

火电站直接空冷凝汽器积灰监测

杨立军, 杜小泽, 杨勇平, 刘登瀛

(华北电力大学 能源与动力工程学院 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 火电站直接空冷凝汽器积灰是影响传热性能的重要因素, 研究直接空冷凝汽器积灰对传热性能的影响规律并提出监测措施具有重要意义。通过分析汽轮机背压与汽轮机排汽量、冷却空气流量、凝汽器传热系数、凝汽器总传热面积以及环境温度之间的关系, 得到了空冷凝汽器在维持汽轮机排汽量和冷却空气量不变时, 汽轮机背压和传热系数之间的关系以及凝汽器积灰对汽轮机背压的影响。研究表明: 凝汽器积灰会导致凝汽器传热系数降低, 汽轮机背压升高, 机组运行经济性下降。设计工况下, 当蛇形翅片扁平管结构凝汽器积灰厚度达到 1.2 mm 时, 汽轮机背压将增加 50% 左右。通过监测空冷机组运行过程中汽轮机背压的变化, 可预报积灰的程度, 为直接空冷凝汽器清洗提供一定的理论依据。

关键词: 直接空冷; 凝汽器; 汽轮机背压; 传热特性; 积灰监测

中图分类号: TK264.1 文献标识码: A

引 言

直接空冷机组以环境空气而不是以水作为汽轮机排汽的冷却介质, 可有效解决富煤贫水地区的发电问题, 因而在世界上获得了较快发展^[1~2]。直接空冷机组与水冷机组的主要区别在冷端系统, 冷端系统设计、运行的好坏, 都是通过凝汽器压力直接反映的, 因此凝汽器压力的变化直接关系到整个机组的经济性, 研究环境条件、汽轮机运行参数、凝汽器传热性能等对直接空冷凝汽器压力的影响对于机组安全高效运行具有重要意义。李润森从空冷机组机炉电匹配的角度^[3], 阐述了空冷机组汽轮机背压的选取原则。严俊杰等人在直接空冷凝汽器压力变工况计算数学模型的基础上^[4], 分析了直接空冷系统运行经济性的影响因素。李树梅等人研究了变工况条件下^[5], 各主要参数对直接空冷系统汽轮机背压的影响, 提出了汽轮机冷端参数的选取原则。高玉忠对 600 MW 机组直接空冷凝汽器变工况计算进行

了研究^[6], 绘制了空冷凝汽器特性曲线, 分析了迎面风速、环境气温、凝汽器热负荷对空冷凝汽器性能的影响。

综上所述, 凝汽器压力的影响因素很多。环境气温、凝结蒸汽量、冷却空气流量、空冷凝汽器传热系数、传热面积等因素都会影响凝汽器压力。在一定的环境气温下, 当维持汽轮机排汽量和冷却空气流量不变时, 凝汽器压力仅与空冷凝汽器传热系数有关。为了强化空气侧换热过程, 直接空冷凝汽器通常采用翅片管结构, 翅片布置紧凑, 翅片间距小。在我国富煤贫水的西部地区, 环境条件相对比较恶劣, 风沙大, 扬尘多, 因此灰尘极易在翅片管上聚集, 严重时还会堵塞冷却空气通道, 导致凝汽器传热系数降低, 传热性能恶化, 机组运行经济性变差。因此, 我国直接空冷电站需要经常进行空冷凝汽器清洗, 浪费了水资源, 与火电站采用直接空冷凝汽器实现节水的初衷矛盾。可见, 研究直接空冷凝汽器积灰对汽轮机背压的影响规律, 并能根据机组运行过程中汽轮机背压的变化监测积灰的程度, 从而进行空冷凝汽器的合理清洗, 对于机组安全经济运行具有重要意义。

1 直接空冷凝汽器传热性能

图 1 给出了空冷凝汽器传热过程中, 饱和蒸汽和冷却空气的温度变化示意图。当忽略汽轮机排汽由汽轮机出口流向凝汽器入口以及蒸汽在凝汽器内的流动压降时, 凝汽器内的压力就认为是汽轮机的排汽压力, 即汽轮机背压。通过对蒸汽、空气能量平衡方程以及空冷凝汽器效能 ϵ 、传热单元数 NTU 的推导, 可得到空冷凝汽器内凝结温度 t_s 的关系^[4]:

$$t_s = \frac{m_s(h_s - h_w)}{A_F v_F \rho c_{p_a}} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{KA}{A_F v_F \rho c_{p_a}}}} + t_{al} \quad (1)$$

收稿日期: 2006-05-15; 修订日期: 2006-06-21

作者简介: 杨立军(1970-), 男, 山东章丘人, 华北电力大学讲师。

其中: m_s —凝结蒸汽量; h_s 、 h_w —凝结压力下饱和蒸汽和饱和水焓; ρ 、 c_{pa} —空气密度和定压比热; A_F 、 v_F —空冷凝汽器迎风面面积和迎风面风速; K 、 A —空冷凝汽器传热系数和传热面积; t_{a1} —空气进口温度。

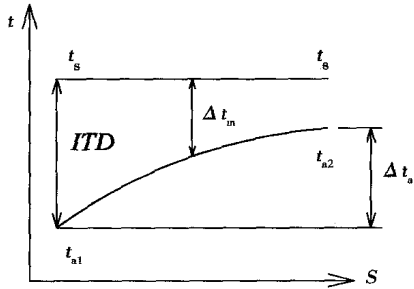


图 1 空冷凝汽器传热过程温度变化示意图

可以看到, 凝结温度与空冷凝汽器进口空气温度、凝结蒸汽量、汽化潜热、空冷凝汽器迎风面面积、迎风面风速、空冷凝汽器的传热系数、总传热面积有关。由于汽化潜热是凝结温度的函数, 在其它影响因素确定的情况下, 需要进行迭代计算才能得到空冷凝汽器内凝结温度。对直接空冷系统而言, 在汽轮机背压变化范围内, 汽化潜热变化很小, 可以忽略汽化潜热变化对凝汽器温度和背压的影响。由式(1)可知, 随空冷凝汽器进口空气温度升高, 凝汽器温度升高, 汽轮机背压升高。随汽轮机排汽量增加, 汽轮机背压升高。随空冷凝汽器迎风面面积、迎风面风速、空冷凝汽器传热系数、传热面积的增加, 凝汽器温度降低, 汽轮机背压减小。在直接空冷机组正常运行过程中, 当维持凝结蒸汽量、轴流风机流量稳定, 而且假定直接空冷凝汽器在积灰时传热面积近似不变的条件下, 汽轮机背压仅与空冷凝汽器入口空气温度和传热系数有关:

$$p_s = g(t_{a1}, K) \quad (2)$$

2 直接空冷凝汽器积灰监测

以某 600 MW 直接空冷机组为例, 汽轮机设计背压为 15 kPa, 对应饱和温度 53.5 °C。夏季满发设计背压为 29.2 kPa, 对应饱和温度为 68.3 °C。在设计背压下空冷凝汽器热负荷为 785.45 MW, 排汽量为 330.8 kg/s。设计环境空气温度为 17 °C, 夏季环境温度为 30 °C。空冷凝汽器总传热面积为 1 531 849 m², 迎风面面积为 12 430 m², 迎风面风速为 1.88 m/s。

在设计气温和夏季气温工况下, 维持冷却空气量和汽轮机排汽量不变时, 600 MW 直接空冷机组汽轮机背压随空冷凝汽器传热系数的变化规律如图 2 所示。图中所示温度即为设计气温 17 °C 和夏季满发气温 30 °C, 曲线上标出的两点分别代表了设计工况和夏季满发工况下的参数。可以看到, 在一定环境温度, 即凝汽器入口空气温度下, 空冷凝汽器的传热系数越大, 汽轮机背压就越小, 表明直接空冷机组的经济性就越好。在设计气温下, 当凝汽器传热系数由设计值 27.4 W/(m²·K), 增加 20% 时, 汽轮机背压则由 15 kPa 降低到 13.1 kPa, 降低了 12.7%。在夏季满发气温下, 当传热系数增加 20% 时, 汽轮机背压则由 29.2 kPa 降低到 27 kPa, 降低了 7.5%。可见, 通过增加空冷凝汽器传热系数, 可以降低汽轮机背压。当空冷凝汽器传热系数减小时, 汽轮机背压则会显著升高。在设计气温下, 当传热系数降低 20% 时, 汽轮机背压由 15 kPa 增加到 18 kPa, 增加了 20%。满发气温下, 汽轮机背压则由 29.2 kPa 增加到 33.7 kPa, 增加了 15.4%。

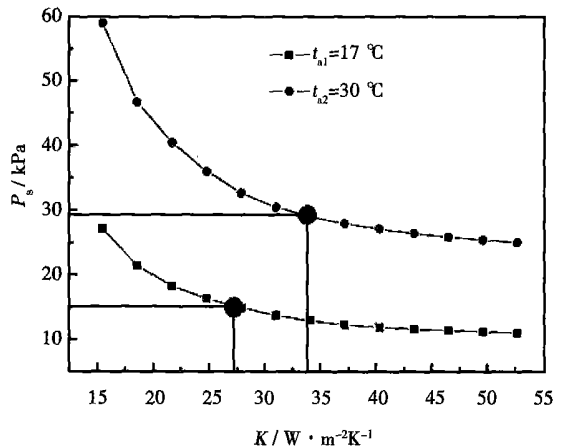


图 2 不同环境温度下, 空冷凝汽器压力随传热系数的变化曲线

当维持汽轮机排汽量和冷却空气流量不变时, 直接空冷凝汽器管内蒸汽凝结换热系数和管外空气对流换热系数保持恒定。如果机组运行过程中出现直接空冷凝汽器积灰, 就会使凝汽器传热系数减少, 从而使汽轮机背压升高。由图 2 可知, 根据机组运行过程中汽轮机背压的变化, 可以得到凝汽器由于积灰带来的传热系数的变化, 由此就可以推算凝汽器积灰的程度, 从而决定直接空冷凝汽器是否需要清洗。

以图 3 所示 600 MW 直接空冷机组通常采用的

单排扁平管蛇行翅片结构为例, 假设通过扁平管的导热为沿着管壁厚度方向的一维导热, 对通过翅片管的传热过程进行理论推导, 可得到以空气侧翅片管总面积为基准的传热系数的表达式:

$$K_o = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \beta + \frac{\delta}{\lambda} \beta + \frac{1}{\eta_o h_o}} \quad (3)$$

其中: h_i, h_o —管内蒸汽凝结换热系数和管外空气对流换热系数; λ —管壁材料的导热系数; δ —管壁厚度; β, η_o —翅片管的肋化系数和肋壁总效率, 其定义分别为:

$$\beta = A_o / A_i \quad (4)$$

$$\eta_o = (A_1 + A_2 \eta_f) / A_o \quad (5)$$

其中: $A_o = A_1 + A_2$ —翅片管空气侧总传热面积; A_1 —空气侧光管部分面积; A_2 —空气侧翅片面积; A_i —蒸汽侧传热面积; η_f —翅片效率, 根据翅片效率定义, 有如下表达式:

$$\eta_f = \frac{t_2 - t_a}{t_1 - t_a} \quad (6)$$

式中: t_2 —翅片表面平均温度; t_1 —翅片管基管外部平均温度; t_a —流经翅片管的空气平均温度。

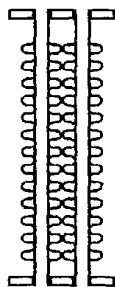


图 3 直接空冷凝汽器单排扁平管蛇行翅片结构示意图

当直接空冷凝汽器运行一段时间以后, 就会在其基管外表面和翅片上聚集灰尘, 产生积灰现象。假设翅片管基管外表面和翅片上表面均匀积灰, 积灰厚度为 δ_d , 积灰后空气侧光管面积 A_1 和翅片面积 A_2 不变, 蒸汽凝结换热系数和空气对流换热系数保持不变, 翅片管肋化系数和肋壁总效率也保持不变。积灰之后以翅片管总传热面积为基准的传热系数为:

$$K'_o = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \beta + \frac{\delta}{\lambda} \beta + c \frac{\delta_d}{\lambda_d} \beta + \frac{1}{\eta_o h_o}} \quad (7)$$

其中: λ_d —积灰的导热系数; c —考虑到翅片仅在上表面积灰而引入的积灰系数。

联立式(3)和式(7), 可得到积灰厚度和传热系数变化之间的表达式:

$$\delta_d = \frac{\lambda_d (K_o - K'_o)}{c K_o K'_o \beta} \quad (8)$$

当凝汽器积灰使得汽轮机背压升高后, 可根据不同环境温度下凝汽器压力随传热系数的变化曲线, 得到凝汽器积灰之后的传热系数 K'_o , 于是根据式(8)就可以获得凝汽器压力随积灰厚度之间的关系。图 4 给出了采用单排扁平管蛇形翅片的 600 MW 机组凝汽器压力和积灰厚度之间的关系曲线。积灰的导热系数 λ_d 取为 $0.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 积灰系数 c 取为 0.4 , 根据翅片管结构参数, 取其肋化系数 β 为 16.4 。

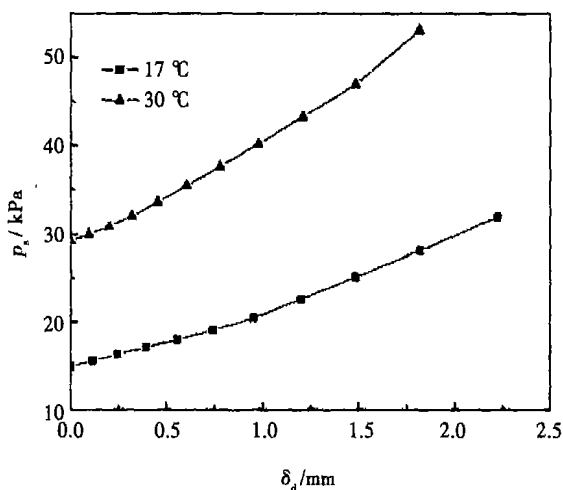


图 4 在设计气温和夏季气温下, 凝汽器压力和积灰厚度之间的关系曲线

图 4 显示, 在设计气温和夏季满发设计气温下, 随空冷凝汽器积灰厚度增加, 凝汽器压力升高。在设计气温下, 当积灰厚度达到 1.2 mm 时, 凝汽器压力则由设计压力 15 kPa 升高到 22.6 kPa , 增加了 51% 。在夏季满发设计气温下, 当积灰厚度达到 0.6 mm 时, 凝汽器压力则由设计压力 29.2 kPa 升高到 35.5 kPa , 增加了 21.5% 。可见, 直接空冷凝汽器积灰对凝汽器压力的影响非常显著。在直接空冷机组运行过程中, 可以通过凝汽器压力的变化来监测积灰的程度, 从而制定凝汽器清洗的标准, 为直接空冷机组的高效运行提供指导。在其它气温条件下, 根据式(1)和式(2)也可以得到凝汽器压力和凝汽器传热系数之间的关系, 然后由式(8)获得凝汽器压力随凝汽器积灰厚度的变化规律, 从而实现直接空冷凝汽器的积灰监测。

3 结 论

通过直接空冷凝汽器传热性能分析,获得了汽轮机背压和空冷凝汽器传热系数之间的关系。在对空冷凝汽器积灰前后传热系数变化分析的基础上,得到了汽轮机背压随积灰厚度变化的关系曲线。维持冷却空气量和汽轮机排汽量不变时,汽轮机背压随传热系数增加而降低,即随凝汽器积灰厚度增加而升高。对于蛇形翅片扁平管结构凝汽器,当设计工况下积灰厚度为 1.2 mm 时,汽轮机背压会增加 50%左右。在直接空冷机组运行过程中,可以通过汽轮机背压的变化来监测空冷凝汽器积灰的程度,从而制定凝汽器清洗的标准,为直接空冷机组的安全高效运行提供指导。

参考文献:

- [1] TAWNEY R, KHAN Z, ZACHARY J. Economic and performance evaluation of heat sink options in combined cycle applications[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(2): 397—403.
- [2] 伍小林. 我国火力发电厂空气冷却技术的发展现状[J]. 国际电力, 2005, 9(1): 15—18.
- [3] 李润森. 空冷机组机炉电匹配的探讨[J]. 动力工程, 2004, 24(2): 159—165.
- [4] 严俊杰, 张春雨, 李秀云, 等. 直接空冷系统变工况特性的理论研究[J]. 热能动力工程, 2000, 15(6): 601—603.
- [5] 李树梅, 赵 耀. 直接空冷系统变工况计算与热力特性曲线[J]. 内蒙古电力技术, 2003, 21(2): 3—4.
- [6] 高玉忠. 电站直接空冷凝汽器变工况计算与特性分析[J]. 上海汽轮机, 2001(3): 5—7.

(编辑 何静芳)

(上接第 171 页)

实验表明: Elman 网络不但具有更高的准确性, 而且每次训练的结果很稳定; 而 BP 网络对初值比较敏感、识别率低, 且每次训练的结果不尽相同。Elman 网络训练误差曲线如图 7 所示。

5 结 论

提出了小波和 Elman 神经网络用于气液两相流流型识别的新方法, 得出如下结论:

(1) 定义了小波能量对压差信号进行特征提取, 检测结果证明了小波能量能够很好地提取不同流型的特征;

(2) 用 Elman 神经网络实现了对流型的智能识别, 实验结果证明, 该识别方法优于 BP 网络, 具有很好的识别效果。

参考文献:

- [1] 林宗虎. 气液两相流与沸腾传热[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987.

- [2] 袁曾任. 神经网络及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [3] 孙 斌, 周云龙. 基于支持向量机和小波包能量特征的气液两相流流型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 93—99.
- [4] MI Y, ISHIM, TSOUKALAS L H. Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase flow models[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 204(1/3): 87—100.
- [5] EMBRECHTS M J, LAHEY R T, YAPO T. The application of networks to two phase flow regime identification // Proceeding of the American Nuclear Society Conference[C]. New York: Hemisphere Pub Corp, 1996 860—864.
- [6] 王妍, 林宗虎. 改进 BP 神经网络在流型判别中的应用[J]. 热能动力工程, 2001, 16(1): 63—65, 90.
- [7] MALLAT S. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Trans Information Theory, 1992, 38(2): 617—643.
- [8] 彭玉华. 小波变换及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [9] 孙 斌, 周云龙, 陆 军, 等. 水平管气液两相流压差波动信号中噪声的辨识[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(6): 639—642.
- [10] 刘建成, 蒋新华, 吴今培. 小波分析在虚拟检测系统中的应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(5): 466—469.

(编辑 何静芳)

tional fluid dynamics) software platform, a numerical simulation of boiler flue gas and air system as well as coal feed cut-off and fire extinguishing process has been conducted for the first time. For the following three operating regimes, i. e. at the time of 0.3 s, 0.5 s and 1 s after stopping the feed of coal, a simulation calculation has been performed. Through an analysis and comparison of calculation results of the three operating regimes, the authors conclude that the speed of coal feed stop off to a boiler has a great impact on boiler implosion. The quicker the coal-feed cut-off to the boiler, the greater the possibility that a boiler implosion may happen. If all parts in a boiler are designed to have a same maximum pressure bearing capacity, it is most likely for the implosion to take place in the furnace. In the meantime, the process of change in pressure and temperature at the time of 0.01 s and 1.5 s after stopping coal feed was also calculated and compared. The analysis leads to a conclusion that apart from a temperature drop, the boiler implosion may cause a quick decrease of RO_2 after a fire extinguishing and it is also an important factor contributing to pressure fluctuations in furnace and the quicker the coal feed is stopped to a boiler, the less will be the effect of temperature. **Key words:** boiler implosion, dynamic simulation, flue gas and air system, porous medium

基于小波和 Elman 神经网络的气液两相流型识别方法 = **A Method for Discriminating Gas-liquid Two Phase Flow Patterns Based on Wavelets and Elman Neural Networks**[刊, 汉] / WANG Qiang, ZHOU Yun-long, CHENG Si-yong, et al (College of Power Engineering under the Northeast Electric Power University, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 168 ~ 171, 175

The traditional flow pattern discrimination method can only be used as a kind of qualitative flow pattern discrimination. To overcome such a defect of the traditional method, a wavelet analysis and Elman neural network technology has been adopted to realize an intelligent discrimination of gas-liquid two-phase flow patterns. In this connection, the pressure-difference fluctuation signals of the gas-liquid two-phase flow inside horizontal tubes were measured and a wavelet analytic method was employed to analyze the dynamic pressure-difference fluctuation signals of the flow patterns, extracting relevant characteristics. Then, the wavelet energy was treated as an input to the Elman neural network, thus accomplishing an intelligent discrimination of the flow patterns. The test results show that the method under discussion can identify 4 kinds of flow patterns with a very high accuracy. The method has a very good discrimination effect, thereby providing a quantitative flow pattern discrimination method for an on-line discrimination of flow patterns. **Key words:** wavelet analysis, Elman neural network, two-phase flow, flow pattern discrimination

火电站直接空冷凝汽器积灰监测 = **Monitoring of Dust Accumulation on Direct Air-cooled Steam Condensers in Thermal Power Plants**[刊, 汉] / YANG Li-jun, DU Xiao-ze, YANG Yong-ping, et al (Education Ministry Key Laboratory on Monitoring and Control of Power Plant Equipment Conditions, College of Energy Source and Power Engineering under the North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 172 ~ 175

The dust accumulation on direct air-cooled condensers is a major factor affecting their heat transfer performance. It is of great significance to study the law governing the impact of dust accumulation on direct air-cooled condensers in respect of heat transfer performance and come up with adequate monitoring measures. Through an analysis of the relationship of steam turbine back pressure with turbine exhaust-steam flow rate, cooling air flow rate, condenser heat transfer coefficient, condenser total heat transfer area and ambient temperature, the relationship of steam turbine back pressure and heat transfer coefficient was identified along with the effect of dust accumulation of the condenser on steam turbine back pressure when steam turbine exhaust-steam flow rate and cooling air flow rate for the air-cooled condenser are kept constant. The study indicates that the dust accumulation on a condenser can lead to a decrease in heat transfer coefficient of condensers, an increase in steam turbine back pressure and a decrease in turbine unit operating efficiency. Under design operating conditions when dust accumulation on finned spiral flat tube-structured condensers has a thickness of 1.2 mm, the steam turbine back pressure will increase by about 50%. Through a monitoring of the change in steam turbine back pressure during the operation of an air cooled turbine unit, the degree of dust accumulation can be forecasted, thus providing a theoretical basis for cleaning air cooled condensers. **Key words:** direct air-cooling, condenser, steam turbine back pressure, heat transfer characteristics, dust accumulation monitoring