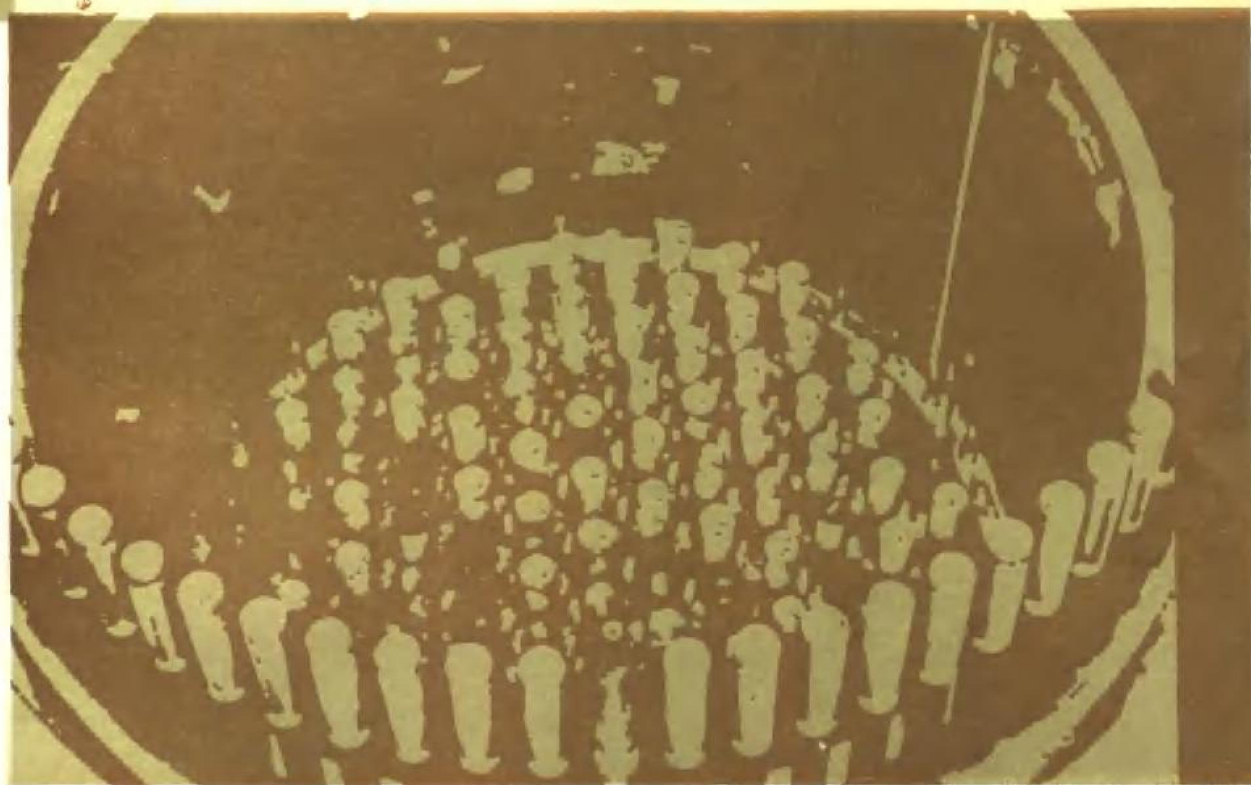


原子能出版社

原子能出版社



实验反应堆物理

罗璋琳 罗安仁

内 容 简 介

本书对实验反应堆物理作了系统的讨论。在介绍各类实验的物理图象的同时,对有关实验方法和实验技术作了详细的描述,并有选择地给出了若干典型实例。第一章介绍了实验反应堆物理的研究对象;从第二章开始,直到第九章将反应堆作为一个研究实体,从各种角度介绍了反应堆整体物理特性的测定,分别讨论了临界实验、中子通量分布测量、反应性和动态参数测量等有关问题。第十章和第十一章讨论了随机信息处理技术在反应堆物理实验中的应用以及用反应率方法研究堆中子能谱问题。第十二章到第十四章介绍了反映反应堆栅格特性的各种静态物理参数的测量。第十五章简要介绍了带功率运行反应堆的实验物理,着重叙述了功率堆物理实验的特点。

本书可供反应堆物理和核动力工程方面的科技工作者参考,也可供大专院校有关专业师生阅读。

实验反应堆物理

罗璋琳 罗安仁

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092¹/₁₆·印张24·字数592千字

1987年4月北京第一版·1987年4月北京第一次印刷

印数1—1000·统一书号:15175·764

定价:4.90元

前 言

原子能的发现和应用是近代科技史上最重大的成就之一。从1939年发现铀原子核的裂变以来不过四十多年时间，原子能工业已经成长为整个工业的一个重要方面。核反应堆是原子能工业中最重要的设备，它在国防、科研和生产方面都有很大的用途。

反应堆在国防用设备方面占有很重要的地位。原子弹中作为核炸药的一种而使用的钚，氢弹中使用的氘都要用生产堆来制取，核舰艇要用动力堆来推动。核动力的应用使潜艇技术发生了根本性的变革，建造大型水面核舰只的国家正逐渐增多。三十年来舰艇用堆已经发展了好几代，性能大有提高，但还有许多改进工作要做，发展工作还在不断进行。

随着化石燃料消耗量的增加及其价格的波动，人们对能源长期稳定供给问题十分关注，所以许多国家越来越重视核能的发展。使用动力堆发电具有成本低、技术成熟等重大优点，增殖堆技术发展成熟后又可以具备使燃料资源大大扩大的重大优点，加上一些别的优点，使得民用核动力将在近几十年内在电力工业方面占有特别重要的地位。

慢中子动力堆的建堆技术虽已经基本成熟，但它的安全和经济性能还需要进一步提高。在快中子增殖堆、高温气冷堆等先进堆型方面则还有大量的研究工作需要完成。快堆的增殖、经济和安全性能都还要大加改进，高温气冷堆也有许多技术和经济方面的问题尚待解决。其它先进堆型的情况与此类似。总而言之，反应堆科学技术目前仍然处于继续向前发展的过程之中。

反应堆是一种利用可控自持中子链式反应来进行工作的设备，中子物理性能是它的主要性能之一。如果堆内的中子链式反应不能自持，它就完全不能工作，也就不成其为反应堆。研究反应堆中子物理性能的科学称为堆物理。对任何新型堆的研究总是与堆物理研究工作密切联系的。因此，堆物理在反应堆科技领域中有着重要的地位，它与反应堆的燃料元件、热工水力、机械结构等各方面的研究紧密配合，形成反应堆科学技术的整体。

三十多年来已经发表了大量堆物理文献，包括许多专著在内。这些专著中理论书占大多数。我国翻译出版的理论堆物理名著已有好几本，近来我国理论堆物理工作者的专著也已开始陆续出版。截至目前为止，各国出版的实验堆物理专著较少，而且其出版年代也比较早，反映实验堆物理近来的发展不多。我国过去没有出版过本国的实验堆物理专著。为了补上这一空缺，我们根据多年来从事这方面研究工作的经验编写了本书，希望能为在这方面开始做研究工作的同志和大专院校有关专业的同学们提供一些系统的资料。为使内容更加紧凑，省略了对一些基本知识的说明。省略掉的基本知识在一般教科书中都可找到。由于我们学识有限，书中不当和错误之处在所难免，希望广大读者能多多指教。

中国科学院学部委员、核工业部原子能研究所所长戴传曾先生对本书提纲的确定给予全面的指导，并审阅了本书部分手稿，我们在此表示深切的感谢。核工业部原子能研究所堆物理室有关同志对写作本书给予了许多宝贵支持，沈俊雄同志、周平同志、中国科学院上海原子核研究所陈福根同志和该所零功率实验组的一些同志对本书手稿提了许多很好的修改意见，李植华同志通读了全部手稿并提出了具体修改意见，我们在此一并致谢。

本书第二章到第十四章由罗璋琳同志撰写，第一章和第十五章由罗安仁同志撰写。

目 录

前 言

第一章 实验堆物理的研究领域和基本课题	1
一、反应堆物理的研究领域	1
二、实验堆物理和理论堆物理的分工配合	2
三、实验堆物理的基本研究课题	4
第二章 临界实验	9
一、临界点及其确定方法	9
二、实验原理、方法和误差	10
三、实验仪器和设备	14
四、临界实验举例	15
五、有关问题讨论	20
1. 保证临界安全的措施和注意事项	20
2. 临界外推曲线的直线化及其单组解释	21
3. 中子源本底和光致缓发中子对临界参数的影响	23
第三章 中子通量测量之一	
——相对分布测量	24
一、中子通量测量的目的和方法	24
二、活化法的原理和方法	26
三、活化探测技术	29
1. 探测材料的选择	29
2. 活化探测器的制备	30
3. 探测片校正及其他	33
四、其他方法	35
1. 微型探测器方法	36
2. 自给能探测器方法	36
3. 固体径迹探测器方法	37
五、探测器对中子场的扰动	38
六、测量结果举例	43
第四章 中子通量测量之二	
——绝对测量	47
一、测量目的和方法	47
二、活化放射性强度的绝对测量	48
1. $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合方法	48
2. 固定立体角方法	56
三、探测片扰动因子的确定	58
四、半导体探测器方法以及其他方法	60
五、应用举例	61
1. 测量裂变率	61
2. 刻度反应堆功率	62

第五章 反应性测量之一	
——周期法	65
一、反应性的定义	65
二、反应堆动态方程	66
三、倒时公式	69
1. 点堆倒时公式	69
2. 考虑反射层(两点模型)的倒时公式	70
四、测量方法和测量仪器	77
五、外中子源和各有关参数的影响	78
1. 外中子源本底	78
2. 缓发中子参数	81
3. 瞬发中子参数和光中子有效系数	84
六、消除中子源本底和光中子效应的方法	84
1. 减本底逐步迭代方法	84
2. 倒数外推法	85
第六章 反应性测量之二	
——控制棒效率测量	88
一、控制棒效率及其测量目的	88
二、周期法测量刻度曲线	89
三、反应性系数法	90
1. 水位系数法	90
2. 压力系数法	92
四、落棒法和跳源法	93
1. 实验原理和方法	94
2. 非瞬时落棒效应	97
3. 空间效应和它的消除	98
五、暂态分析(功率史)法	102
六、方波加权法	105
七、振荡法	110
八、源倍增法	112
九、有关问题讨论	115
1. 测量方法的物理模型	115
2. 棒栅效率、剩余反应性和停堆深度	117
第七章 反应性测量之三	
——脉冲中子源方法	119
一、引言	119
二、实验原理和方法	119
1. 裸堆点模型	120
2. 带反射层——两点模型	126
三、脉冲中子的产生	129
1. 中子管	129
2. 加速高压和脉冲调制	131

四、实验数据的采集和处理	132
1. 实验数据的采集	132
2. 分辨时间的确定及其修正	133
3. α 、 $\langle A_p \rangle$ 和 $\langle A_d \rangle$ 的计算	134
4. 几种修正因子	136
五、面积法和空间效应	138
1. 空间效应的起因	139
2. 空间效应的修正	141
3. 次临界度的量度和脉冲中子源法的极限测量深度	147
第八章 反应性系数和反应性效应测定	149
一、引言	149
二、温度系数和温度效应	150
1. 概念和分类	150
2. 温度系数的模拟	152
三、水位系数和水位效应	154
1. 定义和测量方法	154
2. 弯月面效应和蒸发效应	155
3. 由水位系数导出其它物理参数	156
四、质量系数	157
五、其它反应性系数和效应	159
1. 毒物系数和毒物效应	159
2. 失水效应	159
3. 压力系数	160
4. 空穴系数和空洞效应	160
六、反应性漂移修正	161
第九章 动态特征参数的测量	163
一、引言	163
二、特征时间常数 α_0 的测量	163
1. 瞬时响应法	164
2. 瞬发-缓发周期法	166
三、缓发中子有效份额测量	167
1. 基本概念和测量原理	167
2. 慢化剂中毒法	170
3. 替代法	174
4. 统计权重法	175
四、光中子有效系数及其测量	179
五、传递函数的测量	183
第十章 随机技术应用之一	
——堆中子数目的统计分析	186
一、引言	186
二、堆中子的统计特性及其利用	186
三、堆中子数目统计分析的主要方法	189

1. Rossi- α 方法及其发展	189
2. 方差-平均比方法	194
3. 零几率方法	197
4. 间隔分布法	203
四、有关问题的讨论	206
1. 方法的选择	206
2. 探测效率和分辨时间	206
3. 时间相关和空间无关	206
第十一章 随机技术应用之二	
——核噪声分析	208
一、引言	208
二、随机信息分析原理简述	208
1. 相关函数	208
2. 频谱函数	210
3. 脉冲响应函数以及输出和输入的关系	212
三、反应堆核噪声的特性	215
四、数据的采集和处理提要	220
五、应用举例	224
1. α_0 的测定	224
2. 反应性测量	225
3. 堆功率测量	227
六、双探头技术和极性相关技术	227
1. 双探头技术	227
2. 极性相关技术	231
七、在线反应性表	232
1. 互功率谱密度反应性表	232
2. 互相关函数零交反应性表	234
八、结束语	235
第十二章 用反应率方法研究堆中子能谱	237
一、引言	237
二、反应率方法概述	237
1. 堆中子能谱和反应率的关系	237
2. 探测片的活化反应率	241
三、能谱参数测量	246
1. 镅比及其测量	246
2. 双探测片方法测量等效中子温度	257
3. 超热指标和 $1/E$ 偏离测定	262
四、能谱分布测量	268
1. 用阈能探测片测量快中子能谱	269
2. 热和超热中子能谱测量	271
第十三章 栅格参数测量之一	
——宏观参数测量	277

一、栅格参数及其测量	277
二、材料曲率和反射层节省的测量	279
1. 材料曲率与反射层节省的关系	279
2. 中子通量分布法	281
3. 其它方法	288
三、在次临界(指数实验)装置上测定材料曲率	289
四、零反应性方法测 k_{∞}	292
1. 实验原理	292
2. 实验方法和实例	294
第十四章 栅格参数测量之二	
——微观参数测量	299
一、热利用系数测量	299
1. 定义和测量原理	299
2. 通量比的测量方法	302
3. 举例	304
二、 ρ_{28} 、 γ_0 和 δ^{25} 的测量	308
1. 定义	308
2. 测量原理和方法	310
3. 实验技术	315
4. 各种辅助因子的确定	323
5. 举例	325
三、快裂变比 δ^{20} 的测量	332
1. 快裂变因子和快裂变比 δ^{20}	329
2. δ^{20} 的间接测量	331
3. δ^{20} 的直接测量	337
第十五章 带功率运行反应堆的实验堆物理简介	341
一、在带功率运行的反应堆上作堆物理实验研究应注意的问题	341
二、功率堆上的中子通量测量	343
三、功率堆上的反应性和控制棒效率测量	347
四、温度效应及其测量	350
五、功率堆的其他反应性效应	352
六、反应堆的堆芯管理	355
七、堆用核燃料的燃耗测量	357
附录 本书涉及的反应堆及反应堆实验装置一览表	362
参考文献	364

第一章 实验堆物理的研究领域和基本课题

一、反应堆物理的研究领域^[1-4]

堆物理的研究对象是反应堆和核燃料循环中的各种中子增殖系统以及有关介质内与中子和其它辐射的时间、空间、角度与能量分布有关的各种问题，某些安全问题和与核动力系统工程有关的一些经济问题也包括在内。但中心问题是堆用中子增殖系统的中子物理性能*。

各种反应堆有同是堆的共性方面，也有由于使用目的或其它方面的不同而产生的特性方面。堆物理既研究各种反应堆的共性问题，也研究它们的特性问题。堆物理共性研究的对象是各种中子增殖系统及有关介质共同具有的中子和其它射线的物理性能，在研究中要发展各种研究方法和手段，积累数据资料知识、掌握支配这些系统物理性能的规律，提出新系统概念加以初步研究并进行经济和安全性能方面的共性研究，这些研究是对某种特定类型的反应堆进行特性研究的基础。堆物理的特性研究对象是某种工程项目的中子物理特性，例如某个反应堆的设计、建造和运行中的物理问题，某个核燃料后处理厂的临界安全问题等。

堆物理的共性研究包括以下各方面的内容。

(1) 有关反应堆事业发展中技术方针路线的物理研究。各国反应堆事业的技术方针路线是根据本国具体情况来选定的。随着情况条件的发展变化，往往要不断地对各种堆型的技术经济参数进行分析，根据核燃料的资源 and 供应使用情况、反应堆的经济性能等条件来修正建堆路线。核动力系统工程是为建堆技术方针政策的制定提供学术基础的学科，它和堆物理有不少共同课题。

(2) 中子增殖系统用核物理和中子物理微观常数的整理、评价和编辑。

(3) 堆物理积分实验数据的测量、整理、评价和编辑。美国布鲁克海文研究所对铀水栅所作的系统研究是这方面工作为大家所熟知的例子。

(4) 堆理论计算分析用数学模型和电子计算机通用程序的发展。

(5) 堆物理实验用设备和测量方法技术的发展。

(6) 中子增殖系统临界安全及有关的其它安全研究。

(7) 对各种新型堆概念的初步研究。这种研究可能导致堆的工程设计，但不一定都能导致工程设计。

(8) 其它共性研究。

对具体某个反应堆工程项目的堆物理研究可分为概念设计、正式设计和建造以及运行三个阶段来进行^[1]。

一种新型反应堆的概念提出以后，先要进行概念设计。在这一阶段要对各种参数进行大量方案比较，在较短的时间内作出选择。这时重要的是相对精度而不是绝对精度，使用的理论分析模型可以粗一些，对测量绝对精度的要求也可以低一些。如果堆型比较复杂，理论分

* 由于篇幅限制，本书对中子和 γ 射线等辐射在屏蔽体等介质中的物理性能未作说明。

析模型不够成熟，则往往要用理论结合实验的方法来处理分析。服务于工程概念设计的研究实验叫做模拟实验，通常在零功率装置上进行。模拟实验可分两种，一种用来直接比较和选择方案，另一种主要用来检验微观数据、理论模型和计算程序，有人称之为基准试验。基准试验研究的系统比实际上工程中采用的方案要作某些简化，以便于作理论分析。作概念设计时，对各种有关参数都要全面作出比较。在这一阶段由于堆的临界质量、反应性、燃耗等物理性能与堆的燃料元件、材料、堆芯布置、堆的热工水力参数、屏蔽和控制性能等各方面都有密切联系，堆物理研究工作是起着关键作用的。

概念设计阶段结束以后选定一种或少数几种方案进行工程正式设计。要研究的堆物理参数主要还是概念设计阶段中研究的那些，例如临界参数、功率分布、动态参数、控制特性、增殖性能、屏蔽性能等，但是要求弄清细节问题，因此要求较高的绝对精度，要求作细致而准确的测量。服务于这一阶段的模拟实验叫做工程模拟。这时工程进度往往不容许研究工作用很多的时间改进方法技术，要求以较快的时间拿出成果来。燃料元件的结构往往在概念设计阶段终了时就已选定，在正式设计时要确定栅距、堆芯尺寸、控制棒布置方式等，以便各项部件能够加工制造。这时堆内中子通量的空间分布问题是关键的堆物理问题之一。

反应堆建造安装完毕以后就进入运行阶段。运行的第一步是物理启动。作物理启动时要对堆的物理性能进行测量，确定各种特性，保证堆的安全和有效运行，并为修改设计提高性能打下基础。物理启动完毕后，堆物理研究工作就退居次要地位了。但是有两方面的工作还要重点研究。一方面是研究燃耗，改进燃料管理方式，尽可能提高平均燃耗来降低动力堆的发电成本；另一方面是注意堆运行中的异常现象，加以分析来保证堆的安全运行。

二、实验堆物理和理论堆物理的分工配合^[5-10]

我们在前一节中说明了反应堆物理各方面的研究课题。这些课题中，有一些既可以使用理论手段，也可以使用实验手段弄清，有一些宜于只用理论手段，有一些则只能用实验手段。通过中子输运理论一类理论模型，使用原子核和中子相互作用的微观数据，借助电子计算机等计算工具来进行堆物理研究的工作属于理论堆物理范畴，对某种中子增殖系统或有关介质用中子或其它粒子探测系统进行实际测量并对测量结果加以分析解释而进行的堆物理研究，则属于实验堆物理范畴。所用的手段不同，目的则是一样的。在研究时可以根据实际条件选择应用。在热中子堆情况下由于目前微观数据已经比较齐全，电子计算机也已比较普及，理论模型也已经比较完善，用理论手段进行堆物理研究通用性比较大，费用比较少，可以迅速得出结果，因而用得较多。只有在某些特定的情况下，例如在运行中的动力堆上要研究中子通量的分布情况时，由于条件复杂，而且通量分布是时间的函数，用理论计算难以算准，必须实际测量。这就是说，对热中子堆而言，目前理论计算的作用已经大于实验测量。对快中子堆而言则还不能这样说。

热中子堆物理中理论研究的作用较大这种状况是热中子堆技术接近成熟阶段后才出现的。在反应堆发展初期，实验堆物理的作用大于理论堆物理的作用。

可以认为，早在1940年费米等人筹备建造世界上第一座反应堆时，堆物理研究就已经开始了。截至五十年代中期为止，堆物理主要研究对象是军用生产堆和军用动力堆。当时这些研究工作是严格保密的，直到1955年在日内瓦召开第一次国际和平利用原子能会议时，堆物

理方面的研究工作才开始大量解密，各国把一些原子核和中子微观数据拿出来互相交换。这以后，各国大量建造研究堆并开始建造民用动力堆，热中子堆物理进入全盛时代。在五十年代中期以前，由于微观核数据属于保密资料，不易得到全部数据，有很多数据实际上没有来得及测量，加之当时的测量精度也不够高，电子计算机又处于开始发展阶段，应用不广，用理论方法来研究反应堆的物理特性所得结果总的说来要差一些。例如，由于当时还不能大量依靠电子计算机作数值计算，理论分析侧重于求解析解，而由于被研究的系统往往很复杂，不得不使用多方面作了简化的计算模型，这就必然导致计算精度的降低。为了弥补这一不足，需要用较多的积分实验结果来校正计算模型和参数，某些计算环节中还要直接使用半经验公式。在建造某些形状很复杂的研究堆时由于理论计算难以得出准确结果，干脆直接做大量模拟实验，分析大量实验结果提供设计依据。苏联五十年代中期为了建造特高通量研究堆CM-2，做了3000次模拟实验就是一个例子。有名的四因子公式能相当好地代表当时堆物理中采用的分析方法。在这一阶段中，建造的反应堆大部分是生产堆和研究堆，它们之中石墨堆和重水堆占很大比重。对石墨堆和重水堆说来用四因子公式一类简单理论模型结合模拟实验作分析能相当好地满足当时的设计要求，模型的物理图象也很清楚，因此不仅对石墨堆和重水堆有用，在对水堆作初步研究时也使用这种方法，一直用到五十年代后期甚至六十年代初期。到六十年代中期为止，实验堆物理的作用和相对工作量比理论堆物理的大。在这一阶段中实验堆物理的主要设备零功率装置也比较简单，易于建造，截至1960年为止，据不完全统计，世界各国共建了五十多座。在这些零功率装置上做了大量堆物理实验研究。

从五十年代中期起，美苏等国开始成批建造海军压水动力堆，从六十年代中期起，各国开始大量建造民用压水动力堆。水堆能谱较硬，用简单的计算方法难以保证精度，另外，五十年代中期后各国加强了微观核数据的交流，这些数据的测量值逐渐齐全精确，电子计算机的发展又已允许研究人员从基础微观数据出发作较准确的数值计算，从而逐渐摆脱大量依靠宏观模拟实验与半经验公式的依赖。这样，早期使用的年龄近似，单群、二群等简单理论模型慢慢被多群理论等较精密的模型代替。六十年代中期起，国外开始对基本微观核数据作系统的搜集整理评价，开始成批发表堆物理用电子计算机程序，这标志着堆物理研究手段上的一大转折。近来在微观核数据的测量整理评价、电子计算机的计算速度和存储量、理论模型的改进等方面比起六十年代中期来又有了很大的进展。虽然微观核数据还不能认为已经足够完整和准确（例如裂变产物的核数据还有不少未曾测出），计算机的速度和存储量对于解三维燃耗一类复杂问题还不能满足需要，理论模型也还不能认为已经足够完善，热中子反应堆物理中一些问题还要用实验校核，堆的物理性能最后也要通过实验测定，但热中子堆的静态性能可认为已经基本弄清，不必再作许多实验研究了。因此，作为静态堆物理主要研究手段的热中子堆零功率装置到六十年代中期数量达到最大值，约为一百座左右，这以后就很少有人再建热中子零功率装置了，有一些热中子零功率装置在研究课题全部完成后已经停闭拆除。目前热中子堆物理的大部分问题可以用理论方法解决。所以，六十年代中期以前实验工作在热中子堆物理中占主导地位的现象已经改变，起主导作用的是理论分析。但在多维时空动力学等动态堆物理问题方面实验研究还有重要作用，另外，在一些热中子堆的先进堆型如使用铀钍循环的重水堆等方面，实验堆物理仍然占有很重要的地位。总之，尽管热中子堆物理实验研究工作的作用已有减退，但这方面研究工作的意义还是不能忽视的。

快堆物理方面情况不同一些。快堆在技术上比热中子堆复杂得多，对快堆的要求也比热

中子堆高得多。热中子动力堆只要能以比火电站低得多的发电成本安全发出电力就可以认为基本上满足了要求，对快中子动力堆则不仅要求发电成本低，还要求增殖核燃料的速度快，快堆的安全问题也多一些。为了满足这多方面的要求，快堆物理要解决的课题比热中子堆复杂得多。从工作量上看，快堆物理的研究工作量比起热中子堆来不是多一两倍而是多好几倍，甚至说大一个量级也不算夸张。快堆的增殖性能与安全性能有一定矛盾，这个矛盾多年来还未曾妥善解决。从七十年代中期起提出了多区非均匀堆芯方案来解决这一矛盾，但这种堆芯的理论计算非常复杂，现阶段连静态堆物理问题也不能全靠理论解决而必须作大量实验，一些涉及安全的重大问题也还要作许多实验工作。看来对快堆说来目前还难说理论工作已占主导地位。但是，随着快堆技术的逐渐成熟，理论快堆物理的作用将日益增大是肯定的。

三、实验堆物理的基本研究课题

我们将在本书内详细说明实验堆物理所用的方法，着重介绍实验原理和实验过程中涉及的物理图象。在具体进行介绍之前，需要进一步介绍实验堆物理的研究课题，以便本书读者对如何应用实验堆物理的手段来解决被研究的课题能有一个较全面的了解。

堆物理的研究课题是多种多样的，但都与中子与其它辐射在介质中的各种性能有关，其中主要的是中子在介质中的空间、时间和能量分布问题。我们将从这里出发来比较详细地说明实验堆物理的主要研究课题。

反应堆是一种利用可控自持中子链式反应来进行工作的设备，它必须能在无外中子源的情况下稳定地或周期性地提供足够数量的中子，否则它就不能成其为反应堆。能够在无外源的情况下稳定地或周期性地提供足够数量的中子是反应堆能够正常工作的主要标志。堆内的中子空间分布能在数量上维持一定水平，不随时间变化的状态称为临界状态。对临界状态的研究是实验堆物理的基本研究课题之一。反应堆总要先达到临界状态后才能正常工作。使反应堆达到临界状态的实验称为临界实验。临界状态下反应堆内核燃料的装载量称为临界质量，这时堆芯的体积称为临界体积。

临界质量和临界体积是决定反应堆许多技术和经济性能的基本参数。它们决定于中子在堆内的增殖、被吸收和漏出堆外（称为漏失）的有关性能，与所用的核燃料种类、同位素组成、浓缩度、形状，慢化剂和结构材料种类、数量、成份、反应堆控制系统执行元件的种类、同位素组成、形状等许多因素有关。为了研究一种新型反应堆的最佳物理特性，需要反复进行多次临界试验，有时多达几百次以上。

决定反应堆临界状态的主要是中子的增殖、吸收和漏失三种过程，因此要变化核燃料、慢化剂、结构材料和吸收材料的种类、数量和状态等各方面的参数来研究这三种过程对临界状态的影响。变化反应堆的增殖性能时通常会涉及核燃料浓缩度、核燃料原子核数对慢化剂原子核数之比、核燃料元件形状等方面的变化，在每次临界实验中同时变化这些条件来达到临界状态比较麻烦。因此，通常在进行临实实验时，总是固定这些性能中的一种到几种而变化某一种别的性能来作一系列试验，等到这一系列试验完成后再对燃料浓缩度、元件形状、核燃料原子核数对慢化剂核数之比等性能加以改变去作其它系列的实验。这样安排可以用较少的时间、人力和经费迅速得到要研究的结果。

在临界实验中，通常采用改变反应堆的中子吸收性能来作试验，如果改变的是结构材料的种类或数量、可燃毒物的种类或数量等因素，则由于改变这些因素比较麻烦，通常采用把这些因素中的一部份暂时相对固定，改变其他因素作完一系列实验后再改变原来相对固定的因素来做实验。如改变的是反应堆控制系统执行元件（如吸收控制棒）的位置、数量一类因素，则由于在每次实验中不难迅速改变它们，就可以利用它们的变化来达到临界状态，完成临界试验。

相对增殖性能说来反应堆的中子漏失性能比较容易变化。往堆内加入燃料元件或提高堆芯内液态慢化剂的水位，借以加大堆芯的体积，减少中子漏失，是最常用的达到临界状态的办法。

反应堆既是利用可控自持中子链式反应来工作的设备，堆内产品的生产率与堆内中子数量就有直接而密切的联系。不论是在生产堆内生产核燃料或其它放射性同位素也好，用动力堆来生产电力也好，还是用堆内的中子来作科学实验也好，都是如此。堆内的中子分布并不是各处相同的，因此，为了使反应堆能最大可能地发挥作用，必须研究中子在堆内的空间分布，这是实验堆物理的另一类基本课题。不仅产品生产率问题，而且堆内冷却剂流量的布置，核燃料元件的工作安全限度等许多技术问题也是与中子空间分布密切相关的。我们在这里举几个例子来说明。

核燃料原子核在中子作用下裂变时放出大量能量。以铀-235原子核为例，每个铀-235原子核裂变要放出约200兆电子伏能量，其中约170兆电子伏以裂变碎片动能的形式放出以后转化为热能；以其它形式放出的约30兆电子伏能量后来也要转化为热能。在动力堆中要把热能从堆中取出来发电，在研究堆和生产堆中往往不利用裂变中产生的热能而只利用所生成的中子，但也要把热能从堆芯中疏散出来以免烧坏堆芯，所以反应堆中要应用冷却剂。冷却剂的流量配置应该和中子通量空间分布成正比，也即是与反应堆功率分布成正比，这样才能既保证反应堆以较高的效率工作，又保证不致因导热不善烧坏堆芯。我们把中子通量在整个堆内的空间分布称为宏观分布，并借用物理学中的微观一词来用在燃料元件内的中子空间分布方面，把燃料元件内的中子通量空间分布称为微观分布，这里所谓微观分布指的是中子通量的精细分布，不是通常物理学中所具有的意义。

反应堆内用来做燃料元件包壳、元件定位格架等结构材料的结构强度是有限的，元件温度超过一定限度时包壳就很容易损坏。在理想情况之下，中子在堆内的宏观空间分布的最大值应该在堆的中心，但是由于实际上堆内各种条件的变化往往会使中子分布出现局部峰值，这种峰值可能成为全堆中子通量最大的地方。中子通量出现局部峰的空间点称为热点。热点往往不在堆的中心。位于热点处的核燃料元件最容易损坏，它是限制反应堆功率输出的主要因素之一，设计反应堆时必须弄清。为了确定热点，就必须弄清堆内的中子宏观分布。

我们在前面提到了中子通量空间分布的展平问题。展平指的是宏观中子通量分布的展平。通量展平后可以提高堆的功率和燃料的燃耗，也就提高了堆的使用效率。

中子通量的微观分布是决定堆的中子增殖系数、转化比等栅格参数的重要因素之一。

实验堆物理的第三类基本课题与堆内中子通量随时间的变化有关。反应堆的正常运行包括启动、提升功率、在一定功率下稳定运行和停闭等操作在内，在有事故发生或即将发生事故的情况下必须能将堆紧急停闭。这就是说，堆内的中子通量应能在保证安全的前提下随需要而加以控制调节。这样就必须研究堆内中子通量随时间的变化情况。

决定反应堆内中子通量随时间变化的主要参数之一是反应性。反应性通常定义为堆的中子有效增殖系数减 1 对中子有效增殖系数之比，反应性为正时堆的中子通量随时间的增加而上升，反应性为零时堆内中子通量不随时间变化，反应性为负时中子通量随时间的增加而下降。反应堆运行时有一些导致反应性降低的因素存在。例如堆内温度的升高通常导致反应性的降低，这称为负温度效应；核燃料原子核裂变生成的裂变碎片能吸收中子，从而导致反应性的降低，这称为中毒和结渣效应；核燃料原子核在反应堆的运行过程中不断裂变减少，导致反应性降低，这就是燃耗效应。为了补偿反应性的减少，在反应堆装料时要适当地多加一些燃料，使反应性有一定的富裕量，这一反应性的富裕量称为剩余反应性。但是，以上所述使反应性降低的效应是随时间等因素的变化逐步表现出来的，所加入的剩余反应性必须用控制棒来抵消，然后移动控制棒来控制反应性的变化，在堆以稳定功率运行时维持反应性为零。控制棒所相当的反应性称为它的效率。对控制棒效率的测量称为控制棒的刻度。控制棒刻度也是在每座反应堆上都几乎一定要作的实验测量研究工作之一。

反应堆的临界安全问题是与堆内中子通量随时间的变化是否受人控制密切相关的问题。如果中子通量随时间的增加而增长的速度太快，反应堆的控制就很困难，甚至失去控制。通常用中子通量变化 e 倍或 2 倍的时间来衡量堆内中子通量的变化速度，称为堆的周期。堆的周期由反应性、瞬发中子在堆内的平均寿命、缓发中子的有效份额等因素决定的，其中起主要作用的是反应性。

核燃料原子核裂变时放出的中子有两种。一种是与裂变碎片同时产生的中子，称为瞬发中子，另一部分是一些所谓缓发中子先驱核在衰变时放出的中子，称为缓发中子。瞬发中子从产生到消失所经历的平均时间叫作它的平均寿命（或简称寿命）。不同核燃料同位素裂变时产生的缓发中子先驱核的性能稍有不同。以铀-235为例，主要的缓发中子先驱核可以划分为六组，它们放出缓发中子而衰变的时间由 0.16 秒到 50.6 秒不等。每次裂变中产生的某一组缓发中子数与裂变产生的总中子数之比称为它的相对份额。一座反应堆建成以后，堆内中子的寿命、缓发中子参数基本确定了，反应性则是经常变化的参数，因此它在决定反应堆的周期时起主要作用。

在大量使用的一般热中子堆中，瞬发中子的寿命为 10^{-3} 到 10^{-4} 秒量级。如果反应堆内的反应性大于缓发中子的总份额，只靠瞬发中子就能迅速增殖，堆就控制不住了，这时短期内能放出大量的能，足以对反应堆和周围环境造成严重危害，这就是瞬发临界事故。为了避免和预防这方面的事故，要进行多方面的研究，这也是实验堆物理的重要研究课题之一。

在堆内中子通量随时间变化这个基本课题的研究中，对反应性的研究占有主导地位。如果把反应性测量说成是实验堆物理的基本课题之一，这不能算是夸张。

作实验堆物理的以上三类基本课题研究时，所得结果有两方面的意义。一方面是学术性的意义，它使我们能了解中子在反应堆这种增殖系统中的各种性能。把实验研究的结果和理论堆物理配合起来，用实验测量结果去检验和改进理论分析方法，就可以扩大我们对中子在增殖系统中各方面性能的理解，也就是加深了对反应堆物理的认识，发展了堆物理。另一方面的意义又在于，这些实验研究的结果直接回答反应堆建造工程方面提出的问题，因而可以用来直接指导反应堆的设计、建造和运行。

除以上三类基本课题外，实验堆物理的基本研究课题还有两大类。它们的共同特点是，这些课题的学术意义大于工程意义。相对说来它们并不直接回答反应堆工程迫切需要解

决的问题，但是它们却为回答这些问题提供基础。如果说前三类课题的工程学科性比较重，那末可以说，后两类基本课题的基础学科性要比较重一些。

实验堆物理的第四类基本课题是与中子在介质中的能谱分布相关的。反应堆内中子的能量分布很复杂，不同能量中子的物理性能各不相同，但是，由于能量分布不同造成的性能差别相对时间分布来说却比较小。例如，在大功率反应堆中，把堆的功率由停堆提升到满功率时，中子通量的差别可以达到十几个量级，但堆内能量最高的多数中子和最低的多数中子的物理性能差别却往往在几个量级以下，许多参数的差别根本不需要用量级来衡量。另一方面，能量差别造成的性能差别又不如空间分布造成的性能差别影响严重。例如，堆芯内某处的局部中子通量如果异常增加到正常值的百分之几十以上，又没有及时发现并采取措施就可能导致元件的损坏，但中子能量差别百分之几十往往不会带来这一类严重后果。因此，对中子能量造成的性能差别从堆物理方面来说可以采取平均值的办法来处理，从工程方面来说不必象对待空间分布那样采取多方面的区别对待措施（例如随着堆芯中子通量分布的不同而改变冷却剂流量的分配等）。但是，为了使中子在介质内因能量不同造成性能差别的平均值能求得准确，需要较准确地测出堆内的中子能谱。

测量中子能谱的方法是多种多样的。对实验堆物理说来比较准确的方法是中子飞行时间法。这种方法是在中子物理中已经发展成熟的方法，主要依靠能量不同的中子飞行经过同一距离时间不同，因此从同一场所出发的中子到达探测器的时间不同，从而定出中子能谱。但是这种方法要求使用比较复杂的仪器。因此，往往要用比较简单的方法来配合，或是不测量能谱而测量能谱的某些参数。例如，镅对热中子的吸收截面高达2400靶恩，厚0.5毫米以上的镅片就可以把打到它上面的热中子基本上都加以吸收，但快中子则绝大部分可以通过，用包镅和不包镅的中子探测器测量，就可以把测量点处的热中子数和热上中子数区别开来，这种测量称为镅比测量，镅比就是常用的能谱参数之一。

实验堆物理的第五类基本课题是对中子在增殖系统中单—介质中的各种物理参数进行测量研究。前面提到的能谱参数可以归入第四类课题，也可以归入第五类课题。测量这些参数便可了解中子在增殖系统和非增殖介质中的物理性能，同时，可以用测量结果来校核改进反应堆理论。

各种堆物理参数也可以大致区分为动态参数和静态参数两类，这两类参数又可按照是否在增殖介质内测量而大致区分。

静态参数通常指表征中子在各种介质中不随时间变化的物理特性的那些参数。例如，在非增殖介质中，表征中子扩散和慢化性能的参数有扩散长度和慢化长度等，在增殖介质中的静态参数又可分宏观参数和微观参数两种。所谓宏观参数指的是要在整个堆芯范围内进行测量才能确定的参数，例如决定堆芯尺寸的曲率常数和决定反射层作用的反射层节省等；所谓微观参数指的是不必在整个堆芯范围内测量，只要在核燃料元件与冷却剂和慢化剂（快堆中没有慢化剂）组成的栅格单位栅元中测量的参数。它们表征栅格增殖性能的物理特性，例如中子增殖系数及其组成因子，转化比等。

所谓动态参数指的是表征中子在介质中随时间而变化各种性能的参数。例如，中子寿命、反应性的温度系数、压力系数等。

以上五类基本课题并未包括实验堆物理的全部研究课题。例如，应用反应堆噪音分析可以测量反应性等若干参数，这属于以上五类基本课题的范畴，但近来由于研究工作的发展，

已可以应用噪音分析来研究反应堆部件的振动和一些热工水力特性，这就完全超出了上述五类基本课题的范畴了。但是，对这五类基本课题的研究是实验堆物理的主要研究内容。本书将在以后各章中分别对这些问题进行阐述。我国已经出版了好几本关于堆物理的专著^[8-10]，实验堆物理工作者应该掌握的堆物理理论知识在这些专著中已有全面而深入的说明，因此本书只着重从实验的角度讲述堆物理问题，对有关的基础理论知识只作附带性的说明，不作全面介绍了。

第二章 临界实验

临界问题是反应堆物理中最基本的问题。在新反应堆的物理设计过程中，有关人员首先要围绕临界问题开展大量工作。在反应堆建设工程结束后的物理启动中，首先要进行的工作是临界实验。在这一章的开头，我们将就临界实验的一般问题加以讨论，这些讨论虽然以圆柱形反应堆为对象，但所讨论的各点对其他形状的反应堆也是适用的。然后，我们将结合临界实验的例子，概要地介绍几个零功率反应堆实验装置。介绍这些装置的目的在于为以后各章作准备，当我们再列举在这些装置上的实验时，将只指出装置的名称，而不再对装置本身作描述。在这一章的末尾，我们还将讨论几个与临界实验有关的一般性问题。

一、临界点及其确定方法

人们在认识和改造自然的过程中，往往用一些物理量来描述物质运动的关节点。在这些关节点上，物质运动的量的增加或减少会引起该物质所处状态的质的变化。例如，每种金属都有自己的熔点，每种液体在一定压力下，有自己的冰点和沸点等等。在反应堆物理学中，我们也经常遇到这种量变引起质变的关节点，临界点就是其中具有代表性的一个，在这个关节点上，反应堆中的中子裂变链式反应从不自持转变为自持状态，我们就说这时的反应堆处于临界状态。当反应堆处于临界状态时，堆中裂变物质的装载量称为临界质量，对应的体积称为临界体积，与之相应的还有临界水位，临界控制棒栅高度等等。临界实验的目的就是用实验的方法测量反应堆的临界点。反应堆作为一个中子增殖系统，其性能是通过中子运动规律表现出来的，所以也可以说，堆物理学是研究反应堆中子运动规律的一门科学。中子在反应堆内经过裂变而不断地产生，经过慢化被堆内材料吸收和经过反应堆表面泄漏出去而不断地消失。堆内中子就是这样一代一代地不断产生和不断消失。为了描述堆内中子不断产生和不断消失的运动规律，我们引入有效增殖系数这一物理量，它定义为在有限大小的反应堆内，新一代中子的产生率与中子的总消失率之比：

$$k_{eff} = \frac{\text{新一代中子的产生率}}{\text{中子的总消失率 (被吸收率 + 泄漏率)}}$$

当 $k_{eff} < 1$ 时，产生的中子少，消失的多，堆内中子数随时间下降，我们说反应堆处于次临界状态；当 $k_{eff} > 1$ 时，产生的中子多，消失的少，堆内中子数随时间增加，我们说反应堆处于超临界状态；当 $k_{eff} = 1$ 时，产生的中子数和消失的中子数相等，堆内中子数处于平衡状态，不随时间变化，我们说反应堆处于临界状态。临界实验的目的就在于求出 $k_{eff} = 1$ 的条件。

应该指出，反应堆的有效增殖系数与功率水平是两个互不相关的概念。有效增殖系数只与中子产生数和消失数的比值有关，反映堆中子数随时间变化的趋向，而功率水平却反映堆中子数数值的大小。因此，在任何一个功率水平下，反应堆都可以处于临界状态，而使 $k_{eff} = 1$ 。