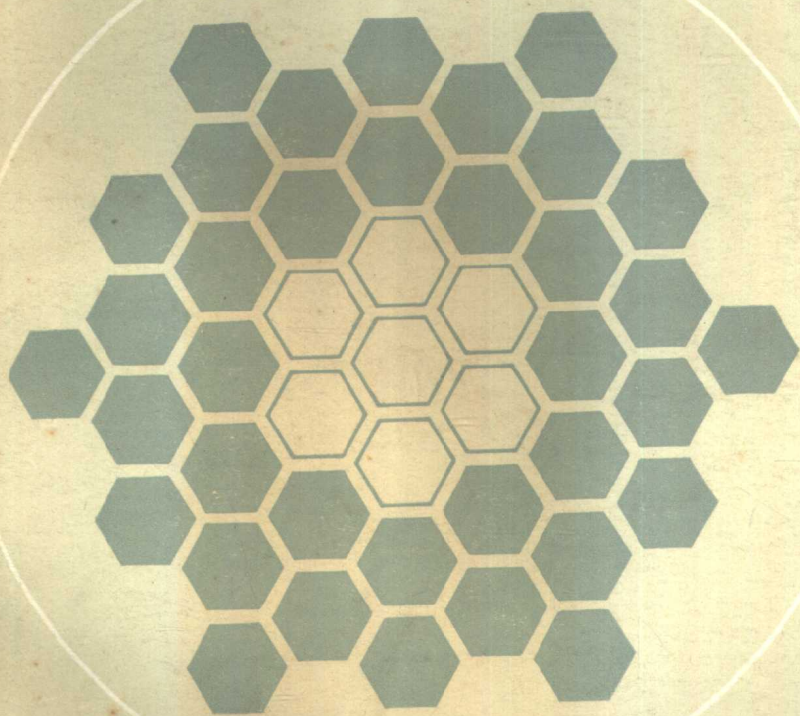


核反应堆动力学基础

黄祖洽 著



原子能出版社

核反应堆动力学基础

黄祖洽 著

原子能出版社

内 容 简 介

本书从反应堆物理学的观点系统地讨论了核裂变链式反应堆的动力学行为,着重介绍有关问题的物理基础和分析问题所用的理论方法。第一章至第五章在“点堆模型”的基础上分别讨论了反应堆动力学的若干问题:物理基础;简化反应堆动态学方程;特殊反应性变化和一般点堆动态学;数值计算方法;反应性反馈和自限堆功率漂移。第六和第七两章则讨论与空间有关的反应堆动力学。这两章中发展的理论方法对探讨各种反应系统动力学具有相当普遍的意义。

本书可供从事堆物理工作和核动力学研究的科技工作者参考也可供有关专业的教师、研究生和高年级学生阅读。

核反应堆动力学基础

黄祖洽 著

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $17^{3/4}$ ·字数 477 千字

1983 年 6 月第一版·1983 年 6 月第一次印刷

印数 1—1700·统一书号: 15175·467

定价: 2.60 元

前 言

核反应堆动力学的研究对象是核裂变链式反应堆的动态和动力行为。它既要研究反应堆工作状态随时间变化的特点和产生这些特点的内在物理原因，也要研究影响这些变化的其它因素和影响的规律。研究的目的是使我们可以对堆运行中可能出现的现象（特别是事故）进行预测和分析，为进一步探讨反应堆的最佳利用和控制问题提供必要的基础。

本书从反应堆物理学的观点，系统地讨论了核反应堆动力学基础的各个方面，着重介绍了有关问题的物理背景和分析问题所用的理论方法。在第一章提供了必要的中子物理基础知识和引进了点堆模型动态学方程之后，接下的四章用这模型讨论了反应性变化的各种情况和相应的功率响应、短期功率变动或长期运行所引起的反应性反馈效应，并给出了处理这些问题的理论分析和数值计算方法。第六和第七两章从中子输运方程和一般反应系统的运动论出发讨论了和空间有关的反应堆动力学。这两章中所发展的理论方法，对探讨各种反应系统动力学具有相当普遍的意义。

除作者本人的工作外，本书写作时参考了G. R. Keepin, D. L. Hetrick, 以及A. Z. Akcasu、G. S. Lellouche 和L. M. Shotkin的有关著作，同时也参考了到本书写作时为止的期刊文献。所有文献均见各章末所附文献目录。

承许汉铭、马大园、田和春、张玉山等同志分别阅读本书各章的原稿，热心地提出了使内容得到改进的有益意见。作者对他们表示衷心感谢。

由于作者水平的限制，书中的不妥和错误之处一定不少。欢迎读者批评指正。

目 录

第一章 物理基础简介和简化反应堆动态学方程	1
§1.0 引言	1
§1.1 物理基础	3
§1.2 裂变中能量、质量和电荷的分布	5
§1.3 裂变中放出的瞬发中子和 γ 射线	11
§1.4 简化的反应堆动态学方程	20
§1.5 裂变中的缓发中子和它们的先行核	25
第二章 固定和阶跃反应性、脉冲源和振荡源	42
§2.1 平衡态和临界性、无源模型	43
§2.2 反应性方程	46
§2.3 对阶跃反应性输入的响应	58
§2.4 矩形反应性脉冲	68
§2.5 与时间有关的源	75
§2.6 振荡源、频率响应和传递函数	84
§2.7 反应性小振荡	89
第三章 一般点堆动态学	101
§3.1 求解点堆动态学初值问题的奇异扰动法	102
§3.2 线性反应性输入	123
§3.3 反应堆启动	132
§3.4 缓慢的反应性变化	152
§3.5 Akcasu微扰解法、描述函数	160
§3.6 周期性脉冲装置的动态特征	168
第四章 数值计算法和积分方程表示	180
§4.1 Gear 方法	181
§4.2 差分计算中的修匀和外推技巧	186

§4.3	积分方程形式和数值计算	199
§4.4	加权残差法	202
§4.5	Hansen方法	204
§4.6	数值检验例	207
§4.7	Hermite 插值多项式法	213
§4.8	Keepin 积分方程	220
§4.9	反应堆动态分析的逆方法	227
第五章 反应性反馈、自限堆功率漂移及堆的中期和		
	长期行为	241
§5.1	反应性温度系数	242
§5.2	反应性反馈的数学模型、反馈核	252
§5.3	Nordheim-Fuchs模型	260
§5.4	小反应性漂移	270
§5.5	瞬发临界附近的漂移	280
§5.6	Fuchs 斜坡输入模型	293
§5.7	复杂停堆机制, 热堆	305
§5.8	复杂停堆机制, 快堆	318
§5.9	氙反馈和其他裂变产物积累的影响	326
§5.10	燃耗和转换	339
第六章 与空间有关的动力学		
§6.0	引言	351
§6.1	中子输运方程	353
§6.2	介质原子核运动的影响	364
§6.3	流体力学运动对中子输运的影响	389
§6.4	流体力学方程组和热工水力问题	403
§6.5	多群扩散近似	411
§6.6	与空间和能谱有关的中子学现象	421
§6.7	数值计算方法	429
§6.8	因子分解法(准静态法)	441
§6.9	模项展开法(综合法)	449
§6.10	粗网格少群近似法和节点法	463
§6.11	有限元法	469

第七章 与空间有关的动力学中的若干问题	480
§7.1 温度反馈	480
§7.2 和空间有关的氙反馈, 氙致功率振荡	495
§7.3 与空间有关的燃耗问题	508
§7.4 脉冲源	518
§7.5 中子波	527
§7.6 反应堆噪音	533

表 的 目 录

表1.1 反应堆中各种过程的特征时间	3
表1.2 中子裂变阈	6
表1.3 ^{235}U 、 ^{238}U 及 ^{239}Pu 热裂变中能量的释放	7
表1.4 入射中子能量为0.53MeV时, ^{235}U 裂变中子的能谱分布	14
表1.5 $\nu(E_n)$ 的最小二乘方拟合式	15
表1.6 重核裂变中所发射中子数的离散	18
表1.7 由中子引起的裂变中, 缓发中子绝对产额的推荐值	27
表1.8 不同临界装置中 β_* 的实验值和计算值的比较	30
表1.9 八种核素的缓发中子分组参量	32
表1.10 三种易裂变核素热裂变中的缓发中子分组参量	35
表1.11 Cahalan 及 Ott 的缓发中子新分组产额	36
表1.12 ^{235}U 、 ^{238}U 及 ^{239}Pu 的瞬发和缓发中子产额及平均衰变常数	37
表1.13 ^{235}U 的裂变 γ 在无限 D_2O 介质中产生的缓发光中子的分 组参量	39
表1.14 ^{235}U 的裂变 γ 在无限 ^9Be 介质中产生的缓发光中子的分 组参量	40
表2.1 从表1.11 导出的有效寿命 $l' \simeq \frac{\beta}{\lambda} = \sum_i \frac{\beta_i}{\lambda_i}$	51
表2.2 ^{235}U 热裂变中缓发中子的少组表示	58
表2.3 一临界 ^{235}U 热堆 ($l=10^{-4}\text{s}$, $\beta_*=0.0079$) 中, 脉冲响应 的特征根和系数	80
表4.1 1至6阶 Gear 方法中的 l_i 常数	184
表4.2 点堆动态学的五个检验例	193

表4.3	检验例1的百分误差	194
表4.4	检验例2的百分误差	195
表4.5	检验例3的百分误差	196
表4.6	检验例4的百分误差	197
表4.7	检验例5的百分误差	198
表4.8	四个检验例的参量	209
表4.9	检验例数值计算结果	219
表4.10	“功率变换” $\bar{n}(\lambda, t) = \int_0^t e^{\lambda \tau} n(\tau) d\tau$ 表	229
表5.1	非 $\frac{1}{\nu}$ 因子 $g_s(T)$	245
表5.2	中国重水堆的等温反应性温度系数	249
表5.3	^{235}U 燃料快堆的等温反应性温度系数	252
表5.4	热裂变产物中毒物的产额	327
表5.5	中国重水堆中控制毒物随时间的变化	348
表6.1	Doppler函数 $\Psi(\xi, Y)$ 及 $\chi(\xi, Y)$ 的表	380
表6.2	Gauss 求积公式中的常数	432
表6.3	因子分解法中的近似系列	446
表6.4	检验反应堆的物理参量	473
表7.1	噪音法实验数据与理论比较	544

图 的 目 录

图1.1	由热能、 $\sim 2\text{MeV}$ (裂变谱)、 5MeV 、 8MeV 及 14MeV 中子引起的 ^{235}U 裂变中, 裂变碎片的质量-产额曲线	9
图1.2	^{235}U 及 ^{239}Pu 的热中子裂变中, 裂变碎片的质量-产额曲线	10
图1.3	^{235}U 及 ^{232}Th 由裂变谱中子 ($E_n \sim 2\text{MeV}$) 引起的裂变中, 裂变碎片的质量-产额曲线	11
图1.4	中子发射几率 P_s 在 $\bar{\nu}$ 附近的分布	17
图1.5	缓发和瞬发中子能谱的比较	29
图1.6	从 ^{87}Br 来的缓发中子源	38
图2.1	对于 6 组缓发中子, 反应性方程的示意图	47

图2.2	反应性方程正根 ω (或 $T = \frac{1}{\omega}$) 对正反应性 ρ_0 在双对数图上的表示	53
图2.3	反应堆的稳定及瞬变周期与反应性的关系 (对于 ^{235}U 热裂变的缓发中子数据)	54
图2.4	反应性曲线正支的 1 组及 6 组计算结果的比较	56
图2.5	1 组缓发中子近似下, 对阶跃反应性输入的响应	65
图2.6	对反应性阶跃的响应: 瞬跳近似 (PJ)、恒源近似 (CS) 与 1 组缓发中子模型计算结果的比较 ($0 < \rho_0 < \beta$)	68
图2.7	矩形反应性脉冲输入的功率响应	74
图2.8	一临界 ^{235}U 热堆 ($l = 10^{-4}\text{s}$, $\beta_0 = 0.0079$) 的脉冲响应	81
图2.9	$t=0$ 时突然在处于平衡态 n_0 的临界堆中引进一恒定中子源 q_0 所引起响应的示意	83
图2.10	“抽源”或“落棒”实验中, 中子密度随时间的变化	84
图2.11	一临界反应堆 (^{235}U , $\frac{l}{\beta} = 10^{-2}\text{s}$) 的典型频率响应	94
图2.12	零功率堆传递函数的极坐标图	95
图2.13	一代中子时间 l 取不同值时, ^{235}U 零功率堆传递函数的绝对值和相角	96
图2.14	各种近似中的堆频率响应, $\log G(i\omega) $ 随 $\log \omega$ 的变化	97
图2.15	具不同次临界度的反应堆的频率响应 ($l = 10^{-4}\text{s}$)	98
图2.16	具不同超临界度的反应堆的传递函数 ($l = 10^{-4}\text{s}$)	99
图3.1	瞬跳近似的近似成立区域 (固定极限反应性 ρ_m 的围道)	114
图3.2	线性反应性输入响应的近似估计式 (3.42) 的适用范围 (极限反应性 ρ_m 等于不同值的围道)	116
图3.3	瞬发临界时刻倒周期随反应性上升率的变化	130
图3.4	陡斜坡极限情形下, 反应性斜坡输入响应的严格解 (3.57) 式和新近解 (3.84) 式的定性比较 (包括负反馈效应的迹象)	132
图3.5	启动事故中的功率瞬变	134
图3.6	1 组缓发中子 ($\lambda = 0.1\text{s}^{-1}$) 模型中, 从 -1 元平衡开始以 10分/s 增长率输入反应性所产生的响应 (严格解由数字计	

计算机得出, $\frac{l}{\beta} = 10^{-2} \text{s}$)	138
图3.7 对于图 3.6 的例子, 瞬时周期随瞬时反应性的变化	139
图3.8 缓发中子累积因子 ξ 随反应性增长率 γ 的变化	143
图3.9 瞬时周期随瞬时反应性的变化, 严格的 6 组缓发中子解和 瞬跳近似结果 (3.103) 式的比较 ($l = 10^{-4} \text{s}$, $\gamma = 1.2 \times$ 10^{-4}s^{-1} , $\beta = 0.0075$, $\lambda = 0.0767 \text{s}^{-1}$)	144
图3.10 缓发临界时的瞬时相对功率和倒周期随反应性增长率 变化 [(3.100) 及 (3.104) 式]	145
图3.11 倒周期 ω_i 作为反应性 ρ 的函数 (^{235}U , 6 组缓发中子)	147
图3.12 $F(\rho)$ 随反应性 ρ 的变化, (3.111) 式 (^{235}U , 6 组缓发 中子, $\beta = 0.00755$)	148
图3.13 积分 $\int_0^t \omega_i(\rho') d\rho'$ 随 ρ 的变化 (^{235}U)	149
图3.14 低功率核反应堆对正弦反应性输入 $\rho(t) = \rho_0 \sin \omega t$ 的 响应	159
图3.15 功率脉冲示意图	169
图3.16 对于抛物线与四次曲线形反应性脉冲, 函数 J 及 $\frac{\theta}{\theta_s}$ 随 $\frac{1}{b}$ 的变化	174
图3.17 对于抛物线形反应性脉冲, 函数 $g(b)$ 及 $F(b)$ 随 b 的 变化	178
图4.1 瞬跳近似对检验例 4 的计算结果	209
图4.2 不同方法对检验例 1 峰值功率计算结果随时间步长的变化 (虚线为瞬跳近似结果)	210
图4.3 不同方法对检验例 2 峰值功率计算结果随时间步长的变化 (虚线为瞬跳近似结果)	210
图4.4 不同方法对检验例 3 峰值功率计算结果随时间步长的变化 (虚线为瞬跳近似结果)	211
图4.5 不同方法对检验例 4 峰值功率计算结果随时间步长的变化 (虚线为瞬跳近似结果)	212
图4.6 缓发中子衰减函数 $f(t)$ (^{235}U , 热裂变)	222

图4.7	缓发中子几率密度 $D(t)$ (^{235}U , 热裂变)	231
图4.8	正功率漂移中的反应性变化	235
图5.1	(n, ρ) 相平面中, 一次3.5元的反应堆漂移的典型轨线 (NF 模型)	262
图5.2	3.5元漂移中反应性、功率及能量随时间变化的典型曲线 (NF 模型)	264
图5.3	某些堆安全试验及脉冲堆系统中峰值功率随初始倒周期的 变化	265
图5.4	功率随时间的变化 ($\frac{l}{\beta}=10^{-6}\text{s}$, $\frac{\alpha K}{\beta}=1$, $n_0=10^{-6}$, $\omega=$ 2400, 3000, 3600 s^{-1} , $\rho_0=1.00223, 1.00286, 1.00349$ 元)	268
图5.5	功率随时间的变化 ($\frac{l}{\beta}=10^{-6}\text{s}$, $\frac{\alpha K}{\beta}=1$, $n_0=10^{-6}$; $\omega=8,$ 10, 12 s^{-1} , $\rho_0=1.756, 1.964, 2.170$)	269
图5.6	(n, ρ) 相平面上的典型轨线	271
图5.7	峰值功率随初始倒周期的变化	274
图5.8	峰值功率处反应性随初始反应性的变化, 瞬跳(1组缓发 中子)和NF模型的比较	274
图5.9	峰值功率随初始反应性的变化, 瞬跳(1组缓发中子)及 NF模型的比较	275
图5.10	峰值功率处能量或补偿反应性随初始反应性的变化(1组 缓发中子)	275
图5.11	峰值功率随初始倒周期的变化	276
图5.12	峰值功率处能量或补偿反应性随初始反应性的变化(6组 缓发中子)	277
图5.13	峰值功率处能量或补偿反应性随初始倒周期的变化(6组 缓发中子)	278
图5.14	功率随时间的变化及功率-反应性轨线	280
图5.15	$\rho_0=0.8\beta$ 时 (n, ρ) 平面上的轨线、零斜线ZSI及其渐 近线	283

图5.16	$\rho_0 = 1.8\beta$ 时 (n, ρ) 平面上的轨线和NF近似轨线, 零斜线及其渐近线	284
图5.17	$\rho_0 = \beta + \lambda l$ 时的 (n, ρ) 平面 $(\frac{\alpha K}{\beta} = 1, \lambda = 0.405s^{-1})$	286
图5.18	功率随时间的变化	287
图5.19	对于 1 元反应性阶跃, 峰值功率处的补偿反应性(对绝热反馈和 $\frac{\alpha K}{\beta} = 1$, 就等于 $E(\hat{n})$) 随 $\frac{l}{\beta}$ 的变化	293
图5.20	Fuchs 斜坡输入模型的解轨线	295
图5.21	对大的反应性斜坡输入的定性响应	298
图5.22	对于有缓发中子的斜坡漂移, Canosa判据的定性图解	301
图5.23	对于有缓发中子的快斜坡漂移, 近似轨线的示意图	304
图5.24	对于高加浓度金属燃料, 零滞后模型的爆发形状和 SPERT-I堆数据的比较	308
图5.25	对于高加浓度金属燃料, 长滞后模型的爆发形状和 SPERT-I堆数据的比较	309
图5.26	对于高加浓度金属燃料, $r=2$ 的长滞后模型的爆发形状和 SPERT-I 堆 ($T=7.4ms$) 数据的比较	310
图5.27	超额能量 $Q - E_0$ 和阈能 E_0 之比, 随 $x = K \cdot \frac{(\delta\rho)^2}{l^2}$ 的变化	325
图5.28	对于一个假想的快堆事故, 用修改的Bethe-Tait方法求得的最大反应性和总能量随反应性增长率的变化	325
图5.29	停堆后 ^{135}Xe 核数变化引起的负反应性	332
图5.30	中国重水堆核素成分随时间的变化	345
图5.31	控制毒物吸收和堆中转换比 C.R. 随时间的变化 (中国重水堆)	348
图6.1	共振的Doppler展宽随温度的变化	370
图6.2	修正因子 $\tau(x)$	381
图6.3	燃料棒和冷却剂中的温度分布	407
图6.4	快漂移中反应性随时间的变化	422

图6.5	快漂移中的快群通量分布	423
图6.6	快漂移中幅函数随时间的变化	424
图6.7	慢漂移中的热群通量分布	425
图6.8	有点火区-再生区的140cm平板热中子反应堆中, 棒喷射 事故瞬变的热通量分布	427
图6.9	对300cm平板LMFBR堆芯每端(60cm)引入阶跃反应 性 $\frac{\rho}{\beta}=0.68$ 后, 与空间有关的动力学和点动力学的比较	428
图6.10	240cm平板热堆左端 $\frac{1}{4}$ 区域内, 线性增加 ν 值所引起的反 应性变化(不同方法算出结果的比较)	447
图6.11	240cm平板热堆左端 $\frac{1}{4}$ 区域内, 线性增加 ν 值后, 形状函 数和先驱核的空间分布	448
图6.12	平板组件式快堆装置中的快通量分布	457
图6.13	轻水增殖反应堆内, 缓发临界瞬变过程中, x 网格点8处 的热中子通量	458
图6.14	轻水增殖反应堆内, 瞬发超临界瞬变过程中, x 网格点8 处的热中子通量	459
图6.15	100英寸平板热中子反应堆内, 1.0s时刻的通量分布 (多道MC综合法和单道SC综合法的比较)	462
图6.16	均匀扰动情形 [$h_0=10^{14}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $\Sigma_f=0.006408\text{cm}^{-1}$] 下, 中子通量的瞬变过程	474
图6.17	裂变截面均匀增加情形 [$\Sigma_f=0.006582\text{cm}^{-1}$] 下, 中心 处中子动力学行为对初始通量分布的依赖关系	474
图6.18	中心扰动情形 [$h_0=10^{14}\delta(r)\delta(z)$, $\Sigma_f=0.006408\delta(r)$ $\cdot \delta(z)$] 下, 和空间有关的中子动力学	475
图6.19	偏心扰动情形 [$h_0=10^{14}\delta(r-40)\delta(z)$, $\Sigma_f=$ $0.006408\delta(r-40)\delta(z)$] 下, 和空间有关的中子动力学	475
图7.1	反应堆冷却示意图	491
图7.2	^{135}Xe 引起中性稳定时, 中子通量与功率反应性系数的 计算关系	503

图7.3	对各种稳态通量值的氙振荡周期	505
图7.4	燃料成分随中子积分通量的变化	513
图7.5	均匀燃料装载反应堆的 $\frac{1}{4}$ 体积内, 初始空间功率密度分布 的计算值	514
图7.6	平均燃耗23000MWd/t后, 空间功率密度分布的计算值	514
图7.7	对“从外到内”燃料装载方式, 稳态空间功率密度分布的 计算值	514
图7.8	对于整炉装料、双轴向装料和“从外到内”装料, 堆中心 面上的径向功率密度分布 (平均燃耗都是23000MWd/t)	514
图7.9	高温石墨气冷反应堆中, 可燃毒物在有效增殖因子上的作 用	517
图7.10	活性区中, 分两区添加可燃毒物对功率密度分布的影响 (β 是外区对内区毒物浓度之比)	517
图7.11	对于石墨中的脉冲源实验, 衰减常数随曲率的变化	520
图7.12	次临界系统中中子脉冲的衰减	521
图7.13	石墨中热中子波的衰减常数和波数	529
图7.14	石墨中热中子波的速度、波长及衰减长度	530
图7.15	石墨中热中子波的参变色散律	530
图7.16	稳态运行反应堆的实际功率输出	533
图7.17	Berkeley 堆燃料管道上部截面示意图	537
图7.18	冷却剂温度与燃料温度间传递函数的方块图	543

第 一 章

物理基础简介和简化反应堆动态学方程

§1.0 引 言

世界进入了原子能时代，原子能在人类利用的能源中地位越来越重要。随着各种类型的反应堆在世界各国的大量兴建和运转，出现了大量的动力学问题需要解决。核反应堆动力学就是适应这一需要而迅速发展起来的一门新的工程物理科学。

核反应堆动力学的研究对象是原子核裂变链式反应堆的动态和动力行为。它既要研究反应堆状态随时间变化的特点和它们产生的内在物理原因，也要研究影响这些变化的各种因素和规律，从而探讨决定各种反应堆工作稳定性的条件和控制的途径，并对反应堆运行中可能出现的事故及其后果进行预测和分析。

反应堆状态随时间的变化表现为堆中种种物理量在给定条件下随时间的变化。例如，反应堆中中子的数量和分布以及相应的反应堆功率的大小和分布随时间的变化。在反应堆的启动、运转、事故和停堆过程中，这些变化都具有哪些特点？受哪些条件的制约？可以如何调节？反应堆中各种材料的组成和状态是怎样随着这些变化而变动的？这些变动反过来又如何影响反应堆的工作？如此等等。这些问题都是我们希望在反应堆动力学中加以探讨的。

产生反应堆中所有这些变动和动力行为的根本内在物理原因，是堆内中子在输运过程中跟堆中各种材料的原子核所进行的

各种微观相互作用，即各种核反应。这些核反应中最关键的是中子和核燃料原子核作用所引起的核裂变反应。众所周知，核裂变反应不仅提供了核能，而且提供了使增殖中子的裂变链式反应能维持下去的若干次级中子。中子和核能是反应堆运转中的主要产物，同时也是决定反应堆的动态和动力行为的主要物质基础。某些裂变产物核在 β 衰变后放出缓发中子的事实，可利用来使反应堆易于控制。裂变产物中某些吸收中子本领特别大的核素(如氙-135和钐-149)的积累和耗失，也是严重影响到堆的某些动态行为的重要因素(所谓“中毒”)。裂变链式反应的不断进行，引起堆中装载核燃料(铀-235、钚-239或铀-233)的不断消耗(燃烧)。另一方面，当反应堆中配置有可转换物质铀-238或钍-232时，它们又会由于俘获中子后的 β 衰变而转化为新的核燃料钚-239或铀-233(转换或增殖)。所有这些核反应过程除影响堆中中子的平衡外，都引起反应堆中材料组成的变化。

对于以显著功率运行的反应堆，影响动力学行为的因素更加复杂。除了上面所说的各种中子核反应的直接影响之外，还有由于功率释放所引起的温度和压力升高及物态变化的效应。要是没有冷却剂循环系统从堆内不断把热能引出，反应堆本来会很快由于所释放的大量能量而升温，导致堆中材料的烧坏、熔化甚至气化，因而自动崩溃或飞散。实际上，这也正是严重事故情况下，当冷却系统受阻、失灵，不能充分将堆中热量引出时，或功率上升过剧，超过冷却系统的载热能力时，会要出现的灾害性情况。即使在通常的非灾害情况下，反应堆中温度、压力的变化也会引起堆中各种材料的宏观密度和形状的改变，同时引起各种材料中原子核热运动状态的变化。后者又引起中子核反应中Doppler效应大小的改变。另一方面，冷却剂(不管是液体还是气体，如水或二氧化碳气)以相当高的流速通过反应堆中时，常常会引起堆中材料的机械振动，因而改变反应堆活性区栅格的相对尺寸，有时振幅甚至会因共振而大到使结构损坏的程度。当液体冷却剂(和

慢化剂)在活性区中因过热而在局部或全部体积中沸腾并产生气泡时,则会由于显著改变堆中材料的表观密度而影响其中中子的运动和冷却剂的换热与载热能力(空穴效应)。所有这些效应,都会反过来影响反应堆中中子和物质的核相互作用及中子在堆内的输运过程,从而间接影响反应堆的动力学行为(反馈效应)。

反应堆的动态和动力行为,通常由放在堆中不同部位的中子(及 γ 射线)探测器、温度计及流量计加以监测,并由控制棒系统抽出或放入控制棒而加以调节。

表 1.1 给出反应堆中牵涉到的各种过程进行所需特征时间的量级。

表 1.1 反应堆中各种过程的特征时间

核反应(直接反应—形成复合核)	$\sim 10^{-21} \sim 10^{-17} \text{s}$
瞬发中子发射	$\sim 10^{-17} \text{s}$
瞬发光子发射	$\sim 10^{-14} \text{s}$
(γ 射线, 中子)探测器响应	$\sim 10^{-11} \sim 10^{-7} \text{s}$
中子一代时间(快堆—热堆)	$\sim 10^{-8} \sim 10^{-3} \text{s}$
反应性反馈	$\sim 10^{-2} \sim 10^{-1} \text{s}$
燃料温度变化	$\sim 10^{-1} \sim 10 \text{s}$
温度流量指示	$\sim 10^{-1} \sim 10 \text{s}$
控制棒移动	$\sim 0.5 \sim 10 \text{s}$
缓发中子发射	$\sim 0.3 \sim 80 \text{s}$
慢化剂温度变化	$\sim 1 \sim 10^3 \text{s}$
铀及钚中毒	$\sim 10 \text{h}$
燃耗、转换、增殖	$\sim 10 \sim 5 \cdot 10^2 \text{d}$

我们将着重讨论特征时间在 $\sim 10^{-8} \text{s}$ 至 $\sim 10 \text{h}$ 范围内的动力学现象。更短得多的时间,对于反应堆动力学的研究来说,可以看成瞬时。对于牵涉到更长特征时间的燃耗、转换及再生等问题,将只在探讨时空动力学时顺便涉及。

§1.1 物理基础

作为物理基础,我们将在本章中讨论裂变过程的各个方面,