

引用格式：苗梦薇，于瑞皎，陈浩，等. 太阳能电解水制氢系统性能与稳定性分析 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(3): 1-10. MIAO Mengwei, YU Ruijiao, CHEN Hao, et al. Performance and stability analysis of a hydrogen production system based on solar electrolysis of water [J]. Southern energy construction, 2025, 12(3): 1-10. DOI: [10.16516/j.ceec.2024-413](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024-413).

太阳能电解水制氢系统性能与稳定性分析

苗梦薇，于瑞皎[✉]，陈浩，叶芳，郭航

(北京工业大学机械与能源工程学院传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要：[目的] 太阳能电解水制氢系统受限于太阳能的波动性和间歇性、光伏系统的转换效率以及电解槽的性能等因素。通过对太阳能电解水制氢系统性能与稳定性的分析，可以为技术研发提供数据支持，推动系统组件的优化设计，进而加速太阳能电解水制氢技术的商业化进程，助力氢能产业的规模化应用。[方法] 文章提出一种太阳能光伏电池间接耦合电解槽制氢系统，研究内容包括光照强度和环境温度对光伏电池输出性能的影响，分析了蓄电池对稳定质子交换膜电解槽输入功率的作用，并基于天津市夏季气候数据，对所提出系统的性能进行了验证和评估。[结果] 研究表明：在环境温度恒定的情况下，光照强度的增加会提升光伏发电功率。而在光照强度固定时，环境温度升高则会导致光伏发电功率下降。蓄电池可以很好地稳定电解槽的功率。[结论] 通过太阳能电解水制氢系统全天运行动态分析，验证了该系统有助于全天候稳定生产氢气，为大型光伏电池间接耦合电解槽制氢系统提供了宝贵的参考。

关键词：太阳能光伏系统；质子交换膜电解槽；储能；系统模拟；制氢

DOI: [10.16516/j.ceec.2024-413](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024-413)

文章编号: 2095-8676(2025)03-0001-10

CSTR: [32391.14.j.ceec.2024-413](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024-413)

中图分类号: TK51; TK91



论文二维码

Performance and Stability Analysis of A Hydrogen Production System Based on Solar Electrolysis of Water

MIAO Mengwei, YU Ruijiao[✉], CHEN Hao, YE Fang, GUO Hang

(Beijing Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, College of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: [Objective] The hydrogen production system based on solar electrolysis of water is limited by the volatility and intermittency of solar energy, the conversion efficiency of the photovoltaic system, and the performance of the electrolysis cell. Through the performance and stability analysis of a hydrogen production system based on solar electrolysis of water, it can provide data support for technology research and development, promote the optimal design of system components, and then accelerate the commercialization process of solar electrolytic water to hydrogen technology, and help scale up the application of hydrogen energy industry. [Method] This paper proposed a solar photovoltaic (PV) cell indirectly coupled electrolyzer hydrogen production system. The research included the effects of light intensity and ambient temperature on the output performance of PV cells, analyzed the role of the storage battery in stabilizing the input power of the proton exchange membrane electrolyzer, and verified and evaluated the performance of the proposed system based on the summer climatic data of Tianjin city. [Result] Studies have shown that an increase in light intensity at a constant ambient temperature increases the PV power. When the light intensity is constant, the increase in ambient temperature will lead to a decrease in PV power generation. The battery can well stabilize the power of the electrolytic tank. [Conclusion] Through the dynamic

收稿日期: 2024-12-04 修回日期: 2025-02-10

基金项目: 国家资助博士后研究人员计划 B 档“非常规重力环境下分离式再生燃料电池系统性能研究”(GZB20230047); 中国博士后科学基金面上项目“微重力环境中分离式再生燃料电池系统传质特性及强化措施研究”(2024M750150); 中国科学院微重力重点实验室开放课题“短时微重力环境下再生燃料电池水-气两相流体输运特性研究”(NML202409)

analysis of the all-day operation of the hydrogen production system based on solar electrolysis of water, it is verified that the system contributes to the stable hydrogen production around the clock, which provides a valuable reference for the large-scale photovoltaic cell indirectly coupled electrolyzer hydrogen production system.

Key words: solar photovoltaic system; proton exchange membrane electrolyzer; energy storage; system simulation; hydrogen production
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/>).

0 引言

随着气候变化问题的日益严峻以及全球碳达峰目标的迫切实现激发了对清洁能源和绿色能源替代品的开发^[1]。氢气作为一种高能量密度的绿色能源,具有储能和清洁燃料的潜力。在工业、交通、发电等多个领域中,氢气的使用可以减少对化石能源的依赖,并大幅度降低碳排放^[2]。

通过可再生能源产生的绿氢,已被广泛视为推动低碳能源转型的关键方案。绿氢是利用可再生能源驱动水电解从而生产的,过程中没有二氧化碳排放,是最清洁的制氢形式。目前的研发工作集中在提高电解过程的效率上,以降低绿氢生产成本^[3]。

质子交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM)电解槽对于可再生能源制氢具有重要意义^[4]。碱性电解槽、PEM 电解槽、固体氧化物电解槽和阴离子交换膜电解槽是电解槽的主要类型^[5]。其中,碱性电解和质子交换膜(PEM)电解槽已逐步工业化,固体氧化物电解槽和阴离子交换膜电解槽正在试验产品阶段^[6-9]。本文主要考虑面向工程应用,并为大规模和长期运行的光伏电池间接耦合电解槽制氢系统提供理论基础。PEM 电解槽具有工作温度范围广、电流密度高、气体渗透率低、能源效率更高以及易于处理和维护,最重要的是 PEM 系统具有更快的动态响应,这在连接到可变可再生能源时是一个优势^[4, 10]。然而,当前常规的 PEM 电解槽在能量供给方面,主要依赖不可再生能源,如煤炭、天然气等化石能源发电来驱动电解反应。这一现状使得 PEM 电解槽在整个运行周期中,无法摆脱对有限且会造成环境污染的传统能源的依赖,从能源的源头和长期利用角度来看,难以达成可持续性运行的目标。由于不可再生能源在使用过程中会产生大量的温室气体排放,对环境造成负面影响,并且其储量有限,随着使用量的增加,面临着资源枯竭的问题。基于此,推动可再

生能源发电技术与 PEM 电解槽结合将实现绿色可循环的清洁能源供给装置。因此,推动更高效、更低成本的氢气发展生产技术势在必行。

太阳能光伏电池与电解槽结合的制氢技术被广泛认为是最具可持续发展的能源解决方案之一^[3]。光伏制氢系统有 2 种耦合方式:直接耦合和间接耦合^[11]。其中,PEM 电解槽已被证明特别适用于光伏系统^[12]。在直接耦合系统中,太阳能电池与 PEM 电解槽直接连接,不含直流-直流降压变换器与储能元件,虽然此类系统初始投资成本较低,但由于制氢效率易受光照波动影响,难以实现稳定供氢,且对光伏阵列与电解槽之间的结构匹配要求较高^[13-14]。因此,为提升太阳能的利用效率并增强系统运行的稳定性,通常采用间接耦合的光伏-PEM 电解水制氢方案。该方案通过加入电力电子变换器或储能装置,有效缓解了光伏发电的不稳定性,从而提升了制氢效率与系统可靠性^[15]。

周行等^[16]在 MATLAB-SIMSCAPE 搭建了光伏耦合电解水制氢系统模型,只考虑电解槽的电气特性,构建电解槽等效电阻模型。仿真结果表明,该模型能够适应电源波动,并具备动态调节能力。Gutiérrez-Martín 等^[17]研究了光伏耦合电解槽制氢系统在带蓄电池和不带蓄电池两种配置下的性能,分析了电解槽的最优尺寸和系统效率。研究发现配置蓄电池不仅可以减小电解槽的尺寸,还能提升系统的制氢效率。Hassani 等^[18]提出了一种集成燃料电池与电解槽系统的能源管理策略,并通过实验证明该策略的可行性。该系统不仅可满足用户用电负荷,还可利用多余电能进行电解水制氢。Dahbi 等^[19]的研究表明,采用最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 控制的转换器能够更好地匹配光伏电池与电解槽,从而实现电解系统的最优性能,最大限度地提高制氢效率。Omar^[15]建立了间接耦合的光伏-电解槽系统,重点研究了基于神经电流估计器

与可变步长技术的最大功率点跟踪方法在提升系统效率方面的作用。仿真结果表明, 与传统的可变步长 MPPT 技术或直接耦合方式相比, 该系统表现出更高的性能。杨强等^[20]提出了一种基于优化粒子群算法的光伏电解水制氢控制策略, 在 Matlab/Simulink 环境下对 3 种算法进行对比分析, 验证了该算法在解决局部阴影问题方面的优势, 并有效降低了系统输出电压与电流的纹波。Gu 等^[21]构建了光伏电池-蓄电池-PEM 电解槽系统, 提出了一种能源管理策略, 并验证其能够实现稳定制氢的目标。Liu 等^[22]基于多级 DC-DC 变换器, 为离网型光伏-PEM 电解制氢系统开发了一种可变顺序控制策略。研究表明, 采用该策略后, 不同电解槽在额定功率和波动功率下的运行时间分布更加均衡。

目前, 大多数太阳能光伏间接耦合的电解槽制氢系统主要集中于利用光伏发电中的剩余电能进行氢气生产, 以减少能源浪费或优化能源管理策略。然而, 针对全天候稳定制氢的研究仍相对较少。本文提出并构建了一种基于蓄电池的光伏间接耦合电解槽制氢系统, 其中蓄电池用于对电能进行存储与调节, 以实现电解槽运行功率的稳定化。此外, 本文还对比分析了蓄电池在稳定电解槽功率方面的作用, 并选取天津市夏季的典型气候条件对系统进行验证。

1 系统模型建立

本文建立的系统包含光伏电池、蓄电池、质子交换膜电解槽、升压(降压)转换器、储气罐, 如图 1 所示。

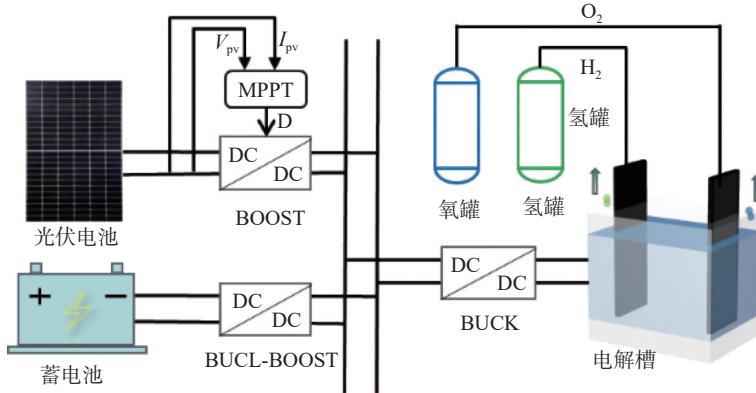


图 1 太阳能电解水制氢系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the hydrogen production system based on solar electrolysis of water

1.1 光伏板模型

本文使用的光伏电池模型是一个单二极管模型。光伏面板的输出电流可以由基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律推导^[23]。式(1)是等效电路的理论物理表达式:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

式中:

I_{ph} ——光生电流;

I_0 ——二极管反向饱和电流;

I ——光伏电池输出电流;

R_s ——等效电阻;

R_p ——等效并联电阻;

q ——电荷量;

K ——玻尔兹曼常量, 为 $1.380\,649 \times 10^{-23}\text{J/K}$;

T ——电池温度;

A ——二极管理想因子。

在实际应用中对模型进行工程简化, 简化后的方程为:

$$I = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(e^{U/(C_2 U_{oc})} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

$$C_1 = [1 - (I_m/I_{sc})] e^{-U_m/(C_2 U_{oc})} \quad (3)$$

$$C_2 = [(U_m/U_{oc}) - 1][\ln(1 - (I_m/I_{sc}))]^{-1} \quad (4)$$

式中:

U_m ——最大工作电压;

I_m ——最大工作电流;

U_{oc} ——开路电压;

I_{sc} ——短路电流。

参数在参考光照强度(1000 W/m^2)和参考环境

温度(25 °C)下测得。

1.2 电解槽模型

总电解电压由开路电压、活化过电位、欧姆过电位组成, 如下所示^[24]:

$$V = V_{oc} + V_{act} + V_{ohm} \quad (5)$$

电解槽的开路电压可以通过能斯特方程计算。

$$V_{oc} = 1.229 - 0.009(T - 298) + \frac{RT}{2F} \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (6)$$

式中:

P_{H_2} 、 P_{O_2} ——氢气分压、氧气分压。

活化过电位是电化学活化过程中出现的能量损耗, 受到多种因素的影响, 如方程(7)所示^[25]。

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha_{an} F} \arcsin \left(\frac{i}{2i_{0,an}} \right) + \frac{RT}{\alpha_{cat} F} \arcsin \left(\frac{i}{2i_{0,cat}} \right) \quad (7)$$

式中:

α_{an} 、 α_{cat} ——阳极、阴极的电荷转移系数;

$i_{0,an}$ 、 $i_{0,cat}$ ——参考温度下的交换电流密度。

电解槽中的阻抗由膜电阻决定, 其他电阻可以忽略不计。欧姆过电位表示如下^[26]。

$$V_{ohm} = \delta_m \frac{i}{\sigma_m} \quad (8)$$

$$\sigma_m = (0.005139\lambda - 0.00326) e^{\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)} \quad (9)$$

式中:

δ_m ——质子交换膜的厚度;

σ_m ——质子交换膜的膜电导率。

电解水产氢的速率与内部电流成正比, 可以表示为:

$$q_{H_2} = \frac{nI}{2F} \quad (10)$$

1.3 蓄电池模型

由于光照强度和环境温度一直变化导致光伏发电的输出不稳定, 不利于电解槽稳定制氢。因此, 为了稳定生产氢气, 在上述光伏系统中增加了储能系统电池, 减小电解槽输出功率的波动。基于 Simulink 模块库中的锂离子电池模块, 构建了图 2 所示的电池模型。

1.4 储罐模型

存储罐中的实际气体压力:

$$P = \frac{nRT}{V-nb} - a \frac{n^2}{V^2} \quad (11)$$

$$a = \frac{27R^2 T_{cr}^2}{64P_{cr}}, b = \frac{RT_{cr}}{8P_{cr}} \quad (12)$$

式中:

T_{cr} ——临界温度;

P_{cr} ——临界压力。

1.5 模型验证

1.5.1 光伏模型验证

为了模型的准确性需要在标准条件下对光伏电池模型进行验证。光照强度和环境温度分别调整为 1000 W/m² 和 25 °C。太阳能电池板选择天合光能 TSM-250PA05.08 光伏电池板模型, 将仿真数据得到的 P-V 曲线与文献进行比较。如图 3 所示, 模拟数据与文献^[27]提供的数据之间有很好的一致性。

1.5.2 电解槽模型验证

将质子交换膜电解槽的极化曲线与 Debe^[28] 的实验结果进行了比较, 如图 4 所示。仿真模拟数据

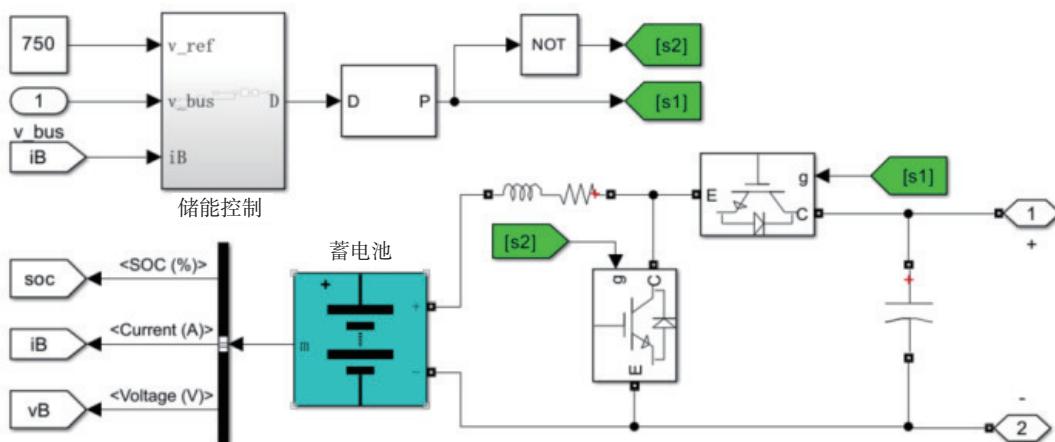


图 2 Simulink 蓄电池模型

Fig. 2 Simulink battery model

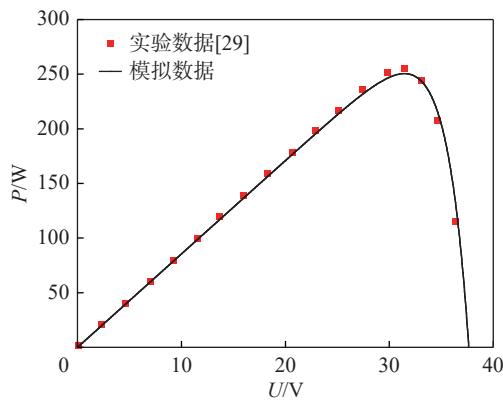


图3 光伏模型验证

Fig. 3 Photovoltaic model validation

与实验数据偏差为 1.01%，偏差较小，说明该模型是合理的。

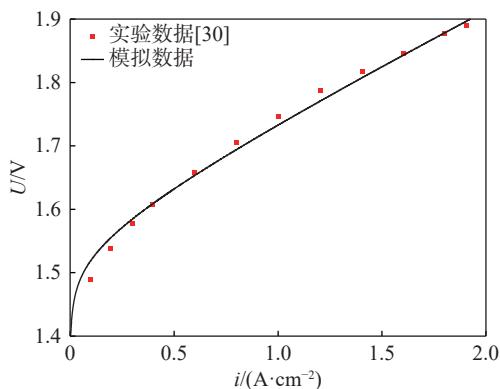


图4 电解槽模型验证

Fig. 4 Electrolytic cell model validation

1.5.3 最大功率跟踪控制验证

在本研究中, MPPT 控制采用了扰动观察方法。光伏电池的输出功率受到光照强度、环境温度、阴影遮挡等影响。光伏面板有一个特定的最大功率点, MPPT 控制算法通过实时调整光伏电池的工作点, 使其始终在最大功率点工作, 从而优化光伏电池的输出性能。为了验证本文所提出的控制方法的有效性, 系统进行了 1 s 的仿真测试, 结果表明在最大功率点跟踪控制后, 光伏面板的输出功率如图 5 所示。仿真结果显示, 经过 0.1 s 的调整, 光伏系统的输出功率在标准测试条件下达到了实测的最大功率 180 kW, 并且保持稳定, 功率波动幅度较小。该结果验证了所采用的 MPPT 算法的准确性和系统的运行稳定性。

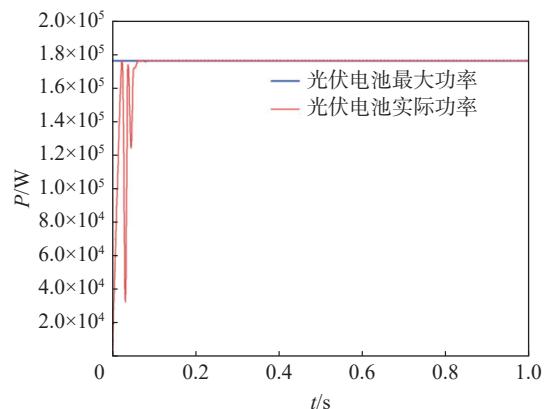


图5 最大功率跟踪控制验证

Fig. 5 Maximum power tracking control verification

2 结果与分析

2.1 光伏模型系统性能评估

2.1.1 温度对光伏电池输出特性影响

温度对光伏电池性能影响如图 6 所示。设置光照强度为 1000 W/m^2 , 温度分别为 5°C 、 15°C 、 25°C 、 35°C 、 45°C 时, 光伏组件最大输出功率分别 251.1 W 、 250.7 W 、 250.1 W 、 249.0 W 、 247.5 W , 电压分别为 33.6 V 、 32.0 V 、 31.2 V 、 30.4 V 、 29.6 V , 对应的电流值可通过图 6(a)获得, 分别为 8.13 A 、 8.34 A 、 8.55 A 、 8.76 A 、 9.00 A 。环境温度逐渐升高, 光伏材料中的电子迁移率有所改善, 导致短路电流增大。然而, 环境温度的升高, 也导致电子-空穴对的速率增加, 从而使得开路电压降低。最终导致的结果是光伏电池的输出功率随着环境温度升高而逐渐降低。

2.1.2 光照强度对光伏电池输出特性影响

图 7 描述了光照强度对光伏电池性能的影响当环境温度为 25°C , 光照强度分别为 400 W/m^2 、 600 W/m^2 、 800 W/m^2 、 1000 W/m^2 时, 光伏电池的短路电流分别为 3.24 A 、 5.13 A 、 6.84 A 、 8.55 A , 对应的开路电压分别为 28.0 V 、 28.8 V 、 30.4 V 、 32.0 V 。从图 7(a)可以看出, 随着光照强度的增加, 入射到光伏电池上的光子流越来越多, 产生电子-空穴对的速度增大, 这导致短路电流的增加。开路电压的大小在电学上取决于短路电流, 短路电流增大会导致开路电压也增大, 光伏电池的输出功率提升。

2.2 蓄电池对稳定电解槽输入功率的作用

在系统模拟中, 2 种系统在环境温度 27°C 及不同光照强度条件 (600 W/m^2 、 700 W/m^2 、 800 W/m^2) 下

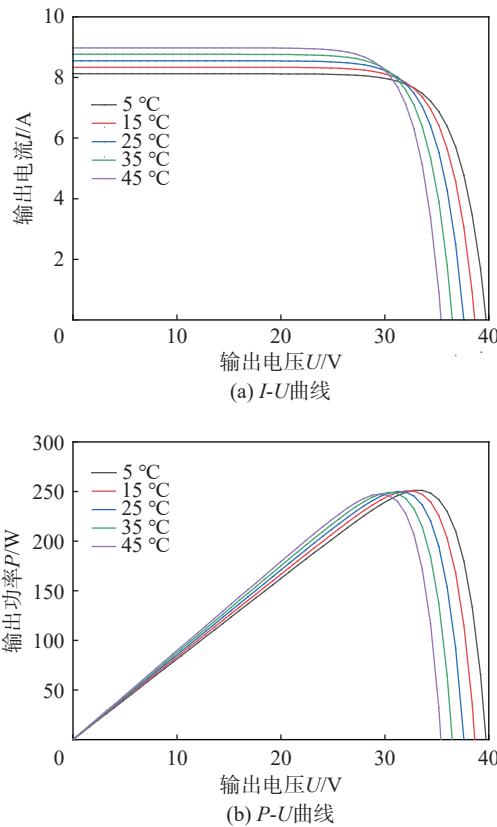


图 6 环境温度对光伏电池性能的影响

Fig. 6 Effect of ambient temperature on the performance of photovoltaic cells

进行了对比实验。从图 8 的结果可以看出, 光照强度变化时, 无蓄电池系统的电解槽输出功率波动幅度较为显著, 表现出明显的不稳定性, 此现象归因于直接连接系统缺乏 MPPT 控制、直流-直流转换器和蓄电池等调节装置。尽管直接连接系统相较于含蓄电池系统在结构上更加简洁且具有较低的成本, 但在电解槽与光伏电池之间的匹配关系上仍需进行进一步优化, 以提高系统的稳定性和效率。

2.3 制氢系统动态响应与稳定性分析

本文基于天津的气候条件和能源数据, 对太阳能电解水制氢系统的动态响应进行分析研究。考虑光伏电池受温度和光照幅度影响以及系统稳定, 本文是在一定假设电解槽的功率是 25 kW 条件下, 此时配置的光伏电池的容量是 75 kW, 容量电池容量 800 Ah 进行模拟, 所得到的数据为实际应用提供理论支持。表 1 是模型输入变量的光照强度和环境温度的数据^[29]。

基于 Matlab/Simulink 仿真, 系统的仿真结果如图 9 所示。假设电解槽功率在模拟时间段内始终保

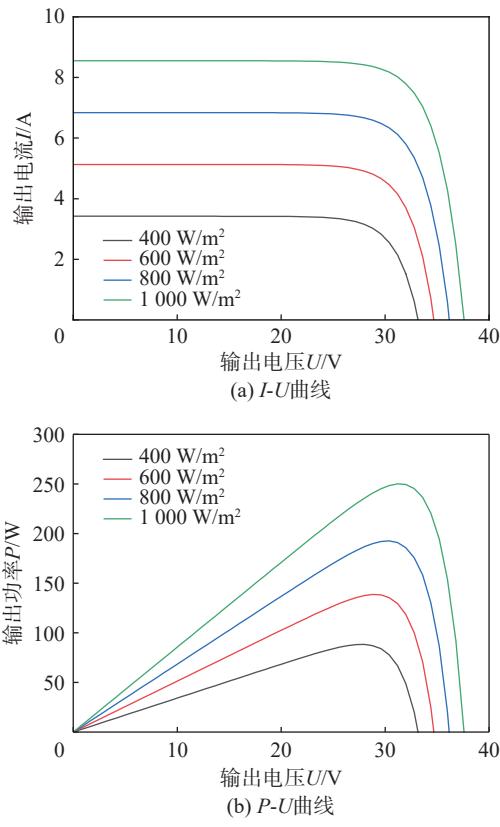


图 7 光照强度对光伏电池性能影响

Fig. 7 Effect of light intensity on the performance of photovoltaic cells

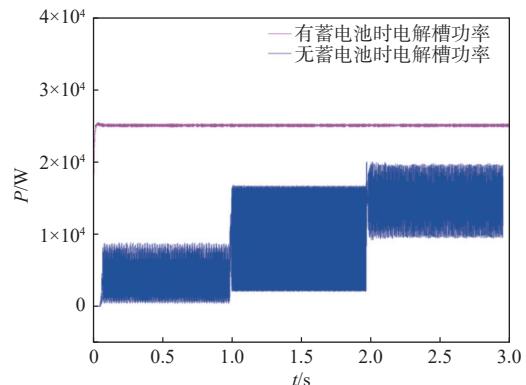


图 8 太阳能制氢系统电解槽功率对比

Fig. 8 Electrolyzer power comparison of the solar hydrogen production system

持 25 kW, 从表 1 可以看出模拟时间内, 由于夏季一天内温度和光照幅度的变化, 光伏系统的输出功率从 18.215 kW 增至 65.481 kW, 然后又降至 20.037 kW。图 9(a)、图 9(b)、图 9(c) 分别为光伏电池功率、蓄电池功率、电解槽功率。由图 9(a) 可得, 0 ~ 2 h 模拟时间内光伏功率小于电解槽的功率, 蓄电池需要

表 1 太阳能制氢系统模型输入的光照强度和环境温度

Tab. 1 Light intensity and ambient temperature for the solar hydrogen production system model inputs

时间/h	温度/℃	光照强度/(W·m ⁻²)
0~1	26.31	215.79
1~2	29.88	253.02
2~3	31.39	468.86
3~4	31.79	575.60
4~5	34.30	709.37
5~6	35.15	798.55
6~7	33.80	790.25
7~8	31.59	604.53
8~9	30.23	449.18
9~10	27.47	253.02
10~11	24.26	234.52

释放电量维持系统平稳, 蓄电池的功率和光伏的功率之和为电解槽功率。2~9 h 模拟时间内, 光伏功

率大于电解槽的功率需求, 电解槽能够稳定运行。多余的光伏发电量被有效存储于蓄电池中, 电池的荷电状态(State of Charge, SOC)逐渐增加, 从而保障系统中直流母线电压的稳定。特别是接近2~6 h 模拟时间时, 一天内光伏的功率越来越大, 在6 h时, 光伏功率最大, 最大为65.481 kW。此时系统中剩余的光伏发电量越来越多, 蓄电池的容量增长速度变快, 在6~8 h这一模拟时间段内, 温度和光照强度慢慢降低, 光伏功率变小, 蓄电池充电速度变慢。9~11 h 模拟时间段内, 光伏功率降到最小20.037 kW。此时, 光伏功率小于电解槽功率, 电解槽需要蓄电池提供电量。太阳能电解水制氢系统中三者功率的变化体现了太阳能电解水制氢系统对光伏功率波动的适应能力。实际操作时, 为满足全天氢气生产需求, 系统设计的光伏容量需要保证电解槽在光照条件变化的情况下持续稳定运行, 同时将剩余的电能储存于蓄电池中, 以降低能源浪费。

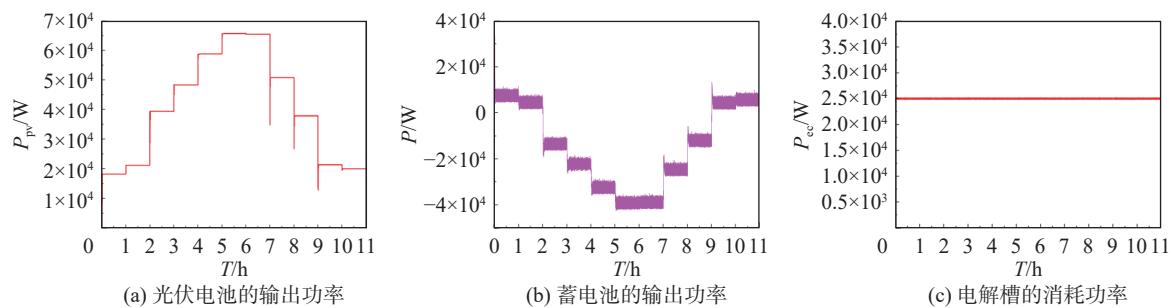


图 9 太阳能电解水制氢系统功率变化

Fig. 9 Power variation of the hydrogen production system based on solar electrolysis of water

图9(c)和图10(a)分别展示了质子交换膜电解槽的消耗功率和质子交换膜电解槽效率的变化。从图中可以看出, 假设电解槽的功率在模拟时间段内保持在25 kW, 此时对应的电解槽的效率稳定在70%。由于电解槽的氢气产量与电流密度成正比, 电解槽在模拟时间段内功率保持稳定, 所以电解槽的运行电流密度保持稳定, 因此氢气的摩尔流速在模拟时间段内保持稳定, 其数值为31 mol/s。因此, 氢气罐内的压力呈现出线性增长的趋势。图10(e)描述了蓄电池SOC状态, 当光伏电池的功率大于电解槽功率时, 多余的电能被用于为蓄电池充电。蓄电池的SOC上升, 当光伏的功率小于电解槽功率时, 蓄电池放电为电解槽提供能量, 蓄电池的SOC下降。

图10(c)和图10(d)分别是蓄电池的电流和电压变化图, 可以观察到, 蓄电池电压先增大后降低, 但是变化幅度较小。蓄电池的电流在放电状态为正, 充电状态为负。蓄电池电流的变化趋势较明显, 且跟蓄电池功率变化趋势一样。根据系统的仿真结果, 在一天的仿真周期内, 尽管光照强度和环境温度存在波动, 质子交换膜电解槽在全天的运行过程中依然能够稳定地进行氢气生产。

3 结论

本文提出并构建了一种基于蓄电池的光伏间接耦合电解槽制氢系统, 旨在研究光照强度与环境温度对光伏电池输出性能的影响, 并分析蓄电池在稳

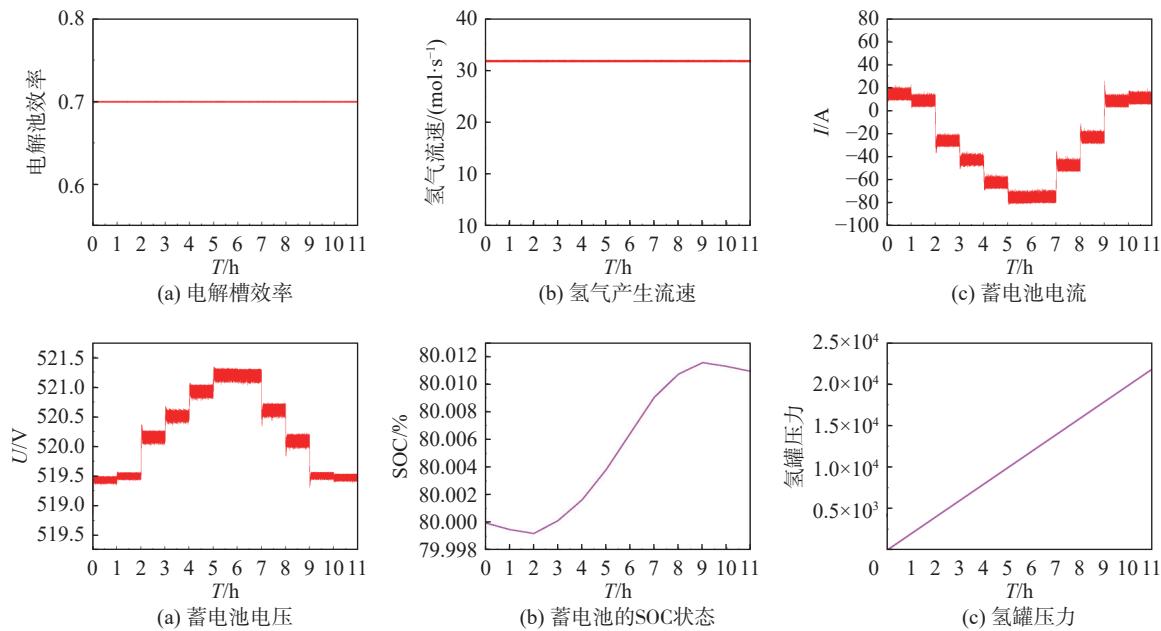


图 10 太阳能电解水制氢系统仿真结果

Fig. 10 Simulation results of the hydrogen production system based on solar electrolysis of water

定电解槽输入功率中的作用。此外,本文基于天津市夏季的典型气候条件对所建立的系统进行了验证。主要研究结论如下:

- 1) 在环境温度保持不变的情况下,光照强度越大,短路电流越大,从而提升光伏系统的发电功率。
- 2) 在固定光照强度的条件下,随着环境温度的升高,光伏电池的开路电压会下降,从而导致光伏系统的发电功率减少。
- 3) 由于间接耦合系统配备了蓄电池用于功率调节,因此其电解槽功率的波动控制效果优于直接耦合系统,表现出更高的稳定性。
- 4) 在光照充足时,光伏电池的输出功率超过电解槽的需求,多余的电能会储存至蓄电池中;而在光照较弱时,光伏电池的输出功率低于电解槽的需求,此时蓄电池将为电解槽提供所需功率,从而保持系统运行的稳定性。通过对太阳能光伏制氢系统分析,验证了所提出的间接耦合系统有助于全天候稳定地生产氢气,并为大规模和长期运行的光伏电池间接耦合电解槽制氢系统提供了有价值的理论参考。

本文研究了太阳能电解水制氢系统全天的运行性能与稳定性。针对本文存在的不足,未来可从负荷预测的精度提升、系统耦合方式的优化以及各环节工作模式的改进等方面入手,进一步提升系统的整体性能与长期稳定性。此外,可在系统集成、智能

调度、运行稳定性与经济性等方向持续深入研究,以推动太阳能制氢系统的实际应用与工程化发展。

参考文献:

- [1] BOZOGLAN E, MIDILLI A, HEPBASLI A. Sustainable assessment of solar hydrogen production techniques [J]. *Energy*, 2012, 46(1): 85-93. DOI: [10.1016/j.energy.2012.03.029](https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.029).
- [2] SÁNCHEZ-SQUELLA A, FLORES R, BURGOS R, et al. 99.6% efficiency DC-DC coupling for green hydrogen production using PEM electrolyzer, photovoltaic generation and battery storage operating in an off-grid area [J]. *Renewable energy*, 2024, 237: 121781. DOI: [10.1016/j.renene.2024.121781](https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121781).
- [3] HÜNER B. Mathematical modeling of an integrated photovoltaic-assisted PEM water electrolyzer system for hydrogen production [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2024, 79: 594-608. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2024.07.041](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.041).
- [4] SCHMIDT O, GAMBHIR A, STAFFELL I, et al. Future cost and performance of water electrolysis: an expert elicitation study [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2017, 42(52) : 30470-30492. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2017.10.045](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045).
- [5] ŁOSIEWICZ B. Technology for green hydrogen production: desk analysis [J]. *Energies*, 2024, 17(17): 4514. DOI: [10.3390/en17174514](https://doi.org/10.3390/en17174514).
- [6] HERNÁNDEZ-GÓMEZ Á, RAMIREZ V, GUILBERT D, et al. Development of an adaptive static-dynamic electrical model based on input electrical energy for PEM water electrolysis [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2020, 45(38): 18817-18830. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2020.04.182](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.182).
- [7] KARAGÖZ Y, BALCI Ö, ORAK E, et al. Effect of hydrogen

- addition using on-board alkaline electrolyser on SI engine emissions and combustion [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2018, 43(24) : 11275-11285. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2018.04.235](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.235).
- [8] LEE K J, LEE M J, HWANG H. High-temperature steam electrolysis combined with methane partial oxidation by solid oxide electrolyzer cells [J]. *Applied surface science*, 2019, 473: 746-749. DOI: [10.1016/j.apsusc.2018.12.128](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.128).
- [9] LEI Y C, ZHOU J Y, ZHOU W T, et al. Advanced development of anion-exchange membrane electrolyzers for hydrogen production: from anion-exchange membranes to membrane electrode assemblies [J]. *Chemical communications*, 2024, 60(79): 11000-11016. DOI: [10.1039/d4cc03043e](https://doi.org/10.1039/d4cc03043e).
- [10] ABHISHEK U S, TEWARI P K, ANAND V. Mathematical modelling and dynamics of proton exchange membrane electrolyzer [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2025, 99: 189-202. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2024.12.129](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.129).
- [11] 郭常青, 伊立其, 闫常峰, 等. 太阳能光伏-PEM 水电解制氢直接耦合系统优化 [J]. *新能源进展*, 2019, 7(3): 287-294 DOI: [10.3969/j.issn.2095-560X.2019.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560X.2019.03.012).
- GUO C Q, YI L Q, YAN C F, et al. Optimization of photovoltaic-PEM electrolyzer direct coupling systems [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2019, 7(3): 287-294. DOI: [10.3969/j.issn.2095-560X.2019.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560X.2019.03.012).
- [12] RAZI F, DINCIER I. A critical evaluation of potential routes of solar hydrogen production for sustainable development [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 264: 121582. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.121582](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121582).
- [13] KHALILNEJAD A, SUNDARARAJAN A, ABBASPOUR A, et al. Optimal operation of combined photovoltaic electrolyzer systems [J]. *Energies*, 2016, 9(5): 332. DOI: [10.3390/en9050332](https://doi.org/10.3390/en9050332).
- [14] GARCÍA-VALVERDE R, ESPINOSA N, URBINA A. Optimized method for photovoltaic-water electrolyser direct coupling [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2011, 36(17): 10574-10586. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2011.05.179](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.179).
- [15] OMAR F A. A new approach for improving the efficiency of the indirectly coupled photovoltaic-electrolyzer system [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2023, 48(24): 8768-8782. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2022.11.327](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.327).
- [16] 周行, 李少华, 王慧, 等. 光伏耦合电解水制氢系统的建模与仿真 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(3): 104-111. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011).
- ZHOU H, LI S H, WANG H, et al. Modelling and simulation of photovoltaic coupling water electrolysis hydrogen production system [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(3): 104-111. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011).
- [17] GUTIÉRREZ-MARTÍN F, AMODIO L M, PAGANO M. Hydrogen production by water electrolysis and off-grid solar PV [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2021, 46(57) : 29038-29048. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2020.09.098](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.098).
- [18] HASSANI H, ZAOUCHE F, REKIOUA D, et al. Feasibility of a standalone photovoltaic/battery system with hydrogen production [J]. *Journal of energy storage*, 2020, 31: 101644. DOI: [10.1016/j.est.2020.101644](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101644).
- [19] DAHBI S, ABOUTNI R, AZIZ A, et al. Optimised hydrogen production by a photovoltaic-electrolysis system DC/DC converter and water flow controller [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2016, 41(45) : 20858-20866. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2016.05.111](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.111).
- [20] 杨强, 马柱, 白丽弘, 等. 光伏制氢系统建模与多海拔应用的稳定性研究 [EB/OL]. 全球能源互联网, 2025: 1-9(2024-12-16) [2025-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1550.TK.20241213.1650.002.html>.
- YANG Q, MA Z, BAI L H, et al. Modeling and multi-altitude stability study of photovoltaic hydrogen production system [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2025: 1-9(2024-12-16) [2025-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1550.TK.20241213.1650.002.html>.
- [21] GU X F, YING Z, ZHENG X Y, et al. Photovoltaic-based energy system coupled with energy storage for all-day stable PEM electrolytic hydrogen production [J]. *Renewable energy*, 2023, 209: 53-62. DOI: [10.1016/j.renene.2023.03.135](https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.135).
- [22] LIU X Y, ZOU J, LONG R, et al. Variable period sequence control strategy for an off-grid photovoltaic-PEM electrolyzer hydrogen generation system [J]. *Renewable energy*, 2023, 216: 119074. DOI: [10.1016/j.renene.2023.119074](https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119074).
- [23] SALOUX E, TEYSSEDOU A, SORIN M. Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point [J]. *Solar energy*, 2011, 85(5): 713-722. DOI: [10.1016/j.solener.2010.12.022](https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.022).
- [24] ABDOL RAHIM A H, TIJANI A S, KAMARUDIN S K, et al. An overview of polymer electrolyte membrane electrolyzer for hydrogen production: modeling and mass transport [J]. *Journal of power sources*, 2016, 309: 56-65. DOI: [10.1016/j.jpowsour.2016.01.012](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.01.012).
- [25] AWASTHI A, SCOTT K, BASU S. Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2011, 36(22) : 14779-14786. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2011.03.045](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.045).
- [26] CHOI P, BESSARABOV D G, DATTA R. A simple model for solid polymer electrolyte (SPE) water electrolysis [J]. *Solid state ionics*, 2004, 175(1/4): 535-539. DOI: [10.1016/j.ssi.2004.01.076](https://doi.org/10.1016/j.ssi.2004.01.076).
- [27] ZOU L, SHEN Q W, YANG G G, et al. Improved hydrogen production efficiency of a photovoltaic-electrolysis system with P&O algorithm: a case study [J]. *Chemical physics letters*, 2023, 832: 140891. DOI: [10.1016/j.cplett.2023.140891](https://doi.org/10.1016/j.cplett.2023.140891).
- [28] DEBE M K, HENDRICKS S M, VERNSTROM G D, et al. Initial performance and durability of ultra-low loaded NSTF electrodes for PEM electrolyzers [J]. *Journal of the electro-*

[chemical society](#), 2012, 159(6): K165-K176. DOI: [10.1149/2.065206jes](#).

- [29] 李金玉. 风光互补发电制氢储能系统研究 [D]. 天津: 天津商业大学, 2021. DOI: [10.27362/d.cnki.gtsxy.2021.000101](#).

LI J Y. Research on hydrogen generation and energy storage system based on wind-solar hybrid power generation [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2021. DOI: [10.27362/d.cnki.gtsxy.2021.000101](#).

作者简介:



苗梦薇 (第一作者)

2000-, 女, 北京工业大学能源动力硕士研究生在读, 主要从事太阳能制氢及氢能储的研究工作 (e-mail) S202265369@emails.bjut.edu.cn。

苗梦薇



于瑞皎 (通信作者)

出生年份-, 女, 博士, 助理研究员, 主要从事电解制氢及电化学储能等方面的研究工作 (e-mail) yuruijiao@bjut.edu.cn。

于瑞皎

项目名称 非常规重力环境下分离式再生燃料电池系统性能研究
(GZB20230047)

承担单位 北京工业大学

项目概述 研究在非常规重力环境中分离式再生燃料电池系统的性能研究, 包括在微重力环境、超重力环境以及变重力环境中。

主要创新点 (1) 获得超重力及微重力环境下分离式再生燃料电池系统中电解池运行工况对燃料电池子系统中热-电-两相流同步信号的影响规律; (2) 掌握变重力环境下分离式再生燃料电池系统性能的变化规律; (3) 获得优化分离式再生燃料电池系统循环效率的方法。

项目名称 微重力环境中分离式再生燃料电池系统传质特性及强化措施研究(2024M750150)

承担单位 北京工业大学

项目概述 以带导流式流道的分离式再生燃料电池为研究对象, 以航天应用为背景, 利用微重力落塔开展微重力环境下燃料电池及电解池子系统中传质特性、传质强化措施及系统效率的相关研究工作。

主要创新点 (1) 微重力环境下含不同导流板结构分离式再生燃料电池系统流场内两相流形态; (2) 获得最适合在微重力环境下运行的分离式再生燃料电池子系统流场结构。

项目名称 短时微重力环境下再生燃料电池水-气两相流体输运特性研究(NML202409)

承担单位 北京工业大学、中国科学院力学研究所

项目概述 拟搭建分离式再生燃料电池系统样机, 开展基于落塔短时微重力环境下分离式再生燃料电池两相流体输运区域内的两相观测及性能同步测量实验。

主要创新点 (1) 微重力运行环境下电解池和燃料电池协同运行模块系统内水-气传输特性规律及电化学耦合过程规律; (2) 微重力运行环境下分离式再生燃料电池电解和发电模块系统改进及电池结构设计优化策略。

(编辑 徐嘉铖)