

## 火电机组冷却塔变工况特性研究

夏 林, 刘德有, 丁 伟, 贺 达  
(河海大学 水利水电学院 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 基于冷却塔进塔风速软测量原理和出塔水温实时测量数据, 提出一种出塔水温计算新方法, 对某电厂 300 MW 机组的出塔水温进行计算并与实测结果进行对比, 结果表明: 出塔水温的在线计算结果与实测结果最大偏差约 2%, 该方法可准确计算出塔水温。利用出塔水温计算新方法进行了冷却塔变工况特性研究, 并绘制了冷却塔变工况特性曲线。通过对影响出塔水温的外界气象参数进行敏感性分析可知: 大气压力对出塔水温的影响很小, 可忽略。由冷却塔变工况特性曲线可知: 出塔水温随着干球温度、相对湿度的增大而增大, 且相对湿度对出塔水温的影响随干球温度的增大而增大。

**关 键 词:** 火电机组; 循环冷却水系统; 冷却塔; 出塔水温; 气象条件

中图分类号: TK121 文献标识码: A

## 引 言

冷却塔作为火电机组循环冷却水系统中的重要换热设备, 其主要作用是吸收冷却水中携带的废热, 并将其散入大气, 达到降低冷却水温度的目的。冷却塔的运行状况受到机组负荷、循环水泵运行方式、外界气象条件的影响, 如图 1 所示。火电机组实际运行时, 机组负荷随电网调度要求而改变, 外界气象条件实时变化, 循环水泵运行方式根据机组负荷、外界气象条件、机组发电经济性等因素综合确定, 冷却塔长期处于变工况运行状态。

现有文献资料主要针对冷却塔热力计算方法<sup>[1-3]</sup>、冷却塔热力性能实验进行了研究<sup>[4-6]</sup>, 而针对循环冷却水系统的变工况特性研究, 也主要集中在凝汽器方面<sup>[7-8]</sup>。并且, 在循环冷却水系统的循环水泵优化运行过程中, 文献[9-10]都是在凝汽器进口水温、机组负荷一定的前提下, 利用凝汽器变工况特性确定循环水泵最优运行方式, 未考虑机组负荷、循环水泵运行方式和外界气象条件的变化对

凝汽器进口水温的影响, 即忽略了冷却塔的变工况特性, 存在着明显的技术缺陷<sup>[11]</sup>。在循环冷却水系统的运行过程中, 冷却塔的运行状况将会直接影响到凝汽器真空度, 进而影响机组的经济性。一般情况下, 对于 300 MW 机组, 出塔水温降低 1℃, 凝汽器真空将提高 400-500 Pa, 发电煤耗下降 1-1.59 g/(kW·h)。因此, 研究冷却塔的变工况特性也是确定循环水泵最优运行方式的关键内容之一。

自然通风逆流式冷却塔变工况特性计算的结果应使冷却塔的冷却能力与冷却任务、总阻力与总抽力同时保持平衡。因此, 现有的冷却塔变工况特性计算方法都需要进行空气动力学计算。但由于塔内阻力计算过程复杂, 并且阻力系数常常需要进行多组试验才能确定, 因此文献[12]提出一种基于麦克尔焓差法的冷却塔进塔风速软测量方法, 并据此估算循环水泵在其它运行方式时的进塔风速, 但是, 估算的进塔风速不够准确, 只能为确定循环水泵在不同运行方式下的出塔水温提供参考。针对此不足, 本研究基于软测量原理和冷却塔实时测量数据, 提出一种冷却塔出塔水温计算的新方法, 并利用该方法研究冷却塔的变工况特性, 绘制冷却塔变工况特性曲线, 由此可对冷却塔的运行状况进行监督, 指导循环冷却水系统的优化运行。

## 1 影响冷却塔变工况特性的边界条件

本研究拟建立的冷却塔变工况特性数学模型包括影响冷却塔变工况特性的边界条件数学模型和冷却塔出塔水温计算数学模型两部分。

冷却塔运行时受到边界条件的影响, 如图 1 所示。其中, 机组负荷和循环水泵运行方式将影响冷却塔内冷却水的放热量与冷却水流量, 气象条件则直接影响进塔空气参数。

收稿日期: 2013-08-21; 修订日期: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979029; 51209073)

作者简介: 夏 林(1989-), 男, 福建三明人, 河海大学博士研究生。

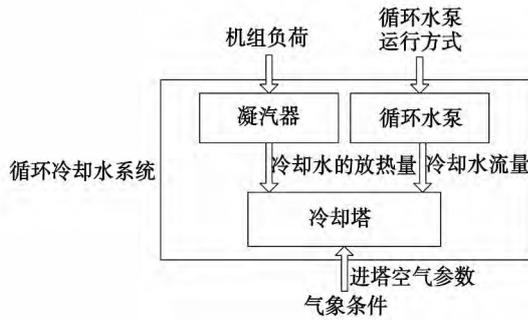


图1 冷却塔受边界条件影响分析图

Fig. 1 Chart for analyzing the influence of the boundary conditions on a cooling tower

### 1.1 机组负荷

当忽略进入凝汽器的其它热量时,凝汽器中蒸汽的凝结放热量等于冷却水的吸热量,用下式表示:

$$W_c = Q_s(h_s - h_c) = Q_m c_w(t_{c2} - t_{c1}) \quad (1)$$

式中:  $W_c$ —凝汽器内冷却水的吸热量 kW;  $Q_s$ —进入凝汽器的排汽量 kg/s;  $h_s$ —排汽焓 kJ/kg;  $h_c$ —凝结水焓 kJ/kg;  $Q_m$ —冷却水的质量流量, kg/s;  $c_w$ —冷却水比热容, kJ/(kg·°C);  $t_{c2}$ —凝汽器出口水温, °C;  $t_{c1}$ —凝汽器进口水温, °C。

如不考虑冷却水补水、循环泵耗电的影响以及冷却塔出口至凝汽器进口的热量损失,则冷却塔内冷却水的放热量等于凝汽器内冷却水的吸热量,即:

$$W_t = W_c \quad (2)$$

式中:  $W_t$ —冷却塔内冷却水的放热量 kW;

当机组负荷变化时,汽轮机低压缸的排汽量、排汽焓以及凝结水焓都会发生变化,因此,当忽略凝汽器压力变化对凝汽器中蒸汽凝结放热量的影响时,由式(1)、式(2)可知,冷却塔内冷却水的放热量可表示为机组负荷的函数,即:

$$W_t = f(U) \quad (3)$$

式中:  $U$ —机组负荷, MW。

### 1.2 循环水泵运行方式

在循环冷却水系统中,冷却水流量取决于循环水泵的工作点,即循环水泵性能曲线与系统水阻曲线的交点。当循环水泵运行方式不同时,有不同的循环水泵性能曲线。对于固定的循环冷却水系统,在一定的系统阻力系数下,系统水阻曲线取决于系统静扬程(指系统的几何供水高度,即循泵吸水井中水面至冷却塔中央竖井中水面之间的标高差)。因此,冷却水流量可表示为循环水泵运行方式与系统静扬程的关系式:

$$Q = f(M, H_s) \quad (4)$$

式中:  $Q$ —冷却水的体积流量, m<sup>3</sup>/s;  $M$ —循环水泵运行方式;  $H_s$ —系统静扬程, m。

当忽略冷却塔竖井内水位变化,可认为系统静扬程不变,则上式可简化为:

$$Q = f(M) \quad (5)$$

### 1.3 气象条件

在冷却塔出塔水温的计算中,忽略塔内水蒸气分压力对大气压力的影响,并将进塔空气参数取为外界气象参数,即:

$$\begin{cases} T_{a1} = T_a \\ RH_1 = RH \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $T_{a1}$ —进塔空气干球温度, °C;  $T_a$ —外界空气干球温度, °C;  $RH_1$ —进塔空气相对湿度;  $RH$ —外界空气相对湿度。

外界气象条件中的大气压力、干球温度、相对湿度的变化都可能对冷却塔出塔水温产生影响,但三者的影响程度不同。

## 2 冷却塔出塔水温的计算

考虑到冷却塔空气动力计算中塔内阻力系数的确定过程较为复杂,本研究基于进塔风速软测量原理<sup>[12]</sup>,提出一种塔内阻力系数的软测量方法,并基于软测量结果对出塔水温进行在线计算。

### 2.1 塔内阻力系数的软测量

麦克尔焓差法将散热系数、散质系数以及湿空气的比热在整个冷却过程中看作为常量,不考虑水侧的热阻,并通过引入刘易斯数,把传热与传质统一为焓变<sup>[13]</sup>,其基本公式为:

$$\frac{\beta_{sv} V_t}{Q_m} = \frac{1}{K} \int_{t_{11}}^{t_{12}} \frac{c_w dt_1}{(h_{sw} - h_a)} \quad (7)$$

式中:  $\beta_{sv}$ —冷却塔内填料的容积散质系数, kg/(m<sup>3</sup>·h);  $V_t$ —冷却塔内填料的体积, m<sup>3</sup>;  $K$ —蒸发水量散热系数;  $t_{11}$ 、 $t_{12}$ —进、出塔水温, °C;  $h_{sw}$ —水的饱和蒸汽焓 kJ/kg;  $h_a$ —空气焓 kJ/kg。

式(7)右侧为冷却塔的冷却任务数,它与气象条件有关,一般采用辛普森近似积分法进行计算,即:

$$N = \frac{c_w \Delta t}{6K} \left( \frac{1}{h_{s2} - h_{a1}} + \frac{4}{h_{sm} - h_{am}} + \frac{1}{h_{s1} - h_{a2}} \right) \quad (8)$$

式中:  $N$ —冷却塔的冷却任务数;  $h_{s2}$ 、 $h_{s1}$ 、 $h_{sm}$ —与进塔水温、出塔水温及进、出塔平均水温对应的饱和空气焓  $\text{kJ/kg}$ ;  $h_{a1}$ 、 $h_{a2}$ 、 $h_{am}$ —进塔空气焓、出塔空气焓及进、出塔空气焓的均值  $\text{kJ/kg}$ ;  $\Delta t$ —冷却水温差,  $^{\circ}\text{C}$ 。

式(7)左侧为冷却塔的冷却能力数,即淋水填料的散热特性,它表征了在一定淋水填料及塔型下冷却塔所具有的冷却能力,与填料的特性、构造、几何尺寸及冷却水量有关。一般由填料厂家直接给出,即:

$$N' = A\lambda^B \tag{9}$$

式中:  $N'$ —冷却塔的冷却能力数;  $A$ 、 $B$ —填料热力特性系数;  $\lambda$ —气水比。

由冷却塔内抽力与阻力平衡可得塔内阻力系数的计算公式为:

$$\xi = \frac{4H_e g(\rho_1 - \rho_2)}{v_m^2(\rho_1 + \rho_2)} \tag{10}$$

式中:  $H_e$ —风筒有效高度  $\text{m}$ ;  $g$ —重力加速度  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\rho_1$ —进塔空气密度  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_2$ —出塔空气密度  $\text{kg/m}^3$ ;  $v_m$ —进塔风速  $\text{m/s}$ ;  $\xi$ —塔内阻力系数。

由式(1) - 式(10)可知,在冷却塔的边界条件一定的情况下,塔内阻力系数可由实测的出塔水温求解得到,其求解流程如图2所示。

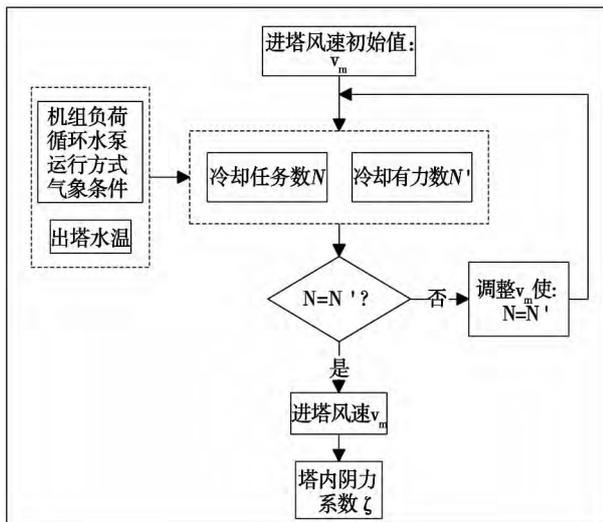


图2 塔内阻力系数求解流程图

Fig. 2 Chart showing the flow path for seeking solutions to the drag coefficient inside a cooling tower

根据中国水利水电科学研究院关于自然通风冷却塔通风阻力的研究成果知,对于塔型和内部设备一定的冷却塔,其塔内阻力系数取决于冷却水体积

流量和进塔风速<sup>[13]</sup>,即:

$$\xi = f(Q, v_m) \tag{11}$$

由1.2节分析可知,在循环冷却水系统中,可认为冷却水流量取决于循环水泵运行方式。考虑到火电机组冷却水系统中循环水泵运行方式相对固定,因此,可在循环水泵运行方式一定的前提下,由实测的出塔水温,求解得相应的进塔风速和塔内阻力系数。图3即为某电厂300MW机组冷却塔阻力系数与进塔风速的关系曲线。

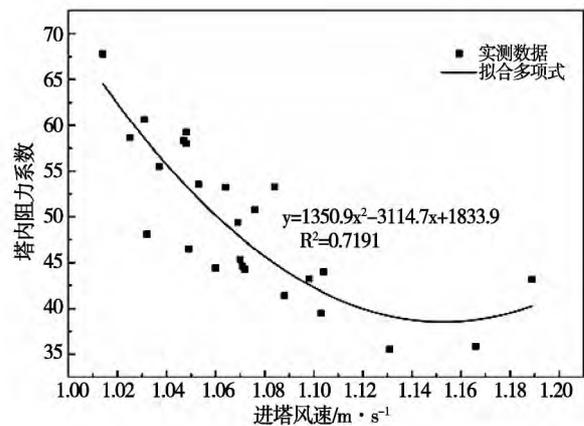


图3 塔内阻力系数与进塔风速的关系曲线

Fig. 3 Drag coefficient in the tower vs. its inlet air speed

### 2.2 出塔水温的在线计算

由前文分析可知,进塔风速可由出塔水温在线计算得到,而图3建立了塔内阻力系数与进塔风速的直接关系。因此,在边界条件一定的情况下,进塔风速、塔内阻力系数均可表示为出塔水温的函数,即:

$$(v_m, \xi) = f(t_{t2}) \tag{12}$$

根据冷却塔的实时边界条件,将式(12)和冷却塔内抽力与阻力平衡方程式(10)联立,即可进行出塔水温的在线计算,其求解流程图如图4所示。

根据图4出塔水温在线计算方法求解的300MW机组自然通风逆流式冷却塔的出塔水温如表1所示。同时,由分辨率为 $0.01^{\circ}\text{C}$ 的pt-100型铂电阻探头实测得冷却塔出口回水沟内出塔水温。在表1中,将出塔水温的实测结果与在线计算结果进行对比可知,两者的最大偏差约为2%,因此,该方法可准确确定冷却塔的出塔水温,这对于在线指导火电机组循环冷却水系统的优化运行有重要的实际意义。此外,由图3塔内阻力系数与进塔风速的关系

曲线可知 随着冷却塔运行数据的积累 出塔水温在线计算的结果也将更加准确。

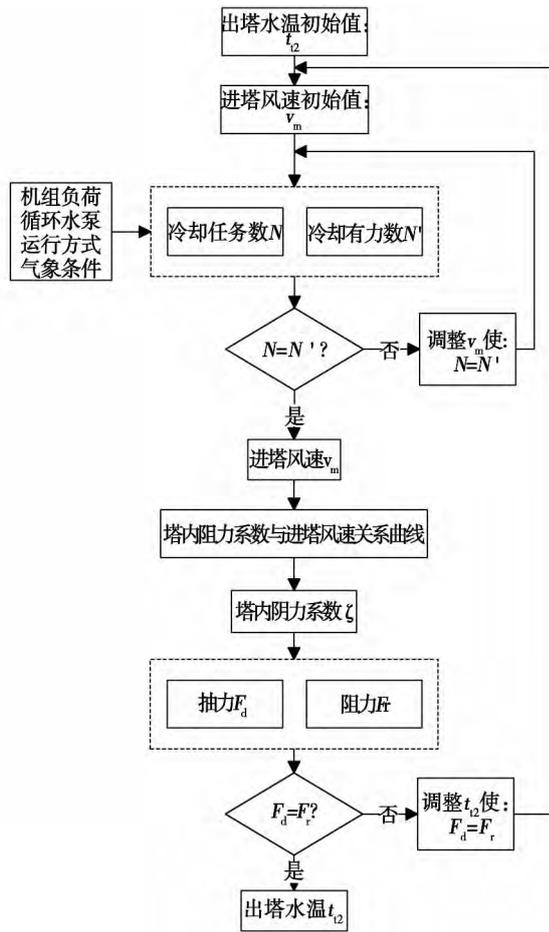


图 4 出塔水温在线计算流程图

Fig. 4 Chart for on-line calculating the temperature of water outgoing from the tower

表 1 某电厂出塔水温实测结果与在线计算结果对比  
Tab. 1 Contrast of the actually measured result of the temperature of water outgoing from the tower in a power plant and the on-line calculation result

大气压力 / Pa	干球温度 / °C	相对湿度	冷却水量 / t · h <sup>-1</sup>	实测出塔水温 / °C	计算出塔水温 / °C	偏差
99900	27.60	0.616	30812	30.05	30.36	1.03%
99900	26.93	0.610	30812	29.28	29.85	1.95%
99900	26.87	0.588	30812	28.88	29.18	1.04%
100000	27.75	0.639	30812	30.22	30.46	0.78%
99750	30.38	0.600	30812	30.42	30.58	0.53%
99750	30.29	0.590	30812	30.62	30.49	-0.42%
99700	30.32	0.567	30812	30.72	30.42	-0.98%
99750	30.57	0.551	30812	30.83	30.27	-1.82%
99900	27.82	0.574	30812	29.95	30.04	0.30%

### 3 冷却塔变工况特性分析

影响冷却塔变工况特性的边界条件包括机组负荷、循环水泵运行方式以及外界气象条件中的大气压力、干球温度和相对湿度 并考虑到机组负荷、循环水泵运行方式对出塔水温的影响较为明显 因此 本研究先通过对 3 个气象参数进行敏感性分析 忽略一些对出塔水温影响较小的边界条件 最后 将剩余边界条件对冷却塔变工况特性的影响反映在冷却塔特性曲线中。

#### 3.1 气象参数的敏感性分析

##### 3.1.1 大气压力

在机组负荷为 100%、干球温度为 15 °C、相对湿度为 70% 情况下 当大气压力在当地极端气象条件内变化时 可计算得大气压力与出塔水温的关系如图 5 所示。

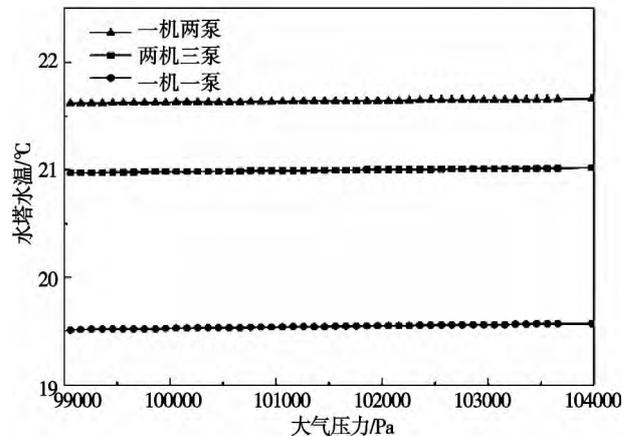


图 5 大气压力变化对出塔水温的影响

Fig. 5 Impact of the atmospheric pressure on the temperature of water outgoing from the tower

由图 5 可知 在 3 种循环水泵运行方式下 大气压力变化对出塔水温的影响都较小 大气压力在其极值范围内变化约 5 000 Pa 出塔水温变化约 0.1 °C。因此 在冷却塔变工况特性研究中 可忽略大气压力对出塔水温的影响。

##### 3.1.2 干球温度

在机组负荷为 100% 大气压力为 101.5 hPa 相对湿度为 70% 情况下 当干球温度在当地极端气象条件内变化时 可计算得干球温度与出塔水温的关系如图 6 所示。

由图 6 可知,在 3 种循环水泵运行方式下,干球温度的变化对出塔水温都有显著影响。干球温度变化约 5 °C,出塔水温变化约 2.5 °C。并且,气候变化时,干球温度的变化幅度大且频繁,干球温度是气候变化最直观的反应,因此,干球温度是进行冷却塔变工况特性研究的重要气象参数。

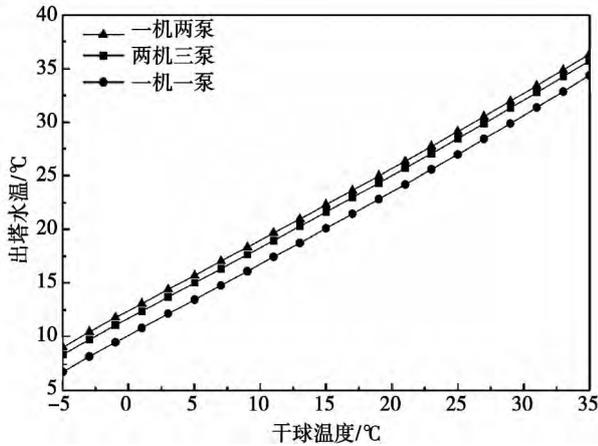


图 6 干球温度变化对出塔水温的影响  
Fig. 6 Impact of the changes of the dry-bulb temperature on the temperature of water outgoing from the tower

### 3.1.3 相对湿度

在机组负荷为 100% ,大气压力为 101.5 hPa ,干球温度为 15 °C 情况下,当相对湿度在当地极端气象条件内变化时,可计算得相对湿度与出塔水温的关系如图 7 所示。

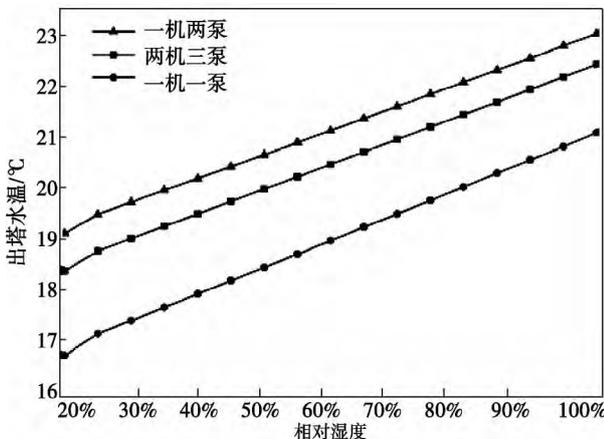
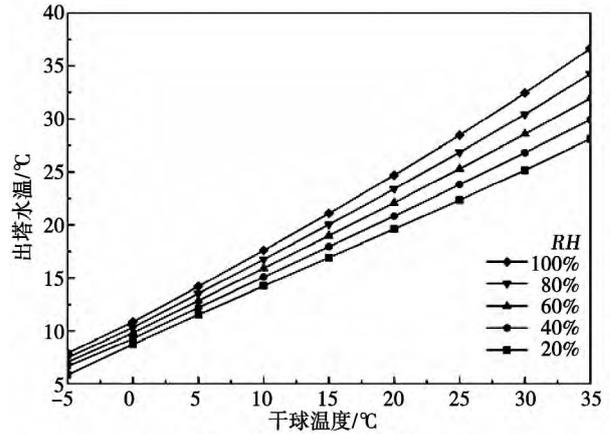
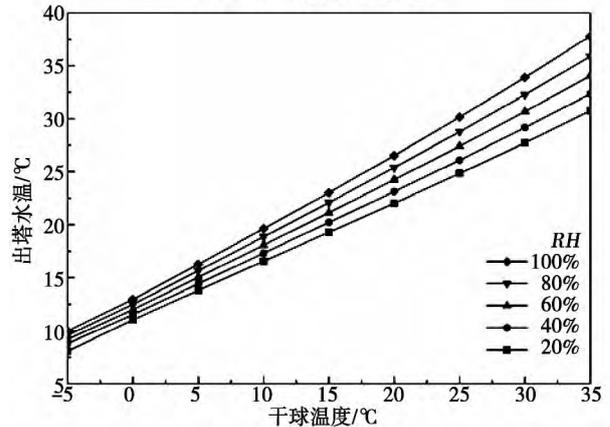


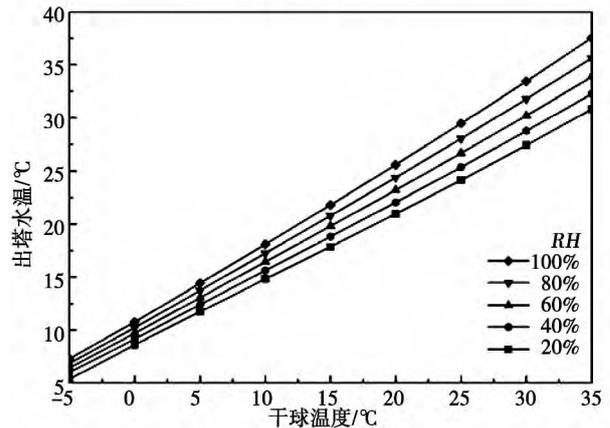
图 7 相对湿度变化对出塔水温的影响  
Fig. 7 Impact of the relative humidity on the temperature of water outgoing from the tower



(a) 一机一泵、100% 负荷



(b) 一机两泵、100% 负荷



(c) 一机两泵、60% 负荷

图 8 冷却塔特性曲线

Fig. 8 Curves showing the characteristics of the cooling tower

由图 7 可知,在 3 种循环水泵运行方式下,相对湿度的变化对出塔水温都有较大影响。相对湿度变化约 10%,出塔水温变化约 1 °C。虽然气候变化时,相对湿度变化幅度较小,但它对出塔水温的影响不可忽视。因此,在冷却塔变工况特性研究中,考虑

相对湿度变化对出塔水温的影响。

### 3.2 冷却塔变工况特性曲线

在绘制冷却塔变工况特性曲线的过程中,考虑到干球温度和相对湿度的变化具有一定的随机性,而循环水泵运行方式相对固定,机组负荷也可采用典型负荷(如100%、90%、80%)来表征,因此,在机组负荷、循环水泵运行方式一定的情况下,将干球温度和相对湿度作为变量,建立出塔水温与这两变量的关系曲线,如图8所示。

由图8可知,出塔水温随着干球温度、相对湿度的增大而增大,并且相对湿度对出塔水温的影响随干球温度的增大而增大,高温情况下,相对湿度变化10%,出塔水温变化约1℃,低温情况下,相对湿度变化10%,出塔水温变化约0.15℃。对比图8(a)、图8(b)可知,在机组负荷一定的情况下,出塔水温随着冷却水流量的增大而增大。对比图8(b)、图8(c)可知,在循环水泵运行方式一定的情况下,出塔水温随着机组负荷增大而增大。

由图8查得的出塔水温是指当冷却塔处于正常运行状态时,在一定边界条件下,出塔水温应该达到的值,它是设备处于正常运行状态的数字化体现。因此,根据冷却塔变工况特性曲线,由实时的边界条件查得的出塔水温应达值,可作为电厂监测分析设备故障的辅助手段。

利用冷却塔变工况特性曲线和凝汽器变工况特性曲线,可直接建立循环冷却水系统的边界条件(机组负荷、循环水泵运行方式、气象条件)与凝汽器压力的直接联系,并基于气象条件、机组负荷确定循环水泵最优运行方式<sup>[11]</sup>。

## 4 结 论

(1) 利用基于冷却塔进塔风速软测量原理和出塔水温实时测量数据的冷却塔出塔水温计算新方法对某电厂300 MW机组的出塔水温进行计算并与实测结果进行对比,出塔水温的在线计算结果与实测结果最大偏差约2%,该方法可准确计算出塔水温。这对于在线指导火电机组循环冷却水系统的优化运行有重要的实际意义。

(2) 对影响冷却塔出塔水温的外界气象参数进行敏感性分析可知:在冷却塔变工况特性研究中,可忽略大气压力对出塔水温的影响。

(3) 由冷却塔变工况特性曲线可知,出塔水温

随着干球温度、相对湿度的增大而增大,并且相对湿度对出塔水温的影响随干球温度的增大而增大。

### 参考文献:

- [1] ZHANG Quan, WU Jiasheng, ZHANG Guoqiang, et al. Calculations on performance characteristics of counterflow reversibly used cooling towers [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(2): 424-433.
- [2] 赵顺安, 廖内平, 徐 铭. 逆流式自然通风冷却塔二维数值模拟优化设计[J]. 水利学报, 2003, 34(10): 26-31.  
ZHAO Shun-an, LIAO Nei-ping, XU Ming. Two-dimensional numerical simulation and optimized design of a counter flow natural ventilation cooling tower [J]. Journal of Water Conservation, 2003, 10: 26-31.
- [3] 赵顺安. 双系统自然通风逆流式冷却塔的热力计算方法[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 79-82.  
ZHAO Shun-an. Method for thermodynamically calculating a dual-system natural ventilation counter flow type cooling tower [J]. Journal of Water Conservation, 2008, 1(39): 79-82.
- [4] 曾宪平, 潘雯瑞, 翁建华, 等. 火电厂循环水冷却塔冷却性能的实验研究[J]. 汽轮机技术, 2011, 53(5): 365-368.  
ZENG Xian-ping, PAN Wen-rui, WENG Jian-hua, et al. Experimental study of the cooling performance of a circulating water cooling tower in a thermal power plant [J]. Steam Turbine Technology, 2011, 53(5): 365-368.
- [5] 陈友良, 高明, 赵元宾, 等. 侧风下逆流湿式冷却塔优化进风的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(23): 48-54.  
CHEN You-liang, GAO Ming, ZHAO Yuan-bing, et al. Experimental study of air intaking optimization of a counter flow and wet type cooling tower under the crosswind [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2012, 32(23): 48-54.
- [6] 高明, 赵元宾, 张 磊, 等. 环境侧风与湿式冷却塔内通风量关系的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(26): 18-22.  
GAO Ming, ZHAO Yuan-bin, ZHANG Lei, et al. Experimental research of the correlation between the environmental crosswind and the air flow rate inside a wet type cooling tower [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2012, 32(26): 18-22.
- [7] 钱 进, 吴爱民, 张 俊. 300 MW 汽轮机凝汽器变工况计算及特性曲线分析[J]. 发电设备, 2007, 21(1): 23-25.  
QIAN Jin, WU Ai-min, ZHANG Jun. Off-design condition calculation of the condenser of a 300 MW steam turbine and analysis of its characteristic curves [J]. Power Generation Equipment, 2007, 21(1): 23-25.
- [8] 夏 林, 刘德有, 王 丰, 等. 考虑潮汐影响的凝汽器变工况特性及最佳真空[J]. 动力工程学报, 2013, 33(8): 31-37.  
XIA Lin, LIU De-you, WANG Feng, et al. Calculation of the off-design condition characteristics of a condenser and its optimum vacuum when the influence of tide is considered. [J]. Journal of Power Engineering, 2013, 33(8): 31-37.
- [9] 王爱军, 李艳华, 张小桃, 等. 循环水泵优化运行方式的在线分

析与研究[J]. 汽轮机技术 2005 47(2): 130-132.  
 WANG Ai-jun, LI Yan-hua, ZHANG Xiao-tao, et al. Online analysis and research of the optimized operation mode of a circulating pump [J]. Steam Turbine Technology 2005 47(2): 130-132.

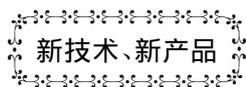
[10] 赵斌, 张晓亮, 刘玲. 汽轮机凝汽器最佳真空的影响因素及确定方法[J]. 河北理工大学学报 2007 29(4): 85-90.  
 ZHAO Bin, ZHANG Xiao-liang, LIU Ling. Factors influencing the optimum vacuum of the condenser of a steam turbine and its determination method [J]. Journal of Hebei Polytechnic University, 2007 29(4): 85-90.

[11] 夏林, 刘德有, 王丰, 等. 考虑气象条件变化的火电厂循泵优化运行[J]. 排灌机械工程学报 2013 31(6): 490-495.  
 XIA Lin, LIU De-you, WANG Feng, et al. Optimized operation of a circulating water pump in a thermal power plant with changes in weather conditions being considered [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering 2013 31(6): 490-495.

[12] 张志刚, 王玮, 曾德良, 等. 冷却塔出水水温的迭代计算方法[J]. 动力工程学报 2010 30(5): 372-377.  
 ZHANG Zhi-gang, WANG Wei, ZENG De-liang, et al. Method for iteratively calculating the temperature of water outgoing from a cooling tower [J]. Journal of Power Engineering 2010 30(5): 372-377.

[13] 赵顺安. 海水冷却塔[M]. 北京: 中国水利水电出版社 2007.  
 ZHAO Shun-an. Sea water cooling towers [M]. Beijing: China WaterPower Press 2007.

(丛敏 编辑)



### 日立公司 112 MW H-80 型燃气轮机

据《Gas Turbine World》2013 年年度手册报道,日立公司最近推出了发电用 H-80 型燃气轮机。

H-80 是具有独立压气机转子和气动连接自由动力涡轮的双轴燃机。用燃气作为燃料,在 ISO 条件下,简单循环额定性能:

设计参数	60 Hz	50 Hz
装置总输出功率/kW	110 610	112 440
热耗率(低热值)/kJ·(kWh) <sup>-1</sup>	9 579	9 416
效率/%	37.6	38.2
涡轮转速度/r·min <sup>-1</sup>	3 600	3 000
压比	19.3:1	19.3:1
排气流量/kg·s <sup>-1</sup>	307.2	308.2
排气温度/°C	546	546
重量/t	563	563
外形尺寸(长×宽×高)/m	36.6×12.2×15.2	36.6×12.2×15.2

17 级轴流压气机在低负荷下能够变速运行,全负荷转速为 4 580 r/min。压气机入口装有可转进口导叶,随后 2 级也装可转导叶,以便控制部分负荷空气流量和喘振。

干式低排放的单管燃烧室设计使 NO<sub>x</sub> 排放低于 15 mg/m<sup>3</sup>。

驱动压气机的高压涡轮为 2 级空气冷却涡轮,所有级的静叶和动叶都采用空气冷却。第 1 级静叶是用 Co 基合金制造,第 1 级动叶用 Ni 基合金制造,两者都涂有陶瓷热障涂层。

2 级轴流式自由动力涡轮装有带冠动叶,以便提高效率并降低叶顶泄漏损失。

(吉桂明 摘译)

were used respectively to simulate a 1 025 t/h utility boiler and the simulation results were contrasted with the test ones. It has been found that due to the dispersion resistance of the ash layer to the combustion gas ignored by the self-contained model, the carbon content of flying ash thus obtained is only 0.1% while that obtained by using the improved model is 3.1%, the latter is closer to the test result 2.2%. The oxygen volumetric percentages at the outlet of the furnace obtained by using the self-contained and improved model are 3.0% and 3.3% respectively, thus the error is in a range of  $\pm 10\%$ . **Key words:** utility boiler, combustion of pulverized coal, carbon content of flying ash, core shrinkage model

**基于可视图网络节点重要性度量的离心泵振动故障诊断方法 = Method for Diagnosing the Vibration Fault of a Centrifugal Pump Based on the Visual Graph Network Node Importance Measure** [刊, 汉] SUN Bin, LIANG Chao, CUI Bin-bin ( College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(3). - 320 - 325

In the light of the nonlinear and unsteady characteristics of the vibration signals from a centrifugal pump, proposed was a method for diagnosing a fault of a centrifugal pump based on the visual graph network node importance measure (shortly referred to as visual graph network). A network was built by using the visual graph method and its characteristic parameters were extracted from the network. An analysis of the four kinds of network of the centrifugal pump, i. e. normal, non-aligned, non-balanced and loosened in the foundation, came to a conclusion that more accurate network information can be extracted from the visual graph network than from the relevant coefficient network and the former can be used to more accurately diagnose and analyze any fault of the centrifugal pump. By measuring the important nodes of the network, the authors obtained comprehensive evaluation results of the importance of the nodes in the network. The BC (betweenness centrality) index was used to diagnose fault, the correct percentage of a diagnosis can be up to 98.7%, more applicable for fault diagnosis compared with other indexes. It has been found that the method based on the visual graph and network node importance measure can diagnose more accurately any vibration fault of a centrifugal pump. **Key words:** complex network, visual graph, node importance, fault diagnosis

**火电机组冷却塔变工况特性研究 = Study of the Off-design Operating Condition Characteristics of a Cooling Tower in a Thermal Power Generator Unit** [刊, 汉] XIA Lin, LIU De-you, DING Wei, HE Da ( College of Water Conservation and Hydropower, Hohai University, Nanjing, China, Post Code: 210098) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(3). - 326 - 332

Based on the theory for soft measuring the air speed entering into a cooling tower and the real-time measured data of

temperature of water outgoing from the cooling tower proposed was a new method for calculating the temperature of water outgoing from the tower. The temperature of water outgoing from a cooling tower of a 300 MW unit in a power plant was calculated and compared with the actually measured results. It has been found that the maximum deviation between the on-line calculation result and the actually measured one is about 2%. The method in question can accurately calculate the temperature of water outgoing from a tower. The method under discussion was used to study the off-design operating condition characteristics of a cooling tower and plot the curves of its off-design operating condition characteristics. It has been known from a sensitivity analysis of the meteorological parameters from the outside world influencing the temperature of water outgoing from the tower that the atmospheric pressure has very little influence on the temperature of water outgoing from the tower and can be neglected. It has been also learned from the off-design operating condition characteristics of the tower that the temperature of water outgoing from the tower will increase with an increase of the dry-ball temperature and relative humidity and the influence of the relative humidity on the temperature of water outgoing from the tower will also increase with an increase of the dry-ball temperature.

**Key words:** thermal power generator unit ,circulating cooling water system ,cooling tower ,temperature of water outgoing from a cooling tower ,weather condition

风力机翼型动态气动特性粗糙度敏感性研究 = **Study of the Sensitivity of the Dynamic Aerodynamic Characteristics of an Airfoil in a Wind Turbine with Roughness** [刊, 汉] ZHOU Zheng ,LI Chun ,YE Zhou ,YANG Yang ( College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai , China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29( 3) . -333 -337

The SST turbulent flow model was used to simulate the dynamic sinusoidal oscillation aerodynamic characteristics of S809 smooth surface airfoil. A comparison with the test data measured from the wind tunnel in Ohio State University shows that the simulation results are in good agreement with the test ones ,proving that the method in question is feasible and effective. The dynamic aerodynamic characteristics of S809 airfoil at various levels of roughness were numerically simulated when it was being pitched and oscillated ,during which the hysteresis loop of the lift and drag coefficient was obtained. It has been concluded from an analysis that for the dynamic aerodynamic characteristics of the airfoil ,the critical roughness is regarded as 0.4 mm. Furthermore ,the dynamic aerodynamic characteristics of the airfoil were simulated and analyzed when the rough band having a roughness of 0.4 mm is located at various places on the pressure and suction surface of the airfoil. It has been pointed out that the dynamic aerodynamic characteristics of the airfoil are most susceptible to the rough band being located at the place of 10% away from the leading edge on the suction surface. With an increase of the height of the rough band ,the dynamic aerodynamic performance will deteriorate by a big margin and the dynamic stall attack angle will be in advance. **Key words:** S809 airfoil ,dynamic aerodynamic characteristics ,roughness ,numerical simulation