

# Analysis of the Influence of Passive Start-Up of Nuclear Reactor on Design of Nuclear Reactor Nuclear Instrument System

Xi Fu, Dezhong Wang

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai  
Email: fuxi83447@163.com

Received: Oct. 8<sup>th</sup>, 2018; accepted: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2018; published: Oct. 30<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

At present, the start-up of pressurized water reactor is mainly through the external introduction of neutron sources, such as the loading of primary neutron sources and secondary neutron sources in reactor. The introduction of neutrons increases the neutron background level of the reactor, enabling the neutron probes of ex-core nuclear measurement instrumentation to obtain effective detection counts, thereby ensuring that reactor reactivity is effectively monitored for a safe and controllable start-up. However, the nuclear fuel itself in practical nuclear reactor can release a considerable number of neutrons. How to make full use of the neutrons generated by the spontaneous fission of the core nuclear fuel, through nuclear fuel design, fuel loading methods, detector layout, detector selection, etc. to achieve a safe and controllable start-up of the reactor without introduction of neutron sources, is one of the important research directions for reactor design. Through analyzing and comparing the characteristics and performance of a variety of neutron detectors, and practice experience on the VVER passive start-up design and implement, this paper provides some ex-core nuclear instrumentation design suggestion for CAP1000 type or new type reactor design with low or without neutron source.

## Keywords

Neutron Source, Start-Up without External Neutron Source, Ex-Core Nuclear Measurement Instrumentation, Detector

---

# 反应堆无源启动对堆外核测仪表系统设计影响浅析

付 羲, 王德忠

上海交通大学, 上海

## 摘要

目前压水堆的启动主要是通过外引入中子源的方式, 例如反应堆中装载初级中子源和次级中子源。引入的中子提高了反应堆的中子本底水平, 使得堆外核探测器获得有效的探测计数, 从而确保反应堆的反应性得到有效的监控, 以便安全可控地启动核反应堆。但在实际的核反应堆中, 核燃料本身可释放相当数量的中子, 如何充分利用堆内核燃料自发裂变产生的中子, 通过核燃料设计、燃料装填方式、探测器布置、探测器选型等一种或多种方式的综合, 达到无外引入中子源的前提下仍可安全可控地启动反应堆, 是目前反应堆设计的重要方向之一。本文通过对多种中子探测器的特性分析和性能比较, 基于VVER无源启动实践特点, 对CAP1000堆型或全新堆芯的低中子源或无源启动设计相关的堆外核探测系统提出优化建议。

## 关键词

中子源, 无源启动, 堆外核探测系统, 探测器

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

压水堆核电站是依靠受控核裂变来释放能量, 实时准确的监控核裂变的受控状态是核电站长期安全、稳定运行的基础。反应堆各项运行物理参数中, 堆芯中子通量密度以及变化率是最直接和快速反映堆芯核裂变受控状态的基本物理量。

压水堆核电站反应堆启动时的堆芯中子通量密度实时监测主要依靠堆外核测仪表系统的源量程测量通道。由于该探测器的固有物理特性, 在满足一定的测量准确度条件下, 该探测器必然存在一个测量下限。反应堆启动时反应性缓慢引入, 其中子通量密度也从低到高缓慢增加。为了保证反应堆处于可监督状态, 防止出现反应性快速引入导致的非受控阶跃变化, 常规的堆芯设计中, 均设置有额外的中子源组件来提高本底中子水平, 以保证探测器有足够大的本底计数, 从而避免反应堆启动过程中出现测量盲区, 确保反应堆安全启动。美国核管会(NRC)管理导则 RG 1.68 明确规定[1]: 反应堆启动时源量程中子探测器的中子计数率不得低于 0.5 cps。

当前压水堆的中子源分为初级中子源和次级中子源, 分别针对反应堆的首次启动和后续循环启动。在一定的燃料转载条件下, 中子源源强往往决定了堆外核探测器处的中子通量密度。因此, 提高核测系统的探测效率可有效降低中子源的源强, 甚至取消中子源。降低中子源的需求对反应堆的长期运行会带来显著的益处, 包括:

- 提高核电站的运行经济性。降低中子源源强直至取消中子源, 会减少核电站运行对源的资金投入和放射性防护成本, 例如: 初级中子源中的 Cf-252 (镅)是人工合成的稀有昂贵金属; 次级中子源会增加氙的产量[2]; 中子源的制造、运输、贮存和使用过程中产生额外的放射性, 也会给后期的处理带来

麻烦。

- 提高核电厂运行的灵活性和可靠性。中子源都是利用了放射性核素的衰变或自发裂变来产生中子, 都存在一定的半衰期, 特别是次级中子源, 其最长半衰期的 Sb-124 也仅为 60.9 天。因此降低中子源源强需求为核电厂启动审批、装料和检修等提供了一定的灵活性。国内秦山核电厂已于第四次和第十次换料大修期间, 发生了次级中子源强度不够或无法使用的情况[3]。

本文基于反应堆的无源或低中子源启动的特点, 通过对各种堆外中子探测器及测量系统的特性分析和性能比较以及 VVER 堆型可实施无源启动的实践特点, 对 CAP1000 堆型或全新堆芯的低中子源或无源启动设计相关的堆外核探测系统提出优化建议。

## 2. 堆外核测基本原理

辐射探测的基本原理都是利用被探测对象与物质的相互作用, 一般来说, 利用带电粒子在物质中对物质原子产生的电离和激发效应, 而对于较高能量的带电粒子, 也可利用他们穿过物质时的电磁辐射效应。核辐射探测基本方法是利用各种类型和规格的核辐射探测器探测得到核辐射的信息, 再利用核电子学线路的放大、成型、甄别、变换、分析、记录等手段处理, 从而得出被探测对象的定量测量数据。由于测量方法和原理不同, 输出的核辐射探测信息与被探测对象可能存在以下关系:

- 输出信息与被探测核辐射强度成正比的电信号, 例如: 脉冲计数率、直流电流等;
- 输出信息与被探测核辐射的能量成正比的脉冲幅度;
- 输出信息与被探测核辐射所发生的时间间隔大小成正比。

### 2.1. 堆外核测仪表系统

堆外核测仪表系统用来实时监测核电厂启停、运行以及事故过程中中子的注量率水平, 以便向电厂运行系统和电厂保护系统提供堆芯反应性的状态信息。

由于反应堆在启动到满功率期间, 中子通量密度变化巨大, 堆外核探测器位置处的中子通量密度变化范围也较广。以 CAP1000 堆型为例, 堆外核探测器的测量范围约跨越 11 个数量级。目前无法使用某一种探测器达到如此宽的探测范围。因此, 分别采用了源量程、中间量程和功率量程三个通道分别测量反应堆不同功率水平时堆外中子通量密度[4], 该堆型的各测量通道包括:

- 源量程测量通道, 计数率测量范围为 6 个数量级, 中子通量密度为  $1 \times 10^{-1} \text{ nv} \sim 1 \times 10^5 \text{ nv}$ , 堆功率量程覆盖范围约为  $1 \times 10^{-9} \% \text{ RTP} \sim 1 \times 10^{-3} \% \text{ RTP}$ ;
- 中间量程测量通道, 计数率测量范围为 10 个数量级, 中子通量密度为  $1 \text{ nv} \sim 2 \times 10^{10} \text{ nv}$ , 堆功率量程覆盖范围约为  $10^{-6} \% \text{ RTP} \sim 200 \% \text{ RTP}$ ;
- 功率量程测量通道, 计数率测量范围为 8 个数量级, 中子通量密度为  $5 \times 10^2 \text{ nv} \sim 1.2 \times 10^{10} \text{ nv}$ , 堆功率量程覆盖范围约为  $1 \% \text{ RTP} \sim 160 \% \text{ RTP}$ 。

这些探测器均布置于反应堆压力容器外。在满足一定环境条件的前提下, 尽量靠近压力容器表面, 以保证核测仪表系统获得足够的中子计数。

除中子探测器外, 每个序列的堆外核测仪表系统还包含有前置放大器、信号处理机柜和音响装置等设备。而为了保证反应堆的安全, 核电厂中往往设置多个序列的堆外核测仪表系统并相互独立。

### 2.2. 中子探测器原理

由于中子的不带电特性, 其不受库仑场的阻碍, 所以比较容易接近原子核并与之发生散射或被原子吸收。因此用于中子探测的主要过程是势弹性散射、产生带电粒子的核反应和核裂变。同时, 由于其不带

电的特性无法直接引起物质原子的电离或激发, 只能通过中子与原子核相互作用产生各种带电粒子或  $\gamma$  射线来间接探测。主要探测方法包括: 核反冲法、核反应法、核裂变法 and 活化法。

#### 1) 核反冲法

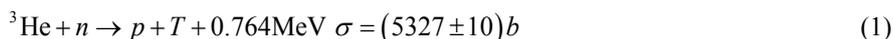
核反冲法是利用了中子与物质原子核(靶核)发生弹性散射的原理。主要用于探测快中子[5]。

#### 2) 核反应法

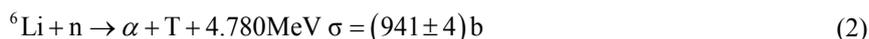
核反应法是利用中子与物质原子核(靶核)形成复合核后发射出其他带电粒子的原理。主要用于探测慢/热中子。

核反应法测量中子的方法, 其应用最广泛的包括  ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$ 、 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$  和  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$  三种核反应。详细的核反应式和反应能如下:

- 靶核为 He-3 材料的核反应式和反应能详见式(2-1)。



- 靶核为 Li-6 材料的核反应式和反应能详见式(2-2)。



- 靶核为 B-10 材料的核反应式和反应能详见式(2-3)和式(2-4)。



以上式(2)和(3)的核反应约占 B-10 与中子核反应的 93.9%。

#### 3) 核裂变法

核裂变法是利用中子与重核发生核反应生成几个中等质量的核裂变碎片, 其裂变碎片是带电粒子的原理。主要用于强  $\gamma$  本底的中子探测。核裂变法的缺点是探测中子的效率较低。

#### 4) 活化法

活化法是利用稳定的原子核(靶核)吸收中子形成放射性原子核(这一过程即为活化), 而后发射放射性粒子的原理。

综上所述, 中子探测的四种探测方法由于其原理的不同, 探测的特性具有明显的差异, 因此, 对于不同种类或不同环境的中子探测应选用合适的探测器。其基本的定性比较详见表 1。

### 3. 堆外源量程中子探测器介绍

堆外核测仪表系统的源量程探测器是用于测量较低中子通量密度的热中子, 中子探测方法主要是核

**Table 1.** Comparison of neutron detection methods

**表 1.** 中子探测方法比较

方法	中子与核反应	靶核材料	反应截面 ( $\times 10^{-28} \text{m}^2$ )	用途
核反冲法	$(n, n')$	H	约 1	快中子能量密度
核反应法	$(n, \alpha), (n, p)$	${}^{10}\text{B}, {}^6\text{Li}, {}^3\text{He}$	约 $10^3$	慢、热中子能量密度
核裂变法	$(n, f)$	${}^{235}\text{U}, {}^{239}\text{Pu}, {}^{233}\text{U}$	约 $1 \sim 5 \times 10^2$	热中子通量密度
活化法	$(n, \gamma)$	In, Au, Dy	热中子约 $1 \times 10^2$ ; 共振中子约 $1 \times 10^3$ ; 快中子约 1;	中子通量密度

反应法, 靶核材料往往采用  $^{10}\text{B}$  或  $^3\text{He}$ , 核反应关系式详见式(2-1)、式(2-3)和(2-4)。压水堆核电厂实际应用中的源量程探测器一般采用气体探测器, 包括涂硼正比计数管、 $\text{BF}_3$  正比计数管和  $^3\text{He}$  正比计数管等。这些计数管的基本结构大体一致, 但材料和填充气体的差异, 使得各有其独特的特性。计数管的基本结构参见图 1。

### 3.1. 涂硼正比计数管

涂硼正比计数管以金属圆筒作为阴极, 圆筒中心处用一根金属丝作为阳极。两极之间利用陶瓷或玻璃进行绝缘。筒内充氩和少量二氧化碳的混合气体, 阴极内表面涂有含  $^{10}\text{B}$  为 90% 以上的硼涂层。

当中子入射到涂硼正比计数管灵敏体积, 阴极表面硼涂层的硼吸收中子发出  $\alpha$  粒子和  $^7\text{Li}$ , 使得气体电离形成离子对。在电场作用下离子对向两极漂移并形成电脉冲( $\alpha$  脉冲)。 $\gamma$  射线也可产生电脉冲, 但幅值相对较小, 因此可采用甄别放大器将其甄别和滤除, 最终仅放大  $\alpha$  脉冲从而得到与中子通量密度成比例的脉冲计数。正比计数管的气体放大倍数为 450 左右。

源量程探测的涂硼正比计数管在我国核电厂中使用最为广泛, 但其最主要的缺点是灵敏度较低。目前我国已基本具备生产与国外知名企业产品性能相似的成熟产品的能力[6]。

### 3.2. $\text{BF}_3$ 正比计数管

$\text{BF}_3$  正比计数管[5]同样以金属圆筒作为阴极, 圆筒中心处用一根金属丝作为阳极, 也称集电极。两极之间利用陶瓷或玻璃进行绝缘。但筒内充三氟化硼气体。

当中子入射到正比计数管中, 硼吸收中子后发出  $\alpha$  粒子, 使得三氟化硼电离。一次电离所产生的电子在计数管内电场作用下加速, 向集电极移动, 其能量可以使其他分子电离, 这些电子全部到达集电极并在负载电阻上形成一个电压脉冲。形成的电压脉冲频率与中子通量密度成线性的关系。当电压增加到一定程度后, 将形成气体放大效应, 电流以倍增系数 A 放大。在电压一定的情况下, A 值为常数, 最高可达  $10^6$  以上。

$\text{BF}_3$  正比计数管是应用较早的中子探测器。具有优异的  $\gamma$  脉冲幅度甄别性能和明显的价格优势, 因此, 仍是源量程测量通道所选择的重要中子探测器之一。其最主要的缺点是氟的存在, 一旦泄漏容易造成环境污染并破坏大气层。随着技术的发展, 国外的优秀制造厂目前所生产的  $\text{BF}_3$  正比计数管的探测效率具有显著提升。

### 3.3. $^3\text{He}$ 正比计数管

$^3\text{He}$  正比计数管的结构与其他正比计数管基本相同, 但筒内充  $^3\text{He}$  气体。

当中子入射到计数管中,  $^3\text{He}$  与中子发生核反应并生成质子和氦核, 其与同时作为工作气体的氦气

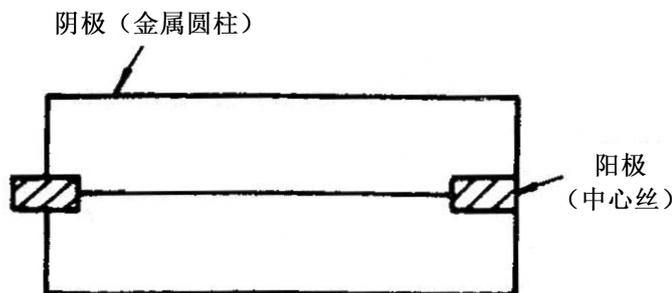


Figure 1. Schematic structure diagram of counter tube [5]

图 1. 计数管基本结构简图[5]

发生电离碰撞并使得氦气电离, 这一过程中将形成大量电子和正离子形成的电子对。在外加的高压电场作用下, 电子向阳极飘逸, 正离子向阴极飘逸, 形成电压脉冲。其测量原理也与  $\text{BF}_3$  正比计数管一致。

$^3\text{He}$  正比计数管的应用极广, 不仅较早的应用于反应堆外核测系统, 在辐射防护领域也由于其固有的优异特性得到广泛应用。 $^3\text{He}$  正比计数管最突出的优点包括: 探测效率极高, 经过特殊设计, 可作为位置灵敏探测器[7]。但其缺点也十分明显, 主要包括: 密封技术难度大, 不易去除  $\gamma$  本底, 价格昂贵。

由于天然氦气中的  $^3\text{He}$  含量非常低(约为  $1.4\text{E}-4$ ) [5], 而人工制备的  $^3\text{He}$  多是制造核武器原料铀时的顺带产物。因为核裁军影响, 铀的制备相应较少, 使得  $^3\text{He}$  气体资源也大量减少, 因此,  $^3\text{He}$  的高昂价格是制约  $^3\text{He}$  正比计数管应用的主要原因。

参考以往研究, 涂硼、 $\text{BF}_3$  和  $^3\text{He}$  三种正比计数管的性能比较可见表 2。

### 3.4. 可能的替代探测器-裂变电离室

据国外的某知名制造厂的相关产品样本, 该制造厂生产的涂铀裂变电离室已可覆盖源量程和中间量程两个阶段的中子测量, 且满足其灵敏度的要求。不仅可通过一种探测器实现较宽的中子通量密度测量, 还能通过均方法(即坎贝尔法)在测量较高中子通量密度时能有效抑制  $\gamma$  射线对测量准确度的影响。其系统信噪比高达 1000 以上。

## 4. 典型核电厂的源量程(或物理启动)测量系统对比

### 4.1. 二代改进机型——恰希玛核电二期

恰希玛核电二期属于二代改进型机型, 属于压水型轻水反应堆。用于监测反应堆启动的堆外中子测量为源量程测量通道。该测量通道用于连续监测反应堆功率、功率水平变化速率。源量程测量通道的安全功能是通过反应堆保护系统在反应堆源量程高中子通量密度时触发反应堆停堆。在地震条件下, 源量程测量通道仍能保证满足其安全功能。

1) 启动时利用的中子探测器

反应堆启动时使用源量程探测器, 探测器类型为涂硼正比计数管。

2) 探测器主要特性指标(规范技术要求):

- 外形尺寸:  $\Phi 50 \text{ mm} \times 766 \text{ mm}$
- 热中子灵敏度:  $8 \text{ cps/nv}$
- 测量范围:  $1.3 \times 10^{-1} \text{ nv} \sim 1.3 \times 10^5 \text{ nv}$  (计数率  $1 \text{ cps} \sim 10^6 \text{ cps}$ )
- 工作电压:  $0 \text{ V} \sim 1000 \text{ V}$
- $\gamma$  场:  $\leq 5.6 \times 10^{-2} \text{ C/kg}\cdot\text{h}$
- 计数率漏计率:  $<10\%$  ( $5 \times 10^5 \text{ cps}$  时),  $<25\%$  ( $10^6 \text{ cps}$  时)

**Table 2.** Comparison test of three counter tubes for neutron detection [8]

**表 2.** 三种中子测量计数管对比试验[8]

类型	探头尺寸 (mm)	阳极丝径(mm) 及材质	气体及成分	理论计算 探测效率	实测 探测效率	灵敏度 ( $\text{cm}^2\cdot\text{s}$ )
涂硼	$\Phi 30 \times 220$	25 镀金钨丝	99.3 kPa Ar + 42.6 kPa $\text{CO}_2$	5.8%	3.6%	2.4
$\text{BF}_3$	$\Phi 50 \times 330$	25 镀金钨丝	81 kPa $\text{BF}_3$	27%	20%	12
$^3\text{He}$	$\Phi 25.4 \times 245$	25 镍铬丝	405.3 kPa $^3\text{He}$ + 101.3 kPa Ar	68%	59%	13.2
$^3\text{He}$	$\Phi 25.4 \times 245$	25 镍铬丝	810.6 kPa $^3\text{He}$ + 202.7 kPa Ar	90%	88%	19.6

### 3) 探测器的具体布置

压力容器外部生物屏蔽层内均匀分布有 8 个测量孔道, 其中 6 个用于安装核测仪表的探测器, 2 个作为备用。用于安装核测探测器的孔道中 4 个用于安装功率量程的探测器, 另 2 个测量孔道分别用于安装源量程探测器和中间量程探测器组合。源量程探测器灵敏区中心位于堆芯下部的四分之一处, 而中间量程探测器的灵敏区中心对准堆芯中心平面。

堆外核测探测器的布置位置示意详见图 2。

## 4.2. VVER 机型——田湾核电一期

田湾核电一期是引进的俄罗斯 VVER-1000 机型, 属于压水型轻水反应堆, 设置有反应堆堆外核测系统, 称为中子通量密度监测装置(NFME)。该监测装置与我国自主开发设计的恰希玛二期和引进美国西屋技术的依托项目的堆外核测系统的功能和作用类似, 但其通道设置、堆外探测器布置以及相关后续处理机柜等均与其他堆型存在明显的差异。

田湾核电一期采用的俄罗斯的 VVER-1000 机组的反应堆按照无外加中子源启动的方式设计[9], 首循环的堆芯燃料装填采用了高泄漏的布置方案。反应堆启动时需使用启动量程和源量程两种探测器, 以达到具有相当深度的临界监测能力。

### 1) 启动时利用的中子探测器

反应堆启动时使用物理启动量程探测器和源量程探测器, 其中物理启动量程探测器的灵敏度更高, 用于极低中子通量密度的测量, 探测器类型分别为  $^3\text{He}$  正比计数管和  $\text{BF}_3$  正比计数管。

### 2) 探测器主要特性指标

#### a) 物理启动量程( $^3\text{He}$ 正比计数管, 探测器代号 SNM18-1)

- 外形尺寸:  $\phi 30 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$
- 热中子灵敏度: 50 cps/nv
- 测量范围:  $3 \times 10^{-3} \text{ nv} \sim 5 \times 10^2 \text{ nv}$  (计数率  $1.5 \times 10^{-1} \text{ cps} \sim 2.5 \times 10^4 \text{ cps}$ )
- 工作电压: 2500 V

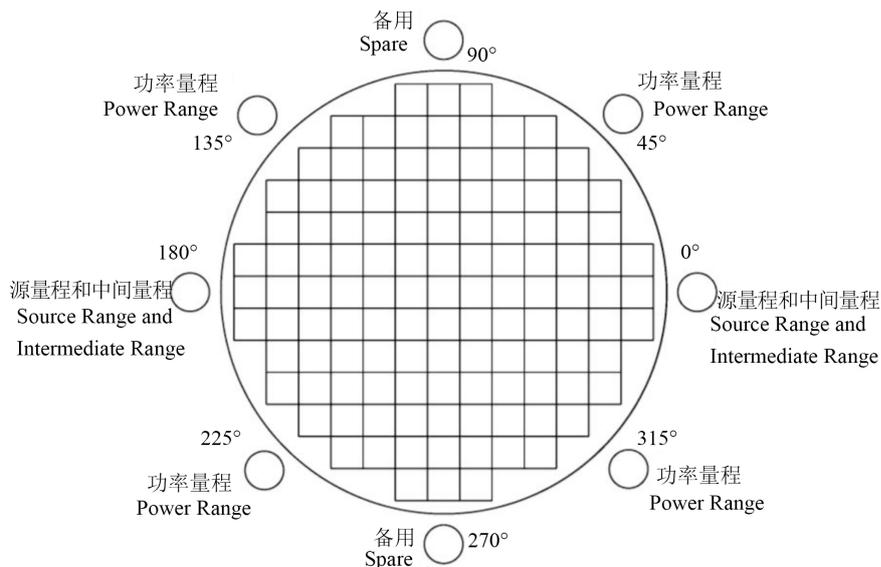


Figure 2. Schematic layout diagram of external nuclear measurement instrument for C-2

图 2. 恰希玛二期核电堆外核测布置示意图

b) 源量程(BF<sub>3</sub> 正比计数管)

- 外形尺寸:  $\phi 68 \text{ mm} \times 625 \text{ mm}$
- 热中子灵敏度: 4 cps/nv
- 测量范围:  $4 \times 10^{-2} \text{ nv} \sim 4 \times 10^3 \text{ nv}$  (计数率  $5 \times 10^{-1} \text{ cps} \sim 5 \times 10^3 \text{ cps}$ )
- 工作电压: 450 V

3) 探测器的具体布置

VVER 压力容器外分布了多个堆外核测仪表的测量位置, 其中物理启动量程探测器安装于 1、4、7 和 9 号孔, 源量程探测器安装于 3、6 和 10 号孔道。

当反应堆启动时, 依靠物理启动量程探测器可测量处于较深次临界度时的反应堆在启动时的中子通量密度, 而源量程探测器用于中子通量密度升高后的测量并能承受一定的  $\gamma$  本底, 其测量功率范围约为  $(1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-4})\%N_{com}$  ( $N_{com}$  为公称中子通量密度) (NFME 系统介绍)。

对于 VVER 反应堆在停堆后的再次启动, 由于堆芯的中子在首次循环运行后具有较高的计数, 再结合 VVER 的高泄漏率装填方案, 可根据实际堆芯的中子计数情况确定反应堆启动的堆外中子测量通道。如达到一定计数后, 物理启动量程探测器也可不再投入使用, 而直接投入源量程探测器开展停堆后的再次启动工作。

堆外核测探测器的布置位置示意详见图 3。

### 4.3. CAP1000 机型—海阳二期

海阳二期采用了 CAP1000 机型, 属于第三代压水型轻水反应堆。用于监测反应堆启动的堆外中子测量为源量程测量通道。通道功能与恰希玛二期的设计基本一致, 但通道的数量设置、位置布置以及性能要求存在较大的差异。

1) 启动时利用的中子探测器

反应堆启动时使用源量程探测器, 探测器类型为 BF<sub>3</sub> 正比计数管。

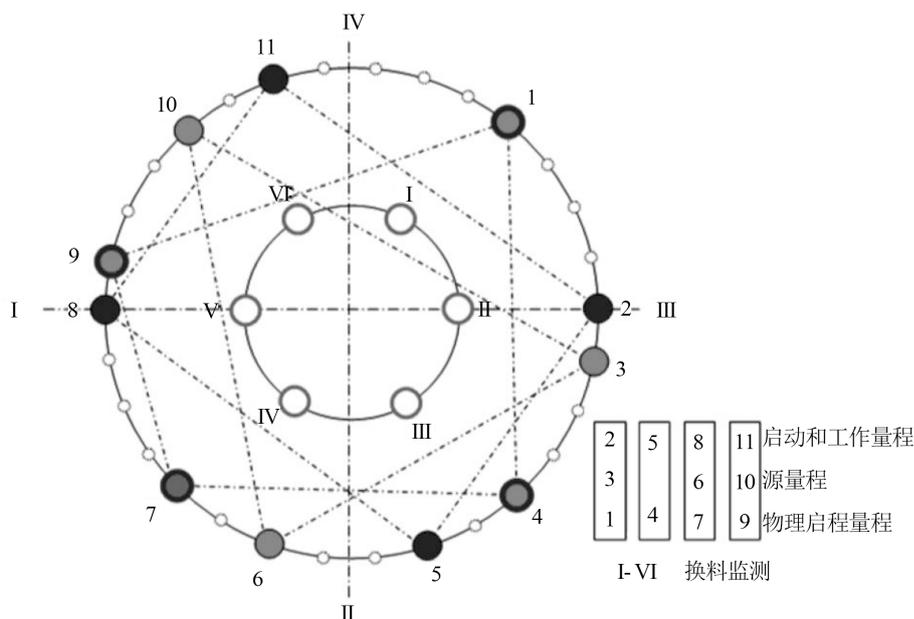


Figure 3. Schematic layout diagram of NFME

图 3. NFME 探测器布置示意图

## 2) 探测器主要特性指标(参考 MIRION 的 NY-10865)

- 外形尺寸:  $\phi 193 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$
- 热中子灵敏度:  $\geq 18 \text{ cps/nv}$
- 测量范围:  $1 \times 10^{-1} \text{ nv} \sim 1 \times 10^5 \text{ nv}$  (计数率  $1 \text{ cps} \sim 1 \times 10^6 \text{ cps}$ )
- 工作电压:  $1500 \text{ V}$

## 3) 探测器的具体布置

源量程探测器分别水平地安装到均匀分布于反应堆压力容器四周的 4 个安装套筒中, 相互之间间隔  $90^\circ$ 。中间量程探测器和功率量程探测器的分布与源量程探测器类似, 但三种不同的探测器之间相互沿压力容器外部间隔一定夹角。

源量程探测器的垂直布置中, 其计数管灵敏区中心线处位于反应堆堆芯四分之一的平面上。中间量程探测器灵敏区中心线处位于堆芯中心平面上。而功率量程探测器分上部和下部, 其灵敏区中心线处分别位于堆芯的四分之一和四分之三处。

堆外中子探测器平面和垂直布置情况示意详见图 4。

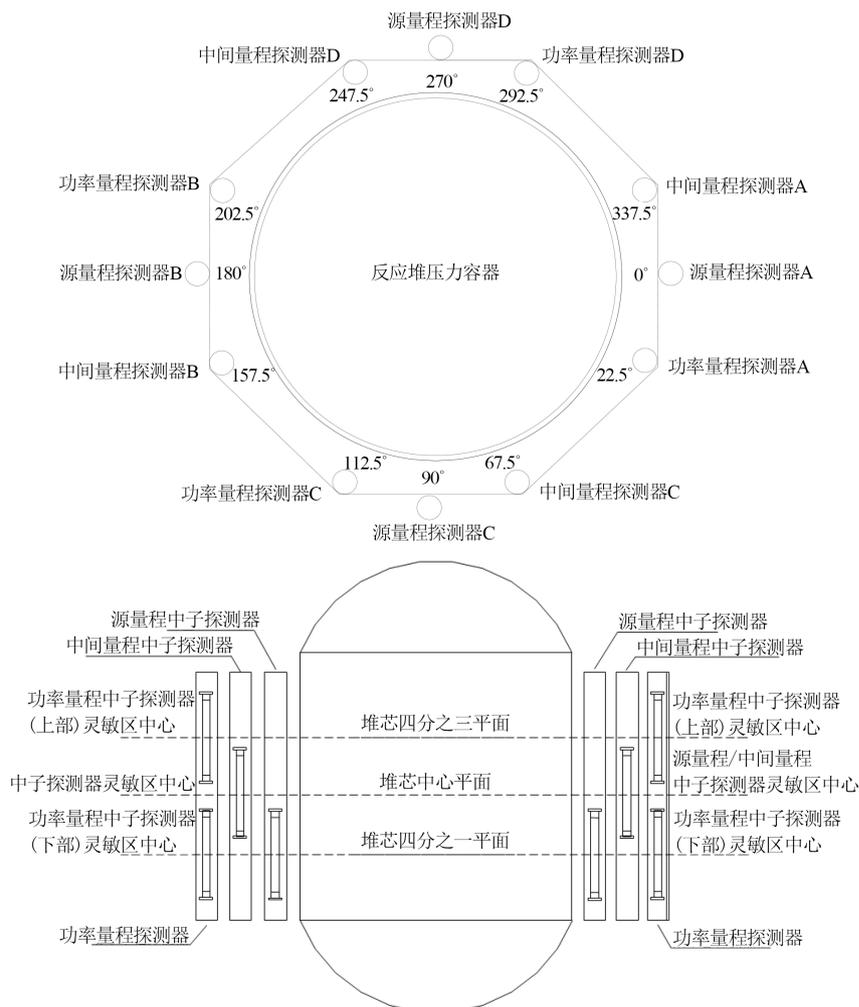


Figure 4. Schematic layout diagram of external nuclear measurement instrument for CAP1000

图 4. CAP1000 堆外中子探测器平面布置示意图

#### 4.4. 各机型使用的源量程(或物理启动)探测设置比对

根据以上的描述, 目前已建或在建核电厂堆外核监测系统中, 用于反应堆启动的中子探测器性能指标和特性对比详见表 3。

从以上探测器类型选择和布置情况分析, 可得出以下特点:

- 对于二代及二代加的压水堆核电厂, 考虑到当时的测量技术水平及成熟性, 用于反应堆启动时的堆外核测探测器的灵敏度较低, 布置数量也较少, 其反应堆的正常启动过程中, 需设置具有足够源强的中子源组件。
- 对于 VVER 堆型的压水堆核电厂, 堆型设计时充分的考虑了无源启动的需求, 设置了两组低量程的堆外核测探测器, 分别用于不同中子通量密度时的测量, 使得反应堆处于较深次临界深度时也能获得有效的中子计数。实际反应堆启动过程中, 可根据实际的装料情况, 灵活选择物理启动量程和源量程两组堆外核测通道开展无源或低中子源源强的启动。但该堆型的堆外核测系统的设计较为复杂。
- 对于 CAP1000 堆型的压水堆核电厂, 用于反应堆启动的堆外核探测器数量多于二代加, 但未布置备用测量孔道, 所选探测器的灵敏度大大高于二代加。从相关文献中可知该堆型具备无源启动或低中子源源强启动的条件, 但需反应堆实际运行数据的支持。

#### 5. 结论和建议

随着科学技术的发展, 中子测量技术也得到长足的进步, 但中子探测的原理和基本方法并无很大变化。因此, 中子探测的发展, 特别是用于堆外核测的中子探测, 主要集中于探测器及其相关电子器件的工艺制造优化, 例如: 提高计数管的密封技术、涂覆材料的厚度和均匀性控制、提升电子机柜对信号的处理能力等, 在尽可能提高探测效率的同时, 降低不利影响。对基于现有工艺制造能力和技术发展, 在新堆芯的研发或现有堆芯改进方面, 来合理设计堆外核测系统以支持低中子源或无中子源的反应堆启动的主要建议包括:

**Table 3.** Comparison of source range (or physical start range) channels for multi type reactor  
**表 3.** 各机型源量程(或物理启动)通道对比

序号	反应堆堆型	探测器类型(启动)	探测器数量	灵敏度(cps/nv)	测量范围(nv)	功率范围	备注
1	二代加	涂硼正比计数管	2	≈8	$1.3 \times 10^{-1}$ $\sim 1.3 \times 10^5$	$(1.3 \times 10^{-9})$ $\sim 1.3 \times 10^{-3})\%RTP$	探测器环保, 去 $\gamma$ 本底强, 但探测器灵敏度较低, 要求测量点处的中子通量密度较高。
		$^3\text{He}$ 正比计数管[4]	4	≈50	$3 \times 10^{-3}$ $\sim 5 \times 10^2$	约 $(7.5 \times 10^{-10}$ $\sim 1.25 \times 10^{-5})\%N_{nom}$	探测器灵敏度高, 但反应能量小, 不易去除 $\gamma$ 本底, 不适宜堆启动后的复杂辐射环境。
2	VVER	$\text{BF}_3$ 正比计数管[4]	3	≈4	$4 \times 10^{-2}\text{nv}$ $\sim 4 \times 10^3\text{nv}$	$(1 \times 10^{-8})$ $\sim 1 \times 10^{-4})\%N_{nom}$	由于堆芯特点及物理启动量程探测器的存在, 采用了较低灵敏度的 $\text{BF}_3$ 探测器
		$\text{BF}_3$ 正比计数管	4	≥18	$1 \times 10^{-1}\text{nv}$ $\sim 1 \times 10^5$	$(1 \times 10^{-9})$ $\sim 1 \times 10^{-3})\%RTP$	探测器应用广泛和成熟, 适用于较高 $\gamma$ 场的中子测量, 但灵敏度一般, 且不环保。

注: (1) RTP 表示额定功率;  $N_{nom}$  表示工程中子注量率。

1) 反应堆堆型的正向设计, 需要整体考虑压力容器及其内部设备、燃料以及装载和堆外核测系统等各项因素, 通过一次或多次设计迭代的方法, 给出堆外核测系统需满足的性能要求, 包括但不限于, 现有堆型设计条件下, 不同装料和不同中子源情况时, 通过中子输运等方法技术, 获取堆外不同位置和方向上的中子通量密度。以给予堆外核测系统的设计提供明确的性能要求和优化方向。

2) 优化堆外探测器的布置, 提高堆外核测的灵活性。CAP1000 堆型可适当增加压力容器外部的堆外核探测器测量孔道。一方面在现有核测系统不修改的情况下, 可以便于以后的运行人员能从容应对类似文中提到的秦山核电所发生的特殊情况; 另一方面, 也为堆外核测系统的改进提供了更多的可能, 例如可采多探测器、组合式探测器、或多类型探测器的方式提高源量程测量阶段的探测效率, 以满足堆外低中子时的反应堆安全启动。

提升核测系统对探测器的可替换性, 增加必要的机械装置和屏蔽设施, 以提升堆外核测系统的兼容能力。对于不同的燃料和中子源装载情况, 在满足全量程测量和安全的情况下, 可根据运行的需要适当地进行探测器的替换和必要的核测系统设置。选用高灵敏度探测器时, 例如: He-3 计数管, 增加必要的机械装置和屏蔽设置, 对高本底时进行适当保护, 以合理增强探测器的寿命。本章节为作者提供“致谢”的示例。

## 参考文献

- [1] US Nuclear Regulatory Commission (2007) RG1.68 Initial Test Programs for Water-Cooled Nuclear Power Plants. Washington DC, March 2007, Revision 3.
- [2] 陈曦, 叶滨. 压水堆核电厂无源装料及启动研究[J]. 科技创新与应用, 2015(9): 21-22.
- [3] 廖择军. 秦山核电厂反应堆无源装料及启动[C]//中国核学会. 反应堆数值计算与粒子输运学术会议暨反应堆物理会议: 2010 年卷. 西安, 2010: 1-5.
- [4] 汤仲鸣, 何文灏, 李树成, 等. AP1000 与 VVER1000 堆外核测系统设计理念分析[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(5): 671-674.
- [5] 钱承耀, 编. 核反应堆仪表[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
- [6] 杨道广, 陆双桐. 百万千瓦级核电站 M310 堆型国产化堆外核探测器综述[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(7): 860-864.
- [7] 杨剑波, 黄红, 刘志, 等. 初探中子探测器的研究现状与发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2016, 2016(14): 89-96.
- [8] 廖俊辉, 谢依冈, 陈元柏, 等. 用于热中子探测的正比管性能研究[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(2): 367-371.
- [9] 李文双. 田湾核电站 1 号机组物理启动简介[C]//中国核学会. 第十一届反应堆数值计算和粒子输运学术会议暨 2006 年反应堆物理会议: 2006 年卷. 哈尔滨, 2006: 612-622.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-7111, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [nst@hanspub.org](mailto:nst@hanspub.org)