

分层流体中运动潜体生成的内波 以及内波的垂向结构研究

作者：魏 岗
专业：流体力学
导师：戴世强



上海大学出版社

· 上 海 ·

2004 年上海大学博士学位论文

分层流体中运动潜体生成的内波 以及内波的垂向结构研究

作 者： 魏 岗

专 业： 流体力学

导 师： 戴世强

上海大学出版社

· 上海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (2004)

**Waves Generated by a Submerged Body
Moving in Stratified Fluids and Vertical
Structures of Internal Waves**

Candidate: Wei Gang

Major: Fluid Mechanics

Supervisor: Prof. Dai Shiqiang

Shanghai University Press

· Shanghai ·

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：缪国平	教授，上海交通大学	200030
委员：黄思训	教授，解放军理工大学	200030
陶明德	教授，复旦大学	200433
李百齐	研究员，中船第 702 研究所	200011
刘宇陆	教授，上海大学	200072
王道增	教授，上海大学	200072
尤云祥	教授，上海交通大学	200030
导师：戴世强	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

缪国平	教授, 上海交通大学	200072
周连第	研究员, 中船第 702 研究所	200011
夏 南	教授, 上海大学	200062

评议人名单:

刘应中	教授, 上海交通大学	200030
张慧生	教授, 复旦大学	200072
鲁传敬	教授, 上海交通大学	200030
刘 桦	教授, 上海交通大学	200030
翁培奋	教授, 上海大学	200072
尤云祥	教授, 上海交通大学	200030

答辩委员会对论文的评语

分层流体中运动潜体生成的内波以及内波的垂向结构研究是当前流体动力学前沿热点之一。本学位论文采用理论分析和模型实验的方法,深入研究了分层流体中运动潜体所诱生的线性界面波、平孤立波和代数孤立波等问题,选题新颖,研究成果具有创新性,主要表现在如下几个方面:

(1) 通过引入两层流体系统中偶极子的 Green 函数,导出了其诱生波动的远场近似解析解,揭示了两层流体系统中运动偶极子产生的波模式间的相互作用对自由面辐射场的影响。对于两层流体密度差接近的极限情况,提出了消除奇性的方法,得到了合理的二阶近似解;

(2) 将运动物体引入共轭流模型中,首次建立了三层流体中运动潜体与共轭流相互作用的理论模型,提出了具有弱非线性弱色散平孤立波的判据,深入揭示了运动潜体与分层共轭流相互作用的物理机理;

(3) 建立了具有自由表面效应的上部浅层分层的大深度流体中的二维 Benjamin-Ono 方程,首次获得了它的代数孤立波精确解,揭示了此类非线性长波的垂向传播的特性;

(4) 系统地进行了球体和圆柱体在分层流中运动生成内波的模型试验研究,通过典型情况和实验模拟和特殊现象分析,定性地验证了一些理论结果;首次在实验室模拟中观察到两种特殊的波动现象,并获得了平孤立波存在的证据。

论文表明,作者对所研究领域的国内外动态和主要文献资

料有深入的了解,具有坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识,具有较强的独立从事科学研究工作的能力。

论文内容翔实,条理清晰,行文流畅,理论和实验结果真实可靠,是一篇优秀的博士学位论文。在答辩中,魏岗同学能正确地回答答辩委员会提出的有关问题。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过魏岗同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席: **缪国平**

2003 年 12 月 28 日

摘 要

论文采用理论分析和实验模拟相结合的方法研究了分层流体中运动潜体所产生的线性 Kelvin 界面波、平孤立内波以及代数孤立波,初步阐明了运动源致内波的特定结构及其对自由面产生的影响,为基于内波动力学原理的非声学探测进一步提供了一些科学依据.

论文的创新点及主要结果如下:

第一、提出了源汇叠加 Green 函数的后处理方法,该法简洁、直观,并易于推广应用到求解分层流体中多体和复杂形状物体运动的波动问题;首次探讨了两层流体系统中运动偶极子产生的波模式间的相互作用对自由面辐散场的影响,理论分析表明:当上下层流体密度跃变较大、潜体接近于界面、且 Froude 数 Fr 接近于临界值 Fr_n 时,两种波模式对自由面辐散场的影响程度趋于接近,并求得了两种波模式对自由面辐散场的贡献完全等同的特征 Froude 数 Fr_s ;首次获得了小密度差情形的可解性条件和一致有效的二阶波动解,并在密度比趋近于 1 的极限情形下,证明了不存在使界面波幅无穷大的内波模式,且高阶解退化为均质流体中 Newman 的二阶自由面波动解;所进行的实验模拟定性地证实了上述理论分析结果.

第二、首次建立了运动潜体与共轭流动相互作用的理论模型,提出了具有弱非线性弱色散平孤立内波的特征判据.数值试验表明:(a) 在三层流体底边界运动的二维潜体,其生成的共轭流以两界面同向上凸的形态最为显著;(b) 共轭流的分叉解比没

有运动潜体时增多,但在相对稳定的系统状态下,满足特征判据的流动总是唯一的;将上述模型推广到含自由面的两层共轭流模型,数值分析结果与用 fKdV 方程所作的理论预测相吻合;利用上述思想建立了台阶地形与共轭流动相互作用的理论模型,数值分析结果与直观物理图像相吻合;实验模拟定性地证实了相关的理论分析结果.

第三、首次获得了满足二维 Benjamin-Ono 方程的代数孤立波准确解,它比一维代数孤立波波长更短,波幅更高;应用射线理论和 WKB 方法分析了弱非线性长波的垂向传播特性,指出:密度跃变的增强伴随着内波低阶模式向高阶模式的转变,而高阶模式射线在跃层中心区域的弯折是导致界面不稳定的重要因素.

第四、首次在实验室模拟中观察到两种特殊的波动现象,定性地验证了理论预测,它们是:(a) 对在两层流体系统中运动的潜体,随着 Froude 数减小,界面 Kelvin 波的侧波波幅减小,横波波幅增大,随着两类波的合并,波动以横波传播,波幅逐渐减小,直至消失;(b) 对在三层流体系统中运动的二维柱体,随着 Froude 数增加,存在四种界面波动形态:“阻塞”态、规则波、过渡态和非规则波,其中平孤立波出现在过渡态,具有最大波幅.

关键词: 分层流体, 两层流体, 三层流体, Kelvin 波, 内波, 界面波, 平孤立波, 代数孤立波, 辐射场, 共轭流动, Green 函数, Benjamin-Ono 方程, 垂向结构

Abstract

This dissertation deals with the internal waves generated by a submerged moving body in stratified fluids, including linear interfacial Kelvin waves, flat internal solitary waves and algebraic solitary waves, by combining theoretical and experimental approaches. Some special structures of those internal waves and their effects on the free surface were elucidated. Scientific evidences were provided for non-acoustic detection of underwater moving bodies based on the principles of dynamics of the internal waves.

The novel points and main conclusions of this dissertation are described as follows.

1. An approach to velocity potentials obtained by superposing Green's functions of sources and sinks is presented, which is straightforward, intuitive and easy to be extended to complicated cases of multi-objects or asymmetrical bodies with arbitrary shapes moving in stratified fluids. The effects of interacting surface- and internal-wave modes induced by a dipole moving in a two-layer fluid on the surface divergence field are investigated for the first time. It is found that as the density ratio γ is not close to one, the dipole approaches to the interface and the Froude number Fr tends to the critical value Fr_n , the equivalent influence of the two wave modes on the divergence field at the free surface will be generated. A characteristic Froude number Fr_s corresponding to the situation of exactly the same influence imposed by the two modes on the free

surface is found. And a solvability condition for the case of small density difference between the two fluid layers and a uniformly valid second-order asymptotic solution are also first presented. For the limit case of $r \rightarrow 1$, it is theoretically shown that there exists no internal-wave mode with infinite amplitude at the interface, and the obtained solution is degenerated to Newman's solution for the single-layer fluid. The above theoretical results are qualitatively consistent with those obtained in our experiments.

2. A new theoretical model formulating the interaction of a submerged moving body with the conjugate flow in a three-layer fluid is first presented. A criterion for the existence of weakly-nonlinear weakly-dispersive (WNWD) flat solitary waves is worked out. The numerical results indicate that (a) the conjugate flow due to a two-dimensional body moving at the bottom possesses an apparent behavior with two convex interfaces; (b) the solution satisfying the existence criterion is always unique near the relatively stable state of system. By applying the model to the case of two-layer fluid system with a free surface, some theoretical results are given, agreeing well with those predicted by the fKdV model. In terms of the above modeling idea, a model for treating the interaction of step topography with the conjugate flow in a three-layer fluid is constructed. All these theoretical results are qualitatively confirmed by our experiments.

3. An exact solution satisfying the two-dimensional Benjamin-Ono equation is first presented, representing the two-dimensional algebraic solitary wave with shorter wavelength

and larger amplitude compared with the one-dimensional one. By means of the ray theory and WKB method, the vertically propagating properties of the weakly nonlinear long waves are attained. It is pointed out that as the density variation becomes drastic, the internal waves of lower-order modes begin to be converted into those of higher-order modes, and that the abrupt inflexion of ray lines of the higher-mode internal waves near the center of pycnocline probably plays an important role in the instability of pycnocline.

4. Two special phenomena have been observed in our experiments, which qualitatively verify the related theoretical predictions. One is that as the Froude number Fr for a sphere moving in the lower layer of a two-layer fluid system decreases, the amplitudes of divergent waves in the Kelvin wave system decrease and the amplitudes of transverse waves increase, and then, with the merging of the divergent and transverse waves into single transverse waves, their amplitudes become smaller and smaller, and finally close to zero. The other is that as Fr for a cylinder moving in the interior of a three-layer fluid increases, there exist four sorts of flow configuration: the blocking regime, regular waves, the transition regime and irregular waves. The flat solitary wave appears in the transition regime and usually possesses the maximum amplitude.

Key words stratified fluid, two-layer fluid, three-layer fluid, internal wave, interfacial wave, Kelvin wave, flat solitary wave, algebraic solitary wave, divergence field, conjugate flow, Green's function, Benjamin-Ono equation, vertical structure

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 研究背景和意义	3
1.3 国内外研究进展	7
1.4 本文主要工作	37
第二章 两层流体中运动潜体产生的内波及其与自由面的 相互作用	41
2.1 引 言	43
2.2 模型与基本方程	45
2.3 运动偶极子产生的内波	49
2.4 运动点源在具有小密度差分层流体中产生 的内波	95
2.5 小 结	105
第三章 三层流体中运动潜体与共轭流动的相互作用	108
3.1 引 言	110
3.2 模型和基本方程	112
3.3 几种特殊条件下的控制方程	116
3.4 弱非线性弱色散的平孤立	119
3.5 实例分析	123
3.6 模型推广: 台阶地形对共轭流动的影响	146
3.7 小 结	162

第四章 连续分层流体中弱非线性内波的垂向结构	
及其表面特征	164
4.1 引 言	166
4.2 模型与控制方程	167
4.3 二维 Benjamin-Ono 方程的解析解	177
4.4 内波的垂向结构	178
4.5 小 结	191
第五章 实验模拟和理论结果的验证	192
5.1 引 言	192
5.2 实验装置及方法	195
5.3 实验结果与分析	202
5.4 实验结果与理论结果的比较	233
5.7 小 结	236
第六章 总结和展望	238
6.1 主要结论	238
6.2 展 望	241
参考文献	243
致 谢	263

第一章 绪 论

1.1 引 言

内波是发生在层化水体(海洋、湖泊、河流、水库等)中的一类普遍现象. 内波现象的最早发现者是挪威探险家 F.Nansen, 他于 1893 年~1896 年驾驶考察船“Fram”号在北极海域探险时,发现船在冰溶解后的水面上航行时航速减慢,而后认定它是由船舶运动生成的内波增阻所致,并称此为“死水”(dead water)现象, (Ekman, 1904).

1978 年 6 月 28 日美国第一颗海事卫星首次从太空发回清晰的内波 SAR 影像,它是人类对海洋内波认识的一个里程碑. 1978 年, 美国石油勘探船 Discoverer 在东南亚的安达曼海和苏禄海发现了波幅高达 60 m 的内孤立波,并得到卫星照片的证实(Osborne *et al*, 1978; 1980). 20 世纪 90 年代,高振中(1991)首次提出古生代的内波、内潮汐沉积理论, 它对于深海中的内波、内潮汐的流动特征及沉积作用方式的认知具有及其重要的意义. 池顺良等(1997)提出的地震内波假说是对传统的板块构造理论的挑战. 2001 年 2 月,我国学者刘秦玉和谢尚平在“Science”杂志上撰文报道:发现了夏威夷群岛与海洋、大气相互作用所形成的一条 3000 公里的超长尾迹,它与层化大气和海洋中的内波有关, 这一发现将改善预测全球变暖的气候模式, 还将在渔业资源、海洋矿产的

利用和开发以及人类学的研究中发挥重要作用. 此外, 内波还能将表层溶解氧丰富的水输送到下层, 对改善渔业水域环境具有非常重要的作用(章守宇和杨红, 1999).

另一方面, 内波的负面效应亦愈来愈引起人们关注. 例如, 1963 年 4 月 10 日, 美国的“白鲨”号核潜艇在距麻萨诸塞州 350 km 的海域失事, 127 名海军官兵罹难, 据调查, 内波是罪魁祸首. 1992 年夏秋之交, 位于南海的我国“南海 VI”号石油钻井平台遭受周期性的强内波的破坏, 致使钻机受损, 作业中断.

上述例子说明, 内波研究极具重要性. 随着人类认识自然能力的提高, 对内波的认识逐步迈向新的高度, 从古代到现代, 从地球内部到表面, 从大气到海洋, 从经济发展到国防建设, 内波在诸多领域愈来愈引起人们注意.

内波具有如此神奇的吸引力, 源于它所具有的特殊性质. 众所周知, 不可压缩流体密度分布的非均匀性导致重力和浮力沿深度变化, 两者构成的约化重力是内波波动的恢复力, 其恢复频率(通称浮力频率或 Brunt-Vasaila 频率) $N(z) = (-g(\partial \rho_0 / \partial z) / \rho_0)^{1/2}$ 非常小, 海洋中的典型值约为 $4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, 这是它区别于水波(如表面重力波)的重要特征. 此外, 内波还有其它许多与众不同的特性, 诸如: 传播方向任意, 相速度与群速度互相垂直, 铅垂方向结构特殊, 波要素覆盖范围广(如: 波幅从若干米到上百米, 波长从几米到最长的几百公里, 周期可为十几到几十小时不等)等等(参看 Phillips, 1977; 梅强中, 1982; 富永政英, 1984; 徐肇廷, 1999).

一个随之而来的问题是: 海洋内波是如何产生的? 这也是内波研究中倍受关注的问题. 目前已经知道: 海洋中激励内波的源来自海洋的上边界(如风生表面压力场的移动、舰船在水面的运

动等)、海洋的下边界(如起伏地形造成的扰动、地震等海底的剧烈震动等)以及海洋内部(如各种海流、鱼群游动、运动潜艇的扰动等). 与上述内波研究相关的课题相当广泛, 详细的内容可参看有关专著和综述(Phillips, 1977; Yih, 1980; 徐肇廷, 1999; Miropol'sky, 2001; 杜涛等, 2001). 本文的主题是: 在分层流体中运动潜体产生的内波. 以下阐述本文工作的背景和意义、内容和方法以及国内外研究进展.

1.2 研究背景和意义

水下武器装备是维系国家安全的一个关键因素, 潜艇以其在海洋中的隐蔽性和机动性的特点发挥了其它舰种难以起到的作用, 尤其是核潜艇具有持久的续航力, 它已成为战略武器的有效载荷, 是国家战略核威慑的重要组成部分. 因而反潜技术亦成为各国武器发展的重要方向之一, 及时有效地发现敌方潜艇的方位、下潜深度、航速及航行姿态等特征参数是增加己方防御能力和反击有效性的先决条件. 声纳探测是目前探测潜艇的最重要的手段, 利用物理学的其它原理(如热力学、电磁学、光学、生物学原理)进行非声学的探测也常作为辅助手段(Stefanick, 1988). 表 1.1 是非声学探测方法的基本原理和局限性.

然而随着潜艇降噪技术和隐身水平的提高, 如: 核动力、泵喷射、仿生、超导磁流体等无桨推进技术的推广, 以及消声瓦、复合材料、钛合金等隐身材料的广泛应用, 特别是海洋中普遍存在的温跃层所导致的“声盲区”, 这些因素都极大地限制了传统声学探测技术及上述非声学探测的使用效能, 以至于目前在 200~300 m 的海洋深度, 要发现敌方潜艇变得十分困难(吴有生和崔维成, 2001; 施征, 2002; 张军, 2003).