



国防特色学术专著·核科学与技术

实验反应堆物理导论

SHIYAN FANYINGDUI WULI DAOLUN

罗璋琳 史永谦 潘泽飞◎编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

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 西北工业大学出版社



国防特色学术专著·核科学与技术

实验反应堆物理导论

罗璋琳 史永谦 潘泽飞 编著

哈尔滨工程大学出版社

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 西北工业大学出版社

内容简介

本书系统地介绍实验反应堆物理的内容,着重介绍各类实验的物理思想和理念,特别在相关章节加强了压水动力堆物理试验的内容。为了加强动态测量方法的理论基础,本书分三个层次引入了点堆动力学模型。

全书内容共分15章,前12章按反应堆物理实验研究的课题分章,后3章分别介绍3个专题,供有关研究工作者和现场工作者阅读。

本书可供核工程技术专业人员学习参考,也可作为核科学与工程及相关专业硕士及博士研究生学位或选修课程教材。

图书在版编目(CIP)数据

实验反应堆物理导论/罗璋琳,史永谦,潘泽飞编
著. — 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2011.2

ISBN 978-7-5661-0025-2

I. ①实… II. ①罗… ②史… ③潘… III. ①反应堆
物理学 IV. ①TL32

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第016906号

实验反应堆物理导论

罗璋琳 史永谦 潘泽飞 编著
责任编辑 石岭

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街124号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

哈尔滨市石桥印务有限公司印刷 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:25 字数:608千字

2011年2月第1版 2011年2月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-5661-0025-2 定价:80.00元

前 言

二十多年来,随着裂变核能应用的蓬勃发展,不断有新的反应堆建成,为了保证反应堆安全、稳定地运行,广大反应堆物理实验工作者进行了不懈努力,积累了大量实践经验和研究成果。

为了改进反应堆物理实验,提高测量结果的可靠性和精确性,不断有新的理念、新的物理思想提出。此外,在这段时间里,为了改进和完善裂变核能的燃料循环,人们将理论与实验相结合提出了核废料核素的嬗变、超铀核素的再利用等新的物理思想,并进行了理论与实验相结合的探讨。这些内容已有工作总结,大部分也已见诸于期刊杂志和会议报告。反应堆工程研究人员,特别是反应堆物理实验工作者和核专业研究生教学人员,迫切需要一本系统地介绍和反映这些研究成果的教材和参考书籍,这是本书编著者努力想要实现的目标。

反应堆物理,包括理论和实验,按其工作内容和目标可以分为两个方面:一是在研究院所,结合研究任务发展反应堆物理,针对新型反应堆、新的核能系统开展工作;二是核电厂反应堆物理工作者,在已建成运转中的工程性反应堆上针对反应堆的物理启动,以及在反应堆运行过程中,测定或监督反应堆的各种物理参数,为校核和改进反应堆堆芯设计提供实验依据,为反应堆的安全稳定运行提供保障。

在编写过程中,我们努力做到全面介绍各种反应堆物理实验的基本物理概念和实验原理,努力反映每一个专题的最新研究成果,供广大反应堆科学技术工作者参考。

原子能科学研究院反应堆物理实验室是从朱光亚先生领导的小组起步,发展组建而成的,本书引用的实践经验和成果是几十年来先后在该室工作过的反应堆物理理论工作者和实验工作者共同努力取得的。这些经验和成果也见证了我国实验反应堆物理发展的历史。

考虑到我国核电面临大发展的机遇,即将有几十座百万千瓦级的压水堆核电机组投入运行,本书在相关章节加强了压水动力堆物理试验的内容,并在专门一章以核电秦山联营有限公司(即秦山第二核电厂)为例,介绍压水动力堆物理试验。这些内容对其他动力堆也有参考意义。

点堆动力学模型在反应堆动态物理实验中起着重要作用,本书分三个层次引入点堆动力学模型。第4章由简单的物理图像,从讨论中子平衡和中子数演变的时间尺度出发,建立了点堆动力学方程;第6章从时间相关的单组扩散方程出发导出点堆动力学方程;第15章从严格的中子输运方程出发,以中子价值函数加权,有条件的导出点堆动力学方程,给出动态参数的严格定义,并结合实验项目进行了讨论,从中引出空间效应修正因子的表达式。控制棒价值测量的空间效应问题,本书在第5、6章和第15章都作了讨论,在第15章还设计了一个物理模型,对静态空间效应修正

因子进行了数字模拟计算,并结合计算结果作了分析讨论。

反应堆噪声分析是反应堆工程技术的一个重要分支。中子噪声分析历来就属于反应堆物理实验的内容。本书专设一章讨论中子噪声分析问题,特别编入了压水动力堆吊篮振动的中子噪声监测,其中包括结合秦山第二核电厂压水堆堆芯吊篮振动刻度因子计算模型和计算结果。压水堆慢化剂温度系数的噪声分析技术测量和监测是人们广泛关注的课题,在本书中子噪声分析一章编入了相关内容,并作了综述和讨论。

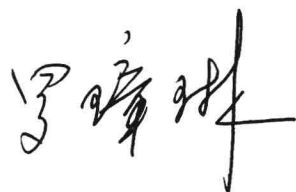
全书共分 15 章,前 12 章按反应堆物理实验研究课题分章,以改编和增补为主,有些课题的实验内容虽然现在已很少进行,但从历史发展的角度考虑,某些物理思想对了解和认识反应堆的物理特性仍有启迪作用,在改编和编写时作了删节和压缩,保留了基本概貌。后 3 章讨论人们关注的题目,第 13 章讨论压水动力堆物理试验,第 14 章专门讨论 ADS 次临界反应堆物理特性及其实验,着重介绍国内近期的研究成果。第 15 章结合导出点堆动力学模型的严格形式,讨论广为关注的反应性测量中的空间效应修正问题。

本书由中国原子能科学研究院核工业研究生部罗璋琳研究员承担第 1,2,4,5,7,8,10,11,12,15 章的改编和编写工作,中国原子能科学研究院史永谦研究员承担第 3,6,9,14 章的改编和编写工作,秦山第二核电厂研究员级高级工程师潘泽飞承担第 13 章的编写工作,原子能科学研究院李义国研究员参与第 11 章的改编,夏普研究员参与了第 14 章的编写。全书由罗璋琳统稿。本书由前核电办总工程师罗安仁和中国原子能科学研究院徐铄研究员审校。秦山核电厂研究员级高级工程师王荣尔和大亚湾核电运营公司研究员级高级工程师李现峰审校了第 13 章。博士生张巍同志参加了第 2 章和第 10 章的审校工作。本书在编写过程中吸收和总结了核工业研究生部专业课程的教学经验。

本书的编写和出版得到中国原子能科学研究院、核工业研究生部和秦山第二核电厂领导以及阮可强院士的关心和支持。本书的出版还得到核工业研究生部教务处肖武、章超同志的帮助和哈尔滨工程大学出版社的大力支持,在此一并表示衷心地感谢。

在本书编写过程中,参考了国内外一些专家和学者的论著,在此表示感谢。同时书中引用的研究成果受作者工作经历的限制,国内相关单位卓有成效的经验和成果未能得到更全面地反映,在此深表歉意。

由于编著者水平有限,书中难免有疏漏和不当之处,恳切希望读者批评指正。



2010 年 7 月

目 录

第 1 章 实验反应堆物理的研究领域和手段	1
1.1 概述	1
1.2 实验内容的扩展与演变	2
1.3 反应堆中子的探测	5
1.4 实验方法和实验手段概述	10
第 2 章 临界实验	12
2.1 临界点及其确定	12
2.2 实验原理、方法和误差	13
2.3 实验仪器和设备	17
2.4 临界实验举例	18
2.5 问题讨论	22
2.6 接近临界实验过程的数学模拟	25
第 3 章 中子通量密度及其测量	28
3.1 概述	28
3.2 活化箔方法测量中子通量密度分布	30
3.3 $4\pi\beta - \gamma$ 符合方法测量绝对中子通量密度	45
3.4 固体核径迹探测器测量中子通量密度	57
3.5 动力堆堆芯中子通量密度分布测量	62
第 4 章 点堆动力学方程和周期法测反应性	68
4.1 反应性的定义和单位	68
4.2 点堆动力学方程	70
4.3 倒时公式	72
4.4 周期测量	79
4.5 外中子源和各有关参数的影响	80
4.6 消除中子源本底和光中子效应的方法	86
第 5 章 控制棒价值和次临界度测量	90
5.1 控制棒价值及其测量目的	90
5.2 周期法测量刻度曲线	90
5.3 反应性系数法	92

5.4	落棒法和跳源法	95
5.5	数字反应性仪	102
5.6	压水动力堆控制棒组价值测量	106
5.7	振荡法	110
5.8	源倍增法	113
5.9	问题讨论	114
第 6 章	脉冲中子源方法测量反应性	119
6.1	概述	119
6.2	单群点堆动力学方程	119
6.3	实验原理	122
6.4	脉冲中子源方法的仪器和设备	127
6.5	实验数据的采集和处理	129
6.6	相关问题讨论	134
6.7	应用举例	137
第 7 章	反应性系数和反应性效应测定	140
7.1	概述	140
7.2	温度系数和温度效应	141
7.3	水位系数和水位效应	145
7.4	质量系数	148
7.5	其他反应性系数和效应	150
7.6	反应性漂移修正	152
第 8 章	动态特征参数测量	154
8.1	概述	154
8.2	特征时间常数 α_0 的测量	154
8.3	缓发中子有效份额测量	158
8.4	光中子有效系数及其测量	169
8.5	传递函数的测量	172
第 9 章	反应堆中子数的统计分析	175
9.1	概述	175
9.2	罗西 - α 方法	177
9.3	内生脉冲中子源方法	183
9.4	方差 - 平均比方法	185
9.5	零概率方法	189
9.6	间隔分布法	192
9.7	有关问题讨论	196

第 10 章 中子噪声分析	199
10.1 概述	199
10.2 噪声信号及其描述符	199
10.3 核噪声	206
10.4 压水堆吊篮振动监测	215
10.5 中子 - 温度噪声法监测 PWR 慢化剂温度系数	221
10.6 中子噪声信号的采集和处理提要	230
第 11 章 用反应率方法研究中子能谱	235
11.1 概述	235
11.2 反应率方法概述	235
11.3 能谱参数测量	242
11.4 能谱分布测量研究	260
第 12 章 栅格参数测量	271
12.1 栅格参数及其测量	271
12.2 材料曲率和反射层节省的测量	272
12.3 热利用系数测量	281
12.4 ρ_{28}, γ_0 和 δ^{25} 的测量	287
12.5 快裂变比 δ^{28} 的测量	297
第 13 章 压水动力堆物理试验	305
13.1 概述	305
13.2 堆芯装、卸料临界安全监督	309
13.3 热态零功率试验	312
13.4 堆芯功率分布测量	331
13.5 堆外电离室刻度	334
13.6 功率系数与功率亏损测量	338
13.7 多普勒功率系数测定	342
13.8 瞬态响应试验	345
第 14 章 ADS 次临界堆物理特性及其实验	351
14.1 概述	351
14.2 ADS 次临界物理学	353
14.3 有源次临界反应堆中子倍增因数的实验研究	359
14.4 启明星 1# 实验装置及其首期实验研究	363
14.5 本章小结	367

第 15 章 反应堆动力学方程和空间效应	371
15.1 概述	371
15.2 点堆动力学方程的严格形式和动力学参数	371
15.3 多点反应堆动力学方程	374
15.4 中子价值函数和共轭函数	375
15.5 反应性测量中的空间效应修正	377
15.6 外中子源所致空间效应	379
15.7 空间效应修正因子的数字模拟	387

第 1 章 实验反应堆物理的研究领域和手段

1.1 概 述

裂变核反应堆是由核燃料、冷却剂、慢化剂、结构材料和中子吸收材料等组成的一个复杂的系统,是一种宏观的大块物质的集合体。研究中子在其中的输运过程,是反应堆物理研究的内容。研究的目的在于应用,其中最主要的是围绕裂变核能的应用,研究设计各种核动力反应堆,以及围绕提供中子束为目的的各种实验研究性反应堆。反应堆物理围绕这些反应堆的设计、建造、运行,为安全性和经济性提供数据。经历几十年的研究,反应堆物理已经是一门比较成熟的学科,有比较完善的理论模型,比较齐全的核数据库和比较完善的计算机程序系统。但是对客观世界的认识是无止境的,不断有新的堆型、新的核能系统需要人们去研究、去开发,已建成的核反应堆工程也不断有新的研究课题提出。因此核反应堆物理作为核工程领域的一门独具特色的学科还将不断发展,不断推进。核反应堆物理与其他物理学科一样,由于学科的特点分为理论与实验两个部分,它们相辅相成,但又各具特色。

本书专门讲述反应堆物理实验,当然要介绍各种堆物理实验方法,但是以讲述实验中的物理问题、物理概念、物理图像为重点。那种认为实验工作者不需要物理知识的观点,显然是不正确的。实验的目的、实验计划的设计、实验程序的执行、实验结果的解释和应用等,无一不需要物理理念,并且需要深层次地去理解中子在核反应堆里的输运过程。反应堆物理,甚至可以说整个核工程都是外来学科,都是引进、借用已有学科的研究成果,在其基础上发展的。

1932年人们发现中子,经过10年核科学长足的发展,于1942年12月第一次实现自续链式反应,建成了第一座反应堆,人类从此跨入了原子能时代^[2]。今天用于核能发电的热中子反应堆已有成熟的堆型,核电站用堆型已跨入第三代,第四代。

世界上第一座反应堆的建成,标志着反应堆物理这门学科的诞生。随着反应堆工程的发展,反应堆物理逐步发展成为在核科学工程中一门相对独立又比较完整的学科,但是许多物理概念、物理思想都能从其他学科中找到痕迹,中子扩散理论来自古老的分子物理,核链式反应使我们联想到化学反应,等等。

反应堆物理实验中许多实验方法都来自实验核物理,其中最典型的要数本书第6章的脉冲中子源实验,在核物理实验中利用脉冲中子法,测定裂变中子数和缓发中子相关参数,这一实验可以追溯到第一座反应堆建成以前。

反应堆物理研究中子在大块物质中的输运特性,理论和实验相辅相成。一个典型的事例是20世纪60年代,普通水内裂变中子由裂变能慢化到1.4 eV(铀的活化吸收共振峰)的年龄的计算值和测量值之间的差别很大,理论计算值为 $26.0 \pm 0.5 \text{ cm}^2$,而当时的实验平均值为 $30.5 \pm 1.5 \text{ cm}^2$,虽然分析了许多可能的误差来源,仍不能解释这个差别,最后确认实验值不正确,分析了实验的理论基础,而采用大而薄的平面裂变中子源,并对源和探测器的扰动进行修

正,最后才得到与理论值相接近的结果。

1.2 实验内容的扩展与演变^[1]

1958年我国建成第一座研究用重水反应堆,简称101实验堆,该反应堆的物理启动标志着我国实验反应堆物理工作的起步,当时以朱光亚先生为组长的反应堆物理实验组,隶属于原子能科学研究院中子物理实验研究室,后来反应堆物理实验组与理论组合并成为反应堆物理研究室,同期建造了反应堆物理实验楼,用于安装放置反应堆零功率实验装置。反应堆零功率实验装置是指反应堆的裂变率很低、功率极小、中子通量密度在 $10^8 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 以下的,专用于物理实验的反应堆,实验楼的实验大厅可放置四座零功率实验装置,第一座零功率堆是1959年建成的东风1号(DF-1)。东风1号建造的主要目的是用于堆用材料核性能检查,当时反应堆事业刚刚起步,各种材料研究成功后,核性能检验的任务由堆物理室承担。那时就世界范围来说,反应堆物理研究尚处于初期阶段,理论计算用的核数据库也处在发展初期,特别是某些稀有核素,数据很缺乏。材料截面在堆内进行宏观检测是各国堆物理实验工作者进行的基础性的工作之一,检查用的基本方法称为危险系数法,测量材料样品放入堆内引起的反应性改变量,用周期法测量,或用刻度好的控制棒,由棒位变化来量度反应性改变量。101重水堆的第一个堆芯,设计安装的精密调节棒就是用于这类测量。因为这类测量是相对测量,用含硼样品,当时用重水硼溶液作为标准,所以实际测量的是被测材料吸收截面的硼当量。当时公认为最精确的手段是堆振荡器,让测量样品在堆内外振荡,以重复测量反应性改变。曾经计划设想建造两座同时运行的零功率堆,安装对称的堆振荡器,一个带被测样品,一个带标准样品,借用天平的原理,测量稀有核素的截面,例如裂变产物的截面,后来由于这种特制堆振荡器技术难度大等原因,放弃了这个计划。俄罗斯有专用于安装堆振荡器的零功率反应堆。在历史上堆振荡器是核数据宏观检验的主要手段。后来在堆物理实验楼还相继建成了东风2号、东风3号等轻水慢化型零功率堆和重水零功率堆。

从20世纪60年代初期开始,各国开始计划建造大量民用轻水动力堆。轻水慢化反应堆中子能谱较硬,用简单的计算方法难以保证精度。此外,从50年代中期开始,各国加强了微观数据的交流、收集整理和评估,电子计算机的发展又允许反应堆物理设计人员从基础微观数据出发,作较准确的数值计算。60年代中期起,国外开始对基础微观核数据作系统地收集整理评价,形成核数据库,计算机的运算速度和存储量以及反应堆理论模型的改进均有了很大的进展,并开始成批研究开发堆物理研究设计用计算机程序,这标志着反应堆物理研究手段的大转折。我国也在同期成立了核数据中心。

但是反应堆的理论设计终究还是需要通过实验进行校核的,所以同期国外建造了大量零功率反应堆实验装置,20世纪60年代中期数量达到最大值,约为一百座左右^[1]。这些零功率实验装置可以粗略地分为两类:一类是为工程设计服务的,从模型上模拟工程设计;另一类是专为校核、检验核数据库设计的,称为基准临界装置。基准临界装置要求材料组分清楚明白,结构简单,几何尺寸准确,实验内容单一,只做临界实验,求出对应于 $k_{\text{eff}} = 1$ 的结构组成的临界点。

先进的反应堆物理计算总是将中子按能量分群,从核数据库出发,制作与理论模型相适应的群常数,这里以堆芯扩散计算为例,群常数产生流程图如图1.1所示。

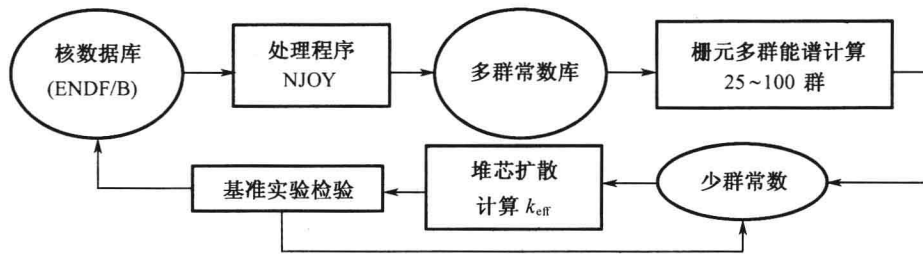


图 1.1 群常数产生流程示意框图

通过基准实验检验所选用的数据库,从少群常数的产生制作过程,特别是少群常数的制作并群过程,可以看出基准临界装置实验的奠基性作用。

核数据库中包含 0~20 MeV 甚至更高中子能量与核素相互作用的核反应截面,目前世界上有五个自成体系的评价核数据库:美国的 ENDF/B 库、欧洲共同体的 JEF 库、日本的 JENDL 库、俄罗斯的 BROND 库和中国的 CENDL 库。我国在 20 世纪 60 年代中期成立核数据中心,收集整理和评价核数据研制出中国的数据库 CENDL,其中包括我国自行实验测量和计算的核数据。近年来版本不断更新,1993 年已开发公布了 CENDL-2 库,现已公布了 CENDL-3 库。

应该说大量的零功率反应堆是为检验反应堆工程设计而建造的,特别是研究试验用反应堆,往往堆芯有各种实验回路和实验管道,结构较为复杂,理论计算的不确定性大,需要进行 1:1 的模拟实验。初期动力堆设计也需进行模拟实验,但不是也不可能进行 1:1 模拟实验,关心的只是一些突出的、理论上很难把握的问题,例如反应性控制问题,可燃毒物反应性价值问题等。最典型的例子是在压水堆发展初期,慢化(冷却)剂温度系数理论计算值的正负号都难确定,为此进行了大量的模拟实验,甚至建造专用高温零功率反应堆。高温零功率说的是慢化剂温度加热到工作温度 300℃左右的临界实验装置。我国在 20 世纪 70 年代初期为此单一目的,建成了电加热的高温零功率堆。

压水堆的工作寿期,很大程度上决定于压力壳钢受快中子辐照的注量(积分通量),因此在运行过程中要理论与实测相结合,在线监测指定位置的中子注量。为了检验监督手段是否可靠,20 世纪末,在西班牙专门建造了作为基准的零功率反应堆 VENUS-3^[4]。

随着我国反应堆事业的发展,除原子能院以外,清华大学核能所、上海核子所等单位也都建造和运行过零功率反应堆,用来完成相应反应堆工程设计建造任务。

裂变核能的利用,终归要使用快中子反应堆。实际上,在核能和平利用的初期,研究建造热中子反应堆核电站的同时就开始了快中子堆核电站的研究,但是由于技术上难度较大,以及非技术的社会因素,推迟了大批建造快中子堆核电站的日程。快中子堆的物理问题比热中子堆要难得多,美、法、日、俄等国都建造了研究快中子堆物理的零功率临界实验装置,这些装置的一个共同的特点是燃料元件采用片状组合式,用纯铝或用铝箔包金属钠块模拟冷却剂、堆芯组成,灵活可变。这些装置为快中子堆堆芯物理计算积累了大量的实验数据,推动了快中子堆中子学设计的理论模型和相应的数据库的建立和完善。

进入 21 世纪,各国核能界普遍关注制约裂变能持续发展的问題。大家都知道裂变核能利用,只能从热中子反应堆开始,从利用²³⁵U 开始。而大型热中子堆核电站每年要卸出的乏燃料

以百吨计,这就必然要积累大量的核废料核素,其中关键的是还积累了少量超铀核素。那些被称为 MA 的核素,放射性半衰期长,毒性高,一旦进入生物圈,对人类的生存将造成极大的危害。科学研究证明,处理核废料核素的理想方法是用中子轰击,使其分裂嬗变,其中最理想的途径是在现行的核燃料循环中引入中能强流质子加速器驱动次临界堆(ADS)。引入 ADS 改造构建新的燃料循环,使之成为放射性洁净的核能系统^[3]。有强流外中子源的次临界反应堆,是 ADS 的核心组成单元。由于有强流外中子源存在,中子能谱及其空间分布均与现行临界反应堆不同,因此成为反应堆物理研究中令人关注的课题,与 ADS 中子学相关课题的实验研究正是在为发展快中子反应堆而建造的临界实验装置上进行的。

动力反应堆,或者在高功率下运行的实验性反应堆都属于大型核设施,与常规的工业设施不同,存在特有核安全问题,所以它们在建成、投入正式营运前都要经历一个物理启动阶段。在物理启动阶段,现场物理工作人员要实施临界安全监督,从反应堆装料开始,直到安全地达到临界,测定各种物理性能参数,校核堆芯物理设计,并为核电厂的安全运行提供数据。

现在核电厂现场物理工作已经成为反应堆物理研究工作的重点。核电厂现场物理工作的特点是理论与实践相结合,共同为提高核电厂的安全性和经济性而展开,工作内容涉及堆芯核燃料管理,确定反应堆物理性能参数,测定控制棒价值和慢化剂温度系数,管理堆芯中子通量密度空间分布,进而还包括乏燃料贮存池的临界安全监督,等等。

按我国现行体制,每一座工业规模的核反应堆都有专设的物理工作小组,从事反应堆物理性能测试和管理工作。现场堆物理工作与研究院所的物理工作关注的重点不同,不再是反应堆堆芯物理组成结构,因为有些在设计建造时就固定下来了,而是反应堆的集总参数,是保证反应堆安全稳定运行,保证安全输出电能(或中子束)相关的运行参数。现场实验工作者的工作,在按安全法规、标准进行各种测试工作的同时,将改进工作方法,提高测量参数的可靠性,缩短工作时间,减少对核电厂正常运行的干扰,提高核电厂的安全性和经济性作为主要目标。

核工业需要对核燃料进行特殊的管理,要关注临界安全问题,防止意外临界事件的发生。核燃料循环如果以核燃料在反应堆的使用为中端,则核燃料的生产制造为前端,从反应堆卸出乏燃料再处理为后端,则从前端到后端的整个循环过程,凡是有核燃料聚集的环节都要进行临界安全设计与评估。在核能发展的历史上不乏发生临界安全事故和事件的例子,有的事故释放出的放射性核素还波及相邻国家,造成极大的影响,所以各国在发展核能的同时都关注临界安全问题,成立相关的临界实验室或临界安全中心。我国原子能科学研究院反应堆物理研究室,同时也是隶属于核工业集团公司,面向全国的临界安全中心。临界安全研究是反应堆物理研究的重要组成部分。

癌症的中子放射治疗是人们关注的话题,远在 20 世纪 30 年代就提出硼俘获中子治疗癌症(BNCT)的理念,BNCT 是利用中子与硼的反应 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 产生的重离子 α 和 ^7Li 杀死癌细胞,实现治疗的目的。它既有中子穿透力强的优点,又有重离子射程短(可与细胞直径相比较)、线性能量转换系数高的优点,对某些癌症,例如脑胶质瘤有特殊治疗功效,广为世界各国关注。目前已经有许多研究性反应堆经过改造为 BNCT 提供中子源,也有专为 BNCT 设计建造的专用反应堆。用加速器作中子源的 BNCT 治疗设施也正在研究建造之中,但是不管是用反应堆作中子源或是用加速器作中子源,原始的中子源能谱都不能满足 BNCT 的要求,需要通过中子束整形装置(BSA),由准直器引出治疗用中子束。而反应堆改造设计,BSA 的设计都涉及中子和 γ 射线在大块物质中的输运问题,以及 BNCT 引出中子束的品质测定等,都需要利用反应堆物

理研究发展积累起来的计算手段和实验方法。所以说, BNCT 中子源的供给和优化也是反应堆物理, 准确地说是宏观中子物理研究发展的一个领域。

1.3 反应堆中子的探测

1.3.1 概述

堆中子探测有两个目的: 一个是监测堆中子水平; 二是从堆中子探测中获取反应堆的物理特性。反应堆物理实验正是通过堆中子的探测来感知反应堆物理特性的, 所以在正式讨论反应堆物理实验之前, 先介绍一些堆中子探测的知识。在堆物理实验中, 中子探测分为空间分布探测和堆中子水平探测。

中子是不能直接测量的, 需要借助于中子与其他核的核反应, 产生发射带电粒子的核素, 通过测量放射性核素的活性间接测量中子, 或直接测量带电粒子形成的电脉冲, 前者称为活化箔技术, 后者称为中子探测器。反应堆物理实验室和动力堆现场应用的中子探测技术有所不同, 在实验室可根据实验目的和内容不同灵活选用中子探测技术, 而动力堆现场物理试验则只能利用堆中子水平监控的中子探测器。除首次装料物理启动试验以外, 一般不允许另装中子探测器。

我们知道反应堆的热功率与核裂变率成正比, 因此当比例关系已知, 则测定了中子通量密度就可以知道反应堆的热功率。当然反应堆的热功率, 也可以通过反应堆冷却剂的流量和进出口温差算出, 但是这并非直接测定, 而且响应时间慢, 有时精度也不高。中子测量响应时间快, 在低中子水平时测量精度也能比较高, 所以在反应堆启动和安全保护监测中, 中子测量是有其重要性的。堆中子探测有下述特征:

(1) 与其他监测信号相比, 测量范围宽达 8 至 12 个数量级。宽的测量范围而且要求高的精度, 这是核能以外的其他领域所没有的。

(2) 从中子探测器出来的信号非常弱, 与 1 个中子输入对应的脉冲电流从几 μA (裂变室) 到 $10 \sim 20 \mu\text{A}$ (BF_3 计数管), 平均电流 10^{-14} A/nv (γ 补偿电离室), 所以注意电缆噪声的消除是十分必要的。

(3) 从系统的安全保护立场出发, 要求监测仪表有特别高的可靠性, 现在这些核监测仪表已有标准的定型产品, 性能指标也能满足堆物理试验要求。

这里, 我们以压水型动力堆的中子探测为例, 压水型动力堆 (PWR) 习惯上把中子监测范围分为三个量程:

- ①源量程 (Source Range) 或简称为 SR, 两个通道;
- ②中间量程 (Intermediate Range) 或简称为 IR, 两个通道;
- ③功率量程 (Power Range) 或简称为 PR, 四个通道。

源量程用于反应堆启动, 其特点是要借助于外中子源, 或利用堆内固有的自发裂变源, 以中子计数管 (通常为 BF_3 正比计数器) 为探测器。探测器一般放在比堆芯最高中子通量低 3~4 个数量级的位置, 而且为了延长探测器的使用寿命, 在功率提升时, 要提出堆外。中间量

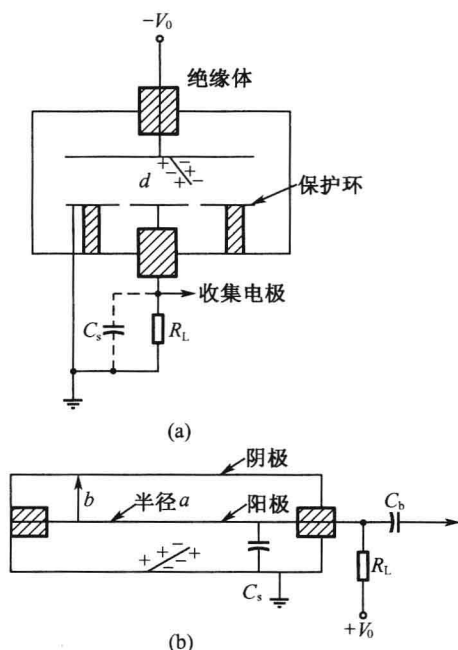


图 1.2 气体电离探测器的一般特征

(a)平行板电离室,带有保护环,以拦截漏电流和确定灵敏区;(b)圆柱形正比或 GM 计数管

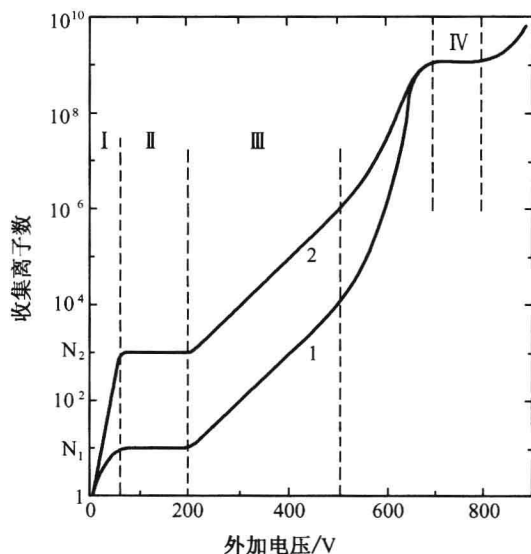


图 1.3 收集到的离子数与外加电压的关系

(1) 正比计数管

压水堆常设堆外源量程探测器为含硼(BF_3)正比计数管,如图 1.2(b)所示。它为一金属圆管,内充 10~20 mmHg 三氟化硼气体,直径为几厘米,中央为通过绝缘子拉伸的一根阳极金属细丝,利用 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, $^4\text{He}(n, p)^3\text{H}$ 反应,或快中子被氢散射所产生的反冲质子探测中子。硼或者涂敷在圆柱形的阴极上,或者以三氟化硼气体充入管内,典型气压为 400~500 Torr(托)。气压虽然还可增高,但 γ 射线的灵敏度也将增加,且工作电压也需增加。为了提高中子探测效率, ^{10}B 可以从自然丰度 18.8% 增加到 96%。表 1.1 列有典型 BF_3 计数管的一些特性。计数管直径可从 6 mm~5 cm,灵敏长度可从 2.5 cm~100 cm。

从表 1.1 中可以看出,同样几何尺寸和工作条件下, ^3He 计数管探测热中子的灵敏度是 BF_3 计数管的 8 倍。

^3He 计数管充有 ^3He 气体,并有少量的猝灭气体,用以稳定气体放大倍数,再附加 10% 或 20% 的氩或氦,以增加阻止本领。 ^3He 比 BF_3 特性更佳,并且压力可充到 10 个大气压以上。到 4 个大气压以上,探测热中子的内在效率就很少变化了,但为了探测中能中子,更高的压力是有益的。常用计数管直径为 6 mm~10 cm,灵敏长度为 2.5 cm~60 cm。 ^3He 比 BF_3 成本贵,此外因它的反应能 Q 值较低,故脉冲幅度较小。

表 1.1 典型中子正比计数管的特性举例

项 目	BF ₃ 计数管	³ He 计数管
充气类别	BF ₃ , 96% ¹⁰ B	³ He + 猝灭气体
气压	100 Torr	4 个大气压的 ³ He
阴极直径	2.5 cm	2.5 cm
阳极直径	0.005 cm	0.005 cm
灵敏体积长度	20 cm	20 cm
工作电压	1 ~ 2 kV	1 ~ 2 kV
放大倍数	20	20
热中子灵敏度	$\frac{4 \text{ 计数/s}}{\text{中子}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})}$	$\frac{32 \text{ 计数/s}}{\text{中子}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})}$

BF₃ 或³He计数管探测快中子和中能中子的效率为 0.01% 数量级,但随能量显著地变化。若在探测器周围包上诸如石蜡、聚乙烯等慢化剂时,效率能够提高,快中子反应堆的中子探测常常采取这样的措施。

在 BF₃ 正比计数管中,主要利用⁴He(α 粒子)产生脉冲, γ 射线也产生电离脉冲,这是测量误差的原因所在,但是由于 α 粒子电离脉冲幅度比 γ 电离脉冲幅度大,因此可以适当选择脉冲甄别器的阈,以甄别掉 γ 射线的贡献。

BF₃ 正比计数管的灵敏度、脉冲幅度分布和坪长都比涂硼正比计数管好,但耐射线损伤能力和寿命都不如后者,所以近年来作为压水堆常设的源量程中子探测器,涂硼正比计数管用得较多,但由于 BF₃ 正比计数管的灵敏度高,在首次临界实验中仍被选用作为中子探测器,市场标准的 BF₃ 正比计数管的灵敏度约为 10 计数/nv。

(2) 裂变计数管和裂变电离室

裂变计数管的结构与正比计数管基本相同,只是在电极(内壁)涂以厚度约 2 mg/cm² 的 U₃O₈,典型的裂变室所用²³⁵U的富集度为 90% 以上,充气 1 个大气压,其中 99% 为氩,1% 为氮气,在中子入射时引起 U - 235 核分裂,由裂变碎片在气体中造成电离形成电脉冲。虽然 U - 235 的 α 射线在电离室形成的电脉冲会构成本底,但是由于 α 粒子射程比裂变碎片长得多,在飞行初期,裂变碎片能量损失大,在初期穿行的 1 mm 的狭小路程内,二者的输出脉冲幅度要相差几十倍,因此完全可以用甄别器把中子脉冲挑选出来。

裂变计数管与同灵敏体积的 BF₃ 正比计数管相比灵敏度要低 1 ~ 2 个数量级,仅 0.1 ~ 1 计数/nv,但电荷收集时间短,脉冲上升速度快,分辨率高,多用于中子通量水平较高的测量工作。微型裂变室,直径约 6 mm,灵敏体积长度约 2.5 cm,常用于堆芯中子通量密度空间分布的测量。可以接到微微安电流计上的微型裂变电离室,灵敏度可以达到 10⁻¹³ A/nv。

(3) 电离室

中间量程和功率量程用的中子探测器分为 γ 射线补偿型和非补偿型两种,输出信号为与中子通量成正比的直流电流。电离室的典型直径约为 8 cm,长度约 60 cm。为了提高中子探测灵敏度,将 96% 的浓缩¹⁰B涂在平行圆板电极上,涂层厚度 0.2 ~ 0.8 mg/cm²,灵敏度约 10⁻¹⁴ A/nv。功率量程用非补偿型电离室对 γ 射线和中子都很灵敏,但在功率量程中子通量水