

中子吸收法硼浓度监测系统自动标定方法研究

代航阳, 邓 圣, 崔 璨, 王璨辉, 付国恩, 王红波, 踪训成, 郭 燕

(中国核动力研究设计院 反应堆工程研究所, 成都 610213)

摘要: 核电站运行期间需要对一回路系统进行硼浓度在线监测, 以便及时发现硼稀释事故, 确保反应堆安全; 为保证监测结果的准确性, 需要对硼浓度监测系统定期进行标定; 为了提高定期标定的效率, 提出了一种新型自动标定方法, 分别从控制参数自动获取和标定系数自动获取两方面开展研究; 控制参数自动获取通过远程数字调节技术自动调节工作高压和甄别阈; 标定系数自动获取利用基于数据统计涨落的方法来自动记录中子计数率; 应用效果表明: 硼浓度监测系统的工作高压和甄别阈实现了自动调节, 坪曲线和阈曲线实现了自动绘制, 标定系数实现了自动计算, 测量精度验证试验结果的最大误差为 0.46%, 满足系统技术要求; 该标定方法适用于硼浓度监测系统的标定, 满足该系统定期标定的准确性和效率性要求。

关键词: 硼浓度监测系统; 新型自动标定; 控制参数自动获取; 标定系数自动获取

Research on Automatic Calibration Method of Boron Concentration Monitoring System Based on Neutron Absorption

DAI Hangyang, DENG Sheng, CUI Can, WANG Canhui, FU Guoen, WANG Hongbo,
ZONG Xuncheng, GUO Yan

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: During the operation of nuclear power plant, the boron concentration of primary system has to be monitored for timely finding the boron dilution accident and ensuring the reactor safety. To ensure the accuracy of the monitoring results, it is necessary to calibrate the boron concentration monitoring system regularly. An effective method is proposed for the calibration of boron concentration monitoring system. A new automatic calibration method is designed for improving the efficiency, which is studied on automatic acquisition of control parameters and calibration coefficients. The automatic acquisition method of control parameters is about automatically adjusting high voltages and screening thresholds by using the remote digital regulation technology. The automatic acquisition method of calibration coefficients is about automatically recording neutron counting rates by using the statistical fluctuation method. The results show that the high voltages and screening thresholds can be adjusted automatically, the plateau curve and threshold curve can be drawn automatically, the calibration coefficients can be calculated automatically. Furthermore, the maximum error of verification test, which is equal to 0.46%, meets the technical requirements of system. This calibration method is suitable for the calibration of boron concentration monitoring system, and meets the accuracy and efficiency requirements for periodic calibration.

Keywords: boron concentration monitoring system; new automatic calibration; automatic acquisition of control parameters; automatic acquisition of calibration coefficients

0 引言

中子吸收法硼浓度监测系统^[1-2]是核电站反应堆及一回路系统中硼浓度进行在线监测^[3-6]研制的专用设备, 可以精确监测核电站反应堆及一回路系统中的硼浓度^[7], 还可以及时对硼稀释事故发出报警。为保证监测准确性, 该设备需要在首次使用和每次核电站大修时进行标定。

目前, 核电站硼浓度监测系统的标定过程^[8-9]存在费时、费人、专业性要求高等问题。1) 过程费时具体表现为: 一次标定过程至少需要 18 小时连续不间断地进行; 2) 过程费人具体表现为: 标定过程中至少需要两名操作人

员不间断值守在二次测量设备处进行数据记录和参数调节; 3) 过程专业性要求高具体表现为: 需要经过厂家培训、从事相关工作 1 年以上的人员手动标定。上述 3 点问题给标定工作增加了人工成本, 降低了使用效率。

为降低人工成本, 提高使用效率, 相关技术人员提出了一种中子计数率自动标定方法^[10], 通过预先设定的稳定时间阈值、温度波动范围阈值和计数率阈值确定系统状态稳定, 在系统稳定的情况下自动记录中子计数率。该方法虽然实现了系数的自动标定, 但不能完成控制参数(工作高压和甄别阈)的自动获取, 无法完整地实现硼浓度监测

收稿日期:2022-01-27; 修回日期:2022-03-03。

作者简介:代航阳(1981-),男,四川夹江县人,工学博士,副研究员,主要从事核电子学与核技术应用方向的研究。

引用格式:代航阳,邓 圣,崔 璨,等.中子吸收法硼浓度监测系统自动标定方法研究[J].计算机测量与控制,2022,30(4):79-85,148.

系统的自动标定, 并且自动标定方法中为了尽可能满足所有情况下工作状态稳定, 其设定的稳定时间阈值相对传统手动标定时间更长, 导致标定效率更低。因此, 如何在时间短、人力少条件下, 实现快速、精准、简便的硼浓度监测系统自动标定迫在眉睫。针对手动标定和现有自动标定的缺陷, 本文提出一种适用于中子吸收法硼浓度监测系统的自动标定方法, 解决了当前标定过程时间长、人力资源消耗大、专业要求高的问题, 实现该设备快速和精简的自动标定, 提高了定期标定的效率。

1 中子吸收法硼浓度监测系统

1.1 测量原理

目前, 国内压水核电站反应堆一回路系统的硼浓度监测采用中子吸收法原理^[11]。中子吸收法原理利用硼对热中子具有很大吸收截面, 通过测量探测器接收到的热中子数(中子计数率)来计算回路中的硼溶液浓度。硼溶液中硼-10^[12-13]与中子源发射出的经慢化的热中子发生(n, α)反应, 即 $^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He}$ 反应, 电离的 α 离子与回路中的硼的浓度有关, 硼浓度越大, 反应越多, α 离子的产生量就越多; 反之亦然。 α 离子与硼计数管中的气体产生二次电离, 二次电离产生的脉冲信号经后续电路收集与处理从而计算出硼浓度。硼浓度与中子计数率之间的关系可以通过建立硼浓度计算物理模型得到, 计算模型公式如下:

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

式中, a 、 b 、 c 为二次拟合系数, n 为硼浓度为 P 时的中子计数率, P 为硼浓度。

从上式中看出, 硼浓度监测的准确性取决于拟合系数的准确性, 而拟合系数通过硼浓度监测系统定期标定获得。该系统的定期标定过程包括控制参数标定和标定系数标定。

1.2 组成与功能

中子吸收法硼浓度监测系统包括探测装置^[14-16]、标定装置、机柜、就地显示箱^[17]及温度变送器箱, 具体组成如图1所示。探测装置包括测量容器、中子源、中子探测器、温度探测器、聚乙烯屏蔽体及不锈钢箱体。标定装置为一个可移动的、带轮子的小车恒温水槽。标定装置包括循环泵、标定水箱、标定控制器、恒温设定及显示等。机柜为19吋标准机柜, 其中包括工控机信号处理机箱、NIM信号处理机箱、显示器、键盘/鼠标及工具箱等。就地显示箱为一仪表架安装机箱, 显示内容包括硼浓度和硼溶液温度。温度变送器箱将温度探测器输出的温度信号转换为4~20 mA的温度信号, 仪表架安装。

该系统通过自身的探测装置与核取样回路连接, 构成一个完整和独立的反应堆一回路系统硼浓度测量系统。探测装置内部安装有中子探测器和中子源, 探测器探测中子源经过硼溶液吸收后的剩余热中子数, 探测输出的脉冲信号计数率与探测器接收到的热中子数成正比。该系统通过对脉冲信号^[18-20]进行采集, 并建立中子计数率与硼浓度之间的数据处理模型, 通过中子计数率计算出回路中的硼

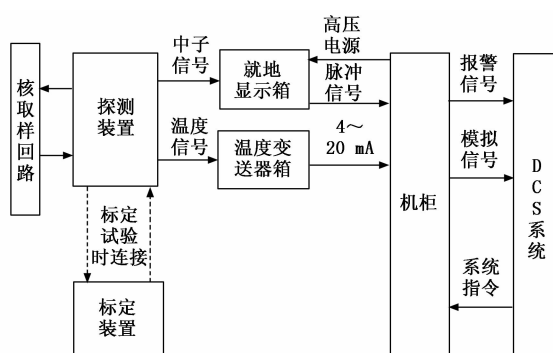


图1 中子吸收法硼浓度监测系统组成示意图

浓度。

该系统的工作高压和甄别阈分别由NIM信号处理机箱里的高压模块和脉冲放大模块提供。目前系统采用机械式电位器进行调节, 需要操作员手动调节电位器控制高压和甄别阈。

1.3 手动标定试验方法

核电站运行一个大修周期(一般为12月或18个月)以后, 随着一回路冷却剂中硼-10丰度和探测装置中中子源衰变的影响, 中子吸收法硼浓度监测系统的测量精度往往会下降, 这时就需要重新对该设备进行标定以满足实时监测的准确性要求。标定试验目标是重新获取中子脉冲信号采集设备的控制参数, 重新获取设备的标定系数。其中控制参数获取方法具体包括坪曲线试验和阈曲线试验, 标定系数获取方法具体包括标定试验和标定结果验证试验, 标定试验方法流程如图2所示。

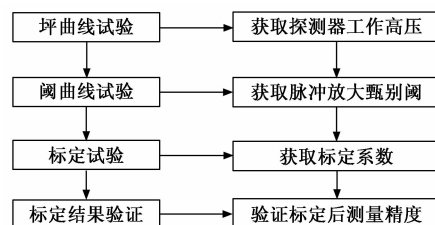


图2 标定试验方法流程图

坪曲线试验是通过手动调节高压模块的方式提升高压, 从而获取不同高压数值下的计数率来绘制坪曲线, 并通过数据分析得到探测器采集数据最稳定的高压坪区, 作为探测器最终的工作高压范围。

阈曲线试验是通过手动调节脉冲放大模块的方式提升甄别阈, 获取不同甄别阈数值下的计数率来绘制阈曲线, 并通过数据分析得到脉冲放大器干扰信号最小甄别电压, 作为脉冲放大器的甄别阈值。

标定试验是在重新获取工作高压和甄别阈后, 开展的设备校准试验。在恒温恒湿条件下, 通过在不同理论硼浓度下, 手动记录若干组数据对(平均计数率 & 滴定硼浓度), 最终按照公式(1)的物理模型计算出二次拟合系数作为最新的标定系数。

标定结果验证试验是在标定系数更新后, 验证设备测

量精度的试验。在恒温恒湿条件和不同硼浓度测量点, 比较硼浓度监测系统软件显示硼浓度与化学滴定硼浓度之间的误差, 是否满足技术要求。

传统的手动标定试验方法在效率上较低, 体现在时间消耗和人力使用。时间消耗主要体现在参数调整、硼浓度稳定; 人力使用主要体现在标定过程全程职守和人工记录数据上。

2 中子吸收法硼浓度监测系统自动标定方案

中子吸收法硼浓度监测系统要实现自动标定分为两个步骤: 控制参数自动获取和标定系数自动获取。

控制参数自动获取关键在于控制参数的自动调节, 采用数字电位器替代机械式电位器的方式实现控制参数的自动调节。硬件方面, 取消现有硼表设备控制参数的机械式调节电位器, 增加数字电位器电路模块, 同时增加一个串口转接模块, 实现与硼表标定软件的远程通讯; 软件方面, 设计包含自动调节控制参数功能的坪曲线和阈曲线自动获取软件界面, 开发控制数字电位器的串口通讯程序。该方案最终目标是自动调节中子探测器工作高压和脉冲放大器甄别阈, 自动绘制坪曲线和阈曲线, 自动获取标定后的工作高压和甄别阈;

标定系数自动获取关键在于中子计数率的自动判稳和记录, 采用基于数据统计涨落的中子计数率稳定判定方法。该中子计数率稳定判定方法替代现有稳定阈值(稳定时间阈值、温度波动范围阈值和计数率阈值)判定方法, 来实现中子计数率的稳定判定。首先, 通过数据统计涨落计算采集到的一段计数率的基准值; 其次, 比较随后采集到的计数率与这个基准值的偏差, 如果偏差小于设定的偏差阈值, 则认为当前计数率已经稳定, 硼溶液充分均匀; 再次, 如果偏差大于设定的偏差阈值, 则认为当前计数率没有稳定, 硼溶液未充分均匀, 因此, 需要继续等待直到当前计数率与上一数据段的基准值偏差在偏差阈值范围内, 则可以判定计数率已经稳定, 并自动记录有效中子计数率, 并通过多组计数率与滴定硼浓度关系自动计算标定后的标定系数。

3 控制参数自动获取

控制参数自动获取关键在于控制参数的自动调节, 坪阈曲线的自动绘制。其中, 控制参数的自动调节通过硬件方法实现, 坪阈曲线自动绘制通过软件方法实现。

3.1 工作高压自动获取

工作高压自动获取是通过坪曲线的自动获取得到。坪曲线自动获取技术包括以下几个部分:

3.1.1 程控高压设计

由于坪曲线的获取需要经常调节高压输出, 所以要实现坪曲线的自动获取, 首先要实现系统自动控制调节高压电源的输出。

目前系统的高压电源采用手动调节方式输出高压。要实现系统自身能够控制调节高压电源的输出, 需要增加程控调节方式, 即采用数字电位器^[21]的高压输出调节方式。

为了增加可靠性, 在增加数字电位器的调节方式的同时, 保留原有机电电位器, 并通过在电路板上跳线方式进行调节方式的切换, 由于电位器切换需要在高压电源断电情况下操作(冷切换), 设置跳线的方式是为了避免非专业人员操作而损坏高压电源。这种冗余的调节方式可保证即使某种调节方式失效后, 仍能切换到另一种调节方式。另外, 在高压电源的输出口增加保护电路, 防止电位器失效导致的探测器损坏。程控高压电源信号流程如图 3 所示。

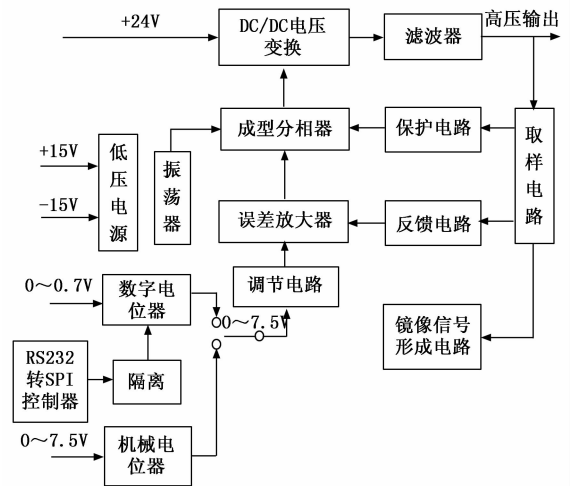


图 3 程控高压电源信号流程图

通过调节变换驱动信号幅度达到调整输出高压的目的。主要部分由低压电源、延时缓升精密基准电源、取样电路、高频振荡器、误差放大器、驱动信号形成与幅度控制电路、功率变换器及过压过流保护电路等组成。

3.1.2 坪曲线自动获取软件设计

高压电源具备程控功能后, 需要设计开发上层坪曲线自动获取程序软件。软件采用 Labwindows/CVI 开发工具开发。坪曲线自动获取软件是基于中子探测器坪特性测试程序步骤设计, 步骤如图 4 所示。

主要包括:

- 1) 首先设置定时计数时间、甄别阈等参数;
- 2) 启动坪曲线获取程序, 自动调节甄别阈至设定值, 按照预设调节速率提升高压直至测量到计数值;
- 3) 高压数值稳定后, 开始定时计数, 将计数结果保存并开始绘制坪曲线;
- 4) 以 50 V 为间隔提升高压, 稳定后计数, 保存数据绘制曲线, 检测该测试点与上一测试点之间的斜率, 如果该斜率大于坪斜阈值, 则表示高压未进入坪区, 重复步骤 4); 如果该斜率小于坪斜阈值, 则表示高压进入坪区, 进入 5);
- 5) 以 20 V 为间隔提升高压, 稳定后计数, 保存数据绘制曲线, 直到高压值大于高压设定上限值, 高压调节会自动停止;
- 6) 根据测得结果绘制坪曲线, 选取工作高压, 计算出坪长、坪斜。

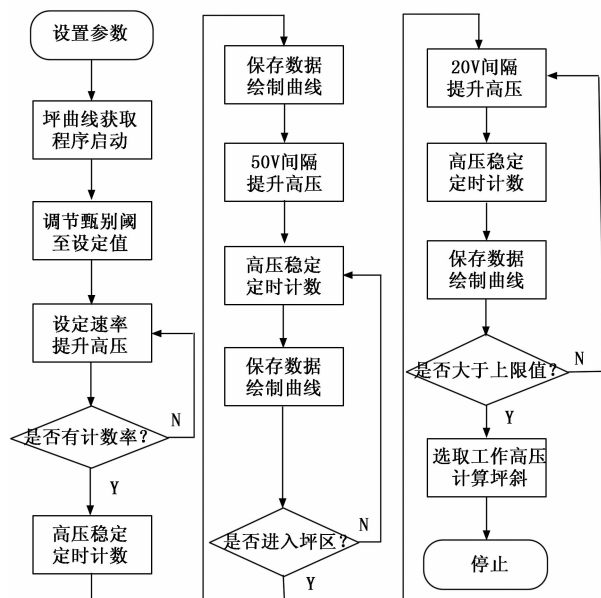


图 4 坪曲线自动获取流程图

3.2 甄别阈自动获取

甄别阈自动获取是通过阈曲线自动获取得到，阈曲线自动获取技术包括以下几个部分：

3.2.1 程控脉冲放大器设计

目前系统的脉冲主放大器的甄别阈压通过机械电位器进行调节，调节范围为 0.3~10 V。为实现自动调节甄别阈，需要增加程控调节功能，即采用数字电位器的调节方式，保留原有机械电位器调节方式，这种冗余的方式可确保某一种调节方式失效后，仍可切换到另外一种调节方式。由于甄别阈调节方式切换不会对其他设备部件造成影响，可采用热切换方式，在面板设置选择开关进行控制方式的选择。程控脉冲放大模块信号流程如图 5 所示，由一级放大电路、增益细调电路、增益粗调电路、微分放大电路、基线恢复电路、直流恢复电路、甄别电路、脉宽固定电路、基准信号发生电路组成。实现了对中子脉冲信号的放大、甄别、成形，同时具有对甄别阈手动和程控双重调节功能。

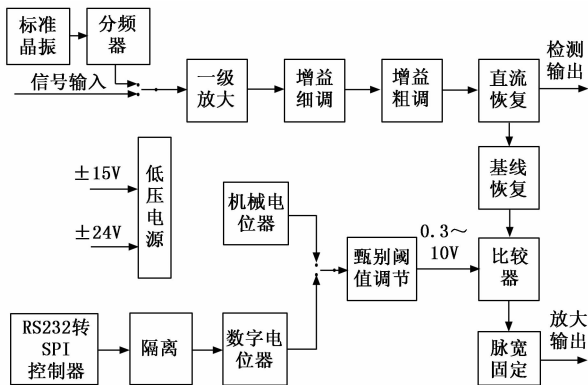


图 5 程控脉冲放大器信号流程图

3.2.2 阈曲线自动获取软件设计

脉冲放大器具备甄别阈程控调节功能后，需要开发设计上层的阈曲线自动获取软件，控制自动完成阈曲线的获取，软件采用 Labwindows/CVI 开发工具开发。阈曲线自动获取软件是基于放大器甄别阈测定程序步骤设计，步骤如图 6 所示。

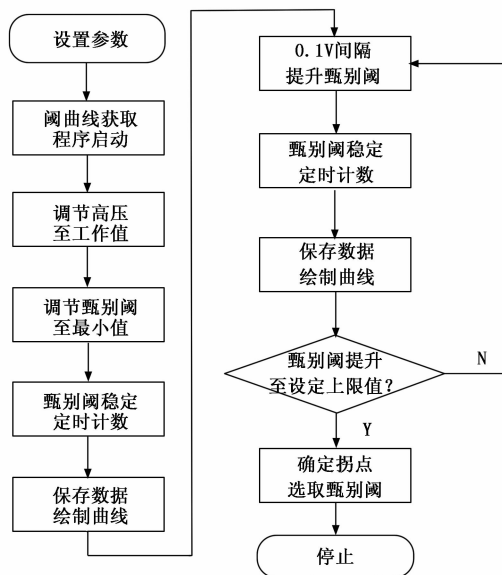


图 6 阈曲线自动获取流程图

主要包括：

- 1) 设置定时计数时间、工作高压等参数；
- 2) 启动阈曲线获取程序，自动调节高压至工作高压，设置甄别阈为最小值 0.3 V；
- 3) 甄别阈数值稳定后，开始定时计数，将计数结果保存并开始绘制阈曲线；
- 4) 以 0.1 V 为间隔提升甄别阈，稳定后计数，保存数据绘制曲线，直到甄别阈数值大于设定上限值，甄别阈调节会自动停止；
- 5) 在绘制的阈曲线中找到拐点，自动选取工作时的甄别阈。

4 标定系数自动获取

中子吸收法硼浓度监测系统定期标定需要通过等温标定过程获得新的标定系数来标定设备。本文利用基于数据统计涨落的中子计数率稳定判定方法来实现自动标定及标定系数自动计算。标定系统自动获取方法包括以下几个部分：

- 1) 高压自动调节：等温标定程序通过串行接口控制高压模块的数字电位器调节高压值。高压数值调节按照设定速率上升，直到坪曲线获取试验确定的工作高压为止。
- 2) 甄别阈自动调节：等温标定程序通过串行接口控制脉冲放大模块的数字电位器调节甄别阈至工作甄别阈为止。
- 3) 中子计数率稳定的自动判定：等温标定程序根据数

据统计涨落的计算结果确定计数率是否已经稳定，自动判定流程如图 7 所示。在每个等温标定试验点，溶液配置完成，启动定时计数后，开始如下过程判断：

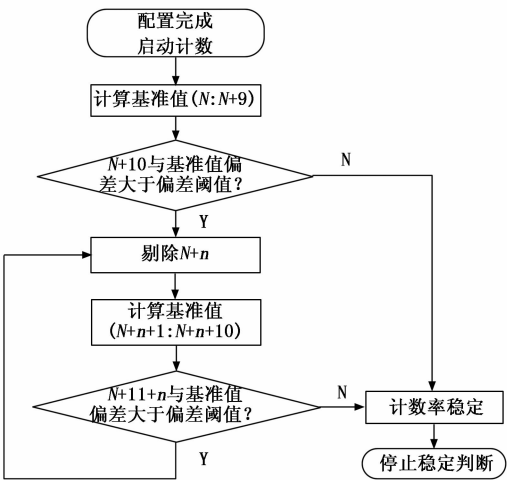


图 7 中子计数率稳定自动判定流程图

- (1) 通过数据统计涨落计算序号 $N-N+9$ 这 10 个计数率的基准值；
- (2) 比较随后序号 $N+10$ 与这个基准值的偏差，如果偏差小于设定的偏差阈值，则认为当前 $N+10$ 计数率已经稳定，硼溶液充分均匀；
- (3) 如果偏差大于设定的偏差阈值，则认为当前计数率没有稳定，硼溶液未充分均匀；
- (4) 剔除掉序号 N 的计数率，重新计算 $N+1-N+10$ 这 10 个计数率的基准值；
- (5) 再比较随后序号 $N+11$ 与新的基准值的偏差，如果偏差小于设定的偏差阈值，则认为当前 $N+11$ 计数率已经稳定，硼溶液充分均匀；
- (6) 如果偏差仍然大于设定的偏差阈值，则认为当前 $N+11$ 计数率没有稳定，硼溶液未充分均匀，则需继续 (4) ~ (5) 的过程，直到计数率稳定为止。

4) 标定曲线自动绘制：根据每个试点的稳定计数率结果和化学滴定值结果自动绘制标定曲线在等温标定程序界面上，并自动计算标定系数。

5) 参数文件自动生成：标定完成后将标定系数生成参数设置文件，自动导入硼浓度监测设备测量软件中。

等温自动标定步骤如图 8 所示，主要包括：

- 1) 设置标定参数，包括定时时间、基本采样点、工作高压、甄别阈、标定点数、标定温度、偏差阈值等参数；
- 2) 启动等温标定程序，自动调节高压和甄别阈至设定的工作值；
- 3) 化学人员完成硼溶液配制，并通知等温标定程序；
- 4) 等温标定程序启动定时计数，根据基于数据统计涨落的中子计数率稳定判定方法判断计数结果是否稳定，不稳定则继续等待；
- 5) 判定稳定后，记录平均计数率，并通知化学人员进

行取样滴定；

6) 化学人员滴定完成后将滴定值发送到等温标定程序，根据滴定值和平均计数率绘制标定曲线；

7) 等温标定程序判定是否完成所有点标定，未完成则重复步骤 3) ~ 6)；

8) 完成所有点标定后，自动计算出标定系数，生成参数设置文件，将参数设置文件导入硼浓度监测设备测量软件中即可完成标定。

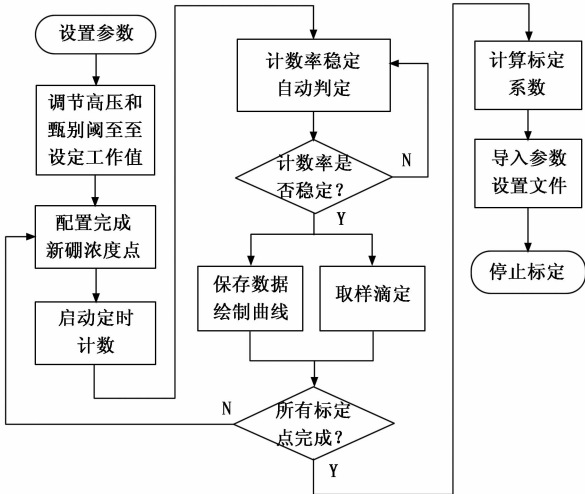


图 8 等温自动标定流程图

5 自动标定方法应用结果及评价

5.1 试验装置搭建

为验证自动标定方法的实用性和可靠性，基于控制参数自动调节硬件改造和自动标定控制软件构建了标定试验装置。该装置是在原有中子吸收法硼浓度监测系统（结构如图 1 所示）基础上，在硬件和软件上进行了改造。硬件上，用程控高压模块和程控脉冲放大模块替换了原来的对应模块，如图 9 所示；软件上，在原有硼浓度测量软件中加入了坪阈曲线自动获取算法和标定系数自动获取算法，同时更新了标定试验界面，如图 10 所示。



图 9 程控高压电源模块和程控脉冲放大模块

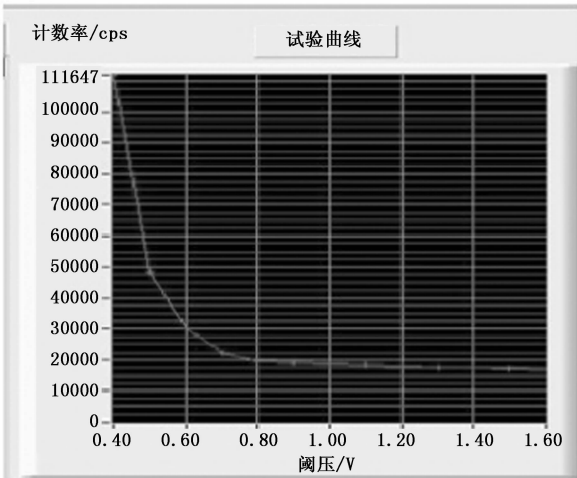


图 12 阈曲线图

表 3 标定系数自动获取试验数据

| 序号 | 平均计数率/cps | 滴定硼浓度/(mg/L) |
|----|-----------|--------------|
| 1 | 17 990.52 | 48.10 |
| 2 | 17 616.75 | 87.57 |
| 3 | 16 903.6 | 169.67 |
| 4 | 15 807.22 | 316.38 |
| 5 | 15 238.77 | 403.34 |
| 6 | 14 253.56 | 565.00 |
| 7 | 13 587.79 | 699.46 |
| 8 | 12 572.01 | 926.12 |
| 9 | 11 859.00 | 1 115.38 |
| 10 | 11 198.73 | 1 319.57 |
| 11 | 10 563.95 | 1 542.09 |
| 12 | 9 822.47 | 1 852.45 |
| 13 | 9 285.21 | 2 122.79 |
| 14 | 8 884.54 | 2 335.10 |
| 15 | 8 307.38 | 2 722.91 |
| 16 | 7 811.60 | 3 107.97 |
| 17 | 7 257.64 | 3 606.67 |
| 18 | 6 903.74 | 4 000.92 |
| 19 | 6 590.03 | 4 388.43 |
| 20 | 6 272.99 | 4 850.53 |

表 4 测量精度验证试验数据

| 理论硼浓度/ (mg/L) | 平均硼浓度/ (mg/L) | 滴定硼浓度/ (mg/L) | 偏差 |
|------------------|------------------|------------------|-----------|
| 4 000 | 3 915.3 | 3 917.4 | -0.05% |
| 1 600 | 1 683.6 | 1 675.9 | 0.46% |
| 500 | 515.3 | 510.5 | 4.82 mg/L |

5.3 效率评价

经过硼浓度监测系统定期维护人员的实际操作，相比原来人员全程职守手动标定以及稳定状态下的自动标定，植入自动调节控制参数和自动判定计数率稳定方法的新型

自动标定在工作效率上获得了极大的提高，具体对比数据如表 5 所示。

表 5 新型自动标定方法与现有标定方法效率对比

| 试验项目 | 工作时间对比 | | 工作效率提升比例/% |
|-----------------|--------------|------------|------------|
| | 新型自动 标定/s | 现有标 定/s | |
| 坪曲线获取(10 个试验点) | 2 000 | 10 000 | 80 |
| 阈曲线获取(10 个试验点) | 2 000 | 10 000 | 80 |
| 标定系数获取(20 个试验点) | 36 000 | 60 000 | 40 |

6 结束语

为解决当前标定过程时间长、人力资源消耗大、专业要求高的问题，研究了一种核电站中子吸收法硼浓度监测系统的新型自动标定方法。该自动标定方法包括控制参数的自动获取和标定系数的自动获取。控制参数的自动获取利用控制参数的自动调节技术，由远程硼浓度监测设备测量软件输出的数字信号控制模拟控制参数的变化，自动绘制坪曲线和阈曲线，从而自动获取控制参数。标定系数的自动获取利用基于数据统计涨落的中子计数率稳定判定方法，采用当前计数率与统计涨落基准值不断比较的方式，判定满足偏差阈值的稳定计数率，并通过计数率与滴定硼浓度之间的数字关系计算标定系数。从自动标定方法的应用效果来看，标定试验过程能实现“一键自动标定”，自动获取工作高压、甄别阈和标定系数，实现了硼浓度监测系统快速、精简和准确的自动标定，提高了核电站硼浓度测量设备定期标定的效率。

参考文献：

[1] 张文杰，屈国普，郭兰英，等. 硼浓度测量技术研究 [J]. 核电子学与探测技术，2007，27（5）：951-957.

[2] 卢才华，饶贤民，庄 昀. 压水堆核电站一回路硼浓度监测 [J]. 核电子学与探测技术，2004，24（3）：262-264.

[3] 邓 圣，李 翔，等. 在线式核电站硼浓度计研制 [C] //第七届全国核仪器及其应用学术会议. 暨全国第五届核反应堆用核仪器学术会议论文集，2009：312-316.

[4] 郑军伟，刘 洋，邓 圣，等. 某核电厂在线式硼表测量准确度超标原因分析及改造研究 [J]. 核动力工程，2020，41（2）：102-108.

[5] 饶仲群. 在线硼浓度计在压水堆核电站中的应用 [J]. 核电子学与探测技术，2015，35（2）：185-187.

[6] 饶仲群. 在线滴定硼浓度分析仪在核电厂的应用 [J]. 自动化与仪器仪表，2015，1：108-112.

[7] 王晓磊. 压水堆核电站一回路硼浓度测量 [J]. 科技视界，2013，12：137.

[8] 鲍克勤，完颜绍会，叶建华，等. 硼水浓度的测量及硼表的标定方法 [J]. 动力工程，1998，18（5）：7-10.

[9] 黄平儿，李 斌，何绍群. 核电厂硼表测试与标定技术试验研究 [J]. 核电子学与探测技术，2012，32（6）：741-743.

（下转第 148 页）