

火电厂沸腾燃烧锅炉微机控制系统

牛培峰

(东北电力学院能源工程设计研究所·吉林, 132012)

摘要: 本文在对沸腾燃烧锅炉动态特性作出分析的基础上,通过现场调研提出了符合实际的微机控制方案,现场运行收到满意效果.该控制系统由一台 TP—805 微型计算机及输入、输出接口、信号转换器等组成.本文主要介绍微机控制系统的研究及投运的基本情况,着重于动态特性分析和控制方案的确定.

关键词: 微型计算机; 控制系统; 沸腾锅炉

1 引言

近十几年来,随着电站沸腾燃烧锅炉的发展与应用,有关沸腾炉的一些控制问题已被提出来.面对当今世界能源严重短缺的情况,对沸腾炉的需要量越来越大.尽管沸腾炉有很多优点,但是由于它的自动控制问题一直没有得到很好的解决,影响了它的使用范围的扩大及其效率的进一步提高.本文在对沸腾燃烧锅炉动态特性作出分析的基础上,提出了实用的微机控制方案.

2 汽压及床温控制系统

2.1 动态特性

沸腾炉在动态特性上不同于煤粉炉或重油炉,这主要表现在沸腾炉燃烧室内流化层大热容量的热平衡特性.这种特性及其随运行工况不同而变化的特性,加大了实现自动控制困难.

在燃烧率扰动及汽轮机采用液压调速系统时,根据现场辨识情况,得到汽压被控对象的动态特性为

$$G_p(s) = K_p G(s) e^{-\tau_p s} = \frac{K_p}{(1 + T_{ps})^2} e^{-\tau_p s}. \quad (1)$$

式中,静态增益 K_p ,时间常数 T_p ,延迟时间 τ_p ,都是随运行工况的不同而变的参数.

沸腾炉燃烧室内流化床温度也是一个被调量,对该量的正确控制与否直接影响着锅炉的连续安全运行.

在燃烧率阶跃扰动下,床温被控对象的动态特性可用如下传递函数来描述:

$$G_\theta(s) = K_\theta G'(s) e^{-\tau_\theta s} = \frac{K_\theta}{(1 + T_\theta s)^2} e^{-\tau_\theta s}. \quad (2)$$

现场辨识发现,上式中的参数 $K_\theta, T_\theta, \tau_\theta$ 也是随锅炉运行工况的不同而变化的参数,而且其变化的趋势和汽压对象基本一致.图1为汽压对象和床温对象的传递函数关系图,图2为汽压对象和床温对象的实测动态特性曲线(燃烧率阶跃响应曲线).

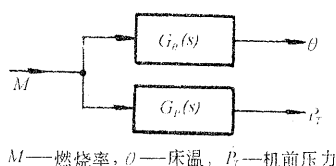


图1 被控对象传递函数关系图

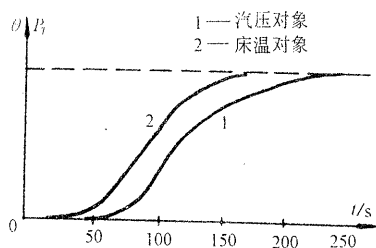


图2 实测动态特性曲线

2.2 控制方案设计

由于沸腾炉燃烧过程被控对象存在纯滞后,对象参数随运行工况变化以及动态过程反应缓慢等特点,对这样的被控对象采用常规 PID 控制难以收到满意的效果.因此,我们提出了一种简便的模型参考自适应 SPC(见后说明)双环选择性控制系统.

2.2.1 模型参考自适应 SPC 主环系统设计

O. J. Smith 提出的 Smith 预估补偿控制,简称 SPC,使得某些具有大纯滞后过程的对象得到了较好的控制.然而,SPC 存在着两个本质的弱点,一是对模型误差敏感;二是抗干扰能力弱.如果我们能够采取某种措施克服 SPC 系统的弱点,则 SPC 将会具有令人满意的控制效果.

针对 SPC 系统的弱点及 SPC 系统本身具有模型参考自适应基本结构的特点,我们设计了如图 3 所示的模型参考自适应 SPC 主环系统.在图 3 中, $K_P G(s)e^{-\tau_P s}$ 为广义控制对象, $K_m G_m(s)e^{-\tau_m s}$ 为参考模型, K 为可调增益, Φ 为自适应律, W_{R_1} 为控制器.

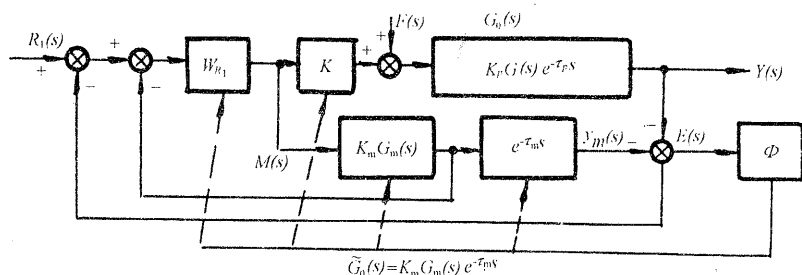


图3 模型参考自适应 SPC 主环系统原理图

如上所述,SPC 系统对模型误差敏感及抗干扰能力弱,实质上对干扰来说 SPC 系统最终还是表现为模型误差.因此,对图 3 系统进行自适应调整的最终目的是,使系统的模型误差 $E(s) = 0$. 由于

$$E(s) = [M(s)K + F(s)]K_P G(s)e^{-\tau_P s} - K_m G_m(s)e^{-\tau_m s} \cdot M(s). \quad (3)$$

若使 $E(s) = 0$, 由式(3)可知应满足下列条件:

$$\begin{cases} G_m(s) = G(s), \\ K = \frac{K_m}{K_P} - \frac{F(s)}{M(s)}, \\ \tau_m = \tau_P. \end{cases} \quad (4)$$

因为 $G_m(s) = \frac{1}{(1 + T_m s)^2}$, $G(s) = \frac{1}{(1 + T_P s)^2}$, 所以当 $F(s) = 0$ 时, 上述条件可表示为

$$\begin{cases} T_m = T_P, \\ K = \frac{K_m}{K_P}, \\ \tau_m = \tau_P. \end{cases} \quad (5)$$

因此, 定义目标函数 $J = \int e^2(t) dt$, 我们的基本设计思想是, 当系统的 K_P, T_P, τ_P 发生变化时, 根据最优化原则, 在线调整可调参数 K, T_m, τ_m , 使目标函数 J 为最小。

根据最速下降法, 可求得使目标函数 J 为最小值的可调参数为

$$\begin{bmatrix} K \\ T_m \\ \tau_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_0 \\ T_{m_0} \\ \tau_{m_0} \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} \frac{\partial J}{\partial K} \\ \frac{\partial J}{\partial T_m} \\ \frac{\partial J}{\partial \tau_m} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\begin{matrix} K=K_0 \\ T_m=T_{m_0} \\ \tau_m=\tau_{m_0} \end{matrix}$

式中, K_0, T_{m_0}, τ_{m_0} 分别为 K, T_m, τ_m 的初值, λ 为修改增量系数由调整试验确定。根据定义的目标函数有

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial K} = 2 \int e(t) \frac{\partial e(t)}{\partial K} dt, \\ \frac{\partial J}{\partial T_m} = 2 \int e(t) \frac{\partial e(t)}{\partial T_m} dt, \\ \frac{\partial J}{\partial \tau_m} = 2 \int e(t) \frac{\partial e(t)}{\partial \tau_m} dt. \end{cases} \quad (7)$$

由拉氏反变换的性质可得

$$\frac{\partial e(t)}{\partial K} = L^{-1} \left[\frac{\partial E(s)}{\partial K} \right] = L^{-1} \left[\frac{1}{K} Y(s) \right].$$

上式是根据式(3)并令图 3 中的 $F(s) = 0$ 而得到的。这样做是为了简化控制律 Φ , 使其能在实际应用中实现。在这里虽然令 $F(s) = 0$, 但在实际应用中并不要求 $F(s) = 0$, $F(s)$ 可以是任意一种随机干扰或几种干扰的迭加。现场试验及实际运行结果, 已经证实了这样做的合理性。事实上, 当系统达到稳态时, 它满足式(4)的条件。

将上式代入式(7)得

$$\frac{\partial J}{\partial K} = \frac{2}{K} \int e(t) y(t) dt. \quad (8)$$

同理可得 $\frac{\partial e(t)}{\partial T_m} = L^{-1} \left[\frac{\partial E(s)}{\partial T_m} \right] = L^{-1} \left[\frac{2}{T_m} \cdot \frac{T_m s}{1 + T_m s} Y_m(s) \right],$

$$\frac{\partial e(t)}{\partial \tau_m} = L^{-1} \left[\frac{\partial E(s)}{\partial \tau_m} \right] = L^{-1} [s \cdot Y_m(s)].$$

代入式(7)有 $\frac{\partial J}{\partial T_m} = \frac{4}{T_m} \int e(t) Q(t) dt. \quad (9)$

式中 $Q(t) = L^{-1} \left[\frac{T_m s}{1 + T_m s} \cdot Y_m(s) \right], \quad \frac{\partial J}{\partial \tau_m} = 2 \int e(t) \dot{y}_m(t) dt. \quad (10)$

将式(8),(9),(10)代入式(6)得

$$\begin{bmatrix} K \\ T_m \\ \tau_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_0 \\ T_{m_0} \\ \tau_{m_0} \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} \frac{2}{K} \int e(t)y(t)dt \\ \frac{4}{T_m} \int e(t)Q(t)dt \\ 2 \int e(t)\dot{y}_m(t)dt \end{bmatrix} \quad (11)$$

$\begin{matrix} K=K_0 \\ T_m=T_{m_0} \\ \tau_m=\tau_{m_0} \end{matrix}$

设 $T_1 = \frac{K}{2\lambda}$, $T_2 = \frac{T_m}{4\lambda}$, $T_3 = \frac{1}{2\lambda}$ 则上式可化为

$$\begin{bmatrix} K \\ T_m \\ \tau_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_0 \\ T_{m_0} \\ \tau_{m_0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \int e(t)y(t)dt \\ \frac{1}{T_2} \int e(t)Q(t)dt \\ \frac{1}{T_3} \int e(t)\dot{y}_m(t)dt \end{bmatrix} \quad (12)$$

$\begin{matrix} K=K_0 \\ T_m=T_{m_0} \\ \tau_m=\tau_{m_0} \end{matrix}$

式(12)即为模型参考自适应 SPC 算法。

由于 MIT 控制律没有稳定性保证,所以在实际应用中必须对其进行一定的限制才能保证系统的稳定性. 根据 Z. Palmor^[2]提出的稳定性判据,在对参考模型设置参数时,应使 K_m 偏小一些, T_m , τ_m 偏大一些. 同时,对式(12)中的可调参数 K 实行限幅 ($0 < K < M$) 及 λ 选适当小的数值,就能保证系统的稳定性, M 为大于零的正数,其值由现场试验来调整确定. 对于恒值调节系统,采取以上措施后,MIT 控制律就有了稳定性保证.

2.2.2 模型参考自适应 SPC 副环系统设计

副环系统完成对床(层)温的自动调节任务,当床温达到它的最高“安全软限”时,该系统即自动投入运行. 床温对控制系统的精度要求不高,它可以是有差调节,能使床温维持在 $700^\circ\text{C} \sim 1050^\circ\text{C}$ 范围内即满足要求. 然而床温对象也是一个含有大纯滞后的变参数环节,其控制系统也应具有一定的自适应能力. SPC 系统受静态增益变化的影响最为明显,因此设计了一种静态增益自适应 SPC 系统. 图 4 是该系统的原理图. 图中, $K_\theta G'(s)e^{-\tau_\theta s}$ 是被控对象, $K_m' G_m'(s)e^{-\tau_m s}$ 是参考模型, $1 + \tau_\theta s$ 是识别器(比例加微分环节),可调增益 K 及自适应律 Φ 是借助主环系统的.

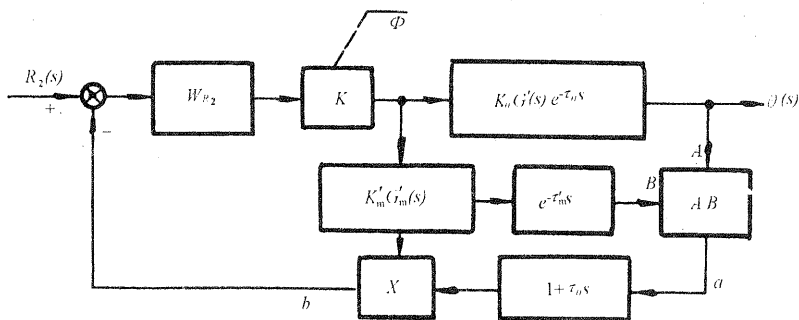


图 4 静态增益自适应 SPC 副环系统原理图

利用主、副环控制系统并通过一个低值选择器 LS 的联络,便构成了图 5 所示的模型参

考自适应 SPC 双环选择性控制系统. 图中, F. B. 信号为积分外反馈, P_b 为汽包压力. 在图 4 和图 5 系统中, 控制律中的微分作用、识别器中的微分作用及汽包压力的微分作用均为实际微分环节 $\left(\frac{Ts}{1+Ts}\right)$, 为了书写方便写成纯微分的形式. 另外, 为了减少干扰的影响, 对微分环节的输入信号均采取了相应的滤波措施 $\left(\frac{1}{1+\tau s}\right)$.

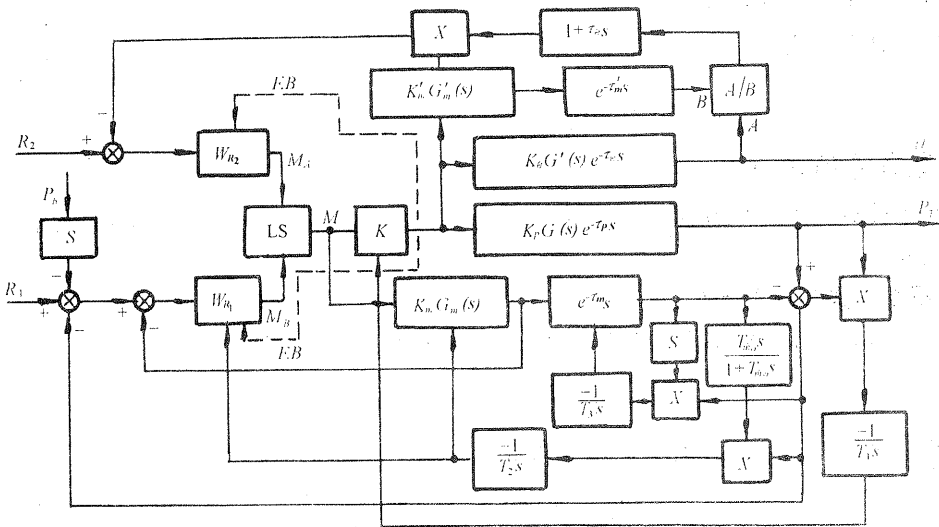


图 5 模型参考自适应 SPC 双环选择性系统结构图

选择性系统的动作过程如下:

当 $\theta < R_2$ 时, $M_A > M_B$, 低值选择器 LS 的输出 $M = M_B$, 主环系统工作. 当 $\theta \geq R_2$, 则 $M_A \leq M_B$, 此时两个系统之间进行工作状态的切换, 切换过程是自动无扰切换. 主、副环两个控制系统间工作状态进行切换的条件是 $M_A = M_B$.

2.3 双环选择性系统的控制器 W_R 的综合

在图 5 系统中, 由于主、副环系统均具有自适应的功能, 所以可以认为它们均达到了完全补偿的状态 ($E(s) \approx 0, A/B \approx 1$), 这样图 5 中的主环系统就可以简化为图 6 所示的系统. 其中

$$G_c(s) = \frac{W_{R1}}{1 + W_{R1} K_p \tau s} \quad (13)$$

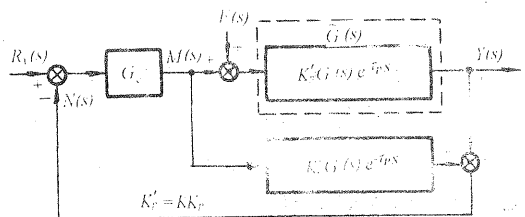


图 6 简化系统图

从图 6 中可以看出, 该系统同时具备开环系统与闭环系统的特征, 这正是 IMC (Internal Model Control) 系统所具有的特性^[4]. 根据 IMC 系统的特性, 可得广义控制器为

$$G_c(s) = \tilde{G}_-^{-1}(s) \cdot f_1 \quad (14)$$

式中, $\tilde{G}_-(s)$ 为对象 $\tilde{G}(s)$ 不含纯滞后的最小相位部分 ($\tilde{G}(s) = \tilde{G}_-(s) \cdot \tilde{G}_+(s)$), $\tilde{G}_+(s)$ 为对

象的所有右半平面零点和纯滞后环节.), 根据 $\tilde{G}_-(s)$ 的特性, 可选 $f_1 = \frac{1}{1 + \epsilon_1 s}$, f_1 是控制器可实现因子, ϵ_1 是控制器参数, 可由给出的性能指标通过过程响应确定. 由式(13)和(14)可得

$$W_{R_1} = \frac{\tilde{G}_-^{-1}(s)}{1/f_1 - 1} = \frac{2T_P}{KK_P\epsilon_1} \left[1 + \frac{T_P}{2}s + \frac{1}{2T_P s} \right]. \quad (15)$$

从上式可知 W_{R_1} 为 PID 控制器, 其参数在线调整算法由式(12)完成. 类似方法可求得副环系统控制器 W_{R_2} 为

$$W_{R_2} = \frac{2T_\theta}{KK_\theta\epsilon_2} \left[1 + \frac{T_\theta}{2}s + \frac{1}{2T_\theta s} \right]. \quad (16)$$

3 送风控制系统

送风控制系统的任务是, 供给充足的空气量, 保证锅炉燃烧过程的经济性, 使锅炉热效率为最高.

3.1 锅炉热效率静态特性

锅炉热效率 η 与过剩空气系数 α 之间存在着极值关系

$$\eta = K_2 \alpha^2 + K_1 \alpha + K_0. \quad (17)$$

且在 $\eta'(\alpha) = 0$ 处 $\alpha_0 = -\frac{K_1}{2K_2}$, 此时 η 具有最大值

$$\eta = \frac{K_1^2}{2} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{K_2} \right) + K_0. \quad (18)$$

方程中 K_0, K_1, K_2 是锅炉负荷、煤种及运行工况的随机函数.

3.2 自寻最优控制器

锅炉热效率的实时测量技术是一个难题, 根据实际运行经验, 我们给出了锅炉热效率的近似表达式:

$$\eta = \beta \cdot \frac{\int_0^T D dt}{\int_0^T \omega dt}. \quad (19)$$

式中, T 为搜索周期, ω 为给煤机转速, β 为修正系数, D 为蒸汽流量.

根据计算公式(19), 自寻最优控制器即可自动寻找最优过剩空气系数 α_0 , 它的输入量是 D 和 ω , 输出量是 α 并以此作为送风控制器的给定值.

4 引风控制系统

为了维持炉膛负压在一定值内, 引风控制系统以炉膛负压为主信号, 送风量作为前馈信号, 输出控制引风机的挡板开度.

5 汽包水位及汽温控制系统

5.1 动态特性

由于锅炉采用的是表面式减温器, 因而其减温水与锅炉给水互相关联, 同时由于减温器的惯性及纯滞后的特性, 致使汽温难以控制. 在给水量及减温水流量分别作阶跃扰动的情況下, 现场辨识得到各通道的传递函数为

$$\begin{cases} \frac{H(s)}{W_H} = \frac{e^{-\tau_{11}s}}{1 + T_{11}s} \cdot \frac{K_1}{T_s} = W_{11}(s), \\ \frac{\theta_T(s)}{W_H} = \frac{K_2}{1 + T_{12}s} \cdot e^{-\tau_{12}s} = W_{12}(s), \\ \frac{\theta_T(s)}{W_\theta} = -\frac{K_3}{1 + T_{22}s} \cdot e^{-\tau_{22}s} = W_{22}(s), \\ \frac{H(s)}{W_\theta} \approx 0. \end{cases} \quad (20)$$

式中, W_H 为给水流量, W_θ 为减温水流量, $H(s)$ 为汽包水位, $\theta_T(s)$ 为过热器出口汽温. 沸腾炉的汽包水位与汽温的动态特性和煤粉炉或重油炉的基本相同, 因此这里就不再给出它们的实测动态特性曲线了.

5.2 控制方案设计

由 $H(s)/W_\theta \approx 0$ 可知减温水流量的变化对汽包水位的影响很小, 因此汽包水位控制系统仍可按照常规方案设计, 即采用单级三冲量控制系统.

汽温对象具有较大延迟, 而且受给水流量变化的影响, 因此本文提出了一种 Smith 预估解耦控制方案使汽温得到了较好的控制. 图 7 为该方案的原理图. 其中, $R_1(s)$ 为给水流量信号, $R_2(s)$ 为汽温给定值, $\theta_T(s)$ 为汽温信号, W_R 为控制器, $N(s)$ 为解耦环节, $W_{22}(s)$ 为广义汽温对象, $W_{12}(s)$ 为给水扰动通道, $G_{22}(s)e^{-\tau_{22}s}$ 为补偿模型.

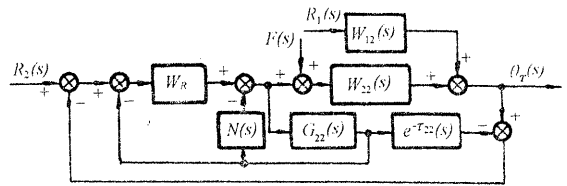


图 7 Smith 预估解耦控制系统

6 微机硬件系统

控制机采用 TP—805 微型计算机, 该机采用总线方式及模块化结构. 其系统配置为:

CPU 板: Z80A, 主频 4MHz, 内存 64K;

CRT 板: 用于 12 英寸绿色显示器;

高抗干扰 A/D 板: 光电隔离、32 路、8 位分辨率;

高抗干扰 D/A 板: 光电隔离、8 路、8 位分辨率.

7 软件系统

整个系统控制程序由 Z80 汇编语言编写, 程序分为基本子程序, 专用子程序, 中断服务程序和系统管理程序四大部分.

8 控制效果

微机系统投运后, 在如下几个方面取得了较好的效果:

- 1) 汽包水位: 静态偏差 $\leq \pm 8 \text{ mmH}_2\text{O}$, 动态偏差 $\leq \pm 15 \text{ mmH}_2\text{O}$.
- 2) 主汽压力: 静态偏差 $\leq \pm 0.04 \text{ MPa}$, 动态偏差 $\leq \pm 0.1 \text{ MPa}$.
- 3) 主汽温度: 静态偏差 $\leq \pm 5^\circ\text{C}$, 动态偏差 $\leq \pm 14^\circ\text{C}$.
- 4) 锅炉热效率: 微机控制比人工手动控制时提高了 2%~5%.
- 5) 炉膛负压: 静态偏差 $\leq \pm 5 \text{ Pa}$, 动态偏差 $\leq \pm 10 \text{ Pa}$.

图 8~图 12 为各控制回路的实测动态过程记录曲线。

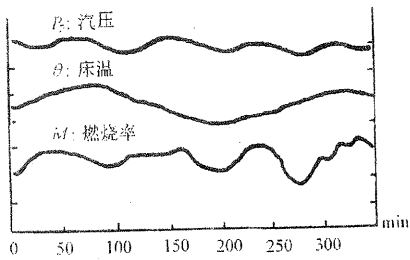


图 8 汽压及床温控制

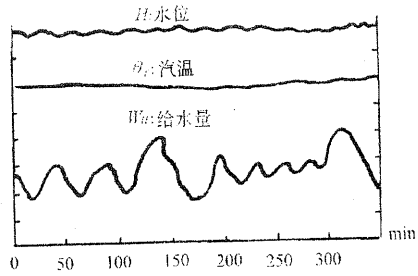


图 9 汽包水位控制

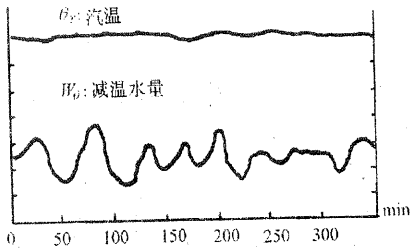


图 10 汽温控制

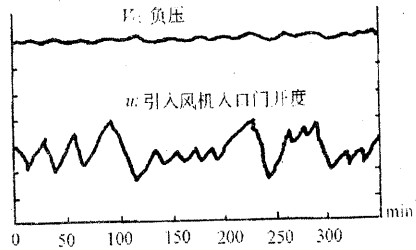


图 11 炉膛负压控制

9 结束语

沸腾炉在我国应用十分广泛,但能够实现微机控制的并不多见.国外有美国、德国、日本及加拿大等国家实现了沸腾炉的微机控制,所用方案均采用古典控制技术,锅炉只能在稳定工况下运行.本文应用现代自适应控制技术,实现沸腾炉的微机控制,使锅炉能在变工况下运行.

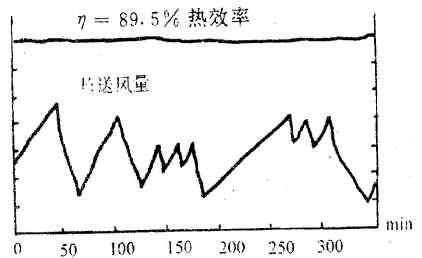


图 12 锅炉热效率控制

参 考 文 献

- [1] 王永初. 自动调节系统工程设计. 北京:机械工业出版社, 1983, 256—266
- [2] Palmor, Z., Stability Properties of Smith Dead Time Compensator Controllers. Int. J. Control. 1980, 32(6)
- [3] 沈平. 时间滞后调节系统. 北京:化学工业出版社, 1985, 124—132
- [4] Carcla, C. E. and Manfred, M., Internal Model Control. 1A Unifying Review and Some New Results. Ind Eng Chem Process Des. Dev., 1982, 21
- [5] 刘晨晖. 多变量过程控制系统解耦理论. 北京:水利电力出版社, 1984, 66—69

Minicomputer Control System for Fluidized Bed Combustion Boiler of Thermal Power Plant

NIU Peifeng

(Energy Engineering Design and Research Section, Northeast Institute of Electric Power • Jilin, 132012, PRC)

Abstract: This paper puts forward a feasible microcomputer control scheme for fluidized bed combustion boiler on the foundation of analyzing its dynamical characteristics through the worksite investigations. The operations on the worksite proved the scheme suggested here is reasonable and feasible. The whole control system consists of a TP—805 microcomputer, input and output interface, signal converter etc. This paper mainly introduces its fundamental condition for manufacturing and operating, and emphasizes the dynamical characteristics analysis and how to fix its control scheme.

Key words: microcomputer; control system; fluidized bed boiler

本文作者简介

牛培峰 1958年生, 高级工程师, 主要研究兴趣为自适应控制、智能控制及其应用。

新书介绍

电子科技大学应用数学系王康宁教授写的《最优控制的数学理论》一书, 即将由国防工业出版社出版问世。该书系统地论述了集中参数系统、分布参数系统、具有完全观测信息的随机系统、具有部分观测信息的随机系统、随机分布参数系统的最优控制的状态空间法和动态规划法。对集中参数系统、分布参数系统和连续时间的随机系统的状态空间法, 作者用泛函分析观点和方法作统一的论述。用非线性算子半群和粘性解理论对动态规划法和了系统的论述。该书可作为研究生和研究工作者的读物或参考著作。

(钟守铭)