

中国现代海洋科学丛书

# 海洋物理学

OCEAN PHYSICS

刘智深 关定华 主编

山东教育出版社

中国现代海洋科学丛书

# 海洋物理学

OCEAN PHYSICS

刘智深 关定华 主编

山东教育出版社



中国现代海洋科学丛书

**海洋物理学**

刘智深 关定华 主编

---

**出版者:** 山东教育出版社

(济南市纬一路 321 号 邮编:250001)

**电 话:** (0531)82092663 **传真:** (0531)82092661

**网 址:** <http://www.sjs.com.cn>

**发 行 者:** 山东教育出版社

**印 刷:** 山东新华印刷厂

**版 次:** 2004 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

**印 数:** 1—2000

**规 格:** 787mm×1092mm 16 开本

**印 张:** 24.25 印张

**插 页:** 1 插页

**字 数:** 393 千字

**书 号:** ISBN 7-5328-4798-5

**定 价:** 41.50 元

---

(如印装质量有问题,请与印刷厂联系调换)

# 前 言

海洋物理是研究声波、光波、电磁波等与海洋相互作用机制、在海洋中传播规律以及利用它们探测海洋的一门科学,因此可分为海洋声学、海洋光学、海洋电磁学等。

第一次世界大战中,由于潜艇在水下作战的需要而研制出声呐,从而发展了声波在海洋中传播的理论。在不同海区、不同季节和昼夜使用声呐时,发现声呐的作用距离与海洋水文要素、波浪、海流、内波、海底地质地貌、海洋环境噪声和海中浮游生物等有密切关系。因此,20世纪50年代以后,逐渐形成了研究声波在海洋中传播的规律和利用声波的研究探测海洋的新的学科分支——海洋声学。

海洋声学是海洋学和声学的边缘学科,基本内容包括三方面:① 声在海洋中的传播规律和海洋条件对声传播的影响,主要包括不同水文条件和底质条件下的声波传播规律,海底对声波传播的影响,海水对声的吸收,声波的起伏,散射和海洋噪声等问题。② 利用声波探测海洋。③ 海洋声学技术和仪器。

海洋中声的传播和声速的分布 声波能在海洋中远

距离传播,但在传播的过程中,海水的温度分布和盐度分布、海面和海底的状况、海水的运动、海中包含的各种不均匀体如气泡和生物等,都能产生很大的影响。

海水由于受太阳辐射加热和风力搅拌等的影响,其温度的垂直分布一般呈分层结构。就大洋来说,由海面向下,可依次分为表面混台层、季节跃层、主跃层和深水等温层。加上压力的影响,使海洋中的声速呈垂直分布。从声速最低的地方发射的声波,由于上下层的声速不同而发生折射,描写声波传播途径的声线,总是弯向声速最低的地方。大部分声波在海水中经过这样的往复弯曲折射,而不与海面和海底接触,故能量损失很小,这种现象称为声道现象。低频声波在声道中能传播到很远的地方,故可以利用声道的这种特性传送失事的飞机和船只的呼救信号。监测水下的地震、火山爆发和海啸等。在声道中,若声源和接收器不在声道轴附近,而距海面较近时,接收器离开声源沿水平方向移动,每隔一定距离便出现声强较高的区域,称为聚区。它是声道中自声源辐射出的许多相邻声线在海面下反转点相交的包络区。大洋中的声能会聚区大致每隔 30~40 n mile 出现一次,其强度逐次减弱。

风浪的搅拌,使表层海水形成等温层。其中的静压力,使声速随深度的增加而略有增加。等温层内自声源出发的声线总是弯曲向上,经海面反射而向前传播,也可以传播到较远的地方,称为表面声道。在无风浪搅拌的条件下,表层海水经日光照晒,往往出现上层的温度和声速都比下层高的情况,使声速呈负梯度的垂直分布。在这种情况下,声波传播的曲线,总是弯曲向下,在声能达不到的地方产生声影区。由此可见声波几乎传不到表层。另外,如果海比较浅,则声线会碰到海底。由于海底的反射损失大,声能衰减很大,因此不能传播得很远。

海底对声波传播的影响很大。声在浅海中的传播特征的重要因素是海底的反射本领。因为海底沉积物的密度和声速一般都随深度而增加的缘故。沉积物中的声速和声吸收系数,与其颗粒度和孔隙率有关。沉积物对声的吸收,还随声波频率的增加而增加。海底对声波的反射损失,与海底物质的密度、声速和声波的入射角有关。一般说来,海底的密度愈大,声速愈高,反射损失愈小;声波频率愈高,海底的反射损失愈大。

海水对声的吸收、散射和反射 声波在海水中传播时,由于介质的热传导和粘滞性,使部分声能被吸收而转化为热能。在声波作用下,水分子的结构有从比较松散变得比较紧密的弛豫过程,使海水对声的吸收量增加。海水中硫

酸镁的离子的弛豫过程,对几千赫兹到几十万赫兹的声波有很大的吸收作用。硼酸盐分子的弛豫过程,对 1 kHz 附近的低频声波的吸收有决定性的作用。对频率更低的声波而言,其声能的衰减是由于湍流引起的声散射所造成的。

海水使声波在传播过程中衰减的效应,可用声衰减系数来表示,海中的气泡、海洋生物和悬浮体,都会散射和反射声波。散射或反射系数与物体的大小、介质和结构有关。不同的物体有不同的散射频率响应。海中存在由生物体构成的、能强烈散射声波的深海散射层,它们遍布各大洋,往往分成几层,其深度随昼夜和季节不同而变化,这反映了生物的趋光性。海底底质的不均匀和不平整,也会增加声波的散射。

声波受波动海面的反射,或者穿过温度呈微观不均匀水团时,其信号强度和相位都会发生起伏。海洋内波对声的传播影响很大,会引起声波大幅度的缓慢起伏。

**利用声波探测海洋** 利用海洋水文要素对声传播的影响,可以反推海洋的特性,这是海洋声学的重要课题。海水中的温度、盐度、压力和流速,都影响着海水中的声速。声波在海流中传播时,顺流则声速增加,逆流则反之。利用这种现象,在两定点之间相对发出声信号,测量声波到达的时间差,就可以求得海水的流速。在若干点之间进行这种测量,可以监视海洋中的中尺度涡等现象,这是声学遥测的重要方法,称为海洋声学层析术。水中的悬浮体,随着水流而运动,故应用声学技术观察这种散射体的运动,就可以了解海水的运动情况。

利用这种方法,还可以观察内波的规律,了解沉积物的搬运情况,也可以测量海水的流速。此外,利用声波起伏规律来研究内波谱的方法,已很受重视;利用深海散射层的散射频率响应,可以进行深海生物的区域划分,其结果和一般的区域划分一致;利用鱼类对声波的散射和反射,可以探测鱼群和了解鱼类资源的分布。

由波浪产生的 500~5 000 Hz 的噪声,与海面的风级和海况有关。利用此频率的噪声,可以监测海面的风级和海况。利用海啸产生的水下噪声,可以预报海啸。海洋生物发出的声音,与其种类和生活状态有关。监听这种声音的特征以区分生物的种类,可以掌握其生活规律,为研究渔业资源提供信息。此外,有可能利用声信号控制海洋生物的活动,以满足人类的需要。

在海洋开发中,声技术是勘探海底唯一有效的手段,广泛应用的地震勘探仪便是声技术应用的一例。海底的界面不平整,底质内部的颗粒大小不一,以

及分层和水平方向的不均匀性,都影响着声波的散射和反射。使用高频窄水平波束的侧扫声呐,可以得出海底凸出部分对声波的强烈散射和凹下部分的声阴影区所构成的地貌声图。

海洋调查和开发中的声学技术 包括测量技术、信息传递和控制技术。它与最新的微电子学、微计算机和换能技术结合,广泛用于水文、地质、地貌和生物等领域的测量,并用于水下定位、导航、通信、遥控、遥测等各方面,在海洋调查和海洋开发中起着重要的作用。

对于海洋光学来说,它是海洋物理学的分支学科,又是光学的分支学科。早在 19 世纪初,就有人用透明度盘目测自然光在海中的铅直衰减。从 19 世纪末开始,海洋学家才比较注意研究海洋的光学性质,并结合海洋初级生产力的研究,用光电方法测量海洋的辐照度。20 世纪 60 年代末期以后,随着近代光学、激光、计算机科学、光学遥感和海洋科学的发展,海洋光学得到了进一步的发展,特别是结合信息传递的要求,用蒙特卡罗方法较好地解决了激光在水中的传输、海面向上光辐射与海水固有光学性质之间的关系等问题,使海洋光学从传统的唯象研究转入物理的和技术的研究。

海洋光学的基础研究中包括实验和理论两方面。实验方面主要运用现场和实验室的测量方法进行海洋光学性质的研究。可见光波段是能透入海中的电磁波的主要波段,其传播规律决定于海洋水体的散射和吸收等性质。各海区的光学性质和海洋水体的组分密切相关,因此海洋光学调查是研究区域海洋光学性质的主要手段。在理论研究方面,海洋辐射传递理论是海洋光学的主要理论基础,从辐射传递方程出发,主要运用随机模拟方法和蒙特卡罗法,建立各种辐射传递模型,包括分层结构海洋水体、均匀海洋水体、海洋—大气系统、窄光束水中传输等模型,再选择水质稳定的海区进行海中辐射场的精确测定,研究其变化规律。

海面光辐射研究 主要研究日光射入海洋后,经过辐射传递过程所产生的、由海洋表层向上的光谱辐射场。它是光学遥感探测海洋的主要信息来源,是建立光学海洋遥感模型的重要依据。

水中能见度 主要研究水中的视程和图像在水中的传输问题。由海洋辐射传递方程出发,可导出水中对比度传输方程和水中图像传输方程,用以研究水中的图像系统。

激光与海水的相互作用 主要研究激光在水中受到的散射、吸收及其所遵循的传输规律。20 世纪 70 年代以后,对海水激光荧光和海水受激拉曼散

射的研究,为激光测水深、海水的化学分析和海洋的温度、盐度按深度的分布,打下了基础。

**海洋水体的光学传递函数** 用线性系统理论研究海洋水体对光的散射和吸收的过程。主要研究海水点扩展函数、海水光学传递函数与海水固有光学参数的关系。它是建立海洋激光雷达方程和水中图像系统质量分析的重要依据。

海洋光学与物理海洋学的研究密切相关。测定海水的光学性质,为研究海流、上升流、海洋锋、水团、海洋细微结构等提供了另一种有效的手段;随机海面的光学研究,为遥测海浪方向谱建立了物理模型,并为现场测定海浪要素提供了快速而又有效的手段。海洋生物初级生产力的研究和调查,与海中辐照度的分布、海水辐射能密度分布、海中辐射能的储存等有直接的关系,例如辐照度为海洋初级生产力方程的主要参数。探测海洋的光学遥感传感器的波段、视场角和动态范围等参数,都要根据海面光谱辐射的数据来确定。海洋辐射传递理论,是水色光学遥感方法的基础。海洋光学的发展目的与近代光学的发展密切相关;光电子学方法是海洋光学测量的主要手段,激光技术的发展,例如可调谐激光、水中新型蓝—绿激光、高时间分辨率激光技术等,已成为海水激光光谱研究的重要手段,是发展海洋探测激光雷达的技术基础。近代光学信息处理和信息传递理论,为海洋中光信息传递的研究及随机量的统计分析研究奠定了基础。

海洋物理学中不少课题仍有待于深入研究的发展,但它在不断引入新方法、新技术、加强应用研究后,在海洋探测、海洋开发等方面将展示出更加美好的前景。



# 总序言

我承蒙大家的推崇来担任《中国现代海洋科学丛书》的总主编,感到很荣幸。同时我作为为之奋斗 70 多年的老海洋科技工作者,看到这套丛书出版自然感到由衷的高兴。《中国现代海洋科学丛书》共 9 部:《海洋生物学》、《海洋物理学》、《物理海洋学》、《海洋化学》、《海洋地质学》、《海洋环境科学》、《海洋工程》、《海洋经济学》和《中国海洋学史》。以上各部学术专著,系统地全面地概述了各个学科 100 年来,特别是新中国成立后 50 年学科建设和发展及其学术研究成果,展示了 21 世纪面临的前沿问题,探讨了解决的途径。经著名专家、著名学者评审,称它们“既有理论创新意义,又有指导实践的实用价值。达到国际先进水平”。各部专著的主编都是我国海洋科学有关方面造诣较深、颇有建树的知名专家学者。这些专著,是他们致力于海洋科研和实践几十年的一个总结,也是留给后人的一笔宝贵财富。

目前,在人口膨胀、资源短缺和环境污染日益突出的背景下,世界上有 100 多个沿海国家把开发海洋作为基本国策,作为加快经济发展、增强国家实力的战略选择。

近 20 年来,沿海各国加快了海洋经济发展的步伐。1980 年世界海洋产值约 3 400 亿美元,到 1990 年达到 6 700 亿美元,10 年翻了将近一番。20 世纪 90 年代以来,世界海洋经济产值平均每年的增长速度为 11%。海洋经济已日益成为世界各国国民经济的重要组成部分。根据这种发展趋势,一些有识之士普遍认为:21 世纪世界将进入海洋开发新世纪。在新世纪之初出版这套丛书,它的重要意义是可想而知的:它不仅将推动我国海洋科学理论的研究,而且必将促进我国海洋科学和海洋经济的发展,促使人们遵循客观规律,更加健康地开发海洋。

开发海洋必须坚持资源开发利用与生态环境保护同时并举,实现可持续发展战略。这是当代人类面临的双重历史使命,是人类经历了无数痛苦的磨难、总结正反两方面的经验得出的,应当成为人类海洋资源开发与保护必须遵循的规律。海洋是浩瀚的,它的面积占地球表面积的 70% 以上,海洋资源极其丰富,是资源的宝库、生命的源泉。但实践还告诉我们,海洋资源也是有限的,并不是取之不尽、用之不竭的,海洋环境的承载力也是有限的。众所周知,对海上倾废造成了海洋污染,无限制的捕捞造成了渔业资源枯竭,二氧化碳、甲烷等温室气体大量排放造成了全球变暖,这些教训难道还不应该汲取吗?

海洋开发与保护必须依靠科技进步。由于海洋环境的特殊性,人的天然器官不能适应海洋开发的需要,必须依赖科学技术;尤其是现代海洋开发,没有现代先进的技术装备,就不能进行大深度和高层次的海洋开发。美、英、日、法国相继提出优先发展海洋科学基础理论和高新技术,以增强其开发管理海洋的能力。世界临海各国均把合理开发利用海洋作为求生存、求发展的战略决策,加大了海洋科技和资金的投入。我国是海洋大国,海洋开发是我国今后的主战场。为此必须加强海洋科技的投入,集中优势力量开发重点基础理论研究 and 应用基础研究,充分提高我国海洋科学的整体水平和国际竞争力;突出重点,以近海和大陆架区域研究为主,适度向大洋拓展;抓住机遇,融入海洋科学全球化,积极参加全球化研究;加大经费投入,建立国家海洋科学创新的思想库和人才库,把“青岛·中国海洋科学研究中心”建设好。

海洋是全球来往的通道,是资源的宝库,是兴国的发祥地,是人类新的生存空间。把我国新世纪发展战略纳入到海洋强国的轨道上来,是顺乎潮流的强国之道。沿海国家的政治、经济、军事无可选择地与海洋联系在一起,国家的兴衰荣辱也无可选择地与海军力量联系在一起。海洋和海军实际上成了国家战略问题。目前世界正处于和平与发展时期,我国将利用这个国际环境进行现代化建设。但世界并不太平,进入 20 世纪 90 年代以来,世界上影响最

大、范围最广又难以解决的热点多发生在海洋上或沿海地区。《海洋法国际公约》生效后,世界各国围绕海洋权益的争夺不断升温,我国海洋权益也面临着严峻挑战,存在着资源被掠夺、岛屿被侵占、国土被分割以及多元化威胁的局面。所以,海洋强国战略事关国家的主权和权益、经济和安全,关系着民族的兴衰。海洋活动本质上是开放性、商业性的活动,它与市场经济、与经济全球化有着天然的联系。我们要利用海洋加强与世界各国的贸易往来和文化交流,促进海洋经济发展。同时,要加快海军现代化建设,改进武器装备,使我国海军成为海防安全的坚强柱石。

我们这套丛书,虽然经过众多专家学者精心努力,但肯定还会有缺点和错误,有一些不尽人意的地方。我们期盼着广大读者提出宝贵意见和批评,也希望就不同学术观点展开讨论,更希望看到更高水平的海洋科学论著问世,让我们为人类海洋事业不断前进不断做出贡献!

山东教育出版社是“全国优秀出版社”,“出精品、成系列、重积累、见长效”是该社的出版特色。这次他们以极大的热情、最高的标准、百倍的努力来策划、编辑、出版《中国现代海洋科学丛书》,付出了很大的心血和资金。值此丛书出版之际,我谨代表编委会对他们的敬业精神表示钦佩,并致以衷心的感谢。

学 星 奎

2004年4月18日

## 丛书编委会

顾 问 宋 健  
总 主 编 曾呈奎  
副总主编 孙 斌 张正斌  
编 委 (以姓氏笔画为序)  
王 涛 刘智深 孙 斌 杨子赓  
邹景忠 张正斌 张培军 侍茂崇  
郑一钧 徐鸿儒 曾呈奎

## 本册编委会

主 编 刘智深 关定华  
编 委 (以姓氏笔画为序)  
包青华 刘智深 关定华 宋小全  
张亭禄 殷杰羿



▲ 丛书编委会部分成员合影,前排左起第四位为中科院资深院士、丛书总主编曾呈奎,第二排右起第二位为本册主编之一刘智深。



第二节	海水的声吸收 .....	(31)
第三节	海面的声散射 .....	(34)
第四节	海底声学特性 .....	(35)
第五节	海洋内波 .....	(36)
第六节	海洋内部的不均匀性对声波的影响 .....	(37)
第四章	深海声传播 .....	(40)
第一节	深海声传播的条件 .....	(40)
第二节	深海声道中的声传播 .....	(41)
第三节	会聚区声场 .....	(44)
第四节	深海混合层声道 .....	(48)
第五节	声道水平方向变化的影响 .....	(50)
第五章	浅海声传播 .....	(54)
第一节	浅海声传播条件 .....	(54)
第二节	海底在声传播中的作用 .....	(57)
第三节	均匀层浅海的声传播 .....	(60)
第四节	浅海表面声道声传播 .....	(63)
第五节	浅海负梯度声传播 .....	(65)
第六节	负跃层声传播 .....	(67)
第七节	浅海声场的数值计算方法 .....	(68)
第八节	环境有水平变化时的浅海声传播 .....	(71)
第九节	内波孤子对声传播的影响 .....	(73)
第六章	海底声学特性及其反演 .....	(75)
第一节	海底沉积层 .....	(75)
第二节	海底反射和反射模型 .....	(80)
第三节	海底反射损失的实验研究 .....	(84)
第四节	海底反射损失预报 .....	(87)
第五节	海底的声散射和声吸收 .....	(89)
第六节	声散射场反演海底分层介质参数 .....	(91)
第七章	海洋界面不平整性和介质不均匀性的声散射 .....	(92)
第一节	不平整表面声散射 .....	(93)
第二节	波动海面的反射和散射 .....	(97)
第三节	不平整海底的声反射和散射 .....	(102)
第四节	海洋中声散射层的散射 .....	(106)

第八章 随机海洋中的声传播 .....	(111)
第一节 海洋的随机不均匀性 .....	(111)
第二节 随机海洋中声传播起伏 .....	(119)
第三节 内波和中尺度涡旋对声传播的影响 .....	(125)
第四节 声的多途传播 .....	(129)
第九章 海洋中的噪声场 .....	(131)
第一节 海洋中的噪声源 .....	(131)
第二节 海洋环境噪声场基本特性及研究方法 .....	(132)
第三节 海洋环境噪声场谱特性 .....	(135)
第四节 海洋动力学噪声场谱特性和噪声场预报 .....	(137)
第五节 舰船辐射噪声谱特性 .....	(140)
第十章 声场的数值计算方法 .....	(144)
第一节 数值计算方法引论 .....	(144)
第二节 射线方法 .....	(145)
第三节 波数积分方法 .....	(149)
第四节 简正波方法 .....	(151)
第五节 抛物方程方法 .....	(158)
第六节 有限差和有限元方法 .....	(161)
附录:1. 常用的射线程序 .....	(163)
附录:2. 快速场程序 .....	(164)
附录:3. 简正波和耦合简正波程序 .....	(164)
附录:4. 常用抛物方程程序 .....	(165)
附录:5. 有限元、有限差及混合方法的计算程序 .....	(167)

## 第二篇 海洋光学

第十一章 海洋的光学性质 .....	(171)
第一节 引言 .....	(171)
第二节 海洋中的辐射场 .....	(175)
第三节 海洋光学中的辐射度量参数 .....	(179)
第四节 海洋的固有光学性质 .....	(183)
第五节 海洋的表观光学性质 .....	(189)
第六节 海水类型的分类 .....	(191)





第十二章	光辐射与海表面的相互作用 .....	(194)
第一节	引言 .....	(194)
第二节	海—气交界面的反射与折射 .....	(196)
第三节	海面离水辐亮度 .....	(201)
第十三章	海洋固有光学性质与表观光学性质的关系 .....	(204)
第一节	引言 .....	(204)
第二节	海洋固有与表观光学性质之间关系的模型 .....	(205)
第三节	不同散射函数形式的 $K_d$ 与 $a$ 、 $b$ 关系 .....	(208)
第四节	$G(\mu_0)$ 与体积散射函数形式的关系 .....	(211)
第五节	不同散射函数形式的水中反射 .....	(214)
第十四章	海洋辐射传递理论 .....	(216)
第一节	引言 .....	(216)
第二节	海洋两流辐射传递理论 .....	(218)
第三节	海洋辐射传递的辐亮度模型 .....	(221)
第四节	海洋辐射传递的傅立叶光学方法 .....	(225)
第十五章	水中能见度 .....	(232)
第一节	引言 .....	(232)
第二节	水中对比度传输 .....	(234)
第十六章	海面向上光谱辐射及其海洋光学模型 .....	(239)
第一节	海面向上光谱辐射 .....	(239)
第二节	海洋固有光学参数的模型 .....	(241)
第三节	海面上遥感反射比模型 .....	(246)
第四节	海中有关参数的反演与应用 .....	(250)

### 第三篇 海洋探测技术

第十七章	海洋声探测技术和仪器 .....	(255)
第一节	海洋声学仪器的基本原理和分类 .....	(255)
第二节	声换能器和基阵 .....	(256)
第三节	海深和海底地形测量仪器 .....	(257)
第四节	海底测量仪器 .....	(262)
第五节	海洋声层析术和海水运动测量仪器 .....	(266)
第六节	大洋气候声学测温(ATOC) .....	(270)
第七节	水中物体观测系统 .....	(272)