

凝汽器机器人在线清洗装置效益分析

孙 莉, 周久祥, 徐 斌, 魏明业

(太仓港协鑫发电有限公司, 江苏 太仓 215433)

摘 要: 某公司凝汽器冷却水采用开式循环, 即用长江水作为凝汽器冷却水源, 凝汽器钛管易出现泥沙沉积, 导致凝汽器真空降低。目前凝汽器清洗主要采用机械清洗和胶球清洗相结合的方式, 这种清洗方式存在诸多弊端, 效率低下, 浪费巨大的人力物力。

凝汽器机器人在线清洗是目前国内最先进的清洗技术, 该公司 2015 年对 5 号机凝汽器清洗装置进行改造, 用该技术取代传统清洗方法, 取得了很好的效果。并通过测定清洁系数进行效益分析。

关键词: 凝汽器; 机器人在线清洗技术; 清洁系数; 效益分析

凝汽器是汽轮机冷端关键的换热设备, 是热力发电循环的冷源, 其内部主要由数以万计的冷凝管组成, 作用是通过凝汽器内部冷凝管的汽-水热交换, 将汽轮机做过功的乏汽凝结成水, 降低汽轮机排汽压力和排汽温度, 提高汽轮发电机组的循环热效率, 同时回收凝结水供锅炉加热循环使用。

1 设备概述

某公司 5 号机是上海汽轮机厂生产的 H156 型机组, 其所配套的凝汽器是由上海动力设备有限公司生产的单背压、单壳体、对分双流程、表面式凝汽器, 其型号为 N-17000-1, 凝汽器冷却面积为 17000 m², 设计端差 > 2.8℃。

凝汽器清洗主要采用人工机械清洗和胶球在线清洗相结合的方式。人工机械清洗主要是清理钛管内的硬垢, 用胶球在线清洗维持钛管的清洁程度。人工机械清洗效果比较好, 每次清洗后端差下降 1.5℃ 左右, 但随运行时间增加, 端差逐渐上升, 一般只能维持 3 个月, 每年需清洗 4 次。

虽然凝汽器优化清洗方式, 但这种清洗方式不能从根本上保证凝汽器钛管的清洁程度。人工机械清洗最好是在机组检修时进行, 但受调度运方的限制, 清洗次数远远不能满足生产需要。而且凝汽器运行中半边隔离存在威胁人身安全、凝汽器循环水入口门故障, 阀门坑满水、凝汽器断水、等安全隐患, 严重威胁机组安全运行。

2 机器人在线清洗系统简介

凝汽器为单背压、单壳体、对分双流程、表面式凝汽器, 在四组凝汽器分别安装四套清洗设备。将四台关节型清洗机器人分别安装在凝汽器的进水室或出水室内部; 四套盘管装置安装在凝汽器顶部或侧面; 清洗系统配置两个就地电气控制柜; 每两套清洗装置共用一台高压水泵, 高压水泵的水源从工业水母管上接入。四套清洗装置分散控制单独运行, 可实现自动和手动切换。

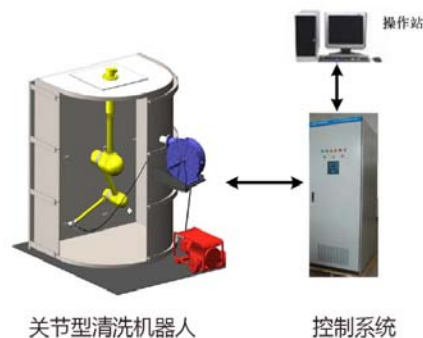


图 1 系统组成示意图

凝汽器清洗系统按照凝汽器管板上的冷凝管孔的位置, 全部转化为 XY 坐标系统, 通过关节型机器人对管孔进行精确定位; 高压水喷头通过反作用力带动高压水软管进入冷凝管直接对内部污垢进行冲洗, 冷凝管的冲洗长度为 10m (可调), 盘管装置对高压水软管进行有规律地收放, 并且通过传感器检测高压水软管回收到位后对下一根冷凝管进行冲洗。

3 清洁系数对煤耗影响

3.1 清洁系数对凝汽器端差的影响

$$\delta t = \frac{\Delta t}{\frac{KA}{e^{C_w D_w} - 1}} \tag{1}$$

式中：A—凝汽器传热面积；K—凝汽器总体传热系数

公式（1）中的凝汽器总体传热系数 与清洁系数 成正比。在循环水流量、负荷不变的情况下，循环水温升 Δt 不变。因此，清洁系数提高，端差 δt 下降。

凝汽器清洁系数设计值一般为 0.85~0.9，正常使用情况下凝汽器的清洁系数为 0.7 左右，根据公式（1），当使用凝汽器清洗机器人将清洁系数由 0.7 提高至 0.9 后，机组凝汽器端差将降低。

3.2 端差对凝汽器排汽温度的影响

循环水温升：

$$\Delta t = \frac{h_c - h_{wc}}{c_w D_w / D_k} = \frac{h_c - h_{wc}}{c_w m} \tag{2}$$

式中：Cw—循环水比热；Dw—循环水；Dk—蒸汽流量；m—循环倍率。

排汽温度（饱和温度）：

$$t_s = t_{w1} + \Delta t + \delta t \tag{3}$$

式中：ts—饱和温度；tw1—循环水进口温度
在循环水入口温度、流量、负荷不变的情况下，同时对于高真空下的凝汽器来说，比焓差 与 Cw 变

动范围很小。由式（2）可知，循环水温升基本 Δt 不变；而由（3）可知，凝汽器饱和温度的变化与端差的变化是一致的。因此，在同样的条件下，清洗以后凝汽器平均排汽温度下降。

3.3 凝汽器压力对机组效率的影响

凝汽器排汽温度与排汽压力相互对应，凝汽器排汽压力对机组热耗率的影响采用汽轮机厂家提供的修正曲线计算，如图 2 所示。

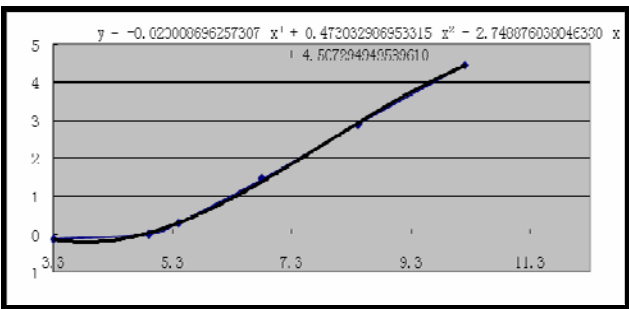


图 2 凝汽器排汽压力修正曲线

4 凝汽器性能试验

为了评价在线清洗装置运行效果，评估节能效果，在 300MW 及 250MW 负荷下对投运在线清洗装置前、后凝汽器进行性能试验，测定凝汽器压力、端差、过冷度、水阻等指标，分析计算试验数据，测定清洁系数。试验结果见表 3。

表 3 试验主要结果

项目	单位	5 号机试验数据		6 号机试验数据	
		试验工况 1	试验工况 2	试验工况 1	试验工况 2
机组负荷	MW	250	300	250	300
冷却水进口水温	℃	14.16	14.27	16.4	16.42
冷却水出口水温	℃	21.63	22.91	25.42	27.44
低压缸排汽温度	℃	27	29.16	31.71	34.83
凝汽器压力	kPa	3.22	3.64	4.43	5.26
循环水流量	t/h	36939	38336	32926	32421
凝汽器端差	℃	3.52	4.23	5.76	6.89
凝汽器热负荷	MW	310	374	317	380
凝汽器总体传热系数	W/(m ² ·K)	2766	2818	1977	1969
冷凝管清洁系数		0.829	0.828	0.606	0.608
修正后的传热系数	W/(m ² ·K)	3041	3036	2223	2230
修正后的温升	℃	7.35	8.87	7.53	9.02
修正后凝汽器传热端差	℃	3.05	3.69	5.18	6.17
修正后凝汽器饱和温度	℃	30.4	32.56	32.7	35.19
修正后的凝汽器压力	kPa	4.29	4.92	4.95	5.67

4.1 试验工况

（1）#5 机加装凝汽器清洗机器人清洗后，在

机组 250 MW、300 MW 负荷工况下，分别进行凝汽器性能试验。

(2) #6 机未加装凝汽器清洗机器人, 正常投运胶球清洗系统, 在机组 250MW、300 MW 负荷工况下, 分别进行凝汽器性能试验。

4.2 计算方法

(1) 对数平均温差 Δt_m

$$\Delta t_m = \frac{(t_s - t_{w1}) - (t_s - t_{w2})}{\ln \left(\frac{t_s - t_{w1}}{t_s - t_{w2}} \right)} = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\Delta t + \delta t}{\delta t}}$$

式中: t_s —凝汽器压力对应的饱和温度; t_{w1} —循环水进水温度; t_{w2} —循环水出水温度; $\Delta t = t_{w2} - t_{w1}$ —循环水温升; $\delta t = t_s - t_{w2}$ —凝汽器端差。

(2) 凝汽器试验热负荷 Q_T

$$Q_T = G_{wT} \cdot C_{PT} \cdot (t_{w2} - t_{w1})$$

式中: Q_T —凝汽器试验热负荷; G_{wT} —凝汽器试验冷却水流量; C_{PT} —试验冷却水定压比热容。

(3) 凝汽器试验总体传热系数 K_T

$$K_T = \frac{Q_T \times 10^3}{A \cdot \Delta t_m}$$

式中: K_T —凝汽器试验总体传热系数; A —凝汽器传热面积。

(4) HEI 标准中凝汽器总体传热系数 K 的计算方法

$$K = K_0 \cdot \beta_c \cdot \beta_t \cdot \beta_m$$

式中: K_0 —基本传热系数, 是冷却管外径和冷却水流速的函数, $K_0 = c\sqrt{v_w}$; c —管径修正系数, 按冷却管外径查表求得; v_w —冷却管管内平均流速; β_c —清洁修正系数, 主要与冷却水的清洁程度有关, 根据水质、供水方式以及冷却管情况查表; β_t —冷却水进口温度修正系数, 查相应的修正曲线; β_m —管材和壁厚修正系数, 查相应的修正系数表

(5) 根据 HEI 标准, 对试验总体传热系数 K_T , 冷却水流量和进口温度的修正

$$K_c = K_T \cdot F_v \cdot F_t$$

$$F_v = \sqrt{\frac{v_D}{v_T}}, \quad F_t = \frac{\beta_{tD}}{\beta_{tT}}$$

式中: K_c —修正后的总体传热系数; F_v —流量修正系数; F_t —水温修正系数; v_D —设计工况下冷却水流速; v_T —试验工况下冷却水流速; β_{tD} —设计工况下进口温度修正系数; β_{tT} —试验工况下进口温度修正系数。

(6) 发电煤耗率

$$b = \frac{q_T}{\eta_b \times \eta_p \times 29.3076}$$

式中: q_T —试验热耗率; b —试验发电煤耗率; η_b —锅炉效率; η_p —管道效率。

4.3 试验结论

(1) 根据试验数据计算凝汽器相关指标, 5 号机凝汽器在进行机器人清洗后平均清洁系数为 0.828, 6 号机凝汽器在正常投运胶球情况下平均清洁系数为 0.607。与 6 号机凝汽器相比, 5 号机凝汽器清洗后平均清洁系数高出约 0.221。

(2) 据计算结果, 在 250MW 和 300MW 的负荷下, 5 号机凝汽器修正到设计工况下的压力分别为 4.29 kPa、4.92 kPa, 6 号机凝汽器分别为 4.95 kPa、5.67 kPa。在相同负荷工况下, 5 号机凝汽器压力低于 6 号机凝汽器约 0.66 kPa、0.75 kPa。

(3) 利用背压对热耗机出力的修正, 计算出因背压较低使得 5 号机发电煤耗可比 6 号机低 1.4 g/(kW·h)。

5 结束语

2015 年度 5 号机平均负荷为 250MW, 凝汽器平均背压为 5.62 kPa, 加装机器人清洗系统后, 5 号机背压比 6 号机低约 0.66 kPa, 由此因背压较低使得 5 号机发电煤耗可比 6 号机低 1.4 g/(kW·h)。2016 年 5 号机发电量按照年利用小时 5000 小时 16 亿 kW·h 测算, 标煤单价按照 420 元/吨计算, 全年 5 号机与 6 号机相比节煤成本约 94.08 万元。

加装机器人清洁系统后, 还可为该机组节约人工清洗费用以及胶球清洗费用。按照每年清洗 2 次计算, 每次清洗人工费加上对负荷、真空等指标的影响折算成人民币约 8 万元/年, 胶球清洗费用约 1.5 万元/年。

综上所述, 本项目可为该机组节约 103.58 万元/年。

参考文献:

- [1] ASME PTC 12.2-1998, 表面式凝汽器性能试验规程[S].
- [2] DL/T 1078-2007, 表面式凝汽器运行性能试验规程[S].
- [3] Standards for steam surface condensers, tenth edition, Heat Exchange Institute (HEI)[S]. 2006(美国传热学会标准).

作者简介:

孙 莉 (1986-), 女, 本科, 工程师, 从事火电厂热力试验
及运行管理工作;

周久祥 (1980-), 男, 本科, 工程师, 从事火电厂节能、科

技管理工作, Email: gcl_zjx@163.com;

徐 斌 (1983-), 男, 本科, 工程师, 从事火电厂汽轮机性
能试验工作;

魏明业 (1973-), 男, 本科, 高级工程师, 从事火电厂汽机
管理工作。