



深度次临界刻棒电子学实现方法研究

罗庭芳, 朱宏亮, 高志宇, 包超, 王银丽, 青先国, 何正熙, 孙琦, 杨振雷, 袁航, 单伟

Study on Implementation Method of Deep Subcritical Rod Worth Measurement Electronics

Luo Tingfang, Zhu Hongliang, Gao Zhiyu, Bao Chao, Wang Yinli, Qing Xianguo, He Zhengxi, Sun Qi, Yang Zhenlei, Yuan Hang, and Shan Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.05.0086>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

次临界反应性测量方法研究

Study on Measurement Method of Subcritical Reactivity

核动力工程. 2020, 41(6): 214–217

铀基混合堆次临界能源包层瞬态动力学分析

Transient Dynamic Analysis of Subcritical Energy Blanket for Uranium-Based Fusion-Fission Hybrid Reactor

核动力工程. 2020, 41(3): 104–109

控制棒价值对外推临界试验的影响分析

Analysis on Effect of Control Rod Worth in Extrapolation in Criticality Experiment

核动力工程. 2020, 41(6): 58–61

束流瞬变下CiADS次临界反应堆燃料包壳安全分析

Safety Analysis of CiADS Sub-Critical Reactor Fuel Cladding under Beam Transients

核动力工程. 2018, 39(5): 51–57

福清核电站基于堆外核仪表系统中量程测量的动态刻棒试验

Dynamic Rod Worth Measurement in Fuqing Nuclear Power Plant Based on Intermediate Range of Ex-Core Neutron Flux Measurement System

核动力工程. 2020, 41(4): 30–33

核电站指套管磨损涡流检查深度定量的影响因素研究

Research on Impact Factors of Depth Quantification in Eddy Current Test for Thimble Tubes Wear of Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(5): 150–154



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)05-0086-04; doi:10.13832/j.jnpe.2021.05.0086

深度次临界刻棒电子学实现方法研究

罗庭芳, 朱宏亮, 高志宇, 包超, 王银丽, 青先国,
何正熙, 孙琦, 杨振雷, 袁航, 单伟

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, 成都, 610213

摘要: 为实现深度次临界刻棒计算所需数据的有效采集, 研究并设计了深度次临界刻棒电子学的总体架构及关键模块, 通过堆上试验对关键模块特性进行了测试。结果表明, 所设计的深度次临界刻棒电子学能够有效测量经过约 200 m 电缆传输后的探测器信号, 脉冲信号波形宽度稳定, 信噪比水平良好; 所测得的高压坪特性曲线可以为探测器高压选取提供有效参考; 所测得的甄别特性曲线稳定, 能有效获取探测器信号中的中子成分。

关键词: 深度次临界; 电子学; 堆上试验
中图分类号: TL363 **文献标志码:** A

Study on Implementation Method of Deep Subcritical Rod Worth Measurement Electronics

Luo Tingfang, Zhu Hongliang, Gao Zhiyu, Bao Chao, Wang Yinli, Qing Xianguo,
He Zhengxi, Sun Qi, Yang Zhenlei, Yuan Hang, Shan Wei

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In order to realize the effective acquisition of data required for deep subcritical rod worth calculation, the overall architecture and key modules of deep subcritical rod worth measurement electronics have been researched and designed. The characteristics of the key modules have been tested through reactor test. The results show that the designed deep subcritical rod worth measurement electronics can effectively measure the detector signal transmitted through about 200 m cable. The pulse signal has a stable waveform width and a proper signal-to-noise ratio. The measured high voltage plateau characteristic curve can provide an effective reference for the high voltage selection of the detector. The measured discrimination characteristic curve is stable, from which the neutron component in the detector signal can be effectively obtained.

Key words: Deep subcritical, Electronics, Reactor test

0 引 言

刻度控制棒价值(以下简称刻棒)是核电厂的一项重要试验内容,用于验证堆芯性能与设计预计值的一致性。目前的刻棒方法只适用于反应堆偏离临界不远的状态,在深度次临界状态下存在较大的偏差,如能将刻棒工作点从临界附近推向深度次临界,可进一步压缩大修时间,提升核

电厂的安全性和经济性,因此,有必要开展深度次临界刻棒研究。

深度次临界刻棒研究的重点之一是有效获取刻棒计算所需数据,考虑到深度次临界状态下,反应堆中子注量率水平很低,只能采用脉冲型中子探测器测量中子注量率水平,且在核电厂环境下探测器信号需经过约 200 m 长电缆传输,使得

收稿日期: 2020-07-10; 修回日期: 2021-03-14

作者简介: 罗庭芳(1991—),男,工程师,硕士研究生,现从事核测量技术研究工作, E-mail: xiefengluo@163.com

信号测量和处理较为困难。本文针对上述难点，重点开展了深度次临界刻棒电子学实现方法研究，提出了深度次临界刻棒电子学的总体架构，对关键模块进行了设计，并通过堆上联配试验验证了其特性。

1 深度次临界刻棒电子学总体架构

深度次临界刻棒需要同步采集脉冲型中子探测器信号以及控制棒组棒位信号，并根据采集结果和修正因子计算控制棒组价值。对于脉冲型中子探测器，需要电子学提供工作高压和测量计数率，常见的涂硼正比计数管探测器高压一般在800~1200 V，深度次临界刻棒试验预计的计数率范围为 $10\sim 10^4\text{ s}^{-1}$ ；对于控制棒组棒位信号，一般为标准的0~10 V电压模拟量或4~20 mA电流模拟量。

基于上述需求，提出了图1所示的深度次临界刻棒电子学总体架构，包括宽频带低噪声前级放大器、多路电压信号采集、高速数字化采集模块、直流高压电源、低压电源以及数据处理器等主要模块，主要实现0~1500 V的低纹波可调高压输出、 $0\sim 10^6\text{ s}^{-1}$ 的计数率测量以及10路隔离的0~10 V或4~20 mA模拟量测量，通过数据处理器中的定制化软件实现深度次临界刻棒计算。其中多路电压信号采集和高速数字化采集模块可以通过较为成熟的电子学电路实现，低压电源采用线性电源方案可以实现良好的供电电源品质。本文重点研究宽频带低噪声前级放大器、直流高压电源的设计和测试。

2 深度次临界刻棒电子学的关键模块设计

2.1 宽频带低噪声前级放大器

宽频带低噪声前级放大器需要处理的信号为脉冲型中子探测器信号，该信号具有幅度微弱、

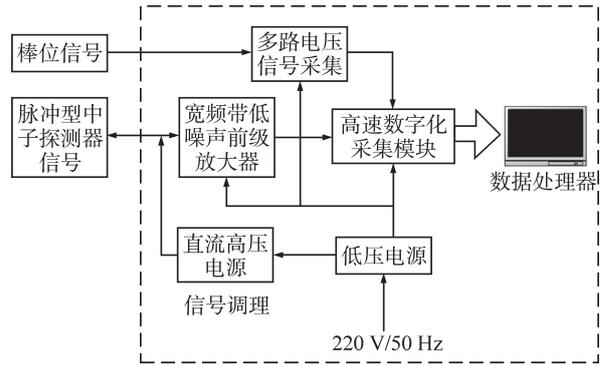


图1 深度次临界刻棒电子学总体架构
Fig. 1 Overall Architecture of Deep Subcritical Rod Worth Measurement Electronics

宽频带、需经约200 m长电缆传输的特点。为有效测量这种微弱脉冲信号，本文设计了如图2所示的宽频带低噪声前级放大器功能原理图。首先，为了匹配长电缆的 $50\ \Omega$ 特性阻抗，避免阻抗不匹配引起的反射噪声问题^[1-2]，该模块的信号处理链路严格保证 $50\ \Omega$ 特性阻抗，低噪声匹配放大的输入阻抗采用串联匹配方式实现，各级电路之间通过 π 型衰减电路在控制增益的基础上保证 $50\ \Omega$ 特性阻抗，在达到信号甄别电路时，通过高输入阻抗形式完全吸收信号进行甄别处理；其次，为了保证信噪比水平，低噪声匹配放大之前，通过选用低噪声电阻电容器件、低噪声芯片以及参数匹配，保证低噪声水平。根据以往工程经验^[3-4]，输入噪声峰峰值相比于探测器信号幅度值应低于10%，一般正比计数管探测器信号幅度按 10^{-3} V 考虑，因此输入噪声峰峰值应保证不超过 10^{-4} V 。此外，由于信号和高压共用一根电缆，为降低高压对放大电路的影响，通过低通滤波电路滤除噪声后再直接耦合到探测器电缆上。

2.2 直流高压电源

直流高压电源为脉冲型中子探测器提供工作电压，为了使探测器信号不被噪声淹没，直流高压电源应具有极低纹波水平。本文设计了如图3

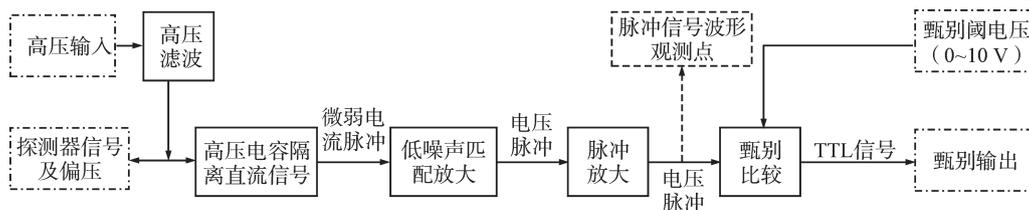


图2 宽频带低噪声前级放大器功能原理图
Fig. 2 Functional Schematic Diagram of Wideband Low Noise Preamplifier

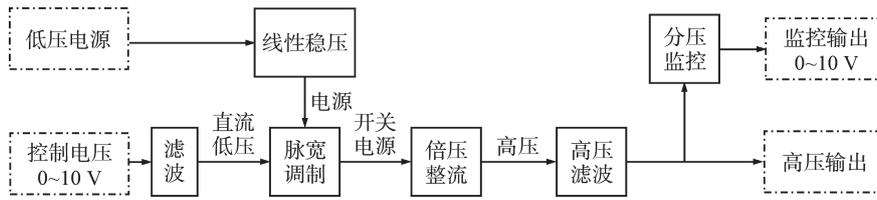


图3 直流高压电源功能原理图
Fig. 3 Functional Schematic Diagram of High Voltage DC Power Supply

所示的直流高压电源功能原理图。首先，对于输入的低压电源和控制电压进行稳压和滤波，保证电源和控制信号的低噪声；然后，通过脉宽调制产生开关电源，再经过倍压整流产生高压；最后，对于该高压，进一步利用 π 型高压滤波进行调理，通过选用低噪声的高压电容、电阻和电感等器件，调试得到合适的滤波参数，根据以往工程经验，高压纹波峰峰值控制在 0.01 V 以内。

3 堆上联配试验和数据分析

3.1 堆上噪声水平和脉冲放大特性测试

通过约 200 m 长电缆与涂硼正比计数管探测器相连，在高压输出值为 0 V 的情况下，调节甄别阈电压值，测得的计数率值见表 1。从表 1 中可以看出，深度次临界刻棒电子学的噪声水平极低，峰值小于 0.03 V，等效到输入端噪声峰值小于 3×10^{-5} V，具有良好的噪声特性。

表 1 深度次临界刻棒电子学噪声情况

Tab. 1 Noise of Deep Subcritical Rod Worth Measurement Electronics

| 参数名 | 参数值 | | |
|---------------------|-------|------|------|
| 甄别阈电压值/V | 0.01 | 0.02 | 0.03 |
| 计数率/s ⁻¹ | 14046 | 30 | 0 |

在宽频带低噪声前级放大器的甄别电路前（即图 2 中的脉冲信号波形观测点），使用数字示波器记录脉冲信号波形。通过设置不同高压值，观察脉冲信号波形的特性，高压为 800 V 时，最大脉冲幅度约为 0.26 V，脉冲宽度约为 200 ns；高压为 900 V 时，最大脉冲幅度约为 0.6 V，脉冲宽度约为 200 ns；高压为 1000 V 时，最大脉冲幅度约为 1.5 V，脉冲宽度约为 200 ns（图 4）。由此可见，深度次临界刻棒电子学在堆上测得的涂硼正比计数管探测器信号宽度基本固定在 200 ns，幅度随高压的提高而逐渐升高，表明深

度次临界刻棒电子学具有较为优异的频率特性，且能有效地测量探测器信号，为达到较高的计数率上限提供了保证。

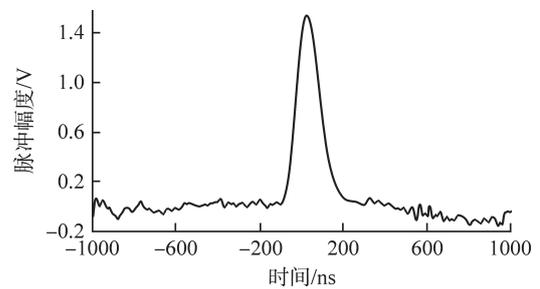


图 4 典型探测器脉冲信号波形图（高压 1000 V）
Fig. 4 Waveform of Typical Detector Pulse Signal (at the High Voltage of 1000 V)

3.2 高压坪特性测试

将甄别阈电压值设置为 0.1 V，消除噪声影响，同时尽可能收集探测器随机信号，然后改变高压输出值，记录测得的计数率值。根据测量结果绘制了探测器的高压坪曲线，如图 5 所示。从图 5 中可以看出，随着高压的变化，能够明显测出涂硼正比计数管的高压坪曲线，根据图中数据，取 850 V 至 950 V 段的数据计算得到坪斜约为 58%/100 V。该值相比涂硼正比计数管的典型坪斜较高，分析原因是测量时中子计数率水平约为 20~30 s⁻¹，随着高压的提升， γ 射线引起的信

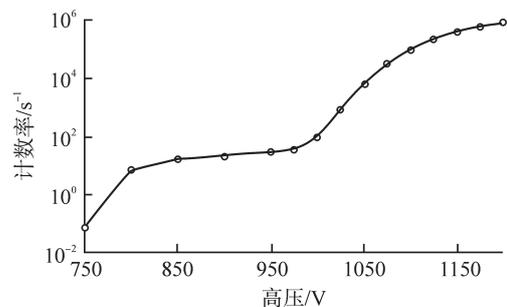


图 5 探测器高压坪曲线
Fig. 5 High Voltage Plateau Curve of Detector

号幅度不断变大，被当做有效信号计入中子计数率之中，因此相比真实中子计数率要高，导致本文测得的探测器高压坪斜较大。

3.3 信号甄别特性测试

将高压值分别设置为 950 V 和 1100 V，调节甄别阈电压值，记录测得的计数率值。根据测量结果绘制了信号甄别特性曲线，如图 6 所示。从图 6 中可以看出，2 种高压情况下探测器信号甄别曲线形状较为一致，且平稳段的计数率值相当，表明脉冲放大性能稳定，能有效获取探测器信号中的中子成分，且在不同高压下，可根据甄别曲线选取合适的甄别阈电压值。

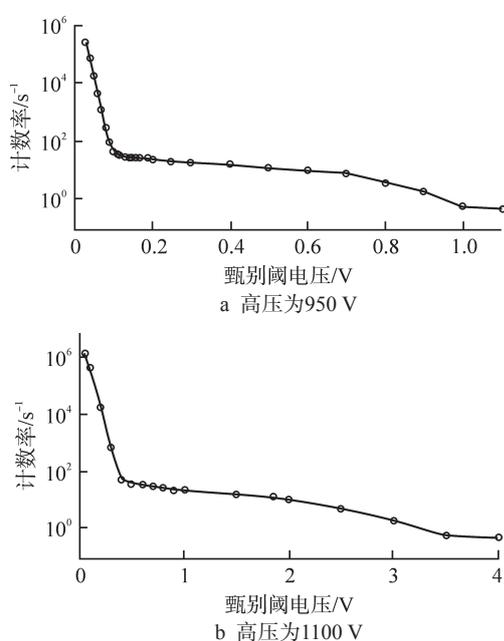


图 6 探测器信号甄别曲线

Fig. 6 Discrimination Curve of Detector Signal

4 结论

本文针对深度次临界刻棒的需求，设计了一种深度次临界刻棒电子学的总体架构，然后对其关键的宽频带低噪声前级放大器和直流高压电源进行了研究和设计。通过堆上试验，对深度次临界刻棒电子学关键部分的噪声水平、脉冲信号波形特性、高压坪特性和信号甄别特性进行了测试，测试结果表明，涂硼正比计数管探测器信号经过约 200 m 长电缆传输后，能够有效测量探测器信号，并且脉冲信号波形宽度稳定，信噪比水平良好；所测得的高压坪特性曲线坪区明显，可以为探测器高压选取提供有效参考；所测得的甄别特性曲线稳定，能有效获取探测器信号中的中子成分。综上，本文所设计的电子学适用于深度次临界刻棒需求，下一步将针对性开发深度次临界刻棒电子学应用软件，融入深度次临界刻棒算法，从而实现更为实用的试验用仪器。

参考文献：

- [1] 田阳, 王义, 李元景, 等. 一种用于放大快速小信号的电流灵敏型前置放大器甄别器的研制[J]. *核电子学与探测技术*, 2009(2): 386-389.
- [2] 王亚平, 蔡勛. ALICE实验中同轴电缆的信号传输特性的研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2006(2): 195-198.
- [3] LESCOP B, NORMAND S, TRAMA J C, et al. A new system for in-core wide range neutron monitoring[C]. Roma, Italy: IEEE Symposium Conference Record Nuclear Science, 2004.
- [4] 包超, 高志宇, 罗庭芳, 等. 基于数值微分的核脉冲信号数字处理方法[J]. *核动力工程*, 2020, 41(1): 150-153.

(责任编辑: 马 蓉)