

# 串联型化工动力多联产系统主导因素与变工况特性

冯 静, 倪维斗, 李 政

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 多联产系统以电力为主要的产品之一, 因而在运行时必然要面对变负荷的问题。从变负荷的角度考虑如何设计多联产系统以满足电网的要求, 通过详细的仿真分析, 提炼出影响串联结构多联产系统变负荷能力的两个主导因素: 设计动化比和合成单元容量盈余度。以四象限图的形式展示系统设计参数与系统产品输出和变负荷能力的关系, 并进一步分析系统在变负荷运行时的特性, 特别是燃气轮机燃料气的  $H_2/CO$  随电负荷的降低而增大的情况。

**关 键 词:** 多联产系统; 变负荷; 甲醇合成; 四象限图; 主导因素

中图分类号: TK01; TQ54 文献标识码: A

## 引 言

多联产系统的主要产品之一是电力, 在实际运行时必然要面对电网对电力输出调度的问题, 也即要变负荷运行。为了使系统满足电网的要求和具有更好的变负荷性能, 在设计初期就必须对此问题进行考虑。不同结构的多联产系统具有不同的负荷调节参数和变负荷特性。图 1 为多联产系统的 3 种基本结构示意图, 包括串联、并联和串并联。多联产系统中电力和化工产品生产都以合成气为原料, 因而可以通过调节合成气在发电和化工产品合成间的分配比例来实现对发电单元负荷的调节, 而不用改变包括空分在内的气化单元(操作灵活性较差、投资比例高)的运行工况。在这样的负荷调节策略下, 多联产系统的操作灵活性、变负荷运行的经济性相比纯

IGCC 电站都有所改善。

在分析了并联结构多联产系统基于变负荷考虑的设计问题和变负荷特性的基础上<sup>[1]</sup>, 本文以串联结构电力、甲醇联产系统为分析对象, 图 2 为其结构框图。为了得到一定的普适性规律, 采用主导因素法, 通过提炼影响系统变负荷能力的主导参数, 绘制主导参数与变负荷能力的关系四象限图, 以此得到满足系统产品输出要求和变负荷能力要求的主导参数的设计取值。

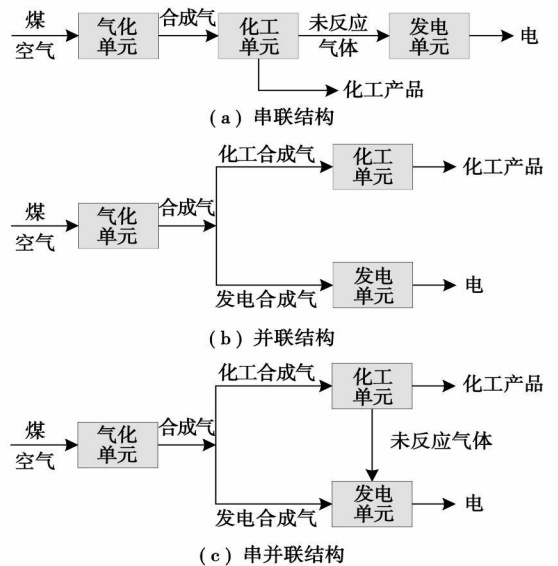


图 1 多联产系统基本结构示意图

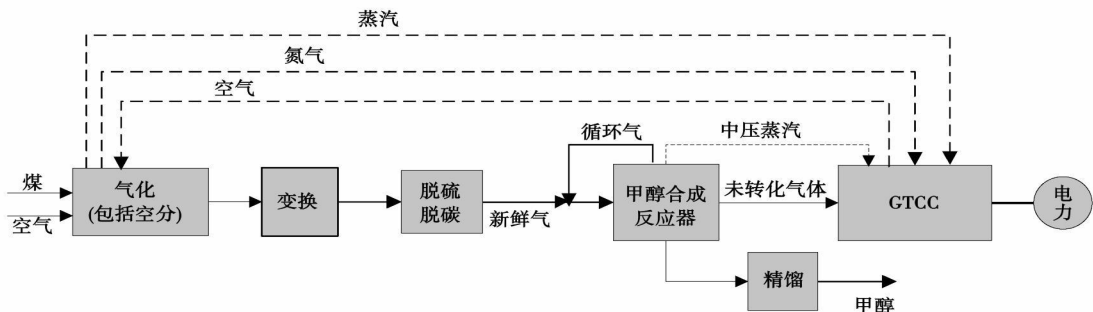


图 2 串联结构多联产系统结构框图

收稿日期: 2007-11-30; 修订日期: 2008-03-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2005CB221207); 国家自然科学基金重大研究计划基金资助项目(90210032)

作者简介: 冯 静(1980-), 女, 内蒙古阿拉善盟人, 清华大学博士研究生。http://www.cnki.net

# 1 串联结构多联产系统的变负荷设计

## 1.1 系统负荷调节策略及变负荷能力主导参数

串联结构多联产系统由甲醇合成系统和燃气轮机联合循环发电系统串联组成, 甲醇合成系统的原料

是气化单元产生的新鲜合成气, 发电单元的燃料是甲醇合成单元的未转化气体, 如图 2 所示。系统中采用液相甲醇合成工艺, 其具有突出的反应器温度控制能力、良好的操作弹性及其它一些优良特性, 非常适合用于多联产系统。为分析变负荷的串联联产系统的特有问題, 对有关参数定义进行设定, 如表 1 所示。

表 1 参数定义

	定义或备注
系统设计甲醇输出 $P_{msd}/t \cdot a^{-1} (\times 10^4)$	联产系统设计工况下甲醇输出
合成单元额定甲醇输出 $P_{mcd}/t \cdot a^{-1} (\times 10^4)$	甲醇合成单元设备的额定工况点对应的甲醇输出
电力输出 $Ee/MW$	发电单元总功率输出
循环比 $X_{re}$	合成单元循环气与新鲜气体积流量的比值
系统设计循环比 $X_{resd}$	联产系统设计工况下, 甲醇合成单元的循环比
合成单元额定循环比 $X_{resd}$	甲醇合成单元额定工况点对应的循环比
最大循环比 $X_{re,max}$	在改变负荷时, 甲醇合成单元允许操作的最大循环比
系统设计空速 $V_{sd}/L \cdot (kg \cdot h)^{-1}$	联产系统设计下, 甲醇合成单元的操作空速
合成单元额定空速 $V_{rd}/L \cdot (kg \cdot h)^{-1}$	甲醇合成单元额定工况点对应的操作空速
系统设计转化率 $\theta_0$	联产系统设计工况下, 甲醇合成单元的 CO 转化率
设计动化比 $\lambda_0$	联产系统设计工况下, 系统电力总功率输出与甲醇低热值能量输出的比例
化工单元容量盈余度 $\rho$	(合成单元额定甲醇输出 - 系统设计甲醇输出) / 系统设计甲醇输出
单元负荷分数 $\pi$	下标 e, m 分别代表发电单元和合成单元
发电单元最小负荷百分数 $\pi_{emin}$	发电单元可以实现的最低负荷

不改变气化单元运行工况时, 串联结构多联产系统实现负荷调节的实质是通过控制合成单元的转化率, 改变未转化气体的量, 从而改变发电单元的功率输出。在催化剂选定时, 影响合成单元 CO 转化率的参数包括反应压力、循环比、操作空速(单位质量催化剂所能处理的反应器入口气体体积流量, 单位:  $L/(kg \cdot h)$ (标态))以及新鲜气成份。在系统运行时, 反应压力一般不作为操作参数, 操作空速的改变来源于新鲜气或循环气流量的改变。在变负荷时, 气化单元运行工况不变, 新鲜气流量和成份不变, 因而串联结构多联产系统的负荷调节参数是合成单元的循环比。

影响串联结构多联产系统调节电负荷能力的参数很多, 为了得到具有一定普适性规律的结果, 本文采用主导因素方法。基于对案例分析的结论, 大量的模拟计算和公式推导, 提炼出设计动化比  $\lambda_0$  和合成单元容量盈余度  $\rho$  是决定系统变负荷性能  $\pi_{emin}$  的主导参数(与并联系统结果一致)。合成单元受最大允许运行负荷的限制(操作空速为设计值的 120%<sup>[4]</sup>), 其可以接收的发电单元降低负荷时多余的合成气量是有限的。因而, 合成单元相对发电单元的规模越大(也即设计动化比越小), 其负荷变化对发电负荷的影响越大。合成单元容量盈余度的意义在于, 在设计动化比确定时, 为了提高发电单元负

荷调节的范围, 在系统设计工况下, 合成单元工作在部分负荷。其它参数(单元效率、操作压力等)对系统调节电负荷能力的影响力都远小于设计动化比和盈余度, 不作为主导参数。

## 1.2 系统设计四象限图

多联产系统的设计目标是满足产品输出要求和变负荷能力要求, 本文采用四象限图的形式展示主导参数与系统设计目标间的关系。图 3 中包含 7 个参数, 设计转化率  $\theta_0$ 、设计动化比  $\lambda_0$  和容量盈余度  $\rho$  是系统的设计参数, 系统设计甲醇输出  $P_{msd}$ 、合成单元额定甲醇输出  $P_{mcd}$  和发电单元总功率输出  $Ee$  及其最低负荷  $\pi_{emin}$  是系统的设计目标。依据该四象限图, 可以从第一象限到第四象限逐步得到满足系统设计要求的主导设计参数的取值。例如, 根据市场、投资及资源等情况要求设计年生产甲醇 30 万 t 和 240 MW 发电量的系统 S1, 电网要求其最低稳定运行负荷为 80%(图 3 中系统 S1)。从图中看出, 根据产品输出要求, 在第一象限的纵坐标上得到  $\theta_0$  为 44%; 向左, 通过第二象限曲线得到  $\lambda_0$  为 1.15; 向下, 在第三象限按选定的最低电负荷百分数( $\pi_{emin} = 80\%$ )得到  $\rho$  为 19%; 最后通过第四象限得到合成单元的额定容量为 36 万 t/a。下面详细说明每个象限。

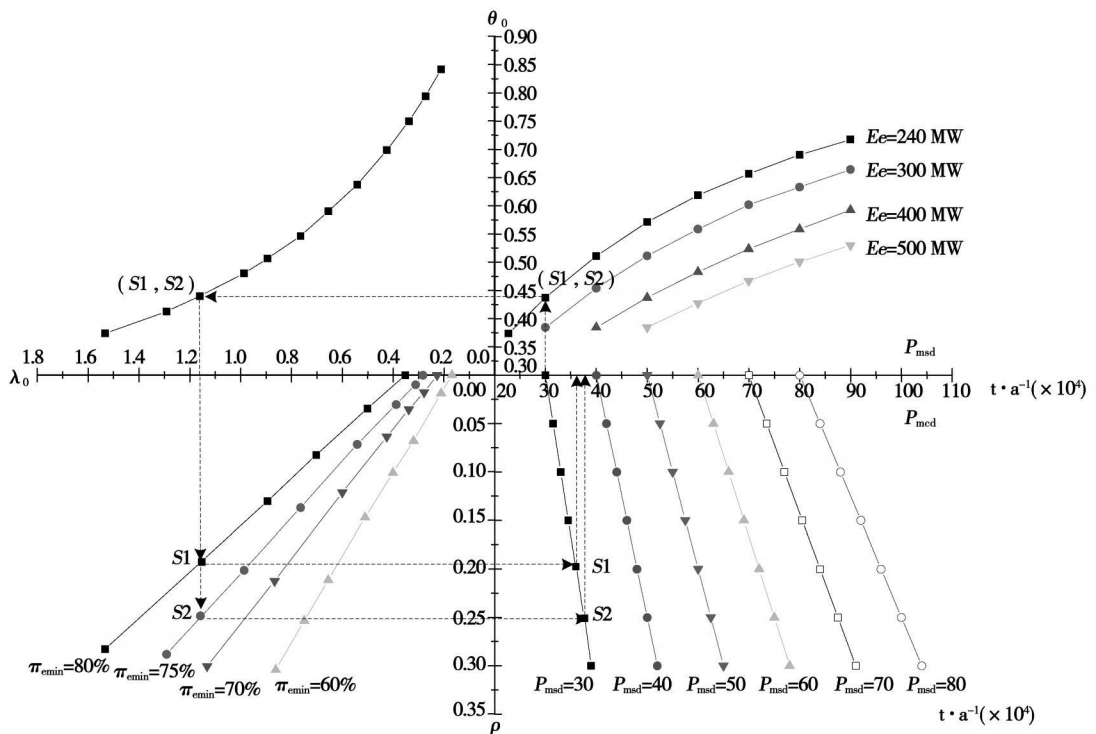


图 3 基于变负荷设计的电力、甲醇串联联产系统的四象限图

1.2.1 第一象限: 产品输出与合成单元转化率

前面已分析过, 对于串联结构的电力、甲醇联产系统, 合成单元的转化率是决定产品输出比例的关键因素。在此象限, 展示了 4 种发电规模下 (240、300、400 和 500 MW), 不同甲醇生产规模时合成单元的设计转化率  $\theta_0$  的取值。考虑到厂用电率估计的不准确性, 这里的发电规模采用总功率输出表征。第一象限的曲线显示, 串联系统的发电规模和甲醇生产规模要有合适的比例, 若是“大发电、小甲醇”系统, 则要设计比较低的合成单元转化率, 此外, 第三象限的结果也显示此时满足一定的变负荷要求时要设计更大的合成单元容量盈余度, 这在经济上是不划算的。

在设计转化率时, 一个需要特别关注的问题是未转化气体的成份。它将直接影响燃气轮机的燃烧系统设计。在甲醇合成单元为了获得更好的合成气单程转化率, 合成气在进入反应器前需要经过水煤气变换工段, 将部分 CO 与水蒸气反应生成  $H_2$  和  $CO_2$  (大部分  $CO_2$  随后脱除), 以获得最优的氢碳比例 (根据化学计量式, 新鲜气满足  $(H_2 - CO_2) / (CO + CO_2) = 2.05 \sim 2.1$ ), 这导致了未转化气体中的氢气含量较高, 直接影响燃气轮机燃烧系统的设计。图 4 计算了在合成压力为 5 MPa、空速为 6 000 SL/(kg-hr) 时, 未转化气体中  $H_2$  与 CO 含量的比值随合成单元 CO 转化率的变化曲线。转化率越高, 未转化气

体中的  $H_2$  含量越高。

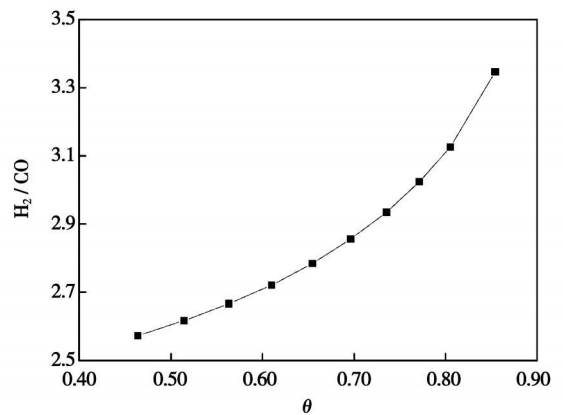


图 4 未转化气体的  $H_2/CO$  随转化率的变化

1.2.2 第二象限: 设计动化比与合成单元设计转化率

第二象限展示设计动化比  $\lambda_0$  和设计转化率  $\theta_0$  的关系。实际上, 设计动化比不仅由转化率决定, 发电单元的效率也是其影响因素之一。四象限图中曲线的绘制采用了 9E 燃气轮机燃烧合成气的联合循环的效率, 在采用其它型号燃气轮机时, 该曲线有一些差别。图 5 中计算了两种发电单元效率  $\eta_c$  (总功率输出与未转化气体低热值能量的比值) 下的  $\lambda_0 \sim \theta_0$  曲线。结果显示, 相同  $\lambda_0$  时, 两种效率情况下的  $\theta_0$  差别在 3 个百分点以内, 不同效率间的差别不

大, 因而不作为主导参数考虑。

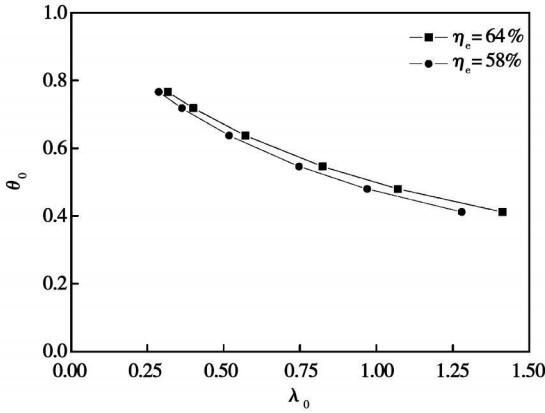


图 5 发电效率对动化比—转化率关系的影响

1.2.3 第三象限: 设计动化比和容量盈余度

第三象限分析了在 4 种变负荷能力 (pi\_min = 60%、70%、75% 和 80%) 要求下, 设计动化比 lambda\_0 与容量盈余度 rho 的对应关系。设计动化比是由产品输出决定的, 将取决于市场等外部因素, 因而要满足电网要求的调节电负荷的范围, 设计的重点是合成单元容量盈余度。

1.2.4 第四象限: 合成单元的额定容量

由于设计了合成单元在系统设计工况下的容量盈余度, 因而合成单元实际的额定工作容量大于系统设计的甲醇输出, 两种容量参数在四象限图中共用一个坐标轴。根据容量盈余度的定义, 这两种容量间具有以下的关系:

P\_mcd = (1 + rho) \* P\_msd

为后面分析的需要, 根据图 3 设计与 S1 系统具有相同产品输出的 S2 系统, 但要求发电单元最低稳定工作负荷为 75%。表 2 为通过 4 象限图得到的两个系统的设计结果。

表 2 满足设计要求的主导设计参数取值

	$E_e / \text{MW}$	$P_{msd} / \text{t} \cdot \text{a}^{-1} (\times 10^4)$	$\pi_{emin} / \%$	$\theta_0 / \%$	$\lambda_0$	$\rho / \%$	$P_{mcd} / \text{t} \cdot \text{a}^{-1} (\times 10^4)$
S1 系统	240	30	80	44	1.15	19	36
S2 系统	240	30	75	44	1.15	25	38

2 系统变负荷运行特性

在上一节分析了串联多联产系统特有的设计问题, 并依据绘制的四象限图设计了具有相同产品输出但不同变负荷能力的 S1、S2 系统。下面以这两个系统为例, 分析系统在变负荷运行时的特性规律, 重点是考察两种产品的输出随电力负荷的变化, 以及

关键物流的属性、系统效率随电负荷的变化。

对串联结构多联产系统而言, 循环比是一个重要的操作参数, 确定 X\_re 的操作范围是系统变负荷运行的关键。根据循环比、空速的定义及甲醇合成单元的最大允许工况点为操作空速达到额定值的 120%, 可以得到以下的参数关系:

X\_resd = (V\_sd / V\_rd) \* X\_retd + (V\_sd / V\_rd) - 1

X\_re\_max = 1.2 \* X\_retd + 0.2

循环比 X\_re 的操作范围为 X\_resd <= X\_re <= X\_re\_max。

图 6 示出了在变负荷运行时, 合成单元的转化率和负荷随发电单元负荷的变化。在发电单元负荷下降时, 合成单元负荷上升, 负荷对应的转化率与设计转化率的比值提高。由于 S1、S2 两个系统的合成单元设计容量盈余度不同 (分别为 19% 和 25%), 在系统设计工况下, 发电单元都工作在额定工况下, 而合成单元的负荷分别为 84% 和 80%。S1 系统转化率提高到设计值的 1.26 倍时, 合成单元达到最大负荷, 对应的发电单元为 80% 的最小负荷; S2 系统最小电负荷工况点的相对转化率为 1.32。

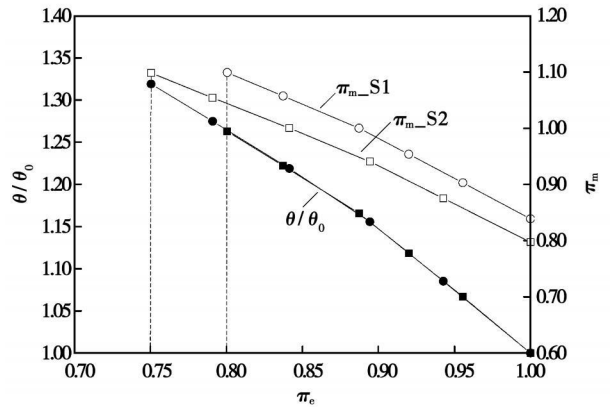


图 6 多联产系统中电力、甲醇的负荷匹配

前文已谈到在设计点未转化气体的属性影响燃气轮机燃烧系统的设计, 而串联结构多联产系统变负荷运行时改变合成单元的转化率, 导致未转化气体的成份随负荷变化, 这对燃气轮机燃烧系统等的设计和稳定运行同样不利。图 7 计算了 S1、S2 系统在变负荷运行时, 发电单元燃料气的 H2/CO 值随电负荷的变化。S1 系统发电负荷从 100% 降为 80% 时, 未转化气中的 H2/CO 从 2.57 变为 2.63, 增长幅度为 2%, 对应热值从 10 881 kJ/m^3 降为 10 830 kJ/m^3, 仅降低 0.5%; 相应的 S2 系统发电单元从额定负荷降为最低负荷, 未转化气中的 H2/CO 从 2.58 升为 2.66, 增长幅度为 3%, 对应热值从 10 878 kJ/m^3 降为 10 811 kJ/

$\text{m}^3$ , 降幅为 0.6%。此外, 随着负荷的降低,  $\text{H}_2/\text{CO}$  的变化速率有降低的趋势, S1、S2 在相同电负荷时  $\text{H}_2/\text{CO}$  的差异随电负荷的降低呈增大的趋势。其原因在于, S1、S2 系统设计相同的合成单元额定空速  $V_{r0}$ , S2 系统因为盈余度大, 在相同发电负荷时, 合成单元的操作空速低, 反应工段合成气的单程转化率高, 未反应气中的氢气含量更高, 且随着电负荷的降低, 空速升高的速率比 S1 系统慢。燃气轮机在运行时燃料成份随负荷的变化对燃气轮机运行稳定性等具体影响需要在今后的工作中进一步分析。

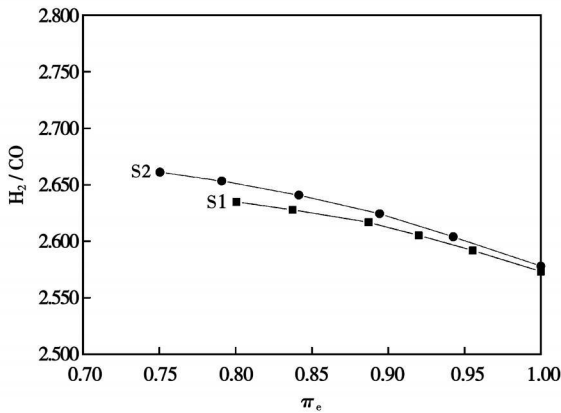


图 7 燃料气中  $\text{H}_2/\text{CO}$  随系统电负荷的变化

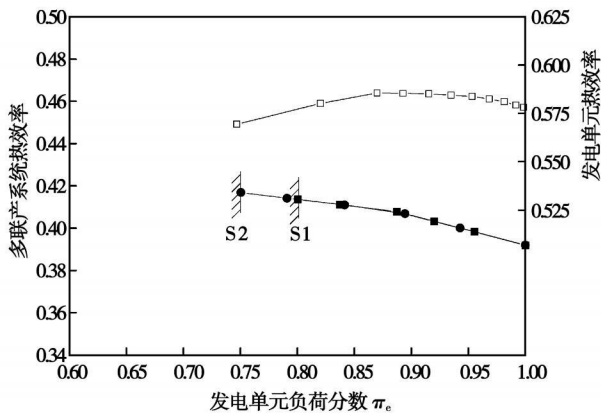


图 8 联产系统热效率随发电负荷的变化

多联产系统具有多种产品输出, 各产品(例如电和甲醇)具有不同的能量品位, 目前还没有一个合适的评价系统效率的指标。这里采用最常规的热效率定义: 联产系统净热效率等于净功率输出加甲醇低热值能量输出之和除以煤低热值能量输入, 以此分析系统热效率随电负荷的变化。图 8 结果显示, 与一般电站不同, 联产系统的热效率在发电负荷降低时反而增大。其原因在于甲醇生产系统的能量转换效率高于目前技术水平的纯 IGCC 系统, 因而联产系统中合成比重增大时, 系统热效率提高。因为在发电单元采用

等 T3 的 IGV 控制, 发电单元效率(定义为功率输出与合成气低热值能量输入的比值)在 IGV 可调的范围内有略微的增长, 之后迅速下降(图中上方曲线), 整个联产系统热效率的增长速率出现相应的变化。

### 3 结 论

(1) 串联结构多联产系统通过控制合成单元的合成气转化率实现对发电单元负荷的调节, 操作参数是合成单元的循环比。影响系统调节电负荷能力的主导参数是系统的设计动化比  $\lambda_0$  和合成单元容量盈余度  $\rho$ 。基于这两个参数, 以四象限图的形式展示了系统设计参数与系统产品输出和变负荷能力的关系, 从而为设计满足要求的系统提供数据参考。

(2) 串联结构多联产系统燃气轮机的燃料气中氢气含量较高(有变换情况), 且设计动化比越低, 其  $\text{H}_2/\text{CO}$  越高。与并联系统在变负荷时燃料气成份不改变不同, 串联系统燃料气的成份随负荷变化。所分析的两个系统在电负荷从额定负荷分别降为 80% 和 75% 时, 燃料气的  $\text{H}_2/\text{CO}$  增长幅度分别为 2% 和 3%, 但热值变化幅度很小。

(3) 对串联结构多联产系统来说, 从适应电力负荷变化的角度考虑, “大甲醇、小发电”的形式比较合适(并联系统则相对可以设计为更大的动化比)。若是“大发电、小甲醇”则化工单元要有较大的盈余度, 进入发电单元的气体成份变化也比较大, 会引起经济性和燃气轮机工作稳定性的问题。

### 参考文献:

- [1] 冯 静, 倪维斗. 并联型化工动力多联产系统主导因素与变工况特性[J]. 热能动力工程, 2008, 23(5): 485-489.
- [2] U S DEPARTMENT OF ENERGY. Commercial-scale demonstration of the liquid phase methanol (LPMEOH™) process[R]. Washington: Department of Energy, 1999.
- [3] AIR PRODUCTS AND CHEMICALS INC. Commercial-scale demonstration of the liquid phase methanol (IPMEOH™) process[R]. Allentown: Air Products and Chemicals Inc, 2000.
- [4] 陈闽松, 应卫勇, 房鼎业, 等. 机械搅拌反应釜内三相淤浆床甲醇合成宏观反应动力学[J]. 燃料化学学报, 1994, 22(4): 380-385.
- [5] 王德慧. 现代燃气轮机热力循环分析及系统集成研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [6] 麻林巍. 以煤气化为核心的甲醇、电的多联产系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [7] 王云波. 煤基甲醇电多联产系统集成优化和综合评价[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [8] 金红光, 高 林. 煤基化工与动力多联产系统开拓研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(4): 397-400.

(编辑 单丽华)

off-design condition under the mode of “determining power generation on the basis of heating (cooling) demand”, thus revealing the off-design operating performance of the system under various regulating methods. It has been found that a recuperation adjustment can accommodate a relatively wide range of cooling and heating load regulation. Therefore, the micro gas turbine-based cogeneration system is particularly suitable for the occasion when the cooling and heating load undergoes a great change while the electric power load in the system is relatively stable. To keep a comparatively high performance of the system when operating at off-design conditions, in case of an increase of the cooling and heating load, the electric power regulation should be adopted as a first priority, followed by the recuperation regulation as a second choice and supplementary firing regulation as a last resort. When the cooling and heating load decreases, a reverse regulation order should be chosen. The research results can well provide useful reference and guidance for the design and operation of micro gas turbine-based CCHP cogeneration systems. **Key words:** micro gas turbine, cooling, heating and power cogeneration system, off-design performance

循环流化床旋直复合流化下的两相流动试验研究 = **Experimental Study of Two-phase Flows in a Circulating Fluidized Bed under a Rotating and Straight Compound Fluidization** [刊, 汉] / HAO Xiao-wen, (College of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, China, Post Code: 264209), MA Chun-yuan, ZHANG Li-qiang (College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), WANG Chun-bing (ZHONG-guang Nuclear Engineering Design Co. Ltd., Shenzhen, China, Post Code: 518124) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 620 ~ 624

To increase in-tower blending and material concentration represents an approach for raising the flue gas desulfuration efficiency of a circulating fluidized bed. The authors have proposed a rotating and straight compound fluidization mode and measured gas-solid two-phase in-tower flow field by using a PDA (Phase Doppler Anemometer) measurement system. Obtained was a law governing the gas-solid two-phase flows in a desulfuration tower before and after axial rotating blades were installed in a Venturi throat. It has been found that the non-uniform air distribution as characterized by the rotating and straight compound fluidization mode can help increase the tangential speed in the tower, leading to an in-tower strong pulsation, good mixing and resulting in a higher in-tower particulate concentration and an increased inner circulation. In addition, a higher superficial speed can bring about a better comprehensive effectiveness of the compound fluidization. The experimental results can provide an underlying basis for the structural design and optimization of new technologies for flue gas desulfuration. **Key words:** circulating fluidized bed, compound fluidization, impulsive speed, inner cycle

串联型化工动力多联产系统主导因素与变工况特性 = **Leading Factors and Off-design Operating Characteristics of a Tandem Type Chemical-industry Power Polygeneration System** [刊, 汉] / FENG Jing, NI Wei-dou, LI Zheng (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 625 ~ 629

A polygeneration system having electric power as one of its main products, will, as a result, unavoidably face load variation problems during its operation. From the viewpoint of load variations to design a polygeneration system capable of meeting the requirement of an electric grid, the authors have through a detailed simulation analysis, come to emphasize two leading factors influencing the load variation capacity of a tandem type polygeneration system, namely, designed power-chemical production ratio and synthetic unit capacity surplus degree. In the form of a four-quadrant chart, shown was a relationship between the system design parameters and system product output on the one hand and the load variation capacity on the other. In addition, the characteristics of the system in question during a load variation were further analyzed, especially concerning the case when the fuel gas  $H_2/CO$  of the gas turbine increases with a decrease of the electric power load. **Key words:** polygeneration system, load variation, methanol synthesis, four-quadrant chart, leading factor

气液两相流垂直冲刷错列管束漩涡脱落特性的实验研究 = **Experimental Study of Vortex Shedding Characteristics of a Gas-liquid Two-phase Flow Vertically Sweeping Across a Staggered Tube Bundle** [刊, 汉] / ZHOU Yun-