

反应堆物理

(1977年反应堆物理工作交流会资料汇编)



原子能出版社

反 应 堆 物 理

(1977年反应堆物理工作交流会资料汇编)

田和春、李广铎、孙玲、孙

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本汇编收集了一九七七年十二月在安徽芜湖召开的反应堆物理工作交流会上交流的大部分论文。论文按性质分为两个部分。第一部分为反应堆物理实验；第二部分为反应堆物理理论和计算。两部分共包括五十四篇论文。可供从事反应堆物理工作的科技人员和大专院校有关专业师生参考。

反 应 堆 物 理

(1977年反应堆物理工作交流会资料汇编)

原子能出版社出版

(北京市2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(内部发行)

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $29 \frac{1}{2}$ · 字数 694 千字

1980年12月第一版·1980年12月第一次印刷

印数 001—1100 · 统一书号: 15175·174

定价: 4.00 元

编 者 的 话

一九七七年十二月在安徽芜湖召开了反应堆物理工作交流会。会上交流的大部分论文经原作者修改后汇编于本文集。这些论文较集中地反映了我国从事反应堆物理工作的广大科技人员多年来辛勤劳动所获得的科研成果。

参加本文集编辑工作的有田和春、李广钧、温鸿钧、李尔康、陈仁济、李文虎、沈维新和张永钱等同志。

由于缺乏经验，汇编中缺点错误一定很多。衷心希望读者批评指正。

编 者

目 录

一、反应堆物理实验

堆芯监测技术的现状与发展	1
DF-VI快中子零功率装置上的数字逆动态技术及其应用	9
重水零功率堆及其临界实验和中子通量分布测量——低浓铀重水栅物理实验报 告之一	23
改进断源法测量水位效应和控制棒效率——低浓铀重水栅物理实验报告之三	33
用阈探测器测定游泳池式反应堆内的快中子通量谱	39
测量核反应堆反应性的脉冲中子源技术	48
脉冲法测量反应堆的次临界度	54
脉冲中子源法反应性测量中的空间效应	64
落棒法的新发展	72
落棒法时间与空间效应的测量	81
大型反应堆落棒法的研究	86
对反应堆中子噪声做在线互相关分析的反应性测量装置及其应用	95
反应堆噪声数字分析技术	103
零概率法测量反应性的研究	112
Rossi- α 法测量动态参数的研究	119
费曼方法的空间效应和缓发中子效应实验	128
水位系数测量和由水位法确定各种样品反应性效应	134
测量渐近周期的倒数外推法	152
绝对功率法和硼中毒法测量缓发中子有效份额	160
低浓缩铀含硼水活性区的热不利因子测量	167
用半导体探测器测量反应堆内的绝对热中子通量	175
β 衰变型自给能中子探测器灵敏度数字模型	181
一种自动测量反应堆周期的数字化仪表	192

二、反应堆物理理论和计算

二维少群反应堆中子扩散方程的数值计算	200
SIP方法在反应堆中子扩散计算中的应用	208
重水栅格的物理计算	218
聚变堆包层中子学计算	230
响应矩阵法在反应堆临界计算中的应用	246
控制棒栅效率计算的改进	247
控制棒黑度计算	258
核反应堆共振吸收的计算方法	274

计算有效共振积分的中间近似法	288
强吸收体超热群参数的计算	300
MC 3: 一个计算共振中子能谱的蒙特卡罗程序	309
实验快堆的多普勒效应	313
用重气体模型计算重水栅元的热中子谱	323
用 z 变换求解中子逐次碰撞问题	331
某压水堆反应性温度系数的微扰法计算	343
解微扰问题的微分蒙特卡罗方法	347
考虑反射层效应的动态方程	348
耦合反应堆动力学籍贯方程	355
籍贯方程中耦合系数的一种解析表达式及近邻耦合判据	363
压水堆一维轴向氙振荡分析和控制	368
快中子反应堆的共振不稳定性	378
快堆芯部解体事故	391
循环燃料反应堆动力学	397
一维多组 P_L 和 DP_L 近似法在反应堆屏蔽设计中的应用	406
二维($r-z$)三群中子屏蔽程序说明	423
研究性重水反应堆主体屏蔽计算	426
用蒙特卡罗方法计算压力壳内表面的快中子通量	432
燃料和元件包壳间隙中裂变产物的计算	439
堆芯剩余发热计算	445
典型群常数处理程序的综合简介	451
一个计算 Bickley 函数 $K_{i_n}(x)$ 的具有较高精度的近似公式	461

一、反应堆物理实验

堆芯监测技术的现状与发展

李克明

一、前言

堆芯监测技术是为了提高反应堆的经济性和安全性而发展起来的。随着堆型和设计目的不同，堆芯监测的内容和方法也不相同。中子通量、温度、压力、流量以及振动情况等都是反应堆运行中需要随时了解的参数。但是在目前反应堆工艺发展阶段，通常堆芯监测的内容主要是中子通量及其分布和元件进出口温度。文献[1]曾对各种堆芯探测器做了全面的论述。本文只涉及与中子通量监测有关的问题。

近年来在活化法通量测量的基础上，发展了堆芯通量监测技术。这是一种在线监测方法。它与活化法相比从本质上改进了从堆芯取出的信息的时间特性：活化法只能断续而延迟提供反应堆稳态运行数据，在线监测法却能连续而及时获得反应堆运行中稳态以至瞬态数据。这一发展不仅提高了堆芯通量测量的自动化水平，而且为提高反应堆控制性能实现最佳控制创造了条件。

发展堆芯监测技术的意义可概述如下：

(1) 近代动力堆的发展对临界实验数据的依赖性逐渐减少。通常是在同一类型反应堆的第一个堆芯装设尽可能完备的堆芯仪表，取得实测数据，用以校核设计和积累反应堆运行的历史资料，作为反应堆改进和定型的依据。

(2) 利用堆芯监测系统可以确定运行的安全余量，提高反应堆运行参数。例如：杨基罗反应堆的功率从392兆瓦提高到600兆瓦^[2,3]；德累斯顿-1活性区减少7.5%的燃料仍不降低热功率(630兆瓦)^[2]；哈尔顿重水反应堆由设计额定功率20兆瓦提高到30兆瓦，每年增加四百万美元的收入而堆芯监测系统仅需一千到五万美元^[2]。从这些早期的实例可以明显看出堆芯测量对于投入运行后的反应堆挖潜的经济意义。

(3) 热功率2500兆瓦以上的反应堆，可能会产生不稳定的氙振荡，监测氙引起的功率不对称性和氙振荡，对反应堆控制有着重要意义。美国“商业核电站设计数据和安全装置”(ORNL-NSIG-55. I. II. III)中60个反应堆有50个为此设置堆芯仪表系统。

(4) 利用堆芯探测器提供的及时的堆芯信息，采取一定控制措施，可以实现通量管理和最佳控制。此外堆芯监测数据在用于产量及燃耗计算和提供实验环境数据方面也有它独特的优点。堆芯监测技术与噪声分析方法的结合可以为反应堆诊断开辟新的前景，这些方

面都已经开始研究。

表 1 各种类型探测器性能比较^[2]

探测方法	探测器	测量范围 (nV)	响应时间 大约	相对精度 (%)	寿命 (在 10^{13} nV 下)	估计费用 (美元)
活化法	活化片	10^3 — 10^{15}	30分	3	< 3个月	1,000—10,000
	活化丝	10^3 — 10^{15}	30分	3	< 1年	> 5000
	气动球	10^3 — 10^{15}	10分	3	< 1月	1,000—10,000
监测器	裂变室	10^{10} — 10^{14}	瞬时	~1	< 1年	1,000—10,000
	自给能探测器	10^9 — 10^{15}	瞬时—5分	~1	> 1年	< 1,000
	中子灵敏热偶	10^9 — 10^{14}	0.5分	~5	< 1年	

二、探测器与监测系统

(1) 堆芯环境与探测器特殊问题

堆芯探测器一般设计工作在功率区；研制能够在功率范围的堆芯条件下长期工作并给出有用堆芯信息的探测器，是堆芯探测器的研究目的。堆芯环境因堆型和具体设计而明显不同。一般说来堆芯环境包括强辐射（中子 $> 10^{12}$ 中子/厘米²·秒， $\gamma > 10^8$ 伦琴/小时）、高温、高压、冷却剂腐蚀和振动等。此外在堆芯允许设置探测器的空间受到严格限制，探测器的小型化是一个特殊的要求。所有这些在堆芯探测器结构设计和材料选择以及信号传输等方面都造成了特殊困难。

强辐射环境带来了探测器灵敏度与燃耗寿命的矛盾以及提高信噪比的特殊困难。高温造成了严重的绝缘降低。目前已经证明压力对探测器信号没有影响，但振动和腐蚀问题在探测器设计和布置上都应该十分注意。

(2) 主要堆芯探测器

目前发展比较成熟并成功地用于堆芯监测的探测器是微型裂变室和自给能中子探测器。

堆芯裂变室是芯外裂变室的小型化。为了使它能在堆芯应用，在结构和材料上做了适当的改变。它具有输出信号大，本底 γ 影响小以及测量方法灵活等优点。

微型裂变室多是圆筒型结构，电极材料多用钛（原子序数低， γ 效应小，热性能机械性能和核性能好）。涂铀工艺方面过去一般是电解方法但近年实验表明蒸镀电极的铀层与金属衬托接触好，表面光滑，经得起反应堆功率剧变的冲击。此外，国外在裂变室最佳结构方面做了不少研究^[5,6]，使裂变室的研究进入十分细致的阶段。

目前微型裂变室的主要问题仍然是燃耗寿命问题。在积分通量到 10^{21} /厘米² 时，灵敏度要降低 50% 左右。为此使用时不得不采用复杂的校准系统。为了延长寿命曾经对再生混合涂层做过不少研究工作，但由于材料来源和价格问题，这方面研究还不能在工业上应用。

目前典型的微型裂变室尺寸是 $\phi 6 \times 95$ 。电流灵敏度约为 10^{-17} 安培·厘米²·秒，这比一般自给能探测器要高三个量级左右。

自给能探测器于60年代初问世。作为堆芯探测器，它具有体积小、结构简单、坚固、寿命长和价廉等优点，很适合大量采用。这种探测器不但能用于通量分布测量，而且快响应自给能探测器可以用于堆芯保护系统，这种应用在加拿大的重水反应堆已经开始。

自给能探测器的主要物理性能取决于发射体材料。到目前为止已经研究过的发射体材料有Rh, V, Ag, Co, Pt, Ge, Os, Ta, Pd, W, Er, Hf, B¹¹, Al, Gd, Yb, Au, Tl等。其中灵敏度最高的是Rh，其次是V和Co。时间响应好的是Co, Er, Hf和Pt。关于自给能探测器的理论计算已有不少研究，一般可以做到±10%的吻合程度。为了便于参考，表2列出了目前能够工业应用的自给能探测器的主要性能。

表 2 常用自给能探测器的主要特性^[1,7]

发射体	丰度 (%)	热中子截面 (靶)	反 应	半衰期	最大β能量 (兆电子伏)	中子灵敏度* (A/nv-cm)	燃 耗 (在10 ¹⁸ nv下, %/月)
V ⁵¹	99.76	4.5	(n,β)	226 秒	2.6	7.7 × 10 ⁻²³	0.013
Rh ¹⁰³	100	150	(n,β)	42 秒	2.4	1.2 × 10 ⁻²¹	0.23
Co ⁵⁹	100	37	(n,γ,e)			1.7 × 10 ⁻²³	0.094

* 所列中子灵敏度系对发射体直径 0.02 英寸，外壳直径 1/16 英寸的探测器而言。

目前自给能探测器研究的主要课题是如何提高信噪比。从理论和大量实验结果来看，信号水平不可能有显著提高。因此信噪比提高的主要方向是降低本底噪声。降低本底噪声可以从改进电缆结构降低本底水平入手，也可以采用补偿方法或者两种措施同时采用。降低本底绝对水平，主要靠材料选择和几何结构改进，这方面文献较少。补偿方面采用平行双芯电缆和差分线路是普遍的做法，但完全补偿是不可能的。好的也只能补偿一个量级左右。很明显平行双芯电缆的空间不符合是造成不完全补偿的原因之一。为此曾对双芯螺旋式电缆做过研究，据报道这种电缆可使本底降低两个量级左右。

长期考验和工程应用情况表明，自给能探测器的主要损坏方式是机械损伤和腐蚀造成绝缘过低引起的。这在探测器设计 and 应用时都应该十分注意。

除了上述两种主要堆芯探测器外，还有一种利用中子反应的热效应测量通量的装置——中子灵敏热偶。它具有与自给能探测器相似的优点，但由于微型裂变室和自给能探测器的迅速发展，中子灵敏热偶至今没有实际应用。在探测方法中还研究过微波中子探测器，契伦柯夫探测器，火花计数器以及半导体探测器。这些方法都处于原理性研究阶段，其中半导体探测器由于严重的辐照损伤和高温本底太大，用于堆芯监测希望不大。

(3) 监 测 系 统

目前动力堆使用的堆芯仪表系统有三类：

- ① 连续监测功率分布且用于反应堆保护的系统。
- ② 连续监测功率分布的系统。
- ③ 定期监测功率分布的系统。

从探测器在堆芯的设置来说第一、二种系统必须是固定式的，第三种系统可以是移动式的。

一个完整的堆芯监测系统的研究，不仅包括堆芯探测器的研制和堆芯布置，还包括信

息处理方法和设备以及信息利用等问题。研究表明,采用合理的分析方法,堆芯探测器的数目可以显著减少^[8]。所以作为一个统一的系统需要进行大量研究工作。

三、应 用

裂变室是沸水堆主要监测元件,从源区到满功率的 125% 的功率监测,功率区功率分布测量,反应堆保护以及校准系统都用裂变室作为探测元件。从表 3 可以看出裂变室对沸水堆的重要性。

运行经验表明裂变室的损坏有两种情况,一是由于潮气引起电缆内部短路或探测器本身损坏造成信号异常增大;另一种是由于金属-陶瓷密封的损坏引起电离室漏气造成信号下降。西德沸水堆 1971—1974 年安装的 232 个裂变室,共有 18 只损坏,最低运行时间是 270 天,多数在 600 天以上,足以说明裂变室的可靠性。

压水堆的堆芯核测量仪表,目前有固定式微型裂变室和自给能探测器以及移动式校准系统(移动式堆芯探针系统或气动球系统)。美国的压水堆采用自给能探测器,用带有裂变室的移动式探针作为校准系统。西德施塔德压水堆则同时安装了自给能探测器和微型裂变室,并用气动球作为校准系统。西德最大的比布利斯-A 核电站只用了钴探测器和气动球系统。这些情况说明压水堆的堆芯监测系统还处于试用阶段。通过试用,来比较各种系统性能的优劣。

为了比较具体地说明 70 年代初期堆芯监测技术现状,本文将文献[7]的附录引译于后,它包括了 1973 年 6 月 30 日以前的资料,概括了美国正在运行或建造以及计划建造的动力堆所采用或者打算采用的堆芯仪表情况。为了便于考查承包公司与反应堆设计的关系,笔者加入了“主要承包者”一栏。

从表 4 关于压水堆的情况可以看出:

(1) 电功率 300 兆瓦以上的压水堆基本上都装有堆芯仪表系统。目前堆芯监测元件在温度测量方面主要是采用镍铬-镍铝热电偶。在中子通量测量方面主要是微型裂变室和自给能探测器,这两种探测器处于竞争状态。自给能探测器以铯探测器作局部通量测量和以钚探测器做平均通量测量是普遍的作法。使用自给能探测器的一些重要反应堆,每个组件还装有一个本底探测器,这种情况说明有关本底效应的规律性还有待进一步认识。

(2) 堆芯探测器的布局,在早期多采用一个象限(或卦限)布置,在其余空间只设一些比较用的探测器。近年是向均匀布置发展。每个探测组件都设有一个平均探测器和 4—7 个局部通量探测器。

在美国“商业核电站设计数据和安全装置”(ORNL-NSIG-55, I、II、III)资料中有一个值得注意的情况,就是一些大堆用芯外仪表代替堆芯仪表。这种情况说明,在取得堆芯仪表与芯外仪表的关联之后,用方便的芯外仪表代替大量设置的堆芯仪表的某些功能是不可能的。

(3) 表 4 中 900—1200 兆瓦(电)的核电站,堆芯探测元件都用裂变室,这些核电站的承包者主要是西屋公司。该公司其它电站也都采用裂变室作为堆芯监测元件,这种情况似与公司历史有关。

综上所述,目前堆芯监测技术随着反应堆工艺的进步已经初步建立起来,它已成为核

表 3 沸水反应堆采用的堆芯仪表

电站名称	主要承包者	热功率 (兆瓦)	电功率 (兆瓦)	燃料 元件	控制棒 控制棒	控制棒 类型	探测器 套管	功率 区 组件	每个组 件局部 通量器	局部通 量探测 器总数	活化 套管	活化 套管分 布	移动式 套管 探测	移动式 套管 探测	中间区 探测器	源 区 探测器
0—300 兆瓦 (电)																
拉克罗斯	A-C	165	53	72	29	X	8	8	3 FC	24 FC	8	U	9	91C	R	
亨博尔特湾	GE/Bethel	240	68	172	32	X	8	8	3 FC	24 FC	8	U				
大岩角	GE/Bethel	240	70	84	32	X	16	16	4 FC	64 FC	16	U				
德累斯顿 1	GE/Bethel	700	200	488	80	X	16	16	4 FC	64 FC	16	U				
300—600 兆瓦 (电)																
九英里角 1	GE	1850	625	532	129	X	42	30	4 FC	120 FC			30	4 FC	8 FC	4 FC
佛蒙特·扬基	GE	1593	514	368	89	X	30	20	4 FC	80 FC			20	3 FC	6 FC	4 FC
牡蛎湾 1	GE	1930	640	560	137	X	42	30	4 FC	120 FC			30	6 FC	8 FC	4 FC
蒙蒂塞洛	GE	1670	545	484	121	X	36	24	4 FC	96 FC			24	3 FC	8 FC	4 FC
杜尼·阿诺德 1	Bethel	1593	530	368	89	X	30	20	4 FC	80 FC			20	FC	6 FC	4 FC
600—900 兆瓦 (电)																
“流浪者”	GE/Bethel	1998	664	580	145	X	42	30	4 FC	120 FC			30	4 FC	8 FC	4 FC
磨石角 1	GE	2010	652	580	145	X	42	30	4 FC	120 FC			30	4 FC	8 FC	4 FC
德累斯顿 2,3	GE	2527	809	724	177	X	53	41	4 FC	164 FC			41	5 FC	8 FC	4 FC
库珀	GE	2381	778	548	137	X	43	31	4 FC	124 FC			31		8 FC	4 FC
“方城” 2,3	GE	2511	800	724	177	X	53	41	4 FC	164 FC			41	5 FC	8 FC	4 FC
“赫奇” 1	GE/SS	2436	813	560	137	X	43	31	4 FC	124 FC			31	4 FC	8 FC	4 FC
肖哈姆	GE/B&W	2436	819	560	137	X	43	31	4 FC	124 FC			31	FC	8 FC	4 FC
布伦斯威克 1,2	GE	2436	821	560	137	X	43	31	4 FC	124 FC			31		8 FC	4 FC
布郎兹弗里 1,2,3	GE	3293	1065	764	185	X	55	43	4 FC	172 FC			43	6 FC	8 FC	4 FC
“桃花谷” 2,3	GE/Bethel	3294	1065	764	185	X	55	43	4 FC	172 FC			43	6 FC	8 FC	4 FC
侯珀 1,2	GE/Bethel	3293	1067	764	185	X	55	43	4 FC	172 FC			43	5 FC	8 FC	4 FC

所用缩写注解: X——十字型棒 FC——裂变室 IC——离子电离室 U——均匀。

表 4 压水反应堆采用的堆芯仪表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
电站名称	主要承包者	热功率 (兆瓦)	电功率 (兆瓦)	燃料 元件	控制棒	控制棒 类型	热偶 总数	热偶 管道	热偶 分布	移动式 套管	移动式 探测器	移动式 探测器 类型	探测器 速度 (英尺/分)	套管 分布	探测器 组件	每根组 件局部 通量探 测器	局部通 量探测 器总数	每根组 件平均 通量探 测器	平均通 量探测 器总数	本底探 测器总 数
0—300 兆瓦 (电)																				
希平港 ⁺	West	505	90	97	20	X	62 CA	83	F+S											
场基 ⁺⁺	West	600	175	76	24	X	27 CA	27	Q+S											
印第安角 1	Con.Ed	615	265	120	21	X														
300—600 兆瓦 (电)																				
京纳	West	1300	420	121	29/4 PL	16 RR	CA				4	FC								
圣奥诺弗莱	CE	1347	430	157	45	16 RR	35 CA	35		30	30	FC	36/6	Q+S						
康涅克特扬基	West	1825	575	157	45	20 RR	48 CA	48	Q+S	19	2	FC	72/12	U						
尖角滩 1,2	West	1518	497	121	33/4 PL	16 RR	CA			36	4	FC		U						
基沃尼	West	1650	541	121	29/4 PL	16 RR	39 CA	39		36	4	FC		U						
普雷里岛 1,2	NSP/West	1650	530	121	33/4 PL	16 RR	39 CA	39		36	4	FC			28	3 Rh	84 Rh	1 V	28 V	
卡尔亨堡 1	CE	1420	458	133	49	5 RR														
600—900 兆瓦 (电)																				
土耳其角 3,4	West/Bethel	2200	639	157	41	20 RR	CA													
罗比森 2 (ROBIN-SON2)	West	2200	700	157	45/8 PL	20 RR			U		5	FC	72/12	U						
塞瑞 1,2	West	2441	788	157	45/8 PL	20 RR	51 CA	51		50			72/12							
法雷	West/SS	2652	829	157	45/8 PL	20 RR	CA						72/12							
北安纳	West	2775	898	157	45/8 PL	20 RR	CA						72/12	U						
塞布罗克 (SEABRO-OK)	West	2660	885	157	45/8 PL	20 RR							72/12							
印第安角 2	West	2758	873	193	53/8 PL	20 RR														
印第安角 3	West	3025	965	193	53/8 PL	20 RR														
比弗谷 1	West	2660	852	157	45/8 PL	20 RR	CA		U				72/12	U						

奥康尼 1	DPC	2452	841	177	61/8 PL	16 RR	52 CA [§]				52	7 Rh	364 Rh	52 ^q
奥康尼 2,3	DUKF/DPC	2568	886	177	61/8 PL	16 RR					52	7 Rh	364 Rh	52 ^q
三哩岛 1	UEC/B&W	2535	819	177	61/8 PL	16 RR					52	7 Rh	364 Rh	52 ^q
三哩岛 2	UEC	2772	905	177	61/8 PL	16 RR					52	7 Rh	364 Rh	52 ^q
克里斯特河 3	B&W	2452	825	177	61/8 PL	16 RR					52	7 Rh	364 Rh	52 ^q
阿肯色 1	Bethel	2760	902	177	61/8 PL	16 RR					52	7 Rh	364 Rh	52 ^q
兰乔·赛可	B&W/Bethel	2452	804	177	61/8 PL	16 RR					52	7 Rh	364 Rh	52 ^q
米德兰 1,2	Bethel	2468	492/818	177	49/8 PL	16 RR					46	7 Rh	322 Rh	46 ^q
戴维斯·贝塞	B&W/Bethel	2789	906	177	49/8 PL	16 RR					57	7 Rh	399 Rh	57 ^q
帕利塞兹	Bethel	2212	700	204	45	X	90 CA [*]				45	4 Rh	180 Rh	1 V 45V
卡里浮脱悬崖 1,2	CE/Bethel	2570	845	217	89	5 RR					45	4 Rh	180 Rh	1 V 45V
细菌·扬基	CE	2440	790	217	89	5 RR	45 CA [§]				45	4 Rh	180 Rh	1 V 45V
ST.I.UCIE1		2560	801	217	85	5 RR					45	4 Rh	180 Rh	1 V 45V
“磨石” 2	Bethel	2560	828	217	85	5 RR	45 CA [§]				45	4 Rh	180 Rh	1 V 45V

900--1200 兆瓦 (电)

考克 1,2		3250	1060	193	53/8 PL	20 RR	CA				4	FC		
“砾山” 1,2	West	3250	1050	193	53/8 PL	20 RR	CA			58	6	FC		
迪亚布卢·卡 双翁 1,2	West	3250	1060	193	53/8 PL	20 RR	65 CA	65	U	58	6	FC	U	
斯拉姆 1,2	West/Bethel	3423	1115	193	53/8 PL	20 RR	65 CA	65	U	58	6	FC	72/12 U	
“勇士”	West/Bethel	3423	1130	193	53/8 PL	20 RR	65 CA	65	U	58	6	FC	72/12 U	
塞科亚 1,2	West	3423	1140	193	53/8 PL	20 RR	65 CA	65	U	58	6	FC	72/12 U	

所用缩写和注解: PL—短棒。X—十字型棒。RR—圆棒。CA—镍铬-镍铝。E+S—封装 + 对称。Q+S—象限 + 对称。U—均匀。R—无规则。
 FC—裂变室。Rh—铀自给能探测器。V—钒自给能探测器。*—每个组件两个热偶。+—有 6 个活化丝管, 6 个活化丝驱动机构
 (80 英尺/分), 活化丝类型: Zr, Fe, Mn, 丝管分布无规则。†—有 20 个活化丝管, 8 个驱动机构 Fe-Mn 型活化丝, 丝管象限布置并对称校核。
 §—每个组件一个热偶。q—每个组件一个本底探测器。

电站重要的设备系统之一。但是堆芯探测元件的性能尚待改进，监测系统的研究还很少，尤其需要积累运行经验。

参 考 文 献

- [1] Boland, J. F., *Nuclear Reactor Instrumentation (In-Core)*, Gordon and Breach, 1970.
- [2] Glenn F. Popper., *Power Reactor Technology*, 9, 25(1965—1966).
- [3] Tong, L. S, Weisman, Joel., *Thermal Analysis of Pressurized Water Reactor*, p.267, American Nuclear Society, 1970.
- [4] 伯克, «国外核技术», 第2期, 10(1978).
- [5] Philipp, L. D., et al., *Nucl. Techn.* 20, 51(1973).
- [6] Philipp, L. D., et al., *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 17, 387(1973).
- [7] Harrer, J. M., Beckerley, J. G., TID-25952(1973).
- [8] Levine, M. M., Diamond, D. J., *Nucl. Sci. Eng.*, 47, 415—420(1972).

DF-VI 快中子零功率装置上的数字 逆动态技术及其应用

糕凤官 金曼宜 姚世贵

一、引言

为了测定 DF-VI 快中子零功率装置上的各种反应性效应，我们研究并应用了下面三种数字逆动态技术，即

- 1) 逐点逆动态法^[1];
- 2) 有效源强符合落棒法^[2];
- 3) 数字积分落棒法^[3]。

与模拟逆动态法相比，这些反应性测量方法测量精确度高、动态范围大、适于用在线计算机进行实时分析。与各种堆噪音技术相比，又具有不需要进行临界参考测量、数据采集速度快等特点。其主要缺点是要求堆有大的反应性扰动，并且测量结果依赖于探测器效率的变化。

逐点法是我们研究并应用的一种基本的逆动态法。已用它测量了安全块及控制棒的事后保护动作时间、装置的停闭特性、安全块和侧反射层的反应性价值与位置的关系、控制棒的积分反应性曲线等。与堆振荡装置相配合，该方法还可以用来测量堆材料的反应性价值及 Doppler 系数等小反应性效应。符合法主要用来测量堆的次临界度。它不但适用于有源系统，也适用于无源系统。应用积分法主要是为了与符合法相互比较。

由于在 DF-VI 装置上目前尚无在线数字计算机，因此，全部逆动态数据分析都是通过 DJS-6 机上进行离线处理来实现的。为此，用 DJS-6 机 ALGOL-60 算法语言编写了专用计算程序^[4]。逆动态数据的采集是利用专门的数据采集系统进行的。采集系统虽以普通 256 道分析器为主体，但是，由于合理地设计了程序控制线路，粗、细道宽配合采集数据，并利用一种精确的方法测定了系统的死时间，从而保证了数据采集的精确度。本文将介绍 DF-VI 装置上的数字逆动态技术及其所得主要结果。

二、算法说明

置于堆内一定位置上的中子探测器的计数率 $R(t)$ 与作为时间函数的中子密度 $N(t)$ 的关系是

$$R(t) = \frac{wN(t)}{v\lambda} \quad (1)$$

堆内有外中子源时的点动态方程为

$$\frac{dN(t)}{dt} = [\rho(t) - \beta] \frac{N(t)}{\Lambda} + \sum_{j=1}^m \lambda_j C_j(t) + S \quad (2)$$

$$\frac{dC_j(t)}{dt} = \beta_j \frac{N(t)}{\Lambda} - \lambda_j C_j(t) \quad (3)$$

方程(1)、(2)和(3)中, w 是探测器效率, 定义为堆内每产生一次裂变, 探测器所计到的中子数; 其余符号的定义是众所周知的, 不再一一说明。

假定 w , Λ , β 及 S 不随堆状态的改变而变化, 把(1)式中与中子密度 $N(t)$ 有关的实验测得的量 $R(t)$ 作为输入数据, 对 $\rho(t)$ 解点动态方程(2)和(3), 这些是 DF-VI 装置上三种逆动态算法的出发点。

(一) 逐点逆动态算法(ZDF)

这个算法要求测量从堆定态运行开始。在记下定态计数率 R_0 之后, 移动被测对象, 并记录与被测件位置 h_i 或时间 t_i 对应的中子计数率 R_{λ} 。然后以 R_i 及 h_i 或 t_i 作为输入数据求解方程(2)和(3), 给出作为位置或时间函数的反应性 $\rho_i(h_i)$ 或 $\rho_i(t_i)$ 。这里 $i=0, 1, 2$, 是实验点的序号。算法的基本算式是

$$\rho_i = \rho_{i-1} + \delta\rho_i \quad (4)$$

$$\delta\rho_i = \Lambda \left[(\alpha_i - \alpha_{i-1}) + S \left(\frac{1}{R_{i-1}} - \frac{1}{R_i} \right) \right] - \sum_{j=1}^m \left[E_{j,i} \left(\frac{\lambda_j \beta_j}{\lambda_j + \alpha_i} - A_{j,i-1} \right) \right] \quad (5)$$

(5)式中

$$\alpha_i = \frac{\ln R_i - \ln R_{i-1}}{\Delta t_i} \quad (6)$$

是在第 i 个数据采集间隔 Δt_i 内堆中子密度变化的倒周期。

$$A_{j,i} = A_{j,i-1} e^{-(\lambda_j + \alpha_i)\Delta t_i} + \frac{\lambda_j \beta_j}{(\lambda_j + \alpha_i)} E_{j,i} \quad (7)$$

$$A_{j,0} = \beta_j \quad (8)$$

$$E_{j,i} = 1 - e^{-(\lambda_j + \alpha_i)\Delta t_i} \quad (9)$$

而有效源强 S 的值是用下述符合算法借助次临界度测量来确定的。在导出上述算式时还利用了在每个计数间隔 Δt_i 内, 反应性随时间线性变化、堆功率按倒周期 α_i 指数变化的假设。

(二) 有效源符合算法(FHF)

设落棒前堆系统处于定态。落棒过程自 $t=0$ 开始, 到 $t=t_r$ 结束。该算法假定系统的有效源强 S_i 始终保持常数, 并首先从 $i \geq (r+1)$ 的任一点开始, 用测得的 $R_i(t_i)$ 和落棒后堆的次临界度的一个初估值 ρ_s , 依下式计算 $S_i(t_i)$:

$$S_i(t_i) = \frac{1}{\Delta t_i} \left[R_i - R_{i-1} + \sum_{j=1}^m (C_{j,i} - C_{j,i-1}) - \rho_s \int_{t_{i-1}}^{t_{i-1} + \Delta t_i} \frac{R_i(t')}{\Lambda} dt' \right] \quad (10)$$

上式中的 $C_{j,i}$ 由下面的递推关系计算:

$$C_{j,0} = \frac{\beta_j}{\Lambda \lambda_j} R_0 \quad (11)$$

$$C_{j,i} = C_{j,i-1} e^{-\lambda_j \Delta t_i} + \frac{\beta_j R_i}{A} \frac{E_{j,i}}{(\lambda_j + \alpha_i)} \quad (12)$$

其次，把(10)式给出的 $S_i(t_i)$ 与方程

$$S_i(t_i) = a + b Z_i(t_i) \quad (13)$$

作最小二乘法符合，求常数 a 和 b 。如果 $b \neq 0$ ，则改变 ρ_z ，重复上述过程。如此逐次叠代符合，直到 $b=0$ 为止。最后一次叠代符合时 ρ_z 的值即为堆的终态次临界度，而 a 的值就是系统的有效源强。堆的初态次临界度 ρ_0 由下式给出：

$$\rho_0 = -\frac{Aa}{R_0} \quad (14)$$

方程(13)中的时间函数 $Z_i(t_i)$ 规定为

$$Z_i(t_i) = \sum_{k=1}^{m-1} A_k e^{\omega_k t_i} \quad (15)$$

这里 $\omega_k (k=0, 1, 2, \dots, m-1)$ 是倒时方程

$$y(\omega) = \rho_z - \omega \left(A + \sum_{j=1}^m \frac{\beta_j}{\lambda_j + \omega} \right) = 0 \quad (16)$$

的前 $(m-1)$ 个根。

$$A_k = \frac{\rho_z}{\omega_k y'(\omega_k)} \quad (17)$$

由于按(10)式计算 $S_i(t_i)$ 的起始点 i 可选为任意大于 r 的适当数据点，因此，这个算法能够大大减小落棒过程引起的高次谐波对测量结果的影响。

(三) 数字积分落棒算法(JFF)

这个算法只适用于无源系统。由于 DF-VI 装置的活性区体积只有 6 升，影响反应性测量的空间效应不明显，因此我们使用了如下简单算式：

$$\rho_L = -\frac{\left[A + \sum_{j=1}^m \frac{\beta_j}{\lambda_j} \right]}{\sum_{i=0}^H R_i(t_i) \Delta t_i} R_0 \quad (18)$$

式中 ρ_L 是下落控制棒的反应性价值。(分母中 $i=H$ 时， $R_i \sim 0$)。

三、数据采集系统

数据采集系统由中子信号道、多路定标型 256 道时间分析器、时标发生器和程序控制线路等四部分组成，完成三种逆动态法的数据采集。其框图如图 1 所示。

中子信号道由脉冲型仪器组成。中子探测器是 LBS-8 型和 LBS-4-1 型 ^{235}U 裂变室。前置放大器是将文献[5]的线路稍加改变装制成的，放大倍数 ~ 70 ，上升时间 ~ 50 ns。由于在次临界度测量中，落棒结束时的中子计数率 $R(t_r)$ 可表示为