

影响平板式光伏系统跟踪效果因素研究^{*}

陈 维, 沈 辉

(中山大学物理科学与工程技术学院 / 太阳能系统研究所, 广东 广州 510275)

摘 要: 通过对光伏组件平面辐照量、光伏组件特性的模拟计算, 对北京、广州、拉萨三个地区的双轴跟踪和固定布置时平板式光伏发电系统性能进行了研究。同时对光伏系统在不同负载下, 跟踪的意义进行了研究、讨论, 结果发现: 对于并网发电应用, 跟踪系统在北京、广州、拉萨使用都能取得好的效果, 其中以拉萨的效果最为明显; 对均衡型负载跟踪系统在北京和拉萨使用都有一定的效果, 而在广州效果较差; 对夏季型负载跟踪系统在北京和广州都能较大的增加产出, 而在拉萨效果却不好; 对冬季型负载, 跟踪系统在拉萨地区使用效果很理想, 在广州和北京作用却不明显。

关键词: 太阳能; 平板光伏系统; 跟踪系统

中图分类号: TK514 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 06-0034-05

太阳能电池方阵可分为平板式和聚光式两大类。一般来讲, 聚光式方阵为了使方阵在白天的任何时候都正对太阳, 必须使用跟踪系统。而平板式方阵不需要加汇聚阳光的装置, 结构简单, 只需把一定数量的太阳能电池按照电性能的要求串联、并联起来即可, 目前国内设计和研制的平板式光伏发电系统大多数采用固定安装方式, 这种方式虽然安装方便, 但是由于大部分时间太阳光不能直射, 因此太阳能利用率比较低。对太阳光进行跟踪, 能提高太阳能电池板的发电效率, 达到降低成本的目的^[1-3], 随着技术的发展, 跟踪系统的性能和可靠性都有了很大的提高, 而且跟踪系统的成本也在不断降低, 使得在光伏系统中广泛使用跟踪技术来提高光伏系统的性能成为可能。

在平板式光伏发电系统中是否进行跟踪, 许多因素需要考虑。本文通过模型计算, 对在不同地点双轴跟踪和固定布置时平板式光伏阵列接受的太阳辐照量和产出电能情况进行了比较、分析, 同时对在不同应用负载情况下, 采用平板式光伏系统跟踪的效果进行了研究。

1 模型计算

1.1 H_{av} 的天空散射各向异性模型

太阳能电池组件每小时的发电量由组件平面上每小时接受到的平均辐照量、环境温度和组件特性以及负载特性决定。由于太阳能电池方阵平面通常与地面成一定倾角, 在计算太阳能电池组件每小时的输出

时, 需要将水平面上实测的辐射强度数据折算到组件平面上的相应值。 H_{av} 的天空散射各向异性模型常用于此目的, 其表达式为:

$$H_t = H_b R_b + H_o [R_b H_b / H_o + 0.5(1 - H_b / H_o) \cdot (1 + \cos \beta)] + 0.5 \rho H (1 - \cos \beta) \quad (1)$$

$$R_b = \cos \theta_i / \cos \theta_z$$

$$\text{入射角: } \theta_i = \cos^{-1} [\cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos (\gamma_s - \gamma)]^{[5]}$$

$$\text{天顶角: } \theta_z = \cos^{-1} [\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cdot \cos \omega]^{[6]}$$

$$\text{太 阳 方 位 角: } \gamma_s = \sigma_{sw} * \sigma_{ns} * \sigma_{so} + \left[\frac{1 - \sigma_{sw} * \sigma_{ns}}{2} \right] * \sigma_{\omega} * 180^{[6]}$$

$$\text{式中: } \gamma_{\theta} = \sin^{-1} \left[\frac{\sin \omega \cos \delta}{\sin \theta_z} \right],$$

$$\sigma_{\omega} \begin{cases} 1 & |\omega| \leq \omega_b \\ -1 & \text{其他} \end{cases}, \sigma_{\phi} \begin{cases} 1 & \phi(\phi - \delta) \geq 0 \\ -1 & \text{其他} \end{cases}, \sigma_{\omega} \begin{cases} 1 & \omega \geq 0 \\ -1 & \text{其他} \end{cases}, \omega_{sw} = \arccos(\tan \delta / \tan \phi)$$

H_t 为倾斜面上的太阳总辐射强度; H 为水平面上的太阳总辐射强度; H_b 为水平面上的太阳直接辐射强度; H_o 为水平面上的天空散射辐射强度; H_o 为大气层外水平辐照量, $H_o = 1367 \text{ W/m}^2$; R_b 为倾斜面和水平面上直接辐照量的比值; β 为斜面倾角; ρ 为地物表面反射率; θ_i 为入射角, 太阳辐

* 收稿日期: 2006-12-26

基金项目: 国家十五科技攻关资助项目(2004BA411A09 2004BA411A19); 广东省科技计划资助项目(2004A11005002)

作者简介: 陈维 (1977年生) 男, 博士后; 通讯联系人: 沈辉, E-mail: shenhui1956@163.com

射与所研究表面法线间的夹角； θ_z 为太阳天顶角； ϕ 为纬度； δ 为赤纬，当天赤纬角为在太阳时正午，太阳光线与赤道平面的夹角； α 为太阳高度角； γ 为表面方位角，所研究表面法线水平面的投影与正北方向的夹角； γ_s 为太阳方位角，太阳辐射水平面的投影与正北方向的夹角。

通过上面公式（1）可以计算双轴跟踪、固定倾角安装（按当地纬度作为倾角布置）两种情况下的太阳电池组件平面每小时太阳辐照量。

1.2 太阳电池输出数学模型

太阳电池的特性方程是一个没有解析解的超越方程，不能直接用来计算太阳电池组件每小时的输出。在假设使用最大功率跟踪器时，太阳电池组件工作在最佳工作点，可以使用下面的公式计算太阳电池组件在最佳工作点时的电流、电压、功率^[7]。

$$I_{mp} = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{mp}-\Delta V}{C_2 \cdot V_{oc0}}\right) - 1 \right] \right\} + \Delta I$$
(2)

式中： $C_1 = (1 - I_{mp} / I_{sc}) \cdot \exp[-V_{mp} / (C_2 \cdot V_{oc0})]$
 $V_{mp} = V_{oc0} \cdot [1 + 0.0539 \lg(\frac{H_f}{1000})] + \beta_0 \cdot \Delta T$ (3)

$\Delta V = V_{mp} - V_{oc0}$;
 $\Delta I = \alpha_0 (\frac{H_f}{1000}) \cdot \Delta T + (\frac{H_f}{1000} - 1) \cdot I_{sc0}$;
 $\Delta T = T_{cell} - 25 \quad T_{cell} = T_A + 0.03 \cdot H_f$
太阳电池阵列工作在最大工作点时输出功率:

$$P_{mp} = I_{mp} \cdot V_{mp}$$
(4)

I_{sc0} 为标准测试条件下太阳电池阵列的短路电流； V_{oc0} 为标准测试条件下太阳电池阵列工作在最大工作点时输出电压； V_{oc0} 为标准测试条件下太阳电池阵列的开路电压； I_{mp} 为太阳电池阵列工作在最大工作点时输出电流； V_{mp} 为太阳电池阵列工作在最大工作点时输出电压； α_0 为太阳电池组件电流温度系数， $A/^{\circ}C$ ； β_0 为太阳电池组件电压温度系数， $V/^{\circ}C$

1.3 性能因子和太阳电池实际输出功率计算

在采用跟踪后，太阳电池组件产电的效率提高主要表现在两方面：减小直射光线的入射角和提高入射辐照度。

（1）当光线垂直入射时太阳电池组件的反射损失率通常只有 4%~5%，但是当入射光线的入射角度增加时，反射损失也会增加。太阳电池组件的朝向对散射光线不是很敏感，主要影响因素是太阳辐照中的直射部分。固定安装布置的太阳电池组件在早晚太阳光线的入射角都很大，而随着入射太

阳光线的入射角的增加，太阳电池组件上的光学损失将增大^[8-11]。如图 1（a）所示，我们使用性能因子 η_1 来表征在入射角对太阳电池组件输出效率的影响，当太阳光在组件上的入射角大于 60° 时，太阳电池组件的前表面玻璃的光学损失明显增加，是性能因子 η_1 快速减小。采用双轴跟踪时太阳光线基本是直射太阳电池组件平面，这样能极大的减少早晚太阳光斜射时太阳电池组件上的光学损失。

（2）固定安装布置的太阳电池组件在早晚由于太阳光的斜射，获得的太阳辐照量很低，从文献[12-14]可以看出，在低辐射时，太阳电池的效率有较大的降低。

如图 1（b）所示，我们使用性能因子 η_2 来表征辐照度对太阳电池输出效率的影响。在采用双轴跟踪后，在晴朗的天气下早、晚投射到太阳电池组件平面上的太阳辐照度比较固定安装时有较大的提高，因此在分析比较跟踪对固定安装优势时这也需要被考虑。

太阳电池组件实际输出功率：
$$P_{OUT} = P_{mp} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2$$
(5)

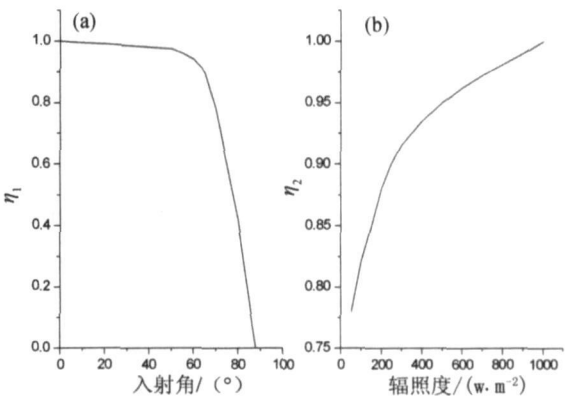


图 1 （a）性能因子 η_1 相对入射角的变化
（b）性能因子 η_2 相对辐照度变化
Fig 1 （a）Performance ratio η_1 relatives to the angle of incidence （b）Performance ratio η_2 relatives to the solar radiation

2 结果与分析

按照以上的计算模型对标准测试条件下，峰值功率 $P_{mp}=100\text{ W}$ ，峰值电压 $V_{mp}=17.5\text{ V}$ 峰值电流 $I_{mp}=5.71\text{ A}$ 的平板式太阳电池组件在北京（ $E16^{\circ}28'N39^{\circ}54'$ ）、广州（ $E13^{\circ}15'N23^{\circ}08'$ ）、拉萨（ $E91^{\circ}10'N29^{\circ}40'$ ）三个地区双轴跟踪和固定倾斜布置（太阳电池板朝南按当地纬度倾角布置）时性能进行了研究。图 2—4 是双轴跟踪与固

定安装平板式光伏系统在三个地区月平均太阳辐照量和产出电能变化曲线。从图中可以看出，采用跟踪后在三个地区全年各个月太阳辐照量和产出电能比固定安装时都有增加，其中以拉萨地区全年太阳辐照量和产出电能增幅最大，分别为 28.4%和 32.2%；广州地区的增幅最小，分别只有 15.5%和 18.4%。这是因为拉萨地区位于青藏高原，海拔高，大气洁净，空气干燥，太阳直射辐照量在太阳总辐照量中占的比例很大，因而跟踪效果很好。

从图 3 可以看出在广州，2—4 月采用跟踪后增幅很小，主要原因是 2—4 月是该地区的雨季，月

平均总太阳辐照量很低，而且这段时间主要是散射辐照为主，直射的比例很小，因此跟踪对太阳电池组件平面的太阳辐照量的增幅很小。同样拉萨的夏季 6—9 月多云雨天气，从表 1 可以看出这时在拉萨地区跟踪的效果最差。从表 1 还可以看出北京冬季的 12—1 月，跟踪的增幅明显小于在夏季的增幅。分析原因，主要是因为太阳直射点夏季在北半球，冬季在南半球，纬度高的地区就会出现白昼冬短夏长的现象。而且纬度越高，夏季时，白昼越长，冬季时，白昼越短，因而在较高纬度的北京地区，冬季时可跟踪利用的日照时间明显短于夏季。

表 1 采用跟踪相对固定安装时月平均太阳辐照量和产出电能增量

Tab 1 Comparison between different tracking and fixed PV modules performance

%

地点	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
广 辐照量	10.1	7.0	0.2	5.4	10.5	13.0	18.2	13.0	11.4	16.0	20.3	17.1
州 产出电能	14.2	9.5	1.1	6.5	15.1	18.7	26.0	17.8	15.8	21.8	29.6	23.0
北 辐照量	22.0	21.6	24.6	29.9	39.4	39.6	29.1	32	24.2	23.3	16.8	19.6
京 产出电能	25.1	24.2	27.7	34.1	44.9	46.2	34.9	36.3	28.4	26.7	20.4	22.4
拉 辐照量	34.9	28.3	30.5	35.5	28.3	19.0	20.9	19.0	17.5	23.9	31.6	36.4
萨 产出电能	38.6	31.3	34.0	40.3	32.9	21.6	24.8	22.8	21.6	26.7	34.7	40.8

在平板式光伏系统中是否进行跟踪，除了与当地的气候和地理位置（纬度、海拔）有关外，还与应用负载情况密切相关。光伏发电系统可以分为并网和独立发电系统，并网发电系统要求全年获得最大的产出电能；独立发电系统又根据负载用电要求不同分为均衡型和季节型负载，均衡型负载是指日均耗电量相同的负载，而季节性负载按照主要用电的特定时期又可分为夏季型和冬季型负载，它们分别是指负载用电主要是以夏季或冬季为主的负载。

并网应用时要求全年获得最大的产出电能，在采用跟踪后较固定安装时全年产出电能在这三个地区增幅都很大，其中在北京、拉萨增幅都在 30%以上，效果很明显。均衡型负载是指日均耗电量相同的负载，由于广州地区 2—4 月是雨季，主要以阴雨天为主，采用跟踪后太阳辐照度和发电量增幅都不是很大，其中在增幅最低的 3 月产出电能只增长了 1.1%，而采用跟踪却使全年月平均太阳辐照量和产出电能最大值与最低值相差更大，月产电最高值是最小值的 2.99 倍，使系统发电的均衡性变得更差，因此对均衡性负载，采用跟踪不能在很大程度上降低蓄电池和太阳电池组件的容量，减少系统成本。在北京和拉萨地区采用跟踪后也会使光伏系统发电的均衡性变差，但同时也使全年各个月的产

出电能都有较大的增长，因而在北京和拉萨地区，对均衡性负载供电时，采用跟踪后能在一定程度降低光伏系统的成本。

夏天型负载以光伏水泵、太阳能光伏冰箱为代表，夏天天气炎热，负载耗电量大，而冬季需求较小。从表 1 可以看出在北京和广州采用跟踪后夏季的产出电能增幅都很明显。在应用光伏水泵时，晴朗的夏天用户对供水的需求最大，此时跟踪后的增幅最大，而且光伏水泵工作时存在着一个扬水阈值，

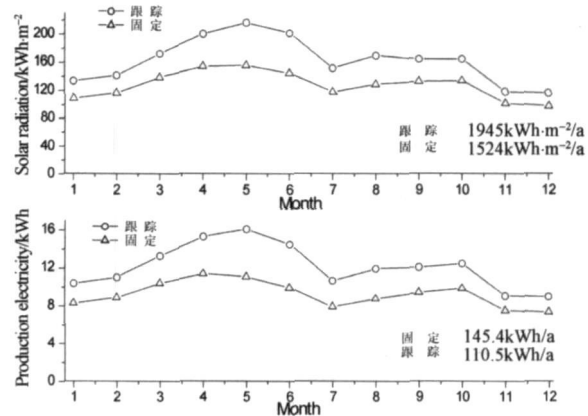


图 2 跟踪与固定安装太阳电池组件在北京地区月平均太阳辐照量和产出电能变化

Fig 2 Comparison between different tracking and fixed photovoltaic modules during one year in Beijing

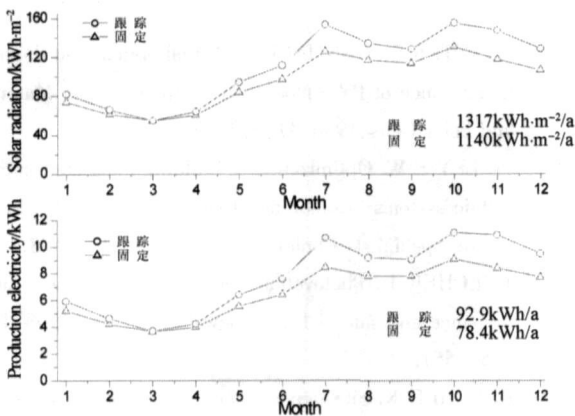


图 3 跟踪与固定安装太阳能电池组件在广州地区月平均太阳辐照量和产出电能变化

Fig. 3 Comparison between different tracking and fixed photovoltaic modules during one year in Guangzhou

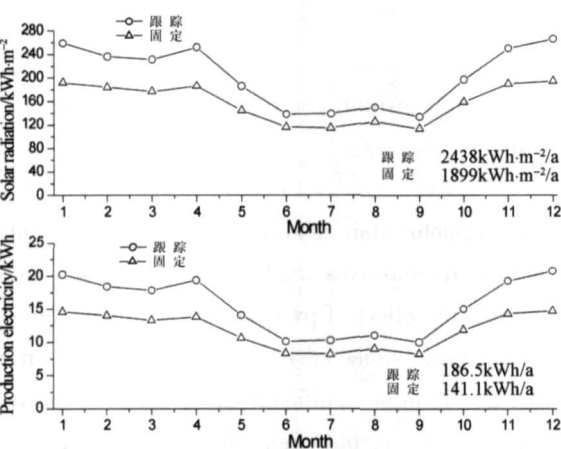


图 4 跟踪与固定安装太阳能电池组件在拉萨地区月平均太阳辐照量和产出电能变化

Fig. 4 Comparison between different tracking and fixed photovoltaic modules during one year in Lhasa

也就是只有当太阳辐照度达到某一值时，光伏水泵才开始扬水（相应于扬程为某一定值时），采用跟踪后，早、晚太阳电池组件的辐照度都有极大的提高，这样能够使水泵上午开始工作的时间得到提前，下午结束工作的时间得到推迟，做到早打水、多打水，因而在北京和广州地区采用跟踪对夏季型负载能极大的提高系统性能，降低系统配置成本，是比较理想的选择。拉萨的夏季 6—9 月多云雨天气，采用跟踪对夏季型负载效果不理想。

冬季型负载以光控太阳能路灯等为代表，在冬季要求工作时间更长和消耗更多的电能。在广州地区，虽然采用跟踪能使冬季的产出电能得到了一定的提高，然而在春季 2—4 月份的雨季，产出电能增幅很小，这也会使在太阳能路灯等冬季型负载中采用跟踪的意义不大。由于北京纬度较高，冬季的

日照时间较短，采用跟踪后产出电能增幅不是很大，而对于冬季需求更多电能的冬季型负载，采用跟踪作用就不是很理想。拉萨地区纬度不是很高，而且在冬季天气晴朗良好，使在冬季时采用跟踪后的增幅很大，从表 1 可以看到在一年中太阳辐照量和产出电能增幅最大的月份为 12 月，增幅分别为 36.4% 和 40.8%，这使在拉萨地区在冬季型负载中应用跟踪系统很有利。

3 结 语

本文对北京、广州、拉萨三个地区的跟踪和固定布置时平板式光伏发电系统性能进行了研究。在平板式光伏发电系统中，是否有必要进行跟踪，需要考虑多方面的因素，诸如：当地的气候状况、地理位置（纬度、海拔），以及光伏发电系统应用负载情况等。对于并网发电应用，跟踪系统在北京、广州、拉萨使用都能取得好的效果，其中以拉萨的效果最为明显；对均衡型负载跟踪系统在北京和拉萨使用都有一定的效果，而在广州效果较差；对夏季型负载跟踪系统在北京和广州都能较大的增加产出，而在拉萨效果却不好；对冬季型负载，跟踪系统在拉萨地区使用效果很理想，在广州和北京作用却不明显。

研究成本对平板式光伏发电系统中，是否有必要进行跟踪设计，有一定的指导意义，详细的数值分析、实验研究工作将在以后进一步完成。

参考文献：

[1] ABDALLAH S The effect of using sun tracking systems on the voltage— current characteristics and power generation of flat plate photovoltaic [J]. Energy Conversion and Management 2004 45 1671— 1679

[2] KARMOV K S SAQBMA AKHTER P A simple photo— voltaic tracking system [J]. Solar Energy Material and Solar Cells 2005 87 49— 59

[3] ALATAM AH-NMRMA, QAROUSH Y Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control [J]. Energy conversion and management 2005 46 1229 — 1245

[4] HAY JE Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces [J]. Solar Energy 1979 23(4): 301— 307.

[5] BRAUN JE MITCHELL JC Solar geometry for fixed and tracking surfaces [J]. Solar Energy 1983 31(5): 439 — 444

[6] 郭廷玮, 刘鉴民, DAGUENET M 太阳能的利用 [M]. 北京: 科技文献出版社, 1987: 22— 30

- [7] 艾斌, 沈辉. 风光互补发电系统的优化设计 (I) CAD 设计方法 [J]. 太阳能学报, 2003, 24 (5): 717—722
- [8] MARTIN M, RužM J. Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model [J]. Solar Energy Material and Solar Cells, 2001, 70: 25—38
- [9] PARRETTA A, SARNO A. Effects of solar irradiation conditions on the outdoor performance of photovoltaic modules [J]. Optics Communications, 1998, 15: 153—163
- [10] TAKAO Y, HIROYUKI N, TADATOSHI S. Reflection loss analysis by optical modeling of PV module [J]. Solar Energy Material and Solar Cells, 2001, 67: 405—413
- [11] KRAUTER S, HANITSCH R. Actual optical and thermal performance of PV—module [J]. Solar Energy Material and Solar Cells, 1996, 41: 557—574
- [12] SMILEY EW. Optimization of building integrated photovoltaic systems. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002, 1501—1503
- [13] BUECHER K. Photovoltaic modules in buildings: performance and safety [J]. Renewable Energy, 1998, 15: 545—551
- [14] BUECHER K. Site dependence of the energy collection of PV modules [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1997, 47: 85—94

E ffect of Sun Tracking on Flat Plate Photovoltaic System s

CHEN Wei SHEN Hui

(School of Physics Science and Engineering // Solar system research institute, Sun Yat-sen University
Guangzhou 510275, China)

Abstract: Through mathematic simulation of the hourly irradiation on photovoltaic module plane, and photovoltaic modules performance, study was proceeded on output performance of double axes tracking and stationary modes PV module system in Beijing, Guangzhou and Lasa. At the same time, the effect of PV module tracking at different load application was discussed and investigated. result showed that for grid connected PV system, tracking can enhance the solar electric power greatly in Beijing, Guangzhou and Lasa; the most significant effect occurred in Lasa; for balanced load tracking system, there was obvious effect in Beijing and Lasa, but slight effect in Guangzhou; for summer type load, the effect of tracking fashion was very significant in Beijing and Guangzhou except Lasa, it can enhance output greatly and decrease cost of PV system; for winter type load, the tracking effect was significant in Lasa, but slight in Guangzhou and Beijing.

Key words: solar energy, panel photovoltaic system, tracking system