



核电厂电仪设备延寿再鉴定试验研究

陈青, 郭星, 高轩, 邱新媛, 王广金, 段绪星, 赵传礼, 姜圣翰

Requalification Experimental Study on Life Extension of Electrical Instrument Equipment in Nuclear Power Plant

Chen Qing, Guo Xing, Gao Xuan, Qiu Xinyuan, Wang Guangjin, Duan Xuxing, Zhao Chuanli, and Jiang Shenghan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.05.0217>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

核电厂电气贯穿件设备延寿再鉴定方法研究

Study on Life Extension and Re-Qualification Method for Electrical Penetration Assembly of Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(1): 140-144

国内在役核电厂首例电气贯穿件更换改造

Modification of First Electrical Penetration in Domestic Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(2): 140-144

核电厂安全壳中压电气贯穿件绝缘支撑盘绝缘耐潮性能试验分析

Test Analysis of Insulation and Moisture Resistance of Insulation Support Plate of Electrical Penetration in Containment of Nuclear Power Plant

核动力工程. 2021, 42(4): 233-238

基于三代核电技术的电气贯穿件导体组件研制

Development of Feedthrough Assembly for Electrical Penetration Assembly Based on Third-Generation Nuclear Power Technology

核动力工程. 2019, 40(4): 153-156

三代核电厂电气贯穿件用屏蔽双绞导体组件的设计及验证

Design and Verification of STP Feedthrough of EPA for Third Generation NPPs

核动力工程. 2019, 40(3): 155-158

秦山CANDU-6重水堆压力管变形对延寿的影响研究

Study on the Influence of Pressure Pipe Deformation on Life Extension of QINSHAN CANDU-6 HWR

核动力工程. 2021, 42(6): 199-202



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)05-0217-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.05.0217

核电厂电仪设备延寿再鉴定试验研究

陈青¹, 郭星^{1*}, 高轩², 邱新媛¹, 王广金¹,
段绪星¹, 赵传礼², 姜圣翰¹

1. 中国核动力研究设计院, 成都, 610213; 2. 中核核电运行管理有限公司, 浙江海盐, 324300

摘要: 在核电厂电气仪表设备(简称电仪设备)环境鉴定研究成果的基础上,开展核电厂电仪设备延寿再鉴定分析和试验研究。以秦山第一核电厂 DDG-1 型电气贯穿件(EPA)为研究对象,根据运行实际制定了再鉴定试验研究的遵循原则,在此原则下结合分析法确定了试验方案和试验项目序列以及 EPA 修复依据和方案,并在此基础上开展再鉴定试验研究。适当修复后的 DDG-1 型 EPA 按试验大纲依次通过了设备性能随时间变化的试验、抗震试验、设计基准事故(DBA)条件下热力学试验和 DBA 后极限电性能试验,试验后状态完好,表明该 DDG-1 型 EPA 经适当修复后能够完成继续延寿 20 a 的预期目标,可为核电厂其他电仪设备再鉴定试验研究提供指导和借鉴。

关键词: 核电厂; 电仪设备; 电气贯穿件(EPA); 延寿; 再鉴定

中图分类号: TM623.7 **文献标志码:** A

Requalification Experimental Study on Life Extension of Electrical Instrument Equipment in Nuclear Power Plant

Chen Qing¹, Guo Xing^{1*}, Gao Xuan², Qiu Xinyuan¹, Wang Guangjin¹,
Duan Xuxing¹, Zhao Chuanli², Jiang Shenghan¹

1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;

2. CNNC Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Haiyan, Zhejiang, 324300, China

Abstract: On the basis of the research results of environmental qualification of electrical instrument equipment in nuclear power plant, the life extension requalification analysis and experimental research of electrical instrument equipment in nuclear power plant are carried out. Taking the DDG-1 electrical penetration assembly (EPA) of Qinshan Nuclear Power Co., Ltd. as the research object, the principles for requalification experimental study are formulated according to the actual operation. Based on these principles, the test scheme, test item sequence and EPA repair basis and scheme are determined by combining the analysis method, and requalification experimental study is carried out on this basis. The properly repaired DDG-1 EPA passed the test of equipment performance with time, seismic test, thermodynamic test under design basis accident (DBA) conditions and ultimate electrical performance test after DBA in sequence according to the test scheme. Its state is intact after the test, which indicates that the DDG-1 EPA can achieve the expected goal of continuing to extend its life for 20 years after proper repair, and can provide guidance and reference for the requalification experimental study of other electrical instruments in nuclear power plants.

Key words: Nuclear power plant, Electrical instrument equipment, Electric penetration assembly (EPA), Life extension, Requalification

收稿日期: 2021-10-19; 修回日期: 2022-04-21

作者简介: 陈青(1984—), 男, 副研究员, 现从事核反应堆结构总体设计研究工作, E-mail: chqing84@163.com

*通讯作者: 郭星, E-mail: guoxing_npica@163.com

0 引言

早期核电厂的设计寿命通常为 30~40 a。实际根据多年来核电厂的运行经验反馈,核电厂超出运行年限后其主体仍然处于安全可用的状态,同时能够满足安全运行相关的要求。因此,对核电厂开展延寿工作成为可能,延寿能够在很大程度上提升核电厂的经济效益和环境效益。

秦山第一核电厂(简称秦一厂)30万千瓦核电机组经过 2 a 试运行后,于 1991 年 12 月首次并网发电,正式投入商业运行,截至 2020 年已累计运行超过 28 a。考虑到秦一厂 30 a 设计寿命即将结束,按照建造之初的设计寿命要求,秦一厂中大量电气仪表设备(简称电仪设备)也即将达到设计寿命。为实现机组继续延寿 20 a 的预期目标,有必要针对秦一厂中代表性电仪设备进行延寿再鉴定试验研究。

截至目前,国外相关研究机构针对核电厂电仪设备的老化管理和延寿等已开展很多研究工作,部分研究成果已应用到核电厂的日常运行与维护工作中^[1-3]。我国的大部分核电厂投运年限较短(30 a 以内),电仪设备的延寿再鉴定和老化管理等工作基本处于起步阶段。中国核动力研究设计院刘文静等^[4]通过理论研究工作,筛选出需要进一步开展老化研究和管理的核电厂电仪设备清单,保证在满足安全性的前提下经济合理地开展老化研究和管理工作;王新宇等^[5]基于已有设备的设计、制造和鉴定数据,结合已有的标准体系规范和行业研究成果,开展了核电厂设备延寿再鉴定方法研究,并提出相关设备老化管理建议。上述研究均立足于理论方法研究,并建议对需要延寿再鉴定的电仪设备开展全系列鉴定试验,但实际并未开展对应验证试验。

根据目前核电厂电仪设备环境鉴定的研究成果,要达到电仪设备在核电厂运行许可证延续有效期内可用的目标,主要处理方法有基于实际运行环境的时限老化分析(TLAA)、再鉴定试验、改造或更换、状态监测^[6-8]等。本文选用秦一厂 DDG-1 型电气贯穿件(EPA)开展延寿再鉴定试验和分析研究,DDG-1 型 EPA 自秦一厂建造之初便安装于安全壳上,随机组运行至今。通过查阅梳理 DDG-1 型 EPA 的鉴定试验资料,按照

设计鉴定时的技术规格书和鉴定试验大纲,能满足 30 a 设计寿命;但按照目前需要延寿 20 a 的预期,DDG-1 型 EPA 能否继续使用或经过必要改造后继续使用,需对其进行延寿再鉴定试验研究。

1 再鉴定试验研究原则

在制定《延寿再鉴定试验大纲》并开展试验时,需要从经济性和可操作性上充分判断试验方法是否为最佳再鉴定方法,同时在保证再鉴定试验结果有效、直观、正确的前提下,充分结合分析法和运行经验法,缩短再鉴定试验周期并降低投入成本。其次,考虑到设备鉴定之初为保证可用置信度和环境包容性,鉴定运行条件比实际往往严酷很多,而再鉴定试验往往只针对设备在某一确定环境中的长期运行,运行环境清晰明确,所以在进行再鉴定试验时应采用实际运行环境条件,叠加适当裕量。

再鉴定试验需满足新的执行参照标准要求,若新的执行参照标准要求与原有的鉴定试验时采用的标准和方法不同,需进一步评估新的执行参照标准要求是否需要在再鉴定试验中体现。对于某些在《设备运维手册》中明确需要定期维修或更换的部件,在进行再鉴定试验时可将这些部件更换后开展试验。

再鉴定试验只考虑设备长期运行时的显著老化机理对设备造成的老化影响,而对于某些不能表征老化影响的环境适应性试验和极限使用条件下的型式试验等不予以考虑。再鉴定试验虽然建立在原有鉴定结果的基础之上,但属于对设备重新鉴定的过程,因此,试验方法应参考原有鉴定试验方法,并保持再鉴定试验的严酷性和有效性。

2 再鉴定试验方案和试验件

2.1 再鉴定试验方案

随着我国核电建设的持续发展,国内核电设备的标准体系日益成熟完善。目前国内对 EPA 设备所认可的执行标准主要有美国电气电子工程师学会 IEEE 317—2013《核电厂外壳结构中电气贯穿件》、GB/T 13538—2017《核电厂安全壳电气贯穿件》和 GB/T 25837—2010《核电厂安

全壳电气贯穿件的质量鉴定》。由于针对 DDG-1 型 EPA 并没有长久而准确的监测数据以辅助判断分析和研究，因此对其开展延寿再鉴定试验研究时，其再鉴定试验方案主要立足于满足现有鉴定标准体系规范的要求，主要包含以下各阶段：

- (1) 基本性能检测试验。
- (2) 极限运行条件下的电性能试验。
- (3) 设备性能随时间变化的试验，包括热老化、运输储存模拟、辐照老化和机械振动等。
- (4) 设计基准事故（DBA）下的性能试验，包括抗震、辐照和热力学试验。
- (5) DBA 后极限电性能试验。

对 DDG-1 型 EPA 开展延寿再鉴定试验是在其已完成的鉴定试验的基础上，综合考虑长期在役运行的基本情况，开展延寿再鉴定试验研究。因此可根据具体要求，继承其原有鉴定试验结果，同时结合具体使用要求分析论证相关试验对设备的影响情况，最终确定项目和顺序。

极限运行条件下的电性能试验是 GB/T 25837 参照法国核电鉴定试验体系设置的鉴定试验项目，而在 IEEE 317 中归为设计定型试验。考虑到 DDG-1 型 EPA 在初次鉴定中已经开展该类试验，试验要求和结果符合规范要求，因此在其再鉴定试验序列中不再考虑该类试验。

对电气设备的绝缘而言，潮湿环境一般不作为老化机理，在通常情况下对绝缘失效不起支配作用。所以在电气设备的鉴定试验中，湿度不作为一种老化机理考虑，仅作为一种显现故障的手段。DDG-1 型 EPA 已在役运行 28 a，期间充分经受了环境湿热的影响，同时在 DBA 条件下的热力学试验中将充分经受湿热环境的考验。因此，在 DDG-1 型 EPA 再鉴定试验序列中不考虑单独进行湿热循环试验。

运输与储存模拟试验主要应用温度变化试验模拟运输和储存工况，用于确定设备低温、高温储存以及经受环境变化的能力。针对 DDG-1 型 EPA，其已全部安装至核电厂现场，无运输和储存工况。因此，在 DDG-1 型 EPA 再鉴定试验序列中不考虑开展运输和储存模拟试验。

DDG-1 型 EPA 安装在安全壳预埋套管内，其作为静态设备，本身无振动工况，周边亦无振动源。因此，在 DDG-1 型 EPA 再鉴定试验序列

中不考虑进行机械振动试验。

综上所述，根据 DDG-1 型 EPA 再鉴定试验大纲与现有 EPA 产品及相关鉴定试验项目和参数的对比分析进行的综合评估论述，确定 DDG-1 型 EPA 延寿再鉴定试验序列见表 1。

表 1 DDG-1 型 EPA 延寿再鉴定试验序列

Tab. 1 Life Extension Requalification Test Sequence of DDG-1 EPA

序号	试验项目	
1	基本性能检测试验	
2	设备性能随时间变化的试验	加速热老化
		辐照老化
3	抗震试验	
4	DBA 条件下热力学试验	
5	DBA 后极限电性能试验	额定短时过负荷电流
		额定短路电流
		额定短路热容量

2.2 DDG-1 型 EPA 试验件

DDG-1 型 EPA 总体结构如图 1 所示，由预埋法兰、预埋管、导体组件、检漏组件和接线箱等主要部件构成。其中导体组件为主要功能部件，贯穿端板、安全壳预埋管空间和安全壳内侧的支撑板与两侧外部电缆连接，与端板之间通过 4 道橡胶圈和 1 道 O 型金属密封圈实现密封。DDG-1 型 EPA 与焊接在预埋管上的预埋法兰通过螺栓连接固定，再通过 2 道 O 型橡胶密封圈和 1 道 O 型金属密封圈实现密封。

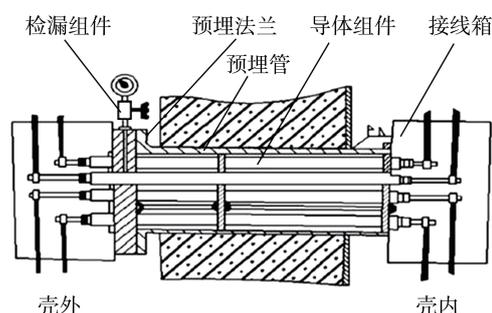


图 1 DDG-1 型 EPA 结构示意图

Fig. 1 Structure Diagram of DDG-1 EPA

DDG-1 型 EPA 的导体组件通过线夹与外接电缆进行端接，由于端接处间隔较小因而采用热缩材料进行绝缘加强，并通过接线箱实现防护。检漏组件用于监测可能的泄漏通道，通过端板内

一系列气道实现连通。

导体组件承担 DDG-1 型 EPA 的绝缘和密封功能,由不锈钢保护套管、铜导体和绝缘模块等构成,其中绝缘模块主要由聚酰亚胺和聚矾等有机高分子材料组成,其与热老化和辐照老化机理密切相关。因此,将 DDG-1 型 EPA 的导体组件全部拆下,单独完成加速热老化和耐辐照老化等评价设备性能随时间变化的试验后,安装至 DDG-1 型 EPA 开展后续试验。

DDG-1 型 EPA 设计寿命为 30 a,多处采用 O 型橡胶密封圈,橡胶对环境老化机理较为敏感,目前国内核电厂对橡胶制品的更换周期通常限制在 8~10 a。考虑到 DDG-1 型 EPA 生产于 20 世纪 80 年代,其橡胶制品的更换周期应更短。因此,采用 VITON 材料 O 型橡胶密封圈作为试验件,完成老化机理相关试验后作为零部件安装至 DDG-1 型 EPA 整机,并参与后续延寿再鉴定试验。如鉴定通过,则选用的 VITON 材料用于 DDG-1 型 EPA 中旧橡胶圈的更换。

重新整装后的 DDG-1 型 EPA 整机用于开展与整机性能相关的抗震、DBA 下热力学和事故后极限电性能等试验,其导体组件和 O 型橡胶密封圈已开展延寿 20 a 热老化和辐照老化试验。

3 再鉴定试验研究

3.1 基本性能检测试验

基本性能检测试验的对象主要分为导体组件和整机 2 种,试验项目包括密封性能、介电强度、绝缘电阻和导体连续性试验。鉴于 DDG-1 型 EPA 已在役运行近 30 a,因此其基本性能检测试验的合格指标均为施加应力后的性能要求。

在按照表 1 中的再鉴定试验序列对 DDG-1 型 EPA 具体开展每项再鉴定试验项目前后,需进行基本性能检测试验,试验结果作为每项再鉴定试验是否通过的合格判据。

根据实际 DDG-1 型 EPA 再鉴定试验结果,在再鉴定试验序列中累计对导体组件和整机累计开展 7 次基本性能检测试验,试验均合格。

3.2 设备性能随时间变化的试验

根据材料性能参数,通过计算确定 DDG-1 型 EPA 导体组件应在温度为 $145\pm 5^\circ\text{C}$ 环境中进行 610 h 热老化试验,O 型橡胶密封圈应在温度

为 $127\pm 5^\circ\text{C}$ 环境中进行 610 h 热老化试验。

辐照老化试验模拟反应堆 20 a 延寿寿期内正常运行条件下的辐照老化,与一次 DBA 条件下的辐照老化叠加进行,累积辐照剂量为 201.4 kGy。辐照老化采用 ^{60}Co γ 放射源,累积辐照剂量为 221.54 kGy (包含 10% 的裕度)。

试验件累计辐照试验时间 64 h,试验后 O 型橡胶密封圈外观完好,手动轻微拉伸时表面无开裂,弹性无明显退化。导体组件开展基本性能检测试验后,试验结果均合格。

3.3 抗震试验

将完成热老化和辐照老化试验的导体组件和密封圈等安装至 DDG-1 型 EPA 整机,完成基本性能检测试验并合格后,开展抗震试验以验证其经受地震试验能够保证机械和电气完整性。模拟现场安装方式将 DDG-1 型 EPA 安装至试验支架上,并与地震台面刚性连接。

为确保试验结果适用性,采用秦一厂安全壳标高 +16.5 m 楼板反应谱 (RRS),运行基准地震 (OBE) 对应阻尼比 2%,安全停堆地震 (SSE) 对应阻尼比 4%,完成 5 次 OBE 和 1 次 SSE 地震试验。地震试验过程中选取导体组件中的 2/3 全部串联施加额定电流 (200 A),其余导体组件施加额定工频电压 (600 V)。在线监测上述连续电流和额定电压,试验全程未出现任何击穿和电信号断续现象。试验过程中,地震台面输入载荷满足 DDG-1 型 EPA 再鉴定试验大纲要求,DDG-1 型 EPA 全程结构完整、无裂纹变形且连接件无松动脱落,试验后整机基本性能检测合格。

3.4 DBA 条件下热力学试验

针对 DDG-1 型 EPA 内侧 (安装于安全壳内) 进行模拟 DBA 条件下的热力学试验。压力峰值为 0.3 MPa,温度峰值为 135°C ,相对湿度为 100%。喷淋液的含硼浓度为 0.25%~0.30% (质量分数),含 NaOH 浓度为 0.75% (质量分数),pH 值为 8.5~10,喷水强度为 $300\text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ (垂直向下)。试验过程中选取导体组件中的 2/3 全部串联施加额定电流,其余导体组件施加额定工频电压。试验过程中在线监测上述连续电流 (200 A) 和额定电压 (600 V),试验全程未出

现任何击穿和电信号断续现象。同时定期测量各导体组件的绝缘电阻值,变化趋势如图2,绝缘电阻均大于 $107\ \Omega$,满足鉴定要求。

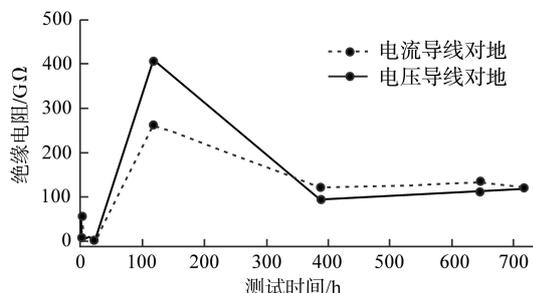


图2 导体组件绝缘电阻变化趋势

Fig. 2 Variation Trend of Insulation Resistance of Conductor Assembly

DDG-1型EPA完成29d又8h的鉴定考验,试验过程中容器内温度、压力曲线分别见图3、图4,实际试验结果均包络鉴定要求。试验后对其开展基本性能检测,各项指标均合格。

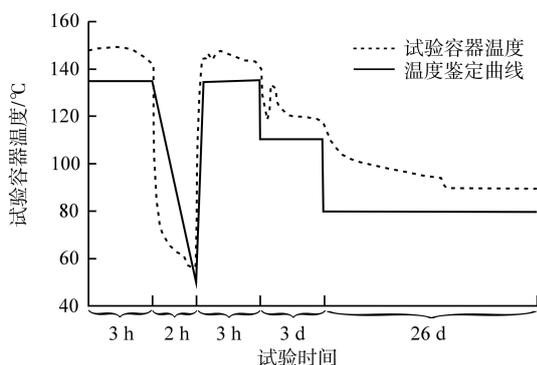


图3 试验容器温度实际曲线

Fig. 3 Actual Temperature Curve of Test Vessel

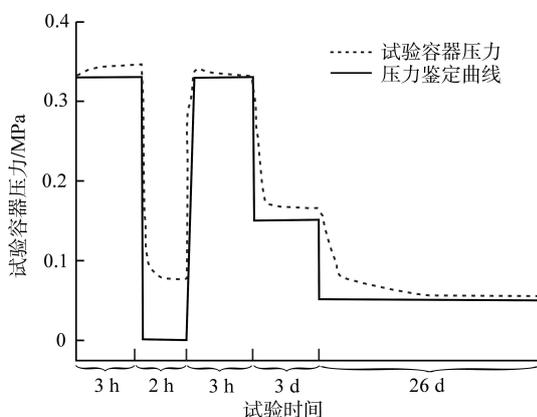


图4 试验容器压力实际曲线

Fig. 4 Actual Pressure Curve of Test Vessel

3.5 DBA后极限电性能试验

为了验证DDG-1型EPA在经历延寿20a的环境老化、地震事故和1次DBA事故后,是否能保证设备运行状态良好,本研究对其开展DBA后极限电性能试验。

试验项目包括额定短时过负荷电流试验、额定短路电流试验和额定短路热容量试验,将DDG-1型EPA整机置于环境温箱中加热至 $135\ ^\circ\text{C}$ 并稳定后开展试验,试验结果分别见表2、表3和表4。表中数据说明DDG-1型EPA延寿运行20a后,在DBA事故工况下仍能承受至少1417A过负荷电流,以及至少45kA短路电流和 $2.373\times 10^8\ \text{A}^2\cdot\text{s}$ 短路热容量的考验。试验后DDG-1型EPA各导体组件均能承受600V额定电压并无异常,整机全程保持机械完整,恢复室温后表压力指示未降低。

表2 额定短时过负荷电流试验结果

Tab. 2 Test Results of Rated Short-Time Overload Current

试验部位	短时过负荷电流/A	持续时间/s	环境温度/ $^\circ\text{C}$
A相	1417	10.3	135.2
B相	1472	10.7	135.3
C相	1475	10.2	135.5

表3 额定短路电流试验结果

Tab. 3 Test Results of Rated Short Circuit Current

试验部位	电流峰值/kA	持续时间/ms
A相	45.22	42.82
B相	45.92	
C相	55.34	

表4 额定短路热容量试验结果

Tab. 4 Test Results of Rated Short Circuit Heat Capacity

试验部位	试验电流/kA		短路热容量/ $(\text{A}^2\cdot\text{s})$	持续时间/s
	有效值	峰值		
A相	15.18	33.47	2.379×10^8	1.034
B相	15.43	31.07	2.458×10^8	
C相	15.17	34.18	2.373×10^8	

4 结论

本文对DDG-1型EPA开展延寿再鉴定试验分析研究,在对其橡胶密封圈、金属密封圈和接线夹等可更换部件修复完好后,依次完成各再鉴

定试验项目并合格,表明对 DDG-1 型 EPA 适当修复后能够实现继续延寿 20 a 的预期目标,可为后续电仪设备再鉴定研究提供指导和借鉴。主要结论如下:

(1) 对于核电厂内不易更换或更换成本较高的安全重要电仪设备,可采用再鉴定试验的方法证明其在延寿期内仍具有在正常运行和事故工况中实现其预期功能的能力。

(2) 设备延寿再鉴定试验是通过试验的方法证明研究对象在延寿期内能够完成其设计的预期功能,期间合理科学的分析方法能够保证在安全可靠的前提下经济高效地开展再鉴定试验。

(3) 目前核电厂电仪设备状态监测的覆盖性、经济性和可操作性均较差,在设备延寿再鉴定试验研究中无从获得长久而准确的监测数据以辅助判断分析和研究,笔者认为对核电厂电仪设备辅以状态监测技术手段势在必行。

参考文献:

- [1] TSVETKOV P V. Nuclear power - control, reliability and human factors[M]. London: IntechOpen, 2011: 289-310.
[2] LEE S H, LEE J D, KIM M Y, et al. Evaluation of accelerated ageing cables used in nuclear power

plant[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali: IEEE, 2012: 681-684.

- [3] SMITH R J. Electrical equipment qualified life extension through area temperature monitoring[C]//Proceedings of 1995 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record. San Francisco: IEEE, 1995: 872-875.
[4] 刘文静, 谢峰, 韩勇, 等. 核电厂电仪设备的老化评估筛选[J]. 科技视界, 2016(10): 11-12.
[5] 王新宇, 王广金, 周天, 等. 核电厂电气贯穿件设备延寿再鉴定方法研究[J]. 核动力工程, 2020, 41(1): 140-144.
[6] 国家能源局. 核电厂安全级电气设备老化管理: NB/T 20155—2012[S]. 北京: 中国原子能出版社, 2013.
[7] 黄立军, 陈世均, 黄卫刚, 等. 核电站重要敏感设备加速老化管理研究与应用[J]. 核科学与工程, 2011, 31(2): 185-192.
[8] GUO J, LIU Y J, GU K K, et al. Ageing management system of the steam generator of the nuclear power plant[C]//Proceedings of the First International Conference on Information Science and Engineering. Nanjing: IEEE, 2009: 2266-2269.

(责任编辑: 刘 君)