

处理核电厂硼表测量偏差的研究

Research on Handling Deviation of Boron Meter Measurement in Nuclear Power Plant

郑泽材

Zecai Zheng

中广核苍南核电有限公司 中国·浙江温州 325000

CGNPC Cangnan Nuclear Power Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325000, China

摘要: 核电厂使用硼表监测一回路硼浓度, 它的准确性直接影响操作员对反应性的控制, 涉及核安全, 重要性很高。论文总结了三个影响硼表测量准确性的关键因素: ①硼酸溶液丰度; ②硼酸溶液温度修正; ③脉冲计数的稳定性, 提供了解决硼表测量偏差的方法。

Abstract: The use of boron meters in nuclear power plants to monitor the boron concentration in the primary circuit directly affects the operator's control of reactivity, which involves nuclear safety and is of great importance. The paper summarizes three key factors that affect the accuracy of boron meter measurement: ① abundance of boric acid solution; ② Temperature correction of boric acid solution; ③ The stability of pulse counting provides a method to solve the measurement deviation of boron meters.

关键词: 反应性; 硼表; 丰度; 温度修正; 脉冲计数

Keywords: reactivity; boron concentration meter; abundance; temperature correction; pulse count

DOI: 10.12346/peti.v5i3.8417

1 引言

压水堆核电厂是通过原子核的链式裂变反应持续产生大量能力, 再将这些能量传到二回路做功转化为电能。为了确保原子核的裂变反应可控, 引入反应性 ρ 的概念。

为了确保反应堆稳定, 就必须把 ρ 控制在临界状态。控制反应性有三种手段: ①控制棒控制; ②可燃毒物控制; ③化学补偿控制。其中第三种方式使用的是硼酸溶液, 因此在核电厂需要持续对硼酸浓度进行测量, 引入了硼表装置, 论文重点研究解决硼表测量偏差的方法。

2 硼表基本原理和三个影响测量准确性的因素

核电厂硼酸溶液采用天然硼, 含 ^{10}B 和 ^{11}B 两种同位素, 其中 ^{11}B 不受辐射和温度影响, ^{10}B 的中子俘获截面大, 能与反应堆热中子发生反应。

硼表测量的是 ^{11}B ^[1]。中子源发生的中子被硼酸部分吸收后进入探测器产生电离作用。为了有效计算硼浓度, 设计了专门的电路对中子脉冲进行收集、放大与处理, 最终经过

一系列计算建立中子计数与硼浓度的对应关系。

基于中子在硼酸溶液中的衰减特性关系, 最终可推演出硼浓度与中子计数率的关系如下二次曲线:

$$\frac{1}{n} = aP^2 + bP + c \quad (1)$$

式中, P 表征硼浓度, n 是计数率, a 、 b 、 c 是三个系数。从曲线我们可以进一步提炼出来影响硼浓度有效测量的三个因素。

2.1 硼酸溶液丰度

核电厂每一次换料大修, 需要使用硼酸溶液对硼表做标定, 采集硼酸浓度 - 计数率数据对, 拟合式 (1) 二次曲线, 计算 a 、 b 、 c 参数。此时采用的硼酸浓度是使用化学滴定的方法进行测量, 包含 ^{10}B 和 ^{11}B 两种同位素, 而硼表测量的是 ^{10}B 浓度。从计算公式可以推断出如果 ^{10}B 丰度发生变化, 在 a 、 b 、 c 参数不变的情况下将导致测量出现偏差, 需要引入一个参数对偏差进行修正。

2.2 硼酸溶液温度修正

一回路的温度若发生变化, 将导致单位体积内有效 ^{10}B

【作者简介】郑泽材 (1986-), 男, 中国广东揭阳人, 本科, 工程师, 从事自动化仪表研究。

含量变化,对应的硼吸收截面将发生变化,此时硼酸浓度/计数率的对应关系也将产生变化。体现到公式(1)中也就是系数 a 、 b 、 c 发生改变。因此,需要引入一种机制对温度进行有效修正。

2.3 脉冲计数的稳定性

从公式(1)可以看出,在 a 、 b 、 c 三个系数确定后,有效硼浓度和中子计数率存在对应关系。硼浓度稳定准确测量的前提是中子探测器能输出准确的脉冲计数。中子探测器产生的是 μV 级的微弱信号,通过前置放大器放大为 mV 级信号,再通过主放大器放大为 V 级脉冲。前置放大器需要引入有效的抗干扰机制,否则微弱的脉冲信号很容易引入干扰,最终影响测量。

3 三个影响因素分析及纠偏策略研究

3.1 硼酸溶液丰度

从公式(1)可知,硼浓度和计数率存在二次函数曲线的对应关系。如果要对硼浓度的连续测量,就需要提前在一定硼浓度范围内建立两者的对应曲线,进一步可以计算出具体的 a 、 b 、 c 参数值。核电厂可以在不同硼浓度平台采集多组硼浓度/计数率数据对,即可拟合出二次曲线。

硼表测量准确性完全依赖于数据对的准确性。数据对的硼浓度是由化学滴定采样获得,计数率是在对应的硼浓度平台读取硼表测量值获得。通过前述介绍可知,化学滴定采样的数据包含 ^{10}B 和 ^{11}B 两种同位素,因此曲线准确的前提就是硼酸溶液的丰度要保持不变。

^{10}B 在一回路不断与中子发生反应,一回路也会有补硼和稀释等操作,因此硼酸丰度是一个动态变化的过程^[2]。因此为了解决这个问题,硼表就需要引入一个修正系数,根据需要做调整。

硼表用于一回路反应性控制,尤其是在反应堆启停阶段,一回路硼浓度会有剧烈变化,这个时候如果因为丰度问题导致硼表测量偏差很大,将影响操作员对反应性控制,也可能导致触发运行事件。因此需要分析丰度因素在机组状态转换时候的对硼浓度测量的影响规律,提前采取干预措施,尤其是机组装卸核燃料阶段。

以机组卸料为例,开始卸料前,一回路需要充水,水源来自PTR(反应堆和乏燃料水池处理和冷却系统)水箱,这部分硼酸溶液是新配置,浓度和丰度均高于一回路硼酸水,因此每次充水后硼酸浓度会上涨,且由于丰度更高一些,在线硼表测量值会上涨更多一些。

有了定性的分析结论,再进一步分析具体上涨数值。为了确保停堆深度,卸料前硼酸浓度有明确规定,也就是硼酸浓度固定;经过一个燃料循环, ^{10}B 丰度值也比较固定;PTR水箱硼酸是按照固定要求配置,PTR水装量和一回路水装量是固定比例(大致是3:1)。从上述几条信息可以推断出硼表测量值比化学滴定值偏高的量应该有固定量。查

询每次卸料平台调整量,发现硼表在充水后基本比化学取样值高15~20ppm。

由于每次一回路充水后就要执行卸料操作,有了定量规律,就可以在开始充水前的合适窗口提前将在线硼表测量值调低15ppm左右,确保充水后硼表测量准确,避免影响卸料操作。这就是对丰度影响机理进行总结的意义。

3.2 硼酸溶液温度修正准确性

核电厂停堆卸料过程中,冷源会停运检修,导致硼浓度取样回路温度出现上涨。为了有效说明温度对一回路硼浓度测量的影响机理,在某一次停堆卸料过程中尝试关闭温度修正功能,验证温度影响结果。过程如下:

在反应堆一回路压力降到25bar以下后,硼表取样回路采取RRA(堆芯余热排出系统)-RCP(反应堆冷却剂系统)连接^[3],此时硼表取样回路真实温度约27.7℃。硼表测量温度与真实温度基本一致,硼浓度保持在2370ppm左右。

机组状态继续下行,某一时刻RRI冷却水流量下降到0,取样回路失去冷源,温度缓慢上升。由于取消了硼表的温度修正功能,因此硼表捕捉到的温度值一直保持在27.9℃,但硼酸吸收截面已经跟随温度发生变化,导致硼浓度显示值出现了明显的下降。

此时通知化学专业对硼酸进行滴定取样,结果是2411ppm,硼表在线显示值是2376ppm,偏差达35ppm。现场恢复硼表温度补偿功能,硼表取样回路的温度值上升为36.5℃,硼浓度测量值上升到2412ppm,与化学取样值基本一致,验证了温度修正的有效性。

为了验证温度修正功能,使用信号发生器(仪器1)模拟一个固定的硼浓度值2403ppm,再使用另一个信号发生器(仪器2)模拟温度值30℃,其他参数与现场设备保持一致。调整仪器2模拟温度15℃,可以发现在输入脉冲计数率不变的情况,显示硼浓度降至2365ppm,变化量 $\Delta=38\text{ppm}$;再次调整温度为0℃,硼浓度降至2327ppm,变化量 $\Delta=38\text{ppm}$ 。在温度下降幅度一致的情况下,可以看到硼浓度也随着均匀变化,说明软件设置中是按照一次函数关系引入温度修正量。从上述数据可以分析出在2400ppm高硼浓度下,温度变化1℃对应硼浓度变化约2.5ppm。

这个数值体现的是软件的修正量,每一个硼表装置应该设计多大的温度修正量,取决于中子探测器特性。因此需要通过硼表标定小车模拟取样回路温度变化,固定硼浓度值,做中子探测器的温升试验,采集硼浓度测量值随温度变化关系,再设计对应的修正系数,最终再通过温升试验确认硼浓度测量不受温度变化影响。

因此本节对温度修正机理的分析就是为处理硼表故障提供思路,如果硼表测量值出现波动,首先要确定取样回路温度是否也有对应变化。如果有变化应做到:第一确认硼表测温回路是否正常,第二检查中子探测器特性是否发生变化,从温升试验数据入手判断是否需要优化温度修正系数。

3.3 脉冲计数的稳定性

硼表信号流程：涂硼正比计数管输出 μV 脉冲，前置放大器放到为 mV 信号，经主放大器最终输出 V 脉冲。在这个过程中最重要的就是保证所有信号不受干扰，尤其是前段的弱信号。

在详细说明中子计数率信号处理回路之前，需要先介绍硼表机柜接地设计理念。硼表机柜设计了保护地和模拟地两个“接地”铜排，其中保护地是裸铜排，与电厂接地母线连接。模拟地需要和机柜悬浮安装，也就是模拟地与机柜地之间是绝缘浮空的。该设计本身就是为了确保信号回路同电位且不接入大地，避免引入干扰。接下来，对信号处理流程作介绍。

涂硼正比计数管电离产生 μV 脉冲信号，这个信号很弱小，且含有噪声信号。因此在离计数管不远的地方设计了前置放大器，把 μV 信号放大 1000 倍，成为 mV 信号，再使用同轴电缆远传到硼表机柜，经过主放大器进一步放大为 V 信号。使用示波器对主放大器输出的信号进行录波，可以发现正常信号中叠加了大量不规则的噪声信号，需要对这部分信号进行处理。

为了处理噪声信号，引入甄别阈值概念，也就是将幅值低于某一数值的信号定义为噪声信号直接剔除，这一数值需要设置为多少需要通过试验的方法建立甄别阈值曲线。以某核电厂实验数据为例，甄别阈和计数率对应关系如下： $0.3\text{V}/96802.42\text{cps}$ 、 $0.6\text{V}/33874.03\text{cps}$ 、 $1.0\text{V}/26286.28\text{cp}$ 、 $1.2\text{V}/24598.14\text{cp}$ 。从上述数据可以看出，绝大部分的噪声信号在 1V 甄别电压下都已经被有效滤除，因此可以在 $1\sim 1.2\text{V}$ 之间选取合适数值作为甄别阈值。

设置合适的阈值电压是确保脉冲计数稳定的第一步，接下来还要确保前置放大器有足够的抗干扰能力。以某电厂测量数据为例，在将甄别阈值设置为 1.1V 之后，还出现了硼表测量值的阶跃向下波动 2% 的情况，之后自动恢复正常。查看后台数据，发现是因为在某个时刻测量的计数率出现了阶跃上涨。从硼表测量原理可知，硼浓度越低，硼表探测器捕获到的中子计数越多。因此如果引入无法剔除的噪声信号，这部分信号将直接参与硼浓度计算，就会导致测量值突然阶跃上涨，但噪声信号消失后，测量又会自动恢复正常。

为了验证是否真实存在噪声信号，在硼表测量出现波动时，将送探测器的高压值直接降为 0，也就是将探测器退出运行，此时对放大器进行录波。从波形可以捕捉到与正常信号幅值相当的噪声信号，就是因为这部分信号的存在，导致硼表测量值出现阶跃向下的波动现象。证明了硼表计数率的异常波动就是因为引入了大量的噪声信号。

为了解决这一问题，首先需要对脉冲信号处理最关键的前置放大器做分析。前置放大器安装于屏蔽盒内，隔离要求是脉冲信号输入、输出连接器屏蔽层与屏蔽盒、信号地电气连接，与机箱电气隔离，也就是要求浮空安装。进一步看前置放大器和电源模块的连接，如图 1 所示。电源模块的

$\pm 5\text{V}$ 和 $+15\text{V}$ 的电源参考端通过 9 针 D 型头与前置放大器的信号地相连，前置放大器的信号地与外壳相连。为了确保两个地之间等电位，设计了短接线将两个电源的参考端与前置放大器外壳连接。

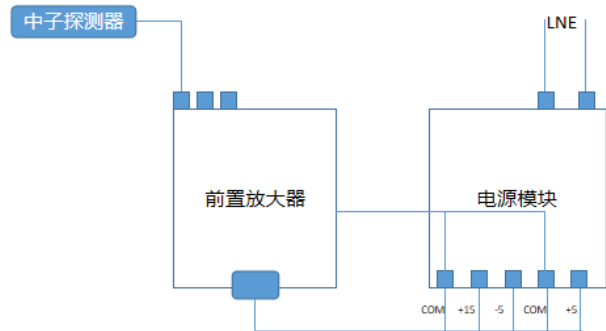


图 1 前置放大器连接示意图

从连接图可知，中子探测器、前置放大器、电源模块的低信号回路连接在一起，也就是做了等电位处理，同时整套设备与电气地是完全绝缘。因此对连接可靠性很重要，如果接触不良就有可能引入干扰，导致信号不稳定。查看所有连接位置，基本是端接或者同轴电缆接头连接，只有前置放大器下部设计的是 D 型插头，存在插头松动可能。实地检查前置放大器接头安装情况，发现接头是从下往上安装，且无固定措施，现场轻微晃动接头，可以明确捕捉到硼表测量计数率波动。

针对上述情况，现场对 D 型接头采取了增加螺丝固定的优化措施，之后再次模拟晃动接头的操作，硼表测量一直维持稳定，录波确认与有效脉冲幅值相当的噪音信号全部消失，证明了接触不良会对测量造成影响。

本节分析就是要充分说明脉冲计数对硼浓度准确测量的意义，如果捕捉到计数率的波动，必须第一时间确认整个测量回路是否接触良好，只要某一个点引入干扰，必将影响硼表测量稳定性。

4 结语

硼表是直接影响核安全的重要仪表，在实际使用过程中会表现出各式各样的故障模式，引入测量偏差。论文从核电厂运行维修的实践出发，提炼总结了影响硼表测量准确性的三个重要因素。对于各类型的测量偏差，可依照本文阐述的方法从这三个因素入手去详细剖析故障机理，快速定位故障点并实施纠偏措施。

参考文献

- [1] 代磊.核电站硼表和氢表运行原理概述[J].中小企业管理与科技,2019(3):2.
- [2] 和娇梅,王远,张泽浩,等.¹⁰B丰度对核电厂硼表测量的影响与优化分析[J].科技视界,2018(9):3.
- [3] 王晓磊.压水堆核电站一回路硼浓度测量[J].科技视界,2013(12):1.