

DOI: 10.3785/j.issn.1006-754X.2009.05.008

# 固定式太阳能光伏板最佳倾角设计方法研究

韩 斐, 潘玉良, 苏忠贤

(杭州电子科技大学 机电工程研究所, 浙江 杭州 310018)

**摘 要:** 为实现太阳能光伏板最佳倾角的设计及优化, 通过 Matlab 建立倾斜放置的光伏板表面接收太阳辐射能模型, 计算得到光伏板上的辐射能, 推导出光伏板的年最佳倾角和季节最佳倾角. 为使光伏板最大限度地接收太阳辐射能, 在对传统季节区段重新划分的基础上, 优化了季节最佳倾角. 结合杭州本地情况, 实测光伏板接收的太阳能日辐射量, 对不同倾角下的日辐射能进行计算和分析. 研究表明, 根据季节调整倾角的光伏板接收的年辐射能, 与水平和年最佳倾角放置的光伏板相比, 分别提高了 11.5% 和 4.1%, 水平光伏板辐射能的理论值与实验值误差在 5% 以内, 完全能满足一般太阳能工程研究的需要.

**关键词:** 太阳能; 太阳辐射模型; 最佳倾角

中图分类号: TM 615

文献标志码: A

文章编号: 1006-754X(2009)05-0348-06

## Research on optimal tilt angle of fixed PV panel

HAN Fei, PAN Yur liang, SU Zhong-xian

(Institute of Mechatronic Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To design and optimize an optimal tilt angle, solar radiation, annual optimal tilt angle and seasonal optimal tilt angles of the PV module were calculated through the solar radiation model by Matlab. The seasonal tilt angles of the PV module were optimized after re-dividing the season span to make the solar radiation of the PV model maximum. According to the local condition of Hangzhou, daily solar radiation at different tilt angles was calculated and analyzed. A large number of experiments conducted by TRM-FD1 type of PV power testing system proved the feasibility of the proposed method. The experiments show that, the PV model at seasonal angle can enhance solar radiation by 11.5% and 4.1% compared to that at level and annual tilt respectively. For the solar radiation of level PV model, the calculated results agree with the measured data well, and the relative error is less than 5%, which is accurate enough for solar energy engineering design and research. Validation result indicates that this model is reasonable and applicable.

**Key words:** solar energy; solar radiation model; optimum tilt angle

太阳以辐射的形式向地球持续不断地输送能量, 是地球生物和各种物理过程获取能量的主要源泉之一. 太阳辐射强度在地球大气层外界是基本不变的, 但是到达地球表面的辐射变化很大. 即使是在同一地点, 不同倾角接收面上所获得的太阳辐射能也有很大差异. 通常情况下, 固定式太阳能光伏板都

是与水平面成一定角度放置, 以求获得最大的太阳辐射量. 不同的倾角, 光伏板上接收到的太阳辐射量差别很大. 所以选择最佳的倾角是太阳能工程设计的关键之一<sup>[1]</sup>.

一般气象台站提供的只是水平面上的太阳辐射资料, 需要通过比较复杂的计算来确定倾斜面上的

收稿日期: 2009-03-11.

基金项目: 浙江省科技计划重点项目资助(2006C21053).

作者简介: 韩斐(1984—), 女, 山东济宁人, 硕士生, 从事光伏发电研究. E-mail: hanfei541@126.com.

通信联系人: 潘玉良, 副教授, 硕士生导师. E-mail: ylpn001@126.com.

太阳辐射量, 通常是采用 Klein<sup>[2]</sup> 总结的计算方法, 并认为天空散射辐射是均匀分布的, 显然这是不严格的; 后来 Hay<sup>[3]</sup> 提出了天空散射辐射各向异性的模型. 本文借鉴国内外太阳能辐射计算的公式, 建立倾斜放置的太阳能电板上接收太阳辐射能的模型, 对杭州地区固定式太阳能光伏板的最佳倾角进行了计算分析及优化.

1 模型的建立

本文在全晴天假设的基础上, 建立倾斜放置的光伏板表面太阳辐射能数学模型, 系统框图如图 1 所示.

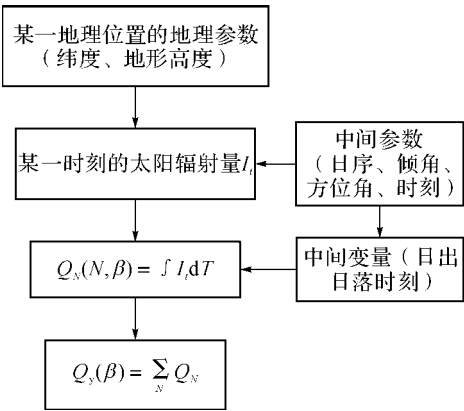


图 1 模型的系统框图  
Fig. 1 Diagram of system model

给定某地的地理参数(包括纬度  $\varphi$ 、地形高度  $h$  等)以及中间参数(日序  $N$ 、光伏板的倾角  $\beta$ 、方位角  $\gamma$  和时刻  $T$ ), 可以得到瞬时时刻太阳能光伏板表面的辐射量  $I_t$  和日出、日落时刻( $T_{sr}, T_{ss}$ )等中间变量; 将  $I_t$  关于  $T$  ( $T_{sr} \rightarrow T_{ss}$ ) 积分得到某一天的日辐射总量  $Q_N(N, \beta)$ , 再将  $Q_N(N, \beta)$  关于  $N$  累加得到太阳能光伏板表面的年累计辐射量  $Q_Y(\beta)$ .

1.1 基本参数的确定

计算地球表面任一点的太阳辐射量, 需要确定一些基本的天文参数, 主要包括地球表层大气外界上空的垂直太阳辐射强度、赤纬、太阳高度角、太阳方位角和日出日落时刻等.

1.1.1 大气层外的太阳辐射强度( $I_0$ )

当太阳光垂直入射在大气上界时, 其太阳辐射强度

$$I_0 = S_0(1 + 0.033\cos(2\pi \cdot \frac{N}{365})) \tag{1}$$

式中:  $S_0$  为太阳辐射常数, 是地球大气上界垂直于太阳直射方向单位面积上的太阳辐射通量, 取  $S_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ ;  $N$  为日序, 即一年中从元旦算起的天数.

1.1.2 太阳赤纬角( $\delta$ )和时角( $\omega_s$ )

日地中心连线与赤道的夹角称为赤纬角, 赤道以北为正、南为负, 变化范围为  $-23.5^\circ \sim +23.5^\circ$ , 可由 Cooper 近似公式得到

$$\delta = \frac{2\pi \cdot 23.45^\circ}{360^\circ} \sin(2\pi \cdot \frac{284 + N}{365}) \tag{2}$$

时角  $\omega_s$  描述太阳在一天内的变化情况, 在当地时间( $T$ )正午时为 0, 每走经度 1 h 为  $15^\circ$ , 上午为正, 下午为负, 即

$$\omega_s = \frac{2\pi \cdot 15^\circ}{360^\circ} (T - 12) \tag{3}$$

1.1.3 日出、日落时刻( $T_{sr}, T_{ss}$ )

日出、日落时刻, 水平面上太阳高度角为 0, 即  $\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega_0$  式中,  $\omega_0$  为水平面上日出、日落时角.

求解(4)式, 得

$$\omega_0 = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \tag{5}$$

在北半球, 纬度为  $\varphi$ 、朝向正南、与水平面成  $\beta$  倾斜角的太阳能电池板上, 太阳光的入射角  $\theta$  与纬度为  $(\varphi - \beta)$  的水平面上太阳光入射角是相等的, 即

$$\cos \theta = \sin(\varphi - \beta) \sin \delta + \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega_e \tag{6}$$

式中  $\omega_e$  为倾斜面上日出、日落时角,

$$\omega_e = \arccos(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta) \tag{7}$$

综合考虑式(4)至式(7), 得到

$$\omega_e = \min \begin{cases} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \\ \arccos(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta) \end{cases} \tag{8}$$

由此得到倾斜面上日出日落时刻:

$$T_{sr} = 12(1 - \frac{\omega_e}{15}) \tag{9}$$

$$T_{ss} = 12(1 + \frac{\omega_e}{15}) \tag{10}$$

1.1.4 太阳直射和散射透明度系数( $\tau_b, \tau_d$ )

1978 年, Kretith 和 Kreider<sup>[4]</sup> 提出了一个晴朗无云条件下, 计算直接辐射透明度系数( $\tau_b$ )的经验公式:

$$\tau_b = 0.56(e^{-0.56AM_h} + e^{-0.095AM_h}) \tag{11}$$

上式中,  $AM_h$  表示一定地形高度下的大气量, 计算公式为

$$AM_h = AM_0 \cdot \frac{p_h}{p_0} \tag{12}$$

$AM_0$  为海平面上的大气量, 其值取决于太阳高度角,

$$AM_0 = (1229 + (614 \sin \alpha)^2)^{1/2} - 614 \sin \alpha \tag{13}$$

$p_h/p_0$  是大气修正系数, 与当地海拔高度  $h$  有关.

$$\frac{p_h}{p_0} = \left( \frac{288 - 0.0065 \cdot h}{288} \right)^{5.256} \quad (14)$$

散射辐射  $\tau_d$  与直接辐射  $\tau_b$  存在线性关系<sup>[5]</sup>:

$$\tau_d = 0.271 - 0.294\tau_b \quad (15)$$

1.2 倾斜放置的太阳能光伏板上太阳总辐射能的计算

倾斜放置的太阳能光伏板的朝向可分为朝向赤道和任意方向两种, 在相同倾角的情况下, 前者斜面接收的辐射能要大于后者<sup>[4]</sup>. 本文只讨论前一种情况.

某一时刻, 倾斜放置的太阳能光伏板上接收的总辐射能( $I_t$ )主要由直接辐射( $I_b$ )、散射辐射( $I_d$ )和反射辐射( $I_r$ )三部分组成<sup>[5]</sup>, 即

$$I_t = I_b + I_d + I_r \quad (16)$$

由于太阳能单晶硅电池光谱响应主要集中在短波区, 而地表的反射辐射主要以长波辐射为主, 所以很大一部分的地面反射辐射对太阳能硅电池来说是无效的. 因此, 在以下讨论中, 将上式倾斜放置太阳能光伏板的瞬时总辐射能改写为

$$I_t = I_b + I_d \quad (17)$$

上式中, 电池板上太阳瞬时直接辐射能

$$I_b = I_0 \tau_b \cos \theta \quad (18)$$

电池板上瞬时太阳散射辐射

$$I_d = I_0 \tau_d \frac{\cos^2 \beta}{2 \sin \alpha} \quad (19)$$

1 天内, 电池板表面接收的总辐射能

$$Q_N = \int_{T_{sr}}^{T_{ss}} I_t dT = Q_B + Q_D \quad (20)$$

式中:  $Q_B$  为日直接辐射能,  $Q_B = \int_{T_{sr}}^{T_{ss}} I_b dT$ ;

$Q_D$  为日散射辐射能,  $Q_D = \int_{T_{sr}}^{T_{ss}} I_d dT$ .

1 年内, 电池板表面接收的总辐射能

$$Q_y = \sum_N Q_N \quad (21)$$

2 最佳倾角设计

在理论上, 给定地理纬度、地形高度等参数以后, 倾角为  $\beta$  的太阳能光伏板表面 1 年内接收的总辐射  $Q_y$  是一个关于变量  $\beta$  的函数  $Q_y(\beta)$ , 对  $Q_y(\beta)$  关于变量  $\beta$  求导并取值为 0, 即

$$\frac{dQ_y(\beta)}{d\beta} = 0 \quad (22)$$

求解方程(22), 即可得到年最佳倾角  $\beta_y$ .

2.1 计算流程图

为简化计算, 用 Matlab 编程将  $\beta$  量化成  $0 \sim 90^\circ$ , 增量为  $1^\circ$ , 利用辛普森法计算在各个  $\beta$  值下的  $Q_y(\beta)$  的值, 从中挑选使  $Q_y(\beta)$  最大的  $\beta$  为  $\beta_y$  的近似

值, 这样的近似取值已基本满足工程计算的精度要求. 图 2 所示为晴天太阳辐射能模型编程计算框图.

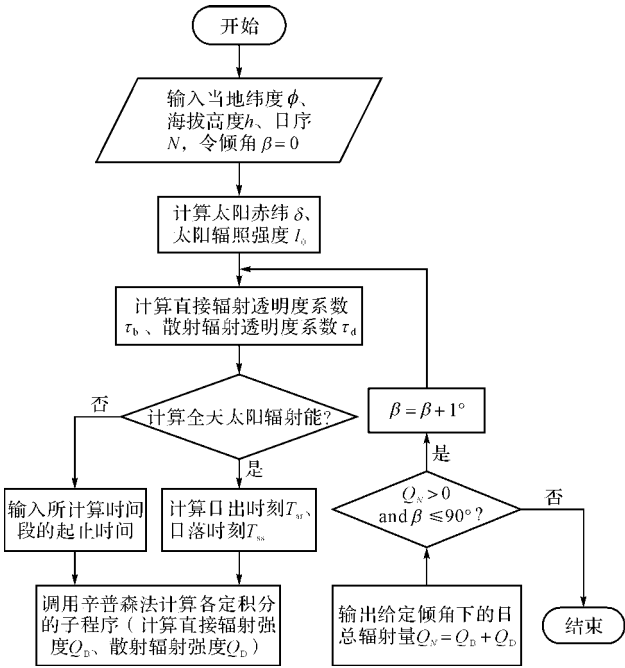


图 2 晴天太阳辐射能模型计算流程图

Fig. 2 Calculation flowchart of clear day solar radiation model

2.2 年最佳倾角设计

以杭州为例, 当地的地理纬度  $\varphi = 30^\circ$ , 海拔高度  $h = 41.7$  m. 由该方法计算得到的年最佳倾角  $\beta = 27^\circ$ . 图 3 显示  $\beta = 0^\circ, 27^\circ, 30^\circ$  时太阳能光伏板上接收太阳辐射能的情况. 同水平放置的太阳能电板相比,  $\beta = 27^\circ$  的太阳能电板表面接收的年辐射量可以提高 8% 左右.

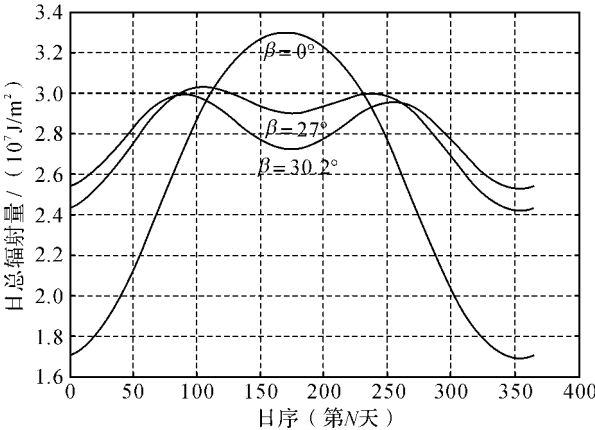


图 3 不同倾角下的太阳辐射能

Fig. 3 Solar radiation of different tilt angles

另外, 由该方法得出的计算结果(精确到个位)与日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)《发电基础调查》的数据相比, 比较吻合, 如表 1 所示.

表 1 结果对比

Table 1 The result comparison

地名(经度, 海拔)	NEDO《发电量基础调查》的结果	本文计算结果
札幌(纬度: 43° 3', 海拔: 17 m)	35° 4'	35°
青森(纬度: 40° 49', 海拔: 3 m)	29° 2'	34°
仙台(纬度: 38° 16', 海拔: 39 m)	33° 8'	33°
东京(纬度: 35° 41', 海拔: 5 m)	32°	30°
横滨(纬度: 35° 41', 海拔: 39 m)	31° 5'	31°
名古屋(纬度: 35° 10', 海拔: 51 m)	32° 1'	31°

2.3 季节最佳倾角设计

以季节为单位, 将太阳能电板表面接收的年辐射能分成 4 个部分, 即

$$Q_{si}(\beta) = \sum_{N_i} Q_{N_i} (i = 1, 2, 3, 4) \quad (23)$$

对  $Q_{si}$  关于变量  $\beta$  求导并取值为 0, 即

$$\frac{dQ_{si}}{d\beta} = 0 \quad (24)$$

可求得季节最佳倾角. 上式中,  $i$  为季节序数,  $Q_{si}$  是季节辐射总量. 春、夏、秋、冬四季的划分分别以春分、夏至、秋分、冬至为中点, 前后各延长 45 d, 即  $N_1$ : 第 35 天—第 125 天,  $N_2$ : 第 126 天—第 216 天,  $N_3$ : 第 217 天—第 307 天,  $N_4$ : 第 308 天—第 365 天和第 1 天—第 34 天. 图 4 为在各最佳季节倾角下, 一年内太阳能板表面接收到的辐射能情况.

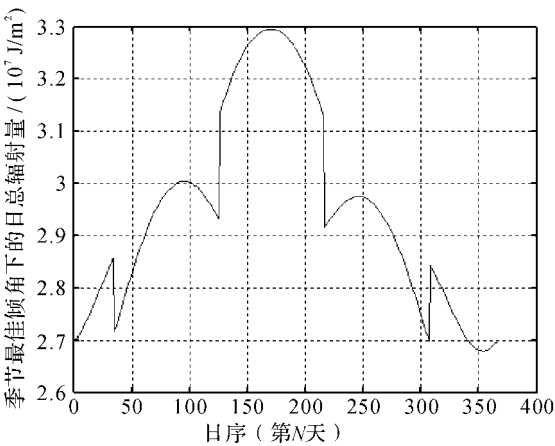


图 4 季节最佳倾角下的日辐射能

Fig. 4 Solar radiation at seasonal tilt angles

从图 4 可以看到, 太阳能光伏板表面接收的日辐射能在各最佳季节倾角下分布曲线是不连续的. 如果严格按照传统意义上的季节划分来确定太阳能光伏板的最佳季节倾角, 最终得到的结果并非是最优情况. 为此, 对传统四季时间段重新划分, 得到一年 4 个区间如下:

$N_1$ : 第 71 天—第 112 天,  $N_2$ : 第 113 天—第

230 天,  $N_3$ : 第 231 天—第 271 天,  $N_4$ : 第 272 天—第 365 天和第 1 天—第 70 天.

利用上述方法, 得到新的季节最佳倾角分别为:

$$\beta_{s1} = 26^\circ \quad \beta_{s2} = 2^\circ \quad \beta_{s3} = 26^\circ \quad \beta_{s4} = 50^\circ$$

图 5 为新的各季节最佳倾角下, 一年内太阳能板表面接收到的辐射能情况.

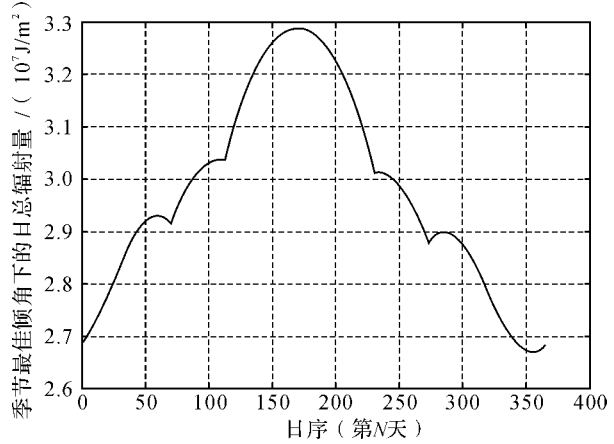


图 5 优化季节最佳倾角下的日辐射能

Fig. 5 Solar radiation at optimum seasonal tilt angles

将图 4 和图 5 的曲线相比较, 显然后者更光滑, 同时后者得到的辐射总量要多于前者. 与水平放置和  $\beta = 27^\circ$  的太阳能光伏板相比, 倾角随季节调整的太阳能电板表面接收的辐射能分别提高了 12% 和 5% 左右.

3 实例分析

挑选 3 块性能相同的太阳能光伏板 (TDB60-38-P) A, B, C, 其中: A 置于水平面 ( $\beta = 0^\circ$ ) 上; B 面向赤道, 与水平面呈年最佳倾角 ( $\beta = 27^\circ$ ) 固定安装; C 面向赤道并可按最佳季节倾角 ( $\beta = 26^\circ, 2^\circ, 26^\circ, 25^\circ$ ) 进行调整.

3.1 模型准确性验证

通过 TRM-FDI 型太阳能发电测试系统, 实测杭州地区 8 月 1 日光伏板 A 接收的太阳能数据, 并将其

与计算值比较. 图 6 为所用太阳能测试系统装置, 图 7 为光伏板 A 各个时刻接收到的太阳辐射能.



图 6 太阳能测试系统

Fig. 6 Solar energy testing system

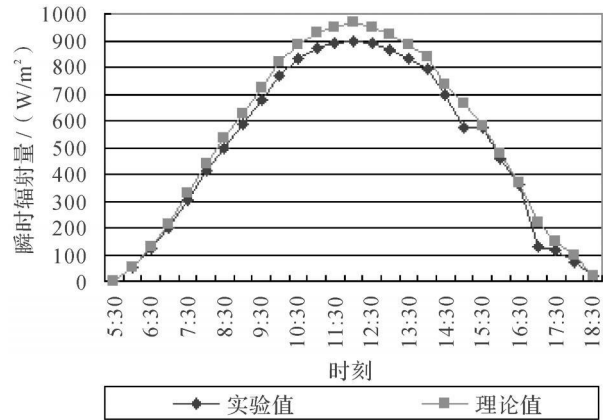


图 7 光伏板 A 接收太阳辐射能理论值和实验值的对比

Fig. 7 The comparison between theoretical and experimental results on PV panel A

结果表明, 实测值与模型计算值的误差在5%~10% 范围内, 完全能满足一般工程计算需要.

3.2 最佳倾角设计可行性验证

为证明倾角设计方案的可行性, 根据杭州地区的太阳能辐射情况, 在一年的 12 个月中分别选取全晴天的典型日期(如表 2), 实测光伏板接收的太阳能日辐射量, 根据测量结果绘制全年的太阳能辐射曲线. 图 8 为实测得到的全年太阳能辐射曲线.

表 2 一年中各月所取的典型日期

Table 2 Typical data per month in a year

月份	1	2	3	4	5	6
日期	15	16	15	15	15	15
日序(第 N 天)	15	47	64	105	135	166
月份	7	8	9	10	11	12
日期	17	16	15	15	15	10
日序(第 N 天)	198	228	258	288	319	344

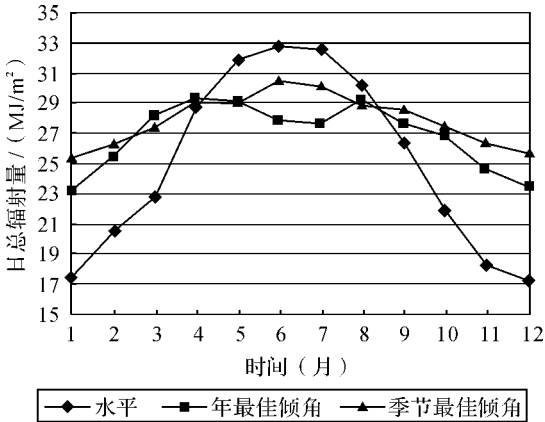


图 8 全年太阳能辐射曲线

Fig. 8 Solar radiation curve in a year

从图中可以看出, 实测日总辐射曲线与上文理论分析结果基本一致. 通过具体计算得到: 同水平放置的太阳能电板相比, 年最佳倾角( $\beta=27^\circ$ )下, 太阳能光伏板表面年辐射量提高 7.2%; 与水平放置和年最佳倾角( $\beta=27^\circ$ )的太阳能光伏板相比, 季节调整倾角的太阳能电板表面接收的年辐射能分别提高了 11.5% 和 4.1%.

4 结 论

1) 借鉴国内外已有的太阳辐射能计算方法, 在全晴天假设的基础上, 建立倾斜放置的光伏板表面太阳辐射模型, 采用 Matlab 编程得出太阳能光伏板的年最佳倾角和季节最佳倾角. 通过计算发现, 按照传统意义上的季节划分确定的季节倾角并非最佳情况. 在对一年四季重新划分的基础上, 对最佳季节倾角进行了优化.

2) 结合杭州地区太阳能辐射情况, 对晴天太阳辐射模型和倾角设计方法进行实验验证, 结果显示, 理论值与实验值符合较好, 完全可以满足一般工程要求. 对于非完全晴朗天气, 也可以采用该模型对某一段晴朗时间内的太阳辐射能进行计算.

3) 优化后的季节最佳倾角既可以应用于固定式太阳能光伏发电系统, 也可应用于极轴跟踪方式中南北方向的季节性调整. 只要在太阳能光伏板上安装简易调节装置就可实现一年四次的季节倾角调整.

参考文献:

[1] 常泽辉, 田瑞. 固定式太阳电池方阵最佳倾角的实验研究[J]. 电源技术, 2007, 31(4): 312-314.  
CHANG Ze hui, TIAN Rui. Experimental research on the optimum tilt angle of ficed solar cell panel[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2007, 31(4): 312-314.

[ 2 ] KLEIN S A. Calculation of monthly average insolation on tilted surface[ J]. Solar Energy, 1977, 19( 4): 325-329.

[ 3 ] HAY J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surface[ J]. Solar Energy, 1979, 23( 4): 301-307.

[ 4 ] KREITH F, KREIDER J F. Principles of solar engineering[ M]. New York: Mc Graw- Hill, 1978.

[ 5 ] LIU B Y H, JORDAN R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation[ J]. Solar Energy, 1960, 4( 3): 1-19.

[ 6 ] 杨金焕, 毛家俊, 陈中华. 不同方位倾斜面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 Jin huan, MAO Jia jun, CHEN Zhong hua. Calculation of solar radiation on variously oriented tilted surface and optimum tilt angle[ J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36( 7): 1032-1036.

[ 7 ] 邱国全, 夏艳军, 杨鸿毅. 晴天太阳辐射模型的优化计算[ J]. 太阳能学报, 2001, 22( 4): 456-460.

QIU Guo quan, XIA Yan jun, YANG Hong yi. An optimized clear day solar radiation model[ J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2001, 22( 4): 456-460.

( 上接第 347 页)

[ 3 ] 刘扬, 刘静, 杨国建, 等. 风道阀门流量性能的试验研究[ J]. 通用机械, 2008( 3): 67-70.

LIU Yang, LIU Jing, YANG Guo jian, et al. Experimental study on flux characteristics of wind tunnel valve[ J]. General Machinery, 2008( 3): 67-70.

[ 4 ] 王伟志, 刘学强. 平流层飞艇外形气动特性分析[ J]. 航天返回与遥感, 2007, 28( 3): 55-61.

WANG Wei zhi, LIU Xue qiang. Aerodynamic characteristics analyses of stratospheric airship[ J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, 28( 3): 55-61.

[ 5 ] 王钢林, 罗明强, 武哲. 临近空间浮空器总体参数的优化设计研究[ J]. 航天控制, 2008, 26( 2): 9-14.

WANG Gang lin, LUO Ming qiang, WU Zhe. Optimization on sizing of high altitude/long endurance airship[ J]. Aerospace Control, 2008, 26( 2): 9-14.

[ 6 ] 韩志刚. 一类复杂系统非建模控制方法的研究[ J]. 控制与决策, 2003, 18( 4): 398-402.

HAN Zhi gang. Study on non modelling control method for a class of complex systems[ J]. Control and Decision, 2003, 18( 4): 398-402.