

CNIC-01036  
SINRE-0059

CN9600973

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE  
AND TECHNOLOGY REPORT

数字反应性仪

DIGITAL REACTIVITY METER

(In Chinese)



中国核情报中心  
原子能出版社

China Nuclear Information Centre  
Atomic Energy Press

OL 27411



蒋宗炳：中国核动力研究设计院高级工程师。1965年毕业于哈尔滨工业大学电子计算机专业。

Jiang Zongbing; Senior engineer of Nuclear Power Institute of China. Graduated from Harbin Institute of Technology in 1965, majoring in computer.

CNIC-01036

SINRE-0059

# 数字反应性仪

蒋宗炳

(中国核动力研究设计院, 成都)

## 摘 要

介绍了核反应堆中反应性测量的意义及常用的测量方法;着重阐述了数字反应性仪的工作原理、软件及硬件构成、主要技术指标、使用情况,以及仪器特点。数字反应性仪在各种堆上的使用情况表明,它具有测量精度高、响应快、噪声低、分辨率高、测量范围宽、操作简便、使用灵活、工作稳定可靠等特点。同时,该仪器还能将测量数据自动存盘,并有较完善的自检功能,不仅能满足核电站的测量要求,也适用于其它各种反应堆的反应性测量。

# DIGITAL REACTIVITY METER

*(In Chinese)*

Jiang Zongbing

(NUCLEAR POWER INSTITUTE OF CHINA, CHENGDU)

## ABSTRACT

The importance and the usual methods of reactivity measurement in a nuclear reactor are presented. Emphasis is put upon the calculation principle, software and hardware components, main specifications, application, as well as the features of the digital reactivity meter. The test results of operation in various reactors shown that the meter possess the following features: high accuracy, short response time, low output noise, high resolution, wide measuring range, simple and flexible to operate, high stability and reliability. In addition, the reactivity meter can save the measuring data automatically and have a perfect capability of self-verifying. It not only meet the requirement of the reactivity measurement in nuclear power plant, but also can be applied to other various reactors.

# 前 言

随着我国经济建设的不断发展,能源需求量越来越大,这将加快核电站的发展步伐。特别是在沿海经济发展较快的地方,核电站的建造会更加迅速。

核电站反应堆的安全运行是至关重要的。而要保证其安全性,首先要对影响中子通量变化的关键变量——反应性进行准确测量,以利于及时正确地控制反应堆的正常运行。

反应性测量有很多方法,如周期法、落棒法、脉冲中子源法等。但在核电站的反应性测量中,则要求测量方法能实时地、连续快速地监测微小的反应性值。早期多用模拟电路(反应性模拟机)来实现反应性测量。但由于模拟电路本身所固有的弱点,使其操作不便,如在设置常数、调整零点及时间间隔等方面的准备工作非常麻烦,既费时又费事。因而,随着微机技术的发展,逐渐被以微处理器为核心的数字反应性仪所代替。与模拟式反应性仪相比较,数字式反应性仪有测量精度高、噪声低、应用范围宽、操作简便等优点。因此,美国西屋公司、日本三菱公司、法国 M·G 公司及法马通公司等都开发出了数字反应性仪。为了增强我国核电设备国产化能力,我们在“八五”期间也研制出了数字反应性仪。该仪器经过实际使用表明,完全能满足核电站对反应性测量的要求,也适用于其它各种堆的反应性测量。

## 1 主要技术指标

### 1.1 输入信号

电离室电流从  $3 \times 10^{-9}$  A 到  $1 \times 10^{-4}$  A,分为下列 10 档:

$3 \times 10^{-9}$ ,  $1 \times 10^{-8}$ ,  $3 \times 10^{-8}$ ,  $1 \times 10^{-7}$ ,  $3 \times 10^{-7}$ ,  
 $1 \times 10^{-6}$ ,  $3 \times 10^{-6}$ ,  $1 \times 10^{-5}$ ,  $3 \times 10^{-5}$ ,  $1 \times 10^{-4}$ 。

电离室电流测量精度优于满量程的  $\pm 1\%$ 。输入信号也可用 10 Hz~1 MHz 的脉冲。

### 1.2 反应性测量范围

反应性测量范围  $\pm 10000$  pcm,分为下列 10 档,可手动切换,也可自动切换。

$\pm 10$ ,  $\pm 20$ ,  $\pm 50$ ,  $\pm 100$ ,  $\pm 200$

$\pm 500$ ,  $\pm 1000$ ,  $\pm 2000$ ,  $\pm 5000$ ,  $\pm 10000$ 。

反应性测量精度小于 4%,实际上一般都在 2%以内。

分辨率为 0.01 pcm。反应性仪本身的输出噪声  $\leq 0.2$  pcm。测量反应性的响应时间  $\leq 1$  s。

### 1.3 使用环境

额定工作条件:温度  $0^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ ;湿度  $\leq 85\%$

极限工作条件:温度  $-10^\circ\text{C} \sim +55^\circ\text{C}$ ;湿度  $\leq 90\%$

### 1.4 电 源

交流电压:220 V (+10%~-15%);频率:50 Hz  $\pm$  10 Hz

## 2 仪器简介

这种反应性仪备有三种配置:一种是含相应探测器所需的高压电源及放大器的全配置反应性仪;另一种是不带高压电源而带放大器的反应性仪;第三种是简易型——仅反应性仪

本身。用户可根据不同需要进行选择。

## 2.1 工作原理

在点堆模型的中子动力学方程中，描述了反应性与中子通量之间的关系。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{L} \cdot n + \sum_{i=1}^M \lambda_i \beta_i + s \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{L} \cdot n - \lambda_i C_i \quad (2)$$

式中： $n$  ——中子密度，中子数/cm<sup>3</sup>；

$\rho$  ——反应性，pcm；

$L$  ——瞬发中子平均寿期，s；

$\beta$  ——缓发中子份额；

$\beta_i$  ——第  $i$  组缓发中子份额；

$C_i$  ——第  $i$  组缓发中子先驱核的浓度，原子核数/cm<sup>3</sup>；

$\lambda_i$  ——第  $i$  组缓发中子先驱核衰变常数，1/s；

$i$  ——缓发中子先驱核组号；

$M$  ——缓发中子组数；

$s$  ——中子源强度，中子数/(cm<sup>3</sup>·s)。

$$\beta = \sum_{i=1}^M \beta_i$$

由 (1) 式得到：

$$\rho = \frac{L}{n} \left( \frac{\beta \cdot n}{L} - \sum_{i=1}^M \lambda_i C_i + \frac{dn}{dt} - s \right) \quad (3)$$

式中：

$$\sum_{i=1}^M \lambda_i C_i = \sum_{i=1}^M \left( \frac{\beta_i}{L} \cdot n - \frac{dC_i}{dt} \right) \quad (4)$$

由于中子密度与探测器的输出信号是成比例的，因而将探测器的输出信号经放大后取样，由已知的初始状态，对上述方程求解，得到反应性数值。

## 2.2 硬件

仪器硬件的各部件构成如图 1 所示。仪器的放大器、高压电源和低压电源装在一个独立的机箱里。

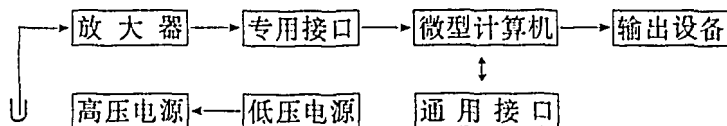


图 1 硬件框图

### 2.2.1 放大器

放大器用于将探测器送来的小电流信号或脉冲信号进行放大和整形。用电流信号时，则用小电流放大器。小电流放大器输出 0~10 V 电压信号。该放大器响应速度快、输出噪声低、量程可手动切换或自动切换，放大倍数在 1~4 范围内可连续调节，使放大器在其测量

范围内不论中子通量处于何种水平都能获得 10 V 的输出信号。

如果需要用脉冲信号来测量反应性，则用脉冲放大器。这种脉冲放大器具有很高的分辨率。它具有放大、整形、甄别等功能，其输出与 TTL 电平兼容。

### 2.2.2 专用接口

专用接口用于将放大器送来的电压信号或脉冲信号转换成微型计算机便于接受的数字信号。为了满足对小反应性的测量要求，它具有很高的分辨率及噪声抑制能力。对信号的取样间隔可根据使用要求编程。

### 2.2.3 微型计算机

反应性仪中所用的微型计算机是能适应恶劣环境的工业控制机。它具有很高的可靠性。配有 80486 CPU, 4 M RAM, 210 M 硬盘, 3.5" 软盘驱动器, 1024×768 分辨率的彩色 CRT 监视器, 101 键盘。机箱内采用双风扇正压排风冷却系统, 插件有防震卡固定措施。

### 2.2.4 通用接口

通用接口用于采入与反应性有关的参数, 例如控制棒位置、温度、硼浓度、压力等。它具有分辨率为 12 位的 A/D 通道 16 个, 用于反应性输出的 D/A 通道 2 个。还具有用来控制放大器量程切换的数字量输入输出通道, 及一个 16 位的定时/计数器。

### 2.2.5 输出设备

测量结果除直接从监视器的屏幕上读出外, 还有几种输出方式。第一种是用打印机拷贝屏幕; 第二种是用多笔记录仪连续记录反应性、中子通量及引入反应性的参数(如棒位等); 第三种是通过微型计算机的串行通讯接口将测量结果送到其它设备。

### 2.2.6 高压电源

高压电源供探测器用。补偿电离室配有正负两种高压, 0~800 V 范围内连续可调, 在其面板上有表头监视。负高压用于探测器的补偿电压。其它探测器, 配有相应的高压电源。

### 2.2.7 低压电源

低压电源分为 +5 V, +15 V 和 -15 V 三组。分别用于放大器和高压电源。该电源具有抗干扰能力强和输出噪声低的特点。

## 2.3 软件

开发应用程序的指导思想是使用方便、稳定可靠。

应用程序由两大部分构成——菜单部分和计算部分。

### 2.3.1 菜单

菜单选择部分作为人机对话的界面, 可以为反应性仪设置各种测量方式和参数。

(1) 测量方式设置 测量方式有连续值方式、瞬时值方式及其它方式。选择瞬时值方式时, 以条形图形象地表示反应性的大小, 以数字具体地表示当时的反应性值。连续值测量方式则是以曲线形式显示反应性连续测量的结果。屏幕的右面为逐点显示测量值部分, 左面为压缩后的测量值显示部分, 以便在更宽的时间范围内观察反应性的变化情况。同时在右上角用数字显示出当前的瞬时值。

为了满足某些特殊测量要求, 还设置有落棒法和周期法等其它测量方式。

(2) 参数设置及检查 通过键盘可以设置和检查下列各种参数。

物理参数: 包括缓发中子组数(不限于 6 组)及各组的份额, 各先驱核的衰变常数等。

计算常数: 包括计算周期、输入和输出的滤波系数以及各种转换系数。

量程参数：反应性的量程、中子通量的量程及参数二（引入反应性的参数）的量程和单位。

控制参数：中子通量量程的切换方式是手动或自动，通量信号的输入方式是电流或脉冲，参数二的输入方式是通过键盘输入或通过 A/D 输入。

(3) 其它 将自动存入磁盘的测量结果重显在屏幕上，并可展开或压缩某一部分或全部，需要时可将整个屏幕复制下来。

此外，还有仪器的自诊断选择。

### 2.3.2 计算

计算部分包含下列内容

(1) 数据采集 按菜单中设置的计算周期及滤波系数，进行采样和滤波。

(2) 数据处理 根据测量要求选择相应的算法计算反应性。

(3) 数据输出 按选择的测量方式将测量结果输出到屏幕上，并经 D/A 转换后送多笔记录仪及自动存盘（待需要时再输出）。

## 3 反应堆上实验

从 1994 年 10 月至 1995 年 6 月，我们先后在中国核动力研究设计院的零功率堆、高通量堆及秦山核电站进行了各种实验，如：反应性仪在各现场的适应性能（抗干扰能力）实验，在不同中子通量水平下输出噪声实验，对小反应性测量的跟踪性能实验及仪器的漂移实验等。还对影响测量精度、响应时间、输出噪声的各种因素，如滤波系数、信号电平和计算周期等，都分别及综合地进行了实验，确定了有关系数的选择范围，摸清了各种因素对测量结果的影响程度。

表 1 列出了部分反应堆上实验的结果。

表 1 部分反应堆上实验结果

序号	测试值 pcm	周期法 pcm	相对误差 %	时间	地点
1	75.0	74.1	+1.2	1994.10.20	高通量堆
2	51.0	50.5	+0.99	1994.11.30	零功率堆
3	30.5	30.3	+0.66	1994.11.30	零功率堆
4	-31.0	-31.6	-1.8	1994.12.6	零功率堆
5	22.8	22.5	+1.3	1994.12.6	零功率堆
6	-42.0	-42.2	-0.45	1994.12.6	零功率堆
7	11.2	11.0	+1.8	1994.12.6	零功率堆
8	-12.0	-11.8	+1.69	1994.12.6	零功率堆
9	-21.0	-20.7	+1.6	1995.1.17	秦山电站
10	11.7	11.8	-0.6	1995.6.7	零功率堆
11	-13.2	-13.2	0	1995.6.7	零功率堆
12	7.0	7.1	-1.13	1995.6.7	零功率堆
13	8.0	8.14	-1.7	1995.6.8	零功率堆
14	-20.4	-20.5	-0.49	1995.6.8	零功率堆
15	21.0	21.1	-0.5	1995.6.8	零功率堆
16	-30.0	-30.4	-1.3	1995.6.8	零功率堆
17	29.6	29.9	-0.9	1995.6.8	零功率堆
18	40.8	40.9	-0.39	1995.6.8	零功率堆



## 4 仪器特点

该仪器与同类仪器相比，有如下特点：

(1) 精度高 一般都在 2% 以内，完全满足美国联邦法规 10 CFR 50 附录 B 的规定 (4%)。

(2) 漂移小 无论是温度漂移还是时间漂移，静态漂移还是动态漂移，都非常小，工作很稳定。

(3) 跟踪性能好 由于响应快 ( $<1$  s)、分辨率高 (0.01 pcm)，使得测量小反应性的跟踪性能好。

(4) 测量范围宽 反应性的测量范围从 0.1 pcm 到 10000 pcm；脉冲输入信号可从  $3 \times 10^{-11}$  A 到  $1 \times 10^{-4}$  A；运算电平可从 0.1 V 到 10 V；缓发中子组数不局限于 6 组。因而，可在各种反应堆、各种通量水平下测量其反应性。

(5) 自动存盘 测量结果自动存盘，自动形成以  $\times \times$  月  $\times \times$  日  $\times \times$  时  $\times \times$  分 (开始测量时间) 为文件号的记录文件，以便查找。文件长短不限，长的可存若干天的测量数据。需要时，可将该数据调出显示在荧光屏上。并可灵活地显示全部或其中的某一部分，即可用菜单进行压缩或展开，便于不同目的的观察和分析。屏幕上显示的全部信息可由打印机打印下来，以便长期保存。

(6) 放大倍数连续可调 小电流放大器在  $3 \times 10^{-9}$  A 到  $1 \times 10^{-4}$  A 内，按 1、3 划分，共分为 10 档，换档可手动或自动进行。此外，在每一档内放大倍数有 1~4 倍的连续调节功能。因而在其测量范围内的任意中子通量水平下，放大器都能输出 10 V 的电压信号，以便反应性获得最佳的信噪比。

(7) 测量方式多 除连续方式、瞬时值方式外，还有可消除空间效应的落棒法方式，因而，使用更灵活。

(8) 自动化程度高 除放大器和反应性仪的自动量程转换外，对测量结果还可进行自动分析和处理。

(9) 自检功能强 不仅对算法可以进行自动检查，对包括放大器在内的硬件也都可进行自诊断。

(10) 操作简便 仪器在使用前不必调试，使用人员只要进行简单的键盘操作，即可实现测量。

(11) 体积小、重量轻，便于携带和使用。

## 5 结 论

在最新微型计算机技术基础上研制出的该数字反应性仪，通过在几种反应堆上各种工况下的应用表明：该仪器的测量精度高、响应速度快、输出噪声低、分辨率高、测量范围宽、操作简便、工作稳定可靠、携带 (或搬运) 方便、自动化程度高。由于它具有各种配置和多种灵活的输出手段和测量方式，因此，可以根据不同的使用环境选用相应的配置，选配所需的输出设备，选择最佳的测量方式，以满足各种不同的使用要求，即不仅适用于核电站的反应性测量，而且也适用于其它各种核反应堆的反应性测量。

参加研制工作的还有魏昌武、魏颖等。

秦山核电站、中国核动力研究设计院二所和一所有关同志，为我们提供了很好的实验条件，在此向他们表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 蒋宗炳. 核动力工程, 1986, 7 (4)
- [2] 津岛洋一郎, 中野雄三. 日本原子力学会志, 1990, 32 (3)
- [3] Saleem A • Ansari. IEEE. Transaction on Nuclear Science, 1991, 38 (4)

(京) 新登字 077 号

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01036 SINRE-0059: 数字反应性仪=DIGITAL REACTIVITY METER/蒋宗炳著. —北京: 原子能出版社, 1996. 2

I. 中… I. 蒋… III. ①核技术-研究报告-中国-连续性出版物②数字-反应性-测量 IV. ①TL-55②TL241

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 21440 号



原子能出版社出版发行

责任编辑: 孙凤春

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷



开本 787×1092 1/16·印张 1/2·字数 12 千字

1996 年 2 月北京第一版·1996 年 2 月北京第一次印刷

# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.