

换热系统变工况分析

(东南大学) 包德梅 房德山 徐治皋

摘要: 本文提出了分析系统性能变化的一种新方法, 并建立相应的线性数学模型。该方法不仅能分析工况变化时整个换热系统的性能, 而且可反映系统内部换热器热量偏差, 温度变化及换热器本身的效能。最后以锅炉受热面吹灰为例, 将该模型与模拟模型所得结果做比较, 说明该方法不仅简单, 而且具有实时性。

关键词: 换热系统; 变工况; 热效率—传热单元($\epsilon - NTU$); 吹灰

中图分类号: TK124

1 概述

表面式换热系统是现代电站锅炉中的重要组成部分, 其运行性能的变化对整个过程中有着非常重要的影响。它的变工况热力计算常采用前苏联 73 标准, 这需要对每个受热面进行详细计算迭代, 计算工作量大, 计算时间长。

本文提出了分析系统性能变化的一种新方法, 并基于物理学基本原理与换热器基本理论, 利用效能—传热单元数法建立相应的线性数学模型。该方法不仅可以确定工况变化时各输入量(进口温度、流量、传热系数的变化)对整个系统的性能的影响, 而且可反映系统内部每个换热器热量偏差, 温度变化及换热器本身的效能。最后以锅炉受热面吹灰为例, 将该模型与模拟模型所得结果做比较, 说明该方法不仅简单、准确, 而且具有实时性。

2 单台换热器变工况计算模型

2.1 纯对流换热器的计算

2.1.1 模型的建立

如图 1 所示的纯对流逆流式换热器的换热过

程。

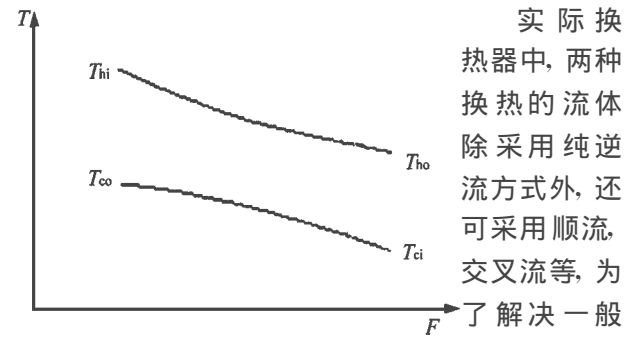


图 1 逆流式换热器的换热过程

实际换热器中, 两种换热的流体除采用纯逆流方式外, 还可采用顺流, 交叉流等, 为了解决一般情况下的计算方法, 本文

采用热效率—传热单元($\epsilon - NTU$)来表示传热速率方法导出有关计算式。

假设(1)冷热流体在整个换热面的热容率为常数; (2)换热器无散热损失; (3)换热面沿流动方向的导热系数可以忽略不计; (4)在换热器中, 任一流体都不能既有单相介质换热又有相变过程; (5)不考虑辐射换热

不失一般性, 对任一换热器, 不妨设热流体的热容率较小, 其热效率定义^[1]:

$$\epsilon = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}} \quad (1)$$

式中, 分母为流体在换热器中可能发生的最大温度值, 而分子则为热流体在换热器中实际温度差值。从定义式可知, 效能表示换热器的实际换热效果与最大可能的换热效果之比。换热器的效能与传热单元数及热流体的热容率与冷流体的热容率之比有关, 即:

$$\epsilon = f(R, NTU)$$

式中, $R = \frac{M_h c_{ph}}{M_c c_{pc}}$, $NTU = \frac{KF}{(Mc)_{\min}}$ 称为传热单元数。

根据(1)得到

$$T_{ho} = T_{hi} - \epsilon(T_{hi} - T_{ci}) \quad (2)$$

又由热平衡方程

$$M_h c_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) = M_c c_{pc} (T_{ci} - T_{co})$$

于是

$$T_{co} = T_{ci} + \epsilon R (T_{hi} - T_{ci}) \quad (3)$$

式中, $M_c, c_{pc}, T_{ci}, T_{co}$ 分别为冷流体的流量, 比热, 进口温度, 出口温度。

$M_h, c_{ph}, T_{hi}, T_{ho}$ 分别为冷流体的流量, 比热, 进口温度, 出口温度。

K, F 分别为传热系数, 传热面积。

由式(2)(3)可以看出, 冷热流体的出口温度除与其进口温度有关, 而且与传热单元数及热容率比值有关。

当只有两种流体的进口温度发生变化时, 不考虑温度变化对物性及传热系数的影响, 将式(2)(3)离散化得:

$$\Delta T_{ho} = (1 - \epsilon) \Delta T_{hi} + \epsilon \Delta T_{ci}$$

$$\Delta T_{co} = \epsilon R \Delta T_{hi} + (1 - \epsilon R) \Delta T_{ci}$$

$$E = 1 - \epsilon \quad E + F = 1$$

$$P = \epsilon R \quad Q + P = 1$$

由上式可以看出, 进口温度对出口温度变化是线性的。 E, F, P, Q 均为小于 1 的常数, 由换热器的结构与正常运行工况所决定, 其值反映了换热器在四个方向上的温度变化传递能力, 故称传递常数^[2]。

当换热器冷热流体流量或传热系数也发生变化时, 它对换热器出口温度变化的影响是非线性的。它们除对自身通过的换热器出口产生直接影响外, 还对换热系统其它各换热器产生间接影响, 并且间接影响是通过其它换热器进口温度变化来传递的。影响传热系数的主要因素包括两种流体的流量变化、物性变化、灰污热阻等。当温度变化不是很大时, 可忽略物性的影响。综合考虑换热器进口温度、冷热流体流量及灰污热阻的影响, 得到:

$$\Delta T_{ho} = E \Delta T_{hi} + F \Delta T_{ci} + E' \Delta (M_h c_h) + F' \Delta (M_c c_c) + G \Delta \epsilon_{hw}$$

$$\Delta T_{co} = P \Delta T_{hi} + Q \Delta T_{ci} + P' \Delta (M_h c_h) + Q' \Delta (M_c c_c) + S \Delta \epsilon_{hw}$$

$$E' = - \frac{\partial \epsilon}{\partial (M_h c_h)} (T_{hi} - T_{ci}), F' =$$

$$- \frac{\partial \epsilon}{\partial (M_c c_c)} (T_{hi} - T_{ci}), G = - \frac{\partial \epsilon}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci})$$

$$P' = \frac{\partial (\epsilon R)}{\partial (M_h c_h)} (T_{hi} - T_{ci}), Q' =$$

$$\frac{\partial (\epsilon R)}{\partial (M_c c_c)} (T_{hi} - T_{ci}), S = \frac{\partial (\epsilon R)}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci})$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial (M_h c_h)} = \left\{ \frac{\partial \epsilon}{\partial NTU} \left[\frac{\partial NTU}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial (M_h c_h)} + \frac{\partial NTU}{\partial (M_h c_h)} \right] + \frac{\partial \epsilon}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial (M_h c_h)} \right\}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial (M_c c_c)} = \left\{ \frac{\partial \epsilon}{\partial NTU} \frac{\partial NTU}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial (M_c c_c)} + \frac{\partial \epsilon}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial (M_c c_c)} \right\}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \epsilon_{hw}} = \frac{\partial \epsilon}{\partial NTU} \frac{\partial NTU}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial \epsilon_{hw}}$$

$$\frac{\partial (\epsilon R)}{\partial (M_h c_h)} = R \frac{\partial \epsilon}{\partial (M_h c_h)} + \epsilon \frac{\partial R}{\partial (M_h c_h)}$$

$$\frac{\partial (\epsilon R)}{\partial (M_c c_c)} = R \frac{\partial \epsilon}{\partial (M_c c_c)} + \epsilon \frac{\partial R}{\partial (M_c c_c)}$$

$$\frac{\partial (\epsilon R)}{\partial \epsilon_{hw}} = R \frac{\partial \epsilon}{\partial \epsilon_{hw}}$$

式中, ϵ_{hw} 为换热器的灰污热阻。

2.1.2 常见的换热器的传热效能公式

下面列出几种电站锅炉所遇到的确常见换热器类型的传热效能公式。

(1) 逆流式换热器^[1] (如经济器等)

$$\epsilon = \frac{1 - \exp(-NTU(1-R))}{1 - R \exp(-NTU(1-R))}$$

(2) 顺流式换热器^[1] (如高温过热器)

$$\epsilon = \frac{1 - \exp(-NTU(1+R))}{1+R}$$

(3) 叉流式换热器^[3] (如管式空预器)

$$\epsilon = 1 - \exp$$

$$\left\{ [\exp(-R * NTU^{0.78}) - 1] / (R * NTU^{-0.22}) \right\}$$

(4) 再生式换热器^[4] (如风罩式空预器)

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} \left(1 + \frac{1}{9} \left(\frac{(Mc)_j}{(Mc)_{max}} \right)^{-2} \right)$$

式中, ϵ_{∞} 为转速度为无穷大时, 再生式空预器可近似看作逆流式换热器的性能; $(Mc)_j$ 为回转式空预器蓄热金属的热容量。

2.2 半辐射换热器的计算

电站锅炉的半辐射受热面一般顺流布置, 模型的导出过程与前相同。它既有对流吸热又有辐射吸热, 因此其传热效能式与顺流换热器有所不同, 经过详细推导, 得到如下公式:

$$\epsilon = \frac{1 - \exp(-NTU(1+R))}{1+R} + \frac{A}{1+R} \quad (4)$$

$$A = \frac{Q_f}{(Mc)_{max} (T_{hi} - T_{ci})} \left(\frac{1 - \exp(-NTU(1+R))}{NTU(1+R)} - 1 \right)$$

式中 Q_f 为该受热面的辐射吸热量。经过计算表明, 式(4)后面一项与前面一项相比很小, 可以忽略不计。因此半辐射换热器的效能可以直接采用顺流式换热器的效能计算公式。但吸热量计算式不一样, 所以工质吸热量变化计算式也有所区别。

2.3 全辐射换热器的计算

电站锅炉的全辐射受热面一般指前屏过热器, 影响其出口温度变化的主要因素有辐射吸热量及其

进口温度与冷流体流量。公式如下:

$$\Delta T_{co} = \frac{\Delta Q}{(Mc)_c} - \frac{(T_{co} - T_{ci})}{(Mc)_c} \Delta(Mc)_c + \Delta T_{ci}$$

式中, Q 为辐射放热量。

3 换热系统的模型

一般换热系统可能由许多换热器组成, 各换热器的传热方式以及布置形式也各不相同。根据上述原理以及冷热流的流程, 详细考虑各个换热器的不同点, 写出它们的温度变化及热量变化, 从而获得整个换热系统的数学模型, 如下所示:

$$\Delta Q = M_h c_{ph} (\Delta T_{hi} - \Delta T_{ho}) = M_c c_{pc} (\Delta T_{ci} - \Delta T_{co})$$

$$q = \sum_{i=1} \Delta Q_i$$

$$\Delta \eta = \frac{q}{Q}$$

式中, ΔQ 为各个换热器热流体的放热量变化值; Q 为换热系统总吸热量; $\Delta \eta$ 为系统总的热效率变化值。

4 实例分析

为检验模型的正确性, 以徐州电厂 DG-670/140-8 型电站锅炉 (其流程图如图 2 所示, H_1 —烟气, C_1 —过热汽, C_2 —再热汽, C_3 —给水, C_4 —空气) 为实际对象, 利用锅炉热力计算 73 标准模拟其运行状态, 另一方面用该模型进行计算分析。变工况计算以锅炉吹灰为例, 在其它输入量不变的情况下, 各个受热面的灰污热阻以及热有效系数将要发生变化。当锅炉进行吹灰时, 炉膛吸热量增加, 炉膛出口烟温降低。各段受热面吹灰时, 传热系数增大, 并且进口烟温也要变化, 由此引起两种流体出口温度都要发生相应的变化。当然由于每种流体平均温度会引起冷流体的物性变化, 导致传热系数发生变化。若忽略物性的影响, 这样处理误差影响不大。

整个换热系统变工况计算模型如下所述:

(1) 炉膛出口温度以及其吸热量变化公式:

$$\Delta T_{lo} = 0.6 T_{lo} \left(\frac{T_b}{T_a} - 1 \right) a_1 \frac{\Delta \Psi}{\Psi}$$

$$\Delta Q_f = 0.6 \frac{T_{lo}}{T_a} a_1 \frac{\Delta \Psi}{\Psi} Q_f$$

式中 T_b 为炉膛出口烟气温, T_a 为理论燃烧温度, Ψ 为水冷壁的热有效系数, a_1 为炉膛黑度, 它与火焰黑度及热有效系数有关, Q_f 为炉膛传热量。

(2) 前屏过热器冷流体的出口温度变化公式:

$$\Delta T_{o1} = \frac{B_j \Delta Q_f F_{qp} \eta_{qp}}{(Mc)_{\max}} / F_{sb} + \Delta T_{ci}$$

式中, F_{qp} , F_{lb} 分别为前屏, 水冷壁的辐射受热面积, η_{qp} 为前屏的辐射吸热分布系数。

(3) 半辐射式过热器以及对流式过热器冷、热流体的出口温度变化公式:

$$\Delta T_{ho} = E \Delta T_{hi} + F \Delta T_{ci} + G \Delta \epsilon_{hw}$$

$$\Delta T_{co} = P \Delta T_{hi} + Q \Delta T_{ci} + S \Delta \epsilon_{hw}$$

顺流换热器传递常数 G 、 S 分别为:

$$G = - \frac{\partial \epsilon}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci}) = - \Gamma \frac{\partial NTU}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci})$$

$$S = \frac{\partial (\epsilon R)}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci}) = R \Gamma \frac{\partial NTU}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci})$$

$$\Gamma = \exp(-NTU(1+R))$$

逆流换热器传递常数 G 、 S 分别为:

$$G = - \frac{\partial \epsilon}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci}) = - \left[\frac{1-R}{1-R\Gamma} \right]^2 \Gamma \frac{\partial NTU}{\partial K} \cdot \frac{\partial K}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci})$$

$$S = \frac{\partial (\epsilon R)}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci}) = \left[\frac{1-R}{1-R\Gamma} \right]^2 R \Gamma \frac{\partial NTU}{\partial K} \cdot \frac{\partial K}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci})$$

回转式空预器传递常数 G 、 S 分别:

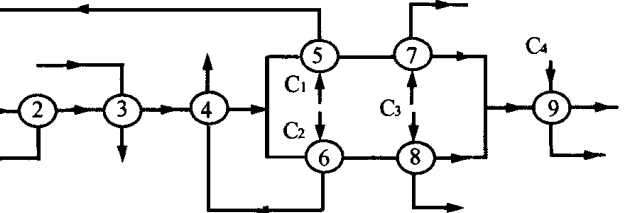


图 2 徐州电厂 DG-670/140-8 型电站锅炉流程示意图
1—前屏过热器 2—后屏过热器 3—高温过热器 4—高温再热器 5—低温过热器 6—低温再热器 7—低温过热器侧经济器 8—低温再热器侧经济器 9—空预器

$$G = - \frac{\partial \epsilon}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci}) = - \left(1 - \frac{1}{9} \left(\frac{Mc \right)_i \right)^2 \left[\frac{1-R}{1-R\Gamma} \right]^2 \Gamma \frac{\partial NTU}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci})$$

T_{ci})

$$S = \frac{\partial(\epsilon R)}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} - T_{ci}) = (1 -$$

$$\frac{1}{9} \left(\frac{(Mc)_j}{(Mc)_{max}} \right)^{-2} \left[\frac{1-R}{1-R\Gamma} \right]^2 R \Gamma \frac{\partial NTU}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial \epsilon_{hw}} (T_{hi} -$$

$T_{ci})$

$$\Gamma = \exp(-NTU(1-R))$$

(4) 电站锅炉换热系统, 其效率变化式^[5] 为:

$$\Delta \eta = \frac{1-q_4}{Q_d} q$$

式中, q 为各个换热器传热量变化之和; q_4 为锅炉机械不完全燃烧损失; Q_d 为燃料带入锅炉总的热量。

当燃料特性一定时, 锅炉各处的烟气流量只决定于燃料量和过量空气系数。燃料量可根据锅炉热效率和工质吸热量计算得到。锅炉热效率用反平衡

计算, 其中除了可计算的损失外, 其它各种损失可按经验值取定, 这种误差是很小的。表 1 便是图 2 换热网络的传递常数。

表 1 传递常数

	E	F	G	P	Q	S
后屏过热器	0.897	0.103	-1.028	0.097	0.903	0.97
高过热器	0.804	0.196	-1.31	0.1	0.9	0.668
高再热器	0.771	0.229	-1.253	0.1718	0.828	0.94
低再热器	0.28	0.72	-2.7	0.32	0.68	1.2
低温过热器	0.33	0.67	-2.07	0.075	0.925	0.232
再热经济器	0.58	0.42	-1.195	0.15	0.85	0.428
过热经济器	0.51	0.49	-0.757	0.151	0.849	0.233
空气预热器	0.131	0.869	-5.15	0.66	0.34	3.96

表二列出了当各个受热面的灰污系数发生变化时, 而其它输入量不变的情况下, 采用本文的模型分析与苏联热力计算 73 标准模拟的计算结果。

表 2 烟气出口温度及冷流体(过热蒸汽、水、空气)的出口温度变化值

受热面名称	ΔT_{ho}			ΔT_{co}		
	模型计算	模拟计算	误差	模型计算	模拟计算	误差
炉膛/前屏	-40	-40.5	0.5	0.96	1.5	-0.54
后屏	-38.9	-39.8	0.9	-0.22	-1.0	0.78
高过	-36.1	-37.0	0.9	-1.54	-1.4	-0.14
高再	-34.2	-34.9	0.7	-9.97	-10.2	0.23
低再	-12.1	-13.2	1.1	-8.57	-8.8	0.23
低过	-16.2	-16.0	-0.2	-2.01	-2.0	-0.01
低再经济器	-9.16	-9.5	0.34	-1.96	-2.45	0.49
低过经济器	-9.86	-9.8	0.06	-1.03	-1.32	0.29
空气预热器	-8.8	-8.0	-0.8	-0.44	-0.7	0.26

由表中可以看出, 模型计算与模拟计算的误差很小, 而且模型计算工量非常小。

上述分析结果可用于指导吹灰, 吹灰使各段烟温都有所降低, 排烟温度下降, 排烟热损失降低, 锅炉效率提高。经计算, 吹灰使炉膛辐射受热面吸量增加, 对流受热面的吸热量有可能减少, 主要由于传热系数增大, 但进口温度降低导致传热温差减少。而锅炉总吸热量增加, 锅炉效率提高大约 0.33%。由于高过出口汽温降低, 若锅炉在吹灰前使用减温水, 则吹灰后, 减温水量就会减少; 另外, 烟气侧放热系数增大, 而整个受热面的放热量却有所减少, 因此对流受热面的管壁温度降低, 这些都与现场实验结果是一致的^[6]。

5 结论

本文基于能量和质量守恒以及换热器过程基本理论, 利用效能-传热单元数法建立模型, 不仅可以

确定各输入量对系统总效率的影响, 而且可以计算出系统中各换热器的热量偏差、冷热流体温度变化。以电站锅炉为实际对象实例表明该模型具有一定的准确性与实时性, 它可用于指导现场运行, 提高锅炉运行的经济性。

参考文献

- [1] 杨世铭. 传热学. 高等教育出版社, 1987, 4
- [2] 李国庆. 换热网络弹性分析方法的研究. 科学出版社, 1993.
- [3] 姚平经, 郑轩荣. 换热器系统的模拟、优化与综合. 化学工业出版社, 1992, 12
- [4] 沈幼庭, 何锦英. 热力设备及最优化. 机械工业出版社, 1985, 11.
- [5] 周克毅. 电站锅炉性能分析模型. 中国电机工程学报, 1992, 112(4).
- [6] 孙志梅. 盐城电厂 125MW 机组 420 t/h 锅炉投用吹灰器前后经济性对比实验报告. 江苏省电力实验研究所, 1993.

(渠 源 编 辑)

ing method for the system can reduce the influence of quantization error of A/D converter, thereby increasing the measurement accuracy of the temperature-rise rate and enhancing the accuracy of thermal stress calculation. In addition, the system on the basis of a measured thermal stress gives an output in the form of 4 - 20 mA to other systems for analysis, accumulating relevant data for computing turbine service life later on. **Key words:** rotor thermal stress, real-time monitoring, difference measuring method, accuracy

稠密气固两相流的直接数值模拟 = **Direct Numerical Simulation of Dense Gas-solid Two-phase Flows** [刊, 中] / Yuan Zhulin (Thermal Energy Research Institute under the Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 465 ~ 466

Gas-phase field and discrete particle field are treated respectively by a Eulerian method and a Lagrangian one. During the treatment of a particle field the effect of particle diameter, specific weight, rigidity of material and friction factor, etc on particle movement has been taken into account. A direct simulation method was employed to simulate funnel flow, the particle movement in a ball mill and a stouted bed. Moreover, tests were conducted to verify the simulation results obtained on the stouted bed. **Key words:** gas-solid two-phase flow, direct numerical simulation

换热系统变工况分析 = **Off-design Performance Analysis of a Heat Exchange System** [刊, 中] / Bao Demei, Fan Deshan, Xu Zhigao (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 467 ~ 470

A new method for analyzing a heat exchange system performance variation is proposed along with the establishment of a relevant linear mathematical model. The proposed method can not only analyze the performance of the heat exchange system as a whole during a change in operating conditions but also reflect the thermal excursion and temperature changes of each heat exchanger within the system and also the efficiency of the heat exchanger itself. Finally, by taking the boiler heating surface soot-blowing as an example the results obtained from the model and those from a simulated model are compared. It is shown that the proposed method features both simplicity and real-time properties. **Key words:** heat exchange system, off-design operating conditions, thermal efficiency, heat transfer unit, soot-blowing

基于模糊神经网络的高加系统内部故障诊断方法 = **A Method for the Diagnosis of Internal Malfunctions of a High-pressure Heater System Based on a Fuzzy Neural Network** [刊, 中] / Qin Zaicong, Xu Zhigao (Southeastern University), Lu Songlin (Jiangsu Provincial Electrical Power Test Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 471 ~ 472

The authors expound the application of a fuzzy neural network for the diagnosis of internal malfunctions in a high-pressure heater system. Practice has shown that the diagnosis model under discussion has broad prospects for engineering applications. **Key words:** failure diagnosis, fuzzy neural network, high-pressure heater system

双列调节级的变工况热力计算方法及应用 = **A Method of Thermodynamic Calculation for Off-design Conditions of a Turbine Dual-row Governing Stage and Its Application** [刊, 中] / Fu Lin, Jiang Yi (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 473 ~ 476

The authors have come up with a thermodynamic calculation method for a turbine dual-row governing stage. Under this method the thermodynamic properties of the governing stage, including post-stage steam enthalpy, can be speedily identified when made known are only such parameters as the relevant geometric characteristics of the stage. The method can be employed for the simplified thermodynamic calculation of heat supply units. **Key words:** dual-row governing stage, algorithm, steam extraction unit

矩阵法和偏微分理论在机组热经济性分析中的应用 = **The Use of Matrix Method and Partial Differential Theory for the Analysis of a Reheat Unit Economic Performance** [刊, 中] / Zheng Xiuping, Zheng Luying, Cai Tianyou (Northeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 477 ~ 480

A general analysis is performed of a power plant reheat-regeneration thermodynamic system with the use of a matrix method and partial differential theory. Given are the calculation results of thermo-economic analytical parameters H_j^0 and η_j^0 . The proposed method is applicable for both reheat units and non-reheat ones. **Key words:** thermal system, matrix method, partial differential theory, economic performance analysis

弹性转子磁气轴承系统的 H_∞ 控制 = **H_∞ Control of the Magnetic Bearing System of a Flexible Rotor** [刊,