

# 华龙一号堆芯在线监测系统的设计与实现

张香菊, 蔡利, 王军令, 杨梦怡, 罗世杰, 卢皓亮, 彭思涛, 厉井钢, 王婷

(中广核研究院有限公司, 广东深圳 518026)

**摘要:** 不同于 CPR1000 等二代核反应堆堆型使用的堆底插入式移动中子探测器, 华龙一号等三代核反应堆使用自给能中子探测器 (SPND) 作为反应堆堆芯中子测量硬件, 本文详细阐述了华龙一号使用的基于 SPND 的高精度堆芯监测系统的设计和实现。首先, 提出了一种新型 SPND 信号处理方法, 这种方法不仅解决了传统设计软件无法进行高精度 SPND 电流计算的缺陷, 而且还能对测量的 SPND 进行高精度信号处理, 并基于此建立了一种高精度的堆芯三维功率重构方法。随后, 描述了基于这套理论模型设计出的华龙一号堆芯在线监测系统 SOPHORA, 并详细说明了其不确定度分析方法。不确定度分析结果表明, 该系统的各项关键参数的精度可以满足高精度堆芯监测的需要。最后, 为了确认该系统的性能, 对比分析了华龙一号首堆在启堆过程中的测量与理论预测 SPND 电流的偏差和组件功率分布的偏差。结果显示, 该偏差远小于启动物理试验的规程要求。不确定度分析结果和启堆过程中组件功率偏差分析结果的双重验证表明, SOPHORA 实现了高精度堆芯监测, 其使用的 SPND 信号处理及堆芯三维功率重构方法具有显著的准确性和可靠性。

**关键词:** 华龙一号; SPND; 堆芯在线监测系统; SOPHORA

中图分类号: TL363

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)07-1406-07

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0316

## Design and Implementation of Core Surveillance System for HPR1000 Reactor

ZHANG Xiangju, CAI Li, WANG Junling, YANG Mengyi, LUO Shijie,

LU Haoliang, PENG Sitao, LI Jinggang, WANG Ting

(China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518026, China)

**Abstract:** Difference from the movable neutron detector for CPR1000 reactor can only be used periodically, HPR1000 and other Gen-III reactor innovatively use self-powered neutron detector (SPND) to continuously measure the in-core neutron flux. This paper provided detailed design and implementation of the high-precision core surveillance system for the first HPR1000 reactor. Firstly, a novel SPND signal processing method was proposed, which not only solved the limitation of traditional design software for high-precision SPND current calculation, but also enabled high-precision signal processing of measured SPND. Based on this, a high-precision core 3D power reconstruction method was established. Subsequently, the online monitoring system SOPHORA for the HPR1000 reactor core designed based on this theoretical model was described, and its uncertainty analysis method was explained in detail. The uncertainty analysis results indicate that the accuracy of the key parameters of the system can meet the needs of high-precision core monitoring. Finally, in order to confirm the

performance of the system, a comparative analysis was conducted on the deviation between the measurement and theoretical prediction of SPND current during the start-up process of the HPR1000 reactor, as well as the deviation of component power distribution. The results show that the deviation is much smaller than the regulatory requirements for initiating physical tests. The double validation of the uncertainty analysis results and the component power deviation analysis results during the start-up process indicates that SOPHORA achieves high-precision core monitoring, and its use of SPND signal processing and core 3D power reconstruction methods has significant accuracy and reliability.

**Key words:** HPR1000; SPND; core surveillance system; SOPHORA

CPR1000 等二代核反应堆堆型微型裂变室等中子探测器堆芯中子测量是使用驱动装置将中子探测器从压力容器底部插入指定的通道进行堆芯测量, 在导向管内部逐点从堆芯底部移动到堆芯顶部, 进行堆芯中子注量率测量。二代堆的中子测量系统在压力容器底部开孔, 导致压力容器边界不完整, 破坏了堆芯的安全屏障, 降低了核电厂的固有安全。

为了保持压力容器边界完整, 提升核电厂的固有安全性, VVER<sup>[1-2]</sup>、AP1000<sup>[3-5]</sup>、EPR<sup>[6-8]</sup>、华龙一号<sup>[9]</sup>、CAP1400<sup>[10-11]</sup> 等三代核反应堆堆型及国外其他核电厂<sup>[12-14]</sup> 的堆芯中子测量系统采用的是从压力容器顶部插入的自给能中子探测器 (SPND)。SPND 结构简单, 从内至外分别为中央发射体、绝缘体和收集体, 共 3 部分, 其中中央发射体为 SPND 的核心部件, 其材料和尺寸基本上决定了探测器的物理特征。常用 SPND 发射体材料有  $^{103}\text{Rh}$ 、 $^{51}\text{Vh}$ 、 $^{194}\text{Pt}$ 、 $^{60}\text{Co}$  等。华龙一号堆型上使用的  $^{103}\text{Rh}$  SPND 除具有 SPND 的一般优点外,  $^{103}\text{Rh}$  还具有大的热中子吸收截面, 是仅次于铀和钚的可燃毒物。此外, 在众多类型的 SPND 中,  $^{103}\text{Rh}$  SPND 具有较大的电流信号, 因此尤其适用于大型热中子反应堆的堆芯中子测量和监测系统。

为了在华龙首堆工程项目上实现高精度的堆芯监测, 本文基于  $^{103}\text{Rh}$  SPND 的物理特性, 通过蒙特卡罗数值模拟的方法, 建立一套新型的 SPND 信号处理方法, 这些参数可弥补传统核设计软件中无法进行 SPND 数值模拟的问题, 也可以对测量的 SPND 进行高精度的数据处理, 并基于此建立一套适应于华龙首堆的堆芯三维功率重构方法。随后基于这套新型方法设计华龙一号堆芯在线监测系统 SOPHORA, 并对其进行不确定性分

析。最后使用华龙首堆数据进行验证和确认。

## 1 华龙一号堆芯在线监测系统的理论模型

### 1.1 $^{103}\text{Rh}$ SPND 的物理特性

$^{103}\text{Rh}$  SPND 对堆芯中子注量率和功率分布的测量是通过信号电流来反映的。中子与 Rh 发射体  $^{103}\text{Rh}$  发生中子俘获反应形成  $^{104}\text{Rh}$ , 该同位素经过  $\beta$  衰变放出  $\beta$  电子, 该部分电子能穿过绝缘体达到收集体, 形成电流信号。从  $^{103}\text{Rh}$  到  $^{104}\text{Rh}$  有两种形成路径, 其中有 7.3% 的  $^{103}\text{Rh}$  形成激发态的  $^{104}\text{Rh}^m$ , 再通过  $\gamma$  衰变达到基态  $^{104}\text{Rh}$ ; 另外 92.7% 的  $^{103}\text{Rh}$  直接形成基态的  $^{104}\text{Rh}$ 。其中, 前一部分经由激发态转为基态需要约 4.4 min 的半衰期, 而后一部分直接达到基态的  $^{104}\text{Rh}$ , 然后经过 42 s 的半衰期, 放出  $\beta$  电子并形成稳态的  $^{104}\text{Pd}$ 。由于这两部分信号均经过一长一短的半衰期才产生  $\beta$  电子, 最终形成电流信号, 故而将俘获反应产生的信号称为中子缓发信号, 其反应过程标记为  $(n, \beta)$ 。

中子与 Rh 发射体  $^{103}\text{Rh}$  反应形成激发态的  $^{104}\text{Rh}^m$  时会生成高能  $\gamma$  光子, 这些光子通过光电效应、康普顿散射和电子对形成过程等将能量传递给电子, 使其具备穿越绝缘体到达收集体的能量, 从而形成电流信号。此反应是瞬时发生的, 将其标记为  $(n, \gamma, \beta)$ 。

以上 Rh 核素反应过程中核素数量的变化如下:

$$\begin{cases} \frac{dN_{\text{Rh-104m}}(t)}{dt} = \sigma_{\text{Rh-104m}} N_{\text{Rh-103}}(t) \Phi(t) - \lambda_{\text{Rh-104m}} N_{\text{Rh-104m}}(t) \\ \frac{dN_{\text{Rh-104}}(t)}{dt} = \sigma_{\text{Rh-104}} N_{\text{Rh-103}}(t) \Phi(t) + \lambda_{\text{104m}} N_{\text{Rh-104m}}(t) - \lambda_{\text{Rh-104}} N_{\text{Rh-104}}(t) \\ N_{\text{Pd-104}}(t) / t = \lambda_{\text{Rh-104}} N_{\text{Rh-104}}(t) \end{cases} \quad (1)$$

SPND 探测到的衰变过程中产生的电子个数变化如下:

$$de(t)/dt = (\sigma_{Rh-103} + \sigma_{Rh-103})N_{Rh-103}(t)\Phi(t) + \lambda_{104m}N_{Rh-103}(t) + \lambda_{Rh-103}N_{Rh-103}(t) \quad (2)$$

其中:  $N_{Rh-104m}(t)$  为  $t$  时刻  $^{104}Rh^m$  核素个数;  $N_{Rh-103}(t)$  为  $t$  时刻  $^{103}Rh$  核素个数;  $N_{Pd-104}(t)$  为  $t$  时刻  $^{104}Pd$  核素个数;  $e(t)$  为  $t$  时刻所产生的电子个数;  $\sigma_{Rh-104m}$  为  $^{103}Rh$  转换为  $^{104}Rh^m$  的吸收截面;  $\sigma_{Rh-104}$  为  $^{103}Rh$  转换为  $^{104}Rh$  的吸收截面;  $\lambda_{Rh-104m}$  为  $^{104}Rh^m$  的衰变常量;  $\lambda_{Rh-104}$  为  $^{104}Rh$  的衰变常量;  $\Phi(t)$  为  $t$  时刻的中子通量。

$^{103}Rh$  SPND 的电流有如下特点: 1)  $^{103}Rh$  SPND 的信号电流主要是通过活化核衰变形成的, 存在几十秒至几分钟的半衰期, 因此其信号电流具有延迟特征, 不能实时反馈堆芯中子注量率的变化, 必须进行信号延迟消除处理<sup>[15-21]</sup>; 2) 反应堆内由裂变、衰变核素发出的光子(称之为环境光子)通过同样的光电效应、康普顿散射、电子对效应将能量传递给电子, 使其达到收集体, 产生电流信号, 此反应过程标记为  $(\gamma, \beta)$ ,  $^{103}Rh$  SPND 的信号电流中包含环境光子电流, 这部分信号电流与中子注量率无关, 在使用时有必要进行无效光子电流的去除<sup>[20-24]</sup>; 3) SPND 放入辐照环境后, 核素  $Rh$  因与中子反应而不断减少, 导致相同中子注量率下 SPND 电流变小, 必须进行燃耗效应处理<sup>[25-28]</sup>。

## 1.2 Rh SPND 的数值模拟

根据 SPND 位置的中子谱和光子谱以及 Rh SPND 的几何结构进行蒙特卡罗数值建模, 并进行 SPND 电流模拟计算<sup>[29-32]</sup>, 可得到 SPND 电流成分: SPND 中子缓发电流 ( $I_{n1}$ )、瞬发中子电流 ( $I_{n2}$ )、光子电流 ( $I_t$ )。

为了便于进行 SPND 灵敏度计算, 根据中子谱以及动量守恒定律可得到该位置的名义中子通量 ( $\Phi_{conv}$ ):

$$\Phi_{conv} = \sum_{i=1}^n \Phi_i v_{conv} / v_i \quad (3)$$

其中,  $v_{conv}$  为中子速度, 通常取  $v_{conv} = 2200$  m/s, 对应的中子能量为 25.3 MeV。

SPND 中子电流包括缓发中子电流和瞬发中子电流, 则 SPND 的中子灵敏度 ( $S_{conv}$ ) 为:

$$S_{conv} = I_n / \Phi = (I_{n1} + I_{n2}) / \Phi \quad (4)$$

同时也可模拟得到光子电流  $I_t$  和中子电流  $I_n$  的系数:

$$r = I_t / I_n \quad (5)$$

另外通过不同比例下 Rh 的蒙特卡罗电流模拟计算, 并进行 SPND 电流的累积, 可得到 Rh SPND 电流与累积电荷  $Q$  的关系:

$$b = I_n(Q) / I_n(0) \quad (6)$$

其中:  $I_n(0)$  为初始中子电流;  $I_n(Q)$  为累积电荷为  $Q$  时的中子电流。

## 1.3 基于 SPND 的堆芯三维功率分布重构方法

为利用实时测量的 SPND 电流信号和理论计算的堆芯三维功率分布及 SPND 电流重构出“最佳估算”的堆芯三维功率分布, 假定 SPND 位置处测量/理论的功率分布比与测量/理论的电流比相等, 即:

$$P_m(x, y, z) / P_p(x, y, z) = I_m(x, y, z) / I_p(x, y, z) \quad (7)$$

实际上堆芯只是在部分位置布置 SPND, 因此需要将 SPND 位置测量/理论电流比推衍到全堆所有组件, 进而重构出全堆所有组件的功率分布, 即:

$$P_m(x, y, z) = P_p(x, y, z) \cdot \overline{I_m(x, y, z)} / \overline{I_p(x, y, z)} \quad (8)$$

其中:  $P_m(x, y, z)$  为测量的堆芯三维功率分布;  $P_p(x, y, z)$  为用中广核自主研发的堆芯三维核设计软件 COCO 进行堆芯跟随得到的实时堆芯理论功率分布;  $I_p(x, y, z)$  为预测的 SPND 电流, 基于蒙特卡罗所计算的 SPND 灵敏度参数, 结合华龙一号堆芯三维核设计计算可得到 SPND 位置两群中子通量, 根据式 (3)、(4) 可得到预测的 SPND 中子电流和光子电流 (式 (9)、(10));  $I_m(x, y, z)$  为测量的 SPND 电流, 其中包含带有燃耗效应为  $Q$  的中子电流和光子电流, 结合式 (5)、(6) 对收到的 SPND 电流进行信号处理 (式 (11))。

$$I_n = \Phi_{conv} S_{conv} \quad (9)$$

$$I_t = r I_n \quad (10)$$

$$I_m = (I_t - I_t) / b = I_n / b \quad (11)$$

其中:  $I_t$  为堆芯在线监测系统收到的 SPND 测量电流, 其累积电荷为  $Q$ ;  $b$  为累积电荷  $Q$  时 SPND 的燃耗修正因子;  $I_m$  为堆芯在线监测系统处理后无燃耗效应无光子噪声的 SPND 测量电流。

堆芯在线监测系统采用式 (8), 通过 SPND 位置的测量电流与理论电流的比, 推衍得到全堆组件位置的测量电流与理论电流的比, 进而得到全堆芯三维组件功率分布及堆芯关键参数及其裕量。

## 2 华龙一号堆芯在线监测系统的设计

### 2.1 系统设计

华龙一号反应堆堆芯中布置有 42 个 SPND 测量组件, 每个测量组件沿轴向布置 7 个 SPND 探测器, SPND 电流信号通过网络送到堆芯监测机柜进行 SPND 信号处理以及堆芯三维在线监测计算。堆芯监测机柜不仅采集 SPND 信号, 还通过网络从 DCS 采集堆芯监测计算需要的回路参数信号。堆芯监测机柜的所有计算结果均可在 RIC 工作站上显示。华龙一号堆芯测量系统 SOPHORA 的设计图如图 1 所示。

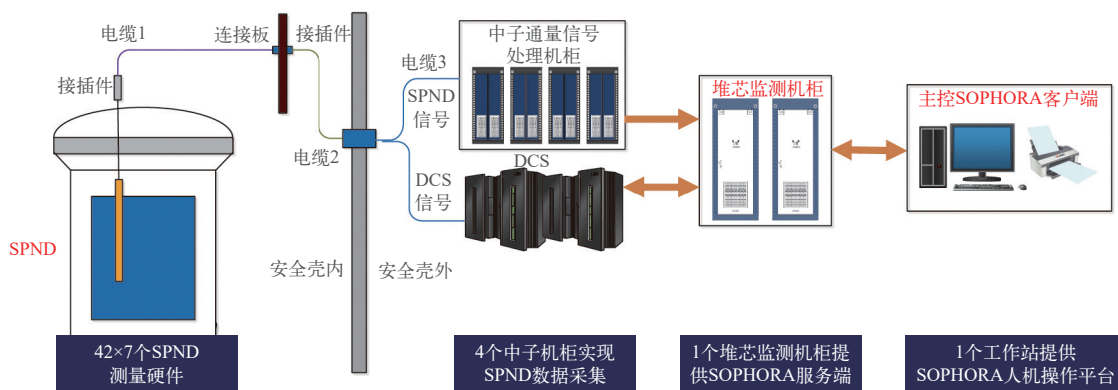


图 1 华龙一号堆芯测量系统 SOPHORA 的系统设计图

Fig. 1 System design diagram of core surveillance system SOPHORA for HPR1000

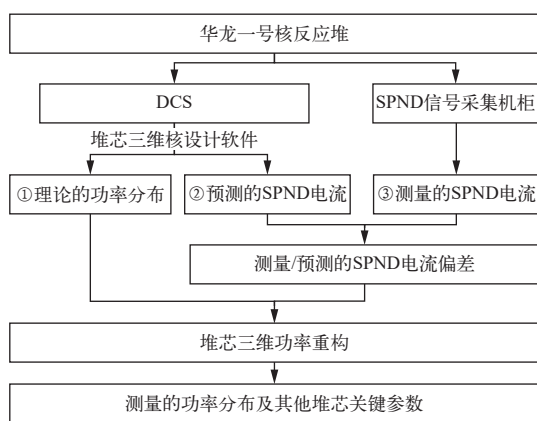


图 2 华龙一号堆芯在线监测系统 SOPHORA 的主要计算流程

Fig. 2 Main calculation procedure of core surveillance system SOPHORA

### 2.2 堆芯监测系统功能设计

华龙一号堆芯在线监测系统 SOPHORA 计算流程如图 2 所示。一方面, SOPHORA 从 DCS 获取功率水平、棒位等堆芯测量信息并耦合堆芯三维核软件进行堆芯跟随, 得到理论堆芯功率分布、中子通量以及预测的 SPND 电流; 另一方面, 获取 SPND 信号采集机柜的 SPND 测量信号, 并进行延时处理、燃耗处理、光子去除等处理, 最后根据测量预测 SPND 电流偏差结合理论功率分布进行堆芯三维功率重构, 得到测量的堆芯功率分布以及其他堆芯关键参数<sup>[33-37]</sup>。

## 3 在线监测系统的不确定度分析

### 3.1 不确定度分析方法

为评估该在线监测系统的不确定度, 首先评估预测 SPND 电流计算偏差, 然后结合 SPND

的运行工况, 根据软件计算流程评估 SOPHORA 计算堆芯关键参数的不确定性, 该不确定度评估方法如图 3 所示。需要说明的是: 1) 该不确定度考虑 SPND 制造误差、安装误差等对 SPND 预测电流的影响, 以及 SPND 采集机柜的信号处理等测量信号的影响; 2) 该不确定度需考虑运行过程中 SPND 可能的硬件失效, 带来堆芯可用 SPND 数量的降低对系统的整体影响。

### 3.2 在线监测系统的不确定度分析结果

根据 SPND 试验堆上数据分析、SPND 生产制造安装评估分析以及华龙一号堆芯设计及运行规程, 评估得到华龙一号堆芯在线监测系统堆芯关键参数的不确定度, 如表 1 所列。

## 4 华龙一号堆芯在线监测系统首堆运行

基于堆芯在线监测系统 SOPHORA 完成了华龙一号首堆各功率水平的功率分布检查, 30% 功率水平下测量与理论预测的 SPND 电流及功率分

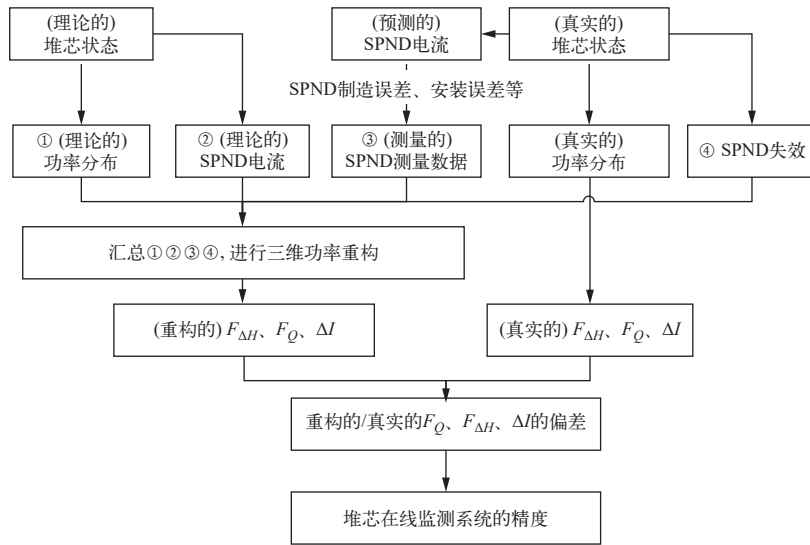


图3 华龙一号堆芯在线监测系统不确定度评估方法

Fig. 3 Uncertainty analysis procedure of core surveillance system SOPHORA

表1 SOPHORA 关键参数的不确定度

Table 1 Uncertainty of SOPHORA key parameter

参数	不确定度/%
热管因子 $F_Q$	4
热点因子 $F_{\Delta H}$	5
轴向功率偏差 $\Delta I$	1.2

布偏差如图4所示。从图4a可见,测量与理论预测的SPND的偏差不大于5%。从图4b可见,测量与理论预测的组件功率分布偏差不大于1%,远低于该功率水平试验规程要求的测量与理论预测的组件功率分布偏差要求。

### 5 总结

华龙一号堆芯在线监测系统 SOPHORA 基于 Rh SPND 的物理特性,通过蒙特卡罗数值模拟的方法对 SPND 电流成分进行高精度模拟,建立了一套新型 SPND 信号处理方法,该方法弥补了传统核设计软件中无法进行 SPND 数值模拟的问题,也能实现测量电流的高精度数据处理,并基于此建立了一套适用于华龙一号首堆的堆芯三维功率重构方法。SOPHORA 不确定度分析结果及其在华龙启堆过程中组件功率偏差分析结果双重验证了 SOPHORA 实现了高精度堆芯监测,其使用的 SPND 信号处理及堆芯三维功率重构方法具有显著的准确性和可靠性。

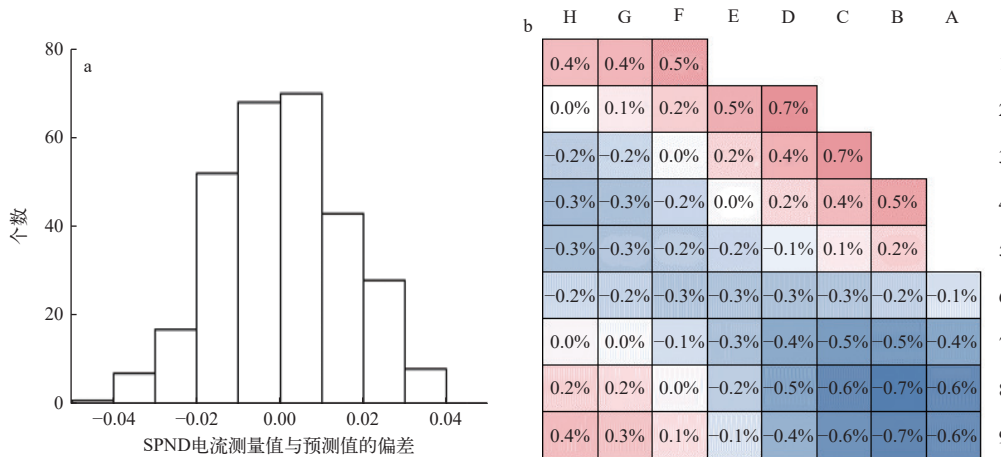


图4 SPND 电流(a)和堆芯功率(b)测量值与理论值的偏差分布

Fig. 4 Measured and predicted SPND current difference (a) and assembly power difference (b)

## 参考文献:

- [1] NIKONOV S P, VELKOV K, PAUTZ A. Prediction of measured SPND readings with the coupled code system athlet-bipr-vver[C]//19th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety. [S. l.]: [s. n.], 2009.
- [2] KURCHENKOV A Y. Burnup of rhodium SPND in VVER-1000: Method for determination of linear energy release by SPND readings[J]. *Physics of Atomic Nuclei*, 2011, 74(14): 1884-1890.
- [3] 邵睿智, 曹良志, 李云召, 等. AP1000 堆芯运行过程中 SPND 响应电流模拟分析[C]//中国核科学技术进展报告(第七卷): 中国核学会 2021 年学术年会论文集第 2 册(核能动力分卷). 北京: 中国原子能出版社, 2021.
- [4] 邵睿智, 曹良志, 李云召, 等. 钒 SPND 中瞬发  $\gamma$  电流对堆芯测量的影响分析[J]. *原子能科学技术*, 2023, 57(8): 1568-1574.  
SHAO Ruizhi, CAO Liangzhi, LI Yunzhao, et al. Impact analysis of vanadium SPND prompt gamma current in PWR-core measurement[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2023, 57(8): 1568-1574(in Chinese).
- [5] 邵睿智, 曹良志, 李云召, 等. 钒自给能探测器响应电流“ $\gamma$ 峰”现象的模拟与分析[J]. *现代应用物理*, 2021, 12(1): 54-58.  
SHAO Ruizhi, CAO Liangzhi, LI Yunzhao, et al. Simulation and analysis of response current “ $\gamma$  peak” phenomenon in vanadium self-powered neutron detector[J]. *Modern Applied Physics*, 2021, 12(1): 54-58(in Chinese).
- [6] 黄美良, 金思奇, 秦戈. AP1000 与 EPR 堆芯中子注量率测量系统的差异性比较和分析[J]. *核电子学与探测技术*, 2012, 32(2): 161-164.  
HUANG Meiliang, JIN Siqi, QIN Ge. Analysis and comparison about In-core neutron flux measurement system of AP1000 and EPR[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2012, 32(2): 161-164(in Chinese).
- [7] 张恒凯, 赵云涛, 刘翱, 等. 钒自给能探测器的热中子灵敏度在线监测[J]. *核技术*, 2020, 43(4): 040003.  
ZHANG Hengkai, ZHAO Yuntao, LIU Xiang, et al. On-line monitoring of the thermal neutron sensitivity of Co-SPND detector[J]. *Nuclear Techniques*, 2020, 43(4): 040003(in Chinese).
- [8] DUWEKE C, THILLOSEN N, ZIETHE J. Neutron flux incore instrumentation of AREVA's EPR™[C]//2009 1st International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications. USA: IEEE, 2009.
- [9] 杨戴博, 李昆, 黎刚, 等. “华龙一号”堆芯中子通量测量系统设计[J]. *核电子学与探测技术*, 2021, 41(1): 146-150.  
YANG Daibo, LI Kun, LI Gang, et al. Design of in-core neutron flux measurement system of HPR1000[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2021, 41(1): 146-150(in Chinese).
- [10] 李树成, 胡铸莹. CAP 1400 核电厂堆芯钒自给能中子探测器设计与验证[J]. *核电子学与探测技术*, 2018, 38(5): 699-702.  
LI Shucheng, HU Zhuxuan. CAP 1400 NPP in-core self-powered neutron detector design and verification[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2018, 38(5): 699-702(in Chinese).
- [11] 毕光文, 汤春桃. 钒自给能探测器响应电流预测方法研究[C]//CORPHY-2016 第十六届反应堆数值计算和粒子输运学术会议暨 2016 年反应堆物理会议. 北京: 中国核学会, 中国物理学会, 2016.
- [12] CURTIS T D. SPND operating experience at oconee nuclear station[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1979, 26(1): 944-948.
- [13] KIM B G, SOHN A M, CHOO K N. Development status of irradiation devices and instrumentation for material and nuclear fuel irradiation tests in HANARO[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2010, 42(2): 203-210.
- [14] TOMAS P O L A. Qualification of in-core measurement signals in frame of core-surveillance system TOPRE at NPP J. Bohunice[C]//Nuclear Energy in Central Europe. [S. l.]: [s. n.], 1995: 414-421.
- [15] TAMBOLI P K, DUTTAGUPTA S P, ROY K. A comparative study of Kalman filter and linear matrix inequality based H infinity filter for SPND delay compensation[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 98: 19-25.
- [16] MUTNEJA T, BHATT T U, TIWARI A P, et al. Design of discrete-time Kalman filter based delay compensator for rhodium-103 SPND[C]//2018 Indian Control Conference (ICC). USA: IEEE, 2018.
- [17] MISHRA A K, SHIMJITH S R, BHATT T U, et al. Kalman filter-based dynamic compensator for vanadium self powered neutron detectors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2014, 61(3): 1360-1368.
- [18] 彭星杰, 张知竹, 李庆, 等. 基于鲁棒滤波理论的钒自给能探测器动态补偿算法研究[J]. *核动力工程*, 2016, 37(1): 77-81.  
PENG Xingjie, ZHANG Zhizhu, LI Qing, et al. Research on the dynamic compensation algorithm of vanadium self-powered neutron detector based on robust filtering theory[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2016, 37(1): 77-81(in Chinese).
- [19] 李东仓, 徐小恒, 张猛超, 等. 钒自给能探测器延迟信号

- 数字处理算法与实验研究[J]. *原子能科学技术*, 2018, 52(11): 2052-2060.
- LI Dongcang, XU Xiaoheng, ZHANG Mengchao, et al. Research on digital processing algorithm and experiment of delay signal of vanadium self powered neutron detector[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(11): 2052-2060(in Chinese).
- [20] ZHANG Q, HU Z, DENG B, et al. A simple iterative method for compensating the response delay of a self-powered neutron detector[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2017, 186(3): 293-302.
- [21] 李昆, 韩文兴, 尹秋升, 等. 低功率条件下铈自给能探测器信号噪声消除[J]. *核动力工程*, 2018, 39(1): 169-172.
- LI Kun, HAN Wenxing, YIN Qiusheng, et al. Elimination of Rh SPND detector signal noise in low-level power[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2018, 39(1): 169-172 (in Chinese).
- [22] MAJUMDER B, DAS S, PAN I, et al. Denoising SPND signal by discrete wavelet analysis for efficient power feedback in regulating system of PHWRs under noisy environment[C]//2011 2nd National Conference on Emerging Trends and Applications in Computer Science. USA: IEEE, 2011.
- [23] LACAILLE R, JEGAT A. Signal anticipation of rhodium self powered neutron detectors for on-line applications[M]//Reactor Dosimetry. USA: ASTM, 1994.
- [24] CHO G, LEE W, YOON J H. Study on the sensitivity of self-powered neutron detectors (SPND) and its change due to burn-up[C]//Proceedings of the 2nd Japan-Korea Seminar on Advanced Reactor Research. [S. l. ]: [s. n. ], 1996.
- [25] LEE W, CHO Y, KIM K, et al. A study on the sensitivity of self-power neutron detectors (SPNDS)[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2001, 48(4): 1587-1591.
- [26] VERMEEREN L, van NIEUWENHOVE R. Theoretical study of radiation induced electromotive force effects on mineral insulated cables[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74: 4667-4674.
- [27] CHA K H, PARK Y W. Depletion sensitivity evaluation of rhodium and vanadium self-powered neutron detector (SPND) using Monte Carlo method[J]. *Journal of Sensor Science and Technology*, 2016, 25(4): 264-270.
- [28] 鄢小兰, 张庆贤, 辜峙铎, 等. Geant4 模拟计算自给能探测器燃耗[J]. *核电子学与探测技术*, 2021, 41(2): 258-263.
- YAN Xiaolan, ZHANG Qingxian, GU Zhixing, et al. Geant4 simulates the burnup of the self-powered neutron detector[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2021, 41(2): 258-263(in Chinese).
- [29] VERMEEREN L. Neutron and gamma sensitivities of self-powered detectors: Monte Carlo modelling[C]//2015 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA). USA: IEEE, 2015.
- [30] 吴雄, 蔡利, 蒋洁琼, 等. MC 方法计算自给能铈中子探测器灵敏度[J]. *核电子学与探测技术*, 2022, 42(4): 634-639.
- WU Xiong, CAI Li, JIANG Jieqiong, et al. Sensitivity calculation of rhodium self powered neutron detector by MC method[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2022, 42(4): 634-639(in Chinese).
- [31] WU X, CAI L, ZHANG X, et al. Study of neutron sensitivity for vanadium self-powered neutron detector in nuclear reactors[J]. *AIP Advances*, 2023, 13(12): 125015.
- [32] 吴雄, 蔡利, 张香菊, 等. 核反应堆瞬发型自给能中子探测器初始灵敏度研究[J]. *科技导报*, 2022, 40(24): 64-71.
- WU Xiong, CAI Li, ZHANG Xiangju, et al. Study on the initial sensitivity of prompt response self-powered neutron detector in Nuclear Reactor[J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(24): 64-71(in Chinese).
- [33] 李文淮, 莫锬, 卢皓亮, 等. 堆芯功率分布重构方法分析[J]. *原子能科学技术*, 2013, 47(增刊): 280-282.
- LI Wenhui, MO Kun, LU Haoliang, et al. Analysis of reconstruction method of core power distribution[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, 47(Suppl.): 280-282(in Chinese).
- [34] LU Haoliang, MO Kun, LI Wenhui, et al. Development and preliminary verification of the 3d core neutronic code: COCO[C]//International Conference on the Physics of Reactors. USA: [s. n. ], 2012.
- [35] LI Wenhui, LU Haoliang, LI Jinggang, et al. Development of a new flux map processing code for movable detector system in PWR[C]//M&C 2013. USA: US Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 2013.
- [36] 张香菊, 李文淮, 党珍, 等. 堆芯三维在线监测系统 SOPHORA 的实现与验证[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29(1): 016005.
- ZHANG Xiangju, LI Wenhui, DANG Zhen, et al. Implementation and preliminary verification of 3D on-line core monitoring system: SOPHORA[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(1): 016005(in Chinese).
- [37] LI W, DING P, DUAN C, et al. Comparison of spatial interpolation approaches for in-core power distribution reconstruction[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 337: 66-73.