

上层海洋动力学

[美] O. M. 菲利普斯 著

科学出版社



200354570

13264



00291101

上层海洋动力学

【美】O. M. 菲利普斯 著

徐德伦 李心铭 译

余宙文 李心铭 校

S215.1/23



科学出版社

1983

内 容 简 介

本专著论述上层海洋中各种形式的海水运动的动力学过程, 讨论运动的成因、维持运动的内部因素和外部因素, 综述迄今已得到的这一领域的研究成果。特别是对于上层海洋中以波动形态出现的运动, 书中有着非常详细的论述。全书共分六章, 在介绍制约运动的动力学方程以及波动的一些普遍规律之后, 从第四章起分章详细讨论海洋表面波、内波和海洋湍流的有关问题。本书基本上不直接涉及诸如预报等应用方面的具体技术问题。

本书可作为有关领域研究生的教学参考书, 亦可供动力海洋学方面的研究工作者参考。特别是对于海洋中波动的动力学研究, 这是一本必不可少的参考文献。

O. M. Phillips

THE DYNAMICS OF THE UPPER OCEAN

Syndics of the Cambridge University Press

Second edition 1977

上 层 海 洋 动 力 学

[美] O. M. 菲利普斯 著

徐德伦 李心铭 译

余宙文 李心铭 校

责任编辑 张立政

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1983 年 6 月第一次印刷 印张: 11

印数: 精 1—950 插页: 精 2

平 1—850 字数: 249,000

统一书号: 13031·2259

本社书号: 3089·13—17

定 价: 布脊精装 2.30 元
平 装 1.70 元

为中译本序

我高兴地欢迎本书中译本的问世，并希望它对中国海洋界的同事和大学生们有所裨益。对科学问题的了解是我们大家共同关心的；将这种了解加以应用会有着许多实际的利益。虽然本书很少涉及实际问题，但是书中所论述的动力学原理和物理学原理可以应用于许多重要的领域，如波浪预报、海洋声学 and 海洋工程等。目前，尚有许多科学问题未得到完全的了解，我个人觉得这些问题既是对我们的挑战，又是引人入胜的。我希望能与中国读者共同分享科学发现的愉快。

我最衷心地感谢译者余宙文、徐德伦和李心铭，他们作了艰苦细致的翻译工作，由于他们的努力，本书的中译本得以出版。

O. M. 菲利普斯

1981 年于巴尔的摩

译 者 的 话

近数十年来,海洋科学得到了飞速的发展。动力海洋学是其中的一个重要分支,它研究的对象基本上属于海水机械运动的范畴,这种运动与海洋中的各种物理过程、化学过程、生物过程、地质过程等,都有着重要的影响,有着密切的联系。而上层海洋中的动力学现象在整个海洋的动力学现象中占据着决定性的地位,因为海洋和大气间的动量交换、质量交换、热量交换以及其它各种形式的能量交换主要地都是通过上层海洋的动力学过程来实现的,而且下层海洋中的各种动力学过程也是在上层海洋的动力学过程驱动之下而形成的。所以对上层海洋动力学进行广泛深入的研究对了解海洋和利用海洋都是必不可少的。本书正是这方面成果的总结,它对我们进一步研究上层海洋中的动力学现象,例如海洋表面波、内波和海洋湍流等,将是一本很有价值的参考书。

用高度精炼简洁的方式将此领域中现有的主要成果概括于不大的篇幅中,是本书的一个重要特点。同时,作者特别注意到理论论述与现场观测或实验结果的联系。作者本人是这一科学领域公认的权威人士之一,书中不少内容就是作者的研究成果。就译者所知,国内外的研究工作者在研究书中所述领域的课题时,几乎毫无例外地将本书置于参考文献的目录中。值得提到的另一点是,本书的早期初稿曾获剑桥大学力学方面的奖金。

正是考虑到上层海洋动力学现象的重要性,正是因为本书兼有上述的各种特点,我们将它译成中文,并期望它的问世对我国在这方面的研究有所裨益。

本书前三章由李心铭同志负责翻译,其余各章由徐德伦同志负责翻译,余宙文和李心铭负责全书译稿的审校工作。

前 言

自本书第一版出版十年以来,在了解上层海洋的动力学过程方面,我们已经取得许多重要的进展。例如,弄清楚了移动介质中波作用量的守恒原理,这就为我们提供了一种有力的新方法,它可以广泛地应用于海洋学的各种场合。波共振相互作用最初是对表面波情形加以研究的,而现在已经了解,它不仅涉及表面波之间的能量交换,而且也涉及许多其它类型波动中的能量交换。在过去几乎没有作过测量的领域,现在已经进行了许多经过精心设计并巧妙完成的测量,特别是在海洋内波方面;这就使我们看到,十年前那些属于试验性的初步测量,或者是过于简单化,或者是错误的。现在,我们又遇到了新的现象,面临着更加深奥的问题。

鉴于这些进展,新版已作了相当大的修改,但就总的范围而言,仍与第一版相同。特定内容的取舍,不仅涉及作者个人的偏爱,而且也与有关章节应占的篇幅有关,同时还要考虑对于这特定的内容是否已有另外的论著。Turner 和 Kitaigorodskii 新近出版了他们的优秀专著,其中论述了海-气相互作用中的对流运动,介绍了海-气相互作用观测方面的研究工作,所以,本书修订时就未把这方面的内容包括在内。由于海底地形的影响而产生的现象是各式各样的,其有关文献增加得如此迅速,以致于对这方面内容即使作出并不充分的介绍,也会使本书的篇幅超出所能允许的范围。

我再次感谢在这一领域工作的所有同事们,他们直接或间接地对本书作了贡献。我要特别感谢的是, M. S. Longuet-Higgins 教授和 F. P. Bretherton 教授曾惠予许多鼓励性

的讨论; D. Irrine 先生对本版的手稿进行了检查; S. Barker 女士和 J. Koutz 女士为本版作了许多很好的准备工作。最后, 对美国海军研究局的一贯支持深表谢忱。

O. M. 菲利普斯

1976 年于巴尔的摩

第一版前言摘录

适当地了解发生于上层海洋中的动力学过程，对物理海洋学中许多问题的解决是至关重要的。最近十年期间，一方面进行了理论研究，另一方面进行了观测和实验，这两者的密切结合已经导致了这一领域的许多重要进展。其中一些进展在分载于各种杂志的论文中得到了介绍，但它们之间的关系并不是一目了然的；而另外一些进展迄今仍未发表。为了便于许多海洋学家了解这些进展，同时也为了鼓励其他研究工作者关心地球物理流体力学中这一大有作为的领域，试图对上层海洋动力学的新近发展提供前后连贯的介绍，这似乎是特别适时的。在某些方面，我们的了解已经相当详细，但在另外一些方面，由于缺乏探索性的试验和决定性的实验，我们受到了阻碍，所以，在这些方面的理论研究必然是初步而有待于修正的。在论述这些情况的时候，我尽量不掩盖这种事实，以期其他研究工作者来弥补这种缺陷。总之，本专著试图为读者提供一种基础，以便在此基础上把现有的成果加以发展或对某些结论作出否定。我想，本书的成功与否也就将取决于它究竟能在多大的程度上为读者提供这种基础。

本书的早期初稿曾获剑桥大学授予的 1963—1964 年度 Adams 奖。

目 录

为中译本序	i
译者的话	ii
前言	v
第一版前言摘录	vii
第一章 绪论	1
1.1 海洋环境	1
1.2 本学科的发展	3
第二章 运动方程	8
2.1 运动的描述	8
2.2 运动方程	9
2.3 机械能方程	15
2.4 Boussinesq 近似	16
2.5 Reynolds 应力	21
2.6 波列运动学	24
2.7 移动介质中的波列动力学	27
2.8 波-波相互作用	29
第三章 表面波动力学	34
3.1 控制方程	34
3.2 小振幅波动	38
3.3 无旋流动中的质点运动	44
3.4 分子粘性的影响	46
3.5 波的折射	60
3.6 动力学守恒方程	61
3.7 一些应用	72
3.8 表面波的相互作用	84
3.9 波浪的破碎	94

第四章 海洋表面波	103
4.1 波场的描述	103
4.2 风浪的生成	111
4.3 风与波之间的耦合	121
4.4 波的相互作用	140
4.5 饱和范围	145
4.6 谱的发展	165
4.7 涟漪和短重力波	178
4.8 波的传播	187
4.9 波面的概率结构	191
4.10 海面上的空气流动	197
第五章 内波	209
5.1 导言	209
5.2 小振幅内波	217
5.3 最低型内波	222
5.4 最低型内波的退化	227
5.5 小尺度内波	235
5.6 内波在海洋中的传播	243
5.7 低频振动	250
5.8 具有一般波型结构的内波谱	256
5.9 内波的生成	263
第六章 海洋湍流	268
6.1 湍流的生成	268
6.2 湍流的能量方程	270
6.3 湍流谱	272
6.4 局部相似理论	275
6.5 温度变化和盐度变化的谱	288
6.6 表面层中的湍流	294
6.7 温跃层的发展	308
参考文献	324

第一章 绪 论

1.1 海洋环境

有史以来,大海就一直是引人神往和敬仰的。不论是腓尼基人、玻里尼西亚人、阿拉伯人、威金人或是中世纪欧洲人,水手们的知识和成就都是对我们文化长河的贡献;它们为绘画、文学和音乐反复不断地提供了主题。如今,和过去一样,对于熟悉海洋的人们来说,海洋或者继续吸引着他们,或者继续引起他们的厌恶,无动于衷的人是很少的。

海洋的深处对许多世代的航海者来说都曾经是个谜;他们对海洋深处的无知给他们带来了恐惧。到十九世纪中叶,海面的探索实际上已告完成,而对海洋深处则仍然处于无知的状态。十八世纪七十年代“挑战者”号(Challenger)的环球航行是最早期的大型海洋考察。这次考察第一次不仅从海面而且也从海洋深处系统地搜集了资料和样品。在后来的考察中,诸如“发现”号(Discovery)、“流星”号(Meteor)和“大西洋”号(Atlantis)等考察船对世界海洋的描述作出了不可磨灭的贡献。这些对海洋深处的考察工作一直在继续进行着。例如,最大的洋流系统之一的太平洋赤道潜流的存在,只是在二十年前才由 Cromwell, Montgomery 和 Stroup 证实了的(Montgomery 和 Stroup, 1962)。系统的深海深度测量揭示了与海底扩张有关的狭谷带、断裂带和海沟的结构,并导致了我们对构造过程看法的彻底改变,而这也不过是十年前的事情。由于这一类的艰苦研究,我们现在关于海洋及其下面的海盆的知识才积累起来。

按地理学的观点,海床可划分成二个或三个大不相同的区域。围绕大陆岸线,数量级为 100 或 200 公里距离的范围内,水相对地浅,其平均深度在 200 米左右。这个大陆架海底通常缓慢起伏,偶而以岸外的砂洲和岛屿的形式露出水面。这是航海者最关心并且用仪器最易测及的区域。尽管这个区域最复杂,但它是人们最熟悉的。潮流和河口流使大陆架上的海水流动;海面上的风应力可以使海水在整个深度范围上搅动。在此区域以外,海底深度迅速增加到大洋的深度。这一过渡带非常陡,平均斜度的量级一般为 0.1,但常常由于局部斜度大得多的海底狭谷而呈现高低起伏的形状。在这个大陆斜坡的底部便是深洋床,其深度的量级为 4000 米。这种深洋海底占据大洋面积的绝大部分。该区域相对说来是比较平坦的,但在这个深海平原上偶而也有海山、海槽或狭长的中央海脊及其断裂带复合体(它把脊轴分割成许多碎段)。研究这样大深度上的运动,不仅涉及昂贵的仪器设备,而且涉及相当大范围和相当长时间的测量。这样的研究就象 1973 年的中大洋动力学实验(MODE)和更新近的太平洋实验年的中大洋动力学实验(POLYMODE)一样,已受到国家或国际努力的支持。

处于深海床之上的外洋中,水体的垂直结构的特点是在一个或一个以上的温跃层。所谓温跃层是指水面下几百米内的大温度梯度区域。在赤道水中,暖表层水和冷深层水之间的差别最大,因而温跃层最强;随着纬度的增加,温跃层变弱,在某些极地水中甚至消失。温跃层的维持和温跃层的结构对于大洋环流的了解来说是中心的问题。从温跃层区域向上到水而这个上层海洋中,发现有多种相互关联的运动——内波、湍流和表面波;它们的动力学将是我们所关心的。

上层海洋的运动为它上面的大气和它下面的深海之间的

物质交换、动量交换和能量交换提供了手段。在地球尺度上, 这些交换在海洋中产生一般的环流模式, 同时构成世界范围内气候分布的最重要因素之一。适当地了解上层海洋的运动状况是这些更大的问题的核心, 我们的努力就是针对这个最终目的。

1.2 本学科的发展

本学科是通过三方面的工作发展起来的, 这些工作都可追溯到很久以前。第一方面是对上层海洋现象的观测, 也就是对在自然的、不受控制的(但认为是可测量的)条件下所发现的各种类型的运动及其动力学过程加以识别、描述和测量。第二方面是实验室内的实验; 在实验室里, 有可能把这些现象中的一个或二个孤立起来并研究它们的特性和相互作用。第三方面是对这些运动及其相互关系进行分析, 即发展系统的理论。只有把这三方面的工作密切地结合起来, 才能阐明有关的现象, 使学科得到发展。

上面谈到了涉及上层海洋动力学的三个主要方面, 我们可以就这三个方面来回顾一下本学科的发展过程。早在古代, 人们就已注意到表面波以及它们与风的关系, 所以, 理论流体力学的先驱们——Lagrange, Airy, Stokes 和 Rayleigh 等——试图用理想流体理论来解释表面波的基本性质是很自然的。即使作最简单的实验, 也会得到可与这种理论相比较的频率-波长关系, 而且, 比较的结果一定是令人鼓舞的。然而海洋中的表面波毕竟是比较复杂的, 实际现象常常与基本理论不相符合。Rayleigh 曾经写道: “海浪的基本规律就是‘明显地缺乏规律性’”。在上一世纪, 要想描述海浪的不规则性是不可能的——这只有在概率论发展起来之后才有可能, 而

这种发展是在本世纪头四十年期间才取得的。把波的成长率与风联系起来的问题是由 Kelvin 提出来的，但当时未取得真正的进展。到 1850 年，Stierenson 已在许多湖泊中对表面波作了观测，并导出一个“最大波高”和风区（离上风岸的距离）之间的经验关系。七十五年之后，Jefferys 试图用实验室的实验来模拟风浪的生成。但直到 1956 年 Ursell 才正确地写道：“水面上的风通过某种物理过程产生水波，而这个物理过程还不能认为是已知的。”当时连不完善的理论也没有，海上的观测结果和实验室的结果似乎又截然不一致。所以，当时的状况是，理论这方面显得无能为力，而观测方面和实验方面又显得互相脱节。

Ursell 的看法引起人们作新的努力，去发展完善的理论并进行能获得可靠记录的实验和观测。这些尝试将在本书的第四章加以介绍。不论这些新的研究工作会有什么样的缺点，看来，理论和观测最后是要互相联系起来的。

另一方面，内波并非象表面波那样凭我们一般的经验所能捉摸。内界面波的最简单的解由 Stokes 在 1847 年给出的；它们的特性可以用简单的实验加以校验。Ekman 记述了关于船模缓慢移动引起内波发生的一些实验室观测结果；这些记述收入在 Nansen 的报告——《1893—1896 北极考察》(Vol. V, 1904, 562) 中。当时已有许多比较粗略的迹象表明海洋中内波的存在，但甚至在十年前，我们关于海洋内波的知识还是如此有限，以致任何一个孤立的测量都是珍贵的、有价值的和刺激人们进行进一步去探索的。然而，尽管想象本身是不可缺少的，但它终究不能代替观测的情报。此后，由于有了精巧的新仪器，并进行了精心设计的实验和更详细的资料分析，我们发现了以前很难想象到的内波的各种动力学特点，而这些新发现的特点又向理论提出不断的挑战。在实验方面，最

杰出的贡献无疑是 Long (1953a, b, 1954, 1955) 所作的, 他的研究深度已经涉及到不规则海底上的流动对内波的激发这样一个一般性的问题。由 Martin, Simmons 和 Wunoh (1972) 和 McEwan (1971) 所作的另外一些令人感兴趣的重要实验已经证明, 由共振相互作用可引起内波内部的能量转移; 由局部湍流区的形成可引起内波的消衰。除某些熟知的特例外, 早期的理论研究都局限于对特殊的密度分布求本征解, 但各种各样的新观测结果把研究的兴趣引向构成本征解基础的动力学机制。甚至到现在, 对内波各种问题的研究也还没有象我们所期望的那样有机地结合起来。现在, 对内波的发生、波-波相互作用、内波从倾斜水底上的反射和内波消衰等过程的研究都是片面进行的, 究竟通过什么途径把这些过程在海洋的条件下结合起来, 仍然是模糊不清的。这种状况要通过长时间的耐心努力才能改变。

将湍流的概念应用于特定的海洋学领域, 这仅仅是很近代的事情。1883 年, Osborne Reynolds 发表了关于“湍流”(sinuous) 实验室观测的著名报告集, 其中指出了湍流的统计性质和用湍流的平均性质来描述运动的必要性。后来, 受空气动力学发展的激励, 提出了混合长度概念; 其中把涡旋运动比作象气体中分子那样的离散实体的运动。在此期间, 理论与实验的密切结合证明了这些概念的成功(尽管是有限的), 而更重要地也揭露了它们的缺陷。人们渐渐地认识到, 只有先建立一种更加基本的研究方法, 才能真正地了解湍流的动力学。1935 年, 在 Taylor 给皇家学会的自成一组的五篇论文中, 提出了这种研究方法; 在这些论文的基础上, 发展成现代的湍流理论。在均匀湍流的特殊情况下, 分析可得到某些简化, 而且这种特殊情况在实验室的风洞中可以近似地实现。Batchelor, Kolmogorov, Kraichnan, Townsend 和

其他一些人对这部分内容的研究,就理论上的一贯性而言,取得了相当的进展,虽然中心问题——非线性相互作用的统计机制——还不能认为已经解决了。所获得的这些相当深入的知识,对考虑其它的湍流运动是有关系的和有价值的。与此同时,湍流切变流的详细实验研究也在进行,特别是Townsend, Laufer 和 Corrsin 进行了这方面的工作。这些实验研究至少估价了相似方法在描述湍流切变流方面的能力和局限性。

早在1915年, G. I. Taylor 就对大气湍流的结构作了巧妙的观测,但直到30年之后,才有合适的仪器供我们进行详细和系统的研究。第二次世界大战后,我们在湍流方面的知识在大气湍流的研究中得到了应用,同时通过大气湍流的研究也增加了我们对湍流的了解;苏联和澳大利亚的有关研究组都在这方面作出了显著的贡献。另一方面,海洋湍流的研究要困难得多;除了某些特例外,实际上尚未进行什么研究,但是,把得自均匀湍流和大气湍流的背景经验、相似推理的应用和对海洋的特有现象(例如破波的存在等)的判断这三者结合起来便可能(在第六章中)对海洋湍流运动的结构作若干推断。其中一些推断已经可与直接观测相比较,而另一些推断尚不能与直接观测相比较。

当然,表面波、内波和湍流这三种类型的运动并非孤立发生的;它们的相互作用是值得研究的。一旦正确地了解了这些问题,就有希望对上层海洋在海洋动力学中所起的作用作出某种判断;当然这里所说的海洋动力学是指作为一个整体的海洋的动力学。在下面几章,我们将依次考虑这些类型的运动。在第三章中,将尽可能简单地导出表面波的基本性质、表面波的守恒定律和相互作用的特性。这些内容对于了解由随机波场带来的往往是复杂的问题,对于了解海浪的发生和消衰等都是基本的。第五章描述内波的结构;所强调的不是

各种特殊情况下波型结构的分析细节，而是强调与这样的运动有关的物理过程的种类。最后我们转向与上层海洋中的湍流有关的机制和现象，并讨论湍流与其它类型运动之间的相互作用。但是，首先以本书使用的形式简略地建立有关的控制方程是必要的，下一章就处理这种问题。