

鲁棒自适应前馈控制器及其在间歇式 余热锅炉给水系统中的应用¹⁾

柴天佑

秦守敬

段晓钢

(东北工学院自动化研究中心, 沈阳 110006)

(本溪第二炼钢厂)

(本溪钢铁研究所)

摘 要

本文提出了基于降阶模型的自适应前馈控制器。当被控对象是开环不稳定或是非最小相位系统, 当存在未建模动态时, 当受到有界干扰和可测干扰作用时该控制器不仅可以使自适应控制系统稳定运行, 而且实现对可测干扰的补偿。本文将该控制器应用于本溪第二炼钢厂间歇式余热锅炉给水系统获得满意效果。

关键词: 鲁棒自适应控制, 前馈控制, 未建模动态, 余热锅炉。

1 前言

全局收敛的自适应前馈控制算法要求输入与输出, 可测干扰与输出之间的模型阶次的上界已知^[1]。如果存在未建模误差, 自适应控制系统可能失稳^[2]。本文提出了鲁棒自适应前馈控制器, 并将其应用于60吨余热锅炉给水控制系统。

2 鲁棒自适应前馈控制器

被控对象的数学模型为

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-k) + B_2(z^{-1})v(t-k_2) + \xi(t). \quad (2.1)$$

其中 k 和 k_2 分别表示控制输入, 可测干扰和输出之间的延时, 且 $k_2 \geq k$ 。采用下列低阶模型来设计控制器:

$$\bar{A}(z^{-1})y(t) = \bar{B}(z^{-1})u(t-k) + \bar{B}_2(z^{-1})v(t-k_2) + \xi(t), \quad (2.2)$$

其中 $A(z^{-1}) = \bar{A}(z^{-1}) + \bar{A}(z^{-1})$, $B(z^{-1}) = \bar{B}(z^{-1}) + \bar{B}(z^{-1})$, $B_2(z^{-1}) = \bar{B}_2(z^{-1}) + \bar{B}_2(z^{-1})$, (2.1) 式可以写成

$$\bar{A}(z^{-1})y(t) = \bar{B}(z^{-1})u(t-k) + \bar{B}_2(z^{-1})v(t-k_2) + M(t) + \xi(t). \quad (2.3)$$

式中

$$M(t) = -\bar{A}(z^{-1})y(t) + \bar{B}(z^{-1})u(t-k) + \bar{B}_2(z^{-1})v(t-k_2). \quad (2.4)$$

本文于1991年4月22日收到。

1) 国家教委博士点基金项目。该文在中国自动化学会第三届全国学术年会上宣读。

选取如下性能指标:

$$J = [e(t+k)] = [Py(t+k) - Rw(t) + Sv(t+k-k_2) + Qu(t)]^2. \quad (2.5)$$

其中 $w(t)$ 是已知的参考输入信号. P, R, S 和 Q 均是 z^{-1} 加权多项式, 广义输出

$$\phi(t+k) = Py(t+k)$$

的最优预报值 $\phi^*(t+k/t)$ 和最优控制律为

$$\phi^*(t+k/t) = Gy(t) + \bar{H}u(t) + \bar{D}v(t+k-k_2) + \bar{H}u(t) + \bar{D}v(t+k-k_2), \quad (2.6)$$

$$\phi(t+k) = \phi^*(t+k/t) + F\xi(t+k), \quad (2.7)$$

$$\phi^*(t+k/t) = Rw(t) - Sv(t+k-k_2) - Qu(t). \quad (2.8)$$

由于 $M(t)$ 未知, 所以 $\phi^*(t+k/t)$ 和最优控制律只能取

$$\phi^*(t+k/t) = \bar{G}y(t) + \bar{H}u(t) + \bar{D}v(t+k-k_2) \quad (2.9)$$

$$\bar{G}y(t) + \bar{H}u(t) + \bar{D}v(t+k-k_2) = Rw(t) - Qu(t) - Sv(t+k-k_2) \quad (2.10)$$

由(2.10)和(2.3)式可得系统的闭环方程

$$\begin{aligned} [P\bar{B} + \bar{A}Q]y(t+k) &= R\bar{B}w(t) + [\bar{B}_2Q - \bar{B}S]v(t+k-k_2) \\ &+ QM(t+k) + [F\bar{B} + Q]\xi(t+k) \end{aligned} \quad (2.11)$$

为了尽可能消除可测干扰 $v(t)$ 的影响, 选择 S 使其满足

$$\bar{B}S = \bar{B}_2Q, \quad \bar{B}(1)S(1) = \bar{B}_2(1)Q(1) \quad (2.12)$$

或者

$$\bar{F}S = \bar{D}Q, \quad \bar{F}(1)S(1) = \bar{D}(1)Q(1) \quad (2.13)$$

定义数据向量 $x(t)$ 和参数向量 θ 如下:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_r(t) \\ \vdots \\ x_m(t) \end{bmatrix} = [y(t), y(t-1), \dots, y(t-n_{\bar{g}}); u(t), u(t-1), \dots, \dots,$$

$$u(t-n_{\bar{h}}); v(t+k-k_2), \dots, v(t+k-k_2-n_{\bar{d}});$$

$$y(t-n_{\bar{g}}-1), \dots, y(t-n_{\bar{g}}); u(t-n_{\bar{h}}-1), \dots,$$

$$u(t-n_{\bar{h}}); v(t+k-k_2-n_{\bar{d}}-1), \dots, v(t+k-k_2-n_{\bar{d}})]^T$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_r \\ \theta_m \end{bmatrix} = [g_0, \dots, g_{n_{\bar{g}}}; h_0, \dots, h_{n_{\bar{h}}}; d_0, \dots, d_{n_{\bar{d}}};$$

$$g_{n_{\bar{g}}+1}, \dots, g_{n_{\bar{g}}}; h_{n_{\bar{h}}+1}, \dots, h_{n_{\bar{h}}}; d_{n_{\bar{d}}+1}, \dots, d_{n_{\bar{d}}}]^T$$

采用将正则化技术^[3]和相对死区技术结合起来的乘递推估计算法来辨识控制器参数 θ_r ,

$$\hat{\theta}_r(t) = \hat{\theta}_r(t-1) + K(t)V^n(t) \quad (2.14)$$

$$K(t) = a(t)P(t-2)x_r^T(t-k)/[\lambda + x_r^T(t-k)P(t-2)x_r(t-k)] \quad (2.15)$$

$$P(t-1) = P(t-2) - K(t)x_r^T(t-k)P(t-2) \quad (2.16)$$

式中

$$V^n(t) = \phi^n(t) - x^n(t-k)^T\hat{\theta}(t-1) \quad (2.17)$$

$$a(t) = \alpha s(t) \quad (2.18)$$

$$s(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } |V^n(t)| \leq \beta V_{\max} \\ (V^n(t) - \beta V_{\max})/V^n(t) & \text{if } V^n(t) > \beta V_{\max} \\ (V^n(t) + \beta V_{\max})/V^n(t) & \text{if } V^n(t) < -\beta V_{\max} \end{cases}$$

$$\beta = [\varepsilon + 1/(1 - \alpha)]^{1/2} \quad \varepsilon > 0, \alpha \in (0, 1) \quad (2.19)$$

$$\phi^*(t) = \phi(t)/n(t) = Py(t)/n(t) = Py^n(t) \quad (2.20)$$

$$x^n(t) = x(t)/n(t) \quad (2.21)$$

$$\mu^n(t) = \mu(t)/n(t) \quad (2.22)$$

$$n(t) = \begin{cases} \max\{\max_{1 \leq i \leq n_y} |x_i(t-k)|, c\} & M(t) \neq 0 \\ 1 & M(t) = 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

这里 $x_i(t-k)$ 是 $x(t-k)$ 的第 i 项, $c > 0$, $n_y \geq n_x = n_g + n_h + n_d + 3$.

采用下式求控制输入 $u(t)$

$$x_r(t)^T \hat{\theta}_r(t) = R w(t) - S v(t+k-k_2) + \theta u(t) \quad (2.24)$$

可以证明在下列假设: 离线选择 P 和 Q 使 $BP + QA \neq 0$, $|z| \geq 1$ 和 $k_2 > \beta V_{\max}$, 则所提出的自适应前馈控制算法有:

$$(1) |y(t)| < \infty, |u(t)| < \infty \quad (2.25)$$

$$(2) \lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| < \beta V_{\max} n(t) \quad (2.26)$$

3 鲁棒自适应前馈控制余热锅炉给水系统

余热锅炉频繁受到转炉炼钢的启停影响, 炼钢时, 大量高温烟气对它加热, 停止炼钢

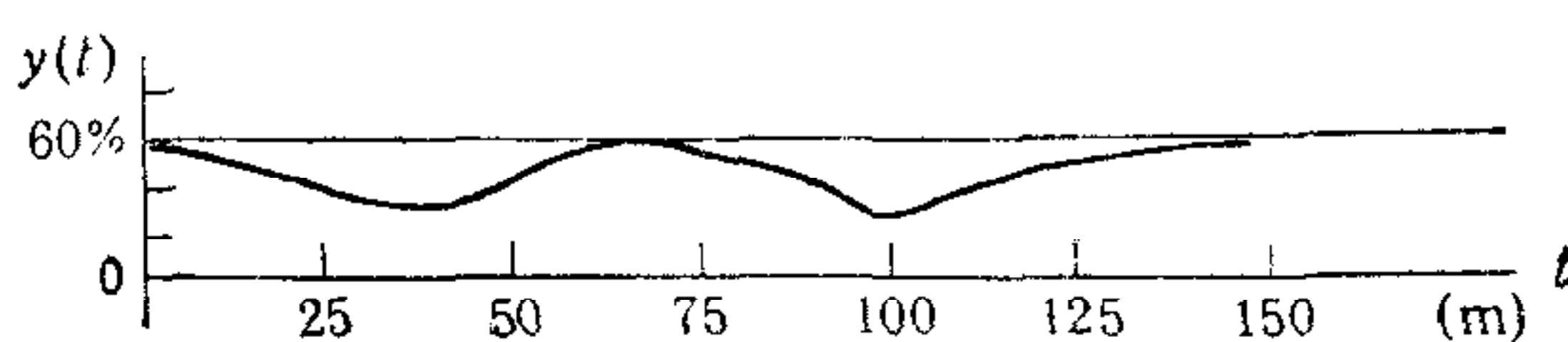


图1 采用 PID 控制器时, 余热锅炉水位 $y(t)$ 变化曲线

时, 中断加热, 该影响可由蒸发量的变化来反映。虽然蒸发量变化复杂但因其可测, 所以将其作为可测干扰来处理。

将水位和给水阀门和开度作为系统的输出 $y(t)$ 和输入 $u(t)$, 对水位影响的其它因素如铁水成份等用有界干扰 $\xi(t)$ 来表示, 采样周期为 30 秒, 采用辨识技术可知被控系统是采用二阶模型来近似的高阶系统, 首先采用常规 PID 控制器来控制水位, 转炉起动和停止炼钢时水位波动较大甚至最大波动值达到给定值的 50%。采用一阶模型来代替二阶系统设计鲁棒自适应前馈控制器, 图 2 实时控制结果表明, 虽然蒸汽流量变化剧烈, 但是本文的控制器有效地克服了蒸汽流量对水位的影响使水位保持在所要求的范围内, 而且要辨识的参数由 9 个减少到 5 个。

将水位和给水阀门和开度作为系统的输出 $y(t)$ 和输入 $u(t)$, 对水位影响的其它因素如铁水成份等用有界干扰 $\xi(t)$ 来表示, 采样周期为 30 秒, 采用辨识技术可知被控系统是采用二阶模型来近似的高阶系统, 首先采用常规 PID 控制器来控制水位, 转炉起动和停止炼钢时水位波动较大甚至最大波动值达到给定值的 50%。采用一阶模型来代替二阶系统设计鲁棒自适应前馈控制器, 图 2 实时控制结果表明, 虽然蒸汽流量变化剧烈, 但是本文的控制器有效地克服了蒸汽流量对水位的影响使水位保持在所要求的范围内, 而且要辨识的参数由 9 个减少到 5 个。

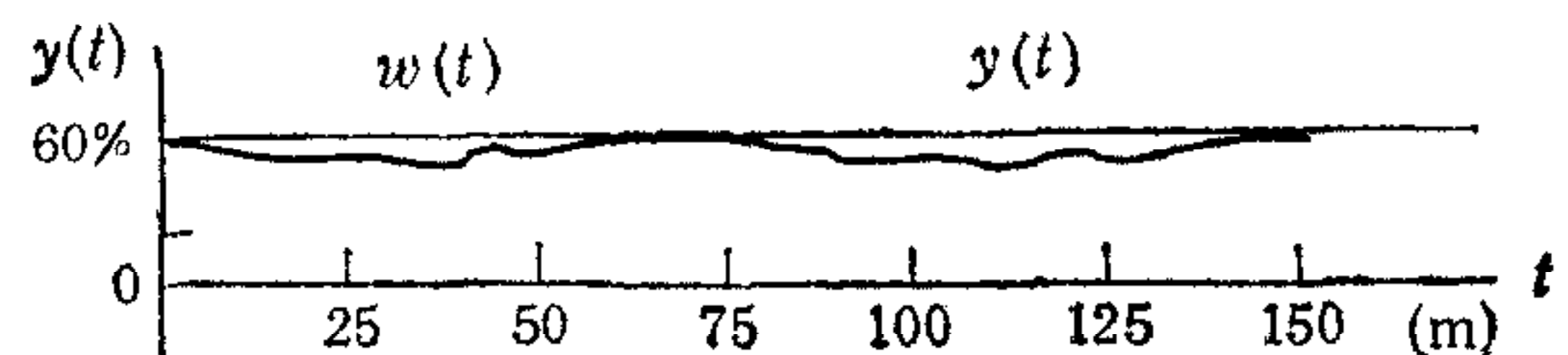


图2 采用鲁棒自适应前馈控制器时, 余热锅炉水位 $y(t)$ 的变化曲线

参 考 文 献

- [1] 柴天佑, 一种新的自校正前馈控制器. 控制理论与应用, 5(1988), (3), 30—37.
- [2] Rohrs, C. E. et al., Robustness of Adaptive Control Algorithms in the Presence of Unmodelled Dynamics, Proc. of IEEE CDC, U. S. A. 1982.
- [3] Cluett, W. A., Stable Discrete-time Adaptive Control in the Presence of Unmodelled Dynamics, Proc. ACC. 1987. 713—719.

A ROBUST ADAPTIVE FEEDFORWARD CONTROLLER AND APPLICATION TO A WASTE HEAT BOILER FEED SYSTEM

CHAI TIANYOU

(Research Center of Automation, Northeast University of Technology)

QIN SHOUJING

(Benxi Second Steel Plant)

DUAN XIAOGANG

(Benxi Institute of Iron and Steel)

ABSTRACT

An adaptive feedforward controller with model reduction is presented in this paper. For unstable and/or nonminimum phase system disturbed by measurable disturbance and/or bounded disturbances, this controller is not only able to make the resulting adaptive control system stable but also can compensate measurable disturbances effectively in the presence of unmodelled dynamics. This controller is also applied to a waste heat boiler feed system of Benxi Second Steel Plant. The satisfactory results are also obtained.

Key words: robust adaptive control; unmodelled dynamics; feedforward control; waste heat boiler feed system.