

核电厂调试问题设计分析及处理

张文锋, 段永强, 曾 畅

中国核动力研究设计院, 成都 610041

摘要: 核电厂调试是核电工程建设的重要阶段, 通过调试验证设计、设备制造、安装的正确性, 发现并处理问题, 保证核电机组按总体性能要求运行。就核电厂调试目的、调试文件管理、调试结果分析及处理进行阐述, 以辅助给水系统 (ASG) 为例介绍主要调试内容, 并利用 Flowmaster 系统设计分析仿真软件对除氧器流量超出设计基准案例进行分析, 解决调试过程中发现的问题。

关键词: 调试, 核蒸汽供应系统, ASG 除氧器, Flowmaster

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A

0 引 言

核电厂调试过程中, 准确、快速地分析和处理发现的问题是核电厂安全可靠及经济性运行的有力保证。

核电厂调试问题复杂, 有必要建立一套调试问题的处理机制, 并利用仿真软件及时准确地分析处理调试中可能或已经发生的各类问题。

从核电厂调试的目的出发, 介绍核岛调试中有关设计文件及其修改的控制, 以及调试过程中所发现问题的分析处理方法。以核蒸汽供应系统 (NSSS) 流体系统仿真软件平台为基础, 以辅助给水系统 (ASG) 的调试为例进行分析, 解决调试过程中的存在的问题。

1 调试目的

依据国家核安全局《核电厂调试程序》、HAF0304、核电厂设计文件、合同等文件的要求进行核电厂调试。其主要目的可概括为以下 5 个方面: 验证设备和系统的功能及性能是否符合设计要求, 确定系统和设备的初始特性以及为运行过程中的定期试验提供原始数据; 证明核电厂已满足安全分析报告中描述的设计要求; 证明核电厂的安全性能符合国家核安全局规定的民用核设施的安全要求; 证明核电厂总的性能满足合同规定的要求; 验证作为设计基准的各项规定和核实安全分析报告中所做的假定。调试还

应保证在设计和安全要求与实际性能之间有足够的裕度。

国家核安全局 2003 年发布的核安全导则《核电厂调试程序》对调试的要求主要包括: 重大修改后, 对这些修改和受修改影响部分的调试需要进行全面的试验, 以证明核动力厂满足初始设计或修改设计的要求; 热态性能试验期间, 运行人员应利用此阶段的机会使用和验证运行规程;

功率试验增加 90% 功率平台; 负责装料的人员应事先培训考核合格 (使用假燃料组件进行操作培训), 首次装料应由正式授权的工程师来监督初始临界; 规定必须保存调试阶段运行和维修的历史记录, 并最终把这些记录移交给营运单位;

特别强调反应堆保护系统的完整性; 验证所有有关系统的配置与设计文件一致; 乏燃料贮存及其内衬的完整性试验或检查, 安全壳设备试验; 对保证仪表和控制系统完整性的任何预防措施应进行试验, 增加反应堆容器水位、反应堆及一回路诊断系统、触发应急堆芯冷却系统和安全壳喷淋系统的仪表以及用于辅助控制室或辅助控制点停堆的控制装置和仪表的试验要求; 反应性功率系数或与通量特性相关的功率试验, 确认计算机的整体安全功能。

调试程序强化了文件的一致性、设备状态记录及反馈, 强化了人员培训及监督, 进一步细化了功率试验平台, 强化了安全系统及乏燃料储存

系统的整体完整性验证，从调试要求的发展总趋势看，其最终目的是更加注重安全事故的监测及安全系统的整体性、可用性。

2 调试文件及修改

调试文件包括系统设计手册和系统调试文件。

2.1 系统设计手册

系统设计手册是系统机械、电气和仪表等设计的基本文件，包括系统功能、基本设计原则和安全准则、设备描述及说明、控制（逻辑和模拟图）安全分析、维修及定期试验原则、流程图等章节。调试过程中对设计文件的修改包括：设计变更申请单；现场变更申请；现场变更通知书；设备介入通知；设计变更通知-系统设计手册（DEN-SDM）。

2.2 调试文件

调试文件包括调试大纲、系统安全准则、系统调试大纲、调试导则、标准调试程序、调试程序（TP），对试验程序的修改包括：设计变更通知-试验程序（DEN-TP）；试验澄清要求。

尽管在核电厂的设计、施工和调试过程中都遵循了有关程序，但在调试中仍可能出现意外的试验结果或发生意外事件，为及时反应，还设置了意外事件单（UES）进行快速处理。

3 试验结果的仿真分析及处理

在调试过程中和调试后，要迅速及时地对试验数据和结果进行处理和分析，填写试验报告，提出相应的澄清、设计变更、意外事件单，并提出相应的修改建议，必要时可采取临时的修改方案。针对不同的情况，一般采取3种处理方式：

试验结果满意，即接受此结果；结果不满意，原因不清楚，重新进行试验；结果不满意，原因明确，修改后重新进行试验。

针对调试过程中出现的各种问题，要具体问题具体分析，对提出的修改方案必须经过充分论证，并在修改后进行重新试验。

对于核电厂中大量的流体系统，通常选择Flowmaster流体系统仿真软件模拟系统的调试结果，对调试过程中出现的问题进行有效的分析。利用Flowmaster软件针对NSSS各流体系统建立的仿真平台，及时、准确地对调试过程中由于设备、阀门、孔板、布置变化等所引起的各种问题

进行稳态和瞬态的系统分析，并实时给出代表计算结果的图表。Flowmaster图形界面提供的建模环境可以建立各种流体管网的仿真模型，管网中包含各种管道（含软管）、泵、接头、弯头、阀、喷嘴、控制器、显示仪表、缸、风扇以及马达等元件，管网内的流体可以是各种流动介质，各元件基本输入数据（如长度、直径、转矩及转速、性能曲线、特性曲线、流阻系数等）的单位可以任意给定。采用Flowmaster交互式仿真功能可以在仿真计算时随时改变元件的某个参数，这些参数的改变对系统的影响会立刻显示出来，可以实时监视输出结果，改变系统参数。当结果不理想时，可以随时停止仿真。

4 ASG系统调试及设计分析实例

某在建项目1号机组冷态功能试验期间，在进行ASG除氧器调试（TP9ASG50）过程中出现了超流量问题，该问题能够充分地说明对调试问题处理及时、准确的重要性，同时也验证了NSSS系统Flowmaster仿真平台的有效性。

4.1 ASG系统主要试验内容

ASG系统试验包括：汽动泵向蒸汽发生器（SG）充水试验、一条给水管线断裂后的ASG供水试验、没有蒸汽加热情况下的除气器启动、除气器的功能试验、ASG系统调试程序、给水管线断裂报警试验、SG水压试验时的供水试验。

4.2 ASG除氧器流量超标

ASG除氧器调试时，需经历充水、循环除氧、生产3个阶段，3个阶段的切换通过三通阀9ASG160VD实现。常规岛除盐水送入除氧器，经循环除氧后送入辅助给水箱，系统设计流量为60 t/h。在由循环除氧阶段切换至生产阶段期间，在即将达到生产阶段时，除氧器流量超过系统报警值（70 t/h）会引起除氧器跳闸。

4.3 问题分析

按照系统的设计，三通阀9ASG160VD切换至生产方向100%全开时，该阀门上限位开关动作。但现场反馈该阀门的上限位动作后，其实际开度约在96%，将触发循环方向的隔离阀9ASG170VD关闭。即，上限位动作时，三通阀循环及生产方向均有流量通过，而由于阀门的机械动作特性，循环方向的流量需要有一定的延迟时间后才能完全关闭。

从厂家提供的阀门流量系数 (C_v) 曲线可以看出, 采购阀门的实际流通能力大于设计要求的流通能力。

4.4 仿真分析

采用流体计算软件 Flowmaster 建立 ASG 除氧器回路的系统仿真模型, 对除氧器从循环除氧至生产阶段的运行进行仿真分析。

仿真结果证实了实际采购阀门的流通能力大于设计值。从仿真结果还可发现, 按三通阀理论的系统设计要求进行 C_v 值计算时 (图 1), 在阀门开度大于 52% 后, 系统总流量将小于 70 t/h; 而当阀门 C_v 值按实际采购阀门曲线进行计算时 (图 2), 在 0~100% 开度时, 生产方向的流量均小于 60 t/h。在阀门开度大于 95% 后, 其总流量小于 70 t/h, 与调试结果一致。

图 2 的结果也表明, 在调试期间出现除氧器跳闸的瞬间, 循环方向隔离三通阀 9ASG170VD

尚未关闭, 循环方向和生产方向均存在流量。因此, 如果对控制除氧器跳闸的判断逻辑进行适当延时, 等待三通阀 9ASG170VD 在延时之内关闭, 则延迟时间结束后只剩下生产方向的流量, 系统不会触发超流量报警。

同时, 在从循环状态切换至生产状态的 10 min 之内, 其最大流量超过 90 t/h, 超过循环除氧泵的设计流量值 (60 t/h)。经泵厂家澄清, 该泵可以满足 10 min 之内流量超过 90 t/h 的要求。

4.5 解决方案

(1) 方案 1: 按照阀门设计 C_v 值重新采购并更换三通阀 9ASG160VD, 该方案可以很好地解决问题, 且由于总流量降低, 对除氧泵的性能影响较低, 但该方案因设备采购周期长, 对工期将会产生影响。

(2) 方案 2: 在三通阀 9ASG160VD 上限位开关触发后, 若循环方向的 9ASG170VD 关闭, 则只存在生产方向的流量, 这时将不会触发报警。因此, 考虑对超流量报警的判断逻辑增加适当延迟, 等待 9ASG170VD 在延迟时间内关闭。考虑到 9ASG170VD 气动蝶阀的机械特性, 初步拟定增加 10 s 延迟。

调试现场按方案 2 对超流量报警判断逻辑增加 10 s 延迟后, 没有发生除氧器跳闸的事件, 调试顺利通过。

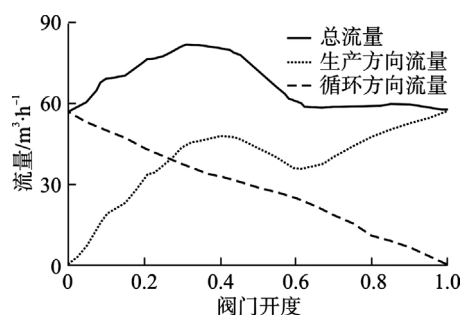


图 1 理论要求阀门 C_v 值计算流量曲线

Fig. 1 Flowrate Curve for Technical Request Valve C_v

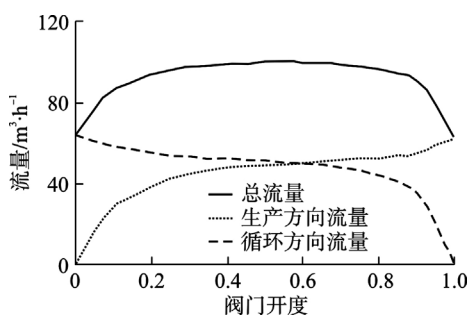


图 2 阀门实际 C_v 值计算流量曲线

Fig. 2 Flowrate Curve for Real Valve C_v

5 结束语

针对核电厂调试过程中的实际问题, 根据核电厂设计参数确定边界条件, 选择合适的计算程序对调试工况进行了模拟仿真。将实际调试工况的模拟分析同试验结果进行比对, 二者具有较好的一致性。对核电厂调试问题选择不同处理方案将对核电厂建造的影响程度差别很大, 通过成熟、完善的设计分析论证和流体系统动态仿真, 对调试结果进行及时、准确的分析和评估, 能快速处理解决调试中出现的问题, 确保核电工程进度和核安全。

Nuclear Power Commissioning Problem Treatment and Design Analysis

Zhang Wenfeng, Duan Yongqiang, Zeng Chang

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China

Abstract: During nuclear power plant construction, commissioning is a very important stage. Through commissioning it finds the problems of the whole system, verifies the correction of design, equipments, and the installation, so to guarantee plant work as the performance requirements. This article states the commissioning purples, commissioning program management, commissioning results analysis and treatment. Using the NSSS ASG commissioning as example, it states the main content of commissioning and utilizes the flowmaster software handling the problem of deaerator flowrate excessing base requirement. That deals with the problem quickly and fast.

Key words: Commissioning, NSSS, ASG deaerator, Flowmaster

作者简介：

张文锋（1968—），男，高级工程师。1991年毕业于华中理工大学。现从事核电项目总体设计和系统设计。

段永强（1982—），男，工程师。2005年毕业于哈尔滨工业大学化学工程学院。现从事核电系统、水化学设计。

曾畅（1985—），男，工程师。2009年毕业于华中科技大学能源与动力工程学院，获硕士学位。现从事核电系统设计。

（责任编辑：孙 凯）