

压水堆核电机组二回路的反平衡单元分析法

李运泽¹, 严俊杰², 林万超², 邓世敏³

(1. 清华大学热能系, 北京 100084; 2. 西安交通大学 动力系统工程研究所, 陕西 西安 710049; 3. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100008)

摘要: 在分析附加成份对加热单元进水系数的影响的基础上推导出二回路高压加热单元进水系统的一般表达式, 通过详细的理论分析和数学推导, 建立起压水堆核电机组二回路的反平衡数学模型, 从而为压水堆核电机组二回路的反平衡单元分析法奠定了理论基础。反平衡单元分析法计算简单、结果准确, 便于手工计算和编程电算, 是二回路系统设计和节能诊断的有力工具之一。

关键词: 压水堆核电机组; 二回路; 加热单元; 放热系数; 反平衡单元分析法

中图分类号: TM623.91; TK212 文献标识码: B

1 引言

在压水堆核电机组二回路的优化设计和节能诊断中, 常常需要分析二回路在各种因素作用下发生局部变化时的热经济性变化。

本文根据二回路各加热器的功能和加热器间的疏水关系将整个二回路划分为一个凝汽单元、若干个中间回热单元、一个高压回热单元和一个再热单元, 并通过循环热效率与凝汽单元放热系数及各回热单元进水系数间的一般关系式来进行二回路热经济性的分析计算, 从而大大简化了压水堆核电机组二回路的分析计算。反平衡单元分析法不同于其它算法, 是压水堆核电机组二回路分析计算的一种崭新方法。

2 回热单元进水系数的分析方法

2.1 单元进水系数及局部定量方法

根据加热单元理论, 这里把一个汇集式回热加热器和所有与之存在疏水联系的放流式回热加热器划分为一个回热单元; 把任意回热单元出口流量为“1”时的单元进口流量定义为该回热单元的进水系数 K :

$$K = \frac{\text{回热单元进口流量}}{\text{回热单元出口流量}}$$

沿逆时针方向给单元内各加热器编号, 则对一

个无任何附加成份引入的回热单元来说其进水系数为

$$K_0 = 1 - \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (1)$$

式中 α_i 为该单元出口流量为“1”时第 i 级加热器的抽汽量, n 为该单元的加热器数目。

附加成份可以以直接放热和间接放热两种方式影响回热单元进水系统^[1]。本文首先研究附加成份直接放热(图 1)的情形。

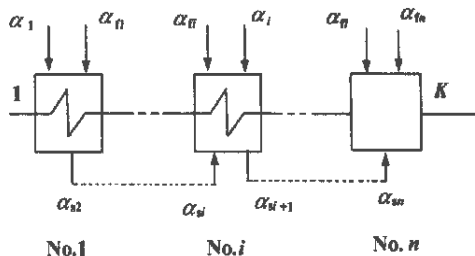


图 1 回热单元

当附加成份 α_{fn} 在第 n 级汇集式加热器直接放热时, 根据该级加热器的热平衡式有

$$\alpha_n = \frac{\tau_n}{q_n} - \alpha_{fn} \frac{q_{fn}}{q_n} - \alpha_{sn} \frac{\gamma_n}{q_n} \quad (2)$$

文中热力参数 q_i , γ_i , τ_i 和 q_{fi} 的物理意义及计算方法与文献[1]第 1 章中常规火电机组热力系统简捷计算的有关约定完全相同。

根据汇集式加热器的流量平衡式有

$$K = 1 - \alpha_n - \alpha_{fn} - \alpha_{sn} \quad (3)$$

汇集式加热器在附加成份直接放热及其接受的疏水流量变化时进水系数 K 的变化规律:

$$\Delta K = - \left(1 - \frac{\gamma_n}{q_n}\right) \Delta \alpha_{sn} - \left(1 - \frac{q_{fn}}{q_n}\right) \Delta \alpha_{fn} \quad (4)$$

式中 ΔK , $\Delta \alpha_{sn}$, $\Delta \alpha_{fn}$ 分别为进水系数、进入第 n 级汇集式加热器的疏水及附加成份变化量。

当附加成份在第 i 级放流式加热器直接放热时(图 1 中的第 i 级加热器), 根据该级加热器的流量平衡式有

$$\alpha_{s_{i+1}} = \alpha_{s_i} + \alpha_i + \alpha_{fi} \quad (5)$$

根据放流式加热器的热平衡式有

$$\alpha_i = \frac{\tau_i}{q_i} - \alpha_{fi} \frac{q_{fi}}{q_i} - \alpha_{si} \frac{\gamma_i}{q_i} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)可得进入下级加热器疏水流量

$$\alpha_{s_{i+1}} = \frac{\tau_i}{q_i} - \alpha_{fi} \left(1 - \frac{q_{fi}}{q_i}\right) - \alpha_{si} \left(1 - \frac{\gamma_i}{q_i}\right) \quad (7)$$

由上式可得放流式加热器在附加成份直接放热和本级疏水流量变化时进入下级加热器疏水流量的变化规律:

$$\Delta\alpha_{s_{i+1}} = \left(1 - \frac{q_{fi}}{q_i}\right) \Delta\alpha_{fi} + \left(1 - \frac{\gamma_i}{q_i}\right) \Delta\alpha_{si} \quad (8)$$

从式(8)可得如下重要结论:

取 $\Delta\alpha_{fi} = 0$, 可得附加成份直接放热对进入下级疏水流量的影响:

$$\Delta\alpha_{s_{i+1}} = \left(1 - \frac{q_{fi}}{q_i}\right) \Delta\alpha_{fi} \quad (9)$$

取 $\Delta\alpha_{si} = 0$, 得疏水流量变化的递推关系式:

$$\Delta\alpha_{s_{i+1}} = \left(1 - \frac{\gamma_i}{q_i}\right) \Delta\alpha_{si} \quad (10)$$

由式(9)、式(10)和式(4)可得第 i 级附加成份直接放热时该单元进水系数的变化规律:

$$\Delta K_i = - \Delta\alpha_{fi} \left(1 - \frac{q_{fi}}{q_i}\right) \prod_{j=i+1}^n \left(1 - \frac{\gamma_j}{q_j}\right) \quad (11)$$

当回热单元的各级加热器均有附加成份直接放热时, 其进水系数的变化为:

$$\Delta K = - \left(1 - \frac{q_{fn}}{q_n}\right) - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta\alpha_{fi} \left(1 - \frac{q_{fi}}{q_i}\right) \prod_{j=i+1}^n \left(1 - \frac{\gamma_j}{q_j}\right) \quad (12)$$

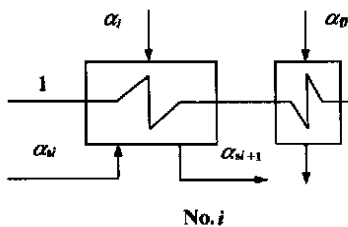


图 2 附加成份间接放热

同理, 当附加成份还在第 i 级加热器间接放热时(图 2 其实质为一纯热量作用), 可得此时进入下级的疏水量变化为

$$\Delta\alpha_{s_{i+1}} = - \frac{q_{fi}}{q_i} \Delta\alpha_{fi} \quad (13)$$

进水系数变化为

$$\Delta K_i = \Delta\alpha_{fi} \frac{q_{fi}}{q_i} \prod_{j=i+1}^n \left(1 - \frac{\gamma_j}{q_j}\right) \quad (14)$$

所以, 附加成份对进水系数影响的一般表达式为

$$\Delta K = \Delta\alpha_{fn} A_n - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta\alpha_{fi} A_i \prod_{j=i+1}^n \left(1 - \frac{\gamma_j}{q_j}\right) \quad (15)$$

当 q_{fi} 直接放热时: $A_i = \left(1 - \frac{q_{fi}}{q_i}\right)$ 。当 q_{fi} 间接放

热时: $A_i = - \frac{q_{fi}}{q_i}$; $1 \leq i \leq n$ 。

考虑附加成份的作用后回热单元的进水系数变为:

$$K = K_0 + \Delta K \quad (16)$$

式中的 K_0 和 ΔK 分别由式(2)、式(12)或式(15)确定。

2.2 高压回热单元进水系数的定量分析方法

压水堆核电机组二回路的高压回热单元各级回热加热器除接受单元内部的疏水外还接受来自再热单元的疏水, 这些来自再热单元的疏水对高压单元进水系数的影响可应用式(11)来分析。

由文献[5]推导得出了二回路高压回热单元进水系数的一般表达式

$$K = \frac{K_0 + \lambda \xi}{1 + \xi} \quad (17)$$

式中 K_0 为无任何来自再热单元的附加成份进入时的高压回热单元进水系数; 参数 λ 、 ξ 分别表示各种高压漏汽和再热单元疏水对高压回热单元进水系数的影响。

当循环参数确定时, 考虑到再热单元影响参数 $\xi = \text{const}$, 对式(17)求全微分得

$$dK = \frac{1}{1 + \xi} dK_0 + \frac{\xi}{1 + \xi} d\lambda \quad (18)$$

据此可得二回路高压回热单元进水系数的变化规律:

$$\Delta K = \frac{1}{1 + \xi} \Delta K_0 + \frac{\xi}{1 + \xi} \Delta\lambda \quad (19)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为各种高压汽水损失的变化量; ΔK_0 为不考虑再热疏水影响时单元进水系数的变化量, 其大小可应用式(11)或式(14)来予以分析。

3 凝汽单元的放热系数及核电机组二回路的反平衡数学模型

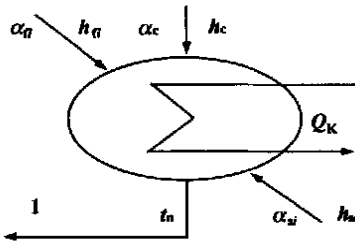


图 4 凝汽器

二回路核电汽轮机的凝汽器除了接受低压缸排汽和直接排向凝汽器的各种附加成份外一般还接若干级低压加热器的疏水, 这里将凝汽器和与之有疏水联系的低压加热器定义为二回路的凝汽单元; 将凝汽单元出口流量为“1”时的凝汽器放热量定义凝汽单元的放热系数 Q_K 。

根据凝汽器的热平衡式有

$$Q_K = \alpha_c (h_c - t_n) + \sum_{i=1}^m \alpha_{fi} (h_{fi} - t_n) + \sum_{i=1}^n \alpha_{si} (h_{si} - t_n) \quad (20)$$

根据凝汽器的流量平衡式得低压缸排汽

$$a_c = 1 - \sum_{i=1}^m \alpha_{fi} - \sum_{i=1}^n \alpha_{si} \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)得凝汽单元放热系数的一般表达式:

$$Q_K = (h_c - t_n) + \sum_{i=1}^m \alpha_{fi} (h_{fi} - h_c) + \sum_{i=1}^n \alpha_{si} (h_{si} - h_c) \quad (22)$$

式中 m 、 n 分别为排向凝汽器的附加成份和低加疏水数目; h_{fi} 、 h_{si} 、 h_c 、 t_n 分别为排向凝汽器的附加成份焓、疏水焓、排汽焓和凝结水焓; α_{fi} 、 α_{si} 分别为凝汽单元出口流量为“1”时排向凝汽器的附加成份和低加疏水份额。

定义蒸汽发生器入口流量为“1”时的凝汽单元出口流量 K_c 为凝汽单元的出水系数, 则:

$$K_c = \prod_{i=1}^R K_i \quad (23)$$

式中 R 为二回路凝汽单元前回热单元的数目; K_i 为各回热单元的进水系数。

所以, 循环放热量

$$Q_c = K_c Q_K = \prod_{i=1}^R K_i Q_K \quad (24)$$

考虑到上述各式中的附加成份份额 α_{fi} 为凝汽单元出水系数 K_c 的函数

$$\alpha_{fi} = \frac{\alpha_{fi}^0}{K_c} = \frac{\alpha_{fi}^0}{\prod_{i=1}^R K_i} \quad (25)$$

式中 α_{fi}^0 是蒸汽发生器入口流量为“1”时排向凝汽器

的附加成份份额。式(24)可写为

$$Q_c = K_c [(h_c - t_n) + \frac{1}{K_c} \sum_{i=1}^m \alpha_{fi}^0 (h_{fi} - h_c) + \sum_{i=1}^n \alpha_{si} (h_{si} - h_c)] \quad (26)$$

所以, 二回路循环热效率为:

$$\eta_i = 1 - \frac{Q_c}{Q_0} = 1 - \frac{K_c Q_K}{Q_0} = 1 - \frac{K_c}{Q_0} [(h_c - t_n) + \frac{1}{K_c} \sum_{i=1}^m \alpha_{fi}^0 (h_{fi} - h_c) + \sum_{i=1}^n \alpha_{si} (h_{si} - h_c)] \quad (27)$$

上式就是压水堆核电机组二回路的反平衡数学模型。式中参数 Q_0 为蒸汽发生器入口流量为“1”时二回路的循环吸热量, 对压水堆核电机组来说

$$Q_0 = (1 - a_{bl}) h_0 + a_{bl} h_{bl} - h_g + Q_{ex} \quad (28)$$

h_0 、 h_g 、 h_{bl} 分别蒸汽发生器的出口焓、给水焓和排污焓; a_{bl} 、 Q_{ex} 分别为蒸汽发生器入口流量为“1”时蒸汽发生器的排污份额和此时进入二回路的外部热量。

至此不难根据二回路各热经济性指标间的关系求得二回路汽轮发电机组的热耗率

$$q = \frac{3600}{\eta_i \eta_m \eta_g} \quad (29)$$

η_i 、 η_m 、 η_g 分别为二回路汽轮发电机组的循环效率、机械效率和电机效率。

4 算例

通过回热单元的进水系数和凝汽单元的放热系数的分析计算来求得二回路的循环热效率是反平衡单元分析法的基本思路。以引进 984.3 MW 压水堆核电机组二回路为例, 应用反平衡单元分析法进行分析计算(暂未考虑各加热器散热损失), 所得结果见表 1。

表 1 984.3 MW 压水堆核电机组二回路的反平衡单元分析计算

计算项目	计算值
高压回热单元进水系数 K_1	0.647 596
中间回热单元进水系数 K_2	0.921 649
凝汽单元出水系数 K_c	0.596 857
凝汽单元放热系数 Q_K	1 976.26 kJ/kg
循环放热量 Q_c	1 179.678 874 kJ/kg
循环吸热量 Q_0	1 799.92 kJ/kg
循环热效率 η_i	34.459 2 %

取发电机的机电效率 $\eta_m \eta_g = 0.987 7$, 根据上述计算结果可得二回路汽轮发电机组的热耗率

$$q = \frac{3\ 600}{0.344\ 592 \times 0.987\ 7}$$

$$= 10\ 577.237\ 5\ \text{kJ}/(\text{kWh})$$

为了验证理论和算法的正确性, 仍以引进 984.3 MW 压水堆核电机组二回路为例, 应用矩阵分析法进行二回路热力系统的常规计算, 所得的抽汽份额及各项热经济性指标见表 2。

表 2 二回路抽汽份额及主要热经济性指标的常规计算结果

加热器号	抽汽份额	指标名称	计算结果
1	0.032 15	循环功	620.24
2	0.029 69	/kJ·kg ⁻¹	
3	0.024 73	循环吸热量	1 799.92
4	0.025 43	/kJ·kg ⁻¹	
5	0.039 75	循环放热量	1 179.678
6	0.068 03	/kJ·kg ⁻¹	
7	0.046 69	循环效率	34.459 2
8	0.044 69	/%	
9	0.048 58	热耗率	10 577.237 5
		/kJ°(kWh) ⁻¹	

两种方法所得的计算结果完全一致, 而反平衡单元分析法的分析过程大为简化, 充分体现了应用反平衡单元分析法进行核电机组二回路分析计算的正确性、可行性和简捷性。

5 小结

应用反平衡单元分析法进行二回路的分析计算, 只需按本文提供的算法求出各回热单元的进水系数和凝汽单元的放热系数就可以进一步根据二回路的反平衡数学模型求得循环热效率等热经济性指标, 必要时还可以根据进水系数求解二回路任一加热器的抽汽流量。反平衡单元分析法具有计算简单、结果准确、手算电算都很方便等诸多优点, 是压水堆核电机组二回路的分析计算有力工具之一。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 马芳礼. 电厂热力系统节能分析原理—电厂蒸汽循环的函数与方程[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [3] 严俊杰. 汽轮发电机组经济性诊断理论研究及应用[D]. 西安: 西安交通大学, 1997.
- [4] STERMAN S, TERLIN S A, SHARKOW A T. Thermal and Nuclear Power Stations[M]. Moscow: Mir Publishers, 1986.
- [5] 李运泽. 压水堆核电机组二回路的线性单元分析法[J]. 热能动力工程, 2000, 15(5): 544—547.

(挥 编辑)

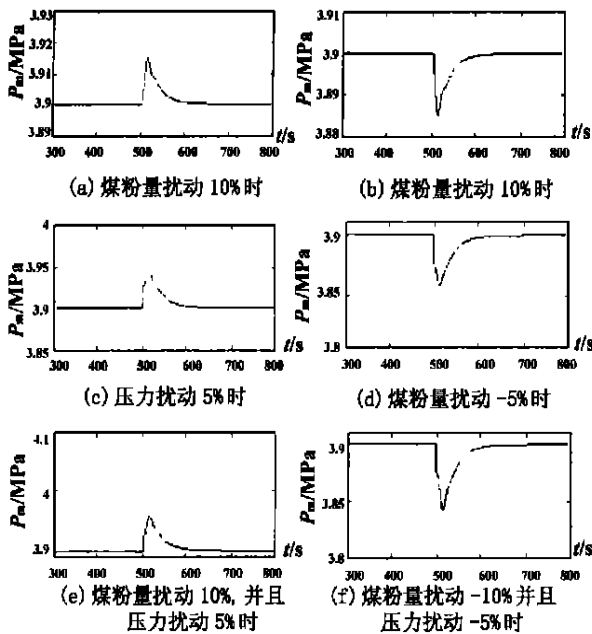


图 4 蒸汽压力仿真曲线

(上接第 645 页)

燃烧控制系统能满足运行的要求。

参考文献:

- [1] 赵广播. 树皮流化床、链条炉排加煤粉复合燃烧的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
- [2] 王德文, 李文田. 模糊控制在循环流化床锅炉控制系统中的应用[J]. 电力情报, 1997(4): 47—50.
- [3] 赵景波, 马林立. 工业锅炉燃烧系统——加权广义预测自校正控制[J]. 工业仪表与自动化装置, 1997(5): 34—36.
- [4] 牛陪峰, 孙建. 国产 75 t/h 循环流化床锅炉燃烧智能控制系统[J]. 发电设备, 1997(7): 22—26.
- [5] 曾德良, 刘吉臻. 单元机组智能协调控制系统的发展和应 [J]. 电力情报, 1998(3): 6—10.
- [6] 赵广播, 黄怡琨, 高志宏, 等. 树皮在流化床锅炉中干燥时间的计算[J]. 热能动力工程, 1999, 14(3): 212—214, 222.

(李乡复 编辑)

tute of Thermal Energy Engineering under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—637~640

The use of an advanced combustion diagnostic system can be conducive to an effective enhancement of utility boiler operation economy and safety. Through the collection of furnace flame images and by utilizing computer-based digital image processing techniques as well as the analysis method of an artificial neural network model a combustion diagnostic system of flame images has been developed for boiler No. 5 of Yongan Thermal Power Plant in Fujian Province. This system has provided meaningful quantified characteristics parameters, performing a highly effective probing of the combustion condition identification mechanism. As a result, a new method and approach for combustion diagnosis and optimized control is provided for utility boilers. **Key words:** utility boiler, combustion diagnosis, digital image, artificial neural network

火电机组锅炉过热汽温的约束模型预测控制研究 = **A Study of the Constrained Model Predictive Control for the Boiler Superheated Steam of a Thermal Power Plant** [刊, 汉] / JU Gang, CHEN Shao-bing, XU Zhi-gao (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—641~643

Presented is a model predictive control algorithm with an input of hard constraints. With no need for on-line iteration solution or on-line matrix inversion the recommended algorithm features a simplified calculation method with a low on-line computation load. It has been employed for the simulation study of boiler superheated steam control of thermal power plants and proved to be highly effective. **Key words:** predictive control, constraint, boiler, superheated steam temperature

75 t/h 树皮—煤粉复合燃烧系统的建模与仿真 = **Model Building and Simulation of a 75 t/h Bark and Pulverized Coal-fired Boiler** [刊, 汉] / BAO Gang, DENG Su-bi, WANG Zu-wen (Pneumatics Technology Center under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—644~645, 649

A 75 t/h boiler with a composite firing system operates on bark and pulverized coal. A model of the firing system has been set up with the combustion system serving as an object model. Meanwhile, a simulation of its control system was also conducted. **Key words:** fluidized bed boiler, simultaneous burning of bark and pulverized coal, mathematical model, control system simulation

压水堆核电站二回路的反平衡单元分析法 = **Inverse-balance Element Analysis for the Secondary Circuit of a Pressurized Water Reactor-based Nuclear Power Plant** [刊, 汉] / LI Yun-ze, YAN Jun-jie, LIN Wan-chao (Power System Engineering Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), DENG Shi-min (Thermal Engineering Research Institute of National Electric Power Co., Xi'an, China, Post Code: 710032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—646~649

On the basis of analyzing the effect of additional components on the incoming water factor of a heating unit derived is a general expression for the incoming water factor of the high-pressure heating unit of a secondary circuit. Through a detailed theoretical analysis and mathematical deduction an inverse-balance mathematical model was set up for the secondary circuit of a pressurized water reactor-based nuclear power plant. The foregoing has laid a theoretical basis for the inverse-balance element analytical method of the above-mentioned secondary circuit. Such an analytical method features a simplified calculation and an accuracy of the calculated results. Being convenient for manual calculations and programming-based electronic calculations, it represents one of the effective tools for the secondary circuit system design and energy-saving diagnosis. **Key words:** pressurized water reactor-based nuclear power plant, secondary circuit, heating unit, incoming water factor, heat release factor, inverse-balance element analytical method

利用 Monte Carlo 方法对循环流化床锅炉炉膛传热的数值计算 = **Numerical Calculation of Heat Transfer in a**