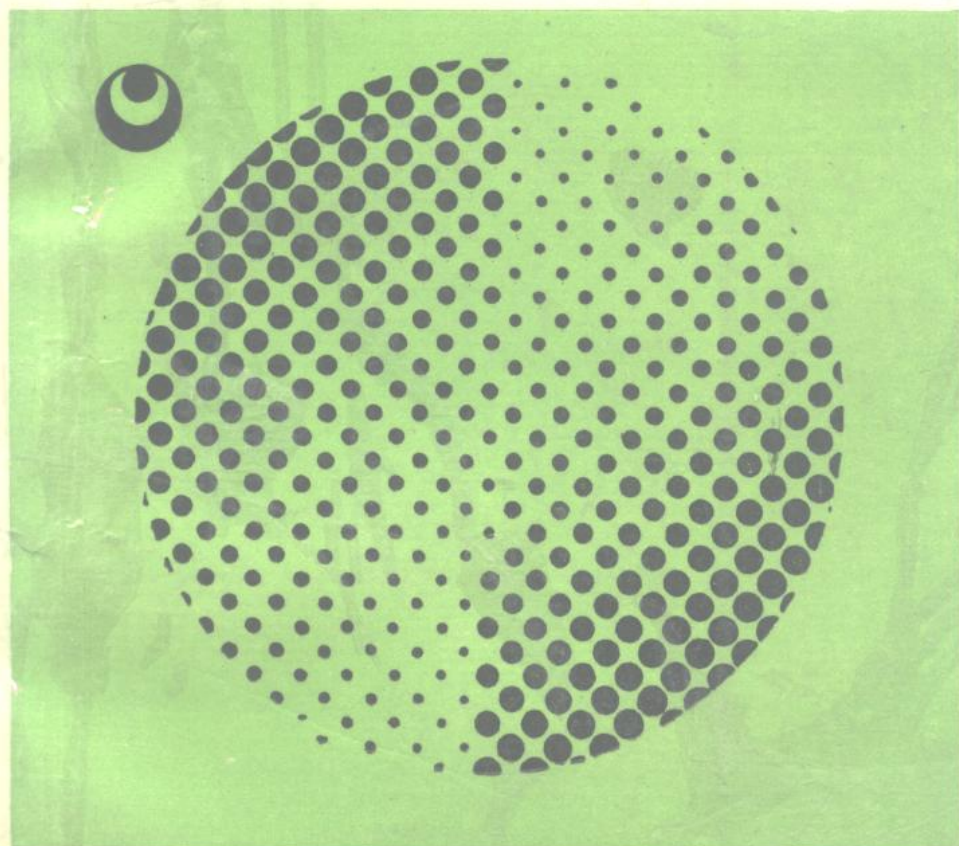


计算物理丛书

输运问题的计算机模拟

杜书华等编著



湖南科学技术出版社

计算物理丛书

输运问题的计算机模拟

杜书华 张树发

冯庭桂 王元璋

邢静茹编著

湖南科学技术出版社

输运问题的计算机模拟

杜书华等编著

责任编辑：陈一心

湖南科学技术出版社出版发行

(长沙市展览馆路8号)

湖南省新华书店经销 湖南省新华印刷二厂印刷

1989年12月第1版第1次印刷

开本：850×1168毫米 1/32 印张：23.375 字数：614,000

印数：1—1,100

ISBN 7—5357—0552—9

TP·22 定价：10.35元

地科 27

《计算物理丛书》编辑委员会

主 编：秦元勋

副 主 编：况蕙孙 符鸿源

编 委：(按姓氏笔划为序)

王宗皓	王貽仁	付德薰	乔登江	曲钦岳	杜书华
邱希春	况蕙孙	吴声昌	陈一心	孟昭利	胡海清
郝柏林	袁兆鼎	张开明	张锁春	谈庆明	秦元勋
常铁强	曾庆存	黄 敦	符鸿源	蒋伯诚	裴鹿成
虞福春					

名誉编委：(按姓氏笔划为序)

于 敏	王大珩	王淦昌	冯 康	庄逢甘	李德元
何祚庥	谷超豪	周光召	周毓麟	程开甲	彭桓武

编 辑 部：

蒋伯诚 张锁春 杜书华 陈一心 邵富球

总 序 言

计算物理学在中国的发展已有30年的历史。这门学科首先为国防科研作出了重大贡献,现已广泛应用于国民经济建设和基础科学研究。我国的一大批计算物理科学家积累了丰富的实际经验,急需及时地总结、提高、推广和交流。

继1982年成立中国核学会计算物理学会和1984年出计算物理学报以来,现在开始出版的计算物理学丛书是计算物理学界的又一重大里程碑。

这套丛书的对象是高年级大学生、研究生和广大的科技工作者。内容首先反映中国人自己的成就,并吸收国外的有用经验。有理论,有方法,有算例。既保证高水平的科学体系,又注重解决实际问题,以普及的形式表达专著的内容。

这套丛书的出版得到湖南科技出版社的大力支持。对湖南科技出版社这种着眼于中华民族科技自立的崇高行为,计算物理学工作者都高度赞赏,并表示衷心的感谢。

对于参加这套丛书撰写的科学家、丛书编委会的编委、德高望重的名誉编委和编辑部的工作者所付出的辛勤劳动,我代表中国核学会计算物理学会表示衷心的感谢。

祝计算物理学在为祖国的现代化作出贡献中茁壮成长!

秦 元 勋

1988年8月8日

前 言

本书的目的是试图对粒子输运理论的物理基础与计算机模拟方法给出一个较全面的叙述,并对各种近似方法在不同情况下的相对适用性作一简要的讨论。

本书的内容是自成系统的。然而,既然《计算物理丛书》的对象是高年级大学生、研究生和有关专业领域的科技工作者,我们自然认为本书的读者已经具有相应的初步知识。所以本书的陈述方法,不是为了适应那些用本书作为初步入门的读者,而是面向前述那类读者。具体地说,我们不采取从简化了的物理概念和图象出发导出比较初等的近似,进而逐步精确化的写作方式,而是从给出基本物理量的概念和定义开始,直接导出物理问题的精确数学模型,并给出求解精确方程的各种近似方法和简化处理。我们认为,这样做可以使问题的表述更统一完整,使读者更清晰地了解每种近似方法所能适用的范围。诚然,这就要求读者在他能了解本书所涉及的内容之前,具备相当的物理和数学基础。本专业领域之内对本书有兴趣的读者,也需经过一定的数学和物理概念的训练。

本书是输运理论计算机模拟方面的专著,内容包含了作者多年实际工作的经验,同时也吸收了文献上发表的成果,论述上比较着重于实用性。我们希望本书对从事核能理论研究和反应堆理论设计的实际工作者会有所裨益。

本书执笔者和具体分工如下:杜书华(第一至第七章,第十四、十五章),王元璋(第八章),冯庭桂(第九至十三

章)，张树发（第十六至十九章，第二十一章），邢静如（第二十章）；并由杜书华负责全书的统一整理。张树发绘制了本书的全部插图。

本书写作过程中，曾得到秦元勋教授和况蕙孙教授热情鼓励和支持，符鸿源研究员在百忙中审阅了全部书稿，在此谨对他们表示衷心的感谢。

由于作者学识水平所限，书中一定会存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评、指正。

作者

一九八八年五月

目 录

绪 论

第一篇 输运问题的物理基础

第一章 基本概念和基本物理量的定义..... (17)

§ 1 基本物理量及其定义..... (17)

1.1 截面..... (17)

1.2 碰撞定律..... (18)

1.3 增殖介质和非增殖介质..... (19)

1.4 密度、通量及流..... (20)

§ 2 次级粒子各向异性发射的重要性和一般描述..... (22)

2.1 各向异性的定性描述..... (23)

2.2 非弹性散射..... (26)

§ 3 散射运动学..... (27)

§ 4 转移截面..... (31)

§ 5 基本假设..... (33)

第二章 物理量守恒和粒子输运过程的数学描述..... (36)

§ 1 物理量守恒和守恒方程..... (36)

§ 2 辐射流体力学方程组..... (38)

§ 3 燃耗方程..... (42)

§ 4 输运方程..... (44)

4.1 近似计及流体宏观运动的输运方程..... (44)

4.2 计及流体宏观运动的输运方程的推导..... (47)

§ 5 输运方程的定解条件..... (51)

§ 6 输运积分方程的一般形式..... (54)

§ 7 输运积分方程的特殊形式..... (57)

§ 8	各种坐标系的输运方程的相互转换	(63)
8.1	输运算符的张量表示	(63)
8.2	直角坐标系向环形几何坐标系的转换	(65)
8.3	柱几何坐标系	(68)
8.4	输运算符在一般正交坐标系中的形式一览表	(69)
第三章	输运方程解的一般性质	(74)
§ 1	一般讨论——近似的必要性	(74)
§ 2	临界条件	(77)
§ 3	输运方程的定态化	(78)
3.1	分离变量	(79)
3.2	Laplace变换	(80)
3.3	输运算符的谱	(81)
3.4	临界性和解的唯一性	(83)
§ 4	输运算符的各种本征值及相应的本征函数	(84)
4.1	各种本征值	(84)
4.2	本征值之间的关系	(87)
4.3	各种本征函数	(89)
第四章	多群输运理论	(93)
§ 1	P_N 方程	(93)
1.1	一般形式的 P_N 方程	(95)
1.2	一维平几何 P_N 方程	(99)
1.3	一维球几何 P_N 方程	(102)
1.4	P_N 近似中弹性散射各向异性源的处理	(104)
§ 2	转移截面的近似处理	(106)
2.1	输运近似	(106)
2.2	广义输运近似	(110)
2.3	转移截面的几率函数法近似	(112)
§ 3	多群方程的建立及群常数的确定	(116)
3.1	多群方程的形式确定	(116)
3.2	多群理论工作的步骤	(117)
3.3	确定群常数的一般方法	(120)
§ 4	估算群内能谱的 PB_N 方法	(124)

4.1	均匀介质几何输运方程的 P_N 近似和 B_N 近似	(124)
4.2	PB_N 近似方程组	(127)
§ 5	单能输运理论	(130)
5.1	研究的意义	(130)
5.2	输运方程的精确解	(131)
5.3	临界问题的精确解及其数值结果	(144)
§ 6	输运方程能量关联的其它近似处理	(152)
第五章	扩散理论	(156)
§ 1	Fick定律	(157)
§ 2	扩散方程的建立	(160)
§ 3	定解条件	(162)
§ 4	扩散方程与输运方程的关系	(165)
§ 5	扩散理论的局限性及适用范围	(167)
§ 6	定态单能扩散方程的基本解	(169)
6.1	无限平面源	(169)
6.2	点源	(171)
6.3	具有自由表面的有限厚平板系统	(172)
6.4	外区为无限厚的双区平板系统	(174)
§ 7	改进扩散理论	(175)
7.1	半经验的改进扩散理论	(176)
7.2	计及散射各向异性的改进扩散理论	(182)
第六章	价值理论	(192)
§ 1	输运算符和伴算符	(192)
§ 2	价值函数及其物理意义	(196)
§ 3	价值守恒定律的数学描述——价值方程的建立	(200)
§ 4	定解条件	(201)
§ 5	输运方程和价值方程的相伴性及其解的正交性	(203)
§ 6	非定态价值方程解的性质	(207)
§ 7	扩散价值理论	(210)
7.1	价值通量和价值流	(210)
7.2	扩散理论的价值流	(212)

7.3	扩散价值方程	(214)
7.4	定解条件	(216)
第七章	不变量嵌入输运理论	(218)
§ 1	概述	(218)
§ 2	反照函数和穿透函数的定义	(219)
§ 3	无限薄平板的反照函数和穿透函数	(222)
§ 4	不变量嵌入方程的建立	(224)
§ 5	半无限介质的反照函数——不变量嵌入法的基本原理	(228)
§ 6	变形的穿透函数	(229)
§ 7	变形穿透函数和一般穿透函数的关系式	(232)
§ 8	无限介质的粒子总通量	(233)
§ 9	粒子在介质中穿透问题的不变量嵌入方法解	(235)
§ 10	临界条件和含裂变再生能谱的不变量嵌入方程	(236)
§ 11	Boltzmann 输运理论和不变量嵌入理论的差别及 其相互之间的关系	(239)

第二篇 输运问题的数值模拟

第八章	扩散方程的数值解法	(243)
§ 1	引言	(243)
§ 2	扩散本征值问题的幂迭代法	(244)
§ 3	一维扩散方程的有限差分方法	(247)
§ 4	二维扩散方程的离散形式	(256)
4.1	差分方法	(256)
4.2	有限元方法	(260)
§ 5	离散方程的迭代解法 (内迭代)	(276)
§ 6	外迭代的加速收敛方法	(293)
§ 7	非定态问题	(298)
第九章	一维离散S_N方法	(304)

§ 1 引言	(304)
§ 2 平几何的离散 S_N 方法	(306)
2.1 离散 S_N 方程	(306)
2.2 高斯求积系数	(307)
2.3 离散 S_N 方程的解法	(308)
2.4 负通量及其处理方法	(314)
2.5 各种计算格式	(316)
2.6 计标格式的误差	(320)
§ 3 一维球几何的离散 S_N 方法	(325)
3.1 引言	(325)
3.2 守恒原则与差分方程的建立	(326)
3.3 差分方程的解法	(331)
3.4 负通量处理及加权格式	(335)
3.5 指数函数格式	(339)
3.6 Carlson S_N 方法	(341)
§ 4 一维柱几何的离散 S_N 方法	(345)
第十章 二维离散纵标法	(348)
§ 1 方向求积系数的选择	(348)
§ 2 差分方程的建立	(356)
§ 3 差分方程的解法	(364)
§ 4 一维柱坐标离散 S_N 方程的解法	(373)
§ 5 射线效应	(374)
第十一章 多群计算	(386)
§ 1 多群差分方程组及其解法	(386)
1.1 多群离散 S_N 方程组	(386)
1.2 源迭代方法	(387)
§ 2 几类求解问题	(394)
§ 3 非定常问题	(399)
§ 4 伴输运方程的离散 S_N 方法	(401)
第十二章 加速迭代收敛方法	(407)
§ 1 引言	(407)

§ 2	扩散综合加速法	(409)
§ 3	再平衡加速法	(411)
§ 4	广义再平衡加速法	(416)
4.1	广义再平衡迭代格式	(417)
4.2	广义再平衡迭代格式的收敛性	(421)
§ 5	解非定常输运方程的加速处理	(425)
5.1	指数外推法	(426)
5.2	显式再平衡修正格式	(429)
第十三章 有限元方法		(432)
§ 1	一维离散 S_N 有限元方法	(432)
1.1	一维几何离散 S_N 有限元方法	(433)
1.2	一维球几何离散 S_N 有限元方法	(438)
§ 2	二维离散 S_N 有限元方法	(444)
2.1	三角剖分与插值函数	(444)
2.2	空间变量的有限元处理	(448)
2.3	求解过程	(452)
§ 3	解二阶形式输运方程的有限元方法	(456)
3.1	二阶形式输运方程	(456)
3.2	二阶形式输运方程的变分原理	(458)
3.3	一维球几何情况	(459)
§ 4	解一阶形式输运方程的有限元方法	(462)
第十四章 输运积分方程的数值模拟		(467)
§ 1	齐次问题的迭代解法	(467)
§ 2	非齐次问题的奇异性消除法	(469)
§ 3	一维平板和球输运积分方程的数值解	(470)
第十五章 离散节块法		(474)
§ 1	引言	(474)
§ 2	解扩散方程的节块法	(474)
§ 3	节块Green函数法	(477)
§ 4	节块内的通量分布	(480)
§ 5	解输运方程的离散节块法	(482)

第三篇 输运问题的随机模拟(蒙特卡罗方法)

第十六章 蒙特卡罗方法的基本原理.....(491)

§ 1 概率统计基本知识(491)

1.1 概率的定义及基本运算法则.....(491)

1.2 随机变量与分布函数.....(493)

1.3 数学期望和方差.....(497)

1.4 大数定律和中心极限定理.....(498)

1.5 数理统计学名词术语.....(498)

§ 2 蒙特卡罗方法的基本思想(500)

§ 3 蒙特卡罗方法的误差.....(506)

§ 4 蒙特卡罗方法的特点.....(508)

§ 5 随机数简介(510)

5.1 随机数的性质.....(511)

5.2 准均匀分布随机数.....(512)

5.3 在计算机上产生随机数的方法.....(513)

5.4 伪随机数的统计检验.....(517)

第十七章 随机抽样方法(519)

§ 1 直接抽样方法(519)

1.1 离散型分布的抽样.....(519)

1.2 连续型分布的抽样.....(520)

1.3 直接抽样方法的推广(变换抽样).....(521)

§ 2 舍选抽样方法(525)

2.1 简单的舍选抽样方法.....(525)

2.2 乘抽样方法.....(526)

2.3 减抽样方法.....(527)

2.4 乘减抽样方法.....(528)

2.5 积分抽样方法.....(529)

§ 3 复合抽样方法(530)

3.1 复合抽样方法.....(530)

3.2 加抽样方法.....(531)

3.3 乘加抽样方法.....(531)

3.4	近似-修正抽样方法	(531)
3.5	复合抽样方法的推广	(535)
§ 4	随机抽样的其他方法	(537)
4.1	偏倚抽样方法	(537)
4.2	对称抽样方法	(537)
4.3	近似抽样方法	(538)
4.4	多维分布抽样方法	(544)
第十八章	粒子输运的随机模拟	(546)
§ 1	概述	(546)
1.1	解一个问题的全过程	(546)
1.2	跟踪一个粒子的过程	(547)
§ 2	源分布抽样	(549)
2.1	概述	(549)
2.2	一维平板几何	(551)
2.3	一维球几何	(551)
2.4	圆柱几何	(554)
§ 3	碰撞距离抽样	(559)
3.1	抽样的一般程序	(559)
3.2	指数分布的抽样	(561)
3.3	点到界面的距离	(564)
3.4	强迫碰撞点抽样	(566)
3.5	最大截面方法	(568)
3.6	球对称几何	(570)
§ 4	相互作用类型抽样	(571)
§ 5	出射粒子能量方向抽样	(572)
5.1	概述	(572)
5.2	中子弹性散射	(574)
5.3	中子非弹性散射	(578)
5.4	裂变反应	(580)
5.5	崩裂反应	(583)
5.6	光子的康普顿散射	(585)
第十九章	几类输运问题的求解	(589)

§ 1 输运问题的随机模拟	(589)
1.1 积分输运方程和它的逐次逼近形式解	(589)
1.2 蒙特卡罗方法解输运问题	(595)
1.3 伴随粒子输运方程	(603)
§ 2 辐射屏蔽问题	(605)
2.1 屏蔽问题的数学描述	(605)
2.2 直接模拟法	(607)
2.3 简单加权法	(609)
2.4 统计估计法	(609)
2.5 半解析方法	(613)
2.6 δ 散射的应用	(617)
§ 3 通量的计算方法	(619)
3.1 问题描述	(619)
3.2 体通量的计算	(621)
3.3 面通量的计算	(624)
3.4 点通量的计算	(625)
§ 4 临界问题	(632)
4.1 问题的数学描述	(632)
4.2 源迭代的方法	(636)
4.3 有效增殖因子的估计	(640)
§ 5 非定常问题	(643)
第二十章 带电粒子输运的随机模拟	(648)
§ 1 电子输运的随机模拟	(648)
1.1 能量对数分割法	(648)
1.2 利用大碰撞划分电子的游动历史	(666)
1.3 用 MC 方法计算电子输运的一些例子	(668)
§ 2 质子输运的随机模拟	(673)
第二十一章 降低方差技巧	(677)
§ 1 系统抽样与分层抽样	(677)
1.1 数学模型	(678)
1.2 分层抽样	(680)
1.3 系统抽样	(681)

§ 2 控制变数法和对偶变数法	682
2.1 控制变数法	682
2.2 对偶变数法	684
2.3 构造对偶变数的一个方法	685
2.4 在输运问题中的应用	687
§ 3 偏倚抽样	688
3.1 估计量方差的解析表示	689
3.2 最简单的偏倚抽样	692
§ 4 重要抽样 (密度偏倚抽样)	694
§ 5 分裂与俄国轮盘赌	698
§ 6 运用期望值与统计估计方法	703
§ 7 估计量统计误差的预测理论	704
附录1 一些数学函数的定义和性质	713
附录2 电子输运计算中所需公式及数据	724