

# 凝汽器在线清洗机器人装置项目 节水评价研究

吴 鑫<sup>1</sup>, 周玲霞<sup>1</sup>, 孙伯明<sup>2</sup>, 曹德君<sup>1</sup>, 王 欣<sup>1</sup>, 朱相丞<sup>1</sup>

(1. 南京市长江河道管理处, 江苏 南京 210011; 2. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 江苏 南京 210029)

**摘要:**以凝汽器在线清洗机器人装置为研究对象, 分析在同等工况下, 凝汽器加装清洗机器人前后凝汽器传热变化以及凝汽器清洁系数、排汽压力、循环水流量等的变化特征。结果表明, 该凝汽器在线清洗机器人装置可以明显提高凝汽器清洁系数, 增加传热系数, 对电厂节能成效明显, 也具有一定的节水潜力。

**关键词:**凝汽器; 在线清洗; 节能; 节水

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2021)07-0019-04

## Study on water saving evaluation of on-line condenser cleaning robot device project

WU Xin<sup>1</sup>, ZHOU Lingxia<sup>1</sup>, SUN Boming<sup>2</sup>, CAO Dejun<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, ZHU Xiangcheng<sup>1</sup>

(1. Nanjing Yangtze River Management Division, Nanjing 210011, China;

2. Jiangsu Province Water Engineering Sci-Tech Consulting Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Taking on-line condenser cleaning robot device in a power plant in Nanjing as the research object, the heat transfer change and the change characteristics of cleaning coefficient, exhaust pressure, circulating water flow and so on of condenser before and after the installation of condenser cleaning robot under the same working condition were analyzed. The results showed that the on-line cleaning robot could obviously improve the cleaning coefficient of condenser and increase the heat transfer coefficient, which had obvious effect on energy saving and water saving potential of power plant.

**Key words:** condenser; groundwater; online cleaning; energy saving; water-saving

节约用水是解决我国水资源短缺问题的根本性措施<sup>[1]</sup>, 对于保障经济社会可持续发展具有重要意义。2019 年水利部印发《关于开展规划和建设项目节水评价工作的指导意见》, 正式启动规划和建设项目节水评价工作。为积极响应国家提出的建设资源节约型、环境友好型社会方针, 充分挖掘工业企业节水潜力, 开展工业企业建设项目节水评价研究具有重要意义。

火电行业是我国节水减排和节能降耗的重点行业, 其生产的各个环节均有较大的节水潜力。对火电厂各个环节的节水研究很多, 本文选取南京某发电厂凝汽器机器人在线清洗装置项目为研究对象, 对该在线清洗装置项目节能节水潜力进行评价, 初探其节水效果, 并对存在的不足提出建议, 为该装置项目在行业节水中的推广提供研究依据, 也为后续研究奠定基础。

收稿日期: 2020-12-17

作者简介: 吴鑫(1987—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水资源管理等工作。E-mail: 307302403@qq.com

## 1 设备运行概况

### 1.1 设备概况

所研究电厂为  $2 \times 660$  MW 超超临界燃煤机组, 冷却水采用直流供水方式, 凝汽器型号为 N-37000 型双背压、双壳体、单流程、表面式凝汽器, 总有效面积为  $37\,000\text{ m}^2$ , 循环水为长江水, 配 4 台立式混流泵。

凝汽器是火力发电机组的主要设备之一, 是汽轮机冷端关键的换热设备, 其内部主要由数以万计的冷凝管组成, 通过凝汽器内部冷凝管的汽—水热交换, 降低汽轮机排汽压力和排汽温度, 提高汽轮发电机的循环热效率。凝汽器中, 排汽温度越低, 排汽压力也越低, 机组真空严密性就越好, 机组效率就越高<sup>[2]</sup>。影响凝汽器性能的主要运行参数有凝汽器压力、热负荷、漏空气量、冷却(循环)水流量和冷却水温度等<sup>[3]</sup>。

凝汽器运行中由于冷却水中离子含量的浓缩, 冷凝管内会产生结垢现象, 严重时会导致凝汽器真空降低, 致使汽水交换热效果变差, 影响机组热经济性<sup>[4]</sup>。该电厂 1#、2# 机组凝汽器原清洗方式为胶球清洗或人工清洗。胶球清洗存在胶球回收率低, 易堵塞冷凝管, 不能完全清除由化学反应形成的污垢等缺点; 人工清洗由于冷凝管数量多、长度长、劳动强度大、作业环境恶劣, 并且需要机组停机或降负荷运行进入凝汽器内部工作, 难以长期保持清洁效果<sup>[5]</sup>。本研究采用关节型凝汽器在线清洗机器人, 其主要由机器人本体(机械臂、喷头)、清洗系统(含绞盘、高压清洗机、清洗胶管)以及运动控制系统组成, 如图 1 所示。清洗机器人实现了凝汽器随时清洗, 且定位准确, 易于控制, 清洗效果得到明显提高。

### 1.2 设备参数

该凝汽器在线清洗机器人为关节型机械臂, 主要由 2 级关节、3 个机械臂组成, 移动范围为整个凝汽器的管板平面, 清洗覆盖率为 85%, 重复定位精度为  $\pm 0.50\text{ mm}$ 。机械臂内部的动力线与信号线通过支撑杆与控制柜和电源柜相连, 机械臂末端安装了清洗喷头, 用于在水室内运动定位, 让清洗喷头对准管板的冷凝管管口。绞盘系统由盘管装置及内部的高压水冲洗软管组成, 用于高压清洗水管的收放控制, 精确控制冷凝管冲洗长度。高压水泵系统作为在线清洗的动力装置, 清洗的高压水均由此提供。运动控制系统实现对凝汽器在线清洗机器

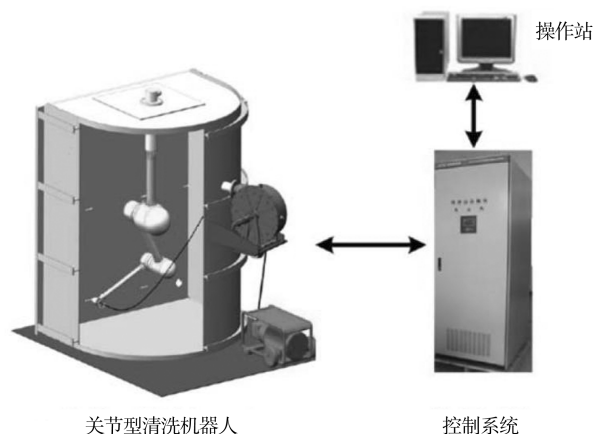


图 1 凝汽器在线清洗机器人系统组成  
人的远程监控。凝汽器技术参数如表 1 所示。

表 1 凝汽器设计技术参数

项目	单位	参数
型式	/	双背压、双壳体、 单流程、表面式、 横向布置
型号	/	N-37000
总有效面积	$\text{m}^2$	37000
凝汽器 A(B) 的有效面积	$\text{m}^2$	18500 (18500)
设计工况	/	VMO
VMO 工况循环水带走的净热	$\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$	745854
VMO 工况循环水温升	$^{\circ}\text{C}$	8.696
凝结水过冷度	$^{\circ}\text{C}$	$\leq 0.5$
凝汽器设计端差	$^{\circ}\text{C}$	6.242/5.707
管子总水阻	kPa	$\leq 67$
凝汽器汽阻	kPa	0.4
循环倍率(设计工况)	/	60
设计冷却水流量	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	20.49
设计冷却水流速	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.1388
设计清洁系数	/	0.85
凝汽器 A 设计压力	kPa	4.408
凝汽器 B 设计压力	kPa	5.439
水室设计压力	MPa	0.4
壳侧设计压力	MPa	0.098

(续表1)

项目	单位	参数
凝汽器出口凝结水保证氧含量	$\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\leq 20$
管束有效长度、总长	m	11.125、11.211
管束顶部外围部分材料	/	TP304
管束顶部外围部分直径、壁厚	mm	$\Phi 25, 0.7$
管束顶部外围部分数量	根	824
管束主凝汽器区材料	/	TP304
管束主凝汽器区数量	根	39780
管束主凝汽器区直径、壁厚	mm	$\Phi 25, 0.5$

## 2 节水节能效益分析

### 2.1 理论分析

凝汽器传热公式如下:

$$Q = D \times C_p \times \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\Delta t + \delta}{\delta}} \quad (2)$$

$$K = \frac{Q}{A \times \Delta t_m} \quad (3)$$

$$K = K_0 \times \beta_i \times \beta_m \times \beta_c \quad (4)$$

$$K_0 = c_1 \times \sqrt{v_w} \quad (5)$$

式中:  $Q$  为凝汽器热负荷,  $\text{W}$ ;  $D$  为循环水流量,  $\text{kg/s}$ ;  $\Delta t$  为循环水温升,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_p$  为冷却水的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\Delta t_m$  为对数传热温差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta$  为凝汽器端差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $K$  为凝汽器传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $A$  为凝汽器面积,  $\text{m}^2$ ;  $K_0$  为基本传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\beta_i$  为冷却水进水温度修正系数;  $\beta_m$  为冷却管管材和壁厚修正系数;  $\beta_c$  为凝汽器清洁度系数;  $c_1$  为系数;  $v_w$  为循环水在冷凝管内流速,  $\text{m/s}$ 。

根据凝汽器传热相关公式对该电厂凝汽器清洗机器人节能效果进行理论分析。由上述公式可以看出,循环水流量对凝汽器各个性能具有一定的影响,而如何降低排汽压力,可以通过不同途径实现。

由式(1)可知,凝汽器温升受循环水流量影响,循环水温升随着循环水流量增加而降低,即  $D$  增大,  $\Delta t$  降低。而循环水在冷凝管内流速随着循环水流量增加而增加,凝汽器传热系数也随之增大,凝汽器排气压力降低,即在不改变其他因素的情况下,若要达到一定的传热效果,需增大循环水量。

由式(2)~式(5)可以看出,同样的清洁度系数情况下,凝汽器热负荷越高,凝汽器的排汽压力也会越高;在相同的热负荷下,清洁度系数越高,凝汽器传热系数越高,凝汽器排汽压力降低,即在其他因素不变的条件下,提高凝汽器清洁系数,同样能增加传热系数,使得排汽压力降低。

综合来看,在热负荷一定的情况下,为降低排汽压力,可采取增大循环水流量,或提高凝汽器清洁系数等措施,两者对排汽压力的影响趋势是一致的。理论上,若要达到相同的传热效果,清洁系数较高的凝汽器可以使用较少的循环冷却水。

### 2.2 节能效果

根据该发电厂两机组凝汽器加装清洗机器人前后性能试验相关数据,1#、2#机组加装凝汽器在线清洗机器人前,额定工况下低压凝汽器运行清洁系数分别为 0.564、0.624,高压凝汽器运行清洁系数分别为 0.589、0.776;加装凝汽器在线清洗机器人后,额定工况下低压凝汽器运行清洁系数分别为 0.806、0.698,高压凝汽器运行清洁系数分别为 0.929、0.827,与未加装机器人相比均明显有所提高(图2、图3)。

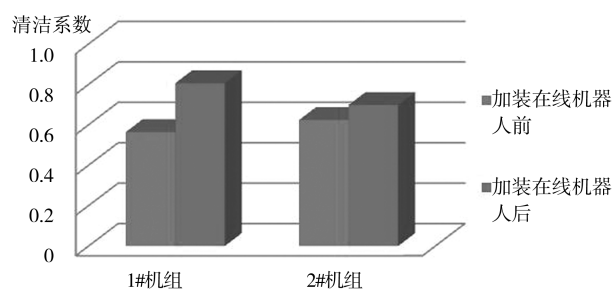


图2 加装凝汽器在线清洗机器人前后清洁系数对比(低压)

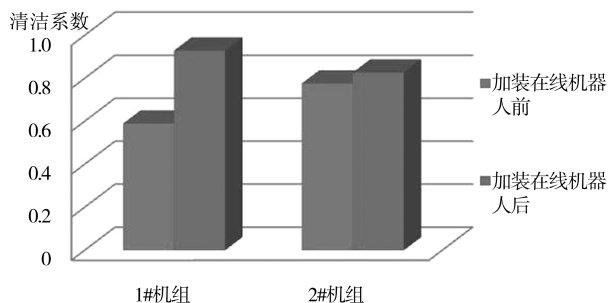


图3 加装凝汽器在线清洗机器人前后清洁系数对比(高压)

根据性能试验结果,1#、2#机组加装凝汽器在线清洗机器人后,凝汽器平均排汽压力分别降低了 0.89 kPa、0.22 kPa。由此可知,安装凝汽器清洗机器人后,该电厂凝汽器的传热系数增加,传热效果更好,凝汽器真空效果提升,节能效果明显。根据

前文,凝汽器在线清洗机器人与普通清洗相比,提高了传热系数,即为达到同样的真空效果,相对于普通清洗,凝汽器在线清洗机器人使用的循环水流量较低,达到了节水的目的。

### 2.3 节水潜力评价

在实际生产中,要考虑循环泵的经济运行,所以对循环水流量的调节并不灵活,且没有专门的仪表监测,因此通过间接指标分析其节水效果。

#### 2.3.1 根据总发电量和总取水量推算节水量

应用该电厂实际用水数据分析节水潜力。该电厂于2016年1月和5月分别在2台凝汽器安装在线清洗机器人,将安装前后(2015年和2017年)电厂年发电量、年取水量和年耗水量等数据进行统计分析,计算单位发电量对应的取水总量(包含工业水和冷取水)变化,如表2所示。

表2 加装凝汽器在线清洗机器人前后取水量

年份	取水量/万 m <sup>3</sup>	发电量/(MW·h)	工业耗水量/万 m <sup>3</sup>	冷却水量/万 m <sup>3</sup>	单位发电量取水 总量/[m <sup>3</sup> ·(MW·h) <sup>-1</sup> ]
2015	42 676.00	7 422 217.50	315.30	42 360.70	57.498
2017	41 001.73	7 180 098.80	188.06	40 813.67	57.105

由上表可知,2017年比2015年单位发电量取水总量有所降低,侧面反映出安装凝汽器在线清洗机器人后,循环水量较普通清洗减少。按照2015年的发电量计算加装在线清洗机器人后的取水量,可节约水291.43万m<sup>3</sup>。

#### 2.3.2 通过节煤量推算节水量

根据试验结果,该项目1#、2#机组2015年平均发电煤耗分别下降2.18 g/(kW·h)、0.5 g/(kW·h),年节煤量分别为9 053 t、2 017 t,2台机组年节煤量11 070 t,节能减排效果明显。通过节煤量来间接推算节水量,2台机组年节煤量对应该电厂发电量36 947 MW·h,根据其2015单位发电量取水量57.498 m<sup>3</sup>/MW·h,对应取水量为212.43万m<sup>3</sup>。

不同的间接计算分析均可以看出,该凝汽器在线清洗机器人具有很大的节水潜力,对于电厂节水节能具有重要意义。

### 2.4 节水措施建议

在实际生产中,要考虑循环泵的经济运行,所以对循环水流量的调节并不灵活,又由于该项目在运行过程中尚未考虑水量计量及节水要求,建议采用可靠的节水措施。

#### 2.4.1 完善计量设施

高压水泵供水系统的出水干管上安装水量计

量装置,必要时设调节和控制流量的装置,并将厂区内主要计量数据送到统一地点进行统计分析,以便有针对性地控制水量。清洗的高压水作为在线清洗的动力装置,由凝汽器机器人在线清洗装置项目中的高压水泵系统提供,应加装计量设备统计除盐水的耗水量。

#### 2.4.2 加强水务管理

加强管理制度的实施及节水的宣传力度,提高相关人员的节水意识,制定切实可行的规章制度,将水务管理作为电厂运行考核的一项重要指标,使各项节水措施最终得以落实。加强用水设备、管线检查,防止跑、冒、滴、漏,对泄漏点及时组织检修,加强该项目的循环冷却水、凝结水、除盐水等的检查管理,加大考核力度,减少水量消耗。

## 3 结 语

通过研究可以发现,所研究电厂凝汽器机器人在线清洗装置节能效果显著,也具有一定的节水潜力。由于没有专门的仪表监测,水量计量设施仍待进一步完善,对节水方面参考数据不足。建议在高压水泵供水系统的出水干管上加装水量计量装置,便于对节水指标的进一步分析。通过增加节水因子,使得该系统更加完善,做到按需供水,节能节水。

### 参考文献:

- [1] 侯传河,林德才,汪党献,等. 实施节水评价限制用水浪费[J]. 中国水利, 2020(7):1.
- [2] 陈功. 影响凝汽器传热效果的因素及分析[J]. 节能, 2007(3):19-21.
- [3] 朱锐,种道彤,刘继平,等. 冷却水流量对凝汽器性能影响的试验研究[J]. 热力发电, 2006(4):10-13, 27.
- [4] 闫顺林,韩建,曹保鑫. 600MW机组凝汽器水侧胶球清洗系统数值模拟及优化改造[J]. 汽轮机技术, 2019(6):74-77.
- [5] 孙勇. 某300MW发电机组凝汽器的不停运化学清洗[J]. 电工技术, 2016(11):124-125.