

安全壳光纤监测系统的开发与验证

王振^{1,*} 马谷剑² 张昆桥¹ 陈森¹ 张锋¹ 宋涵³

(1. 中核武汉核电运行技术股份有限公司, 武汉 430000; 2. 福建福清核电有限公司, 福清 350300;
3. 武汉理工大学, 武汉 430000)

摘要 针对核电厂预应力混凝土安全壳结构整体性测试的要求, 本研究设计与开发了一套基于JAVAEE分层架构的软件平台及光纤传感设备的安全壳结构整体性试验光纤监测系统。系统采用点式与分布式多级监测网络、全光信号状态监测、光谱信号解调、采集与分析前后端处理等技术, 简化了系统设计, 提高了系统扩展性及可靠性, 建立了数据感知层、采集层、数据层、应用层四级架构的在线监测系统。安全壳光纤监测系统已在预应力混凝土安全壳整体性试验中应用与验证。现场验证结果表明: 系统稳定可靠、监测结果准确可信, 可满足预应力混凝土安全壳结构响应监测的要求。系统可在后续机组安全壳监测系统改造与升级中应用, 实现安全壳结构整体性试验在线监测。

关键词 预应力混凝土安全壳, 整体性试验, 监测系统

中图分类号: TU 899 **文献标志码:** A **DOI:** 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0016

Development and Verification of Containment Optical Fiber Monitoring System

WANG Zhen^{1,*} MA Gujian² ZHANG Kunqiao¹ CHEN Sen¹ ZHANG Feng¹ SONG Han³

(1. China Nuclear Power Operation Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China;
2. Fujian Fuqing Nuclear Power Co., Ltd., Fuqing 350300, China;
3. Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract To meet the requirements of the structural integrity test for prestressed concrete containments in nuclear power plants, a containment structural integrity monitoring system has been designed and developed. This system is based on a JAVAEE layered architecture software platform and uses fiber-optic sensing equipment. It employs point and distributed multi-level monitoring networks, all-optical signal status monitoring, spectral signal demodulation, and front-end and back-end data acquisition and analysis technologies. These features simplify system design, improve scalability and reliability, and establish an online monitoring system with a four-level architecture comprising data perception, acquisition, data, and application layers. The containment optical fiber monitoring system has been applied and validated during the structural integrity test of a prestressed concrete containment. On-site verification demonstrates that the system operates stably and reliably, with accurate monitoring results that satisfy the requirements for monitoring prestressed concrete containments. The system can be further applied in subsequent renovation and upgrade projects of containment monitoring systems to enable online monitoring during containment structural integrity

收稿日期: 2024-08-02

基金项目: 国家重点研发计划-在役核电站重要构筑物及设备材料老化退化行为规律与预测模型研究(2019YFB1900903), 中核集团集中研发华龙后续机型研发-先进的安全壳全寿期智能化健康监测监测系统研究(K210505)

* 联系作者: 王振(1989-), 男, 汉族, 湖北洪湖, 高级工程师, 硕士研究生, 现从事核电厂构筑物监测检测技术研究。E-mail: 756793726@qq.com

tests.

Keywords prestressed concrete containment, structural integrity test, monitoring system

0 引言

安全壳是核电厂中安全等级为二级的构筑物,是继燃料包壳、一回路压力边界之后的最后一道安全屏障,在发生一回路失水事故时用于控制和限制放射性物质外泄,保护公众和环境免遭放射性物质伤害。因而,安全壳在整个服役寿期内必须保持其预定的结构完整性和良好的密封性。每十年定期开展的安全壳整体打压试验和强度试验是检验安全壳整体密封性和结构完整性的最为关键的性能试验,也是核安全监管法规所强制要求的性能试验^[1-2]。

目前,国际上常用的安全壳整体性试验标准主要有美国 ASME 规范和法国 RCC-G 规范两种^[3]。国内安全壳整体性试验主要参考《压水堆核电厂安全壳结构整体性试验》(NB/T 20017—2010)执行,混凝土应变监测主要采用预埋至混凝土内部的振弦传感器。然而,随着服役时间的增加,预埋传感器易发生老化失效,且难以维修,影响安全壳结构状态监测与趋势分析。美国电力研究协会(EPRI)基于已有的先进监测技术研究适用于安全壳结构监测系统升级改造的解决方案,光纤传感监测因其具有准确性、可靠性,便于维修,可连续监测,被认为是最优的解决方案^[4]。

土木工程混凝土结构监测中的光纤传感器主要通过表面粘贴或直接埋入的方式监测混凝土的应变。与直接埋入式布设方法相比,表面粘贴式布设方法通过胶黏剂将光纤传感器粘贴于被监测对象表面,避免粗犷施工降低传感器的存活率,但应变经粘接层传递后难以精确测量。本文针对安全壳混凝土不允许采用开槽埋设、表面螺栓锚固的方式增设传感器的管理要求限制以及预埋振弦传感器失效后无法维修与传感器失效后难以有效评估安全状态的实际困境,采用表面粘贴布设的方式进行安全壳预应力混凝土结构应变补充监测,并结合安全壳结构计算模型进行安全壳状态评价。本研究开发了一套安全壳结构光纤监测系统,用于安全壳结构应变、温度的在线监测。系统应用于新型双层安全壳,外层为普通钢筋混凝土,内层为预应力钢筋混凝土,结构如图 1 所示。

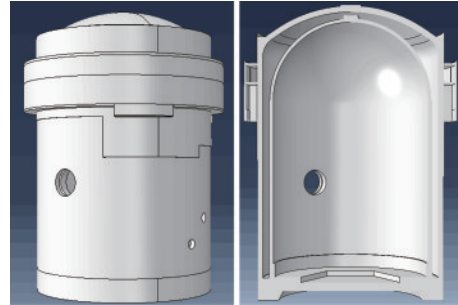


图 1 双层安全壳示意图

Fig.1 Schematic diagram of double-wall containment

1 总体技术路线

安全壳光纤监测系统的总体架构为数据感知层、采集层、数据层、应用层四级结构。首先根据核动力厂设计安全规定的要求确定系统需实现的主要功能,然后根据安全壳既有监测系统以及国外安全壳光纤监测系统研究成果,结合双层安全壳结构特点,对系统功能进行完善。安全壳光纤监测系统拓扑图如图 2 所示。

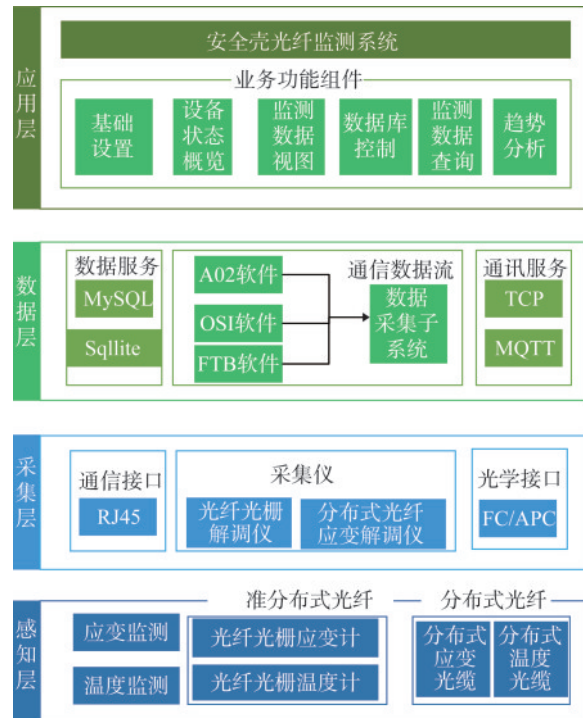


图 2 安全壳光纤监测系统拓扑图

Fig.2 Topology diagram of the containment optical fiber monitoring system

安全壳光纤监测系统由安全壳应变/温度测量模块、数据采集模块、数据存储模块、数据展示模块组成。安全壳应变/温度测量模块主要通过光纤传感器对安全壳应变温度进行测量并转化为光纤光栅波长以及频域信号,数据采集模块主要通过光纤光栅解调仪以及分布式光纤解调仪分别将光纤光栅波长信号以及分布式光纤频域信号解析为数字信号,同时使用TCP协议与数据存储系统连接,数据存储系统将光纤解调仪解析数据利用服务器进行数据存储,并最终通过数据展示模块进行展示以及人机交互。数据展示模块实时显示光纤传感器采集的应变与温度数据,实现数据统计、分析,并对异常数据、监测路径异常进行报警。

2 监测系统的开发与设计

2.1 系统总体功能设计

根据安全壳整体性试验监测的需求,安全壳光纤监测系统的基本功能如下:

(1) 基础设置。对项目信息、设备配置和监测范围进行管理,建立传感器与安全壳测量范围的对应关系。

(2) 设备状态概览。展示已安装光纤传感器位置、光纤传感器的状态。对异常通道进行报警提示与报警信息展示。

(3) 监测数据视图。实时展示最近的一次采集数据,以三维立体图展示应变监测云图以及光纤光栅(FBG)传感器、分布式光纤应变实时监测曲线。

(4) 数据库控制。对光纤传感器监测数据精度、测点位置精度、安全壳光纤监测系统的数据采集频率进行控制。

(5) 监测数据查询。基于监测对象、监测时间、监测位置等筛选条件对监测数据进行查询,并将关注监测数据以报表形式导出。

(6) 趋势分析。对FBG传感器的监测数据进行对比分析展示,对分布式光纤的监测数据进行时间历程展示、位置历程展示,对多组数据进行对比分析与趋势分析。

2.2 双层安全壳整体性测试原理

安全壳为双层安全壳,外层为钢筋混凝土结

构,内层为预应力钢筋混凝土结构,内层安全壳为承压边界,内层安全壳内径为23.400 m,外径为24.700 m,厚度为1.3 m,穹顶厚度为1.05 m,钢衬里厚度为6 mm。

安全壳整体性试验目的为通过安全壳打压试验检验安全壳在构造和强度方面承受设计基准事故的能力,验证在设计基准事故时安全壳能够保持结构的完整性。^[5]试验期间,通过对安全壳加压,测量安全壳整体变形、混凝土应变、灌油(蜡)钢束力、灌浆钢束力、温度、混凝土外观质量、安全壳内试验压力,最终全面整体分析试验数据,评估安全壳结构整体性是否满足设计要求。本次开发的安全壳光纤监测系统主要用于混凝土应变、温度测量,确定试验期间非预应力钢筋是否发生屈服。

试验过程中,观测应变传感器布设位置混凝土应变随试验压力的变化趋势,分析混凝土应变是否与试验压力呈线性变化,且卸压后是否应变恢复良好,判断混凝土是否与非预应力钢筋协同变形。根据以下公式计算非预应力钢筋的受力状态,根据计算结果判断非预应力钢筋是否屈服^[6]。

$$\sigma = E_s \times \varepsilon \quad (1)$$

式中: σ 为非预应力钢筋应力(MPa); E_s 为非预应力钢筋弹性模量(2.0×10^5 MPa); ε 为混凝土与非预应力钢筋协同的应变,取应变传感器监测最大值。

2.3 硬件设计与实现

2.3.1 硬件总体结构

安全壳光纤监测系统所涉及硬件包括光纤传感器、光纤传感器解调仪、工控机、交换机、服务器、显示器、信号传输光纤、传感器解调仪与工控机电力电缆、传感器固定耗材系统机柜。系统总体架构图如图3所示,具体实物如图4所示。光纤光栅传感器串联后通过FC/APC接口与光纤光栅解调仪光口适配器连接,分布式光纤传感器可单端/双端通过FC/APC接口与分布式光纤解调仪光口适配器连接。使用交换机,修改光纤光栅解调仪、分布式光纤解调仪IP地址至同一局域网,采用TCP协议调用解调仪数据并传输至服务器、工控机,最终通过显示器展示监测数据。本系统传感器均为无源传感器,信号线路简洁,可串联多组传感器,传感器两端均可传输数据,系统线路可冗

余配置,系统中解调仪既采集数据又存储原始数据,数据均备份至服务器,提高了数据储存的可靠性。

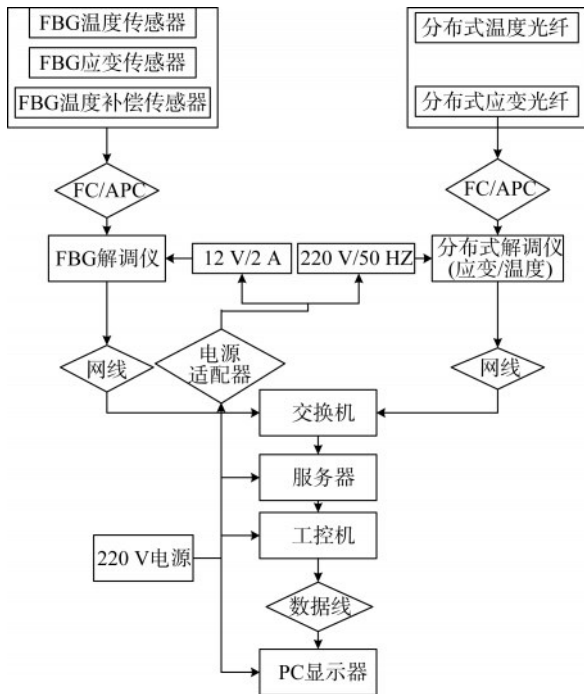


图3 安全壳光纤监测系统总体架构图

Fig.3 Architecture diagram of the containment fiber optic monitoring system



图4 安全壳光纤监测系统实物图

Fig.4 Photo of the containment fiber optic monitoring system

2.3.2 传感器研制与标定

光纤本身存在纤细、质地脆、易断裂的缺点,难以直接应用于土木工程结构的使用环境,针对该情况,研制了金属管式封装的光纤光栅传感器与分布式光纤传感器。管式封装传感器由金属管层、胶层和光纤三层构成,金属封装光纤为外径0.7 mm、内径0.1 mm的毛细金属管,通过环氧树脂固定光纤于金属管内部,其中光纤光栅传感器标距为200 mm,分布式光纤长2 000 mm,具体如图5—图7所示。金属管式封装工艺主要由注胶

罐内部高压将环氧树脂胶压入不锈钢毛细管内部,直至胶体从不锈钢毛细管上部端口溢出,注胶流程如图8所示。在对不锈钢毛细管注胶完成之后,对光纤两端施加砝码适度预紧,常温固化24 h后,金属管式封装光纤应变传感器封装完成。

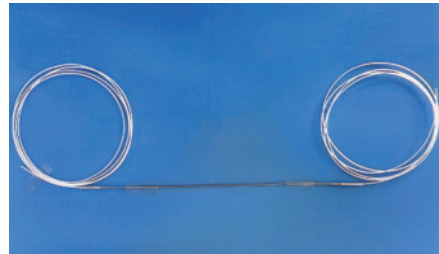


图5 光纤光栅应变传感器

Fig.5 Fiber bragg grating strain sensor

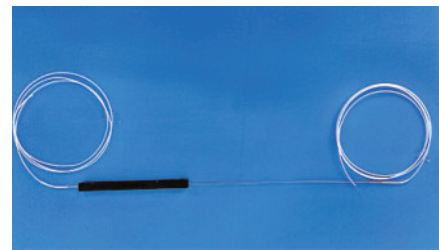


图6 光纤光栅温度补偿传感器

Fig.6 Fiber bragg grating temperature compensation sensor



图7 分布式光纤传感器

Fig.7 Distributed optical fiber sensor

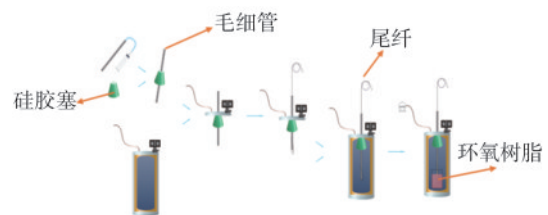


图8 注胶灌封工艺流程图

Fig.8 Process flow diagram of glue injection and sealing

光纤经金属封装后,将产生剪滞效应,在胶层和光纤层将产生应变传递衰减,为明确光纤传感器的测试性能,开展了标定测试试验,不锈钢毛细管封装FBG的温度灵敏度、力灵敏度、应变灵敏度和应变传递率分别为27.5 pm/°C、0.94 pm/N、1.11 pm/με和91.918%,工作温度范围为-60~

50 °C,可满足安全壳混凝土结构应变监测的需求。

2.3.3 传感器安装工艺研究

因核电厂管理要求,不建议在预应力安全壳混凝土表面钻孔与开槽,故开展了表面粘贴布设方式传感器安装工艺研究。季冬亮的研究表明,胶黏剂的粘接长度和粘接中间层厚度是影响应变传递率变化的主要因素^[7]。通过表面粘贴式光纤应变传递建模分析,提出了针对金属管式封装传感器的规范粘贴工艺,具体如图9所示。

分布式光纤的应变监测元件为纤芯,混凝土

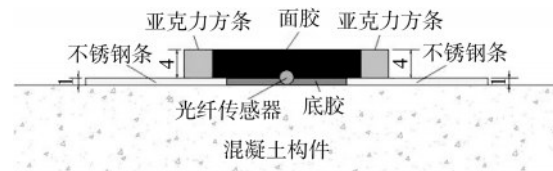


图9 光纤传感器表面粘贴布设工艺

Fig.9 Surface bonding and laying process of fiber optic sensors

基体应变通过剪力传递至纤芯,其结构模型如图10所示。基于多中间层剪滞理论,得到如下分布式光纤与基体之间的应变传递公式^[8]:

$$\alpha(x) = \frac{\overline{\varepsilon_f(x)}}{\varepsilon_m} = \frac{2 \int_0^L \varepsilon_f(x) dx}{2L\varepsilon_m} = 1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)} \quad (2)$$

$$k^2 = \frac{2}{r_f^2 E_f \sum_{i=2}^n \frac{1}{G_i} \left\{ \left[1 + \sum_{i=3}^n \frac{(r_{i-1}^2 - r_{i-2}^2) E_{i-1}}{r_f^2 E_f} - \frac{E_i}{E_f} \right] \ln \left(\frac{r_i}{r_{i-1}} \right) + \frac{(r_i^2 - r_{i-1}^2) E_i}{2r_f^2 E_f} \right\}} \quad (3)$$

式中: $\alpha(x)$ 为应变传递率, x 为采样点的空间位置, $\varepsilon_f(x)$ 为纤芯应变, ε_m 为基体应变, E_f 、 E 为纤芯和中间层弹性模量, G_i 为中间层剪切模量, r 为中间层半径, L 为1/2空间分辨率大小。

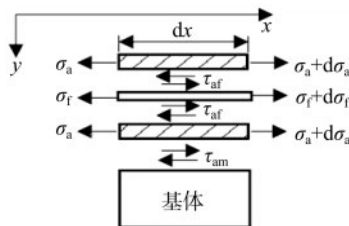


图10 分布式光纤应变传递原理图

Fig.10 Schematic diagram of distributed fiber optic strain transfer

依据理论公式计算,2 mm紧护套分布式光纤平均应变传递率为0.965,金属管式分布式光纤应变传递率为0.913。

针对分布式光纤开展了布设工艺试验研究,

测试该布设工艺的应变传递率。应变传递率为纤芯应变与基体应变的比值,由于钢筋混凝土梁局部应变离散性较大,以位移计计算应变值为基体应变值。应变传递研究试验方案如下:对预应力混凝土试验梁进行四点弯试验,如图11所示,将分布式光纤传感器、光纤光栅传感器、应变片分别布设于预应力混凝土试验梁的底面。监测元件的布置位置示意图如图12所示。根据跨中与两端的位移计测量值计算的预应力梁纯弯段应变值与两类分布式光纤的测试值的对比如图13所示。以位移计应变值为基准,按此粘贴工艺的金属管式分布式光纤应变传递率为0.883,2 mm紧护套分布式光纤应变传递率为0.939,实测结果略低于理论计算结果,可能原因为光纤与混凝土材料粘接层未全段粘接紧密,与理论公式假定条件存在一定差异。

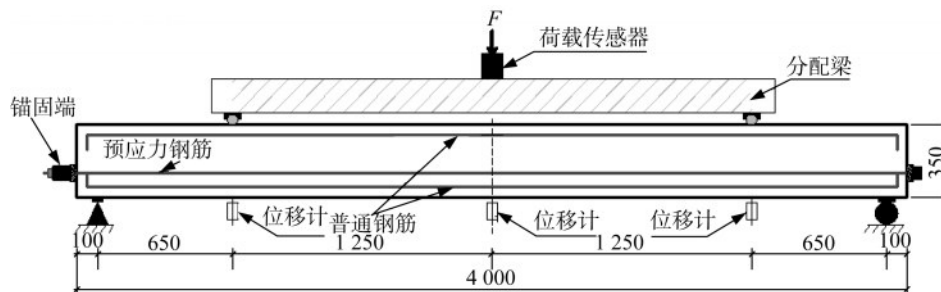


图11 试验梁加载示意图

Fig.11 Schematic diagram of experimental beam loading

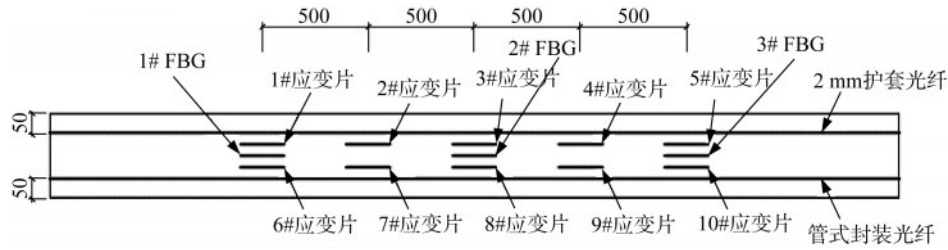


图 12 试验梁底面传感器的布置示意图

Fig.12 Layout diagram of sensors on the bottom surface of the test beam

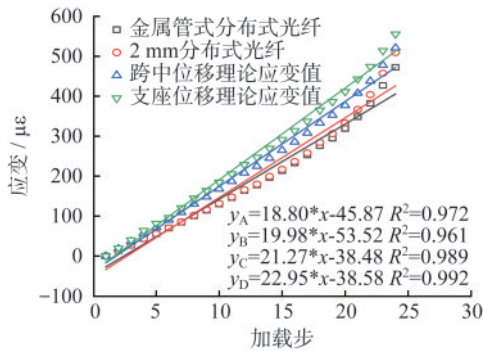


图 13 梁纯弯段分布式应变均值与理论应变均值对比图

Fig.13 Comparison between the mean distributed strain and the mean theoretical strain in the pure bending section of the beam

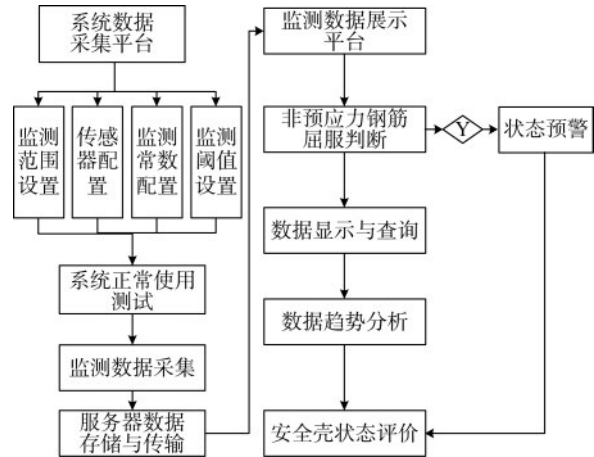


图 14 系统软件流程图

Fig.14 System software flow chart

2.4 软件设计与实现

安全壳光纤监测系统基于 JAVAEE 分层架构,采用 B/S 模式进行设计,采用前后分离的方式对前后台进行解耦。后台主要基于成熟开源框架进行底层构建,前端主要依托主流 JS 框架和丰富的 UI 组件进行页面功能开发,前后端分离后主要通过轻量级 WEB 服务架构 RESTFUL 进行数据交互。主要包括系统数据采集平台与监测数据展示平台,系统软件流程图如图 14 所示。

软件的主要模块介绍如下:

(1) 系统数据采集平台

系统数据采集平台主要用于配置光纤传感器基础信息、光纤传感器与光纤解调仪以及布设位置关联信息、光纤传感器监测阈值,如图 15 所示。FBG 解调仪数据抽取采用读取 sqlite 数据库表的方式,分布式解调仪数据从 TXT 文件获取,分布式解调仪输出的文件,应变数据文件内容为位置-应变,温度数据文件内容为位置-温度,数据抽取频率、精度从数据库控制模块读取,如果在抽取频率内未读取到新的数据,系统判定传感器监测已断开,将形成报警数据记录到状态报警信息表。最终所有经光纤解调仪采集的数据均抽

取后存储于服务器中,供监测数据展示平台查询与调用。

(2) 监测数据展示平台

监测数据展示平台对光纤光栅传感器、分布式光纤传感器监测数据进行计算、趋势分析,将原始监测数据经温度修正、应变传递率、混凝土内外部转换后,根据计算公式(1),计算各监测部位非预应力钢筋的应力状态,评估其是否屈服,当出现超过阈值时触发报警信息并存储报警信息,最终结合历次监测数据趋势分析(如图 16 所示)以及理论阈值,总体评价安全壳结构整体状态是否满足安全壳结构整体性试验要求。

3 系统测试与验证

3.1 系统测试

安全壳光纤监测系统在某核电厂进行了安装测试与验证。安全壳光纤监测系统包含三类传感器,分别为光纤光栅应变传感器(含温度补偿)、光纤光栅温度传感器、分布式光纤。光纤光栅传感器布设于 95° 方位角处、设备闸门左侧 84.5° 以及设备闸门右侧 5°~23° 处,分布式光纤布设于设备

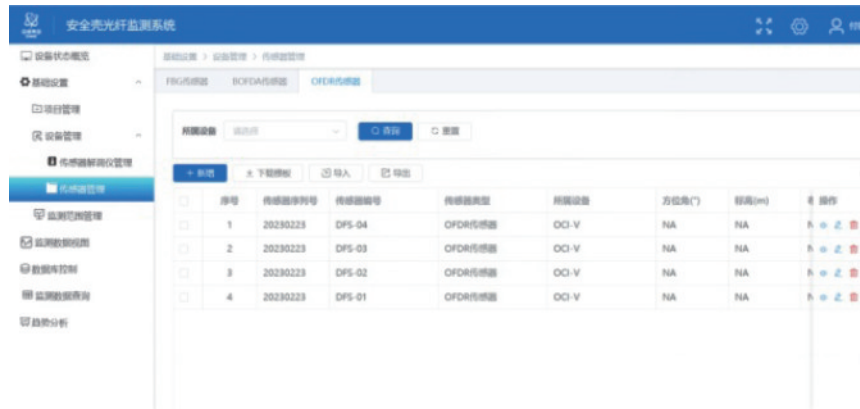


图15 传感器基础信息设置页面

Fig.15 Sensor basic information setting page



图16 安全壳监测系统趋势分析界面

Fig.16 Trend analysis for the containment monitoring system page

闸门右侧5°~23°、标高13~18 m处,监测元件布设位置信息如图17所示。

分别为:0 MPa, 0.105 MPa, 0.21 MPa, 0.42 MPa, 0.21 MPa, 0.105 MPa, 0 MPa。

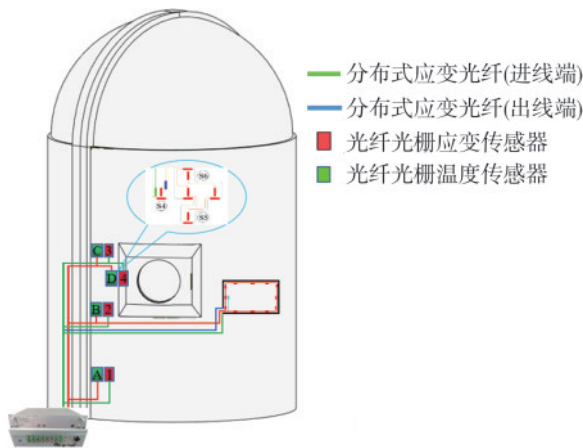


图17 光纤传感器布设位置示意图

Fig.17 Schematic diagram of fiber optic sensors deployment location

安全壳结构整体性试验实际的升压降压曲线如图18所示,整个升降压期间共有7个压力平台,

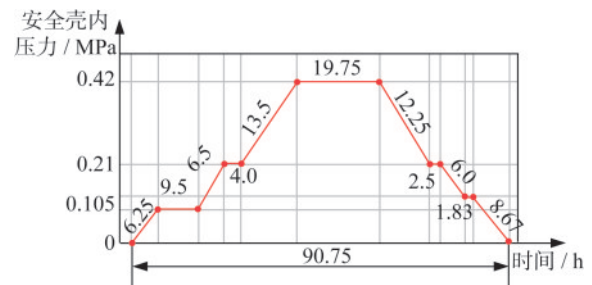


图18 安全壳实际升降压曲线

Fig.18 Actual pressure curve of the containment

各个压力平台下,各级压力下光纤光栅应变传感器监测数据如图19、图20所示,各处光纤光栅监测数据具有较好的线性,能反映各级压力平台下安全壳结构的应变响应,卸压后,各监测段整体应变趋近于0,表明安全壳结构处于弹性状态,无残余变形。

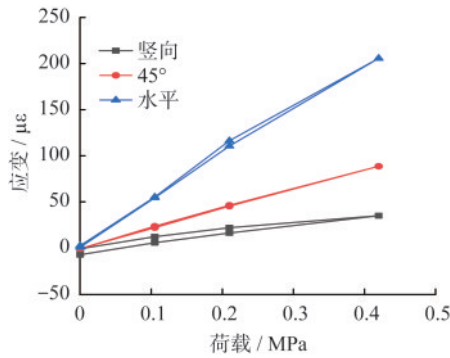


图 19 2.65 m 处光纤光栅监测数据

Fig.19 Fiber bragg grating monitoring data at 2.65 m

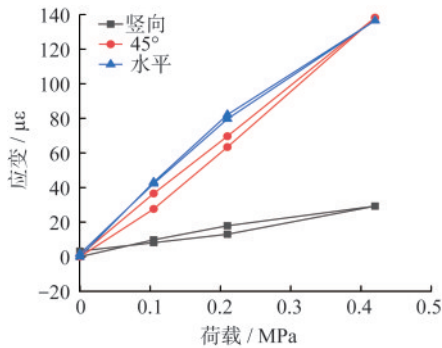


图 20 13.27 m 处光纤光栅监测数据

Fig.20 Fiber bragg grating monitoring data at 13.27 m

双端高精分布式应变解调仪共采集 4 组监测数据,分别为 13.00~18.00 m/22°(AB 段)、18.00 m/22°~5°(BC 段)、18.00~13.00/5°(CD 段)、13.00 m/5°~22°(DE 段)。各级压力下,各段分布式光纤整体应变监测数据具有较好的线性,能反映各级压力平台下安全壳结构的应变响应,卸压后,各监测段整体应变趋近于 0,表明安全壳结构处于弹性状态,无残余变形,如图 21 所示。

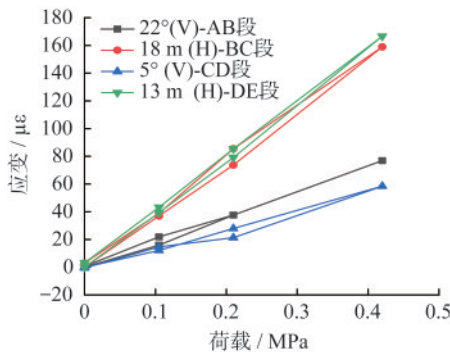


图 21 分布式光纤整体应变历程曲线

Fig.21 Overall strain history curves of distributed fiber optics

3.2 系统验证

为了验证测试系统的准确性,开展了安全壳

结构整体性试验计算分析以及光纤传感器监测数据与振弦传感器监测数据对比分析。

3.2.1 安全壳结构整体性试验计算分析

在本次安全壳结构整体性试验中,光纤光栅传感器与分布式光纤主要布设于安全壳外表面,为掌握安全壳结构整体性试验过程中光纤传感器布设区域的应变分布以及安全壳沿壁厚的应变分布规律,采用 ABAQUS 软件建立了安全壳分离式有限元模型。

按照模拟工况,计算安全壳结构的压力-应变变化,结合不同部位振弦传感器的监测数据,对安全壳结构有限元模型进行修正,安全壳结构环向与竖向变形如图 22、图 23 所示,安全壳设备闸门左右两侧环向变形较大,穹顶竖向变形较大。

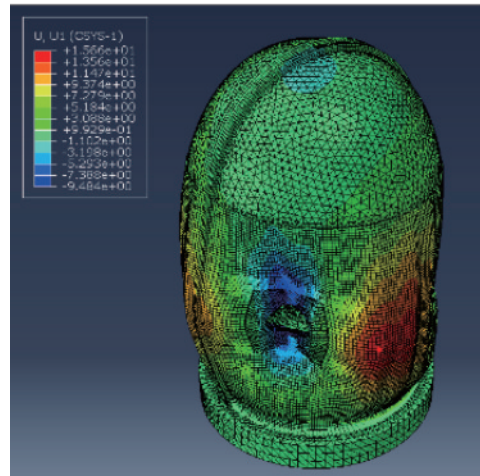


图 22 安全壳环向变形图

Fig.22 Diagram of circumferential deformation of the containment

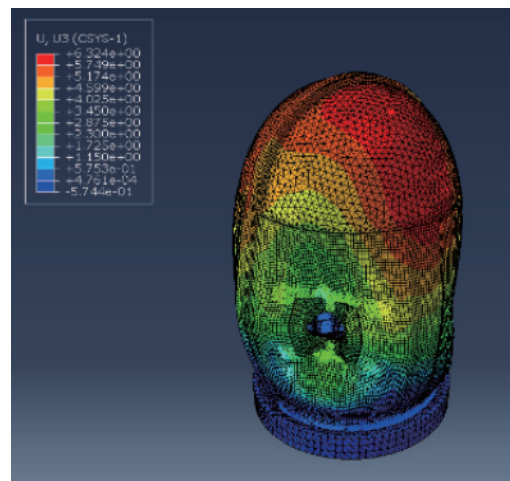


图 23 安全壳竖向变形图

Fig.23 Diagram of vertical deformation of the containment

靠近扶壁柱布设光纤光栅传感器处的安全壳结构沿壁厚的应变变化规律如图24、图25所示。不同内压荷载作用下,安全壳结构连续区域的应变值沿安全壳筒体厚度的变化规律基本呈线性增大,且变化幅值较小^[9];结构非连续区域,如设备闸门、扶壁柱区域,受局部加强以及应力重分布的影响,沿安全壳筒体厚度的变化虽仍呈线性增长,但是变化的幅值较大。

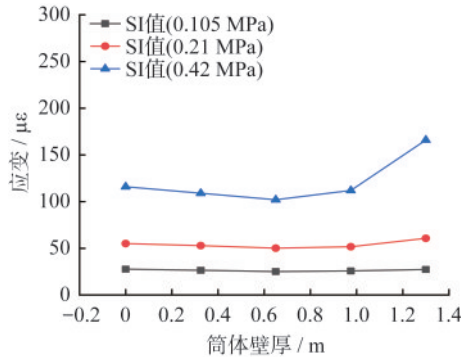


图24 2.65 m/95°环向应变沿径向变化曲线
Fig.24 Radial variation curves of 2.65 m/95° circumferential strain

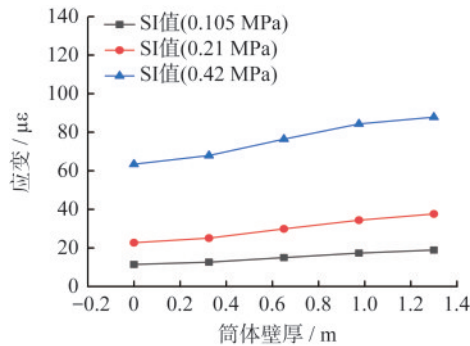


图25 2.65 m/95°竖向应变沿径向变化曲线
Fig.25 Radial variation curves of 2.65 m/95° vertical strain

3.2.2 监测数据对比分析

预埋振弦传感器沿安全壳壁厚分两层布设,分别布置于内层非预应力钢筋网与外层非预应力钢筋网,具体位置如图26所示。根据预埋振弦传感器监测数据,对其外表面对应区域的光纤光栅传感器监测数据进行重点分析,将光纤传感器监测数据经温度修正、应变传递率修正后,与预埋振弦传感器的监测数据进行对比分析。

各级压力平台下,表面粘贴光纤光栅传感器的监测结果、有限元计算结果以及两类传感

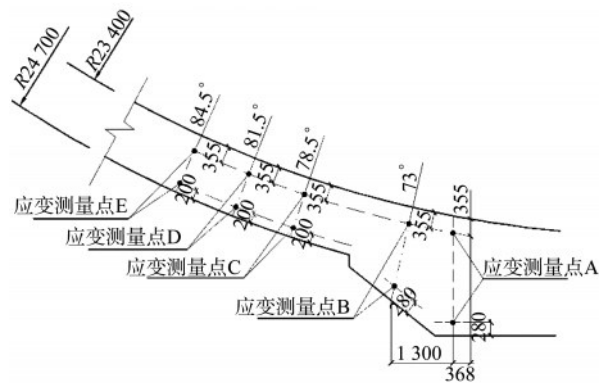


图26 预埋振弦传感器平面图

Fig.26 Plan view of embedded vibrating wire sensor

器监测误差见表1,FBG测试误差为表面粘贴FBG测试值与有限元计算值的差值,振弦传感器(VWS)内层测试误差为靠近钢衬里侧预埋振弦传感器测试值与有限元计算值的差值,VWS外层测试误差为靠近安全壳外侧预埋振弦传感器测试值与有限元计算值的差值,具体如图27、图28所示。以上不同高度、方位角的环向与竖向共8组应变监测数据,有5组光纤光栅传感器的监测误差大于振弦传感器的监测误差,总体监测效果略差于预埋式振弦传感器。存在以上现象的原因可能为现场布设工艺的不稳定性导致光纤传感器的应变传递效率不一致,同时现场安装定位误差可能导致光纤传感器监测数据与理论数据存在差异。

为验证分布式光纤测试准确性,在分布式光纤布设区域处外表面布设一组振弦式传感器,如图29所示,各级压力平台下,分布式光纤整体应变与振弦式传感器监测应变、理论计算值如表2所示。监测数据表明,分布式光纤、振弦传感器监测数据与有限元计算值具有较高的一致性,如图30所示,振弦传感器监测数据与有限元计算值最大误差为 $-8.50 \mu\epsilon$,分布式光纤监测数据与有限元计算值最大误差为 $3.89 \mu\epsilon$ 。

布设光纤传感器的区域混凝土最大环向应变为 $206.51 \mu\epsilon$,根据公式(1)的计算方法,可计算该处非预应力钢筋最大拉应力为 41.2 MPa ,远小于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中HRB500钢筋的屈服强度,内层安全壳为预应力钢筋混凝土结构,静载时钢筋混凝土处于预压状态,综合预压应变和此拉应变可判断光纤传感器布设处非预应力钢筋未发生屈服。

表 1 两类传感器与有限元计算结果误差值
Table 1 Error values of two types of sensors and finite element calculation results

| 位置 | 压力平台/MPa | 方向 | 表面有限元计算值/ $\mu\epsilon$ | 表面FBG测试值/ $\mu\epsilon$ | FBG测试误差/ $\mu\epsilon$ | VWS内层测试误差/ $\mu\epsilon$ | VWS外层测试误差/ $\mu\epsilon$ |
|--------------|----------|----|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 2.65 m/95° | 0.105 | 环向 | 27.3 | 54.88 | 27.58 | 7.52 | 20.87 |
| | 0.210 | | 60.7 | 113.42 | 52.72 | 12.16 | 37.49 |
| | 0.420 | | 166 | 205.69 | 39.69 | 16.02 | 41.53 |
| | 0.105 | 竖向 | 18.9 | 15.63 | -3.27 | -1.92 | 6.08 |
| | 0.210 | | 37.35 | 27.79 | -9.56 | -5.48 | 9.37 |
| | 0.420 | | 87.8 | 52.10 | -35.7 | -31.91 | -1.25 |
| 13.27 m/95° | 0.105 | 环向 | 26.6 | 45.70 | 19.1 | 15.15 | 23.37 |
| | 0.210 | | 68.9 | 83.60 | 14.7 | 29.97 | 37.66 |
| | 0.420 | | 105 | 159.40 | 54.4 | 52.06 | 99.95 |
| | 0.105 | 竖向 | 19 | 11.88 | -7.12 | -2.23 | 6.07 |
| | 0.210 | | 38.4 | 21.31 | -17.09 | -5.55 | 7.19 |
| | 0.420 | | 95.3 | 40.16 | -55.14 | -19.58 | -9.78 |
| 23.89 m/95° | 0.105 | 环向 | 26.1 | 55.29 | 29.19 | 19.28 | 18.63 |
| | 0.210 | | 67.1 | 106.10 | 39 | 34.85 | 31.28 |
| | 0.420 | | 139 | 206.51 | 67.51 | 51.21 | 64.95 |
| | 0.105 | 竖向 | 19.7 | 21.37 | 1.67 | -7.24 | 1.65 |
| | 0.210 | | 39.7 | 42.40 | 2.70 | -16.35 | -0.34 |
| | 0.420 | | 97.1 | 84.44 | -12.66 | -46.18 | -18.97 |
| 19.7 m/84.5° | 0.105 | 环向 | 34.6 | 44.53 | 9.93 | 6.14 | 19.88 |
| | 0.210 | | 70 | 93.90 | 23.9 | 11.28 | 36.03 |
| | 0.420 | | 248 | 189.43 | -58.57 | -11.10 | -36.83 |
| | 0.105 | 竖向 | 27.3 | 31.30 | 4.00 | -2.55 | 23.93 |
| | 0.210 | | 56 | 65.85 | 9.85 | -4.75 | 39.16 |
| | 0.420 | | 159 | 139.84 | -19.16 | -27.05 | 22.85 |

表 2 分布式光纤与表面振弦式传感器监测数据

Table 2 Monitoring data of distributed fiber optic and surface vibrating wire sensors

| 压力(MPa)测点 | | | | 0 | 0.105 | 0.210 | 0.420 | 0.210 | 0.105 | 0 |
|-----------|-------|--------|----|-------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 编号 | 高度/m | 方位/(°) | 方向 | 应变/ $\mu\epsilon$ | | | | | | |
| VWS | 13.27 | 10 | H | 0.00 | 33.70 | 72.20 | 154.60 | 89.90 | 50.50 | 12.40 |
| DOFS | 13.00 | 5~23 | H | 0.00 | 39.37 | 79.13 | 166.66 | 85.45 | 43.21 | 3.12 |
| 理论值 | 13.00 | 5~23 | H | 0.00 | 40.78 | 81.56 | 163.10 | 81.56 | 40.78 | 0.00 |
| VWS误差 | | | | 0 | -7.08 | -9.36 | -8.50 | 8.34 | 9.72 | 12.4 |
| DOFS误差 | | | | 0 | -1.41 | -2.43 | 3.56 | 3.89 | 2.43 | 3.12 |

监测数据对比表明,分布式光纤传感器与理论值以及振弦传感器监测数据较为吻合,监测结果准确可信,而光纤光栅传感器监测误差大于振弦式传感器,光纤光栅传感器相较于振弦传感器的监测准确性有待进一步验证。

4 系统的优势分析

基于光纤传感原理的自身优势以及系统的智能化监测设计,本系统形成了以下核心优势。

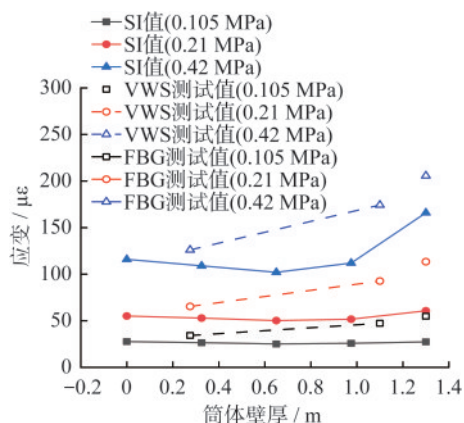


图27 2.65 m/95°环向应变对比图

Fig.27 Comparison of 2.65m/95° circumferential strain

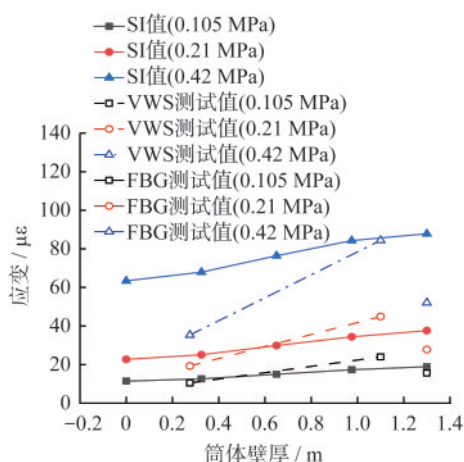


图28 2.65 m/95°竖向应变对比图

Fig.28 Comparison of 2.65 m/95° vertical strain



图29 分布式光纤与振弦传感器布设位置

Fig.29 Location of distributed fiber optic and vibrating wire sensors

4.1 高精度大范围损伤诊断能力

分布式光纤可大范围地监测安全壳结构应变状态,可获得光纤沿路径各点的应变信息。基于混凝土表面应变监测技术,可判断非预应力钢筋受力状态,实现实时的状态预警。

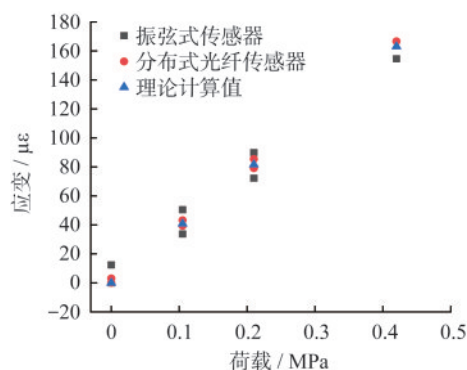


图30 分布式光纤与振弦传感器监测数据

Fig.30 Monitoring data of distributed fiber optic and vibrating wire sensors

4.2 多层次高可靠度网状监测系统

系统集成光纤光栅传感器、分布式光纤传感器,建立了准分布式与分布式网络。光纤光栅传感器为无源传感器,可串联/双端布设,减少现场线路布设工作的同时,提高了监测系统的冗余度。分布式光纤,既可满足局部高精度监测,也可满足大范围全域状态监测需求,多通道监测提高了系统可靠性与可扩展性。光纤传感器均布设于安全壳表面,提高了监测系统的可维护性。

5 结 语

本文基于JAVAEE分层架构的软件平台开发了国内首套安全壳光纤监测系统,并在安全壳整体性试验中进行了验证,主要结论如下:

(1) 不锈钢金属管封装光纤光栅传感器的温度灵敏度、力灵敏度、应变灵敏度和应变传递率分别为 27.5 pm/°C、0.94 pm/N、1.11 pm/με 和 91.918%,工作温度范围为-60~50°C,满足安全壳高精度监测要求。

(2) 基于表面安装方式的光纤传感器经传递率修正、温度修正后,分布式光纤最大监测误差为-8.5 με,可评价非预应力钢筋屈服状态,表面安装传感器可实现安全壳状态评估。

(3) 安全壳光纤监测系统稳定可靠、监测结果准确可信,可满足预应力混凝土安全壳结构响应监测的要求。系统可在后续机组安全壳监测系统改造与升级中应用,实现安全壳结构整体性试验在线监测,为原CIM系统预埋振弦传感器失效后进行安全壳应变监测提供了解决方案,具有较强的工程推广价值。

(4) 本系统光纤传感器均采用粘贴方式布设于混凝土表面,为保证安全壳光纤监测系统的长时间正常使用,粘贴布设方式的稳定性、耐久性以及光纤传感器定期标定方法有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 许凯伟, 荣华, 杨璋, 等. 压水堆核电机组安全壳结构自动化监测系统开发与应用[J]. 建筑结构, 2018, (16): 111-113, 101.
XU Kaiwei, RONG Hua, YANG Zhang, et al. Study and application of safety monitoring system for pressurized water reactor nuclear power plant containment [J]. Building Structure, 2018, (16): 111-113, 101. (in Chinese)
- [2] 岳清瑞. 工程结构安全鉴定加固技术与工程实例[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2013.
YUE Qingrui. Engineering structure safety appraisal and reinforcement technology and engineering examples [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [3] 谢永金. 核电站安全壳结构整体性能检测标准与技术[J]. 核标准计量与质量, 1996(1): 16-20.
XIE Yongjin. Standard and technology for integrity performance testing of nuclear power plant containment structure [J]. Nuclear Standard Metrology and Quality, 1996(1): 16-20. (in Chinese)
- [4] Program on Technology Innovation: Retrofitted Sensors for Nuclear Containment Structures 3002007819 EPRI Report[R]. Palo Alto, CA: EPRI, 2016.
- [5] 压水堆核电厂安全壳结构整体性试验: NB/T 20017—2010[S]. 北京: 原子能出版社, 2010.
Structural integrity test of containments for pressurized water reactor power plants: NB/T 20017—2010 [S]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010. (in Chinese)
- [6] 申彤. “华龙一号”核电安全壳结构整体性试验变位测试分析[J]. 工业建筑, 2021(12): 1-6.
SHEN Tong. Displacement analysis for structural integrity test of containment of HPR1000 nuclear power plant [J]. Industrial Construction, 2021(12): 1-6. (in Chinese)
- [7] 季冬亮. 粘贴式光纤光栅传感器动态应变传递规律研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
JI Dongliang. Study on the dynamic strain transfer law of surface bonded fiber Bragg grating sensor [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [8] 毛江鸿, 崔磊, 金伟良, 等. 基于分布式光纤传感的混凝土裂缝识别与监测试验研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(9): 1298-1304.
MAO Jianghong, CUI Lei, JIN Weiliang, et al. Experimental research on concrete crack recognizing and monitoring based on distributed fiber sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(9): 1298-1304. (in Chinese)
- [9] 李建波, 梁招瑞, 宋永军, 等. 某核电机组安全壳打压试验期间安全壳外加应变计数据分析研究[J]. 核技术, 2019(12): 75-84.
LI Jianbo, LIANG Zhaorui, SONG Yongjun, et al. Research on data analysis of added strain gages of containment building under the pressure test of nuclear power unit during the overhaul period [J]. Nuclear Techniques, 2019(12): 75-84. (in Chinese)