基于航道边坡挖掘的绞吸船绞刀高精度定位方式

刘　航，王曦巍，刘　昊，李金峰，冯诗甲
（中交（天津）疏浚工程有限公司，天津 300450）

摘要：针对传统绞刀定位方式误差较大的问题，以国外某疏浚工程航道边坡施工为例，开展绞刀高精度定位方式研究。国外疏浚工程对边坡的高要求致使传统绞刀定位方式难以为继，施工效率大幅降低，人力物力成本增长。采用绞刀平面系统误差分析及船舶平面定位校核、绞刀挖深系统误差分析及绞刀挖深校核、绞刀包络线挖深修正等方法，通过理论计算与效果验证，总结出一套基于航道边坡挖掘的绞吸船绞刀高精度定位方式，大幅提高边坡施工的精度和质量，其成果能够加快自动挖泥系统的应用落地与普及，为类似绞吸船高精度施工提供参考。

关键词：疏浚工程；绞吸挖泥船；绞刀高精度定位；自动挖泥
中图分类号：U616+.21　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)05-0163-06

High-precision cutter positioning method for cutter suction ship based on excavation of channel slope

LIU Hang, WANG Xiwei, LIU Hao, LI Jinfeng, FENG Shijia
(Tianjin International Marine Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: In response to the problem of large errors in traditional cutter positioning methods, a high-precision cutter positioning method is studied taking the channel slope construction of a dredging project abroad as an example. The high requirements for slopes in foreign dredging projects have made it difficult for the traditional cutter positioning method to continue, resulting in a significant decrease in construction efficiency and an increase in labor and material costs. By using the methods of the error analysis of the cutter plane system and the verification of ship plane positioning, error analysis and verification of cutter excavation depth system, and cutter envelope digging correction, through theoretical calculations and effectiveness verification, a high-precision cutter positioning method for a cutter suction dredger based on channel slope excavation is summarized, which greatly improves the accuracy and quality of slope construction. The results can accelerate the implementation and popularization of automatic dredging systems, providing reference for high-precision construction of similar cutter suction dredgers.

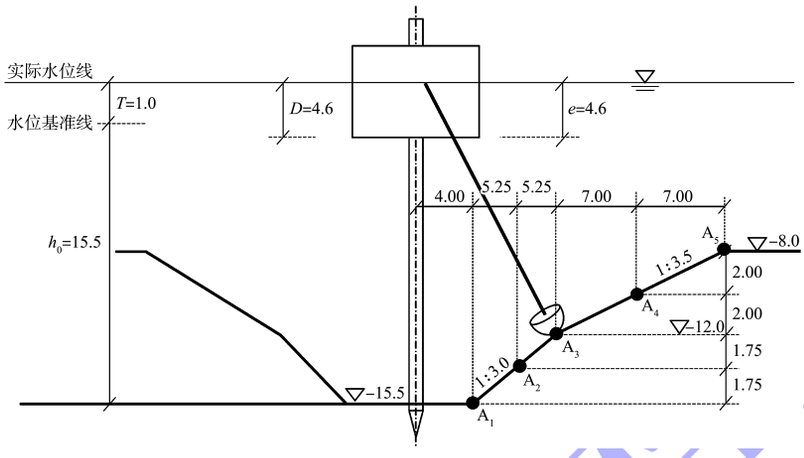
Keywords: dredging engineering; cutter suction dredger; high-precision cutter positioning; automatic dredging

随着疏浚市场的逐渐饱和，国内外疏浚工程对施工精度、质量的要求越来越高。以国外某疏浚工程为例(图 1)，其底槽设计底宽仅为 8 m，最大超深仅为 0.3 m，坡比分别为 1∶3.0 和 1∶3.5(根据施工规范要求，大型绞吸船设计超深 0.4 m，超宽 4 m)[1]，工期仅 3 个月。传统的阶梯法开挖

收稿日期：2024-07-23
作者简介：刘航（1983—），男，高级工程师，从事疏浚装备及施工技术工艺研究等工作。

水运工程

边坡工艺无法满足工程边坡精度和工期要求[2]，考虑选用自动挖泥系统进行高精度施工作业[3]。本研究设计边坡侧按照台阶开挖，预留 2~3 m 进行主体施工，之后采用边横移边起放桥梁的方式进行修坡。该方法在国内疏浚行业中非常少见[4]，此施工工艺研究及应用是对绞吸船施工高精度黏土一次成型边坡的一次探索和尝试[5]。



注：e 为桥架耳轴距离船底距离，L 为桥梁长度，T 为水位，D 为船舶吃水，h_0 为实际水位线到泥面的深度。

图 1　开挖基槽断面（单位：m）

Fig. 1　Excavation foundation trench section（unit：m）

为实现绞吸船高精度自动挖泥，绞刀精确定位尤为重要[6]。传统的绞刀定位存在较大的误差，无法满足高精度施工的要求[7]。本文通过绞刀平面定位校核、绞刀挖深校核、绞刀包络线挖深修正等方法提高绞刀定位的精度[8]，旨在为大型绞吸船高精度自动挖泥提供技术保障。施工过程中，差分全球定位系统（differential global position system，DGPS）接收机实时采集的天线位置坐标、罗经实时采集的施工船瞬时方位角、绞刀下放深度指示仪实时采集的绞刀下放深度信息、钢桩台车位置测量仪实时采集的主钢桩台车伸缩量信息等同步传输到施工导航软件中，通过预设在导航软件中的各设备的几何关系换算出绞刀头和钢桩的位置坐标，并显示在导航屏幕中，使得系统可自动操控挖泥船进行施工作业[9]。

1　绞刀平面定位校核

1.1　系统误差分析

绞吸挖泥船的 DGPS 天线接收设备一般安装在驾驶楼顶部，设 DGPS 天线位置坐标为(x_0, y_0)，根据几何换算关系可以推导出绞刀头和钢桩位置坐标换算公式，各设备的几何关系见图 2。

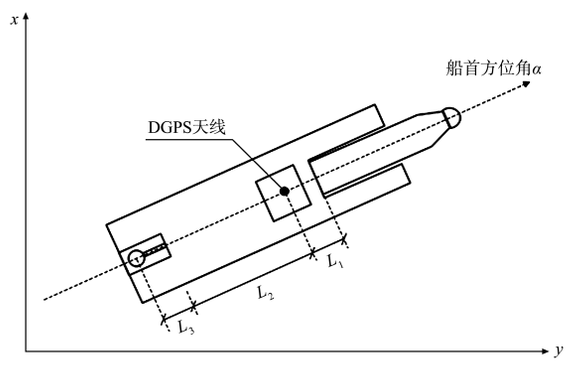


图 2　绞刀及船舶坐标

Fig. 2　Coordinates of cutter and ship

绞刀头位置坐标：

$$\begin{cases} x_c = x_0 + (L_1 + L_0\cos\theta)\sin\alpha \\ y_c = y_0 + (L_1 + L_0\cos\theta)\cos\alpha \end{cases} \tag{1}$$

主桩位置坐标：

$$\begin{cases} x_s = x_0 - (L_2 + L_3)\sin\alpha \\ y_s = y_0 - (L_2 + L_3)\cos\alpha \end{cases} \tag{2}$$

式中：L_0 为桥架耳轴距离绞刀头的长度，L_1 为 DGPS

天线安装位置距离桥架耳轴中心的水平距离，L_2 为 DGPS 天线安装位置距离台车行走槽端面中点的水平距离，L_3 为钢桩台车行程，θ 为桥架下放角度，α 为船首方位角。

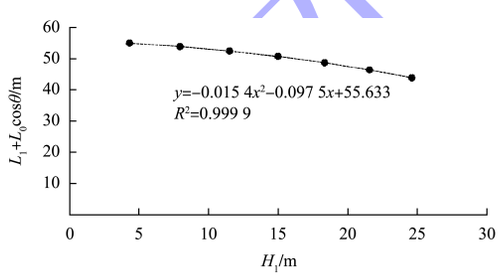
由上式可以看出，DGPS 导航系统的误差源为 x_0、y_0、L_0、L_1、L_2、L_3、θ、α，其中 L_0、L_1、L_2 为固定距离参数，L_3 由台车行程传感器测量得出（一般误差可忽略），θ 由绞刀下放深度指示仪测定的深度计算，x_0、y_0 由 DGPS 接收机测量得出，α 由罗经直接测定。

施工船船体参数为 $L_0$44.0 m、$L_1$12.3 m、$L_2$37.4 m、$L_3$6.0 m。施工船计算参数见表 1 和图 3。

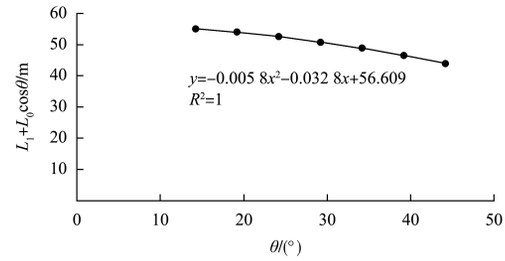
表 1　施工船计算参数

Tab. 1　Calculation parameters of construction ship

θ/(°)	表显挖深 H_1/m	$L_1+L_0\cos\theta$/m	L_2+L_3/m
14.2	4.30	54.96	
19.2	7.93	53.86	
24.2	11.50	52.44	
29.2	14.98	50.71	43.40
34.2	18.34	48.70	
39.2	21.56	46.41	
44.2	24.61	43.86	



a) 计算参数1



b) 计算参数2

图 3　施工船船计算参数

Fig. 3　Calculation parameters of construction ship

计算得：

$$\begin{cases} x_c = x_0 + (-0.015\,4H_1^2 - 0.096\,3H_1 + 55.624)\sin\alpha \\ y_c = y_0 + (-0.015\,4H_1^2 - 0.096\,3H_1 + 55.624)\cos\alpha \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} x_s = x_0 + (-0.005\,8\theta^2 - 0.031\,7\theta + 56.592)\sin\alpha \\ y_s = y_0 + (-0.005\,8\theta^2 - 0.031\,7\theta + 56.592)\cos\alpha \end{cases} \tag{4}$$

当 α 和 DGPS 坐标 (x_0, y_0) 保证准确的情况下，定义绞刀头位置误差 $\Delta s = \sqrt{\Delta x_c^2 + \Delta y_c^2}$，当 θ 误差为 1°时，绞刀头位置误差见图 4。当 θ、DGPS 坐标 (x_0, y_0) 准确时，α 误差为 1°时，绞刀头 x 坐标误差见表 2。

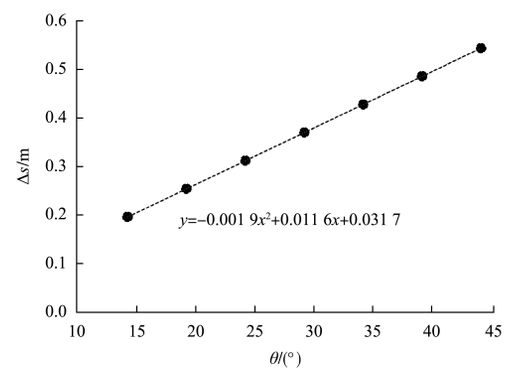


图 4　施工船绞刀误差与桥架角度关系

Fig. 5　Relation between cutter error of construction ship and bridge angle

表 2　绞刀头位置误差统计

Tab. 2　Statistics of position errors of cutter head

θ/(°)	Δx_c/m								
	$\alpha=5°$	$\alpha=15°$	$\alpha=25°$	$\alpha=35°$	$\alpha=45°$	$\alpha=55°$	$\alpha=65°$	$\alpha=75°$	$\alpha=85°$
14.2	0.96	0.93	0.87	0.79	0.68	0.55	0.42	0.26	0.09
19.2	0.94	0.91	0.85	0.77	0.66	0.54	0.42	0.26	0.09
24.2	0.91	0.88	0.83	0.75	0.65	0.52	0.42	0.26	0.09
29.2	0.88	0.85	0.80	0.72	0.63	0.51	0.42	0.26	0.09
34.2	0.85	0.82	0.77	0.70	0.60	0.49	0.42	0.26	0.09
39.2	0.81	0.78	0.73	0.66	0.57	0.46	0.42	0.26	0.09
44.2	0.76	0.74	0.69	0.63	0.54	0.44	0.42	0.26	0.09

水运工程

当 θ、α 准确时，DGPS 坐标(x_0,y_0)误差 1 m 时，绞刀头坐标(x,y)误差 1 m。根据分析结果可知，θ、α、DGPS 坐标(x_0,y_0)是影响绞刀头定位精度的主要参数，是质量控制的关键因素。

1.2　船舶平面定位校核

1.2.1　船体位置

施工船舶进场前需要核实当地 GPS 差分站，并核实 DGPS 连接差分站后的精度。根据国内使用情况，差分信号的精度一般为亚米级(偏差 0.5 m 左右)，无法满足高精度边坡的施工要求。本项目投入绞吸船的 DGPS 接收设备具有实时动态载波(real-time kinematic，RTK)信号接收功能，可以提供厘米级的定位精度，施工前验证陆地基站和 RTK 接受端的连接稳定性和定位精度，采用 RTK 对绞刀头位置偏差数值进行初步测量，结果显示，DGPS 信号与 RTK 信号推算的绞刀位置偏差为 1~2 m。

1.2.2　船体方位角

船体方位角测量采用电罗经设备(又称陀螺罗经)，它是以陀螺仪为核心元件、指示船首方向的导航设备，其精度较磁罗经更高，且不受地球磁场和钢质船体等铁磁物质的影响。

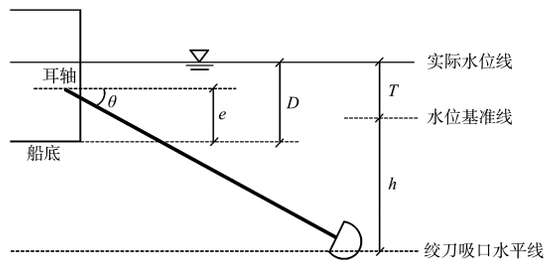
K 值是罗经光电传感器与直角反射棱镜法线方向的安装夹角，定义它为仪器常数，其值直接影响测量结果的精度。由于温度或应力等原因，设备使用一段时间后 K 值可能发生变化，因此每隔半年或一年需要对 K 值进行重新标校。

电罗经校准通过测量的坐标方位角计算船舶中轴线的真方位角来校准电罗经测量的天文方位角，即当电罗经基准线(0 刻度线)与船舶中轴线平行时，电罗经测量值与船舶中轴线真方位角差值即为电罗经改正值。沿绞吸船中轴线在绞刀维修平台和船尾各选择 1 个点采用 RTK 定位测得的坐标分别为(x_1,y_1)和(x_2,y_2)，则 $\alpha=\arctan[(y_2-y_1)/(x_2-x_1)]$，据此修正电罗经 K 值。

2　绞刀挖深校核

2.1　系统误差分析

绞吸船船体相关几何关系见图 5。



注：h 为绞刀挖深。

图 5　几何关系

Fig. 5　Geometric relationship of cutter suction ship

绞刀挖深为：

$$h=D-e+L\sin\theta-T \tag{5}$$

e 和 L 为船舶固有尺寸，因此绞刀挖深误差由 T、D、θ 引起。当 T、D 保证准确的情况下，θ 误差为 1°时，绞刀挖深误差见图 6。

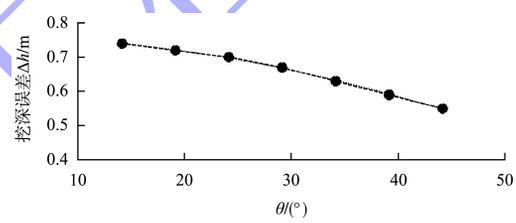


图 6　挖深误差与桥架角度关系

Fig. 6　Relationship between excavation depth error and bridge angle

2.2　挖深校核

2.2.1　船舶吃水

绞吸船耳轴下方的船舶吃水由船舶艏艉吃水换算得出，因此需要对艏艉吃水进行校核。随着淡水、燃油等变化，绞吸船吃水会发生变化，制定船舶吃水校核规定，每次加油、加水完毕后立刻进行吃水校正，此后每天进行 1 次吃水校正。

2.2.2　潮位

每周采用水位自动遥报仪对报潮仪进行校核。绞吸船定期接收水位，将接收时间间隔由原 3 min 缩短为 1 min。

2.2.3　桥架下放角度

每月进行桥架下放角度校核。对海水取样并得出密度，在绞刀吸口处安装压力式水深传感器，根据海水密度修正水深传感器参数，逐步下放桥架，根据测得的水压对桥架下放角度进行修正。

水运工程

3　绞刀包络线挖深修正

绞刀下放深度的测深点一般取绞刀吸口中心，绞刀旋转时由刀齿齿尖形成的包络线为实际挖泥线，绞刀吸口中心距离包络线有一定距离，因此实际刀齿挖泥深度与仪表显示值存在绞刀包络线挖深误差 ΔH，其大小与绞吸船桥架下放角度有关。

施工船采用 3G 五臂绞刀挖泥，刀齿采用凿齿，绞刀参数为大圈内径 2.330 m，绞刀总高 1.865 m，适用功率 1.400 MW。

采用绞刀和刀齿建立模型，计算得 θ、H_1、刀齿挖深 H_2、ΔH($\Delta H = H_2 - H_1$)关系见图 7，H_1 与 ΔH 的关系见图 8。

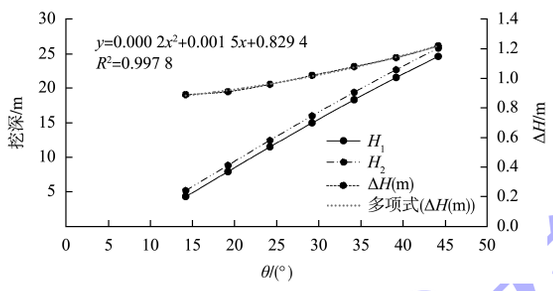


图 7　挖深修正计算结果

Fig. 7　Calculation results of excavation depth correction

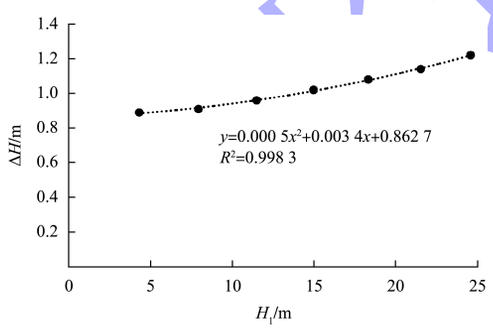


图 8　H_1 和 ΔH 关系

Fig. 8　Relationship of H_1 and ΔH

4　效果验证

在国外某疏浚工程中，针对基槽区域码头侧边坡最大超宽 0.5 m、底槽设计底宽 8.0 m、最大超深 0.3 m、坡比分别为 1∶3.0 和 1∶3.5 的高精度施工要求，通过对绞刀平面定位校核和绞刀挖深校核，提高了绞刀定位精度。

基于绞刀高精度定位方式研究，自动挖泥系统应用得以顺利开展，见图 9。作为自动挖泥系统控制横移、桥架起落联动施工的先决条件，只有最大程度将绞刀施工过程中的运行轨迹精准校正，才能提高施工质量[10]，达到高精度施工要求。测量结果表明，平均层残留厚度由校核前的 0.40 m 降低为 0.12 m(图 10)，大幅提升了大型绞吸挖泥船的施工精度。

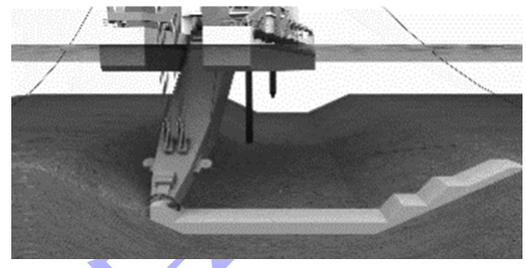


图 9　自动挖泥联动施工

Fig. 9　Automatic dredging linkage construction

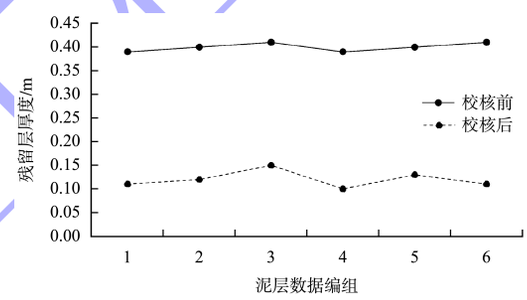


图 10　校核前后残留层厚度对比

Fig. 10　Comparison of residual layer thickness before and after verification

5　结语

1）经计算，桥架角度、方位角、DGPS 坐标是影响绞刀头定位系统误差的主要参数。船舶平面定位校核通过使用 RTK 信号接收设备，并通过修正电罗经 K 值对方位角进行校核，保证船舶平面定位精度。

2）绞刀挖深误差主要有由水位、船舶吃水、桥架下放角度引起。通过计算分析桥架下放角度与挖深误差的关系，精确定位绞刀深度，同时对船舶吃水、潮位进行校核，降低误差，确保挖深数据准确。

3）通过拟合计算修正绞刀包络线与吸口位置误差，确保系统数据与实际挖深相吻合。

4）通过对船位、绞刀平面位置、绞刀下放深度、绞刀实际挖掘包络线等参数的校核与修正，

将施工精度精确到厘米级，总结出一套大型绞吸船精确定位技术，有助于提高自动挖泥系统的施工效率。

参考文献：

[1] 赵文戬, 占军. 航道疏浚工程的绞吸式施工方法[J]. 中国水运, 2019(17): 91-92.
ZHAO W J, ZHAN J. Cutter suction construction method for waterway dredging engineering [J]. China water transport, 2019(17): 91-92.

[2] 王望金. 提高绞吸式挖泥船施工能效的探讨[J]. 水运工程, 2012(9): 190-193.
WANG W J. On dredging capacity and efficiency of cutter suction dredger [J]. Port & waterway engineering, 2012(9): 190-193.

[3] 王曦巍, 李军, 冯诗甲, 等. 重型绞吸挖泥船挖掘砂岩混泥岩施工工艺优化[J]. 水运工程, 2024(3): 184-188, 193.
WANG X W, LI J, FENG S J, et al. Optimization of construction technology for excavation of sandstone mixed with mudstone by heavy-duty cutter suctiondredger[J]. Port & waterway engineering, 2024(3): 184-188, 193.

[4] 陈飞飞, 刘斌, 郑选斌. 大型绞吸船最小挖宽和挖深的计算方法[J]. 水运工程, 2018(3): 190-192, 207.
CHEN F F, LIU B, ZHENG X B. Calculation method of minimum dredging depth and width of heavy-duty cutter suction dredger [J]. Port & waterway engineering, 2018(3): 190-192, 207.

[5] 周志强, 朱海涛. 双耳轴重型绞吸船深槽基岩开挖施工工艺[J]. 水运工程, 2020(11): 205-208.
ZHOU Z Q, ZHU H T. Construction technology of deep groove bedrock excavation for double trunnions heavy cutter suction dredgers[J]. Port & waterway engineering, 2020(11): 205-208.

[6] 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.
WANG J, KONG F Z. Applied research on key technology of Tiankun self-propelled cutter suction dredger[J]. China harbour engineering, 2017, 37(1): 58-62, 67.

[7] 疏浚与吹填工程设计规范: JTS 181-5—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
Design code for dredging and reclamation works: JTS 181-5-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2013.

[8] 苏召斌, 张润喜, 林森, 等. 绞刀齿空间位置和姿态的定位技术[J]. 水运工程, 2018(12): 208-211.
SU Z B, ZHANG R X, LIN S, et al. Positioning technology of space position and pose of cutter tooth [J]. Port & waterway engineering, 2018(12): 208-211.

[9] 丁树友, 顾明, 俞孟蕻. 绞吸挖泥船无人操控自动挖泥系统研制[J]. 水运工程, 2020(S1): 1-6.
DING S Y, GU M, YU M H. Development of unmanned automatic dredging system for cutter suction dredger[J]. Port & waterway engineering, 2020(S1): 1-6.

[10] 周禹扬, 张蓓. 绞吸船施工效率影响因素分析[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(5): 317-318.
ZHOU Y Y, ZHANG B. Analysis of factors affecting the construction efficiency of suction dredgers [J]. China water transport (the second half of the month), 2017, 17(5): 317-318.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 155 页)

[14] 朱建国, 伦灿章. 大型管节浮运关键技术分析[J]. 船海工程, 2016, 45(5): 157-160.
ZHU J G, LUN C Z. Analysis on the key technologies of floating transport for large tunnel elements [J]. Ship & ocean engineering, 2016, 45(5): 157-160.

[15] 上海交通大学. 深中通道沉管运输安装一体船航行快速性计算分析报告[R]. 上海: 上海交通大学, 2017.
Shanghai Jiao Tong University. Calculation and analysis report of immersed tubes transportation and installation integrated ship navigation speed in Shenzhen-Zhongshan Link[R]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.

[16] 波浪模型试验规程: JTJ/T 234—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Wave model test regulation: JTJ/T 234-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.

(本文编辑 王璁)

水运工程