

近底管线上的波浪力

赵德庭

任佐皋

(海洋石油总公司开发公司, 北京)

(河海大学航运及海洋工程系, 南京)

摘要

本文利用物理模型试验, 同步测试了近水底管线在波浪作用下的水平力和外力, 并应用莫里逊公式、二阶斯托克斯波理论, 按最小二乘原理统计了水平力系数 C_D 和 C_M , 分析了它们与 KC 数间的关系, 提出了经验式。

本文重点探讨了升力过程线的计算模式, 采用傅氏级数法分析了实测升力过程线, 提出了五阶升力系数及其相应的初相位值与 KC 数的经验关系式, 从而, 首次提出了计算升力和合力过程线的方法。文中还通过实例, 比较了力过程线的实测值和计算值, 讨论了最大合力值及其相位特征等。

海底管线是开发利用海底油气资源、发展海洋事业的重要设施。近年来海洋开发事业的迅速发展, 尤其是海上采油工程的日益增加, 促使人们越来越重视对海底管线的研究。

国内外许多学者已从实验和理论两个方面对水底管线上的动力问题进行过不少研究, 如 Nath 和 Wright [1, 2]、Grace [3]、Cheong [4] 等人都曾进行过底部附近水平桩上的波力研究; 1975年, Goktun 也曾在风洞中进行过一系列实验; 近10年来, Sarpkaya [5-7] 利用大U形管, 进行了较为系统的二维振荡流中波力的研究; 国内对水平构件上的波浪力问题也进行过一些研究, 如薛鸿超等 [8] 对水平管柱上的波浪力均作过很有价值的实验和理论研究。

但应指出, 多数学者的研究多限于波浪场中作用在管线上的水平力问题, 对升力, 特别是合力的大小及计算方法问题尚缺少深入的研究。以往的研究表明, 管线上的升力是一个不容忽视的力。水平力和升力是同时作用在管线上的两个互相垂直的分力, 但它们的最大值所对应的相位在大多数情况下并不一致, 如简单地把两个分量的最大值进行叠加, 以此来代替最大合力的作法是缺乏根据的, 不能满足现代工程设计的需要。为此, 本文基于模型试验, 着重研究水平力和升力随相位的变化规律, 从而较合理地提出作用在管线上的合力的大小和相位的计算模式。

一、实验装置

本实验在一条波浪水槽内进行。水槽长55m、宽2m、高0.8m。水槽的一端设有悬吊

本文于1988年10月20日收到, 修改稿于1990年6月10日收到。

式造波机, 另一端设有消波装置。水平模型管线布置在离造波机20m处。利用电阻丝变形测断面弯矩的办法同步测量水平力和升力过程线。测力传感器和模型管线的布置如图1所示。

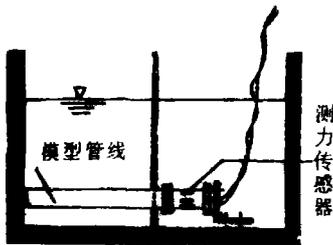


图1 测力装置示意图

模型管线的直径为2.5、3.8和6.5cm三种, 相应测力装置系统的自振频率分别为13、27、24 Hz, 能较好地满足测量要求。

波要素和波力的采样与处理采用微机系统, 系统中并接SC-18型紫外线光线示波仪, 用以直接观察被测物理量的波形。

本实验中, 采样间隔为20 ms, 每组试验重复采样3次, 每次连续采取6个波, 将采集的试验数据存盘或进行实时处理。

本实验中, 开发了下列4个数据处理基本程序: (1) 绘制波面、水平力和升力的实测及计算值过程线; (2) 统计分析动水力系数 C_D 、 C_M 和 C_L ; (3) 优化回归 C_D 、 C_M 、 $C_L(n) - KC$ 之关系曲线, 并绘制试验点和关系曲线图; (4) 绘制水平力、升力和合力的矢量玫瑰图。

二、实验成果及分析

(一) 水平力

图2(A)、(B)、(C)为典型的波面、水平力和升力实测过程线。

从图2可见, 当 KC 数由小变大时, 水平力和波面过程线均具有相同的频率, 但峰谷值的相位却不一致; 当 $KC = 3.2$ 时, 峰谷值出现在静水位附近, 表明以惯性力作用为主; 随 KC 值的增加, 峰谷值的相位向波峰靠拢, 表明速度力的影响逐渐增强, 而惯性力相对减弱。这些特征, 与以往的研究是一致的, 其水平力可用莫里逊公式来计算:

$$F_H(t) = \frac{1}{2} \rho D C_D |u(t)| u(t) l + \frac{1}{4} \rho \pi D^2 C_M \dot{u}(t) l, \quad (1)$$

式中, $F_H(t)$ 为水平管线上的总水平力; D 为管径; l 为管长; $\dot{u}(t)$ 、 $\ddot{u}(t)$ 分别为管线轴心处波动水质点的速度和加速度, C_D 和 C_M 分别为速度力和惯性力系数。

$u(t)$ 和 $\dot{u}(t)$ 的计算值随不同的波浪理论而异。据本试验中波浪流动显示所获得的流谱图分析, 也可从波面和波力实测过程线分析, 宜选用二阶斯托克斯波理论 (并考虑补偿流的影响) 来计算式(1)中的 $u(t)$ 和 $\dot{u}(t)$ 值。

采用式(1)和水平力实测过程线来统计分析 C_D 和 C_M 值时, 曾采用两种方法。

其一为特征值法, 即认为相位 $\theta = 0^\circ$ 或 2π 时, 水平速度最大, 此时 $\dot{u}(t) \doteq 0$, 则由式(1)可得:

$$C_D = \frac{2 F_H |_{\theta=0}}{\rho D (u_{\theta=0}) |_{\theta=0} l} \quad (2)$$

认为 C_D 值不随波相位而变, 将求得的 C_D 值代入式(1), 进而可以求得:

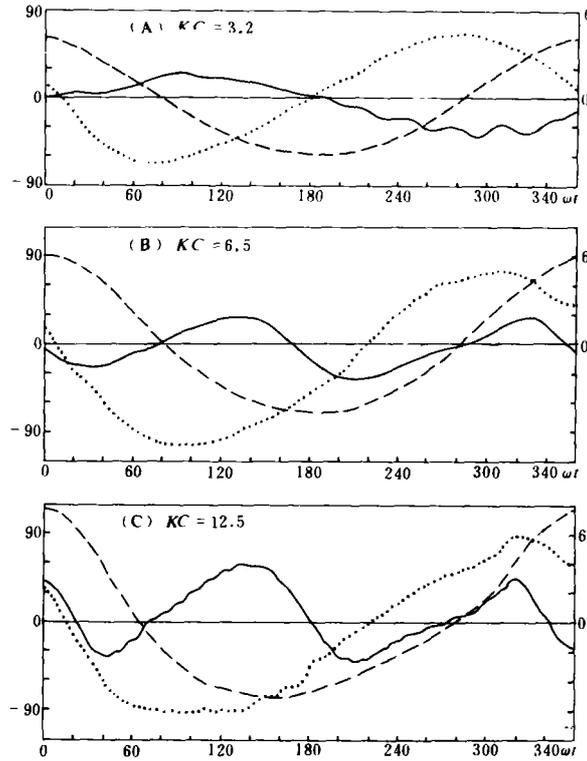


图 2 波面、水平力和升力实测过程线

— — — $N(t)$ ····· $F_H(t)$ ——— $F_L(t)$

$$C_M = \frac{F_{H\max} - \frac{1}{2} l \rho D C_D |u(t)| |u(t)|}{\pi D^2 u(t) l} \quad (3)$$

其二为最小二乘法，仍按式 (1) 计算一周波内逐点离散值 (计算间距为 20 ms)，并与实测的相应点的离散值间的误差最小为条件，应用最小二乘原理求 C_D 、 C_M 值的大小。设

$$E^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_{m_i} - F_{H_i})^2,$$

令

$$\frac{\partial(E^2)}{\partial C_D} = 0, \quad \frac{\partial(E^2)}{\partial C_M} = 0,$$

得：

$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^N (F_m, F_{D_i}) \sum_{i=1}^N (F_{L_i})^2 - \sum_{i=1}^N (F_{L_i}, F_{D_i}) \sum_{i=1}^N (F_m, F_{L_i})}{\sum_{i=1}^N (F_{D_i})^2 \sum_{i=1}^N (F_{L_i})^2 - \sum_{i=1}^N (F_{L_i}, F_{D_i}) \sum_{i=1}^N (F_{D_i}, F_{L_i})} \frac{2}{\rho D} \quad (4)$$

$$C_M = \frac{\sum_{i=1}^N (F_{D_i})^2 \sum_{i=1}^N (F_m, F_{L_i}) - \sum_{i=1}^N (F_m, F_{D_i}) \sum_{i=1}^N (F_{D_i}, F_{L_i})}{\sum_{i=1}^N (F_{D_i})^2 \sum_{i=1}^N (F_{L_i})^2 - \left[\sum_{i=1}^N (F_{D_i}, F_{L_i}) \right]^2} \frac{4}{\pi D^2 \rho} \quad (5)$$

式中, $F_{D_i} = |u(t)_i| |u(t)_i|$; $F_{L_i} = \dot{u}(t)_i$; F_m 为实测水平力; N 为一波内的离散点数。

特征值法较简单,但只能在波峰和最大力值处两点拟合最好,而最小二乘法,由于考虑了一个周波内全过程的误差最小,拟合的 C_D 、 C_M 值稳定性好,特别适宜于用来计算水平力过程线。按最小二乘法统计得到的 C_D 、 C_M 随 KC 变化的关系点分别绘于图 3 和图 4 中。

将全部数据点进行回归,求得的优化方程如下:

$$C_D = 0.336 \exp[0.2KC - 0.00567(KC)^2], \quad (6)$$

$$C_M = 0.0019 KC^2 - 0.092KC + 2.49, \quad (7)$$

并将上述二式的回归方程一并绘于图 3 和图 4 中。从图 3 可见, C_D 值与 KC 数间具有指数关系;当 $KC = 3$ 时, $C_D \approx 0.6$;当 KC 从 3 逐渐增加时, C_D 值逐渐增加,在 $KC = 16-20$ 附近达到最大值,说明此时的尾涡作用最为明显。从图 4 可见, C_M 值与 KC 间具有二次曲线关系。 KC 值较小时, C_M 值大于 2,随着 KC 值的增加, C_M 逐渐减小,当 $KC > 16-20$ 以后, C_M 值近似于 1.4-1.5。

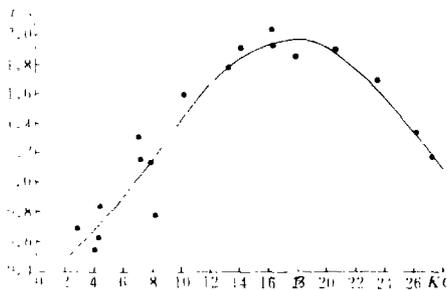


图 3 $C_D - KC$ 关系曲线

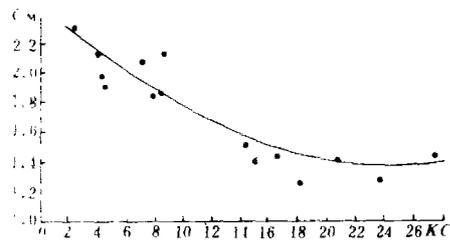


图 4 $C_M - KC$ 关系曲线

(二) 升力

在一些文献中,往往把升力的表达式记为

$$F_L(t) = \frac{1}{2} \rho D C_L l u^2(t), \quad (8)$$

然而, 另一些学者已经发现, 本实验也证实 (见图 2), 升力的频率不仅与波频有关, 而且还与尾流频率密切相关, 也就是说, 升力随时间的变化过程往往不是完全以式 (8) 的形式出现的。

一般认为可将升力的表达式写为

$$F_L(t) = \frac{1}{2} \rho D u_m^2 \cdot \sum_{n=1}^5 C_L(n) \cos [n\omega t + \phi(n)] l, \quad (9)$$

式中, u_m 为最大水平速度; $C_L(n)$ 为第 n 次谐力的升力系数; ω 为入射波的角频率; $\phi(n)$ 为第 n 次谐力的初相位; n 为傅氏级数的阶数。 $C_L(n)$ 、 $\phi(n)$ 为:

$$C_L(n) \cos \phi(n) = \frac{2}{T} \int_0^T \frac{F_L(t)}{f_1} \cos \omega t dt = F_{1c}, \quad (10)$$

$$C_L(n) \sin \phi(n) = \frac{2}{T} \int_0^T \frac{F_L(t)}{f_1} \sin \omega t dt = F_{1s}, \quad (11)$$

$$C_L(n) = \sqrt{F_{1c}^2 + F_{1s}^2}, \quad (12)$$

$$\phi(n) = \arctg(F_{1s} - F_{1c}), \quad (13)$$

式中,

$$f_1 = \frac{1}{2} \rho D u_m^2 l.$$

依据实测升力过程线, 按式 (9) 进行级数分析, 即可求得 $C_L(n)$ 及相应的 $\phi(n)$ 值。图 5 绘制了 $C_L(n)$ — KC 点据图。据此可求得各阶的 C_L — KC 的回归方程如下:

$$\left. \begin{aligned} C_L(1) &= 1.9(KC)^{-0.105} \\ C_L(2) &= 0.0141(KC)^{0.025} e^{-0.512(KC)} \\ C_L(3) &= 0.26 - 0.528(KC) \\ C_L(4) &= 0.147 + 0.089(KC) \\ C_L(5) &= 0.061 + 0.169(KC) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

相应初相位的平均值为:

$$\left. \begin{aligned} \phi(1) &= 2.76 \\ \phi(2) &= 1.33 \\ \phi(3) &= 1.02 \\ \phi(4) &= 0.74 \\ \phi(5) &= 0.53 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

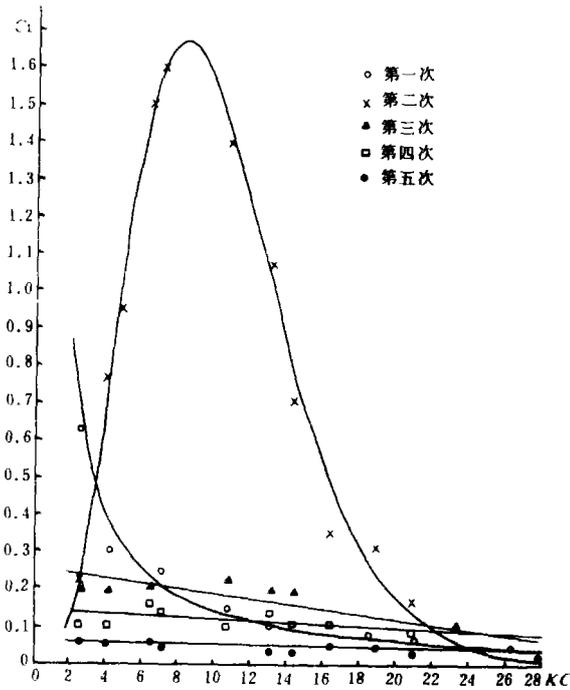


图 5 $C_L(n) - KC$ 关系图

由图 5 可见:

1. 根据对升力过程线的频谱分析可知, 升力除一阶谐波(即波频)外还包括高阶谐波, 但分析表明, 大于五阶的谐波影响甚微, 可忽略不计。

2. 在大部分 KC 范围内, 二阶升力系数占主导地位, 只有当 $KC < 4$ 时, 一阶升力系数才起主要作用。

3. 二阶升力系数与 KC 具有幂指数关系, 在 $KC = 10$ 附近达到最大值约 1.7. $C_L(2) - KC$ 的变化规律类似 $C_D - KC$ 的变化规律, 说明二阶升力与速度力有密切关系。

4. 一阶升力系数与 KC 的关系为幂指数升式. 当 $KC < 4$ 时, $C_L(1) > 0.4$. 随 KC 值增加, $C_L(1)$ 值很快减小. $KC = 10$, $C_L(1) = 0.15$, $KC = 20$ 时, $C_L(1) < 0.1$. $C_L(1) - KC$ 曲线的变化规律类似 $C_M - KC$ 曲线, 说明与惯性力有密切关系。

密切关系。

5. 当 $KC < 10$ 时, 高阶升力成分影响相对较明显; 当 $KC > 20$ 时, 升力系数和升力值已变得很小。

(三) 合力

根据上述提出的水动力系数 C_D 、 C_M 和 $C_L(n)$ 值和相应的理论公式, 就可以计算水平力、升力和合力。

利用水平力 $F_H(t)$ 的计算模式 (1), 并用最小二乘法求得的动力系数 C_D 、 C_M 的回归方程 (6)、(7) 即可求得 $F_H(t)$. 图 6 绘出了 $KC = 14.2$ 时计算的 $F_H(t)$ 过程线, 同时还用虚线绘出了实测的 $F_H(t)$ 过程线. 从图中可见, 计算和实测的 $F_H(t)$ 过程线基本上是吻合的。

利用式 (9) 及相应的升力系数 $C_L(n)$ 和 $\phi(n)$ 式 (14)、(15), 可算得升力过程线 $F_L(t)$, 如图 6 所示. 图中还画出虚线的实测过程线. 从图中可见, 计算值和实测值无论在大小和相位方面, 基本上都是吻合的。

依据水平力和升力过程线, 就可以求得合力过程线

$$\vec{F}(t) = \vec{F}_H(t) + \vec{F}_L(t). \quad (16)$$

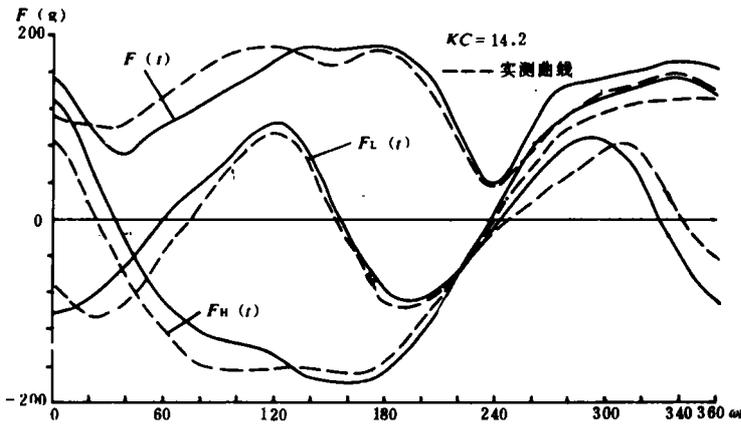


图 6 $\vec{F}_L(t)$ 、 $\vec{F}_H(t)$ 和 $\vec{F}(t)$ 计算值与实测值比较

为了更直观地弄清一个周波 ($0^\circ-360^\circ$) 内, 不同相位时合力的方向及大小的变化规律, 图 7 中绘制了计算所得的 $\vec{F}_H(t)$ 、 $\vec{F}_L(t)$ 和 $\vec{F}(t)$ 力矢玫瑰图, 而图 8 为相应的实测力矢玫瑰图。比较计算和实测的矢量图可见, 二者基本上相似。

从力矢玫瑰图中可清晰地看出, \vec{F}_H 、 \vec{F}_L 和 \vec{F} 值在一个周波内的变化规律:

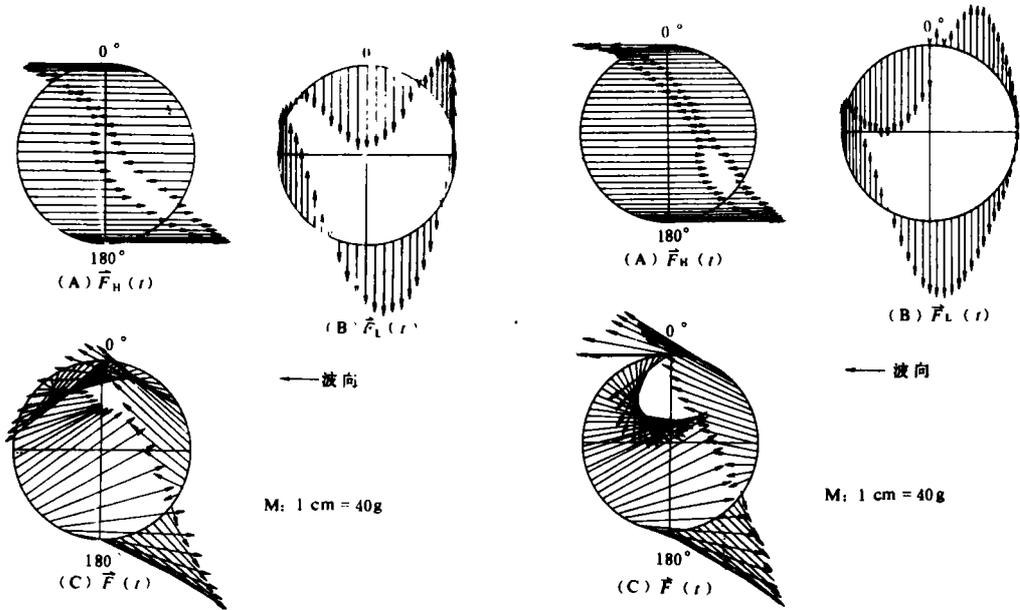


图 7 计算力矢玫瑰图

图 8 实测力矢玫瑰图

1. 对水平力而言, 在波峰 ($\theta = 0^\circ$) 和波谷 ($\theta = 180^\circ$) 附近转向。最大值和最小值发生在 90° 和 270° 附近, 而最大值比最小值的绝对值大约要大 20%—50%。

2. 对升力而言, 一个周波内转向两次, 极值一般发生在每个象限的中部。在 $\theta = 0^\circ$ 、 180° 附近, 其升力为负值 (即指向海底), 其幅值也要比正向外力大 30% 左右。

3. 合力 $\vec{F}(t)$ 是 $\vec{F}_H(t)$ 和 $\vec{F}_L(t)$ 的矢量叠加。根据 $\vec{F}_H(t)$ 和 $\vec{F}_L(t)$ 的相位特征, 最大合力发生在 $\theta = 120^\circ$ 附近。当波向为西时, 最大合力的方向为东北东, 此时, 升力值均约为水平力的 40%—60%, 但力矢量合成后, 合力幅值比水平力幅值约增加 5%—10%。

三、结 语

在波浪作用下, 作用在近水底 ($l/D = 1$) 管线上的水平力, 可按莫里逊公式、二阶斯托克斯波理论计算, 其中 C_D 、 C_M 值可按本试验统计回归式 (6)、(7) 进行计算。该统计方程适用于 $KC = 3 - 30$ 。

目前, 可以用峰值法和级数法求解升力及其系数。传统的峰值法公式简单, 容易获得相应的升力系数, 但峰值法不能反映升力的变化过程, 不能用来计算合力的大小和方向。级数法隐含时间相位的概念, 较确切地反映升力的机理。本文基于实测资料, 提出了五阶升力系数统计公式及其相应的初相位, 从而可以按级数法计算升力过程线, 进而计算合力过程线。将计算值和实测值比较, 二者吻合是好的。根据本实验研究可知, 近水底管线在波浪作用下的最大合力值发生在 $\theta = 120^\circ$ 附近, 此时的升力向上, 其幅值约为水平力的 40%—60%。由于升力的影响, 最大合力的幅值比水平力大 5%—15%。

波浪场中水底管线上的总力问题不但是一个具有实际意义的课题, 而且更是一个非常复杂的问题, 动水力及诸动水力系统将是波参数、 KC 数、雷诺数、管线相对净距 l/D 、水底边界层相对厚度 δ/D 等的函数。限于条件, 本文只讨论了 KC 数的影响, 其余参数的影响有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Nath, J. H. and T. Yamamoto, Force from fluid flow around objects, *Proc. 14th Coastal Eng. Conf.*, Vol. 3, 1974, 1808—1827.
- [2] Wright, J. C. and T. Yamamoto, Wave forces on cylinders near plane boundaries, *Proc. ASCE*, WW1, 1979, 1—14.
- [3] Grace, R. A., Discussion on wave forces on cylinders near plane, *Proc. ASCE*, WW2, 1975, 305—318.
- [4] Cheony Hin-Falt and N. Jothi Shankay, Wave forces on submarine pipelines near a plane boundary, *Ocean Eng.*, 14(1987), 3: 181—200.
- [5] Sarpkaya, T., Forces on cylinders and spheres in a sinusoidally oscillating fluid, *J. Appl. Mech.*, 1975, 32—37.
- [6] Sarpkaya, T., Forces on cylinders near a plane boundary in a sinusoidally fluid, *J. Fluids Eng.*, ASCE, 98 (1976), 499—505.
- [7] Sarpkaya, T., In-line and transverse forces on cylinders near a wall in oscillatory flow at high Reynolds numbers, *Proc. OTC*, 1977, paper No. 2898.
- [8] 薛鸿超等, 水平圆柱上波压力的非线性分析, *海洋工程*, 1983, 1: 36—49.
- [9] Bidde, D. D., Laboratory study of lift forces on circular piles, *Proc. ASCE*, Vol. 102, WW4, 1971, 595—614.
- [10] Chakabart, S. K., Wave forces on vertical circular cylinders, *Proc. ASCE*, Vol. 102, WW2, 1976, 203—221.