



一回路压力边界泄漏率试验数据有效性分析

朱伟, 侯秦脉, 蔡宁, 徐赛, 朱杰, 李秋奇

Analysis on Validity of Test Data of Primary Circuit Pressure Boundary Leakage Rate

Zhu Wei, Hou Qinmai, Cai Ning, Xu Sai, Zhu Jie, and Li Qiuqi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.06.0174>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于泄漏监测数据综合的核电厂反应堆一回路压力边界泄漏诊断技术研究

Comprehensive Leakage Diagnosis Technology of Primary Loop Pressure Boundary of Nuclear Power Plants Based on Leakage Monitoring Data Synthesis

核动力工程. 2021, 42(3): 188–193

基于统计软件R的安全壳泄漏率试验数据有效性分析

Data Reliability Analysis during Containment Leakage Test Based on Statistical Software R

核动力工程. 2020, 41(5): 99–103

基于数据挖掘的一回路小泄漏故障预警研究

Study on Early Warning of Small Leakage in Primary Loop Based on Data Mining

核动力工程. 2021, 42(5): 232–239

双层安全壳环廊泄漏率分析方法研究

Research on Double Containment Annulus Leakage Rate Test

核动力工程. 2021, 42(3): 121–126

基于PCA与SDG的反应堆一回路系统故障诊断方法研究

Research on Accident Diagnosis Method for Reactor Primary Circuit System Based on SDG and PCA

核动力工程. 2021, 42(3): 197–203

基于时间序列分析方法对安全壳泄漏率测量阶段的气体弛豫过程研究

Study on Gas Relaxation Process in Leakage Rate Measurement Stage of Containment Test Based on Time Series Analysis Method

核动力工程. 2021, 42(5): 178–181



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)06-0174-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.06.0174

一回路压力边界泄漏率试验数据有效性分析

朱 伟¹, 侯秦脉^{1*}, 蔡 宁¹, 徐 赛^{1,2}, 朱 杰¹, 李秋奇¹

1. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京, 100082; 2. 山东核电有限公司, 山东海阳, 265116

摘要: 某研究性反应堆一回路压力边界气体泄漏率试验受容积小和设备冷却水等因素干扰, 试验数据存在极端样本点, 在不改变试验方法的基础上, 通过使用回归模型的显著性检验和方差分析等方法确保试验结果的有效性。试验方法借鉴压水堆安全壳泄漏率试验方法, 本文选用 ANSI/ANS-56.8、RCC-G-1988、IIHAЭГ-10-021-90 这 3 种常用的安全壳泄漏率计算方法进行计算分析, 结果表明 3 种方法计算结果基本相同。通过对线性回归模型中残差的独立性、正态性以及等方差性进行分析, 探讨回归诊断对计算结果的影响; 同时对于回归诊断发现方差不齐、自相关和极端样本点等问题, 结合残差加权最小二乘法和去除极端样本点对最终结果进行修正, 提高了结果的可靠性。本文分析方法已应用到核安全审评中。

关键词: 一回路压力边界; 回归诊断; 泄漏率

中图分类号: TL374 文献标志码: A

Analysis on Validity of Test Data of Primary Circuit Pressure Boundary Leakage Rate

Zhu Wei¹, Hou Qinmai^{1*}, Cai Ning¹, Xu Sai^{1,2}, Zhu Jie¹, Li Qiuqi¹

1. Nuclear and Radiation Safety Center, MEE, Beijing, 100082, China;
2. Shan Dong Nuclear Power Company, Haiyang, Shandong, 265116, China

Abstract: The primary circuit pressure boundary gas leakage rate test of a research reactor is interfered by small volume, equipment cooling water and other factors, and there are extreme sample points in the test data. On the basis of not changing the test method, the effectiveness of the test results is ensured by using the significance test and variance analysis of the regression model. The test method draws lessons from the test method of containment leakage rate of PWR. In this paper, three commonly used methods for calculating the leakage rate of the containment, including ANSI/ANS-56.8, RCC-G-1988, and IIHAЭГ-10-021-90, are used for calculation and analysis. The results show that the calculation results of the three methods are basically the same. By analyzing the independence, normality and variance property of residuals in linear regression model, the influence of regression diagnosis on the calculation results is discussed. At the same time, for the problems of heterogeneity of variance, autocorrelation and extreme sample points found in regression diagnosis, the final results are modified by combining the residual weighted least square method and removing extreme sample points, and the reliability of the results is improved. The analysis method in this paper has been applied to nuclear safety review.

Key words: Primary circuit pressure boundary, Regression diagnosis, Leakage rate

0 引 言

核电厂安全监管是核安全的重要组成部分,

每年国家核安全局在年报中对运行核电厂三道安
全屏障完整性的监测结果给予评价并对社会公布。

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-09-20

作者简介: 朱 伟(1988—), 男, 学士, 现主要从事核电厂调试、运行监管技术的研究, E-mail: zhuwei@chinansc.cn

*通讯作者: 侯秦脉, E-mail: houqinmai@chinansc.cn

我国积极借鉴国际先进经验,研发设计高温气冷堆、快中子增殖堆、小型核动力堆、熔盐堆等研究性反应堆^[1]。某研究性反应堆一回路压力边界气体泄漏率试验是验证第二道屏障完整性的重要手段,其泄漏率试验结果的可靠性和试验数据的有效性是第二道屏障完整性的重要依据,试验范围限定于紧急停堆状态下一回路压力边界,目的是在工作温度和压力下进行一回路系统密封性试验,以验证压力边界的密封性。作为研究性反应堆,该试验没有先例,试验方法借鉴了压水堆安全壳泄漏率试验方法。目前国内常用的压水堆安全壳整体泄漏率测量方法有3种,分别是美国核学会标准委的《安全壳泄漏率试验原则》(ANSI/ANS-56.8)^[2]、法国电力公司(EDF)的《安全壳泄漏率及强度试验》(RCC-G-1988)^[3]以及田湾核电站用过的俄罗斯的《核电厂安全包容系统建造和运行规范》(ПНАЭГ-10-021-90)^[4-5]。而我国的《核电厂安全壳密封性试验》(NB/T 20018—2010)^[6]所用方法主要参照了ANSI/ANS-56.8。

该堆气体泄漏率的试验范围相对压水堆安全壳整体泄漏率试验存在较大差异,在试验执行过程中发现设备冷却水对系统造成较大的干扰,测量值对干扰项敏感,最终影响到泄漏率,因此在试验执行时对主风机设备冷却水流量进行了最大限度的控制,从而得到相对稳定的试验数据。本文将使用3种计算方法计算该堆的气体泄漏率,并通过线性回归模型显著性检验,使用残差加权的最小二乘法使其方差齐性化,以保证试验结果的可靠性和试验数据的有效性。

1 泄漏率测量方法

一回路压力边界的气体泄漏率试验与安全壳泄漏率试验相同,不能通过仪表直接测量得到,ANSI/ANS-56.8、RCC-G-1988、ПНАЭГ-10-021-90三种方法均基于理想气体状态方程,采用道尔顿分压定理计算分压,其泄漏率定义为24 h安全壳内空气的质量变化。

文本选取了该堆调试期间试验数据,在稳定运行工况下每隔30 min进行数据采集,记录得到一回路压力边界内气体稳定阶段的49个数据点,包括压力、温度等参数,见图1。在泄漏率

试验程序中给出验收准则为一回路系统24 h泄漏率不超过0.5%,运用上述3种方法对泄漏率进行计算,通过24 h气体泄漏率计算结果满足验收准则的情况来判断ANSI/ANS-56.8方法对气体泄漏率试验的适用性。

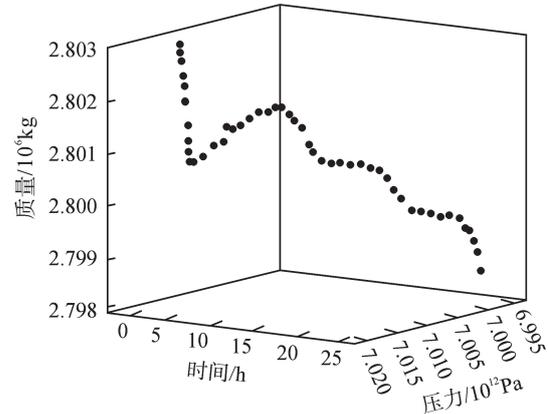


图1 24 h绝对压力与气体质量关系图
Fig. 1 Relationship of Absolute Pressure and Gas Mass in the 24 h

1.1 ANSI/ANS-56.8方法计算

ANSI/ANS-56.8方法通过理想气体状态方程计算得到每30 min对应的一回路气体质量点(m)后,利用最小二乘法对气体质量点进行拟合^[7],得到如下线性回归方程:

$$\hat{m}_i = B + At_i \quad (1)$$

式中, \hat{m}_i 为第*i*次数据采集的气体质量估计值; A 为线性回归方程的斜率; B 为线性回归方程的截距; t_i 为第*i*次数据采集的时间。

由经验回归方程可得到24 h气体泄漏率(L_{am}):

$$L_{am} = -2400 \frac{A}{B} \quad (2)$$

在概率论和统计学中,t分布经常应用于呈正态分布的总体均值估计中,基于t分布的t检验适用于样本量较小的置信区间估计、显著性检验中,其t分布临界值表给出了达到预期置信度需要的临界值。Feiller-Type给出了泄漏率95%上置信限值的计算方法,即:

$$U_{Cl} = L_{am} + 2400 t_{95} \left(\frac{S_A}{B} \right) \quad (3)$$

式中, U_{Cl} 为泄漏率95%上置信限值; S_A 为线性回归方程的斜率标准差; t_{95} 为置信度为95%时t分布临界值,查表可得。

分析气体泄漏率试验数据,选取气体质量点进行最小二乘法拟合,质量趋势图如图2所示,计算得到线性回归方程的斜率 A 为 -127.699 、截距 B 为 2802441.675 、斜率标准差 S_A 为 9.091 ,通过式(2)和式(3)计算 24 h 气体泄漏值 L_{am} 为 0.10934% , U_{CL} 为 0.1224% 。

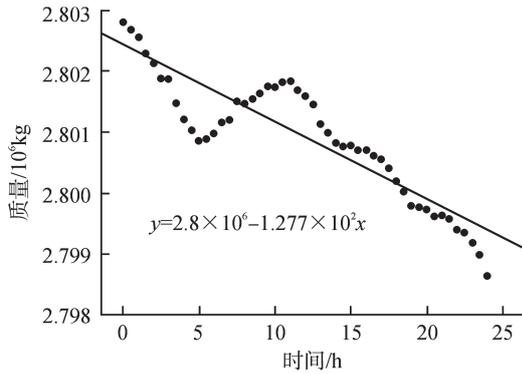


图2 质量趋势图
Fig. 2 Trend Chart of Mass

1.2 RCC-G-1988 方法计算

RCC-G-1988 方法通过对理想气体方程进行求导,即:

$$\frac{dm}{m} = \frac{dN}{N} = \frac{dP}{P} + \frac{dV}{V} - \frac{dT}{T} \quad (4)$$

式中, m 为气体质量; N 为气体摩尔数; P 为绝对压力; V 为一回路容积; T 为绝对温度。

一回路容积变化可以忽略,则气体相对质量变化率为:

$$\frac{dm}{m_0} = \frac{dP}{P_0} - \frac{dT}{T_0} \quad (5)$$

式中, m_0 为初始气体总质量; P_0 为初始系统压力; T_0 为初始系统温度。

用 RCC-G-1988 方法对该堆一回路压力边界的气体泄漏率试验数据 49 个测量点进行处理,依据式(5)计算得到一组气体质量变化率 dm/m_0 ,并进行最小二乘法拟合得到质量变化率趋势图,见图3,其中回归方程斜率为 4.556×10^{-5} , L_{am} 即为 0.10934% 。

1.3 ПНАЭГ-10-021-90 方法计算

ПНАЭГ-10-021-90 方法与 ANSI/ANS-56.8 方法基本相同,通过理想气体状态方程计算得到一回路压力边界内每一时刻气体质量,累积得到不同时刻泄漏率 L_i :

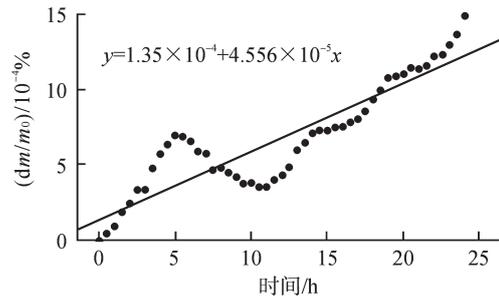


图3 质量变化率趋势图
Fig. 3 Trend Chart of Mass Change Rate

$$L_i = \ln\left(\frac{M_0}{M_i}\right) = \ln(M_0) - \ln(M_i) \quad (6)$$

式中, L_i 为从初始到第 i 次数据采集的累积质量变化率; M_0 为初始气体总质量; M_i 为第 i 次数据采集的气体总质量。在指定一个初始时刻后,依据式(6)每 30 min 可以得到一组 L_i 数据,呈现波动上升趋势,再进行最小二乘法拟合得到线性回归方程如下:

$$\hat{L}_i = B + At_i \quad (7)$$

式中, \hat{L}_i 是第 i 次数据采集的累积质量变化率估计值。

$$L_{am} = 100(B + 24A) \quad (8)$$

用 ПНАЭГ-10-021-90 方法计算气体泄漏率试验数据,根据式(6)得到 L_i 值,进行最小二乘法拟合得到 L_i 曲线图,见图4,计算得到 A 为 4.559×10^{-5} 、 B 为 1.35×10^{-4} ,通过式(8)计算 L_{am} 为 0.1229% 。

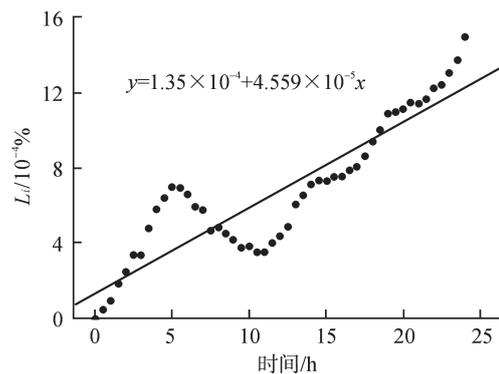


图4 累积质量变化率趋势图
Fig. 4 Trend Chart of Cumulative Mass Change Rate

1.4 计算结果分析

通过使用 ANSI/ANS-56.8、RCC-G-1988、ПНАЭГ-10-021-90 三种安全壳整体泄漏率方法对该堆一回路压力边界的气体泄漏率试验数据进行

计算, 结果表明 ANSI/ANS-56.8 方法与 RCC-G-1988 方法计算结果一致, 与 ПИНАЭГ-10-021-90 计算结果差异不大, 可以认为 3 种方法计算结果基本相同; 且 3 种方法得到的泄漏率均小于试验程序中给定的验收准则, 即一回路系统 24 h 泄漏率不超过 0.5%, 说明一回路压力边界的气体泄漏率达到了设计要求。

2 回归检验

本文选择 ANSI/ANS-56.8 方法下的泄漏率计算开展回归分析。由于安全壳和一回路在温度压力上有重大的变化^[8], 需要对模型有效性进行检验, 从而将此方法定量化。回归分析是参数化方法, 需要设定自然假设, 如果数据集不满足自然假设, 回归分析的结果就会出现偏差。自然假设涉及 5 个方面, 分别是线性性、误差项相互独立、自变量相互独立、同方差性、误差项正态分布^[9]。根据高斯-马尔科夫定理, 在误差零均值、等方差且非自相关的线性回归模型中, 回归系数的最佳线性无偏估计就是最小方差估计^[10-11], 则该气体泄漏率试验的 24 h 样本数据应满足自然假设, 从而保证线性回归的质量和结果的有效性。

2.1 回归诊断

采用 ANSI/ANS-56.8 方法对气体泄漏率数据进行拟合得到回归模型的检验结果, 并生成拟合模型诊断图 (图 5), 用于分析最小二乘法统计假设。线性回归模型通过联合假设检验 (F 检验), 并根据统计量服从 F 分布的判定假设检验结果, 其判定参数 P 值为 1.9304×10^{-18} , 反映整体回归显著。

残差直方图 (图 5a) 显示了残差的分布, 理想状态下希望残差最好接近一种正态分布, 意味着模型在高和低两个方向上误差是相同的。从图 5a 可以看出, 残差只能近似满足正态分布, 不能达到理想状态。

PP 图是根据变量的累积概率对应于所指定的理论分布累积概率绘制的散点图, 可以检验数据是否符合指定的分布, 当数据符合指定的分布时, PP 图中各点近似呈一条直线。检验正态分布的 PP 图称为正态 PP 图 (图 5b), 其数据点在直线的附近, 但并不是都位于直线上, 所以正态性存在缺陷, 与图 5a 反映的结果一致。

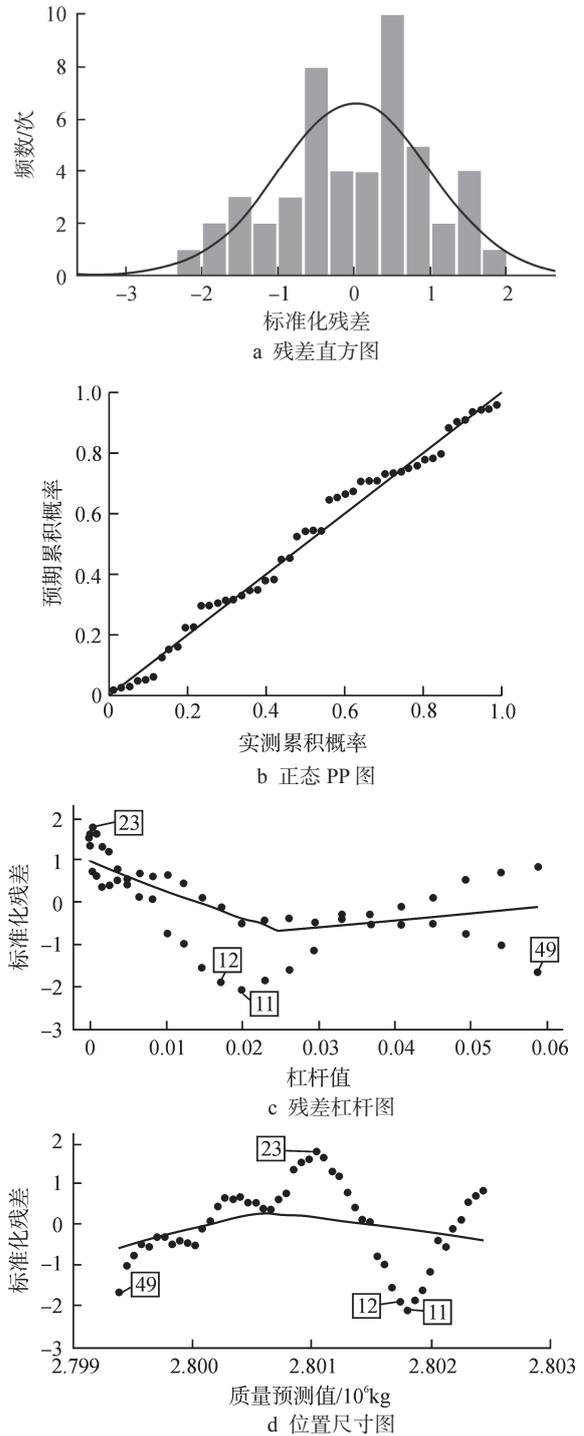


图 5 拟合模型诊断图
Fig. 5 Diagnostic Graph of Fitting Model

杠杆值用于检查数据在空间是否存在异常, 残差杠杆图 (图 5c) 涉及对标准化残差、杠杆值的测算, 可以通过识别离群点和高杠杆值点进而识别强影响点。假如存在杠杆点, 则需要评估其对拟合模型的影响, 图 5c 中点 11 超过 2 个标准

差且杠杆值较大、点 49 杠杆值最大且标准化残差也较大。

位置尺寸图 (图 5d) 中残差基本随机分布在 0 水平线的上下侧, 整体来看没有明显偏正或偏负的趋势, 也说明质量与时间呈线性关系。黑实线是趋势线, 沿着趋势线两侧, 点 11、点 12、点 23、点 49 是明显离群点, 从侧面印证了图 5c 中强影响点。

综上, 图 5 中存在特殊的单个观测点, 应将这 4 个特殊观测点定为极端样本点, 并进行分析和处理。

检测回归分析中, 相关系数 R 表示两变量间线性关系密切程度, R^2 为决定系数, R^2 越接近 1, 表示回归的效果越好, 计算得到气体泄漏率线性回归模型的 R^2 值为 0.80762。线性回归模型中的等方差性是指因变量残差不随所有自变量取值水平的变化而变化, 如建模时出现了残差不齐的情况, 可采用变量转换使其方差齐性化, 或采用加权回归的方法。本文通过采用残差加权的最小二乘法实现回归模型方差齐性化。

德宾-沃森检验 (简称 DW 检验) 用于检验回归分析中残差项的一阶自相关性, 其 DW 检验统计量称为 DW 值, DW 值范围在 0~4 之间, 接近 2 可判断无自相关性, 越接近 0 或 4 说明残差存在自相关性越强。气体泄漏率线性回归模型残差的 DW 值为 0.098796, 残差存在自相关性。

2.2 极端样本点分析和处理

采用最小二乘法进行线性回归假设时, 认为每个样本对模型造成的影响是均匀的, 如果在测量样本中存在极端样本点, 线性回归拟合结果将影响可信度, 最终将会影响气体泄漏率计算结果。且一回路压力边界温度、压力受外部因素影响更

加敏感, 出现极端样本点的可能性和幅度都会更大, 因此需要对极端样本点进行去除, 得到去除极端样本点后线性回归模型的计算结果, 去除极端样本点前后显著性对比见表 1, 包括线性回归模型的斜率、截距和整体显著性检验参数。

从图 1 给出的 24 h 一回路压力边界内气体质量对时间的线性回归曲线以及质量点的分布情况可以看出, 散点整体上服从线性趋势, 有个别数据点偏离回归曲线。由表 1 可以看出, 去除极端样本点前线性回归模型决定系数 R^2 为 0.80762, 低于去除极端样本点后决定系数 R^2 的 0.846851, 且图 5a 中存在占比较高的绝对值较大的残差, 这也是正态性检验不高的原因之一。图 5c 和 5d 中落在 ± 2 区间的 4 个编号为 11、12、23、49 的点被假设为异常点, 在去除 4 个异常点后, 模型决定系数 R^2 得到提高, 残差的正态性得到改善。

去除极端样本点后, DW 值为 0.124181, 模型的检验结果仍然显示存在自相关性问题, 可以看出残差自相关性不会由于去除极端样本点得到改善, 恰好能完整反映因变量是从理想气体状态方程转化而来。由于理想气体状态方程中温度和压力在封闭系统中是相关物理量, 与时间存在自相关问题, 这正是残差存在自相关性的主要原因。

3 等方差性问题的解决

针对建模时出现的残差不齐的情况, 方差齐性化可以通过残差加权的最小二乘法实现。去除极端样本点前、后残差加权最小二乘法的线性回归模型的决定系数 R^2 分别为 0.982297 和 0.998134, 回归模型的显著性较未使用残差加权最小二乘法有明显提高。表 2 给出了残差加权后的计算结果, 回归系数斜率和截距都比表 1 中回归系数斜率和

表 1 去除极端样本点前后的显著性对比

Tab. 1 Comparison of Significance Before and After Removing Extreme Sample Points

参数	去除极端样本点前			去除极端样本点后		
	A	B	整体显著性	A	B	整体显著性
估计值	-127.699267	2802441.675127		-128.820616	2802493.679714	
标准差	9.091085	126.624164		8.354202	116.518745	
t检验值	-14.046647	22131.965941		-15.419858	24051.869699	
F检验统计量			197.308303			237.772031
P 值	1.9304×10^{-18}	1.3866×10^{-166}	1.9304×10^{-18}	3.9538×10^{-19}	6.4991×10^{-155}	3.9538×10^{-19}
R^2			0.807620			0.846851
调整 R^2			0.803527			0.843289
自由度			48			44

表2 残差加权后的结果

Tab. 2 Results after the Residual Is Weighted

参数	去除极端样本点前		去除极端样本点后	
	A	B	A	B
估计值	-130.336	2802480.747	-128.499	2802495.153
标准差	2.552	30.024	0.847	2.610
t检验值	-51.067	9.334×10^4	-151.653	1.073×10^5
P值	7.8×10^{-43}	5.8×10^{-196}	2.5×10^{-60}	7.5×10^{-226}

截距的 P 值更小，可以看出回归系数的显著性得到了提高，显著性的提高说明了残差正态性的改善有利于回归模型的优化。

通过去除极端样本点和使用残差加权的最小二乘法能提高气体泄漏率线性回归模型的显著性水平，有效地解决等方差性问题，降低对计算结果的影响。为了说明等方差性对泄漏率结果的影响情况，本文在去除极端样本点前、后两种不同条件下，使用残差加权的最小二乘法对泄漏率 L_{am} 进行计算，泄漏率结果的对比见表3，其中条件1、2分别代表去除极端样本点前、后应用最小二乘法，条件3、4分别代表去除极端样本点前、后应用残差加权最小二乘法。 L_{am} 结果在去除极端样本点后略有轻微增加，在使用残差加权最小二乘法后的条件4泄漏率为0.11004%，决定系数 R^2 提升到0.998134，模型正态性得到最大改善，预测值接近真值。对比条件4的结果发现，仅使用去除极端样本点的条件2和仅使用残差加权最小二乘法的条件3，泄漏率结果都偏大，只有两种方法同时考虑才能保证结果的可靠性。

表3 泄漏率结果的对比

Tab. 3 Comparison of Leakage Rate Results

条件	$L_{am}/\%$	影响程度/%	R^2
1	0.10934		0.807620
2	0.11032	+0.896	0.846851
3	0.11162	+2.085	0.982297
4	0.11004	+0.640	0.998134

4 结论

本文对该堆调试期间一回路压力边界气体泄漏率试验数据进行不同测量方法之间对比，并对ANSI/ANS-56.8方法回归方程显著性进行分析，结果表明：

(1) 对于24 h泄漏率值，ANSI/ANS-56.8方

法与RCC-G-1988方法计算值结果一致，与ПНАЭГ-10-021-90计算结果略有差异，可以认为3种方法计算结果基本相同。

(2) 3种方法得到的泄漏率均远小于试验程序中给定的验收准则，即一回路系统24 h泄漏率不超过0.5%，证明了一回路压力边界的气体泄漏率达到了设计要求。

(3) 在一回路压力边界气体泄漏率试验计算过程中应用线性回归求解泄漏率，有必要对试验数据进行有效性分析。回归模型中残差的独立性、正态性以及等方差性的假设是对回归系数及标准差进行无偏差估计的前提条件，结合拟合模型诊断图和极端样本点的判断，去除极端样本点后使用残差加权的最小二乘法，分析结果可靠性将大大提高。

参考文献：

- [1] 孔祥波, 王纳秀, 林良程, 等. 高温熔盐试验回路系统设计及验证研究[J]. 核动力工程, 2020, 41(5): 127-131.
- [2] American Nuclear Society. American national standard containment system leakage testing requirements: ANSI/ANS-56.8-2002[S]. La Grange Park: American Nuclear Society, 2002: 5-11.
- [3] EDF. Design and construction rules for civil works for PWR nuclear islands: RCC-G volume I -design-1988[S]. Avenue Dutrievoz: EDF Equipment EEPTEN, 1988: 365-369.
- [4] 褚英杰, 欧阳钦. 安全壳整体泄漏率计算方法的比较分析[J]. 核动力工程, 2010, 31(6): 33-37.
- [5] 薛文博, 陈士军. 关于安全壳整体密封试验的俄标与美标差异分析[J]. 商品与质量, 2016(47): 362-363.
- [6] 国家能源局. 核电厂安全壳密封性试验: NB/T 20018-2010[S]. 北京: 原子能出版社, 2010: 8-15.
- [7] 彭巧云, 惠爽爽, 李彦华. 安全壳整体密封性试验泄漏率的计算方法[J]. 科技创新导报, 2013(10): 26-27.
- [8] 时朝杰. 核电厂安全壳泄漏率数据增大的分析及处理[J]. 科技视界, 2016(8): 95-96.
- [9] 陈希孺. 概率论与数理统计[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 264-268.
- [10] 沈东明, 蔡建涛, 何锐, 等. 基于统计软件R的安全壳泄漏率试验数据有效性分析[J]. 核动力工程, 2020, 41(5): 99-103.
- [11] 沈东明, 何锐, 张骥. 基于时间序列分析方法对安全壳泄漏率测量阶段的气体弛豫过程研究[J]. 核动力工程, 2021, 42(5): 178-181.

(责任编辑: 马 蓉)