

基于变热量等效热降的混合发电系统通用矩阵模型

叶学民¹ 祁 成² 李春曦¹

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院 河北 保定 071003; 2. 西北电力设计院 陕西 西安 710075)

摘 要: 以定热量等效热降法为基础,建立了混合发电系统的变热量等效热降通用矩阵模型。以某 600 MW 机组的混合发电系统为例,利用矩阵通用模型计算了该机组采用混合发电的热经济性,分析了混合发电系统的优越性。研究表明,系统效率、节煤量、CO₂ 减排量与辅助热源系统作用位置及流量分配系数密切相关,辅助热源系统作用于高压级加热器时系统的节能潜力及经济效益总体好于作用于低压级时,辅助热源系统作用于各低压级加热器时,各高压级和除氧器级的抽汽效率均有提高。

关 键 词: 变热量等效热降; 混合发电; 矩阵模型; 热经济性

中图分类号: TK212 文献标识码: A

引 言

面对传统燃煤电厂高煤耗、高污染、高发电成本等现状^[1],混合发电技术的优势日益突出。目前,混合发电研究多集中于太阳能与地热能混合发电、风能与太阳能混合发电、燃料电池与燃气轮机混合发电等方面^[2-5],崔映红等率先将太阳能引入传统燃煤电厂进行混合发电^[6-7],叶学民等在整合太阳能和生物质能储量丰富性、清洁性及能量互补性的基础上,提出生物质与太阳能辅助燃煤的混合发电系统^[8],实现了多能量形式与传统燃煤结合的混合发电模式。

生物质与太阳能辅助燃煤混合发电系统是解决可再生能源不连续、有效缓解化石燃料紧张局面、实现电厂节能减排和提高经济效益的新型发电系统,随着我国对可再生能源发电政策支持力度的不断加大^[9],其优越性将得到进一步体现。而目前针对此类混合发电系统的热经济分析方法尚未进行深入研究,传统分析方法不仅无法直观反映各种因素对系统经济性的影响,而且过程繁琐、规律性不强,且更不易实现多工况下的热经济性分析。本研究针对混

合发电系统,在传统定热量等效热降法基础上进行改进^[10],通过建立混合发电系统变热量等效热降的通用矩阵模型,从而实现分析过程的一体化和计算机程序化。

1 变热量等效热降及混合发电系统

1.1 变热量等效热降

等效热降法在热力循环及小指标的计算方面比常规热平衡方法的计算更加方便和快捷^[11-12],根据汽轮机热耗是否变化可分为定热量和变热量等效热降。定热量等效热降由于保持循环吸热量不变,使分析过程存在以下缺陷^[13]:保持循环吸热量不变,这与实际情况不符,不能反映实际运行状况;计算抽汽效率时所需的循环效率需用常规方法先确定,工作量增加,无法独立完成热力系统的整体计算;概念抽象,不易理解;在有外置式蒸汽冷却器的系统中,确定其等效热降有一定难度。

变热量等效热降通过再现热力过程中实际循环吸热的真实性,使其循环吸热量与实际热力过程存在一定的依变关系,由此可克服定热量等效热降法由于保持循环吸热量不变而造成的上述缺陷,并保持了等效热降分析问题的简洁性和准确性。在此基础上,通过建立混合发电系统变热量等效热降通用矩阵模型,满足目前热力计算分析对准确度、通用性、尤其是适应计算机程序化的要求^[14]。

1.2 生物质与太阳能辅助燃煤混合发电系统

生物质与太阳能辅助燃煤混合发电系统是一种新型的低碳环保型发电系统^[8],其系统如图 1 所示。通过将生物质和太阳能两种新型可再生能源与传统化石燃料的有机结合,充分发挥了新能源低碳环保、能源互补性强和传统火力发电的技术优势,能有效提高机组效率和发电经济效益,同时降低机组污染

收稿日期: 2012-03-23; 修订日期: 2012-04-13

作者简介: 叶学民(1973-),男,河北邢台人,华北电力大学副教授,博士。

物排放,实现机组深层次的节能减排,为传统燃煤电厂的节能减排改造和新电厂的建设提供一种有效途径,同时为混合发电技术领域研究提供一种新的思路和方法。

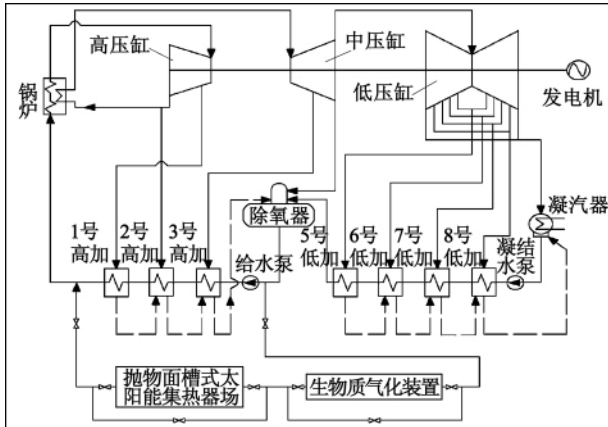


图 1 生物质与太阳能辅助燃煤混合发电系统
Fig. 1 Biomass and solar energy-aided hybrid power generation system

2 变热量等效热降通用矩阵模型

2.1 变热量等效热降通用矩阵模型

混合发电热力系统如图 2 所示,以此为基础建立混合发电系统的变热量等效热降通用矩阵模型。图中虚线表示由太阳能集热器和生物质气化装置组成的辅助热源系统。

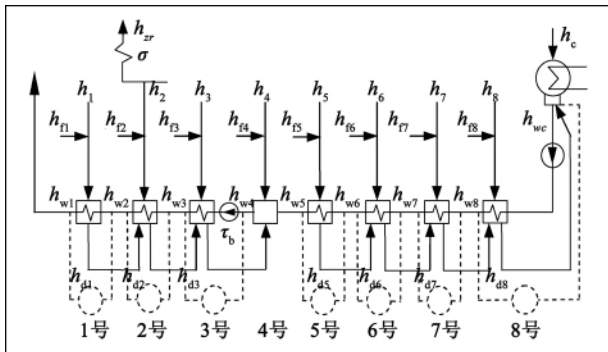


图 2 混合发电热力系统图
Fig. 2 Diagram of a hybrid power generation thermodynamic system.

图 2 中: $h_i, h_{di}, h_{wi}, h_{fi}$ —第 i 级控制单元抽汽焓、疏水焓、出口水焓、辅助汽焓, kJ/kg ; $\sigma, h_{zr}, h_c, h_{wc}$ —再热器吸热量、再热器出口焓、排汽焓和热井出口水焓, kJ/kg ; τ_b —给水泵功, kJ/kg 。

为清晰描述辅助热源系统对汽水分布影响和经济性分析,引入流量分配系数 $\beta_i = D_{gsi} / (D_{gsi} + D_{fzi})$, 表示加热器给水管路中给水流量 D_{gsi} 与 D_{gsi} 和辅助热源系统总管路中给水流量 D_{fzi} 之和的比值。以加热器给水出口参数作为基准可保持各参数定义与原来定义的一致性,且方程结构不变,只需在相应项前倍乘系数 β 即可。则各级抽汽变热量等效热降通式可由以下公式表示。

再热热段以后:

$$H_i = (h_i - h_c) - \sum_{r=i+1}^z \frac{A_r}{q_r} H_r = (h_i - h_c) - \sum_{r=i+1}^z A_r \eta_r \quad (1a)$$

再热冷段及其以上:

$$H_i = (h_i + \sigma - h_c) - \sum_{r=i+1}^z \frac{A_r}{q_r} H_r = (h_i + \sigma - h_c) - \sum_{r=i+1}^z A_r \eta_r \quad (1b)$$

式中: i —加热器级数编号, r — i 级加热器后压力级更低的加热器编号; τ_i, q_i, γ_i —第 i 级控制单元内给水焓升、抽汽放热量、疏水放热量, kJ/kg 。 A_r 定义规则为:若 i 为汇集式加热器,则 A_r 用 $\beta_r \tau_r$ 代替;若 i 为疏水自流式加热器,则 i 以下直到(包括)汇集式加热器 A_r 用 γ_r 代替,在汇集式加热器以下,全部 A_r 用 $\beta_r \tau_r$ 代替。

将通式按各级展开成变热量等效热降方程,并对方程做型式变换可得:

$$\begin{bmatrix} q_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 & \beta_5 \tau_5 & \beta_6 \tau_6 & \beta_7 \tau_7 & \beta_8 \tau_8 \\ q_2 & \gamma_3 & \gamma_4 & \beta_5 \tau_5 & \beta_6 \tau_6 & \beta_7 \tau_7 & \beta_8 \tau_8 \\ q_3 & \gamma_4 & \beta_5 \tau_5 & \beta_6 \tau_6 & \beta_7 \tau_7 & \beta_8 \tau_8 \\ q_4 & \beta_5 \tau_5 & \beta_6 \tau_6 & \beta_7 \tau_7 & \beta_8 \tau_8 \\ q_5 & \gamma_6 & \gamma_7 & \gamma_8 \\ q_6 & \gamma_7 & \gamma_8 \\ q_7 & \gamma_8 \\ q_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \\ \eta_7 \\ \eta_8 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} h_1 + \sigma - h_c \\ h_2 + \sigma - h_c \\ h_3 - h_c \\ h_4 - h_c \\ h_5 - h_c \\ h_6 - h_c \\ h_7 - h_c \\ h_8 - h_c \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$[\tilde{h}_i^\sigma] \quad (7)$$

循环吸热量矩阵方程为:

$$Q = (h_0 + \sigma - h_{w1}) - [\sigma]_c^T [\alpha] - \sum \alpha_{fr} \sigma \quad (8)$$

其中 α_{fr} 来自再热冷段及其以前的辅助蒸汽份额 $[\sigma]_c$ 为再热量矩阵,其型式与 c (为再热前抽汽段数) 的取值有关,即其前 c 行元素为 σ ,其余元素为 0,一般地可表示为 $[\sigma]_c^T = [\sigma \ \sigma \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。

由此可得,汽轮机装置效率的矩阵方程为:

$$\eta = \frac{H}{Q} = \{ (h_0 + \sigma - h_c - [\tau]^\tau [B] [\eta] - ([\Gamma_b]_s (3 \ 1) - [\Gamma_b]_s^T [\eta] + [\alpha_f]^\tau [\tilde{h}_{fr}^\sigma] - [\alpha_f]^\tau [h_{kf}] [\eta] - [\alpha_f]^\tau [\tilde{h}_i^\sigma]) \} / (h_0 + \sigma - h_{w1} - [\sigma]_c^T [\alpha] - \sum \alpha_{fr} \sigma) \quad (9)$$

3 变热量等效热降通用矩阵模型应用

图 3 是基于某引进 600 MW 机组的混合发电系统热力系统构想图^[15],假设辅助热源系统分别作用于各级加热器,以此为例应用变热量等效热降通用矩阵模型分析混合发电系统的经济性。

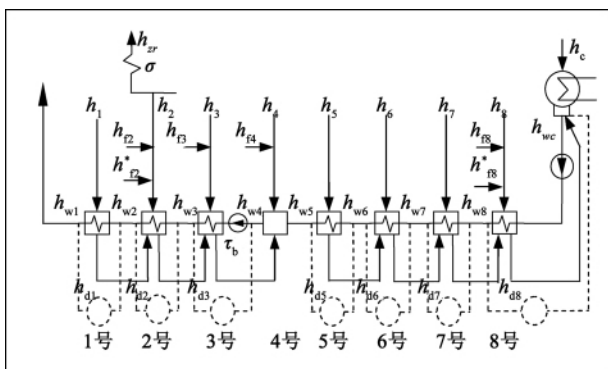


图 3 引进 600 MW 机组热力系统

Fig. 3 Thermodynamic system of an introduced 600 MW unit.

根据混合发电系统变热量等效热降通用矩阵模型式(4)~式(9),利用 MATLAB 矩阵语言编制计算机程序进行经济性分析。当 $\beta_i = 1$,计算可得原系统的热经济性为:汽轮机侧实际做功 $H = 1222.75$ kJ/kg,汽轮机侧实际吸热量 $Q = 2651.28$ kJ/kg,汽轮机装置效率 $\eta = 46.12\%$,各级抽汽效率分别为: $\eta_1 = 50.7889\%$ 、 $\eta_2 = 47.7943\%$ 、 $\eta_3 = 32.9948\%$ 、 $\eta_4 = 27.6895\%$ 、 $\eta_5 = 21.5137\%$ 、 $\eta_6 = 15.8131\%$ 、 $\eta_7 = 12.2912\%$ 、 $\eta_8 = 6.7222\%$ 。上述结果与常规等效热

降法所得数值完全一致。

系统效率、节煤量、CO₂ 减排量、煤炭节约成本随辅助热源系统作用位置及 β 的变化关系如图 4~图 7 所示。由图可知,上述各关注量随 β 均呈线性规律变化。当 $\beta = 1.0$ 时,为传统燃煤发电系统,即在未引入辅助热源系统情形下,此时系统效率最低,无节煤量、CO₂ 减排量及煤炭节约成本产生;当 $\beta = 0$ 时,辅助热源系统完全代替回热加热器发挥作用,该级所有给水全部通过辅助热源系统,系统效率、节煤量、CO₂ 减排量及煤炭节约成本均达到各工况下的最大值。由此可知,由于辅助热源系统的引入,系统效率和节煤量均有明显提高,并随流量分配系数的降低、辅助热源系统投入比例的增加而升高。此时,煤炭成本将大幅下降,CO₂ 排放量有所降低,因此具有良好的节能潜力和经济效益。以流量分配系数 $\beta = 0.7$ 为例,当辅助热源系统作用于不同加热器时,系统效率可达 46.19%~46.81%,节煤量可达 0.51~4.91 g/(kWh),CO₂ 减排量可达 $(0.78 \sim 7.57) \times 10^4$ t/a,节约煤炭成本可达 $(149.85 \sim 1444.58) \times 10^7$ t/a。

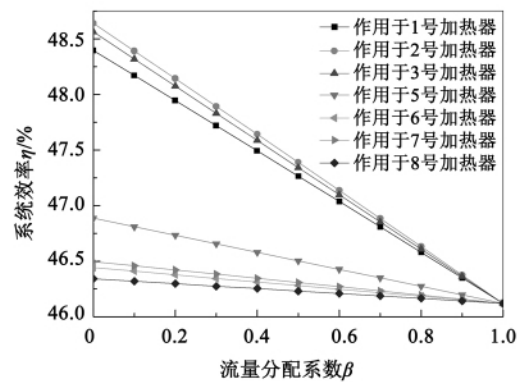


图 4 系统效率随辅助热源系统作用位置及 β 的变化

Fig. 4 Change of the system efficiency with the location acted by the auxiliary heat source system and β

另外,辅助热源系统引入位置对系统节能潜力及经济效益影响较大,相同 β 取值下,并非辅助热源系统作用的加热器压力级越高系统的优越性越强,这是因为虽然压力级越高,排挤单位抽汽的品质越高、做功能力越强,但由于排挤抽汽量不同,最终导致系统效率不一定最高。但研究表明,辅助热源系统作用于高压级时系统的节能潜力及经济效益总明显好于作用于低压级时的效果。

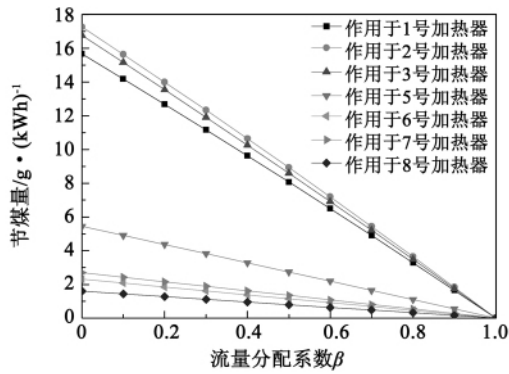


图 5 节煤量随辅助热源系统作用位置及 β 的变化

Fig. 5 Change of coal quantity saved with the location acted by the auxiliary heat source system and β

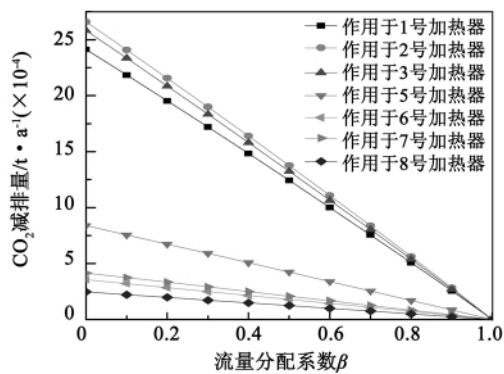


图 6 CO₂ 减排量随辅助热源系统作用位置及 β 的变化

Fig. 6 Change of the quantity of the CO₂ emissions reduced with the location acted by the auxiliary heat source system and β

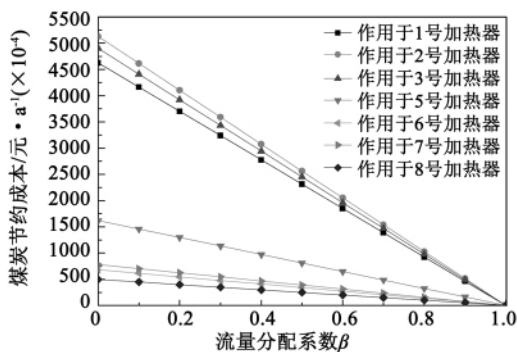


图 7 煤炭节约成本随辅助热源系统作用位置及 β 的变化

Fig. 7 Change of the coal cost saved with the location acted by the auxiliary heat source system and β

图 8 是 $\beta = 0.6$ 时各级抽汽效率随辅助热源系统作用位置的变化。由于低压加热器抽汽效率受本级及以后各级疏水量变化的影响,高压加热器及除氧器抽汽效率受本级及以后各级疏水量和除氧器级以后各级给水量变化的共同影响,而辅助热源系统的引入只影响各级给水量,结合图 8 分析可得,辅助热源系统的引入只影响高压级(1号、2号、3号)及除氧器级(4号)的抽汽效率,对低压级抽汽效率无影响;当辅助热源系统作用于高压级(1号、2号、3号)时,各级抽汽效率不变;辅助热源系统作用于各低压级(5号、6号、7号、8号)时,高压级及除氧器级抽汽效率升高,且随着辅助热源系统作用位置能级降低而降低,但均高于原系统;另外,各级加热器抽汽效率随压力级的升高而增大。

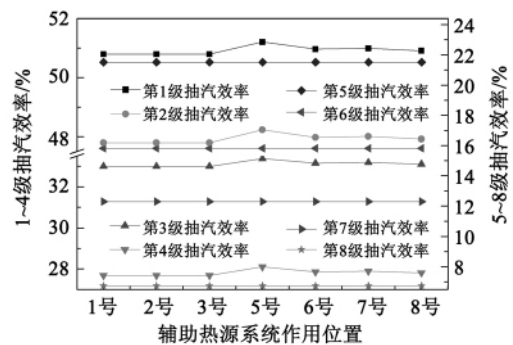


图 8 各级加热器抽汽效率的变化 ($\beta = 0.6$)

Fig. 8 Change of the steam extraction efficiencies of the heaters in different stages ($\beta = 0.6$)

4 结 论

建立了混合发电系统变热量等效热降通用矩阵模型,在反映热力过程真实性的同时,保持了定热量等效热降的简洁性和准确性。该模型可全面反映主系统、辅助热源系统及辅助汽水系统结构特点和各因素对热力系统的影响,矩阵形式使模型具有较强的通用性,适用于混合发电系统及传统热力系统的热经济性分析。

以 600 MW 机组混合发电热力系统为例的通用矩阵模型应用表明,生物质与太阳能辅助燃煤混合发电系统比传统燃煤发电系统具有更高的效率和经济效益,随辅助热源系统投入比例的增加而提高,且辅助热源系统作用于高压级时其节能潜力明显高于作用于低压级时;辅助热源系统作用于各低压级加热器时,各高压级及除氧器级抽汽效率均有提高,并

且随辅助热源系统作用位置能级降低而降低,但均高于原系统对应的抽汽效率。

参考文献:

[1] 李爱军. 我国燃煤发电技术进步的节能减排效果分析[J]. 能源技术经济 2010 22(11): 44-48.
 LI Ai-jun. Analysis of the energy-saving & emissions-reduction effectiveness ascribed to the advances in the coal-fired power generation technologies of China [J]. Energy Source Technology and Economy 2010 22(11): 44-48.

[2] 张丽英, 翟辉, 代彦军, 等. 一种地热与太阳能联合发电系统研究[J]. 太阳能学报 2008 29(9): 1086-1091.
 ZHANG Li-ying, ZHAI Hui, DAI Yan-jun, et al. Research of a geothermal and solar energy-combined power generation system [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica 2008 29(9): 1086-1091.

[3] Li Mingliang, Wang Cong. Research on optimization of wind and pv hybrid power systems[C]//Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporation, 2008: 6429-6432.

[4] Michael D, Lukasa K, Wang Y, et al. Modeling and cycling control of carbonate fuel cell power plants [J]. Control Engineering Practice 2002, 10(2): 197-206.

[5] Peter H, Kai S. Molten carbonate fuel cell (MCFC) with internal reforming: model-based analysis of cell dynamics [J]. Chemical Engineering Science 2003, 58(3-6): 1029-1036.

[6] 崔映红, 陈娟, 杨阳, 等. 太阳能辅助燃煤热发电系统性能研究[J]. 中国电机工程学报 2009 29(23): 92-98.
 CUI Ying-hong, CHEN Juan, YANG Yang, et al. Study of the performance of a solar-energy-aided coal-fired thermal power generation system [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2009 29(23): 92-98.

[7] 崔映红, 陈娟. 太阳能与燃煤机组集成方案的经济性研究[J]. 华北电力大学学报 2009 36(1): 69-75.
 CUI Ying-hong, CHEN Juan. Study of the Cost-effectiveness of a solar energy and coal-fired unit integration scheme [J]. Journal of North China University of Electric Power 2009 36(1): 69-75.

[8] 叶学民, 祁成, 李春曦, 等. 一种可再生能源辅助燃煤的混合发电系统[P]. 中国专利: 201020263158.5 2011.
 YE Xue-min, QI Cheng, LI Chun-xi, et al. A renewable energy source-aided coal-fired hybrid power generation system [P]. Chinese Patent: 201020263158.5 2011.

[9] 吴创之, 周肇秋, 马隆龙, 等. 生物质气化发电项目经济性分析[J]. 太阳能学报 2009 30(3): 368-373.
 WU Chuang-zhi, ZHOU Zhao-qiu, MA Long-long, et al. Cost-effectiveness analysis of a biomass gasification power generation project [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica 2009 30(3): 368-373.

[10] 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.

ZHANG Chun-fa, ZHANG Su-xiang, CUI Ying-hong, et al. Thermoeconomic state equation of a current power system [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2001 22(6): 665-667.

[11] 张才稳. 600 MW 超临界机组热效率等效热降计算[J]. 湖北电力 2010 34(4): 45-47.
 ZHANG Cai-wen. Calculation of the heat efficiency and equivalent heat drop of a 600 MW supercritical unit [J]. Hubei Electric Power 2010 34(4): 45-47.

[12] 陈功. 等效热降法在凝汽式机组经济性分析上的应用[J]. 节能 2006 9: 30-33.
 CHEN Gong. Application of the equivalent heat drop method in the cost-effectiveness analysis of a condensing type unit [J]. Energy Conservation 2006 25(9): 30-33.

[13] 郭仲德, 张树芳. 火电厂再热机组的定热量等效热降矩阵方程[J]. 动力工程学报 2011 31(1): 45-51.
 GUO Zhong-de, ZHANG Shu-fang. Constant-heat equivalent heat drop matrix equation for reheat units in a thermal power plant [J]. Journal of Power Engineering 2011 31(1): 45-51.

[14] 郭江龙, 张树芳, 宋之平, 等. 火电厂热力系统热经济性矩阵分析方法[J]. 中国电机工程学报 2004 24(1): 205-210.
 GUO Jiang-long, ZHANG Shu-fang, SONG Zhi-ping, et al. Thermoeconomic matrix analytic method for thermodynamic systems in a thermal power plant [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2004 24(1): 205-210.

[15] 林万超. 火电厂热力系统节能理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
 LIN Wan-chao. Energy saving theory for thermodynamic systems in power stations [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1994.

(陈滨 编辑)

• 书 讯 •

科里-帕特森等新书《关键对话》

内容概要

本书详细剖析了人们在沟通上常见的盲点, 并提供了许多立竿见影的谈话、倾听、行动技巧, 辅以丰富的对话情境和轻松幽默的小故事, 帮助读者以最迅速的方式掌握这些技巧。说得切中要点, 让对方清楚知道你的看法, 是一种能力; 说得圆满得体, 让对方自动反省, 是一种智慧。运用本书提供的技巧, 不论是多么难以应对的局面, 你都能够事半功倍地轻松面对。

科里-帕特森等/文

机械工业出版社出版

the Inner Mongolia-originated coal was 769 mg/m^3 and that from the Huainan-originated coal was 695 mg/m^3 . In the meantime, the dual-peak variation law governing the precipitation of NO_x from the coal bed surface under different air distribution modes was obtained, offering a theoretical basis for operation of practical industrial boilers at low NO_x emissions. **Key words:** laminar combustion boiler, NO_x , air distribution mode, experimental study

链条炉分层燃烧的数值模型与计算 = **Numerical Model and Calculation of the Stratified Combustion in a Chain Stoker** [刊, 汉] ZHANG Pin, DU Hai-liang, WANG Yuan, LUO Yong-hao (Thermal Energy Engineering Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(1). - 93 ~ 98

In the light of the specific features of the stratified combustion, on the basis of a single particle diameter model, established was a dual particle diameter model for the stratified combustion of a chain stoker and verified through a test in a practical boiler. The dual particle diameter model can better simulate the combustion characteristics of the coal bed after a stratified coal bunker has been additionally installed. By utilizing the improved dual particle diameter model, the influence of the coal feed modes by a commonly used coal bunker and a stratified coal bunker on the combustion was simulated. It has been found that the dual particle diameter model can simulate very well the combustion characteristics of the coal bed when large and small particles of coal are present simultaneously. The stratified stacking mode is conducive to the ignition of coal bed and the promotion of the burn-out of coal. The content of carbon in ash and slag during stratified combustion is 9.54% while that during blended combustion is 15.81%. **Key words:** chain stoker, laminar combustion, stratified combustion, numerical simulation

基于变热量等效热降的混合发电系统通用矩阵模型 = **General-purpose Matrix Model for Hybrid Power Generation Systems Based on a Variable Heat Quantity Equivalent Heat Drop** [刊, 汉] YE Xue-min, LI Chun-xi (College of Energy Power and Mechanical Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), QI Cheng (Northwest Electric Power Designing Institute, Xi'an, China, Post Code: 710075) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(1). - 99 ~ 104

On the basis of a constant heat quantity equivalent heat drop method, established was a variable heat quantity equivalent heat drop general-purpose matrix model for hybrid power generation systems. With a 600 MW unit integrated in a hybrid power generation system serving as an example, by using the general purpose matrix model, the thermal cost-effectiveness of the unit in a hybrid power generation system was calculated with the advantages of the hybrid power generation system being analyzed. The research results show that the system efficiency, coal quantity saved and carbon dioxide emissions reduced are closely related to the location acted by the auxiliary heat source system and the flow distribution coefficient. When the auxiliary heat source system acts on the high pressure stage heaters, the energy saving potential and the economic benefit of the system are as a whole better than those when it acts on the low pressure stage heaters. When the auxiliary heat source system acts on various low pressure stage heaters, the steam extraction efficiencies of various high pressure stages and the deaerator stage will be improved. **Key words:** variable heat quantity equivalent heat drop, hybrid power generation, matrix model, thermal cost-effectiveness