

海洋工程环境

王超 编著

天津大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了作为20~21世纪的三大学科(原子物理、航天科学及海洋科学)之一的海洋学的主要内容。简述了海洋热力学、海洋化学、光学、声学、地质地貌等领域的基本理论及近代科研新成果。作为与海洋工程设计有直接关联的环境条件,本书系统地阐述了海洋中的波浪、海流、潮汐、风暴潮等现象形成发展的机制,运动规律,理论模式,海洋工程设计标准及推算方法。本书文字流畅,论述严谨而生动,适用于海洋工程专业、港工及海岸工程专业本科生,也可用作上述专业研究生参考书及近海、海岸和港工工程技术人员自学辅导教材。

(津)新登字012号

海 洋 工 程 环 境

王 超 编著

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 13 字数: 33.3千字

1993年11月第一版 1993年11月第一次印刷

印数: 1—500

ISBN 7-5618-0458-X

TV·14

定价: 6.50 元

出版说明

根据国务院国发〔1978〕23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会（小组）是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是做好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制定了《1986年—1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次、多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应；二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各院校推荐，同行专家评阅，教材委员会（小组）评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会（小组）复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位 and 广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

海洋工程环境是每一从事近海和海洋工程技术人员必需掌握的专业基础知识。只有在正确认识海洋环境规律、掌握其理论和分析计算方法的基础上,才能深入学习海洋工程技术知识,完成海洋工程规划、设计、制造和管理等方面的任务。这就是开设本课程的目的。

自1971年天津大学设立“海洋工程”专业后,即开设了海洋工程环境课程。特别是1977年以来,在海洋工程环境的教学和教材编写方面,进行了不断的探索和改革。先后编写了《海洋学》、《海洋工程水文》、《海洋石油工程环境-水文分析计算》、《动力海洋学》等教材和书籍,本书是近20年来教学和教材编写的一次总结。

本书包括绪论、海水和海底、风、海浪、潮汐和海流等六个部分。各章力图概括本学科领域的最新成就、理论基础和分析计算方法,并结合工程需要尽可能给出算例和相应的计算图表。

由于海洋科学庞杂的内容与学时、教材字数的矛盾,本书难免挂一漏万,希望能在教学实践中得到补充和修正。

本教材经过船舶工程教材编审委员会审查通过,列入船舶类专业“八五”规划教材出版,并由大连理工大学孙绍述教授主审,作者对此深表谢意。

目 录

绪论	(1)
第一章 海水和海底	(10)
§ 1 海水的温度	(10)
§ 2 海水的化学组成和海水的盐度	(24)
§ 3 海水的密度	(28)
§ 4 声波在海洋中的传播	(34)
§ 5 光波在海水中的传播	(41)
§ 6 海底地形及有关地壳运动理论	(46)
第二章 风	(54)
§ 1 风和气压	(54)
§ 2 地转风计算及海面风速的转换	(57)
§ 3 行星风带和影响我国海域的主要风系	(61)
§ 4 梯度风、旋衡风、热带风暴的气压分布和中心附近最大风速的计算	(66)
§ 5 常风向、强风向、大风日数和风玫瑰图	(69)
§ 6 最大风速的长期概率分布规律	(71)
§ 7 海洋工程建筑物的设计风速	(77)
§ 8 风压计算	(81)
§ 9 我国各海区的基本风压	(84)
第三章 波浪	(87)
§ 1 波浪要素和波浪分类	(87)
§ 2 波浪的形成和发展	(91)
§ 3 海浪观测和资料统计	(96)
§ 4 波浪要素的统计特征及分布规律	(98)
§ 5 海浪的谱特性	(107)
§ 6 由风场推算波要素	(113)
§ 7 波浪要素的长期分布规律及设计波要素的推算	(122)
第四章 潮汐	(128)
§ 1 潮汐现象	(128)
§ 2 引潮力和引潮力势	(130)
§ 3 平衡潮	(134)
§ 4 潮汐的动力学理论	(136)
§ 5 潮汐分析和预报	(146)
§ 6 海啸和风暴潮	(149)
§ 7 设计潮位的推算	(154)

第五章 海流	(161)
§ 1 地转流.....	(161)
§ 2 风海流.....	(166)
§ 3 大洋环流.....	(174)
§ 4 海流的观测与资料整理.....	(181)
§ 5 海洋工程设计中的近岸海流特征值.....	(183)
附表	(185)
主要参考文献	(199)

绪 论

一、海洋与人类

海洋是地球的主要组成部分之一。它的面积和体积均占据地球的很大百分比。因此，这样庞大物质的存在，不能不对人类的生存具有十分巨大的意义。

地球总面积约为五亿一千万平方公里。其中海洋面积不少于三亿六千万平方公里，陆地总面积不大于一亿五千万平方公里。这就是说，海洋的表面积约为整个地球总面积的70.8%，陆地仅占29.2%。海、陆面积之比约为2.5:1。

从南、北半球来看，在北半球中，海洋约占半球总面积的60.7%，陆地占39.3%；而南半球中海洋约占80.9%，陆地仅占19.1%。为了说明海、陆分布的特点，也可以将地球分为水半球和陆半球两部分。水半球以新西兰岛以东附近海面为中心，在此半球中，几乎全为海洋（占半球总面积的90%左右）。陆半球以法国罗德尔河口为中心，此半球几乎集中了全部陆地，即使如此，海洋的面积仍大于陆地面积，占53%（图0-1）。

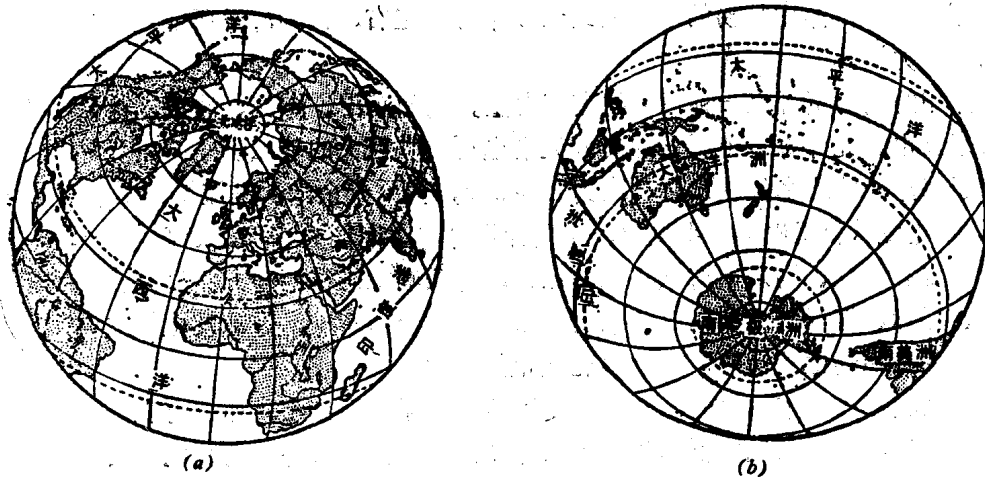


图0-1 陆半球及水半球中的海陆分布

(a) 陆半球

(b) 水半球

海洋和大陆不仅占据着地球的表面，而且占据着一定空间。现代大地高程测量和各大洋水深测量的结果表明，大陆上的至高点为珠穆朗玛峰，其高8848m。海洋中的至深点在玛利亚纳海沟，深10880m。大陆的平均高程为875m，海洋的平均水深为3729m。如果整个陆地都淹没在海水之下（包括水下地壳部分），海洋的水深仍达2854m。图0-2是按实测资料统计得出的，它表示在各个不同高度（深度）间隔中的水、陆面积分布。即根据地球表面在各个高度（深度）间隔内的面积，得出大于某一高度（深度）的累积面积及其与地球总面积之比（%）。从该图中可以看出地壳大致的倾斜规律，也可以得到较准确的海洋平均深度和陆地平均高程。

上述巨大的海洋水体中蕴藏着极为丰富的资源。它们主要包括生物资源、动力资源、矿

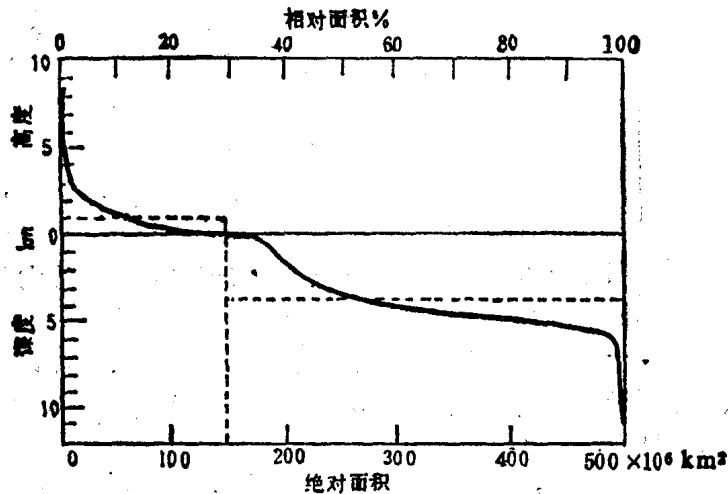


图0-2 地壳起伏统计曲线

物资源以及海底石油等。

1. 生物资源

从海洋中捕捞的大量鱼类和其它生物是人类需要的动物蛋白的主要来源之一。据统计，目前每年人类从海洋中捕捞的水产品约为6千万吨左右，仅为海洋所能生产的很小部分。

2. 动力资源

海洋中的动力资源是一种巨大的潜在力量。例如潮汐、海流、波浪，甚至水的温差都可以利用来发电。此外海水中所含的高能元素也可提供巨大的能量。

由于海洋潮汐的水位变化可以达到8~9m，甚至十余米，潮流流速每小时可达8~10 n mile，因此可以利用涨潮蓄水发电。据估计世界海洋潮能约有10亿kW，每年可发电12400亿度。英吉利海峡、马六甲海峡和钱塘江口，都是潮能丰富的地方。沿海耗电量不大的设施或灯塔、浮标、灯标等常利用海流推动水轮机上的串转子，带动发电机发电，或利用波浪的上、下垂直运动推动活塞，带动涡轮发电机发电。

海水温度分布是不均匀的，它因纬度而异又随深度而变化。如果将表层温度较高的海水引进真空锅炉，使之在低压下沸腾，产生的蒸汽推动汽轮机并带动发电机发电。用过的蒸汽通入深层温度较低的海水中使之冷凝。

上述利用海洋动力资源发电的方案有很多优点。首先，其原动力均可以再生，取之不尽，用之不绝。其次，由于无需消耗燃料，故无产生污染之弊。

海水中含有多种高能元素，如铀、镭、钍、重氢……等可供提取。例如，一桶海水所含的重氢（或其氧化物——重水）将超过400桶优质石油燃烧释放的热量。又例如，据估计海水中铀的总含量约40亿吨，比陆地上的储量约大4000多倍。目前用吸附法提铀已告成功。

3. 稀有金属和其它矿物资源

除高能元素外，海水中尚含有多种其它金属，如金、银、镁、溴、碘……。其中大部分属稀有金属，它们在大陆矿藏中的含量很少，在海水中，相对而言，含量却大得多。例如，每立方公里的海水中含金量约为4g，由此推估出整个海水中的含金量将高达5500万吨。银在海水中的含量比金约高10倍。从海水中提取的镁，约占世界总产量的60%。地球上的溴储量90%存于海水中。海水中的碘含量约达1000亿吨，比陆地上多得多。

除海水中含有矿物资源外，海底也有丰富的矿藏。例如，海底分布很广的红色软泥就是其中之一，软泥中含有大量铁质，故呈红色。在洋底地壳中，还含有不少铜、铅、锌、汞……，有人估计，蕴藏量比海底石油还大得多。近年的调查发现，在丰富的海底矿产资源中，锰结核是最有经济价值的一种。锰结核是一种富集锰、铁、铜、镍、锌、钴、钛、锆等30多种元素的块状结合物，分布在几千米深的洋底表面，或半埋在海底沉积物中。据估计，世界大洋的锰结核储量大约为2万多亿至3万亿吨之间，仅太平洋就有一万多亿吨，尤其是从中美海岸经夏威夷到玛利亚纳海沟一带，被称为“锰砌的航道”。在上述锰结核富集区，平均每平方米的海底表面就有约100kg锰结核。据估计仅从太平洋底的锰结核中就可以提取2000亿吨锰、50亿吨铜、90亿吨镍、30亿吨钴，比整个陆地蕴藏的锰、镍、钴要高出几百至几千倍。根据世界上目前对上述金属的消耗量来计算，铜再过36年，锰、镍、钴再过120年陆地储量均将消耗殆尽。如深海锰结核得到开发，则铜可延续600年，镍15000年，锰24000年，钴13万年。因此锰结核被视为人类的巨大财富，它将为迅速发展的金属工业提供重要的资源。

此外，锰结核还有一种罕见的优越性，就是说，在陆地上的矿产愈开采愈少的同时，大洋底的锰结核却每年都在生长。据估计，仅太平洋底每年都有约1000万吨左右的锰结核生长出来，其生长率大大超过目前消耗量的几倍。因此，只要开采得当，锰结核就是一种取之不尽、用之不竭的宝贵财富。而且还具有冶炼中对空气无污染的优越性。

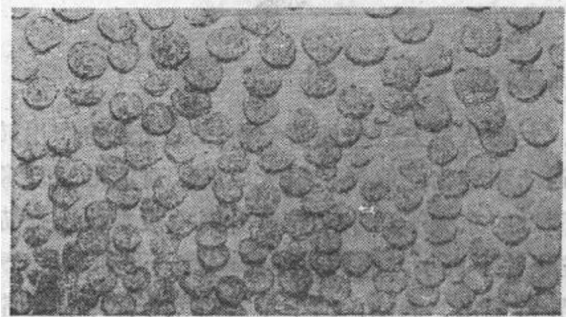


图0-3 海底锰结核照片，其大小与棒球相似



图0-4 锰结核剖面（可以看出其年轮）

关于大洋底的锰结核成因，目前争论很多。归纳起来，可分为胶体成因说、火山活动说、生物作用说、海底岩山风化说等几种假说。

根据计算，锰结核的平均生长率为0.7~6.5mm/千年，虽然数值似乎很小，但就广阔的大洋底来说，其生长总量却是十分惊人。

4. 油气资源

地球上的石油估计有半数以上埋藏在海底，自从能源危机出现以后，石油大量消耗国一方面采取节能措施，另一方面，向海洋要石油已成为注意的集中点。据统计，到1972年止，世界上已建有海洋油井一万眼以上。目前主要的海底油田在沙特阿拉伯—波斯湾，其次是委内瑞拉的马拉开波湖，再其次是北海和墨西哥湾。近年来又发现了北冰洋海底油田，其石油储量不亚于波斯湾，被称为世界五大海洋石油区。

海洋与大气层之间有着密切的关系。地球的四周包裹着厚厚的大气层，占地球表面 $\frac{2}{3}$ 以上的海洋与大气层广泛接触，彼此间永不停息地进行着运动和能量交换。例如，海水吸收了大量的太阳热能，再通过蒸发、辐射等形式将它的主要部分传递给寒冷季节或寒冷地域的大气。由于海水的吸热能力为空气吸热能力的3000倍，为土地的2倍，岩石的4倍，所以，如果没有海水储热的调整作用，大气温度升降之间的变差将增大到不可思议的程度。又例如，在海洋与大气间永恒存在的水循环（图0-5），海面巨大的蒸汽量会使部分海水转变为水蒸汽和云。风将它们吹送到大陆的上空，在适当的条件下凝结成雨滴降落，通过遍布大地的河流，以径流形式或渗入土壤中以地下水形式最终返回大海。由于水、陆温度不同，上部空气受热不均而形成的海陆风等，都对地球的气候变化具有重大影响。

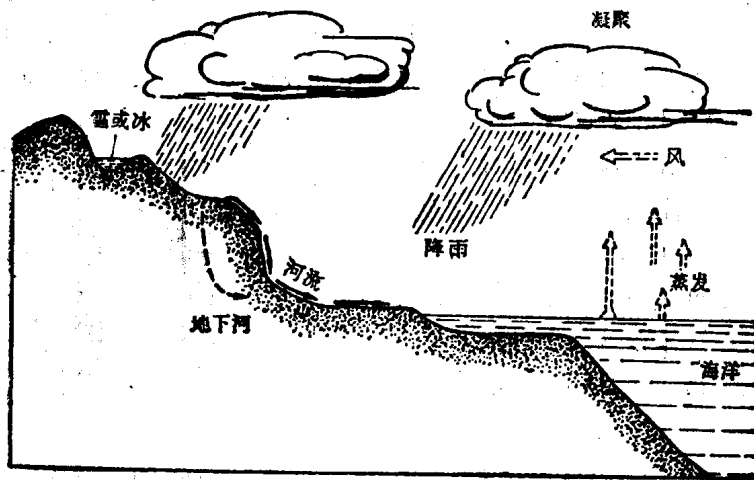


图0-5 水循环图

应当指出的是，近年来海洋和气象学家，大都从过去只单纯研究海洋或气象的作用转而共同致力于观察海、气两流体系界面上发生的运动和变化，取得了很大成就。对厄尼诺现象的探讨就是一例。该现象的主要特征为，赤道附近的东太平洋水温异常升高（暖水覆盖在赤道海区，然后东流，且在秘鲁、厄瓜多尔沿岸堆积并下沉），它广泛地影响着一系列天气、气候和海洋水文现象，并使之在当年或次年产生异常变化。例如，约半年后西太平洋水温异常，同时大气层中的高压加强，位置偏南，西太平洋台风减少，局部地区夏凉如秋、落霜下雪或降水偏多等。该现象经若干年后反复出现，引起广大海洋气象学家的关注。

海洋与军事亦有密切联系。了解和掌握各种海洋现象的规律并充分利用有利因素是取得战斗胜利的重要保证之一。军事对海洋学提出的任务是多种多样的，例如用海水中声波的传播特性制成的声纳，它在第二次世界大战期间发挥了惊人的作用。据统计此次战争中被击沉潜艇总数的60%是由声纳发现的。为了了解声波在海水中的传播路径，就必须准确地掌握海水温度和盐度的分布和变化。而海流的速度和方向对于布设水雷以及各种水下武器的发射也有极大影响。海浪使舰艇颠簸，不利于武器的发射，但却有利于潜入状态的潜艇和鱼雷航迹的隐蔽。潮汐对于登陆作战的成败有决定性影响，只有掌握了准确的潮汐预报方法，并利用高潮时刻登陆才能顺利完成战斗任务。

二、当代海洋科学

综上所述，由于海洋与人类的生存繁衍之间存在着众多的密切联系，因此人类对于海洋

的探索也始于远古时代。但是，在漫长的历史岁月中，这种探求的形式主要限于航海和探险。直至19世纪末20世纪初，随着测试工具和手段日臻完善，人类才开始系统地研究海洋。

本世纪60年代以后，在短短的三、四十年中，海洋科学获得了惊人的迅速发展，一跃而被誉为与宇航科学、原子物理学并列的20世纪至21世纪三大世界科学之一。

因此，海洋科学虽然年轻，却以它无比新鲜和极其丰富的内容吸引了成千上万当代杰出科学家的关注。

当代海洋科学的主要特点为：

1. 国际海洋机构和国际联合考察

由于海洋科学在世界范围内的广泛性和连续性，也由于进一步发展海洋科学，迫切需要扩大规模，在1957~1958国际地球物理年中第一次组织了大规模的国际联合海洋调查。共有40多个国家、70多艘设备完善的调查研究船参加。他们对世界各大洋进行了详细的观测。其后，成立了世界海洋资料中心。1959年，第一届国际海洋学会议在纽约召开，研究交流了与海洋科学发展有关的各项重要事宜，并决定在1960~1965年组织国际印度洋调查（IIDR）。

1960年成立了联合国教科文组织政府间海洋委员会，目前它已成为世界海洋事业的中心领导机构，负责制定海洋科学的宏观规划。例如，1965年开始的“黑潮及其毗邻海区合作调查”（CSKC），1969年开始的“全球大气研究计划”（GARP）和“世界气候研究计划”（WCRP），1970~1980“国际海洋考察10年”（IDOE）等。特别是“国际海洋考察10年”，它规模宏伟，包括若干分计划，如“深地层采样”（JOIDES），“国际海洋钻探”（IPOD）、“中大洋动力学实验”（MODE）、“扩大中大洋动力学试验”（POLYMODE）、“北太平洋试验”（NORPAX）、“国际南大洋研究”（ISOS）、“沿岸上升流生态系分析”（CUEA）等，分别观测研究当代海洋科学中的各个重要课题。

此外，国际性组织尚有“国际海洋工程委员会”、“生物海洋学协会”、“水化学协会”、“海洋污染专家联合会”等多种。

2. 自控遥测观测手段和立体调查方法

高度发展的现代科学技术，尤其是计算技术，微电子技术，声学、光学技术和遥感技术，使海洋观测仪器和方法产生了深刻的变化。这意味着海洋仪器在精确度、灵敏度、长效和高效四个方面较前有了显著的提高，出现了精密的温、盐、深度连续记录仪（STD），改进后更为精确的电导率、温度、深度连续记录仪（CTD），出现了自由降落式温、盐微结构仪，其深度分辨率分别为1m和若干厘米，出现了用声学方法测量微弱海流（mm/s）和湍流的仪器，地层剖面仪及旁测声纳等。此外也意味着各种自控遥感技术在海洋研究中日益占有更为突出的地位。

这里所指的遥感包括航空和航天两类。1960年美国发射了第一颗气象卫星“泰勒斯”。1966年苏联发射了另一颗气象卫星“宇宙-122”。此后，气象卫星和地球资源卫星的数量逐年增加，并且都能兼测一些海洋要素。1978年美国发射了第一颗海洋卫星——“海洋卫星-A”，次年苏联发射了海洋卫星“宇宙-1076”。卫星的观测项目主要包括水温分布、盐度分布、海冰分布、海流边界、海洋锋、波高、内波、中尺度涡、平均海面的高度、海面风向风速、湿度、海洋水深、上升流、海水透明度、叶绿素和海水污染等多种内容。遥感的最大优越性在于全天候和大面积同步观测，这是其它任何观测方法均无法与之相比的。

另一种被普遍采用的先进观测手段是锚泊海洋浮标站。这是一种能够长期使用的连续观测设备，它既可以测海面大气层的风向、风速、气温、湿度和气压，又可以测海水中各层次

的水温、盐度、密度、海流、波浪等物理、化学要素，有的还可以自动升降作剖面观测，观测结果自动处理、存储和传递。

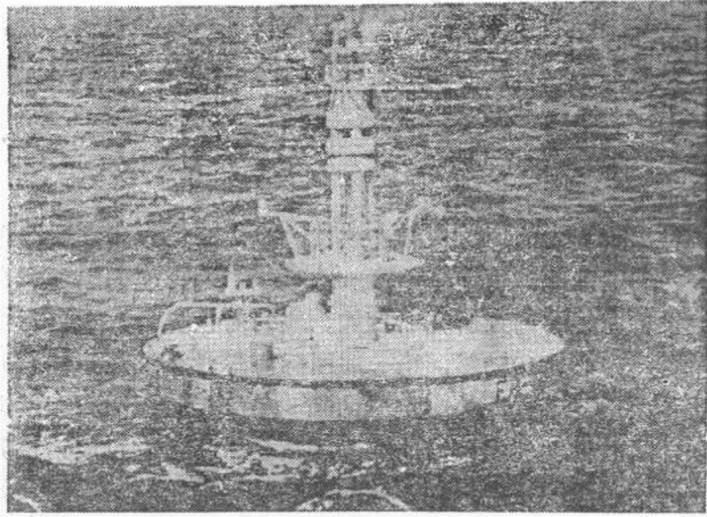


图0-6 标准环境浮标的水上部分

第三种普遍采用的先进观测手段是各种深潜器和形形色色的水下工作室。它们专门用于深海和海底的作业和调查。深潜器不仅有观测窗，而且有机手和观测仪器，有动力装置能在水下自由行动。与调查船或其它观测方式相比，深潜器有许多优越性，主要是①观测人员能亲眼目睹水下或海底发生的现象，拍摄照片，测量和采集样本；②深潜器不受水面状况的影响，在恶劣天气仍能继续工作；③能在某指定地点连续工作若干小时，这对于无法锚锭的海洋调查船来说是不可能实现的；④在同一地点的多次重复调查中能重返海底而无需导航找到原地点。

所谓“立体观测”即为水面观测，深水观测和航天、航空观测三者的结合。水面观测一般可通过调查船、岛屿或沿岸海洋站的观测来实现，此外还有“天气船”和无人浮标站等。水面观测包括近海面层几十米至数百米厚水体中的各种海洋物理、化学、生物和动力现象。深水观测在这里是指深层大洋或洋底的观测，它通过潜水器和潜水艇实施。航空和航天观测则依靠飞机和人造卫星实施。

3. 新奇的海洋现象是20世纪最重大的海洋学新发现

它们动摇了人们的传统观念，并迫使海洋学家朝着探索和建立新理论向前迈进了一大步。主要包括以下几个方面。

①大洋中的生命之谜。众所周知，在现代大洋中栖息着16万种动物和将近1万种藻类。已知的种类数量仍在与日俱增，因为人们总不断地发现和记载一些新品种，有时还会发现一些稀有种类或是被认为在过去地质年代中早已灭绝的种类。长期以来，在深水中是否存在生物是一个有争论的问题。虽然早在“挑战者号”进行调查的过程中就已经在水深2000~3000m的海底发现了底栖生物，但英国生物学家爱德华·费比斯(Edward Forbes)和他的学生们坚持水深548m以下为“无生命区”。德国生理学家芳顿(Fonten)在气压实验室内的实验结果表明，相当6500m水压的压力下甚至连细菌也无法生存；而“勇士号”调查船却在6000m以下的大海深处，采集到286个底栖生物标本。1977年，英国海洋学家乘深潜器发

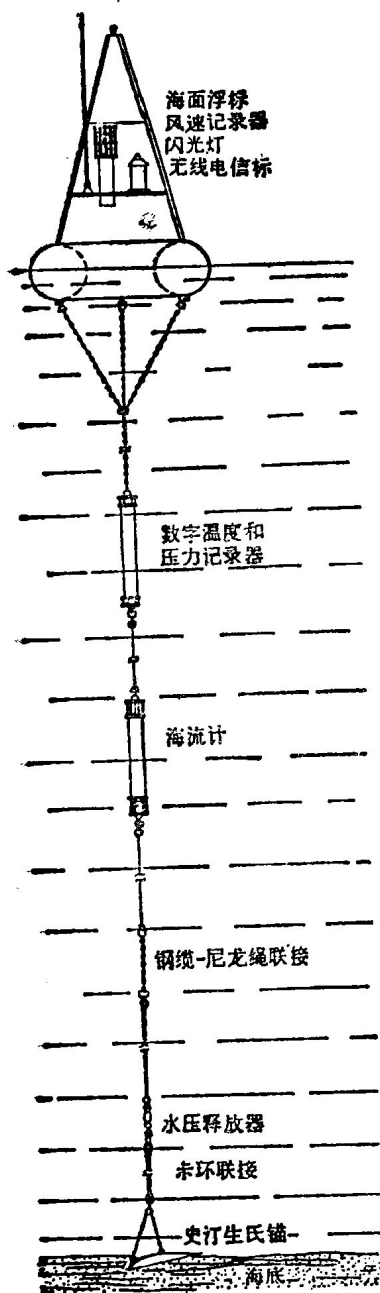


图0-7 浮标的水下观测装置

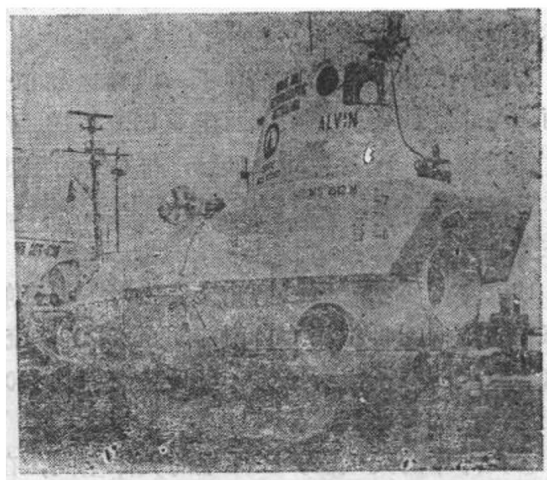


图0-8 “阿尔文” (ALvin)号潜水器

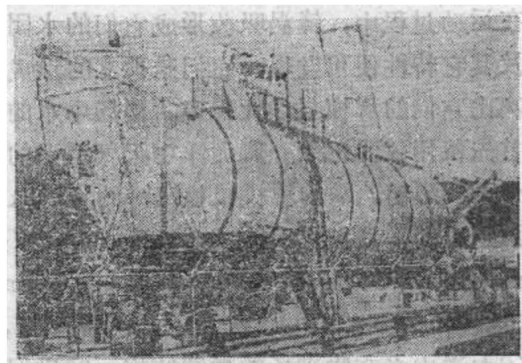


图0-9 “的里雅斯特” (Triesre)号潜水器

现了深海绿洲中生物最丰富的“加拉伯戈斯奇境”，该处的底栖生物数量以 kg/m^2 计，较一般底栖生物数量($10^{-1}\text{g}/\text{m}^2$)增加了好几个量级，称为“生命绿洲”。此外，该处生物类别之多，也使海洋学家惊叹不已。

②世界大洋水体的循环系统。世界大洋的赤道深水逆流系统是20世纪60年代才被发现的。1951年，美国太平洋渔业研究所考察队用深水网具捕鱼时发现，虽然表层流(东南信风流)向西流动，而渔网却被向东冲去。经过调查后发现，在赤道东南信风流的下面，水体永远以 $150\text{cm}/\text{s}$ 左右的速度向东流动，该水层厚约300m，宽约300km，横贯整个太平洋，当时

命名为“克伦威尔流”。1959年，苏联“罗曼诺索夫”号在西径 30° 的大西洋中，根据自动浮标站测定的资料发现，在水下75m处有流速为80cm/s的表层逆流，该流沿赤道向东，横穿整个大西洋，当时定名为“罗曼诺索夫流”。此外，1959~1960年东北季风期间，苏联“勇士”号调查船在印度洋也发现了赤道深水逆流，当即命名为“塔列耶夫流”。由此看来，前后10年，在太平洋、大西洋、印度洋中薄薄的东南信风流（向西运输）水层之下，均发现了沿赤道向东的逆流系统。

1969年春季，苏联又发现了一股长达3800n mile，由巴哈马群岛到赤道的深水流，流向东南，与表层的安的列斯流及圭亚那流相逆。在1972年的重复调查中，发现该流基本参量不变，性质稳定，流量为 $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ （约为墨西哥湾流的1/2），宽约200km，深为200~1000m，流速1~1.5节，长度在3500km以上。据发现该流的学者认为，它是罗曼诺索夫深层流的主要源泉之一。

1968年，苏联“库尔恰托夫院士号”调查船在大西洋西南部发现了强大的气旋式环流及其东缘的南向安哥拉流（自南纬 5° 至 23° ），流速70~80cm/s，其表层（20m以内）被薄薄的向北运输的信风流所掩盖。安哥拉流深达800~1000m，流量约为 $30 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，是罗曼诺索夫流向南的续流。

③大洋中的天气涡。在无垠的大洋空间，在流的交界处和环流的中部，均有一些天气型涡在发展。它们是大气中气旋和反气旋的物理相似物。早在本世纪30年代，海洋学家就注意到大洋中天气型涡的锋型，并且发现在从哈特拉斯角至纽芬兰大浅滩这一段内，墨西哥湾流的主流是不稳定的。其波状振动的波长约为300~400km，相速度约为6~10cm/s。随着水体向东移动，上述波动的振幅增大，转变为规模可达300~500km的蛇形运动，继续发展时，蛇形运动脱离主流成为“锋涡”，于是在锋的一侧形成气旋型涡，另一侧则形成反气旋型涡。

在运动过程中，锋涡吸收形成它们的水团。因此，按其内部和周围水之间的温度和盐度差异及其它特性便可发现，它们是孤立的形成物。因此，在锋带以外，这些形成物之间的平均距离比它们的规模显然大得多。涡场中水的旋转速度可达每秒若干米，而其寿命大约是几年。首先使用仪器记录开阔大洋中天气型涡的是苏联“多边形-70”考察队。它准确地记录到5个天气型涡。涡的规模很稳定，约为100km。整个涡以平均速度5~6cm/s向西移动。而在涡场中的平均流速大致为：200~300m深处——25cm/s；400~600m深处——35cm/s；1000m深处——20cm/s；1500m深处——10cm/s。

美国MODE-1和POLY-MODE考察期间，再次证实了天气型涡的上述特性。

④大洋中水文物理场的微细结构。20世纪60年代以来，广泛采用惯性小的探测仪器测定大洋水的温度、盐度、电导率、声速以及海流等，于是才发现和描述了这些完全崭新的现象——大洋水的细微结构。它们包括可以保持若干昼夜的负密度梯度层和微细温、盐夹层等。

⑤水下声道。1946年，苏联和美国分别同时发现了水下声波超远距离传播现象，即发现了水下声道。它是一个能使声波在其中经过多次内反射而传向远方的水层。例如，在水下1500m作一次不太强的爆炸后，利用水听器在几千海里以外都可收到信号。水下声道的轴约为1000~1200m深，热带水域中约下沉到2000m左右，而在温带则上升至200~500m的表层中。

⑥全球系统的中大洋脊。中大洋脊的重要特点并不在于其地形，而在于其地质构造和地磁变异。1958年和1961年，迈森和拉弗在太平洋东北部进行实验时，首次发现了大洋底地磁

异常的带状结构，这些“带”宽约30~40km，异常强度约为500 Γ ，“带”的分布与海岭的走向平行。其后，在世界大洋的许多其它海区也获得类似的发现，经过许多科学家的研究，最终完全肯定了这个惊人的事实。马修斯等人分别解释了带状地磁异常产生原因的假说：通过纵贯海岭中央的大裂谷，由地幔中溢出熔融的玄武岩，在它们冷凝时即获得正或反的磁性。当新的熔岩溢出时又将它们向两侧推挤，于是形成磁异常带，而大裂谷中形成了地球上最年轻的地壳。由于各大洋的洋底都存在着上述高耸的山脉，贯穿于大洋中部，因此称为洋中脊或中大洋脊。

三、海洋科学的新领域——海洋工程环境

近年来，人们在研究海洋的同时广泛开发海洋。其内容主要包括以下三方面：

1. 资源开发

海洋水产、海洋矿物的开发，海水运动过程中海洋动力资源的利用等。其中特别重要的则是海底石油资源的开发。

2. 空间开发

修建水上城市、人工岛、水下仓库、水下贮油罐以及在近海建造原子能发电站、垃圾处理厂等。

3. 海上通讯运输

修建港口、水上机场、铺设海底管线等。

显而易见，无论何种形式的海洋开发，都必须通过其特定形式的海洋工程结构物来实施。这些结构物种类繁多，它们之中不仅有码头、人工岛、水下仓库、各种防波、防潮和护岸工程，还有采、钻油平台，贮油、输油设施，油轮系泊点等。

由于海洋工程建筑物规模巨大宏伟，结构需坚固耐久，因此造价昂贵。正当各种形式的海洋工程建筑物在世界各海洋纷纷建成投入使用之际，一门新兴科学——海洋工程环境也随之诞生了。它总结了各种海洋因素，特别是风、浪、流、潮波等的变化规律以及它们与建筑物之间的相互作用，它告诫海洋工程部门，如何最有效地根据海洋条件去选择和确定工程建筑物的形状、尺度、材料……，以便最终制定最佳设计方案。不仅如此，在施工过程中，亦需根据海洋环境条件，不失良机地按时完成工程进度。

第一章 海水和海底

§ 1 海水的温度

海水温度是海水的重要物理性质之一，它将直接影响海水的其它物理性能和动力性能，因此对海洋工程、海洋生物和军事活动均有一定影响。

一、海水的热性质

大多数海水的盐度值在32‰~37‰之间，平均值接近35‰。这个事实表明，一方面，海水中纯水占绝大部分，因此海水的物理性质与纯水有许多相似之处；另一方面，海水含有盐分，其性质又与纯水不同。

对于纯水来说，其热性质（如熔点、沸点、比热、蒸发潜热等）较其它液体有许多明显的异常。这是因为水分子由一个氢原子和两个氧原子组成，但其结构特殊，并非想象中的那样——带正电荷的氢原子在两个对称点上与带负电荷的氧原子连结。事实上，氧原子的两个原子键与两个氢原子键以 $105^\circ\sim 110^\circ$ 的键角相结合。即两个氢原子带正电荷，一个氧原子带两倍于氢原子的负电荷。由于电荷间的非对称结构，电荷重心的位移便产生偶极矩——电荷的电量与电荷间距离的乘积。由于两个化学键的极性不能互相抵消，形成正负电极，所以水分子有很强的极性，分子与分子之间有很强的结合能力，因此可使简单的水分子结合成复杂的水分子即分子的缔合。缔合分子随温度而变化，温度升高促使缔合分子离解。水的许多特性就是由上述缔合作用引起的。例如，水的熔点和沸点比氧的同族元素氢化物高很多。如果水是一个与同族元素相似的正常化合物，其理论熔点和沸点将分别为 -110°C 和 -85°C ，由于冰熔化为水或水化成汽时，需要消耗很大的能量离解巨大的缔合分子，因此熔点和沸点升高。水的比热、蒸发潜热等亦有此类现象。

海水的热性质不仅与上述纯水的特性有关，而且还受水中含盐量的影响，简述如下。

①比热：使1克物质温度升高 1°C 所需的热量称为比热（ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ）。比热分为定压比热 C_p 和定容比热 C_v 两种，前者在压力固定不变时测定，后者在体积固定不变时测定。在研究液体物质时，一般采用定压比热。海水的定压比热和定容比热都是海水温度、盐度和压力的函数。1973年，米勒罗（Millero）等人提出了一个较精确的经验公式，即

$$C_p = m(T) + n(T)S + r(T)S^{\frac{3}{2}}$$

式中 $m(T)$ 、 $n(T)$ 和 $r(T)$ 均为 T 的多项式（不高于三阶）。该经验式的适用范围分别为 $T=0\sim 40^\circ\text{C}$ ， $S=0\sim 40\text{‰}$ 。根据上式可计算出在一个大气压下，不同温度、盐度的定压比热值：

②蒸发潜热：使1g海水化为同温度蒸汽所需的热量（ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ），为海水的蒸发潜热。海水的蒸发潜热受盐度影响很小，因此与纯水非常接近。对纯水来说，蒸发潜热随温度升高而降

低, 当温度在 $0\sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间时, 其关系式为

$$L=2479-22T \quad (\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$$

式中 L 为蒸发潜热, T 为温度。

在所有的物质中, 水的蒸发潜热最大。因此, 它对表层海水热平衡和大气热状况有极深远的影响。

③热导系数: 物体由高温部分向低温部分传导的热量 Q 与上述二部分的温差成正比。若沿距离 dn 的温度变化为 dT , 则 dT/dn 即为在 n 方向上的温度梯度。如果通过垂直于 n 的单位面积, 在 dt 时间内通过的热量为 dQ , 则

$$\frac{dQ}{dt} = -r \frac{dT}{dn}$$

式中 r 是比例系数, 叫做热导系数。

流体存在着两种热导系数。当海水静止或处于层流状态时, 由于分子不规则运动而导致的热量转移为分子热传导, 其热导系数称为分子热导系数; 当海水运动为湍流时, 流体微团作随机运动, 与此相应的热量转移为涡动热传导, 其热导系数称为涡动热导系数。温度为 17.5°C 、一个大气压下的纯水, 其分子热导系数为 $1.400\times 10^{-8}(\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1})$, 此值随盐度增大而减小, 随压力增高而略有增高。涡动热导系数约为分子热导系数的 $10^3\sim 10^6$ 倍, 视海洋中的运动状态而定。由于涡动热传导远较分子热传导显著, 同时实际的海洋又不可能仅仅处于静止状态或层流状态, 因此在有关计算中往往将分子热传导现象忽略不计。

④海水密度最大时的温度和冰点: 海水密度最大时的温度 $T_{\rho\max}$ 与含盐有关, 即盐度愈大, $T_{\rho\max}$ 愈低, 其关系式为

$$T_{\rho\max}=3.95-0.200S-0.011S^2$$

当 $S=10\%$ 时 $T_{\rho\max}=1.86^{\circ}\text{C}$

$S=17\%$ 时, $T_{\rho\max}$ 低于零度(纯水的冰点)

$S=30\%$ 时, $T_{\rho\max}=-2.47^{\circ}\text{C}$

海水的冰点比纯水低, 且随含盐量增大而继续下降。据最新得出的结果, 现场压力下的冰点为

$$T_f(^{\circ}\text{C})=-0.0137-0.051990S-0.00007225S^2 \\ -0.000758Z$$

式中 Z 为水深。

比较 $T_{\rho\max}$ 和 T_f 随盐度的变化可以发现, 前者随盐度增加而降低的速度比后者快(见图1-1)。当 $S=24.7\%$ 时, $T_{\rho\max}=T_f=-1.33^{\circ}\text{C}$ 。因此, 盐度小于 24.7% 海水的结冰过程与盐度大于 24.7% 海水的结冰过程是完全不同的。

二、海洋中的热收支——海洋热平衡方程

为了研究讨论海洋中温度的分布和变化, 必须了解海洋中热量收支的情况。如果收入大于支出, 海水的温度将升高; 如果支出大于收入, 海水的温度将下降。这种热量收入和支出的总合叫做海洋热平衡。由于海洋的年平均温度几乎没有什么变化, 所以, 平均而论, 海洋中热量的收支必须基本相等。但是, 在一年中的不同时期, 热量的收支并不平衡, 这种差异决定着海洋中温度的分布和变化。总起来说, 局部海洋吸收热能的主要来源包括: 太阳及