大型矩形沉箱机械化吊装成套技术的应用

孙玉舟[1,2]，武　政[1]，魏　华[1]，李向阳[1]，王　东[1]，刘　刚[3]
（1. 中交水运规划设计院有限公司，北京 100007；2. 北京水规院京华工程管理有限公司，北京 100007；
3. 中交第一航务工程局有限公司，天津 300461）

摘要：传统沉箱吊装施工工艺普遍采用预留吊孔穿销起吊的方式，需要作业人员进行高空和潜水作业，存在安全风险高、施工效率低等问题。针对以上问题，以三亚某码头工程为例，进行大型矩形沉箱机械化吊装的施工技术研究，采用起重船配合自动挂钩脱钩吊架实施机械化吊装的方法，从吊架设计、沉箱起吊、沉箱安装、施工监测及测量等关键环节，系统研究自动挂钩脱钩吊架、机械化吊装、可视化监测系统、360°棱镜控制定位等成套施工技术。该成套施工技术能够实现沉箱顶部无人作业，规避了人员高空和潜水作业安全风险，安全性显著提高；与传统吊装工艺相比，施工效率提升 80%。研究成果可为同类重力式码头沉箱及大体积构件安装工程提供标准化、安全、高效的技术参考和实践借鉴。

关键词：大型沉箱；机械化吊装；吊架；施工监测；施工测量
中图分类号：U656.1+11；TH215　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)10-0296-07

Application of integrated mechanized hoisting technology for large rectangular caissons

Sun Yuzhou[1,2], Wu Zheng[1], Wei Hua[1], Li Xiangyang[1], Wang Dong[1], Liu Gang[3]
(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
2. PDI Jinghua Engineering Management Co., Ltd., Beijing 100007, China;
3. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: Conventional caisson hoisting construction techniques mostly rely on lifting via pins inserted into prefabricated lifting holes. This method requires workers to perform high-altitude and underwater diving operations, which brings about severe safety hazards and low construction efficiency. In view of the above deficiencies, a wharf project in Sanya is taken as an engineering case to investigate the mechanized hoisting construction technology for large rectangular caissons. A mechanized hoisting solution matching floating cranes with automatic hooking and unhooking hangers is adopted. Key working procedures are systematically analyzed, including hanger design, caisson lifting, caisson placement, construction monitoring and surveying. A full set of supporting construction technologies is comprehensively studied, covering automatic hook-engage-and-release hangers, mechanized hoisting, visual monitoring systems, and positioning control with 360° prisms. This integrated construction technology realizes unmanned operation on the top of caissons, eliminates safety risks induced by high-altitude and underwater diving work, and greatly improves overall operation safety. In addition, the construction efficiency is increased by 80% in contrast to traditional hoisting methods. The research results can offer standardized, safe and efficient technical references and practical experience for the installation of caissons and massive structural components in similar gravity-type wharf projects.

Keywords: large caisson; mechanized hoisting; hanger; construction monitoring; construction surveying

收稿日期：2026-04-20　　**录用日期：**2026-05-20

作者简介：孙玉舟(1982—)，男，工程师，从事水运工程项目管理工作。

传统沉箱吊装方式有两种，一种是预埋吊环，另一种是预留吊孔穿销起吊[1]。由于吊环埋在箱口，尺寸受限，承载力一般较小，故穿销起吊工艺应用广泛。穿销起吊一般在沉箱外壁预埋吊孔，采用销轴穿过吊孔，用钢丝绳圈连接销轴与吊架，吊船主钩钢丝绳连接吊架起吊，由于吊点位置较高，起吊前需要操作人员从软梯爬到销孔位置处进行高空作业插销轴。而沉箱安装后，销孔位置又低于沉箱顶口，一般在低潮面以下，需要潜水员在水下将销轴抽出。这种吊装方式存在高空和潜水作业，风险大且效率低[2]。

为了解决沉箱吊装传统穿销工艺效率低、风险大的问题，孙瑞谦等[2]针对 700 吨级沉箱设计了新型沉箱吊具及配套吊点，新吊具可以实现自动挂钩和摘钩，免去高空和潜水作业，可显著提高效率，降低风险，节约成本。国内外超 1 000 t 的沉箱吊装工艺案例较少。为保障大型矩形沉箱的机械化吊装作业施工效率和安全，需要对吊架结构设计、沉箱起吊作业、沉箱精准安装、施工监测及测量控制等全过程施工技术进行研究。

本文依托三亚某码头项目，结合沉箱的尺寸和质量较大的特点，经研究采用 12 点式吊装方案，进行 12 点式吊架设计，从而适配大型矩形沉箱起吊要求。吊架具有自动挂钩脱钩的功能，无需沉箱顶部人工操作，即可实现吊架与沉箱的连接和脱离，降低人员作业安全风险。为掌握沉箱吊装时 12 个吊钩的应力情况，在吊钩上布置传感器进行沉箱吊装过程中的吊钩应力监测，确保吊带受力且相对均匀分布，进一步保障吊装安全。同时采用 360°棱镜控制技术进行沉箱安装定位，有效提升安装精度与效率。

1　吊架设计

三亚某码头项目共有 32 座矩形沉箱，单座沉箱最大质量为 1 060 t，采用 1 600 t 起重船配合自动挂钩脱钩吊架的施工工艺进行吊装。吊架作为 1 000 吨级矩形沉箱海上机械化吊装的核心承载装备，其结构设计合理性直接决定吊装作业的安全性与可靠性。文献[2]已针对沉箱吊装需求设计出新型 8 点式沉箱吊具，为吊具设计提供了参考依据。鉴于本文项目沉箱具有尺寸及质量较大的特点，经力学计算与技术分析，确定采用 12 点式吊装方案，进行 12 点式吊架设计，吊架同时需要满足起吊质量适配、海上作业空间兼容、沉箱受力均衡 3 大核心技术要求。吊架设计以“吊点-框架-吊带”协同匹配为核心原则，结合沉箱结构特性与海上吊装作业工况，其具体技术方案如下。

1.1　吊点布置

采用适配沉箱结构的 12 点均匀受力设计，针对码头 32 座矩形沉箱(A 型长 25 m、宽 7 m、高 12.2 m、质量 1 060 t；B 型长 20.5 m、宽 7m、高 12.2 m、质量 892 t)的仓格分布与薄壁特性(壁厚 300 mm)，将 12 个吊孔均匀布设于沉箱顶面两侧，每侧 6 个，吊孔距离沉箱外壁上部 2.45 m，吊孔间距按沉箱内部仓格划分(横向间距匹配仓格隔墙位置)，确保荷载通过吊孔均匀传递至沉箱整体结构，避免局部应力集中，沉箱吊孔位置见图 1。

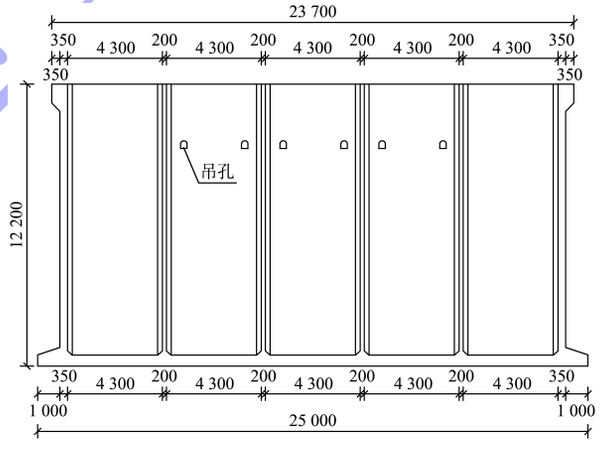


图 1　沉箱吊孔位置(单位：mm)

Fig. 1　Position of caisson lifting holes(unit:mm)

本文按照《海港工程设计手册》[3]进行计算，单吊孔设计受力按总吊力(沉箱重力+吊架重力)均分并叠加安全系数计算，最终确定单孔受力设计值为 1 515.8 kN；吊孔为不透孔结构，采用埋设钢管以及通过加强钢筋配筋进行加强，提升吊孔抗冲切与抗开裂能力，按照 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》[4]进行计算，沉箱混凝土局部受压及受冲切承载力满足要求，吊孔配筋见图 2。

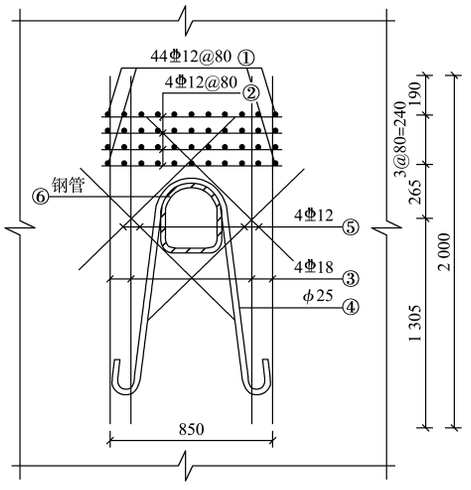
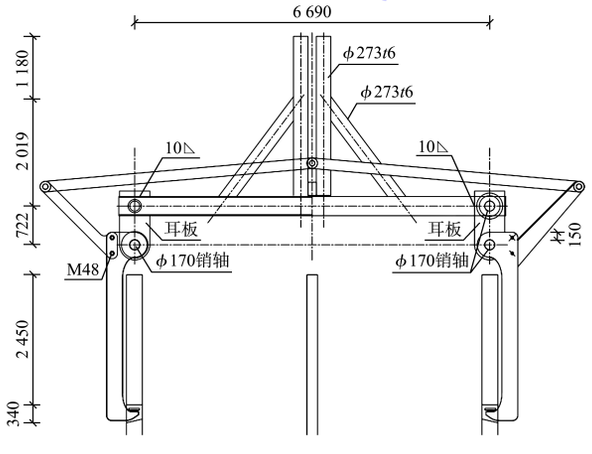


图 2　吊孔配筋(单位：mm)

Fig. 2　Reinforcement layout of lifting holes(unit:mm)

1.2　吊架框架

采用主次梁组合截面的刚性承载设计，吊架由主梁、次梁、销轴、耳板以及吊钩组成，吊架主体框架采用 Q355 钢结构，主梁选用 36a 槽钢背扣组合截面，通过高强螺栓(M48)连接形成整体承载梁，确保主梁在 1 200 t 起吊质量下弯曲变形控制在规范允许范围；次梁选用同型号 36a 槽钢，垂直于主梁布置，间距匹配沉箱吊孔位置，用于固定吊点连接件。吊架各构件经受力计算均满足要求，吊架整体质量约 60 t，吊钩距离吊架平面不小于 16 m，满足 1 600 t 起重船海上绞锚移船的作业空间需求，避免吊装过程中吊架与起重船结构干涉，吊架整体模型断面见图 3。



t 为壁厚。

图 3　吊架整体模型断面(单位：mm)

Fig. 3　Section of overall hanger model(unit:mm)

1.3　吊架计算

采用 Midas Civil 有限元软件建立吊架整体模型，对“主梁强度、次梁稳定性、销轴剪切、耳板抗撕裂、吊孔抗冲切”5 大关键部位性能进行验算。

1）主梁强度。主梁弯曲应力最大值 129.5 MPa，小于 Q355 钢抗拉强度设计值 160 MPa，强度富余系数 1.23。

2）次梁稳定性。次梁计算长度 2.75 m，截面惯性矩 = 2.73 cm^4，长细比 λ = 100.9，小于 JTS 152—2012《水运工程钢结构设计规范》[5] 的限值 150，稳定性满足要求。

3）销轴强度。销轴直径 170 mm，剪切应力计算值 85.2 MPa，小于钢材剪切强度限值 110 MPa，抗剪富余系数 1.29。

4）耳板抗撕裂。耳板厚度 40 mm，采用坡口焊接工艺，局部受压应力 120.87 MPa，小于材料抗压强度 170 MPa；孔壁受拉应力 145.05 MPa，小于材料抗拉强度 225 MPa。

5）吊孔抗冲切。吊孔孔壁 C40 混凝土冲切承载力 1 583.63 kN，大于吊孔受力 1 515.8 kN，通过双层配筋进一步提升抗冲切能力。

1.4　吊带布置

采用双吊钩-吊带的分级传力设计，根据选定的 1 600 t 起重船(设 2 个主吊钩，间距 5 m)与沉箱宽度(7 m)的适配性，采用“主吊钩-吊带-耳板-吊钩-沉箱吊孔”的分级传力方案。每个主吊钩连接 6 根高强纤维吊带，选用吊力为 1 300 kN 的吊带，自带 6 倍安全系数，根据《港口工程施工手册》[6] 进行受力计算，吊带抗拉强度满足要求。每根吊带末端通过销轴耳板、吊钩与沉箱吊孔连接。吊带长度按沉箱顶面吊孔位置差调整，确保 12 个吊点同步受力，吊带分布见图 4。该布置既能利用高强纤维吊带的柔性特性抵消沉箱姿态微小偏差，又通过“双吊钩对称受力”避免吊架扭转，适配复杂海况下的吊装姿态调整需求。

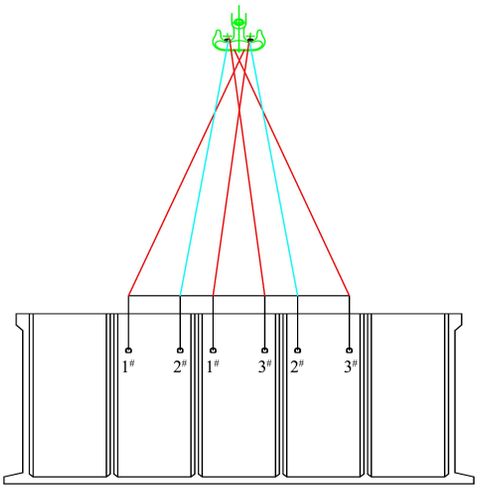


图 4　吊带分布

Fig. 4　Sling distribution

2　沉箱起吊

沉箱出运利用临近已建码头，沉箱通过气囊从预制场纵横移至码头前沿，需要对出运码头结构进行整体稳定性、基床及地基承载力进行核算。根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》[7] 及 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》[8]，结合已建码头的地质勘察和施工图设计资料，经核算出运码头抗滑、抗倾以及承载力均满足要求。同时经测量，出运码头前沿及安装现场水深为 8 m 左右，满足起重船最大吃水深度要求。

起吊时起重船垂直于出运码头驻位，船尾抛八字锚定位，前缆采用码头现有系船柱作为系缆桩，船头离开码头前沿 5 m 驻位。将吊带与吊架连接，起重船主钩连接对应吊带，副钩连接中间钢丝绳。起重船起钩将吊架吊起至沉箱顶面合适高度，无需沉箱顶部人工操作，通过调节副钩，依靠吊架两侧吊钩的自身重力，插进沉箱预埋孔中。

沉箱共有 12 个吊孔，吊钩数量较多，吊钩入孔难度较大，部分吊钩通过调节起重船副钩还难以入孔。经过试验，采用在吊钩上提前系辅助绳，在地面由人工指挥机械适当施加拉力，使吊钩得以顺利入孔，从而将吊架与沉箱进行连接。吊架挂好后施工人员检查吊索具以及吊钩情况，检查无异常后进行试吊。

起重船逐渐增加吊力，双钩起吊总质量达到 500 t，停 5 min，无异常后再增加起吊质量，起重人员可乘坐高架车对吊带及吊架进行检查，确保每根吊带和吊钩都受力，如果发现有吊带未绷紧，重新进行吊带挂钩。如无异常，依次增加质量达到 700、900、1 000 t，直至将沉箱吊起，离开地面 20 cm 距离，离开地面应静止 5～10 min，观察吊孔、吊索具、吊架及沉箱整体是否有变化，同时观测吊钩应力监测值，查看吊钩受力情况，如有异常现象，立即停止。自动挂钩吊架无需沉箱顶部人工操作，即可实现吊架与沉箱的连接，有效避免人员高空作业的风险，保障施工安全。

3　沉箱安装

由于安装位置距离出运码头较近，起重船直接通过绞锚调整船位，移船至安装位置进行安装，移位过程中起锚艇配合进行锚位调整。起重船共有 8 个锚机(前 5 后 3)，安装过程中保证至少有两口锚处于下放状态，保证沉箱起吊后船舶的稳定性。后续沉箱安装过程中，可系缆至沉箱上预埋的系缆环上。

起重船通过绞锚向安装位置移动，根据沉箱安装位置不同，起重船现场站位稍有差别，吊距可根据沉箱安装位置以及起重船驻位做适当变幅调整。待沉箱稳定后，带动起重船锚缆，使沉箱大致就位于基床预安装位置。测量人员提前在陆上做好施工基线放样，以便于确定第 1 座沉箱安装位置。测量控制采用沉箱上 4 个角点预埋管，安装 360°棱镜，陆上全站仪观测控制，吊装全过程沉箱上无人作业，可有效防止人员落水。

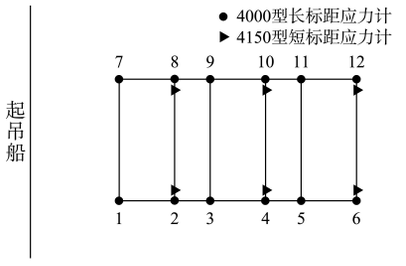
沉箱就位后，缓慢匀速下放，沉箱通过预留

进水孔进行压水下沉。下放过程中保证内外水位差不大于 1 m，以保证吊钩及吊架处于受力状态，防止脱钩。当下放到沉箱底部距离抛石基床顶面约 30 cm 时，起重船停止下放吊钩，测量人员对沉箱进行精确定位。定位时，测量人员用全站仪观察沉箱的四角位置和轴线偏差，随时向起重指挥人员提供偏差情况，由起重人员通过指挥起重船调整沉箱的位置。起重船利用自身移位及船上的调节钢缆，在人员的指挥下调整沉箱的精确位置及角度。当沉箱的位置符合要求后，继续放下起重船吊钩，将沉箱平稳放置在基床上。

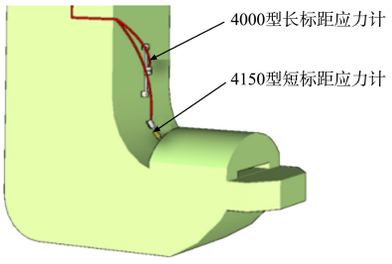
沉箱坐底后，测量人员采用全站仪观测沉箱安装偏差，如偏差过大，超出规范要求，起重船起钩吊起沉箱，重新安装，直至安装合格。安装合格后起重船通过调节副钩，使吊架自动脱钩，主吊钩吊起吊架完成吊装，开始进行下一个沉箱安装。脱钩无需沉箱顶部人工和潜水员水下操作，也无需其他船舶配合，即可实现吊具与沉箱的分离，能够保障施工安全，同时也提高了沉箱安装的施工效率。

4　施工监测

为了掌握沉箱吊装时 12 个吊钩的应力情况，在吊钩上布置传感器，进行沉箱吊装过程中的吊钩应力监测，监测数据实时传输到计算机应力监测系统；吊钩监测点应力计布置及安装见图 5，共布设 4000 型长标距应力计 12 个，4150 型短标记应力计 6 个。



a) 监测点应力计布置



b) 应力计安装

图 5　吊钩监测点应力计布置及安装

Fig. 5　Layout and installation of stress gauges for hook monitoring points

4000 型长标距(10 cm)应力计经过多年的工程实践检验，是一款性能稳定、可靠度高的传感器产品，4000 型应力计吊钩斜面处；吊钩计算书显示吊钩弧度处应力值最大，为了尽可能监测吊钩的最大应力，4150 型应力计安装于紧靠弧面的侧面位置。

通过对沉箱吊装过程中的吊钩应力进行监测，应力监测值能够准确反映沉箱吊装的起吊阶段、吊装阶段、入水安装 3 个阶段的吊钩应力，通常起吊阶段时间较短，吊钩应力增长较快；吊装阶段吊钩受力较为稳定；入水安装阶段时间较长，吊钩应力逐渐减小，且存在一定波动。吊钩应力预警值按照 4000 型长标距应力监测值不大于 260 MPa 控制。每个吊钩对应相应的吊带，吊钩应力监测值同时能反映吊带的受力情况，在首件沉箱起吊试吊阶段，12 个吊钩存在受力不均匀的情况。2#、5#、8#吊点吊钩应力值超过应力预警值 260 MPa，11#吊点吊钩应力值接近预警值，而其余吊点的吊钩应力值均偏小，2#、5#、8#、11#吊点吊钩受力相对于其他吊钩显著增大，沉箱吊具存在 4 钩受力集中现象。

试吊装监测数据表明，沉箱吊装亟须对吊带长度进行调节，以平衡各吊钩之间的受力。经过研究并现场试验，适当调整吊带在起重船吊钩的受力位置点，使每根吊带绷紧，通过调节吊带长度平衡吊钩间的受力均匀性。调整后经连续 5 次施工监测，调整后的吊钩最大应力值均满足小于应力预警值 260 MPa 的要求，确保了吊装过程的安全与稳定。调整前后吊钩应力值对比见表 1。

表 1　吊钩应力值对比

Tab. 1　Comparison of hook stress values

应力计	调整前吊钩应力/MPa	调整后吊钩应力/MPa				
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
4000-1	21. 66	85. 65	75. 50	96. 66	67. 09	70. 05
4000-2	337. 89	198. 57	182. 95	201. 15	189. 13	206. 19
4000-3	54. 12	120. 90	100. 89	108. 05	99. 70	90. 28
4000-4	20. 01	76. 70	80. 70	83. 83	91. 32	100. 58
4000-5	302. 05	206. 96	192. 96	197. 62	188. 47	163. 82
4000-6	35. 21	110. 23	95. 29	90. 01	91. 21	90. 65
4000-7	15. 94	94. 39	75. 79	78. 95	77. 20	74. 29
4000-8	313. 62	254. 80	233. 55	242. 44	251. 98	210. 99
4000-9	25. 03	60. 16	74. 03	75. 33	58. 25	66. 88
4000-10	29. 86	58. 97	52. 54	69. 61	57. 51	61. 55
4000-11	255. 11	219. 65	237. 91	196. 90	217. 64	197. 63
4000-12	20. 13	55. 93	54. 47	70. 20	54. 13	70. 06

5　施工测量

传统沉箱定位安装方法为测量人员使用手持全球定位系统(Global Positioning System，GPS)，在沉箱角点上观测坐标偏差后，把偏差报给指挥人员，由指挥人员对吊船进行指挥移动沉箱[9]。沉箱初安装后，测量人员再另外架设棱镜杆给岸上人员观测，岸上通过全站仪复核。

360°棱镜可在水平方向测量从任何方向入射的信号[10]。为实现安装过程中沉箱上的无人化作业目标，采用 360°棱镜控制技术进行沉箱安装定位。在沉箱预制时，顶端部位预留四周孔洞，确保 360°棱镜安装位置，实现棱镜循环利用。在沉箱吊装前，将 360°棱镜固定于沉箱顶部预设安装位置。360°棱镜用于沉箱初安装后，岸上通过全站仪复核，而且安装 360°棱镜，不需要测量人员再另外架设棱镜杆给岸上人员观测，在确保最终安装精度的过程中，可提高工作效率，保证精度的同时，节省人力。

安装施工过程中，操作人员在远程通过全站仪实时追踪棱镜坐标，监控数据变化，指挥起重设备动态调整沉箱下放位置，保证精准就位，避免人为观测误差。沉箱安装后经测量，32 个沉箱安装轴线位置最大偏差 106 mm，最小偏差 0 mm，平均偏差 47 mm，满足 JTS 257—2008《水运工程质量检验标准》[11]要求的墩式沉箱安装轴线位置允许偏差 150 mm 的要求。该方法实现了全程数据化精准控制，实现沉箱上全程无人化操作，从根本上降低了人员作业安全风险，同时有效提升了安装精度与效率。

6　结语

1）经现场实测统计，采用机械化吊装方案，单个沉箱吊装时间仅需约 5 h，相较于传统穿销起吊方式的 9 h，施工效率提升 80%，在大幅压缩工期的同时，精简现场作业人员配置，有效降低人工与起重船台班成本，兼具显著的工期效益与经济效益。

2）该技术体系具备显著安全创新优势，研发的 12 点式新型沉箱吊架可实现全自动挂钩与脱钩作业，实现全过程沉箱顶部无人作业模式。通过在吊点吊钩布设传感器，实现 1 000 吨级沉箱海上吊装全过程应力实时监测，填补了该领域机械化吊装实时动态监测的行业空白。同时，依托 360°棱镜定位技术，实现沉箱上无人化操作测量，规

水运工程

避人员作业安全风险。

3）在安装精度控制方面，通过在沉箱预留孔洞安装 360°棱镜，结合全站仪实时坐标追踪与远程监控指挥，实现吊装过程的数据化精准控制，有效提升沉箱安装精度与施工质量稳定性。

4）该大型沉箱机械化吊装成套技术成功解决了 1 000 吨级海上构件吊装的技术难题，其形成的技术体系、工艺标准与应用经验，为国内沿海重力式码头及同类海上大型结构体吊装安装工程提供标准化、可推广的施工范式，具备良好的工程适用性与广阔的行业推广应用前景。

5）本文吊具主要由 12 个吊钩以及吊带组成，整体呈矩形结构，吊具受力均匀性控制是一大难点，建议后续类似工程项目持续优化起重船主吊钩与吊具的连接形式，以保证各个吊具的均匀受力。

参考文献：

[1] 苏劭德, 韩春龙, 刘培光, 等. 一种动力挂钩脱钩圆筒吊具的设计与应用[J]. 中国水运, 2019(2): 125-126.
Su Shaode, Han Chunlong, Liu Peiguang, et al. Design and application of a dynamic hanging and unhooking cylinder spreader[J]. China Water Transport, 2019(2): 125-126.

[2] 孙瑞谦, 潘滢. 新型沉箱吊具的设计[J]. 水运工程, 2016(11): 203-206.
Sun Ruiqian, Pan Ying. Design of new caisson lifting device[J]. Port & Waterway Engineering, 2016(11): 203-206.

[3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
CCCC First Harbor Engineering Consultants Co., Ltd. Handbook for design of sea harbour [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.

[4] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].
JTS 151-2011 Design code for concrete structures of port and waterway engineering[S].

[5] JTS 152—2012 水运工程钢结构设计规范[S].
JTS 152-2012 Code for design of steel structures in port and waterway engineering[S].

[6] 中交第一航务工程局有限公司. 港口工程施工手册[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd. Handbook for harbour engineering construction [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.

[7] JTS 167—2018 码头结构设计规范[S].
JTS 167-2018 Design code for wharf structures[S].

[8] JTS 147—2017 水运工程地基设计规范[S].
JTS 147-2017 Code for foundation design on port and waterway engineering[S].

[9] 梁旭清, 陈韶强, 马磊. 定位架、GPS 及 360°棱镜组合技术在沉箱安装中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2020, 27(3): 37-39.
Liang Xuqing, Chen Shaoqiang, Ma Lei. Application of positioning frame, GPS and 360 degree prism combination technology in caisson installation [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2020(3): 37-39.

[10] 王建成, 张志文, 赖忠良, 等. 360°棱镜安全监测定位精度分析及常数测定方法[J]. 广东水利水电, 2025(1): 31-35.
Wang Jiancheng, Zhang Zhiwen, Lai Zhongliang, et al. Analysis of 360° prism safety monitoring positioning accuracy and method of constant measurement [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2025(1): 31-35.

[11] JTS 257—2008 水运工程质量检验标准[S].
JTS 257-2008 Standard for quality inspection of port and waterway engineering construction[S].

（本文编辑 王璁）