

# 堆内自给能中子探测器信号电流 计算方法研究

吴 雄<sup>1,2</sup> 张香菊<sup>3</sup> 罗世杰<sup>3</sup> 蒋洁琼<sup>2</sup>

1(中国科学技术大学 合肥 230026)

2(中国科学院合肥物质科学研究院 核能安全技术研究所 合肥 230031)

3(中广核研究院有限公司 深圳 518031)

**摘要** 自给能中子探测器(Self-Powered Neutron Detectors, SPNDs)是核反应堆监测和保护系统的核心设备,其测量到的电流直接反映堆芯功率的大小和分布。探测器绝缘体是影响信号电流计算精度的主要因素,在 SPND 的研发设计中占有重要地位。为进一步提升 SPND 信号电流计算方法的精度,本文根据 SPND 电流产生机理以及绝缘体中固有的空间电场效应,提出了三种不同的中子、光子电流计算方法,并进行了详细的对比验证。结果表明:三种方法计算结果的差异小于 1%,显示了相当的精度。此外,以反应堆工程中应用广泛的铯 SPND 为例,计算结果表明其信号电流主要由中子产生,光子引起的电流一般不超过 5%。本文所提出的电流计算方法在反应堆上经过了大量的实验验证,理论和实验结果的差异均小于 3%,证明了其有效性和精度。该方法已经应用于中国第三代先进大型压水反应堆——“华龙一号”,并具有通用性。它可用于不同类型自给能探测器的电流分析,也可为其他反应堆(如第四代快中子堆和后续的聚变堆)的堆芯监测系统提供有益的参考。

**关键词** 自给能中子探测器, 绝缘体, 空间电场效应, 信号电流, 蒙特卡罗方法

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030405

## Calculation of the signal current of self-powered neutron detectors in a nuclear reactor

WU Xiong<sup>1,2</sup> ZHANG Xiangju<sup>3</sup> LUO Shijie<sup>3</sup> JIANG Jieqiong<sup>2</sup>

1(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

2(Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

3(China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518031, China)

**Abstract** [Background] Self-powered neutron detectors (SPNDs) are critical devices in the monitoring and protection systems of nuclear reactors, and their signal current directly reflects the value and distribution of the core power. Insulators play an essential role in the design of SPNDs and are the main factor affecting the calculation accuracy of the signal current. [Purpose] This study aims to improve the accuracy of the calculation method of the SPND signal current, ensuring that the measured currents accurately reflect the reactor conditions and meet the highest industrial standards. [Methods] Firstly, the signal generation mechanism of the SPND was thoroughly discussed, and three independent calculation methods of the current based on the inherent physical characteristics of the space electric field of an insulator were proposed. Then, high-fidelity simulations of the SPND were performed using the Monte Carlo code, and the three methods were validated based on the simulation results. In addition to the

第一作者: 吴雄, 男, 1990 年出生, 2018 年毕业于核工业西南物理研究院, 现为博士研究生, 主要从事核反应堆设计以及堆芯监测研究

通信作者: 蒋洁琼, E-mail: jieqiong.jiang@fds.org.cn

收稿日期: 2023-07-19, 修回日期: 2023-09-11

First author: WU Xiong, male, born in 1990, graduated from Southwestern Institute of Physics in 2018, doctoral student, focusing on nuclear reactor design and in-core monitoring

Corresponding author: JIANG Jieqiong, E-mail: jieqiong.jiang@fds.org.cn

Received date: 2023-07-19, revised date: 2023-09-11

current caused by the neutrons, the current caused by the photons inside the reactor was quantitatively analyzed. Meanwhile, extensive radiation experiments on the various reactors have been performed to verify these three current calculation methods. **[Results]** The difference between the results obtained by using the three methods is less than 1%, demonstrating a considerable accuracy. In addition, the current of the rhodium SPND is primarily owing to the neutrons, whereas the photon-induced current is generally less than 5%. Experimental verification results on the several operating reactors show that the difference between the theoretical and experimental results is less than 3%, which also proves its effectiveness and accuracy. **[Conclusions]** This method has been applied to the large Chinese Gen-III advanced pressurized water reactor (HPR1000) and is universal. It can be used for the signal analysis of different types of SPNDs, as well as for providing valuable references for core monitoring systems in other reactors, such as the Gen-IV fast reactor as well as future fusion reactors.

**Key words** Self-powered neutron detector, Insulator, Spatial electric field, Signal current, Monte Carlo method

为了核反应堆的安全控制和堆芯中子注量率的监测,自给能中子探测器(Self-Powered Neutron Detectors, SPNDs)被广泛应用于核反应堆尤其是大型反应堆的监测与保护系统。先进反应堆的设计不仅需要满足最高的安全标准,同时还要考虑核电厂的效益,增加发电量和降低发电成本,以提高经济性。随着反应堆的输出功率不断提升,堆芯活性区尺寸也逐渐增加。另一方面,为了减小堆芯中子泄漏和展平功率分布,通常采用围板和水的重反射层结构,其对中子和 $\gamma$ 射线存在较强的屏蔽作用<sup>[1]</sup>。堆芯信息传递至堆外探测器时信号会发生失真和畸变,导致其难以精确测量堆芯中子注量率的大小和分布。SPND是一种堆内固定式中子探测器,能够承受反应堆内严苛、恶劣的环境。其安装在堆芯燃料组件的中央仪表管孔道内,直接对堆芯中子注量率和功率进行监测。然后通过监测系统将重要的反应堆运行参数(如 $F_q$ 、 $F_{\text{in}}$ 、 $\Delta I$ 等)信息实时传递给核电操作员,并对堆芯状态做出预测,确保反应堆的安全、稳定运行。

SPND无需外界提供能量,其通过自身的中子灵敏材料与堆内中子发生反应产生电流信号,该信号大小正比于入射中子注量率<sup>[2]</sup>。工程上最为常见的SPND中子灵敏材料有铍、钷和钴等<sup>[3]</sup>。根据其在中子反应的物理特征可分为两种类型:衰变型探测器和瞬发型探测器<sup>[4]</sup>。通过对SPND做刻度(或者标定),即可由测量到的电流大小推导堆芯中子注量率的大小和分布。因此,保证电流计算方法的可靠性和精度至关重要,自从Warren<sup>[5]</sup>在1972年首次提出衰变型SPND的电流计算模型以来,已有大量的研究致力于提升信号电流的计算精度。Jaschik<sup>[6]</sup>提出了瞬发型SPND的电流计算模型,之后Warren进一步分析了中子和 $\gamma$ 射线对信号电流的影响,并拓展到其他的SPND材料<sup>[7-9]</sup>。这些基于确定论的解析方法和实验结果吻合较好,并证明了一定的精度,然

而,该方法在理论上相当复杂且含有大量的简化和近似。我国早期关于SPND的相关研究中,也基本上都是采用确定论的分析方法<sup>[10-14]</sup>。Goldstein<sup>[15]</sup>首次使用蒙特卡罗方法分析了SPND的电流和灵敏度,但由于当时计算条件的限制,其精度并不如确定论方法。当前随着计算机性能和并行计算技术的快速发展,蒙特卡罗方法逐渐成为了SPND研发设计的主流方法,据公开文献,Vermeeren和Lee等都使用蒙特卡罗程序对SPND做过大量分析<sup>[16-17]</sup>,最近几年,Cui以及Sang等也使用蒙特卡罗方法对自给能中子探测器做了研究并实现了比“沃伦模型”更高的计算精度<sup>[18-19]</sup>。

我国自主研发的第三代1 000 MW级的大型先进压水堆——“华龙一号”(HPR1000),首次采用铍SPND替代传统的可移动式探测器以实现堆芯监测。为评估SPND的各项指标和长期辐照性能,中广核研究院在国内外数个反应堆上做了大量的中子、光子辐照实验,确保SPND满足最高安全标准和入堆条件。从理论和实验结果来看,SPND绝缘体性能是影响其信号电流和实际寿命的关键因素之一。之前的工作已经对SPND做了一定的研究<sup>[20-21]</sup>,本文旨在进一步对它的电流计算方法展开深入地分析与论证,使理论模型和验证方法更加详实、具体。本文的计算方法已经实现了反应堆在线监测系统的工业应用,将为后续的“华龙一号”核电机组提供有益的技术支持。同时,该方法的通用性也使得其对不同堆型(如小型反应堆、快中子反应堆和聚变反应堆)的堆芯监测也有着参考和借鉴作用。

## 1 SPND几何结构

以我国新研发的大型先进商业压水堆——“华龙一号”为例,其堆芯由177个先进核燃料组件构成,反应堆核功率为3 180 MW,堆芯活性段高度(冷态)为365.8 cm,等效直径达到322.8 cm,堆芯高径

比为1.13<sup>[1]</sup>。在“华龙一号”堆芯对称位置的42个燃料组件内安装了集成的探测器组件(In-Core Integrated Assembly, ICIA)且连接至4个独立机柜。每个ICIA包含有7个铑SPND,沿堆芯活性区等高布置,每个铑SPND长度为25 cm,以实现对整个堆芯的三维、实时、在线监测。铑SPND由发射体、绝缘体、收集体三部分组成,构成如图1所示的同轴圆柱型几何结构<sup>[4]</sup>。发射体位于最内层,由中子灵敏材料构成,是探测器的最核心部分,决定了探测器的物理特征和信号来源。根据不同反应堆的中子能谱特征,选择合适的发射体材料以兼顾电流大小和使用寿命是至关重要的。SPND外层为收集体用于接收电流信号,材料一般为不锈钢和因科镍。发射体和收集体中间填充无机绝缘材料,如从THERMOCOAX公司购买的SPND采用Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,国产

自主生产的探测器则使用了SiO<sub>2</sub>。表1给出了工业应用中典型铑SPND的规格参数。其中,SPND的绝缘体和收集体一般均选取中子吸收截面小、散射截面大的材料,以减少对发射体信号的干扰,降低噪声电流。

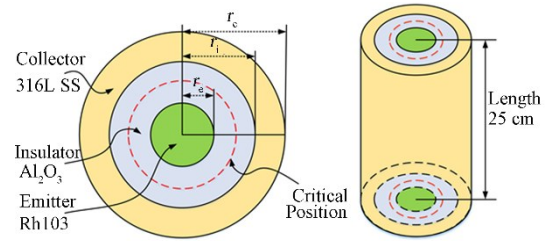


图1 SPND几何结构和材料示意图  
Fig.1 Diagram of geometry and materials of a typical SPND

表1 铑SPND的几何和材料信息  
Table 1 Geometric and material information of rhodium SPND in industrial applications

探测器组成 Components	材料 Material	半径 Radius / cm	质量密度 Mass density / g·cm <sup>-3</sup>	原子核密度 Atomic density / 10 <sup>22</sup> cm <sup>-3</sup>
发射体 Emitter	铑 <sup>103</sup> Rh	0.025	12.40	7.256 444
绝缘体 Insulator	氧化铝 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.055	2.90	8.563 960
收集体 Collector	316不锈钢 316L SS	0.070	7.96	8.637 951

在“华龙一号”所使用的铑SPND入堆之前,同时对进口和国产探测器在秦山CANDU重水反应堆内做了长期的辐照实验。结果表明,进口探测器的计算得到的理论燃烧曲线和实验结果吻合非常好,而使用SiO<sub>2</sub>作为绝缘体材料的国产探测器的理论和实测值则存在一定偏差,在燃烧末期的偏差约为10%,其关键即在于需要进一步提升电流计算方法的精度。

## 2 绝缘体的空间电场理论

SPND中子灵敏材料(发射体)与堆内中子发生俘获反应并通过后续反应释放出高能电子,这些电子并非具有单一能量。特别地,对于铑和钷这类衰变型探测器,其电流主要源于发射体活化核(如<sup>104</sup>Rh、<sup>52</sup>V)的β衰变。β衰变的典型特征是电子具有连续能谱,即电子能量从0到某一最大值E<sub>max</sub>之间呈现概率分布<sup>[5]</sup>。

显然,并非所有的电子都有足够的能量到达收集体并最终成为有效电流信号。此外,即使对于某些能量较高的电子,也会在不断碰撞和散射过程中

沿着它们的运动路径逐渐损失能量。最终,这些电子将沉积在SPND的各个区域,其中沉积在发射体和收集体中的电子容易处理。因为沉积在发射体中的电子显然不会对信号电流做贡献,而沉积在收集体中的电子则都将成为有效电流。但是沉积在绝缘体中电子将引起更为复杂的物理过程,这些电子会在绝缘体中形成空间电场<sup>[22]</sup>。关于绝缘体空间电场效应的理论已经被较为完善地建立起来,其可以从基本的泊松方程导出<sup>[18]</sup>:

$$\nabla^2 V(r) = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

式中: $V(r)$ 为绝缘体中的电势分布; $\rho$ 和 $\epsilon$ 分别为绝缘体材料的电荷密度和介电常数; $r$ 为从发射体中心到绝缘体中某点的距离。

对于圆柱形几何结构的SPND,其电势在绝缘体内、外表面处均为零这一边界条件,也即 $V(r_i) = V(r_c) = 0$ 。因此,上述泊松方程可求解为:

$$V(r) = A \left[ -\left(\frac{r}{r_i}\right)^2 + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_c}\right) + k^2 \ln\left(\frac{r_i}{r}\right)}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right] \quad (2)$$

式中： $r_c$ 和 $r_i$ 分别为发射体和绝缘体的外半径； $k$ 和 $A$ 为和探测器相关的参数，可分别表示为 $k = r_o/r_i$ ， $A = \rho r_i^2/4\epsilon_0$ 。

电子在绝缘体中的运动方向由电场决定，由于电场是电势的一阶导数，因此，对方程(2)求导即可得到绝缘体中的电场分布：

$$E(r) = \frac{2A}{r_i} \left[ -\frac{r}{r_i} + \frac{1 - k^2 \ln\left(\frac{r_i}{r}\right)}{2 \ln\left(\frac{1}{k}\right)} \cdot \frac{r}{r_i} \right] \quad (3)$$

根据方程(2)和(3)可描绘出绝缘体中的电势和电场分布曲线。根据该曲线或者对电势分布函数求极值均可看出，在绝缘体中存在某一位置其电场强度为0，即 $E(r_c) = 0$ ，并且在该位置两侧电场强度方向发生改变。该位置称之为SPND的“临界半径”，其值可表示为<sup>[23]</sup>：

$$r_c = r_i \left[ \frac{1 - k^2}{2 \ln(1/k)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

临界半径的物理含义简单且清晰，其意味着从发射体中释放的电子如果能够到达该位置，将最终达到收集体并成为有效电流信号。反之，如果这些电子的能量不足以达到该位置，则将在空间电场的作用下返回发射体，从而不会对总信号电流起作用。

值得注意的是，还有另一个表征电子穿越绝缘体概率的参数，称为“电子漂移概率”。其物理意义与“临界半径”相似，由Goldstein<sup>[15]</sup>首次提出，其表达式如下：

$$f = \ln\left(\frac{2r_i}{r_i + r_c}\right) / \ln\left(\frac{r_i}{r_c}\right) \quad (5)$$

该公式的物理含义是沉积在绝缘体中的电子有 $f$ 的份额将返回发射体，剩余 $(1-f)$ 的份额将能够达到收集体并成为有效电流。根据理论以及实验结果，对于发射体和绝缘体尺寸大致相等的SPND，绝缘体中大约有60%的电子最终可以成为有效电流。

无论是“Warren模型”中的“临界半径”还是Goldstein提出的“电子漂移概率”，均取得了一定的成功并具有相当的精度。但显而易见，这两种方法都存在明显的缺陷，仍有提升的空间。从式(4)和(5)可见，两者都被认为只取决于发射体和绝缘体的尺寸，忽略了具体材料之间的差异。

针对这一不足，Vermeeren<sup>[24]</sup>在同轴线缆的分析中提出了改进方法，将SPND的材料加以考虑。具体而言，其将式(5)更加细致地等效成如下表达式：

$$f = \frac{\ln(r_o)}{\ln(r_o/r_i)} - \frac{1}{\ln(r_o/r_i)} \frac{\int_{r_i}^{r_o} r \ln(r) \rho(r) dr}{\int_{r_i}^{r_o} r \rho(r) dr} \quad (6)$$

显然，该式可以通过离散化的方法等效处理，也即对绝缘体进行分层：

$$f = \frac{\ln(r_o)}{\ln(r_o/r_i)} - \frac{1}{\ln(r_o/r_i)} \frac{\sum_{j=1}^n \bar{r}_j \ln(\bar{r}_j) \rho_j \Delta r_j}{\sum_{j=1}^n \bar{r}_j \rho_j \Delta r_j} \quad (7)$$

式中： $\rho(r)$ 或 $\rho_j$ 为绝缘体每一层的电荷沉积，可通过蒙特卡罗电子输运计算得到。

本文认为，Vermeeren所提出的方案更为合理，而且不同材料之间的差异已经体现在电荷沉积的统计结果上。经过本文分析与评估，使用该方法所得到的“电子漂移概率”与式(5)之间的差异约为5%。另外经验证，将绝缘体等体积划分成20层时的结果已经足够收敛，尽管理论上对绝缘体划分越精细结果越准确，但是意义不大，划分20层和50层之间的差异已经小于0.5%。

### 3 电流计算方法

之前关于SPND的大量文献中对信号电流的计算方法的研究尚不够充分，缺乏详细的论证过程。本文在SPND固有的空间电场基础上并结合其电流产生原理，具体地提出了三种电流计算方法。这些方法由不同的中间参数计算得到，彼此独立且可相互验证，其具体形式如下所示：

$$J_{ec} = J_c^+ - J_c^- \quad (8)$$

$$J_{ec} = J_{ei} - f \times (J_{ei} - J_{ic}) \quad (9)$$

$$J_{ec} = J_{ic} + (1 - f) \times Q_i \quad (10)$$

式中： $J_{ec}$ 即为SPND净电流也即有效电流； $J_c^+$ 和 $J_c^-$ 分别为临界半径的电子流，正、负符号代表穿越该表面的方向； $J_{ei}$ 和 $J_{ic}$ 分别为发射体/绝缘体、绝缘体/收集体交界面的电子流； $Q_i$ 为绝缘体中的电荷沉积，如已对绝缘体进行分层，则取其总的大小。上述物理参数由蒙特卡罗的电子输运计算得到，均为直接统计结果而没有做任何近似与简化。

#### 3.1 中子电流

如前文所述，SPND信号电流主要源于发射体与堆内中子的相互作用。因此，可根据不同的反应特征，选取对应的粒子输运模式，如单粒子输运和中子-光子-电子之间的耦合输运。关于SPND的蒙特卡罗几何建模、材料信息、源粒子定义、输运方法等，

在我们之前的相关工作中已经做了较详细论述<sup>[20-21]</sup>,在此不再过多重复而着重分析信号电流的计算方法。特别地,对于铯SPND而言,其信号电流主要来源于活化产物的 $\beta$ 衰变,但是铯较大的中子吸收截面使得其具有强烈的空间自屏蔽效应<sup>[5,20]</sup>。该效应使得铯SPND的中子吸收主要存在于发射体的表面区域,而内层区域似乎被“屏蔽”。因此,铯SPND的电子发射概率为其位置的函数,需要通过发射体进行分层的方法来处理这一物理效应。

在信号电流计算之前首先对式(8~10)中的临界半径、交界面位置的粒子方向做如下明确定义,其如图2所示。

如图2所示,对于SPND临界半径和交界面位置上的任意一点,当电子运动方向与该位置法线向量的夹角小于 $90^\circ$ 时定义为向外(Outward),反之则定义为向内(Inward)。特别地,为更清晰分析电子在不同角度区间内的数目,在向外和向内方向上再次

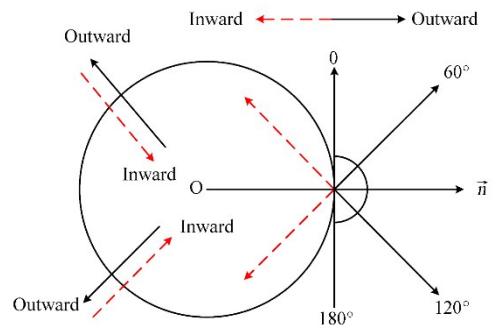


图2 电子穿越SPND的临界半径以及交界面的方向示意图  
Fig.2 Diagram of the directions in which the electrons pass through the critical radius and interface

细分为三个区间,每个区间各 $60^\circ$ 。基于上述定义,再根据蒙特卡罗电子输运的结果,可得到其在发射体/绝缘体、绝缘体/收集体表面的电子流,如表2所示。

表2 发射体/绝缘体、绝缘体/收集体表面不同方向的电子流  
Table 2 Electron flow on the surface of the emitter/insulator and insulator/collector

方向 Direction	角度 Angle / ( $^\circ$ )	内交界面 $J_{ei}$	统计误差 Error	外交界面 $J_{ic}$	统计误差 Error
向内 Inward	0~60	$1.748 \times 10^{-2}$	0.001 1	$3.137 \times 10^{-2}$	0.000 8
	60~120	$3.922 \times 10^{-2}$	0.000 8	$6.987 \times 10^{-2}$	0.000 6
	120~180	$2.616 \times 10^{-2}$	0.000 9	$4.117 \times 10^{-2}$	0.000 8
向外 Outward	0~60	$1.173 \times 10^{-1}$	0.000 4	$7.021 \times 10^{-2}$	0.000 6
	60~120	$2.667 \times 10^{-1}$	0.000 3	$2.377 \times 10^{-1}$	0.000 3
	120~180	$1.465 \times 10^{-1}$	0.000 3	$1.810 \times 10^{-1}$	0.000 3

从统计结果可以看出,无论是在向内还是向外的方向上,中间角度区间的电子数目都要比边缘区间更多,这显然是符合常理的。另外,由于电子从发射体中释放,所以电子主要向外发射。但是仍然有一部分电子在碰撞等过程中被散射回来,因此,向内和向外均有统计计数,也进一步说明并非所有电子都能达到收集体。类似地,对“临界半径”表面的电子流和SPND各个部分的电荷沉积也做了统计,结果分别如表2和表3所示。

表3 临界半径位置的电子流  
Table 3 Electron flow at the critical radius position

方向 Direction	角度 Angle / ( $^\circ$ )	临界位置电子流 $J_c$	统计误差 Error
向内 Inward	0~60	$2.305 \times 10^{-2}$	0.000 9
	60~120	$5.016 \times 10^{-2}$	0.000 7
	120~180	$2.968 \times 10^{-2}$	0.000 9
向外 Outward	0~60	$7.341 \times 10^{-2}$	0.000 5
	60~120	$2.597 \times 10^{-1}$	0.000 3
	120~180	$1.737 \times 10^{-1}$	0.000 3

表4 SPND发射体、绝缘体和收集体的电荷沉积  
Table 4 Charge deposition of the emitter, insulator, and collector

组成部分 Components	电荷沉积 Charge disposition	统计误差 Error
发射体 Emitter	0.552 0	0.000 1
绝缘体 Insulator	0.101 2	0.000 6
收集体 Collector	0.197 2	0.000 3

根据式(8~10)所提出的电流计算方法,结合上述统计结果,可以得到三种不同计算方法下SPND有效电流的大小,其计算结果如表5所示。

表5 三种不同计算方法下SPND的有效电流大小  
Table 5 SPND effective current under three different calculation methods

计算方法 Methods	净电流 Net current	统计误差 Error
式(8) Formula (8)	0.403 99	0.000 4
式(9) Formula (9)	0.404 04	0.000 6
式(10) Formula (10)	0.404 07	0.000 5

由表5可见,使用不同计算方法所得到的有效电流大小极为相近,表明了上述方法的正确性和精度。同时也表明“临界半径”以及“电子漂移概率”的概念是正确可行的。这里值得说明的是,当Warren首次提出SPND“临界半径”的计算公式后<sup>[5]</sup>,在其第二篇论文中对该半径做了适当的修正,并且证明公式(4)计算得到临界半径略微偏大<sup>[7]</sup>。因此,真实的临界半径应当稍微靠近发射体,造成式(8)所得到结果最小,这是符合真实情况的。同样值得注意的是,考虑到蒙特卡罗程序对统计结果归一化的特点,因此该数值在物理上实际上可表示为单个源电子产生有效电流的概率。

### 3.2 光子电流

在核反应堆内部不仅存在中子,还有大量高强度的 $\gamma$ 射线,其可称之为“环境光子”。这些 $\gamma$ 射线同样会和SPND作用从而产生电流,具体而言,通过康普顿效应、光电效应和电子对效应产生电子<sup>[21]</sup>。以“华龙一号”反应堆的首循环、受期初的某燃料组件为例,其中央仪表管孔道SPND位置处的中子注量率 $2.63 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,瞬发光子注量率 $7.46 \times 10^{13} \gamma \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,裂变产物(缓发)光子注量率为 $3.16 \times 10^{13} \gamma \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,总的光子注量率为 $1.06 \times 10^{14} \gamma \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。中子、光子注量率大小处于同一量级,但是光子-电子之间的转换效率较低,仅为1%~2%<sup>[2]</sup>,因此由光子产生电流较小且由光子产生的电流为瞬发信号<sup>[21]</sup>。

光子引起的电流计算方法与§3.1中子电流类似,区别在于源粒子不再是电子而是光子。同时,源粒子的位置也不再位于发射体内部,相应地应设置为SPND收集体外表面且入射方向各向同性以和实际情况保持一致。在电流计算过程中为简洁起见选取发射体、绝缘体交界面的计算方法作为对比。由光子-电子耦合的蒙特卡罗运输计算可以得到界面位置的电子流,如表6所示。这里需要特别注意的是,光子向电子转换时不仅会产生电子,同样会产生正电子,因此需要通过特殊方法将两者加以区分。

使用蒙特卡罗方法不仅可以直接统计各表面的电子流,还可以跟踪粒子的产生和消失过程。我们之前的工作已经评估了康普顿效应、光电效应、电子对效应三种反应的占比<sup>[21]</sup>,其中通过光电效应产生的电子份额最多,占比超过50%,而电子对效应占比最低且不足10%。最终由式(9)可以分别计算得到电子和正电子的电流大小,如表7所示。

从表7中的计算结果看出正电子电流仅比电子

表6 由光子引起的发射体/绝缘体、绝缘体/收集体表面不同方向的电子流

Table 6 Electron flow on the surface of the emitter/insulator and insulator/collector caused by photons

方向 Direction	角度 Angle / (°)	正电子 Positron			
		$J_{ei}$	误差 Error / %	$J_{ic}$	误差 Error / %
向内 Inward	0~60	$1.290 \times 10^{-6}$	0.024 5	$2.481 \times 10^{-6}$	0.017 9
	60~120	$3.095 \times 10^{-6}$	0.016 2	$5.726 \times 10^{-6}$	0.012 4
	120~180	$2.072 \times 10^{-6}$	0.019 9	$3.838 \times 10^{-6}$	0.015 4
向外 Outward	0~60	$8.062 \times 10^{-6}$	0.010 3	$6.411 \times 10^{-6}$	0.012 0
	60~120	$1.824 \times 10^{-5}$	0.006 8	$1.871 \times 10^{-5}$	0.006 8
	120~180	$9.679 \times 10^{-6}$	0.009 1	$1.392 \times 10^{-5}$	0.007 6
方向 Direction	角度 Angle / (°)	电子 Electron			
		$J_{ei}$	误差 Error / %	$J_{ic}$	误差 Error / %
向内 Inward	0~60	$2.338 \times 10^{-5}$	0.005 9	$4.123 \times 10^{-5}$	0.004 5
	60~120	$5.436 \times 10^{-5}$	0.004 0	$9.397 \times 10^{-5}$	0.003 2
	120~180	$3.676 \times 10^{-5}$	0.005 0	$5.637 \times 10^{-5}$	0.004 2
向外 Outward	0~60	$9.547 \times 10^{-5}$	0.003 1	$8.871 \times 10^{-5}$	0.003 3
	60~120	$2.052 \times 10^{-4}$	0.002 1	$2.293 \times 10^{-4}$	0.002 0
	120~180	$1.090 \times 10^{-4}$	0.002 8	$1.518 \times 10^{-4}$	0.002 3

表7 由光子引起的正电子和电子的净电流大小  
Table 7 The net current of positrons and electrons caused by photons

电流组成 Current components	净电流 Net current	统计误差 Error
正电子电流 Positron	$2.844 \times 10^{-5}$	0.014 3
电子电流 Electron	$2.879 \times 10^{-4}$	0.003 7
总电流 Total current	$2.595 \times 10^{-4}$	0.008 6

电流小一个数量级,说明在分析 $\gamma$ 射线对SPND电流信号的影响时,正电子的作用必须加以考虑。同时该结果和表2相比可以明显看出,由光子引起的电流,无论是正电子电流还是电子流,均要显著小于中子引起的电流。这也说明了对铯SPND而言,中子引起的电流是占主要地位的。

此外,需要说明的是,本文所提到的有效电流(或者净电流)并非工程上以安培为量纲的实测电流。由于蒙特卡罗程序对统计结果归一化的特点,因此该数值的实际物理含义为一个源粒子(中子或者光子)产生的有效电子电流。用该数值乘以元电子电荷、中子或者光子注量率、灵敏度和探测器实际入堆长度,即可得到为安培为量纲的实测电流。工程上的铯SPND的实测电流通常为微安量级,足够被精确测量。

### 3.3 理论方法验证

为验证铯自给能中子探测器的性能以及电流的计算方法,在国内外多个反应堆上做了大量的辐照

实验,如斯洛文尼亚的 TRIGA (Training Research Isotop production General Atomics)反应堆、国内的秦山重水堆等。其中,在中国原子能科学研究院 CARR (China Advanced Research Reactor)反应堆上对 4 支进口和国产铑探测器进行了实验测试。CARR 反应堆采用重水作为反射层,其优异的中子慢化性能使得该反应堆在满功率时(约 60 MW)可以提供高达  $8 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  大小的热中子注量率进行辐照<sup>[25]</sup>。该热中子注量率水平已经基本超过“华龙一号”堆内热中子注量率的上限。4 支探测器通过氧化铝支撑件放入辐照孔道内,其简化的实验装置示意图如图 3 所示。该实验中,对 SPND 信号极电流、线缆补偿极电流、温度、绝缘电阻等一系列关键参数做了详细记录。反应堆功率经历 350 kW、5 MW、10 MW 等多个功率台阶,每个功率台阶停留一段时间待探测器电流稳定时记录数据。

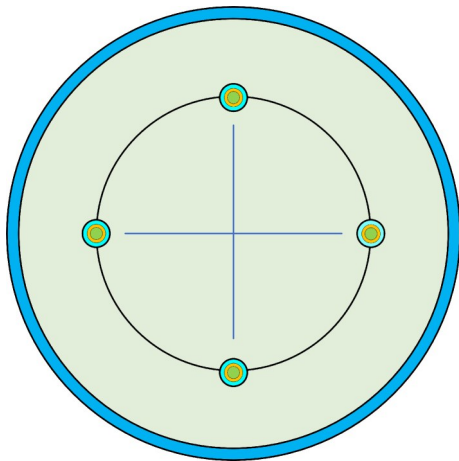


图 3 辐照孔道内简化的实验装置示意图  
Fig.3 Schematic diagram of a simplified experimental set-up in an irradiation channel

4 支铑探测器在不同功率台阶下实测的电流,以及理论计算值和实测值的对比如图 4 所示。为减小 SPND 个体偏差,在理论和实测中对比分析中对 4 支探测器均取平均值,结果表明,理论计算值和实验测量值之间的偏差均小于 3%,证明了该电流计算方法的有效性。

#### 4 结语

本文根据自给能中子探测器的信号产生原理,在深入阐述其空间电场的基础上提出了三种电流计算方法,致力于不断提升 SPND 信号电流的计算精度。通过定量的电流分析与计算,确保 SPND 在整个使用寿命内都能够精确反映堆芯中子注量率的大小和分布,实现反应堆的安全监测。为验证该方法,

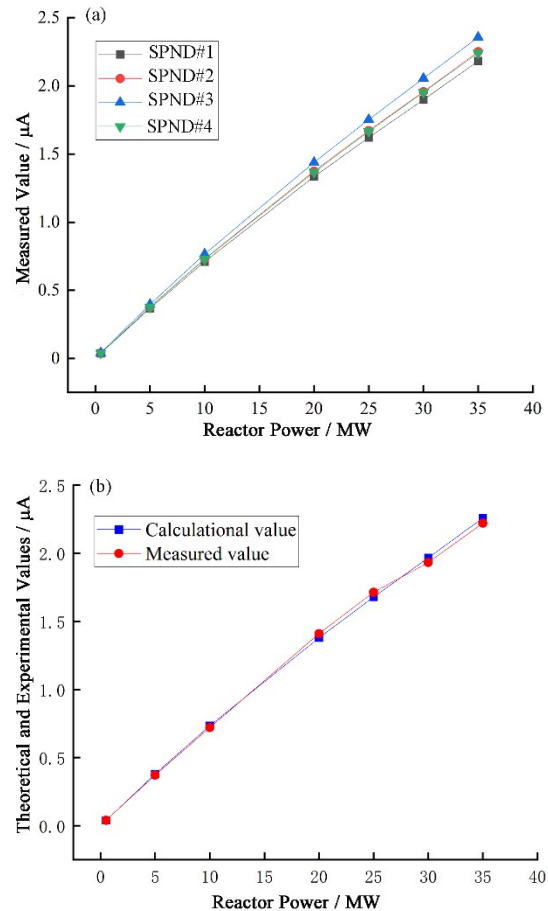


图 4 铑 SPND 在不同功率台阶下的实测电流(a)以及和理论值的对比(b)

Fig.4 Measured current of rhodium SPNDs at various powers (a) and a comparison with the theoretical calculation values (b)

在不同反应堆中做了辐照实验,证明了该方法的有效性和精度,使之能够真正用于反应堆的工业应用。

该电流计算方法的提出是基于圆柱形结构的 SPND 固有的空间电场效应,并非限定某一特殊探测器。因此,本文所提出的三种方法具有通用性,无论对不同类型的 SPND,还是对中子、光子的电流分析都具有普遍适用性。同时该方法被证明对核反应堆内大量存在且具有类似几何结构的信号线缆也适用。

值得说明的是,本文不涉及 SPND 的生产、制造工艺。然而,从工程实际经验来看,SPND 的制造水平:如材料纯度、耐腐蚀、抗辐照性能,特别是绝缘体能否在反应堆内的高温条件下持续保持良好的绝缘性能。正是这些设备制造上的困难往往严重影响探测器的实际使用寿命。尽管在理论上已经做了大量的研究和分析,但是这种核心、关键设备的国产制造水平仍然可以不断优化与提升。

**作者贡献声明** 吴雄负责概念设计,方法确定,数据分析、处理和论文撰写;张香菊提供实验条件,提出设计方法;罗世杰协助理论分析,文献查询;蒋洁琼负责指导并提供支持。

### 参考文献

- 李冬生. 华龙一号“177堆芯”特点分析[J]. 核动力工程, 2022, **43**(3): 28 - 32. DOI: [10.13832/j.jnpe.2022.03.0028](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.03.0028).  
LI Dongsheng. Characteristic analyses of "177 core" of HPR1000[J]. Nuclear Power Engineering, 2022, **43**(3): 28 - 32. DOI: [10.13832/j.jnpe.2022.03.0028](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.03.0028).
- 杨有琏, 王文滋, 周德君, 等. 钴自给能堆芯中子探测器的研制[J]. 核技术, 1983, **6**(4): 10 - 14.  
YANG Youlian, WANG Wenzhi, ZHOU Dejun, *et al.* The development of cobalt self-powered in core neutron flux detectors[J]. Nuclear Techniques, 1983, **6**(4): 10 - 14.
- Banda L A, Nappi B I. Dynamic compensation of rhodium self powered neutron detectors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1976, **23**(1): 311 - 316. DOI: [10.1109/TNS.1976.4328262](https://doi.org/10.1109/TNS.1976.4328262).
- Seifritz W. Measurement of the ratio of the prompt to the delayed neutronic response of a self-powered vanadium detector by cross-correlation techniques[J]. Nuclear Science and Engineering, 1972, **49**(3): 358 - 369. DOI: [10.13182/nse72-a22548](https://doi.org/10.13182/nse72-a22548).
- Warren H D. Calculational model for self-powered neutron detector[J]. Nuclear Science and Engineering, 1972, **48**(3): 331 - 342. DOI: [10.13182/nse72-a22491](https://doi.org/10.13182/nse72-a22491).
- Jaschik W, Seifritz W. Model for calculating prompt-response self-powered neutron detectors[J]. Nuclear Science and Engineering, 1974, **53**(1): 61 - 78. DOI: [10.13182/nse74-a23330](https://doi.org/10.13182/nse74-a23330).
- Warren H D, Shah N H. Neutron and gamma-ray effects on self-powered In-core radiation detectors[J]. Nuclear Science and Engineering, 1974, **54**(4): 395 - 415. DOI: [10.13182/nse74-a23434](https://doi.org/10.13182/nse74-a23434).
- Warren H D, Sulcoski M F. Performance of prompt- and delayed-responding self-powered in-core neutron detectors in a pressurized water reactor[J]. Nuclear Science and Engineering, 1984, **86**(1): 1 - 9. DOI: [10.13182/nse84-a17965](https://doi.org/10.13182/nse84-a17965).
- Warren H D, Rombough C T, Pitts T G, *et al.* Performance of pairs of hafnium and rhodium self-powered in-core detectors in a pressurized water reactor [J]. Nuclear Science and Engineering, 1984, **88**(4): 486 - 494. DOI: [10.13182/nse84-a18367](https://doi.org/10.13182/nse84-a18367).
- 张英振, 万东平. 铑自给能中子探测器的性能研究[J]. 原子能科学技术, 1980, **14**(1): 41 - 49.  
ZHANG Yingzhen, WAN Dongping. Study on the performance of rhodium self-powered neutron detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1980, **14**(1): 41 - 49.
- 王文滋, 孙景海, 杨友琏. 堆芯自给能中子通量探测器[J]. 核技术, 1980, **3**(1): 1 - 14.  
WANG Wenzhi, SUN Jinghai, YANG Youlian. In-core self-energy neutron flux detector[J]. Nuclear Techniques, 1980, **3**(1): 1 - 14.
- 余亚民. 长钒自给能探测器的堆内特性[J]. 核技术, 1980, **3**(1): 15 - 19.  
YU Yaming. In-core characteristics of flexible vanadium self-powered detectors[J]. Nuclear Techniques, 1980, **3**(1): 15 - 19.
- 杨有琏, 王文滋, 孙景海, 等. 柔性钒自给能堆芯中子探测器[J]. 核电子学与探测技术, 1983, **3**(2): 21 - 28.  
YANG Youlian, WANG Wenzhi, SUN Jinghai, *et al.* Flexible vanadium self-powered in-core neutron flux detectors[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1983, **3**(2): 21 - 28.
- 杨有琏. 铑自给能中子探测器的灵敏度[J]. 核电子学与探测技术, 1989, **9**(3): 135 - 141.  
YANG Youlian. Sensitivities of rhodium self-powered neutron detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1989, **9**(3): 135 - 141.
- Goldstein N. A monte-carlo calculation of the neutron sensitivity of self-powered detectors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1973, **20**: 549 - 556. DOI: [10.1109/TNS.1973.4326961](https://doi.org/10.1109/TNS.1973.4326961).
- 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). April 20-24, 2015, Lisbon, Portugal. IEEE, 2016: 1 - 5. DOI: [10.1109/ANIMMA.2015.7465531](https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2015.7465531).
- Lee H, Choi S, Cha K H, *et al.* New calculational model for self-powered neutron detector based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2015, **52**(5): 660 - 669. DOI: [10.1080/00223131.2014.975766](https://doi.org/10.1080/00223131.2014.975766).
- Cui T Y, Yang Y G, Xue H Y, *et al.* A Monte-Carlo simulation method for the study of self-powered neutron detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics



- Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **954**: 161383. DOI: [10.1016/j.nima.2018.10.061](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.061).
- 19 Sang Y D, Deng B J, Zhang Q M, *et al.* Development and verification of a simulation toolkit for Self-Powered Neutron Detector[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, **150**: 107784. DOI: [10.1016/j.anucene.2020.107784](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107784).
- 20 吴雄, 蔡利, 蒋洁琼, 等. MC方法计算自给能铯中子探测器灵敏度[J]. *核电子学与探测技术*, 2022, **42**(4): 634 - 639. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2022.04.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2022.04.014).  
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. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2022.04.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2022.04.014).
- 21 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 initial sensitivity of instantaneous self-powered neutron detector in nuclear reactor[J]. *Science & Technology Review*, 2022, **40**(24): 64 - 71.
- 22 Lee W, Cho G, Kim K, *et al.* A study on the sensitivity of self-powered neutron detectors (SPNDs) [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2001, **48**(4): 1587 - 1591. DOI: [10.1109/23.958400](https://doi.org/10.1109/23.958400).
- 23 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. DOI: [10.1134/s1063778811140055](https://doi.org/10.1134/s1063778811140055).
- 24 Vermeeren L, Van Nieuwenhove R. Theoretical study of radiation induced electromotive force effects on mineral insulated cables[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**(11): 4667 - 4674. DOI: [10.1063/1.1622976](https://doi.org/10.1063/1.1622976).
- 25 Ye C T. China advanced research reactor (CARR): a new reactor to be built in China for neutron scattering studies [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 1997, **241 - 243**: 48 - 49. DOI: [10.1016/S0921-4526\(97\)00509-7](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(97)00509-7).