

疏浚创建新生态
Dredging Create New Ecology



微信号：中国疏浚
www.chida.org

中国疏浚协会
CHINA DREDGING ASSOCIATION

WODA WE



中交一航局一公司

中交一航局一公司承建的港珠澳大桥工程，是粤、港、澳三地首次合作共建的超大型跨海通道工程，全长55公里，包含目前世界最长的约6.7公里沉管隧道和22.9公里跨海桥梁，以及实现桥梁和隧道转换而修建的海中人工岛。其建筑规模之宏伟、设计理念之新颖、技术难度之巨大不仅仅在国内堪称第一，即便放眼世界范围也足以算得上是首屈一指。

一航局一公司重点参与建设的岛隧工程是港珠澳大桥的控制性工程，也是当今世界综合难度最大、建设条件最复杂的工程项目。西人工岛位于珠江口主航道西侧，7年的建设历程，一航局一公司施工团队率先进场，采用“超大型钢圆筒”快速成岛，从2011年5月15日开始，历时221天完成两个人工岛成岛施工，创下了

“当年动工，当年成岛”的施工奇迹；岛上施工深基坑率先展开，2013年5月，西人工岛暗埋段实现了与沉管隧道的“深海初吻”，开启了沉管隧道安装的序幕；2012年7月，抛石夯平施工展开，外海孤船坚守1291个日夜，圆满完成“伶仃洋底筑路基”的施工任务；2017年7月28日，西人工岛主体建筑顺利封顶，珠江口“最美地标”已在伶仃洋上呈现。

一航局一公司承建的CB03合同段是深海区桥梁部分工程量最多的，其施工难度也在桥梁主体工程的三个标段中名列首位，首次提出将单个钢圆筒作为独立挡水围堰形成“干法施工”。2012年11月，钢圆筒围堰干法施工试验取得成功，在气候、水文条件均堪称恶劣的伶仃洋中形成了宝贵的干燥空间，将钢管桩打设的垂直精度从1/400降至1/250，该工艺被交通运输部总工程师周海涛赞誉为“为桥梁结构基础施工开辟了新思路”。2013年6月20日，成功安装国内首个整体埋置式墩台，填补国家在这一领域的空白。施工期间累计申报国家专利2项，技术创新高达25项。



2018年10月24日，一航局一公司全面参建“桥、岛、隧”工程的港珠澳大桥正式通车运营。



港珠澳大桥鸟瞰

福建纳川管材科技股份有限公司

福建纳川管材科技股份有限公司创立于2003年，是国内领先的高新科技环保产业集团，总部坐落于福建泉州，是国内领先的管材制造、管网修复、运营一体的环保产业集团，是“共抓长江大保护科技创新联盟”成员单位。

公司秉承“诚实做人，结实做管”的企业精神，实施“一大一小、一内一外、新旧并举、投服并行、建管一体”战略，以“纳百川，容万物”的开拓精神和客户至上的服务准则。纳川股份致力于以先进制造技术生产和推广有利于环保、节能减排的新型排水管材。为市政工程、核电火电、石油化工、交通枢纽等领域，提供安全可靠的产品和科学系统的管网建设方案，为国家基础建设及城镇化发展提供源源不断的产品和服务。

2016年纳川作为海南文昌航天发射场主要的管材提供商，被授予“海南文昌航天发射场建设贡献奖”。

2016年投资建设龙岩市四个县（区）乡镇污水处理厂网一体化PPP项目入选国家第三批PPP示范项目库及被评为十大典型案例。2019年1月，纳川研发出适合深海铺设的3.3米超大口径HDPE塑料管并成功安装。这是目前世界上最大口径的管材，纳川也成为世界唯一具备生产和服务超大口径塑料管材能力的企业。2019年6月，纳川股份旗下子公司上海纳川取得美国ASME协会核3级授权证书（NPT），成为全球首家获得此项许可的HDPE管道生产企业。纳川基于在城市管网、村镇污水及水务一体化的投资管理经验，开展了管网运营、检测、修复业务，加大管网系统检测、修复技术研发投入，成立管道运营修复中心，积极开拓管网运营修复市场。



企业图片



高密度聚乙烯 (HDPE) 缠绕结构壁管

凝聚智能化海洋勘测的中国力量

Unite China's Power of Intelligent Marine Survey and Prospection

中国疏浚协会

21世纪是海洋的世纪，中国建设海洋强国不仅势在必行，而且势在必成。做好了解海洋、开发海洋、经略海洋这篇大文章，将是建设海洋强国的重要支撑。与此同时，尊重海洋、顺应海洋、保护海洋的理念也已融入海洋开发，我们要比以往更加珍惜和保护海洋资源。探索认知海洋是开发、利用和保护海洋的先决条件，而海洋勘测技术就是海洋研究科学的重要组成部分。

2020年4月28日，由中国疏浚协会主办、中交（天津）生态环保设计研究院有限公司承办的“智能化海洋勘测技术”线上交流会顺利召开。会议邀请了来自武汉大学、中科院、北保中心、海鹰加科、云洲、深之蓝、海卓同创的行业知名专家学者、装备研发领军人物，分别从智能化海洋勘测技术的研究动态与最新成

果等方面进行了广泛交流。会议期间，参会人员在线上进行了热烈的交流互动，掀起了智能化海洋勘测技术的讨论热潮，成为疫情笼罩下疏浚行业从业人员热爱科技的一抹亮色。

海洋勘测技术得到蓬勃发展，其源动力来自于需求的驱动。当前，海洋开发与利用对勘测技术的需求主要体现在：资源勘探与开发，管线敷设、检测，海上风电场运维、跨海桥隧工程、岛礁建设、海洋牧场等多个方面。其中，海洋声学、物探技术的进步最为明显，侧扫声呐技术、浅地层剖面测量技术、合成孔径声呐和相关技术在海底和水下目标观测中得到了广泛应用。通过水声定位技术、惯导技术的应用，实现了水下目标与潜航载体的高精度定位。针对我国“海上丝路”的安全需求，海洋监测技术被提起高度重视。海洋立体监测网包括空、

天、地、海多维度、多平台的立体监测，是数字海洋、智慧海洋建设的基础。在工程实践方面，提出了空地一体化监测、浚测一体化监测的概念。在国家海洋强国建设战略的有力支持下，经过不断与国际接轨，“透明海洋”、“智慧海洋”、“安全海洋”建设取得了一系列阶段性进展。

海洋勘测装备属技术密集型产业，多年来国内市场几乎被欧美企业垄断。但可喜的是，国内一批优秀装备开发企业已崭露头角，他们在不懈努力，甚至在孤独前行，值得我们致敬。国内高校等研究机构在海洋勘测方面也进行了大量基础性研究工作，在多个领域实现了理论突破。目前，国产海洋勘测装备在多波束、ADCP、侧扫声呐、合成孔径声呐，水下潜器、水面无人艇等方面已经与国外同类产品相当，部分性能指标甚至优于国外产品。

“蓝色”经济为海洋勘测和装备研发企业转型升级、创新发展带来无限的机遇与挑战。同时，我们也必须清醒地认识到中国在海洋勘测装备研发方面的欠账仍然较多，在总体规模上、科研活动与市场匹配度上均存在不足，国外先进海洋勘测技术壁垒的突破和国产替代刻不容缓。不仅在装备领域，海洋勘测相关的软

件领域也同样需要引起高度重视。海洋信息化是国家信息化的重要组成部分，以智能化为主题的海洋勘测技术变革正在悄然进行。通过我们共同的努力，形成一批海洋观测、探测和预测的关键装备和技术，将有效带动海洋勘测产业的发展。

相应地，疏浚行业作为海洋勘测产业的重要用户，也必定能从智能化海洋勘测技术的发展浪潮中获益。比如疏浚企业在进行环保疏浚时，在技术层面最为关注的有两个方面，即疏浚引导和施工检测。精确的引导可以保证只挖掉应该挖的污染土，精确的检测可以保证企业能够收到所完成工作量的全部付款。因此，通过智能化、高精度勘测装备、技术的应用，可在疏浚精度控制体系上实现突破，在施工环境调查、施工过程检测、项目验收等方面提供更加可靠的地理空间数据支撑，促进生态疏浚、环保疏浚产业的诞生和转型升级。

在海洋科学发展、海洋强国建设的伟大进程中，每一名海洋从业人员都可以找到用武之地。历史要求我们必须做出努力，我们有责任为中国由海洋大国走向海洋强国做出贡献！我们不能作为时代变革的旁观者，我们的付出必将载入史册！

目录 | CONTENTS

中国疏浚

CHINA DREDGING

(6期/年)

2020年第3期

(总第49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 随守信

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

- 凝聚智能化海洋勘测的中国力量 / 李素江
Unite China's Power of Intelligent Marine Survey and Prospection 01

特别策划 Special Planning

- 智能化海洋勘测技术发展意义重大
Significance of the Development of Intelligent Marine Survey and Prospection Technology 05
- 水面无人测量技术在疏浚行业的应用探索 / 唐梓力
Application of Unmanned Surface Survey Technology in Dredging Industry 06
- 武汉大学海洋测绘课题研究成果概述 / 赵建虎等
Overview of Research Achievements of Marine Surveying and Mapping Technology in Wuhan University 11
- 国产化水下勘测设备在疏浚及智能无人平台应用 / 么彬
Application of Domestic Underwater Survey Equipment in Dredging and Intelligent Unmanned Platform 18
- 海事测绘 + 疏浚智能化应用场景 / 王国成
Maritime Surveying and Mapping + Dredging Intelligent Application Scenarios 21
- 水下机器人应用技术
——以深之蓝水下机器人为例 / 张红良等
A View on Unmanned Underwater Vehicle Application
——Illustrated by the Case of Unmanned Underwater Vehicle of Deepinfa 26

国际视野 International Perspective

- 用于预测浚后羽流扩散和沉积物分布的射流疏浚快速评估工具
/ A. Kirichek 等
Water Injection Dredging Quick-Assessment Tools for Predicting the Plume Dispersion and Sediment Distribution After Dredging Processes 32
- 世界陷入沙荒了吗？！/ 叶清华
The World is Hungry for Sand?! 38

学术论坛 Academic Forum

- 围海造陆工程对渤海湾三维水动力场的影响 / 肖勇
Impact of Land Reclamation on the Three-Dimensional Hydrodynamic Field in Bohai Bay 41
- 防污帘在疏浚、吹填工程中的应用 / 赵亚洲等
Application of Anti-Fouling Curtains in Dredging and Project Reclamation 48
- 关于近海砂质离岸人工岛围埝施工工艺优化探讨 / 李泽慧
Discussion on the Optimized Construction Technology of Sand-Cofferdam of Offshore Artificial Sand-Island 52
- 400 方绞吸挖泥船绞刀转速与桥架横移速度匹配研究 / 韩海强等
Research on the Matching of Rotation Speed of Cutter and Transversal Speed of Bridge Frame in 400m³ CSD 56
- 环保疏浚底泥脱水固化过程中除杂系统的优化研究 / 沈鑫涛等
Optimization of Impurity Removal System in the Process of Dewatering and Solidification of Environment-Friendly Dredged Sediments 60
- 绞吸船在超设计挖深作业时设备安全校核 / 王展
Equipment Safety Check of Cutter Suction Dredger During Over Design Excavation 65
- 无人机航空摄影测量在疏浚吹填工程地形测量中的应用与高程分析 / 江振飞等
Research on Lightweight of Original Terrain Model in Water Conservancy Dredging BIM Management Platform 70
- 关于长江口吹填工程沉降、流失的计量与分析 / 王晓萌
The Measurement and Analysis of Settlement and Loss for Land Reclamation in the Yangtze River 76
- Durand 公式在中粗砂管道输送条件下的应用 / 袁超哲等
Application of Durand Formula in Medium Coarse Sand Pipeline Transportation Conditions 82
- 长江深水航道整治工程丁坝地基变形监测及影响规律 / 徐东晓等
Monitoring of Deformation of Spur Dam Foundation and Influence Law of Yangtze River Deep-Water Channel Improvement Project 86
- 绞吸挖泥船绞刀载荷分析软件研制 / 苏召斌等
The Development of the Load Analysis Software for the Cutter of Cutter Suction Dredger 91

大事记 Milestones

- 中国疏浚行业 2020 年第二季度大事记 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引用参考文献的作者名、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。

智能化海洋勘测技术发展意义重大

Significance of the Development of Intelligent Marine Survey and Prospection Technology

4月28日，由中国疏浚协会主办、中交（天津）生态环保设计研究院有限公司承办的“智能化海洋勘测技术”线上交流会顺利召开。海洋勘测涉及海洋科技、海洋高端装备、岛礁开发保护、海洋权益等多个领域，打造一个稳定健康可持续发展的海洋勘测理论研究和智能化的实践团队，不仅对疏浚行业本身，对积极推进国家海洋发展战略等更具有极其重要的现实意义。

本期“特别策划”栏目，《中国疏浚》邀请“智能化海洋勘测技术”线上交流会知名专家学者、装备研发领军人物等，就智能化海洋勘测技术的研究动态和最新成果等与读者交流共享。

Hosted by China Dredging Association and organized by CCCC (Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd, the online seminar *Intelligent Marine Survey and Prospection Technology* was successfully held on April 28. Marine Survey and Prospection involves many fields such as marine science and technology, high-end marine equipment, island and reef development and protection, maritime rights and interests and so on. It is of extremely important practical significance to establish a practice team that focus on stable, healthy and sustainable development of marine survey and prospection technology research and intellectualization, not only for the dredging industry itself, but also for actively promoting the national marine development strategy.

In the *Special Planning* column of this issue, *China Dredging* invites well-known experts, scholars, and equipment R&D leaders in the Intelligent Marine Survey and Prospection Technology online seminar to communicate and shared with readers on the research trends and latest achievements of intelligent marine survey and prospection technology.



唐梓力

珠海云洲智能科技有限公司

Tang Zili

Zhuhai Yunzhou Intelligence Technology Ltd.

水面无人测量技术在疏浚行业的应用探索

Application of Unmanned Surface Survey Technology in Dredging Industry

摘要：疏浚测量是疏浚工程的重要工作之一，当前主要采用有人测量船对工程区域进行相关的勘察。随着人工智能技术的发展，智能疏浚成为疏浚业的发展新趋势，智能装备在疏浚业的应用将是行业转型升级的重要推力。本文将探讨水面无人测量技术与疏浚业的应用结合点，展示该技术在疏浚业中的应用优势，分析水面无人测量技术在疏浚业应用的可行性与必要性。

关键词：疏浚测量；无人艇；水下地形地貌测量；水质监测；水下设施调查

Abstract

Dredging survey is one of the important tasks of dredging engineering. At present, manned survey ships are mainly used to conduct related surveys on the project area. With the development of artificial intelligence technology, intelligent dredging has become a new trend in the development of the dredging industry, and the application of intelligent equipment in the dredging industry will be an important thrust for the transformation and upgrading of the industry. This article will discuss the application integration point of unmanned surface measurement technology and the dredging industry, demonstrate the application advantages of this technology in the dredging industry, and analyze the feasibility and necessity of the application of unmanned surface measurement technology in the dredging industry.

Key words: dredging survey, USV, underwater topography survey, water quality monitoring, underwater facility survey

1 无人艇发展概况

近年来无人操控成为世界瞩目的前沿科技之一，其中无人艇是继无人机、无人驾驶汽车之后的又一个创新平台，受到世界各国的重视。

无人艇是指可以通过遥控或自主模式在水面上航行，能够完成一项或多项任务的小型化、智能化的水面机器人，是适合用于替代人类执行危险、枯燥以及其它不适于有人舰艇执行的任务，可用于解放人力资源，降低劳动成本，提高工作效率的智能化平台，是未来帮助人类进行水面工作、开发利用保护海洋的核心装备。

与无人机行业发展轨迹类似，无人艇技术率先在军事领域得到推广与应用，如美国的“斯巴达侦察兵”、“锤头鲨”、“CUSV”，以色列的“保护者”等等。其功能涵盖安防、巡逻、扫雷、反潜、补给、近岸打击、特种作战等多个应用领域。后期随着技术的发展与市场的需求，民用行业根据自身的现状逐步开展适用于自身使用需求的无人船技术研究。在海洋勘测领域，国内外已研制出多款测量无人船产品，如英国 ASV Global 公司旗下的 C-worker 系列、C-Enduro，Ocean Science 公司的 Z-Boat 系列，以及 Sea-Robtics 等，国内如上海大学研制的“精海”系列无人艇，云洲智能出品的 M80、M40 等。

相较于无人机的发展，无人艇的起步时间较晚，直到 2000 年研究及产业才逐渐起步。目前，全球范围内共有几百家单位在进行无人艇相关技术的研发与应用。国内，无人艇技术研究相对国外开展较晚，技术发展相对落后。近年来，在国家与行业专家学者的努力下，也开始快速发展起来。在科研上，无人艇相关课题已占到了国家重点研发计划中仪器装备的 1/10；在应用上，无人艇产品已落地应用于全国所有省 186 个市，覆盖测绘、环保、水文、海洋、公安、搜救、科研等 80% 涉水领域。在疏浚行业，中交集团、中铁建港航局及各地航道局均有开展相关的应用和研究。当前，无人艇技术研究已进入国家海洋、测绘、海事、环保、水利等各行业“十四五”规划中，相信在大家共同努力下，我国无人艇技术研究将会迎来更蓬勃的发展。

2 疏浚业务与无人艇技术结合探讨

疏浚测量是工程施工前后的重要工作，根据疏浚工程

相关技术规范，在工程前后需对作业区域进行调查、勘测，监测水环境，为工程设计、施工、检验提供依据。传统测量方式采用大型有人测量船，但随着信息化、大数据等技术的发展，智能疏浚成为新趋势，国家、行业正积极倡导疏浚业与智能技术相结合，提升工程技术水平。

无人船艇作为水面无人智能装备的代表之一，在水下测量应用已非常广泛和成熟，支持搭载多种声呐设备、监测设备执行相关的测量任务。结合对疏浚业务的思考分析，我们认为无人艇技术在疏浚行业的应用，可以有以下几个结合点：

2.1 航道、港口等疏浚工程的水深、地形、水文等测量

无人艇搭载单波束 / 多波束测深系统、侧扫声呐、ADCP 等设备，可实现对航道、港口、码头等水域水深、地形地貌、水流速等数据的测量。无人艇吃水浅，机动灵活，可以克服浅区、急流等情况，按控制基站软件规划的测线独立执行测量任务。作业过程中，可将测量数据实时回传岸基基站并存储。其航行贴线精度高、速度根据流速动态调整、航行姿态稳定，有利于获取高质量的测量数据，是优质测量成果的重要基础。同时还支持多条无人艇同时同步进行测量作业，可大幅提高测量作业效率。



图 2-1 云洲智能自研无人艇产品



图 2-2 云洲智能多艇协同集群控制应用

应用案例分享：

案例 1：

2015 年，云洲智能与中交上航院就无人艇测量项目进行合作。中交上航院采购云洲无人艇针对镇江丹徒江心洲北岸 4 公里，外延 50 米的区域进行间距 50 米的断面测量。这一测区水深普遍小于 2 米，且存在有礁石、碎石等因素，人工测船无法靠近，即存在 50 米的人工测绘盲区。这种情况下，采用人工下水的方式测量，效率低，而且工作危险，劳动强度大，因此选用了无人艇来代替人工测量方式。项目采用云洲测绘无人艇 ME70 搭载单波束测深仪开展测量作业。这款无人艇吃水只有 20cm，在这次测量作业中，无人艇在遍布浅滩和暗礁的水域畅通航行，测绘最大偏差仅 1m，贴线精度高达 ± 0.5 米。



图 2-3 ME70 无人船型

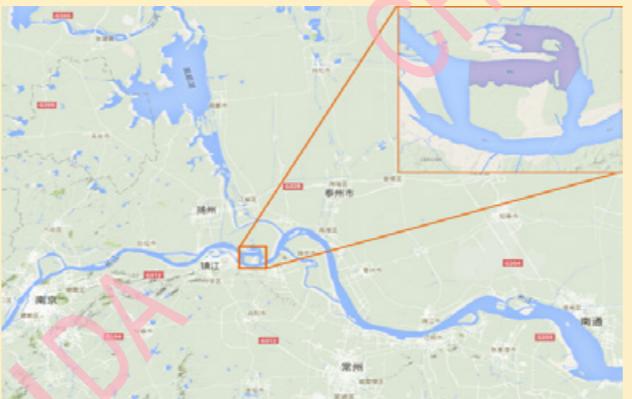


图 2-4 项目测区 (红色区域)



图 2-5 测量现场

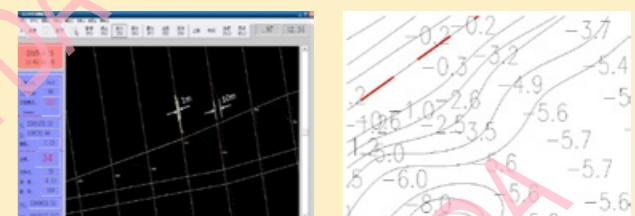


图 2-6 测量成果

案例 2：

2017 年，云洲智能采用海洋探测无人艇 M40 搭载多波束测深系统在白沙湾江段航道西侧开展了水下测量任务。本次测量完成 1000m \times 600m 测区水下地形全覆盖测量，测线总长约 26km，其中主测线约 25km，联络测线约 1km。无人艇作业在顶顺流状态下最大偏航距约为 0.5m，受过往大船尾浪影响，侧流最大偏航距约为 0.4m。

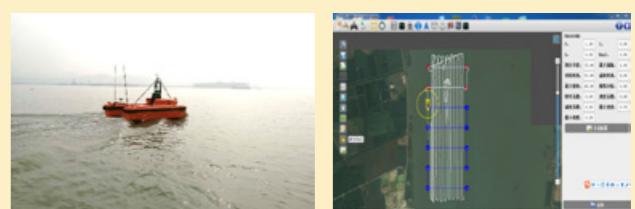


图 2-7 无人艇 M40 及其巡线轨迹

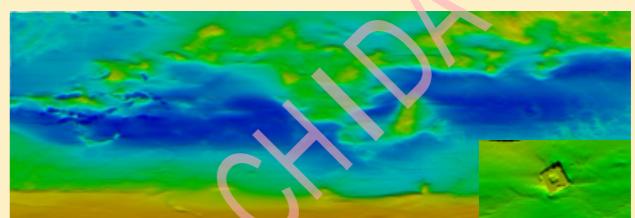


图 2-8 多波束成果图 (发现 5.5*5.5m 水下沉块)

2.2 生态疏浚工程中的水质监测

无人艇搭载采样装置、水质在线监测仪，可实现对测区水质采样及在线监测，快速获取水域的水质参数值，为生态疏浚的环境评估、综合治理提供数据支持。

无人艇采样、监测是根据软件规划的指令进行标准化、自动化的监测任务，点位多，且系统软件可自动生成原始数据表格及水质参数分布图，标准统一，有效避免人为因素造成数据失真。



图 2-9 无人艇在水质监测的应用

应用案例分享：

云洲智能有幸参与了由武汉市环保局主导的“武汉市湖泊湿地水环境生态调查与研究”项目。该项目在武汉市内选取具有代表性的 50 个湖泊及 3 片湿地作为研究对象，通过对水体进行采样和在线监测，分析多种水质参数值，如 pH、浊度、透明度、溶解氧、电导率、高锰酸盐指数等。在调研过程中，采用了云洲智能的全自动采样监测无人艇 ESM30。

在调查武汉三角湖时，无人艇对该湖面 4 个点的水体进行采样，同时对湖面上 28 个监测点进行水质监测，每个监测点间隔为 100m，监测参数包括 pH 值、温度、溶解氧、电导率和浊度。



图 2-10 现场作业图

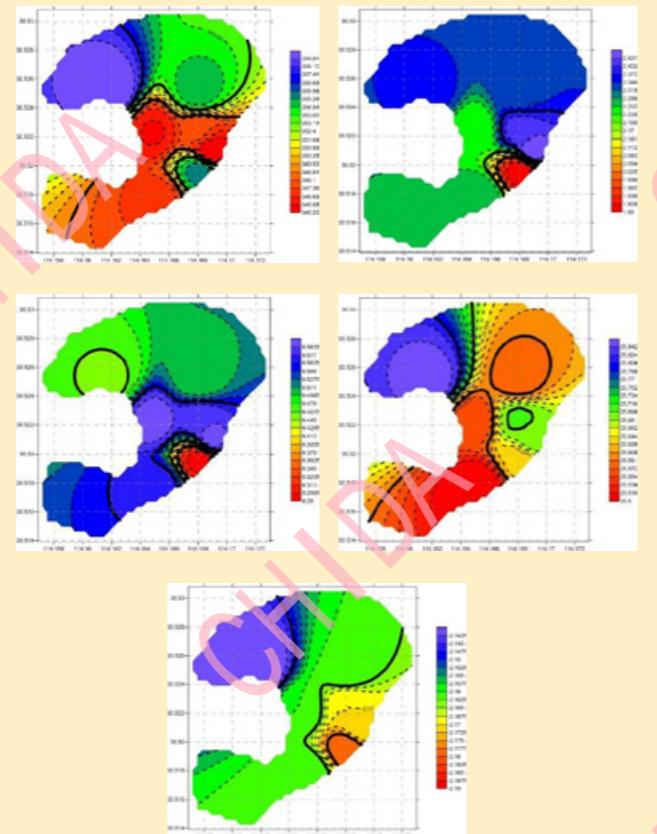


图 2-11 无人艇搭载水质在线监测仪、采样装置

在完成对三角湖 28 个监测点的水质监测后，根据无人艇回传的数据，地面控制基站自动绘制出该湖 5 项参数的分布图（以下五图涉及的参数从左上至右下分别为溶解氧、电导率、pH 值、温度和浊度）。

2.3 疏浚工程的水下设施情况调查

无人艇可搭载 3D 实时声呐、浅层剖面仪、高低频合成孔径声呐等设备，对水下设施进行精准、高效、安全的检测，获取水下设施分布、位置、埋设深度及其结构等情况，保障疏浚工程的安全施工。



3 无人艇技术与疏浚工程结合的可行性与必要性

3.1 可行性

无人艇技术经过多年的发展，国内外已研制出多款无人艇产品，并在各个行业领域发挥重要作用。云洲智能作为国内专注于全领域无人艇开发的高新科技企业，我们攻克了多项无人艇关键技术，研发了系列无人艇产品，并在测绘、环保、安防、军用等领域得到广泛应用。如我国第 34 次南极科考使用云洲智能海洋无人艇 M80 进行全覆盖

水深地形测量工作；国家海洋局南海分局使用海洋探测无人艇 ME120 在西沙岛礁海域进行水深地形测量工作等。无人艇已有的成熟应用基础，是无人艇技术与疏浚工程结合应用可行性的有力证明，将水面无人智能技术应用于疏浚业，可有利于提升疏浚行业技术水平，推动疏浚业的智能化转型发展。

3.2 必要性

无人艇具有多种智能化功能，可为疏浚测量提供更先进的无人智能技术支撑：

3.2.1 无人艇为解决复杂环境作业提供重要技术支撑手段

当前，疏浚测量主要采用传统测量船，体型大，吃水深，人需随船作业，在浅水区或急流区作业难度高，易搁浅和发生事故，随船人员安全得不到保障。此时，无人艇可作为传统测量方式的补充，无需人员下水，可独立根据地面控制基站指令执行测量任务，其吃水浅、适航性强的特点，可解决传统测量在浅水、急流区域的水下测量问题，填补传统方式的测量盲区，为疏浚工程提供更全面的水下测量数据。

3.2.2 是提升测量作业效率的重要技术手段

在广阔的工程水域，单条测量船作业效率较低，耗费时间长，对工程工期会有一定影响；而在通航密集水域，由于航行船舶多，测量作业的时间窗口较窄，需测量船尽

快完成测量任务，恢复航道通行。无人艇可支持多条艇协同作业，即在同一水域，同时开展测量任务，无人艇循线精度高，定位准确，采集的数据可进行拼接处理，作业效率相比传统测量船的“单兵作战”有了极大的提升，可有效缩短工程工期。

3.2.3 获得更精确数据的重要技术手段

无人艇可根据高精度导航定位信息实时控制动力系统保持在高海况下较高的贴线精度。有别于有人测量船，无人艇主控系统会实时调整动力大小和方向，不断修正航向，实现高精度的循线航行，从而获取更精准的测量数据。另外，无人艇可支持与 AUV 等设备的跨域协同，实现更精细化的深水测量。

4 总结

随着信息化、大数据等技术的发展，数字化、网络化、智能化融合应用已成为时代主题。面对新一轮科技和产业的变革，疏浚行业必须以全新的姿态，进入以信息产业为主导的时代潮流中，从而提升行业整体水平。未来，智能疏浚将成为行业发展的必然趋势。

当前，涉水装备勘测技术已步入智能化阶段，无人艇技术作为涉水领域的重要智能装备技术已在多个行业领域中应用，并获得越来越多的业内人士认可。无人艇的高效、精准、安全、低成本等产品特性在疏浚工程中应用，无疑将是推动疏浚行业智能化发展的有效助力。

作者简介：

唐梓力，男，珠海云洲智能科技有限公司，国内事业部总经理。

赵建虎^{1,2}, 李邵波^{1,2}

武汉大学测绘学院
武汉大学海洋研究院

Zhao Jianhu^{1,2}, Li Shaobo^{1,2}

School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University
Institute of Marine Science and Technology, Wuhan University



武汉大学海洋测绘课题研究成果概述

Overview of Research Achievements of Marine Surveying and Mapping Technology in Wuhan University

摘要: 简要介绍了海洋测绘的定义及内涵,从海洋控制测量、海底地形测量、海底地貌测量、海底底质声学探测、海水水体测量5个方面,介绍了武汉大学海洋测绘研究取得的一些进展,展现出了现代海洋测绘的立体、高精度、高分辨率、自动化信息获取、处理发展态势。

关键词: 海洋测绘; 测量技术; 发展现状

Abstract

Briefly introduces the definition and connotation of marine surveying and mapping. It introduces the development status of marine surveying and mapping technology of Wuhan University from five aspects: marine geodetic survey, submarine topography survey, submarine geomorphology survey, submarine bottom quality survey, and marine water survey. At this stage, the surveying and mapping technology presents a trend of three-dimensional, high-resolution, high-precision, automated and efficient information acquisition and processing.

Key words: marine surveying and mapping, surveying technology, development status

1 引言

随着我国“海洋强国”、“一带一路”和“海上丝绸之路”等战略的实施,海洋测绘作为海上活动的先头部队,在建设数字海洋、透明海洋等方面有着重要的意义。在计算机信息技术推动下,多波束测深、机载激光测深等高效率、高精度设备使得海洋测绘的对象得以扩展,并呈现出测量多元化、处理精细自动化的趋势^[1-3]。武汉大学测绘学院紧随上述趋势,在国家需求驱动下,以国家973、国家863、国家自然科学基金等项目支撑下在海洋控制测量、海底地形测量、海底地貌测量、海底底质声学探测、海洋水体测量等方面开展了相关研究,取得了一些研究成果。下面根据海洋测绘的定义和内核,分内容介绍武汉大学海洋测绘技术发展的现状。

1 海洋控制测量

1.1 海底控制网建设

海底控制网在海洋开发和利用中扮演着非常重要的作用,而我国在该领域尚处起步阶段,其建设理论和方法体系尚不完善,难以满足日益增加的海洋科学研究、海洋工程需求。为解决传统海底控制网点绝对坐标确定费时费力、垂直解精度不高的问题,提出一种顾及波浪影响和深度约束的水下控制网点绝对坐标精确确定方法^[4]。提出水下控制网点间高差确定方法以及利用该高差和GNSS垂直解的网点绝对高程确定方法,在此基础上,提出附加深度约束的圆走航单点绝对三维基准传递法、深度约束的二维自由网平差法及联合点间高精度深度差的组合约束平差法和三维联合约束平差法。最后对提出的方法进行验证。该方法可提高作业效率,将传统方法高程确定精度提高了1个量级。

1.2 海洋无缝垂直基准构建

为解决制约基于GNSS的高精度测深成果转换的瓶颈问题,开展了海洋无缝垂直基准构建理论和方法研究,提出了基于多个GPS网数据建立大区域似大地水准面模型的方法、基于锁定GNSS潮位的平均海平面/深度基准面传递方法、基于物理模型和几何模型相结合的海洋无缝垂直基准面构建理论和方法及垂直基准间转换模型构建方法,

在国内首次形成了较为系统的无缝垂直基准构建理论体系,实现了GNSS走航测量成果向海洋垂直基准的无缝转换,满足了海洋工程应用的需要^[5-6]。

2 海岸带及海底地形测量及数据处理

2.1 多波束海底地形测量安装偏差探测

多波束系统是目前水下地形获取的主流仪器,其安装偏差常会引起地形的倾斜、平移、旋转等问题。针对目前多波束系统安装偏差探测使用Patch test方法需要特殊地形、过程复杂、去耦合的不足,提出了安装偏差整体探测方法^[7]。该方法利用安装偏差间的耦合性,形成了安装偏差对测深影响的模型;借助往返测线公共覆盖区形成的地形图像和点云数据,提出了借助SIFT匹配地形高程(水深)图像整体求解安装偏差方法和借助ICP点云配准整体求解安装偏差方法,与Caris结果对比,分别取得了优于0.1°和0.08°的探测精度。上述方法解决了安装偏差一体化高精度获取难题,实现了安装偏差的一体化求解,简化了探测流程,降低了对地形的特殊要求,提高了探测精度和效率。

2.2 声速剖面简化

声速剖面(soundvelocityprofile,SVP)是水下测距、测深等基础要素测量中声线跟踪必不可少的参数。SVP测时深度间隔设置越小,越能准确反映声速分布,声线追踪精度也越高。但由于声线跟踪采用分层计算和逐层累加思想,高密度SVP常会导致声线追踪耗时随层数显著增加,尤其对于深海多波束测深。为此,提出了一种基于面积差的声速剖面自适应简化方法^[8]。基于不同声速剖面之间面积差与声线跟踪误差间的关系,建立了二者关系模型,并给出了基于跟踪精度约束的声速剖面简化方法和流程。实验验证表明在无人工干预的情况下,可方便地实现声速剖面的简化,显著地提高测深数据处理效率。

2.3 多波束海底地形测量残余误差综合影响削弱法

多波束声呐系统是由多传感器组成的综合系统,其测深数据受声速、船只姿态、换能器安装偏差等多种因素的综合影响。在测量和数据处理中,尽管这些因素被严格测定和校正,但它们的残余误差仍会对测深数据产生系统性的综合影响。这种综合影响十分显著且难以克服,并随着

波束入射角和深度的增大而增大，目前尚无合理的解决方案。为此，提出了一种基于海底地形频谱特征的残余误差综合影响削弱方法^[9]。该方法包括四个步骤：基于频谱分析的水深数据低频和高频地形信息分离，海底地形变化趋势的重建，实际地形变化趋势和海底微地形的融合，以及改正后数据的精度评估。同时，基于多项式模型和傅里叶分析的两种地形趋势提取方法，分别给出了两种削弱残余误差综合影响的处理流程。将该方法应用于南海某水域多波束测深数据处理中，从而解决了边缘波束的残余误差造成的地形异常问题。3000m水深测量中，通过两种处理流程的改正，边缘波束测深数据的平均不符值从3.382m分别降低为0.624m和0.695m，残余误差对测深数据的综合影响得到了很好地削弱。

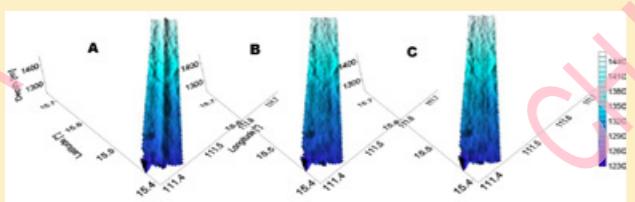


图1 削弱残余误差对两个相邻测线的测深数据的综合影响。

A展示了从两个测线的原始测深数据构建的海底DEM图，而B和C分别为使用多项式模型和傅里叶方法处理流程后的测深数据构建的海底DEM图。

2.4 基于机载激光测深的海底地形测量

机载激光测深(Airborne LiDAR Bathymetry, ALB)是一种快速、灵活、经济有效的浅水测量方法，能很好地适用海岸带等浅水域。ALB虽具有诸多优点，但由于激光自身几何发散、水体多次散射及水底反射等作用影响，仍存在相应的问题。

首先，针对机载激光测深(Airborne LiDAR Bathymetry, ALB)中，传统深度偏差模型未顾及水文参数和仪器测量参数，在高浑浊度水域测深精度不高问题，采用逐步回归法和参数显著性检验法，提出了顾及水深、激光波束扫描角、传感器高度和水体含沙量(Suspended Sediment Concentration, SSC)的ALB深度偏差综合修正模型构建法^[10]。借助所构建的综合模型，双激光ALB

在测区内取得了5.5cm的测深精度，将传统ALB测深精度提高了1.6倍。该项研究丰富了双激光ALB高精度测深数据处理理论。

其次，针对双激光ALB系统设备昂贵，而单绿激光ALB存在水面不可靠问题，借助逐步回归法和参数显著性检验法，提出了关于激光波束扫描角、传感器高度和表层水体含沙量的绿激光水面穿透量(Near Water Surface Penetration, NWSP)模型构建法^[11]。推导给出了关于NWSP的单绿激光ALB高度偏差模型，并基于该模型实现了单绿激光ALB水面、水底点高度偏差修正。该方法在实验中得到了检验和验证，取得了标准差为3cm的NWSP估计精度，5.7cm的单绿激光水底点精度。修正后的单绿激光测深精度接近双激光ALB测深精度，研究为基于低成本的单绿激光ALB高精度测深提供了理论支撑。

3 海底地貌测量及数据处理

3.1 侧扫声呐图像处理与拼接

目前市场上的侧扫声呐数据处理软件如TRITON, Sonar WEB, CARIS sips均可以处理条带SSS图像。但其存在如下不足：a. 海底线提取自动化程度不高；b. 无基于特征的图像拼接，基于地理编码的图像拼接由于地理位置不准导致相邻条带共视特征的错位；c. 大区域图像拼接存在效率不高的缺陷。

针对侧扫声呐图像传统阈值海底跟踪法存在费时且精度不高的缺陷，提出了联合最后峰法、异常海底跟踪段修复方法、对称性和海底地形变化渐近性原则及卡尔曼滤波的海底线综合跟踪方法^[12]。实验结果表明，该方法实现了复杂海洋环境噪声下海底线的自动、准确跟踪；与外部测深数据比较，取得了最大标准偏差为0.17m，与测深精度一致的拖鱼高度跟踪精度。

海底线跟踪完成后，考虑到侧扫图像受波束模式、传播损失、角度响应、拖鱼高度等影响，辐射畸变严重，而现有方法尚无法很好地克服。在分析各不同畸变因素的特点基础上，提出了顾及海底底质变化的侧扫声呐图像辐射畸变改正方法^[13]。该方法包括四个步骤：首先通过数据预处理消除了与角度无关的辐射畸变；然后根据同入射角下

强度序列受影响相同的特点，对侧扫声呐图像开展了海底底质非监督分类；在此基础上，提取出不同底质的角度-强度曲线；最后据此曲线实现了与角度相关的辐射畸变改正。

基于海底线跟踪及辐射畸变改正后的侧扫图像，即可进行大区域图像拼接。为了获得大规模的海床图像，提出了一种使用航迹线位置约束的耦合特征点(CFP)的侧扫声呐(SSS)图像镶嵌方法^[14]。首先基于地理编码图像确定相邻带状图像之间的重叠区域，在重叠区域内，两个条带均采用特征点(FP)检测和配准操作；根据检测到的CFP和航迹线位置，建立平差模型以适应复杂的局部失真并确保全局稳定性。该方法有效地解决了目标重影或位错的问题，并且在镶嵌过程中不会出现累积的误差。实验结果表明，最终拼接的图像能够正确反映出物体的分布。

基于上述方法，研制了侧扫声呐条带图像拼接系统(SIP)。与商业软件TRITON、Sonar WEB等相比，在海底线提取、辐射畸变改正、拼接等处理步骤中占优。



图2 研制的SIP软件处理的南海某水域海底地貌图像与Sonar Web的比较

3.2 三维地形恢复

高精度、高分辨率海床地形数据可借助多波束测深系统(MBS)来获取，但是在深海边缘波束区域，多波束测深数据分辨率会降低，难以反映精细的微地形特征。借助侧扫声呐系统获得的声呐图像，研究了海床数字高程模型的构建问题，在特定水域取得了较好的视觉效果，为基于2D声呐图像获取高精度、高分辨率3D海床地形信息提供了一种全新的思路。

为了获得高分辨率的海床地形并克服现有地形重建方

法在需要外部测深数据和忽略沉积物变化和Side-Scan Sonar (SSS)图像质量影响方面的局限性，提出了一种从海底地形重建的方法具有自约束条件的SSS图像^[15]。根据兰伯特定律和海床散射模型推导了重建模型。提出了一种底部追踪方法来获得沿航迹的SSS拖鱼高度，并结合全球导航卫星系统(GNSS)获得的沿航迹的拖鱼高度，拖鱼深度和潮汐水平，建立了SSS测量区域的初始海床地形。以初始地形为自约束，给出了重建海床地形的完整过程，最终获得了高分辨率的海床地形。实验通过对珠江的实测数据验证了该方法的有效性，实现了小于15厘米的标准偏差，并且重建地形的分辨率大约是通过测深数据建立的数字高程模型(DEM)的分辨率的60倍。

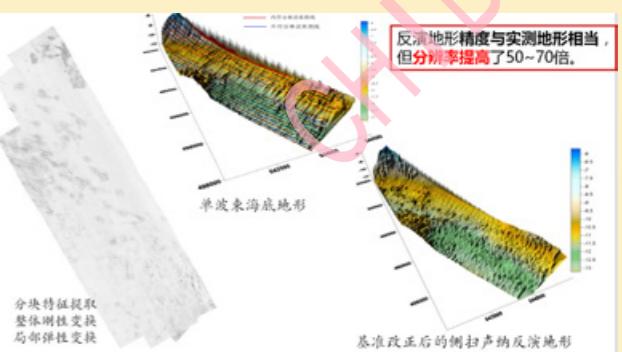


图3 侧扫声呐图像(左)、反演地形(中、右)

4 海底底质声学探测

4.1 浅地层剖面及底质分类

目前浅地层剖面中的地层层界提取主要采用人工法和半自动法。人工法借助人工经验确定底质层界，效率低，且因人差易造成成果不唯一。为此，提出了联合瞬时振幅和余弦相位信息的层界提取方法^[16]。

瞬时振幅可用于衡量反射能量；瞬时相位能表现层界的连续性。瞬时相位具有较高的分辨率，可以实现沉积单元亚相及微相的识别。由于瞬时相位在-180°和+180°是不连续的，通常难以对其进行有效处理，而相位余弦能够像瞬时相位一样增强反射层的连续性且处理方便，故而更适合用于层界拾取。基于此，所提出方法综合考虑了浅地层数据的瞬时振幅、瞬时余弦相位属性和相位纹理属性，以自动获得连续且准确的层界。该方法克服了传统方法在层

界提取中的准确性和连续性过差的缺点，基于瞬时振幅阈值和纹理约束，提取出精细连续的层界。

4.2 多波束背散射图像辐射畸变校正及底质声学分类

角度响应效应导致的背散射图像辐射畸变严重降低了多波束声呐后向散射强度图像的质量，进而影响了多波束声呐图像的应用。由于现有的改正方法尚不够完善，因此往往难以得到高质量的海底声呐图像。为此，提出了两种自适应改正方法，分别为建模法和分类改正法^[17]。建模法使用平均角度响应曲线的角度响应参数进行建模和校正，主要包括四个步骤：连续脉冲平均角度响应曲线的提取，平均角度响应曲线的平滑，角度响应参数的提取，以及角度响应改正模型的建立。分类改正法基于底质分布，使用每种海底底质的角度响应曲线进行角度响应改正，主要也包括四个步骤：角度响应参数的优化，非监督海底分类，不同底质角度响应曲线的提取，以及基于底质分类的角度响应改正。两种方法均能克服传统方法的缺陷，较彻底地削弱了角度响应导致的辐射畸变对多波束图像的影响，为高质量多波束图像的获取提供了一种较好的解决方案。方法的有效性得到了实验的验证，对于受角度响应影响最严重的镜面区中回波强度的平均不符值从3.98dB分别改善为0.38dB和0.17dB。



图4 利用不同方法对福建水域片段数据进行角度响应改正

(a) 为原始的片段数据地理编码图像，而(b)为默认EM模型进行改正后的结果，(m1)为利用建模法进行改正后的结果，(m2)为利用分类改正法改正后的结果

5 海洋水体要素获取

5.1 基于机载激光的海洋水体含沙量测量

针对浅水域波形参数提取困难和水体含沙量大面积获取难题，提出了一种基于ALB波形分解实现水体含沙量大面积、高精度、高分辨率反演的波形法^[18]。借助波形分解，将水体回波从绿激光原始波形中分离，进而计算水体回波的波形参数。结合实测水体含沙量，构建了关于水体回波波形参数的水体含沙量反演模型。实验表明：以实测水体含沙量为参考，基于波形分解的波形法反演获得的水体含沙量平均偏差和标准偏差分别为0.05mg/L和3.8 mg/L，实现了基于ALB的大面积、高精度、高分辨率水体含沙量获取。

考虑波形分解法反演水体含沙量模型和过程复杂、不便于工程应用的不足，提出了一种借助绿激光面回波测距偏差反演表层水体含沙量的三维点云法^[19]。该方法利用绿激光水面点和参考水面点计算绿激光水面穿透量(NWSP)，进而计算绿激光面回波测距偏差，再结合实测水体含沙量构建了关于绿激光面回波测距偏差的水体含沙量反演模型，最终实现了基于该模型的水体含沙量反演。实验表明：以实测水体含沙量为参考，三维点云法取得了优于20 mg/L的水体含沙量反演精度，虽低于波形分解法，但为水体含沙量获取提供了一种简单、快速途径。

5.2 面向海洋水体测量的多波束水柱数据处理

根据各种噪声干扰的强度和空间分布特点将它们归纳为异常“弧圈”干扰和背景噪声两大类别，针对各自的特点提出了不同的消除方法。另外，对于残余的斑点噪声提出了基于形态学约束的剔除方法。(1)对于异常“弧圈”干扰，根据其高强度和等斜距“弧状”分布特征，提出了基于数据拟合的异常“弧圈”检测和消除方法。为了保留“弧圈”内部可能存在的目标，根据气泡流目标在波束方向上的连续性给出了目标的保留方法。(2)对于背景噪声，根据水体环境在局部范围内的一致性，提出了基于图像交集和图像差集运算的差分消除方法，在消除背景噪声的同时保留具有较高回波强度的气泡流目标。(3)对于残余的斑点噪声，根据气泡流目标的形态特点提出了基于形态学

约束的剔除方法。(4)综合上述三种方法，得到了多波束水柱影像的综合消噪方法和流程。

影响多波束水柱影像的主要干扰噪声包括：旁瓣效应、第三方声呐干扰、自噪声和海洋环境噪声、多扇区影响等。根据其空间分布特点将其分类整理为5个主要类别：表面噪声、分层噪声、环境噪声、多扇区影响、“弧圈”干扰等。基于不同水柱图像中噪声分布差异的消噪方法：仿照时间-角度(T-A)图像，新定义一种图像呈现方式，即深度-角度(D-A)图像。“弧圈”干扰在角度-时间图像中是一条水平线，分层噪声则呈现为弧状分布；在角度-深度图像中，“弧圈”干扰呈现弧状分布，分层噪声则呈现为水平分布。对二者单独消噪的结果求取公共部分，则可以较为完整的消除噪声。基于局部水体一致性的差分消噪方法：对于局部水体来说，其生物分布和环境噪声可以认为具有一致性，即在相临近Ping的水柱数据中的背景噪声具有一致性。利用广义的图像交集运算可以将共有的背景噪声提取出来，再利用广义的图像差集运算对其进行消除。最后再利用形态学方法消除斑点噪声。

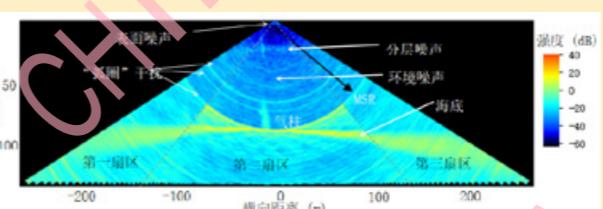


图5 各类噪声在水柱影像中的分布特征



图6 多波束水柱目标的去噪与自动分割

6 结论

论文简要介绍了武汉大学海洋测绘研究中心在海洋控制测量、高精度高分辨率海底地形地貌信息获取、海底声学底质探测、海洋水体探测方面的研究成果。这些研究成果解决了国家、相关部门在海洋测绘活动中部分需求难题，

在实践中取得了很好的应用效果。综合上述研究成果，认为海洋测绘技术现阶段呈现出立体、高分辨率高精度、自动化高效信息获取、处理的态势。

参考文献：

- [1] 赵建虎,欧阳永忠,王爱学.海底地形测量技术现状及发展趋势[J].测绘学报,2017(10):1786-1794.
- [2] 赵建虎,王爱学.精密海洋测量与数据处理技术及其应用进展[J].海洋测绘,2015,35(06):1-7.
- [3] 赵建虎,陆振波,王爱学.海洋测绘技术发展现状[J].测绘地理信息,2017,042(006):1-10.
- [4] 赵建虎,陈鑫华,吴永亭,冯杰.顾及波浪影响和深度约束的水下控制网点绝对坐标的精确确定[J].测绘学报,2018,47(3):413-421.
- [5] 赵建虎,董江,柯灝,张红梅.远距离高精度GPS潮汐观测及垂直基准转换研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(6):761-766.
- [6] 柯灝,赵建虎,张红梅.短潮流序列系统误差的探测及修复方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(7):843-846.
- [7] 李铁,周丰年,赵建虎.多波束系统安装偏差整体校准的地貌特征匹配方法[J].测绘学报,2019,48(4):512-519.
- [8] 郑根,张红梅,冯磊,赵建虎.基于面积差的声速剖面自适应简化方法[J].测绘学报,2018,47(10):1415-1423.
- [9] J. Zhao, J. Yan, H. Zhang, Y. Zhang, A. Wang. A new method for weakening the combined effect of residual errors on multibeam bathymetric data[J]. Marine Geophysical Research,2014, 35: 379-394. (SCI)
- [10] Jianhu Zhao, Xinglei Zhao, Hongmei Zhang, Fengnian Zhou. Improved Model for Depth Bias Correction in Airborne LiDAR Bathymetry Systems[J]. Remote Sensing, 2017, 9(7): 1-16.
- [11] Jianhu Zhao, Xinglei Zhao, Hongmei Zhang,

- Fengnian Zhou. Shallow Water Measurements Using a Single Green Laser Corrected by Building a Near Water Surface Penetration Model[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(5): 1-18.
- [12] Jianhu Zhao, Xiao Wang, Hongmei Zhang and Aixue Wang. A comprehensive bottom tracking method for Side-scan sonar image influenced by complicated measuring environment[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, 42(3): 619-631. (SCI)
- [13] Zhao Jianhu, Yan Jun, Zhang Hongmei, Meng Junxia. A New Radiometric Correction Method for Side-Scan Sonar Images in Consideration of Seabed Sediment Variation[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 575-592.
- [14] Jianhu Zhao, Xiangdong Shang, Hongmei Zhang. Side-Scan Sonar Image Mosaic Using Couple Feature Points with Constraint of Track Line Positions[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 1-22.
- [15] Jianhu Zhao, Xiaodong Shang, Hongmei Zhang, Reconstructing Seabed Topography from Side-Scan Sonar Images with Self-Constraint[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 1-18.
- [16] Jianhu Zhao, Shaobo Li, Xi Zhao, et al. A Comprehensive Horizon Picking Method on Subbottom Profiles by Combining Envelope, Phase Attributes, and Texture Analysis[J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(3): 1-20.
- [17] Zhao Jianhu, Yan Jun, Zhang Hongmei, Meng Junxia. Two self-adaptive methods of improving multibeam backscatter image quality by removing angular response effect[J]. *JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2017, 22(2): 288-300.
- [18] Xinglei Zhao, Jianhu Zhao, Hongmei Zhang, Fengnian Zhou. Remote Sensing of Suspended Sediment Concentrations Based on the Waveform Decomposition of Airborne LiDAR Bathymetry[J]. *remote sensing*, 2018, 10(2): 1-19.
- [19] Xinglei Zhao, Jianhu Zhao, Hongmei Zhang, Fengnian Zhou. Remote Sensing of Sub-Surface Suspended Sediment Concentration by Using the Range Bias of Green Surface Point of Airborne LiDAR Bathymetry[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 1-13.



么彬

北京海卓同创科技有限公司

Yao Bin

Beijing Hydro-tech Marine Co., Ltd.

国产化水下勘测设备在疏浚及智能无人平台应用 Application of Domestic Underwater Survey Equipment in Dredging and Intelligent Unmanned Platform

摘要: 本文主要结合多波束测深系统和侧扫声呐系统的国产化进展情况, 对此类设备在疏浚领域的应用以及与智能无人平台的结合做一个简要的综述, 并以此来为相关行业领域的专家和工程技术人员提供一些思路。

关键词: 多波束测深系统; 侧扫声呐系统; 疏浚应用; 无人智能平台

Abstract

This paper mainly introduces the domestic development of multi-beam bathymetric system and side scan sonar system, and makes a brief review on the application in the field of dredging and the intelligent unmanned platform, so as to provide some ideas for experts and engineers in related fields.

Key words: multi-beam bathymetric system, side scan sonar system, dredging application, intelligent unmanned platform

作者简介:

赵建虎, 男, 武汉大学海洋研究院, 副院长。

李邵波, 男, 武汉大学测绘学院, 博士研究生。

1 引言

多波束测深系统和侧扫声呐系统作为目前为止最通用的高效的水下勘测产品。随着技术不断进步，多波束测深系统和侧扫声呐系统都已经在海洋工程测量、海底资源、航道测量、疏浚测量、水下工程勘察以及各类水文水利水下地形、地貌测量等领域，现已成为海洋勘测不可或缺的首选设备。与此同时，随着水下智能平台的快速发展和不断完善，将勘测设备与无人智能平台紧密结合，将成为行业应用的一个重要方向。

2 多波束和侧扫声呐系统国内外发展状况

就多波束测深系统而言，目前国际上知名的海洋仪器公司，如美国 L-3 ELAC Nautik 公司，挪威 Kongsberg 公司，丹麦 Reson 公司以及美国 R2SONIC 公司的均有自己系列化的多波束测深产品。

我国的多波束测深系统研究始于 1996 年哈尔滨工程大学与天津海军测绘所联合研制的军用多波束测深系统。二十多年间，国产化多波束测深系统的研制一直没有停止。目前，国内企业包括北京海卓同创、无锡海鹰加科、中海达、星天科技都退出了各自的国产化浅水多波束测深产品，其中海卓同创已完成多波束测深系统的产品化过程，并形成系列产品，包括 MS400、MS400P、MS8200、MS8240 等，已在民用市场实现了规模化应用。



图 1

侧扫声呐产品，目前国际上的主流设备提供商包括 Klein、Edgetech、Tritech、Marine Sonic、Kongsberg 等，这些公司均可能提供系列化的侧扫声呐产品，并在各领域得到了广泛的应用。

国产化侧扫声呐的开发主要源自于哈尔滨工程大学、中科院声学所和中船重工 715 所，目前，国内的民营企业中北京海卓同创、北京蓝创海洋、中海达均推出了各自的国产化系列产品，如海卓同创的系列化侧扫声呐产品包括 SS3060/SS4090 双频侧扫声呐、SS600 单频侧扫声呐、SS900 微小型一体化侧扫声呐和 ES1000 微小型嵌入式侧扫声呐，已在不同搭载平台不同行业细分中的实际应用。



图 2

3 国产化水下勘测设备在疏浚领域的应用

本节主要以海卓同创产品为例，介绍国产化多波束测深系统和侧扫声呐系统在疏浚水下工程领域的应用情况。

海卓 MS 系列多波束测深系统已在沿海航道疏浚、内河航道疏浚、港口疏浚等不同类型的疏浚作业测量中得到广泛应用，部分测量成果如下图所示。

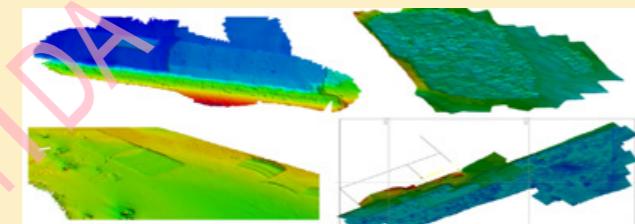


图 3

海卓 MS 系列多波束测深系统在水下丁坝、顺坝测量、水下铺排测量、水下抛石测量等各类水下施工测量领域中得到广泛应用。尤其在长江下游 12.5 米深水航道建设中发挥了重要作用。

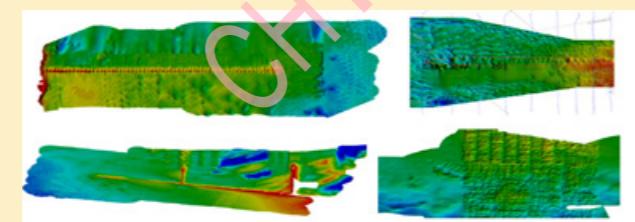


图 4

海卓系列化侧扫声纳产品在进行水下复杂结构物成像的应用中充分发挥了高硬件指标和宽带信号处理的优势，能够清晰展现水下结构物的细节。

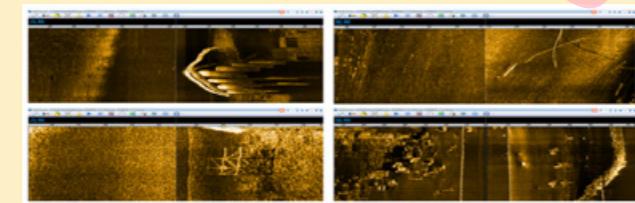


图 5

海卓系列化侧扫声纳产品在进行水下工程检测应用中得到了广泛应用。用户使用海卓 SS3060 对蓬莱某人工岛项目进行水下检测，从声纳图像中能够对扭王字块、多层堆石、四角空心方块、栅栏板等多种建筑材料进行清晰成像和有效分辨。

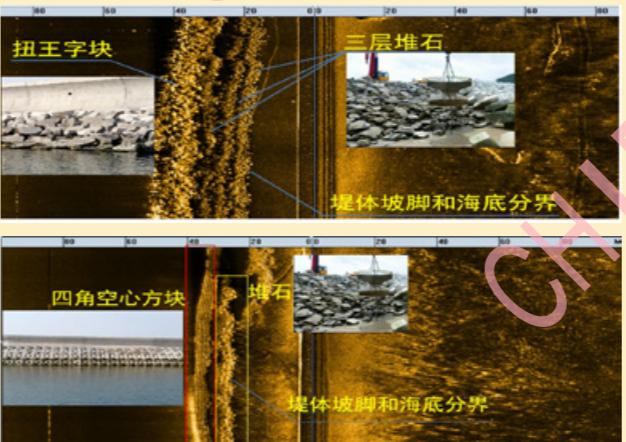


图 6

通过在不同水域、不同工况和不同疏浚方式向的广泛应用，能够证明国产化多波束测深系统和侧扫声呐系统已经完全成熟，完全适用于疏浚及水下工程领域的各种勘探、测量应用。

4 国产化水下勘测设备与智能无人平台结合

水上无人智能平台大体可分为无人船、UUV 和 ROV 三个大类，海卓同创结合自身多波束测深系统和侧扫声呐系统方面的技术积累，为智能无人平台提供了综合的解决方案。

针对无人船综合水下勘测、探测需求，海卓同创提出了由多波束测深成像声呐、侧扫声呐、前视成像声呐等组成的国产化解决方案，满足了在小型中、无人船平台上的水中全空间目标探测需求，解决方案的框图如下。



图 7

作者简介：

么彬，男，北京海卓同创科技有限公司，总经理。

针对 UUV 综合探测需求，海卓同创提出了由多波束测深成像声呐、侧扫声呐、前视成像声呐、接驳导引声呐组成的完整解决方案，满足了小型 UUV 平台的水中全空间目标探测和回收的需求，解决方案的框图如下。



图 8

针对 ROV 水下机器人综合检测、探测需求，本解决方案提供了由多波束测深成像声呐、侧扫声呐、前视成像声呐组成的完整解决方案，结合水下云台等机械结构，满足了中、小型 ROV 对水中结构物等综合检测的需要，解决方案的框图如下。



图 9

5 结语

国产化多波束测深系统和侧扫声呐系统已经基本成熟，并在疏浚测量及各种水下工程测量中得到了广泛的应用，基于相关核心技术的前视声呐、各类高频探测检测声呐的产品也不断成熟和完善。随着水面、水下无人智能化平台的发展，水下工程检测、海洋调查以及军事应用领域的应用也将越来越细分，同时要求声呐设备的体积更小、功耗更低、性能更好，同时具备相应的智能化处理能力，从一定程度上对国产化声学探测类产品提出了更高的要求。

王润成
天津海事测绘中心
Wang Runcheng
Tianjin Hydrographic Center



海事测绘 + 疏浚智能化应用场景 Maritime Surveying and Mapping + Dredging Intelligent Application Scenarios

摘要: 海事测绘和疏浚是港口发展建设不可或缺的保障力量, 随着交通强国、海洋强国等国家战略的深入实施, 以及智能化、无人化、大数据、云计算等新兴技术的应用, 必将带动海事测绘、疏浚等涉海行业的快速发展和高度融合, 为港口建设、航运物流、海洋开发、旅游环保等提供更全面、更精准、更高质量的保障服务。本文从海事测绘的概况、海事测绘“十四五”科技发展思路、海事测绘+疏浚智能化应用场景等方面进行分析, 为两个行业在“十四五”期间的高质量发展抛砖引玉。

关键词: 海事测绘; 疏浚; 十四五; 智能化; 高精电子海图

Abstract

Maritime surveying and mapping and dredging is an indispensable guarantee force for the development and construction of ports. With the in-depth implementation of national strategies such as transportation power and maritime power, as well as the application of intelligent, unmanned, big data, cloud computing and other emerging technologies, it will certainly drive the rapid development and high integration of maritime surveying and mapping, dredging and other marine related industries, so as to promote the port construction, shipping logistics, marine development and tourism environmental protection provides more comprehensive, accurate and high-quality security services. This paper analyzes the general situation of maritime surveying and mapping, the scientific and technological development ideas of maritime surveying and mapping during the "14th five year plan" and the application scenarios of maritime surveying and mapping + dredging intellectualization, so as to provide references for the high-quality development of the two industries during the "14th five year plan".

Key words: maritime surveying and mapping, dredging, 14th five-year plan, intellectualization, high precision electronic chart.

1 引言

2020年4月, 在全国严防新冠肺炎期间, 我非常荣幸应中国疏浚协会之邀, 参加“智能化海洋勘测技术”线上技术交流会, 并做了“海事测绘+疏浚智能化应用场景”专题报告。海事测绘是从航道局分离出来的, 但是人离心未离, 疏浚施工测量仍然是海事测绘重要业务工作之一。随着疏浚和海事测绘业务的扩展, 航道局从沿海延伸到内水, 从国内走向国外, 从追赶到领先行业, 目前已经成为全球海上疏浚的领先者。海事测绘也跟随疏浚老大哥的脚步, 从港口航道测量, 到沿海航路测绘、到内河水域测绘、到民用航海图书资料的提供者, 目前也积极开展深海和南北两极测量。未来, 双方可以在很多方面进行合作, 我衷心希望疏浚和海事测绘能够在向智能化转型发展中, 携起手来, 共创美好未来。

“十四五”时期是我国全面建成小康社会、实现第一个百年奋斗目标之后, 乘势而上开启全面建设社会主义现代化国家新征程、向第二个百年奋斗目标进军的第一个五年, 做好“十四五”规划编制工作意义重大。本报告主要向读者汇报海事测绘“十四五”科技发展规划的发展思路, 进而研究“海事测绘+疏浚”在将来智能社会中的应用场景, 并提出双方合作的建议措施。

2 海事测绘的概况

海事测绘是国家海防建设和港口管理相关业务的延伸与支撑, 在航道疏浚领域孕育成长, 在直属海事系统中逐渐壮大, 现已成为我国航海保障事业的三大主要业务之一。

2.1 海事测绘的发展历史

1955年5月, 国务院交通部从广州港务局等单位选调20人, 成立了交通部海运管理总局海港测量队, 始称珠江测量队, 这是海事测绘的第一支队伍。1956年8月, 海港测量队划归交通部航道管理局领导。1958年5月, 航道管理局海港测量队一分为二, 分别划归天津航道局和上海河道工程局管理, 分工负责全国沿海港口航道测绘工作。

1971年1月, 天津航道局将航标队和海港测量队合并, 组建天津航测大队。



图1 早期海上测绘作业

1988年7月, 天津海港测量队从天津航道局划出, 与天津港务监督、天津海岸电台共同组建了交通部天津海上安全监督局(天津海监局), 更名为天津海监局海测大队(简称天津海测大队)。1999年天津海事局组建后, 天津海监局海测大队更名为天津海事局海测大队。

2011年12月, 交通运输部将航标、测绘、通信等航保业务整合, 新成立北海、东海、南海航海保障中心。直属海事系统的“一体两翼”格局开始形成, 两翼分别指承担海上行政执法的海事监管队伍和从事海上安全保障服务的航海保障队伍。

2.2 海事测绘主要职责

海事测绘是航海保障的重要组成部分, 主要负责港口、航道、航路的测量和数据采集; 负责民用航海图书资料的编绘、出版和发行; 负责沿海交通水域测绘成果的技术审查; 代表国家负责海道测量国际交流并履行相关国际公约。承担辖区港口航道图测绘和技术审查工作; 承担航海保障信息系统的建设、运行和维护工作; 承担通航水域水深、水文等航海保障信息的监测、采集、分析、整理工作; 承担辖区应急测绘等工作。目前海事测绘在国内外公开发行纸质港口航道图540幅, 电子海图529幅, 各类航海出版物23册。

2.3 海事测绘与疏浚的关系

海事测绘与疏浚工作一样, 都是为港口、船舶和监管提供基础服务的、不可缺少的生产性单位。疏浚主要是挖航道, 海事测绘主要是测绘航道。港口不疏浚, 港口就不

能发展；港口航道挖的不够深，船舶就进不了港；水深测量不准确，船舶就会搁浅；没有港口航道图，监管部门就没有指导船舶进出港口的依据。

3 海事测绘“十四五”科技发展思路

“十四五”期间，海事测绘科技发展思路是：推进信息服务智能化，时空数据云端化，测绘技术现代化，测量设备国产化，从“浅蓝”走进“深蓝”，为智能航运提供“全空间、多时域”海上地理信息数据，做开启全面建设社会主义现代化国家新征程的海上探路先锋。

3.1 信息服务智能化

开展船舶航行安全信息可视化技术研究，实现船舶航行安全信息在岸端发布平台与船舶导航终端的数字化、按需化、自动化、智能化播发与应用，建立新型全数字化海上安全信息播发机制，创新现有安全信息播发途径。开发海上智能导航系统，为海事交通组织、综合执法、应急指挥、海洋工程活动和江海船舶航行提供综合查询功能和智能导航服务。开发船舶智能辅助导航系统，监管辖区内船舶、智能查询航保信息。

3.2 时空数据云端化

研究构建海洋地理空间信息基础设施的框架，对海上地理信息数据实施集中统一管理，实时更新维护，为智能航运、智慧海洋、智能港口等建设提供精准的基础性、个性化、全时域、全方位的大数据服务，为涉海单位管理、规划、设计、建设等各方面提供地理信息基础数据决策支持。重点推进“3+5”建设，即海图中心、海事水文服务中心、海事北斗地基增强精密定位服务中心和5个海上地理信息数据库（北方海区、北极、一带一路、内河、众包测深）。开展“一港一图一平台”建设。以港航用户应用为目标，以创新专题图产品为手段，以制作北方海区港口高密度专题电子海图为抓手，逐渐形成“门类齐全、层次丰富、形式多样、用途广泛”的专题服务序列产品。打通测绘资料和水文资料数据壁垒，实现现有海事测绘数据资源整合、集中管理和统一更新，为海事测绘信息服务和专题产品制作提供数据基础的支撑。

3.3 测绘技术现代化

完成60米测量船建造、测试及深远海测绘专用设备购

置和智能化升级，具有深远海测量能力，形成国内领先的海事测绘智能平台。研发无人测量体系，以无人测量艇为平台，实现多功能、多设备陆海一体化测量；以无人机为平台，开展海岸线测量和应急扫测，提升测绘效率和应急扫测反应能力。及时跟踪新技术发展，提前进行新技术与海事测绘的融合发展研究，确保海事测绘的领先地位。主要研究方向包括基于5G的测绘新技术和测量模式研究，基于AI/VI的测绘创新产品和服务研究，基于高分遥感的测绘数据获取研究，基于云计算的航测大数据深度应用研究等。



图2 无人化智能测量

3.4 测量设备国产化

加快推进测绘设备和技术的国产自主可控替代，构建海事测绘安全可控的技术体系。采取“两条腿”走路，一方面主动引进国产化测量设备，另一方面与相关厂商合作开发相关的技术设备。全面推进北斗导航定位技术应用，完全实现测量领域定位设备国产化。引进国产测深仪、多波束、侧扫声呐等设备，开发或引进国产测量软件，基本实现测量设备国产化。

4 海事测绘+疏浚智能化应用场景

4.1 智能导航在疏浚中的应用

海事测绘将研发海上智能导航系统，基本实现船舶信息服务智能化。结合疏浚的实际需求，可开发基于“互联网+”的智能导航和疏浚平台，为疏浚船舶航行施工提供智能化服务。除了实现电子海图、AIS信息、水文气象、渔区显示、航行通（警）告信息、港口服务、航保机构等多元数据的综合显示、实时信息查询及应用等基本功能外，还可以利用高精度、高密度、高质量海事测绘数据，实现测绘与疏浚施工水深同步更新；利用中国沿海北斗高精度导航定位系统，实现“厘米级”导航定位和无验潮潮位改正；

利用沿海海测水文站网，实现潮汐、海流、气象等航海保障信息同步更新；利用海事测绘大数据，实现疏浚作业水域水下地形三维可视化显示等。

4.2 船舶感知在疏浚中的应用

船舶智能感知系统是指船舶能够基于各种传感设备、传感网络和信息处理设备，获得船舶自身和周边环境等各种信息，是船舶能够更安全、可靠航行的一种技术手段。船舶感知的信息可分为自身状态信息和周围环境信息。自身状态信息包括船舶机舱、驾驶台、货仓等状态信息，以及船舶航行的位置、航速、航向的航行状态信息。周围环境信息包括周围船舶和碍航物信息、周围气象条件、水深、视频监控信息、流速流向、航标位置、可航区域等。

在疏浚船舶智能感知系统的建设方面，海事测绘可提供高精电子海图，厘米级的定位导航数据，实时更新的潮汐、海流和气象数据，遥感及三维数字场景重构等，同时还可提供AIS信息、智能通信技术等，实现多种新技术的高度融合及多媒体技术的应用，提高船舶航行环境态势的智能感知能力，彻底解决船舶航行环境探测、感知乃至认知的问题，并为下一代无人疏浚船舶的研发奠定基础。



图3 海上智能导航图



图4 智能疏浚管理系统

4.3 AR/VR 在疏浚中的应用

海事测绘在“十三五”就开展了增强现实（AR）和虚拟现实（VR）技术的应用，在“十四五”将继续开展这方面的应用研究。AR/VR在疏浚中的应用场景包括：

全息港口航道：实现海底地形的全方位空间显示，让疏浚施工人员在船上就能够非常直观的了解到水下信息和疏浚效果，管理人员在陆地就能实时掌握疏浚进度和疏浚质量。

船检作业：在船舶检查及机器维修作业中，利用增强现实原理和多机交互式分享，远程工程师近似面对面的指导船上人员进行船舶检修和维护，节省成本提高效率。

应急抢险和事故分析应用：通过实时共享疏浚船舶的实时数据，制定应急抢险方案，指导船上人员实施科学抢险，减少事故损失。或模拟事故现场，为事故分析提供更科学合理的依据，为预防事故发生制定切实可行的措施。

船员培训：利用AR/VR技术，为船员打造生动、逼真的培训环境，使船员在虚拟空间中进行训练和实验操作，增加驾驶或施工的熟练度，极大地降低了实训经费和危险系数。

4.4 “一港一图一平台”在疏浚中的应用

“一港一图”相对于传统的电子海图，一是打破了电子海图的比例尺限制，水深密度可根据客户的需求进行加载。二是打破了电子海图的图幅限制，图幅根据客户的需求进行定制。三是可以随时更新，只要有测绘数据，就能够对“一港一图”数据库进行更新，不受电子海图的更新限制。四是实现了时空数据的叠加，为港口航道的水深变化、疏浚效果等科学分析提供了便捷的工具。“一港一图一平台”能够解决疏浚施工的痛点问题，将疏浚和测绘真正的一体化，充分发挥测绘在疏浚中的关键性作用，有效提升疏浚能力。

4.5 海陆一张图在疏浚中的应用

海陆融合一张图是海事测绘围绕港口建设、船舶航行、海上工程、海岸带开发等需求，构建陆海高程和深度基准融合统一的海洋地理信息数据库，为交通强国建设提供最新的地图引擎技术和数据支撑。该图陆地部分采用自然资源部的天地图数据，海洋部分采用部海事局出版的电子海

图数据，数据覆盖我国陆地和领海区域，具有精度高、更新快、覆盖范围广的优势。该图比较适合疏浚业务中的填海造田，打破了原陆图和海图的隔阂，形成一张统一的海陆融合地图，实现了挖泥量和造陆面积的完美平衡。

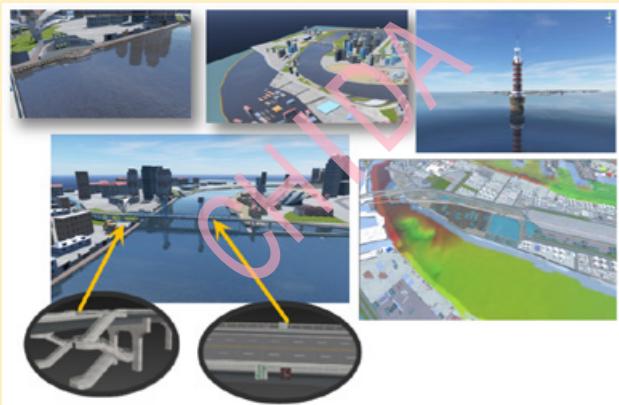


图 5 海陆三维立体图

4.6 高精电子海图在疏浚中的应用

高精度电子海图是无人船最核心的技术之一，是自动驾驶系统中必不可少的组成部分。相较于普通的电子海图，高精度电子海图具有精度更高、信息更全的特点，一方面是海图的绝对精度更高，另一方面所包含的信息更丰富、细致和全面，能够更加精确的反映海洋空间的各种要素的信息。高精度电子海图实际上是疏浚亟需解决的问题之一，一方面由于普通海图的定位精度不高，造成大面积扫浅的浪费，另一方面由于海底底质的变化，造成遗漏浅点较多，疏浚质量较差等。因此，高精电子海图是高精度疏浚等必需品。

4.7 海洋水文气象服务在疏浚中的应用

沿海海事水文网站能够实现验潮、测风、测浪及能见度监测的自动化、标准化和网络化，提高港口和航道水域潮汐变化的有效监测能力，能够为海洋测绘、港口建设运营、船舶航行、海事监管、海洋开发等涉海领域提供精确、详细、便捷的水文气象信息服务，在疏浚中也具有广泛的

应用场景。

4.8 北斗高精度定位在疏浚中的应用

中国沿海北斗高精度定位导航增强系统实现了我国沿海厘米级定位导航服务，极大的提高了我国沿海的海上高精度水下地形测量和快速精确导航定位的公共服务能力。有力促进了我国海事监管、海道测量、船舶航行、海洋开发等方面的安全级别和服务能力。为航海安全、海上应急指挥、海事监管、海洋工程等提供巨大支持。北斗高精度定位在疏浚中的应用前景非常广泛。

5 建议措施

5.1 加强合作，优势互补

海事测绘和疏浚本是一家，都是为港口、船舶和监管提供基础性服务的，在实际工作中也是港口建设关键的两个环节。在智能化发展中，双方应加强合作，取长补短，共赢发展。

5.2 聚焦智能，引领行业

智能化是未来发展的主方向，也是各行各业转型升级的必由之路，双方应聚焦智能化发展，互通有无，在智能化的道路上继续引领行业发展。

5.3 强强联合，资源共享

天津海事测绘和天津航道局曾经都是各自领域的引领者。随着我国市场化的发展，这种领先优势越来越不明显，亟需双方联合起来，实现资源共享，达到“1+1>2”，在全面实现小康社会征程中，继续担当水上交通的先行官。

5.4 携手共进，走出国门

抓住“一带一路”发展机遇，走出国门，共同发展。这里需要疏浚企业助力海事测绘一程，让海事测绘也能够在国际大舞台上一展身手。

5.5 技术融合，开创未来

科学技术就是生产力，双方要紧紧抓住这个生产力，从引进到创新，从创新到引领，共同开创美好未来。

作者简介：

王闻成，男，天津海事测绘中心，高级工程师。



张红良¹，侯明波²，姚广钊³

天津深之蓝海洋设备科技有限公司

Zhang Hongliang¹, Hou Mingbo², Yao Guangzhao³

Tianjin Deepinfa Ocean Equipment Technology Co., Ltd.

水下机器人应用技术 —以深之蓝水下机器人为例

A View on Unmanned Underwater Vehicle Application
—Illustrated by the Case of Unmanned Underwater
Vehicle of Deepinfa

摘要：智能海洋勘测离不开各种智能化的海洋勘测平台。水下机器人作为一种智能化水下设备，可以在海洋勘测中发挥巨大作用。本文首先介绍了水下机器人的分类及各类水下机器人的特点，然后以深之蓝海洋设备有限公司的三类水下机器人（ROV、AUV、AUG）为例，分别对其部分应用中涉及到的技术、场景和案例进行了阐述。

关键词：海洋勘测；水下机器人；应用技术

Abstract

Intelligent ocean survey is dependent on various intelligent marine survey platforms. As an intelligent underwater equipment, the unmanned underwater vehicle(UUV) can play an important role in the ocean survey. This paper first introduces the classification of UUV and the characteristics of various types of UUVs, and then takes three types of UUVs (ROV, AUV and AUG) of Tianjin Deepinfa Ocean Equipment Technology Co., Ltd. as an example, respectively expounds their technologies, scenarios and cases in some applications.

Key words: ocean survey, UUV, application

1 引言

海洋勘测是海洋资源开发的一个重要组成部分和先决条件，也是临海资源开发如临海设港、岛屿、港口城市建设的必备过程。

智能海洋勘测离不开各种智能化的海洋勘测平台。水下机器人作为一种智能化水下设备，可以在海洋勘测中发挥巨大作用。

2 水下机器人

水下机器人当前主要指水下无人潜航器（Unmanned Underwater Vehicle, UUV），是一种工作于水下的是无人驾驶的、靠遥控或自动控制的器具，主要用于海洋、湖泊、江河等水下勘测、水下作业、水下搜救、水下侦察或作战等领域的智能化平台。

常见的水下机器人有缆控无人潜航器（Remoted Operated Vehicle, ROV）和自主水下航行器（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）两种形式。ROV 系统包括机器人本体、脐带缆和岸上控制系统，机器人本体一般采用开架式结构，多推进器布局，搭载摄像机、声纳、机械手等设备和工具，岸上控制系统通过脐带缆对 ROV 机器人本体供电和控制，完成水下探查、勘测和作业任务。根据具体应用场景和重量级等，ROV 分为观察级和作业级。观察级 ROV 主要搭载观察系统（如水下摄像机、成像声纳），完成观察任务，本体尺寸和重量较小，负荷较低，成本较低。作业级 ROV 一般带有水下机械手、液压切割器等作业工具，用于水下打捞、水下施工等，设备尺寸较大，造价高。AUV 是一种自主式水下航行器，一般自带能源，采用流线型外形设计，具有更小的水阻力，适合大范围执行搜索、探查、地形勘测和军事任务，常搭载的作业载荷

工作时间长（可长达几个月），通过携带 CTD 等海洋环境探测设备满足长时间、大范围海洋勘测的需要。

近年来水下机器人在国内获得较大发展，大量高校、研究所和公司开展了水下机器人技术和设备的研究和应用。以天津深之蓝海洋设备科技有限公司（以下简称“深之蓝”）为例，公司成立于 2013 年，是国内第一家从事全系列水下机器人自主研发的民营国家高新技术企业，公司主营中小型水下机器人研发和生产销售业务。当前公司研发的水下机器人包含两个产品线：工业级产品线，产品包含 ROV、AUV 和 AUG；消费级产品线，产品包含水下助推器、动力浮板、水下无人机等。与海洋和水下勘测相关的产品主要是工业级产品。如图 1 所示是深之蓝工业级产品的族谱，包含 ROV、AUV 和 AUG。图中左侧是 ROV 产品，目前主要是观察级和轻作业级 ROV，重量从几公斤到几百公斤不等，最大的工作深度可达 1500 米。中间的是 AUV 产品，从小型到中型，最深的工作深度可达 3000 米。最右侧是 AUG 产品，是中科院沈阳自动化研究所研发，公司生产和销售的“海翼”滑翔机系列，最深的工作深度可达 7000 米。

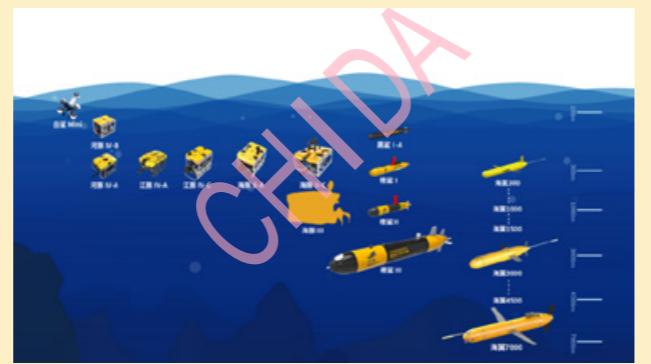


图 1 深之蓝工业级水下机器人产品系列

作为智能化水下运载平台，水下机器人涉及的技术是多方面的，涉及到包含机械、电力电子、流体、控制、能源、电机、通信、计算机等多个学科领域。深之蓝公司经过多年积累，目前在多种潜航器的总体设计和制造技术、水下机器人控制和自动驾驶技术、水下动/静密封技术、高性能电动力推进技术、高精度水下导航技术等方面形成了核心关键技术能力，是水下机器人系统多功能、高性能、高可靠的强力保障，以支撑智能化勘测、观察和水下作业的业务。

3 水下机器人应用

随着水下应用领域的拓展和水下机器人技术的成熟，近年来水下机器人已在海洋调查与勘测、海油、水利水电、应急搜救、海事调查、水下安防、军事等多个领域取得广泛应用。下面仅以深之蓝水下机器人应用为例，介绍部分水下机器人用于案例和技术。

3.1 缆控无人潜航器（ROV）应用

缆控无人潜航器的开架式结构便于搭载摄像机、声纳、电磁探测仪、机械手等工具，在岸上实时操控模式下，十分便于完成水下勘测、观察和作业任务，广泛应用于海油、水利水电、打捞救援等多种场合如图 2 到图 6 所示。

在许多应用中，要求测量设备能位姿稳定，保证成像和测量数据准确。水下机器人的稳定控制是一项关键技术要求。深之蓝 ROV 系统产品采用了如下系列关键技术，保证了水下航行过程中位置和姿态的稳定控制，有利保证了大量水下任务的顺利实施。

- “多推进器布局 + 完备空间姿态表示 + 自适应控制”实现 ROV 的全姿态稳定控制。
- “高性能导航系统 + 非线性控制算法”实现 ROV 动态定位，在流、浪扰动下可以自动悬停。
- 导航路径规划技术，ROV 可以通过设定目标点，自动驾驶达到目标位置。



图 2 ROV 搭载光学摄像机对物体观察和检测

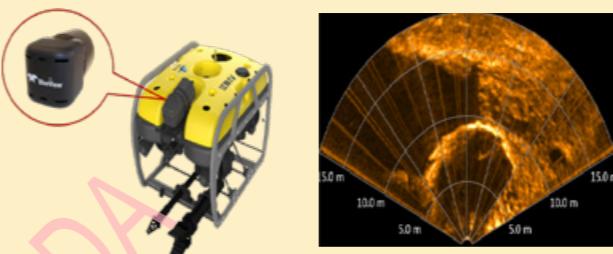


图 3 ROV 搭载 M9002D 多波束图像声纳检测



图 4 ROV 搭载 MS1000 机械扫描声纳检测



图 5 ROV 搭载 BV5000 三维声纳获取目标三维点云数据



图 6 ROV 搭载管线探测仪探测海底管线的埋设情况

下面选取深之蓝公司 ROV 产品大量应用中的部分应用案例进一步说明 ROV 的相关应用。

2018 年 10 月 28 日上午，重庆某区 22 路公交发生重大事故坠入长江。车辆坠落处深度大约 60-70 米，一般潜水员难以下潜或长时间工作，水下情况复杂，救援难度大。深之蓝与长江航道局、佛山蓝天救援队三方协同合作，最终深之蓝“江豚”水下机器人确定车辆位置，并进入大巴车内，拍摄到清晰的水下画面，极大地协助了打捞工作，如图 7 所示。

● 2018 年 4 月，深之蓝“江豚”IV 型水下机器人为葛洲坝水电站进行检测，在一周时间内，检测整个坝体连

接处及坝体平面排除安全隐患。

- 2018 年 5 月, 深之蓝“河豚”IV 水下机器人, 前往柬埔寨为某水电站进行坝体渗漏点检测, 坎体长度 880 米, 水深近 50 米, 共计排查作业段 77 处, 查出需要修理的渗漏点 2 处, 为后期维护提供了充分的资料, 确保了大坝的安全稳定, 如图 8 所示。

- 2018 年 8 月, 深之蓝配合长江水产研究所, 使用“河豚”水下机器人前往青海湖进行湖泊生物取样, 以便对青海湖的养殖环境进一步了解监测, 装载了取样附件的水下机器人顺利完成任务。

- 2019 年 11 月, 中国海事局计划引入水下机器人作为新型的船舶勘验及取样设备, “海豚”II 因其稳定运动、强搜寻能力、敏锐观测能力、超强取证能力而入选, “海豚”II 搭载吸附设备、钻孔取样设备、砂轮设备后, 顺利完成预期设置的任务。切割下指定的钢板样品并带回母船。



图 7 重庆万州公交车坠江搜索救援



图 8 部分水利工程检测试验现场

3.2 自主水下航行器 (AUV) 应用

自主水下航行器可搭载摄像机、侧扫声纳、前视声纳、CTD 等感知设备, 按照设定路线自动完成水下航行, 适合大范围水下勘测、水下搜寻等任务, 在海洋学调查、海上

石油管线监测、海底地形绘制、水质调查、目标物搜寻、港口安防、军事(探雷、侦察)等领域都有应用。

国际上比较知名的 AUV 应用案例: 2003 年的伊拉克战争中, 美国海军利用 REMUS 系列 AUV 进行了水雷探测, 系统用装备在 REMUS 上的声纳对航道进行搜索并绘制声纳图像, 该行动成功在 16 小时完成了需连续潜水 21 天才能完成的作业量, 大大提高了水雷探测效率, 降低了人员的风险; 2014 年马航 MH370 失联, 随着黑匣子电池电量耗尽, 搜索组织停止使用拖曳声波定位仪搜寻, 而改由“Bluefin-21”AUV 执行失联飞机搜寻工作。AUV 采用侧扫声纳、多波束等传感器对海底进行长时间、大范围扫描, 还可以通过探测地磁场的变化来探测水下金属物体。

深之蓝在 2015 年开始投入研发 AUV, 目前形成了直径从 150mm 到 680mm、重量从 15kg 到 1.35t 的系列产品。产品最高速度可达到 16 节。作业图片如图 9 所示, 下面是部分应用案例:

- 2017 年 7 月, 深之蓝“橙鲨”AUV, 配合某客户在丹江口水库进行了水下导航与标校系统的湖上试验。

- 2018 年 6 月, 上海合作组织成员国元首理事会在青岛召开, 期间 8 个成员国和 4 个观察员国的领导参会, 深之蓝“橙鲨”AUV 在会前进行大范围扫测排爆, 确认水域安全。

- 2019 年 5 月, 自然资源部启动环渤海排污排查行动, “橙鲨”AUV 及“江豚”水下机器人协助对海边、栈桥等不易观察的处所进行排查。



图 9 AUV 进行安保、排污检测、水下勘测等作业

3.3 水下滑翔机 (AUG) 应用

水下滑翔机是一种依靠浮力驱动的新型海洋机器人, 具有成本低、续航长、可重复利用、远程可控等优势, 并兼具一定的航迹控制能力, 是海洋环境观测与探测平台的重要组成部分, 是海洋四维空间强有力的观测和探索工具

之一, 可实现多尺度海洋过程的机动、高分辨率、精细观测。AUG 在海洋学调查、海洋水文数据(温盐深)的勘测、海洋情报监视和侦察、反潜作战等领域都有广阔的应用前景。

中国科学院沈阳自动化研究所自 2003 年起开展水下滑翔机的相关研究工作, 2018 年 12 月, 沈阳自动化研究所与深之蓝签署独家授权协议, 由深之蓝全面负责“海翼”水下滑翔机的产业化及品牌运营工作, “海翼”首条量产生产线落户天津。

“海翼”现已在东海、南海、太平洋、印度洋、白令海等海域完成多次海上应用, 创造了多项国内、国际首次和新纪录。截止 2019 年底, “海翼”累计海上工作天数超过 2000 天, 累计观测距离超过 40000 公里, 获得超过 15000 个剖面数据, 作业现场如图 10 所示。

“海翼”滑翔机以优异的性能入选了国家主席 2018 年新年贺词、两院院士评选的 2017 年中国十大科技进展新闻。



图 10 “海翼”滑翔机参加海洋勘测应用

4 结论

水下机器人主要包括缆控无人潜航器、自主水下航行器等, 目前水下机器人已在海洋勘测、海油作业、疏浚、水利水电、水下搜救、军事等领域发挥了巨大作用。随着机器人技术和水下设备技术的发展, 水下机器人的能力不断增强, 会进一步促进我国海洋勘测和海洋开发事业。

参考文献:

- [1] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠 编著. 水下机器人 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000.
- [2] 徐会希 著. 自主水下机器人 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [3] 陈强 编著. 水下无人航行器 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [4] 刘一博. 水下潜航器编队海洋勘测的协调控制方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学博士论文, 2017.
- [5] 谭界雄, 田金章, 王秘学. 水下机器人技术现状及在水利行业的应用前景 [J]. 中国水利, 2018,(12):33-36.
- [6] 裴文良, 郭映言, 陈金山, 申龙. 水下机器人的研发及其应用 [J]. 制造业自动化, 2018,40(4):105-106.
- [7] 孙淑琴. 水下疏浚机器人 [J]. 机器人技术与应用, 1997,(1):16-18.

作者简介:

张红良, 男, 深之蓝海洋设备科技有限公司, 技术总监。
侯明波, 男, 深之蓝海洋设备科技有限公司, 工程师。
姚广钊, 男, 深之蓝海洋设备科技有限公司, 工程师。

Dear readers of *China Dredging*:

In the column *International Perspective* of last issue, we announced in advance that we will bring you two articles from the *Deltas* in this issue. Now we are very happy to present these two articles to you.

The first article introduces an application case of numerical simulation, a rapid evaluation tool for the prediction of post-dredging plume diffusion and jet dredging of sediment distribution. The author of the article, Dr. Kirichek, works at both the *Deltas* and Delft University of Technology. This article introduces the current scientific research in the Netherlands on the prediction and control of plume diffusion. Now the researcher is still working on improving the model to achieve fusion at different scales. The other author of the article, Dr. de Wit, used to work in the Dredging Engineering Department of Delft University of Technology in the field of model development. Now he continues to develop this model at *Deltas* to make it suitable for engineering applications.

The second article was edited and compiled by Dr. Qinghua Ye. It introduced the huge demand for construction sand in the world and the harm caused by excessive mining of underwater sand in various countries under this demand. This article is believed to be also able to evoke the thinking of colleagues in China's dredging industry.

各位亲爱的《中国疏浚》期刊的读者朋友们，

在上一期的“国际视野”栏目中，我们为大家预告了本期将为各位读者朋友带来两篇来自荷兰三角洲研究院的文章。现在我们很高兴的将这两篇文章为各位呈现。

第一篇文章为大家介绍一款数值模拟应用，用于预测浚后羽流扩散和沉积物分布的射流疏浚快速评估工具。文章的作者 Kirichek 博士同时在三角洲研究院和代尔夫特理工大学任职，这篇文章介绍了目前荷兰在羽流扩散的预测和管控上的科研工作，现在科研人员仍在改进模型以实现不同尺度的融合。文章的另一作者 de Wit 博士过去在代尔夫特理工大学疏浚工程系进行模型的开发工作，现在在三角洲研究院继续开发这一模型以使其适用于工程应用。

第二篇文章则由叶清华博士编辑汇总，介绍了现在世界上对建筑用沙的巨大需求，以及在这一需求下各国过度进行水下沙子开采所造成的危害。相信这篇文章也能引发中国疏浚届各位同行的思考。

作者简介：

Sape Miedema, 荷兰代尔夫特理工大学, 海洋与疏浚工程系, 系主任。

用于预测浚后羽流扩散和沉积物分布的射流疏浚 快速评估工具

Water Injection Dredging Quick-Assessment Tools for Predicting the Plume Dispersion and Sediment Distribution After Dredging Processes

A. Kirichek^{1,2}, K. Cronin¹, L. de Wit¹

摘要：射流疏浚 (Water Injection Dredging, 简称 WID) 已成功应用于港口和航道中的沉积物移除。这种疏浚方法基于通过安装在射流挖泥船上泵加压注水的方式使上层沉积物层流化。流化的沉积物可以通过重力或自然洋流来输送。

建模、现场和实验室测量工具的最新进展使股东能够对港口和航道中的射流疏浚进行设计，优化和监控。本文将展示可用建模工具的功能，这些建模工具可以有效地用于评估出于维护目的的备选疏浚策略。特别值得一提的是，我们将展示中场和远场建模方法如何能够用于预测射流疏浚后的沉积物羽流动力学和沉积物分布，从而帮助确定实行射流疏浚的最佳条件。

Abstract

Water Injection Dredging (WID) has been successfully applied for removing sediment deposits in ports and waterways. This dredging method is based on the fluidization of the top sediment layer by pressurized injection of water by a pump that is installed on a WID vessel. The fluidized sediment can be transported by means of gravity or natural currents.

Recent developments in modelling, in-situ and laboratory measurement tools has enabled stakeholders to design, optimize and monitor WID in ports and waterways. In this work, we will demonstrate the capabilities of available modelling tools which can be efficiently used to evaluate alternative dredging strategies for maintenance. In particular, we will show how a mid-field and far-field modelling approach can be applied for predicting sediment plume dynamics and sediment distribution after WID, thus helping to determine the optimum conditions under which to perform WID.

1 导言

长期以来，射流疏浚 (Water Injection Dredging, 简称 WID) 一直是港口维护疏浚作业的一部分。这种类型的疏浚主要用于带有泥床的港口和航道，但是在疏浚行业中，在粗泥沙中使用射流疏浚的实例也同样为人们所知。射流过程的原理是基于使用射流来使沉积床流化（见图 1）。使

用的射流喷嘴越多，进入泥床的可能水量就越大。由于以相对较低的压力射流，因此避免了细质沉积物在整个水柱中发生二次悬浮。取而代之的是，射流在泥床上产生了水-沉积物的混合物。射流疏浚发生后将形成流化泥层，其密度低于泥床沉积物，但高于周围水的密度。在自然流体力学过程的影响下，这种所谓的异重流会在水中扩散。根

据沉积物的性质和施工参数，流化泥层的厚度以及由此产生的异重流会在0.25米至3米之间变化。当进入港口和航道的低能区域时，流化的泥层会随着时间而沉降并固结。总的来说，射流疏浚已成为港口维护中更流行的疏浚方法，因为与标准维护策略相比，射流疏浚在经济、施工和生态方面似乎具有很强的竞争性。



图1 射流疏浚略图（摘自 Sigwald et al., 2015）

近年来，人们开发出了各种工具来优化射流疏浚过程以及更好地预测射流疏浚期间的沉积物羽流运动。通常，根据模型的规模，将疏浚工程中使用的数值工具分为三类：近场模型，中场模型和远场模型。在本文中，射流周围形成动态羽流的区域称为近场。在射流疏浚区域（大约 <1 km）中形成被动羽流时，我们将该区域称为中场。最后，对于超出射流疏浚区域的更大区域，例如整个港口或河口区域（ $>>1$ 公里）被称为远场。

本文的结构如下：首先，我们会介绍一种基于Delft3D的建模工具，该工具可用于在河口地区进行射流疏浚处理后对沉积物分布的远场预测。然后，我们将展示一些1DV和TUDflow3d模型，用于估算射流疏浚后沉积物的羽流扩散，沉淀和固结的应用实例。最后，我们将演示一些已经进行过的实验室实验的示例，这些示例有助于更好地了解射流疏浚过程中的近场影响。并且我们将对射流疏浚与适航水深之间的联系进行讨论。

2 射流疏浚的远场建模

港口中的泥沙动力，特别是泥的淤积，对负责港口和人口航道维护人员而言十分重要。淤积量决定了要维持航行深度需要进行的疏浚的频率和数量。为了理解系统中的沉积物动力情况，特别是悬浮泥浆和流体泥浆的传输过程，必须在一系列的时间尺度和空间尺度下进行分析。为了计算莱茵河默兹河三角洲港口区域的泥浆动力情况，本文使用Delft3D进行了远场建模。

荷兰三角洲学院的开源软件Delft3D是一个灵活的集

成建模框架，可以在数天至数十年的时间范围内对二维和三维的洋流、波浪、沉积物的传输和形态（以及疏浚和弃置）进行模拟。沉积物传输模块包括悬浮和泥床/总负荷传输过程，用于任意数量的内聚和非内聚沉积物颗粒级。它可以跟踪记录泥床的组成，以建立地层记录。悬浮载荷的求解方程连接到流体动力学模块的2D或3D对流扩散求解方程，重要的是对于液体-泥浆模拟而言，也能产生密度反馈。

为此，本文建立了整个莱茵河默兹河口的Delft3D模型，并模拟了包括波浪效应在内的整整一个月的流体动力条件。然后使用该流体动力学模型来推动沉积物传输模型。模型包括了背景沉积物浓度，并使用了三种沉积物颗粒级来代表较粗和较细颗粒级的适当范围。一旦模型获得了有关不同港口内泥沙传输和泥沙沉积的自然动力学数据（通过对测量和模拟的挖泥量进行分析确定），就可以进行一系列射流疏浚测试，例如模拟射流疏浚的羽流被输送的位置，不同港口的回流量以及整个水柱中发生的混合量。该模型还可用于研究沉积物沉积区的最佳位置，以获取射流疏浚的高密度羽流。

图2和图3显示的案例说明了如何使用远场建模来研究在潮汐周期不同阶段进行射流疏浚的影响。射流疏浚在黑色矩形区域内进行。色条指示的是港口区域内悬浮泥沙浓度（SSC）的分布。射流疏浚的持续时间为8小时，生产率为500 kg/s。在2次模拟过程中，射流疏浚在高水位（HW）之前一小时和低水位（LW）之前一小时启动。两次模拟的结果分别在图2和图3中显示。

在高水位之前一小时启动的模拟和低水位一小时之前的启动模拟的对比中，羽流扩散方式明显不同。图2显示，羽流主要随潮汐向海的方向散布。对于射流疏浚而言这是最好的条件，因为这样一来，悬浮的沉积物将从在海上进行射流疏浚的区域重新迁移。但是大约六个小时后，水流会发生转向，羽流将被推向陆地的方向。

图3显示了模拟中的初始羽流扩散，其中在沉积物恰好在低水位之前释放。在模拟的前两个小时中，羽流的扩散类似于刚好在高水位前进行射流疏浚的实验。然而，在四到八小时这个时段，羽流主要向陆地方向散布。当流向逆转后，羽流开始向海的方向扩散。此外，由于洋流受到主要向陆地方向的洪水作用，航道中发生了向陆地方向的持续扩散。

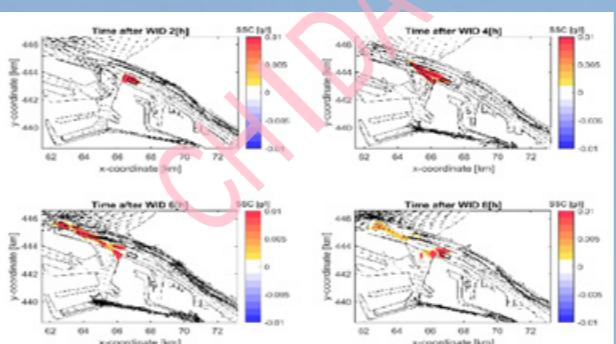


图2 近泥层羽流的水平扩散，
射流疏浚在高水位之前1小时开始，产能为500 kg / s

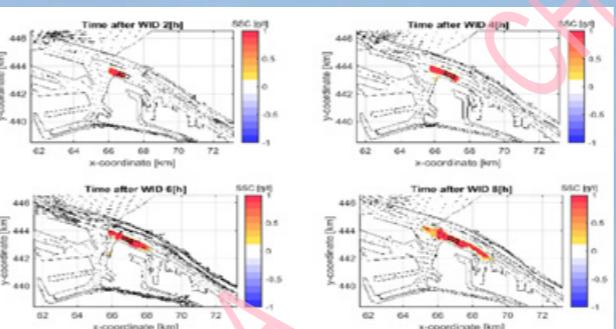


图3 近泥层羽流的水平扩散，
射流疏浚在低水位之前1小时开始，产能为500 kg / s

远场建模显示了射流疏浚期间流体动力条件的重要性。这些知识有助于选择用于港口和航道泥层的最有效的射流疏浚策略。

3 射流疏浚的中场建模

中场建模采用了1DV和TUDflow3d模型。拉格朗日1DV法使我们能够使用活动的参考系来追踪流化层沿着用户定义的轨迹的进展。该模型的主要特征是估算射流疏浚后流化泥层的沉降足迹。此外，1DV模型还能确定流化泥层的厚度和密度（或沉积物浓度），并将这些参数与水柱和泥床边坡中的流体动力学联系起来。上一节显示，在正确的流体动力学条件下进行射流疏浚有助于显著提高射流疏浚的效率。将现实的水深测量纳入考量对于优化射流疏浚也很重要。为了使流化泥层具有相等的初始动量，该泥层将沿向下的边坡流动，而并非沿着平坦的泥床流动。通常，1DV建模的结果可用于对射流疏浚进行更好的规划。

图4和图5展示了1DV模型用于射流疏浚的效果示例。在这两张图中，左图显示了沉积物浓度的分布和沿着边坡流化层的高度。右图显示了流化泥层的流速。图4显示了沿1:20边坡进行射流疏浚的模拟情况，图5显示了在平坦

泥床上进行射流疏浚的结果。由此可以看出，由于重力作用，流化泥层沿1:20边坡流动的距离比在平坦泥床上的流动的距离更远。此外，由于快速移动的流化层与斜坡上的周边水柱之间的剪切力更大，因此沿斜坡水柱中的沉积物比平坦床中的沉积物更多。

考虑到流速（图4和图5的右图），流化层会在短时间内加速，但在平坦泥层的情况下，它随后会严重减速。沿着1:20的边坡，流化层的加速度在水柱最低的0.5 m处最大，在此大部分沉积物都悬浮在水柱中。水平速度在水深上的梯度很大，这导致剪切力增加，从而让混合更严重。

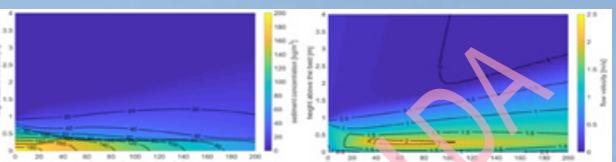


图4 沿1:20坡度的沉积物浓度

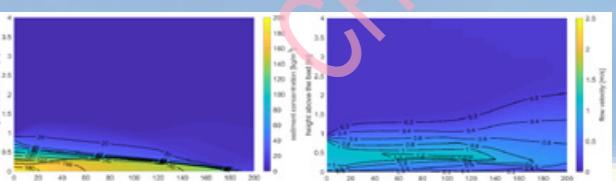


图5 平坦泥床上的沉积物浓度

图6显示了1DV模型模拟的沉积物足迹。在此模拟中，射流疏浚过程从x0开始。如图6所示，流化泥层向着与射流疏浚船的相反方向移动。在此模拟期间，模型域沿x坐标移动并随着空间中的泥浆一起移动。它将对沿着淤泥路径沉积下来的沉积物数量进行跟踪记录，并对沿着泥床移动淤泥的移动速度进行估算。在此，x1和x_max表示流化泥层的最大空间分布。

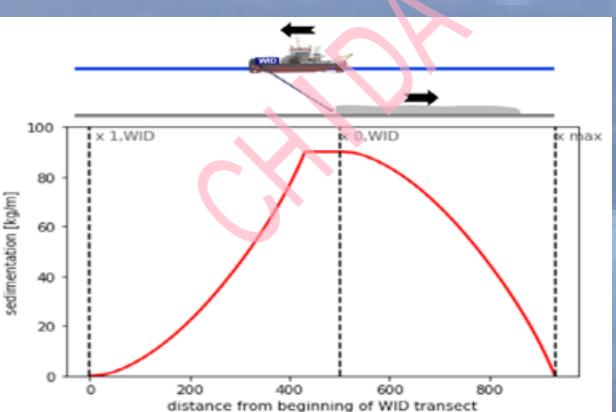


图6 射流疏浚后x0处的沉积物足迹

射流疏浚后，流化泥层的固结也可以用 1DV 模型估算。图 7 显示了流化泥层固结过程中 1DV 模型与实测数据的比较。该模型的输出结果是作为时间函数的泥浆密度，可以将其与标准的多波束数据相关联，该数据通常可以提供水 - 泥接口数据（参见图 8）。

垂直密度分布图如图 7 的右图所示。测量可以通过不同的现场测量工具 (Kirichek and Rutgers, 2019, Kirichek et al., 2020) 进行，在这种情况下，密度可通过 DensX 工具来测量。在此可以观察到，测得的密度分布与 1DV 建模非常相似。

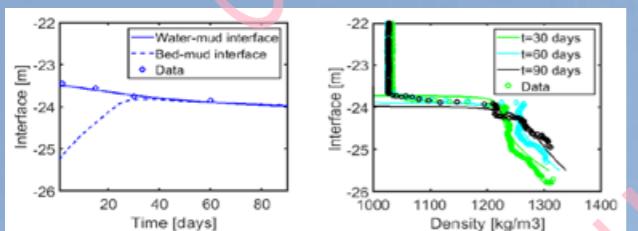


图 7 估算射流疏浚后流化泥层的固结。

左图显示了水 - 流化泥浆交接面以及流化泥浆 - 固结泥床交接面的变化情况，右图显示了水 - 泥垂直柱中的密度模型预测（实线）和现场测量数据（符号）。

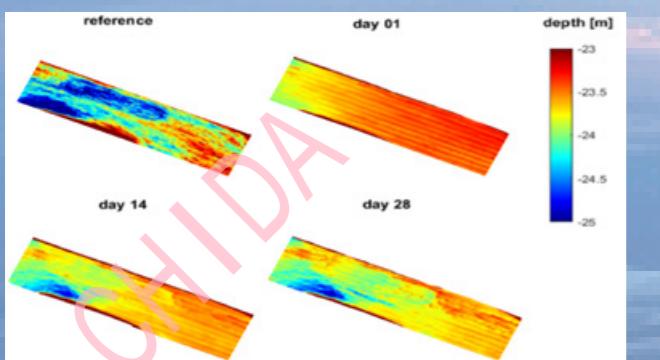


图 8 多波束测量显示的射流疏浚（前的水 - 泥交接面参考），射流疏浚期间（第 1 天）和射流疏浚后（第 14 天，第 28 天）

射流疏浚密度驱动的羽流也可以通过 CFD 模型 TUDflow3D (De Wit 2019) 进行模拟。起初开发 TUDflow3d 是用于以实际比例对耙吸式挖泥船溢流羽流进行精确的近场模拟。它也已用于 MFE (质量流挖掘) 羽流，深海采矿尾矿羽流和盐度驱动的密度流。TUDflow3D 可以对复杂情况下的 1DV 模型进行补充，因为在复杂情况下 1DV 模型的简化会使其难以应用。TUDflow3D 是完全 3D 模型，在所有三个维度（不仅在垂直方向）上都考虑了可

变密度，并通过精确的 LES (大涡模拟) 法获取了非静水压和湍流的结果。

图 9 显示了建模异重流的瞬时快照。在 LES 中网格上的单个湍流旋涡和涡流清晰可见。图 10 给出了时间平均速度和悬浮沉积物浓度 (SSC) 曲线与实测曲线的比较结果。在此对获取湍流的不同方式进行了对比。除了 LES 以外，本文还测试了雷诺平均纳维 - 斯托克斯方程 (RANS) 和在泥床附近涡流粘度降低的 RANS。本文在 CFD LES 模型中很好地获取了垂直洋流的 SSC 分布图和异重流的层厚，并且在对近处泥床速度进行小幅高估的情况下，很好地获取了速度分布图。

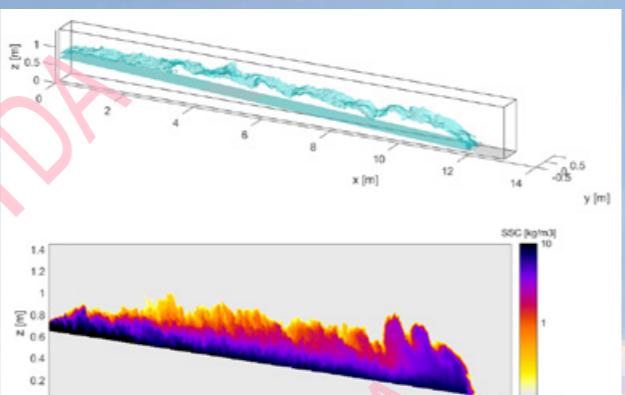


图 9 污流 3D 轮廓的瞬时 LES 快照（上）
和通过污流中心的 2DV 切片处的 SSC（下）

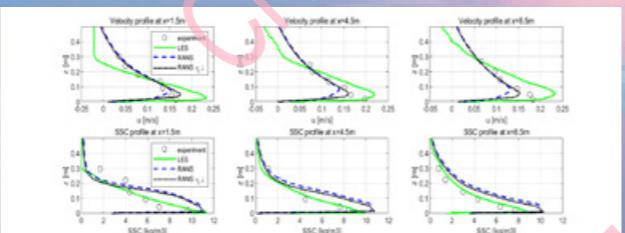


图 10 在 3 种不同湍流设置下，建模的时间平均速度和 SSC 分布图的比较

(LES; 混合长度和在泥床附近涡流粘度降低的混合长度)，以及 Parker 等人 1987 年的测量结果

图 11 给出了 TUDflow3d 用于射流疏浚的一个应用示例。在此 CFD 运行中，射流疏浚沿着一条 300m 轨道连续进行了 6 次的作业。此 CFD 模型使用港口的实际测深。产生的射流疏浚羽流显示为棕色，测深显示为灰色表面。在此图的时刻，射流疏浚刚刚沿着 300m 长的黑色虚线轨迹

完成了 6 次作业。在此案例中，射流疏浚羽流在重力的作用下顺倾斜泥床流下。水深测量的俯视图如图 12 所示。

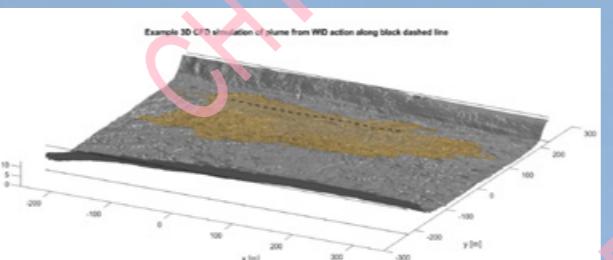


图 11 TUDflow3d 模拟的示例：
沿黑色虚线射流疏浚作业的羽状分布

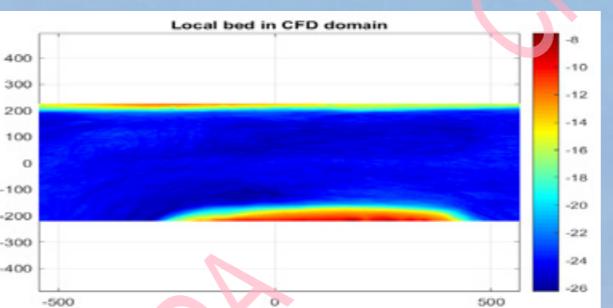


图 12 TUDflow3d 模拟示例：在 CFD 域中执行的水深测量

图 13 显示了在横向受限情况下将 TUDflow3d 用于射流疏浚的另一个示例。此模拟采用了以下初始条件：初始射流疏浚层厚度为 0.5m，200kg/m³ 和 2m/s 流入速度（带来的流入量为 200kg/s）。该示例显示了距射流疏浚不同距离的模拟垂直速度分布和密度分布。该模型还可以根据射流疏浚异重流计算出沉降足迹。

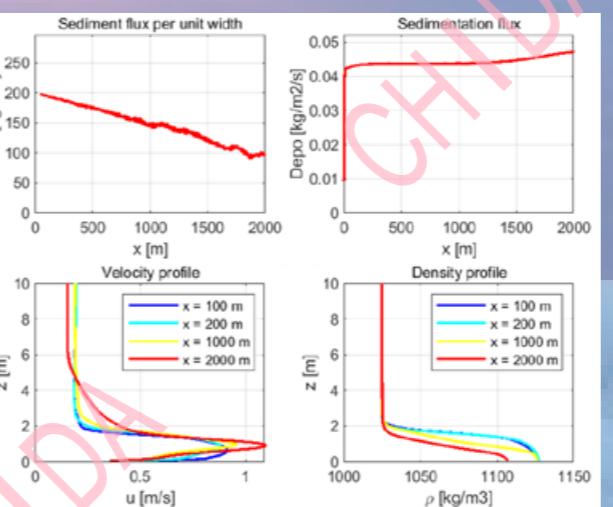


图 13 TUDflow3d 模拟示例：横向受限情况下的射流疏浚

4 射流疏浚的近场和中场实验室试验

在过去几十年中，实验室水槽试验已被频繁地用于射流疏浚。它的主要目标之一是确定最优的施工参数，以保证有泥层的港口和航道中的射流疏浚是高效的。例如，为了能够控制射流疏浚过程的平移方向和射流挖泥船的速度，必须仔细管理射流疏浚循环，喷嘴的数量和大小以及与泥浆性质相关的泵压。如果对施工参数的界定不准确可能会导致过分稀释，产生浑浊或不受控制的二次悬浮，从而导致低效的射流疏浚过程。进行实验室试验（例如图 14 中所示的实验）有助于找到最合适的施工参数而且还有助于了解射流疏浚背后的物理过程。所获得的知识可用于日常射流疏浚作业中，并可作为远场模型和中场模型的输入参数，这些模型是为了优化有泥层的港口和航道中的射流疏浚而开发的。例如，图 15 显示了射流疏浚造成的泥层的时间序列，该泥层通过水槽中的射流水沿平坦泥床运输。现代测量技术使我们能够测量射流疏浚造成泥层的物理特性，例如羽流速度，泥浆的流变性（参见 Shakeel et al., 2019），射流疏浚造成泥浆层的密度和高度以及施工参数（例如泵压，射流挖泥船的速度，射流与泥床之间的距离等）的影响。

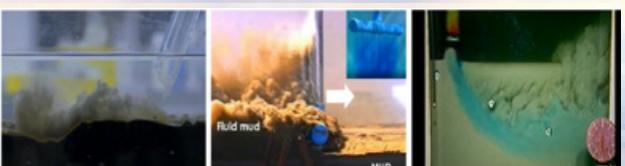


图 14 进行实验室试验以优化施工
并了解射流疏浚的物理原理



图 15 实验室射流后异重流的动力学演示

5 射流疏浚造成的港口和航道淤泥区的适航水深问题

有泥层的港口和航道中的射流疏浚可以大大减少适航水深。射流疏浚造成的泥层厚度将影响通过标准多波束测量测得的水深。在这种情况下，国际航运协会 (PIANC) 的航海底部方法可以解决此问题。根据国际航运协会的说法，“航海底部是指底部的物理特性达到临界极限的水平，超过该极限后，与船舶龙骨的接触会对可控制性和操纵性造成损害或不可接受的影响” (PIANC, 2014 年)。通常，密度和底

服应力被用作底部的物理特征 (Kirichek et al., 2018)。密度和屈服应力的临界极限通常分别约为 1200kg/m^3 和 100Pa 。这样得出的结果是, 当沉积物的密度值低于 1200kg/m^3 (或屈服应力值低于 100Pa) 时的深度可以被认为是适航的, 因此可以包括在通航水深的估计中。

图 16 显示了射流疏浚后在有泥浆层的港口中应用国际航运协会的海底方法的一个示例。两张图描述了进行射流疏浚时的现场密度和屈服应力的测量结果。标准的多波束回声测深表明测深为 23.95m (水 - 泥水位)。但是, 射流疏浚造成的泥浆密度相对较低 ($<1200\text{kg/m}^3$), 强度较弱 ($<100\text{Pa}$)。因此, 可以应用航海底部方法。无论采用基于密度的 (1200kg/m^3) 的适航标准还是基于屈服应力的 (100Pa) 适航标准, 都额外增加了 2m 的可通航水深。

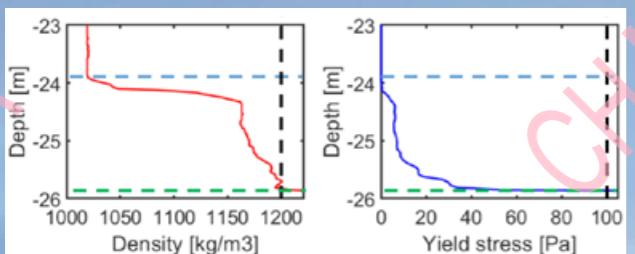


图 16 在射流疏浚之后应用航海底部方法的示例

与基于多波束的标准航行标准相比, 基于密度 (1200kg/m^3) 或基于屈服应力 (100Pa) 的标准可为通航水深增加 2m

结论

本文着重于结合了监控, 数值建模和实验室实验获得的见解。该研究着重于流体泥浆的特性和传输, 但也包括了由此产生的沉积物羽流。两种机制都很重要, 而且取决于流体动力学条件。一个射流疏浚试点证明射流疏浚可有效地流化泥浆沉积物。试点提供了射流疏浚后对泥浆特性高质量的定量和定性监测。此信息用于微调挖泥船羽流特性的近场 3D CFD 模型。射流疏浚羽流层厚度和射流疏浚

产量估算值用作输入远场模型。远场模型用于确定射流疏浚羽流在不同潮汐和排放条件下的传播方向, 有多少沉积回港口, 以及有多少随着退潮而被冲出海洋。该模型还用于测试不同的弃置低点以减少回流。通过结合现场测量, 流体泥浆特性的实验室实验以及最新的建模方法, 不仅获得了将射流疏浚用作维护型疏浚策略的最佳方法的新见解, 而且还在这些技术的发展过程中降低了港口的成本。

参考文献:

- Kirichek A, Chassagne C, Winterwerp H, Vellinga T. (2018). How navigable are fluid mud layers? *Terra et Aqua* 151: 6-18.
- Kirichek A, Rutgers R. (2019). Water injection dredging and fluid mud trapping pilot in the Port of Rotterdam, *Proceedings for CEDA Dredging Days*, Rotterdam, the Netherlands.
- Kirichek A, Shakeel A, Chassagne C. (2020) Using in situ density and strength measurements for sediment maintenance in ports and waterways. *J. Soils Sediments*, 20, 2546 – 2552.
- Parker G, Garcia M, Fukushima Y, Yu W. (1987) Experiments on turbidity currents over an erodible bed, *Journal of Hydraulic Research*, 25:1, 123-147.
- PIANC (2014). Harbour Approach Channels - Design Guidelines, Report 121, PIANC, Brussels.
- Shakeel A, Kirichek A, Chassagne C. (2019) Rheological analysis of mud from Port of Hamburg, Germany. *J Soils Sediments* 19: 1-10.
- Sigwald R, Ledoux S, Spencer K. (2015), Water Injection Dredging Guidance document.
- Wit L. de (2019). 3D CFD modelling of hopper sedimentation, *Proceedings for CEDA Dredging Days*, Rotterdam, the Netherlands.

作者简介:

A. Kirichek 荷兰三角洲学院 (Deltares) 生态系统与沉积动力学系; 荷兰代尔夫特理工大学土木工程与地球科学学院
水利工程学系。

K. Cronin 荷兰三角洲学院 (Deltares) 生态系统与沉积动力学系。

L. de Wit 荷兰三角洲学院 (Deltares) 生态系统与沉积动力学系。

世界陷入沙荒了吗?

The World is Hungry for Sand?!

叶清华

研究中心的 Aurora Torres 与其同事 Jodi Brandt, Kristen Lear 和 Jianhua Liu 共同发表了“沙源枯竭带来迫在眉睫的悲剧”。作者们认为, 现在沙的匮乏是“一个新兴的问题, 同时这个问题会带来重大社会政治, 经济和环境后果。”

由于沙石资源匮乏, 而市场需要变大, 采沙变得野蛮, 不理性, 甚至导致重大犯罪。因为开采量巨大, 大部分采沙仍不受管制, 而且监管和执行成本过高。在此情况下, 资源开发者争相最大限度地采沙而未考虑社会或生态后果。

即使对采沙进行管理, 但沙的来源广泛, 沙源也很容易接近, 以至于非法开采和贸易很普遍。在印度, 犯罪团伙无计划地盗采河沙, 改变河流走向, 破坏了水产养殖栖息地, 并摧毁了湖泊和湿地。2016 年, 《欧洲犯罪学杂志》发表了由 Aunshul Rege 和 Anita Lavorgna 撰写的“环境有组织犯罪”研究报告, 其中详细介绍了“印度和意大利有组织犯罪集团进行的非法土沙开采活动”。在某些情况下, 最终那些试图制止掠夺的有良知的人们会被失踪或被谋杀。根据印度最高法院的说法, “速度惊人的无限制采沙”对鱼类, 水生生物和鸟类意味着巨大的“灾难”。

在东南亚, 新加坡用于建造填海造陆的大量沙石进口引发了与印度尼西亚, 马来西亚, 越南和柬埔寨等国之间的国际争端。新加坡是世界上最大的沙子进口国, 每年使用大型船队疏浚吸起海底数百万吨的沙子, 破坏海洋栖息地, 并整体消灭了 20 多个岛屿。这些沙子用于围海造地, 新加坡的土地面积每年扩大超过一百万平方米。印尼, 马来西亚和越南现已禁止或限制向新加坡出口沙石, 尽管犯罪团伙仍从这些地区开采沙石。

在柬埔寨, 疏浚对红树林、海草床、河流、河口和海底地貌造成威胁。研究人员将采沙与濒临灭绝物种的减少

联系起来，其中包括伊洛瓦底海豚，飞旋海豚和稀有的皇家海龟。在整个亚洲河流系统中，稀有的 Gharial 鳄鱼因采沙业对河岸的侵蚀，也受到严重威胁。

越南已禁止向新加坡出口沙石，但越南继续牺牲森林和耕地来满足其国内需求。在湄公河三角洲，河底采沙正使海水侵入稻田，农田和淡水资源。而且更严重的是，越南仍在三年内将会用尽所有的沙源来满足当地的建筑用沙。

更糟糕的是，在非洲，中国和东南亚，从河流和湖泊中采沙会形成积水，这些积水已成为携带疟疾的蚊子的繁殖地。卫生官员还怀疑这样的病源会导致西非布鲁氏菌暴发和其他新发疾病的蔓延。

同时，渔民和整个捕鱼群体都抱怨挖泥船采沙活动正在摧毁渔场和鱼类繁殖的河口。在一些社区，渔民在失去捕鱼收入后不得不在采沙驳船上工作。

1998 年在加利福尼亚进行的一项研究表明，从加利福尼亞河中挖出每吨沙子都会对基础设施造成 3 美元的损失，包括道路，堤防和桥梁的破坏。2000 年，在台湾，采沙导致一座桥梁完全倒塌。次年，在葡萄牙，由于采沙，一座桥梁在一辆公共汽车通过时倒塌，造成 70 人丧生。与此类似，一座基础被冲刷的桥梁于 2016 年在印度倒塌，造成 26 人死亡。

在中国，从上世纪 80 年代到 90 年代，采沙公司从长江中开采建筑用沙，导致大规模河岸崩塌，阻塞运输通道，供水设备被淤泥堵塞。最终导致，在 2000 年，由于担心随着桥梁基础过度冲刷，中国政府禁止在长江上采沙，而采沙者将河上作业移至距上海 500 公里的江西省鄱阳湖。然而，在禁止采沙之后的很多年里，河岸崩塌仍可能发生。（见 <http://sars.china.com.cn/english/China/66430.htm>；http://www.china.org.cn/environment/2009-10/22/content_18750465.htm，https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_1856555。）

中国最大的淡水湖成为世界上最大的沙矿。数百艘挖泥船每小时从湖中提取约 10,000 吨沙子，每年提取 2.36 亿立方米，比从支流流入的沙子多三十倍。由于采沙挖泥船拓宽了排水通道，增加了向长江的排水，鄱阳湖的水位下降过大，导致巨型货船和废弃渔船搁浅于干燥的土地上。

泥沙总量对（城市）增长的限制

根据 2016 年《工业生态学杂志》上的论文“用于建筑的非金属矿物的全球模式和趋势”，采沙的“环境负担”遵循了人口和国内生产总值（GDP）的增长模式，特别是“受到前所未有的城市增长的推动。”

据联合国称，自 1950 年以来，世界城市人口增长了三倍，今天已达到 40 亿，预计到 2050 年将达到 70 亿。日本东京都圈目前正接近 4000 万居民。到 2050 年，德里，印度和尼日利亚的拉各斯等快速发展的城市正步入 6000 万人口的轨道。大约三千年前，当地球已经遭受了几千年的
人为土壤破坏时，整个人类共有 6000 万人。到 2050 年，至少将有五个城市达到六千万人规模的：德里、拉各斯、孟加拉国的达卡、印度尼西亚雅加达、巴基斯坦卡拉奇，东京、上海、孟买、墨西哥城、纽约和圣保罗紧随其后。

巨型城市扩张需要填埋造陆和混凝土，转化为对沙石的巨大需求。

今年，经合组织（OECD）在日本横滨举行的世界循环经济论坛上发表了“全球物质资源”报告。该报告预计原材料的开采“到 2060 年将翻一番，对环境造成严重影响”。沙子，砾石和碎石占这些材料的一半以上。报告指出：“全球经济在扩张，生活水平在提高。我们将目睹‘对当今环境造成压力翻倍。’”

地球在未来 40 年内是否还能维持这种人口和经济增长，以及环保运动将如何或者是否将做出反应，仍然存在疑问。

荷兰三角洲研究院 Deltares 和泥沙研究

荷兰三角洲研究院的专业知识包含了泥沙的产生，运移，（再）堆积等的物理过程。通过将这些知识与动态动力地貌形态学专业知识相结合，我们可以清楚知道哪些区域沙子可以开采，以及可以在不影响自然价值或海岸基础设施的情况下以可持续的方式开采。

在荷兰，大多数沙子是在北海开采的。但是同时那些区域产业密集。渔业，石油和天然气开采，运输，风力发电场，自然以及未来可能的史基浦机场的扩建：所有这些产业都占用了空间。

三角洲研究院与 TNO（荷兰应用科学组织），代尔夫特理工大学，一起合作的研究北海已有五十多年。通过将钻孔研究与地震地质专业知识相结合，我们可以清晰地了解沙的质量和可用性。通过形态建模和数据分析，我们可以预测泥沙运动，并且，更重要的是，我们可以预测采沙对周围环境和生态的影响。

资源与链接：

Sand depletion, Rex Weyler, Greenpeace, Story.

2018

“Global Patterns and Trends for Non - Metallic Minerals used for Construction,” Alessio Miatto, Heinz Schandl, Tomer Fishman, Hiroki Tanikawa, Journal of Industrial ecology, 2016

“The world is facing a global sand crisis,” by Aurora Torres, Jianguo Liu, Kristen Lear, and Jodi Brandt, The Conversation, 2017.

“Uncovering sand mining’s impacts on the world’s rivers,” WWF study report, PhysOrg, August 22, 2018.

“Sand mining and increasing Poyang Lake’s discharge ability: A reassessment of causes for lake decline in China,” by Xijun Lai, David Shankman, Claire Huber, Herve Yesou, Qun Huang, Jiahu Jiang, Journal of Hydrology, v. 519, 2014.

“Raw materials use to double by 2060 with severe environmental consequences,” The Global Material Resources Outlook to 2060, OECD report, Oct. 2018.

“System Dynamics Model for Global Sand Production Rate (Sand, Gravel, Crushed Rock, Stone),” Harald U. Sverdrup, Deniz Koca, Peter Schlyter; BioPhysical Economics and Resource Quality, May 2017.

“Abundance and Conservation Status of the Yangtze Finless Porpoise in the Yangtze River, China,” Xiujiang Zhao (Chinese Academy of Sciences), Xiujiang Zhao, Jay Barlow, Barbara L. Taylor, Robert L. Pitman, Kexiong Wang, et al., U.S. Department of Commerce, Science Direct, 2008.

“Yangtze finless porpoises in peril,” Jane Qiu, Nature, 24 December 2012

“Sand mining: the global environmental crisis you’ve probably never heard of,” by Vince Beiser, Guardian, 2017.

“China’s search for sand is destroying Mozambique’s pristine beaches,” Lynsey Chutel, Quartz Journal, October 23, 2018.

作者简介：

叶清华编辑（三角洲研究院高级研究员）。



肖勇

中交天津航道有限公司

Xiao Yong

CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd.

围海造陆工程对渤海湾三维水动力场的影响

Impact of Land Reclamation on the Three-Dimensional Hydrodynamic Field in Bohai Bay

摘要:自21世纪以来围绕渤海的围海工程剧增,特别是渤海湾沿岸,自然岸线骤减。人工岸线的增加导致了工程区附近潮流场发生变化,进而影响海域泥沙、排海盐水等时空分布特征。文章通过重新推导Sigma坐标转换公式,建立了三维水动力场数学模型,分别对2000年和2015年渤海湾潮流场进行模拟,结果表明渤海湾的潮流场在近十几年发生了较大变化:工程后,曹妃甸海域由于深水航道的开挖,其附近水域流速增大,除此之外,深水航道以及港区岬角处流速有所增大,剩余绝大部分水域及受防波堤掩护的水域流速均有不同程度的减小。该模型可准确地模拟渤海湾海域潮流场变化特征,为合理利用保护渤海湾水域资源提供了理论基础。

关键词:渤海湾;三维水动力模型;潮流场;围填造陆

Abstract

Since the 21st century, the reclamation projects around the Bohai sea have increased dramatically. Especially along the Bohai Bay, the natural coastline has decreased dramatically. The increase of artificial shoreline leads to the change of field of tide near the project area, then affects the temporal and spatial distribution characteristics of sediment and sea salt water discharge in the sea area. In this article, The three-dimensional mathematical model of hydrodynamic characteristics is established by redrawing the Sigma coordinate transformation formula, and the field of tide of Bohai Bay in 2000 and 2015 is simulated respectively. The results show that the field of tide of Bohai Bay has changed greatly in the past ten years: after the project, the excavation of Caofidian sea area by the deep-water channel increases the velocity of the nearby waters. In addition, The velocity at the headland increased in the deep-water channel and port area, but the velocity in most of the remaining waters and the waters covered by the breakwater have the varying degrees of decrease. The model can accurately simulate the variation characteristics of field of tide in Bohai Bay and provide a theoretical basis for the rational utilization and protection of Bohai Bay water resources.

Key words: Bohai bay, the three-dimensional mathematical model of hydrodynamic characteristics, field tide, reclamation

引言

感潮河段、大型湖泊及近海区域的水流运动,实际上均为三维运动,但由于其水深尺度相对于流场水平尺度较小,采用二维潮流数学模型也能有效的模拟其运动状态。但随着河口、海域地形及水深变化复杂程度加大,以及实际工程问题对潮流垂直结构及河口分层运动特性研究需求的提高,高精度的三维水动力数学模型研究与建立也变得愈加重要。与此同时,自20世纪70年代以来,渤海湾在经济和政策的双重驱动下,对土地资源的需求更加强烈,进一步加快了填海造陆进程^[1]。根据渤海湾2000年至2015年卫星遥感影像资料提取渤海湾岸线,截止到2015年渤海湾沿岸除部分入海河口附近岸线为河口型自然岸线外,其他海域沿岸几乎均为人工岸线^[2]。而在三维水动力模型中,垂向坐标的选取是决定其对模拟水域适应性的关键因素之一,因此,垂向坐标及坐标变换的选取,以及围填海工程对海域水动力场的影响成为了人们一直关注的热点问题。

自1957年Philips^[3]提出 σ 坐标变换, σ 坐标因具有较好地拟合床面和自由水面起伏变化的优势,进而由此引出的三维 σ 坐标变换水流模式已在各海洋、水利学科中得到了广泛应用^{[4]-[8]}。

本文在已有研究的基础上,针对传统 σ 坐标转换舍去的复杂高阶项这一问题,综合考虑补充了经 σ 坐标变换引入的与流速、水位、地形相关的复杂高阶项,形成 σ -坐标下的完整三维浅水模式方程。在改进后的模型中,采用特殊的单元插值函数并在水平方向利用三角形网格剖分计算域,采用集中质量有限元方法离散方程和加速计算,保留了原模型计算快速的优点;在垂直方向上利用差分方法进行求解。利用改进后的三维水动力模型对渤海湾水动力场进行模拟计算,选择围填海工程前后(2000年和2015年)两种地形、岸线条件,得到渤海湾围填海工程前后三维水动力场。

1 基本方程及边界条件的确定

在一般宽、浅水域中,垂向加速度远小于重力加速度,可忽略不计,N-S方程可化简为如下形式。

连续方程:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + fV + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - fU + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial T_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (4)$$

式中,x、y和z分别为直角坐标系下的方向坐标;U、V和W分别为x、y和z方向上的速度;P表示压力,T_{ij}是湍流应力项,f表示科氏力,其中T_{ij}=ρν_i(∂U_j/∂x_i+∂U_i/∂x_j),下标i和j轮流以x和y代替;f=2ωsinψ,ψ为当地纬度;ω为地球自转角速度。

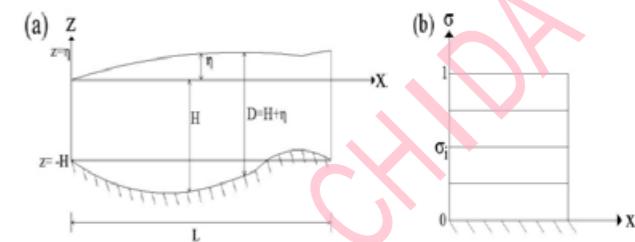


图1 坐标图

(a) 笛卡尔坐标系; (b) Sigma 坐标系

现有的海洋三维模型多为 σ 坐标转换,在该模型中,不仅考虑了由流速沿 σ 坐标方向的二阶项,同时加入了流速沿水平方向变化而引入的高阶项,以及地形和自由表面水平变化引入的高阶项。

设水体不可压缩且满足静压假定和Boussinesq近似,本文从直角坐标系下的连续方程和动量方程出发,推导出在 σ 坐标系下的连续方程和动量方程,即 $(x,y,z) \rightarrow (\alpha,\beta,\sigma)$ 。将笛卡尔坐标系下方程转换到 σ 坐标系下:

$$\alpha = x, \beta = y, \sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}, t^\sigma = t$$

连续方程为:

$$\frac{\partial D}{\partial t^\sigma} + \frac{\partial(Du)}{\partial \alpha} + \frac{\partial(Dv)}{\partial \beta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (5)$$

运动方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(Du)}{\partial t^\sigma} + \frac{\partial(Duu)}{\partial \alpha} + \frac{\partial(Duv)}{\partial \beta} + \frac{\partial(u\omega)}{\partial \sigma} + gD \frac{\partial \eta}{\partial \alpha} - fuD = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_h}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \\ & + \left[D \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{v_h}{D} \frac{\partial u}{\partial \alpha} \right) - 2(\sigma \frac{\partial D}{\partial \alpha} + \frac{\partial \eta}{\partial \alpha}) \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_h}{D} \frac{\partial u}{\partial \alpha} \right) + (\sigma \frac{\partial D}{\partial \alpha} + \frac{\partial \eta}{\partial \alpha})^2 \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_h}{D} \frac{\partial u}{\partial \alpha} \right) \right. \\ & \left. - (\sigma \frac{\partial^2 D}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial \alpha^2}) \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_h u) + 2\sigma(\frac{\partial D}{\partial \alpha})^2 \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_h}{D} u \right) + 2 \frac{\partial \eta}{\partial \alpha} \frac{\partial D}{\partial \alpha} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_h}{D} u \right) \right] \\ & + \left[D \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{v_h}{D} \frac{\partial u}{\partial \beta} \right) - 2(\sigma \frac{\partial D}{\partial \beta} + \frac{\partial \eta}{\partial \beta}) \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_h}{D} \frac{\partial u}{\partial \beta} \right) + (\sigma \frac{\partial D}{\partial \beta} + \frac{\partial \eta}{\partial \beta})^2 \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_h}{D} \frac{\partial u}{\partial \beta} \right) \right. \\ & \left. - (\sigma \frac{\partial^2 D}{\partial \beta^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial \beta^2}) \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_h u) + 2\sigma(\frac{\partial D}{\partial \beta})^2 \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_h}{D} u \right) + 2 \frac{\partial \eta}{\partial \beta} \frac{\partial D}{\partial \beta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_h}{D} u \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(Dv)}{\partial\sigma} + \frac{\partial(Duv)}{\partial\alpha} + \frac{\partial(Dvv)}{\partial\beta} + \frac{\partial(v\omega)}{\partial\sigma} + gD\frac{\partial\eta}{\partial\beta} + fuD = \frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{v_z}{D}\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right) \\ & + \left[D\frac{\partial}{\partial\alpha}\left(v_z\frac{\partial v}{\partial\alpha}\right) - 2\left(\sigma\frac{\partial D}{\partial\alpha} + \frac{\partial\eta}{\partial\alpha}\right)\frac{\partial}{\partial\alpha}\left(v_z\frac{\partial v}{\partial\alpha}\right) + \left(\sigma\frac{\partial D}{\partial\alpha} + \frac{\partial\eta}{\partial\alpha}\right)^2\frac{\partial}{\partial\alpha}\left(\frac{v_z}{D}\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right)\right] \\ & - \left[\left(\sigma\frac{\partial^2 D}{\partial\alpha^2} + \frac{\partial^2\eta}{\partial\alpha^2}\right)\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(v_z\frac{\partial v}{\partial\alpha}\right) + 2\sigma\left(\frac{\partial D}{\partial\alpha}\right)^2\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{v_z}{D}\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right) + 2\frac{\partial\eta}{\partial\alpha}\frac{\partial D}{\partial\sigma}\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{v_z}{D}\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right)\right] \\ & + \left[D\frac{\partial}{\partial\beta}\left(v_z\frac{\partial v}{\partial\beta}\right) - 2\left(\sigma\frac{\partial D}{\partial\beta} + \frac{\partial\eta}{\partial\beta}\right)\frac{\partial}{\partial\beta}\left(v_z\frac{\partial v}{\partial\beta}\right) + \left(\sigma\frac{\partial D}{\partial\beta} + \frac{\partial\eta}{\partial\beta}\right)^2\frac{\partial}{\partial\beta}\left(\frac{v_z}{D}\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right)\right] \\ & - \left[\left(\sigma\frac{\partial^2 D}{\partial\beta^2} + \frac{\partial^2\eta}{\partial\beta^2}\right)\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(v_z\frac{\partial v}{\partial\beta}\right) + 2\sigma\left(\frac{\partial D}{\partial\beta}\right)^2\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{v_z}{D}\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right) + 2\frac{\partial\eta}{\partial\beta}\frac{\partial D}{\partial\sigma}\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{v_z}{D}\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right)\right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中, v_z 为水平粘性系数, v_z 为垂向粘性系数; ω 为 σ 坐标系下的垂向速度:

$$\omega = D\frac{d\sigma}{dt} = W - u\left(\sigma\frac{\partial D}{\partial\alpha} + \frac{\partial\eta}{\partial\alpha}\right) - v\left(\sigma\frac{\partial D}{\partial\beta} + \frac{\partial\eta}{\partial\beta}\right) - \left(\sigma\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial\eta}{\partial t}\right) \quad (8)$$

其中, $D(x, y, t) = H(x, y) + \eta(x, y, t)$, $\frac{\partial D}{\partial\sigma} = \frac{\partial\eta}{\partial\sigma} = 0$ 。

在 σ 坐标系下, 沿整个水深 (-1, 0) 积分连续方程, 并考虑运动学边界条件, 得积深整体连续方程:

$$\frac{\partial(D\bar{U})}{\partial\alpha} + \frac{\partial(D\bar{V})}{\partial\beta} + \frac{\partial D}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

式中, \bar{U} 和 \bar{V} 为整体平均速度^[19], 表达式为:

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \int_{-1}^0 u d\sigma = \sum_b^0 \Delta\sigma_k u_k \\ \bar{V} &= \int_{-1}^0 v d\sigma = \sum_b^0 \Delta\sigma_k v_k \end{aligned} \quad (10)$$

动力学边界条件:

自由面 $\rho v_z (\frac{\partial U}{\partial\sigma}, \frac{\partial V}{\partial\sigma}) = (T_{ax}, T_{ay}) = 0$; 底平面 $\phi(x, y, -1, t) = 0$ 。

海岸边界: 法向速度为 0; 在沿海与开路边界: 由实测潮位或流速给出。

2 渤海湾三维潮流数学模型

2.1 模型设置

应用改进后的 Sigma 三维海洋水动力计算模型对渤海围填海工程前后的水动力进行模拟计算。首先建立渤海三维潮流数学模型, 分别提取 2000 年和 2015 年围填海前后两种地形、岸线条件, 渤海大模型计算结果为渤海小模型提供开边界条件; 其次在考虑径流输入的条件下, 对渤海湾的潮流场进行数值模拟, 并探索围填海工程后渤海主要工程区附近海域水动力条件变化特点及演变规律。

模型采用三角形网格划分方法, 计算范围为 $117.58^\circ E \sim 122.50^\circ E, 37^\circ N \sim 41^\circ N$, 其中渤海湾范围为 $117.58^\circ E \sim 118.85^\circ E, 39^\circ N \sim 39.23^\circ N$, 计算区域及海域等水深线如图 2 所示。

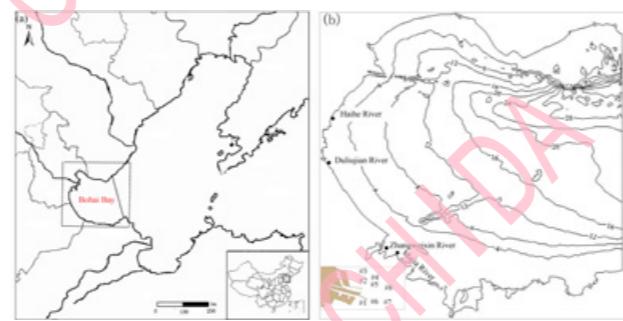


图 2 河流输入位置

垂向采用 Sigma 坐标, 沿水深方向均匀分为 5 层。选取 2000 年和 2015 年渤海海岸线和地形资料, 水深数据采用中国人民解放军海军司令部航海保证部出版的 2000 年和 2015 年黄渤海海域海图, 网格中各点的水深值由实测数值插值获得。模型开边界水位条件由 ChinaTide 潮汐预报系统得到, 模拟时间分别为 2000 年 3 月 10 日至 2001 年 1 月 13 日和 2015 年 3 月 10 日至 2016 年 1 月 13 日, 模拟结果通过实测潮位、潮流资料验证。模型初始条件采用零初始条件, 流速为零。渤海的海流主要是潮流, 不考虑海面大气压强的变化和风应力影响, 海底摩擦系数取 0.001^[20]。

不同河流的径流流量如下表所示:

表 1 径流流量

源项	经度 /°E	纬度 /°N	流量 /m³·s⁻¹
海河	117.718	38.989	43.28
马颊河	117.997	38.203	33.74
独流减河	117.592	38.765	40.00
漳卫新河	117.856	38.271	33.00

2.2 模型验证

选取塘沽港和黄骅港两个潮位观测站 2000 年 4 月的观测值和计算潮位进行验证, 并选取天津港 2015 年 5 月水文全潮观测站(测站位置见图 2)的大潮观测值与计算得到的垂向平均流速、流向进行对比, 结果如图 3、4。

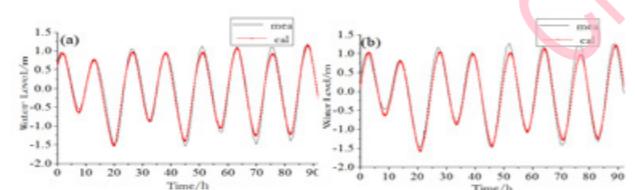
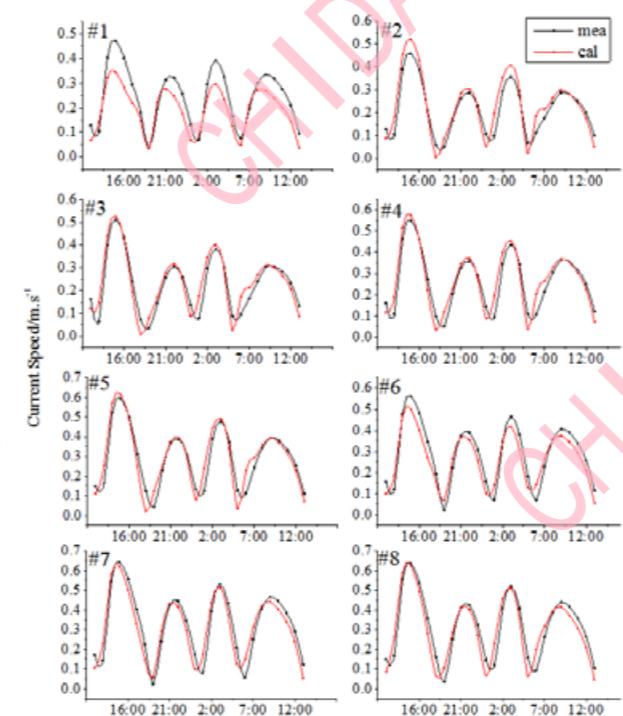
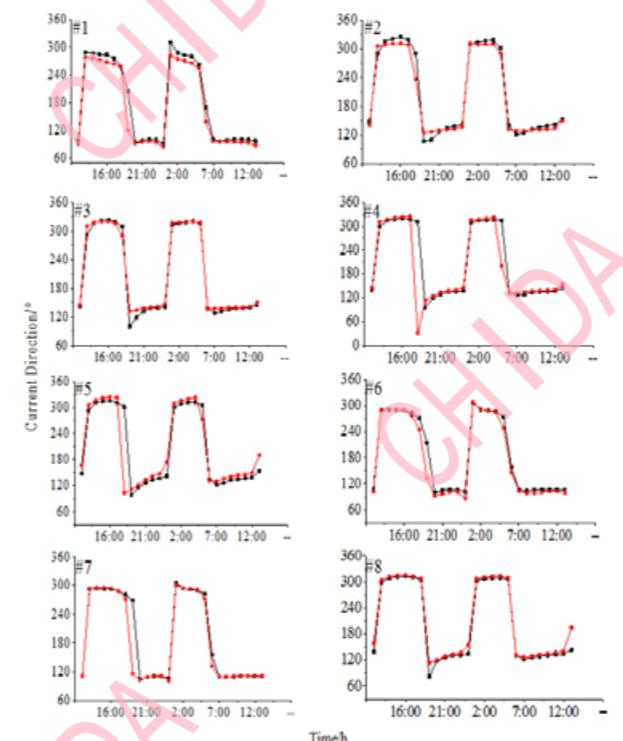


图 3 潮位实测数据与数值模拟数据结果的比较



(a) 天津港验潮站垂向平均流速



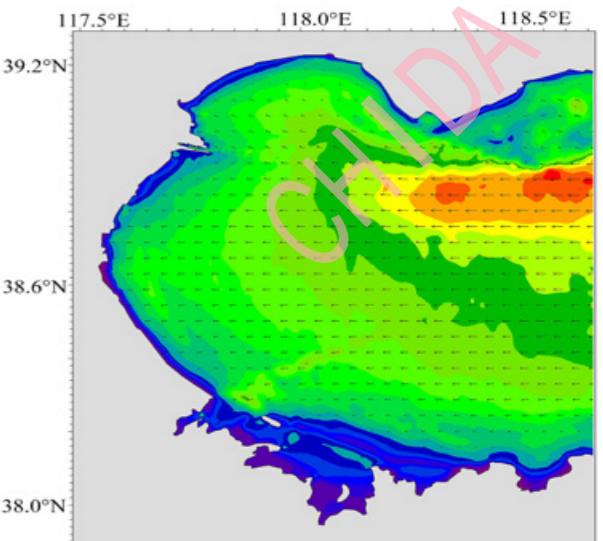
(b) 天津港验潮站垂向平均流向

由图 3、4 中看出各验潮站的潮位拟合较好, 涨潮和落潮与实测值相差很小; 天津港各个验潮站数值计算得到的流速、流向与实测流速、流向对比结果相差不大, 即数值计算结果和实测资料相符。该模型可准确的模拟了渤海湾的潮汐、潮流运动, 下文将对渤海湾围填海前后潮流场进行对比分析。

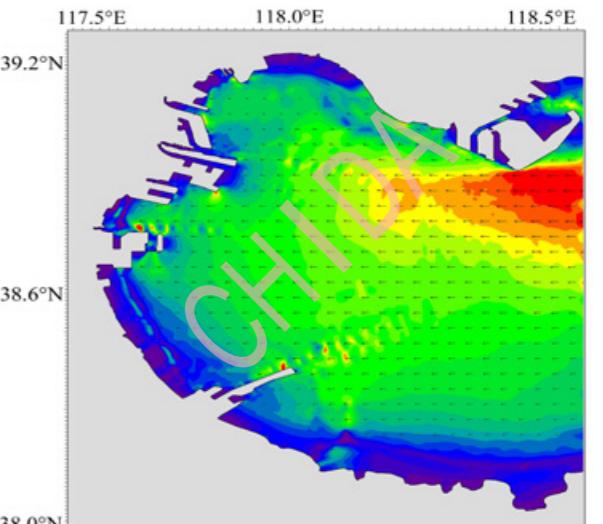
3 数学模型结果分析

3.1 工程前后潮流动力场分析

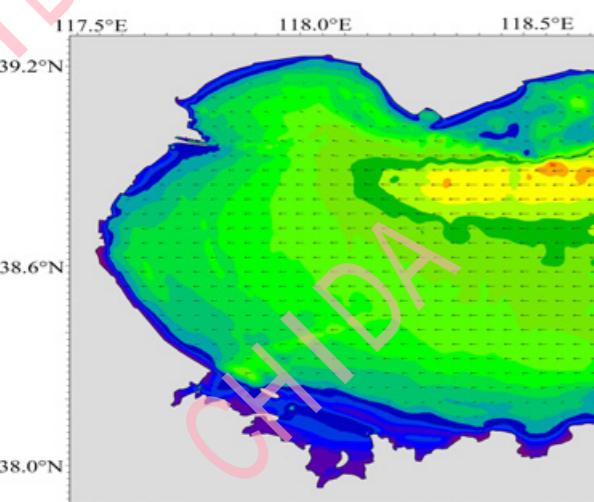
2000—2015 年这段时间内, 渤海湾岸线变化主要发生在曹妃甸工业区、天津港和黄骅港等海域, 岸线变化使渤海湾海域面积减少约 1178 km^2 , 约占渤海湾面积的 12%, 其中围填海工程是造成渤海湾海域面积减小的主要因素。



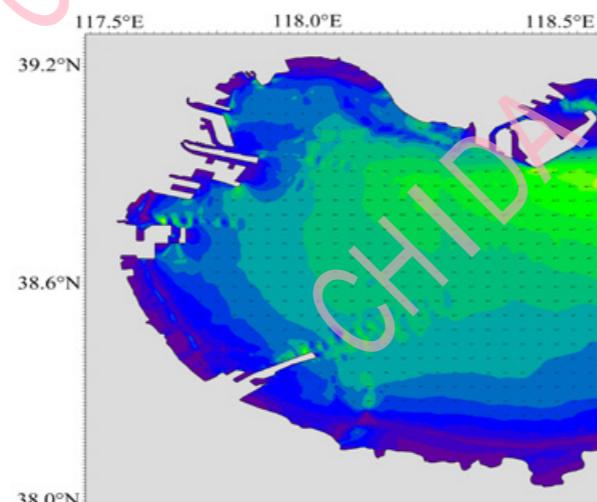
(a-1) 渤海湾表层涨急时刻流场—2000 年



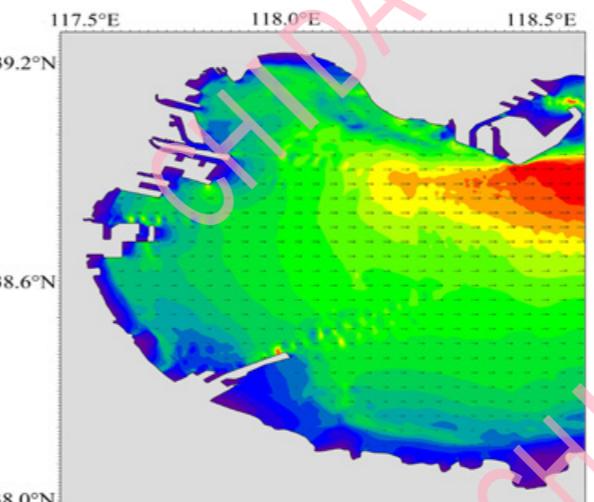
(a-2) 渤海湾表层涨急时刻流场—2015 年



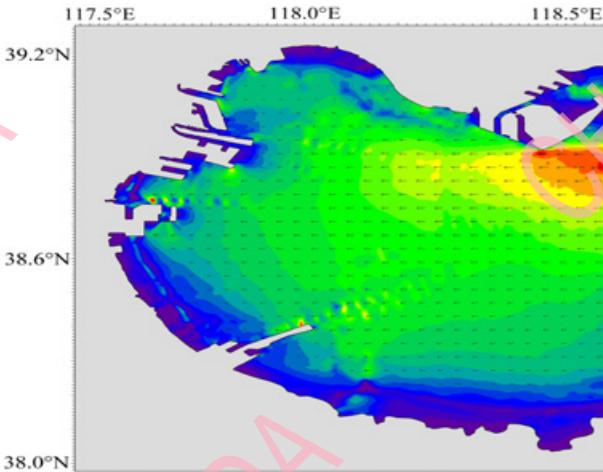
(a-1) 渤海湾表层涨急时刻流场—2000年



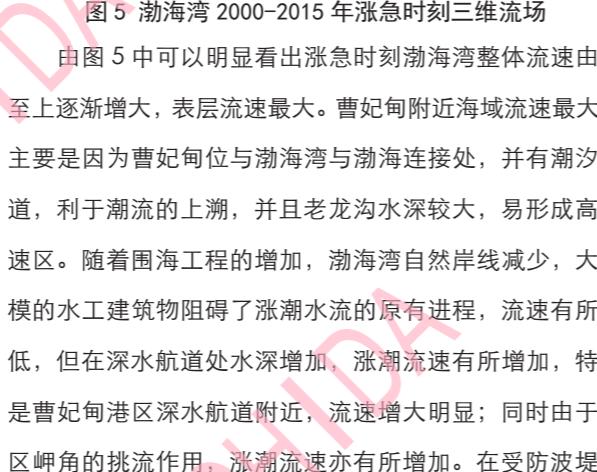
(b-1) 渤海湾中层涨急时刻流场—2000年



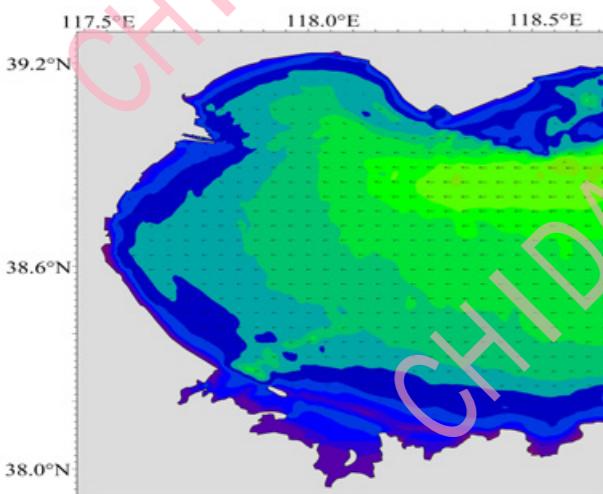
(c-1) 渤海湾底层涨急时刻流场—2000年



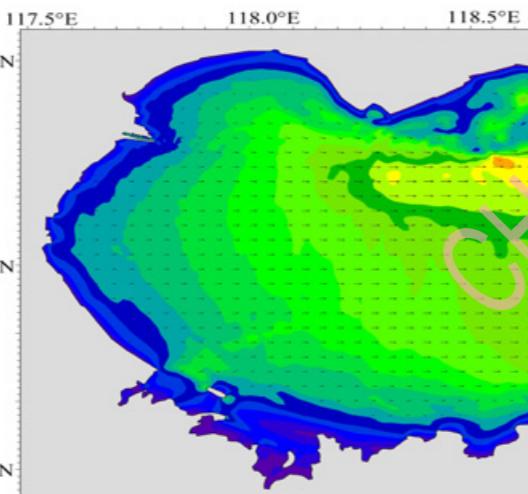
(a-2) 渤海湾表层涨急时刻流场—2015年



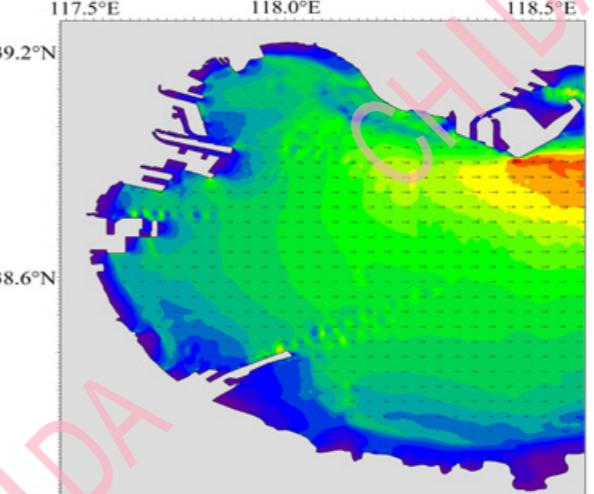
(b-2) 渤海湾中层涨急时刻流场—2015年



(c-2) 渤海湾底层涨急时刻流场—2015年



(a-1) 渤海湾表层落急时刻流场—2000年



(b-1) 渤海湾中层落急时刻流场—2000年

(c-1) 渤海湾底层落急时刻流场—2000年

(b-2) 渤海湾中层落急时刻流场—2015年

(c-2) 渤海湾底层落急时刻流场—2015年

图 5 渤海湾 2000—2015 年涨急时刻三维流场
由图 5 中可以明显看出涨急时刻渤海湾整体流速由下至上逐渐增大，表层流速最大。曹妃甸附近海域流速最大，主要是因为曹妃甸位与渤海湾与渤海连接处，并有潮汐通道，利于潮流的上溯，并且老龙沟水深较大，易形成高流速区。随着围海工程的增加，渤海湾自然岸线减少，大规模的水工建筑物阻碍了涨潮水流的原有进程，流速有所降低，但在深水航道处水深增加，涨潮流速有所增加，特别是曹妃甸港区深水航道附近，流速增大明显；同时由于港区岬角的挑流作用，涨潮流速亦有所增加。在受防波堤或水工建筑物掩蔽的水域流速减小明显。

增大，剩余绝大部分水域及受防波堤掩护的水域流速均有不同程度的减小，但远离工程区的水域流速变化较小。因此，围海造陆工程对工程区附近海域流场变化影响较大，而对远离工程区的流场影响较小。

参考文献：

- 1 Zhu G, Xu X, Ma Z, et al. Spatial Dynamics and Zoning of Coastal Land-Use Change along Bohai Bay, China, during 1979 – 2008[J]. Journal of Coastal Research, 2012, 28(5):1186-1196.
- 2 孙晓宇, 吕婷婷, 高义等. 2000-2010年渤海湾岸线变迁及驱动力分析 [J]. 资源科学, 2014, 36 (2) : 413-419.
- 3 Philips N A. A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting [J]. Journal of Meteorology, 1957, 14:184–185.
- 4 窦振兴, 杨连武, J.Ozer. 渤海三维潮流数值模拟 [J]. 海洋学报: 中文版, 1993, 15(5):1-15.
- 5 白玉川. 海岸三维潮流数学模型的研究及应用 [J]. 海洋学报, 1998, 20(6):87-100.
- 6 白玉川, 于天一. 分步分层拟三维水流数学模型及其在廉州湾潮流计算中的应用 [J]. 海洋学报: 中文版, 1998, 20(5):126-135.
- 7 陈虹, 李大鸣. 三维潮流泥沙运动的一种数值模拟 [J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 1999(5):573-579.
- 8 Bai Y, Wang Z, Shen H. Three-dimensional modelling of sediment transport and the effects of dredging in the Haihe Estuary[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2003, 56(1):175-186.
- 9 汪守东, 沈永明. 三维对流扩散方程的三种高精度分裂格式 [J]. 应用数学和力学, 2005, 26(8):921-928.
- 10 肖嘉凌, 宋志尧, 严以新, 等. 河口海岸潮流速分布模
式研究 [J]. 泥沙研究, 2007(4):34-41.
- 11 John C.Warner,Christopher R.Sherwood,Richard P. Signell,etc.Development of a three-dimensional,regional,coupled wave,current, and sediment-transport model[J]. Computers & Geosciences,2008,34(10):1284-1306.
- 12 Liu Z W,Chen Y C.SIGMA-COORDINATE NUMERICAL MODEL FOR SIDE-DISCHARGE INTO NATURAL RIVERS[J].Journal of Hydrodynamics Ser B, 2009,21(3):333-340.
- 13 于守兵, 王万战, 余欣. 基于非结构网格的三维浅水模型 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2):195-200.
- 14 田勇. 湖泊三维水动力水质模型研究与应用 [D]. 华中科技大学, 2012.
- 15 吴毓儒. 长江口深水航道三维水动力与盐度数值模拟研究 [D]. 天津大学, 2013.
- 16 赵旭东, 梁书秀, 孙昭晨, 等. 基于 GPU 并行算法的水动力数学模型建立及其效率分析 [J]. 大连理工大学学报, 2014(2),204-209.
- 17 LI Da-Ming, ZHANG Hong-Qiang, PU Shi-Long,ect. Research on mathematicalmodel of hydrodynamic chaacteristics in test field of tidal generation electricity[J].JOURNAL OF HYDROELECTRIC ENGINE ERING,2017,36(12):105-120.
- 18 黄牧涛, 田勇. 湖泊三维流场数值模拟及其在东湖的应用 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2014,29(1):114-124
- 19 白玉川, 顾元桢, 邢焕政. 水流泥沙水质数学模型理论及应用 [M]. 天津大学出版社, 2005.
- 20 赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟 [J]. 海洋学报, 1994,16(5):1-10.



赵亚州¹, 余云鹏²

中交广州航道局有限公司

Zhao Yazhou¹, Yu Yunpeng²
CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd.

防污帘在疏浚、吹填工程中的应用

Application of Anti-Fouling Curtains in Dredging and Project Reclamation

摘要: 近几年, 随着国民经济的不断发展, 我国政府对海洋环境治理的重视程度越来越高, 监管力度也越来越大。在疏浚及吹填这种传统行业中, 做好挖泥船施工的防污染措施, 是其在新的环保形势下实现突围的新手段。本文结合钦州港东航道扩建工程(扩建 10 万吨级双向航道)一期工程, 针对其在蓄泥坑以及吹填区周边设置防污帘的实例, 分析高环保要求下防污帘在疏浚及吹填施工中的技术与应用。

关键词: 环保; 防污帘; 扩散; 蓄泥坑

Abstract

In recent years, with the continuous development of the national economy, our government has paid more and more attention to the governance of the marine environment, and the regulation has become more and more intense. In the traditional industry of dredging and reclamation, proper anti-pollution measures in dredging construction is a new means to a breakthrough in the new environmental situation. The paper analyzes the technology and application of anti-fouling curtain in dredging and reclamation construction under high environmental protection requirements in the context of the first phase of Qinzhou Port East Waterway Expansion Project (expansion of 100,000 tons of two-way waterway) with an example of installing anti-fouling curtain around the mud storage pits and reclamation areas.

Key words: environmental protection, anti-fouling curtain, diffusion, mud storage pits

作者简介:

肖勇, 男, 中交天津航道局有限公司海外事业部, 乌克兰办事处负责人, 兼任波兰办事处负责人。

1 前言

钦州港位于钦州湾内，东经 $108^{\circ} 58' - 108^{\circ} 60'$ 、北纬 $21^{\circ} 72' - 21^{\circ} 75'$ ，钦州港东航道扩建工程（扩建10万吨级双向航道）一期工程位于钦州湾东深槽的钦州港东航道，主要施工内容包括：航道疏浚工程（含炸礁工程）、疏浚土处理工程（绞吸船在临时蓄泥坑转吹填）、航标工程等。一期工程疏浚量约3853.73万 m^3 （包含超深超宽、水下炸礁约96.08万 m^3 、施工期回淤量246.29万 m^3 ）。

因为本工程的工程量大、工作面广、工程持续时间长，施工对周边海洋环境影响较大，主要表现在施工导致泥沙的再悬浮、疏浚土可能含有的重金属污染物扩散、海水动力条件改变等，疏浚及吹填作业中产生的污染物直接或间接的进入海洋环境，产生损害海洋生物资源、妨碍渔业和海上其他活动、损害海水水质等有害影响。为减小由此带来的污染问题，在吹填区溢流口及附近排水明渠布置防污帘，并在绞吸船作业的蓄泥坑设置防污帘。

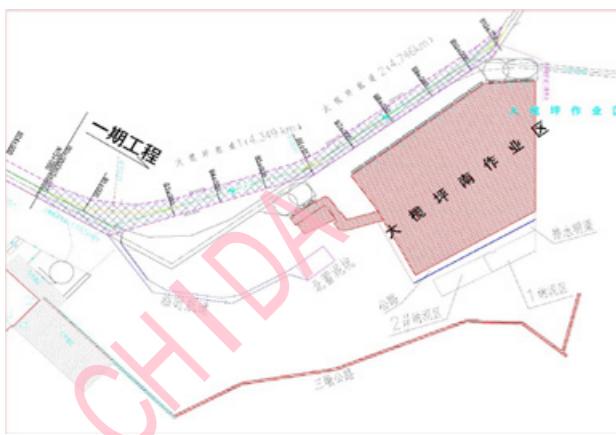


图1 工程总平面布置图

2 防污帘技术参数

防污帘是一种用于阻滞水体污染物扩散的设施，在封闭的区域里，提供固体颗粒从悬浮物中沉淀下来的时间，减少流向其他区域，能有效的将施工中的水域同外界隔离开来，从而防止浑浊水和悬浮物大面积扩散。

如图2，防污帘是一种从水面向下延伸到一定深度，竖直的柔性结构，根据本项目施工工况及拦截沉积物类型、粒径、船舶施工情况等因素，选用PVC浮体式防污帘，主

要由浮子（PVC浮箱）、帘布（400g/ m^2 ）、配重物（沙袋）三部分组成。

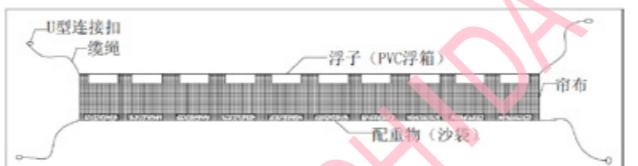


图2 防污帘结构示意图

浮子可选择单个组合式或柔性浮材一体式，每节长度、裙体高度、浮体大小，根据工程实际水域的深度、流速、波高、风力等实际条件确定，本工程中防污帘浮子部分采用了单个组合式PVC材料浮箱，规格为 $1200mm \times 30mm \times 30mm$ ，并在浮筒上缝制警示用反光贴。

帘布选用高强度、透水性好、防老化性能好的圆丝滤布制作，根据本项目过滤物选择密度为 $400g/m^2$ ，缝隙规格为 $1.5mm \times 1.5mm$ ，该帘布具有不易变形、透水性和拦污性好的特点。

而配重物选用了沙袋，沙袋中的中粗砂在吹填区施工场地获取极为简便，每个沙袋重量约为30公斤。为了施工及运输方便，每捆防污帘的长度不宜过长，故制作为20米/捆的规格，每块防污帘的上下设置有高强度涤纶连接缆绳，两端设置有相配合的U型连接扣，以方便两块防污帘通过绳子和钢扣连接成整体，在两块防污帘搭接位置从上至下缝制有魔术贴，更好的使得两块防污帘成为一个整体。最终制作出的防污帘具有强度高，乘波性、稳定性好，施工作业简单快捷等特点。

3 防污帘在本工程中的实际应用

3.1 在吹填区设置防污帘

吹填施工会导致纳泥区内水质浑浊，底部泥沙悬浮，吹填土可能含有各种成分的污染物，浑浊泥流通过溢流口排出，扩散出去，给生态环境和水产养殖造成危害。本工程吹填作业中，吹填区围堰内排出的浑浊水，或涨潮时通过排水明渠流向上游水产养殖区，或退潮时通过排水明渠排向下游海域，如果不作处理，将会严重影响养殖区及下游海域的水质。

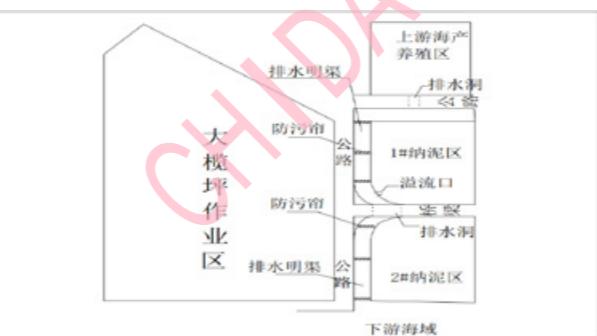


图3 设置防污帘示意图

如图3，将防污帘设置在排水明渠及吹填区溢流口，为了增加其拦污效果，在1#纳泥区及2#纳泥区的排水明渠上各设置3道防污帘屏障。而在吹填区溢流口设置时，则形成一个半包围的形状将溢流口围住，对溢流口排出的浑浊水体进行防护过滤。因安装过程类似，以下仅通过介绍在排水明渠上安装过程，了解防污帘的使用过程。

施工作业中，选取潮水变化较小时段，此时排水明渠水流较小，有利于施工。安装过程如下：

(1) 首先选取四根长约3米，直径为10公分的木桩，分别置于明渠两岸，每侧两根。因土质较为松软，可用挖掘机将木桩打入岸边边坡，使木桩露出地面约一米，两木桩标高应相差2米左右。

(2) 作业人员用铁锹等工具在吹填区取中粗沙装好沙袋，待用。

(3) 将防污帘展布开来，置于A侧河岸。取一根较长细绳，一端连接防污帘缆绳，另一端系石块等重物，抛至B侧河岸，B侧作业人员保持拉紧细绳。

(4) A侧作业人员一边将装好的沙袋封装于防污帘下侧固定口袋，一边将防污帘慢慢放入水中，B侧人员则保持拉紧绳子，将防污帘一端拉至B侧，直至沙袋封装完毕，防污帘位置也基本到位。此时要将下端的缆绳拉紧固定于木桩，上端的缆绳保持稍有富余度，使防污帘能够随潮汐变化而摇摆，减少水流带来的冲击力。



图4 在排水明渠和排水口设置的防污帘

3.2 在蓄泥坑设置防污帘

钦州港东航道扩建工程中，泥驳将抓斗船开挖的复杂土质倒运至北蓄泥坑，然后采用7025型绞吸船吹填至1#、2#纳泥区，泥驳倒泥和绞吸船吹填搅动泥土过程中引起悬浮物扩散，会对周边生蚝养殖等造成环境污染。因此，我们在蓄泥坑设置防污帘以阻碍抛填土微粒在海水中的扩散。

北蓄泥坑为长700米，宽400米的长方形区域，我们在蓄泥坑外围100米处设置防污帘，因为海上台风、涌浪、渔船等不确定因素较多，为了将防污帘位置长期固定，每隔50米距离需设置1.5t的固定锚坠，用来固定防污帘位置，具体布置方法如下：

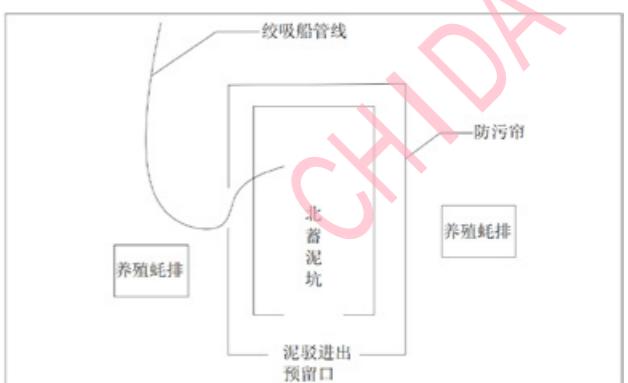


图5 蓄泥坑设置防污帘示意图

(1) 首先，在岸边利用防污帘的U型连接扣及强力魔术贴将5条防污帘连接成100米左右长度，并将沙袋装好封于防污帘布袋内，将锚坠固定于防污帘下端，用挖掘机等设备将100米防污帘有序折叠放至工作锚艇。

(2) 将锚艇开至蓄泥坑外围100米处，通过缓慢移动锚艇实现布施防污帘，每布施100米与上一条防污帘用缆绳相连接，并为泥驳进出蓄泥坑预留出口，在遇到绞吸船管线时要提前截断防污帘并设置锚坠，以保护管线，防止交叉。

(3) 防污帘布施完毕之后，对位置及形状进行调整，定期巡查，以保证正常使用。

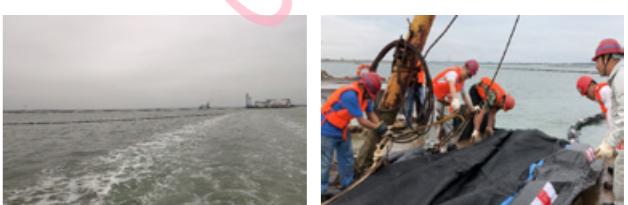


图6 蓄泥坑防污帘布设过程

4 设置防污帘后的环境跟踪监测

4.1 吹填区周边环境监测

为了检验防污帘的拦截悬浮物效果，对吹填区周边环境进行了跟踪监测，工作人员分别在1#纳泥区排水明渠的第二道防污帘上下游各20米处取同量水，装在相同透明塑料瓶内。作为对比，也在溢流口外取水，各静止一天后沉淀。可观察到沉淀物的量：溢流口处>防污帘下游20米处>防污帘上游20米处。用同样的方法在2#纳泥区排水明渠第二道防污帘处取水，实验结果相同，可见防污帘对于拦截悬浮物起到了明显的效果。

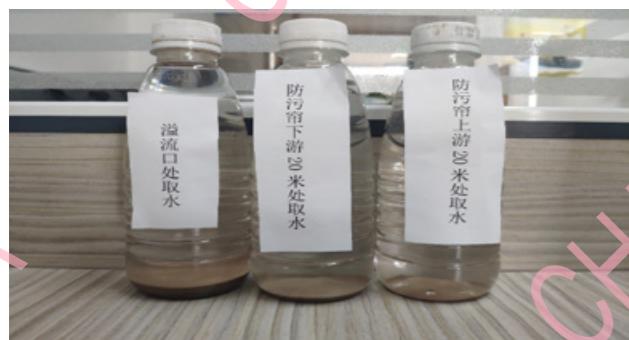


图 7 取水沉淀实验

同时，我们也对上游海产养殖户进行了长期跟踪访问，发现溢流水并未对其养殖造成任何影响；也未对下游出水口海域的海洋环境造成污染、浑浊等现象。

4.2 蓄泥坑及周边海洋环境监测

为了了解设置防污帘后，倾倒物（主要为疏浚物）在蓄泥坑的输移、扩散情况、在海底物质交换过程及对倾倒区周边环境的影响程度，我们委托国家海洋局北海海洋环境监测中心站负责蓄泥坑及周边海洋环境的监测工作。

海洋环境监测共布设水环境站位4个，K1位于蓄泥坑防污帘内，K2位于防污帘外500米，K3作为控制站位于附近海域，K4作为对照站位于不受倾倒影响的附近海域。监测内容主要为水质监测，参数有水色、透明度、叶绿素-a、溶解氧、pH、无机磷、活性硅酸盐、亚硝酸盐-氮、硝酸盐-氮、氨-氮、悬浮物、COD、BOD5、铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、铬(Cr)、汞(Hg)、镉(Cd)、砷(As)、

油类、硫化物^[1]。

对于本次蓄泥坑水质监测结果采用《海水水质标准》(GB3097-1997)进行评价，对各类水质参数作为评价因子，结果显示水质由好到坏K4>K3>K2>K1，除了防污帘内蓄泥坑水域K1站监测水质污染较为严重，项目周边海域的其他水质要素（如化学需氧量、石油类等）含量相对来说均不高，符合第四类海水水质标准，满足工程位置所在海洋功能区定位的水质要求（港口区，四类）。监测沉淀物环境质量状况良好，符合第三类海洋沉积物质质量标准，满足项目所在海洋功能区定位的沉积物管理要求（港口区，三类）^[2]。由此可见，防污帘起到了很好的拦截效果。



图 8 各监测站位置

5 结语

目前防污帘在疏浚及吹填工程中的应用并不普遍，防污帘的设计与施工技术也不成熟，但是随着国家对海洋环境治理力度加大，一系列环保政策与法规也相应出台，防污帘也必将会在今后的疏浚工程中广泛应用。钦州港东航道扩建工程通过对防污帘的使用，有效的改善了疏浚工程及吹填工程导致的水污染影响，成功避免施工单位与养殖户、海洋环境执法部门之间的冲突，为其他水运建设项目的环保施工提供了可借鉴的实例。而防污帘的使用可能会带来譬如限制挖泥船的产量、后期维护困难和增加工程成本等不利影响，施工企业更应综合考虑。

参考文献：

- [1] 《钦州港东航道扩建工程（扩建10万吨级双向航道）一期工程疏浚物蓄泥坑倾倒跟踪监测报告》
- [2] 《钦州港东航道扩建工程（扩建10万吨级双向航道）一期工程海洋环境动态跟踪监测报告》

作者简介：

赵亚州，男，中交广州航道局有限公司，工程技术员。
余云鹏，男，中交广州航道局有限公司，工程技术员。



李泽慧

中交广州航道局有限公司

Li Zehui

CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd.

关于近海砂质离岸人工岛围埝施工工艺优化探讨

Discussion on the Optimized Construction Technology of Sand-Cofferdam of Offshore Artificial Sand-Island

摘要：通过深入研究沙特沙巴大桥人工岛吹填工程施工的特点及难点，论述了在回填过程中施工方案的实施与优化，即主要是围埝施工方案的优化和吹填施工环保的控制措施，为今后类似的近海砂质离岸人工岛回填工程施工提供借鉴。

关键词：近海砂质人工岛；围埝施工；环保控制

Abstract

In accordance with the analysis of the construction characteristics and difficulties of King Fahad Causeway Island-A Dredging and Reclamation Project, this paper focus on the implementation and optimization construction method statement during backfilling progress, mainly for the optimization of temporary sand-cofferdam construction and the environment control measures, it can provide abundant experience for similar offshore artificial sand-island.

Key words: offshore artificial sand-island, sand-cofferdam construction, environment protection

1. 工程概况

1.1 工程概况

沙特沙巴大桥人工岛项目位于沙特东部波斯湾海域，围绕沙特-巴林大桥2号桥堤进行吹填施工，形成一个直径约1km的圆弧形人工岛，该工程为设计、采购、施工为一体的EPC项目，主要施工内容包括人工岛吹填、航道疏浚、轮渡码头浚深、地基处理、护岸工程、游艇码头及防波堤建设，其中疏浚吹填工程为主要施工任务之一，吹填总方量约700万方，吹填面积约86万平方米，吹填标高+7.2米（CD基准）。



图1 沙巴大桥人工岛平面图

1.2 自然条件

① 风

常年风向为西北风到北风，平均风速10节，最大风速35节，每年春季（12月-3月）为季风期。

② 降水

多年年平均降水量为115mm，3月-10月无降雨，其他月份平均降水量20mm。

③ 海浪和潮汐

不规则半日潮，年平均浪高0.8m，最大浪高1.4m，平均潮差为1.1m，最大平均潮差可达到1.4m。

④ 水流

施工区域东、西两侧航道水流流速最高达4.0m/s，平均流速约2.0m/s。

1.3 围埝施工难点及分析

本项目边界离最近的沙特东海岸线约12公里，吹填区平均水深-2.5米，其中靠近东、西两侧航道水深大于5米，根据设计要求，吹填区围堰结构形式采用梯形抛石，兼做护岸。

根据取砂区土质钻孔报告分析，划定取砂区中的南、北航道及其附近土层砂源较好且充足，其中粒径小于75μm的细颗粒含量小于10%，符合合同技术规格书的要求，并且符合砂质围堰工艺需求。

考虑到围堰的具体情况，本项目围堰施工经项目部的充分勘察，大胆求证，科学设计，制定了与当地自然条件相融合的施工工艺方法，如下所述：

(1) 考虑到本项目工期紧，仅一年半的时间，而围堰的成型将严重制约绞吸船连续施工，项目部根据本项目特点，优化作为关键的围堰，加快吹填进度，同时也为绞吸船连续施工作业提供保障。

(2) 经过项目部现场观测数据，除靠近东、西两侧航道区域外其他区域的水流方向基本平行于围堰实施方向，并且水流流速较大的区域为-5米以上区域，项目部经过围堰稳定性验算以及现场实验，深水区采用梯形抛石围堰施工，在水深较浅区域将形成一定的围蔽条件，可以考虑采用临时砂围堰施工方案。

(3) 现场石料短缺，砂资源丰富，如果能够采用临时砂围堰，将会降低造价以及节省石料运输时间。

1.4 环保难点及分析

为配合临时砂围堰施工，吹填施工可能将面临在没有围蔽的情况下施工，而沙巴大桥人工岛下游约五公里处为当地的海水淡化厂，项目对于环保要求极为严格，而船舶开挖和半开放性吹填施工都会对该区域附近水质造成影响。因此，疏浚吹填全过程又必须封闭整个施工区，减少船舶施工所产生的悬浮物的扩散。

但临时砂围堰施工过程中，我们又不得不依靠吹填堆积的砂资源作为原材料，这与围蔽施工是矛盾的，也将制约我们修改本次的施工工艺。

2. 临时围埝实施过程控制方法

2.1 项目策划阶段

在项目策划阶段拟采用全断面抛石围堰封闭式吹填，抛石围堰方案如右图2所示。本项目为EPC项目，前期设计阶段耗时较长，剩余工期仅一年半，需完成回填、地基处理、护岸工程及码头建设等施工任务，综合考虑项目工期，结合土质报告与风浪、水深等情况，将围堰施工方案改为仅在靠东、西两侧航道水深大于5m处进行梯形抛石至海平面，其余部分全部利用砂围堰封闭整个施工区即可。

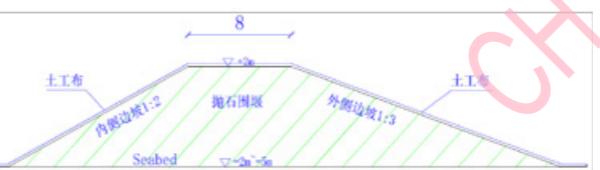


图2 策划阶段围堰施工断面图

2.2 试验阶段

本项目吹填前期沿边界进行为期一周的砂围堰试验段施工，因设计双车道，故该段围堰宽度定为8m，围堰内外侧均为海域，具体试验段围堰施工断面如右图3所示。主要施工设备为：3辆自卸车、2台铲车、1台勾机。后因回填土承载力不够、波浪冲刷等原因，导致砂围堰修筑进度慢且易因波浪淘刷而被破坏，故前期仅修筑一段30m围堰便停止施工。

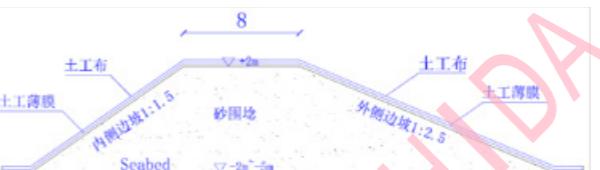


图3 试验阶段围堰施工断面图

2.3 试验阶段

结合土质报告与已吹填成陆区土质类型，并综合现场实际施工情况分析讨论后，确定最终围堰施工断面如右图4所示，顶宽为2m，内侧靠已成陆区的边坡为1:1.5，外侧靠海的边坡为1:2.5，其中管头吹填方向与围堰形成方向一致，且采用三通管进行分块吹填、分层加高的方法沿边界区域逐步吹填砂至设计标高。主要施工设备为1-2台勾机负责围堰修筑，2-4台三角履带式推土机负责将管头砂推

至围堰附近。本项目围堰施工成功的关键技术总结如下：

1) 根据前期吹填成陆后的施工现场测量数据，计算出成陆区平均坡比和水下平均坡比（本项目成陆区平均坡比为1:40，水下平均坡比为1:10），由此计算出管线最佳摆放位置和吹填走向，以此制定临时围堰位置以及满足就地取材的围堰施工工艺；

2) 采用薄膜和土工布对围堰进行防护，回填砂渗透性强，故采用薄膜隔水，而土工布具有加筋效果，使围堰更加坚固、防渗；

3) 采用分层分块吹填施工工艺，且围堰顶端随着岛内标高增加逐步向岛内平移，在砂源丰富的情况下，逐步加宽、加高围堰。

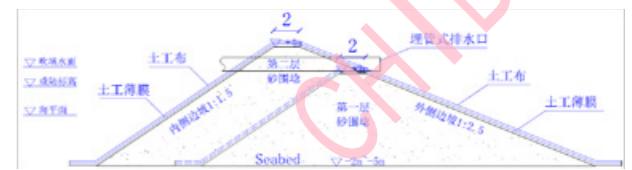


图4 最终实施阶段围堰施工断面图

实践证明最终实施方案中临时围堰施工极大地增大了砂质围堰的稳定性，以及砂质围堰的便捷性，不仅成功缩短了围堰施工工期，也降低了施工成本，同时也有效减少了绞吸船的窝工等待时间。

2.4 环保控制措施

本工程下游约五公里处有一座海水淡化厂，专为沙特库巴市提供城市居民用水，故此岛屿建设过程中的环保问题的控制要求异常严格，因此合同要求施工期间，必须利用防污帷幕封闭整个施工区，每天对人工岛回填区附近1.5km处取水样送检，要求浑浊度小于3.0 (NUT)；一旦施工过程中水质取样检测结果超过合同要求或是防污帷幕破损，工程施工及船舶施工将面临停工整改的风险，故防污帷幕的布设和维护对本次吹填工艺而言是极其重要的配套措施，将会直接影响围堰施工和吹填施工。经实践，对防污帷幕布设技术要点简要总结如下几点：

(1) 施工前期，根据施工区水深情况，合理选择防污帷幕的帷幕高度，确保防污帷幕布设位置为水下坡脚线外5-10m左右；

(2) 施工过程中,根据现场吹填情况,利用锚艇或快艇适当将防污帷幕拖带至合适位置;

(3) 吹填至边界时,防污帷幕布设至人工岛边界设计底边线即可;

(4) 在风浪水流不大的区域,防污帷幕吊坠不宜过重,方便拖带。如此布设防污帘将既不富余浪费,也不会因为防污帷幕过短而被回填砂压盖。



图 5 防污帷幕封闭吹填区

防污帷幕在本工程实施过程中起到了重要的隔离作用,可观察到防污帷幕内外水质浑浊度的差别,而实测施工区附近 1.5 公里水质浑浊度均满足合同要求。

结论

通过对沙特沙巴大桥人工岛疏浚回填工程施工过程中围埝施工和环保控制中难点所采取的措施进行论述,并总结如下:

(1) 对于砂源较好且需修筑围埝的填海造陆项目,可采用分层、分块吹填法,合理设计围埝断面,根据成陆区坡比和水下坡比计算出管头的最佳摆放位置,同时也需在项目实施过程中不断优化围埝的施工方案,这可节省了大

量的施工成本和工期,使得项目整体施工紧凑,提高船舶施工时间利用率。

(2) 实践证明防污帷幕已被成功运用于本项目的施工全过程中,即使遇到苛刻的环保要求,也能维持绞吸船的持续施工;防污帷幕布设的最佳位置应为水下自然形成坡脚线外 5-10m 左右,做到既不富余浪费,也不因防污帷幕过短而被回填砂压盖。

本项目临时砂围埝施工减少了项目工期,也有效避免了抛石围埝可能导致的船舶窝工,工程施工质量和环保要求也得到业主、咨工的一致认可,故本工程成功的施工经验可为今后类似的砂质离岸人工岛的施工提供借鉴。



图 6 项目竣工全景

参考文献:

- [1] 中交天津航道局有限公司.《疏浚与吹填工程施工规范》. [M] 第 1 版. 北京. 人民交通出版社. 2012.
- [2] 席明军.《外海人工岛工程施工技术》. 北京. 中港港湾建设. 2009.
- [3] 吕国平.《沙特扎瓦尔港口工程无围埝吹填施工工艺》. 交通世界. 2013.

作者简介:

李泽慧,男,中交广州航道局有限公司,助理工程师。



韩海强¹, 王潮²

中交天航环保工程有限公司

Han Haiqiang¹, Wang Chao²

CCCC-TDC Environmental Engineering Co., Ltd.

400 方绞吸挖泥船绞刀转速与桥架横移速度匹配研究

Research on the Matching of Rotation Speed of Cutter and Transversal Speed of Bridge Frame in 400m³ CSD

摘要: 在开阔水域施工中,绞吸挖泥船绞刀最大转速不能与桥架最大横移速度相匹配,造成施工质量欠佳。通过剖析绞刀在泥层中的施工效果,分析绞刀液压系统的工作原理,对液压马达、液压泵性能数据进行研究,找到解决问题的途径,推导增加液压马达供油量的方法,进而实现提高马达转速。再对不同的方案进行比较,从可行性、适用性、经济性方面进行研究,最终确定经济合理的改进方式。

关键词: 疏浚; 绞刀转速; 横移速度; 匹配

Abstract

In the dredging construction of open water area, the maximum speed of the cutter can not match the maximum transverse moving speed of the bridge frame, resulting in poor construction quality. Through analyzing the effect of the cutter in the mud layer, analyzing the working principle of the cutter hydraulic system, studying the performance data of the hydraulic motor and hydraulic pump, finding the way to solve the problem, deducing the method of increasing the oil supply of the hydraulic motor, and then realizing the increase of the motor speed. Then compare the different schemes, from the feasibility, applicability, economy in-depth study, and finally determine the economic and reasonable way to improve.

Key words: dredging, cutter speed, increasing oil supply, motor

1 概况

国产 400 方组合式绞吸挖泥船, 前部是桥架, 在其前端配备绞刀装置如图 1 所示。疏浚时桥架放至水底, 绞刀在水下转动切削土层, 同时收放桥架上的左右横移钢缆, 使船以定位钢桩为圆心左右摆动, 船舶前移通过钢桩台车推进完成。吸泥管布置在桥架下部, 其吸口在绞刀后方, 机舱内的泥泵吸入泥浆通过管路排放到指定地点。



图 1 绞刀、桥架和吸泥管

该船适合于内河环保疏浚吹填施工, 可挖掘淤泥、粘土和沙。在开阔水域挖掘时, 为提高生产率, 桥架摆动使用最大横移速度 30 r/min 时, 绞刀最大转速只有 18 r/min。如图 2 所示, 绞刀有 A、B、C、D、E 五个相同的刀臂, 绞刀在水下向右旋转进行疏挖, 同时在横移绞车的牵动下水平移动, 在 A 刀臂上的 a 点切削泥层后, B 刀臂上的同一位置的 b 点再切削泥层时, 由于横移速度过快造成存在未被切削掉的泥层, 如果降低横移速度又会影响施工效率, 即使桥架反向摆回疏挖, 也存在浚后的浅点, 施工质量欠佳。需要研究办法来提高绞刀转速以匹配最大横移速度, 缩短相邻刀臂切削土层的间隔时间, 以便清理掉漏挖的泥层。

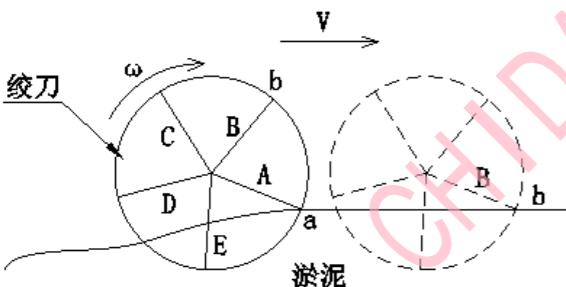


图 2 绞刀挖掘示意图

2 绞刀液压系统

液压系统通常由动力部分、控制部分、执行部分和辅助装置组成^[1]。如图 3 所示, 该船绞刀液压驱动系统主要由液压马达①、单向阀②、平衡阀③、安全阀④、换向阀⑤、液压泵组⑥、滤器⑦、油箱⑧通过管路连接而成为一个回路系统, 以 24V 电路控制绞刀的启动、停止、加减速操作。换向阀⑤由左、中、右三块阀体组成, 当其在中间位置时, 液压泵排油直接回油箱, 绞刀静止不动; 当换向阀向左移动时, 液压泵通过右侧阀体油路供油至液压马达, 使其带动绞刀顺时针旋转; 当换向阀向右移动时, 液压泵通过左侧阀体油路供油至液压马达, 使其逆时针旋转。

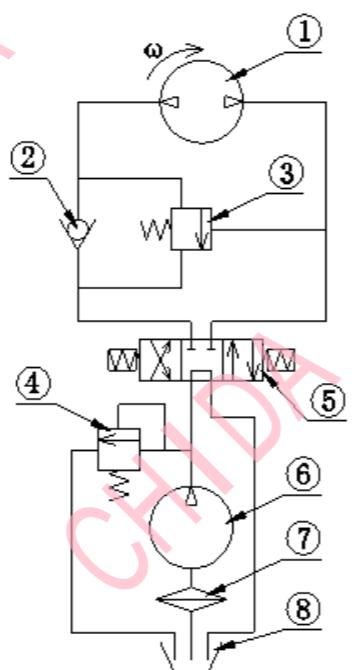


图 3 绞刀液压系统简图

2.1 液压泵组

液压泵组由一台功率 296kW、转速 1800 r/min 的四冲程增压柴油机直接驱动, 该柴油机另一端通过齿轮箱配容量 52kVA 的发电机。液压泵组由 DENISON 公司出品的一台 T6DCC 三联液压泵和一台 T6DR 单联液压泵串联组成, 三联泵内置 028、014、012 三个叶片式泵芯, 单联泵内置一个 031 叶片式泵芯。在液压系统压力为 14 MPa、液压油运动粘度为 24cst 的条件下, 根据各泵芯性能参数标准

值、内部泄漏量、对应转速等数据, 得到各泵泵芯的有效排量和驱动功率见表 1 所示。

表 1 液压泵芯参数

泵型号	T6DCC		T6DR	
泵芯型号	028	014	012	031
理论排量 (l/min)	150.24	74.52	60.24	165.72
有效排量 (l/min)	139.44	63.72	54.24	154.92
驱动功率 (kW)	57.37	31.97	24.88	62.55

2.2 液压马达

绞刀由液压马达通过绞刀轴直接驱动, 马达由 Hägglunds 公司出品, 型号为 CA210, 排量 13.2 升/转、最大允许压力 35 MPa。分析该船液压系统图纸, 液压马达共有两档转速, 当由 028 泵芯单独给马达供油时, 理论转速 10.5r/min; 当由 028 和 031 泵芯共同给马达供油时, 理论转速 22 r/min。

3 提高绞刀马达转速的措施

在理想状态下, 假设液压泵、液压马达容积效率达到 100%, 液压泵排出的液压油全部进入液压马达, 做功后再排出流回油箱, 输入马达的供油量 Q 与马达每转排量 q、马达转速 n 之间的关系可以用公式 (1) 表达。

$$n = Q \div q^2 \quad (1)$$

N—液压马达理论转速;

Q—输入液压马达的供油量;

q—液压马达的每转排量。

由此可见, 通过增加绞刀马达的进油量, 即提高液压泵的输出量可以提高马达转速。

3.1 提高驱动液压泵组柴油机的转速

该船液压泵组由柴油机直接驱动, 提高柴油机转速, 即可提高液压泵组总排出量, 增加对液压马达的供油量, 进而提高马达转速。但柴油机已在额定转速 1800 r/min 下运转, 已是最高工作转速, 所以此法不能实现提高马达转速的目的。

3.2 更换大排量泵芯

DENISON 公司出品的 T6 系列液压泵可以通过更换同系列对应的泵芯来获得不同的排量, 换用容积较大的泵芯可以增大对马达的供油量。但为保证系统设备运转安全,

需要满足两个条件, 一是增加的排量不能超过原泵组液压吸入总管供给余量, 否则会发生其它泵芯因吸入不足功效下降的现象, 甚至发生泵芯因缺油损坏的事故; 二是增大的泵芯需要更大的驱动功率, 增加的驱动功率不能超出液压泵组柴油机的剩余功率, 否则泵芯无法达到标定排量的使用状态, 功效反而降低。

3.2.1 计算泵组吸入总管供给余量

该船液压系统使用运动粘度 46 mm²/s 的液压油, 吸入总管直径 108 mm, 吸油管路流速^[3]1m/s, 对应的管路理论流量 549.36 l/min。在施工时, 各泵芯都通过一根轴同时在运转, 管路供油总流量减去各工作泵芯的理论排量, 得到吸油管路的供油余量为 158.88 l/min。

3.2.2 计算柴油机剩余功率

增压四冲程柴油机机械效率^[4]0.8 ~ 0.92。液压泵驱动柴油机标定功率 296 kW, 机械效率选取 0.85, 转换的实际有效功率 252 kW。在 028 和 031 泵芯共同供油驱动绞刀时, 014 泵芯排油驱动横移绞车, 012 泵芯虽排油但不驱动起锚绞车运转做功, 整个泵组需要驱动总功率 151.89 kW。另外, 柴油机还驱动 52kVA 容量的发电机, 按照机械效率 0.8 折算, 需要提供功率 65 kW。剩余功率可由柴油机有效功率减去发电机需求功率, 再减去绞刀最大转速时各工作泵芯需要的总驱动功率, 最终得到剩余功率为 35.11 kW。

3.2.3 选择替代的泵芯

028 和 031 两泵芯分别对应系列中适合替换的较大泵芯及性能参数见表 2 所示。

表 2 可替换泵芯参数

泵芯型号	028		031		
	替代型号	031	035	038	038
理论排量 (l/min)	165.72	188.64	205.32	205.32	233.64
有效排量 (l/min)	154.92	178.84	194.52	194.52	222.84
驱动功率 (kW)	62.55	70.32	75.86	75.86	85.36
马达转速 (r/min)	11.74	13.55	14.74	14.74	16.88

在船舶施工中, 绞刀转速一般适合分成三档, 即一档控制在 10 ~ 16 r/min、二档控制在 20 ~ 27 r/min、三档控制在 30 ~ 37 r/min。据此初步选择替换原 028 +

031 泵芯的新组合，在一档选用 038 泵芯时，转速提高到 14.74 r/min；二档选择 038 + 038 或 038 + 042 组合，转速提高到 29.5 r/min 或 31.6 r/min。再与原 028+031 组合比较新增加的排量和功率，表 3 所示 38 + 038 组合方式新增的排量和功率都未超过余量。

表 3 泵芯新组合增加的排量和功率

泵芯组合	038 + 038	038 + 042	余量
增加的排量 (l/min)	94.68	123	158.88
增加的功率 (kW)	31.8	41.3	35.11

3.3 加引管路提高对马达的供油量

通过加引管路，增加对绞刀马达的供油量，来提高马达转速。对液压图纸进行分析，在绞刀工作时，起锚绞车不参与施工，可以从为其马达供油的 012 泵芯排出管引油路接入绞刀马达的供油总管，在管路上加装并泵阀组，在操作控制箱内加装控制电器件，实现并泵控制。012 泵芯的理论排量和驱动功率（见表 1）都没有超过计算余量（见表 3），所以该方法是可行的。泵芯组合变为 012+028 和 012+028+031，第一、二档的有效转速分别增加到 15.2 r/min 和 26.9 r/min。

4 结束语

直接提高驱动液压泵的柴油机转速，进而提高对液压马达供油量的方法，虽很简单，但因柴油机已无富裕转速，所以不可行。

作者简介：

韩海强，男，中交天航环保工程有限公司，工程部副经理、高级工程师。

王潮，男，中交天航环保工程有限公司，业务主办、工程师。

更换泵芯的方法比较简单，液压系统无需改动，采购选定的泵芯安装即可，统一型号的泵芯也利于采购、安装、使用、维护，减少相应的成本。

加引管路增加供油量的方式，虽然转速有所提升，但最高转速未达到使用需求。另外，对于既更换泵芯组合，又通过加引管路增加第三档的方法，因对液压系统改动较大，需要加装新的管路和液压阀件，还要加装电控元件，总体费用较高，经济性不佳。

综上所述，从可行性、适用性、经济性方面考虑，采用更换泵芯的方案最为适宜。改进后绞刀转速显著提高，刀臂切削泥层的间隔时间缩短，泥面浚后质量明显提升。另外，通过研究分析即为 DENISON T6 系列液压泵组泵效的改进提供了途径，也为同类型船舶提高液压马达驱动转速提供了借鉴。

参考文献：

- [1] 成大先, 王德夫, 汪德涛. 机械设计手册(第五版). 第 5 卷. 化学工业出版社. 2010 年 9 月. 21-25 页.
- [2] 费千, 阎永健. 船舶辅机. 大连海运学院出版社. 1993 年 4 月. 第 113 页.
- [3] 成大先, 王德夫, 汪德涛. 机械设计手册(第五版). 第 3 卷. 化学工业出版社. 2010 年 9 月. 10-14 页.
- [4] 杜荣铭, 吴恒, 孟庆明等. 船舶柴油机. 大连海运学院出版社. 1990 年 2 月. 第 18 页.



沈鑫涛¹, 赵健²

中港疏浚有限公司

Shen Xintao¹, Zhao Jian²

CHEC Dredging Co., Ltd.

环保疏浚底泥脱水固化过程中除杂系统的优化研究

Optimization of Impurity Removal System in the Process of Dewatering and Solidification of Environment-Friendly Dredged Sediments

摘要：在环保疏浚底泥脱水固化施工工艺中，泥浆的除杂是生产线第一个工艺单元，也是保障整条生产线正常运转的关键环节。如泥浆中杂质不能完全清除，会导致进料泵、板框压滤机滤板损坏等一系列的问题，影响整条生产线的正常运转效率。以武汉市东湖水环境提升工程为例，对脱水固化施工工艺中现有除杂系统存在的问题进行分析，提出优化除杂池和增设格栅除污机的方案，实现除杂池自动化清杂的功能和提升板框压滤机的完好率。绞吸船每月产能可增加约 7200m³，板框压滤机产能每月可增加约 391.5m³，可为工程节省约 64 万元，为类似工程提供参考与借鉴。

关键词：环保疏浚底泥；脱水固化；板框压滤机；除杂系统

Abstract

In the process of dewatering and solidifying environment-friendly dredged sediments, the impurity removal is the first step, and it is also a key point to the entire production line. If the impurities cannot be completely removed, it will cause damage to the feed pump, the filter plate of the plate frame filter, and the like, which will affect the normal operation efficiency of the entire production line. Taking the Wuhan Donghu Water Environment Improvement Project as an example, the existing problems of the impurity removal system in the dewatering and solidification process are analyzed, and the scheme of optimizing the impurity removal pool and adding a grille decontamination machine is proposed to realize the automatic cleaning of the impurity removal pool, improving the intact rate of the plate frame filter. The monthly production capacity of the CSD can be increased by about 7,200m³, and the monthly production capacity of the plate frame filter can be increased by about 391.5m³, which can save about 640,000 RMB for the project, which provides reference for similar projects.

Key words: environment-friendly dredged sediment, dewatering and solidification, plate frame filter, impurity removal system

1 工程概况

武汉市东湖水环境提升工程是以改善东湖各个子湖底质条件、提升东湖子湖水质为基本出发点，结合湖泊功能定位与相关规划，合理确定湖泊整治范围，为创造生态环境良好、服务设施完善的城市公共开放空间做准备。施工清淤范围主要包括庙湖、菱角湖、喻家湖、后湖、郭郑湖南部及郭郑湖北部，总清淤方量 217.15m³。本工程采用环保疏浚工艺进行清淤，疏浚底泥经过脱水固化工处理后形成含水率 40% 以下的泥饼，泥饼再通过外运进行填埋处理。其主要工艺流程如下（图 1）。

2 优化前除杂系统存在的问题

在东湖水环境提升工程中，疏浚底泥内杂质含量主要分两类，一类是长纤维状的，如塑料袋、编制袋、衣物等；另一类是硬质固体颗粒，如石块、砖块、玻璃等。为避免长纤维的杂质进入进料泵叶轮以及满足进入板框压滤机的泥浆中硬质固体杂质的直径需小于 5mm 的要求，因此需对疏浚底泥进行除杂。东湖水环境提升工程优化前除杂系统主要由消能沉杂池和格栅除污机共同组成，如图 2 所示，沉杂池长 20m，宽 6m，高 2m，池底面积约 120m²。疏浚挖泥船将挖掘后的泥浆泵送至消能沉杂池内，泥浆从泵送形式转变为平流的形式，消除了泥浆因泵送产生的冲击能量，同时大块杂质在沉杂池内沉淀，以此来达到消能和沉杂的目的，防止泥浆流过格栅除污机时对其产生冲击损坏。沉杂池出口处设置的宽为 1.7m 的第一级格栅间距为 10mm、第二级格栅间距为 5mm 的回转式格栅除污机，主要用于清除泥浆中的悬浮物和直径大于 5mm 的硬质固体颗粒。由于东湖位于武汉市市中心，湖内生活垃圾和杂质较多，沉杂池内沉积的杂质需采用挖机定期清捞，以确保沉杂池沉积杂质的空间。



图 1 疏浚底泥脱水固化工流程图

优化前除杂系统存在的问题有以下几点。



图 2 条形消能沉杂池平面图

2.1 消能沉杂池形式单一

根据传统的环保疏浚施工工艺，为达到消能和沉杂效果，消能沉杂池一般设计为长条型，占地面积大，对场地要求较高。以武汉东湖水环境提升工程为例，由于场地空间有限，消能沉杂池尺寸设计较小，消能和沉杂效果相对较差，被输送至沉杂池的泥浆及杂质对格栅除污机的冲击能量未能良好的消除。由于大块杂质的冲击，导致格栅除污机受冲击损坏（图 3），杂质直接流入浓缩池，影响工程施工进度和质量。

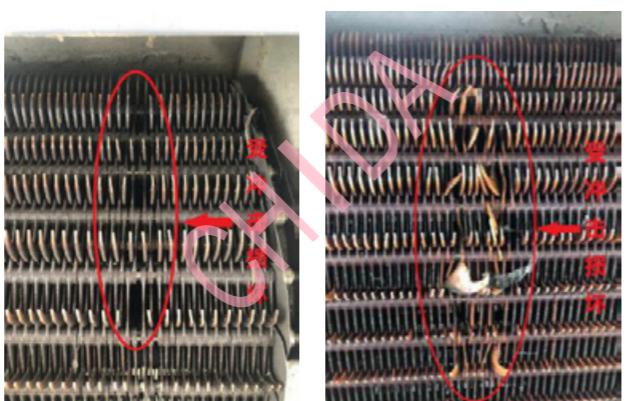


图 3 格栅除污机受损图

2.2 大量底泥在消能沉杂池中淤积

消能沉杂池主要用于消除泥浆因泵送产生的能量，并将其转变为平流的形式以达到消能和沉杂的目的，因此大量的底泥和杂质在消能沉杂池内一并沉淀淤积（图 4）。为不影响格栅机的正常工作，需定期（正常情况每周一次，泥土易堆积时增加频次）对消能沉杂池进行清理。大量底泥的沉淀增加了消能沉杂池的清理频次，由于消能沉杂池清理过程中需要绞吸挖泥船停止作业，并且每次清杂时，需人工使用高压水枪对淤积的底泥和杂质进行冲洗分离，被分离的杂质

才进行能外运处理，所以高频次的清理过程不仅影响了施工的连续性而且增加了消能沉杂池的清理费用。

2.3 消能沉杂池清理效果不佳

本工程消能沉杂池长 20m，宽 6m，高 2m，受消能沉杂池宽度及高度的影响，挖掘机在其外侧进行挖掘清理时（图 5），不仅清理困难、效率较低，而且清理效果不佳。消能沉杂池每次清理完毕后，池内依旧残留不少杂质和垃圾未清理干净，需要人工将其清理干净，耗时长，影响工程施工进度。



图 4 大量底泥和杂质淤积

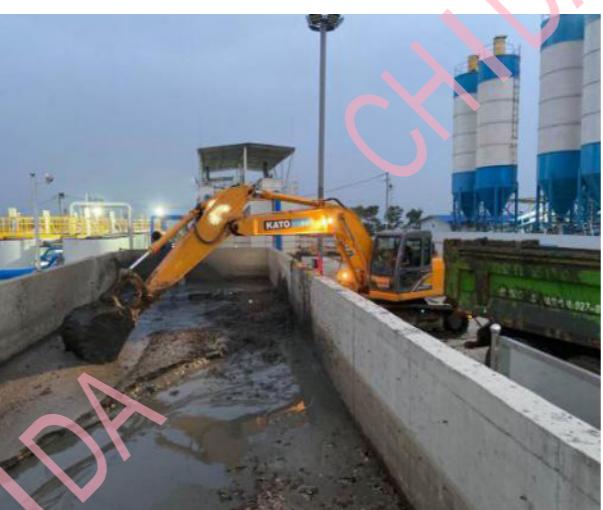


图 5 沉杂池清理

2.4 板框压滤机滤板间滤布滤板被刺破^[1]，发生跑料现象

疏浚底泥脱水固化施工主要采用高压离心泵将均化池内调制好的泥浆输送至高效隔膜板框压滤机内，待板框压滤机内泥浆充盈率达到设计量的 90% 停止进料，并启动压榨系统，通过气压进行压榨深度脱水，直至泥饼含水率合格。实际生产过程中，进入板框压滤机滤板间的泥浆中依然存在不少杂质，由于杂质中含有硬质固体颗粒粒径大于滤板压榨过程中可接受的空间，导致压板无法压紧，甚至刺破滤布滤板，经常发生滤板之间跑料现象（图 6），不仅增加了设备维修成本，且严重影响了泥饼的压榨效果。

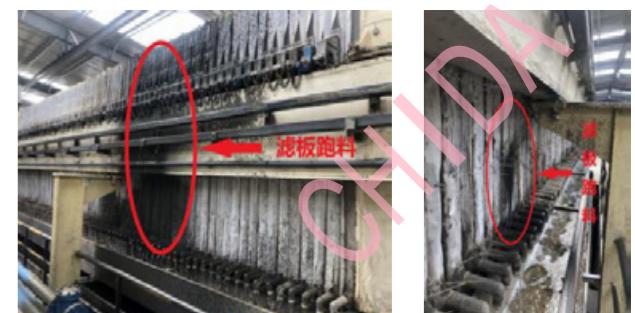


图 6 板框压滤机滤板间跑料

3 除杂系统优化的目的

3.1 优化的目的

除杂系统优化的主要目的有以下三个方面：

- 1) 克服消能沉杂池场地受限问题，增强其消能沉杂效果，避免损坏格栅除污机。
- 2) 减少底泥在消能沉杂池内的淤积，降低对施工的影响和杂质的清理费用。
- 3) 进一步过滤调制好的泥浆，防止杂质损坏板框压滤机滤板和滤布，保证供浆泵和压滤机正常运转。

3.2 消能沉杂池结构优化

根据现场消能和沉杂情况分析，在原有消能沉杂池的基础上进行结构优化（图 7）。首先将格栅通道从右侧中间移至右侧下方位置，并向沉杂池内部延长，与沉杂池最左侧围墙留有 1.7m 的距离，并在该处加设锯齿形活动挡板（图 8），将消能沉杂池分隔为 A、B 两个区域，以此来克服消能沉杂池因场地受限无法达到理想使用面积而未能充分消能的问题。A 区域为初次除杂区域：主要用于泥浆消能和大块杂质沉淀。中间加设的锯齿形活动挡板，主要

用于悬浮物的去除^[2]，也可以根据杂质的沉淀情况，对挡板进行高度调节，加强泥浆过滤除杂的效果，避免了大块杂质损坏格栅除污机。B 区域为二次除杂区域，泥浆从 A 区域经过锯齿形活动挡板溢流至 B 区域，再通过格栅除污机将细小的杂质进行除杂。本设计改变原有平底池底，将 A 区域池底改成坡比为 $i=1:40$ 的斜坡，以便于杂质流向 A 区域右侧并沉淀，B 区域池底改造成坡比为 $i=1:20$ 斜坡，增加 A 区域溢流至 B 区域的泥浆加速流过格栅除污机并流入浓缩池，以防止泥浆在通道内沉淀淤积。

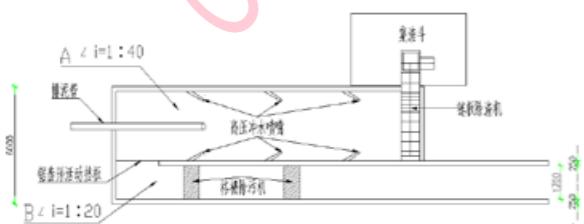


图 7 优化后的消能沉杂池

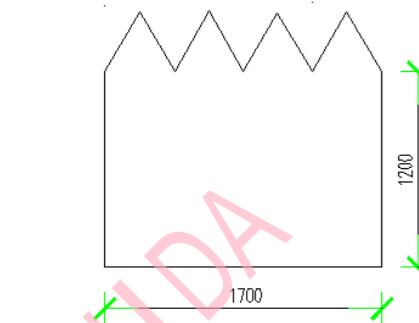


图 8 锯齿形活动挡板

3.3 沉杂池功能优化

为解决沉杂池内淤泥沉淀过多和挖掘机清杂困难问题，现将消能沉杂池做如下优化（图 6）。首先，在 A 区域底部两侧布设两排高压冲水系统，高压冲水水源取自调节池内的上清液（形成闭式循环，不增加尾水处理量）。其次，在 A 区域右侧加装一台链板除杂机，在其外侧放置可移动式集杂斗（图 9）。高压冲水对底部沉积的底泥和杂质混合物进行冲刷、稀释，使底泥和杂质在冲刷下分离的同时将杂质冲入链板除杂机，杂质再通过链板除杂机自动清杂至集杂斗，集杂斗盛满时可以及时运走处理。

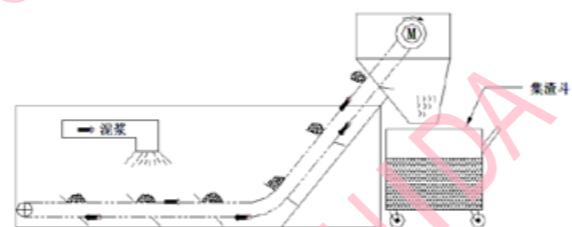


图 9 链板除杂机工作原理图

3.4 搅拌机出口处加设格栅机

本工程原脱水固化施工工艺中只有消能沉杂池一个除杂环节，然而即使消能沉杂池能完全过滤所有的杂质，但在脱水固化环节中依旧存在杂质的风险。首先，因为泥浆需先经消能沉杂池除杂后进入浓缩池沉淀浓缩，再由供浆设备二次挖掘并输送至搅拌机加入固化剂均匀搅拌后进入均化池，最后通过高压离心泵输送至板框压滤机内进行脱水固化。如果供浆设备操作不当，超挖扰动浓缩池底部的原状土。原状土内的杂质将导致泥浆发生二次污染。其次，在施工过程中对固化剂取样检验时发现，固化剂中含有小颗粒杂质存在。现根据工程实际情况，为避免消能沉杂池除杂不净、供浆设备超挖带来的二次污染以及加药过程中固化剂中含有杂质，本设计优化方案在搅拌机出口至均化池入口中间加设一道格栅间距为 5mm 的格栅除污机进行二次除杂（图 10），以确保所有进入板框压滤机的泥浆中无粒径大于滤板压榨过程中可接受的硬质固体存在，保证板框压滤机施工运转正常。

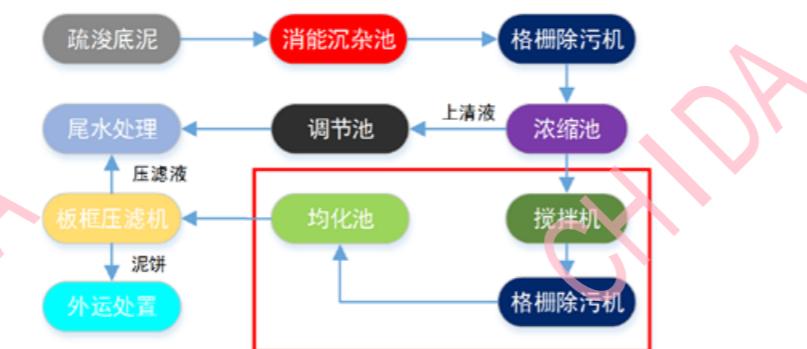


图 10 搅拌机出口处加设格栅除污机

4 除杂环节优化前后的效益分析

通过除杂池结构、功能优化和搅拌机出口加设格栅除污机后，使整个脱水固化工艺流程除杂系统得到了进一步

的提升，降低了除杂池的清杂和板框压滤机的维修费用。

4.1 除杂池清杂费用

优化前：2020 年 4-5 月，除杂池共清杂 8 次，每次清杂需要 1 台挖掘机进行清理，耗时约 6h，需 3 名工人进行协助。以挖掘机每小时 200 元，人工费每小时 40 元进行计算，合计产生清杂费用为 $(200 \times 1 \times 6 + 40 \times 3 \times 6) \times 8 = 15360$ 元，清杂耗时 $6 \times 8 = 48$ h。因此平均每月产生清杂费用 $15360 \div 2 = 7680$ 元，每月清杂耗时约 $48 \div 2 = 24$ h。

优化后：通过加设高压冲水系统和链板除杂机，使除杂池具备自动冲洗和清杂功能，节省了清杂所产生的台班费用和人工清理费用，清杂费用每月可节省 7680 元。由于绞吸船在湖内施工，工况条件较好，绞吸船效率可达 $300\text{m}^3/\text{h}$ ，每月可增加产能约 $300 \times 24 = 7200\text{m}^3$ ，绞吸船时间利用率可提高 $24 \div (24 \times 30) \approx 3.3\%$ 。

4.2 压滤机维修费用

东湖水环境提升工程共投入使用 10 台 HMZGF600/2000-U 型板框压滤机，每台板框压滤机含滤板 85 块，滤布 85 套。

优化前：2020 年 4-5 月，因破损而更换的滤板共计 24 块，滤布 78 套，滤板每次更换耗时约 2h，滤布每次更换耗时约 0.5h，以每块滤板 5500 元，滤布 250 元 / 套，合计产生压滤机维修费用 $5500 \times 24 + 250 \times 78 = 150750$ 元，累计修理耗时 $24 \times 2 + 78 \times 0.5 = 87$ h，平均每月产生压滤机维修费用为 $150750 \div 2 = 75375$ 元，平均每月修理耗时约 43.5h。

优化后：通过对泥浆的二次过滤，保证进入板框压滤机中的泥浆无杂质存在，避免了板框压滤机滤板和滤布损

坏的风险，每月可节省板框压滤机维修费用 75375 元。板框压滤机效率以每小时 9m^3 进行计算，每月可增加产能约 $43.5 \times 9 = 391.5\text{m}^3$ 。

武汉市东湖水环境提升一期工程工期为 10 个月，除杂池的清杂费用和板框压滤机的维修费用可节省 $(7680 + 75375) \times 10 \approx 84$ 万元，节省清杂时间 $24 \times 10 = 240$ h，修理时间 $43.5 \times 10 = 435$ h。而整个除杂系统的除杂池结构、功能优化和搅拌机出口加设格栅除污机所需投资费用约 20 万元。故该优化方案可使绞吸船时间利用提高约 3.3%，也可避免因杂质对板框压滤机造成损坏，确保了工期，并且可以为武汉市东湖水环境提升工程节省约 64 万元。

5 结束语

结合武汉市东湖水环境提升工程，对脱水固化施工过程中的除杂系统进行研究与分析，提出对沉杂池的结构和功能进行优化和搅拌机出口处加设格栅除污机的方案，可提高绞吸船的施工效率、脱水固化过程中除杂的效果和降低板框压滤机滤板、滤布损坏的风险。通过分析计算，该优化方案可提高绞吸船时间利用 3.3%，也可避免因杂质对板框压滤机造成损坏，节约成本约 64 万元，为工程带来了显著效益。

参考文献：

- [1] 闫果. 板框压滤机运行中常见故障与应对措施研究 [J]. 中国管理信息化, 2016, 19(12):127.
- [2] 杨丽丽. 基于 CFD 的平流式二沉池三维数值模拟 [D]. 天津: 天津大学, 2007.

王展
中交（三沙）开发建设有限公司
Wang Zhan
CCCC (Sansha) Development Construction Co., Ltd.



绞吸船在超设计挖深作业时设备安全校核 Equipment Safety Check of Cutter Suction Dredger During Over Design Excavation

摘要：本文以8527型绞吸船为研究对象，基于桥架极限下方角度分析，在不改变船舶主体结构下，提出了船舶改进方案，将船舶极限挖深由设计挖深27m加深至29m。通过对船舶钢桩的安全校核，确保了船舶在超设计挖深状态下安全施工，有效提高了船舶施工能力。

关键词：绞吸船；超设计挖深；安全校核

Abstract

In this paper take 8527 cutter suction dredger as the research object, based on the analysis of the angle under the bridge limit, without changing the main structure of the ship, puts forward the ship improvement scheme, which deepens the ship's ultimate excavation depth from 27m to 29m. Through the safety check of spud, ensure the safety of ship in the state of over design excavation, and improve the construction efficiency.

Key words: cutter suction dredger, over design depth, safety check

引言

随着我国海运事业的不断发展和海外工程建设的不断拓展，对大型绞吸船的挖掘深度和工程质量提出了更高的要求，特别是深水航道疏浚和特定区域超深取土作业，对大型绞吸船设备性能和施工安全提出了更高的要求。当前相关港口与海洋工程的疏浚深度已接近或超过公司8527型绞吸船的设计最大挖掘深度。受船舶结构、设备性能限制，本文通过一系列安全校核在最大程度上提高大型绞吸船在极限挖深工况下的适应性，能较好地满足相关深水工程建设需求，有效提高公司在港口与海洋深水工程建设市场的核心竞争力。

1 根据桥架吊升装置结构与起桥钢缆吊升几何要求，研究桥架极限下放角度

根据8527型绞吸船桥架固定与悬吊结构特点，当桥架下放时，桥架是以耳轴为中心垂直向下转动，起桥钢缆在水平方向上逐渐向船艉方向倾斜，逐渐靠近桥架吊升装置横梁，若桥架继续下放，起桥钢缆将与桥架吊升装置横梁相接触，限制了桥架下放角度，见图1所示。

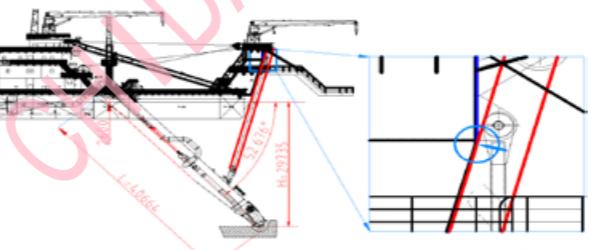


图1 桥架吊升装置与起桥钢缆相接触

因此，需根据起桥钢缆与桥架吊升装置最小安全距离确定桥架最大下放角度。根据现场试验，以起桥钢缆与桥架吊升装置相切的距离为0.2m时，计算桥架最大下放角度，可满足船舶在各种工况施工条件下，桥架升降时的起桥钢缆安全要求，有关桥架最大下放角度计算原理见图2所示。

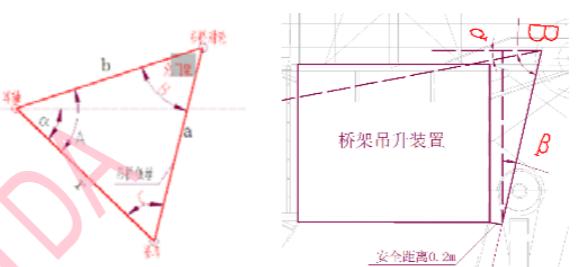


图2 桥架最大下放角度计算原理

有关桥架最大下放角度计算公式如下：

$$\begin{aligned} B &= 90^\circ - \beta - \rho \\ C &= \sin^{-1}\left(\frac{a}{r} \sin B\right) \\ A &= 180^\circ - B - C \\ \alpha_{max} &= 180^\circ - B - C - \rho = 90^\circ + \beta - \sin^{-1}\left(\frac{a}{r} \sin B\right) \end{aligned} \quad (1)$$

式中符号见图2所示：A、B、C—为桥架耳轴、桥架吊升装置上滑轮组和下滑轮组所组成的三角形内角（°）；a、b、r—为所组成的三角形边长（m）；β—起桥钢缆与桥架吊升装置最近安全距离为0.2m时，起桥钢缆与垂直方向之间的夹角（°）；ρ—耳轴与桥架吊升装置上滑轮组中心连线与水平方向夹角（°）；α_{max}—桥架最大下放角度（°）；

以8527型绞吸船为例，桥架耳轴、桥架吊升装置上滑轮组和下滑轮组所组成的三角形内角B为66.37°，起桥钢缆与垂直方向之间的夹角β为12.76°，桥架吊升装置上滑轮组和下滑轮组之间距离a为30.06m，桥架耳轴至桥架吊升装置下滑轮组距离r为29.09m。将以上数值代入公式1可计算出桥架最大下放角度。最大下放角度为52.67°。

根据已确定的桥架最大下放角度及船体设计几何参数计算最大挖掘深度，见公式2：

$$H_{max} = L \sin \alpha_{max} - e \quad (2)$$

式中：H_{max}—最极限挖深（m）；L—桥架长度（m）；α_{max}—桥架与水平面之间最大下放角度（52.67°）；e—耳轴中心距水面的高度（m）。

在设计吃水3.6m状态下，桥架耳轴中心距水平面高度e为2.6m，桥架长度L为40.66m，由公式2可计算出桥架最大下放深度为29.73m，超过设计挖深27m。

2 分析桥架最大角度下耳轴处管路限制，研究改进布置方案

2.1 耳轴处管路限制

绞吸船在桥架下放过程中，随着桥架下放角度的增大，船体与桥架之间相连接的各类管路逐渐被拉直。如图3所示，通过现场试验，当桥架下放角度至51°时，液压软管等管路已处于绷直状态，限制了桥架进一步下放，根据公式2，此时桥架下放深度为29.0m，未达到最大值。因此，

桥架与船体之间连接管路长度亦成为限制桥架最大下放角度的主要因素之一。



图 3 桥架耳轴处管线拉直情况

2.2 桥架最大下放角度时耳轴处管路长度计算

根据桥架与船体管路接口位置参数，结合桥架下放角度，可计算出不同桥架下放角度时所需的各类管路长度。以桥架最大下放角度时所需的管路长度为准，按一定富余量配置各类管路长度，即可满足船舶极限挖深挖掘施工要求。以液压软管为例，有关桥架最大下放角度时所需软管长度计算示意图见图 4 所示。

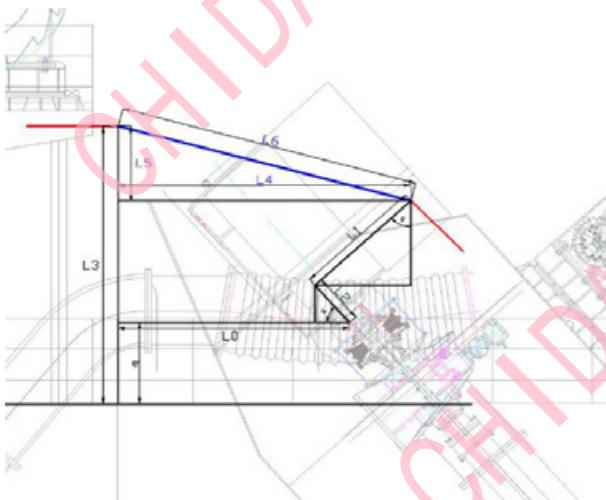


图 4 所需软管长度计算示意图

图 4 中， L_6 为计算所需的软管长度， L_4 为软管水平投影长度， L_5 为软管垂直投影长度； L_0 为耳轴距船体软管接

口水平投影长度， L_1 为桥架软管接口垂直于桥架方向距耳轴距离， L_2 为桥架软管接口沿桥架方向距耳轴距离， L_3 为船体软管接口距甲板高度， e 为耳轴距甲板高度， α 为桥架下放角度， L_0 、 L_1 、 L_2 、 L_3 、 e 、 α 均由测量可得。

根据图 4 所示几何关系，可分别计算出 L_4 、 L_5 ，进而计算出 L_6 ，计算过程如下：

$$\begin{aligned} L_4 &= L_0 + L_1 \times \sin \alpha - L_2 \times \cos \alpha \quad (\text{m}) \\ L_5 &= L_3 - e - L_1 \times \cos \alpha - L_2 \times \sin \alpha \quad (\text{m}) \\ L_6 &= \sqrt{L_4^2 + L_5^2} \quad (\text{m}) \\ &= \sqrt{(L_0 + L_1 \times \sin \alpha - L_2 \times \cos \alpha)^2 + (L_3 - e - L_1 \times \cos \alpha - L_2 \times \sin \alpha)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

根据公式 3，代入桥架最大下放角，即可计算出桥架最大下放角度时所需的理论液压软管长度；为了确保施工安全，按理论所需最大软管长度乘以安全系数 1.1 倍配置软管，即可满足船舶极限挖深挖掘施工要求，为 4.50m。

通过上述方法，可分别计算出桥架与船体之间各条管路所需的管线长度，通过按计算的长度配置各条软管，可解决软管长度不足限制桥架下放的问题，为大型绞吸船极限挖深挖掘施工创造了条件。

3 极限挖深施工状态下的钢桩受力状态

绞吸船在施工时，定位钢桩主要受三个力作用，分别为钢桩自身重力、钢桩套筒施加于钢桩的水平作用力和泥土施加于钢桩的支持力，其中钢桩自身重力与泥土施加于钢桩的垂直分力相平衡且不受挖深改变的影响，挖深改变后主要影响套筒施加的水平力和泥土施加的水平分力，从而影响钢桩稳定性和安全性。

插入泥土的定位钢桩可简化为一端固定的直杆，钢桩受力模型可简化为垂直固定于泥层的直杆受一水平力作用并保持稳定，杆身在水平力 N 作用下产生力矩，由水平力作用点向下方逐渐增加，至下方固定端达到最大。

钢桩在受力状态时，其安全性主要受桩身所受力矩影响，桩身所受力矩最大部位为钢桩薄弱点，即位于泥面的钢桩截面位置；同时，钢桩结构有孔洞的力矩作用部位也为钢桩薄弱点，即最低安全插销孔所在截面位置。因此，主要从这两截面位置验算钢桩受力情况。

以 8527 型轮为例，验算挖深分别为 17m、27m、29m 时的钢桩受力情况，在不同挖深下，钢桩最低安全插销孔和位于泥面截面部位所对应的力臂见图 5 和表 1 所示。

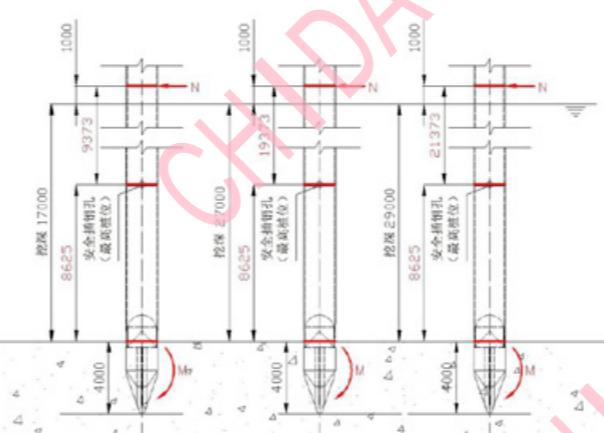


图 5 钢桩最低安全插销孔与位于泥面截面部位的力臂

表 1 挖深为 17m、27m、29m 时钢桩最低安全插销孔与泥面部位的力臂

挖深	17m	27m	29m
最低安全插销孔	9.37m	19.37m	21.37m
泥面部位	18.00m	28.00m	30m

力矩为 $M=D \times F$ ，在受力相同时力矩与力臂成正比，因此在极限挖深状态下施工钢桩受到更大的力矩，面临更大的安全风险，在极限挖深施工前必须对钢桩进行受力计算分析。

定位钢桩在外载荷作用下的受力分析，为分析最恶劣工况，计算过程中假定风、浪、流同向。大型绞吸船在正常施工时，挖槽方向与风、浪、流方向平行，以降低船体正对风、浪、流的面积，减小风、浪、流对船体的作用力^[1]。因此，选择环境载荷沿船长方向对钢桩进行受力分析，此时环境载荷全部传递至钢桩。

以 8527 型轮为例进行定位钢桩受力分析，根据全船技术规格书^[2]，该轮在挖深为 27m 时作业自然环境条件为：最大风速蒲式 7 级，最大潮流速度 2.0m/s，最大波高 1.5m。为确保钢桩在 29m 极限挖深施工时受力满足安全要求，按潮流速度较小的半封闭海域工况进行极限挖深施工钢桩受力验算，取：最大风速蒲式 6 级，最大潮流速度 0.5m/s，最大波高 1.0m。

3.1 风载荷计算

8527 型轮主要船体尺寸为：总长 104.8m，船体长

82.6m，型宽 18.2m，型深 5.2m，设计吃水 3.6m，最极限挖深时吃水 4.04m。

当风向与船长方向一致时，8527 型轮船体的受风面积为：

$$S_x = 18.2 \times (5.2 - 4.04) + 14 \times 12 = 189.11(m^2)$$

查风力等级标准（蒲福风级表）可知，6 级风的风速为 $10.8 \sim 13.9m/s$ ，取平均 $V=12.3m/s$ ，风压 $q=0.613 \times 10^{-3} \times 12.3^2=0.0927(kPa)$ 。取形状系数 $C=1.0$ ， $\alpha=90^\circ$ 。得风荷载为： $F=CqS \sin \alpha=1.0 \times 0.0927 \times 189.11 \times \sin 90^\circ = 17.54(kN)$ 。

3.2 波浪荷载

按波浪沿船长方向，最大波高 1.0m 计算，得波浪荷载为：

$$F_{xwave} = \frac{34.91}{2200} \beta h^2 = 0.289(kN)$$

3.3 流荷载

根据船体尺寸和极限挖深下船体吃水深度，在最大潮流速为 0.5m/s 情况下，船舶受到的流荷载为：

$$\begin{aligned} F_{xflow} &= 0.5\rho V^2 \times 1.2Aw Cx = 0.5 \times 1.025 \times 0.5^2 \times 1.2 \times 18.2 \times 4.04 \times 1.4 \\ &= 15.83(kN) \end{aligned}$$

3.4 横移钢缆拉力荷载

8527 型轮横移钢缆额定拉力为 600kN，按额定拉力的 50% 进行横移钢缆拉力沿船体轴线的分力 1，即钢桩所受最大横移钢缆拉力：

$$F=600 \times 50\% \times \sin 45^\circ = 212.1kN$$

3.5 钢桩有限元应力分析

将风、浪、流和横移钢缆拉力施加于钢桩受力区域，计算钢桩的强度以及刚度，通过有限元计算分析方法对钢桩进行强度校核分析。

采用扫略型网格划分方式建立有限元模型。将环境载荷、绞刀传递的外载荷加载至钢桩受力区，钢桩与海底接触区采取弹性支撑约束，由于土质的不同，弹性系数亦不同，此处选取基床系数 K 为 $5 \times 10^4 kN/m^3$ ，将外载荷施加至钢桩上^[3]，分别计算其在外载荷作用下钢桩的整体变形和应力值。

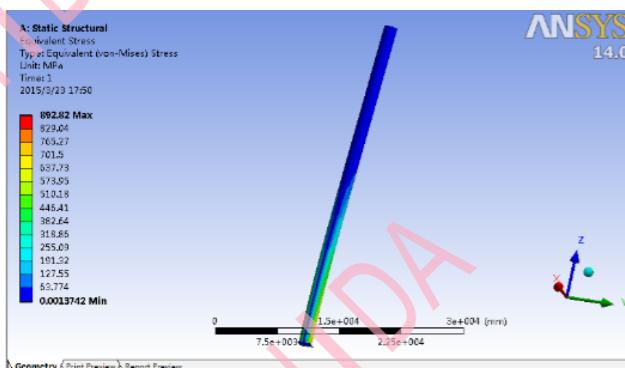


图 6 钢桩受载荷应力图

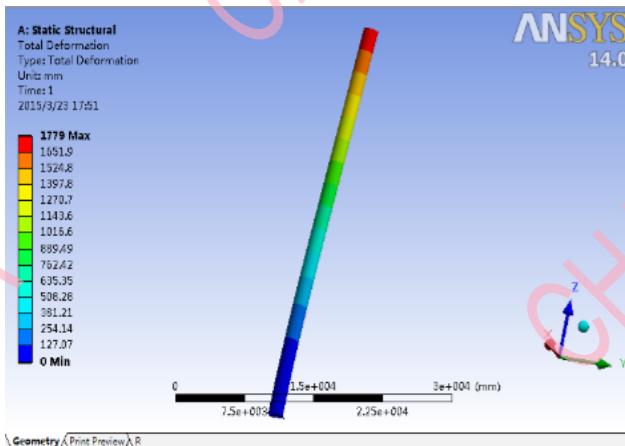


图 7 钢桩受载荷形变图

经计算,钢桩在指定的施工作业工况下,桩体内最大应力为 116.3MPa(图 6),最大形变为 145.7mm(图 7)。8527 型轮钢桩材质为 AH32 钢,最大限制应力为

320MPa,远高于 116.3MPa,因此,可认为在极限挖深施工时,按照给定的施工作业工况,钢桩的强度与刚度均满足安全要求。

4 结论

本文根据大型绞吸船桥架固定与悬吊结构特点,研究了桥架吊升装置横梁与起桥钢缆相对位置和桥架下放角度之间的关系,采用平面几何分析计算方法确定了起桥钢缆与桥架吊升装置横梁之间的距离为最小安全值时的桥架最大下放角度,实现了满足船舶结构安全的绞刀最大下放深度。同时,根据桥架下放过程中耳轴处各类管路的拉伸情况,分析了桥架耳轴处管路对桥架下放角度的限制,并根据桥架最大下放角度和管路布置参数建立了满足安全要求的各类管路所需长度的计算公式,确定了管路布设改进方案,消除了限制船舶大挖深施工的结构因素。将 8527 型挖泥船挖深有效增深至 29m,实现了大型绞吸船在超设计挖深工程施工项目中安全、高效施工的目的。

参考文献:

- [1] 王国锋. 绞吸挖泥船抗风能力研究 [J]. 水运工程, 2017(8):24-27.
- [2] 上海航道局. 船舶性能表.
- [3] 胡京招, 钱胜君, 张崇明, 等. 3500 m³/h 系列绞吸式挖泥船定位钢桩强度分析及改造 [J]. 中国港湾建设, 2016(12).

作者简介:

王展,男,中交(三沙)开发建设有限公司,副经理。

江振飞¹, 杨仁辉²

中交华南勘察测绘科技有限公司

Jiang Zhenfei¹, Yang Renhui²

CCCC Southern China Surveying & Mapping Technology Co., Ltd.

无人机航空摄影测量在疏浚吹填工程地形测量中的应用与高程分析

Research on Lightweight of Original Terrain Model in Water Conservancy Dredging BIM Management Platform

摘要: 本次以昌化江下游河口疏浚工程地形测量与近洋码头吹填工程地形测量数据为依托。因两个项目作业流程几乎相同,所以本次重点以昌化江下游河口疏浚工程地形测量为例介绍无人机航空摄影测量在疏浚吹填工程地形测量中的应用,同时对两个项目的高程数据进行分析。对比传统测量规范的高程精度要求,来分析无人机航空摄影测量在地形测量及吹填工程测量中的适用性。

关键词: 航空摄影; 疏浚吹填工程; 地形测量; 传统测量; 高程精度

Abstract

Based on the topographic survey data of the dredging project in the lower reaches of the Changhua river and the dredging project in the Jinyang wharf, we will introduce the application of UAV aerial photogrammetry in the dredging project and the dredging project. Since the two projects have almost the same operation process, the focus is on the topographic survey of the dredging project in the lower reaches of the Changhua river. Compared with the elevation accuracy requirements in the traditional surveying specifications, the elevation data of the two projects are analyzed to evaluate the applicability of UAV aerial photogrammetry in topographic survey and dredge engineering survey.

Key words: aerial photography, dredging and reclamation works, topographic survey, traditional measurement, elevation accuracy

引言

从无人机航空摄影测量应用伊始，对其测量高程精度及环境适用性的争议就不曾间断，而随着无人机硬件的提升和软件技术的不断进步，越来越多的数字化 / 系统化项目开始应用无人机航空摄影测量进行项目的推进。但是其应用精度具体如何，在疏浚吹填工程地形测量中是否可行，我们对此进行简单分析。

1 无人机航空摄影测量系统概述

该项目应用 Phantom 4 RTK 无人机测量系统，该系统由飞行器、遥控装置、云台相机及配套测量系统的 App 组成，可具备高精度测绘功能。

Phantom 4 RTK 飞行器标配机载 D-RTK，配合网络 RTK 服务或 DJI D-RTK 2 高精度 GNSS 移动站使用，可实现厘米级测量和高精度的定位。同时支持原始卫星观测值及曝光事件数据记录，可用于动态后处理 (PPK) 差分解算。

用户可根据实际测量需求选择摄影测量、航点飞行、航带飞行、仿地飞行、大区分割等测绘作业类型，另外用户可以通过直接在地图上规划或导入 KML/KMZ 格式文件的方式进行摄影测量作业，使用 Phantom 4 RTK 测绘所得的图像数据生成的图像可进行高精度地图的合成。Phantom 4 RTK 无人机如下图 1 所示。



图 1 PHANTOM 4 RTK 无人机

2 实例应用

2.1 工程概述

该工程位于昌化江下游地区，昌化江是海南岛的第二大河，在乐东县转向西北，最后从东方市穿过昌江县的昌化港西流入南海，在入海口冲出一个广阔的喇叭口。在昌

化江下游河段约 2.5km^2 的区域进行地形测量，因河口冲刷原因，该地区地势较为平坦，多为草地、湖泊等地物；主要对两个临时堆沙区及沿河范围附近地物覆盖的区域进行地形地物测量，具体施工测量范围见图 2。



图 2 施工测量范围图

2.2 外业实施

2.2.1 测图基准

本项目平面坐标采用当地平面坐标，高程采用 1985 国家高程基准。测区中央子午线为东经 109° ，比例尺为 1:1000。

2.2.2 像控点的布设与采集

无人机外业飞行测量之前，根据测区的地形位置及现场条件，约每 400m 布设 1 个像控点；像控点采用打印“L 字形”型图案，并在旁边添加编号，此外还对控制点的细部及周围环境进行拍照，以方便后期处理时的内业刺点；像控点测量采用 RTK 进行数据采集，获取像控点的平面坐标和高程并在这个过程中进行点之记信息的记录。此次测量把像控点均匀的分布在整个测区，共布设 16 个像控点。

2.2.3 航摄条件及参数配置

本项目在选择起降场地时，按照技术要求，保持四周空旷，起降空域内无高楼、高架桥、电力线路、通讯线路等障碍物；起降场地尽量选用平坦的草丛或者草地，保证无人机降落过程中的设备安全。对无人机进行校准，合格后进入飞行状态。

根据对应的精度要求，本项目无人机外业测量采用的飞行参数如下：

航空照相机：8.8mm / 24mm (35mm 格式等效)；

飞行高度：80-100m；

航向重叠：80%；

旁向重叠：75%；

旋偏角：不大于 8° 。

结合计划飞行区域的位置、面积、距离等条件，单架次的飞行时间控制在 15-25 分钟，以保证无人机在整个测量过程中，其电池的剩余电量始终处于安全范围内。本项目无人机摄影测量共实施测量 16 个航次。

2.2.4 外业补充测量

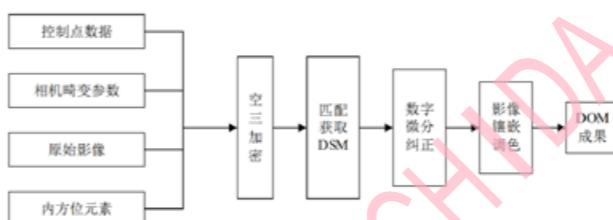
河道沿岸的地形测量，采用无人机航空摄影测量和网络 RTK 相结合的测量方法。无人机测量无法覆盖或者有遮挡的区域，采用 GPS-RTK 点采集的方法进行补测。

2.3 内业处理

2.3.1 航空影像处理

将航摄获取的影像进行预处理，具体包括影像解压缩、相片畸变校正、图像增强等工序。经过预处理的相片对比度增强，更加清晰，为后续的空三加密工作提供了高质量的数据。利用 PIX4D 软件进行空三加密，刺点误差不大于三个像素，在经过微调处理后，最终生成点云数据和正射影像，具体流程如图 3。

图 3 航空影像处理流程图



2.3.2 平面线画图

利用 PIX4D 可以自动生成 DSM，但是其自动生成的产品会因为地形地物不规则的影像造成线画图较凌乱，对于项目实施情况来讲，根据 DOM 影像绘制线画图会更方便。因此平面线画图，在南方 CASS 软件中进行绘制。将航空摄影测量数据处理得到的 DOM 影像数据导入 CASS 软件中，然后根据地形地类目标，绘制对应的地物。测定面状地物的要求图形连续封闭，线状地物要求线段连续，独立符号要求定位点准确。其绘图见下图 4 线画图绘制。

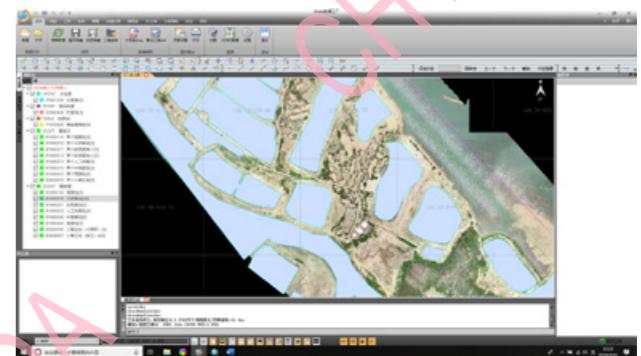


图 4 线画图绘制

2.3.3 高程点采集

高程点采集，利用清华山维 EPS 立体测图软件。在软件中将 DOM 影像和 DSM 点云数据融合生成三维立体模型，然后在三维立体模型中提取高程点信息，见图 5 高程点数据采集，最后输出为 DWG 格式的电子文件。

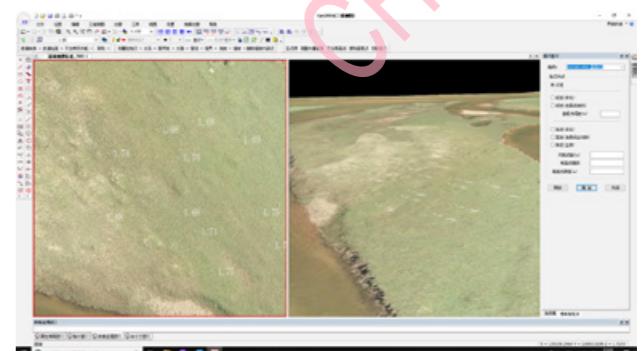


图 5 高程点数据采集

2.4 成果

通过 PIX4D 软件进行内业处理，生成点云数据和正射影像图，利用 CASS 绘制地物特征和线画图，最后利用清华山维 EPS 提取地形高程信息，生成最终成果，如下图 6 局部成果所示。



图 6 局部成果

3 高程精度分析

通过以往实践作业分析发现无人机航空摄影系统在平面上的精度具有较高的可靠性，在高程上精度较传统测量具有一定的差距，所以此次仅针对疏浚吹填项目地形测量的高程作出分析。

3.1 昌化江下游河口疏浚工程地形测量数据

此次地形测量采用航空摄影系统 Phantom 4 RTK 和网络 RTK 联合施测，对航摄成果进行了内业检查和实地对照检查。用 GPS-RTK 对部分地形地貌点进行抽样检查，共随机抽样测量 30 个地形地貌特征点的高程进行比对。具体见表 1 昌化江下游河口疏浚工程地形点高程对比表。

表 1 昌化江下游河口疏浚工程地形点高程对比表

序号	实测纵坐标 X (m)	实测横坐标 Y (m)	实测高程 (m)	影像高程 (m)	Δh
01	XXXX 4.477	XXXXX 8.824	3.472	3.562	-0.090
02	XXXX 3.815	XXXXX 2.774	3.523	3.535	-0.012
03	XXXX 9.906	XXXXX 9.570	4.568	4.503	0.065
04	XXXX 6.434	XXXXX 6.249	4.505	4.604	-0.099
05	XXXX 2.321	XXXXX 7.243	4.422	4.448	-0.026
06	XXXX 5.443	XXXXX 7.708	3.588	3.684	-0.096
07	XXXX 3.667	XXXXX 4.240	1.621	1.660	-0.039
08	XXXX 1.241	XXXXX 7.675	1.694	1.732	-0.038
09	XXXX 4.680	XXXXX 4.230	2.299	2.384	-0.085
10	XXXX 7.754	XXXXX 7.058	2.311	2.257	0.054
11	XXXX 1.784	XXXXX 3.475	2.414	2.425	-0.011
12	XXXX 6.531	XXXXX 8.297	1.933	1.859	0.074
13	XXXX 0.212	XXXXX 9.637	1.843	1.933	-0.090
14	XXXX 2.275	XXXXX 4.579	2.270	2.252	0.018
15	XXXX 9.984	XXXXX 0.288	2.123	2.171	-0.048
16	XXXX 0.964	XXXXX 4.179	3.680	3.618	0.062
17	XXXX 7.244	XXXXX 9.124	3.677	3.763	-0.086

18	XXXX 9.769	XXXXX 0.836	3.429	3.502	-0.073
19	XXXX 6.509	XXXXX 0.972	2.787	2.843	-0.056
20	XXXX 4.381	XXXXX 9.465	2.549	2.451	0.098
21	XXXX 8.928	XXXXX 1.197	2.527	2.606	-0.079
22	XXXX 3.926	XXXXX 5.440	2.700	2.703	-0.003
23	XXXX 2.739	XXXXX 0.786	0.219	0.309	-0.090
24	XXXX 2.434	XXXXX 8.699	0.389	0.428	-0.039
25	XXXX 0.927	XXXXX 3.744	3.870	3.968	-0.098
26	XXXX 1.967	XXXXX 4.255	4.642	4.546	0.096
27	XXXX 4.941	XXXXX 4.283	4.779	4.850	-0.071
28	XXXX 9.274	XXXXX 2.054	2.814	2.715	0.099
29	XXXX 7.522	XXXXX 7.364	2.647	2.719	-0.072
30	XXXX 3.713	XXXXX 0.035	2.509	2.596	-0.087

根据加密点中误差计算公式

$$m_h = \pm \sqrt{\frac{[\Delta h]}{n}} \quad (1)$$

式中： m_h ——高程中误差，单位为米 (m)；

Δ ——高程的互差，单位为米 (m)；

n ——取样高程点的数量。

由以上公式得出 $m_h = \pm 0.071$ m。

3.2 近洋码头吹填工程地形测量数据

近洋码头吹填工程地形测量区域较平坦，共随机抽样测量 30 个地形地貌特征点的高程进行比对，详见表 2 近洋码头吹填工程地形点高程对比表。

表 2 近洋码头吹填工程地形点高程对比表

序号	实测纵坐标 X (m)	实测横坐标 Y (m)	实测高程 (m)	影像高程 (m)	Δh
01	XXXXXX 8.013	XXXXX 1.446	3.491	3.440	0.051
02	XXXXXX 3.011	XXXXX 4.489	3.045	3.077	-0.032
03	XXXXXX 5.226	XXXXX 1.564	3.292	3.266	0.026
04	XXXXXX 8.456	XXXXX 6.758	3.201	3.168	0.033

05	XXXXXX 2.519	XXXXX 9.870	3.483	3.517	-0.034
06	XXXXXX 1.448	XXXXX 9.356	3.187	3.223	-0.036
07	XXXXXX 2.265	XXXXX 3.745	3.448	3.489	-0.041
08	XXXXXX 0.635	XXXXX 3.732	3.246	3.282	-0.036
09	XXXXXX 9.002	XXXXX 6.570	3.285	3.264	0.021
10	XXXXXX 8.312	XXXXX 3.231	2.988	3.011	-0.023
11	XXXXXX 7.231	XXXXX 6.539	3.034	3.067	-0.033
12	XXXXXX 1.315	XXXXX 7.674	2.894	2.872	0.022
13	XXXXXX 7.813	XXXXX 9.217	3.320	3.332	-0.012
14	XXXXXX 2.977	XXXXX 2.489	3.451	3.492	-0.041
15	XXXXXX 0.633	XXXXX 6.489	3.360	3.391	-0.031
16	XXXXXX 6.653	XXXXX 7.489	3.411	3.450	-0.039
17	XXXXXX 6.732	XXXXX 2.489	3.291	3.263	0.028
18	XXXXXX 3.465	XXXXX 1.661	3.253	3.301	-0.048
19	XXXXXX 2.446	XXXXX 5.631	3.314	3.267	0.047
20	XXXXXX 8.568	XXXXX 1.743	3.247	3.279	-0.032
21	XXXXXX 3.234	XXXXX 3.955	3.232	3.277	-0.045
22	XXXXXX 4.538	XXXXX 0.831	3.385	3.427	-0.042
23	XXXXXX 4.533	XXXXX 5.213	3.374	3.407	-0.033
24	XXXXXX 7.456	XXXXX 0.431	3.277	3.290	-0.013
25	XXXXXX 2.983	XXXXX 2.698	3.327	3.401	-0.074
26	XXXXXX 1.534	XXXXX 3.141	3.285	3.304	-0.019
27	XXXXXX 3.524	XXXXX 8.452	3.276	3.298	-0.022
28	XXXXXX 5.643	XXXXX 6.524	3.253	3.284	-0.031
29	XXXXXX 8.005	XXXXX 0.740	3.246	3.313	-0.067
30	XXXXXX 6.726	XXXXX 5.275	3.119	3.132	-0.013

根据式 (1) 加密点中误差计算公式

由以上公式得出加密点中误差为 $m_h = \pm 0.037$ m。

3.3 分析

将 GPS-RTK 所采集的高程点和 DEM 生成的高程点进行比对，比对结果表明，其互差值都是厘米级，高程中误差也是厘米级。

根据地形图航空摄影测量内业规范^[3] 的精度要求，1:500 平地注记点高程中误差不大于 0.2m，山地加密点高程中误差不大于 0.35m；小比例尺地形图要求。通过解算两个项目地物点高程中误差，高程精度满足项目 1:2000 地形测量要求，且实测精度高于项目要求精度，成果可靠。

根据工程测量规范^[5] 的精度要求，数字高程模型格网点的高程中误差为 1/3 基本等高距，1:500 平坦地基本等高距为 0.5m，则其高程中误差上限为 0.166m；工矿区细部坐标点高程中误差在 2cm 内，对比实测高程精度，满足数字高程模型高程精度要求，却难以满足工矿区测量高程精度要求，据此航空摄影测量高程精度距离传统测量高程精度及要求还有一定的距离。

根据水运工程测量规范^[6] 的精度要求，地形测量中用于港口区细部坐标点高程中误差为 ±50mm，用于航道区细部坐标点高程中误差为 ±100mm；吹填施工测量规定吹填区内测量点的高程测量误差不应大于 50mm。对比精度要求及实际高程中误差，在不适用于人工测量的吹填区，做好前期控制测量作业，可尝试采用无人机测量系统进行测量。

对于不同测量规范，其精度要求有所不同。本次航测高程精度成果满足航空摄影测量相关规范要求。若采用水运工程测量规范^[6] 约束无人机航空摄影测量在吹填区测量项目的成果，一方面可在测区适当增加一定数量的像控点，另一方面可通过降低无人机飞行高度这两种方法来进行约束航测，从而达到提高精度的目的。

4 结论

航空摄影测量技术发展越来越快，其技术也越来越成熟，特别是在大比例尺地形测量中，其精度越来越高。但是在现实疏浚吹填应用中，还存在一定的问题，在有较高地物（植物）遮挡时或存在一定深度的水域时都容易对高

程产生一定影响，需要全站仪或者 RTK 进行配合测量，所以航空摄影测量技术还需要进一步的完善，硬件还需进一步提高。相信随着技术的完善，硬件的发展，无人机航空摄影测量的精度会进一步提高，其适用性也会越来越广。

参考文献：

- [1] 城市测量规范 :CJJ/T 8-2011[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
- [2] 1:500 1:1000 1:2000 地形图航空摄影测量外业规
范 :GB/T 7931-2008[S].
- [3] 1:500 1:1000 1:2000 地形图航空摄影测量内业规
范 :GB/T 7930-2008[S].
- [4] 1:500 1:1000 1:2000 地形图航空摄影规范 :GB 6962-
2005[S].
- [5] 工程测量规范 :GB 50026-2007[S].
- [6] 水运工程测量规范 :JTS 131-2012[S]. 北京：人民交通出
版社，2012.

作者简介：

江振飞，男，中交华南勘察测绘科技有限公司，助理工程师。
杨仁辉，男，中交华南勘察测绘科技有限公司，高级工程师。



王晓萌

中交天航滨海环保浚航工程有限公司

Wang Xiaomeng

CCCC TDC Binhai Environmental Channel Dredging Co., Ltd.

关于长江口吹填工程沉降、流失的计量与分析 The Measurement and Analysis of Settlement and Loss for Land Reclamation in the Yangtze River

摘要：目前国內统施工企业都是根据定额或者行业规范对沉降粗略的预估，设置管口间距。所以加强对吹填工程沉降、流失规律的研究对促进吹填工程技术的进步和发展具有非常有意义的作用。本文中所涉及的项目为启东市崇启大桥至三和港长江岸线综合整治工程吹填工程。该工程的工程量计量与泥沙的流失的控制是工程的一大难题；同时工程的吹填土质主要为粉土粉砂，该土质具有粒径小、容易扰动、土质的孔隙比较大，工程前期围埝未完全封闭，管口处的泥浆随着潮水的潮涨潮落容易流失，针对粉土粉砂孔隙比较大的特点，在施工后期泥塘大面积固结过程中可能出现一定程度的沉降，本文根据工程特点结合土力学相关理论，利用 CASS、MATLAB 等软件对数据进行拟合整理，较为科学的对吹填工程沉降、流失量进行估算，总结沉降、流失规律，根据规律采取相应的措施，减少流失，合理预留沉降，提高工程的经济效益。

关键词：土力学；粉土粉砂；孔隙比；工程量计量；经济效益

Abstract

At present, the traditional construction enterprises usually estimate the settlement and set the nozzle distance based on quotas or industry norms. Therefore, it is very important to do the research on the law of the settlement and loss of the dredging project which has a significant role in promoting the progress and development of the dredging and filling technology. The project involved in this article is the comprehensive renovation reclamation work from Qidong Chongqi Bridge to Sanhe Port along the Yangtze River shoreline. The measuring the amount of sediment and loss control is a major problem of the project; at the same time the filling material is mainly silty sand, this kind of soil has a small particle size, easy to be disturbed and the porosity is relatively large. In the early stage of the project, the cofferdam is not completely closed and the mud at the nozzle is easily to lose with the tide. Due to the relatively large void ratio of the soil, the settlement of the soil in the large area during the later stage of construction may be reaching a certain degree. According to the engineering characteristics and the theory of soil mechanics, this paper uses CASS and MATLAB to fit the data, estimates the soil settlement and loss of the project, summarizes the law of settlement and loss and takes corresponding measures according to the law to reduce losses, set aside sedimentation rationally and improve the economic benefits of the project.

Key words: soil mechanics, silty sand, void ratio, engineering quantity calculation, economic benefit

简介

目前随着启东市船舶工业区的建设以及长江岸线资源的开发利用，长江岸线整治工程显得尤为重要，本文主要阐述了如何较为精确的通过船舶疏浚量、泥塘沉降量的计算进而得到吹填流失量，同时通过测图的对比分析找寻泥沙的流失规律，采取相应的对策减少泥沙流失量，提高工程总体的经济效益，加快施工进度。

本项目位于启东市三和港下游 2.2km 至崇启大桥上游 3.6km 的长江口北支北岸处，我项目施工整体工程中的吹填工程部分，吹填形成区域分为形成 1# 区～3# 区共 3 个小围区，围区长度分别为 2352m、5884m 和 4390m，形成陆域总面积 4.09km²，吹填后平均标高要求不低于 1.75m（按国家 85 高程为起算点）。目前吹填 2-2# 区平均标高已基本达到 1.75m，吹填工作接近尾声，仅剩部分区域的补吹工作，工程前期吹填 2-2# 区吹填共投入三条绞吸船施工，围埝仅形成约 4km 左右，处于半敞开状态，吹填土质主要为 7 级土粉土粉砂，其粒径较小，砂土流失较大。



图 1 工程施工地理位置图

2 吹填工程量的计量方法

2.1 船舶采砂工程量以及吹填工程量的计算

以吹填 2-2 区为例进行吹填区砂土沉降、流失量的计算与分析。为减小砂土回淤对测量的影响，工程采用每三天进行一次测量，项目根据每次测图进行相隔三天船舶疏浚工程量的计算。对于吹填区，根据工前和竣工后的两次测图进行吹填总工程量的计算，将疏浚工程量与计算的吹填工程量做差即得到了吹填 2-2 区的沉降、流失工程量的总和。

2.2 吹填区砂土沉降量的计算

2.2.1 地基沉降计算原理：

地基沉降的原理是地基在荷载作用力下，土层发生压缩变形从而引起地基的沉降，吹填前吹填区内主要为稳定的硬土层，故不考虑吹填砂荷载对原始吹填区沉降的影响，同时由于本工程吹填 2 区土质仅为粉土粉砂，故仅分一层进行计算。其中沉降量计算公式如下：

$$S = m \sum_{i=1}^n \frac{e_i - e_{2i} h_i}{1 + e_i} \quad (公式 1) \quad [5]$$

$$e_i = h * cz \quad (公式 2) \quad [5]$$

式子中 S- 地基最终的沉降量 (mm)

n- 压缩层范围的计算分层，根据土层的性质进行合理划分；

e_i - 第 i 土层在平均自重力下的孔隙比

h- 第 i 土层的厚度；

m- 修正系数，根据本地的经验值取 1.2；

cz - 自重应力 (kPa)

2.2.2 计算参数的选定：

根据崇启大桥至三和港长江岸线综合整治工程吹填工程土质勘察资料，土层的物理参数指标见表 1，土层的压缩曲线图见图 2：

表 1 吹填土层物理指标表^[2]

土名	物理性质指标		
	含水率	湿密度 (kg/m ³)	天然孔隙比
粉土粉砂	32.9%	1.85	0.923

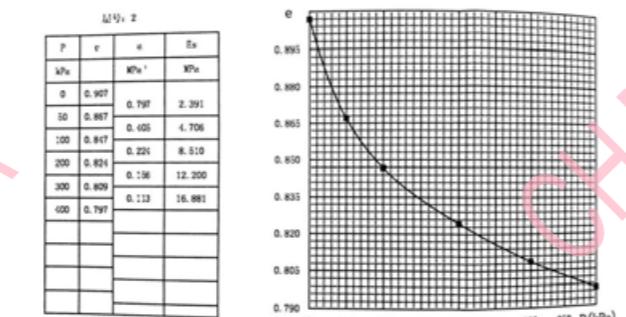


图 2 粉土粉砂压缩曲线图

由土质物理指标可以知道土的天然孔隙比为 0.923，下层在土的自重应力作用下的孔隙比可以根据土的压缩曲

线上得到，该曲线通过 Excel 表格拟合其对应的函数为四次多项式函数时，余项为 0.997，误差极小，其拟合曲线见下图 3：

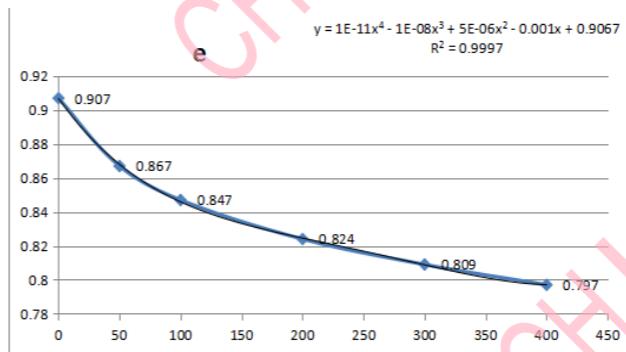


图 3 粉土粉砂拟合压缩曲线图

故孔隙比与压缩力的函数关系式为：

$$e = 10^{-11}P^4 - 10^{-8}P^3 + 5 \times 10^{-6}P^2 - 0.001P + 0.9067 \quad (公式 3)$$

(公式说明：本公式以设计进行的孔隙比压缩试验得到的曲线为依据)

2.2.3 沉降工程量的计算：

通过 Excel 表格将吹填 2-2 区的原始水深图的测量点与吹填顶标高做差值得到 h，将 h 代入公式 2 可以得到每个测量点相应的自重应力 P，将自重应力 P 代入公式 3 可以得到对应的孔隙比 e_2 ，最后将 h、 e_2 同时代入公式 1，即得到了每个测量点对应的沉降量，表 2 为部分点的沉降量计算表格：

表 2 沉降量计算表

X 坐标	Y 坐标	原始水深与吹填顶标高差值 (m)	自重应力 (kPa)	e_2	e_1	沉降量 (m)
3516791.03	363934.69	-4.2	8.1	146.85	0.84	0.92
3516796.16	363943.93	-4.3	8.2	148.67	0.84	0.42
3516800.16	363951.75	-4.2	8.1	146.85	0.84	0.42
3516455.23	364631.18	-2.2	6.1	110.59	0.85	0.92
3516443.31	364627.44	-2	5.9	106.97	0.85	0.29
3516435.31	364626.23	-1.7	5.6	101.53	0.85	0.26
3516427.03	364626.18	-1.3	5.2	94.28	0.85	0.92
3516418.94	364625.5	-1	4.9	88.84	0.85	0.22
3515487.57	366678.26	2.1	1.8	32.63	0.88	0.92
3515488.39	366670.11	1.6	2.3	41.70	0.87	0.07
3515496.53	366652.91	0.6	3.3	59.83	0.86	0.92
3515534.46	366597.81	0.3	3.6	65.27	0.86	0.12
						0.14

以每个点的沉降量作为每个测量点的新水深，做成 dat 文件，再利用南方 CASS 的三角网法按照吹填标高 0m 计算，即算出吹填 2-2 区的沉降工程量，同时可得出吹填流失工程量。吹填 2-2 区沉降工程量计算结果见图 4：

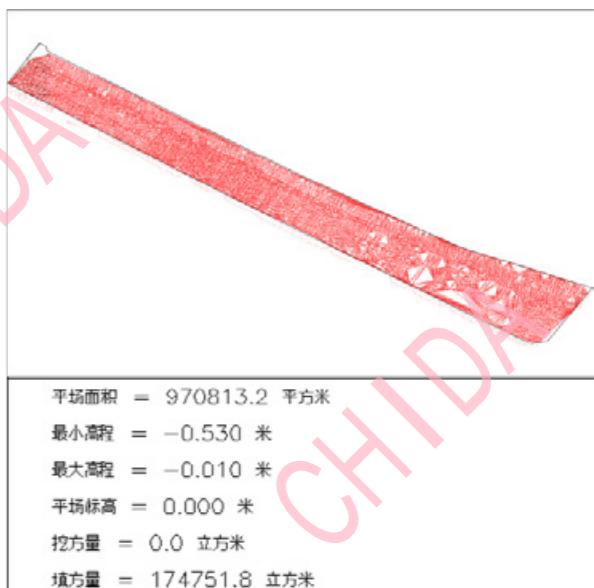


图 4 沉降工程量计算图

3 沉降分析

3.1 沉降观测

3.1.1 沉降盘的布设

按照地质踏勘资料中土质特性、设计要求、以及前期现场实际情况，按照下列原则进行沉降盘的布设。

根据吹填区情况，为便于下沉降盘，需在吹填区形成有效滩面后布设沉降盘，由于工程先完成吹填 2-2 区及吹填 1 区的吹填，同时吹填 2-1 区及吹填 3 区土质与 2-2 区及 1 区土质相近，故工程计划依次在吹填 1 区及 2-2 区分别布设 2 个、3 个。

3.1.2 沉降盘的观测计划

1) 先测出安放前，即将安放处的理论标高。安放沉降盘后，前期计划每隔 3 天进行一次沉降盘顶标高的测量，待沉降速度缓慢，后期每间隔一周进行一次沉降盘顶标高的测量。

2) 数据分析：沉降位移观测后，及时整理观测数据、绘制沉降和位移历时变化曲线上报监理工程师，并对变化

原因、发展趋势做出分析和判断，以指导施工。

3.1.3 分层法计算沉降与三点法计算沉降点的对比分析

根据观测实际数据，利用三点法预测吹填最终沉降，并与分层法计算所得的最终沉降进行对比分析，验证其计算的准确性：

三点法原始计算公式为：

$$U = 1 - \alpha \cdot e^{-\beta t} \quad (\text{公式 4})$$

式子中 U - 地基经过 t 时间的固结度

t - 沉降发生的时间（天）

根据固结度定义可以推导出：

$$S_\infty = \frac{S_3(S_2 - S_1) - S_2(S_3 - S_2)}{(S_2 - S_1) - (S_3 - S_2)} \quad (\text{公式 5})$$

$$S_t = S_\infty(1 - e^{-\beta t}) + S_0 e^{-\beta t} \quad (\text{公式 6})$$

$$\beta = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2} \quad (\text{公式 7})$$

式子中 S_∞ - 地基最终沉降量 (mm)

S_1, S_2, S_3 为 t_1, t_2, t_3 时间分别对应的沉降量 (mm)

S_0 为瞬时沉降 (mm)

沉降点	沉降量 (mm)	时间间隔 (d)	三点法计算最终沉降量 (mm)	分层法计算最终沉降量 (mm)	最终沉降量相对误差
A	240	14	392	410	4.4%
	315	28			
	353	42			
B	206	14	378	390	3.1%
	293	28			
	336	42			
C	182	14	359	370	2.9%
	278	28			
	322	42			

由表格可知，三点法利用沉降观测数据计算的最终沉降与分层法计算的最终沉降误差大约在 3%-4% 之间，验证了分层法计算沉降的准确性较高，可以作为本工程沉降的理论支持。

以沉降观测点 A 点为例，当 $\beta = \frac{8}{\pi^2}$ 带入公式 6 可得出沉降随时间变化的函数为：

$$S_t = 392 - 300 * e^{-0.0486t}$$

利用 MATLAB 绘制沉降时间变化曲线图见图 5：

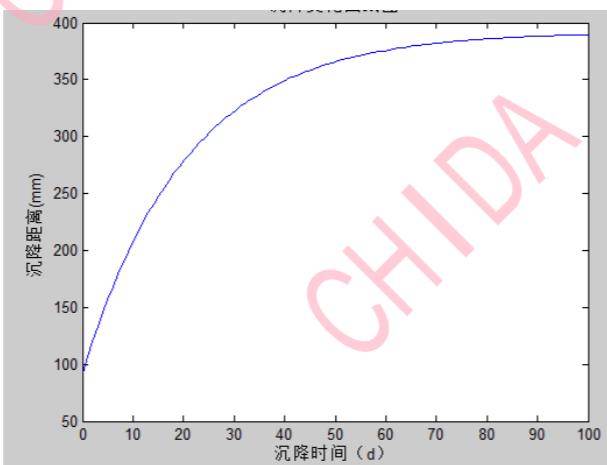


图 5 沉降时间变化曲线图

3.2 根据沉降规律采取的措施：

利用沉降的水深文件，通过 MATLAB 绘制出对应的吹填 2-2 区沉降分布图如图 6：

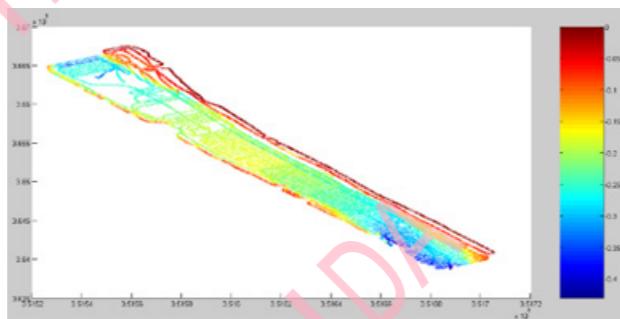


图 6 吹填 2-2 区沉降分布图

由图 6 可知吹填 2-2 区各个部分区域对应的吹填沉降量，为避免泥塘超吹过多，工程依据沉降分布图，将吹填 2-2 区分为三部分，第一部分为图 6 的深蓝色区域，其对应的最终沉降量约为 0.3-0.35m，第二部为图 6 的浅蓝区域，其对应的最终沉降量约为 0.25-0.3m，第三部分为图 6 的红黄色区域，其对应的最终沉降量约为 0.5-0.2m，工程完工即进行验收，验收时沉降较最终沉降少，同时考虑平整度，验收高差尽量不超过 0.15m，故工程将第一部分吹填标高按 2.1m 控制，第二部分吹填标高按 2.05m，第三部分吹填标高按 2.0m 的规律控制吹填 2-2 区的标高，测量人员每 3 天进行巡检观察吹填区标高情况，工程人员根据标高情况及时进行管线延伸以及管口位置的调整，通过上述措施既保证了吹填的质量又减少工程不必要的吹填超吹。

4 砂土流失分析与采取的措施

4.1 流失参考依据

工程分别在 2017 年 9 月 22 日和 2017 年 12 月 4 日为吹填 2 区进行了整体测量，本文根据两次测图通过南方 CASS 绘制等深线从而对泥沙的流失规律展开分析。

4.2 流失分析

图中红色和蓝色线分别为 9 月 22 日测图和 12 月 4 日测图的 3m 等深线，由图蓝色等深线所围区域 1 可知，该部分区域为加深区域，通过对比两次测图，区域 1 在 9 月 22 日测图显示水深大部分在 1-2m 之间，12 月 4 日测图显示水深在 3-3.3m 之间，水深加深约 1.5m 左右。区域 2 为红色等深线与蓝色等深线所围区域，区域 2 在 9 月 22 日测图显示水深在 2.5-2.9m 之间，12 月 4 日测图显示水深在 3-3.1m 之间，相对原来，增加了平均约 0.5m 厚的泥沙。

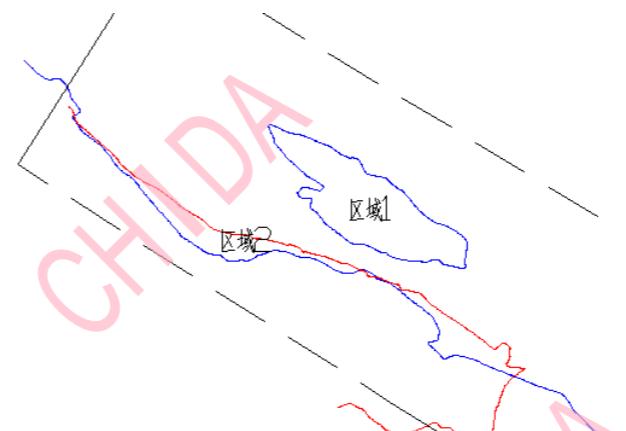


图 7 吹填 2-2 区 3m 等深线图

4.3 采取的措施

4.3.1 与协作单位协商，加快围埝施工：

由测图对比分析，吹填 2-2 区靠南侧，泥沙趋于逐渐增加，吹填 2-2 区靠北侧，水深趋于增加，吹填区内携带泥沙的江水倾向于向 2-2 区北侧流失，其原因为由于管口方向向北，管口处水流冲击力较大，水流趋于流向北侧，吹填区北侧逐渐加深，形成水沟，为减少泥沙流失，工程与协作单位协商，先从北侧开始做敞口处的围埝，从而减小流失。

4.3.2 合理设置两条船之间的吹填管口距离：

提取两条船管口之间的水深文件，分析两管口之间的水深，要第一个管口至两管口之间水深最大点之间的水深点，利用 MATLAB 拟合出该区间水深与管口之间距离的函数关系式，其函数关系式见图 8，函数曲线图见图 9：

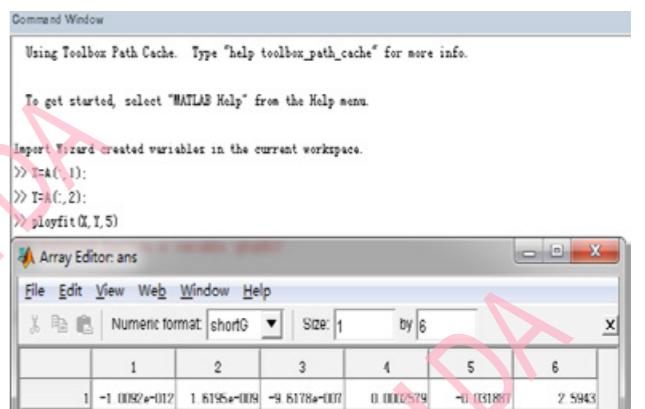


图 8 水深与管口距离函数关系式

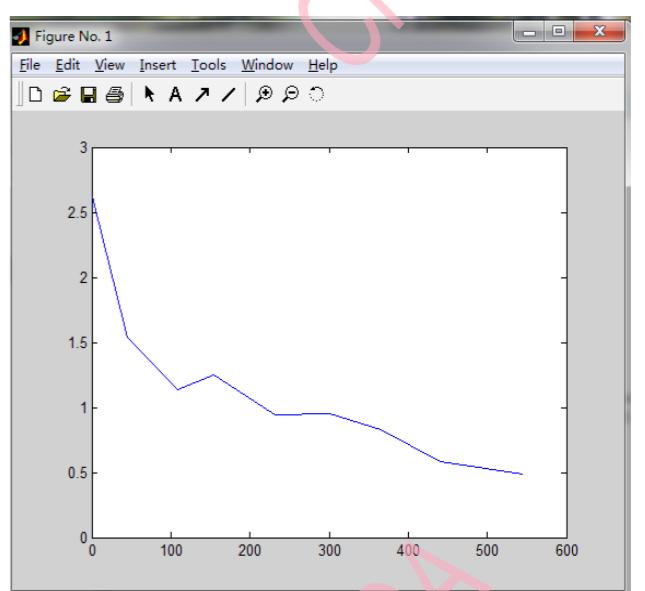


图 9 水深与管口距离关系函数图像

对函数关系式进行求导，其函数的导数为吹填区泥沙的坡比，取导数最小值时（坡比最小，水深最平缓位置，水流动力最小）对应的 X 即为管口设置的最佳距离，计算过程如图 10，由图 10 可知管口设置最佳距离 X=471m，同时可知在距离管口 471m 以外，泥沙流失较少，所以新的管口设置要保证管口距离敞口围埝大于 471m，可保证流失较少。

```

>> [x, fval] = fminbnd('1.0092*10.^(-12*x.^4-1.6195*x.^(-9*x.^3+9.6178*x.^(-7*x.^2-0.0002579*x.^0.031887)',300,550)
x =
471.1112
fval =
4.9536e-004

```

图 10 管口设置最佳距离计算过程图

4.3.3 调整管口方向：

在围埝尚未合口的情况下，为减小潮流动力对泥浆流失的影响，在管口处设置三通，根据潮流方向调整管口方向，使管口方向与潮流方向相反，尽量使管口的水流动力与潮流动力部分叠消，从而较小吹填流失。

结论

本文意旨为同类吹填工程提供工程量计量的新方法，充分掌握吹填工程的沉降、流失工程量从而较为精确的了

解工程的利润空间，提前较为科学的为工程作出整体计划，同时本文还讲述了通过绘制等深线和 MATLAB 进行泥沙的流失分析，研究泥沙的流失方向、合理设置吹填管口从而更好的控制泥沙的流失，提高工程经济效益。

参考文献：

- [1] 《水运工程测量规范》(JTS131-2012).
- [2] 启东市崇启大桥至三和港长江岸线综合整治工程地质勘察报告 (南京和信工程勘察设计研究院有限公司).
- [3] 《疏浚与吹填工程设计规范》(JTS181-5-2012).
- [4] 《疏浚与吹填工程施工规范》(JTS207-2012).
- [5] 土力学 / 刘松玉 中国建筑工业出版社 2016.
- [6] 《大面积吹填砂后地基的最终沉降量和固结度分析》(水运工程第 7 期).

袁超哲¹, 王费新²

中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司

Yuan Chaozhe¹, Wang Feixin²

CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd.

Durand 公式在中粗砂管道输送条件下的应用 Application of Durand Formula in Medium Coarse Sand Pipeline Transportation Conditions

摘要：厦门新机场工程绞吸船输送介质为中粗砂，在施工过程中，船机设备和排泥管线磨损严重，且管线摩阻较大，挖泥船排距较小。该施工工况对绞吸挖泥船的挖掘系统和输送系统性能提出了极高的要求，且对施工工艺的精细化提出了更高的要求。其中，管线摩阻是挖泥船排距和产能计算的重要参数。在淤泥、粉土、粉细砂等较细输送时，经典的 Durand 公式能较好的估算管线输送摩阻，然而在中粗砂输送条件下具有一定的局限性。本文基于陆地排泥管线，使用自主研发的管线摩阻监测系统对管线沿程压力进行实时监测，对比分析不同实验系数 K_D 条件下经典的 Durand 公式摩阻计算值与实测值，并根据实测摩阻值获取中粗砂输送条件下排距的估算值。结果表明：经典的 Durand 公式实验系数 K_D 取 131 时，计算值相比于实测值显著偏大；通过最小二乘法修正 K_D 取值 27 时，摩阻理论值与实测值仍有偏差，当摩阻大于 $0.04\text{mH}_2\text{O}/\text{m}$ 时，计算值偏大，摩阻小于 $0.04\text{mH}_2\text{O}/\text{m}$ 时，计算值偏小；因此经典的 Durand 公式，并不适用于 DN850 排泥管线中粗砂输送摩阻的准确计算；同时，根据实测摩阻平均值 $0.0412\text{mH}_2\text{O}/\text{m}$ ，可知常规三泵绞吸船的排距约为 3500m。

关键词：疏浚；中粗砂；排泥管；摩阻；排距

Abstract

In Xiamen New Airport Project, the transportation medium of the cutter suction dredger is medium-coarse sand. During the construction process, the ship equipment and the dredger pipeline are worn seriously, and the discharge distance of the CSD is small, which requiring a high performance of the excavation and transportation system of the CSD. The frictional resistance coefficient is an important parameter in discharge distance and capacity calculation. The classic Durand formula is widely used in slurry pipeline transportation, which is not work for the medium-coarse sand pipeline transportation. This paper compares the frictional resistance of the classic Durand equation with the measured big data of the pressure drop of the test pipeline on land. According the comparison results, the relationship of the Durand formula calculation result and the measured result is given. And the maximum discharge distance can be estimated from the measured frictional resistance coefficient. The results show that the calculated value is significantly larger than the measured value when the $K_D=131$ in the classical Durand formula. The $K_D=27$, corrected by the least square method, the theoretical value of friction is still deviated from the measured value; when the friction is greater than $0.04 \text{ mH}_2\text{O}/\text{m}$, the calculated value is larger, and when the friction is less than $0.04 \text{ mH}_2\text{O}/\text{m}$, the calculated value is smaller; as a result, the Durand formula is not suitable for estimating the frictional resistance of medium-coarse sand transportation in DN850 pipeline. And according to the measured average frictional resistance coefficient $0.0412\text{mH}_2\text{O}/\text{m}$, it can be calculated that the discharge distance of the conventional triple pump CSD is about 3500m.

Key words: dredging, medium-coarse sand, dredging pipeline, frictional resistance coefficient, discharge distance

作者简介：

王晓萌，男，中交天航滨海环保浚航工程有限公司，工程主管。

1 前言

摩阻是疏浚排泥管线输送基本特性研究的重点。厦门新机场工程的输送介质为中粗砂，相比于传统的淤泥、粉土和粉细砂等较细输送介质，其输送摩阻损失较大，排距较小，对绞吸挖泥船的挖掘系统和输送系统性能均提出了极高的要求，且对施工工艺的精细化提出了更高的要求。

多年来，国内外相关科研单位对疏浚排泥管线输送特性展开了大量的研究与分析，在参考和借鉴其他领域管道输送研究成果和经验的基础上，结合疏浚吹填工程中管道输送的特点，通过开展大量的室内试验及现场实测数据，分析并建立了一些经验公式和简化模型，例如 Durand 公式、Jufin & Lopatin 公式、Wasp 公式、Wilson & GIW 公式和费祥俊公式等。上述各个公式对于疏浚排泥管线设计计算和系统运作具有指导和参考意义。目前我国疏浚领域《JTS 181-5-2012. 疏浚与吹填工程设计规范》中经典的 Durand 公式能够对较细颗粒输送条件下管线输送摩阻损失进行较好的估算。然而，在厦门新机场工程绞吸船施工过程中根据 Durand 公式计算所得摩阻估算的排距，与实际施工过程中的排距相差甚远。针对疏浚吹填排泥管线输送系统的大管径、大流量和高浓度的发展趋势，国内疏浚界少停留在数值模拟和室内模型试验阶段，对大管径、高浓度输送情况的现场测试和分析研究较少，尤其缺乏中粗砂以及更粗粒径土质的研究成果和资料。针对厦门新机场工程中排泥管线摩阻大小无法有效预估，开展 Durand 公式在中粗砂管道输送条件下的适用性分析研究。本文基于厦门新机场工程中绞吸船陆地排泥管线，使用自主研发的管线摩阻监测系统对排泥管线沿程压力进行实时监测，根据该实测数据对比分析不同试验系数 K_D 条件下经典的 Durand 公式摩阻计算值与实测值的相关性；并基于实测摩阻值给出 3500 方绞吸船中粗砂输送条件下的排距，以此为中粗砂吹填排距的准确预估提供关键的现场实测数据。

2 中粗砂输送管线摩阻实测值

2.1 沿程压力现场监测方案

厦门新机场工程中主力疏浚船舶均为 3500 方绞吸船，排泥管线沿程压力损失监测基于某一 3500 方绞吸船的岸管段，其内径为 DN850，材质为 Q235 钢制螺纹管。图 1 所

示，为现场沿程压力监测过程中监测管段航拍示意图，两个压力测点之间监测管段总长 178 米。本文采用自主研发的管线摩阻监测系统对该管段进行沿程压力监测，并通过压力测点高程对沿程压力损失进行高差补偿。

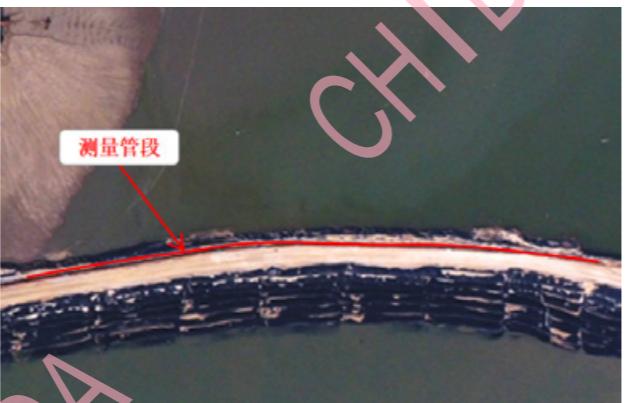


图 1 厦门新机场工程沿程压力监测管段示意图

2.2 沿程压力现场实测数据

绞吸船吸入口浆体浓度不稳定，排泥管线压差随之而产生波动。图 2 所示，散点为厦门新机场工程绞吸船施工过程中根据 Durand 公式计算所得摩阻估算的排距，与实际施工过程中的排距相差甚远。针对疏浚吹填排泥管线输送系统的大管径、大流量和高浓度的发展趋势，国内疏浚界少停留在数值模拟和室内模型试验阶段，对大管径、高浓度输送情况的现场测试和分析研究较少，尤其缺乏中粗砂以及更粗粒径土质的研究成果和资料。针对厦门新机场工程中排泥管线摩阻大小无法有效预估，开展 Durand 公式在中粗砂管道输送条件下的适用性分析研究。本文基于厦门新机场工程中绞吸船陆地排泥管线，使用自主研发的管线摩阻监测系统对排泥管线沿程压力进行实时监测，根据该实测数据对比分析不同试验系数 K_D 条件下经典的 Durand 公式摩阻计算值与实测值的相关性；并基于实测摩阻值给出 3500 方绞吸船中粗砂输送条件下的排距，以此为中粗砂吹填排距的准确预估提供关键的现场实测数据。

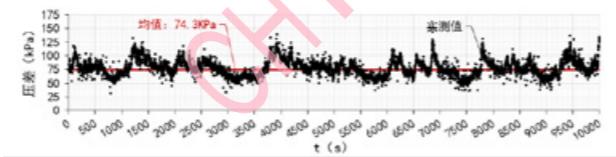


图 2 厦门新机场工程绞吸船岸管监测管段压差实测值示意图

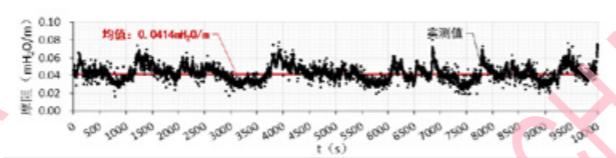


图 3 厦门新机场工程绞吸船岸管监测管段摩阻实测值示意图

3 中粗砂输送 Durand 公式摩阻计算

3.1 Durand 公式简介

绞吸船排泥管线摩阻计算公式采用《JTS 181-5-2012. 疏浚与吹填工程设计规范》中的 Durand 公式。公式 (1) 即为经典的 Durand 公式。为精确计算输送期间绞吸船排

泥管线摩阻值，对输送介质进行取样，并对其颗粒、土颗粒密度和土颗粒沉降速度进行测量，并实时采集绞吸船监控系统中输送流速、输送浓度等关键施工参数。

$$\lambda_m = \lambda_w \left[1 + C * K_D * \left(\frac{v^2}{gD(\gamma_s - 1)} \frac{\sqrt{gd_s(\gamma_s - 1)}}{v_{ss}} \right)^{-\frac{3}{2}} \right] \quad (1)$$

其中， λ_m 、 λ_w 分别为输送泥浆及清水时的管路沿程阻力系数， $\lambda_w = 0.114\sqrt{68/Re + k/D}$ ；C 为土颗粒体积浓度 (%)； K_D 为实验系数，规范推荐取值 121；v 为管路泥浆平均流速 (m/s)；D 为管路内径 (m)； γ_s 为土颗粒密度 (kg/m³)； γ_m 为密度计测量密度 (kg/m³)； γ_0 为原状土密度 (kg/m³)； γ_w 为海水密度 (kg/m³)； d_s 为颗粒平均直径 (m)； v_{ss} 为土颗粒沉降速度 (m/s)。

3.2 Durand 公式关键参数

3.2.1 输送浓度和流速

厦门新机场工程绞吸船输送介质为中粗砂，中值粒径 d_{50} 约为 0.72mm，贝壳含量约为 8%。Durand 公式中的输送浓度为土颗粒体积浓度，根据船载实测输送浓度获取。图 4 所示为绞吸船实测浓度和用于 Durand 公式计算的土颗粒体积浓度对比示意图，其中黑色散点为输送浓度，其均值 21.4%；红色散点为土颗粒体积浓度，其均值 12.9%。图 5 所示，为输送流速实测值，其值在 4.85m/s~6.00m/s 之间波动，均值约为 5.33m/s。

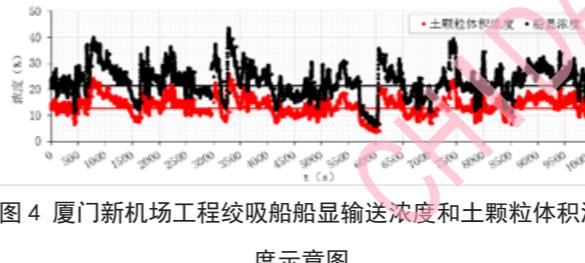


图 4 厦门新机场工程绞吸船显输送浓度和土颗粒体积浓度示意图

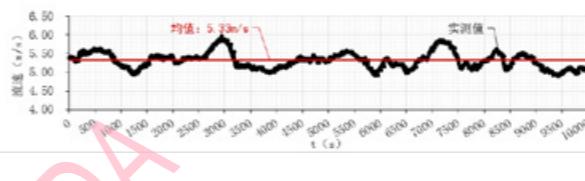


图 5 厦门新机场工程绞吸船显输送流速示意图

3.2.2 其他 Durand 公式关键参数

厦门新机场工程绞吸船排泥管岸管内径为 0.85m，海

水密度 γ_w 为 1021kg/m³，土颗粒密度 γ_s 为 2650kg/m³，根据沉降速度计算公式（添加参考文献）可得沉降流速 v_{ss} 为 0.09124m/s。

排泥管线内壁当量粗糙度可根据清水摩阻系数 λ_w 计算公式与实测摩阻系数进行等式计算获取；即将 f_w 实测 = f_w 理论即可反算出粗糙度 k 值。

4 Durand 公式适用性分析

4.1 摩阻实测值与理论值对比与分析

根据上述获取的 Durand 公式计算所需的相关参数，并通过规范推荐的 K_D 值 ($K_D=121$)，对 Durand 公式进行理论值计算；并将之与图 3 所示的监测管段摩阻实测值进行对比分析。如图 6 所示，为经典 Durand 公式 ($K_D=121$) 摩阻理论计算值与实测值的对比图。由该图可知， K_D 取值 121 时，其摩阻计算值相比于摩阻实测值明显偏大。由该图易知，《疏浚与吹填工程设计规范》中给出的 Durand 公式 ($K_D=121$) 并不适用于中粗砂在 DN850 管道的输送摩阻计算。

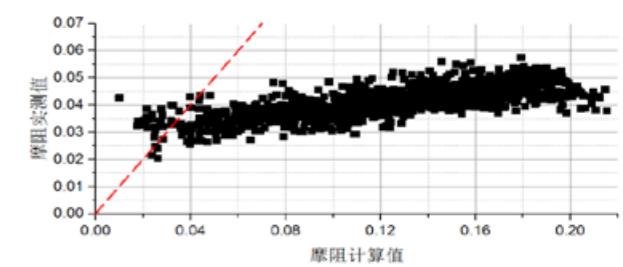


图 6 经典 Durand 公式 ($K_D=121$) 摩阻理论计算值与实测值对比

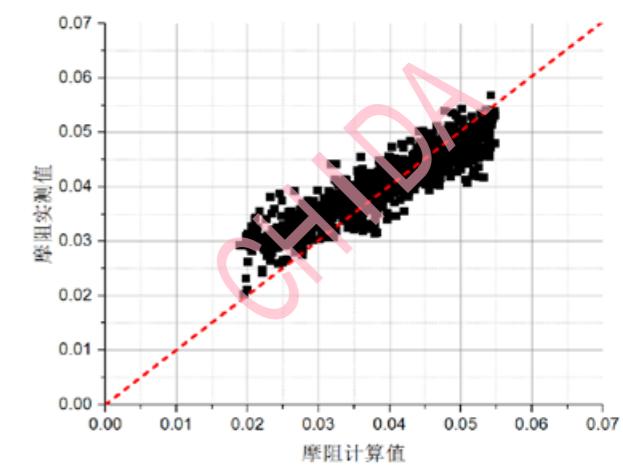


图 7 修正的 Durand 公式 ($K_D=27$) 摩阻理论计算值与实测值对比

基于图 6 的分析结果, 对实验系数 K_D 进行修正。本文通过最小二乘法对不同 K_D 值的 Durand 公式计算所得的摩阻计算值与摩阻实测值进行线性拟合, 并对其相关性进行分析。其分析结果为: 当 K_D 取 27 时, 相关系数最高。如图 7 所示即为当 K_D 取 27 时, 浮片管段摩阻计算值与实测值的比较示意图。由该图易知, 当摩阻大于 $0.04 \text{ mH}_2\text{O}/\text{m}$ 时, 修正的 Durand 公式 ($K_D=27$) 计算值偏大; 摩阻小于 $0.04 \text{ mH}_2\text{O}/\text{m}$ 时, 摩阻的实测值偏大。虽然岸管监测管段修正的 Durand 公式 ($K_D=27$) 相比于 $K_D=121$ 时, 与摩阻实测值更为接近, 但仍然存在偏差, 无法准确的反应排泥管线的输送特性。

结合图 6 和图 7 中监测管段的摩阻理论计算值与实测值的比较结果, 可知: 通过调整 K_D 的取值, 无法获取更好的拟合结果。因此经典的 Durand 公式, 并不适用于 DN850 排泥管线中粗砂输送摩阻的准确计算。

4.2 排距估算

同时, 根据摩阻实测值可以获取输送流速 5.33 m/s 、输送浓度 21.4% 时, 排泥管线摩阻平均值为 $0.0412 \text{ mH}_2\text{O}/\text{m}$ 。根据现场施工情况, 绞吸船为三泵串联施工; 且施工过程中, 2号甲板泵排压基本在 $17 \text{ bar} \sim 19 \text{ bar}$ 之间波动, 其平均值约为 18 bar 。假设管线爬高约为 8 m , 管口出流压力约为 2 bar , 则顺直 Q235 钢制排泥管线排距约为: $\{(18-2)*105/9.81/1000\}-8\}/0.0412 \approx 3765 \text{ m}$; 考虑实际管线排布过程中的弯折、爬坡, 可知常规三泵绞吸船的排距约为 3500 m , 与现场管线距离基本一致。

结论

本文使用自主研发的管线摩阻监测系统对厦门新机场工程某一 3500 方 绞吸船陆地 178 m 长顺直排泥管段进行了沿程压力损失监测, 并根据该实测数据对比分析了不同

实验系数 K_D 条件下经典的 Durand 公式摩阻计算值与实测值的相关性, 得到了如下结论:

- (1) 经典的 Durand 公式实验系数 K_D 取 121 时, DN850 排泥管线摩阻计算值相比于实测值显著偏大;
- (2) 通过最小二乘法修正 K_D , 取值 27 时, 摩阻理论值与实测值仍有偏差; 当摩阻大于 $0.04 \text{ mH}_2\text{O}/\text{m}$ 时, 计算值偏大, 摩阻小于 $0.04 \text{ mH}_2\text{O}/\text{m}$ 时, 计算值偏小;
- (3) 综上所述, 经典的 Durand 公式不适用于 DN850 排泥管线中粗砂输送摩阻的计算;
- (4) 根据现场实测的陆地 178 m 长顺直排泥管段的摩阻平均值 $0.0412 \text{ mH}_2\text{O}/\text{m}$, 估算常规三泵绞吸船的排距约为 3500 m 。

参考文献:

- [1] Durand R. The Hydraulic Transportation of Coal and Other Materials in Pipes [M]. London: Collage of National Coal Board, 1952.
- [2] 邓祥吉. 管道输沙阻力特性研究 [D]. 河海大学, 2005.
- [3] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学 [M]. 清华大学出版社, 1994.
- [4] JTS181-5-2012, 疏浚与吹填工程设计规范 [S].
- [5] 李铭志, 何炎平, 韩政, 黄超. 泥沙管道输送计算方法探讨 [J]. 水运工程, 2014(05):36-40.
- [6] 孙东坡, 王二平, 严军, 许继钢. 高浓度泥浆输送管道阻力及输送能力研究 [J]. 水利学报, 2004,(09):93-99.
- [7] 王海荣, 何炎平. 疏浚管路阻力损失计算方法的分析 [J]. 中国港湾建设, 2008(05):17-20.
- [8] 赵立娟. 不同粒径泥沙管道水力输送阻力特性研究 [D]. 河海大学, 2002.

作者简介:

袁超哲, 男, 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 工程研究所疏浚工艺研究室副主任, 工程师。
王费新, 男, 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 重点实验室总工程师, 正高级工程师。



徐东晓¹, 陈向红², 王磊³

上海达华测绘有限公司

Xu Dongxiao¹, Chen Xianghong², Wang Lei³

Shanghai Dahua Surveying and Mapping Co., Ltd.

长江深水航道整治工程丁坝地基变形监测及影响规律

Monitoring of Deformation of Spur Dam Foundation and Influence Law of Yangtze River Deep-Water Channel Improvement Project

摘要: 长江南京以下 12.5 m 深水航道整治工程是为开拓航道、改善水运条件等通航需要而进行的建设工程, 是长江航道网结构优化的重要组成部分。为确保航道整治过程中对丁坝地基变形的影响, 文中提出了采用传统动态监测方法, 根据在福姜沙水道双涧沙 SL1 丁坝、福姜沙 FL1 丁坝位置布设观测点、全断面分层观测与成果处理, 分析了 SL1 #0+200、FL1 #1+550 两处断面四个监测孔位在实施整治过程中的水平位移和沉降发展规律, 各测点水平位移分布特征反映为: 坝体地基上部高于下部、监测时间段内最大水平位移速率低于 5 mm/d 预警值; 各测点沉降观测结果反映为: 随观测时间呈递增关系, 且监测时间段内最大沉降速率低于 10 mm/d 预警值。由观测反馈信息说明在航道整治工程中丁坝地基稳定, 无明显水平位移和地基沉降发生。该结论可为航道整治效果评价和类似工程建设提供重要借鉴。

关键词: 航道整治; 丁坝地基; 全断面分层观测; 深层位移

Abstract

The 12.5 m deep-water channel improvement project in Nanjing is an important part of the optimization of the structure of the Yangtze River channel network. In order to ensure the influence on the deformation of the spur dam foundation in the course of channel regulation, the traditional dynamic monitoring method is proposed. According to the observation points laid at the positions of Shuangjiansha SL1 and Fujiangsha FL1, the stratified observation and the treatment of the results in the whole section, the horizontal displacement and settlement development of four monitoring holes in SL1 #0 + 200 and FL1 + 550 were analyzed. The horizontal displacement distribution of each measuring point is reflected as follows: the upper part of the dam foundation is higher than the lower part, and the maximum horizontal displacement rate in the monitoring period is lower than the 5 mm/d warning value; The observation results of settlement of each measurement point are reflected as follows: with the observation time, the maximum settlement rate is less than 10 mm/d warning value during the monitoring period. The observation feedback information shows that the spur dam foundation is stable, there is no obvious horizontal displacement and the foundation settlement occurs in the channel improvement project. This conclusion can provide important reference for evaluating the effects of channel regulation and similar engineering construction.

Key words: channel modification, spur dam foundation, stratified observation of whole section, deep displacement

简介

河道整治是保证河道畅通及安全运营的一项重要举措，国内外针对该问题亦开展了大量的研究工作^[1-9]。本文主要针对长江南京以下12.5m深水航道二期工程福姜沙河段的整治工程进行调查分析，该工程采用治理和疏浚相结合的治理方案，以初步实现12.5m深水航道上延至南京为目标。福姜沙河段存在受径流和潮汐影响较大、泥沙运动和河床演变明显等特征，因此，在施工期间受各种因素影响时，很可能要求我们设计和施工的局部方案，根据环境变化情况做出及时调整，这类必要的调整甚至将延续至竣工后的一定时间段内。目前常需要结合动态监测进行设计和施工局部方案的有关调整，根据采集反馈信息和监测成果，及时作出正确分析和判断，以指导设计和施工。

1 结构形式与地质条件

1.1 工程结构型式

福姜沙河段整治工程主要采用抛石斜坡堤、混凝土构件混合堤、充砂管袋裸袋堤和生态软体排，其中如图1所示为抛石斜坡堤结构断面示意图。该标段泥面标高最深处为-22m，堤顶标高在-20~7.5m之间，堤身高度在0.5~13.0m之间。

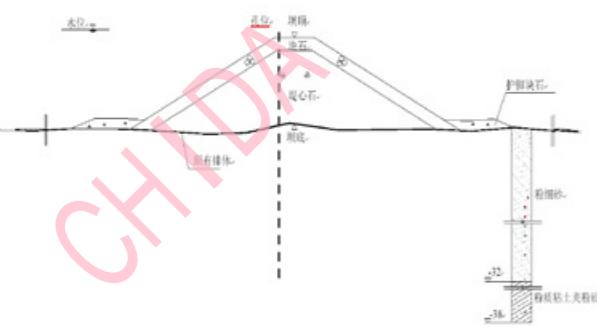


图 1 抛石斜坡堤断面示意图

1.2 工程地质条件

福姜沙河段场地勘探深度内的地基土层主要为第四系全新冲积相沉积物，岩性以粉细砂、粉质粘土夹粉砂为主，局部为淤泥质粉质粘土、粉砂夹粉质粘土及粉土。表层为厚度1.3~23.2m的松散灰黄色粉细砂，粒径小，抗冲刷能力差，受流场变化极易造成局部冲刷变化。福姜沙河段各岩土层主要物理力学指标如表1所示。

表 1 福姜沙岩土主要物理力学参数表

层号	岩土名称	重度 γ (kN/m ³)	压缩模量 E_s (MPa)	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	承载力 f_{ak} (kPa)
①	粉细砂	18.7	8.0			90
① ₁	粉质粘土	17.8	4.69	19.5	17.0	80
① ₂	淤泥质粉质粘土	16.8	2.58	9.0	0.8	70
②	粉细砂	19.1	9.25			120
② ₁	粉质粘土	18.9	5.29	23.9	13.3	110
③	粉细砂	19.1	12.58			160
③ ₁	粉质粘土	18.0	5.12	21.5	15.0	140
③ ₂	粉质粘土	18.1	4.10	15.0	9.0	130
③ ₃	粘土	17.6	4.26	26.3	4.5	120
④	粉细砂	18.9	14.0			220
④ ₁	中粗砂	19.5	20.0			240

2 工程监测

航道整治工程中影响结构地基沉降和位移稳定的主要因素：①流场变化；②护底铺设及堤身成型进展；③堤身成型加载速率。因此，为确保整治建筑物在施工期间的稳定和安全，需对航道整治工程地基的沉降和位移变化进行动态监测，以监测数据指导施工，实施“动态施工，动态管理”的科学管理方法。在整个施工阶段考虑按如下规定进行动态监测：①按月进行固定断面的测量；②按工程进展状况及时进行河床冲淤变化的监测；③服从业主、设计及监理提出的其他监测要求。同时对监测结果进行分析，以便迅速做出相应调整方案，为后续施工提供依据。以确保工程安全和施工安全。

2.1 监测仪器及方案设计

2.1.1 全断面分层沉降监测

该整治工程观测点初始值的首次观测使用GPS静态同步观测法。之后每次观测分层沉降之前采用RTK-DGPS方法测量沉降管管顶高程，RTK-GGPS采集前，先在控制点上比对，满足精度要求后进行观测。观测时采集20分钟，采样间距10s。取平均值作为管口高程。之后施工期内每次使用钢尺沉降仪施测出各磁环距管顶固定位置的距离，并同时用RTK-DGPS测量管口高程，然后计算出各磁环所在位置的标高。每次测量应至少重复1次，且读数差不大于2mm，否则重新测量，每测回取进程与回程的平均数为终值，通过磁环的高程变化来了解各土层沉降变化情况。沉降监测仪器如图2所示。

2.1.2 地基深层测斜

测斜孔观测采用人工观测，将测斜探头导轮完全卡在测斜管的导槽内，轻轻地放入测斜管中，将电缆刻度线对准测斜管标记处，从管口开始自下而上进行测量，以1m为一单位长度读一次测斜管轴线相对于铅垂线的倾角，记下此时深度和对应的数据，一直到测斜导管底端为止。之后，将测斜仪取出，探头调转180°后放入测斜管中，重复上述步骤进行再次测量，记下此时深度和对应的数据。初始观测连续观测3天，取3天读数的平均值作为初始值。沉降监测仪器如图3所示。

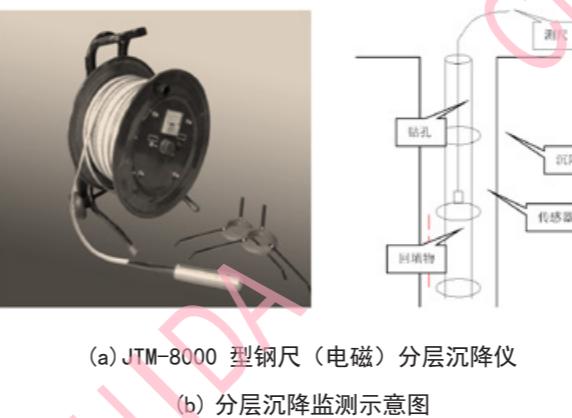


图 2 沉降仪器及监测示意图



图 3 测斜仪及监测示意图

观测设计频率为：在堤心加载施工期间每3天观测一次，根据施工进度调整；断面完工后前3个月每周观测一次，3个月后半年内每一个月观测一次，再后每3个月观测一次，至竣工验收为止。

2.1.3 测点布置及监测内容

依据技术设计书及规范要求，在施工期间考虑对双涧沙SL1丁坝SL1#0+200、福姜沙FL1丁坝FL1#1+550等3

处进行全断面观测点布设和数据分析。全断面监测点布置选在斜坡式结构的典型断面处，在断面轴线处理设测量杆，埋设深度至软土层底部，沿深度测点间距取3m，并考虑各土层均设有测点，测点平面布置如图4所示。监测内容主要包括全断面深层沉降观测和测斜。



图 4 长江 12.5m 深水航道治理工程测点布设示意图

2.2 监测数据分析

2.2.1 丁坝地基沉降分析

图5、图6示出了2016年12月23日至2017年12月8日时间段内测点地基沉降监测数据，以及与理论计算值的比较关系曲线。由图分析可知：

① SL1 丁坝 SL1#0+200 测点处基本未发生明显沉降，最大沉降速率为 -0.24mm/d，小于 10mm/d 的沉降预警值，监测时间段内最大累积沉降量发生在 -6.57m 处的沉降环处，累积沉降 -103mm，说明截止 2017 年 12 月 8 日，丁坝地基稳定，未发生较明显沉降。

② FL1 丁坝 FL1#1+550 测点处基本未发生明显沉降，最大沉降速率为 -0.12mm/d，小于 10mm/d 的沉降预警值，监测时间段内最大累积沉降量发生在 -42.48m 处的沉降环处，累积沉降 -43.0mm，说明截止 2017 年 12 月 8 日，丁坝地基稳定，未发生较明显沉降。

③ SL1 丁坝和 FL1 丁坝两处地基沉降随观测时间均呈现增长关系，且在监测时间段内 FL1#1+550 测点沉降增长趋势相比 SL1#0+200 测点较明显。

④ 以 2018 年 12 月 8 日监测数据为例，将土视为满足虎克定律的各向同性弹性介质，通过与理论计算所得地基沉降值比较可知，沿不同深度测得数据与理论曲线变化规律基本一致；位于丁坝交叉位置的 SL1#0+200 测点，受复杂和多向围压影响，离散性较 FL1#1+550 测点要大。

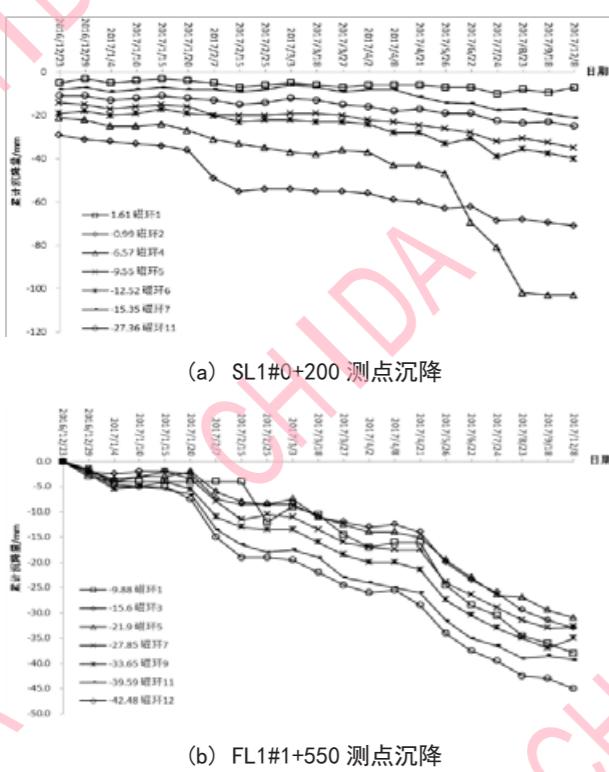


图 5 监测点沉降随时间变化曲线

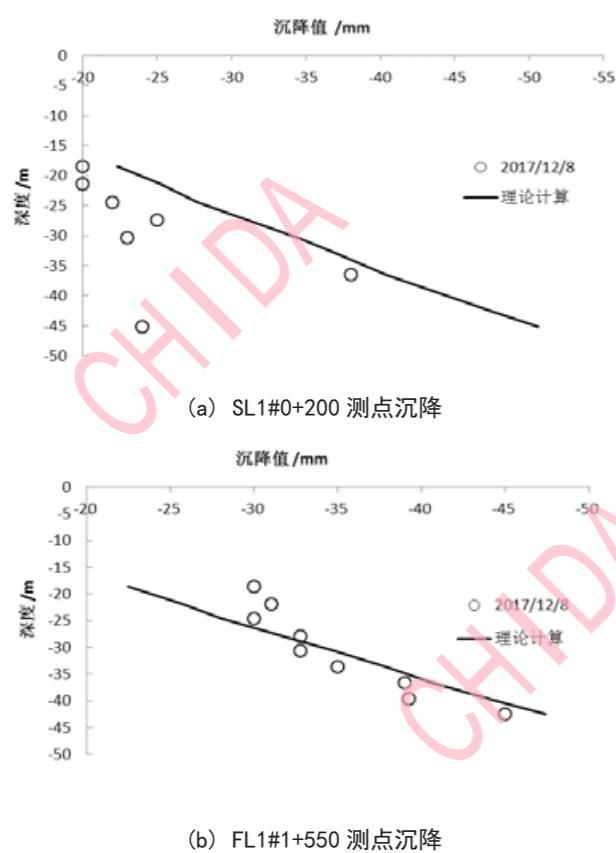


图 6 监测点沉降与理论计算值比较

2.2.2 丁坝地基水平位移分析

图 7、图 8 示出了 2017 年 2 月 7 日至 2017 年 12 月 8 日时间段内测点地基沉降监测数据，以及与理论计算值的比较关系曲线。由图分析可知：

① SL1 丁坝 SL1#0+200 监测时间段内地基基本未发生明显的水平位移，最大水平位移速率为 -0.06mm/d，小于 5mm/d 的沉降预警值；监测时间段内最大水平位移为 -23.62mm，发生在 7 月 24 日深度 -15 米测点位置，说明截止 2017 年 12 月 8 日，丁坝地基稳定，未发生较明显水平位移。

② FL1 丁坝 FL1#1+550 本期监测时间段内地基基本未发生明显的水平位移，最大水平位移速率为 -0.02mm/d，小于 5mm/d 的沉降预警值；监测时间段内最大水平位移为 -4.54mm，发生在 5 月 26 日深度 -10 米测点位置，说明截止 2017 年 12 月 8 日，丁坝地基稳定，未发生较明显水平位移。

③ SL1 丁坝和 FL1 丁坝两处地基深层水平位移随测点深度增加而减小，且在监测时间段内 FL1#1+550 测点累计沉降相比 SL1#0+200 测点较小。

④ 以 2018 年 12 月 8 日监测数据为例，将土视为随深度成正比增长的地基系数的弹性变形介质，通过与理论计算所得地基水平位移值比较可知，沿不同深度测得数据与理论曲线变化规律基本一致，丁坝地基理论值与地基系数的选取相关。

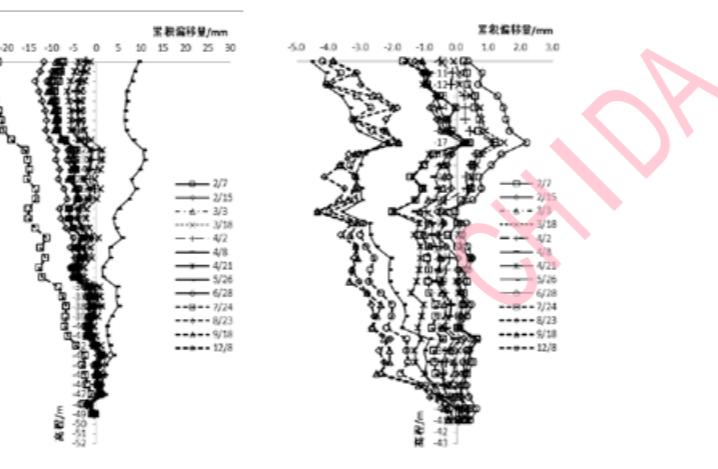


图 7 监测点位移随深度分布规律

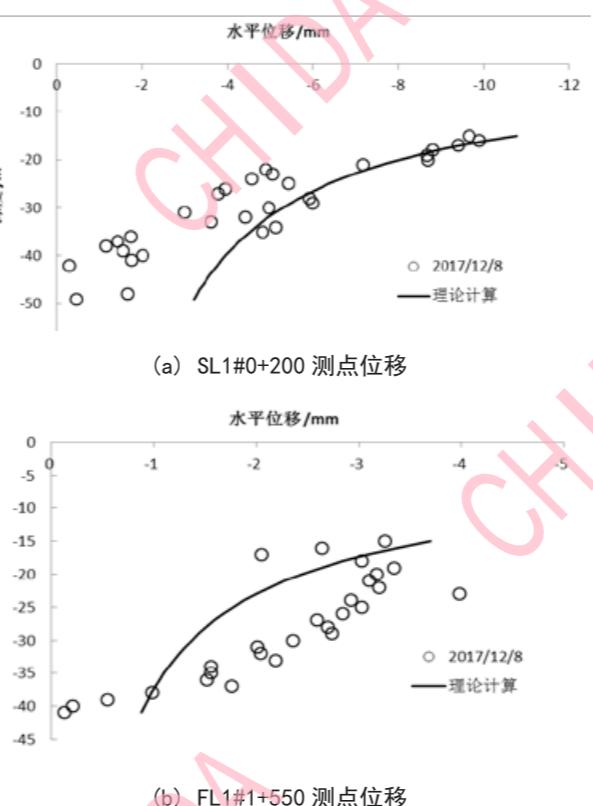


图 8 监测点水平位移与理论计算值比较

结论

整治工程的开展是为了实现“固滩、稳槽、导流、增深”的最终目标，航道整治工程地基变形监测是为了掌握治理效果的主要手段，为此，本文通过对长江 12.5m 深水航道整治工程丁坝地基的沉降和位移监测分析，得出如下结论：

(1) 根据动态监测成果分析，可便于了解整治工程中丁坝的变形发展规律，从而可通过优化施工，有效控制丁坝地基出现过大沉降和位移，保障航道局部稳定。

(2) 航道整治工程的施工将会影响到工程局部区域原有地基的分布状态，通过对 SL1 和 FL1 两处丁坝地基深层沉降和水平位移的动态监测可知：在监测时间段内地基最大水平位移速率和沉降速率均低于预警值，说明在航道整治工程

中丁坝地基稳定，无明显水平位移和地基沉降发生。

(3) 监测点沉降随时间呈逐步递增关系，因此在整个整治工程的施工过程中，应随时对丁坝的水平位移和沉降情况进行监测，监测过程中发现沉降或位移变化异常时及时向工程师反馈，以便采取相应措施保证堤坝安全。

参考文献：

- [1] XN Zhang. "Basic principles and thoughts on deep waterway regulation in the lower reaches of the Yangtze River[J]." Hydro-Science and Engineering, 2009, 128-133.
- [2] PJ Wheeler, JA Peterson , LN Gordonbrown(2010). "Channel Dredging Trials at Lakes Entrance, Australia: A GIS-Based Approach for Monitoring and Assessing Bathymetric Change[J]." Journal of Coastal Research, 2010, 1085-1095.
- [3] 王谷谦, 周海, 谢军 . 以动态工程观点实施长江口北槽 12.5m 深水航道治理工程 [J]. 水运工程, 1999, 2-86.
- [4] 夏云峰, 曹民雄, 陈雄波 . 长江下游三沙 (福姜沙、通州沙、白茆沙) 水道演变分析及深水航道整治设想 [J]. 泥沙研究, 2001, 57-61.
- [5] 陈志昌, 乐嘉钻 . 长江口深水航道整治原理 [J]. 水利水运工程学报, 2005, 1-7.
- [6] 李旺生 . 长江中下游航道整治技术问题的几点思考 [J]. 水道港口, 2007, 418-424.
- [7] 蒋陈娟, 李九发, 吴华林, 等 . 长江河口北槽水沙过程对航道整治工程的响应 [J]. 海洋学报, 2013, 129-14 页.
- [8] 袁晨晨 . 关于航道整治工程泥面沉降观测方法的论述 [J]. 中国水运月刊, 2014, 300-302.
- [9] 陈向红, 陶连金, 刘春晓, 安林轩, 安军海 . 放坡疏浚对海陆交接段隧道稳定性的影响研究 [J]. 隧道建设, 2016, 806-811.

作者简介：

徐东晓，男，上海达华测绘有限公司，岩土项目经理，高级工程师。

陈向红，男，中煤建工集团有限公司，科研经理，副总工程师。

王磊，男，上海达华测绘有限公司，项目经理，工程师。

苏召斌¹, 陈定², 林森³
中交天津航道局有限公司
Su Zhaobin¹, Chen Ding², Lin Sen³
CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd.



绞吸挖泥船绞刀载荷分析软件研制 The Development of the Load Analysis Software for the Cutter of Cutter Suction Dredger

摘要:为了提高绞吸挖泥船绞刀的设计水平,研究了绞刀单齿切削岩石、砂土和粘土的力学模型,使用旋转矩阵方法分析了绞刀运动姿态,在判定刀齿在任意时刻的切削状态时考虑了切削厚度和步进距离,然后用VB语言对绞刀载荷计算模型进行了编程,形成了载荷分析软件。以某绞刀功率5000kW的不同切削角度和不同泥层厚度为例,对该软件的计算的有效性进行了判定。算例结果表明,在给定的绞刀参数、施工参数和土质参数的情况下,该软件能够较为准确地计算绞刀功率和多种绞刀载荷,对绞吸挖泥船施工效率的提高具有一定的指导意义。

关键词:疏浚;绞刀;旋转矩阵;VB

Abstract

In order to improve the ground level of the design of the cutter suction dredger, studied the cutter single tooth cutting mechanics model of rock, sand and clay, rotation matrix method is used to analyze the cutter motion, considering the cutting thickness and step distance, determine the blade cutting state at any moment, and then use the VB language to three kinds of load calculation model for programming, formed the load analysis software. The software can accurately calculate the cutting attitude of the cutter, and solve the load condition and power condition of the cutter when cutting different soil.

Key words:dredge, cutter, rotation matrix, VB

简介

绞吸挖泥船是一种使用绞刀作为挖掘设备的工程船舶,在航道整治和港口建设中发挥重要的作用。目前,国外以ESCO、VOSTA和IHC等等设计水平遥遥领先^[1],而国内在绞刀研究领域的研究尚不成熟。其中,中交天津航道局有限公司拥有国内最多的绞吸挖泥船,如绞刀功率为4200kW的“天鲸号”具备了多种岩土施工的能力^[2],因此研究不同岩土的切削载荷对施工效率的提高具有重要的价值。

在1999年,荷兰的Midema^[3-6]等人提出了砂土、粘土和岩石切削的二维切削理论,给出了不同情况下的水平切削力和竖直切削力的计算力学模型。国内学者张文宣^[7]和姚健伟^[8-9]等人编制了绞吸挖泥船的载荷分析软件,但是对载荷模型和刀齿的切削状态的判定过于简化。随着计算机水平的逐渐提高,国内学者杨桢毅^[10]、李柏^[11]和芦凯鹏^[12]等人利用数值模拟手段研究了绞刀的切削机理,苏召斌^[13-14]等人提出了绞刀齿切削状态的判定条件,在实验室进行了绞

刀切削岩土的切削试验,研究了绞刀切削机理。研究绞刀切削机理能够计算出绞刀的切削功率和绞刀载荷,而一种可视化的绞刀载荷分析软件能够提高绞刀设计水平,而且还能为施工提供参考价值,因此有必要开发一种绞刀载荷分析软件。

1 建立切削模型

1.1 岩石切削

根据岩石受力特点^[8-9],刀齿受力可计算为,

$$\begin{cases} F_{xit} = 10A \cdot \frac{0.35b + 0.3}{b + Bh_{it}^{0.5}} \cdot l \cdot h_{it} \cdot \lambda \cdot \frac{1}{\cos \beta} + 100f_k \sigma_y s_d \\ F_{nit} = K_n (10A \cdot \frac{0.35b + 0.3}{b + Bh^{0.5}} \cdot l \cdot h_{it} \cdot \lambda \cdot \frac{1}{\cos \beta}) + 100k_n \sigma_y s_d \\ F_{ait} = F_{nit} \tan k_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, F_{xit} 、 F_{nit} 和 F_{ait} 分别表示第*i*刀齿*t*时刻的切向力、法向力和轴向力, A 为岩石切割阻抗, b 为刀齿切削刃的宽度, B 为岩石脆性程度指数, l 为同一刀臂上相邻刀齿的间距, λ 为岩石状态系数, β 为刀齿相对切削牵引方向安装角度; f 为抗切削阻力系数, k_n 为平均接触应力对单轴抗压强度比值, σ_y 为岩石单轴抗压强度; s_d 为刀齿磨损面积, K_n 为锋利刀齿进刀力对切割力的比值, k_i 为第*i*刀齿的齿形弧度角, h_{it} 为第*i*刀齿*t*时刻切削岩石厚度, 可以表示为,

$$h_{it} = \frac{60v}{nB} \cdot \sin \beta_{it} \quad (2)$$

其中 v 为绞刀横移速度, n 为绞刀转速, B 为刀臂数目。

1.2 砂土切削

$$\begin{cases} F_{xit} = \frac{G \sin(\beta_s + \varphi)}{\sin(\alpha + \beta_s + \varphi + \delta)} \sin(\alpha + \delta) \\ F_{nit} = \frac{G \sin(\beta_s + \varphi)}{\sin(\alpha + \beta_s + \varphi + \delta)} \cos(\alpha + \delta) \\ F_{ait} = F_{nit} \tan k_i \end{cases} \quad (3)$$

$$G = \rho_s \cdot g \cdot b \cdot h_{it} \frac{\sin(\alpha + \beta_s)}{\sin \beta_s} \left(\frac{h_b}{\sin \alpha} + \frac{h_b \cos(\alpha + \beta_s)}{2 \sin \beta_s} \right) \quad (4)$$

其中, G 为切削土体的重力, α 为刀齿的切削角度, β_s 为砂土的剪切破坏角度, h_b 为齿尖部分的长度, δ 为外摩擦角, φ 为砂土的内摩擦角, ρ_s 为砂土的密度。

1.3 粘土切削

$$\begin{cases} F_{xit} = A_c \cos \alpha + \frac{G \sin(\beta_c + \varphi) + C \cos \varphi - A_c \cos(\alpha + \beta_c + \varphi)}{\sin(\alpha + \beta_c + \varphi + \delta)} \sin(\alpha + \delta) \\ F_{nit} = -A_c \sin \alpha + \frac{G \sin(\beta_c + \varphi) + C \cos \varphi - A_c \cos(\alpha + \beta_c + \varphi)}{\sin(\alpha + \beta_c + \varphi + \delta)} \cos(\alpha + \delta) \\ F_{ait} = F_{nit} \tan k_i \end{cases} \quad (5)$$

$$G = \rho_c \cdot g \cdot b \cdot h_{it} \frac{\sin(\alpha + \beta_c)}{\sin \beta_c} \left(\frac{h_b}{\sin \alpha} + \frac{h_b \cos(\alpha + \beta_c)}{2 \sin \beta_c} \right) \quad (6)$$

其中, β_c 为粘土的剪切破坏角度, C 为粘土的内聚力, A_c 为粘土的粘附力, ρ_c 为粘土的密度。

2 判定切削状态

绞刀受到的驱动力可以分解为三个方向的力, 即水平方向的横移拉力、竖直向下的对地压力和向前的顶推力。在绞刀挖掘岩土过程中, 刀齿与岩土之间相互作用, 每个刀齿受到岩土作用力可以分解为三个方向的力: 切向力、轴向力和法向力。绞刀受力由每个刀齿的作用力的合成, 因此需要准确的判断刀齿的切削状态。

2.1 绞刀坐标系

绞刀是一种螺旋形状的结构, 位于绞吸挖泥船前端, 如图1所示。绞刀齿按照一定的排布规则安装在绞刀臂上^[13], 与岩土相比, 绞刀可以看做一个刚体。每个绞刀齿都属于刚体的一部分, 为了确定每个刀齿的位置和姿态, 需要建立绞刀的整体坐标系和刀齿的局部坐标系。

如图2所示, 建立绞刀坐标系 $o-xyz$, 其中 v_s 为绞刀横移速度, x 轴沿绞刀横移方向 (水平向右), y 轴为竖向, z 轴为绞刀转动轴方向 (从大圈中心指向轮毂中心), 三个坐标轴满足右手直角坐标系。同理, 建立刀齿坐标系 $o'-ma$ 。 τ 轴为刀齿运动的切向 (随时间而改变), n 轴为刀齿运动的法向, 指向绞刀轴, a 轴为轴向, 平行于绞刀轴指向轮毂方向, 三个坐标轴满足右手直角坐标系。

按照绞刀开挖的土质来分, 比较典型岩土分为三种: 岩石、砂土和粘土。



图1 绞吸挖泥船

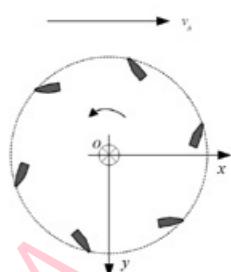


图2 绞刀坐标系

2.2 刀齿坐标变换

绞刀运动为绕钢桩、桥架耳轴和绞刀轴的三维欧拉转动^[15]。能够通过坐标变换的方式得出在任意时刻的刀齿坐标位置和姿态。

任意时刻的刀齿坐标矩阵用如下公式求出, 需要给出刀齿的坐标矩阵,

$$C_t = H \cdot C_0 \quad (7)$$

其中矩阵 C_0 为绞刀所有刀齿在P-XYZ坐标系下的坐标矩阵, 显然在不考虑刀齿磨损的情况下, 矩阵 C_0 是不变的。

假设刀齿总数为 m , 则 C_0 为 $4 \times m$ 矩阵。

$$C_0 = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \cdots & X_m \\ Y_1 & Y_2 & \cdots & Y_m \\ Z_1 & Z_2 & \cdots & Z_m \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

当绞刀工作时, 绞刀的运动形式既有绕轴的旋转运动又有沿着水平方向的横向移动, 则矩阵 H 的矩阵形式为如下其次变换矩阵, 结构形式为 4×4 矩阵, 该矩阵能够实现坐标系的平移和旋转。

$$H = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & vt \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

当考虑绞刀俯仰姿态时, 矩阵 H 修正为 H_s 。

$$H_s = H \cdot H_d \quad (10)$$

其中矩阵 H_d 为考虑绞刀向下俯视角度 α 的旋转矩阵, 表示为如下 4×4 矩阵, α 以向下为负值。

$$H_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.3 切削状态判定

绞刀实际切削区域为不规则形状^[13-14], 桥架下放角度对绞刀切削区域形状影响明显, 而且切层厚度 ΔH 和步进距离 ΔL 对其形状尤为显著。切层厚度和步进距离可分别表示为,

$$\Delta H = \text{Max}\{Y_{djt} - Y_d\} \quad (12)$$

$$\Delta L = \text{Max}\{Z_{fjt} - Z_f\} \quad (13)$$

其中, d_j 和 f_j 分别为最下端刀齿和最前端刀齿序号, Y_{djt} 为最下端刀齿竖向坐标, Z_{fjt} 为最前端刀齿纵向坐标(从船艉指向船艏为纵向), Y_d 为下放之前垂向值, Z_f 为步进之前纵向值。

比较绞刀在任一时刻的刀齿坐标, 容易判断绞刀在该时刻参与切削的刀齿序号。绞刀齿的坐标满足式(12)和式(13)时, 该刀齿处于切削状态。

$$Y_{it} - Y_d \leq \Delta H \quad (14)$$

$$Z_{it} - Z_f \leq \Delta L \quad (15)$$

其中, Y_{it} 为刀齿的垂向值, Z_{it} 为刀齿的纵向值。

2.4 软件研制

使用 VB (Visual Basic) 进行绞刀载荷分析软件的编制。软件的基本功能包括: 针对不同的绞刀参数、土质参数和操作参数进行计算, 能够计算绞刀的横移载荷、对地载荷、轴向载荷和绞刀功率等。

3 实例计算

3.1 计算工况

以某功率为 5000 kW 的大型自航绞吸挖泥船切削岩石绞刀为模型^[13], 计算工况为: 切削厚度 1200 mm、步进距离 400 mm、绞刀转速 30 r/min、横移速度 10 m/min、绞刀倾角 30°。

3.2 计算结果

如图 3 所示, 在不同倾角时绞刀功率有所不同, 绞刀功率呈现出明显的周期性变化。随着绞刀倾角的逐渐增大, 绞刀功率先减小再增大, 其中在倾角 15° 时的功率约 2850kW 左右。如图 4 所示, 随着绞刀倾角的增大, 绞刀的横移载荷先减小再增加, 与绞刀功率的变化趋势相同。因为在绞刀倾角为 0° 时, 绞刀轴线指向船艏方向, 参与切削的刀齿更加靠近大圈方向, 刀齿的受力半径也较大。当绞刀倾角在 30° 时, 绞刀参与切削的刀齿也增多, 但是刀齿的受力半径较小。绞刀倾角为 15° 时, 参与的刀齿数相对于 30° 时较少, 刀齿的受力半径相较于 0° 时也较小, 因此绞刀功率和横移载荷均为较小值。

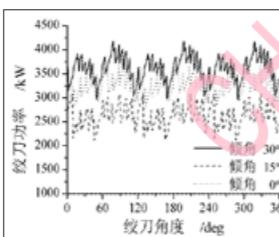


图 3 不同倾角绞刀功率

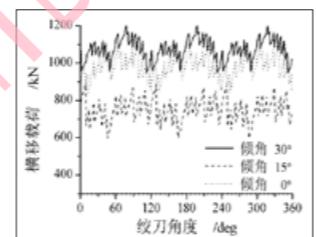


图 4 不同倾角绞刀横移载荷

如图 5 所示, 在绞刀转速、倾角和步进相同的情况下, 不同的泥层厚度对应的绞刀功率随着泥层厚度的增加而增加, 与实际情况相符。绞刀功率均呈现相同的周期性波动, 变化趋势一致, 当泥层厚度到 1500mm 时, 绞刀功率的极值也稍微超过 5000kW, 约 5150kW。如图 6 所示, 绞刀的横移载荷也是随着泥层厚度的增加而增加。当泥层厚度为 1500mm 时, 绞刀的横移载荷约 1300kN, 与该绞刀所属船舶的横移锚的极限锚固力相近。从图 5 和图 6 可以看出, 增加泥层厚度而获得高产量的情况下, 绞刀功率和绞刀横移载荷也在迅速增加。

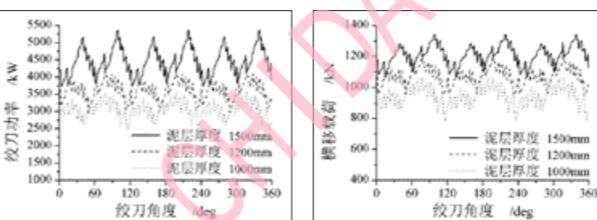


图 5 不同泥层厚度绞刀功率

结论

研究了刀齿的切削岩石、砂土或黏土的载荷模型, 以绞刀功率和绞刀载荷为导向, 编制了适用于绞吸挖泥船的绞刀载荷分析软件。

以某 5000kW 绞刀计算为例验证了绞刀载荷软件的可靠性, 绞刀功率和绞刀横移载荷的计算结果与实际相符。该软件可以计算绞刀功率、横移载荷、对地载荷和顶推载荷等, 对实际施工效率的提高具有重要的参考价值。

文中对岩石、砂土和黏土等构建了载荷模型, 但是实际施工中的土质具有不均匀性、非线性和各向异性等, 因此在今后的不同岩土的切削机理的研究中, 应重点进行切削机理的分化和改进。

参考文献:

- [1] 中国疏浚协会. 国内外疏浚设备技术性能手册(港航疏浚与吹填设备分册) [M]. 北京: 中国疏浚协会, 2013 年版.
- [2] 何炎平, 冯长华, 顾敏童, 等. “天鲸号”大型自航绞吸式挖泥船 [J]. 船舶工程, 2009, 31(5): 1-5.
- [3] Miedema, S.A., Considerations on limits of dredging processes, 19th Annual Meeting & Technical Conference of the Western Dredging Association, Louisville Kentucky, May 16-18, 1999.
- [4] Miedema, S.A. & Zhao Yi, An Analytical Method of Pore Pressure Calculations when Cutting Water Saturated Sand, Texas A&M 33rd Annual Dredging Seminar, June 2001, Houston, USA 2001.
- [5] Zhao Yi, & Miedema, S.A., Finite Element Calculations To Determine The Pore Pressures When Cutting Water Saturated Sand At Large Cutting Angles, CEDA Dredging Day 2001, November 2001, Amsterdam, The Netherlands.
- [6] Miedema S.A., The cutting mechanisms of water saturated sand at small and large cutting angles [J]. Delft University of Technology, Mechanical & Dredging Engineering, Mekelweg 2, 2628 CD Delft, The Netherlands, 2004, (1): 1-13.
- [7] 张文宜, 陈新权, 谭家华. 绞吸式挖泥船外力计算软件及应用 [J]. 中国港湾建设, 2008, (6): 6-8.
- [8] 姚建伟, 杨启. 基于岩石切削理论的超大型绞吸挖泥船绞刀动载荷分析 [J]. 中国港湾建设, 2011, (1): 5-10.
- [9] 姚建伟. 绞吸挖泥船大功率绞刀切削载荷计算与桥架结构动力响应分析 [D]. 上海交通大学, 2011.
- [10] 杨桢毅, 朱汉华, 范世东等. 基于二维切削理论的绞刀刀臂载荷分析 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(5): 1040-1043.
- [11] 李柏, 焦修勤, 黄睿等. 绞吸式挖泥船挖岩绞刀动载荷模拟分析 [J]. 船海工程, 2013, 42(5): 119-122.
- [12] 芦凯鹏. 对绞吸式挖泥船绞刀切削岩土的数值分析 [D]. 华北水利水电大学, 2014.
- [13] 苏召斌, 林森, 刘俸麟. 大型绞吸挖泥船挖岩绞刀切削数值模拟 [J]. 水运工程, 2017, (8): 40-44.
- [14] 林森, 苏召斌, 李章超等. 绞吸挖泥船大功率挖岩绞刀设计与研究 [J]. 中国港湾建设, 2017, 37(11): 46-48.
- [15] 苏召斌, 林森. 绞刀运动姿态的欧拉角表示 [J]. 中国港湾建设, 2017, 37(12): 62-66.

作者简介:

苏召斌, 男, 中交天津航道局有限公司, 工程师。
陈定, 男, 中交天津航道局有限公司, 工程师。
林森, 男, 中交天津航道局有限公司, 工程师。



中国疏浚行业 2020年第二季度大事记

2020年4月**4月12日**

●中交一航局牵头、中交河海公司等单位组成的联合体，中交路建牵头、三公局等单位组成的联合体，中交天航局牵头、中交生态组成的联合体，中交四航局牵头、中国城乡等单位组成的联合体，分别中标唐山市全域治水清水润城县区工程PPP项目A标、B标、D标、E标共计4个标段，中标金额分别为25.5亿元、24.39亿元、24.09亿元及22.68亿元。项目合作期均为25年，其中建设期3年，运营期22年。

4月13日

●中交上航局上海交建公司承建的上海国际时尚中心新建游船码头项目开始旧防汛墙破拆作业。该项目将在今年年底投入运营，届时将成为上海这个“世界会客厅”的又一水上旅游门户。

4月15日

●中交天航港湾公司长江项目部针对传统人工抛石量方存在的各种弊端，创新采用无人机测绘技术进行抛石量方，取得了较好成效。将新兴的无人机航空测绘技术引入抛石量方领域，依托数字高程模型(DEM)与运动恢复技术

(SFM)，将航拍图像转化为真实完整的三维立体模型，换算出船载石方的体积数据。

4月21日

●中国船舶集团下属黄埔文冲公司为沧州黄骅港航务工程有限公司建造的10000立方米耙吸挖泥船2号船“沧航浚2”号(H5689)顺利出坞。

4月23日

●振华重工为长江航道局建造的4500方/时自航绞吸挖泥船“长狮18”圆满完成首次海上试航任务，返回振华重工启东海洋公司。“长狮18”总长139.54米，型宽28米，型深9米，最大挖深35米，航速12节。该船为单体、钢质、全焊接结构，可挖掘粘土、密实砂土、强风化岩和弱风化岩。

4月30日

●中交广航局建设的连云港港30

万吨级航道二期工程航道疏浚施工项目LYG-302-H3.1标段一次性顺利通过验收。连云港港30万吨级航道二期工程是构建国家级主枢纽港、区域性国际航运中心的重大公共基础设施项目，建成后将对连云港打造成为连接“一带一路”的国家级综合交通枢纽、新亚欧大陆桥出海门户和区域性国际枢纽港具有十分重要意义。

2020年5月**5月1日**

●中交天航局日照港石臼港区及岚山区部分水域维护性疏浚工程全面开工。

5月6日

●中交上航局参建的上海苏申内港线暨吴淞江(老白石路~油墩港)整治工程1标段正式开工。该工程是上海市“一环十射”高等级航道的重要组成部分，也是国家批准的“172项重大水利工程之一”。

4月27日

●中交天航局唐山港京唐港区新建防波挡砂堤和拆除既有防波挡砂堤工程正式开工。

4月28日

●长江武汉航道工程局成功中标云南省个旧市大屯海水库清淤扩建工程。该项目位于云南省个旧市，建设工期36个月，主要包含库底清淤工程、新

通道特种海洋平台珠江口专用航道一期

建人工岛工程、入库沟渠清淤等。

工程施工(S14标)，中标合同额为2.4亿元，该新建航道将作为深中通道沉管浮运的专用航道。

5月7日

●中交天航局滨海公司横沙八期工程2#泵闸水闸侧上部厂房成功封顶，较计划提前2天完成了浇筑任务。标志着2#泵闸厂房、管理房主体结构全部完成，此次封顶对后续装饰装修部分施工的按期推进具有重要意义，也为横沙八期工程2020年顺利完工奠定坚实基础。

5月10日

●由中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司承建的湖北省首艘两栖式多功能环保疏浚船“武航一号”正式开工建造。该船的成功开建，将为中交疏浚进一步拓展生态环保和城市河湖综合治理业务提供动能。

5月11日

●中交疏浚(集团)股份有限公司被国家税务总局上海市杨浦区税务局评定为“2019年度纳税信用等级A级企业”。这是公司首次获得纳税信用评定最高等级。

●中交二航局牵头组成的联合体成功中标重庆市渝北区空港新城城市基础设施及公共服务PPP项目。项目总投资额超过55亿元，采用“PPP+EPC+可行性缺口补助+使用者付费”运作模式，整体合作期为20年。

5月12日

●宜昌航道工程局申请的“吸盘式挖泥船泥浆装驳装置”获得实用新型专利。该发明使得吸盘式挖泥船告别了以往单一的施工方式，提高了吸盘式挖泥船在长江航道疏浚工程中的适用性，也为今后同类型船舶的改造提供了借鉴和帮助。

5月13日

●中交广航局设研究院中标韶关港白土港区一期工程可行性研究报告编制项

目，白土港区一期工程位于韶关曲江区白土镇，是韶关港重点发展的核心作业区之一，计划建设8个1000吨级多用途泊位，码头岸线长度615米，并相应配套机械设备、给排水、供电照明、通信等辅助生产等设施。项目总占地面积约346亩，总投资估算约为7亿元。

5月15日

●重庆工程局昆明空港经济区秧草凹项目1#防洪渠箱涵、明渠工程顺利完成验收。

5月25日

●中交广航局承建的江苏盐城港大丰港区深水航道一期工程二阶段疏浚施工项目(DFG-HDSG标段)顺利完工，10万吨级散货船无须减载即实现乘潮通航。

2020年6月**6月2日**

●在江苏巨鑫石油钢管有限公司海工基地码头，巨鑫钢管为中国路桥公司孟加拉蒙塔巴瑞电厂码头项目制造的首批118支钢管桩顺利发运。

6月5日

●中交天航局云南省昆明市官渡区海河清淤及生态修复项目通过竣工验收。该项目分为建设期和运营期，建设期主体工程完成后，官渡海河便成为国内首个通过综合整治消除“黑臭水体”称号的成功案例。

6月11日

●中国广核集团在北京召开境内新能源业务领域2020年供应商大会。会上，振华重工被授予中广核新能源2019年度“四星级供应商”及中广核新能源2020年度“战略合作供应商”。

6月12日

●中国港湾承建的加纳特码集装箱码头工程全面完工。该工程于2016年7月开工，合同工期49个月，较原

施工计划提前50天完成。

6月22日

●中交广航局联合北京中宇瑞德建筑设计有限公司和青岛海科霖能源环境有限公司等单位成功中标江西省永修县杨柳津河一修河流域农业面源污染治理EPC O&M总承包项目。

6月26日

●中交三航局中标中广核广东海域海上风电项目集约化施工1标段，中标金额约59亿元，工期501日历天。该项目是中国交建单次中标最大的海上风电项目。

●中交一航局中标上海至武汉国家高速公路无为至岳西段项目新建路基施工WYTJ-06标段工程。该项目位于安徽省桐城市，全长28.69公里，施工内容主要包括：主线路基21.81公里，总挖方量387.92万方，总填方量398万方，软基换填41.84万方；特大桥1座、大桥6座、中小桥6座、互通式立交2处、停车区1处；预制装配式箱梁326榀、安装T梁544榀、涵洞及通道134座，天桥16座。

6月30日

●中交海建成功中标“宁德1号”深远海养殖平台总包项目，彰显中交海建在海洋牧场设计施工方面的专业实力，标志着中交海建在深远海海洋牧场业务领域再次迈出了坚实的一步。

6月30日

●由中交上航局投资建造的两艘3000方等级自航耙吸挖泥船在振华重工启东公司正式开工建造。开工建造的两艘3000方等级自航耙吸挖泥船均为双机、双桨、复合驱动、单耙、单甲板，球鼻艏、带双尾鳍型钢质焊接流线型船体；具备无限航区航行能力，满足最新生效规范、规则公约，船舶环保性能及船员居住环境有了大幅改善。