

文章编号: 0258-0926(2015)S1-0089-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.S1.0089

# 一条给水管线破裂后的辅助给水系统 供水试验分析

邓安涛

中核核电运行管理有限公司, 浙江海盐, 314300

**摘要:** 本项试验是方家山核电机组调试大纲项目, 主要验证在一条给水管线破裂后辅助给水系统供水时, 从破口处的总流量不能超过  $250 \text{ m}^3/\text{h}$ , 向 2 台完好蒸汽发生器 (SG) 中的每一台供应的给水流量不能低于  $45 \text{ m}^3/\text{h}$ 。难点在于试验中不会有破口, 无法直接得到仪表测量流量数据。于是建立模型, 分析破口事故时辅助给水泵的运行工作点, 通过正常供水试验数据拟合模型未知参数, 最终根据工作点参数计算出破口与正常管线给水流量, 综合分析得出破口时的给水数据, 满足验收准则要求。

**关键词:** 辅助给水; 汽动泵; 给水管破裂

**中图分类号:** TL329 **文献标志码:** A

## Experimental Analysis of Water Supply of Auxiliary Feed Water System after Breakup of One Feed Water Line

Deng Antao

CNNP Nuclear Power Operations Management Co., Ltd., Haiyan, Zhejiang, 314300, China;

**Abstract:** This test is one of the projects specified in the commissioning program for Fangjiashan nuclear power units, which is mainly to verify that when the water is supplied by the auxiliary feed water system with one broken feedwater line, the total flow from the break shall not be more than  $250 \text{ m}^3/\text{h}$ , and the feed water flow to each of two intact steam generator(SG) shall not be below  $45 \text{ m}^3/\text{h}$ . The difficulty lies in the fact that there will be no break in the test, and no flow data can be measured directly. A model is established to analyze the operation point of the auxiliary feedwater pump during the breakup accident, and fit the unknown parameters in the model with the data from normal tests. And then we can calculate the water supply flows to the breakup and normal lines with all the operation point data. Analysis shows that the water supply data meets the requirements of the acceptance criteria.

**Key words:** Auxiliary feedwater, Turbine driven pump, Feed line breakup

### 0 引言

方家山 M310 核电机组蒸汽发生器 (SG) 二次侧供水系统主要有主给水系统 (APA)、启动给水系统 (APD)、给水流量调节系统 (ARE) 和辅助给水系统 (ASG)。简略流程如图 1 所示。

正常功率运行时由 APA 供水, 主给水电动泵从二回路除氧器吸水, 经高压给水加热器 (AHP)、给水流量调节站后分别送 3 台 SG。启停堆或维持热停堆阶段由 APD 供水, 供水回路与 APA 类

似, 也可以用 ASG 系统供水。ASG 属专设安全系统, APA 或 APD 供水时发生功能失效时投入运行, 维持 SG 水位, 同时导出堆芯热量。ASG 辅助给水泵从辅助水箱吸水, 经出口气动调节阀、限流孔板后分别送 3 台 SG。

电动给水泵共 3 台, 每台额定流量  $3620.4 \text{ m}^3/\text{h}$ , 正常运行时使用 2 台, 1 台备用。启停电动给水泵 1 台, 额定流量  $260 \text{ m}^3/\text{h}$ 。辅助给水泵 4 台 ( $4 \times 50\%$ ), 每台额定流量  $101 \text{ m}^3/\text{h}$ 。4 台辅助给水

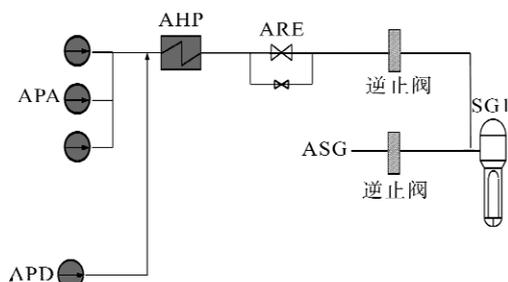


图1 蒸汽发生器二次侧供水简图

Fig. 1 Flow Chart of Water Supply to Secondary Side of Steam Generator

泵总流量约为蒸汽发生器额定给水流量的6%。

## 1 ASG 介绍

ASG的安全功能为导出堆芯热量。通过电动机或汽动泵将辅助水箱中7~50的冷水打入SG,接收一回路冷却剂传热后汽化为蒸汽经大气释放阀排放,或排入冷凝器,由此导出堆芯热量。

方家山核机组ASG主要设备有1只容量约1000 m<sup>3</sup>的辅助水箱(碳钢),2台电动辅助给水泵[6.6 kV交流应急配电母线A系列(LHA)和B系列(LHB)供电],2台汽动辅助给水泵以及供水管线上的出口流量调节阀、限流孔板,另外还有一套除氧水生产装置。

ASG属专设安全设施,在全厂失电工况下,系统在导出堆芯余热、防止堆芯融化方面起着至关重要的作用。方家山M310机组设置了2台电动辅助给水泵(2×50%)以满足应急供水需要,同时设置2台汽动辅助给水泵(2×50%)以保证全厂失电时的应急供水能力,避免共模事故。与此对应,秦山核电一厂300 MW级核机组ASG在2台电动辅助给水泵的基础上增设了1台柴油机驱动的电动给水泵。

汽动泵的汽轮机直接由SG的蒸汽驱动,不需要外接动力电源,只要蒸汽压力在0.76~8.6 MPa之间既可运行。汽动泵一边消耗SG的蒸汽作动力,一边将冷水注入SG,因此冷却堆芯的效果比电动泵更佳;由于不需要外接动力电源,即使丧失控制电源也能运行,可靠性更强。

正常满功率运行时,辅助水箱的贮水量不能少于790 m<sup>3</sup>,以保证发生事故停堆时ASG可以将堆芯冷却到余热排出系统投入运行为止,为最少安全水量。方家山核电厂的辅助水箱已经扩容至1000 m<sup>3</sup>,大大提高了机组的安全可靠性。

## 2 试验分析

### 2.1 一条给水管线破裂的辅助给水供水要求

试验主要分析在给水管线止回阀后,进SG入口前发生的破口,给水流量全部从破口流失。一条给水管线破裂后ASG的运行要求安全地将反应堆冷却至余热排出系统投入运行。必须保证:辅助水箱有足够的水容量(正常功率运行水位保持13.0 m以上,有效容积900 m<sup>3</sup>);从破口处损失的水量不能超过125 m<sup>3</sup>。

设计上考虑事故后操作员有30 min的反应时间(识别事故破口管线并隔离),因此破口总流量不能大于250 m<sup>3</sup>/h;同时堆芯需要有一定的冷却速率,故设计要求向2台完好SG中的每一台供应的给水流量不能低于45 m<sup>3</sup>/h。因此试验的安全准则要求:破口总流量不大于250 m<sup>3</sup>/h;提供给每台正常SG的流量不小于45 m<sup>3</sup>/h。

为满足此准则,在每条供水管线上设计了一限流孔板,限制破口流量同时要保证正常给水流量,调试期间需要验证破口工况运行时的给水流量是否满足安全准则要求。经过限流孔板的流量必须同时满足以上两个条件,孔径太大,破管时流失水装量太多,不能带走堆芯热量;孔径太小也不合适,不能满足堆芯冷却速率的要求。本试验的目的就是要验证系统、泵、孔板等设备的设计能够满足以上2条安全准则的要求。

### 2.2 建立模型

由于调试试验期间管线不会发生实际的破口,需要结合试验并建立模型分析计算出破口时的破口管线流量与正常管线供水流量。

分析知,决定管线上的流量因素有:泵出口压头、泵出口到SG入口处的位差、SG背压、管线阻力。泵出口压头由泵的运行性能和动力源决定;位差安装后不变;SG的背压随SG运行状态变化。管线阻力由调节阀开度、节流孔板、沿程阻力等因素决定,考虑此工况运行时调节阀全开,节流孔板起主要限流作用,管线阻力可近似为 $KQ^2$ ( $K$ 为管线阻力系数, $Q$ 为给水流量单位m<sup>3</sup>/h)。

$K$ 主要由限流孔板决定,近似常数。分析可得:

$$P_A - (P_{SGM} + h_1) = K_i Q_i^2 \quad (1)$$

式中, $P_A$ 为泵出口压头,MPa; $Q_i$ 为第*i*条管线流量,m<sup>3</sup>/h; $P_{SGM}$ 为SG二次侧压力,MPa; $h_1$

为泵出口到 SG 入口处的位差, m;  $K_i$  为管线阻力系数 (近似不变, 常数)

### 2.3 试验方法分析

$K_i$  为常数, 在一定 SG 背压  $P_{SGM}$  下启泵供水, 根据测得的  $P_A$ 、 $P_{SGM}$ 、 $Q_i$ , 已知的  $h_1$ , 代入式 (1), 即可求得各管线阻力系统  $K_i$ 。

在驱动端, 不同压力下的流量由泵的运行性能决定, 即有泵的运行特性曲线  $C_1$ 。在负荷端, SG 背压一定时, 流量由驱动压头决定, 即可以作 ( $P, Q$ ) 阻力曲线图  $C_2$ 。运行曲线  $C_1$  与阻力曲线  $C_2$  的交点即为工作点。因此, 只需要分析出发生破口时各蒸汽发生器的压力, 可以作出对应的阻力曲线, 再与运行曲线相交, 即可得破口时的泵出口压力  $P_A$  与总流量  $Q_A$  (图 2),  $P_A$  代入式 (1) 即可计算出各管线的流量  $Q_i$ 。因此, 试验的关键点在于得到事故下泵的运行曲线  $C_1$  与管线的阻力曲线  $C_2$ , 即可得到结果。

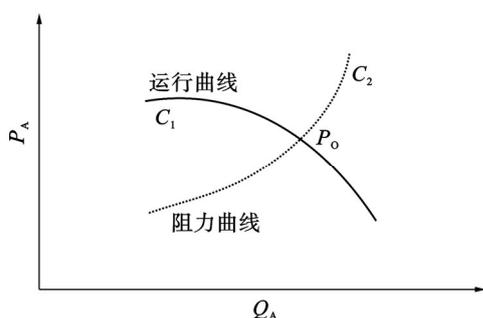


图 2 运行曲线与阻力曲线

Fig. 2 Operation Curve and Resistance Curve

由于汽动泵与电动泵的运行特性不同, 分为 2 台电动泵并列运行供水试验和 2 台汽动泵并列运行供水试验。

### 2.4 2 台电动泵并列试验

电动泵的运行特性由泵本身及供电电源决定。启动 2 台电动泵给 SG 充水, 通过调节阀调节供水流量, 得出几组 ( $P_A, Q_A$ ) 数据即可作出运行曲线图。

分析得知, 当给水管线发生破口后, 正常 SG 的背压最高时 (设计压力 8.6 MPa), 正常 SG 的进水流量会最小; 此时破口流量最大, 破口处的背压为 0 (最大破口, 双端断裂)。作阻力曲线 ( $P_{SG1}=0, P_{SG2}=P_{SG3}=8.6$  MPa)。两曲线相交得 ( $P_A, Q_A$ ), 代入式 (1), 计算得正常 SG 的辅助给水流量为:  $Q_{S1}=47.0$  m<sup>3</sup>/h (>45 m<sup>3</sup>/h);  $Q_{S2}=46.9$

m<sup>3</sup>/h (>45 m<sup>3</sup>/h)。

破管 SG 的流量:  $Q_{RC}=112.3$  m<sup>3</sup>/h (<250 m<sup>3</sup>/h)。

结果满足验收准则要求。

### 2.5 2 台汽动泵并列试验

2.5.1 破口事故时 2 汽动泵并列供水分析 汽动泵与电动泵不同, 在不同的蒸汽压力下, 运行特性不同。汽动泵汽轮机的进汽管线上有一压差调节阀 (136VV\236VV), 基本控制原理是根据汽动泵的出口压力与汽动泵汽轮机的进汽压力差  $P$ 、出口给水流量  $Q$  自动调节开度从而控制进汽量。在流量  $Q$  稳定时, 控制压差  $P$  基本不变 (阀门全开之前)。

分析知, 当 SG 压力最高时, 汽动泵出口压力相对最高; 此时发生破口, 破口流量最大。由于破口处分流最大, 总流量基本恒定, 此时供往正常 SG 的流量最小。即发生破口后 SG 压力最高时为辅助给水汽动泵供水最恶劣工况, 此时流量若满足准则要求, 其他工况也定满足。

2.5.2 汽动泵初步试验 与电动泵类似, 可作出  $P_{SG1}=0, P_{SG2}=P_{SG3}=8.6$  MPa 下供水管线的阻力曲线  $C_2$ 。由于 8.6 MPa 为 SG 的设计压力, 实际试验中无法作出供汽压力 8.6 MPa 下的两泵并列运行供水特性曲线, 考虑用近似替代曲线。

参考电厂的方法是在 SG 压力 7.5 ~ 5.0 MPa 之间选取几个压力平台, 启动 2 台泵并列供水运行, 得几组 ( $P_A, Q_A$ ) 点作运行曲线, 近似替代 8.6 MPa 下的泵运行曲线。此做法的可行性是考虑到了汽动泵的压差调节机构的稳压差性能, 即正常运行时, 在不同的压力平台下, 汽动泵供水能力差别不大。分析认为: 蒸汽压力在 5.0 MPa 以上, 是因为低于 5.0 MPa 以下压差调节阀已近全开, 无法调节压差。

方家山核电厂 1# 机组试验时先采用了上述方法, 在 SG 压力分别为 7.0、6.7、6.5、6.0、5.0 MPa 下试验作运行曲线, 最后结果得出  $Q_{S1}=38.1$  m<sup>3</sup>/h,  $Q_{S2}=38.3$  m<sup>3</sup>/h (<45 m<sup>3</sup>/h), 达不到安全准则要求。

2.5.3 汽动泵初步试验结果分析 当汽轮机进汽压力在 7.5 ~ 5.0 MPa, 2 台汽动泵正常供水运行时, 在压差调节阀的作用下汽动泵的出口压力与汽动泵汽轮机的进汽压力差  $P$  在 3.8 MPa 左

右, 总流量 195 m<sup>3</sup>/h 左右 (试验数据), 说明蒸汽压力变化时汽动泵的供水能力稳定。

仔细分析, 当发生一条给水管线破口时, 泵出口流量大增, 出口压力降低, 压差调节阀会自动开大以维持泵出口压力 (供汽的 SG 压力不变) 直至全开。由于破口时流量瞬时大增, 压差调节阀会全开, 压差  $P$  变小。此后压差调节阀不能稳住压差, 蒸汽压力越高, 泵出口压力越大。因此, 用  $P_{SG}$  在 7.5 ~ 5.0 MPa 的运行曲线与  $P_{SG}=8.6$  MPa 的阻力曲线交点  $P_0(P_{A0}, Q_{A0})$  与实际  $P_{SG}=8.6$  MPa 运行曲线与阻力曲线交点  $P_1(P_{A1}, Q_{A1})$  相比,  $P_{A0}$  偏小, 所得的  $Q_S$  偏小 (图 3), 不能就此判定流量不足或孔板孔径偏小。由于误差较大, 不能用 7.5 ~ 5.0 MPa 的曲线替代 8.6 MPa 压力下的运行曲线。

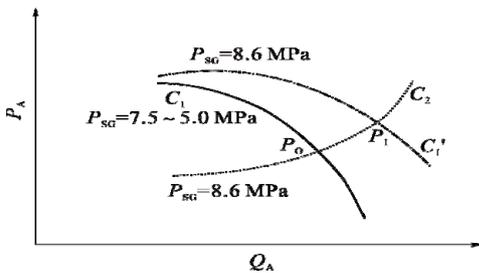


图 3  $P_{SG}=7.5\sim 5.0$  MPa 运行曲线与  $P_{SG}=8.6$  MPa 运行曲线对比分析

Fig. 3 Comparative Analysis of Operation Curve Based on Steam Pressure from 7.5 to 5.0 MPa and Curve under 8.6 MPa Steam Pressure

#### 2.5.4 SG 压力 $P_{SG}=7.5$ MPa 下汽动泵试验分析

考虑改进措施, 在  $P_{SG}=7.5$  MPa 下试验得两汽动泵的运行曲线以代替  $P_{SG}=8.6$  MPa 的泵运行曲线, 结果得  $Q_{S1}=41.7$  m<sup>3</sup>/h,  $Q_{S2}=41.9$  m<sup>3</sup>/h, 仍小于 45 m<sup>3</sup>/h, 不能判定结果满足要求。但是与 2.5.2 节结果对比, 正常 SG 的给水流量增大, 进一步验证了 2.5.3 节分析的正确性。即用  $P_{SG}=7.5$  MPa 的运行曲线与  $P_{SG}=8.6$  MPa 的阻力曲线交点  $P_2(P_{A2}, Q_{A2})$  跟实际  $P_{SG}=8.6$  MPa 运行曲线与阻力曲线交点  $P_1(P_{A1}, Q_{A1})$  相比,  $P_{A2}$  偏小 (图 4), 所得的  $Q_S$  仍偏保守, 不能判定结果是否满足准则要求。

#### 2.5.5 厂家提供运行曲线的试验分析

由于用  $P_{SG}$  为 7.5 ~ 5.0 MPa 的两泵运行曲线或  $P_{SG}=7.5$  MPa 的曲线去代替  $P_{SG}=8.6$  MPa 两泵

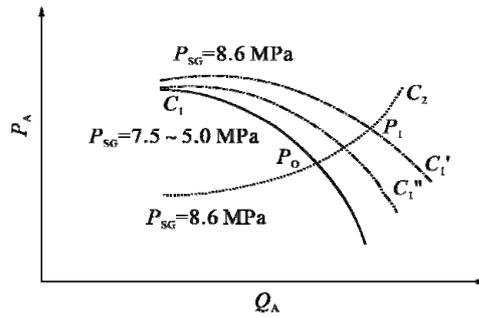


图 4 不同蒸汽压力下的运行曲线对比分析

Fig. 4 Comparative Analysis of Operation Curves under Different Steam Pressure

运行曲线的试验结果均过于保守, 试验精度不能满足要求, 需要改进试验方法, 明确 8.4 MPa 压力下两汽动泵并列运行的特性曲线。最后向克莱德厂家咨询, 结果厂家可以提供更高供汽压力下两泵的运行特性曲线。考虑到蒸汽从 SG 供到汽动泵汽轮机间管道约有 0.2 MPa 的压降, 厂家提供了两汽动泵在蒸汽压力  $P=8.4$  MPa 下的运行特性曲线。最后根据厂家提供的运行曲线与试验所得的阻力曲线交点计算得  $P_{A1}=11.2$  MPa,  $Q_R=117$  m<sup>3</sup>/h,  $Q_{S1}=52.1$  m<sup>3</sup>/h,  $Q_{S2}=52.4$  m<sup>3</sup>/h, 考虑电动泵  $Q_R=112.3$  m<sup>3</sup>/h,  $112.3+117=229.3 < 250$ , 同时各  $Q_S$  均大于 45 m<sup>3</sup>/h, 即可以判断试验结果满足验收准则要求, 孔板内径合格。

### 3 结论

一条给水管线破裂后的辅助给水供水试验分电动泵与汽动泵部分, 其中电动泵部分用模型分析试验后结果满意合格。汽动泵部分试验合格。但是由于汽动泵在 8.6 MPa 蒸汽压力下的运行曲线无法直接求得, 结合汽动泵的控制特点考虑用  $P_{SG}=7.5 \sim 5.0$  MPa 的运行曲线代替, 分析得知正常工况下不同蒸汽压力下汽动泵运行供水能力稳定, 但破口事故发生后压差调节阀会全开, 不能保持较稳定的压差调节能力, 而是蒸汽压力越高, 泵的出口压力越大, 故替代曲线的偏差较大。最终用厂家提供的运行曲线分析后结果合格, 进一步验证了分析的正确。通过本文的分析, 有助于运行人员了解辅助给水系统电动泵、汽动泵的运行特性, 事故时的分析。同时, 对同类电厂的调试工作可以借鉴这种对于破口事故的验证分析方法。

(责任编辑: 刘胜吾)