

一种新型的电站热力系统矩阵模型及其应用

司风琪 胡华进 徐治皋
(东南大学)

[摘要] 本文提出了一个新型的电站热力系统矩阵模型,该模型综合考虑了回热系统和各个辅助系统的对象特征,物理概念简单易懂,模型采用热平衡方法,算法可靠,通用性强。在计算机软件实施中可以使用组态的思想,有突出的优点,能够提高电站性能监测软件的健壮性与可移植性,在电站性能分析领域具有广阔的应用前景。

关键词 热力系统 矩阵 数学模型 电站 组态 软件
中图分类号 TK621.4

0 问题的提出

目前国内外正在掀起大型火电厂的性能监测的研究热潮,通过对机组性能指标的计算,进行机组偏差分析,最后提出操作指导^[5]。在这些工作中电站热力系统的经济性分析是重要的基础,它直接反映出全厂的经济效益,对电厂的节能也有重大的意义。但是由于电站热力系统结构复杂,运行方式多变,它的软件实现一直比较麻烦,实际工作中常会遇到一些问题。

一般的分析软件是针对具体的系统结构设计的,一方面当机组的局部结构发生变化时,诸如发生一些频率相对较高的事故工况(如高加切除、加热器短路等)和一些辅助系统(如喷水减温系统、蒸汽冷却器系统以及工质泄漏与加热器水位波动等)的投停,软件难以及时作出机组性能的正确评价与比较,另一方面由于系统结构改变的不确定性,往往同样内容的软件在两个不同的电站系统之间移植时,需要针对其特点重新设计,重新编程,工作量大且繁琐。上述问题在

教学和设计部门同样存在,要对不同形式的回热系统作热经济比较或火电厂课程教学的 CAI 研究,这些工作中都迫切要求解热力系统的通用算法及软件设计方法^[1~3]。

为解决上述问题,笔者认为可以采用目前比较流行的面向对象的思想利用系统组态的方法,编制通用的性能计算软件及其组态软件。用户通过一个组态软件形成机组的组态文件,再提供给计算软件,以实现算法和数据的分离。而问题的关键在于需要通用的模型和算法。这方面,很多同志作了大量的研究,笔者也作了一些工作,提出了一个新的加热器模型,能够较好实现机组性能分析的通用化。

1 加热器模型

目前使用的加热器模型可以根据其物理结构特性分为多种类型(如表面型、混合型等),每一个类型有具体的算法,这对于笔算或针对每一个具体的机组有突出优点,但在计算机编程中恰恰限制了通用性。笔者分

析了各种加热器的结构特点,认为可以将加热器抽象成一种类型。如图 1 所示,它可以简化到任何一种实际形成的加热器^[2,4,6]。

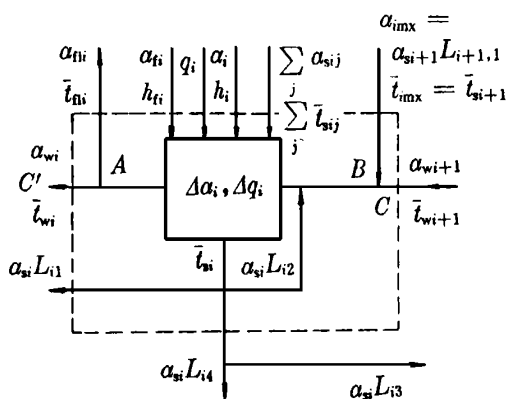


图 1 加热器模型示意图

图中的参数说明如下:

T_i 为 i 级加热器利用抽汽份额; h_i 为 i 级加热器利用抽汽焓; T_{fi} 为 i 级加热器利用辅汽份额; h_{fi} 为 i 级加热器利用辅汽焓; q_i 为 i 级加热器利用的外部纯热量; T_{si}, T_{si+1} 为 $i, i+1$ 级加热器流水份额; T_{sij} 为 i 级加热器利用第 j 级加热器疏水份额; \bar{t}_{si} 为 i 级加热器疏水焓; T_{wi}, T_{wi+1} 为 $i, i+1$ 级加热器出口水份额; \bar{t}_{wi+1} 为 $i, i+1$ 级加热器出口水焓; T_{fi} 为 i 级加热器的分水系数; ΔT_i 为 i 级加热器储质的变化; Δq_i 为 i 级加热器储能的变化;

1.1 物理模型说明

模型考虑了加热器流水的不同流向,利用外部纯热量和辅汽、蒸汽冷却器、给水管、给泵与凝泵的泄漏与疏水排地沟、水泵的泵功与辅助加热器以及加热器的水位波动等特殊情况的处理^[2,5]。

结合图 1 中的各个参数对这个物理模型作一个较深入介绍:

加热器利用其他各级加热器的疏水为 ET_{sij} , 利用外部纯热量 q_i 辅汽 T_{fi} 和主抽汽

T_i

加热器的疏水有四种排放方式即:排加热器出口、排加热器入口、被其他级利用和排出回热系统,在数学模型中用组态矩阵 L 表示,如 $L_{i1} = 1$ 则表示排到出口,其他类推(详见 3.1)

定义一个给水侧出口点(图 1 中 A 点),这里主要考虑蒸汽冷却器和喷水减温的分水和水侧的泄漏。定义一个给水侧入口的混合点(如图 1 中 B 点),当作下级加热器的疏水进入本级的入口点。

图中通常 C 点的参数可由端差求得,在实时软件中可由布置的测点得到,故采用此点作为一级加热器的分界点。

1.2 加热器水位变化的处理

运行过程中,如加热器的水位发生波动,典型的情况是除氧器水位的波动和凝汽器热井的水位波动(表面式加热器如果热井水位可测也应考虑),此过程中加热器的进出口物质与能量平衡时,要扣除工质储质产生的水位变化 ΔT_i 和热量变化 Δq_i ,使用时取 Δt 时间内的平均值,以流量和能流的形式代入。

1.3 加热器数学模型

数学模型的推导是利用热平衡方法,建立在物质守恒和能量守恒这两大基本定理基础上的,具体表示如下:

水侧物质平衡

$$T_{wi} = T_{wi+1} + T_{si+1}L_{i+1,1} + T_{si}L_{i2} - T_{fi} \quad (1)$$

汽侧物质平衡

$$T_i = T_{fi} + T_i + \sum_j ET_{sij} - \Delta T_i \quad (2)$$

加热器能量平衡

$$ET_{sij} \bar{t}_{sij} + T_{wi+1} \bar{t}_{wi+1} + T_{si+1}L_{i+1,1} \bar{t}_{si+1} + T_{fi} h_{fi} = T_{wi} \bar{t}_{wi} + T_i \bar{t}_{si} (L_{i1} + L_{i3} + L_{i4}) + T_{in} \bar{t}_{wi} + \Delta q_i + q_i \quad (3)$$

加热器效率 Z_i

上述模型的推导取 $Z_i = 1.0$, 如果 Z_i 不

为 1.0 则由下式修正 h_i

$$h'_i = h_i Z_i + t_{si}(1 - Z_i) \quad (4)$$

2 系统集成模型

将上述加热器的数学方程联立就可以组成求解回热系统的线性方程组。

2.1 组态矩阵

为了更方便地进行系统集成,我们应用了三个系统组态矩阵 L 、 K 、 M ,其中 L 矩阵表示本级加热器的疏水流向, K 矩阵表示整个回热系统的疏水利用情况, M 矩阵表示分水的特性,分别定义如下:

$L[i] = (0, 0, 1, 0, j)$, 表示 i 级加热器疏水被第 j 级加热器利用。

$L[i] = (0, 1, 0, 0, 0)$, 表示 i 级加热器疏水往入口打。

$L[i] = (1, 0, 0, 0, 0)$, 表示 i 级加热器疏水往出口打。

$L[i] = (0, 0, 0, 1, 0)$, 表示 i 级加热器疏水排地沟。

$K[i, j] = 1$, 表示 i 级加热器利用 j 级加热器疏水,它可以有 L 生成。

$M[i] = 1$, 表示 i 级加热器分水还回到给水管道(典型的是蒸汽冷却器的分水)

$M[i] = 0$, 表示 i 级加热器分水不回到给水管道(典型的是减温水和管道泄漏)

2.2 系统集成数学模型

由加热器数学模型可组成以 $(T_{w1} \dots T_{wn}, T_{wn+1}, T_{s1} \dots T_{sn}, T_1 \dots T_n)$ 为自变量的线性方程组^[7](其中 n 为加热器级数, T_{wn+1} 为凝水份额, T_w 为锅炉进水份额, T'_{fw} 为第一级高加出口水份额,有

$$T'_{fw} = T_w - \sum_{i=1}^n E_{fi} M[i]$$

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ 0 & K & I \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中矩阵块定义如下:

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ -L_{12} & -L_{21} \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ -L_{n-1,2} & -L_{n1} \\ -L_{n2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A_{31} = \begin{bmatrix} -t_{w1} & -t_{w2} \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ -t_{wn} & -t_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_{33} = \begin{bmatrix} h'_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ h'_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n-1,n-1} & d_{n-1,n} \\ 0 & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$d_{ii} = t_{si}(1 - L_{i1} - L_{i3} - L_{i4})$$

$$d_{i+1,i} = t_{s(i+1)} L_{i+1,i} \quad (11)$$

$$A_{32} \text{ 中 } |T_{ij}| = |K_{ij} t_{sj} + d_{ij}| \quad (11)$$

$$(X_1, X_2, X_3)^T = (T_{w1}, \dots, T_{wn}, T_{wn+1}, T_{s1}, \dots, T_{sn}, T_1, \dots, T_n)^T; \quad (12)$$

$$(C_1, C_2, C_3)^T = (T'_{fw}, -T_{Q1}, \dots, -T_{Qn}, -T_{Q1} + \Delta T_1, \dots, -T_{Qn} + \Delta T_n, - (T_{Q1} h_{Q1} + q_1 - \Delta q_1), \dots, - (T_{Qn} h_{Qn} + q_n - \Delta q_n))^T; \quad (13)$$

3 典型加热器举例

点直观的说明,它包含了常用的几种加热器的类型

下面以图 2 所示的回热系统为例做一

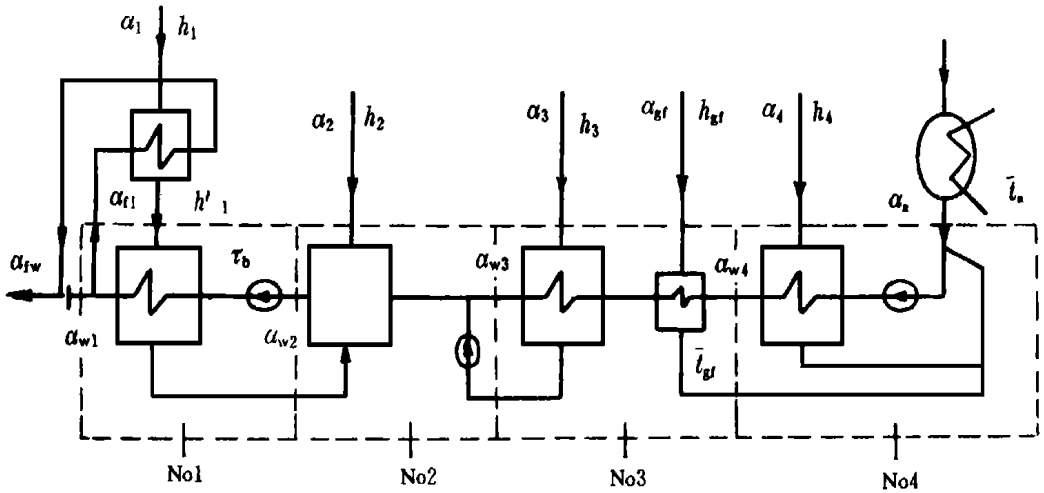


图 2 典型回热系统举例

第一级是常置于除氧器前的高加,给水泵功作为其利用的纯热量,它利用的抽汽经过蒸汽冷却器,焓值修正为 h'_1 ,水侧分水系数 α_{f1} ,疏水自流。

第二级为除氧器,利用上级疏水,下级疏水经汽水混合点进入,疏水往入口打,一般取用疏水焓等于进口水焓以构成迭代方程,但由于此类加热器能量方程式 (3) 中 \bar{t}_{sf} 系数为 0,所以当加热器效率为 1 时入口疏水焓不影响计算结果,当加热器效率不为 1 时式 (4) 中抽汽焓修正应采用进口水焓。

第三级为疏水往出口打的类型,它后面紧接着一级轴封加热器,该级利用纯热量 $T_{gf}(h_{gf} - \bar{t}_{gf})$

第四级为末级加热器,把轴加来的工质 $T_{gk} \bar{t}_{gf}$ 作为一种辅汽来利用,它的疏水往入口打。

为了验证模型的正确性,参照文献 [2],对两台机组作了计算(结果一),并与书中结果(结果二)进行对比,如下面表格。

国产 N 100 - 90/535 非再热机组(不计加热器散热损失),结果见表 1

国产 N 300 - 165/550/550 机组(加热器效率取 0.98),结果见表 2

计算示例中最大相对误差不超过 0.2%,而且集中于后几级。在本模型中采用列主元的高斯消去法由计算机求解,计算过程中舍入误差很小,示例中计算结果的误差主要是由书中手工计算迭代次数不多造成的 [7]。

基于本模型,笔者已经编制了一个通用计算函数(本函数代码不足一百行),调用该函数对文献 [2] 附录中的所有机组都进行了验算,证实达到了本文开始提出的要求

5 计算举例

表 1 N100 MW 机组计算结果

项 目	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
结果一	0.05 199	0.06 743	0.02 264	0.04 069	0.02 133	0.04 154	0.04 155
结果二	0.05 199	0.06 743	0.02 264	0.04 069	0.02 133	0.04 154	0.04 156
误 差	0.00 000	0.00 000	0.00 000	0.00 000	0.00 000	0.00 000	0.00 001

表 2 N300 MW 机组计算结果

项 目	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
结果一	0.045 842	0.088 791	0.037 049	0.009 629	0.031 561	0.052 103	0.036 425	0.022 072
结果二	0.045 842	0.088 791	0.037 049	0.009 629	0.031 561	0.052 119	0.036 358	0.022 056
误 差	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 016	0.000 067	0.000 016

5 结 论

这种建立在对加热器结构高度抽象基础上新型的矩阵模型大大提高了电站热力系统性能计算软件的通用性,从而解决了电站性能分析的一个瓶颈问题.使电站性能分析软件的可移植性、可维护性大大增强,基本解决了本文开头所提出的问题.而此模型是建立在物质与能量守恒的基础上的,因此算法可靠.在计算机被广泛应用的当今,在工程实践中,这种矩阵模型更具有突出的优点,具有广阔的应用前景,必将推动电站性能分析的进一步发展.

参 考 文 献

1 郑体宽.热力发电厂.水利电力出版社,1986年 6月

2 林万超.火电厂热系统定量分析.西安交通大学出版社,1985年 5月
 3 汪孟乐.火电厂热力系统分析.水利电力出版社,1992年 6月
 4 王永初.对象模型是怎样建立的.自动化与仪表,1984,(2)
 5 Satsarnis G T and Sanae-M. On-line thermoeconomic evaluation of power plant performance. International Power Generation Conference. ASME, New York, U. S. A, 1991
 6 林万超.火电厂热系统节能理论.西安交通大学出版社,1994年 11月
 7 袁慰平.数值分析.东南大学出版社,1994年 10月

作者简介 司凤琪,男,1973年 2月生于江苏盐城.东南大学动力工程系电厂热能动力工程专业硕士研究生.从事水蒸气热物性与火电厂 CAI研究,有多篇论文发表.现主要从事电站性能监测方向的研究工作.(210096 东南大学动力系)

(渠源 编辑)

大 连 将 建 造 PFBC 热 电 联 供 装 置

据“Modern Power Systems”1997年 3月号报道,中国东北电力集团与 ABB 大连市地方当局签订了一个联合投资协议,用来建设一个 PFBC(增压流化床)电力项目.

大连有 350万居民,并且工业和商业对电力和分区供热有很大的需求.此项目将是一个热电联供装置,包括 2台 P200锅炉,输出的总电力为 125 MW和 200 MW的过程蒸汽.

该项目是中国“九五计划”的一部分,并且应该于 2000年投运.它组成了在新的电站和重新分配动力工程中利用中国煤资源的总计划的一部分.

(思娟 供稿)

cessively low thermal efficiency of the boiler. Relevant modification measures are proposed, with the help of which anticipated improvements have been attained. **Key words** energy saving, fly ash, combustible

小型燃煤锅炉改烧天然气的措施及效果 = **Measures and Effectiveness of Switch-over to Natural Gas Firing by a Small-sized Coal-fired Boiler** [刊, 中] / Guo Jianqiang, Han Hongjia, et al (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -200~ 203

Specific measures are described regarding the change-over to burning natural gas by a small-sized coal-fired boiler. In this connection some valuable experiences are provided for coal-fired boilers to switch over to firing natural gas. **Key words** boiler, natural gas, modification

论折合焓的概念及其应用 = **On the Concept of Reduced Exergy and Its Application** [刊, 中] Han Xueting, Zhang Jie (Hebei Institute of Architectural Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -204~ 207

On the basis of the assumption that factor K of the ratio of use value of non-usable energy and exergy is equal to energy level Ω , deducted is a universally applicable formula for calculating reduced exergy. From this one can perceive the variation relationship of reduced exergy with energy level, thereby proving that the reduced exergy is a status function. The analysis of the reduced exergy can lead to a more comprehensive and accurate evaluation of the use conditions of various energy quantities. Moreover, the determination of the price of heat, electricity and cold products by the reduced exergy method is more scientific and rational. **Key words** reduced exergy, usable non-usable energy, unusable energy level, practical exergy, average thermodynamic temperature

一种新型的电站热力系统矩阵模型及其应用 = **A New Type of Power Station Thermodynamic System Matrix Model and Its Application** [刊, 中] / Si Fengqi, Hu Huajin, Xu Zhigao (South eastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -208~ 212

The authors have come up with a new type of power station thermodynamic system matrix model. It takes into consideration in a comprehensive way the object characteristics of a regenerative system and various auxiliary systems and features a simple and easy-to-understand physical concept. By the use of a heat balance method the algorithm of the model is reliable and universally applicable. Through the implementation of a computer software it is possible to make use of the idea of configuration. This outstanding merit can enhance the robustness and transplantability of the power plant performance monitoring software, creating wide application prospects in the area of power station performance analysis. **Key words** thermodynamic system, matrix, mathematical model, power station, configuration, software

Windows平台上锅炉微机监控系统的开发应用 = **Development and Application of a Microcomputer-based Boiler Monitoring System on a Windows Platform** [刊, 中] / Wan Jingyi, Liu Qingge (Harbin No. 703 Research Institute), Zhao Xia, Jin Hongda (Suibin County Television Station) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -213~ 217

The authors give a brief description of the hardware structure and regulating principle of a Yanhua industrial control model PC486 boiler microcomputer-based monitoring system, detailing the development of microcomputer-based boiler monitoring system and software design method on a Windows platform as well as the important role played by dynamic data exchange (DDE) and dynamic chain connection function base on a Windows platform. **Key words** windows, boiler, microcomputer monitoring

可编程控制器在声能吹灰控制中的应用 = **The Use of Programmable Controllers in Sonic-Energy Soot Blowing Control** [刊, 中] / Zhang Rui, Jin Haifeng (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -218~ 220

Described is the technological process and control method involved in the use of programmable controllers for controlling sonic-energy soot blowing and the resulting energy-saving. The application of such programmable controllers in the above-mentioned area is not only proper but also cost-effective. **Key words** programmable controllers, sonicenergy, soot removal, control

JKTH-1000DEH系统在 50 MW 汽轮机组上的应用 = **The Use of JKTH-1000DEH System in a 50 MW**