

近代物理讲座

第十四讲 海洋物理学概貌

关定华

(中国科学院声学研究所)

海洋占地球表面积 70% 以上,有丰富的资源,是重要的交通要道,有重要的战略意义,对全球的气象有决定性的影响。因此,海洋开发是新技术革命的重要内容之一。海洋物理在海洋研究、海洋开发和海上战争方面很重要。

现代海洋学中有所谓物理海洋学的分支,它研究海洋中的热力学和动力学现象。但是,按物理学家的概念,凡研究海洋中的物理现象的科学统称为海洋物理学,因此人们习惯地把海洋中的声、光、电磁等物理现象以及对它们的规律和应用的研究都列入海洋物理学的范畴。海洋物理学中又以海洋声学和海洋光学的内容最丰富,它们对国防、国民经济影响最大。

一、海洋声学^[1-3]

虽然人类很早就注意到水中声音的现象。文艺复兴时代在达·芬奇就提出过把管子的一端放在水中,从另一端可听到远处船只的声音的设想。渔民也很早就会听鱼的叫声找鱼,用敲击船板的声音驱赶鱼群。但是一般认为,作为一门近代科学,海洋声学是在 1826 年科拉顿和斯特姆在日内瓦湖测量声在水中的速度时开始的。他们敲击一个水下的钟,并同时点燃火药,在远处观察火光并用管子在水下听测钟声,这样测出了水中的声速。1912 年英国大商船“坦塔尼克”号因撞冰山而沉没,为寻找沉船,发明了回声探测器。在第一次世界大战中,为了探测潜艇,发明了声呐。在第二次世界大战中声呐有很大的发展,相应的声在海中的传播规

律的研究也有很大的进展。在深海声道中低频声波可以传播上万公里,这个现象就是在那时发现的。第二次大战以后水声技术有更大的发展,出现了性能更强的声呐,水声技术在海洋开发中也得到广泛的应用。此外,声在海洋中传播的规律、海中噪声场、混响场、海水和海底的声学特性以及声信号散射、反射和起伏的研究都有很大的进展。在海中光波和电磁波衰减都很快,只有声波能在水中传播很远的距离,因此声波就成为水下探测、通信、导航遥控等最有效的手段。

1. 声在海洋中传播的规律

声在海水中传播时有部分能量被海水吸收,转化为热。吸收由于粘滞性的存在,又由于硫酸镁分子的离子弛豫和硼酸盐的离子弛豫产生,海水吸收随频率升高而升高(见图 1)。因此,低频声波在海中传播时吸收小,可以传得很远。

海水的声速随温度、盐度和静压力而变,一般可用下式表示:

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + (1.34 - 0.01T) \times (s - 35) + 0.016z,$$

其中 c 为声速(米/秒), T 为温度($^{\circ}\text{C}$), z 为深度(米)。

由上式可见海水声速随温度、盐度和深度的增加而增加。海水的温度决定于日光的照晒和风浪的搅拌。因此,在一定范围内可以认为水温在水平方向是均匀的,只随深度而变,是分层不均匀的介质。海水声速随深度的变化情况是:从海面而下,一般可以分为四层,最上层由于风浪搅拌,温度是均匀的,声速随深度增加而

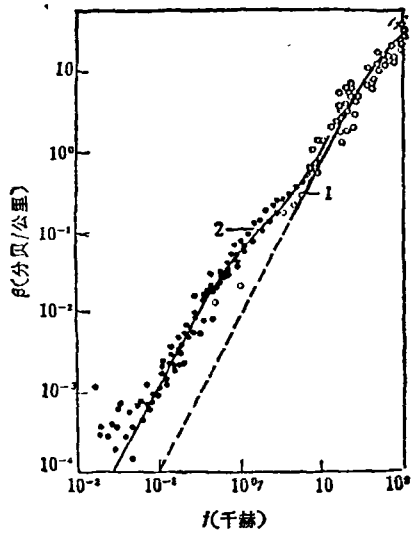


图1 海水的声吸收

略有增加。由于太阳照射的能量大部分为上层水吸收，第二层温度一般随深度增加而降低，但受季节影响较大，称为季节跃层。第三层比较稳定，温度随深度增加而降低较快，声速也随深度增加而降低，称为主跃变层。再向下则海水温度保持不变，称为深海等温层，在这层中由于深度增加因而压力增大，声速随深度增加而增加。在声速随深度增加而降低到声速随深度增加而增加的区域间有一声速最低深度，称为

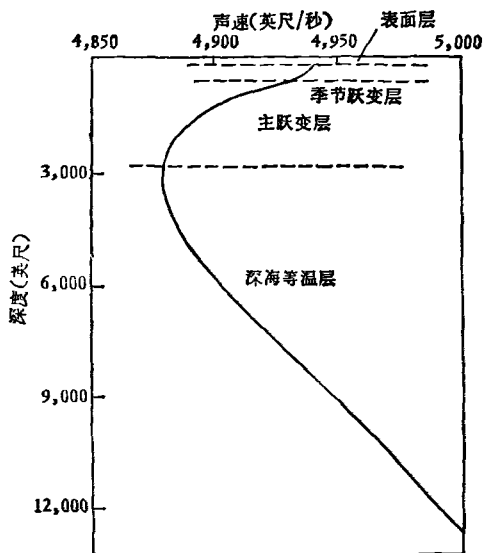


图2 典型的深海声速断面

深海声道轴。图2所示的声速断面是典型的情况，中纬度的大洋中声速断面大体都是这样。

由于声速分层不均匀，声线在传播中发生折射现象。按斯奈尔定律，声线总是向低声速的方向弯曲，如果声源处在声道轴上，则凡是向上方发射的声线总是弯曲向下，回到声道轴，而凡是向下的声线，总是弯曲向上，也回到声道轴。这样一定角度范围的声能就被限制在声道轴上下一定范围内传播，不接触到海面 and 海底，损失很小，可以传播很远的距离。一个20多公斤的炸弹在声道轴上爆炸，它的声音在两万多公里以外还可以收到。深海声道中声线传播示于图3。

如果声源不在声道轴，而在海面附近，则在中纬度海区每隔35海里左右，有一个声能会聚的区域，叫做会聚带。会聚带中的声强比按球面衰减要高出近二十分贝左右。在海中形成近距离亮区、近距离影区和远距离亮区（会聚带）等。处在会聚区距离的目标，比近距离影区更容易探测到。目前利用会聚区实现远程探测已成为一种重要的工作方式。我们的理论预言是，在我国南海表面声速小于底部声速的海区中也存在较强的反转点会聚区，这已为实验所证实。

浅海的声速分布随海区和季节变化很大，再加上海底的影响较大，浅海中声传播比深海传播更为复杂。浅海典型的声速分布是等温层（微弱正梯度）、负跃层、负梯度等。浅海均匀层平滑平均场大体上可分为四个场区，依次为球面衰减区、柱面衰减区、 $r^{-3/2}$ 衰减区和柱面衰减加指数衰减区。负梯度声速分布情况下的声线向下弯曲，使声线以较大角度触及海底，声线碰撞海底次数增加，每次碰撞反射损失较大，声场衰减速度远大于均匀层情况，而且与底质关系甚大。在声速分布存在跃层的情况下，声源与接收器如果分置在跃层上下，则传播情况较差，对探测很有影响。声源与接收器如果同在跃层下，则声信号传播情况就比较好。

浅海声传播中多途效应使得脉冲声信号在传播过程中不断畸变，出现波形的拖散和梳状

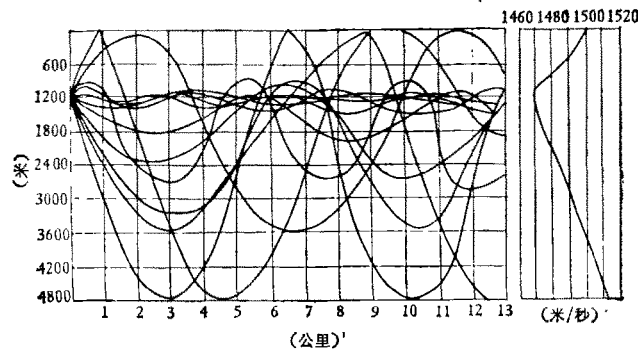


图3 深海声道中的声线图

结构。

分层不均匀介质中的声传播常用简正波方法或射线方法进行分折。最近证明，简正波与广义射线之间满足傅里叶变换关系。由于声速分布的复杂性和声速分布在水平方向也有变化，目前发展了快速数值预报方法，包括射线算法、简正波算法、抛物方程算法、快速声场程序算法和水平射线-垂直简正波算法等。用这些方法，再加上使用计算机，就可以计算出声场变化的规律。

海底对声传播影响很大。在浅海负梯度条件下，海底的反射能力就决定了传播距离的远近。海底反射能力与沉积物的性质、状态和结构有关。通过近年来的研究，人们发现表层沉积物的声速、密度与沉积物的孔隙率和颗粒度有密切关系。孔隙率愈大或颗粒度愈小，则声速与密度就愈低。沉积物的声吸收也与颗粒度或孔隙率有关，当孔隙率和颗粒度在一定数值上时，声吸收有最大值。声吸收与频率一次方成正比。

比较疏松(颗粒度较小)的海底，声速会小于海水中的声速，这种海底称为低声速海底，这里反射能力很差，在负梯度条件下声传播距离很短。颗粒度大，比较密实的海底，声速大于海水中声速，称为高声速海底，这儿反射能力较强，利于声的传播。

由于波浪、湍流及航船的运动，地震、生物的发声以及海水分子的热骚动，海洋中不断有噪声产生。在低频，噪声的频谱强度随频率升

高而降低。50千赫以上的噪声主要由分子热运动决定。几百赫与几千赫之间的噪声是风浪产生的，与风级和海况有关。风噪声级 L 与风速 u 有对数关系：

$$L = A(f) + 20n(f) \lg u,$$

其中 $A(f)$ ， $n(f)$ 为频率的函数， u 为风速。海洋噪声谱见图4。

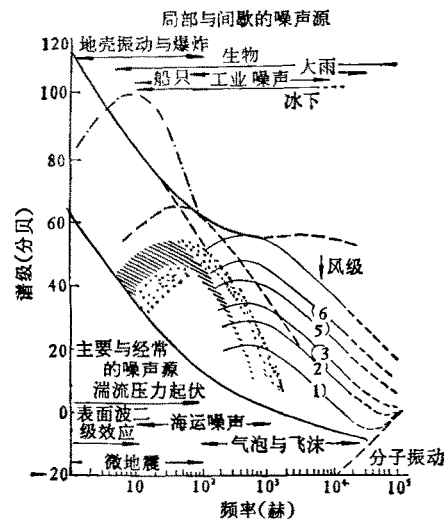


图4 海洋噪声谱图

海洋动物在运动或摄食时会发出声音，不少海洋动物还会发出不同的叫声，海洋动物的叫声是人们识别海洋动物，研究它们的生态的一种手段。

2. 水声的应用

水声在国防上，特别是在水下战争中有重要的应用。潜艇在水下有很好的隐蔽性，用无

线电波,光波很难探测。若在水下利用声波的反射,则可以探测潜艇、水雷和其它水下障碍物。利用声波致导的鱼雷和利用声引信触发的水雷是水下攻击的重要武器。潜艇之间的通信主要也靠水声。

在海洋开发和利用中,声波也是重要的手段。利用海底对声波的反射,测量声波往返的时间可以测量海底的深度。用新型的多波束测深仪在船前进的过程中可以测得一定宽度的大片海区的多个深度,并自动画出等深线海图。利用声波的反射和散射,可以探测海中的鱼群,还可以调查海中鱼类和浮游生物分布的规律。利用低频声波向下发射,声波穿透海底,并由海底沉积物分层界面反射回来,可以判断海底的分层结构。利用极低频率的声波,可以穿透几公里深的地层,得到上地幔的反射,能观察大洋底板块的活动规律。

利用声波可以在水下定位。人们曾在水下布放多个带有声发射器的中性浮子,这些沉到大洋声道轴上达到平衡。浮子随海流飘动,并按固定时间间隔发射声信号。从大西洋中几个岛上把水听器放到声道轴,收听浮子发来的信号。这样可以确定浮子在不同时刻的位置,得出深层海流图。这样深处的海流情况是过去无法测出的。

在潜器进行水下寻物或水下施工等活动中,定位是很重要的。通常在海底放几个声信标,由潜器发出声信号,声信标收到信号后立即发出回答信号。根据各信标回答信号到达的时间,可以定出潜器的位置。

利用低频声波穿透海中的水团,可以得到海水状况和运动的许多信息。近年来发展了所谓海洋声层析法。在被测海域的边上,放置多个声发射接收器。每个发射器发射声信号,声波穿透被测海域,到达多个接收器。从单程传播的时间可以计算出传播路径上的海水温度。利用两点间声波往返时间差,可以测出海水流速的分量。如果在各个点都发射信号,则在各接收点都接收声信号。把多个路径上的传播时间和往返时间差送入计算机进行求逆运算,可

以得出这个洋区的温度和流速的分布。这种方法和在医学中的X射线层析方法相仿。目前人们用这种方法可以测出 300×300 平方公里范围内海洋中海水的运动,特别是中尺度涡的运动。继续发展这种技术,可望能观测整个洋盆的水中“天气图”。

二、海洋光学^[4-7]

海洋光学在十九世纪开始受到海洋学家的注意。十九世纪初有人用透明度板目视测定海水对自然光的垂直衰减。十九世纪末,有人用光电管测量海水中的辐照。由于海洋生物研究和水产的需要,人们开始研究海洋生物与辐射能的关系,并发展了各种海洋光学仪器,对海洋中的光学性质进行测定。

第二次世界大战以后,由于水产、水下观察和海洋开发的进展,人们开始对海中光现象进行全面调查,并开展海洋光学基本理论——海洋辐射传递理论的研究。根据这方面基础研究,可以建立海水各种光学参数的相互关系、水下对比度传输理论、海色理论模式以及海洋光学基本测量方法等。

自六十年代以来,近代光学技术如激光与红外技术、光谱技术,光学遥感技术等在海研究及探测中发挥了很大的作用,海洋光学有了先进的技术基础。近年来,海洋光学遥感有长足的进展,在卫星上用光学和红外方法可以大面积观测海洋,这是海洋观测方法的革命。与之相应,激光束传输、海洋大气系统的辐射传输、图象传输等研究也不断发展。水下光学技术,如水下电视、水下激光电视和水下激光雷达等技术也发展很快。

1. 海洋光学的基本问题

海水光学性质可以分成两类,一类是海水固有光学性质,它仅由海水本身物理性质决定;另一类为表观光学性质,它决定于海水固有光学性质及海中辐射场分布。

(1) 海水固有光学性质

海水对光的散射与吸收造成光的衰减。海

水的衰减指数随波长有明显的变化，称为衰减光谱分布。蓝绿光是海水的透射窗口。在清澈的大洋中，透射窗口在波长 480 纳米附近。沿岸水含有较多的悬浮颗粒及黄色物质，透射窗口一般在 530 纳米附近。图 5 为海水体积衰减系数随波长变化的曲线。从原子和分子结构来看，海水的光谱衰减曲线不存在精细结构，精密的实验也证明，海水不存在窄谱段的窗口。

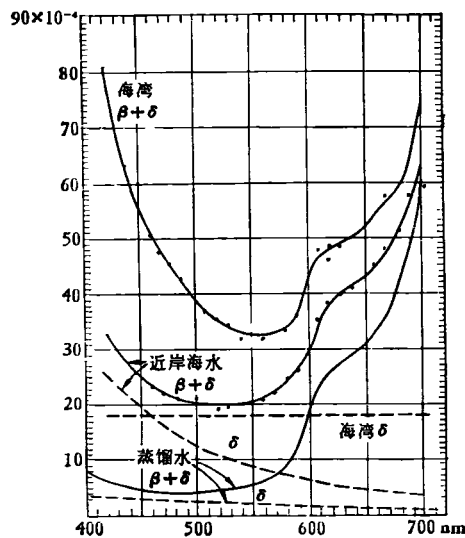


图 5 海水体积衰减系数与波长的关系

透明度是表示海水垂直衰减及能见度的一个度量。海洋学中海水透明度是指当 ϕ 30cm 的白色圆板垂直沉入水中时，能看到的最大深度。透明度与海水光衰减指数有固定的关系。

海水的光散射，是指由水分子的瑞利散射、悬浮粒子的 Mie 散射以及透明物质的折射的过程。水中某些物质分子与光子发生的非弹性碰撞产生的荧光和喇曼散射，既是吸收过程，又是散射过程，并有谱线位移。在这些机理中，透明物质和大粒子产生的散射是主要的。根据 Mie 理论，散射与波长关系不大。

(2) 海水表现光学性质

日光照射到海面，大部分能量在水下一米内被吸收。图 6 是海中日光辐射率的分布曲线。在浅处，分布曲线有显著的尖峰，且位于日光的折射线方向。随着深度增加，最大值逐渐

物理

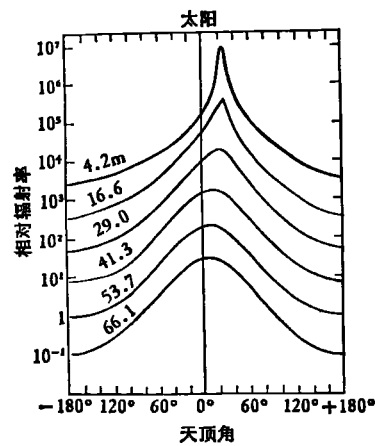


图 6 海中日光辐射率分布曲线

移向天顶。约经 20 个衰减长度后，就达到对称的极限分布，即渐近分布。

海中向下辐射度 E_d 和向上辐射度 E_u 及其比值 $R = \frac{E_u}{E_d}$ (即辐射度比或反射比)，可以用来进行大洋水的光学分类。测量海面的向上辐射是光学遥感方法的基础。关于海面向上光谱辐射与海水物理性质关系的研究，已取得了重要的结果。

海水的颜色，随海区的不同，从深蓝到碧绿，从微黄到棕色。水色主要取决于水分子及悬浮物的光学性质。清澈的大洋水，悬浮粒子少，主要存在瑞利散射，散射系数与波长四次方成正比，故海水呈蓝色。近岸水中，悬浮颗粒多而且大，水中含有溶解的黄色物质，故海水呈浅蓝色或绿色。在许多情况下，悬浮物的颜色决定水色。红海之所以得名，是由于一种赤褐色的海藻大量繁殖之故。

关于水中的能见度，海水衰减大，散射强，所以水中视程约为大气中的 1/1000。在海水中随着距离的增加，目标与背景的面辐射强度差迅速减少，对比度变差。随着准直光衰减系数、漫射光衰减系数之和与距离乘积的增加，对比度指数下降。我们定义对比度下降到 1/e 的观察距离为对比度衰减长度。在清洁的海水中，对比度衰减长度为 20 米。沿岸带衰减长度为 5 米。混浊水中衰减长度为几个厘米。大多

数自然条件下水平观察视程为4个衰减长度。

当涉及到图象在水中传输质量(如图象分辨率)时,则引入点的扩展函数 $h(x, y)$ 及其傅里叶变换光学传递系数 $H(u, v)$ 。

海洋光辐射传递理论是光在海水中传播的最基本的理论。光辐射在海洋中传播是一种散射与吸收的复杂过程,海水散射函数复杂,又属于强散射介质的多次散射过程,因此计算起来很困难。如果假定介质的特性只随深度而变,又考虑到能量的平衡,包括光能在这体积元中的衰减和光能从周围散射到这个体积元,可以推导出亮度随距离变化的规律。它是一个微分-积分方程,常称作辐射传递方程。一般要用蒙特-卡罗方法求解。

在光学遥感中,除海水中的辐射传递以外,还要涉及大气中的辐射传递和海气交界面的光传递等问题。

2. 海洋光学的应用

海洋光学的应用目前有两大方面。一方面是光学遥感,由于在海水中可见光有一定的透明度(几米或几十米),因此可以取得一定深度的信息。红外线被海水强烈吸收,只能显示海面温度。海洋光学遥感主要使用多光谱扫描成像的办法,可以了解河口与海岸变迁、沉积分布、海陆分界线、潮间带、浅海水底地形,可以进行水团分析,可以测量内波、沿岸流、上升流、表面温度分布、初级生产力、叶绿素分布,可以进行污染监测、鱼群监测等。由于快速、大面积观测等优点,光学遥感已成为目前海洋观测的最重要的方法。

激光遥感是引人注目的新方向,目前尚在实验阶段。

应用的另一方面是水下观察,包括水下照相、水下电视、水下激光电视、水下激光雷达等。

三、海洋电磁学

海洋电磁学目前最受人们注意的研究内容大体可以分成几个方面。

1. 海洋电导率的研究和海洋电磁场的研究,后者对于研究海洋地质有重要的关系。

2. 电磁波在海水中的传播。电磁波在海水中衰减很厉害,但是如果用频率很低的电磁波(几千赫),并使用大功率的发射机,则可以与深度在几十米以内的潜艇通讯。

3. 水下电磁探测技术。在水下沉物很多的情况下,近距离用电磁方法探测可以有较好的效果。较大的金属物体(如潜艇)也可以在低空用磁异常方法探测。

4. 利用微波的反射、散射和辐射对波浪、海水温度、海流、内波、污染等进行观测。微波遥感已成为海洋遥感的重要内容。微波遥感不受云层的影响,这是比光学和红外遥感优越的地方。

参 考 文 献

- [1] Л. М. 布列霍夫斯基主编,山东海洋学院海洋物理系,中国科学院声学研究所水声研究室译,海洋声学,科学出版社,(1983), 59—128.
- [2] 汪德昭、尚尔昌,水声学,科学出版社,(1981), 1—68.
- [3] 关定华,声与海洋,海洋出版社,(1982), 12—57; 120—210.
- [4] A. Ivanoff, Introduction à L'océanographie. Propriétés Physiques et Chimiques des Eaux de Mer, Librairie Vuibert, (1975), 323—507.
- [5] N. G. Jerlov, Optical Oceanography, Elsevier Publ. Co., (1968), 1—45
- [6] S. Q. Duntley, *J. Opt. Soc. Am.*, **53**, (1963), 214—233.
- [7] N. G. Jerlov and E. Steemann Nielsen, Optical Aspects of Oceanography, Academic Press, (1974), 56—72.