

中文摘要

在传统的天津港维护疏浚工程当中，水深维护是其唯一目的，历年来投入大量的技术力量去研究疏浚的新工艺，并未考虑在挖泥、疏松、弃土处理等施工过程中，对港口环境及周围水体的影响，本文首先概述了天津港传统维护性疏浚的现状，分析了天津港的自然条件和泥沙回淤规律，指出天津港是在渤海湾西岸海河河口北侧的淤泥质浅滩上人工挖海建港、吹填造陆建成的，需常年实施水深维护疏浚。

本文详细分析了现有的传统挖泥设备的工作原理，对传统挖泥船施工环保性进行了观测，通过几次在不同位置对现场水体取样，分析其对环境的影响，找出现有挖泥设备存在的缺陷，得出耙吸船造成的二次溢流，已导致施工区附近海域海水浑浊度增加，影响海洋环境。针对疏浚中产生的环保问题，本文从实际出发，重点放在研制出环保疏浚船舶设备的新技术与新工艺研究，并进行初步研究与实践。通过大量的实验数据，对新设备进行施工扰动状况观测后，并根据天津港各水域的特点，逐步投入到天津港实际。经实际证明，新的环保设备在当前，既能独一无二地胜任天津港北疆与东疆港区、泊位港池的维护疏浚施工，又具有良好的疏浚环保性能，这在国内实属首创。港口环保工作的开展，必将会使天津港成为淤泥质海滩上人工开挖出来的“清水大港”，最后本文也指出新设备也存在一定的问题，以便今后做进一步的研究。

关键词：天津港；维护性疏浚；环保；新设备

ABSTRACT

In the traditional maintenance dredging of Tianjin Port, the water depth is the sole purpose. Over the years, a lot of technical personnels was put in studing the new technology of dredging in Tianjin Port. However, the negative effects on the port environment and the surrounding water bodies have not been considered. This paper provides an overview of the Tianjin Port maintenance dredging of the traditional status and analyzes the natural conditions of the Tianjin Port. It is shown that Tianjin Port is the bend in the Bohai Sea in the West Bank on the north side of the Haihe River, which required land from the sea into the implementation of annual maintenance dredging of the water depth.

This paper analyzes the operating principle of the traditional dredging equipments and observes the environmental protection method of traditional dredger. Basing on the measurement data of water sampling from different locations, the negative effects on the environment of traditional dredging technology are analyzed and the disadvantages of the dredging equipment have been found out. it is believed that the trailing suction caused by the second run-off vessels leads to the construction area increased turbidity near the sea and affects the marine environment. Dredging for the environmental problems, this thesis put focus on new technology equipment and new technology research. Basing on a large number of experimental data, we carried out the construction of new equipment after the disturbance conditions of observation and the Tianjin Port in accordance with the characteristics of the waters, and gradually put into practice the Tianjin Port. It is proved that the new environmental protection equipment is not only adequate to dredging northern and eastern harbor area and berths harbour basin of Tianjin Port, but also has a good environmental performance, which is an original technology in China. Port the work of environmental protection is bound to the Tianjin Port will become artificial beach mud digging out the "water port". Finally, this thesis also pointed out that there are also some problems with the new equipment for further studies.

KEY WORDS: Tianjin port, maintenance dredging, environmental protection, new equipment

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得天津大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名: 陈晓萍 签字日期: 2009年8月10日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名: 陈晓萍

导师签名: 丁立

签字日期: 2009年8月10日

签字日期: 2009年8月10日

第一章 绪 论

1.1 引言

天津港是我国最大的人工港。所谓“人工港”，主要是指靠人工开挖航道、港池与泊位，并需经常疏浚泥沙来满足通航与靠泊的要求。

天津港是在渤海湾西岸海河河口北侧的淤泥质浅滩上人工挖海建港、吹填造陆建成的。自1939年开始筑港以来泥沙回淤严重，建港初期，挖泥量逐年增加，在逐年增加挖泥量的同时，在港内航道和停泊水域等深水区频频发现流动性很大的浮泥，一次大风大浪过去，浮泥面显著增高。为此不少人为天津港前途担忧，有专家断定“聚淤现象”有使天津港会变成“死港”的危险^[1]。

随着天津港港域泥沙环境的不断优化（进港含沙量逐渐减少），以及港内深水区增加，尤其是浅滩吹填成陆，使港内无用水域大量减少，及其各种有效减淤措施的有效实施，以及维护疏浚管理的现代化，尽管随着港口规模的不断扩大，就天津港泥沙回淤程度而言，已由五六十年代的“严重回淤港”，变成了90年代后期的“轻淤港”^[2]。

随着天津港的开发建设，港口水域面积逐步增大，船舶通航水深逐渐加深，港口水深维护范围及疏浚工程量也随之加大。从绝对数量而言，天津港每年的泥沙回淤量依然非常巨大，需常年实施水深维护疏浚。为了维持天津港各种大型船舶的通航水深，天津港依然每年需投入800万m³以上的维护疏浚工程量，涉及资金都在上亿元^[3]。

1.2 天津港传统的维护性疏浚工程对环境存有影响

在传统的天津港维护疏浚工程当中，水深维护是其唯一目的，历年来投入大量的技术力量去研究疏浚的新工艺，并未考虑在挖泥、疏松、弃土处理等施工过程中，对港口环境及周围水体的影响，在挖泥船施工作业时，由于机械扰动、溢流、洒漏等因素，导致施工区附近海域海水混浊度增加，水体透明度下降，影响

海洋环境，造成“二次回淤”。从国家“十一五”规划中不难看出，关于国民经济的目标最关键的三个词就是“资源、环境、自主”。如今，天津市政府将“碧海蓝天”工程作为天津市可持续发展的战略措施提了出来。随着人们对环保意识的增强，一系列环保政策与法规也相应出台，对天津港的疏浚工程也提出了环保要求。

1.3 国内外现状

在环境保护越来越受到世界各国重视的今天，环保疏浚应运而生。环保疏浚是水下机械疏浚行业的一个新的分支，其目的是最大限度地清除被污染的底泥，清除污染水体的内源。尽可能地减少施工中带来的二次污染。水陆交界的河沿岸，是人类活动最活跃的地区，人们的交通和经济建设离不开疏浚作业。总起来说，全世界用于航道维护及加深的投资每年达数十亿美元之巨^[4]。20世纪90年代起，各国都把可持续发展列为国策。十分重视环境保护问题，为此投入技术力量，开展环保疏浚等新技术新工艺研究^[5]。

我国在环保疏浚方面起步较晚，从1998年首次将环保疏浚理念引入国内大型湖泊污染治理以来，环保疏浚技术得到快速的发展，全国各地掀起一股环境疏浚的浪潮，我国环保疏浚技术起步于近海疏浚工程。如吹填造陆工程中采用的防污屏、环保绞刀头和泥舱溢流监控系统等技术，但由于近海疏浚环保政策相对宽松，环保疏浚技术得不到充分的体现和发展^[6]。到上世纪90年代末，滇池治理工程中应用了环保疏浚技术，拉开了国内江河湖泊环境疏浚的序幕，同时推动了环保疏浚技术的快速发展。2007年1月，交通部在云南举办了有关疏浚技术问题的培训班，在所发的参考资料中，也专列一章涉及“环保疏浚”，表明我国港口与航道疏浚行业的最高主管部门，也开始重视此项工作^[7]。

1.4 本文研究内容

天津港维护疏浚，尚属“非环保疏浚工程”。如今，天津市政府将“碧海蓝天”工程作为天津市可持续发展的战略措施提了出来，同样，要求天津港成为设施先进、功能完善、管理科学、运行高效、文明环保的现代化国际深水港，因此，本项目所研究的在天津港维护疏浚过程中，如何采用环保疏浚新技术、新工艺，避免“二次回淤”，使港口海水清澈化，无疑是港口环境美化的一个重大举措。

环保疏浚与环保疏浚工程不同，前者强调的是疏浚过程中所采取的各种环保技术措施，而后者强调的是某项疏浚工程的主要目标是治理环境，就如航道疏浚

工程的主要目标是疏通浚深航道。不管工程的主要目标是什么，只要在疏浚施工过程中有针对性地采取了一些环保技术措施，从某个角度上都可以称为环保疏浚^[6]；而环保疏浚工程是借助环保疏浚的工程措施清除受污染的底泥、最终实现对环境的治理的目的，因此，环保疏浚对疏浚过程中所采取的环保措施的要求是最严格的，也就是环保疏浚技术在环境疏浚工程中最能得到充分的利用和体现^[8]。其次，在整个疏浚施工流程中的任何一个环节都可能有环保疏浚技术的应用。疏浚工程主要包括疏挖、输送、堆存、余水排放四方面内容，疏挖过程中采用环保绞刀头、输送过程中岸管投放促凝剂、堆存场地的防渗技术以及保证余水达标排放的余水处理技术，这些都是环保疏浚技术在疏浚施工各个环节的具体应用^[9]。最后，环保疏浚技术是一项多学科的综合技术，综合了机械、水工、岩土、环境、生态等诸多学科，环保疏浚产业涉及了制造、设计、科研、施工等相关行业。因此，环保疏浚技术的开发和推广必须集结各相关行业、相关学科的技术力量，使之沿着更深层的技术水平和更广阔的应用领域不断发展。

环保疏浚涉及的范围很广，研究的内容侧重点也各不相同。天津港港务设施管理中心与天津市海亿海洋技术开发公司多年来一直对港内水深维护技术进行科研创新，针对疏浚中产生的环保问题，把重点放在了环保疏浚船舶设备的新技术与新工艺研究，进行初步研究与实践。通过分析传统疏浚设备环保性分析、找出现有挖泥设备存在的缺陷，研制出新的环保疏浚新颖设备与施工工艺，并投入天津港的实际生产。在当前既能独一无二地胜任无吹泥地后天津港北疆与东疆港区、泊位港池的维护疏浚施工，又具有良好的疏浚环保性能，这在国内实属首创。

第二章 天津港自然条件与泥沙回淤规律

2.1 自然条件

天津港位于渤海湾顶坡坡度平缓的淤泥质海滩上，港区南侧毗邻海河河口北岸，港区北侧距蓟运河河口约 12km。随着天津港近十年来的快速建设与发展，与六十、七十年代相比，无论是港口规模、航道等级，还是港口边界条件均发生了明显的变化^[10]。

本区潮汐类型为不规则半日潮型港区水域潮流呈往复流性质。港内海流方向基本与航道轴线平行，涨潮流速大于落潮流速。港区海域每年冬季有不同程度的海冰出现，初冰日在 12 月下旬，终冰日在 2 月下旬，总冰期约 60 天，多年资料统计，严重冰期年平均仅为 10 天，正常年份海冰对港口营运及船舶航行无甚影响。津港区域土层分布较有规律，自上而下主要分为三大层：人工吹填的冲填土；海相沉积的淤泥和淤泥质粘土、粘性混贝壳土；河口三角洲相沉积的粉土、粉质粘土、粉土及粉细砂、粉质粘土、粉土、粉细砂。

含沙量的多少，直接反映泥沙环境，掌握沿航道纵向含沙量分布规律，对计算航道泥沙回淤强度和数量，安排维护疏浚工程计划等都是最基本、最重要的参数，天津港曾进行了两次进行了含沙量测验，主要是对航道南侧边滩纵向分布进行了一定数量的观测，得出的规律如下：

表 2.1 沿航道纵向含沙量分布 单位：kg/m³

航道里程 (km)	4+0	6+0	8+4	12+0	13+4	15+5	17+0	19+0
1987	0.054	0.211	0.287	0.199	0.115	0.066	0.051	0.035
2001	0.031	0.067	0.140	0.087	0.074	0.024	0.019	0.016

2.2 泥沙来源

作为淤积海港，大致可分为：潮汐汊道型、河口型、深槽边坡型和海滩型四大类型。天津港港内属于典型的人工潮汐汊道型泥沙回淤海港，而外航道 8+8—15+0 则属于航道纵切海滩型回淤类型，既受港内进出潮流影响，又受海滩泥沙横向运动的影响，而 15+0 以外，则属于浅滩型，主要受浅滩潮流影响。

天津港泥沙来源问题，自五十年代至今，有众多的研究与论述，目前基本上认为：天津港自河、港分家以来，现代天津港泥沙来源主要来自天津港外海-5.0 米等深线以内浅滩物质的“波浪掀沙、潮流输沙”的再搬运，港内泥沙与外航道泥沙主要由潮流输沙为主。潮流输沙有两种形式：悬浮沙与近底高浓度含沙水层移动（包括流动浮泥），至于两种输沙方式所占的比例关系，目前尚不清楚。

外海泥沙环境，是决定天津港泥沙回淤强度的最主要因素之一。目前天津港外海港域已无恒定的泥沙来源。进港含沙量的减少，是港域周边泥沙环境改善的必然结果，这为天津港建设深水航道创造了有利条件。

2.3 泥沙回淤强度分布规律

2.3.1 港池回淤强度分布规律

本文所说的港池（或航道）的回淤强度是指港池（或航段）在一年中泥沙累计的回淤厚度，也称年回淤速率。它是衡量泥沙回淤程度的重要指标，也是合理安排维护疏浚工程计划的重要依据，掌握港池淤强分布的基本规律，即可方便、可靠地预测港口进一步扩建、改造工程引起的泥沙回淤情况。

港内的泥沙回淤强度主要与港外的泥沙环境、动力条件和港内流场分布等因素有关。天津港淤积泥沙全部由海向进入，泥沙随潮流入口门以后，由于港内水域平静，流速降低，水中悬浮的泥沙便开始落淤沉积，较粗颗粒首先在口门附近落淤，较细颗粒泥沙可运移到较远的地区落淤，同时，港内水域离口门越远，水流速度越小，输沙能力越弱，只有极细部分泥沙才有可能输移到较远的地区，故港内回淤强度分布形成离口门越远淤强越小的规律。

在同等条件下，水深越大泥沙回淤越多的现象是众所周知。天津港泊位处的淤强较同一港池处的淤强大 1.3-1.6 倍。究其原因，除悬沙均匀淤积外，尚有底部高浓度的含沙层的浮泥层，在重力作用下，流入较港池为深的泊位区域所致。

2.3.2 外航道回淤强度分布规律

天津港以口门为界分内、外航道，由于边界条件和动力条件的截然不同，其回淤机制和回淤状况也完全不同。内航道属港内水域的一部分，其回淤强度与离口门的距离、水深的大小和周边浅滩面积的多少有关，所以其淤强可参照航道段临近港池的淤强，只是航道的水流状态与挖入式港池的水流状态有所差别，淤强也会有少量差异。

外航道的淤强计算，有一个专门的计算公式，里面的参数涉及到泥沙动力沉速、含沙量等。为计算航道的淤强分布，首先必须掌握含沙量沿航道纵向的分布规律，因为航道淤积泥沙来自两侧边滩，尤其随涨潮流进入航道的南侧边滩水体的含沙量大小是影响航道淤强的最主要因素。随航道里程的增加，边滩水深是逐渐增深的，因此波浪对边滩的掀沙作用逐步减弱。

2.4 泥沙回淤强度分布规律

对港口泥沙回淤程度分类与评价，由于港口规模不同，使用水深不同，不应采用绝对量作为港口回淤程度的分类标准，我们经常可见到“严重回淤”“回淤”、“轻淤”等等，这些只是一种倾向性定性。为此，我们不妨采用两种参数：“挖泥吞吐比”和“淤强水深比”评价，作为港口回淤程度分类标准是较合适的。根据“挖泥吞吐比”，结合国内外有泥沙回淤的港口，标准如下：

表 2.2 港口的分类标准

年挖泥量/年吞吐量	港口类型
<0.001	不淤港口
0.001~0.01	微淤港口
0.01~0.1	轻淤港口
0.1~1.0	回淤港口
>1.0	严重回淤港口

根据天津港历年的挖泥数量和吞吐量资料，分年代统计两者的比值，可以看看出天津港由五十年代的严重回淤港转变为现在的“轻淤港”。

表 2.3 天津港不同时期的挖泥吞吐比值

年代	平均值	最大值 (%)	港口类型
50 年代	220	336	严重回淤港
60 年代	113	170	严重回淤港
70 年代	68	93	回淤港
80 年代	46	80	回淤港
91-93 年	22	26	回淤港
94-98	9	11	轻淤港

按历史资料统计，依据“淤强水深比”指标评价，天津港同样经历了从“严重回淤港”到“回淤港”最后到“轻淤港”的演变过程范围。见下表：

表 2.4 天津港不同时期的淤强水深比

评价指标 年代	淤强水深比	
	%	港口类型
60 年代	170	严重回淤港
70 年代	93	回淤港
80 年代	80	回淤港
91-93 年	26	回淤港
94-98	11	轻淤港

第三章 天津港港内传统疏浚设备环保性分析

3.1 天津港水深维护疏浚工程现状

天津港目前已成为三十万吨级世界大港，新口门（16+000 航道段）比老口门（8+800 航道段）平移约 7200m，港内现分为北疆港区、东疆港区与南疆港区。天津港码头设施岸线总长度 23216.31m，其中生产用泊位 21176.82m，非生产用泊位 2039.49m，总泊位数 110 个，其中生产用泊位 99 个，非生产用泊位 11 个。码头前沿泊位部分的维护水深一般在-10——12m，而近期修建的深水泊位可达-16.5m。

3.1.1 港池与泊位

目前，天津港的所有港池都在南、北防波堤的掩护之下。天津港现有泊位年泥沙回淤量约 1029666 万 m^3 （表 3.1）。

表 3.1 天津港泊位泥沙年回淤量统计表

区域	面积 m ²	设计水深 m	设计通航 水深 m	年淤强 m/年	年回淤量 m ³	疏浚方式
客运 1 泊位	6500	8.10	7.50	0.15	975	抓斗或抓吸
客运 2 泊位	6500	8.10	7.50	0.15	975	抓斗或抓吸
客运 3 泊位	6500	8.10	7.50	0.15	975	抓斗或抓吸
1 泊位	19892	11.0	10.00	0.25	4973	抓斗或抓吸
2 泊位	19892	11.0	10.00	0.25	4973	抓斗或抓吸
3 泊位	19891	11.0	10.00	0.25	4973	抓斗或抓吸
4 泊位	20500	11.5	10.50	0.45	9225	抓斗或抓吸
5 泊位	21500	10.5	9.50	0.35	7525	抓斗或抓吸
6 泊位	18000	9.0	9.50	0.25	4500	抓斗或抓吸
增 6 泊位	18000	9.0	9.50	0.25	4500	抓斗或抓吸
7 泊位	9547	11.50	10.50	0.38	3628	抓斗或抓吸
8 泊位	9547	11.50	10.50	0.38	3628	抓斗或抓吸
9 泊位	7742	9.00	8.50	0.25	1936	抓斗或抓吸
10 泊位	8810	9.00	8.50	0.25	2203	抓斗或抓吸
11 泊位	8810	9.00	8.50	0.25	2203	抓斗或抓吸
12 泊位	25204	11.50	10.50	0.76	19155	抓斗或抓吸
13 泊位	23655	11.50	10.50	0.76	17918	抓斗或抓吸
14 泊位	7389	9.00	8.50	0.42	3103	抓斗或抓吸
15 泊位	7389	9.00	8.50	0.42	3103	抓斗或抓吸
16 泊位	8582	9.00	8.50	0.42	3604	抓斗或抓吸
17 北泊位	5096	9.00	9.00	0.48	1929	抓斗或抓吸
17 南泊位	4018	10.00	9.00	0.48	1929	抓斗或抓吸
18 泊位	9114	10.00	9.00	0.48	4375	抓斗或抓吸
燃料泊位	8500	10.00	9.00	0.65	5525	抓斗或抓吸
19 泊位	17890	11.00	10.00	0.74	13239	抓斗或抓吸
20 泊位	13056	11.00	10.00	0.74	9661	抓斗或抓吸
21 泊位	21116	11.00	10.00	0.74	15626	抓斗或抓吸
22 泊位	7788	11.00	10.00	0.64	4984	抓斗或抓吸
23 泊位	8825	11.00	10.00	0.64	5648	抓斗或抓吸
24 泊位	8825	11.00	10.00	0.64	5648	抓斗或抓吸

续表 3.1

区域	面积 m ²	设计水 深 m	设计通航 水深 m	年淤强 m/年	年回淤量 m ³	疏浚方式
25—26 泊位	35925	19.00	18.00	2.60	93405	抓斗或抓吸
27—29 泊位	69853	16.00	15.00	1.50	104780	抓斗或抓吸
30 泊位	18525	12.00	11.00	1.00	18525	抓斗或抓吸
31 泊位	23769	12.00	11.00	1.00	23769	抓斗或抓吸
32 泊位	33956	14.00	13.00	1.20	40747	抓斗或抓吸
33 泊位	16069	12.00	11.00	1.00	16069	抓斗或抓吸
34 泊位	13406	12.00	11.00	1.00	13460	抓斗或抓吸
35-36 泊位	30200	15.20	14.20	1.50	45300	抓斗或抓吸
37-38 泊位	30000	15.20	14.20	1.50	45000	抓斗或抓吸
滚装船泊位	58001	11.50	10.50	0.60	6360	抓斗或抓吸
联盟国际	109984	16.00	15.00	1.00	47170	抓斗或抓吸
太平洋泊位	291613	16.00	15.00	1.00	291613	抓斗或抓吸
建材泊位	10600	10.00	9.00	0.60	6360	抓斗或抓吸
新滚装泊位	58001	11.50	10.50	0.60	34801	抓斗或抓吸
欧亚国际泊位	164986	16.00	15.00	0.90	148487	抓斗或抓吸
30-31 段港池	44814	13.00	12.00	0.70	31370	气吸
32-33 港池	71560	13.00	12.00	0.70	50092	气吸
34 段港池	20985	13.00	12.00	0.70	14690	气吸
北港池 1	292294	15.50	14.70	1.20	350753	气吸
北港池 2	431158	15.50	14.70	1.20	517390	气吸
滚装港池 1	75475	15.50	14.7	1.00	75475	气吸
滚装港池 2	66737	15.50	14.70	1.00	66737	气吸
联盟国际港池	332761	15.50	14.70	1.00	332761	气吸
太平洋国际新港池	1057257	15.50	14.70	1.00	1057257	气吸
北航道	439143	15.50	14.70	1.20	526972	气吸

续表 3.1

区域	面积 m ²	设计水 深 m	设计通航 水深 m	年淤强 m/年	年回淤量 m ³	疏浚方式
建材港池	47214	10.00	9.00	0.50	23607	气吸
新建滚装港池	290983	10.00	9.00	0.50	145492	气吸
欧亚国际港池	397015	15.50	14.70	0.70	277911	气吸
南 1 港池	136936	17.40	16.80	1.2	164323	绞吸
南 2、3、4 港池	89021	11.00	10.00	0.80	71217	绞吸
南 5-6 港池	141714	12.00	11.00	0.90	109543	绞吸
南 7-8 港池	109720	12.00	11.00	1.00	109720	绞吸
南 7-8 港池	109720	12.00	11.00	0.90	109543	绞吸
南 9-10 港池	98832	14.80	13.80	1.20	118598	绞吸
南 11 港池	139511	17.40	16.80	1.50	2092067	绞吸
南 12 港池	73222	17.40	16.80	1.50	109833	绞吸
南 1 泊位	33640	18.80	17.80	1.20	40368	绞吸
南 2 泊位	20954	12.40	11.40	0.70	14671	绞吸
南 3 泊位	13049	10.50	9.50	0.60	7829	绞吸
南 4 泊位	30895	13.50	12.50	1.00	30895	绞吸
南 5-6 泊位	58933	13.80	12.80	1.00	58933	绞吸
南 7-8 泊位	61501	13.80	12.80	1.00	61501	绞吸
南 9-10 泊 位	55541	16.30	15.30	1.40	77757	绞吸
南 11 泊位	44461	20.8	19.8	2.4	106706	绞吸
南 12 泊位	37500	20.8	19.8	2.4	90000	绞吸
南 13 泊位	42000	19.6	18.6	2.0	84000	绞吸
南 14-15 泊 位	41877	16.3	15.3	1.50	62816	绞吸
三十万吨原 油泊位	70202	22.50	21.00	8.00	561616	绞吸
客运港池	74342	7.00		0.15	11151	气吸

续表 3.1

区域	面积 m ²	设计水 深 m	设计通航 水深 m	年淤强 m/年	年回淤量 m ³	疏浚方式
1-5 号泊位 港池	148438	10.00	9.00	0.25	37110	气吸
一港池	183707	10.00	9.00	0.25	45927	气吸
二港池	216514	10.00	9.00	0.30	64954	气吸
油港池内 外	37932	4.50	0.27		10435	气吸
三港池	167326	12.00	11.00	0.57	95376	气吸
三港池调 头圆	46041	17.40	16.80	1.2	55244	气吸
四港池	236513	17.40	16.80	1.2	283816	气吸
南 13 港池	80179	17.40	16.80	1.50	120269	绞吸
南 14-15 港 池	97887	14.80	13.80	1.00	93887	绞吸
三十万吨级 原油港池	667335	19.5	19.1	4.0	2669340	绞吸
南 9-南 10 调头圆	41459	17.40	16.80	1.2	497508	气吸
南 11-12 调 头圆	118454	18.60	18.00	1.40	165836	气吸
合 计					1029666	

注：表中年淤强值为近 5 年调查研究所得，经检验，误差不超过 5%。

3.1.2 航道

经过多年建设，天津港先后完成 10 万吨级深水航道、15 万吨级深水航道和 20 万吨级深水航道建设。25 万吨级航道工程的建成，使天津港的航道水深达到 -19.5 米，实现了凡能进入渤海的船舶都能进入天津港，创造了在淤泥质海滩建设深水港的先例，成为了世界等级最高的人工深水港。现在天津港主航道长 44 公里，航道底宽最宽已达 260 米，航道水深最深已达 -19.5 米，20 万吨级船舶可以随时进港，25 万吨级船舶可以乘潮进港。以 08 年航道维护疏浚范围为例，航

道的设计水深如下表：

表 3.2 天津港主航道设计水深

区域	面积 m ²	设计 水深 m	设计通 航水深 m	年淤强 m/年	年回淤量 m ³	疏浚方 式
0+000—1+100	66000	5.50		0.10	6600	耙吸
1+100—1+460	21600	7.5		0.20	4320	耙吸
1+460—2+600	68400	10.0	9.00	0.35	23940	耙吸
2+600—4+000	210000	10.00	9.00	0.35	23940	耙吸
4+000—5+000	180000	17.4	16.8	0.90	162000	耙吸
5+000—7+088	476064	17.4	16.80	1.00	476064	耙吸
合计					672924	

3.2 天津港维护疏浚基本要求

3.2.1 设计水深与通航水深

设计水深与通航水深是在开拓港池、泊位与航道时，按设计船型尺度依据有关规范所计算的开挖深度：

$$\text{设计水深} = \text{通航水深} + \text{备淤富裕深度}$$

其中备淤富裕深度，应根据两次挖泥间隔期的淤积量确定，一般不小于 0.4m。

3.2.2 设计水深与通航水深

基本要求，即确保港口正常作业所需的各水域的水深，假如有特大吃水的船只需进出港（超过设计船型），则一般按特殊要求处理。

几十年来，随着天津港区的扩大，疏浚范围也随之增大，目前包括主航道（4+00—7+088），三港池、四港池、东突堤北港池、滚装港池、东突堤低头。目前，天津港港内水深维护和港池水深疏浚已经成为了全天候的工作。天津港水深维护疏浚工程实施中，在疏浚的船舶选择上，根据施工作业区的地形、水深、土质等自然条件以及泥土处理方式的不同，有自航耙吸式船、绞吸船以及抓斗船等几种船型。对于港池泊位水深维护主要利用绞吸船通过陆地管线将疏浚土吃至泥塘进行造陆，航道水深维护利用耙吸船将疏浚土外抛至外海指定水域。05 年以后，由于天津港北疆无吹泥地后，无法采用绞吸式挖泥船的北疆大面积的顺岸式

港池，尚无其它适宜的疏浚手段，只能采用耙吸式挖泥船施工。

以 06 年为例，该年天津港航道、港池、泊位水深维护性疏浚工程设计总工程量为：601.5 万 m^3 ，其中主航道（4+000—7+000）、北支行道、四港池、南 1 港池及其砖头圆、东突堤北港池与客滚港池与客滚港池采用自航耙 4500 m^3 舱容耙吸式挖泥船施工，设计工程量为：351.7 万 m^3 。南疆区域港池及泊位采用 1600 m^3/h 绞吸式挖泥船施工，设计工程量为 124.2 万 m^3 ，北疆港区泊位及部分港池边角区域其他各港池、泊位采用抓斗挖泥船和卧式吸泥泵相结合、气吸方式施工，设计工程量为 339.2 万 m^3 。

3.3 挖泥船的类型及工作原理

挖泥船的种类较多，每种挖泥船都有一定的优缺点。各种型式的挖泥船施工时对挖深、卸泥方法、进入现场条件、气象状况及环境因素等方面都有一定的适应程度，下面主要分析在天津港所使用的几种挖泥船型^[11]：

3.3.1 设计水深与通航水深

它是目前在疏浚工程中运用较广泛的一种船舶，它是利用吸水管前端围绕吸水管装设旋转绞刀装置，将河底泥沙进行切割和搅动，再经吸泥管将绞起的泥沙物料，借助强大的泵力，输送到泥沙物料堆积场，它的挖泥、运泥、卸泥等工作过程，可以一次连续完成，它是一种效率高、成本较低的挖泥船，是良好的水下挖掘机械。

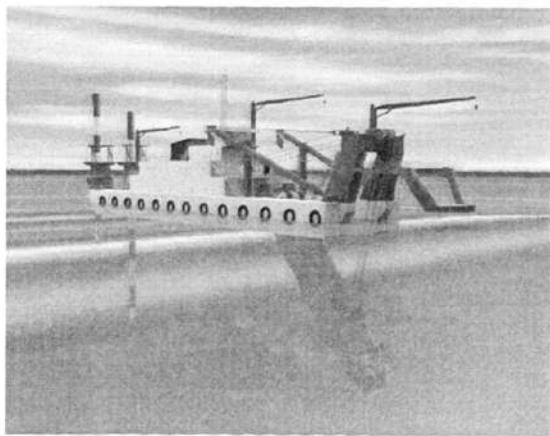


图 3.1 绞吸式挖泥船

3.3.2 抓斗式挖泥船

是利用旋转式挖泥机的吊杆及钢索来悬挂泥斗；在抓斗本身重量的作用下，放入海底抓取泥土。然后开动斗索绞车，吊斗索即通过吊杆顶端的滑轮，将抓斗关闭，升起，再转动挖泥机到预定点（或泥驳）将泥卸掉。挖泥机又转回挖掘地点，进行挖泥，如此循环作业。抓斗式挖泥船主要用于挖取粘土、淤泥、砾石、宜抓取细砂、粉砂。



图 3.2 抓斗式挖泥船

3.3.3 抓斗式挖泥船

是吸扬式中的一种。它通过置于船体两舷或尾部的耙头吸入泥浆，以边吸泥、边航行的方式工作。耙吸式挖泥船机动灵活，效率高，抗风浪力强，适宜在沿海港口、宽阔的江面和船舶锚地作业^[12]。



图 3.3 耙吸式挖泥船

3.3.4 气动式挖泥船

主要利用空气形成的压力差，将水下土层已被松动的泥沙和水的混合体，通过管道的吸入、提升和排出，来达到疏浚的目的，主要有气动泵挖泥船和空气提升挖泥船两类。

3.4 挖泥船的类型及工作原理

挖泥船施工过程中，扰动或溢流所形成的悬浮泥沙扩散，将形成以挖泥船为中心，依据不同风向、潮流方向的向外扩散浑水圈，与原有海平面之间存有一明显的分界线，一清一浑。据测定，该浑水层一直下延至海底。只要依据海面观测，即可判断不同挖泥船扰动、溢流所造成悬浮物扩散大致程度与二次回淤状况。我们通过试验确定各种挖泥船对环境的影响。

天津港作为典型的潮汐汊道系统，以口门为界，向内随着远离抠门泥沙颗粒逐渐减少。海区地质类型为易变形的凝聚性土壤，海底表层土质除河道及大沽沙顶部有细砂外，大部分区域港区底质粒径分布情况见表3.3。

表3.3 天津港底质中值粒径

粒径 站位	一港池	二港池	三港池	四港池	平均
D60	0.0016	0.0017	0.0017	0.0018	0.0017
<0.04mm %	71.1	69.2	68.8	67.0	68.9

3.4.1 耙吸式挖泥船

在挖泥时，海面所反映的浑水扩散层范围不大。关键是溢流阶段，无论是水面以上溢流口溢流，还是水面以下溢流口溢流，大量含沙量可达 200kg/m^3 以上的浑水浆溢进海中，而且耙吸式挖泥船溢流时，挖泥船往往处在缓航状态，所形成的悬浮质扩散层范围相当大，一般以挖泥船为中心，在其下风向（下流向）向外展开。

在天津港港内，耙吸式挖泥船无论是维护疏浚航道，还是顺岸港池，只要一溢流（水面以下溢流也是如此），其下风向可形成直达码头或岸边的全面浑水区。

第一次观测：

取样地点： 北港池

船型： 耙吸式挖泥船（北港池维护疏浚作业）

取 样 日 期： 2006 年 8 月 17 日；
 风 向 风 力： 东北风，风力 3~4 级；
 潮 时： 高平潮开始；
 位 置： 下风向；

海水含沙量背景值：表 0.021kg/m³，中 0.022kg/m³，底 0.031kg/m³，平均 0.025kg/m³。

溢流中不同时期水样各部分的密度如下表所示：

表 3.4 溢流初期不同部位密度表 单位：kg/m³

	离船 50m	离船 100m	离船 200m	离船 400m
表层	16.8kg/m ³	7.8kg/m ³	5.6kg/m ³	4.6kg/m ³
-7.0m	17.9kg/m ³	9.4kg/m ³	7.3kg/m ³	5.6kg/m ³
-14.0m	26.5kg/m ³	9.7kg/m ³	8.4kg/m ³	6.4kg/m ³
平均	20.4kg/m ³	9.0kg/m ³	7.1kg/m ³	5.5kg/m ³

3.5 溢流后半小时不同部位密度表 单位：kg/m³

	离船 50m	离船 100m	离船 200m	离船 400m
表层	10.5kg/m ³	6.5kg/m ³	4.7kg/m ³	3.7kg/m ³
-7.0m	12.1kg/m ³	7.8kg/m ³	6.5kg/m ³	5.6kg/m ³
-14.0m	13.0kg/m ³	8.1kg/m ³	7.2kg/m ³	6.0kg/m ³
平均	11.9kg/m ³	7.5kg/m ³	6.1kg/m ³	5.1kg/m ³

有上述表可以看出：耙吸式挖泥船溢流造成悬浮物扩散强度达 200~1000 倍（相对海水背景值）

第二次观测：

取样地点： 25~29 泊位与港池
 船型： 耙吸式挖泥船（5+0~7+0 主航道施工）
 取样日期： 2006 年 7 月 25 日；
 风向风力： 东南风，2~3 级；
 潮时： 涨潮后 30 分钟开始；
 位置： 下风向；
 海水含沙量背景值：表 0.034kg/m³，中 0.028kg/m³，底 0.054kg/m³，平均 0.039kg/m³。

溢流中不同时期水样各部分的密度如下表所示：

表 3.6 溢流初期不同部位密度表 单位 kg/m^3

	离船 50m	离船 100m	离船 200m	离船 400m
表层	20. 7 kg/m^3	19. 2 kg/m^3	15. 2 kg/m^3	7. 8 kg/m^3
-7. 0m	19. 8 kg/m^3	20. 4 kg/m^3	17. 8 kg/m^3	10. 2 kg/m^3
-14. 0m	30. 7 kg/m^3	21. 5 kg/m^3	19. 3 kg/m^3	12. 8 kg/m^3
平均	23. 7 kg/m^3	20. 4 kg/m^3	17. 4 kg/m^3	10. 3 kg/m^3

表 3.7 溢流后半小时不同部位密度表 单位: kg/m^3

	离船 50m	离船 100m	离船 200m	离船 400m
表层	15. 3 kg/m^3	12. 8 kg/m^3	10. 2 kg/m^3	5. 6 kg/m^3
-7. 0m	16. 7 kg/m^3	15. 4 kg/m^3	12. 1 kg/m^3	8. 7 kg/m^3
-14. 0m	17. 2 kg/m^3	16. 2 kg/m^3	13. 4 kg/m^3	9. 3 kg/m^3
平均	16. 4 kg/m^3	14. 8 kg/m^3	11. 9 kg/m^3	7. 9 kg/m^3

由上述表中可以得出结论:耙吸式挖泥船溢流造成悬浮物扩散强度达 200-800 倍 (相对海水背景值)。

3.4.2 绞吸式挖泥船

施工时仅在挖泥船绞刀下放处存有较小范围的浑水, 影响范围不足 50m。

观测地点: 南 1 港池;

观测时间: 2007 年 3 月 15 日;

挖 泥 船: 绞吸式挖泥船 (南 1 泊位与港池浚深);

风向风力: 西北风, 风力 3-4 级;

取样位置: 下风向;

海水含沙量背景值: 表 0. 019 kg/m^3 , 中 0. 021 kg/m^3 , 底 0. 025 kg/m^3 ,
平均 0. 022 kg/m^3 。

表 3.8 水体不同部位密度表 单位: kg/m^3

	离船 50m	离船 100m	离船 200m	离船 400m
表层	4. 5 kg/m^3	0. 32 kg/m^3	0. 07 kg/m^3	0. 03 kg/m^3
-7. 0m	6. 7 kg/m^3	0. 42 kg/m^3	0. 09 kg/m^3	0. 03 kg/m^3
-14. 0m	12. 1 kg/m^3	0. 51 kg/m^3	0. 13 kg/m^3	0. 02 kg/m^3
平均	7. 8 kg/m^3	0. 42 kg/m^3	0. 10 kg/m^3	0. 03 kg/m^3

绞吸式挖泥船仅在挖泥船 70~80m 范围内造成浑水，其影响较小。

3.4.3 抓斗挖泥船

在抓斗挖泥船的抓斗上下过程中，存有漏泥现象，形成海水浑浊圈不足 50m。

观测地点：32 泊位；

观测时间：2007 年 5 月 10 日；

挖 泥 船：抓斗船（32 泊位维护施工，离码头 5m 线）；

风向风力：东北风，2~3 级；

取 样：下风向；

海水含沙量背景值：表 0.021kg/m³，中 0.023kg/m³，底 0.031kg/m³，

平均 0.025kg/m³。

表 3.9 水体不同部位密度表 单位：kg/m³

	离船 50m	离船 100m	离船 200m	离船 400m
表层	0.027kg/m ³	0.23kg/m ³	0.023kg/m ³	0.019kg/m ³
-7.0m	0.022kg/m ³	0.18kg/m ³	0.031kg/m ³	0.021kg/m ³
-12.0m	0.034kg/m ³	0.19kg/m ³	0.032kg/m ³	0.034kg/m ³
平均	0.028kg/m ³	0.20kg/m ³	0.029kg/m ³	0.025kg/m ³

抓斗挖泥船施工仅在抓斗船 30m 范围内造成浑水，其影响较小。

3.5 环保性分析

根据以上的试验参数，我们假定海水含沙量背景值为 1，可以得出以下的数据。

表 3.10 传统挖泥船施工时泥沙扩散对周围海水含沙量的影响值

船型	离船 50m	离船 100m	离船 200m	离船 400m
耙吸船（港池）	816	360	284	220
耙吸船（航道）	608	523	449	264
绞吸船	354	17	4	1
抓斗船	1	1	1	1

由表 3.10 数据分析可知，绞吸船与抓斗船泥沙扩散对船体 100m、50m 外的

海水含沙量基本上无影响，耙吸船泥沙扩散对距船体 400m 以外的海水含沙量尚有 200 倍以上的浑水影响，具体而言：

3.5.1 绞吸式挖泥船

由于绞吸船的独特优点，目前依然在疏浚工程大量采用该种船型，该船在施工时由于绞刀转动所扰动的底泥的扩散，但是对回淤土的扰动造成的悬浮物扩散面较小，按目前港口环保疏浚的要求水平，基本算是环保设备。关键是，绞吸式挖泥船施工时，一定要注意海上与陆上输泥管不能漏泥，尤其是海底输泥管线。

3.5.2 耙吸式挖泥船

耙吸式挖泥船，施工过程中有一溢流过程，可造成大面积海水浑浊与四周水域的泥沙“二次回淤”，属非环保疏浚设备。然而，耙吸式挖泥船，具有机动、高效的优势，尤其是在船只通航繁忙的港内航道的维护疏浚中，目前尚无较好的专用环保挖泥船可替代。

3.5.3 抓斗挖泥船

抓斗式挖泥船，在抓斗上下过程中，将有一些泥土散落于海中，形成挖泥船附近的浑浊圈。据观察，以抓斗上下处为中心，浑水圈范围不超过直径 20m。其弃土处理为装驳外运，只要能到达指定位置抛泥，对于天津港维护疏浚这样的“非环保疏浚工程”来讲，基本上属环保疏浚设备。但是，由于抓斗式挖泥船效率低、机动性差，在天津港水深维护疏浚中，仅仅用于海底存有较多杂物的码头前沿的局部水域。

基于以上分析，我们把重点放在了耙吸式挖泥船对环境的影响上。

3.6 耙吸式挖泥船溢流“二次回淤影响分析环保性分析

耙吸挖泥船，施工过程中有一道溢流工序，尽管溢出的是含泥沙浓度稍低的泥浆，但因溢流流量大，对四周水域造成二次回淤比较严重，其影响：首先，耙吸挖泥船所挖工程量泥沙并未全部运走；其次，溢流泥沙由低价位流入高位疏浚成本的水域（泊位维护疏浚成本是耙吸挖泥船的近 2 倍）；另外，增加泊位维护疏浚难度，影响码头正常作业；再有，溢流作业不符合越来越严格的港口环境要求。天津市主要领导在视察天津港时，看到耙吸挖泥船溢流作业造成港内海面大范围浑浊海水时，明确指示“需研究解决”。为此我们仔细分析了近几年的研

究数据。

3.6.1 2006 年 8 月天津港北港池耙吸挖泥船维护疏浚溢流影响

2006 年 8 月, 天津港北港池耙吸式挖泥船实施维护疏浚面积为: 729954 m² (按测图面积计), 浚前平均水深为 14.19m, 浚后平均水深为 14.45m, 维护土方量为 18.98 万 m³。在无其它影响因素的情况下, 其溢流造成北港池 35~38 泊位等水域的回淤增量 (已扣除正常回淤量) 为 9.1097 万 m³ (表 2-1)。两者测图时间与比例尺相同。

表 3.11 2006 年 8 月天津港北港池耙吸维护疏浚溢流影响表

区 段	面 积 m ²	年 淤 强 m/年	实测水深 m			施工期 内 正常回淤 m	回 淤 增 厚 m	回 淤 增 量 m ²
			浚 前 m	浚 后 m	水 深 差 m			
35 泊位	30100	2.00	15.03	14.06	0.97	0.17	0.80	2.4080
36 泊位	30100	2.00	14.60	13.97	0.63	0.17	0.46	1.3846
37 泊位	30000	2.00	14.81	14.06	0.75	0.17	0.58	1.7400
38 泊位	30000	2.00	14.69	13.69	1.00	0.17	0.83	2.4900
38 泊位西部	3000	1.80	11.83	10.70	1.13	0.15	0.98	0.2940
35 泊位东三角	22600	1.80	14.01	13.51	0.50	0.15	0.35	0.7931
合 计	145860							9.1097

3.6.2 2006 年 7~8 月天津港主航道 5+0~7+0 耙吸挖泥船维护疏浚溢流影响

2006 年 7~8 月, 天津港主航道 5+0~7+0 航道段维护面积为: 46800 m² (按测图面积计), 浚前平均水深为 15.89m, 浚后平均水深为 17.14m, 其间水下维护工程量为: 58.50 万 m³。在无其他影响因素的情况下, 造成四周港池与泊位水域的回淤增量 (已扣除正常回淤部分) 为: 24.63 万 m³ (表 3.6)。两者测图时间与比例尺相同。耙吸船在此区域其具体维护疏浚溢流影响如下表所示:

表 3.12 2006 年 7~8 月天津港 5+0~7+0 主航道耙吸维护疏浚溢流影响表

区 段	面 积 m ²	年淤 强 m/年	实测水深 m			施工 期 内 正 常 回 淤 m	回 淤 增 厚 m	回 淤 增 量 m ³
			浚 前 m	浚 后 m	水 深 差 m			
25~26 泊位	35912	1.57	15.42	14.69	0.73	0.07	0.66	2.3702
27~28 泊位	31110	1.10	14.56	14.13	0.43	0.05	0.38	1.1822
29 泊位	38742	1.10	14.25	13.82	0.43	0.05	0.38	1.4722
30 泊位	18525	0.72	11.13	10.93	0.20	0.03	0.17	0.3149
31 泊位西	11594	0.72	11.05	11.02	0.03	0.03	—	—
31 泊位东	12205	0.76	11.73	11.53	0.20	0.03	0.17	0.0244
32 泊位	34001	0.94	12.89	12.59	0.30	0.04	0.26	0.8840
33 泊位	16068	0.76	12.61	12.37	0.24	0.03	0.19	0.3053
34 泊位	13406	0.72	10.22	10.15	0.07	0.03	0.04	0.0536
四港池	225189	1.13	14.53	14.13	0.40	0.05	0.35	7.8816
30, 31 泊位港 池	44516	0.96	13.17	12.85	0.32	0.04	0.28	1.2464
32, 33 泊位港 池	70039	0.96	13.49	13.26	0.23	0.04	0.19	1.3307
34 泊位港池	20862	0.96	12.26	12.06	0.20	0.04	0.16	0.3338
南 4 泊位	30895	1.00	13.22	12.97	0.35	0.04	0.31	0.9577
南 5 泊位	34991	1.03	13.65	13.36	0.29	0.04	0.25	0.8748
南 6 泊位	33459	1.15	12.92	12.81	0.11	0.05	0.06	0.2008
南 7~8 泊位	61501	1.28	13.32	13.16	0.16	0.05	0.11	0.6765
南 9~10 泊位	55541	1.56	14.06	13.84	0.22	0.07	0.15	0.8331
南 2~4 港池	89021	0.96	12.59	12.39	0.20	0.04	0.16	1.4243
南 5 港池	62376	1.02	12.61	12.38	0.23	0.04	0.19	1.1851
南 6 港池	59338	1.02	12.30	12.19	0.11	0.04	0.07	0.4154
南 7~8 港池	109720	1.10	12.56	12.45	0.11	0.05	0.06	0.6583
合 计	1109011							24.6273

3.6.3 天津港港内维护疏浚耙吸挖泥船溢流影响分析

(1) 北港池耙吸挖泥船溢流影响分析

2006年8月,天津港北港池采用耙吸挖泥船维护疏浚,水下土方量计算为18.98万 m^3 ,造成四周泊位等水域回淤增量为9.11万 m^3 ,使原本已维护至-14.6m至-15.0m的35~36泊位水深变浅为-13.7m至-14.1m,不能满足通航水深要求,为此承担泊位常年水深维护疏浚的分包方只好进行应急疏浚,无偿地追挖所增泥沙。

据测定,耙吸溢流所造成的增量回淤层,“二次回淤”初期,其平均容重为1.20t/ m^3 左右,过三个月后大致密实至1.40t/ m^3 (天津港回淤土标准容重),体积将缩小一半,上述9.11万 m^3 的增量回淤,可形成4.6万 m^3 实际标准回淤土。可见北港池耙吸船维护,造成35~38泊位等水域的“二次回淤”增量达耙吸疏浚总量的4.6万 m^3 /18.98万 m^3 =24%左右(与施工期间常吹东北风也有关系)。

2006年7~8月,5+0-7+0主航道耙吸疏浚土方量为58.50万 m^3 ,二次回淤量为24.63万 m^3 。同样,按标准回淤容重计,为12.32万 m^3 ,占耙吸维护疏浚量的12.32万 m^3 /58.50万 m^3 =21%。

(2) 耙吸挖泥船溢流实测数据分析

现将由交通部天津水运工程科学研究所耙吸挖泥船维护疏浚作业时溢流口与舱内所获实测数据作一分析。不同时间段的实测数据分别见如下表:

表 3.13 空舱首次满舱舱内泥浆容重(t/ m^3)

	艏	中	艉	平均
表层	1.10	1.09	1.11	1.10
舱深3.5m	1.17	1.14	1.16	1.16
舱深7.0m	1.55	1.55	1.61	1.57

表 3.14 溢流(数次)完毕满舱舱内泥浆容重(t/ m^3)

	艏	中	艉	平均
表层	1.22	1.22	1.25	1.23
舱深3.5m	1.27	1.27	1.27	1.27
舱深7.0m	1.70	1.60	1.59	1.63

表 3.15 溢流口溢出泥浆容重 (t/m³)

	艏	中	艉	平均
溢流口	1.13	1.17	1.12	1.14

溢流泥沙计算：

舱内容重内插：耙吸挖泥船舱内泥浆浓度由上至下，并非直线关系递增，呈抛物线关系，现内插如下：

表 3.16 空舱首次满舱舱内泥浆内插容重 (t/m³)

	艏	中	艉	平均
表层（实测）	1.10	1.09	1.11	1.10
0.875	1.10	1.09	1.11	1.10
1.75m（一次内插）	1.11	1.10	1.12	1.11
2.625m（二次内插）	1.12	1.11	1.13	1.12
3.5m（实测）	1.17	1.14	1.16	1.16
4.375m（二次内插）	1.18	1.15	1.17	1.17
5.25m（一次内插）	1.23	1.18	1.21	1.21
	艏	中	艉	平均
6.125m（二次内插）	1.28	1.22	1.25	1.25
7.0m（实测）	1.55	1.55	1.61	1.57
平均				1.20t/m ³

表 3.17 溢流（数次）完毕满舱舱内内插容重 (t/m³)

	艏	中	艉	平均
表层（实测）	1.22	1.22	1.25	1.23
0.875（二次内插）	1.22	1.22	1.25	1.23
1.75m（一次内插）	1.23	1.23	1.25	1.24
2.625m（二次内插）	1.24	1.24	1.26	1.25
3.5m（实测）	1.27	1.27	1.27	1.27
4.375m（二次内插）	1.28	1.28	1.27	1.28
5.25m（一次内插）	1.31	1.31	1.29	1.30
6.125m（二次内插）	1.35	1.35	1.31	1.34
7.0m（实测）	1.70	1.60	1.59	1.63
平均：				1.31t/m ³

首先，按天津港泥沙的回淤土容重与干重含量之关系，将上述溢流平均容重($1.14\text{t}/\text{m}^3$)，首次满舱泥浆容重($1.20\text{t}/\text{m}^3$)与溢流完毕满舱泥浆容重($1.31\text{t}/\text{m}^3$)分别换算成每 m^3 中含有泥沙的重量： $1.14\text{t}/\text{m}^3 \rightarrow 218\text{kg}/\text{m}^3$ ； $1.20\text{t}/\text{m}^3 \rightarrow 311\text{kg}/\text{m}^3$ ； $1.31\text{t}/\text{m}^3 \rightarrow 482\text{kg}/\text{m}^3$ 。

设：溢流总流量(体积)为 x ，满舱体积为 A (单位均为 m^3)

那么：未溢流时泥沙为： $311\text{kg}/\text{m}^3 \cdot (A)$ (疏浚泥沙)；

溢流溢出泥沙为： $218\text{kg}/\text{m}^3 \cdot (x)$ ；

留于舱内泥沙为： $482\text{kg}/\text{m}^3 \cdot (A-x)$ 。

$$\text{即: } 218\text{kg}/\text{m}^3 \cdot (x) + 482\text{kg}/\text{m}^3 \cdot (A-x) = 311\text{kg}/\text{m}^3 \cdot (A)$$

(溢流泥沙) (舱内泥沙) (疏浚泥沙)

$$482\text{kg}/\text{m}^3 \cdot A - 263\text{kg}/\text{m}^3 \cdot x = 311\text{kg}/\text{m}^3 \cdot A$$

$$x = 482 - 311 / 263 \cdot A$$

$$x = 0.65A$$

海底挖走泥沙为：

$$281\text{kg}/\text{m}^3 \cdot 0.65 \cdot A \text{ (溢流泥沙)} + 482\text{kg}/\text{m}^3 \cdot A \text{ (满舱外运泥沙)}$$

$$= 624\text{kg}/\text{m}^3 \cdot A$$

因此，耙吸式挖泥船所挖土方中有($218\text{kg}/\text{m}^3 \cdot 0.65 \cdot A = 624\text{kg}/\text{m}^3 \cdot A$) $=22.7\%$ 的泥沙为溢流泥沙，有 77.3% 的泥沙为外抛，溢流泥沙可形成二次回淤的体积为所挖泥沙体积(按 $1.40\text{t}/\text{m}^3$ —标准容重计)的 46% (按 $1.20\text{t}/\text{m}^3$ —强淤容重计)，密实后大致为 23% (按 $1.40\text{t}/\text{m}^3$ 计)。

因此，无论是从耙吸挖泥船疏浚溢流造成实际“二次回淤”，还是由实测耙吸挖泥船舱内泥浆容重与溢流泥浆容重的计算，两者结果一致，均为溢流泥沙占疏浚泥沙的 23% 左右，表明研究所得结论是可信的。

(3) 天津港港内耙吸式挖泥船维护疏浚实际成本

《2006年度天津港水深维护疏浚工程》总合同中，耙吸式挖泥船维护疏浚土方单价为 $18.0\text{元}/\text{m}^3$ (以水下土方量为准)；北疆泊位维护疏浚土方单价为 $35.0\text{元}/\text{m}^3$ (以水下土方量为准)。现按耙吸式挖泥船溢流泥沙占总疏浚泥沙 22.7% 计(与上述两处实测二次回淤数接近)，耙吸式挖泥船维护疏浚实际每 m^3 价格：

$$18\text{元}/\text{m}^3 \text{ (施工区费用)} + [35\text{元}/\text{m}^3 \times 22.7\%] \text{ (二次回淤区泊位费用)} = 25.945\text{元}/\text{m}^3 \approx 26\text{元}/\text{m}^3$$

(4) 耙吸挖泥船溢流影响有关泊位码头的正常生产

有关泊位港埠公司关注的是，不但增加了泊位的水深维护费用投入，更重要

的是泊位的水深维护疏浚施工增加了难度，影响码头正常的生产，更加剧水深维护与码头生产在时间中的矛盾。按 35~38 泊位为例，耙吸式挖泥船维护北港池时，一次可造成 35~38 泊位约 15% 左右的年回淤增量（按密实后体积计），即增加泊位维护对码头生产的影响时间增加了 15%。对于承担泊位维护疏浚的施工单位来讲，正常泊位维护疏浚的有效挖泥时间仅为 20~25%，因此，“二次回淤”后需机动增配挖泥船的挖泥能力大致为“二次回淤量”的 4~5 倍。

因此耙吸挖泥船溢流无论从环保性，还是由于其溢流造成经济成本的增加都是不合适宜的，天津迫切需要新型的环保疏浚设备。

第四章 新型环保疏浚设备研制

新颖环保疏浚设备的研制，是当前疏浚行业界最热门的话题。纵观国际国内的现状，环保疏浚是近 30 年来发展起来的新兴产业，是水利工程、环境工程和疏浚工程交叉的边缘工程技术^[13]。它利用机械疏浚方法清除江河湖库污染底泥，在挖泥、输送过程中和疏浚工程完成后对环境及周围水体的影响都较小。环保疏浚越来越受到业内人士的重视，围绕泥沙搅动、扩散和二次污染、精确疏浚及疏浚土处理等主要环节的研究成果不断涌现。北美、欧洲及我国的香港地区对这项技术的研究起步较早，掌握了比较先进的环保疏浚技术，并有许多成功的应用实例^[14]。

4.1 什么是环保疏浚

成功的环保疏浚工程应该达到以下 4 个效果^[15]：

①使悬浮状态的污染物最少。有很大一部分重金属及有机污染物依附在悬浮颗粒上，因此，悬浮颗粒的数量是衡量环保疏浚工程效果的一项重要指标。

②彻底清除污染物。

③使抽走的水量最小，即疏挖的污染底泥要有较高的浓度。

④过挖量最小，以免伤及原生土。

为了达到以上效果，必须把握好环保疏浚工程的几个关键技术环节：

①尽量减少泥沙搅动，并采取防扩散和泄漏措施，保证高浓度吸入，以避免处于悬浮状态的污染物对周围水体造成污染。

②高定位精度和高开挖精度，彻底清除污染物，并尽量减少超挖量，即在保证环保疏浚效果的前提下降低工程成本。

③避免输送过程中的泄漏对水体造成二次污染。

④对疏浚的污染底泥进行安全处理，避免污染物对其他水系及环境的再污染。

4.2 目前国内外的环保疏浚技术与主要设备

环保疏浚技术是个复杂的系统工程，对一项具体的环保疏浚工程，应综合考

虑工程的地理环境、水体特征、污染物的种类、含量等工程特性并有针对性地进行设计，工程特性不同，所采用的环保疏浚技术、设备及方法也不同。自 20 世纪 70 年代以来，美国、日本及欧洲的一些发达国家就开始投入大量人力、物力致力于环保疏浚技术的研究，并取得了一定成果^[16]。尽管各国常用的疏浚技术与设备各有特点，但大体上可分为两大类：

4.2.1 利用传统的疏浚设备进行改造

在传统挖泥船的基础上进行改造是目前环保疏浚业普遍采用的措施。荷兰 IHC 研制了长锥形罩壳式环保绞刀头，刀头四周设有 12 个纵向刀片，保护罩壳内壁设有若干固定刀片，绞刀头刀片转动时与之相切，外罩底边始终和泥面贴合，防止了因绞刀扰动使底泥颗粒向罩外水体扩散^[17]。该绞刀头已安装在海狸 600 型和海狸 1600 型上进行应用；荷兰 DAMEN 公司研制的环保绞刀头为螺旋切割型，并带防护罩，螺旋刀头始终与河道保持水平，不会产生漏挖，对水体的扰动小；我国中港集团自行研制丁环保型绞刀头和防扩散挡污屏，改善了耙吸式挖泥船的溢流方式，安装了抛泥自动记录仪，成功完成了云南省滇池污染底泥环保疏浚工程等多个环保疏浚项目的设计和施工^[18]；由中国水利投资公司和重工集团武昌造船厂共同研制的环保疏浚绞刀头，已进入验收阶段。

这类设备一般是对普通挖泥船在三方面进行改造，以适应其环保特性，减少疏浚土及残留物对环境的影响：

- ①改造挖泥机具，以减少搅动，增加疏浚底泥的浓度，防止污染底泥在水体扩散。
- ②加装 GPS 系统、视频及超声波系统，以便对开挖过程进行监控，提高疏挖精度，减少漏挖及超挖。
- ③对输排系统进行改造，减少输排过程中的泄漏，并要设计好与污染底泥处理设备或工程的衔接，避免疏挖出的污染底泥对环境二次污染。

4.2.2 专用环保疏浚设备

近 20 年来各国开始设计适用于环保疏浚的专用设备。如日本研制了专用于污染底泥疏挖的螺旋式挖泥装置和密闭旋转斗轮挖泥船，意大利首先研制出了气动泵挖泥船。从技术角度讲，专用设备的设计和建造并非坏事，但从经济上考虑，专用设备的设计和建造比对传统的挖泥设备进行改造造价要高得多，对于规模较小的项目，经济性更差。因为每一项环保疏浚工程的水体环境、地理特征、污染物的类别及含量都不同^[19,20]。

4.3 天津港新颖环保疏浚设备

从严格意义上说，每一疏浚工程都具有唯一性，除了一些基本的通用概念外并没有标准的、典型的环保疏浚设备，每项工程都要进行深入的勘察研究，才能设计出针对该工程的具体疏浚方法和设备。尽管专用环保疏浚设备经济性较差，但由于其针对性强、效率高，能够更好地满足工程需要，尤其是对一些质量标准要求高或水体特征较特殊的工程，专用环保疏浚设备有着独特的优势^[21]。考虑到天津港水域的独特性，在天津港港内水深环保疏浚当中，我们更多地是考虑研制开发新的环保疏浚设备。

天津港的环保疏浚主要是开发了新的环保设备。针对天津港北疆维护疏浚施工条件，研制成功的新颖环保疏浚设备目前有三种类型。卧式气动吸泥泵（第二代）、气旋吸泥泵（第三代）与涡流增压气吸泵（第四代），后一种是前两种的复合，具有前两种各自的优点。

4.3.1 新设备研制的关键——排泥浓度

无论是绞吸式挖泥船，还是耙吸式挖泥船，吸泥核心部件均采用“离心泵”，离心泵只能吸取一定浓度的泥浆，难以装驳外运。疏浚界多年注力于“绞吸装驳”与“耙吸装驳”课题研究，主要是针对取沙与挖沙，尚难以对付天津港具一定粘性的回淤土。为此，在研制新颖的能满足装驳外运要求的高浓度吸泥泵时，吸泥核心部件吸泥原理应突破“离心泵”这一框框。

国内外公认的上世纪六十年代由意大利人发明的“劲马泵”具有较高的排泥浓度，属典型环保疏浚设备。2004年引进两台180 m³/h型劲马泵，在天津港进行数月海试，发现存有四个致命缺陷：①排泥浓度不稳，难以装驳外运；②挖深很难掌握（有潮条件下）；③机械故障太多（无法正式投入使用）；④成本价格高于抓斗式挖泥船，业主难以承受^[22-25]。

4.3.2 卧式气动吸泥泵

2005年9月，多年参与天津港维护性疏浚的天津市海亿海洋工程技术开发有限公司，经多年的攻关，研制成功适合于天津港水深维护疏浚的新颖环保疏浚设备——卧式气动吸泥泵。

(1) 原理

卧式气动吸泥泵吸泥原理，类似于体检时的静脉抽血：排气——泵内负压（相对海底四周），进泥；进气——泵内高压，将泥沙通过排泥管排出水面；再排气进泥、进气出泥。

(2) 关键技术突破

排泥浓度：相对回淤土的可比浓度为 40~50% (所专门设计的卧式铲头直接卧入回淤层，增加了吸泥浓度);

挖 深：取泵体直接接触设计浚深处 (疏浚基面) 进行牵引作业，不需进行水位改正;

机械故障：易损部件采用特殊材料，提高使用寿命。

(3) 技术性能

目前投入施工的卧式气动吸泥泵，技术性能：

排泥浓度：40~50%可比浓度;

排 量：500 m³/h (船组);

挖 深：>80m (2007 年 6 月在南 13 泊位施工，挖深-18.0~-22.0m，空气用压尚不足配置量的 30%)。

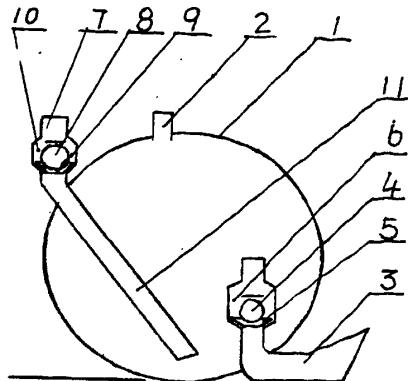
因沉于海底的泵体与水面船只之间为软连接 (由钢丝绳吊拖)，在行进施工中，超深控制难度大于耙齿与水面船体为硬连接的耙吸挖泥船，超深量宜参照小型耙吸挖泥船取 0.6m;

本次投入使用的选用规格为 300 m³/h，具体参数如下表 4.1

表 4.1 300m³/h 卧式气动吸泥泵技术参数表 (300m³型)

项 目	技术参数	说明
挖深	7m—50m	水深越大，进泥越佳
泵容积	1.25m ³	—
进泥管口径	Φ 200mm	—
出泥管口径	Φ 150mm	高压胶管
气管口径	Φ 100mm	高压胶管
额定出泥 (水) 量	300m ³ /h	260—420m ³ /h
进泥铲类型	回淤铲与原状铲	可换
排泥浓度	50—70% (可比)	平均 60%以上
作业面宽度	4.2m	
拖曳速度	0.60—0.80m/min	1m 挖深时
生产率	150m ³ /h	300m ³ /h × 50%以上

以前用于疏浚挖泥的泥泵，一般均为单体离心泵，存在排泥浓度低即过稀的缺陷，因为泥中水量大，不适合装驳外运。本设备是将多个单体泵串联成一体并平卧在水底，用气来控制，以提高排泥浓度，便于装驳外运。



1. 单体泵 2. 气口 3. 进泥口 4. 浮球 5. 阀垫 6. 球阀 7. 出泥口
8. 浮球 9. 阀垫 10. 球阀

图 4.1 单体泵结构示意图

工作原理：该设备采用单个单体泵连连在一起串联成一长筒状，单体泵上的进泥口和出泥口分别安置在单体泵圆柱的前后两侧，进泥口的底部与出泥口的排泥管的下口应和单体泵圆柱体在同一水平面上。作业时整个长筒平卧在水底。在进泥口和出泥口的管道上分别装有球阀，该球阀均由橡胶浮球和球垫构成。当水面作业船从气口给单体泵充气时，进泥口上浮球压向球垫 5，则球阀 6 关闭，球垫 5 起到了密封作用，与此同时，出泥口 7 处球阀中的 10 中的浮球 8 被顶向上而脱离球垫 9，则球阀 10 打开，则单体泵 1 内的泥水通过总排泥管 12 排到驳船上，因为三个单体泵 1 上的出泥口 7 均连接在一跟总管上。当气口 2 处停止充气，并放出气体时，单体泵 1 内的压力小于外面的水压，进泥口 3 上浮球 4 被推向上脱离球阀 5，则球阀 6 打开，与此同时，出泥口处球阀中的浮球被压向球垫，则球阀关闭，这时，进泥口吸进泥水，进泥完毕后，转入充气排泥程序。下图是多个单体泵连接示意图：

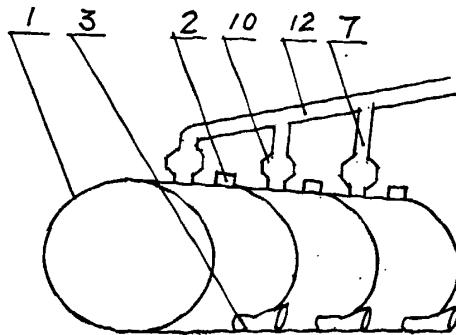


图 4.2 连接示意图：(1—7 如前图所示，12. 总排泥管)

(4) 卧式气动吸泥泵船

由于设备的各种数据一直处在调试与优化之中,至今尚未正式建造卧式气动吸泥泵船。目前,为迅速满足天津港水深维护疏浚的需要,均简易地安装在渔船 上,由两艘渔船拼接为一组挖泥船,灵活机动。其配置如下:

表 4.2 300m³/h 卧式气动吸泥泵船主要设备配置表

项 目	数 量(艘、台)	人 员 配 置(工 日)	燃 料(kg/ 艘班)	说 明
400kW 自航作业船	1 艘	25.20	576.0	300m ³ /h 型泵
卧式吸泥泵	1 台	10.0	—	
30m ³ /min 空压机	2 台	2.00	355×2	每台 224kW
160kW 柴油发电机组	1 台	2.00	189.0	
GPS 定位设备	1 台	—	—	
测深仪	1 台	—	—	浅水精密型
5T (50kN) 卷扬机	2 台	2.00	—	
3T (30kN) 卷扬机	3 台	3.00	—	
φ150mm 高压胶管	50m	—	—	
φ100mm 高压胶管	100m	—	—	
500m ³ 自航平底驳	若干艘	11.96	每艘 324.0	数量视运距而定
200m ³ 离心砂石泵	4 台	—	—	每台 220m ³ /h 流量

(5) 环保性

海底扰动:吸泥铲卧于回淤土中,几个泵体轮换一口一口地吸,对底土无扰动,影响程度不足海底以上数米(两侧浮泥下滑所致)。卧式气动吸泥泵,进泥铲进泥时,属于一口一口进,不存在扰动问题。对底土扰动仅在 1m 之内(浮泥向进泥口流动),其他均在封闭的条件下进行。另外,当空气分配器在排泥时,有少量泥浆随高压空气排出,形成海面 10m 以内的浑水圈,后装置气水分离器(专利号: ZL200720095041.9)后,状况大为改观。作业深度可大可小,可比容重达 70—80%,排泥浓度高,适合于装驳外运,挖泥底面平整,结构简单,自动化程度高,便于操作,成本低。

海面影响:开始投入生产,排气管可挟带少量浮泥排出,形成海面直径大

致为5~10m的浑浊圈，后装置上《气水分离器》，基本上清除这种影响。

运输泄漏：卧式气动吸泥泵所排泥浆，尽管浓度较高，但依然属流动状浮泥，因此，不适用于开底驳或开体驳装载，最后取满底驳，至抛泥区再由泥浆泵外排。所以在疏浚弃土运输过程中不存在泄漏问题。

4.3.3 气旋吸泥泵

2006年6月，研制成功第二种新颖环保疏浚设备——气旋吸泥泵。

(1) 原理

龙卷风是一种四周空气迅速向中间集中所形成的旋转上升气柱，具有巨大的提升力与掀翻力。气旋吸泥泵由内泵与外泵组成，外泵套住内泵，外泵与内泵间由数组呈上斜角度的喷嘴均隔连接。当外泵体内高压空气进入内泵时，在内泵形成上升旋涡气流，其下侧则形成负压进行吸泥（内泵下侧连接进泥铲），内泵上侧连接排泥管进行排泥。

(2) 关键技术突破

排泥浓度：可比浓度35~45%（铲头同卧式气动吸泥泵，卧于回淤土中）；

挖深：同卧式气动吸泥泵；

机械故障：易损部件采用特殊材料，提高使用寿命。

(3) 技术性能

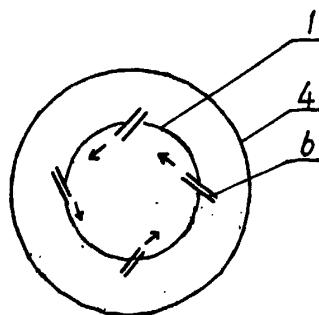
目前投入施工的气旋吸泥泵，技术性能如下：

排泥浓度：35~45%可比浓度；

排量：640 m³/h（船组）；

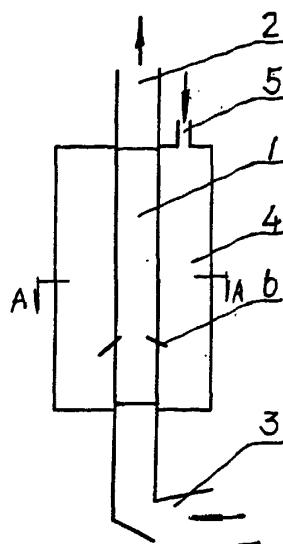
挖深：>80m；

慢速自航：适用于顺岸式港池。



1. 内泵体 4. 外泵体 6. 喷嘴

图 4.3 结构示意图



1. 内泵体 2. 排泥管 3. 吸泥铲 4. 外泵体 5. 进气管 6. 喷嘴

图 4.4 剖视示意图

泵体分为内、外两层，内泵体的上、下分别连接排泥管与吸泥铲，排泥管通过管道与气水分离器连接，外泵体的顶端与高压气进气管相连，内、外泵体之间，在内泵体上的同一高度处固定连接有 8 个（一般为 6—10 个）呈反时针方向排列的喷嘴，即可利用龙卷风发旋负压原理，进行深水水底吸泥与排泥。因为，龙卷风是一股由四周空气迅速向中央集中形成的反旋上升气柱，具有巨大的掀翻力与提升力。当外泵体注入高压气体时，通过气嘴 6 喷入内泵体 1 的空气呈反时针方向转动。泵体置于水底，旋转空气沿排泥管 2 上升，泵体外压力大于泵体内压力，泵体下连的吸泥铲内形成负压，进行吸泥。吸进泵体内的泥沙，与空气混合，沿排泥管上升至水面，通过气水分离器，泥少装驳外驳，而空气外排，完成整个吸泥过程。使用时，一般用四个的泵组成一组，进行吸泥，外泵体 4 直径取 250mm，内泵体 1 直径取 150mm，采用 8 个喷嘴 6，喷嘴 6 的口径为 16mm。排泥与吸泥管的口径均为 150mm。

(4) 气旋吸泥泵船

由于气旋吸泥泵正在进行试生产，也尚未建造正式的挖泥船，目前基本上与卧式气动吸泥泵船混同使用，仅替换一下泵组即可。

(5) 环保性

①海底扰动：吸泥口处在回淤土层内，无干扰，影响程度不足数米；

- ②海面影响：排泥口出来的泥与气，均排入满底泥驳，无任何泄漏；
- ③运输泄漏：同卧式气动吸泥泵，无泄漏。
- ④效率高：作业深度达 200m，排泥浓度约 50%—60%，适合装驳外运，一般生产率 360—400 m³ / h，成本低。

4.3.4 涡流增压气吸泵

卧式气动吸泥泵，由于各泵体轮换工作，进泥时不会时多时少，故排泥浓度稳定性好，可连续排出牙膏状泥柱；气旋吸泥泵，因进泥、排泥在同一口径管中进行，不易堵泵，但缓航作业时由于海底回淤层厚薄不同，排泥浓度稍欠稳定。

2007 年 7 月，创新性地将卧式气动吸泥泵与气旋吸泥泵主要核心部件结合在一起，前者为主泵，后者改为“涡流增压器”，形成新一代涡流增压气吸泵，具备前两泵各自之优点，经海试已获得初步成功，并于 2007 年 9 月，批量投产。

(1) 原理

在卧式气动吸泥泵各泵体排泥管汇合的最近端，装一个“气旋增压器”（小型气旋吸泥泵）。这样，使卧式气动吸泥泵所排的泥，一出泵口，即进入气旋负压区，既能加大下方卧式气动吸泥泵的吸泥力，又增加上方排泥管中的排泥力。

(2) 关键技术

涡流增压器形成的负压大小是关键技术，太大可使下方的卧式气动吸泥泵进、排泥顺序搞乱，直接成气旋吸泥泵；大小则涡流增压不起作用，依然是一个卧式气动吸泥泵。目前已经调试成功，适合天津港维护疏浚施工条件的两者的进气量比例，卧式气动吸泥泵为 1，则涡流增压为 0.5~0.8（随水深而变化），在该种比例时耗能功效率较佳。

(3) 技术性能

初试涡流增压气吸泵技术性能：

排泥浓度：50~60% 可比浓度（大致提高 10~20%）；

排 量：750~800 m³/h（船组）（提高 20% 左右）；

挖 深：>80m；也适用于疏浚深度小于 -7.0m 的回淤土；

疏 浚 土：采用犁式铲头可疏浚较坚硬的土层，不易堵泵。

(4) 涡流增压气吸泵船

目前正在建造三艘涡流增压吸泥泵船，因涡流增压吸泥泵具有双重性，不对涡流增压装置给气，即成为卧式气动吸泥泵；将涡流增压装置直接接于进泥铲，即成气旋吸泥泵。因此，不再考虑建造卧式气动吸泥泵船与气旋吸泥泵船。如果讲，涡扇发动机使喷气式飞机进入一个崭新的时代，那么，涡流增压气吸泵也必

将使气动吸泥疏浚技术提升到一个高水平。

(5) 环保性

涡流增压气吸泵，在环保性上吸取了卧式气动吸泥泵与气旋吸泥泵两者的优势，既具有不干扰底土的特点，又可减小放气时少量泥浆随气外喷的现象，当船只在泊位与半封闭式港池施工时，取锚机牵引作业，主要使用卧式气动吸泥泵部分，起动涡流增压装置，可加大排泥量；在顺岸较开畅港池施工时，主要使用气旋吸泥泵部分，进行缓航式作业。一旦发现排泥浓度不够，起动卧式气动吸泥泵装置，增加其排泥浓度。这样可做到一船多用。是一种具有广泛前途的环保疏浚设备。

4.4 新型环保设备施工扰动状况观测

为了测试新型环保疏浚设备的性能以及环保性，我们专门进行了试验，对施工区周围的水样进行了测试。

4.4.1 卧式气动吸泥泵

2005年7月，第一艘 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 型卧式气动吸泥泵船《海亿1号》组装完毕，驶入25—26泊位海试现场，经调试，技术指标达到设计要求，即与抓斗挖泥船组合投入泊位维护疏浚施工。

至2005年9月，先后组装了4艘卧式气动吸泥泵船（ $300\text{ m}^3/\text{h}$ 型），配置4艘 500 m^3 自航驳船。在续后的70多天的海试期间内，辅以抓斗船共完成维护疏浚量19万 m^3 。在有效工时与抓斗船相仿的情况下，组合施工生产效率是抓斗挖泥船的3～～4倍。

取样地点：25～26泊位；

挖泥船：卧式气动吸泥泵（未配置气水分离器）；

取样日期：2006年12月7日；

风向风力：西北风，2～3级；

潮位：低平潮；

位置：下风向；

海水含沙量背景值：表 0.019 kg/m^3 ，中 0.023 kg/m^3 ，底 0.025 kg/m^3 ，平均 0.022 kg/m^3 。

表 4.3 卧式气动吸泥泵对水体影响

	离船 5m	离船 10m	离船 20m	离船 50m
表层	0.421kg/m ³	0.07kg/m ³	0.031kg/m ³	0.021kg/m ³
-7.0m	0.291kg/m ³	0.08kg/m ³	0.028kg/m ³	0.023kg/m ³
-14.0m	0.357kg/m ³	0.07kg/m ³	0.031kg/m ³	0.029kg/m ³
平均	0.356kg/m ³	0.07kg/m ³	0.030kg/m ³	0.024kg/m ³

卧式气动吸泥泵船施工，几乎不存在悬浮物扩散问题。

4.4.2 气旋吸泥泵

取样地点：北港池 35 泊位；

挖泥船：气旋吸泥泵船（配置气水分离器）；

取样日期：2007 年 4 月 17 日；

风向风力：西南方，2~3 级；

潮位：涨潮；

海水含沙量背景值：表 0.023kg/m³，中 0.022kg/m³，底 0.024kg/m³，

平均 0.023kg/m³。

表 4.4 气旋吸泥泵对水体影响

	离船 5m	离船 10m	离船 20m	离船 50m
表层	0.049kg/m ³	0.051kg/m ³	0.032kg/m ³	0.024kg/m ³
-7.0m	0.050kg/m ³	0.032kg/m ³	0.027kg/m ³	0.023kg/m ³
-14.0m	0.062kg/m ³	0.041kg/m ³	0.030kg/m ³	0.024kg/m ³
平均	0.054kg/m ³	0.041kg/m ³	0.030kg/m ³	0.024kg/m ³

气旋吸泥泵船施工，几乎不存在悬浮物扩散问题。

4.4.3 涡流增压气吸泵

取样地点：三港池

挖泥船：涡流增压气吸泵船（配置气水分离器）

取样日期：2007年9月2日；

风向风力：东南风，2~3级；

潮位：涨潮；

位置：下风向；

海水含沙量背景值：表 0.019kg/m³，中 0.023kg/m³，底 0.031kg/m³，平均 0.024kg/m³。

表 4.5 涡流增压气吸泵对水体影响

	离船 5m	离船 10m	离船 20m	离船 50m
表层	0.031kg/m ³	0.027kg/m ³	0.021kg/m ³	0.022kg/m ³
-7.0m	0.041kg/m ³	0.027kg/m ³	0.022kg/m ³	0.023kg/m ³
-11.0m	0.041kg/m ³	0.031kg/m ³	0.031kg/m ³	0.026kg/m ³
平均	0.038kg/m ³	0.028kg/m ³	0.025kg/m ³	0.024kg/m ³

涡流增压气吸泵施工，几乎不存在悬浮物质扩散问题。

表 4.6 三种设备的施工悬浮泥沙扩散程度分析

类型	海水含沙量 背景值指数*	离船 5m	离船 10m	离船 20m	离船 50m
卧式气动吸泥泵	1	16.2	3.2	1.4	1
气旋吸泥泵船	1	2.3	1.8	1.3	1.0
涡流增压吸泥泵	1	1.6	1.2	1.0	1.0

* 按指数 1 计。

由表 4.3 可知，新颖的卧式气动吸泥泵、气旋吸泥泵船与涡流增压吸泥泵船的施工悬浮物扩散影响，仅在 10m 范围内，可形成稀浑水。其环保性优于绞吸挖泥船与抓斗挖泥船。

4.5 存在问题

4.5.1 尚不适宜航道作业

无论是卧式气动吸泥泵船、气旋吸泥泵船，还是涡流增压气吸泵船，均需与驳船靠接才能作业，二船或三船捆拢。如在航道中作业，海事部门是不允许的。

4.5.2 难以在海底有杂物水域作业

只要是吸泥，海底杂物（尤其是大量的编织袋、绳头、钢筋等）特容易堵泵。为此，在维护疏浚泊位时，需辅助配置小型抓斗挖泥船。因此，天津港北疆泊位的维护疏浚工艺取“抓吸疏浚”名称。

4.5.3 操作难度较大

由于泵体与作业船之间取钢丝绳软连接，疏浚厚度则由回淤层厚度、底土容重等所决定的作业速度来控制，操作难度较大，全凭操作手经验。如无2~3年的实际操作经验，很难高效率地施工。

4.6 无溢流耙吸挖泥船研制

天津港港内泥沙回淤量约为1760万m³/年，其中有490万m³属于航道，约有28%的维护疏浚量依赖于溢流耙吸式挖泥船，上述三种环保设备不能完全取代耙吸式挖泥船为此，研制无溢流耙吸式挖泥船是当务之急。

传统耙吸式挖泥船施工“溢流”，是为舱内的泥浆增加浓度，以减少外运成本，新型无溢流耙吸挖泥船研制的技术关键，就是必须提高吸泥浓度。

上述各种气动吸泥泵，可达到高浓度排泥目的，为此在已使用的气动吸泥泵的基础上，将气动吸泥泵改制成耙吸式吸泥即可解决这一问题。目前已进行试验的样机有两种，吸泥量1480m³/h与2960m³/h，均取得初步成功。为达到耙吸式吸泥的目的，泵体成长圆筒状，泵体内体积为2.94 m³，取二个进泥口，每个进泥口直径300mm，出泥口一个，直径275mm。进泥铲取下置式，即在泵体下侧，便于作业船舶在航行中将海底淤泥吸入。

4.6.1 涡无溢流耙吸式挖泥船建造

目前已开始建造“无溢流耙吸式挖泥船”2艘，舱容3000 m³，取2960 m³/h吹泥泵组，大约12小时可装满泥舱，其年生产力每艘可达300万m³，基本上可

满足天津港港内主航道的航道维护疏浚的需要。

据测算，无溢流耙吸式挖泥船维护疏浚成本基本上与传统耙吸式挖泥船相当，但传统耙吸式挖泥船溢流泥沙占疏浚泥沙量的 23%，新型的无溢流耙吸挖泥船投入施工后，不但能彻底解决天津港环保维护疏浚难题，其“节能减排”可达 23%。

4.6.2 挖深大、机动小型滚吸式挖泥船研制

天津港三十万吨级原油码头于 2008 年 11 月 26 日正式竣工，其港池面积 667335 m²，设计水深-19.5m，设计通航水深-19.1m。泊位面积 70202 m²，设计水深-22.5m，设计直径-21.0m。由于其地处新口门附近，水深又最深，呈锅底状，回淤速度为天津港之首，年回淤量 322 万 m³。作为维护疏浚而言，其挖深达 23-27m，只能使用 2500 m³/h 以上的大型绞吸式挖泥船，但每次维护疏浚后，其浚后高频水深又达不到设计水深，需常年配置一艘船实施不间断维护疏浚，从成本上讲是不可能的。

为解决这一问题，传统的绞吸式挖泥船可以讲是无能为力，为此，已研制成功 2200 m³/h 排量的可挖深 50m 以上的小型，机动“滚吸式挖泥船”的船，其功能与绞吸式挖泥船相当，利用Φ500mm 吹泥管进行吹填，年生产力约 450-500 万 m³，可长年服务于天津港三十万吨原油码头港池泊位，实施不间断的维护疏浚，其成本约为绞吸式挖泥船的 90%。

第五章 天津港港内水深维护环保疏浚具体实施

由于天津港各水域的水深维护疏浚条件不同，以及各类新颖环保疏浚设备均处在研制与完善过程中，其适应范围也各不相同，因此天津港港内水深维护环保疏浚尚需逐步展开。

5.1 天津港各水域疏浚宜采用的船型

5.1.1 主航道与东突堤东航道

尽管新研制成功的三种气动力疏浚泵，具有良好的机动性与环保性，但其排泥需装驳，这样在工作船与驳船两船拼连后，依据航行管理制度，是不允许在航道中施工的。因此，目前对于天津港港内航道部分依然只能采用耙吸式挖泥船（单船自挖自载）进行维护疏浚。

5.1.2 南疆泊位与港池

天津港南疆陆上尚存有吹泥地，需大量的泥土吹泥成陆，且绞吸式挖泥船效率高，具有较好的环保性，宜依然取绞吸式挖泥船进行维护疏浚施工。

5.1.3 北疆港池与泊位

天津港北疆无吹泥地，2005 年起，其泊位与半封闭港池取“抓吸疏浚”，顺岸港池取耙吸式挖泥船。鉴于耙吸式挖泥船的溢流问题，2007 年起，已由“气吸疏浚”方式替代。按 2007 年度天津港水深维护疏浚工程合同中，“气吸疏浚”土方单价为 20 元/ m^3 ，耙吸疏浚土方单价为 18 元/ m^3 。耙吸疏浚，实际价格可达 26.0 元/ m^3 ，比“气吸疏浚”实际便宜了 6 元/ m^3 ，既不会造成二次回淤（环保性好），价格也具有竞争力。因此，在北疆港区，除航道外，由“气吸疏浚”方式替代耙吸式挖泥船进行港池水深维护环保疏浚施工是必然的，目前天津港内疏浚方式入下表所示：

表 5.1 天津港港内水深维护环保疏浚表

疏浚方式	适应水域	环保性
绞吸疏浚	南疆泊位与港池	环保
抓吸疏浚	北疆泊位与半封闭港池	环保
气吸疏浚	北疆顺岸式港池	环保
耙吸疏浚	主航道与北支航道	非环保

为完成天津港北疆港区（航道除外）的水深维护环保疏浚任务，目前已投入 5 组涡流增压气吸泵船（既可成卧式气动吸泥泵船，又可成气旋吸泥泵船），相应配置 12 艘 1000m³ 自航满底泥驳。设备年疏浚能力达 800 万 m³，因避让等置时间达 75% 以上，实际上年疏浚能力 200~250 万 m³，也完全可满足环保疏浚需要。

5.2 环保疏浚施工工艺与设备完善

新型的环保设备在实际应用中，我们发现了不少问题，需要完善。为避免卧式气动吸泥泵在吸泥对底土的扰动及增加排泥浓度，目前所有设备的吸泥口均取卧在回淤土层中的平面半月铲，作业牵引速度取 1.0m/min 左右，直接吸取回淤土下层较厚的浮泥。

对付排气所挟带的少量泥沙问题，除在排气口装置过滤器外，还专门研制专利设备“气水分离器”，效果较好。最近又在出气管下端装置多层“过滤器”，效果更佳。

取自航满底泥驳装运，尽管运价较高，在弃泥时需增加一道沙泵抽排工序，但在外运时可确保防止漏泥，避免造成二次回淤。

随着南北防波堤延伸、“港岛”开发与南疆吹泥地围埝合拢等工程的进展，天津港进港泥沙环境已有相当大的改善，港内海水越来越清澈。目前，除耙吸式挖泥船作业外，其他挖泥船作业，均不影响海水清澈度，取得了维护环保疏浚的预期效果。

5.3 未来应该做的工作

由于天津港主航道南北防波堤向东延伸，“港岛”与南疆吹填区建设又大范围减少了原属于口门外的浅滩（泥沙来源地之一），天津港进港泥沙将日渐减少。尽管目前全年的维护疏浚量减幅不大，每年大致递减 100 万 m³，这主要是大量新

开发水域投入使用所致^[27]。目前，天津港平均年淤强由上世纪末的 78cm/年降低至 54cm/年，降幅达 30%左右。为尽快使天津港成为淤泥质海滩上人工开挖出来的“清水大港”，以后建议采取如下几项措施。

5.3.1 加快具有自主知识产权的新颖环保疏浚设备研制

目前已投入使用的具有自主知识产权的新颖环保疏浚设备：卧式气动吸泥泵、气旋吸泥泵与涡流增压气吸泵，既适应天津港无吹泥地水域的维护疏浚，又具有较好的环保性。但由于航道施工中不能使用作业船与驳船拼连的船组，尚无法替代耙吸式挖泥船。为此，应加大“自航自载气动挖泥船”的研制力度。

5.3.2 对港内边边角角的浅滩污染底泥进行清淤

天津港与外海通道仅为一条主航道，海河水也不排放至港内，这样既有好处，也有弊病。好处是可减少陆域对港口的排污，弊端是港内外海水循环太慢，必然使港内边边角角处存有一定的污染底泥（属于海水自生污染物——有机污染）^[28]，如南疆 7~8 号码头后侧水域，客运码头以西沿岸浅滩，在低潮时其污染底泥散发着异味，应逐个进行清淤。

5.3.3 对高桩码头岸坡进行定期清淤

天津港码头大部分为高桩码头，码头岸坡回淤，一方面对码头桩柱存有安全隐患，另一方面码头岸坡处于隐蔽浅滩，极易形成自生污染源。不少高桩码头前沿在低潮时，尤其是大潮低潮时，由码头内向外散流出黑水，因此，应建立起高桩码头岸坡的定期清淤制度。高桩码头岸坡清淤器在 30~31 泊位浚深工程岸坡自动化清淤的成功，为天津港高桩码头岸坡定期清淤提供了条件。

第六章 结论与建议

天津港港内水深维护环保疏浚问题的提出与实施，标志着天津港在全国率先开展了港口维护环保疏浚的又一示范性工作。由于这方面的研究工作刚刚起步，有关港口环保疏浚的要求与标准，均需随着此项工作的开展，逐步建立、完善与制订。

6.1 成果应用前景

6.1.1 近期

2005 年 7 月以来，本项目研究成果已在天津港的水深维护疏浚中投入使用，已成为天津港北疆诸泊位水深维护的新的手段与方式。该成果经过两年的实践，已完成近 400 万立方米的疏浚量，产生直接和间接效益 2000 多万元。经交通部和中国工程院专家组鉴定，天津港港内水深维护环保疏浚新工艺研究成果，已经达到国际先进水平，在沿海港口、水域、江湖等环保疏浚市场具有广阔的推广应用价值。

6.1.2 远期

沿海港口的发展，要求维护疏浚设备与船只更具机动性、挖深性、高效性与环保性。近几年来，挖深不足 18m 的绞吸式挖泥船与耙吸式挖泥船已经渐渐淡出天津港水深维护疏浚市场，这表明作为传统的维护疏浚设备在新形势下需要改造，也意味着需要研制出更多更好的新颖的环保疏浚设备^[29,30]。卧式气动吸泥泵、气旋吸泥泵与涡流增压气吸泵等新颖疏浚设备的研制成功与投产，表明未来的港口维护环保疏浚市场，将是具有自主知识产权的新颖环保疏浚设备的角逐场所。另有可能成为天津港未来设计水深达 18.8—23.0m 的深水港池与泊位水深维护的主类型设备，从而改变天津港不同水深、不同水域进行维护疏浚时，需用不同类型、不同吨位的多种大小不一的挖泥船的复杂局面，可一船多用。

随着南北防波堤向外延伸，“港岛”与南疆吹泥地大规模建设、港内使用面积继续扩大及港外泥沙环境的优化，以及港口环保疏浚工作的开展，不久将来，

天津港必将成为世界顶级“清水大港”。

6.1.3 推广应用

在全国所有回淤港口，本项目研究成果可普遍推广，可替代目前采用的抓斗挖泥船进行有关泊位与港池的维护疏浚（不含基建疏浚）。同时，也可涉足环保疏浚、水库疏浚、闸下疏浚、吸水口疏浚、海底管线疏浚等广阔的特种疏浚领域。

6.2 建议

在实施天津港港内水深维护环保疏浚过程中，需逐步制定与完善港口环保疏浚的要求、标准与规范；

迅速开展“自航自载无溢流”的新颖环保疏浚挖泥船的研制工作，以替代耙吸式挖泥船进行天津港港内航道水深维护环保疏浚，使天津港港内水深维护环保疏浚得以全面实施；开展仅有一个海水交换通道的天津港港内自生污染物产生原因、污染程度及其清除措施研究，尽快使天津港成为举世闻名的“东方清水大港”。

参考文献

- [1] 发挥黄力, 杨志良, 现代天文教育和研究平台——虚拟天文台, 北京师范大学学报(自然科学版), 2005, 41 (03): 300~302
- [2] 戴明新, 挖泥船疏浚作业对环境影响的试验研究, 《交通环保》1997年04期
- [3] 邱志, 天津港水深维护疏浚工程分析, 天津港口, 2009. 1: 19-21
- [4] 倪福生; 国内外疏浚设备发展综述, 河海大学常州分校学报; 2004年01期
- [5] 刘怀远; 中国疏浚业发展、机遇和挑战[J]; 水路运输文摘; 2004年21期; 41-42
- [6] 林风; 大型耙吸挖泥船的发展动向[J]; 中国港湾建设; 2001年04期; 4-10
- [7] 彭建军, 井绪东; 常见挖泥船疏浚特性及选型[J]; 浙江水利科技; 2004年06期; 88-89
- [8] 刘厚恕; 耙吸挖泥船在我国的发展及大型化展望[J]; 上海造船; 2003年01期; 45-49+3
- [9] 刘志, 周洪, 程锦萍; 中国疏浚业现状与发展分析[J]; 水利经济; 2004年03期; 9-11+66
- [10] 韩明, 刘厚恕; 浅述中国疏浚工业的发展道路[J]; 船舶; 2002年02期; 4-11
- [11] 章庆生, 戴雪良; 新型水下泥泵挖泥船的研制[J]; 江苏船舶; 2003年06期; 15-18
- [12] 于卫良; 疏浚市场展望与现代自航耙吸挖泥船的发展趋势[J]; 水运管理; 2002年07期; 26-28
- [13] 陈国平, 王庆丰, 陶国良; 挖泥船作业综合监控系统的研究与开发[J]; 船舶工程; 2004年03期; 50-53
- [14] 韩明, 刘厚恕; 浅述中国疏浚工业的发展道路 [J]; 船舶; 2002年02期
- [15] 张天存; 抓紧时机研究开发环保疏浚工程 [A]; 机械疏浚专业委员会第十六次疏浚与吹填技术经验交流会论文与技术经验总结文集 [C]; 2002年
- [16] 苏华; 浅谈环保疏浚应抓住的关键环节 [J]; 江苏水利; 2005年01期
- [17] 戴明新, 港口疏浚作业对海域环境的影响《交通环保》1995年01期

- [18] 徐启明; 航道疏浚对环境的影响及措施 [J]; 水运工程; 2002 年 04 期; 47-48
- [19] 张建专; 绞吸式挖泥船环保清淤刀具的设计与模拟实验研究 [D]; 哈尔滨工程大学; 2007 年
- [20] 易兴恢, 袁振寰; 国内深水环保疏浚方法的研究和探索——深圳水库清淤工程 [J]; 广东水利水电; 2000 年 02 期; 23-25
- [21] 承家; 美国的疏浚政策 [J]; 中国港口; 1996 年 01 期, 43
- [22] 魏高峰; 江河湖库污染内源治理中的环保疏浚 [J]; 浙江水利科技; 2002 年 06 期; 80-81
- [23] 刘厚恕; 浅谈环保船与环保疏浚 [J]; 船舶; 1998 年 06 期, 6-11+2
- [24] 李金贵, 李进军, 杨建华, 丁树友; 污染底泥精确疏浚技术 [J]; 中国港湾建设; 2004 年 06 期; 15-18+24
- [25] 邢西哲, 倪福生; 基于 HART 协议的混合型环保疏浚多相流体测控系统, 32-34
- [26] 李进军; 污染底泥环保疏浚技术 [J]; 中国港湾建设; 2005 年 06 期; 52-53+71
- [27] 智雨; 疏浚强国之路在继续延伸 [J]; 港口经济; 2007 年 03 期; 62
- [28] 庞启秀, 徐金环; 河口疏浚对环境的影响 [J]; 中国港湾建设; 2005 年 02 期; 12-14
- [29] 王国平, 王常金; 1m~3 全液压式挖泥船介绍 [J]; 水运工程; 1989 年 11 期; 51-53
- [30] 段子毅, 汪义达, 林健煜; 现代挖泥船讲座之五——挖泥船的仪器仪表(上) [J]; 水运工程; 1981 年 09 期; 54-57

发表论文和科研情况说明

发表的论文:

无

参与的科研项目:

- [1]天津港港内水深维护环保疏浚新工艺研究, 天津港集团科研项目
- [2]设施完好率码头技术状态分类标准结合评估方法研究, 天津港集团科研项目
- [3]天津港岸坡与接岸结构相互作用机理研究天津港集团科研项目

致 谢

本论文的工作是在我的导师刘润老师的悉心指导下完成的，刘老师严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响，特别是在本文的选题、研究和论文的撰写上刘老师倾注了大量的心血和精力，在此衷心感谢刘老师对我的关心和指导。

另外要感谢我的企业导师章大初老师，在过去的两年中，章老师在学习、工作上给予了我极大的鼓励与帮助，在此衷心地感谢章老师对我的关心与爱护。

最后，对在我的成长道路上给予我帮助的所有老师和朋友们表示深深的感谢，对评阅论文的专家表示最真挚的感谢。