南通港小庙洪航道通航能力及复式航道方案设计

万新宁，贾雨少，卢行长，黄志扬
（中交上海航道勘察设计研究院有限公司，上海 200120）

摘要：针对苏北辐射沙洲海域利用潮汐通道通航的小庙洪航道船舶流量快速增长、航道通过能力不足的问题，开展了复式航道方案设计研究。结合航道水深条件及周边涉水构筑物分析，确定复式航道断面形式采用“中间主航道、两侧小船航道”。根据船舶流量预测结果及海事等部门需求，对多个复式航道建设规模、平面布置及航标配布方案进行综合比选与推荐，研究成果可为辐射沙洲海域及其他类似复式航道的建设提供科学参考和借鉴。

关键词：小庙洪航道；复式航道；断面设计；通州湾港区
中图分类号：U612.32　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)04-0114-06

Navigation capacity and composite channel scheme of Xiaomiaohong Channel in Nantong Port

WAN Xinning, JIA Yushao, LU Xingchang, HUANG Zhiyang
(CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: To solve the problem of rapid growth of ship flow and insufficient channel capacity in Xiaomiaohong Channel, which is navigable by tidal channel in the radial sandbar sea area of northern Jiangsu province, and then the compound channel design is studied. Combined with the water depth conditions and the surrounding wading structures, it is determined that the section type of the compound channel adopts“the middle main channel and the small ship channel on both sides”. According to the prediction results of ship flow and the needs of maritime departments, the comprehensive comparison and recommendation of the construction scale, plane layout and navigation mark distribution schemes of multiple complex channels are carried out. The research results can provide scientific reference for the construction of radial sandbar sea area and other similar compound channels.

Keywords: Xiaomiaohong Channel; compound channel; section design; Tongzhou Bay port area

航道是水运重要的基础设施之一，一般在港口建设初期，由于到港船舶密度较小，为节省工程投资，多建设单线航道。随着港口发展及吞吐量的增长，航道通过能力不满足船舶通航需求时，应将单线航道扩建为双线航道或根据船舶进出港实际情况建设复式航道[1]。复式航道在同一航道设计断面处有两个或两个以上不同通航水深；相较于双线航道，复式航道在提高航道通过能力的同时可显著降低工程投资，但交通组织相对复杂。赵智帮[2]分析了天津港航道通过能力影响因素，结合到港船舶情况提出复式航道设计方案，计算复式航道通过能力；谢华东等[3]在钦州港东航道扩建工程设计时提出一种单侧局部浚深的新型复式航道；根据河床演变、流场和通航行为等分析，徐元[4]提出长江南京以下 12.5 m 深水航道落成洲航段复式航道平面调整方案；针对长江口南槽航道一期

收稿日期：2024-05-18
作者简介：万新宁（1977—），女，博士，高级工程师，从事港口与航道设计与研究工作。

工程的复式航道平面布置特点(中部大船航道、两侧小船航道)，周春成[5]提出了侧面标+虚拟船舶自动识别系统(Automatic identification system,AIS)的航标配布方案；基于天津港复式航道交通流现状和航行规则分析，孙甲坤[6]提出了交通流组织优化方案。

本文以南通港小庙洪航道为例，对辐射沙洲潮汐通道的复式航道进行方案设计。基于航道条件分析和船舶流量预测，开展复式航道断面形式、建设规模、平面布置及航标布置等多方案比选，研究成果旨在为类似工程提供参考和借鉴。

1　航道概况

小庙洪航道是南通港通州湾港区吕四作业区、三夹沙作业区、海门作业区及通州湾一港池唯一进出港通道。自外海-18 m 等深线至通州湾一港池和东灶一港池，小庙洪航道全长约 80 km，沿程可分为吕四 10 万吨级航道、小庙洪上延航道和三夹沙南航道(图 1)。其中，吕四 10 万吨级航道满足 10 万吨级散货船乘潮单向通航，小庙洪上延航道和三夹沙南航道均满足 5 万吨级散货船乘潮单向通航和 2 万吨级散货船、杂货船全潮双向通航。

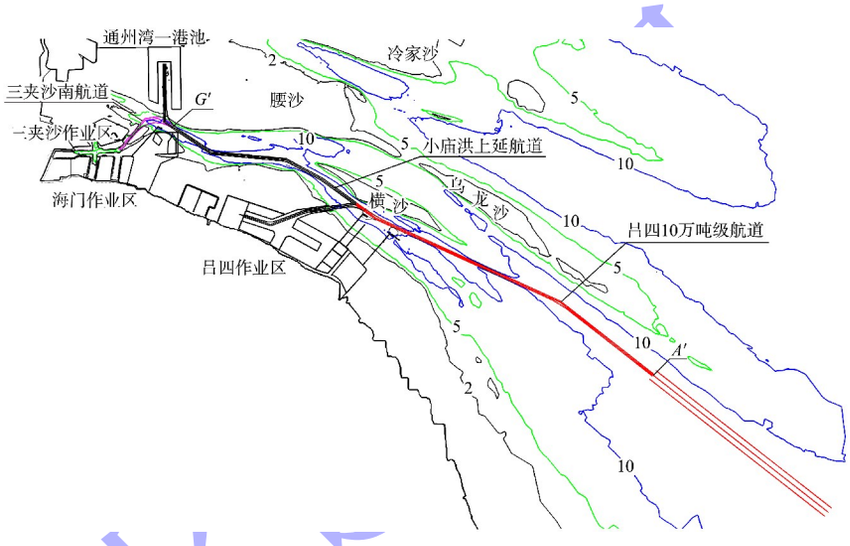


图 1　小庙洪航道及港区（单位：m）

Fig. 1　Xiaomiaohong Channel and port area（unit：m）

根据航道通航尺度测算，小庙洪航道全段均满足 2 万吨级散货船、杂货船全潮双向通航，但仅满足 5 万吨级船舶乘潮单向通航，其中吕四段乘潮历时约 8 h，小庙洪上延航道和三夹沙南航道乘潮历时约 5 h。

2　航道通过能力分析

基于《南通港总体规划(2035 年)》和临港企业调研资料[7]，预测得到小庙洪航道在 2025、2035 年的船舶流量(表 1)。2025 年小庙洪航道通航船舶为 110.74 艘次/d，以 5 000 吨级及以下船舶为主，约 52.91 艘次/d，5 万吨级及以上大型船舶为 14.38 艘次/d；2035 年航道通航船舶艘次约 210.25 艘次/d，较 2025 年增长 1 倍，仍以 5 000 吨级以下船舶为主，但占比有所下降，5 万吨级及以上船舶约 25.33 艘次/d。

表 1　小庙洪航道船舶流量预测

Tab. 1　Prediction of ship flow in Xiaomiaohong Channel

年份	船舶吨级	通航船舶/(艘次·d^{-1})	通航密度占比/%
2025	5 000 吨级及以下	52.91	48
	1 万吨级	31.72	29
	2 万吨级	11.73	11
	5 万吨级及以上	14.38	13
	合计	110.74	100
2035	5 000 吨级及以下	88.9	42
	1 万吨级	63.97	30
	2 万吨级	32.04	15
	5 万吨级及以上	25.33	12
	合计	210.25	100

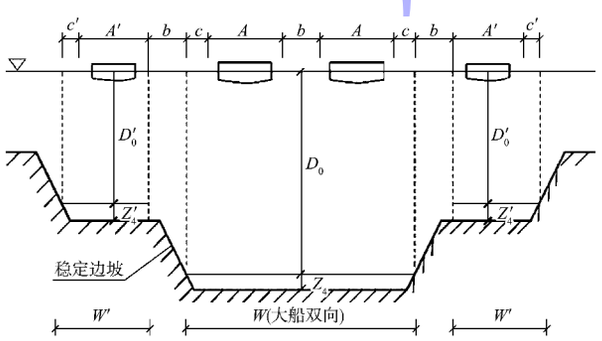
理论计算及计算机仿真模拟结果表明，受长航道乘潮单向通航(5 万吨级及以上)及禁止夜航等因素影响，小庙洪航道现状通过能力为 86.00 艘次/d，其中 5 万吨级及以上船舶为 15.10 艘次/d。可见，现状航道基本能满足 2025 年 5 万吨级及以上大型船舶通航需求，但不能满足 5 万吨级以下船舶通航需求，更不能满足 2035 年各吨级船舶的通航需求。

一方面，考虑小庙洪航道到港船舶以 5 000 吨级及以下船舶为主，另一方面考虑航道扩能提升工程的经济性，提出复式航道方案，使大、小型船舶分道通航，提高航道通过能力。

3　复式航道方案

3.1　断面形式及航道建设规模

JTS 163—2013《海港总体设计规范》[8]提出 3 种复式航道形式：1) 主航道(大船航道或重载航道)与次航道(小船航道或轻载航道)分开设置；2) 大船航道单向通航，同时满足小船航道双向通航；3) 中间大船航道双向通航，两侧小船航道各单向通航。本文设置复式航道首要目的是将大、小船分道通航，因此，第 2 种形式不适用。鉴于小庙洪航道基本沿潮汐汊道深槽布置，两侧具有一定宽度的水深相对较好的水域，宜选择第 3 种复式航道形式(图 2)。



注：A、A'分别为大船、小船航道的航迹带宽度,m；b 为大船航道的船舶间富余宽度,m；C 为大船航道设计船型与底边线间富余宽度；c'为小船航道的设计船型与底边线间富余宽度；W、W'分别为大船、小船航道通航宽度,m；Z_4、Z'_4 分别为大船、小船航道的备淤深度,m。

图 2　复式航道横断面

Fig. 2　Cross-section of composite channel

船舶流量预测结果表明，2025、2035 年小庙洪航道主要通航船舶类型为 5 000 吨级及以下和 1 万吨级船舶，通航密度占比分别约 45%和 30%。鉴于 1 万吨级船舶通航水深约 10 m，航道疏浚工程量较大(仅吕四段与小庙洪上延航道段达 200 万 m^3 以上)，复式航道中的小船航道主要考虑 5 000 吨级及以下船舶通航。此外，结合海事、引航等管理部门需求，小船航道还考虑 1 万、2 万和 5 万吨级船舶空载进出。因此，提出复式航道不同建设规模。方案 1 为主航道(大船航道)规模同现状航道，小船航道满足 5 000 吨级船舶满载全潮双向通航；方案 2 为主航道(大船航道)规模同现状航道，小船航道满足 5 000 吨级船舶满载全潮双向通航，兼顾 1 万吨级船舶空载双向通航；方案 3 为主航道(大船航道)规模同现状航道，小船航道满足 5 000 吨级船舶满载全潮双向通航，兼顾 2 万吨级船舶空载双向通航；方案 4 为主航道(大船航道)规模同现状航道，小船航道满足 5 000 吨级船舶满载全潮双向通航，兼顾 5 万吨级船舶空载双向通航。

3.2　平面布置

小庙洪航道沿程分为 3 段，其中吕四 10 万吨级进港航道进口段约 21 km 长自然水深航道，扫海宽度 1 000 m，可满足大型船舶双向通航，无需设置复式航道；三夹沙南航道及小庙洪上延航道(二阶段)两侧滩面水深较浅，设置复式航道的基建疏浚量和后续维护量均较大。因此，复式航道起点设于吕四航道人工疏浚段起点 A'点，终点拟选择在小庙洪上延航道(一阶段)终点 G'点，全长约 51 km。

根据设计代表船型尺度，计算得到各方案复式航道小船航道的通航尺度(表 2)，主航道尺度维持现状航道尺度不变。由于 1 万~2 万吨级船舶空载吃水较小，方案 1~3 小船航道设计底高程为−8.0 m(当地理论最低潮面)，均由 5 000 吨级船舶满载吃水控制；方案 4 设计通航水深为−8.2 m，由 5 万吨级船舶空载吃水控制。吕四 10 万吨级进港航道(简称吕四段)和小庙洪上延航道(简称上延

段)风流压偏角取值不同，相同方案下 2 个航段的小船航道通航宽度也不同，吕四段各方案小船航道通航宽度为 75～140 m，上延段为 90～160 m。

表 2　复式小船航道通航尺度

Tab. 2　Navigable dimensions of composite small-boat channel

方案	设计底高程/m		单侧通航宽度 W'/m	
	吕四段	上延段	吕四段	上延段
1	−8.0	−8.0	75	90
2	−8.0	−8.0	85	100
3	−8.0	−8.0	105	120
4	−8.2	−8.2	140	160

《海港总体设计规范》规定甲、乙类危险品船舶在港系泊时，船舶与航道边线的净间距不宜小于 100 m；液化天然气船舶在港系泊时，其他通行船舶与液化天然气船舶的净间距不应小于 200 m。大唐电厂码头船舶与吕四航道边线距离约 239 m，由于小船航道既要与主航道之间保持 1 倍主航道设计代表船型的船宽(10 万吨级散货船船宽 43 m，考虑一定富余后取 50 m)，还需与大唐电厂煤码头保持 100 m 安全距离(参考危险品船舶取值)，小船航道宽度最大取值 89 m。广汇 LNG(液化天然气，liquefied natural gas)码头船舶与吕四航道边线距离约 505 m，考虑与主航道、LNG 船舶的安全距离后，小船航道宽度最大取值为 255 m。可见，大唐电厂码头对复式航道的平面布置具有一定制约。小庙洪航道与相关码头位置关系见图 3。

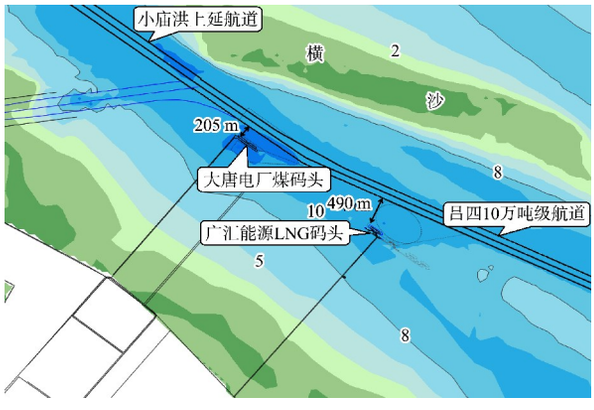


图 3　小庙洪航道与相关码头位置关系

Fig. 3　Positional relationship between Xiaomiaohong Channel and terminals

若满足方案 3 和 4 的小船航道布置，需调整吕四 10 万吨级航道局部轴线。经测算，方案 3、4 引起的主航道调整疏浚工程量分别为 2.2 万、21 万 m^3。鉴于小船航道满足 5 000 吨级船舶全潮双向通航后，对主航道船舶的分流效果已较为明显，从减小工程投资的角度，推荐复式航道的小船航道建设规模主要考虑方案 1 与 2。

综上，得到小庙洪航道复式航道的 2 个平面布置方案。方案 1 为在吕四 10 万吨级航道及小庙洪上延航道(一阶段)两侧分别布置 1 条进、出港小船航道，形成复式航道。主航道建设规模及尺度均维持现状航道不变，小船航道满足 5 000 吨级船舶满载全潮通航。小船航道起自吕四 10 万吨级进港航道人工开挖段 A'点，终点在小庙洪上延航道(一阶段)终点 G'点附近，南、北侧小船航道长约 51.0、51.7 km。小船航道单侧通航宽度 75～90 m，设计底高程−8.0 m。方案 2 主要在小船航道单侧通航宽度 85～100 m 上与方案 1 不同。

3.3　航标布置

复式航道包含 2 个或 2 个以上不同通航水深，航标布置方式对合理标识、区分主航道与小船航道、保障船舶通航安全具有重要意义。已有复式航道航标布置方式可分为 3 类：1）主航道两侧布置侧面标，小船航道不设标，如长江南京以下 12.5 m 深水航道；2）主航道采用虚拟 AIS 航标标识，小船航道两侧设置侧面标，如长江口南槽航道；3）主航道两侧设置侧面标，小船航道两侧设置方位标，如天津港复式航道[9]。此外，JTS/T 181-4—2023《沿海导助航工程设计规范》[10]中对于中间为大船航道、两侧为小船航道的复式航道航标布置，提出可采用虚拟 AIS 航标与侧面标相结合的方式。

根据小庙洪航道沿程水深条件，提出 2 个航标布置方案：

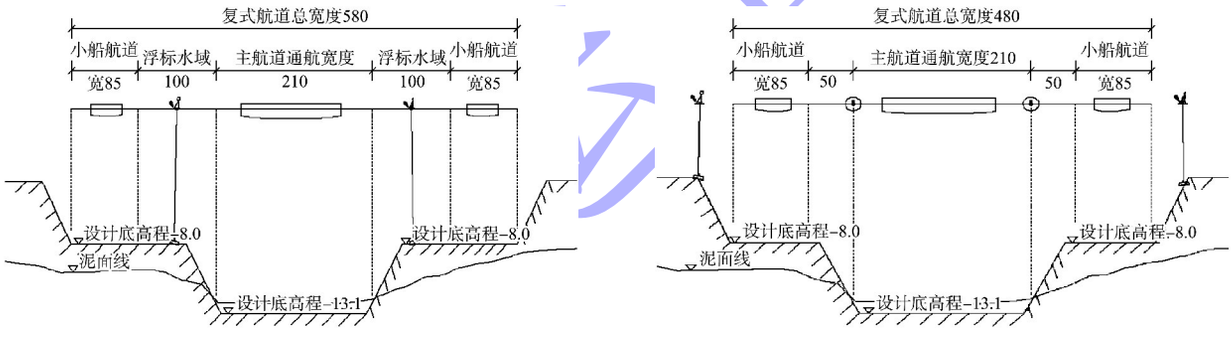
1）侧面标方案。吕四段和上延段沿程水深条件总体较好，在小船航道外侧还有一定宽度的水深满足 8 m 的区域，仅少数水域存在水深不足 8 m 的浅点。因此，参考长江南京以下 12.5 m 深水航

道，主航道沿用现状侧面标，在小船航道外侧水深较浅处设置方位标，水深较好的水域不设标。航标工程量为新设 6 座方位标，撤除 1 座侧面标，移位 2 座侧面标。

2）侧面标+虚拟 AIS 航标方案。鉴于侧面标方案中，小船航道与主航道之间的侧面标占用水深较好的水域，另考虑规范推荐的侧面标与虚拟 AIS 航标组合的设标方案。将现有主航道两侧的侧面标移位至小船航道外侧，并在主航道边线上增设虚拟 AIS 航标。航标工程量为新设 AIS 虚拟航标 30 座，移位侧面标 31 座。

根据《海港总体规范》，对于工程所采用的第 3 种复式航道断面形式，小船航道与主航道之间的富余宽度取 1 倍设计船宽(主航道设计代表船型)，但当航标布置不同时，该富余宽度取值有所变化。对于侧面标方案，小船航道与主航道之间设有侧面标，侧面标与主航道边线及小船航道边线均需考虑航标的回旋半径，根据工程海域潮汐、水深等回旋半径取 50 m，即小船航道与主航道之间的实际富余宽度为 100 m。对于侧面标与虚拟 AIS 航标组合方案，小船航道与主航道之间富余宽度取 1 倍设计船宽即可，其中吕四段为 50 m，上延段为 33 m。

以吕四段平面布置方案 2 为例，采用侧面标布置时复式航道总宽为 580 m，其中中间为 210 m 宽的 10 万吨级主航道，两侧为 2 条 85 m 宽小船航道，主航道与小船航道间为 100 m 浮标回旋水域(图 4)。采用侧面标与虚拟 AIS 航标组合方式布标时复式航道总宽为 480 m，其中中间为 210 m 宽的 10 万吨级主航道，两侧为 2 条 85 m 宽小船航道，主航道与小船航道间富余宽度 50 m。



a) 侧面标方案　　b) 侧面标+AIS虚拟标方案

图 4　吕四段复式航道航标配布横断面（单位：m）

Fig. 4　Cross-section of navigation aid layout of composite channel in Lyusi section（unit：m）

3.4　方案比选与推荐

小庙洪复式航道包括 2 个建设规模方案及 2 种航标配布方式。采用最新水下地形测图计算，2 个复式航道建设方案均无疏浚工程量，即自然水深可满足 5 000 吨级船舶满载全潮通航，兼顾 1 万吨级船舶空载全潮通航。因此，为了尽量提高主航道小型船舶分流效果，提升复式航道通过能力，推荐采用方案 2。

对于 2 种航标布置方式，均能够较好地标识复式航道，方案比选见表 3，其中侧面标方案占用水域较大，工程费用相对较低；AIS 虚拟标与侧面标组合方式占用水域较小，但需新设 30 余座 AIS 虚拟标，工程费用较高，由于现有 AIS 基站容量无法满足新设虚拟航标数量，还需申请新设 AIS 基站，审批程序较复杂。因此，综合考虑经济性及审批难易程度，推荐采用侧面标布置。

表 3　复式航道方案比选

Tab. 3　Comparison and selection of composite channel schemes

航标方案	航道方案	航道尺度	疏浚工程量	航标工程量	工程费用/万元	航道通过能力
侧面标方案	1	航道总宽度 560～626 m，主航道设计底高程−13.1～−11.7 m，小船航道−8.0 m	0	新设方位标 6 座，撤除 1 座侧面标，移位 2 座侧面标	534	约 130 艘次/d，基本满足 2027 年通航需求
	2	航道总宽度 580～646 m，主航道设计底高程−13.1～−11.7 m，小船航道−8.0 m	0			约 144 艘次/d，基本满足 2028 年通航需求
AIS 虚拟标+侧面标方案	1	航道总宽度 460～492 m，主航道设计底高程−13.1～−11.7 m，小船航道−8.0 m	0	新设 AIS 虚拟航标 30 座，移设航标 30 座	1 158	约 130 艘次/d，基本满足 2027 年通航需求
	2	航道总宽度 480～512 m，主航道设计底高程−13.1～−11.7 m，小船航道−8.0 m	0			约 144 艘次/d，基本满足 2028 年通航需求

4　结语

1）小庙洪航道现状仅满足 5 万吨级船舶乘潮单向通航，且大小船混行，是航道通过能力的重要制约因素之一。通过设置复式航道，实现大、小船分道通航，是提升航道通过能力较为经济有效的方式。

2）根据航道沿程水深条件，确定复式航道采用中间主航道、两侧各布置 1 条进出港小船航道的断面形式；复式航道起于吕四航道人工疏浚段起点 A'点，终于小庙洪上延航道(一阶段)终点 G'点，全长约 51 km。

3）经方案比选，推荐复式航道建设规模为主航道沿用现状航道，小船航道满足 5 000 吨级船舶满载全潮通航，兼顾 1 万吨级船舶空载全潮通航，航标采用侧面标布置方式。

参考文献：

[1] 季则舟, 刘红宇, 秦福寿, 等. 海港工程设计手册(上册)[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
JI Z Z, LIU H Y, QIN F S, et al. Handbook for design of sea harbour(volume 1)[M]. Beijin: China Cmmunications Press Co., Ltd., 2018.

[2] 赵智帮. 天津港复式航道的探讨[J]. 港工技术, 2008(5): 4-7.
ZHAO Z B. Discussion on compound channel of Tianjin Port[J]. Port engineering technology, 2008(5): 4-7.

[3] 谢华东, 李顺嘉, 孙铠. 钦州港东航道扩建工程复式航道设计[J]. 水运工程, 2024(8): 97-103.
XIE H D, LI S J, SUN K. Design of navigation channel with compound cross section for expansion project of eastern channel of Qinzhou Port. [J]. Port & waterway engineering, 2024(8): 97-103.

[4] 徐元. 长江南京以下 12.5 m 深水航道落成洲航段平面调整探讨[J]. 水运工程, 2019(6): 1-7.
XU Y. Discussion on the layout adjustments at Luochengzhou passage of the 12.5 m deep channel of the Yangtze River downstream of Nanjing[J]. Port & waterway engineering, 2019(6): 1-7.

[5] 周春成. 长江口南槽航道航标配布和应用要点[J]. 航海技术, 2020(6): 31-34.
ZHOU C C. Key points of navigation mark distribution and application in south passage of the Yangtze River estuary[J]. Marine technology, 2020(6): 31-34.

[6] 孙甲坤. 天津港复式航道交通流组织模式适应性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
SUN J K. A study on adaptability of traffic flow organization mode in Tianjin Port compound channel[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.

[7] 黄志扬, 贾雨少, 卢行长, 等. 南通港小庙洪航道扩能提升工程预可行性研究报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2023.
HUANG Z Y, JIA Y S, LU X C, et al. Preliminary feasibility study of Xiaomiaohong Channel capacity expansion project in Nantong Port [R]. Shanghai: CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., 2023.

(下转第 142 页)

水运工程