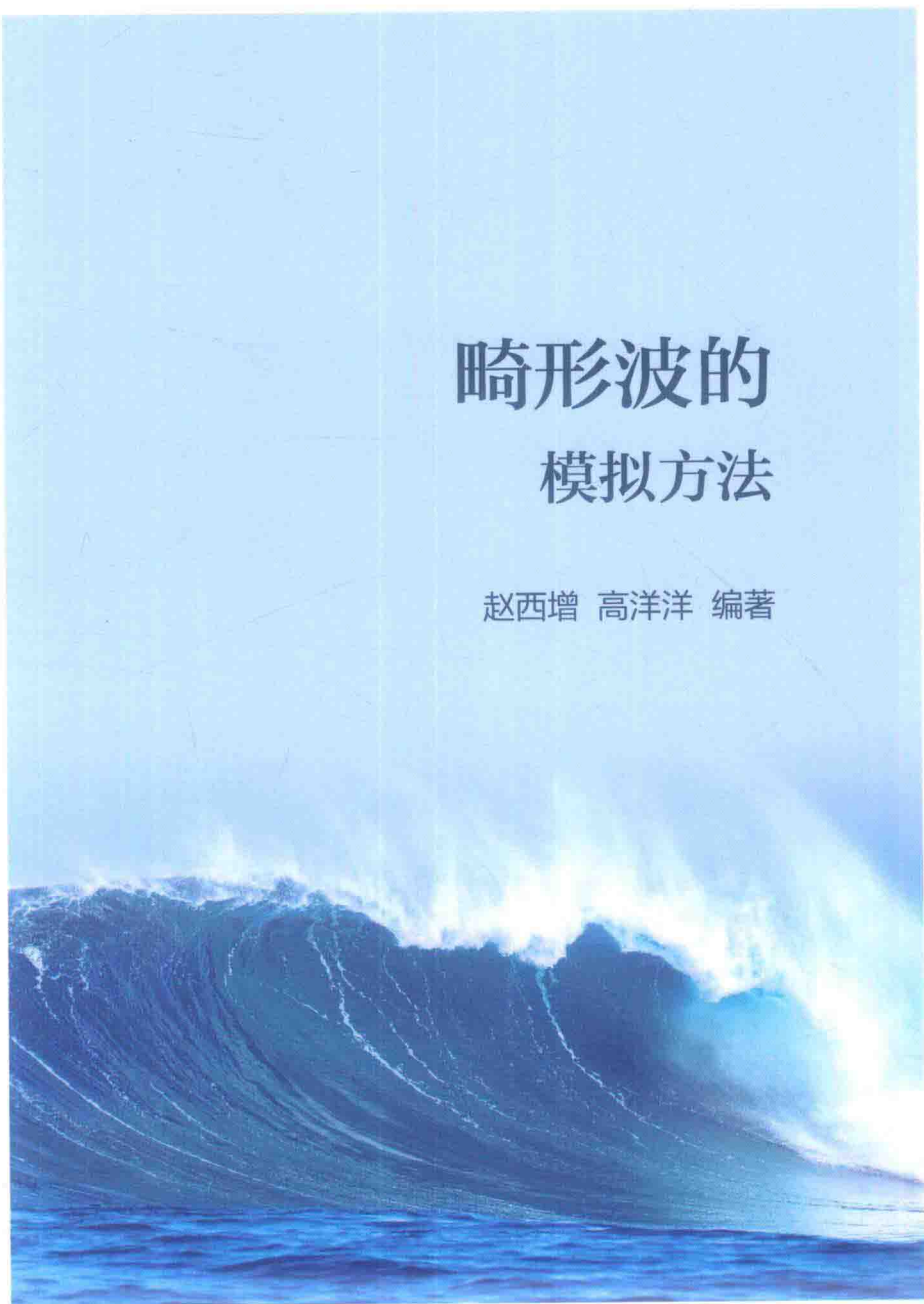


畸形波的 模拟方法

赵西增 高洋洋 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

畸形波的模拟方法

赵西增 高洋洋 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书阐述了实验室内畸形波模拟的不同数值方法。主要包括物理波浪水槽中畸形波的模拟及其统计特性、基于势流理论的高阶谱方法模型、基于非周期谱方法的数值波浪水槽建立、波浪的非线性运动、畸形波模拟的有效波浪模型、基于粘性流体力学理论的计算流体力学模型以及畸形波与浮式结构相互作用等方面。本书在畸形波的成因、不同方法的实验室产生及其对结构物的作用等方面做出了有益尝试,可供从事波浪理论、计算流体力学及其波浪与建筑物相互作用等学科方向的工程技术人员和科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

畸形波的模拟方法 / 赵西增,高洋洋编著. —上海:
上海交通大学出版社,2017
ISBN 978-7-313-18173-2

I. ①畸… II. ①赵… ②高… III. ①波浪—数值模拟 IV. ①O353.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 235976 号

畸形波的模拟方法

编 著: 赵西增 高洋洋

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 虎彩印艺股份有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 281 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-18173-2/O

定 价: 98.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 15.5

印 次: 2017 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0769-85252189

前言

波浪是近海、深海及超深海工程中最重要动力要素之一,人们在科学研究中对波浪的认识和预测投入了很多精力,这是因为由波浪引起的水体运动在很多方面的表现尤为重要,如海岸建筑物所受的波浪载荷,船舶及海上平台等所受的波浪力和运动响应以及沉积物的输移等。如果对海洋波浪动力环境考虑不周,很可能造成结构物的毁坏或船舶等的倾覆事故。为了做好相应的防护工作,就要掌握全面的波浪理论,了解其作用机理。

由于波浪运动的复杂性,人类对于它的认识和了解还远没有完成。在不受外部因素影响下,线性波的传播会在比较简单的形式下进行,其基本形状及波浪内部结构基本保持独立、恒定;而由于波浪与波浪、波浪与其他介质之间非线性相互作用的存在,波浪的时空演变以及波浪内部的形态会具有比较复杂的结构,畸形波就是其中一种具有强非线性的灾害性波浪存在形式。

畸形波是一种特殊的随机波浪,它波高极大,能量很集中,具有很强的非线性,破坏力极大,对海岸和海上结构物及船只构成严重威胁。然而,由于畸形波不可预知性,可靠的测量、分析数据非常少,对其发生机理有不同的解释,其发生概率及工程意义还不明确。国内外学者在畸形波这个新兴领域的研究中做了一定量的探索性工作,但是,这个领域的许多问题还没有展开,要搞清楚畸形波的发生机理、畸形波的内部结构、对工程结构物作用的机理等一系列问题,还有大量的工作要做。有关研究的突破将对海洋工程水动力学的发展和促进人类对波浪理论的认识和进步具有重要的理论意义,对海洋运输船舶和石油钻井平台等工程结构物的设计和防护也具有重要的工程实际意义。

在此背景下,本书将介绍作者近十年来开展的与畸形波相关的研究,主要包括随机波浪水槽中畸形波的统计特性,基于势流理论的高阶谱方法模型,基于非周期谱方法的数值波浪水槽建立,基于黏性流体力学理论的计算流体力学模型,畸形波与结构物的相互作用等方面。主要研究内容概述如下:

(1) 断面水槽随机波列中畸形波的实验研究。重点分析波浪破碎对随机波浪统计特性及畸形波出现的影响,明确无因次水深、波陡、谱峰升高因子及谱峰周期等因素对随机波浪统计特性及畸形波出现的影响。通过实验发现,波浪破碎会抑制随机波列中畸形波的出现,其对偏度的影响较小,而对峰度的影响较大;水深较大时更易得到畸形波;水深较小时波浪破碎对波高超值概率分布的影响较大。谱峰升高因子对波浪统计特性的影响主要是频谱的形式,而对其他参数,像波高分布、偏度值、峰度值等统计参数的影响较小。波浪畸形参数 $H_{\max}/H_s$ 的极大值主要出现在中等大小的偏度范围内,其有随峰度的增大而增大的趋势。通过对实验结果的分析,发现波浪能量的线性汇聚和非线性汇聚都可引起畸形波的出现。

(2) 基于高阶谱方法建立快速模拟波浪非线性运动的数学模型。基于小波陡对速度势展开,通过快速 Fourier 变换解决自由面波动问题,时间积分格式采用改进的 Adam-Bashfort-Monlton 预报校正格式代替传统的 Runge-Kutta 格式,可降低每时间步的计算量。通过对五阶 Stokes 波和波浪调制不稳定等问题的模拟对模型的正确性和有效性进行了验证。在谱方法数值模型的基础上,利用波浪的色散性,并考虑波浪的方向分布,建立了聚焦模拟畸形波的谱方法模型,并开展实验尺度的波浪聚焦和开敞海域畸形波的模拟研究。

(3) 基于非周期谱方法的数值波浪水槽。在上述谱方法数值模型的基础上,通过附加速度势的方法引入造波边界,突破传统谱方法对周期边界的限制,采用二阶造波理论,建立了可模拟波浪产生、传播的谱方法二阶波浪水槽,通过把数值结果与理论结果及实验聚焦结果相比较,验证了水槽的正确性和有效性。本书进一步分析了波浪的初始不稳定运动和非线性传播问题,并利用小波变换理论分析了波浪运动的谱特征。对于采用线性输入的非线性数值模拟,由于非线性项的存在,在波浪初始运动过程中会出现大波的问题,这主要是由发展方程中能量不平衡引起的高频不稳定引起的,波浪的这种不稳定主要发生在波浪初始运动过程中。对于短波问题,波浪的初始不稳定随传播距离的增大而增大,同时还随着波陡的增大而增强。利用时间坡度施加于造波板的运动位移可有效地控制波浪的这种初始不稳定运动。通过设定时间坡度的长度,可采用线性输入的方式模拟波浪的非线性运动。

(4) 模拟畸形波的有效波浪模型。本书还给出四种实验室内模拟畸形波的理论波浪模型:极限波聚焦模型+随机波模型;极限波聚焦模型+规则波模型;相位角分布范围调制聚焦模型;部分组成波聚焦模型。通过调整传统 Longuet-Higgins 海浪模型中能量分配的方式,可在有限空间和时间内,

模拟出具有不同畸形程度 $H_{\max}/H_s$ 的畸形波,为实验室模拟得到畸形波提供了参考依据,并使得进一步开展畸形波对建筑物作用的研究成为可能。

(5) 极端波浪与结构物相互作用的黏性流体力学数学模型。为了处理畸形波引起的陡峭自由面、碎波、水汽掺混等强非线性自由面问题以及结构物的极限响应等复杂流固耦合问题,本书将基于黏性流体理论,建立可处理波浪破碎、水汽掺混等复杂自由面流动及其与浮式结构相互作用的多相流数学模型。模型在笛卡尔直角坐标系统下建立,具有解决自由面大变形和结构大幅值运动响应等问题的良好适用性;采用高阶紧致插值差分方法离散动量方程的对流项,实现了计算域流场的高精度求解;采用多相流的方式处理固-液-气的相互作用问题,可有效处理水汽掺混和波浪与建筑物相互作用过程中的多相耦合作用问题;固-液按同相处理,保证了模型的迭代速度和计算效率;选择高精度的流体体积类型的自由面捕捉方法,保证了自由面的精确重构;采用浸入边界方法处理结构边界,结构的瞬时位置通过拉格朗日方式处理,保证了固体相完全的质量守恒。基于建立的模型,通过开展复杂界面流动与物体相互作用的研究验证模型的有效性,开展了畸形波与浮式结构相互作用的模拟研究,同时在断面波浪水槽内开展了相应的物理模型实验研究。

感谢国家自然科学基金青年基金项目“畸形波与浮体相互作用研究”(51209184)让作者得以在科研的道路上起航,同时感谢随后而来的国家自然科学基金面上项目“畸形波的近岸演变及其对海岸结构致灾机制研究”(51479175)、“畸形波与浮式结构相互作用的三维模拟研究”(51679212)和浙江省杰出青年基金项目“紊流自由面流动与海洋结构的流固耦合精细化模拟”(LR16E090002)让作者对畸形波相关的研究保持热情追逐,同时保证了作者对黏性流体力学相关数学模型的开发。没有这些基金项目的资助,作者的研究和本书出版也无法完成,谨此致谢。成书之际,还要感谢恩师孙昭晨教授和胡长洪教授多年的悉心指导,也要感谢单位领导、同事和家人的帮助与支持。近年指导的已毕业硕士生叶洲腾、付英男、张大可、程都及在读的研究生陈勇和李梦雨等同学做了部分辅助工作。最后,向所有关心和帮助过我的人,表示诚挚的感谢!

由于畸形波问题的复杂性以及人类认知畸形波形成机理和作用机理的有限性,本书试图专门讨论畸形波相关的理论,参考的著作也较多,编者对这些文献的理解程度和归纳水平都有限,书中存在的不当之处,敬请广大读者批评和指正。此外,书中对于其他专家学者的论点和成果都尽量给予了引证,如有不慎遗漏,恳请各位专家谅解。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 畸形波的定义	3
1.2.2 畸形波事件和观测	4
1.2.3 畸形波成因的探讨	8
1.2.4 畸形波的产生方法	11
1.2.5 数值模拟方法	13
1.2.6 畸形波对海洋结构物的作用	14
1.2.7 小波分析的应用	17
1.3 本书内容和结构	18
第2章 随机波列中畸形波的实验研究	20
2.1 造波设备和理论	20
2.1.1 造波水槽	20
2.1.2 浪高仪布置	21
2.1.3 波浪的产生	22
2.1.4 实验参数及工况	23
2.2 试验数据分析方法	24
2.2.1 统计分析	24
2.2.2 谱分析	25

2.3	波浪破碎对随机波列中出现畸形波的影响	27
2.3.1	实验目的	27
2.3.2	实验结果分析	28
	小结	34
2.4	谱峰升高因子对随机波列中出现畸形波的影响	35
2.4.1	实验目的	35
2.4.2	实验数据分析	35
	小结	53
2.5	谱峰周期对随机波列中出现畸形波的影响	54
2.5.1	实验目的	54
2.5.2	实验数据分析	54
	小结	60
2.6	小波理论应用于随机波浪频域特性分析	60
2.6.1	小波理论分析随机波列中能量的分布	60
2.6.2	小波理论分析畸形波的成因	65
	小结	75
2.7	本章总结	75

第3章 高阶谱方法 76

3.1	控制方程及边界条件	76
3.2	高阶谱数值方法	77
3.2.1	边界求解	77
3.2.2	计算步骤	80
3.2.3	时间积分格式	80
3.2.4	误差消除	81
3.3	模型验证	82
3.3.1	深水五阶 Stokes 波	82
3.3.2	波浪第一类调制不稳定	84
3.4	模拟畸形波的波浪模型	86
3.4.1	实验尺度波浪聚焦	86

3.4.2	考虑波浪的方向分布	89
3.4.3	开敞海域畸形波的模拟	92
3.5	本章总结	93
第4章	基于谱方法的数值波浪水槽	95
4.1	引言	95
4.2	模型建立	95
4.2.1	控制方程和边界条件	95
4.2.2	问题的解	99
4.2.3	计算步骤	99
4.2.4	吸收边界设置	100
4.2.5	造波边界设置	100
4.3	模型验证	101
4.3.1	不同输入条件的比较	101
4.3.2	线性输入得到 Stokes 波	102
4.3.3	波浪聚焦与实验结果的比较	103
4.3	本章总结	107
第5章	波浪的非线性运动	108
5.1	波浪的产生	108
5.1.1	短波初始运动特性	109
5.1.2	长波初始运动特性	110
5.2	数值波浪水槽的初始化	111
5.2.1	短波问题	112
5.2.2	长波问题	117
5.3	波浪的传播和变形	119
5.3.1	数值条件	120
5.3.2	数值结果与线性解的比较	121
5.3.3	数值结果与二阶 Stokes 波解析解的比较	125
5.3.4	数值结果与试验结果的比较	127

5.4	本章总结	130
第6章	畸形波的有效模拟模型	132
6.1	问题的提出	132
6.2	组合聚焦理论模型	133
6.2.1	极限波+随机波组合模型 I	133
6.2.2	数值条件和计算结果	134
6.2.3	极限波+规则波组合模型 II	138
6.2.4	数值条件和模拟结果	138
6.3	调制聚焦理论模型	140
6.3.1	相位角分布范围调制聚焦模型 III	140
6.3.2	数值条件和模拟结果	141
6.3.3	部分组成波聚焦模型 IV	144
6.3.4	模拟条件和数值结果	144
6.4	本章总结	148
第7章	基于 CIP 方法的黏性流数值模型	149
7.1	问题的提出	149
7.2	控制方程	150
7.3	计算网格	151
7.4	边界条件	152
7.4.1	交错网格的边界条件给定	152
7.4.2	固壁边界	153
7.4.3	造波边界	154
7.4.4	消波边界	155
7.4.5	内部固体边界	156
7.5	计算流程	158
7.6	流场求解器	159
7.7	对流项求解	160
7.7.1	对流方程的平移特征	160

7.7.2	传统差分格式的半拉格朗日反演	160
7.7.3	高精度对流项求解方法——CIP 方法	163
7.7.4	数值结果验证	165
7.8	非对流项求解	168
7.8.1	求解过程	168
7.8.2	压力 Poisson 方程迭代求解	169
7.9	本章总结	170
第8章	畸形波对不同工程结构的作用	171
8.1	界面捕捉方法介绍	171
8.1.1	THINC 方法	172
8.1.2	WLIC 方法	176
8.1.3	刚体旋转问题	177
8.2	强非线性界面流动问题	179
8.2.1	液滴冲击液膜问题	179
8.2.2	平底干床溃坝	180
8.2.3	下游带障碍物的溃坝	184
8.2.4	柱体冲击液面问题	191
8.3	畸形波对海岸工程结构物的作用	194
8.3.1	模型试验	194
8.3.2	潜堤上畸形波的演变	195
8.4	畸形波对浮式结构的作用	200
8.4.1	模型试验	200
8.4.2	波面信息	203
8.4.3	浮体双自由度运动	207
8.4.4	浮体三自由度运动	213
8.5	本章总结	218
	参考文献	219

第1章 绪论

1.1 概述

众所周知,随着人口数量的不断增加和人均消费的增长,地球上的陆地资源压力成倍增长。面对日益“超载”的地球,发展绿色经济,减缓自然资源耗竭的速度,同时开辟新的资源途径,已经成为全球刻不容缓的课题。占地球表面积 70% 以上的海洋蕴含丰富的油气、矿产以及生物资源等,随着人类的发展和科学的进步,人类正向海洋全面进军。人类对海洋的探索自古至今,公元前 1000 年,随着人口迁徙,波利尼西亚人偶然试水太平洋,开启了探索海洋的序幕。紧接着,地中海、印度洋、大西洋、北欧、北美的航行道路被打通。1500 年地理大发现之后,大陆文明逐渐被复制到海洋世界。19—20 世纪,海洋文明、海上帝国,塑造了现代世界的面貌,也带来了全球文明危机。20 世纪下半叶至今,海洋全球化再次改变了文明世界的历史进程,21 世纪将是海洋的世纪。

人类除了利用海洋中丰富的矿产、油气资源外,航运贸易也逐渐成为全球经济贸易的一大组成部分。此外,海洋中丰富的生物资源已成为沿海地带经济发展的重要手段,深海、极地考察以及海上军事作战能力等也成为衡量一个国家综合实力的重要方面。另外,我国的海岸线长 18 000 千米,拥有约 37 万平方千米领海和约 300 万平方千米的海洋专属经济区。而占领国土 13% 的沿海经济带,承载着全国 40% 左右的人口,创造全国 60% 左右的国民经济产值。这些活动的进行,都离不开各种用途的船舶、海洋平台和海上结构物等,因此船舶与海洋结构物的安全性,作为一切活动的前提保证,密切地关系着我国国民经济的发展以及海岸带地区人民的生活及生产安全,受到了人们的极大关注。

海洋既是人类在地球上生存、发展的一片乐土,同时也是诱发各种灾害的温床,如台风、风暴潮、巨浪、海冰、海底地震及海啸、赤潮、海上溢油、海岸侵蚀、海平面上升等自然灾害和人为灾害,这就要求我们在进行海洋开发利用的同时,更

要做好相关安全防护工作。

波浪是海洋及近海工程最重要的动力要素之一,不仅由于波浪引起的水体运动非常复杂:如海岸建筑物所受的波浪荷载,近海结构物及船舶等所受的波浪力和运动响应,以及沉积物的输移等,而且它受很多因素影响,难以预测。然而由于波浪运动的复杂性和海洋环境的不确定性,人类对于它的认识和了解远远不够深入。在线性假定下,波浪的形状规则、其内部结构基本保持独立、恒定。但现实海域中,由于波浪与波浪、波浪与水流、风或其他介质之间非线性相互作用的存在,波浪的运动和变形以及波浪内部的形态会变得异常复杂,畸形波就是一种具有强非线性的极端波浪代表。

畸形波是一种特殊的随机波浪,它是单峰波,波形与孤立波有点相似,但它的波峰尖,波高极大,能量瞬间集中,波峰的速度远远大于同等波高的其他波浪,破坏力极大,这与孤立波这种推进波又有很大区别;其持续时间短,波形随时间变化,突然出现,又很快消失,故也不同于驻波;而其发生与地震等因素无必然联系,故又不同于海啸。过去,人们认为海上出现畸形波的可能性是相对小的,偶尔会在某海以惊人的波高升起,实际上世界各大海域均有畸形波出现,它可以在深水、浅水或有限水深区域,较强海流海域或无明显海流区域,天气恶劣或者正常等多种情况下生成,一些统计数据表明它出现的频率不是稀少而是相对比较频繁的。

由于其极大的波高,畸形波对海上建筑物具有巨大的潜在危害。最早的记录是1896年由畸形波所引起的葡萄牙 Spray 号船的倾覆,此后在挪威北海海域、日本海域以及南非东南海域相继出现类似的海难事故,因此引起人们越来越多的重视。Draper(1965)首次提出畸形波(freakwave)的概念,此后越来越多的学者和工程人员也开始关注这一现象。随着港口、海洋工程及近海油气开发不断向深海方向发展,人们越来越多地观察到天然海浪波列中存在的畸形波,并且认识到畸形波带来的船舶灾难和工程事故的可怕性,关于畸形波的讨论和报道也越来越多。但是,由于畸形波大多在未知和不可预测情况下出现,可靠的测量、分析结果非常少,对其发生机理有不同的解释,对其发生概率及工程意义还不明确。虽然国内外学者在畸形波这个新兴领域的研究中做了一定量的探索性的工作,但是这个领域的许多问题仍然没有深入展开,要搞清楚畸形波的发生机理,以及在某些特定条件下发生的概率,研究畸形波的内部结构,其与海洋和结构物相互作用等一系列问题,还有大量的工作要做。有关研究的突破将对海洋水动力学的发展具有十分重要的理论意义,对海洋运输船舶、石油钻井平台以及海岸港口等工程结构物的设计和防护都具有重大的实际工程价值。

1.2 国内外研究现状

本书将在室内物理波浪水槽和数值波浪水槽内开展畸形波的实验研究和数值模拟研究,分别采用势流理论和黏性流理论建立数值波浪水槽。研究主要包括以下内容,首先在有限长度的二维波浪水槽内开展随机波浪的统计特性及随机波列中畸形波事件的实验研究,主要分析波浪要素对随机波列中出现畸形波的影响;然后通过高阶谱方法建立了快速模拟波浪非线性运动的数值模型,把能量在横向和纵向分割,考虑波浪的方向分布,建立了聚焦模拟畸形波的谱方法模型,在改进的谱方法数值模型中引入造波边界,利用二阶造波理论,建立了可模拟波浪产生、运动及传播的二阶数值波浪水槽,进而在数值波浪水槽中开展了波浪的传播、变形和初始运动不稳定问题的研究;同时还基于理论模型,给出了四种模拟畸形波的有效波浪模型;最后给出了模拟畸形波的黏性流模型,开展了聚焦畸形波对海上结构的作用。在数据分析的过程中采用了小波分析工具,从能量变化方面解释了畸形波发生机理及波浪初始不稳定运动的原因。以下分别就这几个方面进行综述。

1.2.1 畸形波的定义

畸形波目前没有统一的名称和定义,国外研究人员一般称畸形波为 freak wave, abnormal wave, rogue wave, giant wave, extreme wave 等,国内把它译成突浪、巨浪、疯狗浪、畸形波及极值波等,以上各种称谓指的是同一种波浪现象,在书中,对这种波浪采用统一的名称,称其为畸形波。

畸形波通常具有如下的特征:有陡且尖的波峰和平坦的波谷,波峰的前坡很陡且升高很快,波峰形状为前凹后凸,是一种强非线性、非常不对称的波浪,出现和消失很突然,具有瞬态性。其中,最明显的特征是高且陡的波峰,因此一些学者和工程人员据此从波高的角度进行定义,认为波高大于有效波高的 2.0 倍或 2.2 倍的单波可以称为畸形波。

Klinting 和 Sand(1987)定义畸形波为:① 其波高大于有效波高的 2 倍;② 其波高大于其前面和后面波浪的波高的 2 倍;③ 其波峰高度大于其波高的 65%。

Kjeldsen(1990)认为波高大于 2.0 倍的有效波高的单波为畸形波,即: $H > 2H_s$, 其中 H 为畸形波的波高, H_s 为有效波高。

Kharif(2003)认为,在一般情况下,只要波浪的波高与有效波高的比值超过

一定的范围就可认为该波浪为畸形波,此范围为 $[2.0 \sim 2.2]$,他认为在高斯假定的条件下, $H_{\max} > 2H_s$ 可作为畸形波的判定标准。

而由于波浪非线性存在,应采用更高的畸形波的定义标准,即 $H_{\max} > 2.2H_s$ 。较高的畸形波的判定标准主要是由以下三个方面引起的:

(1) 风浪谱的带宽不属于窄带谱的假定。

(2) 考虑波浪的非线性相互作用,导致非高斯过程。

(3) 由于水平面上大气压力、风流等因素随时间变化的影响。该判定标准主要应用于随机波浪的长时间模拟中的畸形波的判定。

本书在有限的波浪水槽内模拟了畸形波的产生问题,而没有开展长时间的模拟研究,故部分内容采用 $H_{\max} > 2H_s$ 作为畸形波的判定标准;而从实际工程结构安全的角度出发,极端波浪的发生中可能会伴随着波浪破碎和结构的大幅值响应等强非线性问题,这些问题无论从理论分析还是工程实际的防灾减灾角度出发都是非常重要的方面,所以本书中也未完全受限于畸形波的特定判定标准。

1.2.2 畸形波事件和观测

1) 畸形波事件

人类对畸形波的认识源于它给人类带来的伤害,近年来人们开始认识到诸多的海上船舶灾难和工程事故可能源于畸形波。1933年美国海军“拉马波”汽轮遇到了34 m巨浪、1978年德国超级油轮“明兴号”沉没、1980年英国“德比郡”巨型军舰在日本海域失踪、2000年英国超级游轮“奥丽亚娜”号遭巨浪狂袭、2006年5月法国超大邮轮“彭特·艾温”被15 m巨浪摧毁、2007年1月挪威海域一艘载有650吨燃油的塞浦路斯籍油轮被巨浪打断裂成两截,近300吨燃油泄漏入海……此外还有航海员们熟知的好望角怪浪和被欧盟乃至全世界海洋工作人员注目的挪威北海大浪(陶爱峰,2008),所有的这些灾难事故可能都与灾害性波浪——畸形波有关。

2004年,“伊万”飓风席卷美国墨西哥湾,巨浪滔天高达近百英尺,4级飓风的风速达到150英里/时。2001年初,两艘游船“布雷曼”号和“苏格兰之星”号在南大西洋航行,两船相距1000千米,它们分别被30米高的巨浪击中,两艘船驾驶台上的窗户都被击碎,“布雷曼”号失去了航行能力,在海上漂浮了两个多小时。

1978年12月7日,长度超过两个半足球场,凝聚了德国海运界全部骄傲,被誉为“不沉之轮”的有史以来最大的货船,竟在驶往美国的途中突然消失,27名船员生死不明,营救人员只找到一艘体无完肤的救生艇。

据 Lawton(2001)统计,在 1969—1994 年近 25 年的时间里,世界海域内共有 22 艘巨轮因遭遇畸形波而失事(Kharif, 2003; Dysthe, 2008),发生灾难的具体分布位置如图 1.1 所示。

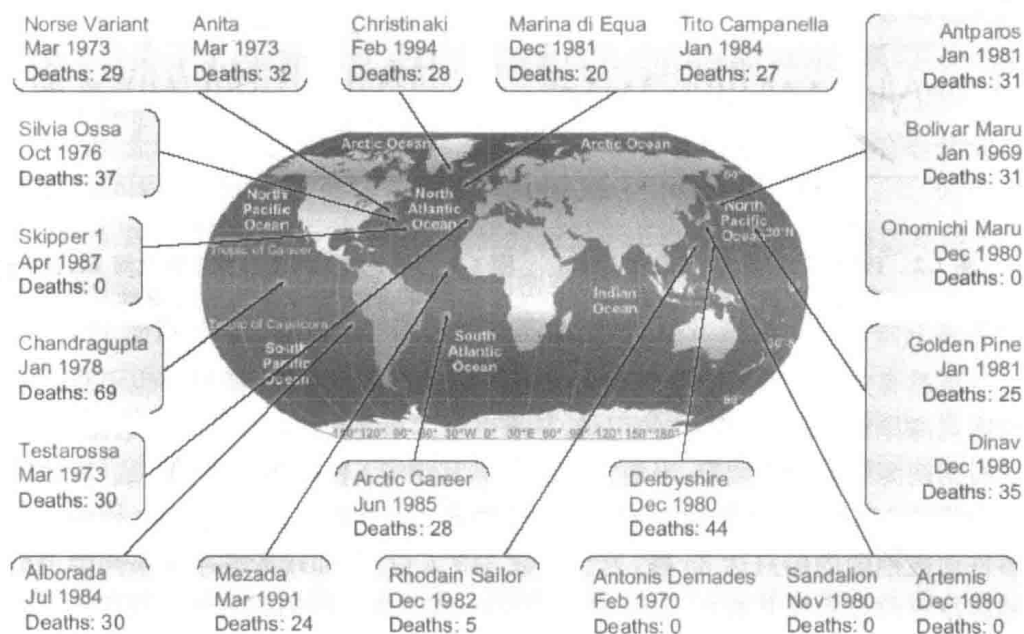


图 1.1 1969—1994 年,巨轮受畸形波破坏的位置统计分布

关于畸形波最有力的证据主要来自海上的采油平台。1984 年北海 Gorm 海域油田遭受到一巨浪的袭击(Sand, 1990),其波峰值为 11 m,为有效波高($H_s=5$ m)的 2.2 倍,图 1.2 给出了其短时波面过程。

1995 年 1 月 1 日,畸形波袭击了北海水深为 70 m 水域的 Dranpner 采油平台,对设备造成了一定的损坏。该波即为著名的“新年波”,是目前记录最完善的畸形波:其波高为 25.6 m,波峰高度为 18.5 m,周期约为 12.5 s,而当时的有效波高仅为 11.9 m,其波面形状如图 1.3 所示。

1995 年 2 月巡洋舰 Queen Elizabeth II 在北大西洋的飓风天气里遭遇了 29 m 高的畸形波,波浪造成船体小的损坏,并无人员伤亡,该船船长描述它为大水墙(a great wall of water)。

2007 年 5 月的印度尼西亚沿岸遭巨浪袭击事件是最近发生的可能的畸形波事件,从 5 月 17 日早晨开始,在苏门答腊岛的西苏门答腊省、亚齐省、巴厘岛和爪哇岛南部海岸相继出现异常海浪,多数海浪有 2~3 m 高,一些地区的海浪高达 7 m,巨浪造成了巨大的经济损失,由于此前没有发生地震或风暴,气象部门目前还无法解释发生大面积巨浪的原因。

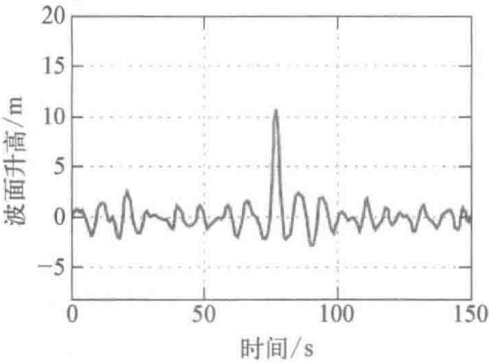


图 1.2 1984 年 11 月 17 日北海 Gorm 海域观测到的畸形波事件

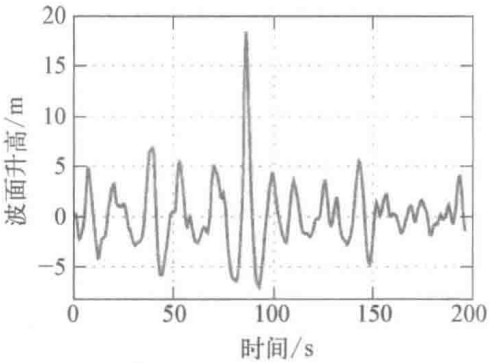


图 1.3 1995 年 1 月 1 日发生在北海 Draupner 平台的“新年波”畸形波事件

虽然有关我国畸形波造成重大灾害的报道不多,但畸形波事件也不少。台湾四周海岸都有发生畸形波的记录,冬季以台湾东北角海岸发生的次数最多,夏季时西南海岸发生较频繁,当地常称此种突发性伤人怪浪为“疯狗浪”或“突浪”。据收集的 1954—1998 年间台湾海峡附近的共 140 次畸形波资料显示,因畸形波事件而被摧毁的船只达 35 艘,死亡人数 343 人以上,而畸形波事件被列为台湾地区严重的经常性灾难之一[许等人(1993);陈等人(1999);庄(1995)]。大陆及香港地区虽还没有人进行这方面的统计,但仅在近两年的新闻中就可以查到 6 例畸形波事件。2005 年 9 月 5 日,香港石澳及西贡在大浪下发生意外,在香港城市大学任高级研究助理的一名内地博士,于石澳沙滩伫立悬崖边观浪拍照时,被突发巨浪卷走,同行友人欲救人时也跌伤;消防及水警接报到场救起堕海男子,证实其已气绝身亡。2005 年 9 月 22 日,“达维”台风到达前夕,汕头南澳岛云澳镇老园村几辆采沙车正在海边作业时,风平浪静的海面上突然生成数个巨浪,呼啸着冲上沙滩,一下子把几辆采沙车埋进沙里,幸而未造成人员伤亡。2005 年 9 月 24 日,43 名福建工贸学校的学生在福建长乐市湖南镇大鹤村象鼻山海滩游玩,突然一个巨浪袭来,3 名男生被卷走,之后,又有 4 名前往搜救的学生失踪。2006 年 7 月 10 日,山东青岛市澳门路海边突然掀起巨浪,像“山包”一样向岸边砸来,冲到岸边时形成达 10 多米高的浪,很多停靠在此的车辆被突如其来的巨浪打得来回摇晃。2006 年 7 月 11 日,浙江渔山岛一名钓友在牛粪礁 4 号钓点被突发海浪卷走。2006 年 8 月 20 日,福建厦门 4 名工人在椰风寨海域一起下海游泳,不料一个巨浪打来,其中 3 人被卷走,只有一人拼命往回游才捡回一条命。

由这些记录可看出,畸形波是真实存在的,而且世界各大海域都有记录,它可以在多种条件下发生,发生的时间和地点具有不确定性,但总体而言,主要发