

工业锅炉的加权预测自校正控制¹⁾

陈增强 袁著祉

(南开大学计算机与系统科学系,天津 300071)

李玉梅

(中国船舶工业总公司七〇七所,天津)

侯平 王维民 崔保民

(南开大学计算机与系统科学系,天津)

摘 要

本文介绍了加权广义预测自校正控制器在工业锅炉上的应用,实际运行结果显示了这种控制器有很好的鲁棒性。

关键词: 广义预测控制,自校正控制,计算机控制,锅炉控制。

一、前 言

工业锅炉是工厂中的重要设备,普遍有煤耗高、供汽不稳定及热效率低等缺点。本文采用微型计算机与先进的控制方案,对工业锅炉实行自动控制,对于节能、稳定供汽及安全都具有重要意义。

在现代控制理论中,自校正控制器发展很快,其中广义预测自校正控制器^[1,2]是一种具有很强适应能力的控制器,文中叙述了这种控制器在工业锅炉上的成功应用。

二、工业锅炉及其控制

图1是工业锅炉的工艺流程图。

工业锅炉包括汽水循环系统和燃烧系统,是一个复杂的时变动态过程,有多个控制回路,有的有很强的非线性、大滞后及大干扰,因此,传统的PID调节器难以使工业锅炉达到理想的控制效果。由于预测自校正控制器采用大范围预测,能够增加模型的信息量,还能通过对模型的在线辨识以适应锅炉的动态特性的变化,最后通过滚动优化计算出合理的控制信号,从而使预测自校正控制器比PID调节器能够更好地控制工业锅炉。作者在十吨工业锅炉上使用了广义预测自校正控制器。

本文于1991年6月15日收到。

1) 国家自然科学基金资助的课题。本文曾在1990年全国控制理论与应用会(杭州)上宣读。

整个工业锅炉可以分成三个部分,每部分由一个或几个回路构成。

1. 汽包给水系统

汽包水位是工业锅炉正常运行的主要指标,水位过高会影响汽水分离,产生汽带水现象,水位过低会影响汽水循环,导致事故,因此通常要使水位保持在一个设定的数值上。这个回路以水位作被控量 y , 给水流量作控制信号 u 。为克服蒸汽流量变化所造成的虚假水位,采用带补偿的蒸汽流量作为前馈量 v 。

2. 燃烧系统

锅炉的燃烧过程是一个具有强干扰的非线性、时变多变量过程,各个通道时滞不同;燃烧过程可以分为三个回路,即蒸汽压力、烟气含氧量及炉膛负压三个回路。

蒸汽压力通常要求稳定在一个设定值附近,所以选择汽压为被控量,控制量是给煤的滑差电机转速,为克服负荷变化,引入平均蒸汽流量作为前馈信号。由于在燃烧过程中,燃烧时间较长,且受煤质的影响,因此时延较大且有时变,为了对付这一点,适当选取了采样间隔、预测范围和 B 的阶次。实际表明,采用预测控制方法能够很好地解决时延问题。

送风与引风对于锅炉的燃烧是至关重要的,送风、引风与给煤配合得好,才能达到最佳燃烧和提高锅炉热效率的目的。

送风回路以烟气含氧量作被控量,送风挡板开度作控制量。引风回路以炉膛负压作被控量,引风挡板开度为控制量。这两个回路耦合严重,使用前馈解耦方法,即双方各以对方控制量作为前馈信号。为使煤能够完全燃烧,要求烟气含氧量与负压保持在一个适当值附近,通常要求含氧量较低,负压为微负压。

3. 除氧器控制系统

水在进入锅炉以前,首先要经过除氧器,除去水中的氧,因为含氧多的水进入汽包中加热时,会氧化腐蚀汽包壁。水中除氧是通过向除氧器中注入水蒸汽来达到的。除氧器的控制是由两个单回路组成的,一个是除氧器水位控制,被控量是除氧器水位,控制量是给水阀位;另一个回路是除氧器压力控制,被控量是压力,控制量是水蒸汽阀位。

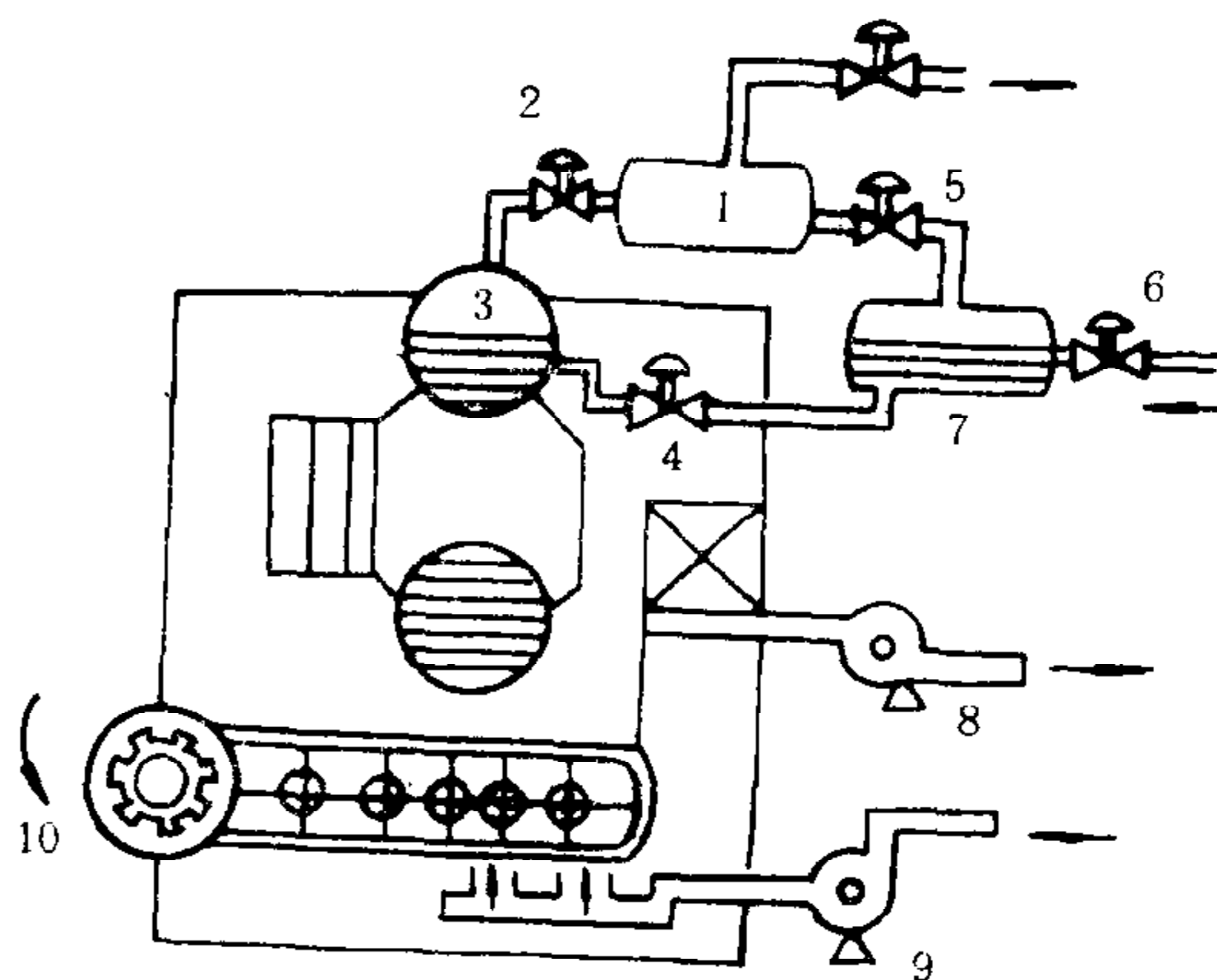


图1 工业锅炉工艺流程图

1——汽包, 2——蒸汽流量, 3——锅筒, 4——给水阀门, 5——除氧器给汽阀门, 6——除氧器给水阀门, 7——除氧器, 8——引风机, 9——送风机, 10——滑差电机。

三、加权广义预测控制器

文献[2]中详细地论述了加权广义预测自校正控制器,这里简述如下:

用 CARIMA 模型描述一个具有非平稳噪声的实际工业过程

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + D(z^{-1})v(k-1) + C(z^{-1})\xi(k)/\Delta, \quad (1)$$

其中 y, u, v, ξ 分别是系统的输出、输入、前馈和正态白噪声干扰, $\Delta = 1 - z^{-1}$ 。

引入辅助输出 $\phi(k) = P(z^{-1})y(k)$, (2)

其中 $P(z^{-1})$ 是输出加权函数, $P(z^{-1}) = P_n(z^{-1})/P_d(z^{-1})$, P_n, P_d 均为 z^{-1} 的多项式.

目标函数

$$J = \sum_{j=1}^N [P(z^{-1})y(k+j) - w(k+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} [Q(z^{-1})u(k+j-1)]^2, \quad (3)$$

其中 N 为预测前位, N_u 为控制前位, λ 是控制加权常数因子, $Q(z^{-1})$ 为控制加权传递函数, $Q(z^{-1}) = Q_n(z^{-1})/Q_d(z^{-1})$, Q_n 与 Q_d 均为 z^{-1} 的多项式. $w(k+j)$ 为设定值序列,

$$\begin{cases} w(k) = y(k), \\ w(k+j) = \alpha w(k+j-1) + (1-\alpha)y_r(k), j = 1, \dots, N. \end{cases} \quad (4)$$

这里 α 是柔化因子, 满足 $0 \leq \alpha < 1$, $y_r(k)$ 为设定值.

考虑丢番图方程:

$$\frac{P_n(z^{-1})}{P_d(z^{-1})} \cdot T(z^{-1}) = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j} \frac{F_j(z^{-1})}{P_d(z^{-1})}, \quad j = 1, \dots, N, \quad (5)$$

其中 $T(z^{-1})$ 是给定的滤波多项式, $E_j(z^{-1})$ 和 $F_j(z^{-1})$ 为待求多项式, 阶次分别为 $j-1$ 和 n_a 加 $P_d(z^{-1})$ 的阶次. 为简化起见, 以 x 表示 $x(z^{-1})$.

由式(1)与式(5)得预测公式

$$\begin{aligned} \phi(k+j) = & G_j \Delta u'(k+j-1) + H_j \Delta v'(k+j-1) + F_j y'(k)/P_d \\ & + \frac{CE_j \xi(k+j)}{T}, \quad j = 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $G_j = E_j B$, $H_j = E_j D$, $y'(k) = y(k)/T$, $u'(k) = u(k)/T$, $v'(k) = v(k)/T$.

令

$$\varphi = [\varphi(k+1), \varphi(k+2), \dots, \varphi(k+N)]^T, \quad (7)$$

$$\tilde{u} = [\Delta u'(k), \Delta u'(k+1), \dots, \Delta u'(k+N_u-1)]^T, \quad (8)$$

$$\bar{f} = [f(k+1), f(k+2), \dots, f(k+N)]^T, \quad (9)$$

$$\bar{e} = \left[\frac{CE_1}{T} \xi(k+1), \dots, \frac{CE_N}{T} \xi(k+N) \right]^T, \quad (10)$$

假定, 当 $j > 0$ 时 $\Delta v(k+j) = 0$, $\Delta u(k+j) = 0$, 于是预测公式(6)可写成向量形式

$$\varphi = G\tilde{u} + \bar{f} + \bar{e}, \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} f(k+1) = (G_1 - g_0)\Delta u'(k) + H_1 \Delta v'(k) + F_1 y'(k)/P_d, \\ f(k+2) = (G_2 - g_1 z^{-1} - g_0)\Delta u'(k+1) + H_2 \Delta v'(k+1) + F_2 y'(k)/P_d, \\ \dots \\ f(k+N) = (G_N - g_{N-1} z^{-N+1} - \dots - g_1 z^{-1} - g_0)\Delta u'(k+N-1) \\ \quad + H_N \Delta v'(k+N-1) + F_N y'(k)/P_d, \end{cases} \quad (12)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & g_0 \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \dots & g_{N-N_u} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

这里 $g_i, i = 0, 1, \dots, N-1$ 是多项式 $G_N(z^{-1})$ 中对应于 z^{-i} 的系数.

为了将 $Q(z^{-1})u(k)$ 统一用 \tilde{u} 表示, 考虑

$$\frac{Q_n \cdot T}{Q_d} = E'_j \Delta + z^{-i} \frac{F'_j}{Q_d}, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (14)$$

其中 E'_j 与 F'_j 是待求多项式, 阶次分别是 $j-1$ 和 ∂Q_d .

令

$$\varphi' = [Qu(k), \dots, Qu(k+N-1)]^T, \quad (15)$$

$$\sigma = [F'_1 u'(k-1)/Q_d, \dots, F'_N u'(k-N)/Q_d]^T, \quad (16)$$

由式(14)得

$$\varphi' = Q\tilde{u} + \sigma, \quad (17)$$

其中

$$Q = \begin{bmatrix} e'_0 & 0 & \cdots & 0 \\ e'_1 & e'_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & e'_0 \\ e'_{N-1} & e'_{N-2} & \cdots & e'_{N-N_u} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

这里 $e'_i, i = 0, 1, \dots, N-1$ 是 $E'_N(z^{-1})$ 中对应于 z^{-i} 的系数.

由向量表达式(11)与(17), 目标函数(3)式可写成

$$J = (\varphi - \bar{w})^T (\varphi - \bar{w}) + \lambda \varphi'^T \varphi', \quad (19)$$

其中

$$\bar{w} = [w(k+1), w(k+2), \dots, w(k+N)]^T. \quad (20)$$

要求 J 的数学期望最小, 得到控制律

$$\tilde{u} = (G^T G + \lambda Q^T Q)^{-1} [G^T (\bar{w} - \bar{F}) - \lambda Q^T \sigma], \quad (21)$$

由于 \tilde{u} 的第一个分量为 $\Delta u'(k)$, 因而容易求出 k 时刻的控制 $u(k)$:

$$\begin{aligned} u'(k) &= \Delta u'(k) + u'(k-1), \\ u(k) &= Tu'(k). \end{aligned} \quad (22)$$

四、预测自校正控制在锅炉上的实现

如前所述, 把锅炉控制分为 6 个回路, 每个回路都用 CARIMA 模型描述, 即给出预测模型

$$\hat{A}(z^{-1})\Delta y'(k) = \hat{B}(z^{-1})\Delta u'(k-1) + \hat{D}(z^{-1})\Delta v'(k-1), \quad (23)$$

模型中的多项式 \hat{A} , \hat{B} 与 \hat{D} 的阶次经现场试验确定, 它们的系数是通过参数辨识得到的, 每个采样间隔辨识一次, 辨识方法采用变遗忘因子最小二乘法, 公式如下:

定义辨识参数向量

$$\theta_k = [-\hat{a}_1, \dots, -\hat{a}_{n_a}, \hat{b}_0, \dots, \hat{b}_{n_b}, \hat{d}_0, \dots, \hat{d}_{n_d}]^T, \quad (24)$$

$$\phi(k) = [\Delta y'(k-1), \dots, \Delta u'(k-1), \dots, \Delta v'(k-1), \dots]^T. \quad (25)$$

递推算法:

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \frac{P_{k-1} \phi(k)}{\beta(k) + \phi(k)^T P_{k-1} \phi(k)} \varepsilon(k), \quad (26)$$

$$Q_k = P_{k-1} - \frac{P_{k-1}\phi(k)\phi^T(k)P_{k-1}}{1 + \phi(k)^T P_{k-1} \phi(k)}, \quad (27)$$

其中

$$\varepsilon(k) = \Delta y'(k) - \theta_{k-1}^T \phi(k), \quad (28)$$

$$M(k) = \{[\phi^T(k)P_{k-1}\phi(k) + 1]/\varepsilon^2(k)\}\eta(k), \quad (29)$$

$$\beta(k) = 1 - \frac{1}{M(k)}. \quad (30)$$

如果

$$[1/\beta(k)] \cdot \text{trace}[Q_k] \leq c, \quad (31)$$

则

$$P_k = Q_k/\beta_k, \quad (32)$$

否则

$$P_k = Q_k. \quad (33)$$

参数 $\eta(k)$ 与 c 的选择如下:

$$\eta(k) = N(k) \cdot \eta_\varepsilon(k), \quad (34)$$

$$c > \alpha^2, \quad (35)$$

其中 $N(k)$ 为记忆长度, 文中取为 1.000, $\eta_\varepsilon^2(k)$ 为 $\eta(k)$ 的方差, α^2 为初始协方差阵 $P_0 = \alpha^2 I$ 中的取值, 文中为 100, 记号 $\text{trace}[Q_k]$ 表示矩阵 Q_k 的迹。

采用时变遗忘因子 $\beta(k)$ 的最小二乘法, 在线递推辨识参数, 能够保证辨识参数既能适应系统的缓慢变化, 又不会发生爆发现象。

每个采样间隔完成一次递推参数辨识, 得到估计模型(23), 根据该估计模型, 用本文第三节中的方法可以得到广义预测自校正控制器(22)式, 直接计算出控制动作 $u(k)$ 。在参数辨识中, 不需要人为地加入持续激励信号, 这是因为工业现场中各种干扰信号足够丰富。

在控制器设计中, 令目标函数(3)中的加权传递函数 $P(z^{-1})$ 与 $Q(z^{-1})$ 分别为

$$P(z^{-1}) = \frac{1 - \beta z^{-1}}{1 - \beta}, \quad 0 \leq \beta < 1, \quad (36)$$

$$Q(z^{-1}) = \frac{1 - z^{-1}}{1 - \alpha_0 z^{-1}}, \quad 0 \leq \alpha_0 < 1. \quad (37)$$

对锅炉的 6 个控制回路逐个进行现场调试以便确定如下参数:

- 1) N , 预测前位, 表示预测的范围;
- 2) N_u , 控制前位, 通常取值为 $A(z^{-1})$ 中不稳定极点的个数;
- 3) $\lambda (0 < \lambda < \infty)$, 控制加权系数, 有限制控制幅度的作用;
- 4) $\beta (0 \leq \beta < 1)$, 主要是抑制超调, 起平滑作用;
- 5) $\alpha_0 (0 \leq \alpha_0 < 1)$, 主要影响控制动作的趋势;
- 6) $\alpha (0 \leq \alpha < 1)$, 柔化因子, 调节跟踪速度。

五、加固工业控制微机

这个锅炉控制系统, 使用 16 位 intel 8086 加固微型工业控制机, 配有 8087 协处理器, 以增加浮点运算能力, 支持先进控制方案的实施。该机在硬件上采用滤波、加固、浮

地输入及光电隔离技术，因此具备很强的抗干扰能力，还配备智能终端，可以方便地调试程序及在实时运行状态下查看与修改数据。操作系统实时性强，基于优先权的调度策略能支持多任务并行执行。数据检测程序、算法程序及其它应用程序分别采用 PL/M, FORTRAN 及 ASM 语言编制后，固化在 EPROM 中运行。该机还配备彩显与打印机等外设，能够显示和打印多幅画面和表格，具有完善的声光报警系统。计算机、手动与仪表自动之间切换方便，容易操作。

六、运行结果

工业锅炉加权广义预测自校正控制微机系统在工厂运行后，经过热平衡测试，热效率达 77%，烟气含氧量为 9%，煤渣含炭量、蒸汽压力、水位、炉膛负压、除氧器水位及压力等各项指标都达到较高标准。实际运行表明，该系统可以根据负荷变化迅速调整燃烧过程，保持热循环及燃烧稳定。该系统已经通过市级鉴定。专家们评价这套系统已达到国内领先水平，节煤效果明显，直接经济效益 10 万元/年。

图 2—图 5 为锅炉的四个主要回路在加权广义预测自校正控制器控制下的动态过程。

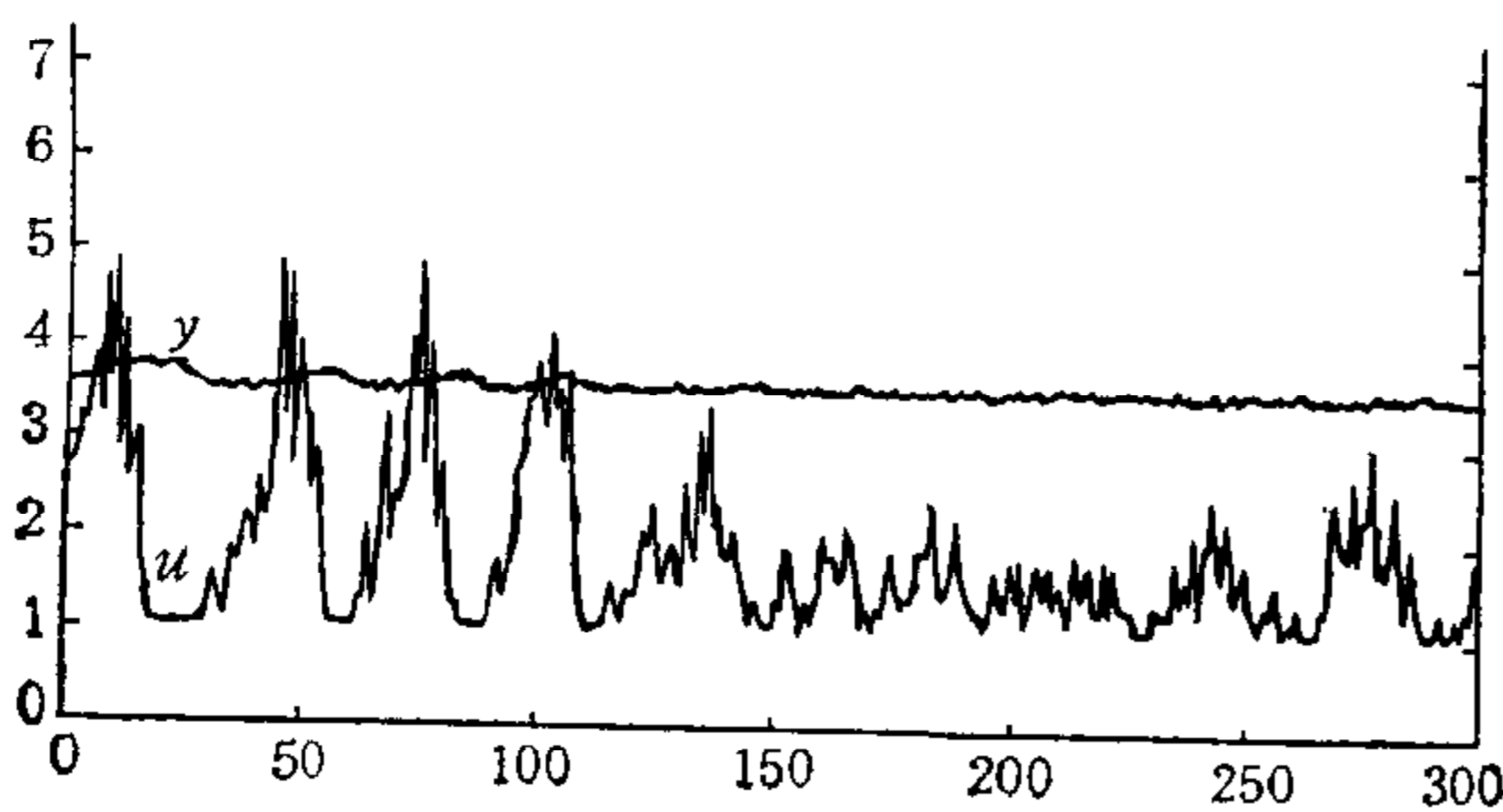


图 2 锅炉水位控制

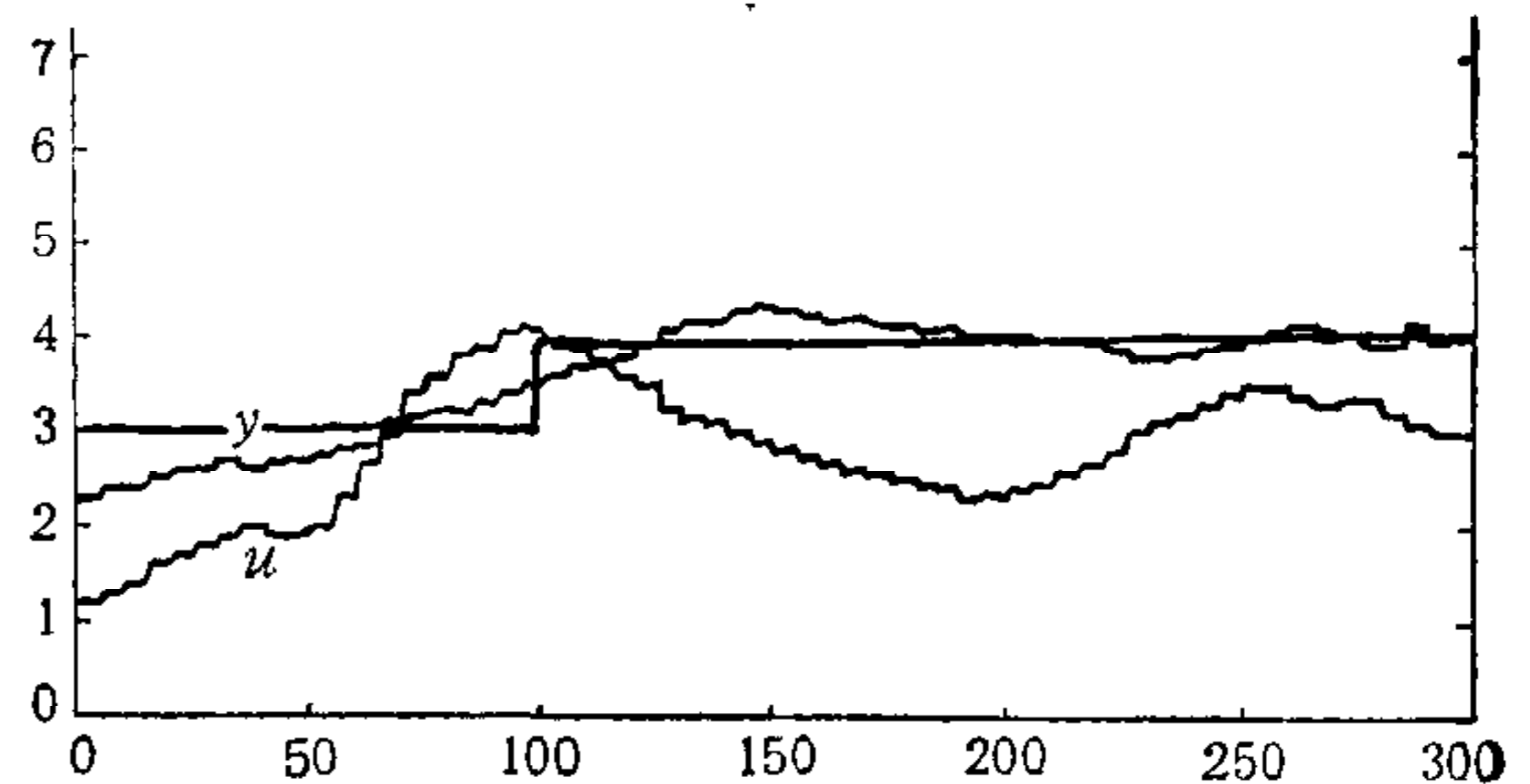


图 3 蒸汽压力控制

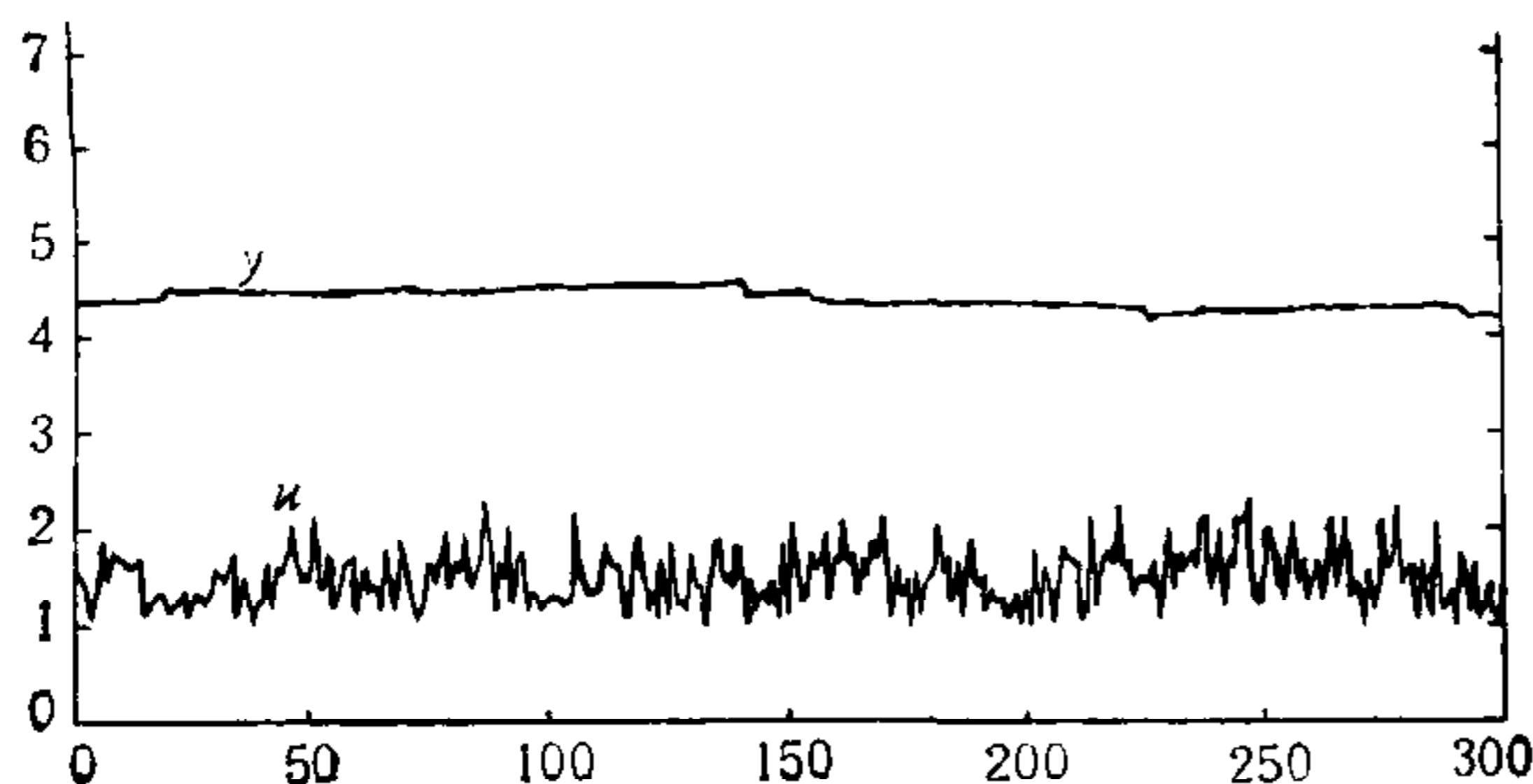


图 4 烟气含氧量控制

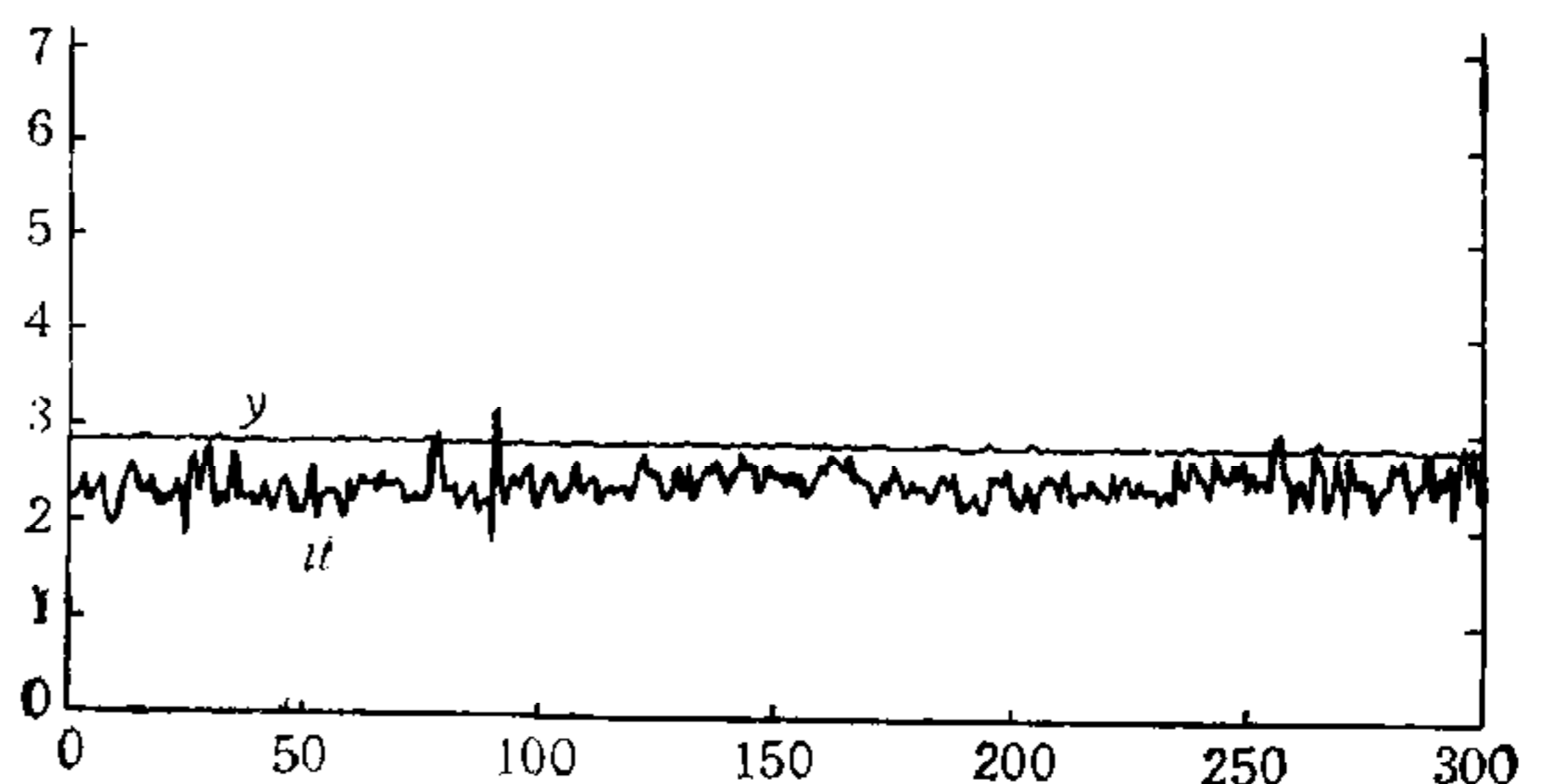


图 5 炉膛负压控制

参 考 文 献

- [1] Clarke, D. W., Mohtadi, C. and Tuffs, P. S., Generalized Predictive Control-part I and II, *Automatica*, 23(1987), 137—160.

- [2] Yuan Zhuzhi et. al, Recursive Synthetic Generalized Predictive Self-tuning Controller, on the 8th IFAC/IFORS Symposium on Identification and System Parameter Estimation, 1(1988), 414—419, Beijing.

WEIGHTING PREDICTIVE SELF-TUNING CONTROL FOR INDUSTRIAL BOILERS

CHEN ZENGQIANG YUAN ZHUZHI

(The Department of Computer and System Sciences, Nankai University, Tianjin 300071)

LI YUMEI

(The 707 Institute of China Ship Company, Tianjin)

HOU PING WANG WEIMIN CUI BAOMIN

(The Department of Computer and System Sciences, Nankai University, Tianjin)

ABSTRACT

This paper introduces an application of the generalized predictive self-tuning controller to an industrial boiler. The operation has demonstrated that this type of controller has good robustness.

Key words: Generalized predictive control; self tuning control; computer control; boiler control.



陈增强 1964年9月生于天津,1987年6月毕业于南开大学数学系,获理学士学位,1990年6月获南开大学计算机与系统科学系自动控制工学硕士学位并在该系自动控制教研室任教。曾获南开大学优秀研究生论文一等奖。主要从事自动控制理论及应用的研究工作,研究兴趣:自校正控制、预测控制及计算机控制。



袁著祉 教授。1937年生于山东青岛,1962年毕业于南开大学数学系并留校任教,1970年开始研究自动控制,1984年转计算机与系统科学系,1989年赴美国进行合作研究。曾完成化工、造纸、发酵、锅炉、太空站等10个装置的自适应控制系统,发表几十篇论著,获国家教委科技进步一等奖。研究兴趣:建模、自适应理论及应用、计算机控制等。



李玉梅 高级工程师，1964年毕业于南开大学计算数学专业，在707研究所进行系统仿真、软件研制及计算机控制的研究工作，完成舰船、锅炉及电站用加固16位微机实时多任务操作系统及应用软件，还参与了自校正控制软件包的研究工作。发表多篇论文，获国家教委科技进步一等奖。研究兴趣：计算机控制、系统软件及应用软件。

中国自动化学会主办的北京高新技术 与经济管理培训中心获准成立

由中国自动化学会主办，北京联合大学自动化工程学院协办的“北京高新技术与经济管理培训中心”日前正式由北京市成人教育局批准成立。

该中心的领导机构为理事会，负责制定中心的办学方向、教学方针，并决定中心的重大事项。我会将负责新专业设置和教材编写的指导，充分利用全国各省(市、区)自动化学会和各专业及工作委员会的技术力量，协助在全国范围内进行现场教学、答疑等活动。北京联合大学自动化工程学院负责提供办公场所、教室和教学组织与管理人员，以及其他办学所需的条件，并负责教学的组织工作和教材的编写、印刷。同时，办学双方可以在各自的专业范围内，根据各自的实际情况，独立地开展多方面、多层次、多形式的培训、继续教育等方面的办学活动。

该中心开办的专业或学科为：自动化技术与控制理论、仪器仪表与控制装置、应用电子技术与自动化工程设计、机电一体化与传统产业改造、计算机软件和硬件、金融财会与企业管理、汽车运用与维修、土建、外语、能源利用等。办学形式为函授、面授、短期培训。招生范围与对象是面向社会招收在职职工、机关干部、军人、农民和待业青年等。使用教材以自编教材为主，适当选用通用的优秀教材。

我们热切希望我会各省(市、区)学会、各专业与工作委员会充分利用这一办学条件，发挥各自的优势，结合实际，因地制宜、为科技兴国、提高全民族的文化素质做出自己的贡献。

中国自动化学会办公室