

高温高压考验回路主流量测量系统研究与应用

陆 星, 王宏业, 陈建杞, 李璐瑶

(中国核动力研究设计院 第一研究所, 四川 成都 610213)

摘要:为实现反应堆高温高压考验回路主流量的准确测量和快速响应,对温压补偿算法和系统响应时间进行研究分析;将实际功能需求与数字化技术充分结合,从软件和硬件 2 个方面进行优化升级。自主搭建测试系统进行验证;由该文优化算法建立的修正模型测得的主流量测量准确性提高了 24%;相比 2000 kW 考验回路中主流量测量系统,响应时间缩短了 40.8%。将该系统投入 500 kW 考验回路实际运行 8 个月,系统稳定可靠。

关键词:主流量;温压补偿;响应时间

中图分类号:TK313

文章编号:1000-0682(2026)04-0038-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.007

Research and application of main flow measurement system in high temperature and high pressure test loop

LU Xing, WANG Hongye, CHEN Jianqi, LI Luyao

(First Institute of Nuclear Power Institute of China, Sichuan Chengdu 610213, China)

Abstract: In order to realize the accurate measurement and fast response of the main flow in the high temperature and high pressure test loop of reactor, this paper studies and analyzes the temperature and pressure compensation algorithm and system response time, combines the actual functional requirements and digital technology, and upgrades the software and hardware. The test system was built independently for verification; the corrected model established by the optimization algorithm in this paper improved the accuracy of the main flow measurement by 24%, the response time of the 2000 kW test loop is shortened by 40.8%. The system has been applied in the 500 kW test loop for 8 months and the system is stable and reliable.

Keywords: the main flow; temperature and pressure compensation; response time

0 引言

主流量是反应堆高温高压考验回路可靠运行重点关注的热工参数,执行紧急停堆和电加热器切除等重要安全联锁功能。因此,对主流量测量系统的准确性、响应时间、可靠性以及稳定性等方面有较高要求。

考虑到系统的可靠性和稳定性,一般采用差压式孔板流量计用于反应堆或考验回路的主流量测量。对于常温低压工况,可直接用测得的压差值进

行计算;对于高温高压工况,主流量测量值还与被测介质(饱和水)的密度有关,必须进行密度补偿。

高温高压工况下,饱和水的密度随温度和压力呈非线性函数变化,相比常温低压工况存在较大差异,当水压为 17.65 MPa,水温在 100~300 °C 内变化时,由于密度变化所带来的主流量测量误差达 15%^[1-2]。因此,必须通过温压补偿对饱和水密度进行精准修正,进而实现主流量的密度补偿。

另外,反应堆在执行重要安全联锁时,要求涉及环节做出快速响应^[3]。然而,对于高温高压考验回路主流量测量环节,由于温压补偿需引入其他变量,一方面新增的温度、压力测量设备本身会引入响应时间,另一方面测量环节增多,多路信号采集运算的速度受到影响,也增加了响应时间。因此,必须从硬件和软件出发,通过改进优化实现主流量测量的快

收稿日期:2026-04-02

第一作者:陆星(1984—),男,云南曲靖人,硕士研究生,高级工程师,研究方向为反应堆仪控系统运维及相关设计。

E-mail:157726546@qq.com

速响应。

综上,该文通过对主流量测量模型和系统响应时间进行研究,提高高温高压考验回路主流量的测量准确性,同时缩短响应时间。

1 温压补偿算法优化及影响因素分析

1.1 温压补偿算法优化

以质量流量为研究对象,由差压式孔板流量计测量的流量基本方程为:

$$Q_m = k\sqrt{\Delta p\rho}, \rho = f(p, t) \quad (1)$$

式中: Q_m 为质量流量; k 为流量系数; Δp 为压差值; ρ 为饱和水实际密度,与压力 p 和温度 t 有关,用 f 表示三者间的函数关系。

由式(1)可知,高温高压工况下,主流量测量值还受饱和水密度变化的影响,必须进行精准密度补偿,而密度补偿的关键在于温压补偿算法。现有温压补偿算法的实现方法主要有3种:状态方程法、经验公式法、拟合法^[4-6]。采用状态方程法可直接获取最准确的密度,但补偿公式和运算过程非常复杂,对数据处理仪表有极高要求;由经验公式法获取的密度受人为因素影响很大,不同的约束条件产生不同的结果,也没有判定模型合理与否的成熟基准;采用拟合法也可获取准确的密度,该方法是目前实际工程应用最多的方法,但传统方法拟合结果易受人为因素影响。该文采用拟合法实现温压补偿,获取饱和水密度值。

由于压力对密度的影响较小^[7-8],认为密度是温度的单值函数,即 $\rho = f(t)$ 。选定某温度下的密度为基准,对式(1)进行整理,可得:

$$Q_m = k\sqrt{\Delta p\rho_s} \times b_\rho(t_s) \quad (2)$$

式中: t_s 为选定基准温度; ρ_s 为温度 t_s 时的基准密度; $b_\rho(t_s)$ 为基准密度 ρ_s 下的密度修正系数, $b_\rho(t_s) = \sqrt{\rho/\rho_s}$, ρ 为实际密度。

由式(2)可知,只要知道压差值 Δp 和某温度下的密度修正值 $b_\rho(t_s)$,就能得到主流量真实值。 Δp 由差压变送器读取, $b_\rho(t_s)$ 则是温度的函数,可通过热力学性质表进行函数拟合获取。考虑到传统线性拟合的局限性,该文对拟合方法进行优化,采用函数匹配性更好、运算更简便的最小二乘法进行曲线拟合,无需人为干预即可获得确切的函数关系式,选择25℃下的密度为基准,即 $b_\rho(t_{25^\circ\text{C}})$,2种方法拟合结果如图1所示。

由图1可以看出,线性插值法将拟合点人为分

成4段分别拟合,生成4个函数关系式,根据输入温度选择适应的函数。线性拟合曲线在分段点处不连续存在断点,且部分拟合点和超量程处拟合偏差较大,拟合效果受主观因素影响,当拟合点达50甚至更多时,操作性差;最小二乘法拟合曲线连续,效果较好。

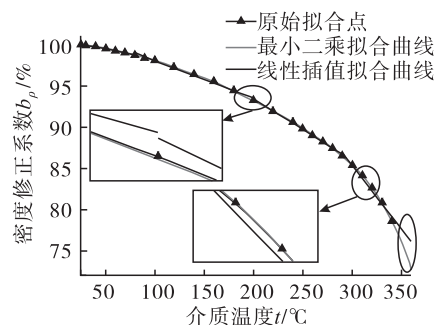


图1 密度修正系数 b_ρ 随温度 t 变化的曲线

对2种方法进行评价,线性插值法和最小二乘法的均方差偏差达2个数量级。由最小二乘法拟合得到的密度修正系数 $b_\rho(t_{25^\circ\text{C}})$ 随温度 t 变化的函数关系式为:

$$b_\rho(t_{25^\circ\text{C}}) = k_1 \times t^6 + k_2 \times t^5 + k_3 \times t^4 + k_4 \times t^3 + k_5 \times t^2 + k_6 \times t + k_7 \quad (3)$$

式中: $k_1 \sim k_7$ 为拟合所得系数,已知量。

式(3)采用拟合法给出了密度修正系数与温度间的确切模型,使得拟合数据更加准确,实现了密度的精准修正,也使得高温高压工况下的主流量得到了准确补偿。该算法公式使用简便且通用性强,不受硬件本身限制,适用于任一有密度补偿需求的测试环境或系统。

1.2 影响因素分析

为便于运算和分析,将式(2)进行整理。以高通量工程试验堆(简称HFETR,下同)某考验回路中主流量测量为研究对象,其在25℃工况下对节流孔板进行标定,流量量程为0~18 t/h,与之配套使用的差压变送器量程为0~165.96 kPa。则有测量方程:

$$Q_m = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta p_{\max}}} \times b_\rho(t_{25^\circ\text{C}}) \times Q_{\max} = \frac{\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{165.96}} \times b_\rho(t_{25^\circ\text{C}}) \times 18 \quad (4)$$

式中: $\Delta p_{\max}$ 为最大压差值; $Q_{\max}$ 为基准工况下 $\Delta p_{\max}$ 对应的质量流量。

对上述方程进行仿真,研究温度和压差对主流量测量值的影响规律,为该系统投入实际运行进行

故障排查分析时提供一定的理论支撑。

图 2 为不同温度下主流量随压差变化的曲线,由图 2 可知,温度一定时,主流量随压差值的增大而增大,增长速率逐渐减小,并且在相同温度间隔下,温度越高,主流量的变化越大。

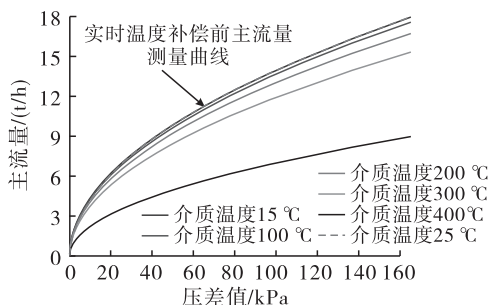


图 2 不同温度下主流量随压差变化的曲线

图 3 为不同压差下主流量随温度变化的曲线。

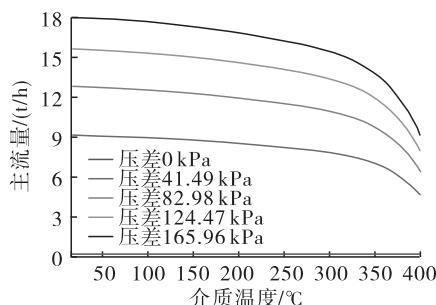


图 3 不同压差下主流量随温度变化的曲线

由图 3 可知,压差一定时,主流量随温度的升高而减小,减小速率逐渐增大,并且在相同压差间隔下,主流量的变化量随压差的增大而减小。当温度为 15℃,压差从 0 增大至 165.96 kPa 时,主流量从 0 增大至 18.00 t/h;当温度升高至 400℃,压差从 0 增大至 165.96 kPa 时,主流量从 0 增大至 8.99 t/h。

由此可知,高温高压工况下,补偿前后的最大测量误差达 50.01% FS,主流量测量值受温度影响很大,必须进行温压补偿,才能实现准确测量。

2 系统响应时间分析及优化

2.1 系统硬件分析及优化

主流量测量系统,一般由信号采集单元、信号传输单元、数据处理单元三部分组成。该系统的响应时间为从接收信号输入到输出超阈值触点信号的时间^[9-12],测试原理如图 4 所示。为缩短主流量测量系统的响应时间,硬件上,一方面减少测量中间环节,将信号采集、处理、运算等复杂功能集成化,缩短系统响应时间;另一方面选择时间性能更优的设备,提高硬件自身响应速度^[13]。现有主流信号隔离器、温度变送器等设备的响应时间最快约 20 ms,系统响应时间的关键在于数据处理单元,拟通过改善软件算法,提高其响应速度,实现主流量快速测量。

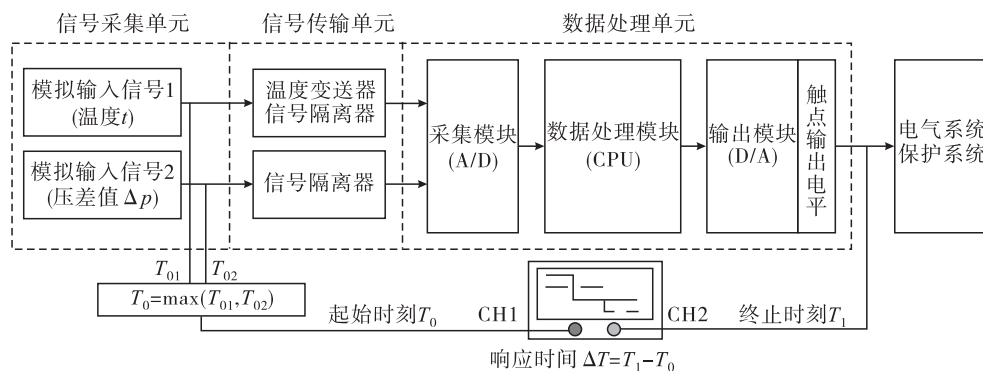


图 4 系统响应时间测试原理图

2.2 软件算法分析及优化

数据处理单元内置算法包括信号采集、数据处理(模型运算、逻辑符合、阈值比较、时钟记忆、实时通信、数据存储)、信号输出等,支持多线程分时作业。经分析,对于主流量测量,数据处理单元响应时间的瓶颈在于多路模拟信号采集与处理。

模拟信号采集模块由 2 块甚至多块相互独立的多通道 A/D 采集卡组成,采集卡与通道均以轮询方式被异步采集。另外,单块采集卡的处理时间由硬件本身决定,在评价多路信号采集的最大响应时间

时,存在某通道刚好错过轮询的情况。在对所有输入信号采集完成后,由数据处理模块(CPU)控制获取数据并进行处理,即先读取并处理 1[#]采集卡中数据,然后轮询切换至 2[#]、3[#]……。另外,当采集卡数据获取线程在为其分配的时间内不能完成时,则该线程暂时中断,其他线程(如授时等)以调度轮转的方式被处理^[14]。

通过对上述算法分析,提出以下优化策略:牺牲多余采集卡,在相同时间内提高对有效采集卡的处理频次;关闭采集卡内的多余通道,减少轮询等待时

间,最大程度保证多路信号输入的同步采集;将采集卡数据获取线程设为 CPU 处理最高优先级,同时关闭多余线程,降低 CPU 负荷。软件算法改进前后流程图如图 5 所示。

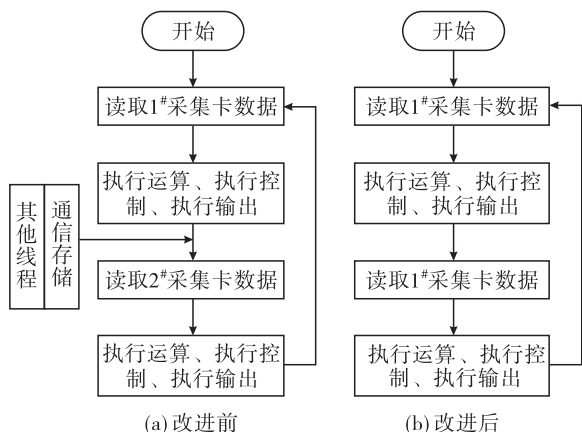


图 5 软件算法改进前后流程图

3 实验验证与实际应用

为验证该文提出的主流量测量温压补偿算法和

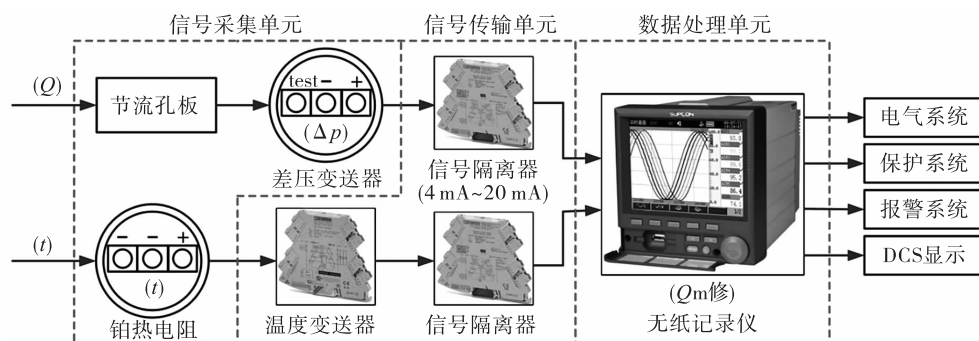


图 6 主流量测量实验平台原理图

3.1 温压补偿算法验证

为验证温压补偿算法的有效性,分别利用该文搭建的测量系统和 2000 kW 回路主流量测量系统进行实验验证。通过模拟实际工况得到不同温度和压差下的测试结果,如图 7 和图 8 所示,图中:IF97 公式计算值 1,由 IF97 公式得到的该文主流量测量系统的理论计算值;该文系统测量值,是该文系统在试验条件下的实际测量值;IF97 公式计算值 2,由 IF97 公式得到的 2000 kW 主流量测量系统的理论计算值;2000 kW 系统测量值,是 2000 kW 主流量测量系统下的实际测量值。IF97 公式计算值是由 IF97 公式中的状态方程计算得到的准确值,作为标准用于验证由拟合法得到的测量结果。

(1) 定温实验:给定温度,让 2 个系统均处于基

系统响应时间优化方法的有效性,选用现行主流技术下硬件性能良好的仪表自主搭建主流量测量系统,如图 6 所示。

利用该系统进行主流量测量时,首先由差压变送器采集节流孔板前后两侧的压差信号,经信号隔离器隔离、转换并传输至无纸记录仪,同时由热电阻采集管道上的温度信号,经温度变送器变送转换和信号隔离器隔离后传输至无纸记录仪;无纸记录仪同时采集两路模拟输入信号,执行数据处理单元复合功能,包括复杂函数运算和软件算法实现,数字化和集成化程度较高。

采用对比法进行实验验证,与 HFETR 2000 kW 考验回路中主流量测量系统进行测量准确性和系统响应时间对比。该回路中主流量测量系统已投运 20 多年,硬件选用当时主流模拟仪表搭建而成,包括差压/温度传感器、信号隔离器、温度变送器、配电柜、专用数据采集运算器、有纸记录仪等,系统组成相对复杂。

准工况(即不进行温压补偿),比较 10 组压差下 2 个系统的主流量测量结果(如图 7 所示)。由图 7 可知,基准工况即不进行温压补偿时,2 个系统测量结果均接近理论计算值,最大测量误差为 0.04 t/h,满足实际运行要求。

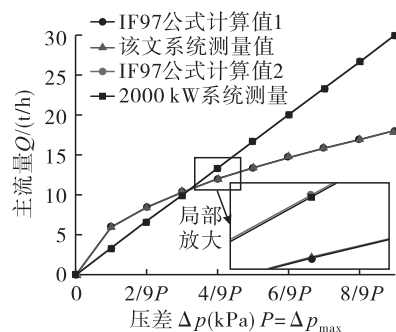


图 7 不同压差下 2 个系统主流量测量实验结果

(2) 定压实验:给定压差,对应的不进行温压补

偿的主流量为 18 t/h, 比较 10 组不同温度下 2 个系统的主流量测量结果(如图 8 所示)。图 8 中补偿前公式计算值, 是不进行温压补偿的情况下, 由 IF97 公式得到的理论计算值。

由图 8 可知, 压差一定时, 随着温度的变化, 2 个系统的测量值均与补偿前有较大偏差。由该文搭建系统所得测量值(13.68 t/h)与补偿前(18 t/h)差值最大为 4.32 t/h, 相对误差为 24%, 由 2000 kW 回路中系统所得测量值(20.81 t/h)与补偿前(18 t/h)差值最大为 2.81 t/h, 相对误差为 15.6%。因此, 温压补偿算法用于高温高压工况下主流量测量是有效的。

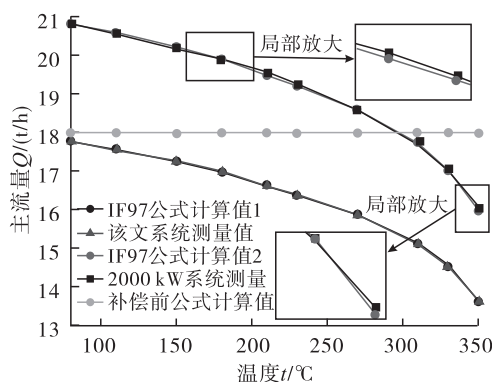


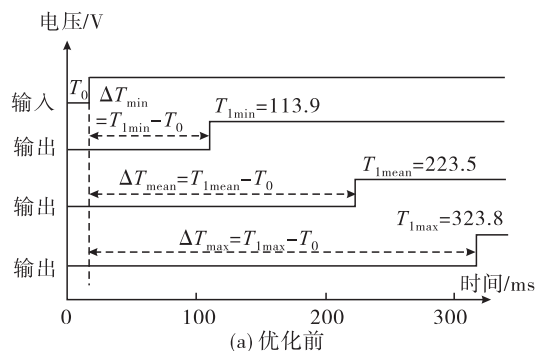
图 8 不同温度下 2 个系统主流量测量实验结果

另外, 对密度拟合方法进行优化, 采用最小二乘法建立密度修正系数模型, 不同温度下的主流量测量结果接近理论计算值, 最大误差为 0.02 t/h, 补偿效果良好。相对而言, 2000 kW 回路中主流量系统测量结果虽满足运行要求, 但误差较大, 最大误差为 0.09 t/h, 相对误差为 0.5%。若将该误差映射至热功率测量, 在实际运行温差为 30 °C 时, 造成热功率测量误差 4.5 kW, 连续运行 1 炉段将损失积分功率 135 kWd, 延长近 2 h 运行时间, 存在一定的安全风险和经济损失。

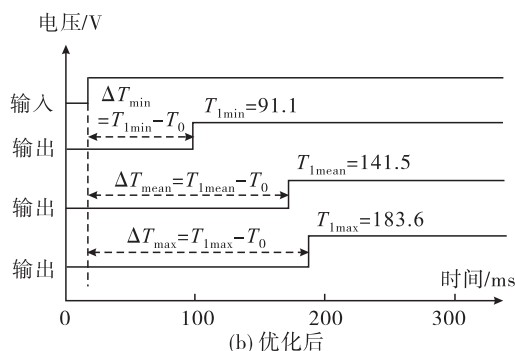
3.2 响应时间算法验证

为验证该系统响应时间优化方法的有效性, 利用该文搭建系统进行优化前后的响应时间对比实验, 同时与 2000 kW 回路主流量测量系统的响应时间进行对比。

(1) 该文系统响应时间优化前后的对比实验: 通过模拟实际工况, 测量该文系统中主流量输入输出的响应时间。分别采用优化前后方法进行多次重复性测试, 结果如图 9 所示。



(a) 优化前



(b) 优化后

图 9 优化前后主流量响应时间重复性测试结果

由图 9 可知, 优化后响应时间明显缩短, 较优化前缩短了 36.7%, 说明该文响应时间优化方法对于提高响应速度是有效的。

(2) 该文优化系统与 2000 kW 回路中系统对比试验: 通过模拟实际工况, 测量主流量输入输出的响应时间, 如图 10 所示。

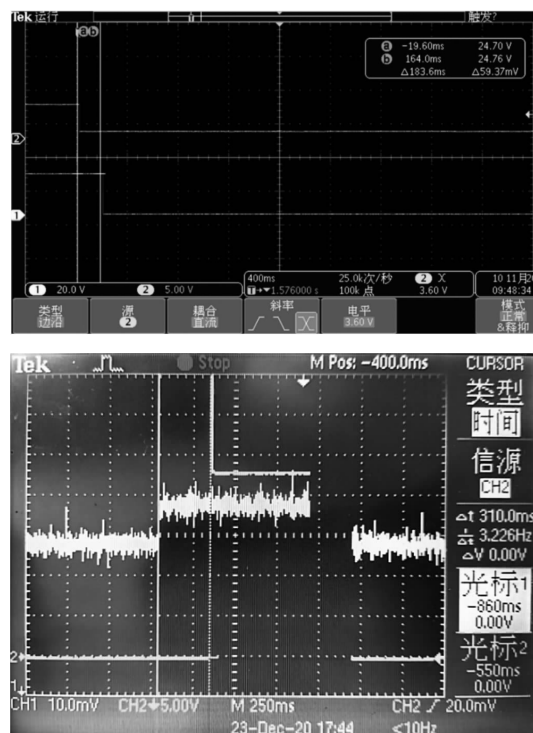


图 10 该文优化系统与 2000 kW 主流量系统最大响应时间测试结果

由图 10 可知,优化方法重复性测试的最大响应时间为 183.6 ms,2000 kW 回路中主流量系统的最大响应时间为 310.0 ms,均满足实际运行需求。说明该文响应时间优化方法对于提高系统响应速度是有效的,较 2000 kW 回路中主流量系统的响应时间缩短了 126.4 ms,优化程度达 40.8%。

3.3 系统稳定性验证

对主流量测量系统涉及软硬件分析优化并进行有效性验证后,将该系统应用于 HFETR 500 kW 高温高压考验回路中,用于主流量连续在线测量。投入实际运行至今已有 8 个月,系统测量功能和联锁响应性能均正常,且稳定可靠。

4 结论

该文针对高温高压工况下主流量测量的温压补偿算法和系统响应时间进行了研究分析,将实际功能需求与数字化技术充分结合,同时从软件和硬件两个方面进行优化升级,实现了主流量的准确测量,缩短了系统的响应时间。该系统能够实现回路停堆保护信号准确及时发出和电加热器精准快速切除,保障了反应堆和考验回路的运行安全。

(1)温压补偿优化算法给出了实现主流量精准补偿的确切修正模型,补偿前后测量准确性提高了 24%。此外,该算法通用性强,也已成功应用于 500 kW 考验回路和水化学回路的旁通流量、主热一次水流量等参数的测量中。

(2)在硬件提升的基础上优化系统响应时间算法,保证了多路信号采集的同步性,相比 2000 kW 考验回路主流量测量系统,响应时间缩短了 40.8%。

此外,该文的 2 个算法简便性和适用性高,不受硬件自身限制,可广泛应用于其他处于高温高压工况且有温压补偿和快速响应需求的水系统,具有较好的实际参考价值,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 周友华,陈培武,邓麟凤,等. 基于神经网络的流量计蒸汽测量温压补偿技术分析[J]. 集成电路应用, 2025,42(10): 178-179.
- [2] 刘志龙,湛力,聂常华,等. 基于分区密度补偿的稳压器液位测量研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(02): 242-245.
- [3] 郑志兴. 核电站反应堆控制保护系统的设计与研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [4] 李一洁. 简谈流量的温压补偿及液位的密度补偿计算[J]. 仪器仪表用户, 2017, 24(03): 88-91+18.
- [5] 潘龙,宋婧菡. 浅谈锅炉汽包液位的测量与控制[J]. 电站系统工程, 2024, 40(04): 37-39.
- [6] 袁明春,蒋凤英,吴礼森. HFETR 试验回路中装置热功率测量[J]. 核动力工程, 2000(03): 202-204+212.
- [7] 肖展,胡玉苗. 标准节流式流量计在线校准系统的不确定度评定[J]. 中国测试, 2020, 46(S1): 81-85.
- [8] 刘成柱. 差压式流量计温压补偿信号的影响及薄弱点分析[J]. 仪器仪表用户, 2023, 30(11): 87-90.
- [9] 王明星,孙诗炎,伍巧凤,等. 数字化反应堆保护装置响应时间分析及设计[J]. 科技视界, 2017(07): 266-267.
- [10] 刘洋,廖良记,张向科. 数字化反应堆保护系统响应时间的评价方法研究[J]. 中国核电, 2020, 13(05): 606-610.
- [11] 顾文平,陈学印,秦正林. 火电厂电气保护装置低电压穿越过流保护技术研究与应用[J]. 电力设备管理, 2025(19): 72-74.
- [12] 杨家龙,徐扬,陈春超,等. 基于改进粒子群优化算法的输电线路实时温度监测与预警模型[J]. 电子设计工程, 2026, 34(6): 103-108.
- [13] 王宏业,陆星,武文超,等. 多路信号采集测量快速响应方法研究[J]. 化工自动化及仪表, 2022, 49(01): 7-12.
- [14] 马刚,康礼鸿. 核电厂数字化反应堆保护系统 T2 响应时间分析及测试[J]. 自动化博览, 2015(01): 72-76.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎刊登广告!

国内邮发代号:52-49 国际发行代号:BM529 定价:18.00 元/期 108.00 元/年
地址:西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编:710075 电话:029-81871277
网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱:gyybbjb@126.com