

侧扫声纳系统在石料人工鱼礁堆体积估算中的应用

刘永虎, 刘敏, 田涛*, 杨军, 陈勇

(大连海洋大学辽宁省海洋牧场工程技术研究中心, 辽宁大连 116023)

摘要: 采用侧扫声纳系统, 对大连市金州湾蚂蚁岛海域中A、B两个石料人工鱼礁区进行调查评估, 将声学方法应用到石料礁堆体积估算中, 目的是探究石料礁堆体积估算的新方法, 提高计算结果的准确性, 进而提高工作效率。使用侧扫声纳系统进行数据采集, 通过相关数据处理软件和计算机辅助技术对声纳数据进行后处理, 提取石料礁堆特征图像, 结合函数曲线对石料礁堆体积进行估算。结果显示, 侧扫声纳图像能够清晰反映石料礁在海底的分布状态, 根据图像能够对石料礁的冲淤程度进行判别, 利用几何关系及相关技术手段对石料礁堆体积进行估算, 估算结果存在一定误差, 通过多次不同角度的检测或配合其他辅助软件能尽可能减小误差。在A石料礁区, 运用积分断面法估算的石料礁堆体积与该礁区投放纪录的实际体积相比, 相对误差接近16%; 对B石料礁区进行检测评估, 所得石料礁堆体积与实际体积之间的相对误差也接近16%。两个石料人工鱼礁区所估算的体积与实际体积相差均很少, 虽然两个礁区物理环境以及石料礁堆大小均不同, 但二者相对误差接近且均小于20%, 验证了积分曲线的合理性。因此, 在诸多不确定因素的影响下, 该方法可相对精确地估算石料礁堆体积, 可为人工鱼礁区建设、管理和评价提供支持和依据。

关键词: 人工鱼礁; 侧扫声纳; 体积估算; 金州湾

中图分类号: S 932.9

文献标志码: A

人工鱼礁是人为放置在自然海域中改变海域环境的构造物, 结构复杂且类型多样, 通过合理投放和科学管理, 吸引、保护和增殖海洋生物。人工鱼礁区建设是一项长期、复杂、系统的工程, 包括礁区选址、礁型设计、投放方式选择以及投放后的管理、维护和规模评估等^[1], 其中人工鱼礁投放后的规模评估对人工鱼礁区的建设效果评价和人工鱼礁管理至关重要。石料人工鱼礁(以下简称石料礁)对海参、鲍鱼、海胆和鱼类等海珍品的增殖养护效果明显, 是我国黄、渤海区域普遍使用的一种人工鱼礁类型。与构件人工鱼礁不同, 石料礁是将一定体积的天然石料装载在专用驳船上, 一次性投放到海底而形成的大型石料礁。石料礁投放后, 海流对鱼礁周围海底的长期冲刷会导致鱼礁淤

积和下沉, 进而鱼礁状态发生变化, 实际规模减小, 影响石料礁的环境功能和集鱼效果^[2], 难以达到生息场修复和渔业资源增殖养护的预期效果。对于如何能够有效掌握石料礁堆投放后的体积, 较为精确地估算人工鱼礁区的总体积, 以实现对人工鱼礁区的科学管理, 目前国内的相关研究较少。

目前, 对石料礁堆体积估算和状态检测普遍应用潜水观测、水下录像、水下测量和模拟分析等方法, 这些方法只能对单个石料礁堆进行评估, 不但无法大面积和大规模估算石料礁区总体积, 而且各种参数的测算十分困难, 局限性较大。为了有效掌握石料礁堆在海底的体积和状态, 本研究利用侧扫声纳系统对石料礁区进行调查, 获取石料礁区海底声学影像, 得

收稿日期: 2016-12-22 修回日期: 2017-03-31

资助项目: 国家科技支撑计划(2013BAD23B01, 2012BAD18B03)

通信作者: 田涛, E-mail: ttbeyond@126.com

到石料礁在海底的真实分布状况, 通过图像信息融合、图像分割等技术^[3]对声纳图像进行分析和处理^[4], 分析石料礁状态, 结合函数关系和计算机辅助估算石料礁堆体积, 进而为人工鱼礁区科学建设和管理提供支持和帮助。

1 材料与方法

本研究所勘测的石料礁区位于大连市金州湾蚂蚁岛海域(图1), 勘测海域海底均为硬泥底, A、B为该海域的两处石料礁区, 两个区域内的石料礁均为近期投放, A区拥有73堆石料礁, 石料礁堆单个体积约150 m³, 共投放石料礁约10 950 m³; B区拥有93堆石料礁, 石料礁堆单个体积约300 m³, 共投放石料礁约27 900 m³, 利用侧扫声纳对A区进行勘测, 通过相关软件对石料礁堆检测图像进行分析, 得到石料礁的海底分布图, 通过函数关系计算石料礁堆体积。然后, 对B区进行勘测, 利用相同函数关系估算不同区域、不同大小石料礁堆体积, 检验函数曲线的合理性。

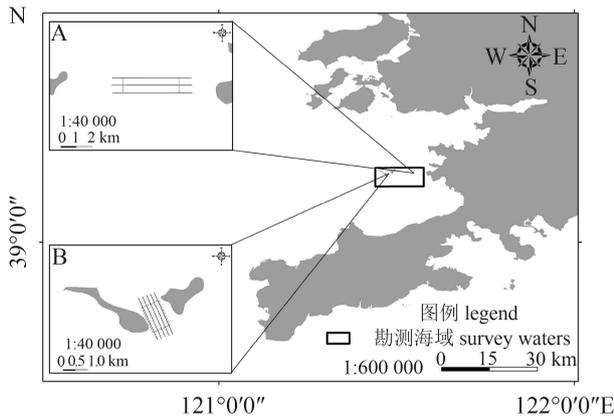


图1 勘测区域
Fig.1 Survey area

1.1 数据采集

本次研究使用Edge Tech侧扫声纳系统对石料礁区进行现场测量, 快速获得石料礁在水下的分布和位置, 获取声纳图数据。侧扫声纳系统包括拖鱼、甲板单元、工作站、数据采集软件、拖缆和DGPS接收机^[5]。

在小型测量船上使用Discover测量软件采集数据, 利用400和900 kHz双频率, 保证数据质量, 400 kHz垂直分辨率设置为2.3 cm, 水平波束

开角调节为0.46°, 900 kHz垂直分辨率设置为1.5 cm, 水平波束开角调节为0.28°, 垂直波束开角均设置为50°。使用导航软件, 获取所测海区地理信息和船舶实时地理位置。侧扫声纳系统在测量船上的安装点及拖鱼放入水下的深度不同, 所采集数据的质量和系统操作效率也不相同, 不恰当的安装会导致采集数据产生误差^[6]。侧扫声纳系统连接方式如图2所示。

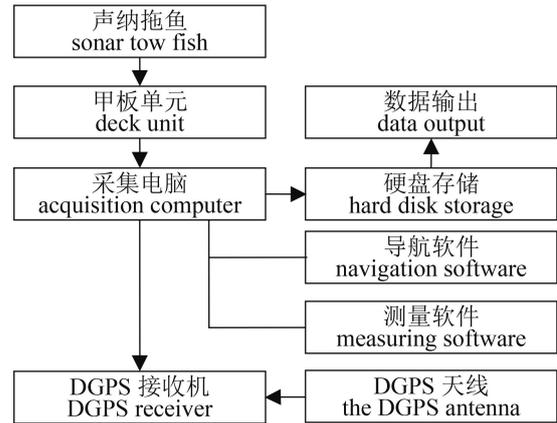


图2 侧扫声纳系统连接方式

Fig.2 The connection method of the Side Scan Sonar system

1.2 工作原理

在航行过程中, 拖鱼左右换能器发出左右2束高频声波脉冲, 声波遇到海底或石料礁后产生反射波和反向散射波, 反射和散射波沿原路线返回到换能器中, 经过声能向电能的转换, 由电缆传输到海面上的甲板单元中^[7]。由于回波信号强弱不同, 在显示器上显示不同灰度的像素影像, 这样就可以看到海底的石料礁^[8]。较高较硬的石料礁会产生较强回波, 洼地和较低较软的区域产生的回波较弱, 较高石料礁堆后面声波难以到达, 无反射信号进入接收阵, 产生阴影区^[9]。

石料礁在海底呈料石堆积状, 假定声脉冲在海水中以直线传播, 则可通过几何关系来确定石料礁的高度(图3)。A为拖鱼放入水中后与水面的距离, B为拖鱼与海底之间的距离, C为拖鱼与石料礁顶端的斜线距离, D为声图阴影区长度, E为石料礁高度。由此根据几何关系: $E/B=D/(C+D)$, 可以计算出石料礁的高度 $E^{[10]}$ 。

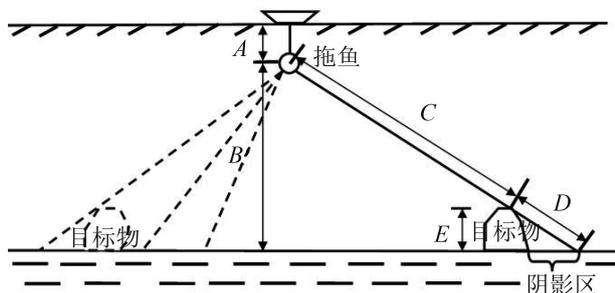


图3 侧扫声纳几何关系图

Fig. 3 The geometry diagram of Side Scan Sonar

1.3 走航测线设计

使用导航软件作为石料礁区边界绘制和测线设计工具,走航测线设计为直线,测线间距不超过侧扫声纳左右换能器所发射的声波量程,结合人工鱼礁区布局进行测线布设,保证声图全部覆盖。以A石料礁区为例,对该礁区进行勘测,石料礁区宽度为160 m(图4),设置3条测线,间距为80 m,该区域平均水深为10 m,为保证测量图像高分辨率及数据准确性,将测量宽度设置为3~5倍水深,因此本次勘测将左右换能器扫宽均设置为50 m,总覆盖宽度为100 m。

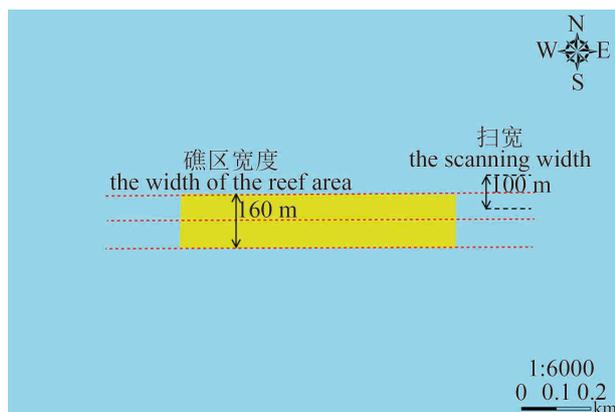


图4 石料礁侧扫声纳勘测走航测线

Fig. 4 Navigation line

用Discover软件采集侧扫声纳数据,软件中的“覆盖图”可对测线的覆盖情况进行实时观察和调整。由于船只在航行中具有不确定性,受风浪影响,测线很难保证直线和对齐,因此在测量时,可将测线的边缘少量重叠^[1],保证测量区域的完整(图5)。

1.4 石料礁状态勘测分析

利用SonarWiz软件分析和处理侧扫声纳数

据,图6为测线上的自然海底图像,图中海底轮廓清晰,左侧为泥质底质,海底平坦,右侧为天然礁石构成的硬质底质,海底凹凸不平,天然礁石在海底呈不均匀分布,与石料礁堆在海底的分布截然不同。

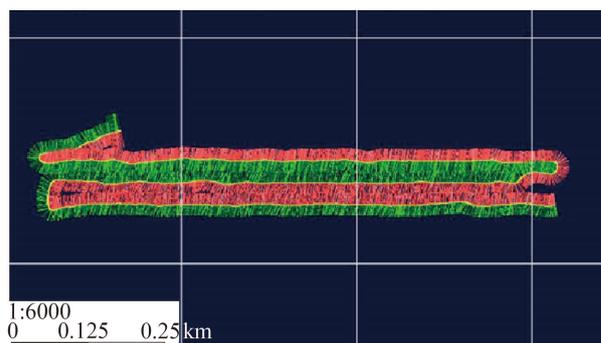


图5 覆盖图

Fig. 5 Coverage diagram

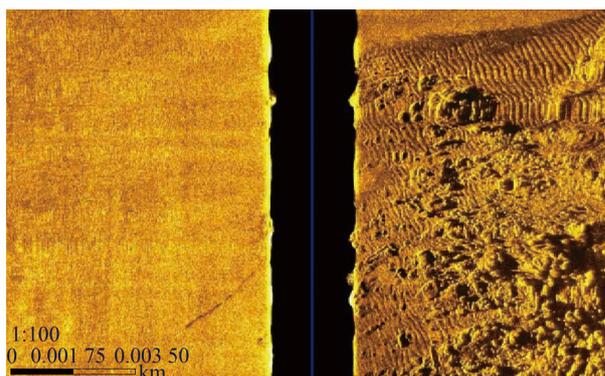


图6 自然海底声纳图

Fig. 6 Natural submarine sonar plot

图7为石料礁侧扫声纳勘测图,石料礁堆均位于拖鱼左舷,对比图6和图7海底图像可对天然礁石与石料礁进行区分,减少石料礁的体积估算中的不确定因素。石料礁在平坦的泥质海底,礁堆表面缝隙密布,其堆积方式与图6中的天然礁石形成鲜明对比,因此在检测时,可以对天然礁与石料礁进行准确区分,该石料礁周围没有冲淤痕迹,在海底具有一定高度,依据侧扫声纳原理图,可知声波无法到达礁堆后方,因此石料礁后方出现较长阴影(图7-a);图7-b为该石料礁处于拖鱼正下方时的侧视图,图中可看到石料礁明显隆起于海底;图7-c中石料礁的轮廓模糊不清,后方阴影极短,少量石块露出海底;图7-d为该石料礁处于拖鱼正下方时的

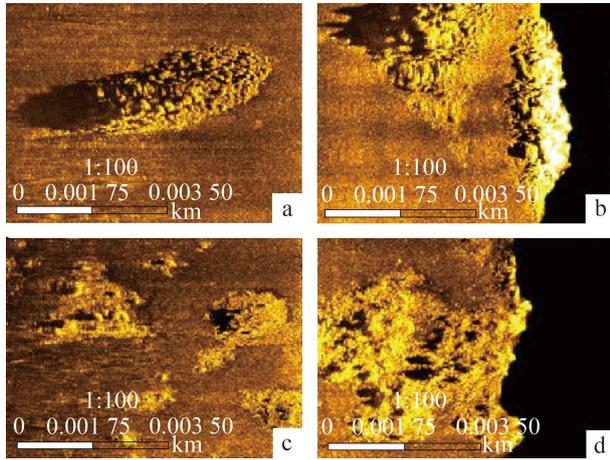


图7 石料礁检测图

图像a、b为未被淤积的石料礁, c、d为被淤积的石料礁

Fig. 7 Images of the stone reef

The stone artificial reefs in a and b is not being alluvial, the reefs in c and d have been deposited

侧视图, 由图像可知, 石料礁露出海底部分极少, 基本被泥沙掩埋。

1.5 石料礁体积估算

石料礁在海底呈料石堆积状态, 通过侧扫声纳检测声图可以估算单位石料礁堆体积。计算石料礁堆体积在人工鱼礁区建设上具有重要意义, 而投放在海底的石料礁的体积无法根据几何关系式直接计算, 因此需要建立数学模型, 通过计算机辅助, 利用积分法进行估算^[12]。

分析图像, 在数据处理软件中做出石料礁的积分曲线, 沿着石料礁的横截面, 将石料礁垂直截分为若干个断面, 作出其中一个断面ab(图8)。

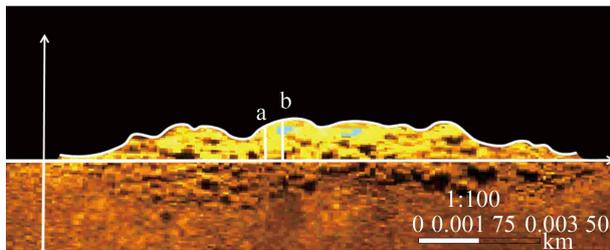


图8 石料礁曲线

图中a和b为一截面曲线

Fig. 8 The function curve of stone reef

In the figure, a and b is a section curve

计算石料体积, 需通过积分计算出所有断面的面积, 整个礁堆的体积为所有断面面积之

和乘以断面之间的距离^[13]:

$$V = \left(\frac{S_0 + S_n}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} S_i \right) \times d$$

对图像建立直角坐标系, 沿着X轴方向对图像进行断面截取(图7), 确定所截得断面的函数曲线, 此处运用阿克玛(Akima)插值法来获得选定区间上的三次多项式函数曲线^[14]。假设区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上的三次多项式:

$$y(x) = A + Bx - x_i + C(x - x_i)^2 + D(x - x_i)^3$$

运用阿克玛几何条件对曲线进行拟合, 配置三次多项式, 得到精确度较高的光滑曲线^[14], 则三次多项式系数表达式:

$$A = y_i$$

$$B = k_i$$

$$C = (3n_i - 2k_i - k_{i+1}) / (x_{i+1} - x_i)$$

$$D = (k_{i+1} + k_i - 2n_i) / (x_{i+1} - x_i)^2$$

选用平面上5个点, 利用阿克玛提出的观点估计5个点的中间点导数, 导数计算公式:

$$k = [(n_4 - n_3)n_2 + |n_2 - n_1|n_3] / [|n_4 - n_3| + |n_2 - n_1|]$$

当出现 $n_4 = n_3$ 与 $n_2 = n_1$ 时, 取 $k = (n_2 + n_3) / 2$, 由此可计算出 k_i 和 k_{i+1} , 将 k_i 和 k_{i+1} 带入系数表达式中, 计算出三次多项式的系数, 从而求出断面曲线上任意点坐标。

所截取断面由若干三次多项式曲线连接而成, 对每一段曲线进行积分, 可求得每个横截面的面积, 为了更加简便计算, 再次将三次多项式进行变换, 设:

$$t = \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} = \frac{x - x_i}{\Delta x_i}$$

$$y(x) = q_0 + q_1t + q_2t^2 + q_3t^3$$

$$\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$$

则三次多项式系数:

$$q_0 = y_i$$

$$q_1 = k_i \Delta x_i$$

$$q_2 = (3n_i - 2k_i - k_{i+1}) \Delta x_i$$

$$q_3 = (k_{i+1} + k_i - 2n_i) \Delta x_i$$

横截面面积:

$$S = \int_{x_i}^{x_{i+1}} y(x) dx = \Delta x_i \sum_{j=0}^3 \frac{q_j}{j+1}$$

阿克玛插值法配置的函数曲线具有良好的光滑性, 函数曲线与实际石料礁堆的轮廓曲线吻

合度较高,计算结果精度较高,而且能减少部分偶然误差^[15]。利用上述公式计算出每一个断面面积后,利用体积公式即可计算出料堆的体积。

1.6 偶然因素和误差分析

勘测过程中,由于船舶在流体中航行具有不确定性,受风浪影响,拖鱼会随着船身摇摆不定,从而导致拖鱼姿态不稳定^[16],声图扭曲变形,得到的图像中石料礁特征模糊,最终确定的积分曲线会产生误差。拖鱼没入水中的深度较浅,一方面可能导致拖鱼在较大风浪的情况下露出水面,使声纳图像出现空缺,另一方面拖鱼下方的水体中会出现大量气泡,导致声纳图中黑色区域出现大量杂波,影响数据质量和积分曲线的确定。在测量区域的边界,船只调头或转弯时,会使声纳图像产生挤压或拉伸,导致积分曲线无法确定,断面无法截取。

计算石料礁堆体积时,在保证测量精确度最大化的情况下,选择处于拖鱼下方特征明显的石料礁进行积分法计算。由于石料礁表面的不规则,导致所确定的曲线存在一定误差,因此最终估算体积也有偏差^[17]。在流体中航行,难以保证拖鱼严格处于石料礁上方,因此确定的积分曲线会有误差,使估算的体积出现偏差。

根据实际检测可知,石料礁大多在泥底上,海底底泥承载力有限,当石料礁重量过大时,在海底会发生下沉,因而直接导致石料礁体积减少。石料礁在投放时,使用驳船进行运输,在实际作业过程中,由于石料装卸损失以及石块之间的缝隙等不可避免的因素,难以保证每船石料总量相同,因此实际投放量与预期投放量之间会产生偏差,所以在计算最终体积时,会产生一定的误差。

石料礁堆体积计算包含多重误差,为了保证体积估算的精确,首先要控制偶然因素,保证拖鱼在水下的最佳位置,选择适当天气进行测量,尽量避免大幅度的转弯和调头,其次计算过程中应认真仔细,避免出现计算错误,最大限度减少误差。在石料礁装卸和投放时,尽量保证总投放数量的准确性。

2 结果

2.1 A区石料礁体积

选择A区石料礁的一段测量数据,利用数据

处理软件对声纳图像的两条测线进行底跟踪处理(图9),图9-a中可清楚看到石料礁堆的分布,图9-b中利用ArcGIS软件对鱼礁轮廓进行近距离描绘,得到鱼礁轮廓图,该图像中共有完整礁堆73个。

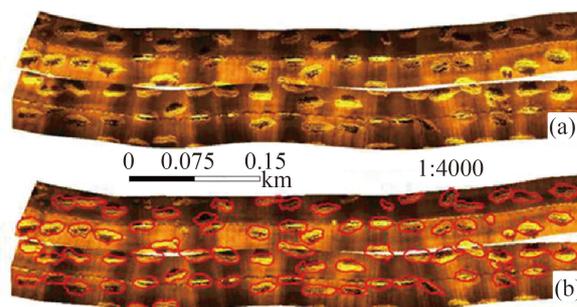


图9 石料礁检测图

(a)中可清晰看到石料礁堆的分布,(b)中红色线圈表示石料礁堆在平坦海底的轮廓

Fig. 9 Stone reef detection figure

(a) shows the reef distribution, (b) red coil stands for the outline of reef heap at the bottom of the sea

随机选择拖鱼正下方特征清晰的15个鱼礁堆用积分法进行计算。以表1中的1号鱼礁堆为例,通过积分法得到各断面面积之和约为254.1 m²,断面之间的间距为0.5 m,则礁堆体积为127.05 m³,由于鱼礁的投放使用小型驳船,运输能力一定,所以将鱼礁实际体积规定为驳船的运输量,即150 m³。通过计算绝对误差和相对误差,验证积分法的有效性,礁堆测量的绝对误差和相对误差表示:

$$\text{绝对误差} = |\text{测量体积} - \text{实际体积}|^{[18]}$$

$$\text{相对误差}(\%) = |\text{测量体积} - \text{实际体积}| / \text{实际体积} \times 100^{[18]}$$

如表1的测量数据,表格中包含了编号、实际体积、估算体积、绝对误差和相对误差,与实际体积相比,该方法估算的石料礁体积误差均小于20%,平均误差约16%,估算结果与实际结果接近。

利用该方法,估算A区所有石料礁堆体积,由侧扫声纳图像得到A区共有石料礁73个,利用积分法计算出所有石料礁堆的体积,从而得到A区石料礁总体积约为9365.608 m³,投礁记录的实际体积为10 950 m³,计算结果与实际体积非常接近。

2.2 B区石料礁体积

在B区石料礁进行侧扫声纳勘测,用于检测

表 1 A区石料礁体积测量结果

Tab. 1 Volume measurement of stone reef in area A

投礁海域 artificial reef area	编号 serial number	实际体积/m ³ actual volume	估算体积/m ³ estimated volume	绝对误差/m ³ absolute error	相对误差/% relative error
A	1	150	127.05	22.95	15.30
	2	150	122.53	27.47	18.31
	3	150	126.03	23.97	15.98
	4	150	126.79	23.21	15.47
	5	150	128.47	21.53	14.35
	6	150	123.91	26.09	17.39
	7	150	122.64	27.36	18.24
	8	150	130.75	19.25	12.83
	9	150	127.28	22.72	15.15
	10	150	124.05	25.95	17.30
	11	150	125.51	24.49	16.33
	12	150	125.57	24.43	16.29
	13	150	126.03	23.97	15.98
	14	150	125.57	24.43	16.29
	15	150	122.83	27.17	18.11
平均 average		150	125.66	24.33	16.22
合计 summation		2250	1885.01	364.99	

拟合曲线的合理性。该石料礁区投礁采用大型驳船, 每船运输量为300 m³, 选择10个典型石料礁进行计算, 结果如表2所示。

由侧扫声纳图像得到B区共有石料礁93个, 利用积分法计算出所有石料礁堆的体积, 从而得到B区石料礁总体积约为23 548.62 m³, 投礁记录的实际体积为27 900 m³, 计算结果与实际体积非常接近。

通过表1、表2和图10得出, 积分法测量的相对误差基本都在20%以内, 个别大于20%, 但十分接近实际结果。通过对两个不同区域石料礁总体积计算可知, 两个石料礁区总体积相对误差均接近16%, 因此在诸多偶然因素的影响下, 测量的精确度较高。

3 讨论

目前, 对人工鱼礁的研究主要包括礁体材料、结构设计和鱼礁功能等, 利用侧扫声纳的声学图像处理技术对人工鱼礁投放选址和礁区

分布检测等方面的应用逐渐增多, 并开始发展到海域的资源调查等领域^[19]。王亚明^[20]利用侧扫声纳对牡蛎礁分布进行检测, 查明了礁体生长和分布的底质环境。Montefalcone等^[21]通过侧扫声纳评估海草床的变化, 通过检测图像的对比, 得出不同时期海草覆盖的差异。鱼京善等^[22]总结了侧扫声纳在海洋环境检测保护中的应用。李海滨等^[23]通过多种图像处理手段, 实现海底目标物的提取与定位。周亮^[24]对ArcGIS的ArcEngine组件进行分析, 给出了基于ArcEngine的侧扫声纳图像处理系统实现方法。van Overmeeren R等^[25]利用侧扫声纳系统反映和监测荷兰近岸浅水区海底贝类以及海底栖息地情况。到目前为止, 由于海水的不可视性, 估算石料礁体积尚无相关理论基础和技术支持, 也没有统一的估算标准, 难以准确评估, 从而导致人工鱼礁无法科学管理, 人工鱼礁区效果评价的可靠性和评价效率受到影响。

近几年, 我国黄海北部辽宁沿海地区投放

表 2 B区石料礁体积测量结果

Tab. 2 Volume measurement of stone reef in area B

投礁海域 artificial reef area	编号 serial number	实际体积/m ³ actual volume	估算体积/m ³ estimated volume	绝对误差/m ³ absolute error	相对误差/% relative error
B	1	300	267.79	32.21	10.70
	2	300	242.32	57.68	19.20
	3	300	256.85	43.15	14.38
	4	300	251.03	48.97	16.32
	5	300	248.36	51.64	17.21
	6	300	237.17	62.83	20.90
	7	300	245.51	54.49	18.16
	8	300	258.33	41.67	13.89
	9	300	251.62	48.38	16.13
	10	300	273.13	26.87	9.00
	平均 average	300	253.21	46.79	15.59
	合计 summation	3000	2532.11	467.89	

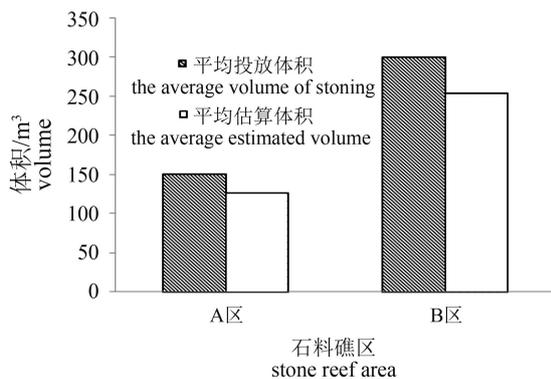


图 10 平均投放体积与平均估算体积比较图

Fig. 10 The average stoning volume and the average estimate volume comparison chart

大量人工鱼礁，以石料礁为主要的鱼礁类型，石料礁投放在海底若干年后，其体积会发生变化，利用侧扫声纳虽然可以得到海底石料礁的分布图，但很难凭借侧扫声纳图像直接估算石料礁的体积，因此，通过对侧扫声纳图像进行分割、去噪、镶嵌、合并和实时增强等处理，并结合计算机辅助，构建数学模型，可以合理估算石料礁体积。

3.1 石料礁特征图像提取

对人工鱼礁区进行勘测，采集声纳数据，对声纳图像进行数据处理，从图像中提取石料礁特征，但很多因素会影响到声纳数据的特征

图像提取，包括勘测当日的海况、声纳拖鱼的姿态、系统参数设置、石料礁布局、石料礁的淤积程度等。勘测当日的海况和拖鱼姿态直接影响原始数据质量，从而影响石料礁特征图像的边缘检测。石料礁布局不合理或间距过小将导致石料礁相互堆叠，从而难以对礁体进行识别。海底承载力过低而导致石料礁下沉淤积，会使礁体声纳图像模糊，影响特征图像提取。因此，本研究在估算石料礁体积时选择良好的海况，将拖鱼固定在测量船上，参数设置中，400 kHz垂直分辨率设置为2.3 cm，水平波束开角调节为0.46°，900 kHz垂直分辨率设置为1.5 cm，水平波束开角调节为0.28°，垂直波束开角均设置为50°，选择近期投放且布局合理的石料礁区进行勘测。

3.2 石料礁体积估算的可行性

以往的体积计算方法是将石料礁作为长方体或锥体，测量石料礁的高度，运用体积计算公式估算石料礁体积，这种测量方法计算过程简单，但石料礁高度需由潜水员进行潜水测量，测量时间较长，安全隐患较高，误差很大。利用侧扫声纳可以从图像中测量石料礁高度，再通过体积公式估算石料礁体积，该方法能够准确测量石料礁高度，但将礁体作为长方体或锥体计算并不合理，也存在较大误差。使

用侧扫声纳对海底石料礁进行勘测,提取石料礁特征图像和体积估算中的相关参数,利用阿克玛插值法对石料礁特征图像配置函数曲线,将曲线分割为若干断面,通过计算机辅助测量技术和相关处理软件计算各断面特征点的X, Y, Z坐标值,然后利用体积计算方法估算出石料礁体积。阿克玛插值法被广泛应用于大型物料堆体积估算中,估算结果较为精确,将其应用到石料礁体积估算中,对A、B区石料礁进行估算,得到的体积估算结果与实际投放的石料礁体积较为相符,因此该方法可行。

3.3 存在不足及展望

为使估算方法科学合理,估算结果准确可信,本研究在最大限度减少影响的同时,运用了大型物料堆体积估算方法和计算机辅助,选取两个不同区域内不同大小的石料礁进行对比,检测估算方法的合理性,所得石料礁的估算体积与实际体积相差较小,相对误差稳定,适用于单个石料礁体积估算和整个石料人工鱼礁区的鱼礁规模估算。但由于估算计算量较大,对整个人工鱼礁区所有石料礁进行估算时,过程较为复杂。石料礁不同于构件礁,本研究中的石料礁是将一定体积的天然石料装载在专用驳船上,一次性投放到海底,形成大型石堆。投放条件不同,石料礁的投放布局也不同,很多区域石料礁投放在海底均呈现相互堆叠状态,在侧扫声纳图像中很难提取单个石料礁的特征图像,因此,利用模型估算体积时受到一定影响。在下一步研究中,将探索更加合理的计算方法,缩减计算量,对石料礁体积进行更精确的估算。

参考文献:

- [1] 沈天跃. 人工鱼礁投放误差评价方法研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
Shen T Y. Research on the evaluation method of delivery error of artificial reefs[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015 (in Chinese).
- [2] 林军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展[J]. 海洋渔业, 2006, 28(3): 257-262.
Lin J, Zhang S Y. Research advances on physical stability and ecological effects of artificial reef[J]. Marine Fisheries, 2006, 28(3): 257-262(in Chinese).
- [3] Wilken D, Feldens P, Wunderlich T, *et al.* Application of 2D fourier filtering for elimination of stripe noise in side-scan sonar mosaics[J]. Geo-Marine Letters, 2012, 32(4): 337-347.
- [4] James R, Supriya M H. Blind estimation of single look side scan sonar image from the observation model[J]. Procedia Computer Science, 2016, 93: 336-343.
- [5] 沈蔚, 章守宇, 李勇攀, 等. C3D测深侧扫声纳系统在人工鱼礁建设中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(3): 404-409.
Shen W, Zhang S Y, Li Y P, *et al.* The application of C3D bathymetry side scan sonar system in artificial reef construction[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(3): 404-409(in Chinese).
- [6] Artur G, Andrzej F, Mariusz W. Experience with the use of a rigidly-mounted side-scan sonar in a harbour basin bottom investigation[J]. Ocean Engineering, 2015, 109: 439-443.
- [7] 董玉娟, 周浩杰, 王正虎. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在海底管线检测中的应用[J]. 水道港口, 2015, 36(5): 450-455.
Dong Y J, Zhou H J, Wang Z H. Application of side scan sonar and sub-bottom profiler in checking of submarine pipeline[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2015, 36(5): 450-455(in Chinese).
- [8] Degraer S, Moerkerke G, Rabaut M, *et al.* Very-high resolution side-scan sonar mapping of biogenic reefs of the tube-worm *Lanice conchilega*[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(8): 3323-3328.
- [9] 魏荣灏, 陈铁鑫, 郭晨. 侧扫声纳在海底管道悬空调查中的应用[J]. 海洋测绘, 2014, 34(2): 63-65.
Wei R H, Chen T X, Guo C. Application of Side-Scan Sonar in suspended submarine pipeline investigation[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(2): 63-65(in Chinese).
- [10] 周兴华, 姜小俊, 史永忠. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在杭州湾海底管线检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2007, 27(4): 64-67.
Zhou X H, Jiang X J, Shi Y Z. Application of side scan sonar and sub-bottom profile in the checking of submerged pipeline in Hangzhou Bay[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2007, 27(4): 64-67(in Chinese).
- [11] 沈蔚, 程国标, 龚良平, 等. C3D测深侧扫声纳探测系统综述[J]. 海洋测绘, 2013, 33(4): 79-82.
Shen W, Cheng G B, Gong L P, *et al.* Review on the

- probing system of the C3D bathymetry side-scansonar[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2013, 33(4): 79-82(in Chinese).
- [12] 王秀美, 宋学斌, 刘炜刚, 等. 利用计算机辅助测量技术测量料堆体积[J]. *北京科技大学学报*, 1999, 21(5): 494-497.
Wang X M, Song X B, Liu W G, *et al.* Volumetric calculations of stockpiles by using computer-aided measuring technique[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 1999, 21(5): 494-497(in Chinese).
- [13] 陈莹, 潘俊民. 大型物料堆体积的计算机视觉测量方法[J]. *上海交通大学学报*, 2002, 36(7): 984-986, 990.
Chen Y, Pan J M. Volume measurement method of large material stack based on computer vision[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2002, 36(7): 984-986, 990(in Chinese).
- [14] 史立新. 基于阿克玛插值法的列表曲线拟合[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2003(12): 10,14.
Shi L X. A fitting method of listing curve based on Akima interpolation[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2003(12): 10,14(in Chinese).
- [15] 霍勇峰, 郝振纯. 洪水模拟中的阿克玛插值法分析[J]. *东北水利水电*, 2004, 22(7): 4-5.
Huo Y F, Hao Z C. Analysis of Akima interpolation in flood simulation[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2004, 22(7): 4-5(in Chinese).
- [16] 熊传梁, 王特, 高君, 等. 侧扫声纳系统姿态参数平滑方法研究[J]. *海洋测绘*, 2012, 32(3): 5-7.
Xiong C L, Wang T, Gao J, *et al.* Smoothing method of the parameters in sidescan sonar data[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2012, 32(3): 5-7(in Chinese).
- [17] 王贤文, 王忠, 程显侠. 利用断面法计算机辅助测量料堆的体积[J]. *沈阳工程学院学报(自然科学版)*, 2002, 4(2): 34-36.
Wang X W, Wang Z, Cheng X X. Using vertical method to measure stockpile's volume [J]. *Journal of Shenyang Electric Power Institute (Natural Science Edition)*, 2002, 4(2): 34-36(in Chinese).
- [18] 张娜. 基于计算机视觉的不规则物体体积测量方法研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2015.
Zhang N. Study on the volume measurement method of irregular object based on computer vision[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2015 (in Chinese).
- [19] Tian W M. Side-scan sonar techniques for the characterization of physical properties of artificial benthic habitats[J]. *Brazilian Journal of Oceanography*, 2011, 59: 77-90.
- [20] 王亚明. 浅析旁侧声纳技术在天津某海区牡蛎礁地质勘查中的应用[J]. *勘察科学技术*, 2013(4): 52-54.
Wang Y M. Brief analysis on application of side-scanning sonar technology in geological exploration on oyster reef in certain sea area of Tianjin[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2013(4): 52-54(in Chinese).
- [21] Montefalcone M, Rovere A, Parravicini V, *et al.* Evaluating change in seagrass meadows: a time-framed comparison of Side Scan Sonar maps[J]. *Aquatic Botany*, 2013, 104: 204-212.
- [22] 鱼京善, 成二丽. 侧扫声纳系统及其在海洋环境监测和保护中的应用[J]. *海洋测绘*, 2004, 24(2): 63-66.
Yu J S, Cheng E L. Applications of side scan sonar in ocean environment monitoring[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2004, 24(2): 63-66(in Chinese).
- [23] 李海滨, 滕惠忠, 宋海英, 等. 基于侧扫声纳图像海底目标物提取方法[J]. *海洋测绘*, 2010, 30(6): 71-73.
Li H B, Teng H Z, Song H Y, *et al.* Technology on the extraction of seabed target based on high resolution side-scan sonar[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2010, 30(6): 71-73(in Chinese).
- [24] 周亮. 基于ArcEngine的侧扫声纳图像处理系统设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Zhou L. Design and implementation of side scan sonar image processing system based on ArcEngine technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008 (in Chinese).
- [25] van Overmeeren R, Craeymeersch J, van Dalssen J, *et al.* Acoustic habitat and shellfish mapping and monitoring in shallow coastal water-Sidescan sonar experiences in The Netherlands[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 85(3): 437-448.

The application of Side Scan Sonar system in volume estimation of stone artificial reef

LIU Yonghu, LIU Min, TIAN Tao*, YANG Jun, CHEN Yong

*(Center for Marine Ranching Engineering Science Research of Liaoning,
Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)*

Abstract: In this study, we used the side scan sonar system to investigate and evaluate the two artificial stone reef areas in A and B in the sea area of the Mayi Island in Jinzhou Bay, Dalian. The acoustic method was applied to the estimation of stone reef volume. The purpose was to explore the new estimation method of stone reef volume to improve the accuracy of the calculation results, improve work efficiency. The data mining of the sonar data was carried out by using the data processing software and the computer-aided technology. The data of the stone reef were extracted and the volume of the stone reef was estimated by the function curve. The results show that the side scan sonar image can clearly reflect the distribution of stone reefs in the seabed, and the scouring and silting degree of the stone reef can be judged according to the image. The geometric relationship and the related technical means are used to estimate the volume of the stone reef. Through several different angles of detection or with other auxiliary software errors were minimized. In the A reef area, the volume of the reef is estimated by the integral section method and the relative error is close to 16% compared with the actual volume of the reef area. The B reef area is tested and evaluated. The relative error between the evaluated volume and actual volume of the stone reef is close to 16%. The estimated volume of the two artificial fish reef areas is very different from the actual volume. Although the physical environment and the size of the reefs are different in the two reef areas, the relative error is close to and less than 20%. The integral curve is verified rationality. Therefore, under the influence of many uncertain factors, this method can estimate the volume of stone reefs relatively accurately, which can provide support and basis for the construction, management and evaluation of artificial reef area.

Key words: artificial reefs; Side Scan Sonar; volume estimation; Jinzhou Bay

Corresponding author: TIAN Tao. E-mail: ttbeyond@126.com

Funding projects: National Science and Technology Support Program (2013BAD23B01, 2012BAD18B03)