

固定光伏阵列在小型游览船上的布置研究

孙忠玉¹, 涂 荣², 胡丽芬¹

(1. 鲁东大学交通学院, 山东烟台 264025;
2. 烟台职业学院船舶工程系, 山东烟台 264670)

摘要: 根据太阳能辐射的规律、理论计算和统计数据, 对太阳能总辐射量进行计算。太阳能在船舶上的应用以光伏发电系统为主, 考虑到船舶这个特殊的载体和水运环境, 研究船舶上的太阳能电池板固定布置非常有必要。针对光伏阵列不同布置类型的特点, 分析计算不同地区光伏阵列的辐射量, 对比结果进行布置优化选择, 得出结论: 在小型游览船上, 光伏阵列面积不变的情况下, 固定布置中水平布置优于倾斜布置; 在追求发电量最多的前提下, 倾斜布置优于水平布置, 且存在最佳倾斜角。

关键词: 船舶、舰船工程; 太阳能船; 光伏阵列; 布置方式; 布置优化

中图分类号: U662.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2015)14-1503-06

Research of arrangement of fixed photovoltaic array on small tourist boat

SUN Zhongyu¹, TU Rong², HU Lifen¹

(1. School of Transportation, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China;
2. Department of Shipping Engineering, Yantai Vocational College, Yantai, Shandong 264670, China)

Abstract: According to the laws of solar radiation, theoretical calculation and statistical data, the total solar radiation was calculated. The main application of solar energy to ships is photovoltaic power generating system. It is necessary to research solar panels layout of the ship, considering the features of ships and water environment. The optimization results of fixing layout are gained by analyzing the calculation of solar radiation of photovoltaic array in different areas according to the characteristics of different fixing types of photovoltaic array. We conclude that photovoltaic array under the condition of invariable area, fixed layout in decorate level is better than that of oblique arrangement. In the pursuit of power under the premise of most inclined layout better than horizontal layout, where the best angle on a small tourist boat exists.

Key words: shipping, ships and warships engineering; solar ship; photovoltaic array; layout; layout optimization

0 引言

近年来, 随着旅游业的飞速发展, 全国各地水上游船休闲娱乐项目日益增多, 江河湖泊等各种水面上运行的小型游览船数量不断增加。可是现阶段运营旅游船通常使用化石燃料, 对旅游区域脆弱的水环境造成一定程度的污染, 旅游区需要清洁无污染的太阳能游览船。太阳能作为一种清洁能源, 被广泛应用于各个领域。太阳能在小型游览船上的应用随科技的发展已经成为现实。然而, 太阳能游览船作为一

基金项目: 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金 (BS2014SF004)

作者简介: 孙忠玉 (1984—), 男, 讲师, 主要研究方向: 新能源在船舶上的应用. E-mail: sunzy1984@126.com

种新型船舶，其设计的影响因素存在与常规船舶不同的特点。

光伏阵列布置的研究目的是使相同面积的光伏阵列表面接收到更多的太阳辐射。

1) 光伏阵列在船上的布置方式分类

光伏阵列在船上的布置分为固定布置和跟踪布置 2 种：固定布置又分为水平布置和倾斜布置；跟踪布置又分为方位角跟踪和全程跟踪^[1]。

光伏阵列优化布置中涉及到倾斜角和方位角^[2~3]。倾斜角是太阳电池方阵平面与水平地面的夹角，并希望此夹角为方阵一年中发电量最大时的最佳倾斜角度。一年中的最佳倾斜角与当地的地理纬度有关，当纬度较高时，相应的倾斜角也较大。太阳电池方阵的方位角是方阵的垂直面与正南方向的夹角（向东偏设定为负角度，向西偏设定为正角度）。

2) 太阳辐射量的计算

不同布置方式光伏阵列表面接收到的太阳辐射资源需要通过当地气象部门或计算取得，这里在计算太阳辐射中没有考虑船舶运行过程中摇摆对辐射的影响。

1 太阳辐射量的计算

1.1 朝向赤道倾斜面上辐射量的计算

光伏系统的能量来源于太阳辐射能量，因此光伏方阵面上所获得的总辐射量决定了其发电量。地面上的总辐射量等于直射辐射与散射辐射之和，而电池板上还要考虑反射辐射量，光伏电池板上获取的总辐射量等于直射辐射、散射辐射和反射辐射之和^[3~5]。

水平面上的太阳辐射量为

$$Q_p = S_p + D_p, \quad (1)$$

其中， Q_p 为水平面总的太阳辐射量 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$)； S_p 为水平面直射辐射量 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$)； D_p 为水平面散射辐射量 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$)。

倾斜面上的太阳辐射量为

$$Q_T = S_T + D_T + R_T, \quad (2)$$

其中， Q_T 为倾斜面上总的太阳辐射量 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$)； S_T 为倾斜面上直射辐射量 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$)； D_T 为倾斜面上散射辐射量 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$)； R_T 为倾斜面上反射辐射量 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$)。

1) 倾斜面上的直射辐射量 $S_T = R_B S_p$ ，对于朝向赤道的倾斜面，两者的比值 R_B 由下式确定：

$$R_B = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega_p + \frac{\pi}{180} \omega_p \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_T + \frac{\pi}{180} \omega_T \sin \phi \sin \delta}, \quad (3)$$

其中， ϕ 为当地纬度； β 为光伏阵列倾角； δ 为太阳赤纬角； ω_p 为水平面日落角度； ω_T 为倾斜面日落角度。 δ ， ω_p ， ω_T 的具体表达式分别为

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{2\pi}{365} (284 + n) \right], \quad (4)$$

其中， n 为一年的第几天；

$$\omega_p = \min \left\{ \omega_T, \arccos \left[-\tan(\phi - \beta) \tan \delta \right] \right\}; \quad (5)$$

$$\omega_T = \arccos(-\tan \phi \tan \delta). \quad (6)$$

2) 倾斜面上的散射辐射量
散射辐射各向同性时:

$$D_T = \frac{1}{2}(Q_P - S_P)(1 + \cos \beta); \quad (7)$$

若考虑各向异性时:

$$D_T = (Q_P - S_P) \left[\frac{S_T}{Q_{P0}} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{S_T}{Q_{P0}} \right) (1 + \cos \beta) \right], \quad (8)$$

其中, Q_{P0} 为大气层外水平面的太阳辐射 (MJ/m^2)。

3) 倾斜面上的反射辐射

$$R_T = \frac{1}{2} \rho_R Q_P (1 - \cos \beta), \quad (9)$$

其中, ρ_R 为地面反射率。

1.2 不同方位角倾斜面上太阳辐射量计算

不同方位角倾斜面上太阳辐射量与面向赤道倾斜面的差别主要在于直射辐射量, 体现在计算公式上即 R_B 的不同。

$$R_B = \left[\frac{\pi}{180} (\omega_{ss} - \omega_{st}) \sin \delta (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) + \cos \delta (\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{st}) \times (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) + (\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{st}) \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \right] \times \left[2 \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \frac{\pi}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \right]^{-1}, \quad (10)$$

其中, ω_{ss} , ω_{st} 分别为倾斜面上日出、日落角。

$$\omega_{ss} = \min \left\{ \omega_s, \arccos \left(-\frac{a}{D} \right) + \arcsin \left(\frac{c}{D} \right) \right\}, \quad (11)$$

$$\omega_{st} = -\min \left\{ \omega_s, \left| -\arccos \left(-\frac{a}{D} \right) + \arcsin \left(\frac{c}{D} \right) \right| \right\}, \quad (12)$$

其中,

$$a = \sin \delta (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma); \quad (13)$$

$$b = \cos \delta (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma); \quad (14)$$

$$c = \cos \delta \sin \beta \sin \gamma; \quad (15)$$

$$D = \sqrt{c^2 + b^2}. \quad (16)$$

当太阳能光伏阵列采用不同的布置方式时, 可以根据上述公式计算不同倾角和不同方位角时太阳能光伏阵列接受到的太阳辐射量。

2 船上光伏阵列固定布置研究

在应用独立光伏系统的小型太阳能游览船上，由于动力来源全部来自太阳能，其主要矛盾之一就是船上电池板的发电量不足的问题。在无法快速提高光伏电池板发电效率的前提下，如何布置更多面积的太阳能电池板，成为解决问题的途径之一。

光伏阵列的固定布置分为水平布置和倾斜布置，船上光伏阵列固定布置有2种选择：1)全部水平布置；2)采用一定倾角的倾斜对称布置。

2.1 水平布置

固定水平安装在早期的太阳能光伏系统中的应用比较多，现阶段在陆上固定地点的光伏系统使用较少。但是，在一些移动光伏系统中仍然被采用，这是由于在太阳车、太阳能船等移动物体上采用跟踪布置机构较复杂。水平固定的优点就是结构简单，不需要附加其他设备，因此在移动的光伏系统中多采用此种方式。

对于水平布置的电池板，其表面接收到的太阳辐射量可以根据当地太阳能辐射资料查询，以北京地区为例，其辐射量如表1所示。

2.2 固定倾斜布置

固定倾角布置是现阶段陆地上大多数小型光伏系统采用的方式，应用上的关键技术问题是计算布置的最佳倾角。根据实验的相关数据^[6]，某些地区最佳倾角的光伏系统的发电量比水平放置增加18.6%~20.9%。

关于最佳倾角下光伏系统的发电量较水平放置的增加量，根据这里的相关，发现不同地区差别较大：北京地区在最佳倾角(44.5°)下辐射量较水平放置增加了22%左右，而珠海地区在最佳倾角(22°)下辐射量较水平放置仅增加4.12%；同时需要指出的是，根据相关计算及实验^[7]，辐射量增加10%，发电量的增加可能大于10%，也可能小于10%，两者的关系并不确定，但是在这里的计算中，假设辐射量和发电量是同比增加的。

固定的不同方位角、不同倾斜角的光伏阵列表面接收到的太阳辐射的计算函数为

$$Q_T(\phi, \gamma, \beta, \delta, Q_p, D_p) = S_T + D_T + R_T$$

$$= R_B(Q_p - D_p) + \frac{1}{2}D_p(1 + \cos\beta) + \frac{1}{2}\rho_R Q_p(1 - \cos\beta), \quad (17)$$

$$Q = \sum Q_{Ti} \cdot S_i, \quad (18)$$

其中， i 表示不同的方位角。

由于船舶处于移动状态，方向不确定，所以在计算中进行了简化处理，假设船舶不动，取方位角为0和180°倾斜布置。不同倾斜面上的辐射量根据水平面辐射量的数据计算得到。

表1 北京地区各月水平面辐射量 [(kW·h/m²)/d]

Tab. 1 Horizontal radiation of each month of Beijing [(kW·h/m²)/d]

月份/月	平面总辐射量 Q_p	平面直射辐射量 S_p	平面散射辐射量 D_p
1	2.75	2.23	0.52
2	3.66	2.87	0.79
3	4.75	3.52	1.23
4	5.83	4.14	1.69
5	6.29	4.16	2.13
6	6.02	3.60	2.42
7	5.29	2.87	2.42
8	4.83	2.72	2.11
9	4.54	2.97	1.57
10	3.70	2.66	1.04
11	2.80	2.13	0.67
12	2.39	1.90	0.49
年均	4.40	2.98	1.43

2.3 水平布置和固定倾角对称布置辐射量对比分析

以北京地区太阳辐射量为算例, 对水平布置和固定倾角对称布置辐射量进行对比分析, 计算结果如表 2 所示。

表 2 不同倾角下对称布置辐射量计算结果

Tab. 2 Calculation results of the symmetrical arrangement of radiation under different angles

方位角为 0 时的倾斜角/ $^{\circ}$	倾斜面辐射量/ [(kW·h/m ²)/d]	方位角为 180°时的倾 斜角/ $^{\circ}$	倾斜面辐射量/ [(kW·h/m ²)/d]	较水平布置增减的百分比/%
水平布置	4.40	0	4.40	0
5	4.60	5	4.12	-0.91
10	4.80	10	3.85	-1.70
15	4.98	15	3.56	-2.95
25	5.26	25	2.97	-6.48
35	5.42	35	2.57	-9.20
45	5.47	45	2.24	-12.4
55	5.39	55	1.96	-16.5

从计算的倾斜面上的数据可以看出, 若采用对称布置光伏阵列, 例如北京地区的陆上固定布置最佳倾角是 45°左右, 当采用对称布置时, 取方位角为 0°和 180°, 此时的辐射量平均值为 3.86 (kW·h/m²)/d, 小于水平布置时的辐射量 4.40 (kW·h/m²)/d, 减少了 12.27%。

对比计算结果表明, 在船舶等移动物体上固定布置光伏阵列, 方位角随着船的移动在变, 这时不存在所谓的最佳倾角; 仅从辐射量角度分析, 固定布置方式中水平布置优于倾角布置。

2.4 大倾角增加布置面积

该种布置形式的目的是增加太阳能电池板的面积, 进一步增加发电量。该方法的原理如房屋顶部的形状, 采用等腰三角形的形式, 在损失一定太阳辐射量的前提下, 通过增加倾角来增加布置的面积。对北京地区的计算结果如表 3 所示。

表 3 北京地区辐射量增幅计算

Tab. 3 Calculation of radiation growth amount of Beijing

倾角度数/ $^{\circ}$	布置面积增加百分比/%	辐射量减少百分比/%	发电量增加百分比/%
25	10.34	5.77	3.97
45	41.42	11.90	24.59
55	74.34	16.90	44.88
60	100	8.45	63.10

根据上述计算结果可知, 采用增大倾角的方式来增加太阳能电池板面积的方法是可行的, 但是这种方式在损失了一部分电池板的发电量的情况下, 对不同地区的损失, 倾角不同会有很大差别, 在船舶的太阳能光伏系统设计中必须充分考虑该方案的经济性。

3 结论

研究给出了太阳能辐射量的理论计算方法。仅从辐射量角度出发, 对光伏阵列在船上固定布置中的水平布置和倾斜布置进行了对比计算, 得出如下结论: 在移动的小型游览船上, 太阳能电池板面积不变时, 光伏阵列固定布置中水平布置优于倾斜布置; 在同一条小型游览船上, 在追求总体发电量最多时, 光伏阵列倾斜布置优于水平布置, 同时存在发电量最大的最佳倾斜角。

[参考文献] (References)

- [1] 林杰, 袁成清, 孙玉伟, 等. 太阳能电池板在不同类型船舶上的布置优化[J]. 船海工程, 2010, 39(6): 116-120.
LIN J, YUAN C Q, SUN Y W, et al. Layout optimization of solar panels on different ships[J]. Ship & Ocean Engineering, 2010, 39(6): 116-120. (in Chinese)
- [2] 魏乔. 船用光伏发电系统最大功率跟踪及自动跟踪控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
WEI Q. Study on MPPT and automatic tracking control of ship PV generation system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [3] 任超. 太阳自动跟踪装置控制系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
REN C. Research on control system of auto-solar tracker[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [4] 孙忠玉. 独立光伏系统在小型游览船上的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
SUN Z Y. Application of independent photovoltaic system on the small tourist boat[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [5] 杨刚, 陈明, 陈卓武. 固定式光伏阵列最佳倾角的CAD计算方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(增2): 165-169.
YANG G, CHEN M, CHEN Z W. CAD method used in determining the optimum tilt angle of fixed PV arrays[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(Suppl. 2): 165-169. (in Chinese)
- [6] 杨金焕, 葛亮, 陈中华, 等. 太阳能发电系统的最佳化设计[J]. 能源工程, 2003(5): 25-28.
YANG J H, GE L, CHEN Z H, et al. The optimum sizing of stand-alone photovoltaic systems[J]. Energy Engineering, 2003(5): 25-28. (in Chinese)
- [7] 杨金焕, 毛家俊, 陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(7): 1032-1036.
YANG J H, MAO J J, CHEN Z H. Calculation of solar radiation on variously oriented tilted surface and optimum tilt angle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(7): 1032-1036. (in Chinese)