



中国原子能科学研究院科学技术丛书

核反应堆中子学 实验技术

史永谦 编著

 中国原子能出版社

中国原子能科学研究院科学技术丛书

核反应堆中子学实验技术

史永谦 编著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核反应堆中子学实验技术 / 史永谦编著. —北京:

中国原子能出版社, 2011. 12

ISBN 978-7-5022-5371-4

I. ①核… II. ①史… III. ①反应堆运行—中子—实验 IV. ①TL375.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 236008 号

内 容 简 介

本书详细地介绍了核反应堆中子学实验技术方面的有关问题,包括基础知识、具体实验技术以及应用和实验中注意事项。作者根据多年教学和实验经验,特别根据作者本人在实践中遇到的问题 and 学生们提出的问题,并参阅了国内外反应堆中子学有关资料进行了总结和讨论。

本书可供核反应堆物理和核电站物理科技人员参考,也可供从事核反应堆工程研究、设计、运行人员和核临界安全研究人员以及大专院校有关专业师生阅读参考。

核反应堆中子学实验技术

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 谭 俊

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 北京画中画印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 31.75

字 数 605 千字

版 次 2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5371-4

印 数 1—2500

定 价 98.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

出版委员会

主 任 赵志祥

副主任 张昌明 柳卫平

委 员 (按姓氏笔画为序)

万 钢	王 楠	王阿凤	王国保	尹忠红	石永康
叶宏生	叶国安	刘森林	许谨诚	李林虎	李和香
李树源	杨丙凡	张东辉	张生栋	张立红	张和平
张锦荣	张静波	陈 凌	陈建欣	邵焕会	罗志福
岳维宏	赵崇德	柯国土	姜兴东	夏海鸿	强家华
樊 胜					

编审委员会

顾 问 (按姓氏笔画为序)

王乃彦	王方定	方守贤	阮可强	张焕乔	周永茂
钱绍钧	黄胜年	樊明武			

主 任 赵志祥

副主任 柳卫平 许谨诚

委 员 (按姓氏笔画为序)

勾 成	卢玉楷	叶国安	吕忠诚	朱升云	刘一兵
关遐令	汤秀章	杨红义	杨启法	肖雪夫	张万昌
张天爵	张先业	张伟国	张应超	陈玉宙	陈永寿
陈钟麟	范显华	林灿生	罗上庚	罗志福	竺礼华
金小海	金华晋	周祖英	姜 山	赵守智	贺佑丰
袁履正	顾忠茂	党淑琴	徐 铄	浦胜娣	容超凡
谢建伦	裴鹿成				

办公室

主 任 尹忠红

副主任 李来霞

成 员 (按姓氏笔画为序)

马英霞	王丽英	王宝金	伍险峰	张小庆	骆淑莉
韩翠娥					

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

编辑工作委员会

主 任 侯惠群

副主任 杨树录

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 王艳丽 刘 朔 李 宁 杨树录 张关铭
张铎清 赵志军 侯惠群 谭 俊

编辑工作小组

组 长 杨树录

副组长 丁怀兰 赵志军

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 王艳丽 刘 朔 李 宁 杨树录 张关铭
张铎清 赵志军 谭 俊

总 序

中国原子能科学研究院创建于 1950 年,是我国核科学技术的发祥地和先导性、基础性、前瞻性的综合性核科学技术研究基地。

在党中央和上级部门的关怀和指导下,中国原子能科学研究院为我国的国防建设、国民经济建设和核科学技术的发展做出了重要贡献,造就了 7 位“两弹一星”功勋科学家和 60 多位两院院士,培养了大批科技人才,在核物理、核化学与放射化学、反应堆工程技术、加速器工程技术、同位素技术、核电子学与核探测技术、辐射防护、放射性计量等学科形成了自己的特色和优势,并拥有核科学与技术 and 物理学两个一级学科硕士、博士学位授予权。

为了系统地总结原子能院在核科学技术相关优势学科积累的知识和经验,吸收和借鉴国内外核科学技术最新成果,促进我国核科技事业的发展,我院决定组织出版《中国原子能科学研究院科学技术丛书》,并选定王淦昌、肖伦、丁大钊、王乃彦、阮可强等院士编著的《惯性约束核聚变》、《放射性同位素技术》、《中子物理学——原理、方法与应用》、《新兴的强激光》、《核临界安全》5 本专著首批出版,今后还将组织撰写更多的学术专著纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给为我国核科技事业献身的人们!

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》出版委员会

2005 年 9 月 1 日

前 言

本人一直从事核反应堆物理实验研究工作,并在中国核工业研究生部教授“实验反应堆物理”课程 20 多年。已经参加工作听过该课程的研究生和刚参加工作的大学生经常给我打电话和面谈,讨论一些具体的实验技术问题,特别是实验中一些实验参数的选择等,他们希望能有一本较详细的、能具体指导核反应堆中子学实验技术方面的专著,为此针对多年来讨论的有关问题,并根据自己参加反应堆物理实验工作的经验和发表的论文以及参阅相关资料,特别是中国原子能科学研究所的有关资料编著了本书。

本书对于核反应堆中子学实验理论公式只给出了部分公式的推导,一般只给出实验原理公式,重点在于对实验方法和关键技术的阐述,同时给出实验实例和实验中的参数选择以供参考。当然有关实验过程和技术还可有不同的途径,希望读过此书后,可使得核反应堆中子学实验者避免无从下手的尴尬,能够立即着手进行实验准备和实验,并能给出正确的实验结果。但同时某些实验方法只给出方法原理,以使读者能有更大想象的空间,发展和补充反应堆中子学实验技术。

本书包括三个部分:第一部分为基础篇;第二部分为实验技术篇;第三部分为应用篇。

基础篇只有第一章,除简单介绍有关核知识外,主要介绍核反应堆中子学实验所需要的设备、测量仪器及仪器调试等的基础知识,这是核反应堆中子学实验者必须具有的知识基础。

实验技术篇是本书的重点,包括第二章到第十章共九章。这九章涵盖了核反应堆中子学实验的基本内容。第二章为临界实验,除了临界实验方法外,还介绍了实验中的有关规程解释和实验注意事项;第三章和第四章为中子通量密度测量,考虑到内容较多,分为相对测量和绝对测量两部分,除介绍了测量技术外,在不同部分还给出了它们的应用例子;

第五章为反应性测量,包括周期法、落棒法、跳源法、逆动态法、脉冲中子源法、振荡法等,特别是讨论了落棒法和跳源法之间的差别,也给出用逆动态法制作反应性计的一些具体思考和实例,同时还简单介绍了每种方法测量的数据处理;第六章和第七章都属于噪声测量范围,但分析方法不同,第六章是分析单个裂变链中子引起计数变化规律,因而出现了许多分析方法,第七章是分析大量中子变化规律,它在时域采用相关分析方法,在频域采用频谱分析方法,因此将第六章命名为微观噪声分析方法,第七章命名为宏观噪声分析方法;第八章为反应堆功率测量,主要介绍几种通过反应堆裂变率来测量反应堆功率的方法;第九章为反应堆能谱测量技术,包括能谱参数测量技术和活化箔能谱测量技术,特别介绍了能谱测量技术中的截面再造等技术;第十章主要介绍了动态参数——缓发中子有效份额测量技术。

应用篇为第十一章,是第二章到第十章测量技术的具体应用,较详细地阐述了反应堆物理启动实验技术。包括小型堆——微型中子源反应堆的物理启动实验技术,一般研究堆的物理启动实验技术和大型动力堆的物理启动实验技术。

限于篇幅,时序分析方法、宏观参数测量、微观参数测量、次临界中子学实验技术、反应堆燃料的燃耗测量、国内外临界实验中的事件和事故介绍、反应堆物理实验规程等舍去。这是因为时序分析方法目前在反应堆中子学测量中应用还不太广泛;宏观参数测量和微观参数测量由于目前计算精度的提高,在反应堆测量中已很少进行实验测量;次临界中子学实验技术和反应堆燃料的燃耗测量则属反应堆物理的前沿课题,内容较丰富,拟单独编写成书;国内外临界实验中的事件和事故以及临界实验有关规程可从国家有关法规中和资料中找到。

撰写本书时,原子能院反应堆研究设计所所长柯国土研究员、党委书记刘振华研究员、副所长赵守智研究员、反应堆物理研究室主任朱庆福研究员、微堆研究室主任李义国研究员、副主任夏普研究员等给予了关心和支持,并提出了许多宝贵意见;张巍博士对某些章节进行了校对,曹健博士对本书内容提出不少建议并编排了本书大部分的图、表,攸国顺博士对部分公式的推导给予了帮助,院科技信息部李来霞副主任对本

书的具体写作给予了很大帮助,南华大学于涛教授对全书进行了审读,在此一并表示衷心的感谢。

由于本人水平有限,书中的不妥和错误之处一定不少,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 反应堆中子学基础	(1)
第一节 引言	(1)
第二节 反应堆中子学实验用中子源	(1)
1.2.1 中子源	(1)
1.2.2 中子源的指标	(2)
1.2.3 中子源的类型	(3)
第三节 反应堆中子学实验用探测器	(11)
1.3.1 中子测量原理	(11)
1.3.2 中子探测器及其指标	(12)
第四节 反应堆中子学实验常用核仪器	(25)
1.4.1 脉冲型核仪器	(26)
1.4.2 脉冲型核仪器的调试	(30)
1.4.3 电流型核仪器	(33)
第五节 反应堆中子学实验装置及反应堆控制	(34)
1.5.1 我国反应堆中子学实验研究的发展	(34)
1.5.2 反应堆中子学实验研究装置	(36)
1.5.3 零功率反应堆控制	(42)
参考文献	(45)
第二章 临界实验	(46)
第一节 前言	(46)
第二节 临界实验原理	(47)
2.2.1 中子计数倒数外推方法——次临界状态下向临界趋近的原理	(48)
2.2.2 超临界时的反应性内插临界方法原理	(50)
2.2.3 稳定功率确定临界的方法原理	(50)
第三节 临界实验仪器	(51)
2.3.1 一般测量仪器	(51)
2.3.2 自动测量仪器	(51)
第四节 临界实验步骤	(54)

2.4.1	中子计数的倒数外推方法步骤	(55)
2.4.2	反应堆向超临界过度及内插临界实验步骤	(56)
2.4.3	稳定功率确定临界点	(57)
2.4.4	停堆	(57)
2.4.5	计算质量系数或液位系数	(58)
2.4.6	临界实验全自动测量系统	(58)
第五节	临界实验举例和分析	(59)
2.5.1	实验举例	(59)
2.5.2	临界实验分析与讨论	(59)
第六节	关于反应堆运行管理有关规定值的讨论	(62)
2.6.1	关于初始装载量	(62)
2.6.2	关于反应堆反应性的安全规定值	(62)
2.6.3	关于反应堆运行时间,运行功率的安全规定值	(63)
	参考文献	(64)
第三章	中子通量密度相对测量	(65)
第一节	引言	(65)
第二节	在线测量中子通量密度的相对分布	(67)
3.2.1	中子通量密度相对测量的目的	(67)
3.2.2	在线测量中子通量密度的相对分布原理	(67)
3.2.3	测量所用仪器	(68)
3.2.4	实验步骤	(68)
3.2.5	数据处理	(68)
3.2.6	分析讨论	(69)
3.2.7	测量举例	(70)
第三节	离线测量中子通量密度的相对分布-活化箔方法	(71)
3.3.1	用活化箔方法测量中子通量密度的优点	(71)
3.3.2	活化箔方法测量原理	(72)
3.3.3	活化箔	(76)
3.3.4	活化箔的校正	(80)
3.3.5	实验仪器	(83)
3.3.6	探测支架准备、辐照、测量	(86)
3.3.7	实验步骤	(86)
3.3.8	数据处理	(87)
3.3.9	误差讨论	(87)

3.3.10 测量举例	(87)
第四节 中子通量密度相对测量的应用	(88)
3.4.1 由中子通量密度相对分布导出材料曲率和反射层节省测量	(88)
3.4.2 由中子通量密度相对分布给出优化的堆芯布置	(90)
3.4.3 测量中子通量密度相对分布为使用反应堆中子束者提供 服务	(91)
3.4.4 由中子通量密度相对分布确定不均匀系数	(91)
参考文献	(92)
第四章 中子通量密度的绝对测量	(93)
第一节 引言	(93)
第二节 $4\pi\beta-\gamma$ 符合方法	(93)
4.2.1 $4\pi\beta-\gamma$ 符合方法测量原理	(93)
4.2.2 实验安排	(99)
4.2.3 实验所用仪器及调试	(100)
4.2.4 实验步骤	(106)
4.2.5 数据处理	(107)
4.2.6 误差讨论	(112)
4.2.7 扰动因子测量	(113)
第三节 固体核径迹探测器测量绝对中子通量密度	(115)
4.3.1 测量原理	(115)
4.3.2 测量所需仪器	(116)
4.3.3 实验步骤	(116)
4.3.4 数据处理	(117)
4.3.5 讨论	(120)
4.3.6 测量举例——游泳池堆热柱和其他装置的中子通量密度测量	(121)
第四节 半导体探测器实时测量绝对热中子通量密度	(123)
4.4.1 原理	(123)
4.4.2 实验仪器	(124)
4.4.3 实验步骤	(124)
4.4.4 数据处理	(124)
4.4.5 讨论	(125)
第五节 固体核径迹探测器测量高中子通量密度方法	(126)
4.5.1 标准含铀玻璃测量中子通量密度	(126)
4.5.2 标准玻璃选择及处理	(126)

4.5.3	辐照及测量	(126)
4.5.4	数据处理(积分中子通量密度计算)	(127)
4.5.5	测量举例	(127)
第六节	过渡法测量绝对热中子通量密度	(128)
4.6.1	Eu 活化片过渡法测量绝对热中子通量密度	(128)
4.6.2	原理	(128)
4.6.3	测量所需仪器	(130)
4.6.4	实验步骤	(130)
4.6.5	数据处理	(130)
4.6.6	应用举例	(131)
第七节	固体径迹探测器测量反应堆周围的快-热中子通量密度分布 测量	(133)
参考文献		(133)
第五章	反应性测量	(135)
第一节	前言	(135)
5.1.1	反应性	(135)
5.1.2	反应性控制	(135)
5.1.3	反应性测量及反应性单位	(137)
第二节	单群点堆动力学方程	(137)
第三节	周期法测量反应性	(141)
5.3.1	原理	(141)
5.3.2	测量仪器	(147)
5.3.3	测量步骤与数据处理	(147)
5.3.4	关于周期法测量误差	(148)
5.3.5	周期法测量反应性值得注意的几个问题	(151)
5.3.6	应用举例	(151)
5.3.7	启动率	(153)
第四节	落棒法测量反应性	(154)
5.4.1	原理	(154)
5.4.2	测量仪器设备	(157)
5.4.3	实验步骤	(157)
5.4.4	测量数据修正	(158)
5.4.5	讨论	(158)
5.4.6	实验举例	(161)

第五节	跳源方法测量反应性	(162)
5.5.1	跳源方法实验原理	(162)
5.5.2	测量仪器设备	(164)
5.5.3	实验步骤及数据处理	(164)
5.5.4	讨论	(165)
5.5.5	应用举例——在轻水堆上应用	(165)
第六节	逆动态法测量反应性	(166)
5.6.1	原理	(166)
5.6.2	测量仪器设备	(167)
5.6.3	实验测量	(167)
5.6.4	讨论	(170)
5.6.5	测量实例	(170)
第七节	脉冲中子源方法测量反应性	(172)
5.7.1	原理	(172)
5.7.2	脉冲中子源方法测量反应性设备	(178)
5.7.3	实验步骤	(180)
5.7.4	脉冲中子源方法测量实验数据处理	(183)
5.7.5	讨论	(184)
5.7.6	应用举例	(188)
第八节	振荡法测量反应性	(188)
5.8.1	原理	(189)
5.8.2	实验设备	(190)
5.8.3	实验	(193)
5.8.4	数据处理	(193)
5.8.5	测量结果误差分析	(198)
参考文献		(198)
第六章	反应堆微观噪声分析方法	(200)
第一节	罗西- α 方法测量瞬发中子衰减常数	(200)
6.1.1	罗西- α 方法原理	(200)
6.1.2	罗西- α 方法实验仪器	(204)
6.1.3	罗西- α 方法实验步骤	(207)
6.1.4	罗西- α 方法实验数据处理	(208)
6.1.5	罗西- α 方法实验举例	(209)
6.1.6	罗西- α 方法误差讨论	(210)

第二节	内生脉冲源方法测量瞬发中子衰减常数	(211)
6.2.1	原理	(211)
6.2.2	实验测量装置	(212)
6.2.3	实验测量步骤和数据处理	(213)
6.2.4	实验测量举例	(213)
第三节	方差—平均比(费曼)方法测量瞬发中子衰减常数	(213)
6.3.1	方差—平均比测量瞬发中子衰减常数 α 原理	(214)
6.3.2	实验仪器	(215)
6.3.3	实验步骤	(215)
6.3.4	数据处理	(216)
6.3.5	讨论	(217)
第四节	零概率方法	(219)
6.4.1	零概率方法测量瞬发中子衰减常数 α 原理	(219)
6.4.2	零概率方法测量仪器	(220)
6.4.3	零概率方法测量步骤	(221)
6.4.4	零概率方法测量举例	(223)
6.4.5	误差讨论	(223)
第五节	间隔分布法测量瞬发中子衰减常数	(224)
6.5.1	原理	(224)
6.5.2	实验仪器及工作原理	(225)
6.5.3	数据处理	(226)
6.5.4	实验结果举例	(227)
第六节	^{252}Cf 随机脉冲源法测量深次临界瞬发中子衰减常数	(228)
6.6.1	测量原理	(228)
6.6.2	测量系统	(229)
6.6.3	深次临界核系统及其探测器布置	(230)
6.6.4	测量及数据处理	(231)
参考文献		(232)
第七章	宏观噪声分析	(234)
第一节	理论基础	(234)
7.1.1	相关分析	(234)
7.1.2	频谱分析	(236)
7.1.3	脉冲响应函数及输入和输出的关系	(237)
第二节	反应堆宏观噪声时域分析	(239)

7.2.1	相关分析	(239)
7.2.2	相关函数测量系统	(244)
7.2.3	数据处理	(248)
7.2.4	相关分析方法测量举例	(249)
第三节	反应堆宏观噪声频域分析	(249)
7.3.1	自功率谱密度(APSD)	(249)
7.3.2	互功率谱密度(CPSD)	(253)
7.3.3	功率谱密度测量设备及技术	(255)
第四节	宏观噪声分析应用举例	(263)
7.4.1	测量用公式	(264)
7.4.2	测量系统	(264)
7.4.3	数据采集、处理和结果	(265)
第五节	铀源(²⁵² Cf)驱动的频谱分析测量方法	(267)
7.5.1	引言	(267)
7.5.2	原理	(267)
7.5.3	应用举例	(274)
第六节	噪声分析在动力堆上应用	(277)
7.6.1	引言	(277)
7.6.2	不同噪声源所对应的频率范围	(277)
7.6.3	举例——水和钠沸腾噪声监测	(279)
	参考文献	(282)
第八章	反应堆裂变功率测量	(284)
第一节	引言	(284)
第二节	活化箔方法测量裂变率	(284)
8.2.1	活化箔方法测量裂变率原理	(284)
8.2.2	实验测量仪器及材料	(285)
8.2.3	实验步骤	(285)
8.2.4	数据处理	(286)
8.2.5	误差讨论	(287)
8.2.6	应用举例	(287)
第三节	固体核径迹探测器测量裂变率	(288)
8.3.1	原理	(289)
8.3.2	实验测量仪器及材料	(290)
8.3.3	实验步骤及测量结果	(290)

8.3.4	讨论	(295)
第四节	微观中子噪声分析法-Rossi- α 实验测量裂变率	(297)
8.4.1	原理	(297)
8.4.2	测量仪器	(299)
8.4.3	实验举例与讨论	(299)
第五节	宏观噪声法-互功率谱密度测量裂变率	(300)
8.5.1	原理	(300)
8.5.2	测量装置及测量	(301)
8.5.3	测量结果及讨论	(302)
	参考文献	(304)
第九章	中子能谱参数及中子能谱测量	(305)
第一节	引言	(305)
第二节	能谱及能谱参数一般理论	(306)
9.2.1	堆内中子密度按速度分布	(306)
9.2.2	反应率及截面	(309)
第三节	镅比及镅比测量	(312)
9.3.1	镅比和能谱参数的镅比表达式	(312)
9.3.2	镅比测量	(317)
9.3.3	镅比测量结果举例	(320)
第四节	中子温度和超热指标测量	(320)
9.4.1	用镅比方法测量超热指标	(321)
9.4.2	用双探测箔方法测量超热指标	(322)
9.4.3	中子温度测量	(323)
第五节	“双组双探测箔法”测量中子温度和超热指标	(325)
9.5.1	原理	(325)
9.5.2	关于修正	(326)
9.5.3	实验用探测箔	(327)
9.5.4	测量方法	(328)
9.5.5	测量实例	(328)
9.5.6	测量误差	(330)
第六节	中子能谱测量	(331)
9.6.1	前言	(331)
9.6.2	活化法测量中子能谱原理	(333)
9.6.3	实验所用设备及测量	(334)