

# RSE-M 2010在福清5、6在役检查中的应用与优化

刘嘉维, 李健捷, 杨洋, 李栋梁, 张卫

中国核电工程有限公司, 北京

收稿日期: 2021年12月17日; 录用日期: 2022年1月7日; 发布日期: 2022年1月18日

---

## 摘要

在役检查是在核电厂运行寿期内保持核安全相关物项可靠性的重要措施, 制定合理的在役检查大纲特别是确定检查对象及方法是核电厂在役检查实施的关键, 本文介绍了RSE-M规范的分级特点、在役检查的分类和在役检查项目的制定原则, 分析了华龙一号在役检查依据法国《核岛机械设备在役检查规则》RSE-M 2010实施存在的问题及解决思路, 解决了该规范是法国为EPR堆型制定而并不完全适用于华龙一号工程的关键问题, 系统地阐述了RSE-M 2010在福清5、6号机组在役检查大纲中的应用情况, 可为其它核电厂在役检查大纲的编制和在役检查的实施提供借鉴意义。

## 关键词

在役检查, RSE-M 2010, 华龙一号, 应用

---

# Application and Optimization of RSE-M 2010 in In-Service Inspection Program of Fuqing 5 & 6 Units

Jiawei Liu, Jianjie Li, Yang Yang, Dongliang Li, Wei Zhang

China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing

Received: Dec. 17<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jan. 7<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 18<sup>th</sup>, 2022

---

## Abstract

In-service inspection is an important method to ensure the reliability of nuclear safety-related items during the life cycle of nuclear power plant. Structuring an applicable in-service inspection

outline, especially nailing down the inspection objects and methods, is the key to the implementation of the in-service inspection of the power plant. This article introduces the characteristics of RSE-M specifications, as well as its classification method and the principals of in-service inspection outline. It also analyzes the existing problems and solutions of Hualong Yihao in-service inspection in accordance with the French "In-service inspection rules for mechanical components of PWR nuclear islands", solving the key problem that the specification was formulated targeting the EPR reactor, which is not fully applicable for the Hualong Yihao. Moreover, it systematically explained the application of RSE-M 2010 in the in-service inspection program for Fuqing No. 5 and No. 6 unit, which can be taken as a reference for the preparation of the in-service inspection program and the implementation of the in-service inspection of other nuclear power plants.

## Keywords

In-Service Inspection, RSE-M 2010, Hualong Yihao, Application

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

核电厂运行寿期内, 部件可能受到多种影响, 其对核电厂运行寿期的影响难以精准预测。因此, 有必要对核电厂系统和部件进行检查, 找出可能的损伤, 判断它们对核电厂安全是否可接受, 或采取必要纠正措施。HAD103/07《核电厂在役检查》将这种在核电厂运行寿期内进行的检验, 定义为在役检查。

我国核安全法规和导则对核电厂在役检查仅提出了基本原则要求, 缺乏对核安全物项具体的检查要求, 国内大部分二代改进型核电项目以岭澳一期为参考, 采用的在役检查标准为 RSE-M 1997 版。

福清 5、6 号核电项目作为华龙一号首堆工程, PSAR 阶段承诺在役检查采用 RSE-M 2010, 同时 RSE-M 2010 也是安全监管部批准的《标准适用清单》中的唯一版本。

然而, RSE-M 2010 是法国为 EPR 堆型编制的在役检查规范, 以设备的放射性释放与承压风险为基础, 不完全适用于华龙一号(以安全分级为基础)。因此, 如何基于 RSE-M 规范要求, 同时根据华龙一号自身的设计特点进行在役检查成了亟待解决的工程技术问题, 此外, RSE-M 2010 的应用研究也是后续华龙一号批量化建设的迫切需求。

## 2. RSE-M 规范介绍

### 2.1. 法国在役检查监管和规范要求

上世纪 80 年代末, 法国电力集团(EDF)编制了 RSE-M《压水堆核电厂核岛机械设备在役检查规则》, 并由法国核岛设计和建造规程协会(AFCEN)于 1990 年正式发布。之后, AFCEN 组织编写并发布了 RSE-M 1997, 以安全分级为基准。

1997 年 5 月 29 日, 欧洲议会和联盟理事会通过欧洲承压设备指令 97/23/EC [1] (PED, 强制性)。1999 年 12 月 13 日, 法国依据 97/23/EC 发布了 1999.12.13 法令[2], 适用于所有非核级和核级承压设备。1999 年 11 月 10 日, 法国发布了主一回路和二回路监管法令, 对再鉴定、无损检测和监督提出了要求 [3]。2000 年 3 月 15 日, 法国发布承压设备监管法令, 对非核级承压设备的再鉴定、无损检测和监督

提出了要求[4]。2005年12月12日,法国发布核承压设备法令(ESPN),将核承压设备分为N1、N2、N3级[5],AFCEN依据上述法令,出版了RSE-M 2010版,以ESPN分级为基准,但同时允许用户根据安全分级使用规范。

## 2.2. RSE-M 2010 版分级特点

RSE-M 2010的使用基础是将承压设备划分为不同的RSE-M等级[6](下文中所说规范等级为RSE-M等级),划分方式有两种,分级特点如表1所示。

Table 1. RSE-M classification table

表 1. RSE-M 分级表

安全分级	RSE-M 分级		ESPN 分级
1级-主一回路	RSE-M 1级		
2级-主一回路	RSE-M 2级	RSE-M 1级	N1
2级	RSE-M 2级		
3级	RSE-M 3级	RSE-M 2级	N2
NC	-		
2级	RSE-M 2级		
3级	RSE-M 3级	RSE-M 3级	N3
NC	-		
2级	RSE-M 2级		
3级	RSE-M 3级	RSE-M NC级	NC

第一种使用方法根据ESPN分级划分规范等级。RSE-M 2010正文将设备分为N1-N3级。再将N2、N3级设备划分为承压设备、管道、承压附件、安全附件4类。而后依据流体性质、最高许用压力、容积、公称直径分为不同承压风险等级。检查对象、检查部位、周期和检查内容根据分类确定,体现了2.1节法令要求。

另一方面,RSE-M 2010保留了97版的分级方式,允许根据设备安全分级使用规范。但同时要求,规范2、3级管辖的设备范围、检查部件等应根据所在地监管部门法规确定,而国内核安全法规和导则仅提出了基本原则要求,缺乏针对在役检查的完善要求。因此如何基于安全分级,为华龙一号制定完善适合的在役检查大纲是难点。

## 3. RSE-M 2010 版的差异分析优化

### 3.1. 在役检查的分类

RSE-M 97版将在役检查主要分为全面在役检查、部分在役检查、其他在役检查、非法规要求在役检查。RSE-M 2010根据2.1节法令,将在役检查分为定期再鉴定、定期检查和深度在役检查。由表2可见,97版和2010版在A册总则中的分类概念是相同的。然而2010版B、C分册细则要求根据ESPN分级、承压设备风险分类及设计参数将设备先划分为不同组别,再根据2000和3000章制定检查周期、抽样方式等,不适用于华龙一号。

因此,福清5、6号机组综合考虑在役检查概念的内涵,依照中国在役检查的实践经验与法规,在福

清 5、6 项目中将在役检查分类分为全面在役检查、部分在役检查、其他在役检查和深度在役检查，同时保持了与 RSE-M 2010 选择性附录 3.1 的一致性。

**Table 2.** Comparison of in service inspection classification between RSE-M 2010 and 1997 version  
**表 2.** RSE-M 2010 版与 97 版在役检查分类对比

RSE-M 1997	RSE-M 2010
1) 全面在役检查(VC): 对规定的安全级设备及支撑进行的检查。	1) 定期再鉴定: 一定时间间隔内进行的检查操作以确保设备满足预期安全功能。
2) 部分在役检查(VP): 在两次 VC 间重复检查 VC 部分项目的检查。	2) 定期检查: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 两次定期再鉴定之间进行的检查(需进行定期再鉴定)。</li> <li>• 按特定周期重复实施的检查(不需进行定期再鉴定)。</li> </ul>
3) 其它在役检查: 指在 VC 和 VP 之外, 规范中强制执行法规的安全 2、3 级压力容器需进行的检查。	3) 深度在役检查: 特殊情形下需对部件进行的更为全面的检查, 应根据部件的服役情况逐例制定。
4) 非法规要求的在役检查是根据规范优化的结果。	
2) 全面在役检查(VC): 对规定的安全级设备及支撑进行的检查。	4) 定期再鉴定: 一定时间间隔内进行的检查操作以确保设备满足预期安全功能。

## 3.2. RSE-M 2010 应用优化分析

### 3.2.1. 在役检查范围概述

根据 HAD103/07 要求, 在役检查的范围是安全级承压设备和支撑。RSE-M 97 和 2010 A1321 章节均有规定, RSE-M 1、2、3 级设备分别对应安全分级 1, 2, 3 级设备。二回路在 RSE-M 2010 中被划分为 RSE-M 1 级。

### 3.2.2. 新增系统的在役检查

相较于 M310, 福清 5、6 号机组新增了应急注硼系统(REB)、堆腔注水冷却系统(CIS)、非能动安全壳热量导出系统(PCS)、二次侧非能动余热排出系统(PRS)4 个系统, RSE-M 97 和 2010 中无相应检查要求。REB 系统应对发生未紧急停堆的预期瞬态(ATWS), 不属于专设安全系统; CIS 系统用于堆芯熔化的严重事故, PCS 系统用于超设计基准事故工况下安全壳的长期排热, 两个系统整体为非安全级。对于 REB、CIS、PCS 系统, 按照部件的安全分级, 参照 RSE-M 同类部件确定在役检查要求。PRS 系统与主蒸汽管线和主给水管线相连, 与主二回路直接相连, 且没有完全隔离, 该系统参考二回路确定检查方式。

### 3.2.3. 规范 2、3 级管道、设备在役检查

RSE-M 2010 将大量规范 2、3 级管道和设备纳入了其他在役检查的管辖范围, 仅根据附录 3.1 CD3400 要求, 监管的管道焊缝数量约为 16,999 条, 而同行业其他电站的监督数量仅为 6000 条。此外, 福清 5、6 号机组很多设备的结构形式与规范中不一致, 需逐一分析。

## 4. 在役检查项目的制定与优化

大纲分别对二回路、新增系统、2、3 级管道和设备在役检查项目的制定进行了详细研究与优化。

### 4.1. 二回路在役检查项目的制定

二回路系统设备为 RCC-M 2 级, RSE-M 1 级。役前和在役检查按照 RSE-M 1 级设备进行, 按照 RCC-M 1 级设备的验收准则进行验收, 相较于 M310 机组, 提高了在役检查和验收标准。

## 4.2. 新增系统在役检查项目的制定

为保证新增系统的设计功能，应对主要部件进行定期检查和定期功能试验，以确保设备的完整性，检查系统能动部件的可使用性和要求的功能特性。

硼酸注入箱 REB001/002BA 为安全 3 级部件，内部设计压力为 0.2 MPa，设计温度 60℃。由于该设备为新增系统设备，要求每十年进行目视检查，主要检查是否泄漏。REB0012/0013/0014 为安全 1 级管道，是一回路压力边界，属于小管道，参照 RSE-M2010 附录 CD3400 主回路小管道检查，同时考虑 REB 为新增系统，增加管道环焊缝和管嘴焊缝的渗透检查，对管道和支撑整体进行目视检查。REB 系统管道 0005/0006 具有安全壳隔离功能，按照规范进行密封泄漏试验，增加渗透检查。

CIS 系统管道 0001/0002/0022/0023/0137 与安注系统相连，CIS 管道 0007/0008/0011/0115/0116/0059/0060 和 PCS 系统管道 0102/0103/0105 贯穿安全壳，执行安全壳隔离功能，为安全 2 级；参照 REB 系统，对上述管道环焊缝进行渗透检查，对管道和支撑进行整体的目视检查。

PRS 系统补水箱和热交换器属于新增设备，为安全 2 级设别，参考规范同等级设备，主要进行目视检查。鉴于 PRS 补水箱和热交换器与主二回路连接的阀门正常工作时处于常开状态，安全性相对重要，因此增加了对重要部位的全面在役检查时的体积检查和表面检查。

## 4.3. 规范 2、3 级管道、设备在役检查项目

### 4.3.1. 管道其他在役检查项目的制定

2、3 级管道主要依据其他在役检查项目进行检查，大纲结合规范 C1300 引入能源行业标准 NB/T 20312-2014《压水堆核电厂核岛机械设备在役检查规则》[7]对管道检查范围进行优化，筛选原则如表 3 所示。

Table 3. Selection principle of other pipelines of 2 or 3 safety class

表 3. 其他 2、3 级管道筛选原则

介质	蒸汽或过热水运行温度 > 120℃		气体、水汽或液体有效运行压力 > 0.1 MPa		
要求	-	化学或辐射特性危害	-	化学或辐射特性危害	T > 120℃ 易燃气体或蒸汽燃点 < 55℃ 氧含量 > 35%
内径 mm	>110	>80	>110	>80	>80
压力 MPa	>0.4	>0.4	>1	>1	>0.4
运行压力 × 内径 MPa × mm	>100	>100	>150	>150	>100

#### 1) TTB、RFT、WCC、WES 系统管道范围的优化

规范附录 3.1 对蒸汽发生器排污系统(TTB)、反应堆换料水池和乏燃料水池的冷却和处理系统(RFT)、设备冷却水系统(WCC)、重要厂用水系统(WES)管道的检查要求如下表 4 所示。

依据 RSE-M 检查要求，WCC、RFT、TTB、WES 需检查管道焊缝数量共 7000 多条，远多于 M310 机组和同行三代电厂检查数量。福清 5、6 号在役检查首先根据 NB/T 20312 进行初步筛选，认为这 4 个系统的管道不满足要求，之后根据检查角度、防范措施、运行经验反馈等方面对管道范围进行优化。

WES 管道介质为海水，腐蚀是主要风险，已纳入电厂防腐大纲进行管理，每次大修实施一列管道的内部腐蚀检查。WES 管道在设计上采取管道内部内衬氯丁橡胶、重防腐涂层和外加电流阴极保护的防腐



措施,避免碳钢直接与海水接触并提供电化学保护。通过以上措施,确保 WES 系统的可用性,1~4 号机组 WES 系统管道未发生过焊缝失效、管道腐蚀失效或减薄问题。

**Table 4.** Inspection requirements of 2, 3 class pipelines of system WCC, RFT, TTB, WES

**表 4.** WCC、RFT、TTB、WES 系统 2、3 级管道检查要求

	检查项目	RSEM2010 (其他在役检查)
TTB、WCC、RFT 2 级管道	管道焊缝,管道和支撑的连接焊缝	外侧目视
TTB 2 级管道 WCC 3 级管道 RFT 3 级管道	孔板:孔板下游法兰连接焊缝,或孔板腔体,以及此焊缝下游区域	目视或射线检验 (每十年对有风险的部件进行汽蚀检查,若经验反馈没问题,则减少检查数量,若有问题,则所有管线均检查)
WCC、RFT 3 级管道	调节阀下游焊缝和下游范围内的焊缝	目视或射线检验
RFT、WCC、RFT 3 级管道	管道焊缝,管道和支撑的连接焊缝	
	管道和支撑	目视检查
WES 3 级管道	没有堆焊层的管道 有堆焊层的管道	

WCC 的系统功能与福清 1~4 号机组相同,均为启动、正常运行、停堆 20 h,最高供水温度 35℃,停堆 4~20 h 和次临界停堆工况,最高供水温度 40℃,事故工况最高供水温度 45℃;主要用户是安注、安喷、主泵、余排等。RFT 系统较福清 1~4 号机组实施了部分设计改进,如换料水箱内置并下移、燃料转运舱容积增大等。但管道的介质、温度、压力等级、执行标准与福清 1~4 号机组保持一致。

规范主要要求 WCC、TTB、RFT 系统执行流量调节的机械设备的下游焊缝区域进行检查,汽蚀是主要风险,并根据经验反馈情况,增加或减少检查项目。相较于 M310,福清 5、6 号机组对于压降较大处选用多级孔板。福清核电 1~4 号机组上述三个系统运行期间状态良好,相关管道焊缝的历次检查,均未发现异常。因此,将 WCC、TTB、RFT 系统的安全级管道,纳入电厂自主在役检查大纲管理。

#### 2) RCV 和 RHR 系统管道范围的制定

对于化学与容积控制系统(RCV)和余热排出系统(RHR),因其与一回路直接相连且参与机组正常运行,根据福清 1~4 号机组在役检查的经验,增加了部分管道的在役检查要求。

其他系统依据 NB/T 20312 加分析的方法进行了筛选,将在役检查管辖的管道数量减少至约 7700 条。

#### 4.3.2. 设备在役检查项目的制定

设备的结构形式与 RSE-M 2010 中存在一定差异,需要一事一议,换热器和贯穿件进行分析在审评中的关注度较高。

#### 4.3.3. 余热排出热交换器在役检查项目的制定

福清 5、6 号机组 RHR 换热器为管侧安全 2 级,壳侧安全 3 级,水室和壳体是焊接形式,与规范中 model 2 类换热器结构类似,如表 5 所示。规范要求通过人孔进行换热器内部件的目视检查,而福清 5、6 的交换器设计为手孔,无法进行管束的目视检查。该差异是换热器应用规范的主要问题之一,如安喷热交换器通过壳侧疏水硼浓度仪表来检查管束的密封性,废液处理冷凝器则根据下游监测槽中是否含有

磷酸根来监测管束的密封性。RHR 热交换器未设置该类装置，因此规定管束的密封性通过设备水压试验，管侧能够保压来判断。对水室、管板、管子和管板连接焊缝，通过内窥镜进行目视检查。


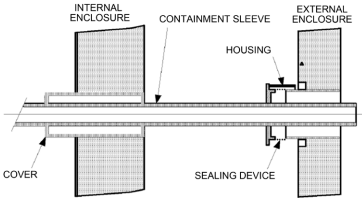

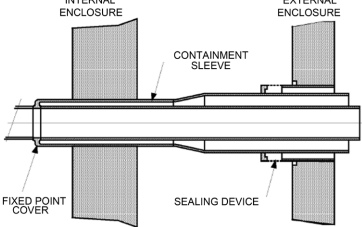

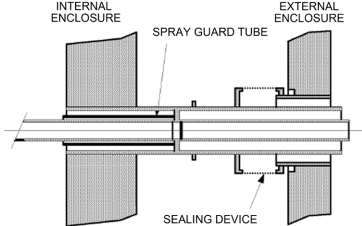


规范规定对人孔螺栓每五年进行目视检验。福清 5、6 号机组设计为手孔，尺寸相较人孔小。根据规范的通用原则，只对规范 1 级的螺栓进行体积检验，其他 2、3 级容器检查表中均未对螺栓的无损检验进行要求。此外，参考 CP03T3015《1、2、3 级设备用紧固件技术条件规定》未规定手孔螺栓进行目视检验。因此，RHR 热交换器人孔螺栓检查依据电厂预防性维修大纲进行管理。

规范在 CD3200 和 CD3400 中均要求对壳程的壳体和管嘴进行目视检查。RHR 热交换器壳侧为安全 3 级，根据规范的要求，部分在役检查只针对安全 2 级设备。因此，壳侧壳体和管嘴通过其他在役检查管辖。

#### 4.3.4.2、3 级管道贯穿件在役检查要求的制定

RSE-M 2010 沿用 97 版要求，规定 13 类 2、3 级贯穿件通过密封试验的方式进行在役检查。福清 5、6 号机组共有 5 类管道贯穿件，其中 3 类在规范中存在对应形式，见表 5。该 3 类贯穿件在役期间随隔离设备密封检查实施密封试验。地坑贯穿件结构虽然较为特殊，但 1188X0TSYXS08《定期试验技术要求汇总》中规定通过内置换料水箱连接的取水套管上的打压接口进行打压试验，满足规范对贯穿件的在役检查要求，上述贯穿件通过密封试验进行在役检查。

**Table 5.** Comparison table of containment penetrations structure  
**表 5.** 安全壳贯穿件结构形式对比表

5 号机组贯穿件	福清 5、6 号机组管道贯穿件结构形式[8]	RSE-M CD3400 贯穿件结构
标准类型贯穿件		
多管类贯穿件		
多管高能贯穿件		
地坑贯穿件		-
PRS 贯穿件		-

RSE-M 2010 将规范 1 级的在役检查项目分为了安全壳内和安全壳外, 同时将二回路纳入了规范 1 级进行管辖。因此, 相较于 M310 机组, 二回路和 PRS 系统管道贯穿件在役检查的制定是一大难题。

主蒸汽和主给水管道, 由于设计压力  $> 2 \text{ MPa}$ , 设计温度  $> 100^\circ\text{C}$ , 满足 RCC-P 中高能管道的定义。因此, 在设计之初, 上述管道作为高能管道, 设计为整体锻件, 直接与壳外主蒸汽系统相连, 内外壳间不存在管道和贯穿件封头的连接焊缝。

PRS 管道每台机组共有 6 个贯穿件, 每个贯穿件与 PRS 管道间有两条焊缝。运行温度最高位  $284^\circ\text{C}$ , 运行压力在  $7 \text{ MPa}$  左右, 属于高能管道贯穿件, 是规范 1 级设备, PRS 系统管道与贯穿件连接焊缝在役期间进行超声检查。由于该 12 条焊缝均位于安全壳套筒内, 管道外壁与套筒最大间隙为  $165 \text{ mm}$ , 而焊缝距离套筒端部开口最小距离为  $1700 \text{ mm}$ , 属于不可达焊缝, 如图 1 所示。

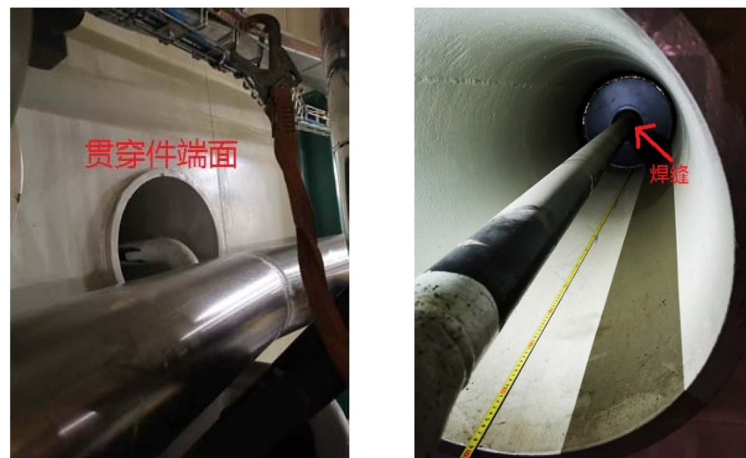


Figure 1. Welds locations of PRS system containment penetrations  
图 1. PRS 系统安全壳贯穿件焊缝位置

因此, 役前阶段该 12 条焊缝放入不可达报告, 电厂服役阶段需由现场开发自动监测设备, 对该焊缝进行超声检验。

## 5. 结论

RSE-M 2010 是 AFCEN 针对法国监管法令的变化以及 EPR 堆型出版的在役检查规范。华龙一号核电堆型遵照 RSE-M 2010 规范的总体要求, 结合自身设计特点做了制定并优化了在役检查的范围及方法。

在确保安全性的前提下, 在充分消化吸收 RSE-M 2010 版要求的基础上结合电厂运行经验反馈和实际设计要求进行了检查项目的优化, 同时引入了 NB/T 20312, 由仅依靠 RSE-M 2010 附录 CD3400 筛选出的 16,999 条管道减少到约 7700 条。同时依据设备的具体特性, 经过逐类、逐个设备的分析研究, 最终解决了应用规范过程中设备不可达、重复检查、设备类型不一致等诸多问题, 确定了福清 5、6 号机组设备的在役检查项目要求, 同时为后续华龙一号批量化建设项目的在役检查提供了参考。

## 参考文献

- [1] 欧洲议会和欧洲联盟理事会. 欧洲承压设备指令 97/23/EC [Z]. 1997-05-29.
- [2] 法国财政、工业和国土资源部. 法国承压设备法令[Z]. 1999-12-13.
- [3] 法国财政、工业和国土资源部. 压水堆主一回路和主二回路在役运行监管法令[Z]. 1999-11-10.
- [4] 法国财政、工业和国土资源部. 压水堆承压设备在役运行监管法令[Z]. 2000-03-15.



- [5] 法国财政、工业和环保部. 法国核承压设备法令[Z]. 2005-12-12.
- [6] Shao, C., Xiang, W., Ning, F., *et al.* (2015) Application of RSE-M 2010 in In-Service Inspection Program of CEPR Units. *Nuclear Power Engineering*, **36**, 54-58.
- [7] 国家能源局. NB/T20312-2014 压水堆核电站核岛机械设备在役检查规则[S]. 北京: 新华出版社, 2014.
- [8] 程岳, 杨志全, 齐云飞, 等. 华龙一号机组机械贯穿件结构设计概述[J]. 核工程研究与设计, 2018(117): 79-84.