

Alstom 气化炉控制基准问题的分析研究

郝 飞¹, 刘吉臻², 谭 文²

(1.南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 210006;2.华北电力大学,北京 102206)

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非线性度的分析,并进行了线性化处理;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

中图分类号: TP273;TK323

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2010)06-0007-04

Alstom 公司提出气化炉控制基准问题的模型是一个复杂的过程控制模型,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。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 M_{ass} 、燃料气的热值 C_{vgs} 、温度 T_{gs} 和压力 P_{gs} 。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 $P_{sink}^{[1]}$ 。在 Alstom 气化炉控制的基准问题中,所采用的气化炉是 87 MW 空气鼓风机化循环 (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 4.5 MJ/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。

为了能够获得更好的控制性能指标,需要对系统模型进行设计前的深入分析,了解系统的非线性度,明确变量之间的控制关系^[2-4],为具体控制器的设计打下基础。

本文主要从 2 个方面展开,一方面通过引入间隙测度的方法对系统的非线性度进行分析,另一方面采用了一种改进的变量配对的方法,从静态特性和动态特性两个角度对系统变量的控制关系进行分析,确定系统的控制结构。

1 气化炉控制基准问题的非线性分析

1.1 基于间隙测度方法的模型非线性分析

Alstom 提供的气化炉模型是一个非线性的模型,具有 4 个输出量,5 个输入量和 1 个干扰量(见图 1),因此首先需要对这个系统模型进行非线性的

分析。用于系统非线性分析的方法有很多,近年来非线性的量化问题受到了人们的重视,也出现了几种方法:稳态图方法、泛函无限级数方法、协方差矩阵方法、统计方法以及基于算子范数的量化方法。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^[5],从而确定系统是否适合采用线性的控制策略,以及控制器的选择。在气化炉模型中分别给出了气化炉在 100% 负荷、50% 负荷、0% 负荷的系统模型,对其进行线性化后可以得到用状态空间表示具有 25 个状态 6 输入 4 输出的系统,本文将主要对系统在 100% 和 50% 的 2 个负荷之间进行系统的非线性的分析。

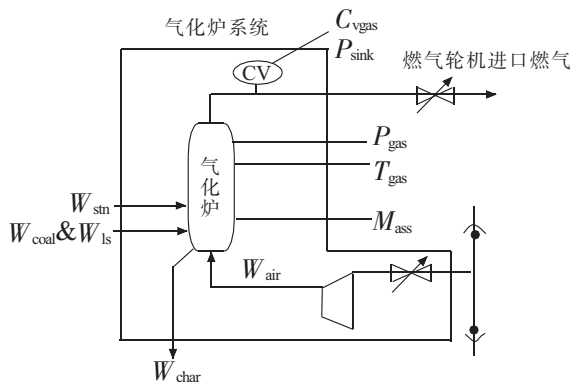


图 1 气化炉原理图

1.1.1 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:

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

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

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

2 个线性系统 P_1 和 P_2 的间隙 (gap) 定义为^[6,7]:

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

其中 Π 为正交投影。间隙可以认为是 2 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:

$$V_g := \inf_L \delta_d(N, L) = \inf_L \sup_r \delta(L_{rN}, L) \quad (4)$$

式中: L_{rN} 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,因此式(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。

1.1.2 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%计算变化后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 2 个模型之间的间隙在一般情况下应满足 $0 \leq gap \leq 1$,在间隙测度的计算中,0 代表 2 个模型之间几乎是一样的,而值越大表明 2 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。

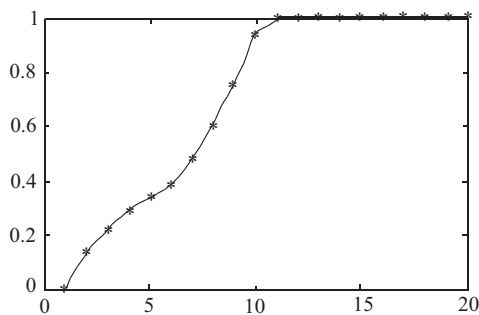


图 2 基于间隙测度方法的系统非线性分析曲线

1.2 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:

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

式中: $[G_{100\%}(0)]_i$ 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:

$$G^s(0) = X^{-1} G(0)$$

由于篇幅在文中只给出了 100%负荷下标量化后的系统的静态增益。

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

2 一种实用回路配对准则的研究及其应用

2.1 有效相对增益阵列(ERGA)

令 $G(s)$ 表示系统输入输出传递函数矩阵, $G(0)$

是稳态增益矩阵, $G_{ii} \in i^{m_i \times n_i}; i=1, 2, \dots, M, \sum_i m_i = n$,

其中 G_{ii} 是对原系统分解后得到的不重叠的方阵子系统, $G_{ij} \in i^{m_i \times n_j}$ 代表 G 的 y_i 和 u_j 之间的块增益, $\text{pair}(y_i, u_j)$ 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^[8]:

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

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,因此在本文中对它进行了修改,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:

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

式中: $g_{ij}(0)$ 和 $g_{ij}^0(\omega)$ 分别是稳态增益和 $g_{ij}(\omega)$ 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:

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

其中 $\omega_{B,ij}$ 为频率响应降到 $0.707 g_{ij}(0)$ 时的频率。即: $g_{ij}(\omega_{B,ij}) = g_{ij}(0) / \sqrt{2}$, 式(7)中的 e_{ij} 可以认为是 $g_{ij}(\omega)$ 的有效能量输出(见图 3),相应的有效增益矩阵可以这样表示:

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

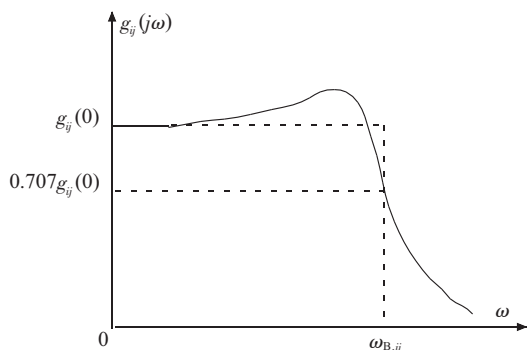


图3 有效能量的表示及响应曲线

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

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

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

由于 e_{ij} 是当 $(y_i - u_j)$ 回路闭合时, 其对其他回路互相作用能量的一个指示, 其值越大表明此回路的优势越大。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。

2.2 闭环稳定性指标

如果系统的所有回路都闭合, 如果 NI 的值是负的, 那末对于任何可能的控制器的参数, 多回路系统将是稳定的。其中:

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

$NI > 0$ 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。

2.3 改进的分散控制系统的配对准则

对于分散控制系统来说, 操纵变量和被控变量之间的控制关系的确定是系统设计的一个相当关键的部分, 它的选择正确与否将关系到整个系统的控制性能。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** 元素的值最接近零的; (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。

3 气化炉控制基准问题的控制结构的确定

气化炉在 100% 负荷时系统可以通过线性化得到一个 4 输入 4 输出的状态空间表示, 通过降阶处理获得系统的最小实现, 其含有 17 个状态。根据前面的定义和公式可以得到其带宽矩阵为:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0.0124 & 0.3386 & 0.2560 & 0.3098 \\ 0.0003 & 0.0004 & 0.0003 & 0.0010 \\ 0.0410 & 0.0512 & 3.7161 & 0.8952 \\ 0.0573 & 0.0029 & 0.0042 & 0.0006 \end{bmatrix}$$

根据式(8,9)可得最终的 **ERGA** 为:

$$ERGA = \begin{bmatrix} 0.0001 & -0.0193 & 0.0043 & 1.0149 \\ 1.0071 & -0.0083 & 0.0008 & 0.0003 \\ -0.0027 & 0.5678 & 0.4543 & -0.0194 \\ -0.0045 & 0.4598 & 0.5406 & 0.0041 \end{bmatrix}$$

在结合 NI 值的情况, 可以得到系统的被控变量与操纵变量之间的控制关系为:

$$\{(y_1, u_4), (y_2, u_1), (y_3 - y_4, u_2 - u_3)\}$$

其中由于 $(y_3 - y_4, u_2 - u_3)$ 的 **ERGA** 的元素并没有呈现出很大的优势, 或者从 RGA 的结论分析它们之间的耦合很大, 无法对其进行完全的分散控制, 因此可以得到以下的系统的控制结构设计方案: $(y_1, u_4), (y_2, u_1)$ 可以采用独立的单回路进行控制和调节, 至于控制器的选择根据系统的实际情况而定; $(y_3 - y_4, u_2 - u_3)$ 由于存在很强的耦合, 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, 也可以先解耦成单回路的, 然后再进行控制器的设计。

4 结束语

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的分析。一方面系统非线性度的分析, 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。另一方面由于在多变量分散控制中 RGA 的变量配对的方法只能体现系统的静态特征, 无法反映动态行为, 而动态 RGA 的设计又依赖于控制器, 文中通过一种改进 **ERGA** 的方法, 进行了系统操作变量和被控变量的控制关系的确定, 最终确定了系统控制结构。

通过这两方面分析, 可以对气化炉控制问题得到以下设计指导意见: 根据间隙测度方法对系统非线性度分析, 在 50% 100% 负荷应该采用至少 2 个线性控制器, 如果采用 2 个控制器, 根据间隙测度的曲线可以将分界点设在 80% 负荷; 在 100% 负荷时

系统可以采用分散控制的方法,但对 (y_3-y_4,u_2-u_3) 要进行进一步的分析,确定采用何种设计方法。

参考文献:

[1] DIXON R,PIKE A W,DONNE M S.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.

[2] SIGURD S. Plantwide Control: the Search for the Self-optimizing Control Structure [J]. Journal of Process Control 2000 (10): 487-507.

[3] RINARD I H,DOWNS J J. Plant Wide Control: a Review Andcritique [C]. AIChE Spring Meeting 1992, New Orleans, paper 67f.

[4] TRULS L. Studies on Plantwide Control [D]. Department of Chemical Engineering Norwegian University of Science and Technology,2000.

[5] JAMES M R,SMITH M C,VINNICOMBE G. Gap Metrics, Representations, and Nonlinear Robust Stability [C]. Proc. 39

th IEEE Conf. On Decision and Control. Sydney, 2000 :2936-2941.

[6] GEORGIU T T,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] WITCHER M,McAVOY T J. Interacting Control Systems: Steady-state Gain Information [J].Ind. Eng. Chem. Fund. , 1985, 24: 221-235.

作者简介:

郝 飞(1980-),男,辽宁丹东人,工程师,研究方向为发电厂智能优化控制;

刘吉臻(1951-),男,山西岚县人,教授,博士生导师,研究方向为大机组智能优化控制,火电厂综合自动化;

谭 文(1969-),男,江西九江市人,教授,研究方向为鲁棒控制,工业过程控制。

Analysis and Research on the Benchmark Problem of Alstom Gasifier Control

HAO Fei¹, LIU Ji-zhen², TAN Wen²

(1.Nanjing Nari-relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China;
2.North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The gasifier control benchmark problem is an issue associated with the control of the multi-variables, strong coupling and nonlinear system model. A nonlinear degree analysis using the gap metric method and linearization operation is carried out for the model firstly. Considering the dynamic behavior of the system, the paper adopts a modified and practical loop variables pairing rule combined with the RGA method in the decentralized control to determine the relationship between the manipulated variables and the controlled variables. Finally the system control structure is proposed in the paper.

Key words: plantwide control; nonlinear degree; gap metric; decentralized control; relative gain array

(上接第 6 页)

置的设计与实现[J].继电器,2007,35(4):49-52.

[3] 莫 峻,谭建成.变电站过程总线采样值传输仿真系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):101-103.

[4] 谌争鸣,陈 辉,陈 卫,等.全数字化继电保护测试系统设计 [J]. 电力自动化设备,2009,29(5):109-112.

[5] 邓洁清,袁宇波.基于 PLC 模块的变电站自动化测试仿真系统的实现及应用[J].电力系统保护与控制,2009,37(24):

157-160.

[6] 石剑华,黄文韬. 基于 GOOSE 报文的简易母线保护的应 用[J].广西电力,2010,23(1):45-48.

作者简介:

陈久林(1970-),男,江苏扬州人,高级工程师,主要从事电力系 统继电保护的试验与研究。

Research on Relay Protection Packet Simulation System

CHEN Jiu-lin, GE Yong-gao, JIANG Yi-quan, FAN Li-xin

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract:Relay protection packet simulation system is basis of function test of relay protection and is also part of transformer substation automation simulation test system. The relay protection packet simulation system completes the system-level test of the transformer substation automation system with transformer substation automation simulation test system based on PLC module. Firstly, this paper describes the structure of relay protection packet simulation system. It explains the software, hardware and background system. Techniques of this system are also included. The successful research and development of the relay protection packet simulation system provides a good test platform for testing the performances of transformer substation automation system and a good tool for analyzing the transformer substation failure.

Key words: transformer substation automation system test; packet simulation system; simulation device