

分层流体中运动源生成的内波研究进展*

魏 岗^{1,†} 戴世强²

¹ 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030

² 上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072

摘 要 针对两类密度分布模型——连续分层流体和间断分层流体, 综述了在运动潜体生成的 Kelvin 型和非 Kelvin 型内尾迹研究方面的现状, 内容侧重于运动源生成内波的解析理论和分层拖曳水槽中内尾迹实验方面的研究成果. 介绍了在连续分层流体中运动源生成的 Kelvin 型非线性内波的一般方程和在间断分层流体中 Kelvin 型内波的势流分析的一般方法; 概述了运动源诱生的先锋内孤立子、代数孤立子和平孤立波 3 类特殊非线性内波的研究进展, 其中运动潜体生成的平孤立内波被作者实验证实是一类极限孤立波, 并首次建立了共轭流动模型予以描述; 综合分析了在密度线性分布流体中潜体运动生成内波的动力学过程多样性特征, 其中包括内尾迹近场和远场的时空结构、不稳定结构、涡旋与湍流耦合结构以及湍流与内波相互作用结构等.

关键词 分层流, 运动物体, Kelvin 型尾迹, 非 Kelvin 型尾迹, 内波, 内孤立子

1 引言

内波是发生在层化海洋中的一类普遍现象, 人们对内波现象的认识, 始于海洋中运动船舶诱生内波增阻的所谓“死水”效应^[1]. 1978 年 6 月 28 日, 海洋卫星“Seasat”从太空发回清晰的合成孔径雷达(简称 SAR)的内波影像, 成为人类认识海洋内波的一个新的里程碑. 随着对大自然认识能力的提高, 内波问题已成为水动力学、物理海洋学、大气科学、沉积学、地震学、船舶及海洋工程以及军事工程等诸多学科领域关注的焦点^[2~9].

内波区别于通常意义下水波(如表面重力波)的重要特征在于: 分层流体中密度分布的非均匀性, 导致重力和浮力沿深度发生变化, 而内部波动的恢复力频率又非常小, 使得波要素覆盖的范围扩大, 例如, 海洋中 Brunt-Vasaila 频率或浮力频率的典型值约为 10^{-4}s^{-1} , 内波的周期可从几小时至几十小时, 波长可从几米到几百公里, 波幅可从几米达百米不等. 此外, 内波具有传播方向任意、相速度与群速度相互垂直等特殊的垂向结构. 海洋中激励内波的源

主要来自海洋的上边界, 如: 风生表面压力场的移动、水面舰船的运动等; 海洋的下边界, 如: 起伏地形造成的扰动、地震等引起的海底剧烈震动等; 海洋的内部, 如: 各种海流、鱼群游动、潜航器运动等产生的扰动.

分层流体中运动潜体所致内波的动力学过程具有多样性, 如波-波、波-流、波-涡等相互作用, 以及波破碎、湍流、随机内波等非线性相互作用, 认识分层流体中内尾迹的时空演化规律是一项极具学术意义和应用价值的研究课题. 传统的解析理论、实验方法和数值模拟依然是研究这一问题的主要方法, 值得指出的是: 现代空间遥感技术的发展为传统的内波研究及其工程应用不断地提出新的课题, 促进了其理论研究与应用技术的紧密结合.

为了系统地建立对分层流体中运动物体复杂内尾迹结构的认识, 本文按照流体密度连续分层和间断分层两类模型, 综述了 Kelvin 型和非 Kelvin 型内尾迹的时空演化特征及其规律, 侧重于运动源生成内波的解析理论以及分层拖曳水槽中内尾迹实验方面的研究成果.

收稿日期: 2005-01-08, 修回日期: 2005-08-06

* 国家自然科学基金(10172059)及中国博士后基金(2004036099)资助项目

† E-mail: Gwei@sjtu.edu.cn

致的内波, 指出自由面形变率参数在内波与自由面相互作用中具有重要作用. 类似于 Miles 的体源表示法, Gorodtsov 等^[21] 推导了线性内波方程及其波场解, 讨论了变强度源的内尾迹问题. Gray 等^[22] 的讨论则侧重于点源生成的内波场中的 Mach 峰. 借助 Phillips 的内波理论^[23], Sharman^[24] 指出, 表面 Kelvin 波与 Kelvin 内尾迹的区别在于: 前者只存在一种模态, 而后者存在着 n 组模态 (n 为截断模态数), 每种模态有各自的侧波和横波系. 在自由面“刚盖”近似条件下, Boroviko^[25] 利用摄动方法处理了三维扁平体运动生成的内波尾迹. Tulin^[26] 提供了在强温跃层情况下表面船舶运动所导致的内波振动谱. 最近, 徐肇廷等^[27] 导出了运动潜体生成内波的一类非线性谱方程.

Lighthill^[28] 系统地建立了关于分层流体中点源运动 (包括水平、垂直运动和振动) 的理论, 阐述了二维和三维水平运动的本质差异. 利用色散关系和驻相法, Kell & Munk^[29] 分析了各向异性介质中一般体源生成的内尾迹的几何形态, 其基本思想是引入“射线”概念. Watson 等^[30] 所进行的海洋船舶实验以及相应的 SAR 成像分析, 验证了 Kell & Munk 的理论研究. Yih & Zhu^[31] 基于射线理论, 对 Kelvin 波形仅依赖于色散关系的结论进行了一般性证明, 该结论不仅适用于无限深和有限深均匀流体的表面波、毛细重力波, 也适用于非均匀流体中的内波.

此外, 人们还广泛研究了分层流体中物体其它运动形式生成的内波问题, 如物体的垂直运动情形^[28,32,33], 振动情形^[28,32,34~36] (包括行进中的振动), 变质量源情形^[28,37], 以及考虑流体黏性的情形^[38,39]. 对于有限尺度的物形处理, 常限于特殊形状的刚体, 所用方法基本上是探究渐近的、远场的性态. 例如: 考虑突然起动的圆柱或球体产生的 Boussinesq 内波问题^[40,41]; 考虑椭球体、细长体、球形和柱形的自由振荡^[42~45] 以及球的脉动而产生的内波问题^[46].

上述 Kelvin 型内尾迹的理论研究, 可一般性地归纳为运动源产生的三维波动问题. 考虑源项的作用, 无黏、不可压、Boussinesq 近似下的控制方程可表示为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_0(u_i))}{\partial x_i} = Q(x_i, t) \quad (2)$$

$$\rho_0 \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho' g_i = -u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

其中, Q 为质量流率, p, ρ' 分别为压力和扰动密度, u_i ($i = 1, 2, 3$) 为速度分量, g_i ($0, 0, -g$) 为重力加速度, 未扰动密度 $\rho_0(z)$ 是深度的函数. 令 $q = \rho_0 w$, 消去 u_i 和 p , 上述方程可转化为含源项的三维内波控制方程

$$\nabla^2 \left(\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} \right) + [N(z)]^2 \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial^3 Q}{\partial t^2 \partial z^2} + J \quad (4)$$

其中 $N(z)$ 为 Brunt-Vaisala 频率, J 为非线性项产生的作用, 其表达式为

$$J = \frac{\partial^3}{\partial x_\alpha \partial z \partial t} \left(u_j \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_j} \right) - \nabla_h \left\{ u_j \frac{\partial b}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial t} \left(u_j \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (5)$$

式中, $\nabla_h = \partial/\partial x_1 + \partial/\partial x_2$, $b = -g(\rho - \rho_0)/\rho_0$ 和 $u_j = (u_\alpha, w)$, $\alpha = 1, 2$.

求解上述问题的传统思路: 在线性理论范畴内, $J = 0$, 借助于 Fourier 变换或 Laplace 变换, 将问题转化为谱空间中的问题; 在非线性理论范畴内, $J \neq 0$, 可借助于摄动方法或非线性谱展开^[47,27]. 对于一般密度分布函数, 引入广义的 Green 势函数, 在满足正交模态分解条件下, 它是一个内 Mach 锥的 Wronsky 行列式, 用来表征在扰动源附近水平面上的内 Kelvin 波系函数^[27,28,48].

内波解通常以积分形式表示, 求积分的方法有驻相法、群速度法和等相位法等^[49]. Rayleigh 的虚拟阻力方法^[15] 常被运用于确定奇性问题的围道积分. 内波解通常有 n 个模态, 其零模态 ($n = 0$) 对应于表面波. 对于 $Q = 0$ 的无源情形, 显然 $q = 0$ 是方程 (4) 的一个平凡解, 它对应于无垂向波动的纯水平运动.

一般地, 内波的色散关系可写为^[28,50]

$$\omega^2 = N^2 \cos^2 \theta \quad (6)$$

式中 ω 是对应于波矢 \mathbf{k} 的频率, θ 为 \mathbf{k} 与水平面的夹角. 相速度 $c = \omega/k$ 沿 \mathbf{k} 方向, 群速度 $\mathbf{c}_g = \nabla_{\mathbf{k}} \omega$ 与 \mathbf{k} 的方向垂直.

在内波特征量相对于波长或周期缓慢变化的假设下, 又称缓变波假设, 射线理论是研究线性和非线性内波传播的一类重要方法, 从该理论的基本点

出发可确定 Kelvin 内尾迹的几何形状^[29,31], 借助波作用量沿射线的守恒性质, 可计算波动的幅度. 由于在焦散线或面 (相邻射线的交点组成的线或面) 附近前述假设不成立, 射线理论的发展受到限制, 最近, Brown^[51]、Broutman^[52,53] 等用 Maslov 方法^[54] 获得了焦散线或面附近的射线解, 使得射线方法应用于大气和海洋中内波问题的研究取得了实质性的进展^[55].

另外, 运动物体生成内波增阻问题可借助于表面运动船舶的波阻理论进行研究, 如采用 Michell“薄船”波阻理论、能量法及 Havelock 等效奇点分布法等^[49,56,57].

2.2.2 非 Kelvin 型内尾迹

由于非 Kelvin 型内尾迹中伴随有涡旋、湍流、剪切流和各类不稳定的随机现象, 以及各种运动与分层环境的混合, 它们既是内波的生成源, 也是与内波相互作用导致问题复杂化的根本原因, 目前单纯依赖于某一理论而彻底解决非 Kelvin 型内波问题是不现实的. 激励内波的共振相互作用机制是迄今发展较为成熟的理论, 诸多学者对其进行了广泛的研究^[58~63], 射线理论在处理非线性内波问题方面近年来也得到不断完善^[55,64], 详细内容参见所列文献.

本文着重介绍 Riley^[65] 关于内波非线性相互作用的一类特殊理论模型. 根据分层流体中远场内尾迹的重要特征: 浮力为支配流体运动的主要动力, 以及尾迹具有准水平的二维运动特征, 为此, 将速度场按位涡项分解为

$$\mathbf{u} = (\nabla_h \varphi + w \mathbf{e}_z) + \mathbf{e}_z \times \nabla_h \psi \quad (7)$$

式中 φ, ψ 分别表示速度势和流函数, w 为垂向速度分量, 右端的括号项表示波动, 第二项表示位涡或 PV 分量. PV 分量对内波场的能谱变换具有非常强的影响, 它是诱生内波的重要根源之一. 考虑各种耦合相互作用, 借助多重时间尺度法可推出控制方程

$$\frac{\partial^2}{\partial t_0^2} \nabla^2 w + \nabla_h^2 w = -2\mu \frac{\partial^2}{\partial t_0 \partial t_1} \nabla^2 w + \mu(I_{ww} + I_{wv} + I_{vv}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_0} \nabla_h^2 \psi_h^2 = -\mu \frac{\partial}{\partial t_1} \nabla_h^2 \psi + \mu(J_{ww} + J_{wv} + J_{vv}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t_0} + w = -\mu \frac{\partial b}{\partial t_1} + \mu(K_{ww} + K_{wv}) \quad (10)$$

其中 t_0, t_1 分别为浮力和对流时间尺度变量, $\beta = -g\rho/\rho_0$, $\mu = Fr = U/NL$, 而 I, J 和 K 分别表示波-波、波-位涡和位涡-位涡间的耦合相互作用.

2.3 密度间断分层模型

2.3.1 界面 Kelvin 波

密度间断分层流体中运动源生成的界面波研究主要集中于两层和三层流体系统的情形. Hudimac^[66] 早期在对两层无限深流体上层运动点源问题的研究中指出: 界面 Kelvin 波两种波系的存在取决于参数 $Fr = (U^2 \rho_1 / ((\rho_2 - \rho_1)gh))^{1/2}$, 其中 U 为源的水平匀速度, ρ_1 、 ρ_2 分别为上、下层流体密度, h 是上层流体的厚度, g 是重力加速度, 当 $Fr > 1$ 时, 仅存在侧波系; 而当 $Fr < 1$ 时, 同时存在侧波系和横波系. Crapper^[67] 考虑了一个在两层无限深流体自由面上运动点源生成的界面 Kelvin 波问题, 明确指出, 两层流体系统中存在两种模式的波: 表面波模态和界面波模态, 其中分层效应对表面波模态的影响甚小, 界面波波幅取决于上层流体厚度和密度差. Yih & Zhu^[31] 还从色散关系直接给出了两层流体界面 Kelvin 波的几何结构. Yeung & Nguyen^[68] 给出了点源在两层有限深流体上层运动的 Green 函数, 证明了自由面和界面 Kelvin 波的两种波系的存在取决于临界 Froude 数

$$Fr_n = (1/2 + (-1)^{n+1} \sqrt{1/4 - (1 - \gamma)h_1 h_2 / h^2})^{1/2}$$

这里, $n = 1, 2$ 分别对应于表面波模态和内波模态, h_1 、 h_2 分别为上下流体层厚度, $h = h_1 + h_2$, $\gamma = \rho_1/\rho_2$, 并讨论了两种模态相互作用对波幅的影响. 沈国光等^[69] 应用 Lapace 变换和基元叠加的方法, 对两层有限深流体中点源和细长潜体的不定常 Kelvin 波进行了理论求解, 给出了自由面和界面的 Kelvin 波形和兴波阻力. Krikerov^[70] 考虑了一个三层无限深流体系统中点源的运动问题, 讨论了非定常的 Kelvin 波的性质. Timour^[71] 将 Yeung & Nguyen 的两层流体模型推广至多层流体系统, 利用摄动方法证明了: 当点源运动速度非常小时, 对自由面的影响主要来自第 ν 个内波模态 (ν 为点源所在的层数). Wei 等^[72] 重点分析了点源在两层有限深流体的下层运动时, 两种模态的波相互作用及其对自由面辐射场的影响, 理论分析结果与马晖扬等^[73] 的实验结果基本吻合. Wei 等^[74] 还讨论了两层有限深流体中偶极子的运动情形, 其叠加源汇 Green 函

数的后处理方法易于推广应用到分层流体中的多体运动问题. 进一步, 魏岗等^[75]给出了两层有限深流体系统中, 小密度差情形的可解性条件和一致有效的二阶波动解, 从理论上解释了密度比趋于 1 时, 内波模态导致界面线性理论失真的原因.

由于密度间断分层流体系统中各层为常密度流体, 上述 Kelvin 内尾迹的理论研究一般可借助于均匀流体中的线性势流理论, 运动物体可由各类奇点(如点源、点汇、偶极子或连续分布奇点)来取代, 求解的基本步骤是: 引入分布奇点的 Green 函数, 作 Fourier 变换或 Laplace 变换, 将问题转化为谱空间的 Sturm-Liouville 型方程(如 Helmholtz 方程)进行求解.

2.3.2 内孤立波

在密度间断分层流体中, 先锋内孤立子、代数内孤立子和内波是非 Kelvin 内尾迹中具有典型意义的 3 类波动. 第一类是弱非线性、弱色散性以及强迫力(如运动物体产生的强迫力)三者平衡作用导致的传播孤立波; 第二类是由弱非线性和弱色散性平衡所致的孤立波, 它不受浅水条件限制, 当扰动尺度接近密度跃层厚度时即可能存在; 第三类是内孤立波的一种极限形式, 它可以是完全非线性、完全色散的有限振幅内波.

2.3.2.1 先锋内孤立子

在均匀有限深流体中, 当船舶或底部障碍物的运动 Froude 数 $Fr = U/\sqrt{gL}$ 满足条件 $Fr_L < Fr < Fr_c$ 时(其中 Fr_c 和 Fr_L 分别定义为转向点和截断点的 Froude 数), 定常运动物体向上游或下游周期性地发射的孤立波, 称之为先锋孤立子. 率先在此领域开展工作的是吴铭德和吴耀祖^[76], 有关研究可参看周显初的综述^[77], 徐肇廷等最近还建立了先锋孤立子尾波列的一个有效预报方法^[78]. Long^[79]是最早在分层流试验中发现此类孤立波的学者, 或许是 fKdV 方程当时并未被充分理解, 故未引起注意. Zhu Jinling^[80]在吴耀祖先生指导下完成了有关先锋内孤立子的博士论文. 之后, 两层流体系统中由外力强迫共振产生的先锋内孤立子与单层流体中的强迫共振效应具有完全相似的作用被相继证实^[81,82]. Shen^[83]进一步分析了强迫尺度效应对含自由面的两层流体系统中的先锋内孤立子的影响. 徐肇廷等^[84]得到了两层流体系统中先锋内孤立子的发射周期和波阻等重要参数. 一些学者开始运用先锋内孤立子的模型来解释不平地形生成的内孤立波的 SAR 影像^[85,86].

对于更复杂的流体系统, 如三层混合分层(上、下层均匀, 中间层密度线性分布), Lofquist^[87]和 Andreassen^[88]分别从理论和实验角度描述了二维和三维潜体运动产生的界面波特性的, 其中对于波长较短的波动, 理论预测较为接近实际, 但对于波长大的孤立波, 预测与实验结果偏差较大. Mathinern^[89]还讨论了三层流体模型中不同的地形和风速分布对 Lee 波的影响, 理论分析与卫星的 SAR 影像吻合. 三层流体模型更接近于真实海洋的情况, 一些学者用此模型开展了对海洋内波(包括内孤立波)的研究^[90,91].

2.3.2.2 代数孤立子

在具有密度跃变的大深度流体中, 当扰动尺度(如大型潜航器的几何尺寸)接近于密度急剧变化的尺度时, 会出现一类特殊形式的孤立波——代数孤立子. 它最早由 Benjamin^[92]和 David & Acrivos^[93]分别在理论分析和实验室实验中发现, 之后, Ono^[94]将 Benjamin 的理论推广到非定常情形, 得到一类非线性发展方程, 称为 Benjamin-Ono 方程(以下简称 BO 方程). Pinkel^[95]在大深度海洋的浅层实测到了二阶内孤立波, 证实了 BO 方程描述的合理性. Shishkina^[96]在具有温跃层的水槽实验中, 证实了椭圆体运动产生的孤立波具有代数内孤立子的形状.

诸多学者基于不同观点, 研究了代数孤立波. 例如, Benjamin^[92]从 Long 方程出发, 采用拟 Lagrange 坐标推导了 BO 方程; 朱勇^[97]从 Lagrange 观点出发, 探讨了 BO 型孤立波的相互作用; 程友良和戴世强^[98]直接从 Euler 方程出发建立了深分层流体中的二阶代数内孤立子理论. 此外, BO 方程还具有诸多与 KdV 型方程完全类似的性质, 如: 张鸿庆和张玉峰^[99]利用屠规彰格式获得了 BO 方程的 Backlund 变换和无穷多个守恒律; 庄大蔚^[100]获得了 BO 方程的对称递推关系; 张领海^[101]证明了广义三阶 BO 方程的整体弱解的存在性; 韩效育等^[102]细致地研究了一维高阶 BO 方程的衰减性质. 二维 BO 方程是由 Ablowitz & Segur^[103]在研究横向扰动对代数孤立波稳定性影响时建立, 它类似于由 KdV 方程得到的 KP 方程^[104,105]. Tsuji 等^[106]对两层流体系统中二维代数孤立波的斜相互作用进行了数值模拟. 最近, 魏岗等^[64]获得了二维 BO 方程的准确解, 它较一维代数孤立子波长更短、波幅更高.

2.3.2.3 平孤立内波

在密度指数分布和双曲正切分布的两种分层流结构中, Turkington^[107] 分别数值模拟出两类孤立波, 一类是人们熟悉的孤立波, 其波形呈单峰突起状, 波包的宽度反比于波幅, 传播速度随波幅增大而增大; 另一类称为平孤立波, 其波峰平缓, 波包的宽度随波幅增大而变宽, 最大波幅对应的波面速度呈水平均匀分布. 后者对应的密度双曲正切型分布是 Holmboe 型分布的二阶展开, 而 Holmboe 型分布是温跃层结构的一种很好的近似^[108], 其极限形式退化为两层流体系统.

平孤立波具有共轭流动 (conjugate flow) 的特征. 共轭流动的概念由 Benjamin^[92] 最早提出: 假设平孤立波的波能增至无穷大, 则波面的后缘将移至 $-\infty$ 远处, 流动转化为前后两个均匀的水平流动, 其间为一个以波速传播的永形波前. Benjamin 还率先将共轭流动的概念应用于内波的研究. 共轭流动的概念也可用于两层或两层以上流体内部水跃问题的研究^[109].

内波的波幅通常有较大变化范围, 一方面, 它可对海洋中的浮体或运动物体产生附加的载荷; 另一方面, 它在海洋表面的表现特征已成为人们了解海洋内部复杂结构的重要依据. 因此, 内波的振幅以及极限内波 (最大振幅) 的预报历来受到人们的重视. Long^[110] 和 Benjamin^[92] 都曾指出: 内波研究中广泛应用的 Boussineq 近似, 可能导致对有限振幅内波预测的失败, 而共轭流模型以非 Boussineq 近似及完全非线性边界条件为基础, 避开了 Boussineq 近似的假设, 更接近于真实物理问题, 它正在被发展为确定内波最大波幅的一种方法^[111~114]. 大量共轭流动问题的研究集中于两层流体模型^[111,115~119], Lamb^[120] 基于拟 Lagrange 坐标和水平动量守恒条件建立了三层流体中共轭流动的完全非线性控制方程, 分析了 Boussineq 近似和非 Boussineq 近似下共轭流动的性质. Rusan & Grue^[121] 关于三层流体中共轭流动的研究侧重于对薄的跃层与两层共轭流模型逼近程度的比较.

考虑一定形状的物体与共轭流动的作用问题, 通常须借助 Schwarz 变换和求 Cauchy 主值积分, 如 Huyun^[122] 分析了在两层流体系统中半圆地形与共轭流动的相互作用; Wei 等^[123] 借助 Lamb 的三层共轭流动模型分析了台阶地形与共轭流动的相互作用. 最近, 魏岗等^[124,125] 在一系列分层流实验中

观察到运动潜体生成的平孤立内波, 如图 1, 进一步证实了它是一类极限内波, 同时, 作者提出的运动潜体与共轭流动相互作用的理论模型, 较好地预测了平孤立内波的波动特征.

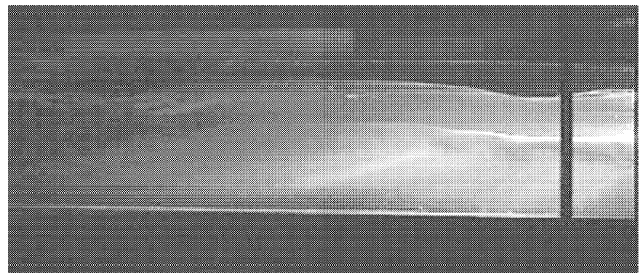


图 1 三层流体中运动潜体生成的平孤立波

3 实验室模拟

3.1 实验设备和方法

运动物体生成内波的实验包括实验室模拟和海洋观测. 前者在实验室分层水槽中进行; 后者常在有明显温跃层结构的海域内进行, 利用星载或机载的 SAR 对表面航行的舰船进行成像, 同时也可利用海流计、海温计以及密度仪等测量仪器进行海洋调查. 本节仅就实验室模拟的设备和方法做一概述.

本着不同的目的, 实验中内波水槽、潜体拖曳方式以及流体的分层途径可以有不同的选择. 水槽的结构大致分为 4 类: 深水槽^[126]、浅水槽^[73]、窄长水槽^[127] 和循环水槽^[128]. 潜体的拖曳方式大致有 5 种: 垂直刚性支杆拖曳法、水平线拖曳法、三线拖曳法、悬线拖曳法和自驱动法, 它们的应用情况归纳在表 1 中. 流体的分层可采用两种实现方式: 一种是传统的“双桶法”, 它源于生物学的“双试管法”^[129], 原则上可生成任意密度剖面的分层流体^[130,4], 中国海洋大学近年来在分层流环境制备和内波造波等研究方面独具特色^[131]; 另一种是“热分层法”, 它可以在水槽任意水平层面生成温跃层结构^[96]. 在内波的显示技术方面, 传统的可视化手段, 如阴影法、彩液显示法、电解沉淀法、氢气泡法、粒子示踪法、激光诱导荧光法、片光技术等, 都已用于分层流体的定性和半定量研究; 分层流体定量研究也已从单纯的流场测量技术, 如热膜方法、PIV 技术等, 发展为具有测量和数据处理综合功能的技术, 如 DPIV 技术、CIV 技术以及图像灰度方法等^[11,132]; 密度测量已从常规的测量仪器, 如折射计、比重计等, 发展为全场的、具有较高时空分辨率并可动态测量密度变化的

技术, 如铂丝探针 (密度) 测量仪、内波动态 (电导率) 测量仪等 [133,135].

表 1 潜体的拖曳方式

分类	适用范围	局限性	研究者
垂直刚性 直杆拖曳法	二维物形; 上、下游波场	支杆对自由面的影响; 支杆对尾涡、湍流场的影响; 未考虑潜体的浮力和重力因素	Shishkina ^[96] Zhang ^[136]
水平线拖曳法	三维物形; 上下游、 自由面及界面波场	拖曳线对尾涡、湍流场的影响; 未考虑潜体的浮力和重力因素	马晖扬 ^[73]
三线拖曳法	三维物形; 尾迹中 的波、涡、流场	拖曳线对自由面、界面的干扰; 未考虑潜体的浮力和重力因素	Chomaz ^[137] Spedding ^[138]
悬线拖曳法	三维物形; 低速; 上游流场; 毛细波	速度低; 稳定性能不佳	Crapper ^[139]
自驱动法	三维物形; 上下游 流场; 尾流中的波、 涡、流场; 自由面、 界面波动	技术要求高; 不易控制操纵稳定性; 自驱动产生的其它效应	Gilreath ^[127] Schooley ^[140]

3.2 Kelvin 型内尾迹

在分层流体中, 单纯 Kelvin 内尾迹的实验研究主要集中于对尾迹几何结构的理论验证上. 例如: Hopfinger & Flor^[141] 对于小球在线性密度分布流体中的内尾迹的实验研究, 验证了 Makarov^[142] 等人推导的抛物形内尾迹结构; 马晖扬等^[73] 在两层流体中对小球内尾迹的实验, 侧重于界面 Kelvin 波对自由面的影响; Robey^[143] 在由“热分层法”形成的具有温跃层结构的流体中的小球内尾迹实验, 以及 Watson & Honga^[144] 在具有显著温跃层的 Lock 海实测水面舰船的内尾迹, 都验证了 Keller & Munk^[29] 关于远场 Kelvin 内尾迹几何结构的理论预测.

目前, 借助表面运动船舶在分层海洋中生成的内尾迹来反演三维流场结构的研究正愈来愈引起研究者的兴趣. 例如, 利用表面船舶运动生成的内尾迹来分析 SAR 的内波成像机理^[145,146], 以及利用它来反演海洋的密度分布结构^[147] 等.

3.3 非 Kelvin 型内尾迹

非 Kelvin 内尾迹的形态与流体的分层情况有关, 在连续分层流体中, 它主要以各种不稳定结构、破碎波、湍流、涡旋以及任意扰动激励的三维内波等形式出现. 自 Lin & Pao^[13] 给出分层流体中内尾迹近场结构的综述以来, 大量的实验研究, 包括湍流辐射的内波^[127,141]、背景剪切流场对内波的影响^[148~151] 以及内波波谱及其变化^[152] 等等, 它们为进一步理解层化海洋中运动潜体内尾迹的运动学和动力学特征提供了很好的帮助. 限于篇幅, 这里仅

涉及密度线性分布流体中小球内尾迹的时空结构及其对相似参数的依赖规律. 显然, 准确、客观地认识这些基本物理图像是深入了解复杂内尾迹结构的基础. 为方便叙述, 我们按内尾迹的近场和远场结构的顺序概述之.

3.3.1 内尾迹的近场结构

对于在 $0.005 \leq Fr \leq 20$ 和 $5.0 \leq Re \leq 10^4$ 范围变化的相似参数, Lin^[153], Lofquist^[154] 及 Honji^[155] 等的大量实验获得了内尾迹近场空间的基本结构及其依赖 (Fr, Re) 的变化特征, 如图 2 所示. 研究表

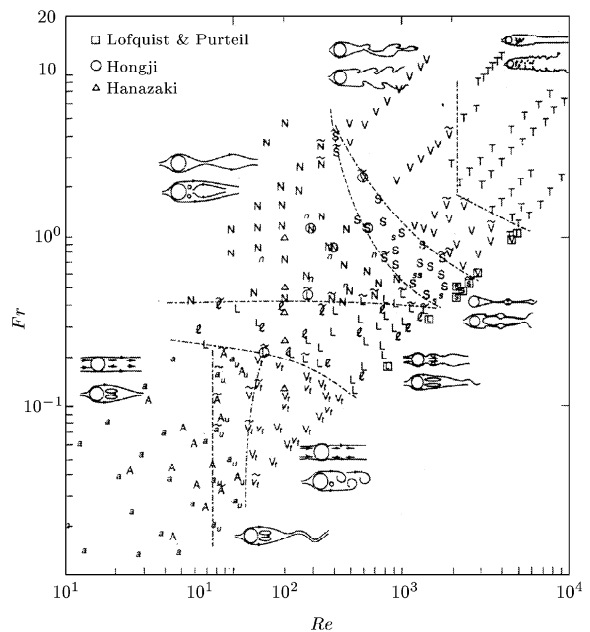


图 2 内尾迹近场的流动形态及其依赖于 (Fr, Re) 的变化. 取自 Lin 等的实验结构^[153]

明: 内尾迹主要以 8 种流态出现, 即稳定的二维附着涡、不稳定的附着涡、二维脱落涡、不稳定对称的 Lee 波、非轴对称附着涡、对称的脱落涡、非对称的脱落涡以及湍流. 不同的拖曳方式将影响尾迹流态在 (Fr, Re) 平面中的分布, 图中大小写字母表示两种不同拖曳方式(垂向支杆拖曳和三线拖曳)的实验结果. 与匀质流体中内尾迹的结构比较^[156~158], 涡旋的脱落受到分层效应非常显著的影响, 数值分析也获得了同样的结论^[159].

在分层流体中, 内尾迹还存在类似于均匀流体中的各种不稳定性结构. 例如, 内尾迹在分层流体中存在对应 Kelvin-Helmholtz(以下简称 K-H) 不稳定和螺旋不稳定结构的两个双频区^[159,160], 其中当 $Fr > 1.5$ 时, 在 $Re = 4 \times 10^2$ 和 $Re = 4 \times 10^3$ 的情况下, 可分别出现弱的和强的螺旋不稳定, 对应的螺旋波 Nt 可从 2.5 维持到 3.0; 而 K-H 不稳定主要发生于强剪切流和弱分层的流层中, 它常常是内尾迹与背景密度场强烈混合的开端. 研究表明: K-H 不稳定性是导致大振幅内波的根源^[161]. 此外, 在弱的剪切流动中, 还伴有 Holmboe 不稳定^[162~164]. 基于稳定和不确定性方面的考虑, Chomaz 等^[160] 将流动在 (Fr, Re) 平面上划分为 4 个区域(如图 3 所示):

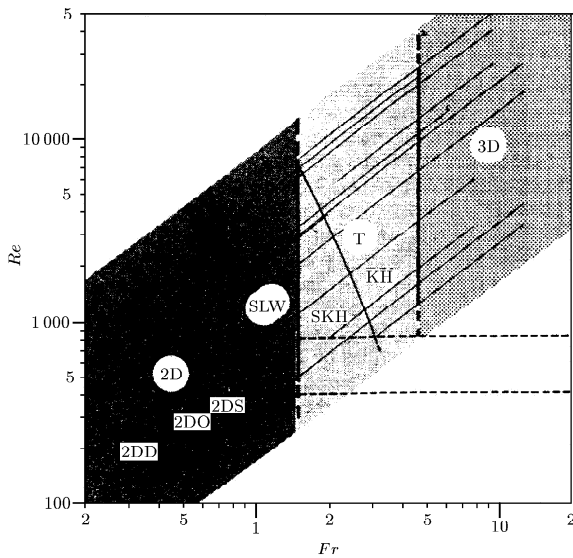


图 3 在 (Fr, Re) 平面上, 内尾迹近场的不稳定性结构^[160]

(1) $Fr < 0.8$, 对应于二维流动 (2D), 它包括 4 种流态, 分别是二维尾流 (2DD)、二维分离流、二维振荡流 (2DO) 和二维非振荡流 (2DS); (2) $0.5 < Fr < 1.5$, 对应于饱和 Lee 波区 (SLW); (3) $1.5 < Fr < 4.5$, 对应于流动的转变 (T), 它包含有 K-H 和非 K-H (SKH) 两个不稳定的区域; (4) $Fr > 4.5$, 对应于三维尾流

区 (3D), 此区域中分层效应对近尾流的影响较弱. 对于更高的 Froude 数 Fr , 当 $Nt > 20$ 时, 可以完全忽略 Lee 波波幅, 内尾迹的波幅主要由湍流尾迹塌陷所激发的随机波控制. 更低 Froude 数 (如 $Fr < 0.4$) 的内尾迹大多具有层流结构^[165].

3.3.2 内尾迹远场结构

一方面, 分层流体中内尾迹远场的涡旋与湍流具有特殊的耦合结构. 研究表明^[153,166]: 远尾迹可发展成具有水平饼状 (pancake) 的准二维涡街, 它依赖于 Fr 数的变化(如图 4 所示): (1) 当 $Fr < 4.5$ 时,

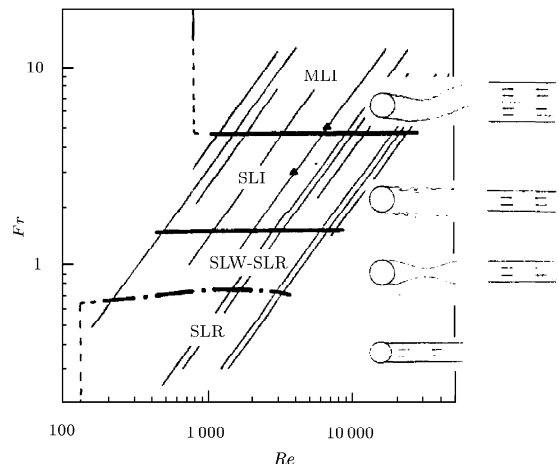


图 4 内尾迹远场的形态及其依赖于 (Fr, Re) 的变化^[160]

内尾迹具有单层结构, 其水平运动垂向相关, 其中 $Fr < 1.5$ 对应于规则的卡门涡街, $Fr > 1.5$ 对应于不规则的涡街; (2) 当 $Fr > 4.5$ 时, 内尾迹具有多层结构, 其水平运动垂向无关; (3) 当演化时间大于浮力频率所对应的周期时, 无论 Fr 如何变化都不影响远场内尾迹的准二维运动形式. 一种自由衰减的层化饼涡结构被用来解释层化的耦合特征^[167], 即每一层是由涡线相联的涡环, 涡层间有间隔但不解耦, 如图 5 所示. 有关层流 ($Fr = 0.4$) 和湍流 ($Fr = 0.6$) 远场尾迹的实验比较表明^[168,169]: 水平运动的垂直耗散具有强的垂直相关, 远尾迹层流和湍流的涡旋场主要由黏性支配; 远尾迹涡结构与近尾流特征并无直接关联, 其湍流涡结构在整个三维方向出现, 层流涡结构以垂直涡旋分量为主. 有关大 Re 数 ($> 5 \times 10^3$) 下晚尾迹 ($Nt > 20$) 的研究表明^[11]: 湍流内尾迹的平均速度、熵、动能耗散率等物理量的衰减具有类似于匀质流体中的相似律; 尾迹中涡斑有序地排列在中心线附近, 可通过平均能量和熵密度的计算进行检测. 最近的研究表明^[170]: 晚尾迹的多数性质与初

始 Fr 数无直接关联, 它可以维持一个相当稳定的长寿命的涡结构. 近来有学者研究发现^[171]: 远场内尾迹的纵向特征对于初始条件具有选择的记忆功能.

另一方面, 分层流体中内尾迹中的湍流与内波之间存在着相互作用. 实验研究表明^[13]: 对于 $Fr \sim O(1)$ 的流场, 由于对流频率和浮力频率量级相同, 波动和湍流运动发生强烈耦合, 数值试验^[172] 亦证实了这种耦合. 进一步的研究表明^[173]: 内尾迹中湍流产生的随机内波通常叠加在 Lee 波上传播, 随机内波与拟序结构有关, 并可从 Lee 波中分离出来, $Fr = 4.5$ 是 Lee 波占优向随机内波占优转变的临界值.

内尾迹的其它结构, 如: 加速或振荡物体在温跃结构分层流体中的尾迹结构^[174~176], 具有剪切流动背景场的尾迹结构^[151] 以及内尾迹中的能量耗散结构^[11,157,160] 等, 读者可进一步参阅所列文献, 这里不拟展开论述.

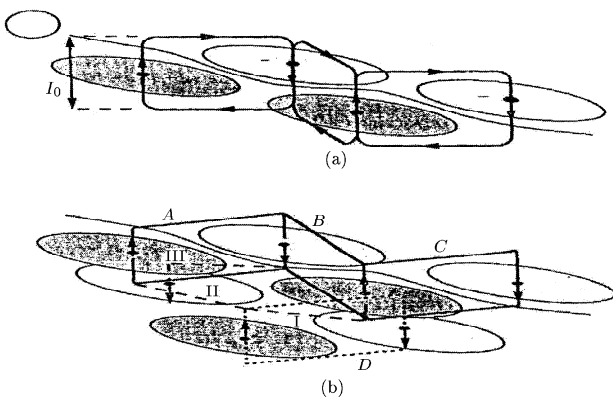


图 5 分层流体中的层化饼状涡结构^[167]

随着计算机技术以及数值方法的发展, 数值模拟在刻画运动源生成内波的精细结构、解决复杂形状物体运动生成的内波问题、以及预测它们的特殊效应等方面正发挥着愈来愈重要的作用. 概括起来, 它主要包含两方面的研究内容: (1) 求解运动源致内波的控制方程及其本征值问题^[25,30,143]; (2) 采用各种数值方法模拟含源的 N-S 方程及边界条件, 如有限差分法、边界元方法、有限元方法、有限体积法等, 近年来, 也有学者尝试将格子气模型应用于内波的研究^[177]. 由于篇幅所限, 这里也不拟展开, 读者可参阅文献^[178~189].

值得指出的是, 建立以实验室物理模拟结果为基础的运动源生成内波的数值模型, 使模拟结果更可靠地运用于实际问题, 正引起愈来愈多的重视. 例

如, Kallen^[190] 利用 Lin & Pao^[13] 的实验结果, 建立了内波的共振相互作用的数值模型, 模拟了尾迹塌陷生成的内波及其能够被 SAR 探测到的表面效应. Fung^[191] 基于内尾迹中涡与浮力诱导振荡的作用, 建立了三维湍流动力学数值模型, 模拟了内尾迹中水平涡旋长时间维持的机制.

4 结束语

通过综述在连续分层和间断分层两类流体模型中运动物体的 Kelvin 和非 Kelvin 内尾迹的研究成果, 应该认识到, 由于分层海洋中运动源致内波动力学过程的多样性, 如波 - 波、波 - 流、波 - 涡等相互作用, 以及波破碎、湍流、随机内波等非线性相互作用, 诸多分层流体中运动物体生成的内波问题的解决, 远未达到人们的期望值. 我们认为, 深入研究各类流动与分层环境相互作用的机理, 建立描绘运动源致内波动力学过程中特殊多样性作用机制的理论模型; 加强在分层流尾迹的实验方法、测量手段及其精密性方面的创新研究; 发展以实验室试验数据为依据的、揭示潜体在分层流中运动特征的数值模型, 是目前运动源生成内波问题研究的主要方向. 总之, 拓展和加强运动源生成内波问题在理论、实验和数值 3 方面的研究, 使该基础性研究的成果付诸于实践, 是我们每一位流体力学工作者义不容辞的责任.

参 考 文 献

- 1 Ekman V W. On dead water. Norwegian North Polar Expedition. *Scientific Results*, 1893-1896, 1904: 1~150
- 2 程友良. 分层流体中内孤立波的研究进展. *力学进展*, 1998, 28(3): 383~391
- 3 朱勇. 分层流体中混合流体团运动生成内波的研究现状. *力学进展*, 1993, 23(1): 34~41
- 4 徐肇廷. 海洋内波动力学. 北京: 科学出版社, 1999.
- 5 池顺良, 锤荣融, 骆鸣津, 杨洪之. 板内地震的成因及全球活动的分布特征 - 内波假说对地震活动的解释. *地壳形变与地震*, 1997, 17(3): 47~54
- 6 高振中, 何幼斌, 李建明. 我国发现内潮汐沉积. *科学通报*, 1997, 43(3): 1418 ~1421
- 7 吴有生, 崔维成. 世纪之交的船舶力学及其对船舶技术发展的推动作用. *上海造船*, 2001, 2: 7~14
- 8 张军, 张效慈. 源于水动力学的潜艇尾迹非声探测技术研究之进展. *船舶力学*, 2003, 7(2): 321~330
- 9 李家春. 水面下的波浪 —— 海洋内波. *力学与实践*, 2005, 27(2): 1~6
- 10 Reed A M, Milgram J H. Ship wakes and their radar images. *Annu Rev Fluid Mech*, 2002, 34: 469~502

- 11 Spedding G R, Browand F K, Fincham A M. Turbulence, similarity scaling and vortex geometry in the wake of a towed sphere in a stably stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1996, 314: 53~103
- 12 Bonnier M, Eiff O. Experimental investigation of the collapse of a turbulent wake in a stably stratified fluid. *Physics of Fluids*, 2002, 14(2): 791~801
- 13 Lin J T, Pao Y H. Wakes in stratified fluids. *Annu Rev Fluid Mech*, 1979, 11: 317~338
- 14 Bonneton P, Chomz J M, Hopfinger E J. Internal waves produced by the turbulent wake of a sphere moving horizontally in a stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1993, 254: 23~40
- 15 Lamb H. Hydrodynamics. Sixth Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1932
- 16 Wehausen J V, Laitone E V. Surface wave. *Handbuch der Physik*, 1960, 9: 446~778
- 17 Newman J N. Marine Hydrodynamics. Third printing. Massachusetts: The MIT Press, 1980
- 18 Wurtele M C. The three-dimensional lee wave. *Beitr Phys Atmos*, 1957, 29: 242~252
- 19 Crapper G D. A three-dimensional solution for waves in the lee of mountains. *J Fluid Mech*, 1959, 6: 51~76
- 20 Miles J W. Internal waves generated by a horizontally moving source. *Geophysical Fluid dynamics*, 1971, 2: 63~87
- 21 Gorodtsov V A. On radiation of internal waves for local and non-local sources with uniform straight motion. *AH SSSR PAO*, 1980, 16(9): 954~961
- 22 Gray E P. The structure of the internal wave Mach front generated by a point source moving in a stratified fluid. *Phys Fluids*, 1983, 26: 2919~2931
- 23 Phillips O M. The Dynamics of The Dynamics of Upper Ocean. Second Edition. Cambridge: the Cambridge University Press, 1977
- 24 Sharman R D, Wurtele M G. Ship and Lee waves. *J Atmo Sci*, 1983, 40: 396~427
- 25 Borovikov V A, Bulatov V V, Vladimirov Y V. Internal gravity waves excited by a body moving in a stratified fluid. *Fluid Dynamics Research*, 1995, 15: 325~336
- 26 Tulin M, Miloh T. Ship internal waves in a shallow thermocline: the supersonic case. In: Ann Arbor ed. Proceedings of 18th ONR. Symp. Naval Hydro, Mich., 1991. 567~584
- 27 徐肇廷, 徐昊. 运动物体生成内波的一类非线性谱方程. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33 (4): 503~511
- 28 Lighthill J. Waves in Fluid. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.
- 29 Keller J B, Munk W H. Internal wave wakes of a body moving in a stratified fluid. *Phys Fluids*, 1970, 13: 1425~1431
- 30 Waston G, Chapman R D, Apel J R. Measurements of the internal wave wake of ship in a highly stratified see Loch. *J Geo Reasearch*, 1992, 97(C6): 9689~9703
- 31 Yih C S, Zhu S P. Pattern of ship waves. *Quar App Math*, 1989, XLVII(1): 17~33
- 32 Vision B. Internal wave generation in uniformly stratified fluids. Part 2. moving point source. *J Fluid Mech*, 1994, 261: 333~374
- 33 Torres C R, Hanazaki H, Ochoa J. Flow past a sphere moving vertically in a stratified diffusive fluid. *J Fluid Mech*, 2000, 417: 211~236
- 34 Dupon P, Vision B. Internal wave generation by a translating and oscillating sphere. *Dyn Atm Oceans*, 1996, 23(1): 289~298
- 35 Hurley D G, Keady G. The generation of internal waves by vibrating elliptic cylinders, Part 2. Approximate viscous solution. *J Fluid Mech*, 1997, 351: 119~138
- 36 Hurley D G, Hood M J. The generation of internal waves by vibrating elliptic cylinders, Part 3. Angular oscillations and comparison of theory with recent experimental observations. *J Fluid Mech*, 2001, 433: 61~75
- 37 Chashechkin Yu D, Makarov S A. The time-dependent motion due to a cylinder moving in an unbounded rotating or stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1984, 276: 210~213
- 38 Gordon. A viscous internal wave in a stratified fluid whose buoyancy varies with altitude. *J Fluid Mech*, 1975, 69: 615~624
- 39 Kistovich Y V, Chashechkin Y D. An exact solution of a linearized problem of the radiation of monochromatic internal waves in a viscous fluid. *PMMJ Appl Mat Mech*, 1999, 63(4): 587~594
- 40 Bretherten F P. The time-dependent motion due to a cylinder moving in an unbounded rotating or stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1967, 28: 545~570
- 41 Grimshaw R. Slow time-dependent motion of a hemisphere in a stratified fluid. *Mathematika*, 1998, 16: 231~248
- 42 Rehm R G, Radt A. Internal waves generated by a translating oscillation body. *J Fluid Mech*, 1975, 68: 235~258
- 43 Larsen L H. Oscillations of a neutrally buoyant sphere in a stratified fluid. *Deep Sea Res*, 2000, 16: 587~603
- 44 Appleby J C, Crighton D G. Internal gravity waves generated by oscillations of a sphere. *J Fluid Mech*, 1987, 183: 439~450
- 45 Appleby J C, Crighton D G. Non-Boussinesq effects in the diffraction of internal waves from an oscillating cylinder. *Q J Mech Appl Maths*, 1985, 39: 209~231
- 46 Vision B. Internal wave generation in uniformly stratified fluids, Part 1. Green's function and point sources. *J Fluid Mech*, 1991, 231: 439~480
- 47 Claudio C. Spectral Methods in Fluid Dynamics. New York: Springer-Verlag New York Inc, 1988
- 48 Smirnov V I. A course of Advanced Mathematics. Moscow: SSSR Gov Press, 1952
- 49 李世谟. 兴波阻力理论基础. 上海: 人民交通出版社, 1986
- 50 Staquet C, Sommeria J. Internal gravity waves: from instabilities to turbulence. *Annu Rev Fluid Mech*, 2002, 34: 559~593
- 51 Brown M G. The Maslov integral representation of slowly varying dispersive wavetrains in inhomogeneous moving media. *Wave Motion*, 2000, 32: 247~266
- 52 Broutman D, Rottman J, Eckermann S D. Maslov's method for stationary hydrostatic mountain waves. *Q J R Meteor Soc B*, 2002, 128: 1159~1172
- 53 Broutman D, Rottman J, Eckermann S D. A simplified Fourier method for on hydrostatic Mountain waves. *J Atmos Sci*, 2003, 263: 18~31

- 54 Maslov V P, Fedoriuk M E. Semi-classical Approximation in Quantum Mechanics. Holland: The Reidel Press, 1981
- 55 Broutman D, Rottman J, Eckermann S D. Ray methods for internal waves in the atmosphere and ocean. *Annu Rev Fluid Mech*, 2004, 34: 559~593
- 56 刘应中. 船舶兴波阻力理论. 北京: 国防工业出版社, 2003
- 57 Michell J H. Wave resistance of a ship. *Phil Mag*, 1898, 5(45): 106~123
- 58 Phillips O M. On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude. *J Fluid Mech*, 1960, 9: 193~217
- 59 Phillips O M. The interaction trapping of internal gravity waves. *J Fluid Mech*, 1968, 34: 407~416
- 60 McComas C H, Betherton F P. Resonant interactions of oceanic internal waves. *J Geophys Res*, 1977, 82: 1397~1411
- 61 Muller P. Nonlinear interactions among internal gravity waves. *Rev Geophys*, 1986, 24: 493~536
- 62 Lombard P N, Riley J J. Instability and breakdown of internal gravity waves. *Phys Fluids*, 1996, 8: 3271~3287
- 63 Milewcki P A, Benney D J. Resonant interactions between vertical flows and water waves, Part 1. Deep water. *Stud Appl Math*, 1995, 94: 131~167
- 64 魏岗, 苏晓冰. 分层流体中弱非线性长波垂向传播结构的理论研究. 见: 周连第, 邵维文, 鲁传敬编. 第六届全国水动力学学术会议暨第十七届水动力学研讨会论文集, 香港, 2003-12-29~2004-01-02. 北京: 海洋出版社, 2003. 97~105
- 65 Riley J J, Lelong M P. Fluid motions in the presence of strong stable stratification. *Annu Rev Fluid Mech*, 2000, 32: 613~657
- 66 Hudimac A A. Ship waves in a stratified ocean. *J Fluid Mech*, 1961, 11: 229~243
- 67 Crapper G D. Ship waves in a stratified ocean. *J Fluid Mech*, 1967, 29: 667~672
- 68 Yeung R W, Nguyen T C. Waves generated by a moving source in a two-layer ocean of finite depth. *J Eng Math*, 35: 85~107
- 69 沈国光, 李德筠. 内波研究中的射线理论和陷波. 水动力学研究与进展 (A 辑), 1996, 11(1): 43~51
- 70 Krikorov A M. Perturbations from a source in a three-layer atmosphere. *J Appl Maths Mechs*, 2002, 66(1): 59~64
- 71 Timour R. Ship waves in a stratified fluid. *J Ship Res*, 2001, 45(1): 1~12
- 72 Wei G, Le J C, Dai S Q. Surface effects of internal wave generated by a moving source in a two-layer fluid of finite depth. *Appl Math Mech, English Edition*, 2003, 24(9): 20~36
- 73 马晖扬. 分层流体中运动物体与自由面相互作用的实验研究. 流体力学实验与测量, 2000, 14(3): 7~11
- 74 Wei G, Lu D Q, DAI S Q. Waves induced by a submerged moving dipole in a two-layer fluid of finite depth. *Acta Mechanica Sinica*, 2005, 21: 24~31
- 75 魏岗, 乐嘉春, 戴世强. 具有小密度差的两层流体中运动点源的二阶内波解. 力学季刊, 2004, 25(1): 1~8
- 76 Wu D M, Wu T Y. Three-dimensional nonlinear long waves due to moving surface pressure. In: Wu T Y, ed. Proceedings of 14th Symp. Naval Hydrodyn, New York, 1982. 103~129
- 77 周显初. 流体力学中的强迫孤立波. 力学进展, 1998, 28(3): 374~381
- 78 徐肇廷, 徐昊. 单层流先锋孤立子生成问题中的尾波列生成. 自然科学进展, 2000, 10(6): 538~542
- 79 Long R R. Some Aspects of the flow of stratified fluids I. A theoretical investigation. *Tellus*, 1953, 5(1): 42~58
- 80 Zhu J L. Internal Solitons Generated by Moving Disturbances: [dissertation]. California: California Institute of Technology, 1986
- 81 Grimshaw R, Smyth N F. Resonant flow of a stratified fluid over a topography. *J Fluid Mech*, 1986, 169: 429~464
- 82 Zhu J, Wu T Y. Internal solitary waves generated by moving disturbances. In: Wu T Y, ed. Proceedings of 3rd Int Symp On stratified flows, Pasadena, USA, 1987-02. CIT: 1987. 3~5
- 83 Shen S S. Forced solitary waves and hydraulic falls in two-layer flows. *J Fluid Mech*, 1992, 234: 583~612
- 84 徐肇廷. 先锋孤立子生成问题中的物理常数. 中国科学 (D 辑), 1997, 27(2): 180~186
- 85 Hsu M K. A study of internal waves in the China seas and Yellow sea using SAR. *Continental Shelf Research*, 2000, 20: 389~410
- 86 Meng J M. The simulation of the SAR image of internal solitary waves in Alboran sea. *J Hydrodynamics*, 2001, Ser. B, 3: 88~92
- 87 Lofquist K. Internal waves produced by sphere moving in density stratified water. American, AD-69144, 1968
- 88 Andreassen Φ , Havidsten Pre, Fritts D C, Arendt S. Vorticity dynamics in a breaking internal gravity wave, Part I. Initial instability evolution. *J Fluid Mech*, 1998, 367: 27~46
- 89 Mathinern T. Three-dimensional Lee waves. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 569~580
- 90 江明顺, 方欣华. 陆架陆坡潮成内波的二维三层模式. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(3): 277~285
- 91 朱勇. 分层流体中孤立波的生成、演化和相互作用: [博士论文]. 上海: 上海工业大学, 1990
- 92 Benjamin T B. Internal waves of permanent form in fluids of great depth. *J Fluid Mech*, 1967, 29: 559~592
- 93 David R, Acrivos A. Solitary internal waves in deep water. *J Fluid Mech*, 1967, 29: 573~607
- 94 Ono H. Algebraic solitary waves in stratified fluids. *J Phys Soc Japan*, 1975, 39(4): 1082~1109
- 95 Pinkel R M, Merrifield M, McPhaden. Solitary waves in the western equatorial Pacific Ocean. *Geophys Res Lett*, 1979, 24: 1603~1606
- 96 Shishkina O D. Resonant generation of a solitary wave in a thermocline. *Experiments in Fluid*, 1996, 21: 374~379
- 97 朱勇. Benjamin-Ono 型孤立波的相互作用. 实验力学, 1996, 11(增刊): 75~78
- 98 程友良, 戴世强. 大深度分层流体中的二阶内孤立波. 见: 周连第等编. 第五届全国水动力学学术会议暨第十五届水动力学研讨会论文集, 武汉市, 2001-10-12-14. 北京: 海洋出版社, 2002. 53~60
- 99 张鸿庆, 张玉峰. Benjamin 方程的 Backlund 变换、非线性叠加公式及无穷守恒律. 应用数学和力学, 2001, 22(10): 1017~1021
- 100 庄大蔚. Benjamin-Ono 方程的对称间的递推关系. 数学物理学报, 1990, 1 (10): 31~37
- 101 张领海. 广义三阶 Benjamin-Ono 方程. 数学物理学报, 1993, 13(4): 473~479

- 102 韩效宵, 郝海龙. 高阶 Benjamin-One 方程解的衰变性质. 数学年刊, 1996, 17A (2): 163~172
- 103 Ablowitz M J, Segur H. Long internal waves in fluids of great depth. *Stud Appl Math*, 1980, 62: 249~262
- 104 Kadomtsev B B, Petviashvili V I. On the stability of solitary waves in weakly dispersive media. *Sov Phys Dokl*, 1970, 15: 531~541
- 105 Gorshkov K A, Pelinovskii D E. Normal and anomalous scattering, formation and decay of bound states of two-dimensional solutions described by the Kadomtsev-Petviashvili equation. *Sov Phys JETP*, 1993, 77(2): 28~37
- 106 Tsuji H. Oblique interaction of internal solitary waves in a two-layer fluid of infinite depth. *Fluid Dynamics Research*, 2001, 29: 251~325
- 107 Turkington B, Eydeland A, Wang S. A computational method for solitary internal waves in a continuously stratified fluid. *Stud Appl Math*, 1991, 85: 93~110
- 108 富永政英著. 海洋波动——基础理论和观测成果. 关孟儒译. 北京: 科学出版社, 1984.
- 109 Yih C S. Stratified Flow. New York: Academic Press, 1980
- 110 Long R R. Solitary waves in one-and two-fluid system. *Tellus*, 1956, 8: 460~471
- 111 Turner R, Vanden-Broeck J. Broadening of interfacial solitary waves. *Phys Fluids*, 1988, 31: 286~299
- 112 Evans W A B, Ford M J. An integral equation approach to internal (2-layer)solitary waves. *Phys Fluids*, 1996, 8: 20~32
- 113 Lamb K G. A numerical investigation of solitary internal waves with trapped cores formed via shoaling. *J Fluid Mech* 2002, 451: 109~121
- 114 Lamb K G, Wilkie K P. Conjugate flows for waves with trapped cores. *Phys Fluids*, 2004, 16: 4685~4695
- 115 Mehrotra S C, Kelly R E. On the equation of nonuniqueness of internal hydraulic jumps and drops in a two-layer system. *Tellu*, 1973, 25: 560~571
- 116 Kakutani N Y, Yamasaki N. Solitary waves on a two-layer fluid. *J Phys Soc Jap*, 1978, 45: 674~686
- 117 Helfrich K R. On interfacial solitary waves over slowly varying topography. *J Fluid Mech*, 1984, 149: 305~317
- 118 Amick C J, Turner R E L. A global theory of internal solitary waves in two-fluid systems. *Tran Amer Soc*, 1986, 298: 431~443
- 119 Wallace B C. Run-up of internal waves on a gentle slope in a two-layered system. *J Fluid Mech*, 1988, 191: 419~442
- 120 Lamb K G. Conjugate flows for a three-layer fluid. *Phys Fluids*, 2000, 12 (9): 2169~2185
- 121 Rusas P O, Grue J. Solitary waves and conjugate flows in a three-layer fluid. *Euro J Mech B/Fluids*, 2002, 21: 185~206
- 122 Huyun Sha, Vanden-Broeck J M. Two-layer flows past a semicircular obstruction. *Phys Fluid*, 1993, A5(11): 2661~2668
- 123 Wei G, Li J C, Dai S Q. Conjugate flows over a step in a three-layer fluid. *J Hydrodyn Ser B*, 2002, 24(9): 20~36
- 124 Wei Gang, Su X B, Dai S Q. The limiting internal solitary wave in a stratified fluid. In: Cheng Liang, Kervin Yeow, eds. Proceedings of the 6th International Conference on Hydrodynamics, Perth, Australia, 2004-11-03-06. Leiden: A A Balkema publishers, 2004. 38~46
- 125 魏岗. 分层流体中运动潜体产生的内波及其垂向传播的研究: [博士学位论文]. 上海: 上海大学应用数学和力学研究所, 2004
- 126 Mowbray D E, Rariry B S H. A theoretical and experimental investigation of the phase configuration of internal waves of small amplitude in a density stratified liquid. *J Fluid Mech*, 1967, 28: 1~6
- 127 Gilreath H E, Brandt A. Experiments on the Generation of internal waves in a stratified fluid. *AIAA Journal*, 1985, 23(5): 693~700
- 128 Sutherland B R, Linden P F. Internal wave excitation from stratified flow over a thin barrier. *J Fluid Mech*, 1998, 50: 525~543
- 129 Oster G. Density gradient. *Sci Amer*, 1965, 5: 70~76
- 130 Hill D F. General density gradients in general domains: the “two-tank” method revisited. *Experiments in Fluid*, 2002, 32(4): 434~440
- 131 徐肇廷, 新型三维内波及分层流水槽系. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(6): 868~876
- 132 王伟, 沈正. 短波特征的实验及理论解释. 中国科学 (D 辑), 1998, 28(6): 512~517
- 133 Dalziel S B, Hughes G O, Sutherland B R. Whole-field density measurements by ‘synthetic schlieren’. *Experiments in Fluid*, 2000, 28(4): 322~335
- 134 Sutherland B R, Hughes G O, Dalziel S B. Internal waves revisited. *Dynamics Atmospheres and Oceans*, 2000, 31(4): 209~232
- 135 吕红民, 徐肇廷, 方欣华. 实验室用内波动态测量仪. 水动力学研究与进展, A 辑, 1995, 10(3): 328~334
- 136 Zhang S G, Dai S Q, Huhe A. Experimental research on internal waves generated by a moving body in a stratified fluid. *J Hydrodynamics*, 1989, 2: 10~19
- 137 Chomaz J M, Bonneton P. Froude number dependence of the flow separation line on a sphere towed in a stratified fluid. *Phys Fluid*, 1992, A4(2): 254~258
- 138 Spedding G R, Browand F K, Fincham A M. The long-time evolution of the initially turbulent wake of a sphere in a stable stratification. *Dyn Atmo Oceans*, 1996, 23: 171~182
- 139 Crapper G D. Introduction to Water Waves. London: Chichester: Ellis Horwood Ltd, 1984
- 140 Schooley A H. Experiments with a self-propelled body submerged in a fluid with a vertical density gradient. *J Fluid Mech*, 1963, 15: 83~99
- 141 Hopfinger E J, Flor J B. Internal waves generated by a moving sphere and its wake in a stratified fluid. *Experiments in Fluids*, 1991, 11: 255~261
- 142 Makarov S A, Chashechkin Yu D. Apparent internal waves in a fluid with exponential density distribution. *J Appl Mech Techn Phys*, 1981, 22: 772~779
- 143 Robey H F. The generation of internal waves by a towed sphere and its wake in a thermocline. *Phys Fluid*, 1997, 9(11): 3353~3367
- 144 Watson, Honga. Measurements of the internal wave wake of ship in a highly stratified sea Loch. *J Geo Research*, 1992, 97(C6): 9689~9703

- 145 Ouchi K, Stapleton N R, Barber B C. Multi-frequency SAR image of ship-generated internal waves. *Int J Remote Sensing*, 1997, 18(18): 3709~3718
- 146 Hogan G G, Chapman R D, Watson R D. Observation of ship-generated internal waves in SAR images from Loch Linnhe, Scotland, and comparison with theory and in situ internal wave measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 532~542
- 147 Avital E, Miloh T. On an inverse problem of ship-induced internal waves. *Ocean Engineering*, 1999, 26(2): 99~110
- 148 Van Duin. Reflection properties of internal gravity waves incident upon a hyperbolic tangent shear layer. *J Fluid Mech*, 1982, 120: 505~552
- 149 Koop C G. A preliminary investigation of the interaction of internal gravity waves with a steady shearing motion. *J Fluid Mech*, 1982, 113: 347~386
- 150 Rohr J J. Growth and decay of turbulence in a stably-stratified shear flow. *J Fluid Mech*, 1988, 195: 77~111
- 151 Nicolaou D, Stevenson T N. Internal waves around a disturbance in a fluid with arbitrary stratification and background shear flow. *Applied Scientific Research*, 1997, 57: 95~117
- 152 Itsweire E C, Hellomd K N. The evolution of grid-generated turbulence in stably stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1986, 162: 299~338
- 153 Lin Q, Lindberg W R, Boyer D L, Fernando H J S. Stratified flow past a sphere. *J Fluid Mech*, 1992, 240: 315~354
- 154 Lofquist K, Purtell P. Drag on a sphere moving horizontally through a stratified liquid. *J Fluid Mech*, 1984, 148: 271~284
- 155 Honji H. Near wakes of a sphere in stratified fluid. *Fluid Dyn Res*, 1987, 2: 75~76
- 156 Pao H, Kao T W. Vortex structure in the wake of a sphere. *Phys Fluids*, 1977, 20: 187~191
- 157 Nakamura I. Steady wake behind a sphere. *Phys Fluids*, 1976, 19: 5~8
- 158 Kim H J, Durbin P A. Observations of the frequency in a sphere wake and of drag increase by acoustic excitation. *Phys Fluids*, 1988, 31: 3260~3265
- 159 Hanazaki H. A numerical study of three-dimensional stratified flow past a sphere. *J Fluid Mech*, 1984, 192: 393~419
- 160 Chomaz J M. The structure of the near wake of a sphere moving horizontally in a stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1993, 254: 1~21
- 161 Grue J. Properties of large-amplitude internal waves. *J Fluid Mech*, 1999, 380: 257~278
- 162 Holmboe J. On the behaviour of symmetric waves in stratified shear layer. *Geophys Publ Oslo*, 1962, 24: 67~113
- 163 Smyth W D. Finite amplitude Holmboe waves. *Geophys Astrophys Fluid Dyn*, 1988, 43: 181~222
- 164 Peltier W R, Caulfield C P. Mixing efficiency in stratified shear flow. *Annu Rev Fluid Mech*, 2003, 35: 135~167
- 165 Dupont P K, Chomz J M. Internal waves generated by the wake of Gaussian hillocks. *Phys Fluids*, 2001, 13(11): 3223~3233
- 166 Chomaz J M, Hopfinger E J. Vertical diffusion of the far wake of a sphere moving in a stratified fluid. *Phys Fluids*, 1993, A5(11): 2799~2805
- 167 Fincham A M, Maxworth T, Speeding G R. Energy dissipation and vortex structure in freely-decaying, stratified grid turbulence. *Dyn Atmos Oceans*, 1996, 23: 155~169
- 168 Bonnier M, Bonneton P, Eiff O. Far-wake of sphere in a stably stratified fluid: characterization of the vortex structures. *Applied Scientific Research*, 1998, 59: 269~281
- 169 Bonnier M, Eiff O, Bonneton P. On the density structure of far-wake vortices in a stratified fluid. *Dyn Atmos Oceans*, 2000, 31: 117~137
- 170 Spedding G R. Vertical structure in stratified wakes with high initial Froude number. *J Fluid Mech*, 2002, 454: 71~112
- 171 Bonnier M, Eiff O. Experimental investigation of the collapse of a turbulent wake in a stably stratified fluid. *Physics of Fluids*, 2002, 14(2): 791~801
- 172 Metais O, Herrig J R. Numerical simulations of freely evolving turbulence in stably stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1989, 202: 117~148
- 173 Bonneton P, Chomz J M, Hopfinger E J. Internal waves produced by the turbulent wake of a sphere moving horizontally in a stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1993, 254: 23~40
- 174 Stevenson T N, Kanellopoulos D. The phase configuration of trapped internal waves from a body moving in a thermocline. *Appl Sci Res*, 1986, 43: 91~105
- 175 Nicolaou D, Garman J F R, Stevenson T N. Internal waves from a body accelerating in a thermocline. *Applied Scientific Research*, 1995, 55: 171~186
- 176 Nicolaou D, Liu R, Stevenson T N. The evolution of thermocline waves from an oscillatory disturbance. *J Fluid Mech*, 1993, 254: 401~416
- 177 Buick J M, Easson W J, Greated C A. Numerical simulation of internal gravity waves using a lattice gas model. *Int J Numerical Methods in Fluid*, 1988, 26: 657~676
- 178 Foldvik A, Wuitele M G. The computation of the transient gravity wave. *Geophys J R Astron Soc*, 1967, 13: 167~185
- 179 Haussling H J. Viscous flows of stably stratified fluids over barriers. *J Atmos Sci*, 1977, 34: 589~602
- 180 Belotserkovskii. Numerical and experimental modeling of internal gravity waves during the motion of a body in a stratified liquid. *Sov Phys Dokl*, 1984, 29: 884~886
- 181 Peltier W R, Clark T L. Nonlinear mountain waves in two and three spatial dimensions. *Q J R Met Soc*, 1983, 109: 527~548
- 182 Smolarkiewicz P K, Rotunno R. Low Froude number flow past three-dimensional obstacles. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 1154~1164
- 183 Suzuki M, Kuwahara K. Stratified flow past a bell-shaped hill. *Fluid Dyn Res*, 1992, 9: 1~18
- 184 Gerz T, Yamazaki H. Direct numerical simulations of buoyancy driven turbulence in stably stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1993, 249: 415~440
- 185 Ramaden D, Holloway G. Energy transfers across an internal wave-vortical mode spectrum. *J Geophys Res*, 1992, 97: 3659~3668
- 186 Staguet C. Two-dimensional secondary instabilities in a strongly stratified shear layer. *J Fluid Mech*, 1995, 296: 73~126

- 187 Fritts D C, Arendt S. Vorticity dynamics in a breaking internal gravity wave, Part II. Vortex interactions and transition to turbulence. *J Fluid Mech*, 1998, 376: 47~64
- 188 LeLong M P, Durkerton T J. Inertia-gravity wave breaking in three dimensions. *J Atmos Sci*, 1998, 15: 2489~2501
- 189 Zhu W, You Y X, Miao G P. Waves generated by a 3D moving body in a two-layer fluid of finite depth. *J Hydrodynamics*, 2005, Ser B, 17(1): 92~101
- 190 Kallen E. Surface effects of vertically propagating gravity waves in a stratified fluid. *J Fluid Mech*, 1986, 182: 111~125
- 191 Fung Y T. Surface and internal signatures of organized vortex motions in stratified fluids. *Phys Fluids*, 1996, 8(11): 3023~3056

ADVANCES IN INTERNAL WAVES DUE TO MOVING BODY IN STRATIFIED FLUID SYSTEMS *

WEI Gang^{1,†} DAI Shiqiang²

¹School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

² Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract This article presents a brief review of the research work on both the Kelvin-wake and the non-Kelvin-wake generated by a submerged body moving, respectively, in continuous and discontinuous density stratification systems. The review lays the emphasis on analytical results and related experimental work in a stratified tank. The general governing equation for the non-Kelvin-wake in the continuously stratified fluid and the potential-flow analysis for the Kelvin-wake in the discontinuously stratified fluid are outlined. Three special internal waves, i.e., the precursor soliton, algebraic solitary wave and flat solitary wave, induced by a moving source, are described, in which the internal flat solitary wave is shown to be a typical limiting solitary wave in experiments by the authors and then is first formulated by a conjugate flow model. The complicated dynamical characteristics in the internal wave generation due to a moving body in a linearly-distributed density fluid are summarized, including space-time structures at near and far fields of wakes, instabilities, coupled configurations between vortex and turbulence and interactions between internal wave and turbulence.

Keywords stratified fluids, moving body, Kelvin wakes, non-Kelvin wakes, internal waves, internal soliton

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10172059) and the National Postdoctor Foundation of China (2004036099)

†Email: Gwei@sjtu.edu.cn