

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材



核动力系统热工水力 计算方法

苏光辉 秋穗正 田文喜 等 著

<http://www.tup.com.cn>



清华大学出版社

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推

核动力系统热工水力 计算方法

苏光辉 秋穗正 田文喜 等 著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书共分9章。第1~4章介绍核动力系统完整的建模与数值计算。第5、6章以专题的形式介绍了两相流数值分析技术、热工水力关键现象的数值模拟。第7章介绍新方法在反应堆热工水力数值模拟方面的应用。第8章为先进反应堆系统热工水力分析。第9章系统地展现了作者所在单位关于运动条件下的核动力装置热工水力特性的研究成果。

本书可作为高等院校反应堆工程专业研究生的专业基础课教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

核动力系统热工水力计算方法/苏光辉等著.--北京:清华大学出版社,2013

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

ISBN 978-7-302-30710-5

I. ①核… II. ①苏… III. ①反应堆—热工水力学—研究生—教材 IV. ①TL33

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第280416号

责任编辑:张占奎 洪 英

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:26.25 字 数:571千字

版 次:2013年11月第1版 印 次:2013年11月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:59.00元

产品编号:038962-01

能源是发展经济和人类进步的重要物质基础。为了持续、稳定、高速地发展我国国民经济,在 21 世纪中叶使我国国民经济的发展达到国际中等发达国家水平,必须相应地发展我国能源。

据预测,到 2050 年,我国一次能源的需求将达到 3340~4153Mtce,而我国煤炭因受诸多因素的制约,到 2050 年其供应极限值约为 2700Mt(1928Mtce);石油和天然气资源有限;水电经济可开发资源为 290GW,全部开发也仅折合为 255Mtce。因此我国能源供需之间将产生较大的缺口,除大力发展各种可再生能源外,唯一能大规模填补缺口的便是核能。

我国在发展军用核能科学技术和工业体系的基础上发展核电。至今我国已经基本具备独立自主发展核电的能力,已建成并运行 300MW 压水堆核电站;正在建设 600MW 压水堆核电站;21 世纪初将建设 1000MW 压水堆核电站,形成压水堆核电站的国产化、系列化和标准化,为大规模发展核电创造条件。

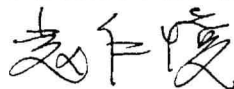
经过多年的论证和实践,对我国核能发展战略的共识是:近期发展热中子反应堆核电站(热堆);为了充分利用铀资源,扩大核电容量,中期发展快中子增殖反应堆核电站(快堆);远期发展聚变反应堆核电站(聚变堆),聚变堆将是人类长远解决能源供给的主要依托。

利用核能的前提和基础是确保核安全,而核安全的核心科学技术是核能系统热工水力性能的分析研究,为了使核反应堆及其动力系统有更好的经济性和安全性,人们必须更深入地掌握其更详细的机理、更准确的实验数据和更完善的分析程序和计算方法。因此,自核电问世以来,核能系统的热工水力分析研究是核能科学技术最有活力、不断开拓发展的一门学科,它的涉及面十分

广阔,因此也是一门复杂的综合学科。

本书研究内容丰富,系统地论述了核动力系统的各个方面,从理论到实践,从分析研究到程序计算,理论结合实际,十分有价值,本书的出版将十分有助于我国核能热工水力学科和核能事业的发展。

中国科学院院士,中国工程院院士



1999年8月15日

随着我国国民经济持续高速增长,以煤、石油为主导的化石能源消费结构给供应和环境等带来了不堪重负的压力,再加上我国粗放型的开采和低效率的消耗,使能源问题已经成为制约国民经济发展的瓶颈,对环境造成的影响已成“众矢之的”。尽管历史上曾发生过严重的核事故,IAEA等权威机构和国际上权威专家们负责任地评估后表明,核电技术是成熟的、安全的技术,核能是安全的、清洁的、当前不可替代的能源。日本福岛核电站特大自然灾害事故后,我国核电专家对我国核电站、核设施进行评估后,仍然认为“核能是安全的、环境友好的能源”,到2020年将我国核电提高装机容量发展到60~70GW“是需要的,也是可能的”。

国务院2007年10月正式批准了国家发展改革委上报的《核电中长期发展规划(2005—2020年)》后,最近又原则批准了《关于全国民用核设施综合安全检查情况的报告》,肯定了中国已在役核电站的安全性。这标志着中国将迎来核电发展的第二个春天。

目前,我国核电研发水平相对于美国、法国等核电发达国家还存在一定的差距,属于我国自主研发的专利技术还相对较少。一个典型的例子是,用于反应堆热工水力分析的成熟的大型软件,如RELAP5、TRAC、CATHARE、RETRAN等都依赖进口。在此情况下,本书作者及西安交通大学的反应堆热工水力研究课题组的同仁们,自1991年以来在国内率先开展了核动力系统软件自主化的研发工作,先后得到了国家自然科学基金、教育部博士点基金、核工业基金、国家“九五”和“十五”攻关课题、中国核动力研究设计院项目等各类资助,在反应堆热工水力计算方法和计算软件研究方面,取得了系统化的研究成果,受到了国内外学术界的广泛关注和认可。

根据多年的研究成果和大量的技术经验,西安交通大学的反应堆热工水力研究课题组精心撰写了本书,为核动力专业的同行及后学们提供了一本关于核反应堆热工水力分析基础理论和计算方法的全面深入的教材和学习参考资料。本书不但完整论述了传统核动力系统热工数值计算的重要模型和方

法,还通过专题的形式介绍了两相流相关计算技术以及关键热工水力现象的分析计算,并结合课题组的优势与长期科研积淀的成果,集中展现了近年来热工水力热点研究领域,如新的分析技术与方法、新型核动力堆的热工水力分析技术以及复杂运动条件下的数值分析方法等相关技术的技术前沿与最新成果。

本书共分9章。第1~6章,系统地介绍了反应堆热工水力分析中流体流动和传热的各种物理与数学模型,或计算程序实例;第7~9章,介绍了反应堆热工水力研究领域出现的新研究热点和技术前沿,以及所开展的研究工作及成果,特别是第9章对于运动条件下核动力系统热工水力特性的系统论述,在国内外同类著作中尚属第一次;对超临界水堆、钠冷快堆、行波堆、熔盐堆等的热工技术与安全分析研究已走在了国际的最前沿。最值得一提的是,作者将人工神经网络、遗传算法、小波分析、移动粒子半隐式(MPS)等先进分析技术和计算方法应用于核反应堆热工水力分析,并做了较为详细的介绍,这是作者所在课题组在核能最新技术领域长期研究与积累的综合展现,也是本书的一大亮点。

在本书付梓之际,我有幸先睹为快,深感其内容新颖,结构严谨,科学性强。深信本书的出版必将有助于从事核能科学与工程研究的人才培养,有助于核动力系统热工水力软件自主化和核能科学研究事业的深入发展。

在此,我非常高兴地将本书推荐给我国广大从事核能热工水力分析研究的科技工作者、教师和研究生。

中国工程院院士
中国核动力研究设计院研究员



2012年7月于成都

随着世界核能事业的发展,核能已成为世界能源结构的重要组成部分。我国为了优化能源结构,制定了“积极推进核电建设”的战略,坚持“引进、消化、吸收、再创新”的核电发展方针,组织并实施了“大型先进压水堆和高温气冷堆核电站”的重大专项。先进核能系统对安全性提出了新的更高的要求。核动力系统热工水力与安全分析计算是研究其安全性的基础。

围绕核能系统的热工水力与安全分析,作者及其课题组经过 20 多年的科研工作,取得了一些突破性的研究进展,已经建立起较为完善的研究方法与理论体系。本书是在归纳、整理和总结作者多年来的研究成果的基础上完成的一部学术专著。同时,为了尽可能全面地反映国际研究动态,书中也介绍了其他研究者的成果。

本书共分 9 章。作者的分工如下:苏光辉教授执笔第 1~3 章、6.2 节、7.1 节、8.8 节、9.1 节和 9.4 节,秋穗正教授执笔第 8 章和 6.3 节,郭玉君博士执笔第 5 章(不含第 5 节),张金玲博士执笔第 4 章(不含第 8 节和第 10 节),田文喜副教授执笔 4.8 节、5.5 节、6.1 节、7.2 节和 7.3 节,巫英伟副教授执笔 4.10 节,现任哈尔滨工程大学教授的谭思超博士后执笔 9.2 节和 9.3 节。全书由苏光辉教授统稿。

本书第 1~4 章介绍核动力系统完整的建模与数值计算。在核反应堆的热工水力研究领域,核能系统的瞬态模拟一直是重点和难点。这部分工作既涉及冷却剂瞬态的热工水力基本模型,也包含了传热与流动阻力模型,还包括了大量辅助模型的建立。这些模型既有来自纯理论的数学推导,如冷却剂的热工水力基本模型,也包含了相当多的依赖于实验得到的经验关系式,如对流传热的经验关系式、摩擦阻力系数的选取以及辅助模型中空泡份额的确定等。除此之外,核能系统的瞬态计算是多个设备相耦合的计算,一个回路系统中就包括了堆芯、稳压器、蒸汽发生器和主泵以及管道等的联合建模,再加上余热排出等其他辅助设备,整个系统的建模是一个相对复杂和庞大的工程。多种设备、复杂模型的联合求解对数值计算方法也提出了很高的要求,如刚性方程

和非刚性方程的同时求解问题。因此,要进行核能系统的瞬态分析程序的开发,既需要研究者在热工水力领域的基础理论方面有深厚的功底,也需要其在数值计算方法的实现上具有相当的经验。

第5~6章以两个专题的形式介绍了两相流数值分析技术、热工水力关键现象的数值模拟。两相流数值分析技术在反应堆的热工设计与安全分析中日益受到重视,而且随着计算机技术的提高,该数值分析技术正在飞速的发展。第5章重点介绍了目前广泛应用的两相流数值分析技术中采用的思想、模型以及具体的数值算法,是对两相流数值技术一个比较完整的总结。第6章中论述了热工水力领域非常重要的两相流动不稳定性、临界流等现象的数值分析方法,作者所在课题组对这些现象做了深入的研究。

近年来,反应堆的热工水力研究领域出现了一些新的研究热点和技术前沿问题,例如人工神经网络、小波分析、粒子法等新方法在核能领域的应用,以及新型核动力堆如超临界水堆、熔盐堆等的热工设计与安全分析。从第7~9章可以发现,作者最近几年在这些新的研究领域开展了大量深入的研究,并取得了相当丰硕的研究成果。第7章中介绍的神经网络、遗传算法与小波分析在核能领域的应用展现了其在处理数据信息时的明显优势;移动粒子半隐式(MPS)方法对动态过程的真实模拟为数值模拟技术提供了新的强有力的工具。第8章的新型核动力堆的热工设计分析是作者所在课题组在核能最新技术领域长期研究与积累的综合展现,是本书的最大亮点之一。课题组对超临界水堆、钠冷快堆、行波堆、熔盐堆等的热工物理技术研究与安全分析做了大量的研究工作,已经走在了国际的最前沿,这对中国第四代堆进一步的设计与研发提供了重要的参考资料。

第9章系统地展现了作者所在单位关于运动条件下的核动力装置热工水力特性的研究成果。舰船所呈现的绕轴运动或沿轴向运动等典型以及耦合运动工况会给冷却剂流动带来一个附加力,这对运动条件下的流动换热特性以及流动不稳定性和临界热流密度都会带来较复杂的影响。

本书的工作先后得到了国家“七五”、“八五”、“九五”重点科技攻关课题(75-19-03-27、85-212-05-06、96-G01-02-05)、国家自然科学基金杰出青年基本项目(11125522)、国家自然科学基金“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划培育项目(91026023、91126009)、国家自然科学基金面上项目(19675028、11075124、10675096、10575079)、国家自然科学基金青年科学基金项目(10905045、11105103)、教育部博士点基金项目(20110201110036、20110201120046、20110201120047、20090201120002)、核工业基金(H7196EY701)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-06-0837、NCET-05-0835、NCET-11-0430)、科技部ITER计划专项课题(2009GB109001、2009GB108001)、中国核动力研究设计院、中国原子能科学研究院、上海核工程研究设计院(728)、核动力运行研究所(武汉105所)、中船重工719所等的支持。

本书初稿成于1997年,一直用作研究生教材。十几年来,作者不断改进与完善书中相关内容。已故的中国科学院和中国工程院院士赵仁恺先生于1999年为本书作序。时值本

书正式出版之际,著名的核动力系统热工水力专家、中国工程院院士于俊崇先生又在百忙中热情地为本书作序。

特别说明的是,从作者所在课题组毕业的历届硕士和博士研究生,对本书的形成做出了贡献,由于时间跨度大、人员众多,在此不具体列出名单。在书稿排版、整理及校对等方面,巫英伟博士和张大林博士付出了艰辛的劳动,在此一并表示衷心的感谢。

作者们非常感谢导师贾斗南教授和喻真烷教授,二位导师为本书倾注了大量心血,使得本书顺利交稿。

本书的出版得到了各方面的支持与帮助,特别是全国工程硕士专业学位教育指导委员会以及秘书处联系人、中国科学技术大学王相纂教授的鼎力支持,在此一并表示衷心的感谢。

限于作者水平有限,本书难免有不足和不当之处,热切希望读者和同行专家不吝赐教!

作者

2013年5月于西安交通大学

主要符号表

英文字母

A	流通截面/传热面积, m^2
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D_e	当量直径, m
G	质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Gr	格拉晓夫(Grashof)数
H	比焓, J/kg
H_{fg}	汽化潜热, $= H_g - H_f, \text{J}/\text{kg}$
I	泵的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Nu	努塞尔(Nusselt)数
P	压力, Pa
Pr	普朗特(Prandtl)数
Q	换热量, W
Re	雷诺(Reynolds)数
S	滑速比
T	温度, K
U_e	润湿周长, m
U_h	加热周长, m
V	流体的流动速度, m/s
W	质量流量, kg/s
X	X 方向
Z	Z 方向
d_{in}	内管直径, mm
f	达西(Darcy)摩擦系数
f_w	范宁(Fanning)摩擦系数
g	重力加速度, m/s^2
h	对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

q	热流密度, W/m^2
q_v	体积释热率, W/m^3
t	时间, s
u	单位质量流体的内能, J/kg
v	比体积, m^3/kg
x	含汽量
x_c	平衡含汽量

希腊字母

α	空泡份额
β	流动体积份额
μ	动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
τ	壁面剪切力, N/m^2
ρ	流体的密度, kg/m^3
Φ_{tp}^2	两相摩擦压降倍增因子
Γ	相间质量交换量, kg/s
θ	夹角, rad
σ	表面张力, N/m
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
ω	泵的转速, rad/s
ΔT_{sat}	壁面过热度, $= T_w - T_s, \text{K}$

下标

f	液相
fo	全液相
g	汽相
go	全汽相
s	饱和
w	壁面

第 1 章 冷却剂热工水力计算的基本模型	1
1.1 稳态工况下的热工水力模型	1
1.1.1 一维稳态单相流动的基本守恒方程	1
1.1.2 一维稳态两相流动的基本守恒方程	2
1.2 瞬态工况下的热工水力模型	5
1.2.1 一维流动时的基本热工水力模型	6
1.2.2 三维流动时的基本热工水力模型	12
参考文献	14
第 2 章 相关传热及水力学模型	16
2.1 对流换热模型	16
2.1.1 单相液体对流传热	16
2.1.2 欠热沸腾区传热	18
2.1.3 饱和沸腾区传热	18
2.1.4 稳定膜态沸腾区或缺液区对流传热	20
2.1.5 单相蒸汽对流传热	21
2.1.6 界限含汽量计算	21
2.1.7 过渡沸腾传热	21
2.1.8 作者在科研中所选公式汇总	23
2.1.9 凝结换热	24
2.1.10 管外壁与空气换热	25
2.2 热传导模型	26
2.2.1 燃料元件热传导方程	27
2.2.2 包壳导热方程	27

2.2.3	蒸汽发生器换热管管壁导热方程	28
2.3	间隙导热	28
2.4	阻力系数	32
2.4.1	单相摩擦阻力系数关系式	32
2.4.2	两相摩擦阻力系数关系式	33
2.4.3	局部阻力系数关系式	35
	参考文献	36
第3章	辅助模型	39
3.1	空泡份额模型	39
3.1.1	饱和沸腾区的空泡份额	39
3.1.2	欠热沸腾区的空泡份额	40
3.2	临界热流密度及 DNBR 的计算	47
3.2.1	q_{CHF} 计算关系式	48
3.2.2	q_{CHF} 表	52
3.2.3	q_{CHF} 及 DNBR 的计算结果比较及讨论	55
3.2.4	两相流动不稳定性对 q_{CHF} 的影响	58
3.2.5	重水堆的 q_{CHF} 与临界功率比	61
3.2.6	临界热流密度的机理模型	62
3.3	堆芯中子动力学方程	75
3.3.1	堆芯中子动力学方程	75
3.3.2	反应性反馈	76
	参考文献	77
第4章	核动力系统稳态与瞬态热工计算实例	80
4.1	概述	80
4.2	系统及设备数学物理模型	82
4.2.1	反应堆数学物理模型	82
4.2.2	蒸汽发生器数学物理模型	82
4.2.3	稳压器数学物理模型	84
4.3	主循环泵模型	86
4.3.1	主循环泵及四象限特性	86
4.3.2	主循环泵状态选择	88

4.3.3	环路冷却剂流量模型	88
4.4	非能动应急堆芯余热排出系统模型	89
4.5	管道与腔室数学物理模型	90
4.6	控制系统模型	91
4.6.1	反应堆功率控制系统模型	91
4.6.2	反应堆短周期保护	92
4.6.3	稳压器控制系统模型	92
4.6.4	蒸汽发生器的控制系统模型	94
4.7	辅助模型	95
4.8	仿真系统简介	95
4.9	MITARS 程序	97
4.9.1	MITARS 程序的编制	97
4.9.2	MITARS 程序的验证及应用	99
4.10	MITARS 的后续开发	102
4.10.1	MITARS-SyTar 软件的编制	102
4.10.2	MITARS-SyTar 软件的功能简介	103
4.10.3	MITARS-SyTar 软件的界面简介	104
4.11	稳态自然循环和程序 MISARS	109
4.11.1	MISARS 程序的编制	109
4.11.2	MISARS 程序的应用	110
	参考文献	116
第 5 章	两相流数值分析技术和商用程序简介	120
5.1	两相流基本方程的闭合	121
5.2	数值解法简介	128
5.3	程序的输入、输出要求	139
5.4	典型的程序结构	144
5.5	当前开发的有关程序简介	145
5.5.1	TRAC 程序	146
5.5.2	RELAP5 程序	147
5.5.3	RETRAN 程序	148
5.5.4	CATHARE 程序	149
5.5.5	COBRA-TRAC 程序	150

5.5.6	PHOENICS 程序	151
5.5.7	严重事故分析程序	154
5.5.8	TEXAS-VI 蒸汽爆炸分析程序	155
5.5.9	其他程序	156
	参考文献	157
第 6 章	关键热工水力现象的基本模型	160
6.1	临界流	160
6.1.1	临界流的定义	160
6.1.2	单相临界流	161
6.1.3	两相临界流	163
6.1.4	过热蒸汽临界流	166
6.2	两相流动不稳定性	167
6.2.1	两相流动不稳定性分类	168
6.2.2	两相流动不稳定性判别准则	170
6.3	超临界条件下流动不稳定性	192
	参考文献	195
第 7 章	新方法在反应堆热工水力数值模拟方面的应用	199
7.1	小波分析、人工神经网络及遗传算法的应用	199
7.1.1	小波分析	199
7.1.2	人工神经网络	201
7.1.3	遗传算法	204
7.1.4	遗传神经网络	205
7.1.5	小波神经网络	205
7.2	粒子法及其应用	207
7.2.1	粒子法的提出	207
7.2.2	移动粒子半隐式(MPS)方法	208
7.2.3	MPS 方法的应用举例	216
7.3	核动力系统多尺度耦合的数值模拟计算	221
7.3.1	多尺度模拟方法简介	221
7.3.2	国内外研究现状	223
7.3.3	物理热工耦合	224

7.3.4 热工水力多尺度耦合	226
参考文献	227
第 8 章 先进反应堆系统及其热工水力分析	232
8.1 超临界水冷堆	232
8.1.1 超临界水冷堆概况	232
8.1.2 超临界水冷堆研究历史及现状	233
8.1.3 超临界水冷堆的热工设计及安全分析	235
8.2 钠冷快堆	240
8.2.1 钠冷快堆概况	240
8.2.2 钠冷快堆研究历史及现状	241
8.2.3 钠冷快堆热工水力分析研究	243
8.3 熔盐堆	251
8.3.1 熔盐堆概况	251
8.3.2 熔盐堆的研究历史及现状	252
8.3.3 熔盐堆堆芯物理热工耦合及安全特性研究	256
8.4 铅铋快堆	263
8.4.1 铅铋快堆概况	263
8.4.2 铅铋快堆研究历史及现状	263
8.4.3 铅铋快堆热工水力分析及设计	266
8.5 行波堆	271
8.5.1 行波堆概况	271
8.5.2 行波堆研究历史及现状	273
8.5.3 钠冷行波堆热工水力设计及安全分析	274
8.6 球床式水冷堆	280
8.6.1 球床式水冷堆简介	280
8.6.2 球床式水冷堆的热工水力模型	282
8.6.3 球床式水冷堆热工水力分析	289
8.6.4 球床堆燃料堆积床 CFD 模拟	292
8.7 磁约束核聚变关键能量转换部件——实验包层	294
8.7.1 ITER 计划和实验包层概况	294
8.7.2 氦冷固态陶瓷氚增殖剂实验包层概念(HCSB TBM)	297
8.7.3 液态金属氚增殖剂实验包层概念(DFLL-TBM)	301