



绞吸挖泥船三缆定位系统设计

冯永军^{1,2,3}, 陈 城^{1,2,3}, 陈新权^{1,2,3}, 欧阳义平^{1,2,3}, 杨 启^{1,2,3,4}

(1. 上海交通大学, 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240;

2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

3. 上海交通大学, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240;

4. 上海交大海洋水下工程科学研究院有限公司, 上海 200231)

摘要: 三缆定位系统是绞吸挖泥船的重要定位设备之一, 对施工作业能力和船舶安全性方面都有着重要影响。针对三缆定位系统的设计问题, 从系统的主要组成、工作原理及设计流程等方面进行论述, 形成不同工况下三缆系统所承受的外荷载计算流程, 采用频域分析和有限元分析等方法, 分析得出缆绳张力的变化规律及筒体结构的受力特点, 提出缆绳选型及局部结构设计方法。结果表明, 各种工况下, 缆绳张力随风速增大而增大, 且在同等风浪条件下, 处于挖泥作业工况和避风工况的缆绳张力区别较大, 应综合考虑。此外, 在三缆定位的设计过程中, 须对受力较大部位进行特殊考虑与重点加强。

关键词: 绞吸挖泥船; 三缆定位; 外荷载; 缆绳; 结构设计

中图分类号: U 661

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0203-07

Design of three-cable positioning system of cutter suction dredger

FENG Yong-jun^{1,2,3}, CHEN Cheng^{1,2,3}, CHEN Xin-quan^{1,2,3}, OUYANG Yi-ping^{1,2,3}, YANG Qi^{1,2,3,4}

(1.State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2.School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3.Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

4.Shanghai Jiao Tong University Underwater Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200231, China)

Abstract: Three-cable position system is one of crucial position equipments effecting capacity and safety for cutter suction dredger. Aiming at design of three-cable positioning system, this paper introduces the main components, working principle and design process, forms the calculation process of the external loads borne by the three cable system under different working conditions, analyzes the variation law of the cable tension and the stress characteristics of the cylinder structure by using the methods of frequency domain analysis and finite element analysis, and proposes cable type selection and local structural design method. The results show that under various working conditions, the cable tension increases with the increase of wind speed, and under the same wind and wave conditions, the cable tensions under dredging operation conditions and wind shelter conditions are different quitely, which should be comprehensively considered. In addition, in the design process of three-cable positioning system, special consideration and key strengthening should be given to the parts with large stress.

Keywords: cutter suction dredger; three-cable positioning; external load; cable; structural design

收稿日期: 2022-02-10

作者简介: 冯永军(1976—), 男, 硕士, 助理研究员, 从事船舶与海洋工程设计与研究。

对于绞吸挖泥船，定位设备在施工作业能力和船舶安全性方面都有着重要影响。绞吸挖泥船常用定位方式有 2 种：1) 钢桩台车定位，该方式定位精度较高，但作业水深和土质环境受限；2) 此方式相对钢桩台车定位而言，三缆定位作业水深范围更广，可以在大水深、大风浪、各种软、硬土质下实现船舶定位，但在定位精度方面较钢桩台车方式低。现代大型绞吸挖泥船多配备钢桩定位系统，但为了扩大作业范围、适应深远海作业需求，一些大型绞吸挖泥船在配备钢桩台车的同时往往也配备了三缆定位系统，以弥补钢桩台车定位方式的不足，辅助实现定位作业、避风等操作，如“天麒号”“天麟号”“天鲲号”“新海旭”等均是如此^[1-3]。

本文从三缆定位系统的设计角度出发，通过对相关的系统构成、工作原理、外部荷载以及缆绳、筒体受力等方面进行分析，并在此基础上归纳总结，以期对绞吸挖泥船三缆定位系统的设计与评估提供参考。

1 三缆定位系统组成及工作原理

三缆定位系统主要由定位主体、绞车和定位锚等 3 个部分组成^[4]。在绞吸挖泥船拖航或航行时，三缆定位锚回收至绞吸挖泥船的锚架上。通过三缆定位绞车的副卷筒收紧提升钢丝绳，使三缆定位筒体(及安装在筒体底部的固定插销、导向装置等)沿筒体提升导向装置，向上提升直至整体高于船体基线为止，并通过固定横杆及顶部固定结构固定，避免船舶造成不必要的阻力及安全隐患。在绞吸挖泥船抵达施工区域之后，抽出固定横杆，三缆定位绞车的副卷筒释放提升钢丝绳，使三缆定位筒体沿导向装置降落，直至固定插销插入底部固定平台，然后固定横杆及布置在船体之上的顶部固定结构，最后进行抛锚等作业。

三缆定位主体结构由筒体、顶部导向装置、顶部固定结构、提升滑轮、底部导向装置、底部固定插销、底部固定平台、筒体提升导向装置等共同组成，见图 1。

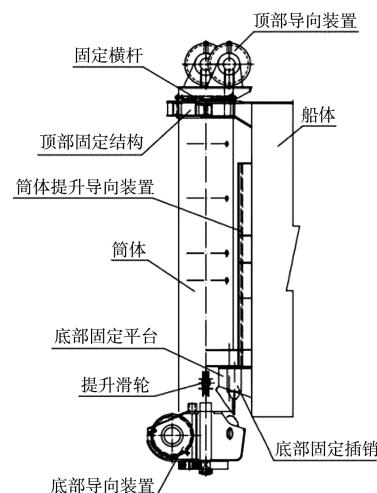


图 1 三缆定位主体构成

三缆定位系统配备 3 台定位绞车，布置在船体甲板上，为定位系统提供维持力及提升所需的起升力。

三缆定位系统配备 3 只定位锚，每只定位锚配备 1 根钢丝绳。钢丝绳一端固定在定位绞车的卷筒墙板上，在绞车卷筒绕一定的圈数后引至三缆定位主体的顶部导向装置，之后向下穿过筒体，并经底部导向装置引出，最后与定位锚连接。在施工时定位锚延伸至对应锚点呈放射状抛设，其中 1 只锚沿船长方向向船尾抛设，其他 2 只锚分别向船首左右两舷抛设，相互之间夹角在 120° 左右。

工作状态下，3 台绞车分别收紧钢丝绳，可以确定唯一的点，即筒体中心线的位置，从而实现船体定位。当挖泥船需要向前移位时，连接船长方向定位锚的定位绞车放松钢丝绳，而左右两舷定位锚的定位绞车收紧钢丝绳，同时船首横移绞车的钢丝绳也适当收紧，从而实现船体向前移位。

2 三缆定位系统的设计要点

2.1 设计模型

首先要确认绞吸挖泥船船体在挖泥作业和避风工况所承受的外部荷载，并在此基础上，选择满足拉力要求的缆绳(以及相应的定位锚、定位绞车等)，并根据缆绳和受力进行三缆定位主体及相关固定结构的设计。

以某绞吸挖泥船为例, 对其在挖泥作业和避风两种工况下三缆定位的缆绳张力进行计算, 通过分析得出相应规律, 供三缆定位系统设计参考。挖泥船主尺度为: 船体长 98 m、宽 20.3 m、型深 6.6 m, 设计挖泥吃水 4.8 m。

为了计算该绞吸挖泥船各种计算工况下的外荷载, 首先根据其型线图建立船体湿表面模型(图 2), 在 Ansys 软件的 AQWA 模块中进行频域分析, 得到船体受到的波浪荷载; 根据风速、流速情况, 通过经验公式计算得到作用在船体上的风、流荷载; 结合绞刀作业工况, 利用经验公式计算得到绞刀荷载^[5]。

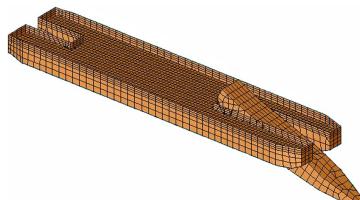


图 2 绞吸挖泥船湿表面模型

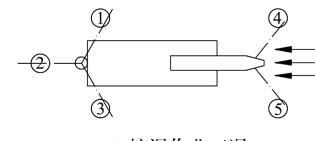
2.2 计算工况选取

三缆定位系统所适用的工况主要有挖泥作业工况和避风工况。

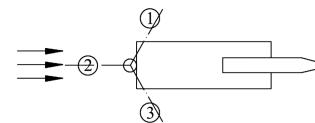
挖泥作业工况下, 绞吸挖泥船尾部依靠三缆系统定位, 船首部依靠两根横移缆拉动桥架、绞刀摆动进行挖泥作业。此时挖泥船顶浪作业, 在 180°荷载方向下对挖泥船的缆绳张力进行计算, 具体布置及荷载情况见图 3a)。具体计算中, 假定风、浪、流同向。

此外, 挖泥作业过程中, 绞刀会分别向左舷和右舷方向产生约 30°的摆角, 相应外荷载的方向将随之产生变化。本文以 180°荷载方向下的挖泥工况为例进行相关介绍, 其他工况计算过程与之类似, 可以参照进行。

避风工况下, 挖泥船顺浪定位, 船首部横移缆绳不工作, 仅依靠船尾三缆系统实现船舶定位, 在 0°荷载方向对挖泥船的缆绳张力进行计算, 见图 3b)。



a) 挖泥作业工况



b) 三缆避风工况

注: ①~⑤分别为左侧边缆、艉缆、右侧边缆、左侧横移缆、右侧横移缆; 箭头方向表示计算浪向范围。

图 3 计算工况及缆绳布置

2.3 外部荷载计算

绞吸挖泥船所承受的外部荷载主要有风、流、波浪荷载, 以及作业时产生的绞刀荷载(避风工况时为零)。系泊浮体在波浪上的时域运动方程可以表达为^[6]:

$$(\mathbf{M} + \boldsymbol{\mu}) \ddot{\mathbf{X}}(t) + \int_0^t \mathbf{K}(t - \tau) \dot{\mathbf{X}}(\tau) d\tau + \mathbf{C}\mathbf{X}(t) = F^1 w(t) + F^2 w(t) + F_{WI} + F_{CU} + F_{MR} + F_c \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; $\boldsymbol{\mu}$ 为附加质量矩阵; $\mathbf{X}(t)$ 为位移; $\dot{\mathbf{X}}(\tau)$ 为速度; τ 为时间延迟; $\ddot{\mathbf{X}}(t)$ 为加速度; t 为时间; $\mathbf{K}(t-\tau)$ 为时延函数矩阵; \mathbf{C} 为静水恢复力矩阵; $F^1 w(t)$ 为一阶波浪力; $F^2 w(t)$ 为二阶波浪力; F_{WI} 为风荷载; F_{CU} 为流荷载; F_{MR} 为系泊缆荷载; F_c 为绞刀荷载(避风工况时此项为零)。

在实际工程应用中, 波浪荷载可以根据选定波浪类型和设置的波浪参数由软件计算得出, 风、流、绞刀荷载均由经验公式计算得到。

2.4 缆绳张力分析

2.4.1 顶风作业工况

三缆定位系统属于锚泊定位范畴, 因此缆绳张力是体现定位能力的重要标志, 在所需缆绳张力超出现有定位系统的张力极限时, 定位系统失效。分别对顶风作业和避风工况下的缆绳张力进行计算与分析。计算所得的顶风作业工况下不同波高和波浪周期对应各缆绳张力见表 1。

表 1 顶风作业工况缆绳张力

风速/(m·s ⁻¹)	有效波高/m	周期 T/s	张力/MN				
			缆绳①	缆绳②	缆绳③	缆绳④	缆绳⑤
20	1.0	6	1.19	0	1.09	0.99	0
		9	1.56	0	1.92	1.10	0
		12	3.12	2.66	3.53	1.74	1.91
		15	4.48	8.03	4.85	2.34	2.00
		18	4.78	8.40	5.19	2.44	2.64
20	1.5	6	1.27	0	1.23	1.14	0
		9	2.01	0.04	2.29	1.31	0
		12	4.55	5.16	4.83	2.67	2.52
		15	11.80	27.70	12.40	4.00	4.78
		18	12.90	27.40	14.10	4.21	4.21

由表 1 可见, 在波周期较小时, 缆绳②⑤会出现持续松弛的现象(张力为零)。波周期较大时, 缆绳松弛现象消失; 且①②③的三缆张力明显高于横移缆④⑤, 某些海况下三缆最大张力可为横移缆最大张力的 2 倍, 是限制定位能力的主要因素; 波周期较小时, 不考虑缆绳②⑤的松弛, 剩余 3 根缆张力水平接近。可见, 顶浪作业时, 决定缆绳张力情况是否满足安全要求的主要为三缆钢丝绳, 工程实际中可以从材料选择上提高三缆钢丝绳张力极限, 进而提高定位能力。

此外, 对 5 根缆绳张力变化情况对比分析发现, 所有缆绳变化规律基本一致, 即缆绳张力随风速增大而增大, 并且波高越大, 则风速的影响越显著。

2.4.2 避风工况

计算所得的避风工况下不同波高和波浪周期对应各缆绳张力见表 2。

表 2 避风工况缆绳张力

风速/(m·s ⁻¹)	有效波高/m	周期 T/s	张力/MN		
			缆绳①	缆绳②	缆绳③
20	1.0	6	0.15	0.49	0.11
		9	1.20	3.15	1.35
		12	2.43	6.20	2.78
		15	5.34	11.80	6.28
		18	4.51	11.10	5.52
20	1.5	6	0.35	0.79	0.32
		9	2.32	5.51	2.35
		12	4.90	10.80	5.52
		15	16.10	34.90	16.80
		18	15.40	34.70	17.00

由表 2 可见, 三缆在避风工况、0°荷载方向时没有出现缆绳松弛的现象; 缆绳②张力高于缆绳①③ 2 倍左右, 限制了船舶定位能力, 由于张紧式系泊的缆绳张力与缆绳长度密切相关, 所以在艉向荷载时, 可以考虑对艉缆加长等操作提高船舶定位能力。

此外, 3 根缆绳张力随环境因素变化的规律极为一致, 即缆绳张力随风速增大而增大; 缆绳张力随波高增大而增大; 缆绳张力随波周期增长而增大, 周期 15 s 附近, 缆绳张力出现极值。

2.4.3 缆绳选取

缆绳的选取需要综合考虑多种因素: 绞吸挖泥船的施工作业、避风工况要求、缆绳对三缆定位系统及绞车规格的影响等。缆绳张力过大, 必然引起三缆定位系统的构件尺寸及质量加大, 相应三缆定位绞车的能力、尺寸、质量也需要增大, 在船上所需的布置空间、结构加强等会发生变化, 甚至会影响原有的总布置, 可见缆绳的选取是一个综合、平衡的过程。

因此, 在进行三缆系统缆绳选取之前, 首先要明确本船的施工作业、避风工况的极限要求, 超过此要求将移船规避。根据此极限工况下所需的缆绳张力, 在考虑一定安全系数的基础上选定缆绳规格, 并根据抛锚距离确定缆绳的长度。缆绳的规格反映和决定了绞吸挖泥船的定位能力。

2.5 简体结构受力分析

2.5.1 结构有限元建模

三缆定位系统的缆绳张力最后作用在系统及

定位绞车上。定位绞车可根据缆绳拉力、直径、绳长等规格进行选型。作为特种作业设备的三缆定位系统则须进行特别设计, 在实现功能性要求的前提下, 整个系统的强度是设计中的难点与重点。因此, 针对绞吸挖泥船及其所需的三缆定位系统缆绳张力, 进行了三缆定位系统的有限元建模与计算。一般而言, 三缆定位的设计前提是在缆绳断裂的情况下, 三缆定位系统及绞车、船体等仍是安全状态。因此, 计算过程中施加的缆绳拉力为破断荷载。

三缆定位系统的设计是一个迭代的过程, 即根据经验初步完成三缆定位系统的设计之后, 进行有限元建模, 对其关键部位和构件进行受力计算和校核之后, 相应修改设计, 并根据修改后的设计重新建模计算, 直至满足设计要求为止。下面以某种荷载下三缆定位系统的设计与计算的迭代过程为例, 对三缆定位系统与结构强度方面有关的设计加以介绍。

三缆定位筒体的有限元模型见图4。坐标系 $oxyz$ 的 x 正向朝船首, y 正向朝左舷, z 正向垂直朝上。

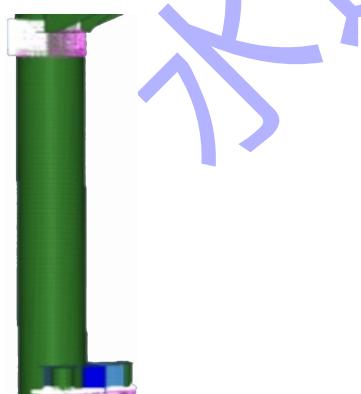


图4 三缆定位筒体有限元模型

2.5.2 边界约束及荷载施加

三缆定位主体主要由船上的顶部和底部固定装置固定。在具体计算过程中, 筒体顶部被“抱住”部分施加 x 和 y 向约束; 筒体底部由两个固定插销 x 和 y 向约束; 连接固定插销的水平板为 z 向约束, 如图5所示。

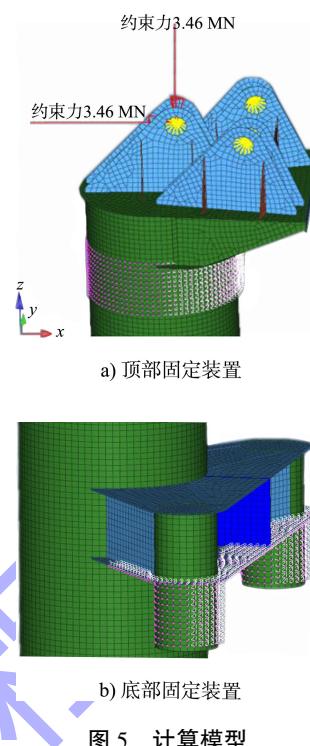


图5 计算模型

进行加载计算分析时, 底部滑轮所受水平荷载通过多点约束传递至固定滑轮的两个轴孔, 垂向荷载通过多点约束施加于固定滑轮的顶部轴孔。顶部滑轮的荷载通过多点约束传递至固定滑轮的耳板上。

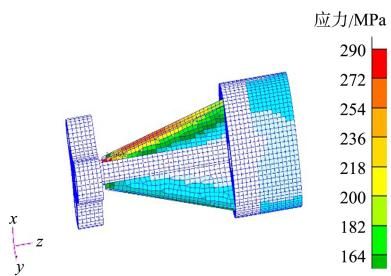
2.5.3 结构受力计算和结果分析

三缆定位筒体受力有多种可能工况, 从缆绳数量角度可以分为承受1、2或3根缆绳拉力, 而每种数量缆绳作用下, 随着绞刀头的摆动尚有风浪流作用角度的区别, 本文选取两种典型的受力工况进行计算和分析, 其他受力情况下过程与之类似。

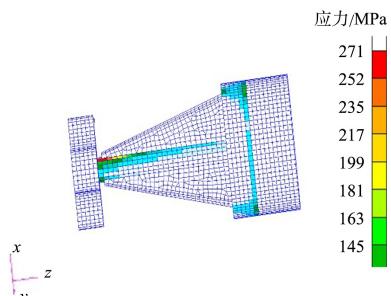
受力工况1为船尾部单根缆绳水平拉力达到破断荷载, 方向沿 x 负向; 此时为绞刀顶浪工作。三缆定位筒体的受力工况1见图6, 主要受力部位应力云图见图7。



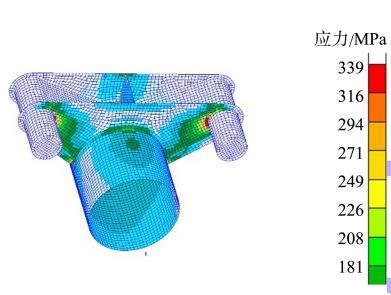
图6 三缆定位筒体受力工况1



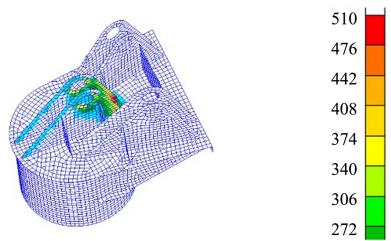
a) 底部导向滑轮支撑装置肘板



b) 底部导向滑轮支撑装置中间支柱



c) 底部固定装置



d) 顶部固定装置

图 7 受力工况 1 主要受力部位应力云图

受力工况 2 为船尾部单根缆绳水平拉力达到破断荷载，方向与 x 轴负向呈 30° 夹角，此时为绞刀摆至 30° 状态斜浪作业。三缆定位筒体的受力工况 2 见图 8，主要受力部位应力云图见图 9。

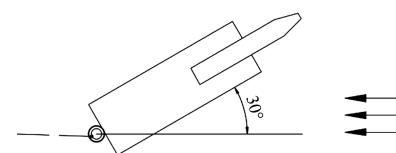
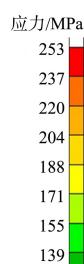
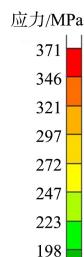


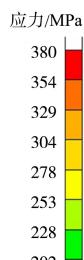
图 8 三缆定位筒体受力工况 2



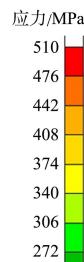
a) 底部导向滑轮支撑装置肘板



b) 底部导向滑轮支撑装置中间支柱



c) 底部固定装置



d) 顶部固定装置

图 9 受力工况 2 主要受力部位应力云图

综合2种受力工况可知: 1) 各种工况下筒体本身的应力水平比较低, 但筒体固定结构以及顶部导向装置部分的滑轮固定结构的应力较大。2) 船体转动30°后, 缆绳拉力不经过筒体中心, 导致底部导向滑轮支撑装置的中间支柱承受额外扭矩, 应力相应变大。这些部位在结构设计中须重点考虑与加强。

3 结论

1) 在挖泥作业工况和避风工况下, 缆绳变化规律基本一致, 即缆绳张力随风速增大而增大, 并且波高越大, 则风速的影响越显著。

2) 在同等风浪条件下, 处于挖泥作业工况和避风工况的三缆定位系统缆绳张力区别较大, 设计过程中要综合两个工况进行考虑。

3) 在三缆定位筒体及相关装置的设计过程中, 除了考虑其功能性的实现外, 还应根据不同部位

(上接第171页)

3) 采用GRLWEAP软件进行基桩可打性分析, 钢管桩贯入密实含砂碎石和卵石地层中时, 桩端闭塞系数可取0.7~1.0。

4) 密实含砂碎石和卵石地层中钢管桩单位侧摩阻力约为225 kPa, 单位端阻力值不低于13 MPa。

参考文献:

- [1] 汪明元, 单治钢, 饶锡保, 等. 基于近海钢管桩现场试验的海洋土参数反演[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S2): 143-148.
- [2] 苏世定, 王幸, 桑登峰. 珊瑚礁岩土地区打入式钢管桩沉桩规律[J]. 水运工程, 2019(10): 187-192, 203.
- [3] 冯光华, 吴青华, 陆治周, 等. 薄壁钢管桩强风化岩层穿透性能研究[J]. 水运工程, 2017(12): 228-231.
- [4] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] American Petroleum Institute, RP2A-WSD. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design [S]. 21st ed.

的受力特点, 对于底部固定装置、底部导向滑轮支撑装置肘板、中间支柱和顶部固定装置等受力较大部位进行特殊考虑与重点加强。

参考文献:

- [1] 杨剑涛, 何炎平, 刘长云, 等.“天麒号”和“天麟号”大型非自航绞吸挖泥船设计要点[J]. 船舶工程, 2012, 34(2): 6-9, 20.
- [2] 何炎平, 刘亚东, 赵永生, 等.“新海旭”全球最大非自航重型绞吸挖泥船[J]. 船舶工程, 2018, 40(9): 1-5, 51.
- [3] 王健, 孔凡震.“天鲲号”自航绞吸船核心技术应用研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(1): 58-62, 67.
- [4] 刘文华. 三缆定位绞吸式挖泥船漂移分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- [5] VLASBLOM W J. Lecture notes on dredging equipment and technology[R]. Delft: Delft University of Technology, 2003.
- [6] 袁梦. 深海浮式结构物系泊系统的非线性时域分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2011. (本文编辑 王璁)

Washington: American Petroleum Institute, 2010.

- [6] API RECOMMENDED PRACTICE 2A-WSD: Planning, designing, and constructing fixed offshore platforms: working stress design [M]. 22nd ed. Washington: American Petroleum Institute, 2014.
- [7] Unified Facilities Guide Specifications(UFGS). Steel pipe piles: UFGS 31 62 16.13 [S]. Washington: Unified Facilities Guide Specifications, 2020.
- [8] European Committee for Standardization. Execution of special geotechnical work-Displacement piles: BS EN 12699: 2015 [S]. London: BSI, 2015.
- [9] ASMT. Standard test methods for deep foundations elements under static axial compressive load: ASTM D1143/D1143M-20. [S]. West Conshohocken: ASMT, 2020.
- [10] TOMLINSON M, WOODWARD J. Pile Design and Construction Practice [M]. 6th ed. London: CRC Press, 2014.
- [11] 唐研, 苏桂全, 杨建岭. 气举法在曹妃甸矿石码头大直径超深钢管桩清除桩心土中的应用[J]. 中国港湾建设, 2006(2): 53-56. (本文编辑 武亚庆)