

“十三五”国家重点图书

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

海洋测绘丛书

水下地形测量

阳凡林 暴景阳 胡兴树 编著

Oceanic
Surveying And Mapping



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

“十三五”国家重点图书

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

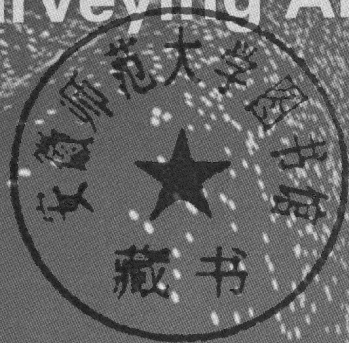
海洋测绘丛书

水下地形测量

阳凡林 暴景阳 胡兴树 编著

Oceanic

Surveying And Mapping



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

水下地形测量/阳凡林,暴景阳,胡兴树编著. —武汉:武汉大学出版社, 2017. 1

海洋测绘丛书

ISBN 978-7-307-18841-9

I. 水… II. ①阳… ②暴… ③胡… III. 水下地形测量
IV. P229. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 274975 号

责任编辑:王金龙 责任校对:李孟潇 版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北民政印刷厂

开本:787 × 1092 1/16 印张:21 字数:496 千字 插页:1

版次:2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-18841-9 定价:45.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

学术委员会

主任委员 宁津生

委 员 (以姓氏笔画为序)

宁津生 任廷琦 李建成 李朋德 杨元喜 杨宏山
陈永奇 陈俊勇 周成虎 欧吉坤 金翔龙 翟国君

编委会

主 任 任廷琦

副 主 任 李建成 卢秀山 翟国君

委 员 (以姓氏笔画为序)

于胜文 王瑞富 冯建国 卢秀山 田 淳 石 波
艾 波 任廷琦 刘焱雄 孙 林 许 军 阳凡林
吴永亭 张汉德 张立华 张安民 张志华 张 杰
李建成 李英成 杨 鲲 陈永奇 周丰年 周兴华
欧阳永忠 罗孝文 胡兴树 赵建虎 党亚民 桑 金
高宗军 曹丛华 章传银 翟国君 暴景阳 薛树强

序

现代科技发展水平，已经具备了大规模开发利用海洋的基本条件；21世纪，是人类开发和利用海洋的世纪。在《全国海洋经济发展规划》中，全国海洋经济增长目标是：到2020年海洋产业增加值占国内生产总值的20%以上，并逐步形成6~8个海洋主体功能区域板块；未来10年，我国将大力培育海洋新兴和高端产业。

我国海洋战略的进程持续深入。为进一步深化中国与东盟以及亚非各国的合作关系，优化外部环境，2013年10月，习近平总书记提出建设“21世纪海上丝绸之路”。李克强总理在2014年政府工作报告中指出，抓紧规划建设“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”；在2015年3月国务院常务会议上强调，要顺应“互联网+”的发展趋势，促进新一代信息技术与现代制造业、生产性服务业等的融合创新。海洋测绘地理信息技术，将培育海洋地理信息产业新的增长点，作为“互联网+”体系的重要组成部分，正在加速对接“一带一路”，为“一带一路”工程助力。

海洋测绘是提供海岸带、海底地形、海底底质、海面地形、海洋导航、海底地壳等海洋地理环境动态数据的主要手段，是研究、开发和利用海洋的基础性、过程性和保障性工作；是国家海洋经济发展的需要、海洋权益维护的需要、海洋环境保护的需要、海洋防灾减灾的需要、海洋科学研究的需要。

我国是海洋大国，海洋国土面积约300万平方千米，大陆海岸线约1.8万千米，岛屿1万多个；海洋测绘历史欠账很多，未来海洋基础测绘工作任务繁重，对海洋测绘技术有巨大的需求。我国大陆水域辽阔，1平方千米以上的湖泊有2700多个，面积9万多平方千米；截至2008年年底，全国有8.6万个水库；流域面积大于100平方千米的河流有5万余条，国内河航道通航里程达12万千米以上；随着我国地理国情监测工作的全面展开，对于海洋测绘科技的需求日趋显著。

与发达国家相比，我国海洋测绘技术存在一定的不足：(1)海洋测绘人才培养没有建制，科技研究机构稀少，各类研究人才匮乏；(2)海洋测绘基础设施比较薄弱，新型测绘技术广泛应用缓慢；(3)水下定位与导航精度不能满足深海资源开发的需要；(4)海洋专题制图技术落后；(5)海洋测绘软硬件装备依赖进口；(6)海洋测绘标准与检测体系不健全。

特别是海洋测绘科技著作严重缺乏，阻碍了我国海洋测绘科技水平的整体提升，加重了海洋测绘科学研究和工程技术人员在掌握专门系统知识方面的困难，从而延缓了海洋开发进程。海洋测绘科学著作的严重缺乏，对海洋测绘科学水平发展和高层次人才培养进程的影响已形成了恶性循环，改变这种不利现状已到了刻不容缓的地步。

与发达国家相比，我国海洋测绘方面的工作起步较晚；相对于陆地测绘来说，我国海

洋测绘技术比较落后，缺少专业、系统的教育丛书，大多数相关书籍要么缺乏，要么已出版 20 年以上，远不能满足海洋测绘专门技术发展的需要。海洋测绘技术综合性强，它与陆地测绘学密切相关，还与水声学、物理海洋学、导航学、海洋制图、水文学、地质、地球物理、计算机、通信、电子等多学科交叉，学科内涵深厚、外延广阔，必须系统研究、阐述和总结，才能一窥全貌。

就海洋测绘著作的现状和社会需求，山东科技大学联合从事海洋测绘教育、科研和工程技术领域的专家学者，共同编著这套《海洋测绘丛书》。丛书定位为海洋测绘基础性和技术性专业著作，以期作为工程技术参考书、本科生和研究生教学参考书。丛书既有海洋测量基础理论与基础技术，又有海洋工程测量专门技术与方法；从实用性角度出发，丛书还涉及了海岸带测量、海岛礁测量等综合性技术。丛书的研究、编纂和出版，是国内外海洋测绘学科首创，深具学术价值和实用价值。丛书的出版，将提升我国海洋测绘发展水平，提高海洋测绘人才培养能力；为海洋资源利用、规划和监测提供强有力的基础性支撑，将有力促进国家海权掌控技术的发展；具有重大的社会效益和经济效益。

《海洋测绘丛书》学术委员会

2016 年 10 月 1 日

前 言

水下地形测量学是海洋测量学的一个重要分支，主要是对海洋、江河、湖泊、水库、港湾、海岸带和岛礁周边水底点的平面位置和高程进行测定并绘制水下地形图的一门应用科学。水下地形测量是人类开发和利用海洋、江河、湖泊的“排头兵”，是一项基础而又极其重要的工作，其作用非常广泛，既为地球科学研究提供基础信息，也为各种不同的海洋工程开发和海洋军事活动提供服务，还为海图和海洋地理信息应用提供基础数据。

水深信息的获取，除了直接测量以外，还可以采用遥感、重力反演的形式，但其精度目前还无法达到相关规范要求。因此，本书主要介绍直接进行水下地形测量的技术方法，包括船载声学测量和机载激光测量两种。因为光波、电磁波在水中衰减很快，只有声波测距是水下测距最有效的方式，水下测距通常采用信号单程旅行时间乘以信号传播速度来计算得到。测深方式有两种：一种是计算垂直距离，即水深；另一种是通过斜距和入射角来计算得到水深，从而衍生出两类声学设备——单波束测深仪和多波束测深仪。由于声学信号本身特性的限制，采用船载测深手段，测量速率低，难以进行灵活、快速的大面积测量。而机载 LiDAR 测深技术利用机载激光发射系统发射激光信号，对海面进行扫描测量，通过接收系统探测海面和海底的激光回波信号，从而确定海底地形和海水深度，在大面积测量中效率高，但其水下作用距离有限，受水质的影响严重，因此在目前的水下地形测量中应用并不普遍。

实际测深过程中，测量载体并不处于一个平衡的状态，水面动态变化，介质传播速度受到海水中各种因素的影响而发生变化，测量载体存在姿态变化、起伏变化等问题，所以在测量过程中需要使用其他辅助传感器得到测量瞬间载体的位置、方位和姿态等信息。除此之外，瞬时水深还受到潮汐变化的影响，还需在水深测量过程中同步验潮，最后在数据处理过程中消除潮汐或水位变化的影响，将测点的水深或高程值归算到稳态的垂直基准面上，再进行数字水底高程模型、水下地形图和各类海图等产品的加工。

本书力求阐述水下地形测量的基本理论和方法，了解水下地形信息的参考系，叙述船载声学测深和机载 LiDAR 测深技术的几何和物理原理、误差来源以及数据处理方法，介绍水下地形项目组织实施过程，提供较完整的水下地形测量知识体系，促进我国水下地形测量技术的发展。

全书共分 11 章，由山东科技大学、海军大连舰艇学院和海南测绘地理信息局的阳凡林、暴景阳和胡兴树等共同编著完成，其中第 1 章、第 2 章由阳凡林、暴景阳撰写，第 3 章、第 5 章由暴景阳撰写，第 4 章由暴景阳、阳凡林撰写，第 6~9 章由阳凡林撰写，第 10 章由胡兴树、王春晓、艾波撰写，第 11 章由胡兴树、王春晓撰写。

在编著本书的过程中，作者参考了国内外相关学者的大量文献，宿殿鹏、冯成凯、柳

义成、辛明真、孙月文、卜宪海、王明伟、闫循鹏、孟俊霞、赵春霞、马丹等研究生提供素材并参与编辑，在此一并表示诚挚感谢。

水下地形测量属于多学科交叉技术，其理论和方法与作用手段密切相关，技术也随相关学科的发展而发展。由于作者水平有限，书中疏漏和不足之处在所难免，敬请专家和读者批评指正。

作者

2016年5月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 水下地形测量的基本原理和概念	1
1.2 水下地形测量的内容和作用	2
1.3 水下地形测量与相关科学技术的关系	8
1.4 本书的体系结构	10
第 2 章 水下地形信息的参考系	12
2.1 水下地形测量中常用的坐标系统	12
2.2 测深点的位置归算	18
2.3 垂直基准体系与转换	27
第 3 章 水声学与水声技术基础	38
3.1 水声学基本原理	38
3.2 声速与声传播	45
3.3 水声换能器及声波收发原理	51
3.4 声传播能量损失与声呐方程	71
第 4 章 测量载体定位与导航	83
4.1 传统地基导航定位技术及精度	83
4.2 卫星定位技术及精度	102
4.3 水声定位技术及精度	109
第 5 章 水下地形的单波束断面测量模式	118
5.1 回声测深基本原理	118
5.2 回声测深的主要误差源	122
5.3 地形形态对断面方向及测图比例尺的依赖性	132
第 6 章 水下地形的多波束条带覆盖测量模式	138
6.1 多波束海底观测基本原理	138
6.2 系统安装校准	159
6.3 波束脚印归位	162

6.4	条带设计与测量效率的关系	164
6.5	典型的多波束系统	168
第7章	海底声学成像原理	176
7.1	海底测量声呐成像原理	176
7.2	海底测量声呐图像镶嵌	182
7.3	典型的侧扫声呐系统	186
7.4	侧扫声呐图像的变形与改正	195
7.5	侧扫声呐图像的分辨率与判读	201
7.6	声波回波强度与底质类型的关系	207
第8章	机载 LiDAR 水下地形测量技术	210
8.1	机载 LiDAR 测深工作机理	210
8.2	系统校准及数据采集	221
8.3	点云数据的海底地形信息处理	225
8.4	回波数据的海底底质分类	230
8.5	典型的机载 LiDAR 测深系统	232
第9章	水下地形测量的主要误差及改正	243
9.1	换能器吃水的影响及测量	243
9.2	声速改正	246
9.3	水位变化与水位改正	253
9.4	GNSS 高精度动态测高模式支持的水下地形测量	268
第10章	海底数字地形模型	270
10.1	海底 DTM 构建	270
10.2	大场景海底地形数据组织和三维可视化	279
10.3	海底地形三维可视化软件	294
第11章	水下地形测量的组织实施	298
11.1	项目设计	298
11.2	组织与实施	305
11.3	成果质量检查与验收	311
11.4	技术总结的编写	315
	参考文献	318

第1章 绪论

1.1 水下地形测量的基本原理和概念

陆地上的地形测量是通过对各地形要素与测站或传感器之间相对关系的确定而实现的,这个相对关系(相对坐标差与高差或距离与角度)就是根据各地形要素与测站或传感器的距离、角度或方位计算的,有了这些相对关系和属性信息,即可绘制成地形图。为了表示各地形点的绝对位置,必须已知测站或传感器测量瞬间的位置(移动测量时还须知道姿态信息)。水下地形测量(Underwater Topographic Survey)与陆地地形测量原理类似,主要区别在于测距设备不同,前者一般用声学设备进行测距,后者一般采用光学、电磁波等信号设备实现测距。这是因为光波、电磁波在水中衰减很快,而声波在水中能远距离地传播。

给出一个定义,水下地形测量就是利用测量仪器来确定水底点三维坐标的实用性测量工作。它是海洋测量学的一个重要分支,其任务是完成海洋或江河湖泊的水下地形图测绘工作(陈然,2009)。有鉴于此,如无特别说明,本书后续章节不再区分海底地形测量和水下地形测量。水下地形测量为各种海洋活动提供基础地理信息,其重要性不言而喻,既服务于水域交通运输、港口建设、海上钻井、海域划界和海上军演等经济与军事活动,还为地球形状研究、海底构造和空间特征提供基础性信息。

水下地形测量手段众多,但本质上是相同的,需要同时得到每个水底点的平面位置和高程,通过测量布满测区的无数多个水底点(类似于陆地地形测量的碎部点)就可得到水下地形图,反映水底起伏形态。水下测距通常采用信号单程旅行时间乘以信号传播速度来计算得到。目前声波测距是水下测距最有效的方式,GNSS(Global Navigation Satellite System,全球导航卫星系统)定位导航是水上准确、高效的定位导航方式,“GNSS+测深仪”这种手段在进行水下地形测量中使用广泛,其基本原理是测量载体在GNSS导航仪的辅助下,获取测区内测点的瞬时平面坐标,同时利用测深设备获得相应位置处的水深值。测深方式有两种,一种是计算垂直距离,即水深,另一种是通过斜距和入射角来计算得到水深,从而衍生出两类声学设备——单波束测深仪和多波束测深仪。除声波测距以外,还可采用激光测距方式,相对于前者来说,后者精度高,但水下作用距离有限。

实际作业时,水面是动态变化的,测量载体并不处于一个平衡的状态,声速受到海水中各种因素的影响而发生变化,测量船存在航向变化、姿态变化、吃水变化等问题,所以在测量过程中需要通过其他辅助设备获取测量瞬间测船的位置、方位和姿态等信息,如声速剖面仪、电罗经、姿态仪、GNSS接收机等。除此之外,瞬时水深还受到潮汐变化的影

响,需要在水深测量过程中同步验潮,再在数据处理过程中消除潮汐或水位变化的影响,将测点的水深或高程值归算到稳态的垂直基准面上,最后进行数字水底高程模型、水下地形图和各类海图等产品的加工。

早期在没有 GNSS 定位导航时,水下地形测量技术落后,测量船定位主要采用光学定位和无线电定位技术,很大程度上依赖于人工图板作业,精度差,效率也非常低。随着 GNSS 定位技术、水声技术和电子计算机技术的发展和大数据时代的到来,全自动化的数字水下地形测量已是现代水下地形测量的主要形式,能够自动采集数据、自动存储数据,具有自动化程度高、速度快、准确程度高等特点,如单波束测深仪、多波束测深系统、机载雷达测深系统等。

1.2 水下地形测量的内容和作用

海洋测量技术的产生和发展,首先源于人类海上活动的需求。早期的航海活动,对航线上的水深和影响航行的相关水文气象要素提出了迫切的需求,催生了海道测量萌芽。如 1405—1433 年,郑和七下西洋,依靠简单的测量器具,开始了上述要素的测量,结合对近岸陆地导航参照物和地形的写意式表示,编制了郑和航海图,基本保证了船队的海上出行需要。葡萄牙人于 1487—1488 年到达非洲最南端的好望角,西班牙人哥伦布于 1492 年跨越大西洋,踏上美洲的土地,麦哲伦在 1519—1572 年真正完成了环球航行。这一系列标志性的古代航海活动不断强化着对相关地理和海洋要素的需求,也通过开展零星的海上测量和调查活动,推动着海洋测量技术的发展。对海洋测量发展进步起到最大推动作用的是英国的海洋考察活动。1768—1779 年,在 Cook 船长的带领下,英国科考队进行了三次远洋考察。1768 年的第一次考察,船队到达了新西兰和澳大利亚,测量了新西兰沿岸的水深,发现了澳大利亚东部的大堡礁;1778—1779 年的第三次科考,在太平洋海域发现诸多岛礁。此后,主要的海洋强国相继组织了海上考察,设计和制造了各种观测和分析的仪器。1925—1927 年,德国科考船“流星”号在南大西洋测量和记录了海底地形。

水下地形测量技术发展至今,出现了船载、机载、星载等多种平台下的现代化技术手段,但不管采用何种技术手段,水下地形测量的内容主要包括定位测量、水深测量和水位控制三部分。

1. 定位测量

所谓定位测量是指测深过程中对载体瞬时位置的确定,对于目前常用的船载测量方式,水上定位就是实时获取测船的平面位置。

早期载体的定位手段主要有光学定位和陆基无线电定位,存在精度差、操作繁琐等问题,难以满足现代工程实际需求,大部分方法几乎停用。近年来,随着技术的革新与飞速发展,特别是 GNSS 技术的突飞猛进与水声定位技术的发展,海洋定位技术取得了突破性的进展,测量载体也不再是单一的测量船,新增了飞机、无人机和水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)等。目前广泛使用的定位技术有 GNSS 差分定位、精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)和水声定位等。下面简要介绍各种海洋定位导航手段与方法。

海上光学定位与陆上定位的原理和方法相同,以交会法为主,即通常所用的前方交会法、后方交会法等,在 20 世纪六七十年代广泛应用。

无线电定位包括陆基无线电定位和空基无线电定位两种。陆基无线电定位由 20 世纪初发展起来,系统的主要部分是地面导航台,该方法具有作用距离远和全天候连续定位等特点,作用距离可由几十千米到上千千米,其基本原理主要是测量距离定位和测量距离差定位,通过在陆上设立若干个无线电发(反)射台(称为岸台),测量无线电波传播的距离或距离差来确定运动的船台相对于岸台的位置。如海用微波测距仪是沿岸海区海上定位的主要仪器之一,作用距离为几十公里,测距精度为 1~2m;更远距离的定位则采用各种不同原理的无线电定位系统,其精度也有所不同,如罗兰 C、奥米加等(梁开龙,1995)。

卫星导航定位技术是空基无线电定位最具代表性的技术之一,兴起于 20 世纪 70 年代,是目前海上定位使用最广泛、最有效的技术手段。GPS 单点定位由于受到的影响因素众多,如卫星星历误差、电离层折射误差和多路径效应等,其定位精度在 5~20m,不适合高精度定位导航需求,因此 GPS 差分技术应运而生,并在实际工程中广泛应用。我国沿海早期 GPS 差分形式有信标差分 and GPS RTK 技术。信标差分是指我国的沿海无线电指向标——差分全球定位系统(Radio Beacon-Differential Global Position System, RBN-DGPS),是中国海事局于 1995—2000 年组织建立的覆盖我国沿海海域并由 20 个航海无线电指向标构成的助航系统,其原理本质上是利用无线电信标播发伪距差分(RTD)改正信息从而实现实时动态差分定位,其定位精度在 1m 左右。GPS RTK 称为载波相位实时动态差分定位技术,定位精度在厘米级,但这种技术的作用距离有限,一般为 15km 左右,故常用于近岸水下地形测量作业中。卫星导航技术发展的广度和深度均在增加,目前全球除 GPS 外,还有中国的北斗、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的伽利略等卫星导航系统,由一支独大的 GPS 发展成为群星璀璨的 GNSS,差分技术也由单基站差分发展到网络 RTK 技术,单点定位技术也出现了精密单点定位技术。网络 RTK 技术是利用多个基准站构成一个基准站网,然后借助广域差分 GNSS 和具有多个基准站的局域差分 GNSS 中的基本原理和方法来消除或减弱各种 GNSS 测量误差对流动站的影响,从而达到增加流动站与基准站间的距离和提高定位精度的目的。与常规 RTK 相比,该方法具有覆盖面广、定位精度高、可靠性强、可实时提供厘米级定位等优点;而精密单点定位技术则利用精密卫星轨道和卫星钟差数据,对单台 GNSS 接收机所采集的相位观测值进行定位解算,其实时定位精度可达到分米甚至厘米级(李征航等,2005)。由于其不受基准站距离的限制,在海洋测绘中有巨大的应用潜力。

水声定位也是一种在海洋测量中常见的定位技术。18 世纪初,法国及瑞士科学家首次精确地测量了水中声速,使得水声定位技术开始应用。在第一次世界大战中,水声定位技术在军事领域崭露头角。第二次世界大战及战后年代,水声定位技术作为重要的军事定位手段受到了各国的重视并得以全面发展,各项理论和技术逐渐成熟。其基本原理是利用声学信号的发射和接收进行测距或测向来确定水下声标(或应答器)与固定在船体下或水中载体中的换能器之间的相对位置关系,确定其中任意一项(换能器或应答器)的绝对位置后,即可获取另一项的绝对坐标。常见的水声定位技术有长基线(Long Baseline, LBL)、短基线(Short Baseline, SBL)和超短基线(Ultra Short Baseline, USBL)定位技术。通常采用

GNSS 与水声定位的组合方式为水下目标进行定位, 例如潜水员水下作业和水下考古, ROV(水下遥控机器人)和 AUV(水下自治机器人)水下定位导航。

2. 水深测量

水下地形测量的发展与其测深手段的不断完善是紧密相关的。早期测深是靠测深杆和测深锤(图 1-1)完成的, 效率低下。1913 年, 美国科学家 R. A. Fessenden 发明了回声测深仪, 其探测距离可达 3.7km; 1918 年, 法国物理学家 Paul Langevin 利用压电效应原理发明了夹心式发射换能器, 它由晶体和钢组成, 实现了对水下远距离目标的探测, 第一次收到了潜艇的回波, 开创了近代水声学并发明了声呐。进入 20 世纪 70 年代, 多波束测深系统兴起, 并随着数字化计算机技术的飞速发展, 逐渐出现了高精度、高效率、自动化、数字化的现代多波束测深系统, 测深模式实现了从点到线、从线到面的飞跃。下面简要介绍各种测深的手段和方法。

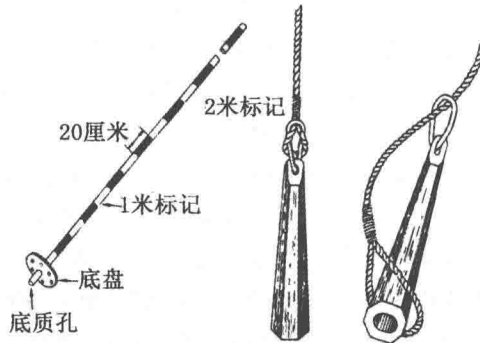


图 1-1 测深杆与测深锤

单波束测深属于“线”状测量。当测量船在水上航行时, 船上的测深仪可测得一条连续的剖面线(即地形断面)。根据频段个数, 单波束测深仪分为单频测深仪和双频测深仪。单频测深仪仅发射一个频段的信号, 仪器轻便, 而双频测深仪可发射高频、低频信号, 利用其特点可测量出水面至水底表面与硬地层面的距离差, 从而获得水底淤泥层的厚度(图 1-2)。

就单频单波束测深而言, 假设换能器吃水为 d , 声波在水中的传播速度为 c 、传播时间为 t , 则测得的水深值为:

$$H = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t + d \quad (1.1)$$

同理, 通过双频测深仪测得的两个水深值 H 和 D 便可求出淤泥等软质层的厚度:

$$L = D - H \quad (1.2)$$

多波束测深属于“面”状测量。它能一次给出与航迹线相垂直的平面内成百上千个测深点的水深值, 所以它能准确、高效地测量出沿航迹线一定宽度(3~12 倍水深)内水下目标的大小、形状和高低变化(赵建虎, 2007)。与单波束相比, 其系统组成和水深数据处理过程更为复杂。除多波束测深仪本身外, 还需外部辅助设备包括姿态仪、电罗经、表层

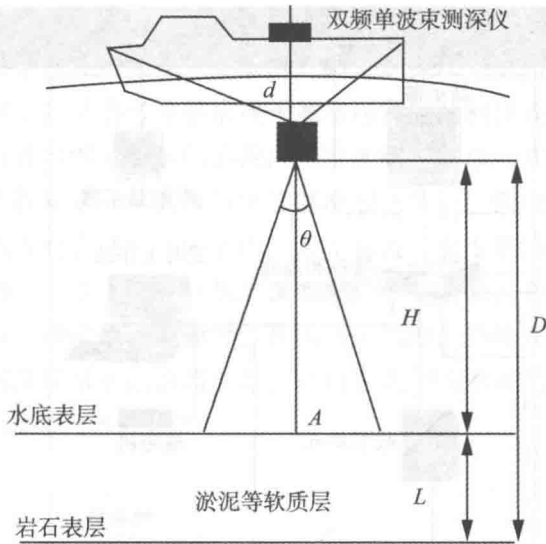


图 1-2 双频单波束测深原理图

声速仪、声速剖面仪和 GNSS 定位仪等(图 1-3)来提供瞬时的位置、姿态、航向、声速等信息。

侧扫声呐常用于水下地貌的调查,提供水底表面声学图像,一般不提供水深测量的功能。但近年来,出现了一种高分辨率测深侧扫声呐,在得到水底地貌图像的同时,也可得到水深信息(赵建虎,2007)。

此外,机载激光测深系统也可用于水下地形测量,具有低成本、高效率的特点。机载激光测深是机载激光雷达测量技术在海洋测绘方面的应用之一,其基本原理是利用红绿激光在海水中的传播特性来计算海水的深度(图 1-4)。该技术兴起于 20 世纪 80 年代,以美国和德国为首,1993 年德国研制出首个商用机载雷达测深系统 TopScan,推动了机载雷达测量技术在各行业的普及与应用。机载激光测深技术对大范围、沿岸岛礁海区、不可进入地区、水草覆盖区域地形的快速获取具有明显优势,缺陷在于对水质要求较高,且探测深度有限。目前,该系统常用于浅海海底地形的探测或海岸侵蚀的动态监测(张小红,2003)。

3. 水位控制

瞬时水深受水位变化的影响,必须移除其影响以得到稳态的水深。水位控制就是在测区周围布设合适的水位站,采用满足精度要求的技术手段观测水位的变化(沿海称为验潮),采用合适的水位改正(或潮位改正、潮汐改正)模型计算每个点测深瞬间的水位值。沿海通常建有长期验潮站,根据工程需要,还可自行建立短期水位站或临时水位站。水位站布设的密度应能控制全测区的水位变化。常用的水位观测方法主要有自动观测、人工观测和 GNSS 测高确定水面高程等方法。

自动观测指采用仪器自动记录水位数据,这样的仪器一般称为验潮仪或水位计,长期

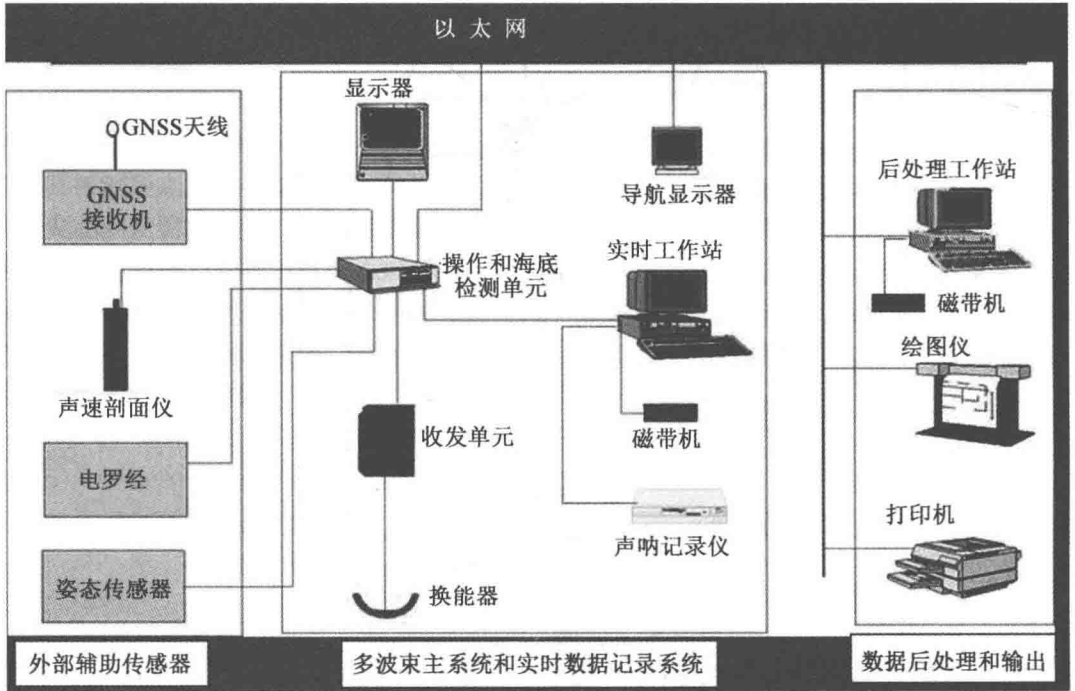


图 1-3 多波束测深系统组成示意图(多波束技术组, 1999)

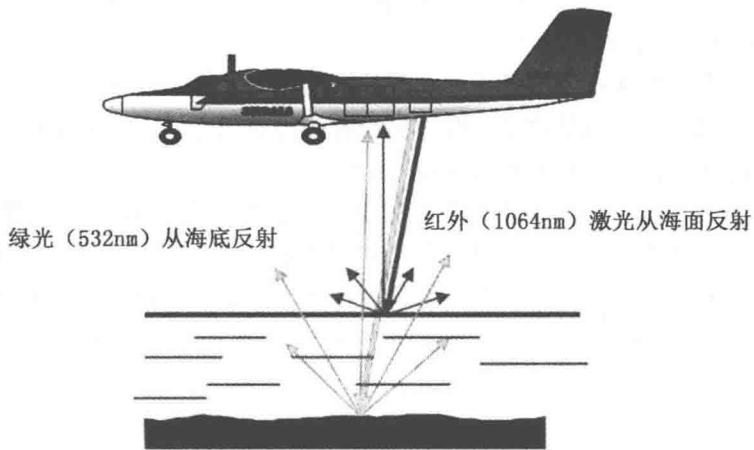


图 1-4 机载激光测深示意图

验潮站通常采用自动观测的模式。考虑到成本问题，且工程上对验潮时间需求比较短的特点，实际测量时可选择人工观测，采用设立水尺或标尺进行人工读数的方式。GNSS 测高确定水面高程是一种精度高、效率快的方法，也归属于自动观测，其利用了 GNSS 高精度测量的优势，如 GPS RTK 技术实现近岸厘米级水面高程数据的获取。

水深测量是一个过程，对水深数据在不同垂直基准面上的归化可得到不同的产品，以满足不同部门的需要，主要有水下地形图、海图两种表达方式。水下地形图的形式一般要求测点归化到高程基准上，而海图通常要求测点归化到深度基准面上。深度基准面的确定既要考虑船舶航行的安全，又要考虑航道或水域水深资源的利用效率。不同的国家或地区根据其海洋潮汐性质或者习惯采用不同的深度基准面确定方法，甚至同一国家的不同历史时期都可能采用不同的算法来计算和维持深度基准面的数值。深度基准面只有标定到平均海面或其他固定参考系才有意义。一般来说，潮差越大，深度基准面与平均海面的差距值越大，其位置越低。国际上常用的深度基准面有最低天文潮面、平均大潮低潮面、最低大潮低潮面、平均低潮面、理论最低潮面等，我国则采用理论最低潮面作为深度基准面。通过确定陆地高程基准和深度基准面的高度差，就可实现测深数据在不同基准之间的转换，海洋测深基本空间结构如图 1-5 所示。

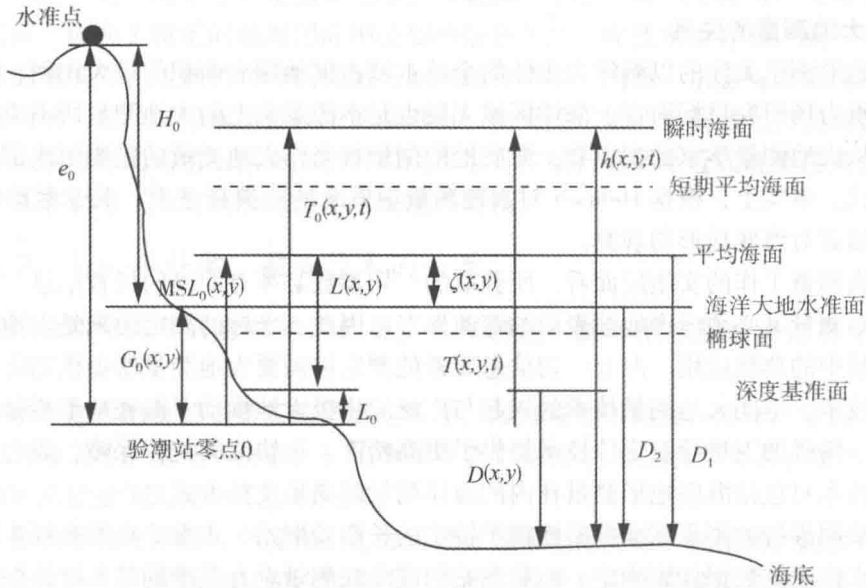


图 1-5 海洋测深基本空间结构示意图(刘雁春, 2003)

水下地形测量作为人类开发和利用海洋、江河、湖泊的“先头兵”，是一项基础而又极其重要的工作，其作用也非常广泛：

- (1) 为研究地球的形状、水下地质构造、大洋勘探等地球科学的研究提供基础信息；
- (2) 为各种不同的海洋工程开发提供服务，如港口建设、海洋资源勘探与开发、海底管道、航运与航道、渔业捕捞、水下考古等；
- (3) 为编制海图、绘制水下地形图以及构建水下三维可视化模型提供基础数据；
- (4) 为建设海洋强国和加强国防建设提供重要保障。