

# 一回路水压试验泄漏率计算优化分析和不确定度研究

言许梁

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518124

**摘要:** 一回路是核电领域的核心系统,其密封性关乎设备运行安全,一回路水压试验是验证核电厂第二道安全屏障密封性的关键试验,泄漏率计算准确性与不确定度量化是判定试验结果的核心。本文基于相关理论,分析现有泄漏率计算模型缺陷,提出优化措施并构建新模型,经实测初步验证。系统识别不确定度来源,量化分量贡献度,计算合成与扩展不确定度,开展敏感性分析。结果显示,优化模型提升计算精度,不确定度分析量化误差,为试验判定提供参考。

**关键词:** 一回路; 水压试验; 泄漏率; 计算优化; 不确定度分析

引言: 在核电行业,一回路负责介质输送与能量传递,其密封缺陷会引发介质泄漏、设备损坏,威胁人员与环境安全。一回路水压试验以水为介质,让一回路承受合适的压力以检测一回路密封性和承压能力,是设备出厂及大修检修后的必要安全验证环节。泄漏率是评判密封性的核心指标,现有计算模型缺陷致误差大,且试验不确定因素干扰结果,缺乏系统不确定度分析易误判。本文研究泄漏率计算优化与不确定度,为提升试验可靠性提供支撑。

## 1 一回路水压试验相关理论基础

### 1.1 一回路水压试验原理与试验流程

一回路水压试验利用液体静压力特性,充注去离子水等试验介质,逐步升压至规定压力并保压,通过观察系统压力、容积变化判断密封性。试验流程严格规范:先按照法规及技术规范要求水质控制,确保试验水质满足要求;接着充水,缓慢注入介质并排气,防止含气量过高导致压力不均;充水后按预设速率升压,每升到一定压力平台后进行稳压,检查泄漏与变形;达试验压力后保压,采集压力等参数;保压结束降压,整理数据判定密封性。试验中,试验压力等参数须严格遵循行业标准,保证结果具代表性与可靠性。

### 1.2 泄漏率计算基础理论

泄漏率是单位时间内一回路系统泄漏介质体积或质量,有体积、质量两种表征形式,可经介质密度换算。其计算基于流体力学与热工学原理,推导泄漏量与系统参数关联。工程常用体积变化法与压力降法计算:体积变化法测保压阶段介质容积减少量算泄漏率,适用于容积可控、泄漏量大场景;压力降法监测保压阶段压力下降值,结合相关参数推导泄漏率,适用于高压、小泄漏量场景。两种方法都要考虑温度影响,用修正公式降误差,保

结果准确<sup>[1]</sup>。

### 1.3 不确定度分析基础理论

不确定度是衡量测量结果分散性的指标,反映试验数据与真实值的偏离程度,是评判泄漏率计算结果可靠性的依据。不确定度分A类与B类,A类源于重复测量随机误差,用统计分析方法计算分散性;B类源于测量仪器精度等系统误差,通过查阅校准证书等方式量化影响。不确定度评定有固定流程:先识别影响泄漏率计算的不确定度来源及影响路径;再量化各分量数值,分别算A类与B类分量;接着依误差传递原理推导传递公式,算合成标准不确定度;最后选合适包含因子(通常取2,置信概率95%),算扩展不确定度,反映结果可靠范围。

## 2 现有一回路水压试验泄漏率计算模型存在的问题分析

### 2.1 现有计算模型应用现状

当下,工程中一回路水压试验泄漏率计算常用体积变化法与压力降法这两种经典模型,因其原理简单、计算便捷,被广泛用于各类场景。体积变化法多用于中小型一回路系统,这类系统容积小、结构简单,能精准获取介质体积变化量,计算无需复杂参数修正,适用于泄漏量大、精度要求适中的场景,如化工行业中小型一回路检修后的密封验证。压力降法多用于核电等大型一回路系统,其压力高、容积大、泄漏量小,压力监测精度高,用压力变化数据计算泄漏率更有优势,适用于高精度场景。不过,现有模型基于一定假设,简化复杂影响因素,虽降低了计算难度,但使计算结果与实际有偏差,难以满足高精度密封性验证需求。

### 2.2 现有计算模型存在的核心缺陷

现有泄漏率计算模型核心缺陷有三。一是温度修正不完善,多仅对介质温度单一修正,忽略设备壁温与介

质温度协同变化,设备壁温受环境等因素影响热胀冷缩,会影响系统容积与压力,导致温度修正误差大。二是容积补偿误差大,假设系统容积恒定,忽略高压下设备弹性形变,管路等会微小膨胀,使实际容积增大,未补偿会误判泄漏量,使计算结果偏高<sup>[2]</sup>。三是参数关联度建模不精准,仅考虑压力等与泄漏率的线性关联,未充分考虑压力波动等因素的非线性影响,模型拟合精度不足,计算误差大。

### 2.3 模型缺陷带来的影响

现有泄漏率计算模型缺陷对一回路水压试验结果判定和设备运行安全有诸多不利。其一,计算误差大易致试验结果误判。低估泄漏率会让有密封缺陷的系统投入运行,引发介质泄漏,造成设备损坏、生产中断甚至危及人员安全;高估泄漏率会使合格系统返工检修,增加成本与工期。其二,无法满足高精度密封性验证需求。随着行业发展,一回路系统对密封性要求提高,现有模型精度难以适配高压、小泄漏量场景,无法精准识别微小密封缺陷。其三,增加设备运行安全隐患。模型缺陷使计算结果不可靠,无法为密封性评估提供准确依据,未被识别的微小缺陷可能扩大,引发严重泄漏事故,威胁系统与环境安全。

## 3 一回路水压试验泄漏率计算模型优化设计

### 3.1 优化设计原则

一回路水压试验泄漏率计算模型优化,要遵循四大准则。其一,贴合工程实际,需全面考量试验中的各类实际因素,避免过度理论化,确保模型能直接投入工程应用。其二,提升计算精度,要针对现有模型缺陷,降低温度修正、容积补偿等环节误差,让计算结果更贴近实际泄漏情况。其三,简化计算流程,优化后的模型计算步骤应简洁明了,无需复杂参数求解,方便工程人员操作。其四,适配现有设备,模型所需参数能通过现有仪器精准获取,无需额外购置设备,控制成本。

### 3.2 核心优化措施

聚焦现有模型核心缺陷,结合优化原则与目标,实施三项关键优化举措。对于温度修正,构建介质与设备壁温协同修正公式,实时采集二者温度数据,算出温度差值与变化速率,引入温度耦合系数,修正温度对介质体积和压力的影响,弥补单一温度修正的不足,降低温度波动计算误差。在容积补偿方面,引入设备弹性形变系数,依据设备材质力学性能和试验压力数据,计算高压下设备弹性膨胀量,建立容积补偿公式,剔除膨胀量,修正容积恒定假设误差,保证泄漏量计算准确。参数关联建模上,结合多元线性回归,引入压力波动系数、介质

黏度等因素,构建泄漏率与多参数非线性关联模型,通过试验数据拟合确定参数,提升模型对复杂工况的适配性,减少误差<sup>[3]</sup>。

### 3.3 优化后泄漏率计算模型构建

依据核心优化措施与基础理论,搭建优化后的一回路水压试验泄漏率计算模型。先以压力降法为根基,融合温度协同修正与容积补偿优化,推导核心公式,明确各参数物理意义与取值范围,公式涵盖试验压力等关键参数,实现多因素协同修正。接着确定参数获取方式,试验压力等用高精度传感器实时采集,系统容积结合设备设计参数与实测数据确定,弹性形变系数按设备材质与试验压力计算,压力波动系数通过统计保压阶段压力标准差确定,保证参数精准。最后明确适用条件,该模型适用于特定压力、温度、容积范围的一回路系统,能适配核电、化工等行业不同试验场景,并给出应用步骤,方便工程人员操作。

### 3.4 优化模型初步验证

选取一回路系统作为验证对象,开展优化模型初步验证试验,验证数据来源于该系统检修后的水压试验实测数据,试验参数设定为:试验压力10MPa,保压时间30min,介质温度25℃,系统容积50m<sup>3</sup>,采用高精度压力、温度传感器采集试验数据,采样频率为1次/分钟。分别采用现有模型与优化模型计算泄漏率,将两种模型的计算结果与实测泄漏率进行对比分析。验证结果显示,现有模型计算结果与实测值的偏差为8.7%,超出允许误差范围;优化模型计算结果与实测值的偏差为3.2%,符合优化目标要求,偏差降低幅度达63.2%。同时,通过改变试验压力、介质温度等参数,开展多组对比试验,结果表明,优化模型在不同工况下均具有较高的计算精度,温度修正与容积补偿措施有效,能够精准反映系统实际泄漏情况,初步验证了优化模型的合理性与可靠性。

## 4 一回路水压试验泄漏率计算的不确定度研究

### 4.1 不确定度来源识别

在一回路水压试验泄漏率计算中,需系统梳理不确定度来源,主要涵盖测量、模型与环境三类。测量不确定度是主导因素,由试验参数测量误差引发,像压力、温度、容积及时间测量不确定度,分别受压力传感器、温度传感器等设备的精度限制与校准误差影响。模型不确定度源于优化模型的假设及参数取值偏差,例如忽略介质黏度微小变化这类假设,以及弹性形变系数等参数的取值误差,它属于系统误差,可借理论分析与试验校准来量化。环境不确定度则来自试验环境的干扰,环境温度、湿度变化会作用于试验设备与介质参数,环境温度波动使

设备壁温改变,环境湿度影响传感器测量精度,最终干扰泄漏率计算结果。

#### 4.2 各不确定度分量量化分析

采用A类与B类不确定度评定方法,分别对各不确定度分量进行量化分析。A类不确定度量化选取试验过程中采集的30组压力、温度等参数的重复测量数据,采用贝塞尔法计算,通过计算测量数据的标准差、平均值,得到A类不确定度分量,其中压力测量A类不确定度为0.02MPa,温度测量A类不确定度为0.1°C,时间测量A类不确定度为0.1min。B类不确定度量化结合测量仪器校准证书、工程经验与模型参数特性,采用概率分布法计算,压力传感器最大允许误差为 $\pm 0.03$ MPa,按均匀分布计算,压力测量B类不确定度为0.017MPa;温度传感器最大允许误差为 $\pm 0.2$ °C,按均匀分布计算,温度测量B类不确定度为0.115°C;模型参数取值误差通过试验校准确定,弹性形变系数取值不确定度为0.002,温度耦合系数取值不确定度为0.001,分别计算两类参数对应的B类不确定度分量,最终得到模型不确定度分量为0.0025mL/s。

#### 4.3 合成标准不确定度与扩展不确定度计算

依据误差传递原理以及经优化的一回路水压试验泄漏率计算模型,推导不确定度传递的运算规则,把之前分析得出的各个不确定度分量代入开展运算,以此算出合成标准不确定度。先确定该模型针对各个参数的偏导数,由此明确传递系数。此传递系数能够反映各个参数的测量误差对最终泄漏率计算结果的影响程度,其中压力参数的传递系数最大,这表明压力测量误差对泄漏率计算结果的影响最为突出。按照合成标准不确定度的运算要求,将各类A类与B类不确定度分量进行平方操作,再把这些平方后的数值相加,最后对相加结果开平方,如此便得到合成标准不确定度为0.042mL/s。选定包含因子 $k$ 为2(此数值对应着95%的置信概率),将合成标准不确定度与这个包含因子相乘,从而得到扩展不确定度为0.084mL/s。该扩展不确定度与运用优化模型计算出的泄漏率的比值为2.6%,这充分说明计算结果具有较高的可靠性,不确定度处于合理范围,能够满足一回路水压试验结果判定的精度要求。

#### 4.4 不确定度影响因素敏感性分析

采用单因素变量法开展不确定度影响因素敏感性分析,固定其他不确定度分量不变,单独改变某一不确定度分量的数值,计算合成标准不确定度的变化量,通过变化量占比判断该因素的敏感程度,变化量占比越大,表明该因素对总不确定度的影响越显著。敏感性分析结果显示,压力测量不确定度对总不确定度的影响最显著,变化量占比为58.7%,主要因为压力参数在泄漏率计算模型中权重较大,传递系数最高;其次是温度测量不确定度,变化量占比为21.3%,温度修正的准确性直接影响泄漏率计算精度;容积测量不确定度与模型不确定度的变化量占比分别为12.5%与5.8%,影响相对较小;环境不确定度变化量占比仅为1.7%,对总不确定度的影响可忽略不计<sup>[4]</sup>。基于分析结果,提出关键影响因素控制建议,优先选用高精度压力、温度传感器,定期开展仪器校准,优化传感器安装位置,减少环境干扰,降低测量不确定度,提升泄漏率计算结果的可靠性。

#### 结束语

本文围绕一回路水压试验泄漏率计算优化与不确定度展开系统研究,结合相关理论基础,分析现有计算模型的应用现状、核心缺陷及不利影响,提出针对性优化措施并构建优化模型,通过实测数据验证了模型的合理性与高精度。同时,系统识别泄漏率计算中的不确定度来源,量化各分量贡献度,计算合成标准与扩展不确定度,明确压力测量是影响不确定度的关键因素,提出相应控制建议。研究解决了现有模型计算误差大、不确定度量化不系统的问题,为一回路水压试验结果精准判定提供理论支撑与工程参考。

#### 参考文献

- [1]原嘎嘎.卜形岔管水压试验结构受力分析[J].水电站机电技术,2024,47(9):82-84.
- [2]黄进,沈自尚.主管道水压试验应变测试及有限元分析[J].一重技术,2025(2):43-45.
- [3]王庆,初起宝,房永刚,等.水压试验在承压设备安全评价中的作用与利弊分析[J].原子能科学技术,2024,58(8):1655-1661.
- [4]姚刚,段永强.核电厂一回路水压试验策略变更的风险研究[J].东方电气评论,2024,38(5):55-59.