

海上风电制氢发展趋势及前景展望

王峰，逯鹏，张清涛，赵辉，王怀明，茹洋洋

（华电重工股份有限公司天津分公司，天津300010）

摘要：在构建以新能源为主体的新型电力系统背景下，海上风电制氢是能源技术领域的一次重大创新，对海上风电和氢能发展将是一种双赢的解决方案，分析研究其发展趋势可为未来能源安全提供新的发展方向。调查了国内外海上风电制氢发展现状，通过对比海上风电制氢、储氢、输氢、用氢的可行技术方案，确定“海上制氢站+运输船输送氢气”方案在现阶段具有推广应用价值。结合各国政府的发展规划，对海上风电制氢发展前景进行了展望。最后指出：风电制氢有望加速海上风电进一步降低成本，顺利进入平价上网时代；海上风电与氢能产业结合，将推动海上风电和绿氢产业发展，助力实现碳达峰、碳中和目标。

0引言

自《巴黎协定》发布以来，全球能源体系从以化石燃料为主的传统体系向高效、可再生的低碳能源体系转型。实现碳达峰、碳中和目标，构建以新能源为主体的新型电力系统，是党中央、国务院在新形势下作出的重大决策部署[1-3]。

海上风电是实现“双碳”目标的重要抓手。海上风电具有风能资源丰富、发电利用小时数高、适宜大规模开发等优点，越来越多的国家开始积极布局建设。2009年以来，我国海上风电快速发展，经过10多年的发展，截至2021年第2季度已累计并网装机11GW，预计2021年年底，累计并网装机容量将达到13-15GW，将超过英国居全球第1位。

现阶段，海上风电正面临着新的机遇和挑战：

（1）在“双碳”目标下，海上风电必将担负大任，迎来大好的发展趋势，但海上风电消纳问题又给海上风电的发展带来前所未有的挑战；（2）海上风电由近海向“大功率深远海”拓展是客观现实和必然走向，但面临着柔性直流输电的高额输电成本的压力；（3）国家对海上风电“退补”政策已经明朗，海上风电将迎来“平价时代”。

在此背景下，找到降本增效的有效措施是保证海上风电可持续发展的首要任务。风电的规模化应用及其自然特性决定了风电市场必须走多元化发展道路，非并网风电系统开发则是一个探索风电多元化发展的方向[4]。

海上风电制氢是一个具有巨大创新潜力的前瞻性方案，不仅可以一定程度上解决海上风电发展所面临的问题，而且可为水电解制氢提供清洁绿色能源。因此，海上风电制氢是当前清洁能源技术研究的重点方向。

氢气来源广泛，热值高，清洁无碳，可用于储能、发电、发热，灵活高效，应用场景丰富，被认为是推动传统化石能源清洁高效利用和支撑可再生能源大规模发展的理想能源载体，备受各国青睐。

氢气制取主要分为3种途径：通过石油、天然气等化石燃料制取并产生碳排放的“灰氢”；通过化石燃料制取同时配合碳捕捉和碳封存技术，从而实现碳中和的“蓝氢”；通过使用风能、太阳能等可再生能源发电或核电电解水产生

2零排放，社会接受度最高，是氢气制取的重要方向。

氢能作为清洁、高效、可存储的二次能源，在21世纪能源体系中占据重要地位。目前，世界上许多发达国家都把发展氢能产业纳入国家发展战略，我国也将其列入《能源技术革命创新行动计划》等重大规划并写入国务院《政府工作报告》。目前，氢能源利用技术已经在燃料电池汽车、家庭热电联供等领域取得成效，也逐步在氢能的碳排放生产、氢能发电、氢能社区等领域进行示范试验。现有制氢工业体系已非常成熟，全球超过95%的氢气采用化石燃料生产，化石能源重整制氢技术成熟、规模大、成本低，但CO₂排放量大。

在海上风电和氢能发展背景下，若将二者进行结合，即利用海上风电电解水制取氢气，将是一个双赢方案。文献[2]阐述了在非并网风电独立供电情况下，当模拟风电电流密度大幅波动时，对电解过程中电流效率的影响并不明显。

从可再生能源中获得氢能，一方面解决了可再生能源能量密度低、稳定性差等问题，另一方面避免了可再生能源并网不安全及传统蓄电池不能长期储能的问题，对于减少可再生能源的不必要浪费及就地消纳具有重要意义[5]。

按照氢能产业上下游行业的特点，氢能技术一般可划分为氢的制取技术、氢的储运技术和氢的应用技术[6]。

“海上风电+氢能”的模式将为海上风电和氢能发展提供可行的思路，也是能源技术领域的一次重大创新。但制约其发展的最大问题是如何降低成本，同时面临氢气输送、氢气利用、成本及安全等技术难题。

为此，本文通过调查研究，系统分析了海上风电制氢的国内外发展水平；从海上风电制氢、输氢、用氢3个方面对海上风电制氢的技术发展趋势进行了全面综述并对氢能应用的发展方向进行了预测；最后展望了海上风电制氢的发展前景，提出了需要解决的问题。

1 国内外发展现状

1.1 国外发展现状

欧洲是海上风电最发达的地区，也是推动海上风电制氢最为积极的地区。欧洲海上风电制氢的概念理论、项目实践都走在了世界的前沿，对欧洲海上风电和绿氢产业发展起到了重要的助推作用。欧洲不仅将氢能看作实现“碳中和”目标、经济结构性转型以及为后疫情时代注入更多发展动能的重要路径之一，还力争成为这一新兴产业的引领性力量。

除了欧洲，韩国、新加坡等国家也在积极布局海上风电制氢项目，寻找绿氢生产新方向。国外海上风电制氢发展现状见表1。

表1 国外海上风电制氢发展现状
Table 1 Offshore wind-to-hydrogen projects abroad

国家	发展现状	项目介绍
英国	布局世界最大海上风电制氢	Ørsted的1.4 GW Horns Rev2海上风电场将与Gigastack项目连接生产绿氢,为英格兰东北部的一家石油和天然气精炼厂提供动力。该风电场计划于2022年建成投产,将取代1.2 GW Horns Rev1,成为世界上最大的海上风电场。该项目致力于通过水电解制氢的规模化应用降低其成本,从而提高该技术商业化应用的可能性 ^[1] 。另一个绿氢项目 Dolphyn 也获得了英国政府提供的312万英镑的资助,该项目计划在英国北海4 GW的漂浮式风电场使用独立装置生产氢,根据计划,样机工程的最终投资决策将在2021年年底完成并于2023年投运,2026年前实现在10 MW机架上制氢
荷兰	全球首个海上风电制氢示范项目	基于Q13a平台的PosHYdon项目是世界上第1个海上风电制氢项目,由荷兰多家企业、机构共同承担,以促进减排事业,在北海建立新的能源模式。Neptune Energy公司的Q13a平台(如图1所示)是荷兰北海首座完全电气化的油气平台,在PosHYdon项目中将被改造为制氢平台。集装箱式的制氢设备体积很小,绝大多数海上平台都可以容纳。目前,平台电力暂时由陆地上的电网通过海缆连接供应(按波动的海上风电发电量来模拟),未来将改由附近的海上风电场供应
丹麦	丹麦首个绿氢示范项目 H2RES 于 2021 年 5 月 开 工 建 设	丹麦可再生能源公司沃旭能源 Ørsted 首个绿氢示范项目——2 MW 的 H2RES 于 2021 年 5 月 动 工, 该 项 目 位 于 哥 本 哈 根(如图2所示),将使用海上风电作为制氢电源。项目将探索如何对 Ørsted 位于 Avedøre Holme 的 2 台 3.6 MW 海上风电与电解槽进行结合,在波动性电源下实现电解槽的最佳运行。该项目预计在 2021 年 下 半 年 开 始 生 产 氢 气, 日 产 量 可 达 1 000 kg 左 右, 产 生 的 绿 氢 将 作 为 燃 料 用 于 大 哥 本 哈 根 地 区 和 西 兰 岛 的 公 路 运 输
比利时	有望建成世界首个投运商业化海上风电制氢项目	2020年,比利时发布了 Hyport Oostende 海上风电制氢项目规划,根据其进度时间表,有望成为世界上首个投运的商业化海上风电制氢项目。该项目由海工巨擘 DEMA、投资机构 PMV 和比利时 Ostend 港共同开发,在 Ostend 港实施。项目分2阶段,第1阶段开发一个50 MW的示范项目,第2阶段开发一个规模更大的商业化项目并在2025年前完成
法国	由浮式风机供电的海上制氢项目	法国一家由浮式风机供电的海上制氢厂计划2022年投入运营,该制氢厂将安装在法国勒克罗西克海岸的 SEM-REV 示范风场并与 Floatgen 浮式风机相连(如图3所示)。Floatgen 是一台 2 MW 的浮式风机,也是法国第1台海上浮式风机,于2018年安装在 SEM-REV 海上风场并于同年开始向法国电网供电
德国	国家战略支持海上风电制氢	根据一份德国经济与能源部正在起草的氢能发展战略,德国正在考虑在海上风电竞标中指定部分海上风电场专门用于生产绿氢。Engie 旗下的 2 家公司 Tractebel Engineering 和 Tractebel Overdick 也将在德国建设一座 400 MW 的海上风电制氢站。2020年6月,德国发布了氢能战略,计划在2030年前投入90亿欧元,开发5 GW 电解制氢项目并推动产业链发展
新加坡	海上风电多元化利用	日前,来自新加坡的能源企业 Enterprize Energy 和 Engie 旗下的工程公司 Tractebel Overdick 签订了一份谅解备忘录,将联合在北海开发建设一个一站式海上平台(如图4所示),利用海上风电制氢和制氨。该平台名为 Energy-Plus,规划容量为400 MW,底部为导管架基础,上部平台装设电解槽设备,用于生产绿氢并通过管道外送,同时生产少量绿色氨气,用气罐存储统一运输
韩国	国家大力推动	2020年11月24日,韩国举行“绿色氢气生产、储存、使用”签约仪式。试点项目利用济州能源公社保有的东北北村海上风力发电系统的弃电,每天生产600 kg 氢气



图1 荷兰 Neptune Energy 公司的 Q13a 平台

Fig. 1 Q13a platform of Neptune Energy Netherlands



图2 丹麦 H2RES 项目所在的 Avedøre 电站

Fig. 2 Avedøre Power Station of Denmark H2RES project

1.2国内发展现状

我国对发展风电制氢技术也很重视,2014年,李克强总理考察了德国氢能混合发电项目,指示国内相关部门组织实施氢能利用示范项目。国家能源局指示河北、吉林省加快推进可再生能源制氢示范工作,将氢储能作为解决弃风、弃光问题的新思路。

目前我国的风电制氢项目与课题已经超过20个,但海上风电制氢项目较少,仅有少数几个科研课题及初步签约的项目,见表2。

表2 国内海上风电制氢项目
Table 2 Offshore wind-to-hydrogen projects in China

时间	项目名称	涉及企业	项目介绍
2009年	风光电结合海水制氢技术前沿研究	国网上海市电力公司	针对风电、光电制氢提出了多种应用方案,并以东海风电场为例,开展了风、光电制氢的综合效益评价
2014年4月	风电直接制氢及燃料电池发电系统技术与示范项目	中国节能环保集团	为国家863项目,在中节能风力发电(张北)有限公司建设风电场,制氢功率为100 kW,燃料电池发电功率为30 kW
2014年12月	河北建投沽源风电制氢综合利用示范项目	河北建投新能源有限公司	项目由河北建投新能源有限公司与德国迈克菲及欧洲安能公司联手打造,于2014年12月31日获得河北省发改委核准。项目总投资20.3亿元,分为200 MW风力发电场、10 MW电解水制氢系统及氢气综合利用系统2个部分
2020年7月	青岛深远海2 GW海上风电融合示范风场项目	蓝谷管理局、中能融合公司、中国电建集团西北院	项目风电部分直接投资300亿元以上,可拉动风电场与海洋牧场一体化融合产业、风电制氢、风能海水淡化和装备制造等相关产业,合计投资500亿元以上
2020年11月	广西北部湾海上风电产业大基地化开发	广西壮族自治区钦州市政府、中国华能集团公司、西门子能源有限公司	不同于传统海上风电项目的是,钦州、华能与西门子能源三方合作的大基地项目可能还涉及氢能
2020年11月	中海油海上制氢工艺技术研究	同济大学、中海油能源发展股份有限公司	项目旨在研究设计和优化海上风电制氢的工艺流程,提出技术和经济可行性的边界条件。该项目位于上海长宁区,主要进行:(1)海上电解水制氢工艺方案选型及技术研究;(2)海上风电与制氢设备匹配性研究;(3)海上储氢、输氢技术等研究
2021年8月	《海上风电制氢/氨产业链创新及产业化战略合作(框架)协议》	中国船舶大船集团、中国科学院大连化学物理研究所、国创氢能科技有限公司、中国船舶集团海装风电股份有限公司	合作各方将以国家“碳达峰、碳中和”为战略目标,大船集团利用本地化优势及在海上氢/氨的制取、储运、应用装备的优势和能力,大连化学物理研究所利用制取氢/氨关键技术开发能力和优势,中国船舶集团海装风电股份有限公司利用本企业在风电开发领域的能力和实力,国创氢能科技有限公司利用在氢燃料电池领域的生产、技术成果转化的能力和优势聚焦海洋绿色能源开发及利用,密切合作,共同促进制氢、制氨、燃料电池及液氢/氨储运技术在船舶与海洋工程领域的创新应用与发展,共同推进海上风电制氢/氨及其储运技术与装备的研发及产业化,推动地方及我国绿色海洋经济发展

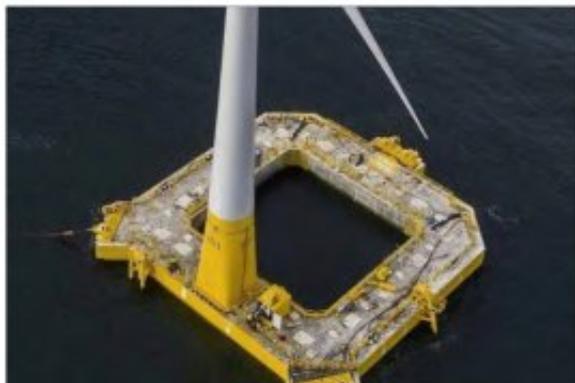


图3 法国 Floatgen 浮式风机

Fig. 3 Floatgen floating wind turbine in France



图4 新加坡海上制氢站模型

Fig. 4 Model of a Singapore offshore hydrogen production station

随着国内海上风电的进一步发展和风电制氢项目经验的积累,海上风电制氢项目将迎来一个发展高潮。

总体而言,国内外海上风电制氢均处于起步阶段,各国仍在探索可行的技术方案和商业化方案。作为海洋能源综合利用的一种方式,伴随着海上风电的快速发展,海上风电制氢有望得到进一步发展,为海上风电消纳、海上风电输送系统建设提供新思路。

我国作为海上风电大国、氢能应用大国、海洋资源大国,应当注重海上风电制氢的发展,通过更多的方式挖掘海洋资源潜力,并与氢能产业结合,从而解决“绿氢”来源问题,助力碳中和目标的实现。

2技术路线研究

2.1方案1：“电能+氢能”共享输送方式

此方案适用于离岸近、敷设海缆传输电力尚具经济性的海上风电制氢项目。方案的核心思想是将海上风电的电能和海上风电制取的氢气通过共享的一条脐带缆输送，即“电能+氢能”共享输送。制氢系统集成布置于海上升压站。海上制氢站配置有海水淡化装置、水电解制氢装置、压缩储氢装置等[8]。

风电场风机所发电能通过中压集电海缆汇集到海上平台上，与中压开关柜连接，中压开关柜分别和升压变压器和降压变压器连接，进行升压和降压。升压后把电能通过脐带缆的电缆单元输送到陆上，降压后分别给平台设备和制氢设备供电，制取的氢气经过脐带缆的管道单元输送到陆上，如图5所示。

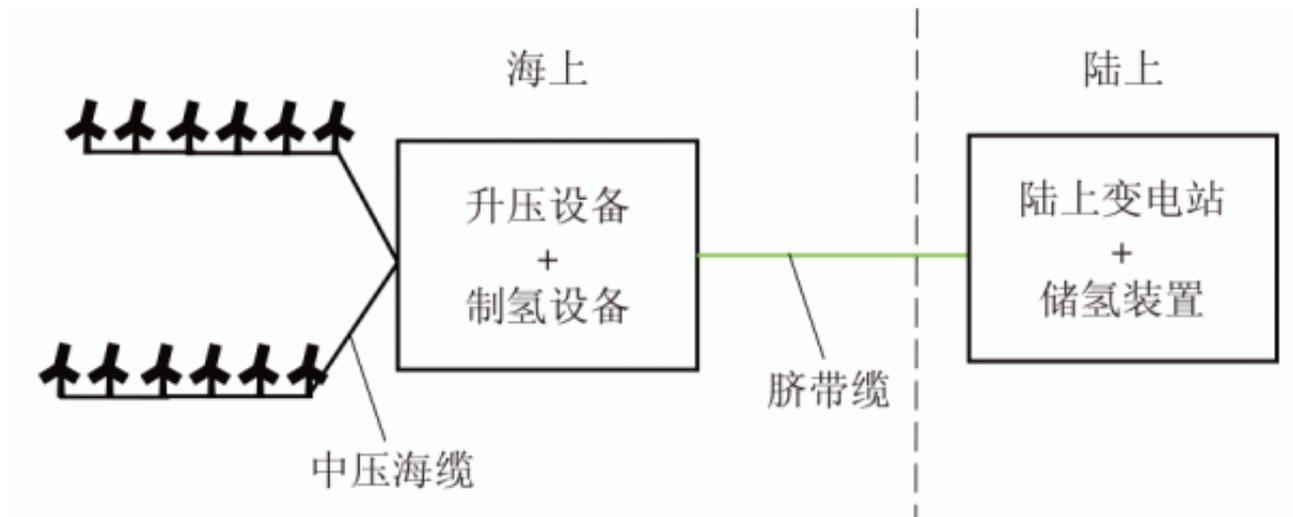


图5 “电能+氢能”共享输送示意

Fig. 5 Concept of "electric energy + hydrogen energy" shared transportation

脐带缆主要包括电缆单元、氢气管道单元、光纤单元、填充物及铠装等，脐带缆截面如图6所示。

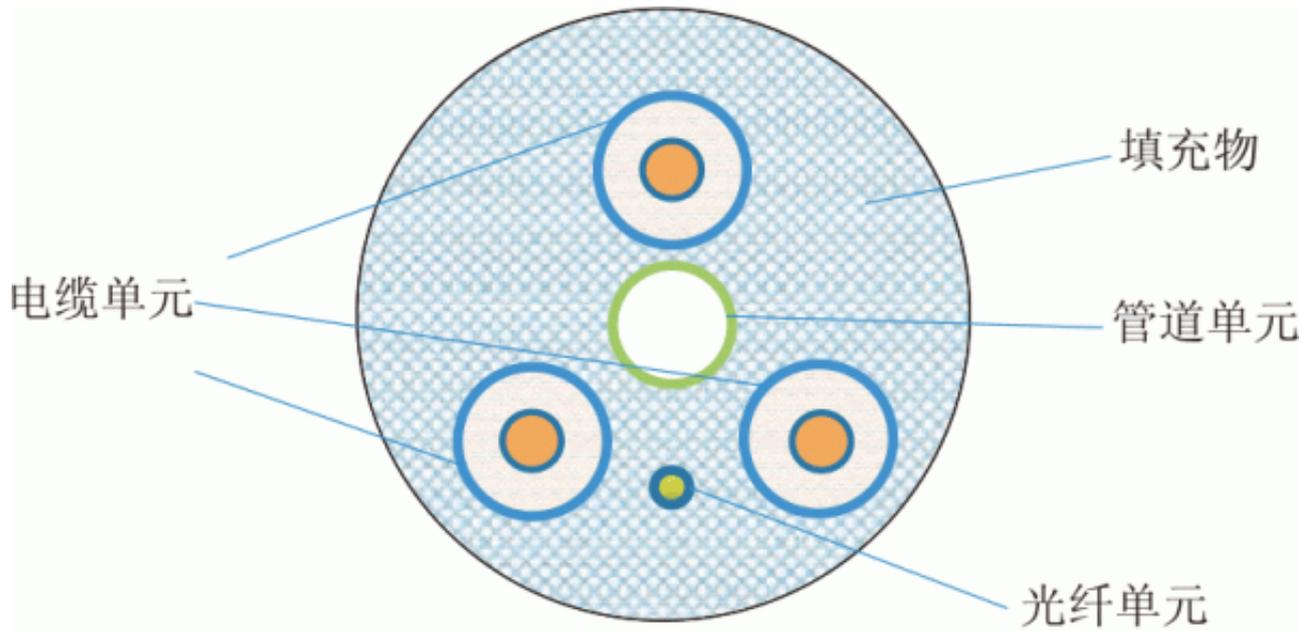


图6 脐带缆截面

Fig. 6 Section of an umbilical cable

根据弃风的程度可分为3种工作模式。

(1) 完全弃风模式，即风电场所发电能在满足平台设备供电后全部用来制取氢气，不并网。电能经海上平台降压后给制氢设备供电，制取的氢气经过脐带缆的管道单元输送到陆上。在此模式下，电能不经升压环节，脐带缆的电缆单元不工作。

(2) 非弃风模式，即风电场所发电能在满足平台设备供电后全部并网，不制取氢气。电能经海上平台升压后通过脐带缆的电缆单元输送到陆上，经海上平台降压后给平台设备供电。在此模式下，不给制氢设备供电，脐带缆的管道单元不工作。

(3) 部分弃风模式，即风电场所发电能在满足平台设备供电后部分并网，部分制取氢气，并网的量由电网调度部门调控。升压后把电能通过脐带缆的电缆单元输送到陆上，降压后分别给平台设备和制氢设备供电，制取的氢气经过脐带缆的管道单元输送到陆上。在此模式下，并网和制取氢气同时工作，脐带缆的电缆单元和管道单元同时工作。

2.2方案2：海上制氢站+管道输送氢气

此方案适用于远海、敷设海缆传输电力已不具有经济性的海上风电制氢项目。风电场风机所发电能通过中压集电海缆汇集到海上制氢站上，全部用来制取氢气。制取的氢气经过海底压力管道输送到陆上储氢装置中，供陆上使用和消纳，如图7所示。

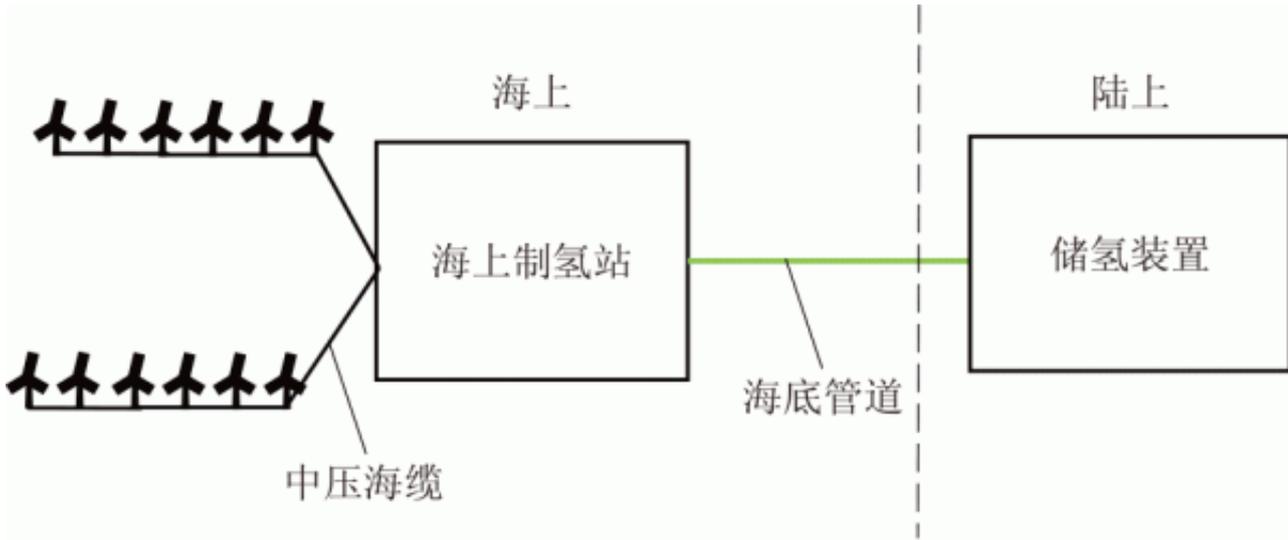


图7 海上制氢站管道输送氢气

Fig. 7 Pipeline transportation of hydrogen from offshore hydrogen production stations

2.3方案3：海上加氢站+运输船输送氢气

此方案适用于远海、敷设海缆传输电力已不具有经济性的海上风电制氢项目。风电场风机所发电能通过中压集电海缆汇集到海上制氢站，全部用来制取氢气，制取的氢气充装在氢瓶组中。海上制氢站或运输船布置有吊机，氢气瓶由运输船海运到码头氢气转运场地，供陆上使用和消纳，如图8所示。

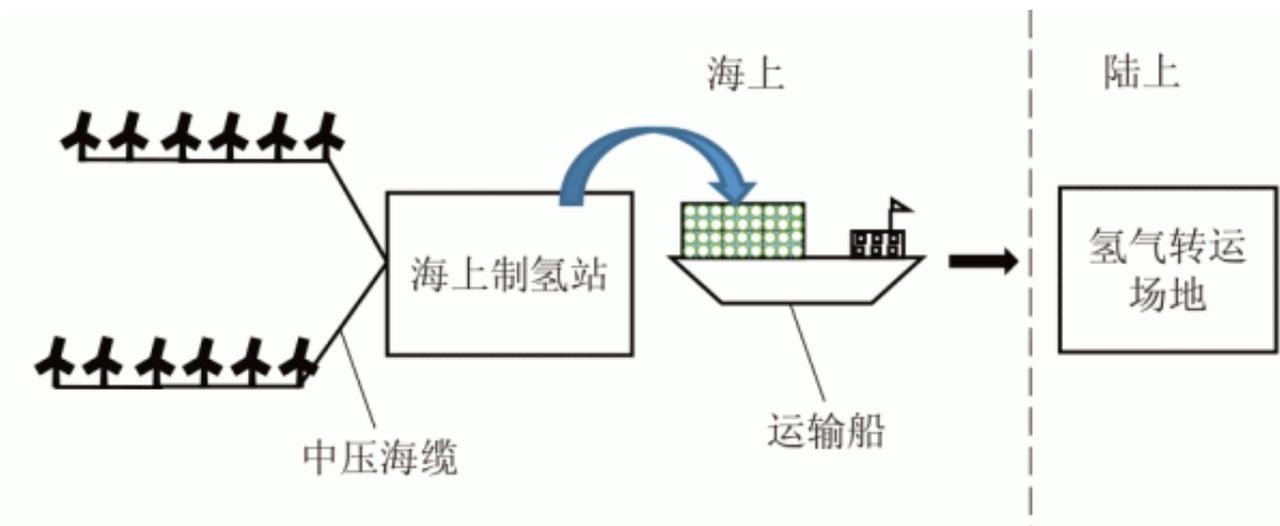


图8 海上制氢站船舶输送氢气

Fig. 8 Ocean transportation of hydrogen from offshore hydrogen production stations

2.4方案4：海上加氢站为船舶提供清洁能源

近年来，船舶航运业带来的环境污染问题受到国际社会的高度关注。规制船舶环境污染和降耗减排的国际公约及相

关规划文件相继出台，且标准和规范日益严苛，绿色低碳已成为船舶航运业发展的必然趋势[9]。

氢燃料动力船舶是很好的解决方案，可实现船舶“零排放”的目标。目前，汽车领域的氢燃料电池系统应用已较成熟，为氢燃料电池在船舶上的应用奠定了良好的基础。

海上制氢站、海上加氢站可为未来氢动力船舶提供氢气，如图9所示。

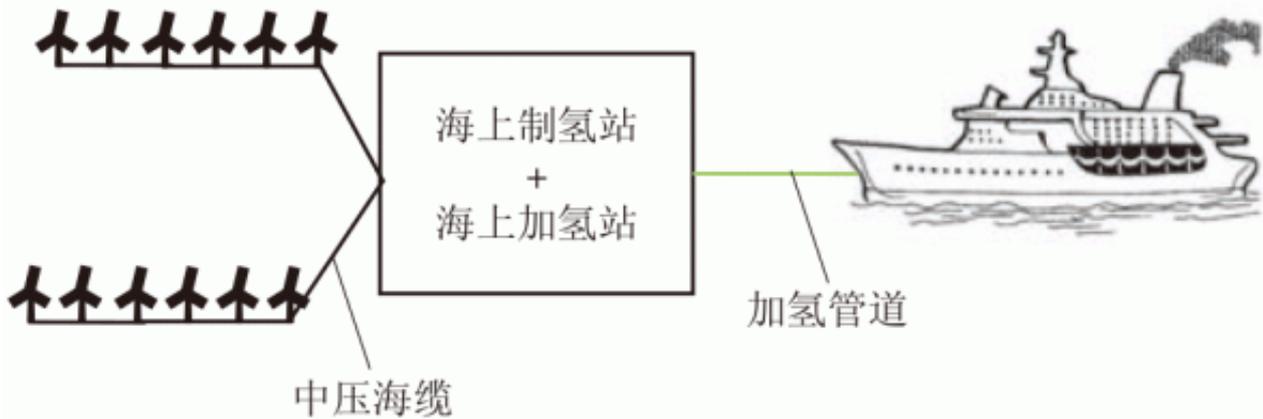


图9 海上制氢站、加氢站为船舶提供氢气

Fig. 9 Vessel powering by hydrogen from an offshore hydrogen production station

2.5方案对比

4种技术方案对比见表3。综合对比这4种方案[10]，得到如下结论。

项目	方案1	方案2	方案3	方案4
技术可行性	可行	可行	可行	可行
技术成熟度	技术不成熟 原因：嵌有氢气管道的脐带电力电缆国内外没有工程借鉴	技术成熟 原因：氢气管道类似海底石油、天然气管道，技术成熟，可靠	技术成熟 原因：氢气瓶组运输船运输类似海上石油、天然气运输，技术成熟，可靠	技术不成熟 原因：海上加氢站国内外没有工程借鉴
安全风险	安全风险大 原因：氢气属于易燃易爆危险气体，氢气与电力并行，若发生氢气泄漏，存在较大的爆炸风险	安全风险在可控范围内	安全风险在可控范围内	安全风险在可控范围内
投资成本	成本高 原因：海底脐带电缆造价远远高于海底电力电缆	成本高 原因：海底管道的投资成本不亚于海底电力电缆	成本可控	成本低 原因：氢气就地消纳，没有远距离运输成本
氢气消纳	输送到陆上，消纳广泛	输送到陆上，消纳广泛	输送到陆上，消纳广泛	氢气消纳问题短期内无法解决 原因：氢动力船舶仅在国外有少量报道，研发、制造时间长

(1) 方案1和方案2在短期内不具有技术和经济优势，需要技术攻关和科技创新，以提高安全性、可靠性并降低成本。

(2) 方案2的海底管道初始投资成本不亚于海底电力电缆，故不具有经济优势。

(3) 方案3在技术和经济上均具有优势。

(4) 方案4的氢动力船舶若在短期内不能普及，则氢气消纳问题无法解决。

故方案3，即“海上制氢站+运输船输送氢气”方案在现阶段具有推广应用价值。

3 前景展望

3.1 全球视野

到2030年，全世界必须将温室气体排放量减少一半，而全球近75%的碳排放来自能源的使用，全球向可再生能源的快速转型至关重要。这需要企业和政界人士敢于向前迈进，尽快做出大胆决策，以加快绿色能源的应用。

对于全球各国家和地区来说，“双碳”不仅是一个环境目标，还会促进绿色经济和绿色社会的形成。各国政府要实现碳中和视为产业绿色转型大发展的契机，抓住这个发展机会，在新能源尤其是可再生能源的开发利用、二氧化碳的回收再利用[11-12]等关键技术领域和应用领域进行革命性的技术创新和应用创新。

美国、日本、德国等发达国家高度重视氢能产业发展，已将氢能上升到国家能源战略高度，并推出相应的氢能发展规划和支持政策。根据国际氢能委员会的Hydrogen Scaling Up报告，工业、交通、建筑供暖供电是氢能应用的重点领域，预测到2050年氢能约占全球能源需求的18%。

3.2 行业建议

针对可再生能源的电力消纳问题，可以结合清洁高效的氢能源形成微网，实现能源的有效转换，从而提高可再生能源的利用率和占比，有效支撑可再生能源的大规模发展，推动现有能源系统向更新型、更优化的方向发展[13]。

中国船舶集团有限公司第七一八研究所制氢工程部主任张玉广表示，由于水电解制氢技术已经非常成熟，期待某项关键技术的突破对绿氢制备成本造成颠覆性的下降并不现实。张玉广认为，应当从社会层面支撑氢能产业的发展，坚定用绿氢替代灰氢、用可再生能源替代化石能源的决心，随着化石能源的使用及灰氢制备成本的不断提高，形成自主自然的选择。所以，应该重点关注灰氢制备成本上升的可能性，而不是期待绿氢成本的无限下降。

3.3 国家支持

2020年上半年，我国国家层面发布了15份氢能政策文件。仅2020年一年，我国就有4个直辖市10多个省份超过40个地方政府推出了支持氢能产业发展的规划，出台了促进氢能产业发展的优惠政策，以期利用氢能产业带动当地经济的发展[14]。

国家能源局监管总监李冶在“十四五”氢能产业发展论坛上表示：国家能源局高度重视并积极推动氢能技术和产业的发展，目前正在研究编制的《能源技术创新“十四五”规划》中，已经将氢能及燃料电池技术列为“十四五”期间能源技术装备的主攻方向和重点任务。这必将为我国海上风电制氢的发展提供十分有利的政策、产业和市场大环境[15]。

3.4 海上风电制氢的意义

(1) 借助风电制氢建立风储一体化系统，能够有效缓解海上风电快速增长和电网建设速度较慢之间的矛盾，解决海上风电消纳问题，提高风能利用率。

(2) 针对远海海上风电高昂的电能送出成本，通过电解水方式，利用管道或船舶将氢气输送到用氢地，在成本和周期上都具备优势，也可利用现有的天然气管道，进一步降低运氢成本。

(3) 风电制氢有望加速海上风电成本的降低，保证海上风电顺利进入平价上网时代。

(4) 海上风电与氢能产业结合，可助力海上风电和绿氢产业发展，实现经济与社会、人与自然的可持续发展。

3.5 前景展望

我国海上风电总规划为166.386GW，因此，在我国进行海上风电制氢将有非常广阔的电力来源；同时，利用海上风

电制备氢气，并通过各类储运技术送到氢能源市场，开发跨越电力输送的渠道，为海上风电和氢能发展提供了可行的思路，有利于国家能源安全[16-19]。

现急需建设一批示范工程，完成大规模商业化、市场化和产业化推广应用，这不仅能够解决我国能源系统的矛盾和难题，还会创造出若干个新兴产业，为实现我国经济转型升级和快速发展提供新的思路，也有利于推进经济体制深化改革，成为我国全面深化改革的重要抓手。

在国家规划和业界技术进步的助推下，海上风电和氢能的发展道路会越来越宽广。

4结论

海上风电制氢不仅为海上风电发展带来了巨大的发展空间，而且为电解水制氢提供了绿色能源，形成了零碳排放制氢技术路线，二者的结合可有力促进实现碳达峰、碳中和目标。海上氢气输送和应用的创新方案为海上风电制氢的发展开拓了思路，用规模化应用倒逼成本下降。国家的有力支持和政策导向为海上风电制氢发展提供了政策保障。

海上风电制氢将会带来显著的经济效益和社会效益，具有重要的理论研究价值和工程应用意义。未来，随着海上风电装机规模的不断扩大以及电解水制氢技术的突破和成本的大幅下降，风电制氢有望实现大规模商业化。因此，海上风电制氢具有广阔的发展前景。

从技术角度看，风电的随机性、不稳定性、波动性较大，而水电解制氢设备对电能质量的稳定性要求较高，频繁的电力波动会对设备的运行寿命及氢气的纯度造成影响。因此，需要进一步研究和探讨如何进行有效的电能匹配以及如何提高制氢设备的可利用率。此外，氢气的储存和运输成本较高、氢气储运的安全性等都是制约氢能行业发展的瓶颈，储运技术需进一步深入研究。

接下来，项目团队将就以上问题进行技术攻关与科技创新，为海上风电制氢的健康有序发展、为“双碳”目标的实现做出更大贡献。

参考文献：

[1]刘平,刘亮.日本迈向碳中和的产业绿色发展战略——基于对《2050年实现碳中和的绿色成长战略》的考察[J].现代日本经济,2021(4):14-27.

LIU Ping, LIU Liang.Green development strategy of Japan's

- industry towards carbon neutrality: Based on the investigation of "Green Growth Strategy for Carbon Neutral in 2050"[J].Contemporary Economy of Japan,2021(4):14-27.
- [2]喻小宝,郑丹丹,杨康,等.“双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J].华电技术,2021,43(6):21-32.
YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 21-32.
- [3]张俊锋,许文娟,王跃琦,等.面向碳中和的中国碳排放现状调查与分析[J].华电技术,2021,43(10):1-10.
ZHANG Junfeng, XU Wenjuan, WANG Yueqi, et al. Investigation and analysis on carbon emission status in China on the path to carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(10): 1-10.
- [4]金春鹏.海上风电开发与多能源协同供电规模化制氢(氧)产业基地建设研究[J].中国工程科学,2015,17(3):56-59,66.
JIN Chunpeng. Offshore wind power development and hydrogen(oxygen)production industrial base construction in multi energy cooperative supply system [J]. Strategic Study of CAE,2015,17(3): 56-59,66.
- [5]李争,张蕊,孙鹤旭,等.可再生能源多能互补制-储-运氢关键技术综述[J].电工技术学报,2021,36(3):446-462.
LI Zheng, ZHANG Rui, SUN Hexu, et al. Review on key technologies of renewable energy multi energy complementary hydrogen generation, storage, transportation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3):446-462.
- [6]吉力强,赵英朋,王凡,等.氢能技术现状及其在储能发电领域的应用[J].金属功能材料,2019,26(6):23-31.
JI Liqiang, ZHAO Yingpeng, WANG Fan, et al. The present situation of hydrogen energy technology and its application in the field of energy storage and power generation [J]. Metallic Functional Materials,2019,26(6): 23-31.
- [7]孙一琳.海上风电+制氢,Gigastack项目进展如何?[J].风能,2020(3):48-50.
SUN Yilin. Offshore wind power + hydrogen production ,how is the Gigastack project progressing?[J]. Wind Energy, 2020 (3): 48-50.
- [8]杨源,陈亮,王小虎,等.海上风电-氢能综合能源监控系统设计[J].南方能源建设,2020,7(2):35-40.
YANG Yuan, CHEN Liang, WANG Xiaohu, et al. Design of integrated offshore wind power-hydrogen energy monitoring system [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7 (2) : 35-40.
- [9]郑洁,柳存根,林忠钦.绿色船舶低碳发展趋势与应对策略[J].中国工程科学,2020,22(6):94-102.
ZHENG Jie, LIU Cungen, LIN Zhongqin. Low carbon development trend and countermeasures of green ships [J].

- Engineering Science in China, 2020, 22(6): 94-102.
- [10] 田甜, 李怡雪, 黄磊, 等. 海上风电制氢技术经济性对比分析[J]. 电力建设, 2021, 42(12): 136-144.
TIAN Tian, LI Yixue, HUANG Lei, et al. Comparative analysis on the economy of hydrogen production technology for offshore wind power consumption [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(12): 136-144.
- [11] 连少翰, 李润, 张泽洲, 等. 复合膜在CO₂分离领域的研究进展[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 128-137.
LIAN Shaohan, LI Run, ZHANG Zezhou, et al. Advances of composite membranes in CO₂ separation [J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 128-137.
- [12] 李扬, 王赫阳, 王永真, 等. 碳中和背景、路径及源于自然的碳中和热能解决方案[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 5-14.
LI Yang, WANG Heyang, WANG Yongzhen, et al. Background and routs of carbon neutrality and its nature-derived thermal solutions [J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 5-14.
- [13] 骈松, 赵燕晓, 杨泽鹏, 等. 可再生能源大规模制氢前景概述[J]. 清洗世界, 2021, 37(3): 3-5.
ZHANG Song, ZHAO Yanxiao, YANG Zepeng, et al. Overview of large scale hydrogen production from renewable energy [J]. Cleaning World, 2021, 37(3): 3-5.
- [14] 张巍, 张帆. 中国氢能产业发展的现状与建议[J]. 可持续发展经济导刊, 2021(z2): 26-27.
ZHANG Wei, ZHANG Fan. Current situation and suggestions of hydrogen energy industry development in China [J]. China Sustainability Tribune, 2021(z2): 26-27.
- [15] 李琴. 海上风电制氢: 一场豪赌? [N]. 中国船舶报, 2020-12-18(5).
- [16] 邱玥, 周苏洋, 顾伟, 等. “碳达峰、碳中和”目标下混氢天

然气技术应用前景分析[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-20 [2021-12-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20211102.1629.005.html>.

QIU YUE, ZHOU Suyang, GU Wei, et al. Application prospect analysis of hydrogen enriched compressed natural gas technologies under the target of carbon emission peak and carbon neutrality [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-20 [2021-12-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20211102.1629.005.html>.

[17] LI Qi, QIU Yibin, YANG Hanqing, et al. Stability-constrained two-stage robust optimization for integrated hydrogen hybrid energy system [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 162-171.

[18] 高鹏飞, 周孝信, 杨小煜, 等. 考虑氢气注入的电-气综合能源系统电制气设备容量规划 [J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3781-3791.

GAO Pengfei, ZHOU Xiaoxin, YANG Xiaoyu, et al. Optimal capacity planning of power-to-gas in the integrated electricity and natural gas systems considering hydrogen injections [J]. Power System Technology, 45(10): 3781-3791.

[19] 王秀丽, 赵勃扬, 郑伊俊, 等. 海上风力发电及送出技术与就地制氢的发展概述 [J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 3-12.

WANG Xiuli, ZHAO Boyang, ZHENG Yijun, et al. A general survey of offshore wind power generation and transmission technologies and local hydrogen production [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 3-12.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/209479.html>