

黑龙江省精品工程专项资金资助出版

自然科学学术文库

波物相互作用的全非线性 边界元数值方法与应用

BOUNDARY ELEMENT METHOD AND APPLICATION FOR FULLY
NONLINEAR WAVE-STRUCTURE INTERACTION

周斌珍 陈中飞 著

波
物
相
互
作
用



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

黑龙江省精品工程专项资金资助出版
自然科学学术文库

波物相互作用的全非线性边界元 数值方法与应用

周斌珍 陈中飞 著



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

本书阐述了基于势流理论假定建立的波浪与三维结构物全非线性相互作用的时域高阶边界元数值模型及其应用,总结了国内外研究人员和作者的最新研究成果,内容新颖、实用性较强,系统的分析评述有助于读者对内容的理解。

本书可供从事船舶与海洋工程、海岸与近海工程等学科方向的研究生及科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

波物相互作用的全非线性边界元数值方法与应用/
周斌珍,陈中飞著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,
2018. 2

ISBN 978 - 7 - 5661 - 1858 - 5

I. ①波… II. ①周… ②陈… III. ①波浪 - 相互作用 - 非线性 - 边界元法 IV. ①O353. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 045389 号

选题策划 夏飞洋 雷 霞

责任编辑 丁 伟

封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 mm × 960 mm 1/16
印 张 10.5
字 数 224 千字
版 次 2018 年 2 月第 1 版
印 次 2018 年 2 月第 1 次印刷
定 价 39.80 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

序 言

随着海洋开发逐渐向深海领域发展,面临的海洋环境条件更加恶劣,海洋工程领域需要解决的波浪的非线性效应更加显著。非线性波浪的高频分量容易诱发海洋结构物产生高频共振响应等现象,且随着水深的增加而加剧,对结构物的安全性构成重大威胁。目前,全非线性海洋水动力学的理论研究及其在工程中的应用已经成为国内外专家学者极为关注的前沿课题之一。随着计算机软硬件技术以及相关理论的进步和发展,采用一种合适的数值方法来模拟全非线性波浪与海洋结构物之间的相互作用成为可能,其中,边界元方法只需对边界进行离散和插值,使问题的维数降低一维,与有限元、有限差分等域内求解方法相比,未知量个数减少了,从而降低了存储量和计算量,应用起来更加简单和方便,因此,边界元法在波浪与结构物相互作用问题的研究中得到了广泛的应用。

本书基于势流理论假定,采用高阶边界元方法建立了波浪与三维结构物相互作用的全非线性时域高阶边界元数值模型,并给出了典型算例。本书共10章,第1章介绍了完全非线性波浪与结构物相互作用数值模型的发展现状、孤立波与结构物相互作用数值模型的发展现状以及海上结构物高频共振响应现象的研究现状;第2章论述了理想流体的控制方程,波动问题所满足的自由水面条件、物面条件、辐射边界条件和初始条件;第3章介绍了常用的非线性 Stokes 波浪理论、流函数波浪理论和孤立波理论;第4章阐述了波浪与三维物体相互作用的完全非线性数值模型的建立,介绍了边界积分方程的建立、离散、求解以及物体水动力荷载和运动响应的求解问题;第5章介绍了网格生成与更新方法;第6章介绍了水槽域波物作用完全非线性数值模型的建立,进而介绍了平台水槽和台阶式变深水槽内数值波浪的生成、水槽域波浪对固定物体的绕射作用以及水槽域波物作用数值模型的局限性;第7章介绍了开敞域淹没圆球、截断圆柱和倒圆台的全非线性强迫运动问题;第8章介绍了开敞域波物作用完全非线性数值模型的建立,进而介绍了开敞域 Stokes 波对固定物体的绕射作用以及 Stokes 波与浮体的完全非线性相互作用问题;第9章论述了水槽域孤立波与浮体相互作用完全非线性数值模型的建立,进而讨论了单个孤立波的传播、孤立波在直墙上的反射、孤立波对固定物体的绕射作用以及孤立波与浮体的相互作用问题;第10章介绍了开敞域张力腿平台高频共振运动响应的完全非线性时域模拟,探讨了入射波浪幅值和入射波浪频率对平台高频共振运动响应和张力腿张力的影响。

本书的出版旨在比较系统地介绍国内外学者在全非线性波浪与三维结构物相互作用方面的工作,特别是笔者多年来的研究成果,以利于读者在了解已有成果的基础上进行新的研究和探索,并有助于读者在工程实际中正确地理解和应用现有的研究成果。

本书内容包含了笔者自研究生到工作以来的主要科研成果,得到了博士生导师大连理工大学滕斌教授、硕士生导师大连理工大学宁德志教授、博士后导师哈尔滨工程大学吴国雄教授的悉心指导,同时在本书的编写过程中得到了哈尔滨工程大学船舶工程学院张亮教授的大力支持,在此一并深致谢意。

著 者

2017年12月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 背景和意义	1
1.2 波浪与结构物全非线性相互作用数值模型的发展现状	3
1.3 孤立波与结构物相互作用数值模型的发展现状	6
1.4 海上结构物高频共振响应现象的研究现状	7
第2章 水波理论基本方程	10
2.1 理想流体的控制方程	10
2.2 边界条件和初始条件	12
第3章 非线性波浪理论	15
3.1 Stokes 波浪理论	15
3.2 流函数波浪理论	19
3.3 孤立波理论	20
第4章 波浪与三维物体相互作用的时域高阶边界元理论	22
4.1 速度势的时域求解	22
4.2 坐标系选取和运动量的描述	28
4.3 物体水动力荷载和运动响应的求解	30
第5章 网格生成与更新方法	34
5.1 网格生成方法	34
5.2 网格更新方法	37
5.3 网格插值方法	41
第6章 水槽域全非线性波物作用模型及绕射问题求解	43
6.1 水槽域波物作用数值模型的建立	44
6.2 网格划分方法	48
6.3 平底水槽内数值波浪的生成	49
6.4 台阶式深水槽内波浪的生成	53
6.5 水槽域波浪对固定物体的绕射作用	56
6.6 水槽域波物作用数值模型的局限性	61
第7章 开敞域浮体强迫运动的全非线性数值模拟	65
7.1 浮体的强迫运动方程	66
7.2 淹没圆球的强迫运动	66
7.3 截断圆柱的强迫运动	71

7.4 倒置圆台的强迫运动	79
第8章 开敞域 Stokes 波与浮体全非线性相互作用	88
8.1 开敞域波物作用数值模型的建立	88
8.2 Stokes 波对固定物体的绕射作用	91
8.3 Stokes 波与浮体的全非线性相互作用	108
第9章 水槽域孤立波与浮体全非线性相互作用	124
9.1 孤立波与浮体作用数值模型的建立	124
9.2 单个孤立波的传播	125
9.3 孤立波在直墙上的反射	127
9.4 孤立波对固定物体的绕射作用	129
9.5 孤立波与浮体的全非线性相互作用	133
第10章 开敞域张力腿平台高频共振运动响应	137
10.1 基本假定和 ISSC TLP 平台参数	137
10.2 张力腿的受力	139
10.3 平台固有频率	140
10.4 黏性阻尼矩阵	143
10.5 平台高频共振运动响应现象	143
参考文献	152

第 1 章 绪 论

1.1 背景和意义

我国是世界上第二大石油消费国,其中一半左右的需求来源于进口。当前我国陆地油气资源匮乏,但海洋油气资源十分丰富。我国的南海有着丰富的油气资源,被称为世界四大油气聚集地之一,也是世界上公认的第二个“波斯湾”,其中 70% 的能源蕴藏于深海,因此南海是我国海洋石油可持续发展的最有前景的海域。南海深水油气开采的作业水深为 500 ~ 2 000 m,而我国现有的实际技术只达到了 330 m 水深,随着水深的增加,海洋油气开采的技术难度急剧增加,因此必须大力发展深海工程领域的基础研究。

对于深海油气资源的开发,安全、合理、经济地设计及建造海洋结构物是十分重要的,而准确地预报环境荷载,尤其是波浪荷载,是保证海洋结构物安全设计和可靠运营的首要前提。从 1954 年到 1982 年的 28 年间,全世界就有 36 座石油钻井平台因遭狂风恶浪的袭击而翻沉。在海洋上由狂风恶浪引起的海难,至今仍占世界上海难总数的 60% 以上。实际的海洋环境是十分复杂和恶劣的,随着海洋开发的日益发展,我们面临的海洋工作环境日益恶劣,要面对的波浪的非线性效应更加显著。而传统的分析方法都是在假定波浪非线性较小的基础上进行的,这样必然导致计算失效或计算精度不够,因此研究非线性波浪与结构物的相互作用对海岸工程和海洋工程具有重要的指导意义。随着数值计算方法的发展和电子计算机技术的突飞猛进,许多复杂的水波问题的研究已成为可能,但大部分的研究仍局限于非线性较小的水波问题,关于全非线性波浪与三维结构物的相互作用,目前仍是国内外众多专家学者探索的热点和难点。

基于黏性理论的三维非线性水动力问题十分复杂,对于波浪与大尺度物体的相互作用问题,波浪力中流体黏性的影响相对较小,忽略流体的黏性,仍然可以较准确地计算结构物所受的波浪荷载及其运动响应。基于此假定的势流理论已在数值计算中得到广泛应用,并为物理模型实验结果所验证。在忽略流体黏性的假定下,进一步假定流体无旋,不可压缩,流场可以通过速度势这一标量函数来描述,且速度势函数在整个流场内满足拉普拉斯(Laplace)方程。虽然控制方程是线性的,但边界条件是非线性的,正是边界条件的非线性造成了研究上的难度和问题表现上的丰富多彩。

许多情况下,可以用基于摄动展开的线性或二阶绕射和辐射理论来描述结构物的运动特性,但海洋工程中的许多现象又超过了二阶理论的范围,需要用更高阶的理论或全非线性理论来描述,如海上结构物的 ringing(高频共振响应)现象。ringing 现象是指海上结构物在高海况下产生的一种近似瞬态的高频共振响应,其频率远高于波浪特征频率,振动幅度可达到包括一阶、二阶波浪力及风动力共同作用达到的幅度^[1-2]。通过模型实验和现场观测发现,ringing 现象发生在低频、大振幅的大风浪中,ringing 现象产生的频率是对应入射波浪频率的 3~5 倍,这意味着三阶和更高阶波浪作用力是 ringing 现象的激振根源^[3]。深水海域复杂海洋环境使得海上结构物可能承受恶劣海况下极端波浪的作用,并产生瞬态高频共振响应,从而遭到巨大损失或破坏。由于结构物的高频共振响应引起的作用力危及深水大体积结构物(如张力腿平台和重力基础类结构)的安全,对海上结构物造成极大危害,而目前强非线性波浪作用下海上结构物高频共振响应产生的机理尚不明确,因此为了在工程实际中避免该现象的产生,对其进行系统的理论研究具有重要意义。

当流场中存在结构物时,结构物自身的运动特性、弹性变形及其与流体或相邻部件(如系泊系统)间的运动耦合也是导致非线性的重要因素。利用摄动展开法将波浪近似成线性、二阶甚至三阶来处理的方法,计算得到的波浪荷载已越来越不能满足当今海岸工程和海洋工程领域的精度要求。也就是说,仅仅在物体的运动幅度和波幅相对于波长或物体的特征长度很小时,基于摄动展开的线性、二阶或更高阶的水波绕射和辐射理论才有效。当超过这个条件时,就需要用全非线性水波模型来求解上述相应问题。

当今,全非线性海洋水动力学的理论研究及其在工程中的应用已经成为国内外专家学者极为关注的前沿课题之一,旨在揭示非线性波浪变形、演化及其与结构物、近岸地形的相互作用等方面的力学机理,提高对现象本质的反映水平和对工程设计条件确定的指导能力。全非线性理论严格满足瞬时自由水面和瞬时物面条件,需要解决瞬时水面和瞬时物体湿表面的网格重构,非线性波浪荷载的准确计算,自由液面的卷曲变形,庞大的计算量和存储量,数值计算的稳定性等问题。正是上述问题使得在很多物理现象中强非线性波浪与结构物相互作用的准确预测非常困难,大部分与之相关的学术研究也仅局限于二维物体或简单的三维物体。同时,截至目前,全非线性模型通常都是建立在数值波浪水槽中,由于数值波浪水槽存在侧壁反射、横向立波共振以及入射边界二次反射等问题,很难模拟实际开敞水域中波浪与结构物的相互作用问题,因此,建立一个与开敞水域中波浪和结构物相互作用更为相近的全非线性模型,准确预测实际海洋中强非线性波浪与结构物的相互作用,对海洋结构物的设计具有重要的指导意义。

1.2 波浪与结构物全非线性相互作用 数值模型的发展现状

关于全非线性波浪与海洋结构物的相互作用问题,国内外专家学者已经开展了一系列的研究工作,并成为该领域研究的热点问题之一。对于在真实海域中波浪与结构物的相互作用问题,流域相对于结构物的尺寸几乎是无限大的。为了实现数值计算,需要截取有限计算域,在截断边界上,必须保证由于物体的存在和运动产生的散射波浪被吸收,不能反射到计算域内。然而,在数值模拟过程中,入射波浪和散射波浪作为整体求解,难以在吸收散射波浪的同时,不影响入射波浪。其中一种广泛应用的方法是模拟物理实验,建立数值波浪水槽模型。此外,一些学者采用速度势分离法解决远场辐射边界条件问题,建立了开敞水域全非线性波作用的数值模型。

1.2.1 水槽域波浪与结构物全非线性相互作用数值模型的发展现状

全非线性理论最初由 Longuet-Higgins 等^[4]提出,应用边界元方法求解欧拉格式的流体场方程,对自由表面边界条件在时间上进行积分,采用拉格朗日坐标追踪流体质点,这就是著名的“混合欧拉-拉格朗日”方法(MEL)。随后许多学者通过各种数值方法对全非线性问题进行了研究,其中全非线性数值波浪水槽作为一种重要的手段,在二维和三维问题方面都得到了广泛的发展,以下主要介绍在三维问题方面的应用。

在纯波浪方面,Boo 等^[5]、Kim 等^[6]、Boo^[7]用不连续边界元方法对三维数值波浪水槽中全非线性不规则波问题进行了模拟,避免了角点问题;刘桦等^[8]利用高阶边界元法建立了数值波浪港池,对 Stokes 波和孤立波的非线性传播进行了模拟研究;Fochesato 等^[9]将快速多极子边界元法应用于模拟三维倾覆波问题;周斌珍等^[10-11]分别通过推板造波和源造波法生成波浪,建立了三维全非线性数值波浪水槽模型,对单向传播的规则波和不规则波进行了模拟研究;Xue 等^[12]、Grilli 等^[13]采用高阶边界元法,Yan 等^[14]利用有限元方法,对三维倾覆波在复杂地形上的传播进行了模拟研究;虽然以上建立的都是三维模型,但仅对单向传播的波浪进行了模拟,李金宣等^[15]通过高阶谱方法,模拟了聚焦波浪在不同方向分布时的产生和聚焦过程,研究了波浪的方向分布对聚焦波浪的波面、波峰最大值、聚焦点的偏移、波面参数及频谱的影响。

在波浪对固定物体的绕射作用方面,Ma 等^[16-17]利用有限元法对规则波浪在一个和两个圆柱周围的绕射作用问题进行了数值模拟;Xue 等^[18]采用高阶边界元法模拟了波浪对物体的绕射作用;宁德志^[19]采用高阶边界元法结合快速多级子方

法模拟了规则波与直立圆柱的绕射作用,从而使三维边界积分方程的计算量和存储量由 $O(N^2)$ 降低到近似 $O(N)$ 的线性关系(其中 N 为未知量个数),大大降低了对计算机的计算速度和存储能力的要求;Kim 等^[20]模拟了陡波作用下圆柱波浪爬高问题;Bai 等^[21]利用高阶边界元法结合分区技术对单向传播的规则波和聚焦波与直立圆柱的绕射作用进行了数值模拟;Bai 等^[22]将该模型应用于模拟四柱干涉现象;Wang 等^[23]采用有限元法对规则波与单个变截面圆柱的绕射作用进行了数值模拟;Wang 等^[24-25]将此方法应用于研究规则波浪对多个直立圆柱的绕射作用以及两物体之间的水波共振问题;桂琴琴等^[26]采用外域求解 Boussinesq 方程、内域求解欧拉方程的方法,建立了三维全非线性数值波浪水槽模型,并成功计算了固定箱型船体上的非线性波浪压力。以上研究仍仅局限于规则波浪对简单结构物的绕射作用,由于复杂结构物湿表面网格的重构较为复杂,目前这一方面还未得到广泛的应用。

在波浪与浮体相互作用方面,Tanizawa 等^[27]采用边界元法模拟了规则波与有航速的 Wigely 船的相互作用,由于对称性,物体仅在纵荡、垂荡和纵摇方向产生运动;Wu 等^[28]采用有限元方法对规则波与 FPSO 的相互作用问题进行了模拟,但只考虑了物体的纵荡运动;钱昆^[29]利用非均匀有理 B 样条的边界元法对规则波与漂浮圆柱的相互作用问题进行了模拟研究,但物体运动只考虑了纵荡和垂荡,未考虑转动,对于网格的处理方法尚不够成熟,不适用于复杂物体;Bai 等^[30]利用高阶边界元方法结合分区技术对规则波与漂浮均匀圆柱和变截面圆柱的相互作用问题进行了模拟研究,模型仍局限于规则波浪和简单物体;Ma 等^[31]采用准静态有限元法对单色波和双色波与 Spar 平台、单色波与一个和两个 Wigely 船的耦合运动问题进行了数值模拟,仅在初始时刻剖分一次网格,之后每一时刻只需要利用弹簧法移动自由水面和物面上的点即可,避免了网格的重新划分,有利于模拟波浪与复杂结构物的相互作用问题,但是物面采用弹簧近似法生成的动网格技术进行网格重构,网格的连接方式和节点数目保持不变,当物体大幅运动时,会引起物面网格和自由水面网格步长差距太大,影响数值计算精度,甚至导致数值计算不稳定,因此应该寻求通用性更强的网格重构技术,解决复杂结构物大幅运动时的网格重构问题。

1.2.2 开敞域波浪与结构物全非线性相互作用数值模型的发展现状

尽管全非线性数值波浪水槽模型得到了广泛的应用,但它与物理水槽一样,在模拟实际开敞水域中波浪与结构物相互作用时存在一定的局限性。Chen^[32]的研究结果表明,在大多数频率下,只要保证物体与水槽侧壁的间距足够大,就可以忽略水槽侧壁对物体受力的影响,然而当物体的尺寸增大或者频率增加时,为了避免水槽侧壁的反射影响或保证数值结果的收敛性,都需要增加水槽横向网格数量,从而增加了计算时间。且当入射波浪的频率与水槽固有模式的频率接近时,会引发水槽横向立波共振,从而显著影响了水槽中物体受到的波浪力,从图 1.1 可以看

出,当波浪频率等于水槽横向共振频率时, $kW/\pi = 2n(n=1,2,3,\dots)$,利用水槽计算的结果与开敞水域结果差别较大,并且对垂向力的影响更大。此外,当长时间模拟波浪与浮体相互作用时,从物体反射回来的波浪在入射边界形成二次反射,反射的重复出现将会使作用在结构物上的波浪扭曲,无法真实模拟开敞水域。

Di Mascio 等^[33]提出了速度势分离法,将总速度势分离成入射势和散射势。入射势通过理论解给定(Rienecker 等^[34]),建立关于散射势的定解问题。该方法在圆域内进行模拟,消波过程容易实现,便于长时间的模拟,且自由水面网格的划分只需考虑散射波的作用,散射波沿着计算圆域径向逐渐减小并趋于0,因此沿着计算圆域径向网格可以逐渐变疏,相比于数值波浪水槽,大大减少了网格数量,提高了计算效率。该方法被许多学者应用于解决非线性波浪对固定物体的绕射作用问题,如 Ferrant^[35-37]、Ducrozet 等^[38]。然而他们采用半混合欧拉-拉格朗日法(Semi-MEL)追踪自由水面流体质点,只允许水质点在垂直方向上运动,无法直接模拟物体运动问题,而采用全混合欧拉-拉格朗日法(MEL)追踪自由水面流体质点,可直接求解浮体任意运动问题。周斌珍等^[39]结合速度势分离法和 MEL 方法,建立了适用于开敞水域的全非线性波物作用数值模型,其中入射势通过五阶 Stokes 波浪理论解给定^[40],研究了全非线性波浪对圆柱的绕射作用,与已发表数值和实验结果进行对比,验证了模型的准确性。此外,该模型求解过程中需要已知每一时刻入射波浪的速度势、波面及其空间和时间的导数,且入射势需要在瞬时总波面上满足,因此需要已知入射波浪的理论解才能求解,当入射波浪理论解未知或入射波浪理论解的精度不满足计算精度要求时,必须寻找其他方法解决远场辐射边界条件问题。

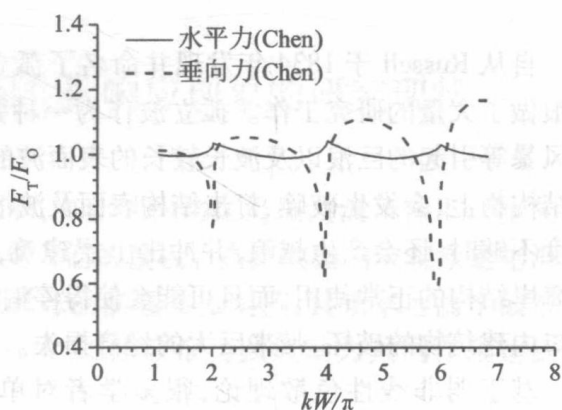


图 1.1 截断圆柱水平力和垂向力水槽结果 F_T 和开敞水域结果 F_0 的比值
(W 为水槽宽度, k 为波数)

1.3 孤立波与结构物相互作用 数值模型的发展现状

自从 Russell 于 1834 年发现并命名了孤立波以来,人们对孤立波这种特殊的波浪做了大量的研究工作。孤立波作为一种强非线性的波浪,可以用来描述海啸和风暴等引起的巨浪以及波长较长的表面波的某些特性。这种极限波浪作用于海洋结构物上,会发生破碎、打击结构表面及波浪上涌等复杂现象。当结构物的甲板高度不够时,还会产生越浪,并冲击上层建筑,造成损坏。这些现象不但会影响海洋海岸结构的正常使用,而且可能会使得停泊在港口内的船舶发生事故,甚至造成港口内建筑物的破坏,带来巨大的经济损失。

基于弱非线性色散理论,很多学者对单个孤立波进行了理论研究,如基于 Korteweg 等^[41]得到了一阶孤立波理论,也就是著名的 KdV 方程, Laitone^[42] 和 Grimshaw^[43] 分别得到了二阶和三阶孤立波理论。这些理论仅适用于孤立波波高相对较小的情况。Fenton^[44] 得到了九阶孤立波数值解。当边界满足全非线性条件,求解边界积分方程可得到孤立波的全非线性解,如 Tanaka's^[45] 和 Clamond 等。其中 Clamond 等^[46] 提供了 Matlab 的可执行程序,输入初始波高,即可得到相应的孤立波。此外,很多学者对两孤立波的迎面碰撞问题进行了研究,其中两个相同孤立波的迎面碰撞等价于孤立波在直墙的反射,此方面的工作大部分是二维问题。如 Maxworthy^[47] 和 Chen 等^[48] 开展了孤立波在直墙上反射的实验研究。Cooker 等^[49]、Craig 等^[50] 和 Chambarel 等^[51] 采用边界元对孤立波在直墙上反射问题进行了全非线性数值模拟研究,其中入射波通过孤立波的全非线性理论解给定^[45]。在理论研究方面,Su 等^[52] 基于摄动理论分析得到了两个孤立波迎面碰撞的三阶理论解。近年来随着计算机技术的发展,人们开始应用计算机模拟孤立波与结构物的相互作用问题。对于孤立波与固定圆柱的作用问题,Sun 等^[53] 采用有限元法研究了二维孤立波和结构物的非线性相互作用问题;Yates 等^[54] 开展了三维孤立波与固定直立圆柱绕射作用的实验研究;Mo 等^[55] 采用有限体积法模拟了孤立波与固定小尺度物体的作用;Zhao 等^[56]、Zhong 等^[57-58] 利用有限元法对三维孤立波和单个直立圆柱和多个直立圆柱的绕射作用问题进行了模拟研究;万德成等^[59] 应用 VOF 方法研究了孤立波翻越水下方柱流动的全过程,用人工压缩法和差分法求解二维 Navier - Stokes 方程,用施主 - 受主法求解流体体积函数控制方程,通过数值计算得到了孤立波翻越直立方柱的流场和压力值,并成功地模拟出波浪涌顶、水柱喷射、冲击和界面破碎的过程。Cao 等^[60] 利用 Reynolds - Average Navier - Stokes 模型开展了三维孤立波对单个直立圆柱的绕射作用问题研究。目前对于孤立波与运动物体的相互作用问题的研究十分少见,Isaacson^[61] 采用边界元法对三维孤立

波与运动物体的相互作用问题进行了研究,但文中给出的结果非常有限,且仅考虑了圆柱的垂荡运动。以上数值模型中,均采用孤立波一阶理论解作为入射边界条件。以上对孤立波与结构物的相互作用绝大部分局限于对固定物体的研究,且入射边界采用孤立波一阶理论解。

1.4 海上结构物高频共振响应现象的研究现状

随着海洋开发不断向深海领域发展,海上结构物在极端波浪条件下产生的瞬态的高频共振响应现象越来越多地受到人们的重视。高频共振响应现象是指海上结构物在恶劣海况下产生的一种近似瞬态的高频共振响应,其频率远高于波浪主导波的频率,其振动幅度可达到包括一阶、二阶波浪力及风动力共同作用达到的幅度。

早在1982年,Mercier^[62]在Hutton张力腿平台模型实验中初次发现这种高频共振响应现象,其频率远高于海浪主导波的频率,但当时并未引起人们的注意。1983年,Spidsøe等^[63]在分析1981年11月24日飓风过程中北海3个石油平台动力响应实测资料时也观测到了这种高频响应现象。Spidsøe等^[63]虽然确认了这种高频响应是一种非正态的共振响应,其动力响应峰值超过海浪线性理论得到的值,但仍未能合理解释这一现象。1990年,Nwogu等^[64]研究了高阶波浪力产生的响应,这一研究是对高频共振响应现象进行分析研究的重要开端。同期,Kim等^[65]通过研究发现,高频共振响应现象是一种高海况大波浪作用下产生的类似于瞬态的响应过程。为了进一步研究这一现象,他们在实验室根据Camille飓风的实测资料(发生在墨西哥湾)模拟了这种高海况海浪,并用Doppler激光流速仪对波峰处的速度场进行了精度很高的测量,说明了这种海浪是一种接近破碎的海浪,波峰处水平速度较大。

为了进一步研究这种高频共振响应现象,1993年由挪威石油管理局和英国健康与安全署等多家单位联合资助了一项名为“高阶波浪荷载对大体积结构物的影响”的研究项目^[66]。该项目对带有混凝土重力基础类的结构物(GBS)和张力腿平台(TLP)进行了一系列的现场观测、实验模型和数值模拟研究,在涉及高频共振响应现象的产生机理、响应强度、数值模型建立等方面做了许多工作,取得了一些成果^[67-70],并开始用“ringing”一词来命名这种高频共振响应现象。此外,Scolan等^[71]、Zang等^[72]在水池中对圆柱的ringing响应问题进行了实验研究,Grue等^[73]、Chaplin等^[74]、Grue等^[75]在水槽中对圆柱的ringing响应问题进行了实验研究,其中Chaplin等^[74]对底部与水槽底部铰接而顶端用弹簧和平板连接的不同直径的单桩在单个极端瞬态大波作用下产生的响应进行了研究。他们测得桩柱在静水面处的位移并计算得到桩柱在静水面处的加速度,发现桩柱在极端瞬态大波经过后产

生瞬态高频共振响应。Kim 等^[76]在实验室波浪水槽中对张力腿平台在三种典型的非对称波浪的作用下受到的波浪力和张力腿平台的响应进行了试验。这三种非对称波浪分别为强非对称的极端波浪、Stokes 五阶波和类似 Stokes 波的非线性不规则波。Zou 等^[77]研究了在实验室模拟的风暴海况下 ISSC 张力腿平台的高频共振现象。通过分析可知在风暴海况里的强非对称波浪击打张力腿平台的立柱时会产生高频共振现象。所有的弱非线性波浪只产生弹跳响应。在测得的波浪力中,非线性高频部分在产生大的高频共振运动和张力中起了重要作用。

通过模型实验和现场观测发现,ringing 现象产生的频率是对应入射波浪频率的 3~5 倍,这意味着三阶和更高阶波浪作用力是 ringing 现象的激振根源,因此,三阶波浪力的计算对预测 ringing 现象是十分有意义的。在过去十几年中,国际海洋工程界有几个研究组开展了 ringing 现象的研究,依据 ringing 现象发生在长波中的观测结果,Fatinsen 等^[78]提出了一个细圆柱的三阶波浪力计算方法,该方法完全忽略了二阶绕射势的影响,三阶波浪力采用 Morison 公式的扩展形式进行计算;Malanica 等^[79]根据已经建立的二阶半解析理论,建立了均匀圆柱三阶全绕射波浪力的计算方法;滕斌等^[3]利用自由水面上的三阶强迫项外推的方法,建立了一个轴对称物体三阶绕射波浪力的计算方法。以上方法都是基于频域理论建立的,只能用于计算简单物体的三阶波浪力,并且频域方法只适用于周期稳态问题,很难处理瞬变或者强非线性问题,在工程应用上受到很多限制。

在时域模拟方面,Lee 等^[80]利用有限元方法模拟非线性效应,在时域范围内给出了随机海浪中耦合 ISSC-TLP 系统的非线性相互作用力和响应的分析。庞红犁^[81]建立了单自由度小尺度桩柱振动模型,在二维全非线性数值波浪水槽中模拟了圆柱在极端波浪作用下产生的高频共振响应。通过分析可知,极端波浪具有强非线性和非对称性,包含接近于或整数倍于结构物自振频率的高频成分。Srinivasan 等^[82]对等边三角形布置的 TLP 平台的 ringing 现象和 springing 现象进行了模拟研究。以上模型都是基于 Morison 方程,同时通过不同方式加以修正,从而计算作用在物体上的波浪力。然而海上结构物也不尽是小尺度结构,采用 Morison 公式计算波浪力忽略了结构物存在对波浪形态的影响。海上结构物高频共振响应首先在张力腿平台中发现,由于张力腿平台为大体积结构物,其本体尺度较大,因此需要考虑波浪和结构物的耦合作用,考虑结构物存在对波浪形态的影响。

根据前人关于海上结构物高频共振响应的研究工作所取得的研究成果,可以得到高频共振响应现象的一些特征^[81]:

- (1) 高频共振响应通常从产生至达到最大值只需 2~3 个波浪周期。
- (2) 高频共振响应对张力腿平台的纵摇和横摇影响很大,而对艏摇几乎不影响。
- (3) 高频共振响应的统计分布表现出很强的偏态,其最大值和标准值之比的典型值可达 7~11,而 Springing 响应的最大值和标准值之比的典型值为 4。

(4) 高频共振响应与海浪的非线性特性密切相关, 研究人员指出强非对称海浪引起的冲击力能引起高频共振响应, 且响应极其依赖于波浪速度和方向。

(5) 高频共振响应对海浪水质点的运动特性极其敏感。

(6) 高频共振响应对结构物的固有频率极其敏感。

目前对于高频共振响应现象数值方面的模拟大部分局限于小尺度物体, 而高频共振响应现象的模拟涉及强非线性波浪与结构物相互作用问题, 因此建立非线性水波模型来模拟这一现象是非常有必要的。海上结构物高频共振响应的影响因素很多, 本书仅从波浪的非线性特性角度来分析高频共振响应现象产生的机理。

第2章 水波理论基本方程

在波浪与结构物相互作用的研究中,通常假定流体均匀、不可压缩、无黏和无旋,且忽略表面张力,这样的流场可以用势流理论进行分析。求解一个势流方程的完整数学问题也就是求相应边界条件下 Laplace 方程的解。对于任意一个给定的势流问题,很难直接求得其解析解,所以往往是采用数值方法进行求解。流场中的速度势除应满足 Laplace 方程外,还应满足非线性自由水面条件、水底条件、瞬时物面条件以及适当的辐射条件等。为此,本章将简单叙述理想流体的控制方程,波动问题所满足的自由水面条件、物面条件、辐射边界条件和初始条件。

2.1 理想流体的控制方程

在波浪与海洋工程结构物相互作用问题中,水密度的变化通常可以忽略不计,因此模型满足基本的流体质量守恒和动量守恒定律。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.1)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \right) \mathbf{u} = - \nabla \left(\frac{p}{\rho} + gz \right) + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.2)$$

式中, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)^T$; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; $\mathbf{u}(x, y, z, t) = (u, v, w)$ 为速度矢量; p 为压力; ρ 为流体密度; g 为重力加速度; ν 为运动黏性系数。式(2.2)称为耐维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程。

定义涡量矢量 $\boldsymbol{\Omega}$ 为速度矢量的旋度

$$\boldsymbol{\Omega} = \nabla \times \mathbf{u} \quad (2.3)$$

它是当地转动速率的两倍。取式(2.2)的旋度,利用式(2.1),可得

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \right) \boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nu \nabla^2 \boldsymbol{\Omega} \quad (2.4)$$

从物理上看,这一方程意味着:跟随着运动流体的涡量的变化率分别由涡线的伸缩扭曲(右端第一项)、黏性扩散(右端第二项)产生。在水中 ν 值很小($\sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$),除了在速度梯度很大和涡量很大的区域中以外,式(2.4)的末项可以忽略。也就是说,除了在很薄的边界层中以外,忽略黏性有良好的近似,式(2.4)变成

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \right) \boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla \mathbf{u} \quad (2.5)$$

以涡量矢量点乘式(2.5),得到