

# 天津市资源与环境（绿色低碳） 科技创新蓝皮书（2023）

天津市科学技术局

天津市科学技术发展战略研究院

二〇二四年四月

## 编辑委员会

编委会主任：梅志红 王华峰

编辑指导：王祯祥 党馨 樊少杰

主 编：王华峰

责任编辑：高峰 董晓珊 张玉娇

# 目 录

<b>一、天津市科技局 2023 年推进资源与环境领域核心技术攻关情况综述</b> .....	<b>1</b>
(一) 推动关键技术攻关 .....	1
(二) 助力构建创新平台 .....	1
(三) 支持我市企业发展 .....	2
(四) 加强先进技术推广 .....	3
<b>二、技术成果篇</b> .....	<b>5</b>
<b>A、绿色低碳技术</b> .....	<b>6</b>
技术 1: 风光电源全自动碳电极水解离制氢技术 .....	6
技术 2: 空气源燃气机热泵 .....	12
技术 3: 基于光伏绿电和能源综合监控的城市轨道交通低碳技术创新与工程应用 .....	19
技术 4: 天津地铁“风水联动”智能控制系统的研究应用 .....	23
技术 5: 一种能耗在线监测用一体化数据采集终端 .....	29
<b>B、生态环境保护技术</b> .....	<b>35</b>
技术 6: 城市更新和新农村建设中的雨水速渗路径和生态收储技术 .....	35
技术 7: 基于无人船的海草床观测系统 .....	42
技术 8: 一种海上平台高盐生活污水处理回用装置 .....	58
<b>C、海洋资源开发与保护技术</b> .....	<b>65</b>
技术 9: 天津市海洋数值预报、风暴潮漫堤和漫滩预警系统 .....	65
技术 10: 基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术与装置 .....	77
技术 11: 一种针对海洋油性漂浮薄膜的智能取样无人船 .....	84
技术 12: 天津土著经济贝类浅海增殖技术开发与应用 .....	87
技术 13: 海洋平台 TEG 天然气脱水及再生系统自主化关键技术 .....	97
技术 14: 深远海浮式风电平台 .....	103
技术 15: 风电用大型导管架裙桩夹桩器 .....	108

技术 16: 海上油田二氧化碳捕集与回注装置技术研究与应用 .....	111
技术 17: 海洋平台超高压注气压缩机成套技术 .....	116
技术 18: 基于玻璃纤维结构的水下油气生产设施防护系统技术 .....	119
技术 19: LNG 冷能海水淡化技术 .....	125
技术 20: 海水淡化用高抗污染中空纤维膜与模组器 .....	131
技术 21: 压力驱动-电驱动海水淡化全流程技术创新与应用 .....	140
技术 22: 水下探测装备关键计量标准及溯源技术 .....	148

# 一、天津市科技局 2023 年推进资源与环境领域核心技术攻关情况综述

## （一）推动关键技术攻关

**绿色低碳领域：**2023 年度天津市自然科学基金项目指南中，在新能源领域强调项目要面向国家双碳目标，开展原创性、引领性基础研究。推动物质绿色创造与制造海河实验室围绕碳基资源转化绿色新工艺开展科研攻关。采用“揭榜挂帅”机制实施“碳达峰碳中和科技重大专项”，围绕钢铁行业低碳技术创新需求立项 2 项科研项目。在年度组织实施的科技领军（培育）企业重大创新项目、京津冀协同创新项目，突出低碳方向的科技立项，2023 年已立项 6 项，支持财政资金 1000 万元。

**环境保护领域：**2023 年紧密围绕我市生态文明建设中的重大科技需求，聚焦大气污染防治、水污染防治、土壤污染防治、固体废弃物资源化、自然保护地生态建设及修复等重点领域开展核心技术攻关及示范，通过重点研发计划、技术创新引导专项、京津冀协同创新项目、自然科学基金等科技计划支持“危险废物绿色低碳焚烧处理与尾气净化关键技术研发及产业化推广”、“生态材料与低产土壤高价值利用技术研究”等环境保护领域项目 41 项，支持财政资金约 1100 万元，有力支撑解决重大生态环境问题，助力我市生态环境质量改善。天津同阳科技发展有限公司通过科技立项完成“基于振荡天平法的大气颗粒物连续监测系统开发与应用”研究，突破了高精度质量传感器、振荡天平检测等关键技术，实现营业收入 2 亿元，有望带动天津市环境监测行业上下游企业发展。

**海洋领域：**2023 年，支持天津理工大学，围绕“天津海域海上漂浮式光伏及风光联合高效开发利用应用及示范”开展技术攻关及工程示范；支持围绕“天津市推动海洋工程装备创新型产业集群创新发展路径研究”开展战略研究。在资源与环境领域重点研发计划中，将海洋作为专项，从“深海核心技术与装备核心技术攻关及示范、海洋环境与安全保障核心技术攻关及示范、海洋资源高效绿色开发核心技术攻关及示范、海洋战略性新兴产业核心技术攻关及示范”4 个方向公开征集到 38 个项目，正在组织专家评审，拟支持 6 项。通过制造业高质量发展专项支持海淡所“海水淡化高性能分离膜研发及平台建设”项目，获批资金 500 万元，强力支撑巩固海水淡化产业领先优势。中海油田服务股份有限公司完成了“海上中深层特稠油热采关键技术研究及应用”，突破了海上热采耐高温完井防砂技术等 6 项关键技术，实现营业收入 16.91 亿元。

## （二）助力构建创新平台

**绿色低碳领域：**在研发后补助、高新技术企业认定等工作中，积极深入节能环保企业宣讲政策、加强辅导，引导申报。据统计，截止目前，1000 多家环保企业被认定为高新技术

企业，750 多家环保企业获得研发后补助 6100 万元，为节能环保企业积极开展科技创新提供了良好环境。2023 年联合各区积极推动龙头企业牵头，集聚创新资源，围绕绿色低碳各领域组建创新联合体。目前已批准支持国网电力、TCL 中环新能源、国安盟固利新材料、中海油天津化工研究院、中石化（天津）石油化工、水泥设计研究院等，组建了智能电网、高效光伏技术研发及产业化、先进动力电池、海洋资源利用绿色技术与智能装备、高端化工新材料与氢能、水泥行业绿色生态与低碳零碳等创新联合体。

**环境保护领域：**支持天津市圣威科技发展有限公司建设“基于生态环境新污染物监管指挥与决策平台”，实现对新型污染物和排放单位的监测和预警、对治理技术的支持和指导。推动玖龙纸业（天津）有限公司完成“绿色造纸废弃物循环利用技术及智能化平台的研发”，实现从原料、制浆、造纸到废物资源化全产业链的绿色造纸平台建设，项目成果近一年销售额高达 416433.55 万元。

**海洋领域：**支持自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所组建天津市海水资源化利用技术创新中心，积极围绕海水淡化开展核心技术攻关。服务天津理工大学和滨海新区联合筹建“绿色智慧能源前沿技术创新研究院”，助力打造我市绿色智慧能源高端科创资源聚集的重要载体。推动丹娜生物“鲨资源开发技术平台”建设，开展临床用诊断试剂和工业市场用内毒素检测产品开发，已获得医疗器械注册证 10 项。

### （三）支持我市企业发展

**绿色低碳领域：**通过科技领军培育企业重大创新项目、重点研发计划等各类科研计划，先后支持 50 余家节能环保企业围绕产业节能、降碳、环境保护等领域，开展科技创新，市财政支持经费 3600 万元，引导企业投入 3.14 个亿。其中，重点方向有支持天津环博科技有限责任公司围绕“12 英寸超大硅片智能化柔性产线核心装备研发及产业化”、中船风电工程技术（天津）有限公司围绕“风储一体化控制关键技术研究及应用验证”、合力（天津）能源科技股份有限公司围绕“油气钻采设备智能化创新项目”开展技术攻关。

**环境保护领域：**2023 年通过技术创新引导专项（基金）、制造业高质量发展专项、重点研发计划等支持天津辰创环境工程科技有限责任公司围绕“危险废物绿色低碳焚烧处理与尾气净化关键技术研发及产业化推广”、天津泰达绿化科技集团股份有限公司围绕“生态材料与低产土壤高价值利用技术研究”、天津渤化永利化工股份有限公司围绕“氨低温高效催化脱除技术的应用研究”等开展技术攻关。通过企业科技特派员项目推进产学研深度融合，为企业开展创新服务，向企业转化科技成果，为科技型企业发展提供科技和智力支撑，2023 年环境保护领域立项 11 项。通过科技领军培育企业重大创新项目，支持玖龙纸业（天津）有限公司、中海油田服务股份有限公司、天津同阳科技发展有限公司完成资源环境技术创新。

**海洋领域：**依托科技型企业梯度培育机制，在海洋装备领域着力培育雏鹰、瞪羚、领军（培育）企业，截至 2023 年底数量分别达到 54 家、20 家、16 家，国家高新技术企业 120 余家。着力打造海工装备制造和服务产业新高地，目前已形成以海油工程、博迈科为龙头的

海洋油气装备产业，以中交一航局为龙头的港口航道工程产业，以瑞源电气等为代表的风能装备产业，基本形成了涵盖“零部件-装备集成-总装建造-配套服务”的海工装备产业体系。

#### （四）加强先进技术推广

以科服网·天津成果网线上平台为核心，推动高校院所、行业、服务、区域等四类机构协同配合，打造“1+4”技术转移体系，积极为“低碳”领域的各类民营企业提供成果路演、供需对接等服务。完善科技成果评价机制，指导天津产权交易中心持续完善技术产权股权交易平台，实现绿色低碳等领域科技成果全流程线上交易。组织专场成果推介会。遴选了 6 项节能降碳领域先进技术组织线下召开“天津市 2023 年节能降碳先进技术推广会”，并连续在官网展播，宣传推广科技发展成效、技术成果和示范案例，推动低碳、清洁、高效的发展技术，提高天津市节能降碳科技成果转化效率。通过科学技术普及项目、创新基地（平台）与人才专项计划组织“碳普惠微课堂”、““生态环境多元共治 协同助推双碳目标”科技人才大讲堂”等科普推广活动。

深入国家海洋技术中心、海水淡化研究所等海洋领域高校院所，讲解科技成果转化激励政策。2023 年 5 月，先后组织天津市涉海高等院校科研机构负责人、知名专家学者、国家涉海驻津主要科研机构有关负责人、主要领域龙头企业代表和市主要科研院所代表召开两场“天津市海洋科技创新座谈交流会”，交流单位海洋科技创新发展情况、研讨天津海洋科技创新发展问题、探讨海洋科技创新未来发展；依托参会单位，建立了交流对接机制，进一步加强涉海科技创新主要力量的联系联动。同时，组织高等院校、科研机构和龙头企业“握手”交流，在水下无人机器、海水淡化、远洋保障服务、海上能源装备等领域进行了具体对接。



## 二、技术成果篇

技术成果篇展示资源与环境（绿色低碳）领域先进适用示范性技术成果 22 项，涉及碳达峰碳中和技术 5 项、生态环境保护技术 3 项、海洋资源开发技术 14 项。通过深化绿色技术推广，为推动经济社会发展全面绿色转型，实现碳达峰碳中和目标提供有力技术支撑，具体技术内容列示如下。

## A、绿色低碳技术

### 技术 1：风光电源全自动碳电极水解离制氢技术

#### 1.1 技术提供方

天津锦美氢源科技发展有限公司注册在天津市空港经济区，是集研发、生产、销售、服务为一体，专业从事于绿氢高端装备制造，公司产品类别包括：集中式制氢设备、分布式制氢设备、可移动式制氢设备、微型制氢设备及氢能应用系统解决方案服务方。锦美氢源公司的诞生依托于锦美集团在碳材领域 20 余年专注探索实践、研发创新的技术储备，2018 年锦美集团战略布局氢能领域，制氢项目团队经过四年多的努力，创造性研发出碳电极电解水制氢技术，采用能耗低、抗高温、耐腐蚀、导电性能好的碳复合材料作为电极板实现电解水制氢，该产品具备制氢成本低、设备响应快、碳电极寿命长、维护成本低的优势，目前该技术已被认定为国际先进水平。公司首创“标准单元模组”制氢装置，可依据客户实际需求灵活装配，满足不同场景制氢用氢，有效解决了行业内制氢、运氢、储存成本居高不下的痛点。目前公司已通过 ISO9000 质量、环境、职业健康管理体系。公司注重自主研发和管理创新，成立企业工程技术中心，具有强大的研发能力，截止至今，已拥有有效专利 17 项、软件著作权 2 项。2022 年通过国家科技型中小企业认定，2022 年天津第一批入库雏鹰企业，2022 年天津市创新型中小企业认定，第七届“创客中国”天津市中小企业创新创业大赛三等奖，天津市创新创业大赛暨第 11 届中国创新创业大赛二等奖。2023 年 4 月经权威专家、教授针对我司“分布式碳电极水解离制氢技术”召开技术研讨会论证后，专家组一致认为该技术先进、高效，运行安全、稳定，经济性较好，具有示范推广价值。2023 年 5 月我司“风光电源全自动碳电极水解离制氢技术”荣获 2023“零碳中国”零碳技术解决方案，2023 年 11 月荣获 2023 TOP 10“零碳中国”十大创新技术。

#### 1.2 技术成果简介

本项目采用锦美氢源自主研发的制氢装置，创造性的采用碳复合材料作为电极，该技术为国际首创。产出氢的品质极好、电极寿命长，制氢装置自动化程度高，装置可以安全运行并且稳定性好，并可以实现远程互联网人工干预，实现智能控制。开发了光伏发电、风力发电、蓄电池和电网供电多模块协调控制的电源系统，有效降低了电解水制氢的能耗成本。

##### 1.2.1 技术成果名称和领域

技术名称：风光电源全自动碳电极水解离制氢技术。

技术领域：碳中和基础前沿技术领域。

##### 1.2.2 技术成果来源

技术成果来源于企业自主研发，在技术人员对新产品、新技术的不断研发和开发中已经成功取得实用新型专利 17 项，软著 2 项，具体如表 2-1-1 所示：

表 2-1-1 所获得的知识产权

序号	专利名称	专利号	专利类型
1	锦美氢源小型制氢装置运维集成控制系统		软件著作权
2	锦美氢源分布式制氢装置控制系统		软件著作权
3	一种变流量氢气压缩机工况的跟踪调控系统	201920610425.2	实用新型
4	一种适用于电解水制氢的调制电源	202020843502.1	实用新型
5	一种用于电解水制氢的阳极区内泄漏氢的快速排出方法	202005946947.0	实用新型
6	一种电解水制氢用碳基电极板	202123217645.5	实用新型
7	一种分布式制氢设备	202123219358.8	实用新型
8	一种碳电极水解离制氢设备	202123294277.4	实用新型
9	一种电解水制氢设备用收集氢气装置	202220624222.0	实用新型
10	一种电解水制氢生产用储氢罐	202220659805.7	实用新型
11	一种电解水制氢生产用提纯设备	202220799598.5	实用新型
12	一种带有指示功能的液位计检测装置	202221065053.8	实用新型
13	一种具有定位精准功能的内螺纹工装	202221276981.9	实用新型
14	捕沫器	202221523971.0	实用新型
15	抽拉窗	202221867499.2	实用新型
16	一种富氢水机中的混氢装置	202222341203.X	实用新型
17	一种使用于碳电极板电解水制氢的电解槽	202222159393.3	实用新型
18	汽水分离器	202320196200.3	实用新型
19	用于电解水制氢电解槽	202320267246.X	实用新型

### 1.3 技术内容

#### 1.3.1 技术原理及工艺流程

基于潜在市场分析和我公司多年从事碳电极电解水制氢的研发和技术积累，提出了一种风光电源全自动碳电极水解离制氢的解决方案。

制氢系统采用多模组累加的模式，电解槽通以直流电的条件下，阴极侧产生氢气，阳极侧产生氧气，氢气与氧气分别通过对应的管路进行汇总，氢气汇总之后送至压缩机室，经过压缩之后通过精制系统进行精制处理。

各项运行参数均可数实现自动监测和控制，可按用户需求不同，提供气动仪表控制、电动仪表控制、PLC 可编程控制、DCS 控制、远程通讯等控制手段以及各类分析仪表。

每套制氢系统通常配备控制柜、整流柜等控制单元以及氧中氢、氢中氧等分析仪表。

我司首创“标准单元模组”制氢装置，如图 2-1-1 所示，采用模块化设计，主要分为电源系统、制氢装置、压缩系统、储氢系统、精制系统，各部分均配备氢气报警装置，且均与一个控制系统相连接。可根据实际需求调配不同模块，或增减某模块的规模，各个模块可集成在一个或多个区域内。可依据客户实际需求灵活装配，满足不同场景制氢用氢，有效解决了行业内制氢、运氢、储存成本居高不下的痛点。



图 2-1-1 “标准单元模组”制氢装置

### 1.3.2 技术成果适用性分析

近年来，随着全球对清洁能源需求不断增加，电解水制氢技术得到了广泛的关注和研究。

首先，在能源转型方面，电解水制氢技术可以作为一种可再生能源的储存和转换方式。由于风能、太阳能等可再生能源具有不稳定性，而氢气可以作为能源的储存介质，将多余的能量储存起来，以备不时之需。此外，氢气还可以通过燃料电池等方式转化为电能，为家庭和企业提供清洁、可靠的电力供应。因此，电解水制氢技术在能源转型中具有重要应用前景。

其次，在交通运输领域，电解水制氢技术可作为电动汽车的一种理想能源。相比于传统的燃油汽车，电动汽车具有零排放、低噪音等优点，但是其续航里程和充电时间一直是制约其发展的主要因素。而氢气可以通过燃料电池等方式直接转化为动力，不仅能够延长电动汽车的续航里程，还能够实现快速充电。目前，一些国家和地区已开始推广使用燃料电池汽车，未来随着技术的不断成熟和成本的降低，电解水制氢技术有望成为电动汽车的主流能源之一。

最后，在工业生产方面，电解水制氢技术也有广泛的应用前景。例如，钢铁、化工等行业需要大量的氢气作为原料或保护气，传统的生产方式通常采用天然气重整等方式获得氢气，这种方式不仅消耗大量能源，而且会产生大量的二氧化碳等温室气体。而电解水制氢技术可以直接利用电力将水分解为氢气和氧气，不仅能够减少能源消耗和环境污染，还能够提高生产效率和降低成本。因此，电解水制氢技术在工业生产中的应用前景也非常广阔。

### 1.3.3 技术创新性及先进性

本技术针对电解水制氢电极寿命短、耗能高等难题，采用了碳复合材料电极和多模块协调控制的电源系统，开发了分布式碳电极水解离制氢技术。

主要创新点和取得的成果为：

(1) 提出了使用碳复合材料极板作为电解水制氢的电极，极板具有电流通量高，电极寿命长等优点，迄今 40000 小时无腐蚀；

(2) 开发了光伏发电、风力发电、蓄电池和电网供电多模块协调控制的电源系统，有效降低了电解水制氢的能耗成本，制氢电耗为  $4.05\text{kWh}/\text{Nm}^3$ ；

(3) 该技术智能化程度高，可远程控制，已形成完整的工艺包。

2019 年底进行了省级科学技术成果鉴定，被评为国际先进。

2023 年 4 月 27 日能投委组织对锦美氢源“分布式碳电极水解离制氢技术”进行技术研讨，专家组一致认为该技术先进、高效，运行安全，稳定，经济性好，具有示范推广价值。

2023 年 10 月 17 日我司制氢设备所产氢气质量满足国家标准 GB/T 37244-2018 质子交换膜燃料电池汽车用燃料氢气质量指标要求及 GB/T 3634.2-2011 高纯氢质量指标要求。

#### 1.4 节能减碳或污染防治效果

首先，电解水制氢技术不需要燃烧化石燃料，不会产生二氧化碳等温室气体，因此可以减少大量的碳排放。根据国际能源署的数据，全球每年氢气生产所需的能源中，约 80% 是通过化石燃料制得的，如果能够将这部分化石燃料制氢替代为电解水制氢，将会显著减少全球碳排放量。

其次，电解水制氢技术的能效比传统方法更高。电解水制氢只需要消耗电能即可完成水的分解反应，而不需要额外消耗其他能源。据统计，目前电解水制氢技术的效率已经超过了 70%，并且还有不断提高的趋势。这意味着使用电解水制氢技术可以更加节约能源，从而实现更好的节能减排效果。

最后，电解水制氢技术还可以减少污染物排放。传统的化石燃料制氢过程中会产生大量的污染物，如二氧化硫、氮氧化物等。而电解水制氢过程则只会产生氧气和水蒸气等无害物质，不会对环境造成污染。因此，采用电解水制氢技术可以实现零排放的目标，对于保护环境和人民健康具有重要意义。

#### 1.5 技术示范情况

电解水制氢技术已经在多个领域得到广泛应用，具体包括能源、交通、工业和建筑等。

在交通领域，氢气被认为是实现零排放运输的重要途径，电解水制氢技术可以为燃料电池车提供清洁能源。

在电力行业，电解水制氢技术被用于调节电网负载，提高电网的稳定性和可靠性。此外，由于氢气可以作为储能介质，电解水制氢技术也被视为一种可再生能源储存方式。

对于工业领域来说，电解水制氢技术被应用于冶金、化工等行业。其过程不会产生有害的副产品，相比传统的焦炭还原法，能够有效降低碳排放。

在建筑领域，电解水制氢技术有望成为未来建筑采暖的新能源。

##### 案例：二氧化碳加氢合成绿色甲醇项目

(1) 工程规模：天津锦美氢源科技发展有限公司与金岩集团、山西碳基新材料产业研究院目前正在山西省吕梁市孝义市新能源发电制氢及后续二氧化碳捕捉合成甲醇项目的研发、应用等领域开展全面合作。关键设备为分布式电解水制氢装置，主要建设内容包括完成现场 50Nm<sup>3</sup>/h 电解水制氢装置的装配。

(2) 主要参数及工艺流程如表 2-1-2 和图 2-1-2 所示：

表 2-1-2 制氢设备技术参数

序号	项目	单位	参数
1	氢气生产能力	Nm <sup>3</sup> /h	50
2	电解槽温度	℃	≤50℃
3	电解槽压力	MPa	常压
4	直流电耗	KWh/Nm <sup>3</sup>	≤4.1
5	排气压力	Mpa	0.5
6	氢气纯度	%	99.99
7	电力输入		交流：380V 50HZ 三相电

序号	项目	单位	参数
8	额定功率	KW	250

注：氢气需求纯度，按客户要求可达到 99.999%。

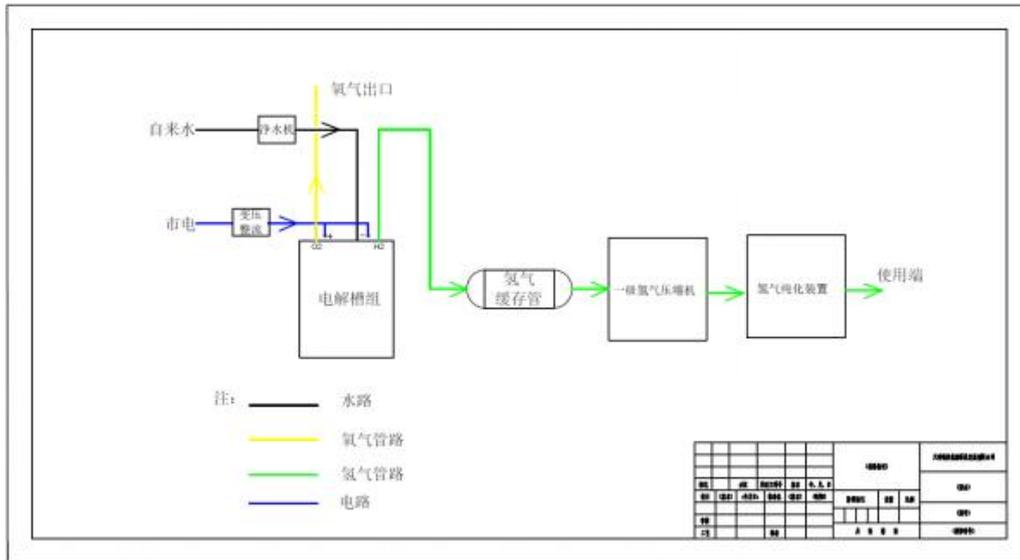


图 2-1-2 制氢工艺流程

## 1.6 成果转化推广前景

### 1.6.1 技术推广前景

该技术以运行电流密度高、能耗低、适应可再生能源发电波动等特性表现出了显著优势，为其产业化和规模化发展奠定了基础。

此外，中国在“十四五”规划中将氢能发展作为长期发展战略，重点在于提高电解水制氢转化效率，改善电解槽电堆、电极等的设计和制造工艺，加强可再生能源与氢能的耦合，以推动我国“双碳目标”的实现。这无疑为该技术的发展提供了广阔的市场空间。

然而，虽然该技术具有诸多优点，但在一些方面还存在一些挑战需要解决。未来几年将是电解水制氢技术发展和市场竞争的关键时期。因此，持续优化该技术并解决相关问题将成为推动其市场普及率提升的重要任务。

**技术成熟度：**该技术已经相对成熟，目前已经有多种类型的制氢设备走向市场。这些设备的制造成本逐渐降低，效率不断提高，能够满足不同领域的需求。

**市场容量：**随着全球对清洁能源需求不断增加，电解水制氢技术的市场规模也在不断扩大。根据市场研究机构数据，预计到 2025 年，全球电解水制氢市场规模将达到数十亿美元。

**技术经济性：**该技术的经济性取决于多个因素，包括电价、设备成本、氢气价格等。目前，由于可再生能源成本不断下降，以及政府对清洁能源的支持力度加大，该技术的经济性逐渐提高。预计到 2025 年，电解水制氢技术的经济性将更加优越，进一步推动其市场推广。

根据上述分析，预计到 2025 年，该技术在产业或领域内的市场推广比例将逐渐增加，市场规模将逐步扩大。该技术具有显著的节能减碳和环境污染防治潜力。通过该技术制备的氢气可以作为清洁能源替代传统的化石燃料，从而减少温室气体的排放。预计到 2025 年，

电解水制氢技术将在节能减碳和环境污染防治方面发挥更大的作用。

### 1.6.2 技术推广障碍及应对措施

该技术在成果转化和推广过程中面临多重挑战。首先，虽然该技术具有环保、清洁的特性，但其阳极析氧反应的高能耗问题限制了其广泛应用。此外，该技术的设备成本较高，需要通过改进技术、提升规模经济效益等方式来降低制氢成本。

同时，政策壁垒也是阻碍其发展的一个重要因素。尽管许多国家已将氢能发展作为长期发展战略，并制定了相应的支持政策，但在具体实施过程中，由于各地政策执行力度、监管机制等方面的差异，可能会对该技术的推广产生影响。

另一方面，资源或资本的制约也产生了一定影响。该技术的推广需要大量的资金投入，包括研发、设备购置、生产线建设等，而这对于企业来说是一大负担。此外，人力资源也是一个关键因素，该技术的发展和应用需要大量的专业人才，包括技术研发、生产运营等各个环节。

针对上述问题，可能的应对措施包括：一是持续优化该技术并解决相关问题，如提高电催化剂活性、优化电解槽结构等；二是争取政府加大政策引导和支持力度，为该技术的推广创造良好的环境；三是加强人才培养和引进，满足该技术的发展需求。

## 技术 2：空气源燃气机热泵

### 2.1 技术提供方

蓝焰高科依托与清华大学、天津大学和天津城建大学等高校教授科研团队的产学研合作，专注于以燃气为能源的供热、制冷、供生活热水和发电技术为核心，拥有强化换热、燃气燃烧、燃气供热、燃气空调、智能控制、计算流体力学仿真技术、计算燃烧学仿真技术、数值传热仿真技术等方面的高端研究人员。

公司是获批“天津市“专精特新”中小企业”，国内独家专门从事设计、开发、生产、销售、服务于一体的燃气机热泵(GEHP)冷热水机组的制造商，是燃气热泵行业最具有专业技术研发能力的智力密集型公司。多年来公司通过以燃气为能源的高效、低排放新技术产品研发，引领国内燃气采暖、供热水和燃气空调产业技术与国际接轨。

蓝焰高科拥有多项自主知识产权和技术创新产品，依托过硬的产品和服务，近年来稳步发展，在多个领域尤其是冷暖节能和燃气高效利用方面在国内处于领先地位。

公司自成立以来，相续研发了空气源燃气机热泵、螺杆式燃气机水源热泵、高效热交换器、超级热源节能消白机组及高温烟气余热回收系统等产品，主营产品核心技术全部拥有国家专利，并全面市场化，且获得广大客户的信赖与好评。公司组装生产的高效铸铝热交换器及OME代工的低氮全预混燃气锅炉已占据国内市场主导地位，空气源燃气机热泵在国内市场与日本松下、洋马等国外品牌竞争中稳步增长，锅炉烟气高效余热回收节能消白产品及系统也获得客户的认可与肯定。

### 2.2 技术成果简介

#### 2.2.1 技术成果名称和领域

GARC 空气源燃气机热泵，作为一款燃气高效利用和烟气余热回收的综合节能产品，主要应用分布式集中供暖、酒店冷热及洗浴用水、办公楼冬暖夏冷、恒温养殖、工业稳定烘干等领域。

(1) 采用自主产权的高温烟气与余热回收系统，将可利用的烟气与燃气机缸套温度全部吸收，整体能效(PER)提升到 165%以上，高出同行 5-10%。

(2) 外型紧凑，燃气机、压缩机、热交换器、风机、控制柜一体式结构，更节省空间，更方便操作。

(3) 热泵内循环水一次性注入后封闭，无需补水(减少了软化水及再生成本)，换热器不受腐蚀，无水垢。

(4) 燃气机完全负压运行，燃烧不会爆炸，安全性极佳。热泵在运行的全过程始终保持负压状态，所以不会有爆炸的危险。并设置了传感器、压力开关、防过热开关等多重安全保护装置，四级保护系统(其中一、二级保护故障排除后系统自动恢复，三、四级保护则需要专业人员手动恢复)保证了热泵的安全性。

#### 2.2.2 技术成果来源

蓝焰高科与清华大学、天津大学、天津城建大学等高校教授团队长期产学研合作，坚持

进行高校科研成果产品化、市场化、标准化。

蓝焰高科空气源燃气机热泵技术是与高校科研课题联合成果，并吸收国外先进技术与经验，经过多年市场实践应用和迭代成型而来，蓝焰高科拥有自主知识产权和国家专利。该技术目前已成功取得实用新型专利 2 项。在 2019 年 4 月 18 日申请了《燃气机驱动蒸汽压缩式空气源热泵冷热水机组》、2020 年 9 月 4 日申请了《一种空气源燃气机热泵热水器》，为两种国家实用新型专利，并于 2020 年 4 月获得授权及专利证书（证书号 第 10282257 号）、2021 年 11 月获得授权及专利证书（证书号 第 14646765 号）。

## 2.3 技术内容

### 2.3.1 技术原理及工艺流程

如图 2-2-1 所示，为本公司所开发的空气源燃气机热泵机组冬季工况制热原理图。整个机组可以分为制冷剂循环系统和燃气发动机防冻液循环系统。

制冷剂循环系统主要由开启式活塞压缩机，翅片管换热器（冷凝器）、板式换热器（蒸发器）、热力膨胀阀 1、油分离器等辅助设备组成。首先，低温低压的制冷剂蒸汽通过压缩机吸气截止阀进入压缩机气缸中被压缩为高温高压的过热蒸气后经压缩机排气截止阀排出。随后，排出的过热态制冷剂蒸气流过油分离器后进入冷凝器中，在冷凝器中，过热蒸气将热量传送至冷却水中，变为高温高压的液态制冷剂而冷冻油则经过油分离器回油管进入压缩机曲轴箱。被冷凝和过冷以后的液态制冷剂依次流过储液器、干燥过滤器、供液电磁阀、视液镜和热力膨胀阀 1 和 2，经热力膨胀阀 1 和 2 节流后变为低温低压的气液两相态制冷剂，而后进入到翅片式蒸发器中，在风机的强制对流作用下，提取低温空气中的热量，进而蒸发为低温低压的气态。最终，低温低压的气态制冷剂经过气液分离器后，再次进入压缩机进行下一个制冷剂循环。

生产工艺流程包括：原材料准备、组件制造、组件组装、制冷剂充注、系统调试和测试。

热泵系统制冷工艺流程包括：制冷剂的循环、热交换、蒸发器吸热、压缩机排热、冷凝器放热、节流阀降压。

空气源燃气机热泵的主要技术参数：

制冷量：在夏季工况下为 55kW；在冬季工况下为 90kW。

系统一次能源利用率（PER）：167%

噪音：≤65 分贝。

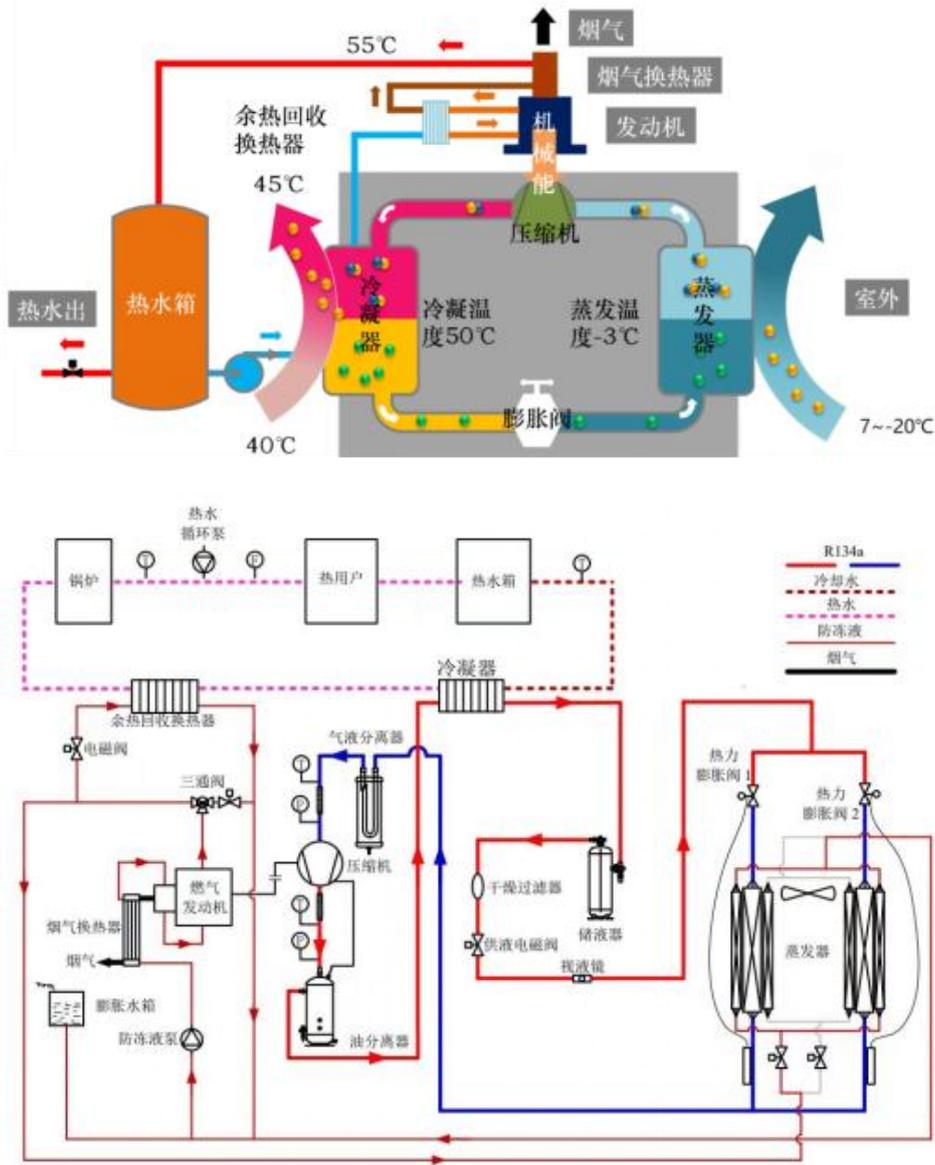


图 2-2-1 空气源燃气机热泵机组制热原理图

### 2.3.2 技术成果适用性分析

空气源热泵是一种利用高位能使热量从低位热源空气流向高位热源的节能装置。可以把不能直接利用的低位热能（如空气、土壤、水中所含的热量）转换为可以利用的高位热能，可以使用的高级热能可以节省一部分高级能源（例如煤炭，天然气，石油，电力等）。空气源热泵作为一种清洁能源装备，在 2016 年“煤改清洁能源”政策推出后便迎来爆发期和高速增长期。

纵观国内外空气源热泵行业的起源与发展，可以显著地看出空气源热泵行业属于政策驱动型的市场。全球空气源热泵发展比较快的地区都有明显的法规政策推动，近几年，紧随国家“绿水青山就是金山银山”发展理念，清洁能源产业优势凸显。

紧紧响应环保政策的号召，加上国内能源消费结构逐渐趋向优质化，天然气消费占能源消费总量比重逐年递增，预计 2025 年会达到 15%，供应量 5000 亿立方米。进入绿色经济

时代，节能降耗是节约能源、保护生态的重要途径，是转变发展方式的必经之路。而空气源燃气机热泵作为绿色环保的清洁能源装备，以其高能效和高性价比，得到了政府和用户更多的认可，未来将有非常广阔的市场发展前景。

### 2.3.3 技术创新性及先进性

(1) 通过智能的温度感知和控制技术，能够实时调整热泵系统的运行，以最大限度地提高能源利用效率，从而降低能耗、节约能源。

(2) 空气源燃气机热泵具备高精度的温度控制功能，能够快速响应温度变化，并精确地维持出水温度在设定的范围内。

(3) 空气源燃气机热泵具备智能化管理功能，这种智能化管理可以帮助用户更加方便地调整设置、观察能耗数据，并根据需求进行远程操作与管理。

(4) 空气源燃气机热泵具备多种安全保护功能，如温度保护、过载保护等，可以确保系统运行的安全性和可靠性。

(5) 空气源燃气机热泵技术优势：

**温度感知技术：**热泵采用高灵敏度和高耐用性的温度传感器，控制系统采集到温度信号以后，进行内部分析处理，这个技术已经非常成熟，可靠性很高。

**压缩机控制技术：**空气源燃气机热泵的核心部件式压缩机，本公司热泵采用的式往复式塞式压缩机，技术已经非常成熟，可靠性高。

**换热器技术：**换热器式热泵的另一个重要部件，本公司采用的翅片式换热器和板式换热器技术非常成熟，可靠性高。

**控制系统：**空气源燃气机热泵的控制系统负责调节设备的运行状态，确保热泵在各种工况下都能稳定运行。本公司采用 PLC 控制，经过多次调试及实验，控制系统可以长时间稳定运行，该技术成熟、可靠性高。

**机组配件：**本公司热泵采用的配件都具有良好的耐腐蚀性和耐久性，能够保证设备长时间稳定运行。





图 2-2-2 技术创新性及先进性

## 2.4 节能减碳或污染防治效果

空气源燃气机热泵的节能减排效果主要体现在能效比（COP）和一次能源利用率（PER）上。测算方法是：首先，需要测量热泵在特定工况下的制冷或制热能力，其次计算热泵系统的一次能源总能耗，包括燃气机热泵输入功率、辅助设备功率，然后，将热泵系统产生的制热或制冷能力除以一次能源总能耗得出。依据方面：我国《蒸汽压缩循环冷水（热泵机组）》（GB/T 18430.1-2007）和《燃气发动机驱动空调（热泵）机组》（GB/T 22069-2008）规定热泵的能效等级和能效限定值。

节能减碳或污染防治效果体现在如下几点：

（1）高效节能，热泵系统循环，通过冷媒蒸汽进行交换。预热时间短，开机几分钟内即可供热水，同时也节省了能源。比照间接式（电热泵）供热形式，更方便节能。

（2）热泵受力钢板高温区、高压区的成功分离，使燃气机、压缩机、膨胀阀等主件使用寿命延长。

（3）热泵循环系统虽然与二次网供暖系统直接对接，但系统水与热媒互不相干，热泵不需要排污，因此效率就是系统的效率，中间没有任何损耗。

（4）效率高、超节能，比照传统锅炉燃料费用节约 50%以上。

（5）无需报检，根据国家燃气空调标准，燃气热泵用户不需要到质量技术监督部门办理安装和使用登记注册手续。

（6）使用寿命长，机组内部处于真空状态，没有氧气，无氧化腐蚀，也没有结垢腐蚀，冷媒在机组内部封闭循环，换热器只与循环水接触，杜绝北方供暖回水温度低造成的冷凝腐蚀。

## 2.5 技术示范情况

项目位于北京市西城区东岔胡同，中国佛教协会办公楼（6000 平米）新建供冷供暖系统和建筑节能升级改造，总体装修改造工程由北京首华建设经营有限公司（国企，隶属北京首都开发控股集团，联系人：刘凤林经理 13801062211）承接，其中冷热源设备选择空气源

燃气机热泵（冷暖型），同时项目建筑改造升级为五步节能建筑。

项目总投资 300 万，其中热源设备 45 万，项目于 2022 年 8 月份启动，于 2022 年 10 月底竣工并验收。目前项目运维管理由北京首华负责运营（联系人：刘凤林经理 13801062211）。

该项目涉及新建及升级内容包括：新增 3 台空气源燃气机热泵，冬天供暖（45-50℃热水）夏天制冷（7-12℃冷水），室内为水路循环系统，终端为风机盘管，为办公楼提供全方位能源管理。

热源设备安装在办公楼顶，合理利用闲置空间，安装维护方便且燃气使用更安全，同时作为燃气空调系列产品，不需要做特种设备和燃气锅炉备案。

夏冬两季使用，全年共运行 9 个月+全年生活用热水（洗浴），冬季室温保持在 22 度以上，夏季室温保持 25 度以下，冷暖温度可调可控且运行稳定。三台热泵相较燃气锅炉节能 45%以上，一年节约 4857.2 吨标准煤，减少二氧化碳排放 13.2 吨。

该项目燃气机热泵经济效益显著，相较于燃气锅炉可节能 45%以上，按实际测算所得，投资回收期≤3 年。

燃气机热泵操控便捷，现场可无人值守，摆脱了以往对燃气锅炉需人工看护的束缚，手机 APP 即可值班，各种参数和指标一目了然，3 台燃气一组数据链，既方便又智能。

夏季制冷的同时，又为佛协僧众宿舍提供免费的淋浴用水，提升了经济性，也让综合能效和节能率维持在 145%以上，应用效果良好，客户好评度很高。

经过一年冷暖季和全年生活用热水的运行可知，热源设备运行平稳，维修率较低，现场无需人员专职值守，经过综合测算，加上设备折旧（15%），每平米运行费用 50 元（冷暖两季，含人工费用），毛利为 20 元/平，符合设计及营运要求，节能和盈利效果显著。

设备	耗电量(kWh/天)		电价 (元/kWh)	运行时间(天)	年电费 (元)		用气量(m <sup>3</sup> )	燃气价格 (元/m <sup>3</sup> )	年燃气费 (元)	总运行费用(元)	
	70	100			30240	43200				36720	86832
原装置	70	100	1.2	360	30240	43200	310	3.6	401760	36720	401760
燃气蒸汽锅炉	85				36720					438480	
改造后	70	100			30240	43200	67	3.6	86832	36720	86832
GEHP-KXLY-75	85		36720		123552						



图 2-2-3 运行费用对比

## 2.6 成果转化推广前景

### 2.6.1 技术推广前景

燃气机热泵作为空气源热泵家族重要的一员，燃气机热泵以燃气作为动力源，充分利用

发动机的排热，技术成熟可靠，采用活塞式压缩机，具有优越的供热性能。燃气热泵还具有制冷、采暖、热水等多种功能，是极为理想的商用中央空调、分布式集中供暖产品。燃气热泵实现了对能源的高效利用，能源综合利用率为 1.45，燃气热泵对于能源的利用更为有效。而燃气热泵供热时的能源利用率更要远远高于其它供热方式。通过分析，气电价比低于 5.33 时，燃气热泵运行费用对比电动热泵有优势。在中国，西气东输沿线的城市，其气电价比远低于 5.3，燃气热泵的运行费用对比电动热泵具有很强的优势。

2022 年空气能热泵行业总销额为 190 亿元，同比上升 9.8%，这得益于宏观采暖政策补贴推动、热泵热水器楼盘配套以及北方市场空气源热泵热风机的快速发展。预计到 2025 年，结合目前国内积极推进空气源热泵发展及全面替代低能耗锅炉等多种节能减排政策，行业销额将到达 300 亿元，空气源燃气热泵因其自身高效及极寒天气抗衰减等技术优势也将占据一定的比例，约占据 5%。

燃气高效利用与节能减碳完美结合，最大程度地净化排向大气中尾气含量，减少对环境的污染，促进环保，极大减轻各地尤其是北方地区供暖季的环保与治霾压力。

### 2.6.2 技术推广障碍及应对措施

#### (1) 技术推广过程遇到困难与障碍

**技术成本高：**空气源燃气机热泵的购买和安装成本相对较高，对消费者和企业来说是一笔不小的投资。

**能源利用率受环境影响较大：**在低温环境下，空气源燃气机热泵的制热量有限，导致能源利用率不高。

**市场认知度低：**许多消费者和企业对空气源燃气机热泵的技术和优势了解不足，影响了其推广。

#### (2) 应对措施与方案

**降低成本：**通过技术创新和规模化生产降低设备成本，提高产品性价比。

**提高能源利用率：**优化设备性能，提高在低温环境下的工作效率。

**增加市场推广力度：**通过各种渠道提高消费者和企业对空气源燃气机热泵的认知度。

## 技术 3：基于光伏绿电和能源综合监控的城市轨道交通低碳技术创新与工程应用

### 3.1 技术提供方

天津轨道交通运营集团有限公司（以下简称“运营集团”）成立于 2018 年 12 月，为天津轨道交通集团有限公司的全资子公司，是以经营天津城市轨道交通线网为主业，集客运服务、行车调度、车辆养护、电力保障、通信信号、机电维管、研发创新、科技咨询、文化传播、项目结建、新线筹备等业务于一体的国有企业。运营集团目前主要负责地铁 5、6、9、10 号线和天津站交通枢纽、天津西站交通枢纽的运营管理工作。运营的 4 条地铁线路共设地铁车站 109 座，总运营里程 151.4 公里，基本形成覆盖天津中心城区主要居住区、商业区和交通枢纽，联通滨海新区的网络化运营格局。

### 3.2 技术成果简介

#### 3.2.1 技术成果名称和领域

本项目为基于光伏绿电和能源综合监控的城市轨道交通低碳技术创新与工程应用，项目以分布式光伏技术、空气源热泵技术及能源综合管理平台为依托，在能源绿色低碳转型领域深入研究区域性能源消费绿色化及能源管理智慧化，项目起到良好示范效应。

#### 3.2.2 技术成果来源

中国城市轨道交通系统的每年的用电量已达 150 亿度，约占全国总用电量的 3%，随着行业的发展及客流量的增长，水、燃气等能源的消耗也在与日俱增，能源费用已经占据轨道交通运营成本的 20% 以上，已达相当规模；天津轨道交通运营集团有限公司负责天津地铁 5、6、9、10 号线运营维护与管理工作，2022 年用电量约 3.19 亿度，相当于 3.92 万吨标煤。

在推动绿色低碳轨道交通发展的方针政策下，运营集团将 6 号线作为深入研究设备设施节能的试点，通过开展光伏系统建设、供暖系统改造和搭建能源综合管理平台等多项优化设计及改造，在节能低碳、降本增效方面取得显著成果，6 号线大毕庄车辆基地基本达成近零碳车辆基地的效果。

### 3.3 技术内容

#### 3.3.1 技术原理及工艺流程

##### （1）分布式光伏技术

运营集团通过利用 6 号线大毕庄车辆基地上盖空闲区域搭建光伏发电系统，采用单晶 440W 功率光伏组件进行发电，所发直流电经过光伏逆变器转化为交流 0.4kV，进汇流箱汇流后传输至并网柜，并网柜与地铁供电系统相连，并网点电压位 0.4kV，将清洁能源接入地铁供电系统，实现绿色能源的使用，减少碳排放。

结合基地上盖空闲区域的条件，经过技术讨论和探索，运营集团创立“光伏+”模式，建立光伏发电多元布局；通过对光伏发电量以及储能系统充放电进行模拟分析，以及建模仿真光伏并网发电效能，形成大毕庄车辆基地 5.83MW<sub>p</sub> 分布式光伏发电项目建设方案。建成的

光伏系统采用自发自用、余电上网模式，由车辆段、车站的负载设备就近消纳。

#### (2) 空气源热泵技术

大毕庄车辆基地 2021 年底完成供暖系统热源提升改造工程，以契合国家能源利用新标准为指导方向，将风险控制难度较大、环保指数低、供热成本高的燃油锅炉替换为绿色、减碳、经济的空气源热泵作为热源，实现节能减排的目标。

#### (3) 能源综合管理平台

运营集团统筹建设 6 号线能源管理系统，通过安装统一的能耗监测仪表，采集线路各用电、用水、燃气等能耗的精准数据，并通过搭建有效的数据传输网络，结合现有的综合监控系统，将现场的能耗数据进行汇总并完成各离散数据的统一分析。呈现分类、分项、分区域能耗数据展示，实现用能排序及能耗同比、环比等对比功能。通过数据统计结果及单位能耗成本，呈现分类能耗总量及成本费用、分项能耗组成及所占比重、主要用能区域或设备的能耗对比图表，同比以及环比的增减幅度、关键能耗指标的统计结果等组件的综合能耗评估报告。辅助诊断能源系统运行过程中的潜在问题和用能规律，并对监测对象关键运行参数、耗能量、能耗指标等超标进行预警和报警，辅助管理人员开展用能决策。

### 3.3.2 技术成果适用性分析

6 号线大毕庄车辆基地分布式光伏项目并网规模为 5.83MW，为北方地铁行业内规模最大的分布式光伏发电项目。标志着天津轨道交通在绿色清洁能源供应方面首次取得阶段性成果。同时也为后续轨道交通光伏并网提供了极大的借鉴意义。

空气源热泵技术应用在满足供暖使用需求的基础上，提升了系统运行安全性、稳定性和智能化管理水平，达到大幅降低系统运行费用的目标。同时契合国家能源利用新标准的指导方向，减少碳排放，实现节能减排目标。

综合能源管理平台实现对能耗进行实时监控，为运营成本提供可视化数据，结合项目实测数据对标分析，优化车辆段能源架构，实现节能降耗的目标。

### 3.3.3 技术创新性及先进性

(1) 采用空气源热泵电供暖，减少燃油消耗，避免了燃油尾气的排放，更加环保。

(2) 光伏发电系统充分结合现场实际情况，建设分布式光伏发电，并与既有地铁供电系统结合，使光伏系统所发电量全部自发自用、就近消纳，提高绿电使用比例，减少火电消费量，降低碳排放。

(3) 能源管理系统对 6 号线整体供暖、供热、用水、用电等能耗进行全局监控，实现碳足迹的追踪登记与管理，并采用物联网方式对收集能耗指标进行分析，实时调整能源结构并制定节能降耗策略。

## 3.4 节能减碳或污染防治效果

### (1) 光伏发电应用方面

目前 6 号线光伏发电系统年发绿电约 800 万度，减少二氧化碳排放约 7000 吨。系统所发绿电在满足大毕庄车辆基地 400V 供电及牵引供电需求的同时，多余电量已通过供电系统供给附近的南孙庄至北站 9 座地铁车站使用，年节约电费约 450 万元。目前为北方地铁行业

内规模最大的分布式光伏发电项目。标志着天津轨道交通在绿色清洁能源供应方面首次取得阶段性成果。2023 年底，6 号线光伏系统继续扩建至 10MWp，建成后将为全国地铁行业内单个车辆段规模最大的分布式光伏发电项目。

#### （2）空气源热泵应用方面

改造前三年供暖季平均柴油耗量 291 万升，二氧化碳排放量 8291 吨/年，改造后年均供暖季空气源热泵供暖耗电量为 240 万 kWh，折合二氧化碳年排放量 2122 吨，碳排放降幅达 74%，此外空气源热泵白天使用光伏绿电运行，核算后综合运行费用减少可达 90%以上。

通过供暖系统热源改造，在满足供暖使用需求的基础上，提升系统运行安全性、稳定性和智能化管理水平，达到大幅降低系统运行费用的目标。同时契合国家能源利用新标准的指导方向，减少碳排放，实现节能减排目标。目前已在 5、10 号线梨园头车辆段完成推广落地。

#### （3）能源综合管理方面

推动线网能源管理系统平台建设应用，辅助管理人员开展用能决策，预估年度能耗指标降低约 2%。

### 3.5 技术示范情况

#### 案例一：分布式光伏发电技术应用示范案例

（1）深圳地铁 6 号线在 12 座高架车站设置了太阳能光伏发电系统，总装机容量 2.3MWp。

（2）2023 年青岛地铁光伏改造项目计划利用 3、11 号线 2 座车辆段共 8.91 万平方米的闲置库区屋顶建设分布式光伏，同时在古镇口、董家口、瓦屋庄、大田、安顺、胶州北车辆段采用光伏板雨棚形式增设自行车、电动车挡雨棚，满足员工电动车停放与充电（AC220V）的要求，方便员工环保出行。规划总装机容量不低于 8.74MWp。

（3）合肥地铁 1 号线珠江路车辆段分布式光伏发电项目，利用轨道交通 1 号线车辆段闲置屋顶铺设光伏组件，项目设计装机总容量为 2.4 兆瓦，总投资 1100 万元，采用“自发自用、余电上网”模式。

#### 案例二：空气源热泵技术应用示范案例

（1）天津国家会展中心津园宾馆于 2019 年 11 月应用空气源热泵设备，总体节费率在 50%以上。

（2）天津中储陆通物流有限公司于 2021 年 11 月应用空气源热泵设备，总体节费率在 50%以上。

### 3.6 成果转化推广前景

#### 3.6.1 技术推广前景

天津轨道交通大毕庄车辆基地通过综合能源管理平台的运行数据监测利用，使大毕庄车辆基地的供暖舒适性、供电经济性与节能效果均达到既定目标。建成的光伏系统既可满足供暖用电，余电还可满足大毕庄车辆基地设备设施和沿线车站使用。供暖热源系统的使用，减少碳排放的同时大幅降低运行费用，实现了能源的高效运行与能源供需的精准匹配，保障了供热、供电的质量。通过上述探索与实践，为轨道交通车辆基地降碳推广应用提供了数据配比依据，为天津轨道交通运营节能减排工作提供了新的思路。

### **3.6.2 技术推广障碍及应对措施**

轨道交通行业作为耗电大户，受限于行业特点和地理位置，可开发光伏系统建设的范围有限，用能更多依赖于国网供电。在调整能源结构、引入绿色能源、开发应用节能新技术等方面，需要做更多努力。

## 技术 4：天津地铁“风水联动”智能控制系统的研究应用

### 4.1 技术提供方

该技术成果知识产权归天津轨道交通运营集团有限公司、天津安捷物联科技股份有限公司所有。天津轨道交通运营集团有限公司于 2018 年 12 月 5 日正式成立，是以经营天津城市轨道交通线网为主业，集客运服务、行车调度、车辆养护、电力保障、通信信号、机电维管、研发创新、科技咨询、文化传播、项目结建、新线筹备等业务于一体的国有企业，隶属于天津轨道交通集团有限公司。

天津轨道交通线网目前既有运营线路 8 条，运营里程 265 公里，已引入中铁建、中铁、中交建、神州高铁四家社会资本方参与城市轨道交通建设及运营领域，是国内首家地铁存量 PPP 项目及新线 PPP 项目同时开展的城市。目前，天津地铁全天运营时间 16 小时，最短行车间隔 3.5 分钟。天津地铁运行图兑现率和列车运行正点率保持在 99.9% 以上，轨道交通在城市公共交通系统中的骨干作用进一步显现，赢得了广大乘客一致好评。

运营集团积极响应党中央碳达峰和碳中和的重大决策部署，全面开展节能减排工作，制定用能指标，逐级进行用能精细化管理，积极参加行业相关技术交流、开展节能减排项目的应用和推广，包括大毕庄空气热源泵改造，能源管理系统搭建，地铁车站风水联动系统改造等项目。绿色低碳发展是时代的潮流，更是企业的责任，运营集团将继续推进企业的绿色转型，为碳达峰碳中和目标贡献自己的一份力量。

### 4.2 技术成果简介

#### 4.2.1 技术成果名称和领域

该技术成果名称为天津地铁“风水联动”智能控制系统的研究应用，属于交通运输低碳化领域，在保证地铁地下站舒适度的前提下，最大限度减小环控空调系统用电量，进而减少轨道交通碳排放。

#### 4.2.2 技术成果来源

该技术成果由天津轨道交通运营集团有限公司自主研发，作为高质量发展专项工作列入公司生产计划，经费自筹。

### 4.3 技术内容

#### 4.3.1 技术原理及工艺流程

该智能控制系统通过建立风水联动系统管理平台，根据站内外温湿度情况自动调节空调系统各设备运行参数，保证站内温湿度需求的条件下降低不必要的能源消耗。具有对各地下车站公共区的通风空调系统、空调水系统等进行智能监控、节能控制、能耗统计、能耗分析的功能。

##### (1) 系统构成

风水联动控制系统通过网络连接与各子系统连接，实现信息的集成、集中监视、联动控制。系统拓扑图如图 2-4-1 所示。

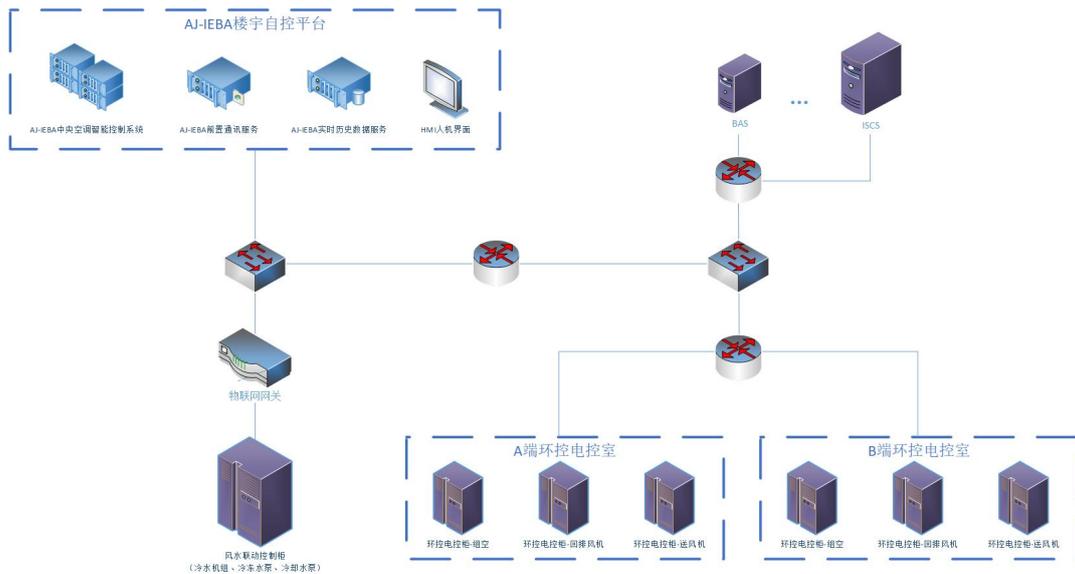


图 2-4-1 系统拓扑

系统主要由计算机、系统软件及网络设备等构成，内置于环控电控室内的“风水联动”智能控制柜。同时，车站综合监控工作站应可实现风水联动控制系统的操作管理功能。

#### ① 变流量智能控制子系统构成

根据空调水系统（冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔等）设备情况，车站变流量智能控制子系统主要由以下设备组成：变流量智能控制子系统控制器，冷水机组及其控制柜冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔智能控制箱柜，现场设备配套控制箱，现场执行设备（各类电动水阀），现场数据采集设备（各类传感器、流量计、电表箱）。其中，变流量智能控制子系统设备与风水联动控制系统（监控平台）通过以太网连接并进行数据传输。

#### ② 变风量智能控制子系统构成

该子系统主要针对车站通风空调的风系统设备进行控制，控制对象主要为大系统中的部分设备，主要由以下设备组成：变风量智能控制子系统控制器，大系统组合式空调机组、回排风机、新风机智能控制箱柜，现场设备配套控制箱，现场数据采集设备（组合式空调机组进出口传感器）。其中，变风量智能控制子系统设备与风水联动控制系统（监控平台）通过以太网连接并进行数据传输。

#### (2) 运行控制策略

系统通过全面采集影响空调水系统设备运行时的各种数据，采用先进的算法和优化控制技术，使空调冷冻水系统始终运行在高效区间，在保证空调水系统在各种负荷条件下，均处于最佳工作状态，从而实现综合优化节能。控制策略如图 2-4-2 所示。

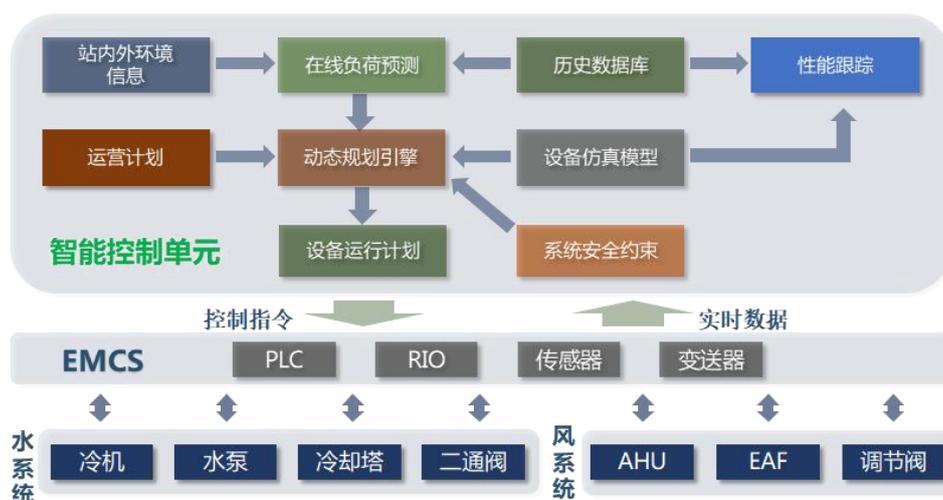


图 2-4-2 运行控制策略

本系统采用新一代的系统架构和人工智能技术，将工业过程控制领域已经得到成熟应用的模型预测方法应用到“风水”系统的优化控制，利用搭建的管理系统规划引擎，全系统、全时段的优化系统运行，空调优化问题分解如图 2-4-3 所示。



### 4.3.2 技术成果适用性分析

- (1) 该技术适用于轨道交通行业地铁地下车站。
- (2) 该技术使用中的不涉及特定条件限制。

### 4.3.3 技术创新性及先进性

(1) 结合北方制冷季短的特点，充分考虑经济性，仅选取车站环控空调系统中用电量最大的大系统（公共区通风空调系统）进行“风水联动”智能控制系统应用，同时主要针对关键的核心设备进行相应的变频改造和调控，其中风系统选取了组合式空调机组、回排风机及对应连锁风阀，水系统选取了冷水机组、冷却泵、冷冻泵、水系统电动二通阀及冷却塔的的风扇启停。与整个车站完整的风水联动系统比节电率降低小于 10%，但初投资费用降低大于 59%。对于制冷季整体节电量不大的北方城市地铁站十分友好。

- (2) 该系统的智能控制单元采用新一代的系统架构和人工智能技术，将工业过程控制

领域已经得到成熟应用的模型预测方法应用到“风-水”系统的优化控制。能够实时跟踪主要设备的性能变化，可对性能明显退化的设备给出维护建议。同时设备的实时性能数据也作为优化引擎的必要输入，系统能根据设备性能差异，系统负荷需求，合理安排各设备的工作计划，达到全系统运行效率最优化。

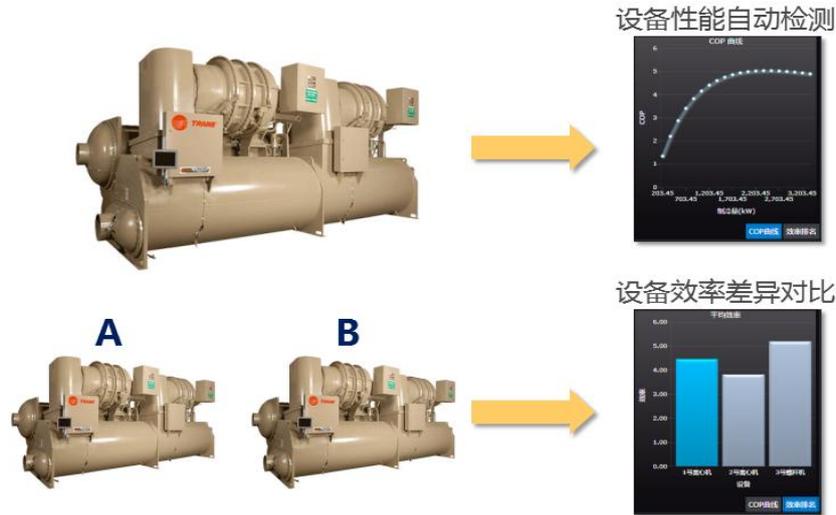


图 2-4-4 设备性能跟踪与检测

#### 4.3.4 其他

在实际测试使用过程中，发现现有风水联动系统在温湿度传感器设置方面存在数量较少，同时安装位置位于站厅站台的侧墙墙壁上，对于温度采集的准确性及稳定性造成一定的影像，因此对于风水联动后期改造在温湿度计精确度、设置数量及安装位置进行了优化。系统新旧版本配置如表 2-4-1 所示：

表 2-4-1 统新旧版本配置

系统比较情况	原始版本	新版本
设备调控情况：		
冷水机组调节	√	√
冷却塔变频调节	√	×
冷却水泵变频调节	√	√
冷冻水泵变频调节	√	√
大系统组空风机变频调节	√	√
大系统回排风机变频调节	√	√
软硬件配置：		
室内温湿度传感器数量	2	7
室外温湿度传感器数量	1	2
水管温度传感器	2	4
算法服务		
冷源 AI 决策模块	节能控制、均衡运行、故障逻辑、	节能控制、均衡运行、故障逻辑、

系统比较情况	原始版本	新版本
	停机策略	停机策略
空调 AI 决策模块	支持扩展、节能控制、分区控制	支持扩展、节能控制、分区控制
通用 AI 决策模块	客流预测、室温趋势、气象趋势	客流预测、室温趋势、气象趋势
数据服务		
实时历史数据库	点位量大	点位量大
大数据 AI 检验	无	支持大数据剔除规则定义

#### 4.4 节能减碳或污染防治效果

系统中主要设备均增设电量表，节电量测试方式为：以 1 天为单位，按常规运行方式（根据车站惯常运行模式，依全线的运行标准执行）和风水联动控制方式（以下简称“风水联动”，由风水联动系统负责所有可用设备的运行）隔天运行，分析常规模式和风水联动模式的运行记录，剔除明显受天气、负荷、维护等影响的样本，计算两种方式下用电能耗的累计值。

目前制冷季站均节电率约为 30%，站均节电量为 165846kWh。制冷季站均减少约 146.66 吨碳排放量，相当于 366.6 亩树林的碳汇量。计算如下：

华北电网排放因子：0.8843kgCO<sub>2</sub>/kWh

行业指标：1 亩树林能吸收 0.4 吨碳

节碳量（吨）=节电量（kWh）\*0.8843/1000=165846\*0.8843/1000=146.66 吨

速生树亩数（亩）=节碳量（吨）/0.4=146.66/0.4=366.6 亩

#### 4.5 技术示范情况

该智能控制系统已于 2021 年至 2023 年先后在天津地铁 5、6 号线共 4 个车站进行应用并不断优化，制冷季站均节电率约为 30%。

##### 案例一：6 号线文化中心风水联动改造项目

###### （1）案例概况

6 号线文化中心风水联动改造项目，为天津地铁 6 号线文化中心的“风水联动”智能控制系统应用案例，改造内容、关键设备见技术内容，2022 年 7 月投入运行时间，2022 年 12 月完成项目验收，包括现场设备安装、运行情况和系统节能率，均符合合同要求，满足项目验收要求，业主天津轨道交通运营集团有限公司，项目负责人联系方式：13803067871。

###### （2）工艺流程及主要参数

工艺流程见技术内容，运行主要包括：冷冻水供、回水温度，冷却水供回水温度，风机运行频率，水泵运行频率；设备性能参数主要包括：冷水机组 COP、系统 COP、冷水机组供回水温差、冷却塔供回水温差。

###### （3）应用效果

文化中心 2022 年制冷季站节电率为 35.54%，2023 年为 30.5%。具体分别详见检测报告。

###### （4）投资和运行成本

改造整体费用为 40 万元，主要包括设备及传感器的采购、安装，系统调试等费用；运行成本：系统寿命按 15 年计算，每年运维费用约 1 万元，从第三年开始每年增加备品备件

费用约 0.17 万元。

## 案例二：天津地铁 5、6 号线“风水联动”智能控制系统试点改造项目

### （1）案例概况

天津地铁 5、6 号线“风水联动”智能控制系统试点改造项目，为天津地铁 5 号线月牙河站、直沽站，6 号线一中心医院站“风水联动”智能控制系统应用案例，改造内容、关键设备见技术内容，2023 年 7 月投入运行时间，2023 年 12 月完成项目验收，包括现场设备安装、运行情况和系统节能率，均符合合同要求，满足项目验收要求，业主天津轨道交通运营集团有限公司，项目负责人联系方式：15522610498（5 号线）、13803067871（6 号线）。

### （2）工艺流程及主要参数

工艺流程见技术内容，运行主要包括：冷冻水供、回水温度，冷却水供回水温度，风机运行频率，水泵运行频率；设备性能参数主要包括：冷水机组 COP、系统 COP、冷水机组供回水温差、冷却塔供回水温差。

### （3）应用效果

2023 年制冷季，月牙河站节电率为 27.91%，直沽站节电率为 32%，一中心医院站节电率为 29.26%。具体分别详见检测报告。

### （4）投资和运行成本

改造整体费用为 144.04 万元，主要包括设备及传感器的采购、安装，系统调试等费用；运行成本：系统寿命按 15 年计算，每年运维费用约 3 万元，从第三年开始每年增加备品备件费用约 0.5 万元。

## 4.6 成果转化推广前景

### 4.6.1 技术推广前景

经过两年的应用和测试，相同天气情况下，整个制冷季风水联动模式较传统模式节能率达到 20%以上，具有良好的节能降耗的效果；二是针对既有线路轨道交通通风空调系统已经投用的情况下，采取了最优的改造方案，即最少的减少原设备系统及接口系统的改造实现了风水联动的功能；三是通过引入一套针对空调“风水联动”全系统的智能优化控制设备，采用人工智能技术和机器学习算法，通过综合监控、BAS 系统的专用接口和协议，与综合监控、BAS 系统无缝集成和协调控制，实现车站通风空调全系统的自适应变负荷优化控制，改变了空调系统粗放管理，设备超负荷运行的问题。因此从节能降耗，设备良好运行，车站内温湿度平稳舒适性以及经济成本设备成本考虑，风水联动具有在轨道交通行业推广的意义，尤其针对既有站进行改造，具有较大的市场前景。

### 4.6.2 技术推广障碍及应对措施

考虑到天津地区夏季温湿度的情况，制冷季约在 3 个月左右，投资回报周期较长。根据地域的不同，制冷季越长的区域，风水联动系统的节能降耗效果，投入产出比效果越好。

## 技术 5：一种能耗在线监测用一体化数据采集终端

### 5.1 技术提供方

赫斯辛克(天津)智能自动化技术有限公司成立于 2016 年 10 月,主要从事自动化设备、能源监测设备、节能环保设备、计算机软硬件技术、机电工程、安防工程等业务。目前公司业务主要涉及自动化仪器仪表定制开发和能耗在线监测系统建设两大部分。其中自动化仪器仪表定制开发部分,以食品级仪器仪表和矿用仪器仪表为主,例如:矿用流量传感器、压力开关、压力传感器、温度传感器、食品级热电阻、无线装置、流量控制仪、温度器等;能耗在线监测系统建设部分,是以重点用能企业能耗在线监测系统建设为基础,同时进行自主研发智能数据采集器及物联网数据采集平台,将自主研发的软件和硬件推广到在系统建设中,为自主研发产品的应用提供了更多的实例,截止到 2023 年底,已完成天津市重点用能企业能耗在线监测系统建设近 50 余家。公司已取得了近 30 项专利且已成功转化,2021 年赫斯辛克被认定为国家级高新技术企业,入选 2023 年服贸会数据孪生优秀案例。

### 5.2 技术成果简介

#### 5.2.1 技术成果名称和领域

技术成果名称:一种能耗在线监测用一体化数据采集终端。

技术领域:碳汇核算及低碳管理领域。

#### 5.2.2 技术成果来源

能耗监测系统以物联网、云计算等先进技术为支撑,实现对重点用能单位能源消费情况的实时监测,提高能源数据的准确性、及时性,实现部门信息共享,为政府部门强化能源管理,企业节能降本增效,社会公众加强节能意识提供基础支撑。2018 年 6 月 11 日,全国重点用能单位能耗在线监测系统正式上线运行,2019 年 9 月 14 日,天津市开始推进全市 328 家重点用能单位能耗在线监测工作,2022 年总书记在二十大报告提出积极稳妥推进碳达峰碳中和,完善能源消耗总量和强度调控,重点控制化石能源消费,逐步转向碳排放总量和强度“双控”制度。能耗监测数据是碳排放数据的主要来源,能耗在线监测是碳排放在线监测的基础。

能耗在线监测系统中数据采集主要来自现场仪表和企业现有数据系统对接,本项目产品正是针对现场电表、燃气表、蒸汽表等能源计量表具进行数据采集的主要设备,目前能耗在线监测项目中仪表数据采集主要由采集传感器、数据处理终端和数据发送终端组成,数据传输分为有线和无线两种方式。目前已成果取得 2 项实用新型专利,1 项软件著作权,具体如下:

(1) 实用新型专利,一种带有防护装置的能耗监测数据采集器,专利号: ZL202120200012.4

(2) 实用新型专利,一种便于携带的能耗监测数据采集器,专利号: ZL202120200021.3

(3) 软件著作权,物联网数据采集平台 V1.0,登记号: 2022SR1114818

### 5.3 技术内容

#### 5.3.1 技术原理及工艺流程

本产品包括中央处理器，中央处理器连接通信芯片，用于获取接口数据；中央处理器上连接有红外信号调制芯片，红外信号调制芯片获取红外数据后发送至红外信号调制芯片；加密芯片连接于中央处理器，用于将中央处理器的接收数据加密，获取加密数据，其中，接收数据包括接口数据以及红外数据；中央处理器连接有通讯芯片，通讯芯片将加密数据发送至接收端。产品工艺流程图如 2-5-1 所示。

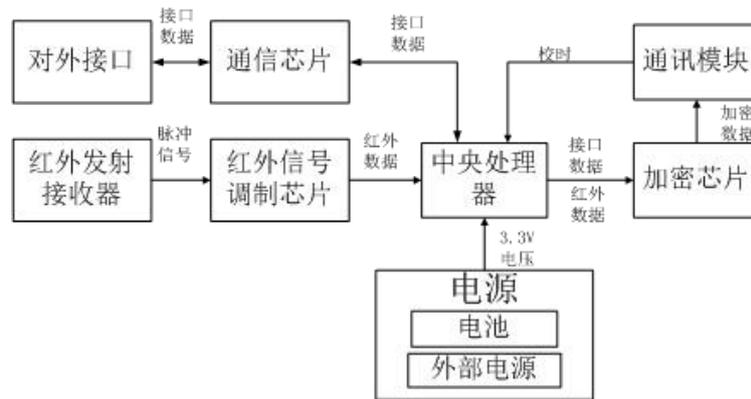


图 2-5-1 能耗在线监测用一体化数据采集终端工艺流程

通过使用通信芯片 485 将电表、燃气表、蒸汽表等的工业数据终端的数据进行采集，485 电平转换芯片，实现 CPU 的 TTL 电平与 RS485 电平的转换，用于设备与外部 485 设备的数据交换。将对外接口对接到数据终端上获取数据表的数据，通过红外信号调制芯片获取具备红外通讯窗口的数据表上的红外数据。在获取接口数据和红外数据后，通过加密芯片 LKT4305-GM 将数据加密然后传递到通讯模块，通过通讯模块将加密数据传输到接收端，并且上传云端。高性能高安全性的国密算法加密产品，持 SM1,SM2,SM3,SM4,SM7 等超高安全等级加密算法，用于用户数据的加解密，保证系统的安全性。

电表采集对准具有红外接口的电表（电表规约 DL/T6451997、2007）即可读取数据，自动识别电表表号；通讯符合标准的 MODBUS 通讯规约的燃气表、蒸汽表、压力温度表均可使用本实用新型进行数据采集。第一次工作先发送命令读取电表的表号，以后根据设定的采集周期到设定时间后发送命令读取电表的相关参数，读取后通过物联网模块把数据发送到云平台并通过基站进行校时。

红外信号调制芯片连接红外发射头与红外接收头，并通过红外发射头与红外接收头获取红外数据。红外信号调制芯片具有红外信号调制与解调的功能，将二进制数字信号调制成 38KHz 频率的脉冲序列，并驱动红外发射二极管以红外光脉冲的形式发送出去；收发器将接收到的光脉转换成电信号，再经过放大、滤波等处理后送给解调电路进行解调，还原为二进制数字信号，经过报文解析后，按照指定格式发送至通讯模块。目前的电表具备红外通讯窗口，本实用新型通过电表的红外通讯窗口获取数据，达到了方便检测的技术效果。

中央处理器连接有电源，电源包括电池以及外部电源。使用电池和外部电源两部分为采

集终端供电，供电电压为 3.3V，保证了采集终端工作的稳定性，并且使用电池可以使采集终端持续工作。

通信芯片为 485 电平转换芯片，将被采集设备的 RS485 的数据采集到本实用新型的采集终端，通讯模块为 NB-IOT 无线通信模组，通讯模块连接有电话卡卡槽。

### 5.3.2 技术成果适用性分析

#### (1) 针对能源监测方向

工业领域：工业生产过程中，需要大量的电力、水力等资源，通过能耗监测系统对这些资源进行实时监测和分析，可以有效地管理和节约这些资源。

商业领域：商业场所如超市、商场等需要消耗大量的电力、水力等资源，通过能耗监测系统对这些资源进行实时监测和分析，可以有效地管理和节约这些资源。

公共领域：公共场所如学校、医院等也需要消耗大量的电力、水力等资源，通过能耗监测系统对这些资源进行实时监测和分析，可以有效地管理和节约这些资源。

(2) 在智慧时代，计算力就是生产力，数据中心作为计算力的承载体,是支撑数字经济发展的核心基础设施。数字化转型已经成为许多行业的趋势，制造业也不例外。数字化转型赋能制造业的高质量发展成为了当今制造业转型升级的重要手段。我们的产品可以应用在数字化转型需求的所有企业，还包括智慧园区、智慧城市等领域。

### 5.3.3 技术创新性及先进性

本产品省去了能耗在线监测数据采集部分的部件，大大减少了现场施工和后期的设备维护成本，可减少项目总费用近一半，本产品的批量使用必将带动能耗在线监测行业的发展，能源在线监测的发展必将加快碳排放监测的快速推进，助力双碳目标的实现。

在线监测这一设想由来已久。早在 1951 年，美国西屋公司的约翰逊针对运行中发电机因槽放电的加剧导致电机失效，提出并研究了在运行条件下监测槽放电的装置。局部放电的在线监测难度较大，数十年来，它的发展一直受到限制。传感器技术、信号处理技术、电子和光电技术、计算机技术的发展，提高了局部放电在线监测的灵敏度和抗干扰水平。近 20 年来,由于压电元件灵敏度的提高和低噪声集成放大器的应用，大大提高了超声传感器的信噪比和监测灵敏度，使其得以广泛用于局部放电的在线监测。20 世纪 80 年代以来，我国的在线监测技术也得到了迅速发展，相继研制了不同类型的监测装置。

随着人工智能和大数据技术的不断发展，能耗在线监测系统将会越来越成熟和普及。

目前，能源在线监测达到了 1、智能分析、智能诊断，实时节能优化，2、支持多类型能源介质，全局系统监测，3、快速部署，实现厂区、跨地域的能源综合管控，4、按需选配，支持定制和平台对接，技术已经非常成熟。

未来，我们可以预见到它将会在更广泛的领域得到应用，例如城市能源管理、家庭节能等等。相信在不久的将来，我们的生活将会因为这一系统变得更加环保、高效和智能。

### 5.4 节能减碳或污染防治效果

企业耗能数据是作为企业进一步节能减碳的数据基础，将企业的用能数据通过本技术成果进行采集，通过对现场仪表（电表、燃气表、蒸汽表、水表等）数据的采集，将数据对接

传入至能耗在线监测系统或企业内部数据管理平台中,实现企业内部对耗能数据的实时跟踪及分析,进一步分析出高耗能产线,从而以耗能数据作为依据,进行针对性的设备改造或技术革新,优化产业设备,最终达到节能减碳的效果。

本产品批量使用必将带动能耗在线监测行业的发展,能源在线监测的发展必将加快碳排放监测的快速推进,助力双碳目标的实现。

### 5.5 技术示范情况

该产品已应用到重点用能企业,涉及汽车制造、电力、钢铁、石油、化工、有色金属等行业;已服务的重点用能企业有:中芯国际集成电路制造(天津)有限公司、天津中玻北方新材料有限责任公司、中粮佳悦(天津)有限公司、天津敏信机械有限公司等;在数据采集上,已实现对电、燃气、蒸汽、水能源消耗采集。实现精准对接,实时数据上传。

#### 案例:企业用能数据接入用户指定平台建设

##### (1) 案例概况

用户名称:天津敏信机械有限公司;

项目内容:安装 11 块采集器(蒸汽、水、燃气)并将数据对接至指定平台;

项目建设时间:2023 年 4 月-5 月。

##### (2) 主要参数

产品采用一体化设计,体积小;

可采集多种能源计量表具:电、燃气、蒸汽、水;

采集接口多样:红外通讯和 RS485 通讯;

数据传输安全可靠:内嵌高性能高安全性的国密算法加密芯片,支持 SM1、SM2、SM3、SM4、SM7 等超高安全等级加密算法;

精准性:通过对采集到的数据进行分析 and 处理,能够得出更加准确的能源使用情况,为能源管理提供更加精准的数据支持;

安装简单,免布线:红外采集用 3M 双面胶直接与控制箱玻璃门粘接、电池供电、无线数据传输,不用现场布线施工;

后期维护简单方便:高性能锂电池可保证至少一年使用,期间免维护;

环保节能:通过合理利用能源,避免浪费,达到环保节能的目的。

##### (3) 应用效果

本产品省去了能耗在线监测数据采集部分的部件,大大减少了现场施工和后期的设备维护成本,可减少项目总费用近一半,本产品的批量使用必将带动能耗在线监测行业的发展,能源在线监测的发展必将加快碳排放监测的快速推进,助力双碳目标的实现。

(4) 投资和运行成本如表 2-5-1 所示。

表 2-5-1 投资和运行成本

类别	单位	数量	预算金额(万元)	人员	开发时间
采集器软硬件开发	项	1	30	3	8 个月
外壳磨具	套	1	8	2	2 个月

类别	单位	数量	预算金额（万元）	人员	开发时间
数据采集平台开发	项	1	40	4	10个月
云空间费用	年	3	2	1	60个月
小批量试制	块	500	20	6	12个月

## 5.6 成果转化推广前景

### 5.6.1 技术推广前景

目前，该技术成果已在天津市 402 家重点用能单位中应用 50 家，并且随着企业能耗系统的建设，会应用至更多的企业中，市场预测分析如表 2-5-2 所示：

表 2-5-2 市场预测分析表

年份	2023 年	2024 年	2025 年
每年新增企业数量	50	50	50
重点用能企业数量	150	200	250
新增采集点位数量	1500	3000	8000

该技术成果通过现场应用，可为企业提供能源消耗数据的实时监控，对用能数据的掌握，有利于企业进一步实现节能减碳。

### 5.6.2 技术推广障碍及应对措施

（1）知识产权风险：项目实施后，可能会遇到产品被仿制、专利被侵权的情况，对此我们将采取以下措施：

加大研发力度，缩短技术和产品更新周期，成立技术研究中心，不断研究新工艺、新技术，为深海探测，开采，维修工作做出更多的贡献。

加强知识产权保护，自有技术产权与职工签订保密协议，专利技术保护通过营销队伍调查侵权事实，提取证据，通过法律程序解决。

（2）技术风险：技术人员技术和业务掌握程度不够、以及技术难题攻关是本项目主要面临的风险，具体如下：

技术开发人员存在正常的流动，这种流动对一个正在开发的项目或多或少都会产生一定程度的影响。首先在项目过程中尽量保证主要骨干人员之间的稳定，可以通过签订合同、调整待遇、增加提升机会等多种手段来保证。其次在项目开发过程中要遵循企业开发规范，执行文档规范和项目阶段性评审要求，使技术人员的技术思想及时采用书面形式保存归档，加之我们的主要技术人员是公司的股东，一般不会流动，这样即使发生一般人员流动也不至于使整个项目中断或重新开始。公司目前拥有国内著名的行业专家，有着二十多年的设计经验，在国内的同行业中，我们的技术处于领先水平。

技术难题攻关，项目实施都或多或少的存在主要攻关的技术难题。这些技术难题中有些是在前期已经预见到的，则在系统规划初期即进行可行性研究，在确定可以突破后再组织实施。本公司拥有国内一流的行业专家和一支勤于研究、实践的高素质团队，他们的专业水平、奉献精神 and 协同研发的能力，为产学研结合之路提供了坚实的基础，也对本项目产品的开发

实施奠定了技术保证。在他们的带领和指导下，研发人员已熟练掌握项目工艺、技术等工作。因此，该项目的技术实现应无风险。

公司建立了完备的管理制度，做到全程监控、实时管理、高效管理，用现代化管理方式和手段严格保证公司的良好运行。在生产过程中将全面推行质量管理，实施质量保证体系，保证项目产品实施中的稳定生产。

## B、生态环境保护技术

### 技术 6：城市更新和新农村建设中的雨水速渗路径和生态收储技术

#### 6.1 技术提供方

天津城建大学是天津市属普通高等学校，以“发展城市科学，培育建设人才”为办学宗旨，秉承“依托行业，强化特色，质量为本，追求卓越”的办学理念，践行“重德重能、善学善建”的校训精神，立足天津、面向全国、放眼世界，服务新型城镇化和城市现代化进程。近五年，获批国家级科研项目 138 项，省部级科研项目 325 项；年均科技经费 1 亿元左右；获得省部级以上科技奖励 48 项。有 4 个省部级重点实验室，1 个国家工程中心、9 个省部级工程中心等科技平台 18 个；出版学术著作 50 余部；发明专利授权 129 件。

天津城建大学在软土特性与地下工程、结构安全与防灾减灾、水处理与环境治理、历史建筑保护与城市更新、绿色建筑与建筑节能、城镇化与新农村建设等领域取得了一批标志性成果，在天津市处于领先地位。近 5 年来承担了大量科技服务工作，主持完成了天津站交通枢纽工程、天津文化中心工程、滨海新区围海造陆工程等重大科技项目，为天津市发展提供了科技支撑。已经形成了城市规划、城市建设、城市管理三大学科群，分别对应城市建设与发展的三个阶段，正在形成和发展的其它四个学科群是：生态城市、智慧城市、城市经济、城市文化学科群。其中生态城市、智慧城市学科群服务于中国新型城镇化发展需求；城市经济、城市文化学科群完善了学校学科体系，围绕城市科学构成了较为完整的城市学科体系。

#### 6.2 技术成果简介

##### 6.2.1 技术成果名称和领域

技术成果名称：城市更新和新农村建设中的雨水速渗路径和生态收储技术。

技术领域：城乡建设绿色低碳、水污染防治与水生态修复。

##### 6.2.2 技术成果来源

(1) 国家自然科学基金(51178290)，“非饱和土的强度指标与其低维合成微结构参数的统计关系及机理研究”。经费 60 万元。项目主持人李顺群。执行时间 2012.1~2015.12。

(2) 天津市重点研发计划科技支撑重点项目(19YFZCSF00820)，“适用于天津建成区的海绵城市建设关键技术研究”。经费 50 万元。项目主持人李顺群。执行时间 2019.04~2022.03。

(3) 相关知识产权

全国建设行业科技成果推广项目 1 项-砂石渗透井，地表径流入渗工程，证书编号 2021058。

高分子材料管状渗井及施工方法[P]. ZL201610973457.X。

- 角度取土装置及其操作方法[P]. ZL201610614352.5。
- 一种用于增大雨水下渗量的钢纤维混凝土透水砖[P]. ZL201820864933.9。
- 一种具有高透水性滤芯的水平联络通道[P]. ZL201921562144.0。
- 一种嵌套式海绵城市芯柱体[P]. ZL201921774465.7。
- 一种具有反滤功能的复合渗透芯柱体[P]. ZL201921774440.7。
- 一种测试滤芯渗透性能的装置[P]. ZL201921250052.9。
- 一种适用于海绵城市建设的净水绿化装置[P]. ZL201920328015.9。
- 用于增大地表水下渗量的装配式渗井[P]. ZL201621169015.1。
- 粉煤灰陶粒雨水渗井[P]. ZL201720447146.1。
- 以既有地层作为蓄水海绵体的地下水库[P]. ZL201621168888.0。
- 具有横向和竖向渗流通道的海绵城市建设装置[P]. ZL201820796799.2。
- 实用新型专利：适用于海绵城市建设的强透水砖[P]. ZL201820300893.5。
- 基于正十二面体的三维应力状态测试装置及操作方法[P]. ZL2016106232.64.1。

### 6.3 技术内容

#### 6.3.1 技术原理及工艺流程

雨水在土层中由上至下渗透时**具有速度慢、效率低**等特点，往往难以下渗。采用滤芯渗井作为竖向通道，让雨水由地表流至渗井后再向四周渗透，能大幅度提高下渗效率。①大幅度增大雨水下渗面积；②变串联渗透为并联渗透，能充分利用粉黏层、粉砂层、砂层良好的渗透性；③大幅度缩短渗透路径，缩短雨水到达非饱和土层孔隙需要的时间；④滤芯渗井布置在透水地面/路面/雨水花园/下沉绿地/旱溪之下，能通过透水层和反滤层顺利实现上下衔接和协同。

以**非饱和土层孔隙作为雨水收储空间**，储水能力巨大。以地下水位深 2 米为例，若孔隙比为 0.5（较常见值偏小），则每平米储水可达 0.6m<sup>3</sup> 左右。我市的年降水量一般不超过 600mm，若将其一次性全部储存于土层中，理论上也是可行的。考虑降雨前土层已有一定含水量和全年降雨并非一次到达地面正反两方面的影响，将雨水储存于土层孔隙的方案是可行的。

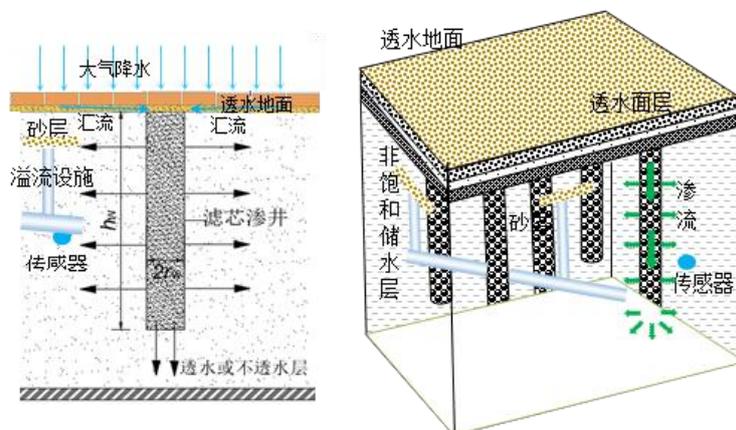


图 2-6-1 技术原理和施工流程

### 6.3.2 技术成果适用性分析

降水量的季节分配不均和用水量的相对稳定,导致天津内涝和缺水并存的结构性问题严重。以2022年为例,全市平均降水584.7mm,降水总量69.69亿立方米,比多年平均值567.1mm偏多3.1%。全市地表水资源11.0242亿立方米,比多年平均值10.1703亿立方米偏多8.4%。地下水资源6.7863亿立方米,比多年平均值5.7756亿立方米偏多17.5%。即便如此,2022年与2021年相比**全市地下水位依然呈下降趋势,全部为下降区和相对稳定区,平均下降0.44m,蓄水量减少0.8936亿立方米**。其中下降区(下降0.5m以上)面积占34.3%,水位平均下降0.81m,相对稳定区(下降小于等于0.5m)面积占65.7%,水位平均下降0.24m。

显然,如果所有降雨都能得到合理利用而**不是当作内涝水和城市积水排除**,即使没有南水北调和引滦入津等外来水资源,地下水也可实现供大于求或供求平衡,不致出现地下水位下降现象,满足生活、生产、生态用水更应该不成问题。可见,天津缺水的原因很大程度上在于**水资源自然供应的结构性失衡**,即夏季的大量降水不得当作内涝水和积水排除掉而不是加以有效储存。

### 6.3.3 技术创新性及先进性

(1) 雨水下渗速度快:采用滤芯渗井+表层模式+外排模式复合方案,能提高雨水下渗效率120倍以上。

(2) 不影响地面其他功能:滤芯渗井是一种埋置于浅部土层的竖向渗水构件,埋设之后即可铺设透水砖、透水路面,设置雨水花园、下沉绿地等表层设施,不影响地面其他使用功能。

(3) 综合效能强:能消纳85%以上的年降水量。既可消除城市积水或消减城市内涝程度,又可补充地下水即将雨水作为资源储存在土层中以备生态生活之用。

(4) 维护方便:若某个滤芯渗井无法正常工作,雨水会自动通过透水砖和砂层或其他水平通道转移至附近其他滤芯渗井中入渗。另外,可随时替换或在附近重新设置滤芯渗井以替换损坏渗井。

(5) 成本低、工期短:在地面钻孔,孔内放置渗透性滤芯,再铺设砂层即可。具有造价低、工期短优势。

(6) 对环境影响小:在地面钻孔,孔内放置滤芯即可,不用大面积开挖,不改变地形地貌,不产生泥浆等副产品。

(7) 绿色环保:可采用废弃混凝土生成的粗骨料和细骨料制作滤芯,具有绿色、环保、废物资源化利用等特点。

(8) 具有自洁净功能:以透水砖(透水混凝土路面)、土工布、反滤砂石、滤芯渗井为主要特色的雨水下渗和收储模式,具有过滤与自洁净功能,可实现地表水与地下水的生态联络。

(9) 协同性强:滤芯渗井与透水路面、雨水花园、下沉广场等表层模式和下水管网外排模式组合应用,具有可充分利用已有成熟技术的优势。

(10) 低碳生态:以浅部非饱和土层作为储水空间,不需要任何人造储水设施,且储水

量巨大。以孔隙比 0.3、非饱和土层 2 米计，每百平米储水量达 46m<sup>3</sup>。

(11) 适用性广：只需钻孔下放滤芯即可，占用空间小。适用于城市更新尤其是老旧小区、老旧厂房、老旧街区和城中村更新中的地表建设改造。

#### 6.3.4 其他

该技术集雨水消纳、地下水补充、生态治理、建筑垃圾再利用于一体。能消减内涝时间 55%以上，消减积水深度和积水面积 65%以上。运行期间只需进行透水地面和常规景观维护，维护费用约为传统方法的 35%。该技术可广泛应用于城市建设、城市更新（老旧小区、老旧厂房、老旧街区、城中村改造）和新农村建设。

#### 6.4 节能减碳或污染防治效果

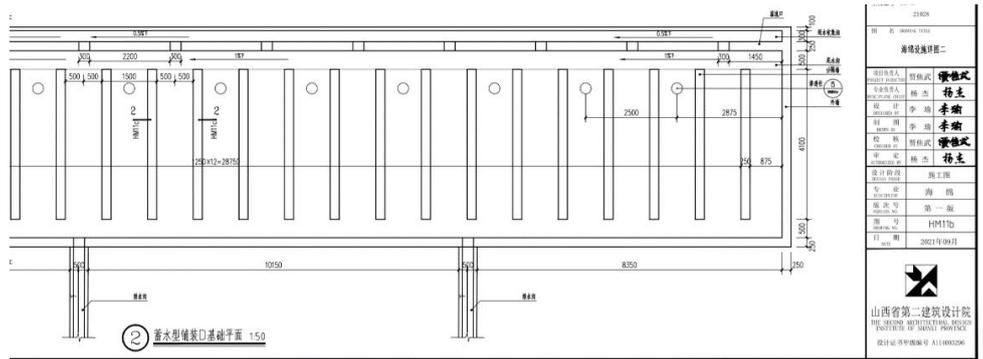
(1) 增大雨水下渗面积 30~100 倍：滤芯渗井是一个圆柱体，当水沿滤芯半径向四周土体渗透时，其有效渗透面积等于柱面和截面面积之和，如图 1 所示。可见，设置滤芯渗井后渗透面积大幅度增加。

(2) 改善渗流状态，缩短渗流路径：浅层土具有明显的成层性，其水平渗透系数往往是竖向渗透系数的 3~8 倍。设置滤芯渗井后，雨水由从地表向下渗流改为从滤芯柱面沿径向水平直接进入深部土层。一方面，渗流路径能缩短 70%以上；另一方面，改串联渗流为并联渗流，渗流模式得到了显著优化，渗透效率明显提高。

(3) 以土层孔隙作为雨水收储空间，低碳生态：天津地区地下水位在 2 米左右，土的孔隙比在 0.35~0.65 之间。据此得到每平米土层储水能力在 0.6m<sup>3</sup>~0.8m<sup>3</sup> 之间，而本地区的年降水量约为 500~600 毫米。即使将全年降雨量一次性储存于土中，也能满足储存容量要求，且地表不会出现积水现象。由此可见，该方案不需要专门储水存水设施。另外，将雨水储存于土层中，低碳生态，是真正意义上的海绵化。

#### 6.5 技术示范情况

相关技术已经应用于天津、合肥、长治等地的老旧小区改造。图 2-6-2 为应用于山西长治维特小区改造项目实况，图 2-6-3 为应用于武清黄庄工业园改造项目。



(a) 施工图一角

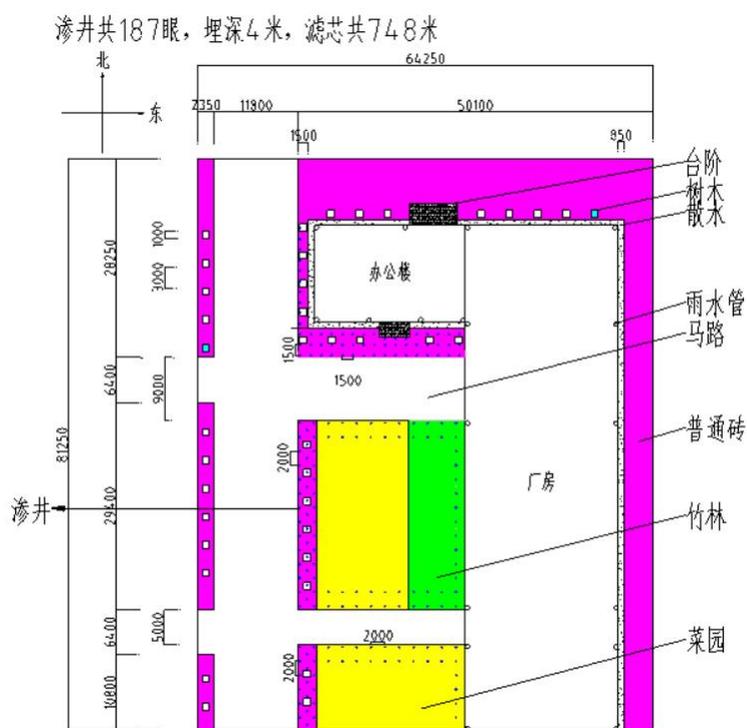


(b) 施工现场 1



(c) 施工现场 2

图 2-6-2 山西长治老旧小区改造项目



(a) 平面布置



(b) 施工现场



(c) 改造后效果

图 2-6-3 天津武清工业园区老旧厂区改造

## 6.6 成果转化推广前景

### 6.6.1 技术推广前景

随着社会的发展和水平的提高，城市用水量越来越大。华北地区先前较丰富的水资源在经济过热时代被大量开采，平衡的水生态环境面临失衡风险。本技术集入渗材料选取、入渗装置制备、监测装置开发、水生态建设为一体，可直接应用于老旧小区、老旧厂房、老旧街区和城中村更新改造和内涝积水治理、水生态建设以及雨水收储。在水害频发和水资源日益紧缺的今天，具有广阔的前景。

本技术可应用于具有相似气候条件、地质条件的整个华北平原，涉及京、津、冀、鲁、豫、皖、苏等约 100 万平方公里。目前，为解决水资源短缺问题，本地区建有南水北调东线、中线工程，引滦入津工程、海水淡化工程等，但仍难以满足日益增长的水资源需求。将夏季过多的降雨收集储存于土层中，可大大延缓或缓解地下水过度开采导致的地面沉降、地裂缝等生态问题。市场容量巨大，前景十分广阔。

表层模式消纳内涝积水能力有限；外排模式在遭遇强降雨时又很难满足社会期望。通过在老旧小区、老旧厂房、老旧街区和城中村工程示范，可进一步彰显本技术在消除城市内涝积水、涵养地下水资源、生态修复中的强大普适性，有望占有 10%以上市场份额。

### 6.6.2 技术推广障碍及应对措施

内涝积水整治和水生态修复是一项公益事业，必须在政府主导下才能完成，由此导致该技术在转化和推广过程中面临资源和资本制约。为此，天津城建大学已经与中国市政华北院、天津市政府就雨水速渗路径和生态收储技术开发合作与知识产权等问题达成了协议，在后期科研项目和生产项目中共同推动该技术应用落地。

## 技术 7：基于无人船的海草床观测系统

### 7.1 技术提供方

#### (1) 单位性质及主营业务范围

国家海洋技术中心创建于 1965 年，是隶属于自然资源部的事业单位。主要职能和基本任务是从事国家海洋技术研究、开发应用及成果转化，为全国海洋技术发展实施业务指导，为国家海洋规划、海洋管理、公益服务及海洋安全提供技术支撑。

#### (2) 近三年经营情况

在单位各项业务科研活动中，中心强调依法经营、合法经营，未参与任何有违国家法律法规的经营行为。中心高度重视保密工作，建立完善的保密管理体系，制定了全面的保密管理制度，严格按照国家保密管理规定开展业务科研工作，多年来未发生重大失密泄密事件。建立了安全生产规章制度，严格按照制度执行，并组织进行定期检查，未发生过安全生产事故和人员伤亡事故。近三年主要经营指标平均数额如下：资产总额 38930.05 万元，负债总额 6532.77 万元，净资产 3239.28 万元，收入总额 19376.32 万元，社保缴纳金额 1345.79 万元，纳税额 412.22 万元，资产负债率 16.32%。

#### (3) 生态环境领域技术工作情况简介

在国家 863 计划、国家自然科学基金、海洋公益性行业科研专项、国家重点研发计划等科研项目支持下，国家海洋技术中心自主研发了海洋生态监测专用无人船、海草床水下监测系统、多参数水质仪、营养盐自动分析仪、BOD 分析仪、硝酸盐传感器等多项科研成果，形成岸基在线监测系统、船载在线监测系统、海洋生态浮标、坐底式在线监测系统等适用于不同场景的集成监测系统，同时开展海洋生态在线监测装备体系构建方法的研究，为开展区域性综合监测奠定了基础。相关技术成果在我国北、东、南海区多个海洋站、近岸海域和监测船上开展了示范应用，取得了很好的成效。

### 7.2 技术成果简介

#### 7.2.1 技术成果名称和领域

技术成果名称：基于无人船的海草床观测系统。

技术领域：碳减排技术。

#### 7.2.2 技术成果来源

##### (1) 技术成果主要项目来源

自然资源部项目：新型海洋观测技术业务试运行，C1230YJ07，120 万

工业和信息化部项目：2022 年自然灾害防治技术装备工程化攻关专项，TC220H02F，1440 万

河北省自然资源厅项目：河北省赤潮快速处置技术装备应用示范，ZZHJT-2022-073，109 万

##### (2) 已获得授权的同类型发明专利

一种基于无人艇的多海湾区域路径遍历方法及系统，ZL202010395859.2

无人船在地形复杂海域遍历监测中路径优化方法及系统，ZL202110425542.3

一种储水罐、多点位自动采水装置及方法，ZL202210720189.6

一种基于无人船的地波雷达方向图测量方法，ZL202211002308.0

### 7.3 技术内容

#### 7.3.1 技术原理及工艺流程

##### 技术路线

基于无人船的海草床观测系统利用无人船的优势弥补传统人工对海草床生态系统观测的局限性，从而达到对海草床生态系统的实时监测及保护。技术路线如下：

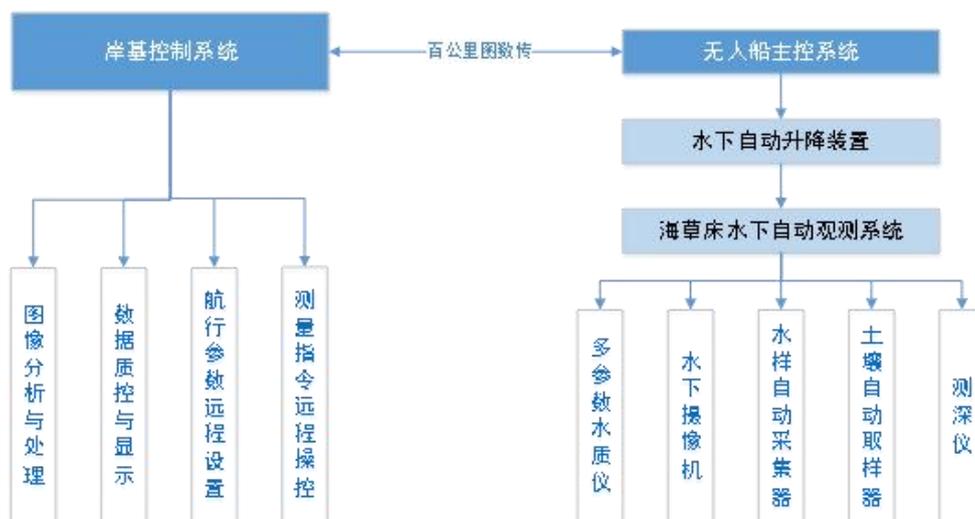


图 2-7-1 技术路线图

利用无人船在海洋观测领域的优势进行海草床生态系统的自动观测，将水质监测、视频图像采集、水样土样采集等工作全流程自动化，并可在岸基通过远程操控自动实现。该技术可有效改善传统人工观测在工作效率、危险系数、环境限制等多方面的局限性，为海草床生态系统的监测带来新技术和新方法。

##### 技术方案

根据研究内容，制定技术方案如下：

#### (1) 海草床水下自动观测系统

海草床水下自动观测系统由无人船主控系统和测量装备构成，其中，测量装备包括多参数水质仪、水下摄像机、水样自动采集器、土壤自动取样器和测深仪组成。

海草床水下自动观测系统通过岸基系统、船基系统以及水下各设备的协同工作，将海草床生态系统的观测由人工转为无人船，采用先进的技术手段弥补传统观测方式的不足。

##### ① 系统组成及功能

海草床水下自动观测系统是整个海草床观测系统的前端，其组成及工作流程如下图所示：

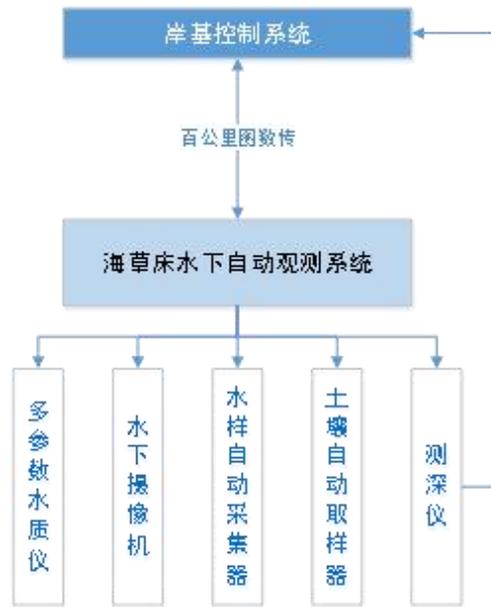


图 2-7-2 海草床水下自动观测系统

在本系统中，测深仪作为海草床水下自动观测系统工作的指导输入端。在到达工作区域后，首先开启测深仪，无人船按照测深仪的实时数据下放水下装置，使得多参数水质仪、水下摄像机、水样自动采集器以及土壤自动取样器等设备到达指定深度，并开始工作。

在各设备协同工作的过程中，依靠图数传系统实时与无人船岸基系统进行数据及指令的交互，确保无人船及船载设备处于岸基控制系统的掌握中，同时，测量数据实时发送到岸基并进行数据的质控、可视化等进一步应用，充分保证数据的有效性和实时性。

## ② 信息交互及系统控制

由于无人船平台工作的特殊性，与人工观测不同，在海草床观测作业现场无人值守，这就要求无人船海草床观测系统中充分做好岸基控制系统与船体平台及船载设备的信息交互，保证船体平台及船载设备状态正常，从而保证数据质量及有效性。本系统中岸基控制系统与船体平台及船载设备的信息交互主要包括：设备自检（主动自检、被动自检）、心跳、启动、停止、上下电控制等。

在设备预备工作时，岸基控制系统通过用户界面向设备发送“自检”指令，船载设备进入“被动自检”模式并回复自检结果。在收到设备的自检回复并一切正常后，岸基控制系统方可下达“启动”指令，船载设备开始工作。工作过程中，实测数据及视频图像信息实时发送到岸基控制系统，经过数据质控后进行进一步应用。根据实测数据可分析现场的测量情况，当判断测量任务结束时，岸基下达“停止”指令，船载设备随即结束工作。

除岸基控制系统向船载设备下达的被动自检指令，船载设备还需要定期主动自检并将结果发送到岸基控制系统，使得岸基实时掌握船载设备的状态，以及时发现问题并采取措施。另外，船载设备与岸基控制系统之间还需保持“心跳”信号，心跳信号相比于自检信息要简单得多，只需要保持通信，以证明船载设备实时在线，故心跳信号的发送频率相比于自检信号要频繁很多。

如果某些设备在接下来比较长的时间里无工作任务，岸基控制系统可发送“下电”指令，暂时切断该设备的电源，以节省船电。待有测量任务时可发送“上电”指令将该设备重新上电，保证其正常运行。在出现异常情况时，例如船载某设备收不到心跳信号或自检信息，亦可尝试采用“下电”、“上电”等操作使其强制恢复工作。

信息交互与系统控制工作流程如下图所示：

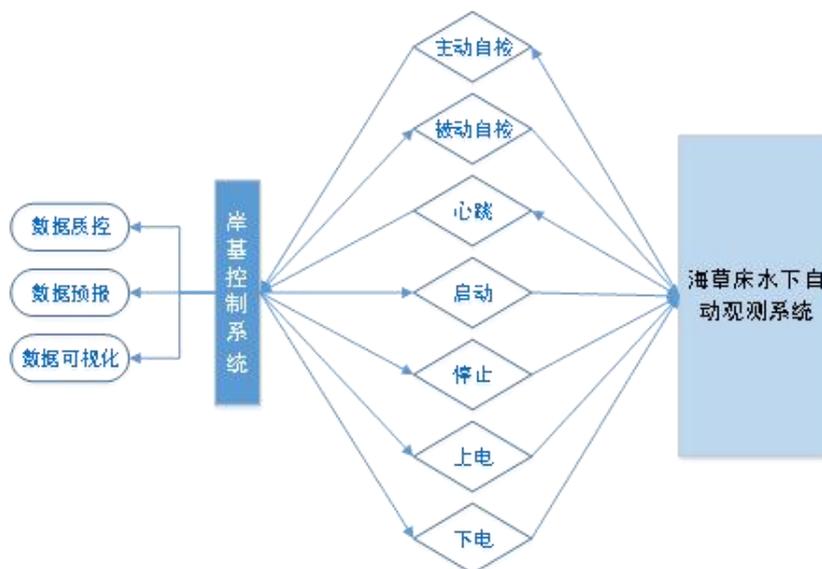


图 2-7-3 信息交互及系统控制

鉴于无人船测试平台的特殊性，岸基系统与船体平台和船载设备之间的信息交互与系统控制显得尤为重要，在无人值守的情况下，使得船体及设备远程可控，从而保证观测作业的顺利进行，并且保证观测数据的正确有效。

### ③ 工作状态及工作参数设置

同信息交互与系统控制一样，船载设备的工作状态及工作参数也需要由岸基控制系统根据任务需求远程设置。

在海草床生态系统的观测过程中，根据任务需求的变化，可能需要对船载设备的工作状态以及工作参数进行设置，以适应新的观测任务。由于无人船平台观测的特殊性，工作状态及工作参数设置的指令包括：设置指令及应答两种。每次进行设置操作后，需要等到设备的应答回复后才可确定设置成功，并且，应答回复的指令内容应重复设置参数信息。

以设置“测量周期”为例，岸基控制系统发送某船载设备的测量周期为“10s”，该设备收到指令并成功执行，随即回复应答信息，该信息里应包括“周期 10s”的内容，以对设置指令的进一步确认。

工作状态与工作参数设置流程如下图所示：

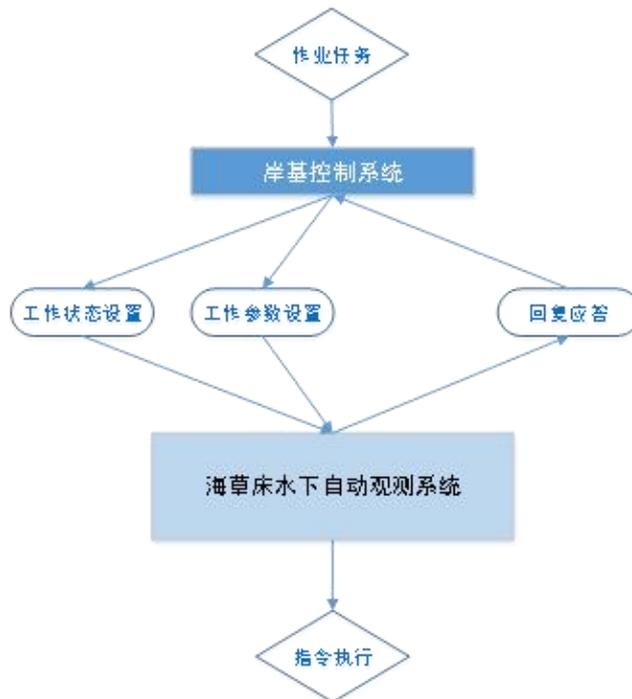


图 2-7-4 工作状态与工作参数设置

需要注意的是，岸基控制系统向船载设备发送的工作状态与工作参数信息与应答回复进行必须一一对应，为保证信息通畅，岸基控制系统应在船载设备应答后方可继续发送下一条设置指令，不可快速连续发送，以免造成信息拥堵从而导致对整个系统带来不可估量的影响。

## (2) 无人船载水下自动升降装置

无人船载水下自动升降装置是转为水下设备而设计的独立模块，可根据任务需求安装或拆卸。无人船载水下自动升降装置由缆绳牵引，由电机远程控制。任务中需要入水的设备安装于升降臂前端的平台上，执行任务时升降臂下放，任务结束时升降臂上升，一方面减少水流对设备的冲击，避免损失，另一方面也减少了行进过程中船体的阻力。

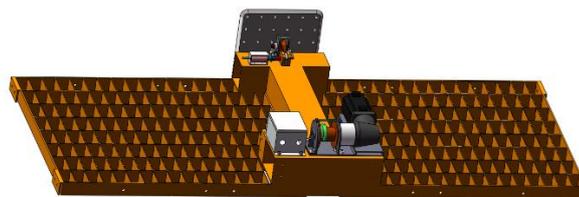
无人船载水下自动升降装置位于底板最前端（安装位置示意图如图 2-7-5 所示），一方面为了船体前后配重（电池箱在底板最后端），另一方面为了搭载设备后，升降臂运行过程中空间使用方便。



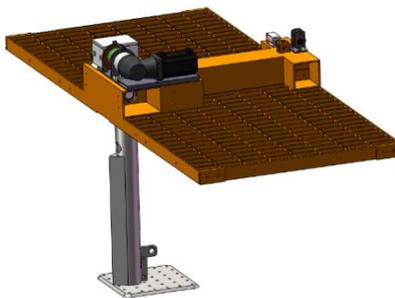
图 2-7-5 无人船载水下自动升降装置安装位置示意图

上图是无人船载水下自动升降装置完全升起后的示意图。其末端的平板是水下设备安装的平台，根据每次试验任务，将搭载不同的水下设备进行具体任务的测量。该型无人船载水下自动升降装置在实验室环境下搭载能力为 100kg。

无人船载水下自动升降装置臂长约 80cm，入水深度约 60cm，满足生态环境监测需求。如图 2-7-6 所示为无人船载水下自动升降装置升降的示意图，其中图 2-7-6 (a) 为升降臂完全升起时的状态示意图，图 2-7-6 (b) 为升降臂完全降下的状态示意图。



(a) 无人船载水下自动升降装置升起状态示意图



(b) 无人船载水下自动升降装置下降状态示意图

图 2-7-6 无人船载水下自动升降装置升降示意图

升降臂的首末端均有一个电磁控制阀，当升降臂完全升起时，末端电磁阀打开，将升降臂及其搭载的设备固定在无人船的底板上；当升降臂完全放下时，起始端的电磁阀打开，将升降臂保持竖直状态，以保证其搭载设备在工作状态的稳定性，从而保证测量数据的准确性和有效性。

若试验任务不需要水下装置，则可替换该底板，将其替换成普通模式，简化船体的装置。

### (3) 海草床生长情况图像处理系统

海草床属于比较脆弱的生态系统，对外界条件的要求比较高，很容易受到外界环境的影响，围填海、港口建设、挖沙及破坏性的渔业捕捞等人类活动，严重危及海草的生存。陆源养殖、工业、生活排污等，也会影响水体和底质，引起海草床的退化。对海草床的密度、覆盖范围等情况进行实时监测，及时发现对其有害的影响，对保护海草床具有非常重要的意义。海草床生活于近岸海域或滨海河口区水域中，被认为是在演化过程中再次下海的植物，其生长环境导致对其生长情况的监测异常困难。传统方式一般是雇佣潜水员下水进行监测。这种方式具有非常大的局限性：首先，实施难度大，经费支出高、监测频率严重不足；其次，受周边环境、天气等因素影响，监测区域和时间受限；再次，每次作业的人员不固定，对海草床的生长情况描述有出入，从而导致无法掌握真实的数据。

通过水下摄像机、测深仪等设备协同工作采集的海草床的图像、视频数据实时发送到岸

基，在岸基控制系统对上述数据进行图像处理及分析，可获取到海草床的面积、种类、盖度、茎枝密度、茎枝高度、生物量等参数。通过上述参数，可实时掌握海草床的生长情况，并通过与历史数据的比对分析，及时发现对海草床的生长造成危害的情况，并采取相应措施，从而达到对海草床生态系统进行保护的目的。

根据海草床的分布情况，对无人船的行驶路径进行规划，无人船启动自主航行模式，运用高精度的航线保持技术沿规划路径航行，在航行的过程中通过水下摄像机实时获取对应地点的图像、视频数据并发送到岸基，从而达到对海草床生态系统进行观测是目的。

无人船路径规划及获取的图像信息如下图所示：



图 2-7-7 青岛栈桥海域海草床实时视频资料

海草床生长情况图像处理系统需要依靠无人船的自主航行技术及高精度巡线技术实现，另外，无人船航行的稳定性及海况适应能力也是保证该系统数据有效性的关键因素。

#### (4) 无人船海草床观测技术试应用

在本项目研究的最后，将近海有海草床生长的区域进行无人船海草床观测试应用，从工作效率、环境因素限制、数据有效性和连续性多方面进行比对，充分体现无人船在海草床生态系统观测领域的优势，同时通过实地应用总结不足，以待后续改进。

无人船海草床观测技术试应用主要包括以下几个方面：

##### ① 工作效率

选择一片固定的海草床海域，利用无人船对海草床进行观测，通过完成的工作时间计算工作效率，从而判别无人船海草床观测的优劣。

##### ② 环境因素限制

选择多种典型海草床生长海域，例如河流入海口、多海湾区域、浅滩暗礁海域等，判断环境因素对观测方式的限制，体现无人船在海草床生态系统观测中的优势。

##### ③ 数据有效性和连续性

通过多次试验，查看无人船对海草床观测的数据和人工观测数据，通过比较数据的有效性和连续性，判断无人船观测的适用性。

##### ④ 水下目标识别的准确率和效率

通过无人船在海草床观测中获取的图像和视频资料的识别，与人工识别进行比较，在识别的准确率及识别效率两方面进行比对，体现无人船观测的优势。

### 7.3.2 技术成果适用性分析

(1) 技术成果适用的行业和具体领域：基于无人船的海草床观测系统适用于海草床生

态环境的监测及保护，包括海草床生长环境的周期性巡查巡视、生态参数连续观测、水质及水文环境的连续测量、水样及土壤样品的自动采集等。

(2) 技术成果使用中的特定条件限制：基于无人船的海草床观测系统适用于无人船平台，根据目前无人船的发展水平，其工作的最大海况在 3 级，续航时间 8 小时左右。

### 7.3.3 技术创新性及先进性

(1) 相比于传统方式例如雇佣潜水员下水进行监测，利用无人船对海草床的生长密度、覆盖范围等情况进行调查具有以下优势：

可长时间、周期性进行海草床等典型生态系统监测，操作便捷，无需专业潜水人员协助；人员工作环境安全，只需要在岸基进行无人船远程操控，无需下潜到海底进行现场监测；数据实时性强，视频及水质数据通过远程通信及时发送到岸基；机动性强，可根据监测需求到达指定地点，由原位监测的“点”扩展到“线”、“面”；定位精准，通常巡线误差在 0.5m 以内，有利于同一地点/路线的多次数据比对；使用便捷、成本低，受环境、天气等因素限制小。

(2) 总结创新点如下：

**无人船载水下自动升降技术。**利用无人船进行海草床水下观测，可根据需求自动调整观测深度和角度，对海草的生长情况进行全方位拍摄，相比传统的人工观测，无人船观测在工作效率、观测效果、数据有效性和连续性等方面具有明显优势。

**海草密度、种类及生物自动识别技术。**利用图像自动识别技术对无人船采集的图片、视频等影响资料进行数据处理及分析，自动识别海草的种类、密度、以及海草床生态系统中生物的生长情况，相比于人工观测在准确率及检测效率方面，具有明显优势。

### 7.3.4 其他

国家海洋技术中心在本技术成果方面有关的研究基础：

#### (1) 与无人船有关的研究基础：

自 2016 年开始，国家海洋技术中心在前期相关技术的研究基础上，开始开展无人船技术研究，目前已完成 3 型无人船的研发与应用。无人船有关的研究基础发展历程如下图所示：



图 2-7-8 国家海洋技术中心无人船研究历程

#### ① 复合能源无人船

第 1 型为复合能源无人船，该型无人船重点开展了复合动力无人艇总体技术研究、无人艇平台和载体结构设计技术研究等工作，突破了风能太阳能和化石能源复合能源技术、高速低速复合运动控制技术，以及海上目标快速巡视和取证技术等关键技术，形成无人艇原理样

艇 1 艘，成功完成了海上功能验证。该平台可高速航行，并具有超长巡航能力，其功能及技术指标如下：

高速航行（最高 30kn，持续 5h）；

超长巡航（巡航 6kn，持续 60d 以上）；

目标巡视取证（3 级海况下能锁定 1km 外 10m 以上目标并连续取证）。



图 2-8-9 复合能源无人船

## ② 海洋生态监测无人船

第 2 型为海洋生态监测无人船。自 2021 年开始，国家海洋技术中心开始承担自然资源部业务化项目中无人船海洋监测技术研究，根据任务要求，降低成本、提高海况适应能力，自主研发一型框架式、模块化的无人船平台。实现了定时定点定区域的立体化海洋环境监测，原位监测与实验室环境下的水体综合分析相结合。该平台采用双浮筒设计，具有较高的搭载能力和海况适应能力，其功能及技术指标如下：

外形尺寸：4m\*2.15m\*0.9m

最大工作载荷：300kg

最高航速：6Kn

续航时间：5h

搭载生态监测设备，可长期、周期性监测目标海域的水质情况及变化趋势；

搭载自动采水器，实现现场监测与实验室综合监测相结合。



图 2-7-10 海洋生态环境监测无人船

### ③ 海洋环境综合监测无人船

第3型为海洋环境综合监测无人船，该型无人船主要聚焦我国海洋环境监测“小型化、无人化、智能化”需求，依托自然资源部业务化项目，在前期无人船研究基础上，重点开展了新型海洋综合环境观测无人船平台、海洋水文气象生态综合观测、自动避障自主航行以及基于无人船的智控自动升降系统研究等几个方面的工作，突破了双体结构高海况适应性、轻量化高载重能力、浅滩作业能力、模块化多任务载荷能力等方面的关键技术，实现了浅滩、暗礁水域的生态监测功能，并完成了多次海上试验验证，较为全面地满足海洋生态观测需求。功能及技术指标如下：

高载荷、吃水浅，平台总体载荷 300kg，吃水小于 20cm；

最高航速 6kn，巡航 8h，满足海洋环境综合监测的需求；

3 级海况可工作，4 级海况可生存；

装备智控自动升降系统，可搭载 100kg 的水下设备，并根据任务需求和具体海域状况自动升降；

装备水样自动采集系统，可通过远程控制或定时、定点自动进行水样采集，与人工采样形成有效互补。



图 2-7-11 海洋环境综合监测无人船

#### 与海草床观测有关的研究基础：

由本项目组自主研发的“守望者”海草床实时监测系统是一种用于监测海草、鱼类以及海洋生态、动力环境要素的设备，实现了原位监测与数据实时传输，为海草床典型生态系统的在线监测提供了一种有效手段。

“守望者”海草床实时监测系统由水下视频监控系统、水质监测系统、水面能源供给系统、数据传输系统、岸基数据综合处理系统等组成。水下视频监控系统对海草床及特定目标进行图像采集，水质监测系统对本海域的水质参数进行采集，然后由数据传输系统通过铠装缆传输到水面通讯装置，进而发送至岸基数据综合处理系统；水面能源供给系统将太阳能转换存储至储能模块，以延长其在线监测时长，当进行超长周期观测时；此外，可以远程调整工作模式，定点休眠和唤醒进行图像和数据采集。

“守望者”海草床实时监测系统可以通过全天候或任务规划方式开展海草床典型生态系统的在线监测任务。实时回传的视频图像可进一步掌握、记录海草床的生长状态以及鱼类资源，实时接收的生态参数可反映本海域动态生境质量，是一种海草定点监测的新方法。

水质监测系统参数如下：

表 2-7-1 水质监测系统参数统计表

序号	参数	单位	测量范围	测量精度	分辨率
1	温度	℃	-5℃-35℃ 35℃-50℃	±0.01℃ ±0.05℃	0.001℃
2	电导率	mS/cm m	0-100mS/cm 100-200mS/cm	读数的±0.5%或 0.001mS/cm 读数的±1%	0.0001~0.01mS/cm，取决于量程
3	浊度	FNU	0-999FNU 1000-4000FNU	0.3FNU 或读数的±2 读数的±5%	0.01FNU 0.1FNU
4	溶解氧	mg/L	0-20mg/L 20-50mg/L	读数的±1%或 0.1 mg/L 读数的±5%	0.01 mg/L
5	叶绿素	ug/L	0-400 ug/L	检出限：0.09 ug/L	0.01 ug/L
6	溶解氧	%sat	0-200% 200-500%	读数的±1%或 1%空气饱和度 读数的±5%	0.1%
7	pH		0-14	校准温度±10℃：±0.1 全部温度：±0.2	0.01
8	深度	m	浅水：0-10m 中等水深：0-100m	浅水：±0.04%FS 中等水深：±0.04%FS	0.001m

视频监控系统的参数如下：

表 2-7-2 视频监控系统统计表

序号	参数	技术指标
1	图像传感器	1/3"CMOS
2	最高像素	1920X1080
3	像素	200 万
4	视场角	>90°
5	焦距	4mm
6	最低照亮	0.1Lux（彩色）/0.01Lux（黑白）
7	最大工作深度	50m

“守望者”观测系统具有很好的扩展性，可以根据不同任务需求搭载不同类型的传感器或进行其他水下目标识别监测，服务于不同的任务场景。

2023 年 7 月 28 日，“守望者”海草床实时监测系统于青岛栈桥水域成功布放，与北海预报减灾中心联合开展海草床典型生态系统的在线监测。“守望者”海草床监测系统的布放，丰富了海草床监测的手段，提高了监测效率，为研究海草床与海域环境的相互作用提供了可靠、量化的数据支撑。



图 2-7-12 “守望者”布放现场与图像采集

#### 7.4 节能减碳或污染防治效果

海草床生态系统是三大典型海洋生态系统之一,具有较高的生产力水平和十分重要的生态意义,也是地球上最有效的碳捕获和封存系统之一, 具有极高的生态服务功能。

传统对海草床的观测手段是人工驾驶船只到达指定地点, 对水体、大气、浮游动植物、土壤标本等进行定点采样分析。海上作业条件艰苦, 船只往往随波摇晃, 工作人员只能跪着或者趴在甲板上进行实验。在采集土壤样本、标记海草生长等工作中, 科研人员都需要身着不透气的防水服, 夏季尤其闷热难熬。而在海水退潮后露出的泥泞滩涂里“跋涉”, 浅的地方泥会没过脚踝, 深的地方甚至整条腿都会陷进去, 随时有受伤甚至危及生命的险境。无人船一般采用电力驱动, 不会对水域造成污染。

无人船机动灵活、吃水浅, 受环境因素影响较低, 针对特殊监测需求可水陆两用。无人船可以搭载不同任务载荷, 执行任务也呈现多样性, 可自主规划路径、自主避障航行、自主完成环境感知、目标探测、航迹跟踪等任务, 定位精度高, 数据一致性保持好。将无人船应用于海草床观测及保护领域中, 可大大降低工作人员的工作强度、改善工作环境、降低工作的危险系数、提高工作效率, 节省人力物力, 并且能够获取连续性、一致性数据, 对科学研究提供有效的数据支撑。

#### 7.5 技术示范情况

##### 案例一：海草床等典型生态系统监测

##### (1) 应用示范

海草床在海洋生态系统中的作用非常重要, 海草床可调节气候、净化和调控水质、保护生物多样性、护堤减灾等。但是, 海草床属于比较脆弱的生态系统, 对外界条件的要求比较高, 很容易受到外界环境的影响, 围填海、港口建设、挖沙及破坏性的渔业捕捞等人类活动, 严重危及海草的生存。陆源养殖、工业、生活排污等, 也会影响水体和底质, 引起海草床的退化。对海草床的密度、覆盖范围等情况进行实时监测, 及时发现对其有害的影响, 对保护海草床具有非常重要的意义。

但是, 海草床生活于近岸海域或滨海河口区水域中, 被认为是在演化过程中再次下海的植物, 其生长环境导致对其生长情况的监测异常困难。传统方式一般是雇佣潜水员下水进行监测。这种方式具有非常大的局限性: 首先, 实施难度大, 经费支出高、监测频率严重不足; 其次, 受周边环境、天气等因素影响, 监测区域和时间受限; 再次, 每次作业的人员不固定, 对海草床的生长情况描述有出入, 从而导致无法掌握真实的数据。

今年夏季，国家海洋技术中心联合北海预报中心，利用“逐浪 1 号”无人船搭载水上、水下摄像机和多参数水质传感器在青岛栈桥海域对附近的海草床监测开展了联合演练，实时获取了海草床生长情况的视频数据并及时传送到岸基，验证了无人船自动精准巡线、基于实时视频的目标精准跟踪、水下吊放系统以及水文气象生态综合要素的在线测量功能，积累了更多的实战经验，很好地支撑中心生态在线监测业务发展（图 2-7-13）。



图 2-7-13 青岛栈桥海域海草床实时视频资料

## （2）取得成效

相比于传统方式例如雇佣潜水员下水进行监测，利用无人船对海草床的生长密度、覆盖范围等情况进行调查具有以下成效：

可长时间、周期性进行海草床等典型生态系统监测，操作便捷，无需专业的潜水人员协助；

人员工作环境安全，只需要在岸基进行无人船远程操控，无需下潜到海底进行现场监测；数据实时性强，视频及水质数据通过远程通信及时发送到岸基；

机动性强，可根据监测需求到达指定地点，由原位监测的“点”扩展到“线”、“面”；

定位精准，通常巡线误差在 0.5m 以内，有利于同一地点/路线的多次数据比对；

使用便捷、成本低，受环境、天气等因素限制小。

## 案例二：浒苔、赤潮等海洋灾害监测预警

### （1）应用示范

赤潮、绿潮是影响海洋生态环境的主要灾种之一。赤潮绿潮灾害已在我国近海海域连续暴发十多年,对沿岸社会经济和生态环境造成了极大损失,严重制约了地区经济的可持续发展。

赤潮和绿潮都是复杂的生态异常现象,发生的原因也比较复杂,关于其成因尚没有定论,赤潮甚至被称为“红色幽灵”。国内外对赤潮、绿潮生物大规模增殖发生的环境机制尚无直接的证据,当前主要将其归结为海水富营养化、春夏季水温变化、增殖海域水动力交换缓慢导致局部种群密度增大等因素,对其防控暂时除人工捞除和机械采收外,尚缺乏有效的对策和手段。每年为了防治和治理赤潮、绿潮,国家不惜投入大量的人力物力,但仍无法阻止灾害的发生。

青岛海域是绿潮的高发区域,今年 6 月至 8 月,技术中心海保部自主研发的“逐浪 1 号”生态综合监测无人船搭载多参数水质仪、气象监测设备、水上水下摄像机等,在青岛海域开展浒苔海洋灾害的在线监测及应用示范,全面检验了无人船在气象水文生态传感器的综合搭载、3-4 级海况下的精准巡线作业以及特定监测目标的跟踪作业能力,获取了长周期、大量、

连续的水文、气象、水质数据，为浒苔的起因、发展、消亡等的科学研究提供充足的理论依据和数据支撑。相比驾驶有人船进行数据采集的传统方式，无人船在有效降低经费的同时，避免了工作人员在酷暑天气下长时间连续作业，凸显出明显的优势（图 2-7-14）。



图 2-7-14 “逐浪 1 号”在青岛海域进行浒苔监测

秦皇岛海域是赤潮高发区域，赤潮每年都会对秦皇岛的旅游、渔业等造成巨大影响和经济损失。今年 8 月至 9 月，“逐浪 1 号”生态综合监测无人船在秦皇岛海域开展赤潮生态灾害的在线监测及快速处置试应用，技术人员克服高温酷暑和恶劣海况的影响，在秦皇岛海域连续开展了 20 多天的生态环境要素和覆盖范围在线监测方法试验，并探索优化了水下探测方式，监测数据覆盖了赤潮发生的全周期，为赤潮的科学研究提供了非常有价值的的数据（图 2-7-15）。



图 2-8-15 “逐浪 1 号”在秦皇岛海域进行赤潮监测

## （2）取得成效

海洋生态灾害一般发生在近海，属于突发事件，传统的监测手段如人工监测、大浮标定点监测等很难及时发现灾害出现的时机，利用海洋生态综合监测无人船，可实现生态灾害“爆发前、过程中、结束后”的长周期、连续性机动调查。

相比传统的监测手段如人工驾驶有人船和大浮标定点监测的方式，无人船在海洋生态灾害监测预警方面的应用成效总结如下：

无人船具备可昼夜工作和不间断工作的特点，巡检效率高、劳动强度低，任务重复性强；

无人船适合在复杂海域环境中作业，能够有效实施岛礁周边水域环境调查，降低集群调查的成本并提高精度；

无人船吃水浅，可进入有人船无法进入的浅滩、暗礁以及多水草的水域进行环境监测；

无人船可在恶劣环境下作业，无需考虑人员的舒适性和安全性；

无人船一般是电力驱动,不会对监测水域造成油污等二次污染,监测的数据也更加精准。

利用无人船在赤潮、绿潮发生海域开展长期性、重复性作业,实时监测其“形成-成长-衰亡”过程中的水温、水质要素变化情况,可对赤潮、绿潮的起因研究提供充足的数据支撑和科学依据。

### 案例三：海洋生态监测业务化应用

#### (1) 应用示范

海洋生态保护是一项长期性、连续性的工作,传统的人工采样和大浮标定点采样等手段经济成本高、数据连续性差、工作效率低,并且受到工作环境的多方限制。无人船可自主规划路线、自主航行,自主完成环境感知、能根据需求搭载多种任务载荷,并拥有较高的巡线精度。无人水面艇吃水浅,对工作环境要求较低,适用于浅滩、暗礁、高污染区域以及连续性、长期性、周期性的海洋环境观测工作,在很大程度上解放人力、节省物力、提升工作效率。将无人水面艇应用于海洋海洋生态监测保护领域,可与传统监测手段形成有效互补。

自 2021 年开始,依托自然资源部业务化项目,聚焦我国海洋生态监测“小型化、无人化、智能化”需求,技术中心海保部在前期无人船研究基础上,重点开展了新型海洋生态环境观测无人船平台、海洋生态气象水文综合观测、自动避障自主航行以及基于无人船的智控自动升降系统研究等几个方面的工作,突破了双体结构高海况适应性、轻量化高载重能力、浅滩作业能力、模块化多任务载荷能力等方面的关键技术,实现了浅滩、暗礁水域的生态监测功能,“逐浪 1 号”无人船在渤海海域天津近海多次完成了海上试验验证,全面地满足海洋生态监测的需求(图 2-7-16)。



图 2-7-16 “逐浪 1 号”在天津近海进行生态监测业务化应用

#### (2) 取得成效

相比于传统的人工监测和大浮标原位监测手段,利用无人船进行海洋生态环境业务化监测主要有以下成效:

可承担长期性、连续性、重复性的工作,满足海洋生态环境的业务化应用需求;

相比于传统的人工采样和大浮标定点采样等手段,无人船使用便捷,成本低;

人工监测和定点监测数据连续性差、工作效率低,无人船具有很强的机动性,有效弥补

了传统监测手段的局限性；

人工监测受到工作环境的多方限制，无人船的工作要求受环境、天气等因素影响小；可进入有人船无法驶入的水域，并且电力驱动不会对工作水域造成二次污染。

## **7.6 成果转化推广前景**

### **7.6.1 技术推广前景**

海草床是以海草为核心形成的包括动植物以及其他生物在内的近岸生态系统，是三大典型近海海洋生态系统和三大“蓝碳”生态系统之一，也是地球上最有效的碳捕获和封存系统之一，具有极高的生态服务功能。目前对海草床的观测方法主要有采集土壤样本、标记海草覆盖面积及生长密度等，这些工作需要依靠人工进行，工作效率低、工作环境恶劣，并且受海域、天气、海况等因素影响较大，很难获得持续性数据。海洋无人船是近年新兴的一种观测装备，可自主航行、自动避障、对工作环境要求较低，具有灵活的搭载能力和水上水下立体观测能力，其获取的观测数据、视频信息可实时回传到岸基，充分保证了数据的有效性和实时性。将相关设备安装于无人船上，对海草床等典型生态系统进行周期性、连续性观测，可有效弥补传统观测手段的局限性，为海草床的监测、保护以及科学研究提供更有效的数据，为有效缓解全球气候变化、保持生态系统健康提供新型手段。

到 2025 年，该技术可实现在全国具有代表性的海草床生态系统进行试应用，为后续的推广打下坚实的基础。

### **7.6.2 技术推广障碍及应对措施**

目前，无人船的发展突飞猛进，在多个领域都进行了很好的应用，但国内无人船的发展水平与国际发达国家的发展水平尚有一定差距，特别是海洋无人船在国内的发展尚处于起步阶段。这种现状对于该技术的推广存在一定的限制。

但是，我国的无人船技术虽然起步比较晚，但近年来发展势头迅猛。根据观研报告网发布的《中国无人船艇行业发展趋势分析与未来前景预测报告（2023-2030 年）》显示，2022 年我国无人船艇行业市场规模达到 13.3 亿元。目前，我国相关机构和企业纷纷投入力量开展无人船研发工作，并在海洋领域开展了一定应用。随着无人船的高速发展，无人船海草床监测技术必将取得可观的应用成效。

## 技术 8：一种海上平台高盐生活污水处理回用装置

### 8.1 技术提供方

本次申报的技术成果由天津科技大学和天津市塘沽鑫宇环保科技有限公司联合参与技术研发。天津科技大学是中央与地方共建、以天津市管理为主的公办高校，是以工为主、工理文农医经管法艺等学科协调发展的多科性大学。牵头主持国家重点研发计划专项 3 项，“主要食品全产业链品质质量控制关键技术开发研究”专项总经费为 3400 万元，“益生菌健康功能与基于肠道微生物组学的食品营养代谢机理研究”专项总经费为 2314 万元；“渤海湾生态环境监测评估及污染控制技术研究”专项总经费 1608 万元。学校建有化工与材料学院、海洋与环境学院，有一批教师从事环境保护和评价方面的教学和研究。依托的平台有：

- (1) “环境科学与工程”一级学科天津市重点学科
- (2) “环境科学与工程”一级学科硕士点
- (3) “环境工程”二级学科硕士点
- (4) 天津市应用型专业
- (5) “环境科学与工程专业”教学团队为天津市教学团队和天津市工人先锋号
- (6) 依托于天津市海洋资源与化学重点实验室
- (7) 依托于天津市海洋环境保护技术实验教学示范中心
- (8) 依托于天津市海洋环境保护与修复技术工程中心

天津市塘沽鑫宇环保科技有限公司，位于滨海新区海洋高新技术开发区园内，与天津经济开发区相邻，地理位置优越，交通运输极为便利。成立于 2001 年，注册资金 2000 万元，目前总资产逾 2 亿元人民币，是一家专业从事环境保护事业的新型高科技民营企业，现已形成集“科研开发、工程设计、装备制造、工程施工、安装运营”五位一体的服务格局。凭借着雄厚的技术力量，先进的治理工艺、高效的处理设备、丰富的实践经验，承揽了多项污水治理，涉及生活污水、医疗废水、各种工业废水，以及在防风抑尘、脱硫除尘等环保事业中，业绩优良，成效显著，为塘沽及滨海新区环境保护事业做出了贡献。2010 年获批天津市污水处理装备与技术工程中心。

### 8.2 技术成果简介

#### 8.2.1 技术成果名称和领域

本次申报的技术成果为“一种海上平台高盐生活污水处理回用装置”，属于海洋环境保护领域。2020 年获得天津市专利优秀奖。

#### 8.2.2 技术成果来源

(1) 本技术成果来源于天津科技大学与天津市塘沽鑫宇环保科技有限公司共同承担的两个项目：

天津市互联网跨界融合重大专项“互联网+环境应急污水处理装备的研发与示范”，75 万元，2016.10-2019.9 已鉴定结题（国际先进），项目编号 16ZXHLSF00150。

天津市科技特派员专项-耐油耐盐菌的筛选及在港口污水处理中的生物强化研究,10万,2020.10-2022.9, 已鉴定结题(国际先进), 项目编号: 20YDTPJC01820

(2) 取得专利如下:

一种海上平台高盐生活污水处理回用方法, ZL201610084763.8;

一种斜体式氧化沟, ZL201610072217.2;

一种海上平台高盐生活污水处理回用装置, ZL201620119636.2;

一种斜体式氧化沟, ZL201620104519.9。

### 8.3 技术内容

#### 8.3.1 技术原理及工艺流程

本技术具体涉及斜体式氧化沟装置和分段式 MBR 装置, 是一种可以实现“A<sup>2</sup>/O 和倒置 A<sup>2</sup>/O”双模式同步运行的“OAAO+MB-MBBR”的高效脱氮除磷处理工艺, 具体步骤如下:

(1) 原水收集阶段: 如厕、餐厨、洗浴等生活污水通过如厕、餐厨、洗浴等污水给水管收集到调节池 3-1 内; 调节池 3-1 给水管前安装筛网对污水中较大颗粒物(如塑料袋、食品残渣和废瓶子等)拦截; 调节池 3-1 内底部的潜水泵 3-2 将污水泵入斜体式氧化沟装置 1 的厌氧池给水管 1-5。

(2) 厌氧消化阶段: 高盐生活污水进入斜体式氧化沟装置 1 内, 在导流墙 1-3、1-4 的作用下, 同时通过控制转刷曝气机 1-1、1-2 的转速和鼓风量调节污水中 DO, 实现厌氧池 1-12、兼氧池 1-13 和缺氧池 1-14; 两台转刷曝气机 1-1、1-2 相向运转, 靠近厌氧池给水管 1-5 的转刷曝气机 1-1 运转方向与厌氧池 1-12 进水流向相同, 且离厌氧池给水管 1-5 较远的转刷曝气机 1-2 的转速大于另一台转刷曝气机 1-1 的转速, 以增大水流的传质阻力, 使污泥不易沉淀且得到充分搅拌; 在厌氧池 1-12 和兼氧池 1-13 主要去除污水中化学需氧量(COD)和释放磷, 缺氧池 1-14 主要去除污水中部分的生物需氧量(BOD<sub>5</sub>)和脱氮(释放 N<sub>2</sub>)。

(3) 好氧氧化及膜过滤阶段: 厌氧消化后的高盐生活污水从缺氧池 1-14 末端的溢流堰 1-1-8 溢流到中间水池 1-9; 中间水池排水管 1-11 与分段式 MBR 装置 2 的填料区 2-4 连接, 高盐污水进入装有由球状型活性炭和耐盐活性污泥组合成生物活性炭的填料区 2-4; 再通过穿孔墙 2-2 使填料区 2-4 中活性污泥和污水进入 MBR 膜组件区 2-3, 然后靠抽吸泵 2-6 将经膜组件 2-5 过滤后的处理水排入集水池 3-3; 填料区 2-4 主要去除污水中大部分有机物, 有效降低氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和以排泥的形式进行除磷, MBR 膜组件区 2-3 主要作用是泥水分离, 同时膜丝表面的生物膜和活性污泥可去除部分污水中有机物, 但运行一定时间后, 膜通量会变小需要清洗膜组件。

(4) 回流污泥及超声消毒阶段: 缺氧池排泥管 1-10、填料区排泥管 2-7 和污泥消解池给水管 3-61 连接成三通管; 需要回流污泥时, 关闭污泥消解池给水管 3-61, 依次打开缺氧池排泥管阀门 1-10, 填料区排泥管阀门 1-71, 填料区排泥管阀门 1-73 和填料区排泥管阀门 1-72, 并打开污泥泵 3-5; 无需污泥回流时, 关闭污泥泵 3-5 和填料区排泥管阀门 1-72, 打开污泥消解池给水管 3-61, 经超声消毒达标后排泥; 集水池 3-3 排水管与污泥消解池给水管

3-61 连接，集水池 3-3 排水管与厕所给水管连接；集水池 3-3 中产水可回用作厕所用水或是直接在污泥消解池 3-6 中消毒达标后排出。

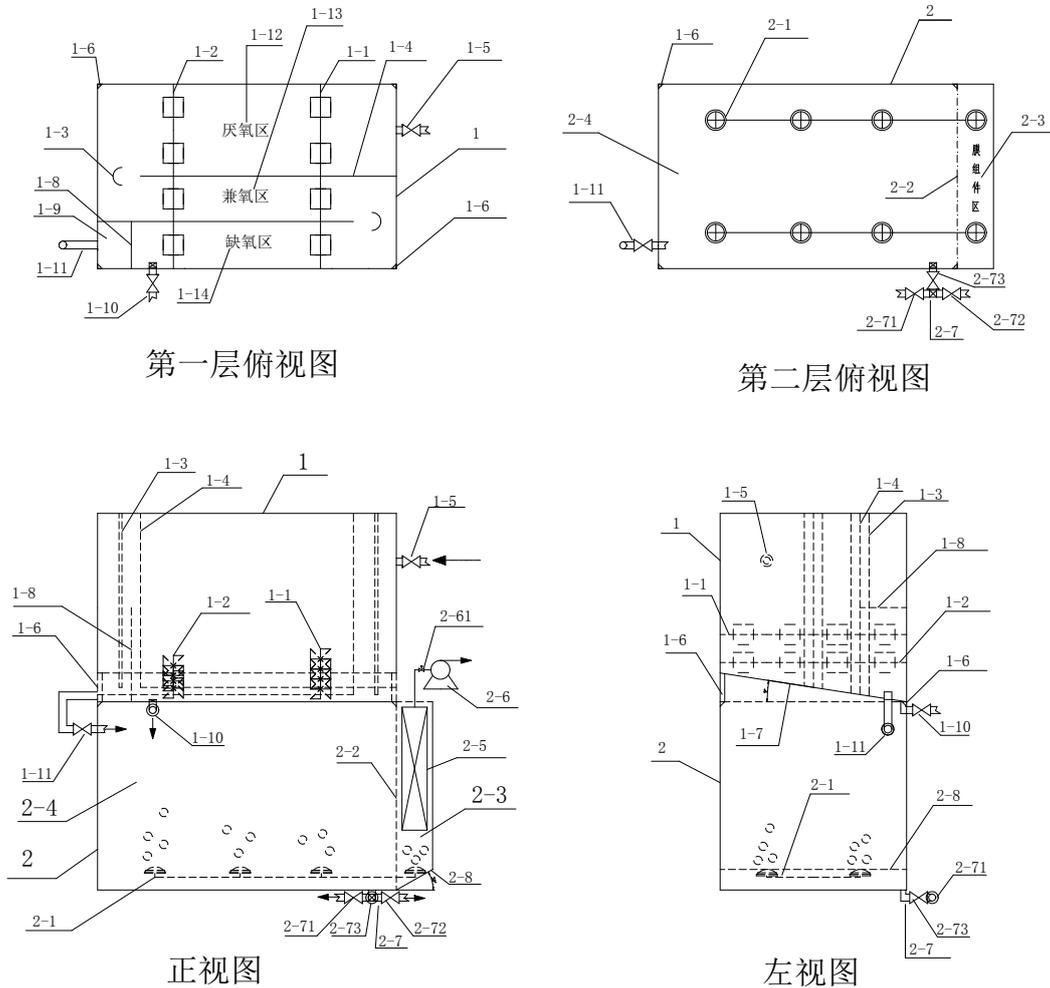


图 2-8-1 高效脱氮除磷处理工艺路线图

### 8.3.2 技术成果适用性分析

本技术适用于高盐污水，河道排水超标应急处理，属于生活污水治理领域；本技术还可以应用在海上平台含盐生活污水、制药废水、有机工业废水等海洋环境保护领域。

因“海水代用”产生的生活污水具有 35%（以 NaCl 计）的高盐度，通过污泥培养、驯化方式可获得耐盐的活性污泥，实现高盐环境下的生化处理，但耐盐的活性污泥处理系统不具备脱盐功效，盐度是导致膜池“浓差极化”现象发生的直接原因。受盐度胁迫，嗜盐菌或耐盐菌对高盐生活污水中的含 N、P 元素的降解率低于传统生化处理工艺的降解率，经试验表明，本处理技术对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均去除率为 60.4%，TP 平均去除率为 58.9%。

### 8.3.3 技术创新性及先进性

要求提供关键技术指标对比本技术针对海上平台“海水代用”后产生的高盐生活污水采用传统处理工艺治理成效低等问题，公开了一种海上平台高盐生活污水处理回用装置，具体涉及斜体式氧化沟装置和分段式 MBR 装置，是一种可以实现“A<sup>2</sup>/O 和倒置 A<sup>2</sup>/O”双模式

同步运行的“OAAO+MB-MBBR”的高效脱氮除磷处理工艺，所述 MB-MBBR 处理技术是 MBBR 和 MBR 等处理技术的优化组合，主要克服了氧化沟的污泥膨胀、排泥不畅、脱氮除磷效果差、有效水深浅、占地面积大以及 MBR 的污泥浓度差异（膜池高，生化池低）等技术的不足。对比传统的氧化沟、MBR、MBBR 等传统处理工艺，本工艺进行了改进。

氧化沟是一种通过转刷或转盘曝气，并让污水以循环的方式在沟渠中得以降解的活性污泥工艺。氧化沟工艺具有污泥负荷低，循环流量大，抗冲击负荷能力强，流程简单、维护管理方便、处理效果稳定、运行成本低，可不设初沉池和污泥消化池等优点，是备受欢迎的二级处理工艺。同时，经过几十年的实践探索，氧化沟工艺被认为是出水水质好、最为经济的生物处理技术之一。但是，传统的氧化沟工艺的曝气方式单一，占地面积大，充氧效率低，有效水深浅，排泥不畅，污泥膨胀等缺点，限制氧化沟工艺的应用和发展。

MBR 工艺集成了生化处理技术和膜分离技术的优点，具有良好的固液分离效果，剩余活性污泥量少（污泥浓度高，污泥龄长），无需二沉池，出水水质较佳，占地面积小等优点，是目前水处理技术中不可或缺的处理技术。但受膜材质和水质情况等条件的影响，MBR 在运行过程中，会出现膜污堵情况，而且 MBR 的运行费用较高，这也是限制 MBR 技术被广泛应用于工程实例中的重要因素之一。

MBBR 工艺是通过向反应器中投加填料，依靠曝气池内的曝气和水流的提升作用使填料处于流化状态，进而形成悬浮生长的活性污泥和附着生长的生物膜，是一种新型高效的水处理技术。因此，MBBR 工艺兼具传统流化床和生物接触氧化法两者的优点，被称为是“移动的生物膜”。MBBR 具有处理负荷高，无需污泥回流设备和反冲洗设备，污泥产率低和操作简便等优点，MBBR 的缺点是生物膜易脱落，耗电量大，且布气管布置位置困难。

移动床-膜生物反应器（MB-MBR），是一种将膜生物反应器（MBR）与移动床生物膜反应器（MBBR）相结合，并以 MBR 代替二沉池的组合技术。由此 MB-MBBR 均具备了 MBR 和 MBBR 的技术特点。

#### 8.4 科技效果

针对海上高盐废水研发出 A/O-MBR-MBBR 一体化环境应急污水处理设备，集成了污水处理工艺、在线水质分析及自控系统等。污水通过装置后，COD、BOD<sub>5</sub>、TOC、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 的平均去除率可分别达到 90.9%、88.5%、88.9%、60.4%、58.9%。出水可达到《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）一级排放标准。同时，该装置可用于含氰废水的实验室小试环境，污水经处理后，总氰化物低于 0.5mg/L。

2015 年 8 月 12 日，天津港瑞海公司危险化学品仓库爆炸事故发生后，采用天津科技大学和天津市塘沽鑫宇环保科技有限公司共同研发的移动污水处理装置处理第一时间进入爆炸现场，8 月 14 日下午 16:30 便安装好一套 3000 吨 t/d 的破氰装置，并在后续的 112 天中，累计投入 39 台移动式应急破氰装置，共计处理 547817 吨含氰废水，为保护海洋环境做出了重大贡献。

针对海上高盐废水研发出一款可以在线管理、云端储存的软件，通过计算机程序、手机 APP 的操作，真正意义上实现远程干预与调控，便捷高效的同时减少了成本的投入及对人

体的伤害。

### 8.5 技术示范情况

多年来天津科技大学与天津市塘沽鑫宇环保科技有限公司合作，围绕车载移动式污水处理装置，一体化污水处理装置和应急污水处理装置开展研发工作。主持研发的车载移动式污水处理装置和系列化一体式污水处理车，经检测，出水达到城市污水再生利用城市杂用水水质标准（GB/T 18920-2002）。申请发明专利 8 项，制定了“移动污水处理成套装置”的企业技术标准“移动式污水处理装置集成技术研究及产业化”项目被列入天津市第四批自主创新及产业化重大创新项目。2016 年“可移动式一体化污水处理系列成套装置”获滨海新区科技进步三等奖；“车载移动式污水处理装置”2012 年获环保部环境保护科学技术三等奖和天津市科技进步三等奖、2011 年获天津市滨海新区技术发明三等奖，2010 年获天津市环境保护科学技术二等奖。2012 年获天津市科技进步三等奖，2013 年获环保部环境保护科学技术奖三等奖，2020 年获天津市专利优秀奖和天津市环境保护科学技术一等奖。

本技术已经应用于天津长芦海晶集团有限公司沿河里、万年桥泵站高盐生活污水超标的应急处理、天津中燃船舶燃料有限公司罐区清洗储油罐含油废水和办公室生活污水处理、南疆污水处理厂区内污水处理。

#### 案例一：天津长芦海晶集团有限公司沿河里、万年桥泵站高盐生活污水超标应急处理

自 2017 年 8 月签订合同起，天津市塘沽鑫宇环保科技有限公司对沿河里万年桥污水泵站进行 XYZZ-500 和 XYZZ-2500 移动污水处理装置安装，两处共计 29 台污水处理装置，实现水质实时监测，远程控制，取得了良好的效果。

污水处理能力分别为沿河里排污泵站 500~1000t/d 和万年桥排污泵站 2500~4000t/d，每天有一个保底水量，经一段时间调试过后，出水指标达到天津市城镇污水处理厂污染物排放标准 B 类和地表水 V 类水质标准。这一技术的应用，带来了巨大的环境效益和经济效益。

出水合格后开始收取 12.8 元/t 的运营费用，每月月末抄表，根据抄表数结算运营费。2017 年处理量 513703t，2018 年处理量 1978101t，2019 年截止到 5 月份处理量 754671t。COD 由 250mg/L 降至 40mg/L，氨氮由 35mg/L 降至 2mg/L，总磷由 3mg/L 降至 0.4mg/L，总氮由 40mg/L 降至 2mg/L。截止到 2019 年 5 月，COD 减排量 680.7t，氨氮减排量 107.1t，TP 减排量 8.44t，TN 减排量 123.4t，实现销售总额 4155.49 万元，利润 1054.3 万元，由于污水处理技术的不断更新与改进，利润率正不断上涨。

#### 案例二：天津中燃船舶燃料有限公司罐区清洗储油罐含油废水和办公室生活污水处理

天津中燃船舶燃料有限公司租用可组合移动式生活污水处理设备对含油废水进行处理，临时污水处理能力定为 60m<sup>3</sup>/d，出水水质满足《城市杂用水再生利用城市杂用水水质》GB/T 18920-2002 标准，回用于罐区消防水和港区道路清扫，降低了业主的一次性投资，以购买服务的形式进行合作，回用水年效益 17 万余元。

#### 案例三：南疆污水处理厂区内污水处理

运用一体化处理装置，提高了南疆污水处理厂运行管理水平，保证了出水水质，降低运行成本，解决区内污水处理问题，保护了周边环境，社会效益显著。也带来了巨大的环境效

益, 2020 年共处理水量 73634t, 2021 年共处理水量 99147t, 2022 年 1 月至 6 月共处理水量 57505t, 根据平均进水水质和排放水质指标计算, COD 由 218mg/L 降至 30mg/L, 氨氮由 15mg/L 降至 1mg/L, 总磷由 3mg/L 降至 0.2mg/L, 总氮由 20mg/L 降至 2mg/L, 石油类由 45mg/L 降至 1mg/L。截止到 2022 年 6 月, COD 减排量 43.29t, 氨氮减排量 3.22t, TP 减排量 0.64t, 石油类减排量 10.13t。

## 8.6 成果转化推广前景

### 8.6.1 技术推广前景

本技术提供了一种海上平台高盐生活污水处理回用装置, 为海上生活污水处理提供了一种科学可行的处理装置及处理技术, 可对海上平台生活污水进行处理, 使其达到排放标准, 减少其对海洋环境所造成的污染, 保护了海洋生态环境。同时, 响应李克强总理的号召, 开展了“互联网+”方面的研究, 对于海上平台的高盐生活污水处理, 不在现场也可以对污水处理装置进行监测和控制, 不仅减少了人力成本, 对于高危环境(例如危险化学品爆炸、核辐射污染处理等)下的操作, 提供了安全可靠保证。

随着我国经济的快速发展, 航运业和海洋资源开发得到了超前的进步, 海洋环境污染的问题也受到了日益关注。海上平台高盐生活污水不仅有有机负荷较高, 还含有大量的盐类物质(如  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 等), 虽然这些盐类物质在微生物的生长代谢过程中可以维持细胞的渗透压平衡, 但当这些离子浓度过高时, 就会对微生物产生抑制或毒害作用, 从而抑制传统处理方法的处理效果, 本技术克服了适盐生物法处理高盐废水时, 生物降解率低, 活性污泥易流失和设备占地空间大等技术的不足, 即使在恶劣天气影响下, 本技术装置仍能保持高效的处理能力, 通过调控转刷曝气机的转速和鼓风量, 使反应器中泥水充分混合, 有效解决了降解率低, 活性污泥易流失的问题。

高盐生活污水的排放会对环境造成严重的污染, 高盐废水的处理可以有效减少对环境的污染; 高盐生活污水的处理可以回收其中的水资源, 减少对自然水源的消耗, 保障地区的水资源; 高盐废水中含有的无机盐类可以被回收利用, 如氯化钠可以用于制盐、氯化铵可以用于制肥等; 高盐废水的处理涉及到物理、化学、生物等多学科知识, 研究高盐废水的处理方法可以推动相关学科的发展和进步; 高盐废水的处理可以衍生出一系列的环保、制盐、制肥等产业, 促进当地经济的发展和增长。总之, 研究高盐废水的处理方法对于环境保护、资源利用、科学研究和经济发展都具有重要的意义。

### 8.6.2 技术推广障碍及应对措施

随着人口的增长和社会经济的发展, 水的需求量呈现急剧上升趋势, 然而, 日益严重的水体污染, 不断恶化的水质, 使可用的水资源日渐匮乏。国家实施了一系列保护水资源的法律法规, 严格控制污水的排放, 因此, 严格控制污水排放是一项亟待解决的问题。主要有以下应对措施:

(1) 增强人民的环保意识: 人类活动是水污染的主要根源, 工业废水、生活污水、农药、化肥等都会污染水环境。当前水资源的污染有很大部分原因是由于居民的环保意识不强。所以有关部门应开展宣传活动, 将环保知识普及化, 提高人们的觉悟与认识。

(2) 减少耗水量：当前我国的水资源的利用，一方面感到水资源紧张，另一方面浪费又很严重。同工业发达国家相比，我国许多单位产品耗水量要高得多。耗水量大，不仅造成了水资源的浪费，而且是造成水环境污染的重要原因。通过企业的技术改造，推行清洁生产，降低单位产品用水量，一水多用，提高水的重复利用率等，都是在实践中被证明了是行之有效的。

(3) 建立城市污水处理系统：为了控制水污染的发展，工业企业还必须积极治理水污染，尤其是有毒污染物的排放必须做预处理。随着工业布局、城市布局的调整和城市下水道的管网的建设与完善，可逐步实现城市污水的集中处理，使城市污水处理与工业废水治理结合起来。

## C、海洋资源开发与保护技术

### 技术 9：天津市海洋数值预报、风暴潮漫堤和漫滩预警系统

#### 9.1 技术提供方

##### (1) 单位性质及主营业务范围

自然资源部天津海洋中心（国家海洋局天津海洋环境监测中心站）是自然资源部北海局所属事业单位，公益一类，正处级，加挂“自然资源部天津海洋预报台”牌子，是履行天津海域内海洋全业务支撑保障职能的单位，负责天津海域内内海洋观测预报预警、海洋生态预警监测、海洋自然资源调查评估、海洋经济调查监测评估、海域海岛保护利用、海岸带综合保护利用、海洋国土空间规划和用途管制、海洋督察和海洋自然资源监管等相关技术支撑工作，开展海洋资源领域的科学研究、技术创新、成果转化工作。

按照新“三定”规定，自然资源部天津海洋中心下设有办公室、组织人事科、财务资产科、业务管理科、质量管理科、预报预警室、自然资源技术室、海域海岛和生态修复技术室、海洋生态室、海洋调查室、塘沽海洋站等科室。

中心拥有一批成熟的管理和科技人才，配置了先进的检测仪器设备，建设有北海区高精尖实验室，包括常规化学、重金属、油类、有机污染物、生物毒性、生物鉴定等多个工程实验室，有各类仪器设备 920 余台套；中心建立了一套科学、严谨、规范高效的质量管理体系，拥有检验检测机构资质认定证书（CMA 资质），具备海洋水文、海洋气象、水质等 13 大类 161 个项目的检验检测能力，监测能力在全国同级海洋中心中名列前茅。

##### (2) 生态环境领域技术工作情况简介

中心先后主持和参与了多项国家 908 专项、863 项目、602 专项、国家海洋行业公益性科研专项、国家环保行公益性科研专项、国家海洋环境评价科研专项、海洋环境评价科研专项、中央分成海域使用金支出项目、天津市科技兴海项目、北海分局科技项目的研究，在国内外多个重要期刊上发表论文 200 余篇，参与编制行业标准 8 项，出版专著 5 部，申请专利 9 项，科技成果产出丰硕。内设党、团支部先后获得第 20 届全国青年文明号、2019-2020 年度自然资源系统青年文明号、第 21 届全国青年文明号、中央和国家机关“四强”党支部等荣誉称号。

##### (3) 近三年经营情况

中心拥有多年的海洋预警报和防灾减灾工作经验，也一直致力于积极支撑地方社会经济发展，为地方经济发展保驾护航。1999 年，中心与天津市政府共建天津市海洋环境监测预报中心，组织开展天津市海洋观测预报、观测网业务化运行及防灾减灾工作，为天津市政府、企事业单位提供提供海洋环境信息、海域测量、海洋环境预报服务和海洋防灾减灾技术决策支撑。中心近 5 年连续承担了天津市规划和自然资源局（原天津市海洋局）的海洋观测预报和防灾减灾项目：

2019 年度海洋观测预报减灾项目（85.8 万元）；

2020 年度海洋观测预报、观测网业务化运行及防灾减灾管理项目（159.6 万元）；

2021 年度天津市海洋观测预报、预警监测和防灾减灾项目（87.7 万元）；

2022 年度海洋观测预报、观测网业务化运行及防灾减灾管理项目（99.9 万元）；

2023 年度海洋观测预报、观测网业务化运行及防灾减灾管理项目（94.9 万元）。

## 9.2 技术成果简介

### 9.2.1 技术成果名称和领域

技术名称：天津市海洋数值预报、风暴潮漫堤和漫滩预警系统。

技术领域：本技术成果属于“其他”技术领域，主要用于海洋环境预报与防灾减灾领域。

### 9.2.2 技术成果来源

本技术成果来源于 2015 年中央分成海域使用金项目“天津市海洋预警能力升级改造项目”，本技术成果经费共 226.52 万元。

## 9.3 技术内容

### 9.3.1 技术原理及工艺流程

#### （1）技术原理与主要内容

##### ① 精细化大气、海洋环境业务化数值预报系统

针对天津市周边及沿海区域的地理特征并结合当地实际预报需求，基于搜集的基础地理信息、台站资料以及大区模型和再分析等资料，以 WRF、FVCOM、SWAN、ROMS 等大气、海洋数值模式为基础，构建了天津海域精细化的大气和海洋环境业务化数值预报系统。系统包括天津市沿海气象预报系统、天津市沿海三维温盐流业务化数值预报系统、天津市沿海海浪数值预报系统、天津市沿海风暴潮数值预报系统四个模块，能够实现对天津海域风、气温、气压、风暴潮、潮汐、水温、盐度、海流、海浪以及常规要素的实时（准实时）业务化数值预报；系统采用 Linux 系统的 Shell 编程技术和后台管理技术实现预报模式的业务化运行以及预报产品的传输，通过 ftp 实现预报结果上传，利用终端系统显示平台中绘图软件实现预报结果的可视化，实现了“定时、定点、定量”的精细化海洋数值预报，预报产品能够接入相关网站或业务平台进行实时预警发布，供海洋预报业务人员或访客浏览参考。

##### ② 风暴潮漫堤和漫滩预警系统

通过分析天津市风暴潮灾害的时空分布特征，并结合天津市沿海区域的地理特征及预报需求，确定风暴潮漫堤和漫滩预报模拟的关键参数（预报范围、空间分辨率、预报时次等），基于 ADCIRC-SWAN 耦合数值模型，综合考虑海浪和风暴潮的相互作用，构建了天津市风暴潮漫堤和漫滩预警系统，结合历史观测资料对典型风暴潮漫堤和漫滩事件进行模拟，优化完善该系统的物理参数与方案设置，结合海洋环境业务化数值预报所提供的强迫场，开展天津市沿岸海堤的风暴潮漫堤和漫滩的业务化数值预报，并形成相关的数值预报产品。以国家和本市完善的基础工程资料为基础，依托 GIS 平台以及计算机和网络等先进技术，建立了集数值预报产品可视化、基础信息查询、预警分析、会商决策和系统管理于一体的风暴潮漫堤和漫滩风险预警系统，辅助领导对防灾减灾工作进行指挥与决策，最大限度的减少灾害损

失，达到防灾减灾目的。

### （2）系统总体性能

在模型配置上，涵盖了海流-海浪-潮汐-大气等不同模块，能够模拟三维温、盐、流、潮汐、波浪、风暴潮等多要素预报，依托天津市及周边海域的观测数据，实现对预报结果的验证与评估，保证了高质量的预报结果；

在空间设计上，在外海涵盖足够空间区域以包含影响该区域的多尺度海洋动力过程，气象模型范围涵盖了渤海和黄海，海洋模型涵盖了整个渤海区域；通过嵌套或变分辨率的方式，向岸边逐渐细化，海洋模型在天津市近海及关键区域的分辨率达到了 50~100 米，更好地拟合了天津不规则的岸线，实现对局地及小尺度特征的有效模拟，满足了精细化的要求；

在性能指标上，系统能够在高性能计算机平台上实现自动化运行，每天至少运行一次；每日夜间 00 时自动启动，6 小时内运行完毕；每次预报起点为 08 北京时，预报终点为后日 08 北京时，大气、潮汐、海浪等要素的常规预报时效为 72 小时。

### （3）系统框架

天津市海洋数值预报系统、风暴潮漫堤和漫滩预警系统采用了模块化设计，各模块间互连接通过 Linux shell 等脚本程序控制：

#### ① 数据收集与处理模块

能够定时下载模型需要的大气、海洋、波浪模式预报场数据，并进行数据处理，为模式提供输入初始及编制准备；

#### ② 数值预报模块

基于大气模型的数值预报结果，为海洋模型运行提取并准备气象强迫场，自动生成初始场、边界场等输入文件，并在高性能计算机节点进行并行计算；将模型结果通过 shell 脚本以及 ftp 技术自动传输到终端服务器。

#### ③ 后处理及预报结果可视化模块

在终端服务器部署后处理模块，可以对数据进行转换处理并自动调用 Grads 或 Matlab 等绘图软件将预报结果数据进行可视化处理，将生成的图片产品以及数据产品传输到业务平台，对预报结果发布进行更新，并支撑终端用户对预报结果的交互式访问；从数值预报结果中抽取风暴潮要素信息，特别是在风暴潮发生阶段提取风暴潮漫堤和漫滩的信息，生成风暴潮漫堤和漫滩数值预报产品。

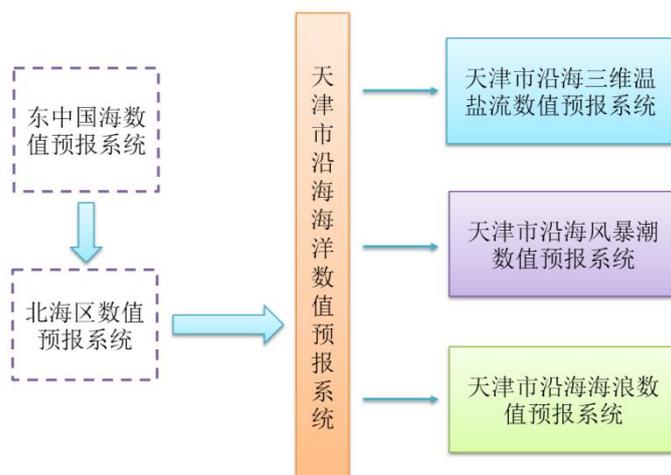


图 2-9-1 天津市海洋数值预报、风暴潮漫堤和漫滩预警系统结构图

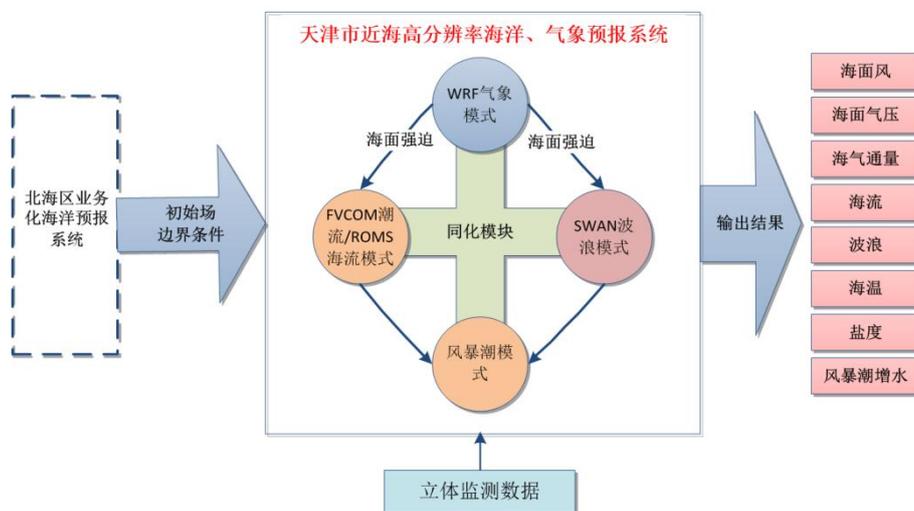


图 2-9-2 天津市海洋数值预报、风暴潮漫堤和漫滩预警系统框架图

(4) 天津市海洋数值预报、风暴潮漫堤和漫滩预警系统成果展示

① 精细化大气、海洋环境业务化数值预报系统

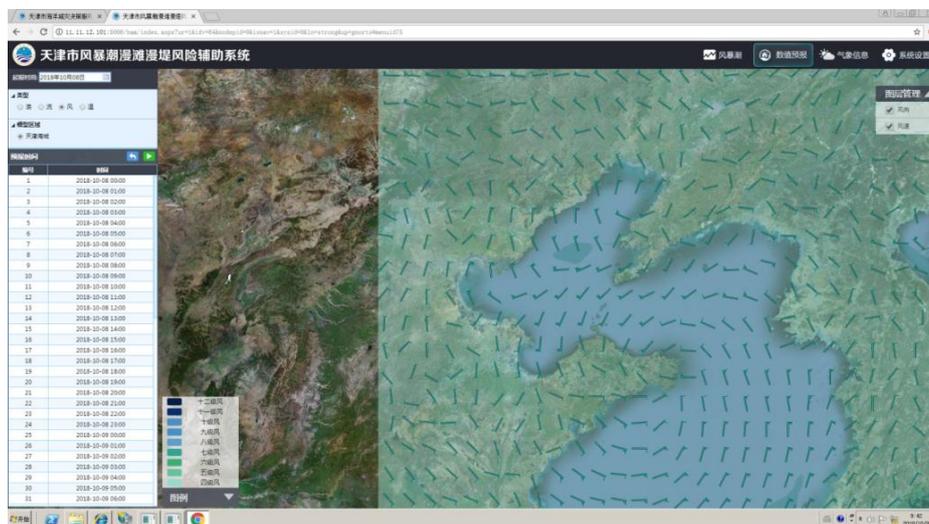


图 2-9-3 天津市沿海精细化气象预报系统

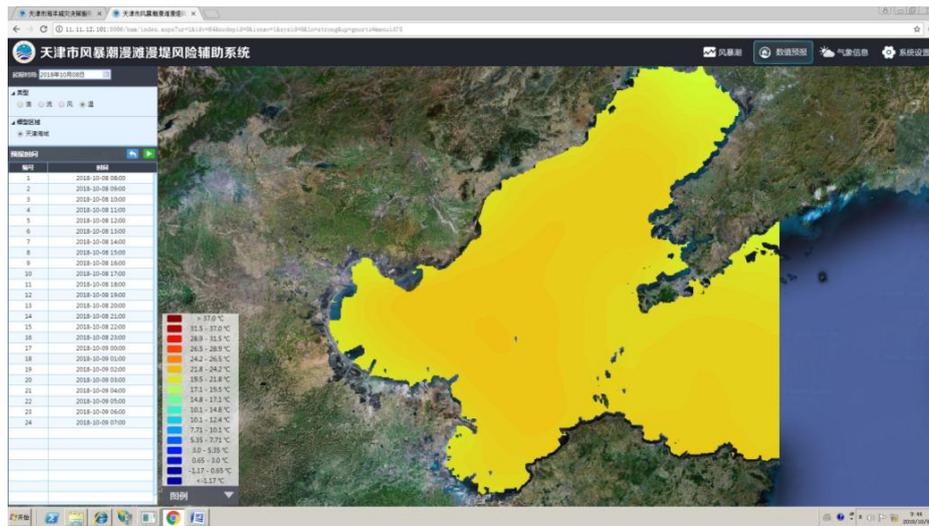


图 2-9-4 天津市沿海三维温盐流预报系统

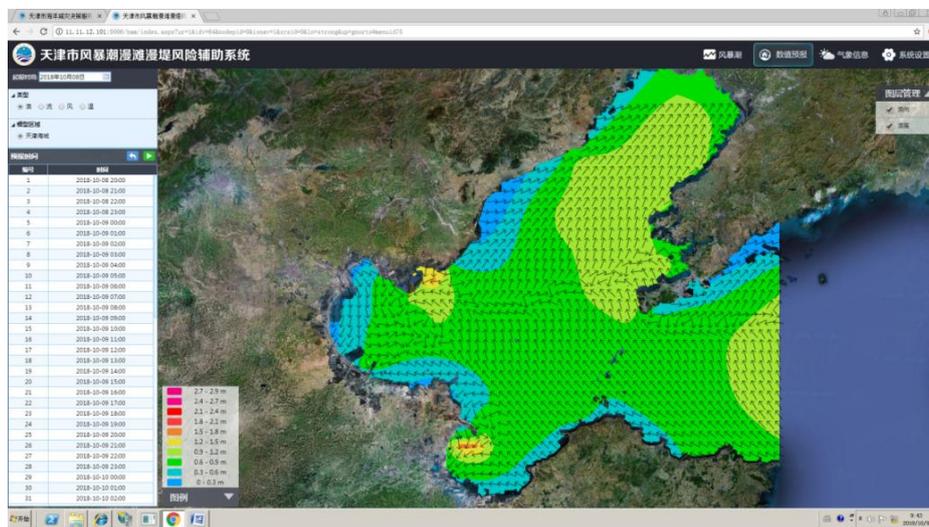


图 2-9-5 天津市沿海海浪数值预报系统

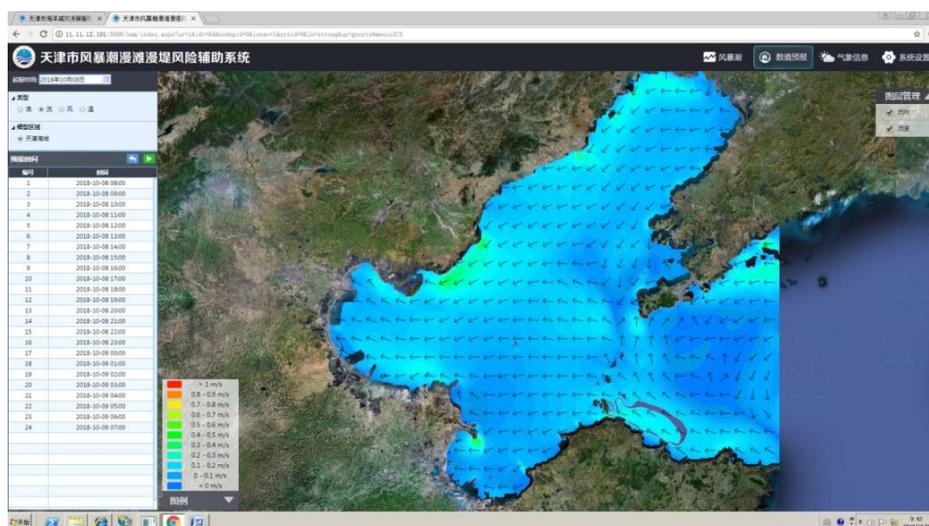


图 2-9-6 天津市沿海风暴潮数值预报系统

## ② 天津近海风暴潮漫堤和漫滩数值预警系统

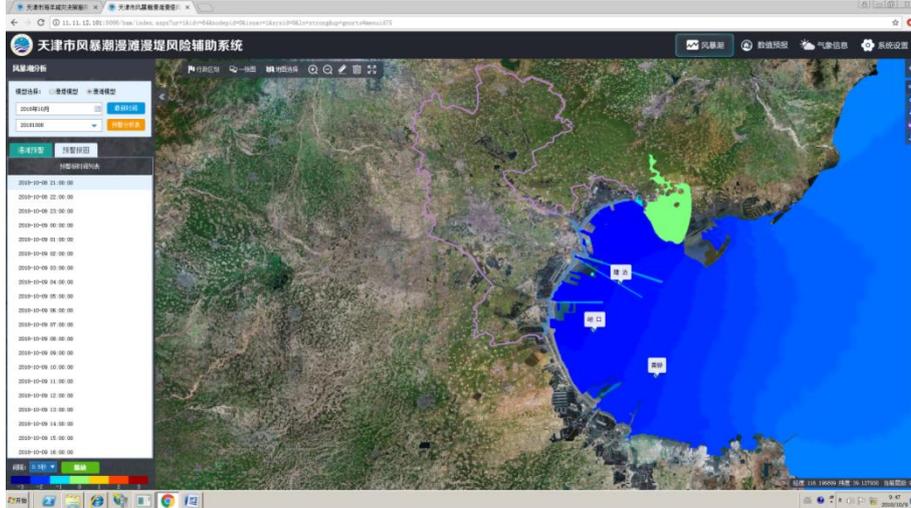


图 2-9-7 天津近海风暴潮漫堤和漫滩数值预警系统

### 9.3.2 技术成果适用性分析

(1) 该技术成果主要用于海洋预警报和防灾减灾领域，适用于海洋环境保护、灾害预警与应急处置、灾害风险评估与区划、海洋工程环境评估、海域使用论证、生态修复评估等工作。

(2) 该系统在业务化运行过程中，须依托于高性能计算机平台进行数值计算，需要稳定的网络环境进行数据传输，以及图形处理性能较高的终端服务器作为可视化平台。高性能计算机的运行环境要求较高，需要配备有符合国家标准的专用机房设施。

中心目前拥有一套中型浪潮高性能计算集群，集群拥有刀片计算节点 13 台，管理/登录节点 1 台，IO 节点 2 台，存储系统 1 套，计算与存储能力满足该系统的运行需求。中心还配备有符合国家标准的专用计算机房，机房配备有防静电地板、专用机柜、UPS 备用电源、专用精密空调、环境监控系统（视频、温度、湿度、烟雾、电力）、七氟丙烷自动灭火系统等，保证了该系统在高性能计算集群的业务化运行。

### 9.3.3 技术创新性及先进性

(1) 该系统的技术标准符合国家相关标准与规范，主要包括：

《短期天气预报》GB/T 21984，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会发布。

《数值天气预报产品检验规范》GB/T 34303-2017，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会发布。

《海洋观测预报及防灾减灾标准体系》HY/T 193-2015，国家海洋局发布。

《风暴潮防灾减灾技术导则》GB/T30746-2014，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会发布。

《风暴潮灾害风险评估与区划技术导则》（征求意见稿），国家海洋局发布。

《风暴潮漫堤预报技术指南》HY/T 195-2015，国家海洋局发布。

《海堤工程设计规范》SL 435- 2008，中华人民共和国水利部发布。

《海洋预报和警报发布（第 2 部分：海浪预报和警报发布）》GB/T 19721.2，国家海洋局发布。

(2) 该系统采用的气象、海洋数值模式在国内外海洋领域应用广泛，各模式采用最新版本与技术。

天津市沿海气象预报系统采用 WRF (the Weather Research and Forecast) 中尺度气象模式；

天津市沿海三维温盐流业务化数值预报系统采用三维全动力 ROMS (Regional Ocean Model System) 区域海洋模式；

天津市沿海海浪数值预报系统采用非结构网格的 SWAN (Simulating WAVes Nearshore) 模式；

天津市沿海风暴潮数值预报系统采用有限体积三维全动力海流模型 FVCOM (An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model) 海洋模式；

天津近海风暴潮漫堤和漫滩数值预警系统采用国际先进的 ADCIRC-SWAN 耦合模式。

(3) 模型技术指标均达到国内外海洋数值预报业务的主流标准。

#### ① 精细化大气、海洋环境业务化数值预报系统

**天津市沿海精细化气象预报系统：**利用渤海周边海洋站和渤海内浮标实测数据对天津市沿海气象数值预报结果进行检验，24 小时、48 小时和 72 小时预报风速相对误差分别为 18.25%、19.54%和 21.89%，风向平均绝对误差分别为 19.90°、22.13° 和 25.63°。

**天津市沿海三维温盐流预报系统：**利用渤海 3 个浮标站位和 3 个海洋站海温数据观测资料验证，模式预报海温绝对误差 24 小时预报小于 0.8℃，48 小时预报绝对误差小于 0.9℃，72 小时预报绝对误差小于 1.0℃。

**天津市沿海海浪数值预报系统：**利用渤海 3 个浮标、1 个平台和塘沽站的有效波高数据对十个大浪过程的模式后报结果进行验证，对于大于 2 米的有效波高，模式 24 小时预报平均相对误差为 10.3%，小于 15%。

**天津市沿海风暴潮数值预报系统：**利用天津近海海域观测数据与模型预报结果进行对比，风暴增水在 1 m 以上时，模拟得到的风暴增水极值与实测值相比相对误差小于 25%。

#### ② 天津近海风暴潮漫堤和漫滩数值预警系统

对历史上十个风暴潮过程和十个大浪过程的海浪要素进行后报，利用渤海 3 个浮标、1 个平台和塘沽站的观测数据对模式进行验证，对于大于 2 米的有效波高，模式 24 小时预报平均相对误差小于 15%，最大风暴潮增水计算值相对误差应低于 10%。

### 9.4 科技效果

天津市海洋数值预报、风暴潮漫堤和漫滩预警系统建成后，主要应用于天津海域海洋环境预警报工作，极大提升了天津海洋中心作为天津市海洋预警发布机构的技术能力，中心也成为北海区第一个实现海洋数值预报业务化工作的海洋中心。系统也应用于海洋科研项目、天津市海洋灾害风险普查等工作，为天津市海洋灾害预警、灾害应急预案、灾害风险评估、

重点防御区的划定提供技术支撑。该系统

(1) 精细化大气、海洋环境业务化数值预报系统

**天津市沿海精细化气象预报系统：**模型空间分辨率 3km，预报时效 120 小时，预报产品为风、热通量、降水、长短波辐射等大气要素，结果输出时间间隔 1 小时。该模型在天津海洋中心集群上运行稳定，完成天津近海气象数值模拟大约耗时 0.5h。

**天津市沿海三维温盐流预报系统：**模型水平分辨率达到  $1/120^\circ$ ，垂向 6 层，预报时效 72 小时，预报产品为温度、盐度、海流等要素，结果输出时间间隔 1 小时。模型采用并行计算方式，72 小时预报的计算时间不超过 30 分钟。

**天津市沿海海浪数值预报系统：**模型近岸最高分辨率约 50 米，预报时效 72 小时，预报产品包括有效波高、平均周期、平均波向等要素，结果输出时间间隔 1 小时。模式采用并行计算方式，72 小时预报计算时间小于 30 分钟。

**天津市沿海风暴潮数值预报系统：**模型最高空间分辨率可达 50 米，预报时效 72 小时，预报产品为风暴增水等要素，结果输出时间间隔 1 小时。模式采用并行计算方式，72 小时预报计算时间约 20 分钟。

(2) 天津近海风暴潮漫堤和漫滩数值预警系统

模型最高分辨率优于 50 米。系统在风暴潮增水预报达到一定警戒值时自动启动，可提供天津近岸未来 3 天（72 小时）的海浪、风暴潮水位、漫滩范围、漫滩水深等要素，并可利用模式结果根据《风暴潮漫堤预报技术指南》中的要求推算漫堤风险级别，结果输出时间间隔 1 小时。模式采用并行计算方式，72 小时预报计算时间小于 20 分钟。

## 9.5 技术示范情况

**案例一：天津市滨海新区海洋局滨海新区自然灾害综合风险普查试点任务——“天津市滨海新区风暴潮灾害风险评估与区划”和“天津市海洋灾害重点防御区划定”**

(1) 案例概况

① 工程规模：天津市滨海新区海洋局滨海新区自然灾害综合风险普查试点任务总经费 162.4 万元。

② 建设条件：

2018 年 10 月 10 日，习近平总书记主持召开中央财经委员会第三次会议，专题研究提高自然灾害防治能力，指出要针对关键领域和薄弱环节，推动实施自然灾害监测预警信息化，自然灾害综合风险普查等九项重点工程。为贯彻落实习总书记关于自然灾害防治工作的重要指示精神，根据《国务院办公厅关于开展第一次全国自然灾害综合风险普查的通知》（国办发〔2020〕12 号）以及国务院第一次全国自然灾害综合风险普查领导小组先后印发的《关于印发〈第一次全国自然灾害综合风险普查总体方案〉的通知》（国灾普办发〔2020〕2 号）和《关于印发〈第一次全国自然灾害综合风险普查工作进度安排〉的通知》（国灾普办发〔2020〕5 号）要求，对地震灾害、地质灾害、海洋灾害、气象灾害、水旱灾害、森林和草原火灾等自然灾害进行风险普查。

根据自然资源部《全国海洋灾害风险普查实施方案》，及天津市应急管理局《关于筹建

天津市第一次全国自然灾害综合风险普查领导小组的函》，海洋灾害主要有风暴潮灾害，海啸灾害，海浪灾害，海冰灾害和海平面灾害。按照《天津市海洋灾害综合风险普查试点项目工作方案》的要求，天津市滨海新区于2021年开始了“天津市滨海新区海洋局滨海新区自然灾害综合风险普查试点任务”工作，其中“天津市滨海新区风暴潮灾害风险评估与区划”和“天津市滨海新区风暴潮灾害重点防御区划定”是此次普查试点工作的重要内容。

### ③ 主要内容：

天津市滨海新区风暴潮灾害风险评估与区划：按照《风暴潮灾害风险评估和区划技术规范》的要求，中心开展了天津市滨海新区海洋灾害基础地理信息资料、水文和气象资料、海底地形资料、防灾工程资料、风暴潮灾害资料、社会经济资料、重要承灾体、避灾点资料、高分辨率遥感数据资料等相关基础数据收集整理和补充调查工作；利用整理的资料以及天津市海洋数值预报、风暴潮漫堤和漫滩预警系统中的漫滩漫堤数值模型，按照技术规范分析灾害孕灾环境、危险性、承灾体脆弱性、减灾能力等因子，完成天津市滨海新区风暴潮灾害的风险评估工作，并在风险评估工作基础上确定风险区划空间单元，对风险评估结果进行空间综合及大小分级，制作天津市滨海新区风暴潮灾害风险评估和区划系列成果图件，并开展区划成果验证和应用工作。

天津市滨海新区风暴潮灾害重点防御区划定：通过分析天津海域风暴潮灾害的类型和特征，基于天津市风暴潮灾害风险评估和区划成果，结合对天津市滨海新区沿海区域重要承载体的综合分析，划定天津市滨海新区海洋灾害重点防御区，对划定结果进行实地踏勘，并征求地方相关行业部门意见，最终确定风暴潮灾害重点防御区。重点防御区的划定为海洋管理、海洋经济发展、海洋环境保护和海洋科学研究提供信息服务，为制定国土规划、社会经济发展计划以及减灾对策提供基础，为滨海新区的海洋防灾减灾提供决策支撑，为保障沿海社会经济和人民生命财产安全，海洋经济建设的安全、持续、稳定运行提供支持。

④ 投入时间：“天津市滨海新区海洋局滨海新区自然灾害综合风险普查试点任务”从2021年7月开始实施。

⑤ 验收情况：“天津市滨海新区海洋局滨海新区自然灾害综合风险普查试点任务”已通过验收。

⑥ 验收单位：天津市滨海新区海洋局。

⑦ 验收日期：“天津市滨海新区海洋局滨海新区自然灾害综合风险普查试点任务”于2021年8月30日验收。

⑧ 验收结论：项目提供的各项资料齐全，符合“天津市滨海新区海洋局滨海新区自然灾害综合风险普查试点任务”合同的要求；项目技术报告内容详实，技术路线合理，各项成果符合技术规范的相关要求；项目成果可以作为风险普查成果进行横向和纵向汇交，为地方海洋管理提供支撑。专家组一致同意该项目通过验收。

### (2) 工艺流程及主要参数

① 风暴潮灾害致灾孕灾要素调查：收集了天津市海洋灾害基础地理信息资料、水文和气象资料、海底地形资料、防灾工程资料、风暴潮灾害资料、社会经济资料、重要承灾体、

避灾点资料、高分辨率遥感数据等资料，形成了能够支撑海洋灾害危险性评估的致灾孕灾要素数据集。

② 风暴潮灾害危险性评估：开展天津市滨海新区风暴潮危险性评估，整理风暴潮致灾孕灾要素数据集和沿海岸线数据。基于沿海岸线数据，构建评估模型，采用风暴潮漫堤漫滩数值模式，模拟影响天津海域沿海的台风及温带风暴潮过程，分析计算可能最大、不同等级风暴潮淹没范围及水深，并进行充分验证保证可靠性，评估风暴潮危险性，编制危险性等级分布图及相关图件。

③ 风暴潮灾害风险评估和区划：在风暴潮危险性评估基础上，在天津市滨海新区开展风暴潮灾害现场实地踏勘，结合滨海新区脆弱性评价结果，构建风暴潮风险评估模型，完成了风暴潮灾害风险评价，规划应急疏散路径，编制了风暴潮风险评估和区划图集和报告。

④ 风暴潮灾害重点防御区划定：通过分析天津海域风暴潮灾害的类型和特征，基于天津市风暴潮灾害风险评估和区划成果，结合对天津市滨海新区沿海区域重要承载体的综合分析，制定符合滨海新区特点的风暴潮灾害重点防御区划定工作流程，划定天津市滨海新区海洋灾害重点防御区，对划定结果进行实地踏勘，并征求地方相关行业部门意见，最终确定风暴潮灾害重点防御区。

### （3）应用效果

“天津市滨海新区风暴潮灾害风险评估与区划”和“天津市海洋灾害重点防御区划定”工作的完成，为海洋管理、海洋经济发展、海洋环境保护和海洋科学研究提供信息服务，为制定国土规划、社会经济发展计划以及减灾对策提供基础，为滨海新区的海洋防灾减灾提供决策支撑，为保障沿海社会经济和人民生命财产安全，海洋经济建设的安全、持续、稳定运行提供支持。

## 案例二：2021 年度天津市海洋观测预报、预警监测和防灾减灾项目第一阶段（第二包）—海洋灾害风险普查项目——“天津市海浪灾害风险评估和区划”

### （1）案例概况

① 工程规模：“2021 年度天津市海洋观测预报、预警监测和防灾减灾项目第一阶段（第二包）—海洋灾害风险普查项目”总经费 39.5 万元。

#### ② 建设条件：

2018 年 10 月 10 日，习近平总书记主持召开中央财经委员会第三次会议，专题研究提高自然灾害防治能力，指出要针对关键领域和薄弱环节，推动实施自然灾害监测预警信息化，自然灾害综合风险普查等九项重点工程。为贯彻落实习总书记关于自然灾害防治工作的重要指示精神，根据《国务院办公厅关于开展第一次全国自然灾害综合风险普查的通知》（国办发〔2020〕12 号）以及国务院第一次全国自然灾害综合风险普查领导小组先后印发的《关于印发〈第一次全国自然灾害综合风险普查总体方案〉的通知》（国灾普办发〔2020〕2 号）和《关于印发〈第一次全国自然灾害综合风险普查工作进度安排〉的通知》（国灾普办发〔2020〕5 号）要求，对地震灾害、地质灾害、海洋灾害、气象灾害、水旱灾害、森林和草原火灾等自然灾害进行风险普查。

根据自然资源部《全国海洋灾害风险普查实施方案》、天津市应急管理局《关于筹建天津市第一次全国自然灾害综合风险普查领导小组的函》，以及天津市规划和自然资源局《天津市海洋灾害综合风险普查项目工作方案》的要求，此次开展风险普查的海洋灾害主要有风暴潮灾害，海啸灾害，海浪灾害，海冰灾害和海平面灾害。天津市于 2021 年在滨海新区开始了海洋灾害普查试点工作，2021 年底开展了海洋灾害普查全面铺开工作。其中，海浪灾害风险评估和区划工作是此次普查全面铺开工作的重要内容之一。

### ③ 主要内容：

按照《全国海洋灾害风险普查实施方案》、《天津市海洋灾害综合风险普查项目工作方案》以及《海浪灾害风险评估和区划技术规范》的要求，中心开展了天津市海浪致灾孕灾风险要素资料调查与分析处理，利用整理的资料以及天津市海洋数值预报、风暴潮漫堤和漫滩预警系统中的精细化海浪数值模型，按照技术导则分析海浪灾害孕灾环境、危险性、灾害危险指数等因子，完成天津市海浪灾害的危险性评估工作，并在评估工作基础上完成风险等级区划，制作天津市海浪灾害风险评估和区划系列成果图件，并开展区划成果验证和应用工作。

④ 投入时间：“2021 年度天津市海洋观测预报、预警监测和防灾减灾项目第一阶段（第二包）—海洋灾害风险普查项目”从 2021 年 7 月开始实施。

⑤ 验收情况：“2021 年度天津市海洋观测预报、预警监测和防灾减灾项目第一阶段（第二包）—海洋灾害风险普查项目”已通过验收。

⑥ 验收单位：天津市规划和自然资源局。

⑦ 验收日期：“2021 年度天津市海洋观测预报、预警监测和防灾减灾项目第一阶段（第二包）—海洋灾害风险普查项目”于 2022 年 6 月 16 日验收。

⑧ 验收结论：项目提供的验收资料齐全、规范，符合验收要求；项目完成了天津市海浪、海平面上升、海冰等灾害风险评估和区划工作，相关成果按要求完成了汇交，项目各项成果符合《全国海洋灾害风险普查实施方案》等技术规范和导则的相关要求；项目技术路线合理，数据内容详实，评估结果可信。专家组同意该项目通过验收。

### （2）工艺流程及主要参数

① 海浪致灾孕灾资料收集：确定风险评估区划的区域和尺度，搜集、整理与分析处理各类基础地理信息数据、历史灾害基本情况等与海浪灾害风险评估和区划相关的数据资料，为海浪灾害危险性评估工作提供支撑。

② 海浪灾害危险性评估：开展天津市滨海新区海浪危险性评估，整理海浪灾害致灾孕灾要素数据集和沿海岸线数据。构建历史海浪场数据集、计算海浪典型重现期和开展海浪危险性评估。

a) 构建历史海浪场数据集。以再分析风场为驱动，基于成熟的海浪数值模型 SWAN，重建天津海域的历史海浪场数据集。构建的海浪场数据集的长度不少于 30 年，空间分辨率不低于  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。

b) 海浪典型重现期计算。基于天津海域的海浪历史数据集，统计确定每个格点上的海浪要素的年极值序列，然后分别用 Pearson III 型或 Weibull 分布极值推算方法计算确定每

个格点上典型重现期的有效波波高，并绘制各省管辖海域不同重现期的波高空间分布图。其中重现期分别考虑 2、5、10、20、50、100 年一遇的情况。

c) 海浪危险性等级评估。基于海浪历史资料，分别计算每个格点上 I、II、III、IV 级浪高出现的次数，参考海浪灾害危险性等级确定方法，计算天津海域海浪灾害危险性等级。

③ 海浪灾害风险评估和区划：在天津市沿海开展海浪灾害现场实地踏勘，在海浪危险性评估基础上，组织开展海浪风险评估和区划。根据导则，海浪灾害危险分为四级，计算历史海浪分析场中每个格点的海浪灾害危险指标，并将其进行归一化处理，确定每个格点上的海浪灾害危险等级，制作完成评估区域海区的海浪灾害危险区划图。

### (3) 应用效果

海浪作为主要海洋灾害之一，会对海上交通运输、施工、捕捞、军事活动、沿海的堤岸、海塘、港口码头和各类建筑物等构成巨大威胁，根据《2021 中国海洋灾害公报》显示，2021 年，我国近海共发生有效波高 4.0 米（含）以上的灾害性海浪过程 35 次，其中台风浪 11 次，冷空气浪和气旋浪 24 次。发生海浪灾害过程 9 次，因灾直接经济损失 10537.50 万元，死亡失踪 26 人。“天津市海浪灾害风险评估和区划”的完成，可以提高防御海洋灾害的能力，减轻海洋灾害所造成的损失，为海洋管理、海洋经济发展、海洋环境保护和海洋科学研究提供信息服务，为制定国土规划、社会经济发展计划以及减灾对策提供基础，为天津市海洋防灾减灾提供决策支撑，为保障沿海社会经济和生命财产安全，海洋经济建设的安全、持续、稳定运行提供支持。

## 9.6 成果转化推广前景

### 9.6.1 技术推广前景

该系统建成后，主要应用于天津海域海洋环境预警工作以及天津市海洋灾害风险普查工作，为天津市海洋灾害预警、灾害应急预案、灾害风险评估、重点防御区的划定提供了技术支撑。该系统技术成熟可靠，应用领域广阔，应用潜力较大。

下一步中心将继续拓展该系统的功能模块，依托于 2023 年天津市规划和自然资源局科研项目“天津市海洋生态预报业务化系统研究”，结合该系统已有水动力模型基础，建立基于海洋水动力-生态耦合模型为基础的天津海域海洋生态预报业务化系统，在目前已开展的天津海域潮汐、风暴潮、海浪、海温、海流等业务化预报的基础上，开展海洋生态要素（营养盐、pH 值、叶绿素等）的业务化预报，提升天津海域海洋生态预警预报技术水平以及海洋生态预警业务能力，为水质环境保障、生态灾害应急监测、生态修复与评估等工作提供相应的预报预警产品与技术服务，也为地方政府海洋主管部门在海洋防灾减灾、海洋自然资源管理、生态修复监管以及海域使用监管等工作提供决策支持。

同时，中心还将进一步拓展该系统预报产品的发布渠道，计划将该系统预报产品接入到“天津市海洋环境预报微信公众号平台”和“北海区智能海洋预报制作及管理一体化业务平台”，可以为公众提供更精细化的预报服务，也可以为智慧城市、智慧港口、城市防潮防汛管理体系等建设提供技术服务。

## 技术 10：基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术与装置

### 10.1 技术提供方

技术提供方为天津水运工程勘察设计院有限公司、武汉大学测绘学院。

#### (1) 单位性质及主营业务范围

天津水运工程勘察设计院有限公司成立于 1993 年，隶属于交通运输部天津水运工程科学研究所，是以勘察、设计、咨询、研究等为主营业务的国家级高新技术企业。依托港口水工建筑技术国家工程实验室、国家水运工程检测设备计量站两个国家级平台及天津市水运工程测绘技术企业重点实验室等省部级实验室平台，长期致力于交通水运工程、海洋工程、应急抢险等方面的科研生产工作。

#### (2) 海洋领域技术工作情况简介

近五年来，承担重大科技生产项目近 200 项，取得各项专利及软件著作权 150 余项，获得省部级科技进步、科技咨询、勘测设计等奖项 100 余项。公司现有职工 198 人，其中正高级工程师 8 人、高级工程师 67 人，工程师 80 人，研究生学历人员 89 人，本科及以上学历人员占职工总数的 94%，拥有注册建造师、注册土木工程师等各专业注册执业资格人员 50 余人，天津市“131”创新型人才培养工程第一层次人选 3 人，省部级专家库专家 15 人。

公司拥有甲级测绘资质证书、甲级工程勘察证书等多项资质，通过了 ISO9001 质量管理体系、ISO45001 职业健康安全管理体系、ISO14001 环境管理体系认证，具有国家认监委颁发的 CMA 资质认定证书。

先后承担并完成了国家 863、908 项目、国土资源部、国家海洋局专项调查项目 20 余项，承担了天津、辽宁、河北、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、广西、海南等 30 余个沿海港口与航道的勘测、设计、咨询等相关工作，以及长江、黄河、珠江、海河流域、松花江、图们江、鸭绿江等内河码头航道的勘测、设计等千余项科研生产工作；勘测设计足迹遍布巴基斯坦、印度尼西亚、缅甸、马来西亚、斯里兰卡、伊朗、几内亚、喀麦隆、塞拉利昂、吉布提、圭亚那等 20 余个国家和地区，为当地港口、发电站等项目建设提供了有力的技术支撑。

### 10.2 技术成果简介

#### 10.2.1 技术成果名称和领域

技术成果名称：基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术与装置。

技术领域：海洋探测、海洋无人装备。

#### 10.2.2 技术成果来源

##### (1) 技术成果来源

国家重点研发计划项目：水上应急救援关键技术研究及应用示范（项目编号：2018YFC0810400，项目经费：11864 万）；

国家重点研发计划项目：水运工程关键计量标准及溯源技术研究（项目编号：2018YFF0212200，项目经费：585 万）；

天津市科技计划项目：沿海港口波、潮、流实时动态共享技术研发及应用平台建设（项目编号：16PTSYJC00190，项目经费：402.62 万）；

中央级科研院所科研创新专项项目：基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术与装置研发（项目编号：TKS200318，项目经费：31 万）

（2）项目总共取得相关科技成果包括专利、计算机软件著作权、科技论文、专著等 16 项。其中：申请专利 7 项，编著专著 1 项，获得计算机软件著作权 1 项，发表科技论文 7 项。

表 2-10-1 知识产权清单

序号	成果名称	专利号/软著号/ 杂志名称/书号	备注
1	一种 GNSS 潮位观测浮标动吃水改正装置	202010476900.9	发明专利
2	一种多功能水动力要素自动化监测平台	202010316112.3	发明专利
3	一种沉管沉放安装过程高程监测方法	202110360570.1	发明专利
4	一种 GNSS 潮位观测浮标	202020960279.9	实用新型专利
5	一种实时动态水深测量装置	202020949905.4	实用新型专利
6	一种浮漂式潮流观测装置	201821531141.6	实用新型专利
7	狭长航道离岸潮位遥测遥报装置	201820608275.7	实用新型专利
8	GNSS PPP 离岸潮位数据实时动态处理及可视化平台	2022SR0574805	软件著作权
9	水运工程测量技术进展	ISBN 978-7-5742-0048-7	专著
10	基于北斗卫星通讯的潮流潮位一体化观测及实时传输技术集成与实现	中国水运	期刊论文
11	Centrifuge Performance of SCM Wall-Reinforced Pile-Supported Wharf Subjected to Yard Loads	Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE	SCI
12	A Simplified BDS Broadcast Ephemeris and State Space Representative SSR Matching Method for BDS-Only Real-Time Precise Point Positioning PPP	IEEE Access	SCI
13	Consistency and analysis of ionospheric observables obtained from three precise point positioning models	Journal of Geodesy	SCI
14	Enhancing real-time precise point positioning with zenith troposphere delay products and the determination of corresponding tropospheric stochastic models	Geophysical Journal International	SCI
15	GGOS tropospheric delay forecast product performance evaluation and its application in real-time PPP	Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics	SCI
16	The realization and evaluation of mixed GPS BDS PPP ambiguity resolution	Journal of Geodesy	SCI

### 10.3 技术内容

#### 10.3.1 技术原理及工艺流程

潮位的精准化测量和预报对远洋航运、科学研究、工程建设、防灾减灾和国防军事具有十分重要的意义，我国对离岸潮位遥测有着广泛需求。目前现有的验潮手段有验潮井、浮子式验潮、声学验潮和压力验潮，以上验潮方法均只能应用于近岸，无法应用于深远海。我院

在 2018 年提出并成功试验了压力式传感器结合水下声学通信的离岸潮位遥测方法，把水下坐底式压力传感器数据通过水声通信传输至水面，再经水面标体传回岸边服务器，但该方式所需成本大、丢失风险高、维护繁琐，只适用于浅水海域，难以推广和产业化，且高性能大量程水下声学通信当前属于欧美发达国家对我国限制出口技术，属于“卡脖子”难题。

项目针对当前离岸潮位遥测中高性能大量程水下声学通讯“卡脖子”难题及其它难点，另辟技术路线，研究了基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术，研制了离岸潮位观测装置，形成了具有完全自主知识产权的技术方法和设备，主要有以下三项关键技术：

(1) GNSS PPP 潮位数据处理方法

研究采用信号滤波技术，分离出潮位数据。根据采集到的卫星定位信号、星基差分信号和姿态改正数据，执行卫星差分定位分析方法，融合计算出浮标在 ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed, 地心地固) 坐标系中的三维位置坐标，选取 SG 滤波器，从卫星浮标的三维位置坐标中分理出波浪的三维坐标，采用 SG 滤波器，从卫星浮标的高程坐标中分离出潮位的高程坐标。确定当地海域潮高基准面在 ECEF 坐标系中沿 Z 轴方向上的坐标值，根据已知潮位高程坐标，两者相减可得到潮位数据。

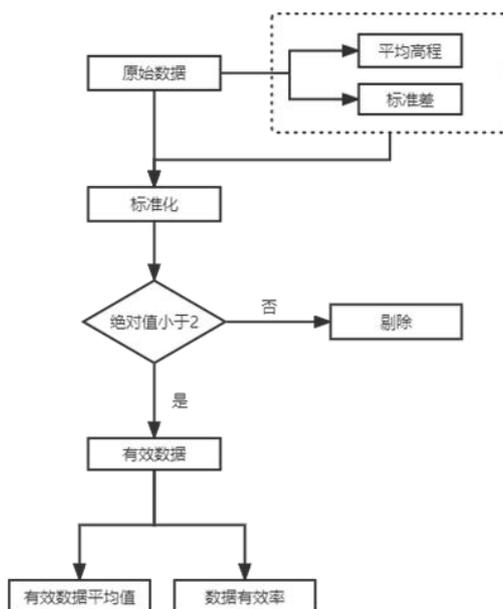


图 2-10-1 粗差别除流程

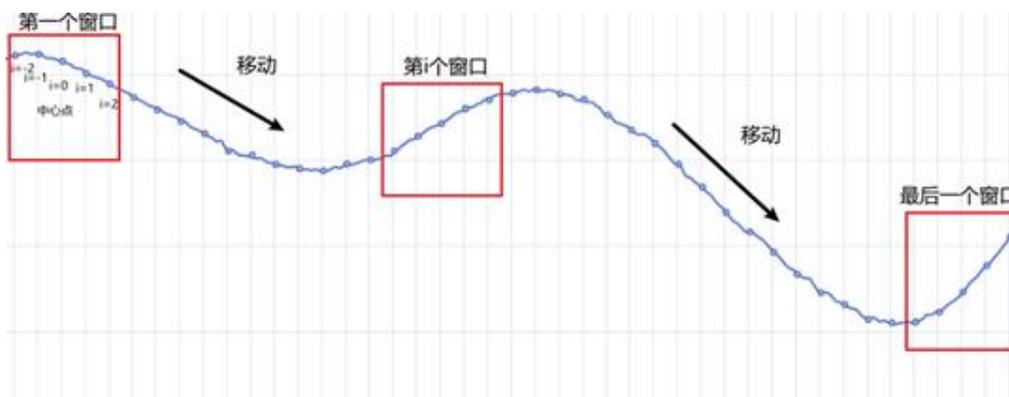


图 2-10-2 S-G 滤波窗口移动平滑法示意图

(2) 基于北斗 PPP 的离岸潮位观测浮标装置样机研制

针对离岸潮位遥测装置的应用特点,需研究卫星定位接收模块、星基增强差分模块、IMU 姿态模块、浮标等各硬件的选用指标,达到成本低、精度合适、体积小、性能匹配的效果;针对各模块的应用特点,统筹考虑安装基准传递、位置误差补偿、应用环境电磁干扰、多路径效应和多模块之间信号时统性,开展系统中模块布局与结构设计、防串扰电源模块设计、多源信号获取、输入输出接口等技术研究。根据测试结果和示范应用情况,进一步优化,形成第一代产品方案,再联系相关厂家,进行样机生产。



图 2-10-3 定制的北斗 PPP 接收机样机



图 2-10-4 “天科观潮 1号” PPP 潮位浮标

(3) PPP 离岸潮位数据实时动态处理及可视化平台软件开发

针对粗差剔除、姿态修正、潮位数据提取和潮位数据计算进行数据处理软件开发,支持在线远程接收遥测数据和实时处理潮位数据等功能;针对整个系统的实测对比检验需求,对离岸潮位遥测装置测量精度进行测试,对整个软硬件系统运行可靠性等进行检验。

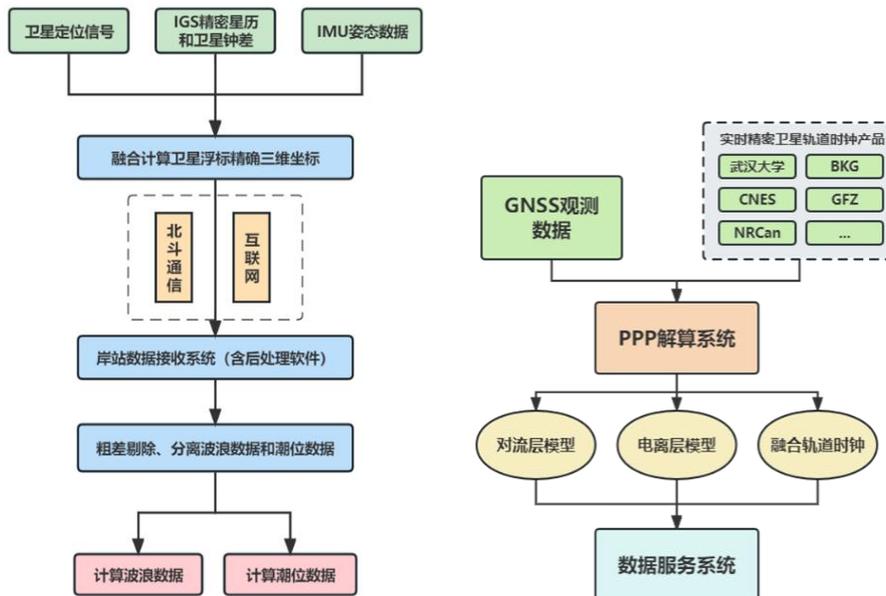


图 2-10-5 项目技术路线示意图

### 10.3.2 技术成果适用性分析

基于 GNSS PPP 的离岸潮位遥测遥报技术与装备与现行的压力验潮+水声通信遥测遥报装置相比,有效提高了离岸潮位观测精度和效率、降低了观测布设和维护难度,可适用于不同水深海域,可应用于海洋测绘、海洋水文调查、生态环境保护、海洋科学研究等领域。

### 10.3.3 技术创新性及先进性

(1) 提出了基于北斗的离岸潮位遥测新方法和北斗 PPP 离岸潮位遥测数据处理方法,应用北斗短报文数据传输,实时进行精密单点定位,实现了离岸潮位的连续观测和实时精密解算;

(2) 研制了基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测装置,开发了潮位动态处理及可视化系统,填补了行业空白,使离岸潮位观测成本大幅降低,易于维护和推广;

(3) 提出了基于北斗 PPP\_B2b 服务和实时自适应动态约束模型的实时精密单点定位方法,有效解决了无公网或地基增强基准站无法覆盖等海洋环境下的实时高精度定位难题,推动了北斗系统向海洋规模化应用。

## 10.4 科技效果

2023 年 4 月 18 日,中国地理信息产业协会组织专家采用视频会议形式对天津水运工程勘察设计院有限公司等单位完成的“基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术与装置研发”科技成果进行了评价。评价委员会听取了成果汇报,审阅了相关文档,经质询与讨论,认为该项目针对离岸潮位快速遥测难题,研究了在无 CORS 信号覆盖海域基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术,研制了离岸潮位观测装置,形成了具有自主知识产权的技术方法和设备,有效提高了离岸潮位观测精度和效率、降低了观测成本。

国家水运工程检测设备计量站对基于北斗 PPP 的离岸潮位观测浮标装置样机“天科观潮 1 号”进行了第三方测试,潮高准确度最大偏差为负 4.8cm,满足《海洋观测规范\_第 2 部分 海滨观测》(GBT14914.2\_2019)对潮位观测的精度要求(三级最大允许误差为 $\pm 10\text{cm}$ )。

工业和信息化部电子第五研究所(中国赛宝实验室)对“GNSS\_PPP 离岸潮位数据实时动态处理及可视化平台”进行了第三方软件产品确认测试,测试结果为通过。

## 10.5 技术示范情况

通过本项目研究的基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术以及研发的离岸潮位观测浮标装置,为黄骅港、天津港、深中通道隧道基槽回淤监测预警预报等提供实时、便捷的潮位遥测技术支撑,为工程建设、港口航道与航运预警预报及防灾减灾、安全应急预警等提供多种成果数据集成以及直观的成果展示。

研究成果在实际工程项目中得到了直接应用,合同总额为 2968.6 万元,为公司带来了显著的经济效益。主要应用在以下三个工程项目中:

### 案例一:黄骅港 20 万吨级航道潮位、潮流实时观测技术服务

依托基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术与装置研发技术成果,建设完成了黄骅港 20 万吨级航道潮位、潮流实时观测平台系统,实现了航道沿程潮位、潮流数据的实时、连续、长期遥测遥报;通过开展日常维护和定期巡检,保障平台平稳运行和测量精度,为 20 万吨级

航道运维和船舶进出港提供了有效的、可靠的技术支持。项目实施实现了航道维护性疏浚施工的科学规划及船舶合理调配，有效提升了船舶疏浚作业质量与效率。依托项目成果优化航道沿程基准面，提高了航道承运能力，提升了航道水深资源利用率，保障了航道精准乘潮的实施，实现了 20 万吨级船舶满载进出港，经初步统计，港口货运经济增量过亿元；促进了港口建管养用科技水平，带动了港口和腹地经济快速发展。

合同金额：1278.6 万元；单位名称：中华人民共和国沧州海事局；应用起止时间：2021-12-01~2023-04-20；单位联系人/固定电话：赵娜/0317-5786571。

### **案例二：深中通道隧道基槽回淤预警预报现场水文监测**

依托基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术与装置，建设了深中通道沉管隧道基槽水沙环境自动监测系统。该项研究成果多源数据集成观测技术体系与一体化综合数据采集器，实现了深中通道水沙环境的长期自动监测，为海底隧道的修建、工程海域泥沙淤积规律研究与淤泥的预测预报及沉管下放辅助决策提供科学依据。

合同金额：1000 万元；单位名称：交通运输部天津水运工程科学研究院；应用起止时间：2020-11-12~2023-04-20；单位联系人/固定电话：严冰/022-59812345。

### **案例三：天津港航道港池泊位常规水深、浚前浚后、防波堤水深测量**

定期开展了天津港航道港池泊位常规水深、浚前浚后、防波堤水深测量项目，项目中使用了先进的测绘地理信息技术，特别是基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术与潮位遥测浮标的应用，提高了水深测量工作效率和成果质量，为天津港智慧港口建设以及航运安全提供了及时可靠的数据支撑。该项目成果在智慧港口建设、港口运营管理、航海保障等方面发挥重要作用，天津水运工程勘察设计院有限公司高质量、高效率的服务为港区发展提供了高水平的地理信息服务保障。

合同金额：690 万元；单位名称：天津港港务设施管理中心；应用起止时间：2021-01-01~2022-04-30；单位联系人/固定电话：刘维利/022-25705069。

## **10.6 成果转化推广前景**

### **10.6.1 技术推广前景**

目前现有的验潮手段有验潮井、浮子式验潮、声学验潮和压力验潮，以上验潮方法均只能应用于近岸，无法应用于深远海。国内外常用的 GNSS 潮位测量技术主要是基于实时动态定位（RTK）、后处理动态定位（PPK）和精密单点定位（PPP），在有效测量距离、验潮精度、验潮时效性方面均存在一定局限性，制约了 GNSS 技术在离岸潮位遥测方面的进一步推广应用。近几年，随着 IGS 实时数据流产品的播发，实时精密单点定位技术发展迅速，特别是 BDS\_3\_PPP 服务，可以为用户提供公开、免费的实时高精度服务。但鲜见实时精密单点定位技术在离岸潮位遥测方面的相关研究和实际应用，市面上未见同类 PPP 离岸潮位实时遥测产品。

项目成果具有良好的应用和推广前景：

（1）提供一种新型离岸潮位遥测技术和装置。取代“压力式验潮+声学通信”的现行离岸潮位遥测方式，为离岸潮位观测业务需求的单位提供一款具备低成本、易操作、广适用、高

精度等特点的新型离岸潮位遥测技术和装置，大幅缩减离岸潮位观测成本，显著提高观测效率。

(2) 可在海域水深测量工作中推广应用。进行海域水深测量时，采用基于北斗 PPP 的离岸潮位遥测技术，可方便实现水深测量、数据处理、数据传输与展示的高度实时化，进而实现海域实时水深测量。该方式可避免水深测量作业中因潮位数据缺失导致水深测量工作无效的情况，从而提高海域水深测量工作效率。

#### **10.6.2 技术推广障碍及应对措施**

(1) 该技术成果在海况较好时，取得了令人满意的结果，但在复杂海况时的适应性和性能精度等情况需要进一步测试。后期可以依托项目或工程实际，开展复杂海况时的测试工作，发现问题解决问题。

(2) 数据平台对于数据的统计与分析深度有限。后期可根据实际需求，进一步挖掘利用现有数据，提高数据的利用率，并进一步完善相关系统功能。

## 技术 11：一种针对海洋油性漂浮薄膜的智能取样无人船

### 11.1 技术提供方

天津金晟保科技有限公司是一家坐落于天津滨海高新区的科技型民营企业，自 2011 年成立以来，始终坚持科技创新发展，被认定为高新企业、科技型/创新型中小企业。并秉持诚信经营、依法纳税，无任何不良记录。主要经营业务范围有无人操控设备的开发、制造和服务，包括无人船、无人车、机器人及其平台和以上设备的相关应用。业务客户遍布全国各省，服务对象包括解放军部队、武警特警、应急部消防研究所、省防汛水利部门、中科院环境研究所、各地高等名校及各级环保、测绘企事业单位，并持续为他们提供着技术支持，保驾护航。

### 11.2 技术成果简介

#### 11.2.1 技术成果名称和领域

技术成果名称：一种针对海洋油性漂浮薄膜的智能取样无人船，该产品可以在海面上通过无人操控对油污油膜智能取样、存储。

技术领域：海洋无人装备及海洋环境保护相关。

#### 11.2.2 技术成果来源

技术成果来源于企业自研。

该产品知识产权归属于天津金晟保科技有限公司，由公司独立自行研发，并已下发专利证书，专利号为 ZL 201920053451X，也由公司完成生产制造。

### 11.3 技术内容

#### 11.3.1 技术原理及工艺流程

本实用新型的目的在于克服现有技术的不足之处，提供一种针对海洋油性漂浮薄膜的智能取样无人船。

本实用新型解决技术问题所采用的技术方案是：

一种针对海洋油性漂浮薄膜的智能取样无人船，包括船体、航行控制系统、动力系统，还包括取油去水装置，所述的取油去水装置包括安装在船舱外侧的取油器以及安装在船舱内的分油罐、抽水泵、排水泵，取油器插入海面下，取油器的排液管穿入船舱内，与安装在船舱内的分流管连接，所述分流管将取油器抽上来的液体分成多路，通过多路分支管分别连接多个抽水泵的进口，多个抽水泵的出口分别连接多个分油罐的进口，多个分油罐的出口分别连接多个排水泵的进口，多个排水泵的出口共同连接一排水汇流管，该排水汇流管连接一排水总管的一端，该排水总管的另一端引至船舱外，排水流入海里。

所述的取油器为管体，竖向放置，在管体的顶部开口安装密封胶塞，在管体的底部开口安装带孔胶塞，该带孔胶塞连接排液管，在管体的外环壁竖向制有一长条孔，该长条孔为进液口。

所述的取油器为两个，分别通过高度调节机构安装在船体两侧。

所述的高度调节机构包括卡箍及限位器，所述的限位器固定在船的外壁，所述的卡箍套

装在取油器的管体上,在卡箍的外环壁制有两定位块,在限位器上竖向均匀制有多个定位槽。

所述的分油罐侧壁上部制有进液口、下部制有出液口,在分油罐内中部通过支架安装吸油棉,分油罐顶部通过螺纹安装密封盖。

所述的动力系统包括两个推进器及推进器的供电电池,供电电池安装在船舱内,推进器通过推进器支架对称安装在船尾部。

在船体顶面中部固装桅杆,在桅杆的顶部安装航行控制系统。

所述的航行控制系统包括单片机及分别与单片机连接的数传模块、PWM 信号接收机、多个水泵控制器、推进器控制器。

船体为 V 型船体,船的重心在船体下部 1 / 4 高度以下,在横倾角不超过 90 度情况下自回正。

所述船体采用铝合金材质制成。

本实用新型的优点和积极效果是:

(1) 本实用新型取油去水装置通过连续不断地进液、分油、排水,可提高油性样品的获取概率和数量。

(2) 本实用新型船体本身既是一个浮子,能保证处于水线中心的取油器的进液口一直保持在水面,保证漂浮在水面的油层能够进入进液口,而不是仅能抽到水。

(3) 本实用新型可调节自适应的取油器可随波浪自行调整,在 3 级风浪摇摆下仍然能稳定提取厚度达分子直径的油膜样品。

(4) 本实用新型采用抽水 and 排水成对的水泵设计,可避免因过滤产生的管路水压,减少爆管的隐患。

### 11.3.2 技术成果适用性分析

(1) 技术适用的行业和具体领域:海洋无人装备,海洋环境保护。

(2) 技术使用中的特定条件限制:本品属于无人操控设备,需要有相应技术素质的人员使用,用于需要漂浮油膜取样的近海海域,恶劣天气不能正常使用。

### 11.3.3 技术创新性及先进性

(1) 使用无人船进行远程智能取样;

(2) 比人工更精准便捷的提取油膜;

(3) 通过每次采集的差异分析油膜泄露的区域。

### 11.4 科技效果

电缆如果断裂,里面会施放出液压油,油体上升到海面后约在几十分钟内变成分子厚度的油膜扩散,只有通过提取液压油分离后检验,才可以分析出电缆断裂点从而进行维修。然而液压油由于漂浮在海面上形成薄膜,导致提取难度非常大,即便人工也不能保证每次抽取的都是油。智能取样能有效的避免此问题,通过无人船则使提取的效率得到提升。

本成果促进了该领域产业的升级,从有人作业升级到无人作业,减少了人力成本,提高了效率,同时降低了作业危险系数。改变了产业模式不仅带动了产业技术发展,也推动了技术进步和创新。

本成果使作业模式从传统低效的人力取样方式，向智能化转变，以新型的形式完成作业，不仅降低了作业劳动强度，增加了作业安全性，也使作业变得简洁便捷，升级了产业的作业方式。

新技术带动的产业升级会催生新的产业模式，推动产业数字化信息化的转变，实现高速信息交互，在管理上也更为透明直观。同时使用新能源方式的无人设备相比传统载人的燃油艇，更为环保清洁，符合低碳环保的主旨。

### **11.5 技术示范情况**

该技术在近海维修及环保领域能够提供有力支撑。

典型应用案例内容应包括：由代理公司销售，应用于南方电网研究项目内采购。

### **11.6 成果转化推广前景**

#### **11.6.1 技术推广前景**

该技术在国内外海洋油污泄露以及海下电缆维修辅助领域属于研究探索阶段，该成果填补了在无人船自动油膜取样技术的空白，在未来海洋治理、监测有广阔的前景和潜力。

#### **11.6.2 技术推广障碍及应对措施**

该技术成果推广需要市场有无人操作技术的支持与推广，若在该领域深耕细作，需要更多的需求方愿意投入研发成本，以解决面对可能出现更细化的问题使之逐一攻克，提高产业效率。

## 技术 12：天津土著经济贝类浅海增殖技术开发与应用

### 12.1 技术提供方

天津农学院始建于 1976 年。1982 年获学士学位授予权，2006 年获硕士学位授予权。学校以农科为主体，农学、工学、管理学、理学、经济学、文学、艺术学协调发展。经过多年的办学实践，形成了紧贴区域经济社会发展，服务于现代都市型农业的鲜明办学特色。

学校以学科建设为龙头，以提高人才培养质量为中心。现有 15 个学院（部），7 个学科门类，48 个本科专业及专业方向；有 9 个一级学科学术硕士学位授权点、4 个硕士专业学位授权点。有 1 个天津市一流学科、4 个天津市级重点学科、5 个天津市级特色学科群、2 个天津市高校服务产业特色学科群、1 个国家级大学生校外实践教育基地、6 个国家级一流本科专业建设点、11 个省级一流本科专业建设点；2 门国家级一流本科建设课程、29 门天津市一流本科建设课程。2021 年，学校入选全国乡村振兴人才培养优质校。

学校现有教职员工 1000 余人，其中：双聘院士 4 人，国务院政府特殊津贴专家 18 人，国家级人才 7 人，省部级人才 53 人。设有 1 个农业农村部重点实验室、4 个国家级科研创新平台、天津市水产生态及养殖重点实验室、天津市农业动物繁育与健康养殖重点实验室、天津市主要农作物智能育种重点实验室等 50 余个省部级平台。

### 12.2 技术成果简介

#### 12.2.1 技术成果名称和领域

技术名称：天津土著经济贝类浅海增殖技术开发与应用。

技术领域：深浅海养殖。

#### 12.2.2 技术成果来源

国家科技重大专项，国家贝类产业技术体系（CARS-49）天津综合试验站，600 万元。

国家重点研发计划-蓝色粮仓项目，重要养殖贝类种质创制与规模化制种，2018YFD0901404，37 万元。

国家海洋局 19-3 补偿款项目，天津海域主要经济动物生态修复工程，19-3BC2014-08，570 万元。

天津市农业科技成果引进项目，天津主要滩涂贝类苗种繁育及池塘养殖技术示范，201602050，50 万元。

种业科技重大专项，“斑马蛤”菲律宾蛤仔良种繁育及虾塘混养技术研究，17ZXZYNC00020，50 万元。

表 2-12-1 成员组成及简介

姓名	工作单位	职称级别	承担任务介绍
郭永军	天津农学院	正高级	方案制定、海域调查
李永仁	天津农学院	副高级	苗种繁育及滩涂调查
梁健	天津农学院	中级	苗种繁育
梁爽	天津农学院	中级	样本采集

姓名	工作单位	职称级别	承担任务介绍
陈丽梅	天津农学院	副高级	水质因子测定
刘惠茹	天津农学院	中级	养殖病害分析

### 12.3 技术内容

#### 12.3.1 技术原理及工艺流程

该成果以天津土著经济贝类（主要为毛蚶、菲律宾蛤仔）的生物学特征为基础，通过引进技术的改进、创新与集成，开发适用于天津海域的浅海贝类增殖技术，包括天津土著经济贝类的苗种规模化繁育技术、贝类增殖技术及资源调查与评估在内的完整技术体系，可为天津及周边海域贝类资源增殖与修复提供技术依托。

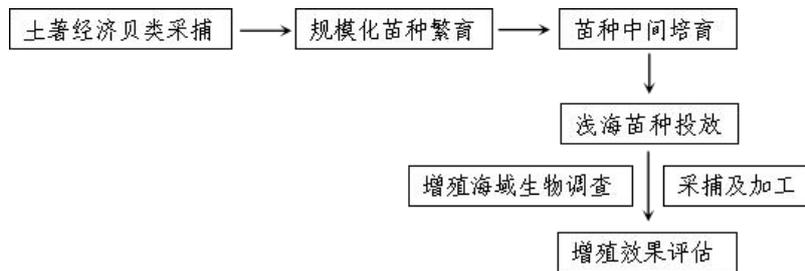


图 2-12-1 工艺流程图

#### 成果详细技术：

##### （1）本地土著贝类的规模化苗种繁育

开展了本地土著贝类苗种繁育，贝类增殖提供苗种。为满足苗种繁育需求，开发了四级单胞藻培养工艺，培育了叉鞭金藻、等鞭金藻、角毛藻、小球藻和新月菱形藻、盐藻、小球藻、角毛藻、扁藻、云微藻等多种藻类。

开发了浮游幼虫培育技术，设计了变态期采苗技术（铺膜隔底采苗法），开发了隔土铺膜式土塘中间育成技术，对土著菲律宾蛤仔、毛蚶、青蛤进行了规模化苗种培育，2018 年以来共培育苗种 12.6 亿粒。



图 2-14-2 贝类苗种繁育单胞藻类培育：A. 单胞藻类一级培养；B. 二级培养；C. 三级培养

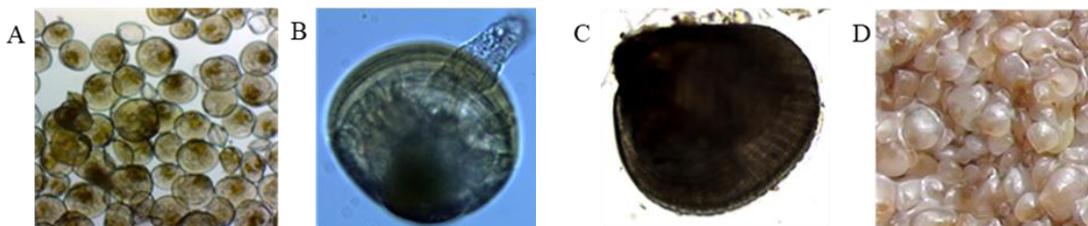


图 2-12-3 不同发育阶段的菲律宾蛤仔苗种：A. 浮游期壳顶幼虫；B. 匍匐幼虫；C. 初期稚贝；D. 双水管稚贝（苗种）



图 2-12-4 铺膜隔底采苗法示意图

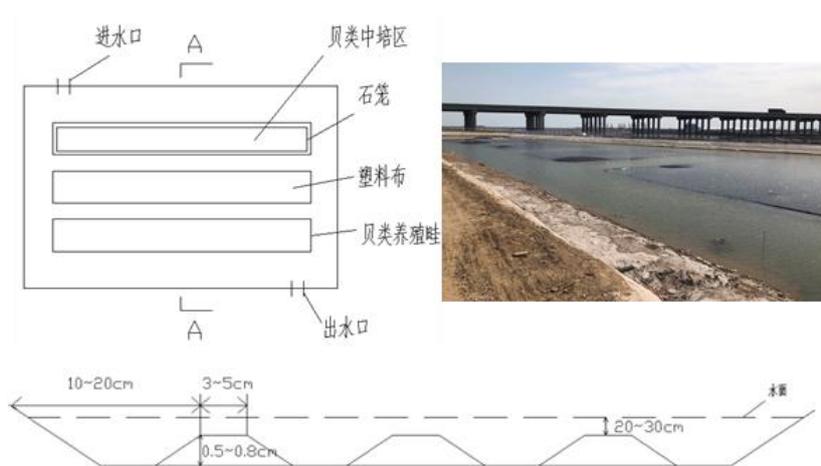


图 2-12-5 底栖双壳类中间培育池塘俯视图和养殖畦构造示意图

表 2-12-2 铺膜隔底采苗与直接采苗参数对比

参数	变态率%	变态期存活率%	变态期生长率 $\mu\text{m}/\text{d}$	稚贝生长率 $\mu\text{m}/\text{d}$
铺膜隔底采苗	52.6 $\pm$ 12.6	64.5 $\pm$ 13.4	38.5	53.4
直接采苗	38.4 $\pm$ 8.3	48.5 $\pm$ 11.2	32.6	46.7

表 2-12-3 隔土铺模式土塘中间育成与普通土塘中间育成参数对比

参数	生长速度 $\mu\text{m}/\text{d}$	存活率%	苗种回捕率%
隔土土塘中间育成	45.6	78.5	$\approx$ 95-99
普通土塘中间育成	32.9	72.4	$\approx$ 60-70

## (2) 贝类的增殖放流技术研究

### ① 贝类的增殖放流技术研发及应用

针对经济贝类资源衰退的问题，在大神堂鱼礁区附近海域增殖滤食性贝类，吸收固定水体中的氮、磷等营养物质，改善水域环境，修复海域经济动物种群，维持渤海生态系统物质流动和能量流动的平衡。

通过海域本底调查，确定放流区域、放流种类、放流时间以及规格密度等参数，制定完整的贝类增殖放流方案。

本团队自 2010 年开展贝类增殖放流，“十三五”以来，共放流毛蚶、菲律宾蛤仔等双壳贝类 1273.5 吨，总计 81183.6 万粒（表 2-12-4）。

表 2-12-4 “十三五”以来，贝类增殖放流信息

时间	种类	规格	数量（万粒）	总重 t	放流位置
2016 年春	毛蚶	110 粒/kg	660.0	6.0	塘沽高沙岭
	文蛤	750 粒/kg	52.6	0.7	塘沽高沙岭
2016 年秋	毛蚶	500 粒/kg	15500	300	汉沽大神堂
	菲律宾蛤仔	723 粒/kg	10845	150	汉沽大神堂
2017 年秋	菲律宾蛤仔	1600 粒/kg	14820	100	汉沽大神堂
	青蛤	644 粒/kg	520	10.5	塘沽高沙岭
	毛蚶	566 粒/kg	3240	140	塘沽高沙岭
2018 年秋	毛蚶	284 粒/kg	880	40	汉沽大神堂
		322 粒/kg	264	12	塘沽高沙岭
	青蛤	436 粒/kg	498	8.3	塘沽高沙岭
2019 年秋	菲律宾蛤仔	1000 粒/kg	6000	60	汉沽大神堂
	青蛤	600 粒/kg	720	12	塘沽高沙岭
	毛蚶	344 粒/kg	4128	120	塘沽高沙岭
2020 年秋	毛蚶	320 粒/kg	2560	80	塘沽高沙岭
	菲律宾蛤仔	1200 粒/kg	12000	100	汉沽大神堂
2021 年秋	毛蚶	312 粒/kg	2496	80	塘沽高沙岭
	菲律宾蛤仔	1000 粒/kg	6000	60	汉沽大神堂
总计			81183.6	1273.5	



图 2-12-6 浅海贝类采捕及滩涂赶海拾贝

## ② 海域土著经济贝类突发性死亡应急调查

2012 年 9-10 月，汉沽浅海底播菲律宾蛤仔发生大规模死亡，死亡率最高达 86.2%，同时生长缓慢。结果表明，蛤仔死亡原因为底质表层的寻氏肌蛤与蛤仔争夺近底海水中的饵料和溶氧，并通过足丝网络影响蛤仔的摄食及呼吸，这是已知寻氏肌蛤首次爆发性出现于渤海湾浅海。

2021年8月，独流减河河口野生菲律宾蛤仔突发急性大面积死亡，本团队调取数据发现，台风“烟花”过后，独流减河作为本市主要泄洪河道之一，出水口盐度低于2，导致滩涂贝类几乎全部死亡。



图 2-12-7 独流减河河口滩涂调查

### ③ 贝类在该海域的适应性及适宜密度研究

通过试验，监测分析 5 种主要经济贝类的生长、存活及其养殖区的底质、生物饵料，探讨其在天津大港滩涂的养殖适应性。结果表明，该滩涂适于养殖长牡蛎、毛蚶，较适于养殖菲律宾蛤仔、青蛤，不适于养殖缢蛏。

为研究大神堂浅海菲律宾蛤仔养殖的适宜密度和生长特征，在不同养殖阶段设计密度梯度养殖试验，结果表明，2000 粒/m<sup>2</sup> 为该海域蛤仔养殖的适宜密度，适于培育大规格商品贝。

### ④ 本地浅海贝类肥满度变化研究

对天津浅海菲律宾蛤仔在不同密度和月份下的肥满度变化进行研究，结果表明：2000 粒/m<sup>2</sup> 及以下密度之间蛤仔肥满度差异不显著，4000 粒/m<sup>2</sup> 密度下蛤仔肥满度显著偏低；蛤仔肥满度周年变化范围为 14.1-25.6，1-5 月，蛤仔肥满度高于 20，3-4 月肥满度最高。

#### (3) 贝类增殖效果调查与评估

为评估增殖放流对本地贝类资源的影响，指导当地贝类资源的修复及合理开发，2008 年以来，本团队对汉沽鲤鱼门、大港减河口及大港滨海湿地三段潮间带滩涂开展持续的经济贝类资源调查，并对大神堂渔港浅海捕获的经济贝类进行跟踪。

滩涂调查的结果表明：共发现经济贝类 24 种，每段滩涂每年 7~14 种；各滩涂的经济贝类生物量范围为 223.5~1665.5 g/m<sup>2</sup>，鲤鱼门及减河口滩涂的经济贝类栖息密度及生物量在 2012 年以后均高于 2008 年，2008 年~2017 年滨海湿地滩涂的经济贝类栖息密度及生物量高于 2018 年-2020 年；鲤鱼门及减河口滩涂的经济贝类主要分布于中潮区中、下部，滨海湿地滩涂的经济贝类主要分布于中潮区中、上部；各滩涂的经济贝类优势种在调查前期均为四角蛤蜊，鲤鱼门滩涂于 2012 年、减河口滩涂于 2013 年以后为菲律宾蛤仔。

“十二五”以来，天津及周边海域野生贝类捕获量逐年增加。以大神堂渔港为例，2018 年菲律宾蛤仔产量下降，2021 年迅速升高，这与 2019-2020 年天津港锚地发现野生蛤仔聚集海域有关，2022 年毛蚶、长牡蛎、脉红螺与头足类采捕量均有所提高，菲律宾蛤仔采捕量低于 2020 年。大神堂渔港 2022 年贝类总产量为 14320 吨，较 2014 年提高 15.8%。

表 2-12-5 2012-2022 年大神堂渔港主要经济贝类捕获量 (t)

种类	2012 年	2014 年	2016 年	2018 年	2020 年	2022 年
毛蚶	225	3500	3000	3000	2400	4000
长牡蛎	1750	4500	6000	6000	4200	4800

种类	2012 年	2014 年	2016 年	2018 年	2020 年	2022 年
菲律宾蛤仔	3250	3500	2400	800	13400	4200
脉红螺	450	760	880	800	920	1200
头足类	100	100	100	100	100	120
总计	5775	12360	12380	13100	21020	14320

注：采捕贝类均达商品规格

#### (4) 成果开发的相关装备

##### ① 天津市滨海新区海水贝类繁育及养殖产业园

为支持天津本地贝类增殖，保护土著贝类资源，在本团队的推动下，利用中央财政经费 2000 万元和自筹经费 2000 万元，在海升水产养殖有限公司建立贝类繁育及养殖基地，促进天津及周边地区贝类苗种繁育和养殖技术的推广。

基地主体建筑面积 8533 m<sup>2</sup>、养殖池塘面积 1112 亩。具备年生产稚贝苗种 20 亿粒、中间培育苗种 200 吨、浓缩藻液 1 万 L、成贝养殖产量 450 吨的产能。主体工程包括：海水贝类繁育车间 6162 m<sup>2</sup>、贝类净化加工车间 713 m<sup>2</sup> 等。



图 2-12-8 贝类繁育及养殖产业园建设组织机构及分工

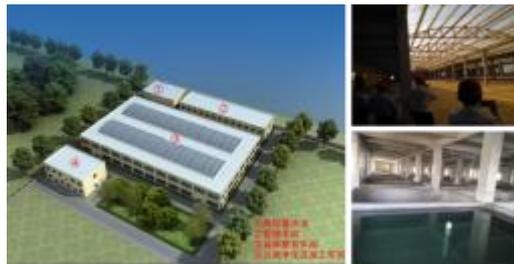


图 2-12-9 贝类苗种繁育主体工程

##### ② 一种闭壳贝类的捕后粗加工处理方法

提供一套适用于蛤类、蚶类、贻贝类、牡蛎类等闭壳型贝类的规格分选和表面净化技术。本发明节省了劳动力，降低了生产成本，可对目标贝类中杂质进行快速分离，保证了贝类捕后的成活率，为贝类的长途运输及销售打下良好基础。

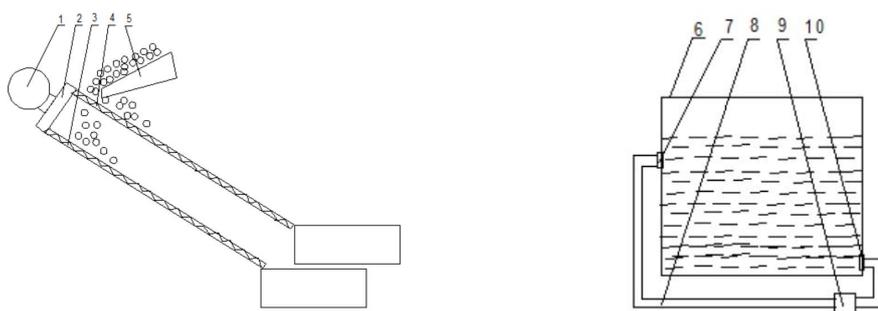


图 2-12-10 浅海贝类采捕及滩涂赶海拾贝

③ 一种贝类育苗池换水设备

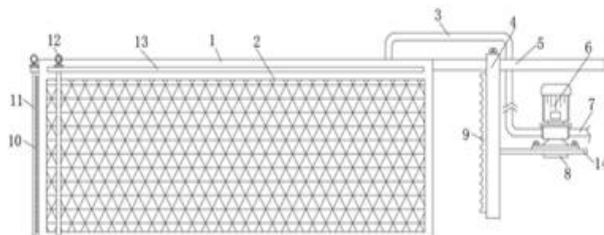


图 2-12-11 贝类育苗池换水设备示意图

④ 一种便携式风扫贝类播苗机

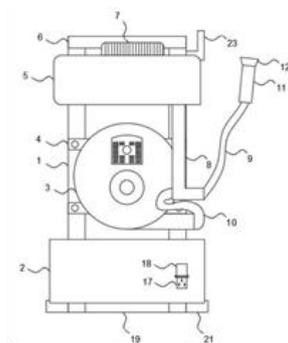


图 2-12-12 便携式风扫贝类播苗机

⑤ 一种适用于池塘养殖的水体环流设备

有效加强池塘底部水体的流动性，控制水体的循环速度，还可作喷淋式增氧，对于促进贝类苗种池塘中间培育有显著作用。

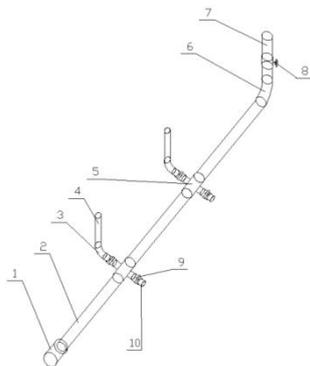


图 2-12-13 池塘养殖的水体环流设备苗机

### ⑥ 菲律宾蛤仔养殖过程中生物样本采集设备

开发了一种浮游生物采样网的底部收集装置。

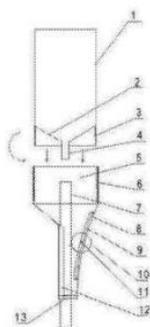


图 2-12-14 浮游生物采样网的底部收集装置

### (5) 技术培训和现场指导

该成果研究成熟以来，陆续开展菲律宾蛤仔苗种繁育及养殖相关的培训会，其中 2018 年以来培训人员 284 人。



图 2-12-15 技术培训现场

### 12.3.2 技术成果适用性分析

该技术成果主要适用于贝类增殖业，包括贝类生境研究、资源调查评估、贝类苗种繁育等领域。另外，对贝类养殖业具有一定支撑作用，包括苗种提供、浅海底播养殖、池塘养殖等领域。

该技术成果适用于我国北方泥质或泥砂质底质浅海的贝类资源增殖，海域深度低于 20m。

### 12.3.3 技术创新性及先进性

#### 创新点：

(1) **铺膜采苗：**贝类苗种繁育过程中，幼虫变态期前在育苗池底铺设透明聚乙烯薄膜（厚度 200-300 $\mu\text{m}$ ）进行采苗，该薄膜维持到幼贝期后可撤除。该方法解决了北方菲律宾蛤仔育苗附底后死亡率高的问题，提高了苗种变态率、稚贝生长速度以及成活率。

(2) **隔土中培：**新型的隔土铺膜式土塘中间育成法，即在土池养殖畦上铺设黑色塑料，四周用石龙压实，进水并肥水后，将出库贝苗均匀播撒其上，由壳长 1mm 左右培育至 5-10mm。解决了在泥底质池塘难以开展苗种中培的问题，对比室内中培成本降低 60%以上。

(3) **保护性增殖：**在贝类苗种放流后，人工看护放流区域，禁止人为采捕，直至苗种达到一次性成熟并排放精卵之后允许采捕。另外，也可以采取在禁止采捕的保护区、鱼礁

区或海洋牧场开展贝类增殖放流。采用保护性增殖方式，海区贝类生物量在 2 年内提高 264% 以上，比普通增殖方式提高 162%。

#### 先进性：

申报技术已通过成果鉴定，鉴定结果为国际先进。

#### 12.4 科技效果

(1) 该成果的土著贝类苗种繁育方面，铺膜隔底采苗与直接采苗对比，变态率提高 37.0%，变态期存活率提高 33.0%；

(2) 隔土铺模式土塘中间育成与普通土塘中间育成对比，苗种生长速度提高 38.6%，存活率提高 8.4%；

(3) 采用保护性增殖方式，海区贝类生物量在 2 年内提高 264% 以上，比普通增殖方式提高 162%；

(4) 采用本成果在大神堂海域增殖菲律宾蛤仔，对比 2010 年，2020 年前后该海域菲律宾蛤仔生物量提高 10 倍以上，同时，滩涂菲律宾蛤仔大量出现，生物量迅速提高，并成为优势物种。

#### 12.5 技术示范情况

##### 案例：大神堂浅海菲律宾蛤仔底播增殖效果及生态评估

##### (1) 案例概况

“十三五”以来，利用本成果提供的技术，天津市滨海新区海之源水产养殖有限公司等经营主体开展土著菲律宾蛤仔、毛蚶的规模化苗种繁育，并在大神堂浅海开展增殖放流，放流菲律宾蛤仔苗种 470 吨，共计 49665 万粒，放流毛蚶苗种 180 吨，共计 4620 万粒。

大神堂南部海域及周边海域或滩涂的菲律宾蛤仔生物量持续提高，对比 2010 年，2019-2022 年，该海域菲律宾蛤仔及毛蚶产量提高 3 倍以上，沿海滩涂的菲律宾蛤仔生物量也迅速提高。

案例地址：天津市滨海新区汉沽大神堂以南浅海

业主及联系方式：天津市滨海新区海之源水产养殖有限公司，李杨：18802282835

##### (2) 工艺流程及主要参数

技术流程：

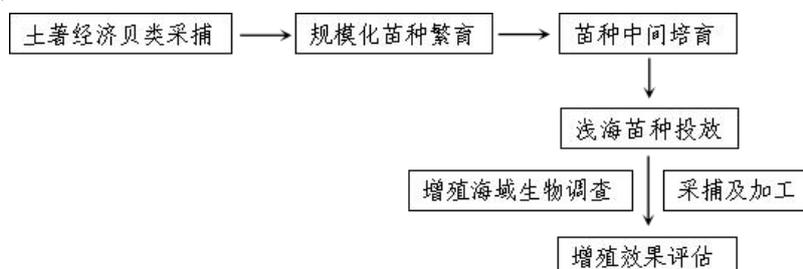


图 2-12-16 技术流程图

苗种繁育过程种，菲律宾蛤仔或毛蚶的规模化苗种繁育周期短、见效快、出苗多，1000m<sup>3</sup> 的育苗水体，每个育苗周期（约 45 天）可产生效益约 4.12 万元。2019-2020 年，苗种繁育

企业实际繁育 11 个批次，各批次育苗水体为 600-1300m<sup>3</sup> 不等，销售额 45.6 万，纯利润达到 33.6 万元。

土著贝类增殖过程中，100 吨菲律宾蛤仔或毛蚶可移除海水中的 C 元素总干重为 8.36 吨，移出 N 的总干重为 1.19 吨，移出 P 的总干重为 119kg。

## (2) 应用效果

该海域及周边海域或滩涂的菲律宾蛤仔、毛蚶生物量持续提高，对比 2010 年，2019-2022 年，该海域菲律宾蛤仔产量提高 3 倍以上，沿海滩涂的菲律宾蛤仔生物量也迅速提高。

## (3) 能源、资源节约和综合利用情况

海域的菲律宾蛤仔生物量提高之后，渔民采捕蛤仔产量提高，单位产出所消耗的能源相应的降低。采捕的蛤仔一方面运往市场销售，另一方面运进加工厂进行精细加工，形成一条龙的产业链，增加了用工量，带动了就业。

## 12.6 成果转化推广前景

### 12.6.1 技术推广前景

天津土著经济贝类（菲律宾蛤仔及毛蚶）的浅海增殖技术适用于世界上温带地区的泥质及沙泥底质浅海区域，技术辐射范围在国内包括天津沿海，河北唐山、沧州沿海，以及黄河口及莱州湾部分地区。

已在沿海多家企业的海水育苗车间开展苗种繁育，并为增殖放流企业提供苗种，目前，菲律宾蛤仔与毛蚶的苗种繁育技术已应用到多家企业 2 万余方水体，实施地点主要包括天津的汉沽区和大港区，在河北省包括唐山市滦南、曹妃甸以及沧州黄骅。该成果操作简易易施行，经济效益高、生态效益显著，其推广应用前景广阔。目前，已有一些企业利用该技术开展贝类增殖放流，贝类资源增加的效果显著。以往贝类苗种在存活率和生长速度方面表现较差，急需抗逆性强、生长快的贝类苗种，而在本地繁育的土著苗种满足了这种需求。

预计到 2025 年，在贝类增殖放流领域内，该成果的应用比例可以达到 70% 以上，每年生产及放流土著贝类苗种 20 亿粒，可收获成贝 15000 吨以上，经济价值约 1.5 亿元，可移除海水中的 C 元素总干重为 1250 吨，移出 N 的总干重为 178.5 吨，移出 P 的总干重为 17.85 吨，产生显著的经济效益与生态效益。

### 12.6.2 技术推广障碍及应对措施

目前，土著贝类苗种繁育技术的推广基本无障碍，本地苗种售价较高，因此本地企业乐于采用该成果生产土著苗种，用于开展海水养殖。但是，在增殖放流过程中，本地土著苗种由于销售价格高而不占优势，放流企业更倾向于采购便宜的野生苗种（出产海域不限），这与国家标准中应采用本地培育的苗种的规定相违背。

贝类增殖技术方面，在本地尚无相关的其他成果，因此，采用本成果，是对保障放流效果的有力支撑，目前本地的贝类增殖放流活动均全部或部分的采用本成果提供的相关技术。

## 技术 13：海洋平台 TEG 天然气脱水及再生系统自主化关键技术

### 13.1 技术提供方

海洋石油工程股份有限公司是中国海洋石油集团有限公司控股的上市公司，是国内唯一集海洋油气开发工程设计、采购、建造和海上安装、调试、维修以及液化天然气、海上风电、炼化工程为一体的大型工程总承包公司，也是亚太地区规模最大、实力最强的海洋油气工程总承包之一。公司总部位于天津滨海新区。经过 40 多年的建设和发展，公司明确了“建设中国特色世界一流工程公司”的愿景和“以设计为龙头的 EPCI 总包能力建设为唯一核心，以经营管理能力和技术引领能力建设为两个基础，以国际化、深水化、新产业化为三个发展方向，以人才、市场、成本、风控、信息化建设为五个抓手”的发展策略，系统形成了以“大型起重铺管船舶序列”“1500 米级深水作业 ROV 序列”“建造场地及建造施工装备”等为核心的十大装备、以“深水浮式平台技术”“水下系统及产品技术”“超大型海上结构物及模块化技术”等为核心的十大技术，先后为中国海油、康菲、壳牌、沙特阿美、巴国油、Technip、MODEC、FLUOR 等众多中外业主提供了优质产品和服务，业务涉足 20 多个国家和地区。

(1) 开发了 TEG 天然气脱水及再生系统一体化设计技术，并形成企标(Q/HS GC 035-2022) 技术提供方单位：海洋石油工程股份有限公司。

(2) 开发了 TEG 脱水塔工艺设计方法，并编写了设计指导文件 技术提供方单位：海洋石油工程股份有限公司。

(3) 开发了 TEG 再生塔顶冷凝器的数值模拟及工艺计算方法，得出了一种优化设计方案，取得软著专利（专利号：2019SR0586199） 技术提供方单位：海洋石油工程股份有限公司。

(4) 开发了 TEG 电加热器表面膜温度及超温概率计算方法，形成一项实用新型专利（专利号：ZL202022645788.5），一项软著专利（专利号：2019SR1413292） 技术提供方单位：海洋石油工程股份有限公司。

(5) 发明了弱旋流式三相分离装置及分流方式，并取得 1 项发明专利（专利号：ZL201811244548.5） 技术提供方单位：海洋石油工程股份有限公司。

(6) 独创了“陆地小循环”调试方法，极大地降低了海上调试工作量，实现工程运行中的降本增效 技术提供方单位：海洋石油工程股份有限公司。

(7) 开发了 TEG 再生系统局部去高压降本优化设计技术 技术提供方单位：海洋石油工程股份有限公司。

(8) 开发了高露点降 TEG 脱水再生装置设计技术 技术提供方单位：海洋石油工程股份有限公司。

## 13.2 技术成果简介

### 13.2.1 技术成果名称和领域

技术名称：海洋平台 TEG 天然气脱水及再生系统一体化关键技术。

技术领域：海洋能源开发利用。

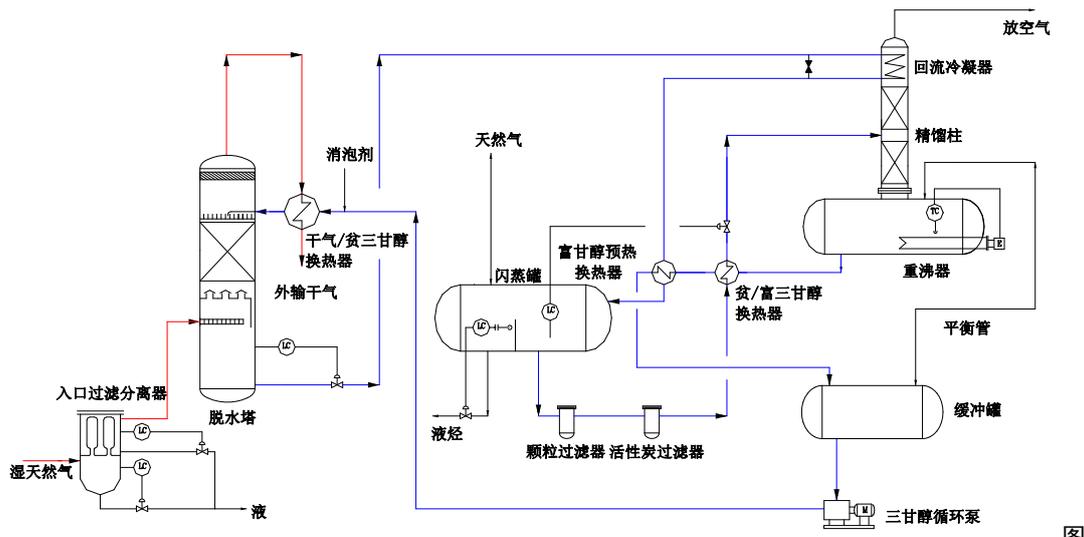
### 13.2.2 技术成果来源

分公司级科研课题及多个生产项目应用。

## 13.3 技术内容

### 13.3.1 技术原理及工艺流程

三甘醇脱水工艺流程见附图 2-13-1 所示。来自三甘醇脱水塔的三甘醇富液首先进入回流冷凝器进行换热，然后经三甘醇预热换热器，进入三甘醇闪蒸罐进行闪蒸分离，分离出来易挥发的烃类液体和溶解在三甘醇里的酸气，然后富三甘醇经过颗粒过滤器和活性炭过滤器，过滤后的富三甘醇液体经富/贫三甘醇换热器换热后，进入三甘醇精馏柱中，向下流入重沸器实现再生。再生后的贫三甘醇经富/贫液换热器和富甘醇预热换热器冷却，然后经三甘醇循环泵加压后进入干气/贫三甘醇换热器降温，后进入脱水塔与天然气逆向接触，脱除天然气中的水分，而吸水后富甘醇再次进入再生系统，形成一个循环系统。



2-13-1 三甘醇脱水工艺流程图

由于受平台尺寸及使用环境限制，海洋平台 TEG 天然气脱水及再生系统，对于工艺的高效性、系统的集成性、运行的可靠性、操维的便利性 etc 均有较高要求。正因如此，海洋平台 TEG 天然气脱水再生系统一度为国外厂家所垄断。

如何实现 TEG 天然气脱水及再生装置的集成化，模块化及一体化是海上平台应用的一个关键技术难点，本技术开发了一种适用于海上平台的 TEG 天然气脱水及再生系统一体化设计技术，再生系统模块应用案例见附图 2-13-2。



图 2-13-2 天津昊野科技有限公司再生系统模块应用案例

TEG 脱水塔工艺设计作为 TEG 系统工艺设计的一个关键技术难点，与陆地项目不同，海上平台减小塔设备尺寸的经济性是非常巨大的，本研究开发了一种适用于海上平台的 TEG 脱水塔工艺设计的方法，解决了吸收塔工艺设计问题，打破了外有技术对项目成本及工期的制约。

再生塔顶冷凝器换热工艺的合理性决定了三甘醇再生效率、三甘醇损耗率、以及系统内能源能否有效利用。本研究开发了 TEG 再生塔顶冷凝器的数值模拟及工艺计算方法，解决了 TEG 损耗率无法定量计算的问题，并得出了一种优化设计方案。模拟结果示范图见图 2-13-3，应用案例示范图见图 2-13-4。

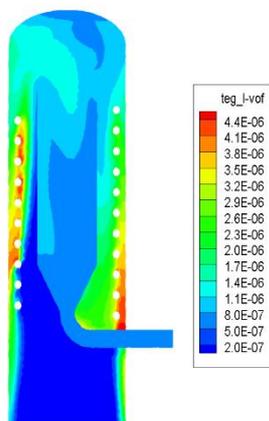


图2-13-3 TEG塔顶冷凝器数值模拟

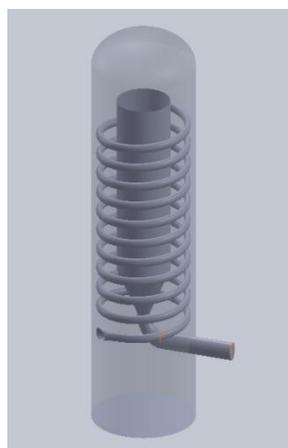


图2-13-4 TEG塔顶冷凝器应用示范图

TEG 超过 207℃会分解，因此再沸器温度控制及电加热器的设计是一个关键技术难点，TEG 电加热器表面膜温度及超温概率计算方法，解决了无法定量计算 TEG 近电加热器壁面膜温度的问题，为电加热器选型设计及 TEG 操作温度下超温概率计算提供理论支撑。

TEG 闪蒸罐的三相分离效率直接影响系统运行效果，发明的一种适用于气/液/液三相分离的弱旋流分离内件及分流方式，可大大提高气体、TEG 及凝析油三相分离效率。

独创了“陆地小循环”调试方法，极大地降低了海上调试工作量，开发了 TEG 再生系统局部去高压降本优化设计技术，实现了再生系统的低压化，达到了降本增效的效果。

### 13.3.2 技术成果适用性分析

(1) 本技术适用于海洋工程行业，海洋能源开发利用技术领域。

(2) 本技术开发主要是针对海洋平台天然气脱水领域，其优点在于满足海洋平台工艺的高效性、系统的集成性、运行的可靠性、操维的便利性等特殊要求，因此对于陆地 TEG 脱水使用中的特定条件可能不具备优势。

### 13.3.3 技术创新性及先进性

(1) 本技术开发的 TEG 再生塔顶冷凝器的数值模拟及工艺计算方法，在国内同类技术中处于领先水平，相关研究成功已发表论文并取得软著专利（专利号：2019SR0586199）。

(2) 本技术开发的 TEG 电加热器表面膜温度及超温概率计算方法，在国内同类技术中处于领先水平，相关研究形成一项实用新型专利（专利号：ZL202022645788.5），一项软著专利（专利号：2019SR1413292）。

(3) 本技术发明的弱旋流式三相分离装置及分流方式，在国内同类技术中处于领先水平，且具有较高创新性，已取得发明专利（专利号：ZL201811244548.5）。

(4) 本技术开发的高露点降 TEG 脱水再生装置设计技术在在同类技术中处于领先水平，在国际上也属国际先进技术，关键技术指标为天然气压力水露点要求为-38℃@5400kPag，普通汽提法 TEG 再生浓度达 99.93wt%，已超出国内标准（SY / T 0076-2008 天然气脱水设计规范）推荐应用范围，接近 TEG 脱水极限。

### 13.4 节能减碳或污染防治效果

本技术实现了从关键技术攻关、技术队伍建设到技术体系搭建的全过程，打破了国外技术封锁，实现了海洋平台 TEG 天然气脱水及再生装置完全自主化设计和建造。

本技术开发的“TEG 再生塔顶冷凝器的数值模拟及工艺计算方法”和“TEG 电加热器表面膜温度及超温概率计算方法”，打破了以往设计均采用经验科学，无法定量计算的问题，为了装置设计利用了理论支撑和设计依据，开发的软著及发明专利，具有适用范围广，降尺减重等优点，非常适用于海洋平台此类集成化程度高，空间极度紧张的环境。

本技术开发的高露点降 TEG 脱水再生装置设计技术可以实现关键技术指标为天然气压力水露点要求为-38℃@5400kPag，普通汽提法 TEG 再生浓度达 99.93wt%，已超出国内标准（SY / T 0076-2008 天然气脱水设计规范）推荐应用范围，接近 TEG 脱水极限。在国内同类技术中处于领先水平，在国际上也属国际先进技术。

本技术独创的“陆地小循环”调试方法，极大地降低了海上调试工作量，为生产方节约价

值超过 200 万元调试消耗费用，实现工程运行中的降本增效。开发的 TEG 再生系统局部去高压降本优化设计技术，为企业综合降本 200 万/套。

本技术编制的技术体系已形成企标，为公司和行业提供技术支撑，为公司产品质量管理提供技术依据，引导同行业发展，提高公司在国内以及国外知名度和市场认同度。

### 13.5 技术示范情况

本技术已应用于海洋工程行业海洋能源开发利用领域，目前应用项目天然气处理规模从 60 万方/天~455 万方/天，实施效果良好，均达到天然气脱水要求，部分技术为项目开发实现降本增效。

#### 案例：渤中 19-6 凝析气田试验区开发项目

##### (1) 案例概况

案例名称：渤中 19-6 凝析气田试验区开发项目

工程规模：天然气处理量 180 万方/天

建设条件：海洋平台

主要建设或改造内容：TEG 脱水及再生装置设计、建造及调试投运

关键设备：TEG 入口过滤分离器橇，TEG 脱水橇，TEG 再生橇

投入运行时间：2020 年 6 月 13 日投产

项目验收情况：性能良好，水露点合格

项目验收单位：中洋石油（中国）有限公司天津分公司

验收日期及验收结论：2020.6.13 合格

业主及联系方式：都宗民 022-66502497

案例地址：BZ19-6 WHPA 平台

##### (2) 工艺流程及主要参数

BZ19-6 WHPA 平台设置 TEG 脱水再生系统，对平台原料气干燥处理，干气输往渤中 13-1 辅助增压平台后，直接进入渤西南管网输至渤西终端。TEG 脱水再生装置工艺参数：

天然气处理量：180X10<sup>4</sup>Sm<sup>3</sup>/d

天然气中杂质：CO<sub>2</sub>、烃、水、H<sub>2</sub>S

入口压力：3500~8050kPaG

入口温度：35~37℃

操作范围：20%~110%

处理后天然气含水：≤32mg/Sm<sup>3</sup>/-6℃@6200kPaG

甘醇损失量：≤13.4L/10<sup>6</sup> Sm<sup>3</sup>

##### (3) 应用效果：

应用该技术，装置达到了设计要求效果，水露点合格（-29.2℃@6957kPag）

##### (4) 能源、资源节约和综合利用情况

本技术独创的“陆地小循环”调试方法，极大地降低了海上调试工作量，为生产方节约价值超过 200 万元调试消耗费用，实现工程运行中的降本增效。开发的 TEG 再生系统局部去

高压降本优化设计技术，为企业综合降本 200 万/套。

### **13.6 成果转化推广前景**

#### **13.6.1 技术推广前景**

该技术成果目前已形成 1 项发明专利，2 项软著，2 项在申请实用新型专利，3 篇核心科技期刊论文，1 套技术体系企业标准，多份研究报告。近 5 年国内海上固定平台三甘醇脱水再生装置的市场占有率几乎 100%，虽然该技术成熟度相对较高，但随着深海气藏及海外市场的不断开拓，该技术仍需要不断研究和完善，预计到 2025 年在国内海上固定平台三甘醇脱水再生装置的市场占有率将继续保持，浮式平台以及海外市场将有新的突破。

#### **13.6.2 技术推广障碍及应对措施**

该技术在成果转化和推广过程需要解决的主要问题是：

（1）资源或资本制约，为了消除上述障碍，公司通过申请科研课题经费，对关键技术进行技术攻关。

（2）市场资源制约，为了消除上述障碍，公司通过降本增效，争取应用项目，为技术实施提供项目资源。

## 技术 14：深远海浮式风电平台

### 14.1 技术提供方

技术提供方：海洋石油工程股份有限公司、中海油融风能源有限公司

海洋石油工程股份有限公司是由中国海洋石油集团有限公司控股的上市公司。是中国唯一及海洋石油、天然气开发工程设计、陆地制造和海上安装、调试、维修以及液化天然气、炼化工程为一体的大型工程总承包公司，也是远东及东南亚地区规模最大、实力最强的海洋油气工程EPCI（设计、采办、建造、安装）总承包商之一，公司总部位于天津滨海新区。近三年来海油工程营业收入不断攀新高。其中2022年营业收入178.63亿，2021年实现营收197.95亿，2022年营业收入293.58亿。

作为我国海洋石油工程领域的“国家队”，海油工程坚持“做低碳生产模式践行者”、“做低碳解决方案提供者”。海油工程珠海场地投用岸基供电系统，有效减少船舶靠泊期间的能源消耗和废气排放；青岛场地开展废气、废水、烟尘等处理设备改造升级，把技术创新作为绿色生产的“推进器”。推进分布式光伏项目建设，天津、青岛、珠海场地光伏项目年内均可实现建成并网，可年产绿电950万度，减少二氧化碳排放近8000吨。

成功建成国内首个深远海浮式风电平台“海油观澜号”，实现国内深远海浮式风电开发取得新突破；成功推动国内首个海上二氧化碳封存示范工程恩平15-1正式投用，实现CCUS技术取得新成果；顺利完成国内首个千万吨级接收站——唐山LNG一阶段工程投产，为京津冀能源结构优化贡献重要力量。

### 14.2 技术成果简介

#### 14.2.1 技术成果名称和领域

技术名称：深远海浮式风电平台。

技术领域：海洋能源开发利用。

#### 14.2.2 技术成果来源

(1) 中海石油（中国）有限公司的“三新三化”项目《深远海浮式风电国产化研制及示范应用项目》

(2) 相关专利如下：

一种用于海洋浮式风电平台的船舶停靠装置，ZL202121909585.0

一种半潜浮式风电平台的压排载装置，ZL202121974710.6

一种半潜式风机座体及深浮式风机，ZL202122579016.0

### 14.3 技术内容

#### 14.3.1 技术原理及工艺流程

深远海浮式风电平台技术主要包括 13 项关键技术，具体为：

- (1) 浮式风电平台船型与主尺度开发技术
- (2) 风机与浮式平台一体化耦合分析
- (3) 考虑风机影响的浮体结构与疲劳设计技术

- (4) 创新型“万向节+在线张紧器”系泊系统设计技术
- (5) 浮式风电平台运动抑制装置设计技术
- (6) 风机与浮式基础一体化水池模型试验技术
- (7) 风机塔筒法兰与船体分段高精度焊接技术
- (8) “三角形”浮体坞内结构及倾斜试验技术
- (9) 大型高耸浮体海上长距离湿拖技术
- (10) 半潜式浮式风机多船限位技术
- (11) 在线张紧器回接及张紧技术
- (12) 浮式基础码头靠泊与临时系泊技术
- (13) 风机、塔筒与浮式基础集成技术

通过突破和攻克以上技术，海油工程设计团队研制出了国内首个双百浮式风电平台——“海油观澜号”，其设计寿命为 25 年，能抵抗超强台风的能力，在极端环境下倾斜角度仅 10 度左右，在 84 米/秒的风速下仍能确保风机安全。在单位兆瓦投资、用钢量、单台浮式风机容量等多项指标上，达到了国际先进水平，创造了全球漂浮式风电离岸距离和水深距离的新纪录。

#### 14.3.2 技术成果适用性分析

(1) 介绍技术适用的行业 and 具体领域：该技术主要适用于新能源开发及海洋工程装备制造等行业，具体为深远海浮式风电平台研发、设计、建造、安装及调试等。

(2) 技术使用中的特定条件限制：浮式风电开发成本高，尤其是单台风机平台的开发，拖航运输、锚链、海缆安装等工作需要动用大型船舶资源，且易受天气影响，因此海上施工费用高昂。现阶段，国内外浮式风电项目主要以单台风机技术示范为主，但随着浮式风电商业化提速，风场规模化开发，施工成本必定会大幅降低。由于浮式风机的研发尚处于初始阶段，风机自身结构对基础运动倾角要求较为苛刻，浮式基础为适应风机需加大尺寸，提高排水量，导致基础重量较大；随着风机技术的突破，深远海风电船型必将更加轻量化，更加经济。系泊系统也是影响浮式风电开发成本的关键因素，常规用的锚链、钢缆采办成本较高，随着系泊系统新材料、新技术的应用，系泊成本也会进一步压缩。

#### 14.3.3 技术创新性及先进性

利用深远海浮式风电船型开发技术研制的“海油观澜号”，创造 2 项国际首次，4 项国内首次，即：

- (1) 世界首个为油气田供电的半潜式深远海风电平台
- (2) 世界首个实现系泊系统利旧的浮式风电平台
- (3) 国内首个“双百”深远海浮式风电平台（水深，离岸距离）
- (4) 国内首次实现从研发+概设到加工设计的一体化自主设计
- (5) 国内跨距与吊高最大的一体化码头风机集成作业
- (6) 国内首次使用在线张紧器的深水系泊作业模式

该平台单位兆瓦投资、用钢量、单台浮式风机容量等多项指标上，达到了国际先进水平，

创造了全球漂浮式风电离岸距离和水深距离的新纪录。

#### 14.4 节能减碳或污染防治效果

(1) 为海上油气田提供绿电：作为国家首座深远海浮式风电平台，“海油观澜号”成功并入文昌油田群电网，这是国家首次实现深远海浮式风电平台直接为海上油气田群供电，年均发电量可达 2200 万千瓦时，每年将节约燃料气近 1000 万立方米，减少 CO<sub>2</sub> 排放 2.2 万吨。

(2) 利旧原系泊系统：通过对原南海奋进号锚链调研分析，“海油观澜号”利旧了 9 条锚腿的吸力桩至配重链段，不仅节省了工程成本，同时这项系泊系统利旧分析技术助力“海油观澜号”成为全球首台利旧系泊系统的浮式风电平台。

(3) 首次使用在线张紧器：浮式风电投资成本低，如果使用常规锚机系统，成本非常高，本项目首次使用在线张紧器，不仅降低了设备采购成本，同时海油工程掌握了在线张紧器安装技术。

(4) 国内首个“双百”深远海浮式风电平台：本项目位于中国南海西部，水深 119m，离岸距离 136km，海域环境最恶劣，通过优化平台尺度、增设高效阻尼结构等技术创新，使浮式平台具备抵抗超强台风的能力，在极端环境下倾斜角度仅 10 度左右，在 84 米/秒的风速下仍能确保风机安全。在应对极端恶劣海况能力方面，对国外制造厂商一举实现“弯道超车”。

(5) 单位兆瓦用钢量、单台风机容量创造国内记录：本项目是国内单机容量最大的浮式风机，通过优化结构，其单位兆瓦用钢量不超过 600 吨/兆瓦，创造国内记录。

#### 14.5 技术示范情况

##### 案例：海油观澜号“是我国首座“双百”深远海浮式风电平台

##### (1) 案例概况

“海油观澜号”是我国首座“双百”（离岸超百公里、水深超百米）深远海浮式风电平台，也是全球首座为油气田供电的半潜式浮式风电平台。该项目业主单位是中海油融风能源有限公司，海洋石油工程股份有限公司负责项目的研发、设计、建造、安装及调试工作。主要工程量包括：适应于文昌海域的 7.25 兆瓦级别的风机的半潜基础及配套设施研发、设计；南海奋进号 FPSO 解脱后与浮式风机相结合的再利旧分析；风机基础到文昌 13-2 平台海底电缆设计；半潜基础的施工建造；风机与浮式基础集成安装；风机平台一体化拖航及海上安装；浮式基础设备调试；该项目可行性研究于 2011 年 3 月正式启动，2022 年 5 月开工建造，2023 年 5 月 20 日并网发电，历时 2 年零 2 个月。

项目验收情况：已组织验收检查

项目验收单位：中国海洋石油有限公司工程技术部

验收日期：2023 年 6 月 29 日

验收结论：已达到机械完工状态

业主：中海油融风能源有限公司

业主联系方式：022-66909215

案例地址：海南省文昌市以东 132km 的南海海域文昌油田群原南海“奋进号”FPSO 位置

##### (2) 工艺流程及主要参数

浮式风机平台为无人驻守平台，设计寿命为 25 年。浮式基础结构按照 50 年一遇环境条件设计，系泊系统按 100 年一遇环境条件设计，50 年一遇环境条件下浮式基础极限倾角不超过 11°，作业倾角不超过 4°。

浮式基础为四立柱三角形半潜平台，中心立柱上面承接风机机组，立柱净高 35m，边立柱上部通过结构斜撑和横撑与中心立柱连接，下部通过旁通压载舱与中间立柱连接。

作业吃水 20m，排水量 1.14 万吨，主结构用钢量大约 4000 吨。浮式基础上配置有注、排水管线，IMMS 系统，导航灯，防腐采用阴极保护联合涂装的方案，在 S 立柱和 F 立柱上设置了靠船件以及人员登平台通道。

南海奋进号 FPSO（浮式生产储存卸油装置）解脱后利旧现有 9 条锚腿的吸力桩至配重链段，上钢缆、中水浮筒、单点浮筒（STP）需要弃置，原上钢缆段替换为锚链，平台端采用万向节连接，采用 6 个在线张紧器（In-line tensioner），目前 3×3 的系泊方案满足百年一遇环境条件。

风机所发电力通过 5km 海缆接入文昌 WC13-2B 平台。海缆在 WC13-2 WHPB 平台导管架 B2 腿登平台，使用附着式卡子将海缆固定在水下 30m 深，30m 水深处到海底着泥点采用悬链线动态构型。海缆在风机塔筒底部结构的电缆入口处连接到浮式平台，水下部分全部采用动态构型。

### （3）应用效果

海油观澜号，在单位兆瓦投资、用钢量、单台浮式风机容量等多项指标上，达到国际先进水平；在极端环境下倾斜角度仅 10 度左右，在 84 米/秒的风速下仍能确保风机安全运行。

### （4）能源、资源节约和综合利用情况

投产年均发电量可达 2200 万千瓦时，每年将节约燃料气近 1000 万立方米，减少二氧化碳排放 2.2 万吨。

## 14.6 成果转化推广前景

### 14.6.1 技术推广前景

从全球范围看，深远海浮式海上风电开发仍处于新兴阶段，据统计，截至 2022 年，漂浮式海风已投运项目 20 个，规模为 245.4MW，占海风累计装机量比值仅为 0.4%，在建项目 12 个，规模为 387.4MW，但漂浮式风电商业化进程显著加快。根据全球风能理事会（GWEC）预计，2030 年全球累计漂浮式海上风电装机将达到 18.9GW，浮式风电将从单台示范专向浮式风场的开发。国内市场，“十四五”时期，预计我国浮式风电新增装机将由 5.5MW 增长至 280MW，“十五五”时期，预计我国浮式风电新增装机将由 0.6GW 增长至 6.2GW。

浮式风电是海上风电发展的未来，深远海浮式风电平台技术涵盖了产品研发、制造、安装、调试等全产业链的各个环节，这项技术充分发挥了中国海油深耕蓝疆 40 载的领先优势，因此未来可期。

### 14.6.2 技术推广障碍及应对措施

浮式风电开发成本高，尤其是单台风机平台的开发，拖航运输、锚链、海缆安装等工作

需要动用大型船舶资源，且易受天气影响，因此海上施工费用高昂。现阶段，国内外浮式风电项目主要以单台风机技术示范为主，但随着浮式风电商业化提速，风场规模化开发，施工成本必定会大幅降低。

由于浮式风机的研发尚处于初始阶段，风机自身结构对基础运动倾角要求较为苛刻，浮式基础为适应风机需加大尺寸，提高排水量，导致基础重量较大；随着风机技术的突破，深远海风电船型必将更加轻量化，更加经济。

系泊系统也是影响浮式风电开发成本的关键因素，常规用的锚链、钢缆采办成本较高，随着系泊系统新材料、新技术的应用，系泊成本也会进一步压缩。

## 技术 15：风电用大型导管架裙桩夹桩器

### 15.1 技术提供方

海洋石油工程股份有限公司是中国海洋石油集团有限公司控股的上市公司，是国内唯一集海洋油气开发工程设计、采购、建造和海上安装、调试、维修以及液化天然气、海上风电、炼化工程等为一体的大型工程总承包公司，也是亚太地区规模最大、实力最强的海洋油气工程总承包之一。公司总部位于天津滨海新区。经过 40 多年的建设和发展，公司明确了“建设中国特色世界一流工程公司”的愿景和“以设计为龙头的 EPCI 总包能力建设为唯一核心，以经营管理能力和技术引领能力建设为两个基础，以国际化、深水化、新产业化为三个发展方向，以人才、市场、成本、风控、信息化建设为五个抓手”的发展策略，系统形成了以“大型起重铺管船舶序列”“1500 米级深水作业 ROV 序列”“建造场地及建造施工装备”等为核心的十大装备、以“深水浮式平台技术”“水下系统及产品技术”“超大型海上结构物及模块化技术”等为核心的十大技术，先后为中国海油、康菲、壳牌、沙特阿美、巴国油、Technip、MODEC、FLUOR 等众多中外业主提供了优质产品和服务，业务涉足 20 多个国家和地区。

### 15.2 技术成果简介

#### 15.2.1 技术成果名称和领域

技术名称：风电用大型导管架裙桩夹桩器。

技术领域：港口与海洋工程装备。

#### 15.2.2 技术成果来源

海洋石油工程股份有限公司“风电用大型导管架裙桩夹桩器”孵化项目；

中国海洋石油总公司“导管架裙桩夹桩器工程化应用研究”科研项目。

### 15.3 技术内容

#### 15.3.1 技术原理及工艺流程

在裙桩导管架安装施工作业过程中，通过液压驱动位于水下的夹桩器执行机构，控制液压缸内卡爪伸缩，可以将钢桩与导管架相对固定，为后续钢桩和导管架间的永久固定提供必要基础。



图 2-15-1 风电用大型导管架裙桩夹桩器



图 2-15-2 夹桩器液压缸及卡爪伸出状态

### 15.3.2 技术成果适用性分析

夹桩器主要用于裙桩导管架海上安装作业，在对导管架调平后，将导管架与钢桩相对固定，应用领域如下：海上油气领域裙桩导管架安装作业；海上风电领域裙桩导管架安装作业。

### 15.3.3 技术创新性及先进性

夹桩器主要应用于海洋油气和海上风电领域，属于海洋工具类产品，是大型裙桩导管架海上安装作业的关键设备。夹桩器通过液压系统驱动位于水下的执行机构，在灌浆之前可以将钢桩与导管架相对固定，是导管架安装过程中必需的海洋工具产品。夹桩器产品此前主要依赖进口，其市场需求量较大，具有广阔的国产化产品应用前景。

公司一直致力于夹桩器产品技术攻关及产品孵化，在 2020 年已在海洋油气领域实现浅水 42 英寸国产夹桩器产品的工程化应用。但在海上风电领域，国内相关产品功能和质量参差不齐，为提高海上风电领域夹桩器产品的可靠性，海油工程产品孵化制造中心按照孵化体系开展“风电用大型导管架裙桩夹桩器”孵化工作，面向海上风电领域开发高性能夹桩器产品。

结合青洲六海上风电项目的实际需求，孵化风电用大型夹桩器产品 4 台，桩径 3300mm，额定夹持载荷 800T，设计水深 50m。将海洋油气领域夹桩器先进技术应用于风电夹桩器，配置应急备用动力系统、水基液压油系统、水下控制面板等，并且进行严格的载荷测试、系统保压测试、功能测试，测试过程由 CCS 现场见证，大幅度提高风电用夹桩器产品的功能性、可靠性和环保性。

创新性如下：

- (1) 海油工程首次成功研制风电领域夹桩器，实现了首个风电夹桩器供货业绩；
- (2) 海油工程首次成功研制超大钢桩直径的夹桩器，最大规格尺寸记录提高到 130 寸；
- (3) 海油工程首次采用新型卡爪结构形式，在钢桩偏心的工况下具有更好的夹持能力；
- (4) 海油工程首次采用水基乙二醇液压油应用于夹桩器，提高环保性能。

### 15.4 科技效果

海洋石油工程股份有限公司研发的风电用大型导管架裙桩夹桩器，已交付青洲六海上风

电项目。该夹桩器孵化产品成功交付，标志着海油工程首次成功进军海上风电夹桩器领域，使公司成为国内唯一同时具有海洋油气和海上风电领域夹桩器产品供货业绩的公司，其技术水平在全国处于领先地位。

### 15.5 技术示范情况

#### 案例：青洲六项目

阳江青洲海上风电场项目场址位于阳江市阳西县沙扒镇附近海域，该规划场址用海面积约 800km<sup>2</sup>，总规划装机容量为 5000MW。海上升压站下部导管架结构桩基础为水下裙桩基础形式，8 根直径 3300mm 的钢管桩。

在青州六项目中，我司已完成孵化 4 套风电用大型导管架裙桩夹桩器产品的设计、制造、出厂测试、陆地调试，并取得出厂测试过程 CCS 见证证书，并对陆地安装、海上操作等提供技术支持，并对项目进行售后服务。

产品适用钢桩直径 3300mm(130 英寸)，极限载荷 1200 吨，额定载荷 800 吨，设计水深为 50 米；产品产值 330 万，利润率约为 10~25%；使用环保的水基乙二醇液压油，对海洋环境起到最大程度的保护；应用新型卡爪结构形式，拥有更强的夹持能力，从而大幅度提高安全性能。

### 15.6 成果转化推广前景

#### 15.6.1 技术推广前景

国内首夹桩器在导管架的安装过程中属于一次性使用的消耗品，我司目前掌握的设计、制造、测试、安装、调试及售后服务技术属于国内领先水平。随着海洋石油的不断开发，夹桩器产品有着可观且持续上涨的需求量。

夹桩器产品系列化产业化方面规划如下：

##### (1) 风电领域夹桩器产品的定制化：

由于风电项目的特殊需求，业主对于夹桩器规格需求多样且不确定，很难系列化；

风电夹桩器向定制化发展，目前公司已具备风电夹桩器定制化生产能。

##### (2) 油气领域夹桩器产品的系列化：

2023-2024年：我司将全面具备深水、大尺寸夹桩器生产能力，并通过实际（深水）项目应用验证产品质量；

2024年-2025年：形成42寸、48寸、60寸、72寸、84寸、96寸、102寸、108寸等系列夹桩器产品生产能力，达到国内领先水平，掌握设计、制造、测试、调试、海上操作等核心技术，满足国内油气项目夹桩器供货需求。

#### 15.6.2 技术推广障碍及应对措施

无。

## 技术 16 海上油田二氧化碳捕集与回注装置技术研究与应用

### 16.1 技术提供方

海洋石油工程股份有限公司是中国海洋石油集团有限公司控股的上市公司,是国内唯一集海洋油气开发工程设计、采购、建造和海上安装、调试、维修以及液化天然气、海上风电、炼化工程等为一体的大型工程总承包公司,也是亚太地区规模最大、实力最强的海洋油气工程总承包之一。公司总部位于天津滨海新区。经过 40 多年的建设和发展,公司明确了“建设中国特色世界一流工程公司”的愿景和“以设计为龙头的 EPCI 总包能力建设为唯一核心,以经营管理能力和技术引领能力建设为两个基础,以国际化、深水化、新产业化为三个发展方向,以人才、市场、成本、风控、信息化建设为五个抓手”的发展策略,系统形成了以“大型起重铺管船舶序列”“1500 米级深水作业 ROV 序列”“建造场地及建造施工装备”等为核心的十大装备、以“深水浮式平台技术”“水下系统及产品技术”“超大型海上结构物及模块化技术”等为核心的十大技术,先后为中国海油、康菲、壳牌、沙特阿美、巴国油、Technip、MODEC、FLUOR 等众多中外业主提供了优质产品和服务,业务涉足 20 多个国家和地区。

### 16.2 技术成果简介

#### 16.2.1 技术成果名称和领域

技术名称:海上油田二氧化碳捕集与回注装置技术研究与应用。

技术领域:海洋能源开发利用、港口与海洋工程装备。

### 16.3 技术内容

#### 16.3.1 技术原理及工艺流程

CCS 是指将  $\text{CO}_2$  从工业或相关能源产业的排放源中分离出来,输送并封存在地质构造中,长期与大气隔绝的过程。CCS/CCUS 是国际公认的可有效促进碳减排的重要手段。中国 21 世纪议程管理中心的研究结果表明,CCS/CCUS 是持续利用化石能源的同时实现  $\text{CO}_2$  近零排放的唯一有效技术。其中, $\text{CO}_2$  地质封存是整个技术流程中的关键环节。

海上油田二氧化碳捕集与回注装置技术主要是对海洋平台生产分离器分离出的伴生  $\text{CO}_2$  气体进行压缩增压和脱水,然后将高压超临界  $\text{CO}_2$  回注到海底咸水层封存。

海上油田二氧化碳捕集与回注技术主要是捕集平台生产分离器分离出的低压伴生  $\text{CO}_2$  气体,一级或多级压缩增压后进行脱水,然后再进行压缩机,最后形成高压超临界二氧化碳,注入海底咸水层封存。该装置由洗涤罐、缓冲罐、压缩机、换热器、气体脱水装置、管线、阀门、仪表、底座和控制系统组成,是一套完整的自动化控制的二氧化碳捕集与回注装置。其中洗涤罐,可以对二氧化碳气体进行“脱液”,去除气体中不可压缩的“液滴”;缓冲罐安装在压缩机的进出口,可减小压缩机对管道产生的脉动;压缩机采用往复式压缩机,可以对二氧化碳气体进行压缩增压,然后通过管道输送;换热器可对压缩后的气体进行冷却;气体脱水装置可对增压后的二氧化碳气体脱水,然后再压缩增压,形成高压超临界二氧化碳,注入海底咸水层封存,达到绿色低碳减排的目的。

### 16.3.2 技术成果适用性分析

我国海上约有 24 个伴生 CO<sub>2</sub> 油气田，CO<sub>2</sub> 储量约 990 亿方。其中，恩平 15-1 油田是我国南海东部首个高含 CO<sub>2</sub> 的油田。若按常规模式开发，CO<sub>2</sub> 将随原油一起产出地面放空排放，预计累计排放量约 8.3 亿方。大量的 CO<sub>2</sub> 排放到大气中会对环境有一定影响。按照国家“双碳”目标，并结合项目特点，在油田开发建设中，中海油首次尝试并开展海上油田 CCS 地质油藏、钻完井和工程一体化关键技术研究及示范应用，并将研究成果和工程经验逐步推广到海上类似油气田开发项目中，助力中海油绿色低碳转型，实现绿色发展跨越。

开展海上 CCS/CCUS 是目前实现碳中和最经济、最可行的技术路径。开展海上油田 CO<sub>2</sub> 捕集与回注装置技术研究，并超前部署 CCS/CCUS 技术，对于推动我国 CCS 领域的技术创新和工程示范，实现国家节能减排目标及应对气候变化，具有关键性的作用。

通过该技术研究形成的自主知识体系、装备及工程经验，可为后续油田开发项目以及沿海高排放企业的大规模碳减排提供重要的工程借鉴和技术指导，推广应用价值大，潜在社会效益显著。

综上所述，有必要开展海上 CCS 技术研究及示范应用，形成自主知识体系、装备及项目经验，填补国内技术及应用空白。中海油作为央企担当，在保障国家能源供应安全的基础上，为国家能源行业绿色低碳做出表率，作为行业引领，开拓海上 CCS 新产业和新业态，推动我国实现“碳达峰、碳中和”的目标。

### 16.3.3 技术创新性及先进性

当前我国 CCS 仍处于技术研究和陆地先导实验和示范应用阶段，尚未开展海上 CCS 示范应用工程；海上 CCS 项目的相关标准、技术规范和管理体系尚未建立。本技术研究拟通过系统性的技术攻关和项目工程示范，摸索建立海上 CCS 项目相关标准、技术规范和管理体系，增强我国海上 CCS 技术实力，为我国沿海省份实现碳中和目标提供有效科技支撑。

虽然我国海域二氧化碳地质封存潜力巨大，但是国内大多数 CCS/CCUS 项目还处于科研攻关和示范阶段，整体成本比较高，通过示范项目逐步掌握海上二氧化碳捕集与回注装置的关键技术，为恩平 15-1 油田提供二氧化碳压缩机橇、气体脱水装置等回注系统核心装置，形成专有技术，促进技术创新和产业发展。

具体创新点如下：

(1) CO<sub>2</sub> 捕集与回注装置中所采用重点设备，例如 CO<sub>2</sub> 回注压缩机，其运行可靠性十分关键。目前 CO<sub>2</sub> 回注压缩机在国内外已有应用案例，而国产 CO<sub>2</sub> 增压压缩机也有相应陆上业绩，但未在海上进行应用验证，存在一定风险。该技术选用往复式压缩机作为核心设备。

(2) CO<sub>2</sub> 回注封存时处于超临界状态，超临界状态的 CO<sub>2</sub> 具有一定特殊性，会溶解部分特殊材料，特别在含水的环境中，将严重腐蚀设备和管线。建立超临界 CO<sub>2</sub> 腐蚀规律、腐蚀预测及选材策略，优选适宜材料，充分考虑现场操作条件变化，并预留一定腐蚀裕量。

(3) 超临界二氧化碳压缩流程设计及二氧化碳相态控制，捕集二氧化碳后压缩增压，脱水再压缩增压，形成高压超临界二氧化碳，注入海底地层封存。

(4) 装置由洗涤罐、缓冲罐、压缩机、换热器、气体脱水装置、管线、阀门、仪表、

底座和控制系统组成，是一套完整的自动化控制的二氧化碳捕集与回注装置。

(5) 该技术采用二级压力调节阀回流控制，可有效控制二氧化碳捕集、压缩、注入过程中气量的不稳定性。

(6) 气体脱水装置包括前置过滤器、干气过滤器、分子筛吸附塔、再生气分离器等，可实现对 CO<sub>2</sub> 气体的脱水，同时可实现装置的“自我修复”功能。

#### 16.4 科技效果

CCS 是实现“碳中和”目标不可或缺的关键技术，目前我国尚未开展 CCS 工程示范应用，该项目的实施具有重大的社会意义：

##### (1) 助力国家“双碳”目标实现

2020 年 9 月，国家主席习近平在七十五届联合国大会一般性辩论上向国际社会做出“碳达峰、碳中和”的郑重承诺。本项目预计高峰年可封存二氧化碳 30 万吨，累计封存二氧化碳近 150 万吨，按 5 月份全国碳市场碳排放配额（CEA）挂牌协议交易成交单价 58.00 元/吨计算，可累计节省碳排放配额费用约 8700 万元，减排效益明显。

##### (2) 填补国内海上 CCS 技术空白，打破国外技术垄断

随着石油、天然气勘探开发逐步向复杂、高风险油气藏等领域发展，渤海、南海以及海外项目中均出现了高含 CO<sub>2</sub> 油气田。国内 CO<sub>2</sub> 封存研究主要针对陆上矿场，该项目为国内首个海上 CCS 项目，由于受限于海上操作空间较小、安全标准严、开发成本高的特点，常规适用于陆上的 CO<sub>2</sub> 捕集及回注封存装置在海上没有应用先例，缺乏技术积累和项目经验。

本技术对海上 CCS 技术的难点，开展海上 CO<sub>2</sub> 捕集和回注封存地质油藏、钻完井、工程一体化关键技术研究，建立我国首个海上 CCS 工程示范应用，补齐 CCS 技术短板，构建安全可控的 CCS 技术供给体系。

##### (3) 推动 CCS 规模化发展

该技术将形成完整的海上一体化 CCS 技术体系和装备，支持推动 CCS 规模化发展。通过示范项目形成的工程关键技术储备，可为海上油气田开发 CCUS 项目的规模化应用提供支撑。

##### (4) 推动粤港澳大湾区绿色低碳发展

《粤港澳大湾区绿色发展报告（2020）》提出了“绿色发展，保护生态”的基本原则。

大湾区经济的高速发展是建立在大量的能源消耗和 CO<sub>2</sub> 排放的基础上的，72% 的 CO<sub>2</sub> 排放集中分布在珠江三角洲地区，在全球气候变暖的背景下，碳排放限制可能会给广东省未来经济的进一步发展带来约束。

大湾区珠江口盆地是南中国海北部地区最大的沉积盆地，被认为是广东省有潜力的 CO<sub>2</sub> 封存地。该盆地面积约为 2×10<sup>5</sup>km<sup>2</sup>，最大厚度约 14km，预计有效封存潜力约 3080 亿吨，如果该潜力的 10% 能够得到有效利用，即可满足广东省电力部门 150 年以上的 CO<sub>2</sub> 减排和封存需求。

结合大湾区经济发展特点和得天独厚的海上资源，并利用本示范项目形成的海上 CCS 技术、装备及工程经验，助力大湾区 CO<sub>2</sub> 减排，加速推进粤港澳大湾区绿色发展目标。

## 16.5 技术示范情况

### 案例：恩平 15-1 油田海上平台二氧化碳捕集与回注装置

#### （1）案例概况：

海洋石油工程股份有限公司特种设备分公司承揽了恩平 15-1 油田的 CO<sub>2</sub> 捕集与回注压缩机橇和气体脱水装置的研发与制造项目，创新性地攻克了海上二氧化碳压缩回注工程关键技术，采用美国 ARIEL 压缩机，配套国产佳木斯电机，主电机功率 1500kW，3 级压缩，设计排压 11MPa，建成 2 套处理规模为每天 24 万标方的二氧化碳处理及回注装置，是国内首个海上油田 CCS 关键技术研究及工程示范应用项目。

该项目于 2023 年 2 月份投产，运行稳定可靠。

#### （二）工艺流程及主要参数：

建成一套处理规模为  $48 \times 10^4 \text{ Sm}^3/\text{d}$  的 CO<sub>2</sub> 处理及回注示范装置。主要设备及技术参数如下：

##### ① 两套二氧化碳注气压缩机

单台二氧化碳处理量： $24 \times 10^4 \text{ Sm}^3/\text{d}$ ；

三级压缩；

进/出口压力：400kPaG/11000kPaG；

##### ② 一套二氧化碳脱水装置-分子筛

二氧化碳处理量： $48 \times 10^4 \text{ Sm}^3/\text{d}$ ；

处理后水露点： $< -20^\circ\text{C} @ 11000 \text{ KPaG}$ ；

水含量： $26\text{mg}/\text{Sm}^3$

#### （3）应用效果

该装置在恩平 15-1 油田平台首次使用，实现了海上二氧化碳封存关键设备的国产化突破，形成了海上二氧化碳捕集、回注、封存的技术体系和成套装备，自投产运行以来，运行稳定可靠，有效地减少了油田生产的碳排放。

#### （4）能源、资源节约和综合利用情况

本项目预计高峰年可封存二氧化碳 30 万吨，累计封存二氧化碳近 150 万吨，按 5 月份全国碳市场碳排放配额（CEA）挂牌协议交易成交单价 58.00 元/吨计算，可累计节省碳排放配额费用约 8700 万元。

## 16.6 成果转化推广前景

### 16.6.1 技术推广前景

本项目的实施，形成了自主的海上 CCS 技术体系、装备及工程经验，填补国内技术应用空白，为国内后续 CCS/CCUS 提供借鉴和指导，并带动产业发展，实现能源行业绿色低碳转型。中海油作为央企担当，实施首个海上 CCS 项目，展现了我国实现“碳达峰、碳中和”目标的决心，有助于我国持续扩大在气候外交领域的大国引领力，意义重大。

目前，海洋石油工程股份有限公司已成功承揽渤中 19-6 凝析气田 I 期开发项目、高栏终端二氧化碳回收利用一期项目、渤中 19-6 气田 II 期开发项目、文昌 9-7 油田开发工程项目等

多个项目约10余台二氧化碳回注装置的设计与建造,这些项目的实施将进一步提升海上油田二氧化碳捕集与回注技术的发展,推动该技术的应用前景。

### 16.6.2 技术推广障碍及应对措施

#### (1) 超临界CO<sub>2</sub>腐蚀

CO<sub>2</sub>回注封存时处于超临界状态,超临界状态的CO<sub>2</sub>具有一定特殊性,会溶解部分特殊材料,特别在含水的环境中,将严重腐蚀设备和管线。为避免可能存在的腐蚀的障碍,在第三级压缩机入口设置分子筛脱水装置,将CO<sub>2</sub>中的水份脱除,同时在系统运行过程中严密监控脱水装置的运行状况,确保运行过程中无积水,从而从根源上消除腐蚀因素。同时,针对重要设备的材料开展专项选材方案研究,所有材料适应超临界CO<sub>2</sub>的特殊性。建立超临界CO<sub>2</sub>腐蚀规律、腐蚀预测及选材策略,优选适宜材料,充分考虑现场操作条件变化,并预留一定腐蚀裕量。

#### (2) CO<sub>2</sub>回注压缩机选型

CO<sub>2</sub>回注系统中所采用重点设备,例如CO<sub>2</sub>回注压缩机,其运行可靠性十分关键。目前CO<sub>2</sub>回注压缩机在国内外已有应用案例,而国产CO<sub>2</sub>增压压缩机也有相应陆上业绩,但未在海上进行应用验证。因此,CO<sub>2</sub>回注压缩机选型时,需进行充分的国内外调研,借鉴国内外CO<sub>2</sub>回注压缩机选型的成功案例,消除技术障碍。

#### (3) 大分子压缩机振动风险

CO<sub>2</sub>回注压缩机采用的是大分子往复式压缩机,安装在海洋平台甲板,对平台结构振动计算及控制带来极大挑战;项目在设计过程中,将充分考虑振动对结构的影响,并采用特殊加强筋等方式提高结构疲劳安全冗余,同时增加设备本身的振动控制措施,消除相关风险。

#### (4) CO<sub>2</sub>泄漏安全

CO<sub>2</sub>无色、无味,且比空气重,本项目回注介质中CO<sub>2</sub>浓度高达94%,高浓度CO<sub>2</sub>将导致人员窒息及中毒。在海上油气平台集中区域布置CO<sub>2</sub>处理及回注装置,一旦设备或管线泄漏,会对操作人员的人生安全造成影响,具有一定的风险性。项目中设计建造中,将着重开展:优选设备工艺材料、严把建造质量并同时开展CO<sub>2</sub>泄漏风险分析等系列措施,并设置完备的CO<sub>2</sub>探头、压力温度等监控手段,从本质上确保CO<sub>2</sub>装置的安全性。

## 技术 17：海洋平台超高压注气压缩机成套技术

### 17.1 技术提供方

海洋石油工程股份有限公司是中国海洋石油集团有限公司控股的上市公司，是国内唯一集海洋油气开发工程设计、采购、建造和海上安装、调试、维修以及液化天然气、海上风电、炼化工程等为一体的大型工程总承包公司，也是亚太地区规模最大、实力最强的海洋油气工程总承包之一。公司总部位于天津滨海新区。经过 40 多年的建设和发展，公司明确了“建设中国特色世界一流工程公司”的愿景和“以设计为龙头的 EPCI 总包能力建设为唯一核心，以经营管理能力和技术引领能力建设为两个基础，以国际化、深水化、新产业化为三个发展方向，以人才、市场、成本、风控、信息化建设为五个抓手”的发展策略，系统形成了以“大型起重铺管船舶序列”“1500 米级深水作业 ROV 序列”“建造场地及建造施工装备”等为核心的十大装备、以“深水浮式平台技术”“水下系统及产品技术”“超大型海上结构物及模块化技术”等为核心的十大技术，先后为中国海油、康菲、壳牌、沙特阿美、巴国油、Technip、MODEC、FLUOR 等众多中外业主提供了优质产品和服务，业务涉足 20 多个国家和地区。

### 17.2 技术成果简介

#### 17.2.1 技术成果名称和领域

技术名称：海洋平台超高压注气压缩机成套技术及应用。

技术领域：属于港口与海洋工程装备。

#### 17.2.2 技术成果来源

该成果依托渤中 19-6 凝析气田试验区开发项目（第二阶段）BOP 平台项目。

### 17.3 技术内容

#### 17.3.1 技术原理及工艺流程

渤中 19-6 凝析气田储层物性差、地露压差小，凝析油含量高，采用常规的衰竭开发模式容易导致反凝析现象，故本项目采用循环注气开发模式，而实现循环注气开发的最大难点就是配置超高压注气压缩机。本项目属于国内海上气田首次开展的高压注气开发，截止目前，国内海上气田的外输和增压压缩机的出口压力均在 25 兆帕以内，而本项目的压缩机注气压力是以往成功应用业绩的两倍，即 50 兆帕。本项目属于国内海上气田首次开展的高压注气开发，其压缩机、发动机等主设备选型，工艺流程设计，总体布置设计，发动机作为驱动机的控制逻辑设计均存在较大的挑战。

整个设备的工艺原理如下：从上游来的干气经过 3 级压缩后注入井口管汇，配置 2 路旁通回流。工艺气冷却创新采用印刷电路板式型式，具有体积小、重量轻，冷却效果好的特点。核心设备采用往复式压缩机增压，二三级压缩采用串联缸配置。往复式压缩机通过卡特燃气压缩机驱动，能够实现变转速流量调节功能，充分利用了现场能源，节约了电能消耗。

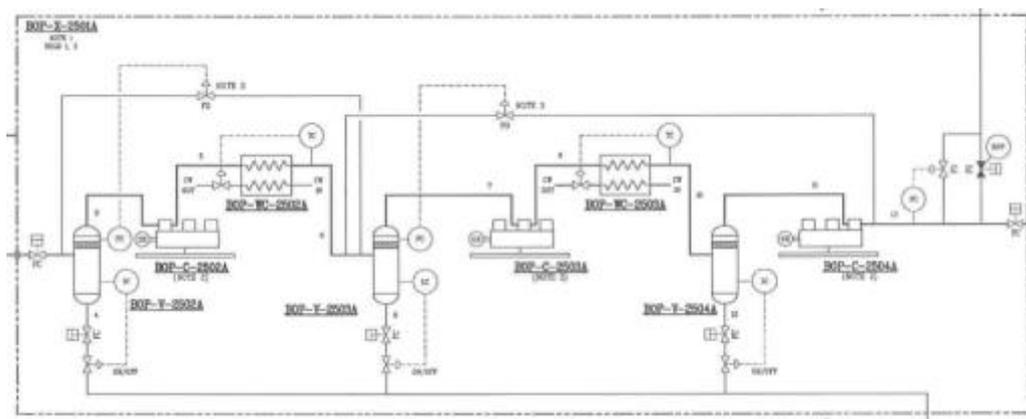


图 2-17-1 系统工艺流程图

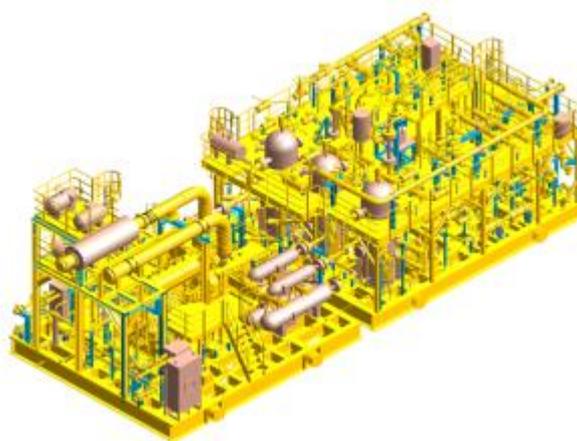


图 2-17-2 设备外形图

### 17.3.2 技术成果适用性分析

(1) 本技术成果可适用于海洋、陆地气田超高压注气开发利用。在国家大力提倡节能减排的背景下，采用注气开发模式是很多气田的选择，此设备能够稳定实现气体回注，减少了气体排放，提高了采收率。

(2) 本技术成果的处理量是 40 万方，进出口压力可以根据不同使用环境要求、调整相关设计参数，具有较强的可推广性。

### 17.3.3 技术创新性及先进性

本项目属于国内海上气田首次开展的高压注气开发，其压缩机、发动机等主设备选型，工艺流程设计，总体布置设计，发动机作为驱动机的控制逻辑设计均存在较大的挑战。主要的创新点如下：

(1) 设备高度集成化。在海洋平台空间有限的情况下，通过高集成度的整橇布置实现整橇功能。同时，针对整橇尺寸较大的问题，采用的分体式设计，压缩机和往复机集中于动力块，主工艺流程集中于静设备块，设备功能划分明确。

(2) 往复式压缩机配套 PCHE 冷却系统。本设备首次采用印刷电路板式换热器（简称 PCHE）实现工艺气冷却，大大减小了成橇的体积和重量，设备使用过程中冷却效果良好。

为保证设备使用的安全性，仪表采用双隔离原则。在海洋特殊应用环境下，双隔离原则

使得设备操作更安全。

#### **17.4 科技效果**

该设备可实现每天 40 万方天然气的回注量，大大减少现场火炬系统的处理量，提高所在气田的采收率，经济效益、环保效益明显。

#### **17.5 技术示范情况**

##### **案例：渤中 19-6 凝析气田试验区开发项目（第二阶段）BOP 平台项目**

（1）案例概况：在渤中 19-6 凝析气田试验区开发项目（第二阶段）BOP 平台项目投用。本项目共包含 2 台套，于 2023 年 4 月份投入运行，运行稳定。

（2）应用效果：目前本设备排气压力达到 42 兆帕，注气量 33 万方/天，节能效果明显。

#### **17.6 成果转化推广前景**

##### **17.6.1 技术推广前景**

该技术因为成橇难度比较大，在国内的应用较少。随着国内高压注气开发项目的实施，需求数量会逐渐增多。

##### **17.6.2 技术推广障碍及应对措施**

无。

## 技术 18 基于玻璃纤维结构的水下油气生产设施防护系统技术

### 18.1 技术提供方

单位介绍：中海油深圳海洋工程技术服务有限公司拥有国家高新技术企业、深圳海关 A 类企业、国家海事局 DOC 证书、IMCA（国际海事承办商协会）培训证书、海洋石油专业二级承包、对外总承包工程资格等证书及资质。公司同时享受深圳市政府“便利直通车服务”，是深圳“工业百强”企业。

主营业务：柔性管缆安装、单（多）点锚系安装、水下结构物安装、水下生产设施预调试、水下检测、维护及修复（IMR）、水下工程产品、海上平台/陆地终端常规维修及改造。

经营数据：2020 年经营收入 262042.61 万元；2021 年经营收入 184643.92 万元，2022 年经营收入 329306.24 万元。

技术工作：公司总人数 737 人，其中研发人员约 180 人。拥有 50 项发明专利，92 项实用新型。公司长期钻研水下油气生产设施及附属产品的成套解决方案，本项目产品为水下油气生产设施的新型保护产品，本产品的研发将给国内水下油气生产设施提供全新的、国际领先的保护方案，提高国内海洋油气开发在国际市场上的竞争力。

### 18.2 技术成果简介

#### 18.2.1 技术成果名称和领域

技术成果名称：基于玻璃纤维结构的水下油气生产设施防护系统技术。

领域：港口与海洋工程装备。

#### 18.2.2 技术成果来源

深圳市科技创新委员会重大科技专项项目：基于玻璃纤维结构的水下油气生产设施防护系统关键技术研发项目，项目编号：JSGG20200701095201004，市财政资金 800 万，配套经费 1000 万，共 1800 万元。

### 18.3 技术内容

#### 18.3.1 技术原理及工艺流程

近二十年中，水下生产技术越来越普遍的应用到全球各水下油气田开发项目中，随着我国海洋油气开发向深水挺进以及海上边际油气田的开发，水下生产系统正成为经济高效的开发手段之一，大量的水下生产设备如海底管线、采油树、管汇终端、脐带缆终端也大量得到应用。另一方面，近年来，国内海洋渔业捕捞方式与海洋石油水下设施均在迅速发展，根据《中国渔业统计年鉴》数据，南海海域活动的海洋捕捞机动渔船超 80000 艘，海洋渔业捕捞方式及捕捞设备同样存在更新和进步，渔业活动对海洋油气水下设施的影响也越发明显。据统计，近 10 年来，由于落物冲击、渔网拖挂等原因造成水下油气设施损坏达 10 起以上，每起事故造成的经济损失上亿元，对水下生产系统保护的需求迫在眉睫。

本项目目标是开展基于复合材料的水下设施保护结构的工程应用研究，并通过研究掌握玻璃纤维复合材料水下设施保护结构的设计技术，完成复合材料保护结构的安装方案研究和工程应用验证，最终完成在陆丰油田群区域开发项目水下设施上的工程应用转化，为实际工

程项目的 PLET、软管等水下设备提供防护作用，保障水下油气设备的安全生产。

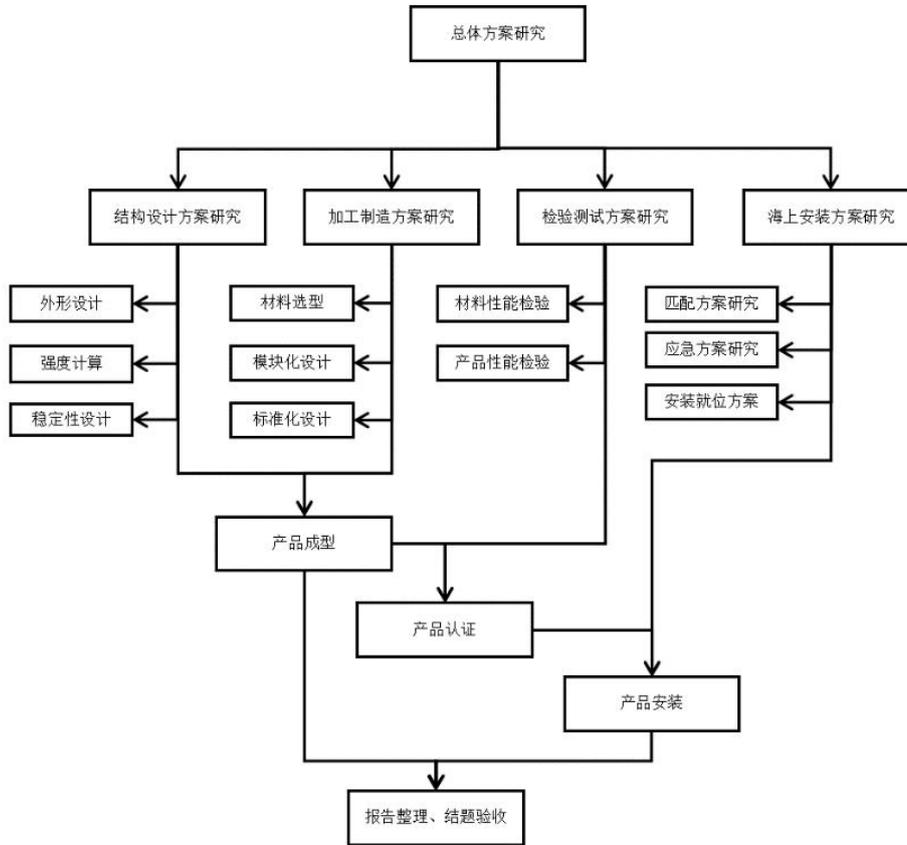


图 2-18-1 技术路线

### 18.3.2 技术成果适用性分析

该技术成果除了用于海洋油气开发领域，还可以用于海上风电领域。

### 18.3.3 技术创新性及先进性

(1) 国内首次掌握复合材料在水下油气设施应用的核心技术，形成从设计分析、生产制造、检验检测、资质认证、安装服役、维护保养等全生命周期国产化。

(2) 采用全封闭结构、解决吊装及过飞溅区安装难题，形成水下保护结构防沙性能设计。

(3) 采用复合材料水下保护结构模块化设计，技术指标达到国际水平，满足国际设计规范要求，并可根据业主要求进行强度定制设计。

### Dropped objects

Impact loads from dropped objects shall be treated as a PLS condition. The impact force from actual objects that will be handled over the structure should be used as initial design loads. Alternatively the following loads may be used:

Group	Impact energy kJ	Impact area	Object diameter mm
Multi well structures	50	Point load	700
	5	Point load	100
Other structures	20	Point load	500
	5	Point load	100

### Fishing gear loads

Design load type	Design load figure		
Trawl net friction	2x200 kN	0° to 20° horizontal	ULS
Trawlboard overpull	300 kN	0° to 20° horizontal	ULS
Trawlboard impact	13 kJ		ULS
Trawlboard snag	600 kN	0° to 20° horizontal	PLS (If not overtrawable/snagfree)
Trawl ground rope snag	1000 kN	0° to 20° horizontal	PLS (If not overtrawable/snagfree)
Trawlboard snag on sealine	600 kN		PLS (If not overtrawable/snagfree)

图 2-18-2 水下生产设施防护指标

### 18.4 科技效果

完成了复合材料水下保护结构总体方案及设计技术研究,掌握复合材料在水下油气设施应用的核心技术,研发出国内首套玻璃纤维 PLET 保护罩及软管保护罩,成功实现玻璃纤维 PLET 保护罩及软管保护罩的工程应用。从 2022 年 8 月至 2022 年 12 月,玻璃纤维 PLET 保护罩及软管保护罩在陆丰油田群区域开发项目的 15-1 海域进行工程应用,目前防护效果良好,技术和设备的可靠性和先进性得到了验证。



图 2-18-3 玻璃纤维 PLET 保护罩海上工程应用

该技术成果的主要技术指标如下：

- (1) 应用水深 $\geq 750\text{m}$
- (2) 渔网通过性：不产生拖挂
- (3) 渔网拖挂载荷 $\geq 2 \times 200\text{kN}$ （相遇角  $0^\circ - 20^\circ$ ）
- (4) 托板拖挂载荷 $\geq 300\text{kN}$ （相遇角  $0^\circ - 20^\circ$ ）
- (5) 托板撞击载荷 $\geq 13\text{kJ}$
- (6) 落物冲击载荷：直径 500mm 落物，载荷 $\geq 20\text{kJ}$ ；直径 100mm 落物，载荷 $\geq 5\text{kJ}$

### 18.5 技术示范情况

#### 案例：陆丰油田群区域开发项目

(1) 案例概况：

项目业主：中海石油（中国）有限公司深圳分公司

项目水深：287m

项目简介：陆丰 15-1 区域水深 287m，海域海底地形地貌较为复杂，存在大规模的海底中性沙波，沙波的底质以中砂、中细砂和细沙为主，具有松散、随时间移动的特点，水动力会造成海底沉积物的侵蚀、搬运和沉积。且随着海底流速的增大，沙波沙脊的移动速度会呈几何倍增长。防止沙波的堆积和移动是保证水下油气生产设施安稳运行的关键。

LF15-1 油田海底存在水下油气生产设施 PLET 结构，传统钢质保护罩一般采用格栅板覆盖表面，在防止沙坡沙脊堆积上局限性较大，很难起到在沙坡沙脊环境下对 PLET 或其他水下结构物的保护功能。而如果采取全钢板覆盖的设计，则会带来较大重量，对 PLET 防沉板的设计以及保护罩安装作业的限制均较大。因此，选取复合材料制作水下保护结构的方案成为最佳选择。

工程示范：首次采用国产化玻璃纤维复合材料 PLET 保护罩对 PLET 结构进行保护，依托陆丰油田群区域开发项目，进行了工程示范。

浮子安装时间：2022 年 9 月

实施效果：完成海上工程应用，应用效果不劣于进口产品且技术支持和相关服务更便捷。

(1) 工艺流程及主要参数：

国产化玻璃纤维复合材料 PLET 保护罩主要参数如下：

表 2-18-1 主要参数

项目	PLET 复合材料防护结构	PLET 复合材料保护罩	界面框架
材质	玻璃纤维增强塑料+钢制基座结构	玻璃纤维增强塑料	钢
空气中重量/te	53.66	35.6	18.06
海水中重量/te	33.56	17.8	15.76
功能	-	防渔具拖挂 防落物冲击 防沙坡堆积 ROV 友好	配重功能 导向功能 锁定功能

(3) 应用效果:

本次安装的国产化玻璃纤维复合材料 PLET 保护罩是国内海洋油气行业首次应用, 能够满足 PLET 对于各类防护要求, 应用效果不劣于进口产品, 受到业主的一致好评。



图 2-18-4 PLET 保护罩工程应用

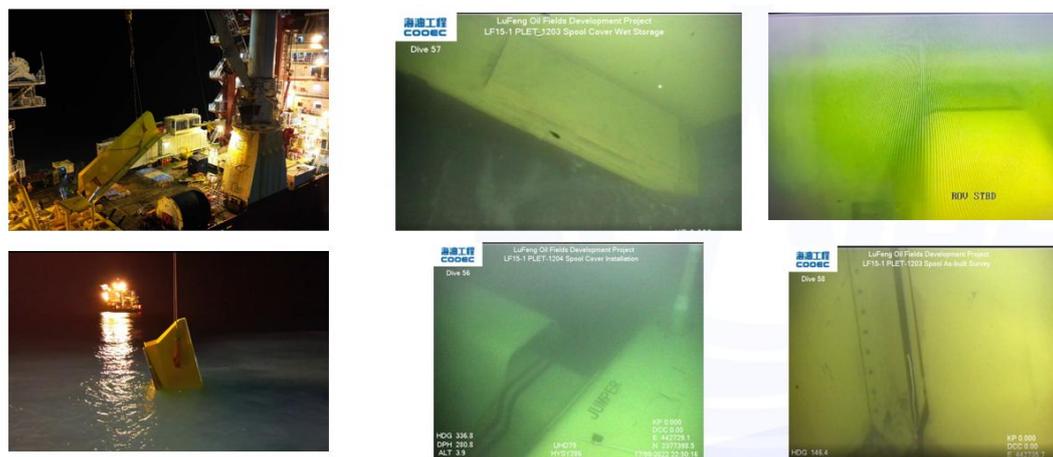


图 2-18-5 PLET 配套软管端口罩工程应用

## 18.6 成果转化推广前景

### 18.6.1 技术推广前景

(1) 本项目已完成新增产品销售产值650万, 预计完成后累计新增产品销售、安装服务产值2000万, 新增就业人数10人。

(2) 本项目完成有助于打破以欧洲为主的国外海洋工程公司在水下复合材料产品设计上的垄断。本项目首套PLET保护罩的设计文件已经取得了英国劳氏船级社的设计认可, 产品也获得劳氏版发的认可证书, 为国内海洋油气行业首次自主完成水下复合材料设计、取证、建造工作。

(3) 本项目研发水下油气设施防护产品可供目前包括水下油气生产结构物、水下油气运输管线、海洋风机水下输电电缆等多种水下油气设施防护使用, 可带动基于玻璃纤维的复合材料产业进一步与包括但不限于海洋油气开发的海洋工程行业进一步融合。一方面可以推动海洋工程新型材料的发展和进步, 另一方面也可以推动复合材料行业在新领域的应用, 创造更大的产业价值。

综上，本项目将完成的研究成果在包括海洋油气开发、海洋风电开发在内的海洋工程行业都具有相当的推广应用价值。

#### **18.6.2 技术推广障碍及应对措施**

障碍一：玻璃纤维复合材料水下防护产品，其采购价格相较于钢制保护罩是其1.5-2倍，但是国内由于运用较少，水下工程经验不足，不能系统的对比在设计寿命周期内的营运成本，在价格上没有较为突出的优势，阻碍了推广的进行。

应对措施：突出复合材料在特殊场景应用优势，积累水下工程应用经验，形成具有竞争力的成本体系。

## 技术 19 : LNG 冷能海水淡化技术

### 19.1 技术提供方

自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所（简称：淡化所）于 1978 年经国务院批准成立，是自然资源部直属的正局级事业单位，是我国唯一专门从事海水资源利用技术研究的国家级科研机构。具备海洋行业工程甲级设计资质、工程咨询甲级资信资格，通过 ISO9001 质量管理体系认证和实验室“三合一”认证。在职员工 300 余人，40%以上人员具有高级职称。在天津滨海新区设有分部，建有占地 25 万平米的示范基地，拥有 50 万元及以上的大型科研仪器设备 380 余台套。自 2020 年至 2022 年，资产总计超过 5.7 亿元，各项营业收入累计超过 5.1 亿元，支出费用约 5.1 亿元。

淡化所主要从事海水等水资源利用基础性、前瞻性、战略性、综合性科学研究，研发海水淡化等成套技术和重大装备，开展技术成果转化与推广应用，提供自主技术试验验证、国内外技术评价等公益服务。在生态环境领域方面拥有污废水生物电催化、多膜耦合废水浓缩及分盐、MVR 废水蒸发零排放、晶相转化法资源化处理高盐、高有机废水等核心技术，为海水、污水、矿渣等处理、转化及资源化利用提供了科技支撑。现已完成国家级、省部级重大项目百余项，建成一批国家重大科技示范工程，获得国家和省部级科技奖励 30 余项、发明专利 200 余项，完成编制国家及行业标准 70 余项。

### 19.2 技术成果简介

#### 19.2.1 技术成果名称和领域

技术成果名称：LNG 冷能海水淡化技术。

所属技术领域：海水综合利用。

#### 19.2.2 技术成果来源

本技术成果来源于以下项目：

(1) 中国石油化工股份有限公司科技开发项目“100 吨/日 LNG 冷能海水淡化中试研究”，项目编号：321112，项目经费：155 万元，项目时间：2021-2022 年；

(2) 中国石油化工股份有限公司设备采购项目“LNG 冷能海水淡化实验装置”，项目编号：31800235-21-MY3833-0028，项目经费：482 万元，项目时间：2021-2022 年；

(3) 自然资源部“十三五”海洋经济创新发展区域示范项目“新型海水淡化装备创新孵化平台”，项目编号：BHSF2017-20，项目经费：358 万元，项目时间：2017-2019 年；

(4) 天津市应用基础与前沿技术研究计划项目“LNG 冷能淡化用冷媒在海水中的雾化特性技术研究”，项目编号：13JCQNJC08500，项目经费：6 万元，项目时间：2013-2016 年；

(5) 国家海洋局青年海洋科学基金项目“基于液态天然气冷能利用的海水冷冻淡化机理研究”，项目编号：2010527，项目经费：10 万元，项目时间：2010-2011 年；

(6) 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“流化床海水冷冻淡化关键技术研究”，项目编号：K-JBYWF-2016-T03，项目经费：25 万元，项目时间：2016-2019 年；

(7) 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“基于微观数学建模的冷冻法

海水淡化冰晶生长现象的研究”，项目编号：K-JBYWF-2011-G02，项目经费：5 万元，项目时间：2011-2012 年。

取得的相关专利如下：

- (1) 一种旋流式流化床冷却结晶系统，国家发明专利，授权号：ZL202110919957.6
- (2) 一种制冰淡化装置，国家发明专利，授权号：ZL202210427052.1
- (3) 基于液态天然气冷能的海水冷冻淡化系统及其淡化方法，国家发明专利，授权号：ZL201210044054.9
- (4) 一种直接接触式海水冷冻淡化装置，国家发明专利，授权号：ZL201510136734.7
- (5) 一种冷冻法海水淡化冰水分离装置，国家发明专利，授权号：ZL201410322878.7

### 19.3 技术内容

#### 19.3.1 技术原理及工艺流程

利用中间流体式汽化器将 LNG 冷能提取利用，通过合适的中间冷媒将 LNG 汽化与海水冷冻的温度相匹配。利用流化床动态制冰技术将海水冷冻成为具有流体性的冰浆，再利用重力和离心的共同作用对冰浆进行冰水分离和洗涤净化。冷冻分离后的浓盐水和冰晶依次对进料海水进行降温，实现 LNG 冷能的回收利用。纯净的冰晶融化后经反渗透工艺进行深度脱盐，保证产水水质满足国家饮用水水质要求。上述工艺流程如图 2-19-1 所示。

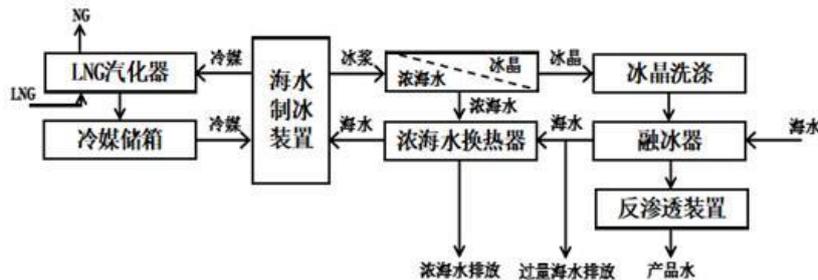


图 2-19-1 工艺流程图

#### 19.3.2 技术成果适用性分析

该技术除用于海水淡化以外，还可适用于渔获保鲜，制冷空调，工业冷却，冷冻结晶等行业领域。LNG 冷能海水淡化适宜与沿海 LNG 接收站共址建设，一方面可有效降低取排海水管路、冷媒管路等基础设施的建设成本；另一方面可发挥 LNG 接收站的区域优势，就地为周边企业如石化、渔港、冷库等提供淡水或冷源，实现 LNG 冷能的综合利用。

作为传输 LNG 冷能的冷媒，其凝固点应低于 LNG 汽化温度（ $-150^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{MPa.a}$ ），在一定压力下冷媒沸点应接近海水冰点，并且具有化学性质稳定、无毒、不可燃、不破坏臭氧层、制冷效率高等特点。此外，由于主体设备通常位于 LNG 接收站防爆区域内，装置建设及运行均须满足 LNG 接收站的防爆要求。

#### 19.3.3 技术创新性及先进性

LNG 冷能海水淡化集成了 LNG 超低温冷能提取、流化床动态海水制冰、冰浆传输与分离、冰晶洗涤净化、反渗透深度脱盐等关键技术，突破了在 LNG 冷能利用与制冰脱盐方面的瓶颈制约，研究成果达到了世界先进水平。目前国外在该领域的研究工作尚主要集中于上

述某一单项技术研发，研究成果也仅限于理论模型分析、试验室原理性验证等，尚缺乏工艺系统集成和工程实践。本技术成果已在天津南港工业区 LNG 接收站内建成了装机规模 100 吨/日 LNG 冷能海水淡化中试装置，在国内外首次实现了 LNG 冷能海水淡化技术的工程化应用，为产业化推广奠定了重要基础。

在海水制冰能力方面，流化床制冰器作为该工艺的核心设备，其内部采用了旋流器和异形结构颗粒，使流态化颗粒在传热壁面产生连续碰撞与刮削运动，持续破坏壁面流体边界层，强化了冷媒与海水换热效果，传热效率可达  $1200\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$  以上，远高于传统制冰设备传热效率  $400\sim 700\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 。该技术也显著提高了颗粒刮削频率与刮削效率，将海水与冷媒的传热温差从  $2\sim 3^\circ\text{C}$  提高至  $6\sim 7^\circ\text{C}$ ，大大增强了设备的制冰能力。此外，通过刮削颗粒运动还可抑制冰晶粘附换热壁面，保障制冰连续、稳定运行。

在海水脱盐效果方面，通过制冰器内颗粒的高速运动有效控制了冰晶尺度与晶型晶貌（冰晶粒度保持在  $0.1\text{mm}\sim 1\text{mm}$ ），减少了冰晶包裹夹带盐水的概率，保障了冷冻脱盐后融冰水的脱盐率达到 70% 以上，而传统冷冻淡化的脱盐率一般仅为 40~60%。融冰水再经反渗透膜深度脱盐后产水指标完全满足 HY/T 247-2018《海水淡化产品水水质要求》，其主要指标为总溶解固体  $\leq 1000\text{mg/L}$ 、氯化物  $\leq 500\text{mg/L}$ 。

#### 19.4 科技效果

该技术成果在我国沿海各 LNG 接收站中推广应用后可取得良好的社会与经济效益。以一台典型的中间流体式 LNG 汽化器运行为例，在 LNG 压力保持为 91.5bar，采用冷媒加热 LNG 从  $-147^\circ\text{C}$  升温汽化成为  $-20^\circ\text{C}$  的天然气，可连续汽化 200 吨/时 LNG，利用所回收冷能每日可生产约 6566 吨的冰。以市场平均售冰价格 110 元/吨计算，每年（按 300 天计）可获得制冰收入约 21668 万元。利用反渗透膜对冰融水进行深度处理后，每日可再生产约 4925 吨淡水。以工业用水价格 8 元/吨计算，每年（按 300 天计）可获得制水收入约 1170 万元。

若不将 LNG 冷能纳入系统运行成本，上述系统总装机功率约为 750kW，则吨水耗电约为  $3.7\text{kWh}/\text{吨}$ （淡水），以工业用电 0.8 元/kWh 计算，产水运行成本约为 2.9 元/吨，低于目前我市自来水价格 4.9 元/吨。

#### 19.5 技术示范情况

##### 案例：100 吨/日 LNG 冷能海水淡化中试研究

工程规模：产冰量 133 吨/日、产淡水量 100 吨/日

建设条件：中试装置总占地面积为  $28\text{m}\times 20\text{m}$ ，需供给 LNG 流量  $4.1\text{t/h}$ 、海水流量  $33.3\text{t/h}$ ，配备自来水  $0.2\text{t/h}$ （洗涤水）、压缩空气  $0.5\text{m}^3/\text{h}$ （压力  $0.6\sim 0.7\text{MPa.a}$ ）

主要建设内容：中试装置主要包括 LNG 供冷单元、海水制冰单元、冰晶洗涤单元、反渗透单元、中控系统单元，以及海水取排水管路、冷媒管路、淡水排放管路、供电电缆等基础设施

关键设备：LNG 汽化器、流化床海水制冰器、冰水分离洗涤器、反渗透淡化设

投入运行时间：2022 年 9 月 1 日—2023 年 7 月 30 日

项目验收单位：中国石油化工股份有限公司天津分公司研究院

项目验收日期：2022 年 8 月 30 日

业主及联系方式：中国石油化工股份有限公司天津分公司研究院，于强 18522873575

案例地址：天津市滨海新区南港工业区中国石化天然气分公司天津 LNG 接收站内。

在 LNG 供冷单元中，LNG 汽化器采用中间流体式换热技术，通过冷媒相变将 LNG 冷能传输给海水冷冻淡化系统。在汽化器中，LNG 压力保持为 91.5bar，LNG 由冷媒加热从 -147℃ 升温汽化成为 -20℃ 的天然气；冷媒则由 -3℃ 气态冷凝成为 -7℃ 饱和液体状态。冷凝后的低温冷媒进入压力为 5.15bar 的冷媒储罐，再经冷媒泵送入海水制冰单元。

在海水制冰单元中，采用多级流化床制冰工艺，低温冷媒为平行进料，海水为串联进料。制冰器采用流化床动态制冰技术，冷媒与海水进行逆流换热。液态冷媒进入换热器壳程降膜蒸发，冷媒与海水换热后由 -7℃ 汽化升温为 -3℃ 气态，汽化后的冷媒再经管道回流至 LNG 汽化器中。海水进入流化床制冰器管程，海水在传热管内降温至冰点并完成制冰过程。

在冰晶分离净化单元中，制冰器所产出的海水冰浆进入转筒式冰水分离器。在离心与重力的共同作用下，浓海水与冰晶实现分离。与此同时，洗涤水从分离器的顶部对冰晶进行洗涤净化，去除大部分在冰晶表面粘附和内部夹带的盐分。洗涤水采用循环利用方式，洗涤水用量控制为制冰产量的 5~10%。分离洗涤后的冰晶经融化升温后成为融冰水。

在反渗透淡化单元，将融冰水送入砂滤罐中，对融冰水进行前处理，保证反渗透的进水水质要求。反渗透采用二段形式，膜材质采用高脱盐率卷式反渗透膜。一段反渗透将含盐量在 5000~8000mg/L 的融冰水进行浓缩，然后浓缩后的融冰水经二段反渗透再继续浓缩。反渗透单元的总回收率达到 75% 左右，产水水质达到国家饮用水标准。

本项目实现了 LNG 汽化、海水制冰、淡水补给的 LNG 冷能综合利用系统。具有对 4.1 吨/时 LNG 连续汽化的能力，利用 LNG 冷能可生产 133.4 吨/日的冰，再将冰融水生产 100 吨/日的淡水，其淡水含盐量小于 300mg/L，LNG 冷能有效利用率达到 80% 以上。

在装置中 LNG 压力为 91.5bar，温度为 -147℃。LNG 在从 -147℃ 汽化升温成 -20℃ 天然气时，每公斤 LNG 所释放的冷量为 580.1kJ/kg。当接收站供给 LNG 流量为 4.08t/h 时，系统输入冷量为 657kW。预冷后的原料海水从 0℃ 降温至冰点 -1.9℃，原料海水流量为 18.6t/h，比热容为 3.99kJ/kg·℃，由此计算出原料海水降温所消耗冷能为 39kW。冷冻后海水含冰率为 30%，海水凝固潜热为 335kJ/kg，由此计算出制冰消耗冷能为 519kW。LNG 有效利用的冷能为制冰潜热与海水降温显热之和，得出 LNG 冷能利用效率达 80.8%，如图 2-19-2 所示。



图 2-19-2 LNG 冷能利用分析

按照市场售冰平均价格 110 元/吨、工业用水价格 8 元/吨计算，该中试装置每年（按 300 天计）所制取冰及淡水收入分别为 440 万元和 24 万元。在不考虑 LNG 汽化收益情况下，每年通过制冰和产淡水可获得总收入 464 万元。

在中试装置建成后，LNG 接收站每年（按 300 天计）可新增 LNG 汽化量 29520 吨，减少向海洋环境排放冷量 473MW，利用所回收的 LNG 冷能海水每年制冰 40020 吨、新增淡水 30000 吨，LNG 冷能综合利用率达到 80%以上。

## 19.6 成果转化推广前景

### 19.6.1 技术推广前景

#### （1）技术发展现状

项目团队自2009年以来一直从事海水冷冻淡化方面的技术研究，开展了流化床单管颗粒分布实验、多管综合性能实验、实验室样机试验等一系列的试验验证和性能测试，掌握了流化床海水制冰的关键参数，并创新性地提出利用旋流式流化床增强颗粒对冰层的刮削动能和刮削频率，采用异形结构颗粒来提高颗粒对冰层的刮削效果，通过颗粒对传热边界层的持续扰动强化冷媒与海水的换热效率。项目团队现已掌握了流化床海水制冰的核心技术，打通了自LNG冷能提取利用、海水制冰、冰浆传输至洗涤净化的全工艺流程。与中石化天津分公司研究院开展合作，在2022年建成100吨/日LNG冷能海水淡化中试装置，并在天津南港LNG接收站进行中试研究，在国内外首次实现LNG冷能海水淡化工程应用，取得了良好的示范效果。

#### （2）市场推广规模

截止2021年，我国LNG消费总量已达8500万吨以上，LNG进口量超过6700万吨；已建成22座LNG接收站，另有超过20个接收站在建，可开发利用的LNG冷能潜力巨大（见表 2-21-1）。现已建成的LNG接收站主要分布在我国东部沿海地区，例如广东（深圳、东莞）、广西（北海）、海南（洋浦）、福建（莆田）、浙江（宁波）、江苏（如东）、上海、山东（青岛、东营）、天津等省市，均为人口稠密、经济发达地区，对制冰和淡水的市场需求迫切。随着国内LNG产业的快速发展，该技术成果在沿海LNG接受站可得到广泛应用，预计到2025年该技术普及率有望达到40%以上。

表 2-19-1 国内部分已建 LNG 接收站

序号	操作单位	项目名称	规模(万吨/年)	一期进度
1	中石油	大连	600	验收投产
2	中海油	天津	220	验收投产
3	中石油	唐山	650	验收投产
4	中石化	山东青岛	600	验收投产
5	中石油	江苏如东	650	验收投产
6	广汇	启东	115	验收投产
7	申能（中海油）	上海洋山	300	验收投产
8	申能	上海五号沟	150	验收投产

9	中海油	浙江宁波	300	验收投产
10	中海油	莆田	500	验收投产
11	九丰	东莞九丰	150	验收投产
12	中海油	粤东	200	验收投产
13	中海油	广东大鹏	680	验收投产
14	中海油	珠海	350	验收投产
15	中石化	广西北海	600	验收投产
16	中海油	海南洋浦	300	验收投产
17	中石油	中油海南	132	验收投产
18	中石化	天津	600	验收投产
19	中海油	深圳迭福	400	验收投产
20	中石化、澳门天然气	澳门黄茅岛	500	验收投产

### (3) 国家支持政策

在传统LNG汽化工艺中，通常将LNG冷能随海水直接排放，由此造成极大的能源浪费。为此，国家相关部门已出台多项政策，推动LNG冷能利用发展。例如，国家发改委发布的《关于印发天然气发展十二五规划的通知》（发改能源[2012]3383号）：为引导天然气高效利用，将LNG接收站冷能利用纳入LNG项目核准评估内容，实现节能减排和提高能效。国家发改委、财政部、国土资源部和国家能源局联合颁布了《页岩气发展规划（2011-2015年）》，明确我国要加大LNG冷能利用力度，冷能利用纳入项目核准评估内容，与接收站同步建设，降低对海洋生态环境的影响，提高能源综合利用率。《石油和化工行业“十二五”发展指南》也明确鼓励LNG冷能的利用。

### (4) 社会经济效益

海水冷冻淡化可大量回收利用LNG冷能，最大程度地降低LNG工业能耗，同时减少海水制冰能源成本，使冷冻淡化的技术优势得到充分体现，在工业节能减排和技术经济性方面优势显著，市场潜力巨大。在沿海LNG接收站推广应用后，还可发挥LNG接收站的区域优势，对周边高耗能、高耗水企业就地形成供冰、供水能力，缓解当地用能与用水短缺局面，同时减少LNG冷能排放对周边海域环境影响，促进海洋生态环境保护。

#### 19.6.2 技术推广障碍及应对措施

LNG的主要成分是甲烷，属易燃易爆气体，遇明火、高温极易发生燃烧和爆炸。在项目施工过程中需要保障压力容器及管道在超低温条件下密封的可靠性，实现对高压超低温LNG的安全输送，由此也增加了工程施工建设和设备调试运行的难度。

为解决上述问题，工程设计及施工人员应严格执行GB50183《石油天然气工程设计防火规范》的相关规定，将现场机泵、远传仪表等电气设备均满足DIIBT4防爆要求，遵守LNG接收站的安全管理制度，做好发生紧急事故或意外情况的应急预案。

## 技术 20：海水淡化用高抗污染中空纤维膜与膜组器

### 20.1 技术提供方

天津工业大学是教育部与天津市共建、天津市重点建设的全日制普通高等学校，2018 年获批国防科工局与天津市共建高校，2017 年入选国家“双一流”世界一流学科建设高校，且 2022 年在教育部、财政部、国家发展改革委正式公布的第二轮“双一流”建设高校及建设学科名单中，成功入选第二轮“双一流”建设高校。学校具有较强科研实力，拥有天津市属高校中第一个国家重点实验室——分离膜与膜过程省部共建国家重点实验室、国家级国际联合研究中心——分离膜科学与技术国际联合研究中心、天津市协同创新中心——天津市膜分离技术协同创新中心等多个科研基地。国家重点实验室”，是目前为止国内唯一专业从事分离膜研究的国家重点实验室。环境科学与工程学科是天津市“十二五”和“十三五”重点学科，2017 年，入选天津市“双一流”建设学科，为天津市“城市水环境与资源”一流学科群牵头单位。单位拥有省部级技术工程中心（天津市水质安全评价与保障技术工程中心）、省部级研究中心（天津工业大学印染废水资源化利用中外联合研究中心）等研究平台，依托学科投资建设有“水质分析与检测”科研平台，拥有超过 40 万元大型设备 30 余台套，总资产超过 3000 万元，在膜法水处理技术等领域的研究居国内领先水平。

### 20.2 技术成果简介

#### 20.2.1 技术成果名称和领域

技术成果名称：海水淡化用高抗污染中空纤维膜与膜组器。

技术领域：海水综合利用。

#### 20.2.2 技术成果来源

技术成果来源为十三五国家重点研发计划项目“水资源高效开发利用计划（专项）”，“压力驱动-电驱动分级脱盐海水淡化新工艺”项目（编号 2017YFC0404000，中央专项经费 500 万元）之课题一“海水淡化用高抗污染中空纤维膜与膜组器研究”（编号 2017YFC0404001，中央专项经费 85 万元）。

本技术由天津工业大学开发，已取得发明专利 4 项。

相关专利信息：

（1）Lanthanide fluoride two-dimensional porous nanosheets, and preparation method and applications thereof, Yuzhong Zhang; Leitao Zhang; Hongli Zhang.

（2）张玉忠；张磊涛；李泓. 一种镧系元素氟化物二维多孔纳米片及其制备方法和应用. 发明专利, 授权公布号: CN108358233B, 授权公告日: 2019.11.26.

（3）张玉忠；黄莉兰；李泓；张涵. 负载孤立铁物种/聚合物多孔 Fenton 催化膜、其制备方法及其应用. 发明专利, 授权公布号: CN109999906B, 授权公告日: 2020.12.15.

（4）张玉忠；黄莉兰；李泓. 磺化氧化石墨烯/聚合物多孔催化膜、其制备方法及其应用. 发明专利, 授权公布号: CN108855213B, 授权公告日: 2020.12.22.

## 20.3 技术内容

### 20.3.1 技术原理及工艺流程

通过膜制备过程关键参数设计，制备海水淡化用高抗污染中空纤维膜；通过数值模拟与过程能效分析，制定中空纤维膜的组件构型设计参数，针对海水预处理研发一种新型柱式单端浇注半开放式膜组件；成功研制十寸直径单端浇筑型的柱式膜组件，并在项目示范工程中稳定运行。

#### (1) 海水淡化用高抗污染中空纤维膜制备

##### 1) 制备流程

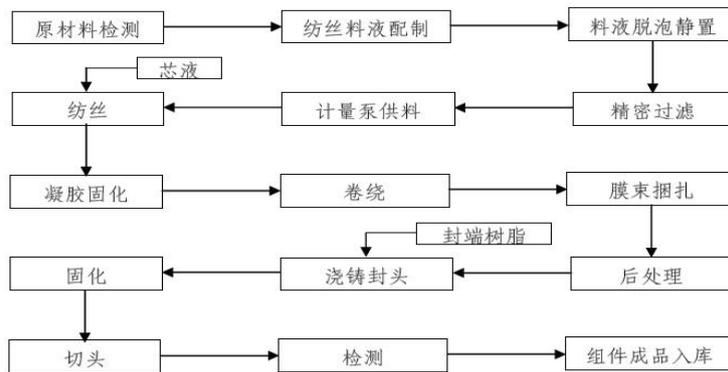


图 2-20-1 制备流程图

##### 2) 制备工艺

###### ① 铸膜液配方

制备中空纤维膜铸膜液的质量百分比配方为：聚合物 10~25%；膜孔调节剂 5~45%；溶剂 30~80%；纳米材料添加剂 5~30%，各组份之和为 100%；或者所述高聚物、添加剂、溶剂与膜孔调节剂所占份数之和为 1。

###### ② 中空纤维膜的制备方法

铸膜液的制备：按照所述膜质量百分比配方的要求，将所述各组份在 70~80℃下搅拌 4~12 小时，充分混合均匀，常温下静置脱泡 24~48 小时后，制得混均的铸膜液。

纺丝制膜：将步骤 1 制得的铸膜液与内凝胶介质同时通过喷丝头注入外凝胶介质中凝固成膜，即获得中空纤维膜；具体说是将步骤 1 制得的铸膜液由压缩气体或计量泵打入喷丝头的外管 1 与内管 2 之间的圆环形空腔 3 内（参见图 2-20-2），同时在喷丝头内管 2 注入内凝胶介质（图 2-20-2b），使铸膜液和内凝胶介质同时注入外凝胶介质凝胶浴中凝固成膜。喷丝头与凝胶浴距离为 0~30mm。按上述条件即可以制得所述的中空纤维膜。

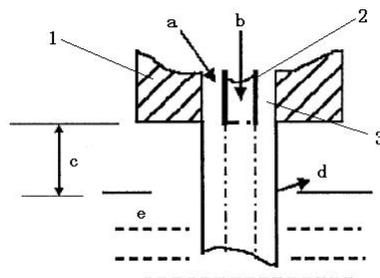


图 2-20-2 喷丝头结构

后处理：为使制备好的膜在干燥（常态）状态下保存，还必须对膜进行保护处理。本发明中采用的保护处理方法是使用 5~30wt% 的保湿剂甘油水溶液浸润 24~48 小时。经过这样的处理后，制得的中空纤维膜能够在干燥保存过程中不收缩，保持其高渗透性能，并在组装膜组件时，保证中空纤维膜与环氧树脂胶粘良好。

## （2）柱式单端浇注开放型膜组件设计

目前常见的膜组件的结构如下图 2-20-3 所示，主要构造包括外壳与中空纤维束，中空纤维束两端被固定。容器中的原水在一定压力作用下，透过中空纤维膜的微孔渗透而成为净水。使用中，原水中的悬浮微粒不断集中于中空纤维表面，造成效率降低，因此，需要对膜组件进行清洗处理。用于内压操作模式与外压操作模式的中空纤维膜组件存在料液分布不均，透过液排放有阻力并存在死角，进行反冲洗操作时反洗液对膜的冲击较大等问题，从而造成膜的使用寿命降低。

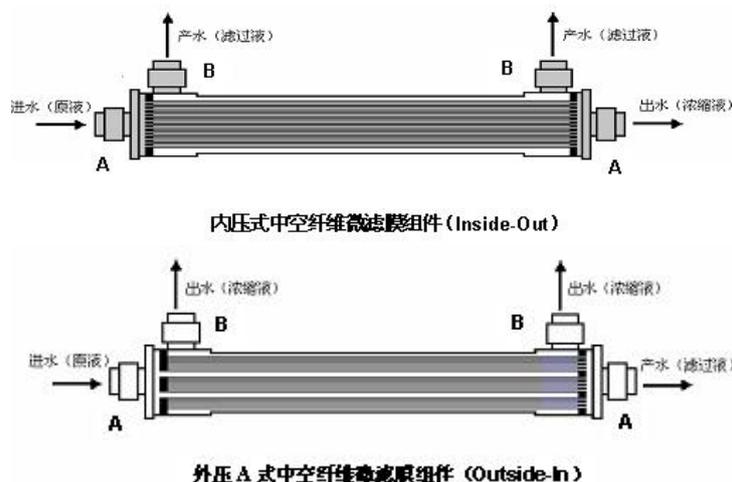


图 2-20-3 膜组件的结构

本项目设计开发的单端浇注膜组件示意图如图 2-20-4 所示，其构成为膜组件内一端膜丝之间不用胶密封粘合，不浇注固定，但每根膜丝单独堵孔，其功能是自由摆动；另一端与常规膜组件制作方法一样，用树脂浇注成型。单端浇注膜组件显著特色就是膜组件反洗时洗下的污染物能够不受阻挡排除，适用于高浊度水体过滤。因此，特别适用于渤海湾高浊度海水过滤净化。

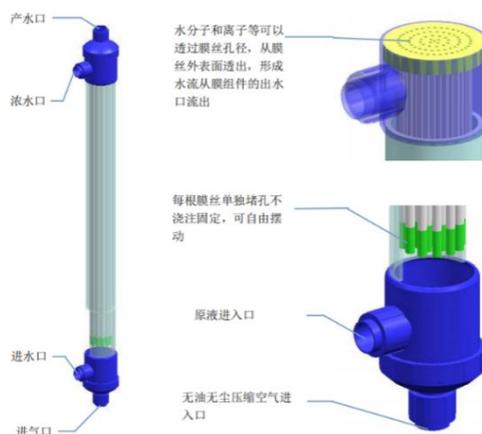


图 2-20-4 单端浇注膜组件示意图

另外，超滤膜组件采用纳米材料改性亲水性 PES/PVDF 膜材料，通过膜制备过程关键参数设计，研制的中空纤维膜具有优异的抗污染性能，能够去除几乎所有的微粒、细菌、大多数病菌以及胶体。单端浇注超滤膜组件具有更高的截污量，更大的过滤面积，使清洗更简便、彻底。通过流体力学计算与过程能效分析，制定中空纤维膜的组件构型设计参数、膜组件浇筑与清洗策略，针对性地研发一种新型柱式单端浇注半开放式膜组件，以提升膜清洗效率、降低膜清洗次数、提升下游高压膜的使用寿命、降低运行成本。

### 20.3.2 技术成果适用性分析

该技术成果适用于海水淡化、高盐污水等工艺前处理，本技术在本项目中应用情况良好，第三方应用报告见附件。本技术用于处理海水、高盐污水等无特殊限定条件，处理对象为渤海湾海水，经长时间连续运行，海水温度变化较大，但是本膜组件运行良好，产水稳定。

### 20.3.3 技术创新性及先进性

#### (1) 项目研制的中空纤维膜特色与创新之处

从制膜配方创新入手，膜中设置永久性纳米亲水调节组分与膜孔调节开关，使本公司生产的中空纤维膜具有永久亲水性与膜通量的长期稳定维护，最终制备表面开孔且相互连通梯度膜孔结构，既保证膜的分离性能又提高膜的通透性，运行跨膜压差小、污染物不易积存，保持膜的高强度。保证膜将不出现运行使用一段时间后亲水性能降低、污染速度加快、产水量降低、运行压力升高、清洗频繁的现象。

制备的纳米材料改性中空纤维膜具有永久亲水性，对蛋白质的吸附显著减弱，使中空纤维膜具有优良的长期抗污染性，保证中空纤维膜具有稳定的过滤性能。

#### (2) 与荷兰 x-flow 公司生产聚醚砜中空纤维膜技术性能对比

本项目研制的中空纤维膜材质为纳米材料改性聚醚砜中空纤维膜，如表 2-22-1 所示，其纯水通量  $591\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、对分子量 150000 道尔顿的 r-球蛋白截留率为 99.53%，拉伸断裂强力大于 4N，其综合性能达到荷兰 Norit 公司生产的 PES 中空纤维膜的性能指标。

表 2-20-1 纳米材料改性 PES 中空纤维膜的性能指标

项目内容	本工作	荷兰 x-flow 公司
膜材料	纳米材料改性 PES	PES/PVP
形式	中空纤维	中空纤维
膜通量 $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$ (0.1MPa)	591	500
拉力 (CN)	>400	>400
截留分子量	150k	150K

### 20.3.4 其他

本课题顺利完成，发表论文数量及质量、专利申请和授权数量、人才培养、平台建设等方面均超过课题合同的要求。在科学研究上，本技术围绕海水污染物吸附功能膜研制及结构设计的成形机理、结构设计、功能化改性在污水处理及海水淡化应用方面开展取得系列进展，建立了高性能混合基质膜结构（丰富传输位点、高孔隙率、高比表面积）及高性能化（高强度、渗透性、高选择性、高抗污染性）的设计方法，并在水处理、海水淡化应用中效

果显著。

## 20.4 科技效果

### (1) 中空纤维膜的微观形貌

如下图 2-20-5 及 2-20-6 所示，聚醚砜及聚偏氟乙烯中空纤维膜具有相互连通的不对称多孔微观结构，此理想的微观结构构建了过滤性能与机械性能均优的中空纤维膜。

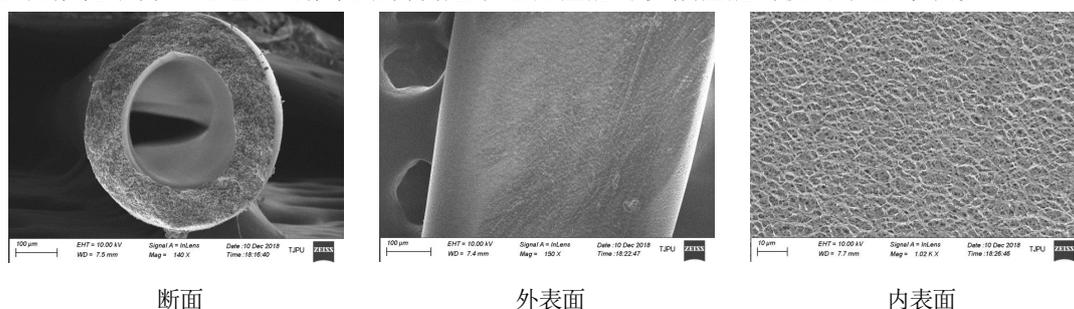


图 2-20-5 纳米材料亲水改性 PES 中空纤维膜 SEM 图

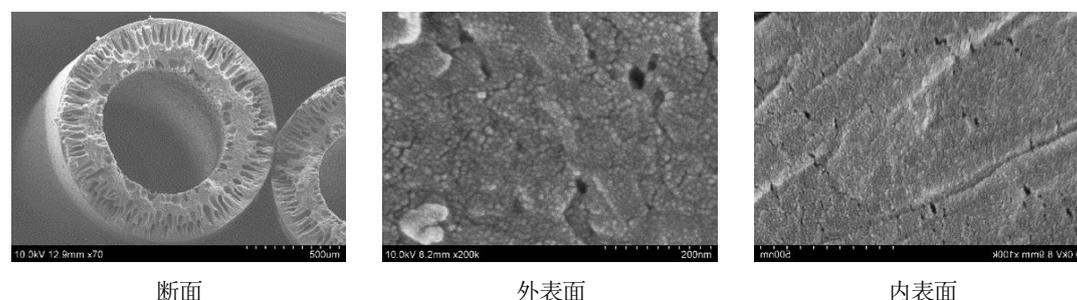


图 2-20-6 纳米材料亲水改性 PVDF 中空纤维膜 SEM 图

### (2) 中空纤维超滤膜性能指标

两种膜材料为纳米材料改性聚醚砜 (PES) 与聚偏氟乙烯 (PVDF)，性能指标如表 2-20-2 所示。

表 2-20-2 纳米材料改性中空纤维超滤膜性能指标

批号	MPES67K	MPES150K	MPVDF
膜材料	MPES	MPES	MPVDF
膜的孔径 (截留分子量)	67000	150000	0.1 微米
纯水透过速率(L/m <sup>2</sup> h,0.1MPa)	352	591	928
拉伸断裂强力 (N)	>4.0	>4.0	>3.9

### (3) 纳米材料改性中空纤维膜性能第三方检测报告

#### ③ 聚醚砜中空纤维膜

MWCO67K: 纯水通量: 0.352 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 截留率: 99.44% (标准物分子量 67000 牛血清白蛋白)。

MWCO150K: 纯水通量: 0.591 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 截留率: 99.53% (标准物分子量 150000r-球蛋白蛋白)。

#### ② 聚偏氟乙烯中空纤维膜

纯水通量: 0.928 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 平均孔径: 0.110 μm; 最大孔径: 0.130 μm; 泡点压力:

0.352 MPa。

#### (4) 10 寸单端浇注膜组件结构尺寸

10 寸单端浇注膜组件结构如图 2-20-7 所示,管体直径 10 寸,250 毫米,膜组件总长 1714 毫米。外壳材料是 UPVC,耐酸碱,强度高,韧性好。1) 膜丝: 选用项目研制的纳米材料改性 PES 为填充试验膜丝,膜丝内外径 1.2/2.6 毫米;膜丝孔径是 MWCO15K 道尔顿,填充膜丝膜面积 30 平方米。事先把一端膜丝堵孔备用;2) 浇注工艺: 按照常规成熟工艺用环氧树脂浇注一端,室温固化,切头后固化完全。内部膜丝浇注结构如图 2-20-8 所示;3) 完整性检验: 采用压力衰减法测试膜组件的完整性。图 2-20-9 是研制的 10 寸单端浇注膜组件实物照片。

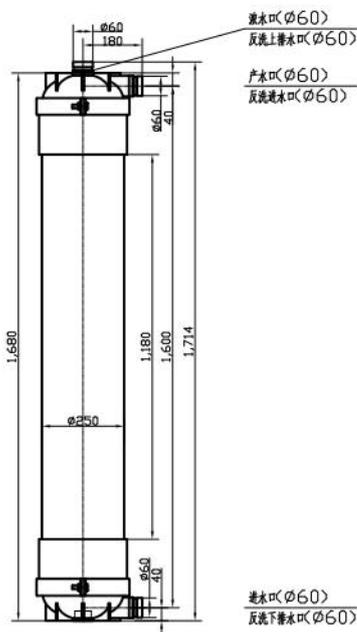


图 2-20-7 10 寸膜组件尺寸

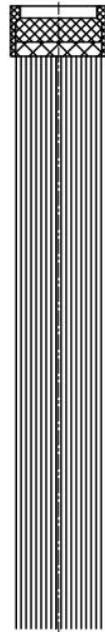


图 2-20-8 单端浇注膜组件  
内部膜丝浇注结构



图 2-20-9 10 寸膜组件实物照片

## 20.5 技术示范情况

### 案例：百吨级“纳滤-电驱动海水淡化示范装置”工程示范

#### (1) 案例概况

示范装置用单封端膜组件照片如图 2-20-10 所示,将单封端膜组件应用于装置,如图 2-20-11 所示,应用于百吨级“纳滤-电驱动海水淡化示范装置”工程示范,于 2019 年 10 月投入使用,在天津临港经济开发区 5 号排海泵站进行了累计超过 12 个月的示范应用,经用户天津海之凰科技有限公司(022-27403389)组织专家于 2020 年 12 月组织专家现场验收,超滤膜产水量与产水水质达到示范工程设计指标,运行稳定,详见附件应用报告。

#### (2) 工艺流程及主要参数

膜组件型式: 单封端开放型柱式膜组件

膜组件型号: 1060WA

膜材质: 纳米材料亲水改性 PES

膜孔径：MWCO67K

膜组件膜面积：每只膜面积 30 平方米

膜组件尺寸：直径 250 毫米（10 寸）、长度 1714 毫米

膜组件设计产水量：不低于 2m<sup>3</sup>/h，温度不低于 5℃

超滤膜组件数量：8 只

运行工艺：过滤 30 分钟，气水反洗

超滤单元实际产水量：不低于 16m<sup>3</sup>/h

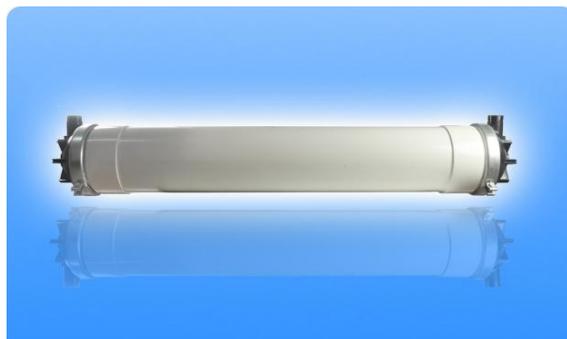


图 2-20-10 示范装置用单封端膜组件照片





图 2-20-11 膜组件应用于工程示范装置

### (3) 应用效果

膜组件运行数据：

产水量：16-18 立方米/小时，运行压力：0.05-0.1MPa

产水：澄清透明

经过长时间的连续运行试验，本单位提供的海水预处理超滤膜产水量与产水水质达到示范工程设计标准，超滤与处理系统运行稳定，满足系统运行要求。

### (4) 能源、资源节约和综合利用情况

十三五国家重点研发计划项目“水资源高效开发利用计划（专项）”——“压力驱动-电驱动分级脱盐海水淡化新工艺”针对现有 SWRO 膜法海水淡化工艺存在的高操作压力、高能耗、高材质要求，预处理繁杂等行业共性问题，创新研发“压力驱动-电驱动”分级脱盐海水淡化新工艺，从膜材料、膜组器、膜成套装备、膜法工艺与膜工程示范等环节开展产学研协作攻关，突破低能耗海水淡化共性关键技术，建成百吨/日规模的“压力驱动-电驱动”分级脱盐海水淡化全流程成套设备并进行应用示范，系统脱盐率达 99.6%，吨水本体能耗不高于 2.4kWh，较常规 SWRO 工艺降低 0.5kWh 或 15%以上，形成低能耗海水淡化新工艺，总体达到国际先进水平。

本课题为“压力驱动-电驱动分级脱盐海水淡化新工艺”项目下课题一，本课题开发出高性能抗污染聚醚砜（PES）、聚偏氟乙烯（PVDF）中空纤维超滤膜规模化制备工艺包，通过膜制备过程关键参数设计，实现膜抗污染调控、膜通量调控与膜强度调控，制备海水淡化用高抗污染中空纤维膜。通过流体力学计算与过程能效分析，制定中空纤维膜的组件构型设计参数、膜组件浇筑与清洗策略，针对海水预处理研制一种新型柱式单端浇注半开放式膜组件。研制的膜组件在百吨级示范工程中长期稳定运行。降低膜清洗次数，提升下游高压膜的使用寿命。与传统预处理工艺相耦合，形成海水淡化高效预处理技术。

## 20.6 成果转化推广前景

本技术作为国家重点研发课题核心成果，以较高的分数通过验收，可见该成果已达到较高技术成熟度，在同类技术中具有显著优势。天津作为重要滨海城市，在发展海洋经济、推

进海水淡化方面具备良好基础和突出优势。同时，天津又是资源型缺水城市，积极发展海水淡化是破解水资源短缺问题的战略举措和重要途径，对优化用水结构、保障水资源持续利用具有重要意义。本技术作为膜法海水淡化前处理单元，具有非常重要的应用前景，特别是渤海湾的海水，与其他沿海地区相比，水质复杂、处理难度大，该技术成熟度高，具有广阔的市场前景，到 2025 年，可达到较好的经济效益和环境效益。本技术研发团队为新型功能膜材料创新团队，成员结构合理，实力雄厚。形成了“国家级人才-省部级人才-青年骨干-技术人才”的梯队化研究团队，拥有天津市“131”创新型人才工程入选者 4 人，5 人具有出国进修经历，硕、博研究生 40 余人。本项目团队近年来牵头承担科技部国家重点研发计划 1 项、承担科技部国家重点研发计划课题 1 项以及 10 余项国家自然科学基金、天津市自然科学基金。本技术研发团队成员结构合理，实力雄厚。目前该技术的推广仍然需要资金支持而不断扩大应用领域。

## 技术 21：压力驱动-电驱动海水淡化全流程技术创新与应用

### 21.1 技术提供方

该技术提供方为南开大学、天津工业大学、自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所、天津长芦汉沽盐场有限责任公司、天津中领水系统技术有限公司。

南开大学是国家“985”、“211”、双一流等重点工程建设高校，1983 年在国内综合性大学中最早成立环境科学系，1986 年获全国首批环境化学博士学位授予权。1993 年环境科学学科首次获评天津市重点学科；2000 年获环境科学与工程首批一级学科博士/硕士学位授权点和首批一级学科博士后流动站；2001 年环境科学获评国家重点学科，为国内首批 4 个环境科学国家重点学科之一；2007 年环境科学再次获评国家重点学科；2011 年获批我国首批生态学一级学科博士学位授予权，2012 年生态学被认定为天津市高等学校一级重点学科。

南开大学近年来大力实施“工科攀登”计划，环境科学与工程学院是“天津市钢铁冶金及制品清洁技术工程中心”、“天津市跨介质复合污染环境治理技术重点实验室”等 10 余个国家级、省部级科研平台依托单位，“环境工程”专业为学校首个通过国际工程学科认证专业，学院科研经费年均近亿元，软科排名国内第 8，学院横向经费连续位列全校之首，近年来获得 10 余项省部级科技奖励一等奖，牵头承担环境领域科技部国家重点研发计划项目 4 项，国际合作项目 3 项，2023 年获批国家自然科学基金项目 23 项，展现了积极、向上的发展态势。

### 21.2 技术成果简介

#### 21.2.1 技术成果名称和领域

成果名称：“压力驱动-电驱动”集成膜过程海水淡化全流程技术创新与应用。

技术领域：海水淡化、海水综合利用。

#### 21.2.2 技术成果来源

##### (1) 项目来源

国家重点研发计划项目，编号：2017YFC0404000，项目名称：“压力驱动-电驱动”分级脱盐海水淡化新工艺，500 万元；

天津市生态环境治理科技重大专项项目，编号：18ZXSZSF00050，项目名称：海水淡化浓海水膜法浓缩与趋零排放关键技术与示范，50 万元；

天津市重点研发计划科技支撑重点项目，编号：19YFZCSF00760，项目名称：面向压力膜浓缩液的电膜反应器零排放脱盐关键技术，30 万元；

天津市科技兴海专项资金项目，编号：KJXH2011-07，项目名称：基于“纳滤/电去离子”集成膜过程的低成本海水淡化关键技术研究，175 万元。

##### (2) 已有知识产权：

一种集成膜过程海水淡化方法，ZL20201092 9429.4

一种用于电渗析脱盐的电渗析系统及方法，ZL20191073 4161.6

## 21.3 技术内容

### 21.3.1 技术原理及工艺流程

#### (1) “压力驱动-电驱动”分级脱盐低能耗海水淡化新工艺

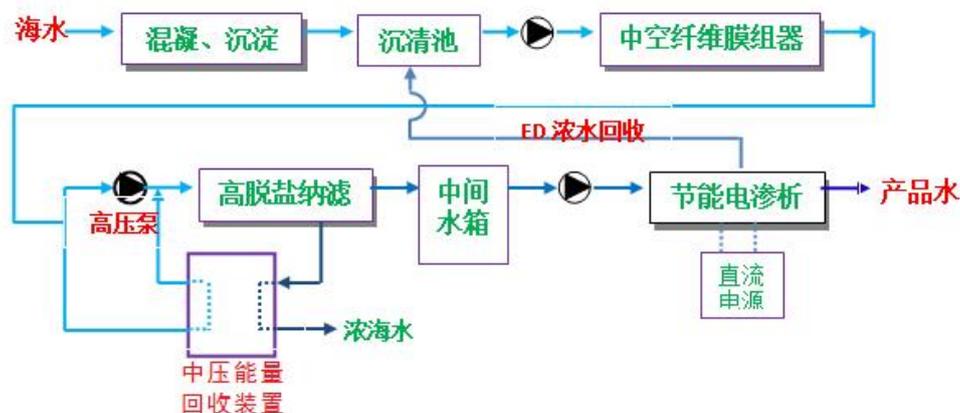


图 2-21-1 “压力驱动-电驱动”多膜集成分级脱盐海水淡化工艺流程

工艺路线描述：预处理单元以新型高抗污染中空纤维膜为核心，视原海水水质，尤其是浊度、颗粒物等杂质成分，必要时在中空纤维膜组器前使用混凝沉淀或砂滤处理。经预处理的海水，有效去除掉颗粒物、浊度、藻类、大分子有机物、微生物等杂质，为下游高压泵和纳滤膜提供持续进水水质保证。一级脱盐单元采用中压运行的高脱盐率 NF 膜，在 3.5-3.8MPa 的低压条件下实现不低于 88% 的海水脱盐率，而由于 NF 的运行压力显著低于 SWRO 工艺的 5.5-6.0MPa，其吨水本体能耗则不高于 1.2KWh。

NF 所得淡水含盐量降低到 3500mg/L 水平，属于典型的苦咸水水质，且以一价离子为主，为传统电渗析除盐工艺最经济的水质适用范围。由此，二级脱盐单元采用高效节能新型电渗析，通过结合离子膜品种选择、节能型水流隔板和电极室构造，以及多级多段式膜堆内部能耗综合优化等节能性技术手段，较传统电渗析苦咸水淡化进一步降低脱盐过程能耗，从而实现整体的低能耗海水淡化。

新型节能电渗析的产水 TDS 可根据工作电压电流机动调整，一般控制在 150mg/L 以下，脱盐率约 95%，使得整个集成过程的海水总脱盐率达到 99.6%，与当前国内外 SWRO 工艺的脱盐水平相当或更优。根据既有研究成果，采用普通异相离子膜的传统电渗析器，该单元的吨水能耗可控制在 0.8KWh 以下。考虑到 EDR 单元的水收率，则“NF/EDR”集成过程的吨水本体能耗可控制在 2.4KWh 以下。在一定条件下，可达到 2.1KWh 水平，显著低于主流 SWRO 工艺的能耗。

电驱动膜脱盐单元的浓缩水完全回收为上游中空纤维膜滤单元的进水以保证整个系统的水利用率，整个工艺的水收率与 SWRO 工艺相近。

#### (2) “压力驱动-电驱动”集成膜过程浓海水膜法浓缩与趋零排放新工艺

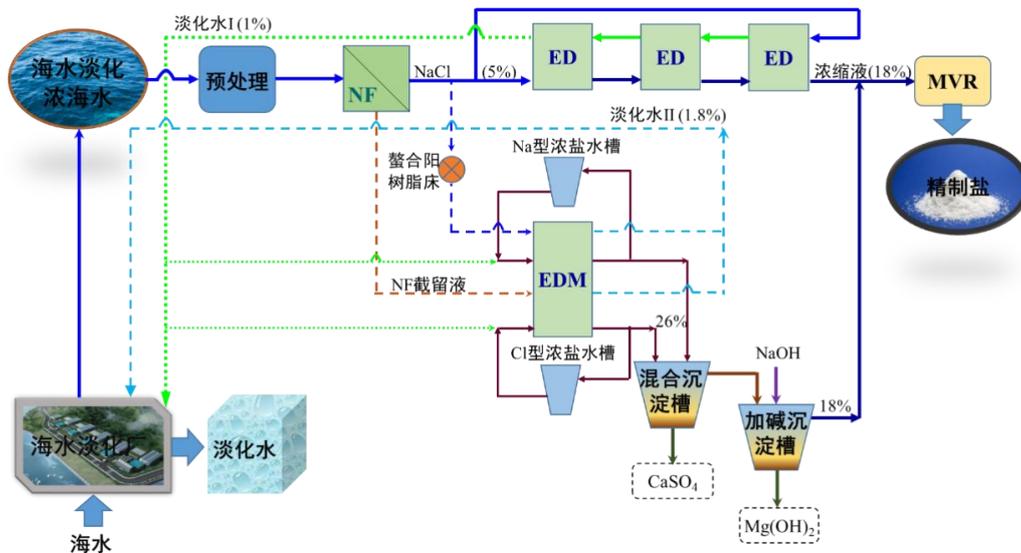


图 2-21-2 “NF/EDM/ED” 集成膜法浓海水高效浓缩与趋零排放工艺路线

图 2-21-2 所示膜集成工艺流程主要包括 NF、EDM、ED 三个单元技术，并通过单元技术间的科学配合、物料及水平衡的合理调控，科学设计该工艺全流程的物料流。具体如下：

预处理单元以成熟的新型单端浇筑短流程、高抗污染中空纤维膜为核心。经预处理的浓海水，有效去除掉颗粒物、浊度、胶体、微生物、藻类物质和大分子有机物等杂质，为下游高压泵和纳滤膜持续提供进水水质保证。

纳滤分盐单元采用中压运行的高选择性 NF 膜和高能量效率的柱塞泵，在 2.0MPa 左右的低压条件下实现 1,2 价离子分盐，其吨水本体能耗则不高于 0.6KWh。NF 分盐所得渗透液中二价离子含量降低 85% 以上，且一价盐浓度较原海水基本不降低，从而可为 ED 浓缩工艺提供较佳的进水水质。

NF 截留液进入电膜反应器单元进行重组分离，制备 Na 型浓盐水（含  $\text{SO}_4^{2-}$ ）和 Cl 型浓盐水（含  $\text{Ca}^{2+}$ ）。两股淡化水返回海淡工艺与经预处理的天然海水勾兑，两股浓盐水则在部分循环模式下浓缩至一定浓度，经互兑析出  $\text{CaSO}_4$  晶形沉淀，而后以加碱沉淀法进行混合浓盐水的提镁过程，经脱钙、提镁的浓盐水浓度达到 18% 后送入 MVR 制盐。由此减少外加沉淀试剂的引入，实现 NF 截留液中二价盐的资源化和残留 NaCl 增值化，继而实现浓海水 NF 截留液的趋零排放。

NF 渗透液（以 NaCl 为主的一价盐）进入电驱动膜浓缩单元进行高浓度液体盐制备，ED 单元采用**阵列式多级串联设计**。本项目研发的高效节能电渗析（SED），通过结合国产离子膜、节能型水流隔板和电极室构造创新，以及多级 ED 间能耗综合优化等节能性技术手段，较国外 ED 海水浓缩制盐过程能耗基本相当，从而实现国产化的整体低能耗浓海水膜法浓缩。此外，电驱动膜浓缩单元的淡化水完全回收，除小部分用于作为 EDM 单元的两股反应液流的进水，大部分则返回海水淡化厂与经预处理的天然海水勾兑，改善海淡原水水质的同时，以改善原水水质、提升系统水收率。整个系统除 ED 和 EDM 的少量电极水外，无其他废水外排；全部无机盐均以 MVR、自沉淀和加碱析出等方式成为单组分盐产品，由此实现整个海淡-浓海水处置系统的趋零排放。

### 21.3.2 技术成果适用性分析

(1) 技术适用的行业和具体领域：本项目技术成果主要适用于海水与苦咸水淡化，石化、电力、化工、医药、钢铁、冶金等工业部门的高盐废水处理与资源化、高值化利用领域。

(2) 本项目技术成果适用围绕高新膜分离技术的海水、浓盐水、工业高盐废水等处理，基于现有商品分离膜的特性，主要的限制条件包括：1) 物料温度一般不宜超过 40℃，不可低于零度；2) 物料不具有强有机溶剂和强氧化特性，以免造成膜结构的不可逆损害。

### 21.3.3 技术创新性及先进性

#### (1) 创新点

基于脱盐过程“推动力-能耗-脱盐率”间的非线性关系，设计、研发了“高抗污染超滤-高脱盐纳滤-节能电渗析”三级膜分离集成的“压力驱动-电驱动”分级脱盐海水淡化新工艺，最高脱盐率 99.7%；同等条件下吨水本体能耗较 SWRO 工艺降低 15%以上。

成功研发了“纳滤分盐-电膜反应器拆盐-电驱动膜阵列浓缩”的“压力驱动-电驱动”集成膜过程浓海水膜法浓缩与趋零排放新工艺，破解了纳滤截留液易结垢的关键难题，所得一价盐浓缩液质量浓度达 18%，为浓海水高效低耗制备精制盐等高值化利用提供了关键技术支撑，核心的离子膜材料和电膜装备实现完全国产化。

采用超薄水流隔板及树脂填充床电极板框，结合非对称膜对数及浓、淡水逆流运行等关键构件和工艺创新，形成了面向脱盐和盐浓缩的高效、节能、高稳定的电驱动膜新工艺与成套技术装备。

#### (2) 相关的项目验收和专家鉴定意见

##### ① 国家重点研发计划项目验收意见

在十三五国家重点研发计划项目（2017YFC0404000）”的综合绩效评价中，以张建云院士为组长的专家组给出了 87.80 的平均得分，专家组认为项目完成了任务合同书规定的研究内容和考核指标，同意通过绩效综合评价。取得成果如下：

成功研制了 10 寸直径单端浇筑的大型柱式中空纤维膜组件用于海水预处理，膜组件在百吨级示范工程中实现应用；

构建了集成中压能量回收装置的多级式纳滤综合试验平台系统，其针对海水水质的系统脱盐率可达 90%，所设计的中压纳滤系统与能量回收系统技术方案成功用于百吨/日级示范项目；

基于新型水流隔板构件、树脂填充床电极板框、级段间的非对称膜对数和浓淡水逆流流动等多种节能方案，形成了 400\*800mm 规格高效节能电驱动膜脱盐成套装备，并在百吨级示范项目中获得应用；

建成了 100m<sup>3</sup>/d 规模的“压力驱动-电驱动”分级脱盐海水淡化示范设备，总脱盐率最高可达 99.7%，集成过程的本体能耗为 2.35 kWh/m<sup>3</sup>，达到了任务合同书的技术指标要求。

##### ② 天津市科技兴海专项资金项目验收意见

本项目（KJXH2011-07）验收专家组认为，项目主要取得的成果为：NF/EDIR”集成过程的总脱盐率不低于 98%，产水量含盐量 TDS 不超过 600 mg/L，水利用率不低于 70%的

情况下,总耗电量不超过 2.2 kWh/m<sup>3</sup>;形成了 1 套“NF/EDIR”样机,建成了 2 项规模为 24 m<sup>3</sup>/d “NF/EDIR”海水淡化示范工程。完成了任务合同书规定的考核指标,通过了技术评审,专家组同意通过验收。

### ③ 天津市生态环境治理科技重大专项项目验收意见

本项目(18ZXSZSF00050)验收专家组认为:该项目开发的“纳滤分盐-电膜反应器拆盐-电驱动膜阵列浓缩”的“NF/EDM/ED”集成膜过程浓海水膜法浓缩与趋零排放成套工艺,解决了纳滤截留液易结垢难题,所得一价盐浓缩液质量浓度达 18%,电驱动膜装备实现了完全国产化;进行了千吨级“NF/EDM/ED”集成膜过程浓海水膜法浓缩与趋零排放示范。完成了任务合同书规定的研究内容和经济技术指标,同意通过验收。

### ④ 天津市科技支撑重点项目验收意见

本项目(19YFZCSF00760)验收专家组认为:该项目针对压力驱动膜过程浓缩液在高效、经济、资源化处置技术方面的行业共性关键难题,开展适应高盐、高硬等水质特点的电膜反应器零排放脱盐技术研究。成功研制了 100\*300mm、200\*400mm 和 400\*800mm 系列规格的电膜反应器专用水流隔板;明确了电膜反应器离子拆盐浓缩过程中反离子迁移和同名离子泄露的影响机制,系统探讨了电膜反应器 Cl 型和 Na 型浓盐水互兑脱钙及加碱沉淀过程影响因素;对单级和两级电膜反应器处理压力膜浓缩液过程工艺参数进行了优化调控;开展了两级部分循环式电膜反应器的连续运行,以海水纳滤截留液为处理对象,实现了处理水量达 2 m<sup>3</sup>/d 的电膜反应器零排放脱盐成套中试示范,完成了任务合同书规定的研究内容和经济技术指标,专家组同意通过验收。

## 21.4 科技效果

本项目通过多年产学研联合攻关,在低成本、低能耗海水淡化及浓海水趋零排放和高值利用等方面取得重要突破及系统性创新成果,突破了制约海水淡化产业可持续发展的关键瓶颈,对海水淡化产业节能降碳与高质量发展、经济社会可持续发展提供可靠水资源保障及人才培养至关重要,具有显著社会价值。

(1) 促进海水淡化行业的节能降碳。面向海水淡化脱盐和浓海水浓缩的节能、高效电驱动膜技术装备及“压力驱动-电驱动”集成膜法海水淡化全流程技术的研发,从核心装备和集成工艺两个维度,提高了海水淡化的技术水平,为节能降碳做出贡献。

(2) 助力海水淡化产业快速发展。本项目研发的“压力驱动-电驱动”分级脱盐低能耗海水淡化工艺,产水水质机动可调,最高脱盐率 99.7%;同等条件下吨水本体能耗较 SWRO 膜工艺降低 15%以上;核心的离子膜材料和电驱动膜装备实现了完全国产化,较进口日本设备可节省投资 70%;此外,项目组成员,原天津市政协常委张玉忠教授所提出的“关于推进天津市海水淡化产业快速发展的提案”已被天津自然资源相关部门列为工作参考,为天津市和国内海水淡化产业高质量快速发展起到了积极推动作用。

## 21.5 技术示范情况

本项目研发的“压力驱动-电驱动”分级脱盐低能耗海水淡化及浓海水膜法浓缩与趋零排放新工艺、面向脱盐和盐浓缩的高效、节能电驱动膜新装备研制、高通量抗污染中空纤维

超滤膜及其大型膜组器研制等技术，通过产学研合作，由天津中领水系统技术有限公司、自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所和天津长芦汉沽盐场有限责任公司进行逐步地推广应用。自 2014 年开始形成生产力以来，在“压力驱动-电驱动”集成膜过程海水淡化全流程技术及其装备，高效节能型脱盐和盐浓缩电驱动膜新技术与装备，以及单端浇筑的大型高通量抗污染中空纤维膜组器等方面形成多项成果和产品，累计新增收入 9521 万元，新增利润 1491 万元，新增税收 443.2 万元。

天津中领水系统技术有限公司主要从事膜分离、水处理高新技术及工程业务。自 2016 年起以专利许可、转让、共同承担重大科技项目等方式对“压力驱动-电驱集成膜过程海水淡化全流程技术创新与应用”相关技术成果进行合作转化应用。该公司基于海水纳滤和高效电渗析的研究成果，成功中标了“天津长芦汉沽盐场有限责任公司浓海水电渗析制盐”项目（合同额 375 万元）、“自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所 100 吨/天集装箱式 NF/EDR 海水淡化示范装置”项目（合同额 166 万元）、“中船重工船舶设计研究中心有限公司 MRU 闪蒸子系统电渗析设备（合同额 118 万元）”、“中领日新（南京）膜技术有限公司定制电渗析器（合同额 97.4 万元）”和“高盐水体电驱动膜综合试验平台”项目（合同额 91 万元）等多项海水淡化、浓海水零排放、高盐水处理、化工高盐废水零排放等项目。累计新增销售收入 1297 万元，新增利润 368 万元。其中，100 吨/天“NF/EDR”海水淡化示范装置为国家重点研发计划项目核心物化成果，受到验收专家组充分认可。

自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所是我国唯一专门从事海水淡化与综合利用科技创新、成果转化、国际合作和社会服务等国家级研究所。该所长期与南开大学进行产学研合作。基于压力驱动-电驱动膜技术的研究，该所成功中标“浓海水淡化及综合利用项目设计和技术支持”（合同额 800 万元）和“环保设施提标改造项目废水处理设备采购及安装工程合同”项目（合同额 400 万元）。此外，该所还将本项目所研发的技术成果推广至高盐、高 COD 的 SN 生产废水处理，实现了废水中有机物的去除及盐分的固化；该所中标的浓海水淡化及综合利用项目设计和技术支持项目则以浓盐水为原料，进行浓缩制取液体盐供氯碱厂使用，同时提取高附加值产品、生产高品质淡水，形成了“海水淡化-化学资源提取-液体盐-氯碱化工”四位一体的循环经济产业模式。2023 年中标的“安徽省阜阳市酸性废液资源化工艺研发设计和装备研制供货项目”（合同额 1268 万元）则是利用中压纳滤-节能电渗析技术进行酸性废液分盐处置，节能电渗析用于高盐组分的浓缩处置，显著降低后续蒸发结晶工艺的投资与运行成本。自 2016 年以来，基于“压力驱动-电驱集成膜过程海水淡化全流程技术创新与应用”的相关技术成果，自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所累计新增收入 2538 万元，新增利润 635 万元。

天津长芦汉沽盐场有限责任公司是我国大型海盐生产企业，也是国家重要的食盐生产基地。该公司作为项目的协作单位，是“压力驱动-电驱集成膜过程海水淡化全流程技术创新与应用”技术成果重要的产业化生产和推广应用单位。该公司使用“高抗污染中空纤维超滤-高选择性纳滤-高效节能电渗析阵列”的“压力膜-电驱动膜”集成技术，对浓海水进行工厂化高效预处理、分盐和浓缩，所得 NaCl 浓盐水在进入工厂 MVR 工艺直接制备高价值

精制盐。该项目于 2018 年 11 月份建成，自 2019 年稳定运行至今。整个项目浓海水进料浓度 5%，处理量 1200 吨/天，采用国产化工艺路线，实现了总体工艺和核心装置的自主可控，投资成本仅为进口日本离子膜全套设备的 30%；所得 NaCl 浓盐水浓度达到 18%，对应的精制盐产能达到 10000 吨/年；自项目投入运行至今，已实现食用精制盐（分装）产量 45800 吨，累计新增收入 5686 万元，新增利润 488 万元，新增税收 383 万元。更重要的是，本项目基于“压力驱动-电驱动”膜集成工艺处理浓海水制精制食用盐，每 500 平米车间可替代盐田 11110 亩。若全部采用项目工艺替代盐田，仅需不超过 30 亩用地即可完全替代 75 平方公里盐田，且产品价值提高 5 倍以上，在土地节约和置换方面具有极其显著的资源、环境和社会效益。

## 21.6 成果转化推广前景

### 21.6.1 技术推广前景

针对“压力驱动-电驱动”分级脱盐低能耗海水淡化新工艺技术成果而言，现有海水淡化产业限于技术手段的局限性和资金、政府财政补贴的不足，成本因素仍然是制约国内海水淡化产业大规模应用的关键，主流的 SWRO 膜法工艺的高操作压力、高能耗、高材质要求，以及海水预处理工艺的效率偏低等问题都亟需通过关键共性技术创新加以解决。本项目着眼于低能耗、低成本、生态化海水淡化，通过产学研紧密结合联合攻关，创新研发多种适于海水淡化各工艺阶段的膜材料、膜组器、膜工艺和膜成套设备，使海水淡化的吨水本体能耗较现有 SWRO 膜法降低 0.5KWh 或 15%以上，对推动海水淡化行业技术进步有重要价值，对海水淡化更好服务于经济社会发展都有重要社会、经济和生态效益。该技术成果可适用的海水淡化规模机动灵活，无产水量限制，尤其对小型岛礁的分散式供水也更具适用性。整个技术链条所涉膜材料中，除 NF 膜外，其余膜材料和装备已均可实现国产，总体上具备自主可控性。

此外，海水淡化副产浓海水的安全处理、处置和排放在部分地区，尤其是天津地区则是海水淡化产业发展的另一关键瓶颈。主流的 SED 膜法浓缩工艺的高初期设备投资、高运行能耗等问题都亟需通过关键共性技术创新加以解决。本项目通过产学研紧密结合联合攻关，创新研发浓海水膜法浓缩新工艺和膜成套设备，以高国产化率，显著降低的投资成本实现不低于 18%的液体盐制备，技术指标较现有 SED 膜法基本接近，同时以创新的 EDM 电膜反应器对 NF 浓缩液进行拆盐、浓缩，同步实现浓海水的趋零排放，从而助力浓缩海水制盐技术及设备的国产化，打破国外相关材料、设备和技术的垄断。这对推动浓海水综合利用与趋零排放行业技术进步有重要价值，对海水淡化更好服务于经济社会发展都有重要社会、经济和生态效益。

项目技术成果除在海水淡化产业的推广应用之外，相关技术在苦咸水脱盐和工业高浓高盐废水的深度处理与资源化利用方面同样具有重要价值，尤其是 SED 盐浓缩技术和 EDM 拆盐浓缩分离技术，为解决高硬、高盐易结垢水体的资源化提供了关键技术支撑。

相关技术成果在海水淡化、工业高盐水体处理领域的国内市场容量达到百亿元/年级别，其推广应用具有重大的社会、经济价值。另外，浓海水膜法浓缩液趋零排放技术的推广应用，

还可以节约、置换出 10 余万亩宝贵的土地资源可供开发利用，同样具有突出的社会、环境效益。

### **21.6.2 技术推广障碍及应对措施**

项目技术成果在海水淡化产业领域的推广迫切需要首先建设千吨级，乃至万吨级示范工程，进行进一步的规模应用示范，这需要有重要的科研平台、基地和应用项目来进行配合；对于石化、电力、化工、钢铁冶金、生物制药、电子等工业部门的高盐水处理而言，项目联合体目前在合作平台、市场渠道和资金等方面尚有显著不足，需要多方资源的有力投入、推动，尤其是大型央企、国企和上市工程公司的结合，将为技术成果的快速、规模产业化推广创造重要条件。

## 技术 22：水下探测装备关键计量标准及溯源技术

### 22.1 技术提供方

交通运输部天津水运工程科学研究院成立于 1974 年，是交通运输部直属正局级科研事业单位。主要从事交通运输科技事业发展中具有基础性、战略性、前瞻性等共性技术和重大工程建设关键技术研究。拥有港口水工建筑技术国家工程研究中心、国家水路绿色建设与灾害防治国际科技合作基地、国家水运工程检测设备计量站、中国-印尼港口建设与灾害防治联合研究中心、中国-孟加拉港口建设联合研究中心、中国-阿联酋绿色生态港口建设技术联合实验室、大型水动力中心国家交通运输科普基地、全国科普教育基地、国家水运监测装备产业计量测试中心等 9 个国家级平台，拥有工程泥沙、水工构造物检测诊断与加固技术、水路交通环境保护 3 个交通运输行业重点实验室和渤海湾港口航道长期性能交通运输行业野外科学观测研究基地，以及天津市水运工程测绘技术重点实验室、天津市海洋环境与修复技术工程中心，建有天津市交通运输行业环境监测中心站和博士后科研工作站。专业覆盖水动力及潮流泥沙、水工结构、环保生态、安全节能、计量检测、仿真与信息化、勘察测绘、岩土工程、风工程、造价定额、工程管理及环境监理等领域的科研实验、技术咨询、政策研究与战略规划等科技服务工作。近三年，先后承担国家级和省部级科技计划项目近 100 项，获得省部级科技进步奖近 130 项；承担长江黄金水道、港珠澳大桥、深中通道、引江济淮等国家重大工程和深远海岛礁等国防建设项目 300 余项，为交通强国、海洋强国建设提供强劲技术支撑。

### 22.2 技术成果简介

#### 22.2.1 技术成果名称和领域

水下探测装备关键计量标准及溯源技术：水下探测是谋划、决策、规划和实施国家质量强国战略、交通强国战略、海洋强国战略的重要基础。天科院聚焦水下探测装备计量标准缺失的现状，致力于解决水深、流速、含沙量、水下定位等量值无法溯源的行业困境，补齐国内外水下关键探测设备无法溯源、无处送检、无效监管的“三无”行业短板，采用了多源要素建模、现场水域验证、标准装置研制的技术方法，提出了 10 种水下关键探测装备计量溯源方法，建立了 10 种水下关键探测装备量值溯源体系及标准装置。按应用领域分如下三个方面：

##### (1) 水下地形地貌计量溯源方法及标准装置（4 种）

通过分析水下地形地貌测量系统各误差的传播影响规律与影响计量标准特性的关键因素，开展了水深、声速、底物分辨等关键量值的计量溯源方法研究，建立了水下地形地貌探测设备量值溯源体系，研制了整套水下地形地貌测量系统的计量标准装置，制定并发布了相应的技术规范。

##### (2) 浪潮流沙计量溯源方法及标准装置（4 种）

开展了声学多普勒流速剖面仪、超声式波浪测量仪、验潮仪和含沙量测定仪的计量溯源方法研究，建立了流速、流向、波浪、含沙量等量值溯源体系，研制了基于无人船的声学多

普勒流速剖面仪校准装置、基于直线静水明槽的超声式波浪测量仪校准装置及基于含沙量标准场的含沙量测定仪校准装置，制定并发布了相应的技术规范。

### (3) 定位定向计量溯源方法及标准装置（2种）

开展了姿态测量仪、超短基线水声定位仪的计量溯源方法研究，建立了斜距、水平转角、垂直转角等量值溯源体系。研制了姿态测量仪、超短基线水声定位仪校准装置，制定并发布了相应的技术规范。

本项目研究成果为“海巡 08”大型测量船、深中通道、港珠澳大桥、舟山-上海跨海通道等国家重点工程项目中的水深、流速、含沙量等数据质量评控提供了有效技术支持；为解决“世越号”、“桑吉轮”、“碧海行动”等国内外大吨位沉船打捞作业中水下定姿定位的量值评定难题提供了科学手段；为验收国家重点研发的大型造波机、多功能水上筑塔平台、挖泥船等提供了权威依据，产生了显著的社会效益。行业标准已被中海达、华测导航、海卓同创等国内厂家用于仪器设备的出厂检验；为国内外 350 余家水下设备的产学研用单位提供计量服务。支撑了天津建设国家水运监测装备产业计量测试中心。成果被纳入天津市交通运输行业新技术推广清单。项目成果制定行业标准 7 项，部门计量检定规程 16 项；授权专利 12 件；出版著作 3 部；发表论文 18 篇。

#### 22.2.2 技术成果来源

##### (1) 项目来源

国家重点研发计划专项“国家质量基础的共性技术研究与应用”，水运工程关键计量标准及溯源技术研究，2018YFF0212200，485 万元。

天津市交通运输科技发展项目（港航专业），多波束声呐校准方法研究及在天津港口示范应用，2018-b5。

交通运输部标准计量质量项目，多波束测深仪计量标准技术研究，2014499224260。

交通运输部标准计量质量项目，声学多普勒流速剖面仪（ADCP）计量标准技术研究 2014499224230。

交通运输部标准计量质量项目，波浪观测仪计量标准技术研究，201609104。

交通运输部标准（定额）项目，水运工程 侧扫声呐标准及规程吗，201720131。

交通运输标准规范研究制（修）订经费项目，压力式波浪测量仪计量检定规程制定，202220034。

交通运输部标准（定额）项目，水运工程含沙量测定仪标准及规程，201720128。

##### (2) 主要知识产权

###### ① 国际发明专利：

Acoustic Doppler Current Profiler Calibration Device and Method Based on Unmanned Ship, LU500577

Device and method for metrological verification of sand content determinator, LU503250

Underwater imaging sonar measurement and calibration device and method, LU503251

###### ② 国家发明专利：

多波束测深仪测深与扫宽性能校准方法, ZL201810714943.9

一种浅地层剖面仪计量校准方法及装置, ZL202210077433.1

一种水下成像声呐计量校准装置及方法, ZL202210137422.8

③ 实用新专利:

一种基于无人船的声学多普勒流速剖面仪校准装置, CN209264759U

一种含沙量测定仪计量检定装置, CN214310045U

一种基于原型深水港池的条带测深仪测深与扫宽性能校准系统, CN208506244U

④ 专著:

水文测绘装备产业计量测试研究与应用, 武汉大学出版社

水运工程检测设备标准化与计量, 交通出版社

⑤ 科技奖励:

中国航海学会科技技术二等奖, 水下关键探测装备计量方法及检定装置研究与应用

天津市科学技术进步二等奖, 水下关键探测装备计量溯源方法及标准装置研究与应用

⑥ 标准规范:

JT/T 1154-2017 《多波束测深仪 浅水》

JJG (交通) 139-2017 《多波束测深仪 浅水》

JT/T 571-2015 《水运工程 回声测深仪》

JJG (交通) 032-2015 《水运工程 回声测深仪》

JT/T 964-2015 《水运工程 声速剖面仪》

JJG (交通) 122-2015 《水运工程 声速剖面仪》

JT/T 1155-2017 《水运工程 浅地层剖面仪》

JJG (交通) 140-2022 《水运工程 浅地层剖面仪》

JJG (交通) 165-2020 《侧扫声呐》

JJG (交通) 138-2017 《声学多普勒流速剖面仪》

JT/T 964-2015 《水运工程 超声波水位计》

JJG (交通) 034-2015 《水运工程 超声波水位计》

JJG (交通) 030-2020 《水运工程 超声波流速仪》

JJG (交通) 031-2020 《水运工程 旋桨式流速仪》

JJG(交通)166-2020 《含沙量测定仪》

JJG (交通) 150-2020 《超声式波浪测量仪》

JT/T 572-2015 《水运工程 地下水位计》

JJG (交通) 033-2015 《水运工程 地下水位计》

JT/T 575-2015 《水运工程 闸门开度计》

JJG (交通) 026-2015 《水运工程 闸门开度计》

JJG (交通) 148-2020 《船用卫星定位仪》

JJG (交通) 152-2020 《超短基线水声定位仪》

JJG（交通）170-2020 《水运工程 姿态测量仪》

## 22.3 技术内容

### 22.3.1 技术原理及工艺流程

水下声呐计量溯源技术：以天津新港船闸独特的原型深水港池（长 180m，宽 25m，深 10m）为设施平台（图 2-22-1），研发了水下六自由度（回转/升降/位移）机械化控制机构，突破水下换能器定姿定位关键技术，通过横向测距代替垂向测深的方式，提出了多波束声呐测深准确度和有效条带宽度的计量校准新方法，实现 180m 测量范围内多波束声呐全条带测深准确度的校准。

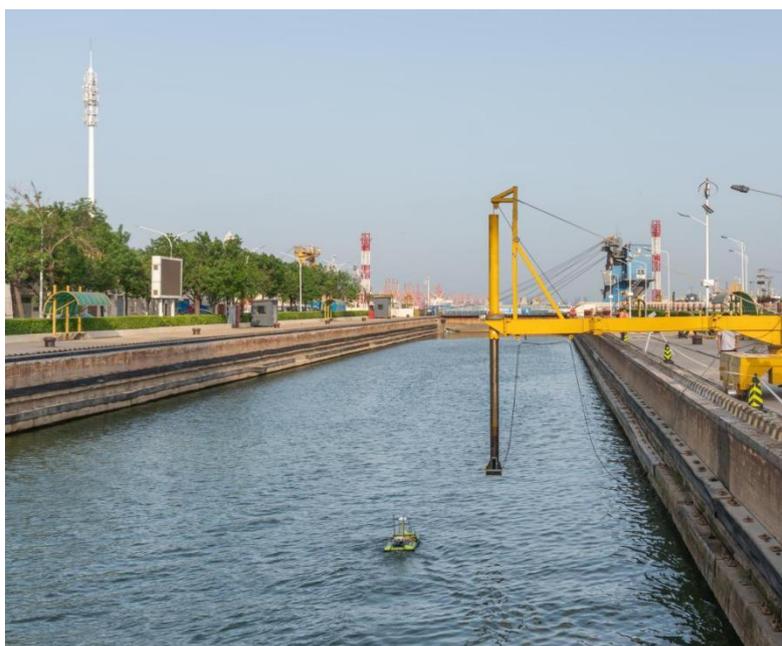
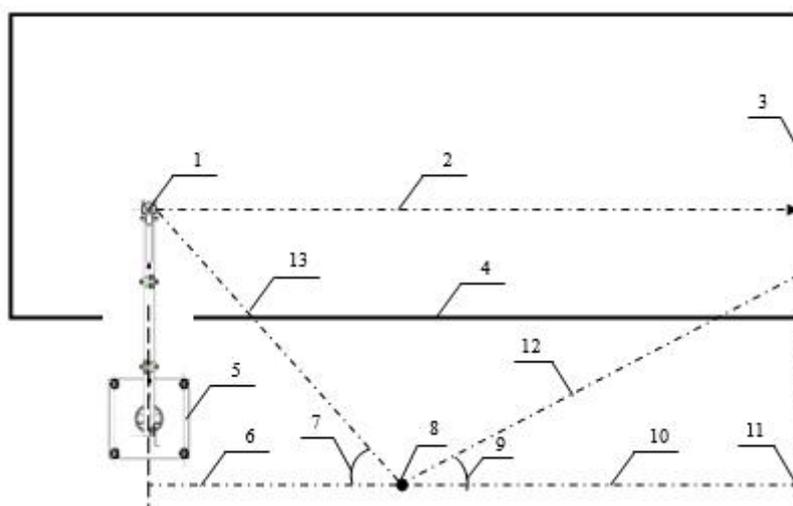


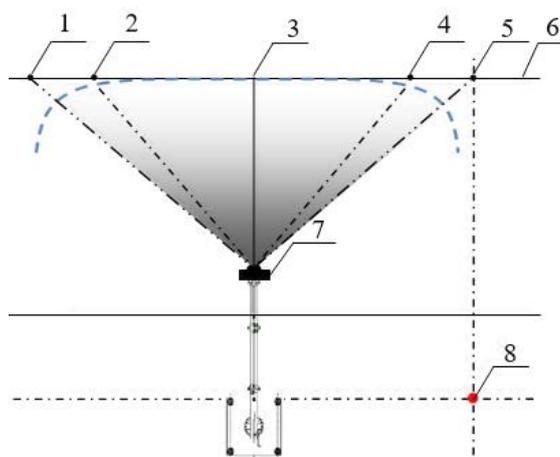
图 2-22-1 原型深水港池

以深水港池边壁作为标准反射面，将测深转换为横向测距，建立三维测距数学模型，使用全站仪测量换能器基阵面至标准反射面的水平距离作为标准值，通过多维度精确控制算法控制多波束测深仪中央和边缘波束扇区依次正对短边反射面，获得扇区内所有波束点水深值，与标准值逐一比对，实现各波束点水深值的修正（图 2-22-2）；使用全站仪确定测深仪换能器正对深水港池长边反射面时的有效边缘波束，由全站仪在长边反射面放样两边缘波束脚印点计算有效条带宽度（图 2-22-3），该技术减小了 GPS-RTK 或激光测距仪作为主标准器的校准方法中的位置偏移改正误差，和海上自校准方法相比规避了涌浪、剖面声速与流速、潮位等复杂环境的影响。研发基于六面消声水池的水下声呐计量装置（图 2-22-4）。依据 GB/T7965-2002《声学 水声换能器测量》和水声计量测试原理与方法，设计了多波束测深仪水声计量测试系统，实现在等效自由场、远场中对多波束发射声源级、波束宽度、工作频率等主要声学指标自动采集与精细处理（图 2-22-5）。



- |              |              |                 |
|--------------|--------------|-----------------|
| 1——换能器；      | 6——换能器水平距离；  | 11——后视点；        |
| 2——中央波束声轴线；  | 7——换能器水平角；   | 12——反射面点水平面内斜距； |
| 3——水池短边壁；    | 8——全站仪控制点；   | 13——换能器水平面内斜距。  |
| 4——水池长边壁；    | 9——反射面点水平角；  |                 |
| 5——多维运行控制机构； | 10——反射面水平距离； |                 |

图 2-22-2 测深校准原理示意图

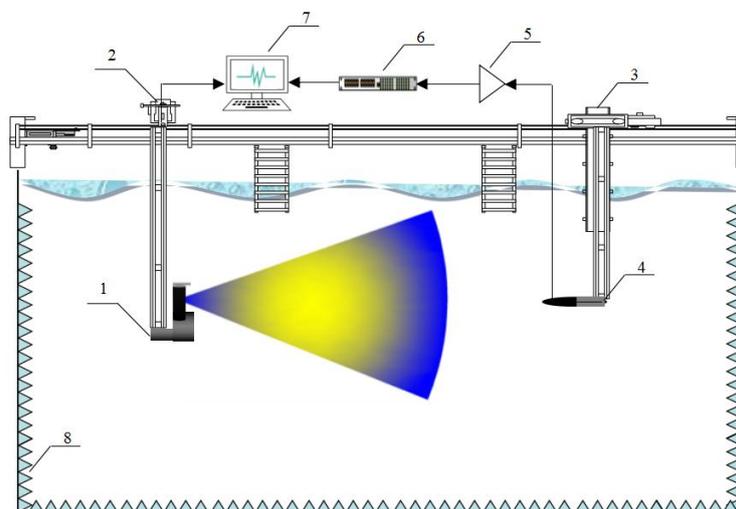


- |                |                 |            |
|----------------|-----------------|------------|
| 1——第 1 号边缘波束；  | 4——扇区右侧有效边缘波束；  | 7——换能器基阵；  |
| 2——扇区左侧有效边缘波束； | 5——第 240 号边缘波束； | 8——全站仪控制点。 |
| 3——垂点；         | 6——长边反射壁；       |            |

图 2-22-3 有效条带宽度校准原理示意图



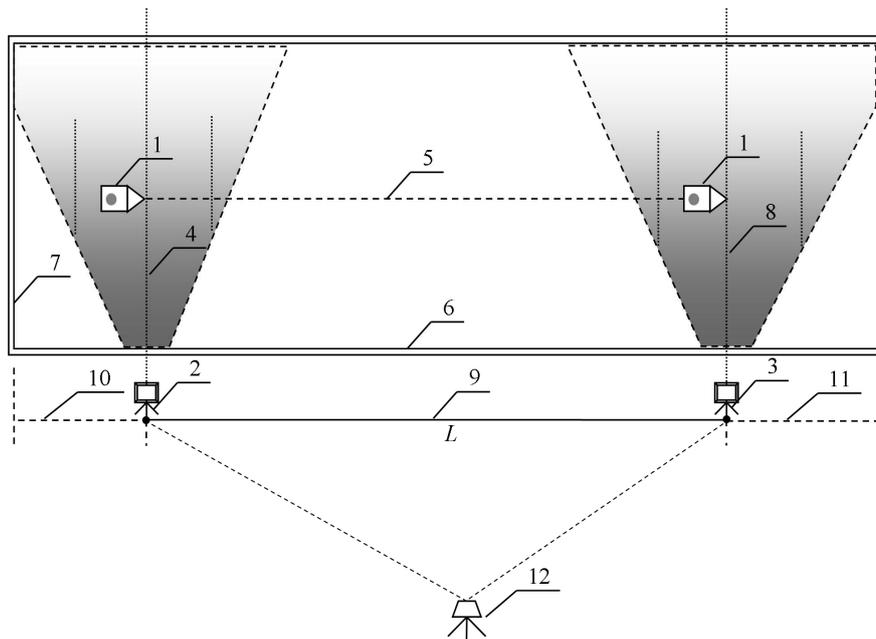
图 2-22-4 基于六面消声水池的水下声呐计量装置



- |            |           |          |
|------------|-----------|----------|
| 1——多波束换能器； | 4——标准水听器； | 7——显控软件； |
| 2——回转装置；   | 5——功率放大器； | 8——消声材料。 |
| 3——升降装置；   | 6——信号采集器； |          |

图 2-22-5 水声计量测试原理图

声学多普勒流速剖面仪计量溯源技术：为实现声学多普勒流速剖面仪（简称 ADCP）流速量值的溯源与传递，提出了一种以深水航道和无人船为技术平台的 ADCP 流速计量测试方法（图 2-22-6）。通过无人船搭载 ADCP 沿规划航线匀速运动，采用高速摄像机和全站仪作为时间和长度测量的主标准器，计量 ADCP 在测量段内的平均速度，作为流速参考标准值，与 ADCP 流速示值比较，计算不同流速示值误差。采用实时差分动态定位技术（简称 GPS-RTK）测绘无人船运动轨迹和偏航误差，核查无人船的瞬时速度稳定性。试验结果表明，在无人船设定航速 1 m/s 的条件下，被检 ADCP 流速示值误差-0.029 m/s，建立数学模型，评定测试系统的扩展不确定度  $U=0.071$  m/s,  $k=2$ 。



- 1——无人船；2——高速摄像机（A）；3——高速摄像机（B）；4——测量段起始线；  
 5——航迹线；6——水池长边；7——水池短边；8——测量段终止线；  
 9——测量段；10——加速段；11——减速段。

图 2-22-6 ADCP 计量测试原理图

### 22.3.2 技术成果适用性分析

#### (1) 技术适用的行业和具体领域

本项目成果结合新时代国家海洋战略和航海行业发展的需求导向，聚焦“水下量值的准确测量问题”，为中交（天津）生态环保设计研究院有限公司、中水北方勘测设计研究有限公司、中交第一航务工程勘察设计院有限公司、长江重庆航道局等企事业单位的海事救助打捞、水运工程建设、港口航道疏浚、水文调查监测、海洋勘察测绘和海洋资源调查提供了坚实的计量保障，有效解决了水下关键探测装备的准确测量与量值评定问题。本项目发布的规程及行业标准为天津智汇海洋科技有限公司、深之蓝海洋科技股份有限公司、北京海卓同创科技有限公司等设备研发厂家提供了生产依据。依据本项目完成的计量溯源方法、技术规范 and 检定装置，国内外水下关键探测装备有效解决了产品在生产、检验和使用过程中的标准化问题，确保设备在首次检定、后续检定和使用中检查的量值准确可靠。

#### (2) 技术使用中的特定条件限制

目前本技术应用的局限性在于，1) 全国水下探测装备需要将设备拆卸运输至天津进行检校，尚未实现现场计量，下一步本技术改进重点是研究原位或远程校准技术，实现现场计量；2) 针对水下探测装备产业，尚未形成完善的产业计量技术体系，下一步将针对装备设计、研发、组装、应用、报废各环节研究全产业链、全溯源链、全生命周期、前瞻性的计量技术，实现全方位、多层次服务水下探测装备的产业计量能力。

### 22.3.3 技术创新性及先进性

(1) 提出了基于深水港池和六自由度控制机构的多波束测深系统计量校准技术，构建

了水下探测装备外场计量测试平台，突破了多波束测深系统、水下成像声呐、超短基线水声定位系统等多源信息融合的水下大尺寸测量的量值溯源难题。

(2) 提出了基于智能无人船的声学多普勒流速剖面仪溯源方法，解决了拖曳水池校准的边界混响干扰、盲区和多普勒频移测量问题，实现了开阔水域环境下流速与流向计量溯源。

(3) 提出了基于标准场的波浪测量仪与含沙量测定仪计量校准方法，攻克了波浪和悬沙浓度量值溯源与传递的技术难题，实现了超声式波浪测量仪的全量程校准，提升了含沙量测量仪的校准水平。

## 22.4 科技效果

根据建立的 10 种水下探测装备关键量值溯源体系，研制声速剖面仪、回声测深仪、多波束测深仪等 10 项水下关键探测装备计量标准装置，进行了功能试验、重复性试验、稳定性试验，并对计量标准装置进行了不确定度评定。建立的 10 项计量标准装置结构组成及主要性能指标见表 2-22-1，国内外相关技术对比见表 2-22-2。

表 2-22-1 计量标准装置性能指标

序号	装置名称	主要标准器	配套设备	性能指标
1	多波束测深仪计量标准装置	全站仪（准确度等级 2 级）、声速剖面仪（MPE: $\pm 2\text{cm}$ ）、倾角仪（MPE: $\pm 0.1^\circ$ ）、标准水听器（ $U=0.9\text{dB}$ , $k=2$ ）	原型深水港池（ $180\text{m}\times 25\text{m}\times 10\text{m}$ ）	实现 175m 范围的全量程测深性能校准和 16m 水深条件下全幅扫宽性能校准，并具备发射声源级、波束宽度、工作频率等主要声学指标的校准能力。
2	侧扫声呐计量标准装置	声速剖面仪（MPE: $\pm 2\text{cm}$ ）、标准水听器（ $U=0.9\text{dB}$ , $k=2$ ）、信号采集器（ $U=2\text{mV}$ , $k=2$ ）、标准目标块套组（MPE: $\pm 0.2\text{cm}$ ）	试验水池（ $30\text{m}\times 10\text{m}\times 8\text{m}$ ）、试验行车（MPE: $\pm 0.01\text{m/s}$ ）	工作频率（10kHz~1MHz）、MPE: $\pm 3\%f$ ；波束宽度（ $0^\circ\sim 360^\circ$ ）、MPE: $\pm 0.1^\circ$ （水平）， $\pm 2^\circ$ （垂直）；分辨力（10cm）、MPE: $\pm 5\%D$ 。
3	回声测深仪计量标准装置	手持式激光测距仪（2 级）、温度计（MPE: $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ）、测深仪模拟器（ $U=11\text{mm}$ , $k=2$ ）	检定水槽（0~75m）	深度（0m~300m）、MPE: $\pm 5\text{cm}$ （水深 $\leq 5\text{m}$ ）、 $\pm 1\%d$ （水深 $> 5\text{m}$ ）。
4	声速剖面仪计量标准装置	标准铂电阻（二等）、数字多用表（ $U=7\times 10^5$ , $k=2$ ）、数字精密压力表（0.02 级）	恒温水槽（MPE: $\pm 0.02^\circ\text{C}$ ）	声速（1400m/s~1600m/s）、 $U=0.10\text{m/s}$ , $k=2$ ；水深（0m~100m）、 $U=0.03\text{m}$ , $k=2$ 。
5	超声式波浪测量仪计量标准装置	激光测距仪（2 级）、计时器（MPE: $\pm 0.001\text{s}$ ）、角度转盘（MPE: $\pm 0.1^\circ$ ）	水槽（ $70\text{m}\times 1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ ）、试验行车（MPE: $\pm 0.01\text{m/s}$ ）	波高（0.3m~25m）、MPE: $\pm 0.01\text{m}$
6	验潮仪计量标准装置	钢卷尺（MPE: $\pm 2\text{mm}$ ）、精密压力表（0.02 级）	水塔（10m）	潮位（0m~100m）、MPE: $\pm 0.30\text{m}$
7	ADCP 计量标准装置	钢卷尺（MPE: $\pm 2\text{mm}$ ）、频率计（MPE: $\pm 1\times 10^3\text{Hz}$ ）、角度转盘（MPE: $\pm 1^\circ$ ）	原型深水港池（ $180\text{m}\times 25\text{m}\times 10\text{m}$ ）	流速（0m/s~4m/s）、MPE: $\pm (v\times 1\%+0.005)\text{m/s}$ ；流向（ $0^\circ\sim 360^\circ$ ）、MPE: $\pm 5^\circ$ 。
8	含沙量测定仪计量标准装置	量筒（MPE: $\pm 10\text{mL}$ ）、滴定管（MPE: $\pm 0.025\text{mL}$ ）、电子天平（MPE: $\pm 0.5\text{e}$ ）	含沙量标准场：均匀度优于 $\pm 3\%$	含沙量（0.001~30） $\text{kg/m}^3$ 、MPE: $\pm 10\%$ 。
9	姿态测量仪计量标准装置	转台（MPE: $\pm 4''$ ）、升降平台（MPE: $\pm 5\text{mm}$ ）	/	横、纵摇（ $-90^\circ\sim 90^\circ$ ）、MPE: $\pm 0.1^\circ$ ；航向（ $0^\circ\sim 360^\circ$ ）、MPE: $\pm 0.2^\circ$ ；升沉（0m~10m）、MPE: $\pm 0.1\text{m}$ 。

序号	装置名称	主要标准器	配套设备	性能指标
10	超短基线水声定位仪计量标准装置	激光测距仪（2级）、正多面棱体（MPE: ±10"）	/	水平转角（0°~360°）、MPE: ±0.5°； 垂直转角（0°~80°）、MPE: ±0.5°。

表 2-22-2 水下探测装备计量标准研究现状对比

序号	计量标准名称	国外研究现状	国内研究现状	本项目研究内容	研究内容评价
1	多波束测深仪计量标准	英国国家物理实验室利用耦合腔校准装置开展了声学指标校准。	中国科学院声学研究所利用消声水池开展声学指标校准。	实现了对多波束测深仪声学指标与几何指标校准 <b>全参数</b> 校准。	<input checked="" type="checkbox"/> 领跑 <input type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
2	声学多普勒流速剖面仪计量标准	美国国家海洋与大气管理局在河道使用差分卫星定位系统进行了 ADCP 检测试验。	海军海洋测绘研究所通过多台流速仪采用比测法开展了流速校准研究。	提出一种以深水航道和智能无人船为设施平台的 ADCP 计量溯源方法， <b>突破了非接触式同步视频流速计量关键技术。</b>	<input checked="" type="checkbox"/> 领跑 <input type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
3	超声式波浪测量仪计量标准	挪威水工实验室采用旋转式正弦模拟法和垂直升降式正弦模拟法实现了波浪测量仪小量程校准。	国家海洋标准计量中心通过波浪浮标旋转模拟波浪正弦运动研发了波浪仪校准装置。	提出了一种波浪模拟校准方法， <b>实现了波高和波周期的全量程校准</b> ，提升了测量范围和准确度。	<input checked="" type="checkbox"/> 领跑 <input type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
4	含沙量测定仪检计量标准	美国伍兹霍尔海洋研究所采用现场标定法进行了设备性能检测实验。	华北水利水电大学提出一种基于音频共振法的含沙量检测方法。	提出了基于均匀悬沙浓度场的含沙量测定仪计量校准技术， <b>解决了悬沙浓度量值复现和传递难题。</b>	<input checked="" type="checkbox"/> 领跑 <input type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
5	侧扫声呐计量标准	美国、英国、加拿大、新西兰发布了侧扫声呐的校准规范。	国家海洋局第一海洋研究所基于消声水池完成了声学指标校准。	实现了对侧扫声呐几何指标与声学指标的 <b>量溯源</b> 。	<input type="checkbox"/> 领跑 <input checked="" type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
6	回声测深仪计量标准	美国国家海洋局采用测深精度为 0.05m 测深仪模拟器开展了的校准研究。	海军海洋测绘研究所采用测深精度为 0.1m 测深仪模拟器开展了的校准研究。	基于 75m 直线静水明槽，提出单波束测深仪测深准确度、测深盲区性能指标的计量检定。	<input type="checkbox"/> 领跑 <input checked="" type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
7	声速剖面仪计量标准	美国国家海洋局通过建立高精度校准环境（温度和压力）实现声速剖面仪检定。	国家海洋标准计量中心采用直接测量法实现了声速仪声速指标校准。	利用声速-压力转换公式及水深-压力转换公式实现了声速仪声速、水深指标校准。	<input type="checkbox"/> 领跑 <input checked="" type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
8	姿态测量仪计量标准	欧洲航天局基于精密摇摆台采用动态参数校准法完成了姿态测量仪参数校准。	北京航天计量测试技术研究所研发了基于星光测量的姿态测量仪精度校准装置。	研制基于双轴转台和升降平台的多自由度校准装置，实现姿态测量仪各量值的计量溯源。	<input type="checkbox"/> 领跑 <input checked="" type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
9	超短基线水声定位仪计量标准	斯坦福大学通过空间角度测量法消除了由设备安装而引起的误差，提升了校准精度。	国内尚未开展计量技术及计量标准装置研究。	提出基于目标模拟方法的多信标定位计量校准技术， <b>实现水下超短基线全量程定位计量。</b>	<input type="checkbox"/> 领跑 <input checked="" type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑
10	验潮仪计量标准	法国海洋开发研究院与日本海洋科学技术中心利用活塞压力计校准法完成了（0~50）潮位校准。	国家海洋标准计量中心利用激光追踪技术完成了（1~8）潮位校准。	研制了基于水密压力罐的压力容器，实现 <b>（0~100）m</b> 水位的计量溯源。	<input type="checkbox"/> 领跑 <input checked="" type="checkbox"/> 并跑 <input type="checkbox"/> 跟跑

## 22.5 技术示范情况

本成果已经成功应用于天津大学“水下地震模拟振动台计量测试”、交通运输部东海航海保障中心“海巡 08 大型测量船计量测试”、哈尔滨工程大学“惯性水声一体化组合导航系统精度测试”、中船重工 722 研究所“水下检测系统测试”。以中船重工 722 研究所“水下检测系统测试”为例，具体应用内容如下：

水下检测系统由中船重工 722 研究所研发，是“港珠澳大桥智能化运维技术集成应用”项目中的装备。通过智能化无人船搭载水下地形、地层、水下机器人等多种水下检测设备，对桥岛隧等设施周边的水下地形、地层以及水下结构进行高效检测，基于大数据分析方法对检测结果进行智能处理，从而获得桥岛隧的冲刷、淤积和表观缺陷等信息，为桥岛隧等跨海集群设施的维养决策评估提供准确、全面的技术参数。2023 年 6 月，应用本技术成果在港珠澳大桥，完成了对水下检测系统的水下地形检测、水下地层检测、水下机器人检测、应急指挥车功能等 6 大类指标，共计 21 个项目的计量测试。

## 22.6 成果转化推广前景

### 22.6.1 技术推广前景

水下探测装备计量检定或校准的核心是用计量标准对测量仪器的计量性能进行评估，以获得仪器量值的溯源性与一致性，以保证其测量的准确可靠。水下探测装备在海洋测绘、救助打捞、水运工程等领域应用十分广泛，其测量结果关系工程质量、航行安全等，本技术体系的建立，主要从设备应用者角度出发，为水下探测装备提供了一套水深、流速、水下定位、底物分辨、涌浪姿态、含沙量等水下探测量值的校准装置和校准方法，构成了一条不间断的校准链，使国家计量基准与水下探测工作计量器具联系起来，为海洋、水运交通科技发展提供准确可溯源的校准结果。

本技术成果将有效推进水下探测装备国产化进程，应用前景广阔，具有巨大的潜在效益。其中多波束测深仪、声学多普勒流速剖面仪、超短基线水声定位仪、含沙量测量仪等检定装置获得国家市场监督管理总局计量标准授权和中国合格评定认可委员会（CNAS）的校准能力认可，且目前属于国内唯一授权。成果被纳入2021年天津市交通运输行业新技术推广清单。预计到2025年可实现计量测试服务产值5000万，包括计量标准装置研制、计量技术服务、计量标准设施设备开放共享等。

### 22.6.2 技术推广障碍及应对措施

本技术成果在转化推广中的潜在风险在于国家对海洋装备产业的政策变化，目前并无相关政策风险。