

# 船用堆核测量探测器改进研究

于勇<sup>1,2</sup>, 于雷<sup>1</sup>, 陈登科<sup>2</sup>, 赵新文<sup>1</sup>, 蔡琦<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 武汉 430033; 2. 海军核化安全研究所, 北京 100077)

**摘要:** 通过分析和改进硼计数管的探测效率, 并与电离室合理组合, 形成具有船用反应堆全量程中子通量测量能力的中子探测器; 通过中子通量堆上试验表明: 该探测器的灵敏度等各项指标超出现有产品性能; 本研究为进一步研发船用堆全量程中子探测器提供了技术参考。

**关键词:** 船用堆; 核测量; 探测器

**本文引用格式:** 于勇, 于雷, 陈登科, 等. 船用堆核测量探测器改进研究[J]. 四川兵工学报, 2014(11): 68-71.

**中图分类号:** TL363

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-0707(2014)11-0068-04

## Improving on Nuclear Measurement Detector for Marine Reactor

YU Yong<sup>1,2</sup>, YU Lei<sup>1</sup>, CHEN Deng-ke<sup>2</sup>, ZHAO Xin-wen<sup>1</sup>, CAI Qi<sup>1</sup>

(1. College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Naval Institute of Nuclear and Chemical Safety Research, Beijing 100077, China)

**Abstract:** The whole range neutron Nuclear Measurement Detector (NMD) for marine reactor was researched by assembled the high efficacy boron coating counters and gamma-compensated ionization chambers. By practical verifying on neutron flux reactor, the detector had finer performance than current detector on sensitivity etc. The study could supply technique reference for development of whole range neutron NMD for marine reactor.

**Key words:** marine reactor; nuclear measurement; detector

**Citation format:** YU Yong, YU Lei, CHEN Deng-ke, et al. Improving on Nuclear Measurement Detector for Marine Reactor[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(11): 68-71.

反应堆中子增殖状况(周期)和中子功率(核功率)是表征核反应堆运行状态的关键参数<sup>[1]</sup>。由于船用反应堆启、停及工况变化频繁,这两项参数的准确测量显得尤为重要<sup>[2]</sup>。但由于中子通量水平跨越11个量级,目前多采用分段接力测量方式通过多种中子探测器相互衔接完成反应堆中子通量的全量程测量<sup>[3-5]</sup>。这种接力方式涉及探测器种类多,还带来相互衔接兼容性等一系列问题,使得当前的中子通量测量还不完全满足高灵敏高精度要求<sup>[6]</sup>。通过分析当前中子探测器的优劣,从工程应用的角度探索组合探测方式的可行性,基于归一化理念将承担分段接力式测量的各中子探测部件组合成标准化产品,并通过中子通量堆上试验测试,检验新型组合式测量方法的可行性,为提高船用堆中子探测器效率及可靠性提供新的思路和技术解决途径。

## 1 船用堆核测量技术概述

20世纪60年代,为确保船用反应堆堆芯中子通量测量的连贯性和准确性,在设计上采取了堆外三段接力式测量方法,将测量区间划分为源区、中间区、功率区三部分<sup>[2]</sup>。其中源区的前端测量选用了三氟化硼充气式正比计数管,该管抗辐射特性差,在热中子场中消耗快,完成区段测量任务后必须尽快取出,而且测量区间短,使用极为不便。源区后端与中间区的衔接采用价格高昂、响应较慢的裂变室来实现。中间区采用电离室测量中子通量。功率区采用电离室测量中子通量。三类探测器在每个区间之间至少衔接1.5个量级,反应堆外围设9个测量孔道,放置9只核测量探测器,后端

与之相配9台核电子学仪器,完成中子通量的全量程测量。上世纪80年代中后期,由于中子测量技术水平大幅提高,硼沉积计数管抗 $\gamma$ 辐射特性好,寿命长,测量区间也有较大延伸,因此替代了三氟化硼充气式正比计数管。20世纪90年代,将核测量电子学仪器由分立元件改为集成电路,后又改为大规模集成电路,同时单片机也开始在测量计算中发挥积极作用。

目前,船用堆核测量装置所含设备、组件繁多,全系统可靠性较差,还不完全满足反应堆临界安全要求<sup>[7]</sup>。表现在:

1) 从统计上看,反应堆启堆过程中大部分非计划停堆由核测量装置错误短周期信号引发,这其中又有半数以上的误信号来至裂变室探测器及其核电子学仪器,这种现状已经影响到反应堆的临界安全。

2) 虽然经历了电子学仪器的数字化改进,但探测器型号、品种没有得到彻底改变,核测量系统的整体性能并没有得到很大提升,使用中仍然存在周期的大幅涨落、误短周期信号、裂变室响应慢等问题。

3) 源区前端只有一支硼沉积计数管配合一套电子学仪器在工作,测量环节上的任何一点故障都会造成该测量通道的失效,导致威胁临界安全的情况发生,不满足单一故障准则要求,同时单支计数管难以保证停堆状态下次临界度的可靠监督。

4) 源区后端由两套裂变室和硼计数管共同承担。裂变室在源区段采用脉冲计数,进入中间区和功率区后采用坎贝尔测量技术。启堆初期,该探测器有很大盲区,当计数管达约2个量级计数率时探测器才开始工作,且周期存在一定幅度的波动,严重时将出现短周期信号导致停堆。进入功率区后该探测器随着功率的提升响应越来越慢(体现在周期和功率上),一定功率以上时甚至停止响应。此外,裂变室自身在脉冲计数与坎贝尔测量之间转换时有衔接不畅或短时“停顿”现象,不利于周期与功率的连续有效测量。

针对船用堆核测量系统存在的问题,工业部门、科研院所一直在寻求一种较好的解决途径,并通过技术研究改进了一些设计,但有些问题目前还无法彻底解决。例如,启堆初期仅由一支计数管和一套仪表监测反应堆停堆深度并完成启堆临界安全的监督。在目前裂变室响应滞后的情况下,这是一种极不安全的做法。但如果采取多通道冗余设计,将增加2~3支计数管,仪器也要相应增加,测量孔道也要随之增加,从目前情况看这是不现实的。因此,将目前的多支探测器合理整合成全量程探测器是解决问题的有效途径。

## 2 船用堆核测量探测器改进方案设计

### 2.1 方案的提出

基于上述理念,经过广泛调研,国内核测量探测器领域有了较大发展,计数管量程的上限可以进一步提高,可以实现与 $\gamma$ 补偿电离室2个量级的衔接,计数管和电离室的结构形式也可以根据使用条件的要求进行改进,满足归一化设计条件,从理念上可以进行合理整合,形成一支组合式探测器,

完成反应堆源区、中间区到功率区的中子全量程测量<sup>[8-9]</sup>。

为实现归一化设计并能够完整替代当前中子探测器,必须重点考虑并解决几个问题:产品的尺寸应符合当前探测孔道对探测器尺寸的要求;计数管与电离室应具备两个量程的衔接要求;计数管与电离室结合后应具有尽量小的自屏蔽效应;产品结构应满足摇摆振动要求,且不产生额外的震颤噪音;应标准化设计并满足与现行装备的通用性要求;测量的灵敏度和精度必须达到和超过现有产品指标。

为实现归一化设计方案,拟选定成熟产品作为组合式探测器的部件。由于堆外探测孔道的直径仅为 $\Phi 80$  mm,除去夹持结构所占空间,组合探测器的直径最大仅能 $\Phi 70$  mm。为了有效利用该尺寸,整合现有探测器,实现技术验证的目的,必须在 $\Phi 70$  mm空间内容纳尽量多的计数管和一支高效的电离室。

符合既定设计要求的电离室为 $\Phi 50 \times 1\ 000$  mm的DL-124电离室。计数管的选择必须综合考虑所余空间可放置的管数和集束管的灵敏度,因此必须通过分析来确定。国内有 $\Phi 12 \times 1\ 050$  mm的成品管,主要应用于小堆和射线装置,可以作为测试样品。利用6支 $\Phi 12 \times 1\ 050$  mm的成品管做C形排列,在680 V高压下,实测灵敏度为25 cps/nv,扣除预想的自屏蔽效应,灵敏度降为约20 cps/nv,距我们的目标40 cps/nv差一倍。查阅资料,发现陈雄月<sup>[1]</sup>曾经做过 $6 \times \Phi 10 \times 515$  mm(灵敏长度483 mm)集束计数管并测得其灵敏度为12~20 cps/nv。陈雄月的束管仅有我们的一半长度和更小的直径却达到了约20 cps/nv。为了分析问题所在,反复对比了国内外计数管的设计,发现由于中子与硼-10反应产生的 $\alpha$ 和 $7\text{Li}$ 粒子在B4C中的平均自由程分别为3.2  $\mu\text{m}$ 和1.56  $\mu\text{m}$ ,在纯硼-10中略有增加,因此国外选用B4C为材料的计数管涂膜厚度一半选择2~4  $\mu\text{m}$ ,陈雄月所做的集束管选择涂层厚度为 $\geq 0.7$  mg/cm<sup>2</sup>(95%的10B),而我们的管子选用涂层厚度 $\geq 0.8$  mg/cm<sup>2</sup>(90%的10B),硼膜厚度的增加带来了灵敏度的降低和自屏蔽的增加,因此灵敏度不仅没有提高反而降低。为此,进行了优化涂硼设计,将硼膜厚度降至0.7 mg/cm<sup>2</sup>,选用丰度更高的95%的10B作为靶核材料,并将硼膜的厚度更加均匀化。试制后的6支计数管经测试灵敏度达到40 cps/nv以上,符合既定设计要求。

### 2.2 组合式探测器结构设计

基于上述方案,组合式探测器结构设计方案如图1所示。由6支 $\Phi 12$  mm $\times$ 1 050 mm硼沉积计数管与DL-124电离室组合而成。6支硼沉积计数管在DL-124电离室外侧成C形结构,计数管与电离室外部制作保护套筒,套筒下端封闭,上端制作电气接口,实现计数管、电离室与后端电子学仪表的连接。

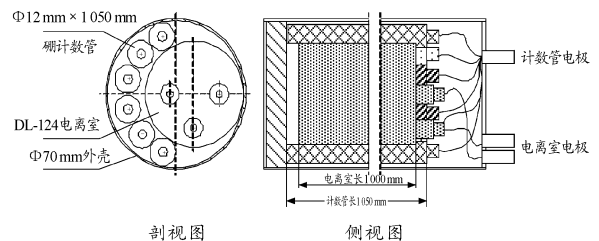


图1 组合式探测器剖视图和侧视图

通过灵敏度测试,6支计数管的整体灵敏度为46.8 cps/nv,电离室的灵敏度为 $2.16 \times 10^{-13} \text{ A/n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。均达到并超过既定设计值。

通过对船用反应堆中子通量量程的分析,组合式硼计数管和电离室探测灵敏度、最佳灵敏区段等要素,量程对比见图2。由此可见,组合式探测器可以实现集束计数管和电离室两个量级的衔接,超出有关标准1个量级以上衔接的要求。

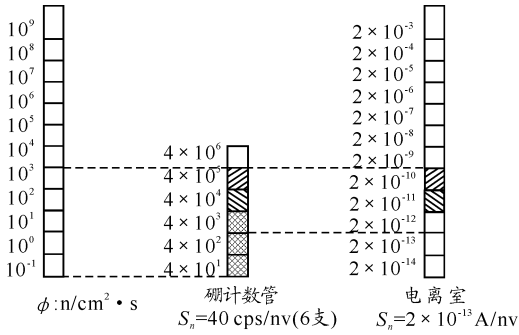


图2 量程对比图

### 3 核测量探测器堆上试验

为检验该组合式探测器量程衔接能否达到要求,在中国

原子能研究院某中子通量反应堆上进行了测试验证。

#### 3.1 试验方法

等周期线性试验方法。参照 GB7164《用于核反应堆的辐射探测器及其性能测试方法》、EJ676-92《中子计数管》、EJ677-92《 $\gamma$ 补偿中子电离室》相关要求开展试验。

#### 3.2 测试条件

(1) 硼计数管。放大  $K = 128 \times 10$  (前级放大板); 微积分常数  $RC = \max \times 0.1$ ; 甄别阈值为  $0.5 \text{ V}$ ; 高压为  $750 \text{ V DC}$ ; 脉宽为  $2 \mu\text{s}$ 。

(2) 电离室。高压  $+300 \text{ V DC}$ , 负:  $-50 \text{ V DC}$ 。

(3) 测量仪表。6517 型静电计。

#### 3.3 测试位置

组合式探测器距反应堆堆芯  $1 \text{ m}$ , 角度为  $180^\circ$  (电离室侧面向堆芯)。

#### 3.4 测试时间间隔

定标器(1 s 计数挡)每 3 个计数记录一次(即每 28 s 记录一次数值)。

#### 3.5 测量本底

堆芯内已加启动中子源。计数管计数  $< 1 \text{ cps}$ 。电离室电流  $< 1 \times 10^{-12} \text{ A}$ 。

#### 3.6 测试结果

测试结果见表 1、表 2。

表 1 计数管测试数据

时间间隔	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
计数/cps	103	147	127	152	166	214	242	315	370	481	547
时间间隔	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
计数/cps	682	824	996	1 168	1 558	1 875	2 207	2 740	3 389	4 152	4 965
时间间隔	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
计数/cps	6 081	7 369	9 103	10 585	13 011	15 702	19 283	23 390	28 516	34 556	41 175
时间间隔	34	35	36	37	38	39	40	41			
计数/cps	49 563	59 759	70 680	83 620	96 497	115 613	133 213	153 224			

表 2 电离室测试数据

时间间隔	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
电流/pA	0.54	0.72	0.58	0.77	1.02	1.15	1.72	2.31	2.73	3.5	4.42
时间间隔	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
电流/pA	5.27	6.70	7.99	10.1	12.5	15.6	18.5	23.5	29.2	36.1	44.4
时间间隔	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
电流/pA	54.6	66.7	82.3	101.6	123	151.6	186	228	282	346	421
时间间隔	34	35	36	37	38	39	40	41			
电流/pA	519	634	781	964	1 180	1 430	1 770	2 170			

试验表明:测出的周期值(计数管测量周期 146.7 s,电离室测量周期 133.4 s)与反应堆给出的周期值(138.5 s)基本吻合,组合式探测器性能符合堆用要求,硼计数管与电离室可以实现两个量级的衔接,实现预定设计目标。

## 4 结论

通过合理组合目前通用涂硼计数管和 $\gamma$ 补偿电离室,在计算机辅助分析和改进涂硼技术的基础上,通过合理组合,研制出能够覆盖船用堆中子通量水平的全量程中子核测量探测器。该探测器保持了计数管和电离室的灵敏度,减少堆外探测孔道和探测器数量,为源区中子测量的准确性和可靠性提供冗余通道,确保反应堆临界安全和核安全。

该项研究可实现中子通量全量程测量功能,减少了堆外核测量孔道、仪器仪表数量,并可整体提升核测量系统的可靠性。在启堆临界安全的掌控上,可以通过三套测量装置实现周期保护的“三取二”保护方式,大大降低测量装置自身误信号引起保护停堆的概率。同时,三套相同的测量装置可以相互校核,验证对方测量的有效性。虽然堆外核测量方式默认反应堆为“点堆”,但三套完全相同的核测量装置可以通过数据对比实现消除空间分辨率误差,解决核探测器的空间效应问题。三套相同的装置还可及时测量并发现反应堆因燃耗不均、控制棒提出程序不当造成的中子通量畸变现象,对及时调整控制棒棒位,发挥核燃料效能具有重要意义。

(责任编辑 周江川)

## 参考文献:

- [1] 陈雄月.核动力工程中的反应堆物理实验[M].北京:原子能出版社,2012.
- [2] 李凤宇.基于中子涨落的反应堆物理启动中反应性测量研究[D].武汉:海军工程大学,2008.
- [3] 汲长松.中子探测试验方法[M].北京:原子能出版社,1998.
- [4] Ensslin N, Harker W C, Krick M S, et al. Application Guide to Neutron Multiplicity Counting [M]. LA-13422, 1998.
- [5] 陈小军,周世新,李保祥.数字化核测量仪表的研制[J].核动力工程,2003,24(1):51-53.
- [6] Kim B H, Kim S I, Kim J S. Response of several neutron measuring devices under the fractional change of thermal and fast neutrons Radiation [J]. Measurements, 2010, (45): 1541-1543.
- [7] 于勇,陈登科,陆双桐,等.组合式核测量探测器研究[J].原子能科学技术,2012,46(S):565-568.
- [8] 范岩成.反应堆堆芯核测量数据在线处理方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005.
- [9] 赵强,张志俭,曹欣荣.反应堆堆外核测量系统的实时仿真[J].核动力工程,2005,26(5):484-487.

(上接第30页)弹带与身管膛长度匹配的合理性,尽可能避免内弹道峰值的发生。

2) 对于有弹道峰效应的火炮,在科研阶段,在身管寿命试验过程中应尽可能对每发弹丸的初速或者膛压进行监测,以确定出内弹道峰出现时机和峰值诸元。

3) 在确定火炮内弹道峰值的时机后,应使用处于峰值阶段的身管选配该型弹药的标准装药,以保证鉴选过程的弹道性能一致性。

4) 利用在峰值点确定的装药内弹道膛压最高的特点,在以图定值初速、膛压为依据选配装药量时,应尽可能使用处于峰值阶段的身管进行试验,以保证火炮全寿命过程使用的安全性。

## 参考文献:

- [1] 周曾素,黄慧冲.弹道学[M].武汉:海军工程大学,1996.

- [2] H. 克里尔, M 萨摩菲尔德. 火炮内弹道学 [M]. 南京:华东工学院, 添加出版时间.
- [3] 姚则武,周维.火炮内弹道峰效应对标准弹鉴选的影响[J].四川兵工学报,2010,31(4):34-37.
- [4] 张振山,吴永峰.炮管内膛烧蚀磨损现象的分析[J].装甲兵工程学院学报,2003,17(2):67-70.
- [5] 张喜发,卢兴华.火炮烧蚀内弹道学[M].北京:国防工业出版社,2001.
- [6] 欧阳青,于存贵,张延成.国内外火炮身管烧蚀磨损问题研究进展[J].兵工自动化,2012(6):44-46.
- [7] 孟翔飞,王昌明,何博侠,等.火炮身管烧蚀磨损的灰色预测模型[J].四川兵工学报,2013(3):5-8.

(责任编辑 杨继森)