

# Discussion on Shipping Technology of Large Caissons from Airbag to Capsule Trolley

Sijun Guo Kangxing Sun

China Communications First Aviation Administration Second Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266071, China

## Abstract

The large caisson is built on the original floor, and the airbag is moved horizontally and longitudinally to the rear end of the export platform, and then transferred from the airbag to the capsule trolley via the slope transition section. The top is lined with wooden rows, which successfully solves the construction problems such as sanding at the bottom of the large caisson and transportation of the airbag to the capsule trolley, laying a solid foundation for subsequent construction.

## Keywords

slope transition section; pushing steel bucket to dig sand; paving wooden row; airbag transfer to capsule trolley for shipment

## 大型沉箱由气囊转胶囊台车出运工艺技术探讨

郭思军 孙康星

中交一航局第二工程有限公司, 中国·山东 青岛 266071

## 摘要

大型沉箱在原地坪上建造台座, 由气囊纵横移运至出运台座后端, 经斜坡过渡段由气囊移运至胶囊台车上, 期间采用装载机顶推钢斗掏沙、胶囊台车顶部铺垫木排, 成功解决了大型沉箱底部掏沙、气囊转胶囊台车出运等施工难题, 为后续施工奠定了坚实基础。

## 关键词

斜坡过渡段; 顶推钢斗掏沙; 铺垫木排; 气囊转胶囊台车出运

## 1 引言

龙口港西港作业区 #5、#6 泊位工程为顺岸重力式沉箱结构, 共有沉箱 20 个, 其中原有沉箱 5 个, 接高沉箱 7 个, 新建沉箱 8 个。沉箱施工、出运工期为 2018.10.2-12.15, 工期非常紧迫, 须在出运线南侧原地坪上新建 4 个大型沉箱, 沉箱尺寸为 32.11 m × 15.95 (16.95) m × 20.8m, 重量为 4953.8t。施工前需铺垫底模支撑沉箱, 沉箱完工后, 底部需掏沙处理, 再由气囊纵横移运至出运台座后端, 经 2.5% 斜坡过渡段由气囊移运至胶囊台车上。因受胶囊台车顶升高度限制, 气囊移至胶囊台车上后无法直接出运, 需在沟盖板上铺垫一层木排, 从而解决胶囊台车顶升受限问题。

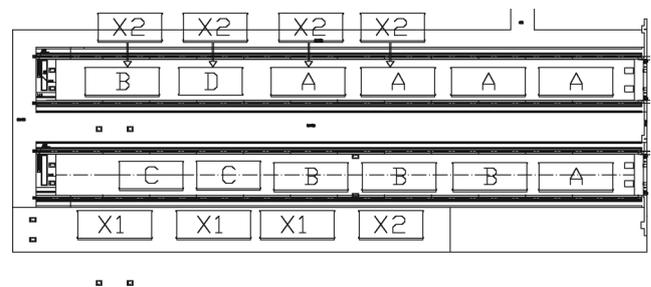


图 1 沉箱预制场平面布置图

## 2 课题研究内容

### 2.1 气囊转胶囊台车出运方案比选和确定

方案一: 传统方案

沉箱底模采用间隔铺垫工字钢, 为缩短施工周期, 淘汰

沉箱底部人工掏沙工艺，在工字钢顶部满铺方木，再铺垫硬质牛皮纸作沉箱隔离层。待沉箱强度达设计强度后，即可穿插气囊，气囊经纵横移运至气囊台车盖板上，在沉箱周边支垫钢板及枕木，抽出气囊后，在沟盖板下布置 16 台 600t 千斤顶及底座，且每 4 台千斤顶由 1 台油泵控制顶升，直至沉箱脱离枕木后，立即撤离沉箱支垫的枕木，再缓慢回落千斤顶，直至沉箱及沟盖板回落至台座上，撤离油泵、千斤顶及底座，最后气囊台车就位，开始顶升沉箱。

#### 方案二：优化方案

沉箱底模采用间隔铺垫工字钢，工字钢间填充细砂，顶部铺垫一层旧木胶板及硬质牛皮纸作沉箱隔离层。待沉箱强度达设计强度后，采用装载机顶推钢斗掏沙处理，掏沙效率为 1.5d/个，再穿插气囊，气囊经纵横移运至气囊台车盖板上后（气囊台车已经就位），在沉箱周边支垫钢板及钢管支墩，抽出气囊。吊移沉箱后方 2 块沟盖板，安装操控室顶升气囊台车，直至沟盖板离地 2cm 高，关闭水阀，且撤离操控室，采用装载机将气囊台车牵引出沟盖板。经气囊放水调平沟盖板后，在盖板上摆放木排。最后由卷扬机将气囊台车连同木排一起牵引至沉箱底部，重新安放操控室，继续加水顶升沉箱，直至沉箱脱离钢管支墩后，迅速撤离支墩，再缓慢放水直至滑块支撑在支垫上，台车顶升沉箱前移<sup>[1]</sup>。

表 1 方案一与方案二施工费用比选

方案一：传统方案						
序号	施工项目	单位	单价	数量	小计 (元)	备注
1	280mm 工字钢	t	4820	85.5	412110	新材
2	满铺 10×10cm 方木	方	3500	240	840000	新材
3	沉箱底部枕木	方	3500	28	98000	400 块 1.1×0.25×0.25m 方木
4	600t 千斤顶	个	28000	16	448000	
5	油泵	个	8000	4	32000	1 台油泵控制 4 台千斤顶
方案一：合计 (元)					1830110	
方案二：优化方案						
序号	施工项目	单位	单价	数量	小计 (元)	备注
1	280mm 工字钢	t	4820	85.5	412110	新材
2	细砂	方	121	672	81312	新材
3	木胶板隔离层	块	45	850	38250	旧材，沿用 3# 立交桥
4	人工掏沙	工日	200	60	12000	单个沉箱需 15 工掏完
5	装载机费	台班	1450	6	8700	
6	Φ420 钢管	t	1500	2	3000	旧材，沿用 3# 立交桥
7	支墩 C30 砼	方	300	6	1800	
8	木排	方	3500	31.6	110600	新材
方案二：合计 (元)					667772	

综上所述，因传统方案一施工费用较高、千斤顶顶升沉箱施工风险较大，且大型千斤顶采购时间较长，无法满足施工要求。拟选定优化方案二，既能节约施工成本，又保证施工进度及安全。

## 2.2 气囊转气囊台车出运工艺原理

沉箱由气囊经纵横移运至台车沟盖板上后，在沉箱周边支垫 2cm 厚钢板、23.5cm 钢管支墩及 1.5cm 木胶板，总高度为 27cm。抽出气囊后，台车顶升沟盖板离地 2cm 高，采用装载机将台车牵引出沟盖板，经放水调平沟盖板后，顶面摆放 20cm 厚木排，木排与沉箱间预留 4~5cm 缝隙。最后由卷扬机将台车及木排牵引至沉箱底部，台车继续加水顶升沉箱，直至沉箱脱离支墩 1cm 后，立即撤离所有支墩，此时台车顶升总高度为 10.5cm（含台车与沟盖板间 2.5cm 空顶高度），再将台车放水直至滑块支撑在支垫上，台车顶升沉箱前移，同时半潜驳 11 的台座支垫相应增高 20cm 木排，且需加固处理。待沉箱上半潜驳 11 就位后，台车继续加水顶升沉箱，直至滑块复位，方可放水撤离气囊台车。

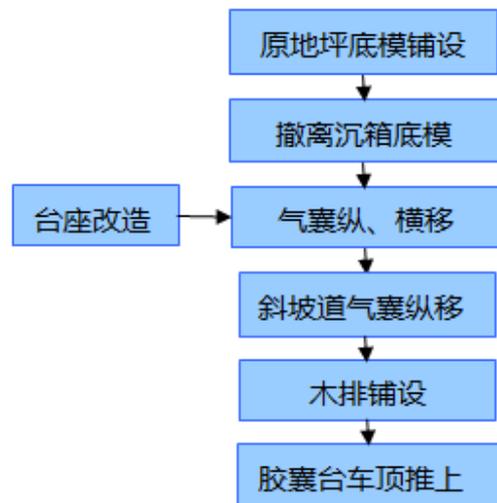


图 2 气囊转气囊台车出运工艺流程

## 2.3 气囊转气囊台车操作要点及其受力验算

### 2.3.1 原地坪底模铺设

#### (1) 底模铺设

沉箱底模采用 280mm 工字钢横向铺设，铺设净间距为 1.75m，工字钢间填充密实细砂，工字钢及细砂上铺垫一层 15mm 木胶板及硬质牛皮纸作沉箱隔离层，沉箱底板周边摊铺一层宽 48cm 防水丙纶作止浆处理。



图3 沉箱底模铺设图

### (2) 沉箱底模工字钢受力分析

最大沉箱重 4953.8t, 由 17 根 280mm 工字钢支撑, 单根工字钢长 19.35m, 净间距为 1.75m。

荷载计算:  $q=4953.8 \times 10 / (17 \times 19.35) = 150.6\text{kN/m}$

抗剪计算:  $Q=qL=150.6 \times 1=150.6\text{kN}$

截面抗剪强度:

$$T=3Q/2bh=3 \times 150600 / (2 \times 122 \times 280) = 6.6\text{N/mm}^2 <$$

$[T]=125$ , 满足要求。

### 2.3.2 沉箱底模撤离

沉箱底部采用装载机顶推钢斗掏沙处理, 顶推钢斗装置由装载机、钢桁架、钢斗三部分组成, 三者间均设置阴阳卡槽, 由  $\Phi 25$  高强螺栓连接。为便于施工操作, 直接在装载机斗内焊接两组由 2cm 厚的  $15 \times 15\text{cm}$  钢板组成的卡槽, 中间打设  $\Phi 27\text{mm}$  孔, 卡槽间距 800mm, 便于连接长 6m 宽 800mm 钢桁架。钢桁架主梁采用双 8[ 槽钢焊接, 中间采用 8[ 槽钢作支撑及斜撑, 共需 3 组, 总长 18m。钢桁架前端连接钢斗, 钢斗底板采用 1cm 厚钢板, 肋板采用 2cm 厚钢板, 后端采用双 12[ 槽钢焊接而成, 钢斗长 1.3m 宽 1.5m。掏沙时先采用 1 组 6m 长钢桁架使用装载机顶推掏沙, 再依次采用 2、3 组钢桁架顶推掏沙, 施工进度为每个沉箱 1.5 天。待细砂清除干净后, 即可穿入气囊顶升沉箱, 直至沉箱脱离工字钢后, 再由装载机撤出工字钢, 当沉箱向前滚动时, 安排人收拾木胶板并摆放整齐。



图4 装载机顶推钢斗掏沙

### 2.3.3 沉箱纵横移出运方案

沉箱纵横移选用  $\Phi 1\text{m}$  超高压气囊, 壁厚为 10mm, 出厂检验承压能力为 0.36MPa, 许用压力为 0.30MPa, 正常使用压力为 0.2-0.25MPa, 安全阀限压值取 0.35MPa, 气囊正常工作高度 H 为 30cm, 承载面宽:  $B=(\pi D-\pi H) / 2=1.1\text{m}$ 。

#### (1) 沉箱纵移

气囊  $\Phi 1\text{m}$ , 有效工作长度 16.95m, 工作压力: 0.25MPa。气囊起重高度为 0.3m 时, 承载面宽 1.1m。气囊每延米承载力  $250 \times 1.1 = 275\text{KN}$ , 每条承载力  $275 \times 16.95 = 4661.25\text{KN}$ , 气囊数量  $49538 / 4661.25 = 10.6$  条, 为保持沉箱的稳定性, 应随时保持有 14 条气囊支撑的状态, 加上接应气囊 5 条, 共需 19 条气囊。气囊在未充气情况下, 宽度为 1.57m < 1.75m, 满足施工要求。

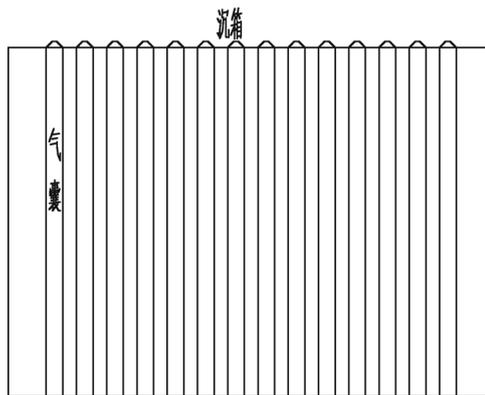


图5 气囊纵移布置

#### (2) 沉箱横移

气囊  $\Phi 1\text{m}$ , 有效工作长度 32.11m, 工作压力 0.25Mpa。气囊起重高度为 0.3m 时, 承载面宽 1.1m, 每条气囊承载力  $275 \times 32.11 = 8830.25\text{KN}$ , 气囊数量  $49538 / 8830.25 = 5.6$  条, 为保持沉箱的稳定性, 应随时保持有 7 条气囊支撑的状态, 加上接应气囊 4 条, 共需气囊 11 条。

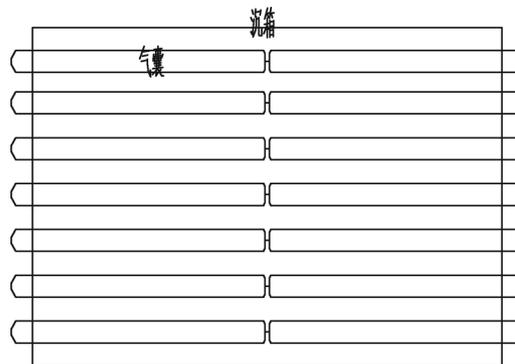


图6 气囊横移布置

### (3) 沉箱底部支墩选用及布设

沉箱底部支墩采用高 235mm 的  $\Phi 420\text{mm}$  钢管，管内上下焊接 2 层  $\Phi 20$  钢筋，并浇筑 C30 砼。施工时先在沉箱周边铺垫宽 1.1m 厚 2cm 钢板，钢板上铺垫 2 排钢管支墩，支墩顶部铺设一层 15mm 厚木胶板，支墩布设完成后，即可放气抽出气囊，进行气囊纵横换位。待气囊换位后，采用绳索直接将钢管砼支墩撤出，将其滚运至下道换位处，施工搬运较方便。



图 7 钢管支墩制作



图 8 钢管支墩浇筑砼



图 9 钢管支墩支撑

原地坪地基为回填碎石碴层，普夯碾压后，经地基检测地基承载力特征值均为 480KPa，地基上再浇筑 20cm 厚 C25 砼面层。本工程沉箱共支垫 108 块支墩，每块支墩受力为 458.7KN。

$\sigma = N/A_n = 458.7 \times 10^3 / (3.14 \times 0.21 \times 0.21) = 3.31 < 12.5 \text{ N/mm}^2$ ，满足要求。

支墩底座压力荷载通过钢板传递到面层后，再经面层传递至回填土石方基面（混凝土垫层扩角取 45 度），支墩地基

承载力验算：

$$N/A_d \leq Kf_k$$

式中 N—支墩传至钢板的轴心力设计值，取沉箱压力值 49538kN

$A_d$ —钢板基础的底面积，取 115.43m<sup>2</sup>

$f_k$ —地基承载力标准值，按砼基础上回填碎石碴土分层碾压后地基承载力  $\geq 480\text{KPa}$

K—调整系数，混凝土取 1.0

$49538/115.43 = 429.16\text{KPa} < 480\text{KPa}$ ，地基承载能力满足施工要求。

### 2.3.4 气囊转胶囊台车出运台座改造方案

根据气囊出运要求，斜坡过渡段坡度比宜 2.5%，为便于出运，气囊转胶囊台车出运台座由转换平台段、斜坡过渡段、胶囊台车顶升段 3 部分组成。其中转换平台段、斜坡过渡段处理前，先在台车沟内预埋  $\Phi 108$  钢管，钢管内穿插胶囊台车牵引钢丝绳，钢管坡度根据钢丝绳实际坡度而定。每根钢管采用 2 组 10# 工字钢进行加固处理，钢管间焊接密实，两端砌筑加气砖封堵后，再分层回填石碴。待石碴回填完成后，在布置支墩位置浇筑宽 1.5m 高 70cm C30 砼圈梁，圈梁砼强度达 75% 后，转换平台段、斜坡过渡段即可分层回填石碴，石碴经碾压完成后，再浇筑 20cm 厚 C30 砼面层。最后在斜坡过渡段与胶囊台车顶升段衔接部位凹槽处填充 22cm 厚石粉，并浇水碾压密实后，方可进行气囊滚运。



图 10 转换平台段



图 11 斜坡过渡段



图 12 气囊台车顶升段

气囊滚运至沟盖板上时, 气囊方向与沟盖板方向垂直, 气囊正常工作起重高度为 0.3m, 承载面宽 1.1m, 沟盖板宽 1.65m, 则每块盖板承载力  $250 \times 1.1 \times 1.65 = 453.8\text{KN}$ 。

盖板两端搁置在管沟壁上, 板按简支受力计算, 均荷载  $q=453.8/2.8=162.07\text{KN/m}$

钢筋砼沟盖板相对受压区高度

$$\xi = \frac{f_y A_s - f'_y A'_s}{f_c b h_0}$$

式中:  $A_s$ -- 盖板钢筋的截面面积为  $3236\text{mm}^2$

$A'_s$ -- 盖板钢筋的截面面积为  $402\text{mm}^2$

$f_y=f'_y$ -- $340\text{N/mm}^2$

$f_c$ --C40 砼  $19.5\text{N/mm}^2$

$b$ -- $1650\text{mm}$

$h_0$ -- $100-(15+10/2)=80\text{mm}$

$\xi=340 \times (3236-402)/(19.5 \times 1650 \times 80)=0.37 < \xi_b=0.544$

截面抵抗矩系数:

$$\alpha_s = \xi(1 - 0.5\xi) = 0.37 \times (1 - 0.5 \times 0.37) = 0.3$$

$$M_0 = f_c \alpha_s b h_0^2 + f'_y A'_s (h_0 - a')$$

$$= 19.5 \times 0.3 \times 1650 \times 80 \times 80 + 340 \times 402 \times (80 - 15)$$

$$= 70.7\text{KN.m}$$

气囊滚运至沟盖板上时为短暂设计状况,  $\psi=0.95$ ; 结构安

全级别为 I 级,  $r_0=1.1$ ; 结构系数  $r_d=1.2$

$$M = 1.1 \times 0.95 \times 0.0456 \times qL^2$$

$$= 1.1 \times 0.95 \times 0.0456 \times 162.07 \times 1.65 \times 1.65$$

$$= 21.03\text{KN.m}$$

$$M = 21.03\text{KN.m} < M_0/r_d = 70.7/1.2 = 58.9\text{KN.m}$$

### 2.3.5 气囊纵横移牵引地牛及预埋件受力分析

牵引力公式  $F=fQ$ , 其中  $f$  为气囊与地面滚动摩擦力取 0.04,  $Q$  为沉箱重量

$$F=0.04 \times 4953.8=198.15\text{t}。$$

本沉箱移运的横移和纵移均由 4 部卷扬机完成, 规格为 25t, 绳速 11m/min, 卷扬机通过 10 倍率滑轮组对沉箱进行牵引, 每台卷扬机牵引力为 250t, 2 台合力达 500t, 出运速度为 1.22m/min。

地牛及其预埋件受力计算

(1) 斜坡  $i=2.5\%$ ,  $a=1.43^\circ$

$$f_1=4953.8 \times \sin a=123.56\text{t}$$

$$f_2=4953.8 \times \cos a=4952.26\text{t}$$

$$f_{\text{磨}}=f_2 \times 0.04=198.09\text{t}$$

如需要反拉  $F=123.56+198.09=321.65\text{t}$

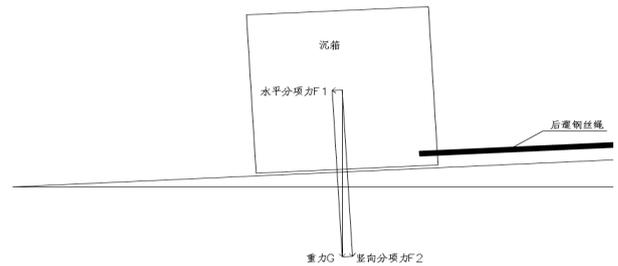


图 13 斜坡上沉箱重力 G 分解

(2) 根据一般后溜力  $f_1=123.56\text{t}$ , 选用  $\Phi 65$  钢丝绳,  $6 \times 37(a)$  直径为 65mm(公称抗拉强度 1670Mpa, 纤维芯)钢丝绳最小破断拉力为 2328.4KN, 最小破断拉力总和为  $2328.4 \times 1.226=2854.6\text{KN}$ 。使用双根, 安全系数  $K=268.4 \times 2/123.56=4.6$  倍。

如沉箱需往回反拉, 反拉力  $F=321.65 < 536.8\text{t}$ , 满足要求。

(3) 25t 卷扬机采用  $\Phi 40$  钢丝绳作为牵引用, 钢丝绳的破断力为  $0.33 \times 40 \times 40 \times (1670/1000) \times 1.226=108.1\text{t}$ , 安全系数  $=108.1/25=4.3 > 4$ 。

(4) 地牛结构计算

$$\text{地牛自重 } G=3.5 \times 3.0 \times 2.5 \times 2.3=60.4\text{t}$$

$$\text{斜坡最大后滞力 } P=321.65\text{t}$$

$$\text{地锚受拉后的被动土压力 } T=P \times \cos a \times 0.5=160.77$$

( $f=0.5$ )

$$G+T > P \times \sin a \times 3 (\text{安全系数 } K \geq 3)$$

地牛结构设计满足要求。

(5) 地牛吊鼻受力计算

本工程每座地牛上预埋 2 个  $\Phi 70$  圆钢吊鼻。

当吊环埋入方向与吊索方向基本一致受力时, 单个吊环

钢筋截面面积可按下列式计算:

$$\begin{aligned} A &= 3F / 2nf_y \\ &= 3 \times 321.65 / (2 \times 2 \times 210 \times 10^6) \\ &= 114.88 > 38.46 \text{cm}^2 \end{aligned}$$

选用  $\Phi 70$  圆钢做吊鼻满足施工要求。

### 2.3.6 气囊转胶囊台车铺垫木排方案

#### (1) 铺垫木排施工流程

牵引台车、沟盖板至沉箱底座外→铺垫木排→牵引台车、沟盖板、木排至沉箱底部→台车顶升沉箱



图 14 铺垫木排

#### (2) 铺垫木排操作要点

①待气囊滚运至台车顶升段且支垫完成后,进行胶囊台车注水,当台车顶升盖板脱离地面 2cm 后,关闭注水阀,采用装载机将台车、沟盖板牵引出沉箱底座外。

②依次打开台车水阀,放水调平沟盖板,调平后依次摆放 20cm 厚木排,采用卷扬机将台车、沟盖板、木排缓慢牵引至沉箱底部。

③台车继续注水顶升沉箱,当沉箱脱离枕木后,立即撤离所有枕木,然后缓慢放水直至沉箱回落由台车垫块支撑,此时沉箱离开台座地坪 270mm (木排厚 20cm+ 台车垫块支撑 70mm),台车顶升沉箱前移至半潜驳 11 坐底。

## 3 工艺实施效果

### 3.1 气囊转胶囊台车出运实施效果

本工程沉箱底部采用装载机顶推钢斗掏沙,大大缩短施工工期,且掏沙完成后均满足陆上气囊出运要求。气囊经转换平台、斜坡过渡段、胶囊台车顶升段后,采用木排成功实现气囊转胶囊台车出运难题,且出运过程中,沉箱平稳,施工安全可靠。



图 15 沉箱纵横移



图 16 铺垫木排后沉箱顶升

### 3.2 实践中的经验、教训

(1) 沉箱底模采用铺垫工字钢,中间填充密实细砂,顶部铺设旧木胶板,底部掏沙时采用装载机顶推钢斗掏沙等优化工艺,平均每个沉箱只需 1.5 天,使用人工约 15 工日,装载机 1.5 台班,节约大量施工成本,同时大大缩短施工工期。

(2) 沉箱底部支墩采用钢管砼支墩,节约大量木材成本,且钢管砼支墩可直接滚运,搬运方便。

(3) 本工程沉箱纵横移通过转换平台段、斜坡过渡段、胶囊台车顶升段,合理利用原有地坪基础,并将原部分台座进行简单改造,成功将不同高度的出运台座由气囊转胶囊台车出运,节约大量台座建造费用,为后续预制场改扩建提供参考。

(4) 本工程沉箱由气囊转胶囊台车出运,主要通过在沟盖板上铺垫 20cm 厚木排及 15mm 厚竹胶板,成功解决胶囊台车顶升高度不够,摒除了大型千斤顶顶升困难等施工难题,为后续沉箱陆上气囊出运提供借鉴。

## 4 效益评估

传统方案采用间隔铺垫工字钢,顶部满铺方木,气囊转运至气囊台车台座上后,采用600t千斤顶顶升工艺,施工费用为183.01万元;优化方案后采用间隔铺垫工字钢,中间填充密实细砂,顶部满铺木胶板,采用装载机顶推钢斗掏沙,气囊转运至气囊台车台座上后,在气囊台车上铺垫木排,施工费用为66.78万元。两方案相比较,本工程采用的优化方案共节约116.23万元。同时工艺优化后,施工进度满足业主工期要求。

## 5 结语

本工程大型沉箱由气囊转气囊台车采用装载机顶推钢斗掏沙、钢管砟墩支撑、斜坡过渡段、沟盖板上铺垫木排等优

化工艺,成功解决了沉箱底部掏沙难、枕木搬运难、不同高度的出运台座由气囊转气囊台车出运难等施工难题,同时大大缩短了施工工期,保证了施工进度,实现了大型沉箱由气囊转气囊台车施工安全、环保、高效、低耗的目标。

实践证明大型沉箱由气囊转气囊台车出运工艺是非常成功的,对类似工程具有较高的推广应用价值,亦为沉箱陆上出运施工提供了一种成功的创新方法,是对传统工艺施工技术的一项重大突破,这对提高沉箱出运水平具有重要意义,它的社会效益和经济效益是巨大的。

## 参考文献

- [1] 中交水运规划设计院编著.港口工程混凝土结构设计规范[S].1999(6).