设计说明书

基于绿色能源的制氢装置设计

|  |  |
| --- | --- |
| 学 院： | 机械工程学院 |
| 专 业： | 机械设计制造及其自动化 |
| 学生姓名： | 陈默雷 |
| 学 号： | 24110181019 |
| 指导教师： | 魏 峥 |

2025年06月

# 摘 要

随着全球能源结构转型与碳中和目标的推进，氢能作为清洁高效的二次能源载体备受关注。近年来，科学技术日益发展，传统化石燃料制氢方式的不足逐渐显露，其存在碳排放高、能耗大等问题；而海上风电及其他技术日趋成熟，在我国海上能源与氢能共同发展的背景下，怎样去实现海上能源互补制取绿氢是国内外学者所广泛关注的。本文主要介绍了一种基于绿色能源的制氢装置的设计，重点研究其机械结构设计与能量转换优化，采用光伏-风电-波浪能互补供能模式驱动电解水制氢，拟解决传统制氢的各类问题，为可再生能源消纳与氢能产业发展提供技术支撑。

本设计利用海上平台，搭载光伏追光装置、波浪能产能装置、风力发电装置以及储能模块实现对氢能的制备，该设计通过创新的机械结构，实现光伏-风电-波浪能多种能源互补，将海上能源高效的转换为电能以供装置的电力需求，实现绿氢的制备。本设计通过所学专业课知识，了解目前氢能的发展，独立完成装置中各零部件的设计，包含各标准零件的选型和各零部件的材料选用，并使用SolidWorks对关键零件进行建模，使用有限元分析对装置中潜在的薄弱环节进行仿真分析，完成总体装配二维图、关键部件的装配体图以及主要零件图。结合理论计算和相关实践的仿真分析，本装置设计的制氢装置在海洋环境中具有较强的工作能力，该设计推动了海水制氢的发展，也为海洋能源的有效利用提供了新的可能。

**关键词：**海水制氢、绿氢、制氢装置、光伏-风电-波浪能互补供能、海上平台

**Abstract**

With the global energy structure transition and the advancement of carbon neutrality goals, hydrogen energy has garnered significant attention as a clean and efficient secondary energy carrier. In recent years, as technology has progressed, the limitations of traditional fossil fuel-based hydrogen production methods have become increasingly apparent, characterized by high carbon emissions and excessive energy consumption. Concurrently, with the growing maturity of offshore wind power and other renewable energy technologies, the synergistic development of offshore energy and hydrogen energy in China has prompted widespread scholarly interest in achieving complementary utilization of offshore energy for green hydrogen production. This paper presents the design of a hydrogen production system based on renewable energy integration, focusing on mechanical structure optimization and energy conversion efficiency. The proposed system employs a photovoltaic-wind-wave complementary power supply model to drive water electrolysis for hydrogen production, aiming to address the shortcomings of conventional hydrogen production methods while providing technical support for renewable energy utilization and hydrogen industry development.

This design utilizes an offshore platform equipped with a photovoltaic tracking device, wave energy generation device, wind power generation system, and energy storage module to achieve hydrogen production. Through innovative mechanical structures, the system realizes complementary utilization of photovoltaic, wind, and wave energy sources, efficiently converting marine energy into electricity to meet the facility's power demands and produce green hydrogen. Based on professional knowledge in related fields, the design process involved independent development of all components, including standardized part selection and material specification. Key components were modeled using SolidWorks, with finite element analysis conducted to simulate potential weak points. The complete design documentation includes 2D general assembly drawings, critical component assembly diagrams, and detailed part drawings.Through theoretical calculations and practical simulation analyses, the hydrogen production system demonstrates strong operational capabilities in marine environments. This design not only advances seawater hydrogen production technology but also provides new possibilities for efficient utilization of ocean energy resources. The integrated approach effectively combines multiple renewable energy sources, offering a sustainable solution for clean hydrogen generation in offshore settings.

**Keywords:**Seawater Hydrogen Production,Green Hydrogen,Hydrogen Production Facility,Photovoltaic-Wind-Wave Hybrid Energy Supply System,Offshore Platform

# 目 录

[**摘 要 II**](#_Toc26159)

**Abstract** [**Ⅲ**](#_Toc25374)

[**目 录 V**](#_Toc8925)

[**第一章 绪 论 1**](#_Toc12648)

[1.1课题的背景 **1**](#_Toc2080)

[1.1.1引言 1](#_Toc31193)

[1.1.2 研究的目的及意义 2](#_Toc3134)

[**第二章 现有技术分析 3**](#_Toc724)

[2.1海上能源的国内外研究现状 3](#_Toc10355)

[2.2氢能制备研究现状 5](#_Toc9058)

[2.3 制氢装置的设计目标 6](#_Toc5984)

[2.4 本章小结 7](#_Toc21621)

[**第三章 基于绿色能源的制氢装置总体设计方案 9**](#_Toc15289)

[3.1 基于绿色能源的制氢装置总体设计方案 9](#_Toc11602)

[3.2能源发电装置各模块设计方案 11](#_Toc6538)

[3.2.1波浪能发电模块 11](#_Toc11335)

[3.2.2 风能发电模块 13](#_Toc24211)

[3.2.3 太阳能发电模块 14](#_Toc30231)

[3.2.4 制氢模块 17](#_Toc6788)

[**第四章 制氢装置零部件的选型与校核 19**](#_Toc18883)

[4.1波浪能发电模块零部件的选用与校核 19](#_Toc3620)

[4.2风能发电装置关键部件的选型与校核 21](#_Toc28841)

[4.2.1 动力模块中齿轮副的校核 21](#_Toc8613)

[4.2.2联轴器的选型 23](#_Toc17606)

[4.3太阳能发电模块关键部件的选型与校核 24](#_Toc19733)

[4.3.1蜗轮蜗杆的校核 24](#_Toc25406)

[4.3.2齿轮轴强度校核 26](#_Toc18162)

[4.3.3同步带的选用与校核 27](#_Toc20220)

[4.4本章小结 28](#_Toc27737)

[**第五章 三维建模与模型优化 29**](#_Toc18178)

[5.1建模软件的选择 29](#_Toc25914)

[5.2零件建模 29](#_Toc27817)

[5.3干涉检查 29](#_Toc10763)

[5.4结构优化 30](#_Toc18694)

[**第六章 总结与展望 31**](#_Toc4735)

[**参考文献 33**](#_Toc14689)

# 第一章 绪 论

## **1.1课题的背景**

## **1.1.1引言**

近年来，全球能源需求持续攀升，传统化石能源的大规模开发已引发严峻的生态环境问题，推动能源结构向低碳化转型成为迫切需求。海洋能源包括风能、太阳能和波浪能等多种形式，海洋面积广阔，蕴含的能源储量是巨大的，目前未能完全利用，在未来有着很大的发展空间；而氢能作为一种清洁、高效的二次能源，来源广泛，应用场景丰富，被认为是支撑可再生能源大规模发展的理想能源，也是实现碳中和的关键载体。

当前，面对人们对氢能的不断开发利用，绿氢的生产仍然面临严峻考验，传统的电解水制氢过度依赖高纯度淡水，不仅生产成本高，还加剧了水资源的短缺；其次，对于可再生能源的发电，如太阳能发电具有间歇性，而风力发电的波动性强，这些因素影响了电解水制氢系统的稳定。面对人类对海洋领域的进一步深入探索，海洋能（如波浪能、风能及太阳能）的规模化开发与高效利用，为破解上述难题提供了新思路，通过海上平台直接利用海水资源，结合可再生能源互补供能技术和新型电解水制氢技术，实现可持续的海水制氢。

本课题的主题是基于绿色能源的制氢装置设计，本装置利用海上绿色能源实现电能的转换，并为正常工作提供能源的海上制氢平台，对于发电方面，设计了很多机械结构，如对光伏板设置多个自由度，实现“追光”功能；对风能和波浪能进行多级齿轮传动，提高产能，实现包括波浪能、风能、太阳能等绿色能源的转化，对转化的电能进行储存和利用，从而达到对于海水制氢的供电需求；对于制氢等其他方面，该装置所设计的海上平台可装配各种制氢装置，并安装海洋探测装置，探测天气的变化和海浪的大小，以适应恶劣环境的影响，降低险峻情况带来的危险，实现产能的最大化，并利用新型的PEM电解槽，完成氢能的制备。本文将着一介绍制氢装置的总体设计方案以及各装置的设计方案与计算校核。

## **1.1.2 研究的目的及意义**

## 在全球能源结构转型与“双碳”战略目标的驱动下，氢能因其零碳排放成为替代化石能源的重要选择；而海上平台因其可利用能源广泛，不占用陆地资源，发展前景广阔等优点，为未来海上发展提供坚实的保障。简而言之，设计一种利用海上能源，实现绿氢的制备具有以下意义：

（1）减少自然界中碳的排放，实现碳中和目标：因人类社会的发展和化石燃料过度使用，导致自然界中的碳循环失衡，而绿氢制备和使用过程中无对环境的污染，为实现碳中和目标和保护自然界起到重要作用。

（2）节省陆地资源、发展海上经济：该海上平台不仅可以缓解陆上资源紧张的局面，并且可以发展深海养鱼、远海发电等，为经济的进一步发展提供远大设想和目标。

（3）军事与安全方面的应用：在军事领域，该装置可以提供新能源，发展新能源武器武装国防力量，也可以设置探测装置，保护沿海安全。

（4）技术领域的突破：通过光伏-风电-波浪能的互补发电和绿氢的制备，可以推动新能源领域的创新，为海洋经济和新能源的发展提供新的可能性。

（5）推动相关海洋和能源产业发展：基于绿色能源的制氢装置的研究和开发可以带动材料科学、机械工程、远海经济、物理应用等相关产业链的发展。

综上所述，对能够实现光伏-风电-波浪能的互补发电制备绿氢的研究具有重大的科技和经济价值。通过对海水制氢领域的研究以及对海洋能源应用的探索，可以推动人类对海洋的进一步认识，也可以加速利用海洋这个庞大的能源宝库，助推新能源产业的高速发展，为人类社会发展和生活水平的提高做出重大贡献。

# 第二章 现有技术分析

## **2.1海上能源的国内外研究现状**

海上能源可供人类利用的有很多形式，主要包括太阳能、波浪能、风能等多种形式，本课题主要基于绿色能源的制氢装置，设计一种利用太阳能、风能和波浪能进行多能互补的联合发电海上制氢平台。

海浪中包含的波浪能是世界上最大的并且未开发的可预测的[可再生能源](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/renewable-energy-source)，全球目前有多家公司在波浪能方面进行研究工作，并已开发出相应的波浪能实体装置，开展实验工作。欧洲可谓是波浪能领域的全球领先者，欧洲学者申请了全球大部分的潮汐能和波浪能专利[1]；对于国内，我国海岸线延绵千里，拥有着庞大的海域面积, 波浪能可供开发的规模巨大，储能较多，这是中国发展波浪能的显著优势，中国也将在波浪能研究领域深入探索，贡献中国力量和中国实践。如图1.1所示为波浪能模块发电的原理示意图。波浪能主要通过一定的机械捕能机构收集并通过转换装置将波浪能转化为其他能量，例如机械能，通过增速器进行增速传动至发电机进行发电[2]。除此之外，还有利用某些压电材料，对海洋中蕴藏的波浪能量进行收集，原理是利用正压电效应将机械能转换为电能, 波浪能可以作用在压电材料上，使其变形，导致电偶极矩间发生变化，产生电动势[3]。目前，波浪能发电也利用了摩擦纳米发电机，其在低频工作状况下的低成本、高效率、高功率、低重量等突出特性，在未来能源收集方面存在着广阔的发展潜力[3-4]。

图示

描述已自动生成

图1.1波浪能模块发电的原理示意图[6]

海上风能作为可再生的能源形式，其规模庞大，且未被完全开发，有巨大的潜在价值，对于实现全球碳中和目标、推动新能源产业的发展具有深刻意义。目前，全球各国对于海上绿色能源的重视程度与日俱增，推动海洋绿色能源技术层面的开发和对相关产业发展的支持。国际能源署等国际组织积极推动海上风电的发展，促进全球海上风电产业的繁荣；当我国的海上风力发电装置主要使用浮动结构，风力发电机放置通过系泊和锚固，通过合理的分配质量和重量完成整体结构的设计，使其悬浮在海面上，主要包括驳船式等结构[5]。近年来，有很多关于能量联合发电方面的研究，国内有研究者提出了风能和波浪能联合发电的浮式平台的设想，并实施研究，可以同时收集风能和波浪能(如图1.2所示) [6]。



图1.2 风-浪两种能源联合发电的浮式平台示意图

海上太阳能有别于传统的陆地太阳能，它不占用陆地资源，是一种在海面上安装太阳能光伏板，用以接收海上巨大的太阳能资源。海上太阳能是目前新兴的可再生能源，具有潜在的巨大发展空间和经济效益。目前，我国学者对海上太阳能进行分析评估，我国海域面积庞大，海上太阳能源储能较多，合理利用太阳能将为我国发展能源产业提供支持[7]。海上太阳能光伏发电有以下优点，不受地域限制、储量巨大、无污染等。为此，有学者提出了海上可移动光伏太阳能发电系统，海上移动光伏发电系统可实现光伏板位置的变化，能够快速准确的跟踪太阳，进而实现太阳能利用率的最大化[8]。

## **2.2氢能制备研究现状**

目前，氢能的获取途径有很多，既可以通过化石能源重整、热裂解等方式制取，也可以来自氯碱、冶金等工业过程的副产品气体，还可以利用电解水制备。在我国，光伏绿氢方面的技术已经逐渐成熟，中国石化新疆库车绿氢示范项目是我国首个万吨级光伏绿氢项目，目前已顺利投产[9]。研究表明，可再生的海上能源与海水制氢的综合运用，在不污染环境的前提下，可降低氢能的综合生产成本，且更方便利用海洋化学资源[10],我国也正向着海水制氢的方向发展，建立了海上风电制氢、输氢及储氢的相关系统（如图2.1所示）[11]，并设想多个情景，完善含风电制氢装置的综合系统能源的优化[12]，实现海上风电的合理利用。在以往，海水通过电催化的方式制取氢气，不仅耗能较多，工艺流程复杂，而且淡化成本导致综合成本的增多。在海水直接制取氢气的研究上，国外研究团队尝试使用超薄半透膜，利用极高的压力将海水推过超薄半透膜，体积过大的氯离子无法穿过此薄膜。浸没在电解液中的两个电极与电源相连接，在两个电极产生电力的作用下，水分子在负极发生分裂，分离出氢离子并产生氧气。但超薄半透膜不仅会阻挡氯离子通过，而也会限制其它较大的离子的移动，使反应不够高效，对后续反应产生影响。对于我国，研究团队开始并已经对一些反渗透膜和质子交换膜进行了多方面的系统性测试，并取得了相应的进展[13]。

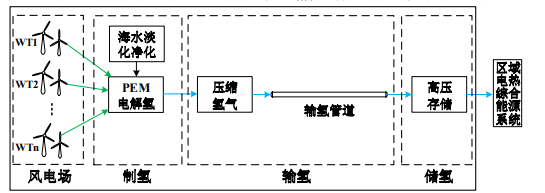


图2.1 海上风电制氢、输氢及储氢示意图

对于目前氢气制备的能源方面，PEM电解水近年来发展势头迅速，正在向规模化进行过渡。PEM水电解槽和光电的耦合是一种很有前途的氢气制备方法，国外提出了一种创新的能源管理策略，以确保稳定的产氢率，即使在波动的太阳辐照。通过集成电池辅助的氢气生产，这种方法允许分散的、独立于电网的可再生能源系统，减轻了光伏间歇性造成的不稳定性。国内外很多学者对PEM电解槽进行了研究分析,未来PEM电解槽的扩产瓶颈不取决于贵金属的高成本，而是其供应可用性[14-15],如图2.2所示为PEM电解槽和单体结构[16]。PEM电解槽因铱资源稀缺且价格高制约了其发展，为此洪思琦等学者提出推动高活性、高稳定性的低铱催化剂的发展[17]。此外，我国海上风力发电正在逐步发展，将海上风电和氢能二者进行结合是趋势，不仅可以平抑海上风电输出波动性，也能降低碳排放量[18]。目前国家提倡进行能源结构的改革，发展方向朝着低碳环保的目标前进，氢能是非常重要的一种能源[19-20]。

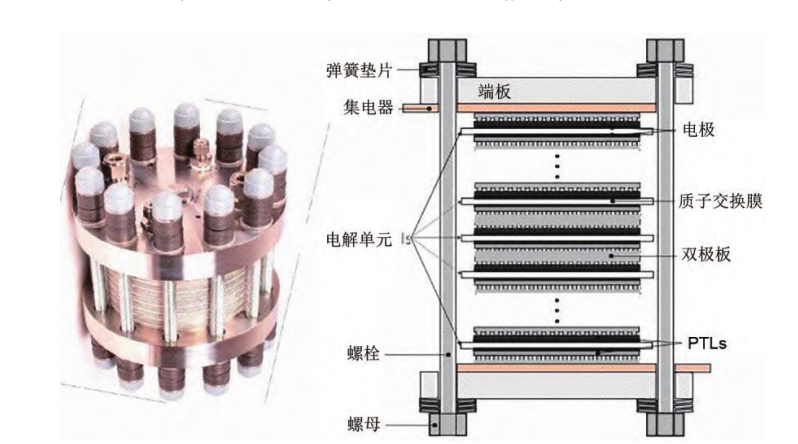


图2.2 PEM电解槽和单体结构

## **2.3 制氢装置的设计目标**

本课题题目为“基于绿色能源的制氢装置设计”，对于利用海洋能源转换方面和制备氢气方面，主要包括以下几个设计目标：

(1) 波浪能发电装置的设计：采用水平轴的叶片，利用海浪的起伏，叶片产生转动，从而将波浪能转化为机械能，并通过相应的增速机构传递给电机，转换为电能供应装置所需的电力。

(2) 风能发电模块设计：设计合适的发电机扇叶，使其具备在强风下稳定发电的能力，并通过变速机构，将机械能高效的转化为电能。

(3) 光伏发电模块设计：利用机械机构，实现光伏板的翻转和旋转，实现光伏板的追光功能，实现太阳能的最优采集。

(4) 海上平台整体结构设计：设计一体化的海上平台，保证自身强度的前提下，实现各模块的合理布置。

(5) 利用相关软件完成课题的三维建模设计，并进行二维图的绘制，完成关键部件和装置中薄弱环节的有限元分析和校核工作。

## **2.4 本章小结**

本章重点讲述了海洋能源的开发与绿氢制备技术的优点和不足，列举了波浪能、风能和太阳能的应用现状和在制氢领域的联合创新。波浪能作为全球最大并且未被完全开发的可再生能源，通过能量转换装置和能源收集的协同作用，可以实现机械能到电能的转化。在技术的发展和创新方面，欧洲地区的专利技术占据全球大多数，而我国占据广阔海洋资源，在近几年的理论研究发展过程中，正在加速推进波浪能技术方面的发展。对于海上风能的开发利用，重点论述浮动式结构的技术特点，并且指出我国在驳船式风力发电机平台领域的领先优势，强调在能源转型中具有重要的战略价值。此外在海上太阳能方面，指出移动式光伏系统的应用特点，其动态追踪技术能有效提升能源转换效率，为我国海洋光伏的规模化开发提供了有力的技术支撑，也为本文中制氢装置的设计提供理论支持。  
 在制氢技术方面，以新疆库车万吨级项目这个典型案例，引出光伏绿氢技术的发展现状。针对目前海水直接制取氢能的技术瓶颈，对比了国内外在膜分离技术领域的研究进展，指出我国在反渗透膜测试方面取得了重要突破，并且深入剖析了PEM电解槽技术的应用前景和当前实验研发所面临的挑战，提出低铱催化剂研发对于突破贵金属资源制约具有重要作用。最后，说明海上风电制氢系统的设计，对平抑发电波动、降低综合成本具有突出优势。  
 本章揭示了当前技术发展存在的矛盾：海洋能源采集效率较低且设备耐久度较低；海水制氢成本控制较为困难，工艺复杂度较高；电解槽材料创新出现瓶颈，产业化需求要求较高，无法实现。未来应着力构建收集能源，储存能源，转化利用一体化的局面，提出风能-太阳能-波浪能多能互补协同发电的创新路径，推动着海洋绿色能源的制氢技术向高效化、经济化、规模化方向迈进。

# 第三章 基于绿色能源的制氢装置总体设计方案

## **3.1 基于绿色能源的制氢装置总体设计方案**

基于绿色能源的制氢装置的主要功能为：海洋绿色能源用于自供电和制备氢能。课题拟定五个部分，主要分为1-风能发电模块、2-太阳能发电模块、3-制氢系统、4-波浪能发电模块和5-储能模块。如图3.1中结构所演示，模型整体上采用具有相对稳定性好的三角状海洋平台，并且由刚性结构组成，稳定性好；平台一角安装风力发电机，其下层设计有稳定性好的立柱，可支撑风力发电机的整体重量，保证风力发电机的安全可靠；平台上层光伏板占用多数面积，提高受光面积，并设计光伏板的翻转机构和旋转机构，保证不同太阳角度都可以做到高效的产能；在平台侧面安装有波浪能发电装置，多种能源协调互补，传递给平台中心的储能模块中，供给电解槽需要的电能。

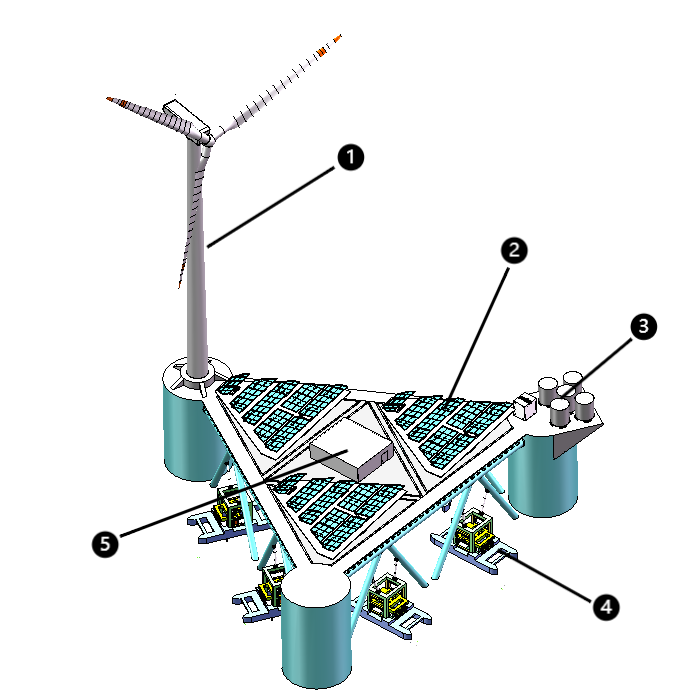


图3.1 总体模型图

波浪能发电模块三维装配图如图3.2所示，使用旋转叶片式结构作为其主要的一级转换机构，叶片采集波浪中的能量将其转换为旋转机械能；采用增速器作为能量的二级转换，通过内部的齿轮结构进行增速，增速后的旋转轴通过连接装置传递给发电机的主轴，使其高速旋转，实现能量的第三级转化，将机械能转换为电能，并将其输出存储。风能发电模块基本原理如图3.3所示，对于一级转化，风力发电装置使用了水平式风力发电机，在保证自身结构安全可靠的前提下，实现高效率的产能；在叶片受风的影响发生转动时，在联轴器的作用下，动力传递给两级行星增速器进行变速，实现输出转轴的高转速；三级转换是将转轴的高转速传递给发电机主轴，发电机将机械能转换为电能，并将其输出。总之，通过波浪能发电装置、太阳能发电装置和风力发电装置，将海上绿色能源太阳能、风能和波浪能转换为电能，为制氢海上平台提供电能，使其正常运行。

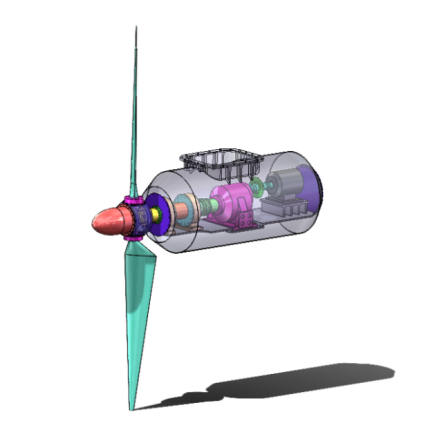


图3.2 波浪能发电模块三维模型装配图

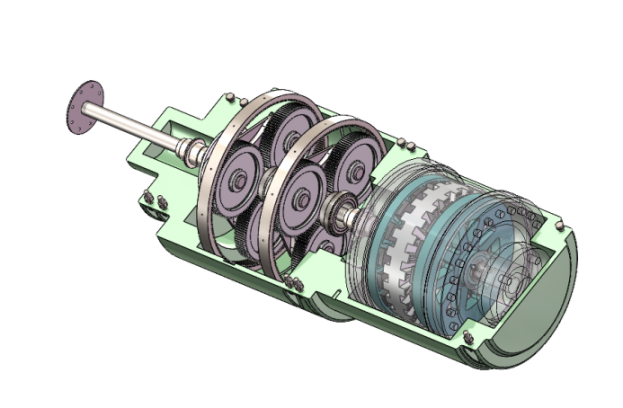


图3.3 风电发电模块三级转换示意图

对于制氢方面，平台设计有储能模块，用于转换和储存电能，为制氢系统提供能源，制氢系统主要是PEM电解槽进行氢气的制备，产生的氢气经管道输送至储气罐中保存，其他相应产物无污染，也有相应价值。

## **3.2能源发电装置各模块设计方案**

## **3.2.1波浪能发电模块**

对于波浪能发电模块的设计，主要将其分为船体和波浪能发电装置两个部分，发电装置的原理是利用大海中波浪每时每刻都在做起伏运动所产生的力，带动叶片旋转。图3.4是波浪能发电装置总体装配示意图。整体为船型，便于在大海中漂浮。图3.5(a)是平常状态，当海面没有波浪或者海面环境恶劣的时候，发电装置处于常态位，保护发电装置的正常使用。如图3.5(b)所示,当海面产生适宜波浪的时候，在剪叉式升降台的作用下，发电装置就会到达最合适的位置，使发电效率最大化，并延长其寿命。

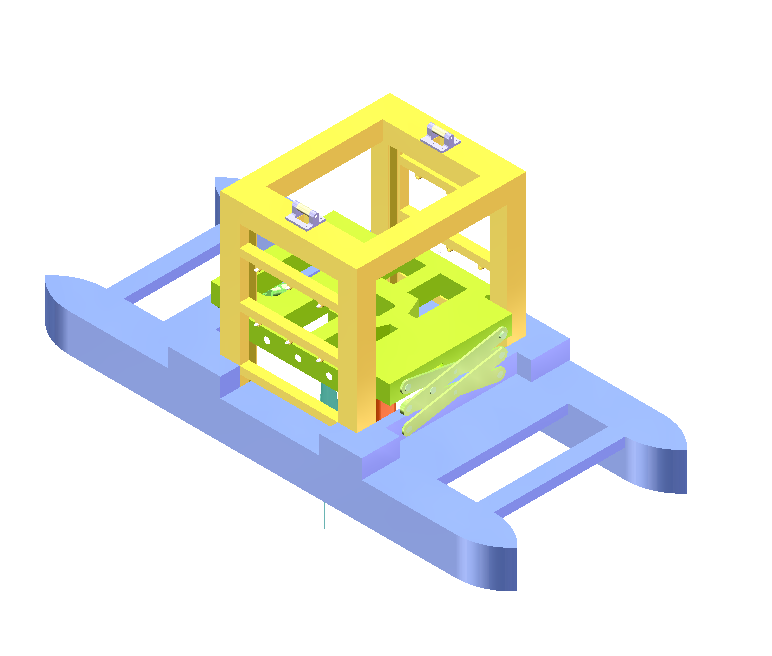


图3.4 波浪能发电装置的总装示意图

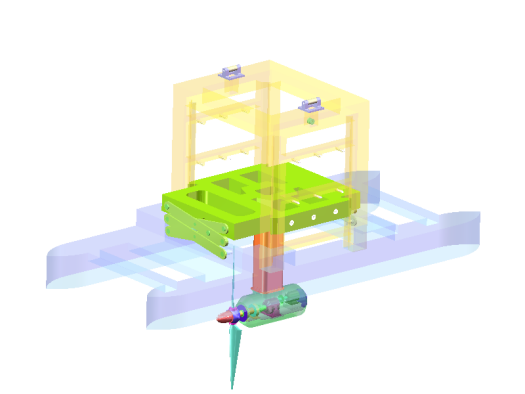
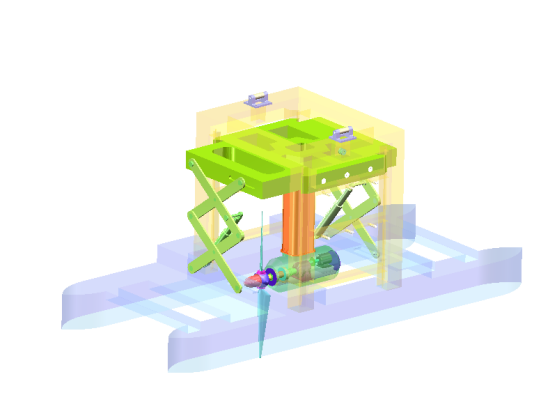


图3.5（a）平常状态 图3.5（b）工作状态

整个波浪能发电装置通过缸体和万向轴承安装在海上平台主体上，有利于减缓海浪对船体的冲击。整个装置采用轻量化结构，可以大大减轻重量，船体结构合理，可支撑整个装置悬浮在海面上，并且结构强度较高，足以抵挡恶劣天气和海上风浪较大的情况。为了保证发电装置的使用寿命，剪叉式升降台将发电装置抬升至常态位，并合理设计机械限位保证升降台的行程最大化，可减少海浪对船体和发电装置的冲击。当发电装置工作时，升降台就会将装置调整到适当高度，并通过观测发电量和波浪的大小，进行后续高度的调整，以促进发电效率的提高。

对于波浪能的发电，本装置采用叶片采集波浪能，图3.6是本发电装置剖面图，主要结构为1-叶片，2-轴，3-联轴器，4-增速器，5-制动片，6-发电机。1-叶片的旋转经2-轴的传递给4-增速器，使转速增加几倍，使发电量增大，提高发电效率。5-制动片可以使增速器和电机脱离开来，进而使发电机停止发电。

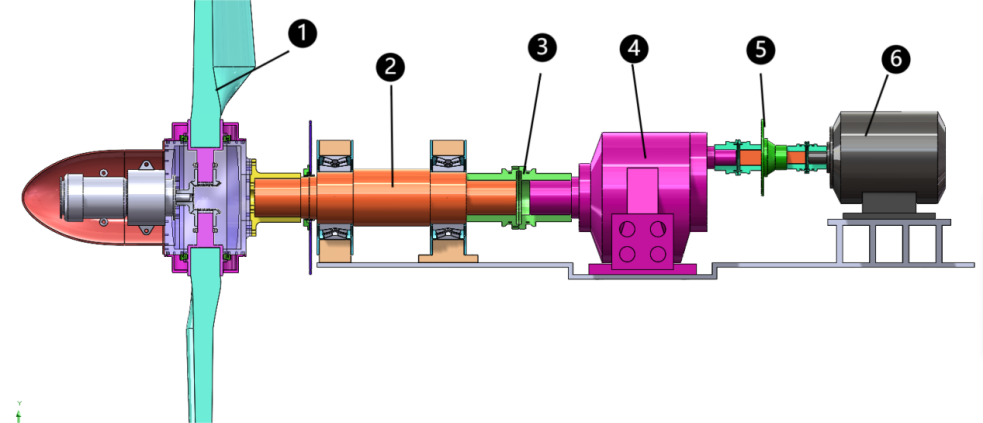


图3.6 波浪能发电装置的结构剖面图

## **3.2.2 风能发电模块**

图3.7为风力发电模块的三维装配示意图。对于风力的收集，采用水平轴风力发电机的发电模块进行风能的收集，发电量大。图3.8是风能收集叶片示意图，采用一定弧形的曲面，在一定程度上，可以减缓海风的强力作用，使发电机的使用寿命延长；在海风较小时，也能增强海风的作用，促使发电量的增加。风力发电机的叶片受海风的作用而开始低速旋转，叶片带动内部的叶轮进行转动，进而将风能转化成低速旋转机械能。



图3.7风力发电模块的三维装配示意图

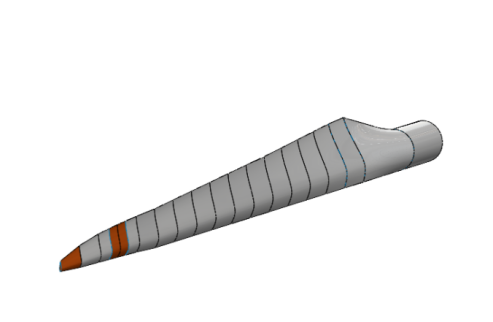


图3.8 风能收集叶片示意图

通过采用水平轴的旋转叶片，将风能转化为内部输入的机械能，风力发电模块设计有两级行星齿轮增速箱，用以提高电机主轴转速，以提高发电效率。图3.9为两级行星齿轮轮系简图，图3.10是风力发电装置动力模块三维图。在动力模块内部，输入轴与内部的行星架以及第一级齿轮轴与第二级行星架均采用了花键进行连接，传递动力。经过两级行星轮的增速，输出轴将高速的旋转机械能传递给发电机，以进行发电。

图示, 工程绘图

描述已自动生成

图3.9 行星齿轮轮系简图

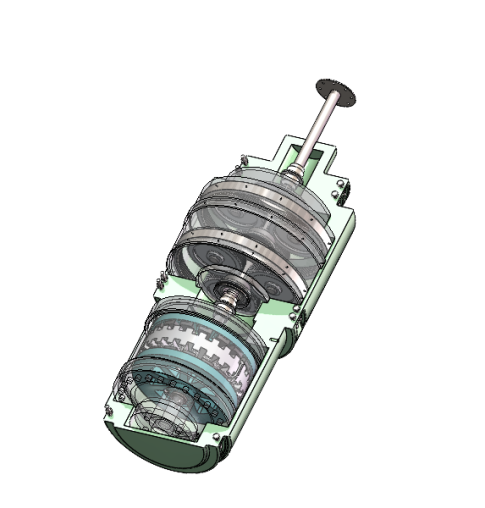


图3.10 风力发电装置动力模块三维图

## **3.2.3 太阳能发电模块**

太阳能发电模块主要是利用光伏板，进行太阳能的收取，进而转换为电能。图3.11为太阳能光伏板的装配示意图。海上平台共安装四组太阳能发电模块，扩大受光面积。为了提高能源的收集率，在光伏板下设置有翻转机构，翻转机构主要由同步带轮和丝杠螺母副组成的传动机构组成，电机的电能可以由太阳能转换的电能供应。电机的输出的转矩经一组同步带轮的传递，使丝杠转动，而经由丝杠副将旋转运动转化为直线移动，再通过连杆实现光伏板的翻转，可以在不同太阳角度时，使太阳能的收集最大化。图3.12（a）为常态位，在此时，光伏板处于水平状态，而丝杠副经机械限位处于静止，减少常态位时丝杠副的受力，水平状态的光伏板也可以有效的抵挡海风的影响，降低风压，增长使用寿命。图3.12（b）所示的为光伏板的工作位，在此时，可以通过产能的多少和对太阳角度的观测，调节光伏板的翻转角度。

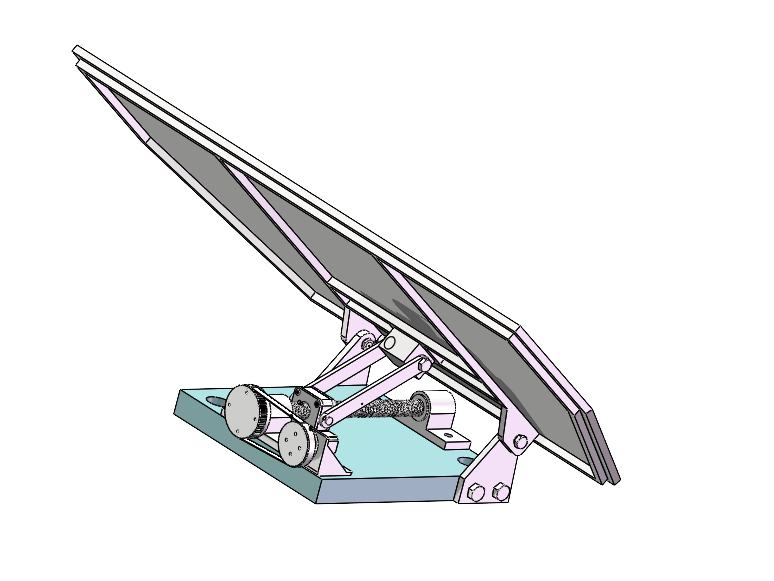


图3.11 太阳能光伏板的装配示意图

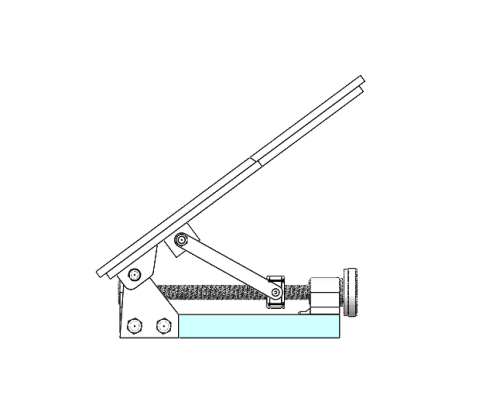
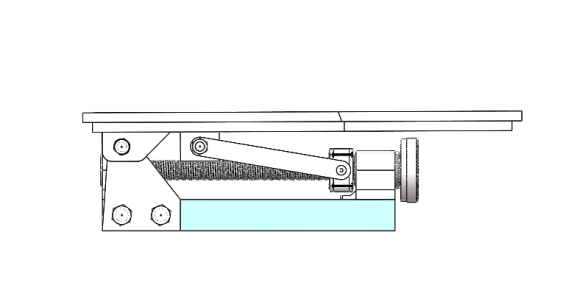


图3.12（a）常态位 图3.12（b）工作位

对于一天中太阳不同位置，除翻转机构外，另外设计旋转机构，旋转机构主要由一组行星齿轮和蜗轮蜗杆副组成，图3.13所示为旋转机构的断面图。电机通过驱动水平轴齿轮轴，将动力传递给另一齿轮轴，进而使涡杆高速旋转，通过涡轮蜗杆副转换为涡轮的垂直轴的转动，通过键的作用，带动太阳轮的旋转，从而外部齿圈开始转动，外部齿圈通过连接件与上层安装光伏板的平台连接，实现整个太阳能光伏板平台的旋转运动。整个旋转机构下层与上层通过餐盘轴承连接，在轴承的作用下，实现上下层的运动与静止。

在翻转机构和旋转机构的协同运行下，实现太阳能光伏板的追光功能。

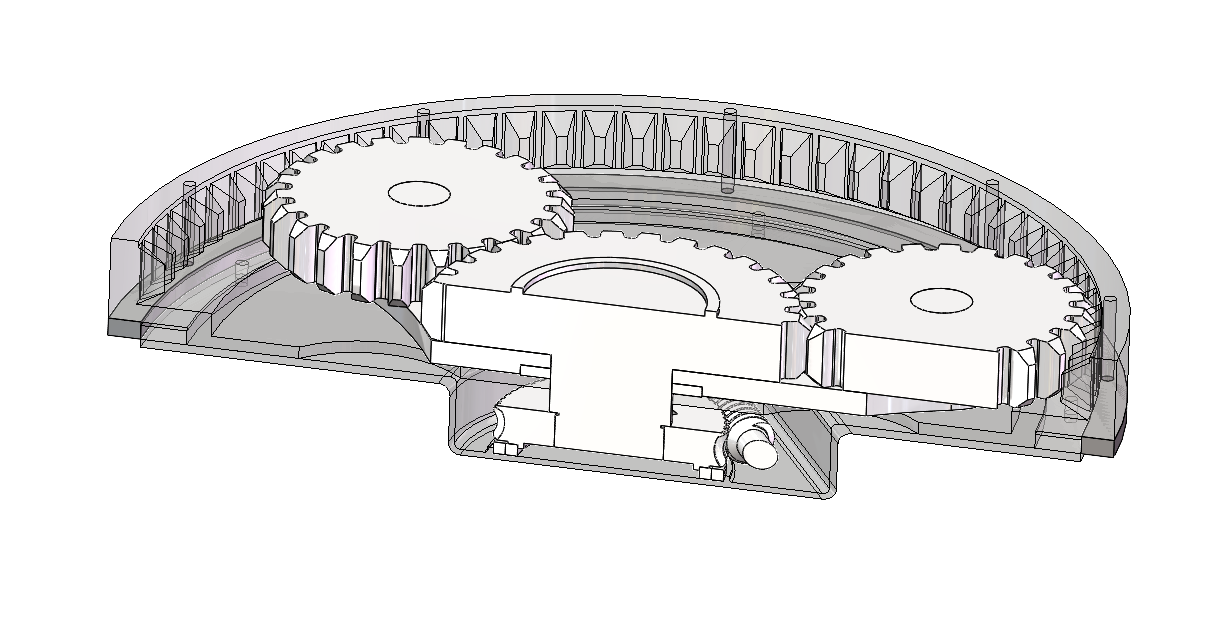


图3.13旋转机构断面图

## **3.2.4 制氢模块**

本装置制氢模块运用PEM电解槽，电解槽原理图如3.14所示。工作原理为，在通电的情况下，通过质子交换膜，氢离子从水分子中分离，在阴极生成氢气，氧气在阳极析出。

阳极反应式为：



阴极反应式为：



而本装置是将经过预处理的海水输入电解槽，由于电压对水的裂解作用，在被质子交换膜隔开的腔室中，在阳极析出氧气、氢离子和电子。氢离子通过质子交换膜到达阴极室，吸收电子形成氢气，从阴极室排出，经过气水分离器生成高纯度氢气。

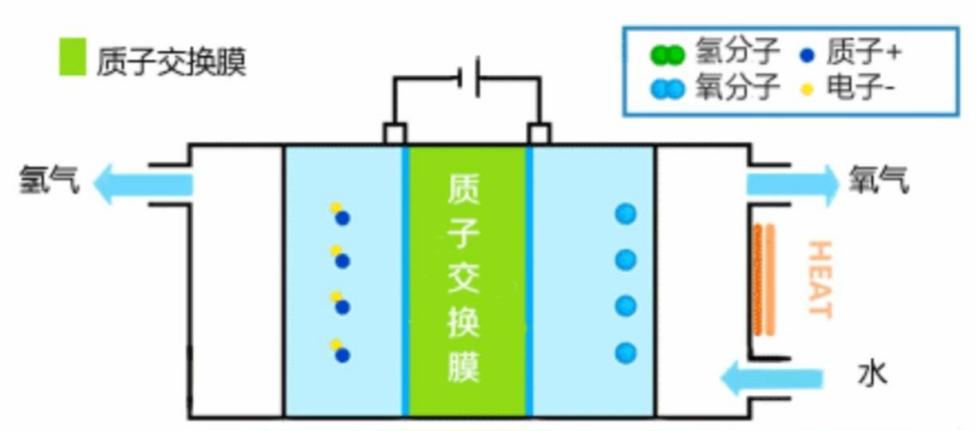


图3.14 电解槽原理图

本装置PEM电解槽的组成如图3.15所示。1-膜电极由质子交换膜、催化层、扩散层组成，质子交换膜兼有隔膜和电解质的作用，采用的材料为全氟磺酸，以铂铱为催化层，具有超高的电化学活性和超强稳定性；2-钛毡在PEM电解槽中作为气体扩散层，以铂为图层，具有高导电性和长的使用寿命；3-多网层材质为纯钛钛网，多层真空烧结，起到气体扩散和真空导流的作用；4-水汽隔板采用食品级PC材质，耐高温、高压，且高密封；5-阴极电极板和7-阳极电极板均为铂金钛电极，采用了中瑞国能特有的涂层专利技术，转换效率高；6-阴极面板和8-阳极面板为金属材质，起很好的支撑保护作用。

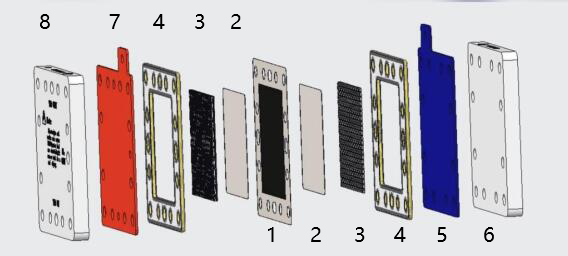


图3.15 PEM电解槽的组成

# 第四章 制氢装置零部件的选型与校核

## **4.1波浪能发电模块零部件的选用与校核**

对于波浪能发电装置，动力模块采用水平轴的叶片将海水起伏的波浪能转化为旋转的机械能，并用内部设计的增速器实现对转轴的增速，通过连接装置将高速的旋转机械能传递给发电机的输入轴，进行高效发电，本节从剪叉式液压升降台的液压部件的选型与升降台关键部件的校核做出说明。

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 波浪能发电装置采用了剪式液压平台结构设计进行发电模块的常态位和工作位转换以及发电效率的调整，液压缸行程缩短，控制剪叉式平台高度的降低，液压缸行程增长，控制剪叉式平台高度的升高。经过对升降台重量的评估，液压缸所承受最大载荷为22860。经查阅相应压力下的液压缸推荐可知，液压缸在该负载下的工作压力范围为0.8-1 *，*由此选取1作为液压缸的正常工作时所承受的压力数值，并进行计算。利用公式4-1进行计算分析，可以获得液压缸与所受负载之间的有效接触面积，得出液压缸的主要参数。   |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | |  |  | | (4-1) | | | 本式当中： | | —— 液压缸与所受负载之间的有效接触面积，；  —— 液压缸所承受的最大载荷，22860 ；  —— 液压缸正常工作时的所承受的压力，1.5；  —— 液压缸正常工作时的机械效率，0.86-0.99；  —— 缸内直径，。 | |   经过一系列的计算分析，可以得到液压缸的缸内直径=134mm，查阅液压缸的缸筒内径的使用手册后，选取=140mm。通过合理的缸径比计算后，得出合理的活塞杆的直径。通常依据液压杆活塞杆的负载选择合适的缸径比。本设计经过计算分析，杆径比可以选取0.55并得出液压缸活塞杆直径 =86，查阅液压缸的活塞杆外径尺寸系列后选取d=90。根据分析计算可得，1980.9为剪叉式升降平台在极限位置时的最大极限尺寸，1560.8为剪叉式升降平台在极限位置时的最小极限尺寸*，*得出液压缸的实际工作行程为420.1。根据查阅液压缸的活塞行程选用手册，选取活塞行程为450。依据上述计算得出的液压缸的相关参数，最终选择HSG型工程用液压缸。  在实际的工作过程中，由于升降平台在连杆交界处会产生很大的应力集中现象，因此需要对连接处的螺栓强度进行校核计算，选取升降平台的几个关键部位的螺栓进行校核，以确保升降平台的正常使用。螺栓在连杆连接处受到较大的剪应力，计算公式如下所示(公式4-2和4-3)，表4.1.1为螺栓的参数，表4.1.2给出了校核计算相关参数。   |  |  |  | | --- | --- | --- | |  | | (4-2) | |  | | (4-3) | | 式中： | —— 螺栓所受到的挤压应力，；  —— 螺栓受到的载荷，；  —— 螺栓受剪应力处的直径，；  —— 螺栓上挤压面的最小长度，；  —— 许用挤压应力，；  ——螺栓受到的的剪切应力，；  —— 螺栓的许用剪切应力，。 | | |   表4.1.1 螺栓参数   |  |  |  | | --- | --- | --- | | 编号 | 型号 | 螺栓材料 | | 1 | M80×240 | 40Cr | | 2 | M60×130 | 40Cr | | 3 | M60×110 | 40Cr |   表4.1.2校核计算相关参数   |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | |  | 螺栓所受载荷 | 螺栓上挤压面最小长度 | 螺杆的直径 | | 1 | 10254.16 | 120 | 80 | | 2 | 6234.18 | 120 | 60 | | 3 | 6158.35 | 50 | 60 | |

由上述公式计算分析，得出每个螺栓在工作时所承受最大负载状况下的剪应力，经与螺栓对应材料的剪切许用应力数值进行比较，经验证，所有螺栓均满足材料的剪切强度要求，符合正常工作要求。

## **4.2风能发电装置关键部件的选型与校核**

风力发电装置中，动力模块采用水平轴的大型叶片，收集海上的风能，将其转化为机械能，再通过内部的机械结构实现对主轴旋转的增速，使用联轴器等将动力传递给发电机，实现风能到电能的转化，以供海上平台的正常运行。下面将进行动力模块中进行齿轮副的校核和内部联轴器的选用。

## **4.2.1 动力模块中齿轮副的校核**

风力发电装置的动力模块的内部结构如图3.5所示，模型设计采用二级行星齿轮传动，单级的传动比为9，两级传动比为81。为了保证两级行星齿轮在正常工作时的不会因结构的损坏而失效，需要排除内部薄弱环节的影响，校核齿轮的强度。在传动过程中，输入轴通过一级传动，将动力传递给下一级行星齿轮，承受较大的负载，相比较第二级行星齿轮齿轮传动，产生的失效风险更大，为此需要对一级传动做出相关的校核。需要对内外啮合的齿轮齿面进行接触应力的校核，以满足齿轮的齿面接触疲劳强度要求，接触疲劳许用应力如公式4-4所示。表4.2.1所展示的是行星齿轮机构的齿轮参数。



3.5动力模块内部结构示意图

表4.2.1 齿轮相关参数

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 名称 | | 模数m | 齿数z | 齿宽b | 齿轮材料 | | | |
| 太阳轮 | | 6 | 26 | 100 | 40Cr | | | |
| 行星轮 | | 6 | 91 | 100 | 40Cr | | | |
| 外齿圈 | | 6 | 208 | 100 | 40Cr | | | |
|  |  | | | | | (4-4) | |
| 式中： | —— 齿面接触疲劳许用应力，；  —— 太阳轮和行星轮的齿面接触疲劳许用应力  min{\*} —— 取数值最小值。 | | | | | |

、的计算方法如公式4-5所示。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | ， | | (4-5 ) | |
| 式中： | | —— 太阳轮和行星轮的齿面接触疲劳强度寿命系数；  —— 最小安全系数，1。 | |

经计算后，得出= 726 。下面对一组外啮合齿轮的齿轮副进行校核，公式4-6为计算齿面接触疲劳强度的校核公式。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | | (4-6) | |
| 式中： | | —— 节点区域系数，2.3；  —— 弹性影响系数，189.8；  —— 重合度系数，0.916；  —— 太阳轮的分度圆直径，;  —— 齿数比;  —— 载荷系数，1.56;  —— 齿宽，。 | |

计算得=83.47，满足，得出结论，中心太阳轮的齿面接触疲劳强度满足所需要求。

## **4.2.2联轴器的选型**

风力发电装置在扭矩的过程中，联轴器起到至关重要的作用，联轴器的选择是设计的关键。下面将进行联轴器的选型，转矩的计算公式为，查阅机械设计手册后，选取载荷系数，。查表后，LX4弹性柱销联轴器公称转矩为Tn=2500 ，许用转速为[n]=3850，选用此联轴器，满足设计要求。在两轴的连接部位安装弹性联轴器，可以适当的补偿两轴线的偏移，因为该轴工作时主要承受剪切应力，补偿两轴线偏移可以增强该机构的工作能力，提升工作的可靠性。

## **4.3太阳能发电模块关键部件的选型与校核**

传动机构的作用是将动力源的运动和动力传递给执行机构，常见的传动方式有带传动、齿轮传动等。

带传动：具有传动平稳，适当的缓冲作用，减小振动，不仅结构简单、成本低，而且还能起到过载打滑保护等优点，但传动比不准确、传动效率相对较低、外廓尺寸较大。本装置中采用内含齿形的同步带，可以与同步带轮上的齿形啮合，实现传动比的精确和避免过载打滑的影响。

齿轮传动：它的优点是传动比准确，传动效率高，结构紧凑，缺点是制造和安装精度要求高，成本较高，使用时噪声大。本装置中由于需要调整光伏板平台的旋转角度，因此对旋转角度的精确度提出要求，使用齿轮啮合，可以保证其精确性和可靠性。

太阳能发电模块通过光伏板收集太阳能，光伏板设计有翻转机构和旋转机构，满足太阳不同入射角度的需求，在这些机构中，主要采用了齿轮传动和带传动。而这些功能的实现，需要内部零件和机构的可靠，为此本节从蜗轮蜗杆副、齿轮轴和同步带做出选型与校核。

## **4.3.1蜗轮蜗杆的校核**

如图表4.3.1所示，为蜗轮蜗杆的相关参数。

表4.3.1 蜗轮蜗杆相关参数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 名称 | 模数 | 齿数 | 材料 |
| 涡轮 | 30 | 60 | ZCuSn10P1 |
| 蜗杆 | 30 | 12 | ZCuSn10P1 |

蜗杆导程角：

中心距：

传动比：

采用公式4-7为蜗轮蜗杆接触疲劳强度公式。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | | (4-7) | |
| 式中： | | —— 弹性影响系数，189.8；  —— 载荷系数，1.2; | |

许用应力   
解得最大允许转矩：

理论接触强度允许极大载荷，但实际受胶合限制。  
采用公式4-8为蜗轮蜗杆接触疲劳强度公式。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | | (4-8) | |
| 式中： | | —— 齿形系数，2.4；  —— 应力修正系数，1; | |

许用应力   
 解得最大允许转矩：

同样显示极高理论值，实际受材料配对限制。  
实际限制因素  
（1）胶合与磨损：钢对钢摩擦系数高，润滑不良时易胶合，有效载荷需大幅降低。  
（2）蜗杆刚度：蜗杆挠度可能限制载荷，具体需计算支承跨距和弹性变形。  
（3）散热条件：高滑动速度下温升显著，需强制冷却。  
 若考虑安全系数，有效载荷范围约为，实际工作载荷符合校核值。

## **4.3.2齿轮轴强度校核**

在整个机构设计中，主要的传动机构为圆柱齿轮、蜗轮蜗杆等，各轴的强度直接影响传动精度和工作质量，需要对其进行校核，而涡轮轴的直径较小，易于发生失效现象。为了保证轴的强度，下面将对涡轮轴进行强度校核。

经理论上可知，同一根轴的扭矩相同，计算强度时只需要分析校核最大应力处，也就是最小轴颈的轴端，计算这一轴的此轴端处的扭转刚度，即可完成轴的可靠性校核，由公式：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | | (4-9) | |
| 式中： | | T —— 阶梯轴轴上的最大转矩；  WT —— 抗扭截面系数；  d —— 阶梯轴直径；  —— 许用扭转切应力。 | |

阶梯轴的材料选用40Cr，其最大的许用扭转应力为100MPa；经计算可以得到，所受扭转应力小于其许用应力。所以，阶梯轴的强度设计满足要求，工作可靠。

## **4.3.3同步带的选用与校核**

在光伏板的翻转机构中，使用了同步带以及同步带轮，为保证装置的正常运行，现选取合适的同步带，并对其进行校核。  
 大带轮直径：

小带轮直径：

中心距：  
 小带轮齿数：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4-10) |

大带轮齿数:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4-11) |

选用周节制同步带，S型圆弧齿，参考标准节距型号S5M（节距5mm）。  
   
 理论皮带周长：  
 根据标准周长表（如S5M系列），选择最接近的环形同步带。  
设计动力校核  
 过载系数

负载平稳，无惰轮、传动比 ，查表得，则。  
 传动动力，公式如4-10所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4-12) |

电机转矩

电机转速

则可得：  
 设计动力：  
 经查S5M型带参数表，根据基准传动容量)，啮合补偿系数，宽度补偿系数，则：  
 满足条件。

## **4.4本章小结**

本章围绕制氢装置上所设计机械结构的展开了详细设计计算。在动力系统设计方面，选用合适的电动机，确保电动机能稳定输出有效功率。传动系统设计中，通过对带传动和轴的设计计算，确定了带传动的各项参数以及轴的结构和尺寸，并进行了强度校核，保证传动系统的可靠性和稳定性。对两级行星齿轮增速机构和蜗轮蜗杆传动进行校核，验证其可靠性。这些设计计算为后续的三维建模提供了准确的数据支持，确保各机构在实际运行中能够高效、稳定地工作，满足各种功能的正常运行。

# 第五章 三维建模与模型优化

## **5.1建模软件的选择**

为满足制氢装置结构设计的复杂性和精确性要求，选用SolidWorks软件进行三维建模的创建，该软件具备强大的参数化设计功能，可便捷地对模型进行修改与调整，可以显著提升建模效率。此外，它还能将三维模型转化为符合生产加工需求的二维工程图，满足设计与制造连贯性的需求。

## **5.2零件建模**

依据制氢装置各部件的设计参数，运用SolidWorks软件对零件进行精确建模。

动力系统零件建模：按照选定的电动机实际规格，细致绘制电机外壳、转子、定子等关键部件，精准还原电机安装孔、输出轴等细节特征，确保模型与实际电机高度契合，也为模型的实践应用提供了基础。同时，依据键连接的设计尺寸，创建键的三维模型，保证与电机轴和带轮的配合精度。

传动系统零件建模：根据带传动的设计参数，精确绘制同步带轮模型，包括轮槽的形状、尺寸以及带轮的直径等关键要素，以确保与同步带的紧密配合。通过校核计算和仿真分析，确定齿轮的参数和减速器的传动比，保证所需功能的实现。对于轴的建模，严格按照设计的轴段直径、键槽尺寸和轴肩结构进行绘制，保证轴与其他零件的装配准确性。此外，还创建了轴承传动系统相关零件的模型，确保传动系统的完整性。

执行机构零件建模：针对发电机叶片，依据设计的叶片尺寸、形状进行建模，精确刻画叶片的轮廓角度等细节，以保障实际工作的效果。对于太阳能光伏板，按照设计尺寸进行创建，充分考虑实际的倾斜角度和安装位置，确保太阳能光伏板工作的可靠性。

## **5.3干涉检查**

完成装配体建模后，运用SolidWorks的干涉检查功能对模型进行全面检测。经检查发现，带轮与电机外壳之间存在微小干涉，分析是建模尺寸公差累积所致。通过微调带轮安装位置，调整配合尺寸，使带轮与电机外壳间保持合理间隙，成功消除干涉。同时，对太阳能光伏板的翻转以及旋转功能进行检查，确保工作过程中无干涉情况，保证设备运行时各部件互不碰撞。

## **5.4结构优化**

依据干涉检查结果，对制氢装置结构进行针对性优化。在传动系统方面，为增强轴的强度和刚度，在轴的关键部位（如轴肩处）添加圆角。经强度分析后，优化后的轴在承受相同载荷时，应力集中现象明显缓解，强度和刚度得到提升。

对关键传动部件，如涡轮蜗杆等传动机构进行了强度和刚度校核，并对机构中关键的零部件进行了有限元分析，充分验证机械结构是否满足实际使用要求，确保传动系统的在正常工作条件下的可靠性。

经过干涉检查和结构优化，解决了模型中的干涉问题，提升了各部件的结构性能。优化后的三维模型为氢能生产提供了可靠的设计蓝本，有助于确保制氢装置在实际运行中高效、稳定地工作，满足氢气纯度和能源方面的需求。

# 第六章 总结与展望

本研究聚焦于绿色能源的制氢装置的设计与开发，运用三维模型软件SolidWorks进行三维模型的创建，使用AutoCAD进行二维工程图的绘制，并对模型进行渲染，通过深入的理论分析、严谨的设计计算成功完成了一款基于绿色能源的制氢装置的设计工作。该装置对风能、太阳能和波浪能的综合运用提供新的设想，也为氢能的制备提供了新的方案，将对未来海洋能源的发展和新能源的利用具有深远意义。

在总体设计方案上，海上平台采用稳定的三角形结构，使用抗腐蚀材料，搭载平台上的各种机构及装置，实现海上制氢的目的。本文对目前风能、太阳能和波浪能的发展进行了详细的分析，在太阳能方面，在海上平台上布置了大面积的光伏板，运用带有翻转机构的太阳能光伏板，并采用旋转机构，实现光伏板的追光功能，为太阳能的采集提供新思路，也使光伏板适应恶劣环境，延长使用寿命；在风能方面，使用水平轴的风力发电机，并设计合理形状和强度的叶片，运用两级行星轮增速器对输入的机械能转换为高速的旋转机械能，供给发电机产生电能；在波浪能方面，利用大海中波浪每时每刻都在做起伏运动所产生的力，带动叶片旋转，产生低速机械能，并通过内部的增速器，实现机械能的高速输出，传递给发电机产生电能，波浪能发电装置整体采用船型，便于海上悬浮，使用剪叉式升降平台，可以使发电装置对发电量进行调整。本装置整体上采用轻量化设计，采用高强度和高刚度材料，该装置在保证安全可靠的前提下，力求高效。

通过有限元分析对制氢装置的部分关键零部件进行仿真分析，通过有限元分析和相应的校核计算，波浪能发电模块、风能发电模块和太阳能发电模块的关键部件满足强度和刚度要求，大大提高了该装置工作时的可靠性，保证了该装置的正常工作。该装置创新性的设计了多种能源模块，保证自供电的功能，综合运用PEM电解槽及其他原理和装置，实现氢气的制备。

综上所述，本项目对于解决目前氢气制备耗能多，传统化石能源制备氢气污染严重等问题有着推动性意义，为目前制备绿氢和海洋能源应用的设计难题提供了一个新的思路。未来，海洋能源这一巨大宝库将为人类发展提供新的可能，绿氢作为实现碳中和目标的重要资源，在今后能源产业中必将占据一席之地。

# 参考文献

1. Raju Ahamed, Kristoffer McKee, Ian Howard. Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review [J]. Ocean Engineering 2020, 107248, ISSN 0029-8018.
2. 邹鸿翔, 苏昌胜, 赵林川, 张文明, 魏克湘. 波浪能量采集及自供能海洋无人机电系统研究进展. [J].光源与照明,2022,No.173(11):116-118.
3. Lee, G., Lee, D., Park, J. et al. Piezoelectric energy harvesting using mechanical metamaterials and phononic crystals [J]. Commun Phys 5, 94 (2022).
4. Li, Y., Guo, Z., Zhao, Z., Gao, Y., Yang, P., Qiao, W., Zhou, L., Wang, J., & Wang, Z. (2023). Multi-layered triboelectric nanogenerator incorporated with self-charge excitation for efficient water wave energy harvesting [J]. Applied Energy.
5. 中国海上风电累计装机连续两年位居全球首位[J].走向世界,2023,(33):9.
6. 赵永发,柯世堂,员亦雯,王硕,李晔,任贺贺.新型风浪联合发电浮式平台浮筒-立柱-浮子多尺度流场演化与荷载特性[J]. 太阳能学报, 2023, 44(7): 370-379.
7. 吴亚楠,周庆伟,武贺等.中国近海太阳能资源特征分析及储量评估.太阳能学报, 2023, 44(12).DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1293
8. 尚凯林.海上移动光伏太阳能追光与功率跟踪控制研究.工程科技Ⅱ辑,.DOI:10.27381/d.cnki.gwlgu.2020.001245
9. [孛衍君](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrj7ndEiFYZUQ_f-X7TqnNWmAOkYrcI3wuu7cmplpDmKm5OEdzx0YNW5iyEpxKsMcZoNqFSCUtbTgy2TXLjisqCT3jh5ud3rFKrp_S9UHJCSV0cHWHa8dEE6&uniplatform=NZKPT&language=CHS),[何舟磊](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrj7ndEiFYZUQ_f-X7TqnNWm9NKUp3S16sW9Z5bCuNrAt68avxa2RMAokjQTjCqRgm0taGEoEK2troYujlbdio2869eB6hjiFMdQ0Ssvd4vTIkvB3ynBp9n7&uniplatform=NZKPT&language=CHS),[杨竞择](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrj7ndEiFYZUQ_f-X7TqnNWmg53CFIhatHYfzWIQeWMtMmiyEvEx0EslzgP9Wvx7VmFVzTdwbu2UvWGri2XsA8vNoQTtIm4TTWprsHjGjaTGehMJzx15WIXQ&uniplatform=NZKPT&language=CHS)等.可再生能源电解水制备绿氢研究进展[J].[湖南电力,](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3U03wxACKtgbcT3ARYkPPvOHGKEtN4L5IMJdFR0zpgRym527CkcZqb4Xr6oZlvHQDaSJeld4VFt3c6vyUCmZlKSJngLSyUyc0w=&uniplatform=NZKPT)[2023 ,43 (06)](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3U03wxACKtgbcT3ARYkPPvOWncOIP3bIC2pGkeBqrABQYNqjFhY92swXf8QaQQE7u57B92v7JJN9mKPIyaZTBZE5SEa0PY246AsExIVX5BMk5lk0NP_ro1p&uniplatform=NZKPT).DOI:10. 3969 /j. issn. 1008-0198. 2023.06.005
10. [柯善超](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrh9Luy1o_OuT4OLMZSHzn1b-6XypWGeynF9lru0dh_Tt1pVOruAg1wBDClhvZkCZlYVuoynGjEMQUc8YsqhvU9TK-BuDc0iYbINoRNc9ofJjuGMW2izWa9D&uniplatform=NZKPT&language=CHS),[陈锐](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrh9Luy1o_OuT4OLMZSHzn1b-6XypWGeynEt_pQW4y3mpzhCBPYfThAjI5na3oP9BMeInEECYmeXEr-lTZICdHQ3BjfoqYv_3WyZxFV9KVuNQQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS),[陈刚华](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrh9Luy1o_OuT4OLMZSHzn1b-6XypWGeynHrQtIxje8U9Pqtb4Fuujq79OIwn-DmeXOqbYPg5iNjLYR6DbSMzWWbc0ZJt4rR9yq3YgYj-6pBVNbDK1KPmOzS&uniplatform=NZKPT&language=CHS)等.碳中和背景下的海水制氢路线[J].[分布式能源,](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3WCPNZ91W-trSDWq5YfRUD2Xlbvoy7wTSCfIEaLv82trYjnEqomcckHRBiUq8lF00WKbh8ndr2y-3ZLPC0G1PF46yd9Iyv88WI=&uniplatform=NZKPT)[2021,6(06).](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3WCPNZ91W-trSDWq5YfRUD2fxmUZZOnhD2s3U3UxQVnOV3X8Y6m5WRbCbmH0OAq3qoOb74kBcmTg5waBFUPlTlw7KVVEogjZKQZ2OPn1p1e9xfo2T2Nto0F&uniplatform=NZKPT)DOI:10.16513/j.2096-2185.DE.2106605
11. [金子儿,](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRri-QInM75C89posvetsGi4pYpTE7W73QOGznl9lRh7LjRIpDmJWHRP91HvCvk4f9TxmK5VCbi7ydypQ69hh0HUNlsiPBG4acm2ZtRIVzpGjsw6MPo7MoH8j&uniplatform=NZKPT&language=CHS)[王子缘,](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRri-QInM75C89posvetsGi4pjfeh7RnQlPLdAfPhnbUOA3r1KGL2Aw5ub3FWTz8zHMuVq19-vMyMtfZ_-TJ7k6Jdmo3ppYiur2tBYUBdoP3JVs06dDm5O3pU&uniplatform=NZKPT&language=CHS)[李亚杰](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRri-QInM75C89posvetsGi4psnGSERvkTedS02RyAoKldEwJDO7FKmkGRoYr1ERz2AgmKXo9R65nSUE24UHFldS3PGEi4P2H8Cce4iGH1XJv5MWxW_82siVb&uniplatform=NZKPT&language=CHS)等.我国海上风电制氢产业发展现状、问题与展望[J].[南方能源建设](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3WMkySb0Pk3X6Kd5DAX47ScHRLkzLNZdT4ZlyhgQQ7bL8n9MPJapKvvY_irHTuTMcDSqG0aUKjVArLBkmI5H5_elw6sRDEL8rQ=&uniplatform=NZKPT).DOI:10.16516/j.ceec.2024-231
12. [张丝钰,](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrj4FI-h138y8EbRCnRGCH8CceK3IE42Cuv7lleQZguc4uCqj4LRIXq4RJeuJd8neJfxjAtB1pfXaVrG9B4jJwbqiyiQYv5Yxh2cU1Rri1ZC8oWOcQd8BtsS&uniplatform=NZKPT&language=CHS)[张宁,](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrj4FI-h138y8EbRCnRGCH8CGbxCMT5SrbXJHSAUyf-J-02gqLMOtXFJLRW-j3sl2BYIc5U47OSd6WAkFsPK0vLop0q0f8J_0AWIW4vJkpMhSA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS)[代红才](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrj4FI-h138y8EbRCnRGCH8CQtCzphVqCm-ltkFjJa1qx_Ne_O5TX_Rw6lE2_zWxwuuDKPB0HMEdTro-Jgq56QU6xS3pDrXwTX1qLYBTTbfINjqgJVGhDMlS&uniplatform=NZKPT&language=CHS)等.可再生能源电解水制氢系统规划优化与生产模拟[J].[中国电力,](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3Ui1YSNcsrQoH1Wk2x1j-8nqd8XL2_gfHb3sQZcvYQye4poeFqTIBZTJaRAUgX3Grb7sHzSy9IO8EQlHv2wz3hC4SWOsTRCah8=&uniplatform=NZKPT)[2024 ,57 (04)](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3Ui1YSNcsrQoH1Wk2x1j-8nGt5t4WyUYrbSs3O7TXETyiOBkUGrWrF3S-TmdW2xPoHosTYBWZmV9X9QAsQ56005f09yDgXqKpulIgo6FAGAEc4osyCduGQa&uniplatform=NZKPT).DOI:10.11930/j.issn.1004-9649.202306045
13. [程雅雯](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrgR8zzA4MKDGBdFc01dQozqhMuseAciBeGQ2ZnzpDR91L2W4x0VoS5hXAblr5dBao1QRtcd6WapsPFofAmq7PeHzWrrbiSAnA4IxsgitAHyg4JYzqP7kvRa&uniplatform=NZKPT&language=CHS),[任晓勇](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrgR8zzA4MKDGBdFc01dQozq4XUbvJ6hv-hyEX8T_Zwlro1yGaeidSg0wh0htljxjEJ9HLtr8kaJzQwInIBOBCa7QrtmY1ykpTa_J12kadGRCFi3iEKEOwFe&uniplatform=NZKPT&language=CHS),[李恒东](http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/author/detail?v=fAsipVvIRrgR8zzA4MKDGBdFc01dQozqZ627KT2pjsMcK_Fsk_yiVYdR66BZKzBx-CVxA5Ck2HtJhUzrPqGYXSYlip6w50lVpKpEqP-_mIsKt6uBoeQZfqR4xQuBvj5Z&uniplatform=NZKPT&language=CHS)等.电解水制氢研究现状[J].机械制造,[2024 ,62 (07)](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3UBKq203dmf3Wczp62InAQL-619-7NZqiZHw1pt13bSmhrDLR9FiH_mOoNEhYJ1SP47tOIk1GFULcGfmGdimeHKREJYphfpLjaK13KF2uT_vWzUfoZ9p6gH&uniplatform=NZKPT).
14. Muthumeenal Arunachalam1,Dong Suk Han.Efcient solar‑powered PEM electrolysis for sustainable hydrogen production: an integrated approach[J]. [Emergent Materials](http://scholar-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/journal/index/SSJD252257313488).DOI:[10.1007/S42247-024-00697-Y](http://dx-doi-org.newvpn.sdut.edu.cn:8118/10.1007/S42247-024-00697-Y" \t "http://kns-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/kcms2/article/_blank)
15. Dang Saebea, Yaneeporn Patcharavorachot , Viktor Hacker,et al.Analysis of Unbalanced Pressure PEM Electrolyzer for High Pressure Hydrogen Production[J].[Chemical Engineering Transactions](http://scholar-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/journal/index/SJLW228392160001).DOI:[10.3303/CET1757270](http://dx-doi-org.newvpn.sdut.edu.cn:8118/10.3303/CET1757270)
16. 徐滨,王锐,苏伟等.质子交换膜电解水技术关键材料的研究进展与展望[J].[储能科学与技术,](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3X3vjG0_1C6fElzscoVfSHMRC83hTPwG6cuVwzehyvzsaM5Fz52bDsjhx7QCPOpuEhiNq62vvI5tEntIVGMF0vst5o21O3IMHo=&uniplatform=NZKPT)[2022 ,11 (11)](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3X3vjG0_1C6fElzscoVfSHMZG3o9lx88w0AKRwEwhcdsxQgvxOjqDmL93j_P38dRExPD7Yh_ySUQMDO4SFswl8MYP9MJiElG6btCWMAYp7bfCCvY-b8bkMR&uniplatform=NZKPT).DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0319
17. 洪思琦,顾方伟,郑金玉.PEM水电解制氢低铱催化剂发展现状及展望[J].化工进展.DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2024-0014.
18. 张智泉,陈晓杰,符杨等.含海上风电制氢的综合能源系统分布鲁棒低碳优化运行[J].电网技术,[2025 ,49 (01)](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3UUtsw_kFdKmRfVe8IQXsTWxov6N5_bGgQPwI8Q_X8OrrEYHig0GMOOg-1CswX5A-RjBK5YNiBi0egYpknrk87sh6iRoz5xUTL3Q3HrPpXZlRiWGrOTgpii&uniplatform=NZKPT).DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1726
19. 孟凡,张慧铃,姬姗姗等.高效电解水制氢发展现状与技术优化策略.[黑龙江大学自然科学学报](https://navi.cnki.net/knavi/detail?p=0AqzyO_BIE6xLjhMdq_zvPaXxOMWch28-3vAYd3CHD-3dRkMnQOH30A-hVPn6TDUnGvRmjb_U2h6CjpAL-Iozv3mJwfGOFqht8LlqUmTV0I=&uniplatform=NZKPT),[2021 ,38 (06)](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3UUtsw_kFdKmRfVe8IQXsTWxov6N5_bGgQPwI8Q_X8OrrEYHig0GMOOg-1CswX5A-RjBK5YNiBi0egYpknrk87sh6iRoz5xUTL3Q3HrPpXZlRiWGrOTgpii&uniplatform=NZKPT).DOI:10.13482/j.issn1001-7011.2021.10.180
20. 武晓彤,谭磊,郑越源等.氢经济展望与电解水制氢技术经济性分析[J].化学工业与工程,[2021 ,38 (06)](http://navi-cnki-net-s.newvpn.sdut.edu.cn:8118/knavi/detail?p=eDisG4TBa3UUtsw_kFdKmRfVe8IQXsTWxov6N5_bGgQPwI8Q_X8OrrEYHig0GMOOg-1CswX5A-RjBK5YNiBi0egYpknrk87sh6iRoz5xUTL3Q3HrPpXZlRiWGrOTgpii&uniplatform=NZKPT).DOI:10. 13353 /j.Issn.1004. 9533. 20230813