

# Analysis of the Alstom Gasifier Control Benchmark Problem Based on Plantwide Control

Hao Fei<sup>1</sup>, Liu Jizhen<sup>2</sup>, Gu Quan<sup>1</sup>, Chen Genjun<sup>1</sup>

1. Nanjing Nari-relays Electric co.,Ltd, Nanjing, China, 211100;

2. North China Electric Power University, Beijing, China, 102206

Email: haofei\_hy@163.com

**Abstract:** The gasifier control benchmark problem is an issue to control the multi-variables, strong coupling and nonlinear system model. A nonlinear degree analysis using the gap metric method is done for the model firstly. The paper adopts a modified and practical loop variables pairing rules combined with the RGA method in the decentralized control to determine the relationship between the manipulated variables and the controlled variables, which takes into account the dynamic behavior for the system. Finally the system control structure is proposed, according to the analysis results.

**Key words:** Plantwide Control, Nonlinear Degree, Gap metric, Decentralized Control, Relative Gain Array

## 基于厂级控制的 Alstom 气化炉控制基准问题分析

郝飞<sup>1</sup>, 刘吉臻<sup>2</sup>, 顾全<sup>1</sup>, 陈根军<sup>1</sup>

1. 南瑞继保电气有限公司, 南京, 中国, 211100;

2. 华北电力大学, 北京, 中国, 102206

Email: haofei\_hy@163.com

**摘要:** 气化炉控制基准问题是对一类多变量、强耦合、非线性的系统模型进行控制的问题。针对这一模型首先采用间隙测度的方法对其进行了的非线性度的分析; 结合 RGA 在分散控制中确定操纵变量和被控变量之间的配对关系的方法, 引入了一种改进的、实用的回路变量配对的准则, 考虑了系统的动态行为。最后根据分析结果, 给出了系统的控制结构的设计方案。

**关键词:** 厂级控制, 非线性度, 间隙测度, 分散控制, 相对增益阵列

### 1. 引言

整体煤气化燃气-蒸汽联合循环(简称 IGCC)是一种重要的洁净煤电技术, 气化炉作为 IGCC 电站最前面的一部分, 是其最重要的核心技术之一, 它的稳定运行直接影响着整个系统运行的好坏, 因此必须对气化炉进行有效的控制。气化炉的控制研究包括两个部分, 一部分是控制结构分析, 一部分是控制器设计, 两则有很大的不同。本文的研究将秉承了厂级控制的设计理念<sup>[1-3]</sup>, 着眼于整个控制系统的控制结构分析和设计, 确定控制系统的操纵变量、被控变量, 以及他们之间的控制关系, 并在此基础上进行系统控制结构的选取和设计。

在 ALSTOM 气化炉控制的基准问题中, 所采用的气化炉是 87MW 空气鼓风机化循环 (Air Blown Gasification Cycle, 简称 ABGC) 整体示范电厂的一部分, 采用喷动流化床气化概念设计。煤粉和吸附剂

(石灰)由增压空气和蒸汽运送, 喷入气化炉里, 空气和蒸汽对固体进行流化, 同时与煤中的碳和挥发份发生化学反应, 产生低热值燃气(约 4.5MJ/Kg, 相当于天然气热值的 12%), 经净化后进入燃气轮机, 余下的灰分, 石灰和未完全反应的碳从气化炉的底部或顶部排出。

气化炉是一个具有非线性和强耦合的多变量系统, 具有 5 个控制输入量和 4 个输出<sup>[4]</sup>, 见上图。控制输入量包括进口空气流量  $W_{air}$ 、进口蒸汽流量  $W_{stm}$ 、煤粉流量  $W_{coal}$ 、吸附剂流量  $W_{ls}$  和排出煤焦量  $W_{char}$ , 输出量为料床质量  $Mass$ 、燃料气的热值  $C_{vgas}$ 、温度  $T_{gas}$  和压力  $P_{gas}$ 。另外下游燃气透平进气阀门的调解, 会对气化炉的压力产生扰动, 带来扰动输入量  $P_{sink}$ 。由于煤粉流量和吸附剂流量可以保持一个固定的比例 10:1, 因此在不考虑模型扰动  $P_{sink}$  的情况下, 可以得到一个  $4 \times 4$  气化炉控制系统模型。

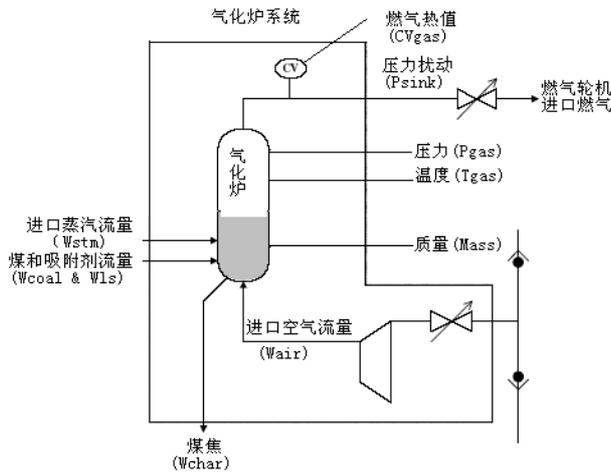


Fig.1 The elements of the gasifier  
图 1 气化炉原理图

## 2. 气化炉控制基准问题的研究

### 2.1 模型标量化处理

模型的标量化处理在多变量的系统设计和分析中是很一个很重要的环节，其目的之一就是要保证在不同负荷条件下以同一标准对系统的响应进行衡量和分析。本文采用了一种简单的方法，标量化矩阵可以表示为：

$$X_{ii} = \max \{ \| [G_{100\%}(0)]_i \|_2, \| [G_{50\%}(0)]_i \|_2, \| [G_{0\%}(0)]_i \|_2 \}$$

其中  $[G_{100\%}(0)]_i$  表示在 100% 负荷下系统静态增益矩阵的第  $i$  行，在对系统不同负荷条件下静态增益的计算和选取后，可以得到系统的标量化矩阵：

$$X = \text{diag}(8.58 \times 10^5, 5.21 \times 10^4, 1.55 \times 10^4, 164.64)$$

标量化后的系统静态增益为： $G^s(0) = X^{-1}G(0)$ ，

下面分别给出系统 100%、50% 负荷下标量化后的系统静态增益。

$$G_{100\%}^s(0) = \begin{bmatrix} 0.0385 & -0.0427 & 0.0444 & -0.0474 \\ -0.1115 & -0.0297 & 0.0770 & -0.0142 \\ 0.0327 & 0.8630 & 0.0477 & 0.5019 \\ 0.0088 & 0.1284 & -0.1101 & -0.2834 \end{bmatrix}$$

$$G_{50\%}^s(0) = \begin{bmatrix} 0.0975 & -0.0381 & 0.0269 & -0.1130 \\ -0.2096 & -0.0500 & 0.1563 & -0.0211 \\ 0.0506 & 0.6923 & 0.0295 & 0.4200 \\ 0.0359 & 0.1804 & -0.1641 & -0.3967 \end{bmatrix}$$

### 2.2 基于间隙测度方法的模型非线性分析

在 Alstom 提供的气化炉模型是一个非线性的模

型，因此首先需要对这个系统模型进行非线性的分析。本文中采用的是一种间隙测度的方法对系统的非线性度进行分析<sup>[5]</sup>，从而确定系统是否适合采用线性的控制策略。本文将主要对系统在 100% 和 50% 的两个负荷之间进行系统的非线性的分析。

#### 2.2.1 间隙测度与非线性度

设  $P$  为  $P \times m$  的有理传递函数矩阵。令  $P$  具有以下正规化右互质因式分解：

$$P = NM^{-1}, \text{ 且 } M^-M + N^-N = 1 \quad (1)$$

式中  $(\bullet)^-$ ，即  $M(s)^- := M(-s)^T$ 。  $P$  的图 (graph) 为 Hardy 空间  $H_2$  的子空间：

$$\delta(P) := \begin{bmatrix} M \\ N \end{bmatrix} H_2 \quad (2)$$

两个线性系统  $P_1$  和  $P_2$  的间隙 (gap) 定义为<sup>[6, 7]</sup>：

$$\delta(P_1, P_2) := \left\| \prod_{G(P_1)} - \prod_{G(P_2)} \right\| \quad (3)$$

其中  $\prod$  为正交投影。间隙可以认为是两个线性系统的“距离”的度量，它不仅适用于稳定的系统，同时也适用于不稳定的系统。介于计算上的考虑，本文定义了如下基于间隙测度的非线性度为

$$\nu_g := \inf_L \delta_d(N, L) = \inf_L \sup_r \delta(LrN, L) \quad (4)$$

式中  $LrN$  为  $N$  在任意操作点  $r$  上的线性化模型， $L$  为所有可行线性模型。实际计算中，通常将  $L$  固定为  $N$  在某一操作点上的线性化模型，式 (4) 反映了非线性系统与某一线性化模型的距离。下面分析一下气化炉系统模型从 50% 变化到 100% 负荷过程中的非线性度变化情况。

#### 2.2.2 气化炉模型的非线性度的分析

以气化炉系统在 100% 负荷时的模型作为研究的标称模型，让其模型从 100% 变化到 50%，计算变化过程中的模型与标称模型之间的间隙测度，得到的曲线如图 2 所示。对于两个模型之间的间隙在一般情况下应满足  $0 \leq \text{gap} \leq 1$ ，在间隙测度的计算中，0 代表两个模型之间几乎是一样的，而值越大表明两个系统的差距越大。从图中可以看出气化炉系统模型存在着较强的非线性，如果在系统负荷在 50%-100% 变化时采用一个线性的控制器将很难得到好的控制效果，因此需要考虑采用多模型的控制，或在不同负荷段进行相应控制器的切换。

## 3. 一种实用回路配对准则的研究及其应用

在多变量系统变量配对的研究中，RGA 的方法以它的简单适用得到了广泛的应用，但是由于 RGA 的方

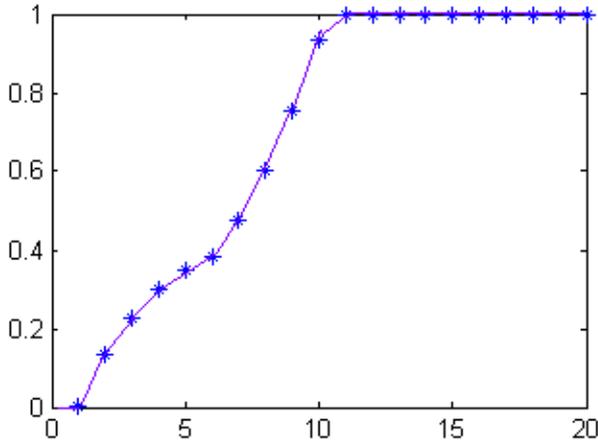


Fig.2 The analysis curve for the system based on the gap metric method  
图2 基于间隙测度方法的系统非线性分析曲线

法是基于模型的静态增益，因此它无法体现系统变化过程中的信息，气化炉模型在 100% 负荷时不同频率下的 RGA 和 RGA 的性能变化曲线是不同的，甚至有些 RGA 元素的性能曲线会出现发散，这必定会导致系统动态控制品质的恶化。因此需要寻找一种能够体现系统模型的动态变化的方法来实现系统操纵变量和被控变量的配对。

### 3.1 有效相对增益阵列 (ERGA)

令  $G(s)$  表示系统的输入输出传递函数矩阵， $G(0)$  是稳态增益矩阵， $G_{ii} \in \mathbb{R}^{m_i \times m_i}; i=1,2..M, \sum_i m_i = n$ ，其中  $G_{ii}$  是对原系统分解后得到的不重叠的方阵子系统， $G_{ij} \in \mathbb{R}^{m_i \times m_j}$  代表  $G$  的  $y_i$  和  $u_j$  之间的块增益， $pair(y_i, u_j)$  表示与  $G_{ij}(s)$  相关的变量配对。一个系统的静态相对增益阵列可以通过公式<sup>[8]</sup>：

$$\Lambda(G) = G(0) \circ G(0)^{-T} \quad (5)$$

由于上式是根据系统的静态增益计算出来的，而无法体现系统的动态行为，因此在本文中对其进行了修改，并引入了回路的带宽频率，它可以反映系统回路的响应速度。在分散的控制系统设计中单独回路的调节，一般是在控制系统的带宽所在的频段附近进行的，而回路的响应速度在频域中是与带宽成比例的，因此可以用带宽来反映来自有限带宽控制的相互作用和快速响应的配对回路。令：

$$g_{ij}(j\omega) = g_{ij}(0)g_{ij}^0(j\omega) \quad (6)$$

其中  $g_{ij}(0)$  和  $g_{ij}^0(j\omega)$  分别是稳态增益和  $g_{ij}(j\omega)$  归一化的传递函数，即： $g_{ij}^0(0) = 1$ 。为了能将稳态增益和响应速度的信息用于回路间相互作用的量度和回路配对，本文中引入了有效增益：

$$e_{ij} = g_{ij}(0) \int_0^{\omega_{B,ij}} |g_{ij}^0(j\omega)| d\omega \quad (7)$$

其中  $\omega_{B,ij}$  为频率响应降到  $0.707g_{ij}(0)$  时的频率。即： $g_{ij}(j\omega_{B,ij}) = g_{ij}(0)/\sqrt{2}$ ，式 (7) 中的  $e_{ij}$  可以认为是  $g_{ij}(j\omega)$  的有效能量输出，相应的有效增益矩阵

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \cdots & e_{nn} \end{bmatrix}$$

可以将式 (7) 简化成： $e_{ij} \approx g_{ij}(0)\omega_{B,ij}$ ，即是图 4 方形区域，得到有效增益矩阵为：

$$E = G(0) \otimes \Omega \quad (8)$$

由于  $e_{ij}$  是当  $(y_i - u_j)$  回路闭合时，其对其他回路作用

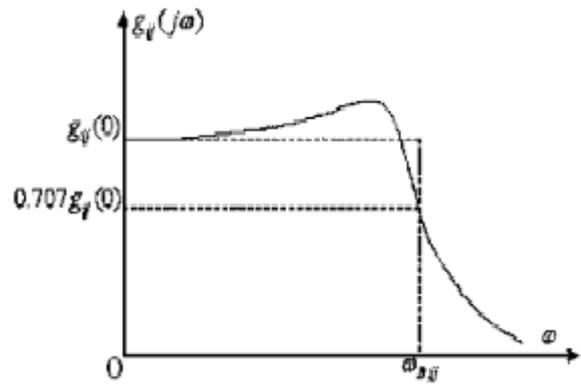


Fig.3 Response curve and effective energy of  $g_{ij}(j\omega)$ .  
图3  $g_{ij}(j\omega)$  有效能量的表示及响应曲线。

能量的一个指示，其值越大表明此回路优势越大。

$$\text{其中: } \Omega = \begin{bmatrix} \omega_{B,11} & \omega_{B,12} & \cdots & \omega_{B,1n} \\ \omega_{B,21} & \omega_{B,22} & \cdots & \omega_{B,2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \omega_{B,n1} & \omega_{B,n2} & \cdots & \omega_{B,nn} \end{bmatrix}$$

因此可以将其与 RGA 结合，将其称之为 ERGA：

$$ERGA = E \otimes E^{-T} \quad (9)$$

因为 ERGA 也是用相对增益计算来的，因此它具有 RGA 的所有特性。由于篇幅本文中不在列举。

### 3.2 闭环稳定性指标

如果系统的所有环路都闭合，如果  $N$  (Niederlinski Index) 的值是负的，那末对于任何可能的控制器的参数，多回路系统将是不稳定的。其中<sup>[9]</sup>：

$$NI = \frac{|G(0)|}{\prod_{i=1}^n g_{ii}(0)} \quad (10)$$

$NI > 0$  提供了一个必要的稳定条件。从式 (10) 中可以看出他的值也是与系统的静态增益矩阵有关, 所以它可以作为 ERGA 的一个补充, 用来判断配对方案的闭环稳定性。

下面给出一种简单实用又可以兼顾到系统的动态特性和闭环稳定的配对准则:

- 1) 优先选择 ERGA 元素的值最接近 1.0 的变量
- 2)  $NI$  的值要大于零
- 3) 所有配对的 ERGA 的值都要大于零
- 4) 舍弃 ERGA 的值过大的元素

ERGA 用来衡量回路间的相互作用, 而  $NI$  作为一个充分的条件来去除那些闭环不稳定的配对。

#### 4. 气化炉控制基准问题的控制结构的确定

系统控制结构的确定最重要的是确定控制系统的操纵变量、被控变量, 以及他们之间的控制关系。在多变量系统变量配对的研究中, RGA 的方法以它的简单适用得到了广泛的应用, 但是由于 RGA 的方法是基于模型的静态增益, 因此它无法体现系统变化过程中信息, 系统的 RGA 值会随着频率的不同而变化, 甚至某些 RGA 元素的性能出现了发散, 这必定会导致系统动态控制品质的恶化。另一方面对于气化炉系统负荷的变化范围很大, 根据 RGA 确定的变量控制关系, 在工况点变化时不一定会适合新的负荷条件。因此在本文中采用 ERGA 控制系统配对准则对 RGA 的分析结果进行补充, 将系统的动态特性考虑到控制结构确定的过程中。

气化炉模型在 100% 负荷下的相对增益矩阵:

	<i>Wchar</i>	<i>Wair</i>	<i>Wcoal</i>	<i>Wstm</i>	
$RGA =$	<i>CVgas</i>	0.4133	-0.0724	0.4187	0.2404
	<i>Mass</i>	0.5781	-0.0302	0.4246	0.0274
	<i>Pgas</i>	0.0150	0.9066	0.0519	0.0265
	<i>Tgas</i>	-0.0064	0.1959	0.1048	0.7056

可以看到, 燃气压力 ( $P_{gas}$ ) 和燃气温度 ( $T_{gas}$ ) 与其它变量之间的耦合程度较小, 可以分别由空气流量 ( $W_{air}$ ) 和蒸汽流量 ( $W_{stm}$ ) 独立控制; 而燃气热值 ( $CV_{gas}$ ) 和床料质量 ( $Mass$ ) 之间存在强耦合, 需由排焦量 ( $W_{char}$ ) 和煤粉流量 ( $W_{coal}$ ) 共同控制。因此, 根据 RGA 配对原则, 最佳变量配对方案为:  $CV_{gas}$ 、 $Mass$  由  $W_{air}$ 、 $W_{coal}$  共同控制;  $P_{gas}$  由  $W_{air}$

控制;  $T_{gas}$  由  $W_{stm}$  控制。对于耦合强的部分可以将其作为一个分散块采用多变量的控制方法进行控制<sup>[10]</sup>, 但是如果将其解耦成单回路, RGA 的方法是不能提供帮助的。

采用 ERGA 的方法对由输出  $CV_{gas}$ 、 $Mass$  和输入  $W_{char}$ 、 $W_{coal}$  构成的子系统的相对增益, 根据系统 Bode 图, 得到该子系统带宽矩阵为:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0.0124 & 0.3629 \\ 0.0003 & 0.0003 \end{bmatrix}$$

结合子系统的静态增益可以得到:

	<i>Wchar</i>	<i>Wcoal</i>	
$ERGA =$	<i>CVgas</i>	0.0307	0.9693
	<i>Mass</i>	0.9693	0.0307

ERGA 显示  $CV_{gas}$  和  $Mass$  之间的耦合并不像稳态时那么强, 所以根据 ERGA 的配对原则:  $CV_{gas}$  由  $W_{coal}$  控制;  $Mass$  由  $W_{char}$  控制。

基于以上分析, Alstom 气化炉控制系统的操纵变量和被控变量可以给出以下的控制关系: 燃气热值  $CV_{gas}$  由煤粉流量  $W_{coal}$  控制; 床料质量  $Mass$  由排焦量  $W_{char}$  控制; 燃气压力  $P_{gas}$  由控制流量  $W_{air}$  控制; 燃气温度  $T_{gas}$  由蒸汽流量  $W_{stm}$  控制。系统在确定变量控制关系后, 可以采用分散控制的方法, 对每个回路进行控制器的单独设计。

#### 5. 结论

文中针对 ALSTOM 公司提出的气化炉控制基准问题的模型从两个方面进行了详细地分析。一方面采用间隙测度的方法对系统非线性度进行分析, 表明系统在 100% 负荷变化到 50% 负荷段之间存在着很强的非线性, 单单通过一个控制器的调节是很难获得优良的控制品质的, 需要针对不同的负荷段设计不同的控制器, 然后再根据负荷的变化进行控制器的无扰切换; 另一方面提出 ERGA 的变量配对方法, 克服了 RGA 方法在确定变量控制关系时无法兼顾系统的动态特性的缺点, 为 RGA 方法提供了一个很好的补充。最后根据 RGA 和 ERGA 的分析结果, 给出了模型操纵变量和被控变量的控制关系, 从而可以确定气化炉控制基准问题的控制结构。

#### References (参考文献)

[1] Sigurd Skogestad, Plantwide control: the search for the self-optimizing control structure [J], Journal of Process Control 2000, 10: 487-507.  
 [2] Rinard, I.H. and J. J. Downs, Plant wide control: A review

- andcritique [C], AIChE Spring Meeting 1992, New Orleans, paper 67f.
- [3] Truls Larsson, Studies on Plantwide control [D]. Department of Chemical Engineering Norwegian University of Science and Technology, 2000.
- [4] R. Dixon, A.W. Pike, and M. S. Donne, The Alstom benchmark challenge on gasifier control [J]. Proc. Instn. Mech. Engrs, Part I, Journal of Systems and Control Engineering, 2000, 214(16): 389-394.
- [5] James, M.R., Smith, M.C., Vinnicombe, G., Gap metrics, representations, and nonlinear robust stability [C]. Proc. 39th IEEE Conf. On Decision and Control. Sydney, 2000: 2936-2941.
- [6] Georgiou, T. T. and Smith, M. C., Optimal robustness in the gap metric [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1990, 35(4): 673-686.
- [7] Zhou. K, Doyle, J. C., Essentials of Robust Control [B]. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1998.
- [8] M. Witcher, T.J. McAvoy, Interacting control systems: steady-state gain information, Ind. Eng. Chem. Fund., 1985, 24: 221-235.
- [9] P. Grosdidier and M. Morari, Interaction measures for systems under decentralized control [J]. Automatica, 1986, 22(3): 309-319.
- [10] V. Manousiouthakis, R. Savage, and Y. Arkun. Synthesis of decentralized process control structures using the concept of block relative gain [J]. AIChE J., 1986, 32 (6): 991-1003.