

## 海洋内波与海洋工程<sup>1)</sup>

李家春 程友良 范平  
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 简介海洋内波的研究历史; 概述海洋的密度分层结构; 根据观测, 分析地球上和我国海域内波分布, 认识海洋内波发生、传播和耗散的机理; 概述海洋内波、内波流场理论研究进展。最后, 以深海石油开采为背景, 提出若干同海洋内波相关的科学问题。

**关键词** 内波, 跃层, 孤立子, 波包, 内潮, 深海平台

### 引言

内波是发生在分层介质内部的波动现象。我们可以通过观察背风波、对流积云等现象发现大气内波的踪迹。由于海洋内波发生在水下, 使海洋内波的观测和研究多少蒙上一层神秘的面纱。1893年~1896年, 挪威“弗雷姆”号考测船在北极探险过程中, 从南森发觉船只驶入上层有冰融化淡水区域时突然减速。经研究知道, 这是由于船舶航行在密度跃层上, 为产生海洋内波做功需要耗费能量, 所以难于前进(富永政英 1976)。

海洋内波是海洋中普遍存在的一种动力学过程, 它对海水动量、热量和质量的垂向输送起重要作用, 因而海洋内波在整个海洋动力学的研究中占有重要的地位, 是物理海洋学的重要分支。由于内波可影响海洋中的温度、盐度和营养物质的分布; 可改变海洋声波的传播方向, 从而影响声纳的探测; 内波可阻碍潜艇前进, 也可破坏海洋结构物, 因此, 人们已普遍认识到, 海洋内波与海洋生态学、海洋水声学、海洋工程 etc 应用紧密相关。尤其是海洋内波研究关系能源和军事, 因此, 受到各国政府的重视。

在新世纪, 由于经济高速发展和消费水平提高, 我国对能源需求急剧增长。但是, 鉴于陆上石油潜力严重不足, 国家十分重视深海石油开发。海洋内波, 特别是内孤立波、内潮, 在海洋密度跃层中传播时, 其携带的巨大能量会导致较高的流速, 对海洋石油钻井平台和海底石油管道会造成严重的威胁。例如, 在安得曼海的一个石油钻井机被水下通过的孤立子内波扭转了 $90^\circ$ 并推移了30.48 m。1992年, 中国南海东部石油公司在东沙群岛附近的石油钻井机在孤立子内波经过时无法操作, 曳定的油罐箱在不到5 min内摇摆了 $110^\circ$ (蔡树群, 甘子均 2001a)。它也可以把潜艇托出水面或拽下水底。由此可见, 在内波活动频繁的海区, 石油钻井平台设计必须考虑它能否经受内波产生的作用力。因此, 加强对内波流场及其同海洋结构物相互作用的研究对海洋工程设计是十分必要的。

20世纪下半叶, 随着近代测试技术的发展, 特别是采用了各种温深仪(CTD, STD), 声多普勒流速仪(ADCP), 综合孔径雷达(SAR)等手段进行探测, 研究工作取得较大进展。20世纪70年代提出了大洋内波的GM谱模型。由于它的普适性, 被誉为海洋内波研究的里程碑。

<sup>1)</sup> 中海油科技合作项目、中科院知识创新工程和科技部海洋 863 的资助

同时, 基于非线性波理论成果, 内孤立子的研究也取得进展, 并成为非线性科学的重要组成部分。目前研究的重点转向近海大陆架的浅海内波, 转向内波能量产生、传播和耗散机理, 转向内波流场及其与结构物相互作用各种其它实际的应用研究。

## 1 海洋的密度分层结构

既然海洋内波是指在稳定层结的海洋中发生的、最大振幅出现在海洋内部的波动, 了解海洋密度分层的结构是内波研究的前提。

实际上, 大洋沿垂直方向大致可以分三层: 海洋表层由于风剪切和表面波破碎造成上层混合层 (UML), 在那里由于湍流混合, 温度几乎是均匀的, 厚度约数十米; 在海底为厚 10m 左右由剪切产生的底部湍流边界层 (BBL)。在上述两层中, 平均速度满足对数分布规律、海洋的中间层是相对平静的大洋内部, 在那里由内波产生间隙性的微弱扰动, 并呈现片状的微结构 (Li 1993, Wuest & Lorke 2003)。在混合层底部可以由于外部的强迫: 风应力、加热和冷却发生卷挟现象。室内实验研究发现, 混合层的无量纲卷挟速度是总体 Richardson 数的负次幂函数。研究这种卷挟可以预测混合层或温跃层的演化, 所以也称为温跃层动力学 (Turner 2000)。

海洋中的层结现象可以由海水的温度和盐度差异引起, 所以, 在海洋的一定深度上存在着温跃层 (thermocline) 和盐跃层 (halocline), 并导致密跃层 (pycnocline) 的出现。主跃层出现在深度约 300~1000m 处。沿纬向, 在赤道附近主温跃层强而较浅, 在中纬度地区, 主温跃层变弱变深, 高纬度处又出现在浅层。季节性跃层一般在 50~100m 水深处左右, 一般发生在春夏。此外, 还有周日温跃层存在。通常, 连续密度分布可以用 Holmboe 模式表示, 也可以用间断的两层、三层等密度分布近似, 这种结构将决定内波发生的可能模式 (富永政英 1976)。

## 2 海洋内波分布和产生

海洋内波主要可以通过链式传感器和综合孔径雷达进行探测。前者通过沿深度分布的传感器来测量电导率, 温度和盐度, 这就是电导率温深仪 (CTD) 和盐度温深仪 (STD)。通过上述仪器可以测量等温面变化的数据, 从而获取内波的信息; 后者利用在内波波峰后和波谷后处, 分别产生辐聚和辐散现象, 从而使水表面改变粗糙度, 形成条纹结构, 并由此发现内波的踪迹。虽然也可以用可见光和其它雷达进行探测, 但 SAR 灵敏度高, 不受云层影响, 因此是主要的手段。

在全球范围的海域内广泛存在着内波。30 年来, 通过各国在 ERST/LAND STAT-1 空间站上的遥感和现场观测, 可以绘制出全球的内波分布图。人们会发现大部分内波经常出现在层结、地形和洋流条件适合的大洋边缘区域, 时间多数在夏季有强跃层出现的时候, 海域甚至可以扩展到北极白令海峡、南极 Weddel 海附近。也有一些例外, 比如: 可以在大西洋中部海洋中脊 Azores 北观察到孤立波; 也可以用声多普勒流速仪 (ADCP) 在南太平洋 Bismark-Solomon 群岛东北观察到孤立子波包。前者是由于墨西哥湾流通过海底山脊, 后者是在 Bismark-Solomon 群岛的岛屿间有海槛所致 (Jackson & Apel 2002)。在南海大陆架, 地形由东南向西北逐渐变浅。我国南海北部地区, 因为春、夏会有季节性温层出现, 加上那里的地形情况, 也是内波的多发地区。石油公司为了保证海丰外海、流花地区石油平台的安全, 需要了解南海北部内波信息。中国科学院南海所实验三号科学考察船于 1994, 1996, 1998 年在离珠江口 300km 的东沙群岛西南 (20°40'N, 115°51'E)、西部 (22°22'N, 116°58'E) 和南部地区 (20°21'N, 116°50'E) 观测, 那

里水深 300~500 m. 根据观察, 发现内波出现深度在 0~150 m, 多数在 40~60 m. 最大流速达 1.5~2.0 m/s, 波速 2.0 m/s. 出现时间一般在大潮后 4~5 天最频繁, 隔 12 h. 内波诱导的突发性强流出现形式有: 单锋: 持续 15 min, 流速 1 m/s; 多锋: 每个波的强流持续 15~25 min, 间隔 1.5 h, 强度逐渐减弱, 方向向岸: NW-W. 推测可能的发源地是该海域东部 566 km 的吕宋海峡附近的狭窄水道, 如: 巴坦 - 萨布廷水道 (方文东等 2000, 蔡树群 2001a, 2001b). 也有人推测是黑潮支流深入南海北部所致.

因台风、潮流、地震、地形等外来因素扰动, 在有强密跃层的季节和海域会有强内波的频繁活动, 李家春 (1983) 讨论了气象, 位移和海底运动诱发的瞬变波. 研究还表明, 内孤立子波或孤立子波包往往可以由正压潮同地形相互作用产生或发生分裂 (Grimshaw 1997). 常常在夏季大潮时每隔 12 h 在大陆架地形突变处发生, 而在小潮时就没有内波发生. 波包中的孤立波按次序排列, 高大的波在前, 短小的波在后, 随着时间增加, 波的个数也增加. 由于上层较浅, 孤立波呈现下凹的形状. 在传播过程中, 不同波包间的距离等于内潮的波长. 在更长的时间尺度上, 会出现 2 周的大小潮的调制. 孤立子在海槛上传播时, 呈现背风波的特性: 由于很快就不受地形的影响, 所以有较长的生存时间; 孤立波在大陆架上传播时, 由于地形不断变浅, 孤立波发生折射, 并受到底部摩擦的耗散, 很快就会消失. 同时, 也使底床的泥沙和营养物质悬浮, 海水的透明度减小 (Jackson & Apel 2002).

### 3 海洋内波与内波流场的研究

由于海洋内部跃层两侧的密度差小, 要用等价的约化重力加速度  $g' = \rho'g/\rho$  代替原先的重力加速度. 在海洋中,  $\rho'/\rho = O(10^{-3})$ , 所以, 恢复力也小, 不多的能量便可掀起轩然大波, 它的周期也相应地增加. 根据海洋观测, 海洋内波尺度范围很宽, 形式多样, 包括: 内潮、内孤立波、周期内波, 小尺度内波. 对海洋结构有影响的内波, 波长可以是几百米至百公里, 周期为 10 min 到 10~20 h. 观察表明, 温跃层处, 内波振幅可以在 100~200 m 之间, 所诱导的内波流场的最大流速可以达到 2 m/s 或以上.

类似于水表面波, 在问题中存在三个长度尺度, 波幅  $A$ 、波长  $L$  和水深  $H$ , 综合起来, 我们可以构成一个参数  $Ur = AL^2/H^3$ , 表征非线性和频散效应的大小, 从而划分如下的各种波浪理论的适用范围:

- 线性内波, 可以有谐波解. 对于波幅略高者, 可进行弱非线性修正;
- 内孤立波, 一般用 KdV 方程描述, 可以有孤立波解和椭圆余弦解. 在上下层深度接近于 1 的临界情况, 服从修正的 KdV 方程. 在大洋中, 如果密度变化限于表层, 可以用中长波方程 (ILW) 描述. 当深度趋于无穷时, 变成 Benjamin-Ono 方程; 弱二维的内孤立波服从 Kadomtsev-Patviashvili (KP) 方程.

• 浅水内波, 可以描述内潮在大陆架上的运动. (Grimshaw 1997) 以往的内波研究注重波的运动和变形, 忽视内波流场的分析, 只有少数工作涉及内波流场及其同结构物的相互作用 (Cai et al. 2003). 近年来, 我们通过和中海油的合作项目, 对内波流场进行分析, 得出如下结论 (Cheng et al. 2004):

- 在跃层上下, 存在着速度剪切, 跃层上下密度差愈大, 跃层愈薄, 剪切强度也愈大, 这一结论已为观察证实;
- 存在临界深度, 当水深由小于该深度到大于该深度时, 内孤立波由下凹变成上凸 (Orr

2003);

- 由于水深同波长比是小量, 内波诱导的流场的水平速度几乎均匀, 因此可以产生巨大的水平推力, 使海洋结构物发生整体推移或扭转;

- 同内波波长相比, 海洋结构物的尺度较小, 因此, 可以用 Morison 公式计算作用力. 因  $K_c = O(10^2)$ , 黏性力起主要作用, 惯性力可以忽略. 周期波的剪切可以导致疲劳破坏. 孤立波波峰到达时, 对结构物呈冲击作用 (Sarpkaya 1981, Chakrabarti 1994).

#### 4 结束语

基于海洋工程开发深海的迫切需求, 我们必须重视海洋内波, 特别是我国南海海域海洋内波的研究. 应注意加强对内波发生时间和地区的确定、内波流场计算以及内波同结构物的相互作用等相关的科学问题研究:

- (1) 温跃层动力学: 定量确定温跃层深度、强度的时间演化, 分析影响温跃层深度变化的影响因素, 特别是还应考虑厄尔尼诺和全球变化的影响;

- (2) 孤立子内波和内波包发生的机理和传播规律, 包括: 大气扰动、地形、地震等因素. 尤其是, 内潮通过海山、海沟、海槛, 大陆架突变处和狭窄水道时产生的内波;

- (3) 中国南海的内波谱和内波参数的统计分布;

- (4) 内波流场计算及其对各种海洋结构物和部件 (平台、立管、锚链等) 的作用力; 海洋结构的响应, 强度和疲劳分析;

- (5) 海洋结构物的防护措施.

#### 参 考 文 献

- 1 Cai S Q, et al. A method to estimate the force exerted by internal solitons on cylinder piles. *Ocean Eng*, 2003, 30: 673~689
- 2 Chakrabarti S K. Fluid structure interaction in offshore engineering. *Computational Mechanics Publication*, 1994
- 3 Cheng Y L, Li J C, Liu Y F. The Induced Flow Field by Internal Solitary Wave and Its Action on Cylindrical Piles in the Stratified Ocean. In: Zhuang F G, Li J C, eds. *Recent Advances in Fluid Mechanics*, Qinghua-Springer, 2004. 296~299
- 4 Grimshaw R. Internal Solitary Waves. In: Philip L-F Liu, ed. *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, Vol.3, World Scientific, 1997. 1~30
- 5 Hsu M K, Liu A K. Evolution of nonlinear internal waves northeast of Taiwan. In: *Proc Eighth Int Offshore and Polar Eng Conf*, Montreal, Canada, 1998-05-24-29, 1998. 18~24
- 6 Hsu M K, Liu A K, Liu C. A study of internal waves in the China seas and yellow sea using SAR. *Cont Shelf Res*, 2000, 20: 389~410
- 7 Jackson C R, Apel J R. *An Atlas of Internal Waves and their Properties*. Global Ocean Associates, 2002
- 8 Li J C. Turbulence in Atmosphere and Ocean. In: *New Trends on Fluid Mechanics and Theoretical Physics*, Peking University Press, 1993. 427~433
- 9 Liu A K, Chang Y S, Hsu M K, Liang N K. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas. *J Geophys Res*, 1998, 103(C4): 7995~8008
- 10 Orr M H, Mignerey P C. Nonlinear internal waves in the south China sea: Observation of the conversion of depression internal waves to elevation internal waves. *J Geophys Res*, 2003, 108(C3): 3064~3076
- 11 Sarpkaya T, Isaacson M. *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1981

- 12 Turner J S. Development of geophysical fluid dynamics: the influence of laborator experiments. *Appl Mech Rev*, 2000, 53(3): R11~R22
- 13 Wuest A, Lorke A. Small scale hydrodynamics in lakes. *Ann Rev Fluid Mech*, 2003, 35: 373~412
- 14 蔡树群, 甘子均. 南海北部孤立子内波研究进展. *地球科学进展*, 2001, 16(2) 215~219
- 15 蔡树群, 甘子均, 龙小敏. 南海北部孤立子内波的一些特征和演变. *科学通报*, 2001, 46(15): 1245~1250
- 16 杜涛, 吴巍等. 海洋内波的产生与分布. *海洋科学*, 2001, 25(4): 25~28
- 17 方文东, 陈荣裕, 毛庆文. 南海北部大陆坡区的突发性强流. *热带海洋*, 2000, 19(1): 70~75
- 18 富永政英. 海洋波动 - 基础理论和观测成果. 北京: 科学出版社, 1976. 423~456
- 19 李家春. 分层流中的瞬变波. *力学学报*, 1983, 11(6): 611~622

www.cnki.net