

蒸汽炉温度的一种自适应预测控制

汪 锐, 汪仁煌

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州, 510090)

摘要: 对具有滞后和惯性时变对象, 提出了一种自适应预测控制方案, 对对象参数进行预测, 利用最小方差控制方法进行控制, 确保系统在对象参数变化时仍保持优良的控制性能. 根据本文提出的方法, 对蒸汽炉系统蒸汽温度控制进行了仿真, 取得了较满意的控制效果.

关键词: 蒸汽炉; 计算机控制; 温度控制; 自适应控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2001)02-0031-05

1 系统的基本结构及控制原理

蒸汽炉的作用是产生一定温度的蒸汽, 用于进行蒸汽浴等理疗. 国内市场上的蒸汽炉设备, 很多都依赖于进口, 价格昂贵, 实行国产化能有效的降低成本, 方便维修, 并能为国家节约大量的外汇. 这里介绍的蒸汽炉智能控制系统完全能够满足用户需要, 可替代国外同类产品.

(1) 实际上蒸汽炉采用电加热, 采用工业交流电压供电电压不是一个恒定值, 容许 10% 的电压变化, 对加热温度的变化影响很大. 蒸汽炉的水源温度随季节温度不同而变化.

(2) 蒸汽炉的蒸汽输送管道为定长, 有确定的蒸汽传送延迟.

(3) 蒸汽炉有一定的炉容, 加热时间为 1.5 min.

由于上述因素的影响, 蒸汽炉是一个纯迟后、有惯性的不确定的系统. 在工况稳定时做的飞升曲线近似是一个一阶纯迟后、有惯性系统响应曲线. 蒸汽炉是一个具有自平衡性的对象, 可用一阶惯性环节和一个延迟环节来近似. 这样得到模拟部分各个环节组成的传递函数:

$$G(s) = \frac{K_d}{1 + T_d s} \cdot e^{-\tau_s}$$

T_d 一般为几十至几百秒, τ 一般为几至几十秒. 可按飞升曲线法测出开环时传递函数各个系数.

一般控制系统中, 在得到准确对象模型的前提下, 可以采用常规控制的办法解决. 然而, 在实际的蒸汽炉这种纯滞后、有惯性的控制对象的控制系统中, 对象的特性参数交流电压供电电压、水源温度都具有时变性, 甚至事先可能都不知道在这种情况下, 常规的控制方案将不能采用. 本文介绍了一种采用对大滞后系统在线辨识参数, 再根据以获得的参数预测系统当前的参数, 进行最小方差控制的方法. 并对实际的蒸汽炉的模型进行了仿真, 实验表明, 对具有固定延时慢时变特性的对象, 本方案具有优良的控制性能.

收稿日期: 2000-06-28

作者简介: 汪锐(1977), 男, 在读研究生; 主要研究方向: 微机测量与智能控制.

1.1 基本结构

系统基本结构如图 1 所示, 主要由被控对象, 参数估计器, 最小方差自适应控制器组成.

$G(s)$ 为带有大纯延时的对象, 其传递函数可表示为

$$G(s) = G_p(s)e^{-\tau s}. \quad (1)$$

$G_p(s)$ 为一不带纯滞后的参数时变的大惯性环节.

1.2 控制原理

对图 1 虚线框所示的

时变对象 $G(s) = G_p(s)e^{-\tau s}$ 进行分析, 将对象传递函数离散化, 系统的输出

$$y(k) = z^{-d}y_p(k) = y_p(k-d), \quad (2)$$

这里设采样时间为 T_1 , $d = \frac{\tau}{T_1}$. 将时变环节 $G_p(s)$ 离散化, 得到离散化模型为

$$A_k(z^{-1})y_p(k) = B_k(z^{-1})u(k), \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} A_k(z^{-1}) = 1 + a_1(k)z^{-1} + \dots + a_n(k)z^{-n} \\ B_k(z^{-1}) = b_1(k)z^{-1} + \dots + b_{n_b}(k)z^{-n_b} \end{cases}$$

为时变参数. 这样, 整个环节的离散化模型为

$$A_{k-d}(z^{-1})y(k) = B_{k-d}(z^{-1})u(k-d),$$

即

$$A_{k-d}(z^{-1})y(k) = z^{-d}B_{k-d}(z^{-1})u(k). \quad (4)$$

从式(4)可以看出, 根据一般的系统辨识方法, 取得输入输出数据对时变对象参数进行辨识, 只能获得 $\hat{A}_{k-d}$ 和 $\hat{B}_{k-d}$ 的辨识值, 并不能直接辨识出对象当前的参数 $\hat{A}_k$ 和 $\hat{B}_k$, 而控制的输出 $u(k)$ 直接作用在时变对象上, 为了取得良好的控制效果, 获得能真实说明对象当前状态的模型是关键问题. 这样, 必须根据已经获得的各个参数估计值来预测当前时刻系统的参数, 并实时修改控制器的参数, 使控制器在实时的控制中能不断的跟踪实际对象, 从而达到对对象较满意的控制效果.

2 控制系统参数辨识

系统是一个闭环控制系统, 这里辨识和控制是有机结合的, 利用辨识方法获得对象的动态性能时必须是在闭环回路中进行. 根据文献[1], 系统满足一定条件时才是可辨识的.

这里, 考虑到对象的性能指标的要求, 在控制器的输出人为引入一个与前向通道上噪声不相关的可测随机摄动 $p(k)$, 其幅值由系统性能指标确定. 这样, 系统就能满足持续激励的条件, 能采用对开环系统辨识的各种方法来进行辨识. 将对象模型用式(4)来描述:

定义

$$\begin{cases} \theta(k-d) = [a_1(k-d), a_2(k-d), \dots, a_n(k-d), b_1(k-d), b_2(k-d), \dots, b_{n_b}(k-d)]^T; \\ h(k) = [y(k-1), \dots, y(k-na), u(k-d-1), \dots, u(k-d-nb)]^T. \end{cases}$$

将式(4)写成如下的最小二乘格式

$$y(k) = \theta(k-d)^T h(k), \quad (5)$$

则可利用递推最小二乘法进行参数估计. 这时获得实际上是 d 时刻前的对象参数的估计值 $\hat{\theta}(k-d)$, 而控制需要根据对象当前的参数进行才能取得较精确的控制效果. 这样, 必须估计系统在当前时刻的参数 $\hat{\theta}(k)$. 设时变参数可以用 p 阶 AR 模型来描述, 即将 $\hat{\theta}(k)$ 的各分量描述成:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i(k) = a_{i1}\hat{\theta}_i(k-1) + \dots + a_{ip}\hat{\theta}_i(k-p); \\ i = 1, 2, \dots, N; \\ N = n_a + n_b. \end{cases} \quad (6)$$

其中, 参数 $a_{ij}(j = 1, 2, \dots, p)$ 用以描述时变参数 $\hat{\theta}(K)$ 的变化规律, p 得选取经过仿真实验表明, 可选为 $1 \sim 2$ 倍 d , 太大的 p 增加运算量, p 过小时估计的效果较差. 再次利用辨识方法估计 AR 模型的系数, 则可以在根据已得到参数辨识值的情况下预报出当前的参数估计值.

定义

$$\begin{cases} a_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ip}]^T; \\ \varphi_i = [\hat{\theta}_i(k-1), \dots, \hat{\theta}_i(k-p)]^T. \end{cases}$$

将式(8)写成如下的最小二乘格式,

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i(k) = \varphi_i^T(k) a_i + v_i(k); \\ i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (7)$$

这样, 可以再次利用递推最小二乘法进行参数估计, 得到需要的 $\hat{a}_i(K)$.

采用式(8)~(14)进行最小二乘递推计算, 估计 $\hat{\theta}(K-d)$ 和 $\hat{a}_i(K)$, 从而求出 $\hat{\theta}(K)$ 的预测值. 在第推运算中, 为了保证数值稳定, 采用了平方根算法^[2], 克服数值发散和提高估计精度.

$$P(N+1) = S(N+1)S^T(N+1), \quad (8)$$

$$f(N+1) = S^T(N)\phi(N+1), \quad (9)$$

$$\beta(N+1) = \rho + f^T(N+1)f(N+1), \quad (10)$$

$$a(N+1) = \frac{1}{\beta(N+1) + [f(N+1)]^2}, \quad (11)$$

$$K(N+1) = \frac{S(N-1)f(N)}{\beta(N)}, \quad (12)$$

$$\hat{\theta}(N) = \hat{\theta}(N-1) + K(N)[y(N) - \phi^T(N)\hat{\theta}(N-1)], \quad (13)$$

$$S(N+1) = \frac{1}{\sqrt{\rho}}[I - a(N)\beta(N)K(N)\phi^T(N)]S(N). \quad (14)$$

设置 $\hat{\theta}(0)$ 和 $S(0)$ 的初值, 再进行递推运算. 由于对象参数的变化率可能会发生变化, 若都采用固定的遗忘因子, 则会影响参数估计的精度, 从而影响系统的控制性能. 为此, 把前两次的参数估计值进行比较, 并根据参数估计值差的变化率调节 ρ 值, 调节范围为 $0.9 \sim 0.99$, 从而加快参数收敛的过程.

3 控制系统调节器的设计

根据式(1)可以看出, 时变环节的 $G_p(s)$ 输出 $y_p(t)$ 和对象的输出 $y(t)$ 只是在时间轴上进行纯延时时间 τ 的平移, 而两者的动态响应曲线完全相同. 如果能对 $y_p(k)$ 有较好的控制效果, 则能对整个系统有良好的控制效果.

通过对系统参数的辨识和预测得到的 $\hat{\theta}(k)$, 根据式(4)可以构造时变环节模型

$$\hat{A}(k)(z^{-1})y(t) = \hat{B}(k)(z^{-1})u(k). \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} \hat{A}(k)(z^{-1}) = 1 + \hat{a}_1(k)z^{-1} + \dots + \hat{a}_{n_a}(k)z^{-n_a}; \\ \hat{B}(k)(z^{-1}) = \hat{b}_1(k)z^{-1} + \dots + \hat{b}_{n_b}(k)z^{-n_b}. \end{cases}$$

取指标函数为 $J = E\{y(t+d) - r(t)\}^2$, 按式(15)进行递推运算, 即可获得时变模型当前时刻的输出 $\hat{y}(k)$, 取模型的输出作为系统输出的估计值, 根据最小方差进行控制, 计算出控制量 $u(k)$. 考虑到实际系统输出控制量有一定的要求, 这里根据实际情况对输出控制量进行限幅处理后输出到对象进行控制.

4 蒸汽温度控制系统自适应控制仿真试验

根据蒸汽温度控制系统质量指标的要求和对对象的实际特性, 蒸汽温度控制模型简化为带有纯迟后一阶系统

$$G(s) = G_p(s)e^{-\tau_s} = \frac{K}{Ts+1}e^{-\tau_s}. \quad (16)$$

在实际上, 由于受到水源温度、压力、供电电压变化等的影响, 使蒸汽炉出口蒸汽温度控制系统成为一个有滞后、惯性不确定的系统. 系统的传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{K(t)}{T(t)s+1}e^{-\tau_s}. \quad (17)$$

采用常规办法难以取得满意的控制效果. 这里讨论采用自适应控制的办法对其进行控制.

根据图 1 系统的基本结构, 用 Matlab 系统仿真工具进行仿真.

按蒸汽炉在工况稳定时做的飞升曲线求构造一个时变的对象模型:

$$G(s) = \frac{K(t)}{T(t)s+1}e^{-\tau_s}.$$

其中, $K(t)$ 和 $T(t)$ 为慢时变参数, 参数的变化范围分别是 $360 \times (1 \pm 60\%)$ 和 $10 \times (1 \pm 60\%)$, τ 为 90. 在输入信号的作用下, 采用常规控制方法的响应曲线如图 2 所示, 跟踪性能较差, 需要较长时间才能达到稳定. 而采用有自适应的响应曲线如图 3 所示, 可以看出采用自适应控制时, 系统有良好的动静态特性, 能充分满足性能指标的要求.

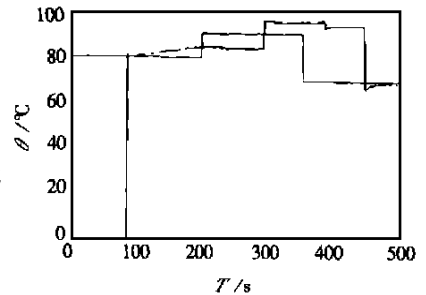


图 2 常规控制的响应曲线

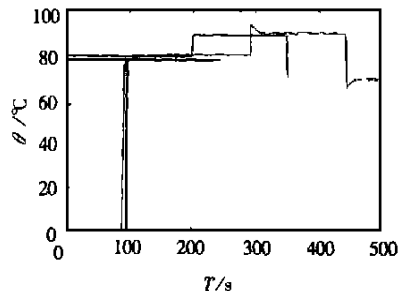


图 3 自适应控制的响应过程

5 结束语

蒸汽炉是一个有纯迟后、有惯性的不确定的系统. 在工况稳定时做的飞升曲线近似是一个一阶纯迟后、有惯性系统响应曲线.

而对象的特性参数(交流供电电压不是一个恒定值、水源温度)都具有时变性, 甚至事先可能都不知道, 在这种情况下, 常规的控制方案将不能采用. 本文介绍了一种

采用对有滞后系统在线辨识参数, 再根据已获得的参数预测系统当前的参数, 进行最小方差控

制的方法,并对实际的蒸汽炉的模型进行了仿真,实验表明,对蒸汽炉的蒸汽输送管道为定长,有确定的蒸汽传送延迟的慢时变特性的对象,对纯延时时间基本不变,参数具有慢时变特性的对象,采用本文介绍的参数预测最小方差控制,能使系统具有优良的控制性能。

参考文献:

- [1] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. 361-395.
- [2] 韩曾晋. 自适应控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995. 70-119.

An Adaptive Predictor Control for Steam Generator Temperature Control

WANG Rui, WANG Ren-huang

(Faculty of Automation, GDUT, Guangzhou 510090, China)

Abstract: This paper discusses an adaptive control scheme on time varying parameter with pure delay and inertia. First, control system predicts parameter of the plant based on the parameters recognized, and then calculates control output according to minimum error control. By using this method, the system can maintain good performance when the parameters of the plant are varying. The steam generator system model is simulated, and a satisfied control effect is achieved.

Key words: steam generator; microcomputer control; temperature control; adaptive control

(上接第 24 页)

UML/OMG IDL Modeling

WANG Jing, LI Zhi-jun, FU Xi-fen

(College of Computer, GDUT, Guangzhou 510090, China)

Abstract: After making a short presentation on the UML technology, this paper takes an emphasis on UML/OMG IDL modeling technology and analyzes methods and steps of UML/IDL Modeling. Then with an electronic bank application, the basic process of UML/IDL Modeling is given.

Key words: UML; CORBA; electronic bank application