

基于人工智能的可再生能源电解水制氢 关键技术及发展前景分析

杨博, 张子健

(昆明理工大学电力工程学院, 云南省 昆明市 650500)

Analysis of Key Technologies and Development Prospects for Renewable Energy-Powered Water Electrolysis for Hydrogen Production Based on Artificial Intelligence

YANG Bo, ZHANG Zijian

(School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, Yunnan Province, China)

摘要:【目的】可再生能源电解水制氢作为一种重要的可持续能源技术, 因其环保和低碳排放优势, 得到了广泛关注。然而, 传统电解水制氢技术在效率和成本方面存在挑战, 人工智能(artificial intelligence, AI)的快速发展为解决电解水制氢技术的难点问题提供了有效途径。为此, 探讨AI在优化电解水制氢系统效率和经济性中的关键应用及其发展前景。【方法】利用常用AI工具, 如MATLAB、Python和SimuNPS, 在电解水制氢系统中进行算法开发、深度学习模型训练和多物理场仿真。通过引入AI技术实现出力预测、系统容量优化与调度、故障诊断等应用, 提升系统性能和稳定性。通过对比分析不同AI模型在多种实际场景下的表现, 探讨其在提升系统性能与可控性方面的具体作用与实现方式。【结论】AI技术为可再生能源电解水制氢系统的效率提升与智能调度提供新思路。未来研究应重点聚焦AI在出力预测、调度优化和故障诊断等方面的应用, 推动AI与系统运行的深度融合, 探索其在智能监测、自动控制和多源协同中的创新应用, 为构建高效、稳定、低碳的氢能系统提供有力支撑。

关键词: 可再生能源; 电解水制氢; 人工智能(AI); 深度学习; 碱性电解槽; 质子交换膜电解槽; 故障诊断

ABSTRACT: [Objectives] As an essential sustainable energy technology, renewable energy-powered water electrolysis for hydrogen production has attracted widespread

attention due to its advantages in environmental protection and low carbon emissions. However, conventional water electrolysis technologies for hydrogen production face challenges in terms of efficiency and cost, the rapid development of artificial intelligence (AI) provides an effective way to solve the difficult problems of hydrogen production technology through electrolysis of water. To address this, this study aims to explore the key applications and development prospects of AI for optimizing the efficiency and economic performance of water electrolysis systems for hydrogen production. [Methods] Common AI tools such as MATLAB, Python, and SimuNPS are employed for algorithm development, deep learning model training, and multi-physics simulation in water electrolysis systems for hydrogen production. By integrating AI technologies, applications such as output prediction, system capacity optimization and scheduling, and fault diagnosis are implemented to improve system performance and stability. A comparative analysis of performance of different AI models in various real-world scenarios is conducted to explore their specific roles and implementation methods in enhancing system performance and controllability. [Conclusions] AI technology offers new avenues for enhancing the efficiency and intelligent scheduling of renewable energy-powered water electrolysis hydrogen production systems. Future research should focus on the application of AI in output forecasting, scheduling optimization, and fault diagnosis, promoting deep integration between AI and system operation. Moreover, innovative applications of AI in intelligent monitoring, automatic control, and multi-source coordination should be explored to provide strong support for the development of efficient, stable, and low-carbon hydrogen energy systems.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62263014); 云南省应用基础研究计划项目(202401AT070344, 202301AT070443)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (62263014); Yunnan Provincial Basic Research Project (202401AT070344, 202301AT070443).

KEY WORDS: renewable energy; water electrolysis for hydrogen production; artificial intelligence(AI); deep learning; alkaline electrolyzer; proton exchange membrane electrolyzer; fault diagnosis

0 引言

在全球气候变化和能源危机的背景下,清洁能源技术的研究和应用成为了实现可持续发展的重要途径^[1-4]。氢能作为一种高效、清洁的能源载体,因其高能量密度和零排放特性,越来越受到各国政府和学术界的关注^[5-7]。传统的制氢方式主要依赖于化石燃料,如天然气重整、煤气化等,这些方法虽然技术成熟,但其过程中的二氧化碳排放量巨大,难以满足当前日益严格的环保要求^[8-10]。

因此,利用可再生能源电解水制氢逐渐成为研究热点,然而该技术在实际应用中面临着诸多挑战。首先,电解水制氢的效率和成本问题尚未得到有效解决,传统的电解水设备能耗较高,制氢效率较低,导致制氢成本偏高^[11-12]。其次,如何对可再生能源电解水制氢系统的电解槽容量进行合理配置仍然存在一些问题^[13-14],这进一步限制了电解水制氢的推广应用。最后,可再生能源的间歇性和波动性给制氢过程的稳定运行带来困难,难以实现连续高效的氢气生产^[15-17]。

在此背景下,人工智能(artificial intelligence, AI)的迅速发展为电解水制氢技术带来了新的突破和希望。人工智能技术,尤其是机器学习和深度学习,通过其强大的数据处理和模式识别能力,能够在多个层面提升电解水制氢的效率和经济性^[18-19]。

为此,本文总结了近年来人工智能在可再生能源电解水制氢技术中的发展现状,深入分析了电解水技术优化、电解槽优化调度、故障诊断方法和可再生能源优化利用等方面的最新进展,概述了相关领域的研究成果,并进一步对电解水制氢技术的未来发展趋势进行展望。

1 可再生能源电解水制氢

1.1 电解水制氢技术

电解水制氢是一种利用电能将水分解为氢气

和氧气的过程。这一技术因其对化石燃料依赖性低、排放清洁而被认为是最有前景的绿色制氢途径之一。目前,电解水制氢技术主要包括4种类型的电解槽:碱水电解槽(alkaline water electrolyzer, AWE)、质子交换膜电解槽(proton exchange membrane water electrolyzer, PEMWE)、固体氧化物电解槽(solid oxide electrolysis cell, SOEC)和阴离子交换膜电解槽(anion exchange membrane water electrolyzer, AEMWE)^[20]。

这些技术各有优势和局限性,AWE是最传统且最成熟的电解水制氢技术,使用液态碱溶液(通常为氢氧化钾或氢氧化钠)作为电解质。它的主要优势在于技术成熟、成本相对较低,以及使用的催化剂不需要稀有或昂贵的材料。然而,AWE的主要缺点是其较低的电流密度和能量效率,以及较低的操作压力限制了其产氢速率。同时,由于AWE的负载范围在额定功率的20%~100%,对于离网型可再生能源电解水制氢系统,风光出力的波动可能会导致AWE频繁启停,而AWE的冷启动时间比较长,造成巨大的能源浪费^[21]。

PEMWE使用固体聚合物电解质,并且在较高的电流密度下工作,能够提供较高的能量效率和产氢速率。PEMWE的主要优点是其快速启动和停止的能力,适合与间歇性的可再生能源(如风能和太阳能)集成使用。其缺点包括对催化剂(尤其是铂族金属)的高需求和相对较高的系统成本^[22]。

SOEC是一种高温电解技术,可在800~1 000 °C的温度下运行。SOEC的高温运行使得它可以直接使用热能,提高了总体能效,同时可以与热电联产系统或工业余热回收系统集成。尽管SOEC提供了高能量效率,但其技术复杂性高,耐用性和长期稳定性仍是主要挑战^[23]。

AEMWE是一种新兴技术,其特点是通过氢氧化物(OH⁻)在阴离子交换膜上的运动来运作^[24]。目前,AEMWE的工业应用程度较低,商业产品很少,技术仍处于研究和开发阶段。4种电解水制氢技术的示意图如图1所示,其特点和信息^[25-28]如表1所示。

1.2 可再生能源电解水制氢存在的问题

尽管可再生能源电解水制氢为实现氢能的清

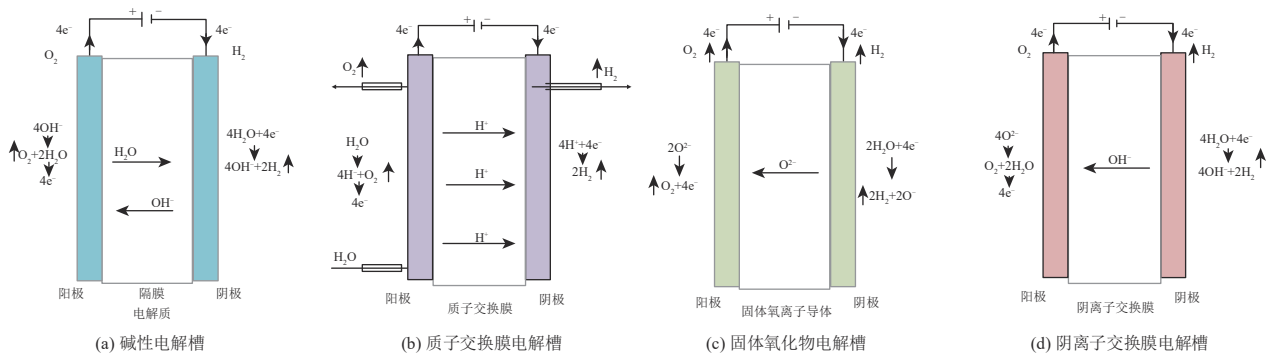


图1 4种电解水技术示意图

Fig.1 Schematic diagram of four water electrolysis technologies

表1 4种电解水技术特点及信息

Tab.1 Characteristics and information of four water electrolysis technologies

参数	AWE	PEMWE	SOEC	AEMWE
电解质	10%~40%KOH	质子交换膜	固体聚合物	阴离子交换膜
电荷载体	OH ⁻	H ⁺	O ²⁻	OH ⁻
电流密度/(A·cm ⁻²)	0.2~0.8	1~2	0.3~1	0.2~2
电极面积/cm ²	10 000~30 000	1 500	200	<300
效率/%	62~82	67~84	90	<74
工作温度/℃	70~90	50~80	700~850	40~60
工作压力/MPa	0.1~3	<7	0.1	<3.5
产氢纯度/%	99.9~99.999 8	99.9~99.999 9	99.9	>99.9
冷启动/min	30~120	<15	>600	<20
热启动	分钟级	秒级	—	—
负载范围/%	15~100	5~120	—	5~100
运行寿命/h	60 000	50 000~80 000	<20 000	>5 000
投资成本	270 美元/kW	400 美元/kW	>2 000 美元/kW	—
技术成熟度	成熟、商业化	商业化	实验室阶段	实验室阶段

洁和可持续生产提供了一个有效途径，但在将这些技术从理论推向广泛应用的过程中，仍面临着一系列技术性和经济性问题^[29-30]的挑战：

1) 成本高。当前，绿氢的生产成本主要受限于高昂的设备投资和运行成本。电解槽(尤其是质子交换膜电解槽和固体氧化物电解槽技术)需要使用昂贵的材料，如稀有金属催化剂，这显著提高了初始投资和维护成本。此外，电解槽的制造和维护工艺复杂，进一步增加了生产成本。尽管电解水制氢技术在效率和环保方面具有明显优势，但高昂的成本仍然是其大规模应用的主要障碍。降低设备成本和优化生产工艺是实现电解水制氢技术经济可行性的关键。

2) 可再生能源出力不稳定。可再生能源(如太阳能和风能)的最大挑战之一是其产能具有高度的间歇性和不可预测性。这种能源的供应不仅受

季节影响，而且受天气变化的即时影响极大，这直接影响到电解水制氢的连续性和效率。例如，在太阳能不足的情况下，太阳能电池板的能量输出降低，这会导致电解过程中断或效率下降，从而影响氢气的产量和成本。

3) 系统容量配置难。容量配置对可再生能源电解水制氢系统的经济性、灵活性、供电可靠性以及设备利用率有重要影响。科学合理地配置系统中各设备的容量有助于提升系统的经济性，是可再生能源电解水制氢领域的研究重点之一。

4) 电解槽功率分配不均。可再生能源的间歇性和波动性给电解水制氢的优化调度带来了巨大挑战。在实际操作中，需要根据可再生能源的发电量实时调整电解槽的运行状态，以保证氢气生产的稳定性和效率。然而，传统的调度方法往往难以应对复杂多变的能源输入，导致电解槽频繁

启停,增加了设备的磨损和能耗。

5) 故障频率高。电解槽的长期稳定运行是实现经济性的重要保证。然而,在高强度、复杂环境下运行的电解槽容易出现故障,这不仅影响制氢效率,还可能导致设备损坏和安全隐患。传统的故障检测方法依赖人工检查和经验判断,效率低且准确性不足。随着电解槽系统的复杂性增加,亟须更高效、智能化的故障诊断方法来保障系统的可靠运行。

可再生能源电解水制氢技术的主要挑战在于能源的间歇性和不稳定性、高昂的生产成本、容量配置的优化、调度的实时调整以及故障检测的智能化。这些问题限制了其大规模商业化应用。通过电解槽技术革新可以有效降低生产成本,而通过引入人工智能技术,可以在一定程度上解决间歇性和不稳定性、优化调度、容量配置以及故障检测等问题,从而推动可再生能源电解水制氢技术的广泛应用。

2 人工智能在可再生能源电解水制氢技术中的应用

2.1 可再生能源出力预测

AI在可再生能源出力预测中的应用为解决间歇性和不稳定性问题提供了强有力的技术手段。通过利用大数据分析、机器学习和深度学习算法,AI能够显著提高可再生能源发电量预测的准确性和可靠性,从而优化电解水制氢过程中的能源利用效率^[31-34]。

2.1.1 数据补全及异常值检测

数据质量对预测模型的性能至关重要。由于气象波动、风电机组特性、传感器干扰以及通信故障等因素的影响,采集到的光伏和风电场数据常常存在缺失值和异常值,导致后续预测的输出功率不准确。因此,需要对光伏和风电场数据进行异常值检测和修正,并对缺失值进行插补,从而获得完整的时间序列数据。使用完整的光伏和风电场时间序列数据,可以显著提高风电输出功率预测的准确性。利用先进的仿真工具,如SimuNPS、Python等软件,可以进一步增强对复杂物理过程的理解和建模,能够更好地捕捉系统

中的动态变化和非线性特征,提高异常值检测和数据补全的准确性。

异常值与正常数据点有显著的差异,这种差异可以在数值上表现为极端值,也可以在多维空间中表现为与其他数据点的距离较大。异常值在数据集中通常是少数,这个特性使得很多异常检测方法能够有效地将这些数据点识别出来。徐昊等^[35]将孤立森林算法应用于风电序列的异常值检测中,首先选择与风电功率关联性最高的风速特征,使用孤立森林算法构建一定数量的孤立树对所有数据进行训练,然后通过检测公式识别风电功率数据中的异常值,结果表明,孤立森林算法确定的异常值点与风电生产的实际情况相符。

传统的数据补全方法(如线性插值、样条插值等)可以填补少量缺失数据,但在处理大规模和复杂数据时可能不够精确。随着AI技术的发展,一些深度学习算法,如生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)在数据生成和特征提取方面表现出十分优越的性能,使其在电力系统量测数据补全领域取得了丰富的研究成果。杨哲^[36]提出了一种基于生成对抗网络的缺失值补全模型,可以直接在不完整数据集上对缺失值进行补全,并在3套智能气象观测设备中的智能气象网关上进行了数据补全和气象要素预测的实验应用验证,结果证明了基于时间序列数据修复与缺失值填补的生成对抗网络(generative adversarial network for time-series repair and time-series imputation, GAN-TRTI)模型在气象要素数据缺失值补全方面的有效性和实用性,在3个样本集中均方误差分别为0.159、0.168和0.188,均为各算法中的最小值。

2.1.2 特征挖掘

特征挖掘在预测任务中起着至关重要的作用,通过从大量数据中提取有用的信息,可以显著提高预测模型的性能。在可再生能源出力预测等领域,特征挖掘和AI技术的结合尤为关键。AI通过自动化的特征选择、特征工程和降维技术,不仅能高效地从复杂数据中识别出重要特征,还能优化模型的训练和预测过程。特征挖掘的应用主要体现在以下方面:

1) 特征选择。从预处理后的数据中选择最具

代表性的特征，这可以减少模型的复杂性和计算成本，同时提高预测的准确性。常用的特征选择方法包括包裹法和嵌入法。

2) 特征工程。通过对原始特征进行转换、组合或生成新的特征，可以提高模型的表达能力和预测效果。特征工程的常见方法包括特征组合和特征生成。

3) 特征降维。通过降维技术可以减少特征数量、简化模型，从而提高模型的训练速度和预测效果。特征降维不仅减少了特征数量，还保留了数据的主要信息，减少了过拟合的风险。常用的降维方法包括主成分分析、线性判别分析、t-分布随机邻域嵌入(t-distributed stochastic neighbor embedding, t-SNE)和统一流形近似与投影(uniform manifold approximation and projection, UMAP)等方法。

AI在数据挖掘中的应用如表2所示。

表2 AI在数据挖掘中的应用
Tab. 2 Applications of AI in data mining

应用方面	方法	方法描述
特征选择	包裹法	使用特定的机器学习算法(如递归特征消除)评估特征的重要性
	嵌入法	在模型训练过程中自动进行特征选择,如Lasso回归和树模型中的特征重要性评分
特征工程	特征组合	将多个特征进行交叉、相乘或其他组合操作,生成新的特征,如交叉特征、交互特征
	特征生成	通过聚类、自动编码器等方法,从原始数据中生成新的、更具代表性的特征
特征降维	主成分分析	将原始特征投影到一个低维空间,保留数据的主要信息,通过主成分提取数据的主要变异,减少特征数量
	线性判别分析	寻找能够最大化类间方差与类内方差比值的特征组合,常用于分类任务,通过线性变换找到能区分不同类别的特征组合
	t-SNE和UMAP	适用于高维数据的可视化和降维。t-SNE
		和UMAP是2种非线性降维技术,能够在保持局部结构的同时,将高维数据嵌入到低维空间,适合数据的可视化和聚类分析

在可再生能源发电量预测中，AI驱动的特征挖掘技术能够大幅提升预测精度和系统效率，推动清洁能源技术的进一步发展和广泛应用。

2.1.3 可再生能源出力预测模型

目前预测方法可以分为物理模型、统计模型、机器学习模型三大类，物理模型和统计模型虽然

方法成熟，但是面对风电功率预测中复杂的环境变化时应对能力不足，导致预测效果不理想。相比于前2种模型，机器学习模型主要通过算法从数据中学习规律和模式来进行预测，在建立气象特征和风电功率之间非线性映射关系方面具有显著优势，能够更灵活地适应非线性关系、处理多变数据。此外，面对风电功率预测的复杂环境情况，算法可以相互组合，形成集成模型或深度学习结构，提高整体性能。陈磊等^[37]提出一种基于信息重组和时间卷积网络(temporal convolutional network, TCN)-长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)-多头自注意力机制(multi-head self-attention, MHSA)的超短期风电功率预测方法，采用变分模态分解将功率数据拆分后重组，再将卷积网络、长短期记忆网络和多头自注意力机制相结合，构造风电功率预测模型。结果表明，该模型面对不同数据，决定系数 R^2 均能达到0.995以上，性能表现稳定，鲁棒性强，且能够捕捉到数据中的普遍规律，适应不同的数据特征，具有良好的泛化能力。

2.2 系统容量配置

可再生能源电解水制氢站初始投资较高，维护成本较大，同时制氢需消耗大量电能，运行成本高。因此，如何确定制氢电站规模是项目投资经济性的主要内容。对于直接耦合可再生能源的电解槽制氢系统，其容量设计的关键在于优化风能、太阳能和电解槽之间的相对容量^[38]。当光伏和风电装机容量按一定比例增加时，电解槽的最佳容量也应相应地调整和扩大，以确保系统的经济性和效率最大化。利用人工智能算法可以有效配置系统的电解槽容量，其作用主要体现在以下方面：

1) 数据分析与处理。人工智能算法能够处理和分析大量的可再生能源发电数据，这些数据通常具有很强的随机性和波动性，人工智能算法可以通过聚类、回归和分类等方法对数据进行处理，提取出具有代表性的典型日或典型场景，为容量配置提供基础数据。

2) 优化建模。基于处理后的数据，人工智能算法可以建立电解槽容量优化模型。该模型考虑

了系统投资成本、运行成本和维护成本等多个因素,以最小化总成本或最大化系统效率为目标,确定电解槽的最佳容量配置方案。

3) 智能决策。人工智能算法可以模拟不同容量配置方案下系统的运行效果,通过迭代优化逐步逼近最优解。例如,粒子群优化算法、遗传算法等可以在多维度空间内搜索最优容量配置,提高系统的经济性和运行效率。

在具体应用案例中,万永江等^[39]提出了一种基于不同典型日的风光制氢电解槽容量配置优化方法,首先利用K-means算法对风光出力进行典型日划分,然后通过双层优化配置模型求解最优电解槽配置容量。结果显示,随着配置电解槽容量的增大,全年相对最大收益趋势为先增大后减小,在1 406 MW时达到最大,在3 591.5 MW时降为0,再之后收益变为负值。韩子娇等^[40]通过基于密度的噪声应用空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)算法和有序聚类算法将风机出力归算为6个典型日,然后以系统投资成本、运行成本和维护保养成本最小为目标函数,利用粒子群算法对系统各单元进行容量优化配置。结果表明,随着氢气负荷的提升,系统的弃风电量明显降低,当日均氢气负荷为500 kW时,弃风电量仅为688.43 kW·h,由此也证明,耦合制氢设备可以有效降低系统弃风,从而提高风能利用率。这些方法充分利用了人工智能在处理复杂数据和优化决策中的优势,有效提高了电解水制氢系统的经济性和运行效率。

2.3 多电解槽系统优化调度

考虑到电解槽系统复杂的动态特性,优化其控制和运行至关重要。这种优化通常涉及与电解槽的电力调度、状态控制和热管理相关的决策。采用有效的控制策略,最大限度地发挥电解槽的灵活性,可以显著提高系统的效率^[41-43]。

传统的电解槽控制方法主要依赖于预设的规则和手动调整。这些方法虽然在早期的氢气生产中起到了重要作用,但随着生产规模的扩大和系统复杂性的增加,其局限性也越来越明显。缺乏灵活性、实时优化能力,能耗管理不足等问题导致系统效率低、能耗高和维护成本高。而启发式

算法或机器学习算法等AI控制方法通过动态调控和自适应优化,显著提升了电解槽系统的性能和效率^[44-45]。AI技术的应用克服了传统控制方法的局限性,为氢气生产提供了更加智能化和高效的解决方案。在这方面,上海科梁信息科技股份有限公司开发的SimuNPS作为多物理场仿真工具,能够精确模拟电解槽热管理和电化学反应。通过与AI算法结合,SimuNPS提供的仿真数据可以用于训练深度学习模型,从而实现对电解槽系统更精准的优化控制。目前国内外已有大量研究利用AI技术优化电解槽的控制策略,以进一步提高氢气产量和电解槽寿命。王加荣等^[46]对碱性电解槽的启停过程进行建模,并通过短期风电预测确定系统电解槽运行机组的数量,最后通过多目标适应度函数对电解槽进行滚动优化,平衡电解槽的关键运行参数。优化结果表明,所提方法的产氢量相较于简单启停和阵列轮值分别提升了5.36%和4.13%,同时开关启停次数分别降低了28.11%和36.52%,具有较好的经济性,提高了制氢系统的产氢量和电解槽寿命。梁涛等^[47]以风光可再生能源制氢系统为研究对象,对建立的系统以总体收益最高、环境成本最低为目标,利用多目标金鹰算法以小时为单位进行运行优化,在最大化系统收益的同时兼顾最小化环境成本以减少温室气体排放。Zheng等^[48]提出的电解槽模型整合了负荷水平变化、启停周期、热管理和频繁启动对制氢效率的影响。基于所建立的模型,提出了基于滚动优化的策略并利用优化器求解各时刻电解槽最优功率分配。运行结果表明,新策略年运行产氢量311 297 kg,系统效率相较于简单启停和轮值法分别提高了4.1%和2.6%,同时使电解槽间负荷更加均衡,温度更加稳定。电解槽优化调度方法数据统计如表3所示。

2.4 电解槽故障诊断

电解槽在高强度、复杂环境下运行时,容易出现各种故障,这不仅影响制氢效率,还可能导致设备损坏和安全隐患。为了保证系统和周围环境的正常运行和安全,实时诊断故障是必不可少的。故障检测方法大致可分为数据驱动和基于模型2类。

表3 电解槽优化调度方法数据统计

Tab. 3 Data statistics of optimization scheduling methods for electrolyzers

来源	年份	配置	电解槽规模	调度方法	产氢量	优势
文献[17]	2024	PV-AWE	20 MW	基于光伏出力预测的多目标滚动算法	半年产氢4 952 642 m ³ ,相较于简单启停和轮值法分别提高5.37%和9.00%	电解槽开关次数大幅减少,提高系统经济性和电解槽寿命
文献[42]	2024	PV-AWE+PEMWE	0.3 MW	考虑电解槽特性的制氢效率提升策略	相较于常规启停模式制氢总量提升9.2%	实现功率阵列间的合理分配以及效率的最大化利用
文献[43]	2024	Wind-AWE	42 MW	改进滚动优化算法	年产氢2 539 t,产氢效率相较于常规启停和循环轮转法分别提升2.31%和1.65%	提高系统整体效率、运营成本效益和制氢的可持续性
文献[44]	2024	Wind+PV-AWE+PEMWE	20 MW	基于风光出力预测的最优调度方法	一季度产氢318.5 t,相较于简单启停和轮值法分别提高4.49%和4.47%	合理地规划了电解槽运行数量,提高系统效率和能源利用率
文献[46]	2024	PV-AWE+PEMWE	20 MW	多目标滚动优化控制	相较于常规启停和阵列轮值法分别提高5.36%和4.13%	减少电解槽的启停次数,延长使用寿命并提升风氢系统的经济性
文献[48]	2023	Wind-AWE	4 MW	基于功率优化器的滚动优化策略	年产氢311.3 t,系统效率相较于简单启停和轮值法分别提高4.1%和2.6%	提高系统效率,降低制氢成本;负载平均平衡,温度变化更稳定

基于模型的故障诊断方法依赖于准确的行为模型，然而建模的复杂性，特别是对于传感器有限的系统，对故障检测提出了挑战。相比之下，数据驱动的方法利用机器学习和深度学习算法，通过大量运行数据实现故障诊断，无需复杂物理模型。支持向量机、核方法、随机森林等机器学习算法，以及卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)、递归神经网络(recurrent neural network, RNN)和自动编码器等深度学习技术，因其自动特征提取和处理复杂非线性关系的能力，成为现代故障诊断的重要手段^[49-50]。

Balyogi 等^[51]提出了一种新的 PEMWE 故障诊断与隔离方法，利用键合图(bond graph, BG)和自监督学习(self-supervised learning, SSL)应对标记故障数据有限的挑战。基于线性分式变换-键合图模型生成不确定残差和伪标签，通过自监督学习训练深度神经网络。结果表明，该层次化组合能有效减少误报警，F1 评分到达到 0.881 3。此外，提出了基于键图的可解释人工智能(bond graph-based explainable artificial intelligence, BG-XAI)方法，结合可解释人工智能和键合图的结构方程以解释深度学习模型的决策。Zhao 等^[52]提出了一种基于数据驱动的海上风电-制氢系统故障诊断框架，通过物理参数及时检测潜在故障。基于所建

立的模型，采用 CNN 和双向长短期记忆网络(bidirectional long short-term memory, BiLSTM)结合的方法，实现对系统潜在故障的精确诊断。该研究通过故障注入技术模拟常见故障，并收集风机发电、储能电池充放电电流和电解槽产氢率等参数。实验结果表明，该方法在不同故障场景下具有 96.9% 的高精度，验证了模型的实用性和可行性。Zhang 等^[53]提出了一种新颖的鲁棒动态变分贝叶斯学习监测方法，以提高 AWE 操作的可靠性和安全性。该方法利用稀疏贝叶斯学习保存 AWE 过程的动态机制信息，从而便于解释故障检测结果。为提高对测量不确定性的鲁棒性，提出了低秩向量自回归方法，以可靠提取过程变量中的序列相关性。通过工业氢气生产过程的验证，鲁棒动态变分贝叶斯学习能够有效检测和诊断 AWE 的关键故障。

2.5 AI在可再生能源电解水制氢系统的协同优化

可再生能源出力预测为制氢系统提供准确的能源供应信息，通过预测可再生能源的产量，可以辅助 AI 更好地确定电解槽的最佳容量，以确保能源使用最优化，从而提高整个系统的经济性和效率。同时，准确的出力预测能够直接影响电解槽的优化调度。例如，通过预测风力和太阳能的变化，可以动态调整电解槽的运行策略，确保在

能源供应充足时最大化氢气的生产，同时在能源供应不足时减少运行，以优化能源消耗和延长设备寿命。另外，系统容量配置确定了电解槽的规模和性能参数，这为电解槽的优化调度提供了物理和经济的参数基础。良好的容量配置使得调度更加高效，通过适应不同的能源供应情况，调度策略可以更灵活地调整电解槽的运行，提高整体系统效率。最后，故障检测技术直接影响整个系统的稳定性和安全性。准确及时的故障诊断可以减少停机时间，保护设备免受进一步损坏，这对于维持电解槽优化调度和系统容量配置的效果尤为关键。这些环节通过 AI 的集成应用相互支持，形成了一个互补和增强的关系网络，提高了整个制氢系统的性能和可靠性。AI 在可再生能源电解水制氢中的应用及各技术之间的关联如图 2 所示。

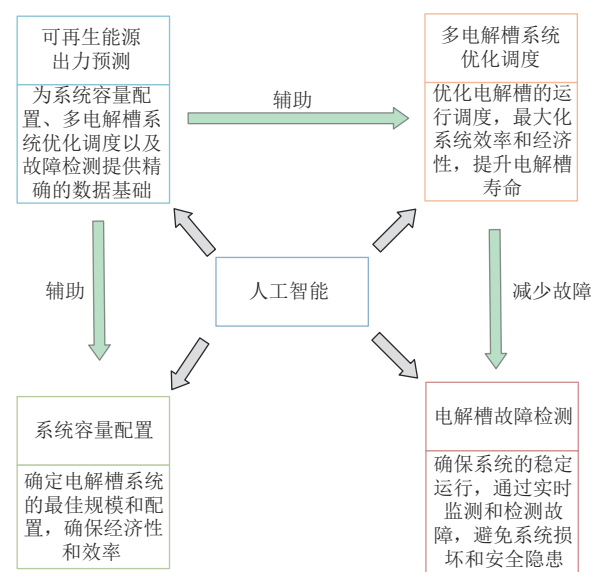


图 2 AI 在可再生能源电解水制氢中的应用及各技术之间的关联

Fig. 2 Applications of AI in renewable energy-powered water electrolysis for hydrogen production and interrelations between technologies

3 基于人工智能的可再生能源电解水制氢技术发展前景分析

AI 技术在可再生能源电解水制氢中的应用已展现出巨大潜力和多样化的前景，为可再生能源电解水制氢领域注入了新的活力。本文通过 SWOT 分析探讨基于人工智能的可再生能源电解

水制氢技术的发展前景。

3.1 优势

3.1.1 环保和低碳排放

可再生能源电解水制氢技术主要依靠风能和太阳能等可再生资源，显著降低了对化石燃料的依赖性和碳排放。例如，墨西哥在利用可再生能源电解水制氢方面具有显著的技术经济潜力，其每年最多可生产 2.173 3 亿 t 氢气，主要依赖海上风电制氢，显著减少了化石燃料的使用和碳排放。同时，在氨生产中使用氢气可以减少 82.5% 的二氧化碳当量排放，带来显著的环境效益^[54]，这种技术有助于实现全球碳中和目标，符合国际环保政策的方向。

3.1.2 高能量密度和零排放

氢能作为一种高效、清洁的能源载体，相较于传统化石燃料具有诸多优势。例如，氢气的燃烧热值高，是汽油的 3 倍、酒精的 3.9 倍、焦炭的 4.5 倍；同时具有转化效率高、没有温室气体排放等优点^[55]。

3.1.3 技术进步和 AI 优化

AI 技术的应用在电解水制氢系统中实现了优化控制和故障诊断，大大提高了系统的效率和可靠性。研究展示了一种基于计算流体动力学和人工智能/机器学习的模型，成功模拟了氢气和氧气的流动分布、气泡运动和湍流特性。该模型与人工神经网络集成，能够高精度预测电解槽性能($R^2=0.999$)。这一方法有效优化了电解槽设计，减少计算资源和时间，为高效制氢提供了坚实基础^[56]。

3.1.4 资源广泛

可再生能源(如太阳能、风能等)资源在全球范围内分布广泛，为电解水制氢提供了稳定的能源供应。以我国为例，中国拥有丰富的可再生能源资源，特别是中国西北地区的太阳能资源和东北、西北沿海地区的风能资源极为丰富，能够为大规模制氢提供充足的清洁电力。这些可再生能源资源的广泛应用，为我国推动绿色氢能发展和实现碳中和目标奠定了坚实基础。

3.2 劣势

3.2.1 高成本

目前电解水制氢技术的设备投资和运行维护

成本较高。例如，质子交换膜电解槽需要昂贵的铂族金属催化剂，这大大增加了成本。研究表明，在没有补贴电力和/或碳税调整的情况下，灰氢似乎仍然是不可战胜的^[57]。

3.2.2 间歇性和不稳定性

风能和太阳能具有间歇性和波动性，导致电解水制氢过程不稳定。在某些地区，由于天气变化导致的风能和太阳能波动，使得电解水制氢的氢气产量难以稳定，造成设备的频繁启停和损耗^[58]。

3.2.3 技术成熟度不足

某些电解水制氢技术(如固体氧化物电解槽和阴离子交换膜电解槽)仍处于开发阶段，尚未成熟和商业应用。根据研究，这些新兴技术的长期稳定性和耐久性仍需进一步验证^[58]。

3.2.4 基础设施不足

氢能的储存和运输技术尚不成熟，缺乏完善的基础设施。我国宁夏、蒙西、山西等地区的氢能产能较高，但东南部发达地区却是氢能的主要消费区域。由于氢能资源与消费区域分布不匹配，现有的基础设施无法有效连接氢能的主要产地和消费地，限制了氢能的大规模应用和推广，同时增加了氢能使用的成本和复杂性^[59]。

3.3 机会

3.3.1 政策支持和市场需求

随着全球对清洁能源需求的增加，各国政府纷纷出台政策支持氢能技术的发展。例如，德国的《国家氢能战略》计划到2030年将国内电解氢能力的目标提高一倍，从5 GW提高到至少10 GW，同时德国还将建立高效的氢能基础设施，计划在2028年前改造和新建超过1 800 km的氢气管道^[60]。这些政策推动了氢能技术的快速发展。

3.3.2 技术创新和研发投入

持续的技术创新和研发投入可能会降低电解水制氢的成本，提高效率。近几年，许多研究集中在开发低成本的催化剂和膜材料，这些突破可能显著降低设备和运行成本^[61-62]。

3.3.3 国际合作和标准化

国际合作和技术标准化进程正在加快，有助于全球范围内推广先进的电解水制氢技术。例如，

随着我国“双碳”目标的提出，氢能标准化的进程加快^[63]，同时各国推出了氢能规划战略，强调在清洁氢及国际标准等方面开展国际合作。

3.3.4 产业链完善

氢能产业在全球范围内正进入一个快速发展的新阶段，随着产业链的不断完善，从原材料供应到设备制造，再到储运技术和终端应用，电解水制氢的商业化前景十分广阔。从长远来看，氢能有望成为推动全球能源转型和实现气候目标的重要力量^[64]。

3.4 挑战

3.4.1 市场竞争激烈

除电解水制氢技术外，其他制氢技术(如蒸汽重整和生物质制氢等)也在快速发展，形成了激烈的市场竞争。在当前各种资源消耗量的价格水平下，电解水制氢成本最高^[65-66]。

3.4.2 技术和经济风险

电解水制氢技术的经济和技术可行性仍然具有挑战性。AI模型的开发和部署需要大量的数据和计算资源，增加了初始投资成本。此外，AI技术的应用在实际工业环境中的表现可能不如实验室条件下的理想，可能限制AI在该领域的进一步扩展。

3.4.3 AI系统被入侵的风险

随着AI技术在电解水制氢中的应用增加，系统面临的网络安全风险也在增加。一旦AI控制系统遭到攻击，可能导致生产中断、数据泄露甚至设备损坏。

3.4.4 政策变化

政策支持对于可再生能源电解水制氢技术的发展至关重要，但政策的不确定性和变化可能影响该技术的推广。

4 结论

概述了可再生能源电解水制氢技术的发展现状，探讨了该技术在环保和低碳排放方面的优势，以及当前所面临的效率低和成本高等挑战。得出以下结论：

1) AI技术通过大数据分析、机器学习与深度学习算法，可有效提升风电、光伏等可再生能

源出力的预测准确性,缓解其间歇性与不稳定性问题,为制氢系统的调度提供数据支持。

2) AI技术可根据实时负荷与资源变化,动态调整电解槽容量配置,实现更加灵活高效的系统调度,提升能源利用效率,避免资源浪费。

3) 利用AI技术在运行数据分析方面的优势,系统能够提前识别潜在故障,实现预测性维护,降低非计划停机率,实现智能化故障诊断与维护管理,提高运行可靠性。

4) 可再生能源电解水制氢具备环保与可持续优势,在政策支持和市场驱动下,通过融合AI技术开展可再生能源出力预测、电解槽制氢系统优化调度与故障诊断等应用,有望突破高成本与技术不成熟等瓶颈,推动其高效、可靠、规模化发展

未来基于AI的可再生能源电解水制氢技术的研究建议在以下方面开展:

1) 优化AI算法在电解水制氢中的应用。未来研究应重点开发和优化更先进的AI算法,用于实时监控和调节电解槽的操作状态,以提高系统的效率和响应能力。这包括研究深度学习算法在复杂多变量调度中的应用,探索机器学习在提高风光出力预测精度方面的潜力,并加强AI在预测性维护和故障诊断中的应用。

2) 电解槽技术的进一步改进。高效的电解槽设计和材料创新是提升电解水制氢效率的关键。未来研究应集中开发高性能的膜和催化剂材料,研究新型催化剂以提高反应效率和稳定性,降低材料和生产成本。此外,还应优化电解槽的结构设计和制造工艺,以延长设备寿命和减少维护需求。

3) AI与电解水制氢系统的集成优化。未来应继续深入研究AI技术如何在电解水制氢系统的集成优化中发挥作用。结合AI技术进行全系统的能效优化、热管理和资源配置,提升整体系统的经济性和可靠性。通过模拟和实证研究,优化系统运行参数,进行全生命周期成本分析和风险评估,以推动电解水制氢系统的商业化应用。

4) 拓展AI技术在电解水制氢的创新应用场景。探索AI在新型电解水制氢技术中的创新应

用,如智能化监测、无人化操作和自动化控制等。未来研究还可以关注如何利用AI技术增强电解水制氢与其他可再生能源技术的协同效应,实现更高效的能源转化和利用。

通过针对以上方向的深入研究和发 展, AI技术将进一步提升可再生能源电解水制氢的技术水平 和应用潜力,加速这一领域的技术进步和大规模应用,助力全球向可持续能源系统的转型。

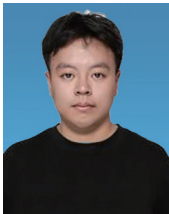
参考文献

- [1] 冀肖彤, 杨东俊, 方仍存, 等. “双碳”目标下未来配电网构建思考与展望[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 37-48.
JI X T, YANG D J, FANG R C, et al. Research and prospect of future distribution network construction under “dual carbon” target[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 37-48.
- [2] 任晨星, 任清洁, 高翔. “双碳”背景下我国低碳电力发展研究[J]. 热力发电, 2024, 53(2): 1-7.
REN C X, REN Q J, GAO X. Research on low-carbon electric power development in China under “carbon neutralization and carbon peak” background[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 1-7.
- [3] 张春雁, 窦真兰, 王俊, 等. 电解水制氢-储氢-供氢在电力系统中的发展路线[J]. 发电技术, 2023, 44(3): 305-317.
ZHANG C Y, DOU Z L, WANG J, et al. Development route of hydrogen production by water electrolysis, hydrogen storage and hydrogen supply in power system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(3): 305-317.
- [4] CHEN L, GAO L Y, XING S P, et al. Zero-carbon microgrid: real-world cases, trends, challenges, and future research prospects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 203: 114720.
- [5] 邱一苇, 朱杰, 曾扬俊, 等. 离网型可再生能源发电制氢能量管理技术需求分析与展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(22): 43-59.
QIU Y W, ZHU J, ZENG Y J, et al. Technological requirement analysis and prospect of energy management for off-grid renewable power-to-hydrogen systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(22): 43-59.
- [6] 李彬, 潘雨情, 文华杰, 等. 基于碳减排的氢电资源耦合发展现状及展望[J]. 供用电, 2023, 40(10):

- 106-113.
- LI B, PAN Y Q, WEN H J, et al. Current status and prospects of hydrogen electricity resource coupling development based on carbon emission reduction[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(10): 106-113.
- [7] 袁铁江, 张一瑾, 杨紫娟, 等. 基于系统动力学的氢需求量中长期预测[J]. *中国电力*, 2023, 56(10): 11-21.
- YUAN T J, ZHANG Y J, YANG Z J, et al. Medium and long-term hydrogen load prediction based on system dynamics[J]. *Electric Power*, 2023, 56(10): 11-21.
- [8] 潘光胜, 顾钟凡, 罗恩博, 等. 新型电力系统背景下的电制氢技术分析与展望[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(10): 1-13.
- PAN G S, GU Z F, LUO E B, et al. Analysis and prospect of electrolytic hydrogen technology under background of new power systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(10): 1-13.
- [9] XIE R, SUN J, SHI Y, et al. Baffled-type thermochemical reactor for high-efficient hydrogen production by methanol steam reforming[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(61): 23425-23439.
- [10] 滕越, 赵骞, 袁铁江, 等. 绿电-氢能-多域应用耦合网络关键技术现状及展望[J]. *发电技术*, 2023, 44(3): 318-330.
- TENG Y, ZHAO Q, YUAN T J, et al. Key technology status and outlook for green electricity-hydrogen energy-multi-domain applications coupled network[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(3): 318-330.
- [11] 张轩, 王凯, 樊昕晔, 等. 电解水制氢成本分析[J]. *现代化工*, 2021, 41(12): 7-11.
- ZHANG X, WANG K, FAN X Y, et al. Cost analysis on hydrogen production via water electrolysis[J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(12): 7-11.
- [12] 王明华. 新能源电解水制氢技术经济性分析[J]. *现代化工*, 2023, 43(5): 1-5.
- WANG M H. Technical economic analysis on hydrogen production from water electrolysis by new energy[J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(5): 1-5.
- [13] 商伟情. 多场景风光耦合制氢系统优化配置研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- SHANG W Q. Research on multi-scene wind-photovoltaic coupling hydrogen production system. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [14] GAO F Y, YU P C, GAO M R. Seawater electrolysis technologies for green hydrogen production: challenges and opportunities[J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2022, 36: 100827.
- [15] AZIZIMEHR B, ARMAGHANI T, GHASEMIASL R, et al. A comprehensive review of recent developments in hydrogen production methods using a new parameter[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 72: 716-729.
- [16] AKYÜZ E S, TELLİ E, FARSAK M. Hydrogen generation electrolyzers: Paving the way for sustainable energy[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 81: 1338-1362.
- [17] YANG B, ZHANG Z, LI J, et al. Efficient multi-objective rolling strategy of photovoltaic/hydrogen system via short-term photovoltaic power forecasting[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 80: 1339-1355.
- [18] UKWUOMA C C, CAI D, JONATHAN A L, et al. Enhancing hydrogen production prediction from biomass gasification *via* data augmentation and explainable AI: a comparative analysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 68: 755-776.
- [19] 杨博, 陈义军, 姚伟, 等. 基于新一代人工智能技术的电力系统稳定评估与决策综述[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(22): 200-223.
- YANG B, CHEN Y J, YAO W, et al. Review on stability assessment and decision for power systems based on new-generation artificial intelligence technology[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(22): 200-223.
- [20] NASSER M, MEGAHED T F, OOKAWARA S, et al. A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(58): 86994-87018.
- [21] 张海龙. 碱性水电解制氢装置模型研究综述[J]. *太阳能*, 2024(5): 34-41.
- ZHANG H L. A review of model research on alkaline water electrolysis hydrogen production equipment[J]. *Solar Energy*, 2024(5): 34-41.
- [22] 宋洁, 郜捷, 梁丹曦, 等. 质子交换膜电解制氢系统建模研究综述[J]. *电力建设*, 2024, 45(2): 58-78.
- SONG J, GAO J, LIANG D X, et al. A review on modeling of hydrogen production system with proton exchange membrane electrolysis[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(2): 58-78.
- [23] 胡轶坤, 曹军文, 张文强, 等. 高温固体氧化物电解池应用研究进展[J]. *发电技术*, 2023, 44(3): 361-372.
- HU Y K, CAO J W, ZHANG W Q, et al. Application

- research progress of high temperature solid oxide electrolysis cell[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(3): 361-372.
- [24] CARBONI N, MAZZAPIODA L, CAPRÌ A, et al. Composite anion exchange membranes based on graphene oxide for water electrolyzer applications[J]. *Electrochimica Acta*, 2024, 486: 144090.
- [25] SCHROPP E, CAMPOS-CARRIEDO F, IRIBARREN D, et al. Environmental and material criticality assessment of hydrogen production via anion exchange membrane electrolysis[J]. *Applied Energy*, 2024, 356: 122247.
- [26] IKUEROWO T, BADE S O, AKINMOLADUN A, et al. The integration of wind and solar power to water electrolyzer for green hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 76: 75-96.
- [27] WANG J, WEN J, WANG J, et al. Water electrolyzer operation scheduling for green hydrogen production: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 203: 114779.
- [28] 孙浩, 吴维宁, 陈丽杰, 等. 新能源电解水制氢技术发展研究综述[J/OL]. *电源学报*, 2024: 1-18. (2024-01-24). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240123.1730.002.html>.
- SUN H, WU W N, CHEN L J, et al. Review on the development of new energy electrolytic water hydrogen production technology[J/OL]. *Journal of Power Supply*, 2024: 1-18. (2024-01-24). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20240123.1730.002.html>.
- [29] 陈颖. 电解水制氢技术的研究现状及未来发展趋势[J]. *太阳能*, 2024(1): 5-11.
- CHEN Y. Research status and future development trend of hydrogen production by water electrolysis[J]. *Solar Energy*, 2024(1): 5-11.
- [30] 张显峰, 唐乾, 刘伟, 等. PEM电解制氢技术问题及现状分析[J]. *山东化工*, 2024, 53(4): 105-109.
- ZHANG X F, TANG Q, LIU W, et al. Technical problems and current situation analysis of PEM electrolysis hydrogen production[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2024, 53(4): 105-109.
- [31] 高岩, 吴汉斌, 张纪欣, 等. 基于组合深度学习的光伏功率日前概率预测模型[J]. *中国电力*, 2024, 57(4): 100-110.
- GAO Y, WU H B, ZHANG J X, et al. Day-ahead probabilistic prediction model for photovoltaic power based on combined deep learning[J]. *Electric Power*, 2024, 57(4): 100-110.
- [32] 苏向敬, 宇海波, 符杨, 等. 基于DALSTM和联合分位数损失的海上风电功率概率预测[J]. *中国电力*, 2023, 56(11): 10-19.
- SU X J, YU H B, FU Y, et al. Probabilistic forecasting of offshore wind power based on dual-stage attentional LSTM and joint quantile loss function[J]. *Electric Power*, 2023, 56(11): 10-19.
- [33] 陈晓华, 吴杰康, 蔡锦健, 等. 基于猎人猎物优化算法优化BiLSTM的电力负荷短期预测[J]. *山东电力技术*, 2024, 51(4): 64-71.
- CHEN X H, WU J K, CAI J J, et al. Short-term load prediction based on BiLSTM optimized by hunter-prey optimization algorithm[J]. *Shandong Electric Power*, 2024, 51(4): 64-71.
- [34] 匡洪海, 郭茜. 基于多特征提取-卷积神经网络-长短期记忆网络的短期风电功率预测方法[J]. *发电技术*, 2025, 46(1): 93-102.
- KUANG H H, GUO Q. Short-term wind power prediction method based on multimodal feature extraction-convolutional neural network-long-short term memory network[J]. *Power Generation Technology*, 2025, 46(1): 93-102.
- [35] 徐昊, 王永生, 许志伟, 等. 基于生成对抗网络多变量风电时间序列异常值处理[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(12): 300-311.
- XU H, WANG Y S, XU Z W, et al. Outlier processing of multivariable wind power time series based on generative adversarial network[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2022, 43(12): 300-311.
- [36] 杨哲. 基于GAN的智能气象网关数据补全技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- YANG Z. Research on data imputation technology of intelligent meteorological gateway based on GAN[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [37] 陈磊, 黄凯阳, 张怡, 等. 基于信息重组和TCN-LSTM-MHSA的超短期风电功率预测[J/OL]. *南方电网技术*, 2024: 1-10. (2024-06-27). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240626.1553.009.html>.
- CHEN L, HUANG K Y, ZHANG Y, et al. Ultra-Short-Term Wind Power Forecasting Based on Information Recombination and TCN-LSTM-MHSA[J/OL]. *Southern Power System Technology*, 2024: 1-10. (2024-06-27). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240626.1553.009.html>.
- [38] 杨胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 考虑平抑风光波动的ALK-PEM电解制氢系统容量优化模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(1): 85-96.
- YANG S, FAN Y F, HOU J J, et al. Capacity

- optimization model for an ALK-PEM electrolytic hydrogen production system considering the stabilization of wind and PV fluctuations[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(1): 85-96.
- [39] 万永江, 韩爽, 闫亚敏, 等. 风光制氢容量配置优化研究及绿氢经济性分析[J]. *内蒙古电力技术*, 2023, 41(1): 8-14.
- WAN Y J, HAN S, YAN Y M, et al. Research on optimization of capacity allocation of wind power and photovoltaic hydrogen production and economic analysis of green hydrogen[J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2023, 41(1): 8-14.
- [40] 韩子娇, 李宠, 苑舜, 等. 风电制氢混合储能系统容量优化配置研究[J]. *东北电力技术*, 2022, 43(10): 56-62.
- HAN Z J, LI C, YUAN S, et al. Research on optimal allocation of hybrid energy storage system capacity for wind power hydrogen production[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2022, 43(10): 56-62.
- [41] 年珩, 陈磊磊, 赵建勇, 等. 基于电解槽状态识别的风光制氢系统能量管理优化[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(10): 10-16.
- NIAN H, CHEN L L, ZHAO J Y, et al. Energy management optimization of wind-solar hydrogen production system based on electrolytic cell state recognition[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(10): 10-16.
- [42] 李建林, 赵文鼎, 梁忠豪, 等. 基于混合电解槽制氢系统的功率分配技术[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(13): 9-18.
- LI J L, ZHAO W D, LIANG Z H, et al. Power distribution technology based on hybrid-electrolyzer hydrogen production system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(13): 9-18.
- [43] WANG J, WEN J, WANG J, et al. Coordinated scheduling of wind-solar-hydrogen-battery storage system for techno-economic-environmental optimization of hydrogen production[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 314: 118695.
- [44] YANG B, ZHANG Z, SU S, et al. Optimal scheduling of wind-photovoltaic-hydrogen system with alkaline and proton exchange membrane electrolyzer[J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 614: 235010.
- [45] 梁涛, 刘伟, 曹欣, 等. 基于深度确定性策略梯度算法的可再生能源大规模制氢系统能量调度[J/OL]. *电网技术*, 1-16. [2024-07-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0211>.
- LIANG T, LIU W, CAO X, et al. Research on energy scheduling of renewable energy large-scale hydrogen production system based on deep deterministic strategy gradient algorithm[J/OL]. *Power System Technology*, 1-16. [2024-07-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0211>.
- [46] 王加荣, 杨博, 张芮, 等. 基于风电预测的碱性电解槽系统优化控制[J]. *电网技术*, 2024, 48(7): 2940-2947.
- WANG J R, YANG B, ZHANG R, et al. Optimization control of alkaline electrolyzer system based on wind power prediction[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(7): 2940-2947.
- [47] 梁涛, 孙博峰, 刘伟, 等. 可再生能源制氢系统多目标优化调度[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(1): 226-235.
- LIANG T, SUN B F, LIU W, et al. Multi-objective optimal scheduling of renewable energy hydrogen production system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(1): 226-235.
- [48] ZHENG Y, HUANG C, TAN J, et al. Off-grid wind/hydrogen systems with multi-electrolyzers: optimized operational strategies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 295: 117622.
- [49] KHEIRROUZ M, MELINO F, ANCONA M A. Fault detection and diagnosis methods for green hydrogen production: a review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(65): 27747-27774.
- [50] ZHANG Q, XU W, XIE L, et al. Dynamic fault detection and diagnosis for alkaline water electrolyzer with variational Bayesian Sparse principal component analysis [J]. *Journal of Process Control*, 2024, 135: 103173.
- [51] BALYOGI M, BELKCEM O, KOMI M, et al. Prior knowledge-infused self-supervised learning and explainable AI for fault detection and isolation in PEM electrolyzers[J]. *Neurocomputing*, 2024, 594: 127871.
- [52] ZHAO T, FENG S, ZHOU Y, et al. Data-driven fault detection framework for offshore wind-hydrogen systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 70: 325-340.
- [53] ZHANG Q, LU S, XIE L, et al. Dynamic fault detection and diagnosis of industrial alkaline water electrolyzer process with variational Bayesian dictionary learning[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 71: 1492-1506.
- [54] JUÁREZ-CASILDO V, CERVANTES I, DE G GONZÁLEZ-HUERTA R. Harnessing offshore wind for decarbonization: a geospatial study of hydrogen production and heavy industry utilization in Mexico[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 83: 701-716.

- [55] 张春晖, 肖楠, 苏佩东, 等. 氢能、碳减排与可持续发展[J]. 能源与环保, 2023, 45(7): 1-9.
ZHANG C H, XIAO N, SU P D, et al. Hydrogen energy, carbon emission reduction and sustainable development[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(7): 1-9.
- [56] SIRAT A, AHMAD S, AHMAD I, et al. Integrative CFD and AI/ML-based modeling for enhanced alkaline water electrolysis cell performance for hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 83: 1120-1131.
- [57] GHAEBI PANAH P, CUI X, BORNAPOUR M, et al. Marketability analysis of green hydrogen production in Denmark: scale-up effects on grid-connected electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(25): 12443-12455.
- [58] KOUROUGIANNI F, ARSALIS A, OLYMPIOS A V, et al. A comprehensive review of green hydrogen energy systems[J]. Renewable Energy, 2024, 231: 120911.
- [59] 付强, 杨洸, 金辉, 等. 中国氢能产业链技术现状及发展趋势[J]. 油气与新能源, 2024, 36(4): 19-30.
FU Q, YANG G, JIN H, et al. Technical status and development trends of hydrogen energy industry chain technology in China[J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(4): 19-30.
- [60] 刘赫. 德国加快推动氢能产业发展[N]. 人民日报, 2024-08-12(16).
LIU H. Germany accelerates the development of hydrogen energy industry[N]. People's Daily, 2024-08-12(16).
- [61] LI G, WU L, QIN Y, et al. Gradient catalyst layer design towards current density homogenization in PEM water electrolyzer with serpentine flow field[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 314: 118659.
- [62] ZHANG S, LI X, YANG Y, et al. Microporous and low swelling branched poly(aryl piperidinium) anion exchange membranes for high-performed water electrolyzers[J]. Journal of Membrane Science, 2024, 698: 122587.
- [63] 陈向春. 浅谈“双碳”战略目标下我国氢能标准化的发展[J]. 标准科学, 2022(10): 36-41.
CHEN X C. Brief discussion on the development of hydrogen energy standardization in the context of “dual carbon” strategic goal[J]. Standard Science, 2022(10): 36-41.
- [64] 徐立军, 苏昕, 朱迪, 等. “双碳”目标下氢能产业技术发展分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2024, 41(4): 385-407.
XU L J, SU X, ZHU D, et al. Analysis of the technological development of the hydrogen energy industry in the context of “dual carbon” targets[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition in Chinese and English), 2024, 41(4): 385-407.
- [65] 吉平, 林伟芳, 冯长有, 等. 氢能发电技术发展制约因素及未来方向综述[J]. 全球能源互联网, 2025, 8(2): 165-175.
JI P, LIN W F, FENG C Y, et al. Review on the development constraints and directions of hydrogen power generation technology[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2025, 8(2): 165-175.
- [66] 邵乐, 张益, 唐燕飞, 等. 煤制氢、天然气制氢及绿电制氢经济性分析[J]. 炼油与化工, 2024, 35(2): 10-14.
SHAO L, ZHANG Y, TANG Y F, et al. Economic analysis of hydrogen production from coal, natural gas and green electricity[J]. Refining and Chemical Industry, 2024, 35(2): 10-14.
-
- 收稿日期: 2024-08-01.
修回日期: 2024-09-05.
作者简介:
- 
- 杨博
- 杨博(1988), 男, 博士, 教授, 研究方向为基于人工智能的新能源系统优化与控制, yangbo_ac@outlook.com;
- 
- 张子健
- 张子健(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源发电与控制技术, 820546128@qq.com。
- (责任编辑 杨阳)