

电厂热力系统能效分布矩阵方程式及其应用

郭江龙¹, 张树芳¹, 宋之平², 陈海平¹

(1. 华北电力大学 动力工程系, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学 动力系, 北京 102206)

摘 要: 提出了虚拟热力系统的概念, 将纷繁复杂的实际热力系统用一个系统结构和热经济性指标不变, 但参数发生变化的单一主系统——虚拟热力系统所替代。并在此基础上, 构造了火电机组能效分布矩阵方程, 该矩阵方程直接和热力系统结构一一对应, 且有表征机组热经济性指标的矩阵元素, 有效克服了目前新兴的热经济性矩阵分析方法需要联立其它方程才能求解系统最终热经济性指标的缺陷, 具有通用性、精确度和易于程序化的特点。算例说明了方法的有效性。

关 键 词: 热经济性; 虚拟热力系统; 能效分布矩阵方程; 热力系统

中图分类号: TM621.4; O241.6 文献标识码: A

1 引 言

随着应用数学与计算机技术的迅速发展, 评价火电机组热力系统热经济性计算方法的优劣标准已由 20 世纪 90 年代以前单纯注重方法的简捷性(如: 常规热平衡法、等效热降法和循环函数法等)向目前注重方法的通用性、精确度及适宜计算机编程的方向过渡。将矩阵引入热力系统热经济性计算中^[1~4], 就是在这一背景下提出的一种新的思路。但是目前热力系统热经济性的矩阵分析方法还都是以 $q-\gamma-\tau$ 矩阵^[1]为核心, 而 $q-\gamma-\tau$ 矩阵又仅仅是热力系统中各加热器热平衡方程的矩阵化表示, 是热力系统热经济性计算过程中的一部分, 因此, 无论是热力系统热经济性整体计算还是局部分析, 都必须结合其它方程(如功率方程、吸热量方程), 才能进行热经济指标的分析计算。从这种角度看, 这种矩阵表达形式还只是传统常规热平衡法中局部的一种矩阵表示形式, 还不能称之为一个完善的、独立的热经济性分析方法。

针对这一问题, 在虚拟热力系统概念的基础上, 构造了热力系统能效分布矩阵方程, 并初步论证了基于该矩阵方程的热力系统分析方法。

2 虚拟热力系统

为了实现电能的连续生产, 实际热力系统的结构都是非常复杂的, 传统的做法是在将实际热力系统分解为主系统和辅助系统基础上, 分别计算主、辅助系统对热经济性指标的影响, 然后再合成最终的热经济指标。这种处理方法, 摒弃了常规热平衡法牵一发而动全身的缺点, 尤其在分析辅助系统(或扰动)对热经济性的影响程度时, 可以用简捷的局部运算近似代替整个系统的繁杂计算, 非常符合以手工计算为基点的热经济性分析方法的要求, 在等效热降法和循环函数法中得到了广泛的应用。

但是, 在热经济性计算中, 相比辅助系统而言, 主系统的计算更具有规律性和简捷性, 因此若以一个热力系统结构和热经济性指标不变, 且只具有单一主系统的热力系统来代替实际的热力系统, 无疑能够大大简化热力系统热经济性的计算分析过程, 并探究其规律。

我们将满足以下两个条件的热力系统定义为与所研究实际热力系统相对应的虚拟热力系统:

(1) 热经济性指标与所研究的实际热力系统相等;

(2) 热力系统结构与所研究的实际热力系统中主系统结构相同, 且不含任何辅助汽水成分, 为单一主系统结构。

符合构造条件的虚拟热力系统形式不是唯一的, 虚拟热力系统的引入, 使热力系统热经济性计算分析的问题简化为对主系统的研究, 其核心可以归结为两点: 第一, 选择合适的主系统分析方法; 第二, 归并各种辅助汽水成分, 以构造与主系统分析方法相适应的虚拟热力系统。

3 热力系统能效分布通用矩阵方程

3.1 主系统的能效分布矩阵方程的基本形式

根据常规热平衡计算方法^[1], 主系统的循环效率 η_0 可以表达为:

$$\eta_0 = \frac{h_0 + \sigma - h_n - \sum_{r=1}^z \alpha_r \Delta \hat{h}'_r}{h_0 - \bar{t}_{gs} + \alpha_z \sigma} \quad (1)$$

其中: z 为回热系统内加热器的个数, 再热前, $\Delta \hat{h}'_r = h_r + \sigma - h_n$; 再热后, $\Delta \hat{h}'_r = h_r - h_n$ 。

根据差分比定理, 在式(1)的分母上减去一项 $\alpha_z \sigma$, 在分子上减去一项 $\alpha_z \sigma \eta_0$, 循环效率 η_0 的计算结果不变, 整理得:

$$\eta_0 = \frac{h_0 + \sigma(1 - \eta_0) - h_n - \sum_{r=1}^z \alpha_r \Delta \hat{h}'_r}{h_0 - \bar{t}_{gs}} \quad (2)$$

其中: 再热前, $\Delta \hat{h}'_r = h_r + \sigma(1 - \eta_0) - h_n$; 再热后, $\Delta \hat{h}'_r = h_r - h_n$ 。

由主系统的 $q - \gamma - \tau$ 矩阵 $[A][\alpha] = [\tau]$ ^[1], 得:

$$[\alpha] = [A]^{-1}[\tau] \quad (3)$$

若 m 为再热冷段抽汽所对应加热器的序号, 加热器序号按从低到高递增排列, 令:

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{m-1} \\ \alpha_m \\ \vdots \\ \alpha_z \end{bmatrix} \quad [\Delta \hat{h}'_r] = \begin{bmatrix} h_1 - h_n \\ \vdots \\ h_{m-1} - h_n \\ h_m + \sigma(1 - \eta_0) - h_n \\ \vdots \\ h_z + \sigma(1 - \eta_0) - h_n \end{bmatrix}$$

并将式(3)代入式(2), 则:

$$\eta_0 = \frac{h_0 + \sigma(1 - \eta_0) - h_n - ([A^T]^{-1}[\Delta \hat{h}'_r])^T [\tau]}{h_0 - \bar{t}_{gs}} \quad (4)$$

将式(4)表示为矩阵形式, 得:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ [A]_{zxz}^T \\ \vdots \\ 0 \\ \tau_1 \quad \dots \quad \tau_z q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \vdots \\ \eta_{m-1} \\ \eta_m \\ \vdots \\ \eta_z \\ \eta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 - h_n \\ \vdots \\ h_{m-1} - h_n \\ h_m - h_n + \sigma(1 - \eta_0) \\ \vdots \\ h_z - h_n + \sigma(1 - \eta_0) \\ h_0 - h_n + \sigma(1 - \eta_0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $[A]$ 是传统的 $q - \gamma - \tau$ 主系统矩阵的上三角矩阵表达形式^[1]; 机组再热与否, 元素 q_0 都用 $h_0 - \bar{t}_{gs}$ 表示。

简记为:

$$[C][\eta] = [H^0] \quad (6)$$

本文将该矩阵方程定义为能效分布矩阵方程。

3.2 实际热力系统的能效分布矩阵方程的通用形式

根据前面的分析, 我们只要构造一个合适的虚拟热力系统来替换所研究的实际热力系统, 由于虚拟热力系统不含任何辅助汽水成分, 因此式(5)所示的主系统能效分布矩阵方程也适用于虚拟热力系统的热经济性分析。本文采用以下方式来构造与实际热力系统相对应的虚拟热力系统。

文献[2~4] 将各种辅助汽水成分分为三类: 从加热器汽侧、水侧和纯热量进出系统, 将主系统 $q - \gamma - \tau$ 矩阵方程^[1] 扩展到辅助系统, 表示为:

$$[A][\alpha] + [A_i][\alpha_i] + [A_\tau][\alpha_\tau] + [\Delta Q] = [\tau] \quad (7)$$

其中系数矩阵 $[A]$ 、 $[A_i]$ 、 $[A_\tau]$ 和 $[\Delta Q]$ 的物理意义及填写规则与文献[2~4] 相同。为了和本文所构造的主系统能效分布矩阵方程相适应, 上述矩阵均采用上三角矩阵表达形式。

对该式进行一系列的数学变换, 可以得到如下形式:

$$[A^v][\alpha] = [\tau] \quad (8)$$

式中: $[A^v] = [E - [A_i][\alpha_i]_D - [A_\tau][\alpha_\tau]_D - [\Delta Q]_D]^{-1}[A]$

其中: $[E]$ 为对角线元素为 1 的 z 阶单位矩阵; $[\alpha_i]_D$ 为对角线元素为 α_i / τ_i 的 z 阶方阵; $[\alpha_\tau]_D$ 为对角线元素为 α_τ / τ_τ 的 z 阶方阵; $[\Delta Q]_D$ 为对角线元素为 $\Delta q_i / \tau_i$ 的 z 阶方阵; 其余矩阵填写规则不变。

将式(8)所示的系数矩阵 $[A^v]$ 替换式(5)中的系数矩阵 $[A]$, 则可以得到虚拟热力系统(即所研究的实际热力系统)的能效分布矩阵方程的基本形式。

3.3 另类辅助成分的考虑

在实际热力系统中, 除了文献[2~4] 中(即式(7))所提到的三类辅助汽水流外, 还有一类辅助汽水直接从汽轮机本体出系统的, 如泵功、门杆、轴封漏汽(不包括回收部分, 其回收部分已在前三类辅助循环的考虑范围之内)。

这部分汽水循环引起的做功损失^[5] 和吸热量损失为:

$$\begin{cases} \Pi = \tau_b + \sum \alpha_{mi} [(h_{mi} - h_n) + \sigma(1 - \eta_0)] + \sum \alpha_{ni} (h_{ni} - h_n) \\ \Gamma = \sum \alpha_{mi} \sigma \end{cases} \quad (9)$$

其中:角标 m 代表该类辅助汽水未经过再热器,角标 n 代表该类辅助汽水经过再热器。

这样,虚拟热力系统(即所研究的实际热力系统)能效分布矩阵方程通用形式为:

$$\begin{bmatrix} & 0 \\ & \vdots \\ & 0 \\ [A^V]^T_{zxz} & 0 \\ & \vdots \\ & 0 \\ \tau_1 \quad \dots \quad \tau_z q_0 - \Gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \vdots \\ \eta_{m-1} \\ \eta_m \\ \vdots \\ \eta_z \\ \eta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 - h_n \\ \vdots \\ h_{m-1} - h_n \\ h_m - h_n + \sigma(1 - \eta_0) \\ \vdots \\ h_z - h_n + \sigma(1 - \eta_0) \\ h_0 - h_n + \sigma(1 - \eta_0) - \Pi \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.4 几点说明

(1) 该矩阵分析模型中涉及了矩阵求逆和矩阵乘法运算,因此手工计算较为繁琐。但模型中所涉及的矩阵都具有极强的规律性,因此更加适用于用矩阵语言求解,便于开发通用性计算软件。

(2) 对于再热机组,由于矩阵方程中反映系统循环效率的元素在矩阵多行中出现,因此,若采用常规运算函数,则涉及到递归迭代等问题。为此,推荐使用具有符号运算功能的 MATLAB 5.0^[6] 以上版本,以避免递归迭代运算。在具体软件设计时,可以通过其 API 接口与其它应用软件衔接。

(3) 对于进出相同加热器的同一类 n 股辅助汽水在具体处理时,可以采用两种方法^[2]:抽象为 1 股,焓值取平均焓值;或在矩阵形式上采用并联处理,每一项包含 1 股辅助蒸汽。

4 热力系统能效分布通用矩阵方程的应用

以国产 N200-130/535/535 再热机组为例(如图 1 所示),介绍该能效分布矩阵方程的使用方法。系统主要原始参数见文献[5]。

根据 3.2 节所提到的辅助汽

水成分分类:第一类包括第(1)、(5)、(2)、(6)共 4 股辅助汽流的回收部分和第(0)股辅助汽水出系统部分;第二类包括第(3)、(7)、(10)共 3 股辅助汽水流经轴加冷却后进入 1 号加热器给水侧;第三类包括第(3)、(7)、(10)、(4)、(8)、(9)共 6 股辅助汽流的纯热量进入 1 号加热器;第四类包括第(1)~(8)共 8 股辅助蒸汽从汽轮机本体出系统,其中:第(1)~(4)股为再热前,第(5)~(8)股为再热后。

对于进出相同加热器的同一类 n 股辅助汽水,本例采用文献[2]的处理方式:抽象为 1 股,焓值取平均焓值。以 4 号加热器为例,该级加热器共有 2 股(2)和(6)辅助汽水进入,根据质量、能量守恒定律,合成 1 股后,蒸汽份额 α_{f26} 和吸热量 q_{f26} 分别为:

$$\begin{cases} \alpha_{f26} = \alpha_{f2} + \alpha_{f6} \\ q_{f26} = \alpha_{f2}q_{f2} + \alpha_{f6}q_{f6}/\alpha_{f26} \end{cases} \quad (11)$$

同理,以脚标 015.3 710 和 489 分别表示进出 4 号、2 号和 1 号加热器的多股辅助汽水合成 1 股后的相应参数。

该机组能效分布矩阵方程形式为:

$$\begin{bmatrix} & 0 \\ & \eta_1 \\ & 0 \\ & \eta_5 \\ & 0 \\ & \eta_4 \\ & 0 \\ & \eta_6 \\ & 0 \\ & \eta_7 \\ & 0 \\ & \eta_8 \\ \tau_1 \quad \tau_2 \quad \dots \quad \tau_8 q_0 - \Gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \\ \eta_7 \\ \eta_8 \\ \eta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 - h_n \\ h_2 - h_n \\ h_3 - h_n \\ h_4 - h_n \\ h_5 - h_n \\ h_6 - h_n \\ h_7 - h_n + \sigma(1 - \eta_0) \\ h_8 - h_n + \sigma(1 - \eta_0) \\ h_0 - h_n + \sigma(1 - \eta_0) - \Pi \end{bmatrix}$$

其中: $[A^V] = [E - [A_f][\alpha_d]D - [A_\tau][\alpha_\tau]D - [A_g]]^{-1}[A]$

主要矩阵填写如下:

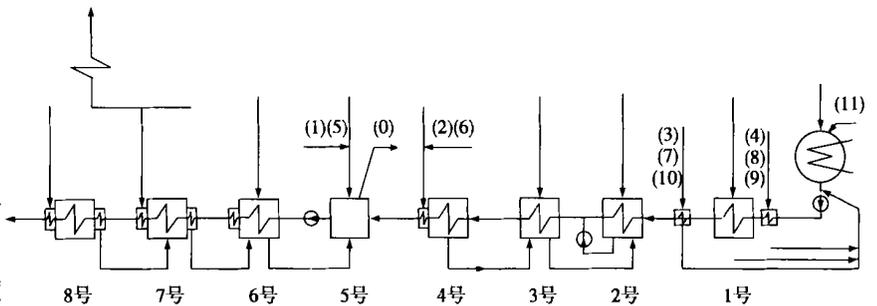


图 1 N200-130/535/535 再热机组简明热力系统图

$$A = \begin{bmatrix} q_1 & \tau_1 \\ & q_2 & \gamma_2 & \gamma_2 & \tau_2 & \tau_2 & \tau_2 & \tau_2 \\ & & q_3 & \gamma_3 & \tau_3 & \tau_3 & \tau_3 & \tau_3 \\ & & & q_4 & \tau_4 & \tau_4 & \tau_4 & \tau_4 \\ & & & & q_5 & \gamma_5 & \gamma_5 & \gamma_5 \\ & & & & & q_6 & \gamma_6 & \gamma_6 \\ & 0 & & & & & q_7 & \gamma_7 \\ & & & & & & & q_8 \end{bmatrix}$$

$$A_f = \begin{bmatrix} 0 & \tau_1 \\ & 0 & \gamma_2 & \gamma_2 & \tau_2 & \tau_2 & \tau_2 & \tau_2 \\ & & 0 & \gamma_3 & \tau_3 & \tau_3 & \tau_3 & \tau_3 \\ & & & q_{f26} & \tau_4 & \tau_4 & \tau_4 & \tau_4 \\ & & & & q_{f015} & \gamma_5 & \gamma_5 & \gamma_5 \\ & & & & & 0 & \gamma_6 & \gamma_6 \\ & 0 & & & & & 0 & \gamma_7 \\ & & & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_\tau = \begin{bmatrix} q_{\tau 3710} & \tau_1 \\ & 0 & \tau_2 & \tau_2 & \tau_2 & \tau_2 & \tau_2 & \tau_2 \\ & & 0 & \tau_3 & \tau_3 & \tau_3 & \tau_3 & \tau_3 \\ & & & 0 & \tau_4 & \tau_4 & \tau_4 & \tau_4 \\ & & & & 0 & \tau_5 & \tau_5 & \tau_5 \\ & & & & & 0 & \tau_6 & \tau_6 \\ & 0 & & & & & 0 & \tau_7 \\ & & & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\Delta q_f]_D = \text{diag}[\Delta q_{f489}/\tau_1, \Delta q_{f3710}/\tau_2, 0, 0, 0, \tau_b/\tau_6, 0, 0]$$

$$[\alpha_f]_D = \text{diag}[0, 0, 0, \alpha_{f26}/\tau_4, \alpha_{f015}/\tau_5, 0, 0, 0]$$

$$[\alpha_\tau]_D = \text{diag}[\alpha_{f3710}/\tau_1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

$$\Pi = \tau_b + \sum_{i=1}^4 \alpha_{fi} (h_{fi} - h_n) + \sigma(1 - \eta_0) +$$

$$\sum_{i=5}^8 \alpha_{fi} (h_{fi} - h_n)$$

$$\Gamma = \sum_{i=1}^4 \alpha_{fi} \sigma$$

4.1 热力系统的定量计算

对热力系统分析在于提高系统的热经济性,因此,各种分析计算最终都要求出实际循环效率。这对于本文所构造的能效分布矩阵方程而言,只要填写了如上的各子矩阵,其实际循环效率通过矩阵运算将直接体现在矩阵特定元素上。

4.2 热力系统的局部定量计算

应用该能效分布矩阵方程,不仅可用于整个系

统的一次性定量计算,还可很方便地用于局部定量分析。在局部定量分析中,只要将所分析的辅助汽水循环参数改为0(即去除该扰动),就可以计算出变化后的 η_0 和整体计算相比较就可以得到该辅助汽水循环对热经济性的影响值。

本文采用系统软件 MATLAB 5.3^④ 编制了计算模块,计算结果如表 1 所示。

表 1 计算结果汇总表 (%)

	能效分布矩阵方程法	常规热平衡法
实际循环效率	43.274 09	43.274 09
辅助汽水对 η_0 的影响		
(0)	0.096 95	0.096 95
(1)	0.092 18	0.092 18
(2)	0.111 47	0.111 47
(3)	0.012 13	0.012 13
(4)	0.121 77	0.121 77
(5)	0.003 60	0.003 60
(6)	0.028 98	0.028 98
(7)	0.175 01	0.175 01
(8)	0.058 78	0.058 78

分析表 1 计算结果可以发现,与常规热平衡相比,该通用矩阵分析模型是完全正确的。

5 结 论

(1) 提出了虚拟热力系统的概念,将实际热力系统热经济性计算方法的研究转化为对单一主系统的研究,有利于探究热经济性计算的规律。

(2) 从常规热平衡出发,推导构建了主系统的热经济性计算矩阵方程——能效分析矩阵方程。

(3) 借助于热力系统矩阵热平衡方程式(即 $q-\gamma-\tau$ 矩阵方程),构造了适合应用能效分布矩阵方程计算的虚拟热力系统。

(4) 以国产 N200—130/535/535 再热机组为例,初步论证了基于该矩阵方程的热力系统分析方法。

参考文献:

[1] 王加璇. 火力发电厂[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
 [2] 郭民臣, 魏楠. 电厂热力系统矩阵热平衡方程式及其应用[J]. 动力工程, 2002, 22(2): 1733—1738.
 [3] 阎顺林, 张春发, 李永华, 等. 火电机组热力系统汽水分布通用矩阵方程[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 69—73, 78.
 [4] 张春发, 张素香, 崔映红, 等. 现行电力系统热经济性状态方程[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(6): 665—667.
 [5] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
 [6] 程卫国. MATLAB 5.3 应用指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2000.

(何静芳 编辑)

on the steam share to be determined and the iteration of programming cycles, calculations were performed of the shares of steam extracted at the various stages of the above system and of the positive and negative thermal balance. On this basis and after a detailed analysis of the supplementary items of the nuclear power system a basic thermodynamic-calculation method both straightforward and precise was developed for the nuclear power plant by way of adding consecutively each supplementary item to the most simplified nuclear power system. **Key words:** pressurized water reactor, secondary circuit, positive and negative balance, supplementary item

电厂热力系统能效分布矩阵方程式及其应用 = **Energy-efficiency Distribution Matrix Equation for a Power-plant Thermodynamic System and Its Applications** [刊, 汉] / GUO Jiang-long, ZHANG Shu-fang, CHEN Hai-ping (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding, Hebei Province, China, Post Code: 071003), SONG Zhi-ping (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code, 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 29 ~ 32

The conception of a virtual thermodynamic system is proposed, which makes it possible to replace the actual complicated thermodynamic system by a virtual one through the use of a single main system featuring an invariant system configuration and thermo-economic indexes but changing parameters. On this basis an energy-efficiency distribution matrix equation was derived, which can be directly correlated with the thermodynamic system configuration. Moreover, the matrix elements, which characterize power plant thermo-economic indexes, can effectively overcome the defect of other currently popular thermo-economic matrix analysis method. The latter requires other simultaneous equations for solving the final thermo-economic indexes of the system. The matrix equation under discussion has the merits of versatility, high precision and ease of undergoing programming treatment. Exemplary calculations have attested to the effectiveness of the proposed method. **Key words:** thermo-economics, virtual thermodynamic system, energy-efficiency distribution matrix equation, thermodynamic system

重力对微槽平板热管传热性能的影响 = **The Influence of Gravitation on the Heat Transfer Performance of Micro-grooved Flat-plate Heat Pipes** [刊, 汉] / FAN Chun-li, SUN Feng-rui (Institute of Marine & Power Engineering under the University of Naval Engineering, Wuhan, China, Post Code: 430033), QU Wei, MA Tong-ze (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 33 ~ 37

A systematic study was conducted of the impact of gravitation on the heat transfer performance of micro-grooved flat-plate heat pipes along with an analysis of such influencing factors as operating temperatures and cooling modes, etc. Through contrast experiments it has been found that there exists a very marked influence of gravitation on the liquid-film axial distribution, while in the peripheral direction the influence is significant only when high liquid-charging rates are employed. The latter condition enables an inclination angle to exercise a relatively great influence on the heat transfer capacity of heat pipes. A more detailed study has shown that deep-grooved flat-plate heat pipes offer fairly good heat transfer performance, providing them with bright prospects of usage in the area of micro-space heat dissipation for cooling microelectronic devices. **Key words:** miniaturized heat pipe, electronic device, micro-grooved flat-plate heat pipe, micro groove, thin liquid film

HAT 循环饱和器传热传质过程及相似分析 = **The Heat and Mass Transfer of a HAT (Humid Air Turbine) Cycle Humidifier and Its Similarity Analysis** [刊, 汉] / WU Wei-liang, CHEN Han-ping (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 38 ~ 41, 44

With the humidifier of a humid air turbine (HAT) cycle serving as an objective of study similarity conditions are discussed during the conduct of experimental research. Under simplified conditions equations of control of multi-phase flows in the humidifier were established along with corresponding boundary conditions. These equations were subjected to a