

疏浚创建新生态

Dredging Create New Ecology



Published By  
China Dredging Association

编印单位  
中国疏浚协会

Submitted By  
Member Institutions and Associated Companies  
and Academic Institutions

发送单位  
各会员单位及相关联企业、院(所)

Printed By  
Urban Printing Factory (Beijing) Printing  
Technology Co., Ltd.

印刷单位  
都市印工场(北京)印刷科技有限公司

Date of Printing  
October 20, 2020

印刷日期  
2020年10月20日

Print Run  
1100

印 数  
1100册

来源:图为中交上航局承揽的上海洋山港项目工程



微信号: 中国疏浚  
www.chida.org



中国疏浚协会  
CHINA DREDGING ASSOCIATION

# 中国疏浚

CHINA DREDGING

特别策划 SPECIAL PLANNING

海岸带保护修复的实践与探索

Practice and Exploration of Coastal Zone Protection and Restoration

关于河湖综合治理的几点认识

Some Views on the Comprehensive Control of Rivers and Lakes

2020  
NO.04

总第50期 VOL.50



准印证号:京内资准字 1728-L0025 号 内部资料 免费交流

# 中交上航局承揽的洋山四期工程 航道维护疏浚项目工程介绍

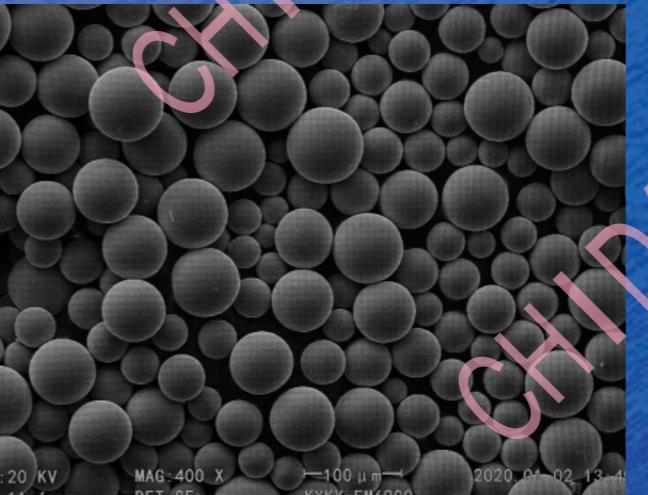
2020 年洋山四期工程航道维护疏浚项目为洋山四期港内水域和港内航道疏浚，其中港内水域包括洋山四期连接水域和回旋水域，维护长度约 3.55km，维护宽度 250m-1550m，水域面积约 336.6 万 m<sup>2</sup>；港内航道维护长度约 2.15km，宽度由 250m 逐渐缩窄，水域面积约 26.9 万 m<sup>2</sup>，疏浚底标高均为 -15.5m，工程量为 258.08 万 m<sup>3</sup>，中港疏浚公司共投入“新海虎”轮、“新海虎 4”轮两艘万方耙吸挖泥船。中交上航局承担了洋山港四期航道紧急疏浚作业，工程投入两艘大型耙吸挖泥船，每船每天疏浚作业能力达 5 万 m<sup>3</sup>。为保证作业安全，船舶施工时需密切关注洋山港区附近 3 个锚地、5 个码头和 8 条航道的船舶动态，确保保持与其他船舶的 1000 米以上的安全距离。工程已于 9 月 22 日开工，预计在 10 月 15 日完工，疏浚完成后，航道水深可满足 15 万吨级集装箱满载靠泊。

洋山深水港作为世界第一大港，是世界上最繁忙的港口之一，施工作业需关注三个锚地、五个码头、八条航道船舶动态。耙吸挖泥船在航道内施工犹如环卫车在高速公路上清洁道路，如何利用有效的时间和空间在不影响其他船舶的情况下，保质保量的完成疏浚任务，既考验挖泥船驾驶员操控船舶水平，又考验项目部综合协调管理能力。本工程旨在维护洋山四期自动化码头通航水深，提高大型集装箱船舶通航保证率和靠离泊能力，进一步巩固上海作为国际航运中心的地位。（刘洋）



新海虎

# 陕西贵资丹新材料有限公司



贵资丹金属粉末电镜图

陕西贵资丹新材料有限公司位于汉中市经开区创智产业园，集研发、生产、销售于一体的高科技成长型企业。公司研发实力雄厚，创新能力强，拥有多专业、高水平的协同创新研发团队，西北工业大学、西安交通大学、陕西理工大学及上海大学等高校合作，为制粉及其延伸项目的发展提供强有力的技术支持与保障。公司在国内 3D 打印金属材料领域，取得了重大关键核心技术，对于进口的高端金属粉，可完全替代，降低费用，安全可控的优势。

贵资丹是业界领先的 3D 打印球形金属粉末生产商。3D 打印金属粉末制取设备为公司自主研发，采

用国际先进水平的新型等离子旋转电极制粉技术（PREP），具有精度高、转速高、稳定性强等特点，生产包括钛合金、高温合金、不锈钢、轴承钢、铜合金等一些列金属材料的高端粉末产品。该设备所生产的金属粉末颗粒致密、流动性好、无空心粉，有效解决了目前国内工艺存在的空心、卫星粉偏多、球形度不高、流动性差、不能量产等问题，对目前国内相关领域的进口粉末，起到进口替代的作用。

今后，陕西贵资丹将继续秉承务实求精的理念，在 3D 打印基础材料领域生产高品质金属粉末，助力高端制造业的发展与突围，并在航空航天、船舶、汽车、医疗、工业机械、模具修复等领域，加速推动公司的金属 3D 打印整体解决方案的形成，实现 3D 打印高端制造和修复的全产业链服务。



企业图片

## 抢抓历史发展机遇 积极推动河湖综合治理和海岸带修复工程

Grasp the Historical Opportunity  
Actively Promote the River-Lake Comprehensive Treatment  
and Costal Zone Restoration Projects

中国疏浚协会  
China Dredging Association

生态文明建设是国家“五位一体”总体布局和“四个全面”战略布局的重要内容。实施重点生态功能区生态修复工程，实施海岸带保护修复工程等是落实和推进生态文明建设的有力抓手。中国疏浚协会的广大会员单位要进一步深入学习贯彻习近平总书记关于社会主义生态文明建设等重要论述，强化政治担当，激发奋斗力量，以更强决心、更大力度在河湖综合治理等重点生态重点生态功能区生态修复工程、海岸带保护修复工程等发挥重要作用并做出更大贡献。

2018年10月10日，习近平总书记在主持召开中央财经委员会会议时强调：“要针对关键领域和薄弱环节，推动建设若干重点工程。”“实

施重点生态功能区生态修复工程，恢复森林、草原、河湖、湿地、荒漠、海洋生态系统功能；实施海岸带保护修复工程，建设生态海堤，提升抵御台风、风暴潮等海洋灾害能力”。

为认真贯彻落实习近平总书记重要讲话精神，中国疏浚协会的广大会员单位充分发挥行业装备、设备、人才和技术等优势，在做强做优疏浚传统产业的同时，积极拓展与水土相关的新兴产业链，包括河湖生态修复、流域治理和海岸带保护等项目的装备研发、施工工艺优化、管理模型创新等，在摸索中奋力前行，在实践中不断进取，在海陆统筹、生态修复等方面取得显著成效。

当前，我国水环境污染和水生态破坏等问题突出。中交疏浚（集团）股份有限公司、中国电建集团港航局有限公司等单位实施的永定河、锦江、沱江、汾河等流域治理及茅洲河治理的成功经验表明，河湖生态系统是动态的有机整体，在制定综合治理方案时，必须从全流域治理的角度出发，干支流、城乡、水陆一体化修复，统筹推进水资源、水环境和水生态综合治理，贯彻源头减排、过程阻断、末端治理的全过程管理的理念。

长期以来，由于海岸线管理体系不健全，缺少统筹规划，存在多头管理等不足，出现了临海工业、城镇建设大量占用海岸线，破坏了海岸景观和生态功能。国家海洋局发布的《海岸线保护与利用管理办法》，明确了现阶段海岸线保护与利用管理的主要任务，从海岸线保护、海岸线节约利用、海岸线整治修复三个方面强化了管理，对拓展蓝色经济空间、保护海洋生态环境、打造美丽海岸提供了保障。灰尘蔽日的日照一期煤码头吹填成美丽的人工沙滩、昔日杂草丛生的南澳岛变成生态岛、旅游岛；经过综合整治的“水不像水，又黑又粘，臭气熏天，垃圾遍布”污染严重的茅洲河恢复了“候鸟觅食、鱼群游荡”的生态画卷，正是广大会员单位用先进的技术装备、创新管理和辛勤的汗水，在海岸带和岛屿生态修

复方面结成的硕果。实施河湖综合治理和海岸带保护修复工程，科技创新、核心技术和关键装备显得尤为重要。通过一系列工程实践，我们要积累经验，总结技术，研发装备，探索发展模式，持续创新突破。这就要求生态修复与管理创新进一步融合发展，加快核心技术、原创技术的研发，加快装备智能化和信息化升级，突破大型装备的自主研发和制造，将核心技术成果牢牢掌握在自己手中。同时要重视科技成果转化工作，坚持政策和市场双导向性，实现产业升级和治理标准提升，市场推动科技成果转化，使科技成果实现其市场价值。最终，推动生态产品价值转化在河湖和海洋生态建设中有效落地，实现“绿水青山”与“金山银山”的协调统一。

习近平总书记指出：生态文明建设事关中华民族永续发展和“两个一百年”奋斗目标的实现。保护生态环境就是保护生产力，改善生态环境就是发展生产力。中国疏浚协会的广大会员单位要紧紧把握产业转型和创新发展的契机，加快生态环保技术研究和成果转化步伐；要培育重点生态功能区生态修复工程和海岸带保护修复工程的“中国疏浚方案”，为保护和发展生产力增添新源泉、注入新动力。

# 目录 | CONTENTS

## 中国疏浚

CHINA DREDGING

(6期/年)

2020年第4期

(总第50期)

内部发行

主办单位：中国疏浚协会

支持单位：中交天津航道局有限公司

编委会主任：王海怀

副主任：周静波 顾明高 伟

委员：（按姓氏笔画排序）

王世峰 王柏欢 王毅

毛元平 朱连宇 李海军

肖乾 张晴波 林懿翀

金国亮 钟文炜 胥昌荣

侯晓明 钱献国 徐德贵

凌云 康学增 隋守信

游斌 葛新兴 霍胜勇

主编：高伟

副主编：胡保安 李素江 陈晓敏

责任编辑：王华原 韩晓喆 陈琦

杨帆 纪泽明

编辑出版发行：《中国疏浚》编辑部

地址：北京市朝阳区西坝河西里

28号英特公寓C2~603室

## 卷首语 Preface

抢抓历史发展机遇  
积极推动河湖综合治理和海岸带修复工程 / 中国疏浚协会  
Grasp the Historical Opportunity  
Actively Promote the River-Lake Comprehensive Treatment  
and Coastal Zone Restoration Projects 01

## 特别策划 Special Planning

推动河湖综合治理和海岸带修复工程意义重大  
It is of Great Significance to Promote the Comprehensive Treatment of  
Rivers and Lakes and Coastal Restoration Projects 05  
海岸带保护修复的实践与探索 / 郑金海等  
Practice and Exploration of  
Coastal Zone Protection and Restoration 06  
关于河湖综合治理的几点认识 / 李轶  
Some Views on the Comprehensive Control  
of Rivers and Lakes 11  
滨海滩涂盐土植被建设的生态技术及其应用 / 陈立华等  
Ecological Technology and Its Application  
for Vegetation Construction in Coastal Saline Soil 14

## 国际视野 International Perspective

波能转换器的合理评价方法 / 谭戬等  
A Reasonable Evaluation Method for Wave-energy Converter 22  
潮汐发电涡轮机技术回顾：现在与未来 / Faisal Wani 等  
A Review of Tidal Current Turbine Technology: Present and Future 34

## 学术论坛 Academic Forum

疏浚工程船舶技能大师工作室  
功能定位与基础建设等思考 / 张玉春等  
Thoughts on Functional Orientation and Basic Construction  
of the Master Workshop of the Techniques and Skill of the  
Dredging Engineering Vessels 41  
流域综合治理及管理的思考与探索——以珠江流域为例 / 陈洁等  
Thinking and Exploration of Comprehensive Reclamation of  
River Basin and Management  
—— Taking the Pearl River Basin as an Example 45  
射流冲刷细沙数值模拟中挟带系数的影响 / 倪雁等  
Effect of Entrainment Coefficient on Numerical Simulation  
of Jet Scouring on Fine Sediment 49

海洋产业发展概述及发展潜力分析 / 汤伊琼  
Overview of Marine Industry Development and Analysis on Its Development Potential 53  
小型绞吸式挖泥船操作要点及施工参数的优化研究 / 韦广荣等  
Study on the Optimization of Operation Point and Construction Parameters of  
Small Cutter Suction Dredger 58  
水气分离装置工作原理及效果分析 / 吴云海等  
Working Principle and Effect Analysis of Water-Gas Separation Device 63  
耙吸船黄骅港航道复合工况施工工艺 / 冯晨等  
Construction Technology of Composite Working Condition of Tshd Huanghua Port Channel 69  
“ACC”自动绞刀控制系统在8527型绞吸式挖泥船的应用 / 韦杏静等  
Application of “ACC” Automatic Control System in Type 8527 Cutter Suction Dredger 73  
武汉东湖疏浚底泥的资源化利用研究及应用 / 于帅哥等  
Research and Application of Resource Utilization of Dredged Sediment in Wuhan East Lake 78  
大型绞吸船强风化岩施工工艺研究 / 张博  
Research on Technology of Highly Weathered Rock Dredging of Super Cutter Suction Dredger 84  
填补Hypack矩阵缺陷的新算法 / 叶桂和  
A New Algorithm to Fill the Defects of Hypack Matrix 90

## 百年百典 Centennial Classics

新中国疏浚装备研发的摇篮  
——记第一个挖泥船技术试验室成立和中华第一耙的诞生  
The Cradle of the R&D of Dredging Equipment in China since 1949  
——The Establishment of the First Laboratory for Dredger Technology and the  
Birth of China's First Hopper Dredger 95

## 征稿启事 Notice of Inviting Contributions

为做好编辑工作，中国疏浚协会秘书处向广大会员单位长期征稿。稿件一经录用即付稿酬，其版权归中国疏浚协会所有并有权在所属微信公众号和网站等转载使用。

征稿要求：文章条理清晰、简明严谨、资料数据正确可靠，稿件通过电子邮箱发送。除论文外，稿件字数一般为2000-2500字。来稿以Word录入排版。来稿须附作者（或第一作者）简介，即作者姓名、毕业院校、单位职务（职称）、个人联系电话（电子邮箱）和作者正装两寸彩色照片一张；来稿可附图片2-3张并有文字说明。

论文除上述要求外，必须有中英文摘要和关键词；计量单位和符号等一律使用国际通用标准或国家法定计量单位；文中引用参考文献应依照先后顺序用阿拉伯数字加方括号在右上角标出，并在论文末尾按标注顺序给出参考文献的作者名、引用文题名、出版单位以及出版日期。论文字数一般为3000-5000字，由作者单位推荐至中国疏浚协会秘书处并出具推荐函（不含约稿）。推荐函必须有作者单位技术总负责人签署同意推荐的意见；论文作者对文章内容的真实性、可靠性和学术性等负全责。论文收到后，中国疏浚协会秘书处指定专家负责审核。

## 推动河湖综合治理和海岸带修复工程意义重大

### It is of Great Significance to Promote the Comprehensive Treatment of Rivers and Lakes and Coastal Restoration Projects

党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视生态文明建设；党的十九大进一步提出：“要加快生态文明体制改革，建设美丽中国”，“要着力解决突出环境问题”，“要加快水污染防治，实施流域环境和近岸海域综合治理”。我国污染防治力度之大前所未有，制度出台频度之密前所未有，监管执法尺度之严前所未有。

本期“特别策划”栏目，《中国疏浚》拟推出河海大学的专家学者关于海岸带保护修复、河湖综合治理等方面内容的文章供读者交流共享。

Since the 18<sup>th</sup> National Congress of the CCP, the Party Central Committee with President Xi Jinping at the core, has attached great importance to the construction of ecological civilization. The 19<sup>th</sup> National Congress further proposed: “We must accelerate the reform of ecological civilization system and build a beautiful China”, “We must focus on solving outstanding environmental problems”, “We must speed up the prevention and control of water pollution, and implement comprehensive management of river basin environment and costal waters”. The intensity of pollution control effort by our country, the frequency of new regulations, and the standards of supervision and law enforcement are unprecedented.

In this issue's Special Column, *China Dredging* presents articles by experts and scholars from Hohai University on subjects including costal zone restoration, river-lake comprehensive treatment, etc.



郑金海<sup>1,2</sup>, 陶爱峰<sup>1,2</sup>, 徐伟<sup>1,2</sup>

1 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室  
2 河海大学港口海岸与近海工程学院

Zheng Jinhai<sup>1,2</sup>, Tao Aifeng<sup>1,2</sup>, Xu Wei<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University  
2 College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University

## 海岸带保护修复的实践与探索

### Practice and Exploration of Coastal Zone Protection and Restoration

**摘要：**海岸带保护修复工程旨在建设海岸带综合防护体系，是提高我国海洋防灾减灾能力、推动海洋生态文明建设的重要举措，建设内容主要包括自然生态系统修复和人工防护工程生态化建设两部分。文章从海岸带保护修复的内涵、措施和实践三个方面进行阐述，通过总结国内外海岸带生态防护相关案例并提出建议，以期为下一步深入开展海岸带保护修复工程提供参考。

**关键词：**海岸带；保护修复；生态减灾；海洋生态文明

#### Abstract

Coastal zone protection and restoration project aims to build a comprehensive coastal protection system, which is an important measure to improve the ability of marine disaster prevention and mitigation and promote the construction of marine ecological civilization. It mainly includes two parts: natural ecosystem restoration and ecological construction of artificial protection engineering. This paper expounds the connotation, measures and practice of coastal zone protection and restoration, and puts forward some suggestions by summarizing engineering cases at home and abroad, so as to provide reference for further development of coastal zone protection and restoration project.

**Key words:** coastal zone, protection and restoration, ecological hazard mitigation, marine ecological civilization

## 1 引言

随着社会生产力的发展，地球的生态环境遭到严重破坏，二十一世纪可以称作“修复地球”的世纪。进入二十一世纪，我国开展了部分流域生态修复、草原生态保护修复、退耕还林还草等重大工程并取得显著成效。党的十九大报告指出，要加大生态系统保护力度，实施重要生态系统保护和修复重大工程，优化生态安全屏障体系，构建生态廊道和生物多样性网络，提升生态系统质量和稳定性。随着我国生态文明建设不断深入，“绿色”、“生态”的海岸带防护理念进一步发展，海洋生态系统受损问题日益受到重视。

海岸带是众多生物的栖息家园，是人类宝贵的自然资源，同时也是受海洋灾害影响最严重的区域。我国拥有1.8万多公里大陆岸线，受风暴潮等海洋灾害影响严重，为了抵御台风风暴潮等海洋灾害，截至2015年底，共建成1.45万公里海堤<sup>[1]</sup>，这些海堤对保障沿海居民的生产生活、促进区域经济发展起到了至关重要的作用，但“灰色”、“硬质”的海堤也对海岸带脆弱的生态环境造成了一定影响。

2018年10月，习近平总书记在中央财经委员会第三次会议中提出实施海岸带保护修复工程，建设生态海堤，提升抵御台风风暴潮等海洋灾害能力。为贯彻落实习近平总书记重要指示精神，各部门迅速响应，上下联动，积极做好顶层设计，组织编制相关规范，建立健全技术方法体系，有效指导海岸带保护修复工程实施。地方政府正在积极编制海岸带保护修复工程相关方案，部分地区先行先试，开展海岸带保护修复工程项目，生态与减灾功能协同增效显著。然而，我国海岸带保护修复工程正处于起步阶段，相比于漫长的海岸线，仍任重而道远。

## 2 海岸带保护修复的内涵

开展海岸带保护修复工程，首先应树立生态防护理念，因地制宜，将“绿色”生态手段和“灰色”硬质工程相结合；其次以生态修复为重要抓手，多措并举，打造安全、生态、

和谐的海岸带生态减灾综合防护体系，最终达到提高减灾能力、改善生境质量的目标。海岸带生态减灾修复指通过保护修复海岸带生态系统，巩固增强其防潮御浪、固堤护岸等减灾功能；或对海岸防护工程设施进行生态化建设，促进生态保护和防灾减灾协同增效的活动<sup>[2]</sup>。总的来说，修复工程主要包括两部分内容：一是保护修复“自然”的生态系统；二是对“人工”的防护工程进行生态化建设。

从空间分布来看，海岸带可划分为滨海带、海堤带和陆域带，部分海岸带不包含海堤带或陆域带。滨海带一般为海堤保护范围临海侧边界（有海堤）或者平均大潮高潮线（无海堤）向海延伸至珊瑚礁和海草床生长外边界的区域；海堤带一般为海堤保护范围临海侧边界和背海侧边界之间的区域；陆域带一般为海堤保护范围背海侧边界（有海堤）或平均大潮高潮线（无海堤）向陆延伸至适宜沿海防护林种植边界线的区域<sup>[2]</sup>。工程应针对不同空间区域，采取对应生态修复措施，提升海岸带防灾减灾能力和生态服务功能。

## 3 海岸带保护修复的措施

海岸带保护修复的措施可分为自然生态系统修复和人工防护工程生态化建设两类，其中自然生态系统修复包括红树林、盐沼、珊瑚礁、海草床、牡蛎礁、砂质岸线等海岸带典型生态系统和沿海防护林修复，人工防护工程生态化建设包括海堤生态化建设、连岛海堤和沿岸工程整治改造等内容。

### 3.1 自然生态系统修复

(1) 红树林生态修复。红树林指以红树植物为主体的生物群落<sup>[3]</sup>，主要生长在陆地与海洋交界的浅滩，广泛分布于全球热带和亚热带海岸。红树林不仅可以抵御风浪、净化海水和空气，还具有促淤造陆、固堤护岸的功能，同时也是东南亚鸟类迁徙重要的“加油站”。在生态修复过程中，可通过修复水环境、改造微地貌和改良沉积物环境等手段实现红树林生态系统修复。

(2) 盐沼生态修复。盐沼指含有大量盐分的湿地<sup>[4]</sup>，

海滨盐沼分布在河口或滨海浅滩，是生物迁徙、鱼类洄游、营养交换、物质和能量转移的重要通道。修复措施包括移除威胁因素、修复水环境、改造微地貌、改良沉积物环境和植被修复等。

(3) 珊瑚礁生态修复。珊瑚礁是由活珊瑚和已死亡的珊瑚骨骼所构成的特殊海底生境<sup>[5]</sup>，是地球上典型的海洋生态系统，主要分布在热带、亚热带地区。珊瑚礁可以保护海岸减缓侵蚀，具有良好的消能护岸作用。在生态修复过程中，应严格管控人类活动，具体可通过生境修复、珊瑚幼体培育、人工生物礁等手段实现珊瑚礁生态修复。

(4) 海草床生态修复。海草床是由一种或多种海草组成的海草群落<sup>[6]</sup>，生长于潮间带或潮下带，具有调节气候、沉降泥沙、防浪固堤、为生物提供营养和产卵场所等重要功能。目前海草床主要通过控制污染源、改善底质条件、培育海草幼苗、移植海草植株等措施进行生态修复。

(5) 牡蛎礁生态修复。牡蛎礁是由活体牡蛎、死亡牡蛎的壳及其它礁区生物共同堆积组成的聚集体<sup>[7]</sup>，分布于温带河口和滨海区，被称为温带地区的“珊瑚礁”。牡蛎礁可以有效改善水质，降低赤潮发生率，是很多鱼类和甲壳动物的栖息场所。牡蛎礁生态修复的三大关键技术为牡蛎礁修复地点筛选、牡蛎礁体构建技术和牡蛎种群增殖技术。

(6) 砂质海岸生态修复。砂质海岸指以波浪作用为主建造的，主要由砂（砾石）构成的海岸<sup>[8]</sup>，在我国沿海省市均有分布，主要集中于辽东半岛、山东半岛和华南海岸。砂质海岸可以有效抵御风暴潮，是众多滨海生物的栖息地，同时也是旅游休闲的重要场所。目前主要通过沙丘修复、固沙植被修复、人工补沙、构建水下沙坝等措施开展砂质海岸生态修复。

### 3.2 人工防护工程生态化建设

(1) 海堤生态化建设。指以维持海堤防潮御灾能力、恢复海岸生态功能为目标，通过优化堤身结构型式、运用生态建筑材料、种植植被等措施对既有海堤进行的维护、

更新、加固等活动<sup>[2]</sup>。主要通过优化堤身结构、运用生态材料、植被种植、退缩建坝、增设潮汐通道等方式开展海堤生态化建设。

(2) 连岛海堤和沿岸工程整治改造。连岛海堤指海岛连接陆地或其他岛屿的海堤<sup>[2]</sup>。为了改善海洋动力条件，恢复海域生态系统完整性，提升海洋生态系统服务功能，可对历史上的连岛海堤和沿岸工程进行退堤还海、海堤开口或透水式改造，对于严重影响海域生态系统，不利于防御灾害的建筑工程予以拆除。

## 4 海岸带保护修复的实践

2019年初，自然资源部和水利部组织编写《海岸带保护修复工程工作方案》，2020年2月，自然资源部、水利部、发展改革委和财政部四部联合发布并实施，同年6月，第一批海岸带保护修复工程项目立项。根据任务规划和设计，工程分三个阶段实施：第一阶段（2019年）为准备与启动阶段，第二阶段（2020-2022年）为推进实施阶段，第三阶段（中长期）为总结推广阶段。从内容上，工程按照适宜性评价、项目建设和效果评估三个阶段开展。2020年7月，中国海洋工程咨询协会发布《海岸带生态系统现状调查与评估技术导则》和《海岸带生态减灾修复技术导则》等21项系列团体标准，为规范项目建设及提升标准化水平提供了技术支撑。

对于海岸带保护修复工程而言，国内从顶层设计、规范编制、项目实施自上而下正逐步系统化。纵览国内外，部分国家或地区在海岸生态防护方面已开展的工程值得我们学习和借鉴。

### 4.1 国际海岸生态防护实践

国际上海岸带生态修复理念发展早于国内，上世纪七八十年代，荷兰、德国等部分发达国家在海岸带防护理念上做出转变，提出“近自然修复”、“建设遵循自然”等理念，并开展了生态修复工程（见表1），在一定程度上提升了海岸带防灾减灾功能，同时为生物提供栖息场所，改善了海岸带生境质量。

表1 国际海岸生态防护案例

序号	地区	案例	内容
1	荷兰	三角洲工程 <sup>[9]</sup>	为了保护东斯海尔德河口动植物生境，修建开放式挡潮闸以取代实体坝。
2	德国	梅-前州和下萨克森州海岸防护工程 <sup>[10]</sup>	采用沙丘、木质丁坝、移动式海堤和盐沼等防护型式建立海岸带防护体系。
3	美国	乔治亚州萨佩洛岛“Living Shorelines”项目	利用装有牡蛎壳、牡蛎壳袋和石头的石笼，建立活力岸线，为生物提供栖息地。
4	印度尼西亚	爪哇岛“Building with Nature Indonesia”项目	通过红树林恢复、养护泥沙、采用渗透性消浪构筑物等措施减轻海岸线侵蚀。
5	澳大利亚	麦克马洪海堤生态改造工程	在海墙上开孔以及修建人工栈道和观景平台，恢复生物栖息环境，提高亲水空间。

#### 4.2 国内海岸生态防护实践

近年来，浙江、广西、福建等地区也积极开展海岸带生态防护工程（见表2），因地制宜，修复红树林、牡蛎礁、盐沼等自然生态系统，对严重影响区域生态系统的工程进行开口改造甚至拆除，为国内下一阶段开展海岸带保护修复工程提供了参考和借鉴。

表2 国内海岸生态防护案例

序号	地区	案例	内容
1	广西壮族自治区	防城港西湾红沙环生态海堤工程 <sup>[11]</sup>	通过“海堤+红树林”的组合模式，提升防护功能，为海洋生物提供栖息空间。
2	浙江省	三门牡蛎礁修复工程	开展牡蛎修复性水产养殖，增加生物多样性，提高生态减灾功能。
3	辽宁省	兴城河口湿地整治工程 <sup>[12]</sup>	采用抬升低洼地、种植碱蓬、疏通潮沟等措施形成海岸生态防护带。

4	福建省	会展中心沙滩修复工程	进行岸线演变预测，采用分层抛填砂，修建突堤，减缓泥沙流失。
5	浙江省	温州灵霓大堤改造工程	正在进行连岛海堤开口改造，形成的生态海沟有利于恢复海水交换通道，促进鱼虾洄游，改善海水水质。

#### 5 建议

学者们在吸取国际海岸带生态防护理念和工程经验的基础上，结合我国海岸带的类型和特点，提出适宜不同区域建设的海岸带保护修复方案并开展实践，对丰富我国海岸带生态减灾理论体系和指导海岸带保护修复工程具有重要意义。针对下一阶段海岸带保护修复工作，提出六点建议：一、统筹协调、综合规划、因地制宜，实现陆海有序融合与发展；二、加大海洋科普宣传力度，健全海洋科普教育体系；三、坚持自然恢复与人工修复并行，最大限度发挥海洋生态系统的自我恢复作用；四、编制和完善海岸带保护修复工程相关标准和规范，保障工程建设科学、有序；五、开展海岸线监测调查，建立海岸带大数据平台。六、加快生态修复关键技术和效果评估研究，加速应用成果转化步伐。

海岸带保护修复工程是提高我国海岸带防灾减灾能力、推动海洋生态文明建设的重要举措。二十一世纪不仅是“修复地球”的世纪，更是“建设人与自然生命共同体”的世纪，践行“绿水青山就是金山银山”的生态理念，坚持统一部署、因地制宜、科学修复，一定能够提升海岸带防灾减灾能力、恢复海岸带生态服务功能、构建安全生态美丽的沿海屏障，实现人与自然和谐共生。

#### 参考文献：

- [1] 国家发展改革委水利部.全国海堤建设方案[Z].2017.
- [2] 中国海洋工程咨询协会.海岸带生态减灾修复技术导则第1部分：总则[EB/OL].[2020.09.06].<http://www.caoe.org.cn/nr/cont.aspx?itemid=209&id=3038>.
- [3] 中国海洋工程咨询协会.海岸带生态减灾修复技术导则第2部分：红树林[EB/OL].[2020.09.06].<http://www.caoe.org.cn/nr/cont.aspx?itemid=209&id=3038>.
- [4] 中国海洋工程咨询协会.海岸带生态减灾修复技术导则第3部分：盐沼[EB/OL].[2020.09.06].<http://www.caoe.org.cn/nr/cont.aspx?itemid=209&id=3038>.
- [5] 中国海洋工程咨询协会.海岸带生态减灾修复技术导则第4部分：珊瑚礁[EB/OL].[2020.09.06].<http://www.caoe.org.cn/nr/cont.aspx?itemid=209&id=3038>.
- [6] 中国海洋工程咨询协会.海岸带生态减灾修复技术导则第5部分：海草床[EB/OL].[2020.09.06].<http://www.caoe.org.cn/nr/cont.aspx?itemid=209&id=3038>.
- [7] 中国海洋工程咨询协会.海岸带生态减灾修复技术导则第6部分：牡蛎礁[EB/OL].[2020.09.06].<http://www.caoe.org.cn/nr/cont.aspx?itemid=209&id=3038>.
- [8] 中国海洋工程咨询协会.海岸带生态减灾修复技术导则第7部分：砂质海岸[EB/OL].[2020.09.06].<http://www.caoe.org.cn/nr/cont.aspx?itemid=209&id=3038>.
- [9] 廖远志,廖鸿志.荷兰水利工程建设与生态环境协调发展探讨[J].水利水电快报,2007(16):7-9.
- [10] 郑金海,冯向波,陶爱峰,等.德国梅-前州和下萨克森州的海岸防护新理念与新型式[A].中国海洋学会海洋工程分会.第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(中)[C].中国海洋学会:中国海洋学会海洋工程分会,2011:1089-1095.
- [11] 范航清,何斌源,王欣,等.生态海堤理念与实践[J].广西科学,2017,24(5):427-434,440.
- [12] 徐伟,陶爱峰,刘建辉,等.国际海岸带生态防护对我国生态海堤建设的启示[J].海洋开发与管理,2019,36(10):12-15.

#### 作者简介：

郑金海，男，河海大学副校长，海岸灾害及防护教育部重点实验室主任，教授。  
陶爱峰，男，河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室副主任，教授。  
徐伟，男，河海大学研究生。

## 关于河湖综合治理的几点认识

### Some Views on the Comprehensive Control of Rivers and Lakes

河流和湖泊是水资源的重要载体,是自然生态系统的主要组成部分之一,在生态系统功能维持、物质能量传递等方面发挥着重要作用,但同时也会出现各类问题,包括洪涝灾害、水土流失、河道淤塞、水体污染、富营养化和生态破坏等。在不同的历史阶段,河湖综合治理对国家和社会安全稳定发展都至关重要,从某种意义上来说,中国的发展史也是一部治水史,例如上古时期的大禹治水、隋唐时期的运河修建以及明清时期的农田水利建设等。近年来,随着我国社会经济快速发展,水环境污染、水生态破坏已成为制约社会长期可持续发展的突出问题,使得水环境治理和水生态修复成为我国当前河湖综合治理的主要工作。针对当前河湖综合治理面临的形势和问题,提出以下几点认识。

#### 1 河湖生态系统是动态的有机整体

流域特性是水资源重要的自然属性,一个流域可以看作为一个生命共同体,其组成包括了自然、经济、社会、

生态等各方面的生命要素,水是其中的战略因素,也是关键性的控制环节。河流和湖泊是流域的主要组成部分,是由水流、物质以及其中的生物和环境因素相互作用构成的生命系统,河湖生态系统的功能由其结构决定,各结构组成相互作用、协调运行,共同实现河湖的各项功能。河湖的主要功能涵盖了水资源功能、行洪及滞蓄洪功能、水流能量功能、航运功能、土地资源功能、水循环和物质输送功能、排污及自净功能、生态功能以及社会经济文化功能等方面。河湖作为一个生态系统,具有不可分割的整体性,在不同的经济社会发展阶段,河湖结构中任何一部分遭到破坏都会影响整个生态系统。因此,河湖综合治理需要针对不同功能,考虑不同层次,正确认识和处理河湖生命与流域可持续发展的关系,从流域的角度出发进行整体规划和统筹推进。

流域保护治理应以新时期治水思路为指导,将节水工作放在优先位置,从供需两方面合理调控水资源空间分配

李轶  
河海大学  
Li Yi  
Hohai University



格局,统筹“山水田林湖草”系统治理的思想,更好地发挥政府作用并充分地利用市场机制。流域保护治理应坚持生态优先、绿水青山就是金山银山理念,重在针对流域生态环境存在的问题开展专项整治,致力于防洪安全保障、水环境治理、水生态修复、水资源承载能力提高等任务。流域保护治理应坚持流域高质量发展的战略目标,必须适应新时代的要求、体现新发展的理念,需要多部门合力,坚持治理开发和管理保护并举,从而达到控制水量、改善水质、修复生态的目标。

#### 2 河湖综合治理需要统筹水资源、水环境和水生态等方面

当前我国河湖水资源短缺、水环境污染和水生态破坏等问题突出,需要根据河湖现状,从流域的角度出发,统筹推进水资源、水环境和水生态综合治理,坚持“水安全、水环境、水生态、水文化、水经济”五位一体的整治目标,多措并举开展河湖综合治理,保证水体功能的实现。

水资源、水环境和水生态等要素之间需要协同考虑,同时要有所侧重。例如,对于城市总体的水系规划,可参考《城市水系规划导则》,解析城市水系规划中的城市水系布局、城市水面、城市河湖生态水量、城市河湖水质、城市水景观和水文化、城市水系管理、规划工程实施方案等内容,可促进城市水系综合功能的有效发挥,保障城市防洪、供水、水生态和水环境安全,实现人水和谐、环境优美,支撑城市经济社会可持续发展。针对黑臭河流治理,应遵循《城市黑臭水体整治工作指南》提出的目标和要求,需要系统分析水质水量特征及污染物来源,结合环境条件与控制目标,筛选技术方法,确定技术路线,预估所需的工程措施、工程量和实施周期,预测水体整治效果,最终形成整治方案。针对日益突出的水生态环境问题,根据2020年重点流域水生态环保“十四五”规划编制要求,要突出水资源、水生态、水环境“三水”统筹,实现“有河要有水,有水要有鱼,有鱼要有草,下河能游泳”的目标。水资源方面,以生态流量保障为重点,使断流的河流恢复有水;水生态方面,按照流域生态环境功能需要,使河流、湖泊的水生态系统逐步恢复;水环境方面,有针对性地改善水环境质量,

不断满足老百姓的亲水需求。

#### 3 精准掌握污染成因并科学决策是河湖水环境治理的关键

河湖水环境治理要求全面掌握污染现状、分析成因并通过环境容量和排污总量的博弈来科学决策。首先应建立一河(湖)一档,内容包括河湖功能信息、河湖基础信息、水环境与水生态状况、水资源开发利用状况以及河湖管理状况。其中,水环境与水生态状况又分为COD、氨氮、总磷等水质现状,浮游植物、浮游动物、底栖动物和鱼类等水生态现状,以及农业污染、畜禽养殖、工业污染、排污口和内源污染等污染源现状。在污染源分析的基础上,进一步明确排污总量和污染物减排量,并结合河湖水环境容量,从而进行科学决策。

河湖现状评价的要点包括水环境容量计算以及限制排污总量制定等内容。水环境容量是水体在规定的环境目标下所能容纳的污染物的最大负荷,其大小与水体特征、水质目标及污染物特性等有关,通常以单位时间内水体所能承受的污染物总量表示,水环境容量也可称为水域的纳污能力。水环境容量的计算基础涵盖了水文学、流体力学、环境化学和生态学,影响因素包括水域特征、水环境功能要求、污染物质特征以及排污方式等。限制排污总量则是在纳污能力基础上,根据管理需求制定的水域最大污染物入河限制量,是指水域部分,通过控制断面污染物限排总量、控制断面污染物削减量和削减率的计算,最终制定控制断面限制排污总量方案。

#### 4 水动力调控是当前我国水环境治理的主要手段之一

河湖生态环境问题可通过改善水动力条件来缓解,特别是在流域的综合治理过程中,水动力调控措施尤为重要。掌握流域水动力特性是流域治理的关键,水动力时空失衡会导致一系列河湖问题。水动力超过河湖承载能力,则会造成洪涝灾害;水动力过缓导致物质运移缓慢,则容易造成富营养化等水质恶化现象;水动力失衡使得生境受到胁迫,会导致水生态退化;水动力不均使得水消耗过大,会使得水资源供需不平衡。

调水引流是改善河网水环境污染问题最常用的方法之

一，水资源再分配涉及水量和水质两个方面，主要通过引入清水的稀释作用以及对水动力条件的改善来实现水环境的改善。调水引流工程可通过将水质相对较好的水引入受污染河流，快速稀释降低污染物浓度，增大水体净化能力和稀释容量，从而减轻水污染程度。而在流域尺度上，调水引流更重要的是改变了河网水体的流速，原有水体从相对静止状态变为流动状态，使得水体的复氧能力和自净能力大大提高，水中的污染物快速降解；同时，调水将水体由往复流转变为单向流，通过改变河网水体流向加速了污染物向区域外围的迁移。调水引流在快速改善生态环境的同时，也会受到一些因素的制约，例如水源限制、运行费用较高、水质改善效果持续性不佳、下游水体负荷增加等，需要进行统筹优化，达到最佳的水动力条件，从而实现河湖水环境的改善。

## 5 河湖综合治理须开展生态系统健康评估

人类活动会影响河湖生态系统的结构和功能，并可能进一步导致河湖生态系统健康恶化、生态服务丧失。为了衡量河湖生态系统服务的健康基准，协调人与河湖系统的可持续关系，提出河湖生态系统健康，即河湖能够恢复和保持其水体的化学、物理和生物完整性等特征，并维持关键生态过程。河湖生态系统健康评估的前提是开展现状调研，掌握生态系统健康的影响因素。流域人类活动和土地利用通过改变河湖内水量、水质和物理生境，进而影响水生生物和生态系统健康；河湖物理生境的变化是影响水生生物群落组成和结构的主要胁迫因子之一；河湖水量和水质能够直接影响水生生物种类和群落特征，进而会影响河湖生态系统健康；河湖生态系统也会受到某些因素的间接影响，如气候变化等因素可能通过改变水量等方式间接影响河湖生态系统健康。

河湖生态系统健康的评估方法主要包括指示生物法、综合指标法和数学模型法。指示生物法通过对污染物敏感或耐受的生物种类的存在或缺失来指示污染程度，综合指标法中应用较为广泛的是生物完整性指数（IBI），通过评

估干扰后反应敏感的多个生物指数对生态系统进行生物完整性或健康评价；数学模型法通过比较物种相对丰富度和环境数据，从而预测河流生态系统健康状况。现行的全国河湖健康评估技术文件包括《河流健康评估指标、标准与方法（试点工作用）》、《湖泊健康评估指标、标准与方法（试点工作用）》和《河湖健康评估技术导则》（SL/T793—2020）。开展河湖健康评估对深入落实“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”新时期治水思路，推动“水利工程补短板、水利行业强监管”总基调向纵深发展，加快推进水治理体系和治理能力现代化，建设幸福河湖具有积极推动作用。在对河湖生态系统健康进行系统评估的基础上，需进一步进行问题成因解析，并开展河湖生态系统修复工作。

## 6 河湖综合治理逐渐向现代化、智能化发展

我国水利建设从工程水利开始，逐渐向资源水利、生态水利和数字水利发展，近年来，信息化建设在国家战略中的地位日益凸显，水利部《关于推进水利大数据的指导意见》的印发标志着水利大数据发展进入一个新阶段，智慧水利已成为水利发展的新趋势。智慧水利平台包括山洪预警、城市内涝预警、防洪应急预案等防洪管理平台，取水总理、用水效率、水功能区纳污管理等水资源管理平台，排污口、河道、湖泊管理等水环境管理平台，以及河湖健康评估、水生态系统保护、生态修复功能等水生态管理平台。

智慧水利时代的水利大数据对提高水利管理效率和决策水平，发挥水利在社会经济、生态环境中的作用和效益，促进水利可持续发展等方面都具有重要意义。河湖综合治理可通过智能诊断、智能控制、智能仿真、智能感知、智能调度、智能预警等技术，结合流域智能综合指挥系统形成集中控制及调度的智慧平台，全过程监测水质、水量及水生态环境的变化，同时对水安全事件进行预测预测。基于水利大数据，推动河湖综合治理科学化，河湖监管智能化，形成“科学决策、智能管理”，已成为快速提升水资源效能的强力抓手和必然选择。

### 作者简介：

李铁，男，河海大学教授，水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心常务副主任。



陈立华<sup>1</sup>，张弛<sup>2</sup>，陶爱峰<sup>3</sup>

1 河海大学农业科学与工程学院

2 河海大学港口海岸与近海工程学院

3 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室

Chen Lihua<sup>1</sup>, Zhang Chi<sup>2</sup>, Tao Aifeng<sup>3</sup>

1 College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University

2 College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University

3 Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University

# 滨海滩涂盐土植被建设的生态技术及其应用

## Ecological Technology and Its Application for Vegetation Construction in Coastal Saline Soil

**摘要：**近年国家加大对海岸带生态修复保护力度，滨海滩涂盐土植被建设是海岸带生态修复保护的重要工作之一。滨海滩涂盐土不同于传统的农业盐土，其水动力条件、土壤结构、植物类型都有很大差别。本文阐述了滨海滩涂植被建设面临的重要障碍，包括粉砂质滩涂盐土没有结构抑制土壤盐分洗脱和植物根系发展，滨海滩涂土壤蒸发剧烈、地表盐分快速累积导致植被生理干旱萎蔫，潮间带土壤缺氧抑制移栽红树植物的根系发展，滩涂盐土植物营养元素匮乏、微生物活性低导致植物营养的供应能力差。针对主要障碍，本文介绍了滨海滩涂盐土植被建设的生态产品的研发及其应用效果，系统描述改良滨海滩涂盐土结构的微生物产品、抑制滨海滩涂土壤蒸发的微生物基产品、红树林定植基质研发及其应用技术、滨海滩涂盐土植物的微生物促生基质。滨海滩涂盐土植被建设的生态技术及产品是植被建设工程重要辅助手段，有利于提升盐土植物的成活率，提升工程效率。

**关键词：**植被建设；滨海滩涂盐土；微生物技术；生态产品

### Abstract

Ecological restoration and protection of coastal zone has been focused on in recent years, and vegetation construction in coastal saline soil is one of the important work. However, the hydrodynamic conditions, soil structure and plant types in coastal saline soil are different from traditional agricultural saline soil. This paper describes the major obstacles to the vegetation construction in coastal saline soil, including lack structure for silty saline soil inhibiting soil salt elution and development of plant root system, the severe evaporation of soil and the rapid accumulation of salt on the surface soil results in physiological drought wilting of vegetation, soil hypoxia in intertidal zone inhibits root development of transplanted mangrove plants, lack of nutrient elements and low microbial activity in the coastal salt soil lead to poor supply of plant nutrition. In view of the obstacles, research and development of ecological products its application for vegetation construction in coastal saline soil are introduced, including the microbial products of improving coastal saline soil structure, microbial base products that inhibit the evaporation of coastal saline soil, research and development of mangrove planting matrix and its application, plants growth promoting microbial matrix for coastal saline soil. The ecological technology and product is helpful to improve the survival rate of saline soil plants and improve engineering efficiency of vegetation construction.

**Key words:** vegetation construction, coastal saline soil, microbial technology, ecological products

## 引言

生态环境部海洋生态环保“十四五”规划，将以海湾为突破口全面提升海洋生态环境质量，力争到2035年，全国1467个大小海湾都能建成“美丽海湾”。传统的沿海围垦、沿海地区工业、农业和生活排污、沿海水产养殖等对近海生态环境造成很大威胁。部分海湾河口、红树林和珊瑚礁等典型生态系统仍处于破坏状态，生物多样性受损，赤潮、浒苔、风暴潮等灾害多发。“十四五”规划关注的重点是近岸海域的生态环境保护，海岸线上面积大于10平方公里的海湾150多个，其长度约占大陆岸线总长度的57%。

滨海滩涂植被在消纳水体污染物、防止海岸线侵蚀、抵御自然灾害、调节气候等方面具有很强功能。滨海滩涂植被建设直接关系到海岸线生态环境保护的成败。滨海滩涂土壤钠盐含量高，潮上带区域部分土壤含盐量高于海水，高盐土壤多板结，土壤结构差，土壤含盐量超过植物存活阈值，植物存活十分困难，植被建设之前和过程中，需要对土壤进行改良。国内外对于滨海滩涂土壤改良多为围垦后形成农地的改良，如使用微生物菌剂、添加有机肥和生物炭改良剂等结合灌溉淡水洗盐，基于“盐随水来、盐随水去”和“培肥是基础，洗盐是根本”这一理念，但是这些措施在海岸带生态修复过程的滨海滩涂盐土改良中直接使用比较困难。海岸线生态修复过程中，相较于用于农用盐土，滨海滩涂区域多为开放区域，水动力强，水盐交换频度高，盐土改良涉及到生态安全、自然灾害防护等更多问题。

微生物技术是近几十年才发展起来的新兴技术，是环境友好型技术，其在医药、农业、工业、环境、工程等领域广泛应用。微生物海涂盐土改良技术，是利用不同功能微生物具有促进植物生长、改良土壤结构、菌丝固结作用等功能，开发的生态友好型产品，本文着重介绍科研团队相关产品的研发和应用。

## 1 改良滨海滩涂盐土结构的微生物产品

高分子化学物质、矿渣、腐殖酸、有机肥等都在农地土壤结构改良中广泛应用，主要通过大分子物质调节土壤团聚体等颗粒的组成。在粉砂质土壤中形成大团聚体增加土壤孔隙性，减少板结、增加透水和通气性；在砂质土

壤中增加小团聚体比例，增加土壤保水保肥能力；淤泥质黏土中，增加孔隙度减少粘性，加速盐分洗脱。但是滨海滩涂是一个特殊的生境，海水交换频繁，滩涂化学物质运动剧烈，农用土壤改良产品使用不当极容易造成污染。微生物合成的次级代谢物多聚谷氨酸( $\gamma$ -Poly-glutamic acid)等可保持水分和养分<sup>[1]</sup>，广泛用于化妆品、药品和食品等行业。本研究团队通过利用在江苏盐城海涂盐土中分离到的微生物专利菌株，黄短杆菌(*Brevibacterium flavum*)、解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)<sup>[1]</sup>和固体有机物进行固态发酵，研制出微生物源滩涂盐土结构改良产品<sup>[2]</sup>，在此产品基础上衍生出一系列产品<sup>[2-5]</sup>，相关产品均能够通过微生物在盐土中繁育持续向土壤供给 $\gamma$ -多聚谷氨酸(图1)，实现土壤结构持续改良。

针对黄短杆菌和解淀粉芽孢杆菌研制的滩涂盐土结构改良产品(专利授权号ZL201310307877.0)实验研究表明，土壤中使用该微生物源改良产品，土壤大团聚体显著增加(图2)，土壤中粒径 $>0.25$  mm的团聚体含量增加了293.5%<sup>[1,6]</sup>，土壤抗侵蚀能力增加了50.0%<sup>[1,6]</sup>；土壤总孔隙度、毛管孔隙度和田间持水量分别增加6.8%、9.8%、和20.0%<sup>[1,6]</sup>；在土壤水交换过程中保留土壤中的氮元素，在90天的频繁水交换时间内，使用该微生物源改良产品0-30 cm土壤可溶性盐含量降低了39.9%<sup>[1]</sup>；土壤总菌、真菌、放线菌、固氮菌、氨化菌、硝化菌和反硝化菌等微生物数量显著增加( $P < 0.05$ )<sup>[6]</sup>。滨海滩涂盐土应用微生物源改良产品，可显著降低土壤盐度、改善土壤结构和微生物特性，有效地保留土壤氮养分含量，有利于滨海滩涂植被的工程建设(图3为滨海滩涂围垦区定植的田菁)。

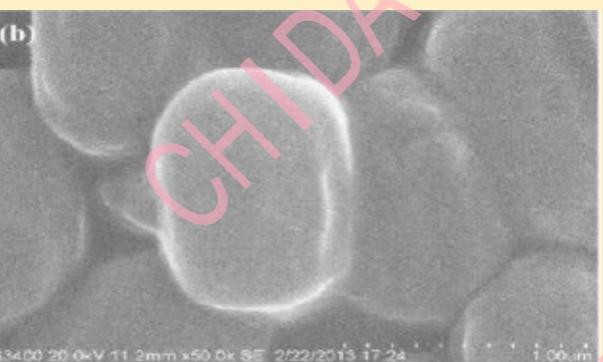
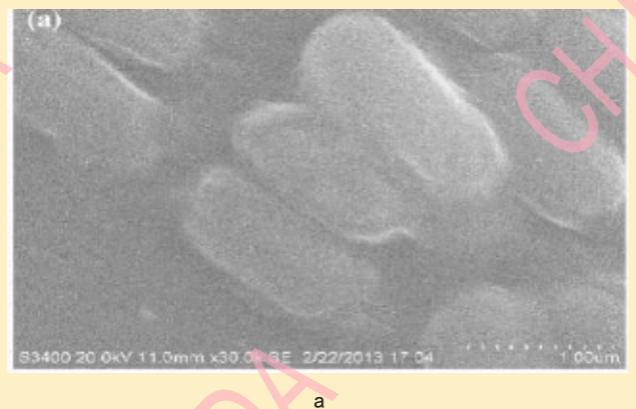


图1 微生物菌株的扫描电镜照片<sup>[1]</sup> (a 和 b) 和培养皿合成多聚谷氨酸照片 (c)

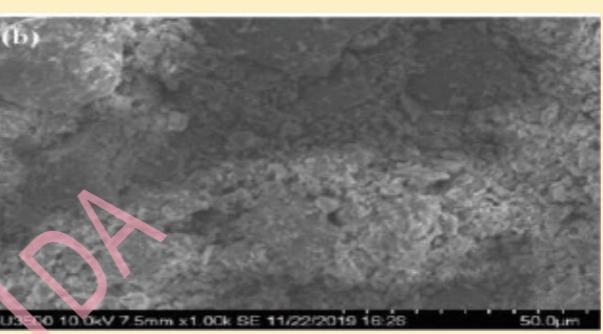
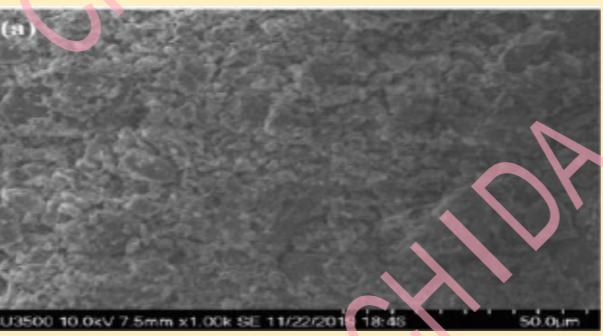


图2 不同处理粉砂质滨海滩涂盐土扫描电镜照片<sup>[1]</sup>，a 未处理土壤，b 增加普通有机质土壤，c 使用微生物结构改良产品土壤

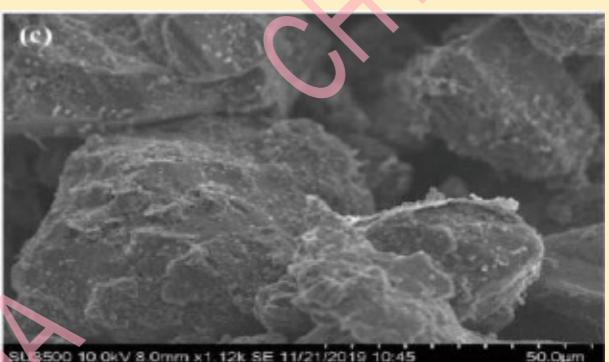


图2 不同处理粉砂质滨海滩涂盐土扫描电镜照片<sup>[1]</sup>，a 未处理土壤，b 增加普通有机质土壤，c 使用微生物结构改良产品土壤



图3 滩涂盐土首次定植田菁的生长照片，a 2016年江苏东台围垦滩涂，b 2017年田菁定植效果

## 2 抑制滨海滩涂土壤蒸发的微生物基产品

滨海滩涂为氯化钠盐土，地表大型植物量少、表层土壤低等生物（苔藓、藻类、真菌、细菌等）数量少，基本没有地表覆盖导致滩涂土壤蒸发量极大，不降雨时很多土壤表层呈现白色盐碱层，土壤蒸发导致盐分表聚是植被建设最大障碍。地表有效覆盖是减少土壤蒸发的重要措施，传统的覆盖材料多为农用塑料薄膜，不可回收且无法自然降解的特性会造成严重的环境问题。同时滩涂植被建设工程面积大、施工机械化，农业措施在抑制土壤蒸发方面很难奏效。微生物菌丝体结构具有的链/黏接作用，将有机物形成薄层的地表覆盖物。本团队研究的微生物基覆盖材料（Microbiological Covering Materials, MCMs）是由专利菌株高大毛霉（*Mucor mucedo*）2820 菌株和秸秆纤维及辅助物质制成<sup>[8]</sup>。MCMs 制成直接的覆盖材料（图 4），可以直接覆盖地面，在植物生长后逐渐分解，其材料体菌丝均匀分布在材料表面和内部，其扫描电子显微镜照片见图 1，微生物菌丝形成膜，覆盖 / 填充了秸秆之间的缝隙，菌丝体生长密集，在材料中形成一层透气性好的生物膜（图 4 c）。MCMs 在大规模工程施工上应用可以通过原位培养的方式开展，在土壤表层均匀覆盖植物秸秆和高大毛霉菌剂复合物（高大毛霉发酵的金针菇渣、麦麸、玉米芯粉等基质形成）的复合体，高大毛霉菌丝生长过程有效固结秸秆，提升复合体的气密性减少蒸发，实现对地表的有效覆盖（如图 5）。

特定规格的 MCMs<sup>[7-8]</sup>（基于发明专利授权号 ZL201710411417.0）对新围垦滨海滩涂植被建设影响实验表明，MCMs 覆盖能够显著增加地表生物量（图 5），覆盖后土壤微生物活性增强，有效植物营养元素和有机质含量增加，土壤含盐量减少。自然滩涂盐土有效磷量为 16.9-51.9 mg/kg，MCMs 覆盖一个作物生长周期后，0-30 cm 土层土壤有效磷 - 高于 60 mg/kg，表层可达 135 mg/kg。自然滩涂土壤速效钾量不足 80 mg/kg，MCMs 处理最高可达 229 mg/kg。原始滩涂土壤有机质量约为 0.51 g/kg，MCMs 覆盖处理下可达 6.46 g/kg。淡水洗盐结合

MCMs 地表覆盖土壤脱盐率达 85-87%。MCMs 抑制蒸发作用，显著提升土壤的生物活力，包括土壤微生物分解矿化转化有机碳和植物营养元素能力、溶解浸出壤矿质元素 P、K 的效率。

MCMs 材料是有机物和菌丝复合体，属完全亲水物质，具吸水保水能力，其吸水量可达自身重量的 2.72 倍，有利于储水和保持土壤表面湿度，实现对盐土的缓慢补水。MCMs 的覆盖有助于增加降水入渗，试验表明，降雨强度稳定为 95.43mm/h 时，MCMs 覆盖后入渗量为 37.02mm/h，是无覆盖处理的 3.02 倍。



图 4 微生物覆盖材料形态图 a MCMs 成品图，b MCMs 细节图，c MCMs 上菌丝体扫描电镜照片



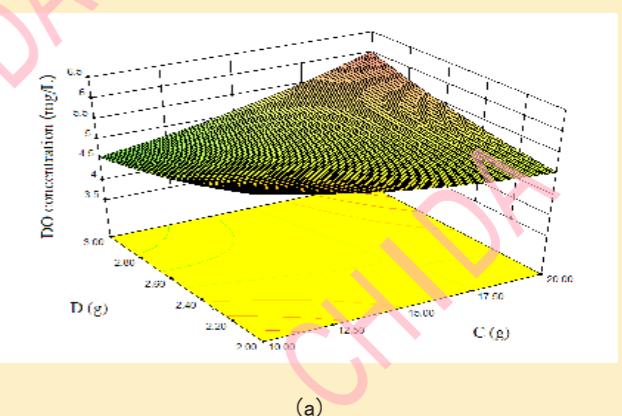
图 5 无覆盖和 MCMs 覆盖处理定植植物效果图

## 3 红树植物定植基质

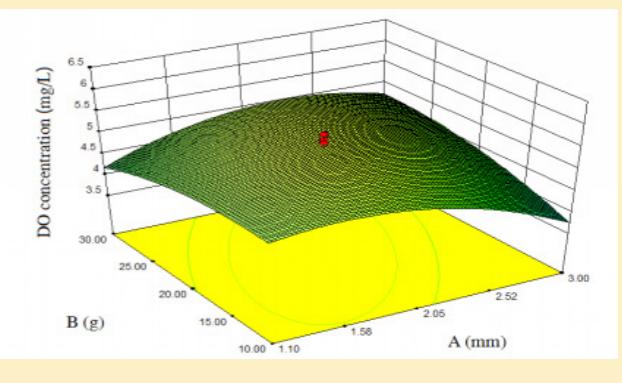
红树林是生长在热带或亚热带低能海岸潮间带的灌木或乔木，具有消减波浪、促进海岸滩涂沉积、维护生物多样性等生态功能。近三十年来，全球红树林的面积减少了 18%。传统红树林建设手段包括移栽和原位种植，但红树成活率较低，移植损伤幼苗根系<sup>[9]</sup>，原位种植中幼苗根系发育不全易受海风浪的伤害，难以扎根成活。红树幼苗根系定植对红树苗成活至关重要，适宜的水、肥、气、热耦合条件是植物生长发育不可缺少的因素，其中氧气参与植物根系的生化反应，是影响植物生长的重要因子。海岸带生态系统不同于海洋与陆地生态系统，干湿交替频繁。生长在海岸带区域的植物根系在淹水期间所需的氧气来自于土壤溶液中的溶解氧 (DO, dissolve oxygen)，海岸水动力交换会增加溶解氧的含量。研究发现通过向根系补充溶解氧，可以促进植物的生长<sup>[10-12]</sup>，增加水稻根际溶解氧浓度对水稻根系生长有正向作用，缺氧环境下水稻生长速度放缓，增加水培营养液中溶解氧含量，生菜生长速度和干重增加了 2.1-2.3 倍并显著促进根系生长，灌溉水在充分曝气后可使洋葱生长速率提高 27%，增加土壤溶解氧含量可以改变土壤微生物群落的结构组成，促进土壤养分循环。

生物炭多孔结构可增加湿地溶解氧浓度，吸附并控制养分释放速率，泥炭质地疏松在一定程度上促进水交换，增加土壤通气性，功能微生物菌株可分解和活化土壤植物矿物营养。本研究团队通过利用生物炭、堆肥、泥炭和淀粉芽孢杆菌等原料，通过生物工艺优化技术（图 6），以滨海滩涂红树林定植土壤溶解氧含量为响应值，研发红树植物定植基质。研发出系列促进红树植物定植的基质<sup>[13-15]</sup>，

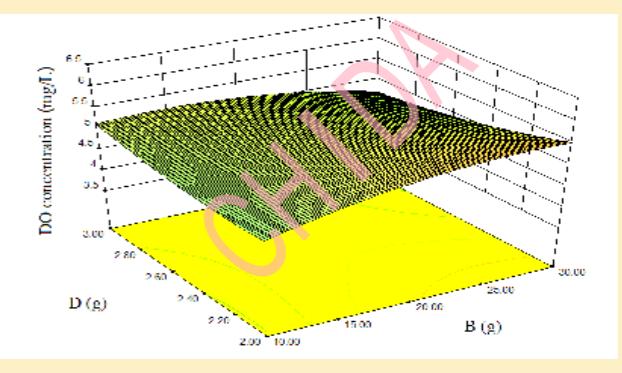
其中一种促生基质（专利申请号 CN202010105877.2）在白骨壤育苗试验表明，定植基质与传统经验基质（红土：牛粪：细砂：过磷酸钙 = 40: 20: 10: 3）和原始土壤相比，显著促进白骨壤生长，相较于经验基质和原始土壤，2 个月内根系伸长量分别增加 39.6% 和 25.6% (P < 0.05)。红树植物定植基质促进土壤中海水交换和红树幼苗根系伸长，有利于幼苗快速生长和定植（图 7）。



(a)



(b)



(c)

图 6 基质中不同原料对土壤中溶解氧响应模型



图 7 基质促生效果 (左为促生基质育苗, 右为普通土壤)

#### 4 滨海滩涂盐土植物微生物促生基质

在滨海滩涂高盐土壤中, 植物通过增加细胞可溶性糖、有机酸和氨基酸等合成以及增加  $K^+$  和  $Ca^{2+}$  吸收量, 对抗根际土壤高盐高渗透压环境, 避免生理性干旱。滨海滩涂土壤中可利用养分匮乏, 不利于植物吸收和累积营养盐离子对抗土壤高盐胁迫。微生物是土壤生物化学循环过程的主要参与者, 包括活化土壤矿质营养元素, 有机物和无机物转化等。本团队通过在滨海滩涂恶劣环境中采集植物根际土壤, 筛选获得功能微生物菌株哈茨木霉 (*Trichoderma harzianum*) T83 菌株、棘孢木霉 (*T. asperellum*) 12 菌株、枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) D9 菌株等功能微生物, 研发了一系列促生产品<sup>[16-18]</sup>, 相关产品在滨海滩涂盐土种植田菁、柽柳、碱蓬、水稻等方面表现出较好效果 (图 8)。

依托哈茨木霉 T83 菌株研发促进高盐土壤植物生长的产品<sup>[16]</sup>, 在重盐土碱蓬定植上开展了实验, 结果表明, 与对照相比, T83 促生产品碱蓬鲜重增加了 82.7%, 干重增加了 119.3% ( $P<0.05$ ), 碱蓬植株内脯氨酸、有机酸、氨基酸、可溶性糖、 $K^+$  和  $Ca^{2+}$  的浓度分别增加了 77.5%、58.3%、86.9%、58.7%、79.3% 和 38.8%, 碱蓬根系组织对抗盐胁迫的过氧化物酶和超氧化物歧化酶的酶活性以及根系活力显著增加 ( $P<0.05$ ), 体现根系细胞受损的丙二醛浓度指标显著降低 ( $P<0.05$ )。土壤盐分会破坏植物细胞膜, 活性氧对脂质和蛋白质等造成氧化损伤, 丙二醛则是膜脂过氧化的最终产物, T83 菌株促生产品提高了碱蓬 CAT、POD、SOD 和 PPO 等抗氧化酶活性, 减轻了土壤盐分引起的脂膜损伤, 促进碱蓬生长。



图 8 滨海滩涂定植碱蓬的效果图 (左为 2016 年光滩, 右为 2017 年生长效果)

#### 总结

高潮线以上滩涂土壤的脱盐和控制返盐十分重要, 微生物源土壤结构改良产品、表层土壤生物覆盖材料、植物促生基质等一套生态材料可以有效解决土壤结构差盐分洗脱困难、土壤返盐严重等植被建设面临的主要问题。潮间带红树林定植过程, 通过利于水交换的红树定植基质, 有利于红树植物根系发展, 利于红树植物的快速定植。微生物源海岸带植被建设产品有利于提高海岸带植被建设效率。

#### 参考文献:

- [1] Chen Lihua, Su Weixia, Xiao Jinyu, et al. Poly- $\gamma$ -glutamic acid bioproduct improves the coastal saline soil mainly by assisting nitrogen conservation during salt-leaching process. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. DOI: 10.1007/s11356-020-11244-7.
- [2] 陈立华, 邵孝侯, 程晋等. 一种农田土壤微生物保水制品及其制备方法. 发明专利授权号 ZL201310307877.0.
- [3] 陈立华, 邵孝侯, 温扶辉等. 一种盐碱地促生生物有机肥. 发明专利授权号 ZL201510030096.0.
- [4] 陈立华, 邵孝侯, 郝树荣等. 一种降低滩涂盐碱地土壤碱性的微生物制品. 发明专利授权号 ZL201510032828. X.
- [5] 陈立华, 郑金海, 张弛. 一种用于改良滩涂盐碱土壤结构的微生物添加物及其制备方法和应用. 发明专利授权号 ZL201510031754.8.
- [6] 尚辉, 颜安, 韩瑞等. 微生物改良基质对新围垦海涂盐土改良的初步研究. *农业工程学报*, 2020, 36(08):120-126.
- [7] 陈立华, 郑金海, 程瑶等. 一种海涂土壤增加降水入渗和减少地表蒸发的生物基覆盖材料及其制备方法. 发明专利申请号: CN201710411417.0.
- [8] 韩瑞, 姚宇闻, 尚辉, 张弛, 郑金海, 陈立华. 微生物基覆盖材料对新垦滨海盐土理化性质的影响. *灌溉排水学报*. doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2020358
- [9] Tan Phong Nguyen, Luom, Thai Thanh, Parnell, Kevin E. Mangrove transplantation in Brebes Regency, Indonesia: Lessons and recommendations. *Ocean. Coast management*. 2017, 149, 12-21.
- [10] Summerfield RJ, Rieley JO. Growth of *Narthecium ossifragum* in relation to the dissolved oxygen concentration of the rooting substrate. *Plant and Soil*. 2002, 242(1-2):111-117.
- [11] Zhao Feng, Xu Chunmei, Zhang Weijian, et al.. Effects of Rhizosphere Dissolved Oxygen Content and Nitrogen Form on Root Traits and Nitrogen Accumulation in Rice. *Rice Science*. 2011, 18(4): 304-310.
- [12] Syantohadi A, Kyoren T, Hariadi M, et al. Effect of high concentrated dissolved oxygen on the plant growth in a deep hydroponic culture under a low temperature. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010, 43(26), 251-255.
- [13] 郑金海, 陈立华, 苏伟霞, 张弛. 一种生态工程制品及其制备方法和应用. 专利申请号 CN202010105877.2.
- [14] 张弛, 苏伟霞, 郑金海等. 一种红树林定植工程的生态基料及其制备方法和应用, 专利申请号 CN202010175753.1.
- [15] 陈立华, 韩瑞, 郑金海等. 一种培育抗盐植物苗的育苗基质及其制备方法和应用, 专利申请号 202010175286.2
- [16] Chen Lihua, Zheng Jinhai, Shao Xiaohou, et al. Effects of *Trichoderma harzianum* T83 on *Suaeda salsa* L. in coastal saline soil. *Ecological Engineering*, 2016, 91:58-64.
- [17] 陈立华, 邵孝侯, 毛欣宇等. 一种防控水稻纹枯病的生物防治菌株及其生物有机肥. 其制备方法. 发明专利授权号 ZL201310307561.1.
- [18] 陈立华, 常义军, 朱福新等. 一种促盐土钠离子交换的有机态改良基. 发明专利授权号 ZL201710579896.7.

#### 作者简介:

陈立华, 男, 河海大学农业科学与工程学院, 副教授。

张 弛, 男, 河海大学港口海岸与近海工程学院, 教授。

陶爱峰, 男, 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 教授。

Dear readers of *China Dredging*:

In the development and construction of sustainable energy in human history, offshore renewable energy is receiving more and more attention. You can find articles about offshore wind power in past issues of *China Dredging*. In this issue's *International Vision*, we will bring you two articles about alternative forms of offshore renewal energy: ocean tidal energy and ocean wave energy.

The first article, *A Review of Tidal Current Turbine Technology: Present and Future*, authored by the Electrical and Sustainable Research Center of Delft University of Technology, offers an in-depth review of types, installation methods, comparison of motor types of various kinds of tidal turbine generators both in the market and under development. Based on the review and comparison, the article put forward its expectation and forecast of the technical choice of tidal power generation.

The second article, *A Reasonable Evaluation Method for Wave-energy Converter*, from the School of Mechanical, Maritime and Materials of Delft University of Technology, proposes a comprehensive evaluation method for comparing the comprehensive technical and economic benefits of various kinds of wave-energy converters both in the market and under development. The article also pointed out the technical difficulties yet to be solved.

We hope these articles will give our readers a quick overview of the current stage of tidal and wave energy. We encourage interested readers to contact us to further discussion on the topic.

Chen Xiuhan

Senior Engineer & Researcher,  
Delft University of Technology

尊敬的《中国疏浚》期刊的读者朋友们，

在人类可持续能源的发展建设中，海上可再生能源正在受到越来越多的重视。这其中，有关海上风力发电的文章可以在过去发布的《中国疏浚》期刊中找到。而在本期的“国际视野”栏目中，我们将为大家带来两篇关于其他形式的海上可再生能源的文章：海上潮汐能和海上波浪能。

第一篇文章《潮汐发电涡轮机技术回顾：现在与未来》来自代尔夫特理工大学的电气与可持续发展能源研究中心，这篇文章详细综述了目前市面上和在研中的各种潮汐发电涡轮机的类型，安装方式，电机类型的优劣对比。基于这样的综述和对比，文章对市场化的潮汐发电的技术选择进行了展望和预测。

第二篇文章《波浪能转换器的合理评价方法》来自代尔夫特理工大学的机械、海事和材料学院，这篇文章提出了一种综合评价方法，用于对比目前市面上和在研中的各种波浪能转换器的综合技术经济效益。同时点明了仍然亟待解决的技术难题。

希望这两篇文章能够让各位读者快速了解潮汐能和波浪能现阶段的概貌。同时也欢迎感兴趣的读者与我们联系，交流相关议题。

陈修涵

代尔夫特理工大学  
高级工程师，高级研究员

# 波能转换器的合理评价方法

## A Reasonable Evaluation Method for Wave-energy Converter

谭懿, Henk Polinder, Peter Wellens, Sape Miedema

**摘要:** 本文在频域模型数值仿真的基础上,建立了波能转换器(波浪能转化器)的合理评估方法。在此评估方法中,波浪能装置的浮子尺寸优化和PTO(能量采集装)的功率优化被同时考虑,以尽量提高波浪能转换器的技术经济性能。基于本文提出的合理评价方法,本文针对一个具体的波浪位置对一个点吸收式波浪能装置进行了技术经济评价,并考虑了两种不同的PTO控制策略。结果表明,这种公平的评估方法有助于提高波浪能转换器的技术经济性能。此外,本文还对三种常用的波浪能转换器的尺寸优化方法进行了比较。

**关键词:** 波能转换器; 合理评估; 尺寸优化

### Abstract

Based on the numerical simulation of the frequency domain model, this paper establishes a reasonable evaluation method for the wave-energy converter. In this evaluation method, the optimization of the float size of the wave-energy device and the power optimization of the PTO (Power Take Over) units are simultaneously considered to maximize the technical and economic performance of the wave energy converter. Based on the reasonable evaluation method proposed in this paper, this paper conducts a technical and economic evaluation of a point-absorbing type wave-energy device for a specific wave position, and considers two different PTO control strategies. The results show that this fair evaluation method helps to improve the technical and economic performance of the wave-energy converter. In addition, this article also makes comparison among three commonly used wave-energy converter size optimization methods.

**Key words:** wave energy converter, reasonable evaluation, size optimization

### 1 简介

数十年来,波浪能作为一种可再生能源一直受到人们的关注,但是波浪能装置的大规模运用还远远没有实现。基本上,波浪能发展的一个重要障碍是波浪能转化器的经济性尚不能与其他可再生能源技术竞争<sup>[1]</sup>。另一个原因是目前波浪能转换器的类型相当繁多<sup>[2]</sup>,这使得研究人员的注意力和企业的投资难以聚焦。为了选择有前途的波浪能

转换器,评估和比较不同类型的波浪能转换器的工作就显得十分有必要。因此,为了最大限度地发掘波浪能转化器的发展潜力,建立合理的评估方法来对各种类型的波浪能转化器进行评价具有十分重要的意义。

目前,已有大量学者研究了波浪能转化器的可行性,其中波浪能转化器的各种经济技术指标也已经被广泛探讨<sup>[3]</sup>。但在波浪能转化器的运行过程中,电力产量不仅依赖于

可用的波浪资源,而且依赖于波浪能转化器的类型<sup>[4]</sup>。因此,评价研究中的一个重要部分是比较不同波浪能转换器在不同波浪位置的性能,并找出最适合当地波浪资源的波浪能转化器。例如,文献<sup>[3]</sup>考虑了5个具有代表性波浪位置,建立了8种类型波浪能转换器的评价基准,并对不同波浪能转化器的一系列成本相关指标进行了分析和比较。文献<sup>[5]</sup>基于成本估算模型针对不同的波浪位置对6种类型的波浪能转化器进行了技术经济评估。讨论了平转化能源成本对波浪资源、装置阵列结构、资本支出和运营支出的敏感性。

除了波浪资源和波浪能转化器类型的变化外,波浪能转化器尺寸的确定对波浪能转化器的技术经济评价具有重要影响。原因可归纳为三个方面:

1)首先,波浪能转化器的功率性能强烈依赖于波浪能转化器浮子的尺寸大小<sup>[4]</sup>。

2)其次,根据波浪能转化器工作原理的不同,其尺寸大小对其功率性能的影响也有很大变化<sup>[6]</sup>。

3)第三,波浪能转化器的尺寸可能会影响波浪能转化器的经济表现<sup>[7]</sup>。

由此可见,波浪能装置的尺寸优化将会对波浪能装置的评价结果产生一定的影响。然而,在评价和比较波浪能转化器的过程中,尽管波浪能转化器的原始尺寸通常只是针对某些特定的波浪位置进行优化,其尺寸优化并没有被视作一个重要的影响因素被考虑在内。因此,本文的第一个目的是建立一个波浪能装置的合理评估方法,并且将波浪能装置的尺寸优化考虑在内。

为了将浮子的尺寸优化纳入波浪能转化器的评价中,建立一种有效的方法来测算波浪能转化器在不同尺寸下的功率性能就显得十分有必要。一些学者已经开展了相关的研究,文献<sup>[7]</sup>和<sup>[8]</sup>在研究波浪能转化器的尺寸优化的同时也探讨了其功率性能的测算。一般来说,测算不同波浪能转化器尺寸下的功率性能主要有两种方法,即Budal图<sup>[9]</sup>和比例定律<sup>[10]</sup>。这两种方法可以用来粗略地估计不同尺寸的波浪能转化器的功率性能。然而,这两种方法在尺寸优化方面的误差仍不清楚,因此可能会造成对波浪能转化器评估的不准确性。除了这两种方法之外,尺寸优化也可以通过数值模拟进行。在数值模拟中,不同尺寸的波浪能转化器的功率性能需要逐一计算,这是相对耗时的。本文将在第二部分中对这三种方法进一步解释。所以为了建立一个公平的评估方法,减少波浪能装置尺寸优化的误差就显得十分有必要。因此,本文的第二个目的是提供一个公平的尺寸优化方法,以减少波浪能装置尺寸优化的不准确性。

在本文提出的合理评估方法中,为了最大限度地提高技术经济性能,波浪能转化器的尺寸可以针对不同的波浪位置进行优化。此外,作为波浪能转化器的一个重要组成部分,PTO系统用于将转换器吸收的机械能量转化为可用电能。为了发掘波浪能转化器的最大潜力,本文也同时考虑了PTO额定功率的优化对技术经济性能的影响。在尺寸优化过程中,本文建立了频域模型对不同尺寸下的波浪能转化器的水动力学系数计算。此外,本文还讨论了PTO系统控制策略对波浪能转化器评估的影响。本文以圆柱形点吸收装置为研究对象,并基于合理评估方法对该装置在特定波浪位置下技术经济性能进行评估的。最后,本文将此合理评估方法与其他针对波浪能装置的尺寸优化方法进行了比较。

## 2 概述

本节对常用的波浪能装置的尺寸优化方法进行了评估。

### 2.1 Froude 比例定律

Froude数是一个无量纲量,定义为惯性力与施加在物体上的惯性力之比<sup>[4]</sup>。Froude定律通常用于水池实验<sup>[11]</sup>,如果Froude数在比例模型和全尺寸原型之间保持一致,比例模型和实物模型之间的动态相似性即可认为被达成<sup>[12]</sup>。在原始尺寸的波浪能装置的功率矩阵已知时,Froude定律也可用于计算其他尺寸下的波浪能转化器的功率矩阵。因此,对于波浪能转化器,比例定律可以有效地估计各种尺度下波浪能转化器的功率性能。如果标度因子被简称为sf [scale factor],其中L2和L1分别代表标度和原始波浪能转化器的特征长度,则其他参数可以通过方程(1)到(5)<sup>[11]</sup>计算。

$$\text{Force: } \frac{F_1}{F_2} = \lambda^3 \quad (1)$$

$$\text{Velocity: } \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\lambda} \quad (2)$$

$$\text{Power: } \frac{P_1}{P_2} = \lambda^{\frac{7}{2}} \quad (3)$$

$$\text{Wave height: } \frac{H_1}{H_2} = \lambda \quad (4)$$

$$\text{Wave period: } \frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\lambda} \quad (5)$$

下标1和下标2分别代表缩放模型和原始模型。这种方法目前为目前最常用的波浪能尺寸优化方法<sup>[7][10]</sup>。

然而,当使用Froude比例定律计算波浪能转化器的功率矩阵时,一些误差是不可避免的。首先,当缩放后的功率矩阵与波浪气候的波况图不匹配时,必须使用外推法去推测一些波况下的功率性能。其次,原始功率矩阵中的PTO额定功率通常只针对特定波浪位置进行了优化,以提高特定波浪位置的技术经济性能<sup>[4]</sup>。因此,这种方法往往会误估波浪能转化器的性能,使得波浪能转化器的尺寸优化和评估结论不准确。

### 2.2 Budal图

Budal图由Budal和Falnes在上世纪六十年代共同提出<sup>[9]</sup>,是估算波浪能转化器理论吸收功率的有效工具。根据Budal图,波浪能转化器在规则波条件下有两个上吸收功率极限,即P<sub>A</sub>和P<sub>B</sub>,如图1所示。P<sub>A</sub>极限与入射波能够提取的最大能量有关,而P<sub>B</sub>极限则反映了实际尺寸对波浪能转化器吸收功率的影响<sup>[9][13]</sup>。

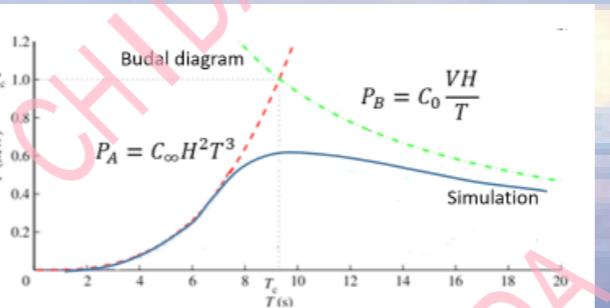


图1 Budal图示意图<sup>[9]</sup>

在规则波中,运动物体的激振力、位移和速度可以表示为

$$F_e(t) = F_{e0} \cos(\omega t + \varphi_F) = \text{Re}\{\hat{F}_e e^{i\omega t}\} \quad (6)$$

$$x(t) = x_0 \cos(\omega t + \varphi_D) = \text{Re}\{\hat{x} e^{i\omega t}\} \quad (7)$$

$$u(t) = u_0 \cos(\omega t + \varphi_u) = \text{Re}\{\hat{u} e^{i\omega t}\} \quad (8)$$

其中  $\hat{F}_e = F_{e0} e^{i\varphi_F}$ ,  $\hat{x} = x_0 e^{i\varphi_D}$  和  $\hat{u} = u_0 e^{i\varphi_u}$  表示激励力、位移和物体速度的复振幅,  $\varphi_F$ ,  $\varphi_D$  和  $\varphi_u$  是其相对于未扰动波的相位角。运动物体的平均吸收功率可以表示为方程(9)<sup>[13]</sup>。

$$P_a = P_e - P_r = \frac{1}{2} |\hat{F}_{e,j}| |\hat{u}_j| \cos \gamma - \frac{1}{2} B_{jj} |\hat{u}_j|^2 \quad (9)$$

$P_a$ 是时均吸收功率,  $P_e$ 是时均平均激发功率,  $P_r$ 是时

间平均辐射功率。 $|\hat{F}_{e,j}|$ ,  $|\hat{u}_j|$ 和 $\gamma$ 分别是激励力的振幅,速度的振幅以及激励力与速度之间的相位差。 $j$ 在此代表自由度。 $B_{jj}$ 是物体在自由度 $j$ 下的兴波阻尼。

如果物体处于最佳相位,相位差为0,  $\cos \gamma = 1$ , 全局最优速度振幅可表示为

$$|\hat{u}_j|_{OPT} = \frac{|\hat{F}_{e,j}|}{2B_{jj}} \quad (10)$$

因此,在这个最优条件下,  $P_a$ ,  $P_r$ 和  $P_e$ 之间的关系可以表示为方程(11)。

$$P_{a,max} = \frac{|\hat{F}_{e,j}|^2}{8B_{jj}} = (P_r)_{OPT} = \frac{1}{2} (P_e)_{OPT} \quad (11)$$

然而,最优速度并不总是能够达到。振荡物体的最大速度振幅与波动周期和最大运动振幅有关,即,

$$|\hat{u}_m| = \omega S_m \quad (12)$$

在接下来的部分中,我们假设波浪能转化器只能在升沉方向上运动。在高频波条件下,  $|\hat{u}|_{OPT}$ 可以很容易地达到,并且可以获得方程(11)中的最佳吸收功率。根据[13],Budal图中的第一个功率边界  $P_A$  可以表示为

$$P_A = P_{a,max} = \frac{J}{k} = \frac{\rho g^3 H^2 T^3}{128 \pi^3} \quad (13)$$

这里,  $P_{a,max}$ 是最大吸收功率;  $\rho$ 是水的密度;  $g$ 是重力加速度;  $H$ 是波的高度,  $\omega$ 是波的角频率;  $k$ 是波数;  $J$ 是入射波单位面积内的能量密。此外,方程(13)中假定了水深为无限深水条件。

在低频波条件下,物体的速度振幅太低而不能达到最佳值  $|\hat{u}|_{OPT}$ 。因此,实际的速度振幅必须考虑到另一个能量边界,即  $P_B$ 。根据<sup>[13]</sup>,另一个功率界限  $P_B$  可以表示为

$$P_B \approx P_e = \frac{\pi \rho g H V}{4T} \quad (14)$$

其中  $H$ 和  $T$ 是相关谐波条件的波高和周期。

为了使波浪能转化器具有经济可行性,波浪能转化器的尺寸必须与波浪资源相匹配。因此,结合波浪资源的信息,可以使用Budal图来选择波浪能转化器的适当大小<sup>[9]</sup>。然而,为了计算方程(14)中的  $V$ ,设计工况( $H_d$ 和  $T_d$ )应该被明确定义。文献<sup>[9]</sup>指出,如果能满负荷工作时间超过年度时间的三分之一,则该波浪能转化器在可认定为具有商业可行性。因此,波浪能转化器的大小应符合波浪资源的“三分之一波浪功率阈值”。根据功率阈值,可以计算设计波形条件下的波高  $H_d$  和波周期  $T_d$ 。具体而言,波浪能转化器的合适大小的选择如下步骤<sup>[9]</sup>进行。

计算在相关波浪气候下超过年度时间三分之一的波功率阈值 (W/m) :

选择波况图中最高频的波浪周期作为 PA 和 PB 中的  $T_d$ ;

基于  $T_d$  和已知的步骤 (a) 和 (b) , 在谐波中, 可以计算波高  $H_d$ ;

通过求解  $P_A = P_B$ , 可以计算出  $P_B$  中波浪能转换器  $V$  的合适体积。

根据不同的控制策略和类型, 选择 PTO 额定功率作为设计波形条件下的最大吸收功率 ( $H_d$  和  $T_d$ )。

基本上, 不需要计算不同尺寸的波浪能装置的功率性能 Budal 图就可以估算出波浪能转换装置的的适宜尺寸。

然而, 在这种方法中, 体积  $V$  的估算强烈依赖于可行性条件的假设, 例如在全功率情况下工作超过每年三分之一的时间。除此之外, Budal 图所推导的为波浪能装置的理论功率极限, 而并未考虑 PTO 控制策略的影响。因此, 在这种方法中, 波浪能转化器尺寸优化对其控制策略的依赖性难以体现。

### 2.3 数值模拟

作为另外一种手段, 数值模拟也可以用于计算不同尺寸下波浪能转换器的功率矩阵。在数值模拟过程中, 不同的 PTO 控制策略控制策略也可以被考虑其中。通过这种方式评估波浪能转化器的功率性能对尺寸大小的依赖似乎更合理。然而, 事实上, 在进行波浪能转化器的尺寸优化时, 该方法却并不常用。因为之前提到的其他方法相比, 这种方法非常耗时。如果考虑到每个尺寸下的波浪能转化器对不同波浪资源的 PTO 额定功率的适应程度, 数值模拟将会更加耗时。文献<sup>[8]</sup>研究了一个点吸收器 (Point Absorber) 的概念模型对全球波浪气候的适应性。其中频域模型被用来计算不同尺寸装置的功率矩阵, PTO 采用了被动控制策略。然而, 在<sup>[8]</sup>, PTO 阻尼系数只是针对每个波场的峰值周期进行了优化, 这有助于减少计算时间, 但不能保证最大的能量产生。

## 3 研究方法

在本节中, 我们介绍了合理评价波浪能转换装置的方法和假设。介绍了波浪能转换装置的概念模型和所采用的

波浪位置的信息。然后, 我们给出了用于合理评价中的所用的频域模型和 PTO 尺寸优化方法。最后, 建立了一个经济模型来预测不同尺寸规模下波浪能转换器的成本支出。

### 3.1 波浪能转化器的模型描述

本文的研究对象为浮升式圆柱浮标。为了研究波浪能转化器尺寸对性能的影响, 我们根据几何相似准则对波浪能转化器的尺寸进行了缩放, 缩放因子范围为 0.5 至 2.5, 每个间隔为 0.25。浮标的半径为  $a$ , 其等于吃水, 浮标的高度为  $2a$ 。对于原始尺寸的装置 (缩放因子 = 1) ,  $a$  等于 2 米。所有尺寸下装置的平均密度假定为水密度的一半 ( $1025\text{kg/m}^3$ )。原始装置的示意图和几何参数 (比例因子 = 1) 如图 2 所示。

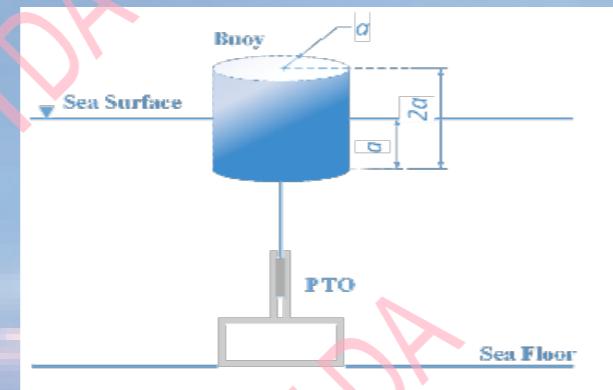


图 2 浮波能量转换器示意图

在实际工程中, 由于结构的机械保护作用, 浮标运动的振幅必须受到限制。此外, 所有的讨论都是在线性假设的基础上进行的, 假设振荡足够小。为了满足线性, KC 数 (Keulegan-Carpenter 数) 应该小于<sup>[9]</sup>。KC 数表示为

$$K_C = \frac{U_m T}{L} \quad (15)$$

其中,  $U_m$ 、 $T$  和  $L$  分别是物体与流体之间的相对速度振幅、振荡周期和物体的特征长度。在本文中,  $L$  为  $2a$ ,  $T$  为波  $L$  周期,  $U_m$  可以估计为速度的振幅<sup>[14]</sup>, 由此可得<sup>[16]</sup>

$$|\hat{u}_m| = \omega S_m = \frac{2\pi}{T} S_m \quad (16)$$

根据 (16), 很容易得出  $S_m$  应小于  $a$  以满足线性理论。在本文中, 所有装置的运动振幅都较为保守被限制在  $0.6a$ , 以满足线性理论的要求。

在本文, Yeu 岛被选做做波浪位置, 此波浪能转化器技术经济性能的计算基于 Yeu 岛的波况资源完成。Yeu 岛

的波浪特征和地理信息取自<sup>[7]</sup>, 如图 3 所示。

### 3.2 波浪能装置的合理评价方法

在此合理评估方法中, 波浪能转化器的尺寸和 PTO 功率都将被进行优化。CAPEX( 支出成本 ) 和 AEP( 年度能源产量 ) 的比值被称作能源成本 (COE) 选为目标优化函数。对于技术指标, 本文使用频域模拟来计算每个尺寸下的波浪能转化器的功率性能。在尺寸优化过程中, PTO 额定功率也一并进行优化, 以进一步降低能源成本。在经济指标方面, 本文建立了成本预估模型来计算波浪能转化器的成本支出。

#### 3.2.1 模型建立

根据牛顿定律, 波浪能转化器的运动可以描述为方程 (17)。

$$ma(t) = F_{hs}(t) + F_e(t) + F_{pto}(t) + F_r(t) \quad (17)$$

$m$ : 质量

$F_{hs}(t)$ : 流体静力;

$F_e(t)$ : 波浪激励力;

$F_r(t)$ : 波浪辐射力;

$F_{pto}(t)$ : PTO 力;

$a(t)$ : 振荡加速度;

为了方便起见, 如果假定物体进行谐波运动, 方程也可以用从方程 (6) 到 (8) 解释过的复振幅来表示。因此, 方程 (17) 可以表示为

$$m\hat{a} = \hat{F}_{hs} + \hat{F}_r + \hat{F}_{pto} + \hat{F}_e \quad (18)$$

$$\hat{F}_{hs} = -S_{wl}\hat{x} \quad (19)$$

$$S_{wl} = \rho g A_w \quad (20)$$

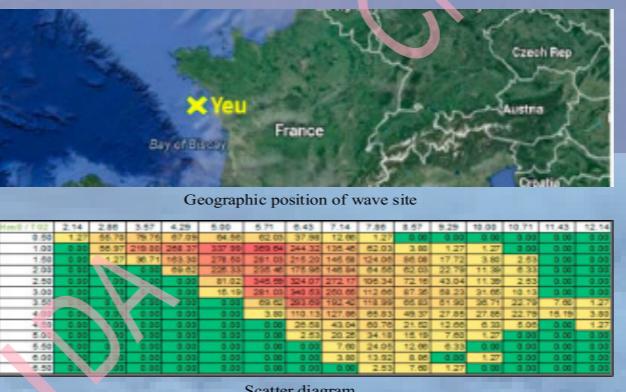


图 3 波浪位置的波况信息

其中  $S_{wl}$  是静水刚度,  $\hat{x}$  为浮标位移的复振幅,  $A_w$  表示物体的吃水截面。

波浪辐射力的计算公式如下:

$$\hat{F}_r = -B_r(\omega)\hat{u} - M_r(\omega)\hat{a} \quad (21)$$

$B_r(\omega)$  和  $M_r(\omega)$  为浮标的水动力阻尼和附加质量;  $\hat{u}$  是浮标速度的复振幅。

本文采用线性 PTO 模型对 PTO 系统进行了模拟, 由此可得

$$\hat{F}_{pto} = -\hat{u}B_{pto} - \hat{x}K_{pto} \quad (22)$$

其中  $B_{pto}$  和  $K_{pto}$  是 PTO 阻尼系数和 PTO 刚度系数。

接下来, 本文引入机械阻抗以简化推导。机械阻抗被定义为测量结构在受到谐波力作用时抵抗运动的程度。机械阻抗由两部分组成。实部称为机械阻尼, 虚部称为机械阻抗。为了方便起见, 浮标的固有机械阻抗和 PTO 阻抗可以表示如下:

$$Z_i(\omega) = R_i(\omega) + iX_i(\omega) \quad (23)$$

$$R_i(\omega) = B_r(\omega) \quad (24)$$

$$X_i(\omega) = \omega[m + M_r(\omega)] - \frac{S_{wl}}{\omega} \quad (25)$$

其中  $Z_i(\omega)$  是升沉浮子的固有阻抗,  $R_i(\omega)$  和  $X_i(\omega)$  分别是固有阻尼和固有阻抗。同样, PTO 阻抗可以给出如下:

$$Z_{pto}(\omega) = R_{pto}(\omega) + iX_{pto}(\omega) \quad (26)$$

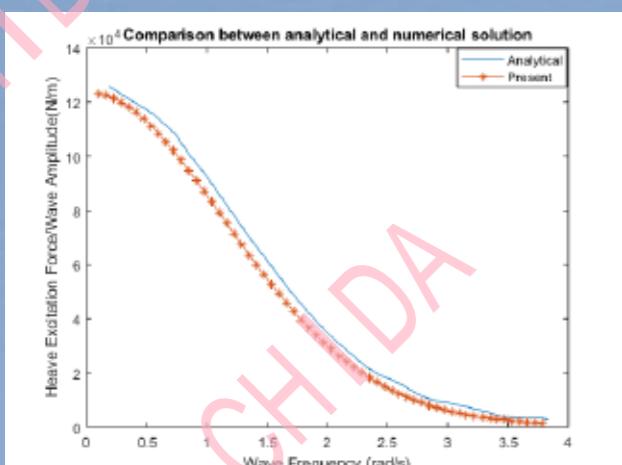
$$R_{pto}(\omega) = B_{pto} \quad (27)$$

$$X_{pto}(\omega) = -\frac{K_{pto}(\omega)}{\omega} \quad (28)$$

其中  $Z_{pto}(\omega)$  是 PTO 阻抗,  $R_{pto}(\omega)$  与  $X_{pto}(\omega)$  分别是 PTO 阻尼和阻抗系数。所以方程 (18) 可表示

$$[Z_i(\omega) + Z_{pto}(\omega)]\hat{u} = \hat{F}_e \quad (29)$$

本文利用边界元软件 Nemoch<sup>[15]</sup> 计算波浪能转化器浮子的水动力系数, 包括  $M_r(\omega)$  (附加质量)、 $R_r(\omega)$  (辐射阻尼) 和  $f_e(\omega)$  (激励力系数)。其中,  $f_e(\omega)$  定义为每个单位波高下的激励力。此外, 波浪能转化器的平均密度假定为水密度的一半 ( $1025\text{kg/m}^3$ ), 因此可以计算出每个装置的质量。然后通过求解动力学运动方程 (29), 可以求出速度的复振幅。本文所求的数值解和解析解<sup>[16]</sup>进行了对比, 如图 4.a 所示。图 4.b 显示了不同尺寸下波浪能转化器的 RAOs (响应幅度), 其中也可以观察到不同尺寸下波浪能转化器的固有频率。



(a) 模拟结果验证

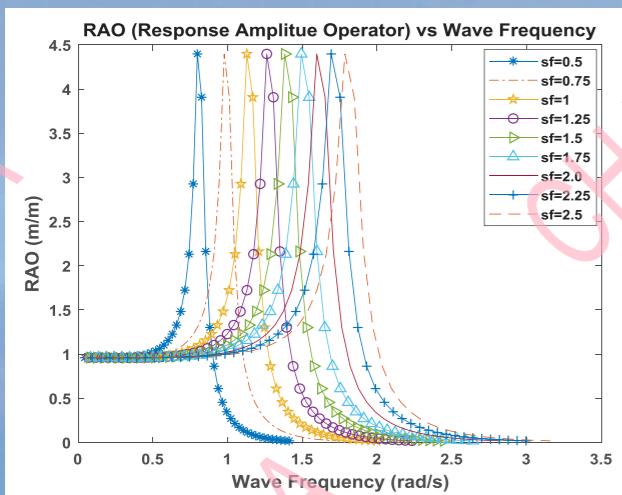


图 4 模型验证以及响应

在波浪能转化器系统中, 时均功率表示为

$$P_c = \frac{1}{2} R_{pto} |\hat{u}|^2 \quad (30)$$

其中  $T$  是波动周期,  $\hat{u}^*$  是  $\hat{u}$  的共轭复数。基于方程(29), 速度的振幅可以表示为

$$|\hat{u}| = \frac{|\hat{F}_e|}{|Z_i(\omega) + Z_{pto}(\omega)|} \quad (31)$$

因此, 波浪能装置的吸收功率可以改写为

$$P_c = \frac{1}{2} R_{pto} |\hat{u}|^2 = \frac{R_{pto} |\hat{F}_e|^2}{2|Z_i(\omega) + Z_{pto}(\omega)|^2} \quad (32)$$

为了研究 PTO 控制策略的影响, 本文分别将反应控制和被动控制作为波浪能转化器中 PTO 系统的控制策略。在反应控制中, PTO 系统的刚度和阻尼系数都可以进行调整以适应变化的海况。但在被动控制中, 只有 PTO 系统的阻

尼系数可以进行调整。在这项工作中, 这两种控制策略都是在频域模型中实现的。

#### a) 反应控制:

在最优反应控制中, 浮标的电抗应该被 PTO 阻抗抵消。所以 PTO 的阻抗应为

$$X_{pto}(\omega) = -X_i(\omega) \quad (33)$$

在反应控制中, 最佳 PTO 阻尼应等于每个波频的辐射阻尼<sup>[13]</sup>, 即

$$R_{pto,opt}(\omega) = R_r(\omega) \quad (34)$$

然而, 在实践中, 由于机械保护, 浮标的运动幅度必然受到限制。如果运动约束发挥作用, 最佳 PTO 阻尼必须增加, 以约束运动幅度和速度幅度。当浮标的运动幅度接近  $|\hat{u}_m|$  时, 最佳 PTO 阻尼系数  $R'_{pto,opt}$  可以表示为方程(35)。

$$R'_{pto,opt}(\omega) = \frac{|\hat{F}_e|}{|\hat{u}_m|} - R_i(\omega) \quad (35)$$

当使用无功控制时, 在规则波下不同 sf (比例因子) 的波浪能转化器的功率性能如图 5 所示。

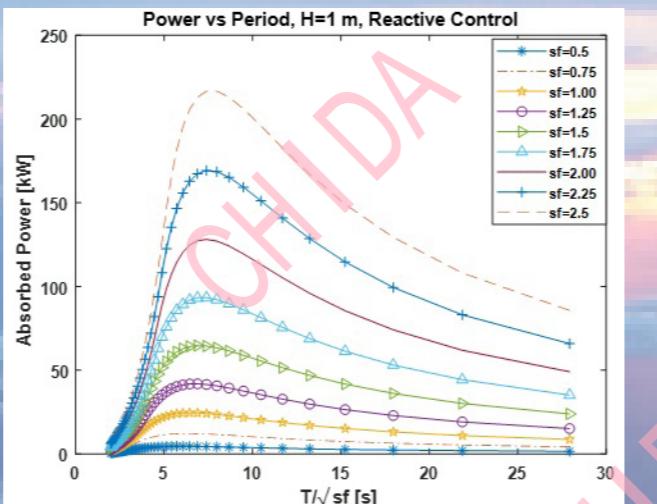


图 5 波浪能转化器在反应控制中的功率性能

#### b) 被动控制:

在被动控制中, PTO 被假定为一个机械阻力负载, 即  $R_{pto}$  等于  $Z_{pto}$ , 因此最佳 PTO 阻尼系数可以表示为

$$R_{pto,opt}(\omega) = \sqrt{R_i(\omega)^2 + X_i(\omega)^2} \quad (36)$$

同样, 由于运动的限制, 在任何波浪条件下, 速度振幅不应超过速度约束。当  $|\hat{u}| > |\hat{u}_m|$ , PTO 阻尼系数至少

应该提高到:

$$R'_{pto,opt}(\omega) = \sqrt{\left(\frac{|\hat{F}_e|}{|\hat{u}_m|}\right)^2 - X_i(\omega)^2} - R_i(\omega) \quad (37)$$

在本文中, PTO 系数针对每个海况都进行了优化。在确定了 PTO 阻尼系数后, 被动控制中各波形条件下波浪能转化器的相应转换功率可由方程(30)计算出。图 6 显示波浪能转化器在规则波及被动控制条件下的功率性能。

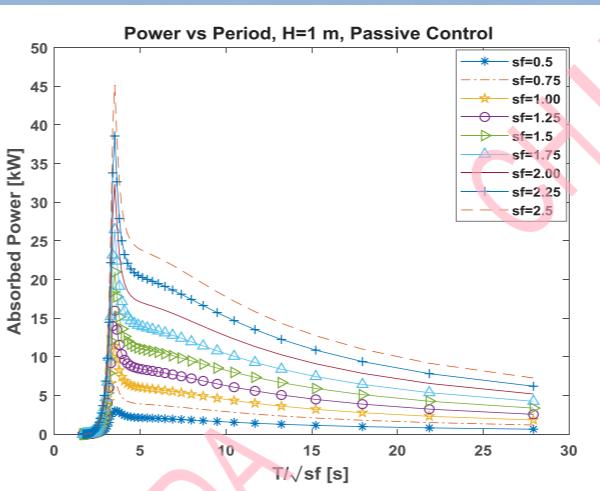


图 6 被动控制中波浪能转化器的功率性能

上述频域分析均基于规则波况展开, 但实际海况条件往往是多变的和复杂的。因此本文采用 JONSWAP 谱和峰值因子为 3.3 的不规则波来表示不规则波, 并基于规则波叠加原理对不规则波条件下的功率性能进行了计算<sup>[17]</sup>。同时, 本文中反应控制和被动控制中的 PTO 参数均以基于波浪周期和波高分别对应于不规则波中峰值周期  $H_s/\sqrt{2}$  的规则波条件进行选择<sup>[18]</sup>。此外, 本文中的 PTO 参数针对每个海况逐一进行了优化。在确定了 PTO 参数之后, 我们即可计算出每个波况条件下波浪能转化器的吸收功率。此外, 本文中 PTO 的能量转换效率假设为 70%<sup>[20]</sup>。因此, 通过以上计算, 每个波况条件下的功率输出即可被获得, 并形成一个称为功率矩阵的表格。值得注意的是, 在恶劣的波浪条件下, 为保护设备, 波浪能转化器必须停止工作。因此, 波浪能转化器有最大操作波高的限制。在本文中, 我们参考于一个类似的原型装置 WaveStar, 它是一个半球形的升沉装置。WaveStar 的最大操作波高为 6 米, WaveStar 的直径为 5 米<sup>[21]</sup>。在本文中, 本文原始波浪能转化器的直

径 (比例因子 = 1) 是 4 米。因此, 在这种情况下, 此原始波浪能转化器的最大操作波高被保守估计为 4 米。另外, 在波浪能转化器缩放过程中, 缩放后的波浪能转化器的最大操作波高与比例因子一起缩放, 如方程(4)所示。在功率矩阵中, 对应于超过最大操作波高的波高的功率值为 0。由于必要的操作和维护, 波浪能转化器的可用性被设定为 90%<sup>[22]</sup>。在求得功率矩阵后, 装置的年度能源产量可通过可用性, 散点图和功率矩阵的乘积来进行计算。

#### 3.2.2 PTO 额定功率优化

在波浪能转化器的尺寸优化的同时, 本文也对 PTO 的额定功率进行了优化, 以进一步提高波浪能装置的可行性。PTO 的支出约占波浪能转化器总支出的 20%<sup>[22]</sup>。如果额定功率过高, 对于波浪能系统来说是一种浪费, 但是如果额定功率过低, 也会浪费装置的尺寸和波浪资源。因此, 在优化波浪能转化器尺寸的过程中, 合适的标定 PTO 的额定功率就显得尤为重要。在本文所提出的合理评价方法中, PTO 额定功率标定对装置经济性的影响将被考虑在内。本文采用用全局搜索的方式来寻找各装置尺寸下 PTO 的最佳额定功率, 以达到最小化波浪能转化器的能源成本的目的。

#### 3.2.3 成本模型的描述

为了评估波浪能转化器的技术经济表现, 一个重要的工作就是预估波浪能转化器的成本。因此, 本文建立了经济模拟用于估算不同尺寸下波浪能转换装置的成本。

表 1 波浪能转化器成本支出的百分比<sup>[22]</sup>

成本支出	类别	LCOE 的百分比
与质量有关的成本	结构	28%~32% (平均 30%)
	基础及系泊设施	6~24% (平均 15%)
	安装	6%~10% (平均 8%)
与电力有关的成本	PTO	18%~20% (平均 19%)
	连接	5% 至 8% (平均 6.5%)

参照<sup>[22]</sup>, 本文将钢材价格选为 1.6 英镑 / 千克, 并假设所有波浪能转化器的结构成本来自购买钢材的费用。本文中, 欧元对英镑的汇率设定为 0.87。据<sup>[22]</sup>报道, 液压 PTO、

空气涡轮 PTO、直线发电机和机械直驱 PTO 的价格分别为 800 欧元 / 千瓦、1000 欧元 / 千瓦、600 欧元 / 千瓦和 1400 欧元 / 千瓦。在本文中, 950 欧元 / 千瓦的平均值被用来计算 PTO 的成本。所有的成本计算都是基于 2017 年欧元的实际购买力进行计算 (公布年份<sup>[22]</sup>)。根据本文表 1, “基础和系泊”和“安装”成本平均分别占成本支出的 15% 和 8%。相比之下, 结构成本平均占成本支出的 30%。因此, 与质量相关的成本可以计算如下:

$$Cost_{mass} = \left( \frac{15\%}{30\%} + \frac{8\%}{30\%} + 1 \right) Cost_{structure} (\text{Euros}) \quad (38)$$

“连接”和“PTO”的成本平均分别占成本支出的 6.5% 和 19%。同样, 与电力相关的成本可以计算如下:

$$Cost_{power} = \left( \frac{6.5\%}{19\%} + 1 \right) Cost_{PTO} (\text{Euros}) \quad (39)$$

因此, 总成本支出可通过方程 (40) 计算的。

$$Cost(CAPEX) = Cost_{mass} + Cost_{power} \quad (40)$$

## 4 结果和讨论

本文将给出研究成果以及相关讨论。首先, 本文针对该合理评估方法的两个主要部分, 浮子的尺寸优化和 PTO 额定功率的优化, 对其技术经济性能的影响分别进行了探讨。其次, 本文给出了通过该合理评估方法获得的波浪能转换器的最优技术经济性能。最后, 本文对 Budal 图, 比例法和该合理评价法的优化结果进行了比较。

### 4.1 尺寸优化对波浪能转换器技术经济性能的影响

结果表明, 通过尺寸优化, 波浪能转换器的技术经济性能得到了显著提高。图 7 展示了波浪能转换器在反应控制和被动控制下的技术经济性能。首先, 可以观察到, 波浪能转换器的能源成本随着装置尺寸呈现出先下降后上升的趋势。对于应用反应控制的波浪能转换器, 在其尺寸的缩放因子为 0.5 时, 其能源成本约为 1.5 欧元 / 千瓦时。当尺寸的缩放因子增加到 0.75 时, 可以获得 1 欧元 / 千瓦时的能源成本。然而, 能源成本随着比例因子的增加而增加, 其最多增加到 2 欧元 / 千瓦时。在这种情况下, 当比例系数范围从 0.5 到 2.5, 能源成本最大可降低 100%。因此可以得出, 尺寸优化可以显著提高波浪能转换器的技术经济性能。

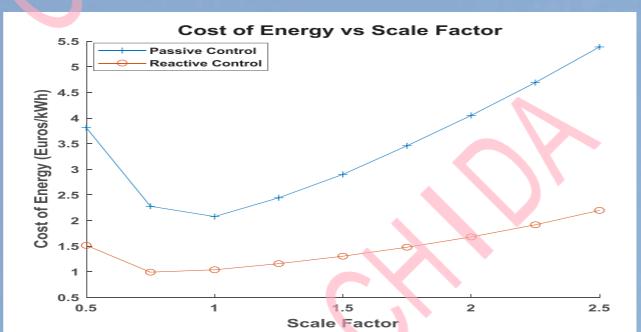


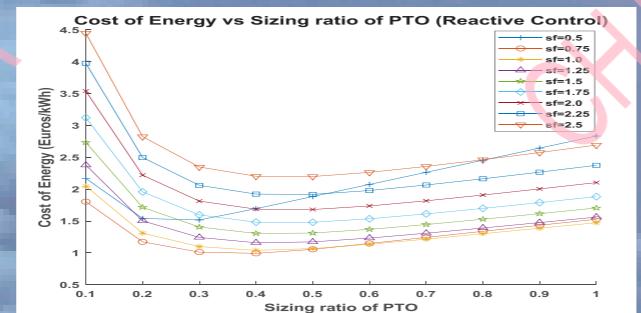
图 7 波浪能转换器浮子尺寸优化对能源成本的影响

当波浪能转换器中使用被动控制时, 其技术经济指标可以观察到与采用反应控制时相似的趋势。但应用被动控制的波浪能转换器的能源成本远高于使用反应控制的转换器。在波浪能转换器的下, 使用被动控制的波浪能转换器的能量成本价值甚至是反应控制的两倍以上。可以看出, 控制策略对波浪能转换器的技术经济表现有相当大的影响。

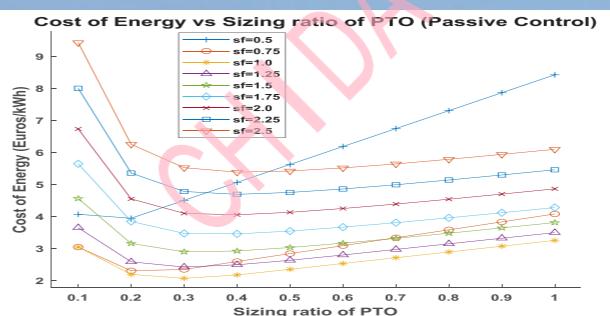
同时, 波浪能转换器的控制策略对其尺寸优化的结果有一定的影响。在反应控制中, 波浪能转换器最优尺寸的缩放因子约为 0.75, 然而在被动控制, 波浪能转换器的最佳尺寸缩放因子为 1。

### 4.2 PTO 功率优化对波浪能转换器技术经济性能的影响

PTO 额定功率是可被视作波浪能转换器输出功率的上限<sup>[3]</sup>。换句话说, 功率矩阵的最大值不能超过其 PTO 的额定功率。更高的 PTO 额定功率标定势必导致更大的 PTO 系统, 更大的冲程和更高的额定发电机。然而, 从技术经济性能的角度来看, 没有必要装备一个足够大的 PTO 来吸收尽可能多的能量。因此, 将 PTO 的额定功率降低到适当的水平, 在成本和产量之间进行一定权衡, 更有利于进一步优化波浪能转换器的技术经济指标。



(a) 反应控制



(b) 被动控制

### 图 8 PTO 额定功率优化对能源成本的影响

为了方便起见, 本文采用了“PTO 的分级比”的概念, 我们将其定义为所取功率与在不进行 PTO 优化的情况下, 该尺寸下的装置所需的最大 PTO 额定功率到最大功率值的比值。为了最小化能源成本, 本文对 PTO 的最佳分级比在 0.1 到 1 之间进行全局搜索, 其间隔取为 0.1。此外, 当波浪能转换器的吸收功率接近额定功率时, PTO 系统将无法吸收更多的能量而对自身进行保护。为了实现这一功能, 必须为 PTO 设计一个有效的缓冲系统。同时, PTO 的额定功率的改变也将影响发电机的整体效率<sup>[23]</sup>。但是, 为了研究 PTO 额定功率优化对波浪能转换器发电系统技术经济性能的影响, 本文假设 PTO 系统在额定功率优化的过程中不会造成额外的成本增加和效率变化。

为了便于理解, 本文将 PTO 在各浮子尺寸下的额定功率分级比称为“部分最优分级比”, 将波浪能转换器在最佳浮子尺寸下的“部分最优分级比”被称为“全局最优分级比”。图 8 显示了 PTO 额定功率优化对波浪能转换器技术经济性能的影响。结果表明, 通过适当缩小 PTO 的额定功率, 任何尺寸的波浪能转换器能源成本都可以得到一定程度的降低。举例来说, 当波浪能转换器的浮子的尺寸缩放因子为 2.5, 并采用反应控制时, PTO 分级比由 1 降至 0.4 能有助于将能源成本从 4.5 欧元 / 千瓦时降至 2.4 欧元 / 千瓦时。此外, 值得注意的是, PTO 额定功率的优化可以在一定程度上影响波浪能转换器浮子的尺寸选择。在使用反应控制时, 较高的 PTO 分级比使得 sf=2.5 时的波浪能转换器比 sf=0.5 时的波浪能转换器更具竞争力。但当分级比降至 0.1 或 0.2 左右时, sf=0.5 时波浪能转换器的能源成本明显低于 sf=2.5 时。同样, 在被动控制情况下, PTO

额定功率的适当缩减也会改变在波浪能转换器在 sf=0.5、sf=2.0、sf=2.25 和 sf=2.5 时其技术经济性能优先级。即使如此, 我们可以发现, 如果采用相同的 PTO 分级比, PTO 的额定功率优化并未对波浪能转换器的最佳尺寸的选择产生显著的影响。但应该强调的是, 此结论基于本文的所用的波浪能转换器和波浪位置得出, 并不一定具有广泛地适用性。类似的技术经济分析应该针对不同的波浪位置和装置分别进行开展。

### 4.3 不同尺寸优化方法的比较

在本节中, 本文使用了 Budal 图和比例定律对选定的波浪位置进行尺寸优化, 并与合理评价方法下尺寸优化的结果进行了比较。此外, 为了着重强调比较结果, 本节只考虑 PTO 反应控制。

#### a) Budal 图

在文献<sup>[9]</sup>中, 其假设波浪能转换器如能满负荷运作的工作时间超过每年三分之一的时间, 波浪能转换器便会具有商业可行性, 并可相应计算出合适的波浪能转换器尺寸。为了研究工作时间假设对其尺寸优化的影响, 本文考虑了三个不同的“满负荷工作时间”阈值, 即 1/3, 1/2 和 2/3 的全年工作时间。表 2 显示了基于不同阈值下, 针对 Yeu 岛的波浪能装置尺寸大小的选择, 并根据<sup>[9]</sup>提供的方法计算相应的 PTO 额定功率。在通过 Budal 图确定了浮子大小和 PTO 容量选择之后, 通过如上所述的频域模拟计算相应波浪能转换器的功率矩阵。

表 2 “波功率阈值”,  
设计波况及 Budal 图选择的优化体积

满负荷工作时间	波浪功率阈值	TD	HD (m)	V (m <sup>3</sup> )
1/3 年度	30.4 kW	7.8 s	2.0	224.1
1/2 年度	16.9 kW	7.8 s	1.5	167.1
2/3 年度	8.6 kW	7.8 s	1.1	119.2

#### b) 比例定律

利用比例定律可以计算不同尺寸下波浪能转换器的功率矩阵。在本文中, 使用尺寸缩放因子因子为 1 的波浪能转换器的功率矩阵作为原始功率矩阵。当功率矩阵被缩放时, 缩放后的功率矩阵可能出现于与波况图不匹配的情况。

为了处理这个问题，在本文使用线性外推法来计算所需海况下的功率性能<sup>[7]</sup>。

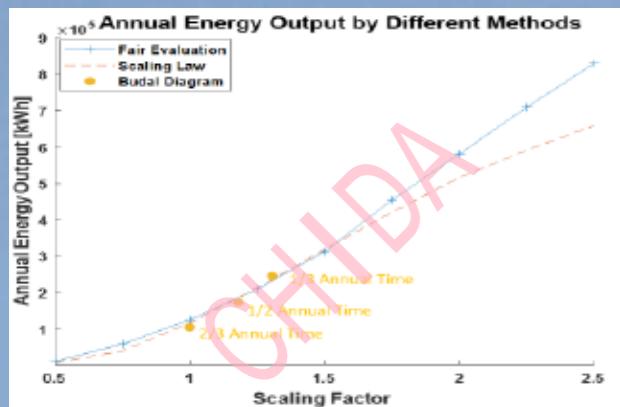


图9 基于不同方法计算的不同尺寸下波浪能转换器年发电量

图9显示了用不同方法得到的波浪能转换器的年发电量。首先，从Budal图中可以看出，浮子最有尺寸的选择对“工作时间假设”有着强烈的依赖。随着设计工作时间的变化，Budal图的适宜尺寸范围在 $sf = 1$ 到 $sf = 1.5$ 之间。其次，当 $sf=1$ 左右时，比例定律和合理评估方法在年发电量上的测算值有很好的一致性。然而，随着尺寸缩放因子的大幅增加，此差异趋向于明显。一方面，外推法带来的偏差会随着比例因子的增加而增加。另一方面，合理评价方法中的PTO额定功率总是经过优化的，但在使用比例定律时，PTO的额定功率标定强烈依赖于原始尺寸的波浪能装置的功率矩阵。

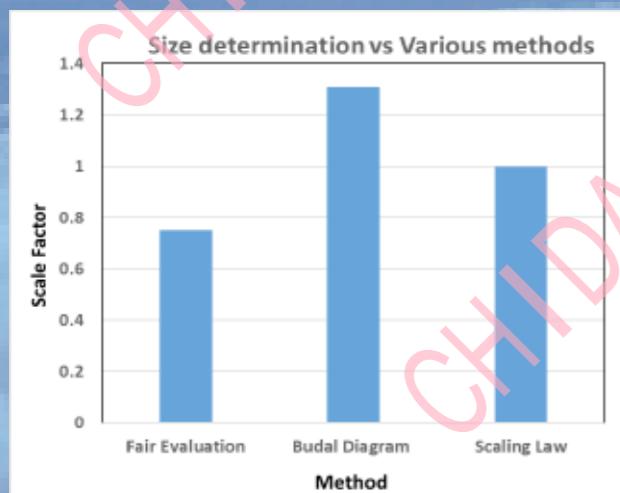


图10 通过不同方法获得的波浪能转化器的优化尺寸

图10显示了基于这三种不同方法得到的合适的波浪能装置浮子尺寸。可以看出，Budal图可以大致估计出特定波浪位置下浮子的最优尺寸，但是其给出的结果与合理评价方法给出的最优浮子尺寸还是有一定的差距。具体来说，Budal图选择的波浪能转化器的最优尺寸缩放因子约为1.3，而通过合理评估法得出的波浪能转化器浮子的最优缩放因子为0.75。此差异来源的主要原因在于“全功率工作时间假设”并不能一定保证经济竞争力，如降低能源成本。此外，在使用Budal图进行尺寸优化时，PTO控制策略的影响也无法被考虑在内。但作为一种高效的理论方法，Budal图可以大致给出不同波浪位置下的浮子最优尺寸的范围。与Budal图相比，比例定律在估计波浪能转化器浮子最优尺寸方面展现了更优的能力。然而，根据比例定律中获得最优浮子尺寸仍然与根据合理评估法得出的最优浮子尺寸展现了一定的差异。此差异可从两个方面来解释：1) 外推法的运用造成的波浪能转化器的功率性能上预估上的不准确性；2) 运用比例定律时难以考虑PTO额定功率的优化。尽管这些因素可能会影响合适的尺寸选择，但根据本文的结果来看，比例定律在浮子尺寸优化方面展现了较好的能力。

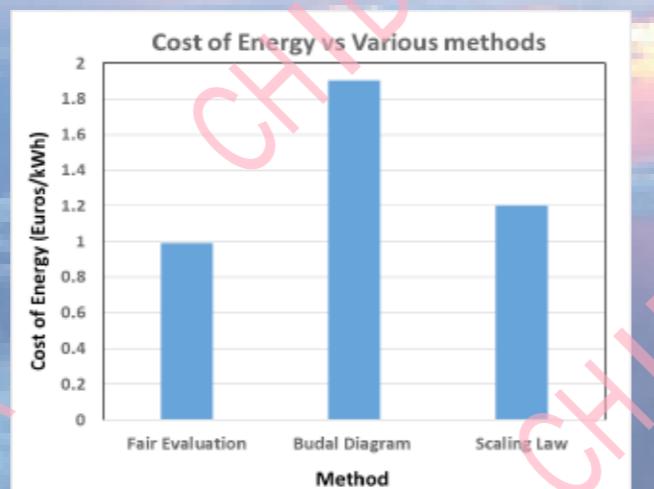


图11 通过不同方法对波浪能转化器进行尺寸优化后的的能量成本

根据不同尺寸优化方法得出的最优尺寸下的波浪能装置的能源成本如图11所示。正如预期的那样，基于合理评估方法下的波浪能转化器的技术经济性能优于其他两种方

法。基于Budal图进行尺寸优化的波浪能转化器的能源成本最高，几乎是合理评估法下的两倍。通过比例法优化的波浪能转化器的能源成本略高于合理评估法下的装置。因此，与合理评估法相比，利用比例法或Budal图对波浪能转化器进行尺寸优化时，其技术经济潜力往往会被低估。

## 5 结论

本文基于频域模型，建立了一种针对波浪能转化装置的合理评价方法。本文运用该方法针对一点吸收式波浪能转化装置进行了技术经济评价。所得出的结论如下：

首先，这种公平的评价方法有助于提高波浪能转化器的技术经济效益。其次，从技术经济效益的角度来看，波浪能转化器尺寸的优化依赖于PTO的控制策略。第三，通过降低PTO的额定功率，波浪能转化器的技术经济性能得以显著提高。同时，在本文的研究情境下，PTO额定功率的优化并未对浮子的尺寸优化产生明显影响。最后，与本文构建的合理评价方法相比，Budal图和比例法波浪能转化器的最优尺寸的预测体现出一定的偏差。因此，在使用比例法和Budal图对波浪能转化器进行尺寸优化的前提下，波浪能转化器的技术经济性能将会被低估。

## 参考文献：

- [1] A. De Andrés, A. Macgillivray, R. Guanche, H. Jeffrey, Factors affecting LCOE of Ocean energy technologies: a study of technology and deployment attractiveness, 5th Int. Conf. Ocean Energy. (2014) 1 – 11.
- [2] A. Uihlein, D. Magagna, Wave and tidal current energy - A review of the current state of research beyond technology, Renew. Sustain. Energy Rev. (2016).
- [3] A. Babarit, J. Hals, M.J. Muliawan, A. Kurniawan, T. Moan, J. Krokstad, Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters, Renew. Energy. 41 (2012) 44 – 63.
- [4] A. Pecher, Handbook of Ocean Wave Energy, 2017.
- [5] G. Chang, C.A. Jones, J.D. Roberts, V.S. Neary, A comprehensive evaluation of factors affecting the levelized cost of wave energy conversion projects, Renew. Energy. 127 (2018) 344 – 354.
- [6] A. Babarit, A database of capture width ratio of wave energy converters, Renew. Energy. 80 (2015) 610 – 628.
- [7] A. de Andres, J. Maillet, J.H. Todalsaug, P. Möller, D. Bould, H. Jeffrey, Techno-economic related metrics for a wave energy converters feasibility assessment, Sustain. 8 (2016).
- [8] A. de Andres, R. Guanche, C. Vidal, I.J. Losada, Adaptability of a generic wave energy converter to different climate conditions, Renew. Energy. 78 (2015) 322 – 333.
- [9] J. Falnes, J. Hals, Heaving buoys, point absorbers and arrays, Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 370 (2012) 246 – 277.
- [10] M. O' Connor, T. Lewis, G. Dalton, Techno-economic performance of the Pelamis P1 and Wavestar at different ratings and various locations in Europe, Renew. Energy. 50 (2013) 889 – 900.
- [11] G. Payne, Guidance for the experimental tank testing of wave energy converters, SuperGen Mar. (2008).
- [12] J.M.J. Journée, W.W. Mossie, R.H.M. Huijsmans, OFFSHORE HYDROMECHANICS Third Edition (2015).
- [13] Johannes Falnes, Ocean waves and Oscillating systems, 2003.
- [14] J.H. Todalsaug, Practical limits to the power that can be captured from ocean waves by oscillating bodies, 4 (2013) 70 – 81.
- [15] M. Penalba, T. Kelly, J. V Ringwood, Using NEMOH

## 作者简介:

谭戬, 荷兰代尔夫特理工大学, 博士研究生。

Henk Polinder, 荷兰代尔夫特理工大学, 副教授。

Peter Wellens, 荷兰代尔夫特理工大学, 助理教授。

Sape Miedema, 荷兰代尔夫特理工大学, 海洋与疏浚工程系主任。

- for Modelling Wave Energy Converters : A Comparative Study with WAMIT, 12th Eur. Wave Tidal Energy Conf. (2017) 10.
- [16] W. Finnegan, M. Meere, J. Goggins, The wave excitation forces on a truncated vertical cylinder in water of infinite depth, 2013.
- [17] J. Pastor, Y. Liu, Frequency and time domain modeling and power output for a heaving point absorber wave energy converter, Int. J. Energy Environ. Eng. 5 (2014)
- [18] E. Tedeschi, M. Carraro, M. Molinas, P. Mattavelli, Effect of control strategies and power take-off efficiency on the power capture from sea waves, IEEE Trans. Energy Convers. 26 (2011) 1088 – 1098.
- [19] A. Babarit, A database of capture width ratio of wave energy converters, Renew. Energy. 80 (2015) 610 – 628.
- [20] J.F. Chozas, J.P. Kofoed, N.E. Helstrup, The COE Calculation Tool for Wave Energy Converters (Version 1.6, April 2014), (2014).
- [21] M.M. Kramer, L. Marquis, P. Frigaard, Performance Evaluation of the Wavestar Prototype, Proc. 9th Eur. Wave Tidal Conf. (2011) 5 – 9.
- [22] A. De Andres, E. Medina-Lopez, D. Crooks, O. Roberts, H. Jeffrey, On the reversed LCOE calculation: Design constraints for wave energy commercialization, Int. J. Mar. Energy. 18 (2017) 88 – 108.
- [23] P. Tokat, T. Thiringer, Sizing of IPM Generator for a Single Point Absorber Type Wave Energy Converter, IEEE Trans. Energy Convers. 33 (2018) 10 – 19.

## 潮汐发电涡轮机技术回顾: 现在与未来

## A Review of Tidal Current Turbine Technology: Present and Future

Faisal Wani, Henk Polinder

**摘要:** 潮汐能是可预测的, 因此从电网集成的角度来看, 潮汐能极具吸引力。近年来, 潮汐涡轮机的增长已经超越了传统的潮差技术。这主要是潮差系统的高成本和环境影响以及原理上与潮汐涡轮机相似的风力涡轮机的成功造成的。本文简要介绍了潮汐涡轮机的可用和建议的解决方案。该理念是概述潮汐能转换系统中涉及的不同类型的技术, 而不是对市场中不同的解决方案进行总结。最后, 本文着重介绍了潮汐涡轮机行业目前面临的主要难题, 并指出了该行业当下的趋势。

**关键词:** 先进潮汐涡轮机; 轮缘驱动式和吊舱式; 水下发电机; 潮汐涡轮机的安装; 转换器的浮式平台

## Abstract

Tidal energy is predictable, which makes it highly attractive from the grid integration point of view. Recent years have seen the growth of the tidal current turbines over the traditional tidal range technology. This is primarily because of the success of the wind turbines, which are in principle similar to the tidal current turbines, and the high cost and environmental impact of the tidal range systems. This paper provides a brief review of the available and proposed solutions for the tidal current turbines. The idea is to give an overview of the different types of technologies involved in the tidal current energy conversion systems, rather than giving a summary of the different market solutions. The paper concludes by highlighting the major challenges currently faced by the tidal current turbine industry, and an indication of the present trends in the industry.

**Key words:** state-of-the-art tidal current turbines, rim-driven and pod configurations, flooded generators, mounting of tidal turbines, floating platform for converters.

## 1 导言

燃烧化石燃料对气候的不利影响一直是可再生能源发展的主要动力。对于主要的可再生能源(例如太阳能和风能), 人们经常提到的主要缺点是它们缺乏可预测性, 而这与它们成功实现电网整合密切相关。尽管当前阶段相对昂贵, 但潮汐能的可预测性使其具有很强的吸引力。

根据 Zhou 等学者的估算, 全球潮流的潜在能量约为 75 GW, 其中约有 11 GW 集中在欧洲<sup>[1]</sup>。另一项估算表明, 全球潜在的潮汐能约为 120 GW<sup>[2]</sup>。欧洲的潮汐资源主要位于英国, 法国, 爱尔兰和挪威<sup>[3]</sup>。

尽管从海洋中收集能量的潜力很大, 但相对而言其开发仍显不足。由于海洋环境带来的风险, 获取大量资金以推动该领域增长的难题一直是其主要瓶颈。设备的风险主要来自于极端天气条件, 腐蚀和结垢。此外, 在海洋中部署大型能量转换装置可能会对海洋生态系统产生不利影响。因此, 需要花费大量时间来探索解决方案, 它不仅从长期来看要具有成本效益, 而且要对海洋生态的影响最小。

潮汐能可以通过两种方式加以利用, 即潮差和潮流涡轮技术。前者类似于水力发电, 因为它利用了存储在合适水头中水的势能。另一方面, 后者类似于风力涡轮机技术,

因为它将潮汐流中的动能转换为电能。

尽管首先大规模开发的是潮差技术，但它已落后于潮汐涡轮机技术了。潮差技术的主要缺点是其高昂的投资成本以及可能对环境造成的不利影响。与潮差技术相比，目前的潮汐涡轮机技术处于较低的技术成熟度（TRL）水平。但是，由于能源成本降低的可能性以及对当地生物多样性的影响极小，因此潮汐涡轮机很可能是潮汐产业的未来。潮汐涡轮机行业的大多数项目在 21 世纪初期提出。这些项目中有部分是由 2001 年英国贸易和工业部（DTI）支持所成型，英国也因此成为了世界上该领域的引领者<sup>[4]</sup>。海上风电行业的成功极大地推动了人们向潮汐涡轮机技术迈进的意愿。

## 2 潮汐涡轮机

最常见的潮汐涡轮机类型是水平轴潮汐涡轮机。除此之外，还有垂直轴潮汐涡轮机和其他设计，包括基于往复运动的系统（例如水翼艇），螺旋状装置以及潮汐风筝等等。图 1 为水平轴潮汐涡轮机的示例。

根据 Corsatae 和 Magagna<sup>[6]</sup> 的研究，潮汐产业研发的投资中有 76% 集中在水平轴潮汐涡轮机（HATT）上，而有大约 2% 用于垂直轴潮汐涡轮机上。在更为恶劣的海洋条件下，HATT 也被证明了不仅更可靠而且还能留存下来<sup>[3]</sup>。出于这些原因，此后我们将仅关注水平轴潮汐涡轮机。

## 3 水平轴潮汐涡轮机的分类

本节介绍了水平轴潮流涡轮机能量采集系统使用的不同技术，重点在于根据其基本组件的技术差异对它们进行分类，例如发电机的类型，涡轮机的安装类型以及转换器的布置。这样做是为了清楚地识别不同制造商之间的异同。以下各小节介绍了每个分类系统。

### 3.1 吊舱式和轮缘驱动式

基于发电机相对于涡轮机的布置，潮汐涡轮机分为两种类型：吊舱式和轮缘驱动式。

在吊舱式中，发电机被水平放置在轴涡轮叶片的后方。图 1 为吊舱式潮汐涡轮机的示例。除其他因素外，对发电机的外径进行限制，防止叶片发生阻塞<sup>[7]</sup>。使用吊舱式涡轮机的制造商包括 Nova Innovation, Atlantis Resources, Andritz Hydro Hammerfest, Tocardo, Schottel 等。



图 1 Nova Innovation 公司的 M100。图片来源<sup>[5]</sup>

在轮缘驱动式中，发电机被放置在围绕涡轮叶片的护罩中。图 2 为轮缘驱动发电机的示例。在此，发电机的内部半径受到涡轮转子直径的限制。与吊舱式相比，轮缘式具有更高的水动力效率，在此情况下，机器体积会影响到穿过涡轮机的水流<sup>[9]</sup>。经济可靠的大直径轴承系统的设计是该设计的主要挑战之一。在主要的潮汐涡轮机制造商中，DCNS-OpenHydro 公司的 Open Center 涡轮机似乎是轮缘式涡轮机的唯一成功示例<sup>[10]</sup>。



图 2 DCNS-OpenHydro 公司的轮缘式发电机。图片来源<sup>[8]</sup>

在 1999 年至 2005 年间，Tocardo 公司对文丘里管轮缘驱动（环形）发电机和开放式转子两叶直驱吊舱发电机进行了测试和对比。根据发现的结果，他们得出了后者比前者更经济的结论<sup>[11]</sup>。



图 3 Tocardo 公司的 T2 涡轮机。图片来源<sup>[12]</sup>

### 3.2 叶轮数量

大多数吊舱式水平轴潮汐涡轮机使用双叶片或三叶片涡轮机。根据文献<sup>[3]</sup>，超过 50% 的水平轴潮汐涡轮机中使用三叶片涡轮机，只有 25% 使用 2 个叶片的涡轮机，此外还有使用 3 个以上叶片的设计。轮缘驱动的涡轮机的叶片通常比吊舱式涡轮更多。

双叶涡轮机的优势包括低成本，易于安装和更高的叶片梢速比。更高的叶片梢速比有助于减小变速箱或发电机的尺寸。与三叶涡轮机相比，两叶涡轮的缺点包括由于较高的转速而导致的尾流和气穴问题增加，并且塔架效应相对较高。图 3 所示的 Tocardo 公司的 T2 涡轮机是一个双叶片涡轮机的示例。在荷兰的 Eastern Scheldt 挡潮闸中已经安装了五台 T2 潮汐涡轮机<sup>[12]</sup>，并取得了令人鼓舞的成功。

三叶潮汐涡轮机在大型涡轮机中更为普遍。它们更受青睐是因为它们具有更高的流体动力学效率以及影响更小的塔架效应，而且由尾流和气穴而产生的问题也较少。不仅如此，该类涡轮机通常的切入速度还较低。此外，无论是从效率还是在稳定性方面来看，将叶片数量增至到超过 3 个收益也不会增加太多<sup>[13]</sup>。三叶涡轮机的示例是 Schottel 公司的 Instream 涡轮机，如图 4 所示。

叶片数量也对涡轮的  $C_p - \lambda$  特性有重要影响。更高的叶片数量可能会导致涡轮具有更尖锐的  $C_p$  曲线，从而具有更好的失速性能。另一方面，双叶涡轮机通常具有较平坦的  $C_p$  曲线，从而能够在较大范围的叶片梢速比下运行<sup>[15]</sup>。



图 4 Schottel 公司的 Instream 涡轮机。图片来源<sup>[14]</sup>

### 3.3 涡轮的安装

潮流涡轮机基本以四种拓扑结构安装<sup>[16]</sup>，描述如下：

1) 浮动拴系：Bluewater 公司与包括 Tocardo 公司和 Schottel 公司在内的其他合作伙伴合作，于 2015 年启用了 BlueTEC 浮式平台。涡轮机和发电机位于水下，并悬挂在平台底部，如图 5 所示。浮式平台系在海床上，可以轻易地系泊在岸上对该系统进行维修。该平台还装有电力电子变换器和其他关键设备，以便在维护期间可以轻松快速地进行访问。该平台仍在用来测试不同的涡轮机，并已连接到荷兰特塞尔的荷兰电网<sup>[18], [19]</sup>。

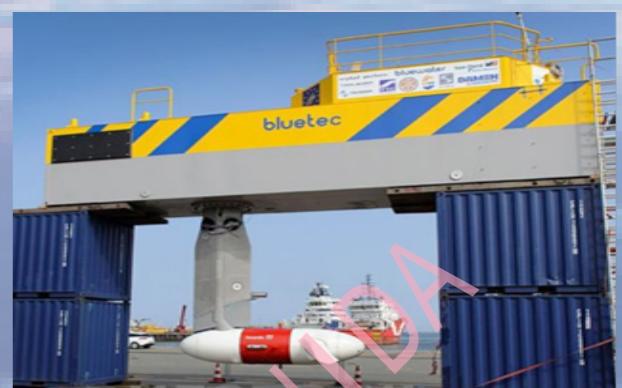
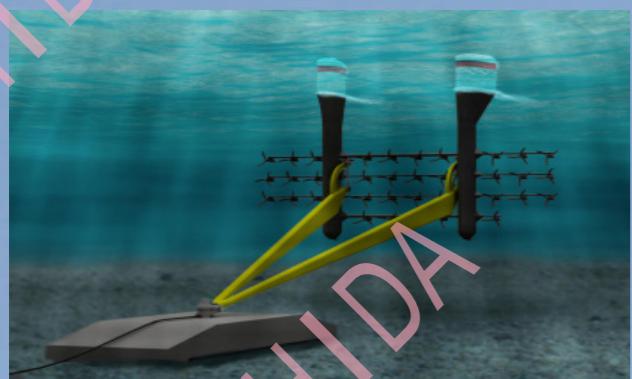


图 5 Bluewater 的 BlueTEC 平台。图片来源<sup>[17]</sup>

2) 水下拴系：半潜式系统的例子是图 6 中所示的 Schottel 公司的 Triton S 平台。Triton 系统可以具有多个横臂，每个横臂可以装配多个涡轮机，以实现冗余和高功率捕获。两个系臂通过基于重力的底座将 Triton 固定在海床上，此外还可以让 Triton 自适应水流动的方向。电力电子变换器装在浮式浮标上<sup>[14]</sup>。

图 6 Schottel 公司的 Triton S 平台。图片来源<sup>[14]</sup>

3) 海床底部安装: 安装在海床附近的涡轮机具有良好稳定性, 而且与在近海表面安装相比, 可以最大程度地减小湍流的影响。图 7 显示了 Atlantis Resources 公司的 AR 1500 型涡轮机, 该涡轮机安装在基于重力底座<sup>[20]</sup>支撑的支撑结构塔架上。其他例子包括 OpenHydro 公司的 Open center 和 Nova Innovation 公司的 M100 型涡轮机。这种基座不会深入到海床中, 因此不需要海底钻探。

图 7 Atlantis Resources 公司的 AR 1500 型涡轮机。图片来源<sup>[20]</sup>

4) 海底桩安装式: 潮汐涡轮机既可以直接安装在桩上, 也可以安装在横臂上, 横臂本身由桩基支撑。例如, 在 SeaGen 项目 (来自 Marine Current Turbines-Siemens) 上, 将两台 1 MW 的涡轮机安装在单桩基座的横臂上, 如图 8 所示<sup>[21]</sup>。

如图 8 所示, 支撑在桩基上半浸式的钢塔很容易将涡轮机从水中带出进行维护。这样就无需部署大型船舶进行维护。

如<sup>[22]</sup>中所述, 实践中还实现了对这些基本拓扑结构的不同改造。

图 8 SeaGen-S (MCT-Siemens) 涡轮机。图片来源<sup>[21]</sup>

### 3.4 固定螺距和可变螺距

对潮汐涡轮机的叶片进行调节以调整涡轮机的功率输出。在叶片无法调节的情况下, 通过失速调节可实现功率控制。然而, 这也导致了效率低于额定速度。近期的解决方法是使用速度辅助失速控制<sup>[23]</sup>。固定螺距系统的示例包括 Nova 公司的 M100 和 Schottel 公司的 Instream Turbine, 分别如图 1 和图 5 所示<sup>[24]</sup>。

另一方面, 通过调节叶片可使控制更主动、更理想 (就效率而言)。采用变桨控制会增加成本和出现故障的可能性, 但是对更高的额定功率它比固定变桨叶片更可取。如图 7 所示的 Atlantis Resources 公司的 AR1500 型潮汐涡轮机和 Andritz Hydro Hammerfest 采用的是变桨距控制<sup>[25]</sup>。

在 2012 年左右, Tocardo 公司开发并测试了双叶片的 T1 涡轮机。在此设计中, 退潮期间两个叶片将同时旋转 180° 进行逆流作业<sup>[11]</sup>。

### 3.5 偏航控制

偏航控制本质上是涡轮主轴的方向控制。通过改变涡轮轴的方向, 改变叶片的迎角, 从而改变叶片的功率系数和拖曳力系数。

由于潮汐涡轮机位于漏斗效应通常会增强潮汐速度的地方, 因此与风力涡轮机相比, 偏航控制的需求并不那么重要。但是由于潮汐大约每 6 小时发生一次 180° 的方向改变, 因此某些制造商确实更喜欢使用偏航控制。Atlantis Resources 公司的 AR1500 就是这类涡轮机的一例, 其中偏航仅在平潮时作业, 以面对下一次涨潮<sup>[20]</sup>。

不使用偏航控制的另一种常用方法是在上游和下游阶段以合理的效率设计叶片。

### 3.6 发电机类型

鼠笼式感应电机和永磁 (PM) 同步电机被广泛用作潮汐涡轮机的发电机。尽管与电动同步电机相比, 永磁电机价格昂贵, 但永磁电机较低的故障率使其具有吸引力。

在本小节中, 我们将发电机分为两大类: 带齿轮箱的高速发电机和低速直驱发电机。

3.6.1 带齿轮箱的高速发电机: 发电机的尺寸与其额定扭矩直接相关, 这意味着在功率相同的情况下, 高速电机尺寸更小。除制造成本外, 高速电机的运输和组装成本也可能更低。由于潮汐涡轮机以低速旋转, 因此在涡轮机和高速发电机之间必须要有齿轮箱。

Atlantis Resources 公司的 AR1500 型涡轮机使用带有两级行星齿轮箱的径向磁通表面永磁同步发电机<sup>[20]</sup>。另一方面, Andritz Hydro Hammerfest 公司的 HS1000 涡轮机和 Schottel 公司的 Instream 涡轮机分别包括带有三级和两级行星齿轮箱的感应发电机<sup>[24], [25]</sup>。

3.6.2 低速直驱发电机: 低速直驱发电机可以无需变速箱直接连接到涡轮机。这显著提高了系统的整体可靠性和效率。

直驱发电机通常具有较高的极数, 因此具有较小的极距。这使永磁电机适合应用于直接驱动, 因为具有高极数的感应电机会由于功率因数较低而导致设计效率低下<sup>[26]</sup>。图 3 和 4 所示的分别为 DCNS 公司的 OpenHydro 和 Tocardo 公司的 T2 涡轮机, 他们使用了直驱的永磁发电机。

### 3.7 密封式和水下式发电机

通常, 潮流涡轮机系统中的发电机隐藏在机舱内。这是为了防止发电机中易于腐蚀的材料与海水直接接触, 从而降低发生故障的风险和发电机的成本。本文再次将 Atlantis Resources 公司的 AR1500 型涡轮机作为示例纳入考量。在这种情况下, 发电机和变速箱的被动冷却是通过机舱框架<sup>[20]</sup>的海水实现的。

另一方面, 水下发电机是面对海洋的发电机, 其中发电机的定子和转子间的空隙充满海水。图 3 中所示 DCNS 公司的 OpenHydro 的开放式中心涡轮机 (轮缘驱动式发电机) 是水下发电机的示例。定子和转子活性材料用加厚的非金属材料封装, 以防止海水进入。表面安装的磁体和无槽定子设计进一步扩大了磁隙, 从而需要更厚的磁体, 并极大地增加了成本<sup>[27]</sup>。

### 3.8 转换器的位置

关于转换器的布置, 主要有三种可能性。

3.8.1 陆上转换器: 海上风电行业的经验表明, 转换器之间的故障率远高于发电机<sup>[28]</sup>。这促使大多数潮汐能涡轮机制造商将转换器放置在岸上, 便于进行频繁维护并降低能源成本。Meygen 项目中使用的 Andritz Hydro Hammerfest 公司的 AH1000 MK1 和 Atlantis Resources 公司的 AR1500 涡轮机就是此类案例<sup>[29]</sup>。

3.8.2 放置在机舱中: 显然, 将每个涡轮机的转换器都放置在岸上潮汐阵列中将导致巨额的缆线布设成本。因此, 人们期望将转换器放置在发电机附近。一种简单的方法是将转换器放置在发电机旁边的密封机舱中。GE 的 (前身为 Alstom) Oceade 涡轮机就是这种配置的一例<sup>[30]</sup>。

3.8.3 海上平台安装: 为了使转换器的维修简便快捷, 经常使用水上或桩式半潜平台。两种情况的示例分别为图 5 和图 8 所示的 Bluewater 公司的 BlueTEC 平台和 SeaGen 项目。

## 4 潮汐技术面临的挑战

潮汐能采集的挑战不仅限于设计的复杂性和可靠性。如下所述, 在经济开发中还面临其他挑战。

适于经济开发潮汐能的位置通常距离电网较远。电网扩建或在理想的位置升级所涉及的成本有时是建立潮汐电场的主要瓶颈<sup>[3]</sup>。

有些潮汐涡轮机不太可能对当地生物多样性造成不利影响, 一些研究已经得出该结论<sup>[11]</sup>。即便如此, 如果不对具有多个潮汐涡轮机的潮汐电场进行大量研究就得出相同的结论未免过于草率。一些项目在开发的各个阶段进行了广泛的环境影响评估, 研究其对当地海洋生物的影响, Meygen 项目就是一个很好的例子<sup>[30]</sup>。

从经济角度来看, 很难预测潮汐涡轮技术的未来。在形成规模经济降低能源成本之前, 当前正在设计和测试中的原型机的成功对于鼓励未来的投资至关重要。

## 5 结论与未来

尽管潮差技术已经成熟, 但潮差所涉及的资金成本和环境影响几乎已将重点完全转移到了潮流流涡轮机上。目前, 潮汐涡轮机的 TRL 低于海上风能, 部分原因是在海底环境中运行面临的额外挑战。但是, 这种可预测能源的潜在优势为推动该技术走向成熟提供了强大的动力。

变速箱需要频繁维护, 这造成了高昂的运维成本, 促

使人们倾向于使用直驱式发电机。直驱发电机的设计和成本应进行仔细研究,因为发电机的较大直径会阻碍水的流动,降低整体效率。此外,应尽可能利用海水的冷却性能来降低发电机成本、增加绕阻绝缘寿命。水下发电机有可能被证明是朝这个方向发展充满希望的替代方案。此外,必须研究使用容错多相永磁电机或双定子永磁电机来提高可靠性<sup>[31], [32]</sup>。

大规模的潮流发电场采用陆上转换器是不实际的。因此人们正在研究将电力电子转换器安装在海底机舱中,安装在浮式平台上或在半潜式基座上。由于转换器的高故障率,转换器拓扑结构的研究和设计刻不容缓,这将使其预期寿命延长。这可以通过对组件留出调整度或实施不会给开关带来不均衡压力的结构来实现,从而防止过早发生故障。这种变换器的设计应与发电机结合进行,以降低潮流涡轮机发电的平均成本。

## 致谢

笔者得到了TiPA项目(潮流涡轮机动力输出加速器)的支持,该项目已获得欧盟Horizon 2020研究与创新计划的资助,该计划由创新与网络执行署管理,授权协议号为727793。本文仅反映作者的观点,执行署对论文所含信息的任何使用不承担任何责任。

## 参考文献:

- [1] Z. Zhou, F. Scuiller, J. F. Charpentier, M. Benbouzid, and T. Tang, "An Up-to-date review of Large Marine Tidal Current Turbine Technologies," in Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), 2014, p. 480-484.
- [2] Tidal Energy Today. (2015) Estimate of global potential tidal resources. [Online]. Available: <http://tidalenergystoday.com/2015/02/17/estimate-of-global-potential-tidal-resources/>
- [3] D. Magagna, and A. Uihlein, "2014 JRC Ocean Energy Status Report," European Commission Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.
- [4] P. L. Fraenkel, "Marine current turbines: pioneering the development of marine kinetic energy converters," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A:
- Journal of Power and Energy, vol. 221, pp. 159 – 169, 2007.
- [5] HYDROWORLD. (2016) Nova, ELSA tidal unit begins generation at Shetland array. [Online]. Available: <http://www.hydroworld.com/articles/2016/03/nova-elsa-tidal-unit-begins-generation-at-shetland-array.html>
- [6] T. D. Corsatea, and D. Magagna, "Overview of European innovation activities in marine energy technology," European Commission Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- [7] S. Djebbari, J. F. Charpentier, F. Scuiller, and M. Benbouzid, "Comparison of direct-drive PM generators for tidal turbines," in Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), 2014, p. 474-479.
- [8] Tidal Energy Today. (2015) OpenHydro nets USD 5million from Canada. [Online]. Available: <http://tidalenergystoday.com/2015/04/16/openhydro-to-receive-usd-5-mln-from-canada/>
- [9] Ø. Krøvel, R. Nilssen, S. E. Skaar, E. Løvli, and N. Sandoy, "Design of an Integrated 100kW Permanent Magnet Synchronous Machine in a Prototype Thruster for Ship Propulsion," CD Rom Proceedings of ICEM, pp. 117 – 118, 2004.
- [10] Openhydro, a DCNS energies company. (2014) Open Centre Turbine. [Online]. Available: <http://www.openhydro.com/Technology/Open-Centre-Turbine>
- [11] Tocardo Tidal Power. (2016) History of Tocardo. [Online]. Available: <http://www.tocardo.com/about/history/>
- [12] Tocardo Tidal Power. (2016) DNV GL issues Statement of Feasibility to TocardoT2s turbine. [Online]. Available: <http://www.tocardo.com/dnv/>
- [13] C. hee Jo, J. young Yim, K. hee Lee, and Y. ho Rho, "Performance of horizontal axis tidal current turbine by blade configuration," Renewable Energy, vol. 42, pp. 195 – 206, 2012.
- [14] Schottel Hydro. (2014) Cost Effective Power From Currents. [Online]. Available: [http://www.schottel.de/fileadmin/data/pdf/SCHOTTEL\\_HYDRO/SCHOTTEL\\_HYDRO\\_Instream\\_Energy.pdf](http://www.schottel.de/fileadmin/data/pdf/SCHOTTEL_HYDRO/SCHOTTEL_HYDRO_Instream_Energy.pdf)
- [15] Z. Zhou, F. Scuiller, J. F. Charpentier, M. Benbouzid, and T. Tang, "Power Control of a Nonpitchable PMSG-Based Marine Current Turbine at Overrated Current Speed with Flux-Weakening Strategy," IEEE journal of oceanic engineering, vol. 40, p. 536-545.
- [16] T. M. Delorm, D. Zappala, and P. J. Tavner, "Tidal stream device reliability comparison models," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability journal of oceanic engineering, vol. 226, p. 6-17.
- [17] P. Schiejgrond, and A. Raventos, "Dutch Wave & Tidal Energy Sector," TKI Wind Op Zee, 2015.
- [18] Bluewater. (2017) BlueTEC Texel Prototype. [Online]. Available: <http://www.bluewater.com/new-energy/texel-project/>
- [19] Schottel Hydro. (2010) BlueTEC platform with SIT. [Online]. Available: <https://www.schottel.de/fr/schottel-hydro/sit-instream-turbine/references/>
- [20] Atlantis Resources Limited. (2016) AR1500 Tidal Turbine. [Online]. Available: <https://www.atlantisresourcesltd.com/wp/wp-content/uploads/2016/08/AR1500-Brochure-Final-1.pdf>
- [21] Marine Current Turbines, a Siemens Business. (2016) SeaGen-S 2 MW. [Online]. Available: <https://www.atlantisresourcesltd.com/wp/wp-content/uploads/2016/08/SeaGen-Brochure.pdf>
- [22] R. J. Wood, A. S. Bahaj, S. R. Turnock, L. Wang, and M. Evans, "Tribological Design Constraints of Marine Renewable Energy Systems," Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 368, pp. 4807 – 4827, 2010.
- [23] B. Whitby, and C. E. Ulgade-Loo, "Performance of pitch and stall regulated tidal stream turbines," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, pp. 64 – 72, 2014.
- [24] Schottel Hydro. (2010) SIT Instream Turbine. [Online]. Available: <https://www.schottel.de/fr/schottel-hydro/sit-instream-turbine/>
- [25] Andritz Hydro Hammerfest. (2017) Tidal Turbines. [Online]. Available: <http://www.andritzhydrohammerfest.co.uk/tidal-turbines/>
- [26] M. R. Dubois, H. Polinder, and J. A. Ferreira, "Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines," in Proceedings of the 2000 NORPIE, pp. 22 – 26, 2000.
- [27] N. J. Baker, S. Cawthorne, E. Hodge, and E. Spooners, "3D Modelling of the generator for OpenHydro's tidal energy system," in Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), 7th IET International Conference on, 2014, p. 1-6.
- [28] J. Carroll, A. McDonald and D. McMillan, "Reliability comparison of wind turbines with DFIG and PMG drive trains," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, pp. 663 – 670, 2015.
- [29] Atlantis Resources Limited. (2017) MEYGEN, Project Development & Operation. [Online]. Available: <https://www.atlantisresourcesltd.com/projects/meygen/>
- [30] GE Renewable Energy. (2017) Oceade Tidal Turbine. [Online]. Available: <https://www.gerenewableenergy.com/innovative-solutions/tidal-energy/oceade-tidal-turbine-platform.html>
- [31] J. Zhang, L. Moreau, J. Guo, and M. Machmoum, "Joint Optimization of Electromagnetic Structure and Control of a Double Stator Permanent Magnet Generator for Tidal Energy Applications," in Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), 2014, p. 485-489.
- [32] J. Zhang, L. Moreau, and M. Machmoum, "Optimal Control Strategies of a Double Stator Permanent Magnet Generator Applied in Tidal Current Energy Extracting," in Symposium de Génie Électrique, 2014.

## 作者简介:

Faisal Wani, 代尔夫特理工大学电气与可持续发展能源研究中心。

Henk Polinder, 代尔夫特理工大学电气与可持续发展能源研究中心

张玉春, 周滨海  
中交天津航道局技能大师工作室  
Zhang Yuchun, Zhou Binhai  
CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd. Master Workshop



## 疏浚工程船舶技能大师工作室功能定位与基础建设等思考

### Thoughts on Functional Orientation and Basic Construction of the Master Workshop of the Techniques and Skill of the Dredging Engineering Vessels

**摘要:** 疏浚行业首家技能大师工作室挂牌在中交天航局, 针对这个全新的工作领域大师室工作团队结合实际, 以疏浚工程船舶技能为主要研究方向, 在大师室功能定位、传承特色体系建设、技能重点人才培养、技能工作站建立在五星级船舶上、基础建设以及技能科研等提出规划和工作目标。为开拓疏浚行业技能人才建设培养, 探索新的途径和工作思路。

**关键词:** 疏浚工程船舶; 技能人才培养; 规划

#### Abstract

The first master workshop in dredging industry is established in TDC. Aiming at this brand new field, the team of workshop combines the research with practice and takes the techniques and skill of the dredging engineering vessels as the research interests. It proposes the plan and objective with the focuses on the position of workshop, the characteristic system construction of inheritance, the fostering of talented person and key skills, the building of the skill station on the five-star vessels, the infrastructure construction as well as the R&D of techniques and skills, which aims to explored new approaches and working ideas for promoting the cultivation of skilled personnel in dredging industry.

**Key words:** dredging engineering vessel, technical personnel training, planning

#### 1 引言

天航局技能大师工作室是中交集团首家挂牌成立的疏浚技能工作室, 在各方面支持帮助下, 选派有多年职业教育经历的老师与大师室领办人组建了专职工作团队, 共同结合工作实际和工作经验, 特别以疏浚工程船舶为重点进行研究和探索, 为技能大师工作室更好的开展工作明晰了方向与目标, 对从事相关工作人员有一定的参考和借鉴。形成主要内容如下:

#### 2 大师室功能战略定位

中交天航局公司技能大师工作室结合公司实际情况, 现阶段主要定位功能为以下几个方面:

**2.1** 以公司业务涉及的船舶技能操作层面人员、水手、机工、电工为研发主体, 开展有关工种的技能技术水平的提升途径和培训手段的研究。对其中取得技师、高级技师及获得国家级岗位能手人员研究有关政策, 组织向滨海新区进行申请补贴及建立工作室。对符合公司高端重点技能人才培养条件人员进行孵化, 再造和提升, 培养疏浚行业各领域的未来的技能大师, 使工匠精神得以传承和发扬。

**2.2** 配合协助目前天航局技能等级认证考核站, 结合中交集团下发的技能考核标准, 完成有关疏浚船舶水手、机工课程大纲与课件研发及新的考核设计研发、培养急缺实操师资人员、逐步建设与完善实训室基地, 担任考前培训师资和日常考评等工作。

**2.3** 组织研发疏浚船舶技能操作方面有关的课题研究、技术创新等各项学术活动与成果申报。

**2.4** 指导和支持技能操作人员的技术创新改造等。

#### 3 大师室特色的传承体系建设

**3.1** 技能大师签订“师带徒协议”, 落实技能重点人才培养计划

对取得国家级岗位能手疏浚船舶水手、机工、电工与大师签订师带徒协议, 并建立技能工作室, 签订工作任务书。

如何有效的以技能大师工作室为机构和平台, 展开对疏浚行业高技能重点人才培养是成立大师室一项重要使命与责任, 是发挥大师室高技能人才传、帮、带功能的体现。

以逐步培养和造就更多的高技能人才成为技能专家和未来各疏浚工种的技能大师。使工匠精神得到传承。同时也是每阶段国家和企业管理部门对大师室考量的硬性指标。

所以, 作为从事此项面对新的领域的企业职教工作人员, 我们进行了思考与研究, 认为技能大师室就是高技能重点人才的孵化室, 可理解为行业技能博士后工作站。使我们寻找到企业对高技能重点人才培养的落脚点。

##### 3.1.1 高技能重点人才筛选的范围

作为高技能重点人才来培养人员主要从以下几个方面进行筛选:

首先, 在国家和集团级技能大赛取得, 获得集团以上岗位能手称号员工。这类员工在本专业技能操作已到达一定水平, 不仅仅是获得奖励荣誉。更主要是能够把好的工作技能传授给更多的员工, 整体带动更多操作层面员工技能和业务能力的提升, 为增强企业核心竞争力, 提高技能队伍素质发挥引领作用。同时取得集团技术能手称号者按规定不再参加以后的技能竞赛了, 为了保证公司参加竞赛后续有人, 也需要这类人员作为教练和企业内训师的培养方向。也是探索企业高技能人才特定的职业培养通道。

3.1.2 再有是在技能岗位做出突出贡献, 有发明创造、一技之长“绝活”能力者。由组织行为为他们创造条件, 使一技之长得到推广和更多人员学习掌握。

##### 3.2 培养方式 (量身定做、管理团队导师制模式)

由企业人资管理部门与大师室按照流程与实际情况进行规划, 编制每阶段高技能重点人才培养计划, 并组织实施。对列入重点培养人员, 要组织管理团队, 指派导师, 量身定做编制对应的培养计划书。主要包含培养人、专业培养(近期、中期、远期)目标、专业导师、教师素养导师、综合能力导师、培养机构、主管部门、编号。内容中要写明培养团队组成、培养总体方案、培养周期、培养人要求、培养人签名、导师要求及签名等。培养人要求写明以下内容:

本人自愿接受公司重点培养, 自觉服从公司培养各种安排。

尊重导师,虚心求教学习,不断总结和提高专业技术水平和综合能力,完成各导师布置的各项工作任务并撰写培养心得。为实现培养目标积极努力。要有高尚的品行和职业道德情操。以感恩之心回报公司。如无极其特殊原因,乐意终身为公司服务。

导师要求写明以下内容:

以高度的使命感和责任感履行导师工作职责,完成培养任务。

接受导师工作安排,结合培养人实际情况量身定做专业培养实施方案经核审、修订完善执行。按照培养方案记录培养人表现情况写出每阶段表现评定意见。要有培养机构负责人及主管部门主管人签字加盖公章。

### 3.3 展开工作步骤

明确大师工作室在高技能重点人才培养的作用和功能,大师室作为培养人才机构自身就需要这方面高端人才的辅助与支撑。须有根据工作需要抽调资深的培训教育师资、专家以及辅助人员配合工作。为大师工作室配置合适的工作服务团队。为大师工作落地开展提供有效的人力资源保障。

要进一步推动公司技能大师室工作的有效开展,加强对大师工作室的组织、领导,充分发挥大师工作室在高技能人才培养、一线技革技改技术创新以及发现扶植能工巧匠的引领作用,保证日常工作的有效运作,完成制定的工作任务。

在以上基础工作成型后,公司与大师室组织编制下发《公司高技能人才重点培养实施办法》,明确申报条件、培养方式、考核与评定等。

大师工作室为实施重点高技能人才培养的日常机构,前期组建导师团队组织研讨,以确定各导师培养课程方案与计划。经审定后大师室下发导师聘书和培养各课程任务书。组织具体实施。大师室要指导导师做好全过程管理与资料、影像的收集整理,以及培养阶段的教务及后勤服务工作。

### 3.4 技能工作船舶站点建设

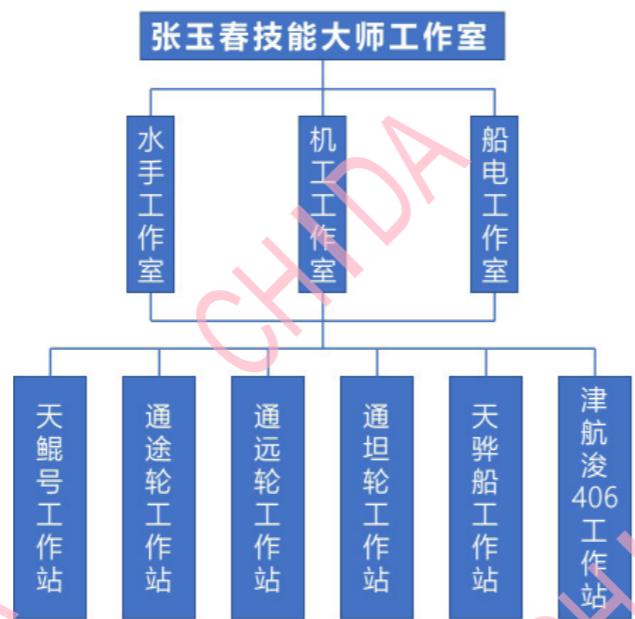
把技能工作站建立在五星级船舶上,是天航技能大师

工作室结合实际工作的特色创举和亮点。找到了技能工作的切入点。已编制了《中交天航局技能大师室船舶技能工作站评定与管理办法》和《中交天航局技能大师工作室船舶技能工作站任务书》。

已申报成为疏浚集团五星船舶确定,名单如下:

序号	船名	类型
1	天鲲	自航绞吸
2	通远	自航耙吸
3	通途	自航耙吸
4	通坦	自航耙吸
5	天骅	绞吸
6	津航浚 406	抓斗

已构思简洁的技能船舶工作站授牌仪式,准备实施。体系图如下



### 4 基础建设

#### 4.1 软件建设:

- 4.1.1 全局技能人员数据库建设。
- 4.1.2 全局大师室专家师资数据库建设。
- 4.1.3 大师室工作制度建设。

#### 4.2 硬件建设:

为满足技能等级认定培训及国家对大师室升级要求,需要组织建设团队开展以下实训室建设:

- 4.2.1 甲板绳索实训室
- 4.2.2 甲板插接实训室
- 4.2.3 甲板操舵实训室
- 4.2.4 甲板海图实训室
- 4.2.5 机舱拆装实训室
- 4.2.6 船电综合实训室

### 5 大师 2020 年度科研项目建设:

#### 5.1 建立技能等级认定培训考核课题组,完成以下任务:

- 5.1.1 水手 1-5 级培训工作手册及授课课件制作。
- 5.1.2 机工 1-5 级培训工作手册及授课课件制作。
- 5.1.3 水手 1-5 级考核工作手册。
- 5.1.4 机工 1-5 级考核工作手册。

#### 5.2 建立疏浚船舶甲板、机舱、船电五星船舶业务标准研发课题组

编制形成《天航局五星船舶技能操作业务标准》用于

指导其他船舶。并作为科研创新成果,向有关方面申报。

### 6 结语

面对新领域技能大师工作室开展运行,特别是疏浚高技能人才培训领域,需要从事相关工作的人员不断思考与探索,并共同努力去实践,积累经验,不断完善,为疏浚行业高技能重点人才培养、再造、提升来探索符合企业发展和需要的新途径。用老一代宝贵的知识和经验予以复制和传承,使疏浚船舶高技能人才后继有人。

### 参考文献:

- [1] 孙兴伟.让技艺薪火相传.2018(5):1674-9111.
- [2] 龚靖.谈人力资源管理对企业核心竞争力形成与提升的作用[J].2011(17):1006-3102.
- [3] 漆翔,陈玲,周林军,文申柳,张勇.高职院校"专业+技能大师工作室"高技能人才培养模式初探[J].2019(13):2096-0603.
- [4] 路春泽,王泽涛,陈肖潇,赵鑫,冯敏楠.航天制造企业技能人才队伍建设的研究与实践[J].2019(7):1005-4669.

### 作者简介:

张玉春,男,中交天津航道局技能大师工作室,高级技师,技能大师。  
周滨海,男,中交天津航道局技能大师工作室,工程师。

陈洁, 陈林  
中交广州航道局有限公司  
Chen Jie, Chen Lin  
CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd.



## 流域综合治理及管理的思考与探索 ——以珠江流域为例

### Thinking and Exploration of Comprehensive Reclamation of River Basin and Management ——Taking the Pearl River Basin as an Example

**摘要:** 流域综合治理是多专业、多工程和多目标的有机统一, 系统性和综合性极强。不仅涉及到水环境, 还与水生态、水安全、水经济等领域息息相关, 需要综合运用经济、法律、科技和行政等多种手段进行治理。本文以珠江流域为例, 针对珠江流域目前存在的水环境问题, 并结合我国流域治理的特点, 提出珠江流域综合治理与开发保护的治理思路与方案, 探讨珠江流域综合治理模式, 旨在通过改变“人与自然对立论”和“人类中心主义论”的观念, 在珠江流域综合治理中实现“人与自然和谐共生”的理念。

**关键词:** 珠江流域; 人与自然和谐共生; 综合治理; 开发保护

#### Abstract

Comprehensive reclamation of river basin realizes the integration of multiple specialties, multiple projects and multiple objectives with significantly systematic and comprehensive, which involves not only water environment, but also water ecology, water security, water economy and other fields closely. Therefore, it is necessary to make use of a variety of means such as economy, law, science and technology and administration to integratedly manage. Based on the Pearl River Basin as an example, according to the problem of water environment of the Pearl River Basin and the characteristics of watershed management in China, this paper puts forward governance ideas and solutions of comprehensive reclamation and exploitation and protection and discusses treatment pattern for the Pearl River Basin. The paper aims to change viewpoints that human is opposite to nature and anthropocentrism and realize the concept of harmonious co-existence between human and nature during comprehensive reclamation in the Pearl River Basin.

**Key words:** the pearl river basin, harmonious co-existence between human and nature, comprehensive reclamation, exploitation and protection

#### 1 引言

自古以来, 人类逐水而居, 依水而生, 人类文明的发源、迁移, 以及发展都依赖着水的供给与滋养。流域生态系统是自然界中最重要的生态系统之一, 是人类发展以及生存所需资源和生态的提供者<sup>[1]</sup>。随着社会经济高速发展、城市化速度加快以及人口增加, 我国主要流域水资源状况发生了重大变化。水环境污染以及水资源短缺等问题造成了流域生态资源与调节功能的大规模破坏, 同时也一定程度上影响了流域地区经济社会的健康、持续、协调发展。

近年来, 我国陆续出台了《水污染防治行动计划》(即“水十条”)、《土壤污染防治行动计划》(即“土十条”)、《“十三五”重点流域水环境综合治理建设规划》等一系列政策法规, 十九大又将生态文明建设提升至千年大计, 我国中央政府已将流域生态环境恢复工作提升到国家战略的高度。

流域综合治理的关键是改变“人与自然对立论”和“人类中心主义论”的观念, 逐步树立“人与自然和谐共生”的理念。目前各地政府正在通过开展流域综合治理, 采用一系列工程措施改善水体生态环境, 维护流域生态系统平衡。

本文针对当前珠江流域治理与开发中存在的问题, 结合国家对流域治理的要求, 提出新的治理思路, 探讨珠江流域综合治理的模式。

#### 2 我国流域综合治理的特点

##### 2.1 特殊的区域性

流域突破了传统的行政区划与边界, 是一个以河道为中心, 由分水线包围的区域; 是一个从源头到河口完整的、独立的、整体性极强的天然区域<sup>[2]</sup>。流域范围涉及河流上下游、左右岸及附近区域。流域特殊的区域性使得它是一种独特的自然资源。流域从起源到汇入海洋通常途经几个省市, 各地政府因各自施政、各自施策、各自开发利用, 难成合力。因此, 这种独特的区域性是流域综合治理与开发中的一个难点。

2.2 多重目标性

流域的多重属性决定了它不仅是一个水文系统, 还是一个涉及自然、经济和社会等多方面的复杂生态系统。科学的流域治理、开发与保护工作, 是流域经济社会可持续发展的基础。因此, 流域综合治理具备多重目标性。

2.2.1 坚持开发与保护并重。即在适度开发水利资源的同时, 注重生态环境的污染防治、水生态系统的平衡。

2.2.2 促进区域经济协调发展。流域是国家水资源综合开发的重点实施区域。河流上下游、干支流的治理, 以及流域所在不同行政区的治理, 是促进区域经济协调发展的基础。

2.2.3 实现可持续发展。

流域以水资源为纽带将不同区域、不同群体、不同产业、联系成一个整体。流域综合治理致力于“生产、生活与生态”协调发展; 致力于在环境改善的同时实现经济社会的可持续发展。

##### 2.3 治理的复杂性

流域综合治理是一项庞大、繁杂的涉及多学科、多工程、多领域的系统性工程。流域综合治理需要综合运用行政、法律和经济等多种手段进行治理。单一侧重无法取得良好整治效果。流域综合治理的最终成果是构建健康的、与自然和谐共生的生态系统, 并让最大限度的发挥水资源的生态环境效益和社会经济效益。

#### 3 珠江流域水环境现状

珠江是我国的七大江河之一, 是西江、北江、东江和珠江三角洲诸多河流的总称。西江、北江、东江等河流在珠江三角洲形成“三江汇集、八口入海”的水系特征。珠江流经云南、贵州、广西、广东、湖南、江西6省。珠江主干流域西江发源于云南省沾益马雄山东麓, 自西向东流经云南、贵州、广西、广东、湖南、江西6省, 在广东珠海市磨刀门汇入南海, 全长2214公里, 珠江水系如图1所示。



图 1 珠江水系图

珠江流域水资源丰富，在全国七大江河中排名第二，仅次于长江。近些年来由于受自然因素和人为因素的影响，珠江流域生态环境脆弱，水资源保障形势严峻，目前珠江流域综合治理存在以下问题：

- (1) 流域综合治理系统性不足
- (2) 污染源多、污染负荷大，已形成复合型污染
- (3) 水资源开发利用程度低，且调控能力低
- (4) 沿海地区水资源短缺
- (5) 水污染严重，水生态退化
- (6) 管理模式单一，公众参与意识不强

#### 4 珠江流域综合治理思路与方案

流域综合治理目的在于促进生态系统相互协调，实现人与自然和谐共生。流域综合治理工程是多专业、多工程和多目标的有机统一，系统性和综合性极强。因此珠江流域综合治理应该以整个“珠江”为单元，以区域为主线，以流域和区域可持续发展为目标，通过对流域内自然资源、生态环境及经济社会发展系统性综合治理，构建“人与自然和谐共生”的水循环系统，实现珠江全流域生态环境建设和社会经济建设综合价值全面提升。

##### 4.1 促进产业结构升级，从源头治理

统筹珠江流域上下游区位特征、资源禀赋、生态红线及环境承载力，系统规划、科学布局、有序管控珠江流域产业发展。

制定严格水环境标准促使产业结构实现升级。通过适当提升污染物排放标准，不断加强污染物排放监管力度，提升污染物不达标排放成本，促使企业实现技术改造或者

实现转型发展。以产业转型升级和绿色发展为目标，从源头治理流域生态环境。

##### 4.2 合理开发水资源，保障供水安全

根据水资源承载能力和水环境承载能力，选择与其相适应的开发利用控制性指标。对于开发程度不高的西江，提高开发利用程度；对于开发程度适中的北江，进行保护性开发；对于东江和珠江三角洲等开发程度较高的区域，进行限制性开发。

在合理开发水资源的同时，统筹协调生活、生产和生态用水，缓解珠江沿海等地区水质性缺水问题，保障港澳及珠江三角洲等重要经济区及重要城镇供水安全，保障城乡居民饮水与农业用水安全。

##### 4.3 实施合理的生态补偿

在进行流域综合治理时，行政区域间的经济合作在给参与主体带来经济利益的同时，也可能遭受经济上的损失。因此可通过资本投入、基础设施同建同享、财政税收优惠等手段，依据珠江流域水环境生态系统服务价值、生态保护成本、发展机会成本等因素，向珠江流域水环境的保护者和建设者提供补偿，以调动其水环境保护和生态建设的积极性，促进水环境保护地区的生态保护和生态建设活动。

##### 4.4 拓宽投资渠道，建立有效的资金保障机制

明确专项资金的流向，保障专项资金用到实处。建立各级行政区层面的流域环境综合治理基金，发挥政府资金引领作用。引导社会资金投入，兼顾“引智”和“引资”，发挥市场在资源配置中的主导作用，调动社会各方面积极性，多渠道筹集建设资金，解决流域综合治理项目实施及运营维护资金不足的问题。

##### 4.5 完善流域综合管理体系，探索创新管理模式

建立流域跨区域联动协调机制，明晰各级政府、部门流域治理职责，落实流域属地主体责任，充分发挥各级“河长制”的作用。对流域的环境治理信息、资金、资源等实现共建共享与合作机制，深化流域上下游常态化协调机制。

聚焦“人与自然和谐共生”，积极探索空间规划多规合一、绿色GDP考核、自然资源资产产权制度、区域生

态补偿制度等可持续发展制度，对珠江流域进行整体保护、综合治理、系统修复。

##### 4.6 鼓励公众参与，加强社会监督

完善流域治理环境政务信息公开制度，及时向社会发布河湖水生态环境状况，确保信息畅通和准确。积极培育民间环保机构，完善流域治理第三方参与机制。加强宣传教育，使流域公众逐步改变“人类中心主义论”的观念。积极发挥电视、广播、报纸和网络等新闻媒介的正确舆论导向，引导公众树立珠江流域治理中“人与自然和谐共生”的理念。

#### 5 结语

流域治理是推进生态文明建设的重要途径，是改善环境质量的重要途径，也是恢复流域生态环境、保障流域安全的重要途径。

在珠江流域综合治理中，需要以科学发展观为统领，在顺应水的自然规律基础上遵循经济社会发展规律，通过开展科学的统筹规划，实现珠江流域合理的开发、利用、保护，促进珠江流域与区域经济社会协调可持续发展，从而实现珠江流域“人与自然和谐共生”。

#### 参考文献：

- [1] 田蕴慧.浅析中国的流域治理[J].管理观察,2016(1):45-310.

48.

- [2] 陈瑞莲,任敏等.中国流域治理研究报告[M].上海:上海人民出版社,2011.3.
- [3] 王佃利.跨域治理视角下的中国式流域治理[J].公共管理变革,2013(5):51-54.
- [4] 陈明媚.珠江流域水污染治理的问题与对策[J].人民珠江,2012(3):54-56.
- [5] 刘晓丹,单凤霞等.珠江流域五大高原湖泊近10年水质状况及变化趋势分析[J].环境科学导则,2017(6):38-42.
- [6] 和丽萍,张兴,陈晟.珠江流域水污染现状与主要问题成因分析[J].环境科学导则,2012(3):24-28.
- [7] 陈兆开.珠江流域水环境生态补偿研究[J].科技管理研究,2008(4):74-76.
- [8] 刘华祥.流域水污染治理模式创新研究[J].广东化工,2018(6):175-176.
- [9] 李敏,张旭,郑冬燕.珠江流域综合治理开发与保护思路[J].人民珠江,2013(1):13-15.
- [10] 严登华,王浩,张建云等.生态海绵智慧流域建设-从状态改变到能力提升.水科学进展,2017(3):302-310.

#### 作者简介：

陈洁，女，中交广州航道局有限公司，高级工程师。  
陈林，男，中交广州航道局有限公司，总工程师。

倪雁<sup>1</sup>, 顾磊<sup>2</sup>, 黄佳丽<sup>2</sup>, 蒋爽<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中交上海航道勘察设计研究院有限公司

<sup>2</sup> 河海大学疏浚技术教育部工程研究中心

Ni Yan<sup>1</sup>, Gu Lei<sup>2</sup>, Huang Jiali<sup>2</sup>, Jiang Shuang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd.  
<sup>2</sup> Engineering Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education,

Hohai University



## 射流冲刷细沙数值模拟中挟带系数的影响

### Effect of Entrainment Coefficient on Numerical Simulation of Jet Scouring on Fine Sediment

**摘要:** 在水利工程中,泥沙冲刷是一个重要的研究课题。在泥沙运动相关的数值模拟中,挟带系数的合理选取尤为重要。本文针对射流冲刷细沙的数值模拟过程,探讨了挟带系数对泥沙底床冲刷速率的影响,并将不同挟带系数下的冲刷坑深与实验数据进行了比较分析。研究结果表明:冲刷效果对挟带系数的敏感性较高,挟带系数越大,对底床的冲刷速率越大。对于细沙沙床的射流冲刷过程,宜采用较小的挟带系数进行数值模拟。本研究可为使用泥沙数值模型计算结果的水利工程提供参考。

**关键词:** 射流冲刷; 泥沙模型; 挟带系数; 冲刷深度

#### Abstract

Scouring is an important issue in hydraulic engineering. In the numerical simulation of sediment transport, the selection of entrainment coefficient is particularly important. According to the numerical simulation process of water jets scour on fine sand, the influence of entrainment coefficient on the scour rate of sediment bed is discussed. The scour pit depths under different entrainment coefficients are compared with the measured experimental data. The results show that the scour effect is sensitively influenced by the selection of entrainment coefficient. Greater scour rates have been found for larger entrainment coefficients. For the water jets scour process of fine sediment, a smaller entrainment coefficient is recommended for numerical simulation. This study can provide a reference for hydraulic engineering projects which need the results calculated by sediment numerical models.

**Key words:** water jets scour, sediment model, entrainment coefficient, scouring depth

#### 1 引言

泥沙冲刷是水利工程中的一个重要课题,涉及到海底管道冲刷、桩柱冲刷及水射流冲刷等,国内外学者对其进行了大量的物理实验及数值模拟研究。N.Rajaratnam 等<sup>[1]</sup>利用圆柱射流对松散无黏性沙床进行冲刷实验,获得了冲刷深度随射流参数和泥沙特性变化的无量纲关系;齐梅兰等<sup>[2]</sup>实验研究了射流冲刷深度随喷嘴尺寸和射流速度的变化,建立了射流冲刷平衡深度计算式。Ming Z. 和 Liang C.<sup>[3]</sup>对海底管道底部的河床冲刷进行了数值模拟,通过求解泥沙的质量守恒方程来确定河床的冲刷深度。王飞<sup>[4]</sup>等基于 FLUENT 软件对桥墩局部冲刷过程进行了三维动态模拟,采用临界切应力判断泥沙的悬浮,依据输运公式确定冲刷速度。Winterwerp 等<sup>[5]</sup>提出以挟带系数为重要系数的无量纲冲刷速率公式。

上述泥沙冲刷的研究,主要着眼于各因素对冲刷效果的影响,往往以冲刷深度作为特征尺寸。实验只能对冲刷后的尺寸进行准确测量,对冲刷过程的分析则往往需要借助数值模拟手段,而在数值模拟中,冲刷速率是直接影响泥沙冲刷效果的关键参数。在冲刷速率计算式中,挟带系数的取值至关重要。然而,现有研究中挟带系数却并无统一取值,并且研究大多集中于河床冲刷领域,对于射流垂直冲刷细沙时挟带系数的取值研究较少。为此,本文针对水射流冲刷细沙的数值模拟过程,研究挟带系数对射流冲刷坑深度的影响,并将数值模拟与试验结果比较,提出射流垂直冲刷细沙时的挟带系数推荐取值。

#### 2 计算模型

数值模拟选择 FLOW-3D 软件,由于其不仅可以准确地模拟流场的详细信息<sup>[6]</sup>,而且可以方便地设置泥沙模型参数<sup>[7]</sup>。首先建立数值计算的几何模型,其设置包括:喷嘴直径 2mm, 泥沙厚度 0.4m, 喷嘴与泥沙床面之间的距离(靶距) 0.1m, 水深 0.2m, 射流以 15m/s 的速度进行冲刷。本文重点探讨挟带系数的影响,泥沙的其他参数均保持不变。其中,泥沙粒径 0.13mm, 泥沙密度 2650kg/m<sup>3</sup>, 推移质系数 13, 水下休止角 32°。简化的射流冲刷三维模型如图 1 所示。

采用结构化网格对模型进行划分,网格尺寸为 0.01m×0.01m×0.01m,对喷嘴附近进行了局部加密,以便对喷嘴附近的流动与两相作用进行更为精细的计算。模型的上边界设置为速度边界,下边界设置为墙边界,四周则设置为溢流边界。

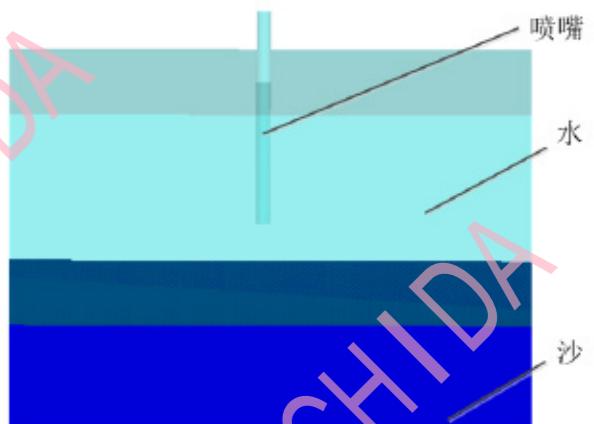


图 1 射流冲刷的三维模型

泥沙模型的使用基于 Mastbergen 和 Van den Berg<sup>[8]</sup>提出的经验模型,表达式如下:

$$u_{lift} = \alpha n_s d_*^{0.3} (\theta - \theta_{cr})^{1.5} \sqrt{\frac{gd_s(\rho_s - \rho)}{\rho}} \quad (1)$$

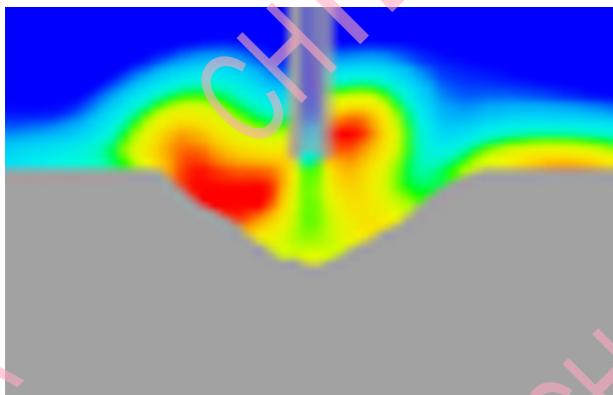
其中,  $u_{lift}$  为用来计算由底沙转化为悬沙的泥沙量;  $\alpha$  为挟带系数;  $n_s$  为沙床面的外法线方向;  $d_*$  为泥沙颗粒的无量纲粒径;  $\theta$  为床面希尔兹数;  $\theta_{cr}$  为临界希尔兹数;  $g$  为重力加速度;  $d_s$  为沙泥沙颗粒直径;  $\rho$  为流体密度;  $\rho_s$  为泥沙密度。

式(1)中,泥沙粒径、泥沙密度、床面希尔兹数、临界希尔兹数等参数均可通过测量或流场计算确定。挟带系数尽管对计算结果至关重要,但其取值却并不确定。在软件使用说明<sup>[8]</sup>中,挟带系数的推荐取值为 0.018,许多学者在模拟时大多也选择采用该默认值<sup>[7, 10]</sup>。而在顾磊<sup>[11]</sup>、王建军<sup>[12]</sup>等粗砂冲刷模拟研究中,当泥沙粒径较大时,挟带系数选取 0.4 时数值计算结果与试验结果较为吻合。由此可见,取值差别很大的挟带系数在各自研究中均得到了试验验证,显然其合理取值会随泥沙粒径而变化。然而,现有研究中对该参数的研究较少。对于细沙沙床的射流冲

而言,挟带系数的合理取值对准确模拟冲刷过程非常重要。下面将以泥沙粒径为0.13mm的细沙为例,探讨细沙冲刷模拟中挟带系数的合理选择。

### 3 数值模拟结果与分析

首先采用现有研究中所取挟带系数值,即0.018和0.4,对垂直射流冲刷过程进行模拟。在相同时刻其数值计算获得的冲刷结果见图2。



$\alpha = 0.018$

$\alpha = 0.4$

图2 不同挟带系数下的冲刷结果

可以看到,当挟带系数选择0.4时,冲坑深度明显大于挟带系数为0.018的结果。说明挟带系数越大,射流对底床的冲刷越剧烈,即对床面的冲刷速度越快。再比较两相流场的浓度分布发现,当挟带系数为0.4时,冲坑内悬沙分布更为均匀,悬起高度相对较低。其原因可能是,更多的泥沙被冲刷进入水体后,混合区域增大,而且混合水体密度的增加又增强了水体对泥沙悬浮的抑制能力,因此泥沙无法悬浮过高,转而在冲坑内均匀混合。与此相比,当挟带系数为0.018时,悬沙浓度呈现图中所示的非对称

不均匀状态,而且明显在漩涡较为强烈的位置浓度更高,这与实验中观察到的泥沙分布情况较为接近。

进一步将两种挟带系数下冲坑深度与实验所得数据进行比较,如图3所示。

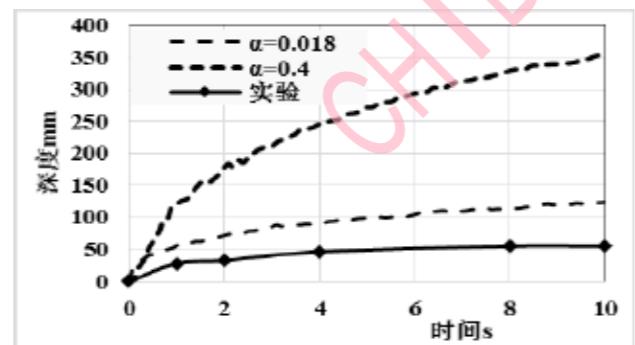


图3 两种挟带系数下的冲深度与实验的对比

图中显示,挟带系数为0.4时的冲坑深度约为实验结果的7倍。挟带系数为0.018时的计算结果较为接近实验值,但也超过两倍,相差较大。这表明,对于粒径为0.13mm的细沙而言,上述两个挟带系数取值偏大。

为此,进一步扩大挟带系数的取值范围,以探索在水射流冲刷细沙的数值模拟中挟带系数的影响。采用单因素分析法,只改变挟带系数,比较挟带系数依次为0.001,0.008,0.018,0.18和0.4时的射流冲坑深度。不同挟带系数下冲坑深度随时间的变化结果如图4所示。

可以看出,挟带系数对于冲坑深度的影响非常显著,随着挟带系数的增大,冲射流冲坑深度明显增大。本文实验仅采用了一种泥沙,并不涉及挟带系数与泥沙特性之间的关系。后续还需开展更多工作,进一步研究泥沙粒径、密实程度等对数值模拟中合理选择挟带系数的影响。

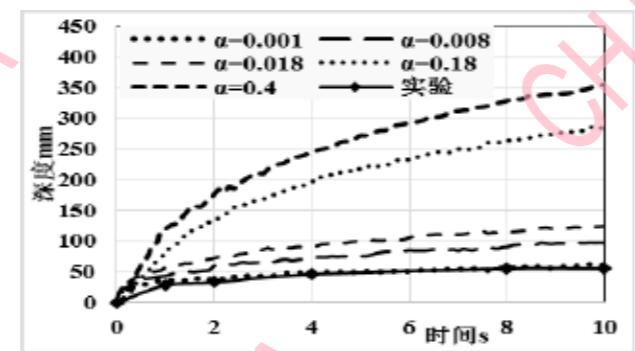


图4 不同挟带系数下的冲坑深度的变化

当挟带系数为0.001时,模拟获得的冲坑深度与实验较为吻合,表明对于粒径为0.13mm的细沙床射流冲刷过程,采用较小的挟带系数较为合适。在该挟带系数下,比较不同时段内实验与数值模拟的冲刷坑深时发现,在4秒之前,实验冲坑深度略小于数值模拟结果,而在4秒后两者的冲刷坑发展基本重合。需要注意的是,实验中射流发生的最初阶段,射流压力和流速存在一定的加速与波动过程,射流对泥沙的冲刷影响尚未稳定。而数值模拟中射流速度从计算伊始即保持恒定,这会导致数值模拟的冲刷发展较实验而言更快,初始冲刷坑深度会更深。

### 4 结论

基于Mastbergen和Van den Berg的泥沙冲刷模型,以冲刷坑深度为衡量指标,研究了射流冲刷细沙时,选择不同挟带系数对射流冲刷效果的影响。研究结果表明:

- (1) 射流冲刷结果对挟带系数的敏感性较高。挟带系数越大,射流对床面的冲刷速率越快,随着挟带系数的增大,射流冲坑深度增大。
- (2) 挟带系数的选择与泥沙粒径有关,对于细沙沙床的射流冲刷过程,应选择较小的挟带系数进行模拟。对于初始冲刷坑深度,数值模拟与实验结果存在系统性差异。
- (3) 本次研究可为使用泥沙数值模型计算结果的水利工程提供参考。

### 参考文献:

- [1] RAJARATNAM N, MAZUREK K A. Erosion of sand by circular impinging water jets with small tail water [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(3):225-

### 作者简介:

- 倪 雁,男,中交上海航道勘察设计研究院有限公司,从事航道工程设计与疏浚技术研究工作。  
顾 磊,男,河海大学疏浚技术教育部工程研究中心,从事疏浚技术与装备研究工作,副教授。  
黄佳丽,女,河海大学疏浚技术教育部工程研究中心,从事疏浚技术研究工作,硕士研究生。  
蒋 爽,男,河海大学疏浚技术教育部工程研究中心,从事疏浚装备研究工作,高级实验师。

229.

- [2] 齐梅兰,府仁寿,陈稚聪.射流冲刷平衡深度研究 [J].水动力学研究与进展,2005,20(3):368-372.
- [3] Liang D F, Cheng L, Li F J. Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents[J]. Part II: Scour simulation. Coast Eng, 2005,52: 43 – 62.
- [4] 王飞,张彬,齐剑峰.桥墩局部冲刷发展过程的三维动网格模拟 [J].南水北调与水利科技,2017,15(2): 132-137.
- [5] Winterwerp, J.C., Bakker, W.T., Mastbergen, D.R. and Van Rossum, H. (1992) Hyperconcentrated sand-water mixture flows over erodible bed. J. Hydraul. Eng., 118, 1508 – 1525.
- [6] 唐尧,张根广,程烨.基于FLOW-3D的水垫塘底板脉动压力数值模拟 [J].人民黄河,2018,40(8): 120-122+148.
- [7] 张曙光,尹进步,张根广.基于Flow-3D的圆柱形桥墩局部冲刷大涡模拟 [J].泥沙研究,2020,45(1):67-73.
- [8] Dick R. Mastbergen and Jan H. Van Den Berg. Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons. Sedimentology, 2003, 50(4): 625 – 637.
- [9] Flowscienceinc. FLOW-3D User Manual [R]. 2012.
- [10] 吉鸿敏,张新燕,朱德兰.单圆柱桥墩冲刷的三维数值模拟 [J].中国农村水利水电,2015(11): 152-155+160.
- [11] 顾磊,倪福生,李雯,等.喷嘴间距对双股平面射流冲刷的影响 [J].泥沙研究,2016(6): 32-37.
- [12] 王建军,倪福生.二维垂向淹没射流冲刷粗砂床的数值模拟 [J].科学技术与工程,2014,14(3): 108-111.



汤伊琼  
中交第四航务工程勘察设计院有限公司  
Tang Yiqiong  
CCCC Fourth Harbor Consultants Co., Ltd.

## 海洋产业发展概述及发展潜力分析

### Overview of Marine Industry Development and Analysis on Its Development Potential

**摘要:** 发展海洋经济、建设海洋强国已成为我国新时期的国家战略。党的十八大提出“发展海洋经济”、“建设海洋强国”，党的十九大提出“坚持陆海统筹，加快建设海洋强国”。习近平总书记致 2019 中国海洋经济博览会贺信强调海洋是高质量发展战略要地，要提高海洋资源开发能力，培育壮大海洋战略性新兴产业。本文结合我国海洋经济发展政策导向、海洋经济发展现状基础、世界主要海洋经济体产业发展趋势，剖析海洋经济发展的内在市场规律，分析我国主要海洋经济产业的发展潜力，并提出产业发展的相关建议，供海洋经济领域的企业决策参考，以充分发挥市场主体活力，共同助力海洋强国建设。

#### Abstract

Developing marine industries and establishing a maritime power, proposed in the 18<sup>th</sup> National Congress of the CPC, has become China's national strategy in the new era, and the 19<sup>th</sup> National Congress further put forward to make coordinated development plans for land and sea and speed the construction of a maritime power. Xi Jingping's congratulatory letter to the 2019 China Marine Economy Expo also stresses that the ocean is a strategic area for high-quality development, and that the country should improve its capacity to exploit more marine resources and foster and strengthen strategic emerging marine industries. Based on the study of the policy guidance and current situation of China's marine economy, the developing trend of the world's leading marine economies and the internal market rules of marine industries, this paper analyzes the development potentials of China's main marine industries, and then puts forward some relevant suggestions for market players, which may further stimulate market vitality and be beneficial to construct the maritime power.

## 1 海洋经济发展概述

### 1.1 海洋产业发展政策

为支撑海洋强国建设，我国出台了相关海洋经济政策来支持加快海洋经济发展。包括海洋经济促进政策、海洋科技创新提升政策和海洋生态环境及资源保护政策。

海洋经济促进政策提出调整优化海洋渔业、海洋油气业、海洋船舶工业、海洋交通运输业、海洋盐业及化工业等传统产业；培育壮大海洋装备制造业、海洋药物和生物制品业、海水利用业、海洋可再生能源业等新兴产业；拓展提升海洋旅游业、航运服务业、海洋文化产业、涉海金融服务业、海洋公共服务业等海洋服务业。并明确了全国 14 个海洋经济发展示范区名单及主要示范任务。

海洋科技创新提升政策重点支持深海关键技术与装备、深水油气资源开发、海水养殖与海洋生物技术、海水淡化、船舶与海工装备制造及海洋可再生能源利用等领域重大科技创新。

海洋生态环境及资源保护政策明确了“修复治理、开发利用、生态保护、监测评价、污染控制、风险防范”六个方面工作。围绕以“湾长制”、“蓝色海湾”等整治行动为主的海洋治理与整治修复、海洋生态保护红线管控、海岸线及海岸带保护与利用管理、围填海严控、海岛开发利用管理等方面展开实施。

### 1.2 海洋经济发展概况

#### 1.2.1 我国海洋经济市场规模大，发展势头猛

2000 年以来，我国海洋产业持续快速发展，近 10 年来全国海洋生产总值平均增速达 10.8%，高于同期全国 GDP 增速。且连续多年占全国 GDP 的比重在 9% 以上，其中 2019 年海洋生产总值达 89415 亿元。

海洋经济产业结构方面，我国海洋经济三次产业比重由 2010 年的 5.0%: 47.0%: 48.0% 调整为 2019 年的 4.2%: 35.8%: 60.0%，第一、第二产业比重均有所下降，第三产业比重不断上升，海洋第三产业已经成为海洋经济增长的主要拉动力。总体来看，我国海洋经济已基本形成“三、二、一”的产业格局，海洋产业结构不断趋于合理化。

在主要海洋产业分类上，滨海旅游业、海洋交通运输

业和海洋渔业是我国海洋经济的三大支柱产业，2019 年占主要海洋产业增加值的比重分别为 50.6%、18.0% 和 13.2%。同时，海洋电力业、海洋生物医药业、滨海旅游业、海洋矿业及海水利用业等新兴产业迅猛，近 10 年的年均增速在 15% 以上。

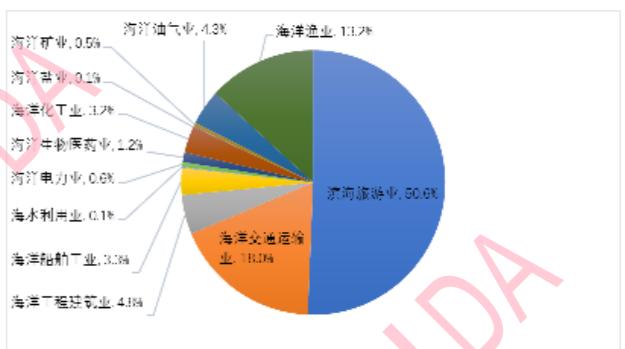


图 1 2019 年主要海洋产业增加值构成

1.2.2 我国海洋经济逐渐形成了各具特色的北部、东部、南部三大海洋经济圈

其中北部海洋经济圈的产业发展以海洋科技、港口物流、海洋船舶、海水淡化、海水养殖、海洋生物医药等为主。2019 年北部海洋经济圈海洋生产总值 26360 亿元，比上年名义增长 8.1%，占全国海洋生产总值的比重为 29.5%。

东部海洋经济圈的产业发展以远洋渔业、海洋交通运输业、海洋船舶工业和海洋工程装备制造业等为主。2019 年东部海洋经济圈海洋生产总值 26570 亿元，比上年名义增长 8.6%，占全国海洋生产总值的比重为 29.7%。

南部海洋经济圈的产业发展以远洋渔业、滨海旅游业、海洋交通运输业、海洋生物医药业等为主。2019 年南部海洋经济圈海洋生产总值 36486 亿元，比上年名义增长 10.4%，占全国海洋生产总值的比重为 40.8%。随着粤港澳大湾区、海南自由贸易试验区、西部陆海新通道等重大战略持续发力，南部海洋经济圈持续领先。

### 1.3 海洋经济发展趋势

1.3.1 海洋经济规模呈波动增长趋势。21 世纪初期，全球海洋产业价值呈波动中上升的总体趋势。根据经济合作与发展组织（OECD）发布的《2030 年海洋经济展望》，全球海洋经济规模不断上升，2030 年海洋产业在增加值和

创造就业方面的表现将超过全球经济整体表现，海洋经济对全球经济增加值的贡献将超过3万亿美元。

1.3.2 产业中心向亚太地区逐步转移。从当前世界海洋市场的地理分布来看，亚洲所占比例最大（34%），然后依次是欧洲（32%）、北美洲（25%）、南美洲（4%）和非洲（3%），其他占2%。航运收入作为产值最高的海洋产业，最大的市场也在亚洲，其次是欧洲和北美洲。石油和天然气支出作为海洋主导产业，主要市场在南美洲和非洲。世界海洋产业发展的主要重心呈现出由欧美地区向亚洲太平洋沿岸转移的发展态势。

1.3.3 海洋经济持续向高阶方向演进。未来，海洋经济将转向海洋产业结构升级、海陆产业集群互动、可持续开发利用海洋资源以及海洋产业信息化与智能化等高阶方向演进。

## 2 海洋经济发展潜力分析

海洋产业门类庞杂，为聚焦重点领域，本文基于“契合国家战略及规划导向、顺应海洋经济产业发展趋势”的原则，从海洋产业标准分类的28个海洋产业中，挑选出规模体量较大、发展速度较快的主要海洋经济产业及国家鼓励发展的新兴海洋产业，分析上述产业的发展潜力，供海洋经济市场主体发展决策参考。

### 2.1 产业规模较大的产业

2.1.1 滨海旅游业。当前滨海旅游业处于行业生命周期的成长期，竞争相对激烈。2019年我国滨海旅游业增加值达18086亿元，占我国主要海洋产业增加值的50.6%，是份额最大、最重要的海洋产业，也是现代旅游业增长最快的领域，近10年年均增速达17.1%。同时，2019年我国旅游业总收入6.63万亿元，而滨海旅游业收入占全国旅游业总收入的比重不足30%，对标发达国家海洋旅游占比普遍达到2/3，我国滨海旅游尚有较大增长空间。长期来看，海岛综合旅游开发、海洋主题公园及邮轮旅游等细分领域发展前景最为突出，但受新冠疫情影响，邮轮旅游短期内受影响较大。

2.1.2 海洋交通运输业。当前海洋交通运输业处于行业生命周期的成熟期。2019年我国海洋交通运输增加值为6427亿元，是海洋经济分类中规模第二大的产业，近10

年年均增速5.5%。交通运输部数据显示，2019年全国沿海港口实现货物吞吐量91.88亿吨，港口货物吞吐量世界排名前十的港口中，中国占了7席，居世界第一。全球海洋交通运输业保持低速增长，盈利水平不佳，加之新冠疫情及贸易摩擦影响，全球海洋交通运输业遭遇低谷，但长期来看，随着世界经济的发展，全球海运市场规模存在一定的提升空间。此外，当前行业发展面临调整，未来市场资源和份额逐渐向大集团、大组织靠拢，港口行业资源整合趋势也越发明显。

2.1.3 海洋渔业。当前海洋渔业处于行业生命周期的成熟期，全球渔产品消费市场需求旺盛、规模庞大，我国是全球第一大水产品进口国。2019年，我国海洋渔业实现增加值4715亿元，是我国第三大海洋经济产业，近10年年均增长6.5%。海洋渔业整体行业前景较好，特别是远洋渔业、深海养殖持续快速增长，行业吸引力较高。国家层面也支持发展远洋渔业、深海养殖、渔港经济区建设等业态。国外市场可聚焦印度洋、南太、东南亚和非洲海域，国内市场以10大沿海渔港群为主，结合国家级海洋牧场示范区建设的政策机遇，综合考虑休闲渔业、海上风电、海洋生态保护等要求，发展“海洋牧场+”模式。

2.1.4 海洋工程建筑业。当前海洋工程建筑业处于行业生命周期的成熟期，行业下行压力较大，吸引力为中等水平。2019年，我国海洋工程建筑业实现增加值1732亿元，是我国第四大海洋经济产业。由于政策及市场形势变化，围填海及海港工程业务发展放缓，海洋油气开采施工、海上风电建设、海上人工浮岛建设、海洋渔业设施工程建设、海上建筑物拆除等海上工程建筑及海底隧道工程、海底管缆铺设等海底工程建筑具有一定发展前景。

### 2.2 发展速度较快的产业

2.2.1 海洋电力业。当前海洋电力业处于行业生命周期的高速增长期，2019年实现增加值199亿元，近10年我国海洋电力增加值年均增长32.4%，是海洋产业中增长最快的产业。其中，海上风电发展最为成熟，2019年新增装机容量达198万千瓦，同比增长19.6%，累计装机容量达593万千瓦。根据沿海9省市规划，海上风电规划容量近1.3万千瓦，未来仍有超万亿元的市场空间，整体行业吸引力

较大，但行业门槛高，市场竞争日趋激烈。2019年国家发改委《关于完善风电上网电价政策的通知》明确，2018年底前已核准海上风电项目必须在2021年底之前建成并网，方可拿到0.85元/kW时的上网电价。在平价上网日趋临近的大背景下，2021年之前将持续风电“抢装潮”，透支部分需求，风电增速将放缓。但从长期来看，可再生能源的发展是大势所趋，海上风电紧邻用电负荷中心，消纳前景广，且发电稳定、电网接入便利、节省土地等，预计2021年后进入稳定发展期。其余海洋能开发受制于技术及成本，尚未大规模产业化。

2.2.2 海洋矿业。当前海洋矿业处于行业生命周期的成长期，但受深海环境和开采技术限制，深海矿产尚未大规模开采；近年来，结合沿海地区的经济开发建设，海砂开采技术相对成熟，但对近岸海洋环境保护带来一定压力。2019年，海洋矿业实现增加值194亿元，近10年年均增速24.9%。未来结合国家深海矿产的重大开采计划，以及沿海大型基建项目需求，在满足环境保护要求的情况下，发展深海采矿、海砂开采等业务，具备一定的市场增长空间。

2.2.3 海洋生物医药业。2019年，我国海洋生物医药自主研发成果不断涌现，产业平稳发展，全年实现增加值443亿元，近10年的年均增速达22.3%，产业上升空间巨大。生物医药行业的平均毛利润可达50%以上，盈利能力良好。但海洋生物医药业对技术要求高，对资金的需求庞大，受到国家各级法律法规和政策监管较多，行业壁垒门槛较高。

### 2.3 国家鼓励发展的产业

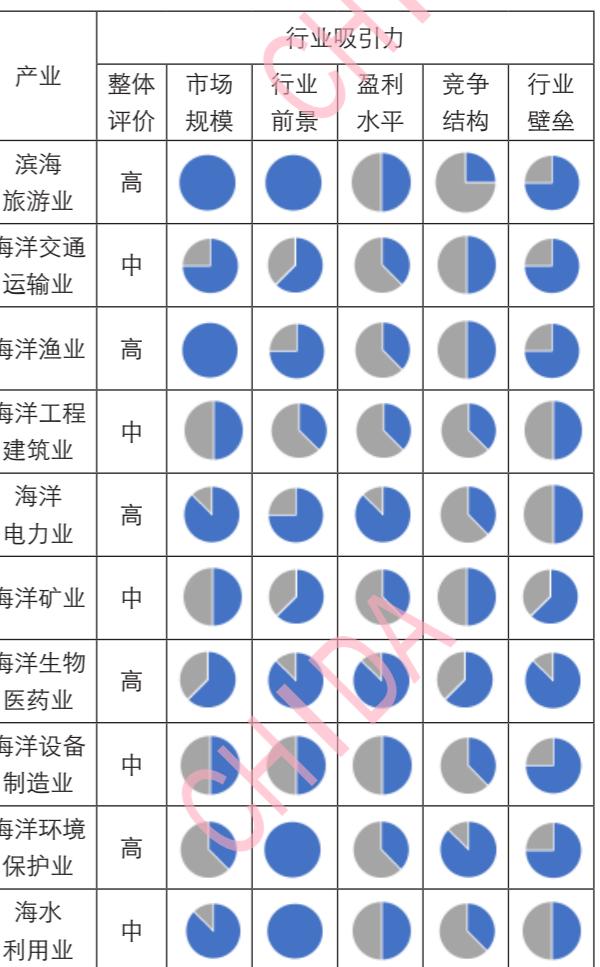
2.3.1 海洋装备制造业。当前海洋装备制造业处于行业生命周期的成熟期，受国际油价和海洋油气开发活动影响，2014年起一段时间内，市场需求一路走低，利润水平受到挤压。自2018年起，市场略有回暖。受地缘政治动荡、贸易关系复杂、OPEC继续履行减产协议等多重因素影响，全球海洋工程装备市场未来仍面临诸多不确定性。总体来看，全球海工装备市场将处于温和复苏态势，海洋工程装备将向作业环境复杂化、装备规模大型化以及水下装备广泛应用的趋势发展。

2.3.2 海洋环境保护业。当前海洋环境保护业处于行业生命周期的成长期，竞争格局尚未成熟，市场规模的大小

取决于政府财政投入和补贴的力度。随着国家将“生态良好”纳入五位一体建设，海洋督察、蓝色海湾整治等系列行动开展，海洋环境保护有着较好的发展前景。具体业态包括海湾、海岸、海滩、海水、海岛的保护和治理，涉及岸滩生态清淤、沙滩修复养护、盐碱地开发利用、生态海堤建设、海岛生态修复、智慧湾岸建设等。

2.3.3 海水利用业。当前海水利用业处于行业生命周期的成长期。其中海水淡化市场规模大，全球总海水淡化量约8900万吨/日，我国海水淡化量达119万吨/日。2019年，我国海水利用业实现增加值18亿元。海水利用业是国家重点支持的产业之一，应用技术较成熟，未来具有一定的发展前景。

表1 主要海洋经济产业行业吸引力评价情况汇总



## 3 海洋经济发展建议

当前国际环境呈现“百年未有之大变局”，给

我国带来重大机遇和挑战，我国海洋经济领域的市场主体需把握时代发展脉搏，融入全球发展浪潮，服务国家战略需求，提升企业核心竞争力，精准发力、分类施策，共同加快海洋经济发展，助力海洋强国建设。

### 3.1 融入全球发展浪潮求进取

我国海洋经济领域的龙头企业宜充分融入全球海洋经济迅速发展的浪潮，构建全面国际化的市场空间格局；针对性对重点市场投放资源，整合内外部优势资源；对标欧美日本等海洋经济体的发展历程，在海上风电、海水淡化和海洋新能源等领域发力；关注国内及东盟、亚太海洋产业发展需求，在海洋油气、滨海旅游和海洋交通运输等传统领域寻找合作机会；并学习借鉴发达国家发展经验，关注海洋金融服务、海洋教育、海洋环保和海洋科技研发等服务业发展，为助力海洋强国战略实施贡献力量。

### 3.2 紧跟国家战略需求谋发展

融入国家大局谋全局，立足国家战略定战略，根据加快建设海洋强国的要求，牢牢把握国家政策、发展规划对海洋经济发展的支持与指引，精准把握海洋经济发展动向。结合粤港澳大湾区、海南自贸区、西部陆海新通道等区域发展战略，以及沿海省市的发展规划，充分发掘海洋经济发展机遇。

### 3.3 面向市场提升核心竞争力

发挥高端策划咨询在海洋经济产业链前端的牵引作用，创造海洋产业价值增量；以科技创新驱动海洋产业发展，以持续提升的技术领先优势掌握市

场主动权，提升核心竞争力；落实人才强企战略，以新兴领域优势人才队伍支撑业务拓展；设立海洋产业智库联盟，为海洋经济发展问诊把脉；搭建全产业链广泛合作平台，通过市场化运作，与地方政府、金融机构、优势合作伙伴、上下游企业共同打造战略联盟，通过外部合作资源谋发展聚合力；不断创新海洋产业经营模式、盈利模式、合作方式等商业模式，通过投建营一体化运作谋求海洋经济多业并举，以商业模式创新促进海洋经济高质量发展。

### 3.4 分类施策提升产业发展成效

从行业吸引力（市场规模、行业前景、盈利水平、竞争结构、行业壁垒）及企业竞争力（现有基础、拓展能力）等维度，客观分析相关海洋产业的发展潜力，进而对不同的行业吸引力、企业竞争力的海洋产业采取针对性的发展策略。例如，对于企业竞争力很强、行业吸引力很高的优势产业，宜继续巩固发展，采取“继续扩大投资、巩固主导地位”的发展策略；对于企业竞争力很强、行业吸引力中等的传统产业，宜优化调整，采取“选择优势的细分市场、大力投入”的发展策略；对于企业竞争力中等、行业吸引力很高的新兴海洋产业，宜加以重点拓展，采取“选择细分市场，追求主导地位”的发展策略；对于企业竞争力中等、行业吸引力中等的海洋产业，宜相对谨慎，采取“选择细分市场、专业化发展”的策略；对于企业竞争力一般、行业吸引力很高的新兴海洋产业，宜适度投资，采取“收并购策略”，依托资本实力对高增长潜力的企业进行财务投资，进入目标市场。

#### 作者简介：

汤伊琼，女，中交第四航务工程勘察设计院有限公司，智慧城市公司总经理。



韦广荣，张汉卿

中交天航环保工程有限公司

Wei Guangrong, Zhang Hanqing

CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd.

## 小型绞吸式挖泥船操作要点及施工参数的优化研究

Study on the Optimization of Operation Point and Construction Parameters of Small Cutter Suction Dredger

**摘要：**近年来，我国江河湖泊环境污染问题日益严峻，水污染从局部河段到区域和流域，从单一污染到复合型污染，从地表水到地下水，严重制约了水环境保护的可持续发展。环保疏浚是解决上述难题的一项有效措施，小型环保绞吸式挖泥船作为环保疏浚工程的主要机械有着重要作用，因此对环保绞吸挖泥船的操作要点及施工参数的优化提出了更高的要求。本文结合一工程实例，分析小型环保绞吸挖泥船的操作要点、施工中实际遇到的突发情况的解决措施、以及针对该项目的施工参数优化，以此为借鉴，为相似的工程提供有力的支持。

**关键词：**小型绞吸式挖泥船；环保疏浚；操作要点；参数优化

#### Abstract

In recent years, the environmental pollution problem of rivers and lakes in China has become increasingly severe. Water pollution from local river sections to regions and river basins, from single pollution to compound pollution, from surface water to groundwater, has severely restricted the sustainable development of water environmental protection. Environmental dredging is an effective measure to solve the problems mentioned above. Small environmental small winch dredger plays an important role as the main machinery in the environmental dredging project. Therefore, higher requirements are put forward for the optimization of operating points and construction parameters of environmental winch dredger. Based on an example of a project, this paper analyzes the operational points of small environmental winch dredger, the solutions to the emergencies encountered in construction, and the optimization of construction parameters for the project, and provides strong support for similar projects.

**Key words:** small cutter suction dredger, environmental protection dredging, operation key points, parameter optimization

## 简介

近年来,随着国内对水环境治理的需求日益增多,小型绞吸式挖泥船依靠船体吃水深度小、可拼装拆解、灵活性强的特点,得以适应多种工况,在国内环保疏浚市场占有一席之地。

以汉沽工程项目为例,力高畅海蓝湾休闲旅游项目利用挖泥船吹填造陆,吹填区距离施工区非常近,业主主要上方土方量达到标准,这就给我施工方带来了难度,需要挖出规定的土方量。但同时,对下层的工程质量要求并不苛刻,不需要质量较高的底层平整度。

## 1 小型绞吸式挖泥船的操作要点

力高畅海蓝湾休闲旅游项目施工区域水位为3m-3.2m左右,泥面高程不一,高至近2m,低至-1m左右,吹填区所需高程3.5m,这就要小型绞吸挖泥船船舶尽可能下放桥梁至最大限度进行作业。



图1 浚河船侧面照片

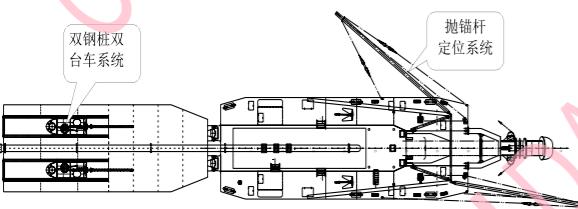


图2 浚河船平面布置图

### 1.1 日常操作中应注意的关键点

注意起桩高度不可过高,尤其在水深较浅时,钢桩极易起冒倾斜,甚至造成人为事故,放桩时要按住放桩按钮,

为避免把钢桩围扣缆绳拽断,切不可中途抬手;

1.1.1 在下放、抬起桥梁时,应时刻注意避免横移缆的紧绷;

1.1.2 在开关绞刀时应注意将桥梁抬至泥面以上再开绞刀,继而下放桥梁,避免横移压力陡增或陡降,给液压系统造成负荷;

1.1.3 在起放桥梁、起钢桩时要利用调速阀,避免液压系统及船体部件受损;

### 1.2 横移摆动施工中的操作要点

横移施工中,要时刻关注四个数值,即横移压力、绞刀压力、真空压力、排出压力。前三个压力数值是可以通过直接调整横移拉力和调整桥梁下放深度(切泥厚度)而直接控制的。在一般的情况下,横移压力可以达到的最大值与锚提供的拉力有关,对于浚河船,绞刀压力应尽可能控制在10MPa左右及以下,而真空压力超过0.05MPa即会产生震车现象。真空压力、排出压力则反应堵口(爆排管)、堵泵、堵排管(管线死弯)等现象。

除四个数值的着重关注,另外要注意显示器上速度的大小、横向轴位置坐标及外界参照物,并观察横移缆、锚头缆及各绞车的运转情况,判断船舶的运行状态。

在控制船舶摆动作业时,应保证其平稳横移。每一次横摆要缓慢起动、缓慢停止,摆至边线、换桩之后重新起步时,拉动横移的速度要由慢至快。

### 1.3 移锚过程

一般的,浚河船在进尺8米左右即要移锚,可以参考在线距、锚杆位置、锚机缆绳圈数来判断是否应该移锚。

1.2.1 在摆动过程中关闭锚缆自由放,将调速阀调至最小,随横移慢收锚头缆,两者收缆速度最好保持一致,如锚头缆紧绷则暂停收缆,这样做不仅在倒锚时节省起锚时间,而且不易使缆绳打卷出槽、乱股,是必要合理的操作程序。

1.2.2 摆至边线后,关闭绞刀,下放桥梁至其入泥(表现为船头抬起),使船舶保持静止状态。略放横移缆,将锚头缆平稳拽出泥面。

1.2.3 用调速阀控制起锚速度,使其起升速度平稳,不

急于拽出水面,同时收横移缆,将锚移至前方。不让锚出水面是为了利用水给锚施加阻力,有效保持锚的平稳前收,避免后限位缆陡增拉力。

1.2.4 在锚杆摆至前端后,将锚拽出水面,慢收横移缆,待锚杆与锚齿略成角度后快速下放。

1.2.5 增加锚的入泥深度并试拉力,方法是锚下放后入泥后,因为此时桥梁深度大于锚直接下放深度,慢收横移缆,可让锚更深入泥层之中,提升拉力。根据本项目泥质情况,此时如果横移拉力表上升至100MPa左右,则锚下的较为稳固。

1.2.6 开启自由放、抬桥梁、开绞刀,恢复作业。

## 2 施工中实际遇到的突发情况的解决措施

### 2.1 锚缆在地铃位置出槽

在起锚、下锚时,锚头缆在地铃位置容易出槽,卡住地铃滑轮,使得无法收放锚头缆。这时需要将地铃滑轮轴的制动挡板取下(拧开螺丝),拔出滑轮轴,重新安装。

预防此现象,在移锚时,首先在摆动过程中就要慢收锚头缆,使锚缆保持轻微紧绷的状态,不要摆至边线再猛收锚缆;其次在起锚时要掌握好起锚速度,地铃处是否正常。在日常作业期间也要给地铃滑轮勤加黄油。

### 2.2 锚缆缠住锚齿

在下锚时因锚的下放形态不佳,或泥面不平等因素会导致锚头缆缠住锚齿,使锚齿无法抓住泥层。这时应将两根钢桩同时下放入泥以固定船位,将桥梁抬至最高,松锚头缆收横移缆,使锚尾到达横移滑轮位置,在稍收锚头缆,使锚位于水面以上。之后需要两人配合,一人用消防钩勾住锚头缆,另一人在操作放出锚头缆,使锚头缆脱离锚齿。最后正常下锚起桩,恢复作业。

预防此现象,在下锚时应慢收横移缆,使锚尾(杆)与锚齿呈一定角度下放,这样不容易使锚入泥时向后翻倒,继而导致锚缆缠住锚齿。

### 2.3 绞刀憋死

在施工中,如桥梁抬离泥面,绞刀依然呈憋死状态的话,应先关闭绞刀,将船摆至边线,再脱泵,把桥梁起高,上绞刀头观察有无杂物憋住绞刀。如有杂物则进行清理,

摆至边线的好处是,可使杂物掉在挖槽区域外。

### 2.4 限位缆断裂

#### 2.4.1 前限位断裂

前限位缆断裂一般出现在左锚杆,因为正刀容易跑刀,有时接近右边线时,绞刀突然吃住硬泥层,横移速度顿时加快,如果此时不关绞刀,加上锚背,左锚杆会突然后摆,扯断左前限位缆。当然,这也和左锚机失去自由放有关。

另一方面,在起锚时也容易造成前限位缆断裂,因为许久不移锚,锚的位置过背,在起锚时则前限位缆也容易受力。

预防此现象,首先要勤移锚,如未能良好掌握移锚时机,则在准备起锚时,先观察锚缆是否竖直,如不竖直,则应将船往边线外多摆一些再起锚。

#### 2.4.2 后限位断裂

一般存在于移锚时,锚起高于水面,无法利用水流增加锚的前移阻力,加上横移缆收缆过快,使锚杆迅速前摆,扯断后限位缆。

通过重新插扣或对接来解决问题,也可在限位缆上接轮胎来预防断裂。

## 2.5 跑刀

横移中经常会出现跑刀现象,可以采用正刀增大切泥厚度的方法杜绝这一现象。但由于基槽(床面)原本并不平整,在正刀接近右边线时,跑刀依然严重,此时下放桥梁令其吃住泥面的方法并不可取,因为在跑刀过程中下放桥梁只会使绞刀更容易借力向右滚爬,使刀齿进一步抓住泥面。因此要迅速起桥梁,当速度过大时,停顿横移调速,让左横移提供反向拉力。如果此时船舶已远超边线位置,则需要关闭绞刀,防止绞刀缠缆。向回摆时,先开启横移旋钮,待左横移缆绷紧后再开启绞刀。

## 2.6 走锚

在某段区域,因为泥质原因,移锚后经常出现走锚,通过慢拉一来回也无法使锚吃住泥面。这时可选择下锚区域可往基槽外多伸出2m或者多尝试几次下锚。

2.6.1 为了防范走锚导致的卸扣被拽入横移总成现象,应注意以下几点:

(1) 在怀疑走锚时, 应收紧锚头缆, 观察锚缆位置;  
 (2) 绞车上的缆绳在摆至边线时, 缠绕缆绳圈数最多, 此时有几圈缆应做到心中有数, 圈数过多时应参照第(1)点操作;

(3) 左右绞车不同步;  
 (4) 绞车猛转, 横移拉力不大, 船不动或摆动很慢, 说明摆向一端走锚;

(5) 船动, 绞车不动, 说明船舶摆向的另一端走锚。

2.6.2 在怀疑走锚时, 应收紧锚头缆, 观察锚缆位置;

2.6.3 绞车上的缆绳在摆至边线时, 缠绕缆绳圈数最多, 此时有几圈缆应做到心中有数, 圈数过多时应参照第(1)点操作;

2.6.4 左右绞车不同步;  
 2.6.5 绞车猛转, 横移拉力不大, 船不动或摆动很慢, 说明摆向一端走锚;

2.6.6 船动, 绞车不动, 说明船舶摆向的另一端走锚。

## 2.7 堵口、堵泵

这些均是施工中常遇到的情况。基本靠真空表、排压表以及船体状态判断。

堵口时, 应起桥, 摆至边线以外, 脱泵后将桥梁抬离水面, 利用管线回水试着将堵口杂物吹出。再上绞刀头或用辅助船舶查看吸口, 杂物未吹出则需要人工掏口。

堵泵时, 拆除泥泵短节, 将吸管与排管清水放出, 同时开启水泵将回水抽出船外, 再吊起短节, 掏出杂物。

## 3 小型绞吸式挖泥船的施工参数

挖泥船施工参数主要是根据船舶性能和以往实际经验确定, 在具体施工中要结合现场情况进行必要调整。

### 3.1 一般挖泥施工中施工参数

#### 3.1.1 横移速度

横移速度根据挖泥厚度而定, 当单层挖泥厚度大于0.6m时, 横移速度控制在6-7m/min, 当挖泥厚度小于0.6m时, 横移速度控制在10m/min左右。这一数据在不同的泥质条件下, 相对的差距会很大, 这与切泥厚度、横移拉力、上步距离、锚是否处于过背的位置、收放缆是否同步等因素息息相关。

#### 3.1.2 前移距确定

为避免漏挖, 前移距根据每层泥层厚度情况而定, 当单层挖泥厚度大于0.5m时, 前移距控制在0.6m-0.8m, 当挖泥厚度小于0.5m时, 前移距控制在1m左右, 以确保绞刀轨迹连续不断, 避免开挖后出现浅埂。

#### 3.1.3 绞刀转速

一般绞刀额定转速为16-34转/分钟, 转速根据船舶情况、切削泥层的土质、挖泥厚度而定。

#### 3.1.4 摆宽确定

挖泥时摆宽根据船舶尺寸进行确定, 可随工程实际情况进行调整, 正常情况下浚河船施工分条50m。摆动宽度是在每条宽度50m的基础上两边各超宽2m, 确保条与条之间完全衔接以避免出现浅埂。

#### 3.1.5 绞刀切削厚度

绞刀设计切削厚度一般根据绞刀直径确定。

### 3.2 本施工中施工参数(以浚河船为例)

#### 3.2.1 横移速度

本项目左右摆动一刀耗时10分钟左右, 其中正刀4分钟, 反刀6分钟, 则正刀的横移速度要在0.15-0.2m/s, 反刀则在0.1m/s以上。

#### 3.2.2 前移距确定

前移距为0.5m, 以确保绞刀轨迹连续不断, 避免开挖后出现浅埂。

#### 3.2.3 绞刀转速

浚河船绞刀头为皇冠式绞刀, 转速一分钟22转, 在应对汉沽项目坚硬土质时转速较低。对于绞刀转速不够, 解决这个问题需要较大的工程, 要把钢桩和锚机的液压泵管路接到绞刀上, 使其可以提供更大的压力, 更快的转速。如果能将绞刀转速提高到1分钟30转以上, 对硬泥的挖掘能力会显著提高。

#### 3.2.4 摆宽

本项目施工摆宽为30m。摆动宽度是在每条宽度30m的基础上两边各超宽2m, 确保条与条之间完全衔接以避免出现浅埂。

#### 3.2.5 绞刀切削厚度

切层由绞刀尺度和所挖土质确定, 浚河船绞刀直径1.5m左右, 理论上讲, 汉沽项目的硬土, 切层厚度应该为绞刀直径的0.5倍, 但实际施工中, 选取这样的切层厚度, 绞刀压力不大。根据实际情况绞刀压力应该控制在10MPa左右, 才能高效的输出功率。

汉沽项目土质向下渐硬, 故浚河船采用切层厚度2m向前上步, 避免加大挖深, 下层坚硬土质将船向后顶, 无法正常上步。而在泥质较硬的区域, 以2m挖深进步, 横移、绞刀压力都很大; 如果两刀挖则在横移速度上会较快, 符合“用速度找浓度”的原则, 采用两刀的方式可以使船机符合较小, 且上步较快。第一刀挖深1m, 第二刀挖深1m, 实际表明, 在泥层厚或泥质硬的情况下, 两刀走要比一刀走效率高, 对船机符合也较小。

在某一区域为稀薄泥时, 切层厚度一刀超过2m也是可行的, 绞刀、横移压力均不大, 但这时避免真空值过高, 所以要通过横移拉力控制速度, 存在塌方现象时, 可以停止横移, 定点吸一会儿。

#### 3.2.6 浓度控制

平均浓度控制在15-20%。实际操作中根据挖泥仪表的真空值、排压、流速等参数, 利用横移速度控制浓度变化

在15%-20%间, 避免浓度过高吸力不足而导致残留残留。

浚河船挖掘生产率即挖泥船的生产率按下式计算:

$$W=60 \times K \times D \times t \times v$$

式中: W—绞刀挖掘生产率 (m<sup>3</sup>/h) ;

D—绞刀前移距 (m) ; 取值: 0.5

t—绞刀切泥厚度 (m) ; 取值: 2

v—绞刀横移速度 (m/min) ; 取值: 6

K—绞刀挖掘系数, 与绞刀切泥断面积有关, 取值1.1。

$$W = 60 \times 1.1 \times 0.5 \times 2 \times 6 = 396 \text{ m}^3/\text{h}$$

取值生产率为396 m<sup>3</sup>

## 结论

近年来, 小型绞吸式挖泥船依靠船体吃水深度小、可拼装拆解、灵活性强的特点, 得以适应多种工况。在正常施工中, 可根据船舶情况及工况, 采取调节优化船舶施工参数的方法, 提升生产效率。

## 参考文献:

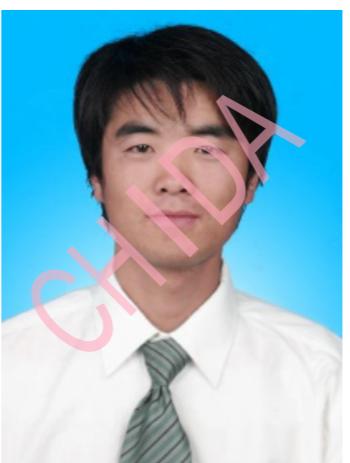
- [1] 周少仙, 绞吸式挖泥船在航道疏浚施工中的应用及优化研究 [J]. 中国水运, 2017, 10:47-48.
- [2] 王明, 绞吸式挖泥船施工的几个问题 [J]. 中国水运, 2010, 10:239-240.

## 作者简介:

韦广荣, 男, 中交天航环保工程有限公司雄安新区项目经理部, 项目总工程师。

张汉卿, 男, 中交天航环保工程有限公司雄安新区项目经理部, 项目施工员。

吴云海, 邹杨, 宋腾  
中交天航港湾建设工程有限公司  
Wu Yunhai, Zou Yang, Song Teng  
CCCC TDC Harbor Construction Engineering Co., Ltd.



## 水气分离装置工作原理及效果分析 Working Principle and Effect Analysis of Water-Gas Separation Device

**摘要:** 近十几年来, 随着我国疏浚事业的飞速发展, 我国形成了大面积的吹填土区域, 由于吹填土形成的特殊性, 有着含水量高, 软土层厚的特点, 若对吹填土处理不当, 就会导致地基沉降或者差异沉降过大, 从而影响后期的土地使用。本文以天津某大型填海造陆工程为例, 过程中为了优化真空预压工艺, 采用了水气分离式真空预压施工工艺。实践表明水气分离式真空预压较传统的射流真空泵式真空预压有四大优势: 一、耗能低; 从技术层面上节约了施工成本。二、质量优; 沉降率, 含水率均优于传统真空预压工艺。三、施工过程中控制与管理更便捷; 恒载抽气阶段, 设备较传统射流装置少且自动化程度更高。四、安全性高, 施工现场所需的电缆, 分电箱较传统真空预压少, 避免了状如蜘蛛网电缆线路, 用电更安全。

**关键词:** 软基处理; 真空预压; 水气分离; 节能; 质量; 高效; 安全

### Abstract

In recent ten years, with the rapid development of dredging in our country, a large area of dredged fill has been formed in our country. Because of the particularity of dredged fill, it has the characteristics of high water content and thick soft soil layer. If the dredged fill is not properly treated, the settlement of foundation or differential settlement will be too large, which will affect the later land use. In order to optimize the vacuum preloading process, a large-scale land reclamation project in Tianjin was taken as an example, in which water-gas separation vacuum preloading technology was adopted. Practice shows that the water-gas separation vacuum preloading has four advantages over the traditional jet vacuum pump vacuum preloading. First, low energy consumption; from the technical level to save construction costs. 2. Excellent quality; Settlement rate and water content are superior to traditional vacuum preloading process. 3. It is more convenient to control and manage in the construction process. In the stage of constant-load pumping, the equipment is less and more automated than the traditional jet device. 4. High safety, less vacuum preloading of cables and distributors needed in construction site, avoiding spider-web cable lines and safer power consumption.

**Key words:** soft foundation treatment, vacuum preloading, water-gas separation, energy saving, quality, high efficiency, safety

### 1 水气分离式真空预压装置简介

水气分离式真空预压装置主要包括真空泵站、水气分离罐、管路、输电线路四部分。

#### 1.1 真空泵站

主要包括仪表箱、配电箱和水环式真空泵。水环式真空泵(见图1)由叶轮、泵体、吸排气盘、水在泵体内壁形成的水环、吸气口、排气口、辅助排气阀等组成的。在泵体中装有适量的水作为工作液。当叶轮按顺时针方向旋转时, 水被叶轮抛向四周, 由于离心力的作用, 水形成了一个决定于泵腔形状的近似于等厚度的封闭圆环。水环的下部分内表面恰好与叶轮轮毂相切, 水环的上部内表面刚好与叶片顶端接触(实际上叶片在水环内有一定的插入深度)。此时叶轮轮毂与水环之间形成一个月牙形空间, 而这一空间又被叶轮分成和叶片数目相等的若干个小腔。如果以叶轮的下部0°为起点, 那么叶轮在旋转前180°时小腔的容积由小变大, 且与端面上的吸气口相通, 此时气体被吸入, 当吸气终了时小腔则与吸气口隔绝; 当叶轮继续旋转时, 小腔由大变小, 使气体被压缩; 当小腔与排气口相通时, 气体便被排出泵外。水环式真空泵在传统真空预压地基加固中很少使用, 主要原因水环式真空泵主要用来抽吸气体, 而在真空预压加固前期会排出大量的水, 影响水环式真空泵的使用, 水气分离装置的发明和应用使得水环式真空泵在地基加固中使用成为可能。

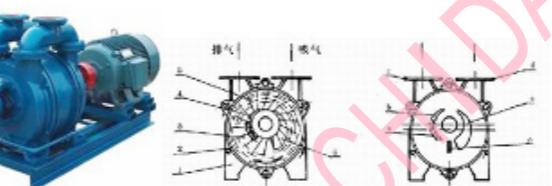


图1 水环式真空泵照片和工作原理图

#### 1.2 水气分离罐

根据真空预压地基的特点设计的一种能将地基中抽出的水和气体分离开来, 连接密封膜下抽气排水管路和膜上真空泵的中间设备。其顶部或上部设有用于与抽真空装置相连接的抽真空气口, 底部或下部设有用于与抽水装置相连接的抽水口, 中部设有用于与水气分离管路的主管

道相连接的水气进口。水气分离罐内设有: ①上密封仓和下密封仓两个密封仓, 上下两个密封仓之间设有隔离板, 该隔离板位于水气分离罐的水气进口的下方; ②进水管道, 进水管道的一端与上密封仓的下部通连, 另一端与下密封仓通连; ③排气管道, 排气管道的一端与上密封仓的上部通连, 另一端与下密封仓通连; ④进水管道上设有进水管道截断阀, 排气管道上设有排气管道截断阀; ⑤下密封仓的上部设有与分仓式水气分离罐外部相通连的进气口, 该进气口上设有进气口截断阀; ⑥抽水口与抽水装置通过抽水连接管相连接, 抽水口或抽水连接管上设有抽水截断阀。当水气分离罐连接的抽水装置启动抽水时, 进水管道截断阀和排气管道截断阀关闭, 进气口截断阀和抽水截断阀打开; 当抽水装置停止抽水时, 进水管道截断阀和排气管道截断阀打开, 进气口截断阀和抽水截断阀关闭。

#### 1.3 管路

包括吸气管、排水管和水气混合管。

#### 1.4 输电线路

包括主电缆、分电缆和信号导线。

### 2 水气分离式真空预压装置工作原理

水气分离式真空预压新设备布设工艺断面见示意图2。密封膜下抽气排水管路通过出膜装置和水气分离罐连接, 水气分离罐和真空泵站连接。水气分离装置内设有排水装置。真空泵站启动后, 在水气分离罐内形成真空压力, 真空压力通过膜下管路、塑料排水板向地基传递, 地基中的水、气在负压作用下, 通过排水板、膜下滤管向水气分离罐内富集。水、气在水气分离罐内自动分离, 气体通过真空泵站排出, 水在罐内达到一定高度后, 水气分离罐内排水装置自动开启, 将水排到罐外。

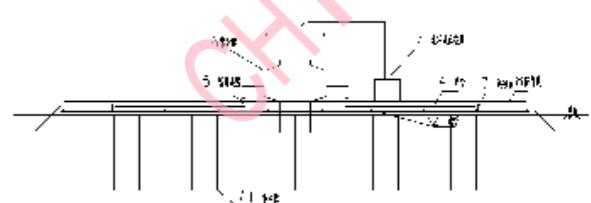


图2 水气分离式真空预压新设备布设工艺断面

### 3 传统抽真空设备与水气分离装置效果分析

	水气分离式真空预压	传统真空预压
加固效果比较分析	水气分离罐放置在加固区的中心位置,通过在区内设置大量的连接点,使得加固区内各个位置的真空压力分布均匀,使得真空预压加固效果得到有效保证。	传统抽真空设备射流泵一般布设在加固区周围,真空压力通过滤管内的水、气体流动做功,向排水板、土体传递。真空压力沿滤管传递过程中由于滤管壁的阻尼作用等不断损耗,尤其在加固前期,加固区内水比较多的时候,损耗就更为明显,这容易造成加固区内真空压力分布不均匀。
能耗比较分析	用电量较传统真空预压工艺可节省30%~40%,符合国家节能减排的政策,水气分离式真空预压工艺摒弃了传统射流泵不能发挥最大效率的缺点,通过水气分离装置,由水环式真空泵只抽气,排水泵只排水,发挥两种设备的最高效能,最大限度的节约能源。以一个面积2.5万平米的常规加固区为例,使加固区内真空度维持在85Kpa以上,采用水气分离技术,需要布设一个真空泵站,泵站的功率为20kw~35kw;布设3~4个水气分离罐,每个罐内设置两台排水泵,整体最大功率不超过100kw,能源节省率在30%~40%;	射流泵是一种靠喷射来形成真空的设备。经过试验发现,真空预压用射流泵在单抽水时效率最高,当抽取水气混合体时效率降低30%以上,甚至更高,造成能源极大浪费。在真空预压地基加固过程中,密封膜下气体是始终存在的,这些气体来源于密封膜漏气、压膜沟气体补给和土体中的水在负压作用下气化所产生的气体,因而射流泵在真空预压过程中,始终不能发挥自身的最大优势。以一个面积2.5万平米的常规加固区为例,使加固区内真空度维持在85Kpa以上,采用传统设备,按照规定,需布设7.5kw射流泵25台,功率总计187.5kw。
质量控制比较分析	水汽分离装置可以根据现场实际工况进行拆分或集成,如果加固区表层强度较高或靠近路边(临时路),可以将设备集成,采用大功率真空泵,比如30kW、50kW、100kW等,几个加固区共用一个真空泵站,便于管理和更大限度的节约能源。如果加固区远离路,且土质非常软,比如超软土,可以选择小功率泵,由人工运送和安装。膜下压力也可以通过真空泵站的变频装置调节控制,因此便于施工和质量控制。	地基加固工程中膜上覆水,许多射流泵淹没在水下(见图4),损坏、关闭等不能及时发现,真实的开泵率不能完全在膜下真空度中体现,给地基加固质量控制带来不便和隐患。同时地基加固后期开泵率之争由来已久。
电力设备比较分析	大幅降低电力设备(如变压器)的投入,同时又减少加固区内电缆的用量,降低漏电风险,便于现场用电安全管理(见图3)。以一个面积2.5万平米的常规加固区为例,使加固区内真空度维持在85Kpa以上,采用传统设备,按照规定,需布设7.5kw射流泵25台,每台射流泵都需要一根独立的电缆,25台射流泵大概需要4000延米的电缆(见图5)。加之每台射流泵的寿命是不一样的,在工作过程中大概有30%~40%射流泵需要维修或者更换。	以一个面积2.5万平米的常规加固区为例,使加固区内真空度维持在85Kpa以上,采用传统设备,按照规定,需布设7.5kw射流泵25台,每台射流泵都需要一根独立的电缆,25台射流泵大概需要4000延米的电缆(见图5)。加之每台射流泵的寿命是不一样的,在工作过程中大概有30%~40%射流泵需要维修或者更换。
安全性比较分析	电缆用量少,天然减少电缆破损、漏电、落水等风险;总体耗电功率低,分电箱数量少,检修方便安全;一个2.5万平米分区只有3~4台水气分离罐,巡视检修简单,降低了分区工人工作量同时增加了安全性。	电缆用量大,密如蛛网,极易发生破损、漏电和落水等安全问题。由于耗电功率大,分电箱容易发生保险损坏、漏电等问题。一个2.5平米分区需要25台射流泵,巡视检修极其困难,无形中会给分区工人带来安全风险。



图3采用水气分离装置加固现场照片



图5采用射流泵真空预压加固现场照片

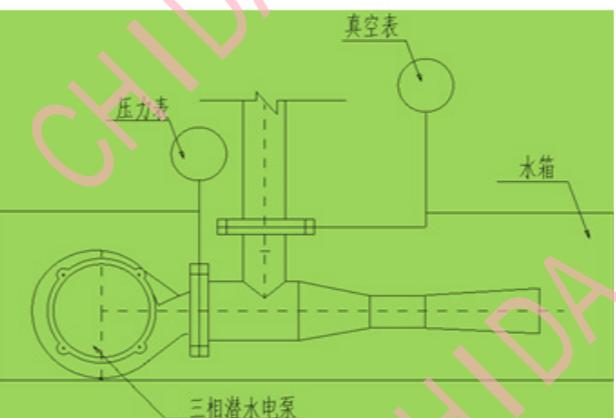


图4射流泵原理及现场工作图

## 4 应用实例

### 4.1 中新天津生态城北塘港区一期补吹及软基处理工程

#### 4.1.1 工程概况

本工程位于渤海湾西部的天津港北部海域,北塘永定新河入海口北岸,已建天津市海挡外移一期工程实验段工程南侧,为原天津海滨休闲旅游区临海新城围海造陆项目南堤南围堤及吹填工程(I标段,以下简称南堤南工程I标段)工程范围内。

本工程区域内由于围堤下方已进行地基处理,且受堤身结构影响存在漏气的可能,真空预压边线确定时考虑对现状围堤进行退线,北侧处理边线为海挡外移轴线内退12.7m,南侧处理边线为南堤南工程I标段南围堤内退8m,东侧处理边线为南堤南工程I、II标段隔埝内退8m,西侧处理边线为码头区一期东围堤轴线内退9m,由此确定真空预压处理总面积为1283156.71m<sup>2</sup>。

#### 4.1.2 设计要求

膜下真空压力不小于85kPa,处理后地表承载力特征值 $\geq 60kPa$ 。

#### 4.1.3 真空预压处理

##### (1) 坚向排水通道

采用B型塑料排水板作为垂直排水通道，塑料排水板应采用可测深的塑料排水板。排水板按正方形布置，间距0.9m，南侧南堤步道区域内（C43~C50区、CG8~CG13区、CG20区、CG26区、CG27区）排水板底标高打设至-14.0m，其余区域板底标高打设至-10.0m。

#### （2）水平排水通道

在土工布上面铺设厚度不小于400mm的中粗砂垫层，形成水平向排水通道。

#### （3）密封系统

密封系统采用一层150g/m<sup>2</sup>编织布+两层聚乙烯或聚氯乙烯薄膜，密封膜要求在工厂热合一次成型。

#### （4）抽真空系统

抽真空按照每个加固区布设3组水气分离设备，使膜下形成85kPa以上的真空压力。以C-1区为例，下图为抽真空系统工艺的平面布置示意图。

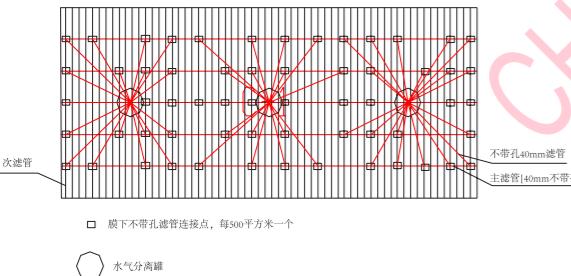


图6 C-1区水气分离抽罐、连接点、真空泵平面布置示意图

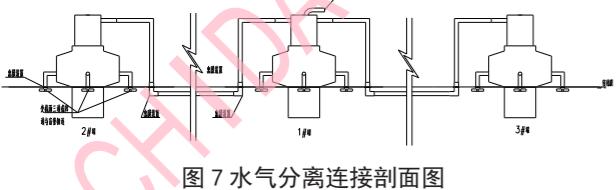


图7 水气分离连接剖面图

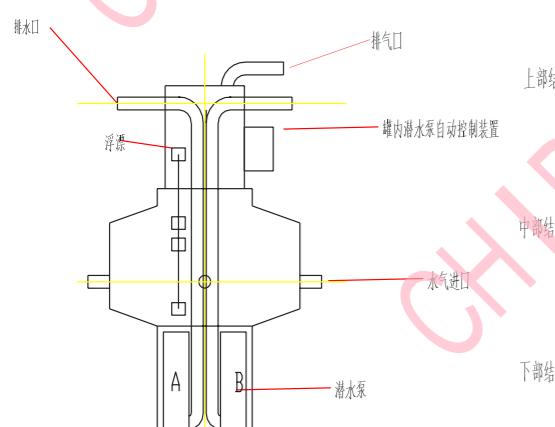


图8 水气分离罐管体结构图



图9 新型水气分离抽真空设备

#### 4.1.4 卸载标准

##### （1）一般真空预压区

- （a）固结度 $\geq 85\%$ （按实测沉降量曲线计算）；
- （b）连续5天的平均沉降速率不大于2.0mm/d；
- （c）有效抽真空时间不少于100天。

为验证水气分离装置加固效果，经建设、监理、设计单位同意，特在本工程选取两个面积相同分区C16、C23区，C3区采用传统射流泵真空预压工艺，C23区采用水气分离式真空预压工艺。根据监测资料对C16、C23区计时满100天真空预压加固效果分析结果如下图：

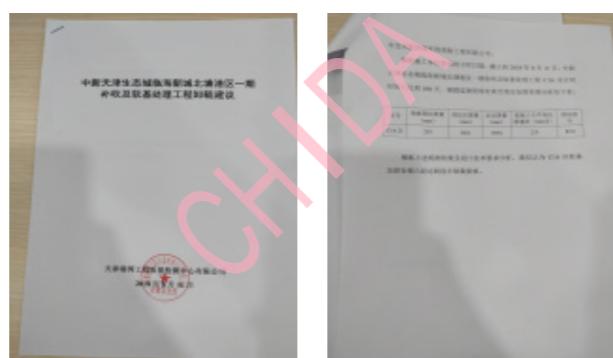


图10 C16区卸载建议

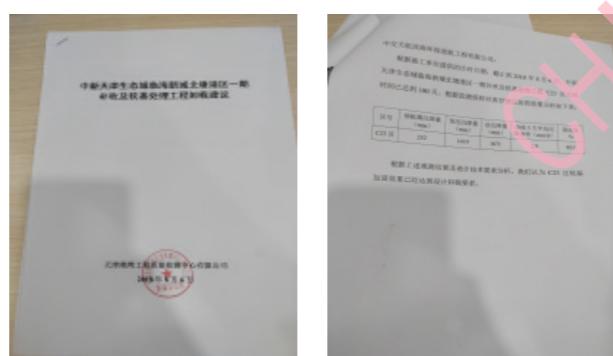


图11 C23区卸载建议

经试验，水气分离真空预压工艺可以达到和传统真空预压一样的加固效果，且具有更加节能、维护更加简单方便等优点，因此本工程其他分区采用水气分离式真空预压工艺。

#### 结语

现阶段水气分离式真空预压工艺在案例工程工程中取得良好效果，但由于其应用还并不广泛，其在其他地基处理工程中能否取得预计效果还需要实践检验，其在技术上的修正、改进方面还会比较多。通过现阶段对该工艺在具体工程中应用的认识，水气分离装置以其高效性、自动化、准确性等优势能够适用较多的真空预压项目，大量的软土地基工程已为水气分离式真空预压工艺提供广阔的平台，

水气分离装置将会成为真空预压技术打造低能耗、可持续利用方面的主力军。

#### 参考文献：

- [1] 许胜,王媛.真空预压法加固软土地基理论研究现状及展望[J].岩土力学,2006,27(S2):943-947.
- [2] 王劲,陈晓平.真空预压法对周边地基变形影响的研究[J].岩石力学与工程学报,2005,(S2):5490-5494.
- [3] 汪令松,周怀民,齐永正.真空预压法加固机理分析[J].安徽冶金科技职业学院学报,2009,19(02):41-44+51.
- [4] 陈小丹,赵维炳,周智勇.真空预压法加固软基的特性和机理探讨[J].路基工程,2005(03).

#### 作者简介：

吴云海，男，中交天航港湾建设工程有限公司第四项目经理部，项目经理。

邹杨，男，中交天航港湾建设工程有限公司第四项目经理部，项目副经理兼项目总工程师。

宋腾，男，中交天航港湾建设工程有限公司第四项目经理部，主办技术员。



冯晨, 吴永彬

中交天航港湾建设工程有限公司

Feng Chen, Wu Yongbin

CCCC TDC Harbor Construction Engineering Co., Ltd.

## 耙吸船黄骅港航道复合工况施工工艺

### Construction Technology of Composite Working Condition of Tshd Huanghua Port Channel

**摘要:** 黄骅综合港是河北省南部沿海地区的重要新兴港口, 是冀中南部最便捷、最经济的出海口, 其于2009年正式开工以来, 我公司绞吸船、耙吸挖泥船先后进场施工。其中航道疏浚部分由耙吸挖泥船主体实施, 在施工过程中遇到了土质不易沉淀、沉淀后不易挖掘、扫浅效率低等各种问题, 通过所有耙吸船在黄骅施工期间的总结以及工艺部门现场调研资料的汇总分析, 为其他耙吸船施工黄骅工程或者类似工程提供参考。

**关键词:** 耙吸船; 航道; 施工工艺

#### Abstract

Comprehensive in Huanghua port is one of the important emerging port, south coastal area in Hebei province, and it is the convenient and economic. From 2009, TDC cutter-suction ship, trailing suction Hopper dredger successively in the construction. Part of channel dredging, implemented by the trailing suction hopper dredger subject encountered some problems in construction process difficult to settle in the hopper, the settlement soil is harder than before, shallow points cleaning efficiency very low. During the period of construction through the summary and the analysis, our team compiled the dredging technology, for other trailing suction vessel in Huanghua engineering or similar engineering construction to provide the reference.

**Key words:** trailing suction hopper dredger, waterway, construction technology

#### 1 工程背景

黄骅港位于河北省沧州市以东约90km的渤海之滨, 恰置河北、山东两省交界处, 环渤海经济圈的中部。

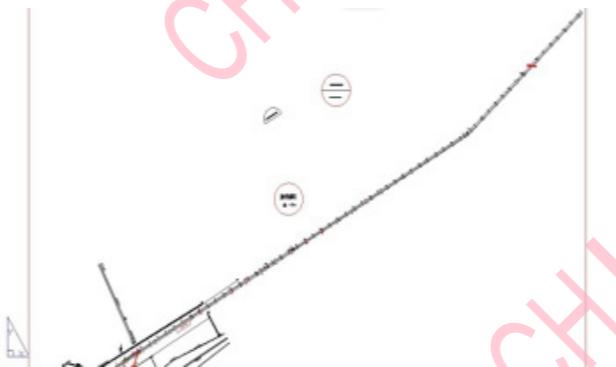


图1 黄骅港综合港区、散货港区20万吨级航道二期工程  
总平面图

该工程(图1)航道总长度为56.8km, 航道里程3+700~60+500段, 航道设计底宽246m, 航道设计底标高-18.3m(其中航道里程19+500~25+000段适当增加备淤深度, 航道设计底标高-18.5m, 防沙堤口门19+500~22+500附近横流较大, 航道设计底宽276m)。设计疏浚基建土方量共2803.1385万方。

#### 2 复合施工工况

##### 2.1 复合的自然条件

潮流: 不规则半日潮(落潮流时间长于涨潮流时间大约1小时); 最低潮位0.26米最高潮位3.58米最大潮差2.26米; 涨潮流流向大约280°, 与航道夹角约40°, 最大流速约1.7节; 落潮流流向大约80°, 与航道夹角约10°, 最大流速约1.2节。

风向: 该区常风向为E向, 次常风向为SW, 其出现频率为10.5%和9.8%; 强风向为E向和ENE, 该向≥6级风的频率为1.2%。春季偏东风居多, 夏季雷雨大风风向不定, 秋冬季大风频发, 给船舶施工造成影响。

##### 2.2 复合的土质情况

施工区土质主要为淤泥和淤泥质粘土(2、4、5、6级土), 该土质不易沉淀; 个别区域为密实土(9、10级土), 该土质沉淀后不易挖掘, 相对开挖难度大。

##### 2.3 复合的施工区环境

为保证工程进度, 施工区域有多艘施工船舶共同施工,

包括绞吸挖泥船和耙吸挖泥船, 施工期间需要密切保持联系, 确保安全施工; 施工区域过往船次较多, 施工船舶为其进出港避让频繁; 施工区域渔船较多, 经常下流网捕鱼, 在往返抛泥区的路上需沿航道绕行; 施工区域距抛泥区较远, 进一步增加了抛泥时间, 影响船舶周期生产效率, 挖抛作业产能低。

#### 2.4 复合的水深分布

该工程水深分布较复杂, 浅区、浅埂、浅点分布不均匀, 个别浅埂、浅点土质较硬, 最大高差达到近5m, 增大施工难度。

#### 3 耙吸挖泥船黄骅港航道复合工况施工工艺

##### 3.1 溢流施工

根据黄骅港区潮汐特点, 土质为淤泥质土且不易沉淀的复合情况, 故制定以溢流施工为主, 装舱施工为辅的施工工艺。

###### 3.1.1 常规施工工艺

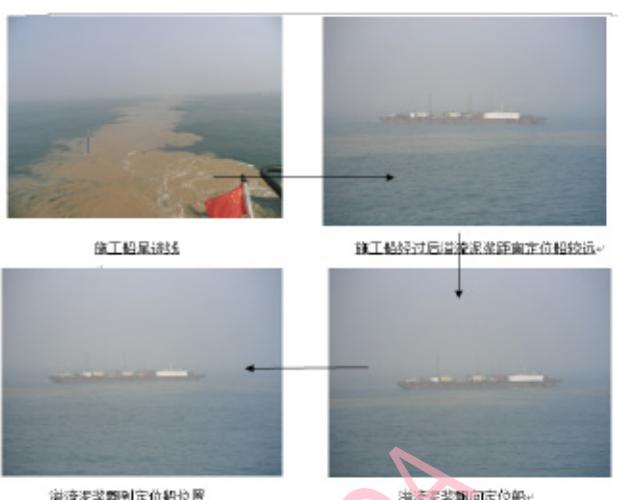


图2 溢流效果图

为更好发挥溢流施工在该工程中的效果, 有针对性的制定下风流施工工艺(图2)。该工艺更好的利用大潮期间流速快的特点, 在下耙施工后, 根据涨落潮流流向确定施工位置, 后根据水上外排的特点, 先期装船将船舶吃水进行调整, 调整后使水上外排排出流与海面接近平行, 尽量减小向下角度, 这样就减少疏浚土向下的分速度, 且水平速度加大, 与潮流速度叠加后加速向槽外溢流。

###### 3.1.2 施工中主要问题介绍

船舶进行中线施工时,若采取装舱施工,由于运距较远,影响船舶产能及时间利用率;若采取溢流施工,由于潮汐和土质原因,影响溢流效果。

鉴于此种情况,灵活运用下风流施工工艺,主要根据风流大小不同,利用风流对泥土进行搬运,从而溢流出槽。

在风流较小的时候采用中线附近折线施工,目的是将中线附近的泥“搬”到边线附近,还能减少沟壑的形成,在风流较大的时候采用边线附近下流施工方案,目的是将边线附近的泥和中线“搬”到边线的泥再“搬”到施工区外。除此之外还要注意到施工区以外和槽内的高度差,调节船舶吃水,从而更高效溢流施工。根据船舶吃水情况,及时更改前后装舱出口的使用方式,以保证块状的泥有更多的时间进行沉淀。

### 3.2 边坡施工

#### 3.2.1 边坡施工常规施工工艺

根据潮水及浚挖深度情况,对不同边坡进行分时施工,潮水较高时做相对较浅边坡,潮位较低时做相对较深边坡。边坡采用直线均匀布耙,分层施工,控制质量。边坡附近采用直线结合斜线寻浅施工,有针对性的将施工区内的浅区、浅条进行串联(图3)。

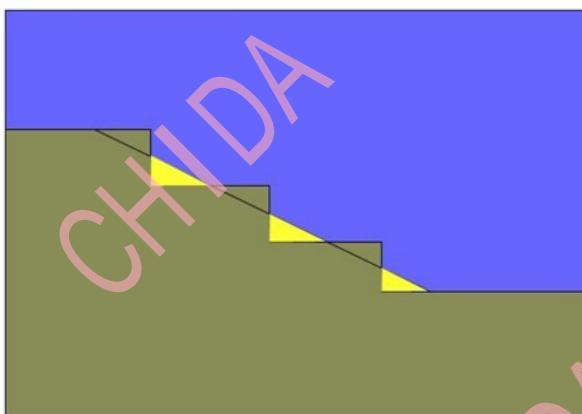


图3 边坡施工方案示意图

#### 3.2.2 施工中主要问题

25+000—28+000施工区域的施工重点是在边坡线,该段最外边坡的设计挖掘深度为-12.5m,而施工区外的平均水深只有-8.5m左右,使得船舶无法安全施工作业。

鉴于此种情况,首先要保证船舶安全;其次要保证船舶能够进行施工作业,对此船舶采取如下措施:

低溢流档、空载施工:目的在于降低船舶载重量。

顶流施工:目的在于增强舵效,避免边坡施工时浅水效应造成船舶机动性变差。

择时施工(潮位≥2m):目的在于保证船舶富裕水深,安全施工。

基于以上条件的情况下才能保证挖掘-12.5m边坡线安全施工。

#### 3.3 扫浅施工质量控制

扫浅质量控制主要针对施工区域内浅区、浅点、浅埂的清除,确保施工质量。

##### 3.3.1 扫浅施工工艺

###### 3.3.1.1 浅区施工操作

针对黄骅综合港项目施工区域土质为淤泥和淤泥质土的特点,为保证基槽施工质量,故前期施工槽内采用大范围,高密度均匀布线,疏挖硬性、粘性土质,槽内中线附近200米区域内采用大“S”型施工方法将施工区内的浅区、浅条消除;后期施工采用多角度斜线作业,即保证施工平整度,又能很好的对疏松后的粘性土质进行挖掘。施工过程中始终保留布线痕迹,不漏挖,减少施工浅点的产生,确保后期施工区平整度。控制下耙深度,每一深度层面控制±0.5米的平整度,防止大垄沟的形成,保持较好的平整度,控制施工质量。

###### 3.3.1.2 浅埂操作

针对浅埂型式调整施工方式,对于宽度较大的浅埂尽可能采取沿浅埂方向精确施工;对宽度较小的浅埂在确保船舶和挖泥设备安全的前提下采用斜向施工确保施工效果,及时调整下耙深度,防止泥耙偏航。

###### 3.3.1.3 浅点操作

针对浅点分布间距不大,没有明显疏密时采用长线曲线找点施工。随着测图的变化,浅点分布不均匀,根据浅

点分布将较密集区域单独分区,施工方法由长线曲线找点施工改为分区域集中施工,按小区域逐个突破,最后剩余零星浅点或浅埂时采取各个浅点精确上点,单独消灭,对硬度特别高的浅点或浅埂采用盘短和拉抽屉式的施工工艺。

#### 3.3.2 扫浅质量控制

为了保证施工质量,利用疏浚辅助决策系统标记实际位置,同时保留72小时以上的耙迹线。根据标记精确走线,同时驾驶员和操耙手积极配合,走到浅点前,提醒操耙手提升耙子离地面一米,待耙子到达浅点后,再将耙子放下海底,防止溜耙出现,同时调整施工设备,以求更好的疏浚效果。

#### 3.4 疏浚工艺优化

针对黄骅港施工区域土质情况,个别区域土质较硬的特点,采取以下措施:

##### 3.4.1 施工参数调整

3.4.1.1 适时调整波浪补偿器压力,在航道内施工时,平整度尚可,但地质较硬,针对此种情况适当调低波浪补偿器压力以增加耙头对泥面的压力,增强对硬质土的疏挖。

3.4.1.2 适时启闭高压冲水,个别区域边坡线附近泥质较软,而边坡内的浅埂泥质较硬。故施工时出港方向主要针对边坡内浅埂施工,使用高压冲水;进港方向主要沿边坡线施工,不使用高压冲水。

3.4.1.3 适时调整泥泵转速,根据施工区内的土质进行取样分析,发现上层土质较软,故采用低泵转170rpm(原转速180rpm),高压冲水10bar施工,此方法施工时挖泥参数较之前没有影响,但降低了船舶油耗量。

##### 3.4.2 挖泥设备改进

###### 3.4.2.1 双排耙齿改单排,加装犁齿

由以往经验得出在类似硬质土施工区施工时的最佳挖

掘航速为3.0—3.5节,但实际在满负荷施工的情况下未能达到最佳挖掘航速,因此将双排耙齿改成单排耙齿以保证施工时能达到最佳挖掘航速,但是减少耙齿的同时势必会削弱泥耙的有效破土,针对此问题,在泥耙的耐磨块附近加装少量的犁齿,目的在于弥补耙齿较少的有效破土。

##### 3.4.2.2 板齿改准尖齿

在土质较硬处施工时,挖泥参数均有不同程度的下降,挖泥浓度由1.4t/m<sup>3</sup>瞬间降至1.1t/m<sup>3</sup>左右,泥泵真空由-0.8bar增至为0bar,泥泵流速下降程度不是很明显,耙齿消耗明显上升。为此将耙头的板齿进行消割,改造成强度大于尖齿的准尖齿,这样能最大程度的挖掘地质较硬的施工区,而且还减少耙齿的消耗。

##### 3.4.2.3 不同耙齿组合

针对土质为5、6、10级,泥浆浓度较差的实际情况,将耙头单一的尖齿改为尖齿和铲齿间隔安装,既保证破土能力,又提高了真空度。

#### 结语

公司在黄骅综合港项目工程中充分利用工地水文、气象、土质等特点,有针对性的制定各种船舶施工工艺,且大量施工工艺在施工中运用效果良好。通过对工程施工过程中积累的经验进行归纳和总结,可为今后类似工程在施工中提供有益的参考资料。

#### 参考文献:

- [1] JTS 181-5-2012. 疏浚与吹填工程设计规范 [S]. 天津. 天津航道局, 2012.
- [2] JTS 207-2012. 疏浚与吹填工程施工规范 [S]. 天津. 天津航道局, 2012.
- [3] JTS257-2008. 水运工程质量检验标准 [S]. 天津. 天津航道局, 2012.

#### 作者简介:

冯晨,男,中交天航港湾建设工程有限公司,技术主管。

吴永彬,男,中交天航港湾建设工程有限公司,技术中心常务副主任,副总工程师。

韦杏静<sup>1</sup>, 黄诚昭<sup>2</sup>, 谢一飞<sup>2</sup>

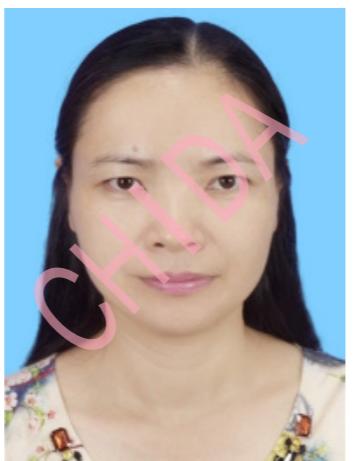
1 中交广州航道局有限公司

2 中交华南交通建设有限公司

Wei xingjing<sup>1</sup>, Huang chengzhao<sup>2</sup>, Xie yifei<sup>2</sup>

1 CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd.

2 CCCC South China Transportation Construction Co., Ltd.



## “ACC”自动绞刀控制系统在8527型绞吸式挖泥船的应用

### Application of "ACC" Automatic Control System in Type 8527 Cutter Suction Dredger

**摘要:** 当今的疏浚市场,施工条件变得越来越苛刻,更多的主要体现在土质硬、挖深大、吹距远、环保节能要求高等方面的项目已占市场主导地位。为应对市场的需求,通过对现有8527型绞吸式挖泥船技术消化的基础上,对现有的疏浚设备技术进行详细研究后,依据计算机技术、智能化技术、ACC自动绞刀控制系统等高新技术,从提高自动化操作方面进行研究改进,提高船舶操作安全性和生产效率,并利用增压原理,增加排距,以解决疏浚行业发展所需的自动化程度更高,挖掘土质更硬、吹距更远、挖深大,安全性能更好等新要求。经过一系列研究改进,提高了8527型绞吸式挖泥船的适应性和竞争力,优化了船舶的挖泥过程,节省能源,降低成本,实现最佳挖泥效果,提高船舶使用价值,使装备技术力量得到跨越式的发展。

**关键词:** 疏浚;装备技术;自动化操作;环保节能;排距

#### Abstract

The construction conditions become more and more stringent for the current situation of dredging market, there are more and more projects in the fields of hard soil, digging deep, long distance, environmental protection and energy saving, and they have occupied the dominant position in the market. In order to meet the demand of the market, on the basis of digesting and absorbing the technology of the existing 8527 type suction dredger, and to study the current dredging equipment technology detailedly, according to the high and new technologies, such as computer technology, intelligent technology, ACC automatic cutter control system, and so on, Study how to improve the level of the automatic operation, and the safety performance and production efficiency, and using the principle of supercharging, increasing the distance to meet the development demand of dredging industry for more automation, excavating the hard soil, long distance, digging deeper, better safety performance and other new requirements. After a series of research and improvement, the adaptability and competitiveness of the 8527 type suction dredger have been improved, the dredging process of the ship is optimized, energy saving, cost reduction, the realization of the best dredging efficiency, the improvement of value of the ship in use, and the equipment technology will be achieved with a great development.

**Key words:** dredging, equipment technology, automatic operation, environmental protection and energy saving, array pitch

#### 简介

8527型挖泥船的研发设计和建造,是为了解决疏浚行业发展的新要求,即需要自动化程度更高,挖掘土质更硬、吹距更远、挖深大,安全性能更好,节能效率高的疏浚设备。经过对现有的疏浚设备技术进行详细研究后,决定利用现有的智能化高新技术,从提高自动化操作方面进行研究改进,提高操作安全性和生产效率,节省能源,并利用增压原理,解决大排距问题,以提高船舶施工适应性。

#### 1 疏浚装备发展趋势

近十多年来,为满足交通运输业、港口建设、能源建设和新兴工业园区、居民商住用地的需要,围海造地业发展较快,从而进一步推动了疏浚装备技术的快速发展。经过一百多年的发展,世界疏浚装备技术已经发生了翻天覆地的变化,光是绞吸船,就已经从小中型跨入大挖深、大绞刀功率、长吹距方面发展,大型超大型长吹距环保型绞吸挖泥船的建造,已从国外四大疏浚公司发展到国内中交所属疏浚公司,目前世界上最大的绞吸船绞刀功率已经达到9000KW以上,吹距已达15km以上。而在疏浚市场方面,施工条件变得越来越苛刻,更多的主要体现在土质硬、挖深大、吹距远、环保等方面项目已占市场主导地位,为应对市场的需要,各大疏浚公司都调整了各自的造船策略。

#### 2 8527型绞吸式挖泥船主要技术参数

为了适应新的市场环境,保障中交广州航道局的长远发展,广航局于数年前建造了“华泰龙”、“华安龙”两艘8527型绞吸式挖泥船。8527型绞吸式挖泥船由IHC设计,大连辽南船厂建造,是一艘非自航绞吸式挖泥船,船体采用适合拖航的线型,首部设绞刀桥梁架,尾部设钢桩台车装置,可挖淤泥、粘土、细粉砂、中细砂、粗砂、碎石和卵石,可无限航区(R1)无人拖航调遣,可在沿海(R2)航区水域进行施工。以下表1是8527型绞吸船“华安龙”、“华泰龙”船舶基本参数。

表1 “华安龙”、“华泰龙”船舶基本参数

效率	4500 立方米 / 小时	主机	CAT 柴油机
----	---------------	----	---------

总长	116.10米	总功率	13670KW
型宽	18.2米	最大挖深	270米
吃水	3.5米	最大排距	16公里
吸管直径	850 mm	排泥管径	850 mm
绞刀功率	1100 kw	泥泵柴油机功率	2000KW+2700KW×2
功率: 1960 kW 水下泵 IHC HRMD-172-36-85	转速: 249 rpm 清水流量: 12600 m <sup>3</sup> /h 压头: 4.4 bar	甲板泵 IHC HRHD-221-37-85	数量: 2 台功率: 3626 kW 转速: 325 rpm 清水流量: 12600 m <sup>3</sup> /h 压头: 7.55 bar

8527型绞吸式挖泥船设计有三台泥泵,可独立完成远距离挖泥、输送、吹填连续施工作业,该类型泥船对于挖掘硬土质、大挖深、吹距远的施工项目有更强的适应性。更重要的是,我们在挖泥控制系统中加入了ACC自动绞刀控制智能系统,该自动绞刀控制智能系统能自动采集绞刀转速、横移系统速度、泥浆浓度和流速、桥梁起落速度和台车速度,然后通过计算机的运算,生成相应的挖泥模式操作次序(图1过程页面关系结构图),在页面上可执行操作和设置,优化了挖泥的过程,实现最佳挖泥效果,与同类型船舶相比,生产效率和疏浚精度更优,并明显降低了挖泥吹岸的万方油耗(在相同土质工况条件下)。

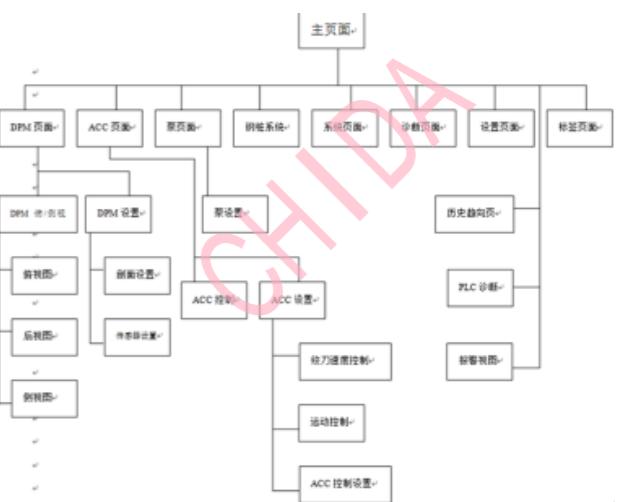


图1 过程页面间关系结构图

### 3 绞刀自动控制 (ACC) 原理及功能

#### 3.1 绞刀自动控制 (ACC) 原理

ACC(Automatic Cutter Control)——绞刀自动控制, 自动绞刀控制器 (ACC) 包括一系列仪器仪表、硬件和软件、显示设备、操作和操纵设备, 它们运行在微软的 Windows 系统和 IHC Systems 的数字平台上。IHC Systems 的 ACC 利用成熟的软硬件系统, 包括一个冗余的可编程逻辑控制器网络 (PLC) 网络, 此网络又由一个高速的、基于 PC 的客户-服务器监测控制和数据采集 (SCADA) 网络监测, 系统的核心是一台独立的专用 PC, 提供一个包含 ACC 算法和模型冗余版本。

PLC 负责进行标准化的, 与仪器、传感器、绞刀 / 斗轮驱动器、横移绞车、桥架绞车、泥泵、真空释放阀、钢桩和钢桩台车相连接的信号的隔离和处理。PLC 系统为相应挖泥模式生成操作次序。

SCADA 系统——可以提供一个冗余版本, 包含两个触摸屏或显示屏和挖泥操作人员使用的键盘-轨迹球组合。其他观测点 (比如在挖泥船办公室) 可根据需要随意添加。根据系统的具体配置, 一台或多台电脑可以提供日志打印机连接、远程调制解调器和导航设备。SCADA 系统起到人机界面的作用。它给操作人员提供 5 个或者更多的处理页面和一些校准、服务和诊断页面。如图 2.ACC 控制系统页面所示。

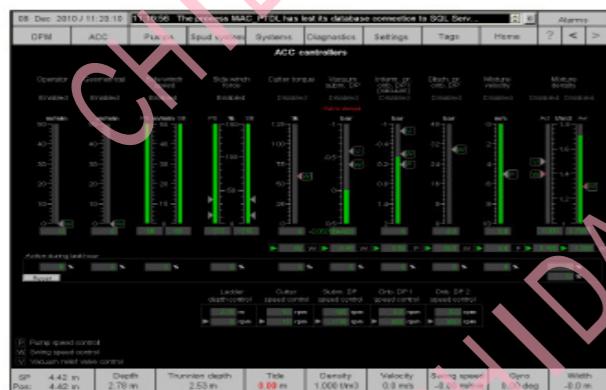


图 2 ACC 控制系统页面

#### 3.2 绞刀自动控制 (ACC) 功能

ACC 提供三种主要功能: 包括模式坐标的自动运动控制, 泥浆传输控制和产量控制。

3.2.1 自动运动控制: 包括横移运动控制、桥架运动控制和钢桩台车运动控制, 它们通过模式坐标功能相互配合使用。

3.2.1.1 横移运动控制: 在最大横移角度、最大允许横移速度、坡度约束和水平步进限制范围内, 通过在横移绞车上施加一个所需的扭矩, 自动控制横移速度, 主动减震以稳定横移速度, 能根据挖泥需要自动控制横移绞车速度、扭矩、刹车及边线的自动回摆等, 提高横移速度控制器的性能

3.2.1.2 桥架运动控制: 在挖槽模式或边坡跟随模式下操纵桥架沿着期望的挖掘轮廓线运动。挖掘层、超挖深度层和清理层可以通过模式坐标功能设置。能根据不同的边坡、精确的挖深要求、潮水变化等来实现自动控制桥梁绞车的起落, 这是人工操作无法实现的。

3.2.1.3 钢桩台车运动控制: 允许钢桩台车在可选的跟随模式下进行相应的步进 (可选的疏浚模式生成器为中断或停止运动、清理过程和继续前进的挖泥过程提供了几个选项), 使用不同的半径值进行钢桩台车的修正以利于疏浚。

3.2.2 泥浆传输控制: 人工智能泥浆流速控制器模块以排放压力为主要参数, 控制三台泥泵和横移速度。泥浆传送过程受到平均粒径、挖泥深度、泥浆流速和平均浓度的影响。AI 控制器可在线估算的平均粒径、泵的磨损及固体物的影响外, 控制器还用于保持泥浆流速, 以使产量达到最大, 泵达到最佳输送状态, 保证混和物输送顺畅, 以达到节能目的。

3.2.3 产量控制: 在特定的切削负荷、横移钢缆速度、泥浆浓度、平均管线泥浆密度、泵的入口、中间和出口压力以及允许的钢桩台车受力基础上, 为达到最高可能产量设定横移速度。必要时主控制器使用这些参数进行控制, 计算最大允许横移速度和超出边界时的回摆。绞刀负荷和扭矩控制器、泥浆浓度控制器已经与采用扩展卡尔曼滤波技术估算过程增益的监测模型并联, 以允许同一绞刀适应不同的疏浚土类型和溢出量。

3.2.3.1 ACC 的原理和功能几乎涵盖了我们传统手动挖泥的所有动作控制, ACC 不间断监测和控制每个单独过程以及它们之间的联系。它运用传统控制方法、人工智能

(AI) 和基于模型的控制 (MBC) 来建立起最佳组合。

3.2.3.2 传统手动挖泥模式是需要操作人员时刻关注绞刀、横移、泥泵流速、柴油机工况等挖泥设备的动作及状态, 高度精力关注多项设备的操作、运行等。而自动绞刀控制 (ACC) 系统它使操作人员将其注意力从紧张单调的任务中转移出来, 把精力集中在挖泥船高效的运作和输出过程中, 相应的减少精神压力, ACC 对于挖泥操作人员来讲是一个非常实用的工具。ACC 挖泥的优点是精确的挖深、多种边坡类型选择、稳定及较经济的流速控制、较稳定的产量、不同土质下绞刀转速的实时改变、平稳及较为快速的边线进台车回摆、自动开启真空释放阀及补水阀保护泥泵等。因此, 它对我们挖泥的过程起到了很大的优化作用, 以下是图 3 挖泥监测布置图。

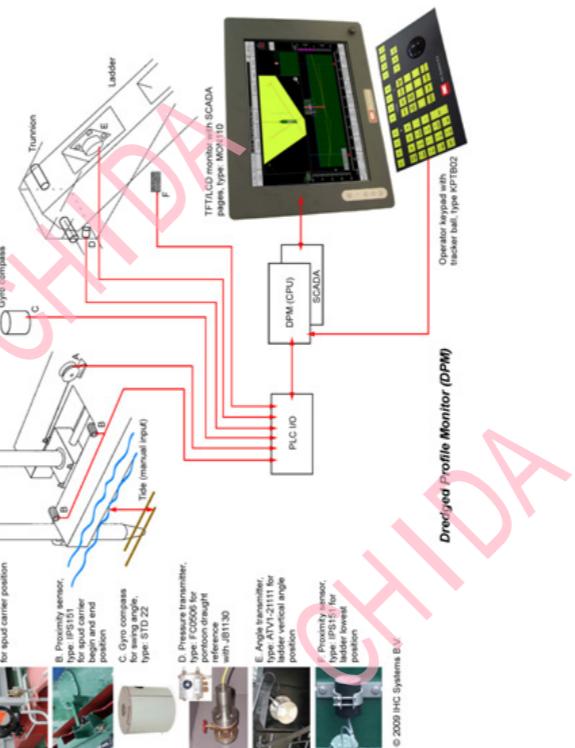


图 3 挖泥监测布置图

### 4 8527 型绞吸式挖泥船在工程项目应用情况：

#### 4.1 节能减排情况测量：

由于“华泰龙”、“华安龙”在船舶建造中就安装了 ACC 系统, “华泰龙”、“华安龙”没有无 ACC 系统时的相关施工数据。为了检验加装 ACC 系统前后对施工能

耗及效率提高有多大。在同一工地同一施工区, 在挖深、开挖土质及吹岸距离基本相同的情况下, 与没有安装 ACC 系统同为 8527 系列绞吸船“港海浚 516”进行施工, 并视作为没有加装 ACC 前的能耗情况, 与“华泰龙”、“华安龙”进行比较。以下是表 2.“港海浚 516”船舶基本参数, 表 3.“港海浚 516”施工能耗情况和表 4.“华泰龙”施工能耗情况。

表 2 港海浚 516 船舶基本参数

效率	4500 立方米 / 小时	主机	CAT 柴油机
总长	116.10 米	总功率	13670KW
型宽	18.2 米	最大挖深	270 米
吃水	3.5 米	最大排距	16 公里

表 3 港海浚 516 施工能耗情况

时间	土方量 (万方)	燃油消耗量 (吨)	油耗 (吨 / 万方)
4 月	100.10	0# 柴油 544.94	5.44 汕头项目
5 月	168.84	0# 柴油 969.49	5.74 汕头项目
6 月	100.42	0# 柴油 501.16	4.99 汕头项目
7 月	55.65	0# 柴油 278.90	5.01 汕头项目
8 月	119.36	0# 柴油 650.24	5.45 汕头项目
合计	544.38	0# 柴油 2944.72	5.41

表 4 华泰龙施工能耗情况

时间	土方量 (万方)	燃料消耗 (吨)	万方油耗 (吨 / 万方)
2011 年 4 月	122	563.10	4.61 汕头项目
2011 年 5 月	199	774.20	3.90 汕头项目
2011 年 6 月	75	313.70	4.18 汕头项目
2011 年 7 月	53	249.20	4.72 汕头项目
2011 年 8 月	98	488.40	4.97 汕头项目
合计	547	2388.60	4.37

从表 3. 中可以看出, 没有加装 ACC 绞刀控制系统的“港海浚 516”平均油耗为 5.41 吨 / 万方。从表 4. 可以看出, 加装 ACC 绞刀控制系统的“华泰龙”平均油耗为 4.37 吨 / 万方。“华泰龙”平均油耗万方节能率为:  $(5.41-4.37) / 5.42 * 100\% = 19.22\%$ 。“华泰龙”、“华安龙”同属有自动绞刀控制 (ACC) 系统的 8527 系统绞吸船, 船舶参数相同, 因此, 两船万方节能率均为 19.22%。ACC 控制系统使操作人员极大地提高施工效率较高, 产量万立油耗低, 节省能源, 降低成本, 真正实现疏浚设备操控的智能化。

#### 4.2 8527 型绞吸式挖泥船在远距离吹填工程上施工分析

8527 型绞吸式挖泥船不但自动化程度高,而且在远距离吹填工程中也有非常好的表现。8527 型绞吸式挖泥船采用三泵串联施工设计,可独立完成远距离挖泥、输送、吹填连续施工作业,按设计最佳挖泥效率为:疏浚土质为中细砂( $d_{50}=236\mu\text{m}$ )、挖深 27 米、排距可达到 5000 米,挖泥产量为  $4300\text{m}^3/\text{h}$ 。为检验其在远距离吹填施工的情况,我们对“华安龙”在福建平潭项目施工情况进行了详细分析,表 5. 中的数据为“华安龙”采用三泵串联施工中情况,项目土质主要为粉细砂、中砂、粗砂、贝壳、粘土、碎石和卵石。从统计表 5 中可以看出,船机完好率为 95.64%,

船机运转状态比较稳定,时间利用率为 65.29% 较低,主要是施工干扰的原因。船舶在排距 5000 米至 10586 米时,平均生产率达到  $3401\text{m}^3/\text{h}$ ,油耗为 5.56 吨 / 万方,在排距达到 10586 米至 10670 米时,平均生产率达到  $3308\text{m}^3/\text{h}$ ,油耗为 5.87 吨 / 万方,油耗相对不高。根据《交通运输节能减排量与投额核算技术细则(2013 年版)》,计算“华安龙”在平潭工地 2012 年 3 月至 2013 年 7 月期间万方油耗为 5.56 吨 / 万方,在此期间,“华安龙”单船节能量为:  $5.56 / (1-19.22\%) - 5.56 = 1.32$  吨 / 万方。同时也更加说明了 ACC 绞刀控制系统在 8527 船型的应用,在长吹距吹填情况下也达到了很好的节能效果。

表 5 “华安龙”福建平潭项目中的施工情况统计

施工船舶	施工期间 (2012 至 2013 年)	船报	生产运转时间	生产性 停歇时 间	停工时间			在场时 间	油耗	挖泥效率	时间 利用 率	自然 影响 率	设备 完好 率	万方油 耗	管线长度	
		土方量	挖泥		自然	故障	其他									
		$\text{m}^3$	h		h	h	h									
华安龙	03.05 ~ 04.23	3593607	954.75	11.33	69.98	0	53.67	93.93	1183.66	1372.2	3763.92	81.62	0.00	95.47	3.82	5600
	04.24 ~ 05.25	1930153	572.23	13.36	158.49	0	9.33	14.59	768	1059.4	3373.04	76.25	0.00	98.79	5.49	6800-7200
	05.26 ~ 06.25	882010	244.99	8.43	101.41	56	8.84	324.33	744	580.5	3600.19	34.06	7.53	98.81	6.58	7800
	06.26 ~ 07.25	1504135	413.77	12.35	53.55	0	11.66	228.67	720	882.6	3635.20	59.18	0.00	98.38	5.87	8750
	07.26 ~ 08.25	1470000	440.58	11.25	63.6	195.25	23.74	9.58	744	875.8	3336.51	60.73	26.24	96.81	5.96	8750
	08.26 ~ 09.25	1603079	479	10	95	66	33	62	744	922	3345.88	65.78	8.80	95.61	5.75	7400-7750
	09.26 ~ 10.26	1556329	457	6	38	30	10	203	744	885	3407.10	62.26	4.03	98.67	5.69	8670
	10.27 ~ 11.28	1418076	410	6	40	0	88	248	792	780	3458.89	52.56	0.00	88.90	5.50	8870
	11.29 ~ 12.26	1031129	330	4	26	0	123	189	672	670	3126.05	49.67	0.00	81.68	6.49	9220
	12.27 ~ 01.22	1732217	500	5	46	56	10	32	648	924	3464.64	77.94	8.56	98.47	5.33	9256
	01.23 ~ 03.01	2264475	683.85	8.33	36.25	7.33	58.74	93.5	888	1280.6	3311.36	77.95	0.83	93.39	5.66	9586-9831
	04.17 ~ 06.09	3156603	1003	9	89	0	14	180	1296	1984	3146.28	78.10	0.00	98.89	6.29	10670
	06.10 ~ 06.28	884712	280.11	5.59	15.96	3.67	23	127.67	456	596.2	3158.44	62.65	0.80	94.96	6.24	10670
	06.29 ~ 07.15	539082	165.84	1.9	12.68	96.25	3.83	127.5	408	308.4	3250.62	41.11	23.59	99.06	5.72	10514-10586
	07.16 ~ 07.20	313857	85.34	0.75	22.25	0	5.58	6.08	120	164.9	3677.72	71.74	0.00	95.35	5.25	10586
	合计		23879464	7020	114	868	510	476	1940	10928	13285	3401.41	65.29	4.66	95.64	5.56

#### 结论

8527 型绞吸船适应大挖深、长排距、土质硬的工程,ACC 自动绞头控制系统在该船上的成功应用,真正实现了疏浚设备操控的智能化,极大地提高了船舶产量,节省能源,降低成本,对船舶使用价值的提高和节能减排都

有着深远的意义,最终提高了企业的经济效益和社会效益。

#### 参考文献:

- [1] 中交广州航道局有限公司,“华泰龙”、“华安龙”,“港海浚 516”。

#### 作者简介:

韦杏静,女,中交广州航道局有限公司,装备技术副经理。  
黄诚昭,男,中交华南交通建设有限公司,副总经理。  
谢一飞,男,中交华南交通建设有限公司,总船长。



于帅气,纪泽明,赵健  
中港疏浚有限公司

Yu Shuaiqi, Ji Zeming, Zhao Jian  
CHEC Dredging Co., Ltd.

## 武汉东湖疏浚底泥的资源化利用研究及应用 Research and Application of Resource Utilization of Dredged Sediment in Wuhan East Lake

**摘要:** 为解决武汉东湖底泥疏浚工程所产生的疏浚底泥难以处置的问题,本文本着减量化、无害化、资源化的处置原则,通过路基填土、绿化种植土、免烧砖三个方面对底泥进行资源化利用研究和应用。一方面在脱水泥饼中添加固化材料,经过搅拌、摊铺、养护后达到路基填筑要求的各项指标;另一方面对疏浚底泥进行肥力改良,使之达到绿化种植土标准;最后通过对疏浚底泥进行加药改良、搅拌、压制等处理,进行免烧砖制备的部分原料。结果表明:通过资源化利用研究和应用,解决了武汉东湖底泥处置的难题,并为工程带来了较大的经济效益和社会效益,也为今后疏浚底泥的资源化利用提供了经验。

**关键词:** 河湖疏浚底泥;土性改良;资源化利用;路基填筑;绿化种植土;免烧砖

#### Abstract

In order to solve the problem that the dredged sediments produced by the Wuhan Donghu Sediment Dredging Project are difficult to dispose of, this document adopts the principles of reduction, harmlessness, and resource utilization, through three methods: subgrade filling, green planting soil, and non-burning bricks. On the aspect of research and application of the resource utilization of sediment. On the one hand, add solidified materials to the dehydrated cake, and after mixing, paving, and curing, it can reach the various indexes required for subgrade soil filling; on the other hand, the fertility of the dredged mud is improved to make it reach the standard of green planting soil; Part of the raw materials for the preparation of non-burning bricks is carried out through the treatment of the dredged bottom mud by adding drugs, improving, mixing, and pressing. The results show that through the research and application of resource utilization, the problem of the disposal of Wuhan East Lake sediments has been solved, and it has brought greater economic and social benefits to the project, and also provided experience for the resource utilization of dredged sediments in the future.

**Key words:** river and lake dredging bottom mud, soil improvement, resource utilization, roadbed filling, green planting soil, non-burning brick

## 1 武汉东湖疏浚工程中底泥资源化利用的必要性

### 1.1 土方处置政策要求

自2000年以来,河湖底泥处置问题得到了国家层面的高度重视。水利部颁发的《水利部河湖管理司关于印发〈2020年河湖管理工作要点〉的通知》中明确持续开展河湖底泥清理整治,坚决遏增量、清存量等问题,对减量化、无害化、资源化提出了更高的要求,也为推进河湖整治提供了保障。

### 1.2 武汉东湖疏浚底泥产生量现状及资源化利用的必要性

武汉东湖项目处理的河湖底泥高达200多万立方米,清淤泥层较薄,底泥的PH值为10左右,富含营养盐、有机质和腐殖质胶质等物质,通过脱水固化工艺,进行泥水分离,所产生泥饼含水率不大于35%,且遇水不进行二次泥化,武汉东湖巨大的疏浚底泥量给河湖底泥资源化利用提出了挑战也提供了机遇。

## 2 我国现阶段底泥处置方式的优缺点

我国的河湖污染底泥处置经历了不同的阶段,大致可分为三种方式:河湖底泥堆积、填筑低洼地和资源化利用。在20世纪中叶至70年代阶段,我国大力发展经济的背景下,国家对河湖底泥处置的方式大多是直接堆积于河湖沿岸,该种方式较为简单、快捷,且运输成本低,能快速达到河湖清淤任务,但该种方式的弊病十分突出,首先该种方式并未达到节能环保的要求,底泥原地处置,也会产生一定量的底泥回流,对水源、土地和大气造成二次污染,目前该种方式已严令禁止。

填筑低洼地是目前消纳场常用的底泥处置方式,对底泥进行简单的灭菌处理,直接倾倒于低洼地或谷地,该种方式简单快捷,处理迅速,在一定程度上缓解了底泥处置的压力,但其会对大气和土壤产生二次污染,且需要占用大量的土地,耗费高,随着城市的发展,消纳场的数量也在急剧减少,该种处置方式逐渐被限制。

随着循环经济、资源化利用目前被专家学者广泛认同,我国也在逐步加大对河湖底泥资源化利用力度。通过对污染底泥进行物化处理,提高底泥综合利用的价值,使其变废为宝、再生利用。一方面解决了底泥处置问题,另一方面实现了底泥再生利用。在我国土壤质量严重下降、污染

底泥利用率低下的背景下,该方式可以良好解决底泥处置问题,但底泥的资源化利用方式目前在市场上推广度较低,国家政策支持和市场接受程度也不足。

## 3 武汉东湖泥浆资源化利用方向探讨

### 3.1 武汉东湖项目工艺概况和底泥处置方案简介

武汉东湖清淤项目以提升东湖水质为基本出发点,促进东湖各个湖周边地区生态友好型、资源节约型的发展,特针对东湖各子湖进行污染底泥清淤,工程内容涉及到环保清淤、脱水固化、泥饼外运、尾水处理等,项目所涉及清淤底泥由于长时间富营养化,底泥中含有TN、TP和COD等成分,经检测东湖底泥中总氮、总磷含量较高,是湖泊部分区域造成重度污染的主要成因,武汉东湖子湖总磷超标倍数在2~5倍之间,总氮监测点超标倍数在1~4倍之间。根据污染程度,通过沉积学法根据污染层和过渡层的等值线确定清淤深度,污染层等值线是确定不同挖泥底高程疏浚作业区分的主要依据<sup>[1]</sup>,经过沉积学法试验,武汉东湖的环保清淤污染底泥深度在0.38~0.56米之间。

武汉市全市仅有汉阳、江夏等6个渣土消纳场且规模有限,伴随着武汉河湖整治力度的加大,消纳场的数量和规模已远远无法满足工程的需要。产生的底泥固化土需要运送到60千米之外的长山消纳场,运输单价高达120元/m<sup>3</sup>,总价高达1.56亿元,运输成本极高,且对环境会造成二次污染,武汉东湖河湖污染底泥处置形势十分严峻,研究东湖清淤底泥资源化处理,发展固废循环利用产业链,对提升武汉市环东湖区域的环境效益、经济效益和社会效益具有重要意义。

### 3.2 底泥资源化利用方向探讨

作为内湖水环境治理的常用手段,环保疏浚治理效果突出,疏浚底泥量巨大,本研究针对将武汉东湖底泥进行路基回填、绿化种植土、免烧砖制作等资源化利用进行研究和应用。本工程所产生的底泥中,含有有机物、氮磷和大量的腐殖质胶体,通过加药和均化处理,对其微量元素控制在允许的范围之内加以利用,也是本工程资源化利用的理论基础。

环保疏浚的工程手段是清淤东湖内源污染,这种方式最为直接和被业界认可,但是由于短时间内产生大量的底泥,若不能采用合理的方式处置,会造成底泥上岸后的二

次污染。本文结合武汉市东湖区域的市政建设,将底泥进行路基回填、绿化种植土、免烧砖制作等资源化利用进行研究,为后续底泥资源化的推广应用提供技术支撑。

#### (1) 路基回填

路基回填是河湖疏浚底泥资源化利用最直接的一种方式。据当地建设工程公司了解到,武汉东风镇至夏家村在建的三级公路路基路面经过挖填平衡后仍然有很大的土方缺口,而本工程河湖底泥经过固化处理后,含水率降至35%以下,再加入生石灰、粉煤灰和砂石等胶凝材料和细骨料拌合后,通过合理的配比使土体达到相应的密实度和水稳定性,是路基土较为良好的材料。



图1 路基土对底泥的利用



图2 配料系统和搅拌系统

根据《公路工程技术标准》,三级公路路基回填土须满足85%以上的压实度、路基回弹模量不小于40MPa、弯沉值不低于290(0.01mm),且有一定的水稳定性和耐久性<sup>[2]</sup>。在本研究试验过程中,通过加入二灰、水泥等外加剂进行分组试验,石灰的主要成分是CaO,向底泥固化土中加入石灰后,Ca<sup>2+</sup>与Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>发生离子交换,通过水化热反应,使胶结物向晶体状态转化,进一步增加土体强度。通过加入粉煤灰,降低孔隙比,减小土体的体表面积,阳离子交换量降低,更易于排水<sup>[3]</sup>。

进行两组不同配料的平行试验:方案一通过加入水泥和生石灰固化剂,具体比例为固化土:水泥:生石灰=72:8:20,取10组路基土试样进行挖坑灌砂法测定密实度,通过灌砂法试验,测得平均压实度为90%,压实强度介于90KPa~100KPa之间。

方案二采用水泥和粉煤灰作为固化材料,比例为固化土:水泥:粉煤灰=67:5:28进行研究测验。同样对现场试验段每组取10组路基土进行试验,测得平均压实度为87%,压实后强度不低于80KPa~95KPa,两组方案的部分试验数据如表1所示:

表1 两组方案的实验数据

配方	泥饼含水率	路基压实度(MPa)	回弹模量(CBR%)	弯沉值	成本分析
水泥+生石灰	30%	88%~90%	55	8	320
水泥+粉煤灰	30%	85%~89%	49	6	290

经过改良处理后的土体经分层碾压后,经过配料系统、搅拌系统等实验程序,两组试验均达到路基土的各项指标,满足《公路工程技术标准》(JTG B01-2014)中关于城市道路支路的标准要求,本研究还对其进行了含水率检测、抗压强度检测等,泥浆经处理后含水率大幅度降低,满足三级公路路基的抗变形能力。但方案一成本要高于方案二成本25%以上,所以本研究以水泥为主要固化材料,粉煤灰为辅助固化材料进行处理,表明改良后的底泥固化土可以作为路基填土材料。

#### (2) 绿化种植土

武汉东湖疏浚底泥中富含有机质和氮磷营养成分,有机质含量达到25g/kg、总氮含量为1.5mg/L、总磷含量为0.1mg/L,可以作为绿化种植土进行改良。但有机质含量过高对土体的液限、塑限、破坏应变、不排水剪切强度、无侧限抗压强度、及固化处理效果有很大的影响,很多学者也通过观察得到有机质增加土体的液塑限,有机质含量越高,土体的天然含水率与初始孔隙比便会线性增加,其剪切强度、渗透性和固结度便会随之减小<sup>[4]</sup>。取10组试样经过重铬酸钾容量法对其进行有机质含量检测,通过平均消耗重铬酸钾的量,测得有机碳平均量为14.5,乘以

系数 1.724, 可得平均有机质含量为 25g/kg, 满足《土壤环境质量、农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15617-2018) 中对三类土和二级花镜所需要的有机质含量  $\geq 20\text{g/kg}$  的标准要求。本研究通过向底泥固化土加入中和剂, 使底泥接近中性, 经酸碱滴定检测改良底泥 PH 为 7.5 左右, 满足草坪土需要的 6.5~8.0 和花坛土需要的 6.0~7.5 的 PH 值要求。在配料方面, 分别进行两组平行试验:

方案一通过采用底泥: 木屑: VT 菌 = 1:0.15:0.003 的质量比进行配料, 经检测土质有机质平均含量达到 25g/kg, 自然堆积状态下单位体积的土壤比重达到了 1.2, 试样孔度介于 42~45% 之间, 通过土壤电导率测定仪测得 EC 值平均为 0.6, 且石砾含量仅为 3%。

方案二通过底泥: 化肥 = 1:3 的质量比进行配料, 测得有机质含量达到 23g/kg, 土壤比重为 1.2, 通过换算公式 {土壤孔度 = (1 - 容重 / 比重)  $\times 100\%$ } , 测得试样孔度平均在 43% 左右, EC 值为 0.75, 满足 0.35~1.2 的要求, 石砾含量为 3%, 满足二级花镜低于 10% 的标准。



图 3 绿化种植土对底泥的利用

通过试验数据分析, 两组方案均满足二级花镜的种植土标准, 直接反映了土壤的紧实度、有机质含量等是符合种植土标准的, EC 值和容重也在种植土的标准范围之内。综合以上分析, 可得出结论: 两种配比均符合二级花镜和一般草坪标准。出于环保考虑, 方案一作为绿化种植土为最佳选择。

### (3) 免烧砖

建筑常见的红砖, 在九十年代被普遍使用, 但其含有大量的硅酸盐矿物(属于不可再生资源), 很多地方的生态也因此被破坏, 国土资源部在 2018 年严禁使用红砖, 这就迫使必须出现新型材料来取代红砖。免烧砖工艺通过向底泥固化土中加入一定量的粘结剂和骨料, 对其压缩处理, 达到一定的强度, 以满足人行步道、广场、护坡的铺筑等。免烧砖的制作设备主要由配料搅拌系统、全功能码垛系统、以及托板回收系统组成, 工艺简单、高效便捷。

在本项目中通过试验配比, 通过加入水泥、石灰类等外添加剂之后形成级配良好的制砖原料, 水泥作为固化处理的主外添加剂, 与土壤中的水分发生水化反应生成水化硅酸钙从而提高整体力学性质。然后进入配料系统进行配料, 本工程具体配料为泥饼: 生石灰: 硫酸铁: 石粉: 水泥 = 38:25:0.6:31:4.5, 并加入 0.2% 的早强剂, 制砖过程中通过严格的配料比, 将材料输入搅拌系统进行搅拌, 材料搅拌均匀后送至主机储料斗, 主机系统将主机储料斗的材料进行压制成砖坯, 叠板机将砖坯叠至 5~6 板后通过叉车运至场地, 具体工艺流程图如图 4 所示。



图 4 制免烧砖工艺流程图

经检测在免烧砖加工场每天洒水养护一周后, 经回弹测试检测其强度可达到 15MPa 以上, 通过严格控制制砖工艺, 随机选取 20 块免烧砖试样作为一组, 每块砖选取 12 个检测点, 每次取五组进行试验, 通过质量检测、配方分析、外观质量检测和强度检测等, 经过回弹检测, 平均强度在 15MPa 以上的试样合格率在 95% 以上, 抗折荷载单块平均达到 5.5kN, 5 块平均值达到 7.3kN, 本研究所制作的免烧砖已符合低强度用砖标准。经过渗水试验, 免烧砖良好的透气、透水性, 也解决了公园中野生定点浇灌给水率不均匀、润湿土体积小等问题, 且免烧砖的抗风化能力和使用期限都是比较良好的, 免烧砖的工艺相对比较灵活多样, 也可根据不同的用途需求, 进行不同样式、版型、图案等的制作, 方便快捷, 灵活性高。



图 5 免烧砖对底泥的利用

## 4 底泥资源化利用效益分析

以武汉东湖水环境提升工程为例, 进行本研究的底泥资源化利用经济效益分析, 具体对比如表 2 所示:

表 2 底泥资源化利用经济效益分析

方案	处置方式	优点	缺点	成本分析	价值分析
武汉东湖	消纳场消纳	简单快捷、无后续处理	资源浪费、污染大, 成本高	工程量约 150 万 $\text{m}^3$ 固化土, 120 元 / $\text{m}^3$ , 总价 1.8 亿元。	无
本研究	路基填土	充分利用, 节约资源	地域受限制, 且需加入配料	每 1000 $\text{m}^3$ 底泥固化土需加入 4500 元二灰等药剂, 共计约 675 万元。	目前路基填土市场价格 36 元 / $\text{m}^3$ , 产生利润 4725 万元
	绿化种植土	改善土壤肥力, 环保、资源利用率高	需加入不同的药剂来改善土质	药剂成本约合 15 元 / $\text{m}^3$ , 共计 2250 万元左右。	绿化种植土单价 40 元 / $\text{m}^3$ , 产生利润 3750 万元
	免烧砖	环保、资源利用率高, 样式灵活、附加价值高	新兴产业, 暂未量产, 市场推广度低	若量产一块砖制作材料成本为 0.45 元, 1 $\text{m}^3$ 固化土可产 512 块标准砖, 则总计成本 3.456 亿元。	砖块市场价格 0.8 元 / 块, 若量产则可产生利润 2.69 亿元

## 5 底泥的资源化利用的成果应用和未来应用成本控制

本研究的成果也在实际工程中得到了一定的运用, 在湖北省武汉市东风镇至夏家村的三级公路的填方工程中, 底泥固化土经过配料、物化反应, 经检测能达到该工程质量标准, 并在 300 米的路基段填方工程中得以应用, 经第三方路基检测已通过质量验收。

河湖底泥是一个长期治理的过程, 在这个过程中会持续产生大量的底泥固化土, 且据湖北省发改委了解到, 湖北省在“十四五”规划期间, 将持续大力发展交通运输网, 拉动经济持续增长, 大量的基建工程对路基填土需求量持续增长, 为底泥固化土提供了长期的资源化利用方向。

随着人们对生态环境的愈发重视, 绿化种植土的前景也十分光明。近年, 各个城市都在兴建公园和生态园, 对园林种植土的需求倍增, 但我国的土地资源十分有限, 底泥经过肥力处理, 作为良好的绿化种植土使用已逐渐被采用。

此外, 本工程所研究的免烧砖工艺目前已与当地绿道维护修缮工程紧密结合, 在武汉东湖绿道修建项目中, 本工程所制作的免烧砖在李家大湾旅游区应用在约 350 米长的绿道, 由于免烧砖可根据不同的要求制作不同的样式, 且使底泥资源化利用产生了良好的经济价值, 为今后底泥的资源化利用提供了经验。

尽管目前底泥处理市场巨大, 且可创造较大的的经济价值, 但不可避免的是, 在目前市场推广度低、暂未达到量产的背景下, 免烧砖的制作成本十分高昂, 如何将制砖成本进行控制, 是未来底泥利用的影响因素之一。免烧砖作为一种环保的利用方式, 通过国家政策的支持, 整合市场资源, 形成完整的产业链系统, 是控制成本并提高市场推广度的一种方法, 另外, 通过对外加剂质量和制砖过程的严格把控, 提高免烧砖的合格率, 也是控制成本的方式之一。

## 6 结论

随着国内外对环保的愈发重视, 针对大量河湖底泥, 其处置问题必须打破固有模式、探索新的方向。本研究通过对底泥固化土微量元素、有机质等的成分分析, 根据不

同的用途加入不同的外加剂进行物化反应，使之达到资源化利用的标准，通过对路基填土、绿化种植土和免烧砖等的再生利用，使得河湖底泥变废为宝。政府部门整合市场资源，并制定相关的资源化利用政策，形成从源头到脱水处理，再到资源化产品应用，形成完整的产业链系统，促进武汉疏浚底泥处理及资源化利用发展。

#### 参考文献：

- [1] 张鑫. 河湖污染底泥环保疏浚深度研究. 北京: 水运工程. 2020.
- [2] JTG B01- 2014. 公路工程技术标准 [S] 北京: 人民交通出版社. 2003.
- [3] 周晓朋. 滨海淤泥质吹填土泥浆絮凝脱水实验研究. 重庆. 2015.
- [4] Landva A.O, Korpilaakko E.O, Pheeney P.E. Geotechnical classification of peats and organic soils. In: Testing of peats and organic soils [C], ASTM STP 820. Edited by P.M. Jarrett. American Society for Testing and Materials, 1985. pp.37-51.



张博

中交天航港湾建设工程有限公司

Zhang Bo

CCCC TDC Harbor Construction Engineering Co., Ltd.

## 大型绞吸船强风化岩施工工艺研究

### Research on Technology of Highly Weathered Rock Dredging of Super Cutter Suction Dredger

**摘要:** 随着全球海上贸易的日益频繁以及贸易规模的不断扩大，随之而来的是各地区对港口的扩建，这直接导致疏浚工程的难度也越来越大，无掩护、强涌浪、复杂土质、坚硬岩石等诸多复杂工况随之出现。采用大型挖泥船直接开挖大体积风化岩已成为沿海深水扩建、新建的主要施工手段。本文以大型绞吸船（绞刀功率 4500kw）天鲸号在西非加纳特码新集装箱码头疏浚工程开挖强风化岩施工为例，对大型绞吸船开挖强风化岩施工中土质分析、绞刀及刀齿选型、挖岩施工区域划分和挖岩疏浚过程的优化等施工技术进行系统的分析、研究和归纳，研究总结了开挖强风化岩的施工工艺，提高船舶施工连续性及生产能力，为类似挖岩工程提供借鉴。

**关键词:** 疏浚；大型绞吸船；强风化岩；施工工艺

#### Abstract

With the increasing frequency of global maritime trade and the continuous expansion of trade scale, the expansion of ports in various regions has followed, which has directly led to the increasing difficulty of dredging projects, uncovered, strong swells, and complex soils. Many complicated conditions such as hard rock have emerged. The direct excavation of large-volume weathered rock by large dredger has become the main construction method for deepwater expansion and new construction in coastal areas. In this paper, the large-scale cutter suction dredger (cutter power 4500kw) Tianjing was used as an example to excavate the highly weathered rock in the dredging project of the new container terminal in Ghana, West Africa. The soil quality analysis and twisting in the construction of super cutter suction dredger excavation highly weathered rock. The construction techniques such as the selection of cutter and teeth, the division of rock excavation construction and the optimization of rock excavation process are systematically analyzed, studied and summarized. The research summarizes the construction technology of excavation highly weathered rock, improves the continuity of ship construction and production. Ability to provide reference for similar rock mining projects.

**Key words:** dredging, super cutter suction dredger, highly weathered rock, dredging technology

#### 作者简介：

于帅奇，男，中港疏浚有限公司，助理工程师。  
纪泽明，男，中港疏浚有限公司，助理工程师。  
赵 健，男，中港疏浚有限公司，工程师。

## 1 引言

伴随着国家“一带一路”战略构想的提出，疏浚行业积极响应国家号召，积极开拓海外疏浚市场。给疏浚业带来新机遇的同时也带来了新的挑战，国外疏浚工程工况大多极其复杂，特别是疏浚土方面，海底土质复杂多变，主体多以风化岩为主，给疏浚作业带来了极大难度。目前，国内对大型绞吸船开挖风化岩的研究较少，多是针对泥砂、珊瑚礁或者软岩等易开挖土质。所以，研究大型绞吸船挖岩的施工工艺，对提高疏浚生产效率，降低工程施工成本，开拓海外新市场具有极为重要的意义。

## 2 简介

### 2.1 挖岩疏浚研究现状

疏浚行业的蓬勃发展，也带来了行业内的激烈竞争，面对着挖岩疏浚施工这个新课题，如何在激烈的竞争中脱颖而出，是每一位疏浚人应该考虑的问题。世界上大的疏浚公司都在技术和设备上做了较为充分的准备。在岩石疏浚当中，绞吸式挖泥船被作为主要疏浚设备，一直是疏浚设备发展的主要方向。例如中交疏浚集团自主研发的自航绞吸式挖泥船，总长约 140.0m，型宽 27.8m，型深 9.0m，设计吃水 6.5m，总装机功率达到 25842KW，其中绞刀功率 6600kw，挖深达 35m。配置通用、黏土、挖岩及重型挖岩等 4 种类型绞刀，可挖单侧抗压强度 45MPa 的中弱风化岩。Jande Nul 公司建造了另一艘大型绞吸式挖泥船。这艘绞吸船（J.F.J.DENUL 号）由荷兰 IMC 建造，属于新一代的绞吸船，总长 142m，宽 27.8m，吃水 6m，航速 12 节，总装机功率 27150KW，总泥泵功率 15800KW，绞刀架重 1450t，便于开挖岩石，挖深范围 6.5~35m。可开挖砂、黏土和岩石。疏浚土可直接通过管径 1m 的管线吹岸，亦可以通过四艘 3700 立方米的泥驳卸泥。另外挖岩绞刀也不断推陈出新，美国 ESCO 公司采用先进的计算机设计系统可根据不同的复杂土质条件进行模拟、分析和设计各种绞刀。（高伟 2007）<sup>[1]</sup>

虽然挖岩疏浚设备在不断的发展应用，但是有关挖岩的工艺技术却缺乏系统的研究。本文借助大型绞吸船天鲸号在西非加纳特码新港的施工情况，研究总结天鲸号开挖强风化岩时遇到的主要技术问题和采用的施工工艺，借以

归纳总结大型绞吸船开挖强风化岩的施工工艺，为后续类似挖岩工程提供参考，也为挖岩疏浚工艺的研究贡献微薄之力。

### 2.2 工程介绍

该工程位于非洲西部几内亚湾北部加纳第一大港口城市特码（Tema），濒临几内亚（GUINEA）湾的北侧，距首都阿克拉（Accra）以东约 26km，位于特码老港现有泊位西侧。施工区域主要为码头基槽、出运通道、下潜坑和内港池。施工区土质主要为泥沙、钙质胶结岩、强风化片麻岩和中风化片麻岩。由于施工海域涌浪太大，所以必须在防波堤的掩护条件下才能施工。



图 2.1 施工区域示意图

## 3 挖岩施工工艺研究

### 3.1 绞吸式挖泥船工作原理

绞吸式挖泥船的工作原理：通过安装于桥梁前端的绞刀旋转切割运动，将海底的泥沙松动，连续运动的绞刀不断地将海底泥沙、岩石等绞碎，绞碎的泥沙与海水混合成泥浆在大气压的作用下，被压入到绞刀后部的吸泥管中，进入吸泥管的泥水混合物，经泥泵加压后，经排泥管输送至指定卸泥区，从而完成绞吸式挖泥船从挖泥、运泥、卸泥等连续作业的疏浚过程。（张克非等人 2018）<sup>[2]</sup>

### 3.2 疏浚土质分析

所有的疏浚问题都可以归结为土质问题，在工程开始就要对土质进行深入研究。但是，由于疏浚工程的特殊性，疏浚土质都处在看不见摸不着的海底，海底土质又复杂多变，土质种类较多且分布不均匀，而地勘资料都是以二维

图纸的形式展现，这极大的增添了工程人员了解施工土质的难度。为了直观准确的分析海底土质分布情况，提高施工水平，利用三维地质建模的方法，建立施工区域海底地质模型是一种很好的手段（缪正建等人 2013）<sup>[3]</sup>。基于地质钻探数据建立海底三维地质建模，并将各土质的试验力学数据输入三维钻孔图中，以便在实际施工中可以全方位动态掌握施工前方土质情况。下面我们以特马港疏浚工程为例，建立三维地质模型。

CH0-045 到 CH0+1000 施工标段的各地层详细土质情况如下：

表 3.1 地层分类

地层序号	地层名称	密实度	颜色	密度 / (g/cm³)	描述
A	泥质中砂	松散	灰黄色	2.0	
1-2	粉质细砂 / 砂质粉土	松散	灰色	1.9	伴有贝壳碎片
1-3	粉质中粗砂	中密	浅灰黄色	1.95	伴有贝壳碎片
2-1	砂质黏土 / 砂砾 / 卵石	密实	浅灰黄色	2.3	不均匀，强钙质胶结，局部含黏土
2-2	含细砂砾粗砂	密实	浅灰黄色	2.1	钙质胶结
2-3	含砂的砾质黏土	坚硬	浅灰黄色	2.07	局部非常坚硬，钙质胶结
3	砂质黏土	坚硬	浅灰黄色	1.94	局部含薄层细砂
4-1	全风化片麻岩	极弱	浅灰黄色	2.15	只在码头区域偶尔出现
4-2	强风化片麻岩	弱	深灰色	2.20	局部中等强度
4-3	中风化片麻岩	中强	灰黑色	2.66	裂纹分布密集
4-4	微风化片麻岩	强	灰黑色	2.80	裂纹分布较少

为了更好的利用三维模型进行施工布置，在进行三维地质建模时，根据各地层土质的特性，将部分土质相似、厚度较薄的地层合并，合并后的地层大致分为砂层、钙质胶结岩层、强风化片麻岩层、中风化片麻岩层四层。利用 CIVIL 3D 软件我们建出 CH0-045 到 CH0+1000 施工标段

的三维地质模型和三维钻孔图，并绘制出栅栏剖切图以便观察地层变化。

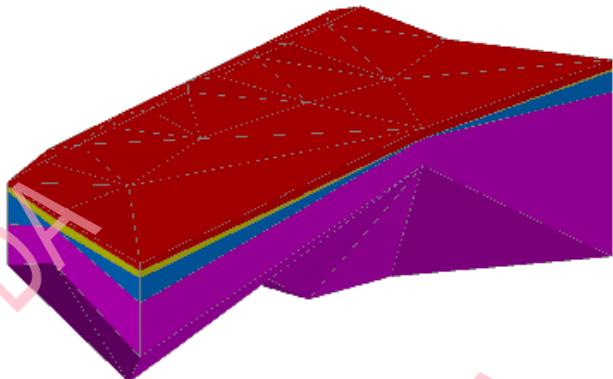


图 3.1 三维工程地质示意图

合并后各土层物理力学参数如下：

表 3.2 各类土质物理力学指标表

土质	高程 /m	SPT/N	UCS/MPa
粉砂	约 -8.3	/	/
钙质胶结岩	-9.75~10.4	56~250	12.82
强风化片麻岩	-10~16.9	70~300	3.2
中风化片麻岩	-17.91~-27.45	/	83.1

注：表中各岩石的单轴抗压强度值来自该工程的地勘报告，均为平均值。

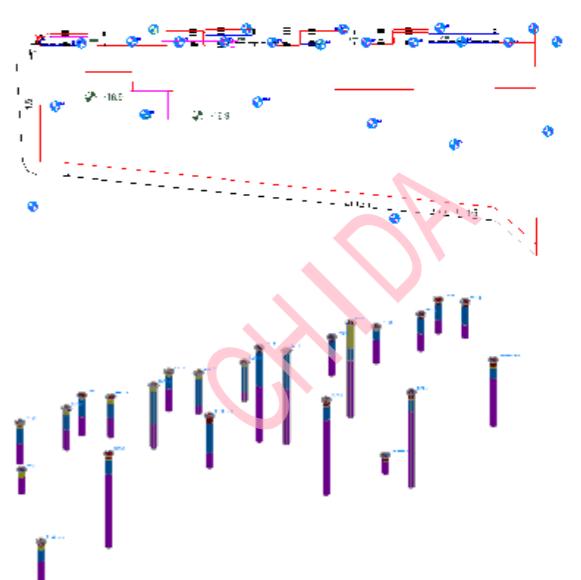


图 3.2 三维钻孔示意图

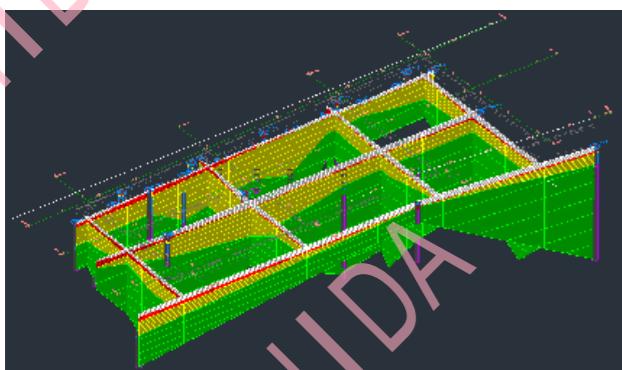


图 3.3 地质栅栏剖切图

从图中可以看出：疏浚范围内的岩石主要是强风化片麻岩和钙质胶结岩，强风化岩层中还混杂着部分黏土以及部分中风化片麻岩，而根据实验室岩石强度试验数据显示，中风化岩区强度已经超过了天鲸号的挖掘能力。

### 3.3 挖岩船舶选择

在了解绞吸式挖泥船的工作原理之后，还要掌握它的基本性能，才能根据相应的施工规模选择与其相适应的施工船舶。掌握一条绞吸式挖泥船的基本性能需要了解三个主要参数：挖深，排距和绞刀功率。挖深越大，船舶主尺度就要加大，其挖掘的浓度就会降低。为此需要安装水下泥泵，用以提高泥泵浓度。排距，也就是挖泥船将从挖泥区挖掘的疏浚土用管线输送到卸泥区的水平距离。显然，在其他工况条件完全相同的情况下，排距越远，则所需配备的泥泵主机功率就越大。绞刀功率的大小关系到绞吸船的挖掘性能，将直接影响绞吸船的生产能力和被挖掘疏浚土的种类。绞刀功率越大，船舶的挖掘能力越强，生产效率相应越高，相对的船舶适应能力就强。配备大功率绞刀的船舶，泥泵功率也应该相对较大，其船舶整体强度也要大。

该工程施工船舶选用由中交天津航道局有限公司投资建造的大型自航绞吸式挖泥船“天鲸号”，总装机功率达到 20020kW，其中绞刀功率 4200kW，挖深 30m，配备 VOSTA 和 ESCO 两种绞刀，具备施工强风化岩的能力。（何炎平等 2009）<sup>[2]</sup>

### 3.4 挖岩绞刀选择

挖岩绞刀的选择不能仅依据以往的施工经验，疏浚土质相似但不代表相同，要想准确选择绞刀还需实践确

定。天鲸号上配备两种绞刀，一种是 VOSTA 绞刀，一种是 ESCO 绞刀。如图 4.4 所示。其中 VOSTA 绞刀配套有 T6.04 尖齿和 T6.02 齿。ESCO 绞刀配套有 62D 尖齿和 58D 大圈齿。在开挖风化岩层时，宜采用可换齿的岩石绞刀，由于施工区硬岩分布变化较大，施工中不可避免碰到硬岩，使用齿会出现断齿情况，且断齿后加剧齿座磨损，所以土质分布复杂且存在硬岩的工况下，齿不适用。为了确定两种绞刀的适用性，分别使用两种绞刀进行试挖。试挖结果如下：

表 3.3 开挖原泥面至 11.5m

绞刀类型	破土量	平均功率	最大功率	破土功率	综合万方齿耗
	m <sup>3</sup> /h	kw	kw	kw/m <sup>3</sup>	个
ESCO	1635	1049	3068	0.67	192
VOSTA	1029	936	2100	0.74	257

表 3.4 开挖 11.5m 至 14.5m

绞刀类型	破土量	平均功率	最大功率	破土功率	综合万方齿耗
	m <sup>3</sup> /h	kw	kw	kw/m <sup>3</sup>	个
ESCO	1186	1386	3586	1.3	192
VOSTA	896	1170	3800	1.6	257

试挖结果显示：ESCO 绞刀的破土量和平均功率均大于 VOSTA，说明 ESCO 绞刀的挖掘能力要高于 VOSTA 绞刀；而且 ESCO 绞刀综合万方齿耗则要小于 VOSTA 绞刀。所以最终选择 ESCO 绞刀进行施工。

### 3.5 船舶仪表校验

在挖岩施工阶段，为及时了解并调整施工状态，必须时时观察绞吸船的各类仪表参数，这些参数可以直接将施工情况反映给施工人员。准确的施工参数可以分析出准确的施工状态，从而对施工状态进行及时的调整。所以，在施工期间，必须要分别对流速计、密度计、排压表实施校验。表 3.3 是该工程施工时，流速校验记录表，流速显示值较实际偏低约 0.3m/s。密度计校验：清水密度 1.06-1.07t/m<sup>3</sup>，零位校正。排压表校验：显示压力较实际压力高 0.3bar，属基点误差。

表 3.5 流速校验记录表

项次	水下泵	1#舱内泵	2#舱内泵	管线排压	管线长度	时间	显示流速	实测管线流速	实测仪表流速	差值
	rpm	rpm	rpm	bar	m	s	m/s	m/s	m/s	m/s
1	220	224	221	8.2	2123	299	6	7.1	6.37	0.37
2	221	242	240	9.3	2123	287	6.44	7.4	6.63	0.2
3	222	261	261	10.9	2123	268	7.16	7.9	7.118	-0.05

### 3.6 挖岩施工区域规划

由于该工程疏浚范围内包含中风化岩区，而且部分强度超过天鲸号的挖掘能力，当天鲸号开挖至硬岩区时，船体晃动厉害，绞刀刀齿磨损严重、甚至断齿、断座。为减少硬岩区域对天鲸号挖掘的影响，在对施工区进行分层、分条时，应根据钻孔剖面图，浚深水平线确定疏浚范围内的硬岩区域，并绘制在施工平面图上，在规划施工区时，规避硬岩区域，合理划分施工区域，才能最大限度释放船舶的挖岩性能。下图青色线框标识的是部分标段内的硬岩区域。



图 3.4 CH0-045 至 CH0+400 标段内的硬岩区域

### 3.7 挖岩疏浚过程优化

#### 3.7.1 开挖岩层的动态调整

该工程在开挖钙质胶结岩和风化岩层时，由于岩层起伏变化大，层厚不均匀，对疏浚过程影响较大。所以在开挖岩层时，应根据岩层的均匀程度，灵活控制绞刀进尺和切厚。土质分布均匀时，增大进尺，保证横移拉力效率发挥；土质分布复杂时，采用小进尺、快横移的方法，避免横移困难、退台车问题，提高综合效率。若土层太薄，开挖土层厚度小于 2m 时，出现严重的跑刀问题，应加大切厚，增加切泥厚度至 3m，使绞刀处于泥层中，同时加大

反张力控制，降低跑刀现象发生的几率，但要控制切厚的增大程度，以免进入吸口的粒径过大，导致堵绞刀、堵泵。船舶在靠近边线时，提前增大反张力，提前进尺，控制船舶提前减速，减少换向时间，提升高效作业时间。

#### 3.7.2 上下岩层交替施工

开挖钙质胶结岩时，易开挖但输送难度大；开挖风化岩时，由于岩层局部含黏土，易输送但存在绞刀前部糊堵的现象，产生推土机效应，导致横移拉力大，横移速度低（横移拉力 50t，横移速度 7m/min 以下）。

针对此问题，采用上下层交替施工的方法。天鲸号在施工上层钙质胶结岩时采用反刀开挖，到边线后下桥梁开挖下层强风化片麻岩，不同土质混合输送，解决输送受限的问题；施工下层时，正刀开挖强风化岩，通过正刀施工缓解横移拉力受限的问题。

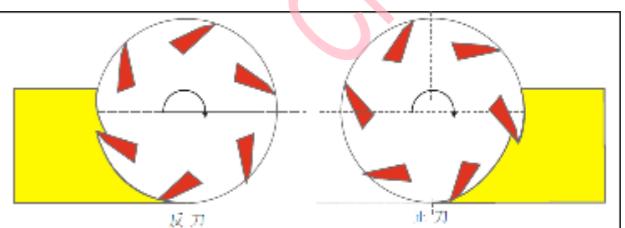


图 3.5 正反刀开挖示意图

#### 3.7.3 绞刀刀齿、齿座的磨损及预防措施

施工区土质变化大，开挖不同土质，绞刀齿及齿座的磨损情况存在较大差异，绞刀检查间隔时间不易把握。针对此问题，一是根据施工参数判断土质情况，合理控制刀齿检查间隔时间。

当开挖粘性风化岩时，绞刀前部存在糊堵、横移困难现象，通常拉力 40t 以上，绞刀功率小，通常在 1500kw 以内，刀齿检查时间控制在 1:20 至 1:40；当开挖主要由砂砾和石块组成的强风化岩时，横移拉力适中，绞刀功率高，可达 2000-3000kw，但输送难度大，排压可达 15bar 以上，此土质磨损较大，刀齿最短使用时间仅 40min，通常在 1 小时左右。针对刀齿、齿座磨损问题，采取在齿座焊制护板、耐磨损，根据工况适时调低绞刀转速的方法，降低磨损。船上应准备 2 个以上绞刀头，以便磨损后便于修理更换，

减少停工时间。为防止大的石块堵塞吸口和泥泵，在绞刀上加焊防石格栅或防石环。

#### 3.7.4 计算管路阻力系数

在挖岩阶段期间，需反算管路阻力系数，对比计算阻力系数与经验值，防止发生岩块在管路中沉积的现象。表3.6是天鲸号开挖风化岩时，计算的管路阻力系数。

表 3.6 清水阻力计算表

管线长度	排压	流速	阻力系数
m	bar	m/s	-
2123	8.2	7.1	0.012963
2123	9.3	7.4	0.013595
2123	10.9	7.9	0.014049

注：管路阻力估算采用流速测定的数据，排高按1m计算。

据现场反应管路吹通时间长达25min，考虑到管线中含1150m水下管，疑似仍有石块在管路中存留，导致计算得出的数据出现偏差。

#### 4 结论

大型绞吸船在开挖风化岩时，一定要对土质情况有一个全面和真实的掌握。合理划分开挖区域，选择适用的绞刀型号。在土质复杂多变的情况下，提前根据土质情况灵活调整施工参数，是提高生产效率的关键所在。在特马新集装箱码头疏浚工程中，天鲸号根据不同的土质情况，合

理安排施工区域，及时调整施工工艺，充分利用和发挥天鲸号的破岩能力，高质量高效率的完成施工任务，为复杂土质条件下大型绞吸船挖岩施工提供了施工经验，也打破了国外疏浚市场被欧洲疏浚企业垄断的局面。

#### 参考文献：

- [1] 高伟 (2007)." 绞吸船挖岩工艺研究 " Study on rock dredging technology of cutter suction dredger2007. 天津大学，博士论文 .
- [2] 何炎平，冯长华，顾敏童，李瑞祥 (2009). " 天鲸号大型自航绞吸式挖泥船 " Large-sized self-propelled cutter suction dredger named Tianjing2009. 船舶工程 , 31(5), 1-5.
- [3] 缪正建，钟登华，李明超，高伟 (2013). " 疏浚工程土质三维建模与可视化分析系统 " Development of three-dimensional modeling and visual analysis system for soil texture in dredging engineering2013. 河海大学学报 ( 自然科学版 )(4), 342-347.
- [4] 张克非，刘超，厉金 (2018). " 绞吸船挖岩施工工艺探讨 " Discussion on dredging technology of rock excavation by cutter suction dredger2018. 中国水运 ( 下半月 ), 2018, 18(05): 123-124+164.

#### 作者简介：

张博，男，中交天航港湾建设工程有限公司，工程技术部副经理，工程师。



叶桂河

中交广州航道局有限公司

Ye Guihe

CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd.

## 填补 Hypack 矩阵缺陷的新算法 A New Algorithm to Fill the Defects of Hypack Matrix

**摘要：**Hypack 矩阵以彩色水深分层“格子”形式来代替数值水深进行显示，以点代面的方法来显示水深，具有直观、方便和实用等优点，这使得 Hypack 矩阵被采用作为部分疏浚船重要施工文件或辅助文件，因此它必须正确体现真实水深，特别是后期扫浅工作。经过水深和矩阵对比、分析，发现 Hypack2017 及以下版本的两种方法所生成的矩阵大部分离散浅点的水深变深且达到设计水深，该问题将影响后期施工扫浅工作和经济效益。在多次实验和比对下，采用水深数据网格化分布、格中有浅点取最浅、无浅点取均值或全部取浅点的新算法，该算法结合 C# 语言可一次性读取较密的多波束水深数据并生成矩阵文件，且能够较好的显示出绝大部分离散浅点，又能够被 Hypack 软件和疏浚船上的施工软件读取并运用。新算法较好解决了该问题，减少疏浚工程的漏挖，为后期扫浅工作做出更准确的施工指导，特别对疏浚工程中硬、黏土质的精准清除，意义重大。

**关键词：**Hypack；矩阵缺陷；新算法；填补；C#

#### Abstract

The colorized depth layered "cell" is used to display water depth with a point-to-face manner in hypack matrix, which replacing the traditional digital manner. Due to the display method has the advantages of intuitive, convenient and practical, the hypack matrix becomes an auxiliary or important construction document for some dredging vessels, so it is important to insure that the hypack matrix can reflect depth precisely, especially in the later sweeping work. After comparison and analysis of water depth and matrix, it is found that most of the discrete shallow points in the matrix generated by hypack2017 software and the following versions, become deeper and reach the designed water depth, which will affect the later shallow sweeping work and economic benefits. To this end, a new algorithm of discrete water depth data gridding is proposed in this paper. The value of a cell will be assigned the shallowest point, or the mean without the shallowest point. Based on C# language, this algorithm can be read the dense multi-beam water depth data at one time and generate matrix file, which can display most discrete shallow points better. It can be read and used by hypack software and construction dredger software. The new algorithm can fill the defect well, reducing the missing dig of dredging works. What's more, this algorithm can provide more accurate construction guidance for later shallow sweeping work, especially for the precise removal of hard and clay in dredging works.

**Key words:** Hypack, Matrix Defects, New Algorithms, Filling, C#

**简介**

Hypack 每个“格子”代表一个矩形区域水深值，由这些“格子”所组成的有序阵列在 Hypack 中称为矩阵 (Matrix)。由于软件专业性和中国行业规范化较好使得其广泛用于测量<sup>[1]</sup>、疏浚行业，部分疏浚施工船舶需结合这种矩阵进行演化来生成相应的施工文件，如 DTPM 系统。但 Hypack2017 及以下版本生成的矩阵存在一个明显的弊端：大部分离散的浅点变深无法“显示”出来。这种变深导致的水深误差部分已经超出《水运工程测量规范》限差<sup>[2]</sup>。通过反复实验研究出一种新的算法，新算法结合 C# 语言读取湄洲湾主航道较密的多波束水深数据可快速生成 Hypack 格式的矩阵并显示出绝大部分离散浅点，在湄洲湾主航道工程后期实际扫浅中更好的指导了船舶的作业。

**1 Hypack 矩阵格式和缺陷****1.1 矩阵格式**

Hypack 的矩阵文件采用 ASCII 编码方式，可以用记事本直接打开，如下图所示：

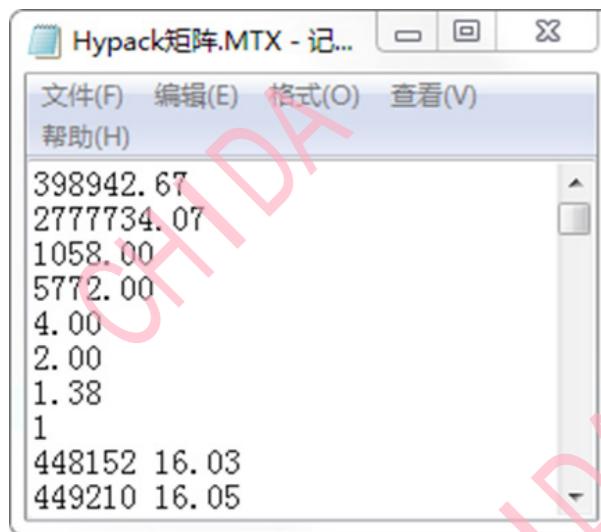


图 1 Hypack 矩阵在记事本中显示

矩阵包含了左下角原点坐标、长度、宽度、格子宽度、格子长度、旋转角度、矩阵类型标志、水深索引和水深共 9 种数据。9 种数据对应图 1 中的数据的说明，如下表 1 所示：

表 1 Hypack 矩阵文件说明表

序号	描述	对应图 1 数据
1	原点东坐标 X	398942.67
2	原点北坐标 Y	2777734.07
3	矩阵长度	1058.00
4	矩阵宽度	5772.00
5	格子长度	4.00
6	格子宽度	2.00
7	绕原点旋转角度	1.38
8	矩阵类型标志	1
9	水深在矩阵中的索引	448152
10	水深数据	16.03

标注：矩阵类型标志有 0、1 和 2，0 为 Survey 矩阵，

1 为 Dredge/Hypack 矩阵，2 为 Hysweep 矩阵。旋转角顺时针为正，0 度为正北。

表 1 中 1~8 为矩阵的头数据，9~10 为水深数据，水深数据分为两列，“格子”索引左下角第一行开始为 0，从左到右，从下到上逐 1 增加。假设有一个长 10 米、宽 4 米，格子长 2 米、宽 1 米的矩阵，则“格子”索引和水深的关系如图 2 所示：

15	16	17	21.5	20.9
10	11	21.4	21.6	21.4
5	21.2	21.4	21.6	9
0	21.7	21.0	21.3	21.7

图 2 矩阵水深和索引示意图

由于矩阵是一组整齐的阵列，要包住所有水深，因此图 2 中会出现有的“格子”中只有索引而无水深，无水深的“格子”数据不写入到矩阵中。

**1.2 矩阵缺陷**

Hypack 矩阵有两种生成方法：一种是 XYZ 数据直接生成，另一种由 TIN 模型生成。两种方法都会导致多数

离散浅点变深不“显示”。这里提出一种新的算法并结合 C# 语言生成了能够显示绝大部分浅点的 Hypack 矩阵。以湄洲湾主航道中后期扫浅 1 米间隔的多波束数据为基础分别生成矩阵，其中 Hypack 软件生成的矩阵和新算法生成的矩阵对比如下：

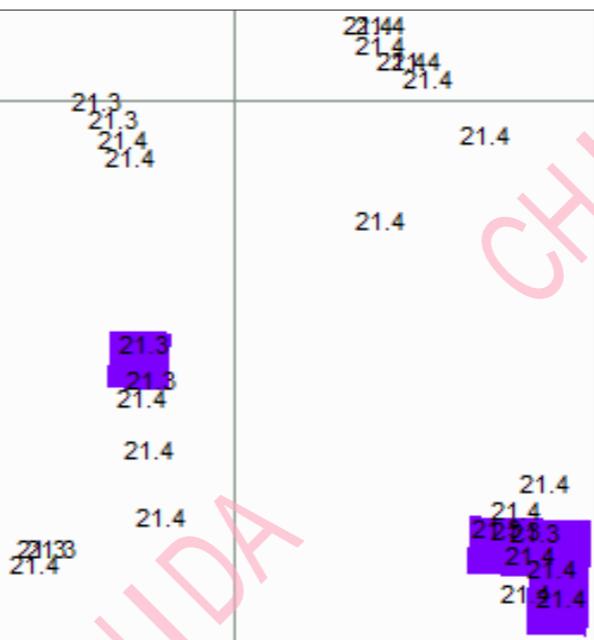


图 3 Hypack 生成的矩阵

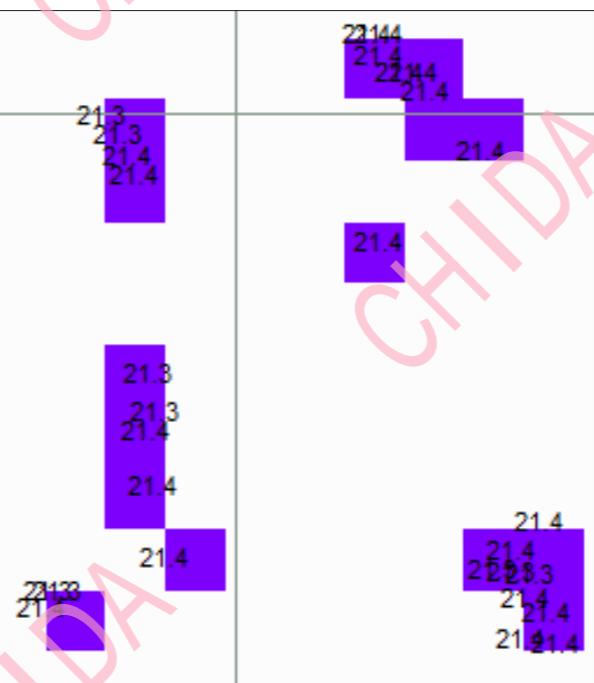


图 4 新算法生成的矩阵

湄洲湾主航道航槽设计水深为 21.5 米，小于 21.5 米的矩阵“格子”以蓝色显示，大于等于 21.5 米的数据用白色显示。和图 3 中 Hypack 软件生成矩阵相比，图 4 新算法可以显示更多的浅点（从原来的 4 个格子增加到 15 个格子），这更加有利于矩阵体现海底地形地貌，在航道设计、开挖等方面得到更加广泛运用<sup>[3]</sup>。

**2 新算法和软件****2.1 新算法**

和 Hypack 矩阵原算法相比新算法有三个变化：1. 矩阵不进行旋转；2. 落入“格子”中的水深若有小于设计水深取最浅，否则取均值或最深。3. 矩阵“格子”长和宽一样。算法流程图如下图 5 显示：

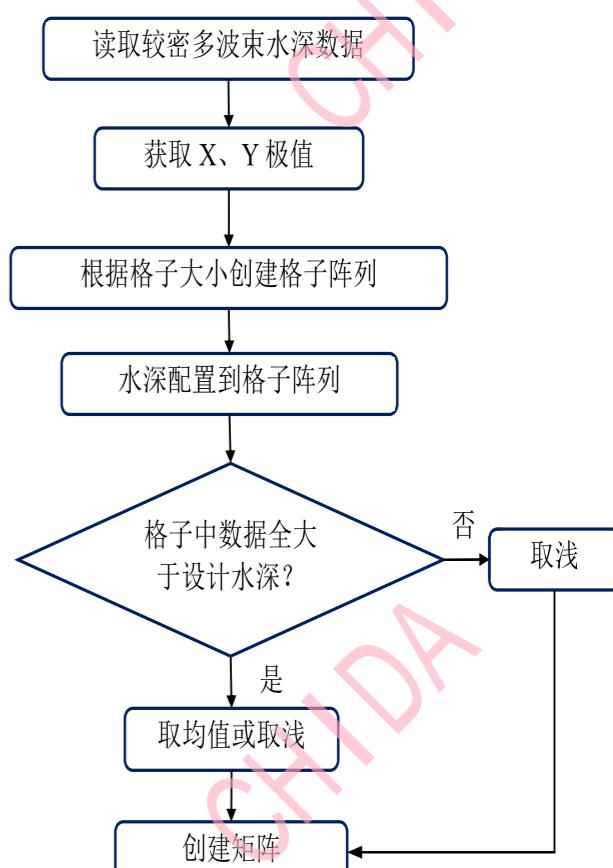


图 5 新算法流程图

新算法中矩阵“格子”长和宽一样且不进行旋转可以在较短的时间内生成矩阵又可以保证“格子”跟水深位置对应；“格子”中水深浅于设计水深取最浅点，可较明显

的突出浅点数据,原点坐标采用xyz数据中X和Y的最小值。

新算法代码封装在一个 Matrix 类中, Matrix 类中主要用到泛型 List<sup>[4]</sup>、文件流操作和 GDI+ 绘图等<sup>[5]</sup>, 将水深XYZ数据转为矩阵包括以下几个步骤: a. 获取数据极值; b. 根据平面坐标将水深分到“格子”中; c. 根据“格子”中的水深生成矩阵。新算法根据真实水深生成矩阵, 而 Hypack 软件则是先成不规则三角网后内插出水深来生成矩阵, 因此 Hypack 原算法中会有离散浅点“不显示”。

新算法和原算法对比如下:

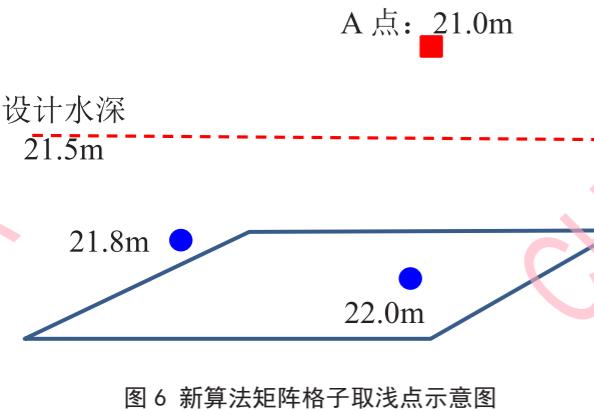


图 6 新算法矩阵格子取浅点示意图

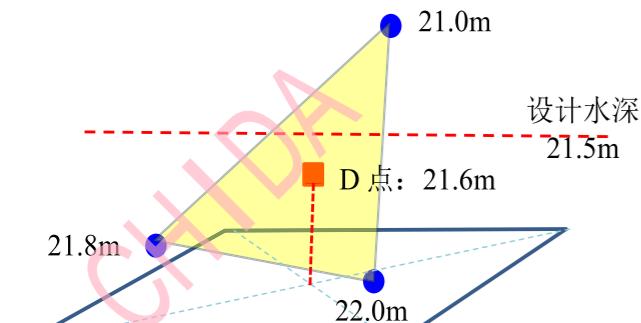


图 7 Hypack 矩阵原算法格子水深内插示意图

如图 6 所示: 新算法中“格子”水深数据里有深有浅则以取浅点 (A 点) 为准; 如图 7 所示: Hypack 矩阵以“格子”中心为坐标内插出一个水深值, 而当周围水深点比较深时, 内插出来的点则可能在设计水深之下 (D 点)。

## 2.2 软件介绍

将该新算法用 C# 语言表达出来并制作成界面, 如图 8 所示:



图 8 软件界面

软件的操作比较简单, 只需导入水深数据, 设置标高和“格子”大小, 点击矩阵按钮即可进行矩阵的创建。图 8 中绿色为大于设计水深, 红色小于设计水深。经过实测, 在内存 4GB, I3-4130 CPU 频率 3.4GHz 的计算机中, 软件读取湄洲湾主航道 1 米间隔的多波束数据 (约 192MB) 并创建矩阵耗时约 1.7 分钟。新算法生成的矩阵仍有个别浅点显示不出来, 但和 Hypack 生成的矩阵相比已有很大的改善。

用湄洲湾主航道工程不同间隔的水深数据分别生成矩阵 (设计水深为 21.5m), 统计其浅点数, 新算法和 Hypack 生成矩阵浅点统计对比表如下所示:

表 2 新算法和 Hypack 生成矩阵浅点统计对比表

xyz 间隔	水深点数	矩阵格子大小	软件	矩阵格子总数	浅点数量	浅点百分比
1m	6483773	2m	Hypack	1478949	286566	19.4%
			新算法	1478704	299964	20.3%
1.5m	2568154	3m	Hypack	657132	128113	19.5%
			新算法	658898	138313	21.0%
2m	1478272	4m	Hypack	369559	72564	19.6%
			新算法	371165	78618	21.2%
3m	659266	5m	Hypack	236408	47333	20.0%
			新算法	234552	51640	22.0%

从表中的浅点百分比可以看出同一个 xyz 数据生成矩阵, 浅点数量新算法比 Hypack 要多出 1% ~ 2% 左右, 新算法在显示浅点方面比较齐全, 但本算法当中需要比较密的水深数据方可生成质量较好的矩阵。通常生成矩阵格子大小对应的 xyz 数据如上表所示, 在实际施工当中矩阵格子大小一半取 2m 左右。

## 结论

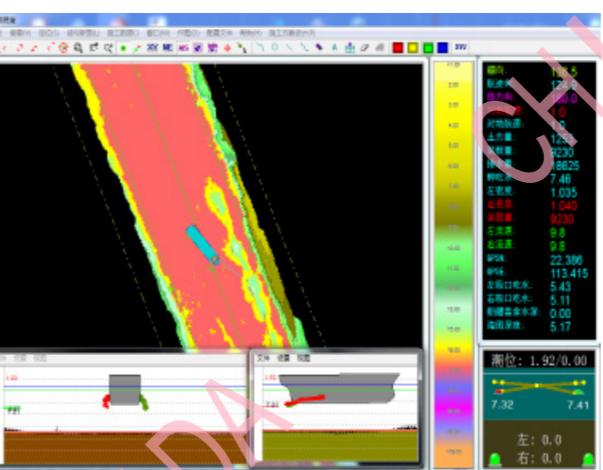


图 9 DTPM 系统软件界面

在疏浚工程的扫浅工作中发现了 Hypack2017 及以

下版本矩阵大部分离散浅点无法显示这个缺陷, 经过多次努力和实验, 笔者研究出新算法并成功解决这一问题, 新算法生成的矩阵在后期扫浅阶段能够显示出绝大部分浅点, 反映出更真实的水深, 并运用到施工船上, 更好地指导疏浚船进行扫浅工作, 最重要的是新算法发现浅点能力大大提高, 扫除疏浚工程障碍物目标精准, 在一定程度上提高扫浅效率和工程项目经济效益。

## 参考文献:

- 吴英士 (2012).Hypack 软件计算土方工程量的研究分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 中国, 1 页 .
- JTS 131(2012). 水运工程测量规范 [S]. 人民交通出版社 2012 年 12 月第一版, 中国, 37-40 页 .
- 林忠成, 孟祥领 (2013). 浅谈 Hypack 软件在疏浚测量中的应用 [J]. 产业与科技论坛, 中国, 86-87 页 .
- 王军, 韩宏志 (2010).C# 入门经典第五版 [M]. 清华大学出版社 2010 年 12 月第一版, 中国, 290-293 页 .
- 钱哨, 李挥剑, 李继哲 (2010).C# WinForm 实践开发教程 [M]. 水利水电出版社 2010 年 1 月第一版, 中国, 94-126 页 .

## 作者简介:

叶桂河, 男, 中交广州航道局有限公司, 高级主管, 工程师。



## 新中国疏浚装备研发的摇篮 ——记第一个挖泥船技术试验室成立 和中华第一耙的诞生

### The Cradle of the R&D of Dredging Equipment in China since 1949 —The Establishment of the First Laboratory for Dredger Technology and the Birth of China's First Hopper Dredger

仲伟东

1958年，在程望等革命前辈、部领导的直接关怀和部署下，前第六机械工业部第七研究院第708研究所正式组建了专门从事工程船舶研究的设计室，开始承担国家各种工程所需的作业船舶设计研究，其中尤以挖泥船为重。1960年代初期，部领导还在物质条件十分匮乏的情况下，从原上海中华造船厂内调拨一处厂房，配备了必要的试验设备，组建了国内首个“特种挖泥机具试验室”，并配备有一个小型试验水池，供708所工程船舶研究设计室使用。该试验室规模虽小，在建成后的将近30年中，却充分发挥了效用：经由该试验室先后研发成功40余型各种规格的泥泵、泥斗、泥门、绞刀、抓斗、斗轮、吸盘头及耙头等挖泥机具，有力地支持了各地疏浚用户，同时为配合多种新船型的机具开发作了积极的铺垫，为我国挖泥船建设做出了积极贡献（见图1）。

自1960-1970短短十年间，经由708所工程船设计室（原八三室）设计的一大批 $60\sim120m^3/h$ 绞吸、链斗及抓斗挖泥船被建造了出来，如 $120m^3/h$ 链斗挖泥船（8艘，武昌船厂建造）； $60m^3/h$ 、 $120m^3/h$ 拼装绞吸船、 $150m^3/h$ 链斗船和为海军部队研制的 $500m^3/h$ 链斗挖泥船（荣获全国科学大会奖，见图1）、 $150m^3/h$ 采金船；哈尔滨船厂建造的 $150m^3/h$ 链斗船和 $350m^3/h$ 双抓斗

挖泥船等。期间挖泥船的驱动方式也普遍由蒸汽机驱动更新为柴油机（电）驱动。尽管这期间的产品总体说来技术较粗糙，品种也较单一，一定程度上还留有“仿制”的印记，但其中不乏优质产品，图2所示 $500m^3/h$ 链斗挖泥船就是其中之一。重要的是跨出了“国造”的第一步，从设计、配套直到建造均不必完全依赖外国人，初步缓解了部队和地方建设的紧迫需求。



图1 经挖泥机具试验室开发的部分配套系列产品组图



图2 708所研发供部队使用的 $500m^3/h$ 链斗船（获全国科学大会奖）

1968年的中国正经历一段特殊时期，但在国务院“三年改变港口面貌”的紧迫要求下，因长江口航道建设的紧急需要，经上海市政府有关部门部署，由江南造船厂、上海航道局、708研究所组成的联合研制小组，用了不到3年的时间，于1970年成功研制出当时国内领先、并接近国际水平的首型4500方耙吸挖泥船“劲松”号，同型船“险峰”号也于1971年初建成投产（后相继更名为“航浚4001”和“航浚4002”号）。该型船为高技术含量的国内首创，对于中国疏浚界来说，确是一个了不起的成就，即使在当时中国造船界也引为傲，中国人民邮政总局还为“险峰”号特别制作了一枚纪念邮票（见图3上）。就连造船业当时居世界领先地位的日本业界，还特别组团前来上海进行观摩学习。1978年该4500方耙吸船荣获全国科学大会奖。

自此以后，708研究所在疏浚装备自主研制的征程中

日渐壮大，无论在产品的多样性、技术的先进性、还是自主创新方面，成就日渐瞩目。现行国内众多挖泥船产品型号中半数以上出自708所，并有多型产品行销国外。

708所分别是中国造船学会和中国疏浚协会理事单位，同时还是中国造船学会工程船学组牵头单位。



图3“中华第一耙”4500方耙吸船“劲松”和“险峰”

#### 作者简介：

仲伟东，男，中国船舶集团第七〇八研究所海工部副主任，研究员。