

核动力反应堆中子动力学

Nuclear Power Reactor Neutron Dynamics

蔡章生 著 濮继龙 主审 陈辅民 审校



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

核动力反应堆中子动力学

Nuclear Power Reactor Neutron Dynamics

蔡章生 著
濮继龙 主审
陈辅民 审校

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

核动力反应堆中子动力学/蔡章生著. —北京:
国防工业出版社, 2005. 1

ISBN 7-118-03504-1

I. 核... II. 蔡... III. 反应堆动力学
IV. TL327

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 049694 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 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 $\frac{1}{8}$ 171 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1500 册 定价: 25.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: 68428422 发行邮购: 68414474

发行传真: 68411535 发行业务: 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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。

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总装备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,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业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。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

序

《核动力反应堆中子动力学》一书是蔡章生教授在多年教学实践和长期研究中子动力学方程组解法工作的基础上撰写而成的。以核工程技术人员和硕士研究生为对象,起点较高,各章内容详略得当,并具有必要的系统性,还恰当地照顾到外专业本科生攻读本专业硕士学位的需要。

本书较系统地整理了常用公式并收集了近十多年来的新成果以及他自己的研究成果,公式的推导过程,步骤清晰、内容可信,使得散落在各种文献中的计算公式系统化、集中化,便于学习和应用。

随着计算机技术的飞速发展和普及,定量计算将得到更为广泛的应用。本书对反应堆上的实验人员和运行人员都将是一本有用的书。

本书具备实用性和新颖性和创新性,在我国核能应用大发展的今天,写作本书是非常必要的和十分及时的。

中国科学院院士
中国工程院院士



2003年7月7日

前 言

核动力反应堆中子动力学的研究对象是核动力反应堆内中子动力学行为,主要研究内容是反应堆处于次临界状态下中子增殖特性、反应堆偏离临界状态时中子增殖特性、温度反馈和毒物反馈对中子增殖特性的影响等。研究的目的是通过对上述特性的分析,为核动力反应堆的设计、安全分析和控制提供必要的理论基础。

到目前为止,中子动力学专著国内只有两本,一本是《核反应堆动力学基础》(1983年黄祖洽著),另一本是中译本《核反应堆动力学导论》(1992年[美]卡尔等著)。这两本书对我国自己设计反应堆的安全分析与计算以及反应堆工程专业硕士研究生的教学都起了非常重要的作用。目前,这两本书已脱销。另一方面反应堆工程专业硕士生数量大增,国内核能利用正在大发展之中,急需有一本新的专著出版。第三,近几年来中子动力学方程解析解的研究又取得了新的成果有待归纳与总结。因此,撰写一本新的《核动力反应堆中子动力学》专著便显得非常必要了。

本书以压水型动力堆为对象,介绍了反应堆中子动力学的基本理论,共分八章。第一章扼要介绍了中子动力学必备的物理基础知识;第二章介绍了描述堆内中子行为的三种形式的中子守恒方程;第三章重点介绍了次临界反应堆中子动力学特性;第四章介绍了偏离临界反应堆中子动力学特性;第五章介绍了温度反馈对反应堆中子动力学的影响;第六章介绍了温度和毒物反馈共同作用对反应堆中子动力学的影响;第七章介绍了点堆中子动力学方程的数值解法;第八章扼要介绍了反应堆时空动力学的主要内容。

第三章收集了近年来本书作者在各种条件下用去耦合法首次

求得的中子动力学方程的十几个精确解析解。这些解析解可用作定量计算,对反应堆的物理启动、反应堆中子动力学特性分析、反应堆的安全运行和控制等有重要的理论意义和应用价值。第四章收集了本书作者导出的无外中子源,反应性阶跃时的中子增殖公式。第五章研究温度反馈的影响,以前人们认为,在考虑温度反馈时,对小反应性阶跃和反应性线性变化,不能求出中子动力学方程的解析解。本书作者近几年使用去耦合法得到了精确的解析解,可用于定量计算,无论对反应堆运行和教学都有重要的意义。在第七章收集了本书作者提出的两个数值计算方法:一是新的刚性限制法,此法比以前的限制法在应用范围上有很大的扩展;二是刚性消去法,此法是一个全新的方法,在反应堆数值计算领域属首次提出。本书作者导出的十多个中子增殖公式和消除点堆中子动力学方程刚性的公式,使得核动力反应堆运行现场的快速即时甚至超时计算变成了现实。这是本书创新的内容。

本书收集了作者近几年研究所取得的成果,其中大多数都已正式发表,这些成果对反应堆中子动力学具有重要的理论意义和实际应用价值。本书在撰写、评审与申报出版的全过程中,曾得到赵仁恺、罗云、濮继龙、陈辅民、于维钧、陈雄月、王大华、龚沈光等著名专家、学者的热忱支持与指导;濮继龙、陈辅民和陈雄月在本书参评过程中,提出了很多宝贵的意见;本书的打印全部由张帆完成,作者在此一并表示衷心的感谢。

本书可作为高等院校反应堆工程专业硕士研究生和博士研究生教学参考书,也可作为相关专业的工程技术人员和研究人员的参考书,特别是可作为从事反应堆安全运行和安全分析人员的参考书。

本书所涉及的知识面甚广,由于作者水平有限,书中难免有不当甚至错误之处,欢迎读者批评指正。

作者

目 录

绪论	1
第一章 物理基础知识	5
第一节 核截面、反应率与中子通量密度	5
第二节 增殖因子	7
第三节 反应性、中子平均寿命和中子一代时间	10
第四节 缓发中子及其作用	11
第二章 中子动力学方程	15
第一节 中子输运方程	15
第二节 单速中子扩散方程	27
第三节 点反应堆中子动力学方程	29
第三章 次临界反应堆中子增殖特性	35
第一节 反应性恒定	36
第二节 无限缓慢提棒	50
第三节 连续提棒	52
第四节 物理启动实际提棒	63
第四章 偏离临界反应堆中子增殖特性	70
第一节 反应性阶跃变化点堆中子动力学方程 的精确解	70
第二节 反应性阶跃变化单组缓发中子近似解	82
第三节 反应性阶跃变化常数缓发中子源近似解	87
第四节 反应性阶跃变化瞬跳近似解	88
第五节 反应性线性变化点堆中子动力学方程的 近似解	91
第五章 温度反馈对中子增殖的影响	100

第一节	温度反馈机理	101
第二节	反馈数学模型	113
第三节	大反应性阶跃输入	115
第四节	小反应性阶跃输入	123
第六章	温度反馈和毒物反馈对 neutron 增殖的影响	129
第一节	温度反馈效应	129
第二节	氙毒反馈效应	130
第三节	钐毒反馈效应	146
第四节	其他毒物反馈效应	150
第五节	温度反馈和毒物反馈同时存在的数学模型	151
第七章	点堆中子动力学方程数值解法	154
第一节	方程的刚性及其数值解问题	154
第二节	刚性限制法	157
第三节	刚性消去法	163
第四节	Gear 方法	165
第五节	其他算法简介	169
第六节	反应堆数值计算方法中的问题	171
第八章	反应堆时空动力学	178
第一节	时空多群中子扩散方程数值解法	178
第二节	因子分解法	182
第三节	模项展开法	186
附录 1	国际单位制 (SI)	188
附录 2	基本常数	191
附录 3	元素与一些分子的截面和核参数	192
参考文献		200

Contents

Introduction	1
Chapter 1 Element of Nuclear Physics	5
Section 1 Nuclear Cross Section, Reactivity and Nuclear Flux Density	5
Section 2 Multiplication Factor	7
Section 3 Reactivity, Neutron Average Lifetime and Neutron Generation Time	10
Section 4 Delay Neutron	11
Chapter 2 Neutron Dynamic Equation	15
Section 1 Neutron Transport Equation	15
Section 2 The Same Energy Diffusion Equation	27
Section 3 Point Model Neutron Dynamic Equation	29
Chapter 3 Hypo-critical Reactor Neutron Multiplication Character ter	35
Section 1 Invariableness of Reactivity	36
Section 2 Lifting Control Rod in Infinite Slow Way	50
Section 3 Lifting Control Rod Continuously	52
Section 4 Practical Lifting Control Rod in Physical Startup	63
Chapter 4 Departure Critical Reactor Neutron Multiplication Character	70
Section 1 The Exactness Solution of Point Model Neutron Dynamic Equation when Reactivity Step-Change	70

Section 2	Approximately Solution with Single-Group Delayed Neutron when Reactivity Step-Change	82
Section 3	Approximately Solution with Constant Delayed Neutron Source when Reactor Reactivity Step-Change	87
Section 4	The Prompt Jump Approximately Solution when Reactivity Step-Change	88
Section 5	Approximately Solution of Point Model Dynamic Equation when Reactivity linear-Change	91
Chapter 5	The Influence of Temperature Feedback to Neutron Multiplication	100
Section 1	The Mechanism of Temperature Feedback ..	101
Section 2	The Mathematic Model of Feedback	113
Section 3	Large Step Change in Reactivity	115
Section 4	Small Step Change in Reactivity	123
Chapter 6	The Influence of Temperature Feedback and Poison Feedback to Neutron Multiplication	129
Section 1	Temperature Feedback Effect	129
Section 2	Xenon Feedback Effect	130
Section 3	Samarium Feedback Effect	146
Section 4	Other Poison Feedback Effect	150
Section 5	The Mathematic Model with Temperature Feedback and Poison Feedback	151
Chapter 7	The Numerical Method of Point Model Neutron Dynamic Equation	154
Section 1	The Stiffness of Equation and Numerical Solution	154
Section 2	The Method of Stiffness Confine	157
Section 3	The Method of Stiffness Elimination	163
Section 4	The Method of Gear	165

Section 5	The Other Numerical Methods	169
Section 6	Problems in Reactor Numerical Methods	171
Chapter 8	Reactor Time-Space Dynamics	178
Section 1	Time-Space Multi-group Neutron Diffussion Equation	178
Section 2	Factorization	182
Section 3	Module Expandedness Method	186
Appendix 1	Le Systeme International d'Unites	188
Appendix 2	Basic Constant	191
Appendix 3	Elements and Some Molecular Cross Section ...	192
References	200

绪 论

核动力反应堆中子动力学的研究对象是核动力反应堆内中子动力学行为,主要研究内容是反应堆处于次临界状态下中子增殖特性、反应堆偏离临界状态时中子增殖特性、温度反馈和毒物反馈对中子增殖特性的影响等。研究的目的是通过对上述特性的分析,为核动力反应堆的安全运行和控制提供必要的理论基础。

核电站反应堆为带恒定负荷运行并且避开了碘坑内启动。与此相反,核动力反应堆为了满足核动力装置的机动性要求,必须经常变负荷运行,或大幅度甩负荷后又重新启动。这样,核动力反应堆发生事故的概率增大了。为了确保核动力反应堆的安全运行,人们便希望在核动力反应堆运行现场应能对瞬变过程作出快速即实时甚至超时计算与分析。但是长期以来,上述要求一直未得到满足,主要原因有:

(1)由于中子动力学方程组的复杂性,人们只是在极其简单的条件下,才能导出近似解析解,这些近似解析解不能用于定量计算与分析。特别是在必须考虑外加中子源对中子增殖的贡献和必须考虑温度反馈对中子增殖影响的两大类问题中,连近似解也未能导出。

(2)由于中子动力学方程组具有较强的“刚性”,对其进行数值计算时,计算效率较低,计算时间比物理过程进行的时间长得多。

近十年来,本书作者对反应堆运行现场快速计算进行了研究,取得了较好的成果。审核本书的几位专家都认为这些成果使上述快速计算要求基本得到了实现。这些成果大多数已融入本书中。

反应堆运行动态,是由于反应堆的中子增殖因子变化的结果,

因为中子增殖因子变化时,反应堆便会偏离稳态,堆芯物理参数,例如中子密度等便随之发生变化,反应堆便会处于动态运行状态。中子增殖因子发生变化的主要原因有如下几种^[1,2]:

(1)控制棒的移动。大多数反应堆启动、变工况和停堆都是通过移动控制棒来改变反应堆增殖因子,从而达到中子密度的改变。

(2)温度变化。反应堆的许多参数值都会随温度变化。而反应堆的温度通常是反应堆运行功率的函数,因此反应堆功率水平的变化将引起反应堆增殖因子的变化。

(3)偶然事故。某些意外的事故可能突然改变反应堆的性质和运行状态。例如,控制棒意外掉落或弹射出堆芯,导致增殖因子急速变化;冷却剂循环泵停转、冷却剂管道破口等,引起整个堆芯温度快速上升;个别冷却剂流道堵塞,引起局部温度快速上升;突然启动一条温度较低的冷却剂回路,而导致堆芯温度降低。

(4)同位素生成。一个可裂变核裂变后产生两个同位素,其中有些有很强的中子吸收能力,它们吸收中子后并不发生裂变和不会放出中子,故称为“毒物”。这些新同位素的出现也会使反应堆的后备反应性下降。另一方面,某些核素吸收中子后,可转化为可裂变核素,又可对后备反应性有正的贡献。

(5)核燃料的燃耗。反应堆释热来源于可裂变核裂变,释热率与核裂变率成正比。因此,反应堆中核燃料的贮量随反应堆带功率运行的时间增加而下降。核燃料贮量的下降导致反应堆后备反应性的下降。

反应性变化引起的动力学过程是非常复杂的,考虑到实际工程计算的可能性,不可能要用一个多元的数学模型来描述,因此,为了建模的需要,通常先把反应堆状态随时间变化的现象,按物理过程所需时间的长短分为如下三大类^[2],分别做不同的近似后,再建立相应的数学模型。

第一类现象——短时间现象

短时间现象是指动态过程所经历的时间为毫秒到秒的时间现象。它或多或少地包括了由于核反应堆的预期变化或意外变化所

引起的中子密度的快速变化。包括上述原因(1),(2),(3)。

第二类现象——中等时间现象

中等时间现象是指动态过程所经历的时间为几小时或几天的时间现象。这类现象主要取决于热中子反应堆中两种裂变产物(^{135}Xe , ^{147}Sm)的积累、燃耗以及 β 衰变。上述两种裂变产物都有很大的热中子俘获截面,因此,在热中子反应堆中,需要给予特别的注意。此类现象,因而常被称为“中毒”或“碘坑”现象。实际上,此类时间现象中,令人感兴趣的是反应堆温度对于中子密度随时间变化的影响,其他问题在方法学上和核反应堆动态学的处理上是有区别的,所以参考文献[2]把它列入其附录中。

第三类现象——长时间现象

长时间现象是指反应堆动态过程所经历的时间尺度为几月或几年的时间现象。它不但包括了大多数裂变产物的积累、燃耗和 β 衰变,还包括了可裂变同位素的燃耗和积累。在快中子能区,所有裂变产物的中子截面都是如此之小,以致于它们不像在热中子反应堆中那样强烈地影响中子密度和反应性。

长时间现象除了包括上述各点之外,还包括核反应堆结构材料的肿胀,燃料芯块因燃耗而发生的变化等。但这些长时间现象,对核反应堆内的中子密度的变化有极小的影响。

对上述三种过程使用术语进行概括如下:

少数学者将所有随时间变化的现象都归结为“核反应堆动力学”问题,其中包括同位素的燃耗和积累。然而大多数学者认为,同位素的燃耗和积累属于长时间现象,已发展成为一类独立的问题,故不应概括在核反应堆动力学之内。

现在大多数学者认为,核反应堆动力学只研究如下两类短时间现象:

(1)第一类:没有温度反馈效应与毒物反馈效应的短时间现象。

(2)第二类:有温度反馈效应与毒物反馈效应的短时间现象。
本书采用大多数学者所概括的第二类核反应堆动力学术语。