



## 反应堆冷却剂流量质量位异常分析与处理

刘丹会, 徐涛, 朱加良, 何正熙, 秦越, 李卓, 石亚东

### Analysis and Treatment of Quality Bit Anomaly of Reactor Coolant Flow Rate

Liu Danhui, Xu Tao, Zhu Jiali, He Zhengxi, Qin Yue, Li Zhuoyue, and Shi Yadong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2024.03.0263>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 反应堆冷却剂系统流量测量试验研究与设计

Research and Design of Flow Measurement Tests of Reactor Coolant System

核动力工程. 2021, 42(2): 193–196

#### 反应堆冷却剂泵叶轮水力性能分析与优化设计

Numerical Analysis on the Characteristics of Steam Condensation in Presence of Air under Vertical Tube Bundle Conditions

核动力工程. 2019, 40(5): 41–45

#### 主泵卡转子工况的反应堆冷却剂系统瞬态水力载荷研究

Study on Transient Hydraulic Load of Reactor Coolant System under the Condition of Reactor Coolant Pump Rotor Seizure

核动力工程. 2024, 45(1): 230–236

#### 摇摆条件下小型反应堆堆芯入口流量分配特性数值分析

Numerical Analysis of Flow Distribution Characteristics at Core Inlet of Small Reactor under Rolling Condition

核动力工程. 2022, 43(5): 89–94

#### TXRIS007试验监督要求准则的流量判定

Flow Rate Research of TXRIS007 Supervision Requirement Criterion

核动力工程. 2020, 41(6): 155–161

#### 影响螺纹套管与导向管胀接质量关键因素的分析与优化

Analysis and Optimization of Key Factors Affecting the Expansion Quality of Threaded Sleeve and Guide Pipe

核动力工程. 2024, 45(1): 123–129



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2024)03-0263-05; DOI:10.13832/j.jnpe.2024.03.0263

# 反应堆冷却剂流量质量位异常分析与处理

刘丹会, 徐涛, 朱加良, 何正熙, 秦越, 李卓玥, 石亚东

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

**摘要:** 针对海南昌江核电 1、2 号机组调试期间发生的单泵运行时环路上 3 个流量计全部超量程触发质量位异常现象, 从反应堆冷却剂流量信号测量原理、停堆保护逻辑和质量位设置原则入手, 对环路流量测量方法及冷停堆状态下流量信号实测数据进行了分析研究, 指出现设计流量信号物理量程无法包络多种运行工况下的相对流量值。根据分析, 需对流量计测量范围进行调整, 使其输出的 4~20 mA 电流换算后对应的工艺流量量程从 0~120%FP (FP 为满功率) 调整为 0~129%FP (环路流量信号显示为  $X\%$ FP, 表示当前流量为相对满功率运行时流量的  $X\%$ ), 并在调试期间将正常满功率运行时的流量计输出电流标定至 13.615 mA。

**关键词:** 环路流量; 弯管流量计; 质量位异常

**中图分类号:** TL353 **文献标志码:** A

## Analysis and Treatment of Quality Bit Anomaly of Reactor Coolant Flow Rate

Liu Danhui, Xu Tao, Zhu Jiali, He Zhengxi, Qin Yue, Li Zhuoyue, Shi Yadong

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** Aiming at the phenomenon of over-range triggered quality bit anomaly of all three loop flowmeters during single pump operation in the commissioning of Hainan 1&2 units, the measurement method of loop flow rate and the measured data of flow signal in cold shutdown state are analyzed and studied based on the measurement principle of reactor coolant flow signal, shutdown protection logic and quality bit setting principle. This paper points out that the physical range of flow signal currently designed cannot envelope the relative flow rate value under various conditions. According to the analysis, it is necessary to adjust the measurement range of the flow meter so that the corresponding process flow range after converting the output 4~20 mA current is adjusted from 0~120%FP (FP is full power) to 0~129%FP (the loop flow signal shows  $X\%$ FP, indicating that the current flow is  $X\%$  of the relative flow rate during full power operation), and the current output of the flowmeters during the normal full power operation should be calibrated to 13.615 mA.

**Key words:** Loop flow rate, Bend flowmeter, Quality bit anomaly

## 0 引言

反应堆冷却剂系统 (RCP) 是压水堆核电厂的能源供给中心, 其冷却剂流量大小直接反映冷却剂系统的带热能力, 属于核电厂安全保护至关重要的热工参数, 在正常、异常条件下需实时监测, 当冷却剂流量过低时触发紧急停堆或产生安

注信号以保护反应堆的安全。

海南昌江核电 1、2 号机组反应堆冷却剂系统共有 2 条环路, 每条环路设置 3 个流量计实时监测冷却剂流量。在大修调试期间, 为处理单台主泵缺陷, 停运一号主泵后, 另一环路流量计全部超量程, 最终引起预期结果外的反应堆停堆保

收稿日期: 2023-07-05; 修回日期: 2024-01-17

作者简介: 刘丹会 (1991—), 女, 硕士研究生, 现主要从事核电过程测量研究工作, E-mail: danh\_liu@163.com

护动作发生。

本文旨在分析反应堆停堆信号产生的原因，并基于分析结论设计合理的解决方案，以保证特殊工况下的调试工作开展，并确保核安全。

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

式中， $K$  为常数。

由式 (2) 可知，环路流量  $Q$  与弯管内外侧压差  $\Delta P$  的平方根呈线性关系，即可通过监测弯管内外侧压差信号来表征环路流量信号的变化。

### 1 一回路流量测量及相关安全功能

#### 1.1 仪表布置

海南昌江核电 1、2 号机组的 RCP 系统中一回路流量计位号为 RCP025/026/027MD，二回路流量计位号为 RCP040/041/042MD。主管道弯管段内侧设置 3 个取压口，位于同一管道截面，相邻两孔夹角 15°，主管道弯管段外侧设置 1 个取压口。

#### 1.3 环路流量相关的安全功能

环路流量信号属于重要的保护信号，在反应堆保护系统 (RPR) 和多样化保护系统 (DAS) 中参与产生反应堆紧急停堆信号。在 RPR 系统中，当一条环路 3 个流量计中有 2 个流量低于 88.8%FP (FP 为满功率) 时 (环路流量信号显示为  $X\%FP$ ，表示当前流量为相对满功率运行时流量的  $X\%$ )，触发该环路冷却剂流量低信号。在以下 2 种工况下，触发紧急停堆信号：

#### 1.2 弯管流量计测量原理

弯管内水流按照等速度矩定律分布，距离曲率中心越近，流速越大，压力越低；反之，流速越小，压力越高<sup>[1]</sup>。当流体流过弯头时，流体产生离心力，在弯管同一直径的内外两侧产生压差，该压差与流经弯管的流体流量存在着一定的关系<sup>[2]</sup>。

弯管弯头处流量与压差的关系可表示为<sup>[3]</sup>：

$$Q = k \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

式中， $Q$  为 RCP 系统环路流量； $k$  为与弯管曲率半径、弯管内半径和流量系数有关的常数； $\rho$  为冷却剂密度； $\Delta P$  为实际压差。

在机组正常运行期间，环路温度和压力保持不变，因此  $\rho$  保持不变，式 (1) 可写作：

(1) 在 P7 (10%FP 平台) 以上，任一环路出现冷却剂流量低。

(2) 任何功率水平下 2 条环路同时出现冷却剂流量低。

具体逻辑功能如图 1 所示。

RPR 系统中反应堆冷却剂低流量保护逻辑的退化规则为：

(1) 当 3 个流量计均正常时，符合逻辑为“三取二”，即 3 个流量计中任意 2 个流量低于 88.8%FP 时触发该环路流量低信号。

(2) 当 3 个流量计有 1 个触发质量位异常时，符合逻辑为“二取一”，即剩余 2 个流量计中任一流量低于 88.8%FP 时触发该环路流量低信号。

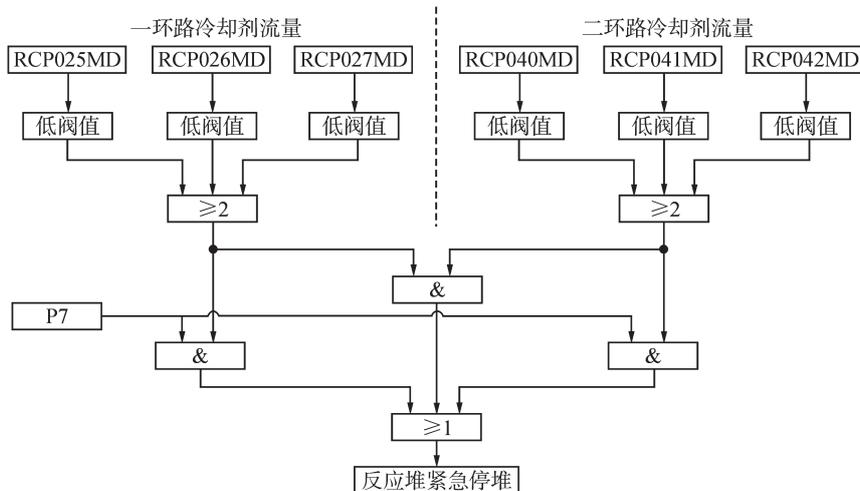


图 1 RPR 中环路流量逻辑功能简图

Fig. 1 Functional Diagram of Loop Flow Logic in RPR

(3) 当3个流量计有2个或以上触发质量位异常时,符合逻辑直接触发动作信号,即当出现2个及以上质量位异常信号时直接触发该环路流量低信号。

#### 1.4 质量位设置原则

质量位设置用于判断测量通道是否处于正常状态,通过超量程进行自动识别。当测量通道采集数值超出质量位上下限设定值范围时,输出质量位异常信号。

本项目采用弯管流量计对环路流量进行表征,仪表输出的电流信号范围4~20 mA经换算后与流量信号的工艺量程0~120%FP对应,RPR系统输入端采集接收的信号为电流信号,系统内部进行开方运算后转换为X%FP流量信号进行表征和显示,每一流量数值均有唯一的电流值与其对应。RRP系统中流量信号质量位上下限值按照电流信号量程的±5%取上下限偏差,即质量位下限对应的电流为3.2 mA,质量位上限对应的电流为20.8 mA。此时若测量通道采集电流数值小于3.2 mA或者大于20.8 mA,输出流量信号质量位异常信号。

## 2 环路流量低信号误触发故障分析

### 2.1 异常现象

海南昌江核电1号机组在105大修期间,为处理1号主泵电机上部轴承箱油位计裂纹缺陷,主控室正常停运1号主泵。冷停堆状态下,当2台主泵均运行时,两个环路流量信号显示均在110%FP左右,伴随1号主泵停运,二环路流量开始上升,观测到流量信号间歇性地超出量程上限120%FP(对应电流值为20 mA),结合日志记录到RPR系统3个保护通道的质量位综合报警间歇性的闪发,同期无其他反应堆保护仪表触发质量位异常,可判断为二环路的流量计间歇性发生超量程上限质量位异常信号。

此时一环路停运主泵,一环路流量计测量值均低于停堆设定值88.8%FP,“三取二”低流量符合逻辑触发。二环路由于流量计测量值间歇性闪发质量位异常,当3个流量计有2个或以上触发质量位异常时,符合逻辑直接触发低流量信号,从而触发P7(10%FP功率平台)以下2个环路低流量符合逻辑,产生紧急停堆命令,导致停堆

断路器异常打开,所有停堆棒组和控制棒组落入堆芯,控制棒棒位偏离技术规范要求正常冷停堆状态下应保持的位置。

### 2.2 异常发生原因分析

该紧急停堆信号误触发的原因来源于二环路流量质量位异常信号的误触发,质量位用于判断信号通道是否存在断线和短路等故障,当识别到测量信号极低或极高时触发质量位异常,从而实现隔离该测量通道的目的。在检修工况下,弯管流量计均处于正常运行状态,测量通道未发生故障,此时不应触发质量位异常,当前质量位上限值的设置不适用于该检修工况。

由于弯管流量计测量的物理量为弯管内外侧压差,电厂分布式控制系统(DCS)中用于保护控制和显示的流量数值为相对量,相对流量的量程0~120%FP对应弯管内外侧压差范围为0~120 kPa,对应流量计输出电流为4~20 mA。

调试时先对流量计进行标定。在正常运行环境条件下,无主泵运行时,读取此时各流量计的电流数据,并将其调整为4 mA,对应流量信号为0%FP;当两台主泵同时满功率运行时,读取此时各流量计的电流数据,将其调整为15.112 mA,对应流量信号为100%FP。因此,在正常运行时,DCS中显示的流量测量信号通过以下公式计算得出:

$$Q_{\text{相对}} = \frac{\sqrt{I-4}}{4} \times 120\%FP \quad (3)$$

式中, $Q_{\text{相对}}$ 为DCS中显示的流量信号值; $I$ 为DCS采集回的电流,即流量计输出电流。式(3)表征的DCS中显示值是当前弯管内外侧压差与正常运行条件下满功率运行时弯管内外侧压差的相对值的平方根,而不是实际的绝对流量值。当反应堆冷却剂密度不变时,环路流量测量值可以反映当前流量与满功率运行时流量的相对量。

在大修调试期间,反应堆处于冷停堆工况下,系统压力约为1.5 MPa,温度约为60℃,此时反应堆冷却剂密度大于电厂正常运行时的反应堆冷却剂密度。根据式(1)可知,在绝对流量值不变情况下,弯管流量计测得的弯管内外侧压差将大于正常运行时流量计测量得到的压差值。同时DCS中通过式(3)计算出的流量相对值也将大于其对应的绝对流量值。

调试记录情况可对上述分析进行证明,冷停堆状态下,当两台主泵均运行时,两个冷却剂环路流量显示均在 110%FP 左右。伴随一号主泵停运,二环路流量开始上升,稳定后二环路流量显示平均值约 117%FP,由于流量测量信号的波动,流量计测量信号间歇性地超出量程上限 120%FP (对应流量计输出电流为 20 mA),当超过 20.8 mA (123%FP) 时即触发超上限质量位异常信号。

由此可见,冷停堆状态下,由于环路流量计信号测量方法带来的上偏差,且相对流量量程对应的压差范围 0~120 kPa 未包络冷停堆状态下弯管内外侧压差值,触发了流量信号质量位上限异常。

### 3 解决方案

#### 3.1 调整流量信号质量位上限

从设计改进的易实现上考虑,可采取调整流量信号质量位上限设定值的方式对系统进行改造,使冷停堆状态下单泵运行时流量计输出的电流值包络在质量位上限值以内即可。

依据冷停堆状态下的试验结果,两台泵均运行时的流量测量信号为 110%FP,对应流量计输出电流值为 17.444 mA,由式(2)可知:

$$K_{\text{冷}} \approx \sqrt{15.112/17.444} \times K_{\text{正常}} \approx 0.931 K_{\text{正常}} \quad (4)$$

式中,  $K_{\text{冷}}$  为冷停堆状态下与弯管结构有关的常数;  $K_{\text{正常}}$  为正常运行工况下与弯管结构有关的常数。冷停堆状态下同样考虑单泵运行和信号波动情况,冷停堆状态下流量信号上限对应的电流需扩大至 22.46 mA。

海南昌江核电 1、2 号机组中测量环路流量信号所用的仪表为差压变送器,供货商为罗斯蒙特,对流量计进行压力试验,在流量计正、负侧加载不同的压力值,测量仪表输出的电流变化,得到流量计能够正常输出的电流区间为 2.96~30 mA,说明目前使用的流量计测量范围可包络冷停堆状态下弯管内外侧的压差值,可用于该工况下的流量信号测量。此时,若流量计输出电流在 20.8~22.46 mA 区间内时,仪表未发生故障,但由于超过流量信号质量位上限值 20.8 mA,将误触发流量信号质量位异常信号。因此需对环路流量信号质量位上限值进行调整。

质量位上限按流量信号上限对应电流+5%电流量程进行取值,为 23.4 mA。

流量计输出的电流信号经 DCS 平台模拟量输入(AI)采集后转化为数字量再进行下一步逻辑运算及处理。质量位判断需在 DCS 中完成,当采集数值落在质量位上下限值之间时,输出质量位正常信号;当采集数值落在质量位上下限值以外时,输出质量位异常信号。

根据海南昌江核电 1、2 号机组 DCS 平台采集通道特性,0~21.2 mA 范围内的电流值能真实转化为对应的 DCS 平台数字量,超出此范围,无法对应到真实的电流值,且此时 DCS 的采集返回值为极大值。换言之,DCS 平台仅能正确采集 0~21.2 mA 的电流信号,超过 21.2 mA 的信号,必定产生超量程上限的质量位异常信号(除非不设置质量位上限值)。

此时,若将流量信号质量位上限值调整为 23.4 mA,DCS 将不能正确采集 21.2~23.4 mA 范围内的流量信号;若将流量信号质量位上限值调整为 21.2 mA,又可能出现流量信号质量位异常误触发,因此该方案存在缺陷,无法满足多种工况下流量信号的测量需求。

#### 3.2 调整流量信号物理量程

冷停堆状态下流量计输出电流上限根据估算约为 22.46 mA,通过式(3)换算为相对正常运行工况下满功率运行时流量的相对值,约为 129%FP。将流量信号的相对流量值量程调整为 0~129%FP,使其对应的流量计电流输出为 4~20 mA,此时 100%FP 对应的流量计电流输出应为 13.615 mA,即在正常运行环境下,当两台主泵同时运行时,读取各流量计的电流数据,需将其调整为 13.615 mA,此时对于正常运行环境或者检修等特殊工况,DCS 中显示的流量信号由式(3)变更为式(5)进行计算:

$$Q_{\text{相对}} = \frac{\sqrt{I-4}}{4} \times 129\%FP \quad (5)$$

此时不同工况下流量计的输出电流均包络在 4~20 mA 中,满足 DCS 采集通道特性,同时也包络在质量位上下限值(3.2 mA, 20.8 mA)之间,不会误触发质量位异常信号。

### 4 结论

本文针对海南昌江核电 1、2 号机组出现的环

路流量计超量程触发反应堆停堆保护动作的情况，从测量原理、保护逻辑和质量位设置角度进行分析，得到如下结论：

(1) 反应堆冷却剂流量信号在冷停堆状态下偏环运行时出现质量位异常是由流量信号采用正常运行环境下满功率运行时环路流量的相对值进行表征引起的。当电厂处于冷停堆状态时，相同的环路流量下所对应的弯管内外侧压差存在较大偏差，因为冷停堆状态下冷却剂密度大于正常运行环境下冷却剂密度，所以此时 DCS 中测量得到的相对流量信号大于其所表征的实际流量值。

(2) 通过对不同解决方案进行分析可知，采取调整流量信号质量位上限的方式无法满足 DCS 采集通道的特性需求，若流量计输出电流超过 21.2 mA 时，必产生质量位异常报警。

(3) 通过调整流量信号物理量程为 0~129%FP，并在调试期间将正常满功率运行时的

流量计输出电流标定至 13.615 mA，可解决流量信号质量位误触发的问题，该量程能满足不同工况下流量信号的测量，同时对应的电流区间为 4~20 mA，符合 DCS 采集通道特性，可作为反应堆冷却剂环路流量信号质量位误触发问题的解决方案。

#### 参考文献：

- [1] 李郁侠. 弯曲管道内流量压差关系的研究 [J]. 西安理工大学学报, 1994, 10(1): 47-53.
- [2] 温良英, 张正荣, 白晨光, 等. 管道流量与弯管压差的关系及流量系数的实验研究 [J]. 设计与研究, 2003, 1: 1-2.
- [3] 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.

(责任编辑: 马 蓉)