

反应堆中子倍增特性分析及标定技术研究

高志宇, 黄有骏, 罗庭芳, 孙琦, 龚涛波

(中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 针对反应堆用核测量仪表的反应堆周期测量标定问题, 从理论推导和实堆数据验证两方面研究了反应堆中子倍增特性, 并确定了使用指数变化规律的信号可以表征反应堆中子注量率随时间的变化特性。为全面标定核测量仪表的反应堆周期测量性能, 结合中子探测器输出信号微弱的特点, 提出了基于数字技术实现反应堆周期信号模拟的方案。方案包括硬件和软件两方面, 识别了关键问题, 并设计解决了高精度定时和微弱信号输出问题。同时, 研究了仪表的标定方法并按方法对反应堆周期信号输出的性能进行测试。在反应堆周期值为 2 s ~ 999 s 的范围内, 选取 7 个反应堆周期值进行测试, 测试偏差绝对值的最大值为 0.45%。

关键词: 反应堆周期; 信号发生; 标定技术

中图分类号: TL413 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-0062(2023)05-0052-05

Analysis of Neutron Multiplication Characteristics of Reactors and Study on Calibration Technique

GAO Zhiyu, HUANG Youjun, LUO Tingfang, SUN Qi, GONG Taobo

(Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Aiming at calibration of reactor period measurement for reactor nuclear measuring instrumentation, the neutron multiplication characteristics of reactors were studied from the aspect of theoretical derivation and verification of real stack data, and it was determined that signals with exponential variation laws can characterize the change characteristics of reactor neutron fluence rate over time. In order to fully calibrate the reactor period measurement performance of nuclear measurement instruments, considering the neutron detectors output signal weakly, it proposed a reactor period signal simulation

收稿日期: 2023-03-20

作者简介: 高志宇(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事反应堆核测量技术研究和系统设计等方面的研究。E-mail: gzy85930@sina.com

scheme based on digital technology. The scheme includes both hardware and software aspects, identifying key issues, and designing solutions to high-precision timing and weak signal output issues. At the same time, the calibration method was studied, by which the reactor period signal output performance was tested. Within the range of reactor period values from 2 s to 999 s, seven values were selected for testing, and the maximum absolute value of the test deviation was 0.45%.

key words: reactor period; signal generation; calibration technology

0 引言

核反应堆安全运行的基础在于成功地控制反应堆中子注量率在各种情况下随时间的变化,特别是在反应堆启动过程中,操纵人员密切监视并关注中子注量率的增减或变化速率。反应堆中子注量率在控制棒移动时,中子注量率将随时间急剧变化,了解这种中子注量率的瞬态变化特性,对反应堆的控制和安全运行是极其重要的。核电厂、研究堆等使用反应堆周期参数监测堆内中子注量率的变化情况,是反应堆启动与运行中涉及核安全的重要参数。反应堆周期太短表示反应堆中子注量率增长过快,超过整定值会触发报警或停堆动作^[1]。

反应堆周期是由核测量仪表进行监测,通过测量中子探测器输出的电信号并计算电信号特性参数的变化率,获得反应堆周期值。为确保反应堆周期测量的准确性,应标定此类仪表的反应堆周期测量性能。目前,国内主要有两个进行反应堆周期标定的方法:一种是使用指数电压信号进行标定^[2],此种标定方式仅适用于模拟仪表;另一种是将指数电压信号转换为微电流信号,使用处理器^[3]或微控制器^[4]进行数字控制,此类型仪表可用于微电流信号仪表的反应堆周期测量标定。

中子注量率的大小具体被量化为中子探测器输出计数率的高低或者输出微电流的大小^[5],反应堆不同中子探测器输出信号的类型不同,计数管型探测器输出脉冲信号,电离室型探测器输出电流信号。两种信号均承担反应堆周期监测功能。特别是反应堆启动阶段,在中子注量率较低时,主要依靠脉冲信号进行反应堆中子注量率监测。

本文从中子动力学的理论分析反应堆中子倍增特性,并结合实堆测试结果验证了反应堆中子

注量率随时间的变化特性,根据该特性研究了核测量仪表反应堆周期的标定方案并设计了信号模拟,对模拟的信号完成了测试。

1 反应堆中子倍增特性分析

1.1 理论分析

反应堆中子注量率变化的影响因素复杂,但核测量仪表主要考虑中子注量率随时间的变化。因此,理论分析选用的模型可简化为考虑缓发中子影响的点堆模型动态方程。当反应性发生正向阶跃变化时,中子注量率在开始阶段会突然迅速变化,一小段时间后会以稳定的速度较缓慢的变化^[6],最终的表现形式见式(1)。

$$n(t) \approx e^{\frac{t}{T}} \quad (1)$$

式中: $n(t)$ 为 t 时刻的中子注量率,单位 $n/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$; t 为时间,单位 s ; T 为反应堆周期,单位 s 。

从理论上分析,反应堆中子注量率变化特性服从指数分布的规律。

1.2 实堆测试

在西安脉冲反应堆上按理论的指导,使用计数管探测器配脉冲计数装置,进行了实堆的计数率数据测试。具体操作方式是将反应堆控制在临界状态下,通过提棒操作引入一个正向的阶跃反应性后并保持不动,计数率在初期阶跃后,按固定反应堆周期呈现指数增长的变化规律。由于反应堆功率较低,温度系数的影响可忽略。

计数率与反应堆的中子注量率间为正比关系,因此,计数率数据可以代表反应堆中子注量率的变化情况。反应堆实堆上对反应性正向阶跃的计数率增长曲线见图1。

使用直线替代指数曲线更为直观,因此将图1中的纵坐标进行了对数化处理,拟合度为0.998。

通过实堆测试数据验证,反应堆中子倍增特性符合指数规律。

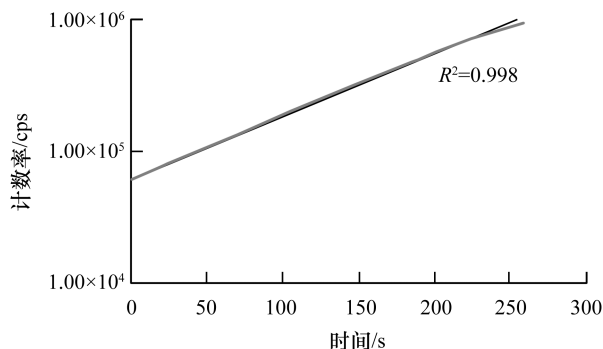


图 1 实堆计数率随时间变化曲线

Fig. 1 Real reactor count rate versus time curve

2 中子倍增特性标定技术研究

2.1 基本思路

反应堆中子倍增特性的标定是对测量仪表测量反应堆周期参数的性能标定。基本思路是产生模拟中子探测器输出的信号,该信号的特性参数随时间变化特性符合指数变化的规律。设置特定的反应堆周期值,将表征该反应堆周期值的信号按时间送入核测量仪表中,读取核测量仪表的反应堆周期测量结果,通过对比设定值和测试值完成标定。

2.2 信号模拟原理

由于中子注量率与中子探测器输出电信号的特性参数成正比。计数管探测器的脉冲信号特性参数为频率,中子电离室的电流信号特性参数为电流。参照式(1),得到基于不同电信号特性参数的反应堆周期信号产生的原理,见式(2)和式(3)。

$$F(t) = F_0 e^{\frac{t}{T}} \quad (2)$$

$$I(t) = I_0 e^{\frac{t}{T}} \quad (3)$$

式中: $F(t)$ 为 t 时刻的频率,单位 Hz; F_0 为初始时刻的频率,单位 Hz; $I(t)$ 为 t 时刻的电流值,单位 A; I_0 为初始时刻的电流值,单位 A; t 为时间,单位 s; T 为反应堆周期,单位 s。

3 反应堆周期信号产生方案

3.1 硬件方案

信号产生的技术包括模拟技术和数字技术。模拟技术由于元器件参数漂移且不能灵活调整等限制,目前信号产生方案普遍采用数字技术。基本方案是使用微控制器实现频率信号和电流信号的输出。考虑到指数信号规律鉴于频率信号和微

弱电流信号不容易进行标定测量,硬件方案采用先产生电压信号,再由电压信号转换为其他信号类型的方案。由于电压信号与其他信号是同源,通过测试电压信号的时间特性可以等效为频率信号和电流信号。对于频率信号,通过 VFC 电路将电压信号转换为频率信号;对于电流信号,利用欧姆定律可将电压信号通过电阻转换为微电流信号。硬件方案的原理框图如图 2 所示。

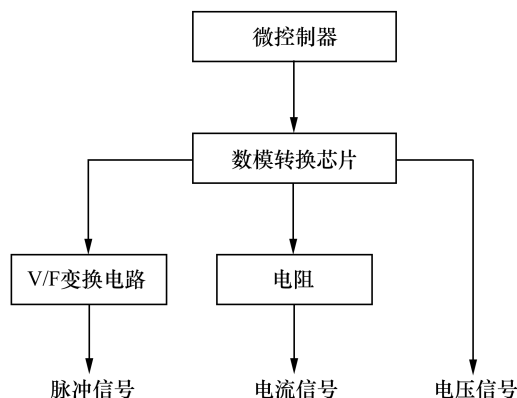


图 2 硬件方案原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of hardware scheme

从硬件方案分析,实现的该信号需解决两项关键问题:1)高精度定时;2)微弱信号输出。

在高精度定时方面,选用稳定的晶振并辅助时间标定技术,可实现 0.1% 以内的高精度定时。

在微弱信号输出方面,采用信号转换电路模拟中子探测器输出信号的类型和幅度。综合采用微弱信号远离数字电路、在信号输出端单点接地等方法,保证微弱信号的质量。

3.2 软件方案

软件方案是在设定状态下,接收外部操作设定的参数并固化,在工作状态下产生所需的指数周期信号。在定时方面使用中断实现高精度定时。软件方案原理框图见图 3。

中断的处理方式是实现高精度定时的关键。通常定时中断的处理方式是在定时器内进行程序各功能模块的处理。反应堆周期是动态信号,信号输出的阶跃性会影响周期信号精度,因此需要尽可能提高信号输出频率。另一方面,程序处理需要占用一定的时间,如果出现偶发情况导致处理时间大于平均水平时,会对定时误差产生影响。这种内在矛盾会影响最终信号输出的精度。为在机制上解决上述矛盾,在定时中断内设置一个计数器,累加变量。当主程序中需要计算时间间隔

时使用该变量。这种方法的优点包括:使用当前值与初始值的差值,不会累加定时误差;定时中断与主程序相互独立,即便某次由于主程序原因导致使用的定时变量有偏差时,该偏差也不会累积到定时中断中的定时变量;主程序可以循环执行输出和计算命令,最大限度地提高了输出频率。该方案解决了定时时间与输出频率的矛盾,将反应堆周期信号定时精度直接与定时中断精准度相关。而定时中断精准度可以通过软件校准标定的方式实现高精度测试。

4 信号标定技术研究及测试

4.1 标定方法

根据硬件原理框图,电压信号与脉冲信号、电流信号在时间上是同步的,可通过对电压信号进行标定获取反应堆周期相关的时间特性。

具体方法是用示波器对输出的电压信号进行连续采集,选取两个电压值,并测试两个电压值的时间间隔,通过计算得到反应堆周期监测值。

为了确保测量准确度,两个电压值的差值需要尽可能大,降低仪表测量误差对最终计算结果的影响。

4.2 标定测试结果

选取反应堆周期设定值为 2 s、5 s、30 s、50 s、100 s、500 s 和 999 s 共 7 个点进行测试,使用泰

克 MDO3034 型示波器,对输出的电压信号进行连续记录,按 4.1 节的方法计算反应堆周期监测值,计算反应堆周期设定值与反应堆周期监测值的相对偏差,测试结果见表 1。

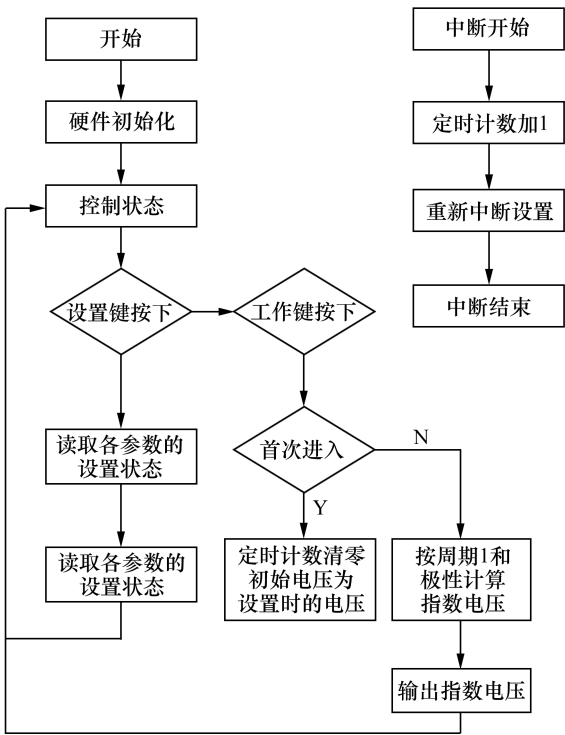


图 3 软件方案原理框图

Fig. 3 Principle block diagram of software scheme

表 1 反应堆周期值测试数据

Table 1 Test data of reactor period value

反应堆周期设定值/s	电压 1/V	电压 2/V	时间间隔/s	反应堆周期监测值/s	相对偏差/%
2	7.60	0.19	7.36	1.995	-0.24
5	9.80	0.32	17.04	4.980	-0.40
30	9.51	0.36	98.38	30.049	0.16
50	9.28	0.64	133.36	49.870	-0.26
100	9.32	0.16	406.56	100.021	0.02
500	9.74	5.09	325.08	500.922	0.18
999	9.74	7.09	318.68	1 003.540	0.45

通过标定测试计算,反应堆周期值从 2 s ~ 999 s 范围内,均能保证偏差不超过±0.5%。

通常,核电厂或研究堆的核测量仪表的反应堆周期测量偏差范围为±5%,该技术可对核测量仪表的反应堆周期参数测量进行标定。

5 结 论

本文分析了反应堆中子倍增的特性,提出了用于标定其测量仪表的方案,并进行了测试验证。通过研究和验证,得到如下结论:

(下转第 74 页)

- 学版),2018,39(4):63-66.
- [4] 赵雪琦,田京涛,陈皓欣. 铝合金模板体系优越性与局限性分析及应用技术研究[J]. 建筑结构,2020,50(增刊2):869-872.
- [5] 张新,张冠,魏双利. 剪力墙结构住宅铝合金模板优化设计研究[J]. 山东建筑大学学报,2021,36(3):16-24.
- [6] DONG F F. Study on the green construction technology model of aluminum alloy formwork based on multi factor coupling[J]. Chemical engineering transactions, 2016, 55:271-276.
- [7] 潘钦锋,崔洪亨,蔡雪峰,等. 铝合金模板抗弯性能试验研究及参数分析[J]. 工业建筑,2017,47(11):142-147.
- [8] 魏佳,杨佩荣,王晨,等. 基于有限元方法的铝合金模板受力分析[J]. 建筑结构,2021,51(增刊):1192-1196.
- [9] 王晓建,程光明,陈哲,等. 带腹板加劲肋高强薄壁钢柱局部稳定研究[J]. 工业建筑,2018,48(4):126-129.
- [10] 罗克嵩,张少钦,罗升,等. 基于 ANSYS 的铝合金拉片体系墙模改进设计[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2019,33(4):80-87.
- [11] 杨旭东,宋国鑫,姚栋,等. 6061-T6 铝合金模板优化设计及力学性能分析[J]. 金属功能材料,2021,28(4):80-84.
- [12] 沈祖炎,郭小农. 对称截面铝合金挤压型材压杆的稳定系数[J]. 建筑结构学报,2001,22(4):31-36.
- [13] 刘璐璐,刘爱荣,卢汉文. T 型截面拱在拱顶集中力作用下的平面外弯扭失稳[J]. 工程力学,2020,37(增刊):151-156.
- [14] 姜超,林冰. 跨中作用下铝合金卷边工字形截面受弯构件的稳定性能[J]. 计算机辅助工程,2021,30(4):6-12.
- [15] ZHAO Y Z, ZHAI X M. Bending strength and design methods of the 6082-T6 aluminum alloy beams with circular hollow sections[J]. Structures, 2020, 26(2):870-887.
- [16] 张颖,王元清,张俊光,等. 铝合金网壳结构箱型-工字型盘式节点单肢受力性能有限元分析[J]. 工程力学,2020,37(增刊1):130-138.
- [17] 冯然,陆洋. 铝合金方形和矩形管截面开孔梁受弯性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2018,35(4):34-44.
- [18] 福建工程学院,福建方鼎建筑材料有限公司,福建金正丰金属工业有限公司. 福建省铝合金模板体系技术规程:DBJ/T 13-236—2016[S]. 福州:福建省住房和城乡建设厅,2016:63.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合铝合金模板工程技术规程:JGJ 386—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016:46.
- [20] 庄金平,邱豪,崔洪亨,等. 铝合金模板销钉半刚性连接性能研究[J]. 工业建筑,2017,47(12):152-156.

(上接第55页)

1)从堆上试验的核测量仪表结果,确认了阶跃反应性下反应堆中子注量率随时间变化服从指数增长规律。

2)采用数字技术结合信号转换电路的方式能够实现模拟中子探测器输出信号类型的反应堆周期信号。

3)基于本方案产生的反应堆周期信号,在反应堆周期值为2 s~999 s范围内,输出偏差不超过±0.5%,可以满足核测量仪表反应堆周期测量的标定要求。

参考文献:

- [1] 熊华胜,李铎,张良驹,等. 数字化核测量系统反应堆

倍增周期计算的敏感性分析[J]. 原子能科学技术,2012,46(增刊1):417-420.

- [2] 宓龙虎. 周期信号发生器[J]. 核电子学与探测技术,1984,4(5):308-310.

- [3] 王学杰. 数字化周期校验信号仪的研制[J]. 核电子学与探测技术,2001,21(4):320-321.

- [4] 李翔,王磊,付国恩,等. 便携式e指数周期信号发生器的研制[J]. 核电子学与探测技术,2013,33(7):798-801.

- [5] 喻恒,王银丽,何正熙,等. 基于SCADE的反应堆中子倍增时间算法设计与验证[J]. 核动力工程,2022,43(2):189-193.

- [6] 谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 西安:西安交通大学出版社,2011:237.