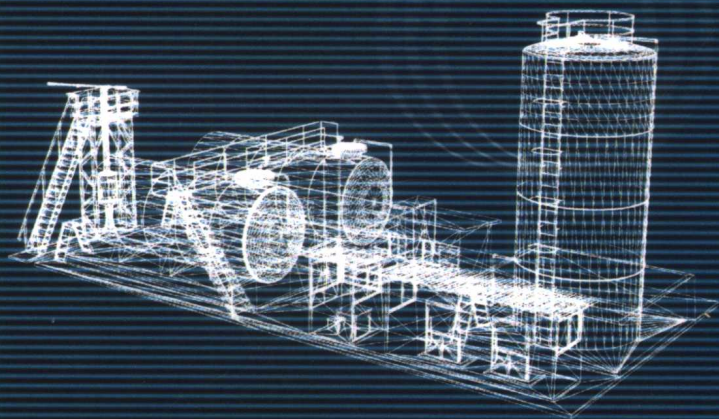


核科学与技术



中子输运理论数值 计算方法

谢仲生 邓力 著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

国防科工委「十五」规划专著



国防科工委“十五”规划专著

中子输运理论数值计算方法

谢仲生 邓 力 著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书系统深入地介绍了中子输运理论及其数值计算方法。全书分上、下两篇。上篇介绍中子输运问题的确定论计算方法,共6章。内容包括:中子输运方程、球谐函数方法、离散纵标方法、积分输运方法、多群扩散方程的数值解法及中子输运共轭方程和微扰理论。下篇介绍中子输运问题的随机模拟,共5章。内容包括:蒙特卡罗方法的基本原理、中子输运问题的蒙特卡罗模拟、蒙特卡罗多群中子输运计算、降低方差技巧和粒子输运问题蒙特卡罗并行计算等。

本书可供核科学与技术领域中从事中子输运理论基础研究及数值计算的工程技术人员参考,也可作为高等院校核科学与工程专业硕士及博士研究生的学位课程或选修课程的教材。

图书在版编目(CIP)数据

中子输运理论数值计算方法/谢仲生,邓力著. —西安:西北工业大学出版社,2005.12

ISBN 7-5612-1855-9

I. 中… II. ①谢… ②邓… III. 中子输运理论—数值计算
IV. TL323

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 133379 号

中子输运理论数值计算方法

谢仲生 邓力 著

责任编辑 李阿盟 责任校对 刘晖

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

发行部电话:029-88493844 88491757

http: www.nwpu.com

西安新华印刷厂 各地书店经销

开本:850 mm×1168 mm 1/32

印张:15.875 字数:395 千字

2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

印数:1~2 000 册

ISBN 7-5612-1855-9 定价:34.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编 委：王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占



有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技



发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全



面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝

前 言

中子输运理论是研究中子在介质内运动的过程和规律的基础理论。随着核能利用的蓬勃发展,它在核科学技术领域中已成为一个独立的基础理论科学,并在核反应堆物理、屏蔽和核技术的工程应用和军事技术等领域中获得广泛的应用。

近年来,随着电子计算机和计算方法的发展,数值方法已逐步成为中子输运理论的主要计算手段。特别是近30年来,发展了许多有效的数值计算方法和计算程序,在计算精度和速度上都达到了相当完善的程度,并在工程上获得了广泛的应用。然而这些内容多见于期刊杂志和会议报告,系统和深入地讨论这方面内容的书籍则极少。因而对于从事核科学与技术的专业研究人员和高等院校研究生来说迫切需要一本系统反映中子输运理论及其数值计算和输运问题计算机模拟的参考书籍。

编写本书的目的便在于系统地介绍中子输运理论和近年来发展的一些工程上实用的数值计算方法,包括一些文献上发表的成果和作者多年来实际工作及教学的经验。本书是在作者的原著《核反应堆物理数值计算》(原子能出版社,1997年,该书曾获国防科学技术三等奖)的基础上增订编写而成的。特别是在蒙特卡罗方法方面的内容作了较大



的扩充。在编写中,努力贯彻理论联系实际,内容少而精的原则;对于各种数值方法,着重于阐述它的基本原理、算法思想及其共性的分析方法;尽量避免艰深的数学理论和繁杂的公式推导过程;力求避繁就简,做到概念清晰,结合实际,使读者便于掌握方法的实质和应用。

在内容安排上,按照各种数值方法独立成章,便于读者自由选择所需内容。全书共分上、下两篇。上篇着重介绍确定论方法,共6章,包括中子输运方程、球谐函数方法、离散纵标方法、积分输运理论方法、多群中子扩散方程的数值解法和微扰理论等。下篇介绍中子输运问题的随机模拟,共5章,包括蒙特卡罗方法基本原理、中子输运过程的随机模拟、多群MC计算、降低方差技巧和并行计算等。

阅读本书的读者应具有原子核物理、反应堆物理、数学物理方法、概率论和计算方法等方面知识。

西安交通大学谢仲生教授负责本书上篇第一至六章的撰写,中国工程物理研究院北京应用物理与计算数学研究所邓力研究员负责下篇第七至十一章的撰写。西安交通大学曹良志博士参加了第二章2.9节的编写。全书由谢仲生教授统稿。

本书由中国核动力研究设计院章宗耀研究员和中国原子能科学研究院罗璋琳研究员审校,他们提出了许多宝贵意见。西安交通大学李佩芝教授对书稿进行了认真的校对和订正。本书的出版还



得到西北工业大学出版社的大力支持。作者在此一并表示衷心的感谢。

鉴于本书涉及的内容广泛,且各种计算方法都在不断发展中,同时限于作者的水平及工程经验不足,书中难免会有缺点和错误之处,恳切希望广大读者批评指正。

编著者

2005年8月

目 录

上 篇 中子输运问题的数值计算方法

第一章 中子输运方程

1.1 引言	(3)
1.2 坐标系与基本定义	(5)
1.2.1 坐标系	(6)
1.2.2 中子密度、中子通量密度和中子流密度	(8)
1.3 中子输运方程	(11)
1.3.1 中子输运方程的建立	(11)
1.3.2 定解条件	(16)
1.3.3 不同坐标系中散度算子 $\Omega \cdot \nabla \phi$ 的表达式	(18)
1.4 中子输运方程的守恒形式	(24)
1.4.1 在曲坐标系中中子输运的角度再分布	(24)
1.4.2 输运算符的守恒形式	(25)
1.5 中子输运方程的积分形式	(29)
1.5.1 中子积分输运方程	(29)
1.5.2 微分-积分输运方程和积分输运方程的等价性	(34)
1.6 稳态输运方程的本征值问题	(36)
1.6.1 k 本征值问题	(37)
1.6.2 α 本征值问题	(40)
1.7 中子输运方程近似解法概述	(42)
1.8 分群中子输运方程	(48)
1.8.1 散射源项的球谐函数展开	(48)
1.8.2 分群中子输运方程及群常数	(50)



1.9 核数据库和多群常数库	(55)
1.9.1 核数据库	(55)
1.9.2 多群常数库	(58)
1.9.3 少群常数的计算及能群的归并	(60)
参考文献	(62)

第二章 球谐函数方法

2.1 一维情况下 P_N 近似方程	(64)
2.1.1 一维平面几何 P_N 近似方程	(64)
2.1.2 边界条件	(68)
2.1.3 扩散(P_1)近似	(71)
2.2 一维平面几何 P_N 近似方程的数值解法	(72)
2.2.1 P_N 近似的差分方程	(72)
2.2.2 P_N 近似有限差分方程的解法	(75)
2.3 一维曲线坐标系中的 P_N 近似	(76)
2.3.1 一维球坐标系	(76)
2.3.2 一维圆柱坐标系	(78)
2.4 双 P_N 近似	(81)
2.5 一般几何坐标系中的球谐函数(P_N)近似方程	(84)
2.5.1 三维直角坐标系中的 P_N 近似方程	(84)
2.5.2 二维直角坐标系中的 P_N 近似方程	(88)
2.5.3 二维($R-Z$)圆柱坐标系中的 P_N 近似方程	(89)
2.5.4 一点注记	(90)
2.6 扩散近似	(91)
2.6.1 P_1 近似与扩散近似	(91)
2.6.2 扩散近似的边界条件	(94)
2.6.3 扩散理论的适用条件	(97)
2.6.4 多群扩散方程	(98)
2.7 中子通量密度球谐矩能谱的近似计算	(100)
2.8 二阶型中子输运方程	(105)
2.8.1 二阶偶对称型中子输运方程	(105)
2.8.2 中子输运方程的变分原理	(108)



2.8.3 球谐近似方法中的边界条件的变分求法	(109)
2.9 中子输运方程的球谐函数-有限元方法	(115)
2.9.1 二阶自共轭形式的 SAAF 中子输运方程	(115)
2.9.2 SAAF 方程的球谐函数展开	(118)
2.9.3 P_N 方程的变分形式	(121)
2.9.4 有限元离散	(122)
参考文献	(128)

第三章 离散纵标(S_N)方法

3.1 一维球几何离散 S_N 方法	(133)
3.1.1 离散求积组的选取	(133)
3.1.2 离散有限差分方程的建立	(139)
3.1.3 差分方程的求解	(145)
3.2 二维及三维离散纵标(S_N)方法	(147)
3.2.1 离散求积组的选取	(147)
3.2.2 角度变量的离散	(159)
3.2.3 空间变量的离散	(162)
3.2.4 差分方程的解	(170)
3.3 加速收敛方法	(172)
3.3.1 粗网格再平衡方法	(173)
3.3.2 扩散综合加速收敛(DSA)方法	(177)
3.3.3 契比雪夫加速收敛方法	(181)
3.4 数值计算中的一些问题	(184)
3.4.1 扫描方向与计算过程的稳定性	(184)
3.4.2 差分格式的截断误差	(185)
3.4.3 负中子通量密度及其修正	(187)
3.5 射线效应	(190)
3.5.1 射线效应	(190)
3.5.2 一维情况下离散纵标方程和球谐函数法方程的等价性	(192)
3.5.3 二维 $X-Y$ 几何中虚源的构造	(195)
3.6 离散纵标方法应用程序	(199)



参考文献	(200)
------------	-------

第四章 积分输运方法

4.1 积分输运方法的基本原理	(204)
4.1.1 基本方程	(204)
4.1.2 输运近似	(209)
4.2 中子飞行首次碰撞概率的计算	(212)
4.2.1 二维多柱系统间的中子首次碰撞概率	(213)
4.2.2 互易关系式	(218)
4.3 一维圆柱栅元内中子空间-能量分布的计算	(220)
4.3.1 基本方程	(220)
4.3.2 栅元首次碰撞概率的计算	(223)
4.3.3 碰撞概率方程的求解	(228)
4.4 面流法——燃料组件内中子通量密度分布的计算	(229)
4.4.1 穿透概率法	(230)
4.4.2 QP_1 近似穿透概率法	(239)
4.5 组合法	(245)
参考文献	(246)

第五章 多群扩散方程的数值解法

5.1 源迭代法	(248)
5.2 一维扩散方程的数值解法	(252)
5.2.1 差分方程组的推导	(252)
5.2.2 差分方程组的解法	(255)
5.3 多维扩散方程的差分方法	(256)
5.3.1 二维差分方程组	(257)
5.3.2 三维问题的差分方程组	(260)
5.4 差分方程的迭代解法	(262)
5.5 中子扩散方程数值解法	(265)
5.6 幂迭代的加速收敛方法	(268)
5.6.1 粗网格再平衡方法	(268)



5.6.2 契比雪夫多项式外推方法	(273)
5.7 粗网节块方法	(278)
5.7.1 引言	(278)
5.7.2 节块展开法	(280)
5.7.3 幂迭代的加速收敛技术	(291)
5.8 节块内精细功率分布的重构	(293)
5.8.1 均匀化节块内精细功率分布的重构	(294)
5.8.2 节块角点中子通量密度值的确定	(297)
5.8.3 燃料组件内精细功率分布的重构	(299)
参考文献	(300)

第六章 中子输运共轭方程和微扰理论

6.1 共轭算子和中子输运共轭方程	(303)
6.1.1 共轭算子	(303)
6.1.2 中子输运共轭方程	(304)
6.1.3 奇-偶二阶型中子输运方程的自共轭性	(307)
6.2 多群 P_1 近似和扩散近似共轭方程	(309)
6.2.1 多群扩散近似共轭方程	(309)
6.2.2 P_1 近似的共轭方程	(313)
6.3 共轭算子的本征值及其本征函数	(315)
6.4 中子价值	(318)
6.5 中子共轭方程的建立与物理解释	(326)
6.5.1 中子输运共轭方程	(326)
6.5.2 分群中子扩散的共轭方程	(328)
6.6 积分输运共轭方程	(331)
6.6.1 中子输运共轭方程的积分方程形式	(331)
6.6.2 中子积分输运方程的共轭方程	(334)
6.7 微扰理论及其应用	(337)
6.7.1 扰动方程	(337)
6.7.2 中子输运方程的扰动方程	(339)
6.7.3 分群扩散方程的扰动方程	(341)
6.8 微扰理论的一些应用	(343)



参考文献	(345)
------------	-------

下 篇 中子输运问题的随机模拟

第七章 蒙特卡罗方法基本原理

7.1 蒙特卡罗方法概述	(349)
7.1.1 方法简介	(349)
7.1.2 误差估计	(351)
7.1.3 方法特点	(353)
7.2 随机数产生	(355)
7.2.1 随机数与伪随机数	(355)
7.2.2 伪随机数的产生	(357)
7.2.3 随机数发生器	(358)
7.3 随机变量的抽样	(360)
7.3.1 离散型随机变量的抽样	(360)
7.3.2 连续型随机变量的抽样	(362)
7.4 随机抽样方法	(365)
7.4.1 偏倚抽样	(366)
7.4.2 舍选抽样	(367)
7.4.3 复合抽样	(370)
7.4.4 分层抽样	(371)
7.4.5 系统抽样	(373)
7.4.6 等概率抽样	(374)
参考文献	(375)

第八章 中子输运问题的蒙特卡罗模拟

8.1 中子输运方程的积分形式	(377)
8.2 发射密度方程的模拟	(380)
8.2.1 发射密度方程的逐次逼近解	(380)
8.2.1 发射密度方程的随机模拟	(381)