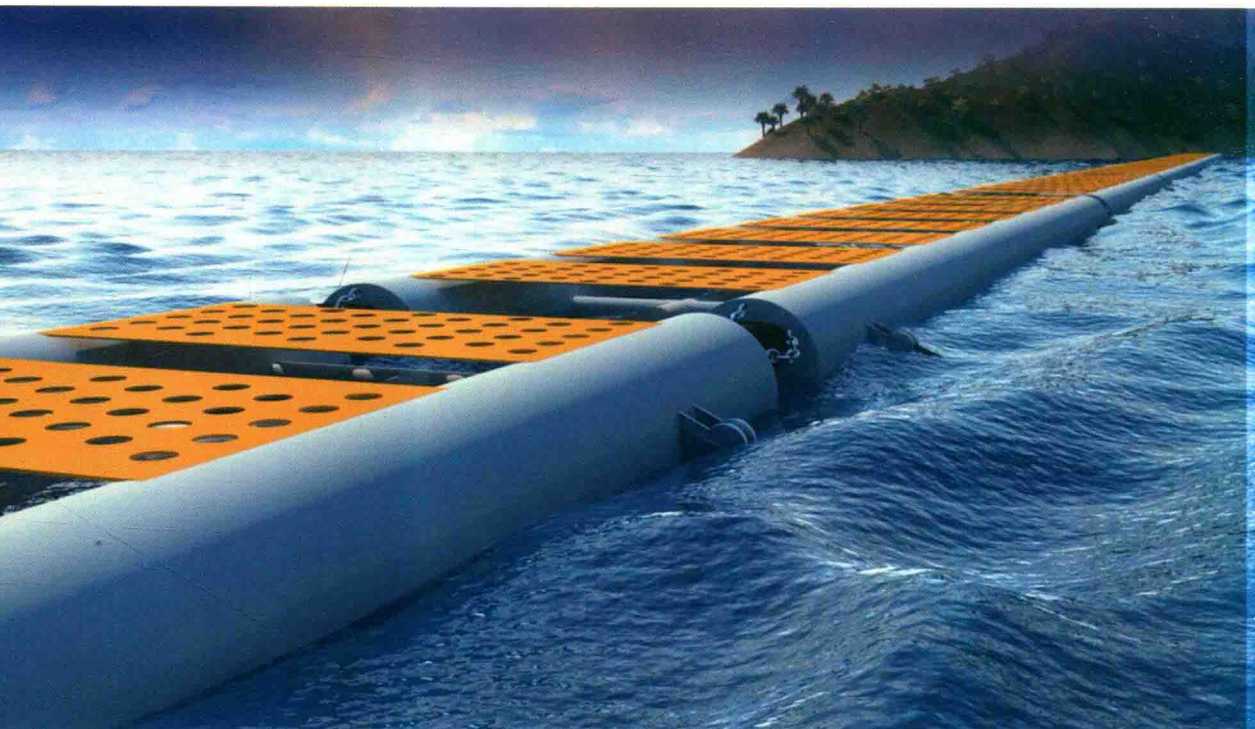


浮式防波堤研究丛书



浮式防波堤水动力与 消波性能分析理论与方法

FUSHI FANGBODI SHUIDONGLI YU
XIAOBO XINGNENG FENXI LILUN YU FANGFA

嵇春艳 程勇 著



科学出版社

浮式防波堤研究丛书

浮式防波堤水动力与消波性能 分析理论与方法

嵇春艳 程 勇 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书论述了浮式防波堤动力响应和波浪场耦合作用理论、多体多重耦合动力学理论、网衣和岛礁地形影响下浮式防波堤的水动力学理论、多道浮式防波堤耦合动力学理论和浮式防波堤—波浪能发电装置一体化耦合作用理论,详细给出了典型方箱浮式防波堤、典型双圆筒型浮式防波堤、网衣—方箱/双圆筒浮式防波堤、岛礁地形影响下方箱/双圆筒型浮式防波堤、多模块双圆筒型浮式防波堤、多道方箱/双圆筒型浮式防波堤、双圆筒型—Savonius 一体化装置的运动响应和波浪场变化规律,反映了当前浮式防波堤的最新进展。内容涉及浮式防波堤在海洋工程、港口工程、海岸工程和船舶工程中的应用,还多方面涉及了数学物理方法的应用,有助于初学者了解和掌握这方面的知识和技能。

本书可供从事海洋工程、船舶工程、港口工程、海岸工程以及研究波浪问题的科技人员、研究生及高等院校师生参考,特别适合作为船舶与海洋工程专业研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

浮式防波堤水动力与消波性能分析理论与方法
嵇春艳,程勇著. — 北京:科学出版社,2018.11

(浮式防波堤研究丛书)

ISBN 978-7-03-059330-6

I. ①浮… II. ①嵇… ②程… III. ①浮式防波堤—
水动力学②浮式防波堤—消波工程—性能分析 IV.
①U656.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 249497 号

责任编辑:许 健 / 责任校对:谭宏宇
责任印制:黄晓鸣 / 封面设计:殷 靓

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>

南京展望文化发展有限公司排版

当纳利(上海)信息技术有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 251 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

浮式防波堤是一种海岸防护工程结构物，用来消减外海传来的波浪，保护掩护区域内的其他浮式结构物和船舶的安全。与传统固定式防波堤相比，浮式防波堤具有建造方便、造价较低、保护环境和易于迁移等优势。在国内外海洋资源大开发的推动下和数值计算技术快速发展的背景下，浮式防波堤的设计和水动力特性研究在近十年有了很大的进展，尤其是浮式防波堤的构型设计、浮式防波堤非线性波浪荷载和波浪传播规律等方面研究更是日新月异。

本书主要内容是作者近十年来在这方面研究工作的总结，同时为了便于读者更好地了解浮式防波堤，本书简述了近几年浮式防波堤研究的相关进展。本书涉及了浮式防波堤动力响应与波浪场耦合作用、多体多重耦合水动力学特性、岛礁地形的浅水效应对浮式防波堤的水动力特性影响规律、多道浮式防波堤耦合水动力特性以及浮式防波堤与波浪能发电装置一体化设计与耦合作用等水动力学方面的关键科学问题。

本书在阐述上注重思路简明、条理清晰，从流体力学基本理论这一主线展开，阐述了浮式防波堤水动力学理论，探讨了浮式防波堤的不同构型、多模块、多道布置、浮式防波堤与波浪能发电一体化装置的水动力学问题和波浪场的传播与变形规律，并突出了以非线性水波理论为主的数值水槽的应用。书中主要理论，如势流理论、计算流体动力学理论、岛礁地形的绕射理论、多道防波堤的绕一辐射理论、浮式防波堤-波浪能发电装置耦合分析理论，都是在数值水槽中进行研究的，并且在基本流体力学部分分别以势流理论和计算流体动力理论的控制方程和边界条件为基础，介绍了数值水槽的建立和验证，以便读者直观地理解非线性水波理论。

本书共分9章。第一章主要介绍了浮式防波堤的结构形式及分类、国内外研究现状以及水动力学关键科学问题及研究难点。第二章介绍了势流理论基础与数值方法，包括以线性 Laplace 方程为控制方程，非线性自由水面条件和瞬时物面条件为边界条件的边界积分方程的建立，边界元方法的数值离散步骤，波浪荷载的间接求解方法以及结构运动响应、自由水面的瞬时更新方法。第三章介绍了计算流体力学基础与数值方法，包括流体的质量自由连续和动量守恒方程的离散方法，自由水面的更新措施，数值推板的造波理论和海绵层消波理论，锚泊系统和浮式防波堤的实时耦合分析方法，以及浮式防波堤实时的全自由度移动网格技术。第四章涉及网衣和地形影响下浮式防波堤水动力学基本理论，介绍了模拟网

衣消浪特性的透空介质模型表达式、模拟网衣运动特征的集中质量模型、两种网衣模型的联合求解方法,推导了岛礁地形的绕射条件和积分表达式,最后给出了非线性高阶谐波的分离方法。第五章以二、三、四章理论为基础,介绍了典型方箱型浮式防波堤运动响应及波浪场分析,描述了典型方箱型浮式防波堤分别在常水深条件下、岛礁地形影响下、垂向网衣配置条件下的运动响应特征、锚链力特征、波浪场传播规律等。第六章给出了典型双圆筒浮式防波堤运动响应及消波效果分析,系统研究了波浪参数、网衣参数、岛礁地形形状对结构运动响应、锚链力和波浪反射、透射系数的影响规律。第七章涉及多模块浮式防波堤水动力数值分析方法,介绍了多体流场数值模型、系泊系统的动力求解方法以及浮体和系泊系统的耦合运动方程求解方法,给出了多模块浮式防波堤数值算例以及相关模型试验验证。第八章给出了多道浮式防波堤运动响应及波浪场分析,分别研究了双道方箱、双道透空方箱、双道双圆筒型浮式防波堤运动响应和波浪场传播规律,最后给出了双道双圆筒浮式防波堤模型试验设计和测试,验证了数值算法的准确性。第九章给出了浮式防波堤与波浪能一体化装置水动力学分析方法,介绍了相关数值算法,给出了浮式防波堤与 Savonius 一体化装置的数值算例。

在本书完成之际,深深感谢中国船舶重工集团第 702 研究所吴有生院士的支持和指导。吴院士严谨的学术作风、一丝不苟的敬业精神让我在参与“***平台”科研团队的工作中受益匪浅、深受鼓舞。真诚感谢江苏科技大学船舶与海洋工程学院的老师 and 同事们的支持和帮助。该研究工作还得到了国家自然科学基金(NSF51622902、NSF51579122)、江苏省自然科学基金(2015CH097J)和工信部、财政部联合重大专项“***平台海上试验验证技术研究——防波堤与波浪能发电装置的海上试验验证技术研究专题”和“***平台工程(二期)——防浪消波专题”的支持,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和疏漏之处,敬请读者提出批评和建议。

嵇春艳

2018 年 7 月

于江苏科技大学

目 录

第一章	绪论	1
1.1	浮式防波堤概述	1
1.2	浮式防波堤浮体结构形式及分类	3
1.3	浮式防波堤系泊系统及类型	6
1.4	浮式防波堤连接结构及类型	6
1.5	浮式防波堤水动力学现状	7
1.6	浮式防波堤水动力学关键科学问题及研究难点	15
第二章	势流理论基础与数值方法	21
2.1	控制方程与边界条件	21
2.2	积分方程与数值离散	23
2.3	运动方程与自由水面更新	27
第三章	计算流体力学基础与数值方法	32
3.1	CFD 流场数学模型	33
3.2	数值离散	34
3.3	自由水面的更新	35
3.4	数值造波和消波理论	35
3.5	配有锚链系泊系统的浮式防波堤运动模型	37
3.6	浮式防波堤运动方程的时间推进方法	38
3.7	计算域网格划分	39
3.8	全自由度分块结构移动网格技术	40
第四章	网衣和地形影响下浮式防波堤水动力学基本理论	43
4.1	CFD 流场数学模型	43
4.2	网衣-浮式防波堤水动力学数值计算方法	49
4.3	边界条件和网格系统	49
4.4	岛礁地形条件下浮式防波堤水动力学基本理论	50
第五章	典型方箱型浮式防波堤运动响应及波浪场分析	55
5.1	二维数值水槽及验证	55
5.2	方箱型浮式防波堤水动力性能及消波效果分析	62

5.3	网衣-方箱型浮式防波堤水动力性能分析及试验验证	66
5.4	岛礁地形的影响	77
第六章	典型双圆筒型浮式防波堤运动响应及消波效果分析	83
6.1	双圆筒型浮式防波堤水动力性能数值分析	83
6.2	网衣-双圆筒型浮式防波堤水动力性能分析	89
6.3	岛礁地形的影响研究	98
第七章	多模块浮式防波堤水动力数值分析方法	104
7.1	流场控制方程和边界条件	104
7.2	边界积分方程的建立	105
7.3	时域格林函数的解析表达式	106
7.4	边界积分方程的离散	111
7.5	结构运动方程求解	114
7.6	系泊锚链力有限元求解	118
7.7	网衣数值模拟	121
7.8	多模块连接浮式防波堤数值算例及模型试验验证	124
第八章	多道浮式防波堤运动响应及波浪场分析	138
8.1	双道方箱型浮式防波堤水动力性能数值算例及分析	138
8.2	双道透空方箱防波堤的水动力性能数值分析算例	147
8.3	双道双圆筒型浮式防波堤水动力性能数值算例及分析	153
8.4	模型试验验证	157
第九章	浮式防波堤与波浪能发电一体化装置水动力学分析方法	165
9.1	浮式防波堤与波浪能发电一体化装置设计方案	165
9.2	CFD 流场数学模型	166
9.3	浮式防波堤与波浪能一体化装置运动方程	170
9.4	浮式防波堤与波浪能一体化装置发电功率基本理论	171
9.5	数值离散及解法	171
9.6	Savonius 转子数值算例及模拟方法验证	174
9.7	浮式防波堤与 Savonius 转子一体化装置性能数值计算及分析	177

第一章 绪 论

1.1 浮式防波堤概述

海洋，蕴藏着丰厚的资源，是地球生态系统的不可或缺的构成部分，同时也是人们能够实现社会可持续发展的宝库。目前，陆地矿产资源日益短缺、人口剧增、自然环境破坏等日益严峻，越来越多的沿海国家开始向海洋获取资源，在全球范围内掀起了一轮以开发海洋为目的“蓝色革命”，对海洋资源开发的热潮推动着相关工程技术的推陈出新。

当前对于海洋资源的开发正处于迅速增长的阶段，随之而来的是频发的工程灾难和环境破坏，这也引起了人们对于防浪消灾工程技术的重视。防波堤属于港口和海岸工程中常见的建筑物，它的主要作用是防御波浪、泥沙、冰凌入侵，保证港口有足够的水深，并维持水面平稳，便于船舶安全停泊和作业。传统的防波堤结构通常采用固定坐底的形式，随着工程区域海水深度的增加，工程造价直线上升，施工建造也变得十分困难。此外，固定坐底式防波堤掩护区域的水体循环流动受到限制，容易产生泥沙淤积、海岸变迁以及港内的水体污染。因此，为了适应人类开发利用海洋资源的新需求，寻求合理、可靠的结构型式和切实可行的施工方法，已经成为世界各国港口工程建设的关键技术之一。

传统的固定式防波堤由于其优越的消波性能和良好的稳定性应用十分广泛，但由于其采用固定于海底的构造方式，适用的水深范围有限，同时随着水深的增加，固定式防波堤成本急剧上升。目前世界上水深最深的固定式防波堤是位于日本本州东海岸岩手县的釜石湾—釜石港大水深梯形沉箱混合堤^[1]，如图 1.1 所示，适用水深达 63 m，工程造价达 7 500 万日元/延米。因此随着海洋工程的深水化发展，如何设计出相对经济又适用于深水的防波堤成为相关工程研究人员和学者关注的方向。固定式防波堤在材料的利用方面，与波浪能量沿水深的变化趋势不十分吻合。当前波浪理论研究与试验测量表明，在水面下波浪的能量按波高的指数关系迅速递减，因此自由液面附近集中了波浪的大部分能量。固定式防波堤由于要有足够的强度和稳定性，往往在接近水底部分使用了大量建筑材料，而在波浪能量十分集中的水面附近所用的材料却最少^[2]。因此，随着防浪设施应用水深的加深，漂浮在水面上通过系泊系统进行锚定的浮式防波堤技术已经受到海洋工程技术人员及相关学者的广泛关注。

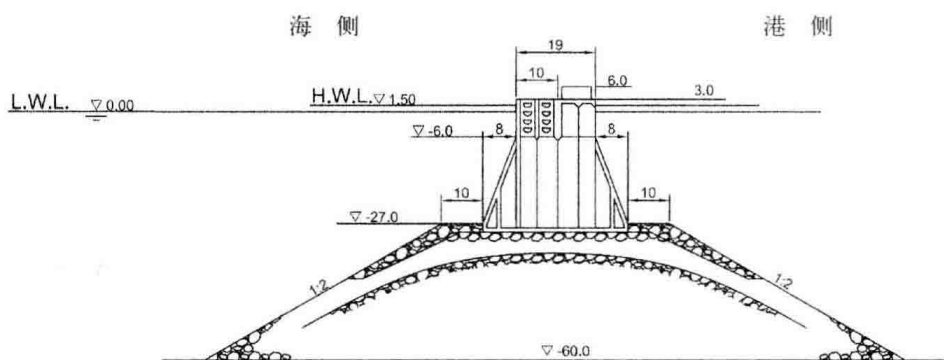


图 1.1 釜石湾—釜石港大水深梯形沉箱混合堤^[1]

浮式防波堤通常是由消波浮体、锚泊系统组成的防浪工程设施。消波浮体可由箱体或浮排组成，是主要的消波结构，锚泊系统用于连接浮体和海底，起到连接和固定作用。浮式防波堤为了保证一定的长度，通常通过连接结构由多个模块连接而成。图 1.2 和 1.3 分别给出了摩洛哥拉巴特港浮式防波堤和加拿大 Pearl Sea Products 公司使用的浮式轮胎防波堤工程应用实例^[3]。浮式防波堤与固定式防波堤相比，其显著的区别在于，在消浪过程中浮体结构可以产生一定幅度的运动，因此其消波原理是利用浮体阻止波浪传播或使波浪破碎，并在波浪作用下上下浮动和前后摆动，干扰波浪的水质点运动，破坏波浪内部的水流结构，以达到消减波能的目的。与固定式防波堤相比，优势主要有：

- 1) 具有很强的水质交换功能，可防止海水污染；

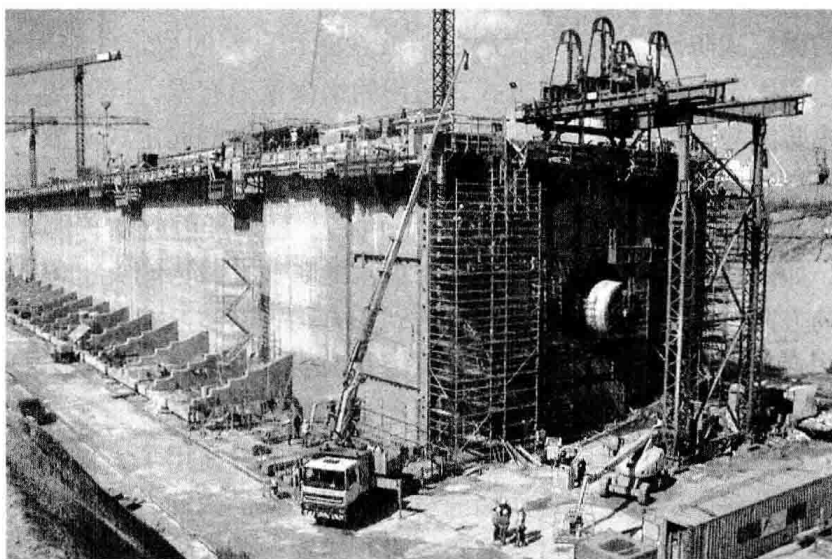


图 1.2 摩洛哥拉巴特港浮式防波堤

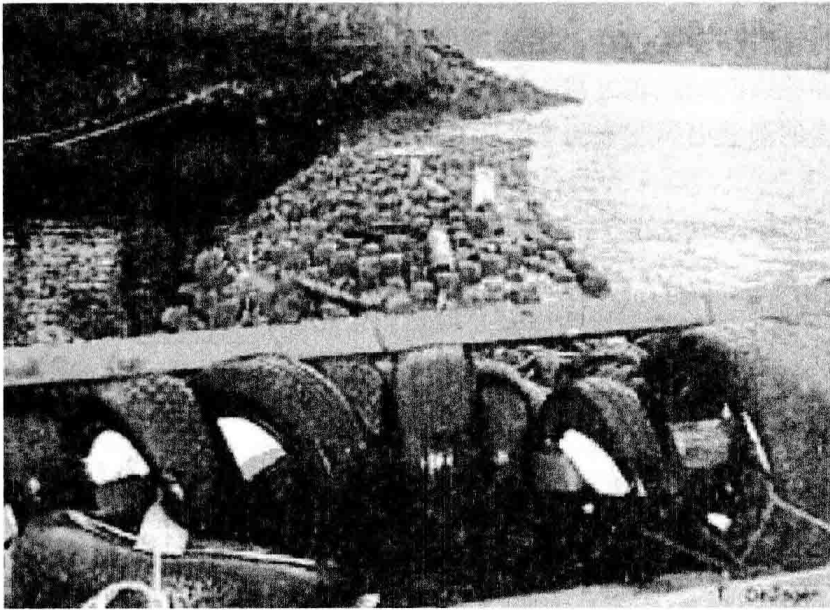


图 1.3 加拿大 Pearl Sea Products 公司使用的浮式防波堤

- 2) 可应用于深水, 随着水深的增加, 其工程造价降低, 而且水深越深, 造价优势越明显;
- 3) 易应用于软土海床水域, 不需要进行地基处理;
- 4) 具有可迁移性, 即修建迅速、拆迁容易;
- 5) 施工周期短, 可进行模块化预制, 海上现场安装;
- 6) 环境破坏小, 不需要大量破坏海洋地质地貌, 有利于保护海洋生态环境。

1.2 浮式防波堤浮体结构形式及分类

根据消波原理, 浮式防波堤分为波浪反射型、波浪反射和波浪破碎混合型以及摩擦型浮式防波堤。波浪反射型消波结构主要利用较大的迎浪面面积把入射波反射回去, 从而减小透射波的波高, 如浮箱型、浮筒型浮式防波堤; 波浪反射和波浪破碎混合型消波结构, 除了利用反射消波, 还通过自身结构特征使来浪发生破碎, 这种构型可以同时减小入射波与透射波, 如栅栏构型、浮筒栅栏构型浮防波堤; 摩擦型浮式防波堤通过自身结构特征与波浪水质点之间发生摩擦, 削弱水质点运动强度, 因此使来浪的能量降低, 来浪的能量在防波堤处被减弱, 从而减小堤后波高, 如浮筏式浮式防波堤。下面主要介绍目前常见的浮式防波堤结构形式及应用。

- 1) 浮箱型浮式防波堤: 典型特征是具有比较大的迎浪面面积, 通过迎浪

面反射来浪达到堤后波高减小的消浪目标。图 1.4 (a)、(b) 给出了典型浮箱型浮式防波堤构型示意。浮箱型浮式防波堤材料可以是钢筋混凝土、钢材。几何形状通常呈现长方体，吃水深度一般取两到三个波高。现有的研究成果表明，较大的迎浪面面积和与波长相比较大的堤宽，可以提高该构型浮堤的消波效果^[4]。

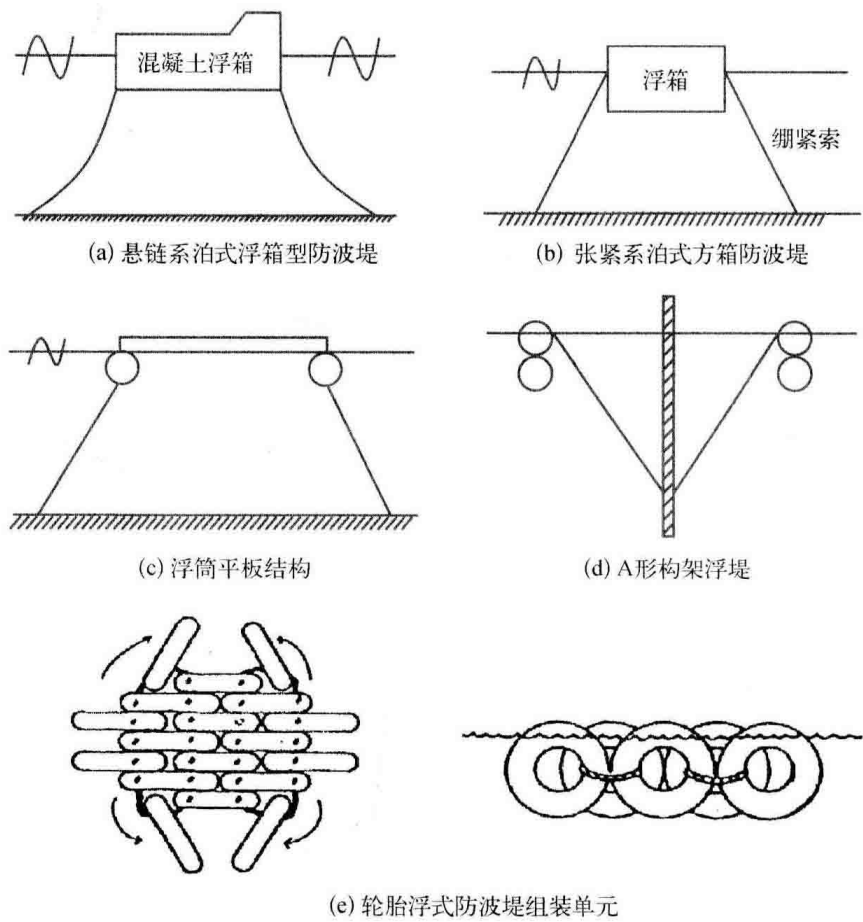


图 1.4 浮式防波堤的主要结构形式

2) 浮筒型浮式防波堤：该构型浮堤在制造材料和消浪原理上，都与浮箱型浮波堤相似，但浮筒型防波堤消波效果要优于浮箱型浮防波堤。浮筒型多为圆筒加横撑结构形式。图 1.4 (c) 是通过刚性横板将两个圆筒浮体连接起来所构成的浮筒型防波堤示意图。图 1.4 (d) 是加拿大学者提出的 A 型架构浮式防波堤^[5]，该构型浮堤的设计目的是增大两个浮体的距离，使整体结构具有较大的横向转动惯量，来浪遭遇防波堤时浮体迎浪面发生反射，同时自身的横摇运动可以吸收很多的能量。

3) 浮筏型浮式防波堤: 该构型浮堤的筏体结构是利用诸如编织袋、合成纤维加强材料或者废旧轮胎等材料做成的, 如图 1.4 (e) 所示。筏体结构可以与来浪水体发生剧烈摩擦, 降低水质点的运动速率, 导致来浪的能量在筏体上发生耗散, 从而使堤后的波高降低, 现有的研究成果表明, 当筏体的宽度与波长相当或者更宽时才能发挥良好的消波效果^[6]。

除了上述三类常见的构型外, 近年来出现了多种新型结构形式的防波堤, 如图 1.5 所示^[7-10]。图 1.5 (a) 为大连理工大学董国海教授团队提出的板-网结构浮式防波堤^[7], 试验表明此防波堤不仅能降低波浪透射高度, 且可减小流速 20% 左右; 图 1.5 (b) 为 He 等^[8]提出得带气室的方箱波浪堤, 可同时达到波浪能发电和防波堤消波双重用途, 进一步减小浮式防波堤建造成本; 图 1.5 (c) 为大连理工大学宁德志教授提出的方箱浮式防波堤及波浪能一体化装置^[9]; 图 1.5 (d) 是江苏科技大学学者嵇春艳^[10]提出的双圆筒-网衣式浮式防波堤, 该构型主要基于主体双圆筒模型, 在圆筒底部等距离布置竖向网衣, 通过网衣孔隙率的黏性消能减少透射和反射波能, 并且孔隙率的存在减少了波浪对结构的波浪力。

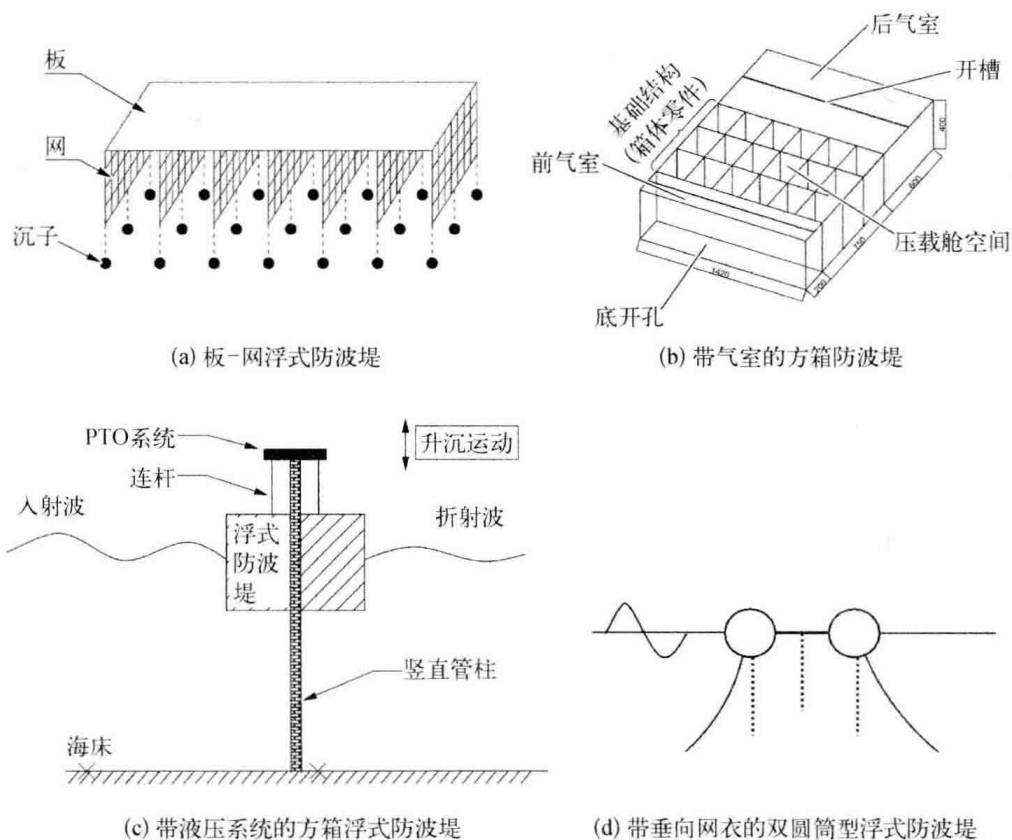


图 1.5 新型浮式防波堤结构形式

1.3 浮式防波堤系泊系统及类型

浮式防波堤在服役期间要像其他海洋浮式结构物一样,通过系泊系统长期系泊于恶劣的海洋环境中,它不能像船舶一样遇到恶劣海况时可以避航。就浮式防波堤的作用机理而言,也要求浮堤自身的运动响应不至于过大,如果其系泊系统不能对浮堤提供适当的约束,造成浮堤自身运动幅度过大、随波逐流,势必会减弱浮式防波堤的消浪效果。

在港口或空间较小的海域^[11],为保证船舶和人员的安全,不适合安装占用较大空间的锚链系泊的浮式防波堤,而是采用垂直导桩系泊。垂直导桩系泊可以限制防波堤的大部分自由度(如纵摇、纵荡、横摇),浮堤只有垂荡和艏摇可以自由运动。然而垂直导桩的系泊方式存在明显的缺陷:垂直导桩只有在坚实的海床上才能打桩,由于浮体的横荡与横摇运动被限制住,因而在垂直导桩上要承受相对较大的水平力和弯矩,如果导桩的选择不当会影响到浮式防波堤的安全使用。

当前锚链系泊是工程应用中最常见的锚泊方式。图 1.6 给出了常见的锚链系泊布置形式^[12]。锚链可以通过重力块、船锚锚固到海底的锚点,锚点的锚固方式还有海底打桩或者采用吸力锚。系泊系统的回复力直接作用到浮式防波堤上,所以系泊系统的设计参数将会直接影响到浮堤的运动,进而影响到浮式防波堤的消波性能。

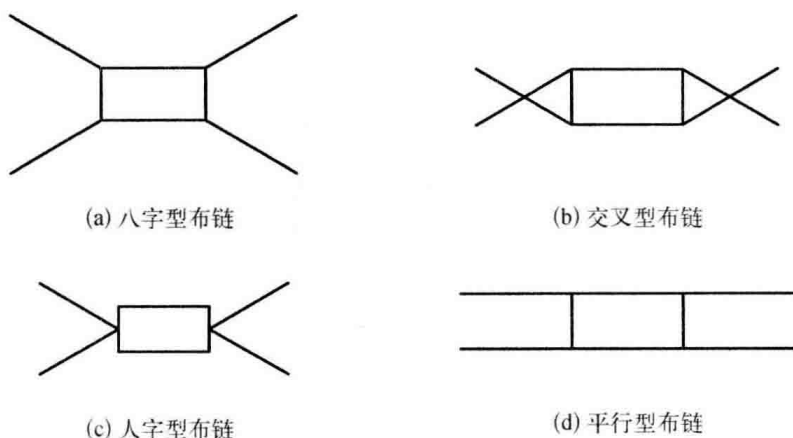


图 1.6 锚链的四种主要布置形式

1.4 浮式防波堤连接结构及类型

为了在开阔的海域得到更好的掩护效果,浮式防波堤必须达到一定长度,形成防波带。但是一个细长的结构在波浪条件下将承受巨大的纵向载荷,结构的中

拱和中垂等响应模态会对结构产生破坏。因此为了减小结构的纵向载荷,要把防波堤做成多个模块相连接的形式。

浮式防波堤多模块间连接的措施仍在研究阶段,目前还没有成熟的产品和技术。模块与模块之间的连接方式根据所允许相对运动量的大小一般分为两种,即刚性连接结构以及柔性连接结构。从结构强度方面来看,模块之间发生相对运动有利于缓解整体结构的动态载荷;然而从浮式防波堤的工作原理来看,如果允许两个模块之间出现过大的相对运动,由防波堤多个模块构成的防波带就会出现扭曲变形,这必然会影响到浮堤的消波效果。目前主要有以下几种连接形式。

1) 刚性连接:模块与模块间六自由度完全约束,如焊接、六自由度全铆接等形式。该种连接结构形式浮式防波堤的整体性好,但连接结构部位会承受较大荷载,不适用于长度大的浮式防波堤构造。

2) 柔性连接:对模块间的某一个或某几个自由度约束,释放或部分释放其他自由度。常见的有铰接连接和橡胶连接。如图 1.7 (a) 为铰接连接示意图^[13],图 1.7 (b) 给出了弹性橡胶连接的设计方案^[12]。该类连接形式结构受载减小,但浮体之间会出现一定程度的相对运动,在工程应用时尤其要注意模块间产生的碰撞等问题。

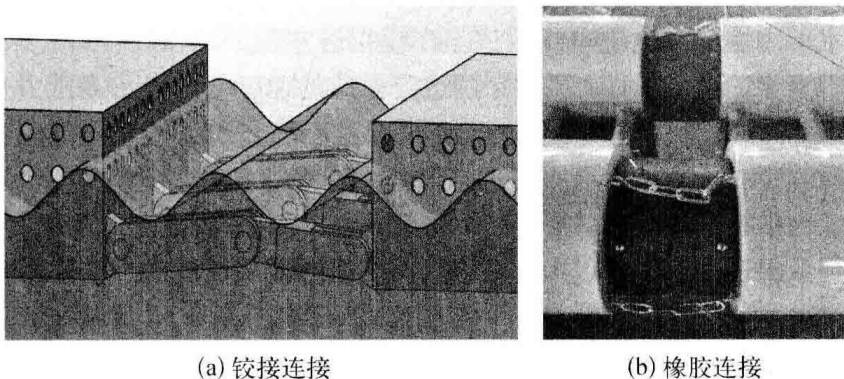


图 1.7 浮式防波堤之间的铰接连接和橡胶连接

1.5 浮式防波堤水动力学现状

1.5.1 理论方法

Mei 和 Black^[14]较早地研究了波浪与浮式防波堤的相互作用。给出了预报圆柱和矩形方箱浮式防波堤的规则波浪散射特性。初步证实了 Schwinger 变分公式针对小振动产生的辐射表面波应用的准确性。Abul - Azm 和 Gesraha^[15]采用特征

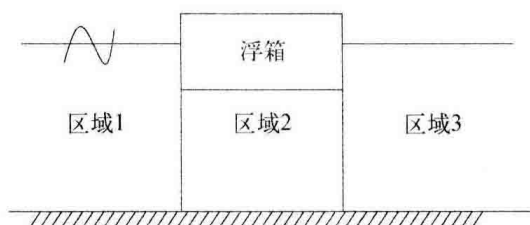


图 1.8 流域分区示意图

函数匹配方法求解了一矩形方箱浮式防波堤的水动力性能。特征函数的中心思想如图 1.8 所示，将流域按照物面和自由水面边界条件分割为多个区域，然后在各个区域上对绕射势和辐射势做特征展开，并在交界面上根据压力和速度的连续条件进行匹配和求解。此方法对于

规则形状的海上结构物水动力性能具有求解简单、快速和准确的特点。在此基础上，Zheng 等^[16,17]发展了斜向波浪入射时的绕射势和辐射势表达式，进行了更加深入的理论研究。进一步，Cho 和 Kim^[18,19]推导出透空平板防波堤的透射和反射系数解析表达式，模拟了单一水下透空板在各种波浪和板参数条件下的消浪特性，总结固定水深条件下板参数的最优选择。Liu 等^[20]提出垂直透空板、水平透空板和垂直直墙的组合新型浮式防波堤，并计算了新型防波堤对波浪的反射系数，结果表明，当垂直透空板与直墙距离超过一定值时，随着透空板孔隙率的增加，波浪反射系数和作用在水平透空板上的力和力矩逐渐减小。Liu^[21]等进一步研究了透空板和非透空板组合式防波堤的水动力特性，结果表明，透空板的孔隙率可以减少防波堤在波浪作用下的上托力，并且当非透空固定板换成透空板时，防波堤的水动力性能可以进一步改进。在模拟透空板的消浪特性时，采取 Darcy 定律模拟透空板的边界条件：流体穿过透空介质的速度可以表示为压力差与一个复频率参数的乘积形式，这个复频率参数的实部和虚部分别表示孔的黏性和惯性影响。复数波数对于精确计算多层透空组合式防波堤水动力性能时的色散关系式非常困难。为了克服这个困难，Evans 和 Peter^[22]采用 Wiener-Hopf 技术使得没有复色散关系出现在求解过程中，最终获得水下半无限长度的透空水平板的水动力性能。

为了避免在透空板水动力研究过程中出现复色波数现象，Liu^[23]以及 Cho 和 Kim^[24]等学者将透空板上、下空间分离成单一独立的流域，每个域中速度势的解表示成通解和特解之和，其中通解是板的孔隙率为零，即固定实板时的解，特解是流体穿过透空板时的解。该方法无需求解复波数，因此可方便、简单地应用于多层透空板时的情况。基于此方法，Cho 等^[25]学者研究和分析了双透空水平板与斜向入射波浪的相互作用，采用含简单源的边界元方法验证此解析法的正确性，并且进一步扩展到倾斜板的情况。研究结果表明，上透空板起到主要的消浪作用，但当潮汐水位变化显著时，下透空板的作用也非常明显。根据方箱和透空板防波堤消浪效率的研究成果，Cho^[26]应用特征函数匹配法研究了一方箱浮式防波堤迎浪端和尾端各配有一垂向透空板时的水动力性能。研究表明，该模型在垂向共振发生时，透射系数会出现拐点现象。

利用解析法求解防波堤的水动力性能特征具有快速、方便的特点,但解析法只适用于一般简单规则形状的浮式防波堤,如矩形、圆形、L形,而对于带有系泊系统的浮式防波堤动力分析,需要采用离散数值方法进行求解。另外在近期的浮式防波堤研究中,各种附加消能结构对结构动力特性的影响成为研究热点,这方面研究解析法目前无法解决。随着计算机硬件的快速发展,强大的运行能力为各种数值方法在水弹性领域中得到实现提供了保障。

1.5.2 数值方法

在波浪与浮式防波堤相互作用的数值模拟过程中,比较常用的数值方法包括边界元方法(BEM)、有限体积法(FVM)、有限差分法(FDM)和有限元法(FEM)。运用的理论主要有线性频域势流理论、线性时域势流理论、非线性时域势流理论和黏性流计算流体动力学理论。

势流理论数值模型是从忽略黏性影响的简化 Navier - Stokes 方程推导而来,采用格林第二公式建立边界积分方程,然后采用常值边界元(CPM)或高阶边界元方法(HOBEM)进行数值离散,形成线性方程组系统求解获得速度势,然后根据伯努利方程获得物体湿表面上的波浪力,并代入结构运动方程,采用时间递进方法(如四阶龙格-库塔法)同时更新自由水面和结构运动方程,获得自由水面波浪高程和结构运动响应的时间历程变化。针对自由水面边界条件和结构物面边界条件的处理方法,势流模型又分为线性模型、基于摄动展开的二阶模型、物面非线性模型和完全非线性模型。根据对未知量中时间项的处理方式不同,又可以分为频域和时域两种理论。Diamantoulaki 和 Angelides^[27,28]采用线性频域势流理论分别研究了无锚泊和缆绳锚泊的浮式防波堤水动力特性。目前基于频域格林函数的水动力商用软件在海洋工程中应用也非常广泛,如 WAMIT、Diffrac、AQWA - LINE、SWSAM、WAFDUT 和 Hydrostar 等。

与频域理论相比,时域理论对顺便或强非线性问题更具有优势,但数值求解计算量也成倍数增加。浮式防波堤的锚链系统与结构主体和流场是相互耦合、相互影响的,因此浮式防波堤与系泊系统在波浪作用下的全时域耦合分析是求解防波堤水动力性能的准确方法。Chen 等^[29]基于线性理论,采用时域模型计算了系泊式单方箱-水下平板组合式浮式防波堤的水动力性能。其中,锚链力采用静力悬链线理论求解。研究发现,单一和双水下平板的安装可有效降低防波堤系统的透射系数、运动响应和锚链力。线性时域理论虽然简单,但是由于忽略了非线性影响,计算结果往往会产生较大的误差。目前普遍使用的商用软件都采用间接时域方法,即:先在频域内求解振幅响应算子和水动力系数,通过 Fourier 变换求得水域内的响应函数,再在时域内分析系泊浮式结构物的运动响应。这一分析需要

频域内预先计算波浪频率 $0 \sim \infty$ 的水动力系数, 而对于大多数结构, 高频下的水动力系数不易求得, 这样傅氏变换引起的误差很难控制, 而且对于记忆项的卷积计算目前的大多数求解方法十分耗时。另外, 假设波浪幅值和结构的运动幅值都比较小, 物体通过摄动展开方法在平均物面上满足, 这样限制了傅氏变换方法在结构做大幅度运动下的运动。实践证明, 采用非线性的时域模拟方法是处理波浪与结构物非线性相互作用问题的最佳手段。Koo 和 Kim^[30] 基于势流理论和混合欧拉-拉格朗日技术, 利用常边界元法建立了二维完全非线性数值水槽, 并研究了波浪与自由漂浮的船舱之间的相互作用。在此基础上, Koo 和 Kim^[31] 研究了两固定船舱之间的晃荡和遮蔽效应。沿着相同的路线, Tang 等^[32] 研究了双箱带网式浮式结构物的动力特性, 并进行了 2D 水槽试验, 验证了数值结果的准确性。文中常数边界元将物体和自由水面离散为二节点单元, 假定速度势及其法向导数为常量, 通过离散边界积分方程获得流场解。常数边界元操作起来比较方便, 数值处理上相对简单, 特别对固角系数的处理, 然而对大型海洋结构物需划分大量单元, 增加计算负担, 并对曲线物面的划分存在误差。另外, 假定单元速度势为常数, 那么单元之间的速度势存在跳跃, 精确解很难获得。为了克服这些缺点, Kim 和 Kim^[33], Teng 和 Eatock Taylor^[34]、Yan 和 Liu^[35] 发展了高阶边界元法来研究波浪与浮体的相互作用。在高阶边界元法中, 单元离散为三节点二次单元或八节点四边形单元, 单元内的物理参数(如坐标、速度势和速度势导数)通过相同的二次型函数表达出来。与常阶边界元相比, 高阶边界元一般划分更少的单元数量, 精确的模拟曲线, 保证连续性。进一步, 大连理工大学滕斌、宁德志团队^[36-38] 采用时域高阶边界元方法联合混合拉格朗日技术建立二维完全非线性数值水槽模型, 对规则波浪或极值波浪、水流与潜堤相互作用问题进行了数值模拟, 并通过修正的两点法分离潜堤迎浪侧和背浪侧的自由波与锁定波, 详细探讨了潜堤的浅水效应。这里的时域非线性数值求解方法是基于 Longuet-Higgins^[39] 采用的混合欧拉-拉格朗日法追踪自由面来实现, 每一时间步均需要求解速度势的边界值问题, 自由面上满足 Dirichlet 边界条件, 固体边界上满足 Neumann 边界条件。一般来讲可以通过边界元来离散求解边界值问题, 可以求得物面上的速度势及自由面上的法向导数, 这样就可以计算自由面上的速度分量, 接着就可以通过时域步进更新每一时刻自由面的位置及自由面上的速度势。基于这个原理就可以实现时域数值模拟。江苏科技大学嵇春艳团队^[40-43] 继续采用基于时域高阶边界元方法的二维完全非线性数值水槽模型研究了规则波浪与双圆筒浮式带网防波堤的相互作用(图 1.9)、聚焦波浪与水下淹没平板的相互作用(图 1.10)、规则波浪与水上弹性浮板在不均匀海洋环境影响下的水弹性相互作用(图 1.11) 等问题。

近年来基于黏性流的计算流体力学(CFD)技术与计算机性能发展迅速, 一