

# 除氧器暂态计算及分析

安 军, 彭诗文, 刘东亚, 廖加雪, 贾 荣

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川成都 610016)

**摘 要:**汽轮机突然甩负荷是造成给水泵汽蚀的重要原因。根据泵汽蚀的基本理论,建立了暂态工况下给水泵汽蚀的数学模型;基于 Matlab/Simulink 仿真平台,结合某  $2 \times 350$  MW 在建热电联产工程,对甩负荷工况下除氧水箱内给水焓  $h_d$  和给水泵进口给水焓  $h_s$  的动态变化过程进行了模拟,得到了 VWO、THA100%、THA75%、THA40% 4 种工况下泵汽蚀余量  $\Delta H$  的下降值;最后对防止给水泵汽蚀提出了建议。

**关键词:**暂态计算;汽蚀;除氧器;给水泵;热力发电厂

**中图分类号:**TK114

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2014)S2-067-04

为了提高发电机组运行的经济性、降低热耗、简化系统和节省投资,大容量机组普遍采用了滑压运行的方式。机组在滑压运行时,除氧器内蒸汽压力、给水箱内给水水温及给水泵入口水温均会随机组负荷的升降而变化。

当机组在稳定工况下运行时,滑压除氧器与定压除氧器没有区别;当机组在变工况下运行时,由于温度变化存在热惯性,除氧器内压力和水温的变化总是不同步,且水温的变化总是滞后于压力的变化。当机组负荷骤升时,除氧器内压力快速上升,而温度上升缓慢,水箱内饱和水变为未饱和水,根据亨利道尔顿定律,除氧器内原本析出的气体重新溶解于水中,出现“返氧”现象,从而导致除氧效果恶化。当机组负荷骤降时,除氧器内压力快速下降,水箱内的水由饱和状态变为过饱和状态,即发生“闪蒸”现象,除氧效果变好。

当给水泵入口水温对应的汽化压力大于给水泵入口最低压力时,就会发生汽蚀现象,从而影响给水泵的安全运行。给水泵最危险的工况发生在汽机满负荷下突然甩负荷后,为了确保给水泵在任何工况下都能安全运行,对除氧器的安装高度和暂态计算具有实际工程意义。

## 1 给水泵汽蚀理论

根据泵的基础理论<sup>[1]</sup>,给水泵是否发生汽蚀主

要由必须汽蚀余量  $NPSH_r$  和有效汽蚀余量  $NPSH_a$  两个参数决定。

### 1.1 必须汽蚀余量 $NPSH_r$

必须汽蚀余量  $NPSH_r$  数学表达式为

$$NPSH_r = \Delta h_r = \lambda_1 \frac{v_0^2}{2g} + \lambda_2 \frac{\omega_1^2}{2g}, \quad (1)$$

式中:  $v_0$  为叶轮进口速度, m/s;  $\omega_1$  为叶轮进口相对速度, m/s;  $\lambda_1$  为流动损失和速度变化引起的压降系数;  $\lambda_2$  为液体绕流叶片进口边引起的压降系数。

必须汽蚀余量  $NPSH_r$  反映了泵本身的汽蚀特性,它与泵的结构、转速及流量等参数有关,与外部吸入系统的布置无关。 $NPSH_r$  越小说明泵本身的抗汽蚀性能越好。

### 1.2 有效汽蚀余量 $NPSH_a$

有效汽蚀余量数学表达式为

$$NPSH_a = \Delta h_a = H_g + \left( \frac{p_d}{\rho_d g} - \frac{p_s}{\rho_s g} \right) - h_w, \quad (2)$$

式中:  $H_g$  为除氧器与给水泵中心高差, m;  $p_d$  为除氧器内饱和水对应的汽化压力, kPa;  $p_s$  为给水泵进口水温对应的汽化压力, kPa;  $\rho_d$  为除氧水箱内容水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_s$  为给水泵进口给水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $h_w$  为给水泵吸入管路的压力损失, m。

有效汽蚀余量  $NPSH_a$  反映了在泵的吸入口,单位质量液体所具有的超过汽化压力的富余压头,其大小与吸入系统的布置有关,而与给水泵本身特性

无关。在稳态工况下,通常忽略给水泵吸入口管道的散热损失,除氧器水箱内的水温与给水泵入口的水温相同,即  $\frac{p_d}{\rho_d g} = \frac{p_s}{\rho_s g}$ , 则泵的有效汽蚀余量  $NPSH_a = \Delta h_a = H_g - h_w$ 。

### 1.3 给水泵不发生汽蚀的条件

要保证给水泵能够正常运行不发生汽蚀现象,必须满足  $\Delta NPSH = NPSH_a - NPSH_r \geq 0$ 。

由式(1)、(2)整理可得:

$$H_g + \left( \frac{p_d}{\rho_d g} - \frac{p_s}{\rho_s g} \right) - h_w - \Delta h_r \geq 0. \quad (3)$$

令  $\Delta h = H_g - h_w - \Delta h_r$ ,  $\Delta h$  表示除氧器稳态工况下防止给水泵汽蚀的富裕压头。

令  $\Delta H = \frac{p_s}{\rho_s g} - \frac{p_d}{\rho_d g}$ ,  $\Delta H$  表示除氧器暂态工况下给水泵汽蚀余量的下降值。

在整个暂态过程中,  $H_g$ 、 $h_w$ 、 $\Delta h_r$ 、 $g$  可视为定值,而参数  $p_s$ 、 $p_d$ 、 $\rho_s$ 、 $\rho_d$  不断变化,因此,对参数  $p_s$ 、 $p_d$ 、 $\rho_s$ 、 $\rho_d$  的求解是整个暂态工况计算的关键。

## 2 暂态工况数学模型

从汽机甩负荷到最后的稳态过程中,凝结水、除氧水箱内容水、给水泵进口给水的压力和温度不断变化,要用精确的数学模型来描述整个动态过程非常困难,因此笔者在建模<sup>[2-3]</sup>过程中进行了简化处理。假设在暂态工况下,除氧水箱的水位保持正常水位不变,排汽及各种疏放水忽略不计,水、汽始终处于饱和状态。

### 2.1 除氧水箱饱和水焓 $h_d$ 的动态变化

假设汽机甩负荷后凝结水焓  $h_d$  分 3 个阶段<sup>[4]</sup>变化。第 1 阶段:甩负荷瞬间,从进入除氧器的凝结水焓值为  $h_{10}$ ,忽略管道散热等因素影响,从末级低压加热器出口至除氧器进口这段管线中的凝结水焓保持不变,只有当该部分凝结水全部进入除氧器后凝结水焓值才开始下降。在该过程中,除氧水箱内饱和水焓  $h_d$  表达式:当  $M_X < M_L$  时,

$$h_d = h_{10} + (h_0 - h_{10}) e^{-\frac{M_X}{M}}. \quad (4)$$

式(4)中,  $M_X$  为汽机甩负荷后进入除氧器的凝结水的累计流量;  $M_L$  为末级低压加热器出口至除氧器进口段管道容水量;  $M$  为除氧器内饱和水质量和除氧器金属当量质量之和;第 1 阶段的历经时间为  $\tau_1 = M_L / W_C$ ,其中  $W_C$  为凝结水流量。

第 2 阶段:在经过  $\tau_1$  时间点后,末级低压加热器出口至除氧器进口段管道容水  $M_L$  已全部进入除

氧器。此后,进入除氧器的凝结水焓  $h_d$  按速率  $\alpha$  线性下降,  $\alpha = \frac{h_{10} - h_c}{M_C - M_L}$ ,其中,  $h_c$  为热井水的焓,  $M_C$  为第 1 级低压加热器入口至除氧器入口凝结水量、各级低压加热器及管道的金属当量质量。在该过程中,除氧水箱内饱和水焓  $h_d$  表达式:当  $M_L \leq M_X \leq M_C$  时,

$$h_d = h_{10} + \alpha(M + M_L - M_X) - [\alpha M e^{\frac{M_L}{M}} - (h_0 - h_{10})] e^{-\frac{M_X}{M}}, \quad (5)$$

其中,第 2 阶段的历经时间为  $\tau_2 = M_C / W_C$ 。

第 3 阶段:在经过  $\tau_2$  时间点后,低压加热器及管道系统内原水换水完毕,此时的凝结水焓  $h_d$  与热井水焓  $h_c$  相等,当无其他操作状态下,凝结水焓  $h_d$  将保持到暂态过程结束。在该过程中,除氧水箱内饱和水焓  $h_d$  表达式:当  $M_X > M_C$  时,

$$h_d = h_c + [\alpha M (e^{\frac{M_C}{M}} - e^{\frac{M_L}{M}}) + h_0 - h_{10}] e^{-\frac{M_X}{M}}. \quad (6)$$

### 2.2 给水泵进口给水焓 $h_s$ 的动态变化

假设汽机甩负荷后给水焓  $h_s$  分 4 个阶段变化。第 1 阶段:汽机甩负荷瞬间,给水泵进口水温  $t_s$  跟除氧器内饱和水水温  $t_d$  一致,在吸入管段内的容水  $M_s$  全部打完之前,给水泵进口给水温度  $t_s$  保持不变,  $t_s$  对应的汽化压力  $P_s$  也保持不变,此时给水泵进口焓  $h_s = h_0$ 。

第 2 阶段:给水泵吸入管内的容水  $M_s$  已经全部打完,除氧水箱容水开始进入给水泵,给水泵进口焓  $h_s$  开始逐渐减小,在该过程中,给水泵进口给水焓  $h_s$  的表达式:当  $M_s < M_X < M_L + M_s$  时,

$$h_s = h_{10} + (h_0 - h_{10}) e^{-\frac{M_X - M_s}{M}}. \quad (7)$$

第 3 阶段:由于先前未被低压加热器加热的凝结水开始进入除氧器,除氧水箱内容水的焓下降速率加快,从而导致给水泵进口焓  $h_s$  下降速率也加快。在该过程中,给水焓  $h_s$  的表达式:

$$\begin{aligned} & \text{当 } M_L + M_s \leq M_X \leq M_C + M_s \text{ 时,} \\ h_s &= h_{10} + \alpha[M + M_L - (M_X - M_s)] - [\alpha M e^{\frac{M_L}{M}} - (h_0 - h_{10})] e^{-\frac{M_X - M_s}{M}}. \end{aligned} \quad (8)$$

第 4 阶段:此时热井水开始进入除氧器,该阶段进入给水泵的给水焓  $h_s$  也会发生变化。在该过程中,给水焓  $h_s$  的表达式:当  $M_X > M_C + M_s$  时,

$$h_s = h_c + [\alpha M (e^{\frac{M_C}{M}} - e^{\frac{M_L}{M}}) + h_0 - h_{10}] \cdot e^{-\frac{M_X - M_s}{M}}. \quad (9)$$

### 2.3 给水泵富余压头 $\Delta H$ 的动态变化

根据假设条件,整个暂态过程中,除氧水箱内给

水和给水泵进水均处于饱和状态。查询焓熵表,由饱和水焓  $h_d$  可以得到除氧器内饱和水对应的汽化压力  $P_d$  和密度  $\rho_d$ ;同理,由给水焓  $h_s$  可以得到给水泵进口给水对应的气化压力  $P_s$  和密度  $\rho_s$ 。然后再根据  $\Delta H = \frac{p_s}{\rho_s g} - \frac{p_d}{\rho_d g}$  进行换算,得到暂态过程中给水泵富余压头  $\Delta H$  的动态变化值。

### 3 工程算例

#### 3.1 原始计算参数

某  $2 \times 350$  MW 在建热电联产工程,选用 CC350/228-24.2/1.3/0.4/566/566 型超临界中间再热抽汽直接空冷凝汽式汽轮机,除氧器型号为 GC-1163/GS-150。凝结水系统采用 1 个轴封加热器和 4 个低压加热器的形式,锅炉给水采用 3 台 50% 容量的电动给水泵组(含电机、前置泵、主泵和液力偶合器)。给水泵吸入管段管径  $\phi 426 \times 11$ , 低压给水全程管长约 25 m,前置泵入口中心标高 0.995 m,入口滤网阻力 0.02~0.03 MPa。除氧器安装在 19.0 m 层除氧加热器平台,其正常液位高度 22.6 m。

表 1 稳态工况下给水泵防汽蚀富裕压头  $\Delta h$

序号	参数名称	单位	VWO	100% THA	75% THA	40% THA
1	$T_s$	°C	199.8	194.9	181.8	157.6
2	$P_s$	MPa	1.548	1.396	1.045	0.581
3	$Q_s$	kg/s	161.6	143.7	104.4	55.9
4	$h_s$	kJ/kg	851.5	829.5	771.1	665.0
5	$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	864.9	870.5	884.9	909.6
6	$NPSH_r$	m	2.55	2.45	2.20	1.95
7	$h_w$	m	3.34	3.26	3.13	3.03
8	$h_g$	m	21.605	21.605	21.605	21.605
9	$\Delta h$	m	15.715	15.895	16.275	16.625

由表 1 可知,在 VWO、THA100%、THA75%、THA40% 4 种工况下稳定运行时,除氧器所具有的防汽蚀富裕压头  $\Delta h$  分别为 15.715、15.895、16.275、16.625 m,给水泵(前置泵)在这 4 种工况下稳定运行,不会发生汽蚀现象。

表 2 为汽机在 VWO、THA100%、THA75%、THA40% 4 种工况下,汽机甩负荷瞬间凝结水及给

水的热力参数<sup>[5]</sup>。

表 2 汽机甩负荷瞬间凝结水、给水系统参数

序号	参数名称	单位	VWO	THA 100%	THA 75%	THA 40%
1	$M_c$	kg	38 317	38 334	38 379	38 454
2	$M_L$	kg	13 592	13 645	13 776	14 003
3	$M_S$	kg	3 252	3 276	3 325	3 408
4	$M$	kg	139 689	140 536	142 697	146 392
5	$h_0$	kJ/kg	851.5	829.5	771.1	665.0
6	$h_{10}$	kJ/kg	665.0	647.5	601.7	517.5
7	$h_c$	kJ/kg	217.0	217.0	217.0	217.0
8	$W_c$	kg/s	250.3	225.1	168.0	94.2

#### 3.2 焓 $h_d$ 、 $h_s$ 的动态响应

当汽机突然甩负荷,除氧器及低加的加热气源突然被切断,此时汽机停机而锅炉继续运行,温度降低的凝结水不断进入除氧器,从而导致除氧水箱内给水焓  $h_d$  及低压给水进口焓  $h_s$  随温度的下降而变化。

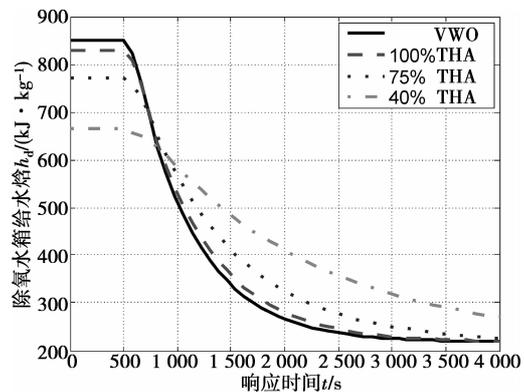


图 1 甩负荷下除氧水箱给水焓  $h_d$  的动态响应

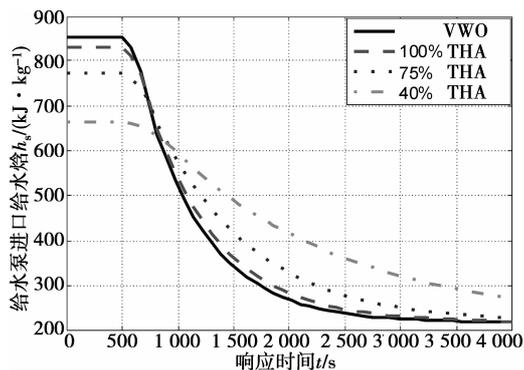


图 2 甩负荷下给水泵进口给水焓  $h_s$  的动态响应

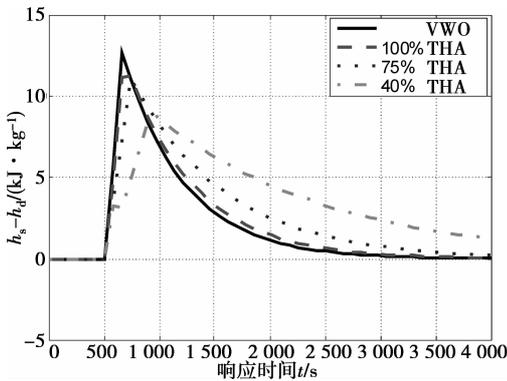


图 3 甩负荷下  $h_s-h_d$  的动态响应

上图 1、2、3 为汽机在 VWO、THA100%、THA75%、THA40% 4 种稳态工况下突然甩负荷后焓  $h_s$ 、 $h_d$  的动态响应情况。汽机在 500 s 时间点瞬间甩负荷,从图 1、2 可以看出,随着低加加热气源的切除,温度不断降低的凝结水开始进入除氧器,导致除氧器水箱内容水的焓  $h_d$  逐渐减小,由于焓  $h_d$  的减小,导致给水泵进焓  $h_s$  在滞后一段时间后也不断减小。焓  $h_d$  在甩负荷后约 3 000 s 时间点与热井水焓  $h_c$  趋于一致。由于甩负荷瞬间,低压给水管道中仍有容水,只有当该部分容水全部打完后,给水泵进口焓  $h_s$  才开始逐渐减小。由于焓  $h_s$  的下降速度比焓  $h_d$  滞后,所以相同时间点焓  $h_s$  总是大于焓  $h_d$ 。

表 3 汽机甩负荷下给水泵汽蚀余量最大下降值  $\Delta H_{max}$

序号	参数名称	单位	VWO	THA 100%	THA 75%	THA 40%
1	$t$	S	660	680	740	940
2	$h_d$	kJ/kg	760	709	674	599
3	$h_s$	kJ/kg	772	721	685	608
4	$\rho_d$	kg/m <sup>3</sup>	887.9	899.7	907.8	924.1
5	$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	885.0	897.1	905.4	922.3
6	$\Delta H_{max}$	m	7.67	5.63	4.74	2.64

从上表 3 可以看出,在 VWO、THA100%、THA75%、THA40% 工况下,在甩负荷后 160、180、240、440 s 时,给水泵汽蚀余量下降值  $\Delta H$  达到最大, $\Delta H_{max}$  分别为 7.67、5.63、4.74、2.64 m。

### 3.3 给水泵汽蚀安全性判定

根据给水泵汽蚀基本理论,当  $\Delta h \geq \Delta H_{max}$  时,给水泵不会发生汽蚀现象。从表 4 可以看出,在本算列 VWO、THA100%、THA75%、THA40% 4 种工

况下,给水泵安全汽蚀余量分别为 8.045、10.265、11.535 和 13.985 m,因此,给水泵的运行是安全的。

表 4 给水泵汽蚀安全性判定

序号	参数名称	单位	VWO	THA 100%	THA 75%	THA 40%
1	$\Delta h$	m	15.715	15.895	16.275	16.625
2	$\Delta H_{max}$	m	7.67	5.63	4.74	2.64
3	$\Delta h - \Delta H_{max}$	m	8.045	10.265	11.535	13.985
4	安全性判定		安全	安全	安全	安全

## 4 结 论

1) 汽机在甩负荷工况下,给水泵入口给水汽化压力下降速度滞后于除氧器压力下降速度,这是造成暂态工况下给水泵发生汽蚀的重要原因,保持除氧水箱给水与给水泵进口给水水温特性变化一致,是解决给水泵发生汽蚀的重要措施。

2) 减小给水泵进口焓的滞后时间,可提高给水泵汽蚀安全性,因此,在满足布置的条件下尽可能缩短低压给水的管道长度、适当增大低压给水管道管径是缩短滞后时间的重要途径。

3) 笔者通过对暂态过程的计算和分析,为除氧器的低位布置和安全运行提供了数据参考。

### 参考文献:

[1] 叶涛. 热力发电厂[M]. 北京:中国电力出版社,2004.  
 [2] 吉红新,郝继胜. 超临界机组除氧器安装高度优化研究[J]. 江西电力职业技术学院学报,2010,23(4): 28-30.  
 [3] 石志奎. 除氧器暂态计算公式及方法的探讨[J]. 热机技术,2000(3).  
 [4] 徐伊生,译. 大型热力发电厂主给水泵进口管系的热力、水力设计法[J]. 热机技术,1992(3).  
 [5] 田丰,徐之昌,刘务波. 国产 300MW 机组除氧器暂态过程试验研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(2): 177-182.

(编辑 张 苹)