

Springer 海洋工程手册

船海书局
SHIPS AND OCEAN PRESS

HANDBOOK OF OCEAN ENGINEERING

[美] 曼哈·R. 达纳克 (Manhar R. Dhanak) 尼古劳斯·I. 希洛斯 (Nikolaos I. Xiros) 主编

海洋新能源

[美] 尼古劳斯·I. 希洛斯 (Nikolaos I. Xiros) 主编 船海书局 译

王世明 主审



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

Springer

海洋工程手册

[美]曼哈·R. 达纳克(Manhar R. Dhanak), 尼古劳斯·I. 希洛斯(Nikolaos I. Xiros)主编

海洋新能源

[美]尼古劳斯·I. 希洛斯(Nikolaos I. Xiros) 主编

船海书局 译 王世明 主审

上海交通大学出版社

内容提要

本书介绍了一系列现代海洋能源技术,包括资源评估和对诸多海洋能源的概述。全书分6章,从海洋流体动力能源的资源评估、海洋波浪能转换概念、洋流能转换、流体动力能源、海洋热能转换及海上风电等方面进行系统论述。本书适用于从事海洋装备研究和设计的工程技术人员阅读,也可供海洋科学研究工作者学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋新能源 / (美) 尼古拉斯·I. 希洛斯(Nikolaos I. Xiros) 主编; 船海书局译.
—上海: 上海交通大学出版社, 2018
(海洋工程手册)
ISBN 978-7-313-20247-5

I. ①海… II. ①尼… ②船… III. ①海洋动力资源—手册 IV. ①P743-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 226442 号

Translation from the English language edition:
Springer Handbook of Ocean Engineering
edited by Manhar R. Dhanak and Nikolas I. Xiros
Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016
This Springer imprint is published by Springer Nature
The registered company is Springer-Verlag GmbH
All Rights Reserved
上海市版权局著作权合同登记号:图字 09-2017-201 号

海洋新能源

主 编: [美] 尼古拉斯·I. 希洛斯(Nikolaos I. Xiros)	翻 译: 船海书局
出版发行: 上海交通大学出版社	地 址: 上海市番禺路 951 号
邮政编码: 200030	电 话: 021-64071208
出 版 人: 谈毅	
印 刷: 武汉精一佳印刷有限公司	经 销: 全国新华书店
开 本: 787mm×1092mm 1/16	印 张: 15.5
字 数: 367 千字	
版 次: 2018 年 11 月第 1 版	印 次: 2018 年 11 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-313-20247-5/P	
定 价: 335.00 元	

出 品: 船海书局
网 址: www.ship-press.com
告 读 者: 如发现本书有印装质量问题请与船海书局发行部联系。
服务热线: 4008670886

版权所有 侵权必究

Springer Handbook of Ocean Engineering

Manhar R. Dhanak, Nikolaos I. Xiros (Eds.)



Springer Handbooks

施普林格手册是为专业读者提供物理和应用科学领域关于研究方法、通则和函数关系以及经过认可的重要信息的简明汇编。该手册每卷的章节均由世界领先的物理或工程领域的著名专家撰写。章节的内容由这些专家从施普林格资源(书籍、期刊、线上内容)和近年来出版的与科学或信息技术相关的出版物中选取。这些重要的知识点被编辑成有价值的案头参考书,方便读者快速全面地阅读和掌握这些重要内容。该手册还包括表格、图表、参考书目等简便检索工具,为读者提供了扩展资源的参考文献。

总主编

曼哈·R. 达纳克 (Manhar R. Dhanak), 博士, 海洋工程教授, 佛罗里达大西洋大学 (FAU) 海洋和系统工程学院 (海洋技术) 院长。他是佛罗里达大西洋大学海洋工程系的前主席, 伦敦大学帝国理工学院的研究生。他曾任帝国理工学院的助理研究员, 英国剑桥 Topexpress Ltd. 公司研究科学家, 在加入佛罗里达大西洋大学之前任剑桥大学的高级助理研究员。达纳克博士以流体力学、物理海洋学、自动水下交通工具 (AUV) 以及海洋能量为研究方向。他赞助的研究活动包括先进的节能自动表面交通工具以及先进的壳体船评估工具的开发, 沿海环境中与海洋学特性有关的电磁场的鉴定, 以及生活用海底电缆相关的电磁场的发射评估。



尼古劳斯·I. 希洛斯 (Nikolaos I. Xiros) 是新奥尔良大学造船与海洋工程学的助理教授。其 15 年的职业生涯跨越了工业界和学术界。他的专业在海洋、电气和海洋工程领域。他有电气工程师学位以及海洋工程博士头衔。他的研究方向在于处理建模与仿真、系统动力学、识别与控制、可靠性、信号及数据分析。他是很多技术论文和一个施普林格专题的作者。他目前的研究包括非线性工艺动态项目、应用数学、能源工程和船舶系统。



总 册 前 言

我们很荣幸也很高兴参与这本施普林格手册(Springer Handbook)的编辑工作。该手册旨在作为海洋工程师,包括海洋产业和政府的从业人员、研究人员、教育工作者和学生的参考资料。该手册的魅力在于其重要的基础原理、应用材料的综述以及海洋工程和海洋技术的与时俱进。我们相信,这本手册应该会吸引那些在诸多方面参与海洋工程研究的人们,包括海上交通工具、海岸系统和近海技术的设计、开发和操作以及可再生海洋能源开采的人的兴趣。同时,它还是任何对海洋、海上和近海环境中人类活动感兴趣的人的入门书籍。该手册分为五个分册,共 47 章,涵盖了海洋工程基础和四个重要的应用领域:无人潜水器、海洋新能源、海岸工程设计、海洋油气技术。其涵盖范围包括基础概念、基本理论、方法、工具和涉及这些主题各个方面的技术。各分册的作者都是来自世界海洋工程领域内的专家,包括学术界、工业界和政府部门的成就卓著的人才。每一章都经过同业互查。这些选择的作者和同行评审者的参与有助于确保这本手册的杰出性和时效性。施普林格编辑团队完美地制作每一章,包括众多的定制图纸和数字。为了方便读者浏览手册,每个页面都恰当地引用了关键词,使其相对容易地定位到对手册中感兴趣的内容。

首先,我们要由衷感谢五个分册的编辑对各个部分的努力斟酌、甄别及选用论题的专家作为每一章的作者,指导每部分章节的安排,跟踪作者的进度,最后为章节寻求同业互查,从而确定手册的范围和质量。其次,我们衷心感谢所有的作者。他们从繁忙的日程安排拨出时间来参与这个项目,投入大量的时间认真准备各自章节的内容。再次,我们非常感谢同业评审人员无私的努力对章节进行评论。最后,我们要特别感谢施普林格的整个出版团队,包括 Werner Skolaut, Leontina Di Cecco, Veronika Hamm, Judith Hinterberg 以及 Constanze Ober,感谢他们的知识性建议、指导、付出,巨大的耐心,快速有效的编辑,这对确保该手册的及时、高质量制作具有重大意义。海岸工程设计部分归功于已故的 Robert Dean 教授,他在沿海工程方面有很多重要的贡献。

曼哈·R. 达纳克
尼古劳斯·I. 希洛斯

海洋新能源

主编

尼古劳斯·I. 希洛斯(Nikolaos I. Xiros) 是新奥尔良大学造船与海洋工程学的助理教授。其 15 年的职业生涯跨越了工业界和学术界。他的专业在海洋、电气和海洋工程领域。他有电气工程师学位以及海洋工程博士头衔。他的研究方向在于处理建模与仿真、系统动力学、识别与控制、可靠性、信号及数据分析。他是很多技术论文和一个施普林格专题的作者。他目前的研究包括非线性工艺动态项目、应用数学、能源工程和船舶系统。



编译委员会

主任委员



王世明教授,教授级高级工程师。主要研究方向:海洋可再生能源及海洋工程装备。曾在特大型央企中国一拖集团公司任教授级高工,在西安交大任教授,2005年作为引进人才来上海海洋大学工作,2014年获“上海市优秀技术带头人”称号。主持科技部、国家海洋局、农业部及上海各委局项目66项,获发明专利39件,软件著作22项,出版专著15部,成果转化18项;获国家海洋局一等奖、国际发明金奖、上海市科技进步二等奖及重要行业奖项33项。

《海洋新能源》编译委员会

(以下排名不分先后)

主任委员

王世明

副主任委员

董海防 王胜军 严 俊 叶银灿 李 威 姚震球

委 员

彭爱武 李世远 石志洲 江齐锋 周长江 管新潮

刘齐辉 陈燕虎 丁忠军 刘沫娜

翻译人员

管新潮 江齐锋 金 毅

专业审校

陆 烨 解洲水

分 册 前 言

本书介绍了一系列现代海洋能源技术,包括资源评估和对诸多海洋能源的概述,如海浪能、潮流能、温差能以及海上风能等。

第1章主要介绍了对海洋能源的资源评估技术。海洋流体能源主要包括波浪能、潮汐能和海流能。该章简要介绍了这几类能源的特性并对各自的开采潜能进行评估,其中更以佛罗里达州的海流资源评估为例对海流能进行了详细的资源评估研究。根据海洋模型提供的数据对全球和局部开放海域内的海流资源进行预估,估算主要西边界流的能量密度,并对全球洋流发展趋势进行评估。海流能开发的经济可行性受诸多因素影响,主要包括当地能源密度、离岸距离和局部水深等,对这些影响因素进行了度量分析。一旦确定了潜在的开发地点,就须满足当局监管和许可部门的相关要求,评估能源开发对当地环境和生态系统的潜在影响以及对资源本身的影响;研发高性能开发设备并设法降低开发和维护成本。

第2章提出了最重要的海洋波浪能源转换概念,介绍了提取波能及利用动力输出系统进行发电的基本概念。根据报道,在过去40多年间已有多个利用波能的相关专利问世,还有许多正在申请中。它们大多基于上述基本概念对波能进行提取并采用适当的动力输出系统将其转化为电能。该章将对这些方法及其发展现状进行介绍。最后,在附录中介绍了一些较为著名的波能在现实领域中的应用技术,重点是商业方面。

第3章对海流能的转换进行了研究。潮汐流、西边界流及河流等均具有像风能一样的发电潜能。近年来,随着人们对可再生能源的关注度日益增高,开发洋流发电潜能的研究应运而生。该章通过重点介绍海流能与风能之间的差异对海流能量转换进行阐述,并讨论这些未经开发的可再生能源将面临的独特挑战。

第4章对海洋流体动力能源(MHK)的转换进行详细说明。MHK是清洁、可再生能源,且遍布全球。它有两种存在形式:垂向波浪能和横向流能,包括海洋流、潮汐流和河流等。除了几大洋的洋流,大部分海流的流速低于3节,河流流速低于2节,这导致利用稳升力技术(如涡轮机)获取海流能面临挑战。横向海洋流体动力能源可以利用变升力技术进行提取。无论是个体还是群体,鱼类都能利用交变升力在水中有效推进。工程结构如圆柱体和棱镜之类的钝体,或者水翼型的细长体可在准恒定均匀流中产生交替升力。流固耦合现象(FSI)对结构尺度的敏感性较高,结构尺度的细微变化都可能导致严重的流固耦合现象。在一般的工程应用中,流固耦合现象是不利的,因此需要通过设计或使用额外的阻尼等附件来避免或抑制流固耦合现象。反之,如果流固耦合现象增强,可能会诱导结构剧烈运动(FIM),从而使机械振荡器将海洋流体动力能量转换成动能和势能。水翼结构体可以通过

颤振来收获海洋流动能量,颤振已通过深入研究,属于非定常流动范畴。此外,如圆形或矩形截面柱钝体可能会受个体或者周边其他结构影响表现出多种形式的流体诱导运动,目前这些现象已广泛研究,但仍不清楚如何有效抑制或增强此类现象。流体诱导的运动(FIM)包括涡激振动、驰振、颤振以及多体交界间的间隙流动。当这些运动增强时,即使在低速水平流动状态下,也能将海洋流动能量转换成具有高功率密度(功率重量比)的机械能。该章将概述交变升力技术的概念和基本物理原理,研究相关可行的实验和计算方法,给出目前已经克服和未来将面临的研究挑战,介绍实际应用进展和相关技术发展和基准等。

第5章介绍海洋温差能的相关转换问题。海洋温差发电(OTEC)是利用海水的温差梯度经热传动发电。尽管这个概念很简单,已经使用了近一个世纪,但在过去的30年中,由于世界范围内正在寻找一种清洁、可持续性的能源来取代化石燃料,因此其发展势头迅猛。挖掘海洋温差发电的巨大潜力还有技术障碍需要克服。尽管如此,目前已经掌握的成熟技术足以发展相关商业。该章对OTEC技术和经济方面的现状进行了概述,同时也根据当前印度的OTEC经验提出了进一步的研究方向和技术指导。

第6章介绍海上风能转换。1991年,世界第一个海上风电场 Vindeby 开始向丹麦洛兰岛海岸电网供电。从此以后,海上风能已经从早期的试验发展到价值数十亿美元的市场,成为世界范围内可再生能源生产的重要支柱。2014年10月,Vindeby 风电场的海上风机组规模从450 kW扩大到7.5 MW,处于原型机制作阶段。该章概述了近海风电机组技术的最新进展,并介绍了海上风电机组(OWT)的建模和仿真原理。对风电机组的组件转子、机舱、支撑结构控制系统和电力电子技术进行介绍,并提出了当前的技术难题。从OWT建模者和设计者的角度对OWT系统动力学以及环境(风浪和海浪)参数进行介绍。最后,对未来的技术前景进行了展望。该章主要介绍了一个单一的海上风力发电系统,更确切地说是一个水平轴风力发电机组组成的动态系统。该章并没有详细介绍海上风力发电场和风电场之间的相互影响,但给出了一些简单介绍和进一步的参考指导。

尼古劳斯·I. 希洛斯

2018年7月

目 录

第 1 章 海洋能源评估	1
1.1 波浪能	1
1.2 潮汐能和洋流能	3
1.2.1 潮汐能	4
1.2.2 洋流能	5
1.2.3 潮汐能和洋流能的功率和功率密度	6
1.3 全球洋流能源评估	9
1.3.1 墨西哥湾湾流	14
1.4 其他评估因素	18
参考文献	19
第 2 章 海浪能量转换概念	22
2.1 一次能源捕获的基本概念	22
2.1.1 点式吸收器	23
2.1.2 振荡水柱	26
2.1.3 浸没压力差分装置	28
2.1.4 振荡波浪转换器	29
2.1.5 衰减器和终结者	31
2.1.6 越浪装置	32
2.1.7 其他先进的理念	32
2.1.8 控制	32
2.2 动力输出系统	33
2.2.1 机械传动动力输出	34
2.2.2 气动和水力涡轮机	35
2.2.3 液压动力输出系统	37
2.2.4 线性发电机	39
2.2.5 其他注意事项	40
2.A 附录:波浪能量转换技术的实际应用	40
2.A.1 点吸收系统	40
2.A.2 浸没式压力差分装置	45
2.A.3 振荡水柱系统	46

2. A. 4 振荡波浪转换器	50
2. A. 5 衰减器	51
2. A. 6 越浪设备	53
参考文献	53
第 3 章 海流能量转换	58
3.1 基本原理	58
3.2 贝兹极限	60
3.3 转换系统	62
3.3.1 轴流系统	62
3.3.2 横流系统	66
3.3.3 潮汐/开阔洋/河流差异	67
3.4 支撑基础结构	68
3.4.1 系泊	68
3.4.2 桅杆、底座和平台	70
3.4.3 其他组件	72
3.5 非工程问题	72
3.6 总结	73
参考文献	73
第 4 章 通过流动来获取能量包括运动	74
4.1 水平流中的水动能	77
4.1.1 海洋水动力能源	77
4.1.2 潜力、要求和挑战	79
4.1.3 定升技术	82
4.1.4 交变升力技术	83
4.2 交变升力技术:以 VIVACE 转换器为例	89
4.2.1 概念、规模和原则	90
4.2.2 尺度、模型、原型	96
4.2.3 基本原理	102
4.3 支持其发展的方法和工具	119
4.3.1 实验设施	119
4.3.2 阻尼模型	127
4.3.3 流动可视化和涡旋跟踪	127
4.3.4 现场测试	130
4.3.5 计算流体动力学	131
4.3.6 利用和耗散功率的数学模型	147
4.3.7 可变附件质量数学模型	157
4.3.8 物理模型和模型等价	158

4.3.9 评量基准	161
4.4 术语	162
参考文献	164
第 5 章 海洋热能转换	177
5.1 OTEC 原理和系统	177
5.1.1 剥离技术	178
5.1.2 不同类型的 OTEC 工厂	179
5.2 世界范围内的 OTEC 装置的历史	182
5.2.1 印度经验	185
5.3 OTEC 技术的现状	187
5.3.1 OTEC 开发技术	187
5.3.2 国际上对 OTEC 的研究	187
5.3.3 OTEC 工厂的商业设计	187
5.3.4 关于 OTEC 商业化的工业提案	187
5.4 对未来的 OTEC 工厂的设计考虑	190
5.4.1 工作流体的选择	190
5.4.2 原料精选	192
5.4.3 设备选择	193
5.4.4 海水进气系统和部署	196
5.4.5 生物污染控制	199
5.4.6 近海的 OTEC 工厂输电	200
5.5 结论	200
参考文献	201
第 6 章 海上风能	203
6.1 目前的海上风力发电机技术	204
6.1.1 转子	205
6.1.2 发动机舱	207
6.1.3 支持结构	209
6.1.4 控制和保护系统	212
6.1.5 电力电子	213
6.1.6 当前技术的挑战	214
6.2 涡轮动力学基础和海洋环境	214
6.2.1 风	215
6.2.2 波浪	218
6.2.3 水平轴流风机的航空液压伺服-弹性模型	219
6.3 对未来技术的展望	222
参考文献	223

第 1 章 海洋能源评估

Manhar R. Dhanak, Alana E. S. Duerr, James H. VanZwieten

海洋能主要包括波浪能、潮汐能和洋流能。本章简要介绍了这几类能源的特性并对各自的开采潜能进行评估,其中更以佛罗里达州的洋流能源评估为例对洋流能的相关评估方法进行详细介绍。根据海洋模型提供的数据对全球和局部开放海域内的洋流资源进行预估,主要估算西边界流的能量密度,并对全球范围内的洋流能源发展趋势进行评估。洋流能开发的经济可行性受诸多因素影响,主要包括当地能源密度、离岸距离和局部水深等。本章对这些影响因素进行了量化分析。一旦确定了潜在的开发地点,就须根据当局监管和许可部门的相关要求,评估能源开发对当地环境和生态系统的潜在影响以及对资源本身的影响,研发高性能的开发设备并设法降低开发和维护成本。

海洋能量可分为水动能和势能,其中水动能包括波浪能、潮汐能和洋流能,势能则以温差能、盐度梯度(盐差能)以及潮差能等形式存在于海洋之中。各种海洋能量的存在形式因地而异,具有显著的地域性。主要洋流通常是大陆东部海岸地带的西边界流。潮汐能普遍存在于世界各地的河口和海峡地域中,例如美国的东北部或欧洲的西海岸。通常在中高纬度($40^{\circ}\sim 60^{\circ}$)的海岸线区域内存在能量超高的波浪能源,这些海岸线毗邻大型开阔海域,风区范围广,如美国西北海岸。温差能主要存在于某些中低纬度($0^{\circ}\sim 35^{\circ}$)海域范围内。利用某一海域海洋能源的经济有效性取决于诸多因素,包括该海域的离岸距离、当地局部水深以及能源利用对当地环境和利益相关者的潜在影响。波浪中蕴藏着惊人的能量,仅仅开发利用其中的一小部分波能,就能为数百万家庭供电。

本章简要评估了各种形式的海洋,特别以开阔海域的洋流动能为例,对有关海洋能源开发潜能的评估方法进行详细介绍,并对全球范围内的主要洋流能源进行概述。估算全球特定海域内的洋流能级需要采用海洋计算模型。本章对该模型在预估洋流能量的现场实际情况以及开发潜力方面的准确性进行了讨论。第 1.1 节和 1.2 节分别讨论了有关波浪能、潮汐能和洋流能的开发潜能;第 1.3 节对开发洋流能和潮汐能的具体实际问题进行了介绍;第 1.4 节则以实际案例对开发洋流能源的评估方法进行讨论。

1.1 波浪能

波浪是海洋水动能的重要来源。本节关注的是风产生的波浪。波浪的形成是一个复杂的演变过程,包括由非定常湍流风、剪切层不稳定性以及波之间的相互作用引起的一定频率范围内的气压波动。波浪的高度、周期、波长和传播方向取决于风速、风时、风区(即受某一特定方向的风持续作用的海域范围)以及水深和海底地形。所谓风大浪高,即大波浪对应着

高风速、长风时以及足够大的风区。当风力不够强,或风时不够长,抑或风区不够大时,都会影响波浪的强度。某一海域的波浪可用波浪谱的形式进行表示,并可根据波浪要素(波高、波长和波周期)将波浪进行分类:毛细波,波高较小,波周期 $T < 0.1\text{ s}$;碎浪,波高范围为 $0.1 \sim 10\text{ m}$,周期范围为 $1\text{ s} < T < 10\text{ s}$;涌浪,其波高量级同碎浪,周期范围为 $10\text{ s} < T < 30\text{ s}$ 。碎浪是在当地风的作用下产生的,波长和波周期都相对较短;涌浪通常是由远场风暴作用产生的,带宽较窄,波长较长,传播距离较长;当涌波从远处风暴区域弥散开来时,波长较短的波将会迅速衰减消散,而波速较快,波长较大(波长为 10^2 m 量级)的波,其传播距离较远,量级为 $10^3 \sim 10^4\text{ km}$ 。系列波的波高采用有义波高 H_0 进行表征。以完全发育的海域作为参考,当风速、风时和风区达到某一临界值时,风的附加作用将会导致波峰发生破裂从而形成白浪。波浪引起的水体振动现象在自由液面处是最明显的,并且随着水深的增大而迅速减小。

波能以群速度随着船舶向前。沿波峰宽度的单位波浪能量通量(即波能流密度)指的是波能通过垂直于波峰传播方向的单位平面的平均速率。对于单向波,以 W/m 为单位给出了以下公式:

$$P_b = \rho g \int_0^{\infty} C_g S(f) df \tag{1.1}$$

式中, $S(f)$ 为对应的波谱模型公式; $C_g(f, d)$ 为对应于水深 d 处的谐波频率为 $f\text{ Hz}$ 的波的群速度;对于定向传播,取 $\hat{S}(f) = \int_{-\pi}^{\pi} S(f, \theta) d\theta$ 。根据线性波理论可得

$$\begin{aligned} C_g &= \frac{g \tanh kd}{4\pi f} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \\ (2\pi f)^2 &= gk \tanh kd \end{aligned} \tag{1.2}$$

对于深水,群速度 $C_g = \frac{g}{4\pi f}$, 由此, P_b 可表示为

$$P_b = \frac{\rho g}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{S(f)}{f} df = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{-1} = \frac{\rho g^2 H_0^2 T_e}{64\pi} \tag{1.3}$$

其中, H_0 为有义波高,表达式为

$$H_0 = 4 \sqrt{m_0} = 4 \sqrt{\int_0^{\infty} S(f) df}$$

T_e 为波能周期,表达式为

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$$

对于浅水,群速度 $C_g = \sqrt{gd}$ 且波谱 $S(f) \rightarrow S_s(f)$ 改为浅水波谱,即

$$P_b = \rho g \sqrt{gd} \int_0^{\infty} S_s(f) df = \frac{\rho g \sqrt{gd} H^2}{16} \tag{1.4}$$

式中, H 为浅水波波高;当波浪传至近岸时,将受到浅水效应的影响发生波向折射的变化。比较式(1.3)和式(1.4)可得浅水效应系数 $\kappa_s = H/H_0 = (gT_e^2/(16\pi^2 d))^{\frac{1}{4}}$ 。实际上,当波浪接近海岸时,部分能量会由于波浪破裂而消失。

以涌浪为例,取波能周期 $T_e = 10\text{ s}$,波高 $H_0 = 0.5\text{ m}$,由式(1.3)可得