

闭环辨识与开环辨识的比较及应用*

祝如松 蒋慰孙

(华东化工学院)

〔提要〕用数字仿真的方法,在同一个单输入单输出线性离散随机系统中,把四种不同实验条件下的闭环辨识与开环辨识进行比较。结果表明,在调节器输出端施加伪随机二位信号的实验条件,适宜于工业生产过程的闭环辨识实验条件。按此实验条件进行闭环辨识可以得到精度与开环辨识相近的过程模型。

也在实验室规模的热交换器上进行了闭环和开环辨识,得到了与数字仿真一致的结果。

一 引言

在实际应用中,常常需要在闭环条件下进行过程辨识。那是因为(1)只允许输出在小范围内变动,尤其需要用反馈来控制漂移之类的低频扰动;(2)被控变量必须跟踪给定值的改变;(3)被辨识的过程是更大的复杂过程的一部分,无法除去反馈。

但在闭环系统中,过程的输入输出信号因通过调节器形成的反馈而变得相关,以致常用的相关方法不能辨识该闭环系统的开环特性。又如分别由过程 $A(q^{-1})y(t) = q^{-k}B(q^{-1})u(t) + c(q^{-1})e(t)$ 和过程 $[A(q^{-1}) + L(q^{-1})G(q^{-1})]y(t) = [q^{-k}B(q^{-1})L(q^{-1})F(q^{-1})]u(t) + C(q^{-1})e(t)$ 与调节器 $F(q^{-1})u(t) = G(q^{-1})y(t)$ 构成的两个闭环系统,尽管过程不同,但因其其在闭环下具有完全相同的输入输出关系而无法辨识其开环特性。由于一些常用的辨识方法在闭环辨识中失效,所以对于能否在闭环条件下进行辨识曾经产生过混乱。T. Söderström^[1,2], I. Gustavsson^[3], L. Ljung^[4]等人都曾就闭环系统的可辨识性进行了研究。至1976年第四次IFAC辨识会议召开,有关闭环辨识的理论问题业已解决。

本文首先用计算机仿真的方法,在同样的单输入单输出系统中,同样的噪声水平下,把四种不同实验条件下的闭环辨识与开环辨识进行比较,从而找出最适宜于工业生产应用

的闭环辨识实验条件。然后在实验室规模的热交换器上进行闭环和开环辨识实验,得到了与数字仿真一致的结果。

二 基本原理

系统可辨识性 $SI(I, \alpha)$ 是指,当测量数据的数目趋向无穷多时,能够得到系统的开环特性。系统可辨识性 SI ,系统强可辨识性 SSI 以及参数可辨识性 PI 的数学定义详见文献[4]。

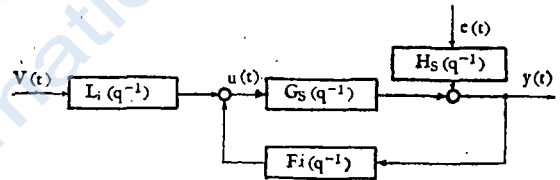


图1

T. Söderström^[1]总结出图1所示系统为 SSI 的必要充分条件是 $\text{rank } R_r(z) = n_y + n_u$

其中矩阵

$$R_r(z) = \begin{bmatrix} I & \dots & I & 0 & \dots & 0 \\ F_1(z) & \dots & F_r(z) & L_1(z) & \dots & L_r(z) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

(2.2)

调节器在 r 个线性反馈规律之间变化。 n_y, n_u 和 n_e 分别为过程输出、过程输入和外部信号的维数。

假定:

$$(1) G_i(0)F_i(0) = 0, \quad (1 \leq i \leq r)$$

* 收稿时间1982年2月4日。

- (2) 闭环系统是渐近稳定的,
- (3) $D_T(S, M)$ 非空集,
- (4) $V(t) = k_i(q^{-1})e(t) + \tilde{v}(t)$,
- (5) $G_s(0)L_i(0)K_i(0) = 0$,
 $G_{M_0}(0)L_i(0)K(0) = 0$
 $(1 \leq i \leq r)$.

可由式(2.2)引出特例:

- (1) 单输入单输出系统, 开环条件下
 $r = 1, n_y = n_u = n_v = 1, F_1 = 0, L_1 = 1$,

$$\therefore \text{rank } R_r(Z) = \text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = n_y + n_u = 2.$$

因此开环系统是SSI的。

- (2) 单输入单输出系统, 不变的反馈规律, 在调节器输出端有一个外部输入信号。本文定义为实验条件1。在此实验条件下

$$r = 1, n_y = n_u = n_v = 1, F_1 \neq 0, L_1 = 1,$$

$$\therefore \text{rank } R_r(Z) = \text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ F_1 & 1 \end{bmatrix} n_y + n_u = 2.$$

∴这种闭环系统也是SSI的。

- (3) 单输入单输出系统, 不变的反馈规律, 在调节器的输入端有一个外部输入信号。本文定义为实验条件2。在此实验条件下

$$r = 1, n_y = n_u = n_v = 1, F_1 \neq 0, L_1 = F_1,$$

$$\text{rank } R_r(Z) = \text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ F_1 & F_1 \end{bmatrix} = n_y + n_u = 2.$$

∴这种闭环系统也是SSI的。

- (4) 单输入单输出系统, 变化的反馈规律, 无外部输入信号。令 r_0 为大于等于 $1 + n_u/n_y$ 的最小整数, 且反馈规律的数目 $r \geq r_0$ 。本文定义为实验条件3。

因为是单输入单输出系统, 所以 $n_u = n_y =$

1, $r_0 = 2$ 。若取 $r = r_0 = 2$, 则一定 $F_1 \neq F_2$ 。

$$\text{rank } R_r(z) = \text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ F_1 & F_2 \end{bmatrix} = n_y + n_u = 2.$$

∴这种闭环系统也是SSI的。

- (5) 单输入单输出系统, 采用不变的反馈规律, 但无外部输入信号。本文定义为实验条件4。在此实验条件下

$$\text{rank } R_r(z) = \begin{bmatrix} 1 \\ F_1 \end{bmatrix} = 1 \neq n_y + n_u.$$

这种闭环系统肯定不是SSI的, 但若调节器的阶数和过程的阶数满足不等式 $\max(n_r - n_b, n_g + k - n_a) - n_p \geq 0$ (2), 则系统仍然是SI的。

在本文中进行计算机仿真的闭环系统分别属于以上五种特例之一, 因此它们或者是SSI的, 或者虽非SSI但仍为SI的。由于根据经验前知识采用了与系统具有相同结构的模型, 因此所有的系统也都是PI的。

三 四种闭环辨识实验条件的仿真比较

1. 动态系统的仿真

仿真的过程、调节器和噪声滤波器见图2和表1 (5)。

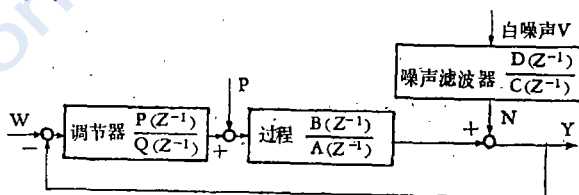


图 2

仿真的过程、调节器和噪声滤波器

表 1

	A	B
过程 $\frac{B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})}$	$\frac{-0.102Z^{-1} + 0.173Z^{-2}}{1 - 1.425Z^{-1} + 0.496Z^{-2}}$	$\frac{0.0186Z^{-1} + 0.0486Z^{-2} + 0.0078Z^{-3}}{1 - 1.7063Z^{-1} + 0.958Z^{-2} - 0.1767Z^{-3}}$
调节器 $\frac{P(Z^{-1})}{Q(Z^{-1})}$	$\frac{3.485 - 5.433Z^{-1} + 2.150Z^{-2}}{1 - Z^{-1}}$	$\frac{4.8182 - 6.375Z^{-1} + 1.6469Z^{-2} + 0.9703Z^{-3}}{1 - Z^{-1}}$
噪声滤波器 $\frac{D(Z^{-1})}{C(Z^{-1})}$	$\frac{1 + 0.500Z^{-1} + 0.250Z^{-2}}{1 - 1.425Z^{-1} + 0.496Z^{-2}}$	$\frac{1 + 0.500Z^{-1} + 0.250Z^{-2}}{1 - 1.7063Z^{-1} + 0.958Z^{-2} - 0.1767Z^{-3}}$
采样时间	2秒	4秒

外部信号P或W采用周期为31位的伪随机二位信号序列(p.r.b.s.)^[6],信号幅值 $p_0 = 0.2$,时钟脉冲宽度 λ 等于采样周期T。

白噪声v是均值为0,方差为1的正态分布数^[7,8]。

参数估计方法采用递推的最小二乘法(LS),辅助变量法(IV)^[9,10]和广义最小二乘法(GLS)^[11]。

模型误差采用参数的相对均方根误差 δ_{θ} 和脉冲响应的相对均方根误差 δ_g ^[13]。

全部计算机仿真辨识都是在华东化工学院719型机上进行的,使用Algol-60语言。

2. 结果与讨论

①闭环实验条件1(调节器输出端施加p.r.b.s.)

表2上实验条件1的数据表明,二阶过程

A所能得到的最小模型误差是 $\delta_{\theta} = 0.0028$, $\delta_g = 0.0193$ (GLS法),比开环的最小模型误差 $\delta_{\theta} = 0.0023$, $\delta_g = 0.0051$ (IV法)稍大一些。三阶过程B所能得到的最小模型误差是 $\delta_{\theta} = 0.0246$, $\delta_g = 0.0440$ (IV法),也比开环IV法的 $\delta_{\theta} = 0.0286$, $\delta_g = 0.0110$ 稍大一些。所以按实验条件1进行闭环辨识,可以得到误差比开环辨识稍大但又十分接近的过程模型。

②闭环实验条件2(调节器输入端施加p.r.b.s.)

由表2可知,若按实验条件2进行闭环辨识,可以得到误差比开环辨识还小的过程模型。但过程输出的方差 V_y 是开环辨识的4—5倍,过程输入的方差 V_u 是开环辨识的15—30倍。这样大的波动显然是控制系统所不能容忍的。所以实验条件2实际上不宜应用。

开环和闭环仿真辨识的模型误差

表2

过程	实验条件	LS		IV		GLS		V_u	V_y	V_N	η
		δ_{θ}	δ_g	δ_{θ}	δ_g	δ_{θ}	δ_g				
A	开环	0.0224	0.2481	0.0023	0.0051	0.0052	0.1041	0.0400	0.0044	0.0016	0.2042
	1	0.0047	0.0518	0.0156	0.1603	0.0028	0.0193	0.0665	0.0058	0.0016	0.1583
	2	0.0025	0.0321	0.0067	0.0775	0.0009	0.0178	0.6072	0.0219	0.0016	0.0524
	2'	0.0079	0.1059	0.0221	0.2122	0.0017	0.0126	0.1541	0.0061	0.0016	0.1040
	4	0.2166	0.6839	0.3045	0.7841	0.1602	0.3964	0.0034	0.0009	0.0016	0.6987
B	开环	0.3791	0.1032	0.0286	0.0112	0.1413	0.0369	0.0400	0.0045	0.0016	0.2028
	1	0.3659	0.2800	0.0246	0.0440	0.2562	0.1605	0.0735	0.0062	0.0016	0.1496
	2	0.0894	0.0647	0.0131	0.0079	0.0238	0.0211	1.2405	0.0192	0.0016	0.0364
	2'	0.2185	0.1824	0.0257	0.0205	0.1039	0.0939	0.3169	0.0063	0.0016	0.0720
	4	0.1688	0.5565	—	—	—	—	0.0096	0.0020	0.0016	0.4135

测量时间: 1000个采样周期

又把施加于调节器输入端的p.r.b.s.的幅值减小到0.1,使过程输出的方差 V_y 与闭环实验条件1相近,重新进行辨识,结果见表2上实验条件2'一栏。模型误差与实验条件1非常接近,但过程输入的方差 V_u 还是开环辨识的4—7倍,闭环实验条件1的2.5—4倍,以至未能显示出实验条件2'有任何优越性。

③闭环实验条件3(改变线性反馈规律)过程A改用放大倍数为1.133的比例调节

器。在闭环辨识过程,调节器的放大倍数,在前一半时间取0.9064(1.133×0.8),后一半时间取1.360(1.133×1.2)。表3上实验条件3的结果表明,系统虽然是可辨识的但是模型误差极大。但若把切换的放大倍数分别增大到2.0与2.8,实验条件3'的结果表明,用Ls法似乎可以得到极佳的结果,但是进一步的试验表明,当放大倍数增大到3.0时,系统发生剧烈振荡, $V_y = 5 \times 10^3$, $V_u = 4 \times 10^4$ 。可见按实

验条件3进行闭环辨识,欲减小模型误差需冒很大的风险,系统的稳定性裕度大大减小了。

④. 闭环实验条件4(不施加p.r.b.s.也不改变反馈规律)

表2上的数据表明,按此条件进行闭环辨识,得到的模型误差是很大的。

通过以上比较可以认为实验条件1是最适宜的闭环辨识实验条件。

过程A在闭环实验条件3仿真辨识的模型误差

表3

实验条件	比例调节器放大倍数		LS		IV		GLS		V _u	V _y	V _N	η
	K ₁	K ₂	δ _θ ⁻	δ _g	δ _θ ⁻	δ _g	δ _θ ⁻	δ _g				
3	0.9064	1.360	0.1730	0.7327	—	—	0.4830	0.9066	0.0013	0.0010	0.0016	1.0947
3'	2.0	2.8	0.0149	0.0705	—	—	0.4208	0.6614	0.0203	0.0030	0.0016	0.2866

测量时间: 1000个采样周期

闭环辨识工作点: 蒸汽阀门定位器的输入电流5.5(mA), 冷水出口温度65.0(°C)。

过程调正时间T_{0.95} = 195秒。

采样时间T₀ = 15秒。

p.r.b.s.的幅值: 调节阀全量程的±8%。

p.r.b.s.时钟脉冲宽度: 30秒。

p.r.b.s.周期长度: 31位。

四 热交换器辨识实验

1. 实验设计

在仿真辨识的基础上,对实验室规模的蒸汽-水热交换器进行了闭环和开环辨识,闭环辨识只采用比较稳妥的实验条件1。输入和输出信号都用工业仪表测量、记录。实验流程如图3所示。

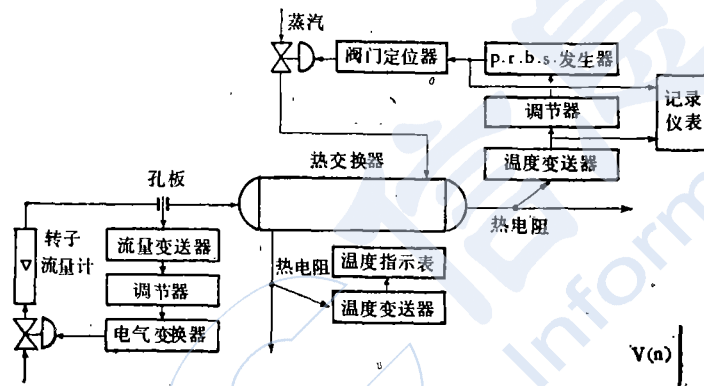


图3 热交换器辨识实验流程图

热交换器外形尺寸: φ200×1400。

换热面积: 2 M²。

内管尺寸: φ12×1.5,共24根,分成四程。

材料: 全部碳钢。

辨识通道: 从蒸汽阀门定位器的输入电流(mA)至冷水出口温度(°C)。

冷水流量: 2100升/小时。

饱和蒸汽阀前压力: 1.5kg/cm²。

开环辨识工作点: 蒸汽阀门定位器的输入电流5.3(mA), 冷水出口温度67.0(°C)。

2. 结果与讨论

①热交换器模型的阶数识别

本文采用目标函数试验的方法来确定模型阶数(14)。

目标函数V(n) = e^T(n)e(n)。

开环和闭环辨识的目标函数试验结果分别示于图4和图5,得到了完全相同的结论: d = 1, n = 3的模型是过程最适宜的模型结构。

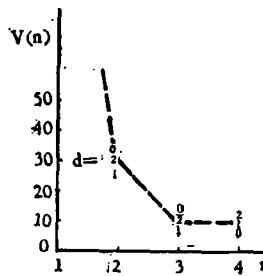


图4

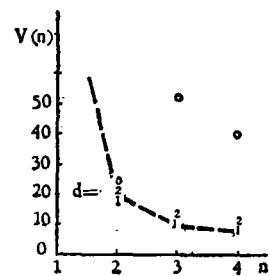


图5

模型的结构式应该是

$$G_s(Z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}}$$

②热交换器模型的参数估计

按d = 1, n = 3的模型结构估计的热交换器

模型参数示于表 4。

由于用自动调节回路稳定了冷水流量，而且蒸气压力比较稳定，所以进入过程的噪声极小，以致模型参数在递归计算了50步之后即趋稳定。在这种情况下，增加测量数据无助于减小模型误差，因此取数据长度为300个采样周

期（5个p.r.b.s.周期）已经足够。在这种情况下，采用改进的参数估计方法也无助于减小模型误差。从表 4 可见，无论LS法 或者 GLS法，其阶跃响应误差 δ_s 几乎是一样的。但与仿真辨识结果不一致的是，无论开环或闭环辨识，IV法的误差总是最大。

热交换器辨识结果

表 4

实验条件	估计方法	a ₁	a ₂	a ₃	b ₁	b ₂	b ₃	δ_s
开 环	LS	-1.7340	1.0714	-0.2700	-0.0068	-0.4875	-0.2409	0.0153
	IV	-1.6572	0.9577	-0.2099	-0.0071	-0.4734	-0.2924	0.0884
	GLS	-1.7247	1.0585	-0.2661	-0.0094	-0.4855	-0.2514	0.0189
闭 环	LS	-1.6436	0.9488	-0.2303	-0.0174	-0.5006	-0.1697	0.1395
	IV	-1.5708	0.8516	-0.1760	-0.0059	-0.4894	-0.2075	0.2569
	GLS	-1.6387	0.9427	-0.2283	-0.0165	-0.5029	-0.1735	0.1392

测量时间：300个采样周期

③模型验证

模型验证只限于比较过程和模型的阶跃响应。为此，类似于脉冲响应的相对均方根误差，本文定义阶跃响应的相对均方根误差

$$\delta_s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\hat{s}(j) - s(j))^2}{\sum_{j=1}^N s^2(j)}}$$

其中S——实验测定的过程阶跃响应，

\hat{S} ——从模型计算的阶跃响应。

从表 4 可见，热交换器闭环和开环辨识的模型误差 δ_s 分别为0.1392和0.0189。闭环辨识的模型误差虽然比开环辨识的稍大一些，但数值还是很小的，因而两者都可用于过程的动态控制。这与仿真辨识的结果也是一致的(见3.2节所述)。

五 结 论

仿真辨识的结果表明，在往调节器输出端施加伪随机二位信号的实验条件下进行闭环辨识，可以得到精度与开环辨识相近的过程模型且不会引起过程输入输出大的波动，也不会危及闭环系统的稳定性，因而是最适宜于工业生产过程的闭环辨识实验条件。

按此实验条件进行了实验室规模热交换器

的闭环辨识，得到的过程模型，虽然比开环辨识模型稍大但是可用于过程控制。

由于闭环辨识能确保生产过程的安全，使用工业仪表即能获得具有足够精度的过程控制模型，离线计算简便迅速，因此可以预见将会在工业生产过程中得到广泛的应用，成为设计控制方案和控制算法的方便工具。

参 考 文 献

- (1) Söderström, T., Identifiability Conditions of Linear Multivariable System Operating under Feedback, IEEE Tr, AC-21, p. 837, 1976.
- (2) Söderström, T., et al., Identifiability Conditions for Linear Systems Operating in Closed Loop, Int. J. Control, V. 21, No. 2, p. 243, 1975.
- (3) Gustavsson, I., et al., Identification of Process in Closed Loop-Identifiability and Accuracy Aspects, Automatica, V. 13, p. 59, 1977.
- (4) Ljung, L., Identification of Linear Multivariable Systems Operating under Linear Feedback Control, IEEE Tr, Ac-19, p. 836, 1974.
- (5) Kurz, H. & Isermann, R., Methods for On-Line Process Identification in Closed Loop, Proceedings of IFAC 6th World Congress part 2, p. 11.
- (6) Davies, W. D., Generation and Properties of Maximum-Length Sequences, Control, v. 10,

(下转52页)

18例中标号为13和104的两例在参数平面上的位置有反常。

三 由脑血流图的处理结果区分健康人, 一期和二期高血压患者

用同样的计算机程序处理 15 例脑血流图, 其中健康人与一期高血压患者 10 例, 二期患者 5 例。结果 (图 7 所示) 表明: 一期患者 (没有品质性病变者) 和健康人的特征值在 (T_y, u_s) 平面上的分布没有明显差异, 而它们与二期患者 (有轻微品质性病变者) 有明显区别 (15 例中标号为 112 的一例反常)。这与医学界的已有结论是一致的。

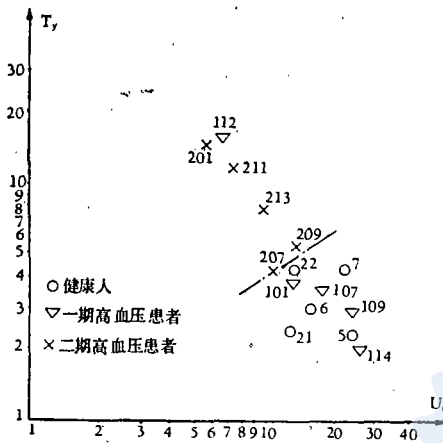


图 7 15 例脑血流图的处理结果

总 结

作者试图用一种与目前广泛使用的直接测量脉波图 形尺寸取得图形特征值不同的方法, 即借助系统辨识的建立数学模型和估计参数的办法提取脉波图象的特征值。这种方法能借助微型电子计算机自动完成。从取得的初步结果业已表

明, 在解决一些具体问题方面, 很可能比目前流行的方法更为有效。

此项研究还得到我院张志方教授、天津医学院付院长吴威中教授和天津中心妇产科医院张丽蓉主任以及有关协作单位的热情指导和大力支持, 特此表示深切的谢意。

参 考 文 献

[1] 张丽蓉等, 1137 例妇女脉象描绘初步总结, 中华妇产科杂志, 1980 年 15 卷 3 期 156~158 页。

[2] 吉村正治等, 临床脉波判读讲座 (I), 日本金原出版社株式会社 (1974 年)。

[3] 张丽蓉等, 脉图预测胎儿性别 350 例临床分析。

[4] 马润津、冯雅君, 人体脉象辨识初探, 中国自动化学会理论委员会 1980 年学术报告会 (1980 年 11 月桂林)。

[5] 张志方、马润津、冯雅君, 利用系统辨识方法辨别中医脉象和预报胎儿性别的尝试, 美控制系统学术会议论文 (1981 年 6 月上海)。

[6] Goodwin, G.C. and Payne, R.L., Dynamic System Identification, Experiment Design and Data Analysis, Academic Press, 1977, New York.

[7] 相良节夫, 秋月影雄, 中沟高好, 片山徹, システム同定, 计测自动制御学会 (1981 年)。

[8] 袁震东, 赵似兰, 黄秉亮, 系统辨识及其在生物医学上的应用 (1980)。

[9] 福永圭之介, 统计图形识别导论, 陶笃纯译, 科学出版社 (1978 年)。

[10] Zhang Zhi-fang, Ma Run-jin and Feng Yajun, Recognition of Traditional Chinese Medicine Sphygmograms Using the System Identification Approach Report at the 6th IFAC Congress of Identification and Parameters Estimation, C 192 (1982, U.S.A.).

(上接 21 页)

p.302, 1966.

- [7] Rotenberg, A.A., New Pseudo-Random Number Generator, J.ACM, v.7, p.75, 1960.
- [8] Richard, K., Evolution of a Pseudo-random Normal Number Generator, J.ACM, v.11, p.357, 1964.
- [9] Wong, K.Y., et al., Identification of Linear Discrete Time Systems Using the Instrumental Variable Method, IEEE Tr, Ac-12, p.707, 1967.
- [10] Yong, P.C., An Instrumental Variable Method for Realtime Identification of a Noisy Process, Automatica, v.6, p.271, 1970.
- [11] Hankins-James, R., et al., Recursive Generalized-Least-Squares Procedure for On-Line

Identification of Process Parameters, Proc. of the IEE, p.2057, 1969.

- [12] Baur, U. & Isermann, R., On-line Identification of a Heat Exchanger with a Process Computer—a Case Study, Automatica, v.13, p.487, 1977.
- [13] Isermann, R., Comparison of Six On-line Identification and Parameter Estimation Methods, Automatica, v.10, p.81, 1974.
- [14] Isermann, R., Practical Aspects of Process Identification, Tutorials on System Identification at the 5th IFAC-Symposium on Identification and System Parameter Estimation 1979.

ABSTRACTS

Optimal Control Theory of Multivariable Econometric Systems

Zhang Zhongjun, Zhang Qiren

Some topics on optimal control theory of multivariable econometric models are discussed in this paper. Using the state space approach several suggestions are made in regard to identification, modelling and control.

Some related expressions have been derived. (pp.1)

A Stability Criterion for Linear System with Constant Complex Coefficients

Chen Xiudong

On the basis of references [10,12], a new stability criterion for linear system with constant complex coefficients has been given. The recursion formula used manipulates the coefficients of the characteristic polynomial by the four basic arithmetic operations in a way that it is simple to implement on computer. The calculation can quickly find out how the internal parameters and their connection affect the system's behaviour and we are able to adjust them to ensure the stability. (pp.8)

Frequency Domain Design of Multivariable System out of Feedforward Concept

Kai Pingan

This paper presents a frequency domain design of the multivariable system out of feedforward concept.

The method improves the Rosenbrock's technique of inverse Nyquist Array. (pp.12)

Study of Open and Closed Loop Identification by Digital Simulation

Zhu Rusong, Jiang Weisun

Comparisons are made by digital simulation between the open loop and closed loop identifications under four different experimental conditions in linear discrete stochastic system with single input and single output.

The result shows that the experimental condition with controller output disturbed by a pseudo-random binary signal is quite suitable for the closed loop identification of real processes. The accuracy of the process model thus obtained by closed loop identification is close to that by open loop identification.

A laboratory heat exchanger has been identified by both methods. The result justifies that of the simulation. (pp.17)

A Time Shared Multichannel Physiological Telemeter

Yang Huaxiang, et al.

The meter is able to detect various physiological parameters of the subject