



申请同济大学工学博士学位论文

# 随机海浪谱的物理模型 与海洋结构波浪动力可靠度分析

(国家自然科学基金委创新研究群体资助项目 编号: 50321803, 50621062)  
(“十一五”国家科技支撑计划资助项目 编号: 200611A023)

培养单位: 土木工程学院

一级学科: 土木工程

二级学科: 结构工程

研究生: 徐亚洲

指导教师: 李杰 教授

二〇〇八年十二月



A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Doctor of Philosophy

# **Physical Model of Wave Spectrum and Ocean Dynamic Reliability of Marine Structures**

(Funded by the National Natural Science Foundation of China for  
Innovative Research Groups, Grant No.50321803 & 50621062)  
(Funded by Key Projects in the National Science & Technology Pillar  
Program in the Eleventh Five-year Plan Period, Grant No. 200611A023)

School/Department: School of Civil Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Candidate: Yazhou Xu

Supervisor: Prof. Jie Li

**December, 2008**

# 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 摘要

风浪相互作用以及随机波浪谱理论一直是物理海洋学和随机波浪理论研究的中心问题。结构在波浪作用下的随机响应及其动力可靠度则为海洋工程研究的重要内容。围绕上述两个主要问题，本文提出了基于拟层流风波生成机制的物理海浪谱模型，并应用概率密度演化方法开展了近海风力发电高塔在随机波浪作用下的动力可靠度分析。

由一般方式推导出高阶 Orr-Sommerfeld 方程，其一阶形式对应经典的拟层流机制。引入合适的坐标变换使得各个高阶 Orr-Sommerfeld 方程变为标准形式。采用 Runge-Kutta 法结合微分方程级数解理论，分别获得深水及有限水深时能量传递系数的数值解。考虑扰动波面是 Stokes 波，发展了风浪相互作用 Stokes 模型。针对二阶情形，考察了高阶波面压力及能量的变化规律，讨论了波陡、相对水深对其的影响，并定义了拟非线性能量传递系数以计及高阶能量的贡献。

基于拟层流模型，本文初步揭示了风浪谱能量来源的具体物理机制，即给定频率处海浪谱的能量等于具有该频率的谐波自具有对数剖面的平行气流中汲取而来。利用 Fourier 密度谱与能量谱之间的关系，建立了海浪谱与风波相互作用之间能量传递的物理联系。采用坐标偏移算子和窗函数，建立了基于拟层流风波生成机制的物理海浪谱模型：随机 Fourier 海浪模型。分析表明，上述能量传递关系具有相同的量纲，由此建立的谱模型具有明确的物理意义。

在 59 个实测波面样本功率谱的基础上，分别以均方逼近和一致逼近为随机建模准则，通过优化算法识别出模型中随机参数的概率结构。通过考虑随机参数的相关性，检验了独立性假定对随机建模结果的影响。

介绍了采用概率密度演化方法进行动力可靠度分析的一般步骤，说明了其中涉及到的关键技术，如数论选点法，等价极值事件原理。基于本文提出的随机 Fourier 海浪模型，分析了海上风力发电高塔结构在随机波浪作用下的动力反应及其可靠性，给出了塔顶侧移、塔底危险点应力、塔底弯矩的动力可靠度。其中，波浪荷载通过线性波浪理论和 Morison 公式计算，结构动力响应的确定性分析结果由 ABAQUS 有限元软件建模完成。

研究表明：本文提出的能量传递关系具有明确的物理意义，在此基础上发展

## 摘要

---

的随机 Fourier 海浪模型可以很好地预测谱能。随机建模结果证实，随机 Fourier 模型均值以及集合功率谱与对应的实测值吻合良好，随机 Fourier 海浪模型的标准差建模结果还有待于改进。结合等价极值事件原理，概率密度演化方法可以成功地应用于结构的波浪动力可靠度分析。

**关键词：**海浪谱 动力可靠度 拟层流模型 概率密度演化 Morison 公式  
随机 Fourier 海浪模型 Stokes 波 风波相互作用 随机建模  
近海风力发电高塔 能量传递系数

## ABSTRACT

Wind-sea interaction and ocean wave spectrum are the main subjects in physical oceanography and stochastic ocean theory. And, structural responses and dynamic reliability subjected to random wind sea are the important parts of researches on ocean engineering. Concentrated on these two issues, this thesis presents a physical ocean wave spectrum based on quasi-laminar wind-wave generation mechanism, and employs probability density evolution method (PDEM) to study ocean dynamic reliability of offshore wind turbine.

On a general view, high-order Orr-Sommerfeld equations are derived. And the classical quasi-laminar model follows the first order case. By introducing coordinate transformation, high-order Orr-Sommerfeld equations are transferred to the uniform expression, which can be solved simultaneously. And numerical solutions of energy transfer coefficient with deep water and finite water depth are obtained using Runge-Kutta scheme combined with series solution theory. Taking Stokes wave as the disturbance source, Stokes wind-sea interaction model is developed, and for the second order case, high-order air pressure over wave surface and corresponding energy transfer between air and wave are investigated, the influence of wave slope and water depth are discussed. Then the quasi-nonlinear energy transfer coefficient is defined to include the high-order energy.

Taking advantage of quasi-laminar model, the energy source of ocean wave spectrum is interpreted as following. The spectrum energy in specified frequency is equal to one that harmonic wave with the same frequency draws from the parallel air flow with a logarithm profile. Using the relation between Fourier density spectrum and energy spectrum, physical ocean wave spectrums are connected to the wind-sea energy transfer. Through coordinate deviation operator and window function, two kinds of physical ocean spectrum models are established, i.e. stochastic Fourier ocean model. Analysis indicates that the energy transfer mentioned above has obvious physical significance since the two terms share the identical dimension.

Based on 59 recorded power spectrum samples and taking mean-square-approximation and uniform-approximation as rules, probability structures of model parameters are identified by optimization algorithm. And the assumption of

independence of random variables is verified partly considering their correlation in the stochastic modeling.

The main procedures using probability density evolution method to evaluate the dynamic reliability are introduced, and some key techniques such as point selection by number theoretical method, equivalent extreme-value event principle, are also presented briefly. Based on the stochastic Fourier ocean model suggested in this thesis, responses and their dynamic reliability of top drift, Mises stress at the dangerous point on the bottom section and bending moment at tower base are calculated by PDEM. Among the process, linear water wave theory and Morison equation are employed to compute wave forces acted on the offshore wind turbine tower. And determine structural responses are obtained by ABAQUS.

The results indicate that, the energy transfer relation between spectrum and quasi-laminar mechanism obviously shows physical meaning, and physical ocean wave spectrum models can predict energy variance well. The mean of stochastic Fourier ocean model and ensemble power spectrum have a good agreement with ones recorded. But the standard deviation of stochastic Fourier model need be improved. Combined with the equivalent extreme-value event principle, PDEM is successfully used to investigate the ocean dynamic reliability.

**Key Words:** Ocean wave spectrum      Quasi-laminar model      PDEM  
Stochastic Fourier ocean model      Stokes wave theory  
Morison equation      Wind-sea interaction      Stochastic modeling  
Energy transfer coefficient      Offshore wind turbine tower



## 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 引言.....	1
1.2 风浪生成机制研究现状.....	2
1.3 海浪谱研究现状.....	5
1.3.1 海浪谱.....	5
1.3.2 海浪方向谱.....	9
1.3.3 第三代波浪谱.....	11
1.4 波浪动力可靠度研究现状.....	14
1.4.1 动力可靠度分析方法.....	14
1.4.2 波浪动力可靠度分析.....	16
1.5 本文工作的目的和意义.....	17
<b>第二章 理论基础简述</b> .....	19
2.1 引言.....	19
2.2 水波理论基础.....	19
2.2.1 水波控制方程.....	19
2.2.2 线性水波理论.....	22
2.2.3 二阶 Stokes 水波理论.....	24
2.3 线性随机波浪理论.....	26
2.4 小结.....	30
<b>第三章 基于拟层流机制的物理海浪谱模型</b> .....	31
3.1 引言.....	31
3.2 拟层流机制.....	32
3.2.1 高阶 Orr-Sommerfeld 方程.....	32
3.2.2 拟层流机制.....	35
3.3 风浪能量传递.....	38
3.3.1 能量传递系数.....	38

3.3.2 能量传递系数的数值解 .....	38
3.3.3 拟非线性能量传递系数 .....	43
3.4 随机海浪谱的物理模型 .....	45
3.4.1 物理海浪谱能量构成机制 .....	45
3.4.2 物理海浪谱模型 .....	48
3.5 小结 .....	52
<b>第四章 物理海浪谱随机建模 .....</b>	<b>53</b>
4.1 引言 .....	53
4.2 随机建模理论 .....	53
4.3 基于均方逼近准则的建模 .....	54
4.4 基于一致逼近准则的建模 .....	58
4.5 考虑相关性的随机建模 .....	63
4.5.1 多维正态分布概率密度函数 .....	63
4.5.2 联合概率密度函数的构造 .....	64
4.5.3 相关性对随机建模结果的影响 .....	65
4.6 小结 .....	68
<b>第五章 近海风力发电高塔随机波浪动力响应分析 .....</b>	<b>70</b>
5.1 引言 .....	70
5.2 概率密度演化理论 .....	70
5.2.1 广义密度演化方程 .....	71
5.2.2 密度演化方程的数值解法 .....	74
5.3 随机波浪荷载 .....	75
5.3.1 基本随机变量的数论选点 .....	75
5.3.2 基于随机 Fourier 海浪模型的波面模拟 .....	76
5.3.3 随机波浪力 .....	77
5.4 近海风力发电高塔随机动力响应分析 .....	79
5.4.1 单自由度模型 .....	79
5.4.2 单桩基础近海风力发电高塔动力响应分析 .....	84

5.4.3 三脚架基础近海风力发电高塔动力响应分析 .....	92
5.5 小结 .....	101
第六章 近海风力发电高塔波浪动力可靠度分析 .....	102
6.1 引言 .....	102
6.2 极值概率密度理论 .....	102
6.2.1 极值分布的密度演化方法 .....	102
6.2.2 等价极值事件 .....	104
6.2.3 波浪动力可靠度分析流程图 .....	105
6.3 近海风力发电高塔波浪动力可靠度 .....	107
6.3.1 单桩基础近海风力发电高塔波浪动力可靠度分析 .....	107
6.3.2 三脚架基础近海风力发电高塔波浪动力可靠度分析 .....	108
6.4 小结 .....	109
第七章 结论与展望 .....	110
7.1 结论 .....	110
7.2 进一步工作的展望 .....	111
参考文献 .....	112
附录 A .....	120
微分方程幂级数解理论 .....	120
附录 B .....	122
样本波面功率谱记录 .....	122
附录 C .....	140
基本随机变量样本识别结果（基于均方逼近准则） .....	140
附录 D .....	142
基本随机变量样本识别结果（基于一致逼近准则） .....	142
致谢 .....	144
个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果 .....	145