

# 燃气机热泵冷热电三联供系统热经济学分析

方 箬, 杨 昭, 陈轶光

(天津大学 热能研究所, 天津 300072)

**摘 要:**采用热经济学分析法对一台燃气机热泵冷热电三联供系统进行分析, 对不同转速, 蒸发温度, 冷凝温度和天然气价格 4 项影响因素条件下, 子系统烟成本差、烟经济因子和总系统的烟经济系数的计算分析, 指出了燃气机热泵冷热电三联供系统需要改进之处, 针对燃气机热泵冷热电三联供系统的设计需要注意传动比的合理设置问题, 并且得出了燃气机热泵冷热电三联供系统在中国具有广阔的应用空间的结论。

**关 键 词:**冷热电三联供; 燃气机热泵; 热经济学; 烟成本差; 烟经济因子; 烟经济系数

中图分类号: TK01; F407.2 文献标识码: A

## 符号说明

$A$ —热经济学分析事件矩阵  
 $e1 \sim e12$ —系统的各股烟流, MJ  
 $c1 \sim c12$ —系统各股烟流的单价, 元/MJ  
 $E$ —各股烟流的对角矩阵  
 $C$ —各股烟流的单价向量  
 $Q_p$ —各个子系统的非能量费用向量  
 $\Delta C_{B,d}$ —子系统 B 的烟成本差, 元/MJ  
 $\Delta C_{in,d}$ —输入烟流平均价格, 元/MJ  
 $\Delta C_{out,d}$ —输出烟流平均价格, 元/MJ  
 $f$ —烟经济因子  
 $\epsilon$ —总系统的烟经济系数, 元/MJ  
 $Z_{总}$ —总的资金投入, 元/a  
 $N$ —发电机的发电功, MJ  
 $Q_1$ —余热回收的热量, MJ  
 $Q_0$ —制冷量, MJ  
 $T_0$ —环境温度,  $^{\circ}C$   
 $T_r$ —发动机的排烟温度, 500  $^{\circ}C$   
 $T_1$ —冷源温度,  $^{\circ}C$   
 $P$ —各个子系统的初投资费用, 元  
 $r$ —年利率  
 $\beta$ —设备维护费用计取因子  
 $n$ —设备年使用小时数, h  
 $P_{qr}$ —设备运行费用, 元/a  
 $P_{gas}$ —天然气的价格, 元/ $m^3$   
 $T_e$ —蒸发温度,  $^{\circ}C$

$T_c$ —冷凝温度,  $^{\circ}C$

$S$ —发动机转速, r/min

## 引 言

燃气机热泵冷热电三联供系统凭其一次能源利用率高<sup>[1]</sup>, 有利于环境保护, 有利于电网和燃气管网的调峰, 以及其部分负荷性能系数高等优势将是未来天然气能源高效利用的理想设备。但在目前倡导的“节能、环保”的前提下, 人们往往追求系统能量转换高效率(高火用效率), 而在实际热力系统中, 火用效率高通常是建立在高投资的基础上, 所以对一个实际用户来说, 需同时考虑系统能量转换的效率和初投资, 这样将烟分析方法与经济学的结合形成了一门交叉学科——热经济学<sup>[2~4]</sup>。

本研究对一台燃气机热泵冷热电三联供系统进行了热经济学分析, 建立了各部分子系统的火用经济平衡方程并求解, 而且使用烟成本差, 火用经济因子和烟经济系数 3 个参数对燃气机热泵冷热电三联供系统在不同转速、蒸发温度、冷凝温度和天然气价格 4 项因素对热泵系统的热经济性的影响进行了评估。

## 1 燃气机热泵冷热电三联供系统的热经济学分析

### 1.1 燃气机热泵冷热电三联供系统的热经济学模型

本研究所分析的燃气机热泵冷热电三联供系统如图 1 所示。在进行热经济学分析时将整个系统划分为: (1) 燃气机子系统; (2) 压缩机子系统; (3) 板式换热器子系统; (4) 电子膨胀阀子系统; (5) 翅片管换热器子系统; (6) 发电机子系统和; (7) 余热回收子系统共 7 个子系统, 在此系统中共有 12 股烟流, 分别为  $e1 \sim e12$ , 各股烟流的单价则为  $c1 \sim c12$ 。

收稿日期: 2008-09-11; 修订日期: 2008-11-19

作者简介: 方 箬(1979—), 男, 浙江衢州人, 天津大学硕士研究生。

为了描述系统各股炯流和各个子系统之间的关系,热经济学引入了事件矩阵<sup>[5]</sup>。假设一个能量系统共有  $m$  个子系统和  $n$  股炯流,将  $m$  作为矩阵的行数,  $n$  作为矩阵的列数,因此可以得到一个  $m \times n$  的矩阵,并将此矩阵称之为事件矩阵  $A$ 。矩阵  $A$  中的各个元素  $a_{ij}$  根据如下方法获得:当第  $j$  股炯流输入到第  $i$  个子系统时,记为  $a_{ij}=1$ ;当第  $j$  股炯流输出第  $i$  个子系统时,记为  $a_{ij}=-1$ ;如果第  $j$  股炯流既不输入也不输出第  $i$  个子系统时,则取  $a_{ij}=0$ 。根据以上法则可以建立燃气机热泵冷热电三联供系统的事件矩阵  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

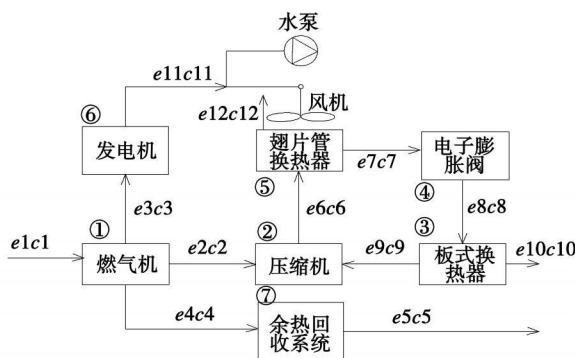


图 1 燃气机热泵冷热电三联供系统示意图

再令  $E$  为各股炯流的对角矩阵,  $C$  为各股炯流的单价向量,  $C_p$  为各个子系统的非能量费用向量:

$$E = \begin{bmatrix} e1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & e12 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c1 \\ \vdots \\ c12 \end{bmatrix}$$

$$C_p = \begin{bmatrix} cp1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ cp12 \end{bmatrix}$$

因为对任一子系统  $i$  都有:

$$\sum a_{ij}c_{ij}e_j + c_{pi} = 0 \tag{1}$$

因此可以得出式(2):

$$A \times E \times C = -C_p \tag{2}$$

由式(2)共可以得到 7 个独立的方程,每一股炯流  $e_j$  都可通过热力学方式计算得出,因此在本文中炯流属于已知量,但是整个系统有 12 个炯流单价,将其作为变量,由此可知 7 个方程 12 个变量,方程组不闭合。为了使得方程组闭合就必须补充 5 个方程,一般补充方程为边界条件和成本分摊方程,在本文中边界条件为天然气的价格,即  $c_1$ ;成本分摊方程则根据文献[6~9]:(1)对多产品的子系统,按各产品炯价相等的原则建立补充方程;(2)对于内部产品,内部产品不计利润,按传递价格计算。由此可以得出以下补充方程:

$$c_2 = c_3 = c_4 \tag{3}$$

$$c_6 = c_7 \tag{4}$$

$$c_8 = c_9 \tag{5}$$

加上天然气价格的边界条件完成了补充方程的建立,再结合热力学定律计算出的各股炯流的实际炯值就可以求解燃气机热泵冷热电三联供系统的热经济学方程组。

## 1.2 燃气机热泵冷热电三联供系统的炯成本差,炯经济因子和炯经济系数

### 1.2.1 燃气机热泵冷热电三联供系统的炯成本差

为了能够定量的分析燃气机热泵冷热电三联供系统中各个子系统的经济性的优劣,引入文献[5]炯成本差概念。图 2 为某子系统 B 的示意图。

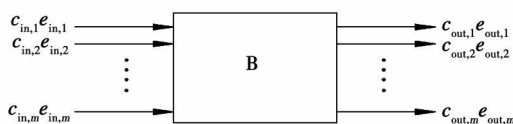


图 2 子系统 B 示意图

在此定义子系统  $B$  的炯成本差  $\Delta C_{B,d}$  为:

$$\Delta C_{B,d} = \Delta C_{in,d} - \Delta C_{out,d} \tag{6}$$

式(6)中的  $\Delta C_{in,d}$  与  $\Delta C_{out,d}$  则由式(7)和式(8)计算:

$$\Delta C_{in,d} = \sum_{j=1}^m c_{in,j} e_{in,j} / \sum_{j=1}^m e_{in,j} \tag{7}$$

$$\Delta C_{out,d} = \sum_{j=1}^m c_{out,j} e_{out,j} / \sum_{j=1}^m e_{out,j} \tag{8}$$

从式(6)可知,系统的炯成本差越大,说明炯流在此系统中能量转换所付出的代价就越大,因此据此可以利用炯成本差来定量的分析各个子系统经济性的优劣程度,热经济性差的子系统也是系统改造的重点考虑对象。

### 1.2.2 燃气机热泵冷热电三联供系统的炯经济因

子

由于系统输出的火用流(产品)成本是系统的输入火用流(燃料)成本与系统的非能量成本之和, 所以如果系统的成本差过大则有可能是因为系统的火用效率太低或者是系统的非能量成本过高造成。为了区分这两种造成系统火用成本差过大的成因, 引入火用经济因子  $f$ , 火用经济因子  $f$  体现的是子系统的非能量费用在火用流成本的增加中所占的比重, 其定义式为:

$$f = C_{p, B} / \sum_{j=1}^m e_{in, j} \Delta C_{B, d} \quad (9)$$

或:

$$f = C_{p, B} / \sum_{j=1}^m e_{out, j} \Delta C_{B, d} \quad (10)$$

式中:  $C_{p, B}$ —子系统  $B$  的非能量费用。当子系统  $B$  的输入火用流量为定值,  $f$  采用式(9)计算, 反之当子系统  $B$  的输出火用流量为定值,  $f$  采用式(10)计算。在分析某一系统的火用经济因子时, 一般认为当  $f < 0.3$  时, 表明系统的火用效率低下, 系统应当从热力学方面加以改进; 当  $f > 0.7$  时, 表明系统非能量费用所占比率过大; 而当  $0.3 < f < 0.7$  时, 则表明系统的火用成本差过大是由系统非能量费用及火用效率两者共同作用的结果, 应同时考虑两者带来的影响。

### 1.2.3 燃气机热泵冷热电三联供系统的火用经济系数

为了评价燃气机热泵冷热电三联供系统的热经济性, 定义其火用经济系数为总资金投入与总输出火用之比, 即输出火用的成本<sup>[19]</sup>, 其定义为:

$$\epsilon = Z_{总} / [N + Q_1(1 - \frac{T_0}{T_r}) + Q_0(\frac{T_0}{T_1} - 1)] \quad (11)$$

### 1.3 燃气机热泵冷热电三联供系统热经济学分析的参数设置

由于制冷与供热工况的计算流程都是相同的, 因此本文仅选取制冷工况作为分析工况。在计算中蒸发温度为  $T_e = -10 \sim 16 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 冷凝温度为  $T_c = 40 \sim 72 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 发动机的转速  $S$  调节范围为  $1\ 200 \sim 4\ 400 \text{ r/min}$ ; 夏季的室外温度则选天津市室外设计干球温度  $33.4 \text{ }^\circ\text{C}$ , 湿球温度  $26.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

发动机在各转速条件下的耗气量如表 1 所示, 天然气的高位发热值取  $52.60 \text{ MJ/kg}$ , 天然气的价格  $P_{gas}$  为  $1.90 \sim 3.99 \text{ 元/m}^3$ ; 热泵系统的各子系统设备的初投资费用及非能量费用如表 2 所示, 非能量费用包括初投资费用, 运行费用及设备管理维护费用, 其计算式为:

$$C_p = \left[ P \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right] + \beta P + P_{opr} \quad (12)$$

年利率  $r$  取  $10\%$ , 设备维护费用计取因子  $\beta$  取  $5\%$ , 年使用小时数  $n$  为  $700 \sim 2\ 100 \text{ h}$ 。

表 1 发动机在各转速条件下的耗气量

发动机转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	发动机的耗气量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
1 200	4.75
1 600	5.85
2 000	8.33
2 400	12.5
2 800	13.75
3 200	17.5
3 600	18.75
4 000	20
4 400	21

表 2 各子系统设备的初投资费用及非能量费用

	初投资费用 /元	非能量费用 /元 $\cdot \text{a}^{-1}$
① 燃气机子系统	19 000	36 398.20
② 压缩机子系统	12 300	1 386.8
③ 板式换热器子系统	9 000	1 014.70
④ 电子膨胀阀子系统	3 700	417.16
⑤ 翅片管换热器子系统	6 000	676.47
⑥ 发电机子系统	3 600	405.88
⑦ 余热回收子系统	4 850	546.82

## 2 计算结果与分析

### 2.1 发动机转速对系统热经济性的影响

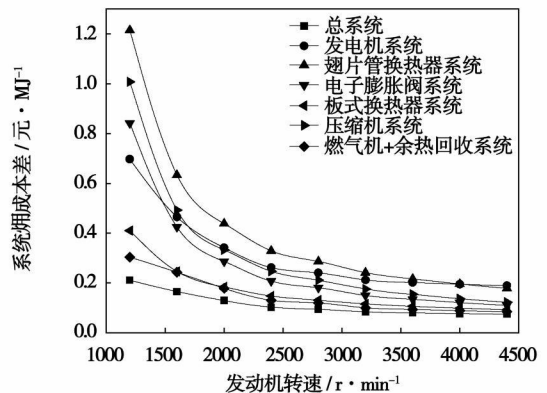


图 3 子系统火用成本差随发动机转速变化

燃气机热泵冷热电三联供系统的一大优势是可以通过发动机转速的无级调速来达到系统容量的无级调节, 因此发动机的转速对燃气机热泵冷热电三

联供系统的热经济性有着很大的影响, 针对发动机转速  $S$  的调节范围  $1\ 200 \sim 4\ 400\ \text{r/min}$  内对系统的火用成本差, 火用经济因子和火用经济系数进行分析。计算条件为: 蒸发温度  $T_e = 5\ ^\circ\text{C}$ , 冷凝温度  $T_c = 50\ ^\circ\text{C}$ , 年使用小时数  $n = 900\ \text{h}$ , 天然气价格  $P_{\text{gas}} = 2.2\ \text{元}\cdot\text{m}^{-3}$ 。图 3~图 5 分别为子系统火用成本差, 火用经济因子和总系统火用经济系数随发动机转速变化图。

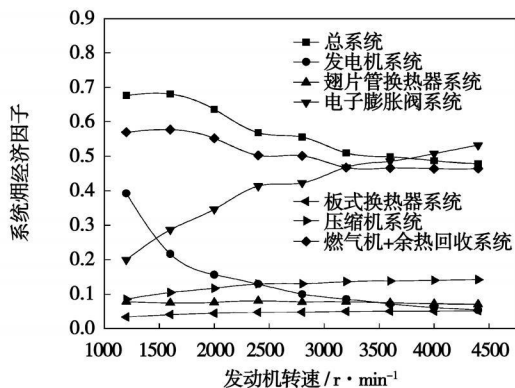


图 4 子系统火用经济因子随发动机转速变化

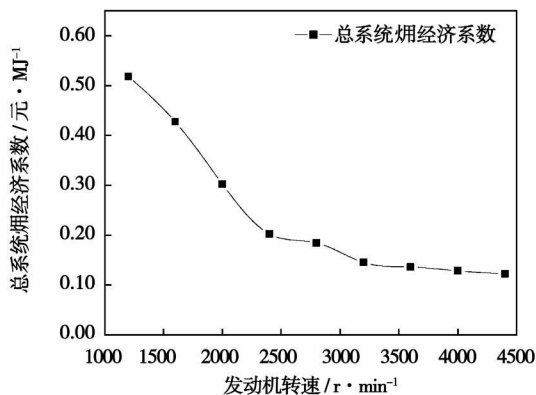


图 5 总系统火用经济系数随发动机转速变化

从图 3 中可以看出随着发动机转速的提高, 各个子系统的火用成本差都减小, 这说明当燃气机热泵冷热电三联供系统处于怠速或者低转速条件下运行是不经济的, 各个子系统的火用经济性都不佳; 当发动机的转速高于  $2\ 400\ \text{r/min}$  时, 各个子系统的火用成本差减小的趋势都趋于平缓, 这是因为  $2\ 400\ \text{r/min}$  转速是发动机的经济转速, 在此转速下各子系统热经济性较好; 图 4 显示压缩机、板式换热器和翅片管换热器子系统的火用经济因子随发动机转速的提高变化很小, 并且  $f$  都小于 0.3, 这说明此子系统火用成本差过大主要是因为系统的火用效率低下造成, 非能量费用所占系统火用成本增加份额的比率小; 发电机子系统的火用经济因子随转速变化较大, 在低速状态下

非能量成本较大, 当转速提高时发电机的火用效率逐渐降低; 图 5 显示总系统的火用经济系数随转速提高而降低, 并且在高于发动机的经济转速后总系统的输出火用成本价变化不大, 这说明热泵系统在经济转速条件下热经济性较好。

### 2.2 蒸发温度对系统热经济性的影响

燃气机热泵系统在制冷工况时, 蒸发温度的变化也必然对系统的热经济性产生影响, 本文着重分析蒸发温度  $T_e$  在  $-10 \sim 16\ ^\circ\text{C}$  范围内变化时系统的热经济性变化。计算条件为: 冷凝温度  $T_c = 50\ ^\circ\text{C}$ , 发动机转速  $S = 2\ 400\ \text{r/min}$ , 年使用小时数  $n = 900\ \text{h}$ , 天然气价格  $P_{\text{gas}} = 2.2\ \text{元}/\text{m}^3$ 。图 6~图 8 为计算结果。

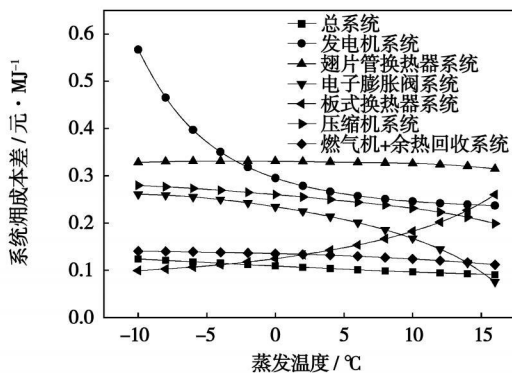


图 6 子系统火用成本差随蒸发温度变化

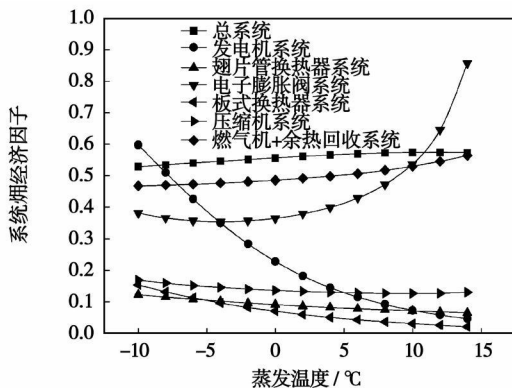


图 7 子系统火用经济因子随蒸发温度变化

分析图 6 与图 7, 在蒸发温度变化的范围内, 电子膨胀阀, 翅片管换热器与发电机子系统的火用成本差和火用经济因子受蒸发温度的影响最大, 在此对电子膨胀阀的热经济性不做评估。随着蒸发温度的升高, 虽然板式换热器的火用损是减小的, 但是由于蒸发温度的提高, 使得系统的工作状况好转, 因此系统的单位时间内的制冷剂流量却是增大的, 并且制冷

剂流量的增加率大于板式换热器的焓损的减小率, 从而导致了随着蒸发温度升高板式换热器的焓成本差增加; 发电机子系统则由于蒸发温度的升高, 热泵系统的制冷量和翅片管换热器的散热负荷的增加使得水泵以及风机的耗电量增加, 相应的发电机在焓转换时的焓损也增加, 因此发电机子系统的焓成本差的变化率的主要原因是系统的焓转换率低下; 从图 8 可知, 总系统的焓经济系数是随着蒸发温度的升高而减小的, 并且随着蒸发温度的升高, 总系统的焓经济系数减小率是增加的, 这表明蒸发温度越高总系统的焓成本减小的越快。

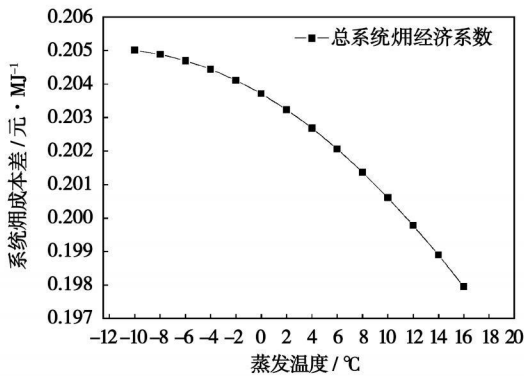


图 8 总系统焓经济系数随蒸发温度变化

### 2.3 冷凝温度对系统热经济性的影响

夏季制冷工况下, 室外温度制约着制冷系统的 COP 系数, 因此可以预想冷凝温度对燃气机热泵冷热电三联供系统的热经济性也有较大的影响, 因此本文还计算了冷凝温度  $T_c$  在 40~72 °C 范围内变化时系统热经济性的变化。计算条件为: 蒸发温度  $T_e=5$  °C, 发动机转速  $S=2\ 400$  r/min, 年使用小时数  $n=900$  h, 天然气价格  $P_{\text{gas}}=2.2$  元/ $\text{m}^3$ 。图 9~图 11 为热经济性参数随冷凝温度变化图。

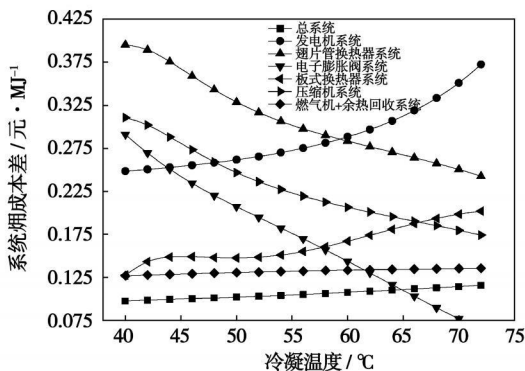


图 9 子系统焓成本差随冷凝温度变化

图 9 显示翅片管换热器, 压缩机, 发电机系统的焓成本差最大, 而翅片管换热器与压缩机的焓成本差都呈下降趋势, 分析其原因是因为随着冷凝温度的升高, 制冷系统的制冷量的减小的量大于增加的轴功率, 这就导致了翅片管换热器的制冷剂侧的焓损的增加幅度比空气侧焓损下降的幅度小, 因此使得翅片管换热器的焓成本差呈下降趋势; 压缩机则受冷凝温度升高制冷剂流量减小过多的原因使得压缩机的焓损下降, 因此焓成本差也呈下降趋势; 图 10 中显示发电机的焓经济因子随着冷凝温度的升高而上升, 这说明了发电机焓成本差过大是因为非能量费用过高造成; 图 11 表明随着冷凝温度的升高, 整个系统的焓成本在不断的升高。

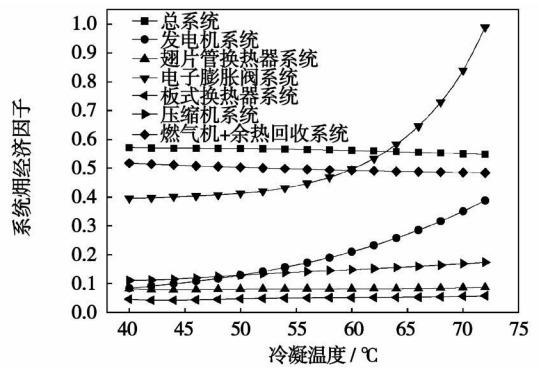


图 10 子系统焓经济因子随冷凝温度变化

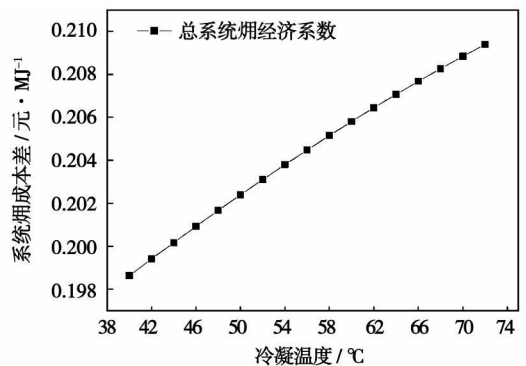


图 11 总系统焓经济系数随冷凝温度变化

### 2.4 天然气价格对系统热经济性的影响

燃气机热泵冷热电三联供系统的燃料是天然气, 因此天然气价格必将对整个系统的热经济性有着明显的影响, 为此还分析了系统热经济性参数对天然气价格的敏感性。天然气价格  $P_{\text{gas}}$  调整范围为 1.90~3.99 元/ $\text{m}^3$ , 计算条件为: 蒸发温度  $T_e=5$  °C, 冷凝温度  $T_c=50$  °C, 发动机转速  $S=2\ 400$  r/min, 年使用小时数  $n=900$  h。图 12~图 14 为计算结果。

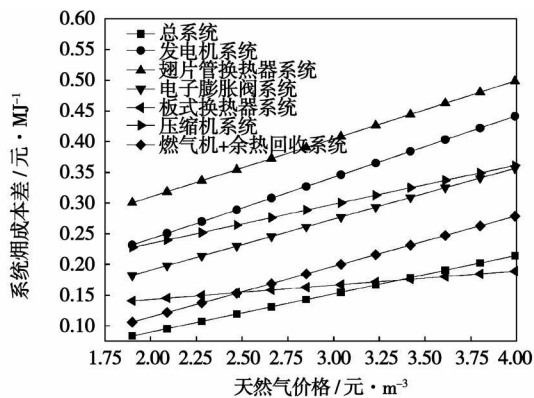


图 12 子系统燃料成本差随天然气价格变化

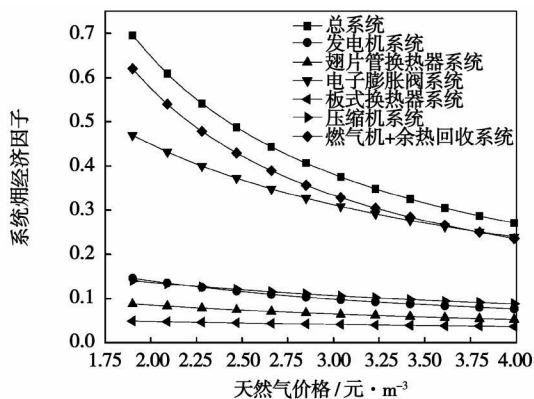


图 13 子系统燃料经济因子随天然气价格变化

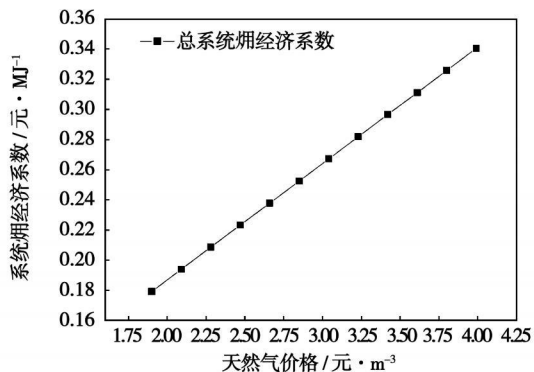


图 14 总系统燃料经济系数随天然气价格变化

从图 12 可以看出各子系统随着天然气价格的上涨,其燃料成本差都成线性递增趋势,但板式换热器的燃料成本差的增率比较平缓,这说明板式换热器的热经济性对天然气价格不敏感;图 13 显示压缩机,板式换热器及翅片管换热器子系统的燃料经济因子随天然气价格上涨变化不大,但其燃料经济因子  $f$  都在 0.15 以下,说明系统的燃料效率低下,燃料在转化过程中损失很大;分析总系统和燃气机+余热回

收系统,其燃料经济因子  $f$  都处于 0.3~0.7 之间,说明燃气机热泵冷热电三联供系统在天然气的市场价格产生波动的局面时,系统的改造需要同时考虑非能量费用和燃料效率对系统热经济性的影响,即需要尽量降低系统设备的运行费用也需要尽量提高内部有燃料转换的设备的燃料效率;图 14 显示天然气价格上涨直接导致了总系统的输出燃料成本价的提高。

### 3 结 论

通过上述的计算分析可以得出如下结论:

(1) 燃气机热泵冷热电三联供系统受蒸发,冷凝温度的影响要比发动机的转速,天然气价格小的多。从以上的四种影响因素的计算分析可知发动机转速和天然气价格决定着燃气机热泵冷热电三联供系统的市场竞争力。

(2) 燃气机热泵冷热电三联供系统的传动比设计须合理。从图 5 可以知道燃气发动机在经济转速范围内燃气机热泵系统的燃料经济系数(即输出燃料成本价)变化很小,当转速高于经济转速时,虽然随着转速的进一步升高,总系统的燃料经济系数降低,但是此时燃料经济系数的降低率很小,燃气机热泵系统是以消耗大量的能量来维持较低的燃料经济系数,此种运行方式并不合理,为此燃气机热泵系统在设计时,需设置合理的传动比,使得发动机及压缩机在多数运行时间内都处于经济转速范围内,从而使得总系统的热经济性较好。

(3) 燃气机热泵冷热电三联供系统在具有广阔的应用空间。燃气机热泵冷热电三联供系统具有同时供电,生活热水和制冷(制热)的功能,其燃料经济系数在天然气价格为 1.9 元/ $m^3$  时为 0.18 元/MJ,相对于产生和此燃气机热泵同样多的电能,生活热水及制冷量所需要的平均燃料成本价 0.13 元/MJ(生活热水成本价 0.17 元/MJ,电能成本价 0.14 元/MJ,电动热泵的制冷成本价 0.04 元/MJ),相差无几,若各个子系统的燃料效率进一步提高必将使得其成本进一步下降,从而使得燃气机热泵冷热电三联供系统在市场上更加具有竞争力。

### 参考文献:

[1] 杨 昭,张世钢,童春荣.燃气机热电冷联供系统技术经济分析[J].热能动力工程,2002,17(10):502-505.  
 [2] 王加璇,王清照,张晓东.热力学分析与经济理论结合的新探讨:从热力学定律中揭示其内含的经济理论[J].热能动力工程,2002,17(6):561-564.

- [3] 程伟良, 王加璇. 热经济学的辉煌发展[J]. 热能动力工程, 1999, 14(2): 79~82
- [4] 王加璇. 动力工程热经济学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [5] 赵衍海, 罗永浩, 陆 方, 等. 热经济学分析方法及其在冷凝水回收系统中的应用[J]. 中国动力工程学报, 2005, 25(1): 121-130.
- [6] 彭启珍, 张树芳, 郭江龙. 热经济学成本分析中补充方程的合理构造[J]. 热力发电, 2003, (10): 29-31
- [7] 李芳芹, 朱 彤, 谢 洪 等. 用经济系数在方案决策中的应用[J]. 电站系统工程, 2000, 16(5): 275-277
- [8] 杨勇平, 王加璇. 确定热电厂供热成本的热经济学方法[J]. 热能动力工程, 1995, 10(2): 73-77.
- [9] 程伟良, 黄其励, 杨勇平. 基于热经济学的空调系统建模[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 94-97.
- [10] 李芳芹, 魏敦崧. 天然气热、电、冷三联供的热经济性分析[J]. 动力工程, 2004, 24(1): 143-146.

(编辑 陈 滨)

## 新技术、新工艺

## SGT5—4000F 燃气轮机的升级改进

据《Gas Turbine World》2008 年 7—8 月号报道, Siemens Energy 通报了对已投放市场 12 年的 SGT5—4000F 燃气轮机最新的升级改进, 该燃气轮机的输出功率已提高到 292 MW, 简单循环效率增加到 39.9%。

新的升级改进是渐进式地提高该燃气轮机性能的第三次, 已经明显改进了 SGT5—4000F 燃气轮机的性能。SGT5—4000F 于 1996 年初次登场, 当时它的额定输出功率为 240 MW, 简单循环效率为 37%。

Simens 描述这些升级改进为“一系列小的改进”, 主要包括动叶、静叶和燃烧室的隔热屏。改进还包括热障涂层、较少的铸件变化和扩大使用静叶密封板。

在例行维护停机期间, 也可以应用该升级系统对已安装的燃气轮机进行翻新改进。

西门子公司声称, 源自升级改进的性能提高, 使在动力装置整个寿命期间 CO<sub>2</sub> 的排放量的减少超过 100 000 t。

## 燃气轮机故障诊断的新方法

据《ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power》2007 年 10 月号报道, 燃气轮机诊断技术通常是依据公认的使用实际和预期的热力性能之间偏差的方法, 偏差通常取决于机组当前的运行条件, 但是研究表明, 这种依存关系可能是很差的。

提出了一种通用的故障分类法, 它与运行条件无关。为了证实这种理论, 计算了实际诊断的概率, 并针对两种情况(提议的分类法和基于固定不变运行点的通常的方法)进行了比较。

通过随机模拟诊断过程来计算概率, 在这一过程中, 热力学模型产生故障引起的偏差, 人工的神经网络识别这些故障。

对于所分析燃气轮机的稳态和瞬态运行, 执行了分类法则。结果表明, 采用通用的分类法几乎不影响诊断的可靠性, 可以在实际的故障诊断应用中使用这种方法。

(吉桂明 摘译)

Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 588 ~ 591

The temperature of atmospheric environment has a big influence on the performance of a gas turbine. An additional installation of an inlet air atomization and cooling system is of enormous practical value for improving the performance of the gas turbine. Through an analysis of the working principle of an inlet air atomization and cooling system of a gas turbine, proposed were a design version and functional realization of a PLC-based (programmable logic controller) gas turbine inlet air atomization and cooling control system. The operation results show that the control system enjoys a high automation level, a good operating stability and a reliable performance. After the gas turbine inlet air atomization type cooling skid equipped with the control system in question has been put into operation, the power output of a PG6551(B) type gas turbine increased, relatively speaking by 8.35% and the efficiency rose by about 3.24%. **Key words:** gas turbine, inlet air cooling, control technique

冷热电联产系统新评价准则研究 = A Study of New Evaluation Criteria for Combined Cooling-heating-power Cogeneration Systems [刊, 汉] / HE Bin-bin, DUAN Li-qiang, YANG Yong-ping (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 592 ~ 596

From the intrinsic characteristics of energy stepped utilization of a cooling-heating-power cogeneration system, presented were the criteria for evaluating energy stepped utilization rates. The criteria were obtained by accumulative adding of energy utilization rates of power generation, refrigeration and heat supply, multiplied by various weighting coefficients respectively. The reference point for comparison was first determined and then a layer-by-layer analytic method was adopted to obtain the weighting coefficients for various energy utilization rates at the reference point. Then, the weighting coefficients at the reference point were corrected by using the temperature of the cold and hot product and the ambient temperature to obtain the weighting coefficients under other circumstances. In conjunction with a calculation case of a practical cogeneration system, the method for using the evaluation criteria was given, and an analysis and comparison with the original evaluation criteria were performed. The research results show that the evaluation criteria under discussion feature rationality, thus adequately serving as a practical method for evaluating and comparing combined cooling-heating-power cogeneration systems. **Key words:** combined cooling-heating-power cogeneration, evaluation criterion, energy stepped utilization rate

燃气机热泵冷热电三联供系统热经济学分析 = Thermo-economics Analysis of a Cooling-heating-power Cogeneration System for a Gas Engine-driven Heat Pump [刊, 汉] / FANG Zheng, YANG Zhao, CHEN Yi-guang (Thermal Energy Research Institute, Tianjin University, Tianjin, China, Post Code: 300072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 597 ~ 603

A cooling-heating-power cogeneration system for a gas engine-driven heat pump was analyzed by adopting a thermo-economics analytic method. From a calculation and analysis of exergy cost differences and exergy economic factors of subsystems as well as exergy economic coefficient of the whole system under the condition of the following 4 influencing factors, i. e. various rotating speeds, evaporation temperatures, condensing temperatures and natural gas prices, the authors have proposed some improvements necessary for the above cooling-heating-power cogeneration system and problems meriting attention in setting a rational transmission ratio during the design of the system. Moreover, they have also concluded that the system enjoys broad prospects for its application in China. **Key words:** cooling-heating-power cogeneration, gas-turbine driven heat pump, thermo-economics, exergy cost difference, exergy economic factor, exergy economic coefficient

不可逆闭式布雷顿热电联产装置炯经济性能优化 = Exergy Economic Performance Optimization of an Irre-