

燃气轮机冷热电联产系统技术与经济性分析

冯志兵, 金红光

(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘 要:分析了现有商业燃气轮机用于热电联产系统和冷热电联产系统时的性能。与常规分产系统相比,两系统在热力学性能上均有较大优势,绝大多数节能率超过 20%。功率较小的燃气轮机单位造价偏高,用于冷热电联产系统时经济性较差;随着功率的增加经济性不断改善,冷热电联产系统的经济性受到很多因素的影响,其中运行时间和电价的影响最明显,其次为燃料价格的影响,热价和冷价的影响相对最小;这些因素在燃气轮机功率较小时影响较大,随功率的增加影响逐渐减小。

关 键 词:燃气轮机;冷热电联产系统;热电联产系统;经济性分析

中图分类号: TK123 文献标识码: B

符号说明

C —制冷量;	COP —制冷系统性能系数;
f —输入燃料能量;	h —烟气焓;
H —供热量;	w —输出电量;
q —动力系统排气中热量;	T —绝对温度;
x —利用热量在排气热量中比例;	η —效率;
下标	
0—环境;	
a—吸收式制冷;	b—锅炉;
c—制冷;	CHP—热电联产系统;
CCHP—冷热电联产系统;	e—电,压缩式制冷;
eg—电网;	h—供热;
re—参照分产系统;	

1 前 言

热电联产系统将动力系统排向环境的热量回收用于供热,在一定程度上对燃料能量进行了梯级利用,具有较高的能源利用效率。随着人民生活水平的提高,夏季对冷负荷的需求显著增加。在这种情况下,将热电联产系统进行扩展,把从动力系统回收

的热量先用于制冷,然后用于供热,使能量梯级利用水平进一步得到提高,系统的性能和经济性将显著改善。通常冷热电联产系统布置在用户周围,直接向用户提供电力,减少了对电网的依赖,提高了用户用电安全性;系统性能的改善使满足相同需求时消耗的燃料减少,同时动力系统的污染物排放量较少,因此对环境的压力明显降低;在满足冷需求的同时,提供了部分电力,从而大大缓解夏季用电高峰时电网的压力。由于以上诸多特点,冷热电联产系统近年来得到广泛重视。

冷热电联产系统中,动力子系统的性能影响各种能量的输出,处于主导地位。燃气轮机具有较高的发电效率,同时尾部烟气温度较高,便于综合利用,因此在冷热电联产系统的市场中占有很大份额。目前市场上发电用燃气轮机种类繁多,功率、效率、排烟温度有较大差异,不同型号燃气轮机有着不同的表现,因此有着不同的适用范围。本文对商用燃气轮机用于冷热电联产系统进行了研究,力图对应用于冷热电联产系统的燃气轮机选择有所帮助。

2 燃气轮机冷热电联产系统

燃气轮机位于燃气轮机热电联产系统的顶端:燃料首先在燃气轮机中燃烧、膨胀做功;燃气轮机排气中热量被回收用于供热,见图 1(a)。冷热电联产系统与热电联产系统的不同之处在于对回收热量的利用方式明显不同。民用领域供热温度通常约为 60 °C,热电联产系统将回收的热量完全用于供热。冷热电联产系统中,采用单效吸收式制冷时,热量温度通常在 100 °C 以上,而采用双效吸收式制冷系统时,170 °C 以上的热量才能被利用。由于制冷所需热量温度高于供热所需,为了充分、高效地利用烟气中热量,冷热电联产系统的布置采用串联回路,即燃

收稿日期: 2004-10-20; 修订日期: 2005-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90210032)

作者简介: 冯志兵(1972-)男,湖北武穴人,中国科学院博士研究生。

气轮机烟气中热量先用于制冷, 然后用于供热, 见图 1(b)。图 1(b)在没有冷量需求时, 制冷系统也可以

将回收的热量用于供热, 此时与图 1(a)没有太大区别。

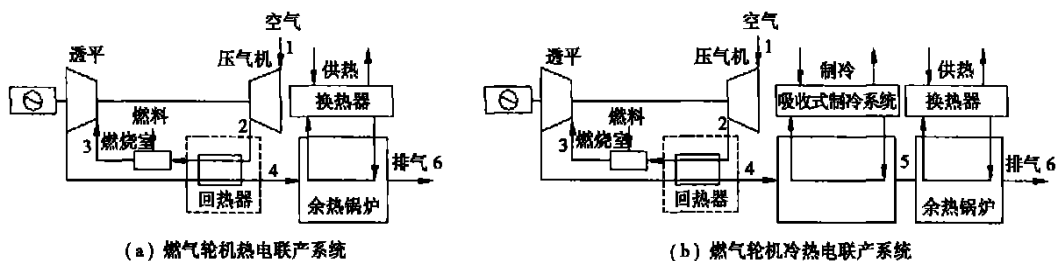


图 1 燃气轮机联产系统示意图

冷热电联产系统提供的冷量温度与环境温度比较接近, 远距离传输十分困难, 因此所选用燃气轮机的功率一般在 10 MW 以下。根据燃气轮机主要性能数据确定冷热电联产系统的性能, 对于燃气轮机冷热电联产系统的普及推广将会有所帮助。

3 燃气轮机联产系统性能分析

燃气轮机排气可认为由两部分混合而成: 燃料的燃烧产物和空气混合。由于燃空比较大, 燃气轮机排气中空气占有很大份额, 因此不同型号燃气轮机排气的成份相差不是很大, 近似分析中可认为燃气轮机排气的物性仅受排气温度影响, 而与燃气轮机型号没有关系。在已知燃气轮机功率和发电效率的情况下, 燃气轮机单位时间输入燃料能量为:

$$f = w / \eta_e \tag{1}$$

燃气轮机排气中的热量为:

$$q = (1/\eta_e - 1) \cdot w = h_4 - h_0 \tag{2}$$

对于图 1 所示联产系统中冷、热系统而言, 所利用的只是动力系统的排气, 因此对于利用的烟气是来自于透平出口或是来自于回热器不需区分, 取燃气轮机系统最终排气的温度为 T_4 。冷热电联产系统中, 排气中热量根据温度段被简单分成 3 部分: $T_4 \sim T_5$ 区间烟气中热量被用于制冷; $T_5 \sim T_6$ 区间烟气中热量用于供热; 余下热量被排向环境。对于热电联产系统, 供热系统利用的是 $T_4 \sim T_6$ 区间烟气中全部热量。两系统提供制冷量和供热量分别为:

$$C_{\text{CCHP}} = \frac{h_4(T_4) - h_5(T_5)}{h_4(T_4) - h_0(T_0)} \cdot \text{COP}_a \cdot (1/\eta_e - 1) w \tag{3}$$

$$H_{\text{CCHP}} = \frac{h_5(T_5) - h_6(T_6)}{h_4(T_4) - h_0(T_0)} \cdot (1/\eta_e - 1) w \tag{4}$$

$$H_{\text{CCHP}} = \frac{h_4(T_4) - h_6(T_6)}{h_4(T_4) - h_0(T_0)} \cdot (1/\eta_e - 1) w \tag{5}$$

节能率直接反映了一个系统与参照系统的输入燃料使用情况^[1~2]:

$$\text{FESR} = (f_{\text{re}} - f) / f_{\text{re}} \tag{6}$$

目前, 电网是最大的电力提供者, 而压缩式制冷机组占有制冷设备绝大多数的市场份额, 锅炉是使用最广泛的供热设备, 因此:

$$\text{FESR}_{\text{CCHP}} = g_1(w, \eta_e, \text{COP}_a, \eta_{\text{eg}}, \text{COP}_e, \eta_b, T_4, T_5, T_6) \tag{6A}$$

$$\text{FESR}_{\text{CCHP}} = g_2(w, \eta_e, \eta_{\text{eg}}, \eta_b, T_4, T_6) \tag{6B}$$

当采用不同形式的吸收式制冷系统时, 冷热电联产系统的排烟温度和性能均会有所不同。经综合考虑, 本文采用双效溴化锂机组。目前双效溴化锂机组的 COP_a 在 1.2 左右, 对应制冷系统排烟温度 T_5 取为 170 °C。供暖温度较低, 在考虑一定传热温差和经济性后, 供热系统排烟温度取为 100 °C, 于是, 联产系统制冷量和供热量将只是燃气轮机功率、发电效率和排气温度的函数:

$$C_{\text{CCHP}} = 1.2x_1(T_4) \cdot w \cdot (1/\eta_e - 1) \tag{3A}$$

$$H_{\text{CCHP}} = x_2(T_4) \cdot w \cdot (1/\eta_e - 1) \tag{4A}$$

$$H_{\text{CCHP}} = x_3(T_4) \cdot w \cdot (1/\eta_e - 1) \tag{5A}$$

通过式 (3A) ~ 式 (5A) 可看到, 随着功率的增加, 制冷量和供热量将线性增加; 当发电效率增加时, 可用于供热、制冷的能量将减少, 因此制冷量和供热量将相应减少。当发电效率不变而燃气轮机排气温度增加时, 烟气中热量占全部输入能量的份额不变, 但是用于制冷的热量份额将增加, 因此制冷量增加; 同时用于供热的热量份额将降低。热电联产系统中, 燃气轮机排气温度的增加, 将导致可以利用的热量份额增加, 供热量将增加。

图 2 为目前一些不同型号燃气轮机的排气温度和发电效率的变化情况。虽然排气温度和发电效率在一定的范围内波动, 但总的趋势是, 燃气轮机的排气温度随功率的增加而略有降低, 而发电效率随功率的增加而略有增加。

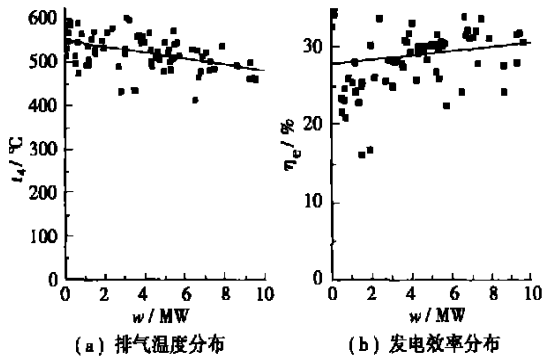


图 2 燃气轮机参数分布

当采用图 1 布置形式时, 额定工况下联产系统各种不同能量的输出情况见图 3。不同功率的燃气轮机发电效率和排气温度略有不同, 但相差不是很大, 因此联产系统的制冷量和供热量与功率基本上是线性关系。冷热电联产系统中, 吸收式制冷系统利用的是燃气轮机出口 (T_4) 至制冷系统出口 (T_5) 的烟气中的热量差值, T_5 是恒定的, 而不同型号的燃气轮机 T_4 有所不同; 此外加上燃气轮机发电效率的影响, 因此制冷量在增长时存在较大的起伏。而其供热系统的进出口烟气温度恒定, T_4 的影响在于改变供热系统接受的热量在全部排气热量中的比例, 因此其影响大为减弱, 从而供热量的变化幅度也明显降低。与冷热电联产系统相同的原因导致热电并供系统中, 供热量的起伏比较大。

对比图 3(a)和图 3(b)可以发现, 冷热电联产系统的制冷量与热电联产系统的供热量基本相当, 但前者输出的能量总量明显高于后者。冷量的获得本来就比较困难, 而且将热用于制冷大大增加了热在夏季的用途, 因此与热电联产系统相比, 冷热电联产系统是一种全新系统。

参照系统采用目前应用最广泛的分产系统: 中国常规电厂发电效率为 33.3%, 电网输变电损失为 8.1%; 压缩式制冷机组性能差别较大, 本文选用 COP 为 5.0 的压缩式冷水机为参照系统; 锅炉效率一般在 90%左右, 可认为是常数。图 4 为联产系统各项输出对应的分产系统消耗燃料量及总燃料消耗

量变化情况。因为联产系统的冷、热输出随燃气轮机功率的增加近似线性增加, 各项对应的分产系统燃料量也存在类似的变化趋势。对应分产系统消耗的总燃料量为各部分分产系统燃料之和, 同样保持了随功率线性增加的趋势。由于分产制冷系统性能较好, 冷热电联产系统对应的分产燃料量略少于热电联产系统对应的分产燃料量。

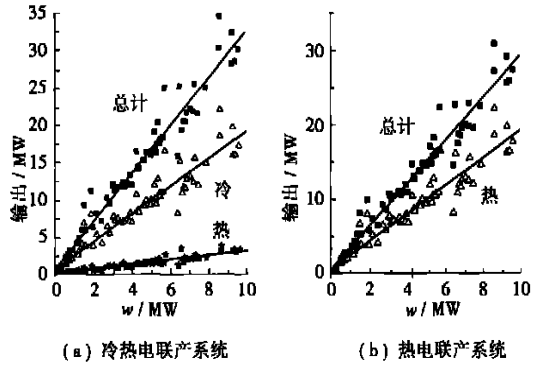


图 3 燃气轮机联产系统输出变化

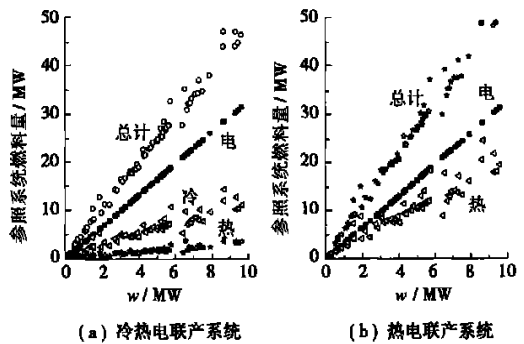


图 4 燃气轮机联产系统对应分产系统燃料消耗量及总燃料消耗量

在参照系统的性能被确定后, 节能率将取决于冷、热、电的供给情况。由于制冷量和供热量只是燃气轮机功率、排气温度以及发电效率的函数, 节能率也只与这三者有关:

$$FESR_{\text{CCHP}} = g_1(w, \eta_e, T_4) \quad (6C)$$

$$FESR_{\text{CHP}} = g_2(w, \eta_e, T_4) \quad (6D)$$

图 5 为对应的系统节能率变化。节能率变化相对比较分散, 对于冷热电联产系统, 绝大多数在 0.20~0.37 之间波动; 对于热电联产系统, 多在 0.30~0.45 之间。由此可见, 采用这两种布置形式, 所有

分析的燃气轮机都具有较好的热力学性能。总的趋势是, 随功率的增加, 两种系统的节能率都略有增加, 但变化幅度不大。由于参照系统中制冷系统的性能较好, 热电联产系统的节能率较冷热电联产系统略高。

当某分产系统燃料量在全部分产系统燃料量中份额较高时, 其对节能率的影响也较大; 因此对应联产系统中子系统性能改善时, 联产系统总体性能改善也最明显。由图 4 可知, 在联产系统各部分对应的分产系统燃料量中, 用于提供与联产系统相同电力所消耗燃料量的份额最大, 因此联产系统中动力子系统的性能对联产系统的性能影响最大。本文系统中, 不同燃气轮机对应的制冷子系统和供热子系统性能基本上没有变化, 随功率的增加, 主要是发电效率的增加导致了系统节能率的增加。在冷热电联产系统中, 制冷子系统的影响处于第二位。

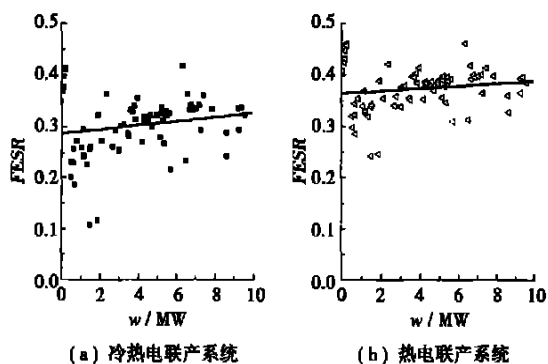


图 5 联产系统节能率变化

4 冷热电联产系统经济性分析^[4]

联产系统由于在一定程度上实现了能量的梯级利用, 因此在额定工况下都有较好的热力学性能, 与常规的分产系统相比具有较高的节能率。但具体是否会得到应用, 还要取决于系统的经济性分析。冷热电联产系统在没有冷需求时运行模式与热电联产系统相似, 而热电联产系统在没有热需求时也很难高效、经济地运行。以下对冷热电联产系统的运行进行了经济性分析。

冷热电联产系统提供的冷、热是满足人的舒适性要求, 主要是在民用或商用领域得到广泛应用。联产系统提供的冷、热、电能大多以商品形式对外销售, 其销售额为全部收入; 设备投资、运行费用和维护费用为其主要成本。

设备投资主要包括燃气轮机、溴化锂机组和余热锅炉的费用以及安装费用。燃气轮机的费用不同型号相差较大, 因此需要单独考虑; 溴化锂机组和余热锅炉相对技术比较成熟, 基本上费用与容量有关, 目前的费用大致为溴化锂机组为 850 元/kW, 余热锅炉为 104 元/kW, 而且可以根据设计容量确定实际容量。设备安装费用大概为设备费用的 10%, 此外燃气轮机需要额外考虑 30% 的税率。设备的运行、维护费用(不含燃料费用)大致为设备成本的 5%。由于西气东输, 燃料使用陕甘宁天然气, 低位发热量为 35.16 MJ/m³, 价格为 1.4 元/m³。设备按 20 年折旧, 资产残值按原值的 10% 计取。

联产系统的收入包括冷、热、电能的销售收入: 北京的商业平均电价为 0.623 元/kWh, 供热价格为 51.40 元/GJ, 供冷价格为 79.60 元/GJ。另外, 还要考虑 33% 的所得税。

北京供冷期一般为每年的 5 月 16 日至 9 月 15 日, 供暖期为 11 月 15 日至 3 月 15 日。供暖期没有冷需求, 可将用于制冷的那部分热量用于供暖。虽然不同天气情况对负荷有一定影响, 但由于商业场所的特殊性, 可认为冷热电联产系统在供冷期和供暖期有一半时间在额定工况运行。考虑不同型号燃气轮机的价格因素后^[5], 冷热电联产系统的经济性分析如下:

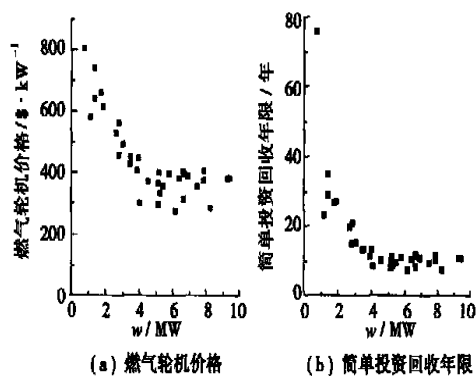


图 6 冷热电联产系统经济性

如图 6 所示, 当燃气轮机功率较小时, 单位功率的价格较高; 随着功率的增加, 价格迅速降低。当功率达到 4 MW 以后, 燃气轮机的单位价格趋于稳定。相对应的, 当燃气轮机功率较小时, 冷热电联产系统的简单回收期很长, 这在某种程度上说明系统的经济性较差。随着燃气轮机功率的增加, 回收期迅速地缩短。燃气轮机功率在 2 MW 以下时, 简单回收

期变化最明显; 在 2~4 MW 时变化趋缓; 当功率大于 4 MW 以后, 简单回收期基本上没有太大变化。

冷热电联产系统会在不同地方、不同场合得到应用, 因此在具体的应用中会受到以下一些主要因素的影响: 供热价格、供冷价格、电价、天然气价格以及运行时间。

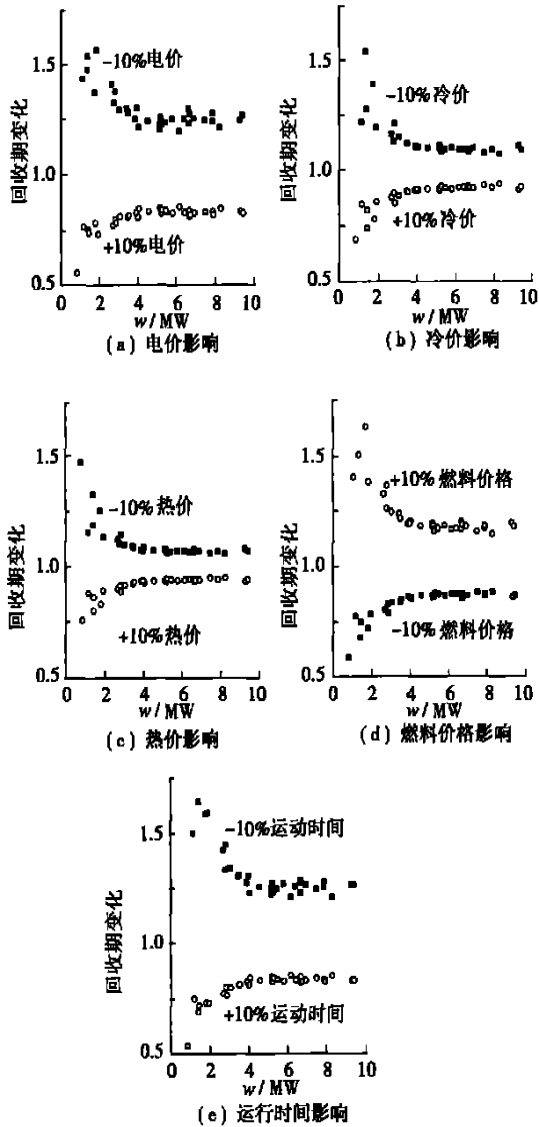


图 7 灵敏性分析

从图 7 可以看出, 系统的运行时间和电价的变化对简单回收期的影响最大, 在电价较高的地区或在系统可以较长正常运行的场合, 冷热电联产系统的经济性会有所改善。燃料价格对回收期的影响小于前二者。冷、热价格的影响基本相当, 与其它因素相比影响偏小。

以上所讨论的影响因素均与运行有关。当这些因素变化时, 将直接影响到系统的年运行收入。设备投资是固定的, 运行收入的变化将导致回收期的变化。在燃气轮机功率较小时, 由于设备费用较高, 系统的投资回收年限较长, 对运行收入的变化相对比较敏感, 因此当以上诸因素发生变化时, 回收期的变化较大。随着功率的增加, 这些因素对回收期的影响大大减弱。

5 结 论

本文对商业燃气轮机用于热电联产和冷热电联产系统进行了讨论, 在已知燃气轮机参数的情况下, 可以对联产系统的性能进行评估。经过分析可以得到以下结论:

(1) 现有商业燃气轮机用于热电联产或冷热电联产系统, 在能量的利用上与常规分产系统相比均具有一定优势; 随功率的增加, 不同商用燃气轮机的排气温度在降低, 发电效率在增加, 相应的联产系统性能将略有改善。

(2) 在相同燃气轮机的情况下, 冷热电联产系统与热电联产系统相比, 可以输出更多的能量, 但受参照系统性能影响节能率略低。

(3) 功率较小时, 燃气轮机价格较昂贵, 冷热电联产系统的经济性受一定影响; 随功率的增加, 系统经济性逐渐好转。

(4) 在诸运行因素中, 系统运行时间及电价的影响最明显, 燃料的价格其次; 在较低功率情况下, 这些因素的影响较大, 随燃气轮机功率的增加, 影响逐渐减小。

参考文献:

- [1] HO RLOCK J H. Cogeneration-combined heat and power (CHP): thermodynamics and economics[M]. New York: Pergamon Press, 1987.
- [2] LI KAM W. Applied thermodynamics: availability method and energy conversion[M]. Washington: Taylor & Francis, 1996.
- [3] 周凤起, 王庆一. 中国能源 50 年[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] 夏敏文. 热能工程设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [5] ROBERT FARMER. Gas turbine world 2003 GTW handbook[M]. Fairfield: Pequot publishing, 2003.

燃气轮机冷热电联产系统技术与经济性分析 = **Technology of Gas Turbine Tri-generation (Cooling Heating and Electric Power) System and Its Economic Analysis** [刊, 汉] / FENG Zhi-bing, JIN Hong-guang (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 425 ~ 429

An analysis is given of the performance of current commercial gas turbines when used for the cogeneration of process heat and electric power and for the tri-generation of cooling and heating energy and electric power. Compared with conventional single generation systems the above-mentioned two systems both have a relatively great edge in terms of thermodynamic performance with energy saving rate in most cases surpassing 20%. Gas turbines with a relatively small output power involve an excessively high manufacturing cost and result in a relatively poor cost-effectiveness when used for the tri-generation of cooling and heating energy and electric power. With an increase in output power and continual improvement of cost-effectiveness the economic performance of a tri-generation system is subject to the influence of numerous factors, among others, those of operation time and electricity price being the most conspicuous. This is followed by the price of fuel with the price of heating and cooling energy having comparatively the least influence. The above-mentioned factors exercise a comparatively great influence when the output power of a gas turbine is relatively small. The influence decreases with an increase in output power. **Key words:** tri-generation system of heating and cooling energy and electric power, cogeneration system of process heat and electricity, gas turbine, economic analysis

蒸汽温度优化控制在火电厂的应用 = **The Application of a Steam Temperature Optimized Control System in Thermal Power Plants** [刊, 汉] / LIN Yan-ping (Computer Science and Engineering Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), ZHOU Bao-lin (Emerson Process Control Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 201206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 430 ~ 432

As a result of more and more aggressive competition, power plants are taking steps to strengthen their ability by applying advanced control strategy and technology. Therefore, the study of advanced process control (APC) composed of model control technology and intelligent control strategy such as Fuzzy Logic, Neural Network got popularly attention. Here we introduce an application of advanced steam temperature control strategy on fuel power station. There are two kinds of control were designed based on Fuzzy Logic and Neural Network. After testing, it indicated that the efficiency of the power plant could be distinctly improved by the application of these advanced control technology. **Key words:** APC, Fuzzy Logic, Neural Network, Advanced Steam Control

SSS 离合器故障仿真研究 = **Simulation Study of the Failure of a Synchro-self-shifting (SSS) Clutch** [刊, 汉] / WANG Ming-wei, LI Shu-ying, WEI Xin-yun, et al (Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 433 ~ 437

The failure of a synchro-self-shifting clutch (SSS clutch), a key component in many power units, can lead to the loss of engine power, thereby the failure of the power plant as a whole. Through an analysis of the force-bearing condition of the main elements of a SSS clutch a kinematic equation of an intermediate element was obtained. By using software MATLAB/simulink a simulation of the displacement curves of the intermediate element was performed with respect to its movement under the condition of an absence of failure and the highest possibility of a failure occurring. Furthermore, the characteristics of displacement curves of the intermediate element under various kinds of failure were deduced and summarized. Through a comparative analysis of the intermediate element displacement curves characterized by a failure and those characterized by an absence of failure one can identify and reveal the causes leading to a potential failure. **Key words:** synchro-self-shifting clutch, simulation, failure