

# 波流相互作用研究进展\*

王 涛 李家春

中国科学院力学研究所, 北京 100080

**摘 要** 波流相互作用是非线性科学的前沿课题, 并具有重要工程意义. 本文概述了波浪在水流中的变形、波流相互作用对流场的影响、波和流与结构物的相互作用以及波流边界层等方面已取得的主要成就.

**关键词** 波流相互作用, 波作用量, 波浪变形, 流体动力, 载荷, 波流边界层

## 1 引言

水波是人们常见的波动之一, 还往往伴有水流存在, 因此, 波流相互作用是一种非常普遍的自然现象. 面向 21 世纪, 人类面临人口、资源和环境三大问题的挑战, 不可避免将越来越重视海洋, 波流相互作用又是在复杂环境中开发海洋需要解决的关键问题之一. 因此, 波流相互作用问题受到国内外科研人员重视<sup>[1~10]</sup>.

根据波长或周期频率的不同, 水波可分为毛细波、重力波、长周期波以及潮波等. 另一方面, 海水的大规模流动是海洋环境中重要的物理现象, 潮汐现象可引起周期性的潮流, 作用于广阔海面上的大气运动形成风生环流, 海洋还可因温差、蒸发或降水不均匀形成热盐环流. 另外, 在河口地区还有较强的径流作用, 在近海海域还有沿岸流. 不同尺度的波与流之间都存在相互作用, 典型的形式有:

- 潮汐、径流、风生环流与波浪相互作用
- 长波与短波相互作用
- 孤立波与流相互作用
- 界面波与流相互作用
- 波和流与结构物的相互作用
- 波和流与挟带物质相互作用

考虑到流剖面是否均匀, 流速在水平方向的变化, 以及流随时间变化尺度的异同, 波流相互作用的形式多种多样.

波流相互作用现象在河口及海湾地区特别显著: 涨潮时顺流进入河口的波浪变平; 落潮时逆流进入河口的波浪变陡, 有时造成波浪破碎, 带来航行困难. 若波长较短的重力波骑在波长

收稿日期: 1997-06-13, 修回日期: 1997-12-10

\* 国家自然科学基金 (59879025) 资助.

较长的海洋涌浪或潮波之上,波浪也会变形.这些不同尺度的波,即长波和短波之间的相互作用,也是波流相互作用的一种形式.当波浪自外海向岸边传播时在接近海岸处会发生破碎,在破波线与岸线之间会形成平行海岸的沿岸流,在破波带还可以形成一股向深海方向的窄带状流动,称为离岸流.这些破波引起的近岸水流又影响着波的传播.近岸区的许多自然现象,如波浪减水及增水、裂流及近岸水流系统等都受波流相互作用影响.实际的海浪是不规则的,波浪谱可以描述作为随机过程的海浪,而海流又会改变波浪谱.除了表面波,流也影响着界面波的传播.

波流相互作用的影响也是多方面的,我们最为关心的有:

- 流使波浪及波浪谱变形
- 波流场相互影响
- 波和流影响结构物载荷和运动
- 波和流影响被动标量输运

要开发利用海洋,就必须认识海洋.波流相互作用影响的这些方面是我们开发利用海洋及沿海资源、保护海洋环境所必须深入了解的.21世纪将是全面开发利用海洋的时代,这就决定了研究波流相互作用的重要意义和紧迫性.

由于对能源的迫切需要,油气资源是当前世界海洋经济发展的重点.据地质学家预测,海底石油的总藏量约有1400亿t至2000亿t.1992年海上石油产量达9亿t,天然气3000亿 $m^3$ ,分别占油气总产量的30%和25%.我国近海石油地质储量为90亿t至140亿t,原油年产量已达1000多万t.目前建造的海洋结构物的种类和数量逐年增加,特别是近年来海洋开发逐渐向深海区拓展,结构物工作的自然环境愈加恶劣.深入研究复杂海洋条件下的环境载荷,已成为提高工程设计安全性和经济性的一个重要因素.

当有结构物存在时,波流相互作用对海洋结构物动力载荷的影响不可忽略.波和流复合作用于结构物浸没部分,是环境载荷的主要部分.用于设计的环境载荷通常基于50年或100年重现期的极端条件,根据长期统计资料确定设计波高和周期.流能使波浪变形,并改变波浪谱,特别是在黑潮,湾流经过的地方、河口、海峡地区流速可超过1m/s,故流影响着设计波参数的确定.对于确定的设计波流参数,波流之间的非线性相互作用改变了波流场.另一方面,小尺度结构物的水动力系数与纯波和纯流情况不同,也因波流相互作用而改变.对于大尺度结构物,结构自身的运动特性及其与相邻部件(如系泊系统)或流体间的运动耦合是导致非线性的重要因素,结构存在使波流场产生的绕射不可忽略.

海岸及河口地区资源丰富、人口稠密、经济发达.沿海地区的发展离不开航道治理、港口建设、海岸防护等海岸河口工程.1994年上海港年吞吐量已达1.6亿t,但由于拦门沙堆积水下,依靠长年疏浚维持水深仅7m.很多大吨位海轮和集装箱船进不了长江口,只能在口外绿华山及北仑港等地卸载或设置中转码头,每年多付运费数亿元.开辟长江口深水航道势在必行.又如,黄河口因河口淤积,百年来改道十余次,给当地人民造成严重灾害.

河口海岸的演变规律和综合治理受制于泥沙运动,而波浪、潮汐、沿岸流、河口径流等因素,则给泥沙运动提供基本动力和物质来源.近岸泥沙运动主要受波浪和破波形成的水流控制,泥沙即可纵向又可横向输运,分别称为沿岸输沙和向岸-离岸输沙.潮汐和径流是河口的主要动力因素,随着流速的变化,无论径流挟带的河沙还是潮流挟带的海沙,在河口段一般经过多次悬浮、沉降、再悬浮的运动过程.另外,人口增长与工业发展使人类面临严峻的环境问题,入海污染物扩散也值得研究.复杂动力因素作用下的泥沙和污染物输运,可以归结为波流作用

下的非恒定物质输移, 这一问题是开发利用海岸带的基础.

总之, 波流相互作用的内容十分丰富, 我们着重讨论以下四个方面: 波流间的能量交换; 波流场的相互影响; 波和流对结构物的作用; 波流边界层与泥沙输运.

## 2 波流间的能量交换

当波在物理环境不同的地方运动时, 总的能量、动量、质量是守恒的, 但波要素 (波长、波幅等) 是变化的. 早在 1911 年, Rayleigh 就曾观测到潮汐中波流相互作用现象, Unna (1942) 是第一个考虑波在变动流上传播时相速度变化的人, Arthur (1950) 研究了浅水波遇到退潮流时的运动. 能量平衡方程首先是由 Longuet-Higgins 和 Stewart<sup>[11]</sup> 给出的

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot [(U_m + C_{gr})E] + S_{\alpha\beta} \frac{\partial U_\beta}{\partial x_\alpha} = 0 \quad (1)$$

式中  $\alpha, \beta = 1, 2$ ,  $C_{gr}$  为群速度, 下标  $r$  代表随平均流速为  $U_m$  的运动坐标系中观察到的波参数.  $S_{\alpha\beta}$  为辐射应力

$$S_{\alpha\beta} = \frac{EC_{gr}}{C_r} l_\alpha l_\beta + \frac{E}{2} \left( \frac{2C_{gr}}{C_r} - 1 \right) \delta_{\alpha\beta} \quad (2)$$

式中  $l_\alpha$  为波传播方向上的单位向量. 辐射应力概念的提出使得正确计算流对波高的影响成为现实. 除能量方程外, Whitham<sup>[12]</sup> 还给出了质量和动量守恒方程. 假设流沿波传播方向是变化的, 而在垂直方向是均匀的, Longuet-Higgins 和 Stewart 从能量平衡方程导出深水中线性波与流相互作用前后幅值的变化, 其中流速的变化可以由上升流或侧向辐散加以平衡. 在反向流中波变陡, 波动的能量增加, 这是因为辐射应力做功的缘故; 同理, 在顺向流中波变平, 关于这种效应 Hughes 和 Stewart<sup>[13]</sup> 已作过实验. Lambrakos<sup>[14]</sup> 的实地观测表明, 浅水中波浪速度谱随着潮流方向和幅值的变化而改变, 他的测量结果与从能量平衡方程导出的谱模型的预测值基本符合.

Phillips<sup>[6]</sup> 指出, 当流非均匀时, 一般说来波与平均流动之间存在着能量交换, 故波能密度并不守恒, 但波作用量是守恒的. 波作用量  $A$  定义为波能密度  $E$  与波固有频率  $\omega_r$  的比值, 即  $E/\omega_r$ .

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{E}{\omega_r} \right) + \nabla \cdot \left[ (U_m + C_{gr}) \frac{E}{\omega_r} \right] = 0 \quad (3)$$

把作用量守恒原理应用于表面重力波, 可导出波能平衡方程. 作用量守恒和波能平衡本质上是一致的, 而由于波作用量守恒更便于实际应用, 在随后的工作中被广泛采用. 从波作用量守恒出发, Brevik, Aas 和 Luftkrigsskolen<sup>[15,16]</sup> 得到规则波与均匀流相遇过程中波长和波高的变化, 他们在粗糙和光滑床面上分别作了实验, 测量结果与理论值非常吻合. 随后, Li 和 Herbich<sup>[17]</sup> 也给出上述计算结果, 并分析了非线性波的影响. Dong 和 Li<sup>[18]</sup> 研究了波在与其有一定角度的反向流中的变形和破碎. 王涛和李家春<sup>[19]</sup> 提出了 Stokes 波与指数廓线流相遇过程中, 波传播特性改变的五阶理论. 实际上, 海洋表面上的波动总是随机的. 把波作用量守恒原理应用于随机波情况, Hedges 和 Anastasiou<sup>[20]</sup> 等人研究了深水中同向和反向流对波谱的影响. 结果表明, 谱密度在顺流中减小, 逆流中增大. 由于波浪破碎, 逆流中谱密度不会出现无穷, 而被限制在一平衡范围内. Li<sup>[21]</sup> 详细讨论了沿不同角度传播的线性波与均匀流相遇过程中波的变形、波的折射和波谱的变化, 并和滕斌、陈兵<sup>[22]</sup> 合作在多功能水池中做了系统的观测.

当水波在斜坡上传播时,水面并不是水平的,静水面与实际水面之间有一定的高度差  $\Delta h$ . 为计算  $\Delta h$ , Lundgren<sup>[23]</sup> 对于纯波运动提出了平均能量面的概念, Jonsson 和 Wang<sup>[24]</sup> 把平均能量面用于波流相互作用的计算. 无旋时,把 Bernoulli 方程在一个波动周期内平均可知,由几何高度、压力高度和速度高度之和决定的面在流场中的任一点都是相同的,这一面就称为平均能量面. Jonsson<sup>[25,26]</sup> 证明,当把平均能量面取为势能的参考面,波作用量通量  $AC_g$  正比于能量通量. 平均能量面概念的提出,把波作用量守恒同传统的能量守恒联系在一起,从物理上解释了波作用量守恒原理.

Boussinesq 方程包含了频散和非线性低阶效应,可描述能量在频率间的交换,波包在浅水区的变形以及波流非线性作用等现象. 近年来的一些工作扩展了 Boussinesq 方程在深水中的应用范围. Madsen 和 Murray<sup>[27]</sup> 采用 Pade 近似扩展系数来调整 Boussinesq 频散特性, Nwogu<sup>[28]</sup> 用特定水深层的速度变量推导出可随水深调整其频散关系的 Boussinesq 方程形式. 李玉成、张永刚和滕斌<sup>[29~31]</sup> 应用 Boussinesq 方程,对潮汐势流与规则波和不规则波共存时的非线性相互作用现象进行了分析,获得等水深条件下二阶波流计算公式,得到与 Yoon 和 Liu<sup>[32]</sup> 一致的结论,并用两个不同水深层的速度变量组合扩展 Boussinesq 方程的适用范围. 为考虑地形和水流的综合影响, Booij (1981), Liu (1983), Kirby (1984) 和 Li, Fleming (1993) 将 Berkhoff (1972) 提出的缓坡波动方程推广到含流情况, Kubo (1991) 和李玉成、张永刚 (1995) 将缓坡波动方程应用于方向波谱和水流的相互作用<sup>[33,34]</sup>. Baddour 和 Song<sup>[35,36]</sup> 直接求解质量、动量和能量守恒方程,讨论了流对线性和非线性波传播的影响,并计及流的平均速度和平均水深的变化.

早在 1976 年, Peregrine<sup>[37]</sup> 就指出,长波与短波的相互作用也是波与流相互作用的一种形式. Pan, Xu (1990) 和施勇 (1995) 分析了河口地区波浪在潮流作用下的变化, 糜振星、刘应中和缪国平 (1992) 基于 KdV 方程进行了分析<sup>[4,38]</sup>. Naciri 和 Mei<sup>[39]</sup> 研究了长波上传播的短波的发展,提出波波相互作用是使海面呈现随机性的一个重要原因. Ölmez 和 Milgram<sup>[40]</sup> 讨论了长短波间非线性相互作用产生的能量交换. 当重力波遇到反向流时波变陡,如果考虑毛细波的作用,重力波因粘性衰减很快,而不会破碎<sup>[41]</sup>. Magnusson<sup>[42]</sup> 和 Komen, Cavaleri 等人<sup>[43]</sup> 研究了波流相互作用对波浪谱的影响及其在海浪预报中的应用.

Turpin, Benmoussa 和 Mei (1983) 研究了缓变底面情况下流动对短波的影响,考虑了有基本流动时 Stokes 波包的稳定性及其分裂. 周显初 (1985, 1986) 考虑了有基本流动时缓变任意截面渠道中的孤立波,并进一步研究了流动对二维缓变渠道中孤立波演变的影响,导出了远场理论的基本方程——变系数 KdV 方程,得到了孤立波解,还讨论了孤立波的分裂,给出了流量、流动深度与孤立波分裂的关系,找出了分裂区和不分裂区<sup>[44]</sup>.

### 3 波流场的相互影响

人们对事物的认识总是由简单到复杂一步步深入的. 我们关心的波通常为有限幅波,流的剖面实际上沿垂直方向是变化的,它们之间的相互作用也是非线性的<sup>[45~48]</sup>. 波流相互作用的研究工作开始于线性问题,这有两种选择,即考虑均匀流或微幅波. 当流均匀时,在随流运动的坐标系中波看上去是在静水中传播,把均匀流速叠加到纯波解,静水中导出的微幅或有限幅波理论可直接推广到波流共存情况. 此时,流的影响主要体现在波的频率上. 在随沿流运动的坐标系中观测到的波的频率  $\omega_r$  与静系中的频率  $\omega$  不相同,有

$$\omega = \omega_r + kU \quad (4)$$

其中  $k$  为波数,  $\omega_r$  由纯波理论确定. 这种现象称为 Doppler 效应 [37].

假设波为微幅波, 同样可使问题大大简化. Thompson (1949) 给出流为线性剖面  $U = U_0 + \Omega z$  ( $U_0$  为静水面处流的速度,  $\Omega$  为涡量, 都是常数) 时的色散关系

$$(U_0 - C)^2 = \frac{g}{k} \left[ 1 + \frac{\Omega}{g}(U_0 - C) \right] \tanh kd \quad (5)$$

其中  $C$  为波的相速度, 此式被 Nepf 和 Monismith (1994) 的实验结果证明 [49]. 对于任意剖面流, Skop (1987) 假设流的速度远小于波的相速度  $U/C \ll O(1)$  得到一阶的扰动展开

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd} + \frac{2k}{\sinh 2kd} \int_{-d}^0 U(z) \cosh 2k(z+d) dz \quad (6)$$

Kirby 和 Chen (1989) 把上述色散关系推广到二阶 [50].

由于在海洋工程中人们最为关心的是结构物受到的极限波流载荷, 故微幅波模型并不能令人满意. 选取随波运动的坐标系, 整个问题定常. Skjelbreia 和 Hendrickson (1960) 用无量纲的一阶谐波的波幅  $ak$ , 而 Fenton (1985) 用波陡  $kH/2$  为扰动参数分别提出了 Stokes 五阶波理论, 在波长小于 10 倍水深范围内 Fenton 的解很精确 [51]. 当有流存在时, 除均匀流和均匀剪切流两种情况外, 流动有旋, 传统的解决波动问题的 Laplace 方程不再成立, 一般地, 采用流函数形式的控制方程为

$$\nabla^2 \psi = -\Omega(\psi) \quad (7)$$

其中  $\psi$  为流函数,  $\Omega$  为涡量. 在自由表面  $\eta(x)$  上压力为常数, 应用 Bernoulli 积分得自由面动力学边界条件

$$\frac{1}{2} |\nabla \psi|^2 + gz = \text{constant}, \quad z = \eta(x) \quad (8)$$

在水底, 边界条件要求法向速度为零. Dalrymple [52,53] 用数值方法解决了线性和指数剪切流上陡波的传播问题. 在 Fenton 的纯波理论基础上, Kishida 和 Sobey (1988) 提出了 Stokes 波在线性剪切流上传播的三阶理论, Eastwood 和 Watson (1989) 则把 Stokes 五阶波理论推广到双线性流情况 [46]. 实测的流剖面垂直方向上总存在剪切, 而这种剪切往往在自由表面附近最强, 尤其是风漂流. 虽然双线性剖面比均匀和线性剖面有所改进, 但仍有别于实际情况, 且此时涡量是不连续性. 对于强剪切流, Swan (1990, 1992) 得到的准确至二阶波陡的色散关系表明, 自由表面处的涡量分布对色散关系的影响是非常重要的. Cummins 和 Swan (1993) 用五层线性流来逼近沿垂直方向具有强剪切的流, 所得波形的非线性特征很明显地受到涡量的影响 [54].

为克服非线性自由边界条件的困难, Dubreil-Jacotin (1934) 提出可利用坐标变换, 把  $z$  视为  $x$  和  $\psi$  的函数, 将问题转换为求解  $z = z(x, \psi)$ , 这样可固定原自由边界于  $\psi = 0$ . 坐标变换后的控制方程为

$$z_{xx} z_\psi^2 - 2z_x z_\psi z_{x\psi} + (1 + z_x^2) z_{\psi\psi} = \Omega(\psi) z_\psi^3 \quad (9)$$

相应的自由面边界条件为

$$\frac{1}{2} \left( \frac{1 + z_x^2}{z_\psi^2} \right) + \delta y(x, 0) = \text{constant}, \quad \psi = 0 \quad (10)$$

其中  $\delta = (\sqrt{g/k}/C)^2$ . 采用 Dubreil-Jacotin 变换, Hui 和 Tenti [55] 把 Stokes 波展开至 11 阶, Drennan 和 Hui [56] 指出, 由这种方法得到的扰动级数具有较好的收敛性. Li [57~59] 等人应用

这一表述不仅考虑了表面张力作用,研究了短峰波,而且推广到有旋流动,这是研究波与非均匀流相互作用的基础, Li 和 Chwang<sup>[47]</sup> 进一步得到非均匀流与波的五阶摄动解,证明 Dubreil-Jacotin 变换可以用来求解有限波幅时的波流相互作用问题. 王涛和李家春<sup>[60,61]</sup> 获得了 Stokes 波与沿水深方向指数递减剖面流共存时的五阶理论,求得的波流场与 Skyrner 和 Easson<sup>[62]</sup> 测量的陡波在强剪切流上传播时的结果相符合. Dalrymple<sup>[63]</sup> 给出了任意剖面流上陡波传播问题的数值解,但求解过程中必须事先给定自由表面的流函数, Chaplin<sup>[64]</sup> 改进了 Dalrymple 的方法,使得解可确定自由面处的流函数值,并加速了结果的收敛过程. 如果沿水深方向给出一系列的测量流速, Thomas<sup>[65]</sup> 提出了线性和非线性波的数值模型,其计算结果与实验测量值符合较好.

## 4 波和流对结构物的作用

### 4.1 波和流与小尺度结构物的相互作用

当海洋工程结构物的尺度  $D$  与波长  $L$  相比较小时,由于研究粘性波的困难, Morison 公式被广泛应用于确定结构所受的波浪力. 单位长度圆柱所受的波浪力  $f$  由阻力项和惯性力项组成

$$f = \frac{1}{2}C_d\rho D|u|u + \frac{\pi}{4}C_m\rho D^2\dot{u} \quad (11)$$

其中  $D$  为圆柱直径,  $\rho$  为流体密度,  $u$  为水质点水平速度,  $\dot{u}$  为加速度,  $C_d$  为阻力系数,  $C_m$  为惯性力系数. 这是一个半经验公式,如何确定阻力和惯性力系数是问题的关键所在. 目前主要通过实验研究这两个水动力系数的变化规律. Sarpkaya, Isaacson<sup>[7]</sup> 和 Chakrabarti<sup>[9]</sup> 概述了不同流场条件、不同柱位时  $C_d, C_m$  的试验结果. Faltinsen<sup>[63]</sup>, Tickell<sup>[67]</sup> 和 Moe<sup>[68]</sup> 总结了 Morison 公式的适用性. Keulegan 和 Carpenter 是开展这方面工作的先驱,他们通过实验分析了作用于圆柱和圆球上的波浪力,提出水动力系数与相应无量纲数间的依赖关系,为随后的工作奠定了基础. Sarpkaya<sup>[69]</sup> 开展了系统的 U 形管实验,大量的数据证明,纯波时光滑圆柱的水动力系数是  $Re_w$  数和  $Kc_w$  数的函数.

$$C_{dw} = C_{dw}(Re_w, Kc_w), \quad C_{mw} = C_{mw}(Re_w, Kc_w) \quad (12)$$

其中  $Re_w = u_0D/\nu$ ,  $Kc_w = u_0T/D$ . 式中  $\nu$  为运动学粘性系数,  $T$  为波周期,  $u_0$  为波动的特征速度.

当波浪和水流  $U$  共存时,需要将 Morison 推广至有流情况. 这里涉及两个问题,一是这种推广是否合理,二是波流场中水动力系数  $C_d$  和  $C_m$  的选取问题. 由量纲分析可知,  $C_d$  和  $C_m$  不仅是  $Re_w, Kc_w$  的函数,而且也约化速度  $V_r(V_r = UT/D)$  相关<sup>[70]</sup>. Verley 和 Moe (1979, 1980)<sup>[9]</sup> 测量了均匀流中振荡圆柱的水动力系数, Sarpkaya<sup>[71,72]</sup> 发表过波流条件下光滑和粗糙圆柱的结果. 他们都指出,由于流的存在,  $C_d$  和  $C_m$  与无流情况有相当大的差别,纯波结果并不适用于波流共存情况. 一般说来,波流共存时的阻力系数较纯波值为小,而惯性力系数则在  $Kc$  数 8~20 的范围内较纯波值为大. Asao (1984) 发现波流相互作用使得阻力系数减小为简谐流中值的 30%~40%. Ren 和 He (1986) 提出阻力系数随着流的速度与波动诱导速度在水深方向的平均值之比  $U/u_d$  的增大而指数递减. Allender 和 Petruskas (1987) 作了一个 150 m 水深中工作的平台的模型试验(比尺 1:47),结果表明,只有波浪作用时  $C_d$  在 1.3~1.6 之间能很好拟合测量结果,而加上流之后  $C_d$  取 0.6~0.7 才能得到满意的结果<sup>[10]</sup>. 王涛和李家春等人<sup>[73]</sup> 通

过考虑波和流的相对影响, 提出了一种利用纯波和纯流结果确定波流场中水动力系数的方法.

Iwagaki 和 Asano<sup>[74]</sup> 对实际的波流共存情况进行了实验研究, 他们提出,  $Kc$  数从物理意义上可以解释为水质点在一周期内向圆柱一侧移动的最大距离  $s$  与圆柱直径的比值  $Kc = \pi s/D$ . 把上述观点应用于波流共存情况, 定义新的  $Kc$  数

$$Kc^* = \begin{cases} \frac{T}{D} \int_{\theta^*}^{\pi} (U + u_0 \cos \theta) d\theta & |U| \leq u_0 \\ \frac{\pi UT}{D} & |U| > u_0 \end{cases} \quad (13)$$

其中  $\theta^*$  为合速度为零时的相位  $\theta^* = \arccos(-U/u_0)$ . 如果把水动力系数表示为  $Kc^*$  的函数, 那么数据分散性较小, 并且所得结果与现有纯波值没有明显差别. 对于多种杆件形式, 李玉成与康海贵、张春蓉、何明、王凤龙和张宁川等人 (1990~1994) 采用同样的方法探求对纯波和波流都适用的水动力系数, 并得到规则波和不规则波归一化的  $C_d, C_m$  与  $Kc^*$  的相关结果<sup>[4]</sup>.

随着海洋工程的不断发展, 方形截面杆件、群桩、海底管线和弹性桩柱的水动力学特性也日益受到人们的重视<sup>[4,75~77]</sup>. 海浪具有随机性, Teng<sup>[78]</sup> 和 Karadeniz<sup>[79]</sup> 分别提出倾斜的刚性和柔性圆柱波流载荷响应谱的线性化计算方法. 虽然 Morison 方程理论上不严格, 但目前没有更好的理论模型. 用数值方法求解 Navier-Stokes 取得一定进展, 但实现高  $Re$  数时的圆柱绕流计算, 并在工程上实用化还有许多工作要做. 实验研究和现场观测仍是减小实际海况下波流载荷不确定性的有效手段<sup>[80]</sup>.

#### 4.2 波和流与大尺度结构物的相互作用

除了导管架平台外, 其它类型的海洋平台都可归为大尺度海洋结构物, 如近海作业的重力式平台、较深海域的半潜平台和张力腿平台等. 与小尺度结构不同, 大尺度结构物的存在改变了流场, 波对结构物的绕射将不可忽略. 一般而言, 当  $D/L > 0.2$  时, 无明显的边界层分离, 除局部区域外, 流体粘性影响可以忽略不计.

波浪或水流对于结构物的单独作用, 多年来国内外学术界和工业界给予了极大的重视, 并发展了有效的计算方法<sup>[81,82]</sup>. 实际问题中波浪和水流往往是同时存在的, 或者物体在行进过程中往往受到波浪的影响. 由于定常流的存在, 物面上波动势的边界条件被改变, 波浪对结构物的绕射发生变化, 相应地波浪对物体的作用力也将受到水流的影响. 假设不可压、无粘流体作无旋运动, 这样有速度势满足 Laplace 方程

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (14)$$

结合相应的自由面、水底和物面条件, 问题完整.

由于自由面是未知的, 自由面边界条件又是非线性的, 上述方程的求解非常困难. 实际计算中常常引入某些假定. 在小波陡的假设下, 速度势可以分解为定常流的势和与时间相关的波动势<sup>[83]</sup>.

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_w \quad (15)$$

定常流势  $\Phi_c$  可以表达为均匀流势  $Ux$  和结构对均匀流势的扰动  $\Phi_b$  之和的形式, 波动势  $\Phi_w$  可以写成入射势  $\Phi_i$  与散射势  $\Phi_s$  之和. 波绕射时相应的物面边界条件可改写为

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial n} = -\frac{\partial \Phi_s}{\partial n}, \quad \text{在物面 } S_w \text{ 上} \quad (16)$$

理想条件下, 散射势应满足无穷远 Sommerfeld 条件

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} \pm ik \right) \Phi_s = 0 \quad (17)$$

对浮体还存在辐射势  $\Phi_r$ , 若求得速度势, 由 Bernoulli 方程可得物面上的压力, 而物体受力可以通过积分物面上的压力得到。

当物体足够细长或完全浸没在水中时, 可以把自由边界条件线性化, 问题进一步简化。对于浸没在深水中的细长圆柱, Grue 和 Palm (1985) 求解了均匀流中二维波动的辐射和绕射问题, Wu 和 Taylor (1987) 解决了相应的任意形状物体的辐射问题<sup>[82]</sup>。在船舶水动力学中充分利用物体细长的特点, 引入了切片理论, 把绕船体的三维流动简化为绕各横剖面的二维流动求解, 沿船长方向各剖面受力的线性叠加即为船体上总的流体作用力, 并在船舶运动估算中得到成功应用。

然而, 对于海洋工程而言, 大部分大尺度结构物属于钝体, 很难满足细长体的要求, 这些结构也通常露出自由面。这时, 如果 Froude 数  $Fr = U/\sqrt{gD}$  较小, 物体对定常流动部分的扰动并不重要。定常问题的自由边界条件简化为刚性水面条件, 而在频域理论范畴内波动部分的一阶自由面边界条件考虑流的修正。从这种假设出发, Zhao 和 Faltinsen<sup>[84]</sup>, Wu 和 Taylor<sup>[85]</sup>, Lin 和 Hsiao<sup>[86]</sup> 得到深水中二维绕射和辐射问题的解。Taylor 和 Hu<sup>[87]</sup>, Nossen 和 Grue<sup>[88]</sup> 把这一方法应用于三维浮体在深水中的缓慢运动。在小流速假定下, 用零速时的三维脉动源加上流速修正项代替三维移动脉动源, 边界元方法可用于有定常流作用的情况<sup>[89,90,81]</sup>。如果要考虑定常运动产生的流场的不均匀性, 可采用简单格林函数 (Rankine 源) 法, 建立起线性或非线性基础上的散射理论, 并可考虑瞬时湿面积变化的影响<sup>[91,92]</sup>。

尽管频域分析法发展较早, 在工程上应用较广, 但它通常只适用于稳态问题。对瞬态和强非线性问题显得无能为力。而时域分析法有很大的自由度, 原则上可以处理全非线性和物体任意运动的问题。Isaacson (1991) 提出波浪中二维物体绕射和辐射问题的时域解, 随后把这一方法用于波浪与二维物体和波浪与三维浮体的相互作用问题<sup>[93]</sup>。用积分方程法求解绕射 - 辐射问题, Kim 和 Ran<sup>[94]</sup> 在频域和时域研究了铰接平台在随机波和流作用下的动力响应。Faltinsen<sup>[95]</sup> 比较了不同数值模型对浮式生产系统慢漂运动的计算结果, 并指出与波浪特征频率一致的波浪力和缓变的慢漂力都受波和流相互作用的影响。张挺和孙明光<sup>[96]</sup> 提出一个浅水域生存工况下, 多锚链系泊浮筒三维运动的工程计算模型, 对不同的风、波、流及链刚度计算了浮筒的运动及链力。

除了桩柱类型的结构物, 直立墙式或斜坡式建筑物 (如防波堤) 也属于大尺度结构物, 这类结构物的受力情况, 一般需要考虑波浪破碎的影响。目前, 理论计算海洋工程结构在指定海况中的受力和运动已具有相当的可靠性, 但远没有达到取代模型实验的程度, 波和流与结构的非线性相互作用, 如无限远辐射条件确定、近场波产生、非线性波流作用下结构动力响应、破波力等问题还有待于进一步研究。随着计算技术和方法的不断发展, 大尺度结构物在海洋环境中的性能预测必将日趋完善。

## 5 波流边界层与泥沙输运

定常水流和浅水时波浪对泥沙输运的影响早已被人们所认识。实际上, 在水深达 200m 时仍可观测到波浪引起的泥沙悬浮。波浪和水流的共同作用控制着大陆架地区的泥沙运动, 而流体通过边界层作用于底床, 边界层进而决定着泥沙的起动、悬浮甚至输运<sup>[97,98]</sup>。

当波浪和流同时存在时, 波动增强了壁面切应力和湍流强度。波流边界层可分成不同的区



域, 波边界层存在于底床附近, 一般的厚度只有 2 ~ 10 cm, 它嵌入在尺度与水深相当的流边界层内. 波边界层内湍动能和切应力既受波的影响, 又受流的作用, 由于波边界层内较大的速度梯度, 这些量远比定常流时的值大, 而在波边界层外可以认为湍动能和切应力只受流控制. 只有波动时, 湍流脉动被限制在底床附近, 而在波流情况下, 流可使得湍流脉动扩展到整个水深区域 [99].

要从理论上确定湍动能及壁面剪切应力, 需要求解波流边界层方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tau}{\rho} \right) \quad (18)$$

通常用涡粘性模型求解上述方程

$$\tau = \rho \epsilon \frac{\partial u}{\partial z} \quad (19)$$

定常流时一般定义  $\epsilon = \kappa u_* z$ ,  $u_* = \sqrt{\tau_c / \rho} = \sqrt{f_w / 2} u_b$ ,  $\tau_c$  为壁面切应力,  $f_w$  为摩擦速度,  $u_b$  为壁面附近速度的幅值. 波与任意角度的流共同作用下, Grant 和 Madsen [97] 假设涡粘性不随时间变化, 并随高度线性增加

$$\epsilon = \begin{cases} \kappa u_* c_w z & z < \delta_w \\ \kappa u_* z & z > \delta_w \end{cases} \quad (20)$$

把方程 (20) 代入 (18), 可得到波边界层内外的解. 由于波的存在, 底床诱导的湍流强度增加, 使得波边界层上的流受到更大的阻力. 这种现象可以看成粗糙度增加产生的, 为此, Grant 和 Madsen 引入表观粗糙度的概念. Scott (1976), Forristall (1977), Trowbridge 和 Agrawal (1995) 的观测结果都证明了这一点 [97,100]. Smith (1977) 提出的模型与上述模型类似, 但他只考虑了波流在一个方向的情况. 在部分区域内假设  $\epsilon$  不随高度线性增加, Myrhaug (1984, 1989), Aukrust 和 Brevik (1985), Christoffersen 和 Jonssen (1985), You (1994) 提出了相应的涡粘性模型 [101,102]. 上述模型都认为  $\epsilon$  不随时间变化, 而 Trowbridge 和 Madsen [103,104] 的波动边界层模型假设  $\epsilon$  是时间的正弦函数. Sleath [105] 认为在整个边界层振荡流和定常流诱导的湍流独立, 涡粘性系数为流和波的涡粘性系数  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_w$  之和,  $\epsilon_c$  仍按习惯上的取法正比于高度, 而通过分析振荡流动的湍流测量, 他提出  $\epsilon_w$  不依赖于高度, 所得速度分布和摩擦因子形式简单, 并与实验吻合较好.

除涡粘性模型外, 求解波流边界层的模型还有混合长度模型 (Bakker, 1974)、 $K-\epsilon$  模型 (Celik, 1985; Justesen, 1987; Davies, 1988)、高阶矩模型 (Shen, 1987; Thanh & Temperville, 1991) 和阻力律 ( $\tau = C_d U^2$ ) 模型 (Weber, 1991) [102]. 这些模型都是针对稳定的波流场, 而 Davies [106] 用  $K-\epsilon$  模型研究了把波叠加到流上和把波从波流场中移开时边界层的发展过程. Deigaard [107] 用混合长度模型研究了边界层分离, 他认为和定常流相比, 由于湍流增强, 有波时流动分离的趋

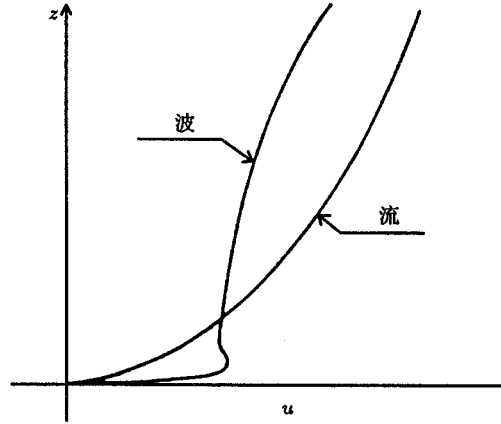


图 1 波流边界层内的速度剖面 (Nielsen, 1992) [99]

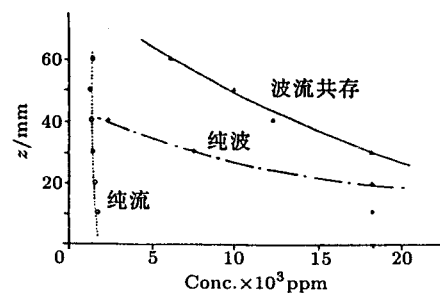


图 2 波流情况下的含沙量剖面 (Kemp 和 Simons, 1984) [109]

势被大大减弱了. 底床粗糙度是泥沙模型中的一个重要参数, You (1996) 提出由于沙波形成和近底泥沙质增加使得有波时的物理粗糙度  $k_s$  较纯流时增加, 所得速度剖面与 Drake 和 Cacchione (1992) 的测量值相符<sup>[108]</sup>. 应该说明, 表观粗糙度的增加是由于波边界层内涡粘性的增加引起的, 这与物理粗糙度增加的原因不同.

由于波增加了壁面切应力, 起动的泥沙明显增加, 湍流度的增加又使得泥沙可以悬浮到远离底床的地方. 从含沙量剖面来看, 波流作用下水体下半部分的含沙量远远大于纯流时的值, 也就是说, 波动会在底床附近产生较大的含沙量. 流的作用使起动和悬浮的泥沙得以大量输送. 与定常流情况比较, 波动使得泥沙输运量显著增加<sup>[109,110]</sup>. 反过来, 泥沙的垂向分层对湍流脉动起了一定程度的抑制作用, 使得泥沙不能无止境的起动和悬浮. 波流共存时的泥沙运动可以概括为“波浪掀沙, 水流输沙”.

研究波流边界层有助于揭示波流作用下泥沙运动的物理机理, 而全面评述波流相互作用对泥沙起动、悬浮及输运的影响亦十分必要<sup>[111]</sup>.

## 6 结束语

波流相互作用是非线性科学的前沿课题, 深入研究这一问题有助于丰富对非线性现象的认识, 并具有重要工程意义. 近年来波流相互作用研究已取得重要进展, 同时也使我们认识到波流间以及它们同结构物和挟带物质间相互作用的复杂性, 有限幅波 (特别是强非线性波) 与任意剖面流的相互作用, 非线性波和流与大尺度结构物的相互作用, 湍流对泥沙输运的影响等问题还有待于进一步探讨<sup>[112]</sup>.

## 参 考 文 献

- 1 李家春. 水波动力学研究的若干问题. 见: 现代流体力学进展. 北京: 科学出版社, 1991. 86~94
- 2 李家春. 现代流体力学发展的回顾与展望. 力学进展, 1995, 25(4): 442~450
- 3 郑哲敏, 周恒, 张涵信, 黄克智, 白以龙. 21 世纪初的力学发展趋势. 力学进展, 1995, 25(4): 433~441
- 4 李玉成, 缪国平. 中国海洋水动力学的研究进展. 中国海洋平台, 1996, 11(6): 255~264
- 5 孙意卿. 海洋工程环境条件及其荷载. 上海: 上海交通大学出版社, 1989
- 6 Phillips O M. The Dyn of the Upper Ocean. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1977
- 7 Sarpkaya T, Isaacson M. Mechanics of Wave Forces on Offshore Structure. New York: Van Nostrand Reinhold, 1981
- 8 Mei C C. The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves. New York: John Wiley & Sons, 1983
- 9 Chakrabarti S T. Hydrodynamics of Offshore Structure. Boston: Springer-Verlag, 1987
- 10 Gudmestad O T, Karunakaran D. Wave-current interaction. In: Environmental Forces on Offshore Structure and Their Pred. Netherlands: Kluwer, 1990. 81~95
- 11 Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents. *J Fluid Mech*, 1960, 8: 565~583
- 12 Whitham G B. Mass, momentum and energy flux in water waves. *J Fluid Mech*, 1962, 12: 135~147
- 13 Hughes B A, Stewart R W. Interaction between gravity waves and a shear flow. *J Fluid Mech*, 1961, 10: 385~402
- 14 Lambrakos K F. Wave-current interaction effects on water velocity and surface wave spectra. *J Geophys Res*, 1981, 86: 10 955~10 960
- 15 Brevik I, Aas B. Flume experiment on waves and currents I: rippled bed. *Coastal Eng*, 1980, 3: 149~177
- 16 Brevik I, Luftkrigsskolen. Flume experiment on waves and currents II: smooth bed. *Coastal Eng*, 1980, 4: 89~110
- 17 Li Y C, Herbich B J. Effect of wave-current interaction on the wave parameter. In: Proc 18th Coastal Eng Conf. New York: ASCE, 1982. 413~438
- 18 Dong G H, Li Y C. Wave transformation and breaking in diagonal opposing current. In: Proc Special Offsh Symp China. Beijing: ISOPE, 1994. 633~640
- 19 王涛, 李家春. 波作用量守恒原理在波流相互作用中的应用. 力学学报, 1996, 28(3): 281~290

- 20 Hedges T S K, Anastasiou, Gabriel D. *J Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng*, 1985, 111: 275~288
- 21 Li Y C. Wave-current interaction. In: Handbook of Coastal and Ocean Eng. Houston: Gulf Pub Co, 1990. 703~726
- 22 李玉成, 滕斌, 陈兵. 波浪在水流作用下的变形. *水动力学研究与进展*, 1995, 10(2): 173~180
- 23 Lundgren H. Wave thrust and wave energy level. In: Proc 10th Congr Intl Assoc Hydraul Res. Congress of IAHR Delft: IAHR, 1963, 1. 147~151
- 24 Jonsson I G, Wang J D. Current-depth refraction of water waves. *Ocean Eng*, 1980, 7: 153~171
- 25 Jonsson I G. Wave-current interactions. In: The Sea, 9, Ocean Eng Sci. New York: Wiley, 1990. 65~120
- 26 Jonsson I G. Energy properties and shoaling of higher-order Stokes waves on a current. *Ocean Eng*, 1995, 22(8): 819~857
- 27 Madsen P A R, Murray R, Sorensen O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. *Coastal Eng*, 1991, 15: 371~388
- 28 Nwogu O. An alternative form of the Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *J Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng*, 1993, 119(6): 618~638
- 29 李玉成, 张永刚. 应用 Boussinesq 方程对非线性波与流相互作用的理论研究. *水动力学研究与进展*, 1996, 11(2): 205~211
- 30 Li Y C, Teng B. The application of Cokelet's wave theory in the calculation of wave current field. *J Hydrodyn*, 1993, B, 5(2)
- 31 张永刚, 李玉成. 促进其线性频散特征另一种形式的 Boussinesq 方程. *力学学报*, 1997, 29(2): 142~150
- 32 Yoon S B, Liu P L-F. Interactions of currents and weakly nonlinear water waves in shallow water. *J Fluid Mech*, 1989, 205: 397~415
- 33 Li B, Fleming C A. Multigrid model of wave-current interaction. In: Wave Kinematics and Environmental Forces. Netherlands: Kluwer, 1993. 317~327
- 34 李玉成, 张永刚. 不规则波和方向谱在有定常流条件下折射 - 绕射问题的数值模拟. *水动力学研究与进展*, 1995, 10(6): 667~672
- 35 Baddour R E, Song S W. On the interaction between waves and currents. *Ocean Eng*, 1990, 17(1/2): 1~21
- 36 Baddour R E, Song S W. Interaction of higher-order water waves with uniform currents. *Ocean Eng*, 1990, 17(6): 551~568
- 37 Peregrine D H. Interaction of water waves and currents. *Adv Appl Mech*, 1976, 16: 9~117
- 38 施勇. 潮流作用下浅水波浪变形数值模式. *水利学报*, 1995, 增刊: 129~134
- 39 Naciri M, Mei C C. Evolution of a short surface wave on a very long surface wave of finite amplitude. *J Fluid Mech*, 1992, 235: 415~452
- 40 Ölmöz H S, Milgram J H. Nonlinear energy transfer to short gravity waves in the presence of long waves. *J Fluid Mech*, 1995, 283: 199~226
- 41 Trulsen K, Mei C C. Double reflection of capillary/gravity waves by a non-uniform current: a boundary-layer theory. *J Fluid Mech*, 1993, 251: 239~271
- 42 Magnusson A K. Effects of a shear current on wind induced wave. In: Wave Kinematics and Environmental Forces. Netherlands: Kluwer, 1993. 53~73
- 43 Komen G J, Cavaleri L, Donelan M, et al. Dynamics and Model of Ocean Waves. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1994
- 44 周显初. 流动对孤立波演变的影响. *中国科学*, 1986, A 辑, 2: 171~181
- 45 Bea R G, Lai N W. Hydrodynamic loadings on offshore platforms. In: Proc 10th Offshore Tech Conf. Houston, 1978: 155~168
- 46 Toumazis A D, Ahilan R V. Review of recent analytical and approximate solutions of wave-current interaction. In: Env Forces on Offsh Struct and Their Pred. Netherlands: Kluwer, 1990. 61~79
- 47 Li J C, Chwang T A. Effect of non-uniform current on wave fields. In: Proc of 4th ISOPE Osaka, 1994. 125~132
- 48 Li J C, Lin M, Wang T. Flow interaction relevant to water waves. In: Proc 1st Intl Conf Flow Interaction. Hong Kong, 1994. 433~438
- 49 Nepf H M, Monismith. Wave dispersion on a sheared current. *Appl Ocean Res*, 1994, 16: 313~315
- 50 Kirby J T, Chen T M. Surface waves on vertically sheared flows: approximate dispersion relations. *J Geophys Res*, 1989, 94: 1013~1027
- 51 Fenton J D. A fifth-order Stokes theory for steady waves. *J Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng*, 1985, 111(2): 216~234
- 52 Dalrymple R A. A finite amplitude wave on a linear shear current. *J Geophys Res*, 1974, 79(30): 4498~4504
- 53 Dalrymple R A, Cox J C. Symmetric finite-amplitude rotational water waves. *J Phys Oceanogr*, 1976, 6(6): 847~852
- 54 Cummins I, Swan C. Nonlinear wave current interactions. In: Wave Kinematics and Environmental Forces. Netherlands: Kluwer, 1993. 35~51.

- 55 Hui W H, Tenti G. A new approach to steady flows with free surfaces. *J Appl Math and Phys*, 1982, 33: 569~589
- 56 Drennan W M, Hui W H, Tenti G. Accurate calculation of Stokes water waves of large amplitude. *J Appl Math and Phys*, 1992, 43: 367~384
- 57 Li J C, Hui W H, Tenti G. Nonlinear water waves in weak shear flows via symbolic computation. In: Proc of Int Coll Nonlinear Atm Dyn. Beijing: Science Press, 1987. 399~406
- 58 Li J C, Hui W H, Tenti G. On nonlinear interaction of a pair of oblique gravity waves. In: Proc 1st ACFM. Beijing: Peking Univ Press, 1987. 496~499
- 59 宋涛, 李家春. 表面张力作用下的高阶摄动解. *力学学报*, 1989, 21(2): 145~153
- 60 王涛, 李家春. 波流非线性相互作用对流场和载荷的影响. *中国科学*, 1997, A 辑, 27(2): 245~254
- 61 Wang T, Li J C. Effect of nonlinear wave-current interaction on flow fields and hydrodynamic forces. *Science in China*, Ser A, 1997, 40(6): 622~632
- 62 Skyner D J, Easson W J. Wave kinematics on sheared current. In: Wave Kinematics and Environmental Forces. Netherlands: Kluwer, 1993. 101~113
- 63 Dalrymple R A. A numerical model for periodic finite amplitude waves on a rotational fluid. *J Comput Phys*, 1977, 24: 29~42
- 64 Chaplin J R. Computation of steep waves on a current with strong shear near to the surface. In: Water Wave Kinem. Netherlands: Kluwer, 1990. 429~436
- 65 Thomas G P. Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 2. Nonlinear waves. *J Fluid Mech*, 1990, 216: 505~536
- 66 Faltinsen O M. Wave loads on offshore structures. *Ann Rev Fluid Mech*, 1990, 22: 35~56
- 67 Tickell R G. Wave forces on structures. In: Coastal, Estuarial and Harbour Eng's Ref Book. London: Chapman & Hall, 1993. 369~380
- 68 Moe G, Gudmestad O T. Predictions of Morison type forces in irregular high Reynolds number waves. In: Proc 7th Intl Offsh and Polar Eng Conf. Honolulu, 1997, ISOPE-97-JSC-158
- 69 Sarpkaya T. In-line and transverse forces on cylinders in oscillatory flow at high Reynolds numbers. In: Proc 8th Offshoxe Tech Conf. Houston, 1976. 95~108
- 70 Stansby P K, El-Khairy N, Bullock G N. Experimental study of forces on a cylinder in oscillatory flow with a cross current. *Appl Ocean Res*, 1983, 5(4): 195~203
- 71 Sarpkaya T, Bakmis C, Storm M A. Hydrodynamic forces from combined wave and current flow on smooth and rough circular cylinders at high Reynolds number. In: Proc 16th OTC. Houston, 1984. 455~462
- 72 Sarpkaya T. In-line force on a cylinder translating in oscillatory flow. *Appl Ocean Res*, 1985, 7(4): 188~196
- 73 王涛, 李家春, 呼和敦德, 黄振华. 波流相互作用对水动力系数的影响. *水动力学研究与进展*, 1995, 10(5): 551~558
- 74 Iwagaki Y, Asano T, Nagai J. Hydrodynamic forces on a circular cylinder placed in wave-current co-existing fields. *Mem Faculty Eng, Kyoto Univ*, 1983, 45(1): 11~23
- 75 Stansby P K, Starr P. On a horizontal cylinder resting on a sand bed under waves and currents. *IJOPE*, 1992, 2(4): 262~266
- 76 马良. 波流作用下海底管道的水动力和在位稳定性研究的现代进展. *水动力学研究与进展*, 1995, 10(2): 135~145
- 77 姚熊亮, 徐文景, 陈起富, 陈虹. 小波浪高雷诺数时垂直桩柱的波流流. *海洋学报*, 1997, 19(1): 104~112
- 78 Teng B, Li Y C. The wave-current force spectrum on inclined cylinders. *Ocean Eng*, 1991, 18(6): 535~553
- 79 Karadeniz H. Wave-current and fluid-structure interaction effects on the stochastic analysis of offshore structures. *IJOPE*, 1993, 3(2): 107~114
- 80 Sawaragi T. Coastal Engineering-Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions. Netherlands: Elsevier Science B V, 1995. 67~143
- 81 滕斌. 深水中波浪与弱流对结构物的作用. *海洋学报*, 1996, 18(5): 117~127
- 82 Zhu S P, Moule G. Numerical calculation of forces induced by short-crested waves on a vertical cylinder of arbitrary cross-section. *Ocean Eng*, 1994, 21(7): 645~662
- 83 Isaacson M, Cheung K F. Time-domain solution for wave-current interactions with a two-dimensional body. *Appl Ocean Res*, 1993, 15: 39~52
- 84 Zhao R, Faltinsen O M. Interaction between waves and current on a two-dimensional body in the free surface. *Appl Ocean Res*, 1988, 10(2): 87~99
- 85 Wu G X, Taylor E R. The hydrodynamics force on an oscillating ship with low forward speed. *J Fluid Mech*, 1990, 211: 333~353
- 86 Lin M C, Hsiao S S. Wave force on a large scale structure under the effects of current. In: Proc Special Offshoxe Symp China. Beijing: ISOPE, 1994. 515~522
- 87 Taylor E R, Hu C S, Nielsen F G. Mean drift forces on slowly advancing vertical cylinders in long waves. *Appl Ocean Res*, 1990, 12(3): 141~152
- 88 Nossen J, Grue J, Palm E. Wave forces on three-dimensional floating bodies with small forward speed. *J Fluid Mech*, 1991, 227: 135~160

- 89 Teng B, Taylor E. Application of a higher order BEM in the calculation of wave run-up in a weak current. *IJOPE*, 1995, 5(3): 298~301
- 90 Teng B, Taylor E. New higher order boundary element method for wave diffraction/radiation. *Appl Ocean Res*, 1995, 17(2): 71~77
- 91 陶建华, 刘连武. 波浪和水流对大直径圆柱的共同作用力. *水动力学研究与进展*, 1993, 8(3): 265~272
- 92 岳琳, 刘滋源, 刘应中, 缪国平. 计及定常流的三维物体的辐射问题. *水动力学研究与进展*, 1995, 10(2): 181~196
- 93 Isaacson M, Ng Y T. Time-domain Second-order wave interaction with three-dimensional floating bodies. *IJOPE*, 1995, 5(3)
- 94 Kim M H, Ran Z. Responses of an articulated tower in waves and currents. *IJOPE*, 1994, 4(4): 298~301
- 95 Faltinsen O. Wave and current induced motions of floating production systems. *Appl Ocean Res*, 1994, 16: 351~370
- 96 张挺, 孙明光. 浅水域生存工况下系泊浮筒系统三维运动. *海洋工程*, 1997, 15(1): 1~11
- 97 Grant W D, Madsen O S. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *J Geophys Res*, 1979, 84: 1797~1808
- 98 Dyer K R, Soulsby R L. Sand transport on the continental shelf. *Ann Rev Fluid Mech*, 1988, 20: 295~324
- 99 Nielsen P. Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport. Singapore: World Sci Pub, 1992
- 100 Trowbridge J, Agrawal Y C. Glimpses of a wave boundary layer. *J Geophys Res*, 1995, 100(C10): 20729~20743
- 101 You Z J. Eddy viscosities and velocities in combined wave-current flows. *Ocean Eng*, 1994, 21(1): 81~97
- 102 Sleath J F A. Coastal bottom boundary layers. *Appl Mech Rev*, 1995, 48(9): 589~599
- 103 Trowbridge J, Madsen O S. Turbulent wave boundary layers: 1. Model formulation and first order solution. *J Geophys Res*, 1984, 89(C5): 7989~7997
- 104 Trowbridge J, Madsen O S. Turbulent wave boundary layers: 2. second-order theory and mass transport. *J Geophys Res*, 1984, 89(C5): 7999~8007
- 105 Sleath J F A. Velocities and shear stresses in wave-current flows. *J Geophys Res*, 1991, 96(C8): 15273~15244
- 106 Davies A G. Transient effects in wave-current boundary layer flow. *Ocean Eng*, 1991, 18(1/2): 75~100
- 107 Deigaard R. Flow separation in combined waves and current. In: Sand Trans in Rivs, Ests and Sea. Netherlands, 1991. 87~91
- 108 You Z J. Movable bed roughness and current profiles in the presence of irregular waves with an arbitrary angle to currents. *Ocean Eng*, 1996, 23(3): 225~242
- 109 Kemp P H, Simons R R. Sediment transport due to waves and tidal currents. In: Seabed Mech. London: IUTAM, 1984. 197~205
- 110 Fredsøe J. Elements of non-cohesive sediment transport. In: Coastal, Estuarial and Harbour Eng's Ref Book. London: Chapman & Hall, 1994. 83~92
- 111 Li Z H, Davies A G. Towards predicting sediment transport in combined wave-current flow. *J Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng*, 1996, 122(4): 157~164
- 112 王涛. 波浪相互作用及其应用: [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1997

## ON WAVE-CURRENT INTERACTION

Wang Tao      Li Jiachun

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

**Abstract** Wave-current interaction is a frontier subject in nonlinear sciences, and has found varieties of important engineering applications. The effects of wave-current interaction on wave kinematics, hydrodynamic loading and boundary layer are reviewed in this paper.

**Keywords** wave-current interaction, wave action, wave transformation, hydrodynamic loading, wave-current, boundary layer