s$  是太阳高度角,  $z$  是海拔高度。

## 2 平流层飞艇太阳电池曲面模型分析

### 2.1 太阳电池铺装模型

通过太阳电池获取能量是平流层飞艇再生能源的主要来源。为充分获取太阳辐照,太阳电池主要铺装于飞艇的顶部,平流层飞艇的太阳电池铺装示意图如图2所示,飞艇长度  $L = 110 \text{ m}$ ,其中灰色部分为柔性太阳电池组件。

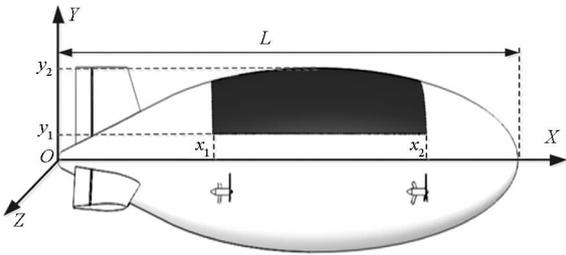


图2 平流层飞艇太阳电池铺装

Fig. 2 Mat formation of solar panel on the airship

平流层飞艇的囊体母线由三段曲线组成<sup>[6]</sup>:

$$\bar{y} = \begin{cases} 0.3077\sqrt{\bar{x}} & 0 < \bar{x} < 0.08 \\ 0.0313 + 0.8671\bar{x} - 2.3583\bar{x}^2 + 2.9824\bar{x}^3 - 1.4912\bar{x}^4 & 0.08 < \bar{x} < 0.92 \\ 0.3077\sqrt{1-\bar{x}} & 0.92 < \bar{x} < 1 \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $\bar{x} = x/l$ ,  $\bar{y} = y/l$ ,  $l$  为飞艇的长度。

太阳电池所在的母线段范围为  $0.4 < \bar{x} < 0.6$ 。飞艇的轮廓曲线如图3所示。

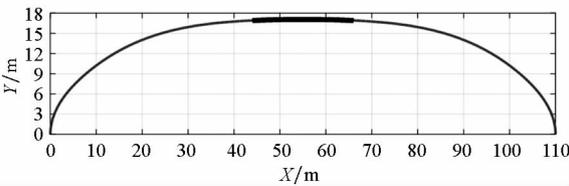


图3 飞艇轮廓曲线

Fig. 3 Cross-section curve of airship

平流层飞艇的横截面如图4所示。图4中,  $\theta = \pi/2$  是曲面太阳电池的圆心角。

### 2.2 投影法计算太阳电池面积

平流层飞艇的太阳电池是一个曲面,在计算太阳电池的产能时,如果将太阳电池近似为平面进行计算,则误差较大<sup>[12]</sup>。可将太阳电池曲面向三轴坐标面进行投影,分别计算各投影面的产能。

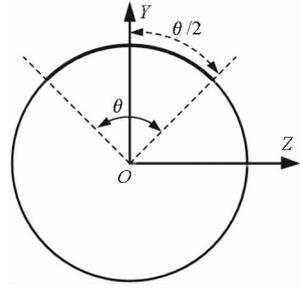


图4 平流层飞艇及太阳电池截面示意图

Fig. 4 Sectional view of the stratospheric airship and solar panel

根据投影算法,在  $XOZ$  平面内的太阳电池投影面积<sup>[13]</sup>可表示为:

$$S_{XOZ} = 2 \int_{x_1}^{x_2} \bar{z} dx = 2 \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} dx \quad (14)$$

在  $XOY$  平面内的太阳电池投影面积可表示为:

$$S_{XOY} = 2 \int_{x_1}^{x_2} \bar{y} dx \quad (15)$$

根据投影可得,  $XOZ$  面内太阳电池投影面积为  $\bar{x} = 0.6$  时的扇形横截面积与  $\bar{x} = 0.4$  时的扇形横截面积之差,因此,该平面内的投影面积可表示为:

$$S_{XOZ} = S_{0.6} - S_{0.4} \quad (16)$$

经计算分析,可得平流层飞艇的整体结构参数及太阳电池参数,如表1所示。

表1 平流层飞艇结构和太阳电池参数

Tab. 1 Parameters of stratospheric airship structure and solar array

参数	数值
飞艇长度	110 m
太阳电池的圆心角	$\pi/2$
太阳电池光电转化效率	18%
太阳电池在 $XOY$ 平面内的投影面积	111.0 m <sup>2</sup>
太阳电池在 $YOZ$ 平面内的投影面积	4.0 m <sup>2</sup>
太阳电池在 $XOZ$ 平面内的投影面积	528.5 m <sup>2</sup>

## 3 平流层飞艇太阳电池产能计算

### 3.1 投影面内太阳辐照强度变化

在  $XOZ$  平面上,太阳入射角为天顶角  $\theta_z$ ,即太阳光线与某点垂直方向的夹角,可用太阳高度角表示为:

$$\theta_{XOZ} = \theta_z = 90^\circ - \alpha_s \quad (17)$$

结合式(1)、式(17),可得:

$$\theta_z = \arccos(\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega) \quad (18)$$

由式(3)可知,太阳的方位角  $\gamma_s$  表示太阳自正北绕地平线顺时针测量的角距离,可表示为:

$$\gamma_s = \arcsin\left(\frac{\cos\delta\sin\omega}{\cos\alpha_s}\right) \quad (19)$$

假定飞艇的方位角为  $Q$ ,表示飞艇飞行方向与正南方的夹角,则太阳的有效方位角<sup>[9]</sup>可表示为:

$$\gamma_{se} = \gamma_s - Q \quad (20)$$

在  $YOZ$  平面上,太阳的入射角可表示为:

$$\theta_{YOZ} = \arccos(\sin\theta_{XOZ}\cos\gamma_{se}) \quad (21)$$

在  $XOY$  平面上,太阳的入射角可表示为:

$$\theta_{XOY} = \arccos(\sin\theta_{XOZ}\sin\gamma_{se}) \quad (22)$$

当  $Q = 0^\circ$  时,在  $XOZ$ 、 $YOZ$ 、 $XOY$  平面上太阳的入射角变化趋势如图 5 所示。

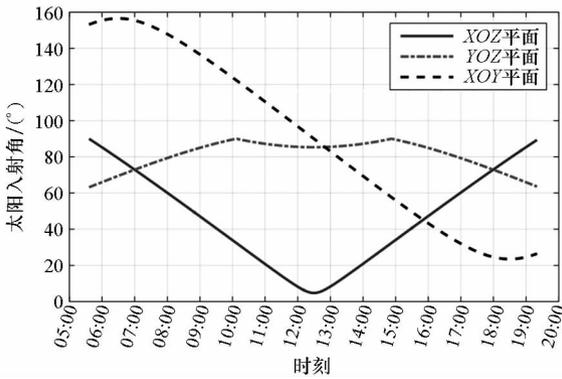


图 5 太阳入射角在三个投影面内的变化曲线

Fig.5 Changing curve of solar incidence angle on three projection planes with time

当飞艇方位角在  $0^\circ \sim 180^\circ$  变化时,三个坐标面内太阳辐照强度变化如图 6 ~ 8 所示。由图 6 ~ 8 可知,太阳辐照强度在  $XOZ$  面内最大,即在水平面内的辐照强度最大。

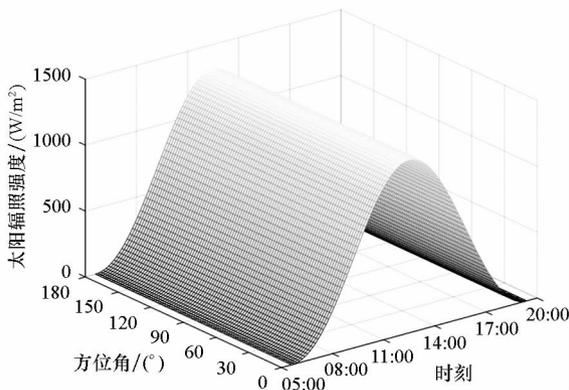


图 6  $XOZ$  平面内太阳辐照强度随时间和方位角的变化

Fig.6 Variation of the solar irradiation on  $XOZ$  plane with time and azimuthal angle

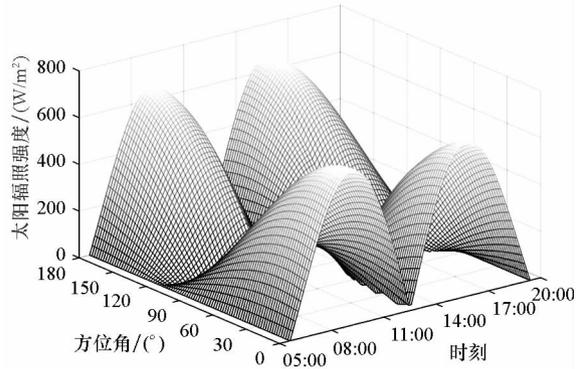


图 7  $YOZ$  平面内太阳辐照强度随时间和方位角的变化

Fig.7 Variation of the solar irradiation on  $YOZ$  plane with time and azimuthal angle

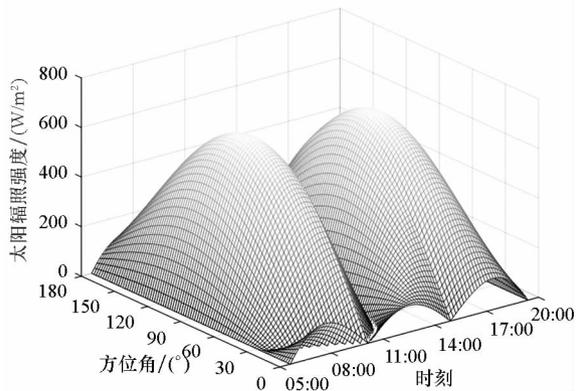


图 8  $XOY$  平面内太阳辐照强度随时间和方位角的变化

Fig.8 Variation of the solar irradiation on  $XOY$  plane with time and azimuthal angle

### 3.2 投影法计算平流层飞艇太阳能电池的产能

平流层飞艇是一个大惯性体,飞艇的方位角主要受风向的影响,如果飞艇不通过动力系统调节自己的方位角,则其方位角是一个随环境风向变化的随机量,获取临近空间风场方向的变化曲线即可获知飞艇方位角的变化趋势。

经探测,长沙某地区 20 km 高度一天内风速、风向变化如图 9 所示。

根据图 9 的风场数据,结合平流层飞艇风场中的航迹仿真软件,可得飞艇方位角的变化,如图 10 所示。

由一天内飞艇方位角的变化趋势可得曲面太阳能电池各投影面内太阳辐照强度的变化,如图 11 所示。

太阳能电池发电功率为:

$$\begin{cases} P_{\text{solar}} = I_{\text{sol}} \cdot \tau \cdot \eta_{\text{solar}} \cdot \eta_{\text{MPPT}} \cdot \sin\alpha_s \cdot \\ \quad S \cdot (1 - \delta_{\text{temp}}) \cdot (1 - \delta_{\text{circuit}}), \theta \geq 0 \\ P_{\text{solar}} = 0, \theta < 0 \end{cases} \quad (23)$$

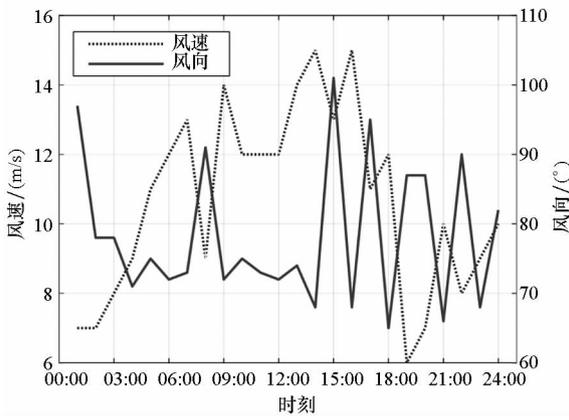


图 9 一天内风速风向的变化  
Fig. 9 Variation of wind speed and wind direction within a day

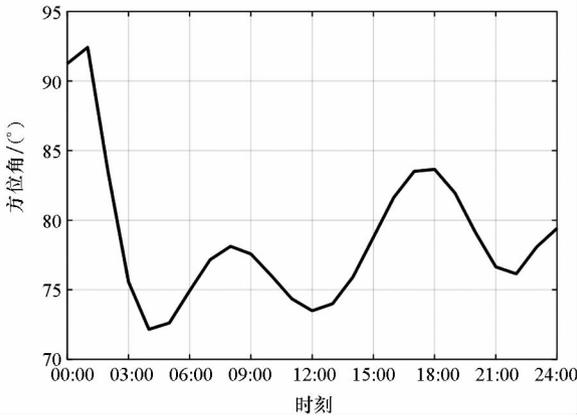


图 10 飞艇一天内方位角的变化  
Fig. 10 Variation of stratospheric airship's azimuthal angle within a day

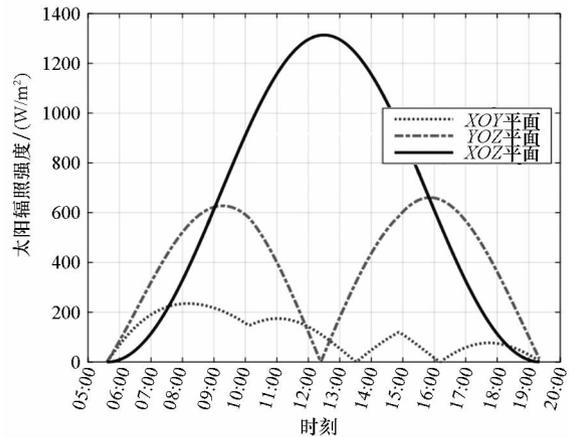


图 11 各投影面内太阳辐照强度的变化  
Fig. 11 Variation of solar irradiation power on the three projection planes

其中: $P_{solar}$ 为太阳能电池阵的实时发电功率; $I_{sol}$ 为太阳辐照强度; $\tau$ 为大气透射率; $\eta_{solar}$ 为太阳能电池光电转化效率; $\eta_{MPPT}$ 为最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)效率,取 0.95; $\delta_{temp}$ 为高空温度升高导致的功率损失率,取 0.95; $\delta_{circuit}$

为系统电路损失率,取 0.95。

平流层飞艇驻空过程中,太阳电池的功率输出情况如图 12 所示。由图 12 可知,曲面太阳电池能量输出功率主要受水平投影面(XOZ 平面)的影响,另外两个垂直投影面(XOY 平面、YOZ 平面)太阳电池发电功率较小,主要由于曲面太阳电池在这两个面内的投影面积较小,同时这两个面内的辐照强度也较弱。

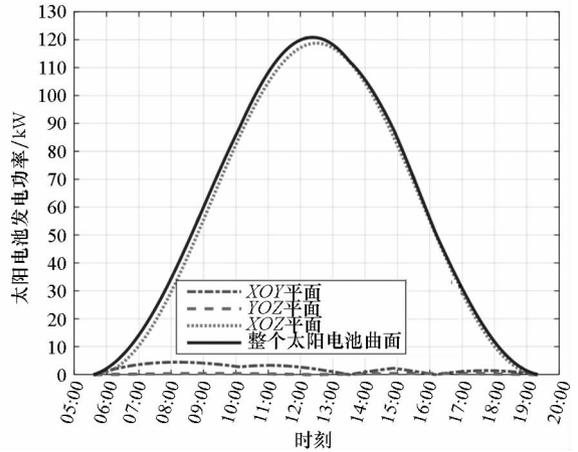


图 12 飞艇驻空过程中曲面太阳电池发电功率  
Fig. 12 Solar cell power in the process of airship's flight

在图 12 中,XOY 平面、YOZ 平面内太阳电池的发电功率变化不明显,在图 13 中进行了单独表述。由图 13 可知,曲面太阳电池在 YOZ 平面内的发电输出功率较小,对照表 1 可知,主要由于太阳电池在 YOZ 平面内的投影面积较小。

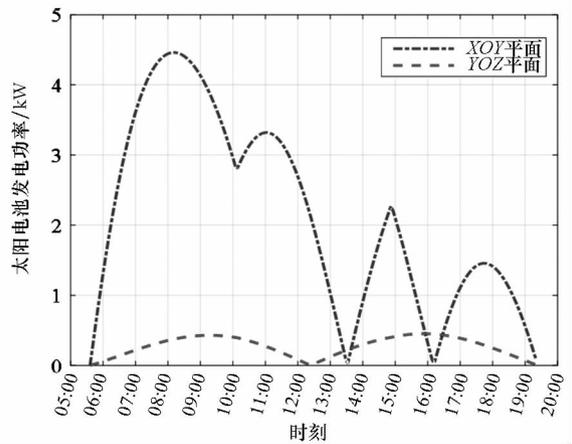


图 13 太阳电池发电功率的变化  
Fig. 13 Variation of solar cell power

综合图 11 ~ 13 的数据变化曲线可知,水平面内的太阳辐照强度以及产能较大,因此在设计平流层飞艇太阳能电池结构时,可增大水平面的太阳能电池铺设面积,以获取更多的能源。

## 4 结论

采用投影法计算平流层飞艇太阳电池的发电功率,利用太阳电池母线方程计算各坐标面内的投影面积,同时结合飞艇驻空期间方位角的变化,从而计算太阳电池在驻空过程中的动态发电功率。在此基础上,进一步结合飞艇高度调节、位置调整、姿态变化等对飞艇太阳电池的产能进行更加精确的计算。

## 参考文献 (References)

- [1] Schmidt D K. Modeling and near-space stationkeeping control of a large high-altitude airship [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2007, 30(2): 540 - 547.
- [2] Stockbridge C, Ceruti A, Marzocca P. Airship research and development in the areas of design, structures, dynamics and energy systems [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2012, 13(2): 170 - 187.
- [3] Widiawan A K, Tafazoll R. High altitude platform station (HAPS): a review of new infrastructure development for future wireless communications [J]. *Wireless Personal Communications*, 2007, 42(3): 387 - 404.
- [4] 刘大海, 阎健, 张健勇, 等. 平流层飞艇的能源技术和平衡分析[J]. *航天返回与遥感*, 2006, 27(2): 6 - 13.  
LIU Dahai, YAN Jian, ZHANG Jianyong, et al. Power technology and energy balance analysis of the stratosphere airship [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(2): 6 - 13. (in Chinese)
- [5] 施红, 宋保银, 姚秋萍. 平流层飞艇太阳能系统研究 [J]. *中国空间科学技术*, 2009, 29(1): 26 - 31.  
SHI Hong, SONG Baoyin, YAO Qiuping. Study of the solar power system of stratospheric airships [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2009, 29(1): 26 - 31. (in Chinese)
- [6] Lü M Y, Li J, Du H F, et al. Solar array layout optimization for stratospheric airships using numerical method [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 135: 160 - 169.
- [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 Wei, SONG Qi, LI Yong, 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] Wang H F, Song B F, Zuo L K. Effect of high-altitude airship's attitude on performance of its energy system [J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(6): 2077 - 2080.
- [9] Khoury G A. *Airship technology* [M]. UK: Cambridge University Press, 2012.
- [10] 白建波. 太阳能光伏系统建模、仿真与优化[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.  
BAI Jianbo. Modeling, simulation and optimization of solar photovoltaic system [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese)
- [11] 刘多能, 杨希祥, 麻震宇, 等. 运用粒子群优化算法的平流层飞艇总体设计 [J]. *国防科技大学学报*, 2015, 37(4): 50 - 56.  
LIU Duoneng, YANG Xixiang, MA Zhenyu, et al. Conceptual design of stratospheric airship based on particle swarm optimization algorithm [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(4): 50 - 56. (in Chinese)
- [12] 王海峰, 宋笔锋, 苏建民, 等. 高空飞艇薄膜太阳电池内辐射量计算研究 [J]. *太阳能学报*, 2006, 27(8): 819 - 823.  
WANG Haifeng, SONG Bifeng, SU Jianmin, et al. Computation research on the solar radiation on the thin film solar cell for high altitude airships [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2006, 27(8): 819 - 823. (in Chinese)
- [13] Garg A K, Burnwal S K, Pallapothu A, et al. Solar panel area estimation and optimization for geostationary stratospheric airships [C]//Proceedings of 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, 2011.