

文章编号: 1001-0920(2002)04-0411-04

一种基于改进双通道继电测试的 闭环辨识方法研究

王学雷, 邵惠鹤

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘要: 基于双通道继电反馈测试及其改进方案, 提出一种提取 SISO 系统频域信息的闭环辨识测试方法。该方法具有许多有意义的特性, 能在很大程度上克服现有辨识测试方法的问题与不足。在充分获取系统频域信息的基础上, 引入频域辨识算法得到系统的低阶传递函数模型。对两个典型过程的仿真取得了良好的效果, 表明了所提出方法的有效性。

关键词: 继电反馈; 双通道继电特性; 频域辨识; 传递函数模型

中图分类号: TP 17

文献标识码: A

Closed-loop identification method based on improved two-channel relay feedback

WANG Xue-Lei, SHAO Hui-he

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the two-channel relay feedback and its improved version, a novel closed-loop identification test method TRFT to efficiently extract multi-point frequency characteristics of SISO systems is presented. This method can overcome some serious shortcomings with other existing test methods. Furthermore, on the basis of obtained multi-point frequency characteristics through TRFT, a frequency-domain identification algorithm is used to estimate the transfer function model. The simulations on two typical processes show excellent results and verify the validity of the identification method.

Key words: relay feedback; two-channel relay; frequency domain identification; transfer function model

1 引言

许多控制算法都是基于模型的算法, 如预测控制^[1], Smith 预估控制^[2]等。模型的获取及其准确程度的高低决定了算法的可行性和所能达到的性能。因此, 建模是控制领域中一个非常重要的方面。作为经典问题, 建模或辨识已取得了大量的研究成果, 但

是这些方法的工业应用却非常有限, 往往面临着各种各样的困难。这主要是由于以下原因:

- 1) 绝大部分方法是开环辨识方法, 异常扰动不能得到有效的抑制;
- 2) 辨识需要一定的先验知识;
- 3) 无法很好地权衡辨识输入信号的强度与对过程的影响之间的关系;

收稿日期: 2000-12-26; 修回日期: 2001-04-30

作者简介: 王学雷(1973—), 男(回族), 辽宁抚顺人, 博士生, 从事系统辨识、过程先进控制等研究; 邵惠鹤(1936—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 从事工业系统建模、过程先进控制等研究。

4) 精确辨识一般需要独立的信号发生设备^[3]。

为此, 寻求更有效的建模方法, 克服现存的各种困难具有普遍意义。本文提出一种改进的双通道继电测试方法。该方法能获取系统指定相位的频域特性, 测试过程不需要外部信号发生装置, 对系统的影响能控制在过程所允许的范围内。更重要的是, 测试过程中系统处于闭环状态, 扰动的影响被控制在最小的程度。进而基于改进双通道继电测试方法充分获取系统的频域信息, 引入文献[4]提出的辨识算法得到系统的低阶传递函数模型。

2 双通道继电反馈基本原理

文献[5]提出一种双通道继电反馈方案。其结构如图1所示。

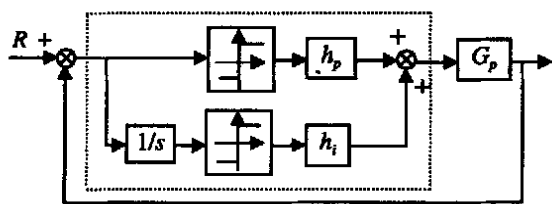


图1 双通道继电反馈结构

双通道继电环节示于图1虚框内, 它由两个标准继电特性^[6], 两个增益 h_p, h_i 和一个积分作用构成。积分通道采用的是标准继电特性, 该通道的输出同另一通道的输出相比, 唯一的不同只是由积分环节所引起的 90° 相位滞后。其描述函数为

$$N(a) = \frac{4h_p}{\pi a} - \frac{4h_i}{\pi a} \quad (1)$$

其中 a 是继电环节正弦输入信号的幅值。由式(1)可得双通道继电环节的负倒数特性

$$-\frac{1}{N(a)} = \frac{\pi a}{4} \frac{h_p^2 + h_i^2}{h_p^2 - h_i^2} - \pi + \Phi \quad (2)$$

其中 $\Phi = \arctg(h_i/h_p)$ 。由式(2)可知, 在 Nyquist 图上, 它是一条始于原点位于第3象限的射线。带有继电特性的单位反馈回路的闭环特征方程为

$$1 + N(a)G(s) = 0 \quad (3)$$

于是 $G(s) = -1/N(a)$ 。取 $s = j\omega$, 则有 $G(j\omega) = -1/N(a)$, 即 Nyquist 图上两条曲线相交, 系统进入振荡状态。由于发生振荡的位置即发生振荡时 $G(j\omega)$ 的相位滞后 Φ , 可由继电特性的放大系数决定, 因此可在实验之前, 通过明确地设定合适的数值来测取第3象限内 $G(j\omega)$ 曲线任意指定相位的频域信息 $G(j\omega)$ 。

3 改进的双通道继电反馈

标准的双通道继电反馈虽然可以测取多点频率特性, 但却不能测取第2和第4象限系统的频率特性。对于工业过程中各种具有复杂动态特性的对象, 这是不充分的。为了弥补其不足, 现提出如下改进双通道继电反馈方案:

在式(3)中, 将 $G(s)$ 附加一个补偿环节 $Q(s)$, 形成广义对象 $G(s) = Q(s)G(s)$ 。对该广义对象实施双通道继电反馈, 得到 $G(j\omega) = G(j\omega)Q(j\omega) = -1/N(a)$ 。令 $Q(j\omega) = A(j\omega) \alpha(j\omega)$, 可见加入补偿环节后, 发生振荡时广义对象的频率特性相当于把原对象的频率特性顺时针移动角度 $\alpha(j\omega)$, 并放大 $A(j\omega)$ 倍。联系前述分析, 对于系统的第2和第4象限频率特性, 只要选择合适的 $\alpha(j\omega)$ 使其移到第3象限即可。特别地, 可以选取积分特性 $Q(s) = 1/s$ 和微分特性 $Q(s) = s$, 它们分别相当于顺时针移动 90° 和逆时针移动 90° ; 这时原系统第2、第3和第4象限的全部频率特性可测, 且有如下关系:

第2象限

$$\begin{cases} |G^{(2)}(j\omega)| = \frac{\pi a}{4\omega \sqrt{h_i^2 + h_p^2}} \\ G^{(2)}(j\omega) = -3\pi/2 + \Phi \end{cases} \quad (4)$$

第3象限

$$\begin{cases} |G^{(3)}(j\omega)| = \frac{\pi a}{4 \sqrt{h_i^2 + h_p^2}} \\ G^{(3)}(j\omega) = -\pi + \Phi \end{cases} \quad (5)$$

第4象限

$$\begin{cases} |G^{(4)}(j\omega)| = \frac{\pi a \omega}{4 \sqrt{h_i^2 + h_p^2}} \\ G^{(4)}(j\omega) = -\pi/2 + \Phi \end{cases} \quad (6)$$

4 基于改进双通道继电反馈的辨识测试方法

双通道继电反馈实际上是一种频率特性测试方法, 可获取过程在指定相位的频率特性 $G(j\omega)$ 。与其它辨识测试方法相比, 双通道继电测试方法具有如下特点:

1) 它是一种闭环测试方法: 在实施继电反馈实验的过程中, 系统处于闭环状态, 是一种受控状态^[7];

2) 测试过程不需要外加信号发生设备: 系统所产生的振荡行为完全是非线性系统的内在特征, 所

要记录和存储的数据仅仅是过程的输出数据;

3) 不需要繁琐而困难的信号设计过程: 仅需指定测试点的相位, 通过相位保证测试的充分性和有效性;

4) 需要很少的先验知识: 在进行双通道继电测试前, 需要了解的一是过程输出的最大允许范围, 用来调整继电环节的增益以限制输出在此范围内; 二是过程的结构特征, 如自衡与非自衡等;

5) 激励作用的强度和对过程的影响可以方便地调节: 这是通过调整继电环节的增益使过程输出在允许的范围而实现的。

综上, 双通道继电测试能克服现有开环测试方法在工业应用中的各种局限性, 是一种获取系统动力学特性的有效手段。

5 基于改进双通道继电测试的频域辨识算法

文献[4] 提出一种快速模型降阶算法, 所选取的低阶模型结构是一阶加纯滞后或者二阶加纯滞后。考虑到这种模型结构在工业中具有广泛的代表性^[8], 将这种模型降阶算法用于系统辨识是可行的。

选取过程模型结构

$$G(s) = \frac{1}{as^2 + bs + c} e^{-Ls}$$

或

$$G(s) = \frac{1}{as + b} e^{-Ls}$$

以一阶加纯滞后模型为例, 定义目标函数

$$J = \sum_{i=1}^M \left| \hat{G}^{-1}(j\omega_i) - G^{-1}(j\omega_i) \right|^2 = \sum_{i=1}^M \left| H_i^T \theta - z_i \right|^2 \quad (7)$$

其中, $H_i^T = [j\omega_i, 1]$, $\theta = [a, b]^T$, $z_i = G^{-1}(j\omega_i) e^{-j\omega_i L}$ 。

式(7)并不是一个最小二乘问题, 因为 z_i 中含有未知的滞后 L 。现假设滞后 L 的当前值为 L_k , 并有 $L = L_k + \Delta L_k$ 。由 $e^{-j\omega L} = e^{-j\omega L_k - j\omega \Delta L_k} = e^{-j\omega L_k} (1 -$

$j\omega \Delta L_k)$, 式(7) 可以进一步写作

$$J = \sum_{i=1}^M \left| H_i^T \theta + j\omega_i G^{-1}(j\omega_i) \Delta L_k - G^{-1}(j\omega_i) e^{-j\omega_i L_k} \right|^2$$

令 $A_i^T = [H_i^T, j\omega_i G^{-1}(j\omega_i)]$, $\Theta = [\theta^T, \Delta L_k]^T$, $x_i = G^{-1}(j\omega_i) e^{-j\omega_i L_k}$, 则有

$$J = \sum_{i=1}^M \left| A_i^T \Theta - x_i \right|^2 \quad (8)$$

这是一个标准的最小二乘问题。令

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \text{Re}[A_1^T] \\ \vdots \\ \text{Re}[A_M^T] \\ \text{Im}[A_1^T] \\ \vdots \\ \text{Im}[A_M^T] \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} \text{Re}[x_1] \\ \vdots \\ \text{Re}[x_M] \\ \text{Im}[x_1] \\ \vdots \\ \text{Im}[x_M] \end{bmatrix}$$

则有 $\Theta^{(k)} = [\bar{A}^T \bar{A}]^{-1} \bar{A}^T X$ (9)

其中上标 k 表示进行到第 k 步。未知变量的初始值全取为 0, 结束条件为

$$E = \max_{i \in \{1, 2, \dots, M\}} \left| \frac{\hat{G}(j\omega_i) - G(j\omega_i)}{G(j\omega_i)} \right| < \epsilon \quad (10)$$

以上推导是针对一阶加纯滞后模型。对于二阶加纯滞后模型, 可得同样的求解算法。

6 仿 真

例 1 选取 $G_1(s) = \frac{18.9}{1 + 21s} e^{-3s}$, 对于控制系统设计所关心的频率都要小于临界频率 $\omega_c^{[9]}$, 所以只要获取过程第 3 和第 4 象限的频率特性便可。这里采用双通道继电测试获取该范围内 4 点频率特性, 实验参数和测试结果见表 1。

选取一阶加纯滞后模型结构, 采用前述辨识算法, 取 $\epsilon = 0.05$, 经 3 次迭代 $E = 0.0475$, 得到模型参数为

$$a = 1.1139, \quad b = 0.0536, \quad L = 2.9832$$

辨识过程模型为

表 1 双通道继电测试实验参数及测试结果

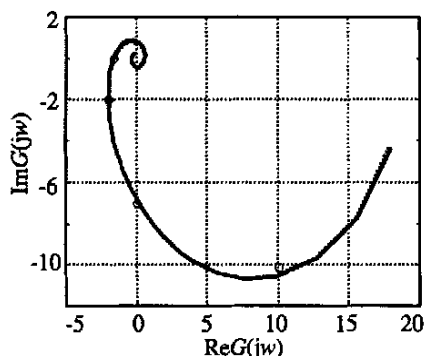
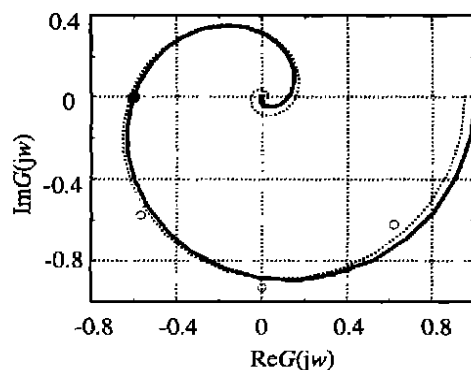
补偿环节	相位滞后	h_i	h_p	w	$\hat{G}(j\omega)$	$G(j\omega)$	相位误差 rad	幅值误差 %
$\frac{1}{s}$	$-\pi/4$	1	1	0.0383	10.0922 - 10.0922i	10.3548 - 10.4825i	0.0061	3.14
	$-\pi/2$	0	1	0.1162	-7.0508i	0.2868 - 7.1586i	0.0400	1.58
1	$-3\pi/4$	1	1	0.3138	-1.9699 - 1.9699i	-2.0159 - 1.9947i	0.0053	1.77
	$-\pi$	0	1	0.5585	-1.6743	-1.6053 + 0.0316i	0.0197	4.28

表2 双通道继电测试实验参数及测试结果

补偿环节	相位滞后	h_i	h_p	w	$\hat{G}(j\omega)$	$G(j\omega)$	相位误差 rad	幅值误差 %
$\frac{1}{s}$	$-\pi/4$	1	1	0.039 3	$0.646 6 - 0.646 6 i$	$0.686 4 - 0.684 9 i$	0.001 0	5.70
	$-\pi/2$	0	1	0.078 7	$-0.926 4 i$	$0.008 7 - 0.884 8 i$	0.009 8	4.70
1	$-3\pi/4$	1	1	0.119 2	$-0.572 6 - 0.572 6 i$	$-0.528 0 - 0.544 5 i$	0.015 4	6.77
	$-\pi$	0	1	0.163 4	$-0.604 7$	$-0.602 0 + 0.010 4 i$	0.017 3	0.43

$$\hat{G}_1(s) = \frac{1}{1.113 9s + 0.053 6} e^{-2.983 2s} = \frac{18.656 7}{20.781 7s + 1} e^{-2.983 2s}$$

$\hat{G}_1(s)$ 和 $G_1(s)$ 的 Nyquist 曲线如图 2 所示, 其中 “*” 表示双通道继电测试得到的点。

图2 $\hat{G}_1(s)$ 和 $G_1(s)$ 的 Nyquist 曲线图3 $\hat{G}_2(s)$ 和 $G_2(s)$ 的 Nyquist 曲线

例2 多容过程 $G_2(s) = \frac{1}{(2s+1)^{10}}$ 。在工业尤其在过程工业中, 这种多容对象是比较普遍的^[3], 如流体输送过程等, 因此对这类对象的处理具有代表性。这里选取二阶加纯滞后模型结构, 通过双通道继电测试获取该对象 4 个点的频域特性, 实验参数及测试结果见表 2。

采用所引入的算法得到模型参数

$$a = 40.189 8, \quad b = 9.959 0$$

$$c = 1.052 6, \quad L = 9.725 8$$

过程的传递函数模型为

$$\hat{G}_2(s) = \frac{1}{40.189 8s^2 + 9.959 0s + 1.052 6} e^{-9.725 8s} = \frac{0.95}{38.181 5s^2 + 9.461 3s + 1} e^{-9.725 8s}$$

$\hat{G}(s)$ 和 $G(s)$ 的 Nyquist 曲线如图 3 所示。

可见, 低阶模型在很大的频率范围内很好地近似了原系统, 这表明模型能很好地表示原系统的动力学特性。

7 结 论

本文提出一种改进双通道继电反馈频率特性测试方法。该方法能在很大程度上克服现有辨识测试方法的问题与不足, 更好地应用于工业实际。在测试得到系统多点频率特性的基础上, 引入一种频域辨识算法来估计系统的传递函数模型。对典型过程对象的仿真取得了良好的效果, 验证了该方法的有效性。

参考文献(References):

- [1] 席庚庆. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [2] Smith O J M. Close control of loops with dead time[J]. *Chem Eng Progress*, 1957, 53: 217-219.
- [3] 王骥程. 化工过程控制工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
- [4] Wang Q G, Zhang Y. A fast algorithm for reduced-order modeling [J]. *ISA Trans*, 1999, 38: 225-230.
- [5] Friman M, Walle K V. Two-channel relay for auto-tuning[J]. *Ind & Eng Chem Res*, 1997, 36: 2662-2671.
- [6] 吴麒. 自动控制原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [7] Astrom K J. 自适应控制[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [8] Seborg D E, Edgar T F, Mellichamp D A. *Process Dynamics and Control*[M]. New York: Wiley, 1990.
- [9] Astrom K J. Assessment of achievable performance of simple feedback loops[J]. *Int J of Adap Contr & Sig Proc*, 1991, 5: 3-19.