



К. Н. 费多罗夫 著

海洋温盐 精细结构

海洋出版社

海洋温盐精细结构

K. N. 费多罗夫 著

牟 勇 赵俊生 译

葛有信 校

海 洋 出 版 社

1992年·北京

(京)新登字087号

内 容 提 要

本书所论述的主题是在海洋中新近被发现的小尺度层结现象和那些参与其形成并控制其演变的物理过程。与精细结构的测量有关的某些方法论的问题也作了讨论。小尺度层结与诸如分子扩散、对流、湍流、内重力波、惯性运动以及平均流等这些重要的物理过程之间的复杂性的相互关系亦都作了研究。

读者对象为物理海洋学家和其他有关的研究分支的专家们。

The Thermohaline Finestructure
of the Ocean
K. N. Fedrov

海洋温盐精细结构

K. N. 费多罗夫 著

车 勇 赵俊生 译

葛有信 校

*

海洋出版社出版(北京市复兴门外大街1号)
新华书店北京发行所发行 北京市燕山联营印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 7.5 字数: 173千字

1992年5月第一版 1992年5月第一次印刷

印数: 1—1000

*

ISBN 7-5027-1276-3/O·33 定价: 5.90元

前 言

自本世纪中叶，在海洋研究中采用新式高灵敏度仪器测量海洋环境的热力学特性以来，海洋学取得了许多成就。就其在海洋科学发展中的地位看，这些成就可以与17世纪的列文虎克（Leeuwenhoek）发明的显微镜在生物学中应用所取得的成果相媲美。为了把所有已被发现和采用新技术仍处发展阶段的、新的有趣的现象加以概括，在第二届国际海洋学会（莫斯科，1966年）上，有人建议把这个新的研究趋向叫做微海洋学（micro-oceanography或micro-oceanology）。尽管这种叫法未被采纳，但却在科学文献中越来越常使用微海洋学这一叫法。所谓海洋的微结构一说，实指海洋中包括温度场、盐度场和密度场在内所有的那些更精细的结构。而这些精细结构用常规手段是无法揭示的，只有借特殊技术方能发现。

这个研究方向只是在最近十几年内才发展起来的。本书的目的仅在于阐述某些已经取得的成果。因此，作者着重论述的只是海洋中精细层结的那些单元，也即水平尺度大大超过其厚度、寿命远超过实测的持续时间的那些精细结构的单元，而不是论述近年来一直被用于研究海洋微扰动的温盐结构的那些最小的起伏。

“精细层结”¹⁾这个术语反映了阿基米德浮力在这类不均匀性结构的形成中所起的最重要的作用。但是很明显，在所研

1) 一般所采纳的等价英语词是“fine structure”(精细结构)。

究的范畴中最大的那些结构单元是在地球自转的实际影响下形成的，而最小的结构单元则在很大程度上要受到分子过程的影响。关于浮力作用，本书是从独有的海洋学角度来考虑的，即是把浮力作用与实际海洋状况联系起来考虑的。这与Turner的专著^[232]大不相同；他的著作是从较一般的理论实验分析出发对浮力进行研究的。

海洋的实际情况远比那些特征化了的状况复杂得多，甚至比最复杂的实验室实验或理论解中所考虑的情况还要复杂。海洋观测很少能直接得到明确的解释。一般来说，先是引出一个基本假设后再加以特征验证。在这种情况下就使我们可以根据新的信息对海洋中结构形成的各个过程的特征和相互关系的看法得以不断地修正。因此，这就不难理解为什么至今还没有一本专门探讨海洋精细结构的书出版的原因了。

本书之得以完成要归功于苏联科学院海洋研究所设计研制出的“AIST”自动数字探测仪^[71]。正是由于这台通用的精密仪器的问世，苏联在此领域中的研究才取得一定成果。

作者仅向那些倾以关注、激励其从事奠定本书基础的研究的各位同仁表达诚挚的谢意。亨利·斯托梅尔(Henry Stommel)教授是因其广泛的兴趣和富有成果的思想为海洋研究的人们所周知的。正是他首先向笔者介绍了一系列有吸引力的有关适于“微海洋学”的问题。应斯托梅尔教授的邀请作者于1965年参加了“大西洋-Ⅱ”号考察船的海上调查。这成了我在该领域中迈向进一步独立工作的最初刺激。A.H. 柯尔莫戈洛夫院士、通讯院士A.C.莫宁、C.A.基泰戈罗德斯基教授、Ю.З.米罗波尔斯基、Б.Н.菲柳什金、К.Д.萨比

宁、H.Γ.加尔尼奇、H.Π.布尔加科夫和Π.Π.甘松对所研究问题的许多方面进行了卓有成效的讨论。此外,在一系列国际会议期间,蒙克教授、特纳(Turner)教授,岑克(Zenk)博士、伍茨(Woods)博士、亨普(Thorpe)博士、考克斯(Cox)博士、格雷格(Gregg)博士、内震依巴(Neshyba)博士等也作了广泛交谈和讨论。这些对于笔者澄清海洋温盐精细结构的物理概念大有补益。

与“AIST”探测仪研制者们进行的周密合作,特别是与普罗赫罗夫的合作,使我们能够恰当地组织起观测和收集有关海洋测量的有价值的原始资料。这些资料都已成为本书所采用的大多数插图和论证材料的基础。(下略)

目 录

第一章 概论	(1)
1.1 海水的精细结构和微结构.....	(1)
1.2 现有的探测仪器及其性能.....	(2)
1.3 关于海洋温盐精细结构观测的实施.....	(6)
1.4 观测实例.....	(8)
1.5 海洋精细结构的垂直、水平和时间尺度.....	(19)
1.5.1 精细结构的特征空间尺度	(19)
1.5.2 微结构的极限尺度	(21)
1.5.3 温盐精细结构单元的时间尺度	(22)
1.6 温盐精细结构的研究史.....	(24)
第二章 海洋精细结构的基础物理学	(30)
2.1 线性化的温盐关系式和简单流体静力学 结果	(30)
2.2 温、盐的精细结构和局部平衡.....	(36)
2.3 内波的运动学效应.....	(42)
2.4 湍流混合所引起的温盐结构不可逆变化 (栓塞效应)	(46)
2.4.1 动力不稳定性的一般判据标准	(46)
2.4.2 不稳定的机理和内波引起的能量释放.....	(49)
2.4.3 海流的切变不稳定性	(57)
2.4.4 (质量和动量的)粘滞扩散和湍流输运 引起的不稳定性	(58)
2.5 温盐不均匀性的平流迁移.....	(60)

2.6 “双扩散”效应引起的温盐结构的对流	
改组	(61)
2.6.1 下层受热导致的稳定盐度梯度分层对流	(66)
2.6.2 “盐指”对流及其在海洋中的可能表现形式	(72)
2.6.3 水平梯度存在时的温盐对流	(73)
2.7 分子过程的中尺度和大尺度的后果	(80)
2.8 海洋中结构形成过程的顺序和互相	
关系	(82)

第三章 观测结果的分析 and 解释

(84)

3.1 廓线分离	(84)
3.2 扰动的选择分析和平均廓线	(88)
3.3 温盐精细结构的 $T'-S'$ 曲线的相关性	(102)
3.4 谱分析	(112)
3.5 统计特性的时-空变化	(121)
3.6 速度、密度垂直梯度廓线的综合分析及其伴随的精细结构的比较	(124)
3.7 某些一般性结论	(138)

第四章 海洋中温度和密度的逆增

(140)

4.1 引言	(140)
4.2 海洋中伴随侵入过程的温盐扰动	(142)
4.3 阿拉伯海中侵入性温度逆增	(150)
4.4 帝汶海中温度逆增	(160)
4.5 形成侵入性温度逆增的其他实例	(166)
4.6 伴随海洋温跃层的局部不稳定性通过垂直对流形成的温度逆增	(170)
4.7 垂直密度梯度的逆增	(175)

第五章 海洋中的阶梯结构及其起源	(186)
5.1 绪言	(186)
5.2 上准均匀层的 分层平流	(187)
5.3 中尺度温度逆增层的 阶梯 结构.....	(190)
5.4 温盐跃层中的 阶跃结 构.....	(198)
结束语	(201)
参考文献	(204)
A. 俄文参考文献 (英译题目)	(204)
B. 非俄文参考文献	(211)
C. 最新参考文献 (本书英文版补充)	(226)

第一章 概 论

1.1 海水的精细结构和微结构

经各种高灵敏度探测仪探测，业已证实海水的温度、盐度、密度及其垂直梯度的廓线都具有许多精细结构的部分。这些细节甚至在海达3000米的深度上都有所发现⁽¹⁸¹⁾。从图象上加以概括，我们可以把这些细节描述为依时间变化相对稳定的海水分层精细层结，达种层结是由数十米直到几个厘米厚度的准均匀层(叠层)和热力学参数具有激剧变化的薄片层交替组成⁽²⁴⁷⁾。最精确的测量结果^(117, 118)证实：根据上述热力学参数推算的密度廓线也显示出精细层结的存在。

早期关于海洋中片层的极限厚度的估算⁽²¹⁴⁾（这可以通过测量范围的自然侧向延伸来得到）表明，达10厘米量级的厚度上、精细层结的概念是有物理意义的。这个结论得到内史密斯（Nasmyth）对厚度10厘米和水平范围达200米实测结果⁽¹¹⁸⁾的支持。不过他怀疑还有为当时所使用的观测仪器无法判别的更深的片层存在。

除了温度场、盐度场、密度场的精细层结外，在海洋里还观察到小尺度的高频振动。它们是由微扰动引起的；其特征频率均超过一赫兹，典型的空间尺度为厘米量级。微扰动及其所引起的海水温度场、盐度场和密度场的微扰动的分

布,在很大程度上取决于精细层结^[33,75]。反之,微扰动本身又在精细结构的形成和演变中起着积极的作用;通常它又和分子扩散的热传导运动一起趋于对温盐的不均匀性起平滑作用。尽管存在着微扰动和分子过程的干扰作用,但是精细层结在海洋中,时时处处以各种不同的形式出现,这一事实表明,海水中的温盐不均匀性的平衡,是由作用在大尺度运动上的结构形成过程来不断地维持的。对这些过程的研究也是本书主题之一。

根据上述讨论很明显,按照专门术语将形式繁多的海水温盐的精细结构重新分成“精细结构”和“微结构”两类是合适的。后者用于研究各种场的湍流微扰动最合适。上述划分方法,有下列优点:首先有一个明确的尺度界线。其次是方便。因为对于海洋中的测量和记录来说,每一范畴所使用的仪器类别是不同的。前者适于采用定深测量仪器,后者则宜采用各种湍流探测仪。

关于探测仪器的主要情况将如下所述。

1.2 现有的探测仪器及其性能

目前所采用的研究精细结构的探测仪器可归结为下列几类:缆控式、自由下落式、下沉式和潜式。最初用于观测温度及盐度场的精细结构的缆控式探头有STD(S——盐度、T——温度、D——深度)和CTD(C——电导率)两种。人们最熟悉的有美国海特奇(Hytech)公司制造的9006和9040型探测仪^[218]、联邦德国基尔大学制造的“霍瓦尔特”(Höwoldt)探测仪^[180]、苏联科学院海洋研究所制造的“AIST”探

测仪和苏联乌克兰科学院海洋水文物理研究所制造的“伊斯托克”(Istok)探测仪。上述仪器的深度分辨率为1米,这妨碍我们对最精细层结的研究。“海特奇”探测仪有一个测量电导的传感器,不过盐度转换是通过一个温度补偿电路直接在仪器内的电子元部件中进行的。尽管这似乎是个优点,但事实上由于温度传感的实际时间常数与预定时间常数之间存在着偏差,所产生的盐度误差是无法订正的^[113]。“霍瓦尔特”、“AIST”和“伊斯托克”探测仪则是将电导率值作为原始数据记录下来并传送给观测者。在进行初步处理时,由计算机换算为盐度,同时对温度传感器的动态误差进行修正^[44]。所有这些探测仪的电缆作为与考察船的通讯线路,同时也用来收放探测仪。这种系统的主要缺点是由于船只的摆动会对仪器下放的稳定性产生有害的影响,从而影响到记录的质量和精度^[23,177]。

“AIST”缆控探测仪的详细介绍可以在[41,71]里找到。构成本书研究基础的主要测量结果,都得自该仪器。在此我们仅列出总的温度、盐度的测量随机误差值 σ_T 和 σ_S ,以及考虑平均海况、船只摇摆度、探头下沉速度和垂直温度梯度^[44]所计算出的总的密度随机误差值 σ_ρ ,

$$\sigma_T = 0.024^\circ\text{C};$$

$$\sigma_S = 0.028\text{‰};$$

$$\sigma_\rho = 0.025 \times 10^{-3} \text{ cgs 单位}.$$

以这些值为基础并考虑深度测量间隔于此最小压力间隔 $\Delta P = 0.27 \text{ db}$ (约相当于 $\pm 27 \text{ cm}$),我们计算了不同间隔下的密度垂直梯度的随机误差值:

$$\text{阶跃1米: } 0.033 \times 10^{-3} \text{ cgs 单位/m};$$

阶跃5米： $0.006 \times 10^{-3} \text{ cgs 单位/m}$ ；

阶跃10米： $0.003 \times 10^{-3} \text{ cgs 单位/m}$ 。

把这些值与在海洋中实测的密度垂直梯度的平均值加以比较的结果证明：在密度跃层最陡的部位，根据“AIST”测得的资料计算密度垂直梯度的最小阶跃不得小于5m，在更深层不得小于10m。

自由下落式探测仪能以预定的速度最均匀地下降。又由于主传感器(主要是温度传感器)相应速度快，这就能保证具有很高的深度分辨率。原则上以5—15cm/s量级的速度自由下降，组配上时间常数为20—50ms的热敏电阻，就能保证1cm的深度分辨率。对缆控式探头来说即使船不摇幌也达不到这么高的分辨率，因为船上的绞车照例也不能以这么小的速度放缆。这种下放的方式便于许多的探头组合装置使用。其中之一可作探头内的信息存储装置(通常是磁性的)^[118]。

在另一装置中，信息沿着一条单独的电缆被传送到船上，沿此电缆深头可以滑动，而信号是通过一个与电缆绝缘并沿之可以滑动的感应环感应到电缆中去的^[249, 252]。

抛曳式探头(XBTS)，美国广泛用其测量海水温度，其精确度与海水深度温度自记仪(BT)几乎无差异。探头所感应的温度和压力计的信号通一根根细的直导线传送到船上，导线在工作的极限深度(可达700米)自动断掉。登纳(Denner)、希尔(Heal)和内夏依巴^[92]曾经在一个标准的XBT中装配了更灵敏的测温计，在北极海盆得到了与较暖的大西洋水侵入有关的很有意义的阶梯状逆温资料(详见5.3)。如今新式的XBT还包括一个电导率计。航空抛曳式XBTS亦已问世。

下潜式探测仪，带有一个能使探头定时浮到水面、并以预

定的低速度下潜到预定深度的装置，在所研究的水层上随海流漂浮。1967年首次用此装置进行了试验^[181]。目前，蒙克和美国斯克里普斯海洋研究所的科学家们正在着手研究一台带潜密舱的装置。上述测量原理是定深测量装置发展的最新动向，亦如1973—1974年所提及的有着许多重要的方法论上的优点。要求这种装置由多用设备及精密测深部件组成，并且兼控缆控和自由漂浮两种工作状态。这样就可以利用船上配备的计算机作初步的数据处理。处理包括，按深度（压力）分级、舍弃和根据所选定的压力区间进行滑动（滤波）平均计算出盐度来。一种新型的精密CTD或称布朗（Brown）微剖面仪和在此基础上发展的自由下沉综合仪^[216]就是类似的探测仪器。

两者都是美国伍兹霍尔海洋研究所研制的。布朗微型剖面仪可以保证平滑后的温度值的随机误差达 $\pm 0.0001^{\circ}\text{C}$ ，平滑后的盐度值随机误差达 $\pm 0.02\%$ 。

在任何一种探测器工作期间，要特别注意它在现场条件下的校准及其稳定性的控制。用“AIST”探测仪达到上述精度的测量是由一系列特殊规定程序来保证的^[41, 46, 48]。当用布朗精密微型剖面仪^[84]进行探测时，为了达到绝对高的精度，每次探测一般都要用一组颠倒采水器与探测仪一起下放。在若干水层上辅以采水样和测温。

校准仪器的最重要也是最麻烦的步骤是电导率通道的校准。这包括根据每个控制点上的海水盐度和温度及压力订正值计算出现场相对电导率（RSTP）来。计算方法取决于在处理探测数据时用于把（RSTP）换算出盐度的那一组公式。在校准时亦应使用这同一组公式。目前大约有10组用于此公式

的。然而，为国际所公认的却只有一个盐度的定义^(10,253)。并且据此已被编成了国际海洋学用表⁽²⁷⁾。1969年，笔者根据此国际定义针对正常大洋的温度和盐度的范围（0—30℃，33—37‰）提出了一组简化公式。该组公式在用“AIST”探测仪作业和对其电导率通道进行校准时均被采用了。于此，介绍任何一组特殊的公式已合时宜，因为，很明显在不久的将来一个满足国际盐度定义、作为国际基础的统一被推荐的公式组将会被采纳。

近年来，一种具有高分辨率、可以得到海流垂直廓线的探测仪正在广泛推广使用^(66,180,202,221)。在苏联科学院海洋研究所太平洋分所¹⁾，B. II. 舍夫佐夫和A. II. 沃尔科夫运用多普勒原理研制出一台测量流速的声波探测仪（“横梁式”）^(9,35,70)。用此探测仪所得测量结果将在第四章中列举讨论。就属于此类型的某些仪器（例如“旋转式探测仪”）^(95,240,241)来说，流速的直接记录是与压力、温度、电导率和声速的记录同步进行的。

许多利用激光、声波、机械或电磁学原理工作的测量流速的新型仪器亦已研制出来，并且正在投入使用。

1.3 关于海洋温盐精细结构观测的实施

研究温盐精细结构的主要目的在于寻求这样一些判据，即据此按照所研究结构的单个的成统计的特征，使我们即可查清它们的起源，通过分析它们随时间的演变及比较其空间和时间尺度，在这方面取得重大进展是可能的。但是，于此我

1) 现在是苏联科学院远东科学中心太平洋研究所。

们遇到一个方法论上的问题,即当用单船进行观测时,要研究垂直面上各点的热量、盐分、动量的内部平衡,纯欧拉的或纯拉格朗日的方法都不能严格地进行观测。

通常,热力学特性的垂直探测是在漂移的船上进行的,并且漂移速度可以非常大。朝不同方向动的水层带走了局部结构,且这些局部结构在每一水层的水平方向上又各不相同。因此,即使在一个严格固定的点上反复探测,也不能得出结构单元瞬时变化的正确印象。而由一条船跟踪数个在任何水层里自由漂动的中性浮标,则将局限于研究该水层的随时间变化的可能性。

如将一或几艘船在不同固定测点上测量的方法移用到可作同步观测信号的浮标上,对按时观测频数又限制得太紧。但从船舷拖释的,缆控探测仪能够重复和保证多次探测。但是船的摇摆其深度分辨率却很低(不超过1米)。另一方面自由下落探测仪目前可以做到记录1—10cm厚度的结构细节。不过,在与这种精细结构的时间尺度相对应的极短的时间间隔内,不能重复得到多条廓线。

从移动的船上运用拖曳仪器来研究这种结构的形态的空间变化是困难的。因为在大多数情况下,无法把由于温度或盐度所引起的准静态水平面或等密度面的不均匀性同非平稳过程的内波的运动学效应区别开来。用探测仪对小水平尺度作水平测量与大尺度的测量一样具有相同的缺点。也就是说,都不能保证观测的同步。如果调遣若干彼此相隔很小距离的船只,则将是困难的、危险的和价值昂贵的事业。也许只有在北极和南极的冰盖上才是同步重复或多次测量的理想平台,于此才能直接在彼此相隔很近距离内的固定点上进行测量。

因此我们必须承认,现有的海洋学作业的方法没有能力提供我们在海洋中作这样的试验。这种试验本身能够帮助我们分析空间及时间变化并认识在所有复杂结构的扰动中与实际精细层结相联系的精细结构的特征。而许多这些扰动正是在测量时由非平稳效应的随机结合所引起的。特别,用普通缆控探测仪进行测量,以避免记录由内波所造成的垂直廓线的瞬时畸度是非常困难的。而这些内波的态型、振幅和周期在不同的水平而上是不同的,而且也无法预知。

一旦探头的垂直位移速度与内波所引起的水层垂直位移速度相接近时,内波也可能是造成所记录廓线上明显精细结构的“多普勒”形变的原因。

内波的速度通常约为 10cm/s 的量级,这与缆控探测器下沉的最小速度($30-40\text{cm/s}$)充分接近。但是,我们并不能根据上面的论述就断定探测仪下沉速度越高越好。探测仪速度的增加会导致动力误差的增加^[44],尽管船体摆动的不利影响在某种程度上会有所降低,但都会显著增加记录失真和在急剧温度梯度下测定盐度时的误差。因此,问题就将是选择最佳探测环境了。

1.4 观测实例

为了生动地说明以后几章将予讨论的精细结构的特征,下面介绍一系列的最典型的观测实例。

图1和图2表示温度(A_T)和盐度(A_S)的垂直廓线。这是1970年“库尔恰托夫院士”号在热带大面洋多边形观测区的544号站和561号站用“AIST”探测仪测得的结果^[39, 47, 48]。