文章编号：1674-9057(2021)02-0421-05 doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2021.02.025

面向桂林气象特征的太阳能光伏电池板最佳部署角度

张声岚，匡贞伍，马 航，张烈平，邓金海

（桂林理工大学 机械与控制工程学院，广西 桂林 541006）

摘 要：在WSN节点太阳能光伏自供电系统中，光伏电池板的部署角度是影响获取太阳辐射量的重要因素之一。阐述了光伏电池板固定过程中的倾斜角度和方位角度，给出了倾斜角和方位角的最佳角度部署策略。在此基础上，以桂林某大学(E110.3°，N25.07°)为部署实验地点，利用PVsyst 6软件对光伏电池板最佳倾斜角和方位角的部署策略进行了仿真实验。结果表明，在该实验地点，最佳倾斜角度为20°，最佳方位角度为偏正东方向-1°~偏正西方向4°。同时，通过Meteonorm软件，以NASA提供的桂林市太阳能光照辐射量数据为例，对最佳角度部署模式(倾斜角度取20°，方位角度取1°)和水平面部署模式进行了对比实验，结果表明，从年度光照总辐射量来看，相对于水平面部署模式，本文提出的最佳角度部署模式能获取更多的能量，稳定性更好，性能更优越。

关键词：光伏电池板；倾斜角度；方位角度；最佳部署；WSN节点自供电；气象特征

中图分类号：TK513 **文献标志码**：A

0 引 言

传感器网络中传感器节点能量供应是无线传感器网络研究的一项关键技术，制约着无线传感器网络的性能和工作周期。当前主要依靠降低系统硬件能耗、优化网络拓扑管理等降低功耗的方法来延长传感器网络工作周期[1-2]。然而，这些方法虽然可以减少能耗，延长节点的使用时间，但有限的储电量总会耗尽，仍然不能保证无线传感器网络运行的持续性。解决传感器节点能量问题，延长网络生命周期的重要方案是采集和存储自然环境中的能量，为传感器节点运行供应能量，实现自供自足[3]。从环境中获取可持续的自然能量中，太阳能的能量密度相比风能、振动能等其他能量源的能量密度要高很多，将太阳能光伏供电应用在无线传感器网络节点的自供电具有很好的应用前景[4]。

近年来，随着生活环境日益恶化，可再生能源利用与节能技术逐渐成为全球研究热点[5-6]。以太阳能为代表的新型清洁能源越来越受到人们的关注，光伏发电作为太阳能利用的主要手段已经逐渐被人们所熟知[7]。合理的光伏阵列安装角度可提升太阳能利用效率，使光伏发电系统的输出功率最大化[8]。在无线传感器网络节点光伏自供电系统中，由于光伏电池板面积小，配置光照跟踪装置会带来额外的大量能量消耗，增加系统的复杂程度和成本。因此，无线传感器网络节点自供电太阳能光伏系统采用固定式部署方式更合适。在实际应用中，即使是在同一地点，不同倾角接收的太阳辐射量差别很大[9]，所以为了获得更多的太阳辐射量，固定式部署通常是将太阳能光伏电池板与水平面

收稿日期：2020-04-01

基金项目：国家自然科学基金项目(61741303)；广西空间信息与测绘重点实验室基金项目(15-140-07-23；16-380-25-23)；广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2019KY0300)

作者简介：张声岚（1984—），女，硕士，高级实验师，研究方向：检测技术与自动化装置，zsl@glut.edu.cn。

通讯作者：张烈平，博士，教授，1994023@glut.edu.cn。

引文格式：张声岚，匡贞伍，马航，等. 面向桂林气象特征的太阳能光伏电池板最佳部署角度［J］. 桂林理工大学学报，2021，41（2）：421-425.

按一定的倾斜角放置。因此，研究如何获取无线传感器网络(wireless sensor networks，WSN)节点自供电系统中太阳能光伏电池板的最佳倾斜角度和最佳方位角度具有重要意义。

在研究太阳能光伏电池板部署角度的问题上，刘国忠等采集某光伏电站内不同安装倾角情况下的同年发电量数据，研究了可调倾角方案对发电量的影响[10]；迟福建等提出了一种集中式大型光伏系统最佳倾角聚类分析方法，并与 PVsyst 软件所计算的结果进行对比分析，验证了有效性[11]；Babatunde 等研究了光伏系统的倾斜、定向、清洗等技术因素对系统输出的影响[12]；Şahin 提出了一种确定最佳倾角的神经网络方法[13]；Ullah 等利用太阳辐射数据，建立了最佳光伏倾斜角模型，模型为光伏电池板的调整提供了最佳时间表[14]。

本文以桂林气象特征为环境背景，对 WSN 节点自供电太阳能光伏电池板的最佳部署角度进行了研究，给出了太阳能光伏电池板最佳倾斜角度和最佳方位角度的部署策略。通过仿真实验，并采用 NASA 气象数据库中的桂林市月平均光照辐射量数据进行测试，验证最佳方位角度和最佳倾斜角度部署策略的有效性。

2 WSN 节点自供电太阳能光伏电池板部署角度策略

2.1 方位角度和倾斜角度的定义

如前所述，无线传感器网络节点自供电光伏电池板采用固定式部署更符合实际应用需求。桂林丰富的光照资源使得太阳能光伏发电有很好的应用前景[15]。在实际应用中，同等光照条件下，当光伏电池板平面与太阳光线垂直的时候，获取能量的效率最高。因此，本文通过改变太阳能光伏电池板的部署角度来改变光伏电池板的朝向方位，使光伏电池能够获取更多的能量，提高获取效率。

部署太阳能光伏电池板涉及到两个角度，分别为方位角和倾斜角。以北半球为例，方位角是光伏电池板的板平面法线在平面上的投影与地球正南方位之间的夹角，记为 β；倾斜角是指光伏电池板的板平面和大地水平面之间的夹角，记为 α。

2.2 方位角的部署策略

以北半球为例，中午 12:00 太阳位于正南方向，是一天内太阳光照最强的时候，所以光伏电池板一般都朝向正南方向摆放，使得光伏电池板能够尽可能多地收集能量。然而，由光伏电池输出特性可知，温度是影响最大功率点电压的主要因素。太阳能光伏电池的转换效率与温度成反比关系，随着温度升高而降低。太阳能的光照强度在正午时刻最大，而温度是在 14:00 左右达到最高。因此，考虑到温度因素对光伏电池能量转换效率的影响，光伏电池板部署的最佳方位角不一定为 0°(正南朝向)。

不同种类的光伏电池有不同的温度影响系数。通常多晶硅光伏电池的温度影响系数约为 0.4%，单晶硅约为 0.2%。一般情况下，光伏电池板材料不同以及所处气候环境的差异，最佳方位角也会有所不同。因此，需要根据实际情况对方位角进行修正：

$$\gamma=\begin{cases}0, & T_{\mathrm{M}}\in[T_{\mathrm{A}},T_{\mathrm{N}}];\\ \varepsilon K(T_{\mathrm{M}}-T_{\mathrm{A}}), & T_{\mathrm{N}}\in[T_{\mathrm{A}},T_{\mathrm{M}}];\\ \varepsilon K(T_{\mathrm{M}}-T_{\mathrm{N}}), & T_{\mathrm{A}}\in[T_{\mathrm{N}},T_{\mathrm{M}}]。\end{cases}\tag{1}$$

式中：γ 为方位角修正角度；ε 为修正系数(一般取值为[0，80])；K 为太阳能光伏电池的温度影响系数；T_{M} 为某一日中的最高温度；T_{A} 为某一日中的正午温度；T_{N} 为太阳能光伏电池的额定运行温度。

根据式(1)计算出的修正角度就是光伏电池板向正西方向调整的角度。理论上，最佳 γ 值不超过 10°。根据本文给出的方位角修正策略可以在正午时分太阳能光伏电池板收集到足够能量的前提下，使得温度最高的时刻太阳光照与光伏电池板的夹角最大，从而防止温度最高时段由于温度过高而造成光伏电池能量收集效率降低的情况发生。

2.3 倾斜角的部署策略

假设地面的反射和光照散射的辐射方向为同方向。在任意时刻，太阳能光伏电池板的斜面所接受的总辐射能量 H_{A}，包括垂直辐射能量 H_{AT}、反射辐射能量 H_{CT} 和散射辐射能量 H_{BT} 三部分[16]：

$$H_{\mathrm{A}}=H_{\mathrm{AT}}+H_{\mathrm{BT}}+H_{\mathrm{CT}}。\tag{2}$$

其中，垂直辐射能量 H_{AT} 计算方法为

$$H_{\mathrm{AT}}=H_{\mathrm{a}}R_{\mathrm{a}},\tag{3}$$

式中：H_{a} 为太阳光每天直射水平地面的平均辐射强度；R_{a} 为光伏电池板斜面和太阳光直射水平面的辐射能量的比值

$$R_{\mathrm{a}}=\frac{\cos(\delta-\theta)\sin\omega\cos\varphi+\omega\sin(\delta-\theta)\sin\varphi}{\cos\delta\cos\varphi\sin\omega_{\mathrm{s}}+\omega_{\mathrm{s}}\sin\delta\sin\varphi},\tag{4}$$

式中：δ 为光伏电池板部署纬度；θ 为太阳能光伏电池板的部署倾斜角；φ 为赤纬角；ω 为光伏电池板斜

面的太阳日面时角；ω_s 为水平面的太阳日面时角。

散射辐射能量 H_{BT}：

$$H_{BT} = H_b\left[\frac{H_aR_a}{H_0} + \frac{1}{2}\left(1 - \frac{I_a}{I_0}\right)(1 + \cos\varphi)\right], \quad (5)$$

式中：H_b 为水平地面上太阳光每天的平均散射辐射强度；H_0 为大气层外太阳光的日平均辐射强度；I_a 为水平地面上太阳光直射水平地面每小时的平均辐射强度；I_0 大气层外太阳光的每小时平均辐射强度。

水平地面上的反射辐射能量 H_{CT}：

$$H_{CT} = \frac{1}{2}\tau H_C(1 - \cos\varphi), \quad (6)$$

式中：τ 为水平地面的反射率(一般取值为 0.2)；H_C 为大气层外太阳光的日平均辐射强度。

由式(2) ~ (6)可知，太阳能光伏电池板的斜面所接受的总辐射能量 H_A 可以表示为

$$H_A = H_aR_a + H_b\left[\frac{H_aR_a}{H_0} + \frac{1}{2}\left(1 - \frac{I_a}{I_0}\right)(1 + \cos\varphi)\right] + \frac{1}{2}\tau H_C(1 - \cos\varphi)。 \quad (7)$$

将光伏电池板部署位置的纬度 φ、垂直辐射能量 H_{AT}、散射辐射能量 H_{BT} 和反射辐射能量 H_{CT} 代入式(7)，即可求得光伏电池板的最佳部署倾斜角度 θ。

3　方位角和倾斜角部署仿真实验与结果分析

3.1　方位角和倾斜角部署仿真实验

PVsyst 是一款关于太阳能光伏系统设计与仿真软件，可以对太阳能光伏电池板的部署地点进行环境参数设定，如温度、经纬度、太阳光的日辐射量等。PVsyst 也可以模拟部署太阳能光伏电池板的倾斜角和方位角，并根据部署角度测算光伏电池板的光电转换总量[17]。本文以桂林理工大学雁山校区 8 号教学楼(E110.3°，N25.07°)为测试地点，利用 PVsyst 软件模拟研究太阳能光伏电池板最佳方位角和倾斜角的部署策略。图 1 是 PVsyst 软件模拟部署光伏电池板的功能界面。

考虑到太阳能光伏电池板的方位角和倾斜角会对全年的太阳能光照总辐射量造成影响。在仿真实验过程中，先将方位角设置为恒定值 0°，然后通过 PVsyst 软件获得不同倾斜角情况下全年太阳能光照的平均总辐射量，如表 1 所示。

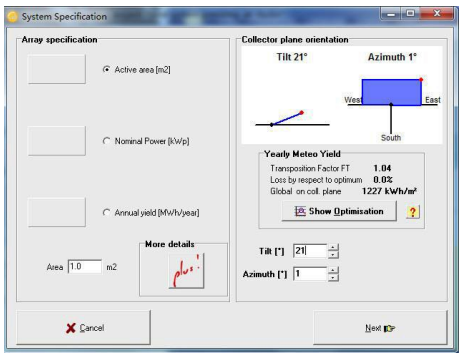


图 1　PVsyst 软件模拟部署光伏电池板的功能界面

Fig. 1　Functional interface for simulating deployment of photovoltaic panels with PVsyst

表 1　倾斜角不同情况下太阳能光照年均总辐射量

Table 1　Annual total solar radiation from different inclination angles

倾斜角/(°)	年辐射量/(kW·h·m^{-2})
15	1 223
16	1 224
17	1 225
18	1 226
19	1 226
20	1 227
21	1 226
22	1 226
23	1 225
24	1 225
25	1 223

由仿真实验可以看出，当方位角恒定为 0°、倾斜角为 20°时，测试地点的太阳能光照年均总辐射量达到最大值为 1 227 kW·h·m^{-2}。因此，在实际太阳能光伏电池板部署时，选择最佳倾斜角为 20°。

在确定最佳倾斜角的基础上，将倾斜角设置为恒定值 20°，获取测试地点不同方位角情况下的全年太阳能光照平均总辐射量，从而最终确定最佳方位角。通过 PVsyst 软件获得的太阳能光照年均总辐射量，如表 2 所示。

表 2　电池板不同方位角下太阳能光照年均总辐射量

Table 2　Annual solar radiation from different azimuth angles

电池板方位角/(°)	−3	−2	−1	0	1	2	3	4	5	6	7
年辐射量/(kW·h·m^{-2})	1 226	1 226	1 227	1 227	1 227	1 227	1 227	1 227	1 226	1 226	1 226

注：方位角=0°表示正南方向，<0 表示南偏东，>0 表示南偏西。

由仿真实验结果可以看出，当倾斜角恒定为20°时，年均光照强度随着方位角的改变不是很明显。在方位角为偏正东方向-1°～偏正西方向4°的时候，太阳能光照年均总辐射量达到最大值1 227 kW·h·m^{-2}。

3.2 方位角和倾斜角部署实验结果分析

为了对比最佳角度部署模式与水平面部署模式的不同效果，本文采用Meteonorm软件对NASA气象数据库中桂林地区2015年的光照辐射量数据进行了分析，分别获得了最佳角度部署模式（倾斜角度取20°，方位角度取1°）和水平面部署模式的月平均光照辐射量，如表3所示。

表3 最佳角度部署和水平面部署模式的月平均光照辐射量

Table 3 Monthly average solar radiation of the best angle deployment and horizontal deployment mode kW·h·m^{-2}

月份	水平面部署辐射量	最佳角度部署辐射量
1	44.613	58.253
2	52.013	57.423
3	68.733	60.864
4	119.273	112.710
5	111.593	100.609
6	94.243	107.609
7	164.653	136.795
8	138.583	125.286
9	122.283	129.795
10	118.083	173.929
11	73.973	93.965
12	67.023	69.762

可知，当太阳能光伏电池板采用水平面部署模式时，年光照总辐射量为1 175.066 kW·h·m^{-2}；当太阳能光伏电池板以最佳角度部署模式时，年光照总辐射量为1 227 kW·h·m^{-2}。从年光照总辐射量来看，以最佳角度部署模式来部署太阳能电池板获得的能量更多。

将最佳角度部署模式和水平面部署模式的各月份太阳能光照辐射能量数据采用曲线的方式表示出来，如图2所示。在1—2月和9—12月，最佳角度部署模式的太阳能光照辐射能量获取量稍微高于水平面部署模式，在3—7月，两种部署模式的太阳能光照辐射能量获取量相差不大，这也与桂林地区的气象特征相吻合。从整体的曲线起伏波动来看，最佳角度部署模式的光照辐射量获取量相对于水平部署模式更趋于均衡，各月份获取的能量变化幅度略小。因此，以最佳角度部署模式来部署太阳能光伏电池板对于WSN节点的自供电会更加稳定。

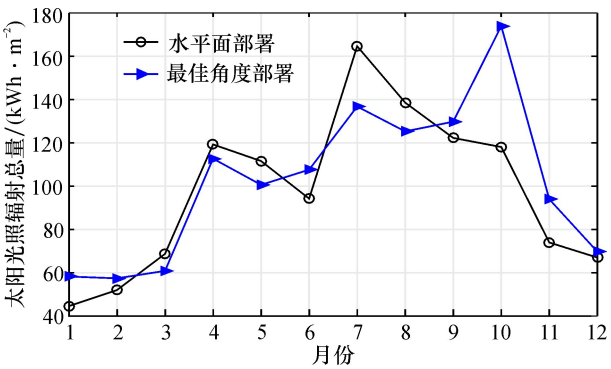


图2 两种部署模式的月平均太阳光照辐射量对比

Fig. 2 Comparison of monthly average solar radiation between two deployment modes

4 结 论

（1）阐述了光伏电池板倾斜角和方位角的定义，并提出了光伏电池板最佳倾斜角和最佳方位角的部署策略。

（2）通过PVsyst软件对最佳部署角度进行仿真实验，得出了部署光伏电池板的最佳部署角度为方位角1°，倾斜角20°。

（3）使用Meteonmorm软件对NASA数据库中桂林的太阳能光照辐射量的数据进行了仿真实验，对最佳部署角度模式和水平面部署模式获取光照辐射量的能力进行了对比分析，得出了以最佳部署角度模式部署光伏电池板更适合WSN节点自供电的结论。

本文在最佳部署策略上采用的是方位角和倾斜角单独最优的情况下组合，在后续的研究中将进行两种角度组合后最优角度的选择和部署，同时在部署太阳能电池板时，将考虑不同季节太阳照射的角度，使得光伏电池板角度部署更加全面、科学和准确，以获得更多的太阳能。

参考文献：

[1] Rout R R, Ghosh S K. Adaptive data aggregation and energy efficiency using network coding in a clustered wireless sensor network: an analytical approach [J]. Computer Communication, 2014, 40: 65-75.

[2] 郑伟胜，周艳红，杨兆万，等. 基于多约束优化的电动汽车再生制动控制策略 [J]. 桂林理工大学学报，2016，36(4)：830-837.

[3] Kassan R, Châtelet E. Photovoltaics in the assessment of wireless sensor networkreliability with changing environmental conditions [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2017, 33: 2239-2254.
[4] Fröhlich A A, Bezerra E A, Slongo L K. Experimental analysis of solar energy harvesting circuits efficiency for low power applications [J]. Computers and Electrical Engineering, 2015, 45: 143-154.
[5] 李东山. 太阳能光伏发电系统中关键控制问题的研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
[6] 杨莎莎, 吴功亮, 赵聪. 低碳经济背景下能源消耗、碳排放与经济增长的关系 [J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35 (2): 376-382.
[7] 宋尊, 王林, 王占伟, 等. 新风比对改进型地下水源热泵制热特性的影响 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2018, 39 (4): 34-38.
[8] 张玉, 黄睿, 张烈平, 等. 固定式光伏阵列最佳安装角度研究 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (1): 42-46.
[9] 韩斐,潘玉良,苏忠贤. 固定式太阳能光伏板最佳倾角设计方法研究[J]. 工程设计学报, 2009, 16(5): 348-353.
[10] 刘国忠, 范忠瑶, 牟娟, 等. 不同安装倾角对光伏电站发电量的影响研究 [J]. 太阳能学报, 2015, 36 (12): 2973-2978.
[11] 迟福建, 葛磊蛟, 洪博文, 等. 固定式光伏发电组件最佳倾角的聚类分析方法 [J]. 电测与仪表, 2018, 55 (13): 89-93.
[12] Babatunde A A, Abbasoglu S, Senol M. Analysis of the impact of dust, tilt angle and orientation on performance of PV Plants [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 1017-1026.
[13] Şahin M. Determining optimum tilt angles of photovoltaic panels by using artificial neural networks in Turkey [J]. Technical Gazette, 2019, 26 (3): 596-602.
[14] Ullah A, Imran H, Maqsood Z, et al. Investigation of optimal tilt angles and effects of soiling on PV energy production in Pakistan [J]. Renewable Energy, 2019, 139: 830-843.
[15] 周绍毅,徐圣璇,黄飞,等. 广西农业气候资源的长期变化特征[J]. 中国农学通报, 2011, 27(27): 168-173.
[16] Daus Y V, Kharchenko V V, Yudaev I V. Managing spatial orientation of photovoltaic module to obtain the maximum of electric power generation at preset point of time [J]. Applied Solar Energy, 2018, 54 (6): 400-405.
[17] 朱菊, 王金梅, 韩世军, 等. 基于 PVsyst 的光伏电池转换效率仿真研究 [J]. 电源技术, 2013, 37 (5): 774-777.

Optimal deployment angle of solar photovoltaic panels for meteorological characteristics of Guilin

ZHANG Sheng-lan, KUANG Zhen-wu, MA Hang, ZHANG Lie-ping, DENG Jin-hai
(College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: In the WSN node solar photovoltaic self-powered system, the deployment angle of photovoltaic panels is one of the important factors affecting the amount of solar energy acquired. The paper defines the tilt angle and azimuth angle in the fixing process of photovoltaic panels, presents the optimal angle deployment strategy for tilt angle and azimuth angle. The experimental site is located in an university of Guilin (east longitude 110.3° and north latitude 25.07°). By PVsyst 6 software the deployment strategy of optimal tilt angle and azimuth angle of photovoltaic panels are simulated. The simulation results show that the optimum tilt angle 20°, and the optimum azimuth angle −1° to 4° from due east to due west. With Meteonorm software, and the solar radiation data of Guilin city provided by NASA, the optimal angle deployment mode (tilt angle 20°, azimuth angle 1°) is compared with the horizontal plane deployment mode. The experimental results show that compared with the horizontal deployment mode, the optimal angular deployment mode can obtain more energy and better stability from the perspective of the total amount of annual light radiation.

Key words: photovoltaic panels; tilt angle; azimuth angle; optimal deployment; WSN node self-power supply; meteorological characteristics

(编辑　任　鹏)