



航道整治铺排测量定位技术

陈存扩

(中交天津港航勘察设计院有限公司, 天津 300456)

摘要: 针对目前检测深水软体排沉排手段不足的情况, 提出一种检测铺排效果的新技术。采用多波束测深系统的水深格网与侧扫声呐生成的声图文件相结合的方式, 镶嵌得出排体沉排位置后使用超短基线测量系统对确定的排体坐标进行验证。该技术在长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程进行推广应用, 提高了工程检测效率及质量。

关键词: 软体排铺设; 多波束测深系统; 侧扫声呐系统; 超短基线测量系统

中图分类号: U 612.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0013-05

Mattress-laying measurement & positioning technology for waterway regulation

CHEN Cun-kuo

(CCCC Tianjin Port & Waterway Prospection & Design Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: In view of the lack of detecting measures for deepwater laying of the soft mattress, this paper presents a new detecting technology, which integrates water-depth grid of multi-beam bathymetric system and sound & image data generated by the side-scan sonar, and uses the ultra-short baseline measuring system to verify the determined mattress coordinates after getting the mattress's sinking and laying position. This technology has been applied to Phase II of 12.5 m waterway project of the Yangtze River downstream from Nanjing and improved the detection efficiency and quality of the project.

Keywords: laying of soft mattress; multi-beam sounding system; side-scan sonar system; ultra-short baseline measurement system

长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程口岸直水道整治工程 II 标段位于扬中河段, 主要包括潜堤、丁坝、护底带、护岸等, 其中丁坝及护底带需要铺设软体排。长江深水航道一期工程施工主要采用以下两种方式——浮标法结合潜水探摸确认和浮标法结合侧扫声呐扫测, 来确定沉排定位及搭接。但这两种方式都有很大的缺点: 定位精度低, 并且在水深变大、潮流变急时无法准确对软体排实施定位。与一期工程相比, 二期工程铺排面积更大、铺排数量更多、单张排布最长超过 200 m。对于施工方, 准确扫测出沉排的位置、确定软体排铺设的成果, 研究快速简便的检测技术势在必行, 这样既能加快施工又能减少排布冗

余量, 从而节约时间并降低人力物力成本。

水运工程质量检测主要采取常规方式^[1]。一期工程检测主要通过侧扫声呐扫测发现排布铺设完整及搭接符合要求, 并不能很好地解决二期工程的难题, 因而二期工程引用多波束扫测技术和水下超短基线定位。综合利用多波束测深系统、侧扫声呐、超短基线 3 种系统, 扬长避短, 从而在二期工程中快速准确地实现软体排沉排之后的定位检测。

1 工程河段概况

本工程位于镇江扬中河段, 落成洲岛屿将长江分为两部分, 北部为主航道, 南部为锚地及停

收稿日期: 2016-03-10

作者简介: 陈存扩 (1974—), 男, 高级工程师, 从事海洋测绘和工程测量领域工作。

泊区(图1)。扬中河段的口岸直水道为大型洲滩或沙体,分汊河段散沙发育。根据相关河道测量资料,落成洲左侧河道近岸水深7.0~15.0 m,河床高程-14.0~-5.0 m。落成洲右侧河道水深一般在8.0~18 m之间,河床高程一般为-10.0 m左右;落成洲洲头及洲体岸坡大部分进行了抛石护岸措施,岸坡形态相对较好,仅局部受江水冲刷影响稍有破坏。

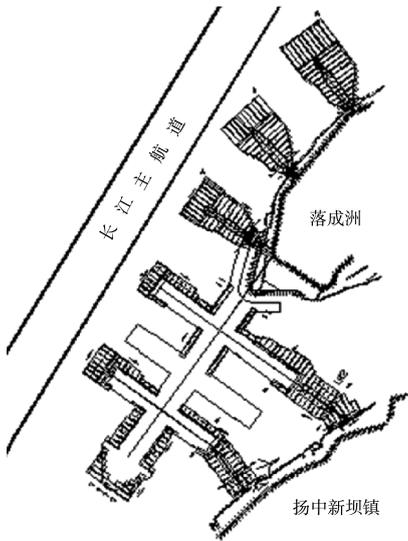


图1 口岸直水道铺排项目位置

1.1 潮汐

该工程潮汐性质属非正规半日浅海潮。潮位每日两涨两落,且有日潮不等现象。在径流与河床边界条件阻滞下,潮波变形明显,涨落潮历时不对称,落潮历时大于涨潮历时。

1.2 潮流

该工程河段落潮流速明显大于涨潮流速,落

潮流是塑造河床的主要动力。口岸直水道枯水期会出现涨潮流,汛期径流量较大,河段内基本上不出现涨潮流。据2012年11—12月测量,口岸直潮流平均流速0.79~1.68 m/s,最大流速超过2.3 m/s。

1.3 泥沙

该工程悬移质中值粒径0.005~0.022 4 mm,枯季涨潮平均含沙量0.04~0.086 kg/m³,落潮平均含沙量0.048~0.095 kg/m³;洪季基本未出现涨潮流,落潮平均含沙量0.01~0.143 kg/m³。

2 常规检测方法

1) 浮标法。在铺设过程中绑扎排头检测浮标、排中检测浮标和排尾检测浮标,沉排完成后对每幅排的浮标检测,从而确定排布的位置。该方式定位精度较低,潮流过急、水深过深对该方式的定位精度影响很大,并且涉及回收浮标,为避免影响施工,须单独检测每张排布,不能成批量检测排体。

2) 人工潜水探摸法。即通过潜水员下潜到河底来确定排布的位置。其定位思路和浮标法一致,施工效率更低;伴随着环境的复杂,潜水员作业危险变大,且容易被质疑探摸位置正确与否。

3) 水下摄影法。即人工潜水探摸法的升级版,通过潜水员携带摄像设备进行拍照,确保探摸得位置准确。但是它和探摸法的弊端一样,受水下环境的束缚很大,并且水深或者浑浊等其他因素导致可见度低时约束了摄影的实现。

以上3种常规检测方法的优缺点如表1所示。

表1 常规沉排检测方法优缺点

| 方法 | 效率/h | 精度 | 优点 | 缺点 | 适用性 |
|---------|------|----|---------------------------|---|----------------------|
| 浮标法 | 1.5 | 米级 | 检测效率尚可,成本低 | 检测精度受潮流和水深影响较大,大批量的排体检测难实施 | 浅水,小批量作业 |
| 人工潜水探摸法 | 8.0 | 米级 | 人为确认,真实地反映水下软体排铺设的情况 | 施工效率低,检测精度低;伴随着环境的复杂,潜水员作业危险变大,且容易被质疑探摸位置正确与否 | 水流缓,平潮期间作业 |
| 水下摄影法 | 8.0 | 米级 | 人为确认并伴有摄像,真实地反映水下软体排铺设的情况 | 受水下环境的束缚很大,并且水深或者浑浊等其他因素导致可见度低时约束摄影的实现 | 水流缓,水清澈,泥沙含量低,平潮期间作业 |

本工程的排布由 3 个区域（联锁块区、砂肋排区、联锁块区）组成，对于事后沉排的检测精度要求高，精确定位排布各区域的实际位置。具体内容如下：各区域与设计线覆盖关系，各区域的长度及不同排布的各区域的搭接宽度。为了节约人力物力，最大限度地降低费用、提高效率，需要采用更加适用的检测方法。而上述 3 种方式都有一定的局限性，不能解决该工程的铺排检测。

3 多波束测深系统、侧扫声呐系统、超短基线测量系统结合检测方法

3.1 系统简介

多波束测深系统是一种优化组合多种传感器的复杂系统，是高精度导航定位技术、高性能计算机技术、数字化传感器技术、高分辨显示技术、现代信号处理技术及其他相关高精尖技术的高度集成。与传统的单波束测深系统相比，实现了从“点-线”测量到“线-面”测量的跨度^[2]。

本次采用的多波束测深系统为美国产 Sonic 2024，该系统由发射接收换能器、MRU 姿态控制系统、数据处理器组成，系统分辨率 1.25 cm。其工作频率可在 400 kHz/200 kHz 之间任选，共有 256 个波束，波束开角在 10°~160°之间可调，测深深度可达 500 m。该系统通过连接平面定位系统，并经过相对位置关系的改正，得到精确的平面坐标和高精度的水下地形图。

侧扫声呐采用美国 EdgeTech 公司生产的 4 200 MP 多脉冲双频侧扫声呐，它根据回声探测原理来实现水下目标探测，换能器按照设定的频率发射声波，并得到相应的回波信号。水下不同介质、不同距离的回波信号强弱不同：一般情况下，硬的、距离近的、粗糙的、凸起的海底发射的回波信号强；软的、距离远的、平滑的、凹陷的海底反射的回波信号弱。换能器基阵通过模拟转换电路依据收到的水底各点回波信号的强度和先后顺序生成声图文件，以显示和记录水下的地形地貌。水下铺设的软体排与河床的介质不

同，明显更硬且裸露在河床之上，扫测时根据声波信号的强弱来区分不同区域，根据回波信号时间长短绘制声图文件，也就实现了对软体排铺设成果的检测。通过专业的声呐软件对获得的河床地形地貌声图文件进行分析，确定水下软体排铺设的完整性以及有无漏铺、断裂、叠排现象发生，在图中量测不同排体的搭接宽度并确定软体排的位置等信息^[3]。

超短基线测量系统主要由发射接收单元（俗称水声换能器）和水下应答信标组成。水声换能器探头里多个间距只有几厘米、按三角形布设的水听器（USBL）。每一个水听器，通过记录声波的发射时间和接收时间求得声波往返时间，通过测量该区域的声速求得水中传播速度，依据 $S=vt/2$ ，得出水听器到信标的距离；多个水听器接受回波信号的相位差可以帮助系统计算确定发射接收单元相对于船艏的方位角。超短基线的工作原理如图 2 所示，图中 1、2、3 为水声探头内的 3 个水听器。通过 1、2、3 点可以构建一个平面，水听器与目标物通过声波建立了 3 条超短基线，根据前方交会原理，建立相应空间解算方程，求解目标物的坐标（X、Y、Z）。对于地球上任意一点的空间位置，需要至少 3 个已知点才能进行求解，而实际上水声换能器探头内的水听器都多于 3 个。本工程使用的是 Sonardyne 公司生产的 Rnger USBL，其探头内装了 4 个水听器，组成的超短基线数量比 3 个多了 1 个冗余观测数据，通过多余数据的平差及校核，提高设备的系统定位精度。在声波覆盖（±90°）范围内，测距精度高于 0.2 m，可达到 2.75% 的系统定位精度。它兼容大多数测量软件和测量设备，在使用外部的高精度姿态和艏向系统时可以提高精度到 0.1%。

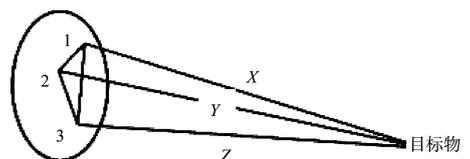


图 2 空间目标的定位原理

本工程的超短基线测量系统采用两对多的作业模式^[4]。两对多作业模式即2个水声换能器对应8个水下应信标。具体实施如下：在铺排船的船头和船尾各安装一个水声换能器，在即将铺设的排布边缘各特征点(联锁块排头、联锁块排与砂肋排的分界处，联锁块排尾部)布设水下定位信标，待整个排布落入水底稳定之后，测量布设好的水下信标位置，对铺设好的水下排体进行准确定位，将潜水回收设备用于下一张的排布，循环作业直至完成整个铺排工程(图3)。

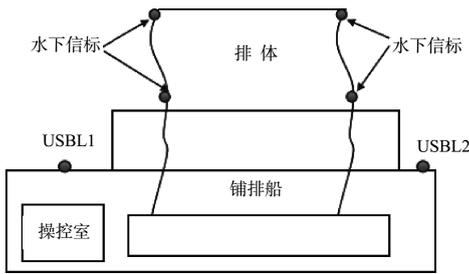


图3 超短基线指导铺排船作业

最终将上述水下信标定位信息输入到铺排软件(中海达施工定位软件)控制系统中，通过软件将坐标转换成施工坐标，在后处理及实时显示平台可以很好地监测排体在水下的位置信息，从而对铺排的施工过程进行监控。多波束测深系统以获得水下地形点的高精度三维数据(平面位置和高程信息)为主，水下地貌图像信息为辅。侧扫声呐系统可以获得更高分辨率的海底图像，更加清晰直观地展现海底地形地貌，但是其位置精度较低，且量测的水深数据不够准确^[6]。综上所述，两者的测量成果具有互补性，因此本文主要介绍如何将多波束的平面位置信息与侧扫声呐的图像信息相结合，确定江底软体排的精确位置。而超短基线是对排体的特征点进行精确定位，完全可以对确定的软体排位置及对上述两种方式相结合得出的沉排位置进行高精度校核。

3.2 系统结合检测实施

通过现场调查并根据第1张排布的检测手段和结果，结合分析现有设备情况的优缺点，制定如下水下软体排检测技术手段(图4)。

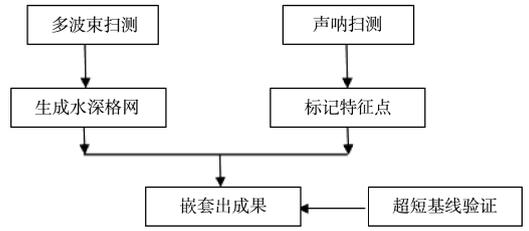


图4 排布扫测技术流程

1) 测线布设。

多波束测深系统的测线布设如图5中测线2、3、4所示，测线布设的要求不仅需要已将铺排布完全覆盖，还要保证相邻测线重叠区域达到50%以上。图5中排布长155.2 m，宽38.5 m，此处水深为12 m左右，布设测线间距25 m，Sonic 2024开角130°，使用0.3 m×0.3 m的水深格网。在3条测线全部测量完毕以后，在Qinsy软件的格网中查看水深数据是否完整，对缺少数据部分进行加密，确保之后的排布坐标提取更加精确。

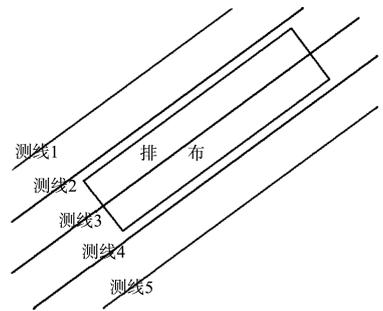


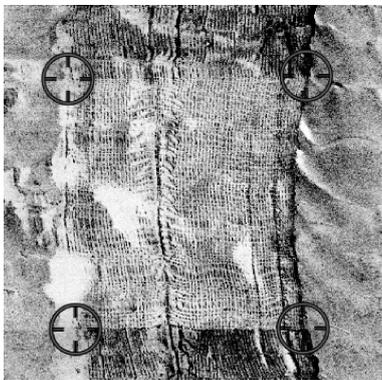
图5 测线布设

侧扫声呐系统的测线布设如图5中测线1、5所示，测线方向为从下游向上游，目的如下：①保持船舶以较小的速度行驶，这样，在一个发射周期内，声呐拖鱼沿拖拽方向行程很小，相邻发射波束扫描间隔在空间位置上很短，提高了成像分辨率；②减少船舶两侧受力，从而减小姿态的改正，避免由于姿态频繁变动引起的图像失真。测线布设于排布两侧30 m以外的范围，原因是声呐自身有一定的盲区范围。在测量过程中，保持TVG不变，以保证图像的灰度一致。由于拖鱼姿态的变化会对海底成像质量造成很大影响，因此应尽量减少风浪、潮流对拖鱼的影响，测量船航速保持稳定，船速以4 kn左右为宜。

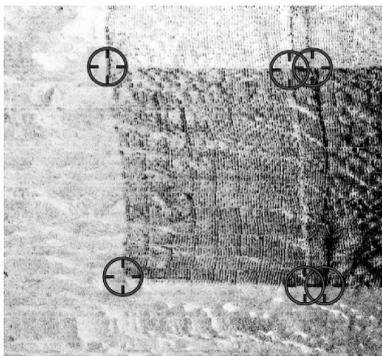
2) 数据处理。

使用多波束数据处理专用软件 Qinsky 进行处理, 在处理打假的过程中, 不建议使用滤波功能。水下排布铺设之后与原地面水深差距不会太大, 经过滤波处理后, 容易出现排布边缘水深失真的情况。处理结束后, 在格网 Grid 中对外业测量的水深数据进行排布轮廓勾绘, 通过调节色块勾绘排布轮廓。在铺设过程中, 如果铺设过程较慢, 将会导致排布边缘出现深坑; 通过多波束格网就可以将排布的精确位置勾绘出来。并非所有的水深格网都可以勾绘出完整的排布位置, 水底不平坦、回淤严重等多种因素导致排布位置不能完整勾绘, 此时须通过结合侧扫声呐来确定排布砂肋的精确位置。

侧扫声呐的影像清晰, 但位置却没有多波束测深系统精确, 因此通过使用声呐专用内业处理软件 Discover II 对声呐的数据进行回放处理, 使用 SonarWiz 对声呐数据进行影像拼接处理, 从中判读出其坐标位置 (图 6)。



a) 砂肋



b) 排尾

图 6 声呐扫测位置

通过 Hypack 软件内置格网转换功能, 将图 6 b) 侧扫声呐图形中提取的大地坐标转换为地方格网坐标, 每张排布的特征点会有多次的提取, 取多次坐标的最或是值, 作为最后的排布位置。

将图 6 确定的排布位置坐标与多波束格网色块图勾绘的排布位置坐标进行比对, 从而确定最终的排布位置。

通过长期的排布位置检测, 发现铺设完成的排布长度与宽度均小于排布的出厂加工长度, 垂直于水流铺设的排布排头侧易出现卷排现象, 所以在格网勾绘、声呐提取坐标过程中要多加注意。此外, 由于侧扫声呐本身定位精度有限, 所以经由侧扫声呐声图提取的绝对位置精度会比多波束格网中提取的坐标精度低, 但是经过处理的声呐图中的相对位置是准确的, 可以用来判断排布不同区域 (联锁块排、砂肋排) 长度及不同排布之间的搭接宽度。若两者之间绝对定位存在偏差, 则以多波束格网坐标为准, 对声图坐标进行偏移处理, 镶嵌拼接生成最终水下沉排位置 CAD 图。

该排布经过超短基线系统进行布控测量, 沉排位置由该系统计算得出, 与多波束测深系统和侧扫声呐系统结合检测的结果进行比对, 误差控制在 0.2 m 之内, 远小于沉排位置检测规范要求的误差 (1 m 以内)。

3) 排布检测常见问题^[7-8]。

① 撕排、叠排现象常出现于垂直水流方向铺设的排布。

② 排布倾斜现象常出现在浅水区。船舶在铺设过程中, 受潮位减小的影响, 船舶无法正常施工, 导致排尾偏离设计位置, 出现排布倾斜的现象。

4 结语

1) 利用多波束测深系统定位精度高的优势和侧扫声呐图形显示能力强的特点, 强强联合, 弥补短板, 提高了大批量排布检测工作的效率和定位精度;

2) 两者相结合获得精确的软体排沉排后的平面位置坐标, 经过超短基线的验证, 该检测方式可信度高, 为软体排铺后的检测提供了很好的方法。