# SeaBat 9001S 多波束系统及其应用

周丰年　张志林　杜国元

(长江水利委员会长江口水文水资源勘测局,江苏 太仓　215431)

【摘要】　与传统的单波束回声测深仪相比,多波束测深系统采用条带测量方式,可对水底进行全覆盖无遗漏扫测,在测量自动化、效率和精度方面都具有极大的优点。本文介绍了SeaBat 9001S 浅水型多波束及前视声纳系统在长江某水下抛石护底工程监理中的应用。

【关键词】　多波束　条带　水下抛石护底工程监理

## 1　前　言

20 世纪 70 年代出现的多波束测深系统,是在回声测深仪的基础上发展起来的。多波束测深系统在与航迹垂直的平面内一次能够给出几十个甚至上百个深度,获得一条一定宽度的全覆盖水深条带,所以它能够精确快速的测出沿航线一定宽度范围内水下目标的大小、形状和高低变化,从而比较可靠的描绘出水底地形地貌的精细特征。与单波束回声测深仪相比,多波束测深系统具有测量范围大、速度快、精度和效率高、记录数字化和实时自动绘图等优点,将传统的测深技术从原来的点、线扩展到面,并进一步发展到立体测深和自动成图,使海底地形完成得又快又好。这使水深测量又经历了一场革命性的变革,深刻地改变了海洋学科领域的调查研究方式及最终的成果质量。

90 年代后期,长江口某电厂煤码头由于长江河势发生很大变化,通州沙东水道深泓西偏南压,引起煤码头前沿水深大片刷深,并有逐年增大冲刷力度的趋势。由于河床变化引起主泓的逼近,局部地形引起的环流加剧和极易启动的底质露裸,造成煤码头前沿剧烈淘刷。为确保煤码头桩基的安全,保证电厂原料的供应和安全运行,对煤码头安全采取水下抛石护底工程措施。由于水下抛护是边施工边投入运行(受水流冲刷),为了指导工程施工和检测工程质量,工程监理过程中采用多波束全覆盖扫测技术,收到了预期的效果。

## 2　SeaBat 9001S 多波束测深系统

### 2.1　系统组成及其功能

多波束系统是由多个子系统组成的综合系统。对于不同的多波束系统,虽然单元组成不同,但大体上可将系统分类为多波束声学系统(MBES)、多波束数据采集系统(MCS)、数据处理系统和外围辅助传感器。其中,换能器为多波束的声学系统,负责波束的发射和接收,多波束换能器通过计算机指令,向下呈扇形发射声脉冲,声脉冲经水底反射或散射返回换能器,换能器的多阵列接收单元利用窗口(窄缝)原理接收信号,并形成一系列窄波束;多波束数据采集系统完成波束的形成和将接收到的声波信号转换为数字信号,将波束进行滤波后反算其测量距离或记录其往返程时间;外围设备主要包括定位传感器(如 GPS)、姿态传感器(如姿态仪)、声速剖面仪(CDT)和电罗经,主要实现测量船瞬时位置、姿态、航向的测定以及海水中声速传播特性的测定;数据处理系统以工作站为代表,综合声波测量、定位、船姿、声速剖面和潮位等信息,计算波束脚印的坐标和深度,并绘制海底平面或三维图,用于水底的勘察和调查。图 1 给出了SeaBat 9001S 系统的单元组成。

### 2.2　系统工作原理

SeaBat 9001S 利用超声波原理进行工作,工作方式分 9001 和 6012 两种。以 9001 方式工作时,发射声脉冲由探头上罐状发射器完成,每次激发 100°(垂直航迹方向)×1.5°(沿航迹方向)的扇形声信号,遇水底时被散射,散射信号由探头上半月形一端水听器组合成 60 道接收阵,接收角为 1.5°(垂直航迹方向)×15°(沿航迹方向),每次发射(ping)接收阵可同时接收到 60 道 1.5°×15°的测深数据(如图 2 所示)。以 6012 方式工作时,发射和接受信号均由半月形探头完成,能在显示屏上看到水下的地貌特征。SeaBat 9001S 型多波束测深系硬件的主要组成如图 1。

收稿日期:2002－08－08

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

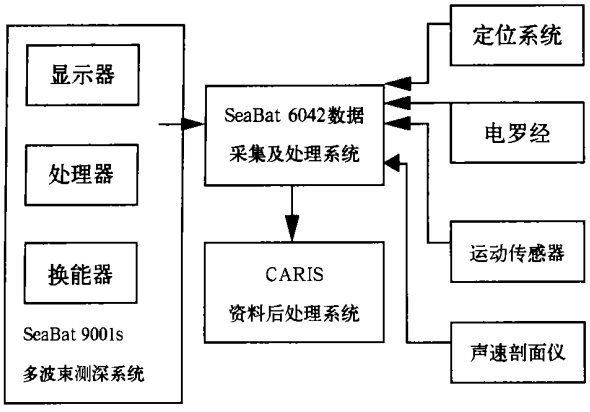


图1 SeaBat 9001S 多波束测深系统组成单元

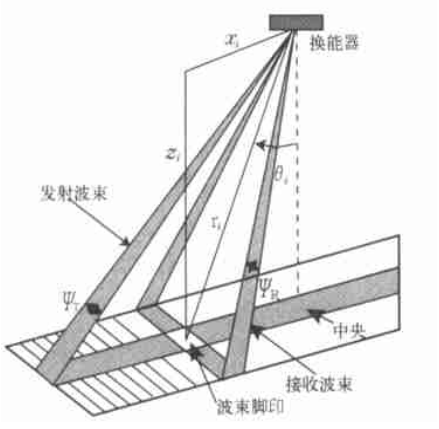


图2 多波束波束的几何构成

### 2.3 系统校准

多波束系统是一个由多传感器组成的复杂系统，最终测量成果的质量不但取决于多波束自身的测量数据质量，还取决于辅助传感器测量参数的精度，因此，系统安装完成后必须严格测量各传感器之间的相互关系，使辅助系统能为多波束提供横摇、纵摇、起伏和船艏向变化的实时补偿。此外，根据多波束系统的使用要求，每次使用前都应对多波束系统进行校准，内容包括GPS 时延、船艏向测量和纵摇、横摇调准误差进行校准。

## 3 SeaBat 9001S 在长江水下抛石护底工程监理中的应用

### 3.1 工程概况

长江口某电厂水下抛石护底工程为煤码头前沿宽约100m 左右，最长约240m 左右，抛石区域成扇形。需抛石建30m 戗台以部分恢复桩基的入土深度和增加码头的总体抗滑能力，并覆盖码头前沿－13.5m以下全部露裸江床，上游水下隆起的下侧需按1∶2 坡度抛石护底，中、下侧平抛石1.5m 以阻止前沿江床进一步淘刷，抛石的总量为39800m$^3$。由于抛石护底工程为水下隐蔽工程，和其他工程相比有以下特殊性：①水下抛石厚度、均匀度难以及时有效地进行检验，工程质量往往靠日后经受水流冲刷来反映；②在抛石施工中一旦出现质量问题，事后难以找到缺陷点位置，给补救措施带来不便；③如果抛石量不足或抛护不均匀，工程实施后，水流持续冲刷使已做工程被抄后路，已完成的工程量往往前功尽弃。由于块石抛投区水深达40余米，水深流急，施工难度很大，传统的单波束水下断面测量质量检测，难以达到质量检验的目的，难以指导及时调整抛投施工参数和水上作业定位的位置。为做到准确抛投到位，本局在监理过程中，为贯彻“接坡石抛足，坡面石均匀、备填石抛准，对突出坡嘴处控制方量，对崩窝回流区适当加抛，尽量保证水下水流平顺”的设计思想，在制订审查抛石网格方量，做好水上（船上）验方和块石质量控制的基础上，安排了施工中期进行的多波束检测，指导控制抛投到位。在竣工验收前进行的多波束检测，实事求是地进行工程计量，严格控制工程变更和索赔。因此，用多波束进行水底全覆盖地形测量是监理工作的重点项目。

### 3.2 测线布设和校准

多波束施测前首先要完成校准和测线的布设工作。

单波束测深时，测线布设遵循垂直等深线原则。多波束测深系统的覆盖宽度与水深有关，SeaBat 9001S 型多波束测深仪波束角为1.5°×1.5°，在码头前沿最大水深40m 的背景下，水底1.05m×1.05m面积有一个波束，最小水深13.5m，水底0.35m×0.35m 面积有一个波束，因此测线布设时，采用沿等深线布设，既可保持精度均匀又可获取最大工作效率。测线间距的设计，根据宽深比计算，必须保证相邻测线有10%的重复覆盖。船只偏离设计测线应为小于测线间距的20%，大于该偏距时应返工。

船艏向校准、纵摇、横摇参数校准、GPS RTK、KVH C100 电罗径、TSS－10 运动传感器将其信号传输至多波束系统，完成发射、接收、记录至磁盘的时间延时校准按要求进行，并将上述校准结果在CARIS 软件中进行后处理。校准的结果见表1。

表1 多波束校准结果

| 项 目 | DGPS 时延 | 电罗经时 延 | 运动传感器时延 | 纵偏 | 横偏 | 艏偏 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 校准结果 | 1.00s | 0.00 | 0.00 | －2.60° | －1.30° | 0.01° |

校准结果由CARIS 软件计算并输入到后处理软件中对测量资料进行改正。校准结果的正确与否，从多波束相邻测线间重叠区域高程点数据可以得到检

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

验，校准结果正确，则重叠区高程点数据一致，否则则存在差异。从本次测量资料的分析结果看，各测线重叠区高程点数据一致，说明本次探头安装的校准结果是正确的，可用于对此次测量资料进行改正。

3.3　多波束测深的实施

(1) 确定量程

打开SeaBat 6042，显示图 3 的声纳图像，在图像范围内均可接收多波束信号，一般将水底面置于A 处，量程为水深的 3 倍左右，这样可获取最大的覆盖范围，又可得到较多的发射次数，获得的信号是最多的。

如果将量程放大，水底面将在B 处，这样覆盖范围变小，而且发射次数变小，所获取信号相应减少。如果将量程变小，则水底在C 处，只有中间一部分波束起作用，两侧波束将被删去，覆盖范围将变小。所以要取得好效果，选取适当量程十分重要。

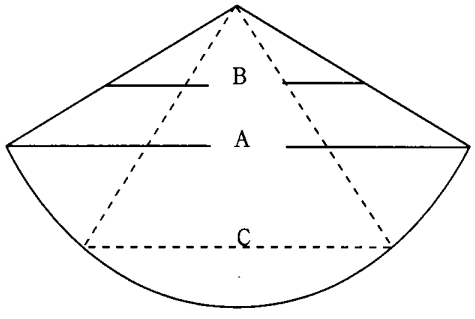


图 3　SeaBat 9001S 声纳图像量程示意

(2) 检查覆盖范围。以数字和图形两种方式显示条带(SWATH) 的覆盖宽度，监控相邻条带的宽度变化，检查是否有重复覆盖 20%，如有漏测及时进行补测，达到全覆盖的目的。

(3) 检查资料拼接情况。显示每个发射脉冲的水深横剖面，对比中央波束和边缘波束的水深变化，以检测声速剖面改正的有效性，如果外缘波束普遍向上或向下弯曲，则说明声速校正不完整，否则说明多波束测量效果较好。

(4) 显示水深瀑布图(waterfall)，通过该图可以立刻知道水底是否有障碍物。

(5) 多波束资料由采集数据软件(6042) 转换为CARIS 可接受的格式文件，在HIPS 模块中对每条测线的每个扫测面(SWATH) 进行编辑，编辑完成后加入声速与潮位改正，调用测船配置文件对所有的原始数据进行改正，并进行合并(MERGE)，CARIS 可以用三角不规则网或规则矩形网来建立数学模型，在建立好DTM 模型的基础上，可以生成 3D 立体图、等值线图、剖面图等，也可以进行方量的计算，并可通过DTM 模型输出文本格式的测点数据(X、Y、Z)，以利于二次开发应用。

(6) 最后根据需要输出不同格式图件。如三维立体图(图 4) 等。

## 4　实测成果及其分析

电厂煤码头水下抛石护底工程施工现场位于电厂煤码头生产重地，水下抛石不能影响电厂正常生产，运煤船只不间断地进出施工现场，施工环境比较复杂；施工现场远离江边达 1400m，水深达 40 余米，涨、落潮流的影响使抛石难度大、有效工期短。监理工程师在质量控制过程中，采用了多波束测深技术指导施工及辅助工程计量，取得了较好的监理效果，现综合评价如下：

从 2002 年 3 月施工中期多波束扫测资料分析(图 4，图 5)，从图中可以看出前段抛石基本投抛准确，但也出现了定位不准、区域外抛石和超抛欠抛的情况，图 4 反映码头前沿 30m 戗台尚未形成，图 5 反映设计抛石区域内以淤积为主，抛石区域外以冲刷为主，说明抛石方基本抛在设计区域内。由于电厂煤码头前沿水流较乱，涨、落潮流速大时抛石头可能不在预定的位置，加上水下地形坡度较大和定位的误差，引起抛石不均匀。为此，监理及时指示施工单位必须定位准确，按照多波束扫测抛石水下地形图调整抛投方量、程序，进行逐断面逐网格补抛，使之达到设计要求抛石标准。

从 2002 年 5 月竣工多波束扫测资料分析(图 6、图 7，图 7 为相对于图 5 的冲淤量)，块石抛投基本符合设计要求。设计抛石区域极易被冲刷的砂石裸露层全部得到了覆盖。抛投准确，平抛区抛石厚度基本满足设计要求，戗台前沿及抛石区上游抛石坡度达到 1∶2，抛石后戗台前沿高为－13.5m。(图 6 所显示的戗台缺口系运煤船停靠而需补抛的位置，与图 7 反映的一致)。

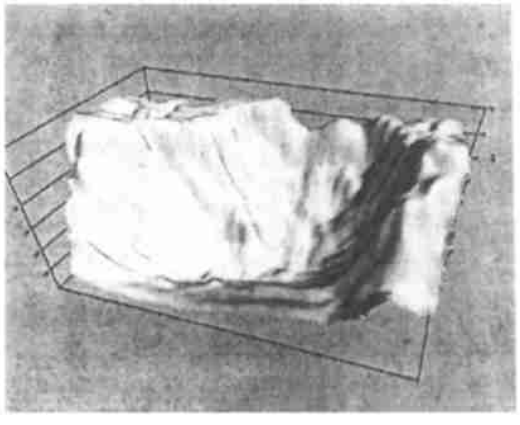

图 4　煤码头抛石护底工程中期多波束扫测立体图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

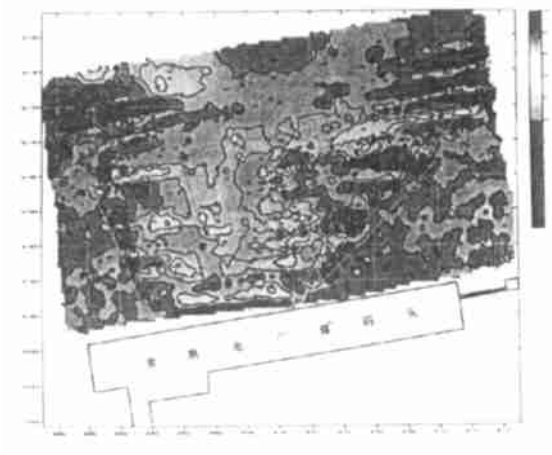

图 5 煤码头抛石护底工程中期多波束扫测冲淤图

从多波束扫测资料分析，竣工扫测水下地形图与设计图纸比较，－20、－25、－30m 等高线与码头最近距离都明显增大，戗台原河底高为－16.5m，现实际高为－13.5m，达到设计标推。各等高线距码头的最近距离值统计见下表 2。

表 2 1999～2002 年煤码头前沿各等高线距离变化统计表 (m)

| 等高线值 | 1999.11 | 2000.10 | 2001.05 | 2001.10 | 2002.3 | 2002.5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| －15 | 10.0 | 4.8 | 2.5 | — | — | 2.1 |
| －20 | 16.7 | 9.9 | 8.4 | 8.0 | 8.9 | 12.6 |
| －25 | 25.9 | 17.7 | 18.0 | 16.0 | 18.4 | 21.6 |
| －30 | 38.7 | 31.9 | 31.9 | 27.4 | 30.3 | 33.2 |

从表 2 可以看出，煤码头前沿各重要等高线与 2002 年 3 月底相比至码头的最近距离均有所增大，说明抛石护底工程使河床地形发生了变化，特别是－15m 等高线在码头前沿重新连通，对煤码头的安全运行有较大的意义。

## 5 结论及建议

综上所述，可得出如下结论和建议。

(1) 综合两次多波束扫测区域情况看，本次采用的水下抛石护底荷载，提高稳定力距，增大岸坡稳定安全度收到了预期的效果，证明抛石护底施工起到了遏制河床冲刷作用。

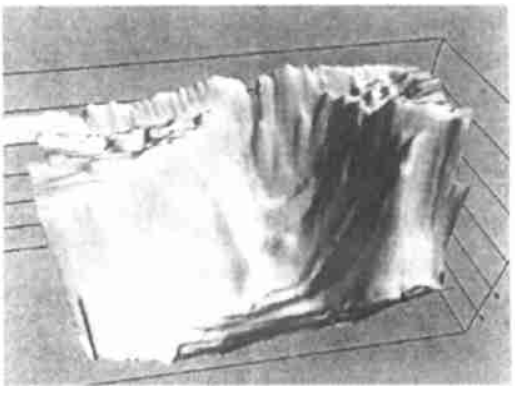

图 6 煤码头抛石护底工程竣工多波束扫测立体图

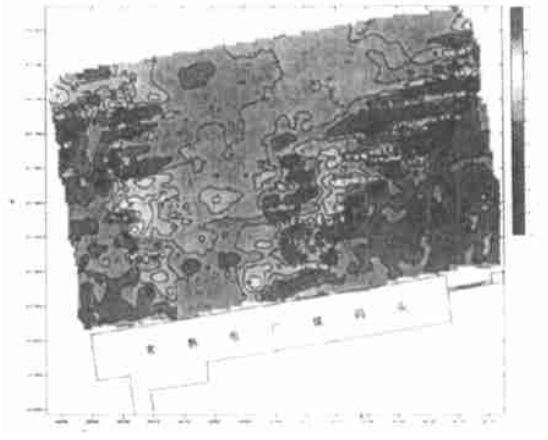

图 7 煤码头抛石护底工程竣工多波束扫测冲淤图

(2) 严格规范水下抛石的计量控制是搞好长江隐蔽工程质量的重要环节之一，抛投数量事关抛石护底工程质量，原始的单波束作业方式难以满足精度要求，多波束测深系统则可获取水底地貌等十分详尽的资料，尤其是在水下抛石后水底地貌较复杂的情况下，优势更为明显。因此，这是一项在长江隐蔽工程质量检测中值得推广的技术。

(3) 两次多波束监理检测结果表明：多波束系统勘测具有速度快、精度高、能清晰地反映抛石后水底微地貌的特点，更主要的是它可根据现场抛石情况，快速更新水下地形，及时准确地指导施工，因而它在长江险工险段及堤防监测应用中将具有良好的前景。

## 参 考 文 献

1 赵建虎．多波束深度及图像数据处理方法研究[D]．武汉：武汉大学测绘学院，2002.6
2 李家彪．多波束勘测原理技术与方法[M]．北京：海洋出版社，1999
3 董晓伟，李先炳，王国平．堤防工程监理手册[M]．北京：中国水利水电出版社，2001.11
4 罗淦堂，朱杰兵．护岸工程水下抛石的数量和质量控制[J]．人民长江，2001，(1)：24～26

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net