

# 大型沉箱重力式码头数智化施工 关键技术降碳效果分析

沈威, 李雪野

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 针对绿色低碳技术应用降碳效果量化难题, 结合海南某集装箱枢纽港扩建工程, 开展大型沉箱重力式码头数智化施工关键技术降碳效果分析研究。采用碳排放因子法与清单分析法, 构建碳排放计算模型, 对比传统工艺与数智化工艺碳排放差异。分析结果表明, 数智化工艺采用的水下抛石振平一体化施工、沉箱预制钢筋整体吊装及沉箱智能浮运安装3大核心工艺, 分别实现施工期降碳364.46、441.28、206.69 t。关键工艺直接碳排放平均降碳比例达16.92%, 外购电降碳比例超13%。该技术体系可显著降低沉箱码头施工阶段碳排放强度, 为重力式码头绿色建筑提供可复制的系统性解决方案, 对推动水运行业碳中和目标实现具有实践价值。

**关键词:** 沉箱重力式码头; 绿色低碳; 施工关键技术; 降碳分析; 直接碳排放; 外购电碳排放

中图分类号: U656.1+11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0086-09

## Analysis on carbon reduction effect of key technologies in digital intelligent construction of large caisson gravity wharf

SHEN Wei, LI Xueye

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of quantifying the carbon reduction effect of the application of green and low-carbon technology, combined with the expansion project of a container hub port in Hainan, the carbon reduction effect analysis and research on the key technology of digital intelligent construction of large caisson gravity wharf are carried out. The carbon emission factor method and inventory analysis method are used to build the carbon emission calculation model, and the difference of carbon emission between traditional process and digital intelligent process is compared. The analysis results show that the three core technologies adopted by the digital intelligence technology, namely, the underwater riprap and leveling integrated construction, the integral hoisting of caisson prefabricated reinforcement and the caisson intelligent floating installation, have achieved 364.46, 441.28 and 206.69 tons of carbon reduction during the construction period respectively. The average carbon reduction rate of direct carbon emissions from key processes reaches 16.92%, and the carbon reduction rate of purchased electricity exceeds 13%. The technology system can significantly reduce the carbon emission intensity of caisson wharf construction stage, provide a reproducible systematic solution for the green construction of gravity wharf, and has practical value for promoting the realization of carbon neutrality goal in the water transportation industry.

**Keywords:** caisson gravity wharf; green and low-carbon; key construction technology; carbon reduction analysis; direct carbon emission; carbon emission of purchased electricity

随着全球气候治理与“双碳”战略的推进, 交通基础设施行业绿色低碳技术应用已成为学术与

工程领域的研究热点。但水运行业现有研究多聚焦于港口运营期能源替代(如岸电技术)及施工

收稿日期: 2025-06-10 录用日期: 2025-06-30

作者简介: 沈威(1976—), 男, 博士, 工程师, 从事港航工程绿色低碳核算研究工作。

阶段局部工艺优化(如新能源设备应用),对通过工艺改进实现绿色低碳的施工技术应用降碳效果评估研究仍存在不足。随着2022年国家“推进国有企业积极打造原创技术策源地”相关政策的出台<sup>[1-2]</sup>,对绿色低碳工艺的支持力度不断加大<sup>[3]</sup>。2024年2月生态环境部等六部门联合印发《国家重点低碳技术征集推广实施方案》<sup>[4]</sup>,明确在建筑与交通运输等领域,遴选和推广具有降碳潜力、降碳效果显著、适合规模化应用的推广类技术。中交集团响应政策号召,开展了五年千项绿色低碳工艺工法征集活动,系统总结行业关键技术成果并编发技术名录,通过细化应用场景推动成果转化,逐步构建行业绿色低碳创新技术体系。但现有研究缺乏对绿色建造技术的系统量化分析,难以有效支撑技术推广决策。

本文以海南某集装箱枢纽港沉箱重力式码头为工程载体,选取大型沉箱重力式码头数智化施工关键技术为研究对象,基于碳排放因子法量化模型,开展“水下抛石振平一体化施工”“沉箱预制钢筋整体吊装”及“沉箱智能浮运安装”等绿色低碳创新技术降碳效果分析。研究旨在通过实证分析,明确技术降碳机理与效果,为该技术的复制推广应用及行业绿色低碳转型提供数据支撑与实践参考,助力国家及企业技术体系的完善。

## 1 低碳关键技术

大型沉箱重力式码头数智化施工关键技术针对沉箱重力式码头工程,开展沉箱标准化预制、自动化养护、智能化安装、精细化监控、智慧化管理、BIM(bulding information modeling,建筑信息模型)技术应用等关键施工技术研究,研发了成套的沉箱重力式码头数智化管理系统,依靠云平台、BIM等技术支撑,通过系统化创新应用,实现各项施工流程提质增效。该成套技术主要包含如下3项低碳关键工艺。

### 1.1 大型沉箱分层预制、钢筋整体吊装工艺

传统工艺下,大型沉箱通常采用分层预制的方法,钢筋以现场绑扎和预绑网片相结合,各墙

体钢筋传统工艺一般采用外墙、纵隔墙单个网片预绑吊装+横隔墙现场穿筋+加强筋现场绑扎方式,在沉箱预制台座从下到上逐层拼接,拼接时需要塔吊吊装网面,现场开展网片间穿筋施工,将各网片连成整体。施工过程中塔吊至少需要9次垂直运输和水平运输,重复繁琐,隔墙穿筋需要长时间占用塔吊,钢筋现场绑扎量大,施工效率低,角钢筋绑扎质量控制难度大,安全风险高。

研发的低碳工艺为基于BIM技术的墙段钢筋分段制作、整体吊装的沉箱预制数智化施工工艺,通过利用旋转立柱式钢筋限位绑扎架、吊装架组合工装实现钢筋精准定位与吊装对接施工。施工前对沉箱钢筋进行三维BIM建模,根据模型分析将墙体钢筋进行分段,各分段钢筋可在设定预制场加工,无需占用沉箱预制台座。钢筋加工时,利用预制场地设置好的固定、锁定、移动和限位等装置组成的钢筋绑扎架完成钢筋精确定位与绑扎,实现大面积钢筋网格预绑成型,见图1、2。采用矩形钢吊装架及多方位定位技术,实现大面积钢筋网格、近千个钢筋接头的整体吊装与准确对接,进而完成大型沉箱分段钢筋的安装,见图3、4。该工艺解决了传统工艺钢筋工序在预制台座作业时间长、质量通病多的弊端,消除传统钢筋施工中的高空吊人、高空穿筋作业。台座周转率为传统工艺的4倍,施工人员减少50%,塔吊总体台班数减少25%,施工工效和施工质量显著提升。

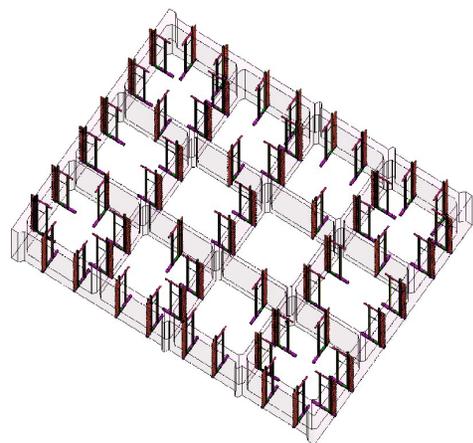


图1 钢筋绑扎架三维展现

Fig. 1 Three-dimensional rendering of reinforcing bar binding frame



图2 整体钢筋绑扎架

Fig.2 Overall binding and hoisting of steel bars

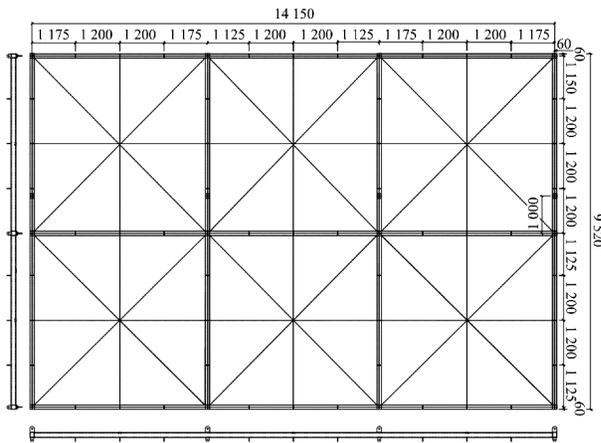


图3 吊装架结构平面(单位: mm)

Fig.3 Crane frame structure plan(unit: mm)

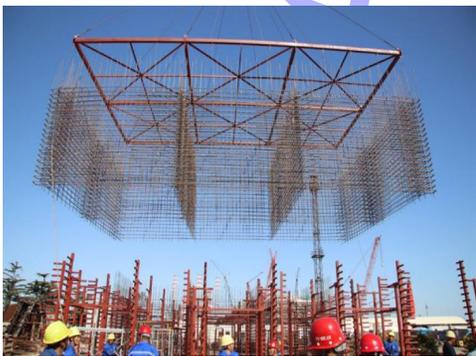


图4 沉箱钢筋整体起吊

Fig.4 Overall lifting of caisson steel bars

### 1.2 水下抛石基床振动整平施工工艺

水下抛石基床整平是沉箱码头建设中的重要工序,传统工艺流程为:抛石船定位→抛石船粗抛→基床分层锤夯→细分层抛石→水下观察、清理→刮平。该方法通常采用水下人工整平的方法,进度慢、质量差、安全隐患大。由于受潜水员的

情绪、身体状况和施工条件等不稳定因素的影响,人工整平基床质量变化很大,往往只能在安放上层构件的过程中对结构质量缺陷加以弥补。

水下抛石基床振动密实整平工艺是基于振动密实原理将原本凹凸不平的块石,通过振动将块石重新排列组合,使基床表面达到平整的方法。该工艺采用开发的抛石振平一体船实现了基床夯实、整平同步及可视化、数字化施工,利用振动锤的特性,将锤夯、细分层抛石、人工整平3道工序合并成单一的夯平工序,推动了深水抛石基床的机械化施工,见图5。该工艺取消了传统工艺中效率不高且危险性较大的潜水作业,水上部分船机施工作业台班数可节省50%,实现了高质量和效率的码头基础施工。

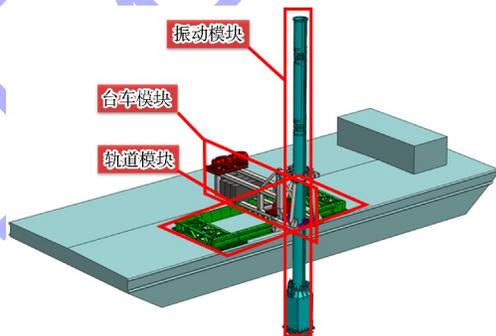


图5 抛石振平一体船

Fig.5 Stone throwing and vibration leveling integrated ship

### 1.3 大型沉箱智能浮运安装施工工艺

目前国内大型沉箱多采用半潜驳出运与下潜出驳安装方式。沉箱出驳后的浮游稳定主要依靠操作人员根据经验开启阀门注水、测绳监控沉箱仓格水位进行调整,安装时依靠人工判断并采用手拉葫芦调整沉箱姿态。作业较多依赖操作人员经验水平,智能化水平低。

大型沉箱智能浮运安装施工工艺提出沉箱智能浮游控制与安装系统,主要通过数智化管理系统与智能启闭电磁阀实现沉箱浮游稳定的自动调整,及沉箱浮运、安装过程的数字化控制,基本实现沉箱顶部无人化作业,见图6。该工艺通过数智化赋能,施工人员较传统方式减少20%,船机台班减少15%,实现重力式沉箱的安全出运与快速安装。

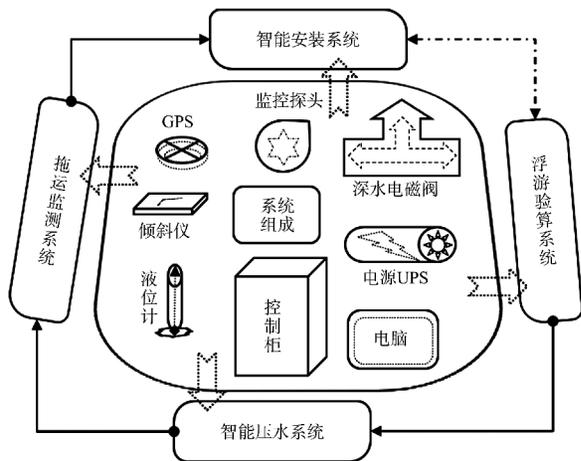


图 6 沉箱智能安装系统组成与控制原理

Fig. 6 Caisson intelligent installation system and control principle

## 2 碳排放计算理论

### 2.1 碳排放计算边界

本文计算内容为重力式沉箱结构码头建设阶段碳排放量, 计算边界包括时间边界和空间边界。

1) 时间边界: 从码头项目开工到交工。2) 空间边界: 施工项目红线范围内水上水下施工场地与消耗的建筑材料生产场所和运输线路上发生的二氧化碳排放。

### 2.2 碳排放源识别

根据 ISO 14064-1《组织层面上温室气体排放与移除的量化和报告规范》温室气体排放分类, 建设阶段碳排放应包括港口工程建设过程中人员、设备化石能源消耗造成的二氧化碳排放(范围 1); 外购电力造成的二氧化碳排放(范围 2); 消耗的各类物资在生产、运输过程中的二氧化碳排放(范围 3)。建设过程碳排放源分类见图 7。其中: 直接碳排放主要指发生在建设项目的生活、办公区和施工场地范围内, 因施工需要发生的人员生活耗能、施工船机化石能源消耗所产生的碳排放。间接碳排放包括工程建设所需的原材料、半成品或成品等在生产及运输过程中所产生的碳排放与外购电力发电过程的碳排放。外购电力不包括使用发电机自行发电的电力, 发电机化石能源消耗产生的碳排放应并入直接碳排放统计中。

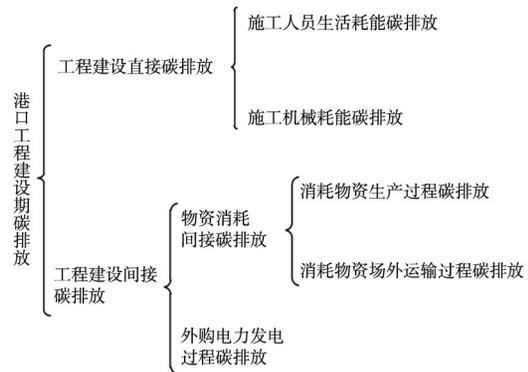


图 7 港口工程建设阶段碳排放源分析

Fig. 7 Analysis of carbon emission sources in construction phase of port engineering

### 2.3 建设阶段碳排放计算方法

采用碳排放因子法开展碳排放量计算<sup>[5]</sup>, 计算公式为:

$$E_y = D_i F_i \quad (1)$$

式中:  $E_y$  为码头项目建设阶段总碳排放量;  $D_i$  为建设阶段导致温室气体排放的第  $i$  项生产活动数据;  $F_i$  为与活动数据对应的碳排放因子。

建设阶段碳排放应包括完成各分部分项工程施工产生的各类碳排放<sup>[6-10]</sup>。参照 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》计算公式<sup>[11]</sup>与陈乔<sup>[12]</sup>提出的清单分析法, 结合港口工程建设阶段碳排放源分类, 得到本项目建设阶段碳排放量计算公式为:

$$E_y = E_z + E_d + E_m + E_t \quad (2)$$

其中:

$$E_z = E_p + E_c \quad (3)$$

$$E_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_i N_{e,i,j} F_{c,j}) \quad (4)$$

式中:  $E_z$  为建设阶段直接碳排放量;  $E_d$  为建设阶段外购电力碳排放量;  $E_m$  为建设阶段消耗物资生产过程碳排放量;  $E_t$  为建设阶段消耗物资运输过程碳排放量;  $E_p$  为施工人员生活耗能碳排放量;  $E_c$  为施工船机化石能源消耗碳排放量;  $A_i$  为第  $i$  项工程内容的工程数量;  $N_{e,i,j}$  为第  $i$  项工程内容中第  $j$  种施工船机的台(艘)班消耗量;  $F_{c,j}$  为第  $j$  种施工船机的台(艘)班碳排放因子。

### 2.4 碳排放因子

本文所用材料、运输设备的碳排放因子主要参考 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》和

国内外碳排放因子的文献研究<sup>[13-15]</sup>。混凝土碳排放因子根据 JTS/T 277—2019《水运工程混凝土和砂浆材料用量定额》<sup>[16]</sup>原材料配比换算而来；施工船机单位台(艘)班碳排放因子由 JTS/T 276-2—2019《沿海港口工程船舶机械艘(台)班费用定额》<sup>[17]</sup>中各类设备单位台班人工、能源消耗量转化而来。主要建筑材料、施工、运输设备碳排放因子见表 1~3。

表 1 常用建筑材料碳排放因子与运距  
Tab.1 Carbon emission factors and transportation distances of common construction materials

建材类型	碳排放因子	运距/km
钢筋	2 375 kgCO <sub>2</sub> /t	500
钢丝绳	2. 34 kgCO <sub>2</sub> /kg	500
型钢	2 350 kgCO <sub>2</sub> /t	500
42. 5 水泥	735 kgCO <sub>2</sub> /t	500
块石	4. 03 kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	200(水上)
C40 混凝土, 碎石粒径 40 mm	267. 23 kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	30

表 2 主要施工船机台班碳排放因子  
Tab.2 Shiftcarbon emission factors of main construction vessels and machinery

设备类型	碳排放因子
船用电动振动锤(激振力 550 kN)	321. 93 kgCO <sub>2</sub> /艘班
固定扒杆起重船(起重能力 500 t)	2 752. 26 kgCO <sub>2</sub> /艘班
方驳(载质量 600 t)	43. 34 kgCO <sub>2</sub> /艘班
方驳(载质量 2 000 t)	390. 08 kgCO <sub>2</sub> /艘班
拖轮(主机功率 441 kW)	1 566. 53 kgCO <sub>2</sub> /艘班
拖轮(主机功率 721 kW)	2 303. 35 kgCO <sub>2</sub> /艘班
拖轮(主机功率 882 kW)	2 993. 74 kgCO <sub>2</sub> /艘班
拖轮(主机功率 1 228 kW)	4 188. 75 kgCO <sub>2</sub> /艘班
拖轮(主机功率 1 941 kW)	6 492. 10 kgCO <sub>2</sub> /艘班
半潜驳(运载能力 3 500 t)	1 168. 52 kgCO <sub>2</sub> /艘班
机动艇(主机功率 44 kW)	114. 55 kgCO <sub>2</sub> /艘班
机动艇(主机功率 88 kW)	229. 10 kgCO <sub>2</sub> /艘班
锚艇(主机功率 510 kW)	2 072. 58 kgCO <sub>2</sub> /艘班
方驳吊机船组(起重能力 50 t)	219. 90 kgCO <sub>2</sub> /艘班
潜水组	7. 36 kgCO <sub>2</sub> /组日
履带式液压单斗挖掘机	267. 73 kgCO <sub>2</sub> /台班
履带式起重机(提升质量 40 t)	135. 13 kgCO <sub>2</sub> /台班
履带式起重机(提升质量 50 t)	139. 99 kgCO <sub>2</sub> /台班
轮胎式装载机(斗容量 3 m <sup>3</sup> )	262. 00 kgCO <sub>2</sub> /台班
混凝土搅拌站(生产率 120 m <sup>3</sup> /h)	748. 75 kgCO <sub>2</sub> /台班
混凝土搅拌运输车(搅动容量 8 m <sup>3</sup> )	194. 16 kgCO <sub>2</sub> /台班
混凝土输送泵车(输送量 70 m <sup>3</sup> /h)	239. 80 kgCO <sub>2</sub> /台班
胶囊台车系统	291. 36 kgCO <sub>2</sub> /台班
塔式起重机(起重力矩 150 kN·m)	62. 37 kgCO <sub>2</sub> /台班
电动单筒慢速卷扬机(牵引力 100 kN)	42. 49 kgCO <sub>2</sub> /台班

表 3 主要运输机械碳排放因子  
Tab.3 Carbon emission factors of main transportation machinery

设备类型	碳排放因子/(kgCO <sub>2</sub> ·t <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup> )
自卸汽车(载质量 25 t)	0. 067
平板拖车组(载质量 60 t)	0. 021
铁路运输	0. 010
干散货船运输	0. 015

### 3 案例分析

#### 3.1 项目概况

海南某集装箱枢纽港扩建工程码头主体采用重力式沉箱结构,建设 2 个 20 万吨级集装箱泊位,设计年吞吐量 300 万 TEU。码头采用顺岸连片式布置,码头面高程为 6.0 m。抛石基床顶高程为-18.0 m,采用 10~100 kg 块石夯实,基床前回填砂或块石,上面设置 200~300 kg 块石护底。码头沉箱底宽 15.85m,其中前趾宽 1 m,泊位长 19.45 m,高 20.2 m,沉箱前壁厚 40 cm,后壁厚 35 cm,平行码头方向隔墙厚 30 cm,垂直码头方向隔墙厚 25 cm,底板厚 65 cm,单个沉箱质量为 2 781 t。沉箱上现浇胸墙,混凝土强度等级为 C40。沉箱后设置抛石棱体,棱体后设置倒滤结构,后方回填中粗砂。项目工程量清单见表 4。

表 4 项目工程量清单  
Tab.4 Project quantities bill

分部工程	项目名称	工程量
疏浚工程	抓斗船挖泥 8 m <sup>3</sup>	144. 899 2 万 m <sup>3</sup>
	绞吸船挖泥 3 500 m <sup>3</sup> /h	7. 589 0 万 m <sup>3</sup>
土石方工程	码头基床抛石	36. 969 7 万 m <sup>3</sup>
	护底抛石	9. 847 3 万 m <sup>3</sup>
	构筑物内抛填砂	46. 744 3 万 m <sup>3</sup>
	构筑物内抛填块石	8 301. 00 m <sup>3</sup>
	构筑物内抛填碎石	3 113. 00 m <sup>3</sup>
	铺设土工织物	10. 242 2 万 m <sup>2</sup>
	填筑棱体	72. 118 2 万 m <sup>3</sup>
	填(铺)筑倒滤层砂	15. 711 5 万 m <sup>3</sup>
	填(铺)筑倒滤层二片石	13. 444 9 万 m <sup>3</sup>
	铺设土工织物	40. 954 0 万 m <sup>2</sup>
	场地填(铺)筑	105. 601 7 万 m <sup>3</sup>
场地夯实	133. 290 0 万 m <sup>2</sup>	
场地碾压	8. 886 0 万 m <sup>3</sup>	

续表4

分部工程	项目名称	工程量
地基与基础工程	钢筋混凝土管桩 φ120 cm	348 根
	桩帽	702 m <sup>3</sup>
	灌注桩成孔 φ120 cm	13 根
混凝土工程	方形沉箱 1 200 m <sup>3</sup>	122.00 件
	预制实心方块	64.00 件
	沉箱及空腔结构封顶	1 038 m <sup>3</sup>
	预制实心板	976 件
	胸墙	9.053 4 万 m <sup>3</sup>
	护轮坎、沿口、护栏	232 m <sup>3</sup>
	矩形梁	6 501 m <sup>3</sup>
	混凝土结构涂防腐料	4.355 9 万 m <sup>2</sup>
钢筋工程	现浇混凝土钢筋	5 198.75 t
	预制构件钢筋	6 504.18 t
	现浇混凝土钢筋笼	83.40 t
其他工程	橡胶护舷	125 套
	扶梯	16 t
	系船柱	125 个
	钢轨	3 641 延米单轨
	车档	6 t
	锚碇拉杆	60 t
	预埋铁件	50 t

### 3.2 碳排放计算成果与降碳量分析

#### 3.2.1 碳排放计算成果

案例项目碳排放计算数据源自施工合同清单, 利用各清单子项内包含的工料机数据逐项开展计算, 然后汇总得出该码头工程建设阶段总碳排放量。根据 JTS/T 271—2020《水运工程工程量清单计价规范》<sup>[18]</sup> 规定, 码头施工内容包含疏浚工程、土石方工程、地基与基础工程、混凝土工程、钢筋工程与其他工程等分部工程。项目建设阶段碳排放计算成果见表 5。应用低碳关键技术后各类碳排放量占比见图 8。

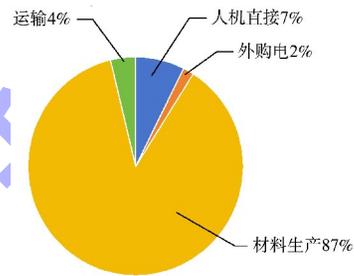


图 8 应用低碳施工关键技术后各类碳排放量占比分析  
Fig. 8 Analysis of proportion of various carbon emissions after application of low-carbon construction key technologies

表 5 沉箱码头建设阶段各分部工程碳排放量

Tab. 5 Carbon emissions of various sub-projects in construction phase of caisson wharf

工艺类别	分部工程	直接碳排放量/t	外购电碳排放量/t	材料生产碳排放量/t	场外运输碳排放量/t	合计碳排放量/t
普通工艺	疏浚工程	6 886.42	0.00	0.00	0.00	6 886.42
	土石方工程	7 091.16	360.54	14 126.00	12 995.33	34 573.04
	地基与基础工程	531.75	648.50	9 472.16	88.18	10 740.59
	混凝土工程	6 043.91	1 239.37	78 758.99	1 252.04	87 294.31
	钢筋工程	178.58	435.15	28 882.92	24.44	29 521.09
	其他工程	212.21	71.27	3 525.81	3.05	3 812.34
低碳工艺	疏浚工程	6 886.42	0.00	0.00	0.00	6 886.42
	土石方工程	6 726.70	360.54	13 730.20	12 670.03	33 487.48
	地基与基础工程	522.40	644.53	9 474.24	88.21	10 729.39
	混凝土工程	5 542.31	1 093.01	78 758.99	1 252.04	86 646.35
	钢筋工程	178.58	435.15	28 882.92	24.44	29 521.09
	其他工程	212.21	71.27	3 525.81	3.05	3 812.34

#### 3.2.2 降碳量分析

对比计算结果, 与关键技术应用相关的土石方与混凝土两项分部工程有较为明显的碳减排量。细化到应用关键技术的清单子项, 分别为: 应用振动整平施工工艺后基床抛石子项施工期碳排放量减少 364.46 t; 应用大型沉箱分层预制钢筋整体

吊装工艺后沉箱预制子项施工期碳排放量减少 441.28 t; 应用大型沉箱智能浮运安装施工工艺后沉箱出运、安装子项施工期碳排放量减少 206.69 t。在涉及碳减排的清单子项中, 传统工艺与低碳工艺下工机消耗对比见表 6, 碳排放计算结果见表 7。

表 6 传统工艺与低碳工艺人工船机消耗对比

Tab. 6 Comparison of labor, vessel and machinery consumption between traditional and low-carbon processes

施工项目	人工船机名称	规格	单位	传统工艺	低碳工艺
基床抛石施工 (每 100 m <sup>3</sup> 消耗量)	人工	-	工日	8.22	8.00
	拖轮	主机功率 441 kW	艘班	0.17	0.08
	机动艇	主机功率 44 kW	艘班	0.26	0.08
	方驳	载质量 600 t	艘班	1.46	0.49
	方驳	载质量 2 000 t	艘班	-	0.08
	船用电动振动锤	激振力 550 kN	艘班	-	0.19
	履带式液压单斗挖掘机	斗容量 2.0 m <sup>3</sup>	台班	-	0.19
	潜水组	-	组日	3.43	-
	履带式起重机(提升质量 40 t)	提升质量 40 t	台班	0.56	-
	履带式起重机	提升质量 50 t	台班	-	0.19
沉箱预制施工 (每 10 m <sup>3</sup> 消耗量)	人工	-	工日	16.03	8.00
	塔式起重机	起重力矩 150 kN·m	台班	0.65	0.49
	轮胎式装载机	斗容量 3 m <sup>3</sup>	台班	0.04	0.04
	混凝土搅拌站	生产率 120 m <sup>3</sup> /h	台班	0.04	0.04
	混凝土搅拌运输车	搅动容量 8 m <sup>3</sup>	台班	0.14	0.14
	混凝土输送泵车	输送量 70 m <sup>3</sup> /h	台班	0.07	0.07
沉箱出运施工 (每个消耗量)	人工	-	工日	12.90	10.32
	半潜驳	运载能力 3 500 t	艘班	2.97	2.52
	拖轮	主机功率 882 kW	艘班	0.41	0.41
	拖轮	主机功率 1 228 kW	艘班	0.41	0.41
	拖轮	主机功率 1 941 kW	艘班	0.55	0.55
	机动艇	主机功率 88 kW	艘班	0.99	0.99
	锚艇	主机功率 510 kW	艘班	0.25	0.25
	方驳吊机船组	起重能力 50 t	艘班	0.40	0.34
	胶囊台车系统	顶升重量 6 000 t	台班	0.32	0.25
	塔式起重机	起重力矩 150 kN·m	台班	0.67	0.59
电动单筒慢速卷扬机	牵引力 100 kN	台班	0.50	0.43	
沉箱安装施工 (每个消耗量)	人工	-	工日	13.27	10.62
	固定扒杆起重船	起重能力 500 t	艘班	0.48	0.40
	拖轮	主机功率 721 kW	艘班	0.13	0.11
	拖轮	主机功率 882 kW	艘班	0.44	0.38
	拖轮	主机功率 1 228 kW	艘班	0.44	0.39
	机动艇	主机功率 88 kW	艘班	2.00	1.70
	锚艇	主机功率 510 kW	艘班	0.63	0.51
	方驳吊机船组	起重能力 50 t	艘班	0.13	0.10
	内燃发电机组	功率 150 kW	台班	1.44	1.23
	潜水泵	出口直径 150 mm	台班	4.32	3.69

表 7 绿色低碳关键技术碳排放量计算结果

Tab. 10 Carbon emission calculation results of key green low-carbon technologies

对比清单子项	工程量	对比内容	直接碳排放量/t	外购电碳排放量/t	材料生产碳排放量/t	场外运输碳排放量/t	碳排放量合计/t
基床抛石	36.969 7 万 m <sup>3</sup>	普通工艺	1 635.51	0.00	1 546.29	1 388.50	4 570.30
		低碳工艺	1 271.05	0.00	1 546.29	1 388.50	4 205.84
		降碳量	364.46	0.00	0.00	0.00	364.46
方形沉箱预制	14.411 2 万 m <sup>3</sup>	普通工艺	1 252.72	1 036.12	48 176.61	713.76	51 179.21
		低碳工艺	952.66	894.90	48 176.61	713.76	50 737.93
		降碳量	300.06	141.22	0.00	0.00	441.28

续表7

对比清单子项	工程量	对比内容	直接碳排放量/t	外购电碳排放量/t	材料生产碳排放量/t	场外运输碳排放量/t	碳排放量合计/t
方形沉箱出运、安装	122 个	普通工艺	2 230.84	34.36	206.62	0.29	2 472.11
		低碳工艺	2 029.30	29.21	206.62	0.29	2 265.42
		降碳量	201.54	5.15	0.00	0.00	206.69
项目降碳总计		普通工艺	5 119.07	1 070.48	49 929.52	2 102.55	58 221.62
		低碳工艺	4 253.01	924.11	49 929.52	2 102.55	57 209.19
		降碳量	866.06	146.37	0.00	0.00	1 012.43

由于该关键技术主要减少了人工、船机台班消耗量, 因此计算成果中碳减排主要体现在涉及化石燃料消耗的直接碳排放与电力消耗的外购电力间接碳排放两方面。项目建设阶段各部分降碳量占比见图 9, 直接碳排放碳减排量占总碳减排量的 86%, 而外购电力碳减排量占总碳减排量的 14%。各子项直接碳排放与外购电碳排放降碳比例见图 10, 相关清单子项直接碳排放平均降碳比例为 16.92%, 外购电力碳排放降碳比例均为 10% 以上, 节能降碳效果较为明显。

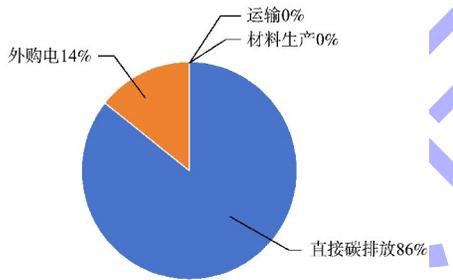


图 9 项目建设阶段各部分降碳量占比

Fig. 9 Proportion of carbon reduction in each part during the project construction phase

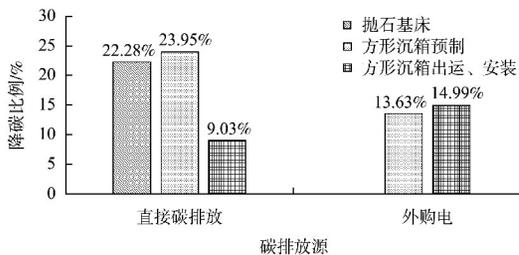


图 10 各子项直接碳排放与外购电碳排放降碳比例

Fig. 10 Carbon reduction ratio of direct carbon emission and purchased electricity carbon emission of each bill item

#### 4 结论

1) 大型沉箱重力式码头数智化施工关键技术节能降碳效果较为明显, 其中直接碳排放合计碳减排量 866.06t, 降碳幅度 16.92%; 外购电碳排

放合计碳减排量 146.37 t, 降碳幅度 13.67%。该技术可为有绿色施工要求的重力式沉箱码头提供工艺方案参考。

2) 由于目前缺少该关键技术节材方面的相关数据, 因此本文碳减排分析中未涉及与节材相关的降碳效果分析。待今后进一步获取相关数据后, 再补充开展整体的碳减排量计算与对比分析, 进一步评估该绿色低碳施工关键技术减碳效果与潜力。

#### 参考文献:

[1] 新华社. 中央深改委会议: 审议通过《关于推进国有企业打造原创技术策源地的指导意见》[EB/OL]. (2022-03-02) [2025-01-22]. [https://gzw.wuhan.gov.cn/ztzl\\_69/gzggqy/202203/t20220302\\_1931008.html](https://gzw.wuhan.gov.cn/ztzl_69/gzggqy/202203/t20220302_1931008.html). Xinhua News Agency. The meeting of the Central Commission for Comprehensively Deepening Reform: Review and approve the Guiding Opinions on Promoting State-owned Enterprises to Build Original Technology Sources [EB/OL]. (2022-03-02) [2025-01-22]. [https://gzw.wuhan.gov.cn/ztzl\\_69/gzggqy/202203/t20220302\\_1931008.html](https://gzw.wuhan.gov.cn/ztzl_69/gzggqy/202203/t20220302_1931008.html).

[2] 李心萍. 央企加快打造原创技术策源地[N]. 人民日报, 2024-07-03(18).  
LI X P. Central enterprises accelerate the establishment of original technology sources[N]. People's Daily, 2024-07-03(18).

[3] 王森. 中国低碳建筑潜在效益与发展前景研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.  
WANG S. Study on potential benefits and development prospects of low-carbon buildings in China[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

[4] 生态环境部办公厅, 科学技术部办公厅, 工业和信息化部办公厅, 等. 关于印发《国家重点低碳技术征集推广实施方案》的通知: 环办气候〔2024〕2号[EB/OL].

- (2024-02-18)[2025-01-22]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk05/202402/t20240222\\_1066647.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk05/202402/t20240222_1066647.html). Office of the Ministry of Ecology and Environment, Office of the Ministry of Science and Technology, Office of the Ministry of Industry and Information Technology, et al. Notice on the issuance of *the Implementation Plan for the Collection and Promotion of Key National Low-Carbon Technologies*: [2024] No. 2 of the Office of the Ministry of Ecology and Environment [EB/OL]. (2024-02-18)[2025-01-22]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk05/202402/t20240222\\_1066647.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk05/202402/t20240222_1066647.html).
- [5] GUSTAVSSON L, JOELSSON A, SATHRE R. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building [J]. *Energy and buildings*, 2010, 42(2): 230-242.
- [6] 张文超, 肖益民, 韩青苗. 基于施工图的建筑建造阶段碳排放计算方法初探[J]. *建筑热能通风空调*, 2012, 31(1): 28-31. ZHANG W C, XIAO Y M, HAN Q M. Carbon dioxide emissions calculation in construction projects based on building blueprints [J]. *Building energy & environment*, 2012, 31(1): 28-31.
- [7] 王成武, 马振东. 建设工程施工碳排放定额估算方法及应用展望[J]. *建筑经济*, 2016, 37(4): 59-61. WANG C W, MA Z D. Quota estimation method and application prospect of carbon emission in construction project [J]. *Construction economy*, 2016, 37(4): 59-61.
- [8] 张价价, 翟麟慧, 黄勇. 简析建设工程施工碳排放定额估算方法及其应用[J]. *建材与装饰*, 2017(20): 153-154. ZHANG J J, ZHAI L H, HUANG Y. Analysis of carbon emission quota estimation methods and their application in construction projects [J]. *Construction materials & decoration*, 2017(20): 153-154.
- [9] 陈彬彬, 陈婵璐, 杨建宇, 等. 施工阶段碳排放定额估算方法研究[J]. *建筑节能*, 2020, 48(11): 147-150. CHEN B B, CHEN C L, YANG J Y, et al. Estimation method of carbon emission quota in construction stage [J]. *Building energy efficiency*, 2020, 48(11): 147-150.
- [10] 吴淑艺, 赖芑宇, 孙晓丹. 基于工程量清单的建筑施工阶段碳排放计算: 以福建省为例[J]. *工程管理学报*, 2016, 30(3): 53-58. WU S Y, LAI J Y, SUN X D. Calculation of carbon emissions of in the construction stage based on the bill of quantities: a case in Fujian Province [J]. *Journal of engineering management*, 2016, 30(3): 53-58.
- [11] 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. Standard for building carbon emission calculation: GB/T 51366-2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [12] 陈乔. 建筑工程建设过程碳排放计算方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2014. CHEN Q. Study on the calculation method of carbon emission during the construction process of architectural project [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [13] 邵高峰, 赵霄龙, 高延继, 等. 建筑物中建材碳排放计算方法的研究[J]. *新型建筑材料*, 2012, 39(2): 75-77. SHAO G F, ZHAO X L, GAO Y J, et al. Research on calculation means of carbon emission of building materials for one building [J]. *New building materials*, 2012, 39(2): 75-77.
- [14] 王铁柱, 张佳阳, 赵炜璇, 等. 装配式建筑物化阶段碳排放量模型建立与现浇建筑对比评价研究[J]. *新型建筑材料*, 2022, 49(10): 88-91. WANG T Z, ZHANG J Y, ZHAO W X, et al. Research on carbon emission model establishment of prefabricated building in the physical and chemical stages and comparative evaluation with cast-in-place buildings [J]. *New building materials*, 2022, 49(10): 88-91.
- [15] 殷涛, 梅聪健. 建筑领域不同建造方式碳排放对比分析探讨[J]. *工程质量*, 2022, 40(11): 24-27. YIN T, MEI C J. Comparative analysis of carbon emission from different construction modes in construction field [J]. *Construction quality*, 2022, 40(11): 24-27.
- [16] 水运工程混凝土和砂浆材料用量定额: JTS/T 277—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019. Quota for consumption of concrete and mortar material in water transportation engineering: JTS/T 277-2019[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [17] 沿海港口工程船舶机械艘(台)班费用定额: JTS/T 275-2—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019. Quota for per-shift cost of ships and machinery used in coastal port engineering: JTS/T 275-2-2019[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [18] 水运工程工程量清单计价规范: JTS/T 271—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020. Code of valuation with bill quantity of port and waterway engineering: JTS/T 271-2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.