

核反应堆 动力学导论

[美] 卡尔·O·奥特
罗伯特·J·纽霍尔德

原子能出版社

76301
A94

369071

核反应堆动力学导论

〔美〕 卡尔·O·奥特 著
罗伯特·J·纽霍尔德
郑 福 裕 译
侯 凤 旺



原子能出版社

京新登字 077 号

DU70/12
内 容 简 介

本书是美国 Purdue 大学核工程系的研究生教材。全书系统地 从核反应堆内的中子增殖物理过程出发, 阐述点动态过程、微观动态过程、带反馈的动力学过程, 以及随时间—空间变化的动力学过程; 此外, 本书还概述了反应性测量问题。全书共 11 章: 基本课题与术语; 缓发中子; 点动态学方程的基本表达式; 静态微扰理论; 点动态学方程; 基本核反应堆动态学问题的解; 微动态学; 近似点动态学; 反应性的测量; 具有瞬时反应性反馈的动力学; 空间—能量相关动力学。

本书适合于高等学校反应堆工程专业的教师和高年级学生、研究生使用; 也可供从事核反应堆物理研究、计算和设计工作的人员参考。



核反应堆动力学导论
〔美〕 卡尔·E·奥特 著
罗伯特·J·纽霍尔德
郑 福 裕 译
侯 凤 旺

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

北京地质印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 850×1168_{1/32}·印张 11.625·字数 312 千字
1992 年 1 月北京第一版·1992 年 1 月北京第一次印刷

印数 1—500

ISBN 7-5022-0730-9

TY·457 定价: 12.00 元

译 者 的 话

本书是由美国 Purdue 大学的核工程系系主任 Karl O. Ott 教授与美国能源部的 Robert J. Neuhold 合著的，是美国 Purdue 大学核工程系的研究生教材。全书系统地从事反应堆内的中子增殖物理过程出发，阐述点动态过程、微观动态过程、带反馈的动力学过程，以及随时间-空间变化的动力学过程；此外，本书还概述了反应性测量问题。

本书的第 7 章至第 10 章及附录是由郑福裕翻译的；其余部分是由侯凤旺翻译的。清华大学的罗经宇教授仔细地审校了本书绝大部分章节的译稿；中国核工业总公司科学技术情报研究所的施建忠副编审审校了本书第 8 章和第 10 章的译稿。此外，在本书翻译过程中，还得到罗经宇教授、西安交通大学的谢仲生教授、中国原子能科学研究院的许汉铭研究员的大力帮助。译者表示诚挚的感谢。

限于我们的水平，本书中出现某些问题在所难免，欢迎读者批评指正。

译者

1991 年 10 月

作者序

自从核工程领域形成以来,构成核反应堆动力学或核反应堆动力学领域的中子通量密度与时间的关系问题,一直是很重要的。在早期的几年中,是将中子群体随时间的变化作为统一整体来考虑的。对于推广应用的大型动力核反应堆情况,随时间变化的中子群体与空间、能量的关系会影响核反应堆的瞬变过程,而必须对之加以评价。

对本书内容的陈述,仿效了过去的模式。在归纳的、易于导致作为点动态学自然扩展的“空间-能量相关动力学”的3种方法中,首先发展的是“点动态学”。本书中的大部分内容都与对动态学问题的各种解的评价和讨论有关。对于反应性测量及其有关的分析问题,将进行广泛地讨论。这些处理方法通常受时间域的限制。在本书中,将不包括稳定性理论、Laplace变换、以及有时所需要的复杂分析。

为了减少理解动态学各方面问题的困难和扩展对随时间变化的现象的感性认识,对于在本书中所讨论的所有问题,几乎全都专门给出了图解说明。

本书的内容,已经由本书作者中的K.O.Ott作为每周3课时双档次导论课程教授了数年。然而,本书内容中的个别部分,如更复杂的反应性测量分析,以及空间-能量相关动力学的某些内容部分,可以从1个学期的导论课程中删去。

本书中有关核反应堆静态学的内容,是建立在K.O.Ott和W.A.Bezella著的《核反应堆静态学导论》

(Introductory Nuclear Reactor Statics)的基础上的。本书中的静态微扰理论都分，是上述这本书阐述的静态学的扩展。因此，本书和上述这本书是姊妹篇，它们在核反应堆中子学所包括的范围中彼此相互补充。

此外，本课程也已经由 Robert C. Bog 博士讲授过，并且，新近，1981 年，Donald J. Malloy 博士 (Argonne 国立实验室, ANL) 也讲授了本课程。Donald J. Malloy 博士将 Purdue 核反应堆 (PUR-1) 的特设瞬变过程分析作为指定作业包括在本课程中，这样的作法，后来成为本课程的持久特色。Donald J. Malloy 博士还为提高本书质量提出了许多建议，对此，我们表示感谢。

本来，是将本书设想为研究生高级教程的。由于考虑到许多学生的意见和反应，特别是由于作者间的密切合作问题，本书才形成目前这种其重点在于进行导论性陈述的形式。本书中的数值图解说明所需要的计算，是由学生们完成的。

W.E. Kastenbergl、D.A. Meneley、R.L. Mnrray 教授，W.K. Terry 博士审阅了本书书稿，并提出了许多有价值的建议和改进意见，作者在此一并表示感谢。

Purdue 大学 Karl O. Ott
美国能源部 Robert J. Neuhold

1985.12.

目 录

第 1 章 基本课题与术语	1
1—1 核反应堆中随时间变化的基本现象	1
1—2 核反应堆动态学与核反应堆动力学	2
复习题	4
参考文献	4
第 2 章 缓发中子	5
2—1 瞬发中子和缓发中子的产生 (由于核裂变)	5
2—2 缓发中子总产额	8
2—3 缓发中子群产额	10
2—4 缓发中子发射谱	16
作业题	19
复习题	19
参考文献	20
第 3 章 点动态学方程的基本表达式	22
3—1 直觉点动态学——基本概念	22
3—1 A 瞬发中子平衡方程	22
3—1 B 平均中子代时间和平均中子寿期	24
3—1 C 缓发中子效应——直觉点动态学方程	27
3—2 单群点动态学	29
3—2 A 核反应堆动态学基础——扩散近似	29
3—2 B 单群点动态学方程的推导	33
作业题	37
复习题	38
参考文献	39
第 4 章 静态微扰理论	40
4—1 基本核反应堆特征值问题与微扰理论方法	40
4—1 A 微扰理论发展动机的形成	40

4—1 B	作为特征值问题的中子增殖问题	41
4—1 C	计算特征值微扰问题的基本方法	43
4—2	1—阶微扰理论	46
4—3	精确微扰理论	49
4—4	1—阶微扰理论的应用	52
	作业题	55
	复习题	57
	参考文献	57
第 5 章	点动态学方程	58
5—1	精确点动态学方程	58
5—1 A	中子通量密度函数因子分解和权重函数	58
5—1 B	初始临界反应堆精确点动态学方程的推导	61
5—1 C	初始次临界反应堆精确点动态学方程的推导	66
5—1 D	精确点动态学方程中的反应性	70
5—1 E	有效缓发中子份额以及对精确点动态学方程的 进一步讨论	75
5—2	点堆模型	80
	作业题	83
	复习题	85
	参考文献	87
第 6 章	基本核反应堆动态学问题的解	88
6—1	小时间值和大时间值下的核反应堆动态学	89
6—1 A	定态解: 中子源增殖公式	89
6—1 B	小时间值下的核反应堆动态学	92
6—1 C	渐近瞬变过程与倒时公式	102
6—1 D	缓发中子源近似提要	111
6—2	常量反应性下的瞬变过程	114
6—2 A	次临界反应堆中的瞬跳变	115
6—2 B	临界反应堆中的瞬跳变	121
6—2 C	单缓发群动态学	124
6—2 D	6 缓发群动态学	129

作业题	136
复习题	138
第7章 微动态学	141
7—1 在裂变链中对连续率(裂变率和中子发射率)的分解	141
7—2 单一裂变链的特征	147
7—2 A 平均裂变链寿期	147
7—2 B 平均裂变链的中子密度	148
7—2 C 平均裂变链的中子数	148
7—3 稳态反应堆中的裂变链	149
7—3 A 与静态裂变链增殖的比较	149
7—3 B 先驱核素与临界	150
7—3 C 静态裂变链和瞬发裂变链的比较	151
7—4 反应堆瞬变中的裂变链	152
7—4 A 阶跃反应性引起的瞬变	152
7—4 B 瞬跳变与缓发调节	153
7—4 C 阶跃中子源引起的瞬变	153
7—5 裂变链与中子源增殖公式	154
7—6 对伴随中子通量密度函数的解释	156
作业题	158
复习题	159
参考文献	160
第8章 近似点动力学	161
8—1 瞬跳变近似	161
8—1 A 瞬跳变近似的公式化和实现	161
8—1 B 瞬跳变近似的应用	169
8—2 瞬发动力学近似	174
8—2 A 由阶跃反应性引入引起的超瞬发临界瞬变	175
8—2 B 由斜增反应性引入引起的瞬变情况下的伪初始中子通量密度	178
作业题	182

复习题	183
第9章 反应性的测量	185
9—1 综述和概念问题	185
9—1 A 综述	185
9—1 B 动态反应性与静态反应性	188
9—1 C 反应性的精确可测性	190
9—2 反应性的静态测量	192
9—2 A 核反应堆单态中子源增殖方法	193
9—2 B 包括两种核反应堆状态的中子源增殖方法	195
9—2 C 0 反应性方法	201
9—3 动态反应性基本测量	202
9—3 A 综述	202
9—3 B 渐近周期法	203
9—3 C 用于临界反应堆的落棒法	204
9—3 D 落棒实验中的次临界测量	204
9—3 E 跳源法和跳棒法	206
9—3 F 堆振荡器法	207
9—3 G 脉冲中子源法	209
9—3 H 理论上一致的中子通量密度形状函数修正	210
9—4 逆动力学	214
9—4 A 逆点动力学	214
9—4 B 反应性系数的逆动力学	216
9—4 C 逆空间动力学	219
作业题	225
复习题	227
参考文献	227
第10章 具有瞬时反应性反馈的动力学	230
10—1 瞬时反馈反应性	231
10—1 A 核燃料温升	231
10—1 B 瞬时反馈	239
10—2 次瞬发临界或次临界反应性域中的瞬变	243

10-2A	小时间下的瞬变.....	243
10-2B	渐近瞬变.....	248
10-3	由阶跃反应性引入引起的超瞬发临界功率剧增	253
10-3A	微分方程的研究.....	253
10-3B	第1积分的研究.....	256
10-3C	超瞬发临界功率剧增期间的中子通量密度瞬变.....	260
10-3D	脉冲后的中子通量密度瞬变.....	262
10-4	由反应性斜增引起的超瞬发临界瞬变	265
10-4A	微分方程的研究.....	265
10-4B	第1积分的研究.....	269
10-4C	中子通量密度瞬变的讨论.....	273
	作业题	279
	复习题	280
	参考文献	282
第11章	空间-能量相关动力学.....	285
11-1	引言	285
11-2	关于动力学问题的一般讨论	287
11-3	对空间-能量相关动力学方法的评价	291
11-3A	有限差分方法.....	291
11-3B	点堆模型.....	294
11-3C	模态方法.....	294
11-3D	节点方法.....	296
11-3E	中子通量密度函数因子分解方法.....	298
11-4	准静态方法和有关方法	303
11-4A	关于准静态假设和绝热假设的物理解释.....	303
11-4B	因子分解和准静态方法.....	309
11-4C	对动态学结果和动力学结果的比较.....	314
11-5	动态反应性系数.....	321
	复习题	327

参考文献	327
附录 A 裂变产物的反应性效应	333
附录 B 核反应堆领域应用的算符	343
附录 C 数学公式	355
附录 D δ 函数	357

第 1 章 基本课题与术语

1—1 核反应堆中随时间变化的基本现象

对核反应堆中随时间变化的现象，可以细分为明显不同的 3 类。此 3 类现象中的各个现象的区别是其时间常数的数量级不同。此外，对不同的物理现象，是按其分类进行讨论的；而对下述不同速率下出现的相同物理现象的讨论，并非完全如此：

1. 短时间现象 典型地出现于毫秒至秒的时间间隔内的现象，在特殊情况下，此时间间隔可增至许多分钟；

2. 中等时间现象 出现于几小时或几天的时间内的现象。这样的时间，相当于强烈地影响反应性的某些裂变产物的平均积累和衰变时间；

3. 长时间现象 在若干月或若干年都在进行变化的现象。

上述这些随时间变化的现象，不但基本上包括了核反应堆系统的因果相关变化，亦即核反应堆系统的成分或温度的因果相关变化，也基本上包括了中子通量密度的变化。中子通量密度和核反应堆物理系统之间的因果关系，可在下述两种变化其中之一的变化中出现，即，核反应堆系统的成分或温度的变化，可以引起中子通量密度的变化；或中子通量密度的变化可以改变核反应堆系统的成分或温度，并因此可以改变核反应堆系统的密度和吸收特性。也可以从外部对核反应堆系统引入某种变化，例如，移动独立的中子源或控制棒或安全棒，都可引起中子通量密度的变化。如果中子通量密度引起核反应堆的变化，并且核反应堆的这些变化紧接着“反作用”于中子通量密度，那么，这样的现象就称之为“反馈”（见第 10 章、第 11 章）。

“短时间现象”或多或少地包括了由核反应堆系统的预期变化或意外变化引起的中子通量密度的快速变化。核反应堆系统的

预期变化或意外变化，可以通过反馈影响中子通量密度。短时间现象包括中子通量密度瞬变，而中子通量密度瞬变对下述问题是很重要的：

1. 核反应堆事故分析和堆反应堆安全；
2. 中子通量密度随时间变化实验；
3. 核反应堆运行，如核反应堆起动、核反应堆负荷变化、以及停堆（虽然某些核反应堆起动过程可持续几小时）；
4. 关于中子通量密度变化的稳定性分析。

“中等时间现象”通常与热中子反应堆中的两种裂变产物（ ^{135}Xe 、 ^{149}Sm ）的积累、燃耗以及 β 衰变有关。上述两种裂变产物都有很高的热中子俘获截面。因此，在热中子反应堆中，对它们需要特别注意。由于对中等时间现象的处理，在方法学上区别于核反应堆动态学，所以，本书正文中不包括这部分的问题，而是将其列入本书的附录中（见附录A）。

“长时间现象”不但包括了大多数裂变产物的积累、 β 衰变和燃耗，还特别考虑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，以致于它们不象在热中子反应堆中那样强烈地影响中子通量密度和反应性。

核反应堆中发生的其它长时间现象，包括核反应堆结构材料的肿胀、由燃耗引起的燃料芯块的变化，等等。这类长时间现象，对核反应堆内的中子通量密度只有极小的影响。

由于短时间现象、中等时间现象和长时间现象在物理上是导致不同方程组的不同现象，所以，对于这些现象，利用了不同的概念和不同的求解方法。这就是将这些有时间变化的现象分为有不同名称的3类的最有说服力的理由。

1—2 核反应堆动态学与核反应堆动力学

在本书和有关对核反应堆内随时间变化的现象进行不同分类的出版物中，所使用的术语不是唯一的。使用中的两个基本术语名称是核反应堆动态学（Kinetics）和核反应堆动力学（dyna-

mics)。少数作者（例如，参考文献 1）将所有随时间变化的现象归结为“核反应堆动力学”问题，其中包括同位素的燃耗和积累问题。然而，大多数作者认为，长时间现象代表独立出来的 1 类问题，即“核燃料循环”问题。在本书中，采纳实际上已经广泛应用的后者。

用于短时间现象类问题的，基本上是 3 类名称：

1. 核反应堆动态学 用于整个短时间现象类问题（例如，参考文献 2）；

2. 核反应堆动力学 也是用于整个短时间现象类问题（例如，参考文献 3）；

3. 核反应堆动力学 作为整个短时间现象类问题的总标题，其下有两个次级标题：（a）核反应堆动态学——用于没有反馈的短时间现象问题；和（b）核反应堆动力学——较狭义地讲，用于有反馈的短时间现象问题（例如，参考文献 4）。

在本书中使用后边的这种术语，这是因为它大都已得到更广泛的应用，并且问题的构成似乎为使用这样的术语提供了启示。对于在其中只需考虑中子时间特性的问题（核反应堆动态学问题，核反应堆动态学方程）的范围，有专门名称是有益的。如果反馈是显著的，那么，必须利用另外的、通常较大的、描述各种反馈效应的方程组，使核反应堆动态学方程组完备起来。对于这种完备的方程组（核反应堆动力学方程，核反应堆动力学问题）取不同的名称是更为合适的。由于完备的方程组描述的是总问题，所以，也将核反应堆动力学作为总标题。

本书涉及到作为时间函数的中子通量密度的短时间变化问题，即涉及到核反应堆动态学和核反应堆动力学的典型课题。对于稳定性分析，即使也用于短时间变化，在本书中也不收入，这是因为在该领域中已有一些好书，例如，参考文献 3、5、6。

复 习 题

1. 简明地叙述核反应堆内发生的随时间变化的 3 类现象。
2. 说明核反应堆动态学或核反应堆动力学的 3 种应用范围。
3. 讨论术语 各个不同的作者所讨论的“核反应堆动态学”或“核反应堆动力学”的研究对象是什么？
4. 核反应堆动力学和核燃料循环分析中的中子通量密度平衡方程的主要区别是什么？

参 考 文 献

1. H. S. Isbin, *Introductory Nuclear Reactor Theory*, Reinhold Publishing Corp., New York (1963).
2. Milton Ash, *Nuclear Reactor Kinetics*, Mc Graw-Hill Book Co., New York (1965).
3. D. I. Hetrick, *Dynamics of Nuclear Reactors*, The University of Chicago Press, Chicago (1971).
4. G. I. Bell and Samuel Glasstone, *Nuclear Reactor Theory*, Van Nostrand Reinhold Co., New York (1970).
5. Z. Akcasu, G. S. Lellouche, and L. M. Shotkin, *Mathematical Methods in Nuclear Reactor Dynamics*, Academic Press, New York (1971).
6. L. E. Weaver, *Reactor Dynamics and Control*, American Elsevier Publishing Company, Inc., New York (1968).

第2章 缓发中子

在核反应堆静态问题中，认为瞬发的裂变中子和缓发的裂变中子是没有区别的，它们共同组成总的裂变中子。发射某些裂变中子（如发射缓发中子）的实际情况，并不影响核反应堆静态问题。然而，小份额的、裂变后1秒钟至几分钟产生的裂变中子，可以强烈地影响中子通量密度与时间的关系；即使这部分的裂变中子很少，但是，它们仍然能够在许多核反应堆动态学现象中起主要作用。因此，必须仔细地研究缓发中子的产生问题。

在装载核燃料 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 、较深燃耗下的热中子反应堆中，和在装载核燃料 Pu 的快中子反应堆中，一些同位素对缓发中子的产生的贡献是相当大的。因此，必须研究几种可裂变同位素的缓发中子数据。在快中子反应堆中，裂变反应是由其能区很宽的中子引起的，所以，在快中子反应堆中，问题变得更为复杂。因此，需要研究同位素以及能量与缓发中子产生的依赖关系，这将在本章中予以讨论。特别强调的重点是对动态学方程的理论公式有影响的缓发中子数据的特点。对缓发中子的产生进行的物理学讨论，只局限于对了解现有缓发中子数据所必需的资料的综合。而对其有关的物理学上的详细讨论，见参考文献1至4。

2—1 瞬发中子和缓发中子的产生（由于核裂变）

几乎所有由于核裂变过程产生的中子，都是“瞬时”地发射的，即，没有明显延迟地发射的。瞬发中子是由核裂变过程后的“直接”裂变产物立即发射的，这是因为裂变产物核的激发能，通常较中子的分离能量（即，中子结合能 E_{Bn} ）大得多。图2—1示意地表示出涉及瞬发中子产生的两个核的核能级。核素（ A 、 Z ）的总结合能和核素（ $A-1$ 、 Z ）的总结合能之间的差就是中子的结合能 E_{Bn} （注意： $A=Z+N$ ）。在图2—1中，激发能 $E^*>$