海洋工程中极端环境事件的研究进展

李家春
（中国科学院 力学研究所，北京 100080）

摘要：环境参数、结构响应始终是海洋平台设计中的核心科学问题。在全球变暖的背景下，极端环境事件发生的频率和强度明显增加，这对如何经济、安全、可靠地设计海洋工程结构，避免灾难性事故发生是一个严峻的考验。综述学术界在崎形波的发生机制和描述、风暴下的巨浪预报和内潮波的产生与传播三方面的研究进展，并提出未来需要解决的若干科学问题。
关键词：极端环境事件; 崎形波; 风浪预报; 内潮波

由于经济快速发展，对能源需求急剧增长。我国低渗和稠油油田占有相当比例，依靠提高石油采收率仅能使年产量维持在 1 亿 8 千万吨左右，远不能满足消费的需求，到 2010 年进口总量将占年总需求量的 50%。然而，我国海洋油气资源丰富，储量达 275 亿吨，开发海洋是应对石油资源不足，确保我国能源安全的重要途径。我国海洋石油工业从 20 世纪 60～70 年代起步，2005 年产量已达 4000 万吨，并能自主开发水深 200～300 m 左右的油田，拟设计 3000 m 水深半潜式平台。环境参数和结构响应始终是海洋工程中平台设计的核心科学问题。海洋深水区，风急浪高，极端环境事件常有发生，并导致海洋结构物的倾覆、扭转、位移和破坏，所以，这是海洋工程的前沿课题。

近年来，全球变暖的研究有了新的进展。2007 年，国际政府间气候变化小组（IPCC）发布了第四次研究报告，结论是：全球变暖已是不争的事实，人类活动的影响占主导地位。全球变暖的后果是扰动了地球的大气环流形势，从而改变全球气候冷暖和降水分布，还可能影响生物多样性。这种全局性的气候变化使随机事件变成一种非平稳的随机过程，不仅其平均值发生改变，同时方差也增大了，因此，极端环境事件的频率和强度也相应增加，对它的研究是海洋工程的重大需求。

最近，海洋工程的设计规范正在 ISO 的组织下，在以往经验的基础上进行修订，其中包括 API 和 DNV。设计规范中最不确定的因素就是随机发生的环境参数，因此，如果不考虑极端环境事件的因素，就会使结构的安全与寿命得不到保证。

主要综述近年来人们最关心的海洋环境的三方面的极端事件（即：平静海况，严峻海况和水面下的大波），它们是：崎形波的发生机制和描述、风暴下的巨浪预报和内潮波的产生与传播的研究进展。

1 崎形波的产生和描述

所谓“崎形波”（Freak）指的是在较平静的海况下偶尔发生的大波。一般说来，其波高为有意义波高的 2 倍以上。由于波高大，因此，波浪载荷也急剧增加，可导致结构破坏。人们认为，ringing 就是由崎形波激发的。

崎形波产生的原因有多种解释：波-波或波-流相互作用：如远方传来的涌浪叠加，波浪与海流的逆向作用；由于海底地形导致的波浪折射和聚焦：当外海波浪传到等深线成凹形的浅水区时，时有发生。有人认为崎形波是单峰大波，我们认为用波群来解释和描述崎形波有一定合理性。所谓“波群”，指的是连续发生的大波事件，在窄谱的条件下，可以由两个频率和波数相近的波叠加而成，从而形成“波包”。以往的 Fourier 分析虽然可以得到各种频率成分所占能量的比例，但是，没有规定各种成分出现的先后次序。在波浪谱相同时，有的可以出现波群，有的则没有，因此，我们可以定义 groupness 来定量描述谱窗平均的波能时间序列偏离平均波能的方差：

$$GF = \frac{\sqrt{\frac{1}{T_R}\int_0^{T_R}[E_s(t)-\overline{E_s(t)}]^2\,\mathrm{d}t}}{\overline{E_s}}$$

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$E_s(t)=\frac{1}{T_p}\int_{-\infty}^{\infty}\eta^2(t+\tau)W(\tau)d\tau$$

$$W(\tau)=\begin{cases}1-\dfrac{\tau}{T_p}, & |\tau|<T_p\\ 0, & |\tau|<T_p\end{cases}$$

其中，$E_s(t)$ 是谱窗平均（瞬时光滑）的波能时间序列（SIWEH），$W(\tau)$ 是 Bartlet 谱窗光滑函数，T_R为时间序列记录长度，T_p为谱峰周期。从它的物理意义来看，表明该物理量可以很好地描述连续出现大波的波群现象[9]。

如果这种波包是不稳定的，就会使波高不断增加，导致大波和波破碎。这就是著名的 Benjamin-Feir 不稳定性。在海上由于有风的存在，Bliven ，Huang & Long[2]的实验认为风会抑制 B-F 不稳定性。然而，Li，Hui& Donelan[10]等进行理论分析，导出了相应的非线性 Schrodinger 方程：

$$i\frac{\partial A}{\partial t}+\mu\frac{\partial^2 A}{\partial \xi^2}=q|A|^2\ A$$

$$\xi=\varepsilon(x-c_g t),\quad \tau=\varepsilon^2 t$$

式中：ε为波陡，c_g为群速度.从$\frac{1}{2}\omega a_0^2k^2$无量纲化的侧带不稳定增长率，研究有风条件下的稳定性，发现：在弱风时，B-F 不稳定性依然增长，在强风时，B-J 不稳定性抑制，并为加拿大风水槽实验证实。同时，还表明下侧带的增长率大于上侧带的增长率，不仅解释了成长过程中风浪谱峰下移现象，而且，在弱风条件下，由于边带不稳定可以导致波群能量的集聚，波群高度增加，从而产生崎形波，乃至发生波破碎。

崎形波是典型的非线性、非平稳过程，因此，不能用 Fourier 分析，可以用小波分析和 Hilbert-Huang 变换进行数据分析。后者采用本征模函数（IMF）进行分解（EMD），可以很好地描述振幅和频率随时间变化的现象（Huang et al.[8]）。可以用数值或实验方法产生崎形波，并用时域分析计算结构的载荷（董艳秋[29]）。

2 风暴下的巨浪预报

近年来，灾难性的热带风暴时有发生，如：2005 年美国墨西哥湾的 Katrina 和 Rita 两个 5 级飓风导致新奥尔良淹没，众多石油平台和输油管线破坏，一度石油工业停产。在我国出现了强台风和超强台风的等级，如：2006 年南海的珍珠台风也对海洋工程设施造成严重威胁。

台风或飓风是发生在热带海域的大气漩涡，由于其风速大，并携带大量水汽，可以造成严重灾害，如：结构破坏，房屋倒塌，风暴潮和暴雨造成洪水和滑坡、泥石流灾害。热带气旋发生在纬度 5 度以上的热带地区海面，海面温度 26 度以上，有上升流和强扰动。热带气旋预报最大困难是路径和强度突变（Li et al.[12]，陈联寿等[17]，Chan [3]），在全球变暖背景下，热带气旋的强度是否增加和如何计算 50 年一遇的风速仍然是一个有争议的问题。

风浪预报已经从经验走向数值预报。除了由风区和风时预报风浪参数外，已经出现第三代风浪谱预报模式（Tucker & Pitt [14]）：

$$\frac{\partial F}{\partial t}+(\vec{U}+\vec{C}_g)\bullet\nabla F=N_{input}+N_{inter}+N_{dis}$$

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中，F 是风浪谱，U 是流速，$\bar{C}_g$ 是群速度，右端项是风生浪的能量输入，波波相互作用的能量交换和由于摩擦和破碎的能量耗散。

我们特别关注风暴下的风浪预报，利用 WAM 模式模拟了 8909 台风浪的风场，波高场和波谱场(Li，Yi & Du [11])。台风的压力场和风场取为：

$$p = p_\infty - \frac{p_\infty - p_c}{\sqrt{1 + C_f (\frac{r}{L(\theta)})^2}},$$

$$v_\theta = (-fr + \sqrt{fr^2 + 4r\left|\frac{\partial p}{\partial r}\right|} / \rho,$$

$$v_r = -\frac{v_\theta \partial p / \partial \theta}{r \partial p / \partial r}$$

右边的源汇项为：

1）波能增长率

$$\beta = Max\{0, 0.25\frac{\rho_a}{\rho_w}(28\frac{U_*}{C}\cos\theta - 1)\}\omega,$$

2）底部摩擦：

$$S_{bf} = -c\frac{k}{\sinh 2kd}F$$

3）波浪破碎

$$S_{br} = -c\bar{\omega}(\frac{\omega}{\bar{\omega}})^n(\frac{\alpha}{\alpha_{pm}})^m F,$$

$$c = -3.33\times10^{-5}, m = n = 2.0, \alpha_{pm} = 4.57$$

最近，Tracey 等利用 SWAN 风浪预报模式分析了 Katrina 飓风引起的巨浪(Tracey et al.[13])，它与 WAM 的区别是，本模式用波作用量密度作为因变量，可以应用于近岸区。同时，风生浪能量输入与波耗散与前者不同。对于风能输入可以采用 Komen，Jassen 和修正 Jassen 模型，非线性相互作用包括了四阶项，耗散项包括了由于在表面产生白帽的能量消耗，风速数据来自 NARR,GFS，FNL。模拟结果与 11 个 NBDC（国家浮标数据中心）的观测比较表明：NARR 分辨率较高，在峰值附近，NARR 低估风速值，FNL 和 GFS 高估风速值。用 NARR 数据给出较低的有意义波高和较小的平均周期。用修正的 Janssen 公式可以在 0.04-0.5Hz 频率范围内很好地预测有意义波高和平均周期。

预报模式中，波浪破碎的参数化尚有改进余地。Banner[1]最近研究波浪破碎是一种阈值过程，当能量增长超过阈值就会发生破碎，否则就是 recurrent 过程。他还获得了破浪耗散的公式为：

$$S_{br} = bc^5 / g\Lambda(c)$$

其中，c 为相速度，$\Lambda(c)$ 为白帽长度。

3 内潮波的产生与传播

大气中由于温度和水汽含量的不同，海洋中则由于压力，温度，盐度的差异导致密度层结，所以在海洋中有温跃层存在。在密度稳定分层的介质中，会产生介质内部的体波，称为内波。内波广泛存在于大气

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和海洋中，对于介质的混合，能量和物质的输送，光波、声波的传播都会有影响。对于海洋工程而言，我们主要关注非线性长内波或内潮的产生与传播（Helfrish & Melville[7]，Garrett & Kunze[4]）。由于它携带巨大的能量，可以导致海洋结构物的破坏。

一般说来，由于密度差小于水表面上大气和水的密度差，因此，恢复力小，只要有小的扰动，就能掀起“轩然大波”。它的周期长，频率低，波长长。内波的特征频率为 Vasala-Brunt 频率，对于连续分层的介质，内波有不同的模态，群速度与相速度方向正交。

南海北部，东沙群岛是内波的频发地区（方欣华，杜涛[18]）。按照南海的地形，在东部菲律宾以北，台湾岛以南，有巴士、巴林唐和巴布延海峡，那里的海底有一高耸的海脊。当每天潮汐发生往复运动时，就会产生内波。我们用有限体积法计算势流方程，自由面和固壁条件依旧，两侧采用辐射条件。模拟结果表明，在潮汐发生往复运动时，确实可以产生内波和孤立波群，主要参数，如：波幅，波速，最大流速。单峰历时等与实际观察一致（见表 1）。

表 1 内波计算和实测结果比较

	模拟值	观测值
最大波幅/m	110	100
单峰历时/min	18	18.3
波速/（$m.s^{-1}$）	1.81	1.9
最大流速/（$m.s^{-1}$）	0.9	0.9

为了估计远离海峡的内波参数，我们进一步计算了内波在不平地形上的传播和演化过程。主要的方程采用推广的 KdV 方程：

$$\eta_t + c_0\eta_x + c_1\eta\eta_x + 3c_5\eta^2\eta_x + c_2\eta_{(3x)} + \gamma\eta + f\eta|\eta| - \frac{1}{2}\varepsilon\eta_{(2x)} = 0$$

通过改变系数分析了非线性，高阶非线性，频散，变浅，摩擦和耗散等因素的影响，确定了这些系数的可能范围，进一步模拟了南海和苏禄海内波的传播，发现在东沙群岛以东洋面，内波波幅可达 100m 以上，而在东沙群岛以西，内波波幅一般衰减为 70m 量级，大致符合观测事实。

为了计算内波载荷，我们首先分析内波流场的特征是：界面上下存在速度剪切，并为观测事实证实；流场的水平速度相对均匀，并远大于垂向速度；根据水深比，波形可以发生下凹和上凸的转换等。相对于内波波长而言，海洋结构物可以视为小尺度物体，因此，Morison 公式适用，并且由于 Kc 数大，相当于单向流的情况，粘性力占主导地位（Cheng & Li[5]）。我们计算了 Spar 和半潜式平台的结果，表明与表面波相比，内波载荷是不可忽视的（Zhang & Li[16]）。

4 结 语

本文综述了海洋工程中极端环境事件的研究进展：用波群的观点来认识和描述崎形波，研究在风暴条件下的巨浪预报方法，分析在我国南海内潮发生和传播的规律。对于在风、浪、流作用下结构的流动载荷和动力响应，包括：ringing 激振，Mathieu 型不稳定和涡激振动（VIV）等流固耦合问题，在工程设计时必须予以关注。通过工程界、力学界、海洋界等科学家的共同努力，人类必将深化对环境、结构及其相互作用的认识，从而设计出经济、安全、可靠的海洋工程设施，为增加我国海洋石油天然气生产做出贡献。

致谢：对国家 863 项目 2006AA09A103-4 和中国科学院创新项目 KJCX－YW－L02 的资助以及袁玉堂，范平，张会琴承担的相关计算工作表示感谢。

参考文献：

1 Banner M L. Recent progress on understanding and modeling ocean wave breaking, in New Trends in Fluid Mechanics Research. eds. Zhuang FG & Li JC, 2007:16-22.

2 Bliven I F et al. Experimental study on the influence of wind on sideband instability. J Fluid Mech.,

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1986,162:237-250.
3 Chan JCL. The physics of tropical cyclone motion. Ann. Fluid Mech., 2005, 37: 99-128.
4 Garrett C, Kunze E. Internal tide generation in the deep ocean. Ann. Rev. Fluid Mech., 2007, 39:57-87.
5 Cheng Y L，Li J C , An L S. Stokes 5th oeder wavesand its action on cylinderic pipes. Proc. of ISOPE. 2006,3:459-466.
6 Global Ocean Associates.Oceanic internal waves and solitons. 2002.
7 Helfrish K R, Melville W K. Long nonlinear internal waves. Ann. Rev. Fluid Mech., 2006, 38:395-425.
8 Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum. Ann. Rev. Fluid Mech., 1999, 31:417-458
9 Kao J C, Lin J M. Computer simulatio of ocean wave grouping. Proc. of the 7th Congress of APRD-IAHR. 1990: 339-343.
10 Li J C, Hui W H, Donelan M. Effects of velocity shear on the stability of surface deep water wave train. in Nonlinear Water Waves, Springer, 1988:213-220.
11 Li J C, et al. On typhoon wave evolution, in Tropical cyclone disasters, in Tropical Cyclone Disasters. eds. By Lighthill J, Zheng Z M.1992:393-403.
12 Li J C, Kwok Y K, Fung JCH. Vortex dynamics in the studies oflooping in tropical cyclonetracks. Fluid Dynamics Res.,1997, 21:57-71.
13 Tracey T, etal. Analysis of high seas generated by Hurricane Katrina. Proc. ISOPE 2007,(3):1777-1784.
14 Tucker M J,Pitt E G.Waves in Ocean Engineering. Elsvier, 2001:329-376.
15 Veritas D N ,et al. New DNV recommended practice DNV-RP-C205: environmental conditions and environmental loads. Proc. of ISOPE, 2006, 3:48-53.
16 Zhang H Q, Li J C. Wave loading on floating platforms by internal solitary waves. in New Trends in Fluid Mechanics Research. eds. Zhuang F G , Li J C. 2007:304-307.
17 陈联寿，徐祥德，罗哲贤，王继志.热带气旋动力学引论.北京：气象出版社，2002.
18 方欣华，杜涛.海洋内波基础和中国海内波.青岛：中国海洋大学出版社，2005.
29 董艳秋.深海采油平台波浪载荷及响应.天津：天津大学出版社，2005.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net