

山地光伏阵列布置方法和排间距计算

罗耿

(中国电力工程顾问集团新能源有限公司, 北京市 西城区 100120)

Layout Method and Row Pitch Calculation for Mountain Photovoltaic Array

LUO Geng

(China Power Engineering Consulting Group New Energy Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100120, China)

摘要: 近年来山地光伏项目越来越多, 为选择适合山地光伏电站的光伏阵列布置方法, 基于数学建模的方法, 建立了太阳光线、坡面和光伏组件的几何模型, 推导出任意坡度和坡面方位角下使用随坡倾角布置和正南倾角布置的光伏阵列理论排间距计算方法, 并通过设置判定条件使排间距的计算更加完善。对不同纬度、坡度、坡面方位角下的排间距进行分析, 总结并对比了2种布置方法下排间距的变化规律和特点, 为设计人员对光伏电站中光伏组件布置优化提供方向和理论基础。

关键词: 山地光伏电站; 随坡倾角布置; 正南倾角布置; 光伏阵列排间距

ABSTRACT: In recent years, there are more and more mountain photovoltaic projects. In order to select a suitable photovoltaic array layout method for mountain photovoltaic power stations, based on mathematical modeling, the geometric model of solar rays, slopes, and photovoltaic modules was established, the calculation methods for the theoretical row pitch of photovoltaic arrays at random slopes and azimuths were derived by using slope's azimuth-tilt layout and south-tilt layout, and the calculation of row pitch was more perfect by setting the judging conditions. By analyzing the results of row pitch under different latitudes, slopes, and azimuths on the slope surface, the rules and characteristics of the row pitch under the two layout methods were summarized and compared, which provided a direction and theoretical basis for designers to optimize the photovoltaic module layout in photovoltaic power stations.

KEY WORDS: mountain photovoltaic power station; slope's azimuth-tilt layout; south-tilt layout; row pitch of photovoltaic array

0 引言

在中国鼓励光伏发展的政策引导下, 光伏行

业快速发展^[1-5]。截至2020年年底, 中国光伏发电装机容量累计达到25 343万kW^[6]。光伏电站项目开发场址也越来越多地从平坦地面转移到山地^[7]。为了达到经济效益最大化, 对山地光伏电站的优化设计必不可少, 其中对任意坡面下光伏阵列的布置方法和排间距的计算尤其重要^[8], 因为其直接影响了光伏系统发电量和项目成本。

文献[9]通过影子倍率法计算了平坦地面的光伏阵列间距。文献[10]推导了正北坡场地下光伏阵列的间距公式。文献[11-12]对南北坡不同坡度下光伏阵列间距进行了计算和分析。文献[13]对方位角为正南、正西、正北、正东的斜坡下阵列间距进行了研究。文献[14-15]对任意坡面朝向和坡度下的阵列间距公式进行了推导, 但使用坡面的分解方法模型较复杂。文献[16-17]使用PVsyst软件对山地光伏系统的排布进行了研究。文献[18]研究了阵列间距对发电量的影响, 提供了一种从经济性角度确定合适阵列间距的方法。文献[19]研究了光伏组件倾角、间距综合影响下最佳倾角和阵列间距的确定方法。

以上文献研究了平坦地面或特定坡面的光伏阵列间距, 一般默认组件为某一种布置方法, 鲜少对多种布置方法进行比较分析。基于此, 本文通过数学模型, 推导了在任意地形条件下随坡倾角布置和正南倾角布置时光伏阵列排间距的计算方法, 并对比分析了2种布置方法下排间距的变化规律。本文侧重理论计算和分析, 以期在设计人员对光伏电站进行经济性分析和系统优化提供理论参考。

1 光伏阵列布置方法

光伏阵列排布设计中最重要便是光伏组件的倾角^[20]、方位角^[21]和光伏阵列排间距,这3个参数均影响光伏系统的发电量。根据设计规范,平地光伏方阵各排、列的布置间距应保证每天09:00—15:00(当地真太阳时)时段内前、后、左、右互不遮挡^[22]。通常光伏电站设计均按照该标准,所以间距对发电量的影响较小,但相比于光伏组件倾角和方位角,排间距直接影响了占地和电缆用量等,故对光伏电站成本影响较大。综上可知,对于平地光伏项目,光伏组件倾角和方位角更多地影响收益,而排间距更多地影响成本。

设计规范仅对平地光伏系统提出要求,即光伏组件安装方位角宜采用正南方向。但山地光伏项目的地形复杂,有时难以保证光伏组件方位朝向正南,有时也难以保证光伏组件每天09:00—15:00时段内不被遮挡。

为了探索山地光伏如何更优地布置,本文从排间距的计算入手进行研究,仍以平地光伏每天09:00—15:00时段内不被遮挡为前提计算坡面上光伏阵列排间距。本文定义了如下2种布置方法:

1) 随坡倾角布置。光伏组件方位角与坡面方位角一致,并与水平面呈一定的倾角。

2) 正南倾角布置。光伏组件方位角为0°(朝向正南),并与水平面呈一定的倾角。

显而易见,对于同一非正南、正北斜坡,光伏组件采用正南倾角布置一定比随坡倾角布置发电量高,但2种布置方法在排间距上表现如何未知,本文将对此展开研究。

2 2种阵列布置下的排间距建模

2.1 太阳光线数学模型

以当地水平面建立 x 、 y 轴所在平面,正南方向为 x 轴,正东方向为 y 轴,通过太阳高度角 α 和方位角 λ 确定太阳光线位置,如图1所示。

太阳高度角和方位角采用以下公式^[23]计算:

$$\alpha = \arcsin(\sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \quad (1)$$

$$\cos \lambda = \frac{\sin \alpha \cdot \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cdot \cos \phi} \quad (2)$$

式中: ϕ 为地理纬度,本文纬度均指北纬; δ 为大

阳赤纬角; ω 为时角。对于太阳方位角 λ ,正南为0°,正西为-90°,正东为90°。

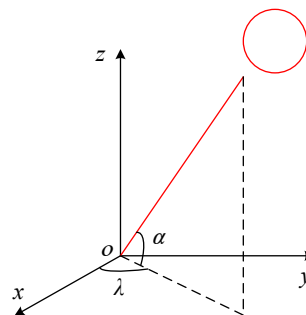


图1 太阳光线数学模型

Fig. 1 Mathematical model of solar rays

太阳赤纬角、时角的计算公式^[24]如下:

$$\delta = 23.45 \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right) \quad (3)$$

$$\omega = 15(t-12) \quad (4)$$

式中: n 为日序,其值为0~365; t 为真太阳时。

从而得到太阳光线的方向向量为

$$\mathbf{n}_s = (\cos \alpha \cdot \cos \lambda, \cos \alpha \cdot \sin \lambda, \sin \alpha) \quad (5)$$

2.2 随坡倾角布置数学模型

光伏组件随坡倾角布置,则光伏组件的方位角与坡面方位角 θ 相等,对于坡面方位角 θ ,正南为0°,正西为90°,正东为-90°。光伏组件倾角 β 为组件所在平面与水平面之间的夹角,那么组件倾角 $\beta \geq$ 坡度 γ 。其中光伏组串竖向宽度 DE 为 d_{width} ,光伏阵列排间距为 d_{pitch} 。

在右手直角坐标系中建立光伏组件和坡面的数学模型,如图2所示,光伏组件和坡面初始位置均朝向正南。

从初始正南位置,以 z 轴为旋转轴,转动斜坡,光伏组件 $CDEF$ 随斜坡旋转,到达图3所示

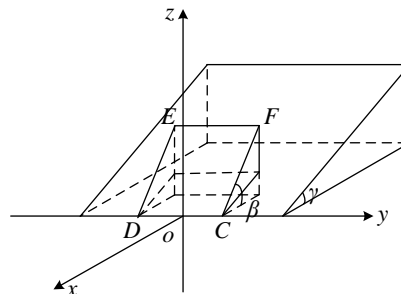


图2 光伏组件和坡面初始正南朝向示意图

Fig. 2 Initial south-facing orientation of photovoltaic module and slope

位置。只有早晚的太阳高度角最低，影子才最长，所以求解前后排间距 d_{pitch} ，即求09:00或15:00组件的上边缘 EF 落到坡面上的影子到直线 CD 的距离，易知组件上边缘线段 EF 的投影一定与直线 CD 平行，为简化计算，求解 A 的投影 B 到直线 CD 的距离即可。计算思路为：先通过联立直线 AB 方程和坡面方程求出 B 点坐标；然后通过向量积关系求出 B 点与直线 CD 的距离。

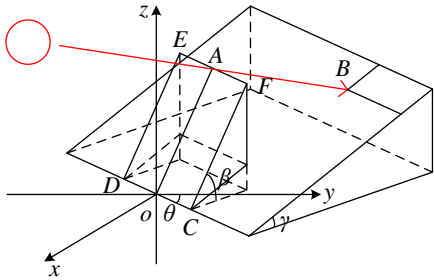


图3 随坡倾角布置下光伏组件和坡面数学模型

Fig. 3 Mathematical model of photovoltaic module and slope under slope's azimuth-tilt layout

直线 AB 的方向向量如式(5)所示。根据图3几何关系可得到坡面法向量：

$$\mathbf{n}_p = (\sin \gamma \cdot \cos \theta, -\sin \gamma \cdot \sin \theta, \cos \gamma) \quad (6)$$

A 点坐标为

$$\mathbf{X}_A = \begin{bmatrix} -d_{width} \cos \beta \cos \theta \\ d_{width} \cos \beta \sin \theta \\ d_{width} \cos \beta \tan \beta \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

直线 CD 的方向向量为

$$\mathbf{n}_{CD} = (\sin \theta, \cos \theta, 0) \quad (8)$$

则可推导出直线 AB 的方程式：

$$\frac{x + d_{width} \cos \beta \cos \theta}{\cos \alpha \cos \lambda} = \frac{y - d_{width} \cos \beta \sin \theta}{\cos \alpha \sin \lambda} = \frac{z - d_{width} \cos \beta \tan \beta}{\sin \alpha} \quad (9)$$

坡面方程为

$$\mathbf{n}_p \cdot (x, y, z)^T = 0 \quad (10)$$

联立式(9)、(10)，即可求出 B 点坐标：

$$\mathbf{X}_B = (-d_{width} \begin{bmatrix} \sin \gamma \cos \theta & -\sin \gamma \sin \theta & \cos \gamma \\ \cos \alpha \sin \lambda & -\cos \alpha \cos \lambda & 0 \\ \sin \alpha & 0 & -\cos \alpha \cos \lambda \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \beta \sin \theta \cos \alpha \cos \lambda + \cos \beta \cos \theta \cos \alpha \sin \lambda \\ \sin \beta \cos \alpha \cos \lambda + \cos \beta \cos \theta \sin \alpha \end{bmatrix})^T \quad (11)$$

则 AB 的距离表示为

$$d_{AB} = |\overrightarrow{OB} \times \mathbf{n}_{CD}| \quad (12)$$

经分析，可能会出现以下2种特殊情况：1) 光线经过组件上边缘与坡面相交于组件的前面，而非后面；2) 光线先穿过坡面再经过组件上边缘。这2种情况可能会计算出错误的结果，故增加以下判定条件：1) 当 $\overrightarrow{OA} \cdot (\overrightarrow{OB})^T < 0$ 时， $d_{AB} = 0$ ；2) 当 $\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{n}_p^T < 0$ 时， $d_{AB} = 0$ 。

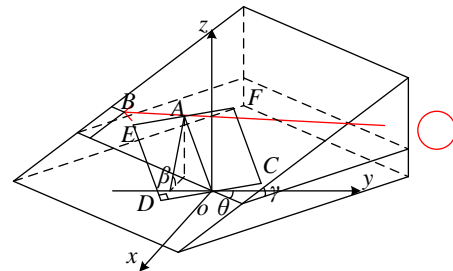
分别计算09:00和15:00时 AB 的距离 d_9 和 d_{15} ，两者取最大值得到排间距，即

$$d_{pitch} = \max(d_9, d_{15}) \quad (13)$$

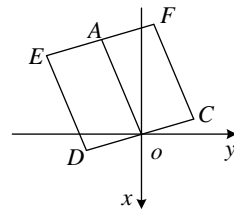
2.3 正南倾角布置数学模型

采用正南倾角布置，则光伏组件的方位角为 0° ，在坡面非正南朝向时，组件倾角一定大于坡度。

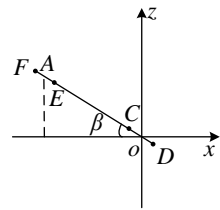
从图2所示的正南初始位置，以 z 轴为旋转轴，转动斜坡，以过原点 o 的组件平面法向量为旋转轴，转动组件 $CDEF$ 使组件下边缘 CD 与坡面贴合，到达图4(a)所示位置。求解前后排间距 d'_{pitch} ，与随坡倾角布置一样，即求 A 的投影 B 到直线 CD 的距离。计算思路同2.2节。



(a) 轴侧图



(b) 俯视图



(c) 左视图

图4 正南倾角布置下光伏组件和坡面数学模型

Fig. 4 Mathematical model of photovoltaic module and slope under south-tilt layout

直线 AB 的方向向量如式(5)所示。根据几何关系可得到坡面法向量，如式(6)所示。

组件平面法向量为

$$\mathbf{n}_z = (\sin \beta, 0, \cos \beta) \quad (14)$$

联立坡面方程和组件平面方程：

$$\begin{cases} \mathbf{n}_p \cdot (x, y, z)^T = 0 \\ \mathbf{n}_z \cdot (x, y, z)^T = 0 \end{cases} \quad (15)$$

得到交线 CD 方程：

$$\frac{x}{\sin \gamma \sin \theta} = \frac{y}{\sin \gamma \cos \theta - \tan \beta \cos \gamma} = \frac{z}{-\tan \beta \sin \gamma \sin \theta} \quad (16)$$

则直线 CD 的方向向量为

$$\mathbf{n}'_{CD} = (\sin \gamma \sin \theta, \sin \gamma \cos \theta - \tan \beta \cos \gamma, -\tan \beta \sin \gamma \sin \theta) \quad (17)$$

根据以下条件可得式(18)：1) A 点在组件平面内；2) 直线 OA 与直线 CD 垂直；3) $d_{OA} = d_{width}$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{n}'_{CD} \cdot (x, y, z)^T = 0 \\ \overline{OA}' \cdot \mathbf{n}'_{CD} = 0 \\ x^2 + y^2 + z^2 = d_{width}^2 \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)即可求出 A 点坐标，得到 2 个关于原点对称的坐标，取 $z_A > 0$ 的一组，即 (x_A, y_A, z_A) ，从而推导出直线 AB 的方程式：

$$\frac{x - x_A}{\cos \alpha \cdot \cos \lambda} = \frac{y - y_A}{\cos \alpha \cdot \sin \lambda} = \frac{z - z_A}{\sin \alpha} \quad (19)$$

联立式(19)与坡面方程式(10)，即可求出 B 点坐标。整理可得 B 点坐标为

$$\mathbf{X}'_B = \begin{bmatrix} \sin \gamma \cos \theta & -\sin \gamma \sin \theta & \cos \gamma \\ \cos \alpha \sin \lambda & -\cos \alpha \cos \lambda & 0 \\ \sin \alpha & 0 & -\cos \alpha \cos \lambda \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ -y_A \cos \alpha \cos \lambda + x_A \cos \alpha \sin \lambda \\ -z_A \cos \alpha \cos \lambda + x_A \sin \alpha \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

则 AB 的距离

$$d'_{AB} = |\overline{OB}' \times \mathbf{n}'_{CD}| \quad (21)$$

经分析，该布置方法也可能会出现特殊情况，即光线先穿过坡面再经过组件上边缘，故增加以下判定条件：当 $\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{n}_p^T < 0$ 时， $d'_{AB} = 0$ 。

分别计算 09:00 和 15:00 时 AB 的距离 d'_9 和 d'_{15} ，两者取最大值得到排间距，即

$$d'_{pitch} = \max(d'_9, d'_{15}) \quad (22)$$

3 排间距分析

因为上午和下午太阳位置是对称的，斜坡南偏西和南偏东也是对称的，所以排间距值只与方

位角的绝对值有关，故本文排间距分析及图表中均只体现方位角为正(即南偏西坡)的情况，方位角为负的情况不再体现，特此说明。

3.1 随坡倾角布置分析

对于随坡倾角布置，显而易见，有以下结论：

- 1) 排间距会随着坡度增加而减小；
- 2) 排间距会随着纬度增加而增大；
- 3) 排间距会随着组件倾角增加而增大。

使用某主流组件进行设计，光伏组串竖向宽度 d_{width} 为 4.036 m，分别在纬度 20°、35°、50°，坡度 10°、20° 下计算排间距。为便于对照分析，组件倾角固定 38° 不变，得到不同纬度、坡度下排间距随方位角变化的曲线，如图 5 所示。

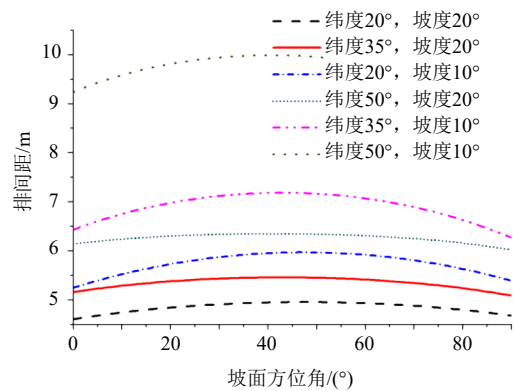


图 5 不同纬度、坡度下排间距随坡面方位角的变化曲线(随坡倾角布置)

Fig. 5 Variation curves of row pitch with slope azimuth at different latitudes and slopes (slope's azimuth-tilt layout)

从图 5 可以看出，随着方位角增大，排间距先增大后减小，方位角在 45° 左右(纬度 20° 对应方位角 41°，纬度 35° 对应方位角 43°，纬度 50° 对应方位角 47°)时，排间距出现拐点。

由此可见，采用随坡倾角布置方法，不论方位角增加多少，排间距始终维持在较低水平，可以节省用地和项目成本。当然，随着方位角逐渐增大，倾斜面峰值日照时数也会逐渐减小，当方位角过大时，对发电量影响较大。通过 PVsyst 仿真，倾角设置为 35°，得到不同方位角下北京地区倾斜面峰值日照时数，如表 1 所示。

由表 1 可以看出，当方位角低于 30° 时，峰值日照时数损失较小，超过 30° 以后峰值日照时数下降幅度较大。

表1 方位角对峰值日照时数的影响

Tab. 1 Effect of azimuth on peak sunshine hours

方位角/(°)	峰值日照时数	变化率/%
0	1 597	0
10	1 593	-0.3
20	1 580	-1.1
30	1 559	-2.4
40	1 529	-4.3
50	1 492	-6.6
60	1 450	-9.2
70	1 402	-12.2
80	1 349	-15.5
90	1 292	-19.1

3.2 正南倾角布置分析

对于正南倾角布置，同样使用某主流组件进行设计，各设置条件与随坡倾角布置一样，得到不同纬度、坡度下排间距随方位角变化的曲线，分别如图6、7所示。

由图6、7可见，排间距随方位角的增加而单调增加，坡度较大时，排间距增加速度更快，而

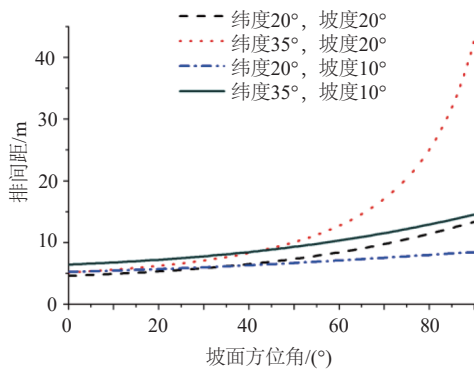


图6 中低纬度、不同坡度下排间距随坡面方位角的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of row pitch with slope azimuth at low and middle latitudes and different slopes

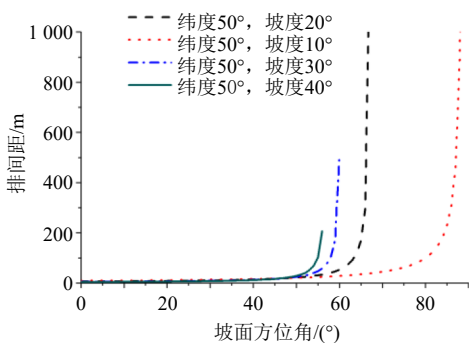


图7 高纬度、不同坡度下排间距随坡面方位角的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of row pitch with slope azimuth at high latitudes and different slopes

坡度较小时，排间距增加速度较为平稳。

从图7可以看出，在方位角增大到一定数值时，计算出的排间距会陡增。通过检查和分析可知，当排间距非常大时，光线与坡面接近于平行。由此可以推测，由南向北并与坡面平行的光线穿过组件上边缘，将不会与坡面相交；当光线高度角增加一个无穷小的正值时，光线将与坡面交于北边的无穷远处，即排间距无穷大，此情况一般只会出现在坡面方位角较大时的早晨或傍晚。并且当09:00或15:00出现阳光先穿过坡面再穿过组件的情况时，一定在09:00—15:00某个时刻光线无限接近平行于坡面，将会导致计算出的排间距无穷大。因此，需对2.3节中正南倾角布置的计算进行修正。更改判定条件为：当 $n_s \cdot n_p^T < 0$ 时， $d'_{pitch} = +\infty$ 。

从图6可以看出，一般在非高纬度地区，坡面方位角不大时，不易出现排间距计算值无穷大的情况。由图7可知，在纬度为50°时，坡度10°、20°、30°、40°条件下，排间距分别在方位角89°、67°、60°、56°处达到极大值。

实际上，对于方位角过大的斜坡，一味地追求峰值日照时数，会导致较大的排间距，从而使占地增大、电缆变长，造成成本增加，得不偿失。选取方位角0°~43°，得到不同纬度、坡度下的排间距变化曲线如图8所示。通过比较同纬度、不同坡度的排间距变化曲线可以看出，在方位角较小时，大坡度的排间距比小坡度的小，然而在

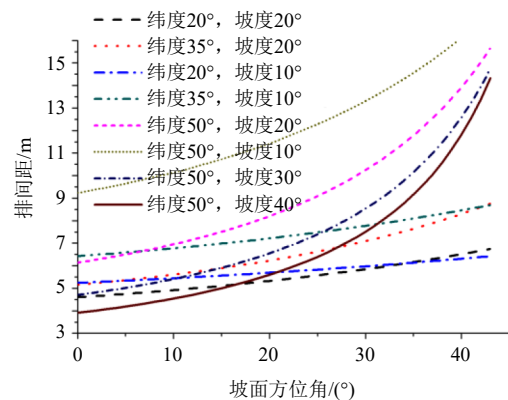


图8 不同纬度、坡度下排间距随坡面方位角的变化曲线 (正南倾角布置)

Fig. 8 Variation curves of row pitch with slope azimuth at different latitudes and slope (south-tilt layout)

方位角增加到一定值时，大坡度的排间距反超小坡度的排间距，并且纬度越小，反超点对应的方位角越小(纬度 20°对应反超点方位角 34°，纬度 35°对应反超点方位角 42°)。

综上，光伏组件在正南倾角布置下可以得到以下结论：

1) 当纬度、坡度、坡面方位角均较大时，在 09:00—15:00 可能出现排间距计算值无穷大的情况。

2) 当坡面方位角较大时，为获得较小的排间距，坡度不宜太大。当坡面方位角较小时，为获得较小的排间距，坡度越大越好。

3.3 2种布置方法对比

将同纬度下 2 种布置方法的排间距变化曲线进行比较，结果如图 9 所示。可以看出，在方位角较小时，2 种布置方法计算出的排间距相差不大，低纬度地区尤其明显；但随着方位角逐渐增大，正南倾角布置的排间距将大大增加，远大于随坡倾角布置；在低纬度地区，当坡度为 10°时，随着方位角增加，正南倾角布置的排间距刚开始小于随坡倾角布置，当方位角超过 30°后才逐渐大于随坡倾角布置。

为直观认识正南倾角布置较随坡倾角布置的排间距更大，整理各个算例正南倾角布置比随坡倾角布置排间距大 5% 对应的方位角，结果如表 2 所示。可以看出，在中、低纬度地区，当坡度较小时，只有方位角增加至较高数值，正南倾角布置排间距才比随坡倾角布置大 5%。与随坡倾角布置相比，正南倾角布置在不增加过多成本的条件下保持了较高的发电量。

综上，可以得到以下结论：

1) 在纬度较低(如小于 35°)、坡度较小(如小于 10°)、方位角较小(如小于 23°)时，正南倾角布置的排间距与随坡倾角布置的相差不大，甚至很小，可在不提高成本的情况下保持较高的发电量，是有效的排布方式。

2) 对于纬度稍高、坡度稍大、方位角稍大的情况，也可通过经济性比选，权衡发电量损失和成本增加，使项目收益率最大。

3) 对于纬度高、坡度大、方位角大的情况，

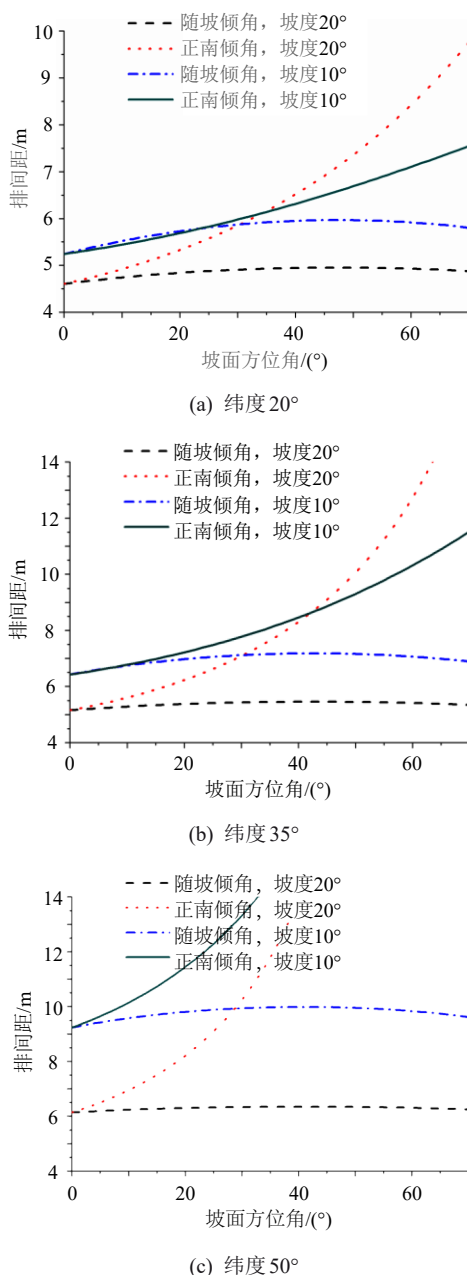


图 9 同纬度下 2 种布置方法的排间距变化曲线对比

Fig. 9 Comparison of variation curves of row pitch of two layout methods at the same latitude

使用正南倾角布置的排间距会格外大。此时可以使用正南倾角布置，但不能按理论计算的排间距进行布置，需人为降低排间距至合适的距离，即不保证 09:00—15:00 光伏组件不被遮挡，也可使用随坡倾角布置。2 种布置方法需进行详细的经济性比选，最终得出适合某个项目地且最经济的布置方法和排间距。

表2 正南倾角布置比随坡倾角布置排间距大5%对应的方位角

Tab. 2 Azimuth corresponding to the row pitch at slope's azimuth-tilt layout is 5% greater than at south-tilt layout

纬度/(°)	坡度/(°)	组件倾角/(°)	方位角/(°)
20	20	38	12
20	10	38	37
35	20	38	8
35	10	38	23
50	20	38	5
50	10	38	8

4 结论

对于平地光伏项目, 一般计算 09:00 或 15:00 这 2 个时刻的前排影子长度, 即可求出光伏阵列排间距。但山地光伏项目不然, 通过分析, 在正南倾角布置下, 存在 09:00—15:00 某个时刻计算出的排间距无穷大的情况。通过多个不同纬度、坡度、方位角的算例得出, 在较低纬度、较小坡度、较小方位角的情况下, 使用正南倾角布置较为合理; 在稍高纬度、稍大坡度、稍大方位角的情况下, 可通过经济性比选找出合适的布置方法; 在高纬度、大坡度、大方位角的情况下, 可调整正南倾角布置下的排间距并与随坡倾角布置进行经济性比选, 最终得到合适的布置方法。

参考文献

[1] 王思聪. 政府补贴政策演进对光伏发电产业发展影响研究[J]. 价格理论与实践, 2018(9): 62-65.
WANG S C. The evolution of PV subsidy policy and its impacts on PV market in China[J]. Price: Theory & Practice, 2018(9): 62-65.

[2] 陈豪, 张伟华, 石磊, 等. 国内外用户侧光储系统发展应用研究[J]. 发电技术, 2020, 41(2): 110-117.
CHEN H, ZHANG W H, SHI L, et al. Research on the development and application of the photovoltaic and energy storage system in the user-side at home and abroad[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(2): 110-117.

[3] 张哲暘, 巨星, 潘信宇, 等. 太阳能光伏-光热复合发电技术及其商业化应用[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 220-230.
ZHANG Z Y, JU X, PAN X Y, et al. Photovoltaic/concentrated solar power hybrid technology and its commercial application[J]. Power Generation

Technology, 2020, 41(3): 220-230.

[4] 田鑫, 张健, 李雪亮, 等. 基于时序运行模拟的山东电网光伏发电消纳能力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 34-43.
TIAN X, ZHANG J, LI X L, et al. Evaluating photovoltaic accommodation ability for the Shandong power system based on sequential operation simulation [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 34-43.

[5] 谢国辉, 李娜娜, 元博. 我国新能源开发路线图分析方法及模型[J]. 发电技术, 2020, 41(6): 631-637.
XIE G H, LI N N, YUAN B. Analysis methods and model of new energy developing roadmap in China[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(6): 631-637.

[6] 国家能源局. 国家能源局发布 2020 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2021-01-20)[2021-03-10]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm.
National Energy Administration. National Energy Administration releases national power industry statistics for 2020[EB/OL]. (2021-01-20) [2021-03-10]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm.

[7] 计俊, 甘磊明, 徐泽元. 山地光伏电站组件排布优化设计研究[J]. 中国科技纵横, 2017(4): 158-161.
JI J, GAN L M, XU Z Y. Study on optimal design of component arrangement for mountain photovoltaic power station[J]. China Science & Technology Overview, 2017(4): 158-161.

[8] 景建龙, 翟红晓. 山地光伏电站组件阴影遮挡原因及改善措施分析[J]. 太阳能, 2016(9): 73-77.
JING J L, ZHAI H X. Analysis of shadow occlusion of PV modules in mountainous regions and improvement measures[J]. Solar Energy, 2016(9): 73-77.

[9] 吴永忠, 邹立珺. 光伏电站太阳能电池阵列间距的计算[J]. 能源工程, 2011(1): 39-40.
WU Y Z, ZOU L J. The calculation of spacing between solar cell array in photovoltaic power station[J]. Energy Engineering, 2011(1): 39-40.

[10] 周长友, 杨智勇, 杨胜铭. 北坡场地光伏电站阵列间距设计[J]. 华电技术, 2013, 35(6): 14-17.
ZHOU C Y, YANG Z Y, YANG S M. Design of array spacing of photovoltaic power stations in north slope[J]. Huadian Technology, 2013, 35(6): 14-17.

[11] 张朝辉, 白永祥, 焦翠坪, 等. 坡面光伏阵列间距确定[J]. 电力科学与工程, 2014, 30(5): 50-55.
ZHANG Z H, BAI Y X, JIAO C P, et al. PV array spacing determination of slope layout[J]. Electric Power Science and Engineering, 2014, 30(5): 50-55.

[12] 王建勃, 何银涛, 黄华. 山地光伏电站间距计算与合

- 理选址[J]. 太阳能, 2015(9): 31-33.
- WANG J B, HE Y T, HUANG H. Calculation and reasonable location of mountain photovoltaic power stations[J]. Solar Energy, 2015(9): 31-33.
- [13] 陈建国, 刘红成, 江波. 任意坡向屋面光伏阵列间距设计[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(3): 26-30.
- CHEN J G, LIU H C, JIANG B. Design of PV array spacing on the roof with arbitrary slope azimuth[J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(3): 26-30.
- [14] 周建朋, 王明介. 随坡安装山地光伏电站阵列间距的计算[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 76-80.
- ZHOU J P, WANG M J. Calculation of the array spacing of mountain PV power plants installed with slope [J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 76-80.
- [15] 王春林, 袁云, 施俞安, 等. 山地光伏项目阵列间距计算方法研究[J]. 华电技术, 2019, 41(4): 51-55.
- WANG C L, YUAN Y, SHI Y A, et al. Calculation method of the array spacing for mountain PV project[J]. Huadian Technology, 2019, 41(4): 51-55.
- [16] 何银涛, 黄华, 刘佳尉. 固定倾角式光伏阵列排布精细化设计方法研究[J]. 科技与创新, 2016(14): 79-80.
- HE Y T, HUANG H, LIU J W. Research on refined design method of fixed inclined photovoltaic array[J]. Science and Technology & Innovation, 2016(14): 79-80.
- [17] 何银涛, 黄华, 汪婷婷. 山地光伏电站阵列方位角设计方法研究[J]. 科技与创新, 2017(19): 9-10.
- HE Y T, HUANG H, WANG T T. Research on azimuth design method of mountain photovoltaic power station array[J]. Science and Technology & Innovation, 2017(19): 9-10.
- [18] 石磊, 侯学良. 光伏电站阵列最佳倾角和间距确定方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(5): 109-114.
- SHI L, HOU X L. Research on optimal tilt angle and spacing of PV power station[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(5): 109-114.
- [19] 叶任时, 刘海波, 李德, 等. 光伏组件倾角和阵列间距的多因素综合计算方法[J]. 人民长江, 2015, 46(5): 39-42.
- YE R S, LIU H B, LI D, et al. Multiple factors integrated computing method to determine angle and array spacing of PV modules[J]. Yangtze River, 2015, 46(5): 39-42.
- [20] 王建民, 张晓威, 孔静. 改进的固定支架光伏阵列最佳倾角确定方法[J]. 可再生能源, 2013, 31(2): 108-110.
- WANG J M, ZHANG X W, KONG J. Method for determining on optimum tilt angle of fixed PV array[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(2): 108-110.
- [21] 陈建国, 张金剑. 山地光伏电站阵列朝向和倾角研究[J]. 华电技术, 2016, 38(4): 63-67.
- CHEN J G, ZHANG J J. Study on the array orientation and inclination of mountain PV stations[J]. Huadian Technology, 2016, 38(4): 63-67.
- [22] 中国电力企业联合会. 光伏电站设计规范: GB/T 50797—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- China Electricity Council. Code for design of photovoltaic power station: GB/T 50797—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [23] 罗耿. 定日镜控制策略和方法的理论研究与实验分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- LUO G. Theoretical and experimental analysis of heliostat control strategies and methods[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [24] 彭军, 杨智奇, 董菁雯, 等. 常用太阳跟踪系统接收辐射量的计算[J]. 节能技术, 2015, 33(2): 74-77.
- PENG J, YANG Z Q, DONG Q W, et al. Calculation of the received radiation for common solar tracking systems[J]. Energy Conservation Technology, 2015, 33(2): 74-77.

收稿日期: 2021-05-26。

作者简介:



罗耿

罗耿(1993), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为光伏发电系统、风力发电系统、光热发电系统设计优化, 834913131@qq.com。

(责任编辑 尚彩娟)