

# 两输入两输出(TITO)系统的基于 频域的闭环辨识方法

赵永国<sup>1</sup>, 贾磊<sup>2</sup>, 蔡文剑<sup>3</sup>

(1. 山东省科学院自动化研究所, 济南 250014; 2. 山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061; 3. 南洋理工大学电气电子工程学院, 新加坡 639798)

**摘要:**提出了一种面向工程应用的两输入两输出(TITO)过程的在线闭环辨识方法。该方法首先通过两个设定值阶跃测试估出频率响应, 然后再通过在频域中多个点处模型匹配辨识出过程的传递函数矩阵。该辨识方法只需要过程的输入输出响应数据, 不需要过程动态特性的先验知识。典型的 TITO 过程的仿真结果证明了该方法的有效性和实用性。

**关键词:** 计算机应用; 两输入两输出系统; 闭环辨识; 频率响应

**中图分类号:** TP301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)05-1278-04

## Method of closed-loop identification based on frequency domain for two-input and two-output (TITO) systems

ZHAO Yong-guo<sup>1</sup>, JIA Lei<sup>2</sup>, CAI Wen-jian<sup>3</sup>

(1. Institute of Automation, Shandong Academy of Science, Jinan 250014, China; 2. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

**Abstract:** An engineering oriented on-line identification technique for a two-input and two-output (TITO) closed-loop control system was presented. By two set-point change tests, the frequency response in the range of interest corresponding to phase lag were estimated, and the parameters of transfer function matrix were identified by matching the model in the frequency domain. The proposed identification method only requires response data of process input and output, and no prior knowledge of the process dynamics is needed. The typical TITO processes were employed to illustrate the effectiveness and practicability of proposed method.

**Key words:** computer application; two-input and two-output (TITO) systems; closed-loop identification; frequency response

大部分大型复杂工业过程事实上都是多输入多输出(MIMO)系统,与单输入单输出(SISO)系统相比,MIMO系统的控制要复杂且困难得多。主要是因为MIMO系统的输入输出之间存在耦

收稿日期: 2008-04-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674062); 山东省自然科学基金项目(Q2005G01).

作者简介: 赵永国(1979-), 男, 博士研究生. 研究方向: DCS, 现场总线, 鲁棒控制, 过程控制.

E-mail: sduzyg@163.com

合作用<sup>[1-3]</sup>, 尽管这十几年来提出了许多针对 MIMO 系统的控制器的设计方法<sup>[4-6]</sup>, 但对于控制工程师们而言, MIMO 系统的控制器的设计和实施仍然是一件很困难的事情, 因为它要求控制工程师们具有系统的辨识知识。

作者提出了一种面向工程应用的两输入两输出(TITO)过程的在线闭环辨识方法。该方法通过两个改变设定值的测试, 可以估计出过程在感兴趣的相位滞后为  $\pi$  处的频率响应, 通过在频域中模型匹配可以辨识出过程的传递函数矩阵。该辨识方法只需要过程的输入输出响应数据, 不需要过程动态特性的任何先验知识。而且, 该法可以推广到 MIMO 系统中去。

### 1 本文方法

一个分散控制作用下的 TITO 系统, 如图 1

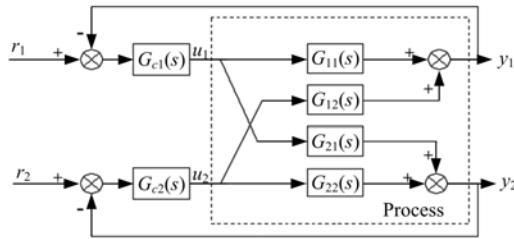


图 1 分散控制作用下的 TITO 系统

Fig. 1 TITO system under decentralized control

所示。图 1 中:  $r_i$ 、 $G_{ci}(s)$ 、 $G_{ij}(s)$ 、 $u_i$ 、 $y_i$  ( $i, j = 1, 2$ ) 分别为设定值、控制器和过程传递函数、控制输入和过程输出。根据图 1 有

$$\begin{cases} y_1 = G_{11} u_1 + G_{12} u_2 \\ y_2 = G_{21} u_1 + G_{22} u_2 \end{cases} \quad (1)$$

假设过程初始时已进入稳态, 初始设定值、控制输入和过程输出变量分别为  $r_1^0$ 、 $r_2^0$ 、 $u_1^0$ 、 $u_2^0$ 、 $y_1^0$  和  $y_2^0$ , 其中的分散 PID 控制器  $G_{ci}(s)$ ,  $i = 1, 2$ , 只是用来保证闭环系统的稳定性的, 整个测试过程在闭环控制下进行, 用两个顺序设定值阶跃变化测试来进行过程辨识。

(1) 将  $r_1$  由  $r_1^0$  做阶跃变化到  $r_1^1$ , 其他设定值保持不变, 记录 2 个回路的控制输入和过程输出信号, 直到  $t = t_x$  时系统进入新的稳态(见图 2), 其中  $t_x$  为所有控制输入信号进入稳态所需的最长时间, 由初始状态(1)到新状态的增量方程为

$$\begin{cases} \Delta y_1^1 = G_{11} \Delta u_1^1 + G_{12} \Delta u_2^1 \\ \Delta y_2^1 = G_{21} \Delta u_1^1 + G_{22} \Delta u_2^1 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Delta u_1^1 = u_1^1 - u_1^0$ ;  $\Delta u_2^1 = u_2^1 - u_2^0$ 。

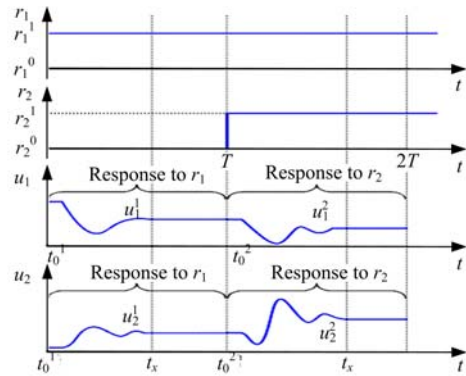


图 2 TITO 系统的阶跃测试

Fig. 2 Step tests for TITO system

(2) 将  $r_2$  由  $r_2^0$  做阶跃变化到  $r_2^1$ , 其他设定值保持不变, 记录 2 个回路的控制输入和过程输出信号, 直到  $t = t_x$  时系统进入另一个稳态(见图 2), 由初始状态(1)到新状态的增量方程为

$$\begin{cases} \Delta y_1^2 = G_{11} \Delta u_1^2 + G_{12} \Delta u_2^2 \\ \Delta y_2^2 = G_{21} \Delta u_1^2 + G_{22} \Delta u_2^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\Delta u_1^2 = u_1^2 - u_1^1$ ;  $\Delta u_2^2 = u_2^2 - u_2^1$ 。

把式(2)、式(3)写成矩阵形式, 有

$$Y = AX \quad (4)$$

式中:

$$Y = \begin{bmatrix} \Delta y_1^1 \\ \Delta y_1^2 \\ \Delta y_2^1 \\ \Delta y_2^2 \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \\ G_{12} \\ G_{22} \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} \Delta u_1^1 & \Delta u_2^1 & 0 & 0 \\ \Delta u_1^2 & \Delta u_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta u_1^1 & \Delta u_2^1 \\ 0 & 0 & \Delta u_1^2 & \Delta u_2^2 \end{bmatrix}$$

如果  $A$  的逆矩阵存在, 那么  $X$  就可由下式得到

$$X = A^{-1}Y \quad (5)$$

文献[7]证明了矩阵  $A$  的逆存在的充要条件是: ①分散控制器存在, 即  $G_{ci}(s) \neq 0, i = 1, 2$ ; ②系统 BIBO 稳定。

把式(2)、(3)、(4)代入式(5), 得到

$$\begin{cases} G_{11}(s) = \frac{\Delta y_1^1 \Delta u_2^2 - \Delta y_1^2 \Delta u_2^1}{\Delta u_1^1 \Delta u_2^2 - \Delta u_1^2 \Delta u_2^1} = \frac{Y_{11}(s)}{U(s)} \\ G_{12}(s) = \frac{\Delta y_1^2 \Delta u_1^1 - \Delta y_1^1 \Delta u_1^2}{\Delta u_1^1 \Delta u_2^2 - \Delta u_1^2 \Delta u_2^1} = \frac{Y_{12}(s)}{U(s)} \\ G_{21}(s) = \frac{\Delta y_2^1 \Delta u_2^2 - \Delta y_2^2 \Delta u_2^1}{\Delta u_1^1 \Delta u_2^2 - \Delta u_1^2 \Delta u_2^1} = \frac{Y_{21}(s)}{U(s)} \\ G_{22}(s) = \frac{\Delta y_2^2 \Delta u_1^1 - \Delta y_2^1 \Delta u_1^2}{\Delta u_1^1 \Delta u_2^2 - \Delta u_1^2 \Delta u_2^1} = \frac{Y_{22}(s)}{U(s)} \end{cases} \quad (6)$$

就参数辨识而言,耦合的闭环 TITO 系统被分解成 4 个独立的单回路系统,如图 3 所示。同一个输入信号作用到 4 个传递函数上。对于任意的一个单回路传递函数所关心的频率范围通常从 0 到截止频率  $\omega_c$  (它对应相位滞后  $\pi$ ),对于控制系统分析与设计来说,计算这一段频率范围的频率响应已经足够了。而截止频率  $\omega_c$  可通过迭代搜寻算法由下式迭代得到

$$\omega_{m+1} = \omega_m - (\varphi^* + \varphi_m) \frac{\omega_m - \omega_{m-1}}{\varphi_m - \varphi_{m-1}} \quad (7)$$

式中:  $\varphi^* = \pi$ , 为期望的相位滞后;

$$\varphi_m = \arg [G(j\omega_m)] \quad (8)$$

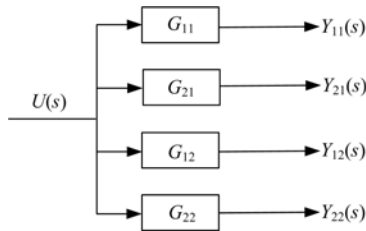


图 3 系统分解

Fig. 3 Decentralized system

由于式(7)在解附近具有二次收敛速度,所以只要迭代几步就可以收敛到期望的截止频率。为了在所研究的整个频率范围内得到更精确的估计,在  $(0, \omega_c)$  中计算  $M$  个频率点上的频率响应,如图 4 所示,于是期望的相位滞后  $\pi$  被分成  $M$  段,每段的间隔为  $\pi / (M - 1)$ 。

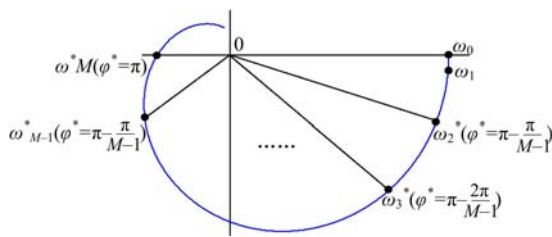


图 4 重要频率范围内期望频率点上的频率响应

Fig. 4 Desired frequencies in important frequency range

由于每一个传递函数的截止频率  $\omega_c$  都不相同,所以确定每一个传递函数  $G_{ij}(s)$ ,  $i, j = 1, 2$ , 在  $(0, \omega_c)$  内的频率响应都需要大量的计算。为此,作者提出一种改进的迭代搜索算法,可以减轻计算负担,该算法的步骤如下:

(1) 确定在  $(0, \omega_c)$  内需要辨识的频率响应的初始个数  $M$ , 将期望的相位滞后  $\pi$  分成  $M$  段,每段间隔位  $\pi / (M - 1)$ 。

(2) 将初始值  $\omega_0$  和  $\varphi_0$  设为零,取  $\omega_1$  为一个比期望频率  $\omega_c^*$  小很多的值,假设取  $\omega_1 = 10^{-3}$ 。令传递函数的初始个数  $n=4$ 。

(3) 当  $m = 2, 3, \dots, M - 1$  时,分别由方程(6)和(8)计算  $G(j\omega_{m+1})$  和  $\varphi_{m+1}$ ;  $\omega_{m+1}$  由下式得到

$$\omega_{m+1} = \omega_m - \left( \frac{n\pi}{M-1} + \varphi_m \right) \frac{\omega_m - \omega_{m-1}}{\varphi_m - \varphi_{m-1}} \quad (9)$$

(4) 对于任意  $G_{ij}$ ,  $i, j = 1, 2$ , 如果  $|\pi + \varphi_m| < \alpha$  (其中  $\alpha$  取一个非常小的值,假设取  $\alpha = \pi/20$ ), 则停止  $G_{ij}$  的迭代,并且  $n = n - \text{number}(G_{ij})$ , 如果  $n = 0$ , 则停止; 否则转到(5)。

(5) 令  $\varphi_0 = \min(\varphi_{m-1})$ , 根据  $M = \text{int} \left( \frac{M - |\varphi_0|}{\pi} \right)$  计算剩下的传递函数的迭代数。令  $\omega_0 = \omega_{m-1}$ ,  $\omega_1 = \omega_m$ , 然后转到(3)。

由于具有较高截止频率的传递函数可以利用较低截止频率的传递函数的结果,本文算法利用这一特点大大减少了计算量,便于在工程中应用。

## 2 传递函数模型辨识

从过程频率响应  $G_{ij}(j\omega_m)$ ,  $i, j = 1, 2, m = 1, 2, \dots, M_{ij}$ , 通过使得频率响应与已定义的模型进行匹配,可获得所需的传递函数矩阵。由于一阶加纯滞后(FOPDT)模型能够近似表示单调、振荡和非最小相位过程,适用于大多数工业过程,所以传递函数采用了 FOPDT 模型

$$G_{ij}(s) = \frac{b_{ij0}}{a_{ij1}s + 1} e^{-L_{ij}s} \quad (10)$$

它的参数通过在多个点  $\omega_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M_{ij}$ ) 拟合  $G_{ij}(j\omega)$  和  $G_{ij}(j\omega)$  的值得到,即

$$G_{ij}(j\omega_m) = \frac{b_{ij0}}{j\omega_m a_{ij1} + 1} e^{-j\omega_m L_{ij}} \quad (11)$$

$$i, j = 1, 2; m = 1, 2, \dots, M_{ij}$$

式(10)中的参数  $a_{ij1}, b_{ij0}$  和  $L_{ij}$  由式(11)的幅值和相角条件决定。

在频率  $\omega_m$  下,式(11)中的幅值和相角条件如下:

$$-\omega_m^2 |G_{ij}(j\omega_m)|^2 a_{ij1}^2 + b_{ij0}^2 = |G_{ij}(j\omega_m)|^2 \quad (12)$$

$$-\arg [G_{ij}(j\omega_m)] - \tan^{-1}(a_{ij1} \omega_m) = \omega_m L_{ij} \quad (13)$$

式中:  $m = 1, 2, \dots, M_{ij}$ , 幅值条件(12)可写成矩阵形式

$$\Psi_{ij} \Theta_{ij} = \Gamma_{ij} \quad (14)$$

式中:

$$\Psi_{ij} = \begin{bmatrix} -\omega_1^2 |G_{ij}(j\omega_1)|^2 & 1 \\ -\omega_2^2 |G_{ij}(j\omega_2)|^2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\omega_M^2 |G_{ij}(j\omega_{M_{ij}})|^2 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\Gamma_{ij} = \begin{bmatrix} |G_{ij}(j\omega_1)|^2 \\ |G_{ij}(j\omega_2)|^2 \\ \vdots \\ |G_{ij}(j\omega_{M_{ij}})|^2 \end{bmatrix}; \theta_{ij} = \begin{bmatrix} \theta_{ij1} \\ \theta_{ij2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{ij1}^2 \\ b_{ij0}^2 \end{bmatrix}$$

### 3 仿真验证

考虑著名 Wood and Berry 的二元分裂蒸馏塔设备

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{1+16.7s} & \frac{-18.9e^{-3s}}{1+21s} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{1+10.9s} & \frac{-19.4e^{-3s}}{1+14.4s} \end{bmatrix}$$

这是一个典型的具有强耦合和显著延迟的 TITO 过程。根据提出的测试方法,并选择  $K_{P1} = 0.5170, K_{I1} = 0.0698, K_{D1} = 0.48$  和  $K_{P2} = -0.1057, K_{I2} = -0.015, K_{D2} = 0.03$ 。

表 1 为在 10% 和 20% 噪信比下的辨识模型,图 5 为估计结果的 Nyquist 曲线(实线表示实际过程;+表示 10% 噪信比下估计得到的频率响应;\*表示 20% 噪信比下估计得到的频率响应)。从 Nyquist 曲线可以看出,该辨识方法的效果还是很有有效的。

表 1 不同噪声水平下的辨识结果

噪声水平	$\hat{G}(s)$	E/%
10%	$G_{11}(s) = \frac{12.4132e^{-1.2214s}}{16.4876s+1}$	4.2681
	$G_{12}(s) = \frac{-18.3213e^{-2.8524s}}{20.3564s+1}$	2.1274
	$G_{21}(s) = \frac{5.9123e^{-7.1670s}}{11.0023s+1}$	2.6328
	$G_{22}(s) = \frac{-19.1867e^{-2.7986s}}{14.1062s+1}$	2.4627
20%	$G_{11}(s) = \frac{11.9136e^{-1.3206s}}{16.1042s+1}$	9.3254
	$G_{12}(s) = \frac{-18.0251e^{-2.7125s}}{19.3124s+1}$	8.2547
	$G_{21}(s) = \frac{6.3014e^{-7.3024s}}{10.3987s+1}$	6.4258
	$G_{22}(s) = \frac{-19.1203e^{-2.3024s}}{13.5138s+1}$	7.3572

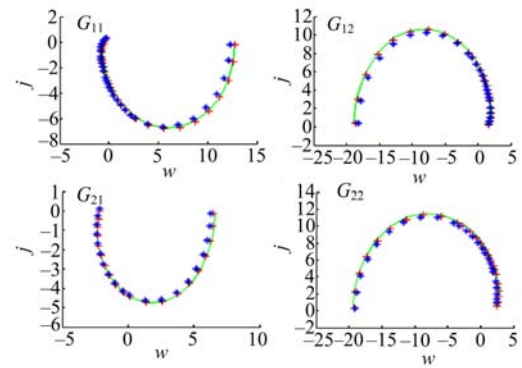


图 5 实际过程与估计的频率响应

Fig. 5 Nyquist plots of real process and estimated

### 5 结束语

提出了一种面向工程应用的两输入两输出过程的在线闭环辨识方法。该方法不需要过程的任何先验知识,仅仅直接通过两个阶跃测试就可以得到 TITO 系统的传递函数模型。该方法简单,便于在工程中实施。典型例子的仿真结果证明了该法的有效性和实用性。

#### 参考文献:

[ 1 ] Lee T K, Shen J, Chiu M S. Independent design of robust partially decentralized controllers[J]. J Proc Cont, 2001, 11: 419-428.

[ 2 ] Chen D, Seborg D E. Design of decentralized PI control systems based on Nyquist stability analysis[J]. J Proc Cont, 2003, 13: 27-39.

[ 3 ] Pomerleau D, Pomerleau A. Guide lines for the tuning and evaluation of decentralized and decoupling controllers for processes with recirculation[J]. ISA Trans, 2001, 40: 341-351.

[ 4 ] Melo D L, Friedly J C. On-line closed loop identification of multivariable systems[J]. Ind Eng Chem Res, 1992,31: 274-281.

[ 5 ] Wang Q G, Guo X, Zhang Y. Direct identification of continuous time delay systems from step responses[J]. Journal of Process Control, 2001, 11: 531-542.

[ 6 ] Wang Y G, Cai W J. Advanced proportional-integral-derivative tuning for integrating and unstable processes with gain and phase margin specifications[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2002, 41(6): 2910-2914.

[ 7 ] Song S H, Cai W J, Wang Y G. Auto-tuning of cascade control systems[J]. ISA Transaction, 2003, 42, (1):63-72.