

DOI: 10.11985/2025.01.027

极端气候条件下光伏发电功率预测方法综述*

陈思宇 蒋俊霞 李帅兵

(兰州交通大学新能源与动力工程学院 兰州 730070)

摘要: 随着清洁能源的大力发展,光伏发电在新能源电力系统中的渗透率与日俱增,准确的光伏功率预测技术对电力系统优化调度至关重要。但近年来极端气候频发,对光伏发电造成严重影响,增大了光伏系统发电功率预测的难度,从而威胁到电网的稳定运行。针对极端气候条件下光伏发电功率预测方法,首先从沙尘、暴雨和降雪三个方面阐述了极端气候对光伏发电的影响,包括其作用机理和优化方法;其次分类综合讨论了现有研究中针对沙尘、暴雨和降雪气候条件下的光伏功率预测方法及各自的优缺点,并总结了目前使用较多的光伏发电功率预测精度评价指标,对评价指标的含义和适用范围进行了阐述。最后结合我国光伏功率预测技术的发展现状,对未来极端气候条件下光伏功率预测技术的发展方向进行了展望。

关键词: 光伏电站; 功率预测; 极端气候; 可再生能源

中图分类号: TM615

Review of Photovoltaic Power Prediction Methods under Extreme Climate Conditions

CHEN Siyu JIANG Junxia LI Shuaibing

(School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070)

Abstract: With the development of clean energy, the penetration rate of photovoltaic power generation in the new energy power system is increasing day by day. Accurate photovoltaic power prediction technology is very important for the optimal scheduling of power system. However, in recent years, the frequent occurrence of extreme weather has seriously affected photovoltaic power generation, which has increased the difficulty of predicting the power generation of photovoltaic systems, thus threatening the stable operation of the grid. Aiming at the prediction methods of photovoltaic power generation under extreme climate conditions, firstly the influence of extreme climate on photovoltaic power generation is discussed from three aspects: dust, rainstorm and snowfall, including its action mechanism and optimization methods. Secondly, the photovoltaic power prediction methods are classified and comprehensively discussed under the climate conditions of dust, rainstorm and snowfall in existing studies and their advantages and disadvantages, the evaluation indexes of photovoltaic power prediction accuracy that are commonly used at present are summarized, and the meaning and scope of application of evaluation indexes are expounded. Finally, based on the current situation of PV power forecasting technology in China, the future development direction of PV power forecasting technology under extreme climate conditions is forecasted.

Key words: Photovoltaic power station; power prediction; extreme climate; renewable energy sources

* 国家自然科学基金资助项目(42205156)。20231031 收到初稿, 20240806 收到修改稿

1 引言

2020年9月,我国明确提出“力争2030年前二氧化碳排放达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的国家发展目标^[1]。为确保达成“碳达峰碳中和”的目标,需要加快实施能源转型,构建新型电力系统。新型电力系统以风电、太阳能发电等可再生能源逐步替代化石能源为主要目标^[2]。2022年,可再生能源新增装机1.52亿千瓦,占全国新增发电装机的76.2%,其中太阳能发电新增8741万千瓦,占可再生能源总装机的57.5%。

光伏发电系统的输出功率主要取决于气象条件,存在较大的随机性、间歇性和波动性,因此大规模光伏并网会对电网造成许多不良影响^[3]。准确的光伏功率预测可以提高系统的可靠性和光伏系统的渗透率^[4-6]。但近年来随着全球变暖加剧,极端天气造成灾害频发,2022年11月27日新疆库车中石化一期300 MW光伏制氢项目遭遇罕见沙尘暴,灾害造成光伏电站损失约200 MW,经济损失约6亿元。2021年7月20日,河南省遭遇特大洪涝灾害,因暴雨以及泄洪等缘故,给许多光伏电站造成了严重损失,据统计光伏电站受损246座,总计规模容量45 572.19 kW。2022年4月30日,内蒙古通辽光伏电站遭受极端天气暴雪影响,累计损失7 307.65万元。这些极端天气不仅对光伏发电造成严重影响^[7],还显著降低了光伏功率预测的准确性,从而威胁电网的整体调度。

本文首先从沙尘、暴雨和降雪三个方面论述极端天气对光伏发电的影响,包括其作用机理和优化方法;然后总结不同极端气候条件下采用的光伏功率预测方法,并针对常用的预测评估指标及其含义和适用范围进行阐述;最后对未来极端气候下光伏功率预测技术的发展方向进行展望。

2 极端天气对光伏发电的影响

我国幅员辽阔,不同地区受到自然灾害的程度不同,图1综合展示了我国七大区域截至2022年累计装机容量以及各个地区2022年的降水量、年积雪深度以及平均能见度。其中华东地区累计装机容量最多,且受降水和积雪影响最大。

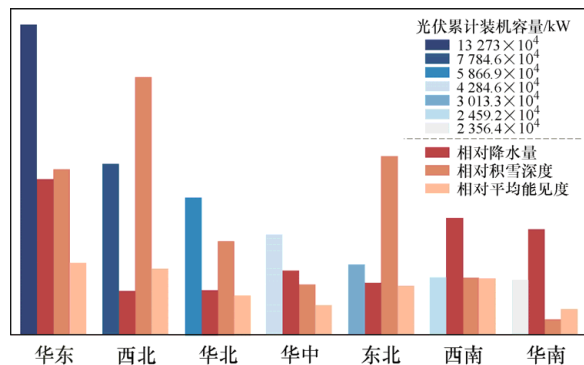


图1 2022年我国七大区域光伏累计装机容量和各气象要素相对量示意图

2.1 沙尘天气对光伏发电的影响

我国光伏电站主要分布在西北和华东地区。截至2022年底,全国七大区域中,西北地区累计装机容量7 784.6万千瓦,占全国累计装机19.9%。与此同时,西北也是我国受沙尘天气影响最大的地区。在沙尘天气下,光伏发电效率会随着降落到光伏组件前面板灰尘的浓度而降低。对光伏系统的影响可以分为针对电力负荷和针对光伏发电本身两种情况来讨论^[8]。

(1) 对局部区域电力负荷的影响。一方面沙尘天气会影响人们的正常生活,例如高速公路和机场的能见度下降,减少人们外出活动机会,从而影响区域居民用电负荷;另一方面当严重沙尘出现时,大型火电厂会受到影响,减少生产负荷运行,使工业负荷显著降低^[9]。用电负荷突然的波动会影响电力调度,而作为电力调度一部分的光伏发电也会间接受到影响。

(2) 对光伏发电出力的影响。一方面沙尘气溶胶会在光照射到面板的过程中吸收和反射一部分光照强度,使得光伏面板接收到的辐照度消减;另一方面沙尘在光伏面板的聚集形成污秽,不仅会降低光伏组件表面的透光率,而且会影响光伏面板的开路电压和短路电流,减少光伏电站的发电量。图2为沙尘对光伏组件的影响示意图。

有研究从自然条件,例如降尘量、降雨量、风速和风向等方面结合光伏组件的物理特性,例如光伏板表面的材质、光伏组件的放置倾角和方位角等因素,综合讨论了不同条件下积尘对光伏电站发电功率的影响,定性分析了积尘是通过影响辐照度和电池温度来间接影响光伏发电功率的^[10]。光电光热综合效率的下降率会随着光伏组件前面板表面上积尘密度的增大呈现出先迅速增大后增大逐渐变缓的趋势^[11]。为缓解沙尘对光伏系统性能的影响,可以从不同气候条件下光伏面板的清理频率、面板材料选择、面板的倾斜角度等几个方面来综合讨论^[12]。

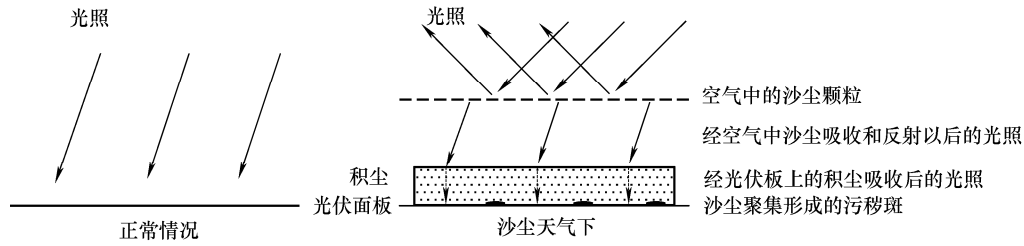


图 2 沙尘对光伏发电组件的影响示意图^[8]

2.2 暴雨对光伏发电的影响

暴雨是指 24 h 降水量为 50 mm 及以上的雨,往往容易造成洪涝灾害和严重的水土流失,导致人员伤亡和重大经济损失。暴雨与光伏电池的发电量并不存在完全的线性关系。

(1) 对光伏组件的清洁影响。短时暴雨是指 1 h 内某地降水量超过 20 mm 的降水过程。当发生区域性短暂暴雨时,光伏组件表面的灰尘难以被彻底清洁,并且当光伏面板积累的粉尘密度大时,还会增加粉尘的黏性,从而导致更多的粉尘堆积。当出现短时暴雨的时候,雨水不断冲刷光伏组件,不仅留下更多污秽,还会对光伏面板造成腐蚀^[13]。但长时间的暴雨对光伏组件的发电效率会产生积极影响。有研究发现,光伏组件的最大输出功率在长时间暴雨的条件下相较于小雨条件下的可提高 16.1%~28.2%^[14],且对于粉尘密度较高的光伏组件,雨水的清洁效果更好。

(2) 对光伏面板的积水影响。由于光伏面板的主要材质是晶体硅,有研究通过分析雨水与光伏组件表面的相互作用,发现雨水对光伏系统的性能在春夏两季有积极影响。首先是因为雨水的蒸发可以减少热损失,其次是降雨导致光伏玻璃上存在一层薄薄的水,可以减少反射损失^[15]。即使雨水对光伏组件有一定的清洁作用,可以暂时增加光伏组件的输出功率,但如果雨水不能完全清洁光伏组件,则积聚在光伏组件表面的灰尘更容易形成聚集,反而会导致最终功率快速下降^[16]。

为缓解暴雨对光伏组件的消极影响,可以使用疏水性材料的光伏面板,以减轻积水和污秽停留在面板的概率^[17]。与此同时,还可以通过合理规划面板倾斜角度使污水快速流出面板的方法降低面板积水量。

2.3 降雪对光伏发电的影响

在极寒的气候条件下,雪会在光伏面板上堆积、停留,阻碍光线到达光伏面板。均匀的遮挡,例如云层的移动、均匀的沙尘覆盖,虽然也会减少系统的输出,但被雪部分遮挡的光伏组件会形成局部阴影,使得光伏电池的电流平衡和电池导电性能出现

复杂的变化,从根本上影响光伏功率输出。由于雪具有显著的光学特性——反照率,即地表反射辐射与入射辐射的比值,因此在研究和判断积雪对光伏组件的影响时还需要考虑雪的反照率的影响。

针对面板上的积雪,反照率会随着雪的融化降低,并且雪的含水量不断增加,辐射吸收会增加,使雪的透射性更差^[18],从而更加削弱到光伏面板的辐照度。图 3 展示了浅层雪层反照率与雪深的关系。可以看出对光伏发电而言,即使不考虑辐射吸收,厚度为 1 cm 的雪就能将潜在的辐射传输减少三分之二,足以严重阻碍电力生产。在冬季,太阳处于较低的角度,阳光穿过大气层的路径长度更长,入射辐照度更低。当面板上的雪超过 10 cm 时,光伏电池就会停止工作^[19]。

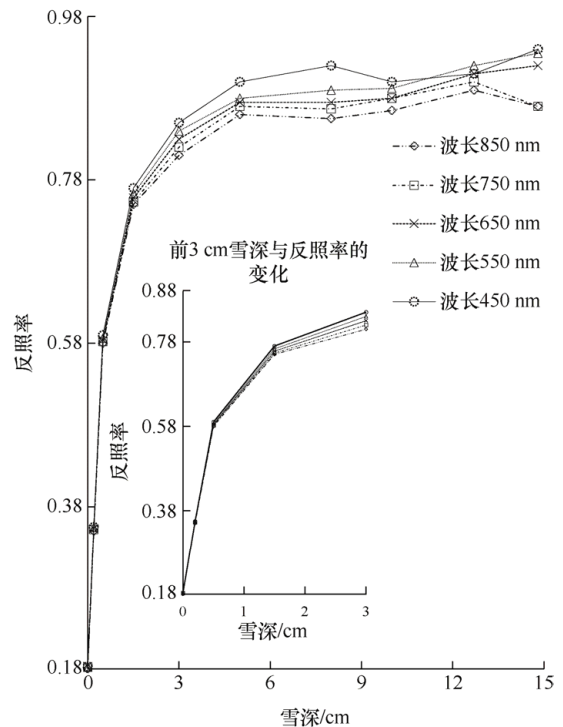


图 3 浅层雪层反照率与雪深的关系^[19]

针对地面的积雪,如果面板不被覆盖,雪的高反射率对光伏生产是有利的。有研究表明,雪地的平均反照率为 67%~75%,而无雪的开放自然环境

的反照率为10%~17%^[20]。图4为积雪对光伏发电影响示意图。可以看出,当雪地将太阳辐射反射到光伏面板上后,可以显著增加发电效率。

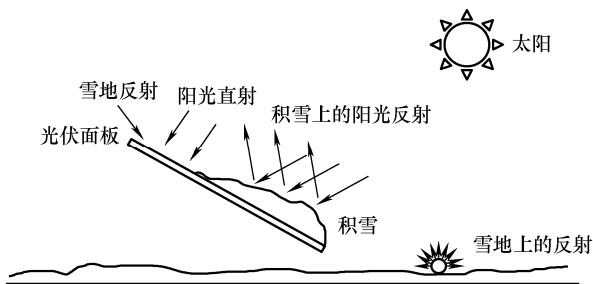


图4 积雪对光伏发电影响示意图

针对以上问题,可以通过增加光伏面板的倾斜角度、采用高吸收率的涂层以及对光伏面板的正面使用摩擦更小的涂层等方法来消除积雪对光伏面板的影响^[21]。

3 极端气候条件下光伏功率预测方法

光伏功率预测技术的方法和形式多样,可以从不同的角度进行分类,比如按照建模方式的不同分为物理方法^[22-23]和统计方法^[24-26];按照时间尺度的不同分为超短期^[27-28]、短期^[29-30]和中长期预测^[31-32]。针对极端气候条件下光伏功率的预测大多也基于基础的预测方法提出改进措施。本节从物理方法和统计方法两个角度总结极端气候条件下光伏功率的预测方法。

3.1 物理方法和统计方法

物理方法主要将光伏电站内部设备,例如逆变器、光伏电池板等的特性^[33],与数值天气预报(Numerical weather prediction, NWP)提供的辐照度、温度等气象要素^[34-35]相结合,建立光伏电站的物理模型。该方法建立的模型物理意义清晰,且不需要使用历史数据对其进行训练^[36]。但是由于物理方法涉及的流程和环节众多,并且高度依赖天气预测数值,缺乏时间和空间的分辨率^[37-40],因此该模型在极端天气或是缓慢变化的天气下存在较大误差,鲁棒性不强^[41]。图5为物理方法的光伏功率预测流程图。

统计方法不需要考虑光伏系统参数和光电转换模型^[42],即不需要利用光伏电站内部设备的特性来对其建模^[43],模糊了预测过程中各种元件的各类特性,直接建立输入、输出数据之间的映射关系,即采用黑盒的思想^[44]。统计方法通常需要大量的历史数据集,例如历史太阳辐射数据和光伏发电处理数据等^[45-46],因此需要工作了一段时间的光伏电站,并且历史数据的质量对最终结果会产生很大的影

响^[47-49]。图6为统计方法的光伏功率预测流程图。

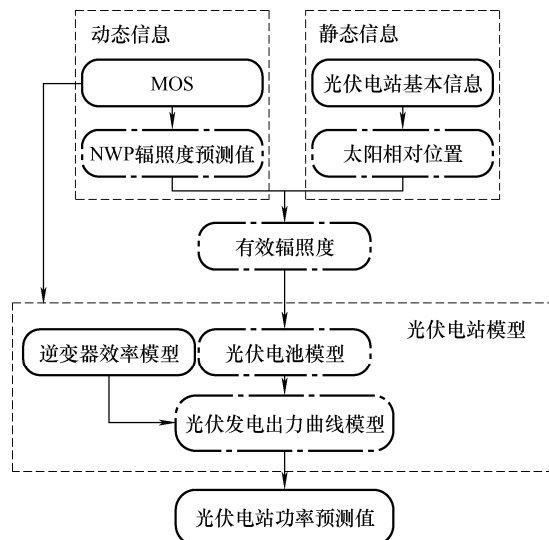


图5 物理方法的光伏功率预测原理图

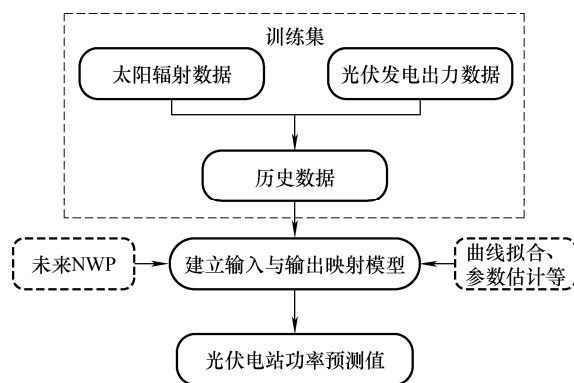


图6 统计方法的光伏功率预测流程图

3.2 沙尘条件下光伏功率的预测方法

采用物理方法对沙尘天气光伏发电量的预测大多通过计算由气溶胶引起的衰减后的辐照度来间接进行。例如使用遥感和建模技术通过预测沙尘对太阳辐照度的衰减得到辐照度衰减模型,再利用卫星和地面数据来预测极端沙尘事件对大气辐射的影响,进一步获得修正以后的光伏功率预测值^[50]。或是通过考虑沙尘粒子特征的影响,例如沙尘材料、尺寸分布等建立一个新的综合物理模型,来分析光伏面板上堆积的沙尘对太阳能电池板透光的影响,再根据这个模型计算光伏面板上接收到的有效太阳辐射,从而更加准确地进行光伏发电功率的计算^[51]。

采用统计方法对沙尘天气光伏发电量的预测大多在传统机器学习预测的基础上增加输入变量,例如增加由沙尘天气引起的气溶胶指数作为输入来整体提高预测精度。有研究提出了一种基于多层前馈神经网络(Back propagation, BP)的光伏日前功率预测模型。该模型在传统模型的基础上将气溶胶指数作为输入,使用BP人工神经网络方法对未来24 h

光伏发电量进行预测。结果表明，与传统的人工神经网络预测方法相比，该模型能显著提高预测精度^[52]。图像处理同样可以应用于统计方法的沙尘天气的光伏功率预测，主要方法是将图像处理应用于

光伏面板上的灰尘检测，并将其作为输入参数放入神经网络进行训练，得到修正后的光伏功率预测值^[53]。图 7 总结了常用的沙尘条件下光伏功率预测方法。

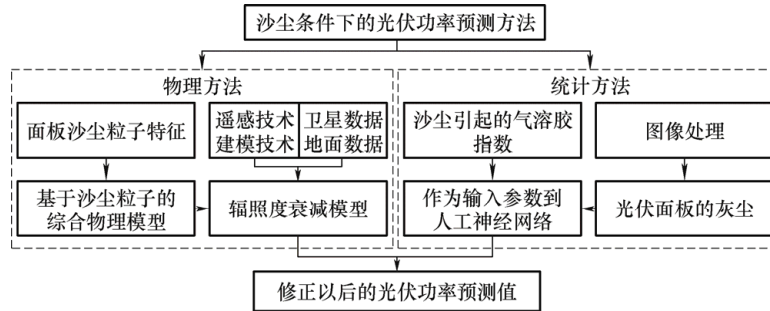


图 7 沙尘条件下的光伏功率预测方法总结

3.3 暴雨条件下光伏功率的预测方法

针对暴雨条件下光伏功率预测的物理方法同样也需要考虑光伏面板上积尘的影响，可以将不同降雨条件对光伏组件积尘输出功率的影响进行建模，并与全球太阳辐射的经验模型结合起来，构造不同降雨条件下光伏组件输出功率的预测模型^[14]，用于评估降雨等气象参数对光伏组件输出功率的影响。

关于使用机器学习的统计方法来进行降雨情况下的光伏功率预测，往往是先对所有天气进行天气分类，再使用不同的人工智能算法进行训练计算^[54]。先以天气为类别进行分组分类，其中包括暴雨。有研究使用支持向量机对模型进行训练，基于天气预报和历史发电数据建立光伏发电功率预测模型^[55]。图 8 总结了常用的暴雨条件下光伏功率预测方法。

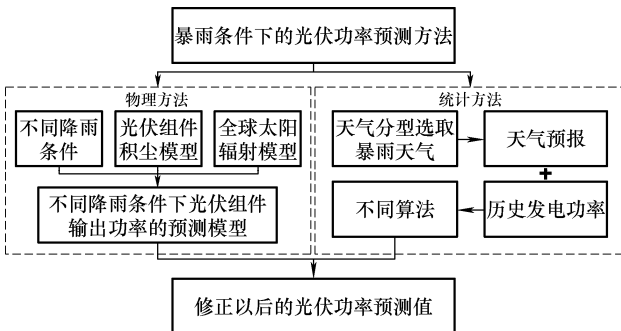


图 8 暴雨条件下的光伏功率预测方法总结

3.4 降雪条件下光伏功率的预测方法

基于物理方法的积雪条件下的光伏功率预测大多直接针对光伏面板上的积雪来进行，通过对积雪的形态和移动的变化建模来间接预测辐照度，从而进行光伏功率预测。也可以根据制定不

同的准则，例如积雪厚度、温度、降雪时间等，将其两两组合，用于描述光伏组件上积雪量的概率，从而实现对单个光伏系统进行光伏组件积雪的检测^[56]。还可以通过对光伏板上的积雪滑动和融化的情况进行分析，从而对光伏面板吸收的有效辐照度进行预测，有研究基于此提出了一种阈值型积雪模型，该模型可以显著提高积雪区光伏发电系统发电量预测的准确性^[57]。

基于统计方法的积雪条件下的光伏功率预测则是在将降雪数据作为神经网络的一部分输入，从而使得整个模型拥有更高的精度。例如有研究在晴空模型的基础上根据经验推导出了带积雪覆盖的损失因子，从而得到修正以后的晴空模型。再根据降雪数据和积雪覆盖损失因子建立前馈人工神经网络模型^[58]，从而提高雪天光伏功率预测的精度。图 9 总结了常用的降雪条件下光伏功率预测方法。

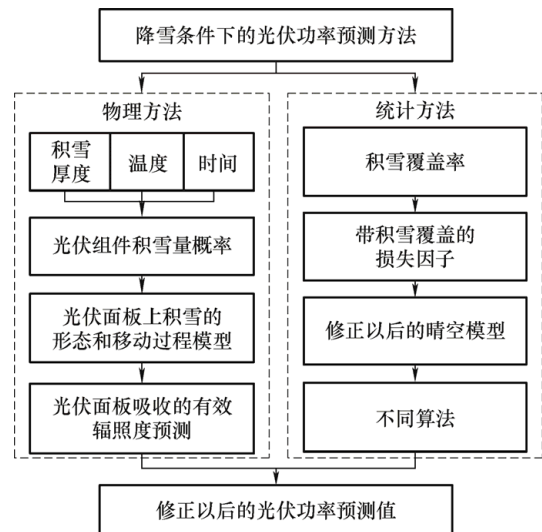


图 9 降雪条件下的光伏功率预测方法总结

4 光伏功率预测结果的评估指标

预测评估指标对于评估模型的预测精度至关重要。常用工具包括：相关系数(r)、均方根误差(Root mean square error, RMSE)、平均绝对百分比误差(Mean absolute percentage error, MAPE)和平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)等。不同的评价指标有不同的特点,表 1 为各评价指标的表达式^[59-61]。

表 1 评价指标公式总结

名称	公式
相关性系数	$r(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var X Var Y }}$
均方根误差	$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{Pi} - P_{Mi})^2}{N}}$
平均绝对误差	$E_{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{Pi} - P_{Mi} $
平均绝对百分比误差	$E_{MAPE} = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ P_{Pi} - P_{Mi} }{P_{Mi}}$
归一化均方根误差	$E_{nRMSE} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{Pi} - P_{Mi})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N P_{Pi}^2}}$
归一化平均绝对百分比误差	$E_{nMAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ P_{Pi} - P_{Mi} }{P_{Mi}} \times 100\%$

(1) 相关性系数 r 。用于表征两组曲线趋势的一致性,是研究变量之间线性相关程度的量。取值范围为 $[-1, 1]$,相关性系数越接近 1,表明变量之间的相关性越强,当相关系数越接近 0,表明变量之间的相关性越弱,当相关系数为负数时,表明变量之间呈负相关。相关性系数可以用于定量表述不同因素对光伏输出功率的影响程度。

(2) 均方根误差 E_{RMSE} 。主要利用预测值和实际观测值之间平方差的平均值的平方根来估计误差的平均值,衡量预测值同真值之间的偏差。在处理大偏差时表现良好,并且对数据中的异常值较为敏感。

(3) 平均绝对误差 E_{MAE} 。误差的绝对值称为平均绝对误差,是评估模型的统一预测误差。平均绝对误差用于表征预测结果与实际结果的平均偏离程度。

(4) 平均绝对百分比误差 E_{MAPE} 。平均绝对百分比误差是相对误差度量值,通过使用绝对值来避免正误差和负误差相互抵消,用于测量预测的准确性并证明真实数据集的预测多样性。

(5) 归一化均方根误差 E_{nRMSE} 。可以通过将 RMSE 除以全距或者均值来得到,常用来衡量大型数据集中的总体准确性^[62-63]。

(6) 归一化平均绝对百分比误差 E_{nMAPE} 。可以

通过将 MAPE 进行归一化(除以全距或者均值)得到,在衡量大型数据集中的总体准确性时使用^[64]。

表 1 中, $Cov(X, Y)$ 为 X 与 Y 的协方差; $Var|X|$ 为 X 的方差; P_{Pi} 为 i 时刻的预测功率; P_{Mi} 为 i 时刻的实际功率; N 为样本数量。

5 总结与展望

针对极端天气下的光伏功率预测技术随着近年来极端天气的频发受到越来越高的关注,本文根据近几年极端天气对光伏发电的影响以及光伏功率预测技术进行了综述。其中极端天气对光伏发电的影响大体可以分为对空气中气溶胶颗粒的影响、对光伏面板的遮挡以及对地表反照率的影响三个部分展开。针对极端天气的光伏功率预测也是通过分析极端天气对光伏电池造成的影响来对基础模型进行改进,从而使模型更具有针对性,对特定条件下的预测更加精确。同时采用物理方法和统计模型相结合也能大大提升预测精度,建立受极端天气影响的辐照衰减模型,结合统计模型增加输入变量等方法,综合提升整体精度。进一步总结了常用的预测精度评估指标以及对应的物理意义,不同的模型需要使用不同的精度评估指标。

未来关于极端气候条件下光伏功率的预测可能会聚焦在以下几个方面。

(1) 深入研究和挖掘特殊天气下光伏功率预测的输入数据,从多个维度来测量极端天气的各项指标,并在数据预处理上采取更优的解决方案。

(2) 由于极端气候对光伏功率预测的影响并不是瞬时的,因此可以将预测范围扩大到区间预测和概率预测。

(3) 采用更准确、更适用于极端气候的预测精度评价指标。可以在多种指标相互融合的基础上,针对不同类型的预测使用不同的评价指标。

参 考 文 献

- [1] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64.
WANG Can, ZHANG Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(6): 58-64.
- [2] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.

- LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.
- [3] DAS U K, TEY K S, SEYEDMAHMOUDIAN M, et al. Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 912-928.
- [4] 龚莺飞, 鲁宗相, 乔颖, 等. 光伏功率预测技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 140-151.
- GONG Yingfei, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. An overview of photovoltaic energy system output forecasting technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 140-151.
- [5] 闫钊汛, 王丽婕, 郭洪武, 等. 基于多特征分析和提取的短期光伏功率预测[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3734-3743.
- YAN Yixun, WANG Lijie, GUO Hongwu, et al. Short-term photovoltaic power prediction based on multi-feature analysis and extraction[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3734-3743.
- [6] 马金玉, 罗勇, 申彦波, 等. 太阳能预报方法及其应用和问题[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 829-837.
- MA Jinyu, LUO Yong, SHEN Yanbo, et al. A review on methods of solar energy forecasting and its application[J]. Resources Science, 2011, 33(5): 829-837.
- [7] 鞠冠章, 王靖然, 崔琛, 等. 极端天气事件对新能源发电和电网运行影响研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 77-83.
- JU Guanzhang, WANG Jingran, CUI Chen, et al. Impact of extreme weather events on new energy power generation and power grid operation[J]. Smart Power, 2022, 50(11): 77-83.
- [8] 杨文海, 程华新, 高亚静, 等. 计及雾霾影响的短期光伏出力预测和负荷预测[J]. 中国电力, 2016, 49(S1): 148-153.
- YANG Wenhai, CHENG Huaxin, GAO Yajing, et al. Short-term photovoltaic output forecast and load forecast considering the influence of fog and haze weather[J]. Electric Power, 2016, 49(S1): 148-153.
- [9] LI J, GAO Y J, LIU J P, et al. The research of grid short-term load forecasting considering with air quality index[C]//2014 International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2014, Chengdu, China. IEEE, 2014: 852-857.
- [10] 崔永琴, 冯起, 孙家欢, 等. 积尘对光伏电站发电功率的影响研究综述[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 270-277.
- CUI Yongqin, FENG Qi, SUN Jiahuan, et al. Review on the impact of dust accumulation on photovoltaic power output[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 270-277.
- [11] 张星辰, 吕建, 霍雨霞, 等. 积尘对光伏光热系统性能影响的实验研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(9): 1169-1174.
- ZHANG Xingchen, LÜ Jian, HUO Yuxia, et al. Experimental study on the effect of dust on the performance of photovoltaic photothermal system[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(9): 1169-1174.
- [12] MONTO M, PILLAI R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 3124-3131.
- [13] RAMLI M, PRASETYONO E, WICAKSANA R W, et al. On the investigation of photovoltaic output power reduction due to dust accumulation and weather conditions[J]. Renewable Energy, 2016, 99: 836-844.
- [14] YAO W X, KONG X R, XU A, et al. New models for the influence of rainwater on the performance of photovoltaic modules under different rainfall conditions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 173: 113-119.
- [15] PERO C D, ASTE N, LEONFORTE F. The effect of rain on photovoltaic systems[J]. Renewable Energy, 2021, 179: 1803-1814.
- [16] CHEN J X, PAN G B, OUYANG J, et al. Study on impacts of dust accumulation and rainfall on PV power reduction in east China[J]. Energy, 2020, 194: 116915.
- [17] HARTLEY J Y, MICHAEL O, THOMAS T, et al. Effects of photovoltaic module materials and design on module deformation under load[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2020, 10(3): 838-843.
- [18] PEROVICH D. Light reflection and transmission by a temperate snow cover[J]. Journal of Glaciology, 2007, 53(181): 201-210.
- [19] ANDENÆS E, JELLE B P, RAMLO K, et al. The influence of snow and ice coverage on the energy generation from photovoltaic solar cells[J]. Solar Energy, 2018, 159: 318-328.
- [20] WILLIAMSON S N, COPLAND L, HIK D S, et al. The accuracy of satellite-derived albedo for northern alpine and glaciated land covers[J]. Polar Science, 2016, 10(3): 262-269.
- [21] PAWLUK R, CHEN Y X, SHE Y T. Photovoltaic electricity generation loss due to snow: A literature review

- on influence factors, estimation, and mitigation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 107: 171-182.
- [22] MAYER M J, GRÓF G. Extensive comparison of physical models for photovoltaic power forecasting[J]. *Applied Energy*, 2021, 283: 116239.
- [23] DOLARA A, GRIMACCIA F, LEVA S, et al. A physical hybrid artificial neural network for short term forecasting of PV plant power output[J]. *Energies*, 2015, 8(2): 1138-1153.
- [24] 周文, 孟良, 杨正富, 等. 基于时间序列的大型光伏电站发电短期预测[J]. *电源技术*, 2021, 45(11): 1490-1494. ZHOU Wen, MENG Liang, YANG Zhengfu, et al. Short-term forecasting method of large-scale photovoltaic power station based on time series[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(11): 1490-1494.
- [25] WAN C, LIN J, SONG Y, et al. Probabilistic forecasting of photovoltaic generation: An efficient statistical approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(3): 2471-2472.
- [26] ZAMO M, MESTRE O, ARBOGAST P, et al. A benchmark of statistical regression methods for short-term forecasting of photovoltaic electricity production, part I: Deterministic forecast of hourly production[J]. *Solar Energy*, 2014, 105: 792-803.
- [27] 张家安, 郝峰, 董存, 等. 基于两阶段不确定性量化的光伏发电超短期功率预测[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(1): 69-77. ZHANG Jiaan, HAO Feng, DONG Cun, et al. Ultra-short-term power forecasting of photovoltaic power generation based on two-stage uncertainty quantization[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(1): 69-77.
- [28] 陈志宝, 丁杰, 周海, 等. 地基云图结合径向基函数人工神经网络的光伏功率超短期预测模型[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(3): 561-567. CHEN Zhibao, DING Jie, ZHOU Hai, et al. A model of very short-term photovoltaic power forecasting based on ground-based cloud images and RBF neural network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(3): 561-567.
- [29] 丁明, 徐宁舟. 基于马尔可夫链的光伏发电系统输出功率短期预测方法[J]. *电网技术*, 2011, 35(1): 152-157. DING Ming, XU Ningzhou. A method to forecast short-term output power of photovoltaic generation system based on Markov chain[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(1): 152-157.
- [30] 代倩, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于天气类型聚类识别的光伏系统短期无辐照度发电预测模型研究[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(34): 28-35. DAI Qian, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Short-term PV generation system forecasting model without irradiation based on weather type clustering[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(34): 28-35.
- [31] 赵书强, 胡利宁, 田捷夫, 等. 基于中长期风电光伏预测的多能源电力系统合约电量分解模型[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(11): 13-19. ZHAO Shuqiang, HU Lining, TIAN Jiefu, et al. Contract power decomposition model of multi-energy power system based on mid-long term wind power and photovoltaic electricity forecasting[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(11): 13-19.
- [32] 方鹏, 高亚栋, 潘国兵, 等. 基于 LSTM 神经网络的中长期光伏电站发电量预测方法研究[J]. *可再生能源*, 2022, 40(1): 48-54. FANG Peng, GAO Yadong, PAN Guobing, et al. Research on forecasting method of mid- and long-term photovoltaic power generation based on LSTM neural network[J]. *Renewable Energy Resources*, 2022, 40(1): 48-54.
- [33] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 1-14. DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 1-14.
- [34] 朱想, 居蓉蓉, 程序, 等. 组合数值天气预报与地基云图的光伏超短期功率预测模型[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(6): 4-10, 74. ZHU Xiang, JU Rongrong, CHENG Xu, et al. Controller architecture design for MMC-HVDC physical simulation system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(6): 4-10, 74.
- [35] LIN F, ZHANG Y, WANG J. Recent advances in intra-hour solar forecasting: A review of ground-based sky image methods[J]. *International Journal of Forecasting*, 2023, 39(1): 244-265.
- [36] MALVONI M, DEGIORGI M G, CONGEDO P M. Forecasting of PV power generation using weather input data-preprocessing techniques[J]. *Energy Procedia*, 2017, 126: 651-658.
- [37] 程泽, 李思宇, 韩丽洁, 等. 基于数据挖掘的光伏阵列发电预测方法研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(3): 726-733. CHENG Ze, LI Siyu, HAN Lijie, et al. PV power

- generation forecast based on data mining method[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(3): 726-733.
- [38] 孟安波, 陈嘉铭, 黎湛联, 等. 基于相似日理论和CSO-WGPR的短期光伏发电功率预测[J]. *高电压技术*, 2021, 47(4): 1176-1184.
- MENG Anbo, CHEN Jiaming, LI Zhanlian, et al. Short-term photovoltaic power generation prediction based on similar day theory and CSO-WGPR[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(4): 1176-1184.
- [39] DAVÒ F, ALESSANDRINI S, SPERATI S, et al. Post-processing techniques and principal component analysis for regional wind power and solar irradiance forecasting[J]. *Solar Energy*, 2016, 134: 327-338.
- [40] TRIVEDI R, PATRA S, KHADEM S. A data-driven short-term PV generation and load forecasting approach for microgrid applications[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 2022, 3(4): 911-919.
- [41] HAN S, QIAO Y, YAN J, et al. Mid-to-long term wind and photovoltaic power generation prediction based on copula function and long short term memory network[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 181-191.
- [42] SON N, JUNG M. Analysis of meteorological factor multivariate models for medium- and long-term photovoltaic solar power forecasting using long short-term memory[J]. *Applied Sciences*, 2020, 11(1): 316.
- [43] 杨丽薇, 高晓清, 蒋俊霞, 等. 基于小波变换与神经网络的光伏电站短期功率预测[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(7): 152-157.
- YANG Liwei, GAO Xiaoqing, JIANG Junxia, et al. Short-term photovoltaic output power prediction based on wavelet transform and neural network[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(7): 152-157.
- [44] MUNAWAR U, WANG Z. A framework of using machine learning approaches for short-term solar power forecasting[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2020, 15: 561-569.
- [45] MANDAL P, MADHIRA S T S, MENG J, et al. Forecasting power output of solar photovoltaic system using wavelet transform and artificial intelligence techniques[J]. *Procedia Computer Science*, 2012, 12: 332-337.
- [46] OSPINA J, NEWAZ A, FARUQUE M O. Forecasting of PV plant output using hybrid wavelet-based LSTM-DNN structure model[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(7): 1087-1095.
- [47] HUANG Y H, LU J, LIU C, et al. Comparative study of power forecasting methods for PV stations[C]//2010 International Conference on Power System Technology, October 24-28, 2010, Zhejiang, China. IEEE, 2010: 1-6.
- [48] GIORGI M G D, CONGEDO P M, MALVONI M. Photovoltaic power forecasting using statistical methods: Impact of weather data[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2014, 8(3): 90-97.
- [49] 刘杰, 陈雪梅, 陆超, 等. 基于数据统计特性考虑误差修正的两阶段光伏功率预测[J]. *电网技术*, 2020, 44(8): 2891-2897.
- LIU Jie, CHEN Xuemei, LU Chao, et al. Two-stage photovoltaic power forecasting and error correction method based on statistical characteristics of data[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 2891-2897.
- [50] MASOOM A, KOSMOPOULOS P, BANSALA, et al. Forecasting dust impact on solar energy using remote sensing and modeling techniques[J]. *Solar Energy*, 2021, 228: 317-332.
- [51] LI X C, NIU K. Effectively predict the solar radiation transmittance of dusty photovoltaic panels through Lambert-Beer law[J]. *Renewable Energy*, 2018, 123: 634-638.
- [52] LIU J, FANG W, ZHANG X, et al. An improved photovoltaic power forecasting model with the assistance of aerosol index data[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(2): 434-442.
- [53] SAQUIB D, NASSER M N, RAMASWAMY S. Image processing based dust detection and prediction of power using ANN in PV systems[C]//2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), August 20-22, 2020, Tirunelveli, India. IEEE, 2020: 1286-1292.
- [54] 叶林, 裴铭, 路朋, 等. 基于天气分型的短期光伏功率组合预测方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(1): 44-54.
- YE Lin, PEI Ming, LU Peng, et al. Combination forecasting method of short-term photovoltaic power based on weather classification[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(1): 44-54.
- [55] SHI J, LEE W J, LIU Y Q, et al. Forecasting power output of photovoltaic systems based on weather classification and support vector machines[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, 48(3): 1064-1069.
- [56] PAWLUK R, REZVANPOUR M, CHEN Y X, et al. A sensitivity analysis on effective parameters for sliding

- melting prediction of snow cover on solar photovoltaic panels[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 185: 103262.
- [57] TOVILOVIĆ D, ĐURIŠIĆ Ž. Tree-based machine learning models for photovoltaic output power forecasting that consider photovoltaic panel soiling[J]. *International Journal of Sustainable Energy*, 2022, 41(9): 1279-1302.
- [58] LORENZ E, HEINEMANN D, KURZ C. Local and regional photovoltaic power prediction for large scale grid integration: Assessment of a new algorithm for snow detection[J]. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2012, 20(6): 760-769.
- [59] VOYANT C, PAOLI C, MUSELLI M, et al. Multi-horizon solar radiation forecasting for Mediterranean locations using time series models[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 28: 44-52.
- [60] RAJAGUKGUK R A, RAMADHAN R A A, LEE H J. A review on deep learning models for forecasting time series data of solar irradiance and photovoltaic power[J]. *Energies*, 2020, 13(24): 6623.
- [61] GAO M, LI J, HONG F, et al. Day-ahead power forecasting in a large-scale photovoltaic plant based on weather classification using LSTM[J]. *Energy*, 2019, 187: 115838.
- [62] LATEKO A A H, YANG H T, HUANG C M. Short-term PV power forecasting using a regression-based ensemble method[J]. *Energies*, 2022, 15(11): 4171.
- [63] VAGROPOULOS S I, CHOULIARAS G I, KARDAKOS E G, et al. Comparison of SARIMAX, SARIMA, modified SARIMA and ANN-based models for short-term PV generation forecasting[C]//IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), April 04-08, 2016, Leuven, Belgium. IEEE, 2016: 1-6.
- [64] YIN W, HAN Y, ZHOU H, et al. A novel non-iterative correction method for short-term photovoltaic power forecasting[J]. *Renewable Energy*, 2020, 159: 23-32.
-
- 作者简介: 陈思宇, 女, 2000 年生, 硕士研究生。主要研究方向为光伏功率预测。
E-mail: chensiy121@163.com
- 蒋俊霞, 女, 1985 年生, 博士, 讲师。主要研究方向为陆面过程和能源气象。
E-mail: 85978554@qq.com
- 李帅兵(通信作者), 男, 1989 年生, 博士, 教授。主要研究方向为新能源电力系统装备检测与运行安全。
E-mail: shuaibingli@mail.lzjtu.cn