



# 千吨级门式起重机出运大型沉箱施工技术

李子华, 赵冬冬

(中铁广州工程局集团港航工程有限公司, 广东 广州 510670)

**摘要:** 针对广州港南沙港区重力式码头工程大型沉箱出运施工中大型门式起重机配套应用及千吨级沉箱吊运技术空白的关键问题, 提出门式起重机与沉箱间高效连接技术, 并对新型施工方法进行探索与实践。鉴于国内尚无利用大型门式起重机批量吊运千吨级沉箱的工程先例, 且实现该吊运工艺需攻克门式起重机与沉箱间的高效连接技术, 通过采用自主设计的专用吊具, 利用既有挖入式港池及2 000吨级大型门式起重机, 替代传统临时出运码头设施, 开发了适用于大型沉箱出运上驳的新型施工方法。研究表明, 该方法直接节省了专用出运码头建设费用, 有效规避了临时出运码头岸线审批周期, 单项目成本降低超30%; 同时, 由于门式起重机可实现全天候作业, 不受潮汐、水位影响, 沉箱出运效率提升40%以上, 至少节省工期2个月。

**关键词:** 重力式码头; 大型沉箱; 出运上驳; 门式起重机; 专用吊具

中图分类号: U655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0245-06

## Construction technology for transporting large caissons using 1,000-ton class gantry crane

LI Zihua, ZHAO Dongdong

(China Railway Guangzhou Engineering Group Port Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511670, China)

**Abstract:** In response to the key issues of the lack of application of large gantry cranes and the technology for lifting thousand-ton class caissons in the construction of the gravity wharf project at Nansha port, Guangzhou Port, an efficient connection technology between the gantry crane and the caissons is proposed, and the new construction method is explored and practiced. Given that there is no domestic precedent for using large gantry cranes to batch-lift thousand-ton class caissons, and that achieving this lifting process requires overcoming the efficient connection technology between gantry cranes and caissons, a new construction method suitable for the transportation of large caissons onto barges is developed by using self-designed special lifting gear, and by utilizing the existing recessed harbor basin and 2,000-ton class large gantry cranes to replace the traditional temporary transportation wharf facilities. The research results show that this method directly saves the construction cost of the dedicated transportation wharf, effectively avoids the approval cycle for the temporary transportation wharf shoreline, and the cost of a single project is reduced by more than 30%. At the same time, as the gantry crane can operate all-weather and is not affected by tides and water levels, the efficiency of caisson transportation is increased by more than 40%, saving at least two months of construction time.

**Keywords:** gravity wharf; large caisson; transportation and loading onto barge; gantry crane; specialized lifting gear

在全球港口工程向大型化、集约化快速演进的背景下, 码头建设对预制构件生产与运输的效率、成本控制提出了更高要求。部分项目因既有预制场地资源稀缺或区域内缺乏可用场地, 面临

建设困境。南沙近洋码头工程需在无既有预制场可依托的条件下, 完成千吨级沉箱的高效预制与出运<sup>[1]</sup>, 同时严格控制成本。传统解决方案中, 新建预制场或租赁专用设备往往存在投资规模大、

收稿日期: 2025-05-20 录用日期: 2025-07-08

作者简介: 李子华(1992—), 男, 工程师, 研究方向为港口航道工程施工。

建设周期长等弊端,迫切需要探索基于既有设备与场地资源的创新工艺。

大型重力式沉箱码头建设过程中,沉箱预制场配套建设及出运工艺始终是制约项目实施的关键技术瓶颈<sup>[2]</sup>。国内外学者和工程人员围绕沉箱出运安装工艺开展了大量研究<sup>[3-4]</sup>,形成了气囊上驳<sup>[5]</sup>、轨道台车运输<sup>[6]</sup>、大型起重船吊装<sup>[7]</sup>等一系列成熟技术。其中,气囊工艺凭借其灵活性,在中小规模沉箱运输中应用广泛;轨道台车运输依赖固定轨道设施,对场地条件要求较高;起重船吊装则受限于水深条件和设备起吊能力。然而,针对千吨级大型沉箱的批量出运,国内尚未有以大型门式起重机作为核心运输设备的工程实践案例,现有工艺在场地适应性、成本经济性和作业效率等方面仍存在显著提升空间。

本文以南沙近洋码头项目为研究对象,提出利用既有大型门机实现大型沉箱出运的技术方案。该方案将码头后方陆域硬化改造为沉箱预制场,通过气囊转移沉箱至2 000吨级门式起重机作业范围内,配合专用吊具<sup>[8]</sup>完成沉箱吊装并转运至半潜驳。

## 1 工程概况

广州港南沙港区近洋码头采用重力式沉箱结构,工程共计29件预制沉箱,单件沉箱质量达1 567 t,外形尺寸为18.77 m×12.65 m×14.0 m(长×宽×高)。在工程实施过程中,沉箱预制场地及出运方式的选择成为亟待解决的核心问题。虽然项目承建方的中山制造基地临近施工区域,但该基地缺乏适配的沉箱上驳码头设施,无法满足大型沉箱的出运需求。

针对上述难题,提出3种可行性方案。方案1,在中山制造基地新建沉箱出运码头,该方案涵盖原场地回填、码头主体建设、河道疏浚及上部配套设施建设等4项工程内容。经测算,总建设成本约需2 200万元;此外,还需拆除原斜坡式防波堤引堤,并采用桩基施工建设专用出运码头,这将导致工程工期延长3个月。同时,该方案面临岸线使用审批的政策壁垒,且由于原引堤的结构

特性,河道疏浚过程中需着重解决半潜驳船的吃水深度问题。然而,该方案在原预制场场地回填再利用方面具备一定优势。方案2,租借临近预制场,需投入费用1 700万元。方案3,基于中山制造基地现有临近港池的大型门式起重机资源,提出创新性出运方案。该方案在实施过程中面临诸多技术挑战:现有的2 000吨级门式起重机在满足沉箱外形尺寸要求的作业半径下,其额定起重量无法满足1 567 t沉箱吊运需求;同时,传统盘式吊具虽能满足吊重要求,但存在设备自重过大、制造成本高昂等问题,严重制约了该方案的工程应用。

基于对各方案的综合技术经济分析,结合工程实际需求,开展2 000吨级门式起重机吊运大型预制沉箱上驳技术研究,重点聚焦于沉箱吊点优化设计、专用吊具创新研发以及吊运工艺系统改进等3个关键技术领域,旨在突破传统大型沉箱出运技术的瓶颈,为工程建设提供安全、高效、经济的解决方案。

## 2 沉箱吊运设计

### 2.1 技术思路

为充分整合中山基地既有场地与码头资源,降低沉箱预制场及临时出运码头建设成本,解决临时出运码头岸线审批难题,采用2 000吨级门式起重机吊运大型预制沉箱上驳方法。主要技术思路:在沉箱预制阶段,于沉箱前后侧对称预留4组共8个吊孔;待沉箱达到设计强度后,首先利用橡胶气囊将目标沉箱转运至门式起重机作业区域;随即安装专用吊具并通过操作平台将吊缆精准锚固于预制吊孔;待吊具系统完成受力转换后,由门式起重机以恒定速率提升沉箱至稳定状态;随后,起重机沿既定轨道匀速行进至码头泊位,将沉箱精确下放至半潜驳指定承载区域;最终由拖轮牵引半潜驳运输至施工水域,完成沉箱安装作业。

### 2.2 沉箱吊孔设计

在沉箱吊装工艺实施中,吊孔的合理设置是保障吊运安全的关键环节。基于沉箱12个仓格、3排分布的平面结构特点,遵循对称布置原则,在

沉箱前后墙壁对应每个仓格位置各预留1个吊孔,共设置8个吊点。吊孔垂直方向距沉箱顶面4.2 m,水平方向两端距侧墙边沿2.71 m,中间吊孔间距4.45 m,吊孔布置见图1。针对混凝土材料抗压性能强、抗拉性能弱的特性,吊孔部位采用钢套筒结构设计,通过套筒的力学传导机制将拉应力转化为压应力,见图2。同时,为确保吊运时吊孔局部压应力不超过混凝土局部承压强度限值,在钢套筒外围增设吊筋进行强化处理,进一步提升吊孔区域承载能力,保障沉箱吊运过程中的结构安全与稳定。

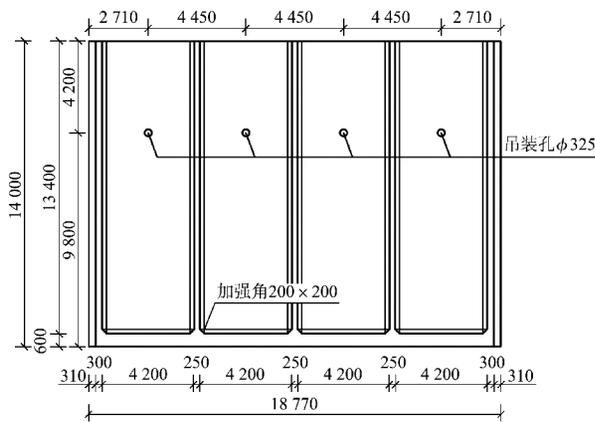


图1 吊孔布置(单位: mm)

Fig. 1 Layout of hoisting holes (unit: mm)

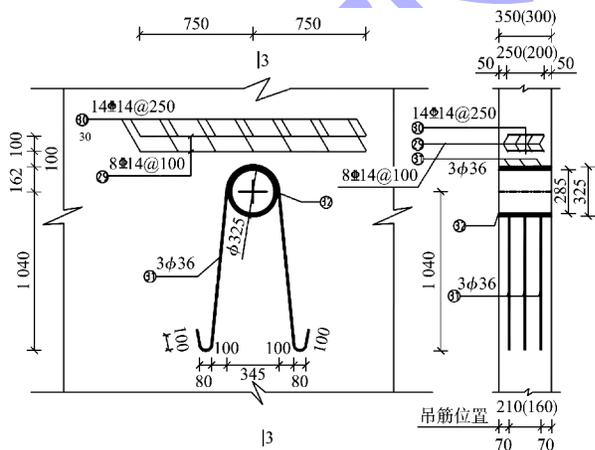


图2 吊孔细部(单位: mm)

Fig. 2 Details of hoisting hole (unit: mm)

## 2.3 吊具设计

### 2.3.1 吊具优化

沉箱吊具初步设计为梁式结构<sup>[9]</sup>,但其自质量超过200 t且受力不平衡,易发生翘头现象。因

此,对吊具设计提出如下优化方案。

优化方案1:充分利用门机剩余净空,将抬梁与吊排的刚性连接改造为钢丝绳圈-杆系组合结构,杆端设置钢丝绳对应沉箱吊孔,使梁式吊具转变为系杆结构,通过将弯矩转化为压力减小构件截面,实现吊具减重。

优化方案2:核算2 000吨级门式起重机主梁承载力与吊具尺寸的匹配关系。采用迭代法,固定下端吊耳间距及门机横梁参数,调整上部抬梁长度。抬梁长度变化会改变门机横梁与抬梁的弯矩计算长度,进而影响弯矩值,而弯矩变化又会影响抬梁截面尺寸,最终影响吊具质量。经计算,抬梁长度可从20 m缩减至15 m,吊具质量由200 t降至100 t以内。

优化方案3:原设计每个吊叉重约2 t,2根系杆两端共4个吊叉,总质量8 t;优化为8个200 t级卡环(单个80 kg),大幅减轻质量,且卡环拆装便捷,吊具报废后仍可独立使用。

优化方案4:门机小车吊钩与吊具连接部位及吊耳的优化。由于2 000吨级门式起重机在沉箱出运期间兼顾其他构件吊装,需频繁拆装吊具。原设计中吊钩与吊具采用销轴硬连接,对孔精度要求高;为提升拆装效率,改为GJT180钢丝绳圈软连接销轴。

综合上述优化方案,确定最终吊具方案如下:吊具上端抬梁吊耳与门式起重机吊钩采用GJT180钢丝绳圈配合插销进行连接,其上部结构为水平抬梁,该抬梁与门式起重机横梁保持平行布置,抬梁顶部的2个吊耳间距设定为15 m。两撑杆之间的间距为11.325 m,此处吊耳转换为垂直方向,通过2条周长23.5 m的GJT180钢丝绳圈,连接垂直于门式起重机横梁的下撑杆(沿沉箱长方向布置),撑杆长8.9 m。撑杆下部的每个吊耳悬挂200 t卸扣,再挂设2根直径96 mm、长度24 m的压制钢丝绳,优化后的吊具见图3。吊具安装时,利用汽车吊将吊具下端与沉箱吊孔连接的插销吊运至吊孔位置,再将插销推入吊孔,以此完成吊具安装及与沉箱吊点的连接,见图4。

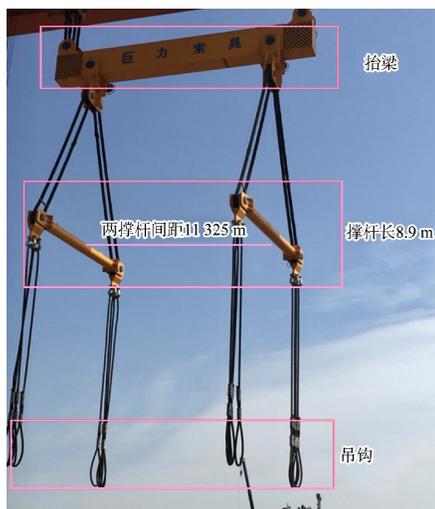


图3 拼装完成的吊具  
Fig.3 Assembled lifting gear



图4 吊具与沉箱吊点的连接  
Fig.4 Connection between lifting gear and lifting points of the caisson

### 2.3.2 吊具均衡性分析验证

采用2 000吨级门式起重机吊运大型沉箱时,设置8个吊点(沉箱每侧4个),通过门机上部小车调整抬梁位置实现两侧受力平衡,确保吊装过程均衡<sup>[10]</sup>。对沉箱每侧4个吊点的受力不平衡因素分析,需满足以下条件:吊孔位置偏差 $\leq 1$  cm;地面平整度导致吊孔水平面偏差 $\leq 10$  cm;钢丝绳加工偏差控制在 $0.5d$ ( $\leq 5$  cm,  $d$ 为钢丝绳的直径),否则可能引发起吊受力不均衡。针对上述不平衡因素,通过简化计算或吊具模型受力分析进行验证。

1) 两点吊装简化计算。以质量800 t的大型

板状构件为例,采用两点吊装,吊点间距8.9 m,吊点距顶部4.2 m,质心距底部5.71 m。当绳1比绳2长30 cm时,计算得拉力差 $\Delta F=247.4$  kN,受力变化率约3.1%。由此推算,钢丝绳制作偏差5 cm时,对受力的影响可忽略不计。

2) 1:50模型试验。采用简易吊具试验装置进行模型试验,验证非平衡状态下的受力情况。模型比例1:50,左右绳长偏差2.9%(等效实际偏差30 cm),测得拉力差异3.16%。按绳长偏差与拉力偏差的线性分布规律,当吊具绳偏差 $\leq 10$  cm时,吊装受力偏差 $\leq 1\%$ (对应吊点偏差 $\leq 20$  t),表明吊具结构可满足受力不平衡工况的要求。

3) 对称平衡模拟实验。按沉箱单侧吊具吊装状态,采用电子秤、钢丝绳、小撑杆、小卡环及配重物模拟平衡工况下的吊具受力,吊具模型平衡状态试验见图5。对称平衡状态下,电子秤显示数值均为1.895,表明吊具在允许误差范围内可实现受力均衡。



图5 吊具模型平衡状态试验  
Fig.5 Test of balance state of the lifting gear model

## 3 施工工艺

### 3.1 吊运工艺流程

沉箱转运至门机下方→门机上吊具安装→汽车吊配合在沉箱顶安装操作平台→门机提升吊具,移至沉箱上方→登高车送工人至操作平台上→汽车吊配合人工分钢丝绳及沉箱吊孔穿销、挂绳→起重指挥门机荷载100 t→人工检查吊点处钢丝绳和销轴受力情况→工人离开操作平台→门机每次加载500 t,直到沉箱离开地面50 cm→门机大车

移动→门机行走至半潜驳上空,将沉箱放置在船甲板上摆好的支垫上→门机放松钢丝绳,工人登上操作平台,汽车吊配合拆掉销孔部位吊具连接→门机吊运吊具离开→人工逐个封堵吊孔→吊机拆除操作平台,对沉箱加固,准备拖航。

### 3.2 沉箱转堆

利用沉箱下支垫形成的间隙,沿垂直于沉箱出运方向穿入气囊组,通过充气装置顶升沉箱后取出支垫结构。在卷扬机-钢丝绳牵引系统的牵拉与制动作用下,沉箱沿预设轨道前移,气囊用于沉箱转堆;同时在移动路径前方同步铺设气囊,当沉箱覆盖前方气囊后立即充气形成支撑,而沉箱后方脱出的气囊则及时放气,转移至前端重新铺设。通过“充气支撑-放气转移”的循环作业模式,将沉箱逐步滑移至2 000吨级门式起重机的吊装作业范围内。

### 3.3 安装操作平台及挂吊缆

25 t汽车吊将沉箱吊孔插销安装操作平台精准安放在沉箱顶部,操作工人通过登高车攀爬至操作台。汽车吊驻位于沉箱外侧指定区域,按序将沉箱吊孔连接的插销逐个吊运至吊孔对应位置,操作工人同步辅助将插销推入吊孔内完成初步固定。门式起重机吊运专用吊具移动至沉箱正上方,通过小车控制吊钩下降;在汽车吊协同配合及操作工人的引导下,对吊具下端钢丝绳进行分绳作业,每根钢丝绳对应沉箱单个仓格吊孔,且钢丝绳两端分别延伸至沉箱墙内、外区域。分绳工序完成后,操作工人将墙内、外两侧的钢丝绳端琵琶头分别挂接于吊孔销轴下方,随即安装销轴端部的挡板组件。待吊具下部钢丝绳与沉箱吊点销轴全部完成连接后,缓慢提升吊具使钢丝绳均匀压紧吊销,通过预紧操作防止起吊过程中钢丝绳脱出,沉箱吊点部位见图6。

### 3.4 吊运沉箱上驳

试吊验收完成后,门式起重机将沉箱缓慢提升500 mm,待沉箱稳定后启动平移操作。吊装前

需精确校准沉箱中线与半潜驳中线的对位基准,门式起重机沿轨道匀速前行至半潜驳正上方,吊运沉箱上驳,经位置复核无误后,以均匀速率下放吊钩,将沉箱平稳落于半潜驳指定区域。定位验收合格后,操作工人通过登高装置登上挂篮操作平台,25 t汽车吊驻位于7#泊位两岸岸线,辅助拆卸插销组件;与此同时,门式起重机提升吊具并移至指定停放区域。待插销拆除完毕,操作工人采用预制堵孔材料对吊孔进行密封处理,经质量检查合格后,由汽车吊将挂篮从沉箱顶面调离。



图6 沉箱吊点部位

Fig. 6 Lifting points of the caisson

## 4 应用实例

基于施工现场条件,广州港南沙港区近洋码头工程项目研发并实施千吨级门式起重机出运大型沉箱施工技术。该工艺依托2 000吨级门式起重机的重载吊运能力,实现千吨级大型沉箱直接上驳作业,避免了专用出运码头的建设投入,其总体方案指标分析见表1。利用门式起重机的全天候作业特性,彻底突破传统潮汐条件对沉箱出运的限制,显著提升沉箱安装船舶的周转效率。经实际工程验证,该技术缩短工期不少于2个月,新增直接经济效益478万元,同步实现施工资源的高效配置与成本优化。

表1 总体方案指标分析

Tab. 1 Index analysis of overall scheme

出运工艺	可行性	工程成本	效率	机械化程度	风险	社会效益	能源使用
气囊出运	可行	需要专用码头,成本较高	低	低	大	不明显	电力驱动
台车出运	可行	需要专用码头和轨道基础,成本高	低	高	较大	不明显	电力驱动
起重船出运	可行	大型起重船租金高,成本高	较高	高	大	不明显	油耗量大
2 000吨级门机出运	可行	现有资源利用,成本低	高	高	小	效益显著	电力驱动

## 5 结论

1) 依托既有千吨级门式起重机及凹入式码头泊位, 研发适用于大型沉箱出运上驳的施工方法, 既节省专用码头建设成本, 又突破潮水限制, 规避出运码头建设周期对总进度的制约, 提升施工效率。

2) 设计专用吊具连接门式起重机与沉箱吊孔, 将吊盘结构优化为杆式结构, 优化后吊具质量由 200 t 降至 87 t, 自重不足吊重构件的 6%, 受力设计合理。

3) 针对吊点受力不平衡问题, 简化吊具钢丝绳延展性计算, 开展吊具模型受力不平衡分析, 制作简易吊具模型, 通过模拟吊装工艺进行相关验证试验, 保障新设计吊具的可行性。

4) 千吨级门式起重机吊运沉箱的出运工艺需配套预制场、码头泊位及门式起重机, 在无临近预制场的场景下应用存在局限性, 需结合场地条件与设备资源论证其可行性。

## 参考文献:

- [1] 成祥. 广西防城港码头 2 000 吨级大型沉箱预制施工[J]. 中国水运(下半月), 2015(10): 275-276.  
CHENG X. Precast construction of 2000-ton large caisson in Fangchenggang wharf, Guangxi [J]. China water transport (the second half of the month), 2015 (20): 275-276.
- [2] 简陈坤, 张永强, 黎斌, 等. 浅谈大型混凝土构件预制场的设计和布置[C]//中国航海学会救捞专业委员会 2006 年学术交流会论文集. 上海: 中国航海学会救捞专业委员会, 2006: 153-160.  
JIAN C K, ZHANG Y Q, LI B, et al. Design and arrangement of huge concrete structure prefabricating yard [C]//Proceedings of the 2006 Academic Exchange Conference of Maritime Salvage Committee of CIN. Shanghai: Maritime Salvage Committee of CIN, 2006: 153-160.
- [3] 刘德进, 张宝昌, 付大伟. 超大型沉箱出运与安装关键技术[J]. 水运工程, 2012(1): 164-167.  
LIU D J, ZHANG B C, FU D W. Key technology of super large caissons' launching and installation [J]. Port & waterway engineering, 2012(1): 164-167.
- [4] 刘宏, 鲁明, 杜惠芳, 等. 中型沉箱出运、安装方案[J]. 水运工程, 2013(8): 191-193.  
LIU H, LU M, DU H F, et al. Transportation and installation of medium-sized caisson [J]. Port & waterway engineering, 2013(8): 191-193.
- [5] 陈绍文. 气囊在移运 5 000 t 沉箱中的运用[J]. 水运工程, 2007(10): 81-83.  
CHEN S W. Application of gasbags in transporting 5 000 t caissons [J]. Port & waterway engineering, 2007(10): 81-83.
- [6] 覃波. 电驱动竖向液压顶升台车在沉箱移运中的应用设计[J]. 中国水运, 2022(10): 50-51, 65.  
QIN B. Application design of electrically driven vertical hydraulic jack-up trolley in caisson transportation [J]. China water transport, 2022(10): 50-51, 65.
- [7] 李永锋. 大型沉箱起重船大吊力助浮出运技术[J]. 水运工程, 2020(7): 223-226.  
LI Y F. Launching and transportation technology of large caisson assisted by crane ship with large lifting force [J]. Port & waterway engineering, 2020(7): 223-226.
- [8] 张恒, 何自强, 陈海燕, 等. 大型设备专用吊具的参数化设计与有限元分析[J]. 起重运输机械, 2009(6): 60-64.  
ZHANG H, HE Z Q, CHEN H Y, et al. Parametric design and finite element analysis of special sling used in large equipment installation [J]. Hoisting and conveying machinery, 2009(6): 60-64.
- [9] 赵凯, 倪大进, 胡静波, 等. 应力测试结合无损检测在起重机专用梁式吊具安全评估中的应用分析[J]. 内燃机与配件, 2017(24): 91-93.  
ZHAO K, NI D J, HU J B, et al. Application analysis of stress testing combined with non-destructive testing in safety assessment of special beam hanger for crane [J]. Internal combustion engine & parts, 2017(24): 91-93.
- [10] 李鹏举. 起重机多绳自平衡吊具[J]. 工程机械与维修, 2013(2): 158-159.  
LI P J. Multi-rope self-balancing lifting gear for crane [J]. Construction machinery & maintenance, 2013(2): 158-159.

(本文编辑 王传瑜)