



海洋条件下反应堆 热工水力特性研究

Characteristics of Nuclear Reactor Thermal
Hydraulics under Ocean Conditions

◎ 谭思超 张文超 庄乃亮 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

海洋条件下反应堆 热工水力特性研究

Characteristics of Nuclear Reactor Thermal
Hydraulics under Ocean Conditions

谭思超 张文超 庄乃亮 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

海洋条件下反应堆热工水力特性研究 / 谭思超, 张文超, 庄乃亮著. — 北京: 国防工业出版社, 2018.6
ISBN 978-7-118-11254-2

I. ①海… II. ①谭… ②张… ③庄… III. ①反应堆-热工水力学-研究 IV. ①TL33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 100362 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

※

开本 710×1000 1/16 印张 23 插页 6 字数 430 千字

2018 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 156.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断探索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

序

核能作为船用动力能源,具有功率密度高、经济效益好、续航时间长、清洁、安全等优点,越来越受到海洋装备大国的高度重视。传统的核动力推进船舶主要包括核动力航母和巡洋舰、核动力潜艇、核动力商船、核动力破冰船等。近期,俄罗斯、美国等世界核电强国也在积极发展水面浮动核动力平台。

随着“21 世纪海上丝绸之路”战略构想和发展海洋强国战略的提出,我国对用于海洋的清洁可持续能源的需求日益迫切。目前,我国在世界海洋资源开发利用的竞争中尚处于劣势,从维护国家海洋安全的战略要求出发,开发能够适应复杂海洋环境的军用及民用核动力系统是核能工作者的当务之急。哈尔滨工程大学核科学与技术学院结合自身在船、海、核领域的优势,在国防重大安全基础研究、国家自然科学基金和国防重点实验室基金等项目的支持下,围绕海洋条件下核反应堆的热工水力特性开展了长期的研究,并取得了一系列非常有价值的成果,其中部分研究成果具有较强的科学和工程价值,对于推动核能在海洋开发等领域的应用具有重要意义。

作者在总结近 20 年国内外相关研究的基础上,精心撰写了本书,为国内核动力专业的同行提供了第一本专门针对海洋运动条件下反应堆热工水力特性研究的专业书籍。本书系统研究了海洋条件引入的耦合因素对核反应堆的系统行为和局部行为的作用机制及影响规律,介绍了海洋条件下反应堆热工水力系统的单相流动换热特性、两相流动不稳定性及其非线性分析、核热耦合特性以及局部气泡行为的可视化成果。其中,第 4 章系统分析了摇摆条件下系统的两相流动不稳定性及运动条件下的部分流动不稳定性,这在之前的研究中并未发现。同时,第 5 章从非线性角度分析了海洋条件下的流动不稳定性机理,这也是本书的一大亮点。

在本书付梓之际,我有幸先睹,对书中的研究内容和研究方法深为认可。由于海洋条件下两相流动和传热问题较稳定状态下更为复杂,有些内容尚需进一步深入、精细研究。我深信本书的出版必将有助于海洋条件下核能科学与工程的研究和人才的培养,有助于海洋条件下核动力系统热工水力特性研究和核能科学研究事业的深入发展。同时,本人也对像谭思超教授这样的年轻研究人员能够长期坚持一个方向的研究深感欣慰,希望他能够继续坚持,力争取得更好的成果。

在此,我非常高兴将本书推荐给我国广大从事海洋条件下核动力系统研究工作的科技人员及高校相关专业的教师和研究生。

于俊崇*

2017 年于成都

* 于俊崇,核动力专家,中国工程院院士。

前言

随着人类对能源和资源需求的增加,海洋运输、深海探测、极地科考等海洋活动日益频繁。核能以其能量密度高、续航能力强和环境友好等优势,在海洋运输、海洋资源开发和浮动核电站建设等领域具有广阔的应用前景。然而,海洋环境复杂多变,常伴随风暴、巨浪、海冰、海雾及海啸等恶劣自然气象。在海洋环境中运行的核动力船舶、浮动核电站、核动力破冰船、深海核动力工作站等势必遭受海浪波动、海浪砰击及海流冲击等作用,对核反应堆设备与系统的热工水力特性造成潜在影响。同时,热工特性的改变又会造成堆芯物理特性的改变,进而影响核反应堆的安全特性。因此,针对海洋条件下核反应堆热工水力特性的研究成为当前的研究热点之一。

围绕海洋条件下核反应堆的热工水力特性,作者及其课题组开展了十多年的研究工作,取得了一些进展,初步建立起较为完善的研究方法和体系,本书是在以往研究成果基础上总结归纳而成的一部学术著作。

本书所涉及的研究工作先后得到了国家重大安全基础研究项目(613103、613278)、国防重点学科实验室基金(HEUFN1305)、国防重点实验室基金(KZAKA-1101)、国家自然科学基金(50806014)、黑龙江省青年学术骨干支持计划(1254G017)、黑龙江省优秀归国基金(LC2011C18)、教育部留学归国基金(2012—1707)以及中央高校基本科研业务费(HEUCFD1512)的资助以及中国核动力研究设计院、中国广核集团有限公司、中国船舶重工集团公司第701研究所、中国船舶重工集团公司第719研究所等单位的支持。

衷心感谢作者所在课题组高璞珍教授、阎昌琪教授以及孙立成教授在研究工作中给予的帮助和支持,也感谢所有对本书内容有贡献的历届博士和硕士研究生,他们分别是王畅、幸奠川、李少丹、王占伟、张连胜、余志庭、袁红胜,他们对本书的出版做出了诸多贡献。在书稿排版、整理及校对等方面,袁红胜、程坤、李兴、何川、杨博男、冯丽、米争鹏等同学付出了艰辛的劳动,在此一并表示感谢。

著名核动力专家、中国工程院院士于俊崇先生对本书的写作给予了热情的鼓励并亲为作序,作者在这里向于院士表示衷心的感谢。

本书承蒙西安交通大学苏光辉教授、重庆大学潘良明教授的推荐,特致诚挚的谢意。

感谢国防科技图书出版基金的资助,衷心感谢国防工业出版社于航编辑在

本书出版过程中给予的大力支持。

海洋条件下的反应堆热工水力特性研究是一个相对较新的领域,本书中不乏新的观点,但限于作者的水平,书中难免有不足和欠妥之处,敬盼广大读者和专家不吝赐教,也希望更多的研究者继续对这一领域保持关注。

作者

2017 年于哈尔滨

目 录

第1章 绪论	1
1.1 背景及意义	1
1.2 船舶海洋环境	3
1.2.1 船舶环境	3
1.2.2 海洋环境因素	5
1.3 海基核动力装置要求	9
1.3.1 气候环境要求	9
1.3.2 船舶机械环境要求	11
1.4 海洋条件潜在影响分析	13
1.5 本书内容	16
参考文献	16
第2章 摇摆条件下单相流动特性分析	18
2.1 研究现状	18
2.2 摇摆条件下单相流动特性理论分析与数值模拟	20
2.2.1 摇摆运动回路积分模型	20
2.2.2 流量波动时层流流场特性理论分析	21
2.2.3 摇摆运动湍流流动特性数值仿真	31
2.3 摇摆运动条件下回路流动特性实验研究	47
2.3.1 实验装置简介	47
2.3.2 摇摆运动条件下典型流量波动现象	48
2.3.3 摇摆运动条件下瞬态流动特性影响因素	52
2.3.4 摇摆运动条件下矩形通道内的阻力特性研究	58
2.4 摇摆条件引起回路流量波动的分析	66
2.4.1 摇摆运动条件下瞬时流动流量波动界限	66
2.4.2 摇摆运动下单相自然循环流动特性分析	69
2.4.3 摇摆运动条件下自然循环摩擦阻力系数修正	72
参考文献	74

第3章 摇摆条件下单相换热特性分析	77
3.1 摇摆条件下单相换热理论分析	77
3.1.1 平板道脉动流换热分析	77
3.1.2 圆管通道脉动流换热分析	93
3.2 摇摆条件下单相流动换热特性数值分析	96
3.2.1 计算模型	96
3.2.2 摇摆运动对流动换热特性的影响	98
3.3 摇摆条件下单相换热实验研究	109
3.3.1 实验系统介绍	109
3.3.2 竖直静止条件下单相换热特性	109
3.3.3 摇摆条件下温度波动特性	114
3.3.4 摇摆运动下的流动换热特性	123
3.4 不同驱动力引起的脉动流流动换热特性	129
参考文献	133
第4章 摇摆条件下流动不稳定性分析	134
4.1 流动不稳定性研究现状	134
4.2 摇摆条件下自然循环流动不稳定性	136
4.2.1 竖直工况自然循环流动不稳定性	136
4.2.2 摇摆工况自然循环流动不稳定性	143
4.2.3 流动不稳定现象分类	148
4.2.4 高含汽率流动特性	150
4.2.5 典型流动不稳定性边界	154
4.2.6 摇摆工况下的流动不稳定影响因素	155
4.3 摇摆运动下强迫循环流动不稳定性	156
4.3.1 实验方法及参数范围	156
4.3.2 典型实验现象	157
4.3.3 摇摆条件下的流动不稳定性机理	160
4.3.4 流动不稳定性演化特性	164
参考文献	166
第5章 摇摆条件下自然循环系统混沌特性及预测	169
5.1 混沌理论基础及分析方法	169
5.1.1 混沌时序分析在两相流分析中的应用	169
5.1.2 混沌理论基础	170

5.1.3	相空间重构理论	171
5.1.4	混沌时序分析步骤及分析方法	174
5.1.5	主分量分析法	183
5.2	摇摆条件下自然循环系统的流动混沌特性	186
5.2.1	典型非线性现象	186
5.2.2	非线性演化特征	201
5.2.3	非线性演化机理	210
5.2.4	摇摆参数对混沌的影响	212
5.3	混沌流量脉动预测	218
5.3.1	混沌流量脉动的预测方法	218
5.3.2	单变量混沌脉动预测	219
5.3.3	基于多变量相空间重构的多变量混沌脉动预测	226
5.3.4	预测时间尺度	231
5.3.5	动态预测	232
	参考文献	235
第6章	摇摆条件下自然循环核热耦合特性	237
6.1	核热耦合特性研究现状	237
6.2	摇摆条件下自然循环系统核热耦合建模	239
6.2.1	物理模型	239
6.2.2	核反馈模型	239
6.2.3	程序的编制	241
6.3	摇摆条件下自然循环核热耦合特性分析	244
6.3.1	摇摆条件下核热耦合效应对自然循环系统参数的影响	244
6.3.2	摇摆参数对自然循环核热耦合效应的影响	247
6.3.3	机理分析	251
6.4	不同核反馈方式下自然循环核热耦合特性研究	253
6.4.1	核反馈方式对自然循环核热耦合效应的影响	253
6.4.2	核反馈系数对自然循环核热耦合效应的影响	259
	参考文献	264
第7章	海洋条件下局部气泡行为	266
7.1	气泡行为分类特性研究	266
7.1.1	可视化实验段	266
7.1.2	气泡类别及其基本特征	267
7.1.3	两类气泡工况分析	274

7.1.4	海洋条件对气泡类别的影响	282
7.2	第一类气泡参数的预测与建模	285
7.2.1	第一类气泡的基本特性	285
7.2.2	气泡最大直径和最大直径时间	291
7.2.3	气泡浮升直径和运动速度	302
7.2.4	气泡核化密度	305
7.2.5	气泡核化频率	311
7.3	第二类气泡参数的预测与建模	317
7.3.1	第二类气泡基本特性	317
7.3.2	气泡平均直径	324
7.3.3	气泡运动速度	331
7.3.4	气泡数量密度	343
7.4	海洋条件影响气泡行为总结	347
	参考文献	347

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Marine and ocean environment	3
1.2.1 Marine environment	3
1.2.2 Ocean environment factors	5
1.3 Requirements for marine nuclear power plants	9
1.3.1 Requirements of climatic environment	9
1.3.2 Requirements for marine mechanical environment	11
1.4 Potential impact of ocean conditions	13
1.5 Book contents	16
References	16
Chapter 2 Single-phase flow characteristics under rolling conditions	18
2.1 Research status	18
2.2 Theoretical and numerical analysis on flow characteristics	20
2.2.1 Integral model of the loop	20
2.2.2 Theoretical analysis of laminar flow field under pulsating flow	21
2.2.3 Numerical simulation of turbulent flow characteristics under rolling conditions	31
2.3 Experimental study on flow characteristics	47
2.3.1 Brief introduction of the experimental facilities	47
2.3.2 Typical flow fluctuation behaviors under rolling conditions ...	48
2.3.3 Influence factors of transient flow characteristics under rolling conditions	52
2.3.4 Resistance characteristics of rectangular channel under rolling conditions	58
2.4 Analysis of flow fluctuation under rolling conditions	66

2. 4. 1	Boundary of transient flow pulsation	66
2. 4. 2	Single-phase flow characteristics of natural circulation	69
2. 4. 3	Modification of frictional resistance coefficient under rolling conditions	72
References		74

Chapter 3 Single-phase heat transfer characteristics under

rolling conditions	77
3. 1 Theoretical analysis of single-phase heat transfer	77
3. 1. 1 Single-phase heat transfer between parallel plates	77
3. 1. 2 Single-phase heat transfer in tube	93
3. 2 Numerical study on single-phase heat transfer	96
3. 2. 1 Simulation model	96
3. 2. 2 Effects of rolling conditions on heat transfer	98
3. 3 Experimental study on single-phase heat transfer	109
3. 3. 1 Experimental system	109
3. 3. 2 Heat transfer in vertical channel	109
3. 3. 3 Temperature fluctuation under rolling conditions	114
3. 3. 4 Heat transfer under rolling conditions	123
3. 4 Heat transfer under different driving forces	129
References	133

Chapter 4 Analysis of flow instabilities under rolling conditions

4. 1 Research status of flow instabilities	134
4. 2 Flow instabilities of natural circulation under rolling conditions	136
4. 2. 1 Flow instabilities of natural circulation under static conditions	136
4. 2. 2 Flow instabilities of natural circulation under rolling conditions	143
4. 2. 3 Classification of flow instabilities	148
4. 2. 4 Flow characteristics with high mass quality	150
4. 2. 5 Boundaries of typical flow instabilities	154
4. 2. 6 Influence factors of flow instabilities under rolling conditions	155
4. 3 Flow instabilities of forced circulation under rolling conditions	156
4. 3. 1 Experimental method and parameter ranges	156

4.3.2	Typical experimental phenomena	157
4.3.3	Mechanisms of flow instabilities under rolling conditions ...	160
4.3.4	Evolution characteristics of flow instabilities under rolling conditions	164
	References	166
Chapter 5 Chaotic characteristics and prediction of natural circulation under rolling conditions		
		169
5.1	Theoretical basis and analytical methods of chaos	169
5.1.1	Application of chaotic time series analysis in two-phase flow	169
5.1.2	Theoretical basis of chaos	170
5.1.3	Theory of phase-space reconstruction	171
5.1.4	Procedure and method for chaotic time series analysis	174
5.1.5	Principal component analysis	183
5.2	Chaotic characteristics of natural circulation under rolling conditions	186
5.2.1	Typical non-linear phenomena	186
5.2.2	Evolution characteristics	201
5.2.3	Evolution mechanisms	210
5.2.4	Effects of rolling parameters on chaos	212
5.3	Prediction of chaotic flow pulsation	218
5.3.1	Prediction methods for chaotic flow pulsation	218
5.3.2	Univariate chaotic prediction	219
5.3.3	Chaotic prediction based on multivariable phase-space reconstruction	226
5.3.4	Time scale for prediction	231
5.3.5	Dynamic prediction	232
	References	235
Chapter 6 Nuclear – thermal coupling characteristics of natural circulation under rolling conditions		
		237
6.1	Research status of nuclear – thermal coupling characteristics	237
6.2	Nuclear – thermal coupling model of natural circulation under rolling conditions	239
6.2.1	Physical model	239
6.2.2	Nuclear Reactivity feedback model	239

6.2.3	Programming	241
6.3	Analysis of nuclear – thermal coupling characteristics of natural circulation under rolling conditions	244
6.3.1	Impact of nuclear – thermal coupling effect on natural circulation parameters	244
6.3.2	Impact of rolling parameters on nuclear – thermal coupling system parameters	247
6.3.3	Mechanisms analysis	251
6.4	Analysis of nuclear – thermal coupling characteristics of natural circulation under different nuclear feedback conditions	253
6.4.1	Effects of nuclear feedback modes on nuclear – thermal coupling characteristics of natural circulation	253
6.4.2	Effects of nuclear feedback coefficients on nuclear – thermal coupling characteristics of natural circulation	259
	References	264

Chapter 7 Bubble behavior under ocean condition 266

7.1	Classification of bubble behavior	266
7.1.1	Experimental setup	266
7.1.2	Bubble types and features	267
7.1.3	Conditions for two types bubble	274
7.1.4	Bubble types under ocean conditions	282
7.2	Prediction model of the first type bubble	285
7.2.1	Characteristics of the first type bubble	285
7.2.2	Maximum diameter and corresponding time	291
7.2.3	Lift diameter and velocity	302
7.2.4	Nucleation site density	305
7.2.5	Nucleation frequency	311
7.3	Prediction model of the second type bubble	317
7.3.1	Characteristics of the second type bubble	317
7.3.2	Mean bubble diameter	324
7.3.3	Bubble velocity	331
7.3.4	Bubble number density	343
7.4	Summary of the bubble behavior under ocean conditions	347
	References	347