



基于 stokes 波浪理论的 近海风电基础波浪荷载变化规律^{*}

蒋博闻，赵明阶，刘 潘
(重庆交通大学，重庆 400074)

摘要：针对近海风电基础所处的环境特点，参考实测资料，选取 Stokes 波浪理论，对作用在风电基础上的非线性波浪荷载进行了研究。计算得出了波浪特征参数确定时波浪的速度势函数、速度场函数和加速度场函数，通过分析其变化规律，计算出作用于基础的总波浪荷载的变化特征；在利用 BP 神经网络对波浪特征参数变量和周期内波浪荷载极值变量进行预测的基础上，获得了波浪荷载极值分布的概率密度函数。

关键词：近海风电基础；stokes 波浪理论；BP 神经网络；概率密度函数
中图分类号：TV 139.2⁺23 **文献标志码：**A **文章编号：**1002-4972(2015)11-0020-05

Variation law of wave load on offshore wind turbine foundations based on Stokes wave theory
JIANG Bo-wen, ZHAO Ming-jie, LIU Pan
(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: According to the actual measurement data and the Stokes wave theory, we study the effect of nonlinear wave loads on the offshore wind turbine foundation. When the wave characteristic parameters are determined, the velocity potential, velocity field and acceleration field function of the wave can be calculated, and the variation regularity can be analyzed. The wave characteristics of variable parameters and cycle wave loading extreme variables are predicted using BP neural network, and the probability density function of wave load extreme value distribution is fitted using Matlab.

Keywords: offshore wind turbine foundation; Stokes wave theory; BP neural network; probability density function

海上风电与内陆风电相比，海上风电具有不占用耕地以及高风速、高产出等优势。但是，为了承受上部平台结构巨大自重及其设备所引起的竖向荷载、强风荷载和波浪冲击等，海上风电机组的基础远比陆上的结构复杂、技术难度高。因此，海上风机在环境荷载下的动力响应分析研究是海上风机设计施工的重要依据。

波浪荷载作为海上风机承受的主要荷载之一，具有随机性、周期性等特征，在动力响应分析中起到关键作用。因此，对波浪荷载进行研究具有

重要意义。

1 波浪荷载理论分析

1.1 波浪理论的选取

在描述波浪的理论中，着眼于流体质点的运动，以拉格朗日（Lagrange）法描述其运动特性的著名理论主要有两个：一个是 Airy（1845）提出的微幅波理论，另一个是 Stokes（1847）提出的有限振幅波理论。后者对波流力采用五阶 Stokes 波理论，在海上风机的波浪载计算中应用广

收稿日期：2015-04-20
^{*}基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金（20125522110004）；重庆市自然科学基金重点项目（cstc2013jjb30002）
作者简介：蒋博闻（1991—），男，硕士研究生，从事港口、海岸及近海工程方向的研究。

泛^[1-2]。竺艳蓉^[3]对如何选取波浪理论给出了下列建议: 当 $T/\sqrt{g/h} < 0.6$ (相当 $h/L > 0.2$) 或 $H/h \leq 0.2$ 时, 采用线性波浪理论; 当 $T/\sqrt{g/h} \leq 10.0$ (相当 $h/L > 0.1$) 时, 采用 Stokes 五阶波理论。

本文以江苏省如东县近海及潮间带风电场建设项目为依托, 根据实际工程所处的海洋环境资料^[4]可知, 选用 Stokes 五阶波理论对波浪进行模拟更加符合工程实际。

1.2 波浪参数的确定

Stokes 波的运动无旋且有势, Stokes 五阶波理论的波面方程为:

$$\eta = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^5 \eta_n \cos(n\theta) \quad (1)$$

速度势函数 Φ 为:

$$\Phi = \frac{L}{kT} \sum_{n=1}^5 \Phi_n \cosh(nks) \sin(n\theta) \quad (2)$$

$$s = z + h \quad (3)$$

式中: η_n 、 Φ_n 、 B_{ij} 、 C_i 均为只与波长 L 有关的系数, 可由式(4)、(5)所示超越方程试算求出。

$$\frac{\pi H}{h} = \frac{1}{h/L} [\lambda + \lambda^3 B_{33} + \lambda^5 (B_{35} + B_{55})] \quad (4)$$

$$\frac{h}{L_0} = \frac{h}{L} \tanh(kh) (1 + \lambda^2 C_1 + \lambda^4 C_2) \quad (5)$$

式中: L_0 为深水波波长, $L_0 = gT^2 / (2\pi)$ 。

Stokes 五阶波的求解步骤为: 1) 假定 (λ_1 、 L_1) 初始值, 将已知参数 (H 、 T) 代入超越方程迭代确定 (λ_n 、 L_n) 值; 2) 根据 (λ_n 、 L_n) 计算各系数的值; 3) 确定速度势函数 Φ 和波面方程 η 。

1.3 波浪荷载的计算

求解出波浪各特征值后, 再根据 Morison 方程按式(6)积分计算出作用在风机 (小直径柱体) 上的总波浪荷载大小:

$$F_H = \int_{-h}^{\eta} \left(\frac{1}{2} C_D Du |u| + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \right) dz \quad (6)$$

式中: 速度力系数 C_D 和惯性力系数 C_M 分别取 2.0 和 1.0^[5]。

2 波浪荷载的模拟与统计分析

2.1 波浪荷载的模拟

本文先取一列波 ($H=4.2$ m、 $T=6$ s、 $h=16$ m),

计算出其各系数值。其 1 个周期内的速度势函数随相位角、水深变化曲线见图 1。

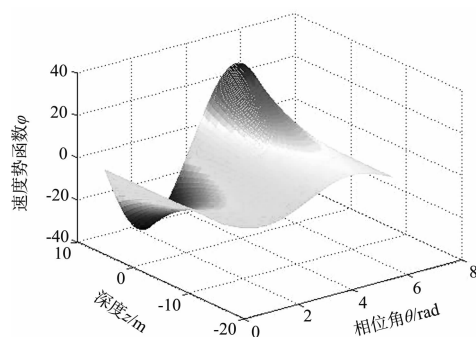


图 1 速度势函数随相位角、水深变化曲线

可见速度势函数随相位角增大出现类似波浪面变化规律, 并在周期后半程达到一个峰值; 其随深度变化规律却由于相位角的不同而不同。

对速度势函数关于时间求一、二阶偏导可得到速度场、加速度场。在 $t=0$ 时刻, 水平速度达到最大值。速度场函数随时间、水深变化曲线见图 2。

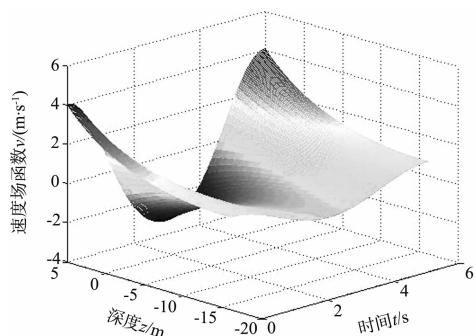


图 2 速度场函数随时间、水深变化曲线

取 $t=0$ 时刻 (图 3), 分析可知速度最大值随水深递增。

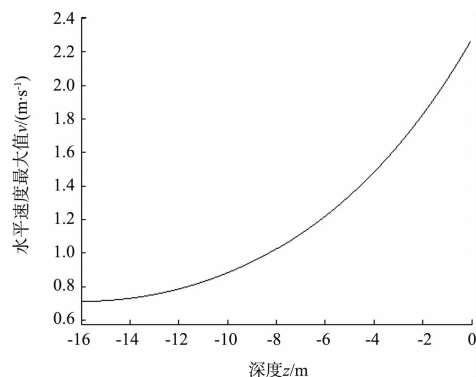


图 3 速度最大值随水深变化曲线

取 $z=0\text{ m}$ ，绘制速度与加速度随时间变化曲线（图4）。

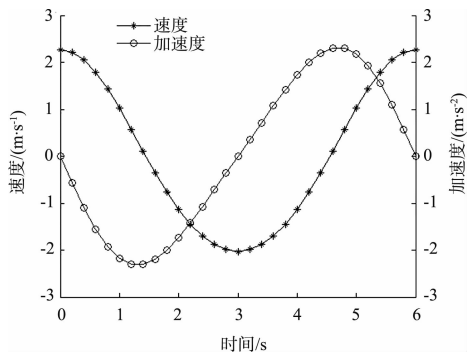


图4 速度与加速度随时间变化曲线

将风电基础简化为直径 5 m 的圆柱体，计算出作用在基础段总波浪力随时间的变化（图5）。

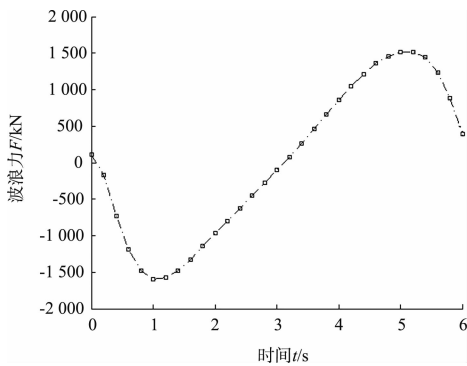


图5 总波浪力随时间变化曲线

由图5可知，波浪荷载在1个周期内出现正负两次峰值。根据式(6)，作用于风机基础上的波浪荷载值随着速度和加速度的变化而变化，在一个周期内，加速度的峰值滞后于速度的峰值出现，导致了一个周期内波浪荷载的变化呈现图5所示的走势。荷载正负峰值的绝对值近似相等。

2.2 波浪荷载的统计分析

利用 Stokes 五阶波理论生成的波浪依赖有效波高 H 、周期 T 和水深 h 共3个初始参数。因此绘制出波浪力最大值（绝对值） $F_{\max}$ 在一定范围内（ $H \in [5, 7]$ ； $T \in [2, 6]$ ）的变化规律（图6）。

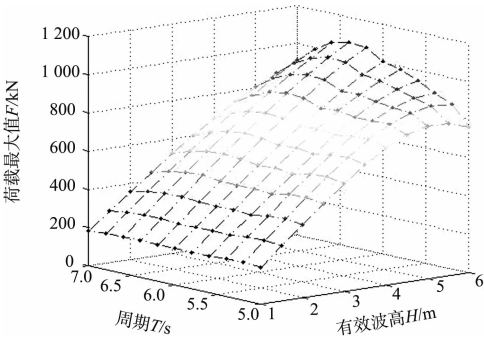


图6 $F_{\max}$ 与 H 、 T 关系曲线

由图6可发现，曲面沿对角线方向 $F_{\max}$ 值的变化程度最为剧烈，即 H 取极大值、 T 取极小值时， $F_{\max}$ 取极大值；反之 $F_{\max}$ 取极小值。

实际工程中，波浪的产生具有随机性， H 和 T 成一定的相关性。为了研究波浪力的最大值出现的概率统计特性，可以根据波浪的统计特性，将波浪的统计特征值作为随机变量。在 Stokes 五阶波理论中，可选取的随机变量为有效波高 H 、周期 T 和水深 h 。选取有效波高 H 和周期 T 作为随机变量，假定随机变量相互独立。可根据资料选取其服从分布类型及参数值（表1）。

表1 H 和 T 服从随机变量参数

随机变量	服从分布	μ	σ
H	极值 I 型	4.2	2.0
T	高斯分布	6.0	0.5

运用 Matlab 软件对变量 T 、 H 进行随机抽样，抽取40组变量 T_i 、 H_i （ $i=1 \sim 40$ ），并计算出对应波浪对风机基础的荷载 F_i （随时程变化）。工程分析时，重点关心荷载的最大值，因此提取出每列波浪对风机基础的荷载最大值（绝对值） $F_{i\max}$ 。为分析 $F_{i\max}$ 的变化规律，需对变量 T 、 H 进行大量抽样，并计算 $F_{i\max}$ 取值，由于计算 $F_{i\max}$ 时需进行复杂的积分运算，计算量巨大且 $F_{i\max}$ 难以直接表示为 T_i 、 H_i 的显式函数，因此考虑利用 BP 神经网络对目标训练，模拟 T_i 、 H_i 与 $F_{i\max}$ 之间的映射关系。神经网络是由大量简单处理元件相互连接构成的高度并行的非线性系统，具有大规模并行处理特征，具有高度的非线性和良好的容

错性;虽然获得的是不完全、模糊的非精确解,但只要控制好精度,便具有良好的应用空间。BP 神经网络(多层感知器)是至今为止应用最广泛的神经网络^[6]。

利用 BP 人工神经网络,将 40 组变量 T_i 、 H_i 、 F_{imax} 输入计算机,利用神经网络进行学习训练,并设置误差值为 0.001。训练过程中均方差衰减见图 7。

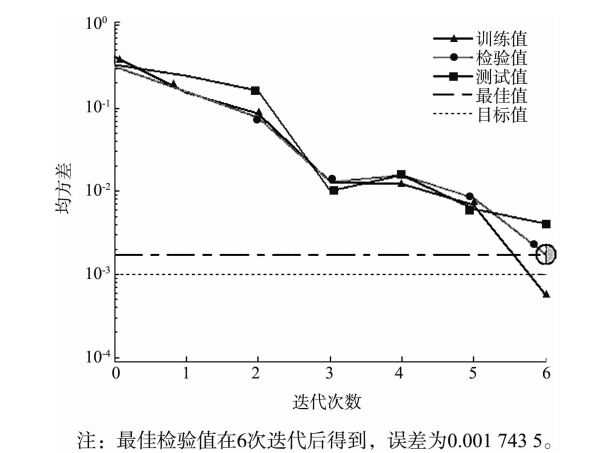


图 7 训练过程中均方差衰减曲线

学习过程中预测值分布见图 8, 该图反映了学习过程中神经网络给出的反归一化前的预测值分布在目标值两侧分布的情况, 能够很好地反映神经网络的学习过程。相关系数 R 反映了预测值的准确程度, R 越大准确程度越大。预测过程中目标值为 F_{imax}/kN 的值, 计算过程中需省略其单位, 将其归一化以规避各参数数量级和单位差异带来的误差。

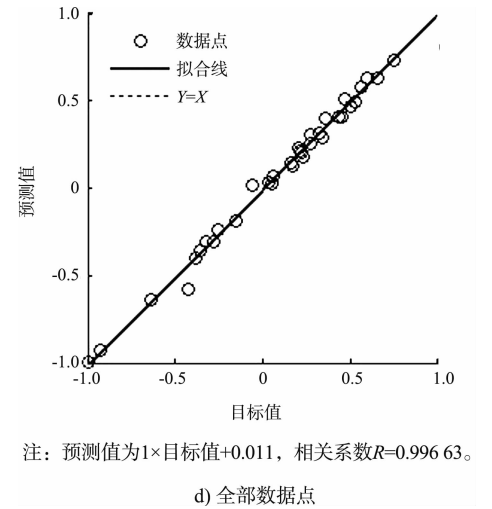
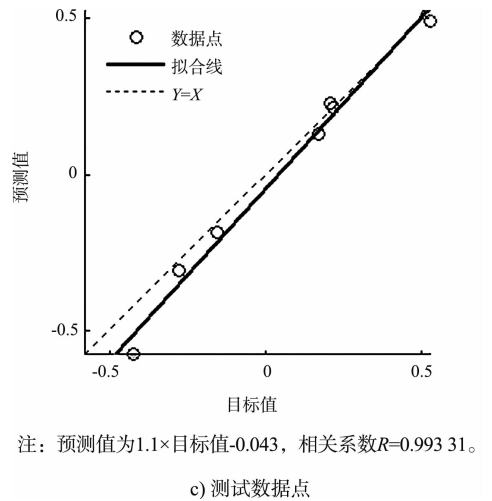
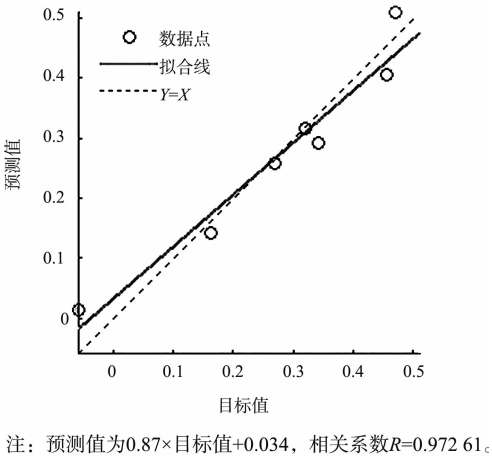
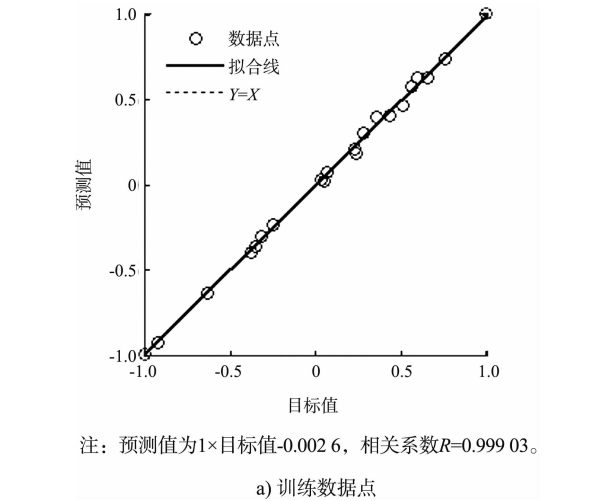


图 8 学习过程中预测值分布

经多次训练,达到要求精度后,保存该神经网络。对变量 T_i 、 H_i 抽样 200 组,通过训练好的神经网络,输出 200 组 F_{imax} 值。为研究 F_{imax} 取值的统计特征,绘制 F_{imax} 频率统计直方图(图 9)。

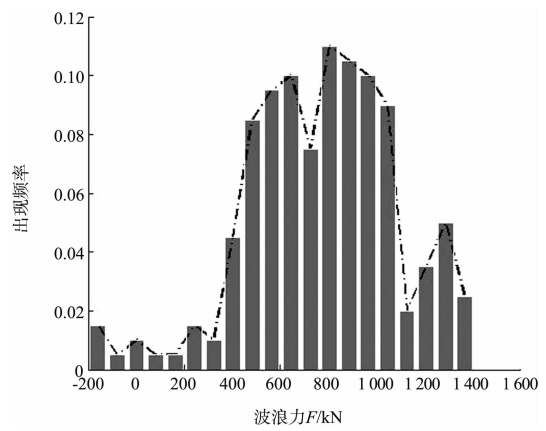


图 9 $F_{\max}$ 频率统计直方图

直方图呈钟型，与高斯分布大致符合。选取高斯分布函数拟合 $F_{\max}$ 概率密度函数(图 10)。置信度取 0.95，拟合出其概率密度函数：

$$f(x) = a_1 \exp \left[- \left(\frac{x - b_1}{c_1} \right)^2 \right] \tag{7}$$

式中各参数取值及样本点波动界限值见表 2。

表 2 各参数取值及样本点波动界限值			
取值	a_1	b_1	c_1
拟合值	0.107 20	791.0	424.7
波动上线值	0.124 20	845.8	504.7
波动下限值	0.090 28	736.2	344.6

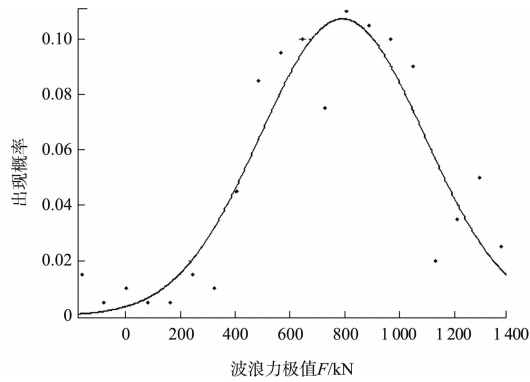


图 10 $F_{\max}$ 概率密度曲线

由图 10 可以看出：波浪荷载极大值分布与高斯分布较为符合。由于样本点相较于完整刻画波浪荷载极值分布规律还是太少，并且没有考虑 H 和 T 的相关性，故实际抽样点与拟合曲线在某些分位值仍有一点偏差。但这并不影响其总体分布趋势。

3 结论

基于近海风电基础所处的环境特征，选取 stokes 五阶波浪理论对非线性波浪荷载作用特征和变化规律进行了研究，总结出以下规律：

- 1) 由于 stokes 五阶波方程中加速度峰值滞后于速度峰值出现，并且速度随深度衰减，导致了 1 个周期内总波浪力出现数值大致相同的正负 2 个峰值。
- 2) H 和 T 共同决定波形的前提下， H 取极大值 T 取极小值时， $F_{\max}$ 取极大值；反之 $F_{\max}$ 取极小值。
- 3) 当 H 、 T 分别服从极值 I 型分布与高斯分布时， $F_{\max}$ 近似符合高斯分布，并且其均值近似等于 H 、 T 取均值时 $F_{\max}$ 的取值。

参考文献：

[1] 戴国亮, 龚维明, 沈景宁, 等. 东海大桥海上风电基础波浪理论分析[J]. 岩土工程报, 2013, 35(S1): 456-461.

[2] 陈小波, 李静, 陈健云. 基于流函数理论的近海风机非线性波浪荷载计算[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(3): 22-28.

[3] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991: 61-64.

[4] 张为民, 张春生, 赵生校, 等. 江苏省如东县近海及潮间带风电场总体规划报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2009.

[5] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].

[6] 韩力群. 人工神经网络教程[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006: 14-15.

(本文编辑 武亚庆)

欢迎投稿 欢迎订阅