



大洋多金属结核 勘探技术与评价方法

朱克超 张国祯 何高文 等著
杨胜雄 陈玄武 王公念



地质出版社

大洋多金属结核勘探技术与评价方法

朱克超 张国楨 何高文 等著
杨胜雄 陈玄武 王公念

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书系统地总结了我国开展大洋多金属结核调查以来所采用的主要勘探技术和评价方法,并结合了近年来大洋科研课题的研究成果及“海洋四号”船的航次调查成果,介绍了地质采样、多波束测深技术、多频及宽频探测技术、海底视像探测技术、多金属结核资源量计算及评价,是总结我国海洋调查技术的现状,对比国际勘探技术前沿的重要资料。

本书可供海洋地质、矿产地质等专业的地质工作者及地质院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大洋多金属结核勘探技术与评价方法/朱克超等著.-北京:地质出版社,1998.3
ISBN 7-116-02532-4

I. 大… I. 朱… III. 锰结核-地质勘探 N.P744.3

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第02395号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路29号)

责任编辑:陈磊 肖宇

责任校对:黄苏晔

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销
开本:787×1092¹/₁₆ 印张:8.875 彩照:3页 字数:213000

1998年3月北京第一版·1998年3月北京第一次印刷

印数:1—350册 定价:35.00元

ISBN 7-116-02532-4

P·1873

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

序

大洋多金属结核是一种潜在的海底矿产资源，它含有数十种金属元素，特别是以储量丰富和富含铜、钴、镍、锰以及铁等有工业价值的金属元素而倍受重视。许多国家在本世纪六七十年代即开展了海洋地质调查研究。

我国从70年代末开始进行有关多金属结核的勘查工作，在政府和有关部门的支持以及广大科研人员的努力下，已取得了可喜的成果，在多金属结核矿床的调查研究以及深海采矿和选冶技术等方面正逐渐接近世界先进水平。90年代以前，地质矿产部和国家海洋局分别引进了国际上较先进的设备和手段，如多频探测和测深、深海照相系统、无缆抓斗采样器以及GPS全球定位系统等，并由“海洋四号”和“向阳红16号”船对中太平洋和东太平洋海盆进行了较大规模的调查研究，取得了丰富的地质、地球物理和多金属结核的数据资料和样品。我国在大洋矿产资源的调查研究方面已经积累了不少经验，培养和锻炼了一支科技队伍。另外，在某些研究领域的国际合作方面，也取得了较好的效果。

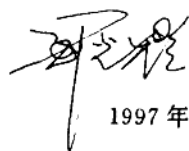
从90年代开始，在“中国大洋矿产资源开发研究协会”的组织下，我国又开始在联合国批准的开辟区内作进一步的勘探工作。同时，还利用引进的多波束测深系统和深拖系统，结合各种地质地球物理方法手段，开展了多金属结核的成矿规律及勘探技术、评价方法方面的研究，取得了一批有相当学术水平的研究成果。

中国的海洋地质调查起源于60年代初的近海石油勘探，自渤海开始，经北部湾、珠江口以及东海，数十年的海上征程为我国成为海洋油气大国奠定了基础。在此过程中，人员素质不断提高，装备也日见精良。自80年代初，我国不失时机地以“海洋四号”和“向阳红16号”船远征太平洋，开始了多金属结核调查，十多年来取得了丰硕的地质成果，为我国争得海底矿产开采权益作出了巨大的贡献。

当今海洋高技术的发展，日新月异，国外发达国家已应用深潜技术进行多金属结核调查及深海地质调查；有关深海矿产资源开采的环境影响调查也正方兴未艾。

本书系统地总结了我国开展大洋多金属结核调查以来所采用的主要勘探技术和评价方法，并结合了近年来大洋科研课题的研究成果及“海洋四号”船的航次调查成果，介绍了地质采样、多波束测探技术、多频及宽频探测技术、海底视像探测技术、多金属结核资源量计算及评价等。值得欣喜的是多数执笔者是工作在大洋多金属结核资源调查第一线的中青年科研骨干，表明我国的海洋地质事业后继有人、兴旺发达。

本书的出版是及时的，对总结我国海洋调查技术的现状、对比国际勘探技术前沿是十分有益的。希望广大从事海洋地质工作的同行们，瞄准海洋高技术，引进、自主开发，加强国际合作，为我国的海洋地质工作作出新的贡献。



1997年4月4日

前 言

自 1873 年英国“挑战者号”科学考察船首次在大西洋发现多金属结核以来,广泛分布于现代洋底的多金属结核,作为一种具有重要潜在经济价值的海底矿产资源(含铜、钴、镍、锰)而受到世界各国的关注。西方发达国家相继在本世纪 60、70 年代开展了大规模的调查研究,并圈定了自己的开辟区,大多已完成区域放弃工作。西方发达国家通过大洋多金属结核的调查及试开采活动,一方面获得了海底矿产资源的开采权益,另一方面以此推动了海洋高技术的发展。

我国从 70 年代末开始进行有关多金属结核的勘查工作,在政府和有关部门的支持以及广大科研人员的努力下,取得了丰硕的调查和研究成果,在多金属结核矿床的调查研究以及深海采矿和选冶技术等方面正逐渐接近世界先进水平。90 年代以前,地质矿产部和国家海洋局分别引进了国际上较先进的设备和手段,如多频探测和测深、深海照相系统、无缆抓斗采样器以及 GPS 全球定位系统等,以“海洋四号”和“向阳红 16 号”船对中太平洋和东太平洋海盆进行了较大规模的调查研究,取得了极其丰富的地质、地球物理和多金属结核的数据资料和样品。通过对近 200 万 km^2 面积的调查,圈定了 30 万 km^2 以上的远景矿区。在此基础上,向联合国申请登记,成为继印度、原苏联、法国、日本之后的第五个先驱投资者国家。

从 90 年代开始,在中国大洋矿产资源开发研究协会的组织下,我国又开始在联合国批准的开辟区内作进一步的勘探工作。1992 年和 1994 年,“海洋四号”和“向阳红 9 号”相继进行了勘探,并取得了圆满的成果;同时引进了具 90 年代国际先进水平的多波束测深系统和深拖系统,为我国开辟区的后期详查作了必要的准备;1995 年,“大洋一号”运用多波束测深系统和深拖系统对开辟区的地形、地貌和多金属结核的分布进行了详细的调查,并进行了深海水下机器人的试验。在此基础上,完成了我国开辟区 30% 的放弃工作;“八五”期间,还开展了大量的多金属结核地质成矿规律及勘探技术、评价方法方面的研究,取得了一批有相当学术水平的研究成果。

近几十年来,随着深海矿产资源的开发和世界各国对开发利用其它海洋资源的迫切需要,有关的海洋技术也得到了飞速发展。对于多金属结核的勘探技术,已从早期以地质采样为主发展到地质、地球物理相结合的多种技术手段,从 80 年代的多频探测到 90 年代的线性调频技术、深拖技术,勘探精度及勘探效率逐步提高,技术手段也越来越先进;发达国家已利用深潜技术进行多金属结核调查及深海地质调查;有关深海矿产资源开采的环境影响调查及深海钻壳的调查也逐步成为热点。

本书系统地总结了我国开展大洋多金属结核调查以来所采用的主要勘探技术和评价方法,并结合了近年来大洋科研课题的研究成果及“海洋四号”船的航次调查成果。

全书由朱克超、张国桢统稿,共分六章。各章节的编写者为:第一章,朱克超;第二章,何高文;第三章,陈玄武、张国桢、朱克超、王公念、梁东红、陶军;第四章,朱克

超、张汉泉、侯颀、吴宣志；第五章，杨胜雄、李振韶；第六章，张国桢；前言及结语，朱克超。

大洋“八五”科研课题DY85-02-05，经参加者一致努力，历时五年，始告完成。本书是其成果的总结与升华。在本书出版之际，作者感谢大洋“八五”科研课题的委托，主持部门大洋协会及地矿部石油海洋局的领导的支持与帮助；感谢陈邦彦、陈圣源和王公念为本书提出宝贵意见和建议；另外，陈圣源对全书进行了校对，莫月珍、韦东菊清绘了图件，在此一并致谢！

特别感谢大洋多金属结核调查项目的早期筹划和领导者、中国科学院院士刘光鼎先生为本书作序。

目 录

序

前言

第一章 深海地质采样	(1)
一、有缆地质采样	(1)
二、自汲地质采样	(4)
第二章 海底地形地貌探测技术	(7)
一、多波束测深技术	(7)
(一) 多波束测深技术发展概况	(7)
(二) 多波束测深基本原理	(7)
二、SEABEAM 2100 系列多波束测深系统	(11)
(一) 系统特性	(11)
(二) 系统组成	(14)
(三) 数据采集及后处理	(17)
三、SEABAT 多波束测深系统	(25)
(一) 系统组成	(25)
(二) 系统特性	(25)
(三) 后处理	(26)
第三章 大洋多金属结核及沉积层的声学探测	(28)
一、多频探测	(28)
(一) 基本原理	(29)
(二) 系统的组成	(32)
(三) 探测结果的分析 and 讨论	(33)
二、宽频探测	(49)
(一) 宽频声学研究的构思	(50)
(二) 基本概念	(51)
(三) 大洋声波探测中的频散现象	(52)
(四) 大洋声学探测设备的改造	(55)
三、大洋沉积层的声学探测	(56)
(一) 大洋沉积层的声学探测技术	(56)
(二) 大洋沉积层的声学探测资料的解释与分析	(59)
(三) 透声层特征与多金属结核分布的关系	(62)
第四章 海底视像探测技术	(72)
一、海底照相及图像处理	(72)
(一) 海底照相	(72)

(二) 图像识别及处理技术	(73)
(三) 图像处理系统 NIRS	(76)
(四) 图像处理结果的地质解释	(77)
(五) 海底多金属结核图像处理技术展望	(87)
二、深拖系统简介	(89)
(一) 系统概述	(89)
(二) 系统组成	(91)
(三) 海试结果	(94)
第五章 多金属结核资源量计算	(96)
一、多金属结核资源量计算方法	(96)
(一) 算术平均法	(96)
(二) 标准差法	(97)
(三) 加权平均法	(97)
(四) 克立格法	(98)
二、各种方法计算结果分析	(100)
(一) 15'×15' 网格	(100)
(二) 7.5'×7.5' 网格	(106)
三、各资源量计算方法评价	(113)
(一) 各种方法计算结果比较	(113)
(二) 各资源量计算方法评价	(114)
第六章 大洋多金属结核勘探开发活动环境影响评价方法	(118)
一、深海环境影响实验	(118)
二、生态地质剖面调查研究	(124)
三、深海环境基线调查研究	(126)
结语	(129)
参考文献	(132)
图版说明及图版	(134)

第一章 深海地质采样

深海地质采样是指通过深海地质采样器直接获取海底结核和沉积物样品，它是大洋多金属结核调查的基本方法。深海地质采样主要通过有缆地质采样和自返地质采样两种方法进行。前者是使用万米深海绞车、倒L型吊架和其它取样器，在测站上获取多金属结核、表层沉积物、岩石和底层水样；后者是采用自返式取样器，在测站上采集多金属结核和较短的沉积物柱状样。

一、有缆地质采样

有缆地质采样是一种利用万米深海绞车和供取样器安全收放的倒L型吊架等器械进行采样的方法。其中，万米深海绞车由液压驱动，运转稳定可靠，配有自动排缆器、速度计、钢缆长度计和张计，钢缆的收放可以无级调速，并有应急报警装置和电动、手动刹车装置，操作简便，既可以在现场操作，雨天或风大时也可以在实验室遥控操作。

有缆地质采样的采样器类型主要有抓斗取样器、箱式取样器、拖网和柱状取样器四种。

1. 有缆抓斗取样器

有缆抓斗取样器是采集海底沉积物的装置，通常具有两个连接的采样斗，以开口状态下到海底，触底后自动合上抓样品，抓取的样品多受到扰动。我国大洋多金属结核调查采用大洋50型抓斗，为中国科学院青岛地质研究所产品，由地质矿产部第四海洋地质调查大队修配厂改装。取样面积为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ (0.25 m^2)，重约200 kg。取样器由钢缆连接，用万米绞车投放和回收，由声脉发生器确认着底。图1-1为大洋50型抓斗的结构示意图，其作业过程为：

- (1) 在抓斗接近海底时，先导重锤首先触底；
- (2) 先导重锤触底瞬间，抓斗从平衡杆释放器脱钩，自由降落扎入海底沉积物并取样；
- (3) 主钢缆提升，抓斗合拢，并把抓斗提离海底。

2. 有缆箱式取样器

有缆箱式取样器是垂直放入海底的无底金属盒，用于采集不受扰动海底沉积物样品。在插入沉积物后，金属铲刀自动闭合箱底。提升箱式器即获取样品。图版I-①为我国大洋多金属结核调查采用的MYZ型箱式取样器，由国家海洋局第二海洋地质研究所（杭州）生产，取样面积为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ (0.25 m^2)，重约440 kg。投放及回收设备以及取样方法基本同有缆抓斗

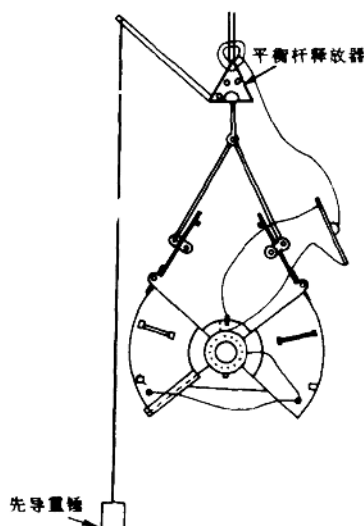


图 1-1 大洋 50 型抓斗结构示意图

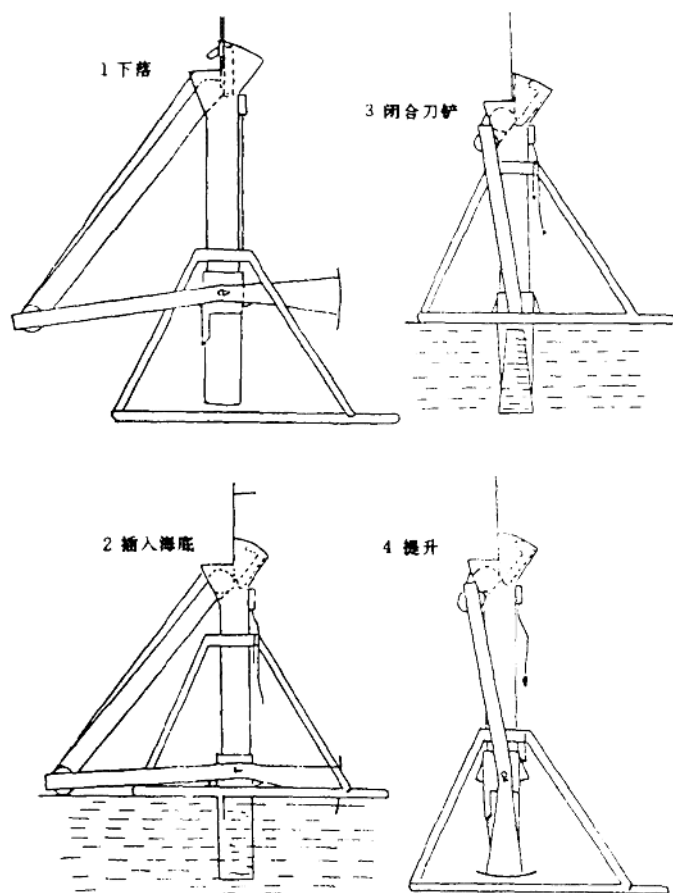


图 1-2 箱式取样器作业过程

取样器。图 1-2 为箱式取样器作业过程。

3. 拖网

拖网是箱式、管式或袋式装置的加长，在船只慢速走航时进行海底拖曳作业，采集多金属结核和岩石样品。图版 1-②为我国大洋多金属结核调查采用的拖网，由地质矿产部第二海洋地质调查大队设计，地质矿产部第四海洋地质调查大队修配厂制造，网口尺寸 $1.2\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ ，钢质。网身为双层尼龙绳制，网眼 1.5 cm 见方，网长约 2 m 。网尾固定一重锤以维持网身的伸展装填状态。拖曳及回收均靠万米深海绞车、钢缆进行，必要时配合以低速移动。图 1-3 为拖网作业示意图。

4. 柱状取样器

柱状取样器为长的中空圆管，直径一般为 $2\sim 8\text{ cm}$ ，用以穿入海底沉积物，从而获取扰动较少的柱状沉积物样品。取样器的长度，也即取样管的长度从 2 m 至 30 m 不等。最简单的柱状取样器为重力取样器，通过自身的重量将取样管压入沉积物中。活塞取样管则利用

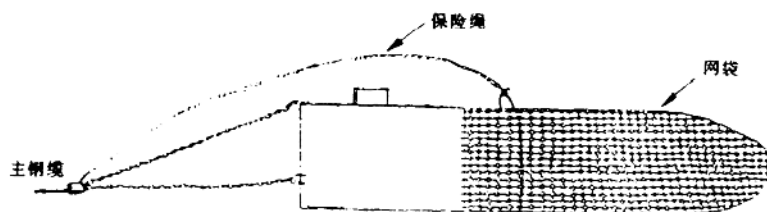


图 1-3 链式袋状拖网取样器作业示意图

静水压力和取样管内的活塞装置取样。图版 1-③为我国大洋多金属结核调查采用的 2450 型大型重力活塞取心器，由美国 Benthos 公司生产。取心器的重锤部分重约为 816 kg，取心器总重约 907 kg，套管尺寸 8.9 cm（外径） $\times$ 300 cm，衬管尺寸为 7.3 cm（外径） $\times$ 6.7 cm（内径） $\times$ 300 cm，最大取心能力为 15.2 m。该设备比较笨重，收放方法繁杂，且具有一定的危险性。为保证施工安全，要求在海况良好情况下进行。

图 1-4 显示了大型重力活塞取样器的作业过程。

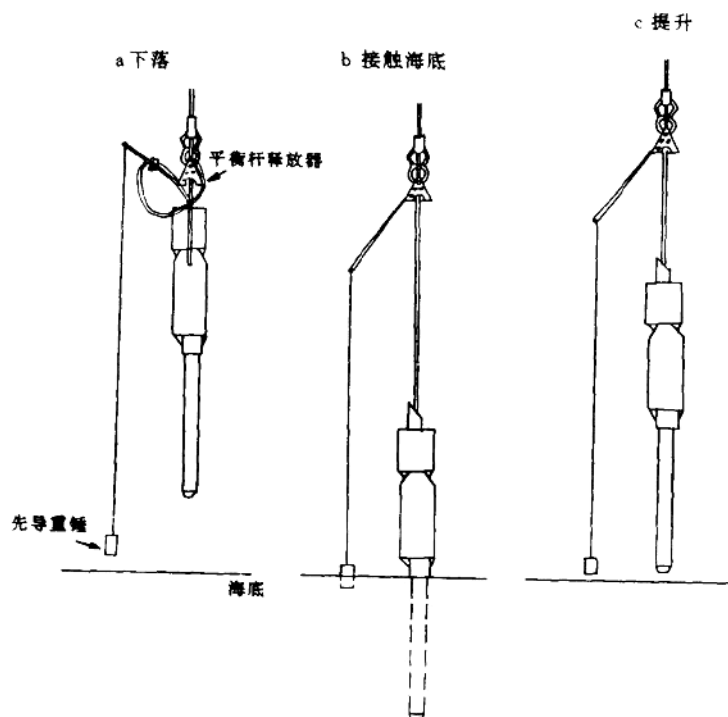


图 1-4 大型重力活塞取样器作业示意图

(1) 在重力活塞取样器接近海底时, 先导重锤首先触底 (图 1-4a)。悬挂先导重锤的细钢绳的长度等于或略小于预留的主钢绳的长度, 预留主钢绳的顶部安装活塞 (在锥形头位置);

(2) 先导重锤触底瞬间, 大型重锤从平衡杆释放器脱钩, 呈自由落体扎入海底沉积物中, 同时利用静水压力、活塞把沉积物抽入塑料衬管, 获取柱状沉积物 (图 1-4b);

(3) 提升主钢绳, 把取样器提高海底 (图 1-4c)。

二、自返地质采样

1. 自返抓斗取样器

自返抓斗取样器 (也称无缆抓斗取样器) 用于获取表层沉积物样品, 下水时不需万米深海绞车和钢绳, 而从船的一边投入海中。当取样器触底时, 抓斗合拢, 抓取表层沉积物, 同时释放压载物, 玻璃球的浮力使取样器浮出水面, 由船上进行回收。图版 1-④为我国大洋多金属结核调查采用的 4201 型自返抓斗, 由美国 Benthos 公司生产。它主要由带网袋的两个弹簧颌形夹、颌形夹释放装置、两个压载筒和带保护硬壳的玻璃浮球组成。采样器开口面积为 0.20 m^2 , 在空气中静重 36 kg , 静浮力 12 kg , 额定采样水深为 6700 m , 下放时装载 40 kg 铁砂, 其在水中沉放、返回的速度是 $1000 \text{ m}/38 \text{ min}$ (携带 2 kg 样品)。它不仅操作简单, 回收率高 (97%), 而且在海况较恶劣的情况下也能使用。在水深 5009 m 的海域作业时, 一般 3 h 可以返回水面, 但也与所获取的多金属结核的数量有关; 若获取的样品多, 回返的时间会稍长一些。白天根据 4201 型自返抓斗的红旗寻找, 夜晚则根据其上的闪光灯发现目标。图 1-5 为 4201 型自返抓斗结构图, 其作业过程为:



图 1-5 4201 型自返抓斗结构图

(1) 用曲柄撑开颌形夹, 用插销插上颌形夹释放杆固定; 在压载筒内装载铁砂, 同样用插销插上筒底盖释放杆固定; 网球装入其固着与网球释放杆之间, 网球释放杆压住主轴转环, 并插上插销。

(2) 用小吊机把自返抓斗吊起, 摇至船舷外准备下水, 拔去所有插销, 把自返抓斗放入水中。网球用来防止抓斗的提前触发, 直到 20 m 才被压缩脱出, 这时抓斗可稳定下沉。当抓斗下

降时，水压保持流体板向上顶住玻璃浮球保护帽的底部，流体板释放杆压住转环，使抓斗不被触发。

(3) 当抓斗触及海底瞬间，抓斗被触发，流体板下落，主轴转环向上弹起，铁砂泄出，颌形夹合拢，抓取海底表层沉积物及结核，由于玻璃浮球的浮力作用，使抓斗离开海底向上运动。

2. 自返重力取心器

自返重力取心器（也称无绳重力取心器）用于采取较短的柱状沉积物，其投放方式同自返抓斗取样器。当取样器触底时，靠取心管的加重的重力扎入海底，获取岩心，取心完成后，外壳遗留在海底，玻璃球的浮力使取样器浮出水面，由船回收。我国大洋多金属结核调查采用 1890 型自返重力取心器，取心器的重物部分在空气中静重约 75 kg，浮体部分重约 11 kg，在水中带样品的浮力为 6 kg，额定采样水深为 9000 m，其沉放返回平均速度为 1/15 km/min，比 4201 型自返抓斗快，衬管尺寸为 7.3 cm（外径）× 6.7 cm（内径）× 122 cm，最大取心长度为 1.2 m。它适于夜晚作业，根据其上的闪光灯发现目标，白天目标不明显，易丢失。实践表明，这种采样器操作简便，工作效率高，在某种程度上可以代替有绳重力取心器。图 1-6 为自返重力取心器的作业过程：

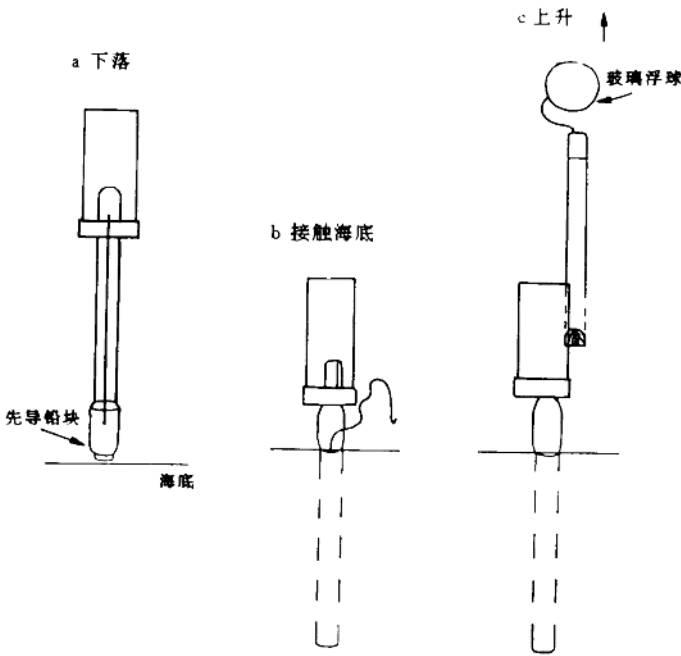


图 1-6 自返重力取心器作业示意图

(1) 在取心套管接近海底时，取心套管顶部及先导铅块先触底（图 1-6a），套管以重力作用扎入海底沉积物，同时先导铅块逐渐滑向套管尾部，当铅块到达套管尾部后，连接先导铅块的细钢绳一端与浮球脱离（图 1-6b）。

(2) 由于浮力作用, 浮球把塑料衬管及获取的柱状沉积物带离海底 (图 1-6c)。取心器外壳遗留在海底。

根据上述, 可以把各种地质采样器的工作特点归纳于表 1-1。

表 1-1 各种地质采样器的工作特点

采样器类型	取样目的	作业特征 (以 5000 m 水深计算)	作业强度
自返抓斗	• 结核丰度 • 结核品位 • 沉积物性质 (不包括直接测量的工程力学性质)	船体静止漂泊, 采样器自由落下并返回, 耗时约 3 h, 作业时间约为 4~6 h	较小
自返重力取心器	• 沉积物性质 (不包括直接测量的工程力学性质)	船体静止漂泊, 采样器自由落下并返回, 耗时约 2 h 30 min, 作业时间约为 4 h	较小
有缆抓斗	• 结核丰度 • 结核品位 • 沉积物性质 (包括直接测量的工程力学性质)	船体静止漂泊, 采样器用绞车放下与回收, 耗时约 3 h, 作业时间约为 4 h	一般
箱式取样器	• 结核丰度 • 结核品位 • 结核赋存状态 • 沉积物性质 (包括直接测量的工程力学性质)	船体静止漂泊, 采样器用绞车放下与回收, 耗时约 3 h, 作业时间约为 4 h	一般
大型重力活塞取样器	• 沉积物性质 (不包括直接测量的工程力学性质)	船体静止漂泊, 采样器用绞车放下与回收, 耗时约 3 h, 作业时间约为 5~6 h	较大
拖网	• 拖网的平均品位 • 为其它研究 (如采冶) 取样	船体慢速 (1~2 kn) 运动, 采样器用绞车放下与回收, 作业时间约为 5~6 h	较大

第二章 海底地形地貌探测技术

海底地形地貌的探测主要是通过水深测量而获得的。因此,海底地形地貌探测技术最终是由水深测量技术决定的。传统的单波束测深技术,由于其效率低、精度不够,已不能满足人们开发利用海洋的需要,取而代之的是多波束测深。由于多波束测深能够提供高精度、全覆盖的测量结果,因此,近十几年来,得到了日益广泛的应用。

一、多波束测深技术

(一) 多波束测深技术发展概况

人类自认识海洋之日起,就开始了对海水深度的测量,从原始的重物垂绳测量到先进的回波测深法测量,人们走过了一条漫长的认识自然的道路,多波束测深仪的出现更是近几十年的事。

1912年,“Titanic”轮被冰山撞沉的惨剧,使人们迫切要求找到一种能发现海底障碍物的手段。两年之后,出现了能探测2 mile^①处目标的 Fessenden 探测仪,此时尚未把这一技术应用于水深测量。直到1925年,才诞生了第一台单波束回声测深仪——Fathometer,它很快被广泛应用于大小船只。人们在发展单波束测深技术的同时,也开始了对多波束测深技术的探索。到本世纪60年代,出现了多波束回声测深仪——Swath。此时的多波束测深仪使用范围窄,且系统不够完善。之后,多波束测深技术不断成熟,全球涌现出许多生产研究多波束测深仪的公司机构,如 SeaBeam、Atlas、Simrad、Reson、Thomson 等公司。80年代后期,是多波束测深技术蓬勃发展的时期,各公司纷纷推出自己的新产品,技术性能不断提高,如 SeaBeam 公司推出的 SEABEAM 2000 系列、2100 系列, Reson 公司的 SEABAT 系统, Simrad 公司的 Simrad EM 1000 等。

我国对多波束测深仪的研制始于70年代,进行这方面工作的主要有海军航保部、哈尔滨船舶大学、中国科学院声学研究所、上海交通大学等。中科院声学所以 SeaBeam 和 Simrad 产品为基准,研制出频率为100 kHz的多波束测深仪;1993年,哈尔滨船舶大学与海军航保部合作研制出频率为45 kHz、工作深度10~1000 m的多波束测深仪。

(二) 多波束测深基本原理

1. 几个工程水声学基本概念

(1) 声纳方程 (sonar equation)

在声纳设备的设计和应用过程中,必须考虑到许多水声学所特有的现象和效应,如声波的传播损失、吸收损失、反射、折射等。声纳方程就是把这些因素联系在一起,以产生积极作用的关系式。声纳方程是进行声纳设备设计研究的核心所在和基本出发点。

① 1 mile=1609.3 m.

声纳方程:

$$L_s - 2L_T + S_T - (L_N - D_I) = T_D$$

式中: L_s ——声源级 (source level), 指发出信号的强度, $L_s = 10 \lg (I/I_{\text{REF}})$, I 为声强, I_{REF} 为单位距离处的声强;

L_T ——传播损失 (transmission loss), 指声波信号在传播过程中的信号损失, $L_T = 20 \lg \{R\}_m$, R 为球面扩展的球半径, 即声源与目标物之间的距离;

S_T ——目标强度 (target strength), 也即反向散射强度 (S_B), $S_B = 10 \lg \mu + 10 \lg \sin^2 \theta$ (θ 为掠射角);

L_N ——噪声级 (noise level);

D_I ——方向性指数 (direction index), 指接收某一方向的信号;

T_D ——检测阈 (detection threshold)。

声纳方程的物理意义为: 由发射器产生一个声源, 在其声轴上单位距离处产生 L_s 分贝的声源级。当发射声波沿声轴方向到达目标时, 由于传播损失, 声源级降低为 $L_s - L_T$, 由于被目标强度为 S_T 的目标所反射或折射, 在返回声源的方向上距目标的声学中心 1 码^① 处的反射或反向散射级为 $L_s - L_T + S_T$ 。当回波信号返回到声源位置时, 声源级再次由于传播损失而衰减, 变为 $L_s - 2L_T + S_T$, 这即是在水听器上的声源级。在声波传播过程中存在环境噪声, 假设环境噪声为各向同性而非混响, 环境噪声级为 L_N 。该噪声被水听器的方向性指数压低, 因此, 在水听器的输出端, 相对噪声的能量为 $L_N - D_I$ 。因为水听器的声轴与回声传来的方向相重合, 所以相对回声能量不受水听器方向性的影响, 且最后在水听器输出端的信噪比为 $L_s - 2L_T + S_T - (L_N - D_I)$ 。对测深仪或多波束测深系统而言, 需要设置一个阈值 (T_D), 才能根据此信噪比对深度或距离作出判断。当输入信噪比小于检测阈时, 不能判断深度或距离; 当深度或距离刚好能检测时, 信噪比等于检测阈 T_D 。

(2) 波束形成 (beam forming)

水听器接收到的回波信号是一种振幅呈指数衰减的海底混响信号 (bottom reverberation signal), 需要经过进一步处理后才能变成可供利用的信息, 其中波束形成就是至关重要的一步。波束形成的方法一般有两种: 一种是时域波束形成 (time domain beam forming), 另一种是频域波束形成 (frequency domain beam forming)。其中, 前者是一种传统方法, 又包括延时法 (加权、求和) 和相位法两种; 后者主要是快速傅里叶变换 (FFT), 这种方法技术要求较高, 难度较大, 但处理效果好, 最多可形成 1000 多个波束。下文介绍的 SEABEAM 2100 系列多波束测深系统就是采用此法。

假设接收阵的阵元是等间距 (间距为 d), 且在同一条直线上, 波束形成 (频域) 可推导如下:

设单位声压的平面正弦声波以 θ 角入射到 n 个上述阵元构成的线阵上 (图 2-1), 第 m 个阵元的输出相对于第 0 个阵元要滞后一段时间, 这段时间就是声波传播距离 $l_m = m d \sin \theta$ 所花费的时间, 若声波波长为 λ , 圆频率为 $\omega = 2\pi f$, 则相应的相位滞后为:

$$\mu_m = \frac{2\pi}{\lambda} l_m = m\mu$$

① 1 码 $\approx 0.91 \text{ m}$ 。

而相邻两阵元之间的相位滞后为：

$$\mu = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$$

电压响应为 R_m 的第 m 个阵元的输出电压

$$V_m = R_m \cos(\omega t + m\mu)$$

整个阵的输出电压为各阵元输出电压之和：

$$V = R_0 \cos \omega t + R_1 \cos(\omega t + \mu) + \cdots + R_m \cos(\omega t + m\mu) + \cdots + R_{n-1} \cos[\omega t + (n-1)\mu]$$

以复数形式表示为：

$$V = (R_0 + R_1 e^{i\mu} + R_2 e^{2i\mu} + \cdots + R_{n-1} e^{i(n-1)\mu}) e^{i\omega t} \quad (1)$$

若各阵元都是单位响应，则：

$$R_0 = R_1 = \cdots = R_{n-1} = 1$$

式 (1) 相应变为：

$$V = (1 + e^{i\mu} + e^{2i\mu} + \cdots + e^{i(n-1)\mu}) e^{i\omega t} \quad (2)$$

式 (2) 乘 $e^{i\mu}$ 减 (2) 整理可得：

$$V = \left(\frac{e^{in\mu} - 1}{e^{i\mu} - 1} \right) e^{i\omega t} \quad (3)$$

因为 $e^{i\theta} = \cos \theta$ ，(3) 式省略时间因子得：

$$V = \frac{\sin(n\mu/2)}{\sin(\mu/2)}$$

在上式中，以 θ 代 μ ，关系式两边平方后，在 $\theta=0$ 处归一化，即得到最后的波束公式：

$$B(\theta) = \left[\frac{\sin(n\pi d \sin \theta / \lambda)}{n \sin(\pi d \sin \theta / \lambda)} \right]^2$$

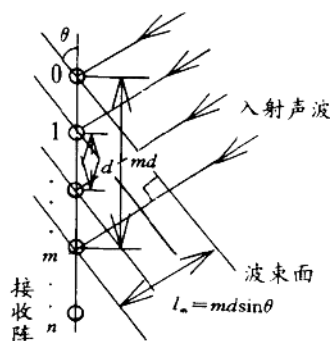


图 2-1 接收阵波束关系图解

其几何图形如图 2-2 所示。 $\theta=0^\circ$ 时，即法线入射，同相叠加； θ 不为 0° 时，作延时相加，以达到同相叠加的效果，也就是使主瓣与入射方向一致。

(3) 能量中心检测

对接收波束信号的能量中心进行检测，找出真正的能量中心点，这样才能确定波束在海底的精确位置。简言之，在接收波束信号能量图中，积分值最大处就是能量中心点。