

核反应堆压力设备环形密封面泄漏监测与分析诊断研究

蒋兆翔, 何攀, 刘才学, 王瑶, 王广金

(中国核动力研究设计院, 成都 610041)

摘要: 针对核反应堆压力设备环形密封面进行了泄漏监测与分析诊断研究, 以自主化研制的新型蒸汽发生器的密封性能验证为对象, 搭建了环形密封面泄漏监测系统, 通过制作等比例试验件开展泄漏模拟试验验证了监测系统的有效性; 针对蒸汽发生器, 开展了数个升降温循环及稳态瞬态等密封性能试验的验证, 试验中未监测到泄漏; 试验后对蒸汽发生器监测数据进行了深层次分析, 通过数据拟合与数据分布两个角度与模拟件真实泄漏数据进行对比分析论证, 最终证明了研制的新型蒸汽发生器环形密封面的声发射监测数据不符合泄漏数据的衰减规律, 因此蒸汽发生器未发生介质泄漏, 密封性能可靠, 具有工程应用的可靠依据, 同时该监测方法也可进一步推广到其它压力设备的环形密封面的泄漏监测中。

关键词: 核反应堆; 环形密封面; 泄漏监测; 蒸汽发生器; 分析诊断

Leakage Monitoring and Analysis Diagnosis Research on Ring Sealing Surface of Pressure Equipment in Nuclear Reactor

Jiang Zhaoxiang, He Pan, Liu Caixue, Wang Yao, Wang Guangjin

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper studied leakage monitoring, analysed and diagnosed the data on ring sealing surface for pressure equipment in nuclear reactor, using a new type of self-developed steam generator as an object, created the ring sealing surface leakage monitoring system. The effectiveness of the monitoring system is verified by the leakage simulation test conducted by the production of proportional test pieces. For the steam generator, several sealing performance tests such as lifting and cooling cycles and steady-state or transient were carried out, but no leakage was detected during the tests. After test in combination with data of analog real leak, analysed deeply on the monitoring data of steam generator, using data fitting and data distribution two different ways to compare with real leaking data, finally proved ring sealing surface of steam generator without medium leakage, sealed performance is reliable, this monitoring method can be further extended to other pressure equipment of the ring sealing surface leakage monitoring.

Keywords: nuclear reactor; ring sealing surface; leakage monitoring; steam generator; analysis and diagnosis

0 引言

核反应堆是可持续发展能源应用的典范, 为了保证反应堆安全可靠地运行, 反应堆内的各种压力设备与装置需要进行密封性能的实时监测与故障诊断, 即泄漏监测技术。目前主流的泄漏监测技术有基于温湿度探测、基于信号声发射特性、基于摄像头图像识别、基于放射剂量探测等多种方法, 大部分方法需要待设备泄漏达到临界阶段才能识别, 而基于信号声发射由于定位定量准、敏感度较高、检测技术不会对设备本身带来影响成为当下最适用的技术^[1-2]。基于声发射技术研发的反应堆一回路主管道和波动管泄漏监测系统已经应用于福清 56 和巴基斯坦 K2K3 核电站^[3], 对核电厂的压力边界评估提供重要指标, 但总体上看应用还不够广泛。与此同时, 反应堆中自主可控研制的

其他新型压力设备包括蒸汽发生器和阀门等的密封性能验证也需要进行泄漏监测才能得到工程应用, 蒸汽发生器是一回路 3 个回路的热交换压力设备, 反应堆各种回路上配置有数量众多的阀门, 它们的环形密封面密封性能的监测对于维护反应堆的正常稳定运行有重要意义。

因此, 有必要对核反应堆压力设备的环形密封面进行泄漏监测与分析诊断, 以准确监测其泄漏状况, 并推广到其他类似环形密封面泄漏监测中, 保证核反应堆运行的可靠性。本文将声发射泄漏监测技术应用到自主化研制的新型蒸汽发生器的密封性能试验验证上, 对蒸汽发生器最容易泄漏的环形密封面进行泄漏监测与分析诊断, 为蒸汽发生器的国产化研制及工程应用提供可靠性的理论依据。

收稿日期: 2020-09-30; 修回日期: 2020-11-09。

作者简介: 蒋兆翔(1991-), 男, 四川成都人, 硕士, 工程师, 主要从事核电子技术应用与反应堆关键设备故障诊断与开发工作方向的研究。

引用格式: 蒋兆翔, 何攀, 刘才学, 等. 核反应堆压力设备环形密封面泄漏监测与分析诊断研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 20-24.

1 试验装置及系统框架

1.1 试验装置

蒸汽发生器是利用反应堆中产生的高温高压微过热蒸汽由过热器加热后驱动汽轮机发电的能源源头, 是反应堆中的重要设备, 其密封性能的评估对其长期运行的安全性至关重要。为了对一种自主设计的新型蒸汽发生器进行密封性能试验验证, 需要针对其新的自紧式密封结构进行泄漏监测, 其密封原理是依靠密封垫片锥面与浮动顶盖的凸形面接触实现, 借助预紧螺栓达到预紧作用。试验装置主要包括蒸汽发生器、蒸汽调节阀、流量测量装置、减温水泵、压力温度调节装置、缓冲器及相关阀门。其中, 环形密封面为该蒸汽发生器最易发生泄漏的位置, 因此将在环形密封面上进行泄漏监测与分析诊断。

如图 1 所示为蒸汽发生器环形密封面的俯视图, 在密封顶盖 $\Phi 600$ mm 空间内周向焊接布置 4 个声发射传感器, 且采用波导杆的安装方式, 以避免高温高压的过热蒸汽对声发射传感器造成损坏, 4 个传感器分别均匀安装在环形密封面上, 即 0° 、 90° 、 180° 、 270° 4 个方向。

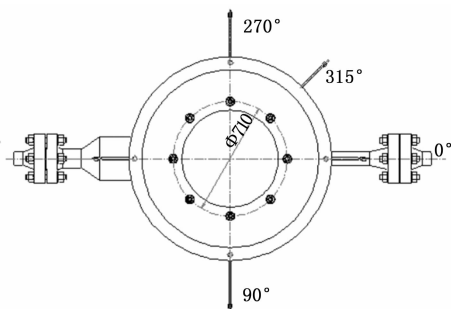


图 1 蒸汽发生器环形密封面俯视图

S1~S4 为安装在环形密封面上的 4 个声发射传感器, 它们布置在圆心对称的位置但不在圆环上。若发生泄漏, 则泄漏源点位于环形密封面以 r 为半径的圆环上, 并在整个密封面上蔓延, 由于泄漏在二维平面上蔓延, 其泄漏判断和定位定量相对一维泄漏有难度, 需要通过试验后的泄漏数据分析与诊断给出更为可靠的结论。

1.2 系统框架

蒸汽发生器环形密封面泄漏监测系统的框图如图 2 所

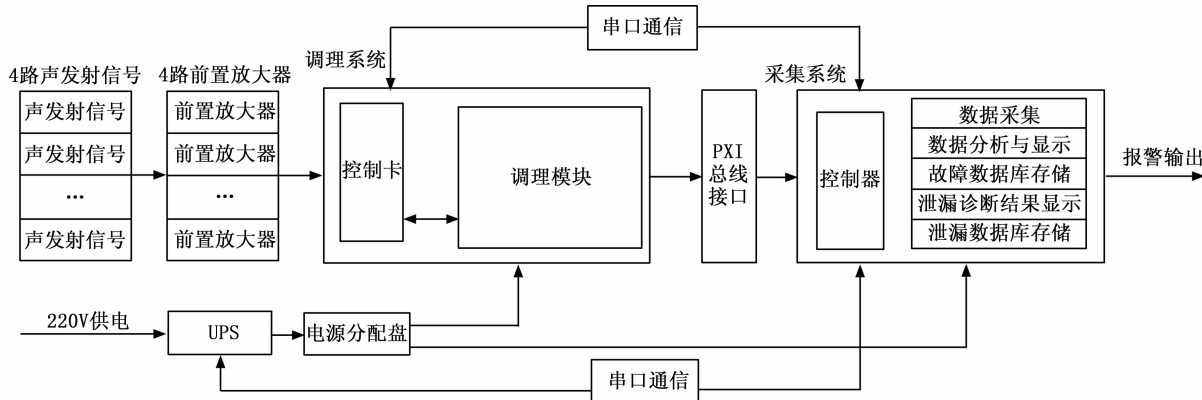


图 2 环形密封面声发射泄漏监测系统框图

示, 声发射是材料受外力或内力作用而产生变形或断裂时以应力波的形式释放能量的现象^[4], 若蒸汽发生器发生泄漏, 其释放的应力波经波导杆导出后由 4 路声发射传感器将其转换为微电压信号, 经前置放大器转换为电压信号。信号调理系统对输入的信号进行电气隔离、程控放大、带通滤波等信号处理, 滤除由结构、摩擦等因素产生的带外噪声后输入到采集系统中, 调理模块同时运用电路设计技术对系统进行自我故障诊断, 保证调理系统正确连接前端放大器且不存在短路等现象^[5]。调理后的信号输出至采集系统, 采集的信号存入日常监测数据库用于后续的泄漏数据分析与故障诊断分析, 若明显存在泄漏, 则通过软件界面的泄漏算法判断及显示并由报警系统输出。

2 声发射特性与软件设计

2.1 声发射信号特性

泄漏声发射信号为超声应力波信号, 该应力波的频率范围主要集中在 $50 \sim 200$ kHz, 属于中高频的超声信号, 前端信号经过前置放大器后的幅度为毫伏及毫伏以下, 波形传输的主要形式为脉冲信号。

泄漏声发射信号沿密封表面传播过程中将发生衰减, 并具有随距离指数衰减的特性^[4-6]。设传感器的位置与泄漏位置 P 的位置距离为 L , 泄漏处声发射信号值为 U_p , 根据声发射信号在金属压力管道表明近似指数衰减的特性, 有如下关系式:

$$U_i = U_p \cdot \exp(-\alpha L_i)$$

其中: α 为距离衰减常数, 和环形密封面的制作材料、信号波的频率有关。

由指数衰减公式可以得到衰减常数 α 的计算表达式为:

$$\alpha = \frac{\ln(U_{i1}/U_{i2})}{L_{i2} - L_{i1}}$$

其中: $U_{i1} U_{i2}$ 为用于计算衰减常数而测试的声发射有效值, $L_{i1} L_{i2}$ 为测试的距离值, 通过试验预先测定现场情况的两组数据后即可求解衰减常数 α , 因此泄漏监测与分析时算法将其视作已知常量进行计算。

信号有效值可以转换为泄漏定量结果, 经研究金属压力管道冷却剂泄漏率 G 与信号有效值 U_p 有下列经验公式^[7]:

$$\log G = a \log U_p + b$$

2.2 软件设计

根据蒸汽发生器环形密封面的试验装置和系统框架,通过 Labview 软件开发了环形密封面泄漏监测软件,其软件流程图如图 3 所示,主要包括软件运行前的系统参数配置和软件运行后 4 个并行的流程。

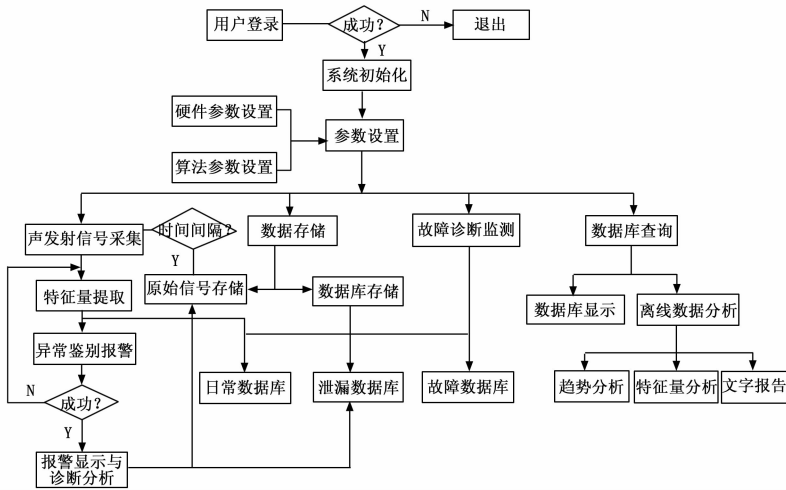


图 3 环形密封面泄漏监测软件流程图

用户登录成功系统开始初始化,之后进行参数设置,硬件参数设置包括声发射传感器灵敏度、转换系数、通信串口、硬件板卡槽位、采样频率、采样时间等参数。算法参数设置包括日常数据存储时间、泄漏数据存储时间、原始波形数据存储时间、泄漏初步/终判诊断时间及达标百分比门限等参数。

软件配置完成正常运行时,主要分为声发射信号采集、数据存储、故障诊断监测、数据库查询 4 个流程。

声发射信号采集通过便携式工控机里的 NI-6356 采集板卡进行数据获取,由于声发射信号频率较高且变化缓慢,一般设置为每隔 1 s 采集一次,采样率设置为 1 MHz,每次采集 50 ms 的数据。日常原始数据间隔满足条件后将波形数据存入文件以供后续数据分析。

声发射信号采集后需要提取信号特征量,主要包括信号频率、有效值、倍频幅值等。提取的特征用于异常鉴别的报警,通常选取信号有效值特征量与阈值比较来进行判别。

试验中采集的声发射信号还需要扣除掉背景噪声信号以保证泄漏判断的准确性,设采集检测的背景噪声水平为 U_0 , U_i 是实际测量的声发射信号的有效值,对 U_i 按下式处理,获取实际的泄漏声发射信号水平。

$$U = \sqrt{U_i^2 - U_0^2}$$

最后,对 U 采用下式作为泄漏鉴别关系式:

$$P(U \geq n) \geq p$$

即在一段时间内统计真实的泄漏声发射信号水平大于设定阈值 n 的概率满足 p ($1 > p > 0$),即认为泄漏发生。实际试验中,选定的泄漏初步及终判诊断时间分别为 3 分钟和 10 分钟,对应达标概率设置为 0.8 和 0.9。根据现场实际采集的本底噪声进行综合统计平均后设置阈值 n ,参考华

龙一号主管道和波动管 LBB 泄漏监测系统的阈值设置思路,结合声发射泄漏监测系统的最小泄漏率监测灵敏度为 0.2 L/min 的特性,一般设置阈值为现场本底的 2~3 倍。若数据满足判定条件,即达到报警输出条件。

报警条件触发后根据设置的泄漏原始信号存储间隔和泄漏数据库存储间隔分别保存泄漏波形数据和特征量数据于文件夹和数据库中,以用于后续诊断分析,同时通过报警信号显示器输出红色泄漏显示。

在软件监测过程中,通过调理模块电路设计获取特定支路电流或电压等方式进行故障诊断监测,包括短路、断路、欠压和过载。短路和断路监测确认调理模块与前端前置放大器的连接正常,欠压监测保证调理模块对前置放大器提供的工作电源满足要求,过载监测保证信号在一个范围内不对设备造成损害。故障诊断设计增强了系统的可靠性。

暂停监测时可进行数据库的显示、查询与离线数据的分析,包括趋势分析、特征量分析与文字报告。趋势分析可根据选定的时间段进行曲线趋势的显示,并可结合特征量分析及现有的趋势给出未来一段时间的预测作参考,文字报告根据分析的结果自动形成,作为离线分析的总结。

按上述编程思路及故障诊断方法进行软件编程,并生成软件泄漏仿真数据,其中数据根据环形密封面 4 个象限的不同角度、例如 45°、135°、210°、280°等,按照泄漏指数衰减的规律生成,导入批量数据后通过软件故障诊断算法诊断验证,与输入数据一一对比,结果与预期相符。因此,该软件可应用到后续的蒸汽发生器等比例泄漏试验及真实密封性能验证试验中。

3 蒸汽发生器试验

蒸汽发生器试验分为等比例模拟件的泄漏模拟试验及蒸汽发生器的真实环路密封验证试验。

3.1 泄漏模拟试验

通过制作蒸汽发生器环形密封面的等比例缩小模拟件对声发射泄漏监测系统进行了真实泄漏情况下的检验。试验选用材料为 0Cr18Ni10Ti 的模拟件,预先在液压疲劳试验装置上,进行循环疲劳加载,使环形密封面预制的轴向沟槽直至裂纹贯穿,并达到一定的泄漏率,模拟件密封顶盖为 $\Phi 300$ mm 空间,声发射传感器均匀安装在密封面上。

将制备的蒸汽发生器环形密封面裂纹模拟件焊接在试验装置回路中,整个试验装置全部包裹保温棉,试验介质为水,通过压力调节装置实现密封面穿透裂纹不同的泄漏率,开展数个升降温循环试验,试验中的本底噪声为 0.007~0.010 V 左右,根据前述理论将泄漏报警的最小阈值设置为 0.02 V。

通过声发射泄漏监测系统对试验过程进行实时监测,试验中 1 个完整的升降温循环过程的声发射采集数据如图 4 所示,压力由 0 MPa 升高至 7 MPa 作为预热,再由 7 MPa 升至 14 MPa 最后降至 7 MPa,图中 4 个通道的数据趋势随着模拟件泄漏率的变化而变化,并且都远远大于泄漏的报

警鉴别阈值。因此, 通过泄漏模拟试验证明该声发射监测系统能监测到试验件的介质泄漏, 可用于真实试验件的泄漏监测中, 该试验中获取的真实泄漏的波形数据也将用于后续真实试验件的泄漏诊断分析中。

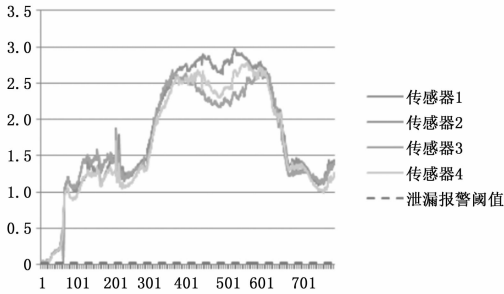


图 4 泄漏模拟试验真实泄漏数据时间分布图

3.2 蒸汽发生器密封验证试验

将蒸汽发生器置于环路中, 按照第一节所述的试验装置、试验回路及系统框架进行试验的搭建, 分别通过锅炉的过热和水作为介质, 开展数个升温升压、降温降压及瞬态工况下长达一周的蒸汽发生器连续密封性能试验, 通过声发射泄漏监测系统读取试验数据, 试验记录的数据每 1 s 采集一次, 并按每秒钟的数据进行统计, 进行 3 分钟和 10 分钟的统计判断。数据库日常数据采用 1 min 记录一次作为后续分析使用, 试验过程中蒸汽发生器未触发泄漏监测系统报警。具体的试验数据分析在下节中阐述。

4 试验结果及分析

试验后为了从理论上确认环形密封面未发生泄漏, 还需对试验数据进行深层次剖析, 并结合 3.1 节等比例件的真实泄漏数据进行对比, 以确保环形密封面的密封是稳定可靠的。本节从数据关系拟合和数据分布两个角度进行对比分析^[8]。

4.1 数据拟合分析

如图 5 所示为环形密封面模拟泄漏试验真实泄漏数据拟合示意图, 对试验中幅值较大的其中 3 个传感器的声发射数据进行拟合, 可以得到两两之间的关系式分别符合: $Y = 0.2515 * \exp(0.8689 * x)$ 、 $Y = 0.2918 * \exp(1.103 * x)$ 、 $Y = 0.1881 * \exp(1.357 * x)$, 式中 x 和 Y 分别代表横纵坐标的数值, 总体上都呈现为指数的关系, 符合第 3 节中声发射信号的指数衰减特性。

如图 6 所示为蒸汽发生器环形密封面数据拟合示意图, 对环形密封面布置的 4 个声发射信号传感器数据进行两两拟合, 可以得到传感器 1 与其它 3 个传感器的关系分别为: $Y = 1.038x - 0.00079$ 、 $Y = 1.711x - 0.00275$ 、 $Y = 0.9049x - 0.00022$, 总体上都呈现为线性的关系。

对比两个试验的数据拟合结果并分析可以得到, 若蒸汽发生器发生泄漏, 由于环形密封面为自主化研制的蒸汽发生器上唯一涉及焊接的部位, 因此等同于环形密封面发生泄漏, 根据环形密封面上的泄漏点至传感器的传输距离信号应该仍然表现为指数衰减的形式, 而试验数据拟合后

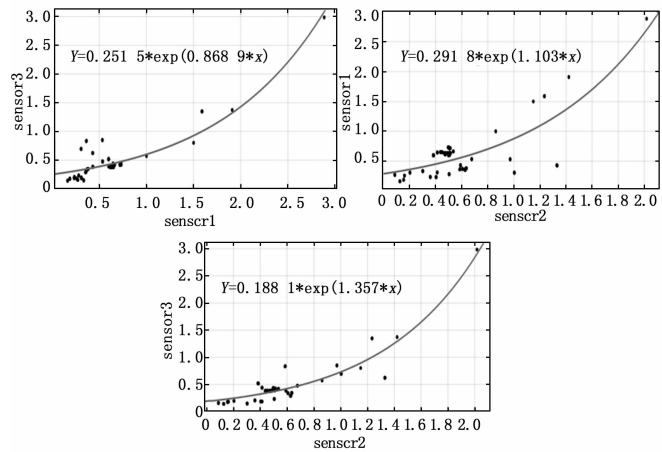


图 5 泄漏模拟试验真实泄漏数据拟合示意图

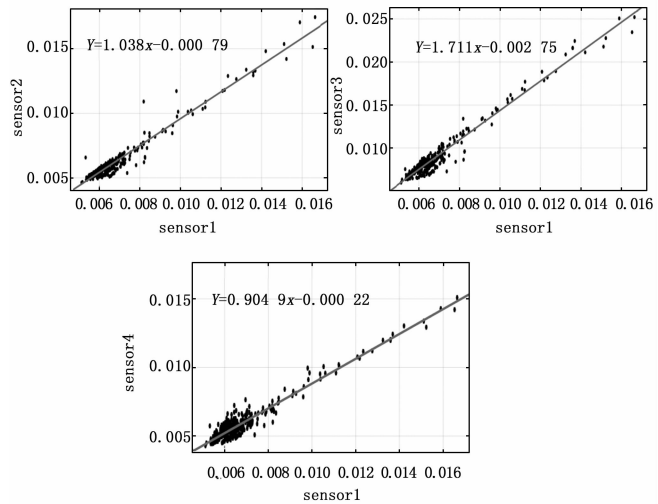


图 6 蒸汽发生器环形密封面数据拟合示意图

却服从线性的关系, 这主要是因为试验的各种本底噪声、仪器噪声、主泵振动、水利摩擦等噪声通过各种介质的传播在 4 个声发射传感器的探测上趋势是基本一致的, 据此可以判断试验中蒸汽发生器环形密封面未发生泄漏。

因此, 从数据拟合角度分析蒸汽发生器环形密封面的密封性能是可靠的, 试验中介质未泄漏。

4.2 数据分布分析

如图 7 所示为泄漏模拟试验真实泄漏数据的分布拟合图, 对幅值较大的 3 个声发射监测值进行数据分布处理, 通过比较正态分布、指数分布、线性分布对数正态分布等常用分布的拟合效果, 发现泄漏数据使用对数正态分布的拟合效果最好, 3 个声发射监测通道基本分别服从: (1.216 1, 2.347)、(1.024, 1.331)、(1.001, 1.754) 均值方差的对数正态数据分布特性, 图中包含拟合的曲线和数据概率密度分布图, 横坐标表示监测的声发射有效值, 纵坐标表示概率密度。在数值特性方面, 监测值覆盖面设计 0~5 V 的广域范围, 取决于泄漏的发展程度及快慢, 由于声发射本底噪声一般为 0.005~0.02 之间, 监测值远远超过本底的 3 倍幅值, 从理论上可以说明模拟件发生了泄漏。

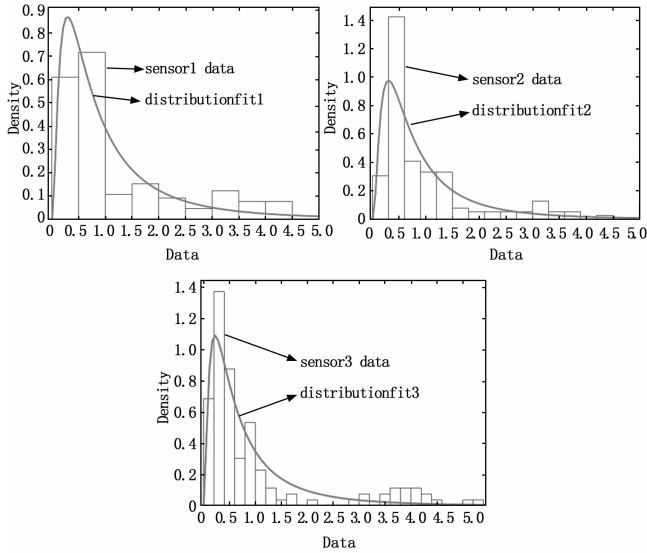


图 7 泄漏模拟试验真实泄漏数据分布拟合

如图 8 所示为蒸汽发生器环形密封面数据的分布拟合图，从环形密封面上选取其中的 3 个声发射传感器对其监测值进行数据分布处理，发现没有特别适用的分布可以拟合试验数据。作为与真实泄漏数据的对比，用对数正态分布拟合环形密封面数据，发现幅值很小的时候试验数据有较大的分布量，数据集中处分布的峰值与实际数据的峰值拟合后概率密度相差接近 3 倍。在数值特性方面，监测幅值一般都不超过 0.02 V，试验数据大部分分布在 0.007~0.01 V 范围内，基本与试验的实际本底噪声一致，试验整个阶段监测值都未能在 3~10 分钟的稳定时间段内超过本底的 3 倍。对比真实泄漏数据和环形密封面的试验数据的数据分布可以证明蒸汽发生器环形密封面未发生泄漏。

因此，从数据拟合和数据分布的角度综合分析，蒸汽发生器环形密封面未发生介质泄漏。

5 结束语

本文针对核反应堆压力设备环形密封面的密封性能验证需求，将声发射监测技术应用到自主化研制的新型蒸汽发生器的密封性能验证上，搭建了蒸汽发生器环形密封面泄漏监测系统，设计编写了软件框架程序，并通过等比例试验件的泄漏模拟试验验证了监测设备的有效性。通过开展数个升降温循环试验对蒸汽发生器密封性能进行验证，试

（上接第 19 页）

[3] 李宝安, 李行善. 自动测试系统 (ATS) 软件的发展及关键技术 [J]. 测控技术, 2003, 22 (1): 1-4.

[4] Teranishi K, Shimomura O. Design and Implementation of Networked ATS Based on LXI [A]. ISTM/2007 International symposium on test and measurement [C]. 2007.

[5] 朱 旂, 杜建军. 国外军用电子自动测试系统发展综述 [J]. 电子测量技术, 2008, 31 (8): 1-3.

[6] 刘泽晖. 基于 LXI 总线的数据采集系统设计及应用研究 [J]. 现代信息科技, 2020, 4 (1): 34-38.

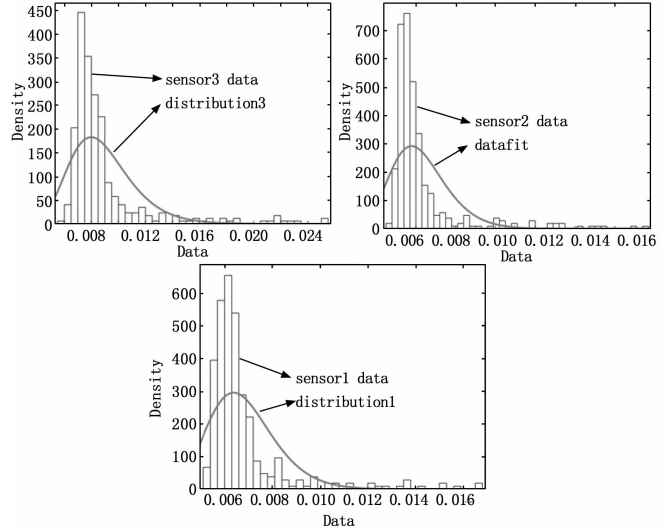


图 8 蒸汽发生器环形密封面数据分布拟合

验中未触发泄漏报警算法。试验后结合模拟件泄漏的真实数据，对监测数据进行了数据分析，通过数据拟合与数据分布两个角度与模拟件真实泄漏数据进行对比分析，证明了自主设计的新型蒸汽发生器环形密封面未发生介质泄漏，密封性能验证可靠。

参考文献:

[1] 王纪兵. 压力容器检验与无损检测 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[2] 肖宁辉. 现代无损检测新技术新工艺与应用技术标准大全 [M]. 北京: 银声音像出版社, 2004.

[3] 何 攀, 蒋天植, 刘才学, 等. 基于声发射的压力管道 LBB 监测系统研制 [J]. 核动力工程, 2019, 40 (S1): 59-62.

[4] 何 攀, 刘才学, 王 瑶, 等. 压力管道裂纹泄漏定量技术研究 [J]. 核动力工程, 2012, 33 (5): 32-35.

[5] 蒋兆翔, 何 攀, 曾 杰, 等. 超声应力波信号有源带通滤波器设计与应用 [J]. 核动力工程, 2019, 40 (6): 140-143

[6] 王祖荫. 声发射技术基础 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1990.

[7] 沈功田, 耿荣生, 刘时凤. 连续声发射信号的源定位技术 [J] 无损检测, 2002, 24 (4): 164-167.

[8] Moler, Cleve. Experiments with MATLAB (MATLAB 之父: 编程实践) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.

[7] 尹洪涛, 黄灿杰, 付 平, 等. LXI 标准概述 [J]. 国外电子测量技术, 2007 (5): 15-18.

[8] 王明帅, 刘 岩, 程 鹰, 等. LXI 总线概述及其相关技术研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2016 (1): 75-77.

[9] 黄 韬, 彭刚锋, 樊江峰. LXI—新一代测试总线技术 [J]. 航空计算技术, 2007, 37 (1): 106-110.

[10] 郭论平. LXI 接口 VISA 设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012, 2.

[11] 魏义虎, 陈 雷. 基于 LabVIEW—VISA 方式的串口通信研究 [J]. 电子设计工程, 2015, 23 (24): 129-131.