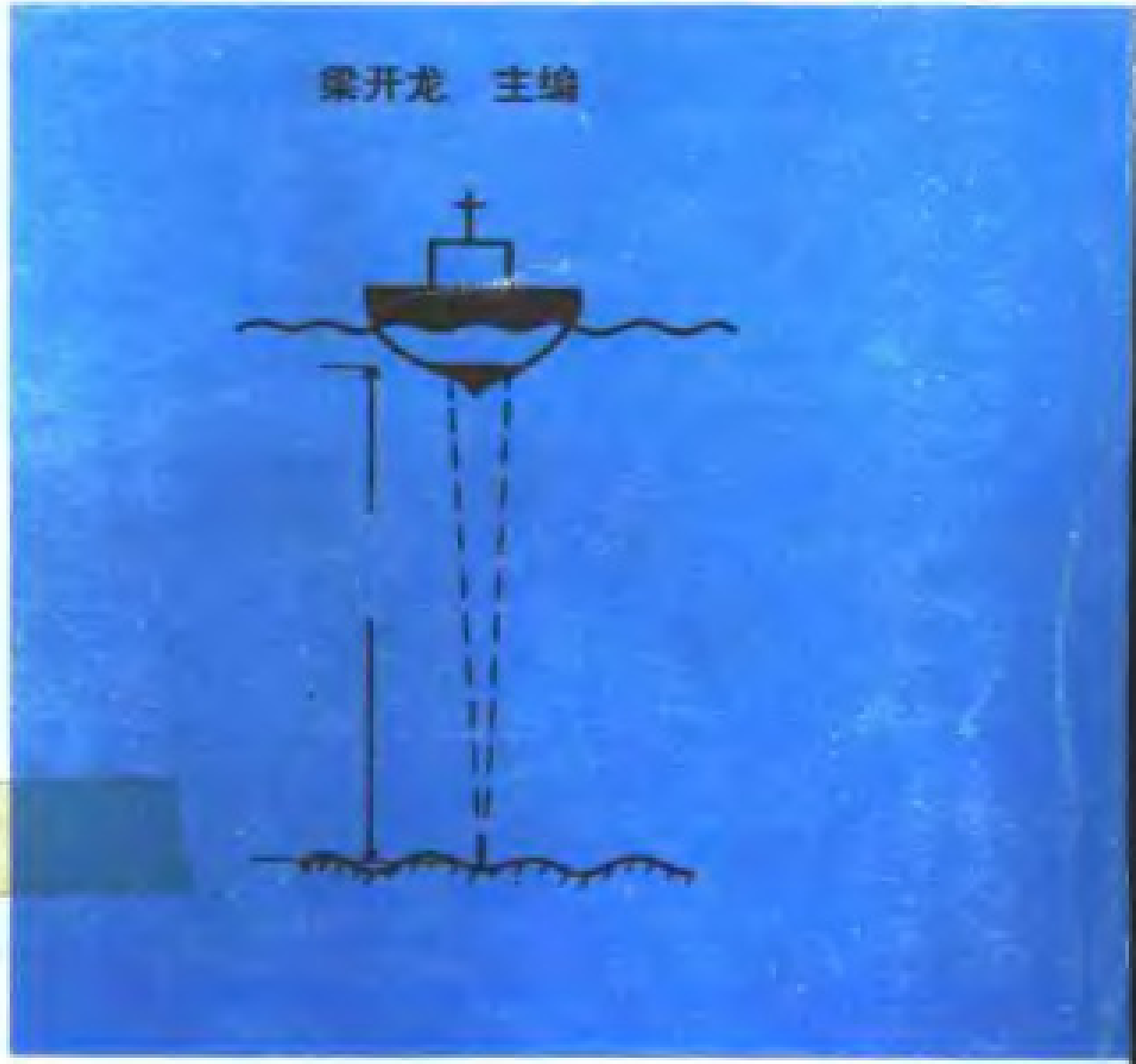
现代测绘科技丛书

984246

水下地形测量

梁开龙 主编



测绘出版社

责任编辑：马秀琴
封面设计：赵培璧

ISBN 7-5030-0666-8/P·256
定　价：9.50元

现代测绘科技丛书

水下地形测量

梁开龙　主编

测绘出版社

内 容 简 介

本书为《现代测绘科技》丛书之一。就水下地形测量技术的几个主要问题：定位方法、测深手段、水位控制与自动成图，作了比较系统的介绍。其中包括沿岸测量自动化系统、GPS 在水下测量中的应用、水下声学定位技术；多波束测深、机载激光测深；数据库及自动绘制海底地形图等先进海洋测量技术。

本书可以作为海洋测量、大地测量、工程测量和海洋开发有关方面的教学、科研、生产人员和高校相关专业的高年级学生的参考书。

水 下 地 形 测 量

梁开龙 主编

*

测绘出版社出版

北京大兴星海印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

*

开本 850×1168 1/32 · 印张 4.75 · 插页 2 · 字数 120 千字

1995 年 9 月第一版 · 1995 年 9 月第一次印刷

印数 0001—3000 册 · 定价 9.50 元

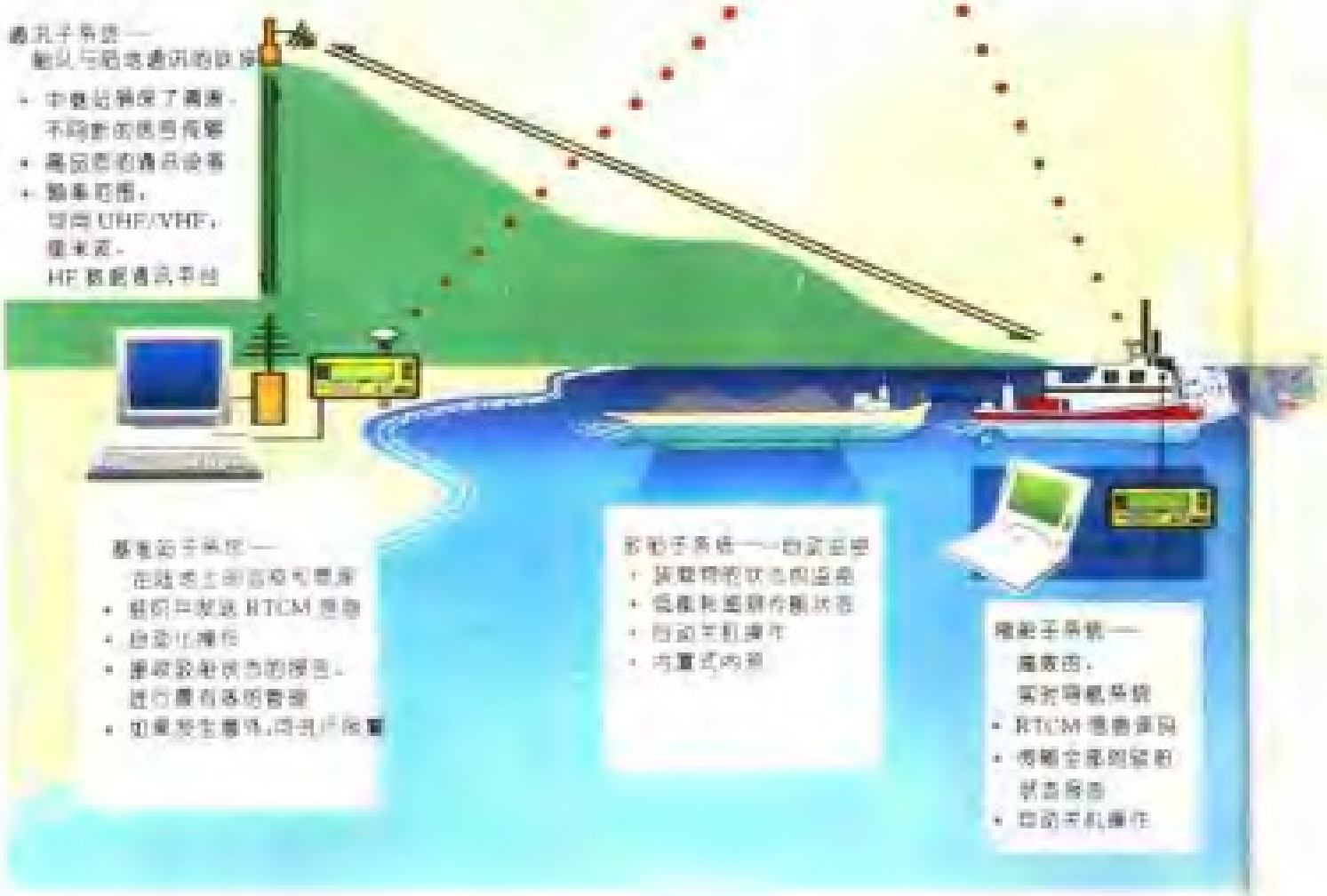
ISBN 7-5030-0666-8/P · 256

北京天测测绘工程公司
天宝船舶监测系统





GPS——导航系，
一体化的，
世界范围内的技术
- 最高精度的商业化定位技术
- 免费使用 GPS 数据
- 全天候的使用
- U.S. 政府提供军事的商业使用条件



通讯子系统——
船队与船舶通讯的联络
- 中继站保证了高质、不间断的信号传输
- 高品质的通讯设备
- 频率范围：
  可用 UHF/VHF，
  很长远、
  HF 数据通讯平台

基准站子系统——
在岸或上游合格可靠源
- 接收并发送 RTCM 信息
- 自动化操作
- 基准站差分改正的接受、进行质量控制管理
- 如果发生意外，可进行恢复

移动子系统——自动运营
- 获取精确位置的监视
- 监视和管理传输状态
- 自动无人操作
- 方案式内容

增值子系统——
高效的、
实时导航系统
- RTCM 信息接收
- 根据定义的监控报告报告
- 自动无人操作

北京天测测绘工程公司
'95 隆重推出

天宝海道测量型 GPS 产品

——用于海道测量、制图、船舶进港导航，海上导航的差分 GPS 定位监测系统。



利用高精度差分 GPS 技术进行海洋测量

北京天测公司
地址：北京市海淀区甲 138 号
燕山大酒店 1612 室
电话：2563388－1612/1614
传真：2564849 转 1612 室
邮编：100086

大连天测公司
辽宁省大连航海学院
电话：(0411)2682405－70250
邮编：11608
联系人：张晓明

《现代测绘科技丛书》

编委会委员名单

主任委员： 陈俊勇

副主任委员： 宁津生　高　俊　张祖勋
楚良才　陈永奇　华彬文

委　　员（以姓氏笔划为序）：
于来法　方　恒　田应中
朱华统　李德仁　陈绍光
张清浦　林宗坚　陶本藻
钱曾波　黄杏元　梁宜希
喻永昌　廖　克　潘正风

出 版 说 明

《现代测绘科技丛书》是经国家测绘局批准列入我社“八五”重点出书规划的选题之一。其编写宗旨是对80年代以来测绘科技领域在新理论、新技术、新工艺等方面所取得的成果进行总结，整理成册，以期对改造传统测绘生产技术，提高劳动生产率和产品质量，形成我国现代测绘技术体系，发挥科技图书应有的作用；同时也为反映我国测绘科学研究水平，丰富我国测绘学术专著宝库服务。出版本套丛书也是为适应加速测绘科技成果转化为现实生产力的需要。

本套丛书按专题成册，专题有两种类型：一类偏重学术性，主要反映我国测绘各专业近十年来在理论研究方面所取得的、能代表我国先进水平的新成就和某些老专家毕生研究成果的专著，以及测绘前沿填补国内空白的著作；另一类偏重应用技术，是本丛书的主体，其内容是在理论指导下以新技术、新工艺、新材料、新产品研究成果的推广应用为主，个别的配有实用软件。

由于GPS（全球定位系统）涉及测量界多方面的应用，内容较多，丛书中将分册配套编写。有关各册主题明确，内容相辅相成，组合起来GPS测量内容就显得比较完整，又发挥了各作者的专长。

丛书编委会于1992年1月成立，全体编委对丛书出版意图、读者对象，乃至每个选题及其内容都作了充分研究和讨论，在全国测绘界选择了有代表性的专家参加各个分册的撰写和审稿工作。按照计划，这套丛书的各分册将根据撰写完成情况先后定稿出版，陆续与读者见面。

前　言

《水下地形测量》为“八五”规划出版的《现代测绘科技丛书》之一。

本书比较详细地叙述了水下地形测量技术的几个主要方面：定位方法、测深手段、水位控制以及自动成图等有关问题。由于水下地形测量与水深测量密不可分，因此，本书内容在一定程度上也反映了我国目前水深测量技术的现状与发展趋势。

水下地形测量在我国尚处在发展的初期，在我国测绘学科当中，算是年轻的，然而又是重要的一个分支。目前，在测量仪器的研制、测量理论与方法、成图手段诸方面，与国际先进水平相比，尚有一定的差距，很多问题有待探讨。随着我国经济改革开放的深入，发展我国的水下测量技术，不仅仅是发展测绘学科本身的需要，而且更是适应我国经济发展的需要。辽阔的水域存在着巨大的经济潜力，21 世纪的测绘学科服务对象的重点之一，将是开发海洋，开发江河湖泊。因此，了解并掌握水下测量技术，是有关专业测量工作者和部分测量管理人员应当做到的。

本书由大连舰艇学院海洋测绘系梁开龙教授主编，并具体撰写了第一、二章和三、四、五章的部分内容；张晓明讲师撰写了第五章一部分和§3.5 内容；赵洪杰讲师和王建文讲师分别撰写了第三章和第四章的部分内容。由于水下地形测量涉及的问题比较多，本书限于篇幅不可能面面俱到，加之作者水平所限，叙述的问题难免存在不够全面和错谬之处，敬请批评指正。

在编著本书过程中，作者得到了不少同行大力支持，孔钺助理工程师为本书描绘了大部分插图，在此，一并表示诚挚的谢意。

编　者

1994 年 10 月

目　录

第一章　绪论……（ 1 ）
第二章　定位方法……（ 6 ）
§2.1　概述……（ 6 ）
§2.2　无线电定位……（ 7 ）
§2.3　光学仪器定位……（ 21 ）
§2.4　差分 GPS 定位……（ 23 ）
§2.5　水下声学定位……（ 35 ）
第三章　测深手段……（ 52 ）
§3.1　常见测深技术……（ 53 ）
§3.2　海底地貌探测仪……（ 60 ）
§3.3　多波束测深系统……（ 69 ）
§3.4　水下测量技术……（ 81 ）
§3.5　机载激光测深……（ 84 ）
第四章　海洋潮汐与水位控制……（ 90 ）
§4.1　潮汐分析……（ 91 ）
§4.2　平均海面与深度基准面……（ 94 ）
§4.3　水位改正……（ 99 ）
第五章　自动成图……（109）
§5.1　自动化定位技术……（110）
§5.2　数据库系统的建立……（119）
§5.3　数字地面模型……（126）
§5.4　绘制海底地形图……（131）
参考文献……（140）

第一章 绪 论

同陆地一样，在海洋上与江河湖泊上进行开发的第一阶段工作就是测图。不同的是，在水域是测量水下地形图。

一个国家的海运实力关系到国家的政治、军事地位和经济利益。我国目前海运状况突出矛盾是港口紧张。建设现代化的深水港，开发国家深水岸段和沿海、河口及内河航段，已建港口回淤研究与防治等都需要高精度的水下地形图。

海洋渔业资源是一种具有再生能力的生物资源，要规划和发展我国的海洋渔业，需要了解各地，包括远洋海域的渔场的详细海底地形和水文。同时，沿海地区养殖业的发展也都需要滩涂地区的海底地形、底质、潮汐、水文等测量资料。

海洋石油工业更是方兴未艾，据有关资料报道，海洋石油储量相当陆地石油藏量的三倍多。现已有 40 多个国家在大陆架海域进行石油钻探与开发，年产原油 6 亿吨，占世界原油总产量的 1/4。人们估计，到 2000 年世界石油总产量的一半将来自海底。为了查明海底石油和天然气储量，首要的任务是测量海底地形图、海洋重磁图及判断地质构造的地质图。在以后的石油开采中，在海底敷设输油管道以及海底电缆等工程时，也必须了解海底地形。此外，大洋底锰结核等矿藏的勘探与开发，海洋能的利用，海水淡化与海洋化学资源的研究等工程都需要这方面的资料。

众所周知，370km 专属经济区和大陆架制度已经在世界范围确立起来。90 年代，沿海国家将普遍加强本国大陆架和专属经济区的勘探开发与管理，我国也是这样。为此，首先要对大陆架和专属经济区进行基础测绘和资源远景评估，为开发活动和与邻国划界准备基础图集和资料，这是我国海洋测绘界一项历史使命。我

国与邻国在海域划界和维护海洋权益方面面临的形势十分复杂，而解决海域划界就需要高精度的海底地形图。

在军事上，水下潜艇的活动、近海反水雷作战兵力的使用、战时登陆与抗登陆地段的选择等，其相关区域的水下地形是指挥人员关心的主要内容之一。

从科学研究的角度上看，为了确定地幔表层及其物质结构、研究板块运动、探讨海底火山爆发与地震以及矿藏分布形成的地球物理现象，要用到海洋重磁测量方法以确定大地水准面垂线偏差的变化，并且需要在地壳断裂带、垂线偏差异常区、海底盆地与峡谷、海底山脊地区进行详细的海底地形测量。

水下地形测量的基础为海道测量，由于海道测量的主要目的是为航海服务，所以水深测线间距依比例尺不同而变化。随着测深仪器的发展，尤其是多波束测深系统和侧扫声呐等仪器的使用，使得水下地形测量迅速得到发展，如今已成为世界各海洋国家在海洋测绘方面重要研究领域之一。水下地形图在投影、坐标系统、基准面、分幅、编号、内容表示、综合原则以及比例尺确定等方面都与陆地地形图相一致，但二者测量的方法却相差甚大。水下地形测量主要使用水声仪器，全覆盖测量水底深度。如果在海上或江河入海口处测量，还要加入潮汐影响(水位改正)、仪器换能器吃水改正及声速改正等。从定位手段看，除了近岸测量或江河测量可使用传统的光学仪器实施交会法定位外，其它较远区域多采用无线电定位方法。尤其是全球定位系统（GPS）在海洋测量中的应用，是当前研究的热点问题，大连舰艇学院海洋测绘系在这方面取得了较好的成绩，为水下地形测量提供了一个既方便、精度又高的定位手段，通过在南沙试用，效果颇佳。随着电子计算技术的发展，在外业测量数据的采集以及内业成图方面逐步向自动化方向发展，天津海洋测绘研究所研制的多功能水深测量自动化系统就是我国海测自动化技术的代表。

水下地形图是近 20 年来发展起来的地形图中最重要的一个

新品种。它不论与传统的航海图，还是同原则上保持一致的陆地地形图比较，都有较大的差别。水下地形图属于专题图范畴。前已述及，水下地形图有着多方面的用途，为此对它的内容要求也是多种多样的。水下地形图的精度由测量工作目前可以达到的精度和制图工作的精度来决定。前苏联对水下地形图精度的要求是：水域地物平面位置相对于大地控制点的中误差，按地图比例尺计不超过 1.5mm；岸上物体不超过 0.7mm。

目前，大范围水域资源经济利用的重点，是在海洋近岸基本平坦的浅水区域——大陆架。1958 年，日内瓦国际会议议定大陆架限定在 200m或者略大深度的等深线以内。1982 年，《联合国海洋法公约》正式确定了大陆架与 370km专属经济区等项制度，使沿海国家对从自己本国领海基线量起的 370km专属经济区和邻接陆地领土的大陆架，都拥有主权和管辖权。也就是说，在该区域内，沿海国家有以勘探和开发、维护和管理自然资源的主权，以及对人工岛屿与设施的建造和使用、海洋科学研究、海洋环境保护和安全的管辖权。其它国家则享有航行、飞越、铺设海底电缆和管道等自由。在专属经济区和大陆架制度下，约有占世界总海域 35.8%的 1.3 亿平方公里面积水域处于沿海国的管辖之下。在该海域内，蕴藏着 87% 已探明的世界石油储量，可提供 94%的世界总渔获量。为此，许多沿海国家纷纷抓紧进行以大陆架和大陆坡地区为主的详细专题制图工作。美国、前苏联、日本、英国等，从 70 年代就开始有计划地出版了大量不同比例尺的海底地形图，为各类用户提供服务，产生了良好的效益。美国在 1988 年 11 月统计，已完成本国的 350 万平方公里专属经济区近一半面积的海底测量任务。日本在《200 海里综合调查计划》中，预计测制海底地形图和海底地质构造图共 500 多幅，可覆盖日本沿海全部海域。1978 年已完成 1：1 万海底地形图 24 幅，1984 年出版了 1：50 万海底地形图等专题图，这些图也采用与陆地图统一的图式和投影进行编制，以保证大陆图与水域边缘图

可以衔接。前苏联，1974 年制定了《大陆架和专属经济区测图计划》，1975 年开始全面施测，已出版的图件主要是海底地形图。其它海洋国家，如澳大利亚、法国、英国、加拿大、伊朗、荷兰、挪威等都先后进行了大量的大陆架海底地形测量工作。这些国家在这方面，不仅起步早，而且普遍采用新技术。

我国是一个海洋大国。按《联合国海洋法公约》规定，归我国管辖的海域约有 300 万平方公里。建国以来，我国的海洋测绘事业有了较大的发展，但是 80 年代以前，主要进行的是比较单一的海道测量，其内容局限于水深测量、底质采集和障碍物探测，由此获取的海洋地理信息，只能满足保证航行安全的需要，其用途有限。随着国际上 70 年代末海洋科学和海洋开发的迅速发展，我国的海洋测绘事业也加快了前进的速度。在引进国外比较先进的海洋测量设备的同时，积极组织科技人员自行研制了许多有一定水平的新仪器，并采用了不少先进的测量方法。从1988 年开始，国务院要求有关部门用 10 年时间完成我国大陆架海底地形测绘任务，为维护我国海洋权益提供基础和依据。目前，黄海、东海大陆架外缘边界，按比例尺 1 :20 万的图幅，形成条带覆盖，基本完成。另外，与海岸带调查同步进行的沿岸海底地形测量也取得了很大成绩。除此以外，南海也作了大量的专题测量。但与世界上一些主要海洋国家相比，差距仍然较大。据有关部门统计，已实测的海区仅占我国管辖海域总面积的 40%，估计尚有 180 万平方公里的海域需要规划、施测；现有的海图也急待更新；建立统一的陆地与海洋大地控制网，形成坚强的海平面和高程控制基础，是为维护国家主权和开发海洋资源所必需的基础建设，目前海域部分还差得多；以掌握海洋地理各种信息，如海洋地貌、海洋沉积、海洋地质构造、海洋重力异常、海洋磁场、海底地震、海洋物理化学特性、海洋生物等为目的的海洋专题测量还远远满足不了经济发展的需要；与之相应的海洋专题图和系列配套的海底地形图是海洋开发部门最关心的图种，它们具有强大

生命力，是未来海图的重要发展方向，这方面我们还仅仅处在发展的初期；将目前的海洋测绘技术向自动化、高精度、全覆盖方向推进，是满足现代海洋工程建设需要的必由之路，建立满足各方面要求的海洋地理信息系统，将是未来海图走向数字化的方向。总之，要使我国的海洋测绘水平，包括水下地形测量技术，尽快跻身于国际先进行列，尚有一段艰难的路程要走。

第二章　定位方法

§2.1　概　　述

定位是水下地形测量的一个重要组成部分。无论是测量海底地形，还是测量江河湖泊水底的地貌，都必须把它们固定在某一坐标系统相应的格网内，否则是毫无意义的。

水上定位不同于陆上定位，主要在于待测船位是运动的、实时的。不可能像陆上测量那样用多测回重复测量，以毫米或厘米级精度严密平差求定点位。但水上定位的坐标基准在陆地，也就是说，水下地形测量通常采用与陆上测量相同的坐标系统。

水上定位主要指海洋定位。由于海域辽阔，海洋定位根据离岸距离的近远不同而采用不同的定位方法，如光学定位、无线电定位、卫星定位、水声定位以及组合定位等。

光学定位与陆上定位的原理和方法相同，但以交会方法为主，即通常所用的前方交会法、后方交会法、侧方交会法以及极坐标法等。由于后方交会法多采用六分仪，点位精度比较低，不宜在近岸大比例尺测图中使用，该法已渐被淘汰，故本章中不再提及。极坐标法为近年来国内外研制的沿岸测量自动化系统所常用之方法，尤其适用于港湾大比例尺水下地形测量。无线电定位方法有作用距离远和全天候连续定位等特点，故在海洋定位中应用比较广泛。如海用微波测距仪是目前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。更远的距离将采用各种不同定位原理的无线电定位系统，其精度也有所不同。卫星定位主要是利用 GPS 定位，GPS 单点定位由于受多种因素影响，精度不高，定位精度为几十米，只可作远海小比例尺海底地形测量的控制。对于较大比例尺测量，可用差分 GPS 技术，其差

分精度小于5m。对于远海局部海域，如测量大比例尺海底地形或进行海上划界测量，可使用水下声学定位方法，该法在我国尚处于起步试用阶段。

从上述可以看出，任何一种定位方法都是为了某种定位需要而产生的，因此存在一定局限性。目前生产的组合定位系统就是把几种定位系统组合起来，使之互相补偿，以达到减少外界影响，提高定位精度之目的。组合定位系统的种类很多，如WINS系统是由卫星接收机、劳兰-C接收机、LTN-76惯性导航系统、多普勒声纳系统及计算机等组成；又如MX1105卫导—奥米加组合导航仪，是由卫星接收机、奥米加接收机、罗经、计程仪及计算机等组成。随着组合定位系统的出现，必然带来多种定位信息处理的问题。卡尔曼滤波是处理随机过程中的预测和滤波有效的数学方法。它是在时间域上采用递推形式，对观测值进行处理，然后给出系统状态的无偏、最小方差的最佳估计。预测和滤波估计使得组合定位系统容易对信号进行实时处理和控制。

由于组合定位系统是由其它定位系统所组成，且价格昂贵，在实际水下地形测量中应用较少，故本章内容中没作介绍。

最后要提到的是自动化测量技术。它是以计算机为核心的测量数据采集、处理及绘图一条龙的先进测绘技术，它大大提高了作业效率和减轻了作业劳动强度。目前，国内各有关测量单位正在积极推广这一技术。相信不久，在沿岸和港湾测量中，自动化测量技术将成为最主要的测量手段。由于自动化测量技术集定位、测深和成图于一体，故将该内容放在第五章中介绍。

§2.2 无线电定位

由于无线电定位系统具有全天候、连续实时定位的特点，而且在定位精度方面基本上能满足水下地形测量要求的前提下，作用距离远、覆盖范围大，所以，无线电定位系统已成为目前海洋

测量的主要定位手段之一。

无线电定位系统按其作用距离可分为：近程定位系统（作用距离小于300km），中程定位系统(作用距离小于1000km)，远程定位系统(作用距离大于1000km)。

无线电定位系统的工作原理，主要有测量距离定位和测量距离差定位。即在陆上设立若干个无线电发(反)射台(称为岸台)，通过测量无线电波传播的有关参数，来确定运动的船台相对于岸台的位置。也就是根据两条位置线（采用测距定位，则位置线为两个圆；采用测距差定位，则位置线为两条双曲线。）相交的交点来确定船台的二维坐标。

一、无线电测距定位

如图2-1所示，在测量船P上设置主台，在岸上两已知点上各设置一副台。定位时，测得主台至副1台、副2台的距离为D_1、D_2，分别以副1台、副2台为圆心，以D_1、D_2为半径，所划圆弧之交点，即为所测船位。如果在岸上几个已知点上设置副台，定位时，测得主台至副台的距离为D_1、D_2、D_3……，则由最小二乘法求得最或然点位。

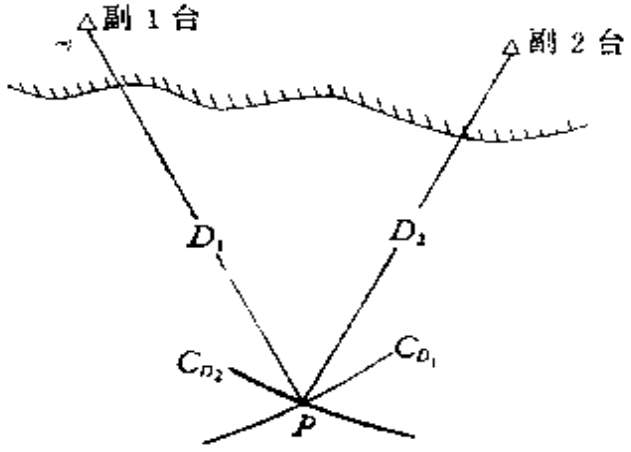


图 2-1　测距定位

无线电测距系统分为脉冲和相位二种类型。脉冲系统的有雷姆（苏）、绍兰、EPJ（美）等。相位系统则比脉冲系统精密，尤

其是采用微波技术，提高精度明显，但有效距离受到限制，海用微波测距仪就属于这种类型仪器。目前在我国海测界使用的有：国产 HLCJ-1、DW-2； 使用较多的是国外引进 Trisponder、Falcan-Ⅳ、Syledis、Mini-Range 等。

1. 测距原理

以下简要说明测距仪相位测距原理。如果我们测得主、副台之间电波的相位差后，就可由下式求得其距离D。

$$D = \frac{1}{2}\lambda N \qquad (2\text{-}1)$$

式中： λ——波长，单位是米/周；

N——相位差周数。

由于N由整数部分n和小数部分α所组成，即$N = n + \frac{\alpha}{1000}$，所以（2-1）式又可写成：

$$D = \frac{1}{2}\lambda n + \frac{1}{2}\lambda\left(\frac{\alpha}{1000}\right) \qquad (2\text{-}2)$$

式中：n——相位周整数；

α——相位周小数部分，在仪器度盘上读数。

由于海用微波测距仪测量相位差的装置只能测出相位周小数α，而测不出整相位周数n，为此，可将波长λ扩大成$\frac{10}{9}\lambda$、$\frac{100}{99}\lambda$、$\frac{1000}{999}\lambda$，即把测距频率降低至$\frac{9}{10}f$、$\frac{99}{100}f$、$\frac{999}{1000}f$。这样，当D一定时，采用以上不同波长去度量，则相位周整数和小数也相应改变。我们可根据波长λ、$\frac{10}{9}\lambda$、$\frac{100}{99}\lambda$、$\frac{1000}{999}\lambda$分别测得的相位周小数α、α'、α''、α'''来解算D值，具

体计算参阅有关书籍。以上是 HLCJ-1 型测距原理。

对于国产 DW-2 和国外产 Trisponde、Falcan-Ⅳ等微波测距仪，主台配有供计时用的精密晶体钟计数器。主台发射编码的询问脉冲信号，岸台应答器接收这些询问信号并按规定编码发射回答信号，不同的询问编码对应不同的岸台应答器。回答信号由主台接收。询问和接收脉冲之间的时间间隔对应主台到两岸台的距离，即

$$D = \frac{1}{2} Vt$$

以上所测距离尚需加上气象改正，并化算为高斯平面上距离。

有了这两个距离和岸台应答器的已知位置参数，经过计算机处理，便获得了测量船的精确位置。DW-2 微波测距仪除测距定位外，还有预置计划测绕导航、实时打印、录音机记录、测深仪同步打标、串行通讯等功能。其主要性能及技术指标均与美国 MOTOROLA 公司生产的 Falcan-Ⅳ相当或更好。

2. 测距法定位计算

当测得船位 P 至二个副台的距离（已化至高斯平面）为 S_1、S_2，二个副台之间的距离为 a，则计算 P 点坐标常用公式为大家熟知的：

$$\alpha = \arccos\frac{a^2 + S_1^2 - S_2^2}{2aS_1}$$

$$\beta = \arccos\frac{a^2 + S_2^2 - S_1^2}{2aS_2}$$

$$x_P = \frac{x_A \operatorname{ctg}\beta + x_B \operatorname{ctg}\alpha - y_A + y_B}{\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\beta} \qquad (2\text{-}3)$$

$$y_P = \frac{y_A \operatorname{ctg}\beta + y_B \operatorname{ctg}\alpha + x_A - x_B}{\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{ctg}\beta}$$

其定位中误差公式为：

$$m_0 = \pm\sqrt{2}\, m_\beta \csc\gamma \qquad (2\text{-}4)$$

式中：m_s为测距中误差；

γ为两位置线交角。

当测得距离为3个以上时，则可用平差方法计算点位坐标：

$$v = Ax + L \tag{2-5}$$

式中：

$$v = (v_1 v_2 \cdots\cdots v_n)^T$$

$$L = \begin{Bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_1 - (S_1) \\ S_2 - (S_2) \\ \vdots \\ S_n - (S_n) \end{Bmatrix}$$

$$A = \begin{Bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ \vdots & \\ a_n & b_n \end{Bmatrix} \tag{2-6}$$

$$a_i = \frac{x_P - x_i}{S_i}$$

$$b_i = \frac{y_P - y_i}{S_i}$$

上式中（S_i）为经气象改正、化至高斯平面的实测距离，S_i由测点的近似坐标（x_0，y_0）与已知点的坐标求出。

平差（2-5）式有：

$$x = (\Delta x,\ \Delta y)^T = -(A^T P A)^{-1}(A^T P L)$$

最后求得船位最或然点位坐标：

$$\left.\begin{aligned} x_P &= x_0 + \Delta x \\ y_P &= y_0 + \Delta y \end{aligned}\right\} \tag{2-7}$$

定位中误差为：

$$m = \pm u_0 \sqrt{Q_{11} + Q_{22}} \tag{2-8}$$

式中：u_0为单位权中误差，Q为相应权倒数。

有一些中程无线电测距定位系统，例如美国产ARGO无线电定位系统，其作用距离最大可达700km，常会遇到跨带计算

的麻烦。此时可采用墨卡托投影，应用高斯第二法则进行定位计算。高斯第二法则的规则实际上是首先把椭球面上的元素投影到一个适当大小的球面上，建立球面位置线方程，在球面上解算点位，然后再将结果反投到椭球面上。这里不详述高斯第二投影法则，而直接给出其正反解公式。

正解公式（由椭球面元素 B、L 求球面元素 u、w）

$$\left.\begin{aligned} u &= 2\left[\operatorname{tg}^{-1}(\beta U^{\alpha}) - \frac{\pi}{4}\right] \\ w &= \alpha \cdot L \end{aligned}\right\} \tag{2-9}$$

式中：

$$\left.\begin{aligned} U &= \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{B}{2}\right)\cdot\left(\frac{1-e\sin B}{1+e\sin B}\right)^{\frac{e}{2}} \\ \beta &= \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{u_0}{2}\right)U_0^{-\alpha} \\ \alpha &= \sqrt{1+e'^2\cos^4 B} \\ u_0 &= \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-e^2}}{\sqrt{1-e^2\sin^2 B_0}}\ \operatorname{tg} B_0\right) \end{aligned}\right\} \tag{2-10}$$

上式中 B_0 为标准纬度，可根据测区位置选取。u_0、U_0 为代入 B_0 计算值。

反解公式（由球面元素 u、w 求椭球面元素 B，L）

$$\left.\begin{aligned} B &= \varphi + B_2\sin 2\varphi + B_4\sin 4\varphi + B_6\sin 6\varphi + \cdots\cdots \\ L &= w/\alpha \end{aligned}\right\} \tag{2-11}$$

式中：

$$\varphi = 2\operatorname{tg}^{-1}(e^{q}) - \frac{\pi}{2}$$

$$q = \frac{1}{\alpha}\left[\ln\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{u}{2}\right) - \ln\beta\right] \tag{2-12}$$

$$\beta = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{u_0}{2}\right)U_0^{-\alpha}$$

上式中 q 为等量纬度，B_2、B_4、B_6 为常系数。

高斯第二法则为等角投影，但存在长度变形。根据对长度比的计算可知，其长度变形基本上对称于基准纬线，在中纬地区（$B=45°$）变形最大，但相距10°仅差1.2m。因此，控制纬差带宽不超过10°，不考虑长度变形，视椭球上距离等于球面距离，可以满足中、小比例尺水下地形测量定位精度要求。

计算点位中误差公式同（2-4）式。此时γ为两条位置线球面上交角，采用球面三角公式计算。

还有一些无线电定位系统，如罗兰-C，其接收机常安装有高稳定度的精密原子频标，可通过测量船台至各岸台的时间差（距离）求得船位。这时定位距离可能超过10°要求，采用高斯第二投影法则，长度变形较大，此时宜用球心纬度法计算点位。该法的实质是一种将地球椭球体在同心球上的双重等角投影。同心球的半径等于椭球的长半径，球心与椭球中心重合，此时球的赤道面与椭球的赤道面重合。这样就可以把地心纬度作为球面纬度，把大地经度当作球面经度，故椭球面与球面的正反解转换公式可表示为：

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tg} u &= (1-e^2)\operatorname{tg} B \\ w &= L \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}13)$$

同时，再用大椭圆代替实测的大地线，即可将远程测距定位计算放在球面上进行。这里所说的大椭圆是指通过地球椭球面上两已知点和椭球中心所作平面切割椭球而形成的一个截面椭圆。当在球面上计算之后，再将定位结果反投到椭球上，求出点位大地坐标。

二、无线电测距差定位

1. 测距差定位原理

测距差定位又称双曲线定位。它是根据到两个固定点的距离差为常数的动点的轨迹为双曲线的几何原理设计的，当有两条双曲线相交时，即可实现定位，如图2-2所示。

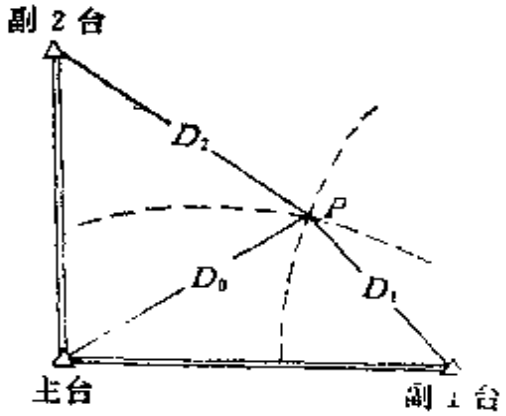


图 2-2　双曲线定位

由船台P至各岸台的距离分别为D_1、D_2、D_0，将岸台视为双曲线的焦点，则船位P就是距离差（D_0-D_1）的双曲线和距离差（D_0-D_2）的双曲线的交点。距离差是由船台接收三个岸台的无线电信号，分别测量它们的相位差求得的。

由主台和两个副台分别组成的二个测量波道所测的相位差分别为$\Delta\varphi_1$、$\Delta\varphi_2$，则通过下面公式可求得两个波道的距离差为：

$$\left.\begin{aligned} D_0-D_1&=\lambda\left(\frac{\Delta\varphi_1}{2\pi}\right)\\ D_0-D_2&=\lambda\left(\frac{\Delta\varphi_2}{2\pi}\right)\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}14)$$

式中，λ为波长，它是通过电波传播速度c除以信号频率f求得的，也称相位周值，单位米/周。

双曲线定位系统类型比较多，但归结为脉冲、相位和脉冲-相位三种类型，它们具有各自不同的作用距离和精度。从水下地形测量的控制来说，主要采用相位无线电系统。如我国的近导系统，国外的台卡系统、罗兰-C系统、奥米加系统和哈-菲克斯系统等。

2. 测距差定位计算

像测距法定位计算一样，测距差定位计算也有近程、中程和远程之分。近程双曲线定位计算一般在高斯平面上进行，下面给出二种计算方法。

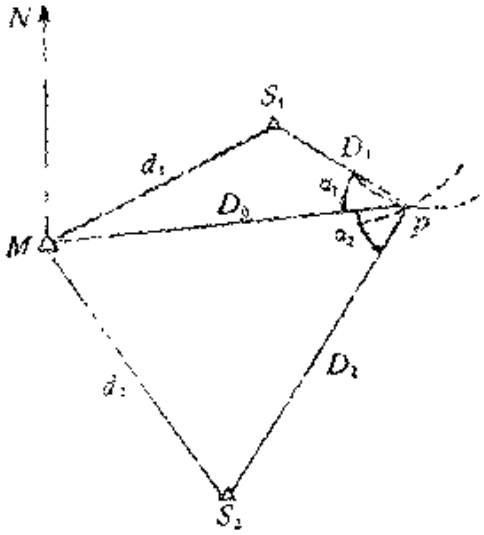


图 2-3

方法一： 直接算法

见图 2-3，两距离差分别令为 C_1、C_2，将坐标原点移至主台M，并设：

$$\begin{cases} x_1 = x_{S_1} - x_M \\ y_1 = y_{S_1} - y_M \end{cases} \quad \begin{cases} x_2 = x_{S_2} - x_M \\ y_2 = y_{S_2} - y_M \end{cases} \quad \begin{cases} x = x_P - x_M \\ y = y_P - y_M \end{cases}$$

分别为新坐标系中副台S_1、S_2和船台P的坐标，根据双曲线定位原理有：

$$\left.\begin{aligned} (x^2+y^2)^{1/2} - [(x-x_1)^2+(y-y_1)^2]^{1/2} &= C_1 \\ (x^2+y^2)^{1/2} - [(x-x_2)^2+(y-y_2)^2]^{1/2} &= C_2 \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}15)$$

化简整理上式最后得：

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{1}{2}(-p \pm \sqrt{p^2-4q} \\ y &= ax+b \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}16)$$

式中：

$$p = \frac{2abC_1^2 - 2aby_1^2 - 2x_1y_1b - x_1C_1^2 + x_1d_1^2 - y_1C_1^2 + y_1d_1^2}{C_1^2 - x_1^2 + a^2 - a^2y_1^2 - 2ax_1y_1}$$

$$q = \frac{C_1^2b - b^2y_1^2 - y_1bC_1^2 + y_1bd_1^2 - \frac{1}{4}C_1^4 + \frac{1}{2}C_1^2d_1^2 - \frac{1}{4}d_1^4}{C_1^2 - x_1^2 + a^2 - a^2y_1^2 - 2ax_1y_1}$$

$$a = -(C_2x_1 - C_1x_2)/(C_2y_1 - C_1y_2)$$

$$b = \frac{1}{2}(C_2d_1^2 - C_1^2C_2 - d_2^2C_1 + C_2^2C_1)/(C_2y_1 - C_1y_2) \quad (2\text{-}17)$$

将以上求得的新坐标再改变原点，即得P点最后坐标：

$$\left.\begin{aligned} x_P &= x + x_M \\ y_P &= y + y_M \end{aligned}\right\} \tag{2-18}$$

定位中误差为：

$$m = \frac{1}{2} m_0 \csc\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \cdot \sqrt{\csc^2\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) + \csc^2\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)} \tag{2-19}$$

式中：m_0为测距差中误差。

方法二： 迭代解法

如图 2-3，根据双曲线定位原理可列出下式：

$$\begin{aligned} F_1 &= \sqrt{(x_P - x_m)^2 + (y_P - y_m)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x_P - x_{S_1})^2 + (y_P - y_{S_1})^2} - C_1 = 0 \\ F_2 &= \sqrt{(x_P - x_m)^2 + (y_P - y_m)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x_P - x_{S_2})^2 + (y_P - y_{S_2})^2} - C_2 = 0 \end{aligned} \tag{2-20}$$

设

$$\left.\begin{aligned} x_P &= x_0 + \Delta x \\ y_P &= y_0 + \Delta y \end{aligned}\right\} \tag{2-21}$$

式中：x_0、y_0为P点概略坐标。

将F_1、F_2在$(x_0 \cdots y_0)$处按级数展开，并取至一次项有：

$$\left.\begin{aligned} \left(\frac{\partial F_1}{\partial x_P}\right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial F_1}{\partial y_P}\right)_0 \Delta y + F_1^0 = 0 \\ \left(\frac{\partial F_2}{\partial x_P}\right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial F_2}{\partial y_P}\right)_0 \Delta y + F_2^0 = 0 \end{aligned}\right\} \tag{2-22}$$

式中

$$\left(\frac{\partial F_i}{\partial x_P}\right)_0 = \frac{x_0 - x_m}{\sqrt{(x_0 - x_m)^2 + (y_0 - y_m)^2}} - \frac{x_0 - x_{S_i}}{\sqrt{(x_0 - x_{S_i})^2 + (y_0 - y_{S_i})^2}}$$

$$\left(\frac{\partial F_i}{\partial y_P}\right)_0 = \frac{y_0 - y_m}{\sqrt{(x_0 - x_m)^2 + (y_0 - y_m)^2}} - \frac{y_0 - y_{S_i}}{\sqrt{(x_0 - x_{S_i})^2 + (y_0 - y_{S_i})^2}} \qquad (2\text{-}23)$$

$$F_i^0 = \sqrt{(x_0 - x_m)^2 + (y_0 - y_m)^2} - \sqrt{(x_0 - x_{S_i})^2 + (y_0 - y_{S_i})^2} - C_i$$

$$(i = 1,\ 2)$$

用 (2-22) 式解出Δx，Δy，代入(2-21)式，将x_P、y_P作为新的概略坐标重新计算，直至改正数满足预先设定的精度要求。

为提高海上定位的精度，不少双曲线定位仪器可进行多余观测，如测得 3 个距离差。其平差方法与前面介绍的平差方法大同小异，略。

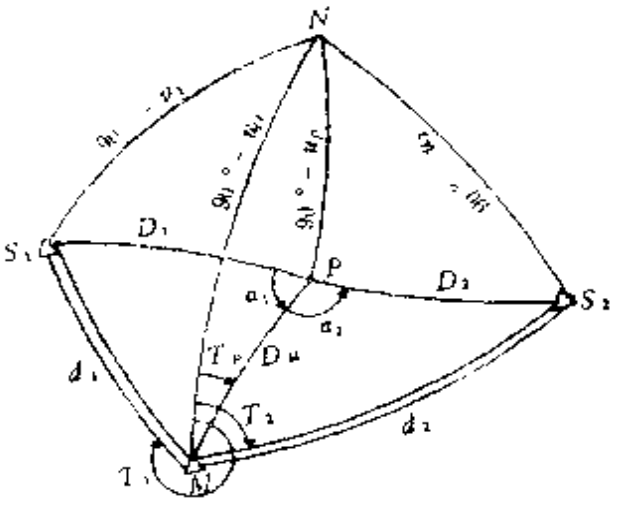


图 2-4

中程双曲线定位计算也叫同测距定位计算一样，需要采用高斯第二投影法则，即采用双重投影法。其双曲线定位的距离差应换算成大圆距离差。见图 2-4，N为极点，已知三个岸台M、S_1、S_2的球面坐标分别为 $(u_M,\ w_M)$、$(u_1,\ w_1)$、

(u_2, w_2)，待定点P球面坐标为(u_P, w_P)，现测得P点至主台M和副台S_1、S_2的大地距离差分别为C_1、C_2。又设以主台M为中心，两基线方位角分别为T_1和T_2，至P点方位角为T_P，则定位计算可按下式进行：

$$\left.\begin{aligned}
&\sin u_P = \sin u_M \cdot \cos D_M + \cos u_M \sin D_M \cos T_P \\
&\sin \Delta w = \sin D_M \cdot \sin T_P / \cos u_P \\
&w_P = w_M + \Delta w
\end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}24)$$

其中，D_M可按下式中任一式求出：

$$\left.\begin{aligned}
&\cos C_1 - \cos d_1 = \operatorname{tg} D_M [\sin d_1 \cos(T_P - T_1) - \sin C_1] \\
&\cos C_2 - \cos d_2 = \operatorname{tg} D_M [\sin d_2 \cos(T_P - T_2) - \sin C_2]
\end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}25)$$

而T_P可按下式求出：

$$\sin(\varphi + T_P) = (q/d)\cos\varphi \quad (2\text{-}26)$$

不难看出，(2-25) 和 (2-26) 式又有一些符号，它们可以从下面公式中求出：

$$\left.\begin{aligned}
&\cos d_1 = \sin u_1 \sin u_M + \cos u_1 \cos u_M \cos \Delta w_1 \\
&\cos d_2 = \sin u_2 \sin u_M + \cos u_2 \cos u_M \cos \Delta w_2 \\
&\sin T_1 = \sin \Delta w_1 \cdot \cos u_1 / \sin d_1 \\
&\sin T_2 = \sin \Delta w_2 \cdot \cos u_2 / \sin d_2 \\
&\Delta w_1 = w_M - w_1 \\
&\Delta w_2 = w_2 - w_M
\end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}27)$$

$$\left.\begin{aligned}
&\operatorname{tg}\varphi \doteq f/d \\
&f = K \sin d_2 \cos T_2 - \sin d_1 \cos T_1 \\
&d = K \sin d_2 \sin T_2 - \sin d_1 \sin T_1 \\
&q = K \sin C_2 - \sin C_1 \\
&K = \frac{\sin d_1 \cos T_1 \cos T_P + \sin d_1 \sin T_1 \sin T_P - \sin C_1}{\sin d_2 \cos T_2 \cos T_P + \sin d_2 \sin T_2 \sin T_P - \sin C_2}
\end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}28)$$

以上过程应进行迭代计算。如果两基线不相邻，其定位计算略显复杂，读者可参阅有关文献。解得（u_P，w_P）后，再代入双重投影反解公式就可得到P点大地坐标(B_P，L_P)。

远程双曲线定位计算也同远程测距定位计算一样，采用球心纬度法。公式简介如下：

$$\left.\begin{aligned} u_P &= \sin^{-1}[\sin u_M\cos r + \cos u_M\sin r\cos(T_1-\alpha)] \\ \Delta w_P &= \sin^{-1}[\sin r\sin(T_1-\alpha)\sec u_P] \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}29)$$

式中

$$\left.\begin{aligned} r &= \mathrm{tg}^{-1}\frac{\cos C_1-\cos d_1}{\sin d_1\cos\alpha+\sin C_1} \\ &= \mathrm{tg}^{-1}\frac{\cos C_2-\cos d_2}{\sin d_2\cos(T_1-T_2-\alpha)+\sin C_2} \\ \alpha &= \sin^{-1}\left[\frac{\sin C_1-\beta\sin C_2\cos\phi}{\beta\sin d_2\sin(T_1-T_2)}\right]-\phi \\ \phi &= \mathrm{tg}^{-1}\left[\mathrm{ctg}(T_1-T_2)-\frac{\sin d_1}{\beta\sin d_2\sin(T_1-T_2)}\right] \\ \beta &= \frac{\cos C_1-\cos d_1}{\cos C_2-\cos d_2} \end{aligned}\right| \quad (2\text{-}30)$$

其中符号的意义如下：

C_1、C_2——距离差，单位为弧度；

d_1、d_2——两基线在球面上距离，单位弧度；

r——船位P至主台M球面距离，单位弧度；

w_M、u_M——主台 i 球面经、纬度；

w_P、u_P——船位P之球面经、纬度；

α——r 与 d_1 两弧之间球面夹角。

求出P点的u_P、w_P后，接着计算该点至三个岸台的大地距离，然后进行迭代计算。迭代过程中，是将距离差换算成时差或

相位差进行的。迭代结束后，再将最后求得的时差或相位差换算成球面距离差，代入前面的球面双曲线定位计算公式求出船位P最后坐标。再根据反解公式求出船位P的大地经纬度。

以上我们简要地按近、中、远程定位的计算问题叙述了测距（圆—圆）定位和测距差（双曲线）定位的基本公式。这些公式都编有现成的软件包，使用比较方便。该软件包程序用Turbo Pascal语言编写，在微机上实现。它由应用程序(Vtilitys)，近程(Ncran)、中程（Miran）和远程（Faran）定位程序等四个子块支持主程序(Survey)。既可在子块中循环计算，又可进行子块间往返转换，在应用于海上定位时，可根据不同的海域，不同的定位系统灵活选用和转换。

在我国，目前常用的无线电定位系统参见表2-1。

常用无线电定位系统一览表 表 2-1

系统名称	工作方式	作用距离 (km)	精度 (m)	频率	用户数目
Trisponder	测距	80	±1	8.8～9.0 GHz	1
Falcan484	测距	75	±2	5410～5900 MHz	4
Mini-Ranger	测距	37	±2	5400～5650 MHz	10
Syledis	测距 双曲线	210	±3	420～450 MHz	圆方式4 双曲线不限
Hifix	测距 双曲线	160～320	±2	2MHz	圆方式4 双曲线不限
ARGO	测距 双曲线	400～800	±4.5	1600～2000 kHz	圆方式最多9
Maxiran	测距	60～300	±5～20	420～450 MHz	6

§2.3 光学仪器定位

在沿岸海区，如距岸 10km 以内进行水下地形测量时，也可使用光学仪器（如经纬仪）实施前方交会法定位，其原理见图 2-5。

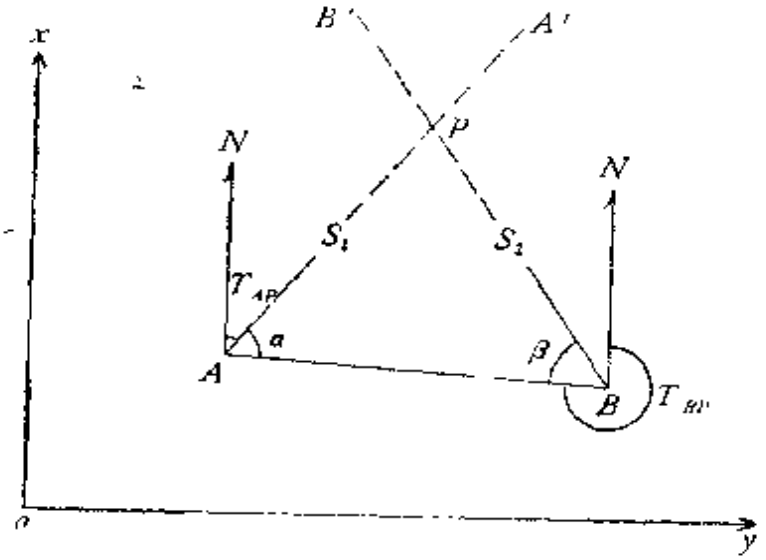


图 2-5 前方交会法定位

通常在岸上两个控制点A、B上设置经纬仪，同时观测测量船的方位角或角度而算得船位。

图 2-5 中测量船定位瞬间位置P的坐标按下式计算：

$$\left.\begin{aligned} x_P &= \frac{x_A \operatorname{tg} T_{AP} - x_B \operatorname{tg} T_{BP} - y_A + y_B}{\operatorname{tg} T_{AP} - \operatorname{tg} T_{BP}} \\ y_P &= y_A + (x_P - x_A)\operatorname{tg} T_{AP} \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}31)$$

y_P也可按 $y_B + (x_P - x_B)\operatorname{tg} T_{BP}$求得。前方交会点位中误差计算公式为：

$$m = \pm \frac{m_\alpha}{\rho} \csc \omega \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \qquad (2\text{-}32)$$

式中：m_α——经纬仪测角中误差；

ω——两条位置线的交角；

S_1、S_2——P点分别至A、B距离。

当已知点多于2个时，则用平差方法计算点位坐标及其中误差。

用光学仪器定位方法还有后方交会法与侧方交会法等。由于这些方法均要在待定点设站，而测船上设置经纬仪不可能，故目前均采用六分仪观测角度，其精度比较低，且受海上环境及人为因素影响极易出错，再加上要求控制点较多，目前在沿岸大比例尺测图中已不采用。

近年来，随着电子经纬仪和高精度红外、激光测距仪的不断发展，利用电子经纬仪加测距仪组成全站测量系统，或者直接利用全站仪，按一方位一距离的极坐标法进行定位，用得很多。这种方法原理是，当测得方位角T_{AP}和距离S时，瞬时船位坐标为：

$$\left.\begin{aligned} x_P &= x_A + S\cos T_{AP} \\ y_P &= y_A + S\sin T_{AP} \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}33)$$

用极坐标法求点位中误差公式为：

$$m = \pm[m_S^2 + (0.3m_\alpha \cdot S)^2]^{1/2} \qquad (2\text{-}34)$$

式中：m_S——测距中误差(m)；

m_α——测角中误差；

S——经纬仪站至测量船的距离(km)。

用极坐标法定位，有时经纬仪站与测距仪站分别在两个控制点A、B上架设，此时在计算P点坐标时，则要增加一个过渡量（如位置线交角或另一边长）计算。不过这种情况很少用。

采用上述极坐标法进行定位时，通常由电子经纬仪或全站仪及时计算出每个瞬时船位的坐标并及时存贮在电子手簿中，事后通过微机处理，利用绘图机自动成图。显然，这种方法方便灵活，且由于采用了高精度的测距仪和电子经纬仪，其测定船位的精度也能满足要求。第五章中介绍的水深测量自动化系统就是这种方法的具体应用。

需要指出的是，这里把测距仪作为光学定位仪器看待似乎欠

妥，但作为一种定位方法，一种在当前港口水下地形测量中使用日渐增多的近岸定位方法，与光学定位有许多相似之处。今后，随着无线电定位技术日益完善，定位精度逐步改善，光学定位方法只能作为一种沿岸测量的辅助方法，而不是一种必备的手段了。

§2.4 差分 GPS 技术

GPS（全球定位系统）是继 NNSS（子午卫星导航系统）之后，美国政府推出的第二代卫星定位系统。运用 GPS 进行高精度动态测量已成为国内外的一个重要研究方向。这方面的应用主要有：无地面控制的空中三角测量、航空重力测量、用活动的地面车辆绘制重力向量图、海上三维地震测量和高精度海洋测量，有关试验及结果已见诸报道。显然，这里所指的动态测量是指在时间和空间上连续测定运载器的轨迹，而不是指伪动态测量或短时间静态观测。在国内海上测量应用中，目前，基本上是采用伪距单点定位方式。这种定位方式对于一般性的导航和小比例尺水深测图来说，可以满足精度要求，但对于大比例尺近海海洋测量的定位工作就显得不够，特别是在美国 SA 政策已实施的情况下。为了提高 GPS 测量的精度，动态差分定位愈来愈引起人们的重视。动态差分定位目前用得较多的为坐标差分和伪距距离差分，伪距距离差分要比坐标差分严密且效果更好。GPS 差分的高精度潜能还在于载波相位的应用，相位与伪距相结合的差分方法能够达到 0.5～1m 的精度，它可以为海上三维地震测量和高精度海上工程测量提供可靠的定位保障。但应用载波相位会存在整周模糊度的确定问题，在陆地车辆和飞机的动态定位中，确定起始整周模糊度一般有三种方法：（*A*）从两个具有已知坐标的测站开始；（*B*）静止观测足够时间；（*C*）天线交换法。上述方法在海洋测量中常常是无法实现的。因而，目前海洋测量定位

应用载波相位最现实的办法，我们认为应当是，同时考虑伪距和载波相位的定位方式，合理利用伪距的无模糊特性和载波相位相对测量的高精度特性，使得两种观测量互相补充、取长补短。以下就伪距单点定位、差分定位和相位平滑伪距法定位进行比较分析，并在差分定位部分中介绍由大连舰艇学院海测系研制成功的，国内首创的 HSD-001 型 GPS 海上动态测量定位系统。

一、伪距单点定位

伪距是 GPS 接收机获得的最基本观测量之一。因为它不存在多值性，故可以用其进行连续实时导航定位。

设接收机位于地球表面某点上，对卫星 j 的距离观测值为 S_{mj}，由于 S_{mj} 中含有多种误差，故有基本观测方程如下：

$$S_{mj}=\rho_{mj}+C\Delta t_{sm}+C\Delta t_j+\Delta T+\Delta I+\Delta m+\Delta\rho+V \quad (2\text{-}35)$$

式中 ρ_{mj}——m 点至卫星 j 的几何距离；

Δt_{sm}——m 点接收机时钟偏差；

Δt_j——卫星 j 时钟偏差；

ΔT——对流层延迟；

ΔI——电离层延迟；

Δm——多路径效应产生的误差；

$\Delta\rho$——卫星真实位置与预报位置之差，SA 政策影响也可并入 $\Delta\rho$；

V——观测噪声；

C——光速(299792458m/s)。

其中，Δt_{sm}一般是未知的，可作为未知数与 m 点坐标一起求解。Δt_j、ΔI 可从卫星播发的导航电文获得，ΔT 可由计算获得，如采用著名的 Hopfield 公式。其余的，如 Δm、$\Delta\rho$ 归入噪声 V 中。这样 S_{mj} 可简表为下式：

$$S_{mj}=\rho_{mj}+C\cdot\Delta t_{sm}+V \quad (2\text{-}36)$$

设接收机概位为(x_0, y_0, z_0)，卫星 j 的坐标为$(x_j, y_j,$

z_j)，则可列出位置线方程：

$$\rho^0_{mj}=\sqrt{(x_0-x_j)^2+(y_0-y_j)^2+(z_0-z_j)^2} \tag{2-37}$$

代入（2-36）式，并线性化得(略去二次以上项)：

$$\frac{x_0-x_j}{\rho^0_{mj}}\Delta x+\frac{y_0-y_j}{\rho^0_{mj}}\Delta y+\frac{z_0-z_j}{\rho^0_{mj}}$$

$$\Delta z+C\cdot\Delta t_{um}+l_{mj}+V=0 \tag{2-38}$$

式中 $$l_{mj}=\rho^0_{mj}-S_m,$$

若接收机在m点同时测得4个卫星的伪距，则可列出4个形如（2-38）式的方程，考虑噪声V无法计算，暂将其略去，剩下各项联立得矩阵：

$$AX+L=0 \tag{2-39}$$

式中：
$$X=(\Delta x,\ \Delta y,\ \Delta z,\ C\cdot\Delta t_{um})^T$$
$$L=(l_{m1},\ l_{m2},\ l_{m3},\ l_{m4})^T$$
$$A=\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & 1\\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & 1\\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & 1\\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & 1 \end{pmatrix}$$

A为可逆方阵，解得

$$X=-A^{-1}L \tag{2-40}$$

则接收机m的位置坐标为

$$\left.\begin{aligned} x&=x_0+\Delta x\\ y&=y_0+\Delta y\\ z&=z_0+\Delta z \end{aligned}\right\} \tag{2-41}$$

若卫星数大于4个，则应用最小二乘法得X的值为：

$$X=(A^TA)^{-1}A^TL \tag{2-42}$$

在海上进行GPS定位时，主要关心点位的二维大地坐标。定位点的高程变化不大，且可在一定精度范围内通过专用图求取，故可视为已知。这样，采用高程已知的定位模型计算点位，可减少计算量和提高定位速度和精度。为此，可用大地坐标(B、

L，H）代替大地直角坐标，其转换公式如下：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+H)\cos B \cdot \cos L \\ (N+H)\cos B \cdot \sin L \\ [N(1-e^2)+H]\sin B \end{bmatrix} \tag{2-43}$$

这样，只要观测到3颗卫星的伪距，根据上式就可列出相应于（2-39）式的方程式：

$$ABX + L = 0 \tag{2-44}$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & 1 \\ q_{21} & q_{22} & 1 \\ q_{41} & q_{42} & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -(N+H)\sin B \cos L & -(N+H)\cos B \sin L & 0 \\ -(N+H)\sin B \sin L & (N+H)\cos B \cos L & 0 \\ [N(1-e^2)+H]\cos B & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X = (\Delta B,\ \Delta L,\ C \cdot \Delta t_{sm})^T$$

$$L = (l_{m1},\ l_{m2},\ l_{m3})^T$$

解（2-44）式：

$$X = -(AB)^{-1}L \tag{2-45}$$

若观测卫星数大于3颗，则按最小二乘法解得：

$$X = [(AB)^T(AB)]^{-1}(AB)^T L \tag{2-46}$$

这样，就可求得点位的大地坐标（B、L）。高程H可根据海面地形图和大地水准面差距图查取相应数据，然后计算得到。

需要强调的是，在（2-39）式前我们曾对噪声V作过特殊处理。不难看出，单点定位中的噪声是无法消除的，尤其是主要误差——SA政策的影响，将使单点定位的误差达到几十米。

二、伪距差分定位

前已述及，由于各项误差的影响，使GPS伪距单点定位误差较大，差分定位是提高精度的有效方法。伪距差分是根据伪距

定位原理，在船台定位的同时，在岸上已知点上设立同类型GPS接收机，接收卫星信号，然后利用已知点上的观测值改正船台接收机的位置坐标，从而消除或削弱卫星误差、接收机误差和大气延迟等项误差，对SA政策的影响也能较好抵消，从而提高船台点位的精度。

1．坐标差分

坐标差分是将岸上已知点的观测坐标与已知坐标的差值作为改正数，改正船台同步测得的点位坐标。改正工作可以实时处理，也可事后处理。坐标差分的另一种形式是在船台进行定位时，岸上多个已知点也同时进行观测，求得船台至各已知点的基线长，此时船台位置可通过多基线确定。

2．伪距距离差分

伪距距离差分是在岸台已知点和船台同时对卫星伪距进行观测，然后对所观测的伪距进行改正的方法。

（1）一阶差分(站际差分)：设m、n分别为船台和岸上已知点，它们同时对卫星j进行伪距测量，分别测得伪距S_{mj}和S_{nj}，可得观测方程为：

$$S_{mj}=\rho_{mj}+C\cdot\Delta t_{sm}+C\cdot\Delta t_j+\Delta T_{mj}+\Delta I_{mj}+\Delta m_{mj}+\Delta\rho_{mj}+V_m \tag{2-47}$$

$$S_{nj}=\rho_{nj}+C\cdot\Delta t_{sn}+C\cdot\Delta t_j+\Delta T_{nj}+\Delta I_{nj}+\Delta m_{nj}+\Delta\rho_{nj}+V_n \tag{2-48}$$

则一阶差分值定义为ΔS_j：

$$\Delta S_j=S_{mj}-S_{nj} \tag{2-49}$$

此时，二站间相关的误差基本可以消除。尤其是二测站相距较近时，信号传播误差也会有一定的相关性，差分处理也将有明显的效果。当距离较远时，就应先进行模型改正后再做差分。其它不相关的误差，如多路径效应和差分处理后的剩余误差将划归噪声

V 中。显然，此时噪声的量值较之单点定位将大大减小。(2-49)式可写成：

$$\Delta S_j = (\rho_{mj} - \rho_{sj}) + C(\Delta t_{sm} - \Delta t_{ss}) + V' \qquad (2\text{-}50)$$

改化上式得：

$$S_{mj} - (S_{sj} - \rho_{sj}) + V' = \rho_{mj} + C\cdot(\Delta t_{sm} - \Delta t_{ss}) \qquad (2\text{-}51)$$

这里只有 ρ_{mj} 和 $C(\Delta t_{sm} - \Delta t_{ss})$ 是未知的。从上式可以大体理解差分法的意义，即它改善定位的精度是通过对运动站观测伪距的改正进行的，而该改正量由已知站的观测值给出，这就相当于用该监测站的有关数据改正轨道有关参数及传播途径误差，改正量为 $\rho_{sj} - S_{sj}$。

由上面的讨论可知，差分定位求得的点位受监测站点位精度的制约，或者说所求定的点位的精度是相对于监测站的。通过公式推证可以知道，监测站坐标不准确对运动站引起的偏差与监测站是近乎相等的。

（2）二阶差分(站际差与星际差)：设船台和岸台在对卫星 j 观测的同时，对卫星 k 也进行了伪距观测，故可得到对卫星 k 的一阶差分值 ΔS_k：

$$\Delta S_k = S_{mk} - S_{sk}$$

则二阶差分值定义为 ΔS_{jk}：

$$\Delta S_{jk} = \Delta S_j - \Delta S_k \qquad (2\text{-}52)$$

即：$(S_{mj} - S_{sj}) - (S_{mk} - S_{sk}) = (\rho_{mj} - \rho_{mk}) - (\rho_{sj} - \rho_{sk}) + V$

简记为：

$$\delta\Delta S = \delta\Delta\rho + V \qquad (2\text{-}53)$$

它的优点是可以基本同时消去卫星及接收机钟差以及轨道误差等。但因星际单差对单点定位精度没有什么改善，所以该法对伪距单差法定位也无大的改善，即它对误差的消除程度与一阶差分相仿。

（3）三阶差分(二阶差分＋历元差)：在相邻两历元，岸台和船台对不同的卫星观测所得的二阶差分值之差定义为三阶差

分。三阶差分对所有观测数据的利用率仅为百分之十几，且实际计算表明，三阶差分的定位精度低于二阶差分的精度，该法不被采用。

依据上述原理，大连舰艇学院海测系于 1992 年研制成功了 HSD-001 型 GPS 海上动态测量定位系统。该系统是在 GPS 接收机基础上，配套差分基准台，近、远距离无线传输设备和一系列软件所组成的，已脱离 GPS 接收机内软件的约束，达到坐标差分和伪距距离差分实时高精度定位。系统各部分之间采用标准接口，很易于移植和配套，一个基准台可供任意个船台进行差分定位，差分过程全部实现自动化。基准台组成见图 2-6。

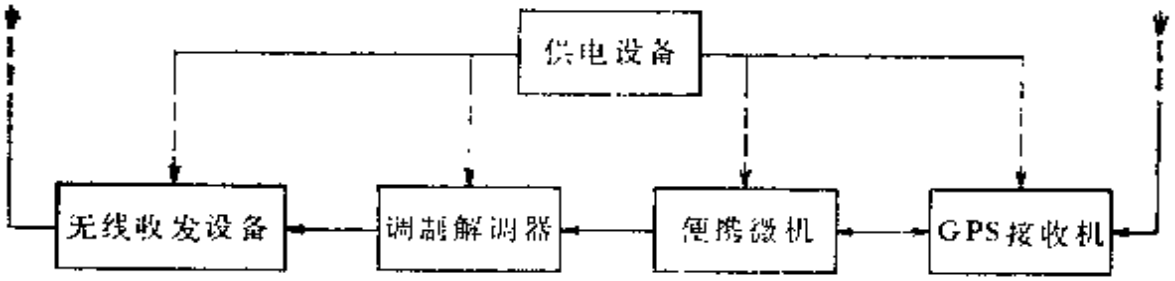


图 2-6　基准台组成

基准台的作用实质上就是向船台发送一系列差分定位改正数。该系统 GPS 接收机采用 Trimble 4000ST、4000SE 或 4000 SST，微机可采用具有一个以上 RS-232 串行口的任何 IBM 兼容机（便携机）。无线发送设备分近距离和远距离两类：近距采用甚高频对讲机，远距采用单边带电台。设备供电采用交流供电或电瓶供电。工作过程中，发送差分数据的时间间隔可根据需要随时设置，微机屏幕及时显示一系列卫星跟踪及差分数据发送情况，并可随时加上人工干预。差分数据同时存贮于软盘上，以备后用。

船台的组成见图 2-7。微机启动船台工作软件后，根据不同的定位方式，对 GPS 接收机的各种状态自动进行设定，不断收集 GPS 接收机中的测量数据。当有差分数据被接收时，可自动

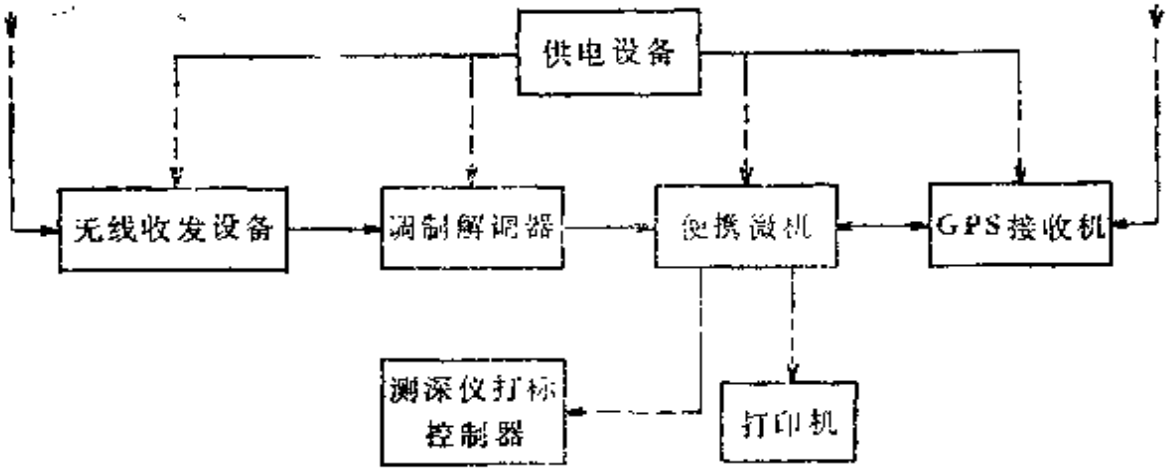


图 2-7 船台组成

收集并更新数据。船台软件还可按计划线进行导航。另设有图形窗口，用人工或数字化仪在测区内输入诸如特殊水深、岸线、障碍物等图形信息。测量时，微机屏幕如同电子海图一样，测线的航迹也能保持，使用起来非常方便，尤适用于大比例尺水下地形测量与扫海。

1992 年以来，该系统先后在广东珠江口和南沙海区使用进行水深测图。实践证明，本系统大大提高了 GPS 动态定位精度，比单点定位提高约 10 倍，并可有效地减弱由于 SA 政策造成的定位精度下降的影响。该系统的试验精度情况详见表 2-2。

这里需要指出的是，GPS定位点的坐标是和用极坐标法定位的船台坐标进行比对的，且GPS差分作用距离为 100km左右。由上表可以看出，该系统坐标差分点位方差为 $\sigma_1=\sqrt{\sigma_x^2+\sigma_y^2}=3.8\sim4.2$m；伪距距离差分点位方差为 $\sigma_2=\sqrt{\sigma_x^2+\sigma_y^2}=2.7\sim2.8$ m。可以满足海上较大比例尺水下地形测量、海上工程勘察、海洋石油开采以及海洋矿藏开发等方面的需要。

三、相位平滑伪距法

载波相位定位的精度要比C/A码伪距定位的精度高很多，且受多路径影响小。但在海洋动态测量中，单纯使用载波相位定

表 2-2

坐标差分比对试验			伪距差分比对试验		
	静态比对	动态比对		静态比对	动态比对
时间	1992.6	1990.8	时间	1992.6	1992.5
地点	广州仑头	珠海万山岛	地点	广州仑头	南沙某岛礁
测定数量	41组	22组	测定数量	211组	30组
结果	平均误差(m) $\Delta x=0.0$ $\Delta y=-0.3$ 方差 (m) $\sigma_x=2.7$ $\sigma_y=3.3$	平均误差(m) $\Delta x=2.9$ $\Delta y=1.0$ 方差 (m) $\sigma_x=2.0$ $\sigma_y=3.3$	结果	平均误差(m) $\Delta x=-1.2$ $\Delta y=-0.3$ 方差 (m) $\sigma_x=2.4$ $\sigma_y=1.2$	平均误差(m) $\Delta x=0.8$ $\Delta y=-0.3$ 方差 (m) $\sigma_x=0.9$ $\sigma_y=2.7$

位几乎是不可能的。Hatch 在 1982 年提出了相位平滑伪距法，这是目前国外海洋测量界的一个研究重点，有关试验结果已见诸报道，国内研究尚少。

已知载波相位的观测方程为：

$$\Phi+\lambda N=\rho+C\cdot\Delta t_u+C\cdot\Delta t+\Delta T+\Delta I+\Delta m+\Delta\rho+V \tag{2-54}$$

式中：Φ——观测相位(单位米)；

λ——载波波长($\Phi=\lambda\varphi$，φ以周为单位)；

N——起始整周模糊度。

其余诸项意义同前。上式中包含了一个难以确定未知数N。为了解决这个问题，可以考虑两时刻之间的相位差(历元差)：

$$\delta\Phi=\delta\rho+C\cdot\delta\cdot\Delta t_u+C\cdot\delta\cdot\Delta t+\delta\Delta T+\delta\Delta I+\delta\Delta m+\delta\Delta\rho+V \tag{2-55}$$

再按照站际差分的方式，可仿 (2-55) 式写成：

$$\delta\Delta\Phi=\delta\ (\rho_{mj}-\rho_{sj})\ +C\cdot\delta\ (\Delta t_{sm}-\Delta t_{ss})\ +V$$

(2-56)

这里，N值不再存在，若该N值没有变化，即无周跳发生，则（2-56）式会给出两时刻间比较精确的相位变化，其误差量级为相位观测的噪声水平，与伪距观测误差相比是很小的。于是，利用（2-59）式可以把两个时刻的伪距观测方程精确地连接起来，实现观测数据的归一化处理，从而实现类似于海洋环境下纯动态测量的点位的重复观测。

对观测后处理而言，观测期间不发生周跳的 n 点的平滑伪距值为：

$$\begin{cases}\overline{P}_1=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}[P_i-\delta P(t_1,t_i)]\\ \overline{P}_i=\overline{P}_1+\delta P(t_1,t_i)\qquad(1<i\leqslant n)\end{cases}$$

(2-57)

其中　　$\overline{P}_i$为第 i 点的平滑伪距值；

$$SP\ (t_1,t_i)\ =\lambda(\varphi_i-\varphi_1)。$$

在不考虑测相误差的情况下，各时刻的平滑伪距值具有相同的精度。为了实时应用，应该采取类似于滤波的形式，使计算结果逐步精确，在这种情况下可推得：

$$\overline{P(t_K)}=\frac{1}{K}P(t_K)+\frac{K-1}{K}[\overline{p(t_{K-1})}+\delta P(t_{K-1},t_K)]$$

(2-58)

其含义是，t_K时刻的平滑伪距值，等于第 t_{K-1} 时刻的平滑值加上相位变化量求得的 t_K 时刻的推估值与 t_K 时刻的伪距观测值的加权平均。可见，在这种情况下，所得平滑伪距的精度随K值的增大而提高。考虑到对不同的卫星所进行的平滑不一定从同一时刻开始，则有 m 颗卫星的观测方程的权阵应为：

$$\begin{pmatrix} K_1 & & 0 \\ & K_2 & \\ 0 & & \ddots \\ & & K_m \end{pmatrix}$$

当有新星出现或检测出某颗卫星的相位观测发生了周跳，则需重新进行平滑处理，即令权阵中相应的K值为1。

点位的具体解算过程与伪距差分法的情况基本相同，只是以平滑的差分伪距代替那里的差分伪距值并顾及如上的权阵即可。

以上简要介绍了相位平滑伪距法的原理，是在无周跳的前提下进行的。而在实际测量过程中周跳往往是要发生的，鉴于它对求得点位可靠性的严重制约，有必要对其进行专门研究。

周跳定义为载波相位观测值的间断，其产生的原因是多方面的，尤其是在动态环境下，相位周的变化不仅由卫星相对于地固坐标的运动所引起，测量载体的运动也会有所影响。特别是当转弯或加速时，波长仅为19cm（L_1频率）的载波相位周数变化产生的影响是难以估计的。周跳现象的特点是，当相位再次锁定后，相位观测值小数部分依然是正确的，而原来连续的整数部分则发生一个随机跳变。显然，周跳属于测量粗差，若不剔除，将直接影响结果可靠性。在动态环境下探测周跳，除可利用双频组合法外，还可利用下面给出的差分伪距检测法，它可以保证所使用的相位平滑伪距法的精度至少不劣于伪距差分定位的精度。

给定某一限差值，当相位推算伪距与实测伪距的差值超过这个限差时，即认为发生了周跳。显然，这里给定的门限值反映了探测周跳的水平，而该水平是由伪距差分值的误差决定的。因而，它不可能探测出较小的周跳，而只是对大的周跳具有控制作用。若相位推算正确，而且假定平滑次数已很多，则可认为推算值是足够接近差分伪距的真值的，因而所测伪距与其偏离情况应该在一定范围内，比如在差分伪距中误差的2—3倍范围内，如果超出此范围，则认为两种观测值必有其一发生问题，而伪距测

量值是在其精度范围内的非模糊量，因而可判定发生了周跳，这就是这种处理方法的基本依据。当探测出周跳后，就要对数据进行适当的处理。在相位平滑伪距法中，因为两种观测量的权是通过直接的数量关系赋于的，所以当发现对于某卫星的相位值发生了周跳，则对伪距观测值赋权为1，而推算值的权为0，即从该点开始对该卫星的伪距重新平滑，从而观测权阵也将发生变化(权阵是以观测次数表达的)。其它卫星数据无周跳，则相应伪距值对测得点位的影响就相对较小，这在一定程度上保证了成果的质量。

除以上介绍的相位平滑伪距法外，还有相位滤波法。由于对伪距运用相位进行滤波和相位平滑伪距法的处理结果是一致的，而相位平滑伪距法又完全可以看成是相位滤波法的一个特例，所以本节就不再单独介绍相位滤波法了。

下面给出一个计算实例结果。计算数据取自1992年4月18日进行的一次飞机定位试验资料。接收机类型为Trimble4000ST，

表 2-3

定位方式		坐 标	与标准值差值的均值（m）	与标准值比较的中误差(m)	与标准值比较的最大偏差（m）
伪距单点定位		B L H	12.976 37.598 55.855	14.706 42.230 70.674	26.563 82.201 134.091
伪距差分定位		B L H	2.307 2.057 −1.673	2.935 3.524 6.295	7.765 9.771 18.874
相位平滑伪距	仅对207历元的滤波方式处理	B L H	1.857 2.217 −0.353	1.966 2.292 1.748	2.466 5.861 4.919
	经263历元平滑后的结果	B L H	2.497 1.551 −2.144	2.498 1.552 2.152	2.670 1.659 2.856

注：表中的标准值系指计算资料中具有高精度的相位处理结果。

数据类型为 RINEX 格式的文本文件，历元间隔 2 秒，有监测站，并具有高精度的相位处理结果以资比较。观测期间一直有 6 颗星可供观测，试验中静态站与动态站之间相距 200 余公里，这里的计算采用 207 组数据，且相位观测值无周跳。用三种方法分别计算，其结果见表 2-3。

§2.5 水下声学定位

利用水下声标在水底建立测量控制网，是为满足局部海域精确测定水下地形、划定海上边界及进行海洋工程建设的需要，是在近 20 年发展起来的一种海洋测量定位手段。目前，国外还应用水声定位技术对海底地壳动态变化，例如海底火山与地震，进行监测。我国在水声定位技术方面的研究和应用工作，尚处在初步发展阶段。

水声定位的基本原理，是在水底设置若干水下声标，首先利

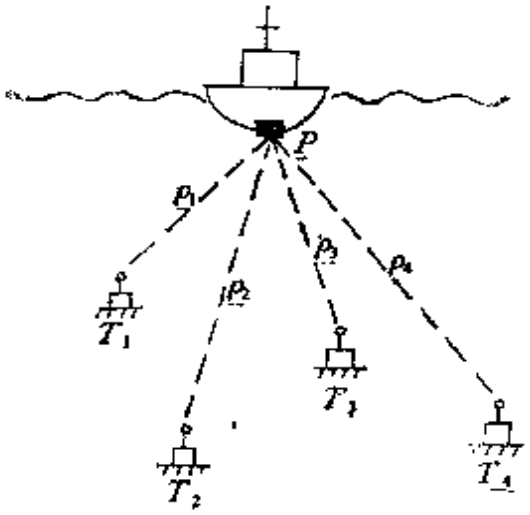


图 2-8 利用圆-圆定位确定水下声标

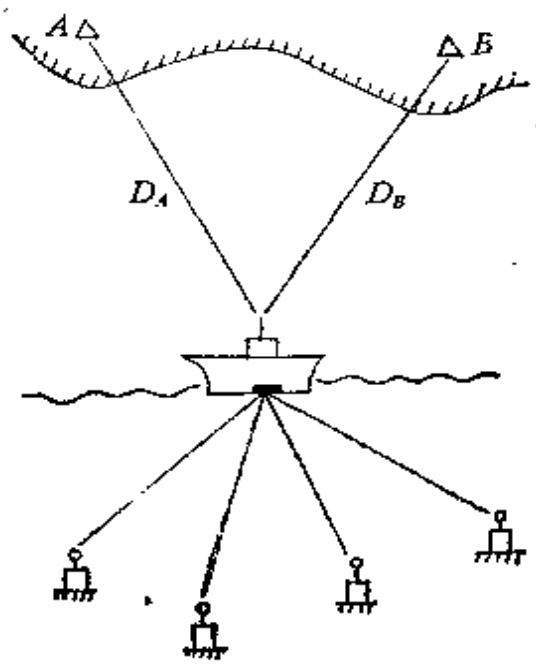


图 2-9 利用水下声标确定船位

用一定的方法测定这些水下声标的相对位置；然后在测量确定船只相对陆上大地测量控制网的位置同时，确定船只相对水下声标的位置，这样同步测量的处理结果，就可以完成水下声标控制点相对陆上统一坐标系统的联测工作。而后，当一个待定船位的测量船，通过发射设备向水中发射声脉冲询问信号时，水下声标接收该信号并发回应答信号（也可由水下声标主动发射信号），应答信号被测量船接收并经计算机处理后，可得到测量船的定位结果。以上过程可参见图 2-8 和图 2-9。

下面，就水下声学定位的几个主要问题讨论如下。

一、水下声学定位网的布设

水下声学定位控制网也称海洋大地网。目前只能根据需要在局部海域布设。我们知道，在海洋上决定船位，至少需要 3 个海底控制点，如果用 4 个控制点来定船位，就有了一个检核条件。海底控制点的布设通常以 3 个或 4 个水下声标为一组，布成连续的列阵，这个列阵就是海洋大地网，参见图 2-10 和图 2-11。

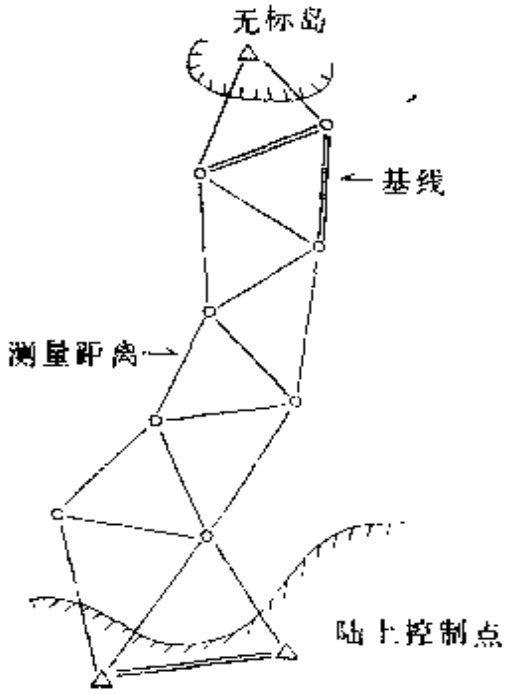


图 2-10　三角形列阵

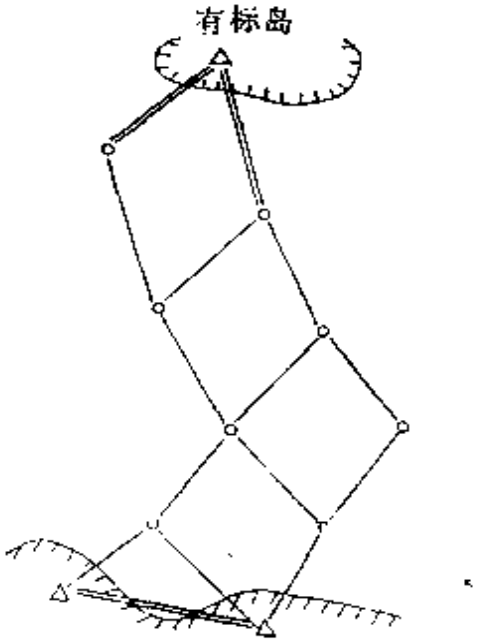


图 2-11　四边形列阵

1. 布设要求

首先讨论一下两个海底控制点之间的距离多远为宜。我们知道，空间交会点的精度与边的交角大小有关。因此，在布设海底控制点时，需要考虑测量船到海底两个控制点之间的交角。一般来说，其值应不小于40°，否则船位精度将受较大影响。

如图2-12所示，海底3个控制点布成等边三角形。以S表示控制点之间的距离；d表示测量船到海底控制点最远超声距离；ABC为测量船所能收到的最远声距范围；θ为交会角；r为三角形中心到控制点的距离。依图可得：

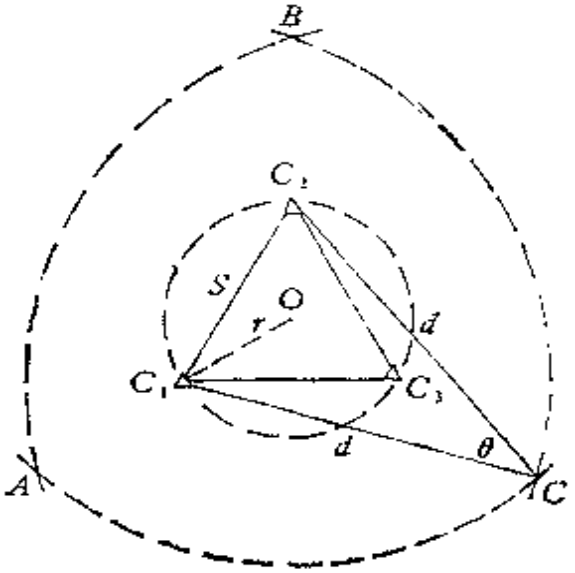


图 2-12　空间交会角示意图

$$r = d \sin\frac{\theta}{2} \Big/ \sin 60° \qquad (2\text{-}59)$$

$$S = 2d \sin\frac{\theta}{2} \qquad (2\text{-}60)$$

按上两式可求得：

$\theta = 20°$	$r = 0.2d$	$S = 0.3d$
$\theta = 30°$	$r = 0.3d$	$S = 0.5d$
$\theta = 40°$	$r = 0.4d$	$S = 0.7d$

如果我们将d看成为海水深度时，那么控制点之间的距离就可大致确定。如果我们取$S = d$，则θ角可避免40°以下角度，从而保证点位有较高的精度。

再看图2-13所示，海底4个控制点布设成正方形。θ_1与θ_2分别表示最近与最远的交会角，d表示超声作用最远距离。若视

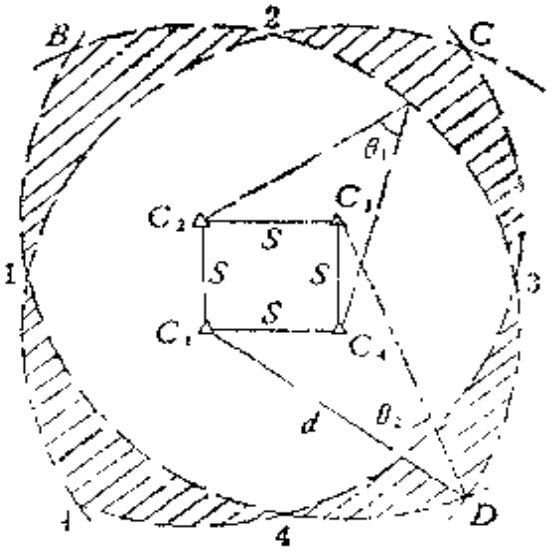


图 2-13

上图为平面关系，则根据 θ_1、S和 d 的关系可导出下式：

$$S=\sqrt{2}\,d\Big/\left(1+\operatorname{ctg}\frac{\theta_1}{2}\right) \qquad (2\text{-}61)$$

按上式可求得：

$$\theta_1=20^\circ \qquad S=0.2d$$
$$\theta_1=30^\circ \qquad S=0.3d$$
$$\theta_1=40^\circ \qquad S=0.4d$$

这就是说，船位与较近声距之交角，如要避免 40° 以下小角度，则正方形的边长一般应大于 $0.4d$。若以 θ_2、d 与S关系式表示，则有：

$$S=\sqrt{2}\,d\sin\frac{\theta_2}{2} \qquad (2\text{-}62)$$

于是得

$$\theta_2=20^\circ \qquad S=0.25d$$
$$\theta_2=30^\circ \qquad S=0.4d$$
$$\theta_2=40^\circ \qquad S=0.5d$$

这说明要保证海面船位在较远点位置具有较高的精度，则必须使正方形边长等于或大于$0.5d$。

以上讨论是单个图形的边长要求，对于区域性海洋大地网的

布设，一般布成菱形和正方形网，如图 2-14 和图 2-15 所示。在图 2-14 中，菱形的边长保持为 d 时，可同时有 3～7 个声标可供使用。在图 2-15 中，使正方形控制点至对边中点的距离等于 d，由此得正方形边长为 $S = 2d/\sqrt{5} = 0.894d$。此时，在网内任何地方将保证有 4～6 个声标可供使用。

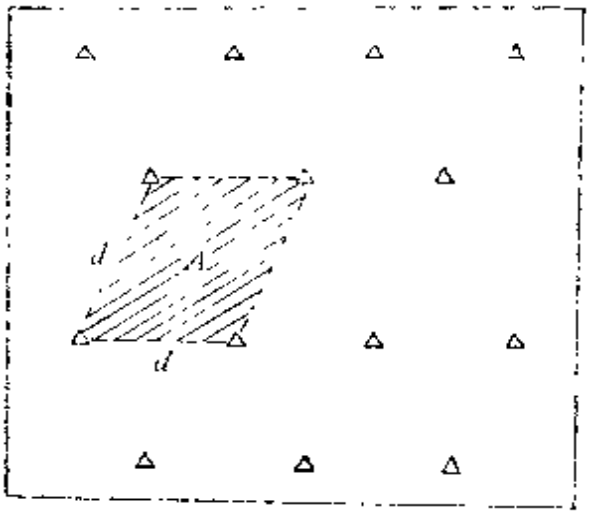


图 2-14

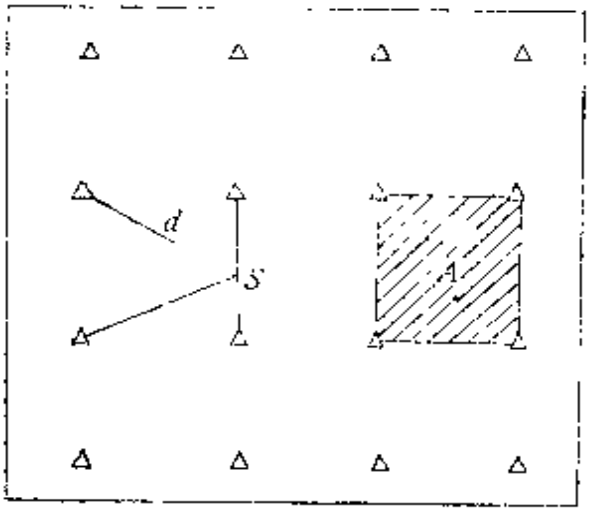


图 2-15

综上所述，布设海洋大地网时，原则上要求以等边三角形或正四边形连续布设，并要求控制点之间的距离约等于海水深度。如果海洋大地网仅作导航、勘探等低精度定位控制时，则控制点之间的距离可等于水深 3/10～5/10；在作为测定水下地形图的控制基础时，应尽量不小于当地水深的 1/2。

2. 布设方法

布网的实施相似于陆测中的选点、造标与埋石的过程，只是在具体问题上不同。在布设时，测量船首先依据设计好的布网图测定某控制点的概位，抛锚或停船，开动声纳指挥潜艇下潜，将水下声标以桩式或锚式固定于海底。3 个或 4 个水下声标共用一个电源，这种电源大都采用寿命较长的原子电池，连续可用 10 年。如果水浅时，也可用电缆沉入海底连在转发器上供应电源。

水下控制点布设完后，还要用测量船按一定方法求出各控制点的水深，相对距离和位置。

二、水下声学定位网的测定

1. 测定水下控制点的深度和距离

（1）以“三叶法”求定控制点的深度

当海底控制点按正三角形布设时，测量船按图 2-16 航迹在海面上航行。图中 1、2、3 标号为海底控制点C_1、C_2、C_3投影到海面的位置。当测量船接近 1 号位置时，就不断地测出C_1点的水声距离，用$f(t)$来表示。当$f(t)=\min$时，所测距离应是最接近C_1点的真正深度。然而，由于测量船航行上的偏差，不一定一次正好通过C_1点投影的 1 号位置。所以实际上采用测量船越过控制点上方多次，取其几次测量值的均值作为该点的最或然深度。按照“三叶法”航行，一个航次穿越每个控制点上方两次，称一测回。每超越一次需要记录当时所测的最小深度及瞬间时刻。读取时间的目的是为了计算海面水位改正。每一个控制点的深度需要测量 3 个测回，共计 6 个深度值。在加入水位改正后，其互差若在 1m 以内时，则取其平均值作为该控制点的深度。当海底控制点按正方形布设时，测量船可按图 2-17 航迹在海上进行。

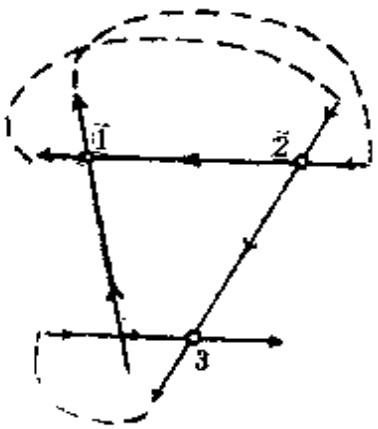


图 2-16　三叶法航迹图

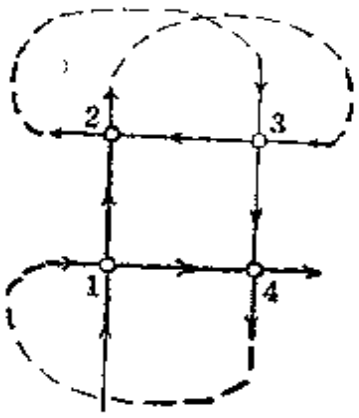


图 2-17　三叶法四点航迹图

“三叶法”测深的可靠性可按下式进行检验：

$$S_{ik}^2 - S_k^2 + Z_i^2 - Z_k^2 = 0 \qquad (2\text{-}63)$$

式中各符号的意义参见图 2-18。

（2）以“穿线法”确定控制点之间的水平距离

所谓“穿线法”，是指测量船的航向穿过两控制点在海面上投影的连线。当然，这种穿线航行绝不是随便进行的，而要在一定的条件下航行，使所测得的两控制点间的距离有唯一解。参见图 2-19。

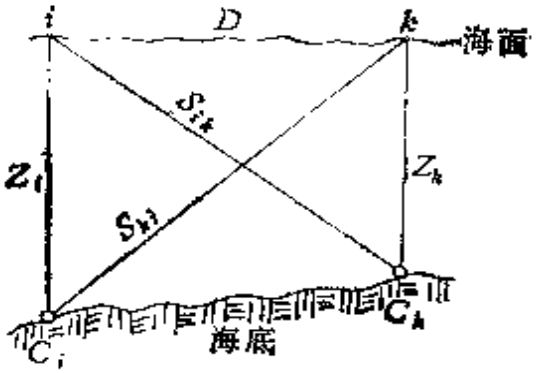


图 2-18

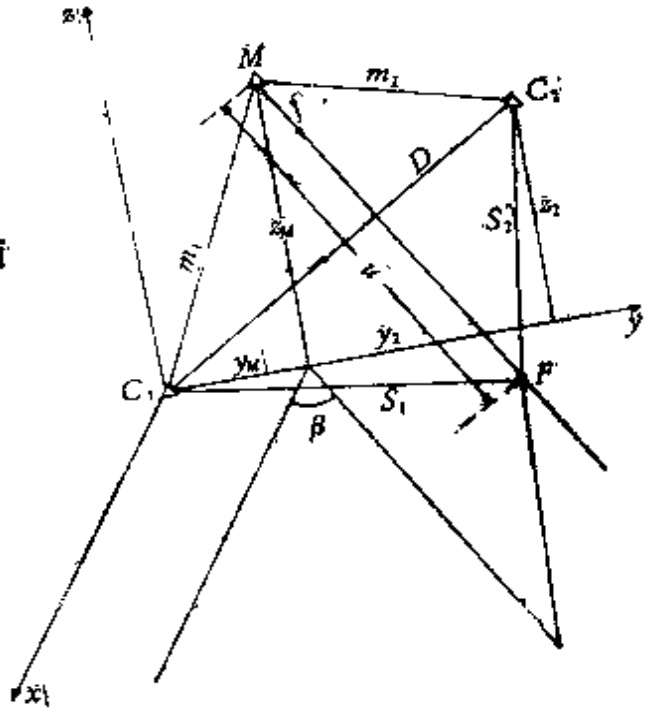


图 2-19

C_1和C_2为两个控制点，其空间斜距为D。将三维坐标原点置于 C_1，并设 C_1、C_2 在含 y、z 轴的法面上，其深度分别为 $z_1=0$ 和 z_2。M为在水面上并包含在法面内的一点，它与C_1、C_2的斜距分别为m_1和m_2，M点的深度为z_M，f为航线单位矢量。假定航向近似垂直于D，其与yC_1z法面的交角为$90°+\beta$；F点为MF航线上一动点，它距C_1和C_2长度分别为S_1和S_2，距M点的长度为u。各点坐标表示如下：$C_1(0,\ 0,\ 0)$；$C_2(0,$

y_2，z_2)；$M(0,\ y_M,\ z_M)$；$F(u\cos\beta,\ y_M+u\sin\beta,\ z_M)$。利用两点坐标求距离公式可得到：

$$S_1^2=u^2+m_1^2+2uy_M\sin\beta$$

$$S_2^2=u^2+m_2^2+2u(y_M+y_2)\sin\beta$$

在这里，u是个变量，我们可以求出当F距C_1、C_2的空间距离之和$S=S_1+S_2$为最小时u的值(u_M)。为此，设$F(t)=S_1+S_2$，求其极值有：

$$Au_M^2+Bu_M+C=0 \qquad (2\text{-}64)$$

其中，$A=(m_2^2-m_1^2)+y_2(2y_M-y_2)\sin\beta$

$$B=[y_M(m_2^2-m_1^2)+y_2m_1^2+y_My_2(y_M-y_2)]\sin^2\beta$$

$$C=[y_M^2(m_2^2-m_1^2)+y_2(2y_M-y_2)m_1^2]\sin^2\beta$$

从上式可以看出：a) $\beta=0$时，即航线垂直于D，可求得$u_M=0$，即动点F与M点重迭；b) 当使C_1和C_2位于同一高度，且有$y_2=2y_M$时，M点位于C_1C_2连线的中垂线上，也可求得$u_M=0$，此时与β值大小无关。依照这个原理，使测量船按照图2-20的航法，即可求得$S=S_1+S_2$最小值，此时测定的S_1、S_2可按下式求出两点的水平距离：

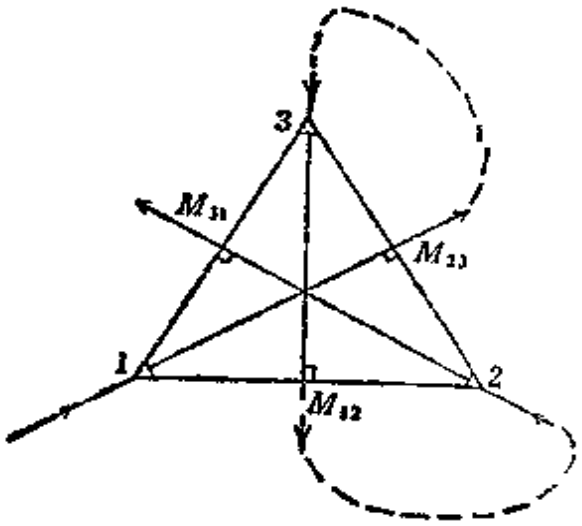


图 2-20

$$d_{1,2}=\sqrt{S_1^2-(z_M-z_1)^2}+\sqrt{S_2^2-(z_M-z_2)^2} \qquad (2\text{-}65)$$

求两点之间的斜距可用下式：

$$D_{1,2}=\sqrt{d_{1,2}^2+(z_2-z_1)^2} \qquad (2\text{-}66)$$

这种穿线法，每个交点只测定一次，但它们都严格地满足$F(t)$ ($S=S_1+S_2$) 等于最小的要求。当然，由于各种原因，欲

保证航线绝对垂直于 yC_1z 法面有困难(即$\beta \neq 0$)，但只要M点能保证大约在C_1C_2连线的中点附近时，u_M是很小的，也符合本方法基本原理。

除以上所述的垂直穿线法外，尚有平行于两控制点连线在海面上投影的穿线法。如图 2-21 所示，这种穿线法由于和控制点连线的平面交角 β 等于 3 个控制点在海面上投影所形成的三角形的内角，所以 β 角可以检验，这是本法的优点。但由于这种方法β角较大，按前面分析，u_M必然增大，因而解算出的 d_{ik} 的误差必然增大。为此，要求每个交叉点M穿越两次，取其中数以便确定最短声距。

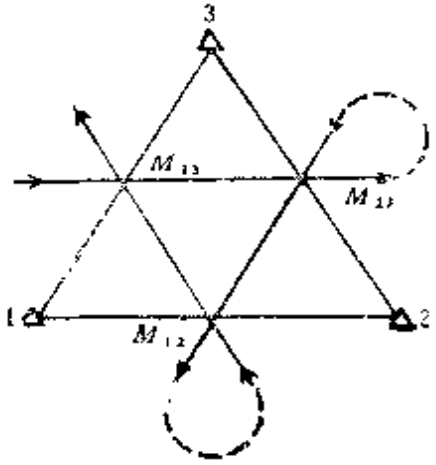


图 2-21　航线平行于两控制点的示意图

2. 解算水下控制点的位置

这里有两种情况：1. 当测量船的位置预先不知道，利用船位至水下声标控制网的斜距，确定船位和水下声标的坐标。这时所构成的测量网相当一个自由网；2. 当船的位置以无线电定位或卫星定位的同时，又测量了船至水下声标的距离，从而确定船位和水下声标的坐标。此法的条件方程有两部分，一是船位至水下声标距离的方程，另一是船位至岸台或卫星的测距方程。

以下给出第二种情况的解算方法。已知用距离表示的方程组为：

$$\left.\begin{aligned} S_{ij}^2 &= (x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2 \\ S_{jp}^2 &= (x_p - x_j)^2 + (y_p - y_j)^2 + (z_p - z_j)^2 \end{aligned}\right\} \quad (2\text{-}67)$$

这里，i、j、p 依次表示为水下声标、船位、岸台或卫星的个数。由上式可看出，每个船位都列出$i+1$个方程，用以求解$3(i+1)$个未知坐标。若有 j 个船位，就有 $j(i+1)$个方程，用于解算

$3(i+j)$个未知数。当方程数大于和等于未知数时，则有：

$$j \geqslant 3i/(i-2)$$

若$i=3$，则$j \geqslant 9$；若$i=4$，则$j \geqslant 6$。这就是求定布成三角形和正方形的水下声标坐标所必需的船位数。

将距离方程按台劳公式展开，在预先求出近似坐标情况下，列出如下误差方程式：

$$\left.\begin{aligned} V_{i,j} &= r_{i,j}(dx_j - dx_i) + l_{i,j} \\ V_{j,} &= r_{j,}\,dx_j + l_{j,} \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}68)$$

式中

$$r_{i,j} = \left(\frac{x_j - x_i}{S_{i,j}},\ \frac{y_j - y_i}{S_{i,j}},\ \frac{z_j - z_i}{S_{i,j}}\right)$$

$$r_{j,} = \left(\frac{x_{,} - x_j}{S_{j,}},\ \frac{y_{,} - y_j}{S_{j,}},\ \frac{z_{,} - z_j}{S_{j,}}\right)$$

$$dx_j = (\Delta x_j,\ \Delta y_j,\ \Delta z_j)^T$$

$$dx_i = (\Delta x_i,\ \Delta y_i,\ \Delta z_i)^T$$

$$l_{i,j} = S_{i,j} - S'_{i,j}$$

$$l_{j,} = S_{j,} - S'_{j,}$$

其中的符号需要说明的有，

$V_{i,j}$——船位j到水下声标i距离改正数；

$V_{j,}$——岸台或卫星P到船位j距离改正数；

$(x_i,\ y_i,\ z_i)$——水下声标近似坐标；

$(x_j,\ y_j,\ z_j)$——测量船位近似坐标；

$(\Delta x_i,\ \Delta y_i,\ \Delta z_i)$——水下声标坐标改正数；

$(\Delta x_j,\ \Delta y_j,\ \Delta z_j)$——测量船位坐标改正数；

$S_{i,j}$、$S_{j,}$——用近似坐标计算的距离；

$S'_{i,j}$、$S'_{j,}$——观测的距离。

有一点需要指出，第（2-68）式第二式中视岸台或卫星坐标改正数$dx_{,}=0$，故只有船位坐标改正数dx_j。

由于此种方法目的，是解算水下声标点的坐标，船位坐标只视为过渡，所以，下面我们还要想办法从（2-68）式中消去船位

的坐标改正数。

为此，首先从（2-68）式的第一式中反求出 dx_j 的表示式，即

$$r_{ij}dx_j = r_{ij}dx_i - l_{ij} + V_{ij} \qquad (2\text{-}68)a$$

得 $$dx_j = r_{ij}^{-1} r_{ij}dx_i - r_{ij}^{-1} l_{ij} + r_{ij}^{-1} V_{ij}$$

写成一般形式

$$dx_j = dx_i + L + V \qquad (2\text{-}68)b$$

下面再引入线性变换参数：距离比例系数 u；旋转角 α；坐标平移量 c。它们均可通过“三叶法”和“穿线法”推算其基本值。它们的变量 du、dx、dc 与控制点坐标改正数 dx_i 存在下面关系：

$$dx_i = dc + X \cdot du + e \cdot d\alpha \qquad (2\text{-}68)c$$

式中符号（取 $i=1$、2、3 为例）：

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}$$

其中

$$X_i = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$ 为控制点近似坐标矩阵；

$$e_i = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}$$ 为控制点近似坐标表示的旋转矩阵。

通常，认为 u 和 α 为常数，即 $du=0$；$d\alpha=0$。代入(2-68)c式有 $dX_i = dC$，再代入（2-68）b式可得：

$$dX_j = dC + L + V \qquad (2\text{-}68)d$$

最后，将(2-68)d式代入（2-68）式第二式，即可达到消去船位未知量之目的。经过整理后得

$$AV + BZ + W = 0 \qquad (2\text{-}68)e$$

式中：V——电磁波测距的改正数矩阵；

Z——控制点坐标改正值 dx_i 的矩阵和变换参数 dC 的矩阵；

A、B——系数矩阵(用点位近似坐标表示)；

W——自由项矩阵。

顾及权矩阵 P，并在满足 $V^TPV = \min$ 前提下，可以得到如下法方程式：

$$B^T(AP^{-1}A^T)^{-1}BZ + B^T(AP^{-1}A^T)^{-1}W = 0 \qquad (2\text{-}68)f$$

答解(2-68)f式，可求出海底控制点的各坐标改正数 dx_i，分别加到各控制点近似坐标中，即可求得最后坐标。

三、利用水下声学定位网实施定位

使用水下声学定位网来测定水上船只位置的水声定位方法有三种工作方式，即长基线水声定位、短基线水声定位及超短基线水声定位。它们是以定位系统中接收装置传感器(换能器)之间的距离（称为基线）来区分的。不论那种系统，基本原理与作业方法大同小异。

1. 长基线水声定位

其原理是利用船上的换能器同时发射和接收布设在水下的 3 个以上相距较远的已知位置的声标的超声波距离，定位仪根据这些测量距离计算出船位。基线长度按作业区的要求确定。

发收换能器可以安装在船舷，也可拖曳在船后。

定位仪包括发射机、接收机和测距系统三部分。它能解码、测量出换能器至水下声标的距离并计算出船位。

水下声标由接收放大、信号处理和发射机三部分组成。有长期性和临时性两种水下声标，临时性的可以根据船上指令浮起，捞起下次再用。

长基线水声定位工作情况见图 2-22。其中，ATNAVⅡ方块图，为美国产的ATNAVⅡ型声字应答器导航系统框图。

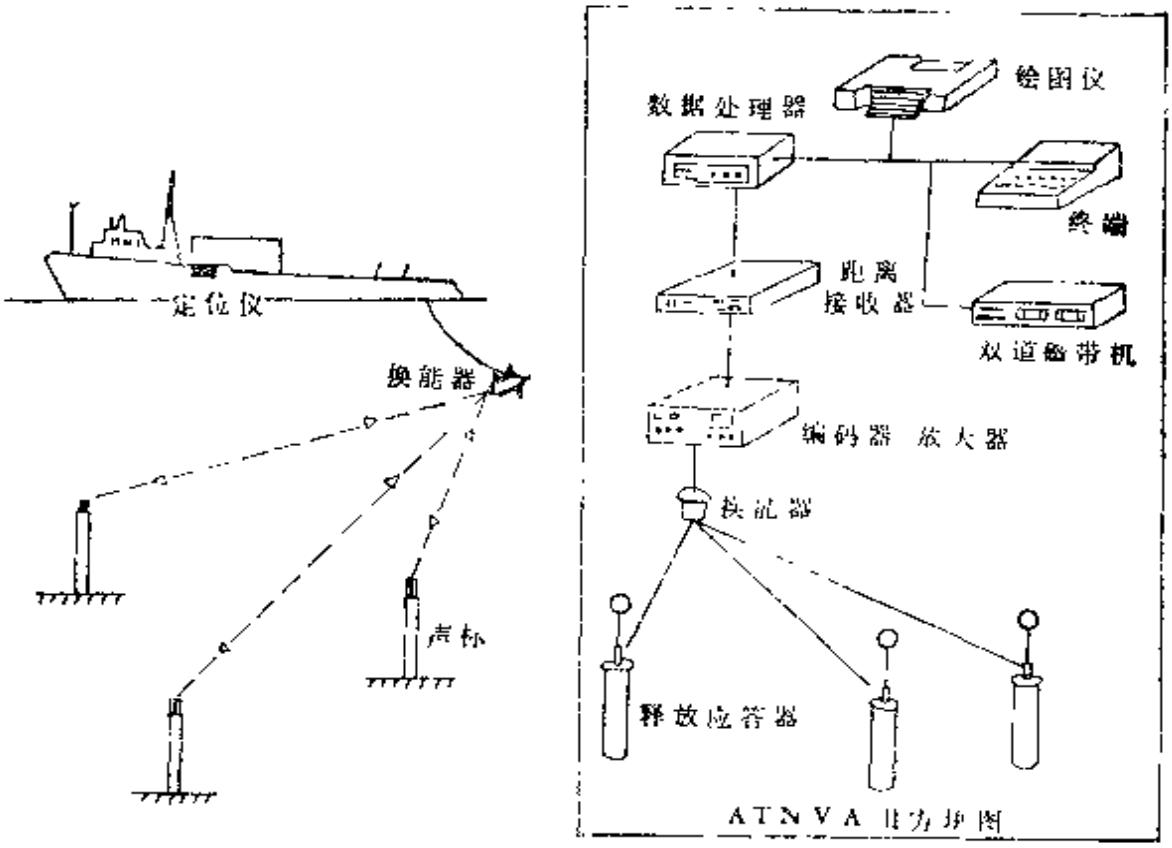


图 2-22 长基线定位系统

该种定位方法的计算以 3 个水下声标定位为例。设$(x_i、y_i、z_i)$为水下声标的平面坐标与深度，$(x_p、y_p、z_p)$表示测量船的平面坐标与深度，S_i为测量船至水下声标的斜距。其测量方程为。

$$\left.\begin{aligned} S_1^2 &= (x_p - x_1)^2 + (y_p - y_1)^2 + (z_p - z_1)^2 \\ S_2^2 &= (x_p - x_2)^2 + (y_p - y_2)^2 + (z_p - z_2)^2 \\ S_3^2 &= (x_p - x_3)^2 + (y_p - y_3)^2 + (z_p - z_3)^2 \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}69)$$

设 $$\eta_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - S_i^2 - 2z_i z_p \qquad (i = 1,\ 2,\ 3)$$

则有

$$\left.\begin{aligned} x_p &= \frac{n_1(y_3 - y_2) + n_2(y_1 - y_3) + n_3(y_2 - y_1)}{2[x_1(y_3 - y_2) + x_2(y_1 - y_3) + x_3(y_2 - y_1)]} \\ y_p &= \frac{n_1(x_3 - x_2) + n_2(x_1 - x_3) + n_3(x_2 - x_1)}{2[y_1(x_3 - x_2) + y_2(x_1 - x_3) + y_3(x_2 - x_1)]} \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}70)$$

2. 短基线水声定位

见图 2-23 所示，短基线水声定位系统的接收基阵最简单的由 3 个换能器组成，基阵安装在船体下方。换能器的作用不仅能发射和接收超声波信号，而且还能用来计算声脉冲到不同换能器之间的时差或相位差。这种换能器之间最小距离，对时差系统约 12m，相位差系统最小可到 0.5m，故称短基线系统。

（1）时差法定位方式

设换能器H_1和H_2连线指向船首方向为 x 轴，基线H_1H_2长度为 b_x；H_2和H_3连线指向右舷的方向为Y 轴，基线H_2H_3长度为 b_y，指向海底方向为 Z 轴。声波波阵面与三个轴的夹角分别为 θ_x、θ_y、θ_z。用该方式实施定位时，由仪器测得 H_1、H_2至水下声标 T 的时间差为$\Delta t_1(t_1-t_2)$，H_2、H_3至水下声标 T 的时间差为$\Delta t_2(t_2-t_3)$，依图 2-24 可得：

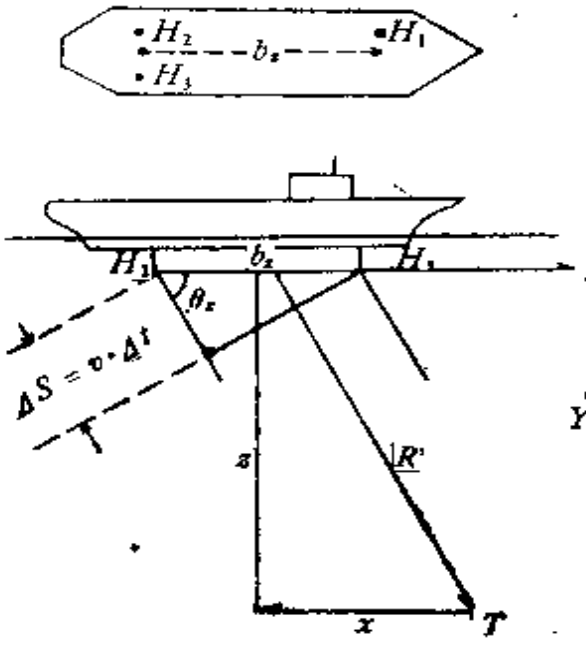


图 2-23 短基线定位

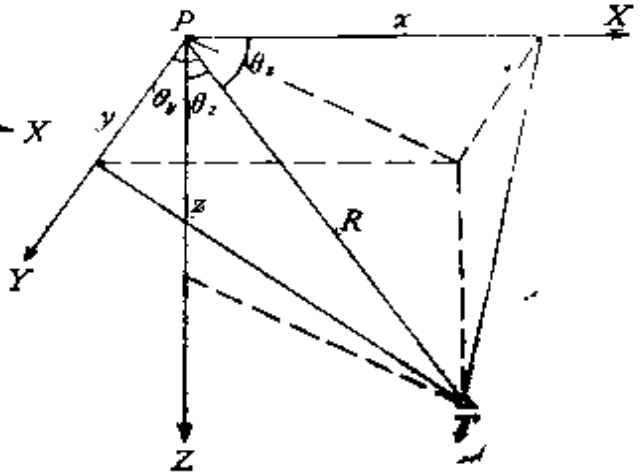


图 2-24 短基线几何意义

$$\left.\begin{aligned}\cos\theta_x &= \frac{V\cdot\Delta t_1}{b_x}\\ \cos\theta_y &= \frac{V\cdot\Delta t_2}{b_y}\\ \cos\theta_z &= \sqrt{1-\cos^2\theta_x-\cos^2\theta_y}\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}71)$$

其中，V为声波速度。由此可得水下声标相对测量船的坐标x、y为：

$$\left.\begin{aligned}x &= \frac{\cos\theta_x}{\cos\theta_z}\cdot z\\ y &= \frac{\cos\theta_y}{\cos\theta_z}\cdot z\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}72)$$

式中，z为定位时换能器与水下声标的垂直距离(深度差)。

（2）相位差法定位方式

此种定位方式不仅要通过测定相位差求定声波波阵面与三个坐标轴的夹角，还要测定船位至水下声标的斜距R。即

$$\left.\begin{aligned}\cos\theta_x &= \frac{\lambda\phi_x}{2\pi b_x}\\ \cos\theta_y &= \frac{\lambda\theta_y}{2\pi b_y}\\ \cos\theta_z &= \sqrt{1-\cos^2\theta_x-\cos^2\theta_y}\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}73)$$

式中，λ为波长，ϕ_x、ϕ_y为换能器H_1、H_2和H_2、H_3之间的相位差。由此也可得到水下声标相对船的位置为：

$$\left.\begin{aligned}x &= R\cdot\cos\theta_x\\ y &= R\cdot\cos\theta_y\\ z &= R\cdot\cos\theta_z\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}74)$$

从上看出，在短基线定位中，不论是时差法，还是相位差法，最后算得的都是水下声标相对测量船的位置。为此，再作如下变换，即求出水下声标相对于船位P在高斯投影平面上的坐标

增量 Δx、Δy。见图 2-25 有：

$$\left.\begin{aligned}\Delta x &= x\cos H_s - y\sin H_s\\ \Delta y &= x\sin H_s + y\cos H_s\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}75)$$

式中，H_s为定位时测量船的坐标航向，它为真航向与子午线收敛角之和。

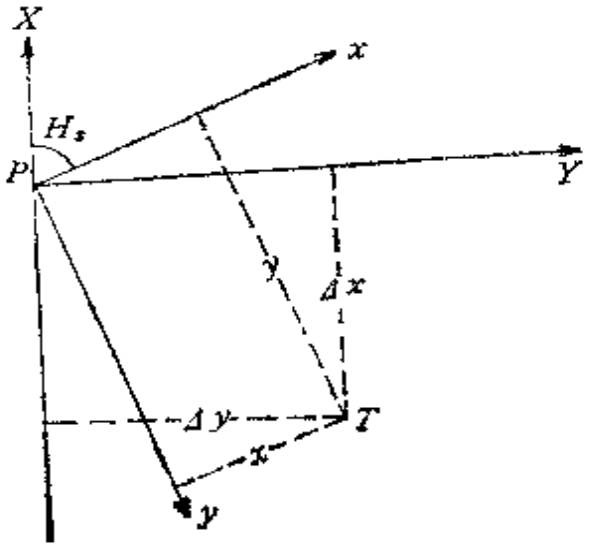


图 2-25

船位 P 的高斯坐标即为：

$$\left.\begin{aligned}x_p &= x - \Delta x\\ y_p &= y - \Delta y\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}76)$$

3. 超短基线水声定位

超短基线水声定位也同短基线定位一样，是测量斜距和相位差来进行定位的。它的特点是把 3 个敏感元件集中安装在一只容器内，敏感元件之间的距离仅有几个厘米，故称超短基线。该系统进行定位只需一个水下声标。我国海洋测绘研究所等单位研制成功的水声定位系统就属超短基线定位系统。

通过检测 3 个敏感元件所接收的水声信号彼此间的相位差 ϕ_x、ϕ_y，就可确定水下声标相对船首的方位角 A，同时测量斜距

$R\left(\frac{1}{2}\ Vt\right)$，就可通过下式计算水下声标相对测量船接收阵的位置：

$$\left.\begin{aligned} x &= v\cdot t\cdot\lambda\cdot\phi_x/4\pi b_x \\ y &= v\cdot t\cdot\lambda\cdot\phi_y/4\pi b_y \\ A &= \mathrm{tg}^{-1}\phi_y/\phi_x \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}77)$$

如果声标位置已知，则可按下式求得船位：

$$\left.\begin{aligned} x_s &= x + r\cos(A + H_s + 180^\circ) \\ y_s &= y + r\sin(A + H_s + 180^\circ) \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}78)$$

式中：r——声标至船的水平距离；

H_s——定位时，船的航向。

第三章　测深手段

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。在回声测深仪尚未问世之前，水下地形的探测，只能靠测深铅锤来进行，这种原始的测深方法不仅精度很低，费工费时，而且只能在船只停泊时进行定点测深，效率很低。因此，根据测深铅锤所测的有限的水深资料，去进行水下地形编绘和从事海洋开发研究是不可能的。20年代出现的回声测深仪，是利用水声换能器垂直向水下发射声波并接收水底回波，根据其回波时间来确定被测点的水深。当测量船在水上航行时，船上的测深仪可测得一条连续的水深线，通过水深的变化，我们可以了解水下地形地貌的情况。利用回声测深仪进行水下地形测量，也称常规水下测量。

60年代出现了海底地貌探测仪（国外又称侧扫声呐或旁视声呐），它是向测量船航向一侧（或两侧）发射倾斜的声波波束，用来探测沿测量船航迹一侧（或两侧）一定面积海域内的水下障碍物和水底地貌的水声设备。利用海底地貌仪探测水底，可以获得类似于航空摄影效果的水底表面声学图像，可以迅速地确定水下障碍物的概略位置与高度，为进一步精测提供依据。海底地貌探测仪的应用，使水下地形测量的工作效率大大提高。但是，由于工作原理上的固有缺点，海底地貌仪对水下地形的分辨率尚不理想。

70年代又出现了多波束测深系统和条带式测深系统，它能一次给出与航线相垂直的平面内几十个海底被测点的水深值，或者一条一定宽度的全覆盖的水深条带。所以它能精确地、快速地测出沿航线一定宽度内，水下目标的大小、形状和高低变化，从而较可靠地描绘出水下地貌的状态。

随着海洋开发工作的迅速发展，在回声测深仪的基础上，又陆

续发展了双频测深仪、浅地层剖面仪等，它们可提供沿航线水下底质层次的剖面曲线，形象地显示海底沉积物的厚度和岩石界面的深度，为海底工程提供依据。近年来，高精度、智能化、多功能的组合式测深系统芸芸而生，一些新型的海洋探测系统也正在研制生产中，配合高精度海上定位系统、自动化成图系统，从而实现测量自动化，使水下地形测量将得到进一步发展。

还有一种具有广阔发展前途的测量手段，即激光测深系统。激光光束比一般水下光源能发射至更远的距离，其发射的方向性也大大优于声纳装置所发射的声束。激光光束的高分辨率能获得海底传真图像，从而可以详细调查海底地貌与海底底质。

另外，美国国防制图局（DMA）1990 年研制的用于沿岸测量的机载水深测量系统(ABS)，包括一台激光测深仪、一台多光谱扫描仪和一台电磁剖面仪，能够在各种环境条件下，从飞机上快速绘制沿岸水深图。该系统测量深度为 30m，精度在±0.3m 范围内。加拿大测量局研制的 LARSEN-500 扫描激光雷达水深测量系统，安装在 DC-3 飞机上，每小时可测 70000 个水深点，每小时可覆盖 70km²的区域。

本章将讨论在水下地形测量中，广泛使用的各种水声仪器系统，主要介绍它们的测量原理、仪器组成及数据处理。另外，还要简要介绍水下摄影测量及激光测深的基本原理

§3.1 常规测深技术

一、回声测深仪测量原理

如图 3-1 所示，安装在测量船下的发射机换能器，垂直向水下发射一定频率的声波脉冲，以声速 C 在水中传播到水底，经反射或散射返回，被接收机换能器所接收。设自发射脉冲声波的瞬时起，至接收换能器收到水底回波时间为 t，则换能器表面至水底的距离（水深）H 为：

$$H=\frac{1}{2}\sqrt{(\overline{Ct})^2-\overline{l}^2} \qquad (3-1)$$

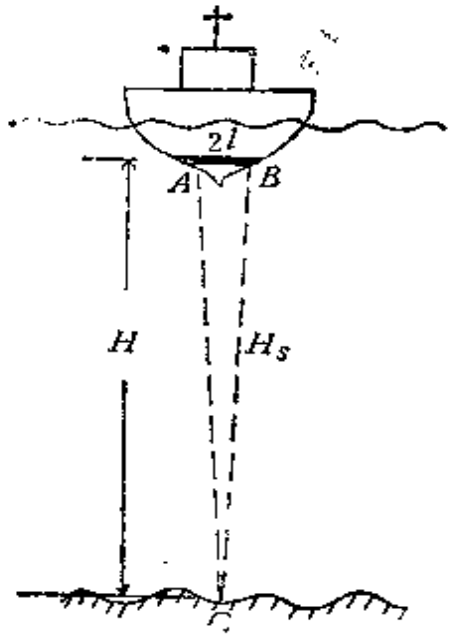


图 3-1　测深原理图

式中，l 为两换能器之间的距离（又称基线长）。当在深水水域或换能器收、发合一时，上式可简化为：

$$H=\frac{1}{2}Ct \qquad (3-2)$$

(3-2)式中的水中声速C与水介质的体积弹性模量及密度均有关，而体积弹性模量和密度又是随温度、盐度及静水压力变化而变化的。时间 t 是仪器测量得到的，一旦声速 C、时间 t 确定后，那么换能器到水底的水深也就知道了。

二、声速

前已述及，声速C与水介质的体积弹性模量 E 和密度 ρ 有关，用公式表示为：

$$C=\sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (3-3)$$

对于海水来讲，在 0°C 时，$E=2.15\times10^9\mathrm{N/m^2}$，$\rho=1020\mathrm{kg/m^3}$，由此得 $C=1452\mathrm{m/s}$。在实际工作中，实测体积弹性模量是十分麻烦的，因而，在测求海水声速时，可用仪器直接测量，或者用经验公式计算。用声速仪直接测量，可以适时地获得当时当地的声速，有利于实施测量自动化，但需要专用仪器和设备。运用经验公式进行计算，首先必须获得影响水中声速的各种因素的数值，然后再运用声速与各因素之间的确切的函数表达式，即经验公式，进行计算。目前在工程上应用较多的经验公式是：

$$C = 1449.2 + 4.6t - 0.055t^2 + 0.00029t^3 + (1.34 - 0.01t)(S - 35) + 0.168P \qquad (3\text{-}4)$$

式中：t 是温度；S 是盐度；P 是静水压力。

由公式（3-4）可知，声速随着水介质的温度、盐度及静水压力增加而增加。当海水温度在0°C、海水盐度在35‰附近时，海水温度每上升1°C，声速增加4.6m/s；盐度每变化1‰，声速变化1.34m/s；静压力增加一个大气压（相当水深增加10m），声速增加0.168m/s。不难看出，对声速影响最大的是海水温度的变化。而海水的温度、盐度和静水压力又是随海区、深度、时间而变化的，因此，在测定海底地形时，必须同时对声速进行测定。

三、回声测深仪组成

回声测深仪主要由发射机、接收机、发射换能器、接收换能器、显示设备、电源等部分组成。现将各部分功能简述如下：

发射机——在中央控制器的控制下，周期性地产生一定频率、一定脉冲宽度、一定电功率的电振荡脉冲，由发射换能器按一定周期向海水中辐射。发射机一般由振荡电路、脉冲产生电路、功放电路所组成。

接收机——将换能器接收的微弱回波信号进行检测放大，经处理后送入显示设备。在接收机电路中，采用了现代相关检测技术和归一化技术，采用了回波信号自动鉴别电路、回波水深抗干扰电路、自动增益电路、时控放大电路，使放大后的回波信号能满足各种显示设备的需要。

发射换能器——是一个将电能转换成机械能，再由机械能通过弹性介质转换成声能的电-声转换装置。它将发射机每隔一定时间间隔送来的有一定脉冲宽度、一定振荡频率和一定功率的电振荡脉冲，转换成机械振动，并推动水介质以一定的波束角向水中辐射声波脉冲。

接收换能器——是一个将声能转换成电能的声-电转换装

置。它可以将接收的声波回波信号转变为电信号，然后再送到接收机进行信号放大和处理。

现在许多水声仪器都采用发射与接收合一的换能器。为防止发射时产生的大功率电脉冲信号损坏接收机，通常在发射机、接收机和换能器之间设置一个自动转换电路。当发射时，将换能器与发射机接通，供发射声波用；当接收时，将换能器与接收机接通，切断与发射机的联系，供接收声波用。

显示设备——显示设备的功能是直观地显示所测得的水深值。目前常用的显示设备有：指示器式、记录器式、数字显示式、数字打印式等。显示设备的另一功能是产生周期性的同步控制信号，控制与协调整机的工作。

电源部分——提供全套仪器所需要的各种电源。

回声测深仪的记录声图详见图 3-2。

四、回声测深仪的几项改正

测深仪记录声图上的水深值，还需要对其进行吃水改正、基线改正、转速改正及声速改正，有关水位改正等将在第四章叙述。

1. 吃水改正ΔH_s

测深仪换能器有两种安装方式。一种是固定式安装，即将体积较大的换能器固定安装在船底；另一种是便携式安装，即将体积较小的换能器进行舷挂式安装，便于拆卸。无论那种换能器，都安装在水面下一定的距离，由水面至换能器底面的垂直距离称为换能器吃水改正数ΔH_s。

$$\Delta H_s = H - H_s \tag{3-5}$$

式中：H——水面至水底的深度；

H_s——换能器底面至水底的深度。

便携式换能器的吃水改正数ΔH_s可由其支撑杆上读取。固

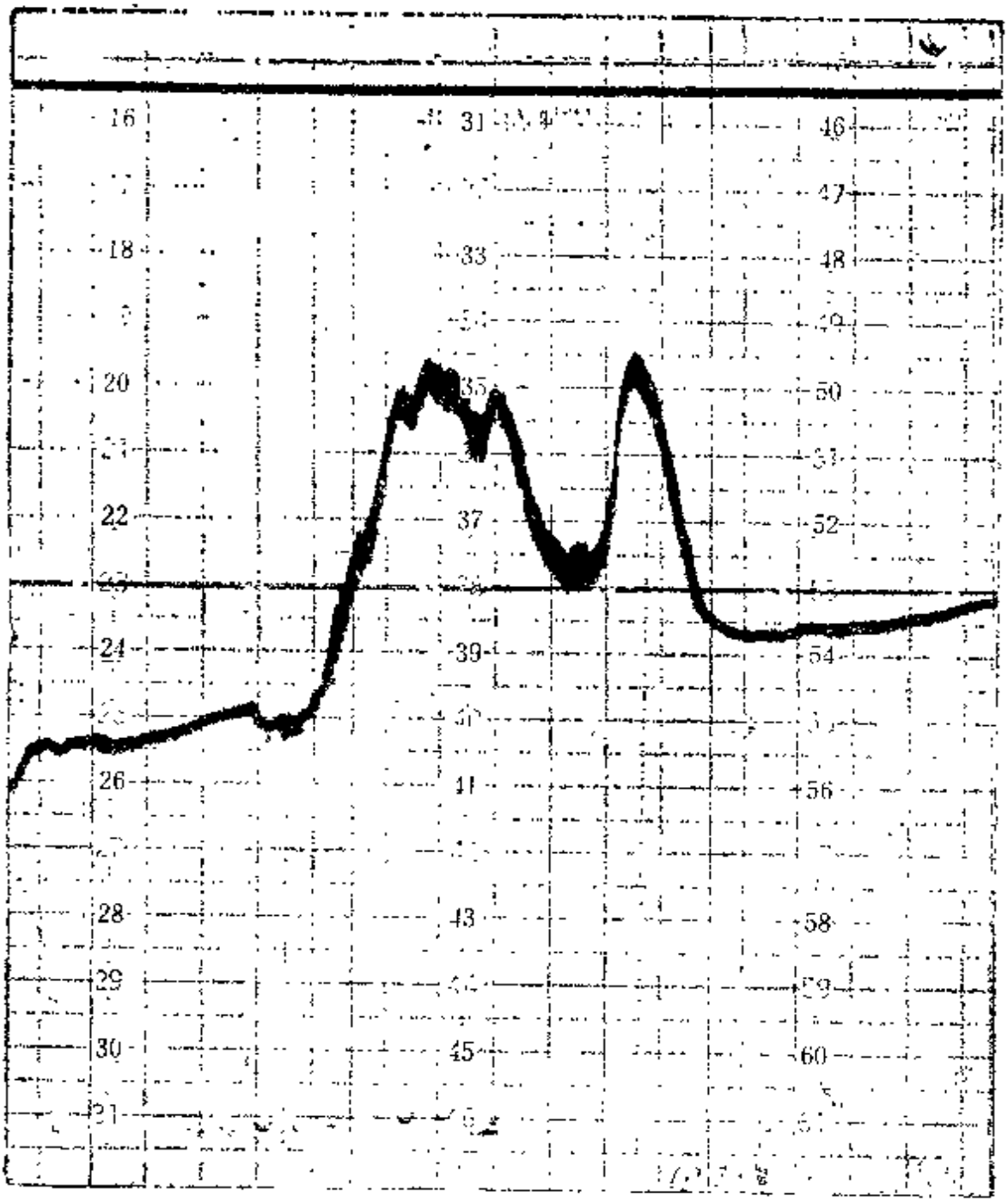


图 3-2　回声测深仪记录声图

定式换能器吃水改正数 ΔH。由图 3-3 可知，有：

$$\Delta H_{定} = H_{首} + (H_{尾} - H_{首}) \times \frac{a}{a+b} - h \qquad (3\text{-}6)$$

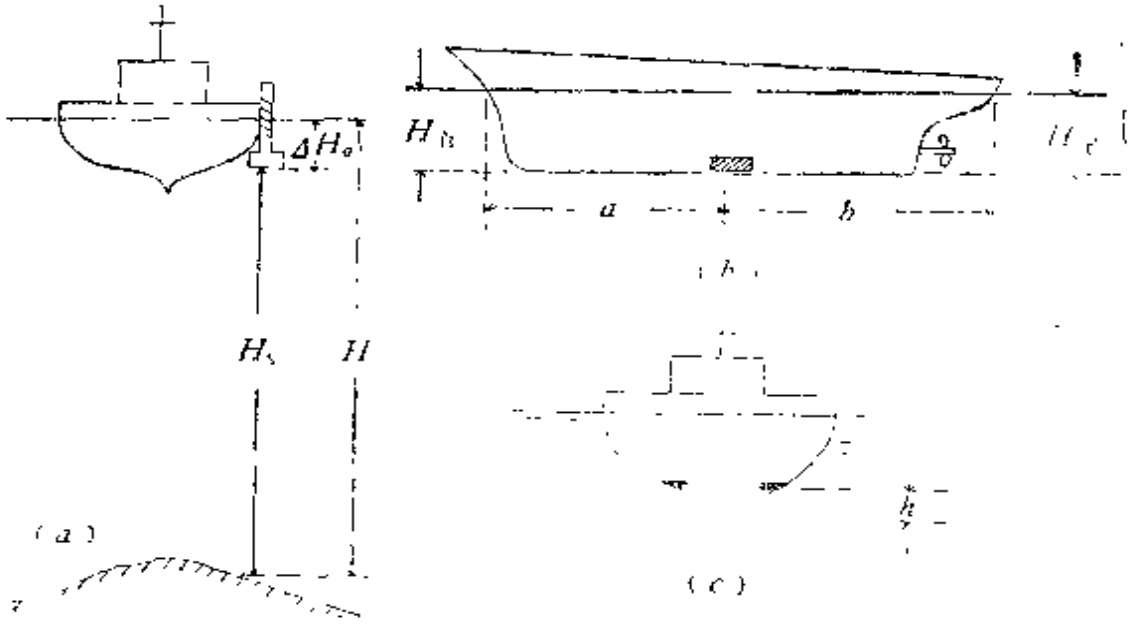


图 3-3　吃水改正

2. 基线改正ΔH_L

当发射换能器与接收换能器不是合一的，那么两换能器之间的距离为换能器基线长$2L$。由于基线长度影响，使得所测水深并不是实际水深H，而是一斜距H_s，见图 3-1。当令$L=\frac{1}{2}l$时，基线改正为：

$$\Delta H_L = H - H_s = \sqrt{H_s^2 - L^2} - H_s = H_c\left[\sqrt{1-\left(\frac{L}{H_s}\right)^2} - 1\right]$$

当$\frac{L}{H_s}<0.14$情况下，L的影响很小，可不顾及。否则应进行基线改正。

3. 转速改正ΔH_n

转速改正是由于测深仪的实际转速n_s不等于设计转速n_0所造成的。记录器记录的水深是由记录针移动的速度与回波时间所决定的。当转速变化时，则记录的水深也将改变，从而产生转

速误差。转速改正数 ΔH_n 为：

$$\Delta H_n = H - H_S = H_S\left(\frac{n_0}{n_S} - 1\right)$$

当 $n_n < n_0$ 时，ΔH_n 为正；当 $n_S > n_0$，ΔH_n 为负。例如，SDH-3型回声测深仪第 I 深段转速 $n_0 = 312$ 转/分，若实际转速为 $n_n = 314$ 转/分，令 $H_S = 20\text{m}$，则：$\Delta H_n = -0.13\text{m}$，$H = H_S + \Delta H_n = 19.87\text{m}$。

4. 声速改正 ΔH_V

我们知道，声波在海水中传播的速度 V 是海水中温度 t、盐度 S 和海水静压力 P 的函数。在不同的地区，不同的季节，这些参数也是变化的，若海区实际声速 V_m 不等于设计声速 V_0 时，就影响实测水深的精度，故应加声速改正数 ΔH_V。

$$\Delta H_V = H - H_S = H_S\left(\frac{V_m}{V_0} - 1\right).$$

当 $V_m > V_0$ 时，ΔH_V 为正；当 $V_m < V_0$ 时，ΔH_V 为负。例如，当 $V_0 = 1500\text{m/s}$，$V_m = 1550\text{m/s}$，$H_S = 20\text{m}$，则：$\Delta H_V = 0.67\text{m}$。

那么，这实际声速怎样知道呢？前已述及，声速 V 是 t、S、P 的函数，我们可在大量实测资料的基础上，建立与实际比较符合的经验公式，进行计算。目前，国际上计算海水中声速常用的算式有（A）代尔-格洛索公式（1952年）；（B）威尔逊公式(1962年)；（C）威尔逊近似公式。

在实际工作中，一般是每个月测定测区 0m、15m、25m、35m、50m、75m、100m、150m……深度处的声速，然后取各层声速的加权平均值，作为海面至某深度处的平均声速 V_m。

5. 测深仪总改正数

由以上叙述可知，测深仪总改正数 ΔH 为：

$$\Delta H = \Delta H_0 + \Delta H_L + \Delta H_n + \Delta H_V \qquad (3\text{-}7)$$

在上述四项改正数中，以声速改正数ΔH_v对总改正数ΔH影响最大，此种改正方法称水文资料法。水文资料法一般适用于深度大于20m以上海区，浅水海区宜采用校对法求测深仪总改正数。

校对法是用检查板、水听器等，置于换能器下方一定深度处，实测其准确的深度H，与测深仪在当时当地测得的深度H_s作比较，其差值ΔH即为测深仪总改正数。如，检查板测绳长为15.5m，仪器测得相应深度为14.5m，则

$$\Delta H = H - H_s = 1.0\text{m}$$

用校对法检查测深仪时，一般1～2周测定一次。校准的深度以能控制这1～2周的测深资料为原则。

§3.2 海底地貌探测仪

海底地貌探测仪又称侧扫声纳。它可显示海底地貌，确定目标的概略位置和高度。海底地貌仪分单侧和双侧两种，目前多使用双侧地貌仪。

一、概述

图3-4，表示测量船通过拖曳电缆，将地貌仪换能器基阵拖鱼，拖曳在离船尾一定距离和一定深度上进行测量的情形。

由于换能器收到海底各点回波的时间有先后之分，故记录器在将一次声波脉冲发射过程中的各点回波记录时，是按先后次序依次记录在一条横线上的。如图3-4中，o为零位线，m为海面线，它是从海面M反射回来的回波信号记录线，om为换能器吃水深度；a为海底回波信号记录线，$oa(H_f)$为换能器至海底的深度；C为礁顶。

回波信号的强弱除与海底地貌的起伏、海底底质的性质等有关外，还与传播路径的远近有关。在海底平坦处，回波信号的强

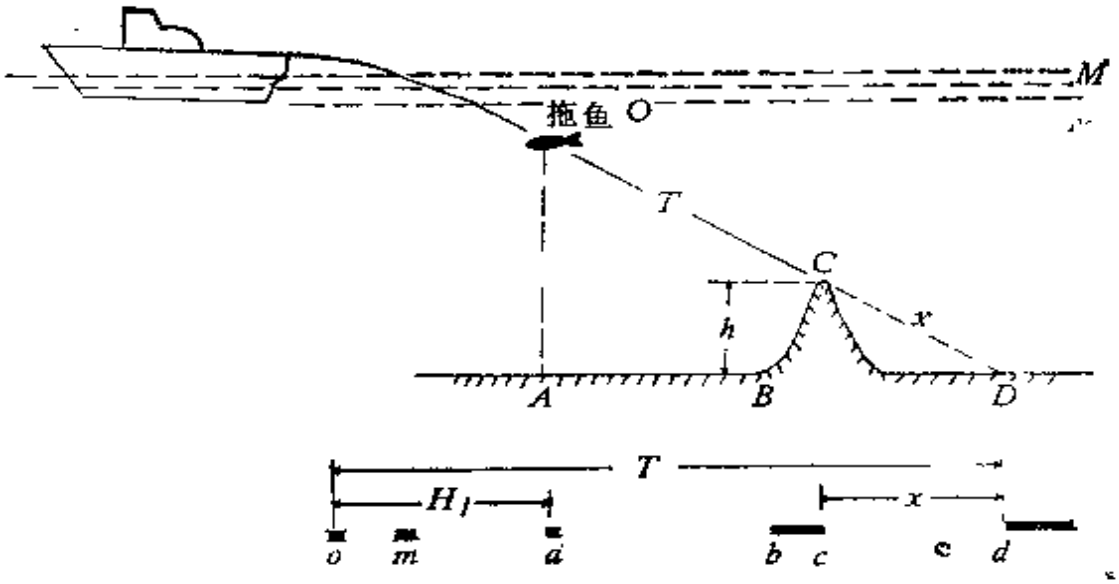


图 3-4

度随着距离的增大而迅速减弱。为了使记录纸上记录信号的黑度变化，只反映地貌的起伏，就必须消除回波记录黑度随距离衰减的现象，仪器为此设置了时间增盖控制设备加以补偿，使得在相同底质且基本平坦的海底上，各处反向散射回波被接收机接收后，在记录纸上记录成一样的黑度。反过来讲，如果记录纸上是一条黑度相同的直线，则表示此段为平坦的海底。如果海底地貌起伏变化，则会引起回波强弱变化，在记录纸上则以浓淡不同的黑度表示出来。

下面介绍两种典型海底地貌的回波记录。

1. 海底局部隆起物的回波记录

如图 3-5 所示，海底有一障碍物(如暗礁、沉船等)。

从 a 至 b 这一段海底基本是平坦的，由于接收机时间增益控制电路的补偿作用，a 至 b 线的黑度是均匀的。而隆起物正面 b 至 c 一段海底，由于声波的掠射角增大，反向散射回波强，记录 bc 段的黑度就加深了。过了 c 点以后，由于 oc 和 od 的斜距有一个突变，因而就有一段时间内没有回波信号，直到 d 点为止，

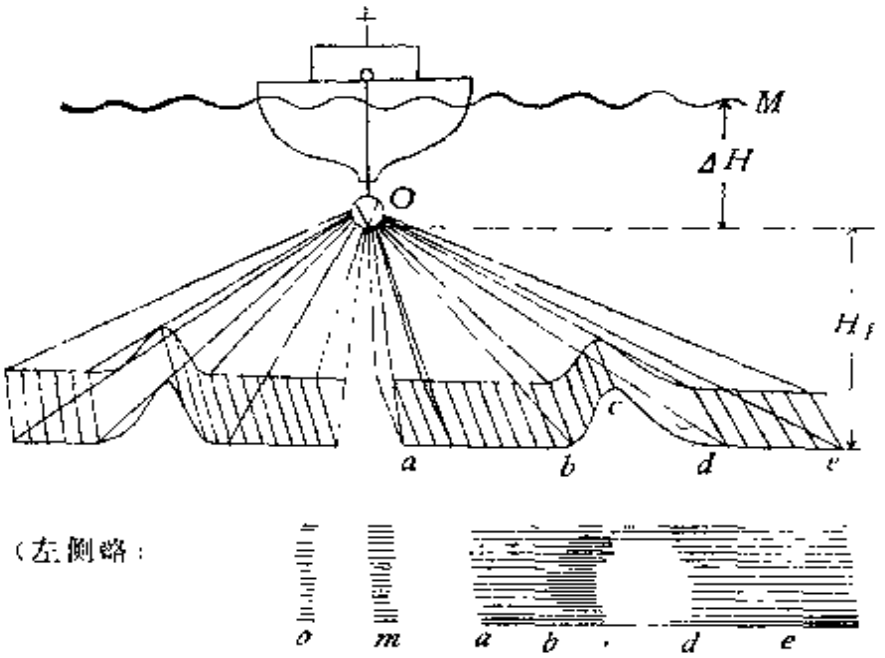


图 3-5　海底局部隆起回波记录示意

cd 段在记录纸上就没有记录。再向前，*de* 段又是平坦海底，回波记录与 *ab* 段又一致了。这样，每一次声波发射的回波，在记录纸上记为一条横线。随着测量船向前航行，记录纸也在均匀移动，显然，在记录纸上就形成了由一条条横线构成的反映海底地貌起伏的平面图形，如图 3-5 所示。海底隆起物反映在记录纸上是左黑右白的图形，黑的部分是隆起物朝向测量船方向的正面，而白的部分是该隆起物背后的阴影。

2. 海底凹陷部位的回波记录

由图 3-6 所示，对于海底的凹陷部位（如沟或坑）*bc* 段，没有回波。反映在记录纸上为白色。而朝向换能器的 *Cd* 段，反向散射回波变强，反映在记录纸上为黑色。海底凹陷部位的地貌声图是先白后黑，白色“影子”的长短在一定条件下反映出凹陷部位的深浅程度。

关于海底地貌探测仪的几个基本问题，如，声图上目标位置

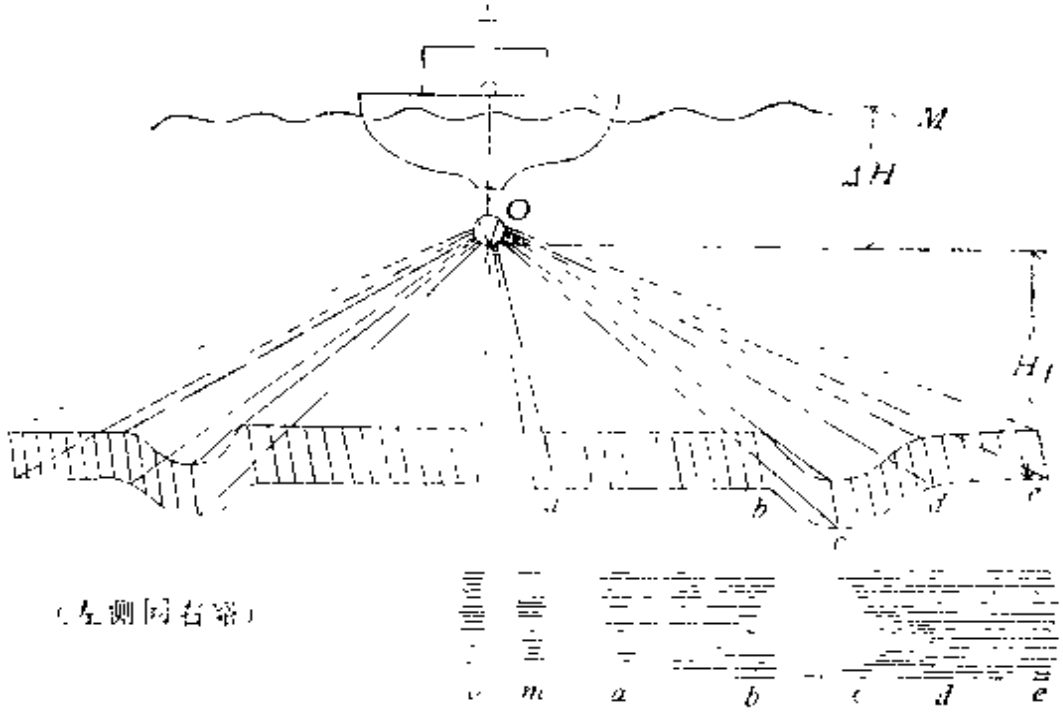


图 3-6　海底凹凸部分回波记录示意

与高度的确定；仪器在水平平面和垂直平面内的分辨力；拖鱼至探测目标远、近端的水平距离；声图的失真与干扰；探测带有效宽度与探测趟的布设等，可参阅有关专业书。

二、仪器组成及其工作原理

海底地貌探测仪组成可分为换能器、发射机、接收机、收发转换装置、记录器、主控电路六个主要部份。见图 3-7 所示。

现以国产 SDH-8 型双侧海底地貌仪为例，说明各部分的作用。

换能器——外部形状似鱼形，故称拖鱼。拖体左右两侧各有一个长条型换能器基阵，每个基阵均由双排等间隔排列的喇叭型振子所组成，各振子间导线采取并联连接，基阵辐射面采用聚胺脂硫化橡胶密封，使之即能保持水密封，又能保持良好的透声性能。左右两侧基阵辐射面均与地垂面成 8°倾斜角，以便在换能器正常工作时，使声波波束倾斜入射海底。为防止两侧基阵之间

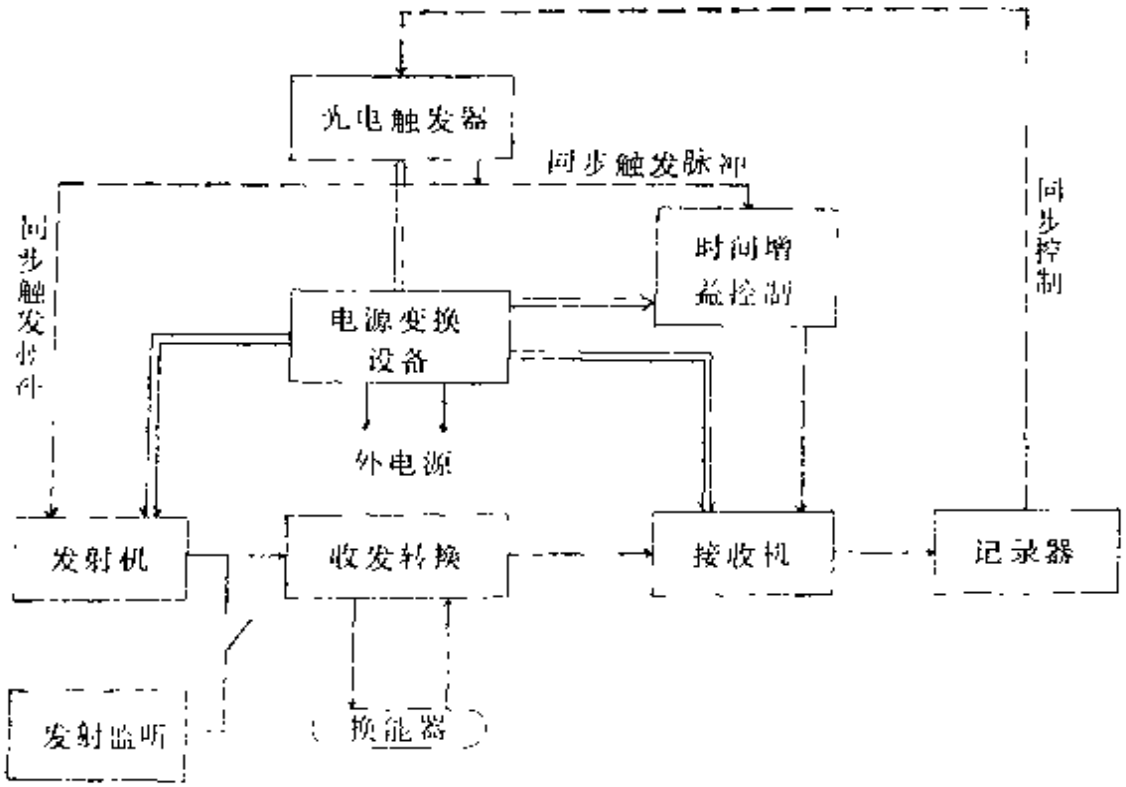


图 3-7

相互干扰，它们的工作频率不相同，其左侧为 38kHz，右侧为 43kHz。另外，主波瓣的水平波束角均为 2.2°，垂直波束角左侧为 34°，右侧为 28°。换能器基阵为收发合用。

发射机——与换能器基阵相对应，分左、右发射机，统一于主控同步触发脉冲，分别产生一定宽度、频率的高频等幅振荡电脉冲，再分别送入左、右换能器基阵，转换成声波脉冲向两侧海底辐射。

接收机——SDH-8 双侧地貌仪分左、右接收机。它们可将两个换能器基阵送来的微弱电信号加以选择放大处理，然后送到记录器将信号在记录纸上记录下来。地貌仪所接收的海底回波，主要是海底反向散射（又称海底混响）回波。不同海区的海底反向散射声强 J_s，大致正比于时间（或距离）的负三次方至负五次方之间，即 $J_s = J_m \cdot (t^{-3} \sim t^{-5})$。为补偿海底反向散射回波随时间（或距离）增大而引起的声波衰减，接收机设有时间增益控

制，它在主控同步触发脉冲的控制下，在每一次声波发射后，使接收机的放大量K随着声波传播时间（或距离）的三次方至五次方而变化，即 $K=K_m(t^3\sim t^5)$。这样，就补偿了由于传播时间（或距离）的不同而引起的回波强弱不同，即 $K\cdot J_s=J_m(t^{-3}\sim t^{-5})\cdot K_m(t^3\sim t^5)=K_mJ_m$。如底质相同的平坦海底，在记录纸上就表现为一条黑度均匀的直线。另外，为了能使动态范围很宽的海底回波信号，能在动态范围很窄的记录纸上显示出来，正确地反映海底地貌的变化，接收机还设有自动增益控制，能自动地压低强信号，增强弱信号，即压缩回波信号的动态范围，使海底回波变化均能在记录纸上记录下来，从而正确反映海底精细地貌的变化。

收发转换装置——其作用相当于在换能器基阵与发射机、接收机之间接入一个自动开关。当发射时，它使换能器只与发射机接通，以防发射脉冲信号损坏接收机；当发射结束后，又将换能器接于接收机，以便接收发射后陆续返回的回波信号。

记录器——作用有二：一是产生总机触发信号，送往主控电路，产生同步触发脉冲，协调整机工作；二是同时记录左、右两侧的海底地貌回波信号。SDH-8 型地貌仪的记录器采用皮带划针式，使用干式石墨电火花纸。

主控电路——由记录器产生的触发信号，经主控电路整形、延时后产生一定宽度的同步脉冲信号，用来控制整机工作。此同步发射脉冲一路送往左、右发射机，使之发射声波；一路送往左、右接收机，使之产生时间增益控制电压，以达到控制补偿的作用。

最后，我们给出二张地貌声图供参阅。

图 3-8(*a*)是由每张相距 500m 的平行横断面地貌声图拼接而成，有 8 条探测趟，反映沉积岩褶皱所形成的一个小盆地地貌平面视图。虽然，探测船的航速与航向不很稳定，相邻地貌声图的岩层露头的横断面吻合得还不很精确，但是岩石露头的真实轮廓还是清晰可辨的。图 3-8(*b*)是(*a*)的说明图。



图 3-8(a)

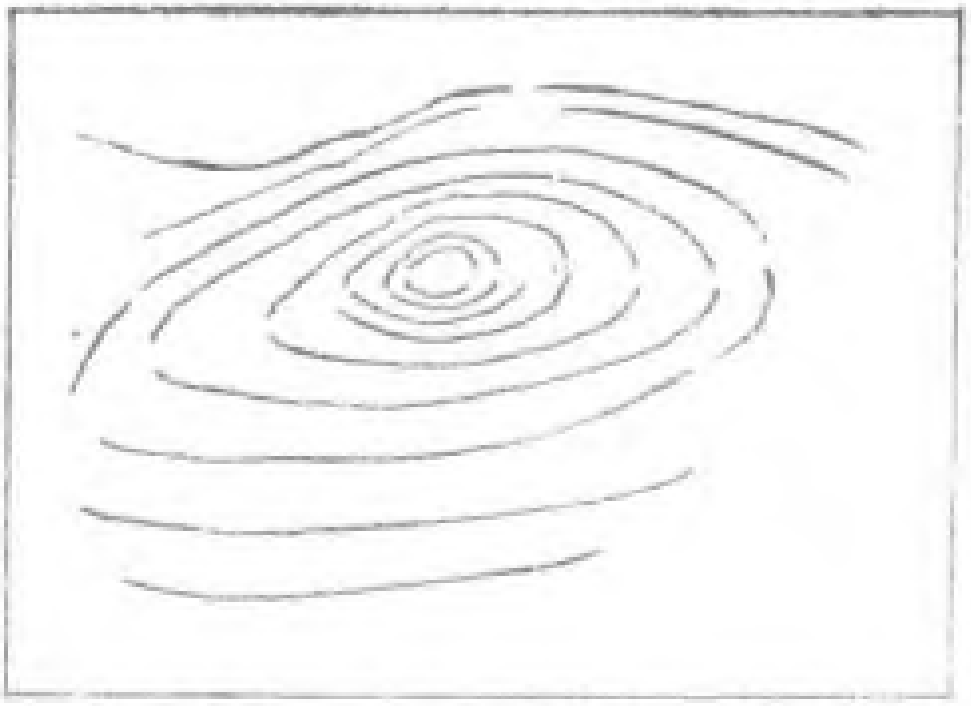


图 3-8(b)

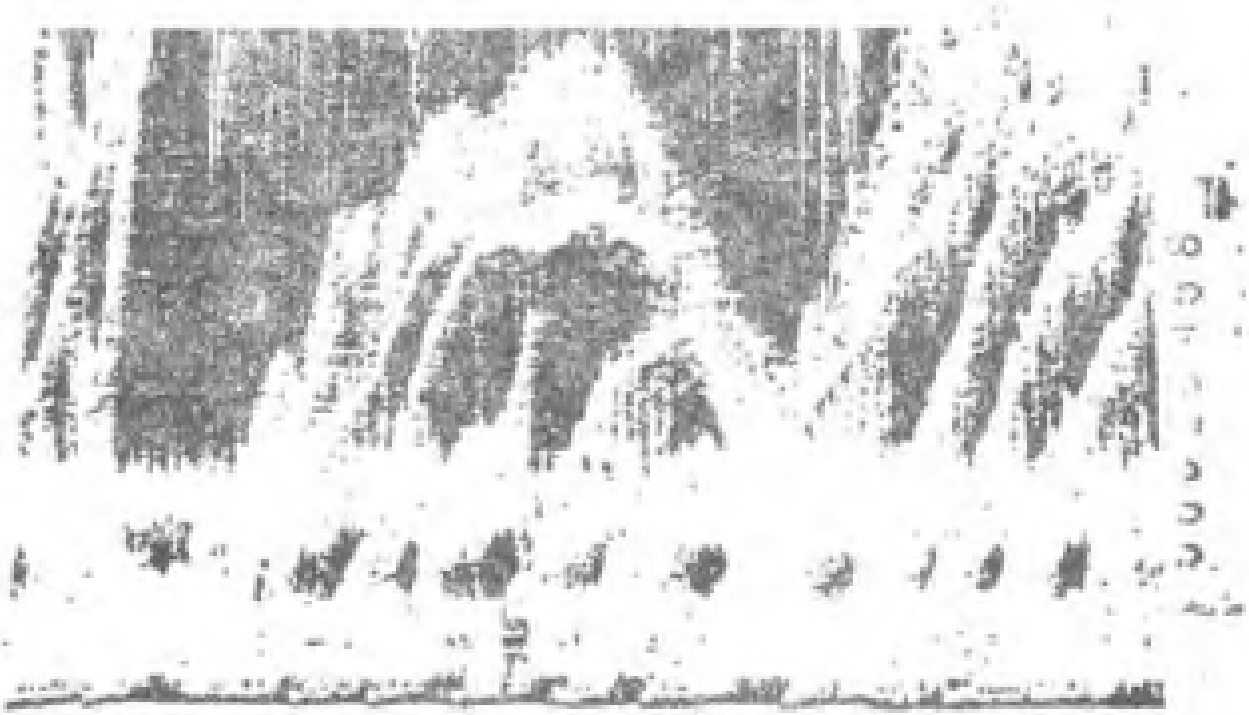


图 3-9(a)

图 3-9(*a*)声图反映沙砾海底上覆盖着沙带和沙波的图像。根据判释声图的方法，可以清楚地辨认沙带、沙坡、沙砾海底，沙波波峰、波谷及沙波发展方向等图像。图 3-9(*b*)为(*a*)图的说明图。



图 3-9(*b*)

三、国外侧扫声纳介绍

根据侧扫声纳的用途不同，大致可分为四类：分辨声纳、搜索声纳、地质声纳、远程声纳。其中，分辨声纳有很高的分辨力，常用来探测海底精细地貌和探测分辨水下物体等。

国外分辨声纳以美国克莱茵公司生产的侧扫声纳为代表，具有当代先进水平。

它采用的声波频率为 500kHz；每侧最大探测距离为100m；脉冲宽度为 0.02ms；主瓣波束角，水平为 0.2°，垂直为 40°。该系统基本组成是换能器拖鱼和图示记录器。其中图示记录器可分为一、二、三通道三种类型。一通道记录器用来探测水深；二通道记录器用来记录航向左、右两侧一定宽度内海底地貌、底质声图；三通道记录器以上功能均可，如插入模数信息处理组件和磁带记录器，就可以组成多功能的模数自动绘图声纳，英文简称 MAPS。该系统有三种基本工作方式：

1. 现场记录方式

在作业现场，记录纸上同步记录了水深和海底淤积层状况；定位和未经校正的航向左、右两侧地貌声图，供初步分析时使用。同时有关数据存储在磁带上，供后期进一步处理。

2. 后期处理方式

由此种方式在记录纸上获得的地貌声图，已经过斜距校正、速度校正等，即已校正了声图的失真，所以可用毫米尺按同一比例在纸上量取目标的水平距离和目标的大小，供详细分析时使用。

3. 实时处理方式

它可在记录纸上实时地提供不失真的(经过斜距和速度校正)；左右两侧拼接在一起的完整地貌声图，供现场准确分析时使用。并实时地将上述完全校正过的二通道声纳信息存储在磁带上。

可见，模数自动绘图声纳(MAPS)，能自动地进行斜距改正，速度改正，使记录纸纵横比例为 1:1，从而消除了地貌声图的失真；它还能自动地消除左、右两侧声图中的重叠部分，并拼接成一幅完整的地貌声图；还能自动在标记线上注释(年月日、时间、趟次、点号、船位)，使声图成为完整的资料；还可以对声图的局部进行扩展，供详细分析用；本校正和已校正过的地貌声图资料可以实时地存储在磁带上保存或供进一步处理。所以 MAPS 实现了大面积地貌声图的拼接，为绘制海底地形图创造了条件，提高了自动化程度。

§ 3.3 多波束测深系统

多波束测深系统是在回声测深仪基础上发展而来的。顾名思

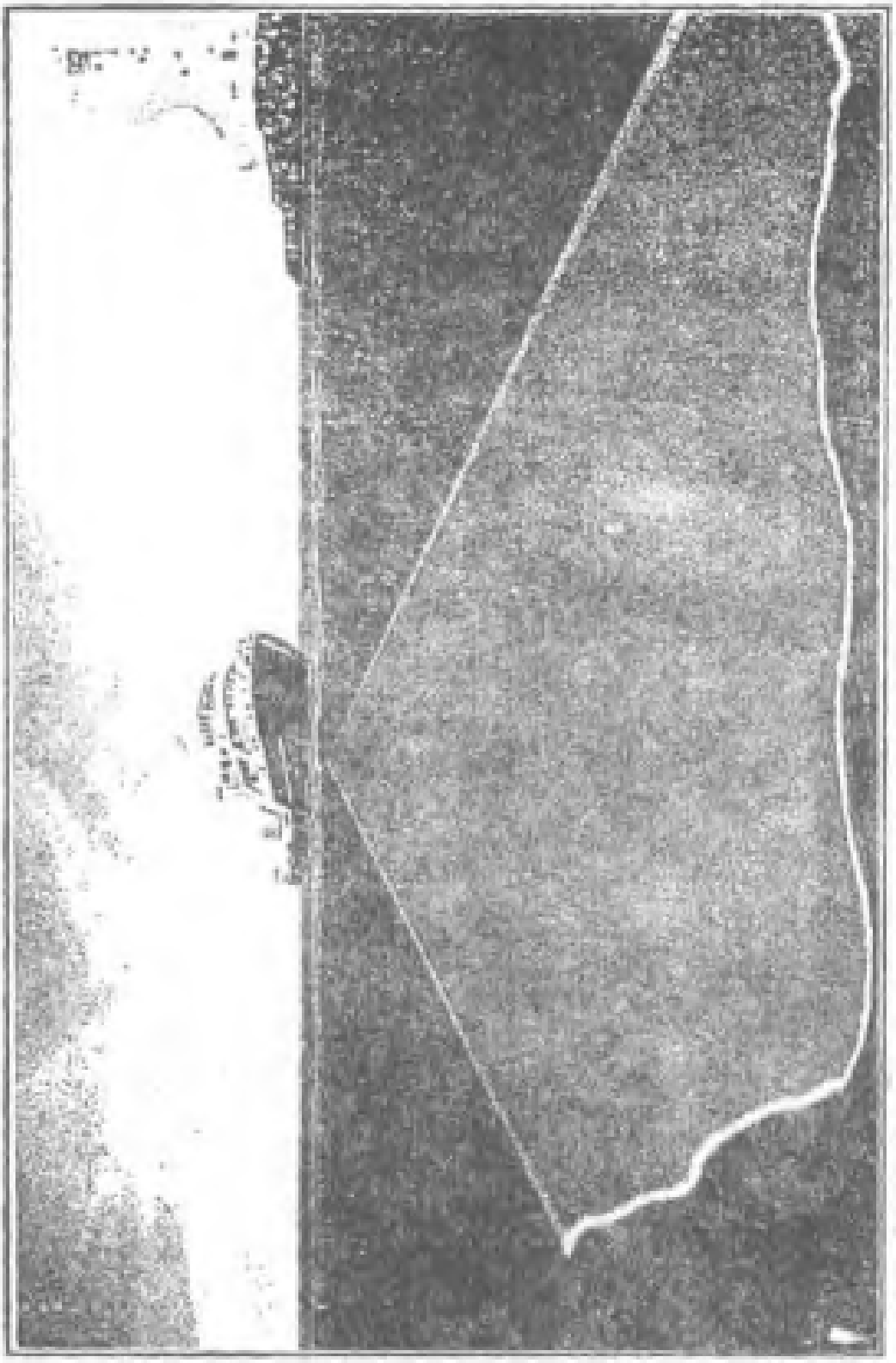


图 3-10 多级床剖面示意图

义，多波束测深系统能一次给出与航线相垂直的平面内的几十个甚至上百个深度。因此，多波束测深系统能精确地、快速地测定沿航线一定宽度内水下目标的大小、形状、最高点和最低点，从而较可靠地描绘出水下地形的精细特征。它与单波束回声测深仪相比，具有测量范围大、效率高得多的优点。将它与卫星定位系统、无线电定位系统等相联，可由微机控制组成自动成图系统，使水下地形测量完成得又快又好。

一、概述

图3-10为多波束测深示意图。

图3-11为中科院声学所和天津海洋测绘研究所联合研制的多波束测深系统的水下声学基阵发射指向性和接收指向性示意图。

该系统发射换能器采用双圆弧合成换能器阵，发射心形单波束，见图3-11（a）所示。该波束在与航线垂直平面内的开角为120°（实际为118°），沿航线方向的开角为3°。

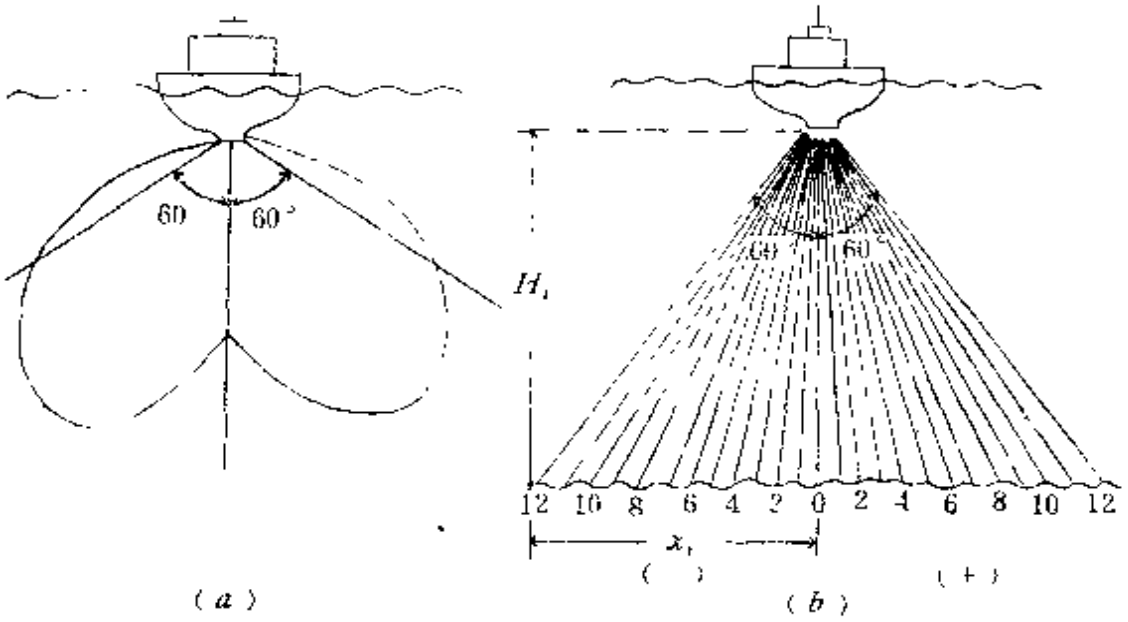


图 3-11　多波束测深系统发射与接收示意图

该系统的接收换能器采用均匀线列阵，在垂直于航线的平面

120° 开角内，用波束形成器组成 25 个波束来接收水底返回的声波。每个波束的夹角为2.4°～5°。

发射换能器每隔 1 秒发射频率为 100kHz 的超声波射向水底，水底回波被多波束接收系统接收，形成 25 个水深点，其位置和水深值按下式求取(参看图3-12)：

$$\left.\begin{aligned} x_i &= \frac{1}{2} G \cdot \Delta t_i \cdot \sin\theta_i \\ H_i &= -\frac{1}{2} G \cdot \Delta t_i \cdot \cos\theta_i \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}8)$$

式中：θ_i——等 i 号波束极大值方向与垂直线的夹角；

G——水中声速；

Δt_i——从声波发射到第 i 号波束收到的时间；

x_i——第 i 号波束所测水深点距换能器垂足距离；

H_i——第 i 号波束所测的换能器到水底深度。

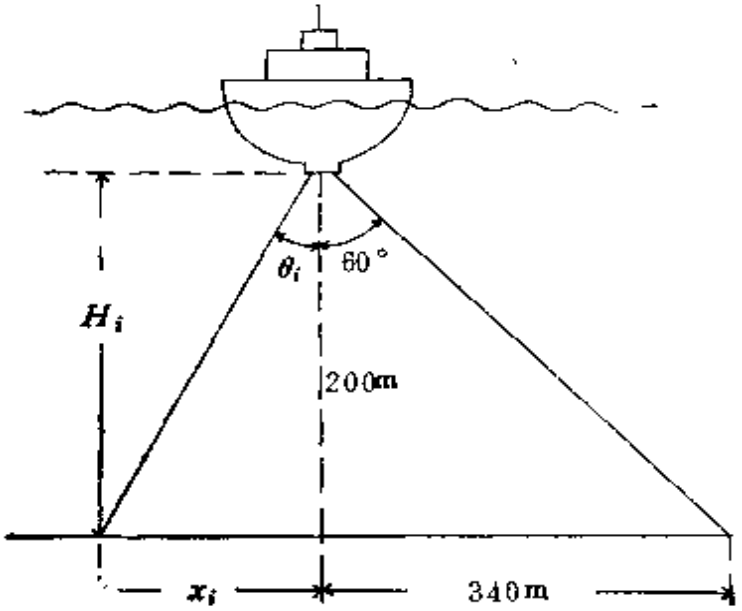


图 3-12　各水深位置与水深值计算示意图

国产的多波束测深系统的最大设计深度为 200m，此时系统所能覆盖的垂直于航线平面的宽度为：$2x_{12} = 2 \cdot H_0 \cdot \mathrm{tg}\,\theta_{12} = 2$

$\times 200 \times \mathrm{tg}\,60° \approx 680\mathrm{m}$。这里，$H_0$为0号波束方向上的水深，取为200m；$x_{12}$为第12号波束测深点到经过换能器的垂直线的距离；$\theta_{12}$为最斜波束极大值方向与过换能器垂直线之间夹角。显然，随着水深变浅，其覆盖宽度也逐渐变窄。其覆盖宽度x与水深H的关系式可概略用下式表示：$x \approx 3.4H$(m)。

国外的多波束测深系统，以美国通用仪器公司生产的BOSUN和海束系统在世界应用较广。BOSUN系统工作深度为240m；横向覆盖宽度为深度的2.6倍；波束数21；工作频率为36kHz。其记录处理设备有数字打印机、数字磁带记录器、描迹仪示波管，由岸上计算机处理出图，该系统适用于近海。海束系统工作深度为45～11000m；横向覆盖宽度为42°，约为深度的0.8倍；波束数为16，每个波束宽度为2.7°；工作频率为12.158kHz。其记录处理设备基本同BOSUN系统，但可在船上适时出图。日本在进行海底地形精密测量的计划中，拟在日本海洋调查船上陆续装备各种型号的窄带多波束测深仪，详见表3-1。

窄带多波束测深仪一览表 **表 3-1**

厂家、仪器	频　率	波束数	每束宽度	覆盖宽度	测深能力
1.通用仪器公司					
海束	12.158kHz	16条	2.7°	42°	45～11 000m
海束2000	12kHz	46条	2.0°	92°	10～11 000m
测图Ⅰ	36kHz	17条	3.5°～6.3°	104°	10～2 000m
2.克鲁伯　阿特拉斯电子公司扫海仪	15.5kHz	59条	1.8°	90°	10 000m
3.古野电气 HS-10	12kHz	64条	2.0°～2.8°	90°	50～11 000m

表里也包括了前面所提的海束。日本已在海上保安厅水路部的“拓洋号”、海洋科学技术中心“海洋号”、东京大学海洋研究所的

“白风丸”号三艘船上安装了海束。水路部在引进海束时，在水深3720m的平坦海底，对数据的精度进行了研究，因海束为深海用的回声测深仪，所以将测定的水深值与实际水深相比较是很难的。因此，为检验精度，只能与传统的方法相比较，或将各波束间的水深值进行比较。当水深为3000m～4000m时，海束经过回

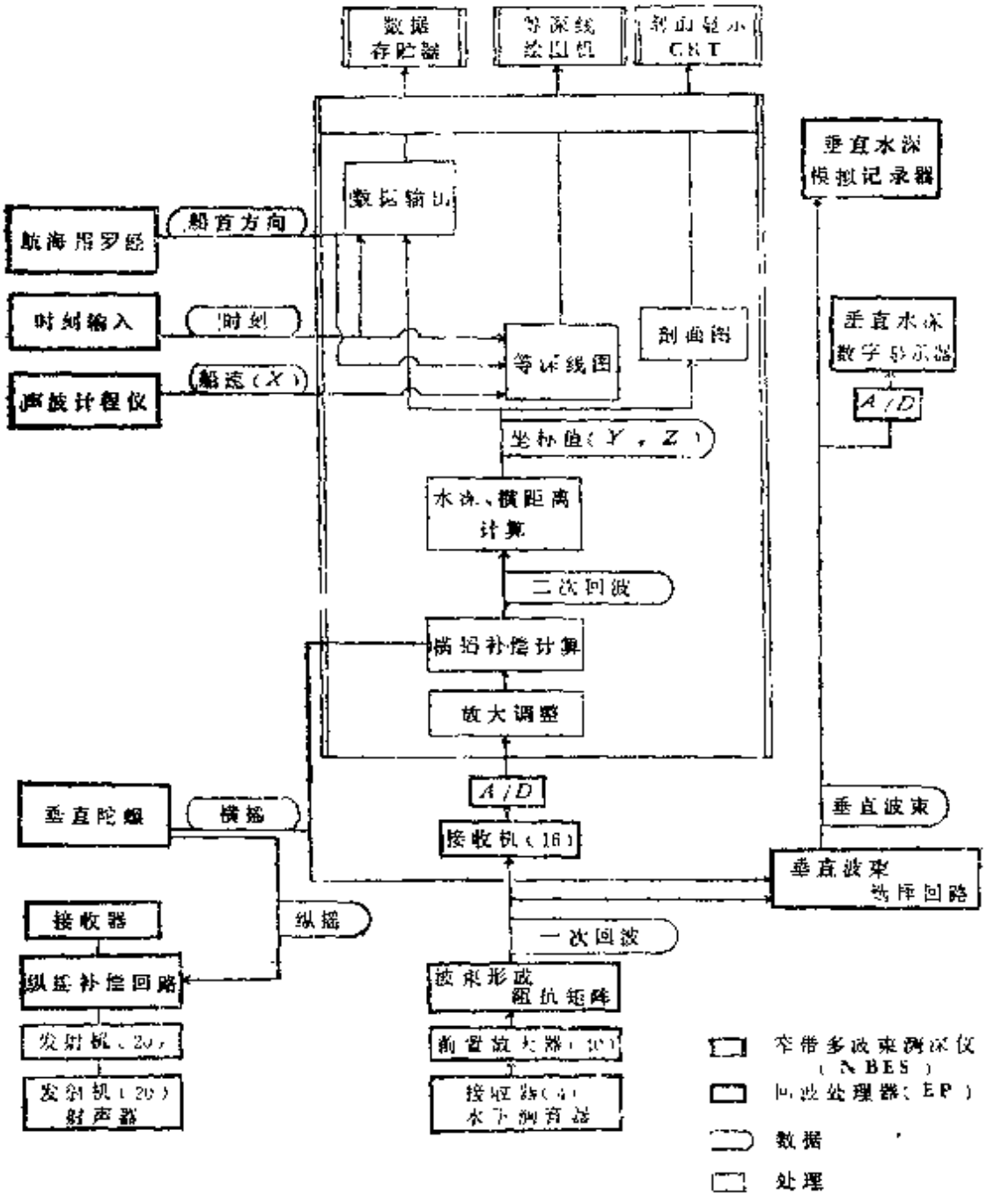


图 3-13　多波束测深仪数据流程图

声处理机的水深数据的精度为几米。最外侧波束的精度稍差，为10m左右。

图3-13 是海束多波束测深仪数据流程图。

除以上所述窄带多波束测深仪外，还有宽带多波束测深仪。宽带多波束测深仪适用于较浅水域内的扫海测量和测绘水下地形。这种仪器波束多，且覆盖宽度大。如挪威产EM-950 型多波束测深仪共有 120 个波束，两个最外侧的波束夹角可分为 150°、140°、128°三种，其相应的覆盖宽度为 $7.4\times D$、$5.5\times D$、$4.1\times D$（D为水深）。例如，在波束角为 150°时，当水深D为 20m时，覆盖宽度为 $7.4\times 20^{m}=148$m。该仪器尤其适宜在近海水域实施水下地形测量，其测深范围是 3m～300m（从换能器底部算起）。EM--950型多波束测深仪的测深精度为 $0.3\%\times D$（D为水深），距离分辨率 15cm，深度分辨率 2 cm。从 1993年以来，先后有多台安装到荷兰、美国、挪威的测量船上进行水下地形测量。图3-14为根据 EM-950 多波束测深仪测量的声图所绘制的海底地形图的一部分。图中等深线的间距为 0.2m。

1995年，我国从美国引进 2 台 Seabeam 2000 型多波束测深系统，测深范围为 5m～1100m，对我国近期完成大陆架水下地形测量将起到重要作用。

二、系统的组成及其工作原理

以国产仪器为例说明。多波束测深系统的主要部分有：声波发射系统、多波束接收系统、换能器基阵水平稳定系统、信号处理线性电路部分、信号控制及时间门电路部分、水底地形剖面显示器、斜距数字记录部分、水深图示部分等。见图 3-15 所示。

声波发射系统——由发射换能器基阵和发射激发器两部分组成。

发射换能器的基阵是由两个彼此间隔 32°的同为 59°的圆弧形基阵所组成，各有 19 个换能器基元，参见图 3-16 所示。基阵

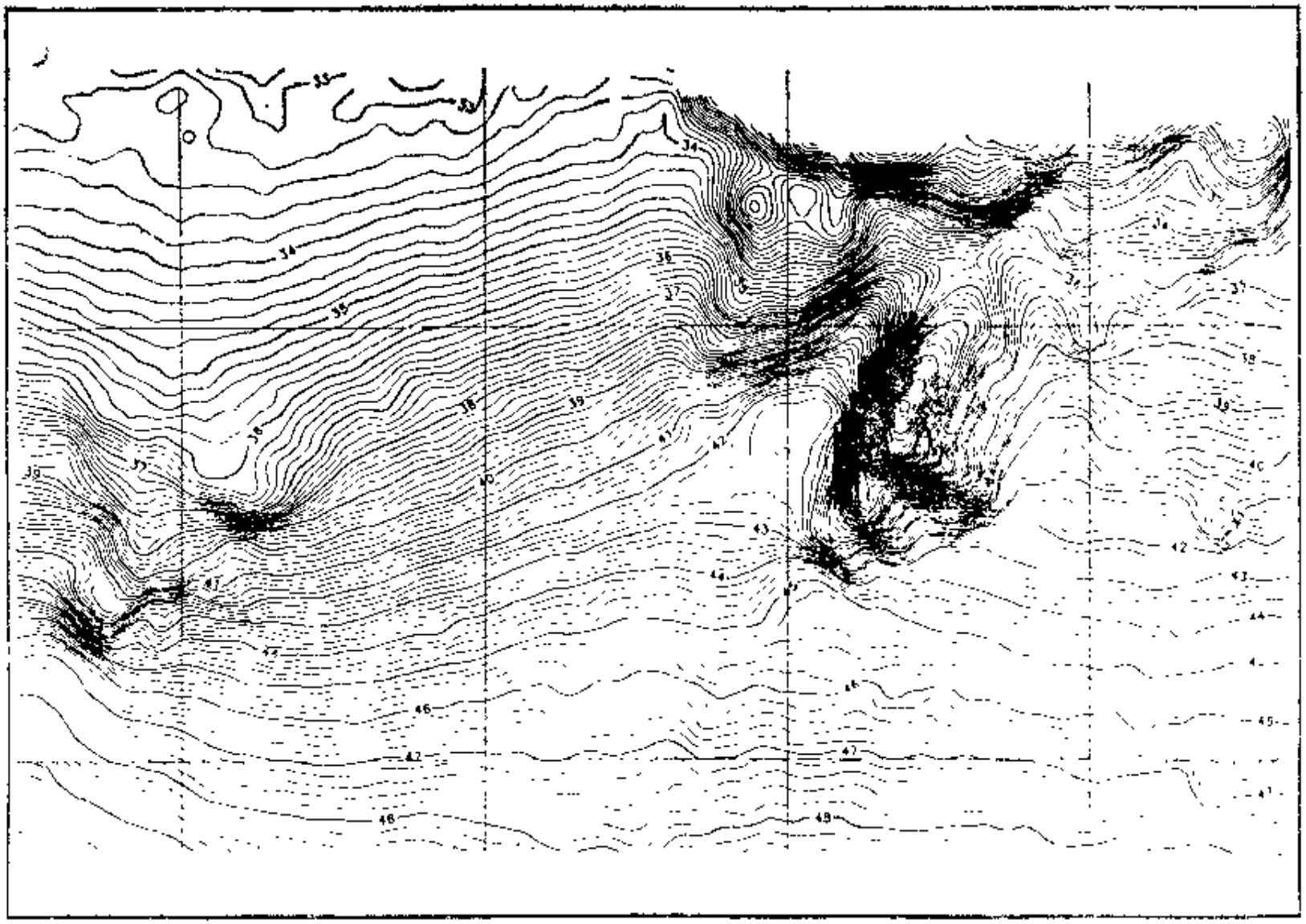


图 3-14　水下地形图

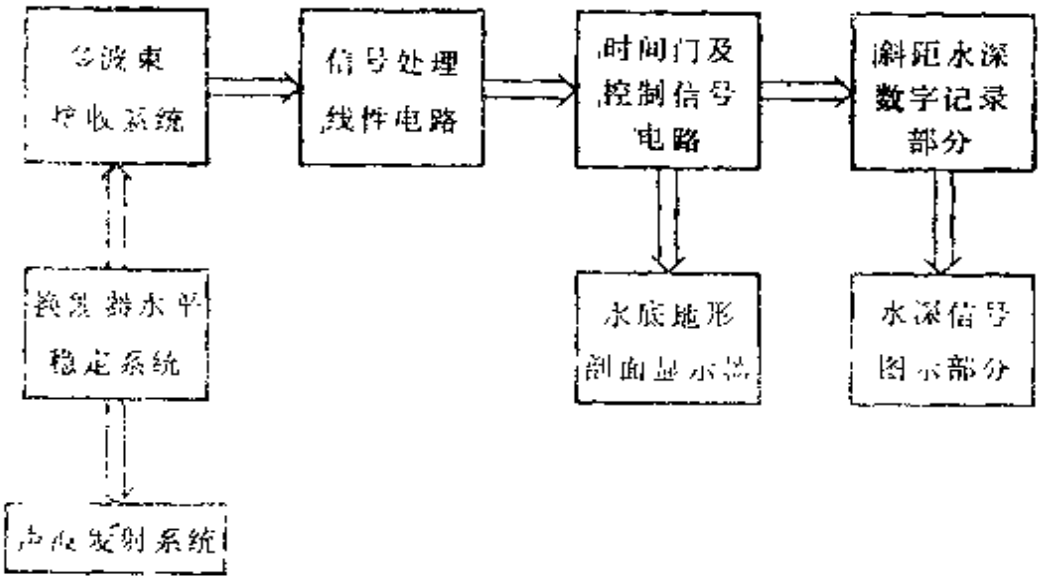


图 3-15　多波束测深系统组成框图

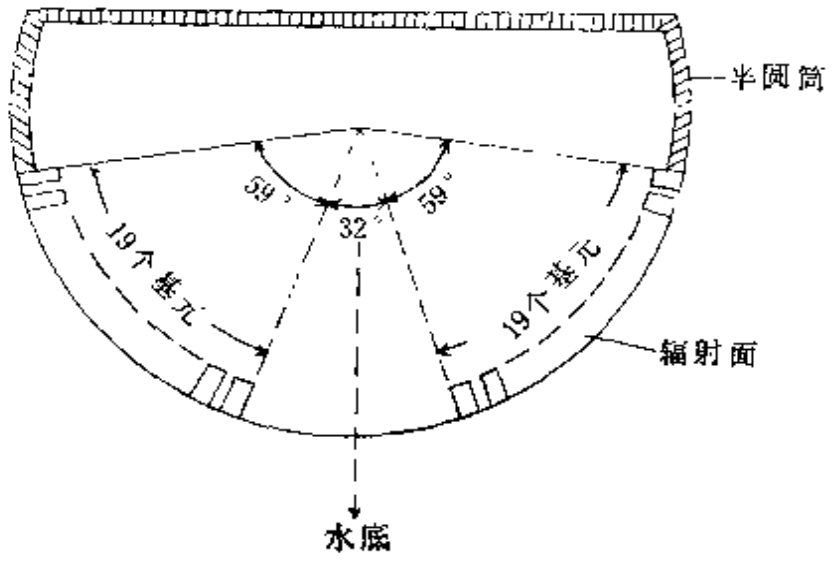


图 3-16　发射换能器的基阵

用吊架悬挂在舰船底部，它的辐射面窗口正对着水底，窗口的中心线与水底垂直。

发射激发器的作用与测深仪中的激发器相同，它产生高频振荡的脉冲信号，加到发射换能基元的两块电板上，使基元发射超声波脉冲。发射电功率为 5kW，发射周期为 1 s，发射的脉

冲宽度有三档。发射激发器的电路由晶体振荡器、射极输出器、发射控制电路、选频放大器、三级功率放大器、功率管高压延时接通电路及电路电源等部分组成。

多波束接收系统——由接收换能器基阵、59路前置放大器、电阻移相多波束形成器等组成。

接收换能器基阵为一均匀线列基阵，安装在船底，其长度方向垂直于舰船的龙骨，这个方向所在平面称为正横平面。基阵的法线方向垂直于水底。在正横平面中与法线左、右成60°角的范围内，用波束形成器形成25个波束，其最斜波束在开角±60°附近。

前置放大器个数与换能器基元个数一致。当回波返回接收换能器基阵时，每一个换能器基元将所接收的声波转换成电信号输出，送往各自的前置放大器进行放大。这需要经过多级放大才能获得足够的信号电压和功率。然后送往电阻相移多波束形成器去形成波束。

电阻相移多波束形成器可以把经前置放大器放大后的电压进行相位同时补偿，达到同相位迭加，在预定方向上形成波束极大值。该系统可在25个方向上形成波束。电阻相移多波束形成器是用移相代替延时，属于时间域波束形成器中常用的一种方法。由于它所用的主要元件是电阻，具有结构简单、体积小、工作稳定可靠、造价便宜等特点，应用比较广泛。

线性电路——由多波束形成的25个波束信号分别送到25块线性电路板，对信号进行动态范围压缩和归一化处理，以满足示波器显示水底剖面水深和水深数字打印机的需要。具体讲来就是，某号波束的回波信号进入线性电路后，首先经过放大，可变增益放大对信号的动态范围进行压缩，然后混频、滤波将载波频率为100kHz的信号变成载波为40kHz的信号，以防止线路的自激、再经放大检波，用信号的包络进行自动增益控制，经检波后的信号通过幅度门进行归一化，输出均为脉宽为2ms，幅度为

5V的正脉冲信号，这些输出信号一路送往水底水深剖面显示线路，一路送往时间门。

时间门电路及控制信号电路——时间门的作用是在波束主瓣方向的水底回波到达时，自动开门让它通过，而在其它时间一律关门，这样就抑制了波束的旁瓣干扰，使波束信号经过时间门的控制，只有一个回波信号输出，作为斜距数字转换的控制信号，供打印机打印斜距。时间门另一个作用是在丢失回波信号后，能连续四次自动按时开门等候，若仍收不到回波，就发出丢失回波的信号送至线性电路的“0”号波束回波干扰抑制，使其控制可变增益放大器，抑制自声波发射到“0”号波束回波返回后的一段时间内的所有信号，使此后从幅度门输出的第一个强回波就是时间门所要跟踪的波束主瓣方向上的水底回波。

水底地形剖面显示——经线性电路幅度门输出的幅度、宽度相同的25个波束信号，一路送至示波器，将垂直于航线断面一定宽度内的海底地形连续地在萤光屏上显示出来，使观测人员对所探测的水底地形有一直观的了解。同时可以判别哪些是波束主瓣方向的水底回波，哪些是干扰。通过调整时间门电路中的定点深度堵塞电路来抑制干扰，保证时间门能自动跟踪真正的水底回波。

水底地形剖面显示器由双踪示波器和外围电路所组成。外围电路分圆扫描产生器与示波管阴极输入电路两部分。圆扫描发生器产生半径随时间不断增大的圆扫描线；阴极输入电路将25个波束回波信号和时标信号陆续送入示波管阴极，然后在萤光屏上显现出来。

斜距水深数字记录部分——多波束测深系统测量结果的另一种显示方法，是用窄行快速打印机记录25个斜距水深结果，以及测量的日期、时间、经纬度等有关数据，作为计算和图上作业的依据。

换能器基阵水平稳定系统——为了避免由于测量船倾斜或摇

摆时，使换能器基阵偏离水平状态而引起的水深测量误差，该系统采用了双轴陀螺稳定平台，作为水平基准的一套换能器基阵水平稳定系统。它可使换能器基阵（包括发射和接收）在测量船摇摆、倾斜时，始终保持水平状态，其水平稳定误差不大于0.5°。

三、四波束扫海测深仪

在港口与航道，通常要定期实施全覆盖扫测，以确保不遗漏水下浅点。由于四波束扫海测深仪具有安装灵活、操作方便的优点，至今在各国航道、港口及近岸海区大比例尺水下地形测量及障碍物探测中得到广泛应用。

四波束扫海测深仪主要由四个收、发合一的换能器，同步控制器和图示记录器组成。四个换能器在船上的安装方式有舷挂式和悬臂式两种，详见图3-17。其中舷挂式安装时，两个换能器垂直安装，另两个倾斜一定角度安装，以期实现对水下全覆盖探测。至于悬臂式，图上一目了然。以上安装换能器时，应将不同工作频率的相间安装，以防同频干扰。

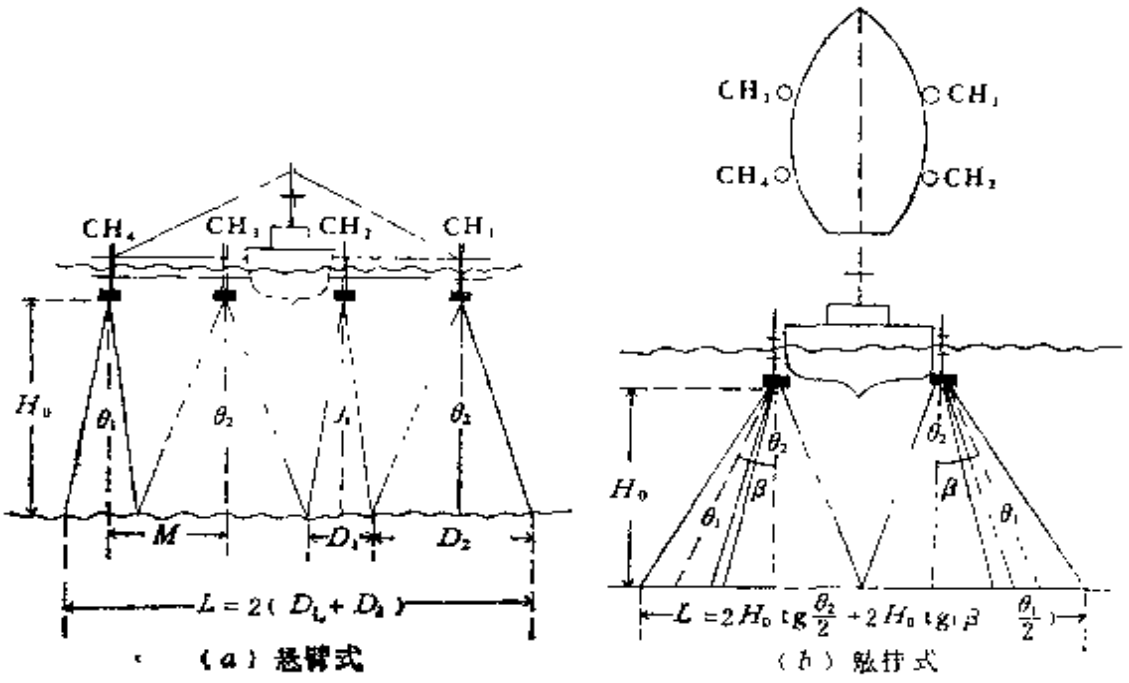


图 3-17　四波束换能器安装方式

当仪器按悬臂式安装时，沿测量船正横方向的声波覆盖总宽度L为：

$$L=2\ (D_1+D_2)\ =2\left(2H_0\mathrm{tg}\frac{\theta_1}{2}+2H_0\mathrm{tg}\frac{\theta_2}{2}\right)\quad(3\text{-}9)$$

当仪器按舷挂式安装时，波束角$\theta_2=16°$的两换能器垂直安装；$\theta_1=6°$的两换能器倾斜β角安装，为做到两换能器之间无遗漏覆盖，应使$\beta\leqslant\left(\frac{\theta_1}{2}+\frac{\theta_2}{2}\right)$。此时声波覆盖总宽度为：

$$L=2H_0\mathrm{tg}\frac{\theta_2}{2}+2H_0\mathrm{tg}\left(\beta+\frac{\theta_1}{2}\right)\qquad(3\text{-}10)$$

目前，我国各单位使用的四波束扫海测深仪，主要有日本产的MS-10型、PS-20R型及PS-600型。以比较先进的PS-600型为例，$\theta_1=16°$，$\theta_2=6°$，当水深H_0为20m时，换能器中心间距为3.86m，声波覆盖宽度L为15.4m。H_0与L的关系约为：$L\approx .77H_0$；对于MS-10型，则为：$L\approx0.63H_0$。

四波束扫海测深仪工作时，1～4（GH_1～CH_4）通道的换能器以一定间隔，依次有序地发射和接收声波，在记录器上则相应记下各波道的发射线及水底回波线。PS-600型仪器还可以把四条水底回波线叠加，并能对四个波道水深用数字表示，参见图3-18。

PS-600型四波束扫海测深仪还设有回波信号自动增益控制(AGC)和时间增益控制(TVG)；有换能器吃水校正和声速校正；还能在记录纸上自动打印量程范围、声速改正值、换能器安装倾斜角值、日期和时间。有通用的RS-232 G输出接口，可将测定的有关数据送入微机进行数据处理，利于实现测量过程的自动化。

§3.4 水下测量技术

以上，我们叙述了利用安装在水面船只上的仪器设备，实施

水下地形测量的各种方法。本节，我们将介绍一下在水下，利用现代科学设备和技术手段进行水下地形测量的问题。

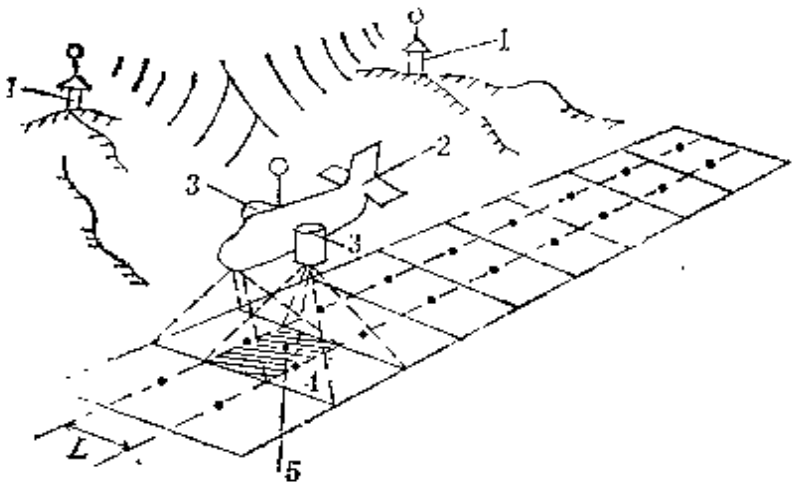
一、潜水器测量

自60年代开始，陆续有前苏联、美国、加拿大等10余个国家开始使用潜水器进行广泛的科学研究工作。目前使用的潜水器以自动式探测器最先进，如德国的SF_3型和前苏联的“斯加特”等。“斯加特”号自动式潜水器既可进行海底地形测量，也可测量物理场和化学场。它由两个牢固的集装箱组成，一个装有全部系统和电池，另一个装有测量和研究的仪器。动力为4马力的附有螺旋桨的电动机，水下航速为2节。潜水器尺寸为$2\times1\times0.7m^3$，排水量0.4t。探测器内装有水声定位系统，其定位中误差为±3m。

一般讲，采用水下船只和潜水器进行水下地形测量工作同用水面船只所进行测量的手段和方法大致一样。只是在水下测量时，需要测定潜水器本身的下沉深度。为此，一般需要使用液体静力深度计和向上方向的回声测深仪。侧扫声纳的使用方法与水面船只使用方法是一样的。进行测量时，潜水器的航行坐标采用保障船只或水下海洋大地控制网点来确定。

一些技术比较先进的国家还在潜水器上安装了水下立体摄影机。这种随潜水器运动的水下立体摄影测量，在某种程度上同航空摄影地形测量工作一样。美国为此作过试验，使用一架测量摄影相机，在沿测线上运动时，获取立体相片，等高线以2.5m间距勾绘。图3-19为水下立体摄影测量示意图。

在进行水下立体摄影测量时，依据水的透明度和照明情况，仪器离海底的高度一般不超过5～12m，因而摄影的比例尺是很大的。这也说明了水下立体摄影测量方法效率低和困难较大。因此，进行海底地形测量，最有前途的方法还是利用具有高分辨率的声学系统。声学系统由超声波发射器、水声接收机和电视显示



1—应答器；2—潜水器；3—相机；4—相机投影中心；
5—相片覆盖带；L—摄影测量基线

图 3-19　水下立体摄影测量示意图

器所组成。由于这种系统超声波衰减性很大，有效作用距离相对较短，但也比光学系统强若干倍，而且不存在光学可见度的问题。现在声纳技术已发展采用声全息摄影技术，对于海底地形测量来说，在潜水器或水面船只上，都可以在海底很大深度上，进行具有足够精度的测量工作。这种以衍射为条件的干涉图像制成的全息图，用激光照射时，是单独点的目标物的水声信息将复原为原来可见图像。

二、水下仪器地形测量

在进行小范围水域，譬如狭窄水道、礁区、浅滩区以及滨岸海域的水下地形测量时，可采用水下仪器进行地形测量。水下仪器地形测量一般在水深 50m 以内，以大比例尺形式进行。

进行水下仪器地形测量，应有带专门的潜水装备的人员潜下水去进行。观测者之间的联系，可利用水声通讯台，如美国的 AN/PQC—2 型水声通讯台可作用距离 450m；英国采用无导线的水下超声波通讯系统，从一个频道进行工作；法国的 ERUS—

2 型橡皮面罩式通讯系统，有效距离为 400m。

水下仪器测量同陆地测量有类似之处，一般情况下，测量工作均以直接观测的技术手段来实施。国外均进行了依靠现代科技成就，完善水下仪器测量的技术工作。如，具有 20 秒精度的水下经纬仪由英国研制成功，它的目镜和物镜各具独立的焦距，望远镜筒比陆上大两倍，作为光环的十字丝采用钨丝。经纬仪装置在金属三角架上，用测锤来确定中心。为了防止腐蚀，仪器金属部分用黄铜制成，并装置在密封匣内，可通过变化其压力使之同四周压力达到均衡。该仪器曾在地中海水深 9～12m的海底测量了边长平均为 14m的三角形的各角度，坐标的确定精度为 2.5cm。另外，前苏联研制的水下气压水准仪和水下液体比重水准仪可以用来测定水下高差。据试验，前者的测量中误差为±2.3 4.6mm。还有水下激光测距仪，如美国 1968 年试制的水下激光测距仪可以测定的距离为 45 m，精度为±15cm；测定深度为 18m，精度为±3cm。其它水下测量仪器还有水下电视摄影仪、水下摄影系统等。

§ 3-5 机载激光测深

机载激光测深技术是本世纪 60 年代末 70 年代初开始出现的，经过 20 多年的研制、试验，目前，机载激光测深已进入实用阶段。本节将就激光测深原理、系统组成及其应用作一介绍。

一、激光测深原理

激光是一种具有高度单色性，良好的相干性和强度上的彩色光源。机载激光测深原理与回声测深的原理相类似。

如图 3-20 所示，从飞机上向海面发射两种波段的激光，其中一种为波长 1064nm的红外光，另一种为波长 532nm的绿光，红外光被海面反射，绿光则透射到海水中，到达海底后被反射回

来。这样，两束反射光被接收的时间差等于激光从海面到海底的传播时间的两倍。

考虑海水折射率后，激光测深的公式为：

$$Z = \frac{1}{2} G \cdot \Delta T / n \qquad (3\text{-}9)$$

式中：G——光速；

n——海水折射率；

ΔT——所接收红外光与绿光的时间差。

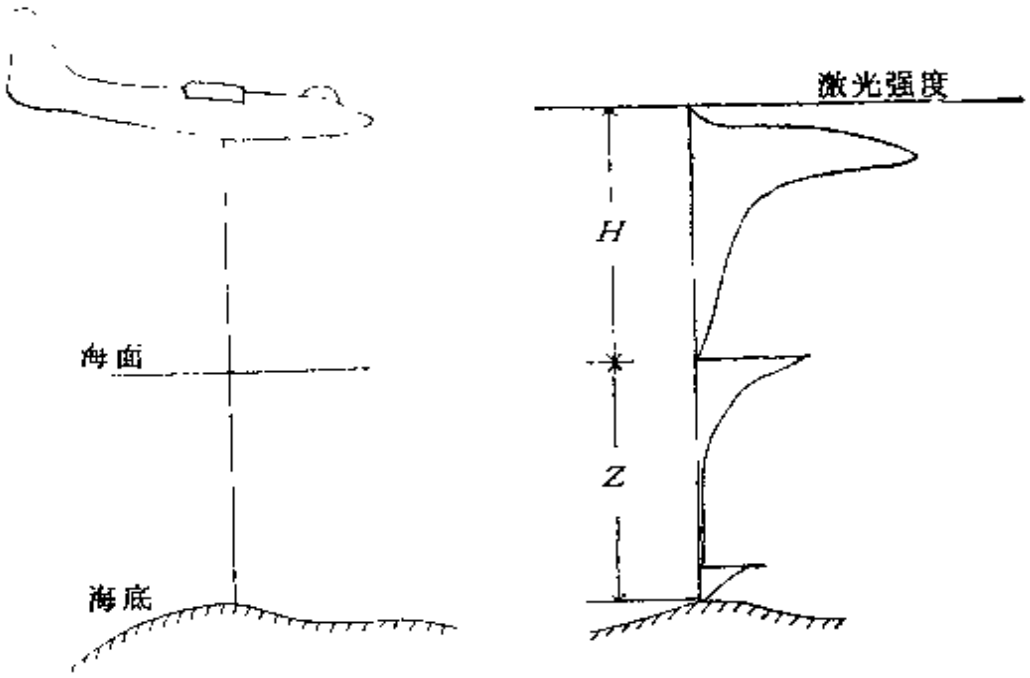


图 3-20 机载激光测深示意图

不同的机载激光测深系统所发射的红外激光和绿光的波长稍不相同，如澳大利亚的LADSⅡ系统的红外激光波长为1064nm，绿光为 532nm。美国的 HALS 系统则相应为1060nm和 530nm。在 520～535nm间的绿光波段，海水对这一波段的光吸收最弱，因此，这一波段称为“海洋光学窗口”。

机载激光测深系统的最大探测深度，理论上可以表达为：

$$L_{max} = \frac{\ln (P'/P_s)}{2\Gamma} \qquad (3\text{-}10)$$

表 3-2

国别	型　号	激光器	波长(nm)	扫描方式	穿透深度(m)	精度（m）	测点间隔(m)	飞机高度(m)	速度(m/s)	试验时间
美国	HALS	Nα:YAG	530	椭圆	50	≤20m为±0.3 >20m为±1	4—5	150	50	1978～1982
	ABS	Nα:YAG	532	椭圆	100	±1	3—10	50	70	1985
	SHOALS	铷激光器	530	椭圆	50(清晰海区) 20～30(一般区)	±0.3	3—10	200	70	1991
澳大利亚	WRELADS—Ⅰ	Nα:YAG	532	直线	50～70	±0.3	10	500	70	1978
	LADS	氖激光器	532	直线	50～70	±1	10	500	70	1985
加拿大	Mk—Ⅰ	Nα:YAG	532	椭圆形	30	±0.3	10	500	70	1980
	LASERN—SOO	Nα:YAG	532	椭圆形	60	±0.3		500	70	1984～1985
瑞典	CCRS—Ⅰ	Nα:YAG	532		40	±0.3		150		1980

说明

1.表中空白处为缺少资料；

2.前苏联在机载激光测深系统研制方面也具有一定水平，1983年也进行了试验并投入使用，但缺少有关资料。

式中：P'是一个系统参量，定义为 $P'=P_L\cdot\rho\cdot A\cdot E/\pi H^2$。其中$P_L$为激光峰值功率，$\rho$为大气——海水界面的反射率，$A$为光探测器接收面积，$E$为接收机的效率；

P_B为背景噪声功率(W)；

Γ为海水有效衰减系数。

P_B和Γ取决于海区自然条件与海水特性，背景噪声P_B与阳光有关。据文献介绍，夜间测浮深度要比白天深许多。

机载激光测深系统目前测深能力一般都在50m左右。其测深精度在0.3m左右。各个系统的情况各不相同。表3-2中给出了各国的机载激光测深系统的代表供参阅。

二、激光测深系统的组成

激光测深系统的组成一般有六大部分，见图3-21所示(以澳大利亚的LADC系统为例)。

1.测深系统（DSSS）

测深系统使用两组激光光束，发射以每秒脉冲数为168次的Nd：YAG激光脉冲。红外光束向海面垂直发射，获取离海面的高度。绿光脉冲以垂直于飞行航向，通过扫描镜获取航线下268m宽的海面扫描线，从而获得一定间隔的海水深度。

2.导航系统（NSS）

导航系统最先采用陆基无线电定位系统，而现在大多采用GPS定位系统。

3.数据处理分析系统（DPSS）

数据处理分析系统用来处理、记录位置和水深数据，也处理、记录系统操作所需的其它数据。

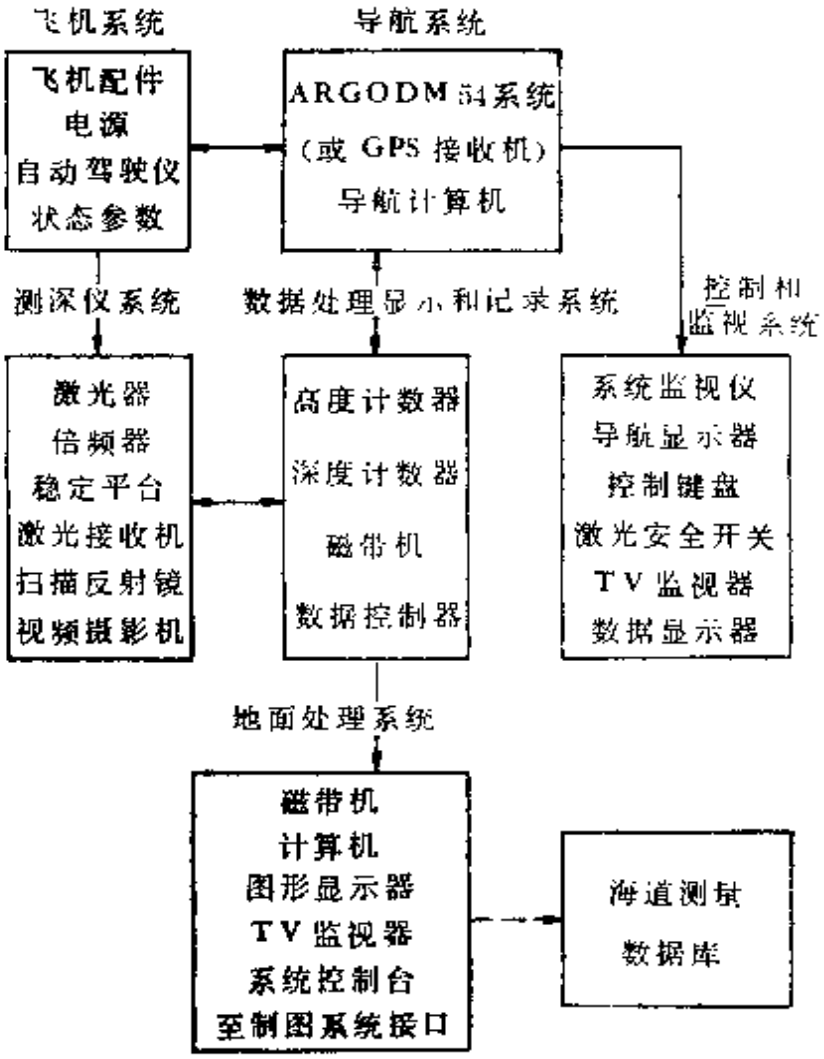


图 3-21 LADS激光测深系统组成框图

4.控制-监视系统 (CNSS)

控制-监视系统操作员在控制台对系统进行实时控制和监视。

5.地面处理系统 (GPSS)

由于激光测深获取的数据量十分庞大，机上计算机不可能进行实时计算。因而必须有地面处理系统对机上的实时记录进行处理。其处理内容包括：

(1) 对所记录的红绿光束进行波形识别，进行滤波和内插处理。

（2）计算该海区的混浊度和最大测深能力。

（3）计算各个点的深度并进行各项改正。

（4）获得每个点的位置和深度并进行可靠性评估。最后的记录为(X、Y、Z)，其中 Z 为深度。

6.飞机与维修设备

装载激光的飞机及维修设备也是这个系统中不可缺少的部分。飞机可以是直升机，也可以是固定机翼飞机。

三、机载激光测深的应用

机载激光测深具有速度快、覆盖率高、灵活性强等优点，因此在某些领域大有可为。

机载激光测深可作常规海道测量之用，这也是研制机载激光测深系统的始动力。机载激光测深具有快速实施大面积测量的优点，被海洋大国广泛应用于沿岸大陆架海底地形测量之中。如澳大利亚用来对其210万km^2的大陆架测量，使用情况表明测量成果良好可靠。加拿大用其∠ARSEN-500 测量北极海域，克服了天气恶劣、海况复杂等困难，效益明显。其它各国的海试表明，机载激光测深是测深技术的一次革命，虽然它不能替代回声测深，但其潜力不可低估。

除了常规的海底地形测量之外，机载激光测深的覆盖率高决定了它还能提高探测航行障碍物的探测率。

同时，机载激光测深还能提高发现水下运动目标（如潜艇）的发现概率。

对无深度信息的登陆场，机载激光测深可迅速、安全地获取信息，从而提高快速反应部队的作战能力。

机载激光还可用来测量海区的混浊度，测定温度、盐度。

在海洋工程中，机载激光测深可以测定港口的淤积等。

第四章　海洋潮汐与水位控制

我们知道，大地测量的高程是从某地平均海面起算的，而平均海面则是通过潮汐观测确定的。如我国的黄海高程起算面，就是利用青岛验潮站19年的观测资料计算出来的平均海面。而海道测量所得的水下深度通常是从深度基准面起算的，这个深度基准面也是根据海区潮汐观测资料按照一定数学关系计算出来的。这两个面是既有联系，又有区别。水下地形测量，可以平均海面为准测量水深值，将高程统一于大地测量基准。但现在多数水深测量数据往往是以深度基准面为准，如果进行水下地形成图时，可依据两面的关系，改化成与陆地地形图统一的高程基准。

以上所述的平均海面和深度基准面是通过验潮站对作周期性的升降运动的海面进行一定时间观测后，通过潮汐分析求得潮汐调和常数，以调和常数再求得深度基准面、平均海面及验潮站有效范围的。利用调和常数还可判断潮汐性质、绘制潮波图、进行潮汐预报等。总之，潮汐分析是求定基准面的理论基础，我们将在本章第一节作一简要介绍。此外，大家知道，在进行水深测量时，测得的深度是由瞬时海面起算的，因此必须把测得的深度改正到从规定的基准面（平均海面或深度基准面）起算的深度，这就是水位改正。由于验潮站分布的不同，可有不同的水位改正方法，这些将在本章第三节中叙述。

关于潮汐观测的方法，在沿岸海域验潮，通常采用设立验潮水尺或选用自动验潮仪。国产的ASS-1型自动验潮仪，测量误差为±1cm。远海验潮，可采用进口的WLRS型水位计。该仪器可将瞬时水位自动记录在磁带上，工作结束后，可在室内通过回放进行资料处理，水深在0—200 m范围内，分辨率可达2.7 cm。

§4.1 潮汐分析

所谓潮汐分析，是指在一定的时间序列中，通过对海面的观测（验潮），而获得了某地区潮汐变化的资料，我们采用相应的数模对其进行计算，得到所需的潮汐主要参数的过程。

潮汐分析从时间长短上可分为：长期分析、中期分析和短期分析；从分析方法上则又分为：调和分析和波谱分析两类。调和分析是传统的分析方法。采用此法可以满足一般潮汐资料处理的要求。属于调和分析原理的具体方法主要有达尔文方法、最小二乘法、杜德逊方法、富里哀分析等。而波谱分析，是利用数值分析找出潮汐波参数的函数关系，进而求得主要分潮常数的方法。由于该法在我国尚少使用，故本节不介绍，而只叙述潮汐调和分析内容。

潮汐调和分析认为，潮汐观测曲线是由若干个分潮组合而成的，通过数学方法可以求出各主要分潮的调和常数。考虑到实际工作的需要，一般说来，在对某一水域潮汐观测资料分析时均采用6个主要分潮：M_2分潮、S_2分潮、K_1分潮、O_1分潮、M_4分潮和MS_4分潮。依此，可给出某一期间的潮位的数学模型如下：

$$\begin{aligned}\zeta(t) &= a_0 + \sum_{i=1}^{m} R_i \cos(q_i t - \theta_i) \\ &= a_0 + \sum_{i=1}^{m} (a_i \cos q_i t + b_i \sin q_i t) \end{aligned} \tag{4-1}$$

式中：a_0为观测期间的平均海面；

R_i为分潮振幅；

P_i为分潮的角速率；

θ_i为分潮的初相位；

$a_i = R_i \cos\theta_i$；

$b_i = R_i \sin\theta_i$；

m为分潮个数，如$m=6$。

需要说明的是，上式中忽略了具有随机性的非天文潮位$r(t)$这一项。

一、达尔文法

达尔文方法是对30天潮汐连续观测序列进行处理的调和分析。它的特点是，认为潮汐由许多分潮群组成，以其周期不等的特点把它们分离。例如，M群中有M_1、M_2……；S群有S_1、S_2……。在进行分潮群分离时，先求出各群每个分潮时的潮高，再求出各分潮群的参量a和b，进而求得R、θ和分潮调和常数H、g。

$$\left.\begin{aligned} R &= \sqrt{a^2 + b^2} \\ \theta &= \mathrm{tg}^{-1}\frac{b}{a} \qquad (\theta \text{ 应注意象限变化}) \end{aligned}\right\} \tag{4-2}$$

$$\left.\begin{aligned} H &= R/D \\ g &= V_0 + d + \theta \end{aligned}\right\} \tag{4-3}$$

式中：V_0为天文参量匀速变化部分；

D、d为分潮振幅订正和迟角订正。

为计算各分潮群每个分潮时的潮高，达尔文制作了专用表格（镂孔格）。达尔文法是经典潮汐分析方法，也是常用的分析方法。可是，此法采用镂孔格进行分潮的分离，一则烦琐；二则精度不高；三不宜电算。人们以后对该法进行了改革，如采用对实测潮汐曲线进行三次样条插值法或分段抛物线插值法求得分潮时的潮高，达到了电算的目的。还有一些其它的方法，不再一一列举。

二、最小二乘法

潮汐最小二乘法分析原理是，取一定长度的潮汐观测序列，以计算潮高去逼近实测潮高，使其差的平方和为最小，建立线性方程组，求解a和b，进而求得分潮调和常数。该法灵活，适用

于任意分析长度，并容许潮汐观测序列不连续，分析结果精度高，适用于计算机。

潮汐最小二乘法用于准调和分析。所谓准调和分析，是因短期资料（如几天或十几天）无法把某些周期相近的分潮完全分离出来，因此，只能将某一潮族的分潮合并到其中影响最大的分潮中去，这样的“分潮”与以前讲的分潮不同，其振幅和角速率不再是常数，因此称为“准调和分析”。准调和分析的数学模型有多种，如方国洪提出的 M_2、S_2、K_1、O_1、M_4、MS_4、6 个准调和分潮表示潮位的数学模型为

$$\zeta(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{6} D_i H_i \cos(q_i t + d_i + g_i) \qquad (4\text{-}4)$$

式中：

$\zeta(t)$为 t 时刻的潮高值；

a_0为平均海面；

q_i为第 i 个分潮的角速率；

H_i、g_i为第 i 个分潮的调和常数；

D_i、d_i为第 i 个分潮的振幅订正和迟角订正。

有了分析模型后，就可以通过观测的离散化的潮位值，采用最小二乘法计算出观测站的 6 个准调和分潮的调和常数H_i、g_i和a_0，通过a_0就可以得到该地区平均海面与理论深度基准面之间的差值关系。同时，通过（4-4）式亦可反预报出所需要的任意时刻的潮位值，从而完成最后的水位改正。

三、富里哀分析

形式上与潮汐最小二乘法相同。不同的是，富里哀分析时，分潮角速率可以是未知的，即依实测潮汐资料展开成很多个角速率成整数倍的“富氏分潮”，取其中与原分潮角速率相接近的项加以订正，使其回复到原分潮的 a、b 值，从而求得各分潮的调和常数H、g。而最小二乘法分析时，分潮的角速率必须是已知

的。富里哀分析结果精度不如潮汐最小二乘法。

四、杜德逊方法

该法也是短期调和分析方法，它用15天、29天的调和分析，求出主要分潮的调和常数。该法的特点是，不采用分潮时的潮高进行计算，而直接以平太阳时的潮高作线性组合。它首先从实测潮汐资料分离分潮族（如半日分潮族、全日分潮族及长周分潮族等），然后由各分潮族求分潮的调和常数。该法对于潮汐分析和预报工作有参考价值。

§4.2 平均海面与深度基准面

一、平均海面

平均海面是指某海域特定范围内，一定期间海面高度的平均值。这个平均海面被假定为不受大气扰动，没有引潮力影响的完全静止的海面。如果我们把海面瞬时高度视为观测时刻的学值连续函数，那么，某一时间段的平均海面可以用下式表示：

$$\overline{h} = \frac{1}{T_2 - T_1}\int_{T_1}^{T_2} f(t)\,dt \qquad (4\text{-}5)$$

若$T_2 - T_1$为24小时，则$\overline{h}$为日平均海面；若$T_2 - T_1$为1个月，则$\overline{h}$为月平均海面；若$T_2 - T_1$为1年，则$\overline{h}$为年平均海面，以此类推。

由于潮汐观测多在整时进行，故可根据求积分公式计算出上式中$\int_{T_1}^{T_2} f(t)\,dt$的近似值，从而求得平均海面$\overline{h}$。

$$\overline{h} = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \frac{T_2 - T_1}{n}(h_0 + h_1 + \cdots\cdots + h_{n-1})$$

$$= \frac{h_0 + h_1 + \cdots\cdots + h_{n-1}}{n} \qquad (4\text{-}6)$$

显然，上式就是求各整时潮位高度的平均值，称中数法。

由于潮位曲线包含许多分潮振动，其周期不相等，所以上述中数法不能完全消除小分潮影响，故精度不高。此外，还有杜德逊（Doodson）法、鲁斯特（Rosslter）法、陈宗镛法、戈登（Godin）法。这些方法都是求日平均海面，采用每小时潮高进行线性组合，通过这样组合，达到较好消除1天之内各分潮对日平均海面的影响，从而提高计算结果的稳定性。

日平均海面是不能消除某些长周期分潮影响的，因此，在实际应用中，还要计算月平均海面、年平均海面和多年平均海面。

前已述及，我国的大地测量高程基准面是根据青岛验潮站资料计算的多年平均海面，称为《1985国家高程基准》。英国的大地测量高程基准面是根据纽林验潮站1951年至1956年的观测结果确定的。美国在1929年利用一定数量验潮站的19年内的观测值去推算平均海面，显然，这种平均海面就不是指某一地点的平均海面，而是一种较准基准面。

必须指出，近百年来，传统的大地测量的大地水准面，一直被认为是与平均海面重合的重力等位面。然而近20年来的研究表明，平均海水面并不是一个等位面。在有些地区，平均海面偏离大地水准面可达±2 m左右。这种现象表明了全球海面地形的存在。在我国，研究人员通过几何水准法、海洋水准法和球函数模型三种不同方法求得的中国近海海面地形特征是南高北低，东高西低，台湾以东海域最高，其最大差72cm。1985国家高程基准高于世界大洋海面地形为零的大地水准面约30cm。

如果目前水下地形测量的深度测定精度要求不是很高的话，那么海面地形可以不顾及。否则，应视情况加入此项改正。

二、短期验潮站多年平均海面的确定

短期验潮站，是根据局部水域水下地形测量的需要而临时增设的，一般观测一个月的潮位。显然，使用这样短时间的资料来

计算平均海面，是不准确的。根据若干个长期验潮站的观测资料统计分析，采用一个月的验潮资料计算平均海面，将有20—50cm的误差。为此，我们可以这样假设，即视外界条件基本相同的海区，其平均海面的日变化、月变化和年变化规律，基本上是一致的。这样，把邻近的长期验潮站的多年平均海面，通过一定方法联测到短期验潮站。实践证明，这种方法是可行的。联测方法有，

1．水准联测法

如图4－1，若通过水准测量求得A、B之间的高差为Δh，那么临时验潮站多年平均海面在水准点B下的高度为：

$$h_2 = h_1 + \Delta h \tag{4-7}$$

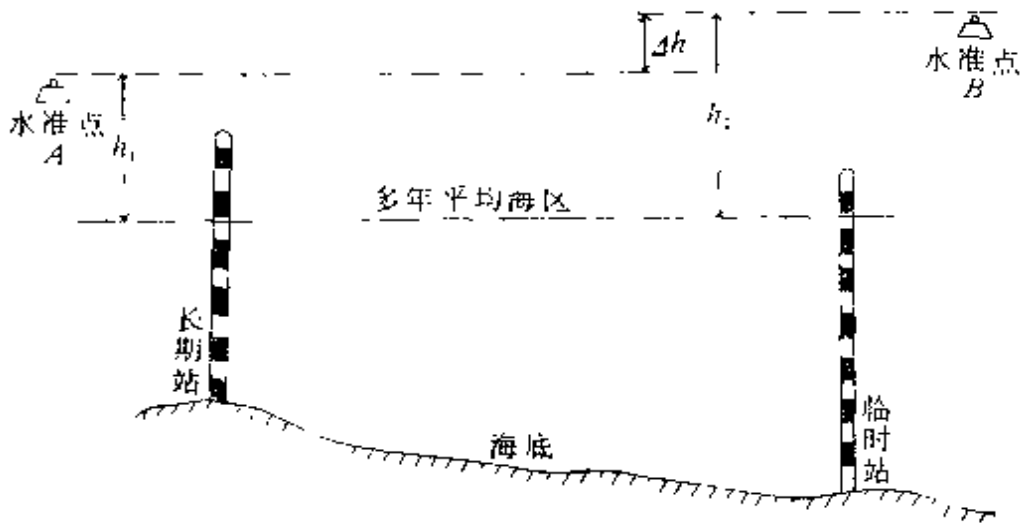


图 4-1　水准联测法示意图

2．同步改正法

同步改正方法就是让长期验潮站和短期验潮站同步观测潮汐，求出短期平均海面在两站水位零点以上的高度，然后将长期验潮站多年平均海面转换为短期验潮站的多年平均海面。见图4－2。

已知长期验潮站的多年平均海面和同步观测求得的短期平均

海面之差值Δh为

$$\Delta h = h_1 - h_2 \tag{4-8}$$

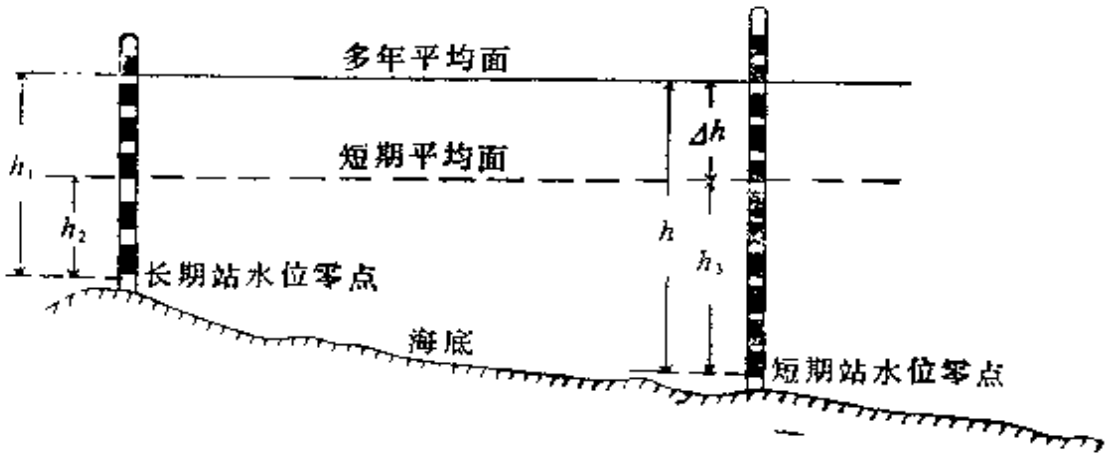


图 4-2　同步改正示意图

如在同步观测期间，短期验潮站的短期平均海面在其验潮站零点上的高度为h_3，那么短期验潮站的多年平均海面在该验潮站零点上的高度为

$$h = h_3 + \Delta h \tag{4-9}$$

若短期站附近有两个或两个以上的长期验潮站，则可以采用同步观测资料取权中数的方法求得短期站的多年平均海面。

此外，还有回归分析法等，可参阅有关文献。

三、深度基准面

前已述及，水深测量所获得的深度，是从瞬时海面起算的，同一地点不同时刻测得的深度都不一样。为了绘制海图必须规定一个固定的水面，作为深度的起算标准，将测得的水深统一换算到这一固定水面，这个固定水面就称为深度基准面。深度基准面是在平均海面下，距平均海面为L值的一个面。

确定深度基准面的原则是，既要考虑舰船的航行安全，又要充分提高航道的利用率。也就是说，若深度基准面定高了，会出现图载水深大于实际水深，依此海图航行，很可能发生搁浅等事

故。若深度基准面定低了，使本来可以航行的航道可能误认水浅而不能通过，从而降低了航道利用率。参见图 4-3 。

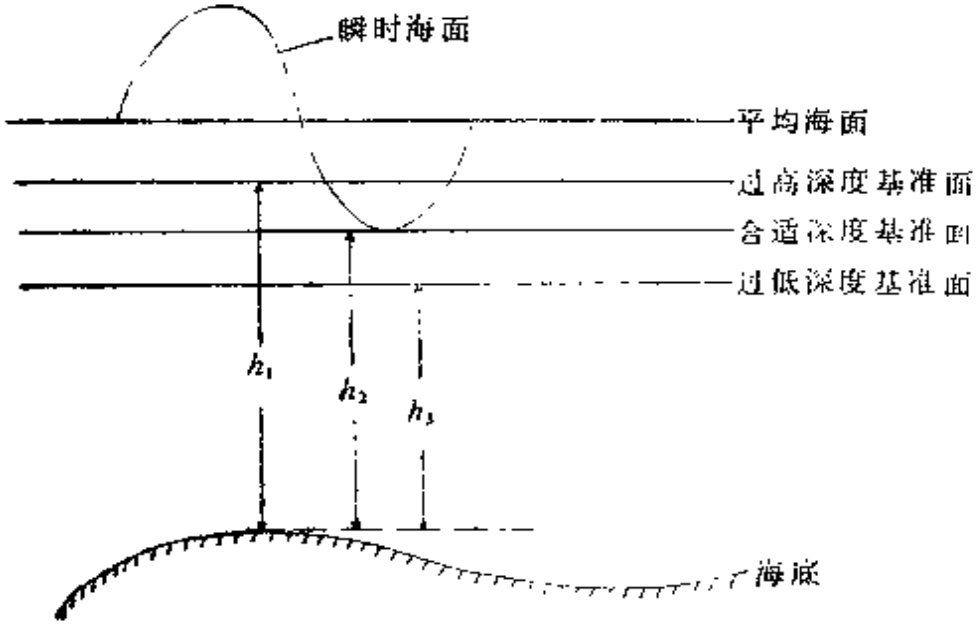


图 4-3　确定深度基准面示意图

世界上各海洋国家根据其潮汐性质的不同，选择了不同的数学模型来计算深度基准面。表 4-1 给出了各主要国家海图通常采用的深度基准面，其中 L 值为平均海面以下的深度基准面的位置。

表 4-1 中的计算公式符号说明如下：

H_{M_2}、H_{S_2} 分别为主要月球和太阳半日分潮的振幅；

H_{K_1}、H_{O_1} 分别为主要月球和太阳日分潮的振幅；

H_{K_2} 为 K_2 分潮的振幅；

$(fH)_{K_1}$ 为 K_1 分潮的振幅，其中 f 称交点因子，是因月球轨道 18.61 年变化而引入的对平均振幅 H 一年的订正；

$(fH)_{K_2}$ 为 K_2 分潮的振幅；

φ_{K_1} 为 K_1 分潮相角。相角决定该分潮的周期；

$\varphi_{K_2}=2\varphi_{K_1}+\alpha_4$，为 K_2 分潮相角。其中 $\alpha_4=2g_{K_1}-180$。

$-g_{K_2}$，g_{K_1}、g_{K_2}为K_1、K_2分潮的调和常数；

$R_1=(M_2^2+O_1^2+2M_2O_1\cos\tau_1)^{1/2}$，即由分潮$M_2$、$O_1$计算出的合成影响量；

$R_2=(S_2^2+P_1^2+2S_2P_1\cos\tau^2)^{1/2}$，意义同上；

$R_3=(N_2^2+Q_1^2+2N_2Q_1\cos\tau_3)^{1/2}$，意义同上。

表 4-1

深度基准面名称	计 算 公 式	采 用 国 家
平均大潮低潮面	$L=H_{M_2}+H_{S_2}$	阿尔巴尼亚，德国，意大利，南斯拉夫，希腊，加拿大，丹麦，比利时，印度、阿根廷，巴拿马等
最低大潮低潮面	$L=1.2(H_{M_2}+H_{S_2}+H_{K_2})$	法国，西班牙，葡萄牙，巴西等
平均低潮面	$L=H_{M_2}$	荷兰，美国（大西洋沿岸），瑞典等
平均低低潮面	$L=H_{M_2}+(H_{K_1}+H_{O_1})\cdot\cos45^\circ$	美国(太平洋沿岸)，菲律宾等
略最低低潮面	$L=H_{M_2}+H_{S_2}+H_{K_1}+H_{O_1}$	日本，印度，中国(1956年以前)
理论最低潮面	$L=(fH)_{K_1}\cos\varphi_{K_1}+(fH)_{K_2}\cos(2\varphi_{K_1}+a_4)-(R1+R2+R3)$	中国，独联体，越南等

深度基准面确定的合理与否，以保证率来衡量。所谓保证率是指高于所采用的深度基准面的低潮次数与低潮总次数之比。我国采用的理论深度基准面的保证率为 95%～100%。

§ 4.3 水位改正

为了正确地表示海底地形，需要将在瞬时海面测得的深度，

化算至平均海面或深度基准面起算的深度，这就是水位改正。以下按常用的归算至深度基准面的要求，叙述一下水位改正的方法。

水位改正可根据验潮站的布设及控制范围，分为一个站、两个站、三个站或多个站水位改正。

一、一个站水位改正

当测区范围不大，在一个验潮站的有效控制范围内，用该站的水位观测资料对所测水深进行水位改正，称为一个站水位改正。如图 4-4 所示：

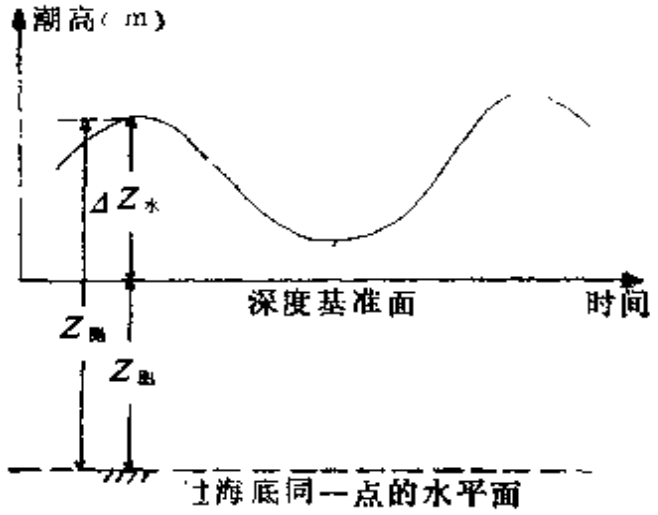


图 4-4　水位改正示意图

图中$\Delta Z_{水}$为水位改正数，也是自深度基准面至瞬时海面的高度。瞬时海面在深度基准面之上，其值为负；反之为正。

$$Z_{图} = Z_{测} + \Delta Z_{水} \qquad (4\text{-}10)$$

为求得任一时刻的水位改正数，需根据水位观测资料绘制水位曲线图，如图 4-5 所示。

横坐标表示时间，纵坐标表示水位改正数，由该图可求得任意时刻的水位改正数。此为图解法。

除此而外，还可用解析方法进行水位改正。解析法是用数字

插值的方法（如二次样条插值），根据验潮站的整点或半点水位观测资料，内插出任意时刻的水位改正数或求出 0.1m 间隔的水位改正数所对应的时间段。

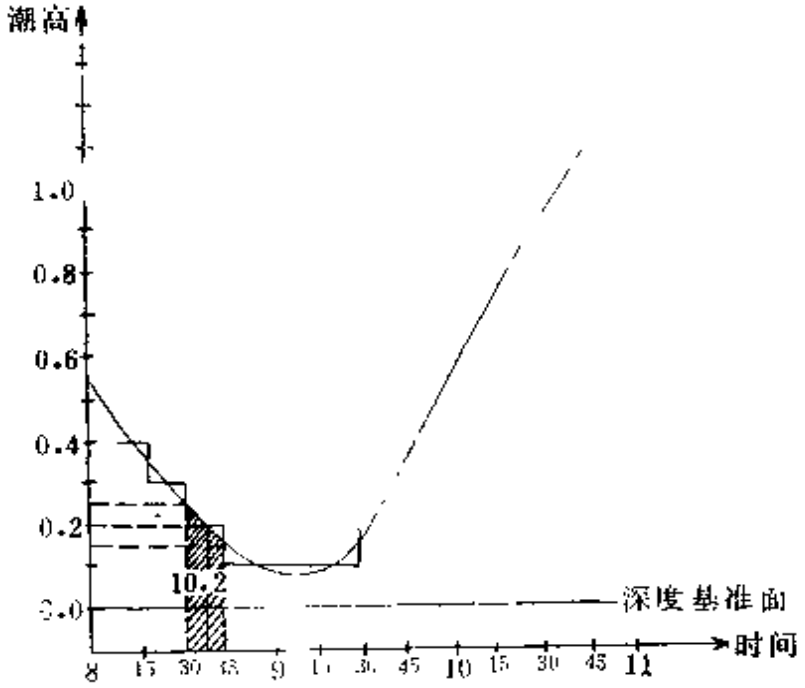


图 4-5　水位观测与改正

二、两个站的水位改正

当测区范围较大，用一个站的水位不能控制整个测区时，可采用两个站的水位资料进行水位分带改正。参见图 4-6 和图 4-7。

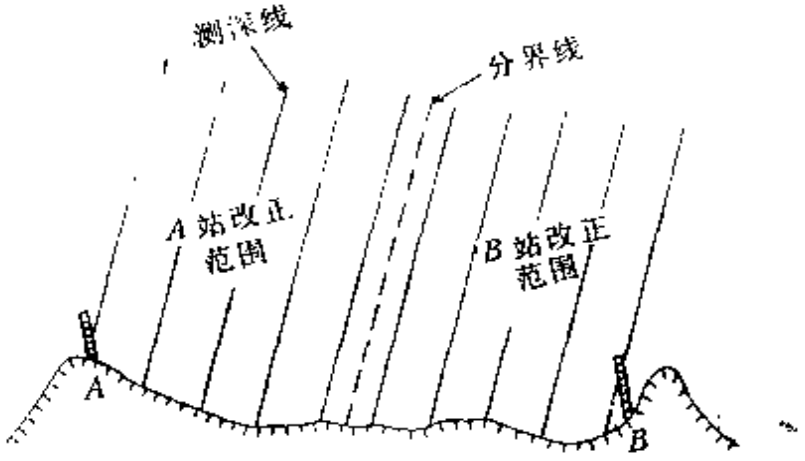


图 4-6　两站改正示意图

图 4-7 为测区位于A、B站控制不到的C、D区，可在一定条件下，根据A、B站的观测资料内插出C、D的水位资料。这种分带改正的前提，是两验潮站的潮波传播是均匀的，即两站间的同相潮时和同相潮高的变化与其距离成比例，这样就可在两验潮站的连线上内插出若干个区域，根据两验潮站的水位内插进行水位改正。

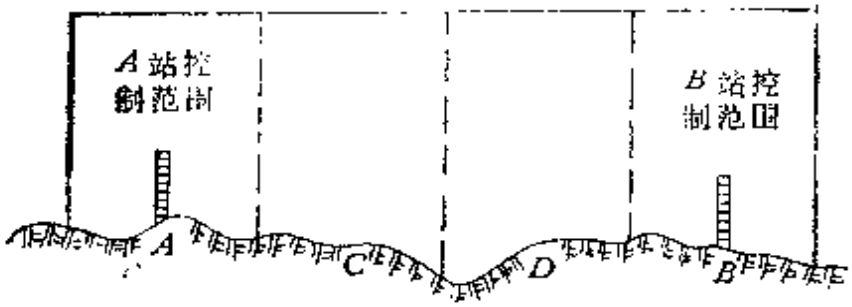


图 4-7　两站分带改正示意图

分带的多少取决于两验潮站从深度基准面起算的瞬时海面的最大差值Δh和测深精度δ_z。求分带数的公式为：

$$K=\frac{2\Delta h}{\delta_z} \tag{4-11}$$

计算出K值后，即可将A、B站连线等分内插K等份，等分点就是内插站位置。而分带的界线一般与潮波传播方向垂直。如图 4-8 所示，各内插水位站的水位曲线可根据A、B验潮站的水位曲线在同相潮波点连线上等分内插求出来。

两站分带的水位改正除用图解法外，还可以用解析法求得。

输入A、B两站同步观测水位资料，利用二次样条插值公式，可通过计算机求出相同时刻海面高差Δh，进而求得分带数K。同时还可算出A、B两站的同相潮时差Δt，从而得到两站的同相潮时$t'_{B_i}=t_{A_i}+\Delta t$，其中$t_{A_i}$为输入的潮时，还可得到两站的同相潮高$Z'_{B_i}$，它根据$t'_{B_i}$和输入的$B$站的潮高$Z_{B_i}$，用二

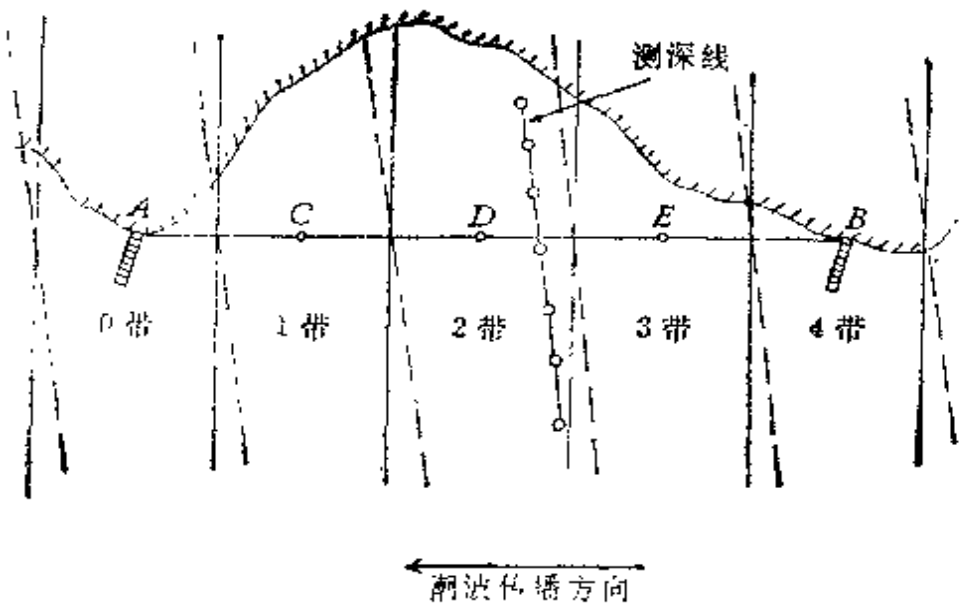


图 4-8　分带示意图

次样条插值公式求得。由此，可根据分带原理，求得各内插带的同相潮时和同相潮高如下：

$$\left.\begin{aligned} t_{P_i} &= t_{A_i} + \Delta t/K \cdot P \\ Z_{P_i} &= Z_{A_i} + (Z'_{B_i} - Z_{A_i})/K \cdot P \end{aligned}\right\} \qquad (4\text{-}12)$$

式中：$i = 0, 1, \cdots\cdots, N$，为节点序号；

$P = 0, 1, \cdots\cdots, K$，为带号；

Z_{A_i}为输入的A站的潮高。

这里还要介绍一种不分带直接求水位改正数的解析法水位改正，见图 4-9。

此法的立足点是，瞬时海面只认为在传播方向上倾斜，而在垂直于传播方向上的一定范围内倾斜甚微。即图上，P点的潮高与投影点P'和交点P''的潮高认为相等。由此，根据定位点坐标和定位时刻直接求出水位改正数。

$$Z_P = Z'_A + (Z'_B - Z'_A) \cdot L_1/L \qquad (4\text{-}13)$$

式中：同相潮高Z'_A、Z'_B可分别根据同相潮时t'_A、t'_B，利用二次样条函数内插而得；

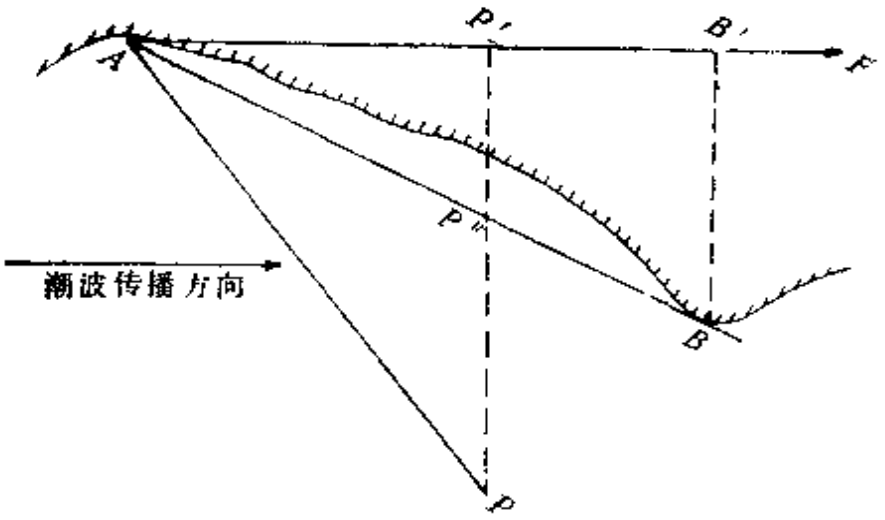


图 4-9　不分带求水位改正原理图

同相潮时 t'_A、t'_B可根据潮时差 Δt_{AB} 和 Δt_{AP}（$\Delta t_{AP} = \Delta t_{AB} \cdot L_1/L$），以定位时刻 t_P 为基准求出（$t'_A = t_P - \Delta t_{AP}$；$t'_B = t_A + \Delta t_{AB}$）；

$L = AB' = AB \cdot \cos(T_{AB} - T_{AF})$；

$L_1 = AP' = AP \cdot \cos(T_{AP} - T_{AF})$。

三、三个站水位改正

当测区离岸较远时，就可能出现两站控制不到的问题。为此，应采用三个站的水位分带法进行改正（又称三角分带法），见图 4-10。

三角分带带数的计算与两站分带基本相同，然后在分带求得三边内插站的水位曲线的基础上再分区，并划定各区改正的范围。至于水位改正的方法与两站的方法相同。

下面着重讨论一下三站水位改正的解析法。我们已经知道，水位分带的理论是视同相潮波点的集合为一空间平面，那么我们可以过已知三站的空间直角坐标（x、y、z）建立一个平面方程。其中 x、y 为平面坐标，z 是从深度基准面起算的同相潮高。如果插值点 P 的潮高 z_P 与 A、B、C 三站的潮高 z_A、z_B、

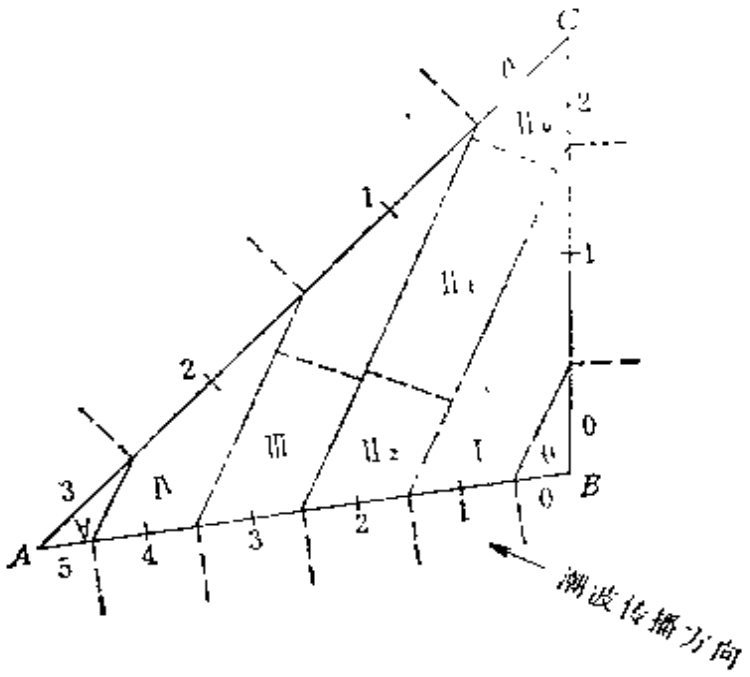


图 4-10　三站水位分带改正

z_C为同相潮高，则 P 点（x_P、y_P、z_P）应在这个平面内。z_P 就是我们要求的同相潮高。其计算公式如下：

$$z_P = z_A + \{(x_P - x_A)[(y_C - y_A)(z_B - z_A) - (y_B - y_A)(z_C - z_A)] + (y_P - y_A)[(x_B - x_A)(z_C - z_A) - (x_C - x_A)(z_B - z_A)]\} \div [(x_B - x_A)(y_C - y_A) - (y_B - y_A)(x_C - x_A)] \tag{4-14}$$

同理，可得同相潮时公式：

$$t_P = t_A + \{(x_P - x_A)[(y_C - y_A)(t_B - t_A) - (y_B - y_A)(t_C - t_A)] + (y_P - y_A)[(x_B - x_A)(t_C - t_A) - (x_C - x_A)(t_B - t_A)]\} \div [(x_B - x_A)(y_C - y_A) - (y_B - y_A)(x_C - x_A)] \tag{4-15}$$

以上二个公式，即为三站求水位改正基本公式。设定位时刻为 t_{P_i}，则由(4-15)式可求出A站的同相潮时 t_{A_i}，则 B、C 站同相潮时 t_{B_i}、t_{C_i}为

$$\left.\begin{aligned} t_{B_i} &= t_{A_i} + (t_B - t_A) \\ t_{C_i} &= t_{A_i} + (t_C - t_A) \end{aligned}\right\} \qquad (4\text{-}16)$$

用 t_{A_i}、t_{B_i}、t_{C_i} 代入二次样条插值公式，可求出三个站同相潮高 z_{A_i}、z_{B_i}、z_{C_i}，代入（4-14）式即可求得定位时刻的同相潮高 z_{P_j}，自然也就求得水位改正数。

上述方法求三站水位改正可用计算机实现。

四、时差法水位改正

时差法是由天津海洋测绘研究所研究并已推广使用的一种水位改正方法。

时差法水位改正与两站分带和三站分带要求的条件相同，即要求两验潮站间的潮时和潮高的变化与其距离成比例。

先讨论在两个验潮站 x、y 之间水位改正的问题。为了求得 x、y 验潮站之间的潮时差，需要首先研究两站在时间区间[$N_1 \leqslant n \leqslant N_2$]内同步观测的水位值 x_n 与 y_n（$n = 1, 2 \cdots\cdots n$）的相关性。我们通过分析两站水位信号波形，根据求误差能量 Q 为最小，得到 x_n 与 y_n 在时间区间[N_1, N_2]内的相关系数：

$$R_{x,y}(N_1, N_2) = \frac{\sum_{n=N_1}^{N_2} x_n y_n}{\sqrt{\sum_{n=N_1}^{N_2} x_n^2 \sum_{n=N_1}^{N_2} y_n^2}} \qquad (4\text{-}17)$$

从潮波传播的角度看，x、y 站位于同一潮波的不同位置上。因此，不仅要考虑 x_n 与 y_n 的相关系数，而且还要考虑在时移中 x_n 与 y_n 的相似性，即把 y_n 对应的潮时 t_n，都加上一个潮时差 τ，所对应的水位 $y_{n,\tau}$ 与 x_n 的相关系数为：

$$R_{x,y}(\tau) = \frac{\sum x_n y_{n,\tau}}{\sqrt{\sum x_n^2 \sum y_{n,\tau}^2}} \qquad (4\text{-}18)$$

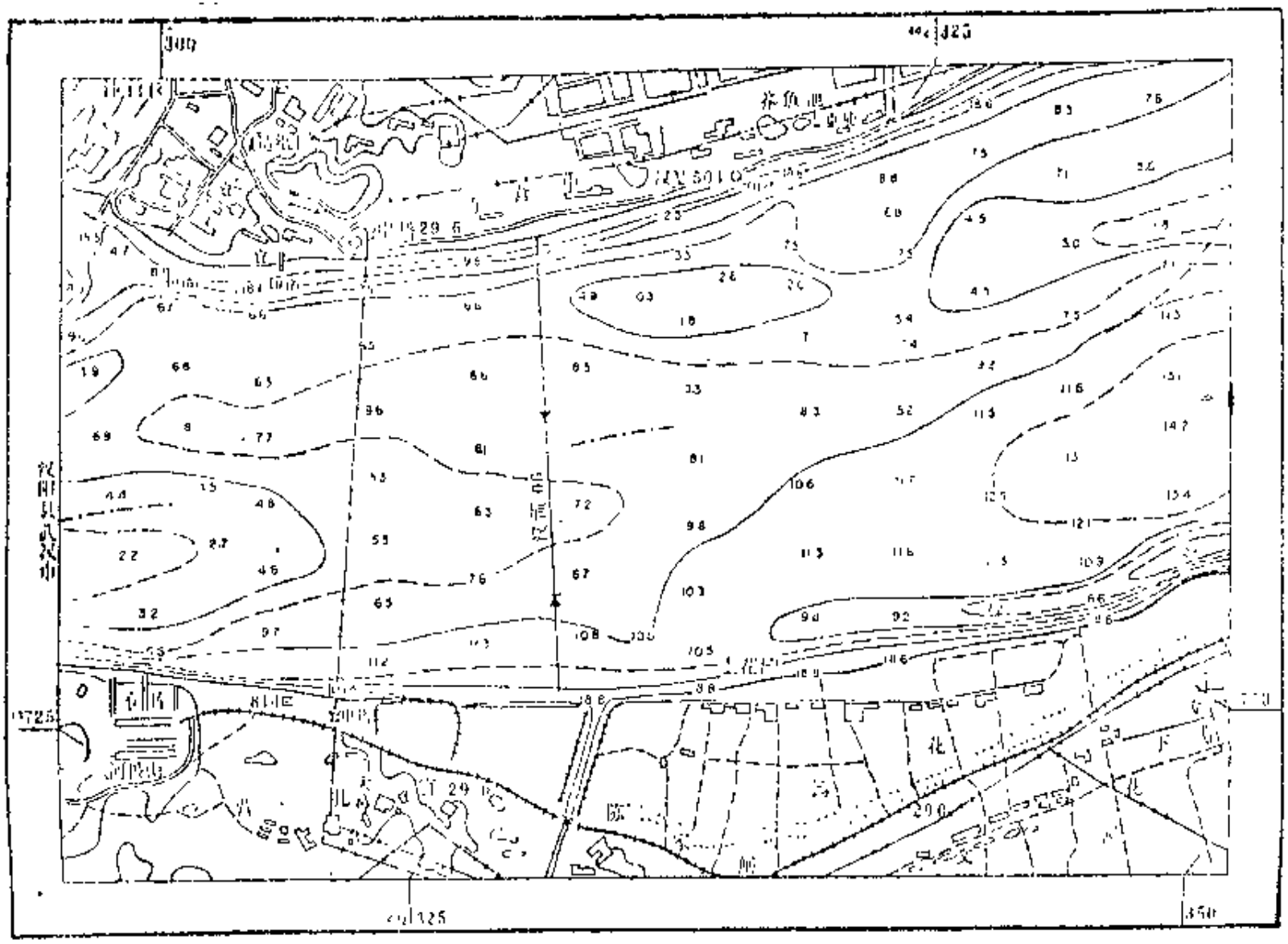
从上式可看出，不同的τ，x_n与$y_{n+\tau}$的相关程度是不同的。如果$\tau=\tau_0$时，$|R_{x,y}(\tau)|$达到最大值，x_n与$y_{n+\tau_0}$最相似，那么τ_0即为要求的两站间的潮时差。具体求τ_0的方法可用逐步试验比对法，取$|R_{x,y}(\tau)|$值最大者的τ为τ_0，其中应注意的问题是，计算步长不应大于3分钟。

有了τ_0，再求得定位时刻t_p与x、y两站同相潮时（方法参见两站水位改正），就可利用两站同步观测资料求两站间任意地点，任意时刻的水位改正数了。

五、水道地形图的水位改正

水道地形图的测点高程等于河面高程减去测得的水深，这儿所指河面高程是通过水位站的水位观测或水位联测求得的。水位联测采用几何水准。水面在经水准联测的长期站、短期站或临时水尺上面的读数，即可得河面高程，也称水位高程。水位联测对不同河段要求是不一样的，如无潮汐影响的河段，要求测深时每天观测（或联测）3次。水位变化快的河段，则应增加观测次数。对有潮汐影响的河段，一般可在施测河段的上、下游或叉道进出口处设立两组临时水尺，每小时观测一次水位。对有潮流影响的区域，河段上、下水尺的最大距离不超过10km。对于湖泊或水库，应在四周设水尺，按测区纵向及横向比降推求水位。

图4-11为水道地形图，供参阅。



比例尺 1:25 000　坐标值以百米为单位

图 4-11　水道地形图

第五章　自动成图

前面几章叙述了水下地形测量信息采集的有关问题，如何根据这些测量信息编制专用的水下地形图，同样是一个重要的技术问题。

目前，在海图编制方面，还多数采用手工的方法。但随着计算机技术和其它自动化技术的飞快进步，制图技术和工艺实现自动化，在发达国家已经实现。在我国，已为期不远。现在不少单位已经拥有比较先进的自动成图系统，经过一段时间实践证明，其经济效益要较手工方法提高 20～30%。

自动成图所使用的仪器、设备主要有：

电子计算机——作用是控制输入、输出和进行数据处理；

数字化仪——可将已有的图件转换成数字，输入计算机；

交换显示装置——可对数据处理结果进行编辑加工，使之适合出图的要求；

自动绘图机——将最后结果转换成各种图形绘出。

当然，如果我们仅仅满足于用计算机去模仿传统方法制图，则远不是最终目的。我们应该是利用不断发展的计算机等先进技术，完全实现水下地形信息采集、存贮、处理、传输、分析和输出的数字化。也就是说，为了实现机助自动制图，建立海图数据库势在必然。目前，国外先进国家已陆续建立了这样的海图数据库。如美国的 Geo Vision 公司的地理信息系统 (GIS) 产品 VISION、加拿大通用系统公司开发的计算机辅助资源信息系统 CARIS、挪威 Sys Scan 公司的 NAutika 系统、芬兰的地理信息系统 FINGIS 等，都先后被多个国家采用进行海图数据处理，并在相应系统的基础上建立了海图数据库。如芬兰的海图数据库，采用单幅图数据库结构，整个库由若干子库（即多幅图）

组成。一个库存贮一幅 1:20000 比例尺基本地形图的数据，范围为 10km×10km。

随着现代化海洋测量技术的迅速发展，海洋测量信息激增。例如，各种先进的定位手段，各种自动化回声测深系统，快速的机载激光测深和卫星遥感测深技术等，这些手段获得的测量成果已完全数字化，而且信息密度很大。庆幸的是，自动制图技术也得到了相应的发展，这就为直接采用和处理这些数字式测量资料，快速出图提供了条件。但从目前看，至少在我国，自动测量与自动制图之间尚未形成一个统一的系统。所以建立一个统一的海洋测绘信息系统是十分必要的。海洋测绘信息系统应当会有若干不同的数据库，有测量的，也有制图的，形成统一的、连续的逻辑数据库。

机助制图的内容另有专著叙述，本章主要介绍利用电子手簿、磁盘等存储的外业测量信息，通过计算机软件，驱动绘图机绘制的平面水下地形图。这种图只能算初级原图，有别于正式出版的海图，但可满足一般海上和江河湖泊工程建设的需要。我们在第二章中曾有简要的叙述，本章将就另外的成图有关问题再作介绍。此外，还要介绍依据数字地面模型原理，利用计算机编绘立体水下地形图的简要内容。这种图已在重要的局部水域的施工中，得到了应有的重视，对潜艇水下活动也能提供直观的海底地形信息。

§5.1 自动化定位技术

随着科学技术的发展，水下地形测量的定位手段由长期落后的手工作业逐步向自动化方向迈进。这种测量自动化系统采用无线传输方式实现测量信息数据的实时采集，并记录于电子手簿中，如定位数据、水下地形测量数据、其它物理测量数据等。然后通过配置的计算机、打印机、绘图机等可及时打印数据和绘图。

也可以将测量信息转录在磁盘或光盘上，实施精确后处理成图。

这种水下地形测量自动化系统，近十年来在国内外均有多种型号的成品生产。如美国IMC公司生产的HydroI型自动定位系统，野外有两人便可完成岸上和船上的全部操作。当天所测数据1～2小时可处理完毕，并可即时绘出水深图、测线断面图、水下地形模型图等。另外，德国的ATLAS POLARTRACK也已被航道部门引进。我国近年也先后研制了多种型号的测量自动化系统，如大连舰艇学院1987年、天津海洋测绘研究所1988年先后研制成功各种类型水深测量自动化系统。下面以1991年大连舰艇学院生产的HYS—103为例说明该系统的工作原理。

一、外业测量数据的采集

从硬设备来说，外业采集设备可分为岸台(共2个，完全相同。)和船台两个部分，见图5-2和图5-3。其原理框图如图5-1所示。

1. 定位数据的采集

作业前，存在磁盘上的外业测量程序经磁盘机送入主控计算机，外业中主控计算机即可按测量程序运行。主控机可通过人控或定时按极坐标法或者前方交会法让单片机发出不同的定位指令，经调制后由船台对讲机发出。岸台的对讲机收入定位命令后，解调出该命令送入单片机，判别无误后，转换器及时接通电子经纬仪DT—5和激光测距仪JCM—3，测得岸台至船台的斜距S、水平角H、天顶距V，这三个实时定位数据由单片机汇总后，再经岸台调制器及对讲机发往船台(对于前方交会法定位，岸台A只采发水平角H_1，岸台B只采发水平角H_2，发送时有先后)。这里，岸台观测员听到船台发出的定位命令时，只要将电子经纬仪照准测船即可，无需人工读数。船台对讲机收到H、V、S三个数据信号（或H_1、H_2二个数据信号），经解调出三组

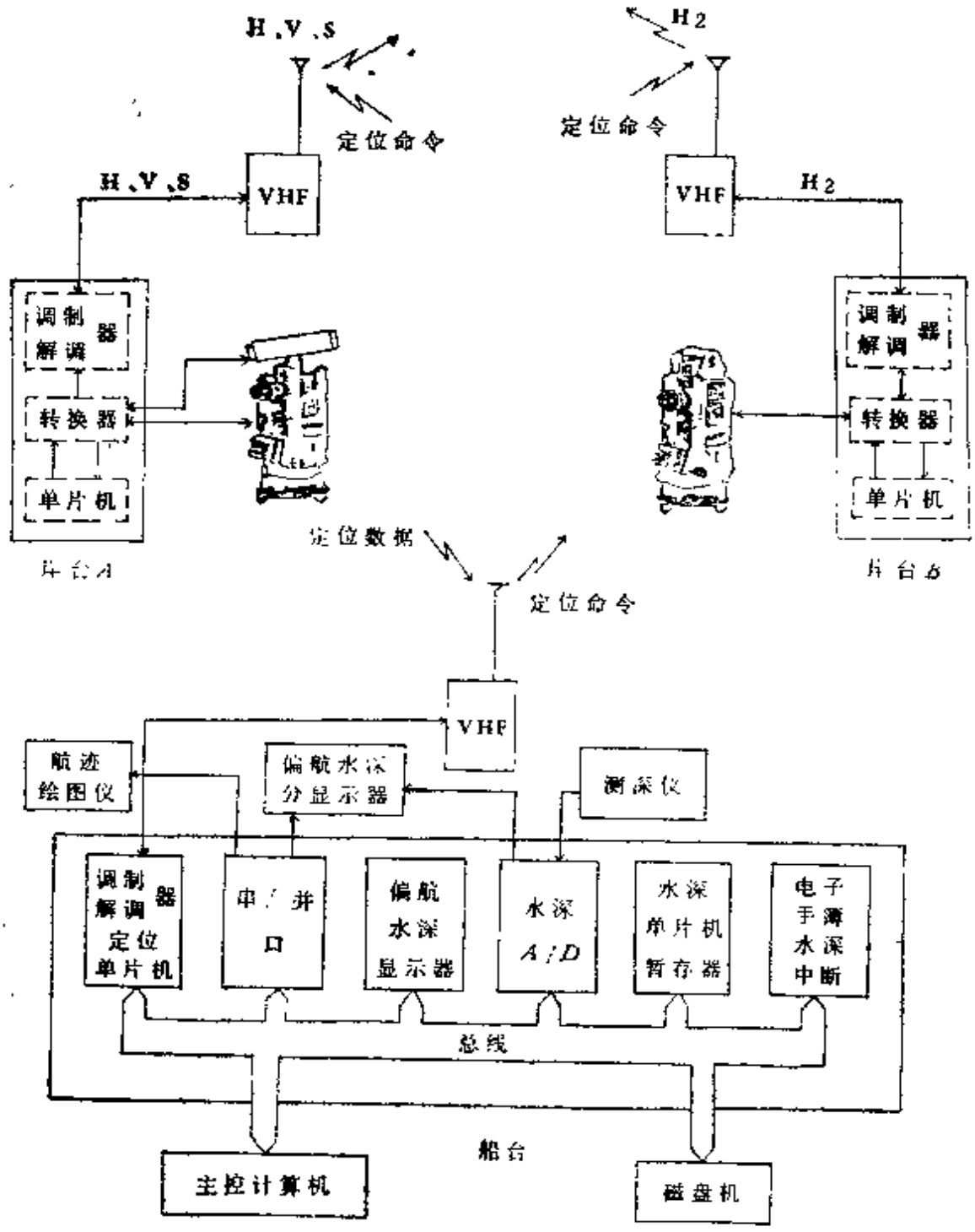


图 5-1　HYS-103 系统原理图

（或两组）重复三遍的数据后，由单片机采用多数判定法判定后与汇总的水深数据一道送往主控计算机并寄存于电子手薄中。



图 5-2　岸台

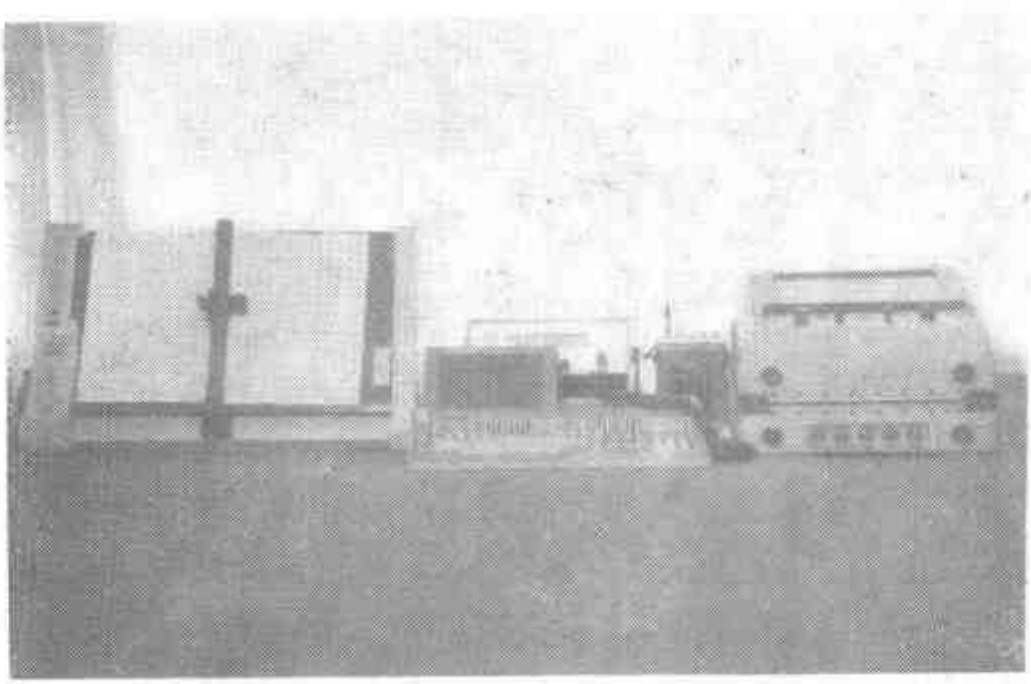


图 5-3　船台

主控计算机收到实时定位原始观测数据后，先将斜距改平，然后按极坐标法或前方交会法定位计算程序解算出船位坐标 x、y 以及相对于预定测线的偏航参数。x、y 数据送往航迹绘

图仪可标出实时船位和测线航迹，偏航参数可迅速显示于船台的偏航显示器上，让舵手及时修正航向。

2. 水深数据的采集

该系统配接SDH-13A型回声测深仪（略加改动也可改接其它型号仪器），所测水深除记在记录纸上外，发—收之间的时间模拟量经模/数转换器变成数字化的水深值。按SDH—13A最快档设置，每秒大约可采集到11个水深数据。显然，如此密集的水深数据在一般作业中是不需要的。为此，用一个单片机专门从事水深数据的外业实时处理，水深数据的实时处理内容包括：

（1）设置水深采样方式：在采集的N个水深中，可按最浅、最深或平均水深值作为N个水深采样的有效值。通常取平均水深，这样即可适当平滑由于短周期波浪的影响，又可减少偶然因素造成的误差。最浅、最深水深则是适应探测浅点或其它特殊要求而设置的。

（2）设置水深采样间隔：即从测深仪送来的N个水深数字中，经处理后得到一个有效的水深值送往暂存器，这时的采样间隔为N。

（3）设置水深采样门限：为了滤除水深数据中的由于汽泡、航行浪花造成的影响，除硬件中的模/数转换器采取措施外，这里用软件设置了一个跟踪门。

以上三个参数在计算机开机时，作为初始值，根据海区地貌、测图比例尺、测船航速和任务情况，由人机对话方式输入。这样，在每一个采样间隔内，可按采样方式和采样门限，取得一个有效水深数据送暂存器，同时也送往偏航水深显示器显示实时水深，以保证测船浅水区航行安全。在两个定位点之间，单片机可将采集的若干个有效水深存入水深暂存器中，当定位时，计算机将水深暂存器中的水深数据取出，存入电子手簿。存入电子手薄的数据还包括：测量日期、定位时间、测线号、点号、定位原始

数据等。定位后，开始采集下一批水深数据，周而复始，直至测量完毕。

返航后，在计算机控制下，将存贮在电子手簿的测量数据，利用磁盘机存入软盘，以供内业机助编辑使用。外业中，也可用打印机打印出所有的测量数据，并可用小型绘图机绘出测深线图与水深图。

二、测量资料的内业处理

测量资料的内业处理包括：测量数据入库；各项改正；测量数据的检查筛选；绘制成果图；成果质量评定和备份数据等项内容。

1. 测量数据入库

将外业中存入磁盘的测量数据分门别类地输入内业机助编辑的数据库中，以便机助编辑过程调用和管理。当然，在此之前，应先输入目录库数据，它包括图幅名称、图幅编号、测图比例尺、日期、定位方法、中央子午线及测图单位等内业机助编辑中必须的数据。

2. 测量数据机助编辑

（1）外业测量数据的检查和修正

机助编辑时，应首先对外业采集的测量数据进行全面的检查，以确保成图数据的可靠。先看一下定位数据的检查，如测船航速为 V，航向为 H，时间间隔为 t 的相邻定位点 $P_i(x_i, y_i)$ 和 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ $(i=1、2\cdots\cdots n)$ 之间应满足：

$$\left.\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + vt\cos H \\ y_{i+1} &= y_i + vt\sin H \\ (x_{i+1}-x_i)^2 + (y_{i+1}-y_i)^2 &= (vt)^2 = r^2 \end{aligned}\right\} \qquad (5\text{-}1)$$

若考虑到定位的允许误差和定位点间变速的可能，以 $2r$ 做误差半径，如实测的 P_i 与 P_{i+1} 满足下式：

$$(x_{i+1}-x_i)^2+(y_{i+1}-y_i)^2\leqslant 4r^2 \qquad (5\text{-}2)$$

则认为P_{i+1}点为正确的定位点，若不满足则为突跳点，应予以自动删除。

再看一下水深数据的检查。可将外业采集的水深数据，根据数据仿真原理，按外业中测深仪的量程、倍乘和纸速，逐条测线输入到计算机中。屏幕根据采集的水深数据显示出海底回波线。若无错误，应与测深仪记录纸上所记录的海底回波线一致；若有差异，可按记录纸上的水深予以修正，直至整条测线的水深与记录纸上记录的水深相一致为止。

（2）测深数据的各项改正

水位改正：目的是将以瞬时海面为起算面的水深改化到由理论深度基准面（或平均海面）为起算面的水深。这里要求提前输入验潮站水位数据。

此外，还有测深仪仪器改正，测船动态吃水改正和海底倾斜改正。

（3）测量数据的机助筛选

按《海道测量规范》对沿岸水深测量成果图板上水深点密度的规定，如外业采集的水深显得过于密集，必须要合理、准确和快速筛选出对绘制水下地形图有用的水深来。先进行测线上的测量数据的筛选，然后进行测区的水深数据的筛选，筛选的原则相同。根据测区编辑好的水深点，可用三角网法或格网法计算出等深线。

（4）测量成果质量的检查与评定

按照现行规范对整幅测图质量的检查是以检查线和主测深线相交（或图上距1mm以内）的水深比对值来评定的，允许限差为该点水深值的4%。参加比对点的符合率若大于75%则认为合格。本系统内业机助编辑中具有自动质量检查评定功能，除进行检查线和主测深线水深的比较外，还可按参加比对的点数、符合限差点数、超限点数及符合率，作为水深测量成果的质量评定指标。

（5）绘图

测量资料经编辑整理后，就可以在绘图机上绘出各种需要的图来，包括测深线图(即定位点图)、水深图和等深线图。如果需要，也可按水下地形测量的规定，绘出水下地形图。除此而外，还可以绘制各种透写图。图 5-4 为内业绘图有关的设备，图 5-5 为机助编辑后，绘图机绘的水深图。

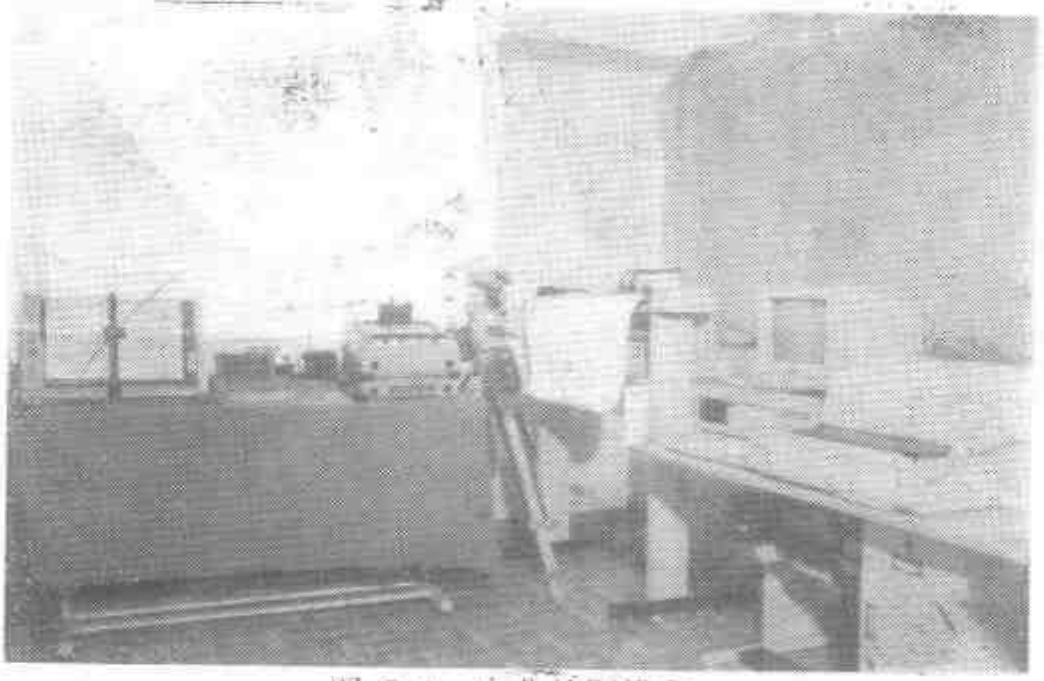


图 5-4　内业绘图设备

该系统曾于 1992 年 3 月和 6 月两次用于 1:500 比例尺水深测量工作，测图 18 幅。该系统因具有定位数据自动传输、实时显示偏航、自动定位、换线、水深显示等作业功能，且有内业机助编辑系统，而使外业和内业工作量大大减少，基本实现了沿岸水深测量自动化，受到了作业人员的好评。下一步，在岸台采集定位数据方面将采用能自动跟踪目标的 Geodimeter 140T(见图 5-6)或 wild ATMS 系统，届时，整个测量过程只需 2-3 人就可进行了。

此外，天津海洋测绘研究所曾于 1987 年和 1988 年先后研制成功近海水深测量自动化系统和多功能水深测量自动化系统，其原理与 HYS—103 系统基本相同。只是在定位方面，近海水深，测

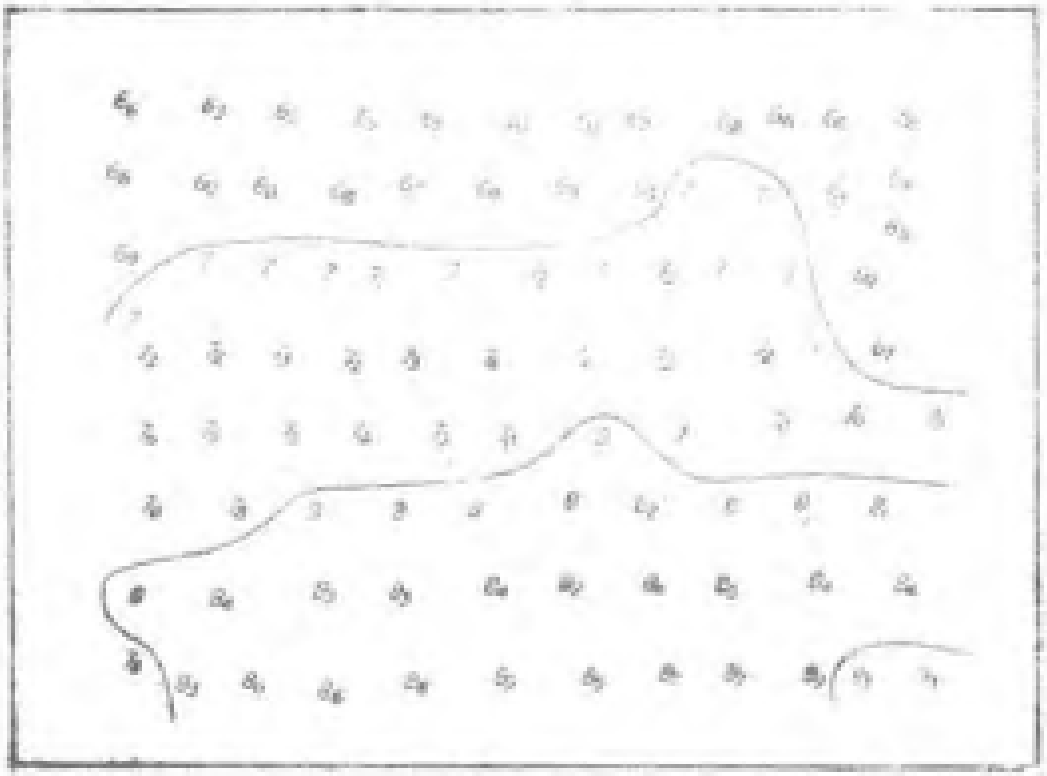


图 5-5 机助编辑成图

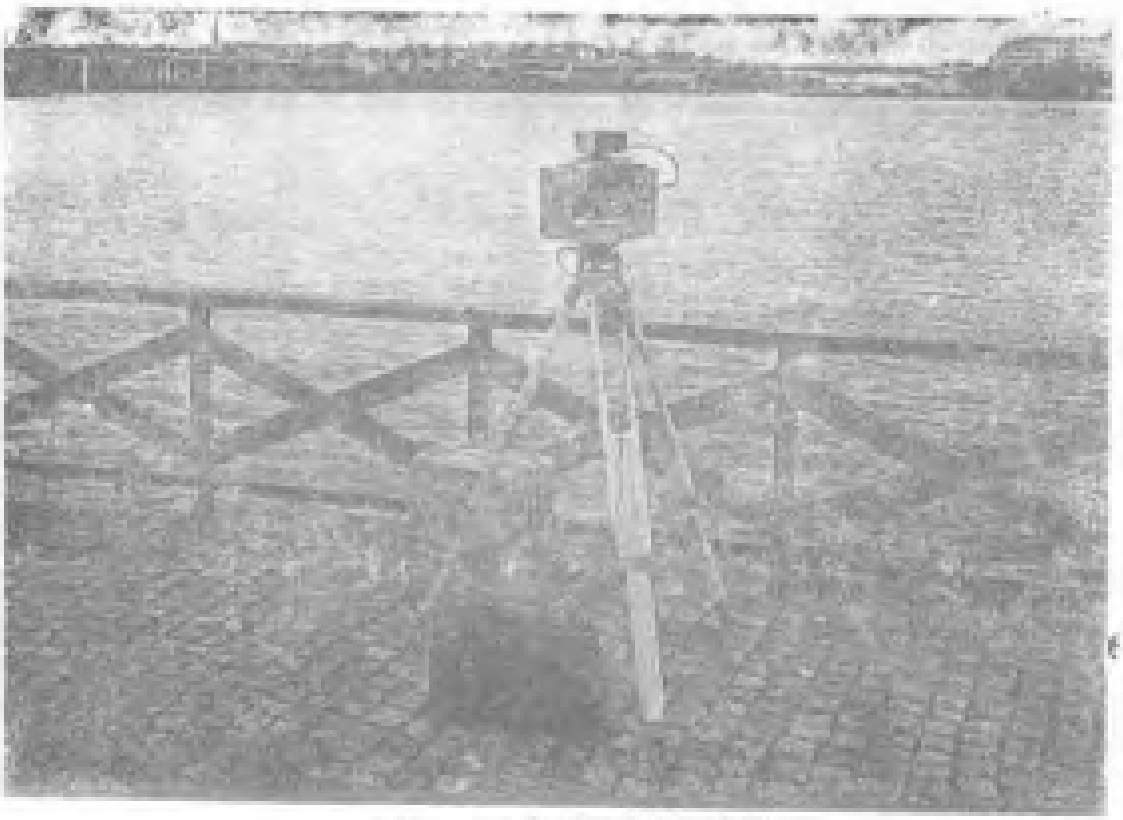


图 5-6 自动跟踪全站仪

量自动化系统采用无线电定位仪，其作用距离要比沿岸测量自动化系统远。而多功能水深测量自动化系统，在定位仪的连接上，对具有 BCD 数字显示/BCD 码数字输出的各种定位仪，通过 BCD 码/串行数据专用转换器，实现与数据采集器连接，如近导-4、猎鹰-Ⅳ等；对具有RS—232G 串行接口的定位仪，可直接与数据采集器相接，如塞里迪斯、三应答器 542、罗兰-C、GPS、MX1105/1107 等。该系统可灵活方便组合成各种不同的配置，扩充不同的外部设备，实现各种应用目的。它具有通用的测量自动化系统的全部功能，即实时导航、测量、数据采集和记录、打印和绘图以及脱机后处理。

§5.2 数据库系统的建立

随着各种自动化采集数据手段的广泛使用，海洋测量信息的数量和速率在迅速增大，用什么方式来存贮这些数字式数据？怎样使它们在自动成图中得以合理使用？唯一的办法是建立海洋测量数据库系统。

海洋测量数据库系统既庞大、又复杂，且联系面甚广。因此，建库之前，必须提出明确要求，并按要求进行设计。下面就沿岸水深测量数据库系统的建立，谈一下建库的过程。

一、建立数据库系统的要求

1．外业采集的数字化数据将代替原手工作业中的测深仪记录纸和定位手簿，因此外业采集到的数据应原封不动予以保留。

2．对原始测量数据应进行全面检查，对存在的错误，应视其情况进行删除或修改，以使内业机助编辑的数据无差错。

3．必须能对测量数据进行各项改正。

4．如有手工记录的数据，也能方便地输入。

5．能对测区的数据进行机助编辑，使之符合国标《海道测

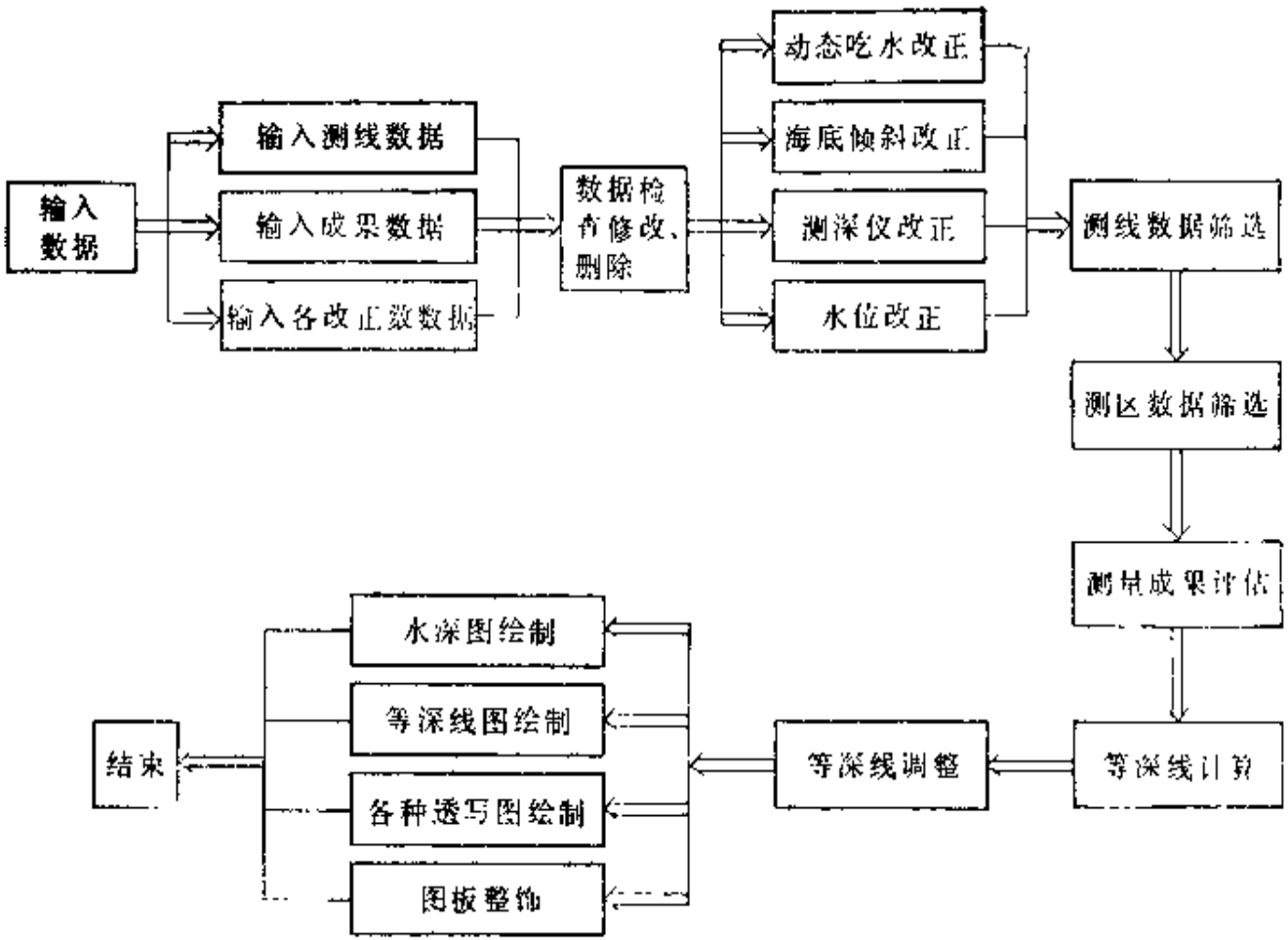

输入数据
输入测线数据
输入成果数据
输入各改正数数据
数据检查修改、删除
动态吃水改正
海底倾斜改正
测深仪改正
水位改正
测线数据筛选
测区数据筛选
测量成果评估
等深线计算
等深线调整
水深图绘制
等深线图绘制
各种透写图绘制
图板整饰
结束

图 5-7　测量用户活动图

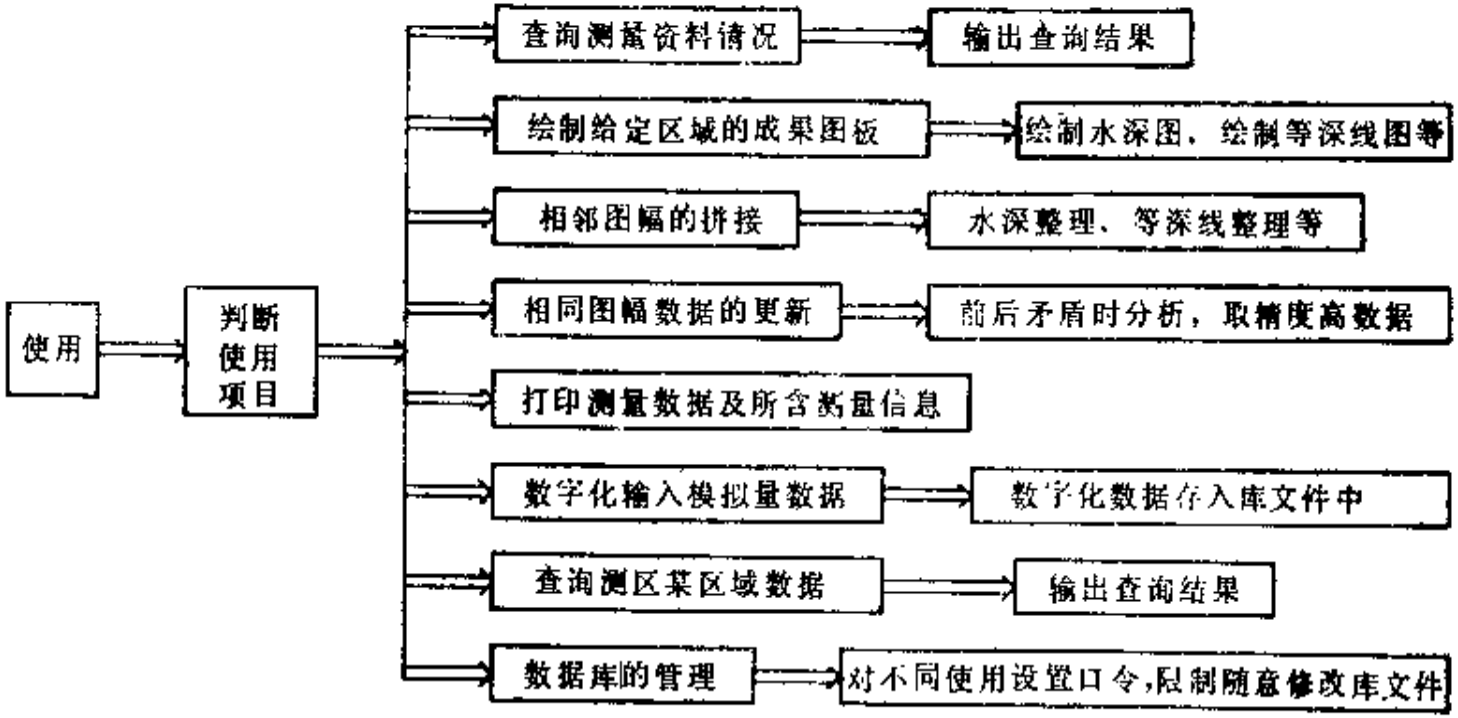

使用
判断使用项目
查询测量资料请况
输出查询结果
绘制给定区域的成果图板
绘制水深图，绘制等深线图等
相邻图幅的拼接
水深整理、等深线整理等
相同图幅数据的更新
前后矛盾时分析，取精度高数据
打印测量数据及所含测量信息
数字化输入模拟量数据
数字化数据存入库文件中
查询测区某区域数据
输出查询结果
数据库的管理
对不同使用设置口令，限制随意修改库文件

图 5-8　使用用户活动图

量规范》的要求。

6．能提供机助编辑等深线的方法。

7．对给定图幅的测区应能绘制成果图板。

8．能进行相邻图幅的拼接；能进行相同图幅的数据更新。

9．能打印测量数据及其相关的测量信息。

10．可查询海区的测量情况；可对已存库的数据进行管理。

根据以上要求，经过概念结构设计、逻辑结构设计和物理结构设计，可设计出建库需要的各子库的数据结构，这样就可存放数据了。

二、用户活动图和数据流程图

根据上述要求，可以先画出测量用户活动图和使用用户活动图。见图 5-7 和图 5-8 。

根据上述活动图，还可绘出各部分数据流程图。现以查询测区区域资料情况为例，简要说明绘制数据流程图的问题。系统收到查询某区域测量资料的指令后，首先查询此区域所在的测量图幅，然后将此区域有关信息调入查找，最后是打印或显示。图 5-9 形象地说明了这一过程。

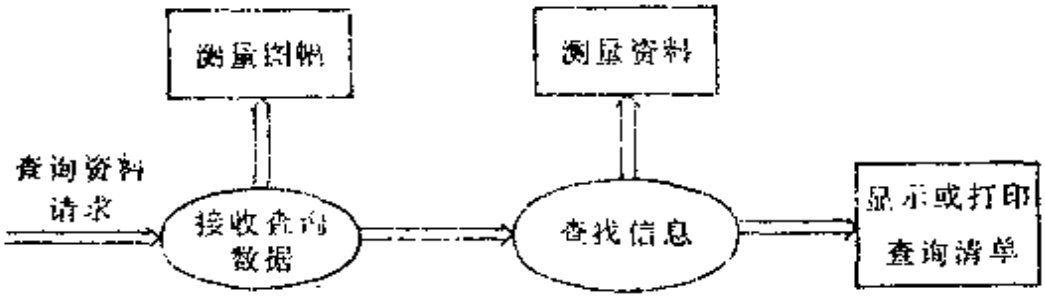


图 5-9　查询测区区域资料的数据流程图

分析图 5-9 中所有数据项，可编写图 5-9 的数据字典，见表 5-1。表中数据字典以极坐标法为例。

有了用户活动图，下面应进行概念模式设计。

图 5-9 的数据字典　　表 5-1

数据项	类型	长度位	小数位
纵坐标 x	实型	11	2
横坐标 y	实型	10	2
水深 h	实型	6	1
线号 L	实型	5	1
点号 D	整型	3	0
日期 R	日期型	8	0
时间 T	实型	7	4
施测单位	字符型	20	0
施测人员	字符型	20	0
⋮	⋮	⋮	⋮

三、系统概念模式设计

概念模式设计使用了通用的E-R图。图中长方形表示实体，菱形表示联系，椭圆表示属性。概念模式设计分为局部和总体两种。

1. 局部概念模式设计

下面以测线数据为例，说明局部概念模式设计。测线包括定位和水深两组数据，我们把定位和水深定义为实体。定位数据包括有线号，点号，观测量A、B、C，纵坐标x，横坐标y，时间T和日期R；水深数据包括有时间T，水深h和线号等。二者之间的联系是通过时间和线号同步得到的。图 5-10 表示的是测线数据的 $E—R$ 图。图 5-11 为测线与控制点组合 $E—R$ 图。数据库的各部分均可绘出各自的 $E—R$ 图。$E—R$ 图是建立数据库系统的关键，有了 $E—R$ 图，就可进行总体概念模式设计。

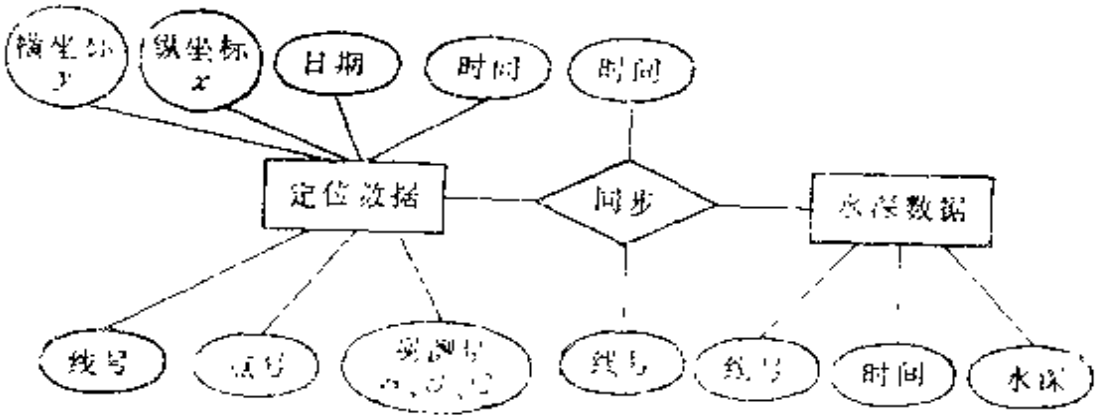


图 5-10　测线数据的 E—R 图

2. 总体概念模式设计

以图 5-10 和图 5-11 两者局部合并为例，说明总体概念模式设计。

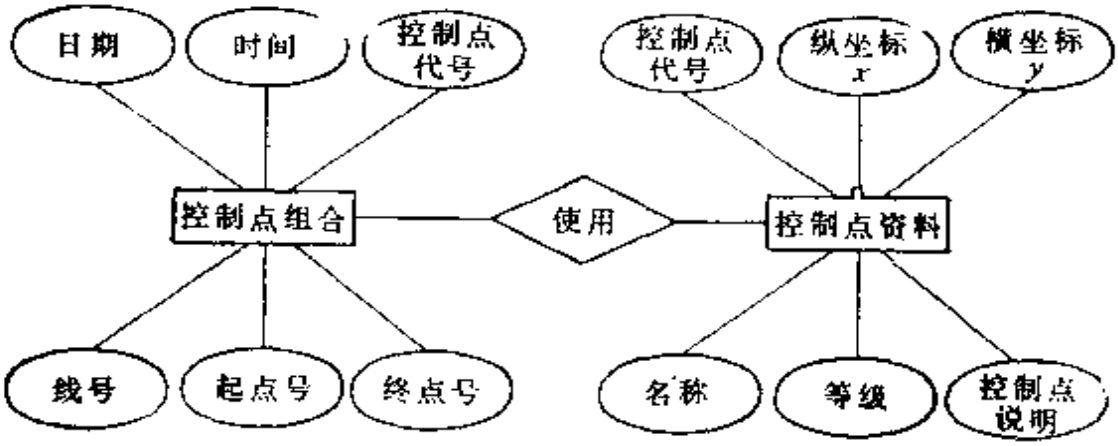


图 5-11　测线及控制点组合 E—R 图

由图 5-10、图 5-11 组成“总体”概念模式，见图 5-12。

这一模式是在消除了冗余数据和联系，在局部概念模式下的优化模式。

进行总体概念模式设计后，下一步进行逻辑模式设计。

三、逻辑模式设计

逻辑模式设计实质上是由概念模式向关系模式的转换。下面以图 5-12 为例说明。

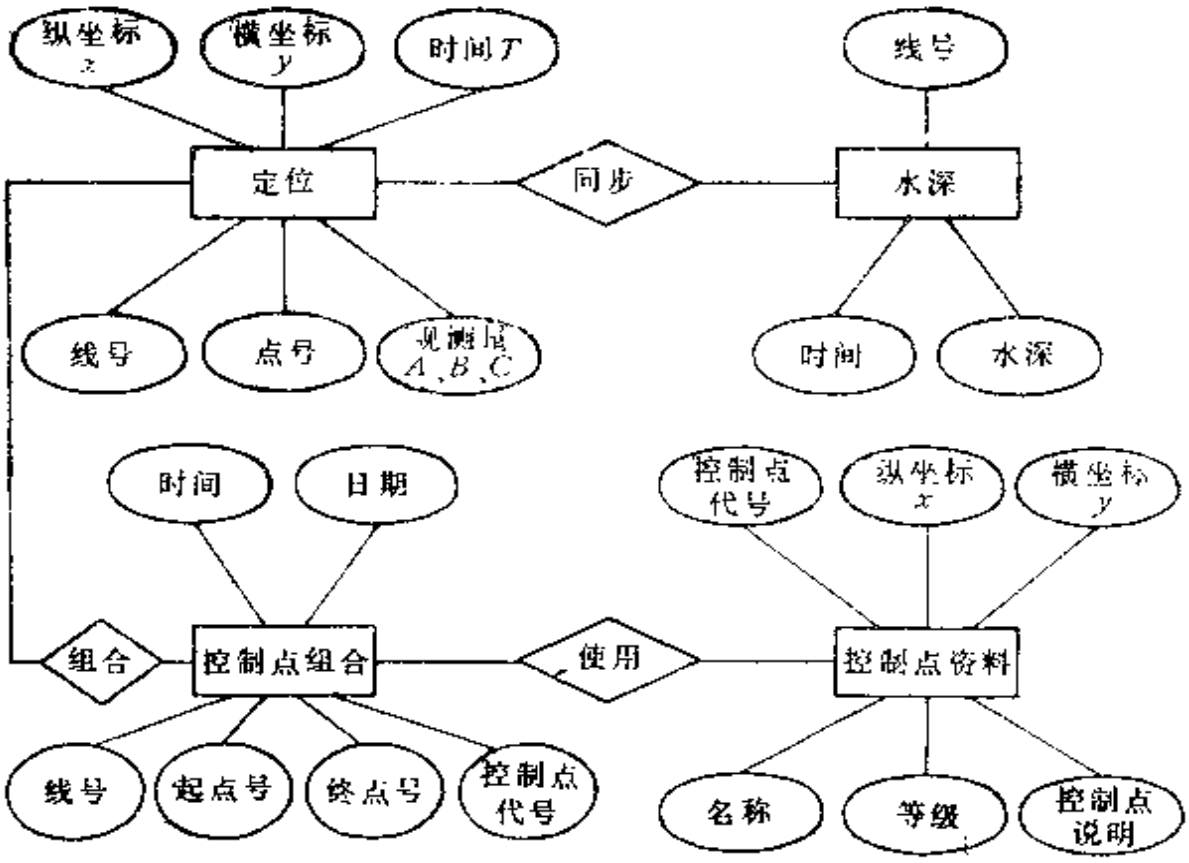


图 5-12 "总体" E—R 图

由图 5-12 可列出如下关系：

定位——点号、观测量A、观测量B、观测量C、横坐标y、纵坐标x、时间T，均与线号相关；

水深——线号、水深，均与时间T相关；

组合资料——起点号、终点号、日期、时间、控制点代号，均与线号相关；

控制点资料——名称、等级、纵坐标x、横坐标y、说明，均与控制点代号相关。

以上关系用表格表示，见表 5-2、5-3、5-4、5-5。

有了以上表格关系，即可进行数据库系统的数据结构设计。限于篇幅，数据结构设计问题从略。

五、沿岸水深测量数据库系统的实施

系统实施分为建库、编写应用程序、组织数据入库、运行应

表 5-2

线　号	点　号	观测量 A	观测量 B	观测量 C	横坐标 y	纵坐标 x	时间 T
⋮							

表 5-3

时　间	线　号	水　深
⋮		

表 5-4

线　号	起点号	终点号	日　期	时　间	控制点代号
⋮					

表 5-5

控制点代号	名　称	等　级	纵坐标 x	横坐标 y	说　明
⋮					

用程序和系统测试。这里的应用程序包括库文件调用、维护和应用子程序。

从数据库系统的实施过程来看，建立沿岸水深测量数据库系统实现了对数据统一的、独立的管理，改进了数据查找工作，实现了数据共享，大大减少了数据冗余，并且在数据处理方面也较以前有了实质性飞跃。

§5.3　数字地面模型

数字地面模型（DTM——Digital Terrain Models）这个概念，是在50年代末期，由美国麻省理工学院的C.L.Mille教授首先提出来的。在国际上，还有几个实质与数字地面模型一致的名称，如数字高程模型(DEM)、数字地形模型(DGM)、数字高度模型(DHM)、数字地面高程模型（DTEM）等。但最常

见到的是数字地面模型(DTM)。数字地面模型应用于水下地形测量中，可称为数字海底地面模型(DSTM)。

数字地面模型现在已不仅是初期所指的，由剖面高程数据来描述地形，而是统指由格网点或非格网点数据来描述地形。因此，数字地面模型就是将地形表面用密集的 x、y、z 坐标的数字形式（通常是格网）来表达。其核心问题在于如何利用一定排列分布的数据，内插出达到精度要求的密集格网点的高程。

一、内插方法

数字地面模型可有以下几种内插算法：样条函数法、双线性多项式内插法、移动曲面法、多面函数法以及加权平均法，下面介绍其中的三种。

1. 样条函数法

所谓样条函数，是指将区域分成若干块，对每一块定义一个多项式曲面，当 n 次多项式与相邻的分块边界上所有的 $n-1$ 阶导数均连续时，称之为 n 次样条函数。常见的有十六项双三次多项式、十二项双三次多项式，八项双二次多项式。

十六项双三次多项式表达式为：

$$\begin{aligned} z = {} & a_1x^3y^3 + a_2x^2y^3 + a_3xy^3 + a_4y^3 \\ & + a_5x^3y^2 + a_6x^2y^2 + a_7xy^2 + a_8y^2 \\ & + a_9x^3y + a_{10}x^2y + a_{11}xy + a_{12}y \\ & + a_{13}x^3 + a_{14}x^2 + a_{15}x + a_{16} \end{aligned} \tag{5-3}$$

十二项双三次多项式表达式为：

$$\begin{aligned} z = {} & a_1xy^3 + a_2y^3 + a_3xy^2 + a_4y^2 + a_5x^3y + a_6x^2y \\ & + a_7xy + a_8y + a_9x^3 + a_{10}x^2 + a_{11}x + a_{12} \end{aligned} \tag{5-4}$$

八项双二次多项式表达式略。下面，以十六项双三次样条函数为例，介绍一种整体最小二乘解法。

将（5-3）式改写成如下矩阵形式：

$$z = f(x、y) = C \cdot A \tag{5-5}$$

式中

$$A = (a_1 a_2 \cdots\cdots a_{16})^T$$

$$C = \begin{vmatrix} x_1^3 y_1^3 & x_1^2 y_1^2 \cdots\cdots 1 \\ x_2^3 y_2^3 & x_2^2 y_2^2 \cdots\cdots 1 \\ \vdots & \\ x_n^3 y_n^3 & x_n^2 y_n^2 \cdots\cdots 1 \end{vmatrix}_{n \times 16}$$

$z_i = f(x_i, y_i)$ 表示点 $i(x_i, y_i)$ 的高程

假定我们有某一区域的 n 个高程点($n>16$)，这 n 个点的高程 z_i 及其坐标 (x_i, y_i) 均为已知。将 (5-5) 式展开，写成误差方程有：

$$C \cdot A - z_0 = V \tag{5-6}$$

式中：

C 为待定参数的系数矩阵；

A 为待定参数向量；

z_0 为已知高程向量；

V 为误差向量。

如取插值点至各已知点的距离平方的倒数为权，即：

$$P_i = \frac{1}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (i = 1, 2 \cdots n) \tag{5-7}$$

根据最小二乘原理 $V^T P V = \min$，组成法方程式：

$$NA + U = 0 \tag{5-8}$$

式中，

$$N = C^T P C$$

$$U = -C^T P z$$

答解 (5-8) 式，可得到所求的待定系数矩阵 A 为：

$$A = (C^T P C)^{-1} \cdot C^T P z \tag{5-9}$$

将 A 代入 (5-5) 式，只要再代入内插点的坐标(x，y)，就可得到该点的高程值。

2. 移动曲面法

该法的基本思想是，在插值点 $P(x, y)$ 附近的某个区域 D 内，用一个二次多项式函数来逼近地形表面。假定地形表面为：

$$z = f(x, y) \tag{5-10}$$

二次多项式为：

$$P(x,y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + b_1 x^2 + b_2 xy + b_3 y^2 \tag{5-11}$$

又设 $\|f\|_2$ 为定义在区域 D 上的函数的二次模，它由下式确定：

$$\|f\|_2 = \iint_D \omega(x,y) |f(x,y)|^2 d\times d, \tag{5-12}$$

式中，$\omega(x,y)$ 为非负权函数。

如果 $P(x,y)$ 满足以下条件：

$$\|P(x,y) - f(x,y)\|_2 = \min \tag{5-13}$$

则称 $P(x,y)$ 为地形表面 $z = f(x,y)$ 的一个最小二乘拟合曲面。相应于 (5-13) 式还有：

$$\sum_{i=1}^{n} \omega(x_i, y_i) |P(x_i, y_i) - z_i|^2 = \min \tag{5-14}$$

称为加权最小二乘拟合曲面。当已知数据点 $n>6$ 时，则可唯一确定 a_0、a_1、a_2、b_1、b_2、b_3 诸参数。

关于权 $\omega(x_i, y_i)$ 的选取，各国采用不尽一致。如捷克的数字地面模型中选 $\omega = 1 - 0.9r^2$；德国选 $\omega = 1/r^2$；瑞典选 $\omega = 1/r^3$。以上 r 为内插点至已知点的距离。

移动曲面法方程的解法与样条函数法解法相同。

3. 多面函数法

当我们采用不规则类型数据构造地面模型时，还可采用多面函数插值法。

该法的数学模型如下：

$$F(x,y) = \sum_{i=1}^{n} C_i Q(x, y, x_i, y_i) \tag{5-15}$$

式中：

F为插值函数，它是插值点坐标（x，y）的函数，也可用以前常用的符号z表示；

C_i为待定参数；

Q为所使用的简单规则面函数(也称核函数)。核函数可选取：

$$Q(x,y,x_i,y_i)=1+[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2]^{3/2} \quad (5\text{-}16)$$

也可选取：

$$Q(x,y,x_i,y_i)=1+[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2]^{1/2} \quad (5\text{-}17)$$

此时，(5-15) 式可写成如下形式：

$$\left.\begin{aligned} z&=Q\cdot c\\ C&=Q^{-1}z\end{aligned}\right\} \quad (5\text{-}18)$$

或者

上式中，

$$Q=\begin{Bmatrix} Q_{11} & Q_{12}\cdots\cdots Q_{1n}\\ Q_{21} & Q_{22}\cdots\cdots Q_{2n}\\ \vdots & \\ Q_{n1} & Q_{n2}\cdots\cdots Q_{nn}\end{Bmatrix}$$

$$z=(z_1z_2\cdots\cdots z_n)^T$$

$$C=(C_1C_2\cdots\cdots C_n)^T$$

由于Q阵为非奇异矩阵，故C有唯一解。

二、DTM 的应用

DTM 的应用领域相当广泛，但主要还是应用于自动制图方面。

用于地形测量及制图的软件，比较著名的有德国人研制的 HIFI(Height Interpolation by Finite elements) 软件、SCOP (Stuttgart Contour Program) 软件、CIP (Contour Interpolation Drogram) 软件。此外，英国的 MOSS 和 HASP 软件也有较好的功能。在处理地质物理学数据的软件中有z—

MAP、UNIMAP、CPS 和 PANACEA 软件。其中，UNIMAP 软件是由欧洲软件公司于 1985 年完成的，它是一个交互式制图系统，具有绘制等深线图和三维立体透视图的功能。我们曾用该软件绘制了水下立体地形图，为港湾大比例尺水下地形测量提供了直观的海底地形地貌。我国武汉测绘科技大学在数字地面模型内插方面也做了许多工作，建立了自动制图系统。其它单位，如铁道部、上海市测绘院、北京市测绘院、测绘科学研究所、西南交大、长沙铁道学院等单位，在数字地面模型研究中，也取得了一批科研成果。

数字地面模型的初级产品是数字地图。数字地图是将一定范围的区域，划分成若干方格，方格的边长根据需要可代表几米至几百米，在每个方格区注上该方格内地形的平均高度，就成了一张数字地图。数字地图易于在计算机内存贮，使用方便。

§5.4 绘制海底地形图

绘制等深线图和海底地形立体图是 DTM 数据文件的一个具体应用，也是对 DTM 数据文件正确性、合理性的一个检验。这里需要说明的是，等深线图虽不是海底地形图，但是主要差别仅高程起算面不同，二者绘制方法基本上是一致的。

一、自动绘制等深线图

绘制等深线图常用的方法主要有两种，一是三角形法，二是网格法。以下主要叙述网格法绘制等深线的方法。

网格法绘制等深线大致可分为以下几个步骤：(1)在网格边上求出等值点；(2)追踪等值点；(3)连接等值点并光滑处理后输出。

1. 网格的划分和等值点的计算

通常测深范围是一个矩形域，把这个矩形域划分为 $i \times j$ 个

格网。其中，横向 $i=1,2,\cdots\cdots m$；纵向 $j=1,2,\cdots\cdots n$。为方便起见，定义网格为正方形，且边长为 C_x。见图 5-13。

各点的高程存在数组 BB 中，即 $BB_{j,i}=|Ee|$；$BB_{j,i+1}=|Ff|$；$BB_{j+1,i}=|Gg|$；$BB_{j+1,i+1}=|Hh|$。图 5-13 中的 I Ⅱ线为空间等值线，12 线为 I Ⅱ线在平面上的投影等值线。二者的距离称为等值线的高程值，用 W 表示，则有 $W=|\mathrm{I}\,1|=|\mathrm{II}\,2|$。

网格 $efgh$ 上是否有等值点，取决于空间四边形 $EFGH$ 是

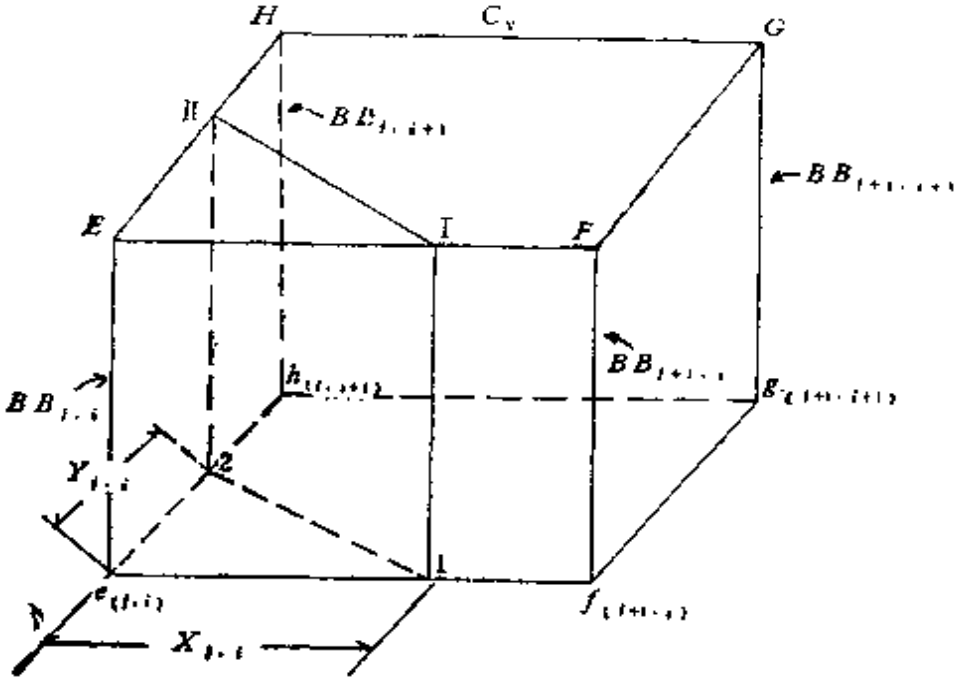


图 5-13

否与高程为 W 的水平面相交，即若下列判断式成立，说明网格横边 ef 上有等值点，如等值点 1。

$$(BB_{j,i}-W)(BB_{j+1,i}-W)<0 \qquad (5\text{-}19)$$

同理，如下式成立，则说明网格纵边 eh 上有等值点，如等值点 2。

$$(BB_{j,i}-W)(BB_{j,i+1}-W)<0 \qquad (5\text{-}20)$$

下面我们求等值点的位置。设 $x_{j,i}$ 表示等值点 1 至 e 的距离，则 $x_{j,i}$ 为：

$$x_{j,i}=\frac{W-BB_{j,i}}{BB_{j+1,i}-BB_{j,i}}\cdot C_x \qquad (5\text{-}21)$$

同样，设 $y_{j,i}$ 表示等值点 2 至 e 的距离，则 $y_{j,i}$ 为：

$$y_{j,i}=\frac{W-BB_{i,j}}{BB_{j,i+1}-BB_{i,j}}\cdot C_N \tag{5-22}$$

取 $C_N=1$，为单位长度，则上两式可为

$$\left.\begin{aligned}x_{j,i}&=\frac{W-BB_{j,i}}{BB_{j+1,i}-BB_{j,i}}\\ y_{j,i}&=\frac{W-BB_{j,i}}{BB_{j,i+1}-BB_{j,i}}\end{aligned}\right\} \tag{5-23}$$

绘图时，等值点 1、2 都要以绘图坐标表示，即有：

$$\left.\begin{aligned}x_p&=(j-1+S\cdot x_{j,i})\cdot C_N\\ y_p&=[i-1+(1-S)\cdot y_{j,i}]\cdot C_N\end{aligned}\right\} \tag{5-24}$$

式中：$S=0$ 表示计算纵边上的等值点；

$S=1$ 表示计算横边上的等值点。

2. 等值点的追踪

计算出全部等值点后，必需有规则、有秩序地将它们逐点连接成等值线，这就是等值点的追踪。其内容大致有三：1．确定等值线进入网格时的大致走向；2．确定等值线进入网格后从哪一条边出去；3．网格点即为等值点的处理。

3. 等值线的搜索

等值线有的是敞开的，有的是封闭的，因此，应有一个完整的、合理的搜索方法。

搜索等值线的关键是如何找到线头，找到线头后按等值点的追踪方法找到线尾。对闭曲线而言，任何一点都可作线头，线

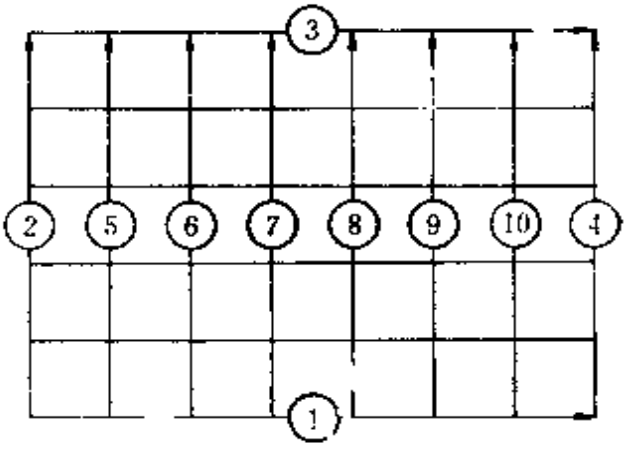


图 5-14

尾也是同一点。等深线的搜索路径见图5-14所示。

4. 实例

图 5-15(见彩图页)是辽宁沈大高速公路普兰店海湾大桥工程实测的等深线图的一部分，为该地区疏浚前的海底地形图。图5-16（见彩图页）是该地区疏浚以后的实测海底地形图。

二、自动绘制海底地形立体图

我们所说的海底地形立体图，是指海底地形立体透视图。透视立体图具有符合视觉印象、空间立体感强，形象逼真等优点。因此，对于常规条件下不能看见的海底地形，如能绘制海底地形立体图，对于狭窄水道的航行、港口航道疏浚的检查、海洋工程的设计与施工和满足潜艇水下活动都有一定的帮助。

绘制海底地形立体图，通常采用透视原理的连续断面法来绘制。其基本思想是进行坐标的透视变换，即完成三维空间坐标到二维平面坐标系统的线性变换。其次是消去隐藏线，即处理由于前面物体遮挡而无需画出的图形。

1. 透视变换原理

在三维空间内，用一个行向量(x, y, z)或列向量$(x, y, z)^T$表示空间点的坐标。对于一个三维空间的立体图形，可以用一个点集来表示，而每个点对应了一个行向量或列向量。这些向量集合组成如下的 $n\times 3$ 矩阵的形式：

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{pmatrix}$$

这样，我们便建立了空间立体图形的数学模型。

在计算机绘图中，常对立体进行各种变换，如平移、旋转、

缩放、投影、透视等。其实质是改变立体各点的坐标。也就是说立体的变换是通过与之相应的矩阵运算来实现的。

对于起伏不平的地形，我们可以使用一组间隔很小且相等的平行斜截面来切割它，从而出现一组剖面图。这组剖面图如果符合透视原则，而且进行消去隐蔽线的处理，则它的整体外形就构成了描述地形起伏的立体图。按照透视原理，地物距观察者按远小近大的规律变化，这种变化，随视角大小（地平线高低）、观察的位置和物体放置地点而不同。透视投影，是将投影面置于投影中心与投影对象之间，用中心投影法把一个物体投影到二维投影面上而产生图形。为了进行透视变换，先建立如下透视图坐标系，见图 5-17。

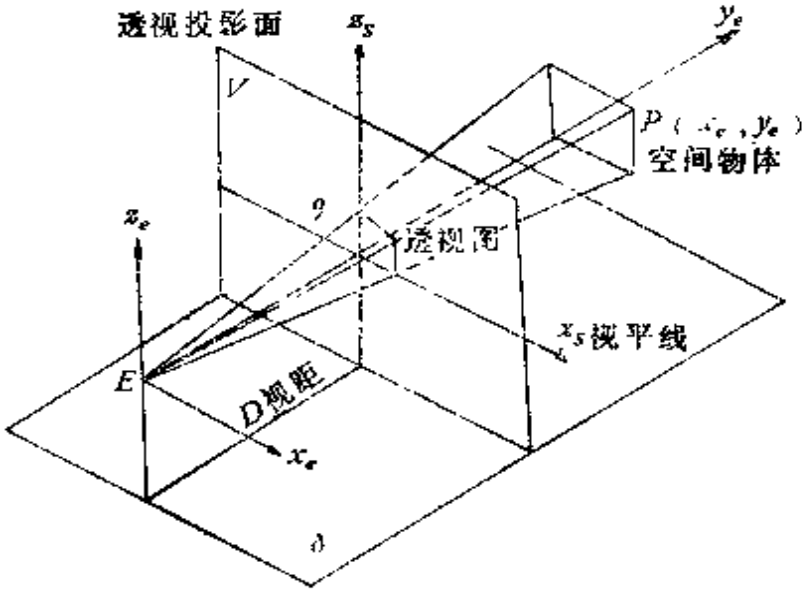


图 5-17　透视图坐标系

为了能从不同角度、方向观察海底地形，首先使物体绕 z 轴逆时针方向旋转 θ_z 角，再绕 x 轴逆时针方向旋转 θ_x 角，最后向 V 面（物体坐标的 xoz 面）作透视投影，即可得到物体的透视图。其过程用下述矩阵关系式表示为：

$$T_{\text{立体透视}} = T_z \cdot T_x \cdot T_p \qquad (5\text{-}25)$$

式中：T_z 为物体旋转 θ_z 角的旋转矩阵：

$$T_z=\begin{pmatrix}\cos\theta_z & \sin\theta_z & 0 & 0\\ -\sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix} \tag{5-26}$$

T_x为物体旋转 θ_x角的旋转矩阵：

$$T_x=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta_x & \sin\theta_x & 0\\ 0 & -\sin\theta_x & \cos\theta_x & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix} \tag{5-27}$$

T_P为透视投影变换矩阵：

$$T_P=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & q\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ L & M & N & 1\end{pmatrix} \tag{5-28}$$

这样，（5-25）式又可写成：

$$T_{\text{立体透视}}=T_z\cdot T_x\cdot T_P$$

$$=\begin{pmatrix}\cos\theta_z & 0 & \sin\theta_z\sin\theta_x & q\sin\theta_z\cos\theta_x\\ -\sin\theta_z & 0 & \cos\theta_z\sin\theta_x & q\cos\theta_z\cos\theta_x\\ 0 & 0 & \cos\theta_x & -q\sin\theta_x\\ L & 0 & N & M\cdot q+1\end{pmatrix} \tag{5-29}$$

2. 隐藏线的处理

绘制立体图时，如果前面的透视剖面线的高程 z 坐标值大于其后面出现的剖面线某些部分的 z 坐标值，后面的剖面线上的那些部分就要被遮盖，这就是隐藏线。在绘制立体图时，要防止那些隐藏线被画出来。

我们可以将海底立体地形看作是一个自由曲面，由一系列的原始数据点来构成，形成了 DTM 的数据文件。在此基础上，根据精度要求，内插足够密度的插值点，这些插值点连同原始数据

点，形成了新的 DTM 格网型数据文件。将相邻的四个数据点连接成四边形，结果就形成一个曲面，对这个曲面实现平面立体的消隐算法，即能得到消除了隐藏线的网状曲面立体图。这里，精度要求愈高，则网眼应愈小，相应网格数目愈多。

3. 图例

我们在 VAX-8530 小型机配套的图形工作站上，调制了绘制海底地形立体图的程序。为了实施对比，我们用此程序绘制了图 5-15 和图 5-16 相应的地区的海底地形立体图。详见 图 5-18、图 5-19 和图 5-20。

以上所列的绘图参数，h 为作图时视点距画面的垂距，d 为直接距离，θ 为旋转角。

为了加深印象，我们再给出国外利用计算机绘制海底地形图的示例。见图 5-20，左边为海底声图，右边为相应的海底地形图，中间则为其对应的立体地形图。图 5-21，为英国大陆架区的透视图，立体感很强。

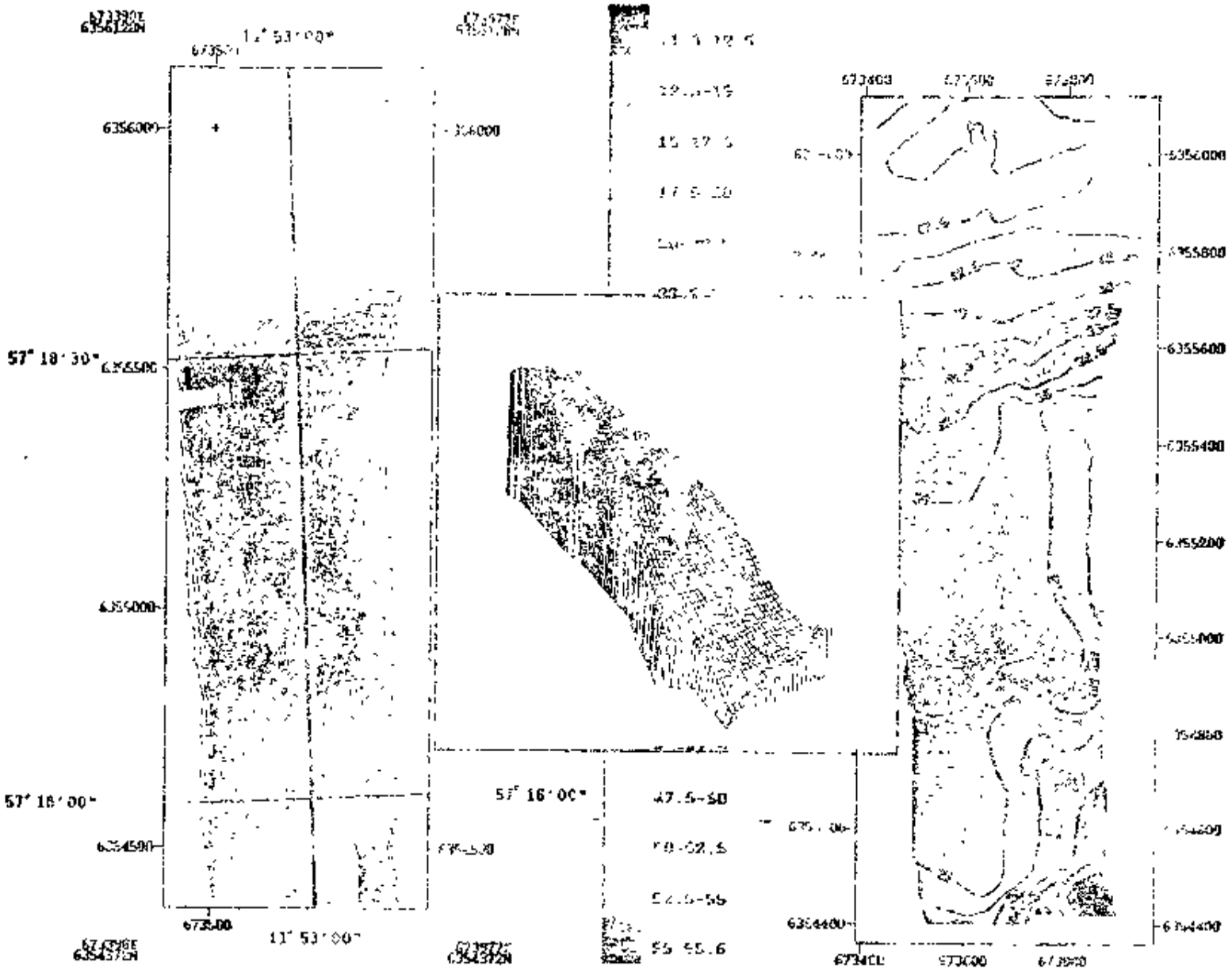


图 5-20　挪威 IRAP 系统绘制的海底地形图



图 5-21　英国大陆架地区的透视图

参 考 文 献

1. 叶久长、刘家伟，《海道测量学》，海潮出版社，1993 年。

2. 彭光宇、赵明才，《海洋测量定位与计算》，测绘出版社，1993 年。

3. 孟德润、田光跃、刘雅春，《海洋潮汐学》，海潮出版社，1993 年。

4. 杨启和，《地图投影与变换》，解放军出版社，1988 年。

5. 熊介，《椭球大地测量》，解放军出版社，1988 年。

6. 邱醒亚、S·J·谢皮德等，《海洋开发中的定位与测量技术》，海洋出版社，1990 年。

7. (苏)A·B·鲍伊柯著，杨定国译，《地形测量自动化的方法与设备》，测绘出版社，1989 年。

8. 胡友元、黄作元，《计算机地图制图》，测绘出版社，1987 年。

9. 刘语、梁启章，《专题地图制图自动化》，测绘出版社，1981 年。

10. 王卫安，《数字地面模型的建立》，同济大学出版社，1985 年。

11. 陆润民，《计算机绘图》，清华大学出版社，1988 年。

12. (英)J. R. 帕尔蒙，《数据库系统实践参考》，宇航出版社，1986 年。

13. (美)B.W.Remondi 著，吴延中译，《应用 GPS 相位观测值进行相对大地定位》，解放军出版社，1987 年。

14. 陈永奇，《全球定位系统 (GPS)及其在工程中的应用》(第二版)，武汉测绘科技大学出版社，1991 年。

15. 许其凤，《GPS 导航与精密定位》，解放军出版社，1989 年。

16. (苏)B.H.巴兰金、Л. А. 鲍里索夫等著，《大陆架地形测量手段与方法》，海司船保部出版，1984。

17. 梁开龙，“论我国海洋测绘事业的发展”，《海洋测绘》，1991 年第一期。

18. 梁开龙等，“GPS 动态测量方法的研究”，《导航》，Vol.30 No.1，1994 年。

19. 梁开龙、殷晓东，“GPS 用于海洋动态定位”，《冶金测绘》，Vol.2 No2，1993 年。

20. 郁祚赢、梁开龙等,"海洋大地控制网的布设",《军事测绘》, 1983年第二期。

21. 郁祚赢、梁开龙等,"海洋大地控制网的测定",《军事测绘》, 1983年第三期。

22. 郁祚赢、梁开龙等,"海洋大地控制网的解算",《军事测绘》, 1983年第四期。

23. 梁开龙、翟国君,"海道测量工作中的精密差分动态定位",大连舰艇学院学报, Vol. 15 No.3, 1992年。

24. 楼锡淳,"海洋测绘科学技术迅速发展的十年",《海洋测绘》, 1993年第二期。

25. (日)加藤幸弘等著,马兰译,"海底地形的精密测量",《海洋测绘》, 1991年第四期。

26. Alfred Leick,《GPS Satellite Surveying》, A Wiley Interscience Publication, New York, 1990.

27. 梁开龙、王建文,《HSD-001 REAL DGPS OCEAN SURVEY LOCATION SYSTEM》, International Hydrographic Review, Lxx(2)September 1993.

28. J. Callins,《Formalas for Position at Sea HyPerbolic and Astronomic Mathods》, NOAA Technical Report Nos 81, 1980.

29. Dennis J. Duven and David A. Artis,《GPS Surface Navigation Accuracy Study》, Marine Geodesy Vol. 9 No. 2, 1985.

30. J. P. Barboux.《An Evaluation of SERCEL Long range differential GPS System》, The Hydrographic Journal No.56 1990.

31. M. E. Cannon.《Kinematic Positioning Using GPS Pseudorange and Carrier Phase Observations》,UCSE Report No.20019, The University of Calgary, January 1987.

32. George Macdonald,《Computer-Assisted Sounding Selection Techniques》, The international Hydrographic Review Vol. LXI No. 1 January 1984.

33. V. I. Fedorov, P. I. Shilov.《Engineering Surveying》, Chapter 5. Mathematic Terrain Models 1985.

34. Erik Stenborg,《The Swedish Parallel Sounding Method

State of the Art», International Hydrographic Review LXIV, January 1987,

35. (日)浅田，章大初译,"利用多波束回声测深数据编绘海底地形图和三维影象图",«海洋测绘»，1988 年第二期。

36. (日)杉浦、邦朗，滕惠忠等译,"机载激光测深系统的现状和存在问题",«海洋测绘»，1989 年第一期。

37. I. Newton,"水下摄影测量的现状",«国际摄影测量和遥感学会第十五届大会论文译文选辑»，1986 年。

38. I. F. Pohner."SIMRAD EM100 多波束回声测深仪——一种新型的海底测图工具"，第十三届国际海道测量大会译文专辑»，1989 年 10 月。

39. A. J. Ker、H. P. Varma,"海道测量与数字化时代",«第十三届国际海道测量大会译文专辑》1989 年 10 月。

40. 孙廷萱等译,«GPS 译文集»，计量出版社，1987 年。

41. 陈兴荣,«海测水声仪器»，大连舰艇学院出版，1981 年。

天测测绘工程技术服务公司

天测测绘工程技术服务公司（简称天测公司）成立于1994年初，是政府测绘工程部门与厂商合资建立的一家进行GPS技术推广、GPS产品销售、各类测绘产品开发的高新技术公司。

公司成立以来，遵照“政府支持，仪器厂家配合，企业推广”的经营思想，本着“将世界上最先进的测绘信息技术、设备、人才和优良的服务推向市场”的精神，积极引进、消化，普及国外在GPS领域内的先进技术。天测公司在短短的一年来，先后向国内引进了天宝4000系列GPS接收机、RTK先进的商品化载波相位实时差分技术，航空、航海、陆地等各类导航设备以及国外先进的软件系统等等高、精、尖的产品，为国内测绘界的科技进步做出了不小的贡献，同时，也创造了年营业额突亿元的优秀业绩，这是令国内同行刮目相看的。

在经销同时，天测公司也致力于提高测绘行业的技术水平和科技水平，先后在北京、上海、广州、武汉、西安、四川、大连等地召开信息交流会，参加的人有学校的教授、高工以及各部门内从事测绘工作的科技人员，在社会上有一定的反响；天测公司长期聘请国外专家定期来华举行讲座、培训，将国外的最新信息技术传授到国内；公司新开辟了GPS热线，在社会中普及GPS技术。

天测公司现在员工20余人，其中大专学历以上的为100%具有中级以上职称的占30%，职员都是来自大地测量、工程测量、无线电技术、计算机软硬件、国际贸易等行业并有多年的工作经验。所有员工的平均年龄仅有30岁，正是有了这样一支训练有素、朝气蓬勃的队伍，采用了现代企业管理的模式，才有可能在竞争日趋激烈的市场上创造出一年一个亿的辉煌业绩。但天测人并未就此停步，为不断提高、完善自己，他们聘请了多名在国内外GPS领域具有很高声望的专家、学者做为技术顾问，并先后与武汉测绘科技大学、同济大学、清华大学、青岛海洋大学、大连舰艇学院等院校建立长期合作关系，与地矿部、测绘局、石油部物探局、林业部等部委有着良好的合作关系。

天测公司的经营范围主要是：GPS产品经销，技术服务，测绘新技术的推广、开发，并承接测绘工程。本着“完善自我，提高技术，一切为用户，用户至上”的宗旨，天测愿与您共创未来！

“天测=GPS销售+GPS租赁+GPS推广+GPS培训”是永恒的方程。

通过GPS，您可以走遍天下都不怕；

请您记住永恒的GPS热线：2536252

地址：北京海淀路甲138号燕山大酒店1612号

邮编：100086

电话：2563388—1612，1614　　传真：2564849转1612

天 海 公 司 简 介

天海公司是以大连舰艇学院测量队为主体，以承接海洋测绘任务为主的测绘技术服务公司。还进行海上导航定位及海底地形测量等产品的研制和开发。该公司拥有优秀的海洋测绘人才，其中教授8名，讲师10名，工程师5名，还拥有先进的海洋测绘设备：

Trimble Trimark DGPS 海上实时动态差分定位系统。

Trimble 4000SSE，4000SE 大地型 GPS 接收机。

瑞士产 Wild T2002 全站仪，DI3000 红外测距仪。

日本产 PS600 四波束扫海测深仪。

国　产 GPY 型浅地层剖面仪。

国　产 HSD-001 DGPS 海上动态差分定位系统。

国　产 HYS-103 型沿岸水深测量自动化系统。

天海公司：

可利用 DGPS 技术(实时差分 GPS 系统)，进行各种海洋测量定位；

可利用 PS-600 四波束扫海测深仪对港口、航道、锚地和沿岸海域等进行高精度的全覆盖的水下扫海测量；

可利用GPY型浅地层剖面仪对重要施工海域的水下泥沙层厚度和基岩标高进行高精度的水下探测；

可进行各类比例尺水下地形测量；

可利用各类型全站仪、无线电定位仪或 DGPS 系统配合回声测深仪组合成水深测量自动化测量系统，进行海道测量；

可利用海洋重力仪进行海洋重力测量；

以及承办与海洋测量专业有关的其他业务。

天海公司测绘许可证：辽测甲字 0214 号。

大连天海公司
辽宁省大连舰艇学院
电话：(0411)2682405-70250
邮编：116018
联系人：张晓明

P21
3314