

基于WRF模式的光伏电站系统优化设计研究

目前,部分光伏电站周边缺少辐射和日照观测站,在光伏系统设计时缺乏相应的数据支撑,从而无法获得合理的光伏系统设计方案。采用中尺度数值预报WRF模式进行太阳总辐射数值模拟试验,根据输出的逐时辐射数据和温度结果从光伏系统倾角、组串配置及系统容配比角度给出了光伏系统的优化设计方案。

邓芷欣/湖北工业大学电气与工程学院
康 慨/湖北省电力勘测设计院有限公司

0 引言

光伏电站系统设计基础之一是太阳辐射,目前国内外一般只有一级气象观测站具有太阳辐射的观测功能,从而造成太阳能辐射观测站较少,光伏场址周边缺少辐射观测资料,部分区域甚至缺乏日照观测资料。在进行光伏电站系统设计时,无法进行光伏电站场址的合理选择、系统的优化设计和光伏电站逐时输出功率的测算,最终导致电站的不经济性和对电网产生较大影响。因此,要想大幅提高光伏发电量比例,保证光伏电站的合理系统配置、提高光电转换效率、降低光伏发电成本,光伏电站的太阳资源推算及系统设计研究显得尤为重要。

本文采用中尺度数值预报WRF模式进行太阳总辐射数值模拟试验,并根据数值模拟的结果绘制了预选光伏电站场区的光资源图谱,输出了预选址点的逐小时辐照资料和温度,通过附近气象站的辐射观测值对模拟结果进行了验证和修正,并根据修正的结果给出了光伏系统的优化设计方案,为后续的光伏系统优化设计提供了参考意义。

关键词/Keywords

辐射·
WRF模式·
光伏系统·



邓芷欣/硕士研究生

1 模式简介和资料方法

WRF (Weather Research Forecast) 模式是新一代中尺度数值天气预报系统,该系统针对中小尺度天气系统、以实时预报为目的的新一代数值预报模式。其通过尺度分析方法,简化支配大气运动的流体动力学和热力学方程组,利用数值方法进行近似求解,来预报未来的大气环流形势和天气^[1-2]。

利用WRF模式对预选区域徐闻地区2012年3月~2013年2月逐月的太阳辐射量进行了模拟,选20.536°N, 110.139°E为模拟区域中心。本文采用NCEP逐6 h再分析资料作为初始场和侧边界条件,侧边界采用松弛边界,每6 h更新一次。地形资料默认采用美国地质勘探局(United States Geological Survey, 简称USGS)采集制作的资料,准确度包括10 m、5 m和2 m等,根据模式网格分辨率的大小选择合适准确度的USGS地形资料。

2 模拟结果分析

采用WRF对徐闻区域进行了太阳总辐射数值模拟试验,根据海口站的辐射数据进行同化,输出了逐时的模拟结果,并采用Surfer软件绘制了模拟区域的太阳能资源图谱。图1为广东湛江徐闻县区域的位置图和基于WRF模式的数学模型输出结果绘制的徐闻县区域的太阳能资源图谱。图2为拟选光伏区域的逐时辐照与温度输出曲线。

距离光伏场址区域最近的辐射观测站为海口辐射观测站(约为35 km),海口区

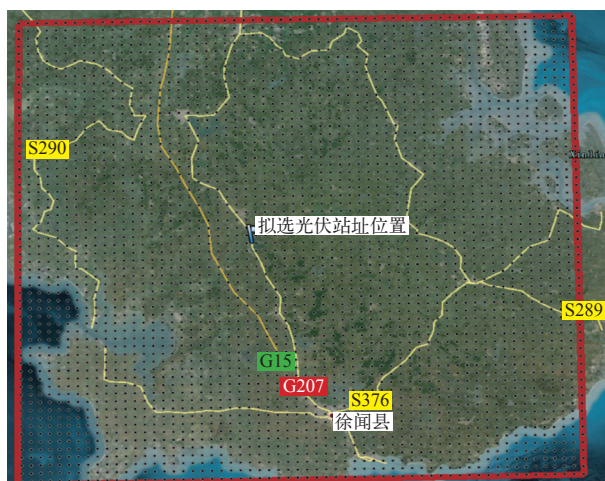
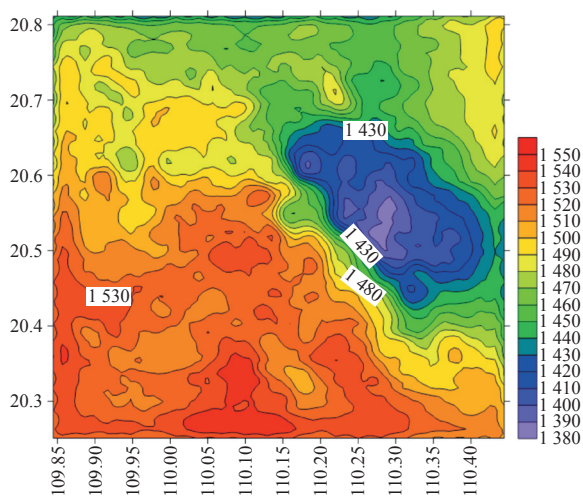


图1 徐闻区域位置图和模拟的太阳能资源图谱

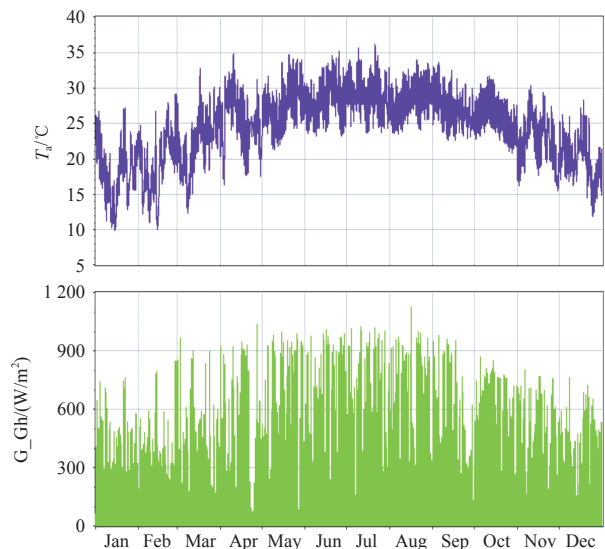


图2 光伏电站站址点的逐时辐照与温度曲线

域光照时间长，大气透明度好，光穿透力强。据海口市气象局资料显示，海口年平均太阳辐射总量为

4 800~5 300 MJ/m²，年日照时数为1 750~2 650 h，光照率为50%~60%。采用WRF模式，并采用海口市气象站辐射数据同化后推算出2012年3月~2013年2月光伏场区的总辐射量为5 396.25 MJ/m²，与海口市气象站同时段的辐射量（5 083.46 MJ/m²）偏高约为6.15%左右，通过建立海口市气象站与场址推算结果的相应各月辐射值线性回归方程，两者相关系数为0.943 5，通过了置信度为0.01的显著性F检验。因此，可初步将推算的场址区域的辐射度作为本场区的辐射参考资料，进行光伏系统的设计。

3 光伏系统设计

在光伏系统设计中，光伏阵列最佳倾角的计算、光伏组件串的串联数确定、光伏组件容量与逆变器容量配比是衡量一个光伏系统的关键要素。系统方案设计的是否合理直接关系着投资的光伏项目的经济性，而太阳能辐射数据及温度是系统方案设计的关键输入要素。

3.1 光伏阵列最佳倾角

光伏阵列最佳斜面倾角计算直接关系到光伏一级阵列的角度，与最终的光伏电站发电量、征地面积、电缆用量等相关，场址区域的月平均太阳辐射是计算最佳倾角的必要条件。根据光伏接受太阳辐射的形式，本文中斜面散射考虑各向异性，包含环日辐射和各向同性散射两部分，采用Klein-Hay模型^[3-4]，并根据WRF模式模拟的水平面总辐射进行斜面上的总辐射计算，依此得到最佳倾角和对应的辐射量。该模型的主要计算公式为

$$Q_s = D_s + S_s + R_s \quad (1)$$

$$D_s = D_H \cdot R_b \quad (2)$$

$$\begin{cases} S_s = S_H \left[\frac{D_H}{Q_H} R_b + \left(1 - \frac{D_H}{Q_H} \right) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right] \\ R_s = Q_H \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \rho \\ R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega + \pi \omega \sin(\phi - \beta) \sin \delta / 180}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega + \pi \omega \sin \phi \sin \delta / 180} \end{cases}$$

式中， Q_s 、 D_s 、 S_s 和 R_s 分别是倾斜面上的总辐射、

直接辐射、散射辐射和反射辐射月辐照量； Q_H 、 D_H 和 S_H 分别是水平面上的总辐射、直接辐射和散射辐射月辐照量； R_0 为方位角为正南时，倾斜面与水平面上的日太阳直接辐射之比的月平均值； ϕ 为纬度， β 为倾斜面与水平面之间的夹角（倾角）， δ 为各月代表日的太阳赤纬， ω 为各月代表日的日落时角，这四个量的单位均为角度， δ 、 ω 根据天文公式计算得到； ρ 为月平均地表反照率，考虑到项目所在地下垫面地貌形态为风积砂丘。

根据第2小节中的，相关模拟推算内容，将月辐射代入到上述公式中计算得到最佳倾角为 15° ，斜面辐射量为 $5\,449.49\text{ MJ/m}^2$ 。

3.2 光伏组件串的串联数

光伏组串的串联数对于系统的投资和线损至关重要，在光伏系统设计时，光伏组串串联数常采用

$$N \leq \frac{V_{dc_max}}{V_{oc}[1+(t-25)K_v]} \quad (3)$$

$$\frac{V_{mppt_min}}{V_{pm}[1+(t'-25)K'_v]} N \leq \frac{V_{mppt_max}}{V_{pm}[1+(t'-25)K'_v]} \quad (4)$$

式中， N 为光伏组件串联个数（ N 取整数）； K_v 为光伏组件的开路电压温度系数； K'_v 为光伏组件的工作电压温度系数； t 为光伏组件工作条件下的极限低温； t' 为光伏组件工作条件下的极限高温； V_{oc} 为光伏组件的开路电压； V_{pm} 为光伏组件的工作电压； V_{dc_max} 为逆变器允许的最大支流输入电压； V_{mppt_max} 为逆变器MPPT电压最大值； V_{mppt_min} 为逆变器MPPT电压最小值。

但在式（3）、式（4）中，需要有一定参数前提，设计阶段基本上只能获得开路温度系数 K_v 和外界环境温度，而部分参数如 K'_v 、 t 和 t' 是无法获得，在设计时常将开路系数 K_v 和外界最低环境温度代替 K'_v 和 t ，并采用标准条件下（辐照强度： $1\,000\text{ W/m}^2$ ，电池温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ，大气质量AM1.5）的光伏参数计算，最终导致设计的串联数往往偏低，系统投资和损耗的增加。

对于形成设计偏差，主要原因体现在温度和辐照度的无法逐时获取。由于极端低温目前采用全天

环境温度的最低值，而运行时的组件温度高于这一值，例如全天环境温度的最低值为 $-17\text{ }^\circ\text{C}$ ，肯定出现在非运行的夜间，白天运行时的极端低温可能在 $-5\text{ }^\circ\text{C}$ 以上，且光照能达到辐照度 $1\,000\text{ W/m}^2$ ，肯定不会出现极端低温。因此采用基于WRF模式模拟的水平面逐时辐射、温度数据进行组串的光伏系统设计具有重要意义。

经采用WRF模式模拟，某区域最佳倾角上辐射值和温度曲线图如图3所示。倾斜上辐射量大于 900 W/m^2 时的组件输出功率表如表1所示。从图4中可以看出，出现最大辐照度段为3月~9月，最大辐照度时为中午前后，且温度比极端低气温高很大。从某厂家获取的 310 W 的功率曲线如图4所示。从图4中可以看出不同辐射强度下、不同温度下光伏板的输出电压和电流有较为明显的差距。

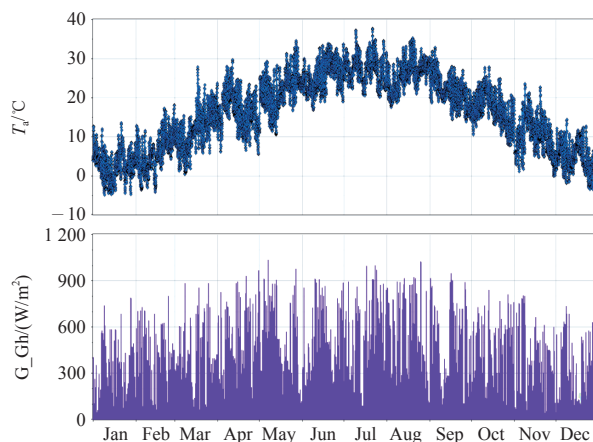


图3 最佳倾角上辐射值和温度曲线示意图

根据组件厂家提供的 310 W 参数可知，给出的参数常分为STC条件和NOCT条件，STC条件：辐照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$ ，电池温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ，大气质量为AM1.5；NOCT条件：辐照强度为 800 W/m^2 ，环境温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ ，大气质量为AM1.5。NOCT条件时，辐照强度为 800 W/m^2 ，虽然此时肯定不会出现极端低温，但相对于辐照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$ ，参数取值相对更准确。根据组件参数，结合基于WRF模式模拟输出的逐时辐射与温度曲线，使用矫正后方法进行上述组串的组串设计时，计算结果如表2所示。

可以看出，当其他条件完全相同，采用传统

表1 倾斜上辐射量大于900 W/m²时的组件输出功率

月份	每月对应的 天数	每天对应的 时间/h	风速 /(m/s)	环境温度 /℃	不考虑风速 组件温度/℃	平面辐射 /(W/m²)	最佳倾角上辐射 /(W/m²)	不考虑风速组件的 输出功率/W	考虑风速组件的 输出功率/W
4	21	14	1.1	18.6	47.6	919	928.4	261.1	268
4	30	14	2.4	15.3	45.4	954	963.7	271.7	281.1
4	30	13	2.8	13.4	42.4	919	928.4	267.2	274.1
5	4	15	1.5	25	53.4	939	909.8	249.2	255.7
5	7	13	1.9	25.1	56.1	1024	992.2	268.4	276.2
5	13	13	2.5	26.3	54.5	931	902.1	245.8	252.3
5	27	13	4.1	32.7	63.2	1 008	976.7	255.3	267.4
5	27	12	2.5	31.2	60.9	981	950.5	251.3	258.5
5	27	14	4.6	33.7	63.4	980	949.6	248	259.5
6	10	11	3.6	27	55.4	955	909.4	246.8	257.3
6	13	11	3.1	32.6	61	953	907.5	239.8	246.4
7	17	13	2.8	31.7	62.8	1 037	993.9	260.4	268.3
7	17	12	1.7	30.4	59.8	983	942.2	250.3	257.4
7	21	13	1.7	35.9	64.2	945	905.7	235.6	242.2
7	22	11	1.9	34	62.4	948	908.6	238.5	245
7	23	14	2.1	33.4	64.6	1 041	997.7	259.1	267
7	24	14	3	30.7	61	1 012	969.9	256.3	268.2
8	13	13	2.2	29.3	57.8	920	913.1	244.9	251.6
8	13	14	1.3	30.1	58.6	920	913.1	244	250.6
8	20	13	3.9	33.5	62.3	929	922	242.1	252.9
8	21	13	3.9	31.4	60	922	915.1	243	249.6
8	25	13	0.3	31.8	63.7	1 030	1 022.2	266.6	274.9
9	1	13	1.5	29.1	57.7	874	915.6	245.8	252.4
9	16	13	3.7	26.7	56.3	905	948	256.1	267.6
9	16	12	3.4	25.4	53.9	872	913.5	249.6	256.2
9	16	14	4.9	27.5	55.9	867	908.2	245.9	256.4

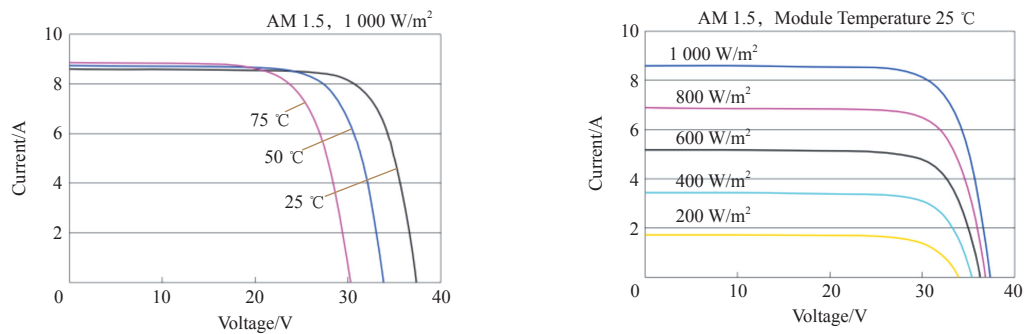


图4 某厂家310 W组件功率曲线

表2 矫正前后310 W光伏组件串联数量计算

项目	矫正前串联电压计算			矫正后串联电压计算				
	17	18	19	17	18	19	20	21
−17 °C 开路电压/V	871.2	922.5	973.7	794.8	841.6	888.4	935.1	981.9
−17 °C MPPT电压/V	502.0	531.5	561.1	452.6	479.3	505.9	532.5	559.2
70 °C MPPT电压/V	744.4	788.2	831.9	671.2	710.7	750.1	789.6	829.1

方法计算，矫正前考虑到逆变器开路电压和MPPT电压跟踪范围，最终的光伏组件串联数为18块；采用矫正后方法计算结果如下。开路电压计算： $N \leq 21$ ，MPPT电压在 $17 \leq N \leq 20$ 时满足跟踪范围，最终串联个数可选择20块。以上可以说明，进行矫正后，采用310 W组件在极端低温 $\geq -17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下，采用每串20个组件是可行的。经测算分析，采用20块作为一串时，基础投资减少8%，直流线损可降低16%，由此大幅提高项目投资的经济性。

3.3 光伏组件容量与逆变器容量配比

在光伏应用早期，光伏系统的容量按直流功率定义，系统一般按照1：1的容配比（光伏组件容量和逆变器容量比，习惯称为容配比）设计。但近年来，在实际应用研究中发现，在考虑各种辐射条件、组件铺设倾斜角度和系统损耗等情况下，达到系统较优的容配比都大于1：1。从应用研究表明一定程度的提升光伏组件容量，有利于提升系统的整体经济效益。

目前，在光伏工作中常采用的太阳常数为 $1\,366\text{ W/m}^2$ ，这个数值是由装在气球、高空飞机

和宇宙飞船上的仪器的测量值加权平均确定的，但当阳光穿过地球大气层时由于瑞利散射或大气中的分子引起的散射、悬浮微粒和灰尘引起的散射、氧气臭氧水蒸气等大气及组成气体的吸收导致光谱辐照度至少衰减了20%~30%。就目前常用的固定倾角的光伏系统而言，即使在太阳能资源最好的地区，光伏组件真正能接收到 $1\,000\text{ W/m}^2$ 以上的辐照强度，时间大概也就中午1点前后的几个小时，此时，光伏组件可以实现满发，而其他大部分时候，由于辐照强度低，光伏组件的输出功率都比装机容量低很多。

光伏系统中，能量从太阳辐射到光伏组件，经过直流电缆、汇流箱和直流配电到达逆变器，当中各个环节都有损耗。根据国家可再生能源信息中心的统计，光伏项目的综合系统效率最高值为89%，光伏系统效率的损失，主要是在逆变器之前的环节造成的，逆变器之后，只有逆变器效率损失、箱式变压器转换损失和交流线损，在逆变器之前，各项效率损失应该在8%以上，即逆变器之前部分的系统效率在92%以下，各项效率损失表如表3所示。光伏组件只有在辐照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$ ，电池温

表3 各项效率损失标准表

编号	测试项目	分项和说明	合格判断标准
1	光伏组件污渍和灰尘损失		$\leq 5\%$
2	光伏组件平均功率衰减	单晶硅组件	$\leq 3\%$
		多晶硅组件	$\leq 2.5\%$
		薄膜组件	$\leq 5\%$
3	光伏系统串并联失配损失	组件—组串	$\leq 1\%$
		组串—汇流箱	$\leq 2\%$
		汇流箱—逆变器	$\leq 2\%$
4	光伏组串MPPT偏离损失		$\leq 2\%$
5	光伏组串温升损失		以测试结果为准，评估温升系数
6	光伏系统直流线损	组串近、中、远平均	$\leq 2.5\%$ (1.5%，20℃)
		汇流箱近、中、远平均	$\leq 2.5\%$ (1.5%，20℃)
7	交流平均线损	逆变器—变压器	$\leq 2.5\%$
		变压器—并网点	$\leq 2.5\%$
8	热斑组件功率损失	选定热斑严重组件	以测试结果为准，分析热斑原因
9	隐裂组件功率损失	选定隐裂严重组件	以测试结果为准，分析隐裂原因
10	光伏方阵间遮挡损失	测量方阵倾角与间距	以GB/T 50797—2012设计标准为准
11	逆变器加权效率		96%
12	变压器加权效率		98%

度为25℃，大气质量为AM1.5，光伏组件的出力才是标称功率，辐照强度降低，输出功率也会降低。光伏组件在辐照强度为800 W/m²，环境温度为20℃，大气质量为AM1.5时的功率为标准功率的74%左右。

根据以上的分析，需采用基于WRF模式输出某地的逐时辐射数据及环境温度推算光伏板理想状态下的瞬时出力曲线，输出结果如图5所示。

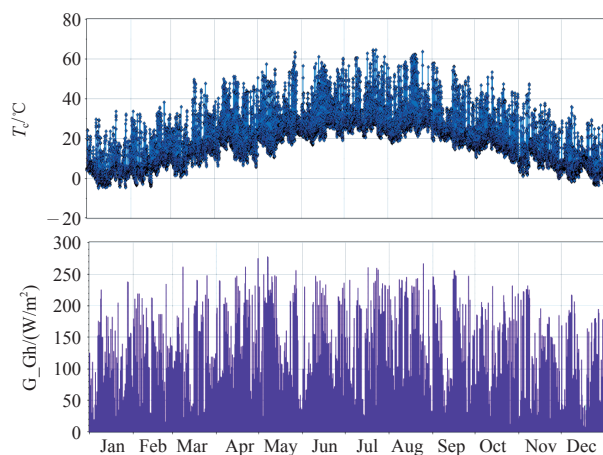


图5 光伏板输出功率与电池板温度曲线图

根据以上分析，在该区域光伏组件最佳倾角面上，考虑到环境温度的影响，光伏组件的最大输出功率约为281 W，同时光伏组件存在0~3 W正功率偏差，可以得出光伏组件瞬时的最大输出功率为283 W。组件的瞬时功率低于标称功率的主要原因除了辐射度、温度原因外，主要的原因在于全年的最佳倾角并非都每月处于最佳倾角，特别是对于辐射值较高的5月~8月，从而造成了最大输出功率的下降。

根据以上分析，逆变器实际输入功率为 $(F/1000)P\eta$ ，设 $\eta=93\%$ （其中 F 为实际辐射强度， P 为实际输入功率），采用“光伏组件：逆变器=1.18：1”的配比时不会弃光，在设定比例为1.2：1时该区域全年只会出现短暂7~8 h左右的弃光，其他的时间内输入逆变器的功率均低于其

标称功率，但逆变器和箱式变压器的利用效率就会提高，从整个系统的LCOE（Levelized Cost Of Electricity）角度综合判别^[5]，采用基于WRF模式输出某地的逐时辐射数据及环境温度推算光伏板理想状态下的瞬时出力曲线进行光伏电站的容配比配置分析，可大幅提高项目投资的经济性，因此光伏系统的容配比分析对于光伏系统的优化设计是非常有必要的。

4 结束语

采用WRF进行太阳总辐射数值模拟试验，并根据数值模拟的结果绘制了预选光伏电站场区的光资源图谱、输出了预选址点的逐时辐照资料，通过附近气象站的辐射观测值对模拟结果进行了验证和修正，并根据订正的结果从光伏系统倾角、光伏系统组串配置及光伏系统容配比角度分析并给出了光伏系统的优化设计方案，提高了光伏系统的经济性，为后续的光伏系统优化设计提供了一定的参考。

参考文献

- [1] 章国材. 美国WRF模式的进展和应用前景[J]. 气象, 2004, 30(12): 27-31.
- [2] 陈玲, 赖旭, 刘霄, 等. WRF模式在风电场风速预测中的应用[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2012, 45(1): 103-106.
- [3] Hay J E. Calculating solar radiation for inclined surfaces: practical approaches[J]. Solar Energy, 1993, 3(4/5): 373-380.
- [4] 杨金焕. 太阳能光伏发电应用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [5] 陈荣荣, 孙韵琳, 陈思铭, 等. 并网光伏发电项目的LCOE分析[J]. 可再生能源, 2015, 33(5): 731-735.

(收稿日期: 2017-09-15) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告