

先进非能动核电机组一回路冷却剂流量 系统化测量方法

罗慧

(山东核电有限公司 烟台 265116)

摘要 压水堆一回路冷却剂流量是防止偏离泡核沸腾的重要参数。三代先进非能动(Advanced Passive, AP)技术核电机组采用低泄漏堆芯装料模式,因堆芯出口温度温差梯度加大,导致量热平衡法流量测量计算的不确定度增加。为了保证核电机组一回路冷却剂流量精准测量,验证其满足设计与监管要求,提出了以伯努利方程为基础模型的系统化测量计算方法。在调试不同阶段,分别执行一回路主设备压差测量、冷热段弯管流量计压差测量;在首次50%、75%、90%、100%的功率平台,进行量热平衡试验计算。通过热试和满功率阶段的实体工艺流体测量值,对冷热管的弯管流量系数进行计算标定。围绕不确定度最小化,权重计算一回路冷却剂总体积流量。本方法测量计算的一回路冷却剂流量值相对误差小于4%,装料后总流量介于最佳预期流量的95.8%~104%之间;NAPs计算体积流量值不确定度低于1.9%,该方法为其他机型冷却剂流量的精准测量提供了一种示范思路。

关键词 流量测量, 弯管流量系数, 权重因子, 不确定度

中图分类号 TL48

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100602

Systematic measurement method for primary coolant flow rate in advanced passive nuclear power units

LUO Hui

(Shandong Nuclear Power Corporation, Yantai 265116, China)

Abstract [Background] The primary coolant flow rate is essential in preventing departure from nucleate boiling. The implementation of a low-leakage core loading pattern in advanced passive (AP) technology-based nuclear power units has increased the temperature difference gradient at the core outlet, resulting in elevated uncertainty in the flow rate calculations when using the heat balance method. [Purpose] This study aims to validate a measurement and calculation method based on the Bernoulli equation model for accurately determining the primary coolant flow rate in AP nuclear power units, hence meeting the design and regulatory requirements. [Methods] First of all, measurements were conducted for the primary loop main equipment and bend pipe flowmeter pressure differentials during the commissioning phases. Calorimetric balance tests were performed at power levels of 50%, 75%, 90%, and 100%. Then, the bend pipe flowmeter coefficients were calibrated using the flow rate values obtained from the hot function test and 100% rated thermal power (RTP). Finally, based on weighted factors, the total flow rate values for the reactor coolant system (RCS) were calculated with emphasis on the minimization of uncertainties. [Results] The proposed measurement and calculation method yields primary coolant flow rate values with a relative error of less than 4%. The total flow rate after loading is within the range of 95.8% to 104% of the expected optimum flow rate. The uncertainty of the volumetric flow rate calculated from NAPs is lower than 1.9%, demonstrating a novel approach for

第一作者: 罗慧, 女, 1984年出生, 2005年毕业于南华大学, 现从事核电站仪控运维技术管理工作

收稿日期: 2023-06-10, 修回日期: 2023-08-24

First author: LUO Hui, female born in 1984, graduated from University of South China in 2005, engaged in instrument and control system maintenance and technical management

Received date: 2023-06-10, revised date: 2023-08-24

precise measurements in other units. [Conclusions] The method of this study offers an advanced perspective for reactor coolant precise measurements in other units, with primary coolant flow rate values exhibiting minimal relative error and volumetric flow rate values from NAPs demonstrating low uncertainty.

Key words Flow measurement, Elbow flow coefficients, Weight factor, Uncertainty

核电站反应堆一回路冷却剂是高温高压大管径、大流量和高放射性的流体,用于一回路热量传递,流量过大会增加机械应力,流量过小会降低热限值裕度。不同机型核电机组对一回路冷却剂测量有多种测量方法研究^[1-3],国内部分核电站曾出现过反应堆一回路冷却剂流量超出设计限值,导致多起执照运行事件^[4]。二代核电机组通过主泵电功率计算、热平衡试验等方式进行流量计算^[5];通过弯管流量计测量一回路流量的机组,通常使用的弯管流量系数为设计给定值^[6]。华龙机组取消主管道的弯管流量计,设置主泵进出口压差表,基于主泵电功率测量一回路冷却剂系统流量^[7]。因弯管流量系数受弯管流量计尺寸、光洁度、弯曲管径、前后直管段长度、雷诺数等因素影响,每个弯管流量计的流量系数均不同,直接用设计值将造成计算结果较大偏差^[8-10]。反应堆冷却剂试验及数据处理,为保证数据可信度,需充分考虑安装位置对测量仪表的静压影响^[11-13],对核电站工艺流量测量不确定度也开展了一定的研究和工程经验^[14]。

先进非能动(Advanced Passive, AP)技术核反应堆有两个热管道环路,每个热管道安装4个流量仪表,当反应堆热功率大于P10,任一环路有两个仪表的百分比流量低于90%,满足逻辑四取二则停堆。本文基于AP技术核电机组的弯管布置特点和监管要求,研究了多种测量方法结合验证的模式,为先进非能动压水堆核电站一回路冷却剂流量验证和弯管流量系数的标定提供了技术方案。同时,随着运行年限增长,工艺流体冲刷将导致弯管流量计的管壁变薄,对弯管流量系数产生影响^[15]。本文所述方法将提供初始技术方案和数据,助于影响评估和策略制定。

1 系统化测量方案

系统化总体方案如图1所示,在机组热试、首次装料临界前、首次功率提升等阶段,利用已有正式永久仪表,安装部分临时仪表,实施一回路主设备(压力容器、主冷却泵和蒸汽发生器)压差测量、未校准的冷热腿弯管压差测量方式、精准量热平衡(功率和温度)三种流量测量方法,以原始压差测量数值计算,验证装料后总流量介于最佳预期流量95.8%~104%之间;利用热试期间流量测量的权重结果,标

定首次弯管流量系数;利用核应用程序(Nuclear Application Program, NAPs)计算一回路流量,验证反应堆一回路冷却剂系统(Reactor Coolant System, RCS)显示体积流量值不确定度低于1.9%。

2 测量原理

2.1 压差测量原理

弯管流量计本质是压差流量计的一种,当冷却剂经过弯头时,其角加速度产生的离心力会在弯头外侧和内侧之间形成压差,该压差的平方根与流量成正比。由伯努利方程和动量矩守恒原理^[9]推导可得出:

$$Q = C \sqrt{\frac{R}{2D}} \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

式中: Q 为体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; C 为流量系数; R 为弯管曲率半径, m ; D 为弯管内径, m ; ΔP 为实际测量压差, Pa ; ρ 流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在实际弯管流量测量与计算过程中,需考虑温度、压力等因素对流体密度的影响,式中压差值 ΔP 和 ρ 、 C 均为未知数。式(1)可简化为:

$$Q = K \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

2.2 量热平衡测量

采集与体积流量相关的参数,包括热功率、温度、压力等参数,执行核电机组一、二回路之间量热平衡试验计算。

$$W_{\text{RCS}} = \frac{RTO \times V_{\text{Specific}}}{(H_{\text{Hot enthalpy}} - H_{\text{Cold enthalpy}})} \quad (3)$$

式中: W_{RCS} 为RCS一回路体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; RTO 为反应堆热功率, MWt ; V_{Specific} 为通过稳压器压力和冷端平均温度作为参考点,可查阅标准参考文件将质量流量转换为体积流量。

2.3 百分比流量

首次反应堆启动期间在热态零功率、50%、75%、90%、100%功率平台下采集数据,以反应堆功率作为补偿参数,对冷热管流量归一化计算形成百分比流量,确保这几个功率平台的百分比流量接近100%。百分比流量主要用于保护联锁,本文不作详

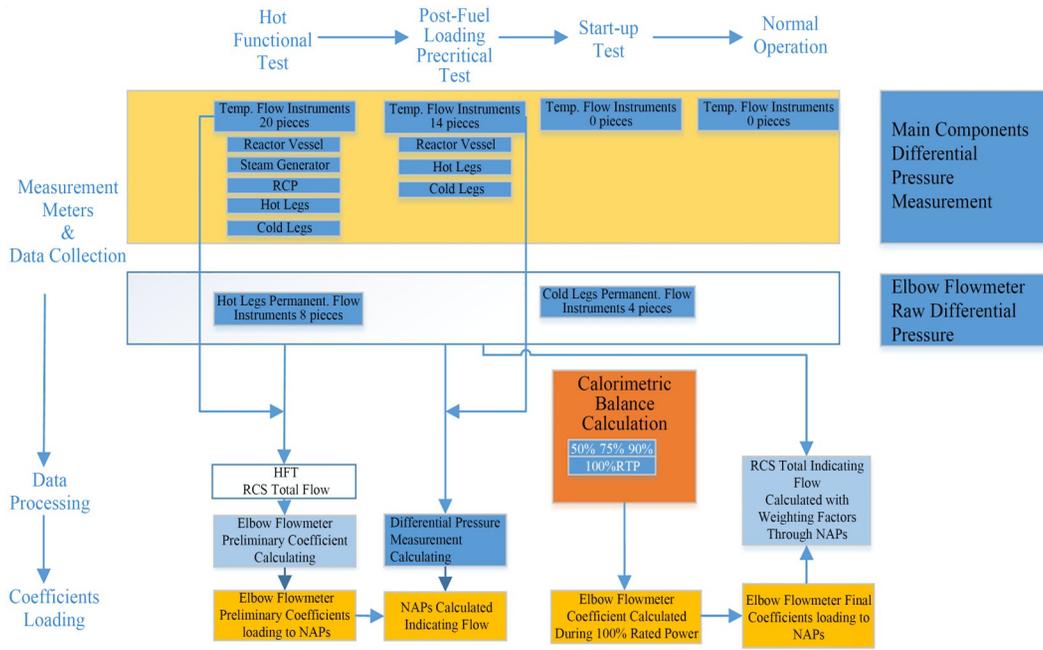


图1 RCS系统流量测量与数据处理总体方案
Fig.1 Overall plan for RCS flow measurement and data processing

细介绍。

3 测量与计算方法

3.1 测量仪表布置

AP核电机组有两个环路,如图2所示,仅示意展示RCS的I环路流量测量仪表布置,FT为正式仪表,TFT为临时仪表。其中,FT1/2/3/4为热管正式流量仪表,TFT109/TFT110为热管临时流量仪表;FT171为冷管正式流量仪表,TFT105为冷管临时流量仪表;TFT101为主泵1压差测量临时流量仪表;TFT113为蒸汽发生器SG1压差测量临时流量仪表;TFT115为压力容器RV压差测量临时流量仪表。在热管段和冷管段的弯曲部位均安装了正式流量变送器,两个环路呈对称布置。每条热管段4个流量变送器对应信号送至安全仪控系统4个序列,共用一个高压侧取压口,两个共用1个低压侧取压口,3个取压口均在同一截面。每条冷管段各1个流量变送器,信号送至控制系统用于流量显示。总计共12个正式仪表。

首次热试时共计安装20块精度为±0.1%的高精度临时仪表。包括热管临时仪表4块、冷管仪表4块、主泵(Reactor Coolant Pump, RCP)压差4块、蒸汽发生器(Steam Generator, SG)压差2块、压力容器(Reactor Vessel, RV)压差6块。其中,冷热管临时仪表与正式仪表共享高低压侧取样口,作为并联平行测量验证。

3.2 数据采集

流量测量试验的数据采集主要分为两大类。

第一类是临时仪表信号采集:通过数据采集仪(Data Acquisition, DAQ)使用电压采集模块,设置10 Hz低通滤波噪声,0.1 s采集周期,±0.5%允许误差,持续10 min,取平均值进行流量计算。DAQ所采集的是电压信号,范围1~10 V,对应临时仪表的测量范围。

$$\Delta P_m = \frac{V_m - V_i}{V_R} \times \Delta P_{\max, \text{Range}} \quad (4)$$

式中: V_m 为DAQ所测得的电压值, V_i 为初始电压1 V; V_R 为最大量程电压值; $\Delta P_{\max, \text{Range}}$ 为临时测量仪表最大量程; ΔP_m 为临时测量仪表所测压差值。

第二类工艺正式永久仪表及相关参数:在数据显示与处理系统(Data Display and Processing System, DDS)采集影响一回路流体密度与计算的相关参数,包括一回路冷热段温度、稳压器压力值、主泵转速、未经补偿的压差等。建立10 min采集周期取平均值,主要用于NAPs计算RCS显示的体积流量。

3.3 数据处理与计算方法

3.3.1 热试阶段压差法流量计算

在热试阶段首次流量测量时,引用设计参数值与实际测量压差值,将式(1)演化为式(5);根据热管段静态压差值修正,热管流量在热试阶段采用式(6),临界启动试验采用式(7);根据确定的雷诺数、管径比数值,冷管段流量采用式(8)。

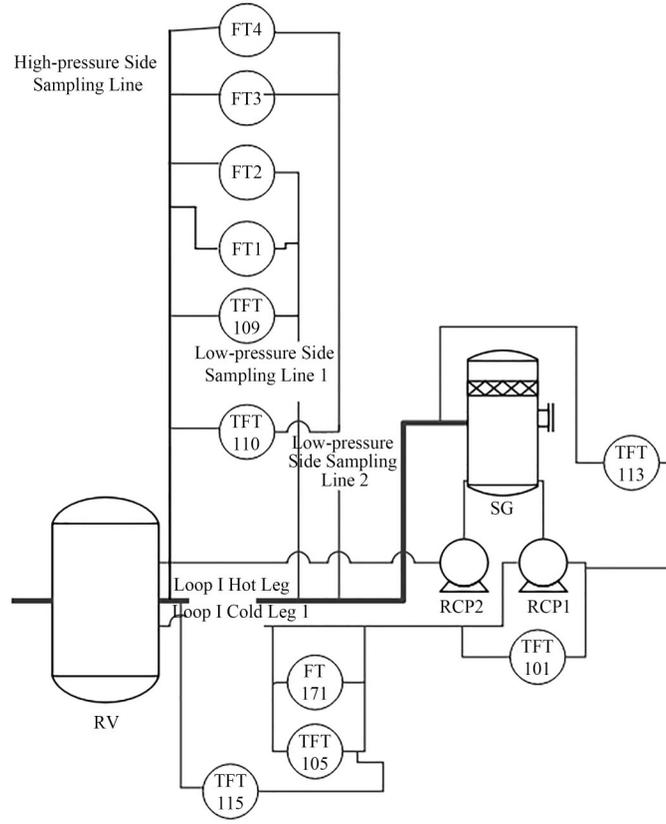


图2 RCS系统I回路流量测量仪表示意图

Fig.2 Schematic of flow measurement transmitters of RCS Loop I

$$Q_m = Q_D \sqrt{\frac{\rho_D \Delta P_m}{\rho_m \Delta P_D}} \quad (5)$$

$$Q_m = Q_D \sqrt{\frac{\rho_D (\Delta P_m - \Delta P_C)}{\rho_m \Delta P_D}} \quad (6)$$

$$Q_m = \sqrt{\frac{\Delta P_m}{K_{HFT} \rho_m}} \quad (7)$$

$$Q_m = 64\,022 \sqrt{\frac{\Delta P_m}{\rho_m}} \quad (8)$$

$$Q_{tot} = \frac{\sum W_i Q_i}{\sum W_i} \quad (9)$$

式中： Q_m 为测量流量； ΔP_m 为测量压差； ΔP_D 为设计压差； ΔP_C 为热管段静压补偿因子； ρ_D 为设计密度； Q_D 为设计流量； ρ_m 为测量密度； K_{HFT} 为热试计算流量系数； Q_{tot} 为权重计算后总流量； Q_i 为各流量计算值； W_i 为权重值。

3.3.2 启动试验阶段利用弯管流量测量计算

NAPs设置一回路流量专用计算模块，该程序自动每60 s采集流量计算相关参数的平均值，对一回路流量进行计算，要求不确定度低于1.9%。计算流程如图3所示。

热试阶段，式(9)计算RCS总加权流量 Q_{tot} ，按式(2)计算得到首次弯管流量系数，此处因临时仪表的

不确定度更低，采用临时仪表压差值 ΔP_m 。功率提升至100%RTP时，利用二次侧热平衡计算和一次侧冷热管未经补偿的压差，按式(2)计算得到功率阶段弯管流量系数。为了使NAPs流量值不确定度最小，对热试和100%RTP的弯管流量系数再次权重，应用式(10)在第一燃料循环末期装载最终流量系数。

$$K_j = W_{HFT} \times K_{HFT} + W_{100\%RTP} \times K_{100\%RTP} \quad (10)$$

式中： K_j 为最终流量系数； K_{HFT} 为热试流量系数； $K_{100\%RTP}$ 为满功率流量系数； W_{HFT} 为热试流量系数权重因子； $W_{100\%RTP}$ 为满功率流量系数权重因子。

NAPs中RCS流量计算模块通过DDS采集相关流量计算参数，使用MATLAB流体系统计算功能，使用式(11)、(12)计算 W 权重因子，冷管与热管流量权重因子分别为0.239 0、0.761 0；式(13)基于热试的弯管流量系数和最终弯管流量系数分别计算RCS总体积流量，式(14)计算总的不确定度大小。

$$W_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (11)$$

式中： W_i 为测量权重因子； σ_i 为不确定度的大小，主要包括系统不确定度和随机不确定度，本试验由设计方给出分项不确定度大小。 W_i 是每分项的权重，

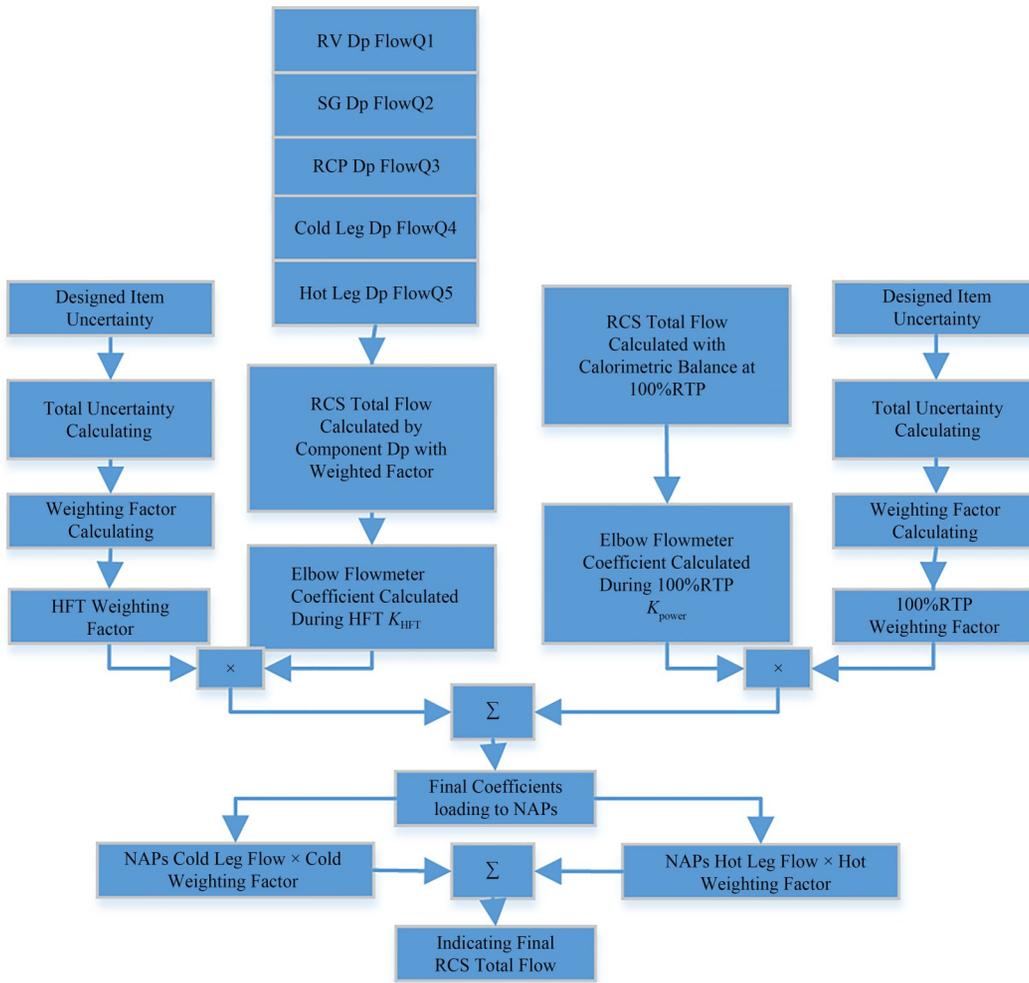


图3 RCS系统弯管流量计算流程图
Fig.3 Flowchart for RCS bend pipe flow calculation

$\sum W_i$ 总和为1。

$$\delta_i = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{N}} \quad (12)$$

式中： N 为测量样本数； x_i 为独立测量结果； \bar{x} 为测量平均值； δ_i 为标准偏差，通过采集大量试验数据，减少随机误差，降低不确定度。

$$Q_{c,Tot} = \frac{(W_H \times Q_H + W_C \times Q_C)}{W_H + W_C} \quad (13)$$

式中： $Q_{c,Tot}$ 为RCS计算总流量； Q_H 为热管计算流量； Q_C 为冷管计算流量； W_H 为热管权重因子； W_C 为冷管权重因子。

$$U_{tot} = \sqrt{(U_1 \times W_1)^2 + (U_2 \times W_2)^2 + \dots + (U_i \times W_i)^2} \quad (14)$$

式中： U_{tot} 是总不确定度， U_i 是每项的不确定度。

3.3.3 量热平衡计算

利用§2.2所述方法，首次反应堆启动期间在50%、75%、90%、100%功率平台下采集数据进行一

二回路的量热平衡计算，并在功率提升阶段通过移动控制棒调节棒组，确保热管温度梯度与峰值变化对流量计算的影响较小，以保证测量结果可靠性。

4 测量试验数据

在RCS正常压力、正常温度平台，4台主泵维持100%转速，RCS工艺参数状态稳定的情况下开展测量试验。以图2的I环路为例，试验计算数据如表1所示。首次热试期间，此时机组堆芯尚未装料，流体阻力相对较小。启动试验阶段，两个环路的热管道弯管流量系数取平均值，按照式(7)计算后两个环路流量取和得到热管测量总流量；4个冷管道按照式(8)计算流量值后取和得到冷管测量总流量。

如表2所示，不确定度越大，所占权重比例越小，所有权重系数的和为1，最终权重总流量为71 546 m³·hr⁻¹。RCP压差测量权重占比为80.98%，是热试期间流量测量的主要数据，最小值是热管热试测量值62 393 m³·hr⁻¹，不确定度±12.68%，权重占比仅为1.23%。

表1 热试与启动试验压差测量与流量计算
Table 1 Differential pressure measurement and flow calculation during HFT and start-up test

测点 Test position	不确定度 Uncertainty	热试计算值 HFT calculated flow / m ³ ·hr ⁻¹	热试总流量 HFT total flow / m ³ ·hr ⁻¹	启动试验计算值 Start-up test calculated flow / m ³ ·hr ⁻¹	启动试验总流量 Start-up test total flow / m ³ ·hr ⁻¹
压力容器 TFT115 RV TFT115	±5.26%	71 131	71 523	71 801.596 8	71 212.962 9
蒸发器 TFT113 SG TFT113	±10.70%	37 044	73 702	—	—
主泵 TFT101 RCP TFT101	±1.54%	18 100	71 840	—	—
热管 FT1 HL FT1	±13.09%	32 154	32 280.5	37 229.208 0	74 570.983 3
热管 FT2 HL FT2	±13.07%	32 550			
热管 FT3 HL FT3	±13.10%	31 949			
热管 FT4 HL FT4	±13.07%	32 469			
热管 TFT109 HT TFT109	±12.68%	32 822	32 398.5	36 890.125 3	73 731.652 4
热管 TFT110 HT TFT110	±12.68%	31 975			
冷管 FT171 CL FT171	±4.28%	18 001	69 369	18 718.055 7	71 950.906 8
冷管 TFT105 CL TFT105	±4.15%	18 434	70 951	18 618.200 9	70 633.531 0
RCS 总流量值 RCS Total Flow	±1.32%	—	71 546	—	—

基于测量误差、温度、压力等流量计算相关因子的动态变化,在相对稳定的工艺流体状态下,根据不确定度最小化的原则,按照式(11)对各分项测量结果权重,并用权重总流量对弯管流量系数实体标定,保证了弯管流量系数结果的可靠度。

热试与启动试验期间,8块临时与正式仪表并行测量冷热管压差,如图4所示。±0.1%高精度的临时仪表作为基准值,对精度±0.25%正式仪表并行验证。其中热管因取样口的位置影响,原始压差值需考虑静态压差补偿。

根据表3数据,同环路的热管弯管系数具备高度一致性,最大偏差不超过1.8%,但两个热管环路

之间存在一定差异,偏差达到11.9%,这与工艺管道本身的制造与布置差异有关;4个冷管总体具有较好一致性,但与热管差异较大。冷热管流量系数均与原设计计算值存在较大差异,由此也充分说明采用实体工艺流体对弯管进行流量系数标定是十分有必要的。

如图5试验结果,各种方法的测量值均满足装料后总流量介于最佳预期流量95.8%~104%之间。热试期间RV及RCP压差测量最接近总流量值;热管流量波动值最大;权重后的总流量值与量热平衡计算值偏差小于7%,NAPs计算流量值不确定度小于1.2%。

表2 热试期间压差流量测量计算与权重因子
Table 2 Differential pressure measurement, flow calculation, and weighting factor during HFT

测量方式 Test method	测量流量 Test flow / m ³ ·hr ⁻¹	不确定度 Uncertainty / %	权重因子 Weighting factor
RV压差 RV Dp	71 523.00	±5.25	0.061 6
SG压差 SG Dp	73 702.00	±10.76	0.010 2
RCP压差 RCP Dp	71 840.00	±1.46	0.809 8
冷管压差 Cold Leg Dp	70 160.00	±4.14	0.106 1
热管压差 Hot Leg Dp	62 393.00	±12.68	0.012 3
总流量 Total Flow / m ³ ·hr ⁻¹	71 546.00	±1.32	—

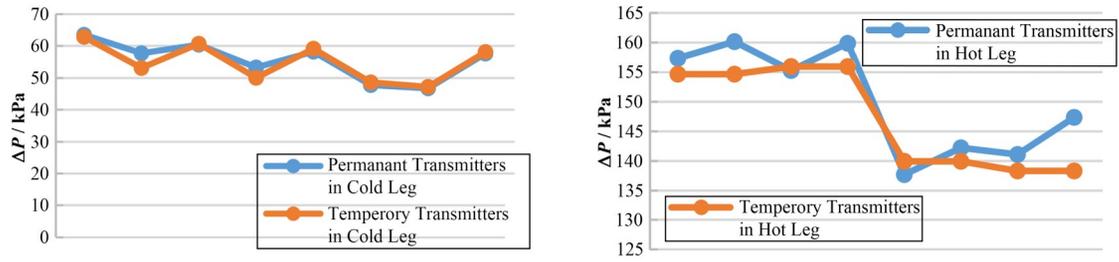


图4 RCS系统冷管(a)和热管环路(b)压差测量
Fig.4 Measurement of pressure difference for RCS cold (a) and hot (b) leg flow

表3 RCS系统弯管流量系数
Table 3 Calibrated RCS bend pipe flow coefficients

永久仪表 Permanent transmitter	热试流量系数 HFT flow coefficient	启动流量系数 PFT flow coefficient	最终流量系数 Final flow coefficient
环路I热管1 Loop I HLeg1	1.528	1.523	1.525
环路I热管2 Loop I HLeg2	1.544	1.533	1.537
环路I热管3 Loop I HLeg3	1.528	1.522	1.524
环路I热管4 Loop I HLeg4	1.544	1.538	1.540
环路I冷管1 Loop I CLeg 1	2.631	2.636	2.632
环路I冷管2 Loop I CLeg 2	2.389	2.391	2.389

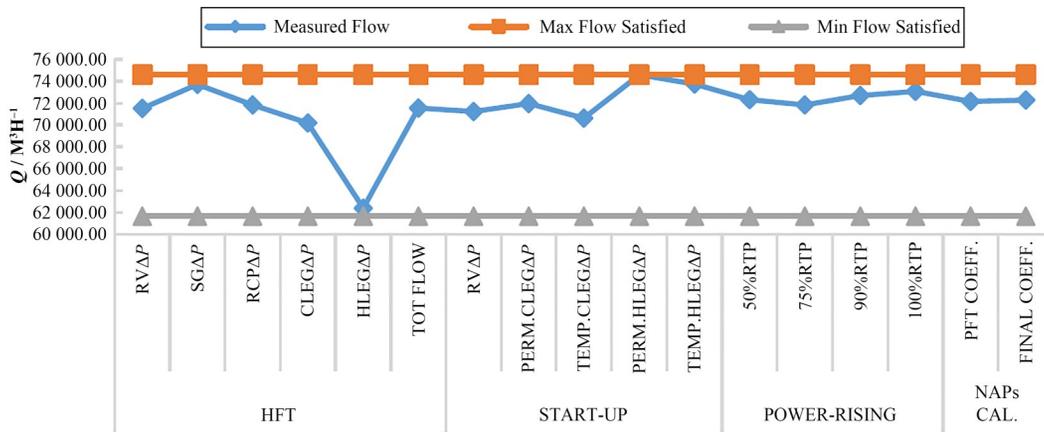


图5 各测量方式的流量测量值与预期值
Fig.5 Flow measurement data and expected data for each measuring method

5 结语

AP技术核电机组一回路流量测量提出并实践了一套有序整合的系统化方法,解决了因一回路弯管角度和直管段非标准设计导致弯管流量难以精准计算,以及因换料方案使量热平衡计算流量值不确定度增加的问题。该方法通过机组不同调试阶段采用不同的测量方法,将高精度临时仪表与正式仪表并行测量验证。围绕RCS总体积流量不确定度最小化,对多种测试方法和多阶段的测量结果权重计算,从多样性、独立性上验证了RCS一回路流量满足设计和监管的相关要求。

与其他技术核电机组相比,AP技术对冷热弯管

流量系数进行工艺流体实测标定计算,且最终系数经过两次权重,使弯管流量系数更加准确,该方法有效解决了核电站高辐照高温高压的大工艺管道弯管流量尚无装置进行标定的问题,可广泛应用于核电站弯管流量系数标定,同时将为中长期后续弯管流量系数修正提供数据与技术基础。

致谢 感谢山东核电有限公司相关试验实施与支持人员对本文提供的巨大帮助。

作者贡献声明 罗慧负责对论文背景调研、试验方案整理和数据处理、论文撰写、论文修改与完善。

参考文献

- 1 李少峰, 孙艳飞, 薛贵军, 等. 弯管流量计测量高温气冷反应堆一回路流量的可行性研究[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2015, 37(1): 49 - 56. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2716.2015.01.011.
LI Shaofeng, SUN Yanfei, XUE Guijun, *et al.* Feasibility study of elbow flowmeter used in high temperature gas-cooled reactor[J]. Journal of Hebei United University (Natural Science Edition), 2015, 37(1): 49 - 56. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2716.2015.01.011.
- 2 凌星. 核电站反应堆冷却剂系统流量测量方法简析[C]//中国核科学技术进展报告——中国核学会2009年学术年会论文集(第一卷·第3册). 北京, 2009: 745 - 749.
LING Xing. Analysis for the method to the reactor coolant system flowrate measurement in the nuclear power plant[C]//Progress Report on China Nuclear Science & Technology (Vol.1). Beijing, 2009: 745 - 749.
- 3 杨洪旭. 弯管流量计在三门核电站一回路的应用[J]. 核电工程与技术, 2012(1): 10 - 13.
YANG Hongxu. Application of bend pipe flowmeter in the primary loop of Sanmen nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering and Technology, 2012(1): 10 - 13.
- 4 李华升, 郑丽馨, 孙树海, 等. 一回路环路流量及堆芯总流量超过机械设计流量的原因分析和改进建议[J]. 核安全, 2015, 14(4): 30 - 35. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2015.04.006.
LI Huasheng, ZHENG Lixin, SUN Shuhai, *et al.* Proposed solutions and root cause of the M310 type PWR licensee events on RCP loop flow and core total flow over the mechanical design flow limit[J]. Nuclear Safety, 2015, 14(4): 30 - 35. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2015.04.006.
- 5 林志坚. 秦山核电厂反应堆冷却剂流量测定[J]. 核动力工程, 1993, 14(1): 42 - 45, 23.
LIN Zhijian. Determination of reactor coolant flowrate for Qinshan nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 1993, 14(1): 42 - 45, 23.
- 6 赵德元, 周获堂. 岭澳核电站2号机组一回路流量测量偏差分析及处理[J]. 核动力工程, 2004, 25(4): 373 - 376. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2004.04.019.
ZHAO Deyuan, ZHOU Huotang. Analysis of the discrepancies of reactor coolant flowrate measurement in unit 2 of Ling'ao nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2004, 25(4): 373 - 376. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2004.04.019.
- 7 黄宗仁, 王明利, 李峰. 反应堆冷却剂系统流量测量试验研究与设计[J]. 核动力工程, 2021, 42(2): 193 - 196. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.02.0193.
HUANG Zongren, WANG Mingli, LI Feng. Experimental research and design of reactor coolant system flow measurement[J]. Nuclear Power and Engineering, 2021, 42(2): 193 - 196. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.02.0193.
- 8 朱磊. 弯管流量计水流特性的数值模拟及流量系数的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
ZHU Lei. Numerical simulation of water flow characteristics and experimental study on flow coefficient of elbow flowmeter[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- 9 廖明燕, 罗万象, 杜鹃, 等. 弯管流量计流量系数的研究[J]. 自动化仪表, 1999, 20(11): 5 - 8.
LIAO Mingyan, LUO Wanxiang, DU Juan, *et al.* Study on the coefficient of the bend pipe flowmete[J]. Automation Instrumentation, 1999, 20(11): 5 - 8.
- 10 李郁侠, 廖伟丽, 田嘉宁. 弯管流量与压差的回归分析及流量系数计算[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(4): 373 - 376. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4710.1998.04.009.
LI Yuxia, LIAO Weili, TIAN Jianing. Regression analysis concerning discharge and pressure difference of elbow and calculation of discharge coefficient[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1998, 14(4): 373 - 376. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4710.1998.04.009.
- 11 白宇轩, 肖明. M310型核电站反应堆冷却剂惰走试验及数据处理方法[J]. 科技与创新, 2017(18): 27 - 29. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2017.18.027.
BAI Yuxuan, XIAO Ming. Idling test and data processing method of reactor coolant in M310 nuclear power plant [J]. Science and Technology & Innovation, 2017(18): 27 - 29. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2017.18.027.
- 12 全卫国, 朱赓宏, 刘震, 等. 基于静压差法的流量测量方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 213 - 218. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.32.031.
TONG Weiguo, ZHU Genghong, LIU Zhen, *et al.* Flow measurement method based on static pressure difference method[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(32): 213 - 218. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.32.031.
- 13 尤兵, 刘仁朋, 李晓振. 核电站一回路冷却剂流量变送器校准方案研究[J]. 自动化博览, 2015(12): 96 - 99. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0492.2015.12.043.
YOU Bing, LIU Renpeng, LI Xiaozhen. Analysis of the

- calibration of reactor coolant flow rate measurement[J]. Automation Panorama, 2015(12): 96 - 99. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0492.2015.12.043](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0492.2015.12.043).
- 14 朱建敏, 胡友森, 李昌莹, 等. 反应堆冷却剂流量测量不确定性分析研究[J]. 核科学与工程, 2023, **43**(1): 35 - 41. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2023.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2023.01.007). ZHU Jianmin, HU Yousen, LI Changying, *et al.* Study on the measurement uncertainty analysis of reactor coolant flowrate[J]. Nuclear Science and Engineering, 2023, **43**(1): 35 - 41. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2023.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2023.01.007).
- 15 陈永伟, 刘润峰, 周新星. 反应堆冷却剂系统及其环路流量修正方法: CN114639494A[P]. 2022-06-17. CHEN Yongwei, LIU Runfeng, ZHOU Xinxing. Reactor coolant system and loop flow correction method: CN114639494A[P]. 2022-06-17.