

多背压凝汽器的平均冷凝温度

徐志明, 杨善让, 罗 珏, 甘云华

(东北电力学院 节能及测控技术研究中心, 吉林 132012)

摘要: 通过理论分析, 得出考虑传热系数随凝汽器结构和冷却水入口温度变化条件下多背压凝汽器的平均冷凝温度的关系式, 分析了各级传热面积和循环倍率对平均冷凝温度的影响, 并以多背压凝汽器的平均冷凝温度为目标函数, 得出多背压凝汽器的最优结构。

关键词: 多背压凝汽器; 冷凝温度; 循环倍率; 优化

中图分类号: TK124; TK264.1 文献标识码: A

1 引言

为了提高发电厂的循环效率, 目前国内外大型汽轮机广泛采用双背压或多背压凝汽器。杨善让等^[1]在假定各级凝汽器的排气量相同的条件下利用温差场均匀性原理获得了传热面积沿级间的最佳分配。徐志明等定义了平均冷凝温度^[2-3], 并利用平均冷凝温度为目标函数, 分别对各级凝汽器的排气量相同和恒定传热系数的条件下, 对多背压凝汽器的结构设计进行了优化, 得出传热面积和循环倍率沿各级均匀分配的结论, 并进行了热力学第二定律分析。郜时旺等研究了多背压凝汽器的熵产问题^[4]。但实践证明, 各级凝汽器的传热系数是随运行条件不同而变化的, 如在多背压凝汽器中, 由于各级冷却水入口温度的差异, 使得各级的传热系数有一定的差异。由文献[5]可知, 当冷却水的入口温度从 0℃增加到 40℃时, 入口温度的修正系数会由 0.57 变到 1.1, 从而也对多背压凝汽器的平均冷凝温度产生一定的影响。但上述所有的工作均没有考虑这种影响。本文以平均冷凝温度为目标函数, 并考虑传热系数的不同, 对多背压凝汽器的结构设计进行了分析优化。

2 传热系数

多背压凝汽器的汽室被分割成两个或两个以上

不相同的独立部分, 汽轮机各排汽口的排汽分别导入压力不同的汽室中凝结, 冷却水依次流过各汽室的管速进行冷却。因各汽室的冷却水进出口温度等各参数不同, 所以使得凝汽器各级的传热系数有所变化。多背压凝汽器流体温度分布如图 1 所示, 其中

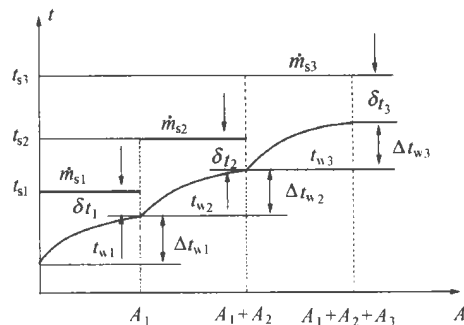


图 1 多背压凝汽器的流体温度分布

t_{si} , \dot{m}_{si} 分别为凝汽器第 i 级冷凝温度和蒸汽量, \dot{m}_w 为循环冷却水量, t_{wi} 、 Δt_{wi} 分别为第 i 级冷却水进

口温度和温升, δ_i 为第 i 级传热端差。

在多背压凝汽器的不同区段, 由于蒸汽参数, 冷却水参数和局部冷却管的排列形状等都不同, 因而各区段内的传热系数也各不相同。依此, 根据文献[5~6]所提出的公式和系数确定方法, 凝汽器第 i 级的平均换热系数为:

$$U_i = 4\ 070 \beta_i \beta_{wi} \beta_{ti} \beta_{zi} \beta_{di} \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad (1)$$

式中 β_i 为第 i 级凝汽器的清洁系数; β_{wi} 为第 i 级凝汽器的水速 V_w 修正系数; β_{ti} 为第 i 级凝汽器的冷却水水温修正系数; β_{zi} 为第 i 级凝汽器的冷却水流程修正系数; β_{di} 为第“ i ”级凝汽器的蒸汽负荷修正系数。

3 平均冷凝温度分析

对多背压凝汽器做如下假设:

收稿日期: 2001-08-29; 修订日期: 2001-11-27

基金项目: 国家电力公司基金资助项目(SPKJ013-07)

作者简介: 徐志明(1959-)男, 吉林九台人, 东北电力学院教授。

(1) 总传热面积 A 为常数, 即

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = \text{const} \quad (2)$$

其中 n 为多背压凝汽器的级数。

(2) 总蒸汽量 \dot{m}_s 为常数, 即

$$\dot{m}_s = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{si} = \text{const} \quad (3)$$

(3) 由于各级平均冷凝温度相差不大(一般小于 5°C), 将各级压力下汽化潜热 h_{fg} 视为常数

(4) 冷却水物性不随温度和压力变化。多背压凝汽器平均冷凝温度

$$t_{sm} = \frac{1}{\dot{m}_s} \sum_{i=1}^n \dot{m}_{si} t_{si} \quad (4)$$

循环倍率

$$r = \dot{m}_w / \dot{m}_s \quad (5)$$

第 i 级循环倍率

$$r_i = \dot{m}_w / \dot{m}_{si} \quad (6)$$

即

$$\frac{1}{r} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i} \quad (7)$$

第 i 级冷凝温度

$$t_{si} = t_{wi} + \Delta t_{wi} + \vartheta_i \quad (8)$$

其中

$$\vartheta_i = \Delta t_{wi} / [\exp(NTU_i) - 1] \quad (9)$$

$$\Delta t_{wi} = h_{fg} / (r_i c_{pw}) \quad (10)$$

$$NTU_i = \frac{U_i A_i}{\dot{m}_w c_{pw}} \quad (11)$$

式中 c_{pw} 冷却水的定压比热。第 i 级凝汽器冷却水进口温度

$$t_{wi} = t_{w1} + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta t_{wj} \quad (12)$$

多背压凝汽器平均冷凝温度

$$t_{sm} = t_{w1} + \frac{h_{fg} r}{c_{pw}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \frac{1}{r_i r_j} + \frac{h_{fg} r}{c_{pw}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i^2 [\exp(NTU_i) - 1]} \quad (13)$$

可见, 多背压凝汽器的平均冷凝温度 t_{sm} 是级数 n 、各级循环倍率 r_i 和各级换热面积 A_i 的函数。以某 300 MW 汽轮发电机组的双背压凝汽器 ($n = 2$) 为例, 当传热面积一定时, 平均冷凝温度 t_{sm} 随循环倍率分配 r_1/r 和换热面积分配 A_1/A 的变化, 如图 2 和图 3 所示 (2、3 为视角不同)。由图可见, t_{sm} 随 r_1/r 和 A_1/A 的变化规律比较复杂, 有一极小值。计算表明, 级数大于 2 时也是如此。由于式 (13) 有约束条件式 (2) 和式 (7), 因此, 极小值可以用拉格朗日乘法求得。当 t_{sm} 取极小值时有:

$$\frac{\partial}{\partial A_j} [t_{sm} + \lambda_1 (A - \sum_{i=1}^n A_i)] = \frac{\partial t_{sm}}{\partial A_j} - \lambda_1 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial r_j} [t_{sm} + \lambda_2 (\frac{1}{r} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i})] = \frac{\partial t_{sm}}{\partial r_j} + \frac{\lambda_2}{r_j^2} = 0$$

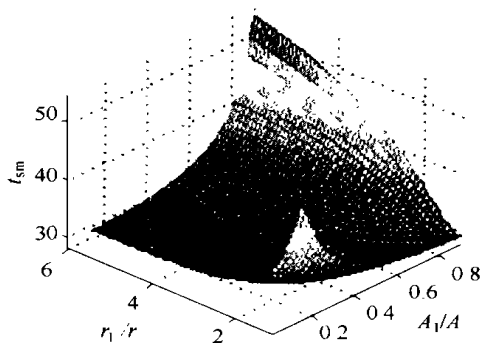


图 2 r_1/r 和 A_1/A 对 t_{sm} 的影响一

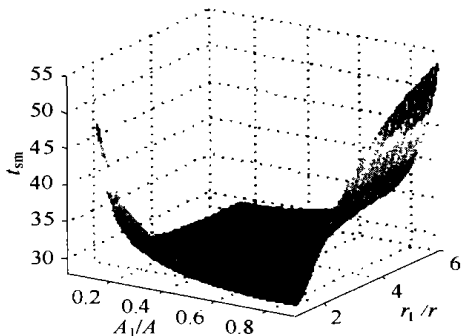


图 3 r_1/r 和 A_1/A 对 t_{sm} 的影响二

即

$$\frac{\partial t_{sm}}{\partial A_j} = \lambda_1 \quad (14a)$$

$$r_j^2 \frac{\partial t_{sm}}{\partial r_j} = -\lambda_2, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (14b)$$

式中的偏导数可以由式 (13) 求得如下:

$$\frac{\partial t_{sm}}{\partial A_j} = - \frac{U_j h_{fg} \exp(NTU_j)}{c_{pw} r_j^2 [\exp(NTU_j) - 1]^2} \frac{1}{\dot{m} c_{pw}} \quad (15a)$$

$$\frac{\partial t_{sm}}{\partial r_j} = - \frac{h_{fg} r}{c_{pw} r_j^2} \left[\frac{2}{r_j [\exp(NTU_j) - 1]} + \frac{1}{r} + \frac{1}{r_j} \right] \quad (15b)$$

将式 (15a) 代入式 (14a) 得

$$\frac{U_j \exp(NTU_j)}{r_j^2 [\exp(NTU_j) - 1]^2} = \frac{U_{j+2} \exp(NTU_{j+1})}{r_{j+1}^2 [\exp(NTU_{j+1}) - 1]^2} \quad (16a)$$

将式 (15b) 代入式 (14b) 得

$$\frac{\exp(NTU_j) + 1}{r_j [\exp(NTU_j) - 1]} = \frac{\exp(NTU_{j+1}) + 1}{r_{j+1} [\exp(NTU_{j+1}) - 1]}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (16b)$$

一般来说, 这是一个超越方程组, 可以用数值方法求解。一个特例, 如果传热系数为常数, 即 $U_j = U_{j+1} = U = \text{const}$, 则式(16a)和式(16b)简化为:

$$\frac{\exp(NTU_j)}{r_j^2 [\exp(NTU_j) - 1]^2} = \frac{\exp(NTU_{j+1})}{r_{j+1}^2 [\exp(NTU_{j+1}) - 1]^2} \quad (17a)$$

$$\frac{\exp(NTU_j) + 1}{r_j [\exp(NTU_j) - 1]} = \frac{\exp(NTU_{j+1}) + 1}{r_{j+1} [\exp(NTU_{j+1}) - 1]}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (17b)$$

式(17a)和式(17b)的解为:

$$NTU_j = NTU/n \quad (18a)$$

$$r_j = nr, j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (18b)$$

这就是文献[3]的结果。由于式(16a)和式(16b)不具有式(17a)和式(17b)的对称性, 因此不能通过求解上述方程得出传热面积均匀分配的结论。

4 计算实例

表 1 某 300 MW 汽轮机的主要数据

	数 值
蒸汽流量 $\dot{m}_s / \text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	589.97
冷却水流量 $\dot{m}_w / \text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	40 000
入口水温 t_{w1} / C	20
传热面积 A / m^2	15 380
循环倍率 r	67.8

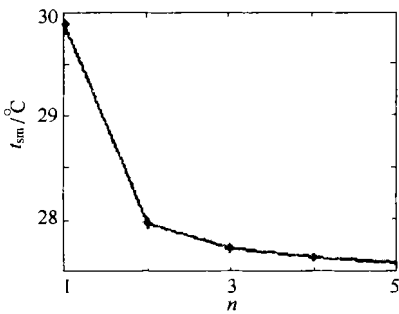


图 4 $t_{sm,opt}$ 随级数的变化规律

表 1 给出某 300 MW 汽轮机的主要计算数据, 以此汽轮发电机组的凝汽器为例, 使用多维极值的复形调优算法求解了 1 ~ 5 级多背压凝汽器的最佳平均冷凝温度及其参数分布^[7], 其结果如表 2。各级参数近均匀分配。图 4 给出最佳平均冷凝温度 $t_{sm,opt}$ 随级数变化规律。随着级数增加, 平均冷凝温度减小, 汽轮发电机组的热效率提高。但当级数大于 4 时, 平均冷凝温度的最小值变化不大。从表 2 可知, 如将单背压凝汽器改为双背压, 可使平均冷凝温度

降低 1.93 °C。对电站循环来说, 一般冷源温度每降低 10 °C, 循环热效率可提高 3.5%, 即此例中的凝汽器由单背压改为双背压的结果是使循环热效率提高 0.676%, 按年运行 7 000 h 计算, 在其它条件不变的情况下每年可以多发电 $7\,000 \times 300 \times 10^3 \times 0.006\,76 = 1.42 \times 10^7$ kWh。

表 2 多背压凝汽器的计算结果

	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
t_{sm} / C	29.90	27.97	27.72	27.63	27.58
A_1 / m^2	15 380	7 927.4	5 120.7	3 715.0	3 095.4
A_2 / m^2		7 452.6	4 881.3	3 813.0	3 031.9
A_3 / m^2			5 288	3 996.5	3 128.7
A_4 / m^2				3 885.5	3 148.5
A_5 / m^2					2 975.4
r_1	67.8	140.7	207.64	270.76	338.55
r_2		132.5	204.74	274.9	340.2
r_3			202.03	271.01	341.74
r_4				272.52	343.65
r_5					342.39

5 结 论

(1) 考虑多背压凝汽器各级传热系数不同, 对多背压凝汽器的平均冷凝温度进行了优化分析, 获得了平均冷凝温度最低时各相关影响条件的变化依赖关系。

(2) 以平均冷凝温度为目标函数, 求得了多背压凝汽器达到最低平均冷凝温度应遵循的关系。

(3) 以 300 MW 机组凝汽器为例, 求得了 2 ~ 5 级多背压凝汽器的参数分布, 计算表明传热面积和循环倍率接近均匀分布。

(4) 最佳平均冷凝温度随级数的增加而减小, 但当级数大于 4 级时, 增加速率明显减缓。

参考文献:

[1] 杨善让, 杨 茉. 多背压凝汽器温差场均匀性分析[J]. 工程热物理学报, 1993, 14(3): 313-316.

[2] ZHIMING X, SHANRANG Y. A design optimization of multipressure condensers[J]. AES of ASME, 1995, 35: 441-447.

[3] 徐志明. 多背压凝汽器的优化[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(4): 11-14.

[4] 郝时旺, 杨 沫, 徐志明. 多背压凝汽器焓产分析[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4): 231-233.

[5] 杨善让. 汽轮机凝汽设备及运行管理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

[6] 东北电业管理局. 火力发电实用技术手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1989.

[7] 徐士良. FORTRAN 常用算法程序集[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

(辉 编辑)

(5). —485~488

Wavelet analysis represents a new tool of mathematical analysis. The use of this numerical calculation method for the transient thermodynamic calculation and analysis of vapor-liquid two-phase flows is of major practical significance. The comparison of the transient calculation results of vapor-liquid two-phase flows by a wavelet numerical method with those of Mini-TRAC calculation method has shown that the wavelet numerical method is fully suited to perform the transient calculation of coupled differential equations for vapor-liquid two-phase flows. **Key words:** wavelet analysis, numerical calculation, vapor-liquid two-phase flow

现场测试地下岩土平均热物性参数方法 = **A Method for the On-site Testing of Average Thermo-physical Parameters of Underground Rock Soil** [刊, 汉] / YU Ming-zhi, FANG Zhao-hong (Shandong Architectural Engineering Institute, Jinan, China, Post Code: 250014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). —489~492

The magnitude of average thermo-physical parameters exerts a significant influence on the number and depth of holes to be drilled, thus affecting the capital investment outlays for a ground-source heat-pump system. To realize the on-site measurement of the average thermo-physical parameters of underground rock soil, a set of on-site measuring equipment was put into use. With its help measurements were taken of the heat flow an underground embedded pipe loop is subjected to and of the temperature change of the circulating water in the loop with the passage of time. Moreover, a piece of software developed by the authors was utilized to calculate and determine the average thermo-physical parameters of the underground rock soil by using a parameter-evaluation method. **Key words:** geothermal heat exchanger, average thermo-physical parameter of rock soil, measuring method

多背压凝汽器的平均冷凝温度 = **The Mean Condensation Temperature of a Multi-pressure Condenser** [刊, 汉] / XU Zhi-ming, YANG Shan-rang, LUO Zhen, et al (Northeast Institute of Electric Power Engineering, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). —493~495

Through a theoretical analysis the authors have derived a relationship for calculating the mean condensation temperature of a multi-pressure condenser, which has taken into account the variation of heat transfer factor with the change of condenser construction scheme and cooling water inlet temperature. Analyzed is the influence of the heat transfer area and the circulation ratio of various stages on the mean condensation temperature. Moreover, with the mean condensation temperature of the multi-pressure condenser serving as a target function an optimized construction of the condenser has been worked out. **Key words:** multi-pressure condenser, condensation temperature, circulation ratio, optimization

大型火电机组表面式加热器动态数学模型研究与开发 = **Research and Development of a Mathematical Model for the Surface Heater of a Large-sized Thermal Power Plant** [刊, 汉] / WANG Jian-mei, LIU Guang-lin, CAI Kai, et al (Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). —496~498

With a simulation supporting system STAR-90 serving as a platform developed is a fairly accurate mathematical model to study a regenerative heating system. The model is capable of not only meeting a given static precision, but also accurately reflecting and reproducing the major features of various operating conditions of a specific regenerative heating system. Furthermore, it is also feasible to employ the above mathematical model for the research of certain dynamic characteristics of heaters. **Key words:** heater, mathematical model, dynamic characteristics, regenerative heating system