

微机辨识系统及其工业应用

宋文忠 陈宝根 徐嗣鑫 王世煜 黄东 蒋珉 顾群
(南京工学院)

摘 要

本文介绍所研制的一套适合复杂工业系统建模用的微机辨识系统。系统采用了提高微机抗现场干扰和实时处理能力的措施,并配备了鲁棒性和快速性均较好的实用辨识软件包。文章还介绍了模/数实时仿真和在350MW火电机组上进行工业应用的辨识测试结果。

关键词: 工业辨识,微机应用,闭环系统

一、导 论

建立在统计试验基础上的系统辨识方法,欲在复杂生产过程中实际应用,必须配备现场数据采集和处理的工具,并应研究适合复杂工业系统建模的实用辨识算法。

笔者研制的一套微机辨识系统可应用于复杂工业系统的建模。它具有采集多路现场数据、发送多路伪随机信号、对采样数据进行检错和滤波以及进行在线相关运算等实时功能;并配置了一个功能较完整的实用辨识软件包,可对线性多变量系统的结构和参数进行离线估计,并有多种模型转换功能。

为提高8位微机的实时处理和抗现场干扰的能力,在微机系统的设计中,采取了有效的技术措施。为选择适合于多变量多闭环复杂工业系统建模的实用辨识算法,进行了大量的混合仿真,对辨识算法的鲁棒性亦作了比较。

本系统于1985年初,在目前国内单机容量最大的火力发电机组——上海宝钢电厂的350MW锅炉-汽轮机发电机组上进行了现场应用,获得了该机组较完整的数学模型,其中有些重要特性是极难用常规的阶跃响应法来得到的。

二、微机辨识系统的组成及其特点

本微机辨识系统主要由下述诸项硬件及软件组成:(1)以双微处理机为核心的微机系统设备,(2)多微处理机实时操作系统,(3)实时数据采集和预处理软件包,(4)系统实用辨识软件包。

其各部分的主要功能特点是:

1. 双微机系统设备

(1) 高速: 采用双微处理机、高速运算部件以及高速模入通道(10000 点/秒)。

(2) 高抗干扰: 模入侧采用隔离式采样开关, 输出侧则加用光电隔离级, 使共模抑制比达 100 分贝, 抗共模电压达 100 伏。

(3) 高精度: 模入侧配用“零点迁移电源”, 从而突出了微小的变化分量, 提高了测量精度。

2. 多微处理机实时操作系统^[1,2]

(1) 实时性: 对双微机系统的各项设备(如过程通道、磁盘、盒带等)及实时应用软件均能予以实时管理与控制。

(2) 兼容性: 能与 CP/M 微机通用操作系统切换, 并与其文件系统相兼容。

(3) 可调性: 配有功能强的多机实时在线调试软件, 它能对多个微机上的程序同时予以实时调试, 且具实时追踪等能力。

3. 实时数据采集与预处理软件包

(1) 适用性: 软件包生成程序以交互方式获取各种信息后, 就能形成满足不同工业生产部门所需的专用数据采集与辨识预处理运行程序。

(2) 伪随机信号发生: 可同时输出 4 路伪随机信号, 其类型、级数、信号始点和幅值均可选。

(3) 在线相关运算: 可对指定的多路数据进行相关运算并绘制相关函数曲线。

4. 系统实用辨识软件包

(1) 参数估计: 含有结构和参数递推最小二乘法 SRLS^[3]、多步最小二乘法 MULS^[4]、广义最小二乘法 OGLS^[5]、递推增广最小二乘法 RELS^[6] 和快速广义最小二乘法 FGLS 等七种参数估计法, 均可选用。

(2) 系统结构判定: 可给出模型响应比较法和 AIC 准则等五种准则, 以判定系统结构。

(3) 模型转换: 系统能将差分方程转换成离散能观查型状态方程和离散或连续传递函数等多变量模型。

三、仿真试验——实用辨识算法的挑选

仿真试验是在模拟机(作为被辨识对象)和微机辨识系统组成的模-数混合实时仿真系统上进行的。除了对整机的可靠性、实时数据采集和预处理功能进行长时间考验外, 着重对各种参数估计方法和结构判定准则的鲁棒性作比较研究。

仿真方案如图 1 所示。被辨识对象是一个二输入单输出系统, 传递函数为 $W_1(s)$ 和 $W_2(s)$, 借 PI 调节器构成闭环系统。其中

$$PI = 0.85 \times \left(1 + \frac{1}{71s} \right), \quad W_1(s) = \frac{1.5}{(25s + 1)(30s + 1)},$$

$$W_2(s) = \frac{2.7}{(35s + 1)(40s + 1)}.$$

微机辨识系统送出一对正交的伪随机信号 M_1 和 M_2 去激励系统, 同时对 y 、 u_1 和

u_2 采样。

试验在三种不同的信噪比(5%、20% 和 100%)下进行,数据长度为 500 点,并用软件包中所配置的各种参数估计法和结构判定准则处理数据。典型的结果示于图 2 和图 3。

由图 2 可见,多步最小二乘法 MULS (用模型响应法 MRC 定阶) 的辨识精度明显地优于其他各种方法,且在各组试验条件下均较满意,因此鲁棒性最好。当采用 SRLS 为基本算法时, MULS 法的总的计算工作量也要比采用迭代技术的 FGLS 和 RELS 法小得多。因此,在此选用以 SRLS 法为基本算法的 MULS 法和 MRC 定阶法作为实用辨识算法,而其他各种方法则作参照与对比之用。

下面,对 MULS 法和 MRC 法的原理作一说明。

1. 多步最小二乘法 MULS

MULS 法的第一步是增高模型阶次,得到高阶的 ARX 中间模型。设离散线性模型为

$$y_k = \frac{B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} u_k + \frac{1}{A(Z^{-1})C(Z^{-1})} e_k. \quad (3.1)$$

设 n_a 和 n_c 分别是 $A(Z^{-1})$ 和 $C(Z^{-1})$ 多项式的幂次,而 e_k 为白噪声序列,则当模型阶次由 n_a 升高到 $n_a + n_c$ 时,可用普通最小二乘法从上式中求出原系统的输入-输出特性的无偏估计,即:

$$\hat{y}_k = \frac{\hat{B}(Z^{-1})\hat{C}(Z^{-1})}{\hat{A}(Z^{-1})\hat{C}(Z^{-1})} u_k \doteq \frac{\hat{B}(Z^{-1})}{\hat{A}(Z^{-1})} u_k. \quad (3.2)$$

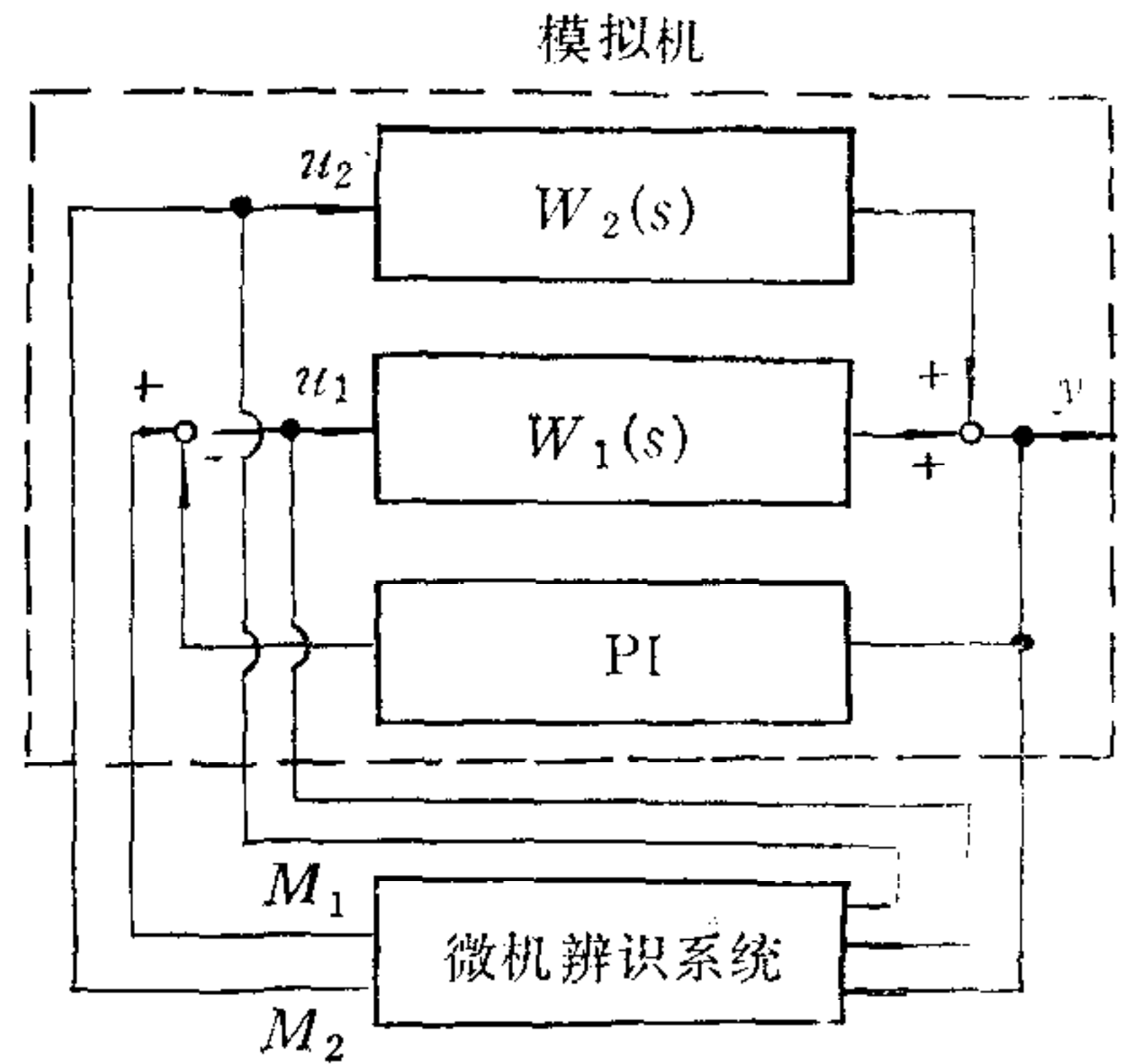


图 1 仿真方案

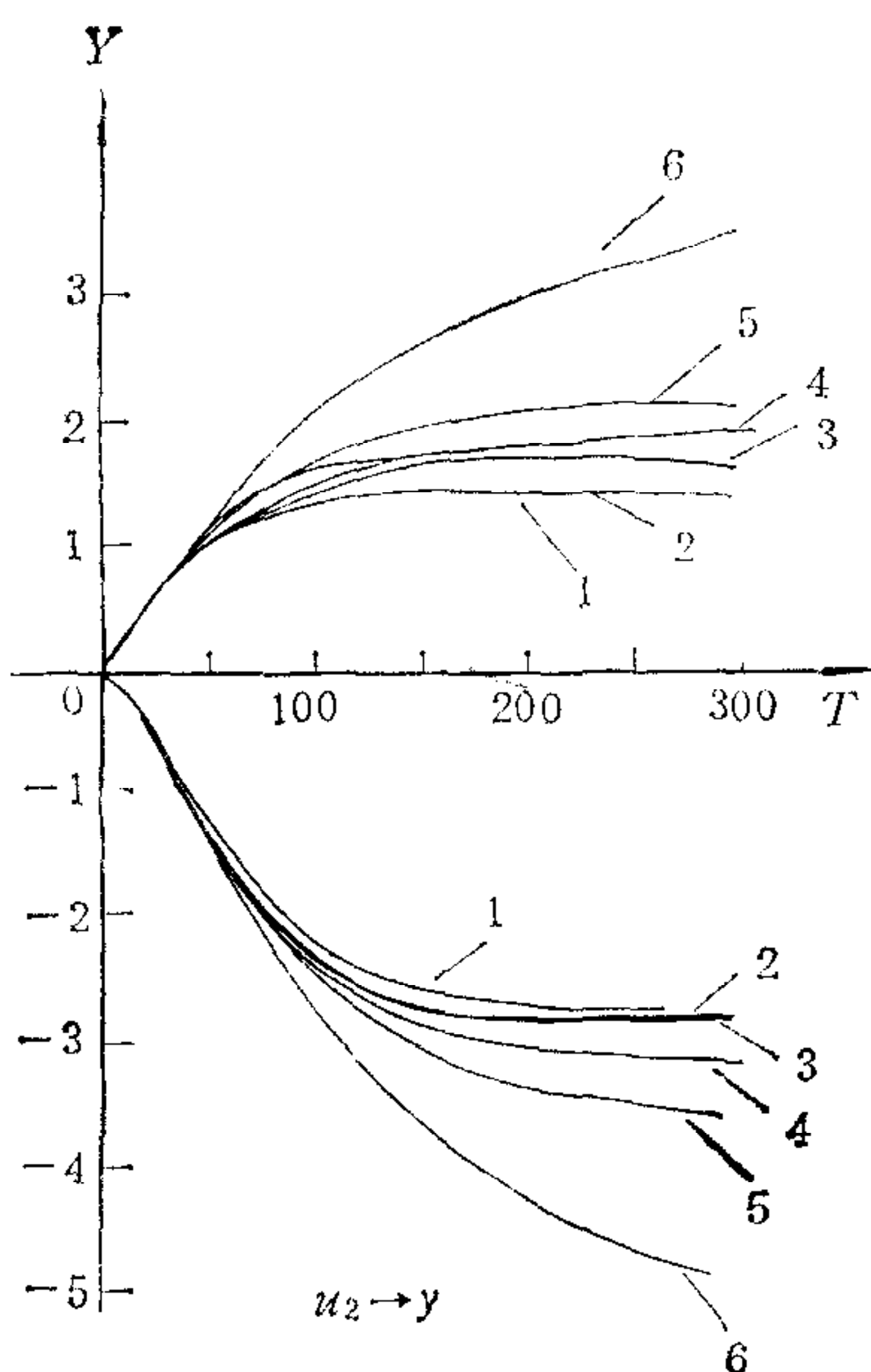


图 2 不同参数估计法的比较

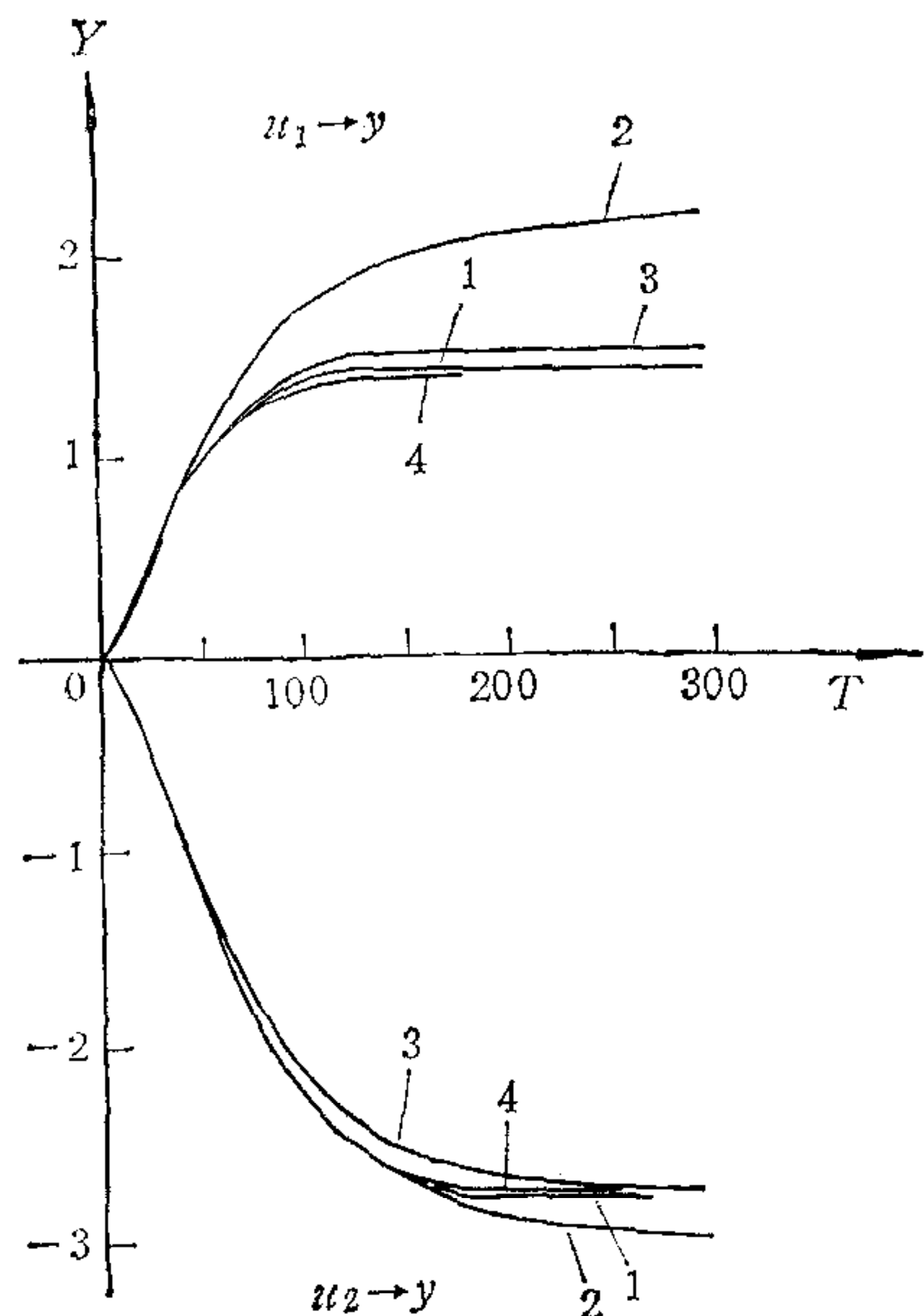


图 3 模型响应比较定阶法

第二步对 $\{y_k, u_k\}$ 及 $\{\hat{\varepsilon}_k = \hat{A}(Z^{-1})y_k - \hat{B}(Z^{-1})u_k\}$ 再各作一次低阶的最小二乘拟合,就可得到 $\{A(Z^{-1}), B(Z^{-1})\}$ 和 $\{C(Z^{-1})\}$ 的无偏估计.

显然,可以把 MULS 法看成是非叠代的广义最小二乘法,且不存在迭代收敛问题.

2. 模型响应比较定阶法 MRC

在搜索模型阶次的过程中,可得到一系列阶次逐渐升高的中间模型. 对应于每一个中间模型可得到一条阶跃(或其他确定性输入信号)响应曲线. 当中间模型的阶次 $\hat{n} < n_a + n_c$ 时,相邻两个阶次的模型响应曲线会有较显著的差异;而当 $\hat{n} \geq n_a + n_c$ 时,则两条响应曲线将是比较接近的. 据此,就可方便而又直观地把模型的合适阶次决定之(图 3).

设 l 和 $l-1$ 阶模型的输出之差为

$$\Delta y_l(k) = y_l(k) - y_{l-1}(k) = \left[\frac{\hat{B}_l(Z^{-1})}{\hat{A}_l(Z^{-1})} - \frac{\hat{B}_{l-1}(Z^{-1})}{\hat{A}_{l-1}(Z^{-1})} \right] u(k), \quad (3.3)$$

可定义一个准则:

$$J_l = \frac{\sum_{k=0}^N |\Delta y_l(k)|}{\sum_{k=0}^N |y_l(k)|}. \quad (3.4)$$

若给定一个临界值 J_0 (如 5%—10%),则当 $J_l > J_0$ 时,继续提高模型阶次,进行搜索. 当 $J_l \leq J_0$ 时,就取 $l-1$ 阶为系统模型的阶次.

对多输入-单输出系统可定义 J_l 为

$$J_l = \sum_{i=1}^r h(i) \frac{\sum_{k=0}^N |\Delta y_l(k, i)|}{\sum_{k=0}^N |y_l(k, i)|}. \quad (3.5)$$

其中, r 是输入的维数, $h(i)$ 是加权系数, $y_l(k, i)$ 和 $\Delta y_l(k, i)$ 分别对应于第 i 个输入的模型的输出和输出的差值.

基于某种统计量的定阶法(如 F 检验、AIC 准则等),都是建立在残差“白色化”的基础上的,因而对噪声的性质较敏感. 当噪声的真实性质同所假设的噪声模型不同时,统计量就会产生“波动”,因此阶次也定不准. 而用 MRC 法就无此缺点,故定阶的准确性高.

MRC 法的另一突出优点是简明性. 它可直接根据显示在 CRT 屏幕上的一簇响应曲线来决定模型阶次,而毋须依(3.4)和(3.5)式来计算决定. 本特点在判定多变量系统的结构特性时则更为优越,因为在多变量系统的定阶中,临界值 J_0 和权系数 $h(i)$ 是甚难选择的.

一般采用搜索法,即逐步增高模型阶次并配用 MRC 法来进行结构判定. 但是,若每改变一次模型的阶次,都重做一次最小二乘估计. 则整个辨识过程的计算工作量将很大. 为此,笔者发展了一种辨识多变量系统结构和参数的递推最小二乘法 SRLS^[3],把上述搜索过程转变为结构递推运算,从而使计算工作量大为降低. 因此,即使在微机上处理多变量系统的数据,其辨识速度还是相当快的.

四、应用实例

本微机辨识系统适合于复杂工业系统的建模。1985年3月，该系统应用于上海宝钢电厂1号机组的特性测试。

该机组为燃煤汽包式锅炉，有一次中间再过热，并用改变喷燃器倾角 θ 来调节再热汽温。机组的主要特性如下：

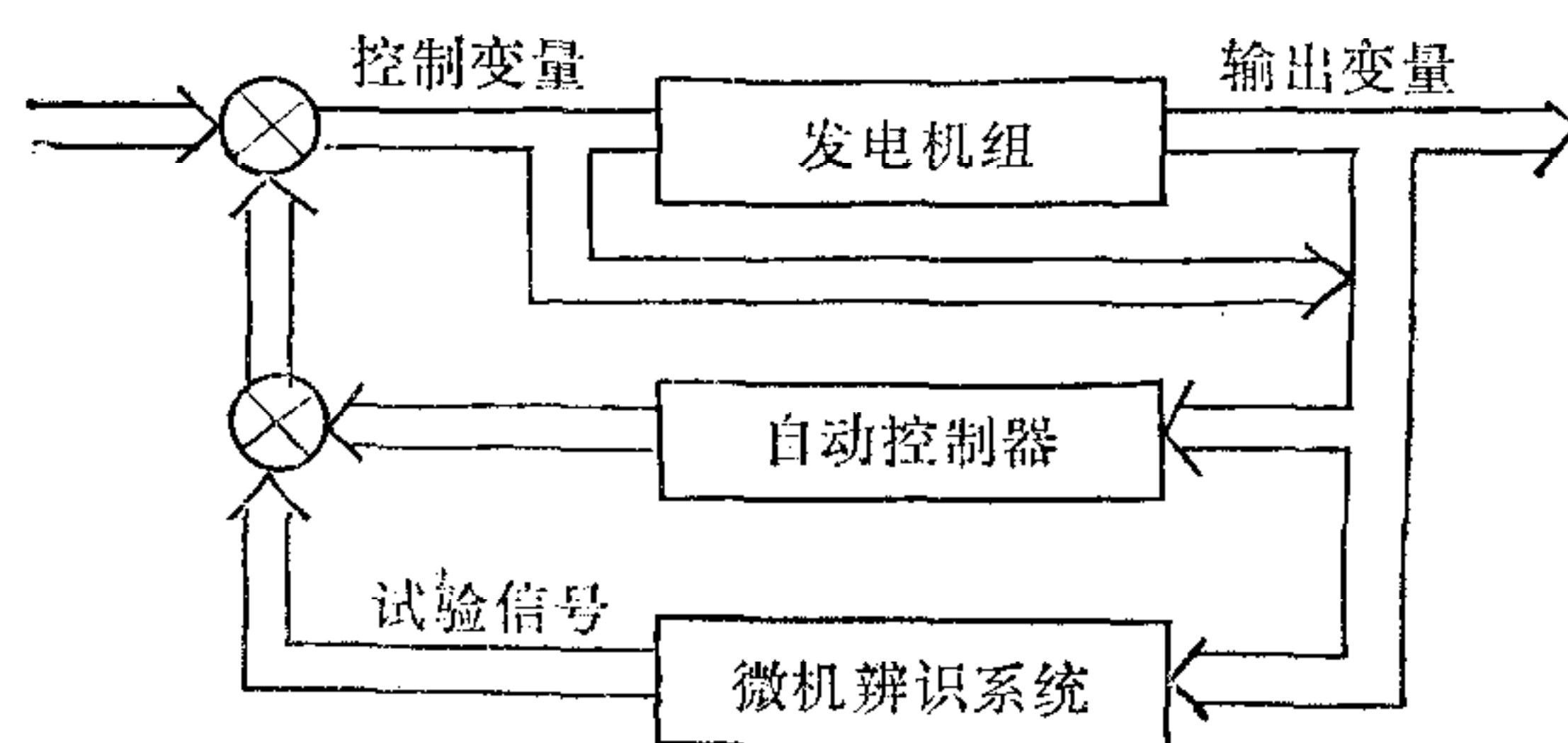


图4 测试方案

发电机额定功率：350兆瓦，锅炉额定出力 $D:1083T/H$ ，主蒸汽压力 $P:1.71197 \times 10^6 Pa$ ，主蒸汽温度 $t_0:541^\circ C$ ，再过热蒸汽压力 $P_R:3.94057 \times 10^6 Pa$ ，再过热蒸汽温度 $t_R:541^\circ C$ 。测试方案如图4所示。

为了保障机组的安全运行和正常发电，机组的自动控制系统全部投入运行，并维持在340兆瓦负荷附近。

表1 测试内容及伪随机码参数

序号	主要内容	控制变量	伪随机码	步数/ 周期	步长 (秒)	周期长 (秒)	幅值(伏)	采样周期 (秒)
I	水位及二次减温 特性测试	二次喷水阀 给水量	m 序列	31	40	1240	± 0.30	5
			逆重复 m 序列	62	40	2480	± 0.20	5
II	摆动喷咀特性 测试	二次喷水阀 喷咀摆角	m 序列	63	40	2520	± 0.20	10
			逆 m 序列	126	40	5040	± 0.30	10
III	燃料扰动特性 测试	二次喷水阀 给煤量	m 序列	31	40	1240	± 0.20	5
			逆 m 序列	62	40	2480	± 0.25	5
IV	“炉跟机”运行 方式综合测试	二次喷水阀 喷嘴摆角 给定功率 给煤量	m 序列	63	42	2646	± 0.20	14
			逆 m 序列	126	42	5292	± 0.25	14
			m 序列 ($\tau = 50$)	63	42	2646	± 0.04	14
			逆 m 序列 ($\tau = 50$)	126	42	5292	± 0.12	14
V	“机跟炉”运行 方式综合测试	二次喷水阀 喷嘴摆角 给煤量	m 序列	63	42	2646	± 0.20	14
			逆 m 序列	126	42	5292	± 0.25	14
			m 序列 ($\tau = 50$)	63	42	2646	± 0.20	14

注：(1) 测试 I、II、V 是“机跟炉”工况 (TF)，测试 III、IV 是“炉跟机”工况 (BF)。

(2) 二次喷水分 A、B 侧，两侧同时进行测试。

由图 4 可见,这是多变量多闭合回路的辨识试验。由微机辨识系统发出一组正交的测试信号,与自动控制器的输出信号迭加后,再去改变相应的控制量,以激励发电机组,并由系统对机组的有关输出变量和控制变量进行采样,再分批贮入盒式磁带。

虽然电厂生产现场的干扰源较多,干扰信号亦较强,但因系统配用的过程通道具有高的抗干扰性能,因此,测试时系统不必另加其他措施即能直接与现场仪表相连接。

测试一共进行 5 次,每次约 8 小时。表 1 汇集了各次测试的主要内容及所改变的控制量和对应的伪随机码特性。

采集到的现场数据用辨识软件包进行处理,所获得的机组各主要通道的传递函数则在表 2 中列出。

上述测试结果经过模型检验,并与电厂提供的部分阶跃响应曲线相比较,证明所得的机组模型同实际情况是相当吻合的。

表 2 350 兆瓦机组的传递函数

输入	输出	运行方式	传递函数	单位
二次喷水阀门开度	主汽温	A 侧	$\frac{-1.62}{(1+97s)^3}$	°C/%
		B 侧	$\frac{-1.90}{(1+95s)^3}$	°C/%
	中间汽温	A 侧	$\frac{-0.88}{(1+10s)^2}$	°C/%
		B 侧	$\frac{-1.11}{(1+14s)^2}$	
	再热汽温		$\frac{-0.7e^{-87s}}{1+427s}$	°C/%
	主汽压	BF	$\frac{2.0 \times 10^4}{1+108s}$,Pa/%
TF		$\frac{3.12 \times 10^8 s^2 + 9.8 \times 10^6 s}{5.58 \times 10^5 s^3 + 5.05 \times 10^4 s^2 + 252s + 1}$		
喷燃器倾角	主汽温		$\frac{2.03e^{-48s}}{(1+75s)^3}$	°C/(°)
	再热汽温		$\frac{1.1e^{-71s}}{1+446s}$	°C/(°)
	主汽压	BF	$\frac{-2.5 \times 10^4 e^{-74s}}{1+234s}$	Pa/(°)
		TF	$\frac{-4.76 \times 10^6 s}{2.25 \times 10^3 s^3 + 5.13 \times 10^4 s^2 + 213s + 1}$	Pa/(°)
燃煤量	主汽温	BF	$\frac{1.21}{(1+79s)^3}$	°C/(t/h)
		TF	$\frac{115s + 0.18}{6.3 \times 10^6 s^3 + 2.45 \times 10^4 s^2 + 227s + 1}$	
	再热汽温	BF	$\frac{1.26e^{-35s}}{1+202s}$	°C/(t/h)

表 2(续)

输入	输出	运行方式	传递函数	单位
燃煤量	主汽压	BF	$\frac{3.95 \times 10^2}{(1 + 10s)s}$	Pa/t/h
		TF	$\frac{8.1 \times 10^4 e^{-13s}}{1 + 151s}$	
		TF	$\frac{3.67 \times 10^7 s}{1.02 \times 10^5 s^3 + 4.69 \times 10^4 s^2 + 294s + 1}$	
功率定值	发电机输出功率	BF	$\frac{4.97s + 0.08}{357s^2 + 38.4s + 1}$	MW/t/h
		TF	$\frac{1.90e^{-19s}}{1 + 119s}$	
调速阀开度	主汽压	BF	$\frac{-7.4 \times 10^4 s - 1.11 \times 10^3}{(1 + 35s)s}$	Pa/%
		BF	$\frac{4.5}{(1 + 15s)(1 + 31s)}$	
给水量	汽包水位	TF	$-2.4 \times 10^4 - \frac{1.4 \times 10^7}{1 + 182s}$	Pa/%
			$\frac{8.3 \times 10^{-3}}{(1 + 33s)s}$	mm/t/h

五、结 束 语

微机辨识系统沟通了辨识理论和工业现场的联系。在使用中表明了微机系统的整体设计是合理而实用的,所选用的辨识算法有较好的鲁棒性和快速性,可以方便地在各个工业部门的辨识试验中推广应用。

参 考 文 献

- [1] 陈宝根,李清,多微处理机实时系统软件的设计与实现,1985年全国第五届系统仿真学术会议论文,成都。
- [2] 陈宝根,实时在线调试软件设计,南京工学院学报, No. 4, 1984年。
- [3] 宋文忠,徐嗣鑫,多变量线性系统结构和参数辨识的递推最小二乘法,控制理论与应用, Vol. 1, No. 4, 1984年。
- [4] Hsia, T. C., On Multistage Least Squares Approach to Systems Identification, Proceedings, IFAC Sixth World Congress, Paper 18.2, Boston, 1975.
- [5] Clark, D. W., Generalized-least-squares Estimation of Parameters of a Dynamics Model, IFAC Symposium-Identification in Automation Control Systems, Paper 3.17, Prague, 1967.
- [6] Young, P. C. and R. Hastings-James, Identification and Control of Discrete Dynamic System, Subject to Disturbances with Rational Spectral Density, Proc. 9th IEEE Sump. Adaptive Processes, 1970.

A MICROCOMPUTER IDENTIFICATION SYSTEM AND ITS INDUSTRIAL APPLICATION

SONG WENZHONG, CHEN BAOGEN, XU SIXIN,
WANG SHIYU, HUANG DONG, JIANG MIN, GU QUN
(*Nanjing Institute of Technology*)

ABSTRACT

A special microcomputer to identify complex industrial systems, named microcomputer identification system, which has better ability to reduce field disturbances and to process data on line with higher speed, is developed. Then an applied identification package with good robustness is designed for this microcomputer.

Examples of digital-analog real time simulations and the field experiments in a 350 MW boiler-turbine-generator set are discussed at the end.

Key words Industrial identification, Microcomputer application, Closed-loop system