

引用格式:周程晟,方世东. 漂浮式海上光伏智能气候预警平台的实践与研究[J]. 南方能源建设, 2025, 12(1): 75-82. ZHOU Chengsheng, FANG Shidong. Practice and research of floating offshore photovoltaic intelligent climate early warning platform [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 75-82. DOI: 10.16516/j.ceec.2023-277.

# 漂浮式海上光伏智能气候预警平台的实践与研究

周程晟<sup>1,2,✉</sup>, 方世东<sup>3</sup>

- (1. 诺斯曼能源科技(北京)股份有限公司, 北京 100012;  
2. 南开大学海洋工程研究中心, 天津 300071;  
3. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** [目的]旨在探索一种新型的漂浮式海上光伏系统, 该系统不仅能够有效收集海上太阳能资源, 还能实现智能化气候预警功能。[方法]研究通过结合海上光伏技术与智能化气象监测技术, 构建一种可行的智能化海上光伏气候预警平台。首先, 利用漂浮式海上光伏平台将太阳能转化为电能; 其次, 通过智能化监测系统实时监测海洋天气状况并发出预警, 以提高光伏发电的可靠性。[结果]试验表明, 该漂浮式海上光伏系统能够在不同海域及气象条件下有效收集太阳能, 并利用智能化气象监测系统及时预警海洋气象变化。[结论]研究发现该平台具有广阔的应用前景和市场潜力, 可为海洋可再生能源发展提供借鉴, 并向相关研究与实践提供思路与方法。

**关键词:** 海上光伏; 漂浮式; 气候预警; 智能监测; AI 算法

DOI: 10.16516/j.ceec.2023-277

文章编号: 2095-8676(2025)01-0075-08

CSTR: 32391.14.j.ceec.2023-277

中图分类号: TK519; TM615



论文二维码

## Practice and Research of Floating Offshore Photovoltaic Intelligent Climate Early Warning Platform

ZHOU Chengsheng<sup>1,2,✉</sup>, FANG Shidong<sup>3</sup>

- (1. Northman Energy Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100012, China;  
2. Ocean Engineering Research Center of Nankai University, Tianjin 300071, China;  
3. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China)

**Abstract:** [Objective] This paper aims to explore a novel floating offshore photovoltaic system that not only effectively collects marine solar energy but also performs intelligent climate early warning. [Method] By integrating offshore photovoltaic technology with intelligent meteorological monitoring technology, we developed a viable intelligent offshore photovoltaic climate early warning platform. Firstly, the floating offshore photovoltaic platform was used to convert solar energy into electrical energy. Secondly, the intelligent monitoring system monitored ocean weather conditions in real-time and gave early warnings to improve the reliability of photovoltaic power generation. [Result] Tests show that the floating offshore photovoltaic system can effectively collect solar energy under different sea areas and weather conditions, and the intelligent meteorological monitoring system is used to timely give early warnings on the changes in marine meteorology. [Conclusion] This study finds that the platform has broad application prospects and market potential. It can provide references for the development of marine renewable energy and provide ideas and methods for related research and practice.

**Key words:** offshore photovoltaic; floating; climate early warning; intelligent monitoring; AI algorithm

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-10-07 修回日期: 2023-11-21 网络首发日期: 2024-03-13

基金项目: 南开大学功能高分子材料教育部重点实验室开放课题基金资助项目“二维层状无机卤化物太阳能电池的关键配体设计及光伏性能研究”(KLFPM202303); 合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室)协同创新资助项目(GXXT-2022-026)

## 0 引言

近年来,随着可再生能源的快速发展和环境保护意识的增强,光伏发电作为一种清洁、可持续的能源形式<sup>[1-2]</sup>,受到了广泛的关注和应用。传统的陆地光伏发电系统由于占地面积大、成本高、受地理环境限制等问题,其发展受到了一定的约束。相比之下,海洋作为一种广阔且未充分开发的资源,为光伏发电提供了新的可能性。然而,充分利用海洋资源并提高光伏发电的可靠性,是对海洋光伏发电系统的一大挑战,也已成为当前光伏发电领域的研究热点<sup>[3-4]</sup>。

目前国内海上光伏大多是近海区域桩基础形式,深远海区域光伏由于建设环境和成本受限,更适合采用漂浮式支撑形式。漂浮式支撑现阶段试点应用结构为成本较高的大型钢结构形式,对于运用大面积海上光伏发电还需进一步优化。然而,海洋气候环境多变,没有针对海上光伏电站特点来对其进行监测与预警,确保海上光伏电站安全稳定运行的系统平台。

在“双碳”背景下,文章旨在探讨一种新型的漂浮式海上光伏系统。该系统不受地理环境限制,具备在不同海域自主漂浮的能力,能最大限度地接收太阳能资源。与传统光伏系统不同,该系统结合了光伏发电技术和气象监测技术,旨在提高海洋太阳能资源的高效利用。另一方面,该系统还设计了一个智能气候预警平台,该平台是系统的重要组成部分,旨在实现实时的气象监测和预警。这种全新的系统设计,有望为海洋光伏发电带来创新性的发展思路和方法。在构建一种新型的漂浮式海上光伏智能气候预警平台,以实现海洋太阳能资源的高效利用和智能化的气象监测。通过实际试验和理论分析,期望能够进一步验证该平台的发电效率(海面波动导致漂浮式光伏组件的倾角不断变化,以及组件与海面的近距离,可能会影响组件背面的温度,从而影响光伏发电效率)和气象监测能力,并探索其应用前景和 market 价值,为海洋可再生能源领域的发展做出贡献。

## 1 漂浮式海上光伏发电系统概述

### 1.1 漂浮式海上光伏发电系统的原理与模型

漂浮式海上光伏发电系统是一种新型的海上发电系统,采用了光伏发电技术与海洋工程相结合的方式,能够在海上利用太阳能进行发电。漂浮式海

上光伏发电系统与传统的陆地光伏发电系统相比,具有一定的优势和特点。

首先,漂浮式海上光伏发电系统可以充分利用海洋资源。由于海洋空间广阔,地域限制少,具备在海洋中任意位置进行布置的条件。规避了陆地资源有限的问题。

其次,由于系统部署在海上,减少了对生态环境的影响。同时,海水可以有效降低光伏组件的温度,提高发电效率。

如图 1 所示,漂浮式海上光伏发电系统的模型主要包括光伏组件、支架系统和逆变并网系统 3 个主要部分。光伏组件是核心部件,其表面覆盖有光敏材料,能够将太阳能光照转化为电能。支架系统用于支撑和固定光伏组件,使其能够在海上稳定运行。逆变并网系统则负责将光伏组件产生的电能逆变并网,供给电网使用。



图 1 漂浮式光伏电站

Fig. 1 Floating photovoltaic power station

在漂浮式海上光伏发电系统的设计和建设过程中,需要考虑多个因素。首先,考虑到海洋环境的复杂性和恶劣性,需要选择合适的材料和结构设计,以确保系统的稳定性和耐久性。其次,考虑到海洋生态环境的保护,需要选择环保的材料和建设方式,减少对海洋生态系统的影响。此外,还需要考虑光伏组件的布置方式和逆变并网系统的设计,以确保系统的发电效率和电力传输的稳定性。

漂浮式海上光伏发电系统是一种新兴的海上发电技术,具有充分利用海洋资源、具有一定的安全性等优势。通过合理的设计和建设,可以实现高效稳定的出力。未来,随着技术的不断发展和创新,漂浮式海上光伏发电系统有望成为海洋能源利用的重要方式之一。

## 1.2 漂浮式海上光伏发电系统的结构与配置

漂浮式海上光伏发电系统是充分利用海洋空间进行可再生能源生产的一种创新型技术。其主要由浮体结构、光伏组件、固定与定向系统、电缆系统以及泊位设备等几个核心部分构成,如图2所示。

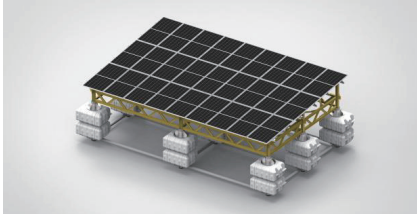


图2 海上漂浮式光伏结构

Fig. 2 Floating photovoltaic structure at sea

**浮体结构:**是整个系统的基础,由HDPE材料制成,能适应各种海洋环境,提供足够的浮力并能承受光伏组件及其他设备的重量。

**光伏组件:**是发电系统的核心,采用高效的晶体硅光伏组件。为增强耐久性并保证长期的输出功率,光伏组件通常需要有防盐雾、防紫外线以及防潮湿的特性。

**固定与定向系统:**在海洋环境中,光伏组件面临风浪和潮汐等因素的影响,因此需要安装固定与定向系统以保持其面向阳光,从而保证电力生成的效率。

**电缆系统:**由于海上光伏<sup>[5-6]</sup>发电系统通常离岸较远,因此需要安装特殊的海底电缆来连接发电系统和陆上电网。这些电缆需要有足够的强度来抵抗海洋环境的影响,同时也需要有良好的绝缘性能。

**泊位设备:**为保证漂浮式海上光伏发电系统能稳定地停留在预定海域,需要配备锚链和系泊设备。这些设备需要考虑到海洋深度、海底状况以及风浪等因素,以保证系统的稳定性。

总的来说,漂浮式海上光伏发电系统的设计和配置需要充分考虑到海洋环境的特性,采用适应性强、耐久性好的材料和设备,同时也需要考虑到系统的经济性与可维护性,以保证其长期高效地运行。

## 1.3 漂浮式海上光伏发电系统的实际运行状况分析

漂浮式海上光伏发电系统实际运行时,海洋气候的相关性是一个不可忽视的要素。海洋气候对系统的性能、耐久性和维护需求产生很大的影响。

海洋气候的变化对漂浮式海上光伏发电系统的性能有着显著的影响。太阳辐射强度、温度、云量、海水

盐度和海浪等都是影响光伏电池板性能的关键因素。

由于海洋气候的特性,云层覆盖度和雾的出现将显著降低太阳辐射的强度,从而影响光伏电池板的发电效率。海水温度的升高可能会导致电池板过热,从而降低其效率。

海洋气候的恶劣条件,如高盐度、强风、大浪和湿度,对漂浮式海上光伏发电系统的耐久性和维护需求构成了挑战。高盐度环境可能会加速系统组件的腐蚀,破坏电池板表面的抗反射涂层,影响电池板的性能和寿命。

强风和大浪可能会对系统的物理稳定性产生威胁,导致其移位或损坏。此外,湿度可能会增加电池板表面的污染,降低其效率,同时可能会导致电气接口的腐蚀,增加系统故障的风险。

漂浮式海上光伏在海洋环境中的应用如图3所示。漂浮式海上光伏发电系统在实际应用中还存在一些挑战和问题。海洋环境的复杂性和不确定性会对系统的运行和维护造成一定的困难。光伏发电技术的成本和效益也需要进一步优化和改进。漂浮式海上光伏发电系统的可持续性和环境影响需要进一步研究和评估。

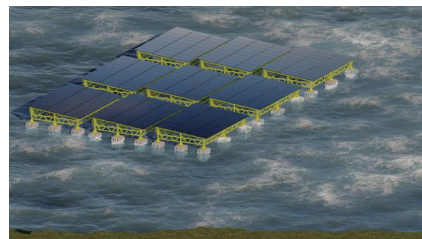


图3 漂浮式海上光伏在海洋环境中的应用

Fig. 3 Application of floating offshore photovoltaic in the marine environment

## 2 气候预警在光伏系统中的重要性

### 2.1 气候预警对光伏发电效率的影响

在漂浮式海上光伏智能气候预警<sup>[7-8]</sup>平台建设中,气候预警是一个重要的因素,它对光伏发电效率产生着直接的影响。光伏发电是利用光能将太阳辐射转化为电能的过程,而气候因素会直接影响太阳辐射的强度和稳定性,从而影响光伏发电的效率。

气候因素中的温度对光伏发电效率具有显著的影响。在高温环境下,光伏电池的发电效率会明显下降。光伏电池主要是通过半导体材料的光电效应

来工作。当阳光照射在半导体材料上,阳光中的光子有足够的能量激发电子从价带跃迁到导带,导带中的电子和价带中的空穴形成电子-空穴对<sup>[9-11]</sup>。在内部电场的作用下,电子和空穴分离,形成电流。当温度升高,半导体的能隙会缩小,这就导致了光电效应效率下降,也就是说,每个光子能够激发的电子数目减少,从而导致电流的减少。同时,半导体材料的载流子浓度也会随着温度的升高而增大,这将会增加材料的电阻,从而减小电压。光伏电池的工作温度升高,会导致其电流和电压都降低,从而使得输出功率下降。这也是为什么光伏电池的效率会随着温度的升高而下降的原因<sup>[12]</sup>,如图 4 所示。因此,在气候预警平台中,及时对温度监测和预警,采取相应的措施,如降低光伏电池的工作温度,以提高光伏发电效率。

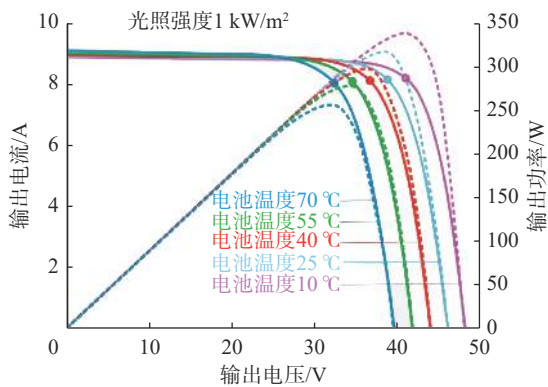


图 4 不同温度的伏安特性曲线与电压功率曲线

Fig. 4 Volt-ampere characteristic curve and voltage power curve under different temperatures

气候因素中的光照强度也对光伏发电效率有重要影响,如图 5 所示。在阴雨天气或夜晚,光照强度会明显降低,从而导致光伏发电效率下降。因此,在气候预警平台中,对于可能出现降低光照强度的天气情况进行预警,减少对电网的影响。

气候因素中的风速也会对光伏发电效率产生影响,如图 6 所示。在强风天气下,光伏组件容易受到风力的冲击,从而导致损坏或位移,进而影响光伏发电的效率。对于可能出现强风天气的预警提前采取措施,如加强光伏组件的固定或采用防风措施,以保障光伏系统的稳定。

通过在漂浮式海上光伏智能气候预警平台中引入气象监测和预警系统,可以及时掌握气候变化情况,采取相应的措施以提高光伏系统稳定,降低对电

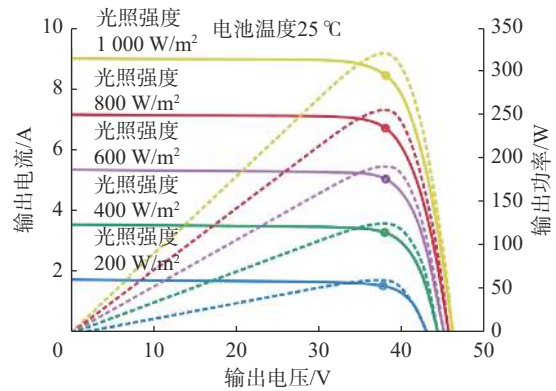


图 5 不同辐照下的伏安特性曲线与电压功率曲线

Fig. 5 Volt-ampere characteristic curve and voltage power curve under different irradiation

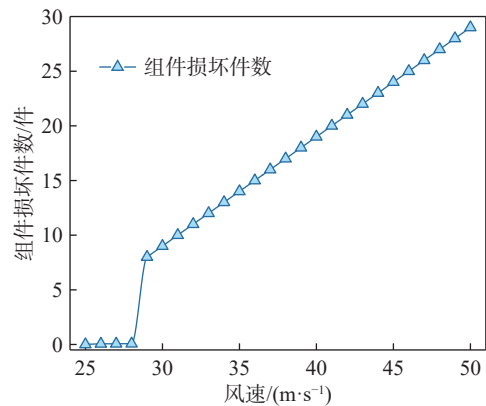


图 6 不同风速下光伏组件破损分析

Fig. 6 Analysis of the damage photovoltaic modules at different wind speeds

网影响。这对海上光伏发电的可靠性和持续性具有重要意义。

## 2.2 气候预警对保障光伏系统正常运行的观察

气候预警平台在运行保障时,对漂浮式光伏电站使用状况,环境温湿度、监控摄像、AI 识别等数据进行实时监测、管理和控制,并能够实现安全指标的对比、分析甚至预测,运维人员及时觉察异常,辅助管理决策。

如图 7 所示,试验的预警平台位于天津滨海区漂浮式海上光伏电站。该试验平台可以提前预测恶劣天气,并提供足够的时间以进行必要的防护措施。例如,当预警系统检测到即将有强风来临时,平台运营人员可以通过调整光伏板的角度,避免直接面对风向,从而减少可能的损害。对于暴雨或冰雹的预警,运营人员可以部署防护罩,保护光伏组件不受损害。

在实际运行中,该气候预警系统已经显示出其



图 7 海上光伏智能气候预警平台中心界面

Fig. 7 Center interface of offshore photovoltaic intelligent climate early warning platform

重要的价值。例如,在过去的一年中,该平台遭遇了多次恶劣天气,包括严重的风暴和冰雹。但由于及时的气候预警和防护措施,这个光伏电站的设备并未受到严重损害,运行效率也始终保持在预期的水平。

试验说明,气候预警对于保障漂浮光伏电站的正常运行具有重要的作用。通过及时预测并应对气候变化,可以有效减少设备的损坏,保证光伏系统的稳定运行。而实际运行的平台已经证明了这一点,气候预警系统的投入使用,可以提升海上光伏发电系统的运行效率和安全性。

### 3 漂浮式海上光伏智能气候预警平台的建设

在国内,尽管漂浮式海上光伏发电项目正在逐步推进,但其气候预警系统的建设还相对落后。当前的气候预警系统主要聚焦在陆地环境的预警,对海上特有的气候条件如台风、海浪、盐雾等的预警能力有限。目前的预警系统大多依赖人工巡查和维护,效率较低。现有的气候预警系统的预警时间通常较短,对于需要提前采取保护措施恶劣天气,如台风,可能无法提供充足的预警时间。

#### 3.1 整合光伏系统与气候预警系统的架构设计

在实现整合的过程中,需要设计一个合理的架构,以确保光伏系统与气候预警系统之间的数据交互和信息共享,如图 8 所示。

首先,搭建一个数据采集和监测系统,通过传感器和监测设备实时采集光伏系统的运行数据和气象数据。这些数据可以包括光伏组件的输出功率、温度、辐照度等指标,以及气象数据如温度、湿度、风

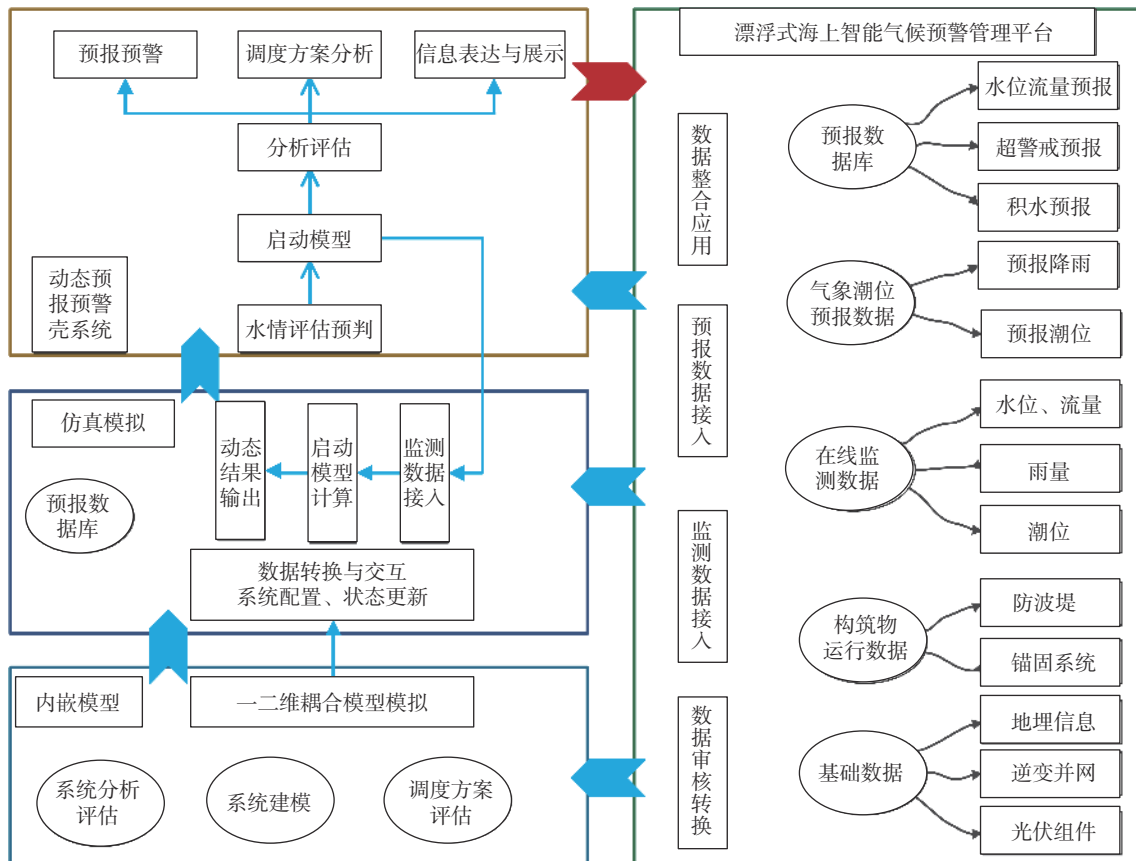


图 8 海上气候预警系统架构设计原理

Fig. 8 Design principle of offshore climate early warning system architecture

速等。然后,将采集到的数据传输到数据处理和分析平台,对数据进行处理和分析,提取出有用的信息。如图 9 所示,通过对光伏系统和气象数据的分析,可以预测光伏系统的性能和气候变化的趋势,为智能化的能源管理提供支持。

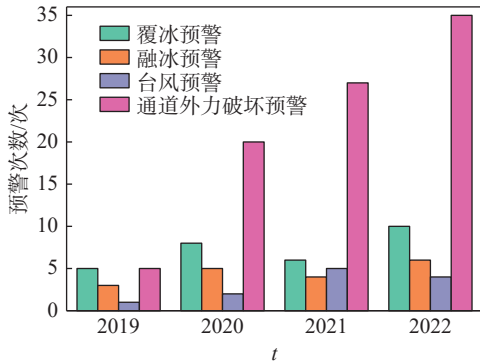


图 9 漂浮式海上光伏智能气候预警平台应用情况统计

Fig. 9 Statistics on the application of floating offshore photovoltaic smart climate early warning platform

在架构设计中,要考虑到数据的存储和管理。通过建立一个数据库系统,可以存储和管理大量的光伏系统和气象数据。同时,通过数据挖掘和机器学习等技术,对数据进行深度分析和挖掘<sup>[13-14]</sup>,发现其中的规律和关联性。

通过利用预测模型和优化算法,实现对光伏系统的最优控制和调度。例如,在光照强度较弱的时候,通过调整光伏组件的倾角和方向,最大限度地提高光伏组件的发电效率。根据气象数据的变化,实时调整光伏系统的运行策略,提高系统的适应性和稳定性。

### 3.2 基于 AI 算法的智能气候预警平台模型

智能气候预警平台是近年来快速发展的一项关键技术,它可以通过数据分析和人工智能算法,提供准确的气候预测和预警服务。在海上光伏发电领域,智能气候预警平台的建设对于提高能源的利用效率和安全性具有重要意义。

基于 AI 算法的智能气候预警平台模型是一种集成了人工智能和气象数据分析的预测模型。如图 10 所示,该模型首先通过收集和整理海上光伏电站的历史气象数据和发电数据,建立完整的数据集。然后,利用 AI 算法对这些数据进行分析 and 训练,以建立准确的预测模型。

在模型的建立过程中,可以利用一些常见的 AI 算法,如支持向量机(SVM)和人工神经网络(ANN)<sup>[15]</sup>。这些算法可以通过对历史数据的学习和分析,提取出不同气象因素对于光伏发电的影响规律,并据此进行预测。同时,还可以结合其他辅助数据,如海洋气象站的实时数据和卫星遥感数据,来提高预测的准确性。

在智能气候预警平台模型的实际应用中,可以利用该模型对未来一段时间内的气象情况进行预测。通过对不同气象因素对光伏发电的影响程度进行评估和分析<sup>[16-17]</sup>,可以及时发出预警信号,以减少光伏电站的气候恶劣条件下的损失和风险。

与此同时,基于 AI 算法的智能气候预警平台模型还可以进行实时监测和数据分析<sup>[18-20]</sup>。通过实时采集和更新海上光伏电站的气象数据和发电数据,

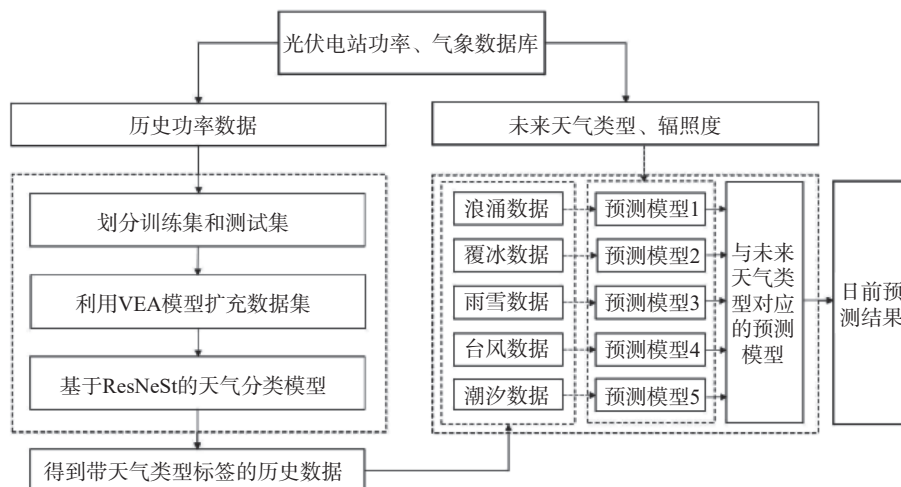


图 10 基于 AI 算法的智能气候预警平台架构

Fig. 10 Smart climate early warning platform architecture based on AI algorithm

可以不断优化和更新预测模型, 提高预测的准确性和实用性。

基于 AI 算法的智能气候预警平台模型在漂浮式海上光伏智能气候预警平台的建设中具有重要的作用。通过对历史数据的分析和学习, 以及对实时数据的监测和预测, 该模型可以提供准确的气象预警和预测服务, 为光伏电站的运营和管理提供有力的支持。在未来的研究中, 还可以进一步优化和改进该模型, 以提高其预测的准确性和实用性。

## 4 结论

文章构建了一种新型的漂浮式海上光伏智能气候预警平台, 充分结合了光伏技术和气象监测技术, 基于 AI 算法, 实现了高效的海洋太阳能资源利用和实时的气象监测。这一独特的设计实现了光伏发电的最大化并提供了准确的气候预警信息, 并为光伏发电系统的运行和维护提供了可靠依据, 保障了光伏系统的可靠性和高效性。

试验结果证实了该平台在能源收集效率和气候监测能力方面的优势。文章不仅为海洋可再生能源的开发提供了新的思路, 也为未来的光伏发电系统和气象预警系统提供了重要的参考。

然而, 尽管已取得了重要的研究进展, 但漂浮式海上光伏智能气候预警系统的优化与升级仍有待进一步探索。通过持续的研究和改进, 该平台将在海洋可再生能源领域发挥重要作用, 促进可再生能源的可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 田明昕. 分布式光伏并网对配电网稳态运行的影响研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020. DOI: [10.27327/d.cnki.gshnu.2020.001057](https://doi.org/10.27327/d.cnki.gshnu.2020.001057).  
TIAN M X. The influence of distributed power grid-connection on steady state operation of distribution network [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. DOI: [10.27327/d.cnki.gshnu.2020.001057](https://doi.org/10.27327/d.cnki.gshnu.2020.001057).
- [2] 刘宇, 赵映, 李世朝. 光伏发电系统在火力发电厂的应用研究 [J]. *内蒙古电力技术*, 2022, 40(2): 36-39. DOI: [10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0026](https://doi.org/10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0026).  
LIU Y, ZHAO Y, LI S Z. Research on application of photovoltaic power generation system in thermal power plant [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2022, 40(2): 36-39. DOI: [10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0026](https://doi.org/10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0026).
- [3] 高文祥. 反激式光伏微型逆变器的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012. DOI: [10.7666/d.y2153026](https://doi.org/10.7666/d.y2153026).  
GAO W X. Research on flyback type photovoltaic micro-inverter [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. DOI: [10.7666/d.y2153026](https://doi.org/10.7666/d.y2153026).
- [4] 宋天琦, 马韵婷, 张智慧. 光伏耦合电解水制氢系统作为虚拟电厂资源的运行模式与经济性分析 [J]. *发电技术*, 2023, 43(4): 465-472. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.22181](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.22181).  
SONG T Q, MA Y T, ZHANG Z H. Operation mode and economy of photovoltaic coupled water electrolysis hydrogen production system as a kind of virtual power plant resource [J]. *Power generation technology*, 2023, 43(4): 465-472. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.22181](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.22181).
- [5] 朱军辉. 海水抽水蓄能与海上光伏一体化发电技术及经济性分析 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 11-17. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.002).  
ZHU J H. Analysis of power generation technology and economy on the integration of seawater pump & storage and offshore PV [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 11-17. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.002).
- [6] 陈继平, 李刚, 刘博, 等. 薄膜型海上漂浮式光伏技术现状及展望 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 1-10. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.001).  
CHEN J P, LI G, LIU B, et al. Current status and prospect of membrane-based offshore floating photovoltaic technology [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 1-10. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.001).
- [7] 周冰. 海上风电机组智能故障预警系统研究 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(2): 133-137. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.019](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.019).  
ZHOU B. Research on intelligent fault warning system of offshore wind turbines [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(2): 133-137. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.019](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.019).
- [8] 周程晟. 海上漂浮光伏电站防雷设计 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(6): 102-110. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.6.11](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.6.11).  
ZHOU C S. Lightning protection design of offshore floating photovoltaic power station [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(6): 102-110. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.6.11](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.6.11).
- [9] 许国泽. 激光辐照对太阳能光伏电池特性的影响研究 [J]. *自动化技术与应用*, 2023, 42(8): 128-132. DOI: [10.20033/j.1003-7241.\(2023\)08-0128-05](https://doi.org/10.20033/j.1003-7241.(2023)08-0128-05).  
XU G Z. Research on the influence of laser irradiation on the characteristics of solar photovoltaic cells [J]. *Techniques of automation and applications*, 2023, 42(8): 128-132. DOI: [10.20033/j.1003-7241.\(2023\)08-0128-05](https://doi.org/10.20033/j.1003-7241.(2023)08-0128-05).
- [10] 周德佳, 赵争鸣, 吴理博, 等. 基于仿真模型的太阳能光伏电池阵列特性的分析 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(7): 1109-1112, 1117. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0054.2007.07.006](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0054.2007.07.006).  
ZHOU D J, ZHAO Z M, WU L B, et al. Analysis characteristics of photovoltaic arrays using simulation [J]. *Journal of Tsinghua*

- University (Natural Science Edition), 2007, 47(7): 1109-1112, 1117. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0054.2007.07.006](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0054.2007.07.006).
- [11] 成志秀, 王晓丽. 太阳能光伏电池综述 [J]. 信息记录材料, 2007, 8(2): 41-47. DOI: [10.3969/j.issn.1009-5624.2007.02.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-5624.2007.02.009).  
CHENG Z X, WANG X L. The expatiates of the solar energy photovoltaic cell [J]. *Information recording materials*, 2007, 8(2): 41-47. DOI: [10.3969/j.issn.1009-5624.2007.02.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-5624.2007.02.009).
- [12] 杨晶晶, 刘永生, 谷民安, 等. 太阳能光伏电池冷却技术研究 [J]. 华东电力, 2011, 39(1): 81-85.  
YANG J J, LIU Y S, GU M A, et al. Research on cooling technology for solar photovoltaic cells [J]. *East China electric power*, 2011, 39(1): 81-85.
- [13] 曹亚兴. 土壤蓄热与 PV/T 耦合系统夏季运行特性研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2021. DOI: [10.27008/d.cnki.gdbdc.2021.000033](https://doi.org/10.27008/d.cnki.gdbdc.2021.000033).  
CAO Y X. Study on operating characteristics of soil heat storage and PV/T systems [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2021. DOI: [10.27008/d.cnki.gdbdc.2021.000033](https://doi.org/10.27008/d.cnki.gdbdc.2021.000033).
- [14] 张孟昭. 运营商移动通信网络精准投资优化研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2021. DOI: [10.26969/d.cnki.gbydu.2021.001349](https://doi.org/10.26969/d.cnki.gbydu.2021.001349).  
ZHANG M Z. Research on precision investment optimization of mobile communication network for operators [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021. DOI: [10.26969/d.cnki.gbydu.2021.001349](https://doi.org/10.26969/d.cnki.gbydu.2021.001349).
- [15] 中国电子技术标准化研究院. 信息物理系统 (CPS) 典型应用案例集 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.  
Written by China Institute of Electronic Technology Standardization. Typical application cases of information physical systems (CPS) [M]. Beijing: Press of Electronic Industry, 2019.
- [16] 李欣. 光伏电站电能质量监测及异常预警研究 [D]. 安徽: 合肥工业大学, 2021. DOI: [10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.000234](https://doi.org/10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.000234).  
LI X. Research on monitoring and abnormal warning of power quality of photovoltaic power station [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021. DOI: [10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.000234](https://doi.org/10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.000234).
- [17] 郭婕, 厉虹, 王丽婕. 基于样本双重选择的马尔科夫链光伏功率预测 [J]. 北京信息科技大学学报, 2019, 34(6): 14-18. DOI: [10.16508/j.cnki.11-5866/n.2019.06.003](https://doi.org/10.16508/j.cnki.11-5866/n.2019.06.003).  
GUO J, LI H, WANG L J. Markov chain photovoltaic power forecasting based on sample dual selection [J]. *Journal of Beijing Information Science & Technology University*, 2019, 34(6): 14-18. DOI: [10.16508/j.cnki.11-5866/n.2019.06.003](https://doi.org/10.16508/j.cnki.11-5866/n.2019.06.003).
- [18] 陈锋, 许绍松, 李张铮. 构建基于 AI 算法的无线网络智能扩容优化体系 [J]. 邮电设计技术, 2020(10): 36-40. DOI: [10.12045/j.issn.1007-3043.2020.10.008](https://doi.org/10.12045/j.issn.1007-3043.2020.10.008).  
CHEN F, XU S S, LI Z Z. Construction of radio network intelligent expansion based on AI algorithm [J]. *Designing techniques of posts and telecommunications*, 2020(10): 36-40. DOI: [10.12045/j.issn.1007-3043.2020.10.008](https://doi.org/10.12045/j.issn.1007-3043.2020.10.008).
- [19] 吴集. 多智能体仿真支撑技术、组织与 AI 算法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.  
WU J. Research on infrastructure, organizations and AI algorithms for multi-agent simulation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [20] 王小虎. 海上船舶融合识别算法研究与改进 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(4): 131-137. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.013](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.013).  
WANG X H. Research and improvement of offshore ship fusion recognition algorithm [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(4): 131-137. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.013](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.013).

---

作者简介:



周程晟

周程晟(第一作者, 通信作者)

1988-, 男, 凝聚态物理学专业博士, 注册电气工程师, 主要从事海上光伏设计方面的工作(e-mail)zhoutw@hotmail.com。

方世东

1975-, 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事低温等离子体应用研究涉及到等离子体化学、等离子体物理、能源化工及材料领域研究工作(e-mail)fangsd@ipp.ac.cn。

(编辑 徐嘉铨)