

## 锥形建筑太阳能电池板辐射量的计算研究

徐 晶<sup>1</sup>, 王民权<sup>1</sup>, 陈子珍<sup>1</sup>, 丁洪起<sup>1</sup>, 梅晓妍<sup>1</sup>, 黄文君<sup>2</sup>

(1. 宁波职业技术学院电子信息工程学院, 宁波 315800; 2. 浙江大学智能系统与控制研究所, 杭州 310027)

**摘 要:** 为提高锥形建筑太阳能的收集和利用, 提出一种采用瞬时辐射量建立的太阳能电池板动态数学模型。按月引入日照系数, 通过对太阳能电池板上瞬时辐射量的连续积分获得计算周期内的太阳辐射总量。以锥形建筑较多的内蒙古二连浩特地区为例, 计算不同坡度圆锥面上太阳能电池板不同覆盖面积的太阳辐射量, 并以 $0.1^\circ$ 为坡度增长步长, 计算圆锥面上太阳能电池板不同覆盖面积的最佳坡度角。仿真计算表明, 覆盖面积越大, 则最佳坡度角越小、太阳能利用率越低。

**关键词:** 锥形建筑; 太阳能电池板; 太阳辐射量; 瞬时辐射量; 日照系数; 最佳坡度角

**中图分类号:** TK519

**文献标识码:** A

### 0 引 言

“十三五”规划提出, 到 2020 年底, 要实现太阳能发电总装机容量达到 1.6 亿 kW, 太阳能热利用面积达到 8 亿  $\text{m}^2$  的目标<sup>[1]</sup>, 比“十二五”规划的 2015 年太阳能发电 2100 万 kW, 太阳能热利用面积 4 亿  $\text{m}^2$  的目标<sup>[2]</sup>分别提高了近 7 倍和 1 倍。太阳能与建筑结合是中国能源可持续和低碳发展的重要、快速和根本途径<sup>[3]</sup>。

建筑中应用太阳能技术已经在国外得到广泛的重视。如美国 1997 年就提出“百万太阳能屋顶计划”, 德国、日本屋顶光伏系统近年来也有了长足发展。Siraki 等<sup>[4]</sup>针对城市的气象条件和具体纬度, 对安装于屋顶的户用太阳能电池板倾角进行了深入研究, 提出能量最大化的获得需要考虑当地纬度、天气条件、周围环境等因素。Entera 等<sup>[5]</sup>对日本独栋别墅采用安装光伏屋顶的设计深入阐述, 并进行数值评价。文献[6]针对地中海地区, 将太阳能电池板的安装在建筑屋顶和南立面表面的 50%, 从节能的角度得出最优建筑形状。Gómez-Gil 等<sup>[7]</sup>得出在最佳辐照的条件下固定式太阳能电池板性价比最高的结论。国内的李 刚等<sup>[8]</sup>对屋顶太阳能利用与绿

色居住建筑一体化进行研究, 提出前坡后凹屋顶太阳能收集利用与绿色建筑一体化方案。任庚坡等<sup>[9]</sup>通过屋顶光伏发电系统与太阳墙的结合, 提高太阳能利用率, 并列举在厂房和一般建筑的应用案例。文献[10]提出将太阳能电池面板作为建筑屋面, 并在中国山东和山西等省份成功应用于建筑中。

太阳能电池与建筑物结合有以下 3 种形式: 太阳能电池板安装在平屋顶上, 如图 1a 所示; 太阳能电池板安装在坡屋顶上, 如图 1b 所示; 太阳能电池板安装在建筑物南立面上, 如图 1c 所示。目前研究成果多集中在如何提高安装在建筑平屋顶、坡屋顶及屋立面上太阳能电池板的太阳能的收集率和利用率。

由于建筑物设计的多样性, 建筑外观形态各异, 为了扩大建筑物太阳能的使用范围, 本文针对安装在锥形建筑上的太阳能电池板(如图 1d 所示), 提出一种采用瞬时辐射量建立锥形建筑太阳能电池板动态数学模型的计算方法, 通过对瞬时辐射量的连续积分获取计算周期内单位面积上的太阳辐射量, 以获取年太阳辐射量的最大化。以锥形建筑较多的内蒙古二连浩特地区为例, 计算不同坡度、圆锥面上太阳能电池板不同覆盖面积的年太阳辐射量及最佳坡度角。

收稿日期: 2016-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(61273100); 2017 年浙江省教育厅一般科研项目(Y201738421)

通信作者: 王民权(1965—), 男, 硕士、教授, 主要从事新能源、流程工业控制建模方面的研究。1605588677@qq.com

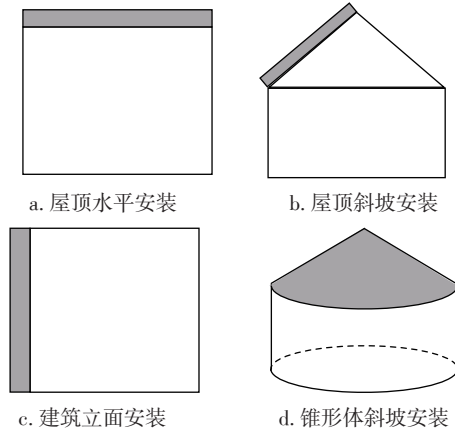


图1 太阳能电池板(阴影部分)的典型安装方式  
Fig. 1 Typical installation of PV Panel (shaded area)

## 1 算法建模

在综合考虑当地日照情况的基础上,建立圆锥面上的太阳能电池板表面所收集的太阳辐射量的算法模型。

### 1.1 太阳光建模

太阳赤纬角  $\delta$  由库伯方程<sup>[11]</sup>计算求得:

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin \left[ \frac{2\pi \times (284 + d)}{365} \right] \quad (1)$$

式中,  $d$  ——年序日。

太阳时角  $\omega$  为:

$$\begin{aligned} \omega &= 15^\circ \times (t_{\text{sun}} - 12) \\ &= 15^\circ \times \left[ t_{\text{bj}} + \frac{e - 4 \times (120^\circ - \rho)}{60} \right] \\ e &= 9.87 \sin 2\tau - 7.53 \cos \tau - 1.5 \sin \tau \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $t_{\text{sun}}$  ——真太阳时;  $t_{\text{bj}}$  ——北京时间;  $e$  ——修正时差,是地球公转和转速变化而产生的时差;

$$\begin{aligned} \cos \sigma &= \frac{(-\cosh \cos \alpha_z, -\cosh \sin \alpha_z, -\sinh) \cdot (-\sin \beta \cos \theta, -\sin \beta \sin \theta, -\cos \beta)}{|(-\cosh \cos \alpha_z, -\cosh \sin \alpha_z, -\sinh)| \cdot |(-\sin \beta \cos \theta, -\sin \beta \sin \theta, -\cos \beta)|} \\ &= \cosh \cos \alpha_z \sin \beta \cos \theta + \cosh \sin \alpha_z \sin \beta \sin \theta + \sinh \cos \beta \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\beta$  ——坡度角,即太阳能电池板的安装倾角,是太阳能电池板与地面的夹角,由于太阳能电池板安装在圆锥面上,所以  $\beta$  角是圆锥轴截面等腰三角形的底角;  $\theta$  ——太阳能电池板的方位角,是太阳能电池板法线在  $XY$  平面上的投影与  $X$  轴的夹角,即圆锥底面圆的圆心角,取值范围为  $-180^\circ \sim 180^\circ$ ,取正南方向为  $0^\circ$ 。

$\rho$  ——该地的经度角;  $\tau$  ——修正系数,  $\tau = 360 \times (d - 81) / 364$ 。

太阳高度角  $h$  和太阳方位角  $\alpha_z$  为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{aligned} \sinh &= \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \\ \cos \alpha_z &= \frac{\sinh \sin \varphi - \sin \delta}{\cosh \cos \varphi} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\varphi$  ——当地的纬度角。

### 1.2 圆锥面上太阳光线的入射角

影响太阳能电池板收集太阳光辐射量的最主要成分是太阳光直射辐射量  $R_b$ ,它和圆锥面上太阳入射光线夹角密切相关。

以圆锥锥顶为原点建立空间三维直角坐标系,如图2所示。定义以正南方向为  $X$  轴正向,与地面平行;以正东方向为  $Y$  轴正向,与地面平行;以天顶方向为  $Z$  轴正向,与地面垂直。其中,  $I$  为太阳入射光线,  $N$  为太阳能电池板的法线。

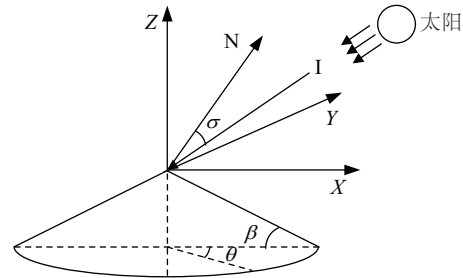


图2 太阳能电池板坐标系  
Fig. 2 Coordinate of the PV Panel

在图2所示的坐标系中,太阳光线入射的方向向量为  $(-\cosh \cos \alpha_z, -\cosh \sin \alpha_z, -\sinh)$ ,圆锥面上的太阳能电池板法线的方向向量为  $(\sin \beta \cos \theta, \sin \beta \sin \theta, \cos \beta)$ 。圆锥面上任意一点太阳光线的入射角  $\sigma$  为:

由式(4)可知,在某一时刻太阳高度角  $h$ 、太阳方位角  $\alpha_z$  和太阳能电池板的安装倾角  $\beta$  均不变,圆锥面上各点  $\sigma$  角的大小由圆锥底面圆的圆心角大小决定,由于圆锥同一条母线上的各点圆心角相同,所以  $\sigma$  角也相同。

圆锥侧面展开为一个扇形,将扇形等分为  $n$  个小扇形,各个扇形对应的圆锥底面圆圆心角为  $\theta_1$ ,

$\theta_2, \dots, \theta_n$ , 它们的变化区间为  $[-180^\circ, 180^\circ]$ 。各个扇形对应的太阳入射光线和太阳电池板法线的夹角近似为  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ 。

忽略大气折射和地表曲率的影响, 太阳电池板上的时角  $\omega_b$  为:

$$\omega_b = \min \left\{ \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \varphi), \cos^{-1}[-\tan \delta \tan(\varphi - \beta)] \right\} \quad (5)$$

忽略大气折射和地表曲率的影响, 太阳电池板上的日出时间  $t_{b-rise}$  和日落时间  $t_{b-set}$  为:

$$t_{b-rise} = \max \left\{ \begin{array}{l} 12 - (\omega_b - \theta)/15^\circ \\ 12 - \omega_b/15^\circ \end{array} \right. \quad (6)$$

$$t_{b-set} = \min \left\{ \begin{array}{l} 12 + (\omega_b + \theta)/15^\circ \\ 12 + \omega_b/15^\circ \end{array} \right.$$

太阳电池板上的日照时间  $t_{b-sun}$  为:

$$t_{b-sun} = t_{b-set} - t_{b-rise} \quad (7)$$

由于各个扇形对应的圆锥底面圆心角  $\theta$  不同, 对应日出时间  $t_{b-rise1}, t_{b-rise2}, \dots, t_{b-risen}$  和日落时间  $t_{b-set1}, t_{b-set2}, \dots, t_{b-setn}$  也不同, 每个小扇形的日照时间分别为  $t_{b-sun1}, t_{b-sun2}, \dots, t_{b-sunn}$ 。

### 1.3 圆锥面上太阳光辐射量的动态模型

太阳电池板收集太阳光辐射量通常采用 Klein 的计算方法<sup>[13]</sup>: 太阳总辐射量主要由太阳光直射辐射量、天空散射辐射量和地面反射辐射量 3 部分组成。太阳电池板表面任意时刻收集的瞬时辐射量  $r_i$  由直射辐射量  $r_b$ 、散射辐射量  $r_d$  和反射辐射量  $r_r$  3 部分组成。大气上界太阳辐射量, 其值随地球的公转而发生变化, 可表示为:

$$r_0 = R_s \left[ 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi d}{365}\right) \right] \quad (8)$$

$$= 1367 \left[ 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi d}{365}\right) \right]$$

式中,  $R_s$  ——太阳常数, 其值为  $1367 \text{ W/m}^2$ 。

#### 1.3.1 太阳光直射辐射量

任意时刻倾斜面上的太阳电池板, 单位面积上每分钟接受的太阳直射辐射能量  $r_{bb}$ , 可表示为:

$$r_{bb} = r_0 \cdot i_b \cdot \eta \cdot \cos \sigma \quad (9)$$

式中,  $i_b$  ——太阳光直射辐射透明度系数;  $\eta$  ——月日照系数, 月统计日照时间与理论日照时间的比值。

任意时刻圆锥面上的太阳电池板, 单位面积上每分钟接受的太阳直射辐射量  $r_b$  由  $n$  个小扇形上所

接受的太阳直射辐射量组成:

$$r_b = \frac{1}{n} (r_0 \cdot i_b \cdot \eta \cdot \cos \sigma_1 + r_0 \cdot i_b \cdot \eta \cdot \cos \sigma_2 + \dots + r_0 \cdot i_b \cdot \eta \cdot \cos \sigma_n) = \frac{r_0 \cdot i_b \cdot \eta}{n} \sum_{i=1}^n \cos \sigma_i \quad (10)$$

由于大气的散射和吸收等原因, 到达地球表面的太阳直接辐射量有一定的衰减, 在晴朗无云的条件下, 太阳光直射辐射透明度系数  $i_b$  为<sup>[14]</sup>:

$$i_b = 0.56(e^{-0.56L_h} + e^{-0.095L_h})$$

$$L_h = \left[ \sqrt{1229 + (614 \sinh)^2} - 614 \sinh \right] \times \left( \frac{288 - 0.0065h_e}{288} \right)^{5.256} \quad (11)$$

式中,  $L_h$  ——该地海拔高度下的大气质量<sup>[14]</sup>;  $h_e$  ——当地海拔高度。

#### 1.3.2 天空散射辐射量

天空散射辐射量是指太阳直接辐射通过大气时, 受到大气中气体、尘埃等的散射作用, 从天空的各个方向到达地表的一部分太阳辐射量。任意时刻倾斜面上的太阳电池板, 单位面积上每分钟接收的天空散射量  $r_d$  为:

$$r_d = r_0 \cdot i_d \cdot \sinh \cdot \frac{2 + \cos \beta}{3} \quad (12)$$

式中,  $i_d$  ——太阳光散射辐射透明度系数。

在晴朗无云的条件下, 散射可看作是一个均质散射, 散射辐射透明度系数与直接辐射透明度系数存在如下关系<sup>[15]</sup>:

$$i_d = 0.271 - 0.294i_b \quad (13)$$

#### 1.3.3 地面反射辐射量

地面反射辐射量是指到达地面的太阳总辐射中, 有一部分被地面反射回大气。任意时刻倾斜面上的太阳电池板, 单位面积上每分钟接收的地面反射辐射量  $r_r$  为:

$$r_r = 0.2 \cdot r_0 \cdot i_r \cdot \eta \cdot \sinh \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (14)$$

式中,  $i_r$  ——太阳光地面反射辐射透明度系数, 地面反射辐射透明度系数与直接辐射透明度系数存在如下的关系<sup>[16]</sup>:

$$\tau_r = 0.271 + 0.706\tau_b \quad (15)$$

#### 1.3.4 圆锥面上太阳电池板得到的辐射量计算

由  $n$  个小扇形组成的圆锥面上太阳电池板单位面积上每分钟接收的太阳辐射量  $r_i$  为:

$$r_i = r_b + r_d + r_r$$

$$= r_0 \left( \frac{i_b \cdot \eta}{n} \sum_{i=1}^n \cos \sigma_i + i_d \cdot \sinh h \cdot \frac{2 + \cos \beta}{3} + 0.2 \cdot i_r \cdot \eta \cdot \sinh \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (16)$$

由  $n$  个小扇形组成的圆锥面上的太阳能电池板单位面积上每天接收的太阳辐射量  $R_d$  为:

$$R_d = \frac{r_0}{n} \sum_{i=1}^n \int_{t_{b-risen}}^{t_{b-set}} \left( i_b \cdot \eta \cdot \cos \sigma_i + i_d \cdot \sinh \times \frac{2 + \cos \beta}{3} + 0.2 \cdot i_r \cdot \eta \cdot \sinh \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) dt \quad (17)$$

圆锥面上的太阳能电池板单位面积上一段时间内接收的太阳辐射量  $R$  为:

$$R = \sum_{d=start}^{d=end} \left[ \frac{r_0}{n} \sum_{i=1}^n \int_{t_{b-risen}}^{t_{b-set}} \left( i_b \cdot \eta \cdot \cos \sigma_i + i_d \cdot \sinh \times \frac{2 + \cos \beta}{3} + 0.2 \cdot i_r \cdot \eta \cdot \sinh \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) dt \right] \quad (18)$$

式中,  $d_{start}$  ——起始日(年序日);  $d_{end}$  ——终止日(年序日)。

## 2 计算实例

### 2.1 计算流程

本算法的计算流程如图3所示。圆锥侧面展开为一个扇形,将扇形等分为  $n$  个小扇形。圆锥面上太阳能电池板上收集到的太阳辐射量等效为太阳能电池板安装倾角  $\beta$  相等,而太阳能电池板的方位角  $\theta$  逐渐变化的  $n$  个小扇形上收集到的太阳辐射量的总和,即圆锥面上的年太阳辐射量为  $R_y$ 。 $\theta$  在  $-180^\circ \sim 180^\circ$  的范围内变化,为了提高太阳能电池板综合利用率,只在圆锥面上部分面积上安装太阳能电池板,  $\theta_{start}$  和  $\theta_{end}$  分别为第一个小扇形对应的方位角和最后一个小扇形对应的方位角。在 Matlab 编程时,取  $\beta$  的步长为  $0.1^\circ$ ,  $\theta$  的步长为  $0.1^\circ$ ,故  $n=1+(\theta_{end}-\theta_{start})/0.1$ 。

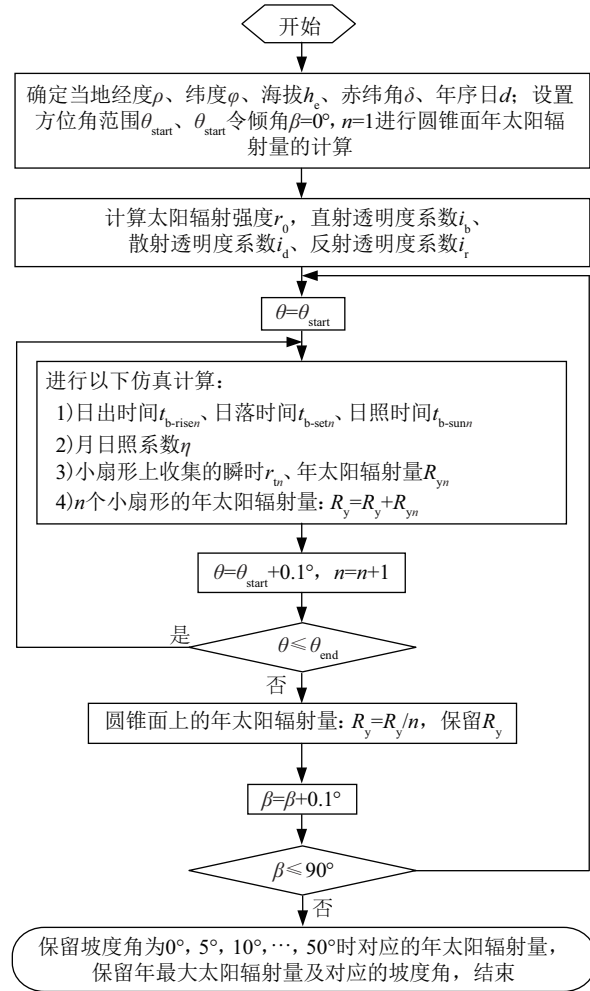


图3 计算流程

Fig. 3 Calculating process

为验证算法的合理性,使用本算法分别计算我国太阳能资源丰富的4个地区,在  $\theta_{start}=\theta_{end}=0$ ,即太阳能电池正向朝南时的水平面和倾斜面(倾角为当地纬度)上收集的年太阳辐射能,并与文献[17]提供的年太阳辐射量统计值进行对比,计算结果如表1所示。从表1计算结果可知,引入日照系数后,在

表1 计算结果对比

Table 1 Result comparison

地区	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m	水平面年太阳辐射量/MJ·m <sup>-2</sup>			纬度角平面年太阳辐射聚光量/MJ·m <sup>-2</sup>		
				统计	仿真	误差/%	统计	仿真	误差/%
二连浩特	111.97	43.65	946.70	6171.08	5732.30	-7.11	7547.93	7173.10	-4.96
哈密	93.52	42.82	737.20	6334.98	5791.29	-8.58	7519.96	7144.46	-4.99
格尔木	94.90	36.42	2807.60	7011.20	6410.08	-8.57	8007.65	7666.68	-4.25
敦煌	94.68	40.15	1139.00	6403.66	6214.80	-2.94	7241.09	7526.08	3.93

北纬地区大部分仿真的计算结果均略小于统计值,倾斜面的仿真计算结果误差要小于水平面,且误差较小,证明了本算法的合理性。

## 2.2 实例仿真计算

以我国锥形建筑较多且太阳能资料丰富的二连浩特地区为例,计算安装在锥形建筑太阳能电池板在不同覆盖面积、不同坡度下的年太阳

辐射量。

### 2.2.1 月均日照系数的计算

月均日照系数  $h$  是月统计日照时间与月理论日照时间的比值。查阅文献[17]可得月统计日照时间,根据式(7)求得每天的日照时间  $t_{b-sun}$ ,即求出月理论均日照时间。二连浩特地区的月均日照系数  $h$  如表 2 所示。

表 2 二连浩特地区月均日照系数

Table 2 Average daylight coefficient of each month in regions of Erenhot

1月份	2月份	3月份	4月份	5月份	6月份	7月份	8月份	9月份	10月份	11月份	12月份
0.804	0.814	0.791	0.757	0.739	0.733	0.696	0.713	0.779	0.793	0.791	0.779

### 2.2.2 不同坡度、太阳能电池板不同覆盖面积下的年太阳辐射量

以二连浩特地区为例,以坡度角  $5^{\circ}$  为步长,计算太阳能电池板不同覆盖面积下的年太阳辐射如表 3

所示。从表 3 可以看出,太阳能电池板在单位面积上接受的年太阳辐射量随太阳能电池板覆盖面积的增大而变小。

表 3 不同坡度、太阳能电池板不同覆盖面积下的年太阳辐射量

Table 3 Annual solar radiation on PV panels in different slope angel of cone surface and different area of coverage

MJ/m<sup>2</sup>

锥形屋顶 坡度/( $^{\circ}$ )	圆锥面上太阳能电池板覆盖角度/( $^{\circ}$ )						
	0	-30~30	-60~60	-90~90	-120~120	-150~150	-180~180
0	5732.3	5732.0	5731.7	5731.3	5730.8	5730.3	5729.8
5	6059.2	6042.6	5997.2	5930.3	5852.0	5773.9	5706.6
10	6347.2	6314.4	6225.1	6093.2	5938.4	5783.2	5648.8
15	6595.0	6546.6	6415.5	6222.1	5994.1	5763.6	5562.4
20	6801.0	6737.9	6568.0	6317.7	6021.2	5718.7	5452.4
25	6963.9	6887.0	6681.6	6379.9	6020.9	5651.7	5325.1
30	7082.2	6992.8	6775.6	6408.4	5994.2	5565.0	5187.0
35	7155.2	7054.7	6789.3	6402.9	5941.5	5565.0	5038.4
40	7183.2	7071.6	6782.5	6363.4	5862.9	5339.1	4879.5
43	7176.3	7060.3	6759.0	6323.4	5803.5	5258.5	4779.5
45	7163.1	7043.9	6735.1	6289.9	5758.7	5201.5	4711.0
50	7097.7	6971.5	6647.4	6182.5	5629.1	5048.2	4533.7



通过循环穷举法,以坡度角 0.1°为步长,计算锥形建筑太阳能电池板在不同覆盖面积下的最佳坡度角及其对应的年太阳辐射量如图 4 所示。从图 4 可看出,圆锥面上太阳能电池板覆盖面积越大,最佳坡度角就越小、太阳能利用率越低。

在内蒙古等一些远离电网的地区,当某些锥形建筑如蒙古包,要求发电量恒定、坡度角一定的情况下,通过本算法可以找到最佳的太阳能电池板覆盖角度;另外在某些太阳能电池板覆盖角度一定的情况下,可以算出最佳坡度角。

通过图 4 可得出一定覆盖面积下的最佳坡度角与对应的太阳辐射量。表 4 是在相同的太阳能电池板覆盖面积下,以最佳坡度角的太阳辐射量为基准,5°为步长,给出了其他坡度角相较于最佳坡度角的太阳辐射量变化情况。

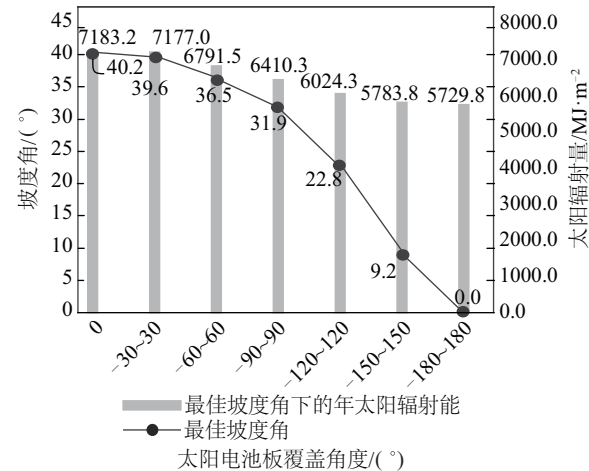


图4 太阳能电池板不同覆盖面积下的最佳坡度角及对应的年太阳辐射量

Fig. 4 Annual solar radiation and optimum slope angle of PV panels in different area of coverage

表 4 不同坡度在太阳能电池板不同覆盖面积下年太阳辐射量的增益

Table 4 Comparison of annual solar radiation in different slope angle and different area of coverage of PV panels								%
锥形屋顶 坡度/(°)	圆锥面上太阳能电池板覆盖角度/(°)							
	0	-30~30	-60~60	-90~90	-120~120	-150~150	-180~180	
0	-20.19	-20.13	-15.60	-10.59	-4.87	-0.92	0	
5	-15.64	-15.80	-11.69	-7.48	-2.86	-0.17	-0.40	
10	-11.63	-12.01	-8.33	-4.94	-1.42	-0.01	-1.41	
15	-8.18	-8.78	-5.53	-2.93	-0.50	-0.34	-2.92	
20	-5.32	-6.11	-3.29	-1.44	-0.05	-1.12	-4.84	
25	-3.05	-4.04	-1.62	-0.47	-0.05	-2.28	-7.06	
30	-1.40	-2.56	-0.23	-0.03	-0.49	-3.78	-9.47	
35	-0.38	-1.70	-0.03	-0.11	-1.30	-3.78	-12.06	
40	0	-1.46	-0.13	-0.73	-2.67	-7.68	-14.83	
43	-0.09	-1.62	-0.47	-1.35	-3.66	-9.08	-16.58	
45	-0.28	-1.85	-0.83	-1.87	-4.40	-10.06	-17.78	
50	-1.19	-2.86	-2.12	-3.55	-6.56	-12.71	-20.87	

由表 4 可以看出,在覆盖面积一定的情况下,选择锥形建筑上最佳坡度角安装太阳能电池板,可有效提高太阳能的利用率。通过改变步

长,可更精确地确定最佳坡度角。此计算对从事太阳能电池板安装的企业具有一定的参考价值。

### 3 结 论

1) 安装在锥形建筑上的太阳能电池板单位面积上接收的年太阳辐射量随着太阳能电池板覆盖面积的增大而减小。

2) 太阳能电池板覆盖面积越大, 对应的最佳坡度角就越小。

3) 在太阳能电池板覆盖角度一定时, 最佳坡度角安装可实现太阳辐射量的最大化。

其结论可为该地区太阳能光伏建筑一体化提供一定的参考。

#### [参考文献]

- [1] 国家能源局. 太阳能利用十三五发展规划征求意见稿 [EB/OL]. [http://www. askci.com/news/chanye/2015/12/30/14653hmi2.shtml](http://www.askci.com/news/chanye/2015/12/30/14653hmi2.shtml), 2015-12-30.
- [1] National Energy Administration. The use of solar energy development plan in 13th five-year draft [EB/OL]. <http://www. askci. com/news /chanye /2015/12/30/14653hmi2. shtml>, 2015-12-30.
- [2] 国家能源局. 太阳能发电发展“十二五”规划 [EB/OL]. [http://www. gov. cn /zwgk /201209/13/content\\_2223540. htm](http://www. gov. cn /zwgk /201209/13/content_2223540. htm), 2012-09-13.
- [2] National Energy Administration. Solar power development in 12th five-year plan [EB/OL]. [http://www. gov. cn/zwgk/201209/13/content\\_2223540. htm](http://www. gov. cn/zwgk/201209/13/content_2223540. htm), 2012-09-13.
- [3] 徐 勤, 刘 雄, 王 晔. 太阳能建筑一体化应用分析[J]. 绿色建筑, 2013, 3(1): 33—35.
- [3] Xu Qin, Liu Xiong, Wang Ye. Analysis of BIPV application[J]. Green Building, 2013, 3(1): 33—35.
- [4] Siraki A G, Pillay P. Study of optimum tilt angles for solar panels in different latitudes for urban applications [J]. Solar Energy, 2012, 86(6): 1920—1928.
- [5] Enteria N, Hiroshi Yoshino, Satake A, et al. Benefits of utilizing on-site and off-site renewable energy sources for the single family detached house [J]. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2016, 2(1): 890—910.
- [6] Pacheco-Torres R, López-Alonso M, Martínez G, et al. Efficient design of residential buildings geometry to optimize photovoltaic energy generation and energy demand in a warm Mediterranean climate[J]. Energy Efficiency, 2015, 1(8): 65—84.
- [7] Gómez- Gil F J, Wang Xiaoting, Barnett A. Energy production of photovoltaic systems fixed, tracking and concentrating [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(1): 306—313.
- [8] 李 刚, 郭晓君, 陈 娟. 屋顶太阳能利用与绿色居住建筑一体化研究[J]. 科技通报, 2015, 31(4): 227—229.
- [8] Li Gang, Guo Xiaojun, Chen Jun. Design about solar energy on roof and livable building [J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(4): 227—229.
- [9] 任庚坡, 房玉娜. 太阳墙系统综合利用技术[J]. 电力与能源, 2014, 35(3): 381—389.
- [9] Ren Gengpo, Fang Yuna. Comprehensive utilization technology of solar wall system [J]. Power & Energy, 2014, 35(3): 381—389.
- [10] Yu Guoguang, Xu Huiqing, Ding Jicai, et al. Building integrated solar power generation on roof [A]. 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference [C], Valencia, Spain, 2010.
- [11] Duffie J A, Beckman W A. Solar engineering of thermal processes [M]. New York: Wiley, 2006, 238—240.
- [12] 高国栋. 气候学教程 [M]. 北京: 气象出版社, 1996, 67—69.
- [12] Gao Guodong. Climatology tutorial [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1996, 67—69.
- [13] Klein S A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces [J]. Solar Energy, 1977, 19(4): 325—329.
- [14] Kreith F, Kreider J F. Principles of solar engineering [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1978, 90—95.
- [15] Gates D M. Biophysical ecology [M]. New York: Springer-Verlag, 1980, 356—358.
- [16] 王民权, 邹琴梅, 黄文君, 等. 太阳能电池板不同运行模式下的聚光增益[J]. 太阳能学报, 2014, 35(10): 2015—2021.
- [16] Wang Minquan, Zou Qinmei, Huang Wenjun, et al. Energy gain of PV panels in different running modes [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(10): 2015—2021.
- [17] 工程设计标准化-全国各地太阳能辐照量资料 [EB/OL]. <http://wenku. baidu. com/view5f60edfb941ea76e58fa0499.html>, 2012-10-12.
- [17] Standardization of engineering design—data on solar radiation across the country [EB/OL]. <http://wenku. baidu. com/view5f60edfb941ea76e58fa0499.html>, 2012-10-12.

## THE CALCULATION RESEARCH OF SOLAR RADIATION OF PV PANEL ON CONE-SHAPED BUILDINGS

Xu Jing<sup>1</sup>, Wang Minquan<sup>1</sup>, Chen Zizhen<sup>1</sup>, Ding Hongqi<sup>1</sup>, Mei Xiaoyan<sup>1</sup>, Huang Wenjun<sup>2</sup>

(1. *Faculty of Electronic Information Engineering, Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, China;*

2. *Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

**Abstract:** To improve the efficiency of solar energy collection and utilizing, a dynamic mathematical model of PV panels position was proposed. To improve calculation accuracy, solar radiation coefficient of sunlight by month was introduced. The solar radiation could be obtained by continuous integration of instantaneous radiation on a PV panel in a computation period. Take the example of Erenhot in Inner Mongolia with big number of cone-shaped building. The quantities of solar radiations on PV panels with different slope angels of cone surface and different areas of coverage are calculated. The optimum slope angles of PV panels with different areas of coverage on cone surface were also calculated by taking the gradient step of  $0.1^\circ$ . The results of emulation showed that the bigger areas of coverage and the smaller optimum slope angle, the lower utilization rate of solar energy.

**Keywords:** conical building; solar PV module; instantaneous radiation energy; sunshine coefficient; optimum slope angle