

20T/H 工业锅炉主汽压回路参数寻优自适应 PID 控制

孙德敏 洗 辉 曹术华 彭立信

(中国科学技术大学自动化系, 合肥)

摘 要

本文给出了一个自适应 PID 调节器应用于工业锅炉燃烧系统控制的实例, 为克服自适应控制中所遇到的实际问题, 采用了监控级专家控制。实际运行表明, 该系统优于常规 PID 调节器。

关键词: 自适应控制, PID, 监控级。

严格地说, 工业锅炉燃烧系统是一个通过鼓风、进煤、引风来控制输出含氧量、主蒸汽压力、负压的有耦合的 3×3 多变量控制系统。但几十年来, 人们通过前馈等手段, 已成功地将其分解成三个单输入单输出的调节回路。本文讨论的就是以此为基础的主汽压回路的自适应控制问题。如图 1 所示。

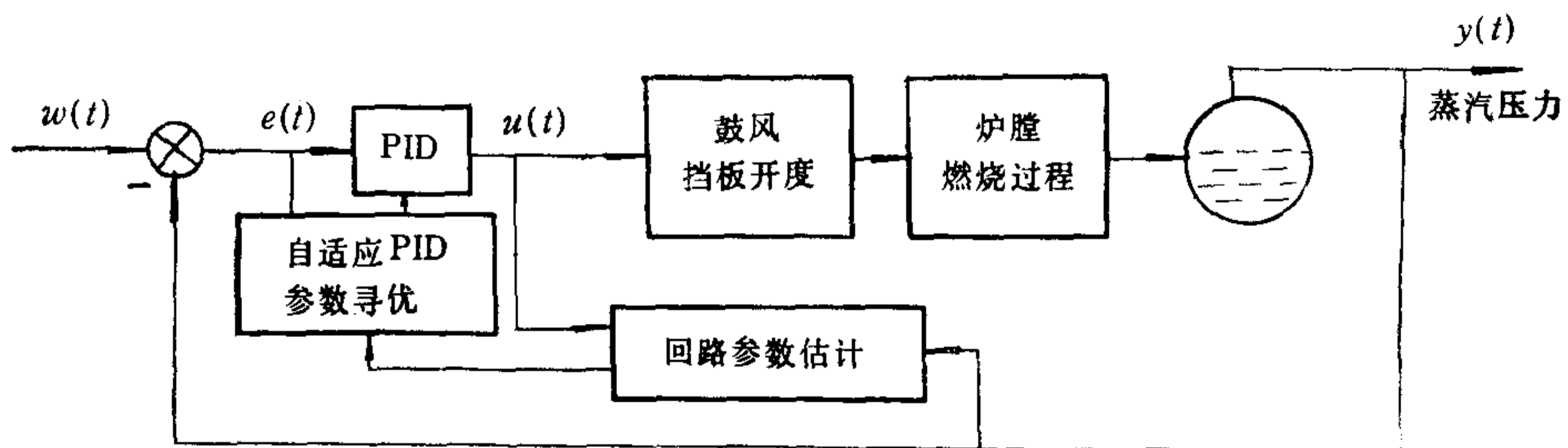


图 1 主汽压调节回路方框图

对主汽压调节回路, 由于大修、炉膛的老化、负荷和环境变化等原因, 使回路参数发生较大的变化, 因而用一组固定的 PID 参数很难实现长期稳定的高性能控制, 所以采用了能适应这种变化的自适应控制。

由于蒸汽流量的变化会引起汽压的突跳或阶跃变化性扰动, 加之锅炉系统经常出现饱和等非线性, 通常的自校正控制算法也很难正常工作, 因而采用了用爬山法进行参数寻优的自适应 PID 控制^[1]。

一、控制算法

采用的参数寻优自适应 PID 控制器算法如下。

1. PID 控制器

离散 PID 控制律为

$$u(k) = K_p \left\{ e_w(k) + \frac{T_0}{T_i} \sum_{j=0}^k e_w(j) + \frac{T_d}{T_0} [e_w(k) - e_w(k-1)] \right\}, \quad (1)$$

其中 K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数; $e_w(t) = w(t) - y(t)$ 为控制偏差变量; T_0 为采样周期。

对(1)式进行 Z 变换并化简, 则有

$$\frac{u(Z)}{e_w(Z)} = \frac{Q(Z^{-1})}{P(Z^{-1})} = \frac{q_0 + q_1 Z^{-1} + q_2 Z^{-2}}{1 - Z^{-1}}, \quad (2)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} q_0 &= K_p + K_p T_0 / T_i + K_p T_d / T_0, \\ q_1 &= -K_p - 2K_p T_d / T_0, \\ q_2 &= K_p T_d / T_0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2. 系统参数估计

本控制回路的数学模型为

$$A(Z^{-1})y(k) = B(Z^{-1})Z^{-d}u(k) + C(Z^{-1})e(k), \quad (4)$$

其中 $A(Z^{-1}) = 1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_m Z^{-m}$,

$$B(Z^{-1}) = b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \dots + b_m Z^{-m},$$

$$C(Z^{-1}) = 1 + C_1 Z^{-1}.$$

而 $e(k)$ 为白噪声

$$y(k) = Y(k) - Y_{00}, \quad (5)$$

$$u(k) = U(k) - U_{00}, \quad (6)$$

式中 $Y(k), U(k)$ 为实际采集来的输出和输入, Y_{00} 与 U_{00} 为其稳态直流分量。引入

$$f = \left(1 + \sum_{i=1}^m a_i \right) Y_{00} - \left(\sum_{i=1}^m b_i \right) U_{00}, \quad (7)$$

令 $\varphi^T(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-m), \vdots, u(k-d-1), \dots,$

$$u(k-d-m), \vdots, \hat{e}(k-1) \vdots 1], \quad (8)$$

$$\hat{\theta}^T = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_m \vdots \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_m \vdots C_1 \vdots f], \quad (9)$$

则(4)式可写成

$$y(k) = \varphi^T(k) \hat{\theta} + e(k), \quad (10)$$

$$\hat{e}(k) = y(k) - \varphi^T(k) \hat{\theta}(k-1). \quad (11)$$

可用渐消记忆增广最小二乘递推算法。

3. 控制器参数的爬山法寻优

控制器参数 $\mathbf{q}^T = [q_0, q_1, q_2]$ 由二次型性能指标函数的极小值来确定。其性能指标

函数为

$$S = \sum_{k=0}^{\infty} [e_w^2(k) + rK_p^2 \Delta u^2(k)], \tag{12}$$

其中 K_p 为系统增益, r 为加权因子, $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$.

当参考输入 $w(t)$ 为阶跃函数时有

$$e_w(Z) = \frac{\hat{A}(Z^{-1})}{P(Z^{-1})\hat{A}(Z^{-1}) + Q(Z^{-1})\hat{B}(Z^{-1})Z^{-d}}, \tag{13}$$

$$\Delta u(Z) = \frac{Q(Z^{-1})\hat{A}(Z^{-1})}{P(Z^{-1})\hat{A}(Z^{-1}) + Q(Z^{-1})\hat{B}(Z^{-1})Z^{-d}}. \tag{14}$$

应用 Parseval's 原理,有

$$S_{e_w} = \sum_{k=0}^{\infty} e_w^2(k) = \frac{1}{2\pi i} \oint e_w(Z)e_w(Z^{-1})Z^{-1}dZ, \tag{15}$$

$$S_{\Delta u} = \sum_{k=0}^{\infty} \Delta u^2(k) = \frac{1}{2\pi i} \oint \Delta u(Z)\Delta u(Z^{-1})Z^{-1}dZ, \tag{16}$$

将(15)式、(16)式代入(12)式,只要闭环系统是稳定的,就可用 Astrom^[2] 提供的递推算法求出此积分. 所用的最优化方法是 Hooke and Jeeves (1961) 的爬山法(步长加速法).

二、一些实际问题的监控级解决

尽管参数寻优自适应 PID 有较好的鲁棒性,但在遇到在线辨识输入信号不满足持续激励条件、系统结构突变或参数大幅度变化、外部强干扰等情况下,自适应控制将无法保证系统正常运行. 因此,本文吸取了文献[3]提出的引入第三级监控级的思想(见图2),同时吸取了文献[4]的“专家控制”思想.

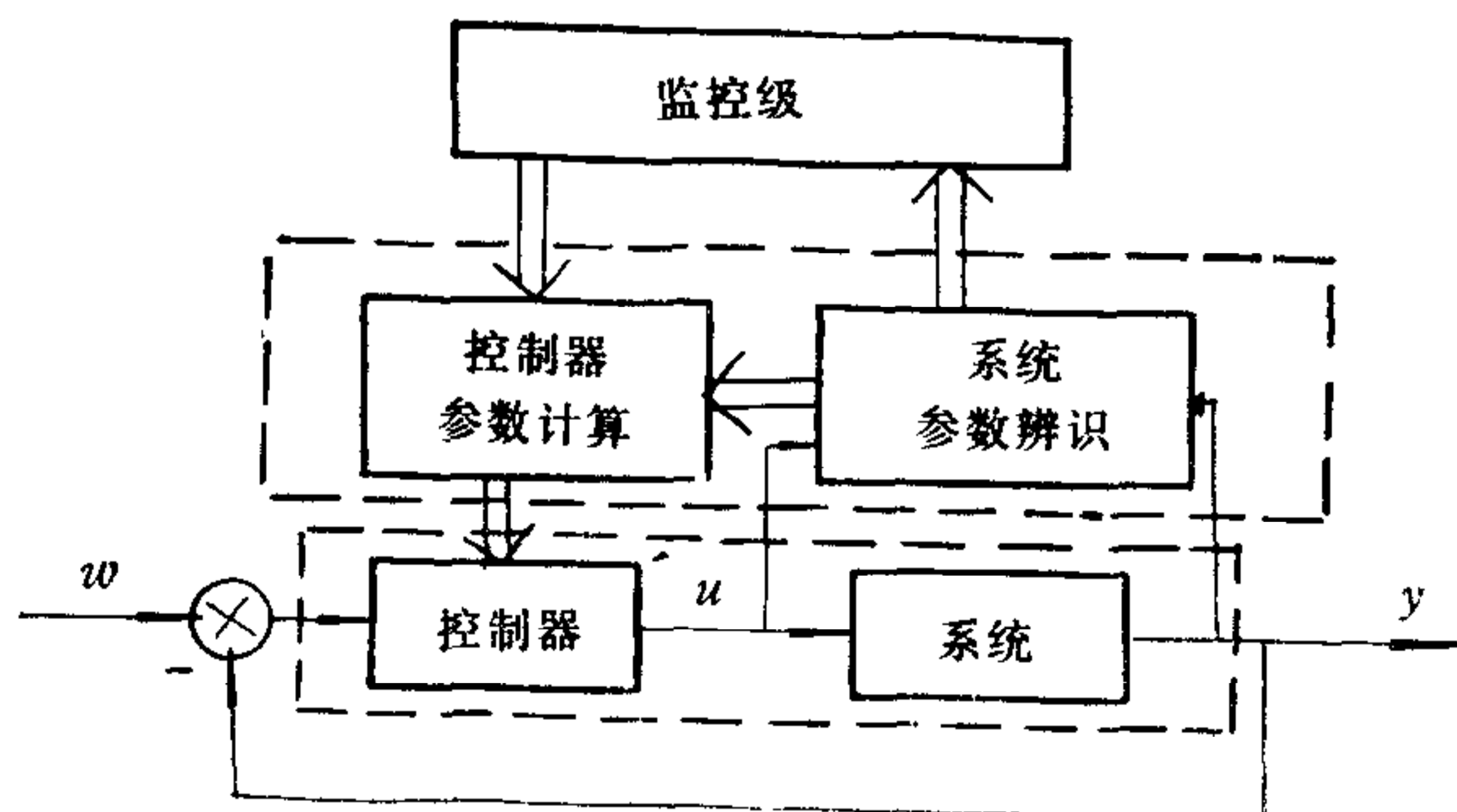


图2 带监控级的自校正控制系统

本锅炉控制系统的第一级由 6809 控制单元完成,第二级和第三级由上位机 PC-9801 完成. 在主汽压回路控制中,监控级采取的一些具体措施有:

1. 辨识参数正确性的判别

由于系统参数估计的初值为 $\hat{\theta}_0 = 0$, 因此控制器刚投入运行的一段时间内,或系统

遇到强外扰动等情况,系统辨识参数尚未收敛之前,不能拿这些参数作为控制器参数的依据。作者加了一个判断,如果辨识参数的变化量连续 10 次小于某个给定的 ε 位时,则认为此时辨识已收敛,且取这 10 次辨识参数的均值作为控制器设计的依据。此外,为防止连续 10 次出错,又附加了增益不能为负,即 $\sum_{i=1}^m b_i / \left(1 + \sum_{i=1}^m a_i\right) > 0$ 的判据,以免出现反向的控制量。

为了防止不稳定的系统参数送出,还加了极点不能在单位圆外的判据。对本系统的一阶模型,只需判别 $|a_1| < 1$ 。

2. 寻优 PID 参数正确性的判别

在 PID 参数寻优过程中,计算(12)式时要求系统是稳定的,因而增加了稳定判据,当该组 PID 参数不稳定时,就回到前一组 PID 参数,这样又隐含了对辨识参数稳定性的复核。

三、运行结果

本算法在重庆长江橡胶厂的一台 20T/H 工业锅炉上已投入运行。所用模型为一阶,纯滞后 $d = 2$, 采样周期 $T_0 = 14$ 秒,目标函数中控制量加权因子 $r = 0.2$, 辨识遗忘因子 $\lambda = 0.98$ 。

主汽压回路的运行曲线见图 3。给定汽压为 11kg/cm^2 , 在此期间蒸汽流量在 7.5—13.4 吨/小时之间波动, 蒸汽压力的调节偏差小于 $\pm 0.3\text{kg/cm}^2$ 。图 4 给出的另一条运行曲线,可看出监控级的作用。在第 13 步给定汽压从 11.5kg/cm^2 降为 10.5kg/cm^2 , 这一跳

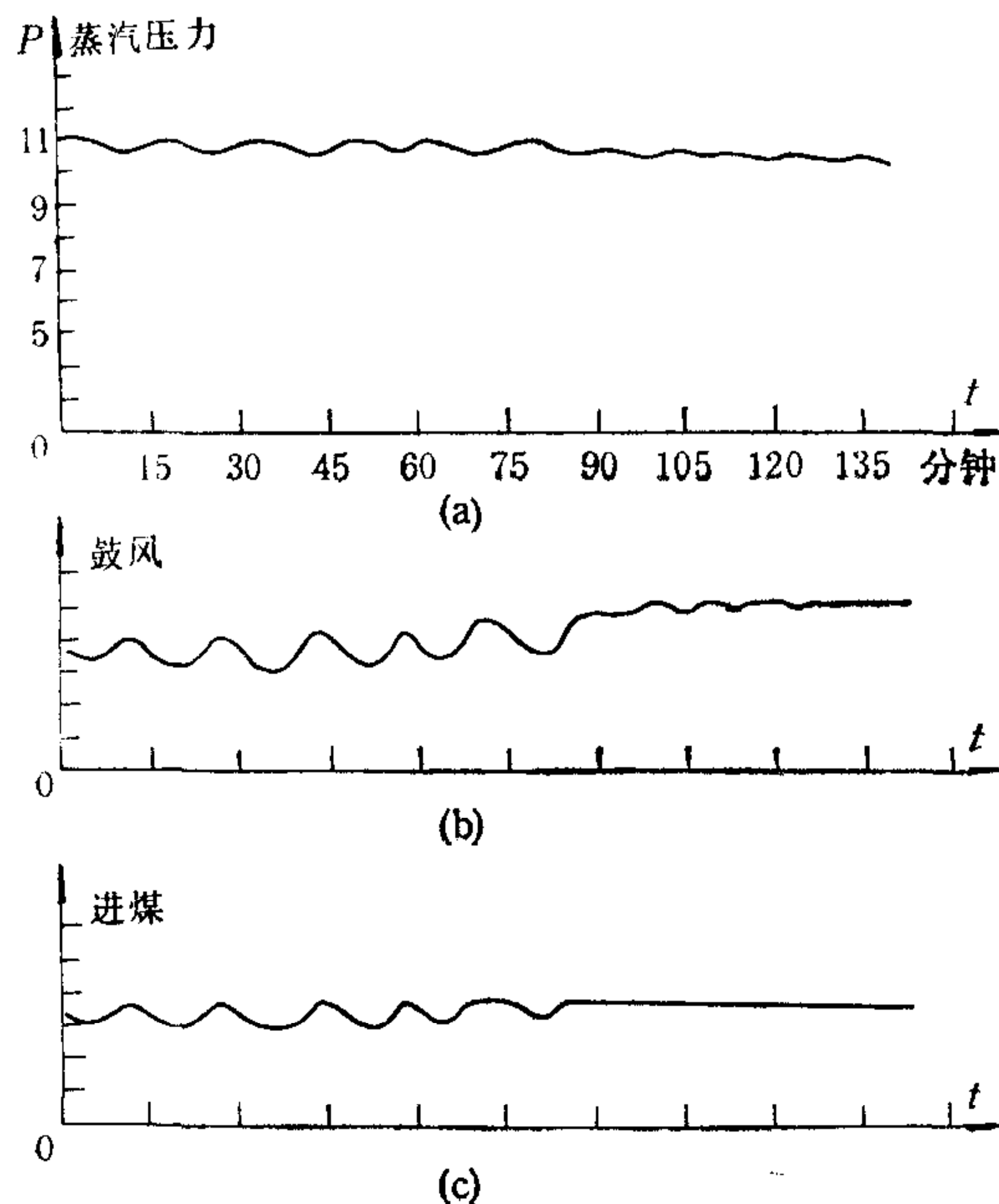


图 3 主汽压回路运行曲线

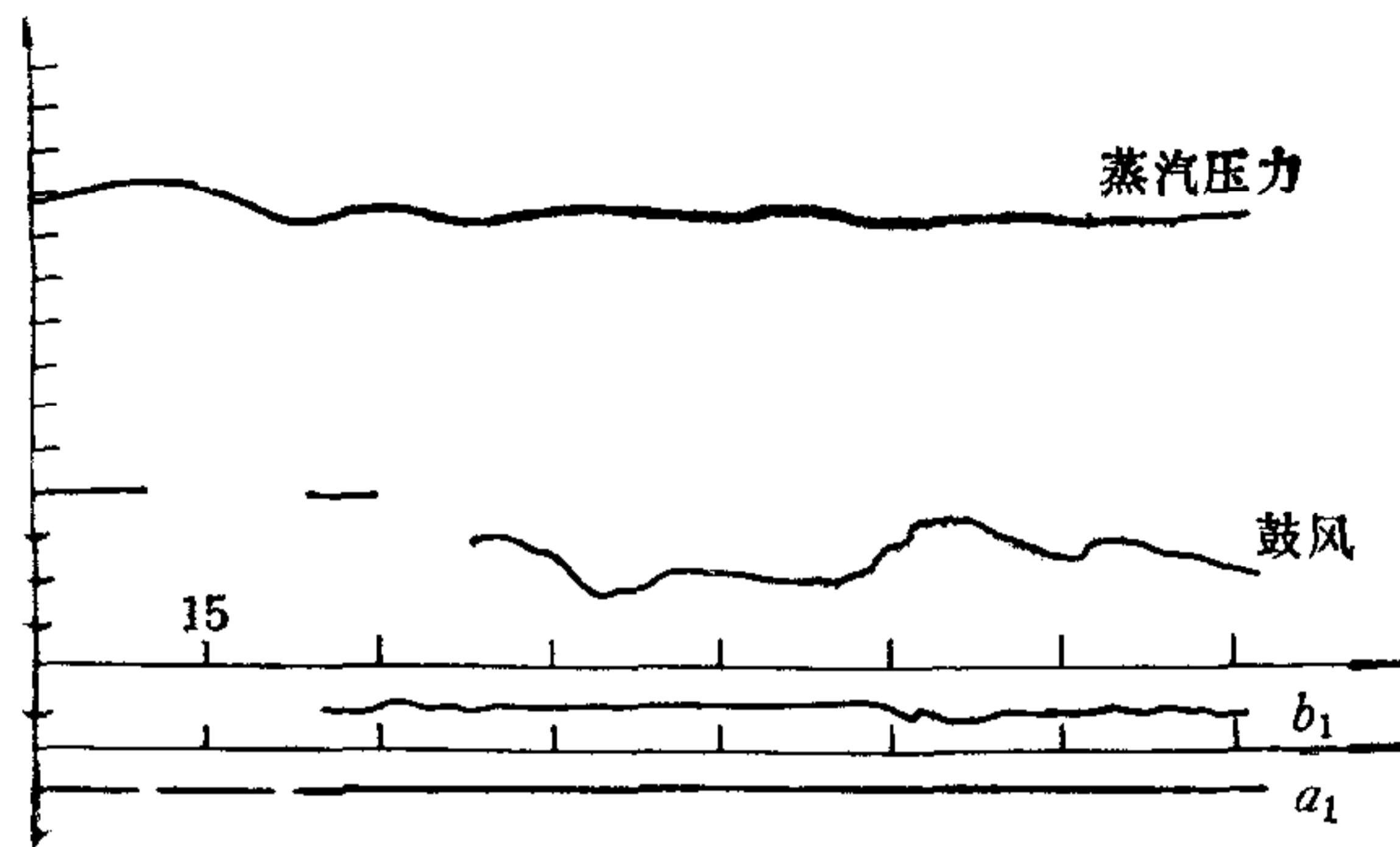


图4 主汽压回路运行曲线及辨识参数曲线

变引起辨识参数的波动,在辨识参数波动的过程中,由于监控级并没有把错误的参数送去修正 PID 参数,控制器一直用跳变前的一组 PID 参数工作,因而主蒸汽压力和鼓风阀都没有发生跳变,汽压平滑地调到 10.5kg/cm^2 。如果没有监控级,控制效果就会糟得多。

参 考 文 献

- [1] Radke, F. and Isermann, R., A Parameter-adaptive PID-controller with Stepwise Parameter Optimization, *Automatica*, 23(1986), 449—457.
- [2] Astrom, K. J., Introduction to Stochastic Control Theory, Academic Press, New York, (1970).
- [3] Isermann, R. and Lachmann, K. H., Parameter-adaptive Control with Configuration Aids and Supervision Function, *Automatica*, 21(1985), 625—638.
- [4] Astrom, K. J., Anton, J. J. and Arzen, K. E., Expert Control, *Automatica*, 22(1986), 277—286.

ADAPTIVE PID CONTROLLER WITH OPTIMUM PARAMETER FOR MAIN STREAM PRESSURE CONTROL OF AN INDUSTRIAL BOILER OF 20 T/H

SUN DEMIN XIAN HUI CAO SHUHUA PENG LIXIN

(University of Science and Technology of China)

ABSTRACT

In this paper, we propose an application example of the adaptive PID controller for an industrial boiler combustion system. In order to tackle the problems which may arise in the practice of adaptive control, a supervision level is introduced to supervise the control system.

Application results show that the system performed better than PID controller tuned by usual method.

Key words: Adaptive control; PID-control; supervision.