



基于非线性薛定谔方程的 畸形波理论及其应用

张解放 戴朝卿 王悦悦 著



科学出版社

基于非线性薛定谔方程的畸形波 理论及其应用

张解放 戴朝卿 王悦悦 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在讲述非线性薛定谔方程的各类物理背景的基础上,对其基本解,特别是有理形式表示的畸形波解的求解方法进行了阐述,包括直接方法、双线性方法、达布变换法和朗斯基行列式方法等,分别重点给出在流体力学、非线性光学、等离子体物理、玻色-爱因斯坦凝聚等领域中的应用,详细讨论了这些系统中的畸形波的控制问题,并展示了丰富的动力学行为,同时分别给出了高维非线性薛定谔方程的线畸形波和耦合非线性薛定谔方程矢量畸形波的求解及其应用.这些成果也包括了作者及其合作者得到的一些研究成果.期望本书可以为数学物理、凝聚态物理、流体动力学、等离子体物理、非线性光学等专业的科研工作者和研究生提供重要的富有启发性的参考.在阅读本书后,读者可以较快地开展不同物理系统的畸形波问题的研究.

本书可作为高等院校和科研机构的数学、物理、力学、光学等专业的研究生和高年级本科生学习非线性科学的教材,也为理论物理、数学物理和力学工程等专业的科技工作者提供了一本实用的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

基于非线性薛定谔方程的畸形波理论及其应用/张解放,戴朝卿,王悦悦著. —北京:科学出版社,2016.3

ISBN 978-7-03-047623-4

I. ①基… II. ①张… ②戴… ③王… III. ①薛定谔方程-波浪-非线性变换-研究 IV. ①O353.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 048743 号

责任编辑:钱 俊 裴 威/责任校对:蒋 萍

责任印制:张 伟/封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本:720×1000、B5

2016年3月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:222 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

畸形波是最早发现于海洋的奇特自然现象,是一种分布非常陡峭、存在时间很短、峰值远高于周围的局域波,具有“来无影、去无踪”的特征.人们普遍认同畸形波是一种非线性波,但不同于孤波,也不同于海啸.它的研究始于海洋动力学,因其突发时的强危害性、目前的不可预测性及出现频次迅速增加的趋势,已经引起了全世界涉海工作人员的重视.20世纪60年代以来,越来越多的学者开始研究畸形波,并在其他领域中也取得了突破,如非线性光学、玻色-爱因斯坦凝聚、等离子体、大气科学、物质波、超流体和金融学.最近十多年,关于畸形波的研究及其应用取得了巨大进展,其中畸形波的动力学特征大多采用非线性薛定谔方程来表征.

本书主要介绍基于非线性薛定谔方程的畸形波理论和应用,包括畸形波的基本背景,非线性薛定谔方程的物理模型及其基本解,求解非线性薛定谔畸形波解的修改达布变换方法、直接方法、朗斯基行列式方法、改进的双线性方法,水畸形波、光畸形波、等离子畸形波、物质畸形波应用成果及其控制机制,矢量畸形波和线畸形波的物理应用和控制动力学等.应当指出,国内外对畸形波的研究正处于蓬勃发展的时期,国内许多研究单位也做出了出色的工作.本书参考了很多相关的文献,也包含了本书作者和合作者的研究成果,我们希望本书能为对该现象和相关研究感兴趣的人提供思路并给予启发.

在此,对参与研究工作的吴雷博士、田青博士、胡文成博士、楼吉辉硕士、赵辟硕士,以及曾与我们讨论学术问题并提供帮助的贺劲松教授、闫振亚教授、李禄教授、郑春龙教授、黄文华教授、宗丰德教授、来娴静博士、杨琴博士、何纪达硕士、王亮亮硕士、钱存硕士、石晓明硕士、金美贞硕士和其他学术同行,一并表示感谢.

本书的出版得到了国家自然科学基金(批准号:1067214、11072219和11375007)、浙江省自然科学基金(批准号:LY13F050006)的资助.

由于作者水平有限,书中难免存在一些纰漏和不足,可能会有某些阐述不当之处,敬请读者批评指正.欢迎各位同行和读者来信讨论与本书相关的学术问题.电子邮箱:719678098@qq.com 或 dcq424@126.com.

张解放 戴朝卿 王悦悦
浙江传媒学院 浙江农林大学

2016年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 导言	1
1.2 畸形波的自然观测记录	2
1.3 畸形波研究的物理模型	13
1.4 畸形波研究的重要实验	14
参考文献	15
第 2 章 非线性薛定谔方程的导出	19
2.1 流体力学背景	19
2.2 非线性光学背景	25
2.3 等离子体物理背景	31
2.3.1 包含非广延分布的非热电等离子体非线性薛定谔方程	32
2.3.2 相对论退化等离子体中的非线性薛定谔方程	35
2.4 玻色-爱因斯坦凝聚背景	38
参考文献	42
第 3 章 标准非线性薛定谔方程的基本解	44
3.1 孤子解	44
3.1.1 亮、暗单孤子解	44
3.1.2 亮、暗多孤子解	45
3.2 呼吸子解	49
3.2.1 一阶呼吸子解	50
3.2.2 二阶呼吸子解	51
3.3 畸形波解	53
3.3.1 修改的达布变换方法	53
3.3.2 直接方法	58
3.3.3 朗斯基行列式方法	59
3.3.4 改进的双线性方法	63
参考文献	66
第 4 章 畸形波应用	68
4.1 水畸形波与实验	68

4.1.1	水畸形波的性质	68
4.1.2	水畸形波的实验研究	70
4.2	光畸形波与控制	73
4.2.1	光纤放大器中非自治皮秒光畸形波的传播控制研究	73
4.2.2	克尔非线性波导放大器中光畸形波的传播控制研究	85
4.2.3	光纤放大器中非自治飞秒光畸形波的传播控制研究	91
4.3	等离子畸形波与控制	96
4.3.1	含非广延分布的非热电子的等离子体中畸形波的应用及其控制	97
4.3.2	在相对论退化等离子体中的静电畸形波	102
4.3.3	三组分超冷量子尘埃等离子体中的尘埃离子声畸形波 (1 维 NLSE)	106
4.4	物质畸形波与控制	110
4.4.1	物质畸形波的性质	110
4.4.2	含时谐振子外势下物质畸形波的性质	111
4.4.3	非自治物质畸形波的控制行为	114
	参考文献	121
第 5 章	矢量畸形波及其控制	125
5.1	矢量畸形波	125
5.2	矢量光畸形波	130
5.2.1	修改的达布变换方法	131
5.2.2	畸形波解	132
5.2.3	呼吸子解	135
5.2.4	畸形波和呼吸子解的动力学特性	137
5.3	矢量物质畸形波的控制	142
5.3.1	相似变换	143
5.3.2	畸形波解及其控制问题	145
	参考文献	146
第 6 章	线畸形波及其控制	148
6.1	(2+1) 维变系数非线性薛定谔方程的线畸形波及其传播特性	148
6.1.1	(2+1) 维变系数非线性薛定谔方程精确畸形波解	148
6.1.2	二维线畸形波的演化传输特性	151
6.2	非均匀非线性波导中线光学畸形波及其传播控制	153
6.2.1	(2+1) 维变系数非线性薛定谔方程的相似变换和二维光学畸形波解	153
6.2.2	非均匀非线性波导中二维光学线畸形波解的动力学特性和传播控制	155
6.3	二维梯度折射率光波导中线光畸形波的传输控制	161
6.3.1	平面梯度折射率波导放大器中传播的光畸波求解	161

6.3.2 平面折射率波导中线光畸波的传输控制	163
参考文献	175

第1章 绪 论

1.1 导 言

畸形波 (freak wave), 也称凶波 (rogue wave)、怪波 (monster wave)、杀人波 (killer wave) 或巨波 (giant wave, extreme wave), 最早发现于海洋中的自然现象, 是一种分布非常陡峭、存在时间很短、峰值远高于周围的波浪的局域波, 具有“来无影、去无踪”的特征。畸形波是单峰波, 与孤立波有点相似, 但与孤立波这种行进波区别很大。畸形波持续时间短, 消失快, 波形随时间变化, 显然不同于驻波。与地震等因素无必然联系, 故又不同于海啸, 因为海啸速度极快, 是在靠近海岸的时候逐渐成形。

海洋畸形波 (图 1.1) 在世界各大海域均曾出现, 不管是深海还是近海、有强流还是没有强流、在风暴天气还是在一般天气都会出现, 而且它出现的频率不是稀少而是相对比较频繁的。因其突发时的强危害性、不可预测性及出现频次逐渐增加的趋势, 对各类船舶、海洋工程结构物等都将造成巨大破坏, 已经引起全世界涉海工作人员的高度关注。



图 1.1 海洋中畸形波 (图片取自网络)

1965 年 Draper^[1] 首先在科学文献中提出畸形波的概念, 至此, 越来越多的科学家开始关注畸形波, 逐渐认识畸形波。畸形波通常具有如下特征: 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、极不对称的波浪, 出现和消失很突然, 具有瞬态性。1987 年 Klinting 和 Sand^[2] 给出一个为该领域大多数研究者所接受的定义:

- (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 2 倍;
- (3) 其波峰高度大于其波高的 65%.

1.2 畸形波的自然观测记录

几个世纪以来,关于畸形波的描述仅限于海员的口述,航海史上畸形波也一直被人们视为传说.航海家讲述的巨波海难事件中,形容畸形波就像一堵水墙,高度达几十米,经常没有任何预兆地出现.受限于观测条件的掣肘,人类长期以来不能完全认识海洋畸形波这种现象,也没有达成对畸形波事件的共识,所以一直不能给出清晰的定义,也不能预报海上畸形波发生的可能.

随着科学技术的进步以及人类认识海洋畸形波的迫切需要,实测海洋畸形波的进展将不断推进.欧洲航天局、德国航空航天中心以及其他几个欧洲的研究机构,分别在 1991 年和 1995 年发射雷达卫星,雷达波束被看作是潜在的、理想的测量波浪高度的工具.欧洲联盟(简称欧盟)自 2000 年开始实施“终极巨浪”(max wave)项目,专门寻找海洋中的畸形波.研究者根据观测台站、石油平台、锚定浮标的观测数据和合成孔径雷达的遥感数据能够给出较为准确的波面高度信息,为确认畸形波这一物理现象奠定了观测基础.研究人员通过分析浮标、平台观测数据,发现了数以千计的畸形波.表 1-1~表 1-3^[3]记录了 2006~2010 年发生的畸形波事件(主要基于大众媒体来源收集).欧盟于 2000 年启动了两架卫星对海洋进行扫描测量,试图绘制一幅巨浪地图,以显示海洋的哪些地方巨浪最有可能发生.

2004 年英国广播公司推出了科普纪录片《夺命怪浪——畸形波》,使人们有机会一睹畸形波的传说.图 1.2 为巨轮遭遇畸形波巨浪拍击后的照片.

下面列举一些具有详细观测描述的畸形波事件.

最早畸形波的记录是 1826 年,法国科学家兼海军指挥官 Dumont d'Urville 上尉在一次海洋考察任务中遭遇了 24~80m 高的海浪^[1],由于当时人们对该现象知之甚少,所以他对该现象的报道受到了不少研究人员的公开嘲笑.

1933 年 2 月美国海军的兰玛博(Ramapo)号蒸汽船从圣地亚哥驶往马尼拉的途中遇到巨浪,瞭望台的值班员对波浪进行了观测,巨浪高达 34m,相当于 11 层楼的高度,而且是突然出现,又瞬间消失.这是目前世界上记录的具有较强可信度的最大波.图 1.3 是根据船员描述的当时的大体情形^[4].

1968 年 6 月 13 日美国载重 28300t 的利比里亚油轮 World Glory 号邮轮在经过南非近岸海域时遭遇了突发巨浪^[5],断为两截后沉入海底,此次事件造成 22 名船员罹难,如图 1.4 所示.

表 1-1 2006 ~2010 年深水畸形波事件

次数	日期	船只	地点	H_r/m	H_s/m	波数量	灾害情况
1	2006 年 11 月 12 日	44ft ^① 木船 (船名 Westwood Pomana)	太平洋 Coos 湾 (美国) 离岸	21	3.9	1	1 人受伤, 船损坏
2	2006 年 12 月 9 日	卢嫩堡, 新斯科舍 省长船 (船名 Picton Castle)	大西洋离 Cod 岬 (美国) 760km		2.6	1	1 人死亡
3	2007 年 4 月 30 日	17.5m 双桅船 (船名 Cowrite Dancer)	印度洋伊丽 莎白湾 (南非) 南 1000km	12	4.8	2	1 人死亡, 2 人受伤
4	2007 年 5 月 19 日	潜水艇 (艇名 HMAS Farncom)	东南亚水域 执行任务中		< 2	1	5 人受伤
5	2008 年 12 月 29 日	巡航船 (船名 Crystal Symphony)	南冰洋德 雷克海峡		2.5	1	船损坏
6	2010 年 3 月 3 日	巡航船 (船名 Louis Majesty)	地中海离 西班牙 24mi ^②	8	4.0	3	2 人死亡, 14 人受伤, 船损坏
7	2010 年 8 月 22 日	摆渡船 (船名 Seastreak)	大西洋马撒葡萄园岛 (美国) 到纽约的途中		3.0	1	3 人受伤, 船损坏
8	2010 年 12 月 7 日	巡航船 (船名 The Clelia II)	南冰洋德 雷克海峡	9	3.5	1	1 人受伤, 船损坏
9	2010 年 12 月 30 日	超级油船 (船名 Aegean Angel)	南冰洋百慕 大群岛东北处		2.3	1	2 人死亡, 1 人受伤

表中 H_r 为畸形波高度, H_s 为有效波高度.

① 1ft = 3.048×10^{-1} m.

② 1mi = 1.609344km.

表 1-2 浅水畸形波事件

次数	日期	地点	H_r/m	H_s/m	波数量	灾害情况
1	2006 年 1 月 18 日	坎贝尔港 (澳大利亚) 离岸 600m	3	平静	1	1 人受伤, 船损坏
2	2006 年 3 月 27 日	角半岛 (南非) 离岸 2 英里	6~7	3.1	1	1 人死亡, 1 人受伤
3	2006 年 4 月 19 日	维多利亚 (澳大利亚)		2.1	1	1 人死亡, 1 人受伤, 船损坏
4	2006 年 4 月 23 日	Pillar 角 (塔斯马尼亚)		2.0	一些	3 人死亡, 2 人受伤, 船损伤
5	2006 年 5 月 21 日	比斯开湾 (法国)	12~15	3.9	1	大于 6 人受伤, 船损坏
6	2006 年 5 月 21 日	英国		2.0	1	1 人受伤, 船损伤
7	2006 年 6 月 6 日	Reyes 角 (美国)		1.5	1	1 人死亡
8	2006 年 6 月 8 日	Moruga 海 (特立尼达和多巴哥)	4.5	2.2	1	1 人死亡, 3 人受伤, 船损坏
9	2006 年 7 月 30 日	拉各斯 (南非)	4~5	1.8	2	1 人死亡, 2 人受伤, 船损坏
10	2006 年 8 月 12 日	Malaga (西班牙)		3.0	1	1 人死亡, 2 人受伤
11	2006 年 8 月 24 日	Hoy, 奥克尼群岛 (英国)		2.6	1	2 人死亡, 船损伤
12	2006 年 9 月 23 日	Porth Ceiriad (英国)		1.0	1	1 人死亡, 2 人受伤
13	2006 年 11 月 5 日	Rakaia 河 (新西兰)		1.5	1	2 人受伤
14	2006 年 11 月 11 日	苏格兰东北 (英国)	30(?)	6.0	1	2 人死亡, 1 人受伤
15	2006 年 11 月 25 日	韩国	最高 6	3.0	3	5 人死亡, 2 人受伤, 船损伤
16	2007 年 1 月 25 日	俄勒冈州 (美国)	6.1	3.3	3	1 人死亡, 3 人受伤, 船损坏
17	2007 年 2 月 26 日	纳索 (巴哈马)		2.0	1	1 人死亡, 1 人受伤
18	2007 年 3 月 23 日	卡特赖特角 (澳大利亚)		1.4	1	3 人受伤
19	2007 年 5 月 5 日	塔斯马尼亚 (澳大利亚)		2.9	1	1 人死亡, 船损坏
20	2007 年 5 月 12 日	Reunion	11(?)	1.9	1	2 人死亡, 船损伤
21	2007 年 5 月 19 日	Muria (澳大利亚)		2.0	1	27 人受伤, 船损坏
22	2007 年 5 月 19 日	Audierne (法国)		2.4	1	2 人受伤
23	2007 年 5 月 24 日	Rakit 岛 (印度尼西亚)	6	2.0	一些	11 人死亡, 2 人受伤

续表

次数	日期	地点	H_r/m	H_s/m	波数量	灾害情况
24	2008 年 9 月 12 日	德班 (南非)		3.2	1	1 人死亡, 2 人受伤
25	2009 年 3 月 29 日	澳大利亚西端		3.3	1	—
26	2009 年 12 月 9 日	布鲁金斯港 (美国)		1.7	4	船损坏
27	2010 年 4 月 19 日	Hokianga Bar (新西兰)		2.6	1	1 人受伤, 船损坏
28	2010 年 8 月 9 日	登加拉 (印度尼西亚)	3	1.4	1	39 人死亡, 21 人受伤, 船损伤
29	2010 年 10 月 5 日	波斯利文沙滩 (英国)		3.3	1	2 人受伤, 船损坏
30	2010 年 11 月 10 日	Dikwella (斯里兰卡)		20	1	1 人死亡, 船损坏

表中部分数字为估计值.

表 1-3 海岸畸形波事件

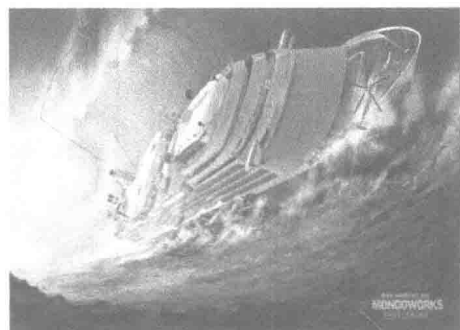
次数	日期	地点	波数量	灾害情况
1	2006 年 1 月 5 日	俄勒冈州 Depoe 湾 (美国)	1	1 人死亡, 2 人受伤
2	2006 年 1 月 7 日	Grassy Head, Kempsey(澳大利亚)	1	1 人死亡
3	2006 年 2 月 6 日	Avoca 海滩 (澳大利亚)	1	2 人受伤
4	2006 年 3 月 13 日	中美洲	1	1 人受伤
5	2006 年 3 月 29 日	Legian 海滩 (巴厘岛)	1	1 人死亡, 2 人受伤
6	2006 年 3 月 31 日	兰开夏 (英国)	1	1 人死亡
7	2006 年 4 月 8 日	Joyce 海滩 (新西兰)	1	1 人死亡
8	2006 年 4 月 11 日	桑德兰 (英国)	1	1 人死亡
9	2006 年 4 月 17 日	新南威尔士州 (澳大利亚)	1	1 人死亡
10	2006 年 6 月 11 日	哥斯达黎加	1	4 人死亡
11	2006 年 7 月 1 日	南海沙滩 (英国)	1	4 人受伤
12	2006 年 7 月 22 日	Kalk 湾 (南非)	1	3 人受伤
13	2006 年 8 月 8 日	Sudak(乌克兰)	1	2 人死亡, 1 人受伤
14	2006 年 8 月 19 日	圣雷莫 (澳大利亚)	1	3 人受伤
15	2006 年 10 月开始	金丝雀岛 (西班牙)	1	1 人死亡
16	2006 年 10 月	东海角 (南非)	1	1 人死亡, 2 人受伤



(a)



(b)



(c)



(d)

图 1.2 遭遇畸形波摧毁的巨轮 (图片取自网络)

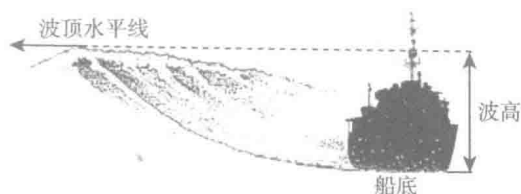


图 1.3 瞭望台值班船员对畸形波高度观测还原图



图 1.4 World Glory 巨轮折断图

1974 年 5 月 17 日, 挪威籍油轮 Wilstar 号, 在南非德班海域附近, 遭受到畸形波的袭击, 船体外部结构严重受损^[6]. 该海域有著名的阿古拉斯海流 (沿着非洲南部东岸向西南方向流动的印度洋洋流) 经过.

1978 年, 德国慕尼黑载驳船沉没在大西洋, 扭曲的残骸说明它是被一个巨大的波浪摧毁的, 如图 1.5 所示.

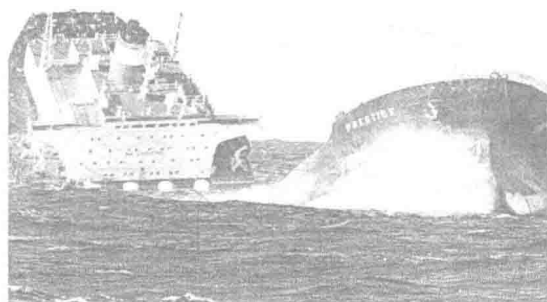


图 1.5 慕尼黑载驳船沉没

1980 年油轮 Esso Languedoc 在南非 (阿扎尼西) 东部港市德班海域遭遇的畸形波, 船员 Phillippe Lijour 成功拍下了当时的场面, 是一个 25m 高的怪波^[7]. 油轮大副描述 “这个畸形大波从船尾过来打在甲板上, 直到它经过船边我才发现, 它很特别, 远高于周围的波浪”, 如图 1.6 所示. 从图中可以看见一个明显的 “水洞”.

1984 年, 北海挪威海域 Ekofisk 油田位于平均海面之上 20m 的 2/4-A 采油平台因受到畸形波袭击而出现了一定的损毁. 在该事故中, 平台控制室的墙壁被波浪

击毁,致使生产停滞 24h^[8].



图 1.6 Esso Languedoc 油轮遭遇到的畸形波

1985 年 4 月 27 日,苏联的一艘油轮,在南非东南海域遭遇了一次畸形波的袭击,一名在前甲板上工作的水手被巨浪卷入海中导致丧命^[9].

1986 年,美国 SS Spray 号军舰在查尔斯顿外海遭遇了目测浪高约为 25m 的三个连续突发海浪,图 1.7 是当时军舰上拍到的画面,图中可以清晰地看见畸形波的高度不对称性^[10].



图 1.7 SS Spray 号军舰上观测到的畸形波

1995 年 1 月 1 日,畸形波袭击了北海水深为 70m 水域的 Draupner 石油平台,对设备造成了一定的损坏.平台上的测波仪记录了一个完整的畸形波序列.该波被命名为“Draupner wave”,即著名的“新年波”(new year wave),这是目前记录的最完整的畸形波,如图 1.8 所示.当时海面有效波高约为 11.9m,观测畸形波波高为 25.6m,波峰高 18.4m,波谷高 7.2m,有非常明显的不对称性^[11].

1995 年 2 月,巡洋舰 Queen Elizabeth II 号,在北大西洋的台风天气中,遭遇了一个 29m 高的巨浪,船体被损坏,庆幸的是事故中无人员伤亡.据该船船长回忆,当时船体发生了两次令人难以置信的“颤抖”,似乎经历了两次连续大浪的袭击^[12].

1996 年,在 Gelendzhik 附近的公海设置了定向乘波浮标 (directional wave rider

buoy), 可直接测量波浪参数, 包括波的传播方向. 数据每隔 3h 通过无线电传到岸上, 共记录了 15000 个波浪. 图 1.9 是在 2001 年 11 月 22 日记录的数据, 非正常波浪有以下特征: 最大波高 10.32m^[13].

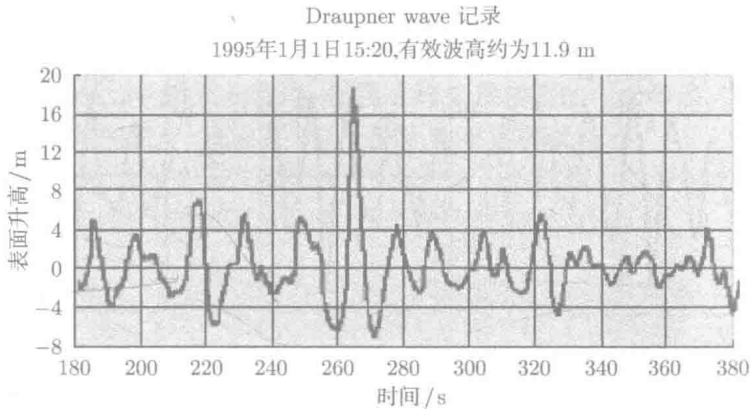


图 1.8 1995 年 1 月 1 日发生在北海 Draupner 平台的“新年波”畸形波

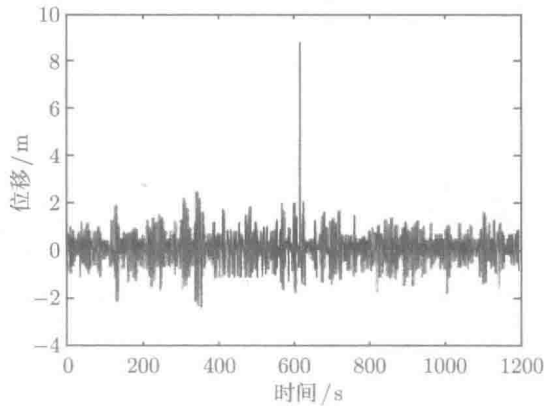


图 1.9 黑海畸形波的记录

2000 年 2 月英国海洋调查船在英国在苏格兰西部的罗卡尔进行科学调查观测到了高达 29.1m 的巨浪, 当时高达 21m/s 的风速持续了大约 2 天. 观测者一度认为这可能是科学仪器观测到的最大的波高^[14]. 图 1.10 是波浪的观测记录图.

2002 年 11 月 20 日, 在西班牙西北部的 Galicia 海域, Prestige 号油轮遭遇畸形波, 发生了严重的损坏, 70000t 原油倒入大西洋^[15], 如图 1.11 所示.

2005 年 1 月 27 日, 在距阿拉斯加阿留申群岛中 Adak 岛南端 650 英里海域, 一艘巡航船遭遇了一次 15m 巨浪的袭击, 巨浪不仅损坏了巡航船的控制系統还造成了两名船员受伤. 尽管没有关于当天波浪状况的详细信息, 但是在风暴期间, 该海域的有效波高最大值约为 7.2m. 之后大约两周 (2 月 14 日) 另一艘巡航船在地

中海遭遇风暴, 被 15m 的巨浪损坏, 当天该海域的最大有效波高仅 2.4m. 4 月 16 日, 从巴哈马群岛开往纽约的船, 在途中遭遇 21m 高的巨浪而受损, 被迫停下来紧急抢修, 波浪淹没了船舱, 造成乘客受伤, 该海域当天的最大有效波高约为 4m^[16].

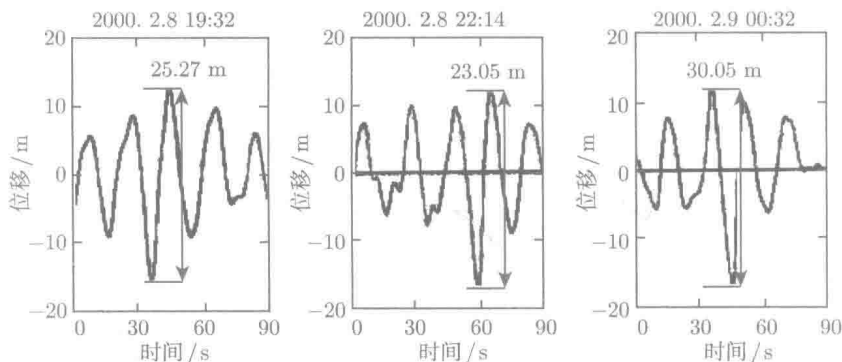


图 1.10 罗卡尔巨波记录

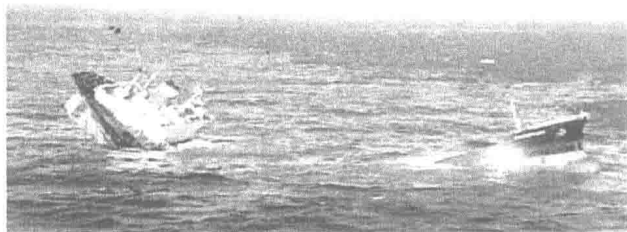


图 1.11 沉没的 Prestige 号油轮

2005 年 8 月 26 日, 在南非的 Kalk 海湾, 2 名游客在防波堤上被巨浪卷走, 该巨浪波高超过 9m, 该海域近岸处的有效波高约 4.5m, 参见图 1.12. 有资料显示, 1996 年 4 月 21 日, 该海域也发生过类似的畸形波伤人事件, 3 人被卷入海中, 仅 1 人获救^[16].



图 1.12 在 Kalk 湾一次超过 9m 高的畸形波将 2 个人从防波堤上卷入海中