

基于凝汽器性能监测的智能在线清洗机器人技术研究与应用

张凯峰¹，杨超¹，肖阳¹，王待²，常金勇²

1 国能（连江）港电有限公司；福建连江 350500

2 郑州赛为机电设备有限公司 河南郑州 450000

摘 要：本课题结合工程运行数据和实践经验，以某沿海 1000MW 燃煤机组为例，基于能量平衡方法与再学习建模等多种方式，最终得到凝汽器性能等冷端指标，指导机器人智能在线清洗和冷端系统优化运行。为验证计算模型的合理科学性，项目通过机组大修前后凝汽器检修前后性能对比分析，结果表明：基于能量平衡方法计算的凝汽器传热性能与运行情况基本相符，计算方法科学性得到验证。本方法计算简单，满足凝汽器性能在线计算要求，可为凝汽器等冷端系统在线性能监督和调整提供便利。

关键词：凝汽器；性能监测；智能在线清洗；研究

1 研究背景

凝汽器作为火力发电厂冷端的主要设备，其清洁状况对机组的安全与经济运行有着重要影响。目前，凝汽器的清洁主要采用胶球在线清洗结合离线人工冲洗的方式。然而，胶球清洗是一种技术粗放、简单的清洗方式，存在胶球回收率低、容易堵管、清洗效果较差等问题，难以维持凝汽器长期清洁；人工冲洗一般只能在停机或单侧隔离状态下进行，受限制较多。因此，传统的凝汽器清洁方式，在数字化与智能化突飞猛进的现代工业时代显得尤为落后，凝汽器清洗技术亟待升级与改进。同时，在工业化与信息化深度融合的背景下，对凝汽器性能进行全面而可靠的监测、实现智能清洗，进而提高机组冷端性能，显得相当必要。

近年来，以“水蜘蛛”系列凝汽器在线清洗机器人装置为代表的新型自动化在线清洗技术以其精准的数字化清洗方式，汇集胶球清洗、高压水清洗、加药清洗等传统技术优点，弥补了传统清洗方式可靠性差、安全灵活性低等不足，迅速在大中型电厂得到推广应用。为提高该技术智能化水平，本课题在此基础上开发了凝汽器性能监测与智能清洗系统，在实现凝汽器性能在线诊断的同时，指导凝汽器在线清洗装置的优化运行，对维护机组良好真空、提高机组运行的安全性、经济性具有重要作用。

2 应用电厂概况

福建某沿海电厂规划容量为 4×1000MW 燃煤发电机组，一期工程安装 2×1000MW 国产超超临界燃煤发电机组，同步建设烟气脱硫和脱硝装置。主凝汽器型号：N-61000 型，冷却水量：33.32m³/S，冷却水入口设计水温为 24.1℃，凝汽器钛管内流速：设计 2.23m/s，凝汽器钛管管径：Φ28×0.7/Φ28×0.5。为加快电厂工业智能化和安全高效发电，本项目以该电厂 1000MW 机组为研究对象，以实现智慧冷端优化为切入点，智能化清洗作为重点课题。

3 智能化清洗设计思想

“水蜘蛛”凝汽器在线清洗装置（机器人）原理是：通过计算机程序控制供水系统和冲洗装置，采用伺服电机带动凝汽器水室内部冲洗装置逐排定点行走，升压泵站通过水力机械臂向冲洗装置提供高压冲洗水，经喷嘴组喷出后在凝接管口形成若干喷射泵，快速增加管内循环水流量，使管内流速在设定时间内从 2.0 米/秒左右快速达到 5-6 米/秒高速流动状态，加快管内污垢的剥离和管口杂物的冲洗，冲走堵塞换热管口的杂物和管内污垢。

本课题遵循“数据→决策→控制”的设计模式，依靠数字化技术和计算机网络系统采集机组实时运行数据、凝汽器在线清洗装置状态与设定参数；基于汽轮机组及冷端系统的专项热力试验，建立凝汽器性能数学模型；计算得到凝汽器性能相关指标，实现凝汽器性能在线诊断和分析〔1〕；确定凝汽器最佳清洗方案，以此监测、指导、控制凝汽器在线清洗装置运行，并可指导运行对机组循环水等冷端系统进行运行调整，实现人机协作和机组节能降耗，提高全厂的经济效益。基于凝汽器性能指标分析的智能机器人冲洗控制系统结构图如图 1

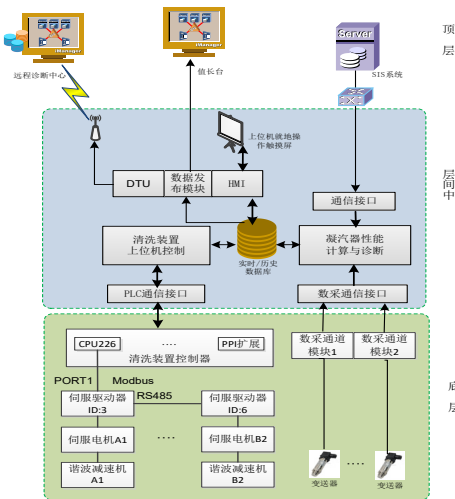


图 1 智能化机器人冲洗控制系统结构图

4 凝汽器实时测点分布与建模

凝汽器性能监测元器件及分析是用计算机软件的开发，主要采用现场 DCS 数据，开发软件需要数据视现场需新增部分测点，压力测点 4 个，温度测点 6 个，其现场测点布置见图 1；

项目基于汽轮机组热力系统机理建模方法，性能计算利用循环水流量计算、传热性能实时计算，具体频率由收敛时间决定。利用试验建模对机理建模进行补充和延伸，同时利用机器学习建模方法，使用计算机模拟人类的学习活动，研究计算机识别现有知识、获取新知识、不断改善性能和实现自身完善。机器学习建模主要用于测点诊断，实时数据预处理，对复杂的、利用机理模型难以实现的影响特性进行计算等。数据甄别时，一旦发现凝汽器传热性能超出合理阈值，即触发异常把信号和相关数据立即传递给专门工程师，可立即采取措施进行下一步工作。（见图 2、图 3）

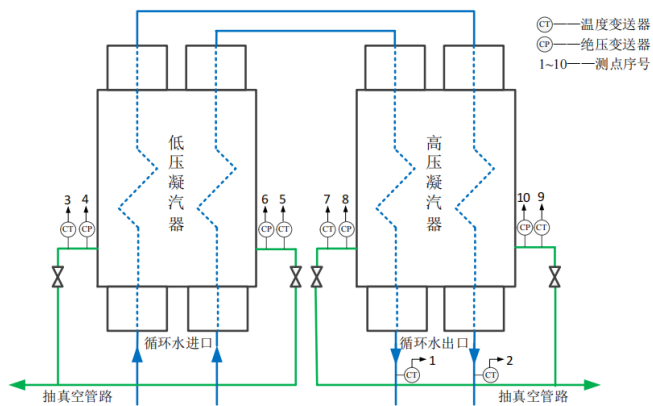


图 2 系统现场数据测点布置图

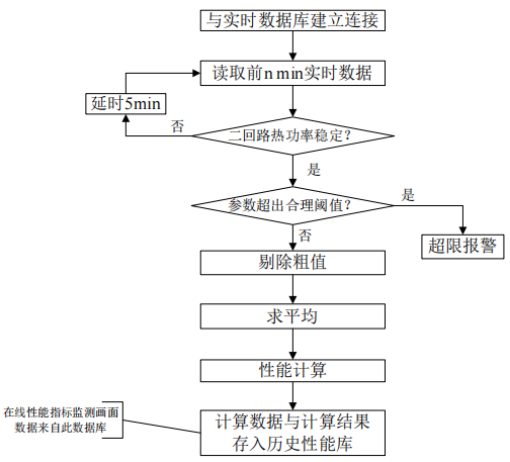


图 3 性能计算流程

5 凝汽器实时在线监测运行效果计算数据对比及效果分析

5.1 表 1：凝汽器实时在线监测运行效果计算数据（委托第三方对凝汽器做的改造后性能试验）

5.2 凝汽器实时在线监测运行效果分析

文中 1.4 条描述凝汽器实时在线监测出现异常提示时，水室内部安装一套在线清洗装置开始进行冲洗，达到阈值内停止冲洗。前后清洗效果对比见图 4 和图 5

表 1：凝汽器实时在线监测运行效果计算数据（委托第三方对凝汽器做的改造后性能试验）

机组负荷	MW	910.27	918.70	909.19	929.88	858.66
主蒸汽流量	t/h	2602.88	2740.95	2701.00	2695.27	2495.31
主蒸汽带入的热量	MJ/h	9128298.51	9538328.77	9548296.90	9432372.66	8778140.87
一号高加进汽流量	t/h	205.11	225.43	221.14	213.84	197.01
二号高加进汽流量	t/h	214.01	220.86	222.58	224.72	199.13
热再蒸汽流量	t/h	2128.15	2248.29	2140.35	2254.07	2010.02
热再蒸汽带入的热量	MJ/h	7822106.13	8252222.94	7842689.90	8250817.22	7381700.44
最终给水流量	t/h	2602.88	2740.95	2701.00	2695.27	2495.31
最终给水带出的热量	MJ/h	3283276.15	3451963.38	3408766.01	3423795.31	3116344.40
运行热耗率	kJ/(kW·h)	7514.57	7798.55	7590.80	7932.57	7476.49
凝汽器压力	kPa	6.14	5.57	6.09	6.98	6.33
低压缸排汽温度	℃	39.80	39.56	38.80	42.49	39.32
CRF 进水温度	℃	15.87	23.76	25.65	27.37	23.04
CRF 出水温度	℃	27.37	31.75	33.49	35.76	30.86
凝汽器热负荷	MW	980.03	1071.45	1007.88	1119.11	943.10
冷却水体积流量	m ³ /s	20.68	32.56	31.25	32.42	29.30
修正至设计温度与流量下的传热系数	kW/(m ² ·℃)	1.83	3.30	3.22	3.22	1.99
修正至设计温度与流量下的总体清洁系数		0.67	0.87	0.85	0.83	0.68
修正至设计条件下的凝汽器压力	kPa	7.07	5.60	5.53	5.72	6.69



图 4 机组大修前凝汽器内部堵塞状况

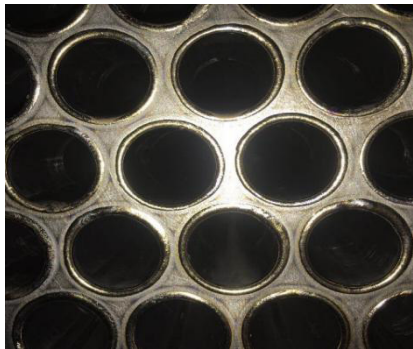


图 5 火电机组大修后凝汽器头部清洗后状况

表 1 是委托第三方国能南京电力试验研究有限公司对凝汽器改造后做的性能试验报告，对其中的数据进行了对及计算分析，得出如下结论：

大修前、后在机组电功率 910MW 时，修正至设计热负荷、设计进口水温和设计冷却水流量等边界条件下，同比 2022 年同时期凝汽器运行状况，修正至设计热负荷、设计进口水温和设计冷却水流量等边界条件下的凝汽器传热系数为 $1.99 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，凝汽器清洁系数为 0.68，修正到设计参数下凝汽器压力为

6.69kPa，2023 年同时期凝汽器压力较去年下降约 1.19 kPa。同时大修前后凝汽器内部检查也验证了凝汽器传热性能变化，证明了本方法的科学性合理性〔2〕。

4 结 语

通过凝汽器性能指标在线分析，大修前试验结果表明凝汽器传热性能下降较多。停机后发现污垢沉积比较严重，钛管内部存在积存泥垢和贝类堵塞物现象，对凝汽器清洁度影响较大，影响凝汽器换热性能，亟需处理。冷端优化运行后文中分析试验数据显示，凝汽器进行了定期在线清洗，长久保持下去，可保持凝汽器清洁和高效运行，在线实时诊断方式以汽水系统和凝汽器换热系统为闭口系，基于能量守恒和质量守恒，得到机组实际运行热耗率；通过能量平衡得到实际运行热耗率，结合机组运行冷却水进出水参数得到凝汽器热负荷，进而求得凝汽器冷却水量；计算得到的冷却水流量，求得凝汽器管束流速等性能参数，进而评判监测凝汽器性能指标。

参考文献：

- [1] 邓德兵，王加勇，杨杰，等. 基于 HEI 和 ASME PTC 方法凝汽器性能计算分析及应用 [J]. 上海节能，2021 (6)：629-633.
- [2] 钟平. 汽轮机简化热力性能试验低压缸效率计算 [J]. 热力发电，2004，(11)：17-21.

作者简介：张凯峰（1982—）汉族 河北灵寿人 男 高级工程师 主要从事火电企业工程建设、生产管理和检修、维护工作。

杨 超（1987—）汉族 湖南岳阳人 男 工程师 主要从事火电企业工程建设、生产管理和检修、维护工作