

光伏阵列最佳倾角计算方法的进展

成驰 陈正洪 孙朋杰

(湖北省气象服务中心/湖北省气象能源技术开发中心, 武汉 430205)

摘要: 为了提高光伏电站运行效率, 增加发电量, 需要综合考虑各种因素, 计算并确定电站光伏阵列安装的倾角。针对固定角度安装的并网光伏发电系统最佳倾角设计, 如果不能直接获取水平面上总辐射量和直接辐射量, 则首先需要利用其他气象资料进行水平面上太阳辐射量的气候学计算, 然后采用某种辐射模型计算阵列斜面辐射量, 进而计算最佳倾角。通过对计算中各个步骤的方法进行分类总结, 比较不同方法的优缺点, 给出了计算方法适用条件和建议。还比较了国内常用的光伏电站设计辅助软件特点。最后总结了目前最佳倾角计算领域新的研究方向和实际应用中亟待解决的问题等。

关键词: 光伏发电, 辐射模型, 最佳倾角

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.007

Advances in Calculation Method of the Optimal Tilted Angle for PV Array in Solar Resource Assessment

Cheng Chi, Chen Zhenghong, Sun Pengjie

(Hubei Provincial Meteorological Service Center/Meteorological Energy Development Center of Hubei Province, Wuhan 430205)

Abstract: In order to improve the efficiency of photovoltaic (PV) power plant and increase the power generation capacity, it is required to consider various factors for calculating and determining the installation angle of the PV array of power plant. In design of optimal tilted angle of fixed grid connecting solar PV array, if the total radiation and direct radiation on the horizontal plane could not be used directly, the first thing needed to do is calculating the horizontal solar radiation by using other meteorological data in climatology; then to calculate the total solar radiation of inclined plane by using some radiation models; and then calculate the optimal tilted angle. Through the classifying and summarizing each step of the calculation method, we compare the advantages and disadvantages between different methods, tell calculation methods applicable conditions and recommendations. Finally we compare the characteristics of commonly used photovoltaic power plant design software, and discuss the direction of research and urgent problems of practical application in the optimal tilted angle calculation methods.

Keywords: photovoltaic power generation, radiation model, the optimal tilted angle

0 引言

地面应用的光伏发电系统, 特别是固定式光伏阵列, 光伏组件倾斜角度的不同会使得方阵面接收的年总太阳辐射量不同, 造成发电量的不同。在光伏电站设计中, 为了获得最大的年发电量, 除了建筑集成应用中需考虑功能和美观外, 光伏阵列设计都是朝向赤道按一定角度倾斜放置的。

太阳光线穿过大气层到达地表, 受大气中各种组成成分、云、水汽、尘埃等的反射、散射、吸收等作用, 方向和能量均发生改变, 不再全部以平行光线的形式到达光伏阵列表面。光伏阵列斜面上接收到的太

阳总辐射由直接辐射、天空散射辐射及地面反射辐射三部分组成。对直接辐射而言, 通常由水平放置增加倾角至垂直太阳光线的角度会增加直接辐射量, 而后继续增加角度又会减小; 对散射辐射而言, 由水平放置增加倾角意味着减小阵列对应天空的开阔程度, 导致接受的散射辐射量减小; 增加倾角还会增加少量反射辐射量。此外, 增加倾角会导致阵列面对应的实际日出、日落时间发生变化, 使得阵列斜面上一天的日照时间变短, 也导致接收辐射量的变化。

因此在光伏电站设计中, 为了提高运行效率, 增加发电量, 需要综合考虑各种因素, 计算并确定电站的最佳倾角。

1 研究历史与现状概述

光伏阵列表面接受辐射量的计算和最佳倾角的研究本质上是对斜面辐射的计算研究, 而最早开展此类

收稿日期: 2015 年 8 月 17 日; 修回日期: 2016 年 3 月 24 日
第一作者: 成驰 (1981—), Email: chc8108@126.com
资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201306048);
气象关键技术集成与应用项目 (CMAGJ2014M34)

研究的是山地气候学领域中对坡面辐射的计算。由于倾斜面或坡面上辐射观测资料极少,所以一般都采用理论计算方法获取。我国20世纪50年代起,傅抱璞曾对坡面辐射进行了卓有成效的开创性研究^[1-2]。1981年,朱志辉采用与相应天文辐射比值的方法计算坡面辐射^[3],1988年朱志辉给出了一个任意纬度各时段斜面辐射总量的计算方法,并给出了全球范围内天文辐射各时段总量的分布图像^[4]。李怀瑾等提出了一个类似的计算方案^[5],其散射辐射采用各向同性,结论认为,晴天大气透明状况对坡地太阳辐射强度和日总量影响很大,特别对南坡影响更显著,且大气透明系数对坡地总辐射强度和总辐射日总量的影响比直接辐射要小。

翁笃鸣等^[6-7]、孙治安等^[8]研究了实际云天条件下我国坡面总辐射和直接辐射的分布特征,采用的方法中考虑了总云量、低云量和地形遮蔽等的影响,研究表明,海拔高度、坡度坡向以及由此带来的日照时数变化都会对坡面上实际太阳总辐射状况造成影响。翁笃鸣在其研究中提出了“最热坡度”的概念,亦即太阳能利用中的最佳倾角。李占清等^[9]利用坡面散射辐射观测资料,对散射辐射的各向异性问题做了较为详尽的分析,并研究了坡面散射辐射量随坡度坡向变化的基本规律。以上这些研究对于指导山区农业生产对光、热等气候资源的利用有着巨大的价值。

随着光伏发电从20世纪80年代起在国际上逐步走向成熟和商业化,研究人员专门针对光伏电站设计而开始开展最佳倾角研究^[10]。而国内从90年代起针对太阳能集热器、离网或并网光伏发电系统等最佳倾角研究开始出现,包括最佳倾角的计算模型和方法、时空分布特点等。朱超群以月代表日的日总辐射量计算为基础,以一月内到达斜面总辐射最大作为最佳倾角条件,先后采用散射辐射各向同性^[11]和各向异性模型^[12-13],研究了最佳倾角的时空分布变化特点,给出了最佳倾角的解析表达式,以及全国主要站点不同季节和全年的最佳倾角等结果。对于并网光伏发电系统,杨金焕采用散射辐射各向异性的Hay模型,给出了方位角为0和不为0两种情况下的斜面总辐射量和最佳倾角的计算方案^[14-15],对方位角为0的情况,采用了对面辐射计算式求导的方法,给出了最佳倾角的解析表达式。

以上对最佳倾角的计算,对并网光伏发电系统而言是以斜面年辐照度最大为条件的,对离网光伏发电系统则需考虑辐射的年分布特性、蓄电池容量和负载情况等。杨金焕^[16]在综合考虑斜面太阳辐射量的连续性、均匀性和极大性的基础上,研究了离网光伏发

电系统最佳倾角计算方法。汪东翔等^[17]则将辐射全年分布的均匀性进行量化,在倾角计算时兼顾了均匀性和极大性。而近年来最新的研究更是引入了多目标优化的方法,充分考虑辐射均匀性^[18]或是倾角对间距系数的影响、不同倾角的安装成本等发电量以外的因素^[19-23],从光伏电站效益最大化出发,进行最佳倾角的设计。

通常光伏阵列都是固定倾角安装的,而为了获取更多的斜面辐射量,近年来也出现了按季节或按月对倾斜角度进行调整的光伏阵列最佳倾角的研究。王民权等^[24]在晴天假设的基础上,分别计算了西北和内蒙古部分地区按月、季度和半年调整倾角,相对于水平面增加的辐射量百分比。对于实际天气条件下,韩斐等^[25]以杭州为例,计算得到按季节调整的阵列得到的斜面辐射量比全年固定的阵列增加了约5%。黄天云等^[26]分析格尔木某实际电站的半年运行数据发现,按季节调整的阵列发电量比固定式大了8%,而额外增加的人工成本不到增加发电收入的4%。陈正洪等^[27]通过武汉地区不同倾角光伏组件一年的实验结果发现,一年之中只需在春、秋过渡季节调节2次,就能使得光伏阵列基本保持在最佳倾角状态,达到较高的发电效率。

近年来,除了采用月平均辐射数据进行最佳倾角计算外,也有部分研究利用逐时辐射数据开展研究,有研究^[28-29]利用中国气象局和清华大学共同出版的《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中的典型气象年逐时水平面总辐射量和散射辐射量进行了最佳倾角的计算,发现我国大部分地区方位角应朝东偏离正南一定角度可增加斜面辐射量^[28]。魏子东等^[30]利用美国能源部提供的银川市中国标准气象数据中的逐时辐射量也进行了类似的研究。利用逐时辐射数据计算可反映太阳辐射在正午前后的非对称性分布,因此在计算最佳倾角的同时,还可以计算最佳方位角,计算结果更接近于实际情况,但由于逐时辐射观测数据的缺乏,在工程实际应用中利用逐时数据进行计算的还较为少见。

总的来说,根据对象的不同,最佳倾角计算方法可分为针对离网系统和并网系统两类;根据安装方式不同,可分为针对固定安装和可调式安装两种情况;根据光伏阵列安装方位角的不同,可以分为方位角为0和不为0两种情况。根据所采用辐射数据的不同,又可分为利用月数据和逐时数据两类。由于目前并网光伏发电系统已成为光伏利用的主流,且逐时辐射数据较难以获得,因此本文主要介绍利用月辐射数据、针对固定安装的并网光伏系统的最佳倾角计算方法。

2 最佳倾角计算方法

2.1 最佳倾角的计算

最佳倾角的计算一般分为两类,即数值法和解析法。

数值法即以一定角度为计算间隔,分别计算不同倾角的斜面上太阳总辐射月总量,最后逐月累加得到年总量。月辐射量最大的倾角即为该月最佳倾角,年辐射量最大的倾角即为年最佳倾角,此倾角上的平均年总辐射量即为最佳倾角斜面上的总辐射量^[31]。

文献[11]和[14]均采用解析法得到最佳倾角的数学表达式,其方法为利用斜面总辐射量的公式对倾角 β 求导,导数为0时求解倾角的解析式即可计算最佳倾角^[20]。

但解析法只适合方阵方位角为0的斜面最佳倾角计算,若方位角不为0则只可通过数值法计算,因此在实际应用中数值法更为常见。计算不同倾角斜面太阳总辐射量为数值法计算最佳倾角的基础,2.2—2.3节介绍了计算水平面和斜面月太阳辐射量的基本方法。

2.2 斜面辐射量的计算

斜面上接收到的太阳总辐射量 Q_s 由直接辐射量 D_s 、天空散射辐射量 S_s 及地面反射辐射量 R_s 三部分组成,即

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

斜面与水平面的直接辐射之间的关系如下:

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

其中方位角为0时,斜面和水平面直接辐射量比值 R_b 可用以下公式计算:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega + \frac{\pi}{180} \omega \cdot \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega + \frac{\pi}{180} \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta}. \quad (3)$$

地面反射辐射表达式为

$$R_s = G \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \cdot \rho, \quad (4)$$

以上式中: G 为太阳总辐射, D_H 为水平面太阳直接辐射, β 为斜面倾角, ϕ 为地理纬度, δ 为太阳赤纬, ω 为日落时角, ρ 为地面反射率,不同的地面反射率会有所不同。天空散射有两种辐射模型:一类是各向同性模型,此模型较简单,即认为天空中的散射辐射分布是均匀的,如Liu-Jordan模型^[32];另一类是各向异性模型:如Hay模型、Perez模型等。Hay模型认为水平面上的散射辐射包含两个部分,即光盘辐射部分与各向同性的穹顶散射部分^[33]:

$$S_s = (G - D_H) \left((D_H / G) R_b + (1 - D_H / G) \frac{1 + \cos \beta}{2} \right). \quad (5)$$

Perez模型^[34-35]认为倾斜面上的散射辐射由三个部分组成:光盘辐射部分、穹顶散射部分与受水平面亮

度影响的部分。

根据天空各向异性模型理论,在北半球,南面天空的平均散射辐射要比北面天空大,所以各向异性模型推算的朝南斜面获取的能量比值要大于同性模型的结果。

2.3 水平面太阳辐射量的计算

由上节可知,要进行斜面辐射量和最佳倾角的计算,首先应获取水平面上总辐射量 G 和直接辐射量 D_H 。如若不能,则需要利用其他气象资料进行水平面上太阳辐射量的计算反演,即基于地面气象站的日照百分率资料或卫星遥感资料,建立太阳辐射量与其相关关系,利用这种相关进而间接计算气候条件类似站点的太阳辐射量。

在按月计算太阳辐射量时,一般使用表1中的日期作为各月代表日,由此求得辐射各月平均值。代表日期是依据最接近该月日平均天文辐射值的原则来选取的,这种方法计算简便,能满足工程需要^[36]。

表1 各月代表日和对应赤纬取值
Table. 1 The representative day and corresponding declination values in each month

月份	代表日	n (日序数) (平年/闰年)	δ (°) (平年/闰年)
1月	17日	17	-21.1
2月	16日	47	-13.0
3月	16日	75/76	-2.5/-2.1
4月	15日	105/106	9.1/9.5
5月	15日	135/136	18.4/18.7
6月	11日	162/163	22.9/23.0
7月	17日	198/199	21.5/21.3
8月	16日	228/229	14.3/14.0
9月	15日	258/259	3.7/3.3
10月	15日	288/289	-7.8/-8.2
11月	14日	318/319	-17.8/-18.0
12月	10日	344/345	-22.7/-22.8

在利用地面观测资料反演辐射量时,一般可以通过与辐射相关较好的日照百分率数据进行计算^[37-40],目前常用的推算公式形式为

$$G = \left(a_g + b_g \frac{n}{N} \right) R_a, \quad (6)$$

$$D_H = \left[a_d \left(\frac{n}{N} \right)^2 + b_d \left(\frac{n}{N} \right) \right] R_a, \quad (7)$$

式中, G 为太阳总辐射,单位为 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; D_H 为水平面太阳直接辐射,单位为 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; n 为实际日照时数,单位为h; N 为理论可照时数,单位为h; n/N 为日照百分率; R_a 为起始计算辐射。

可以以天文辐射、理想大气总辐射、晴天太阳辐

射等为起始计算辐射,有研究发现^[41],以天文辐射起始计算,所需输入数据较少,计算简便的同时效果也较好,适合工程应用。但在地形较为复杂的地区,采用晴天总辐射作为 R_a ,物理意义更为明确,计算误差明显降低^[42-43],但这种方法需要考虑云、气溶胶、水汽和各种气体成分对太阳辐射的散射、吸收、反射等作用,存在计算过程较复杂,所需参数较多的缺点。

a_g 、 b_g 、 a_d 、 b_d 为系数,通过有太阳辐射和日照时数观测的站点统计确定,然后可应用到周边气候条件类似的无太阳辐射观测的地区,计算太阳总辐射和直接辐射。

也有研究^[44]在利用日照百分率建立相关的同时,引入了如云量、气温日较差、降水量等修正项,也能使反演效果有所提高,但存在相关系数不稳定的情况,因此更多的研究仍是采用结构简单、物理意义清晰的经典日照百分率模型。

2.4 最佳倾角的实验验证

由于计算方法、所用数据种类、所取时段的不同,不同的研究计算的理论最佳倾角有很大差异。以武汉地区为例,不同的研究给出的最佳倾角理论计算值为 $18\sim 45^\circ$ ^[27],因此对斜面辐射量或发电量及最佳倾角开展观测实验研究,验证理论计算结果,十分必要。

常泽辉等^[45]设计了一种具备倾角调整装置的太阳能光伏发电测试系统,将实际观测值与理论计算值进行了比较。文献[25]利用3块相同的电池板分布放置在水平面、理论计算年最佳倾角和季节调整最佳倾角处,对比观测一年,验证了其理论计算值。李潇潇等^[46]在沈阳某大楼楼顶建设了人工倾角调节式光伏并网发电实验系统,验证了按季节调整倾角系统比固定倾角系统发电量有明显提升。

以上实验采用倾角调整的方式,验证了斜面辐射计算模型的准确性。还有一些研究采用了多角度光伏发电组件对比的方式,可以验证最佳倾角理论计算的准确性。如陈维等^[47]对广州地区8块不同朝向和倾角的光伏组件输出情况进行了为期一年多的测试,结果发现全年以 22° 倾角组件产出电能最多,与理论模拟计算结果(19°)相吻合。陈正洪等^[27]在武汉开展了从水平面(0°)到南墙面(90°)共15个不同倾角和朝向的光伏组件发电情况测试,分析得到各月最佳倾角与理论计算最佳倾角变化趋势基本保持一致,实验得到的各月最佳倾角要大于或等于理论推算最佳倾角。 30° 倾角为实验年度的实际最佳倾角,比理论计

算值偏大。这种情况可能是由于光伏电站倾角较小的光伏组件较易积灰,影响光伏组件接收太阳辐射。

散射辐射模型是最佳倾角理论计算中的难点,以上研究通过与实验验证对比多发现采用各向异性散射辐射模型计算结果更为准确^[27, 45, 47],其中Perez模型计算效果最好,但过程也最为复杂,实际应用难度较大^[35]。

目前的研究中,实验得出的最佳倾角角度通常是仅在一年左右的数据的基础上统计出来的,时间序列较短,随机因素影响较大,如要得到更精确的结果,需要收集更长时间资料进行深入分析。

3 光伏电站设计软件中的最佳倾角计算

目前国内电力设计行业进行光伏组件倾角设计、斜面辐射量和理论发电量计算主要是通过RETScreen^①、PVSystem^②、上海电力学院太阳辐射计算软件^[48]等辅助设计软件进行,由于其对象多是并网光伏发电系统,因此计算最佳倾角的基本原则均是年斜面辐射量和年发电量最大化。下面将常用软件及其所用辐射数据介绍如下。

1) RETScreen

RETScreen是一款清洁能源项目分析软件,用于评估各种可再生能源的能源生产量、节能效益、寿命周期成本、减排量和财务风险等。该软件由加拿大政府通过加拿大自然资源能源多样化研究所向全世界提供,可免费使用。该软件更为侧重项目财务分析,计算光伏发电系统的最佳倾角和发电量只是其功能之一。

该软件中自带的辐射数据来自于NASA数据库,与中国气象部门提供的地面辐射观测数据相比通常偏大。

2) PVSystem

PVSystem是目前光伏系统设计领域另一个比较常用且历史悠久的软件,来自瑞士日内瓦大学,它能够较完整地对光伏发电系统进行研究、设计和数据分析。涉及并网、离网、抽水和直流光伏发电系统,可提供初步设计、项目设计和详细数据分析3种进展程度的光伏系统设计和研究。

该软件自带辐射数据城市站点较少,在进行设计时可以直接联网从NASA数据库下载辐射数据,也可以自行导入不同格式的辐射数据。

3) 上海电力学院太阳辐射计算软件

该系统软件由上海电力学院采用C语言编制而成。主要有3个模块:太阳能辐射计算模块、并网系统设计模块和独立系统设计模块。计算最佳倾角时,既可自己输入数据,也可用软件自带的数据库。

① RETScreen软件主页: <http://www.retscreen.net/zh/home.php>。

② PVSystem软件主页: <http://www.pvsyst.com/>。

该软件的气象数据库是由国家气象中心发布的1981—2000年中国气象辐射资料年册统计整理而来。

王淑娟等^[49]比较了以上3个系统采用统一的气象辐射数据计算的某地最佳倾角和斜面年太阳辐射量。结果如表2所示。

表2 不同设计软件计算的结果
Table 2 Results from 3 calculating softwares

软件	最佳倾角 (°)	斜面年太阳辐射量
RETScreen	37	2241.0
PVSystem	35	2252.2
上海电力学院软件	33	2159.8

造成这种差异的原因可归结为斜面辐射计算时所采用模型的不同。有文献^[50]指出,上海电力学院软件与RETScreen软件计算结果数据比对,其计算得到的最佳倾角一般偏小2°~4°。这是由于该软件太阳辐射计算模块采用了散射辐射各向同性模型计算倾斜面上的太阳辐射量所引起的。

总的来说,选择不同的软件进行设计,计算的发电量和最佳倾角结果差异较大,从而影响预期收益。而且所用数据会影响到最终计算的结果,目前一般认为NASA所提供的数据较国内气象台站观测数据偏大,导致最佳倾角的计算也偏大。而且采用不同时间段的辐射数据进行设计也会影响结果,因此在设计计算时,应采用气象台站近年的辐射和日照观测数据进行,并需要对所采用的数据进行分析和甄别。

4 结论与讨论

在对光伏电站光伏阵列斜面辐射量和最佳倾角研究历史和现状进行充分调研的基础上,较为全面地论述了光伏电站可行性研究中太阳辐射资源分析和最佳倾角设计计算各个步骤的计算方案,并进行了分类总结和优缺点分析;并比较了不同方法的优缺点。在针对单个光伏电站开展的设计计算中,在没有现场或周边辐射观测的情况下,仍推荐采用日照百分率数据进行气候学计算。在斜面辐射量计算中,理论和实践均证明,散射辐射的天空各向异性模型明显较各向同性模型接近实际情况。此外还归纳最佳倾角的计算方法为解析法和数值法两类,并比较了国内常用的光伏电站设计软件特点,给出了使用中的建议。

近年在最佳倾角的研究中,部分研究开始引入了多目标优化的方法,即并非简单地将设计目标定为斜面接收到的年辐射量最大,而是充分考虑倾角对间距系数的影响、不同倾角的安装成本、电站用地成本等太阳辐射量以外的因素,从光伏电站效益最大化出发,采用博弈论等方法进行最佳倾角的设计。这种新

的研究方向值得进一步完善和优化。

许多涉及最佳倾角的观测和实验验证表明,理论计算的最佳倾角并不等于实际的最佳倾角,倾角的变化除了引起斜面接收到的辐射量和辐射成分比例的变化以外,还会引起雨水、风对组件表面灰尘清除能力的变化,并引起光伏阵列间相互遮挡造成阴影影响的变化,这些因素大多都没有在目前的设计研究中体现,也是未来最佳倾角研究中亟待解决的问题。

参考文献

- [1] 傅抱璞. 论坡地上的太阳辐射量总量. 南京大学学报(自然科学版), 1958, 2: 47-82.
- [2] 傅抱璞. 山地气候. 北京: 科学出版社, 1983.
- [3] 朱志辉. 任意方位倾斜面上的总辐射计算. 太阳能学报, 1981, 2(2): 209-212.
- [4] 朱志辉. 非水平面天文辐射的全球分布. 中国科学B辑, 1988, 10: 1101-1110.
- [5] 李怀瑾, 施永年. 非水平面上日射强度和日射总量的计算方法. 地理学报, 1981, 36(1): 79-89.
- [6] 翁笃鸣, 孙治安, 史兵. 中国坡地总辐射的计算和分析. 气象科学, 1990, 10(4): 348-357.
- [7] 翁笃鸣, 罗哲贤. 山区地形气候. 北京: 气象出版社, 1990.
- [8] 孙治安, 史兵, 翁笃鸣. 中国坡地太阳直接辐射特征. 高原气象, 1990, 9(4): 371-381.
- [9] 李占清, 翁笃鸣. 坡面散射辐射的分布特征及其计算模式. 气象学报, 1988, 46(3): 349-356.
- [10] Gopinathan, K K. Solar radiation on variously oriented sloping surface. Solar Energy, 1991, 47(3): 173-179.
- [11] 朱超群, 虞静明. 我国最佳倾角的计算及其变化. 太阳能学报, 1992, 13(1): 38-44.
- [12] 朱超群, 任雪娟. 太阳总辐射最佳倾角的时空分布. 高原气象, 1993, 12(4): 409-417.
- [13] 朱超群. 估计南向坡面总辐射最佳倾角的表示式. 南京大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 623-630.
- [14] 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. 上海交通大学学报, 2002, 36(7): 1032-1036.
- [15] 杨金焕, 于化从, 葛亮. 太阳能光伏发电应用技术. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [16] 杨金焕. 固定式光伏方阵最佳倾角的分析. 太阳能学报, 1992, 13(1): 86-92.
- [17] 汪东翔, 董俊, 陈庭金. 固定式光伏方阵最佳倾角的选择. 太阳能学报, 1993, 14(3): 217-221.
- [18] 沈洲, 杨伟, 易成星, 等. 基于交互式多目标决策方法的固定式光伏阵列最佳倾角优化. 电网技术, 2014, 38(3): 622-627.
- [19] 王建民, 张晓威, 孔静. 改进的固定支架光伏阵列最佳倾角确定方法. 可再生能源, 2013, 31(2): 108-110.
- [20] 钟天宇, 刘庆超, 杨明. 并网光伏电站光伏组件支架最佳倾角设计研究. 发电与空调, 2013, 34(1): 5-7.
- [21] 丁明, 刘盛, 徐志成. 光伏阵列改进优化设计方法与应用. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 2-8.
- [22] 成珂, 杨洁, 吴自博. 光伏阵列安装角度与安装节距的优化选择. 可再生能源, 2014, 32(6): 743-748.
- [23] 叶任时, 刘海波, 李德, 等. 光伏组件倾角和阵列间距的多因素综合计算方法. 人民长江, 2015, 46(5): 39-42.
- [24] 王民权, 邹琴梅, 黄文君. 太阳能电池板安装倾角间歇性优化调节的研究. 太阳能学报, 2015, 36(1): 113-119.
- [25] 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. 工程设计学报, 2009, 16(5): 348-353.
- [26] 黄天云, 白盛强. 倾角可调光伏支架结构的研究. 太阳能, 2013, 15: 34-36.
- [27] 陈正洪, 孙朋杰, 成驰, 等. 武汉地区光伏组件最佳倾角的实验研究. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 98-105.
- [28] 申政, 吕建, 杨洪兴, 等. 太阳辐射接受面最佳倾角的计算与分析. 天津城市建设学院学报, 2009, 15(1): 61-75.

- [29] 朱丹丹, 燕达. 太阳能板放置最佳倾角研究. 建筑科学, 2012, 28(增刊2): 277-281.
- [30] 魏子东, 霍小平, 贺生云, 等. 固定式光伏最佳水平倾角及朝向的模拟分析——以宁夏银川地区为例. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(5): 700-706.
- [31] 孙韵琳, 杜晓荣, 王小杨, 等. 固定式并网光伏阵列的辐射量计算与倾角优化. 太阳能学报, 2009, 30(12): 1587-1601.
- [32] Liu B Y H, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy, 1960, 4(3): 1-19.
- [33] Hay J E. Calculating solar radiation for inclined surfaces: practical approaches. Renewable Energy, 1993, 3(4-5): 373-380.
- [34] Perez R, Ineichen P, Seals R, et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. Solar Energy, 1990, 44(5): 271-289.
- [35] Li D H W, Lam J C. Evaluation of slope irradiance and illuminance models against measured Hong Kong data. Building and Environment, 2000, 35(6): 501-509.
- [36] 王炳忠. 太阳辐射计算讲座 第三讲: 地外水平面辐射的计算. 太阳能, 1999, 4: 12-13.
- [37] 中国气象局. 太阳能资源评估方法 QX/T89—2008. 北京: 气象出版社, 2008: 1-7.
- [38] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法. 气象学报, 1964, 34(3): 304-315.
- [39] 王炳忠, 张富国, 李立贤. 我国的太阳能资源及其计算. 太阳能学报, 1980, 1(1): 1-9.
- [40] 成驰, 陈正洪, 李芬, 等. 湖北省咸宁市光伏电站太阳能资源评价. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1067-1072.
- [41] 邓艳君, 邱新法, 曾燕, 等. 几种水平面太阳总辐射量计算模型的对比分析. 气象科学, 2013, 33(4): 371-377.
- [42] 王炳忠, 申彦波. 自然环境条件对太阳能资源计算影响的再思考. 应用气象学报, 2012, 23(4): 505-512.
- [43] 申彦波, 张顺谦, 郭鹏, 等. 四川省太阳能资源气候学计算. 应用气象学报, 2014, 25(4): 493-498.
- [44] 刘可群, 陈正洪, 夏智宏. 湖北省太阳能资源时空分布特征分析及区划研究. 华中农业大学学报, 2007, 26(6): 888-893.
- [45] 常泽辉, 田瑞. 固定式太阳能电池方阵最佳倾角的实验研究. 电源技术, 2007, 31(4): 312-324.
- [46] 李潇潇, 赵争鸣, 田春宁. 基于统计分析的光伏并网发电系统最佳倾角的计算与实验研究. 电气技术, 2012, 8: 1-6.
- [47] 陈维, 沈辉, 刘勇. 光伏阵列倾角对性能影响实验研究. 太阳能学报, 2009, 30(11): 1519-1522.
- [48] 杨金焱, 葛亮. 太阳辐射量与光伏系统优化设计软件. 阳光能源, 2005(12): 34-36.
- [49] 王淑娟, 汪徐华, 高赞, 等. 常用于最佳倾角计算的光伏软件的对比研究. 太阳能, 2010, (12): 29-31.
- [50] 周治, 吕康, 范小苗. 光伏系统设计软件简介. 西北水电, 2009, (6): 76-79.

风雨留痕 云助气象

■ 许小峰

在世界气象组织(WMO)和美国天气局(NWS)于美国新奥尔良举办的大数据研讨会上, 亚马逊公司(Amazon)曾介绍过一个案例。

在各类气象资料中, 天气雷达数据的存储与传输显然是具有挑战性的。大约每6 min一部雷达就会完成一次体扫, 形成一个完整的局地数据集, 数据量达10 MB以上。美国有160部天气雷达, 从1991年开始投入业务使用, 至今连续运转20多年了, 累计的数据量估计已是天文数字。实时调用这些数据, 特别是20多年来积累的历史数据, 处理起来不是一件简单的事情。

美国海洋和大气管理局(NOAA)在其大数据发展计划中将这一任务的实现托付给了亚马逊公司, 要求所有的历史和实时运行的雷达信息资料都可以随时调用。亚马逊利用他们在云技术领域的优势将这一目标顺利实现了, 展现出了现代科技的魅力。

亚马逊有非常强大的网络服务系统Amazon Web Services(AWS), 构成了他们云技术的基础。但雷达数据的存贮与应用也绝非易事, 需要多方面的技术支持。亚马逊在做介绍时谈到了他们一起开发的合作伙伴, 除了NOAA外, 还包括Unidata、The Weather Company、The Climate Corporation和CartoDB等。一些学生与研究人员也参与了该系统的应用开发。亚马逊介绍说, 在众多企业与科技人员共同参与的过程中, 同时也创建了围绕这些资料应用的生态系统, 这

些开发者同时也是未来的使用者。

雷达资料的解决仅是一个案例, 在气象业务中, 还有大量其他实时探测信息, 包括数据量很大的卫星产品, 或许依照云技术思路, 可以设计出合理的解决方案, 满足未来海量气象信息存储与应用的需求。

Total amount of Level-II NEXRAD data accessed from NCEI and Amazon Web Services in terabytes (TB)

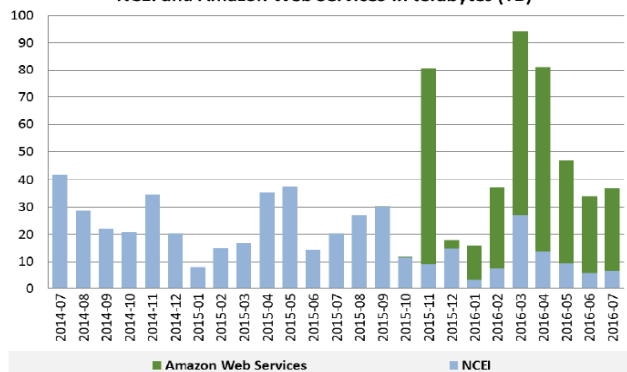


图 从单一的NCEI(国家环境信息中心)平台过渡到可通过亚马逊平台共享后, 美国新一代雷达二级数据访问量被大幅度提升的统计结果

(作者单位: 中国气象局)

本文摘自许小峰新浪博客(2016年4月17日); 图片摘自Ansari S, Del Greco S, Kearns E, et al, 2017. Unlocking the potential of NEXRAD data through NOAA's Big Data Partnership. Bull Amer Meteor Soc, doi:10.1175/BAMS-D-16-0021.1, in press.