

ICS 27.100

F 23

备案号: 15330-2005

**DL**

# 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 932 — 2005

---

## 凝汽器与真空系统运行维护导则

Guide of operation and maintenance  
for the condenser and vacuum system of power plant

2005-02-14 发布

2005-06-01 实施

---

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

## 目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 总则	1
4 运行维护要求	1
5 运行监测与试验	3
6 冷端系统运行优化	7
7 真空系统故障及原因	8
8 检修与维护	11
附录 A (规范性附录) 不同材质凝汽器冷却管的水质要求	13
附录 B (资料性附录) 凝汽器运行特性监督曲线	14
附录 C (资料性附录) 凝汽器总体传热系数计算	15

## 前 言

目前,国内火力发电厂凝汽器及真空系统普遍存在真空低、严密性差等问题,严重影响了机组的经济运行,使机组出力不足,厂用电率上升,供电煤耗率增加。为规范凝汽器及真空系统运行维护和性能监督,提高凝汽器运行真空度,改善电厂热经济性能,特制定本标准。

标准中有关凝汽器性能试验方面的内容可参照 ASME PTC12.2—1998《表面式凝汽器性能试验规程》和 JB/T 3344—1993《凝汽器性能试验规程》中的有关条款。

本标准中的附录 A 是规范性附录。

本标准中的附录 B、附录 C 是资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电站汽轮机标准化委员会归口并解释。

本标准起草单位:西安热工研究院有限公司。

本标准主要起草人:于新颖、朱立彤、居文平。

## 凝汽器与真空系统运行维护导则

### 1 范围

本标准规定了火力发电厂表面式水冷凝汽器和真空系统运行维护的一般原则及要求。  
本标准适用于水冷凝汽式机组，空冷机组可参照使用。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修改版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB/T 5248 铜及铜合金无缝管涡流探伤方法
- GB/T 7735 钢管涡流探伤检验方法
- GB/T 12969.2 钛及钛合金管材涡流检验方法
- DL/T 561 火力发电厂水汽化学监督导则
- DL/T 581 凝汽器胶球清洗装置和循环水二次过滤装置
- DL/T 712 火力发电厂凝汽器管选材导则
- DL/T 957 火力发电厂凝汽器化学清洗及成膜导则
- JB/T 3344 凝汽器性能试验规程
- ASME PTC12.2—1998 表面式凝汽器性能试验规程

### 3 总则

- 3.1 制订本标准的目的是规范运行操作及检修维护，指导凝汽器性能诊断试验和冷端优化运行，使凝汽器和真空系统经常处于良好的工作状态。
- 3.2 本标准为通用性、原则性的技术规定，对凝汽器性能参数计算和真空严密性指标等作了明确的规定，对运行维护内容、经常性故障处理等提出了原则性建议。
- 3.3 电厂编制运行规程时，应附有下列技术资料：
  - a) 机组背压对热耗的影响曲线；
  - b) 机组背压对功率的影响曲线；
  - c) 凝汽器变工况特性曲线；
  - d) 循环水泵运行特性曲线；
  - e) 抽气设备性能与冷却水温度或者工作蒸汽参数的变化曲线。
- 3.4 设计、制造和安装单位要为实施本标准创造条件。

### 4 运行维护要求

#### 4.1 一般要求

- 4.1.1 真空系统严密性试验合格。
- 4.1.2 凝汽器清洁状态良好。
- 4.1.3 冷却水流量满足设计要求。
- 4.1.4 轴封蒸汽压力正常。

4.1.5 凝结水过冷度合格。

4.1.6 传热端差良好。

4.1.7 凝结水水质合格。

4.1.8 热井水位正常。

4.1.9 抽气设备工作正常。

4.1.10 水封系统运行正常。

4.1.11 仪表指示及连锁保护正常。

## 4.2 凝汽器

4.2.1 机组检修完成后，应对凝汽器及真空系统进行灌水检漏。

4.2.2 凝汽器本体上的所有焊缝严密无泄露。

4.2.3 凝汽器喉部与低压缸连接的补偿器严密无泄漏，橡胶带补偿器设有水封时，应定期检查水封是否完好。

4.2.4 与凝汽器本体相连的所有接管焊缝严密无泄漏。

4.2.5 凝汽器汽侧放水门严密无泄漏。

4.2.6 冷却管无穿孔泄漏。

4.2.7 冷却管与水管管板胀缝、焊缝严密无泄漏。

4.2.8 凝汽器水位计及水位变送器的连接处严密无泄露，保证水位控制和水位指示正常。

4.2.9 凝汽器水位开关动作可靠。

4.2.10 凝汽器水位应在正常工作范围之内。

4.2.11 真空连锁保护正常。

4.2.12 凝汽器水室及管板应采取合适的防腐措施。

4.2.13 冷却管流速及水质要求应满足 DL/T 561 和 DL/T 712 的有关规定，见附录 A。

4.2.14 机组停运超过 3 天时，应排除凝汽器水室中的冷却水和热井中的凝结水。

4.2.15 机组停运超过一个月时，应对凝汽器采取干燥保养措施。

## 4.3 循环冷却水和胶球清洗系统

4.3.1 循环水泵工作正常，流量和出口压力能满足机组各种工况的需求。

4.3.2 闭式冷却水系统冷却塔的冷却能力在设计工况不低于 95%。

4.3.3 循环水一次滤网及二次滤网的运行压差不大于规定值，且能保证水质要求。

4.3.4 水室要及时清洗、去除杂物，减少对冷却管的影响。

4.3.5 对具有虹吸作用的凝汽器水室，在水室最高点装设水室真空泵，水室真空泵根据进口阀前、后压差开启或者关闭，及时抽出水室中聚集的气体。

4.3.6 无虹吸作用的凝汽器水室启动时，水室应充分排气，运行中定期排气。

4.3.7 凝汽器正常运行时，循环水进口阀全开，必要时调整出口阀开度以满足系统运行要求。

4.3.8 胶球清洗装置能正常投入且有效工作，其胶球质量、投球量、清洗时间间隔和清洗持续时间以及收球率等技术指标应满足 DL/T 581 的规定。

4.3.9 胶球清洗装置收球率应不小于 90%。

4.3.10 对有条件的电厂，胶球清洗时间间隔和清洗持续时间应根据冷却管清洁系数确定。

4.3.11 对循环水水质应定期监督测量，必要时采取有效措施保证循环水水质。

4.3.12 凝汽器冷却管表面无明显结垢。

## 4.4 凝结水系统

4.4.1 凝结水泵工作正常。

4.4.2 凝结水泵入口滤网清洁，运行压差不超过设定值。

4.4.3 凝结水泵入口盘根无泄漏。

4.4.4 热井至凝结水泵入口段上的法兰、排气阀、疏水阀严密无泄漏。

#### 4.5 轴封蒸汽系统

4.5.1 轴封蒸汽系统设计合理，轴封供汽、回汽顺畅。

4.5.2 各轴封进汽调节阀动作正常。

4.5.3 根据运行工况及时调整轴封供汽参数，维持轴封系统微正压运行。

4.5.4 轴封加热器风机工作正常。

4.5.5 轴封加热器水位正常。

4.5.6 轴封加热器疏水 U 形管内水封高度合理。

#### 4.6 抽气系统

4.6.1 凝汽器真空破坏门严密无泄漏。

4.6.2 真空泵、抽气器工作正常。

4.6.3 真空泵的汽水分离箱水位正常。

4.6.4 调整冷却水流量，使抽气设备冷却水温度尽可能接近设计值。

4.6.5 射水抽气器进水压力正常。

4.6.6 射水抽气器工作水温度高于正常值时，应及时向抽气器水箱补充低温冷却水。

4.6.7 控制射水抽气器水箱水位，保证扩散管出口到水箱水面的标高差不小于 4m。

4.6.8 射汽抽气器工作蒸汽压力正常。如果降低，应将工作蒸汽进口门适当开大以恢复到额定值，或者将工作蒸汽切换至更高一压力级的汽源。

4.6.9 射汽抽气器疏水正常，不串流。

4.6.10 保持抽气器喷嘴前的滤网清洁。

4.6.11 检查多级抽气器中间冷却器的冷却水温度、冷却水流量和冷却面清洁系数正常。

#### 4.7 疏水排气系统

4.7.1 加热器运行水位正常。

4.7.2 加热器运行排气工作正常。

4.7.3 危急疏水调节阀工作正常，无泄漏。

4.7.4 进入凝汽器的汽轮机本体疏水、管道疏水正常运行时应关闭。

#### 4.8 低压缸系统

4.8.1 低压缸中分面平整无变形，严密无泄漏。

4.8.2 低压缸轴封间隙符合设计要求。

4.8.3 低压缸安全门严密无泄漏。

4.8.4 负压段加热器抽汽管上的焊缝、阀门和连接法兰严密无泄漏。

4.8.5 低压缸喷水减温系统工作正常。

### 5 运行监测与试验

#### 5.1 运行监测参数

运行中应对表 1 所列各项参数进行测量监督。

真空严密性指标不合格时，应及时进行运行中检漏，或者利用停机机会灌水检漏；凝汽器压力大于测量工况下设计值 15% 以上时，应进行凝汽器传热特性试验，试验测量项目至少应包括真空严密性、循环冷却水流量、热负荷、凝汽器清洁系数、传热系数等。

凝汽器运行监督可参见附录 B。

#### 5.2 真空系统严密性试验

5.2.1 停机时间超过 15 天时，机组投运后 3 天内应进行严密性试验。

5.2.2 机组正常运行时，每一个月应进行一次严密性试验。

表 1 运行监测参数

序号	测量项目	符号	单位	测点位置
1	凝汽器压力	$p_k$	kPa	第一排冷却管上 300mm~900mm 处
2	低压缸排汽温度	$t_e$	℃	汽轮机排汽口
3	冷却水进口温度	$t_{w1}$	℃	冷却水进水管
4	冷却水出口温度	$t_{w2}$	℃	冷却水出水管
5	凝结水温度	$t_c$	℃	热井出水管
6	抽气口温度	$t_q$	℃	凝汽器抽气管
7	冷却水进口压力	$p_1$	MPa	冷却水进水管
8	冷却水出口压力	$p_2$	MPa	冷却水出水管
9	抽气口压力	$p_q$	kPa	凝汽器抽气管
10	凝结水流量	$G_c$	t/h	凝结水出水管
11	凝结水含氧量	$O_2$	ppb	凝结水泵出口
12	热井水位	$L$	m	热井
13	真空泵工作液温度	$t_{ZY}$	℃	真空泵冷却器热端入口
14	真空泵冷却水温度	$t_{ZS}$	℃	真空泵冷却器冷端入口
15	射汽抽气器工作蒸汽压力	$p_{SQ}$	MPa	射汽抽气器蒸汽入口管
16	射汽抽气器冷却水温度	$t_{SQ}$	℃	射汽抽气器冷却水管
17	射汽抽气器冷却水流量	$G_{SQ}$	t/h	射汽抽气器冷却水管
18	射水抽气器工作压力	$p_{SS}$	MPa	射水抽气器工作水入口管
19	射水抽气器工作水温度	$t_{SS}$	℃	射水抽气器工作水入口管
20	射水抽气器工作水流量	$G_{SS}$	t/h	射水抽气器工作水入口管
21	凝结水电导度	$K_H$	$\mu S/cm$	凝结水泵出口
22	循环水泵电动机电流	$I$	A	循环水泵电动机

5.2.3 试验时，机组负荷应稳定在 80% 额定负荷以上。

5.2.4 关闭凝汽器抽气出口门，应停运抽气设备，30s 后开始记录，记录 8min，取其中后 5min 内的真空下降值计算每分钟的真空平均下降值。

5.2.5 真空系统严密性要求见表 2。

表 2 真空系统严密性要求

机组容量 MW	真空下降速度 kPa/min
<100	$\leq 0.40$
>100	$\leq 0.27$

5.2.6 漏入空气量计算。根据美国传热学会推荐公式由真空下降速度近似求出漏入的空气量，按式 (1) 计算：

$$G_a = 1.657V \left( \frac{\Delta p}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

式中:

$G_a$ ——漏入空气量, kg/h;

$V$ ——处于真空状态下的设备容积,  $m^3$ ;

$(\Delta p/\Delta t)$ ——真空下降速度, kPa/min。

### 5.3 凝汽器传热特性试验

5.3.1 通过试验掌握凝汽器运行状况, 明确提高凝汽器真空的途径。

5.3.2 机组大修前、后均应进行凝汽器传热特性试验。

5.3.3 机组运行过程中, 如果凝汽器性能明显下降, 应进行凝汽器传热特性试验。

5.3.4 要求试验期间凝汽器不补水, 系统为正常运行方式, 机组负荷稳定。

5.3.5 试验仪器仪表应满足 JB/T 3344 的有关规定。

5.3.6 试验测量项目见表 1。

5.3.7 试验项目。

5.3.7.1 冷却水流量。采用超声波流量计或其他装置测量冷却水流量。将当前测量值与制造厂提供的凝汽器变工况特性进行比较, 校验冷却水流量是否达到设计要求。

5.3.7.2 凝汽器热负荷。凝汽器热负荷可采用下列方法之一计算。

a) 正平衡算法。按式 (2) 计算:

$$Q = G_s (h_s - h_c) / 1000 + Q_a \quad (2)$$

式中:

$Q$ ——进入凝汽器的热负荷, MW;

$G_s$ ——进入凝汽器的当量蒸汽量, kg/s;

$h_s$ ——进入凝汽器的当量蒸汽焓, kJ/kg;

$h_c$ ——排出凝汽器的凝结水焓, kJ/kg;

$Q_a$ ——进入凝汽器的附加热负荷, MW。

b) 反平衡算法。按式 (3) 计算:

$$Q = G_w c_p (t_{w2} - t_{w1}) / 1000 \quad (3)$$

式中:

$Q$ ——进入凝汽器的热负荷, MW;

$G_w$ ——进入凝汽器的冷却水流量, kg/s;

$c_p$ ——冷却水比热容, kJ/(kg·°C);

$t_{w2}$ ——凝汽器出口冷却水温度, °C;

$t_{w1}$ ——凝汽器进口冷却水温度, °C。

5.3.7.3 冷却水温升。按式 (4) 计算:

$$\Delta t = t_{w2} - t_{w1} \quad (4)$$

式中:

$\Delta t$ ——冷却水温升, °C。

5.3.7.4 凝汽器水侧阻力。按式 (5) 计算:

$$\Delta p_w = p_1 - p_2 \quad (5)$$

式中:

$\Delta p_w$ ——凝汽器水侧阻力, kPa;

$p_1$ ——冷却水进口压力, kPa;



$p_2$ ——冷却水出口压力, kPa。

5.3.7.5 凝汽器汽侧阻力。按式(6)计算:

$$\Delta p_q = p_k - p_q \quad (6)$$

式中:

$\Delta p_q$ ——凝汽器汽侧阻力, kPa;

$p_k$ ——凝汽器压力, kPa;

$p_q$ ——凝汽器抽汽口压力, kPa。

5.3.7.6 传热端差。按式(7)计算:

$$\delta t = t_s - t_{w2} \quad (7)$$

式中:

$\delta t$ ——凝汽器传热端差, °C;

$t_s$ ——凝汽器压力下的饱和蒸汽温度, °C。

5.3.7.7 过冷度。按式(8)计算:

$$\Delta t_c = t_s - t_c \quad (8)$$

式中:

$\Delta t_c$ ——凝汽器过冷度, °C;

$t_c$ ——热井出口凝结水温度, °C。

5.3.7.8 总体传热系数。按式(9)计算:

$$K = \frac{1000Q}{A\Delta t_m} \quad (9)$$

$$\Delta t_m = \frac{t_{w2} - t_{w1}}{\ln \frac{t_s - t_{w1}}{t_s - t_{w2}}} \quad (10)$$

式中:

$K$ ——总体传热系数, kW/(m<sup>2</sup>·°C);

$A$ ——凝汽器传热面积, m<sup>2</sup>;

$\Delta t_m$ ——对数平均温差, °C。

5.3.7.9 冷却管清洁系数。按式(11)计算:

$$\beta_c = \frac{K}{K_0 \beta_i \beta_m} \quad (11)$$

式中:

$\beta_c$ ——冷却管清洁系数;

$K_0$ ——冷却管基本传热系数, kW/(m<sup>2</sup>·°C);

$\beta_i$ ——冷却水入口温度修正系数;

$\beta_m$ ——管材和管壁厚修正系数。

$K_0$ 、 $\beta_i$ 和 $\beta_m$ 的计算方法参见附录 C。

5.3.7.10 不同运行条件下凝汽器压力计算。对于某一给定的冷却水流速、冷却水温度和凝汽器清洁系数, 根据附录 C 计算该工况下的总体传热系数; 再根据凝汽器试验热负荷或者制造厂提供的汽轮机组热平衡参数计算热负荷, 并考虑机组运行状况予以修正。按式(12)计算凝汽器压力下的饱和温度:

$$t_s = t_{w1} + \frac{Q}{G_w c_p \left(1 - \frac{1}{e^x}\right)} \quad (12)$$

$$x = \frac{KA}{G_w c_p}$$

计算出  $t_s$  后可根据水蒸气表求凝汽器压力。

## 6 冷端系统运行优化

### 6.1 系统设备

冷端系统设备包括汽轮机低压缸、凝汽器、在真空状态下运行的低压加热器、循环水泵、冷却塔、抽气器、胶球清洗装置等。

### 6.2 优化目的

通过不同机组负荷、不同抽气器运行方式、不同冷却水温度和不同冷却水流量条件下的对比试验，确定机组出力增加与循环水泵、抽气器等设备耗功增加的差值最大时的凝汽器压力及运行方式。

### 6.3 优化方法

6.3.1 机组微增出力试验。在不同的机组负荷下，改变凝汽器压力，得出机组出力与背压的变化关系，见式 (13)：

$$\Delta P_1 = F_1(P_1, p_k) \quad (13)$$

式中：

$\Delta P_1$  —— 机组微增出力；

$P_1$  —— 机组负荷；

$p_k$  —— 排汽背压。

6.3.2 凝汽器变工况特性试验。在不同热负荷、不同冷却水温度和抽气器不同运行方式下，改变凝汽器冷却水流量，得出凝汽器压力与冷却水流量的变化关系，见式 (14)：

$$p_k = F_2(P_1, t_{w1}, G_a, G_w) \quad (14)$$

式中：

$G_a$  —— 抽气器不同运行方式下的抽空气量。

6.3.3 冷端设备耗功试验。在抽气器不同运行方式下，测量抽气器耗功；循环水泵分别在一机一泵、两机三泵和一机两泵、高速、低速以及叶片角度改变等方式下运行，测量冷却水流量与循环水泵耗功，得出设备耗功增量的关系式，见式 (15)：

$$\Delta P_p = F_3(G_a, G_w) \quad (15)$$

式中：

$\Delta P_p$  —— 冷端设备耗功增量。

### 6.4 凝汽器最佳背压计算

通过求解以凝汽器压力、冷却水温度和冷却水流量为变量的目标函数得出凝汽器最佳运行背压。在一定的机组负荷及冷却水温度条件下，机组功率增量与冷端设备耗功增量之差值为最大时的凝汽器压力即为机组最佳运行背压。

根据这一原则建立的目标函数为：

$$F(P_1, t_{w1}, G_a, G_w) = \Delta P_1 - \Delta P_p \quad (16)$$

根据数学原理知， $t_{w1}$  和  $G_a$  一定，当式 (17) 成立时，冷却水流量所对应的机组背压为凝汽器最佳背压，即：

$$\frac{\partial F(P_1, t_{w1}, G_w)}{\partial G_w} = 0 \quad (17)$$

即：

$$\frac{\partial \Delta P_1}{\partial G_w} = \frac{\partial \Delta P_p}{\partial G_w} \quad (18)$$

求解式 (18) 即可得到最佳背压  $p_k$ 。

在实际应用中, 可以采用迭代或者比较法得出最佳背压。

## 6.5 最佳运行方式确定

根据计算得出的最佳背压及相应的冷却水温度和冷却水流量, 确定在不同工况下抽气器和循环水泵等设备的最佳运行方式。

运行人员应根据不同工况下确定的最佳运行方式, 及时调整运行参数和系统设备, 保证机组运行始终维持在最佳状态。

## 7 真空系统故障及原因

### 7.1 真空系统泄漏

#### 7.1.1 现象:

- a) 真空系统严密性降低;
- b) 凝汽器端差上升。

#### 7.1.2 主要泄漏部位:

- a) 低压缸轴封;
- b) 低压缸水平中分面;
- c) 低压缸安全门;
- d) 真空破坏门及其管路;
- e) 凝汽器汽侧放水门;
- f) 轴封加热器水封;
- g) 低压缸与凝汽器喉部连接处;
- h) 汽动给水泵汽轮机轴封;
- i) 汽动给水泵汽轮机排汽蝶阀前、后法兰;
- j) 负压段抽汽管连接法兰;
- k) 低压加热器疏水管路;
- l) 抽气器至凝汽器管路;
- m) 凝结水泵盘根;
- n) 低压加热器疏水泵盘根;
- o) 热井放水阀门;
- p) 冷却管损伤或端口泄漏;
- q) 低压旁路隔离阀及法兰。

### 7.2 冷却水系统故障

#### 7.2.1 现象:

凝汽器冷却水温升增加。

#### 7.2.2 主要原因:

- a) 循环水泵故障;
- b) 循环水管路及阀门故障;
- c) 循环水系统调节失衡;
- d) 循环水泵组运行方式不合理;
- e) 循环水泵的可调导叶失调;
- f) 循环水泵流量未达到设计要求;
- g) 凝汽器水室顶部有空气聚集;
- h) 冷却水系统阻塞等;

i) 运行操作不当。

### 7.3 凝汽器水位升高

#### 7.3.1 现象：

凝结水过冷度增加。

#### 7.3.2 主要原因：

- a) 凝结水泵故障；
- b) 凝结水泵入口漏空气或者入口滤网堵塞；
- c) 凝汽器冷却管泄漏；
- d) 凝汽器补水管调门故障；
- e) 低压旁路减温水门误开；
- f) 凝结水系统阀门误关或者备用泵出口止回阀泄漏；
- g) 凝结水再循环门误开；
- h) 凝结水泵出口调节阀故障；
- i) 加热水器水侧泄漏；
- j) 水位计或者水位变送器工作不正常。

### 7.4 抽气设备工作失常

#### 7.4.1 现象：

凝汽器压力升高。

#### 7.4.2 主要原因：

- a) 抽气设备故障；
- b) 真空泵冷却水温度高；
- c) 真空泵的汽水分离箱水位低；
- d) 射水泵漏空气；
- e) 射水泵入口压力低；
- f) 射水泵工作水温高；
- g) 射水抽气器喷嘴堵塞。

### 7.5 轴封系统故障

#### 7.5.1 现象：

轴封压力异常。

#### 7.5.2 主要原因：

- a) 轴封供汽门误关；
- b) 轴封蒸汽母管压力降低；
- c) 备用蒸汽至联箱调整门失常；
- d) 轴封蒸汽压力调整门和温度调整门失常；
- e) 轴封蒸汽溢流调整门和调整门旁路误开；
- f) 轴封蒸汽带水；
- g) 轴封加热水器水侧旁路门误开，导致疏汽不畅。

### 7.6 热负荷增加

#### 7.6.1 现象：

冷却水温升高。

#### 7.6.2 主要原因：

- a) 机组通流部分效率降低，低压缸排汽量增加；
- b) 汽动给水泵组效率降低，给水泵汽轮机排汽量增加；

- c) 高、低压加热器危急疏水进入凝汽器;
- d) 与凝汽器汽侧相连的阀门 (包括低压旁路) 不严引起高品位蒸汽直接进入凝汽器。

## 7.7 循环冷却水进口温度高

### 7.7.1 现象:

冷却水进口温度高。

### 7.7.2 主要原因:

- a) 环境温度高, 相对湿度大;
- b) 冷却水流量不足;
- c) 填料老化、堵塞;
- d) 喷头损坏、配水不均匀;
- e) 除水器变形, 阻力增加;
- f) 自然风影响;
- g) 淋水填料不合格;
- h) 冷却塔淋水面积不足;
- i) 冷却塔结构设计不合理。

## 7.8 凝汽器清洁系数降低

### 7.8.1 现象:

- a) 凝汽器端差增加;
- b) 冷却水温升减小。

### 7.8.2 主要原因:

- a) 无胶球清洗装置, 或者胶球清洗装置运行不正常;
- b) 胶球质量不满足设计和使用要求;
- c) 冷却水品质不合格, 冷却管内表面结垢;
- d) 在蒸汽品质差的情况下长期运行, 使冷却管外表面形成硅酸盐垢;
- e) 凝汽器长期在低真空、高排汽温度工况下运行, 加速传热管内结垢。

## 7.9 凝结水过冷度大

### 7.9.1 现象:

凝结水出口温度低。

### 7.9.2 主要原因:

- a) 凝汽器水位高;
- b) 真空系统严密性降低;
- c) 冷却水流量大;
- d) 传热管束布置不合理。

## 7.10 凝结水含氧量大

### 7.10.1 现象:

凝结水含氧量超标。

### 7.10.2 主要原因:

- a) 凝结水过冷度增大;
- b) 热井水位以下的真空部分有空气漏入, 特别是凝结水泵的入口盘根处;
- c) 凝汽器传热管泄漏;
- d) 真空除氧系统除氧效果差;
- e) 真空严密性降低。

## 8 检修与维护

### 8.1 灌水检漏

#### 8.1.1 适用范围：

- 真空系统汽侧及水侧严密性检查；
- 在机组检修后或者必要时停机进行。

#### 8.1.2 注意事项及要求：

- 灌水前，应将所有与真空系统相连的管道隔离；
- 灌水前，应在凝汽器底部弹簧处加枕木垫实，确保灌水后凝汽器及其相关设备的安全；
- 灌水检漏时，凝汽器水室管板表面应干燥；
- 灌注用水宜采用除盐水，以热水为宜，水温控制在 45℃ 左右；
- 灌水水位应达到汽轮机低压转子汽封洼窝下 100mm 处；
- 水位至少应能维持 8h 不变后认为查漏结束。

### 8.2 运行中检漏

#### 8.2.1 适用范围：

- 机组真空严密性降低，或者凝结水水质恶化；
- 检漏范围包括凝汽器的汽侧和水侧；
- 在运行中进行检漏。

#### 8.2.2 注意事项及要求：

- 工作人员应熟悉系统及设备，正确提出检测对象；
- 检漏应对一切可疑部位进行排查；
- 各部位示踪气体释放量应相对均等；
- 仪器采样处环境应无外来因素干扰；
- 漏点按大漏点、中漏点、小漏点分类，堵漏处理也依次实施；
- 临时性堵漏可选用汽轮机密封胶等合适材料作为堵漏剂；
- 用户在检漏后对漏点的处理质量是提高严密性的关键。

### 8.3 高压水射流清洗

#### 8.3.1 适用范围：

清除冷却管内硬垢或者生物性污垢。

#### 8.3.2 注意事项及要求：

- 合理选择清洗喷嘴类型，考虑因素包括喷嘴小孔排数、每排小孔数量、小孔直径、小孔角度、射流速度等；
- 严格控制清洗水工作压力，一般情况下，清洗水工作压力应为 25MPa~40MPa，最大不超过管材屈服极限的 0.67 倍；
- 喷嘴移动速度不应大于 0.25m/s，且保持匀速；
- 每根冷却管往复清洗一次，且往复过程中应改变喷嘴相位；
- 注意安全，操作时人体应避免近距离接触射流水柱。

### 8.4 机械除垢

#### 8.4.1 适用范围：

- 弹性刮刀型除垢器清除硬垢；
- 橡胶子弹头清除生物性污垢；
- 金刚砂胶球清除硬垢。

#### 8.4.2 注意事项及要求：

- a) 采用弹性刮刀型除垢器清除较厚垢层时，需要先用使用过的除垢器除垢，然后正常除垢；
- b) 橡胶子弹头直径应大于冷却管内径，子弹头宜采用螺旋形；
- c) 金刚砂胶球直径应根据冷却管内径、硬垢厚度以及胶球输送介质压力等因素试验确定，一般湿态胶球直径应小于冷却管内径 1mm~2mm。

## 8.5 涡流探伤

### 8.5.1 适用范围：

材质为铜、铜合金、不锈钢或者钛的凝汽器冷却管在安装前和服役过程中的检查。

### 8.5.2 注意事项及要求：

- a) 激励频率的选择：
  - 不锈钢管：100 kHz~400 kHz。
  - 黄铜管：20 kHz~60 kHz。
  - 白铜管：60 kHz~100 kHz。
- b) 根据被检测管的材质和规格制作相应的探头和人工标准缺陷样管。
- c) 在探伤过程中，每隔 2h 应对仪器灵敏度进行校验。
- d) 在探伤过程中，如发现缺陷信号或可疑信号，应进行复检确认，并作好记录。
- e) 根据缺陷的大小、类型和现场实际情况确定该管材是否合格或是否可以继续使用。
- f) 涡流探伤允许端部有不大于 100mm 的不可检测区。
- g) 根据机组运行寿命的长短，针对更换、监督运行两种处理方案采用不同的判废标准。
- h) 涡流探伤应参照相关标准，如 GB/T 5248、GB/T 7735 和 GB/T 12969.2。

## 8.6 凝汽器酸洗

### 8.6.1 适用范围：

- a) 在役期间酸洗；
- b) 凝汽器运行清洁系数小于 0.6，而且抽样检查确认清洁系数降低主要起因于冷却管内的盐类水垢。

### 8.6.2 注意事项及要求：

- a) 酸洗前要进行试验以确定合适的清洗条件，包括温度、流速、清洗剂的浓度以及清洗步骤等。
- b) 酸洗前凝汽器汽侧应上满水并用氨水将水的 pH 值调节适当，防止酸洗过程中漏酸进入汽侧发生腐蚀。
- c) 严格控制冷却管的腐蚀速率。
- d) 为防止酸液对冷却管的腐蚀，必须在酸液中加入缓蚀剂。
- e) 缓蚀剂应在酸洗系统内搅拌均匀后再加酸清洗。
- f) 清洗不锈钢管时，不应选择盐酸清洗剂。
- g) 凝结水的 pH 值大幅下降时，应及时采取措施。
- h) 用盐酸酸洗完放出酸液后，用碱性溶液循环以除去余酸，再用清水清洗直至不呈碱性为止。
- i) 酸液的浓度和硬度基本保持不变时为酸洗终点。
- j) 酸洗应参照相关标准 DL/T 957 进行。

附 录 A  
(规范性附录)

不同材质凝汽器冷却管的水质要求

不同材质凝汽器冷却管的水质要求见表 A.1。

表 A.1 不同材质凝汽器冷却管的水质要求

管材	溶解固形物 mg/L	Cl <sup>-</sup> mg/L	悬浮物和 含砂量 mg/L	允许流速 m/s		
				最低	最佳	最高
H68A	<300, 短期<500	<50, 短期<100	<100	1.0	1.8	2.0
HSn70-1	<1000, 短期<2500	<150, 短期<400	<300	1.0	1.8	2.0
HSn70-1B	<3500, 短期<4500	<400, 短期<800	<300	1.0	1.8	2.0
HSn70-1AB	<4500, 短期<5000	<20000	<300	1.0	1.8	2.0
BFe10-1-1	<5000, 短期<8000	<600, 短期<1000	<100	1.4	2.0	3.0
HA1 77-2	<35000, 短期<40000	<20000, 短期<25000	<50	1.0	1.8	2.0
BFe30-1-1	<35000, 短期<40000	<20000, 短期<25000	<1000	1.4	2.0	3.0
Ti	不限	不限	<1000		2.3	不限



## 附录 B

### (资料性附录)

#### 凝汽器运行特性监督曲线

影响凝汽器运行性能的因素有真空严密性、抽气设备性能、冷却水流量、冷却水温度、冷却管清洁系数等。由于现场条件限制，冷却水流量和冷却管清洁系数不便在现场测量，所以通过绘制凝汽器汽、水温度变化曲线监督凝汽器运行特性也不失为一种行之有效的方法。

如图 B.1 所示，首先绘制出设计工况下凝汽器冷却水温升、传热端差、过冷度的趋势线，然后测取运行工况下的冷却水进口温度  $t_{w1}$ 、冷却水出口温度  $t_{w2}$ 、凝汽器压力下的饱和温度  $t_s$  和凝结水温度  $t_c$ ，绘出运行趋势线，将运行趋势线与设计趋势线进行比较。如图中运行趋势线 A-B 直线斜率较设计趋势线增大，表示冷却水流量减少，冷却水温升增加；运行趋势线 B-C 直线斜率变大，表示传热端差上升，传热性能恶化，冷却管脏污或抽气器工作不正常；运行趋势线 C-D 直线斜率变大，表示凝结水过冷度增加，说明系统严密性下降，热井水位过高或抽气器工作不正常。如果各线段斜率变化不大，只是平移地上升或下降，则表示由于冷却水温度的变化或热负荷的变化引起凝汽器运行真空的变化，而并非凝汽器本体工作性能缺陷。这时，需进一步检查冷却水系统，包括闭式循环的冷却塔性能，以及可能影响凝汽器热负荷增加的疏水、排汽状况，降低凝汽器附加热负荷，改善真空，提高热经济性。

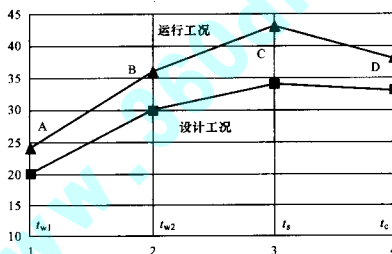


图 B.1 凝汽器运行特性监督曲线

## 附录 C

(资料性附录)

## 凝汽器总体传热系数计算

美国传热学会《表面式蒸汽凝汽器规程》(HEI—1995)规定,总体传热系数按式(C.1)计算:

$$K = K_0 \beta \beta_m \beta_c \quad (\text{C.1})$$

式中:

$K$  ——总体传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$K_0$  ——基本传热系数,可查表 C.1 或者查图 C.1 取得,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$\beta$  ——冷却水入口温度修正系数,见表 C.2 或者图 C.2;

$\beta_m$  ——管材和管壁厚修正系数,见表 C.3;

$\beta_c$  ——冷凝管清洁系数。

根据冷却水水质对冷凝管材料的影响,  $\beta_c$  推荐选取如下数值:铜管, 0.80~0.85; 钛管, 0.85~0.90; 不锈钢管, 0.80~0.90; 也可参照表 C.4 选取。

表 C.1 基本传热系数  $K_0$ 

冷凝管外径 mm	管内水流速度 m/s					
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.7	1.8
18	2743.0	3004.8	3245.6	3469.7	3576.4	3680.1
22	2717.0	2976.3	3214.8	3436.8	3542.5	3645.2
26	2691.0	2947.8	3184.0	3403.9	3508.6	3610.4
30	2665.0	2919.4	3153.3	3371.0	3474.7	3575.5
34	2639.0	2890.9	3122.5	3338.1	3440.8	3540.6
38	2613.0	2862.4	3091.7	3305.2	3406.9	3505.7
冷凝管外径 mm	管内水流速度 m/s					
	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4
18	3781.0	3879.2	3975.0	4068.5	4160.0	4249.4
22	3745.1	3842.4	3937.3	4030.0	4120.5	4209.2
26	3709.3	3805.6	3899.6	3991.4	4081.1	4168.9
30	3673.4	3768.9	3862.0	3952.8	4041.7	4128.6
34	3637.6	3732.1	3824.3	3914.3	4002.2	4088.3
38	3601.8	3695.3	3786.6	3875.7	3962.8	4048.0
冷凝管外径 mm	管内水流速度 m/s					
	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6
18	4405.0	4550.1	4686.1	4814.0	4933.8	5047.0
22	4363.1	4506.0	4640.1	4766.0	4884.0	4995.2
26	4320.9	4461.2	4592.9	4716.7	4832.4	4941.5
30	4278.5	4415.9	4544.8	4666.4	4779.3	4886.1
34	4236.6	4372.2	4499.4	4619.0	4730.1	4835.4
38	4193.6	4327.4	4452.8	4570.6	4680.1	4783.9

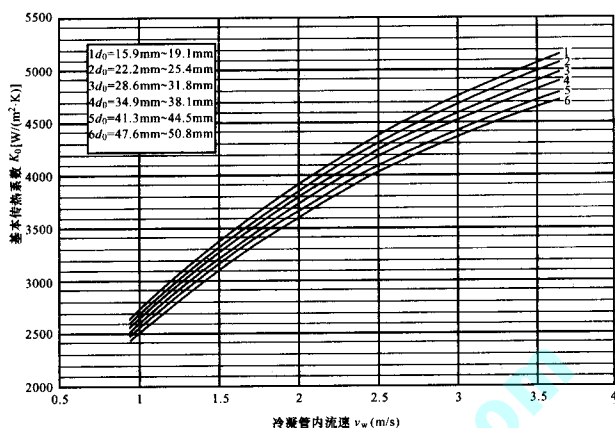


图 C.1 基本传热系数曲线

表 C.2 冷却水进口温度修正系数  $\beta$ 

进口水温 $t_{w1}$ ℃	$\beta$	进口水温 $t_{w1}$ ℃	$\beta$	进口水温 $t_{w1}$ ℃	$\beta$
0.0	0.669	12.0	0.866	24.0	1.026
0.5	0.677	12.5	0.875	24.5	1.029
1.0	0.685	13.0	0.883	25.0	1.033
1.5	0.693	13.5	0.891	25.5	1.037
2.0	0.702	14.0	0.899	26.0	1.040
2.5	0.711	14.5	0.906	26.5	1.044
3.0	0.719	15.0	0.914	27.0	1.047
3.5	0.727	15.5	0.922	27.5	1.050
4.0	0.735	16.0	0.930	28.0	1.052
4.5	0.744	16.5	0.938	28.5	1.055
5.0	0.752	17.0	0.946	29.0	1.058
5.5	0.760	17.5	0.955	29.5	1.060
6.0	0.768	18.0	0.963	30.0	1.063
6.5	0.777	18.5	0.970	30.5	1.066
7.0	0.785	19.0	0.976	31.0	1.068
7.5	0.794	19.5	0.983	31.5	1.071
8.0	0.802	20.0	0.989	32.0	1.074
8.5	0.810	20.5	0.994	32.5	1.077
9.0	0.818	21.0	0.999	33.0	1.079
9.5	0.826	21.5	1.004	33.5	1.081
10.0	0.834	22.0	1.008	34.0	1.083
10.5	0.842	22.5	1.013	34.5	1.085
11.0	0.850	23.0	1.017	35.0	1.088
11.5	0.858	23.5	1.022	35.5	1.090

表 C.2 (续)

进口水温 $t_{w1}$ ℃	$\beta$	进口水温 $t_{w1}$ ℃	$\beta$	进口水温 $t_{w1}$ ℃	$\beta$
36.0	1.092	40.5	1.113	45.0	1.129
36.5	1.094	41.0	1.115	45.5	1.131
37.0	1.096	41.5	1.116	46.0	1.133
37.5	1.099	42.0	1.118	46.5	1.134
38.0	1.101	42.5	1.120	47.0	1.136
38.5	1.104	43.0	1.122	47.5	1.138
39.0	1.106	43.5	1.124	48.0	1.140
39.5	1.108	44.0	1.125	48.5	1.142
40.0	1.110	44.5	1.127		

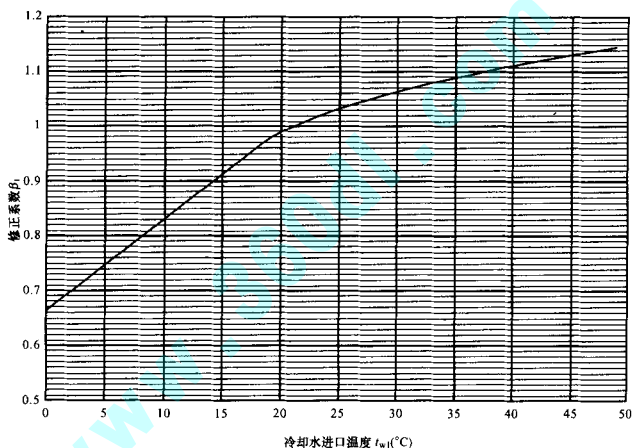


图 C.2 冷却水进口温度修正曲线

表 C.3 冷凝管材料及壁厚修正系数

修正系数 冷凝管材料 \ 冷凝管壁厚 mm	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	2.0
HSn70-1	1.030	1.025	1.020	1.015	1.009	1.007	1.001	0.987	0.965
HA177-2	1.032	1.020	1.020	1.015	1.009	1.004	0.993	0.977	0.955
BFe30-1-1	1.002	0.990	0.981	0.970	0.959	0.951	0.934	0.905	0.859
BFe10-1-1	0.970	0.965	0.951	0.935	0.918	0.908	0.885	0.849	0.792
碳钢	1.000	0.995	0.981	0.975	0.969	0.958	0.935	0.905	0.859
TP304									
TP316	0.912	0.889	0.863	0.840	0.818	0.798	0.759	0.712	0.637
TP317									
TA1, TA2	0.952	0.929	0.911	0.895	0.878	0.861	0.828	0.789	0.724

表 C.4 清洁系数 $\beta_c$ 

项 目	$\beta_c$
直流供水和清洁水	0.80~0.85
循环供水和化学处理水	0.75~0.80
脏污水和可能形成矿物沉淀的水	0.65~0.75
新 管	0.80~0.85
具有连续清洗的凝汽器	0.85
钛冷却管	0.90