重力墩式结构大型圆形沉箱吊装施工技术

张忠伟
（中交一航局第三工程有限公司）

摘　要：为提高重力式码头大型沉箱的安装效率与安全性，解决传统预埋吊环或人工穿销工艺存在的效率低、风险高等问题，依托红沿河核电厂二期取水围堰拆除及排水明渠工程，提出一种适用于 800~1 200 t 大型圆形沉箱的十二点自动脱钩吊装系统。该系统通过优化吊架结构、采用吊带索具与双钩协同作业，实现了吊装全程机械化与自动脱钩，有效解决了传统吊装方式在超大沉箱应用中受力不均、浮稳性差等技术难题。工程应用表明，该工艺将单座沉箱安装时间由 4 h 缩短至 2 h，施工效率提升一倍，同时显著降低了人员高空作业风险，为类似大型水工构件吊装提供了可靠的技术参考。

关键词：重力式码头；圆形沉箱；十二点吊装；自动脱钩

0　引言

传统吊装式沉箱安装工艺面临显著挑战。在起吊环节，需要起重人员在高处或复杂环境下配合进行人工穿销作业，操作本身风险较高；同时，该工艺受潮汐影响极大，必须在特定潮位窗口进行作业，极大限制了有效施工时间，导致效率低下。这两方面因素共同作用，使得施工安全风险增大，并严重制约了工程的整体效率和安全性。

与此同时，现有解决方案存在局限。虽然近年来出现了简易自动脱钩吊具[1]，但其普遍设计基于单个吊钩约 100 t 的理论荷载。若延用传统吊装常用的八点吊方案，其理论最大吊装能力仅为 800 t，无法满足重量 800~1 200 t 沉箱吊装需求。因此，要安全、高效地吊装此类重型沉箱，突破现有吊装能力的瓶颈，必须对整体吊架结构进行根本性的优化设计，以提升其承载能力和适应性。为解决吊装能力与安全效率之间的矛盾，本文通过对吊架结构系统性优化设计，开发出一套适用于大型沉箱的专用吊装系统。

1　工程概况

红沿河核电厂二期取水围堰拆除及排水明渠工程位于辽宁红沿河核电厂，其中取水口拦污网工程在拦网轴线位置设置 5 座圆形沉箱，沉箱为预制钢筋混凝土圆形结构，共计 5 个，分 2 种型号，A 型沉箱 2 座，B 型沉箱 3 座。沉箱顶标高为+4.5 m，底板为圆形。沉箱内部设 2 道十字形隔墙。为降低沉箱重心，沉箱隔墙顶部设置 4 个 1.5 m×1.5 m 开孔，沉箱基本信息见表 1，沉箱吊装信息见表 2。

表 1　沉箱基本信息统计表

型号	数量/个	高度/m	方量/m^3	浮心高度/m	压水高度/m	沉箱吃水/m	定倾高度 m 值	干舷高度/m
A	2	15.5	365.55	6.39	2.45	13.1	0.21	2.4
B	3	11.5	256.60	5.11	0.90	10.4	–0.19	1.1

表 2　沉箱吊装信息统计表

型号	直径/m	高度/m	构件重量/t	粘结力/t	吊架重量/t	吊带重量/t	总重量/t
A	10.4	15.5	945.89	22.61	60	6	1 034.50
B	9.4	11.5	671.07	19.00	52	4	746.07

2　吊架设计结构

2.1　设计结构概述

本工程采用自动脱钩吊架，主要由吊钩、吊架主体（包括吊耳板、拉杆、撑杆、翼板、主梁、立柱等）组成。吊架整体为轴对称圆形骨架结构，由 12 根主梁及其间撑杆构成。本次结构优化在原八点吊架基础上对称增设 4 个吊钩，使吊点增至 12 个、沿圆周均匀分布。在单钩构造与 100 t 设计荷载均不改变的前提下，通过吊点数量的增加实现总承载能力的线性扩展，理论额定起重量由 800 t 增至 1 200 t。

每根主梁一端固定于吊耳板，另一端连接立柱；吊耳板通过滚轴与吊钩铰接，吊钩钩头部位

焊接有凹槽垫块以增强咬合性能。吊钩通过翼板与拉杆相连，拉杆另一端与圆盘铰接，圆盘沿立柱滑动。起吊时，通过提升圆盘处吊点，拉动拉杆带动吊钩内收，实现自动脱钩。自动脱钩吊架结构示意图见图 1。

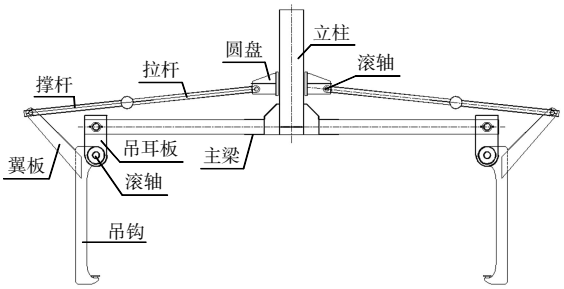


图 1　自动脱钩吊架结构示意图

2.2　设计结构验算

在吊架设计过程中，主要针对吊架主杆件弯矩、轴力、应力，耳板、吊钩、吊孔周边应力，混凝土局部受压、混凝土受冲切承载力等进行验算[2]。经验算吊架、吊钩等受力均满足要求，吊钩 MIDAS 模型分析图见图 2。

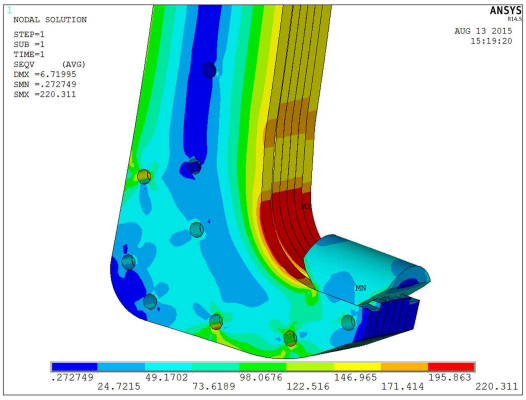


图 2　吊钩 MIDAS 模型分析图

2.3　起吊原理

起吊原理[3]采用主吊钩与索具钩协同作业的方式，其中主钩通过钢丝绳与耳板相连，负责吊装主体结构。索具钩则通过钢丝绳连接拉杆的导向杆端吊点，通过调节其牵引与放松控制拉杆的竖直角度变化，进而带动吊钩翼板实现旋转。实际操作时，索具钩放松使吊钩收紧，从而吊起沉箱进行安装。安装完成后，索具钩拉起使吊钩张开，实现吊具与沉箱的自动分离，整个摘、挂钩过程实现全自动化与机械化操作。

2.4　吊索具选择

考虑到沉箱重量达到 1 000 t，结合周边资源最终选择 1 艘 3 000 t 起重船。吊带连接方式如图 3 所示，3 根单根 42 m 长 200 t 吊带(挂在前钩钩头上 1、2、3 点位)、3 根单根 82 m 长 350 t 吊带(挂在后钩钩头上 4、5、6 点位)。由于 2 组吊带长度差 1 m，导致 2 个钩头竖直高度差约 0.5 m，可以通过调整 2 个钩头高度进行安装。采用 Revit 软件对每根吊带进行模拟，3 000 t 起重船前后钩间距为 3.66 m。

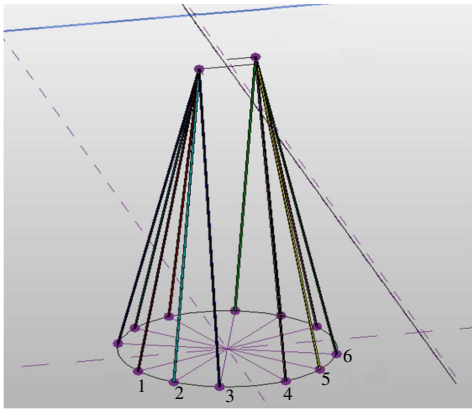


图 3　A 型沉箱吊索具挂钩示意图

3　吊架吊装施工

3.1　吊钩封钩

本次选用的 3 000 t 起重船有 2 个钩头，为有效保证安装效果，在安装前采用提前订制好的 ϕ90 mm 圆环钢丝绳(内径为 3.66 m)对前后 2 个钩头进行封钩，保证 2 个勾头间距小于 3.66 m，避免吊带之间的长短差距加大。

3.2　沉箱起吊

沉箱起吊前，起重船主钩通过吊带连接吊架四角滑轮处，副钩则经钢丝绳连接吊架中间的圆盘吊点。待吊索具与吊架连接完成后，指挥起重船将吊架吊至沉箱顶面合适高度，并确保吊钩中心对准吊架中心。随后，通过抬高副钩使吊架吊钩由竖直逐渐张开，待所有吊钩均插入预埋吊孔后，缓慢下落副钩。确认无误后进行试吊，使沉箱抬离地面约 20 cm。

在沉箱起吊过程中，起重船采取分级加载方式，依次按 0→300 t→500 t→800 t→1 000 t 逐级提升，直至沉箱完全离地。加载至 500 t 后，安排高架车配合起重人员敲击吊带，确保各吊带均匀受力后再继续加载。每级加载后需静止 5 min，密切观察吊索具、吊架及沉箱状态，确认无任何异常后方可继续作业。安装合格后，指挥调节副钩

使吊架自动脱钩，随后依次进行沉箱装船作业。

3.3　沉箱装船及运输

沉箱装船作业采用 1 艘 5 000 吨级运输方驳进行海上运输。沉箱在甲板上由船尾舵楼向船头方向均匀布置，并遵循“由外向内”的起吊顺序。起吊时，沉箱平稳吊起后，通过带动起重船锚缆向后绞移，确保沉箱底部高出运输方驳约 1 m，随后缓慢匀速下放至预先标记的位置，以保证沉箱垂直、平稳安放。在运输加固方面，沉箱就位前由专人在其底部铺设 100 mm×20 mm 的木板，并在甲板纵横龙骨位置焊接 6 处高度为 500 mm 的工字钢牛腿作为加固结构。沉箱安装完成后，采用木方和木楔进一步填充加固沉箱与牛腿之间的空隙。本次运输航程约 40.5 n mile，船舶航速约 6 kn，预计航行时间为 6~7 h。

3.4　现场安装定位

起重船通过绞锚在运输方驳与安装位置之间移动，吊距可随沉箱位置及船舶驻位情况进行适当变幅。沉箱粗略就位后，开始缓慢匀速下放，过程中用预留在沉箱底板的进水孔进行压水下沉，严格控制内外水位差不超过 1 m，下放速度不大于 1 m/min。在吊装 A 型沉箱时，起重船吊重示数需保持不低于 948.18 t，以确保吊钩及吊架持续受力，防止发生脱钩。当沉箱下放至底部距离抛石基床顶面约 30 cm 时，起重船暂停下放，采用全站仪观测吊架和沉箱上的反光贴，实施精确定位。测量人员实时向起重指挥人员反馈偏差信息，据此指挥起重船对沉箱位置进行微调。

3.5　落地测量

为精准控制沉箱安装位置，先在沉箱顶部 4 个角点及吊架中间立柱处分别粘贴反光贴。由于沉箱安装方向有特定要求，测量时首先采用全站仪观测吊架中间立柱上的反光贴，初步确定沉箱圆心的大致位置；随后采用 2 台全站仪分别对沉箱顶部 4 个角点的反光贴进行跟踪，通过实时数据反馈控制安装轴线，确保沉箱定位准确，并用吊架中间立柱的反光贴进行位置复核，以保障安装精度满足要求。

沉箱坐底后，立即使用全站仪检测其实际安装偏差。若偏差超出规范允许范围，指挥起重船重新起吊沉箱，调整位置后再次安装，直至符合质量标准。安装合格后，起重船通过调节副钩实现吊架自动脱钩，随后转入下一沉箱的安装作业。

4　技术质量及安全控制措施

4.1　沉箱重量精准计算保证措施

经计算，A 型沉箱重量基本达到单个吊钩设计使用荷载极限，保证 A 型沉箱重量计算准确。

1）沉箱重量核算由传统的钢筋混凝土综合密度法改为分别计算钢筋和混凝土的重量。

2）沉箱重量核算过程中混凝土密度根据同条件养护试块实测，取 2.37 t/m^3。

3）混凝土方量取设计方量值，沉箱预制过程中，芯模进行缩尺，严格控制混凝土浇筑方量。A 型沉箱设计方量为 365.55 m^3，2 座沉箱实际浇筑方量分别为 362.8 m^3 和 363.3 m^3。

4）沉箱钢筋重量按照下料单计算，包含搭接长度及支撑钢筋等。经计算，单个沉箱重量为 946 t，混凝土综合密度为 2.59 t/m^3。

4.2　沉箱多点吊装施工误差控制措施

A 型沉箱属于首次采用十二点吊吊架进行沉箱吊装，需严格控制施工误差，以确保各点受力均匀及吊钩顺利入孔。

1）严格控制吊孔预埋标高及位置。由于吊孔提前安放在钢筋笼上，模板支立过程中，钢筋笼可能会整体偏移，控制难度较大。沉箱预制完成后，经现场实测吊孔标高最大偏差 1 cm，位置最大偏差 2.3 cm，满足要求。

2）严格控制吊架整体尺寸。吊架制作过程中，在测量放样、整体焊接及最终成型 3 个过程均对吊架整体尺寸进行复核。吊架制作完成后，经验收最大偏差 7 mm。单个吊孔与吊钩富余宽度 5 cm，理论上吊钩可以入孔。

3）吊带为厂家定尺制作，进场后对吊带长度进行严格测量复核，实测最大长度偏差为 1 cm，满足要求。

4）沉箱起吊过程中，吊船吊钩分级加载，重量由 0→300 t→500 t→800 t→1 000 t，直至沉箱完全离地。在加载至 500 t 后，现场配备高架车，对吊带进行敲击，确保各吊带均匀受力后，再继续加载。

4.3　沉箱吊装入水过程均匀进水控制措施

沉箱吊装入水过程中，需确保入水缓慢，各仓格进水均匀且与海面水位差不超过 1 m。

1）单个沉箱为 4 个仓格，每个仓格在底板设置一个 ϕ250 mm 进水孔，沉箱吊装前，检查每个进水孔，确保进水孔不被杂物堵塞。

2）下落过程采取双控，对进水速度进行计算，确保内外水位差不超过 1 m。经计算，下落速度不超过 1 m/min。

3）控制吊钩重量。下落过程中，实时监测起重船显示的吊钩重量。整个下落过程，吊钩重量不得小于 500 t。

4.4　狭窄作业面大型船机安全驻位保证措施

安装现场作业面狭窄，本工程沉箱安装均为大型船机，需采取措施保证船机驻位安全。

1）现场配备 2 艘 4 000 HP 拖轮，船舶驻位全程辅助，出现紧急情况由拖轮控制船舶，确保船机安全。

2）船舶由拖轮拖送至距陆上岸坡约 100 m 位置，停止继续前进，由起锚艇向陆上设置带缆点进行带缆，通过绞缆进出安装现场，以确保船机安全。

4.5　起重吊索具及船舶缆绳使用安全保证措施

整个安装过程中，使用的起重吊索具及船舶缆绳较多，需采取措施确保起重用具使用安全。

1）所有吊索具均进行理论计算。

2）新采购的起重用具均有出厂合格证，并进行自查。原有起重用具项目部内部已联合多部门进行完好性检查，并做好相应检查记录。

3）配备应急缆绳，施工过程中出现断丝等异常情况立即停止作业，进行更换。

5　应用效果

5.1　工艺创新

本工程采用十二点吊装工艺，突破了传统八点、四点吊装模式的限制，可满足 800~1 200 t 沉箱吊装需求。通过吊带索具的可伸缩性，有效解决了复杂起吊条件下受力不均难以定量分析的难题。在沉箱测量定位方面，创新性地使用反光贴进行定位，无需测量人员登沉箱作业，显著提升了施工安全性与效率。

5.2　安全效益

在传统穿销作业中，每座沉箱均需起重工人乘坐吊篮进行穿销、拔销，受潮水影响大、安全风险高。本工艺实施过程中，起重工人无需登高作业，仅通过调节起重船副钩即可实现吊钩入孔与出孔，全程无需人工辅助，极大地降低了作业风险。

5.3　效率提升

传统穿销方式安装单座沉箱需 4 h，且受潮汐制约明显。本次应用将单座沉箱安装时间缩短至 2 h，沉箱的安装效率提升一倍，工期控制更加可靠。

6　结语

本文针对 800~1 200 t 大型圆形沉箱吊装技术瓶颈，设计并成功应用了一套十二点自动脱钩吊装系统。通过吊架结构优化、吊带索具配置与双钩协同机械化作业，实现了沉箱吊装过程的安全、高效与精准控制。该技术为同类大型水工预制构件吊装施工提供了新思路与实践依据，具备良好的推广应用价值。后续可进一步开展吊架及沉箱受力仿真研究，优化吊点布置，拓展吊架对不同尺寸、不同重量沉箱的通用适配能力。

参考文献：

[1] 孙瑞谦. 新型沉箱吊具的设计[J]. 水运工程，2016(11)：100–104.
[2] JTS 215—2018 码头结构施工规范[S].
[3] 胡龙武. 重力式沉箱起吊安装施工技术探讨[J]. 港工技术，2018，45(3)：88–92.