

马小剑 著

开敞式码头 系泊船运动响应 及缆绳张力研究

马小剑 著

开敞式码头 系泊船运动响应 及缆绳张力研究



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江

图书在版编目(CIP)数据

开敞式码头系泊船运动响应及缆绳张力研究 / 马小剑著. — 镇江 : 江苏大学出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-5684-0664-2

I. ①开… II. ①马… III. ①码头—系泊设备—关系—船舶运动—动力学—研究②码头—缆索—关系—船舶运动—动力学—研究 IV. ①U653.2②U656.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 304062 号

开敞式码头系泊船运动响应及缆绳张力研究

Kaichangshi Matou Xibochuan Yundong Xiangying Ji Lansheng Zhangli Yanjiu

著 者/马小剑

责任编辑/郑芳媛 吴昌兴

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

开 本/718 mm×1 000mm 1/16

印 张/9

字 数/134 千字

版 次/2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0664-2

定 价/28.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前言

船舶在码头前的运动响应及缆绳张力是港口设计和运营过程中的关键问题,直接关系到码头结构和货物装卸作业的安全。准确地预报码头前系泊船的运动响应及缆绳张力,对保证船舶的装卸货物、港口运营安全是至关重要的。本书通过数值模拟方法针对不同泊位长度、不同横缆墩墩位布置下风、流、规则波浪、不规则波浪包括波群作用下的系泊船的运动响应及缆绳张力进行深入研究,旨在加深对系泊船运动响应的理解,预报复杂海洋环境条件下,船舶在系缆状态时的运动响应和缆绳张力,为港口设计部门和运营部门提供科学依据。

首先建立了风和流联合作用下系泊船缆力和位移的数值模型,旨在为工程设计提供快速、有效的计算手段。风与流对船舶的作用力由经验性公式计算得到,采用考虑了缆绳非线性变形的 Wilson 公式计算缆绳张力和考虑非线性影响的变形与撞击力关系计算护舷撞击力及撞击能量,对多缆绳和多护舷的超静定系泊系统作静力平衡计算,最后得到缆绳张力和系泊船的位移。模型的模拟结果与实验结果、商业软件 Optimoor 计算结果、第三方实验值分别进行了对比验证,证明了本模型模拟结果的正确性及有效性。应用本模型对风和流作用下不同泊位长度和横缆墩墩位布置的码头系泊船的缆绳张力进行对比计算,并分析泊位长度与横缆墩位置和系缆力分布的变化规律。

其次,基于势流理论,应用三维源汇分布法,采用 Cummins 的理论,通过快速傅里叶变换将频域内采用边界元方法计算得到的船舶附加质量、阻尼、一阶波浪力和二阶平均波浪力的结果转变到时域内,建立了时域系

泊船的运动响应模型。通过与漂浮半球、大尺度漂浮驳船和物理模型试验结果对比验证了时域模型。应用时域模型研究了初张力、缆绳材料、风、流等影响因素对船舶运动响应和缆绳张力的影响,并对风、流、规则波浪、不规则波浪作用下4种泊位长度、3种横缆长度、3种系缆方式下的缆绳张力及系船墩的布置进行了对比研究,分析了上述因素对缆绳张力和运动响应的影响,以减少船舶运动量,提高装卸效率与均衡缆绳张力分布,以减少断缆事件为优化原则,针对本书的码头布置,提出了码头泊位长度及横缆系缆墩位置的优化方案。

波群是海洋波浪场中的重要特性,其对海上系泊浮体、防波堤的动力反应有直接影响。作者采用模拟波浪频谱和波包谱的方法,模拟出具有同一有效波高、有效周期但不同群性的随机波列,研究了群高参数 GFH 、群长参数 GLF 、不同波浪入射角及波群波列作用下系泊船的运动响应、缆绳张力和护舷撞击力。现有数值结果表明波群对系泊船的运动响应和缆绳张力的影响不可忽略,对系泊系统有很大的破坏作用,会引起系泊系统在自身频率附近的共振,并研究了引起系缆状态下船舶共振的相关原因。

最后,详细分析了谱峰因子 γ 、群高因子 GFH 、群长因子 GLF 与波浪特征波高之间的关系,并在考虑二阶差频波浪力的基础上,分析了谱峰因子 γ 对船舶运动响应的影响。

目 录

1 绪 论 / 001

1.1 研究背景和意义 / 001

1.1.1 研究背景 / 001

1.1.2 研究意义 / 002

1.2 研究综述 / 003

1.2.1 码头前系泊船运动响应及缆绳张力的数值研究 / 004

1.2.2 波群对系泊船运动响应的作用 / 009

1.2.3 码头前系泊船的物理模型试验研究 / 010

1.3 研究内容 / 012

2 风和流作用下系泊船的位移及缆绳张力研究 / 014

2.1 数值模型的建立 / 015

2.1.1 坐标系 / 015

2.1.2 船舶受力分析 / 015

2.1.3 缆绳对系泊船的作用力及力矩 / 018

2.1.4 船舶对护舷撞击力及力矩 / 019

2.1.5 水体对系泊船的恢复力矩 / 020

2.2 风和流作用下系泊船非线性方程求解 / 021

2.3 数值模型验证 / 022

2.3.1 计算结果与文献结果对比 / 022

2.3.2 计算结果与规范流力公式、试验结果和商业软件 Opti-moor 对比 / 024

- 2.3.3 计算结果与第三方试验结果对比 / 027
- 2.4 风和流作用下多种泊位长度和系缆方式的比较研究 / 028
 - 2.4.1 数值模拟条件 / 030
 - 2.4.2 数值模拟结果与分析 / 032
- 2.5 本章小结 / 036
- 3 规则波及风、流联合作用下系泊船的时域响应及缆绳张力研究 / 038
 - 3.1 基本假定和坐标定义 / 039
 - 3.2 控制方程和定解条件 / 040
 - 3.3 二阶平均漂移力 / 043
 - 3.4 时域波浪力计算 / 045
 - 3.5 风力、流力 / 045
 - 3.6 黏性阻尼 / 046
 - 3.7 时域下的水动力系数 / 048
 - 3.8 系泊船运动方程 / 050
 - 3.9 数值模型验证 / 052
 - 3.10 数值模拟 / 059
 - 3.10.1 二阶平均漂移力的影响 / 059
 - 3.10.2 初张力的影响 / 061
 - 3.10.3 缆绳材料的影响 / 062
 - 3.10.4 不同流速的影响 / 063
 - 3.10.5 不同风速的影响 / 065
 - 3.10.6 规则波、风、流作用下泊位长度及横缆墩墩位布置的优化研究 / 066
 - 3.11 本章小结 / 076
- 4 不规则波浪及风、流联合作用下系泊船的运动响应及缆绳张力研究 / 078
 - 4.1 数值模型的建立 / 078

- 4.1.1 坐标系 / 078
- 4.1.2 运动方程 / 079
- 4.1.3 时域波浪力计算 / 079
- 4.1.4 缆绳对系泊船的作用力及力矩 / 080
- 4.1.5 船舶对护舷撞击力和力矩 / 080
- 4.2 数值模型验证 / 081
- 4.3 不规则波浪、风与流联合作用下系泊船的运动响应及缆绳张力分析 / 083
- 4.4 本章小结 / 088
- 5 波群与系泊船的相互作用及缆绳张力研究 / 089
 - 5.1 数值模型 / 090
 - 5.1.1 波浪力计算 / 090
 - 5.1.2 波群波面模拟 / 090
 - 5.2 数值模拟 / 093
 - 5.3 横浪作用下系泊船的运动响应及缆绳张力 / 094
 - 5.3.1 不同群性参数下系泊船的缆绳张力 / 097
 - 5.3.2 不同群性参数下系泊船的运动响应 / 099
 - 5.4 顺浪作用下系泊船的运动响应 / 101
 - 5.4.1 不同群高因子 GFH 下系泊船的运动响应 / 101
 - 5.4.2 数值结果分析 / 105
 - 5.5 本章小结 / 108
- 6 波浪群性与波浪统计特征值之间的关系及对船舶运动的影响 / 109
 - 6.1 波浪群性对波浪特征波高的影响 / 109
 - 6.1.1 谱峰因子 γ 与波浪特征波高的关系 / 109
 - 6.1.2 群性参数 GFH 、 GLF 与波浪特征波高的关系 / 113
 - 6.2 谱峰因子 γ 对油轮运动响应的影响 / 115
 - 6.2.1 差频波浪力计算 / 115

6.2.2 数值模拟结果 / 116

6.3 本章小结 / 119

7 结论与展望 / 120

7.1 结 论 / 120

7.2 展 望 / 123

参考文献 / 124

附录 Filon 积分 / 134

1 绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

随着经济的飞速发展,中国已成为最重要的海运大国之一,约 90% 的进出口货物都是利用海上运输完成的。港口是水路交通的枢纽,供船舶安全进出、停泊、装卸货物和补给给养的场所,是支撑国民经济和社会发展的基础设施,对于经济发展、社会进步,乃至国家综合实力的提升都具有十分重要的作用。

经过几代港口科研工作者、设计和施工人员 40 多年的努力,中国建成了一批世界级的大港,取得了举世瞩目的成就,其中离岸式深水港码头工程的建设水平也有了相应的发展,这对技术创新提出了新的要求。港口岸线作为海洋资源的重要组成部分,是宝贵的资源,具有不可再生性和稀缺性。但我国过去持续 30 多年的建港高潮,使得适宜建设深水码头的岸线资源已经基本开发完毕,为了满足迅速增长的贸易运输需求,必须不断地新建更大规模、现代化程度更高的深水港口,这也迫使港口建设向深水式、离岸式发展。然而,当前条件下深水式、离岸式的港口建设面临诸多新挑战,与传统港口相比,离岸式码头常采用开敞式设计,缺少防波堤的掩护。其作业环境恶劣(风大、浪高、流急),以及气象、水文(浪、流、潮)、地质等基础资料的获得相对困难、精确度低;不确定性因素多,如船

舶失控撞击等,故港口设计理念、计算模式与方法均有较大变化。因为影响系泊的因素多且复杂,已建成的某些开敞式码头常发生断缆事件,给码头安全生产带来隐患。图 1.1 所示为典型开敞式码头。

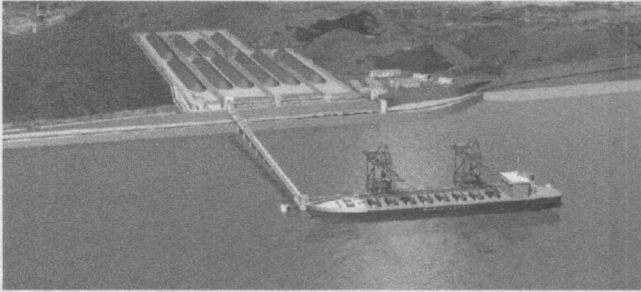


图 1.1 典型开敞式码头

码头数字化、智能化的发展趋势对大型深水港船舶系泊稳定性提出更高的要求。因此,需要更准确确定船舶码头前运动响应及系缆力。开敞式码头前船舶运动响应及缆绳张力的研究为我国港口今后大规模的建设提供技术保障和支持。

1.1.2 研究意义

目前我国对开敞式港口的认识、经验存在不足,影响系泊船舶稳的因素很多,尤其是波浪具有随机性、多向性,使得船舶的运动响应更加复杂。在上述背景下开展开敞式码头系泊研究,旨在依托工程基础上加深对码头前系泊船舶稳的理解,预报系泊船的运动响应,为我国的港口建设提供有力的技术支持和保障。

从 20 世纪 70 年代开始,国外学者使用数学模型开展了波浪作用下码头前系泊船运动响应及缆绳张力的工作。边界元具有将问题降维,减小计算量和机时的特点,在本领域内使用最为广泛与常见。之前也有学者提出了完全非线性数值波浪水槽等方法,但考虑到计算量与可行性,大型浮体结构物与波浪的相互作用问题还是以间接时域法为主。波浪是码头前系泊船主要的环境动载荷,学者对其做了许多研究,但目前开展的工作集中于随机波浪作用下的系泊船运动响应及缆绳张力,并没有考虑海洋波浪场中群性这一重要特性。目前已有试验数据表明群性对防波堤及浮

体的动力响应有直接作用。本书采用模拟频谱与波包谱相结合的方法模拟波群波列,开展了波浪群性与系泊船及系缆力的研究,提出了群高参数 GFH 和群长参数 GLF 随运动响应的变化规律并指出了系泊船运动响应的特性。

由于缺少了防波堤的掩护及规则岸壁对流场的约束,与有防波堤掩护的内港池相比,外海开敞式码头船舶停泊水域的风、浪、流自然环境条件呈现大小、方向随机性较强的复杂现象,给外海开敞式码头设计带来了特殊的问题。一旦船舶承受外力较大,极易发生船舶位移过大而引发断缆及工艺设备损坏等问题,因此研究如何在特定的环境下使船舶受外力最小、位移量最小从而提高装卸效率和均衡缆绳张力分布,降低事故发生的风险就变得十分迫切。本书对风、浪、流联合作用下纯风、流作用下的系泊船,基于船舶运动量最小,提高装卸效率与均衡各个缆绳张力,减少事故为优化原则提出了泊位长度、系缆方式、横缆墩的位置布置的优化设计方案。

风与流对系泊船的作用力,较多采用经验性公式计算得到,风、流作用下的计算模型较少且未考虑缆绳与护舷非线性变形的影响。本书建立了风、流作用下考虑缆绳与护舷非线性影响的系泊船缆绳张力及位移的数值模型,利用模型对泊位优化方面做了一些研究。

1.2 研究综述

船舶在码头前的运动响应及缆绳张力是港口设计和运营阶段的关键问题。随着近岸深水岸线的减少及船舶大型化的发展,港口建设日益向作业条件更加恶劣的深水区开发,大型船舶的系泊安全成为关注的焦点之一。影响船舶系泊安全的因素较多且问题本身的复杂性,已建成的若干开敞式码头都发生过断缆事故。目前大型开敞式码头的系泊问题研究还不成熟,亟须对这一问题进行深入研究。开敞式码头前船舶的运动响应问题涉及的影响因素很多,除了环境载荷风、浪、流 3 者外,还包括码头系泊布置方式、船舶的类型、吨位、缆绳类型、缆绳数量、缆绳初张力、护舷

类型和数量及布置方式、水深等。船舶在码头前除了受到非线性波浪作用力外,还受到护舷和缆绳的约束,以上 2 者的作用力都是非线性的,而且在船舶运动的过程中会出现缆绳松弛现象,由船、缆绳、护舷 3 者组成的系泊系统具有较强的非线性特性,因此系缆状态下船舶的运动特点不再是简单的简谐运动,而是非线性的。

本书研究内容主要集中在风、浪、流作用下船舶的运动响应,研究主要采用物理模型试验和数学模型计算 2 种手段。模型是对实际工程问题高度的抽象及概况,包括 2 类:第一类数值模型;第二类物理模型。物理模型造价高、方案更改周期较长,但其可信度较高,能比较准确地反映实际情况;数值模型是在对实际工程问题机理进行抽象的基础上建立起来的数学物理方程,具有快速、经济、方案更改周期短的特点。

1.2.1 码头前系泊船运动响应及缆绳张力的数值研究

基于数值模型可以弥补物理模型中的不足,而码头和船舶的特性可以根据实际情况在模型中给出,缆绳和护舷的强非线性的变形与力关系可以根据实际护舷型号给出。物理模型试验需要花费大量的人力、物力、财力,耗时耗力,特别是为了提高试验的精确度需要花费较高的试验费用。随着计算机计算能力的提高和数值方法的发展,研究人员对系泊问题的认识更为深入,数值方法受到学者越来越多的重视,数值方法成为港口设计、运营阶段必不可少的一部分。目前系靠泊状态时船舶受到环境载荷主要是风、浪、流 3 种因素,其中风力与流力一般按照静力方式处理,由经验性计算公式计算得到,而波浪力是唯一的动载荷。开敞式码头前系泊船的运动响应问题可以归结为波浪与建筑物相互作用的问题。目前波浪与建筑物相互作用问题的数值方法有边界元方法(BEM)(Hess J L; Garrison C J; Lee C H 等; Teng B 等)、有限元(FEM)(Ma Q W 等;王赤忠等)、有限差分(FDM)(邹志利等;Wang Y 等;Welch J E 等)及最近比较热门的无网格法(SPH)(Monaghan J J 等;Müller M 等;李玉成等)。

边界元方法能使问题降维,当遇到各维尺度相近的大型问题,代数方程组的未知数将会按照指数规律减少,这大大减少了存储量和机时,基于此特点,波浪对建筑物作用的问题中边界元方法使用最多,且最为常见。

码头前系泊船运动响应有非线性特性,不能用频域方法求解而需要在时域内求解。目前时域方法有间接时域法和直接时域法,其中直接时域法有由 Isaacson M 应用简单格林函数和摄动展开理论建立的简单格林函数法,也有 Beck R F 和 Lin W M 等提出的满足自由水面条件的格林函数方法,刘应中导出了适合无限水深和有限水深的时域积分方程,此方法需要在自由表面上格林函数对时间和空间的导数。虽然学者提出了完全非线性数值波浪水槽等方法,但由于计算工作量大的原因,码头前系泊船运动响应问题考虑到计算量和可行性,还是以间接时域法为主。间接时域法是由 Cummins W E 在 1962 年提出的,它利用频域下的激振力、附加质量和辐射阻尼通过傅里叶变换求得时域下的波浪力、附加质量、迟滞函数,最后通过时域运动方程求得浮体的运动响应及系泊系统的内部的应力。这方面的工作国外开展较早,于 20 世纪 70 年代中期利用数学模型模拟了在波浪作用下码头前系泊船的运动、缆绳张力、护舷的作用力。Van Oortmerssen G 在 1979 年的报告中,详尽叙述了采用 Cummins 提出的方法首次建立了波浪作用下系泊船运动响应的数学模型,进行了物理模型试验并与数值结果进行了对比。Wichers 用间接时域法研究了风、流、浪联合作用下单点系泊中船舶的运动响应。

在这个领域多年研究的基础上,一些国外大学教授与商业公司联手开发了码头船舶缆绳张力的计算软件,例如 TermSim(荷兰 MARIN)、Optimoor(美国 TTI 公司)、PcSmart(美国 Exxon Research and Engineering)。由于系泊问题本身的复杂性,软件开发者对缆绳约束下港内水域中船舶运动与系缆力的问题进行了必要的简化,其软件均只考虑缆绳的静张力,暂不考虑波浪激振力对缆绳的动态作用,这是基于一般港内水域波浪波高都比较小,船舶的主要环境载荷来自于潮流与风的假定。美国 TTI 公司在这方面做了较多的工作,国内港航领域的大型设计院购买了美国 TTI 公司开发的商业软件 Optimoor,据设计人员使用后反馈,此软件能较准确地计算风、流下系泊船的缆绳张力,但对波浪作用下系泊船的缆绳张力暂时难以得到令人满意的结果。

部分国内大学和研究所的学者对不同环境荷载作用时系泊船运动及

系缆力也做了类似的研究工作。向溢等在国外学者研究基础上对系泊船的缆绳张力的数学模型进行了适当地简化,其假定暂不考虑波浪激振力的作用,风、流对船舶的作用力以静力方式处理由经验性公式计算,用蒙特卡罗数值方法和混沌算法求解系泊船的超静定静力平衡方程。数学模型中波浪力采用经验性公式计算得到,缆力只考虑静张力,护舷作用力只考虑线性力,这种方法仅适用于港内波浪不大时的工况,与商业软件 Optimoor 有类似的适用范围。

为弥补 Optimoor 等模型未考虑波浪对船舶运动及缆绳张力动态作用的缺陷,部分学者采用时域模型做了相关的工作,例如邹志利等利用系泊船运动方程和相关的国际通用公式研究了风、浪、流作用下系泊船的系缆力,讨论了不同水位与风、浪、流夹角对系缆力的影响,得到以下结论:①高潮位时缆绳拉力稍大,但水位对缆力影响不大;②在风、浪、流不同方向的组合中,3者同向时产生的缆绳力最大;③船舶压载比满载时运动幅值大,缆绳力也较大。在此基础上又考虑了二阶平均漂移力作用时系泊船运动响应、缆绳张力及护舷的碰撞力,并讨论了环境因素,例如水位、风向、流向、来浪向等,对缆绳张力和碰撞力的影响。黄明汉和邹志利将流场划分成船底与水底组成的内场和船侧面的外场,内场采用简单的解析方法,外场采用在船体水面周线上分布点源的快速计算方法,研究了多船和多墩柱相互作用的问题。信书等利用 B 样条曲面方法做船体表面造型和高阶边界元方法,研究了烟大轮渡下系泊船的运动响应及系缆力。聂孟喜等为解决海洋工程中系泊系统在风、浪、流等环境荷载下系泊力的计算问题在时域内建立了一种计算防风、水鼓系泊力的方法。采用设计波法和非线性 Stocks 五阶波,分析了波浪荷载,由经验性公式计算风与流的作用力,准静态方法计算初始条件,忽略了水鼓和锚链动态效应对船舶运动的影响,得到了系泊力和船舶运动的时间历程,由二维集中质量法建立锚链和水鼓的数学模型,用 Houbolt 方法求解了锚链和水鼓的运动方法,并对系泊力进行了修正。聂孟喜等和张琳在时域内建立了单锚腿系泊系统在风、浪、流作用下动力响应的计算方法,静态法得到系泊力后,用 Runge - Kutta 法求解系泊系统的运动响应并成为浮筒和立管的边界条

件,浮筒的运动方程由 Wilson- θ 法求解。李欣等和王磊等应用三维线性理论和 Pinkster 近场方法,研究了浅水工况下,水深对FPSO 二阶慢漂力的影响,研究表明,在浅水条件下,FPSO 的水平面运动随着水深的减小而趋于增大,浅水工况时水深对二阶力影响明显。孟祥玮等提出了计算船舶波浪总力的公式。肖龙飞等对 FPSO 在一年一遇、十年一遇、百年一遇环境条件下,应用三维势流理论及时域计算方法对船舶运动响应及船底与海底间隙进行了数值模拟研究。Sakakibana 等采用数值模型与港口原型观测相结合的方法,提出长周期波浪或港湾共振会引起系泊船纵移方向上的低频运动,并认为应采用非对称系缆方式以避免低频运动。Sakakibana 等采用混合势流理论并在 Sakakibana 等的基础上改进了流的计算方法,研究了海啸作用时系泊船的运动。

随着海洋工程的发展和海洋资源的开发利用加剧,圆柱墩群这一类型的结构形式越来越多地在海洋工程中得到应用。海洋平台的水下结构较多采用圆柱墩这一结构形式。首先开展这方面研究的是 Mac Camy 等给出了单个圆柱墩的微幅波绕射理论,但其没有考虑多个圆柱墩之间的相互作用问题。Chakrabarti 等由 Spring 理论通过复变方法求解多圆柱速度势的系数矩阵。邱大洪和朱大同根据前面的理论,计算了多个圆柱墩群上的波浪力。

目前最新的研究成果表明,在某些特定的波长范围内,因多个物体的相互遮蔽效益和干扰,波浪力和多个物体的分布形式与参数和数值方法相关性很高,对其进一步的深入研究非常必要。缪国平和 Linton 等给出了4个圆柱上的波浪力,高永祥等也做了同样的研究工作,并给出4个圆柱面上的压力分布及群墩柱上总波浪力的计算公式。

随着波浪中单个物体水动力问题研究日趋成熟,越来越多的研究者将研究方向转向2艘船或船与其他建筑物之间的相互作用问题。Ohkusu 采用系列展开法研究了2个相互连接的圆柱体上的水动力问题,并采用近似方法给出了船体在1个结构物体周围的摇荡值。其优点在于不必因物体间距改变,重复满足运动学边界条件来求解,但此方法对求解任意形状的结构物的干扰有难度。Van Oortmerssen 采用三维源汇法计算了圆柱

与方箱的相互干扰水动力,并与模型试验结果进行了对比,但他未将方法推广应用于船体形状的结构物。Duncan 等在 Van Oortmerssen 的基础上计算了两艘船耦合运动的问题,考虑了锚泊时 2 艘船的运动响应,并讨论了水深工况时无航速船在相当靠近时的干扰问题。Fang 和 Kim 把二维切片理论计算结果与试验结果进行了比较,两者吻合较好。Williams 和 Rangappa 采用修正平面波方法计算了多个半浸圆柱结构物组成的多层海洋平台的水动力荷载和附加质量阻尼系数。

有航速的两船体水动力干扰问题的研究发展比较晚,20 世纪 70 年代开始才有相关的文献报道。Yeung 依据细长体假定,将浅水中航行的 2 艘船的三维问题转换成 2 个内部问题和 1 个外部问题,导出了一对耦合的积分-微分方程,利用匹配渐进展开法求解未知的横向流问题。Fang 采用二维方法预测了在斜浪中航行的 2 艘船只水动力干扰问题,深入研究了两船体的间距和航速对绕射力的影响。Chen 和 Fang 为了弥补之前方法存在的误差,例如对流项的特殊处理引起的结果误差,基于三维脉动源分布面元法分析有航速下相隔一定距离时的水动力干扰问题。谢楠等基于三维势流理论,在两浮体湿表面上布置源和汇求解了绕射和辐射波浪场,将两船体用线性弹簧连接求解了 2 个浮体在规则波下的运动方程,并采用叠加原理计算了运动响应和碰撞概率,模拟结果与海上补给模型试验结果进行了初步验证,吻合较好。Li L 研究了有限水深与浅水情况下自由面格林函数,并基于三维频域理论研究了浅水及有限水深中 2 艘船体在波浪中的水动力干扰问题。

波浪在非恒定水深海底的传播与变形是近海工程中的一个热点问题。Chiang 等认为波浪由外海向海岸的传播过程中,由于受到地形变化的影响,将发生折射、反射及绕射现象,反射形状变化严重,波浪的非线性变得非常复杂。为了考虑地形对其的影响,部分学者采用耦合模型来研究波浪传播和波浪与物体相互作用的问题。Takagi 等在外域用缓坡方程,内域用三维边界元方法模拟港口内船舶和波浪的相互作用。Jiang 等应用 Boussinesq 浅水波理论与扩展细长理论匹配模拟了船舶在静水中运动产生的波浪。齐鹏等建立了外场用差分求解 Boussinesq 方程,内场用差