

# 镇江电厂 WSD 凝汽器在线冲洗机器人应用效果分析

许浩然<sup>1</sup>, 沈建<sup>1</sup>, 姚杰新<sup>2</sup>

(1.江苏镇江发电有限公司, 江苏 镇江 212000; 2.郑州赛为机电设备有限公司, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对镇江电厂凝汽器存在的结垢和泥沙沉积问题, 介绍了 WSD 在线冲洗机器人技术的适应性, 通过实际应用和检查, 验证了凝汽器清洁度提高带来了机组性能的提升, 为冷端设备节能新技术的应用和推广提供了宝贵的经验。

**关键词:** 凝汽器; WSD; 机器人; 应用; 分析

## 1 概况

江苏镇江发电有限公司北依长江镇扬河段, 附近引河贯穿, 沟塘密布, 厂址河段潮汐涨落历时不等, 落潮历时大于涨潮历时。#5、6 机组为上汽厂生产的 N630-24.2/566/566 超临界凝汽式汽轮机, 机组于 2005 年 5 月、10 月相继投产。凝汽器为 N-34500-1 型双背压、八水室结构。总有效面积 34500 m<sup>2</sup>, 冷却管为 TP304 不锈钢焊管, 设计流速 2.18 m/s。循环水泵为长沙水泵厂生产的 88LKXA-15 型混流泵, 设计流量 11.79m<sup>3</sup>/s, 扬程 15.5m, 电机功率 2500 kW, 转速 371 r/min。

由于江水含泥量较大, 杂物较多, 检修中发现凝汽器换热管内部积存较厚泥垢, 部分管口被漂浮物堵塞。由于循环水流速低, 尤其是冬季单泵运行时, 胶球等杂物容易集聚进口, 增加凝汽器水阻和泥沙聚集, 而胶球收球网易卡涩漏球, 收球率偏低, 胶球清洗系统长期存在清洗效果差、维护费用高等问题, 一个冬季过后, 管内生物粘泥产生沉积难以除去, 检修时人工高压水冲洗前期效果很好, 但长时间运行后, 换热管清洁度逐渐下降, 因此, 人工清洗只能短期解决凝汽器清洁度问题。见图 1、图 2。

换热管结垢不仅造成凝汽器清洁度降低, 冷却效率下降, 汽轮机冷端损失增加, 循环水运行水阻增大, 循泵电耗增加; 而且, 长时间结垢还会造成换热管内壁发生生物电化学腐蚀, 导致换热管穿孔泄漏, 使用寿命缩短。一旦凝汽器冷却水漏入凝结水, 将污染整个汽水系统, 炉侧造成锅炉结垢和燃烧效率下降, 严重时导致锅炉爆管事故; 机侧则导致通流部分结垢, 监视段压力升高, 机效下降; 配汽机构结垢, 将造成汽门卡涩, 存在超速飞车的隐

患。因此, 为提高并保持凝汽器换热管清洁, 电厂决定在#5、6 机凝汽器水室加装 WSD 在线冲洗机器人装置, 以提高凝汽器换热效率和机组安全性。



图 1 凝汽器进水室生物粘泥和杂物



图 2 凝汽器出水室较厚的泥垢

## 2 WSD 在线清洗技术

WSD 凝汽器在线清洗技术是近几年国内推出的较为成熟的新型智能化清洗技术, 也称为水蜘蛛在线冲洗机器人。其主要由传动机构、导向机构、冲洗机构、供水机构、计算机控制系统和辅助系统

组成。原理是通过计算机控制信号驱动凝汽器水室内部传动机构和冲洗机构行走，导向机构确保冲洗机构平稳移动，供水机构通过机械臂向冲洗机构提供高压水，经过大流量喷嘴排喷出后在换热管口形成高速喷射水流，加快管内流速和扰动，冲走换热管口堵塞物和内壁的泥垢。运行中定期冲洗，可保持凝汽器长期清洁高效运行。

该技术结合凝汽器水室内部结构进行安装，不需对凝汽器作较大改变，不占用太多空间，既可将高压水清洗技术应用到机组运行中，也可在检修中代替人工快速清洗。具体有以下几方面特点：

1) 清洗效率高。采用喷嘴排冲洗技术，与人工单管清洗相比，清洗速度提高了上百倍，且无漏洗之虞。与胶球清洗技术相比，变不可控的胶球清洗为可控的喷嘴清洗方式，杜绝了胶球随机性、清洗不全面、易卡堵管口现象。此机构具有覆盖率高，全方位，全行程清洗特点。

2) 清洗效果好。采用智能化控制技术，实现喷嘴与换热管逐排（行）点对点冲洗，充分利用换热管结垢的诱导期，在泥垢尚未形成硬垢之前，及时清除泥垢，保持凝汽器长期清洁。

3) 运行成本低。采用循环水作为冲洗水源，不存在胶球等消耗，每次清洗耗电不到  $500(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{次}$ ，每年耗电不超过 10 万  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，设备运行可靠，维护量少。

4) 运行操作简单。采用 PLC 控制和触摸屏按钮，一键启动，自动运行/停止，数据记录与保护功能齐全，人机界面友好，无需运行人员进行繁琐的切换操作。

5) 较强的延展性功能。可根据用户需要和换热管结有硬垢的特殊情况，实现机组停运后化学加药清洗或通风干燥保养等功能。

WSD 凝汽器在线冲洗装置改造效果见图 3、4、5。

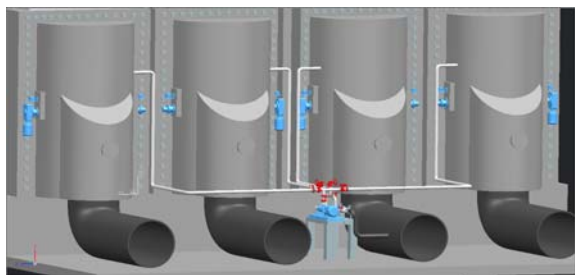


图 3 WSD 凝汽器在线冲洗外部系统示意图



图 4 WSD 冲洗机器人正面示意图

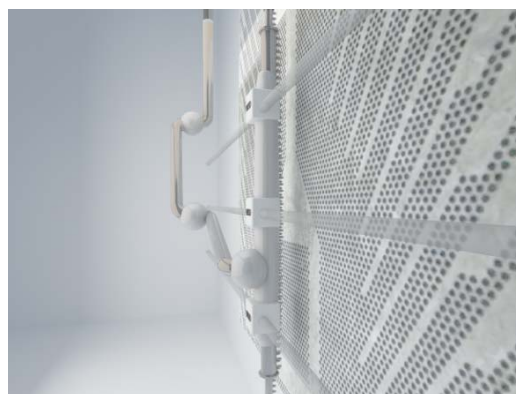


图 5 WSD 冲洗机器人侧面示意图

### 3 运行数据分析

镇江电厂#5 机于 2015 年 5 月份小修中安装了 WSD 凝汽器在线冲洗机器人装置（智能型），7 月初调试完成，移交投运。电厂于 7 月 10 日、19 日、20 日、29 日、30 日进行了 5 次在线冲洗，未发生任何异常情况。8 月份经过数据分析，真空有上升明显，由于#6 机停机检修，循环泵为一机两泵方式，为排除偶然因素，再次做如下试验：即停运在线冲洗装置 35 天后的 9 月 5、6 日两天连续 2 次投入在线冲洗，并重新采集了投运前后的数据进行比对，结果见表 1。

1) 数据来源：发电部报表生成器数据库中调取。为使数据客观准确，尽量选择在各参数相同的工况来进行对比，如真空严密性均合格（均在  $200\text{Pa}/\text{min}$  以下），循环水泵运行方式相同（两机四泵或一机二泵），大气压力相同，负荷相近，循环水温接近等。

2) 对比数据时间：2014 年 6 月 30 日，7 月 31 日和 2015 年 6 月 30 日，7 月 31 日，9 月 4 日和 7 日全天数据（每 10min 保存一次）。

3) 冲洗方式：逐行定位移动自动冲洗。单根冲

洗时间 25s，冲洗压力 2.0MPa，冲洗总时间设定：180min。

表 1 #5 机凝汽器在线冲洗装置投运前后数据对比

项目	日期	负荷	大气压力	真空值		真空度			排汽温度	凝器端差	循水进口	循水出口	循水温升	循泵运行方式
				高	低	高	低	平均						
WSD 装置投运前	单位	MW	KPa	KPa	KPa	%			℃	℃	℃	℃	℃	
	2014-6-30	456.81	98.40	94.76	95.50	96.29	97.05	96.67	34.72	1.46	25.65	33.26	7.62	2 机 4 泵
	2015-6-30	448.01	98.40	93.88	95.02	95.39	96.57	95.98	34.94	1.74	25.70	33.20	7.50	
	历史同比	-8.8				-0.9	-0.48	-0.69		+0.28	+0.05			
WSD 装置投运后	1) 2014-7-31	462.93	101.54	93.28	94.25	91.58	92.82	92.2	37.43	1.36	28.18	36.07	7.89	2 机 4 泵
	2) 2015-7-31	511.03	101.54	93.47	94.88	91.77	93.44	92.6	37.75	1.81	28.71	35.93	7.22	1 机 2 泵
	1) 与 2) 历史同比	+48.1				+0.19	+0.62	+0.40		+0.45	+0.53			
	3) 装置停运 35 天 2015-9-4 日 17:00	554.48	101.13	92.62	94.42	91.32	93.16	92.24	39.95	1.55	29.08	38.4	9.32	2 机 3 泵
9-7 日工况	4) 20:40 同负荷工况对比	555.46	101.06	93.21	95.08	92	93.9	92.95	39.58	1.64	28.54	37.94	9.2	
		+0.98				+0.68	+0.74	+0.71	-0.37	+0.09	-0.54	-0.36	-0.1	
	5) 9-7 日 18:30 负荷工况与上年工况 1) 相比	463.16	100.9	94.03	95.39	93	94.38	93.69	37.74	1.43	28.62	36.31	7.69	
						+1.42	+1.56	+1.49	-0.31	+0.07	+0.44	+0.24	-0.2	

表中数据对比分析：

1)在未安装 WSD 在线冲洗机器人装置的 2014 年 6 月 30 日与 2015 年 6 月 30 日同比，机组工况、参数相近的情况下，2015 年真空度较上年同期相比低 0.69%，说明人工检修清洗效果持续时间有限，泥沙沉积较快。

2) 在安装了 WSD 在线冲洗机器人装置后，于 2015 年 7 月 10 日、19 日、20 日、29 日、30 日进行了间隔式在线冲洗。2015 年 7 月 31 日数据与上年同期同比，在负荷多 48.1MW，循环水温上升 0.53℃，循环水泵运行方式相同情况下，真空度较上年提升 0.40%，如按相同工况修正后真空度提升 1.0% 以上。

3)机组从 2015 年 8 月 1 日至 9 月 4 日 35 天内 WSD 装置停止投运，2015 年 9 月 5、6 日连续两次投用 WSD 装置，并采集 9 月 7 日 20:40 的 555MW 工况与 2015 年 9 月 4 日 17:00 相同工况比较，真空度相对提升了 0.71%。

4)将 2015 年 9 月 7 日 463MW 工况与 2014 年 7 月 31 同负荷工况相比，在循环水温度增加 0.44℃，并少一台循环水泵情况下，真空度提升达 1.49%。

需说明的是：由于镇江电厂是双背压机组，而上述数据中缺少低压凝器循环水出水温度，故而上述凝器端差值是取的两只排汽缸平均温度计算的，不能真实反映各凝器端差，因此凝器端差指标还需要进一步完善和鉴定。

4 现场检查分析

#5 机凝汽器经两个多月的定期在线冲洗，2015 年 11 月 12 日，电厂利用临时停机机会检查了凝汽器水室设备和在线冲洗效果，见图 5、6。与机组检修前的照片（图 1、2）对照，无论是进水侧管口还是出水侧管口，凝汽器清洁如新，换热管内泥垢冲洗效果良好，即机组在安装运行 WSD 在线冲洗机器人设备 5 个多月来，凝汽器清洁度始终保持在较高水平，直观地印证了上述数据的准确性。

本次停机，同时对 WSD 在线冲洗机器人装置系统进行了移动试验检查，设备运行 5 个月后，机器人移动灵活、行走稳定，喷嘴定位准确，未发现管板或管口有冲刷磨损痕迹，说明在线冲洗机器人运行安全可靠，现有冲洗压力和流量的设定安全合理。见图 6、7。



图 6 凝汽器进水室在线冲洗后





图 7 凝汽器出水室在线冲洗后

## 5 结论

针对长江流域开式冷却机组，由于江水泥沙含量较大，停机中的凝汽器人工清洗效果维持时间短，还容易出现漏洗或清洗不干净问题。加装 WSD 在线冲洗机器人装置后，无论采取间断冲洗还是连续冲洗方式，凝汽器真空均会有明显的提升，相比上年同负荷工况，真空度提升量更加明显（夏季接近 1.5%），说明 WSD 在线冲洗机器人装置具有明显的节能效果。

以 600MW 超临界机组真空度每提高 1%，煤耗降低  $2.8\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$  计算，以单机年发电量 35 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，标煤单价按 550 元/t 计算。全年按真空度平均提高 0.60%，煤耗可降低  $1.68\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，年节约标准煤 5880 t，企业可节约成本 323.4 万元，减少  $\text{CO}_2$  气体排放约 1.5 万 t。而 WSD 凝汽器在线冲洗机器人运行稳定可靠，工作效率高，每次冲洗电耗不到 500 度，且运行操作简单，维护方便，年运行成本不到 10 万元。

此外，凝汽器水阻降低，可明显降低循环水泵电流，充分发挥冬季低速泵或低循环水量运行的节电效益。因此，WSD 凝汽器在线冲洗机器人项目综合效益明显，在沿江、沿海开式冷却机组，以及采用城市中水或地下水冷却的闭式机组上均具有很好的推广价值。

### 作者简介：

许浩然（1965-），上海人，高级工程师，主要从事汽轮机运行及检修技术管理工作，E-mail：  
hrxu@crpzj.com.cn。