

[文章编号] 1002-8528(2012) 增刊 2-0277-05

# 太阳能板放置最佳倾角研究

朱丹丹 燕 达 (清华大学建筑学院, 北京 100084)

[摘 要] 在太阳能热利用和光伏发电的地面应用中, 通常将太阳能板朝向赤道固定放置, 其放置最佳倾角的选择是一个重要的技术问题, 影响太阳能的利用效率。本文通过倾斜面太阳辐射计算模型和光伏电池电力输出模型的建立, 基于中国建筑热环境分析专用气象数据集, 分析了倾斜面全年太阳辐射总量随倾斜角的变化规律, 并通过对我国部分地区年最佳倾角影响因素分析, 得出除纬度外, 太阳直射辐射和散射辐射的全年变化状况也是年最佳倾角的重要影响因素。文中给出了我国部分地区太阳能板放置的年最佳倾角, 为各地区太阳能板安装角度提供了设计参考。

[关键词] 太阳能板; 最佳倾角; 全年太阳辐射; 光伏发电

[中图分类号] TM615; TK513; TU18

[文献标识码] A

## Calculation of Solar Radiation and Generated Energy on Inclined Plane and Optimal Inclined Angle

ZHU Dan-dan, YAN Da (School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] In solar thermal applications and photovoltaic power generation, solar planes are usually installed facing the equator with a tilt angle to the horizontal plane, which influences solar energy utilization efficiency, so the choice of optimal tilt angle is an important technical problem. This study built solar radiation calculation model of inclined plane and power output model of photovoltaic cell, and analyzed the trend of change of yearly radiation on inclined plane with the angle of inclination based on special meteorological data set of building thermal environment in China. Through the analysis of influencing factors of optimal tilt angle in some regions of China, it is concluded that annual variation status of direct and indirect solar radiation is also an important factor except the latitude. The optimal tilt angle of solar plane installation in some cities given in this paper will supply references for design of solar thermal applications and photovoltaic power generation.

[Key words] solar plane; optimal inclined angle; yearly solar radiation; Photovoltaic power generation

### 1 引言

在能源和环境问题日益凸显的今天, 太阳能作为一种清洁可再生能源, 其各种利用技术的研发成为一个重要的课题。目前, 太阳能利用的形式多种多样, 如生活热水、供暖、光伏发电等, 常见的太阳能转换设备包括太阳能热水器、光伏电池 (Photovoltaic cells, PV) 等。在太阳能热利用和光伏发电的地面应用中, 通常将太阳能板朝向赤道固定放置, 并且与水平面形成一定的倾斜角  $\beta$ , 如图 1 所示, 因此在太阳能工程设计中, 不同地区最佳倾角的选择是一个重要的技术问题。在太阳能热利用系统中, 一般要求太阳能板全年接受到的太阳辐射总量最大; 在并网光伏发电系统中, 一般要求太阳能电池的全年发

电量最大, 其大小受到太阳辐射强度、光伏电池特性等因素影响, 而独立光伏发电系统还受到负载、蓄电池等其他因素的影响。所以, 同一纬度太阳能热利用与并网光伏发电中的太阳能板放置最佳倾角会有所不同。

对于太阳能板放置最佳倾角的计算, 国内外学者已经进行了不少的研究。过高辉等<sup>[1]</sup>认为倾角等于当地纬度时最佳。杨金焕等<sup>[2]</sup>根据天空散射各向异性的 Hay 模型, 计算了我国一些地区不同倾角情况下倾斜面上的月平均日辐射量, 并进一步求出最佳倾角, 其结果表明, 除了直接辐射量占总辐射量比例较大的地区以外, 一般全年最佳倾角总小于当地纬度。顾超等<sup>[3]</sup>针对独立光伏发电系统提出了最佳倾角的新定义, 并用上海市太阳能辐射月平均数据进行了计算分析。季杰等<sup>[4]</sup>根据香港 1989 年室外气象参数, 分别对香港建筑的东、南、西 3 个朝向立面有自然通风与无自然通风的光伏墙体的发电

[收稿日期] 2012-05-12

[作者简介] 朱丹丹 (1986. 11-), 女, 在读硕士研究生

[联系方式] zhudd06@mails.tsinghua.edu.cn

性能和得热量进行了全年的数值模拟计算。文献<sup>[2,3]</sup>计算斜面上太阳辐射量的时间步长为一天,未考虑一天中太阳辐射逐时变化的影响。另外,已有研究中缺少并网光伏发电系统中太阳能板放置最佳倾角的研究。因此,本文基于逐时气象数据,讨论了面向赤道放置的太阳能板在热利用与并网光伏发电两种情况下放置的最佳倾角,从而为太阳能板的安装角度提供设计参考。

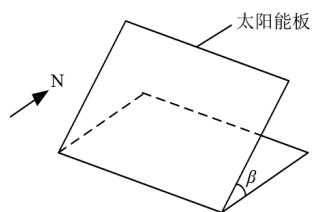


图1 太阳能板放置示意图

## 2 模型建立

本文通过建立倾斜面太阳辐射计算模型和太阳能电池输出功率模型,基于中国建筑热环境分析专用气象数据集的水平面太阳辐射逐时数据,计算倾斜面逐时太阳辐射,并进一步计算太阳能电池逐时发电功率,从而确定不同地区太阳能板的最佳倾角,研究技术路线如图2所示。

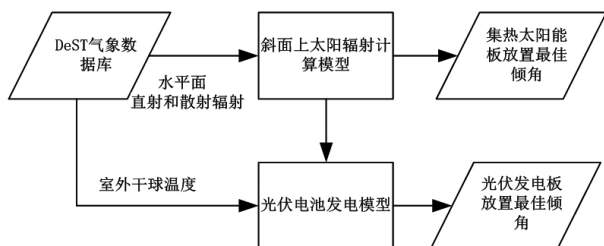


图2 技术路线

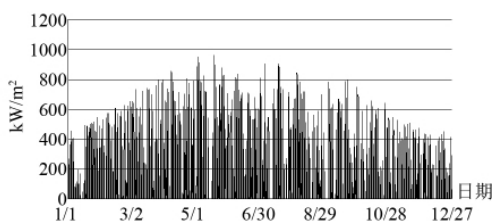


图3 北京典型年水平面直射辐射

### 2.1 气象参数

中国建筑热环境分析专用气象数据集是以中国气象局气象信息中心气象资料室提供的全国270个地面气象站1971~2003年气象观测数据为基础,选

择12个具有代表性气候状况的月份组成代表性气象年,以充分反映长期的气象变化规律<sup>[5]</sup>,北京地区典型年水平面直射辐射如图3所示。

### 2.2 倾斜面太阳辐射计算模型

在已知水平面直射和散射辐射条件下,需要根据太阳高度角和方位角计算倾斜面辐射总量。水平面太阳辐射总量 $H$ 由直接辐射量 $H_b$ 和天空散射辐射量 $H_d$ 组成,而倾斜面太阳辐射总量 $H_T$ 则由直接辐射量 $H_{bT}$ 、天空散射辐射量 $H_{dT}$ 和地面反射辐射量 $H_{rT}$ 三部分组成。文献<sup>[2,3]</sup>采用了天空散射各向异性Hay模型,但该模型计算时间步长为一天,无法计算倾斜面逐时太阳辐射量,且天空散射各向异性对年最佳倾角影响非常有限。在散射辐射和地面反射均各向同性的假设下,计算倾斜面太阳辐射的数学模型如下<sup>[4,6]</sup>:

倾角为 $\beta$ 倾斜面太阳辐射强度为:

$$H_T = H_b R_b + \frac{1}{2} H_d (1 + \cos\beta) + \frac{1}{2} \rho H (1 - \cos\beta) \quad (1)$$

其中, $R_b$ 为倾斜面与水平面直接辐射量之比,由以下表达式确定。

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\varphi - \beta) \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta \cos\omega + \sin\varphi \sin\delta} \quad (2)$$

$$\delta = 23.5 \sin[360 \times (284 + n) / 365] \quad (3)$$

式中, $\varphi$ ——当地纬度; $\delta$ ——太阳赤纬; $\omega$ ——时角; $n$ ——一年中从元旦算起的天数; $\rho$ ——地面反射率,一般情况下取0.2。

根据水平面辐射和当地纬度,由(1)(2)(3)式可以计算该地区朝向赤道放置倾斜角为 $\beta$ 倾斜面太阳辐射。

### 2.3 光伏电池电力输出模型

光伏电池是一种能有效地吸收太阳辐射能,并使之转变成电能的半导体器件,其发电原理主要是半导体的光电效应。

光伏电池输出具有非线性特征,受光照强度、环境温度和负载等影响。在一定的光照强度和环境温度下,光伏电池可以工作在不同的输出电压,但是只有在某个输出电压时,其输出功率才能达到最大值。在最大输出功率条件下,对于并网光伏发电系统,输出功率大小主要受光照强度、环境温度的影响。其中,光伏电池实际输出功率主要取决于光照强度:白

天光照强度最大时,其输出功率最大;而夜晚几乎无光照,其输出功率基本为零。光伏电池的输出功率随着表面温度的上升而下降,因此,当光伏电池表面温度过高时需要用通风等手段来降低温度来提高电池的光电转换效率<sup>[4]</sup>。光伏电池的温度特性一般用温度系数表示,温度系数小表示即使温度较高,但输出功率的变化较小,光伏电池板温度  $T$  可表示为<sup>[7]</sup>:

$$T = T_E + KH_l \quad (4)$$

式中,  $T_E$ ——环境温度, K;  $H_l$ ——光照强度,  $W/m^2$ 。  $K$  根据大量试验数据可取为  $0.03 (K \cdot m^2) / W$ 。

国内外学者对光伏电池输出特性已经做了大量的研究,也提出了不少电性能模型。如 Sandia 国家实验室(SNL, Sandia National Laboratories)开发的 Sandia 模型是包含一系列经验关系式的电性能模型,这些经验关系式中的参数都由实际测量中得到的实验数据拟合而得。在 Sandia 模型中考虑了直射太阳辐射、散射太阳辐射、直射太阳辐射入射角、太阳天顶角、室外温度、风速和高度等因素<sup>[8]</sup>。虽然这是一个比较完善的光伏电池电力输出模型,但该模型过于复杂,输入参数过多,且不少输入参数的逐时数据目前无法获得。对于并网光伏发电系统,光照强度是影响光伏电池电力输出的最显著因素,其次是温度,因此采用基于实测数据的简单模型<sup>[4]</sup>。

$$E = H_l [c_1 + c_2 (T - 273.15)] / H_f A \quad (5)$$

式中  $E$ ——光伏电池模块的电力输出,  $W/m^2$ ;  $H_l$ ——入射太阳辐射强度,  $W/m^2$ ;  $T$ ——光伏电池表面温度, K;  $c_1$ ——实验标定常数, W;  $c_2$ ——光伏电池的温度系数,  $W/K$ ;  $H_f$ ——标定时的太阳辐射强度,  $W/m^2$ ;  $A$ ——光伏电池模块面积,  $m^2$ 。

### 3 数值模拟结果

为确定某一纬度上太阳能板放置的最佳倾角,通过计算分析在各种倾角条件下倾斜面全年太阳辐射总量和光伏电池发电量,从而确定其放置最佳倾角。输入参数包括室外干球温度、水平面直射辐射和水平面散射辐射,光伏电池电力模型中实验标定常数取  $c_1 = 66.42 W$ ,光伏电池的温度系数  $c_2 = -0.244 W/K$ <sup>[4]</sup>。

下面以北京地区为例,说明确定最佳倾角的方法。

#### 3.1 倾斜面太阳辐射日变化曲线

1月4日,北京倾斜面太阳辐射随倾斜角  $\beta$  变化规律如图4所示,此时太阳直射点位于南半球,太阳高度角低,因此,太阳辐射随着倾斜角  $\beta$  的增大而增大,约在  $\beta = 70^\circ$  达到最大值。7月3日,倾斜面太阳辐射随倾斜角  $\beta$  变化规律如图5所示,此时太阳直射点在北半球,太阳高度角高,因此太阳辐射约在  $\beta = 10^\circ$  达到最大值。

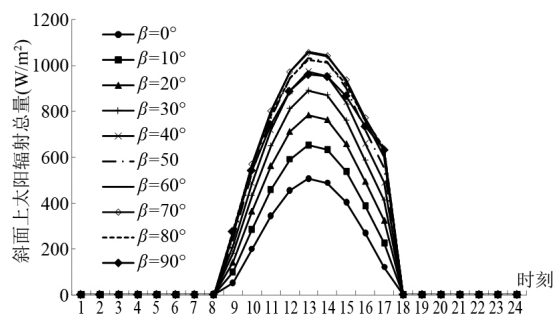


图4 北京倾斜面逐时太阳辐射(1月4日)

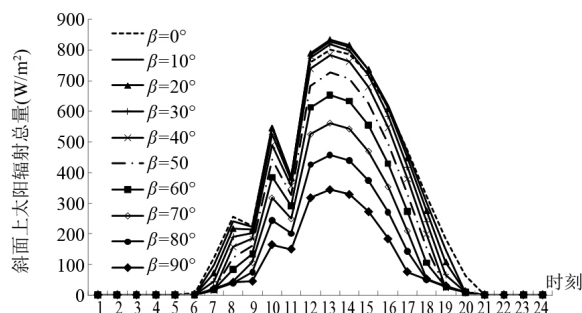


图5 北京倾斜面逐时太阳辐射(7月3日)

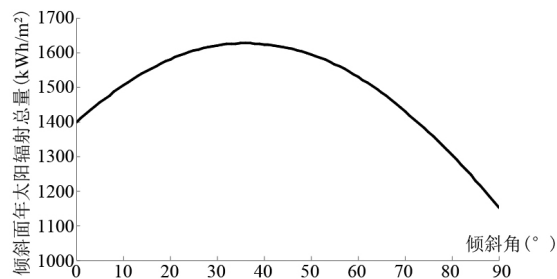


图6 北京倾斜面年太阳辐射随倾斜角变化

#### 3.2 年太阳辐射随倾斜角变化曲线

北京地区倾斜面年太阳辐射随倾斜角变化曲线如图6所示,其大小先随倾斜角  $\beta$  增大而增大而后减小,约在  $\beta = 36^\circ$  达到最大值,与当地纬度相差  $4^\circ$ ,

此时全年太阳辐射总量为  $1629 \text{ kWh/m}^2$ 。

### 3.3 光伏电池日发电量变化曲线

3月7日,北京地区光伏电池板在不同倾斜角下的逐时发电量如图7所示,变化趋势基本与太阳辐射强度一致,在最佳倾角下,全天发电量变化范围为  $0 \sim 120 \text{ W/m}^2$ ,在正午  $12:00 \sim 13:00$  发电量达到最大值。

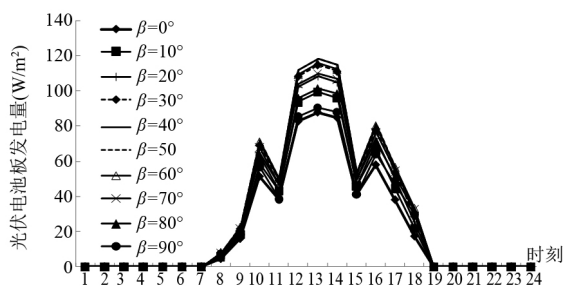


图7 北京光伏板逐时发电量(3月7日)

### 3.4 光伏板年发电量随倾斜角变化曲线

北京地区光伏板年发电量随倾斜角变化曲线如图8所示,约在  $\beta = 37^\circ$  达到最大值,与当地纬度相差  $3^\circ$ ,此时年发电量为  $191.7 \text{ kWh/m}^2$ ,年平均发电效率为  $11.77\%$ 。

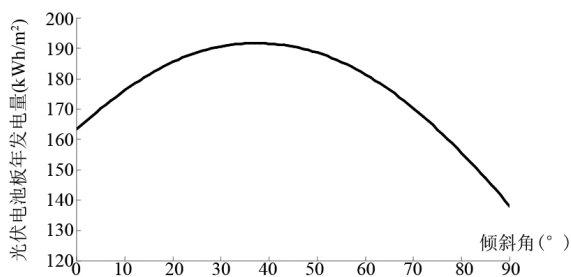


图8 光伏板年发电量随倾斜角变化

表1 部分地区太阳能板放置年最佳倾角

城市	广州	上海	北京	哈尔滨	拉萨
北纬/ $^\circ$	23.17	31.20	39.90	45.75	29.65
直射辐射百分比/%	35.2	51.7	62.0	64.0	79.7
水平面上太阳辐射/ $\text{kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	1137	1271	1401	1274	2033
斜面上太阳辐射/ $\text{kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	1166	1369	1629	1522	2342
集热装置最佳倾角/ $^\circ$	17	27	36	39	33
光伏发电最佳倾角/ $^\circ$	17	28	37	40	34

## 4 年最佳倾角影响因素分析

通过文中所述模型对我国部分地区太阳能板放

置的年最佳倾角进行计算,结果如表1所示。

可以看到:

(1) 年最佳倾角大小主要受纬度影响,大多数城市年最佳倾角略小于所在纬度,如北京、上海年最佳倾角比各自纬度约小  $4^\circ$ ,广州、哈尔滨年最佳倾角比其纬度约小  $6^\circ$ ,拉萨年最佳倾角大于所在纬度约  $3^\circ$ 。

(2) 此外,太阳直射辐射和散射辐射的全年变化状况也是重要的影响因素,如拉萨和上海纬度相近,但年最佳倾角相差很大。由于大气透明度、云层遮挡等原因,各地区太阳直射辐射量占总辐射比例有很大的不同,如上海直射辐射量占总辐射的  $51.7\%$ ,拉萨直射辐射量占  $79.7\%$ 。上海、拉萨倾斜面年直射和散射总量随倾斜角变化曲线分别如图9和10所示,上海直射辐射大小与散射辐射相近,但拉萨散射辐射大小远小于直射辐射,对年最佳倾角的影响可忽略。如果仅考虑直射辐射,上海、拉萨两地的年最佳倾角均为  $33^\circ$ ,但由于上海散射辐射占总辐射比例较大,且散射辐射的年最佳倾角随着倾斜角的增大而减少,所以其总辐射年最佳倾角小于所在纬度。从计算结果来看,直射辐射比重越大,一般太阳能板放置年最佳倾角越接近所在纬度或大于纬度。

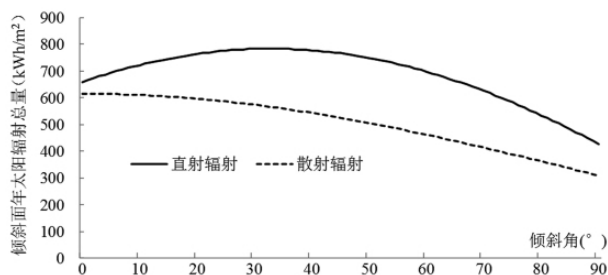


图9 上海倾斜面年太阳辐射随倾斜角变化

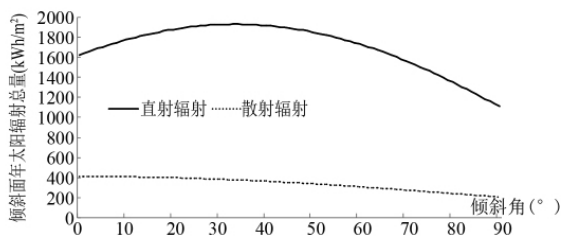


图10 拉萨倾斜面年太阳辐射随倾斜角变化

(3) 此外,直射辐射全年小时数、太阳辐射逐时分配等也是年最佳倾角的影响因素。太阳辐射强度

是光伏电池发电量大小的最主要影响因素,基于本文的光伏电池电力输出模型,光伏发电年最佳倾角与热利用的年最佳倾角相等或略大 $1^{\circ}$ 。

## 5 结语

在已有太阳能板安装最佳倾角相关文献的基础上,本文基于中国建筑热环境分析专用气象数据集,提出了计算逐时太阳辐射的一种新思路。通过我国部分地区太阳能板放置年最佳倾角的数值计算,得出除纬度外,太阳直射辐射和散射辐射的全年变化状况也是年最佳倾角的重要影响因素,为各地太阳能板的安装角度提供了设计参考。此外,在倾斜面太阳辐射计算的基础上,基于某种光伏电池的输出功率模型,进一步提出了光伏板的最佳安装倾角计算方法,并对结果进行了对比分析,也为应用其他光伏电池电力输出模型计算最佳安装倾角打下了基础。

## [参考文献]

- [1] (日) 过高辉,等. 太阳能电池[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 111.
- [2] 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 年 7 月, 36(7).
- [3] 顾超,崔容强. 独立光伏系统最佳倾角计算新方法[J]. 电源技术, 2005, 77(1).
- [4] 季杰,何伟. 光伏墙体年发电性能及年得热动态预测[J]. 太阳能学报, 2001 年 7 月, 22(3).
- [5] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学著. 中国建筑热环境专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [6] Klein S A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces [J]. Solar Energy, 1977, 19 (4): 325 ~ 329.
- [7] 王长江. 基本 MATLAB 的光伏电池通用数学模型[J]. 电力科学与工程, 2009 年 4 月, 25(4).
- [8] EnergyPlus Engineering Reference [R], October 11, 2010, 1037 ~ 1040.
- (上接第 276 页)
- [8] 国家发改委,财政部. 节能服务公司备案名单(第一批). 2010 年,第 22 号.
- [9] 国家发改委,财政部. 节能服务公司备案名单(第二批). 2011 年,第 3 号.
- [10] 国家发改委,财政部. 节能服务公司备案名单(第三批). 2011 年,第 19 号.
- [11] 中华人民共和国住建部. 国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测系统分项能耗数据采集技术导则, 2008.
- [12] 王鑫. 公共建筑用能分项计量综合关键技术研究[博士学位论文][D]. 北京: 清华大学建筑技术科学系, 2010.
- [13] 王远. 大型公共建筑用电分项计量方法研究[硕士学位论文][D]. 北京: 清华大学建筑技术科学系, 2008.
- [14] 李俊. 基于分项计量系统的建筑能耗拆分与节能潜力分析研究[硕士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2008.