



循环流化床锅炉汽温自适应解耦控制系统

牛培峰

(东北电力学院能源工程设计研究院 吉林 132012)

摘要 针对循环流化床锅炉汽温被控对象的高阶特性,参照 Smith 预估滞后系统的设计方法,提出一种与内模原理相结合的模型参考自适应解耦控制系统.由此所设计的控制系统有效地消除了被控对象高阶特性对系统带来的不良影响,同时消除了给水流量变化引起汽温变化的耦合关系.该系统简单、实用,具有工程应用价值,现场运行收到较好的控制效果.

关键词 流化床锅炉,汽温控制,模型参考,自适应.

STEAM TEMPERATURE ADAPTIVE DECOUPLING CONTROL SYSTEM FOR CFBB

NIU Peifeng

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

Abstract Due to the high order characteristics of the steam temperature for CFBB and the design way of Smith forecast estimate delay system, an adaptive decoupling control system of the model reference combining the internal model principle is put forward. The control system effectively eliminates the harmful effects caused by the controlled object's high order characteristics, and eliminates the coupling relation of the steam temperature changed by the volume of the giving water. The system is simple and practical, and has an engineering value. The system is applied to a worksite and good control result is obtained.

Key words FBB, steam temperature control, model reference, adaptive system.

循环流化床锅炉的过热器是在高温、高压下工作的,锅炉出口的过热蒸汽温度是整个汽水行程中工质的最高温度,对于锅炉机组的安全经济运行有重大影响.

1 过热器入口蒸汽温度改变时过热器的动态特性

改变过热器入口蒸汽的温度可以有效地调节出口温度,这是应用较广泛的一种汽温

调节方法,改变入口汽温的方法有直接喷水、自凝式喷水和采用表面式减温器等。

由于75t/h 循环流化床锅炉(中国科学院锅炉)采用的是用表面式减温器来改变入口汽温的方法,因此这里专对采用表面式减温器的汽温控制系统进行研究。

当采用面式减温器来调节过热汽温时,我们把过热器分成两个区域,如图1所示,减温器前称为导前区,减温器后称为惰性区,其传递函数分别用 $W_1(S)$, $W_2(S)$ 表示,整个被控对象的传递函数为 $W(S) = \frac{\theta_1}{W_\theta} = W_1(S) \cdot W_2(S)$,可通过减温水扰动的阶跃响应曲线求取。

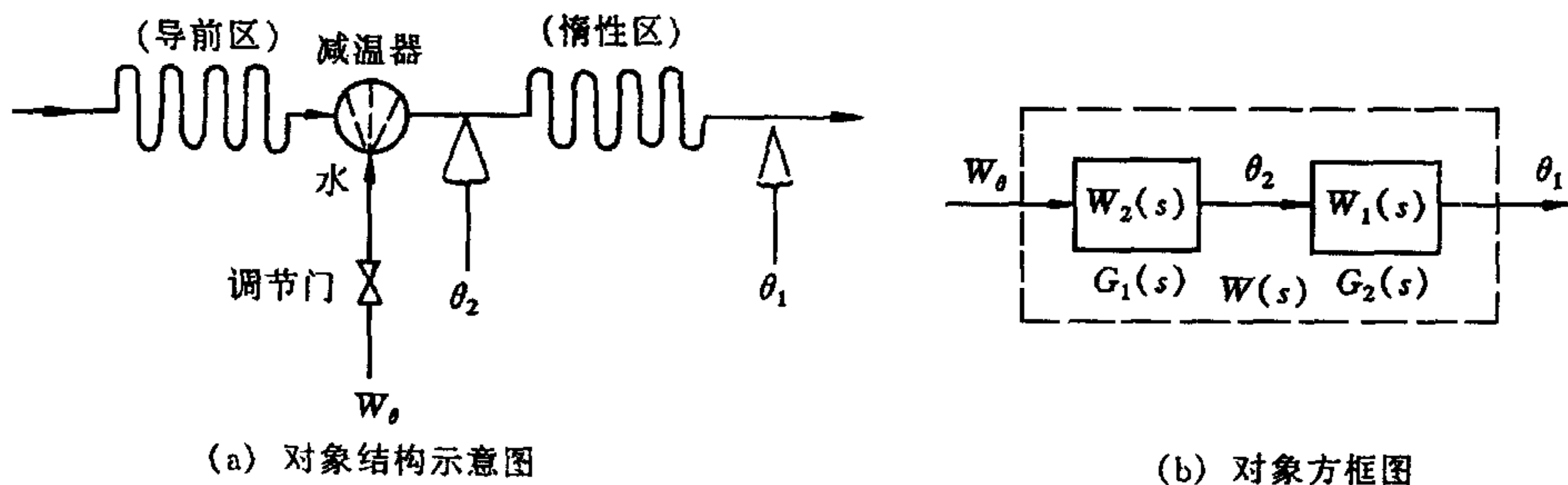


图1 过热器被控对象及方框图

根据汽温的阶跃响应曲线,本文利用面积法求出汽温控制对象和导前区的传递函数,另外通过仿真试验对阶跃响应曲线进行拟合,也得到同样的结果.其中主汽温被控对象的传递函数为

$$W(S) = \frac{\theta_1}{W_\theta} = \frac{K}{(1 + TS)^7} \quad (1)$$

上式中 K ——整个汽温对象的放大系数;

T ——整个汽温对象的时间常数.

导前区的传递函数为

$$W_2(S) = \frac{\theta_2}{W_\theta} = \frac{K_2}{(1 + T_2S)^2} \quad (2)$$

上式中 K_2 ——导前区的放大系数;

T_2 ——导前区的时间常数.

惰性区的传递函数可根据式(1)及(2)求得^[1]

$$W_1(S) = \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2} = \frac{K_1}{(1 + T_1S)^5} \quad (3)$$

中国科学院75t/h 循环流化床锅炉采用的是表面式减温器,其减温水与锅炉给水互相关联,同时由于减温器的惯性和滞后特性及其随运行工况的不同而变化的特性,致使汽温难以控制.

在给水量作阶跃扰动的情况下,现场辨识得到对汽温的传递函数为

$$\frac{\theta(S)}{W_H} = \frac{K_{12}}{(1 + T_{12}S)^7} = W_{12}(S) \quad (4)$$

上式中 W_H ——给水量;

$\theta(S)$ ——过热器出口汽温.

从以上各式中可以看出,汽温控制对象是一个高阶惯性环节,而且受给水流量变化的影响,或者说它们之间存在着耦合关系.由图1(b)可知汽温控制对象可表示成两个惯性环节的串联,且已知 $W_1(S) = \frac{K_1}{(1+T_1S)^5}$ 和 $W_2(S) = \frac{K_2}{(1+T_2S)^2}$,这正是高阶串联系统的控制问题.高阶串联系统属于多容、大惯性动态系统,对于这样的系统采用常规反馈控制的方法很难获得令人满意的控制效果.采用对高阶系统进行降阶处理的方法会带来未建模动力学特性,这将导致控制系统的失真.高阶系统的控制问题一直是控制领域十分关注的课题,迄今为止尚未有比较有效的控制方法.本文将采用文[2]给出的控制高阶串联系统的方法,进行方案设计.

2 Smith 预估解耦自适应汽温控制方案设计

2.1 问题描述

考虑图1(b)所示的高阶串联系统,其中

$$G_1(S) = \frac{k_1}{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_1 S + 1},$$

$$G_2(S) = \frac{k_2}{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \dots + b_1 S + 1}.$$

上式中 $a_i, b_j > 0$; $m > n$; k_1, k_2 为大于零的静态增益.

2.2 方案设计

这里参照滞后系统的 Smith 预估控制方法,可以得到本文设计的如图2所示的 Smith 预估模型参考自适应解耦控制系统.图中 W_R 为控制器; $G_1(S), G_2(S)$ 为广义被控对象; $\tilde{G}_1(S), \tilde{G}_2(S)$ 为参考模型; $W_{12}(S)$ 为锅炉给水对汽温影响的扰动通道; $W_f(S)$ 由被控对象确定,它是消除 $R_1(S)$ 扰动的解耦环节; $A_1(S), A_2(S)$ 为自适应律.

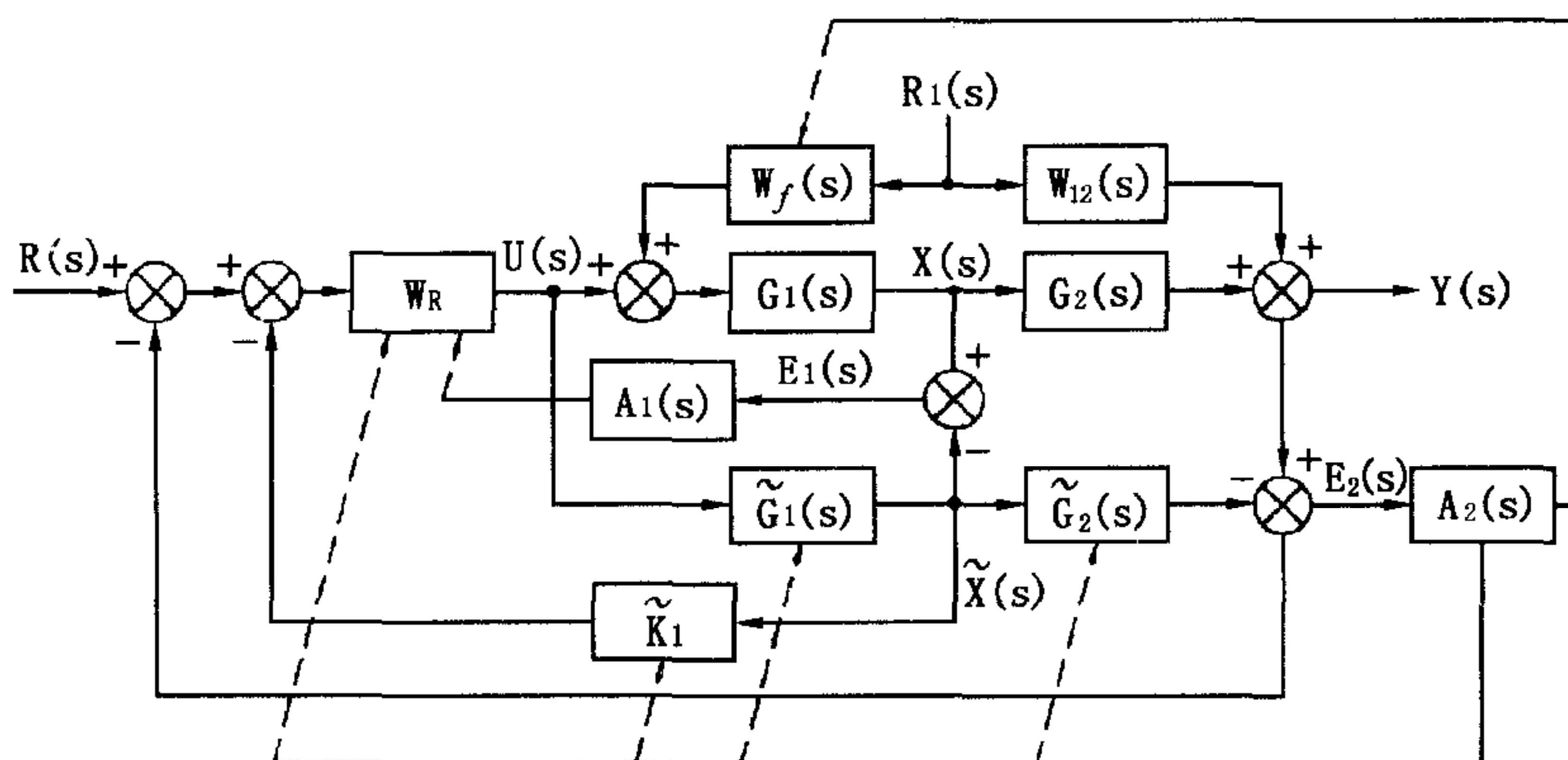


图2 Smith 预估模型参考自适应解耦控制系统

当被控对象 $G_1(S)$ 和 $G_2(S)$ 的参数随着环境的不同或运行工况的不同而发生变化时,应用模型参考自适应的知识在线调整参考模型 $\tilde{G}_1(S)$ 和 $\tilde{G}_2(S)$ 的模型参数,使之跟随对象参数的变化,使 $E_1(S) \rightarrow 0, E_2(S) \rightarrow 0$,同时在线调整控制器 W_R 的控制器参数,使系

统始终保持在最佳运行状态,即为本文的设计思想.

设被控对象 $G_1(S)$ 和 $[G_1(S) \cdot G_2(S)]$ 可用如下状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = A_{P_1} \mathbf{x} + B_{P_1} \mathbf{u}, & \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \\ \dot{\mathbf{y}} = A_{P_2} \mathbf{y} + B_{P_2} \mathbf{u}, & \mathbf{y}(0) = \mathbf{y}_0, \end{cases} \quad (5)$$

描述;并联参考模型 $\tilde{G}_1(S)$ 和 $[\tilde{G}_1(S) \cdot \tilde{G}_2(S)]$ 可用下列状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = A_{m_1}(v_1, t) \tilde{\mathbf{x}} + B_{m_1}(v_1, t) \mathbf{u}, & \tilde{\mathbf{x}}(0) = \tilde{\mathbf{x}}_0, \\ \dot{\tilde{\mathbf{y}}} = A_{m_2}(v_2, t) \tilde{\mathbf{y}} + B_{m_2}(v_2, t) \mathbf{u}, & \tilde{\mathbf{y}}(0) = \tilde{\mathbf{y}}_0 \end{cases} \quad (6)$$

描述;状态广义误差定义为

$$\begin{cases} \mathbf{e}_1 = \mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}, \\ \mathbf{e}_2 = \mathbf{y} - \tilde{\mathbf{y}}. \end{cases} \quad (7)$$

采用超稳定性理论可以导出如下参数调整算法(见文献[3,4])

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = D_1 \mathbf{e}_1, \\ \dot{v}_2 = D_2 \mathbf{e}_2, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_{m_1}(v_1, t) = \int_0^t F_{A_1} v_1 (G_{A_1} \tilde{\mathbf{x}})^T dt + A_{m_1}(0), \\ B_{m_1}(v_1, t) = \int_0^t F_{B_1} v_1 (G_{B_1} \mathbf{u})^T dt + B_{m_1}(0), \\ A_{m_2}(v_2, t) = \int_0^t F_{A_2} v_2 (G_{A_2} \tilde{\mathbf{y}})^T dt + A_{m_2}(0), \\ B_{m_2}(v_2, t) = \int_0^t F_{B_2} v_2 (G_{B_2} \mathbf{u})^T dt + B_{m_2}(0). \end{cases} \quad (9)$$

上式中 $F_{A_1}, F_{A_2}, F_{B_1}, F_{B_2}, G_{A_1}, G_{A_2}, G_{B_1}, G_{B_2}, D_1$ 和 D_2 分别是相应维数的正定矩阵.

2.3 控制器设计

对图2系统进行方框图的变换,并将广义控制器写成

$$G_C(S) = \frac{W_R}{1 + W_R \tilde{k}_2 \tilde{G}_1(S)}, \quad (10)$$

式中 \tilde{k}_2 是参考模型 $\tilde{G}_2(S)$ 的静态增益,从而得到图3所示的改进型模型参考自适应控制系统.该系统具有 IMC^[5] (Internal Model Control) 系统结构,因此可以应用 IMC 系统特性进行控制器的设计.

根据 IMC 系统特性,可以取广义控制器为

$$G_C(S) = [\tilde{k}_2 \tilde{G}_1(S)]^{-1} \cdot f; \quad (11)$$

或当 $\tilde{G}_2(S)$ 不含纯滞后及右半 S 平面的零点时,广义控制器可为

$$G_C(S) = [\tilde{G}_1(S) \tilde{G}_2(S)]^{-1} \cdot f; \quad (12)$$

式中 f 是控制器可实现因子,取其最简形式为

$$f = \frac{1}{(1 + \epsilon S)^\gamma}. \quad (13)$$

(13)式实际上是一个低通滤波器,阶次 γ 取决于 $\tilde{G}_1(S)$ 的阶次或 $[\tilde{G}_1(S) \cdot \tilde{G}_2(S)]$ 的阶次,以保证控制器 $G_C(S)$ 是物理可实现的; ϵ 是控制器参数,它可以通过过程响应来确定,其最佳值是使系统响应不产生超调的最小值.

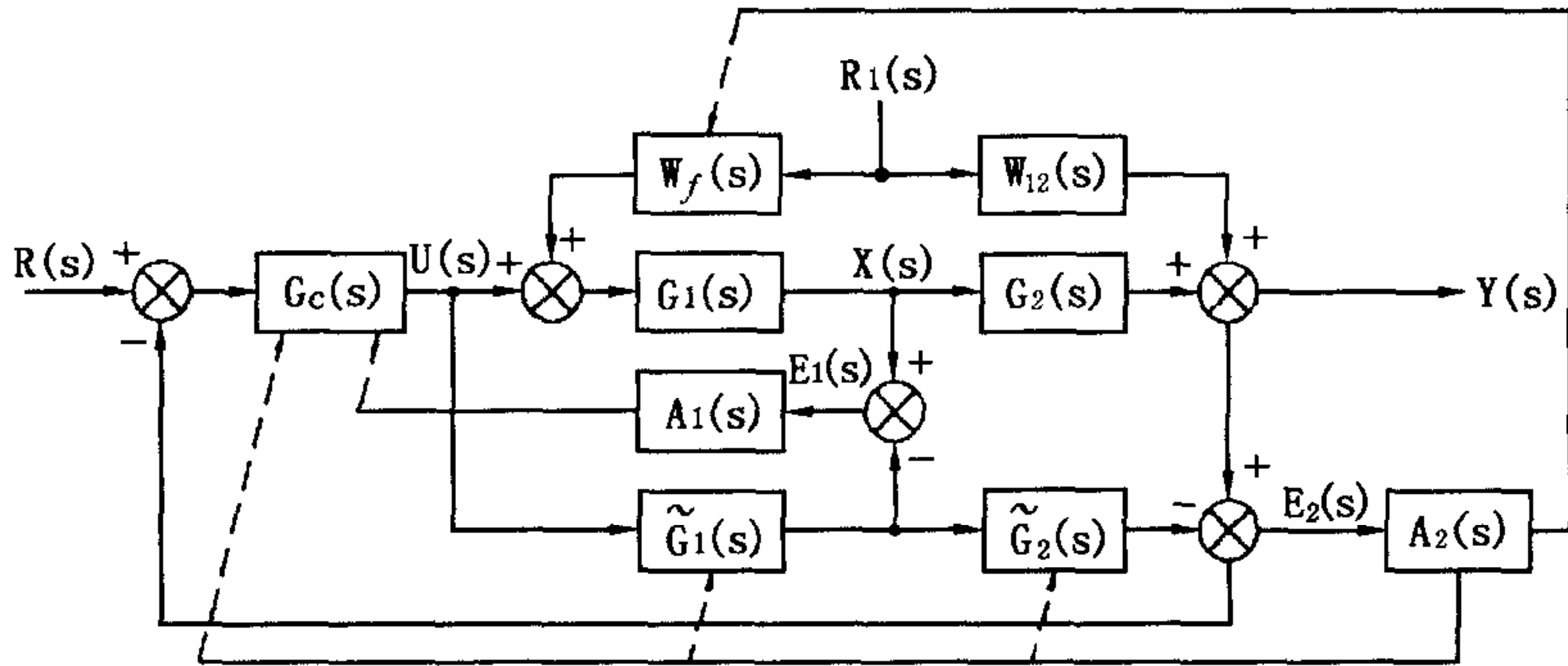


图3 改进型 Smith 预估模型参考自适应解耦控制系统

由式(10)和(11)可得

$$W_R = \frac{f}{\tilde{k}_2 \tilde{G}_1(S)(1-f)}, \tag{14}$$

或

$$W_R = \frac{f}{\tilde{G}_1(S)[\tilde{G}_2(S) - \tilde{k}_2 f]}, \tag{15}$$

即为自适应解耦控制系统的参数自整定控制器。

2.4 现场工业实验研究

2.4.1 对象模型

取汽温控制对象模型为(与图2对应)

$$G_1(S) = W_2(S) = \frac{K_2}{(1 + T_2 S)^2},$$

$$G_2(S) = W_1(S) = \frac{K_1}{(1 + T_1 S)^5}, \quad W_{12}(S) = \frac{K_{12}}{(1 + T_{12} S)^7}.$$

当锅炉负荷在25%—100%之间变化时,现场辨识得到上述模型各参数的变化范围是: K_2 为2~1, T_2 为50—35s; K_1 为0.8—0.5, T_1 为100—80s; K_{12} 为0.3—0.2, T_{12} 为180—150s.

2.4.2 实验系统硬件

系统主机为研化工业 PC486控制机,采用 IPC-610标准机箱.该机采用 PC 总线方式、模块化结构、扩展方便、可靠性高、维护性好.

2.4.3 实验系统软件

采用混合语言编程. Turbo C 编制主程序及各种控制算法的模块化子程序组,汇编语言编制数据采集及数据输出程序,同时利用 A/D, D/A 卡配套的软件驱动程序.

2.4.4 运行控制效果

应用 Smith 预估模型参考自适应解耦控制方案及上述的硬件、软件系统,构成 Smith 预估解耦自适应汽温控制系统,用该系统来实现循环流化床锅炉汽温系统的自动控制,选择采样周期为40s.该自动控制系统在现场投运后,当锅炉负荷在25~100%范围内变化时,取得了如下的控制效果:

- 1) 控温范围为 $450 \pm 3^\circ\text{C}$;

2) 最大静态偏差 $\leq \pm 4^\circ\text{C}$,最大动态偏差 $\leq \pm 8^\circ\text{C}$;

3) 现场运行记录曲线见图4. 图中,曲线1为采用常规PID控制时的记录曲线,在变负荷时已经产生了振荡.

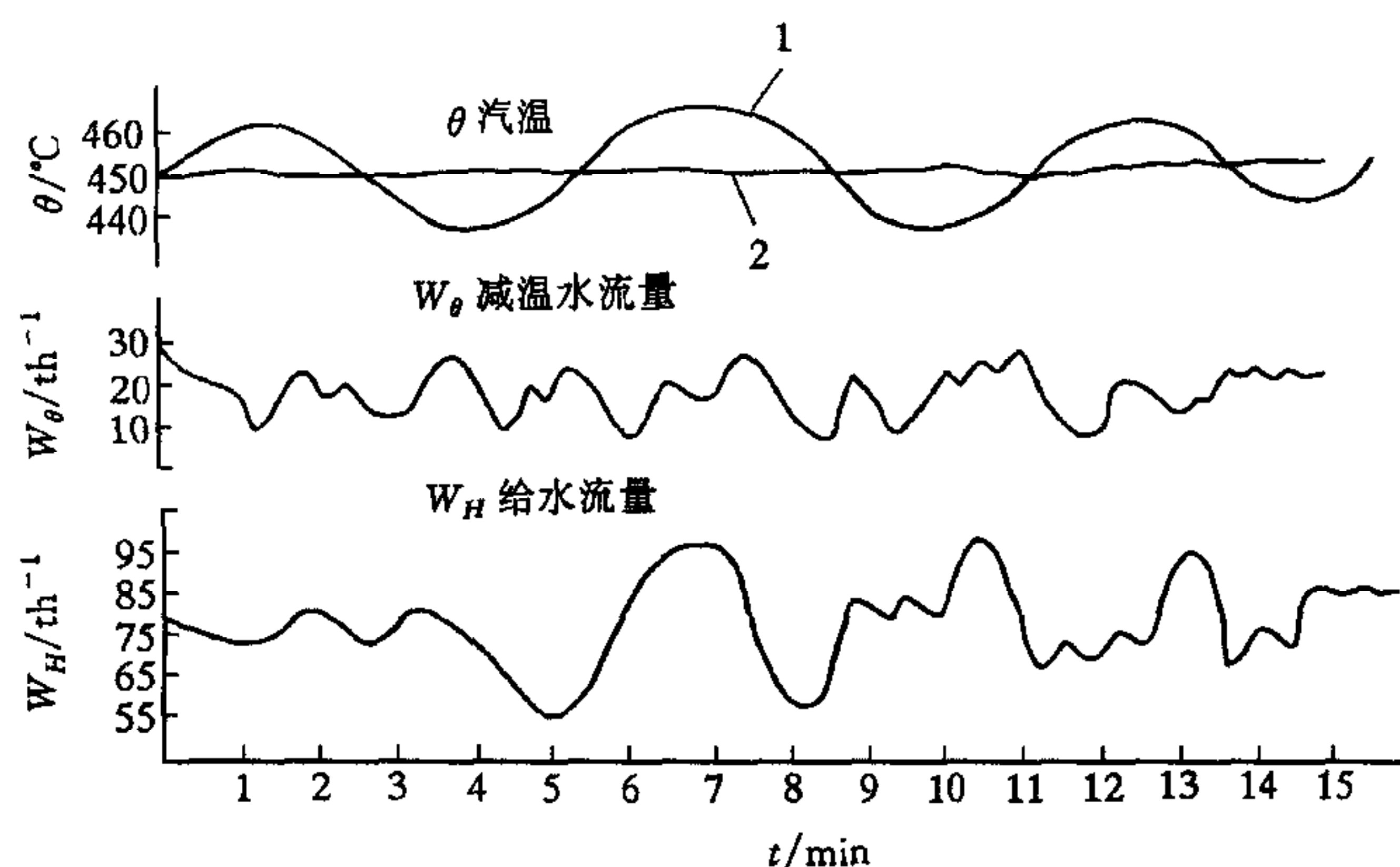


图4 现场运行记录曲线

参 考 文 献

- 1 张玉铎,王满家. 热工自动控制系统. 北京:水利电力出版社,1985
- 2 牛培峰,控制高阶串联系统的一种新方法. 信息与控制,1994,6:366—371
- 3 Landau ID. Adaptive Control—Model Reference Approach. New York:Dekker,1979
- 4 舒迪前,饶立冒,柴天佑著. 自适应控制. 沈阳:东北大学出版社,1993
- 5 Carlos E. Carcla, Manfred Morarl. Internal Model Control. *Ind Eng Chem Process*, 1982,21

牛培峰 男,1958年9月生.1997年9月,东北大学工业自动化专业毕业,获工学博士学位,现任东北电力学院副教授.主要研究方向为:复杂工业过程的建模与控制,自适应控制技术与智能控制技术及其应用.