

# 冷热电联产系统的评价准则

冯志兵<sup>1,2</sup> 金红光<sup>1</sup>

( 1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100080 )

**摘要** 本文通过对以燃气轮机回热循环为动力系统的冷热电联产系统进行热力学分析, 对几种常用的评价准则进行了比较。通过分析, 认为能量利用系数将冷、热、电等各股能量等价看待, 焓效率过分看重能量的作功能力, 折合发电效率过分关注冷、热能的输出, 均不适于冷热电联产系统的评价; 节能率反映的是输入能量的使用情况, 经济焓效率在某种程度上是经济性的表现, 比较适于冷热电联产系统的评价。研究中发现, 燃气轮机温比有利于系统性能的提高, 但针对不同的目标有不同的最佳压比; 在节能率的使用中需要明确参照系统的性能。

**关键词** 冷热电联产系统; 燃气轮机; 回热循环; 评价准则

**中图分类号:** TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2005)05-0725-04

## PERFORMANCE ASSESSMENT OF COMBINED COOLING, HEATING AND POWER

FENG Zhi-Bing<sup>1,2</sup> JIN Hong-Guang<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Combined cooling, heating and power (CCHP) system using a recuperative gas turbine is investigated, and performance assessment criteria is discussed. Here, we find that fuel utilization efficiency treats equally different kinds of energies, and the second-law efficiency extremely attends potential for work availability, and efficiency of power generation fulsomely cares heating and cooling, hence they don't suit assessment of CCHP. Fuel energy saving ratio reflects fuel saving compared with traditional energy systems, and economic exergy efficiency could show market demand in some measure, and both could be used for CCHP evaluation. With the increase in temperature ratio of gas turbine, performance of CCHP will be improved, and there are different optimal pressure ratios according to different assessment criteria.

**Key words** combined cooling heating and power; gas turbine; recuperative cycle; performance assessment

### 符号表

$A$	卡诺循环效率	$T$	温度	$C$	压气机
$B$	(冷、热)与电价比	$w$	比功	$c$	制冷
$C$	制冷量	$\eta$	效率	$co$	CCHP 系统
$COP$	制冷系统性能系数	$\pi$	压比	$e$	电, 压缩式
$c_p$	平均比热	$\tau$	温比	$eg$	电网
$D$	总压恢复系数	$\Delta T$	回热器冷端传热温差	$h$	供热
$d$	$D^{(k-1)/k}$	$\phi$	$\pi^{(k-1)/k}$	$s$	分产系统
$H$	供热量	下标		$T$	透平
$k$	等熵指数	$a$	吸收式制冷	1, 2, 3, ...	流程上各点
$q$	燃料量 (低位发热量)	$b$	锅炉		

## 1 前 言

冷热电联产系统 (CCHP) 由于能量梯级利用,

具有节能、环保等特点, 因而受到广泛关注<sup>[1,2]</sup>。由于存在多种形式能量输出, 联产系统是一种全新的、复杂的能量供应系统。为了确定不同系统的优

收稿日期: 2005-01-07; 修订日期: 2005-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.90210032)

作者简介: 冯志兵 (1972-), 男, 湖北武穴人, 博士研究生, 主要从事工程热力学等方面的研究工作。

劣,指导和优化系统的设计、选择,需要对系统进行评价。目前冷热电联产系统的评价指标较多<sup>[3~6]</sup>,但不同评价准则存在一些矛盾之处。本文通过对采用燃气轮机回热循环的冷热电联产系统进行热力分析,对几种比较常用的评价准则进行了研究。

## 2 评价准则

图1为由燃气轮机回热循环构成的冷热电联产系统,利用余热锅炉回收烟气中热量进一步利用。图中余热锅炉被分成2级:第一级用于生产蒸汽驱动吸收式制冷系统;第二级用于供热。

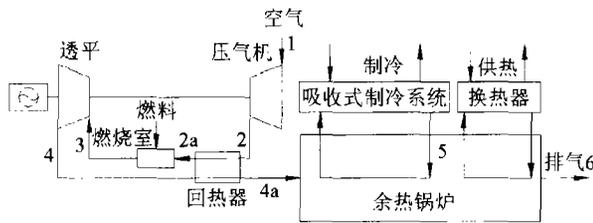


图1 燃气轮机冷热电联产系统

为使分析简单化,采用以下假定:定比热,且空气、烟气比热相同;燃料引起流量增加的影响正好与冷却及漏损空气的效果相抵消;忽略散热损失。燃气侧压力损失集中采用总压恢复系数 $D$ 表示。

令 $\alpha = \tau[1 - 1/(\phi \cdot d)]\eta_T$ ,  $\beta = (\phi - 1)/\eta_C$ ,  $\gamma = \Delta T/T_1^*$ ,  $\xi = T_5/T_1^*$ ,  $\zeta = T_6/T_1^*$ , 则系统输入、输出分别为

$$q_{co} = c_p T_1^* (\alpha + \gamma)$$

$$w = c_p T_1^* (\alpha - \beta)$$

$$C = COP_a \cdot c_p T_1^* (\beta + 1 + \gamma - \xi)$$

$$H = c_p \cdot T_1^* (\xi - \zeta)$$

利用热电并供评价准则,也可对CCHP系统进行评估。以下几种为使用最多的评价准则:

将CCHP提供的冷、热、电3种输出等值看待,即得到系统的能量利用系数:

$$\eta_I = (w + C + H)/q_{co} \quad (1)$$

根据能量的做功能力大小可得系统的焓效率:

$$\eta_{II} = (w + A_c \cdot C + A_h \cdot H)/E \quad (2)$$

式中 $E$ 为输入焓。对于化石燃料,输入焓与燃料低位热值差别不大,因此通常用低位热值表示:

$$\eta'_{II} = (w + A_c \cdot C + A_h \cdot H)/q_{co} \quad (2A)$$

考虑能量价格差异,可得系统的经济焓效率:

$$\eta_B = (w + B_c \cdot C + B_h \cdot H)/q_{co} \quad (3)$$

为了反映出CCHP系统与常规系统在能量使用上的差异,节能率的概念被使用:

$$FESR = (q_s - q_{co})/q_s \quad (4)$$

将联产系统消耗的燃料量扣除输出冷、热量对应参照系统的燃料量,假定剩余燃料产生了联产系统输出的电力,由此得到的为折合发电效率:

$$\eta_{el} = w / \left( q_{co} - \frac{C}{COP_e \cdot \eta_{eg}} - \frac{H}{\eta_b} \right) \quad (5)$$

## 3 典型热力学分析

根据目前水平,取 $\eta_C = \eta_T = 0.88$ ,  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ ,  $D = 0.94$ ;  $k = 1.4$ ;按ISO条件取环境参数。制冷系统使用双效溴化锂机组, $COP_a$ 为1.2,相应余热锅炉I排烟温度为 $170^\circ\text{C}$ ;冷水进出口温度分别为 $12^\circ\text{C}$ 、 $7^\circ\text{C}$ 。供热系统热水进出口温度取为 $50^\circ\text{C}$ 、 $65^\circ\text{C}$ ,余热锅炉II排烟温度为 $100^\circ\text{C}$ 。节能率计算需要参照系统性能:目前中国电网平均发电效率为 $33.3\%$ ,输变电损失为 $8.1\%$ <sup>[7]</sup>;锅炉热效率为 $90\%$ ;压缩式空调性能差异较大,本文 $COP_e$ 按 $3.0$ 、 $5.0$ 两种情况分别考虑。

图2表示输出能量随燃气轮机温比、压比的变化。燃气轮机发电效率的变化与常规燃气轮机回热循环类似:发电效率随温比增加而增加;在给定参数下发电最佳压比 $2.6 \sim 2.8$ 。压比低于 $2.8$ 时,回热器出口烟温低于制冷所需温度,制冷系统不能工作,烟气中余热只能用于供热。

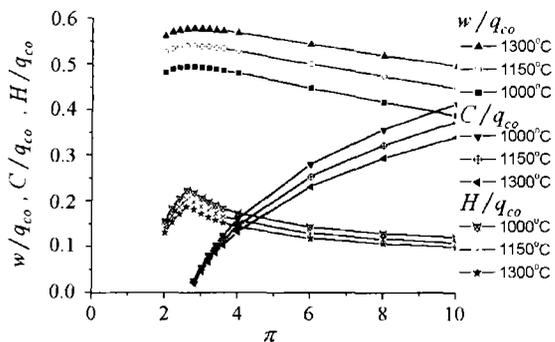


图2 冷、热、电随温比、压比的变化

温比固定时,压比增加,压气机出口气温增加,导致回热器出口烟温增加。在 $T_5$ 不变的前提下,制冷系统可利用热量增加,因此 $C/q_{co}$ 增加。压比低于 $2.8$ 时,回热器出口烟温低于 $170^\circ\text{C}$ ,余热锅炉回收的热量都用于供热,随压比增加,回热器出口烟温增加,可回收热量增加;达到 $2.8$ 以后,高于 $170^\circ\text{C}$

的热量用于制冷，用于供热的热量不再改变，同时压比的增加将导致透平出口烟温降低，从而回热器出口空气温度降低，燃气轮机输入燃料量将略有增加，因此  $H/q_{co}$  将缓慢降低。

当温比增加时，透平排气温度增加，因此回热器出口空气温度增加，燃气轮机燃料量将降低。因为压比不变，压气机出口温度不变，同时回热器出口烟气温度不变，制冷量和供热量不变，结果  $C/q_{co}$  和  $H/q_{co}$  将降低。

### 4 讨 论

图 3 为该系统能量利用系数的变化。压比低于 2.8 时，没有冷量输出，发电效率和  $H/q_{co}$  随压比的增加而增加；当压比达到 2.8 以后，发电效率和  $H/q_{co}$  开始下降， $C/q_{co}$  增加，同时  $C/q_{co}$  的增长趋势快于发电效率和  $H/q_{co}$  的减少趋势，因此在考察范围内能量利用系数随压比的增加而增加。

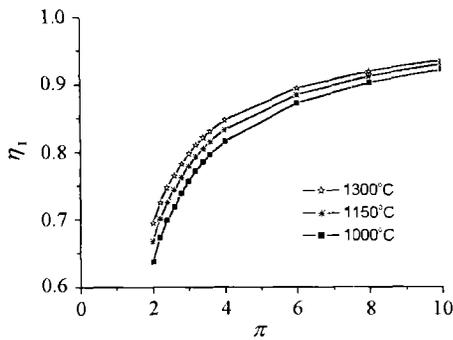


图 3 能量利用系数随压比、温比的变化

考虑能量品位差异时可得图 4。本文条件下， $A_h = 0.128$ ， $A_c = 0.019$ 。因为冷、热能品位很低，系统的烟效率几乎完全取决于电能的生产，因此在压比为 2.6~2.8 时达到最大。烟效率随温比的增加而增加。根据烟效率，冷、热量对系统的贡献很低。

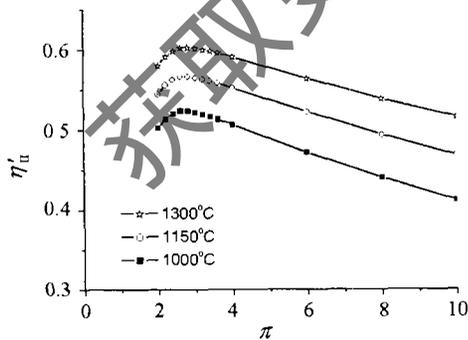


图 4 烟效率随压比、温比的变化

根据北京市场，取电价 0.623 元/度，冷价按 0.29 和 0.19 元/kW·h 两种考虑，热价为 0.19 元/kW·h，

因此  $B_h = 0.305$ ， $B_c$  为 0.465 或 0.305。经济烟的变化见图 5。电价比冷、热价格高，因此系统的性能主要取决于电力的生产；但是冷、热价与电价相比并不是微不足道，冷、热量对经济烟效率的影响相对烟效率较大。经济烟效率随温比增加而增加；由于冷、热能的影响，对应不同的冷、热价格有着不同的经济烟效率最佳压比，且最佳压比随冷、热价格的增加而增加；当冷、热价相对电价增加时，冷、热能影响将增大，系统经济烟效率将增加。

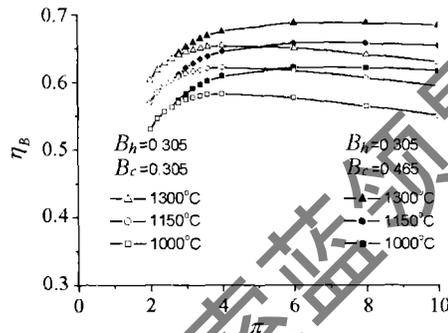


图 5 经济烟效率随压比、温比的变化

表 1 反映了不同评价准则中，三种输出能量的加权情况。能量利用系数将不同能量等同，由于冷、热的生产相对比较容易，因此增加冷、热输出能量利用系数将增加，这种结论显然是不妥的。

表 1 三种评价准则中不同能量的加权因子

	电能	制冷量	供热量
能量利用系数	1	1	1
烟效率	1	$A_c(0.019)$	$A_h(0.128)$
经济烟效率	1	$B_c(0.465^*)$	$B_h(0.305^*)$

\* 经济烟效率只考虑了一种价格情况

建筑领域制冷温度通常大于 5°C，而供热温度多在 90°C 以下，因此所利用冷、热能的卡诺效率很低，采用烟效率评价系统时将过分关注电能。通过表 1 可知， $A_c$  比  $A_h$  小很多。即使在 30°C 条件下， $A_c$  也只有 0.073，低于  $A_h$  的 0.083。如果考虑制冷系统的  $COP_a$ ，吸收式制冷系统 1 份热量所提供的冷烟也只有 0.088，与供热的相当，但是制冷所需热量温度比供热高，因此烟效率不能反映冷、热生产的相对难易。另外，烟效率反映的是能量的可转变为功的能力，而 CCHP 中冷、热是为了满足人对舒适性的要求，因此烟效率不适于 CCHP 的评估。

经济烟效率考虑了冷、热价与电价的差异，在某种程度上反映了市场对不同能量的需求，可视为经济性的一种粗略表现形式。



图 6 为采用不同性能压缩式制冷系统时节能率变化情况。采用  $COP_e$  为 3.0 压缩式系统时, 分产系统性能较差, CCHP 系统具有更高节能潜力。节能率随温比增加而增加, 最佳压比在 3.2~3.4 之间。

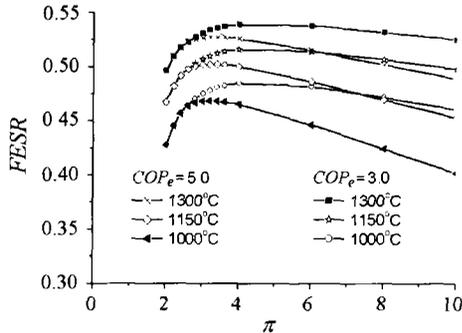


图 6 节能率随压比、温比的变化

图 7 中 (a)、(b)、(c) 表示的分别是各股能量在能量利用系数、焓效率和经济焓效率中的份额; (d) 为  $COP_e$  为 3.0 时对应分产系统燃料消耗量占全部燃料量的比例。能量利用系数反映的是各能量的数量, 而其它三个指标, 冷、热能都是在一定的折扣后在评价指标中起作用。焓效率中冷、热的作用微乎其微; 冷、热能在经济焓效率和节能率中的作用, 由于考察的内容不同, 在数值上有些差异。

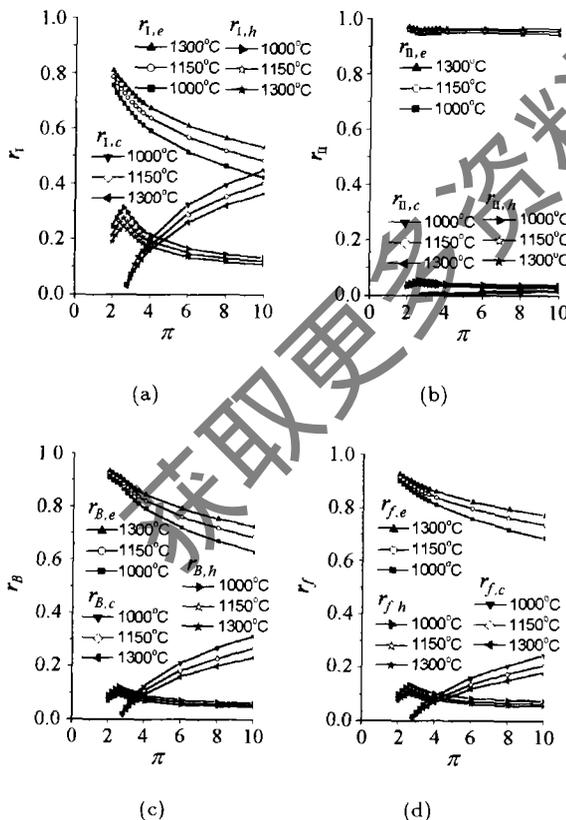


图 7 各种能量在不同评价准则中的表现

假定 2 个联产系统的折合发电效率相同, 同时它们的发电量相同, 根据式 (5) 可得

$$q_{co1} - q_{co2} = \frac{C_1 - C_2}{COP_e \cdot \eta_{eg}} + \frac{H_1 - H_2}{\eta_b}$$

这意味着联供系统 1, 和该联供系统与分产的供热、制冷系统共同构成的系统 2 具有相同的折合发电效率。两系统节省的燃料量相同, 但是系统 2 使用的燃料明显多于系统 1, 系统 2 的节能率小于系统 1, 系统 1 的性能优于系统 2, 折合发电效率不能反映出这两个系统的性能差异。

## 5 结 论

本文通过对采用燃气轮机回热循环的 CCHP 系统进行热力学分析, 对不同的评价准则进行了计算和分析, 经过研究可以得到以下结论:

能量利用系数将电与冷、热等同; 焓效率考察的为能量的作功能力, 而 CCHP 满足的主要是人对生活温度 (即冷、热) 的要求; 折合发电效率不能真实反映制冷、传热系统的作用, 因此这三者不适合 CCHP 的评估。经济焓效率反映了不同能量的市场需求, 节能率考察了燃料的使用, 从不同角度反映了系统性能, 可用于 CCHP 系统评价, 但根据不同评价准则将得到不同的结果。燃气轮机温比升高, 系统性能将改善; 但压比对系统性能的影响将取决于所追求的目标。节能率与参照系统性能有很大关系, 冷、热、电各项价格对经济焓效率有较大影响, 在相应系统评估中应明确参照系统性能与各项能量价格。

## 参 考 文 献

- [1] Donald R Hart, Marc A Rosen. Environmental and Health Benefits of District Cooling Using Utility-Based Cogeneration in Ontario. Canada. Energy, 1996, 21(12): 1135-1146
- [2] G G Maidment, X Zhao, S B Riffat. Combined Cooling and Heating Using a Gas Engine in a Supermarket. Applied Energy, 2001, 68: 321-335
- [3] 蔡睿贤. 功热并供评价准则及燃气轮机功热并供基本分析. 工程热物理学报, 1987, 8(3): 201-205
- [4] J H Horlock. Cogeneration-Combined Heat and Power (CHP): Thermodynamics and Economics. New York: Pergamon Press, 1987
- [5] Kam W Li. Applied Thermodynamics: Availability Method and Energy Conversion. Taylor & Francis, 1996
- [6] Francis F Huang. Performance Assessment Parameters of a Cogeneration System. ECOS'96 Stockholm: 225-229
- [7] 周凤起, 王庆一. 中国能源 50 年. 北京: 中国电力出版社, 2002