

淤泥质港口适航水深技术

庞启秀 著

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

前 言

许多淤泥质港口航道泥沙回淤严重，甚至在台风或寒潮作用下还会产生骤淤碍航现象，回淤物主要为黏性细颗粒泥沙，通常以浮泥状态存在。浮泥单位体积内含泥量较少，导致维护疏浚效率低，若强行将这部分浮泥挖走，会花费大量资金，也会消耗大量能源而造成环境污染，挖出的泥沙往往水抛处理而造成环境的二次污染；另一方面，浮泥具有与水类似的流动特性，船舶航行与停泊作业过程中船底龙骨与其接触并不会受到伤害，对船舶操作性能也无明显影响，可作为水深使用，以增加港口使用水深，即适航水深。适航水深的应用可以提高维护疏浚效率、延长港池航道的维护周期、提高泊位的使用率，从而为港口带来可观的经济效益，同时也符合“资源节约和环境保护全面推进”的国家需要。

参加工作的第一年即 2005 年，在部门主任杨华的安排下，作者跟仪器室的同事合作研发了船模阻力试验设备（后取得了实用新型专利），并从国外购买了流变仪、音叉密度计等设备，建成了适航水深技术专业实验室。在之后的十多年间，作者先后主持或参与了台山电厂码头、连云港、深圳大铲湾港区、广州南沙港区、深圳西部港区、天津南港、珠海电厂码头、连云港主航道、长江口深水航道、厦门港海沧港区、苍南电厂码头等十多个港口的适航技术研究，以及开展了海南洋浦、黄骅港内航道等粉砂质海岸港口掩护水域应用适航水深的可行性论证工作。通过这些研究工作，与同事一起编写了十多本报告和《水运工程泥沙基本特性试验技术操作规程》，发表了多篇科技论文，发明了多项专利，并获得了多项科技成果奖励，为本书提供了丰富的素材。在开展这些研究工作的过程中，通过与港口管理方、船长、海事、引航等人员的多次交流，积累了宝贵的现场应用管理经验，也在本书中得以分享。由作者申请并经单位推荐，2014 年适航水深技术获交通运输部批准为《水运工程建设新技术公告》（第一批）的维护类技术。

本书总结了适航水深研究成果和应用经验，其中第一章为适航水深技术研究进展，侧重介绍适航水深在国内多个港口的实际应用情况，特别是给出了国内港口适航淤泥重度值与对应的泥沙特征，可为其他尚未应用适航水深的淤泥质港口提供参考，并给出适泊淤泥重度值的创新性确定方法。第二章为适航水深技

术的关键参数，即适航水深应用研究的三大项主要工作，包括适航水深应用可行性研究、适航淤泥重度值确定和适航水深测量等，侧重介绍这些关键参数的确定方法。第三章为适航淤泥对船舶操纵性的影响，其中第2、3、4节由高志亮撰写，包括数值模拟和物理模型试验，以及国外船舶试验资料等；第5节为作者请多位船长在进行实船航行操作后编写的应用适航水深体会，资料弥足珍贵。第四章、第五章均为适航水深应用的实例，介绍了在连云港和厦门港开展适航水深研究工作的过程和主要成果。第六章探讨了利用微生物延缓浮泥密实进而延长适航水深使用时间的主动适航水深技术。若希望了解淤泥质港口适航水深技术发展情况的同志，敬请一阅，并望批评指正。

杨华教授级高工主编了我国第一部有关适航水深技术的规范，即《淤泥质海港适航水深应用技术规范》（JTJ/T325-2006），极大地促进了适航水深在我国港口的应用，对适航水深技术的发展做出了突出贡献，并指导了作者参与的十多个适航水深科研项目。蒋睢耀、金镠等老一辈同志对早期的适航水深研究和应用做出了重要贡献，也对作者的适航水深科研工作给予了很多指导。张华庆、白玉川在作者研究浮泥运动特性过程中提供了大量指导。张瑞波和温春鹏在近几年参加了大量适航水深研究和现场测量工作，参加编写了本书引用的连云港和厦门港适航水深应用研究报告，并参加了微生物延缓浮泥密实的相关研究。高志亮开展了浮泥水域船舶阻力数值模拟试验研究工作。我单位的海岸河口工程中心、测绘处和仪器室等的许多同事也都参与了适航水深的科研工作并付出了辛勤的汗水。韩培培和她的多名研究生为从泥沙中筛选微生物也付出了大量劳动。另外，很多单位如连云港、厦门港、浙江苍南电厂、台山电厂、天津港、广州港、深圳港和珠海电厂等的同志也给作者提供了大量资料和管理应用经验，在此深表感谢。

庞启秀

二零一九年十月于天津滨海新区

目 录

第一章 概述	1
1.浮泥的定义、形成及运动	1
1.1 浮泥的定义	1
1.2 浮泥的形成	2
1.3 浮泥的运动	2
2.适航水深概念	3
3.国内外研究进展	3
3.1 适航水深技术	3
3.2 适泊水深	9
4.主要内容	11
第二章 适航水深技术关键参数及确定方法	12
1.适航水深应用可行性研究	12
1.1 泥沙物理特性	12
1.2 泥沙起动	13
1.3 泥沙沉降	18
1.4 密实过程	19
1.5 可行性研究	20
2.适航淤泥密度值确定	21
2.1 流变试验	21
2.2 船模阻力试验	28
2.3 适航淤泥密度值综合确定	30
2.4 适泊淤泥重度值确定方法	32
3.适航水深测量	34
3.1 适航水深测量方法	34
3.2 适航水深图绘制	39

第三章 适航淤泥对船舶操纵性影响	41
1.概述	41
2.浮泥水域船舶阻力数值模拟试验	41
2.1 水动力模型	41
2.2 研究船型	44
2.3 研究工况	46
2.4 计算域及网格布置	46
2.5 模拟结果	49
3.浮泥水域船舶操纵性数值模拟试验	52
3.1 船舶操纵运动方程	52
3.2 研究船型和工况	53
3.3 模拟结果	55
4.国外船舶试验资料	64
4.1 国外船模试验资料	64
4.2 国外实船试验状况	66
5.国内船长实船航行体会	67
5.1 国华台电港口使用适航水深进港时船舶操作的注意事项	67
5.2 苍南电厂码头船长体会	68
第四章 连云港适航水深技术研究和应用	72
1.概述	72
2.自然条件	73
2.1 港口航道基本信息	73
2.2 水动力条件	75
2.3 含沙量	77
2.4 泥沙来源	78
3.适航水深应用可行性分析	79
3.1 泥沙级配	79
3.2 泥沙起动	81
3.3 泥沙沉降	82
3.4 密实过程	83
3.5 适航水深应用可行性分析	84

4.适航淤泥重度值确定	85
4.1 淤泥流变试验	85
4.2 船模阻力试验确定适航淤泥重度值	86
4.3 适航淤泥重度值的综合确定	87
5.适航资源调查	87
5.1 连云港区适航资源分布情况	88
5.2 主航道适航厚度分布情况	89
5.3 适航水深图绘制	89
6.适航水深技术应用管理	91
6.1 连云港区适航水深技术操作方案	91
6.2 实际应用及效果	92
第五章 厦门海沧港区适航水深技术研究和应用	94
1.概述	94
2.水动力条件和泥沙环境	95
2.1 地形特征	95
2.2 水文气象条件	95
2.3 泥沙环境	97
3.适航水深应用可行性论证	98
3.1 泥沙颗分试验	98
3.2 泥沙起动试验	99
3.3 泥沙沉降试验	100
3.4 泥沙静水密实试验	101
3.5 适航水深应用可行性分析	103
4.适航淤泥重度值综合确定	103
4.1 淤泥流变试验	103
4.2 船模阻力试验	105
4.3 适航水深淤泥重度标准值的确定	106
5.适航资源分布	106
5.1 正常天气下适航资源分布情况	107
5.2 洪水、台风后适航厚度分布情况	107
5.3 适航水深应用范围	110

6.适航水深应用管理	112
6.1 适航水深应用操作方案	112
6.2 实际应用和效果	113
第六章 利用微生物延长适航水深使用时间研究	116
1.概述	116
2.微生物对浮泥密实影响研究现状	117
2.1 浮泥沉降密实过程	117
2.2 影响浮泥沉降密实的主要因素	117
2.3 EPS 对浮泥密实影响	117
2.4 在适航水深中的应用	120
3.异养菌延缓浮泥密实过程研究	120
3.1 材料与方法	121
3.2 EPS 含量对密实过程的影响	123
3.3 培养过程中微生物和 EPS 特征	128
3.4 微生物和 EPS 的作用	131
4.直接添加 EPS 后浮泥密实过程	133
4.1 材料与方法	133
4.2 密实试验结果	134
4.3 直接添加 EPS 延长适航水深的可能性	138
5.自养菌延缓浮泥密实过程研究	139
5.1 筛选化能自养菌	139
5.2 甲基营养菌对浮泥密实过程的影响	140
6.利用微生物及 EPS 延缓浮泥密实技术方案	144
6.1 现场延缓浮泥密实模式	144
6.2 现场操作方案	145
参考文献	148

第一章 概述

1. 浮泥的定义、形成及运动

1.1 浮泥的定义

淤泥质海岸的泥沙在潮流和波浪作用下，往往以悬移质运动为主，一般天气条件下含沙量较低，但大风浪期间含沙量较高，特别是在大风和台风影响下，水体含沙量是平常天的几倍、十几倍，甚至几十倍，造成许多淤泥质港口航道泥沙回淤严重，甚至在台风或寒潮作用下还会产生骤淤碍航现象。这些港口的淤积物质主要由黏性细颗粒泥沙组成，淤积物密度由表向下逐渐增大，表层泥沙单位体积内的含沙数量少，通常称为浮泥。

浮泥主要以含沙量或密度为判别参数，并结合流变特性进行界定，即以流变模型由牛顿流体转为宾汉流体时为浮泥的下限，当浮泥的流动性明显消失，流变参数随浮泥重度的增大而明显加大时为浮泥的上限。另外，还有学者综合考虑流变特性、平衡坡度、絮凝结构、界面波等因素来确定浮泥的界限。但不同学者采用的标准不同，为便于描述，将浮泥是否流动作为划分依据，将其简单划分为流动型和相对稳定型浮泥两大类。

(1) 流动型浮泥：悬沙浓度介于 $3\sim 30\text{ kg/m}^3$ 时，絮凝沉速达到最大 ($1\sim 10\text{ mm/s}$)；当悬沙浓度进一步增加时，沉速却迅速减小，在浓度为 $50\sim 100\text{ kg/m}^3$ 时，沉速变得很小趋于 0，此时黏度远大于纯水的黏度，但尚可以流动，因而称为流动型浮泥。也有研究者认为当黏性泥沙浓度超过凝聚点 (gelling point) 即 $10\sim 100\text{ kg/m}^3$ 时，称为浮泥。其表现出明显的非牛顿体，要么稳定要么以层流方式流动，而且其动力与上层水流关系不大。因此，定义流动型浮泥的密度为 $1\ 030\sim 1\ 060\text{ kg/m}^3$ ，黏度较小。

(2) 相对稳定型浮泥：当浓度大于 $50\sim 100\text{ kg/m}^3$ (转化为密度，为 $1\ 030\sim 1\ 060\text{ kg/m}^3$) 时，黏度已经足够大到阻止其发生流动 (但可沿足够陡的斜坡向下以蠕动的黏性流运动)，更多的文献界定的浮泥对应的含沙浓度要远大于 100 kg/m^3 ，综合国内外的成果界定浮泥为 $1\ 030\ (1\ 030\text{—}1\ 100)\sim 1\ 250\ (1\ 200\text{—}1\ 300)\text{ kg/m}^3$ 。

需要说明的是，国内研究人员定义的浮泥大多为相对稳定状态。

1.2 浮泥的形成

针对浮泥的形成原因，已取得了较为一致的认识。浮泥的形成主要为细颗粒泥沙悬扬后，随水流运移到航道或掩护区而落淤，细颗粒泥沙在沉降过程中，由于絮凝作用形成絮凝颗粒，到一定浓度后，絮凝颗粒聚集成蜂窝状高含沙絮团结构，并与上层水体间出现清晰界面，当浓度大到足以改变流变特性时，悬浮物将变成浮泥；或者海床表层淤泥软化后在水平方向发生流动后聚集在一起，或者具有一定坡度的海滩、航槽边坡或峡谷坡面上的泥沙在大风浪作用下起动后形成高含沙水体，然后在重力作用下向坡脚运移汇聚而形成浮泥。

1.3 浮泥的运动

航道浮泥形成后，按浮泥运动形式及对应的动力条件，运动可分解成两种。

(1) 在重力、水动力综合作用下沿底床以浮泥流形式运动（如图 1-1 和 1-2 所示），或者在水动力如波浪或水流作用下起动、悬扬并以悬移质随水流运动。

(2) 浮泥留在港池航道中，在重力作用下逐渐密实沉降。

当然，在第一种运动方式中也会同时伴随着发生密实，浮泥厚度的减小程度取决于两种方式的比重。



图 1-1 浮泥沿泥质斜坡向下流动



图 1-2 水槽中的浮泥被扰动后以密度流形式运移

2. 适航水深概念

港口水深测量通常采用高频测深仪，其反射面为水-淤泥的交界面，经大量实测资料证实这一反射面淤泥重度约为 10.3 kN/m^3 。因此，作为港口通航使用依据的图载水深 (h)，就是指当地理论基面至重度 10.3 kN/m^3 淤泥面的距离。而适航水深，即在原高频回声仪所测水深加上其反射面以下能确保船舶安全航行与停泊作业的小重度回淤层下界面的厚度。小重度回淤层的厚度称为适航厚度，如图 1-3 所示。

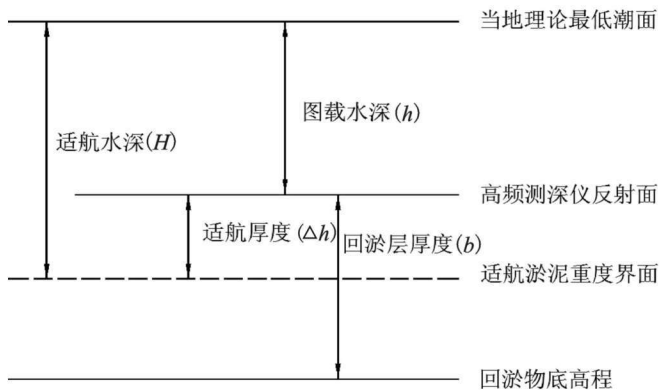


图 1-3 适航水深示意图

3. 国内外研究进展

3.1 适航水深技术

3.1.1 国外适航水深应用研究状况

适航水深资源的开发利用能给港口企业带来巨大的经济效益，因此，自 20 世纪 30 年代以来，荷兰、法国、德国、英国、比利时等国家都进行过大量研究，并在实际中得到了应用。

荷兰的鹿特丹 (Rotterdam) 港对进港航道中的浮泥特征及其对船舶的影响做了大量研究后，将 11.8 kN/m^3 作为确定回淤层中适航厚度的判断标准，并用这个值所处的层面作为确定航道底部的高程。比利时泽布勒赫 (Zeebrugge) 港在确定适航水深时不仅考虑重度，还根据淤泥的流变特性确定了该港适航水深下界面的淤泥重度值为 $11.3 \sim 12.3 \text{ kN/m}^3$ 。德国埃姆登 (Emden) 港为了充分利用水深资源，适航水深下界面的淤泥重度值为 $12.0 \sim 12.2 \text{ kN/m}^3$ 。在泰国曼谷 (Bangkok)、苏

里南帕拉马里博 (Paramaribo) 海岸沿线均采用淤泥重度 12.1 kN/m^3 为确定适航水深的标准。印度的科契 (Cochin) 港、委内瑞拉的马拉开波 (maracaibo) 港、法国的波尔多 (Bordeaux) 港、南特·圣纳泽尔 (Nantes-saint-Nazaire) 港、敦刻尔克 (Dunkirk) 港的适航水深标准重度值均采用了 11.8 kN/m^3 。英国还颁布了有关适航水深应用的国家标准《海工建筑物》(BS6349), 适航淤泥重度值采用 11.8 kN/m^3 。

3.1.2 国内适航水深应用研究状况

在泥沙运动活跃的海岸, 泥沙淤积问题往往是决定建港成败的关键之一。我国淤泥质港口众多, 其中有多港口泥沙淤积较为严重, 为减小港口维护疏浚量、提高港口效益, 前人针对如何有效利用港池航道中的回淤泥沙, 曾开展了大量研究工作并积累了一定的经验, 为适航水深技术在我国的研究和应用做出了巨大贡献。

在国内, 适航水深也同样被视为资源, 在天津港、连云港、长江口、汕头港外航道和宁波港北仑港区虾峙门航道等都曾经开展过应用研究。自 2005 年以来, 作者主持或参与开展了国华台山电厂煤港、连云港、深圳大铲湾港区、广州港南沙港区、深圳西部港区、厦门港海沧港区、珠海电厂和苍南电厂等十多个港口的适航水深研究和应用工作, 这些港口也都已正式、公开应用适航水深, 多年来取得了良好的经济效益, 也证实了科学应用适航水深技术可以保障船舶航行安全。在 2014 年, 由作者申请并经单位推荐, 适航水深技术获交通运输部批准为《水运工程建设新技术公告》(第一批) 的维护类技术。同年, 交通运输部编制的《公路水路交通运输主要技术政策》中明确写到“在淤泥质海岸, 推广应用适航水深技术和走航式适航水深测量技术”。另外, 《水运工程测量规范》(JT5131-2012) 中也列入有关适航水深测量的内容。

目前, 国内正式确定适航水深标准值的淤泥质海港有天津港、国华台山电厂煤港、连云港、深圳大铲湾港区、广州港南沙港区、深圳西部港区、厦门港海沧港区、珠海电厂和苍南电厂等十多个港口。

(1) 天津港: 典型的淤泥质海岸港口, 在大风情况下, 局部港池出现强淤现象, 最大淤积厚度达到 2.0 m 以上, 对港区的生产带来很大影响。天津港适航淤泥重度标准值为 12.7 kN/m^3 , 采用三爪铰和高频回声测深仪组合测量以及走航式适航水深测量系统进行测量。通过几年的应用, 在延长维护疏浚时间、减少维护土方量、提高维护疏浚效率、节约维护费、提高码头的使用率等方面都取得了较好的效果。例如 1998 年 10—12 月发生强淤现象, 东突堤周边港池和当时南疆四港池的淤积厚度分别达 1.22 m 和 1.77 m , 明显不足通航水深, 但一直到 1999 年 9

月才做维护，也始终未影响码头的正常使用。

(2) 国华台山电厂煤港：自 2004 年建成使用后，泥沙回淤现象十分明显，强台风侵入时，港池航道还会产生骤淤，给电厂燃煤的正常供应带来了困难。2006 年，作者主持开展了适航水深应用研究，确定了适航淤泥重度标准为 12.3 kN/m^3 ，并采用走航式适航水深测量系统进行测量，已指导多艘大型煤船利用适航水深实现了安全进港靠泊码头的目的，降低了骤淤对船舶出入港口的影响，保证了电厂用煤的需求，同时还有效减少了船舶滞港时间、节省了船舶滞港费，获取了良好的经济效益。表 1-1 为国华台电船舶利用适航水深进港靠泊统计结果（部分）。

表 1-1 国华台电船舶利用适航水深进港靠泊统计结果（部分）

序号	船名	进港时间	进港吃水 (m)	常规水深 (m)	进港潮高 (m)	要求安全富裕水深不少于 (m)	实际应用适航厚度 (m)
1	鹏业	2006年5月19日	13.45	10.8	2.48	0.8~1.0	1.0~1.2
2	广骅	2006年8月9日	12.96	9.7	3.13	0.8~1.0	0.9~1.1
3	鹏业	2006年8月13日	12.90	10.0	2.73	0.8~1.0	1.0~1.2
4	鹏骅	2007年8月14日	13.65	11.3	2.91	0.8~1.0	0.3~0.5
5	五星先锋	2007年8月16日	13.36	11.4	2.61	0.8~1.0	0.3~0.5
6	广骅	2008年8月26日	13.40	11.2	2.57	0.8~1.0	0.5~0.7

(3) 连云港：连云港港口地处中国沿海中部的海州湾西南岸、江苏省的东北端，主要港区位于北纬 34.4° ，东经 119.7° 。北倚长约 6 km 的东西连岛天然屏障，南靠云台山东麓，人工筑起长达 6.7 km 的西大堤，从连岛的西首将岛陆相连。连云港包括老港区、庙岭港区、墟沟港区三大主要港区，为综合性国际贸易运输枢纽港。连云港进港航道总长 33.9 km，内外航道设计底标高为 -16.5 m，底宽 227 m；港内庙岭航道设计标高 -16.0 m，墟沟 5 万吨级航道设计标高 -11.0 m。

在大规模的开发建设过程中，局部港区和航道泥沙淤积较为严重，港区疏浚频繁，而且维护疏浚量大。2007 年，作者主持开展了适航水深应用研究。结果表明，连云港回淤泥沙颗粒很细，泥沙中值粒径 D_{50} 约为 0.0043 mm ，淤积物中的

黏土含量较高(50%左右);通过流变试验和船模阻力试验,确定了连云港航道的适航水深淤泥重度为 12.2 kN/m^3 ;对船舶停泊或航速较小的港池,适航水深的重度值取试验结果的上限值为 12.4 kN/m^3 。经2008年5月初勘测结果,庙岭港区多个泊位的泥沙回淤层中存在 $0.5\sim 1.8\text{ m}$ 的适航厚度,表明具有较好的适航水深利用前景。

2012年,针对连云港外航道也开展了适航水深相关研究,特别是开展了适航浮泥对船舶操纵性影响的数学模型和物理模型试验研究,成果对提升应用适航水深的功能性具有重要的参考价值。

(4)深圳港大铲湾港区:一期工程港池开挖建设过程和建成初期,局部区域泥沙淤积严重。2008年,作者带领团队开展了淤泥的水力特性试验、流变试验和船模阻力试验等试验,综合确定深圳港大铲湾港区一期工程港池适航水深临界重度值为 12.2 kN/m^3 。按淤泥标准重度 12.2 kN/m^3 ,经多次测量结果,泊位及港池内回淤层中分布有 $1.0\sim 4.0\text{ m}$ 的适航厚度,表明具有较好的适航水深利用前景。多年来,深圳港大铲湾港区一直都在利用适航水深。

(5)广州港南沙港区:2008年,作者和团队开展了适航水深应用研究工作,综合确定了一期、二期港池适航水深临界重度值为 12.3 kN/m^3 。测量表明,港池内回淤层中分布有 $0.5\sim 2.5\text{ m}$ 的适航厚度,也表明具有较好的适航水深利用前景。经实际应用,创造了较好的经济效益。

(6)深圳港西部港区:位于珠江口伶仃洋东岸,毗邻香港,背靠珠江三角洲,地理位置优越,水路交通便利,是我国沿海主枢纽港和集装箱干线港。深圳港西部港区主要包括蛇口港区、赤湾港区、妈湾港区和正在筹划建设的前湾港区。

2008年,作者主持开展的适航水深应用研究成果表明,该海域表层沉积物中值粒径均介于 $0.003\text{ 0}\sim 0.007\text{ 2 mm}$,平均中值粒径约为 0.0048 mm ,黏粒含量在46%左右。综合确定深圳港西部港区航道适航水深淤泥重度值为 11.8 kN/m^3 ;泊位、港池区域可适当增大适航水深的重度值,取试验结果的上限值 12.2 kN/m^3 。通过港方组织开展的水轮测深和常规(高频)测深对比分析,妈湾0#泊位在2008年8月份测量期间存在厚度约为 2.0 m 的淤泥层,招商港区1#—13#泊位港池航道水域在2008年3月和6月的测量期间,也均存在一定厚度的淤泥层。

(7)珠海电厂煤港:珠海发电厂位于广东省珠海市临港工业区,东距珠海市区 50 km ,属中外合作兴建的大型火力发电厂,也是国家“九五”计划的重点项目之一。珠海发电厂首期建设安装两台 700 MW 发电机组,2001年投入商业运营。

珠海电厂港区是在淤泥质浅滩上开发建设的港口，周围有西江的崖门、虎跳门和鸡啼门等河流提供沙源，港池及航道开挖后存在较严重的泥沙淤积。

2012年，作者与团队开展了泥沙流变试验和船模阻力试验等研究，对珠海电厂港池及航道的水流、泥沙淤积变化、港区浮泥分布及适航水深重度标准值进行了论证研究。在珠海电厂港池及航道内，床面泥沙中值粒径介于 $0.003\ 0\sim 0.013\ 4\ \text{mm}$ （黏土含量介于 $30\%\sim 60\%$ ），泥沙中值粒径平均为 $0.005\ 4\ \text{mm}$ 。根据流变及船模阻力等试验结果，适航水深临界重度值取 $12.3\ \text{kN/m}^3$ 较为适宜。音叉密度计和高低频水深测量结果表明，在珠海电厂港池和航道内，利用适航水深后，一般情况下可比采用高频测量结果增加 $0.1\sim 1.2\ \text{m}$ 水深值。

（8）厦门海沧港区：厦门海域位于福建省东南部沿海，与台湾岛隔海相望。厦门海域是一个半封闭型海湾，海沧港区位于九龙江河口区，九龙江河口区受潮汐和径流双重影响，区内有九龙江自此入海。多次现场取样表明，海沧港区特别是西部港池航道的回淤泥沙样品颗粒较细，中值粒径 D_{50} 平均值在 $0.007\ 0\ \text{mm}$ 左右；黏土含量平均为 43% ，大多属粉砂质黏土，泥沙沉降试验、起动试验和静水密实试验等结果表明，泥沙样品表现出淤泥的特性。2014年，作者主持开展了流变特性试验和船模阻力试验等，综合确定厦门海沧港区通航水域的适航淤泥重度值为 $12.1\ \text{kN/m}^3$ ，转化为密度值为 $1\ 235\ \text{kg/m}^3$ 。现场测量表明，九龙江下泄洪水对海沧港区特别是西部水域的13#—21#泊位及其对应航道泥沙淤积产生较大影响，洪水过后会出现较厚的淤泥，密度介于 $1\ 050\sim 1\ 400\ \text{kg/m}^3$ 的泥层厚度可达 $1.0\sim 2.0\ \text{m}$ 。而在正常天气下，海沧港区的适航厚度较小。

（9）华润浙江苍南发电厂：华润浙江苍南发电厂位于浙江省苍南县东北部，布置于琵琶门南侧岬角上，北侧为琵琶山岛和鳌江河口，南侧为平阳咀，东临东海，西南群山抱拦。电厂一期建设规模为 $2\times 1\ 000\ \text{MW}$ 燃煤机组，规划容量为 $4\times 1\ 000\ \text{MW}$ 燃煤机组。卸煤码头前沿区域自然海床底标高约 $2.0\ \text{m}$ （理论基面），挡沙防波堤门口水域自然海床底标高约 $-3\ \text{m}$ 。卸煤码头的港池和航道开挖底标高为 $-7.3\ \text{m}$ ，泊位开挖底标高为 $-12.1\ \text{m}$ 。

泥沙样品的中值粒径 D_{50} 介于 $0.003\ 5\sim 0.005\ 5\ \text{mm}$ ；黏土含量介于 $40\%\sim 55\%$ ，大部分样品属粉砂质黏土。泥沙沉降试验、起动试验和静水密实试验等结果表明，泥沙样品表现出淤泥的特性。2014年，作者主持开展了流变特性试验和船模阻力试验，综合确定华润浙江苍南发电厂港池航道的适航淤泥重度值为 $12.0\ \text{kN/m}^3$ ，转化为密度值为 $1\ 225\ \text{kg/m}^3$ 。适泊水深下界面的密度值建议为 $1\ 300\ \text{kg/m}^3$ ，转换为重度值

为 12.8 kN/m^3 。苍南电厂的港池航道具有丰富的适航水深资源，2015 年 7 月在超强台风“灿鸿”过后利用音叉密度计测量表明，泊位水域的适航厚度在 1.2 m 左右，港池水域的适航厚度为 0.7~1.3 m；内航道的适航厚度介于 0.07~0.5 m，外航道的适航厚度介于 0.04~0.5 m。

3.1.3 适航淤泥重度的取值范围分析

国内外使用适航水深技术的港口对应的适航淤泥重度值并不完全相同，为了对比，将各港口使用的适航淤泥重度值汇总于表 1-2。

表 1-2 国内外有关港口的适航淤泥重度值

国 家	港口名称	标准值
		重度 (kN/m^3)
英国	英国标准《海工建筑物》(BS6349)	11.8
荷兰	鹿特丹	11.8
比利时	泽布拉赫	11.3~12.3
泰国	曼谷	12.1
法国	波尔多	11.8
	南特·圣纳泽尔	11.8
	敦刻尔克	11.8
德国	埃母登	12.0~12.2
	威廉	12.0
委内瑞拉	马拉开波	11.8
苏里南	帕拉马里博	12.1
印度	科钦	11.8
中国	天津港	12.7
	国华台山电厂煤港	12.3
	连云港	12.2 (港池泊位 12.4)
	深圳港大铲湾港区	12.2 (主要用于港池)
	广州港南沙港区一二期港池	12.3 (主要用于港池)
	深圳西部港区	航道 11.8 港池 12.2
	厦门港海沧港区	12.1
	珠海电厂	12.3
	苍南电厂	12.0

另外，为了给其他尚未应用适航水深的淤泥质港口提供参考，汇总国内港口的适航淤泥重度值与对应的泥沙部分特征值，见表 1-3。可知，除天津港因适航水深主要应用在泊位而选用了较大的数值 (12.7 kN/m^3) 外，其他港口的适航淤泥重度值介于 $11.8 \sim 12.3 \text{ kN/m}^3$ ，相差不大。经各港回淤泥沙的中值粒径和黏土含量比较，已研究的各港中泥沙中值粒径基本相当，均在 0.0050 mm 左右，而黏土含量也相差不大，主要在 $40\% \sim 60\%$ 。

我国多个尚未应用适航水深的淤泥质港口的泥沙粒径也很细，黏土含量也较高，因而可以判断这些港口也具有应用适航水深的条件，其适航淤泥重度值可能会介于 $11.8 \sim 12.7 \text{ kN/m}^3$ 。但需要说明的是，真正应用适航水深时还应利用港口现场泥沙通过试验来科学确定，以保证船舶的安全。

表 1-3 国内有关港口泥沙特征及适航淤泥重度值

港口名称	回淤泥沙平均中值粒径 (mm)	黏土含量 (%) ($<0.004 \text{ mm}$)	适航淤泥重度值 (kN/m^3)
天津港	港池: 0.0023 航道: 0.0038	港池: 63 航道: 52	12.7 (主要用于泊位)
国华台山电厂煤港	0.004 8	46	12.3 (只在骤淤时用)
连云港	0.004 3	52	12.2 (港池泊位: 12.4)
深圳港大铲湾港区	0.005 0	45	12.2 (主要用于港池)
广州港南沙港区	0.005 2	43	12.3 (主要用于港池)
深圳港西部港区	0.004 8	46	11.8 (港池泊位: 12.2)
厦门港海沧港区	0.007 0	43	12.1
珠海电厂	0.005 4	30~60	12.3
苍南电厂	0.003 5~0.005 5	40~55	12.0

3.2 适泊水深

3.2.1 基本概念

为了进一步减少维护疏浚频率和疏浚量，船舶可以乘高潮靠、离码头，在泊位停泊期间应用“适泊水深”，即将泊位中密度大于适航淤泥密度值的部分淤泥层仍视为水深，则可利用的淤泥层厚度就会增加很多。但不论是适航水深还是适泊水深，对应的适航淤泥密度或适泊淤泥密度值都是最重要的参数之一，即能够满足作业安全的最大淤泥密度，示意图见图 1-4。

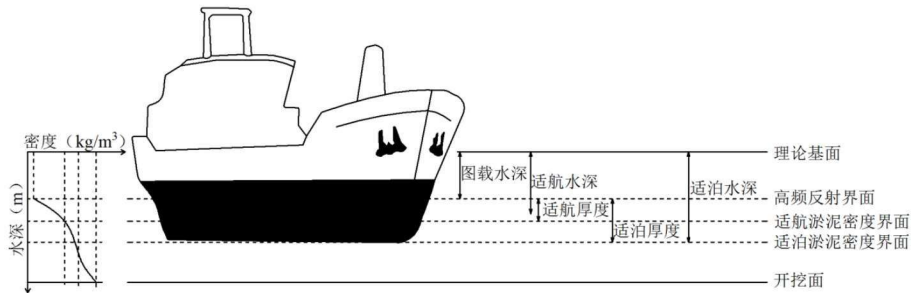


图 1-4 适泊水深概念图

3.2.2 适泊淤泥重度值确定方法研究现状

对于适航淤泥密度值的确定,《规范》主要是通过淤泥流变试验和船模阻力试验这两种室内试验,建立屈服应力与淤泥密度的关系曲线、船模阻力与淤泥密度的关系曲线,进而以曲线中的拐点作为适航淤泥密度值。也有学者如金镠等人从淤泥流态角度来确定适航淤泥密度值。但是当船舶停靠在泊位中处于静止状态时,没有上述的淤泥屈服应力、船模阻力或淤泥流态等问题,也就不能采用上述方法来确定适泊淤泥密度值。

天津港在应用时曾提出“适泊水深”的概念,并采用以下方法确定适泊淤泥值:考虑到能静态托起张网三爪铈的浮泥为“适泊水深”的下界面,对船舶停泊不会有影响,利用“适泊深度”时主要为应对低潮时船舶的下沉(无航行),为此,建议天津港深水泊位“适泊深度”下界面浮泥重度取 13.0 kN/m^3 ,即将“塑性体”浮泥层也计入水深。由此可知,他们主要采用三爪铈来确定适泊重度(或密度),即能够静态托起张网三爪铈的淤泥界面的密度。这种方法存在以下问题:①没有跟船舶联系起来,并不能知道船舶接触这个密度的淤泥是否安全。②三爪铈的重量是固定的,则能够静态托起张网三爪铈的淤泥密度值也是固定的,即采用三爪铈只能测量出单层的淤泥密度,并不能测量出其上层和下层的淤泥密度,所以即便进行实船试验,也不能知道船底接触层的密度。③三爪铈由于严重依赖操作人员的操作过程,精度较低。所以,这种确定适泊淤泥密度值的方法并没有在其他港口推广应用,也没有写进《淤泥质海港适航水深应用技术规范》(JTJ/T 325-2006)和《海港总体设计规范》(JTS 165-2013)。

另外,作者在开展连云港适航水深应用研究时,曾经提出一种适泊淤泥密度值的确定方法(该成果已被文章《适航水深在连云港港口的初步应用》引用):流变试验得出的屈服应力与淤泥密度的关系曲线、船模阻力试验得出的阻力与淤泥密度的关系曲线,其实都不存在真正的拐点(曲线可以用指数关系式来很好地拟合),只是表观上有个拐点,因此从两条关系曲线得出的拐点都是范围值,将下限值 12.2 kN/m^3 作为适航重度值,而上限值 12.4 kN/m^3 作为适泊重度值。由此可知,这种方法确定的适泊淤泥密度值仍是基于试验室内的流变或船模结果得出的运动状态下的数值,未能反映现场的淤泥密度分布情况和船舶停泊实际上是处于静止状态的特征,也就导致事实上这种取上限值的方法确定的适泊水深在港口现场并没有太大的实用价值,因为淤泥密实一段时间后,上、下限值间的淤泥层厚度也会很薄。