

· “长江南京以下12.5 m深水航道建设”专栏(15) ·



## 长江下游感潮河段 超长护底软体排铺设关键技术

孙卫平<sup>1,2</sup>, 张才俊<sup>2</sup>, 莫建波<sup>2</sup>

(1. 中交上海航道局有限公司, 上海 200136; 2. 上海交通建设总承包有限公司, 上海 200136)

**摘要:** 通过研究和改进大型铺排船移动式桁架门吊吊装混凝土联锁片施工设备、超短基线水下排体定位技术和水下软体排成型状况探测技术等关键技术, 提高了超长护底软体排铺设的施工效率, 实时动态精准定位排体铺设过程中水底位置, 检测排体水下平整度及搭接情况, 满足了工程需要。

**关键词:** 感潮河段; 移动桁架式铺排船; 超短基线; 旁扫声纳

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0001-07

### Key placing technology for super-long bottom protection mattress in tidal reaches of the Yangtze River

SUN Wei-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Cai-jun<sup>2</sup>, MO Jian-bo<sup>2</sup>

(1. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200136, China;

2. Shanghai Communications Construction Contracting Co., Ltd., Shanghai 200136, China)

**Abstract:** Researching and improving the large placing ship's mobile truss gantry crane hoisting interlocking pieces of construction equipment, super-short base line underwater mattress locating technology and underwater mattress molding status detecting technology, etc., we can raise the efficiency of super-long bottom protection mattress's laying construction, with real-time dynamic positioning precision of mattress position during the laying underwater, and detect the mattress's underwater smoothness and state of overlapping, to meet the needs of the project.

**Key words:** tidal river; mobile truss type placing ship; super-short base line; side scan sonar

长江南京以下12.5 m深水航道一期工程位于长江下游太仓至南通河段, 受潮汐影响, 涨落潮水位变化较大, 水流动力条件复杂, 呈现多滩多槽格局, 地形冲淤变化敏感, 为典型的感潮河段区域。因此, 工程实施必须遵循“固滩、稳槽、导流、增深”的治理思路, 守护洲滩关键部位, 稳定深槽, 形成稳定的航道边界。根据本工程数学模型计算、物理模型试验以及长年来对长江航道整治的成功经验, 整治建筑物建成后, 靠近航

道侧余排边缘均有一定程度的冲刷。为防止余排边缘的冲刷对整治建筑物的稳定造成影响, 保证整治建筑物结构的安全, 白茆沙整治建筑物采用超长软体排护底, 最长达500 m左右, 最大铺设深度达30 m<sup>[1]</sup>。

现有常规的施工设备单张软体排铺设耗时超过24 h, 过长的铺设时间加上铺设过程受涨落潮流速的严重影响, 容易造成软体排损坏或者搭接不能满足要求, 影响软体排铺设质量和工程进度,

收稿日期: 2014-01-02

作者简介: 孙卫平(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事围海造堤、吹填施工管理工作。

甚至会造成河床的冲刷,增加工程造价。且软体排铺设过程主要是采用GPS定位技术结合定位软件进行铺设过程质量控制,实际反映的是施工船舶的移动轨迹,软体排的实际位置无法直观的体现。铺设完成后浮标倒垂法、水下探摸法等检测方法工效低、准确度差。

如何进行超长软体排的快速精准铺设,其施工船机设备、检测手段等能否满足和达到设计要求的软体排铺设质量及护底进度要求,是整治工程能否顺利实现其整治功能的关键。本文解决了在长江下游感潮河段超长软体排铺设施工过程中为满足进度、质量、施工安全等要求所产生的一系列技术难题,主要包括研发新型混凝土联锁片吊安设备来缩短排体铺设时间、采用超短基线技术来实时动态精准定位排体铺设过程中水底位置、采用旁扫声纳检测排体铺设完毕后水底平整度及搭接情况。

## 1 大型铺排船移动式桁架门吊吊装混凝土联锁片施工设备

### 1.1 总体构想

通常护底软体施工专用铺排船在甲板上设置2台起货克令吊用于吊安混凝土联锁片,克令吊每台每次最多可吊2片混凝土联锁片,克令吊机在经过升降、变幅、回转3个动作后无论工人施工多么熟练,现有的施工船舶都已无法再提高安放效率,不能满足联锁片高效铺排作业的需要,特别是对于超长软体排并且受涨落潮影响较大的施工区域,软体排铺设将受到一定的制约。吊机施工效率低成为软体排铺设船施工效率的瓶颈,为此技术人员考虑增加铺排船起重吊点,在保证安全可靠的情况下增加铺排船同时吊装的能力,采用吊重器具把运输船上竖向摆放的4排混凝土联锁片同时吊运到软体排上安装,以提高联锁片吊运安装速度。

由上述思考设想总体技术方案为:在船舶甲板内的一定区间设置移动式桁架起重架构,架构

上布置4台电动葫芦作为起重元件,每台电动葫芦的额定起重量和克令吊实际吊重相当,从运输船中把混凝土联锁片驳运到所需指定工作面,同步连续完成联锁片的吊安任务,这样可以大大提高吊装速度。

### 1.2 技术方案

#### 1) 研究、设定装备的边界条件。

环境温度:  $-10 \sim 45$  °C; 工作风速: 20 m/s; 船舶纵/横倾:  $2^\circ \pm 5^\circ$ ; 锚泊风速: 55 m/s。

#### 2) 研究、设定装备的周边条件。

辅助船舶舱容平面:  $50 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ ; 联锁片平面/质量:  $5 \text{ m} \times 4 \text{ m}/4 \text{ t}$ ; 施工作业平面:  $42 \text{ m} \times 37 \text{ m}$ 。

#### 3) 研究、设定装备的技术参数。

起重重量:  $10 \text{ t} \times 4$  台; 起升速度: 2.9 m/min; 葫芦运行速度: 13.5 m/min; 小车运行速度: 6 m/min; 大梁跨距: 42 m; 辅梁跨度: 16 m; 起重梁船舷外伸距: 5.5 m; 葫芦行走距: 37 m; 电制: 380 V/50 Hz。

#### 4) 研究装备引用规范和标准。

《船舶与海上设施起重设备规范 2007》<sup>[2]</sup>, 《起重设备法定检验技术规则 1999》<sup>[3]</sup>, 《2006 钢制海船入级与建造规范》, 《起重机设计规范 GB 3811—2005》。

#### 5) 研究、制定装备施工作业的总体要求。

规定装备对混凝土联锁片一次吊安过程(起重葫芦由船舶舳部起始,完成一次吊运后回到船舶舳部。)的时间小于10 min。

#### 6) 装备构建布置。

装备的起重桁架和桁架支撑结构见图1。

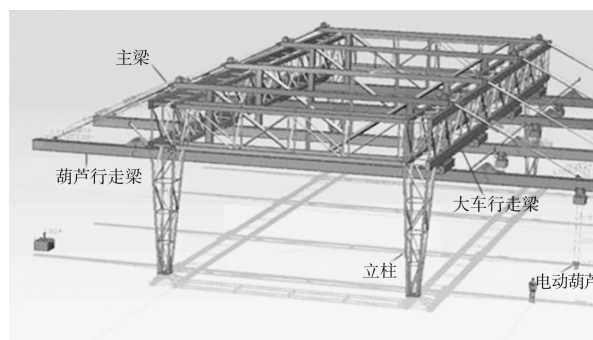


图1 装备的起重桁架和桁架支撑结构

主、辅梁组成起重架构框架,底部为羊角式立柱,支撑上部架构,大车、葫芦行走来保障起重吊运的施工作业面的全覆盖。

### 1.3 实施效果

本项目装备能够同时四点起吊并且同步平行搬运,适用于装载4排平行排列混凝土联锁片的运输船舶一起进行铺排作业,根据现场统计,新工艺单排8片联锁片吊安耗时约10 min,常规克令吊耗时约12.5 min,软体排铺设平均施工效率提高25%左右,在吊安过程中电葫芦运行平稳、安全,混凝土联锁片吊安质量良好。

4个行走装置平行排列并且分别由4个独立的控制系统控制,可以根据铺排要求以及铺排复杂程度分别控制4个行走装置的运动,从而达到提高铺排效率、协调性以及精度的目的。装置的纵向行走和横向行走均有变频电机驱动,提高了行车的可操作性,减少了起重机运行时的冲击,使得动作更加平稳安全。装置的支腿和大梁采用桁架结构,不仅降低了自身质量,而且还使装置的受风面积小,从而提高了铺排作业的稳定性及恶劣工况的适应性(图2)。

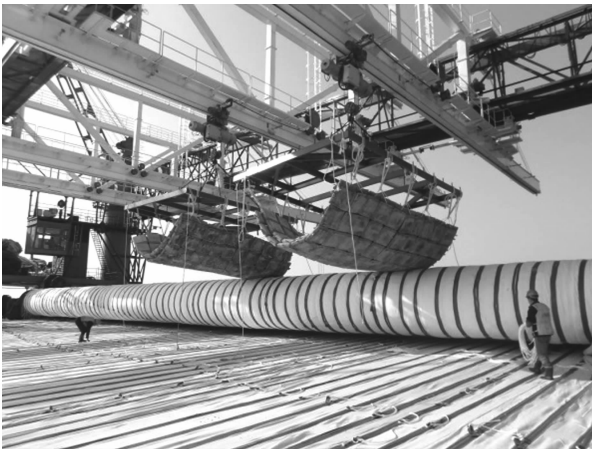


图2 桁架式吊安系统

### 1.4 装备特点

1) 进行铺排作业时,通过控制折叠梁绞车将可折叠梁放至水平位置,实现舷外作业;在船舶拖航时,通过控制折叠梁绞车将折叠梁收回,保

证拖航时安全可靠度。

2) 2根纵向大梁的两端以及可折叠梁的外端均安装有限位开关,从而保证施工的安全。

3) 行车的起重葫芦安装有超载限制装置,在起重量达到设定值时,超载保护装置立即动作,切断电动葫芦的控制系统,保证施工的安全。

4) 行车装有遥控装置,当操作人员需要在船甲板面操作时,可以切换到遥控控制模式,操作人员在船甲板面就可以对行车进行控制,大大提高了行车的可操作性。

5) 此装置的纵向行走装置、横向行走装置以及起重电葫芦上都装有摄像头,借助于起重机安装的闭路电视监控系统可观察到吊重运输的整个过程,从而更好地控制吊重的空中位置。

## 2 超短基线测量水下排体检测技术

### 2.1 工艺原理

长期以来软体排铺设过程主要是采用GPS定位技术结合定位软件进行铺设过程质量控制,实际反映的是施工船舶的移动轨迹,软体排的实际位置无法直观的体现。因此必须研究出实时测定软体排位置的定位技术,确保超长软体排的施工质量。

超短基线水下排体检测技术是铺排船上的接收机接收来自水下信标发出的信号,测出各接收机与水下信标之间的斜距值,通过相应的短基线解算关系获得水下信标相对于接收机的三维位置坐标,数据处理后可显示出排体入水后的实际排边线位置(图3)。

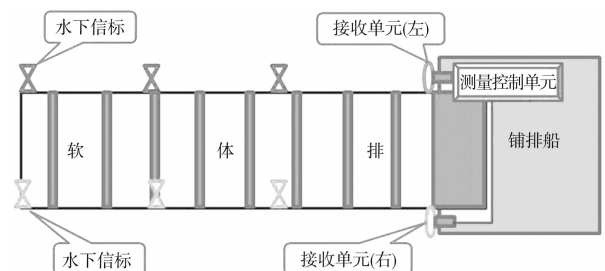


图3 超短基线铺排施工示意图

## 2.2 系统的组成及相关配套设备

### 2.2.1 系统的组成

该系统由数据发射系统、数据采集系统及数据处理系统3部分组成(图4)。正常情况下,超短基线发射接收机一次可同时接收水下6个信标的定位信息,能满足常规生产施工的需求。

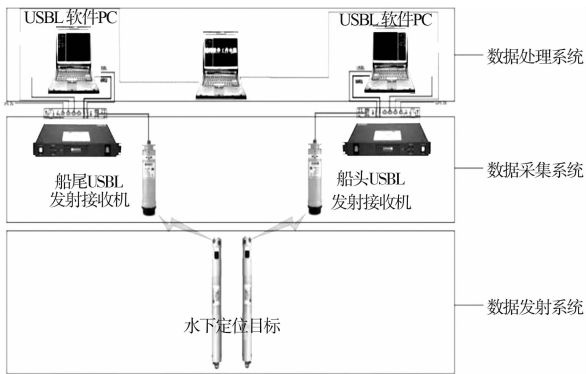


图4 系统结构示意图

### 2.2.2 系统配套设备

系统配套设备及相应作用如表1所示。

表1 系统配套设备

名称	数量	作用
天宝 SPS 882 型双频 GPS 背包	2 套	主要用于超短基线测量系统的校准
天宝 SPS 852 型双频 GPS	2 套	用于铺排软件及超短基线测量系统的定位
高精度光纤罗经 OCTANS	1 台	为系统提供高精度的艏向数据
水下信标	6 组	数据测量

## 2.3 实施方案

本次方案实施共准备6个水下信标,每2个水下信标为1组,每组信标间隔30m左右。

施工前先对超短基线系统进行调试、校核,并将采集的收据与RTK背包式GPS测量的数据进行对比,当数据稳定且误差满足要求时开始排体检测。

排体入水前,将水下信标绑在排体两侧合适位置,同软体排一起入水,数据基本稳定后,采集数据。当第3组水下信标要入水时,利用水下释

放器释放回收第1组水下信标,将其固定至下一段要铺设的排体上,依次循环使用。每组信标反馈的数据均可准确定位该段排体边线位置,为后续铺排时及时调整预留搭接量提供数据指导。同时可结合相邻排体的同点位坐标进行计算,精确计算出排体间搭接宽度,以检测是否满足设计要求。

## 2.4 实施效果

该技术在本工程中重点应用于长江南京以下12.5m深水航道整治一期工程白茆沙整治建筑物I标段头部潜堤、S1丁坝深水流急区域排体铺设质量的抽查检测。现以S1丁坝30#、31#排体铺设检测应用数据说明现场的实施效果。

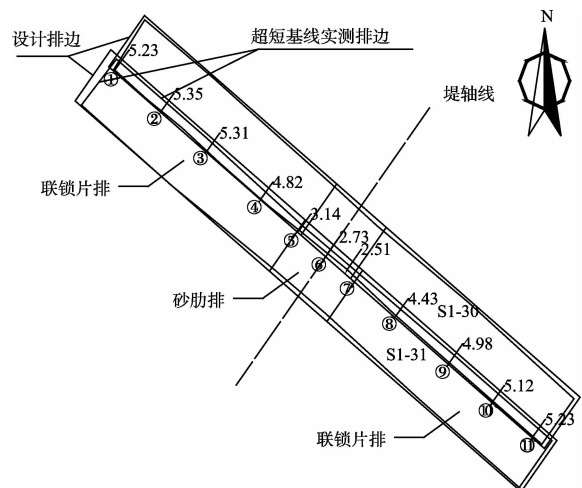
S1丁坝30#排排体规格为35.5m×335.7m,砂肋排长37m;31#排排体规格为35.5m×341.7m,砂肋排长43m。排体铺设时相邻排体预留搭接宽度为8.5m,以确保入水后搭接宽度不小于5m。

### 2.4.1 系统校核

铺排前用RTK背包式GPS测量对超短基线测量系统进行校核,测量误差最大18.9cm,平均误差15.6cm,满足现场检测精度要求。

### 2.4.2 现场排体检测记录

现场数据记录如图5所示,相关数据见表2。



注:信标系法:联锁片排内偏排边约50cm,系绳长约20cm;砂肋处信标系法:内偏1.5m,系绳长约50cm。

图5 现场数据记录

表2 超短基线测量数据分析

部位	31# 实测排宽	30# 实测排宽	实际搭 接宽度	备注
	33.5	33.5	6.2	
混凝土	33.9	34.1	6.3	
联锁片排	33.9	34.0	6.3	通过计算,联 锁片排平均搭 接宽度为 6.0 m,砂肋 排平均搭接宽 度为 5.8 m, 均大于设计要 求 5.0 m
	32.7	33.9	5.8	
	32.1	34.6	6.1	
砂肋排	32.1	33.0	5.7	
	32.0	32.2	5.5	
混凝土	32.9	32.6	5.4	
联锁片排	33.0	34.4	6.0	
	33.1	33.8	6.1	
	33.2	33.3	6.2	

排号	实测混凝土联 锁片排宽平均值	实测砂肋 排宽平均值	实测 排长	平均搭接宽度
31#排	33.3	32.1	341.0	均大于 5.0
30#排	33.7	33.3	334.9	
31#排收缩值	2.2	3.4	0.7	
30#排收缩值	1.8	2.2	0.8	

注:超短基线测量系统比对误差均小于 0.16 m,精度满足要求;30#排第 1 组信标距排头 2.5 m,最后 1 组信标距排尾 2.5 m;31#排第 1 组信标距排头 2.5 m,最后 1 组信标距排尾 2.5 m;施测时间:2013-04-07—2013-04-09。30#排理论尺寸:宽 35.5 m,长 335.7 m;31#排理论尺寸:宽 35.5 m,长 341.7 m。

### 2.4.3 结论

1) S1 丁坝 30#、31#排铺设时,排体入水后,砂肋排平均收缩量为 2.2~3.4 m,最大 3.5 m;混凝土联锁片排平均收缩量为 1.8~2.2 m,最大 2.8 m。

2) 由图 5 及表 2 数据可知,相邻排体搭接宽度均大于 5 m,最小搭接宽度为 5.4 m,满足设计及规范要求。

3) 测量精度基本可以满足排体检测要求,可以指导软体排铺设施工。

### 2.5 技术创新点

1) 首次利用双系统接收机结构形式解决水下排体的位置测量;将常用的一个主机外配多个信标的测量模式进行创新改变,采用双主机配合多信标的方式解决了排体遮挡水下信标信号传输的问题。

2) 超短基线艏向信息提取方法及手段有所创

新:高精度的超短基线定位系统离不开高精度的艏向测量设备,利用铺排船双 RTK-DGPS 及自行编制的软件为短基线测量系统提供两路艏向数据,取代光纤罗经的投入,大大降低了系统的投入成本。

3) 超短基线测量系统校准工艺及方法有所改进:超短基线测量系统以动态校准为主,要求船舶能够自由航行,而铺排船船舶特点较难实现动态校准;在项目实施中,制作了校准杆,提高校准的精度与速度,利用双 RTK-DGPS 进行系统的校准,手段便捷,工艺简单,校准精度高。

4) 水下信标回收技术有所创新:在现场实施过程中,改进信标的安放与回收方法;重点对回收绳的类型、回收方式及栓系排体的方法位置进行了系统的应用测试。将涂塑钢绳更换为易浮起的尼龙绳并在绳上加小型浮球,避免回收绳被排体压住,造成回收困难。

5) 开发了基于超短基线测量系统的铺排施工控制软件,为动态、实时、准确地显示水下信标位置及施工提供保障。

6) 通过在不同工况(不同水深、不同水流、不同距离范围、不同潮位等条件)下试验,将回收数据与 RTK 背包式 GPS 测出数据进行比对分析,确保数据有效性,并验证了此方法的适用性。

7) 可实时取得水下定位信标的的数据,实时显示水下软体排实际排边线位置,与设计排边线对比,动态调整下一张排体铺设位置,可有效减少不必要搭接宽度,且杜绝出现脱开现象,避免补排,从而减少不必要浪费,节约工程成本,提高施工效率。

## 3 水下软体排成型状况探测技术

### 3.1 总体构想

长期以来软体排水下成型状态以及软体排搭接情况主要通过潜水员水下探摸方法来实现,由

于潜水员的水下探摸判断能力有限,无法精确的反映出水下软体排实际状态和搭接情况。超短基线测量技术、GPS定位等方法为事前控制,当软体排体入水铺设于水底后,这些测量技术就无用武之地。目前常规检测方式采用的是浮标倒垂法、水下探摸法,这些方法工效低、准确度差,鉴于护底软体排的特殊性为其事后检测提出了新的要求。

双频旁扫声纳系统是包括一系列全面整合旁扫声纳并使用 Chirp/CW 技术和高速通讯链路技术来获取高解析度声呐图像的系统产品,同时使用高低频采集数据,能清楚地反映整个测量区域海底地貌情况<sup>[4]</sup>。但由于旁扫检测技术是首次应用于软体排成型状态的检测,同时常规的旁扫检测方法存在定位不准、图像变形较大的问题,这就需要在技术上加以研究和改进,以确保所得成果的准确和图像的清晰。

### 3.2 检测方法

为提高水下排体检测的精度,采用 RTK-DGPS 定位方式,旁扫采用工作频率相对较高的 Kenlin 3000 旁扫仪。为了确保检测精度,在设备安装和扫测技术方面将进行一系列的技术改进:1) 将 RTK-DGPS 与旁扫拖鱼安装在同一个垂向测量杆上;2) 采用固定安装方式将旁扫拖鱼安装在测量杆上;3) 采用交叉重复扫测的方式,提高旁扫图像的辨识度。

如图 6 所示,将旁扫仪固定在测量杆下,吃水超过船舶的吃水上,其安装杆顶安装 RTK-DGPS 进行旁扫作业的精确测量定位。

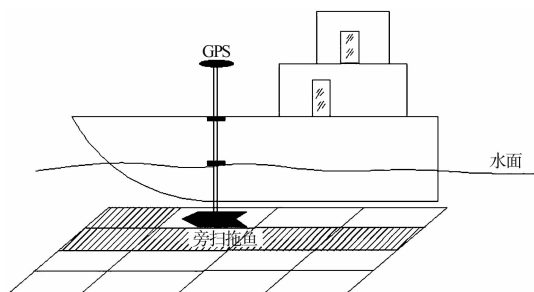


图 6 检测设备安装

## 3.3 检测工艺

### 3.3.1 系统校准

在进行旁扫测量前,参照施工区附近明显的地标进行旁扫影像比对测试,重点对相对距离、成图状态进行验证。相关参数见表 3。

表 3 Klein 3000 旁扫仪主要参数

工作模式	CW 技术, 单波束
工作频率/kHz	低频: 100; 高频: 500
脉宽/ $\mu\text{s}$	25 ~ 400
水平波束角/ $^{\circ}$	低频: 0.7; 高频: 0.21
垂直波束角/ $^{\circ}$	40
横截航迹分辨率/cm	2
沿航迹分辨率/cm	35
最大量程/m	高频: 150; 低频: 600
耐压水深/m	标配: 1 500
耐压水深/m	标配: 1 500
标配传感器	艏向传感器: 精度为 $\pm 0.5^{\circ}$ , 分辨率为 $0.1^{\circ}$ 纵横摇传感器: 精度为 $\pm 0.2^{\circ}$ , 分辨率为 $0.1^{\circ}$

### 3.3.2 坐标的比对

为确保旁扫测量图像定位的准确度,检测前须对投入使用的 RTK-DGPS 进行校对。将 GPS 置于已知的 GPS 控制点上,进行 10 ~ 15 min 的数据采集,在定位数据进度满足本工程检测要求后方可实施测量工作。

### 3.3.3 排体搭接区域检测

检测点或检测排体选择:在进行实船检测实施前,按 6% 的检测要求进行检测点的选择;根据软体排实际的铺设位置设计旁扫检测断面。每个检测点按纵横向交叉布线的方式进行扫测,每个检测点有 4 个扫测断面来确定。当要对一个检测面(搭接面)进行检测时,则采用双侧扫测的方式进行布线,如图 7 所示。

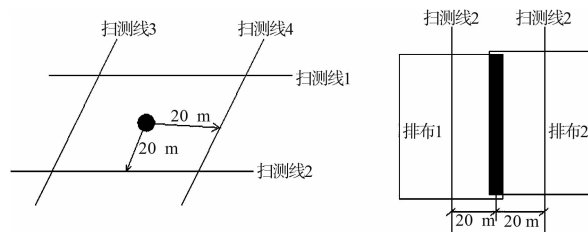


图 7 扫测线布设

图 7 中深色部分是需要检测的区域, 为保证检测影像的质量, 测线的长度将超出检测区 50 m 的范围。

为确保检测点的准确, 测线的布设须涵盖测点, 同时为便于比对判读, 单个位置的扫测范围不应少于 10 000 m<sup>2</sup>。图 8 是采用 Klein 3000 旁扫仪进行搭接扫测的影像图, 检测已铺设的 2 张软体排的搭接情况。如图 8 中白色箭头所示, 软体排排体的水下搭接宽度可通过图像进行判读, 采用 Klein 3000 旁扫仪的图像至少可以判读 0.25 m 精度的排体测量值。

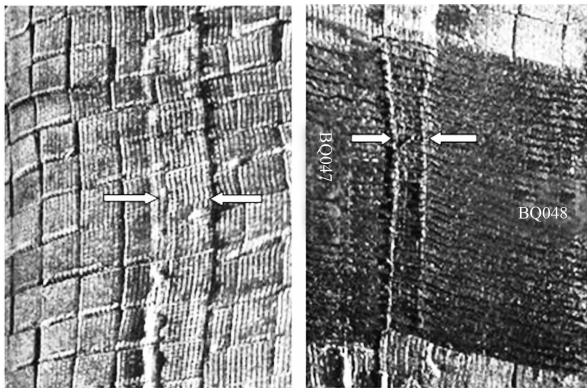


图 8 水下排体/扫测图

### 3.4 数据的采集与处理

利用 Sonpro 软件的实时数据采集与镶嵌技术进行软体排排体的检测, 利用软件的坐标显示与图像存贮功能实现排体位置的确定。

按照检测的要求, 扫测图中输出所需点的坐标, 根据两排边缘的坐标值计算其搭接宽度, 然后按要求进行相应的比对与判读。

### 3.5 实施效果

采用双频旁扫声纳系统进行海底地形地貌和水下软体排的扫测, 通过生成的旁扫影像图, 对水下软体排位置、成型姿态、软体排搭接等进行监控, 所生成的旁扫影像图(图 9)清晰, 满足对软体排检测的要求。

通过旁扫探测技术可以准确地将软体排铺设位置及与设计位置位移大小扫测出来, 给现场施工提供了指导, 对未达到要求的区域进行补铺, 保证了施工质量和精度。

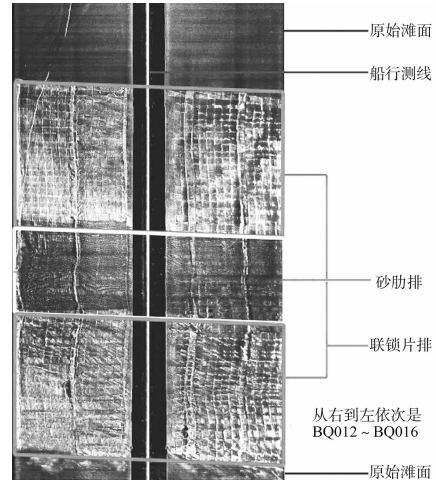


图 9 数据的采集与处理

## 4 结论

本工程首次在国内大型铺排船上研制了 4 个平行排列且独立控制的移动式桁架门吊装置, 实现了多块联锁片的同时起吊安装, 大幅提升了施工工效, 且采用了桁架吊放, 定位准确, 受风浪影响小, 施工安全可靠。超短基线测量技术能实时、准确测量排体的水下位置, 掌握排体入水后的收缩情况, 能实时地调整铺设位置保证软体排搭接宽度确保铺设质量。水下软体排成型探测技术可以准确地将软体排铺设位置及与设计位置位移大小扫测出来, 有效检测出软体排搭接情况, 给现场施工提供了指导, 保证了施工质量和精度。

所取得的关键技术研究成果, 丰富和发展了软体排护底铺设技术, 推进和深化了航道整治施工技术, 便于施工质量控制, 技术经济优势明显, 并可广泛应用于港口航道、海上人工岛、河道整治、防洪水利、水库等项目, 具有良好的应用前景和社会效益。

### 参考文献:

- [1] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交水运规划设计院有限公司. 护底施工图设计说明[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2012.
- [2] 中国船级社. 船舶与海上设施起重设备规范 2007[S].
- [3] 中华人民共和国船舶检验局. 起重设备法定检验技术规则 1999[S].
- [4] 蒋俊杰, 汤民强, 郑西来. 侧扫声纳系统在海底管道悬空调查中的应用[J]. 中国科技信息, 2008(14): 49-51.

(本文编辑 郭雪珍)