

# 核反应堆棒位探测器自动检测装置的设计

蓝 剑<sup>1</sup>, 舒芝锋<sup>1</sup>, 刘 阳<sup>2</sup>, 秦 凤<sup>1</sup>

(1. 中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉 430070;

2. 福建福清核电有限公司, 福建 福清 350300)

**摘要:** 核电厂棒位探测器是检测核反应堆控制棒状态的重要设备, 对棒位探测器进行定期检测是核电厂运维工作中的关键环节, 然而现场棒位探测器数量较多, 通过人工手动进行检测费时费力且存在“人因”失误风险。该文详细介绍了一种棒位探测器自动检测装置, 装置包含主控模块、电源系统、线圈电阻测量模块、绝缘电阻测量模块、信号切换阵列等模块, 可同时自动完成 3 个棒位探测器的测试。测试表明, 利用自动检测装置进行检测, 检测误差对比高精度万用表在 1% 以内, 检测效率提升 50% 以上。

**关键词:** 棒位探测器; 自动检测; 线圈电阻测量; 绝缘电阻测量

中图分类号: TL351.5; TM623

文章编号: 1000-0682(2024)04-0036-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.008

## Design of automatic detection device for nuclear reactor rod position detectors

LAN Jian<sup>1</sup>, SHU Zhifeng<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, QIN Feng<sup>1</sup>

(1. China Nuclear Power Operation Technology Corporation, LTD., Hubei Wuhan 430070, China;

2. Fujian Fuqing Nuclear Power Co., Ltd., Fujian Fuqing 350300, China)

**Abstract:** The rod position detector in nuclear power plants is an important equipment for detecting the status of control rods in nuclear reactors. Regular inspection of rod position detectors is a key link in the operation and maintenance of nuclear power plants. However, there are a large number of on-site rod position detectors, which are time-consuming and laborious to manually detect, and there is a risk of human error. This article provides a detailed introduction to an automatic detection device for rod position detectors, which includes a main control module, a power system, a coil resistance measurement module, an insulation resistance measurement module, a signal switching array, and other modules. The device can automatically complete the testing of three rod position detectors simultaneously. Tests have shown that using an automatic detection device for detection results in a detection error of less than 1% compared to a high-precision multimeter, and the detection efficiency is improved by more than 50%.

**Keywords:** rod position detector; automatic detection; measurement of coil resistance; insulation resistance measurement

## 0 引言

核电厂棒位探测器是检测核反应堆控制棒状态的重要设备, 它是核反应堆进行功率控制不可或缺的一环, 对保障核电厂的安全稳定运行起到关键作

用。对棒位探测器进行定期检测是核电厂运维工作中的关键环节, 然而现场棒位探测器数量较多, 通过人工手动对每个棒位探测器线圈性能进行检测费时费力, 且存在“人因”失误风险。针对上述问题, 该文设计了一种棒位探测器自动检测装置, 可以自动完成棒位探测器的检测工作<sup>[1-2]</sup>。

## 1 总体设计

棒位探测器自动检测装置主要由上位机、自动

收稿日期: 2024-02-29

第一作者: 蓝剑(1986—), 男, 汉, 湖北孝感人, 硕士, 主要研究方向为核电厂仪控系统运维技术开发。E-mail: 779461676@qq.com

检测装置、对外接头及电缆组成,考虑到提高棒位探测器的检测效率以及设备本身的便携性,装置设计了三路与探测器对接的检测接头,可一次同时连接最多三个棒位探测器并完功能检测。棒位探测器自动检测装置检测原理如图 1 所示。

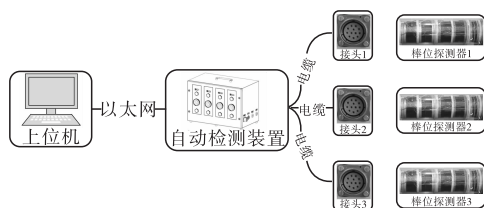


图 1 棒位探测器检测原理示意图

自动检测装置可以完成棒位探测器线圈间绝缘电阻测试、线圈电阻测试、数据自动分析、上位机通讯等功能,自带触摸屏可实现人机交互和测试状态、结果显示:在现场进行测试时,自动检测装置可以脱离上位机独立完成测试工作,测试结束之后可通过以太网将数据导出至上位机<sup>[3]</sup>。

上位机可以对自动检测装置的数据进行读取、分析,导出、生成报表、装置参数设置、装置状态检测等功能。

接头及线缆将棒位探测器与自动检测装置进行连接,接头可与棒位探测器接口直接对接,同时另一端通过延长线缆与自动检测装置本体进行连接。该设计中,检测装置可同时通过最多 3 路接头与 3 个棒位探测器进行对接,并自动完成检测工作。

## 2 硬件设计

### 2.1 系统架构

棒位探测器自动检测装置包含主控模块、线圈电阻测量模块、绝缘电阻测量模块、信号切换阵列、USB 模块、以太网模块、电源系统、显示屏,具体架构如图 2 所示。

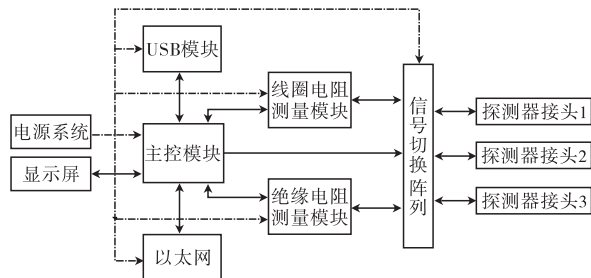


图 2 硬件架构图

主控模块通过控制信号切换阵列完成棒位探测器线圈电阻和绝缘电阻的测试,并将线圈电阻信号和绝缘电阻信号处理之后的测量结果通过显示屏显

示;线圈电阻测量模块对棒位探测器线圈电阻进行采样,内置隔离采样电路和信号调理电路;绝缘电阻测量模块对棒位探测器线圈绝缘电阻进行采样,内置 500 VDC 高压电源和隔离采样模块。装置可通过以太网与上位机进行通讯,也可通过 USB 模块进行数据导出<sup>[4-5]</sup>。

### 2.2 主控模块

主控模块中的主控制器选用单片机,单片机需具备 12 位 ADC, USB OTG, 同时具有符合 IEEE 1588 v2 标准要求的以太网 MAC10/100 等功能,通过搭配外设芯片可以实现以太网通讯、数据储存、信号控制、模拟信号采集、数据传输等功能,完成检测装置整机的控制。主控模块架构图如图 3 所示。

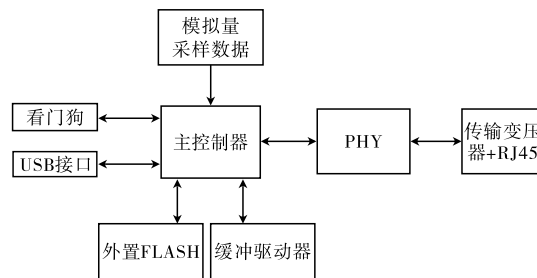


图 3 主控模块架构图

主控模块中外置 FLASH 支持 SPI 进行数据传输;缓冲驱动器,既可以增强单片机的驱动能力,也可以兼容兼容 CMOS、TTL 电平,保证单片机与外设芯片电气性能兼容;以太网通信电路中 PHY 芯片采用 RMII 接口与单片机进行连接;对于绝缘电阻信号和线圈电阻信号,利用单片机自带的 ADC 模块进行模拟信号采样。

### 2.3 电源系统

电源系统给整个装置各功能模块供电,电源系统架构设计如图 4 所示。

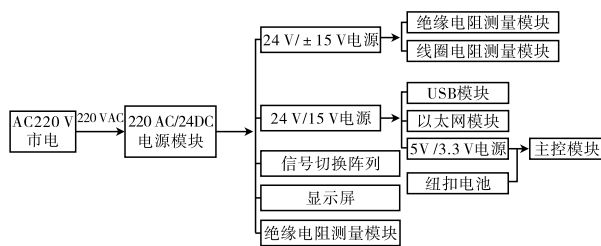


图 4 电源系统架构图

装置采用单相 220 VAC/50 Hz 市电作为输入电源,装置内部通过 220 VAC 转 24 VDC 电源模块完成第一级电源转换,其后级负载包括:24 V 转  $\pm 15$  V 电源、24 V 转 5 V 电源、信号切换阵列、显示屏、绝缘电阻采集模块。24 V 转  $\pm 15$  V 电源采用反激拓

扑,输出 +15 V 和 -15 V 两路电源分别给绝缘电阻测量模块和线圈电测测量模块中的信号调理电路供电;24 V 转 5 V 电源采用 BUCK 拓扑,输出 5 V 电压给 USB 模块、以太网模块以及 5 V 转 3.3 V 电源供电;5 V 转 3.3 V 电源主要用来给主控模块供电,为保证主控模块工作的稳定性,采用 LDO 方案降低电源噪声,输出电压 3.3 V。

## 2.4 线圈电阻测量模块

针对棒位探测器线圈电阻的测量,信号采集调理方案设计如图 5 所示:首先利用比例分压电路接入探测器线圈,并通过与  $R_6$  串联进行基准电压  $V_{ref}$

分压,从而将线圈电阻值转换为电压信号即:

$$V_{coil} = \frac{V_{ref} * R_{coil}}{R_{coil} + R_6} \quad (1)$$

其中: $V_{coil}$ 是线圈电压信号; $R_{coil}$ 为线圈电阻; $V_{ref}$ 为基准电压。

此时,采集到的  $V_{coil}$ 是线圈上的压差信号,并非对地的电压值,因此进一步的采用差分放大电路对  $V_{coil}$ 进行放大,差分电路的放大倍数由  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_5$  和  $R_7$ 共同决定,考虑到保证运算放大器输入电阻的一致性,本设计中放大倍数也为 2.5 倍。

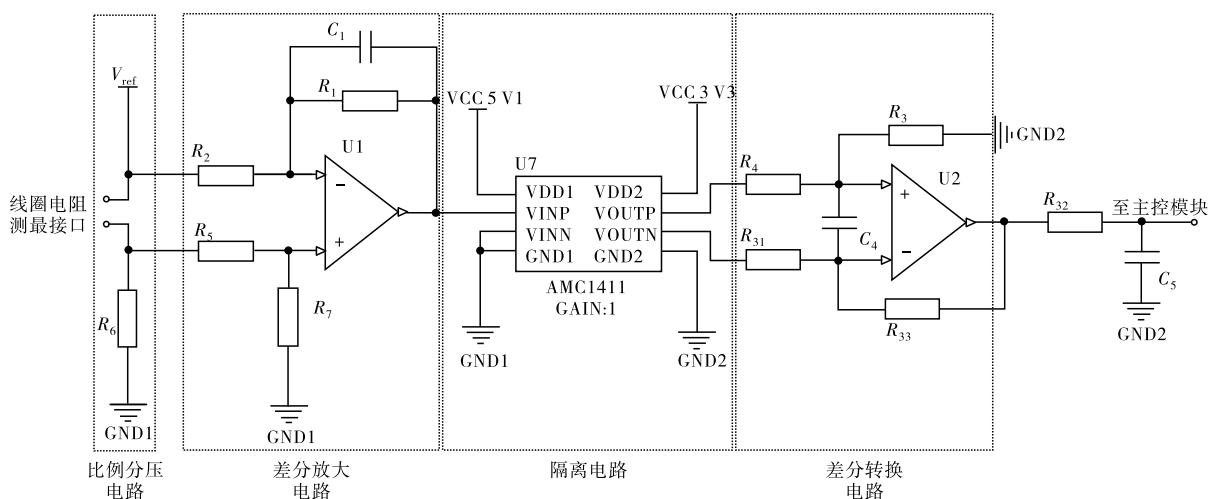


图 5 线圈电阻采样调理电路

测量电路与探测器线圈直接连接,但是探测器接地与测量电路接地并非共地,同时考虑到工业现场外部电磁环境复杂,设计中线圈电阻测量电路引入电气隔离环节,采用隔离运放对差分放大电路的输出信号进行隔离,增强设备的抗干扰性和稳定性,图 5 中 U7 为隔离运放,放大增益为 1,隔离电压达 1000 V<sub>rms</sub> 以上。

经过 AMC1411 隔离之后的输出信号依然是差分信号,不能直接输入 AD 模块进行信号转换,因此还需对差分信号进行转换;如图 5 中差分转换电路将差分信号转换为对 GND2 的差模电压信号,并经过  $R_{32}$  和  $C_5$  组成的 RC 滤波电路滤波之后送入主控模块的进行 A/D 转换处理,从而完成线圈电阻的测

量工作<sup>[6-8]</sup>。

## 2.5 绝缘电阻测量模块

测量线圈的绝缘电阻采用测量漏电流的方式实施。正常情况下,绝缘电阻通常为 MΩ 级别,根据欧姆定律,在电压一定情况下,电阻值越大,流过电阻的电流越小,因此利用几十伏的电压测量绝缘电阻会导致漏电流过小,无法精确对电流进行采样,最终导致无法准确测量绝缘电阻。方案采用 500 V 直流电压进行绝缘电阻测量,电源拓扑如图 6(a) 所示,采用反激拓扑,将 24 VDC 升压至 500 VDC,输出采用串联方式,即输出 2 路 250 VDC 串联组成 500 VDC 电压<sup>[9-10]</sup>。

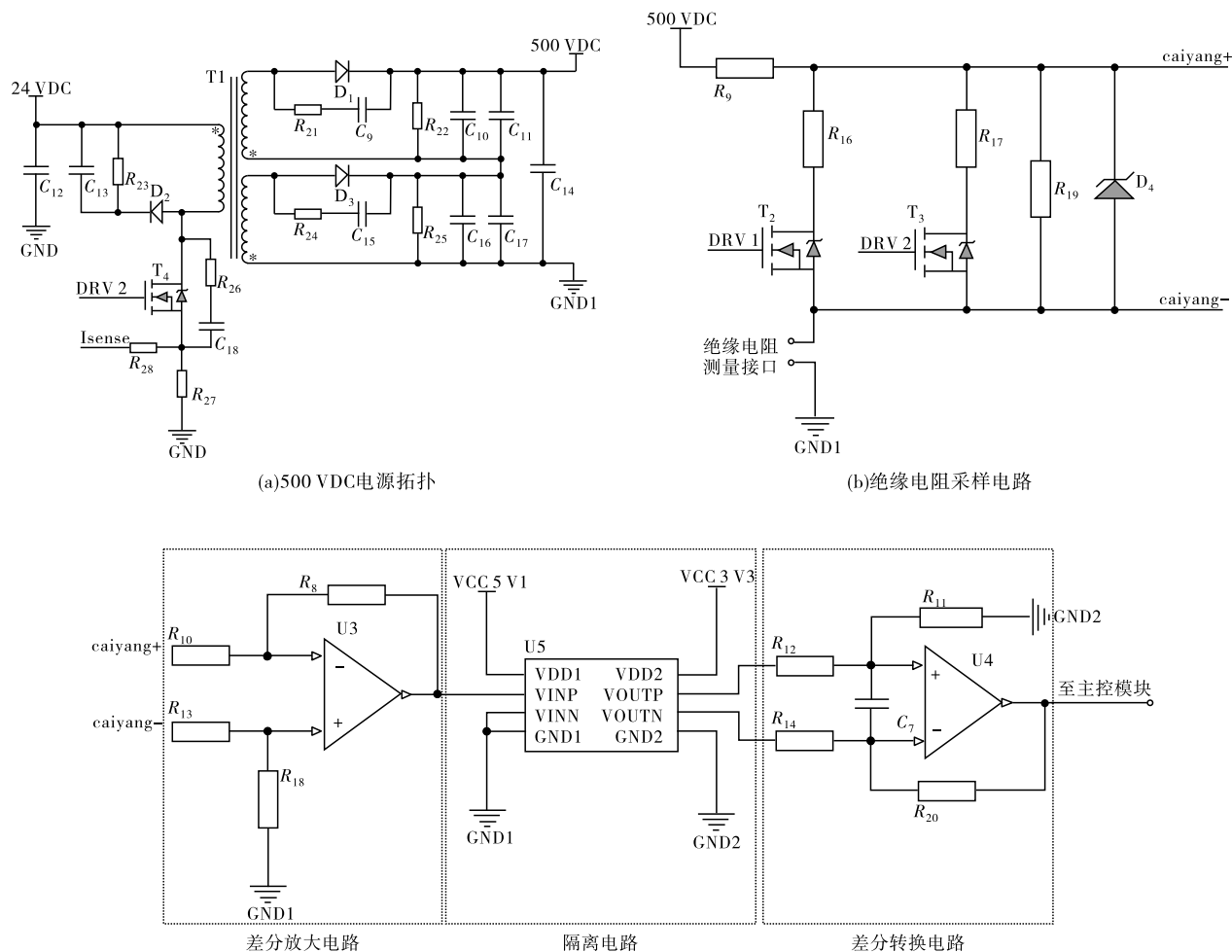


图 6 绝缘电阻采样调理电路

探测器线圈电阻测试端口通过图 6(b) 所示采样电路接入检测装置,  $R_{16}$ ,  $R_{17}$ ,  $R_{19}$  组成漏电流采样电阻阵列, 由于阻值相对  $R_9$  和绝缘电阻很小, 在分压环节中可忽略不计。因此主要由  $R_9$  与绝缘电阻进行串联分压,  $R_1$  主要作用是进行限流, 防止由于线圈破损导致绝缘电阻急剧下降引发的设备过流损坏。 $R_{16}$ ,  $R_{17}$ ,  $R_{19}$  组成的漏电流采样电阻阵列可根据绝缘电阻大小进行三档切换, 保证检测的精确度; 当待测绝缘电阻较大区间时,  $T_2$  和  $T_3$  断开, 由  $R_{19}$  单独采样漏电流; 当待测绝缘电阻在正常区间时,  $T_2$  导通,  $T_3$  断开, 由  $R_{16}$  与  $R_{19}$  并联采样漏电流; 当待测绝缘电阻在较小区间时,  $T_2$  导通,  $T_3$  导通, 由  $R_{16}$ 、 $R_{17}$  与  $R_{19}$  并联采样漏电流。

通过电阻对漏电流进行检测, 间接将绝缘电阻

信号转换为电压信号, 由于采样电阻采集的电压为浮地压差, 因此类似于线圈电阻采样调理电路, 要分三步对信号进行调理: 差分电压放大、采样信号隔离、差分信号转换。不同的是放大倍数更大, 这里隔离运放放大倍数为 8 倍; 差分放大电路放大倍数配置为 200 倍<sup>[11-12]</sup>。

## 2.6 信号切换阵列

该设计中, 一次最多可接入 3 路棒位探测器进行测试, 每个棒位探测器有 7 组线圈, 由于线圈数量较多, 受限于设备体积、重量限制无法同步进行测试, 因此通过设计信号切换阵列依次完成棒位探测器线圈性能的测试工作。信号切换阵列原理图如图 7 所示。

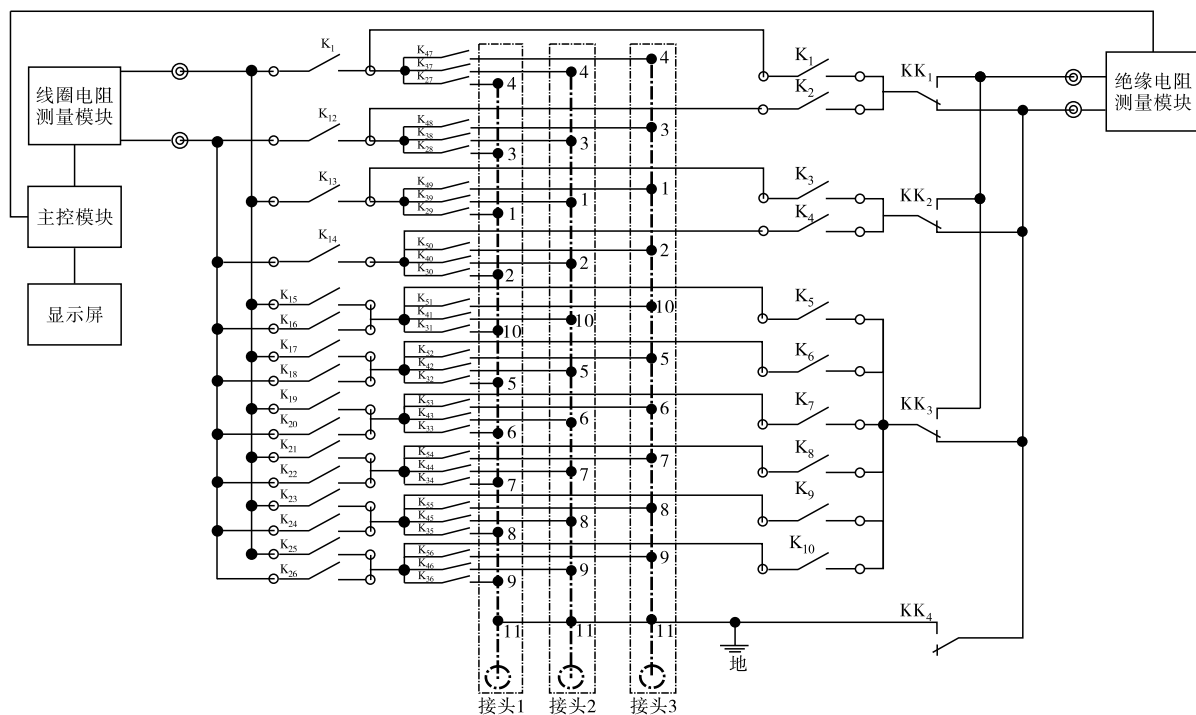


图7 信号切换阵列原理图

图7中包含有接头1~3、单刀继电器  $K_1 \sim K_{56}$ 、单刀双掷继电器  $KK_1 \sim KK_4$ 、线圈电阻测量模块、绝缘电阻测量模块、主控模块、显示屏等设备；图中虚线框所示为探测器引出接头及接头插针，插针分别与探测器中的各类线圈连接：3、4 针连接探测器中的初级线圈，1、2 针连接探测器中的辅助线圈，5、6、7、8、9、10 针连接探测器中的次级线圈；装置通过主控模块控制各继电器进行投切，完成不同接头对应棒位探测器的线圈电阻测量和绝缘电阻测量。

### 3 软件设计

装置软件工作流程从装置上电之后启动。

(1) 系统初始化：控制器完成程序的装载以及前一次断电时的数据读取；

(2) 系统自检：对装置各功能模块状态进行检查，包括电源状态、信号切换阵列状态、线圈电阻测量模块状态、绝缘电阻测量模块状态、通讯状态等，当检测到状态异常时，装置进行报警提示；

(3) 测试信息设置：对测试时间、阶段、探测器信息、报警阈值等进行设置；

(4) 测试功能设置：对当前测试的测试模式进行设置，既可以设置全自动测试也可以进行单步选择性测试；自动测试可以按照预设流程自依次完成线圈电阻测试、绝缘电阻测试、接头切换等功能；单步测试可以手动选择测试项目、测试接头进行；

(5) 测试结果统计分析：对测试结果进行存储和分析，当测试结果正常时，输出报告；当测试结果异常时，进行异常报警并同时输出测试报告。

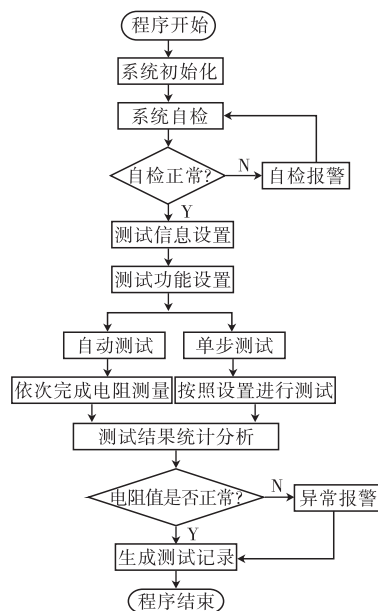


图8 功能检测软件流程图

### 4 系统测试

自动检测装置对线圈电阻测试结果如表1所示，装置分别对5组不同线圈进行测试，测试结果与高精度万用表测试结果进行对比，偏差在1%以内，测试结果满足现场使用需求。

表 1 线圈电阻测试结果

	线圈 1	线圈 2	线圈 3	线圈 4	线圈 5
检测装置电阻/ $\Omega$	8.56	8.53	8.60	8.58	8.67
万用表电阻/ $\Omega$	8.59	8.60	8.56	8.62	8.63

绝缘电阻测试采用不同阻值的标准电阻对绝缘电阻测试性能进行验证,测试记过如表 2 所示,整体偏差在 1% 以内,测试结果满足现场使用需求。

表 2 绝缘电阻测试结果

实际值电阻/ $M\Omega$	1	5	10	20	50
测量值/ $M\Omega$	1.01	4.96	10.08	20.15	50.32

对检测的时效性进行评估对比,评估结果如表 3 所示;手动测试一般需要 2 人执行,一人负责稳定测试工装、一人负责测试;采用自动检测装置只需要一人负责切换接头即可完成自动测试工作,整体检修效率提升 50% 以上。

表 3 检测失效对比

	人数	人员经验 依赖性	单组测试探 测器线圈电 阻检测耗时	单组测试探 测器绝缘电 阻检测耗时
人工手动 测试	2	高	长	长
装置测试	1	低	短	短

5 结束语

原核电厂棒位探测器的检修工作,一般需要两名工作人员配合手动实施;采用该文设计的棒位探测器自动检测装置,每次只需要一名工作人员即可实施棒位探测器的检修工作,实现棒位探测器线圈电阻和绝缘电阻的自动化测试和数据自动记录,整

体检修效率可提升 50% 以上;同时通过采用自动化的测试流程,使现场检修工作的实施更加规范,降低“人因”失误风险。

参考文献:

[1] 万治东. 核电工程控制棒棒位探测器简析[J]. 化工管理,2017(36):114.

[2] 楼蕴昊,马一鸣,周宇. 方家山核电厂棒位探测器的故障分析及改进措施[J]. 中国核电,2022(05):730 - 734.

[3] 吴立峰. 基于超声检测技术的便携式快速蓄电池容量检测装置研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2022.

[4] 蔡杏山. 模拟电路和数字电路[M]. 北京:人民邮电出版社,2023.

[5] 阮新波. 电力电子学[M]. 北京:机械工业出版社,2021.

[6] 曾熠,朱玉玉,江蔚. 国产化便携式电阻测试仪[J]. 兵工自动化,2023,42(9):59 - 63.

[7] 谢俊琪. 基于新型电桥的电阻高精度测量模块的设计与实现[D]. 南昌:南昌大学,2022.

[8] 张俭,庞鸿洋. 导体直流电阻测量不确定度评定研究[J]. 电子元器件与信息技术,2023(06):52 - 55.

[9] 汪渭滨,常红,管月,等. 基于 GaN 的高效率、高功率密度 ACF 变换器的设计[J]. 电力电子技术,2023,57(03):115 - 118.

[10] 丁杰,尹华杰,赵世伟. 反激式隔离型高增益 DC/DC 变换器[J]. 电源学报,2022,20(2):26 - 33.

[11] 罗乐,汪金刚. 电网电缆绝缘在线监测系统的设计[J]. 仪表技术与传感器,2021(03):63 - 66.

[12] 李红信,王忠,朱平平. 燃料电池系统冷却回路绝缘电阻设计及分析[J]. 汽车实用技术,2023(21):12 - 16.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号:52 - 49 国际发行代号:BM529 定价:18.00 元/期 108.00 元/年  
地址:西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编:710075 电话:029 - 81871277  
网址:http://yb - zdh. shaangu - group. com 电子邮箱:gyybbjb@126. com