

文章编号: 1005-9865(2001)02-0013-05

海洋立管综合环境条件设计标准研究

刘德辅, 王树青, 郭海燕

(青岛海洋大学, 山东 青岛 266003)

摘 要:首先用有限单元法推导海洋输液立管在外界环境荷载条件下的侧向振动微分方程。对渤海某海区的 15 次风暴过程作了抽样分析, 得到以波高为主时的波高、流速序列和以流速为主时的波高、流速序列, 并对其进行了 Weibull、Gumbel、Log-normal 等适线分析, 以确定各序列的最优分布形式及相应的特征值。用重点抽样法进行随机模拟得到联合概率为百年一遇的波高和流速。针对浅海固定式平台铰接的海洋输液立管, 以最大应力为控制条件确定其联合设计标准, 并与其它方法作了比较, 得到一些有益的结论。

关键词:输液立管; 联合设计标准; 联合概率; 随机模拟

中图分类号: U674.38

文献标识码: A

Study on combined design criteria for marine risers conveying flowing fluid

LIU De-fu, WANG Shu-qing, GUO Hai-yan

(Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003, China)

Abstract: Based on the small deflection theory, the lateral motion equation of a marine riser conveying flowing fluid subjected to environmental loads is developed by use of finite element method. Sampling analysis is made on 15 storms of Bohai Sea to obtain sequences of wave height and current velocity dominated by wave and current respectively. Then the optimal types of distribution and corresponding characteristic values are determined. Simulation of an important sampling method is made to get the wave height and current velocity whose joint probability is 0.01. For the marine riser hinged on fixed platforms in shallow sea, the maximum stress of riser is regarded as the control condition to determine the combined design criteria and comparison is made with other methods.

Key words: riser conveying flowing fluid; combined design criteria; joint probability; stochastic simulation

随着海洋开发事业特别是油气开采业的进展, 海洋环境设计标准的选定已成为决定工程结构安全、造价及合理形式的最主要因素之一。在传统的海洋工程设计标准中, 采用各种环境条件分别进行概率分析, 然后选取每种环境条件在某一概率下的极值作为设计标准。这种方法没有考虑各环境参量之间的相关性, 且独立于各种不同的海洋结构之外, 往往过高地估计环境条件设计标准, 造成不必要的浪费。中国海洋石油天然气行业标准全盘翻译了美国 API 规范, 该规范是建立在墨西哥湾资料统计基础之上的, 其建议采用“百年一遇的波高和与之相应(associated)的风、流”作为极端海况设计标准, 该规范也承认“相应”一词是“含糊不清”的(ambiguous)^[1], 不同的设计者有不同的理解, 可以得到完全不同的结果。因此, 提出联合概率, 采用“百年一遇的飓风(hurricane)或台风(typhoon)”的概念是符合实际情况的。每一海况都是海洋环境要素联合作用的结果, 它们之间是相关而不是独立的。用每次风暴过程中同时出现的风、浪、流作为分析的基本序列, 得到具有一定概率水平的风、浪、流联合作用, 来取代传统的设计标准显然更为合理^[2]。

本文结合铰接于固定式平台上的海洋输液立管, 对渤海地区的 15 次风暴过程统计分析, 并用重点抽样

收稿日期: 2000-06-20

作者简介: 刘德辅(1937-), 男, 四川人, 教授, 博导, 主要从事近海及海岸工程专业研究。

法随机模拟,得到一定概率水平的浪、流组合,计算作用在立管的应力分布,以最大应力为控制条件确定其联合设计标准,并同其它方法的结果作了比较,得出了一些有益的结论。

1 立管侧向运动微分方程

海洋立管,是海洋工程结构系统中的重要部件,也是薄弱易损的构件。作为海面与海底的联系通道,其下端一般与万向节相连,上端则可连于平台的滑移节或钻探船舶等。海洋立管内部一般有高压的油或气流过,外部承受波浪、海流荷载的作用。由于立管发生事故可能造成恶劣后果,国际海洋工程界对海洋立管的研究非常重视,ISOPE, OMAE, OTC 等大型国际会议都设有海洋立管的研究专题。

本文研究的立管是竖立地铰接在平台上,管内有恒定流通过,坐标原点定于下铰接点处, Z 轴同重力方向相反, Y 轴同来流方向一致。

取长度为 dz 的管壁及相应的管内流体微元,如图 1 和图 2 所示,假设立管变形是小位移变形。

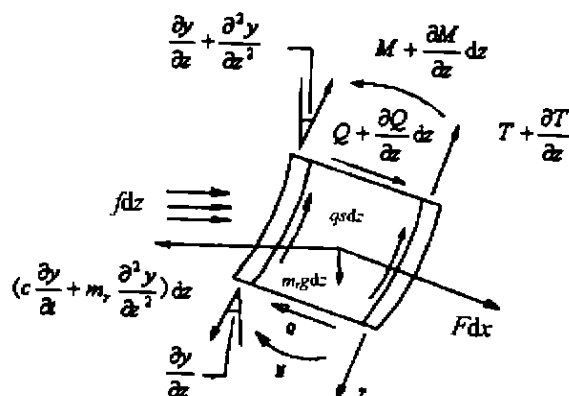


图1 管壁微元受力图

Fig.1 Element of the riser wall

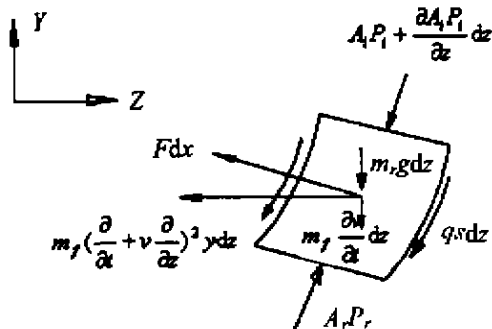


图2 管内流体微元受力图

Fig.2 Element of the internal fluid

图1的立管管壁微元,管外压力可以用一统计等效的力,即一个作用在横断面 A_e 上的压力 $A_e P_e$ 和一个浮力 $B = \rho_e g A_e dz$ 来代替^[3],则管壁微元控

制方程:

$$Z \text{ 向: } \frac{\partial T}{\partial z} + qS - F \frac{\partial y}{\partial z} - m_r g - \frac{\partial}{\partial z} \left(Q \frac{\partial y}{\partial z} \right) + \frac{\partial (A_e P_e)}{\partial z} + B = 0 \quad (1)$$

$$Y \text{ 向: } -C \frac{\partial y}{\partial t} - m_r \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + F + qS \frac{\partial y}{\partial z} + \frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(T \frac{\partial y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (A_e P_e \frac{\partial y}{\partial z}) + f = 0 \quad (2)$$

式中: M, Q 为弯矩,剪力; T 为立管张力; F, q 为管内流体和管壁的压力和摩擦阻力; S 为立管内圆周长; m_r 为立管单位长质量, $m_r = \rho_s (A_e - A_i)$; A_e 为外圆面积, $A_e = \frac{\pi}{4} D_e^2$, D_e 为立管的外径; A_i 为立管内圆面积, $A_i = \frac{\pi}{4} D_i^2$, D_i 为立管的内径; ρ_e 为管外流体密度; ρ_s 为立管材料密度; P_e 为立管外部压力, $P_e = \rho_e g (L - z)$; L 为立管长度; C 为阻尼系数; f 为由波浪和海流产生的环境荷载水平分量; g 为重力加速度。

对流体单元,假设该流体单元体积为 δB ,如图 2,该流体单元的动量变化率为:

$$\frac{dK}{dt} = m_f \frac{\partial V}{\partial t} dz \hat{j} + m_f \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 y dz \hat{k} \quad (3)$$

式中: K 为管内流体单元动量; V 为管内恒定流速度; m_f 为管内流体单位长度质量, $m_f = \rho_i A_i$; ρ_i 为管内流体密度; $\hat{j}, \hat{k}$ 为 y 向和 z 向单位矢。则流体微元的平衡方程:

$$Z \text{ 向: } -\frac{\partial (A_i P_i)}{\partial z} - qS - m_f g - m_f \frac{\partial V}{\partial t} + F \frac{\partial y}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$Y \text{ 向: } -m_f \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 y - F - qS \frac{\partial y}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} (A_i P_i \frac{\partial y}{\partial z}) = 0 \quad (5)$$

式中: P_i 为管内流体内压力, $P_i = \rho_i g (L - z)$ 。

方程(1)和(4)合并,考虑到 $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$ 及导数的乘积项为小量,则

$$\frac{\partial (T - A_i P_i + A_e P_e)}{\partial z} = (m_r + m_f - \rho_e A_e) g$$

另外,若立管顶端是固定的或竖向受到约束作用,则内部流体的压力输送会产生一个额外的轴向力,对一个薄壁管束来说为 $-2vA_i P_{\text{top}}^{[4]}$,其中 v 为泊松比,从 z 到 L 积分,则得到:

$$T - P_i A_i + A_e P_e = T_{\text{top}} - A_i P_{\text{top}}(1 - 2v\delta) - (m_r + m_f - \rho_e A_e) g(L - z) \quad (6)$$

式中: T_{top} 为立管顶端张力; P_{top} 为立管顶端压力; $\delta = 0$ 表示立管顶端没有轴向约束, $\delta = 1$ 表示有轴向约束。

将式(2)和(5)合并,考虑到 $Q = -EI \frac{d^3 y}{dz^3}$ (EI 为弹性刚度)可得到:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left[(T + A_e P_e - A_i P_i) \frac{\partial y}{\partial z} \right] + m_f \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 y + C \frac{\partial y}{\partial t} + m_r \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = f \quad (7)$$

把式(6)代入式(7)中,最后得到立管横向振动微分方程:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + \frac{\partial}{\partial z} \left[m_f V^2 - T_{\text{top}} + A_i P_{\text{top}}(1 - 2v\delta) + (m_r + m_f) g(L - z) - A_e P_e \right] \frac{\partial y}{\partial z} \Big\} + 2m_f V \frac{\partial^2 y}{\partial z \partial t} + C \frac{\partial y}{\partial t} + (m_r + m_f) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = f \quad (8)$$

从而得到静力平衡方程:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + \frac{\partial}{\partial z} \left[m_f V^2 - T_{\text{top}} + A_i P_{\text{top}}(1 - 2v\delta) + (m_r + m_f) g(L - z) - A_e P_e \right] \frac{\partial y}{\partial z} \Big\} = f \quad (9)$$

2 立管系统综合环境条件分析

1) 水平力 f 的确定

对小直径圆柱上外力的计算,仍广泛使用 Morison 方程,因惯性力较小,只考虑拖曳力,水平外力为:

$$f = \frac{1}{2} C_D \rho_e D |V_w + V_c| (V_w + V_c) \quad (10)$$

其中, C_D 为拖曳力系数; V_w 为波浪水质点水平速度,由 Airy 线性波理论求得; V_c 为流速水平分量。

为便于有限元处理,假定力在单元上为线形分布^[5],即:

$$f(z) = \left(1 - \frac{z}{l}\right) f_i + \frac{z}{l} f_{i+1} \quad (11)$$

式中: f_i, f_{i+1} 分别为第 i 单元和第 $i+1$ 单元的结点水平力。

2) 方程的离散及程序的验证

用埃尔米特插值函数,式(9)经离散、合并整理得到最后方程

$$[K] \{Y\} = \{F\}$$

其中, $[K]$ 为包括立管弹性刚度矩阵、与轴向张力有关的矩阵在内的矩阵; $\{Y\}$ 为立管结点位移矢量; $\{F\}$ 为立管结点力矢量。

本文编制了用于计算立管的侧向位移和应力分布的程序。为验证数值计算的准确性,对一立管作了简化计算,即假定立管承受均布荷载作用,立管资料见表1。计算的结果与其级数解析解作比较如表2所示,可以看出本程序的结果是合理的。

表1 立管计算参量

Tab.1 Parameters of the riser model

立管长度 L	32m	立管材料密度 ρ_s	8 200 kg/m ³
立管外径 D_o	0.35m	管内流体密度 ρ_i	1 250 kg/m ³
立管内径 D_i	0.325m	管外流体密度 ρ_e	1 025 kg/m ³
弹性模量 E	200GPa	管顶张力 T_{top}	100kN
管外荷载 f	1 000N	管顶压强 P_{top}	1MPa
管内流速 V	5m/s	单元长度 l	3.2m

3) 海洋环境要素统计分析 & 联合概率随机模拟分析

对渤海地区15次风暴过程的资料进行统计分析,得到以浪为主时的波高、流速序列(表3的C2、C3两列)和以流为主时的波高和流速序列(表3的C5、C6两列)。分别对其进行 Weibull、Gumbel、Log-normal 等适线分析,结合 K-S 拟和优度检验,以绝对误差和与误差均方和最小为准则,得到各序列最优分布形式与相应的统计特征值,如表4所示。

联合概率法的求解,同可靠度公式一样,都是求解非高斯,具有相关性的多维随机变量的联合概率密度函数,实际上就是求解下述公式

$$P_f = \iiint_{g(x) < 0} f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

式中: P_f 为失效概率; $g(x)$ 为极限状态方程, 小于零表示失效域。

对非高斯具有相关性的随机变量的联合概率密度函数的求解,解析法是不可能的。基于 M-C 法在计算较小联合概率时的缺点,用重点抽样法(ISP)来求解是行之有效的方法^[6,7]。重点抽样法的基本思路是集中对分布中最重要的区域进行抽样,而不是像一般 M-C 模拟那样对整个定义域均匀抽样,因此可以达到减少模拟次数,降低方差的目的。用表 3 作为联合概率随机模拟软件 ISPUD 的输入数据,模拟求得以浪为主时联合概率为 0.01 的波高和流速系列与以流为主时联合概率为 0.01 的波高和流速系列,见图 3 和图 4。

表 2 解析解与程序解的比较

Tab.2 Comparison between the analytical solution and this method

	Z 坐标/m	侧向位移程序解/m	侧向位移解析解/m
铰接	0.00	0.000 00	0.000 00
	3.20	0.119 12	0.113 96
	6.40	0.225 35	0.215 41
	9.60	0.308 51	0.294 50
	12.80	0.361 36	0.344 33
	16.00	0.378 36	0.360 90
	19.20	0.361 16	0.343 05
	22.40	0.305 39	0.292 39
	25.60	0.224 10	0.213 25
铰接	28.80	0.119 00	0.112 60
	32.00	0.000 00	0.000 00

表 3 波高和流速序列及其对应的应力响应值

Tab.3 Sequences of the wave height and current velocity and their corresponding response

序号 C1	以浪为主		最大应力 响应值/MPa C4	以流为主		最大应力 响应值/MPa C7
	波高/m C2	流速/(m·s ⁻¹) C3		波高/m C5	流速/(m·s ⁻¹) C6	
1	3.42	0.78	34.904	3.42	0.78	34.904
2	2.68	0.25	13.910	0.19	0.64	13.792
3	2.87	0.56	23.117	0.32	0.72	16.081
4	2.10	0.38	14.648	1.69	0.70	21.682
5	3.31	0.41	20.884	0.89	0.55	13.746
6	4.17	0.35	23.762	2.06	0.71	24.003
7	3.44	0.22	16.772	1.31	0.81	23.740
8	2.28	0.30	13.974	1.66	0.77	24.117
9	2.48	0.44	18.096	1.36	0.94	29.127
10	1.95	0.54	18.496	1.02	0.84	23.522
11	1.26	0.30	11.007	0.88	0.81	21.839
12	3.25	0.22	16.256	2.31	0.66	23.901
13	1.43	0.74	22.372	0.39	0.98	25.672
14	0.93	0.63	16.910	0.16	0.79	18.225
15	1.64	0.11	9.960	0.84	0.97	27.958

表 4 重点抽样法程序(ISPUD)的数据输入

Tab.4 Input data of important sampling procedure

序列	要素	分布形式	均值	均方差	百年一遇	相关系数矩阵
以波高为主	波高	威布尔分布	2.480 2m	0.905 5	4.96m	$\begin{bmatrix} 1.000 0 & 0.106 3 \\ 0.106 3 & 1.000 0 \end{bmatrix}$
	流速	冈贝尔分布	0.415m/s	0.1916	1.19m/s	
以流速为主	波高	冈贝尔分布	1.236m	0.868	4.75m	$\begin{bmatrix} 1.000 0 & 0.104 7 \\ 0.104 7 & 1.000 0 \end{bmatrix}$
	流速	冈贝尔分布	0.777m/s	0.118 4	1.26m/s	

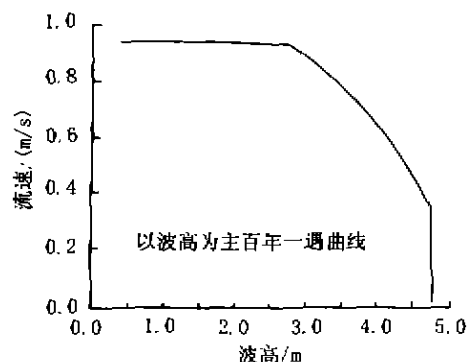


图3 以波高为主百年一遇曲线

Fig.3 Curve of 100-year return period dominated by wave

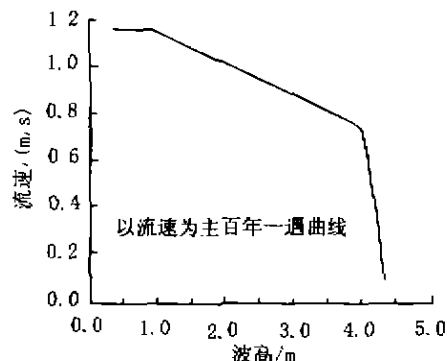


图4 以流速为主百年一遇曲线

Fig.4 Curve of 100-year return period dominated by current

以表1的立管为例,以模拟得到的波浪和流速作为环境参量,计算了作用在该立管上的应力响应,其中响应最大一组列于表5。同时计算了表3原始抽样得到的波高和流速(即C2、C3和C5、C6四列)对应的最大应力响应,列于表3相应的序号后(即C4和C7两列)。对该序列进行适线分析,得到其最优分布进而得到其百年一遇值,也列于表5中。

表5 各种方法的比较

Tab.5 Comparison of computed results by different methods

抽样方法	要素	应力响应值/MPa
以波高为主时 波高、流速序列	联合概率法	39.82
	波高/m 2.80	
	流速/(m·s ⁻¹) 0.93	
以流速为主时 波高、流速序列	响应值概率分析法(gumbel)	42.98
	百年一遇波高+百年一遇流速	65.61
	联合概率法	38.26
以波高为主时 波高、流速序列	波高/m 1.59	
	流速/(m·s ⁻¹) 1.08	
	响应值概率分析法(gumbel)	45.78
以流速为主时 波高、流速序列	百年一遇波高+百年一遇流速	68.58

3 结 语

1)环境要素各自百年一遇计算的响应要远大于其它方法计算结果,这是因为其联合出现的概率远小于0.01。由此可见,传统的环境设计标准过于保守。

2)在抽样方法相同的条件下,应用联合概率法(波高和流速联合出现为百年一遇)得到的立管应力最大响应值较应力响应值概率分析计算出的百年一遇响应要小。以上对比表明,国内外常用的响应值概率分析法相应的波、流联合出现概率,是高于百年一遇重现期的。

3)从联合概率随机模拟过程及应力响应计算中可以得到以下结论:在海流速度较大时,流速较小的变动,不但会引起同一概率域下的波高巨大变化,同时,也会强烈影响立管的响应值。因此,在海流较强海域进行立管设计时,必须以海流速度为控制条件,进行设计校核。

参考文献:

- [1] LPI.RP 2A-LRFD: Planning, designing and constructing fixed offshore platforms load and resistance factor design[Z]. ISO 13819-2; 1995(E); 127.
- [2] Liu De-fu, Yang Yong-chun, Wang Chao. Joint probability of environmental loads on marine structures[A]. Proceeding of the 5th international Offshore and Polar Engineering Conference[C]. The Hague, the Netherland; June 11-16, 1995, 408-411.
- [3] Wu M C, Lou J Y K. Effect of rigidity and internal flow on marine riser dynamics[J]. Applied Ocean Research, 1991, 13(5): 235-244.
- [4] Paidoussis M P, Issid N T. Dynamic stability of pipes conveying fluid[J]. J. of sound and Vibration, 1974, 33(3): 267-294.
- [5] TRIM A D. Time-domain random dynamics analysis of marine risers and estimation of non-Gaussian bending stress statistics[J]. Applied Ocean Research, 1990, 12(4): 162-174.
- [6] Bourgund U, Bucher C G. Importance sampling procedure using design point[R]. Research report of univ. of Innsbruck, Nov. 1986.
- [7] Schueller G I, Atix R. A Critical appraisal of methods to determine failure probabilities[S]. Univ. of Innsbruck, Institute of Mechanics, 1986, 35-74.