

压水堆单一环路流量超差的故障机理分析

王 闯, 熊冬庆, 徐广震, 朱 杰, 李 娟

核与辐射安全中心, 北京, 100082

摘要: 国内三环路压水堆核电机组在功率运行时, 曾发生单一环路流量超差事件。通过对故障机理和故障模式的排查分析, 结合国内外同类机组的实际案例, 认为单一环路流量超差问题是由测量误差相关因素导致的, 可通过停堆大修后的试验和测量数据进行故障排查确认。

关键词: 流量超差; 故障树分析; 测量因素

中图分类号: TL334 文献标志码: A

0 背景

近年来, 国内三环路压水堆核电机组在换料大修后满功率工况下, 反应堆冷却剂系统(RCP)一回路流量测量时, 多次发现其中1个环路的最小计算流量低于热工设计流量标准, 不满足核电厂使用的安全相关系统与设备定期试验监督要求(以下简称“监督要求”)中的验收准则; 而其余2个环路的流量测量数据介于热工设计流量和机械设计流量之间, 满足验收准则要求, 反应堆总流量也满足准则要求。

1 试验方法

根据“监督要求”中给出的的试验验收准则, 每个环路测得流量应介于热工设计流量与机械设计流量之间, 堆芯总流量应介于3倍的热工设计流量与3倍的机械设计流量之间。

对冷却剂流量进行测量验证通常采用热平衡法。热平衡法通过测量二回路的热功率、一回路的冷、热端温度以及一回路的压力等参数, 利用热平衡原理, 计算出一回路流量; 通过对环路流量的计算误差进行分析, 得出环路流量的误差, 以最大的可能流量(计算值加误差值)与机械设计流量比较; 以最小的可能流量(计算值减误差值)与热工设计流量比较, 判断一回路流量是否满足准则要求^[1]。

2 事件原因分析

2.1 分析方法及过程

对于单一环路计算流量超差的事件, 按照以下几个步骤进行事件的根本原因分析:

(1) 针对单一环路计算流量超差的可能原因, 列举所有可能的故障模式, 建立故障分析树。

(2) 针对故障各种模式的特征和表现形式作进一步调查和分析; 根据各种证据, 对所有故障模式逐一进行分析、计算、论证和排除。

(3) 结合国内外同类案例进行综合分析, 找出最可能的故障原因及影响因素。

(4) 针对根本原因及相关影响因素, 制定相应的纠正措施。

2.2 故障树分析

通过对试验方法及流程的分析, 可以判断导致单一环路流量测量超差的主要原因来自测量误差和系统影响两方面的因素。其中测量因素包括: 试验仪表系统(KME)热功率测量结果的准确性和一回路温度探头的准确性; 系统因素包括: 主泵特性、管道阻力以及蒸汽发生器(SG)传热效果^[2]。

针对 RCP 单一环路流量超差问题, 按照潜在的测量误差因素和系统影响因素, 对可能导致超差的故障模式进行分析, 给出 M310 机组可能的故障模式及分析(表 1 和表 2)。数据和计算结果源自 M310 机组的运行经验。

3 核电厂反应堆单一环路流量超差及其处理实例

3.1 岭澳核电站 2 号机组

2010 年 1 月 20 日, 岭澳核电站 2 号机组在进行 L207 大修后一回路流量测量试验时, 发现某一环路流量计算数据为 23455.5 m³/h; 经过误差

分析后得出的最小计算流量为 23152.0 m³/h, 小于 23372 m³/h 的热工流量标准, 不满足岭澳核电站安全相关系统和设备定期试验监督要求的试验准则, 其他 2 个环路的流量数据和反应堆总流量满足准则要求。

运行事件发生后, 电厂对故障机理进行定性分析。针对影响岭澳核电站 2 号机组一回路环路计算流量的因素进行检查。通过对故障模式的排查分析, 认为该运行事件的根本原因最可能是来

源于各种测量误差。基于该流量偏差真实存在展开安全分析。分析结果认为岭澳核电站 2 号机组第 8 循环反应堆运行状态满足最终安全分析报告第 15 章事故分析验收准则。

岭澳核电站 2 号机组第 8 循环运行期间, 增加了对 RCP 一环路流量的定期测量, 流量测量数据较为稳定。随后, 在 L208 大修期间, 根据故障模式的排查分析结果对 ARE 一环路孔板 (L2ARE101KD) 进行检查, 同时使用经过标定的新探头更换 RCP 一环路冷、热腿各 1 支探头作

表 1 测量故障因素

Table 1 Factors of Measurement Fault

因素		是否已执行以下工作	影响分析	影响	结论		
SG 热功率率测量	ARE 流量测量	孔板因素	尺寸测量	大修孔板检查测量	假定孔径增加 0.05 mm, RCP 流量降低 12 m ³ /h, 孔板其他数据若超过 ISO5167-2 规范, 对流量测量有一定影响, 可复查大修检查的数据记录是否符合 ISO5167-2 规范	影响较大	大修检查
			管道结垢	数据取自工程测量	假定结垢 0.1 mm, RCP 流量增加 11 m ³ /h	影响小	大修检查
			孔板结垢	大修孔板结垢检查	假定结垢 0.025 mm, RCP 流量降低 12 m ³ /h, 可复查大修检查的数据记录来判断结垢的可能性	影响小	如复查结果合格, 则可排除
			安装影响	大修检查后安装	有定位孔和凸台, 正反面不会装反, 存在互换可能, 但孔板有明显标识, 可能性小	影响有限	大修检查
	管道异物		孔板有异物, RCP 计算流量会增大	孔板有异物, RCP 计算流量增大	大修检查		
	流量变送器	大修及二次再检定	对 RCP 流量计算影响小, 影响增加 2 m ³ /h	影响小	结果合格则排除		
	ARE 温度及压力测量	温度变送器	大修及二次再检定	假设单环路比标准偏大 0.08, RCP 单环路流量计算影响增加 2 m ³ /h	可忽略	如检定合格, 则影响较小, 可排除	
		温度探头	大修及二次再检定	如检定结果合格, 则对 RCP 流量无影响			
		压力变送器	大修及二次再检定	如检定结果合格, 则对 RCP 流量无影响			
	APG 排污流量	环路不平衡	大修后检查和调整	APG 隔离后, RCP 流量测量计算结果如与未隔离相近, 则可以排除	可忽略	排除	
		流量测量	大修孔板是否检查	检查是否与历史数据相同, 假如偏小 5%, RCP 流量影响增加 12 m ³ /h	可忽略	排除	
	VVP 压力测量	压力变送器	大修检定	假定误差放大 5 倍 (压力降低 0.33 10 ³ Pa), RCP 单环路流量计算影响仅 4.8 m ³ /h, 影响小	可忽略	排除	
水蒸汽焓熵表		标准程序计算	核查计算过程	如无问题, 则无影响			
RCP 冷热端温度测量	温度探头校核	热停堆和满功率时进行交叉比较	假设偏差 0.28, 影响 RCP 流量 220 m ³ /h, 可检查历史数据	影响大	发生可能性小, 大修检查		
	测量温度仪器偏差	2 次标定	如结果合格, 则对 RCP 流量影响小于 1 m ³ /h	可忽略	—		
	冷热端温度波动因素	大量数据平均	大量数据平均可能产生 60 m ³ /h 测量变化	影响有限	—		
计算因素	各计算进行复核检查			如无问题, 可忽略	—		

注: ARE——给水流量控制系统; VVP——主蒸汽系统; APG——蒸发器排污系统

表 2 系统故障因素

Table 2 Factors of System Fault

因素	采取行动	影响分析	影响
主泵特性	检查大修工作	大修期间是否进行影响主泵水力特性的检修活动; 大修结束后的再鉴定、主泵惰走试验以及主泵运行参数是否正常	如都没有问题, 则可能性小
管道阻力	检查大修工作	如没有增加管道阻力的工作、没有堵管、涡流检查结果也正常的话, 则可能性小	可能性小
SG 传热管	SG 结垢	每次大修冲洗	如计算总体传热系数变化不大, 各环路冲洗残渣数量相当, 则影响不大
	SG 堵管	核查是否堵管	如无堵管, 则无影响

为温度参比。最终得出结论，由于一环路冷、热端探头存在漂移现象而导致运行事件的发生。

3.2 法国反应堆单一环路流量超差典型实例

法国电力公司(EDF)的电厂也出现过单环路流量低的问题,原因主要有2种,SG堵管和测量原因。具体是:

(1) Bugey 核电厂:由于SG有大量U形管堵管且不对称(>15%),导致一回路环路流量低和不平衡。

(2) Chinon 核电厂 B3 机组:在进行监测和保护试验、温度测量通道标定试验期间,试验结果显示,一回路流量与寿期初相比大幅下降。

检查测量孔板压差的仪表,发现对取自高压管线上游的用于试验的压力测量仪表与压力管线用于热平衡试验的测量仪表进行比较,前者比后者高约2.3 kPa,从试验测量仪表得到的压差远远高于从流量孔板测量的压差,主要原因为上游测量管线存在阻塞。

(3) Cruas 核电厂 2 号机组:在 Chinon 核电厂 B3 机组事件之后,Cruas 核电厂对 4 台机组之前的运行情况进行检查,在 2 号机组发现类似的现象,经过分析,可能造成反应堆在超过 100%满功率但不超过 101.7%满功率下运行。原因是:安装在流量孔板上的流量试验测量仪表发生漂移。

4 结束语

对近年来三环路压水堆RCP系统多次出现单环路流量超差的问题,从故障产生的机理和故障原因出发,对可能导致超差故障的各种模式进行分析论证,从理论角度对各种故障因素的可能性给出定量或定性的分析。本文的理论分析论证以现有的工作条件为基础,分析论证工作受到试验手段、检验手段等诸多条件的限制,无法进行具体的试验研究来支持理论计算,只能从故障机理的可能性和合理性方面进行分析说明。

通过对故障模式的排查分析并结合国外同类机组的经验,判断引起RCP单环路流量超差最可能的失效模式就是测量误差因素导致的,包括冷端温度探头和热功率测量2种故障模式,这2种故障模式可能单独成因,也可能在事件中共同作用,可通过停堆大修后的试验和测量数据进行故障排查和确认。

我国目前即将投入商业运行的压水堆核电厂越来越多,反应堆单一环路流量超差的事件发生频率增加,本文的分析可为发生类似事件的核电厂提供一种故障排查的方法。

参考文献:

- [1] 广东核电培训中心. 900 MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京:原子能出版社,2007.
- [2] 莫国钧,钱纪生. 调试和启动[M]. 北京:原子能出版社,2000.

Fault Mechanism Analysis of Single Loop Flow Deviation in PWR Nuclear Power Plants

Wang Chuang, Xiong Dongqing, Xu Guangzhen, Zhu Jie, Li Juan

Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing, 100082, China

Abstract: The 3rd Ring Rd PWR repeated some conditions such as single loop flow deviation in power operation, by the qualitative analysis of the possibility and rationality of fault mechanism, and combined with the similar foreign units experience feedback. The author concluded that the single loop flow deviation mostly is caused by the measurement factors, and nuclear power stations can carry out the fault analysis and confirmed by test and measurement data during the unit overhaul.

Key words: Flow deviation, Fault tree analysis, Measuring factors

作者简介:

王 闯(1982—),男,工程师。2008年毕业于华北电力大学热能工程专业,获硕士学位。现主要从事核安全审评工作。

熊冬庆(1983—),男,工程师。2008年毕业于华北电力大学热能工程专业,获硕士学位。现主要从事核安全审评工作。

徐广震(1982—),男,工程师。2008年毕业于华北电力大学热能工程专业,获硕士学位。现主要从事核安全审评工作。

(责任编辑:刘 君)