

高等学校试用教材

核反应堆物理实验方法

胡大璞 郑福裕 编著
罗璋琳 马伯根 审校

原子能出版社

内 容 简 介

本书阐述核反应堆物理实验的基本方法和特点。其内容包括：中子通量测量的一般原理，反应堆静态和动态测量方法以及反应堆噪声分析方法。

本书是高等学校核反应堆工程专业的教材，也可供有关专业的工程技术人员及研究人员参考。

高等学校试用教材
核反应堆物理实验方法

胡大璞 编著

郑福裕

罗璋琳 审校

马伯根

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

重庆印制一厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/32 ·印张 11·字数 241千字
1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数 1—1500

ISBN 7-5022-0090-8

TL·33(课) 定价: 2.15元

前 言

本教材是按1982年8月召开的全国反应堆工程专业教材会议审定的《核反应堆物理实验方法》大纲编写的。其内容主要是阐述反应堆物理实验的基本方法和特点，其结构是按实验方法体系安排的。

全书共分七章，除作为绪论的第一章和介绍中子通量测量的一般原理的第二章外，其余内容可划分为三大类：静态测量方法、动态测量方法和堆噪声分析方法。

静态测量方法是以静态的中子通量或反应率的测量为基础的。它包括指数实验、临界实验、栅格参数的测量和能谱参数的测量等多项内容。这些内容将在第三章中逐项予以介绍。动态测量方法是指依据测得的中子通量或中子密度随时间的变化规律来确定堆的动态参数的方法。它包括第四章中的一般动态测量方法及第五章中的脉冲中子源方法。堆噪声分析方法则是指根据堆的输出信号围绕其稳态平均值的随机统计涨落来确定堆参数的方法。从宏观的观点来看，它是静态的，因信号的平均值不随时间变化；但从微观的观点来看，它是动态的，因信号的瞬时值是随机变化的。这些内容将在第六章和第七章中分别进行讨论。在第六章中介绍了微观堆噪声分析方法和宏观堆噪声分析方法；在第七章中简要地介绍了动态参数模型的时序分析方法。

本书由清华大学胡大璞主编。其中第二章、第五章、第

六章和第七章由胡大璞编写；第一章、第三章和第四章由清华大学郑福裕编写。罗璋琳和马伯根二同志对本书各章各节进行了仔细的审校，并提出了许多宝贵的意见。此外，谢仲生、李茂季、童舜坤和侯凤旺等同志亦对本书稿提出了许多有益的意见。在此一并致谢。

由于我们水平有限，实际经验不足，缺点和错误在所难免，希望读者批评指正。

编者

1986年5月

目 录

前言.....	1
第一章 反应堆物理实验的对象和方法.....	1
一、反应堆物理实验的方法及其特征.....	2
二、反应堆物理实验的装置.....	4
1. 西格马堆.....	4
2. 次临界装置.....	5
3. 临界装置.....	9
三、反应堆物理实验的手段.....	13
1. 中子源.....	13
2. 中子探测器.....	19
3. 记录与分析仪器仪表.....	28
第二章 中子通量的测量.....	35
一、活化法测量中子通量的原理与方法.....	36
1. 活化法测量中子通量的原理.....	36
2. 活化箔材料的选择.....	39
3. 探测技术.....	40
二、热中子通量的测量.....	42
1. 热中子通量的测量方法.....	42
2. 镗差法.....	45
3. 测量中的修正.....	48
三、共振中子通量的测量.....	57
1. 共振中子的测量方法.....	57
2. 测量中的修正.....	60
四、快中子通量的测量.....	64
第三章 静态测量方法.....	70
一、慢化介质中的参数测量.....	70

1. 扩散长度的测量	71
2. 中子年龄的测量	83
二、指数实验——材料曲率 B_m^2 的测量	89
三、临界实验	98
1. 临界质量的测量	98
2. 材料曲率 B_m^2 的测定	107
3. 反射层节省的测量	108
四、栅格参数测量的方法	111
1. 热中子利用系数 f 的测量	112
2. 快中子增殖系数 e 的测量	116
3. 逃脱共振俘获几率 p 的测量	122
4. 初始转换比的测量	128
五、能谱参数(指标)的测量	131
1. 中子温度的测量	132
2. 超热指标的测量	140
第四章 动态测量方法	148
一、周期法测量反应性	150
1. 基本原理	150
2. 周期法测量反应性的误差	155
3. 周期法测量反应性值得注意的几个问题	158
4. 周期法在重水堆上的应用	160
二、落棒法测量反应性	162
1. 微分法	163
2. 积分法	166
三、跳源法测量反应性	174
四、振荡法测量反应性及传递函数	175
1. 基本原理	175
2. 堆振荡器	179
3. 传递函数的确定和应用	180
五、逆动态方法测量反应性	183

第五章 脉冲中子源方法	186
一、脉冲中子源在介质中引起中子通量随时间变化的规律	187
二、用脉冲中子源法测慢化介质的扩散参数	190
1. 实验原理	190
2. 实验测量	192
三、脉冲中子源法测堆的反应性	195
1. 基本理论	195
2. S-K方法	204
3. S-G方法	206
4. G-R方法	210
四、空间效应	214
第六章 堆噪声分析方法	221
一、中子在堆中的随机过程	222
二、微观噪声分析方法	229
1. 罗西(Rossi)- α 方法	230
2. 方差-平均值比方法	235
3. 零概率(P_0)方法	239
4. 时间间隔分布方法	242
三、宏观噪声分析方法	247
1. 相关分析	247
2. 频谱分析	262
3. 反应堆动态参数与传递函数的测量	291
4. 噪声分析方法在动力堆上的应用—— 安全监测与事故诊断	293
第七章 时序分析方法	297
一、时序分析方法的特点	297
1. 参数模型方程	297
2. 特征根	300
3. 格林函数	301
4. 相关函数	303

5. 频谱密度	305
二、自回归 (AR) 模型	308
三、滑动平均 (MA) 模型	317
四、自回归滑动平均 (ARMA) 模型	322
五、动态参数的测定及系统稳定性的分析	326
1. 模型的识别	326
2. 模型检验	327
3. 系统动态参数的确定	327
4. 系统的稳定性分析	330
附录 用最小二乘法作参数估计	332

第一章 反应堆物理实验的对象和方法

随着核技术的发展和测量手段的不断完善以及堆噪声分析方法的引入，反应堆物理实验方法已逐步成熟和系统化。现在，它已经发展成为一门独立的学科。

反应堆物理实验研究对于反应堆技术的发展起着重要的作用。

1939年发现了核裂变现象。但是当时所测得的核截面和核参数过于粗糙，以致无法预计能否实现自持链式裂变反应。1942年末，建立了第一座反应堆临界装置，第一次实现了可控自持链式裂变反应。此后，发展了各种类型的反应堆。为了研究核反应堆的核特性，建立了各种类型堆的临界与次临界装置。通过这些装置上所进行的大量实验，研究了各种栅格的中子倍增特性及有关参量。这些实验研究促进了核反应堆物理理论的发展。在此过程中，各种物理计算方法应运而生。随着大型电子计算机的发展和应用，有关反应堆物理的计算方法日趋完善，其计算精度不断提高。但理论模型及其计算结果仍需要经过实验检验。尤其对新型反应堆，通过在其临界装置上开展各种物理实验研究，可以为反应堆的设计和方案选择提供可靠的数据。动力堆和研究性反应堆首次启动的物理实验和运行期间动态参数的测量，对于反应堆的安全运行是不可缺少的。伴随着核电站的发展，堆噪声分析方法已广泛用来作为反应堆安全监测和事故诊断的手段。

在具体讲述各种反应堆物理实验方法前，在本章中，首先概括一下反应堆物理实验的基本方法及其特征，然后描述反应堆物理实验所专用的实验装置，最后简要地介绍常用的测量仪器——中子探测器和记录分析系统，这对于学习本课程是十分必要的。

一、反应堆物理实验的方法及其特征

反应堆物理实验的任务是通过实验的方法，研究大量中子与介质原子核相互作用所引起的中子倍增以及中子在介质中运动的规律，并根据这种规律确定反应堆的物理参数及有关核特性。和一般核物理实验方法不同，它的任务不是研究单个中子与原子核相互作用的微观特性，而是研究大量中子与大量介质核相互作用的综合结果。这种综合结果反映在反应堆的“宏观”参数中。这些参数，如中子扩散长度、材料曲率、反应性等，往往是通过中子通量对空间、能量或时间的积分定出的。因此，反应堆物理实验常常是带有积分性质的实验。反应堆物理参数是根据中子运动规律确定的，所以，只有通过对中子的测量才能够获取这些参数的信息。例如，“反应性”本身是不能直接测量的，只能由测得的中子密度随时间的变化规律，再根据其定义而间接定出。

按照中子密度随时间变化规律的不同，反应堆物理实验方法可分为三类：

A. 静态测量方法

这类实验方法是以稳态中子通量的测量为基础的。属于这类的实验有：在一个西格马(SIGMA)堆上测量慢化材料性能的参数，如中子年龄 τ 、热中子扩散长度 L 等；在次临界

装置上测定堆材料曲率 B_m^2 以及在临界装置上进行的临界实验、堆芯栅格参数的测量等等。这类实验的特点是：不涉及中子密度随时间的变化，而只需测定稳定状态下（即 $\frac{dn}{dt} = 0$ ，也称静态）中子通量分布或反应率就可以求得所需要的参数。根据所测的参数可以校核理论计算模型和基本核数据。

B. 动态测量方法

这类实验方法是根据测得堆内中子密度随时间变化的规律来定出动态参数的。象反应性的测量、传递函数的确定等都属于这类实验。这类实验方法很多，如常用于测量反应性的周期法、落棒法、脉冲中子源法以及测量反应性及传递函数的振荡法等。这类实验的特点是：反应堆一般不处在临界状态，即 $k_{eff} \approx 1$ 。在超临界状态实验时，需要格外考虑安全问题。

C. 反应堆噪声分析方法

早期，这类实验方法主要是根据中子通量或中子密度围绕其稳态平均值的随机统计涨落的变化来测定堆动态参数的。从宏观观点来看，中子通量是静态的，因为其平均值不随时间变化；但从微观观点来看，它是动态的，因为其瞬时值是随机变化的。

现在，反应堆噪声分析方法已不限于用来分析中子噪声，其他非核噪声分析技术也得到了广泛的应用。噪声分析方法的优点是不必使反应堆受到扰动，而获取反应堆动态参数的信息。此方法还可用于反应堆的在线安全监测与事故诊断。

二、反应堆物理实验的装置

1. 西格马堆

西格马堆*是研究慢化剂特性的实验装置。它是由慢化剂堆砌或集聚起来的装置。最初所研究的慢化材料是石墨。实验装置是用成型的石墨块堆砌起来的一个棱柱。初期，为了确定石墨是否具有很小的中子俘获截面，在一个西格马堆上研究了当时最纯石墨的慢化和俘获性质。西格马堆可写为 Σ 堆。

主要的几种慢化剂材料的性能，在 Σ 堆上都做过研究。对固体慢化剂，如铍、氧化铍等都可以像石墨一样堆砌成 Σ 堆，在其上可研究慢化剂慢化、扩散性能。但对一些液体慢化剂，如重水和普通水等，显然不可能堆砌成 Σ 堆，一般多将装置设计成箱桶，其中充以要测的重水或普通水等液体。箱桶分别设计成圆柱形和长方形，其尺寸取决于待测材料。石墨 Σ 堆通常的截面尺寸为边长 $\geq 150\text{cm}$ 的棱柱。重水装置一般做成直径 $D \approx 100\text{cm}$ 的圆桶。装置尺寸应满足公差要求。

测量时，还需要引入一个中子源。它可以是放射性同位素镭-铍中子源、钋-铍中子源或镅-铍中子源等，也可以是脉冲中子源，还可以是反应堆的热柱。热柱是很好的平面热中子源，它是 Σ 堆的理想热中子源。但上述几种放射性同位素源均不为平面热中子源，而是快中子点源。因此，往往需要在 Σ 堆的端部设置一个放快中子源的石墨垫座，其目的是慢化源中子以得到近似热中子平面源。

* 英文术语为Sigma pile, 所以取名曰“堆”，是从英文Pile翻译而来，又因装置是采用很多石墨块堆砌起来的，故称为西格马堆。

下面给出两个
 Σ 堆的实例图，其
 中图1.1是清华大
 学反应堆物理实验
 室里具有石墨垫的
 石墨 Σ 堆，而
 图1.2则是阿贡
 (ARGONNE)堆
 垂直热柱上的铍 Σ
 堆。

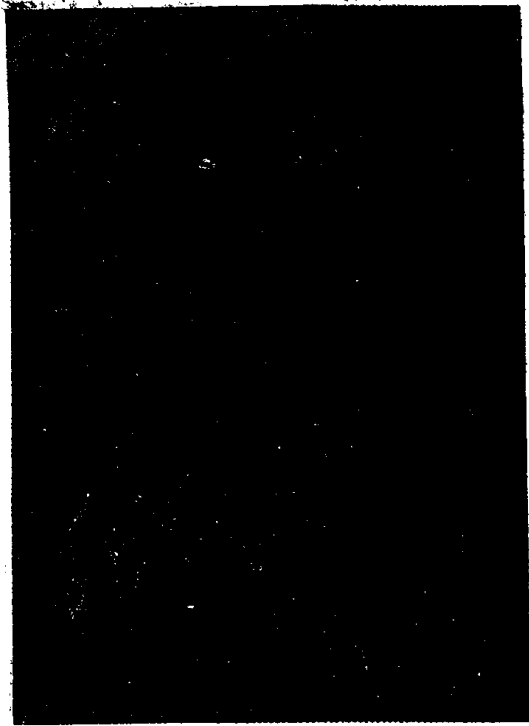


图1.1 石墨 Σ 堆

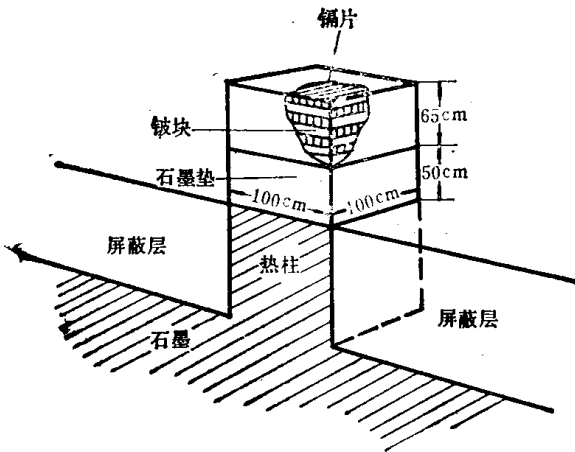


图1.2 阿贡堆垂直热柱上的 Σ 堆

2. 次临界装置

次临界装置是由倍增材料组合起来而未达到临界的装置。

在热中子次临界装置中，燃料、慢化剂和结构材料的比例和

布置都可与所模拟的实际反应堆相同。但它的几何尺寸比临界尺寸要小，因此称为次临界装置。由于装置本身不具备维持自持链式反应的条件，系统本身的有效倍增因子 $k_{eff} < 1$ 。所以，为了维持稳定的裂变反应，必须引入一个外中子源。一旦撤出外中子源，装置内的中子通量就会逐渐衰减，直至趋于本底水平。如果引入源强稳定的外中子源，次临界装置内将形成稳定的中子通量分布；如果引入脉冲中子源，装置内中子通量将经历一个由零到峰值而后衰减至本底的变化过程。通过对装置内中子通量的测量，可以确定材料曲率 B_m^2 、临界质量 M_c 及 k_{eff} 等反应堆参数。

次临界装置的特点是

(1) 经济：利用次临界装置能以较少的堆芯材料进行实验。建造这种装置的费用也比较节省。

(2) 安全：利用次临界装置进行实验不会发生超临界事故。因此，对于次临界装置，一般不设安全保护控制系统，仅对接近临界的次临界装置，才设简易的安全保护控制系统。

(3) 灵活：易于改变堆芯栅格的布置来进行各种方案的比较实验。

当设计一个次临界装置时，要根据次临界的类型、栅格的特性来确定总体布置和尺寸。以下介绍两种类型的反应堆次临界装置：一种是以液体作慢化剂的，另一种是以固体作慢化剂的。

采用液体作慢化剂的反应堆次临界装置往往是盛有燃料和慢化剂的长方形或圆柱形的“箱”或“桶”。图1.3是一个重水次临界装置。它是一个盛装着天然铀燃料棒和重水慢化剂的圆柱形桶，其直径为1.0m，高为3.0m。这个桶由厚为

1.0cm的铝制成。桶壁四周围以0.3—0.4cm厚的含硼塑料，

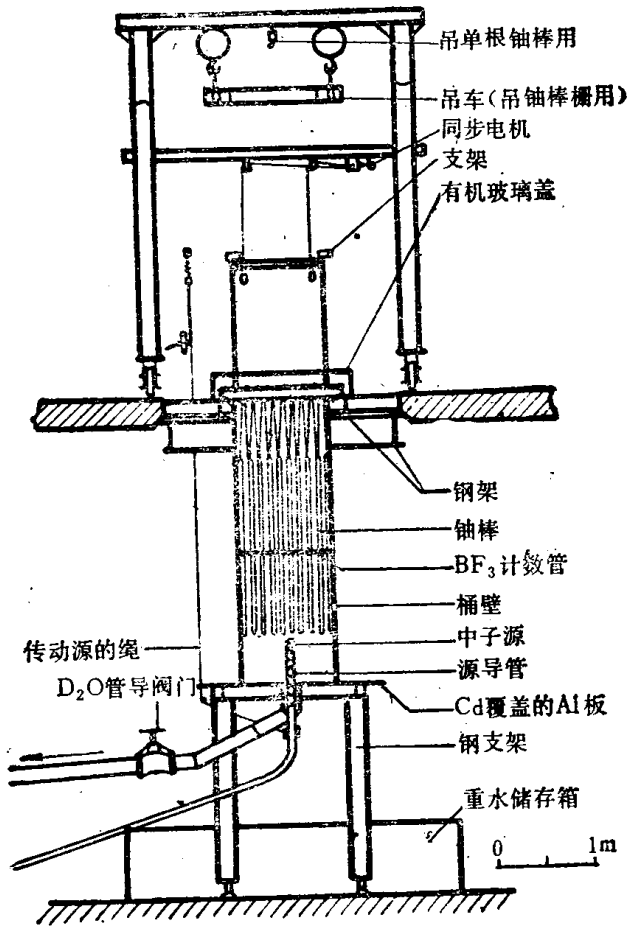


图1.3 重水次临界装置图

以保证黑边界条件。燃料元件是天然铀棒，其直径有三种，分别为2.00、2.53及3.05cm，其长度为2.0m。整个铀棒栅是悬挂在一个栅格距离可调的支架上。铀棒放入盛有重水慢化剂的圆柱桶中。桶上盖有有机玻璃盖，以便观察堆芯。桶的侧壁上沿轴向开有10个相距20cm直径为2.5cm的孔，以

便置放水平探测器的管道。中子探测器为直径1cm、长40cm的BF₃计数管。测量时，将它依次放入水平管道中，可测出装置内的沿轴向的通量分布。探测器最好放在堆芯水平导管轴对称的位置，这样可以消除高次谐波的影响。中子源可由堆芯下面的导管送入。为了减少源中子从导管中的泄漏，源导管中填有石墨柱。此外，由于重水昂贵，整个重水系统需要密封，以防重水漏失及湿空气的侵入而影响重水的纯度。

最早的固体慢化剂次临界装置是费米等人建造的石墨-天然铀装置（见图1.4）。燃料块为边长20.3cm的天然铀立方体。栅距为40.6cm。中子源是2g镭-铍源。它位于装置的底部。这种装置结构简单，但需要采取夹紧措施来加强稳定

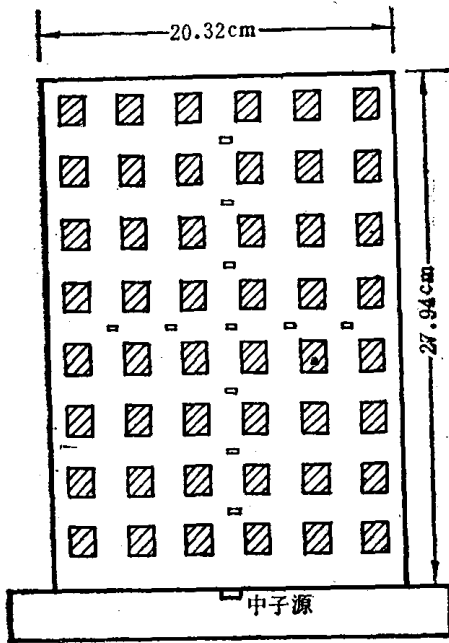


图1.4 石墨-天然铀次临界装置

性。常将石墨加工成带孔或有槽的条块，以便能于其中放入燃料元件和探测片。设计时，要尽量考虑到实验的灵活性。用作慢化剂的石墨应为核纯石墨（典型密度为 $1.6-1.8\text{g/cm}^3$ ，理论结晶密度为 2.25g/cm^3 ）。

铍或氧化铍的装置也可做得与石墨装置类似。因为铍有毒，一定要注意防护，防止铍被吸入体内。

如果采用反应堆的热柱作为中子源，也可以和 Σ 堆一样，把次临界装置安设在热柱上。但要特别注意防止地面散射的影响。

3. 临界装置

临界装置是在很低的功率下运行的能维持可控自持链式裂变反应的装置。在临界装置上能直接测定堆的临界质量，控制棒的当量和功率分布等参数。其中的许多参数是难于在次临界装置上实验测定的。临界装置是从事反应堆物理实验研究的不可缺少的工具。

临界装置具有可接近性和灵活可变性的优点，它的栅格的构成和布置可根据实验的需要改变。又因为它的运行功率很低，所以不需要设置冷却系统。但临界装置可以到达临界和超临界，因而需要配备完整的安全保护控制系统。

按照不同的研究目的，临界装置可分为两类。一类是“纯”临界装置，其栅格构成和几何布置比较简单，具有较大的灵活性，并便于实验。在这类装置上进行实验的目的是：研究某种类型反应堆的物理特性；将测量结果与计算程序和核数据进行比较；以及发展改善实验技术等。

另一类为“模拟”临界装置。它的栅格完全模拟真实的动力反应堆或试验反应堆的模拟设计栅格。因为计算程序和截面并非很完善，在工程模拟装置上进行实验研究以验证设