

# 基于组合积分过程的自适应控制算法研究

郭鸿宇, 任正云, 陈安钢

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

**摘要:** 组合积分系统广泛存在于钢铁、石油化工、食品加工、打叶复烤、矿物处理等现代工业生产过程中, 传统将被控对象简单通过一阶 Pade 近似设计控制器的方法已无法满足更高精度的控制要求, 且基于组合积分控制器的设计仍停留在非自适应控制的阶段; 研究根据组合积分系统对象特性, 利用带遗忘因子的递推最小二乘算法、相关性分析算法以及粒子群优化算法首次提出并设计了组合积分自适应控制器, 并通过系统仿真验证了组合积分自适应控制算法的非线性在线跟踪能力、抗干扰特性以及鲁棒性, 取得了理想的控制效果; 组合积分自适应控制器的设计思想也可应用于其他低阶时滞系统的自适应控制过程中, 只需将广义目标过程  $G_0$  按组合积分模型设计即可实现; 因此, 组合积分自适应控制器对于提高传统时滞系统自适应控制器的控制精度有着广泛的意义, 并且在带有时滞环节的工业过程自适应控制研究中有极大的应用价值。

**关键词:** 组合积分自适应控制器; 相关分析算法; 带遗忘因子递推最小二乘算法; 粒子群优化算法

## Research on Adaptive Control Algorithm Based on Combined Intergrating Processes

Guo Hongyu, Ren Zhengyun, Chen Angang

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Combined Intergrating Processes are widely applied to modern industrial production including iron, petrochemical and food processing, as well as threshing and redrying line and mineral processing. The traditional method of designing controller with first order Pade approximation cannot meet higher precise controlling requirements anymore. Besides, the design of the controller based on the combined integrating object still remains in the non-adaptive stage. The research are on the basis of the characteristics of the combined integrating process, using least squares algorithm, correlation analysis algorithm and the particle swarm optimization algorithm, firstly proposes and designs the combined integrating adaptive control algorithm, and also verifies the nonlinear on-line tracking ability, anti-interference characteristics and robustness of the combined integrating adaptive control algorithm through system simulation, finally achieves ideal control effect. The design idea of the combined integrating adaptive controller can also be applied to the adaptive control process of other low-order time-delay systems by combining the generalized target process  $G_0$  and the combined integrating model. Therefore, the combined integrating adaptive control algorithm is of great significance to improve the controlling accuracy of the adaptive controller of the traditional time-delay system and it has great application value in the study of industrial adaptive control with time delay.

**Keywords:** combined integrating adaptive controller; correlation analysis algorithm; recursive least squares algorithm with forgetting factor; particle swarm optimization algorithm

## 0 引言

现代流程工业中, 许多工业过程对象可以表示为多个不同时滞积分过程的组合, 关于这类系统的控制器设计研究也较为普遍, 许多学者针对这类过程的研究做了大量的工作, 但普遍的设计思路仍为将这类过程近似为普通的一阶时滞过程, 虽然简化了控制器的设计过程, 但控制效果却不能达到较为理想的结果。2008年, 任正云教授根据其多年行业经验带领其课题组首先提出了组合积分系统这一概念, 他将传递函数由两个或多个积分时滞对象组成的被控系统定义为组合积分系统, 并将这类系统从一般的低阶时滞系统控制器设计思路中剥离出来重

新设计控制器, 取得了很好的控制效果。但是关于这类控制器的设计仍停留在传统的手动调节控制范畴, 而工业过程对象参数往往是随着周围环境温湿度的影响而缓慢变化的, 控制过程仍需要人工干预。所以, 对于组合积分系统, 一类能智能适应被控对象参数变化的自适应控制器的设计尤为必要。

## 1 组合积分系统

### 1.1 组合积分系统的定义

任正云课题组将具有如下特征的一类开环稳定对象定义为组合积分对象<sup>[1]</sup>:

$$\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{sG_i(s)} (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} \quad (1)$$

其传递函数一般由两个或多个积分时滞对象组成, 式(1)中  $G_i(s)$  为不含积分环节的稳定多项式, 式子  $k/s(1 - e^{-\sigma})$  是包含在组合积分系统中的稳定系统<sup>[2]</sup>。在实际工业生产过程中, 存在 5 种典型组合积分对象, 它们的传递函数模型<sup>[3]</sup>通常如下所示:

收稿日期: 2017-07-11; 修回日期: 2017-08-09。

**作者简介:** 郭鸿宇(1990-), 男, 山西阳泉人, 硕士研究生, 主要从事组合积分自适应控制系统方向的研究。

任正云(1969-), 男, 湖南汉寿人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事先进过程控制、模型预测控制等方向的研究。

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau s} (1 - e^{-s}) \quad (2)$$

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau_1 s} (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} \quad (3)$$

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau s (Ts + 1)} (1 - e^{-s}) \quad (4)$$

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau_1 s (Ts + 1)} (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} \quad (5)$$

$$\begin{cases} G_p(s) = \frac{k_1}{\tau_1 s} (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} + \frac{k_2}{\tau_3 s} (1 - e^{-\tau_3 s}) e^{-\tau_4 s} \\ \tau_4 = \tau_1 + \tau_2 \end{cases} \quad (6)$$

组合积分系统开环响应曲线如图 1 所示。

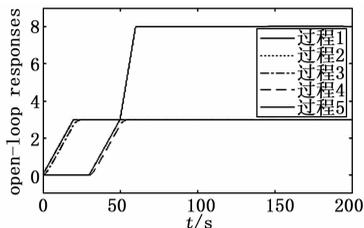


图 1 5 种组合积分过程的开环响应曲线

对于组合积分系统中的每一项, 都含有环节  $k/s(1 - e^{-s})$ , 从而保证了组合积分对象在本质上是一种开环稳定系统, 所以开环的组合积分系统输出具有匀速无超调上升的特点, 本身也非常适合作为期望的闭环传递函数, 故根据组合积分对象这一特性可以设计出控制效果更为理想的组合积分控制器<sup>[3]</sup>。

## 2 组合积分自适应控制器设计

### 2.1 控制器结构

组合积分自适应控制器采用自校正自适应控制系统结构, 通过对被控对象的在线递推估计辨识, 得到过程参数, 并利用模型参数以及组合积分控制器设计原理设计自适应组合积分控制器结构, 并通过此控制作用对被控对象再辨识, 对控制器参数再整定, 最终达到预期的控制性能指标。组合积分自适应控制器主要由 3 个独立功能的单元组成: 参数辨识单元、参数设计单元以及组合积分控制器单元, 结构如图 2 所示。系统运行过程中, 参数辨识单元首先将模型辨识结果传送给参数设计环节, 参数设计环节对这些数据进一步优化处理, 并将其转换为组合积分控制器可接受的参数形式, 最终由组合积分控制器单元实现模型的自适应控制。

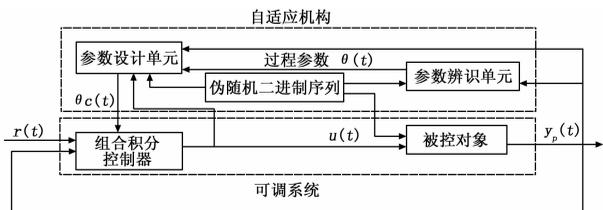


图 2 组合积分自适应控制器结构

### 2.2 系统辨识单元

#### 2.2.1 相关分析环节

相关分析法是目前工业过程中普遍受到重视的一种系统辨识方法, 通常采用伪随机二进制序列作为被辨识系统的输入信号, 然后根据输入输出数据的自相关函数和互相关函数即可推

导出辨识对象的脉冲响应函数, 其主要原理如图 3 所示<sup>[4]</sup>。相关分析法不仅具有极强的抑制噪声能力, 而且可以满足在线辨识的要求。本研究利用相关分析法中输入输出数据的延迟对相关函数的影响这一原理, 辨识出了被辨识系统的延时估计, 达到了预期辨识效果。

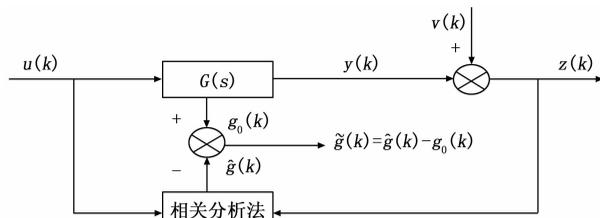


图 3 相关分析法在线辨识原理框图

图 3 中辨识输入信号  $u(t)$  为伪随机二进制序列,  $v(k)$  为白噪声序列, 服从正态分布, 且均值为 0, 方差为  $\sigma_v^2$ ,  $g_0(k)$ 、 $\hat{g}(k)$ 、 $\tilde{g}(k)$  分别为系统脉冲响理论值、估计值与估计误差。

首先, 根据脉冲响应在  $M$  序列一个周期内基本衰减为零的准则, 并由 WinenerHopf 方程的离散形式可得系统输入输出的互相关函数为:

$$R_{uz}(k) = \sum_{j=0}^{N_p-1} \hat{g}(j) R_u(k-j) \quad (7)$$

其次, 由设计准则得  $M$  序列自相关函数为:

$$R_u(k) = \begin{cases} amp^2, & k = 0 \\ -\frac{amp^2}{N_p}, & k = N_p, 2N_p, \dots, N_p - 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $amp$  为  $M$  序列幅值。

将式 (8) 代入式 (7) 可得系统脉冲响应估计值为:

$$\hat{g}(k) = \frac{N_p}{(N_p + 1)amp^2} \left[ R_{uz}(k) + \frac{amp^2}{N_p} \sum_{j=0}^{N_p-1} \hat{g}(j) \right] \quad (9)$$

因此, 通过计算输入输出数据的互相关函数, 就能够通过式 (9) 求出脉冲响应的估计值, 并得到脉冲响应的估计误差, 然后通过脉冲响应的估计值并结合组合积分系统的过程特点即可估计出系统的滞后时间常数  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 。

本研究首先生成循环周期为  $N_p = 2^6 - 1$  的  $M$  序列, 初始状态向量为  $[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]$ ,  $M$  序列发生器的 Simulink 模块如图 4 所示<sup>[5]</sup>。

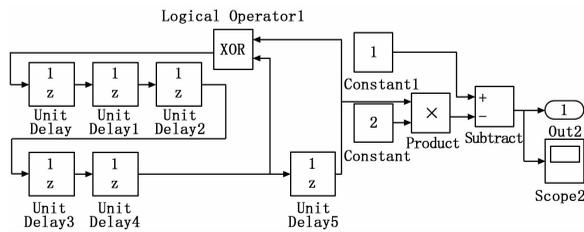


图 4  $M$  序列发生器

生成的  $M$  序列如图 5 所示。

其次, 利用乘同余法生成  $U[0, 1]$  均匀分布的随机数, 并进一步产生标准差为 0.1 的正态分布白噪声序列, 如图 6 所示。

若将式 (2) ~ (6) 对应的组合积分对象依次称为过程

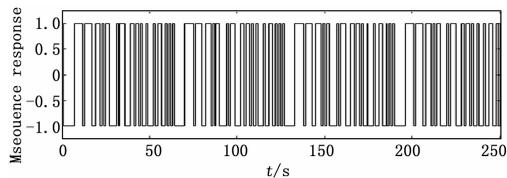


图 5 M 序列波形曲线

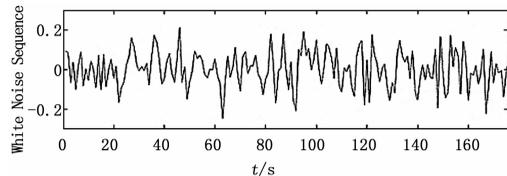


图 6 标准差为 0.1 的白噪声序列

1、过程 2、过程 3、过程 4、过程 5，则对应过程 2 依次取模型参数为  $\tau_1=20$  s、 $\tau_2=30$  s、 $k=3$ ，搭建 Simulink 仿真模型如图 7 所示。

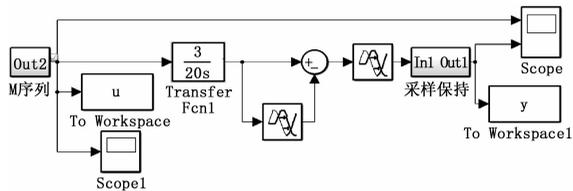


图 7 相关分析法组合积分对象模型

由组合积分对象模型可得系统输入输出响应如图 8 所示。

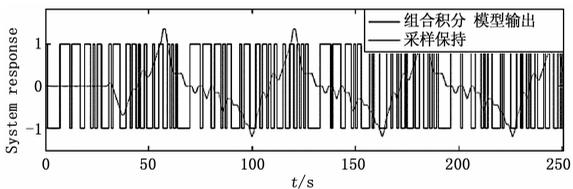


图 8 组合积分对象模型输入输出响应

可加干扰为标准差  $\sigma_v$  分别等于 0, 0.1, 0.5 的白噪声序列，则相关性分析法所得脉冲响应估计值和理论值结果如图 9 所示。

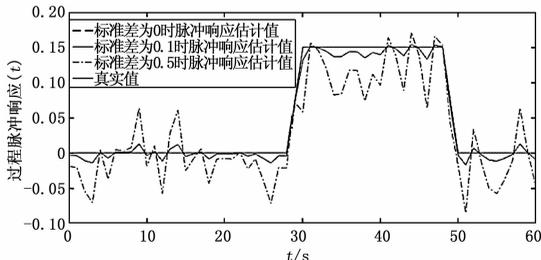


图 9 过程 2 脉冲响应估计值与理论值

标准差分别为 0, 0.1, 0.5 时过程 2 脉冲响应误差曲线如图 10 所示。

根据图 9、图 10 可得白噪声标准差分别取 0、0.1、0.5 的情况下过程 2 的估计误差标准差分别为： $2.69 \times 10^{-15}$ 、0.0957、0.5080。

根据过程 2 可得组合积分对象传递函数的拉普拉斯反变换如式 (10) 所示：

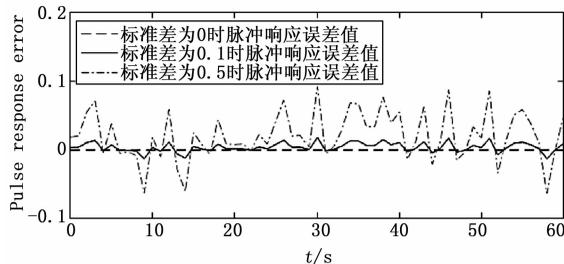


图 10 过程 2 脉冲响应误差曲线

$$g_p(t) = \frac{k[\mu(t - \tau_2) - \mu(t - (\tau_1 + \tau_2))]}{\tau_1} \quad (10)$$

同理可得过程 4 的相关性分析法所得脉冲响应估计值和理论值结果如图 11 所示。

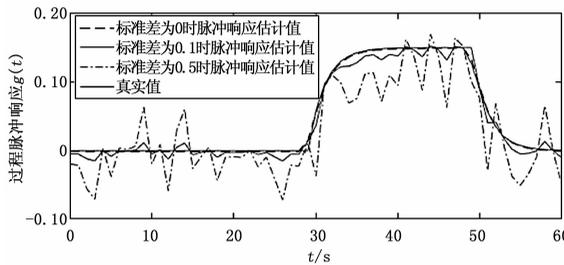


图 11 过程 4 脉冲响应估计值与理论值

标准差分别为 0, 0.1, 0.5 时过程 4 脉冲响应误差曲线如图 12 所示。

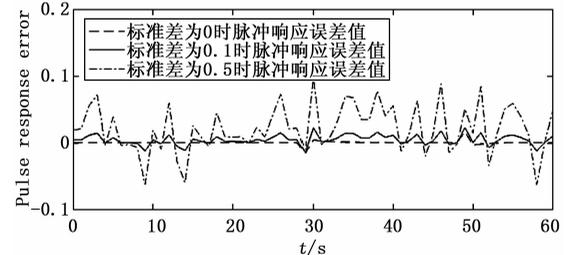


图 12 过程 4 脉冲响应误差曲线

根据过程 4 可得组合积分对象传递函数的拉普拉斯反变换如式 (11) 所示：

$$g_p(t) = \frac{k[\mu(t - \tau_1 - \tau_2)(e^{\frac{\tau_1 + \tau_2 - t}{T}} - 1) - \mu(t - \tau_2)(e^{\frac{\tau_2 - t}{T}} - 1)]}{\tau_1} \quad (11)$$

根据图 11 和图 12 可得白噪声取 0、0.1、0.5 的情况下过程 4 的估计误差标准差分别为：0.0392、0.1154、0.5080。

通过图 10 和图 12 可以看出，在可加白噪声标准差分别取值 0, 0.1 的情况下，利用相关性分析法得到的脉冲响应估计值与理论值误差较小，进一步证实了相关性分析法辨识模型的正确性。

由此，根据相关分析法得到的时域脉冲响应估计值并通过简单的模式识别算法即可较为精确的辨识出组合积分过程的滞后参数  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ ，接着需要利用带遗忘因子的最小二乘算法进行进一步辨识，而对于过程 5 的相关性分析辨识还需要另外的滤波环节、数据处理与模式识别算法，将在未来的研究工作中给出。由于过程 2 包含过程 1、过程 4 包含过程 3，所以本辨识

算法适用于常见的 5 种组合积分过程, 且辨识结果满足预期误差范围。

### 2.2.2 最小二乘环节

在参数时变系统的辨识过程中, 带遗忘因子的递推最小二乘算法不仅收敛快速, 而且可以实时在线估计参数, 针对参数时变带来的“数据饱和”现象也有较好的抑制作用, 所以本研究采用带遗忘因子的递推最小二乘算法对组合积分对象模型参数进一步辨识<sup>[6]</sup>。

考虑如下差分形式参数模型:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) \cdots -a_{n_a} y(k-n_a) + b_0 u(k-d) + \cdots + b_{n_b} u(k-d-n_b) + \xi(k) = \varphi^T(k)\theta + \zeta(k) \quad (12)$$

其中:  $n_a, n_b, d$  为结构参数,  $\xi(k)$  为白噪声序列,  $\{y(k), u(k), k=1, 2, \dots, L\}$  为观测输入、输出数据。

数据向量  $\varphi(k)$  为:

$$\varphi(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n_a), u(k-d), \dots, u(k-d-n_b)]^T$$

$$\varphi(k) \in R^{(n_a+n_b+1) \times 1} \quad (13)$$

待估参数  $\theta$  为:

$$\theta = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_0, \dots, b_{n_b}]^T \in R^{(n_a+n_b+1) \times 1} \quad (14)$$

性能指标  $J$  (目标函数)<sup>[6]</sup> 为:

$$J = \sum_{k=1}^L \lambda^{L-k} [y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}]^2 \quad (15)$$

其中:  $\lambda$  为遗忘因子 ( $0 < \lambda \leq 1$ ), 采用指数遗忘法。

综上可得带遗忘因子的递推最小二乘参数估计公式如下<sup>[6]</sup>:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \quad (16)$$

$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \quad (17)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} [I - K(k)\varphi^T(k)]P(k-1) \quad (18)$$

对于过程 2, 首先利用零阶保持器法对其进行离散化, 其中零阶保持器的传递函数如式 (19) 所示:

$$H(s) = \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s} \quad (19)$$

其中:  $T_0$  为采样周期, 则广义对象的传递函数如式 (20) 所示:

$$HG(s) = \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s} \frac{k}{\tau_1 s} (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} \quad (20)$$

Z 变换后结果如式 (21) 所示:

$$y(z)(\tau_1 - \tau_1 z^{-1}) = kT_0 (z^{-1} \frac{\tau_0}{T_0} - z^{-1} \frac{\tau_1}{T_0} - \frac{\tau_2}{T_0}) u(z) \quad (21)$$

再进行反变换得到对象差分形式如式 (22) 所示:

$$y(m) - y(m-1) = \frac{kT_0}{\tau_1} u\left(m-1 - \frac{\tau_2}{T_0}\right) - \frac{kT_0}{\tau_1} u\left(m-1 - \frac{\tau_1}{T_0} - \frac{\tau_2}{T_0}\right) \quad (22)$$

其中: 令  $a_1 = -1, b_1 = kT/\tau_1, b_2 = -kT/\tau_1$ , 则差分方程如式 (23) 所示:

$$y(m) + a_1 y(m-1) = b_1 u\left(m-1 - \frac{\tau_2}{T}\right) + b_2 \left(m-1 - \frac{\tau_1}{T} - \frac{\tau_2}{T}\right) \quad (23)$$

对式 (23) 差分方程形式进行递推最小二乘在线辨识, 结果如图 13 所示。

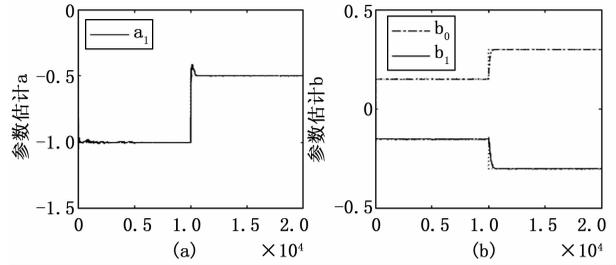


图 13 过程 2 的递推最小二乘辨识结果

其中, 在辨识过程中改变差分方程系数的数值, 辨识结果显示, 递推最小二乘辨识算法对于此类系统有很好的辨识与跟踪特性。

进一步利用两次辨识结果可辨识出过程 2 组合积分系统的增益  $K$ 。

同理, 对于过程 4 可求得其零阶保持器法  $z$  变换形式如式 (24) 所示:

$$\frac{(A + Bz^{-1})(z^{-1} \frac{\tau_2}{T_0} - z^{-1} \frac{\tau_2 + T_0}{T_0} - z^{-1} \frac{\tau_1 + \tau_2}{T_0} - z^{-1} \frac{\tau_1 + \tau_2 + T_0}{T_0})}{(-2 - e^{-\frac{T_0}{T}})z^{-1} + (1 + 2e^{-\frac{T_0}{T}})z^{-2} + (-e^{-\frac{T_0}{T}})z^{-3} + 1} \quad (24)$$

其中:

$$\begin{cases} A = T_0 - T + Te^{-T_0/T} \\ B = T - T_0 e^{-T_0/T} - Te^{-T_0/T} \end{cases} \quad (25)$$

差分方程形式为式 (26):

$$y(m) + (-1 - e^{-\frac{T_0}{T}})y(m-1) + e^{-\frac{T_0}{T}}y(m-2) = \frac{k}{\tau_1} \left[ Au\left(m-2 - \frac{\tau_2}{T_0}\right) + Bu\left(m-3 - \frac{\tau_2}{T_0}\right) - Au\left(m-2 - \frac{\tau_1 + \tau_2}{T_0}\right) - Bu\left(m-3 - \frac{\tau_1 + \tau_2}{T_0}\right) \right] \quad (26)$$

差分方程验证结果如图 14 所示。

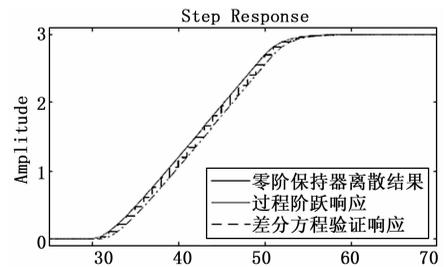


图 14 过程 4 的差分方程验证结果

由图 14 可知过程 4 的差分方程递推公式正确, 且可以很好地描述过程零阶保持器离散化响应。

根据过程 4 的差分方程递推形式, 利用递推最小二乘算法对其进行在线辨识, 同理可得辨识结果如图 15 所示。

由图 13 与图 15 可知最小二乘算法在此类系统的在线辨识过程中有很好的效果, 可先通过相关分析法辨识出模型滞后参数  $\tau_1, \tau_2$ , 进一步通过递推最小二乘在线辨识可辨识出模型参数  $k, T$  等其他项系数。由于对于组合积分系统的辨识过程同时采用了两种辨识方法, 而其中递推最小二乘算法的参数辨识

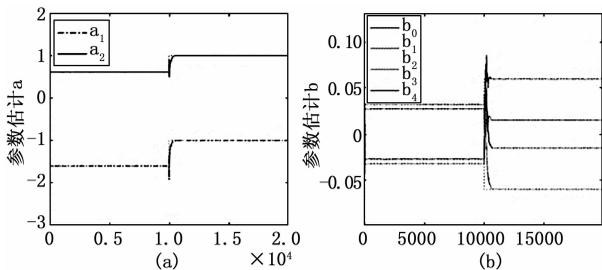


图 15 过程 4 的递推最小二乘辨识结果

以相关性分析辨识算法得到的延时参数结果为前提，所以二次辨识再加之有色噪声的干扰，使得辨识结果产生一定偏差，为了纠正这种偏差，需要对辨识结果进行进一步寻优，才能保证以模型参数准确性为前提的组积分控制器的控制效果达到预期的控制精度。所以，本文在参数设计单元中增加了 PSO 优化算法对辨识结果进行进一步的寻优，以保证模型辨识结果的精确性。

### 3 参数设计单元

参数设计单元主要由参数转换算法与 PSO 寻优算法组成，其中，参数转换算法负责参数辨识单元结果向控制器参数的转换，PSO 寻优算法负责对辨识所得参数进一步精确化处理，使得辨识结果符合期望误差率，进一步增强组合积分自适应控制器的控制效果。

#### 3.1 参数转换算法

参数转换算法主要为将最小二乘辨识结果转换为模型参数的算法，通过模型差分方程的系数公式，可逆推出被辨识系统的模型系数。对于过程 2 可由公式 (27) 推出：

$$k = \frac{b_1 \tau_1}{T} \text{ 或 } k = -\frac{b_2 \tau_1}{T} \quad (27)$$

对于过程 4 可由式 (28)、式 (29) 推出：

$$T = -\frac{T_0}{\ln a_2} \text{ 或 } T = -\frac{T_0}{\ln[-(a_1 + 1)]} \quad (28)$$

$$k = \frac{\tau_1 b_1}{T_0 - T + T e^{-T_0/T}} \text{ 或 } k = \frac{\tau_1 b_2}{T - T_0 e^{-T_0/T} - T e^{-T_0/T}} \quad (29)$$

通过参数转换算法所得结果与专家经验法相结合，可直接确定出 PSO 优化算法的搜索范围，大大节省了优化算法的时间与空间开支，进一步保证了组合积分自适应控制系统的精确度。

#### 3.2 PSO 优化算法

PSO 优化算法是一种新型演化计算方法，通过对社会模型进行模拟，用粒子表示解空间的解，并通过粒子间相互作用，使个体向目标区域移动，从而发现搜索空间的最优区域<sup>[7]</sup>。

设在  $N$  维空间中有  $m$  个粒子，每个粒子的坐标为  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ，每个粒子的运动速度为  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})$ ，各个粒子的初始适应值为  $f(x_i)$ ，第  $i$  个粒子搜索到的最优位置为  $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN})$ ，整个种群搜索到的最优位置为  $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gN})$ 。

则粒子速度更新计算公式为<sup>[8]</sup>：

$$v_i^{k+1} = \omega(t) \times v_i^k + c_1 r_1 (p_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (BestS_i^k - x_i^k) \quad (30)$$

粒子位置更新计算公式为<sup>[8]</sup>：

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (31)$$

其中： $k=1, 2, \dots, G$ ， $G$  为最大进化代数， $k$  表示当前进化代数； $i=1, 2, \dots, Size$ ， $Size$  为粒子组成的种群规模大小； $BestS$  为整个种群目前的最优解； $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  之间的随机数； $c_1$ 、 $c_2$  为局部与全局学习因子， $\omega$  为惯性权重函数。

PSO 算法首先初始化为一群随机粒子，通过跟踪“个体极值”与“全局极值”来不断更新自己的位置，每个粒子通过对自己运动方向和距离的不断调整，追随当前最优粒子在解空间中搜索，最终通过不断迭代找到模型最优解<sup>[7]</sup>。

对于过程 2 的模型辨识结果，送入参数设计单元，通过 PSO 优化算法对过程参数进行寻优。首先，采用十进制浮点制实数编码，将待寻优初步辨识结果的参数向量记为  $x$ ，并确定参数向量维数为  $CodeL = 3$ ，确定参数搜索范围为  $X_{min} = [1 \ 10 \ 20]$ 、 $X_{max} = [5 \ 30 \ 40]$ （可根据专家经验法确定参数搜索范围），种群规模为  $Size = 80$ ，最大迭代次数为  $G = 40$ ，粒子运动速度范围为  $V_{min} = -1$ 、 $V_{max} = 1$ ，惯性权重范围为  $W_{min} = 0.10$ 、 $W_{max} = 0.90$ ，学习因子为  $c_1 = 1.3$ 、 $c_2 = 1.7$ 。其次，惯性权重采用线性递减的策略，由 0.90 递减为 0.10；目标函数为辨识误差指标（越小越好），并将其倒数作为 PSO 的适应度函数。然后，根据式 (30) 和式 (31) 对粒子速度和位置进行更新，并分别检查是否越界，获得新种群。最终，利用 PSO 算法得到最佳目标函数数值如图 16 所示。

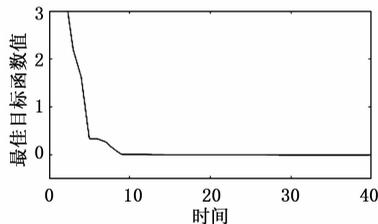


图 16 过程 2 PSO 算法最佳目标函数数值变化曲线

辨识结果为  $\hat{x} = [2.958 \ 20.001 \ 30.021]$ ，最终的辨识误差指标为  $J = 9.848 \times 10^{-6}$ 。由此，对于参数设计环节，先通过转换算法对由相关分析法与最小二乘法辨识得到的模型参数结果进行转换，转换为可用的模型参数值，并通过此参数值与专家经验法确定参数寻优范围，利用 PSO 算法对初步辨识结果进行的寻优，得到最优模型辨识参数，最终将已达到一定精度的模型辨识结果传入组积分控制器设计环节，通过组积分控制器对过程系统进行控制，以达到自适应组积分控制的目的，并满足一定的控制要求。

### 4 控制器设计单元

考虑单位负反馈系统，如图 17 所示。

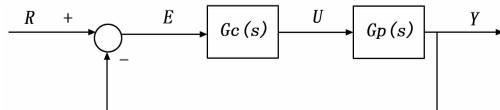


图 17 负反馈结构图

$G_c(s)$  和  $G_p(s)$  分别为控制器和被控对象的传递函数，则

该系统闭环传函为:

$$G(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (32)$$

假设已知组合积分对象的传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} \quad (33)$$

由式 (32) 可得控制器的传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{G_0(s)}{G_p(s)[1 - G_0(s)]} \quad (34)$$

由于开环的组合积分系统输出具有匀速无超调上升的特点, 可将整个闭环系统传递函数设计为具有和开环系统相同的结构, 依此可设计具有更好控制特性的组合积分控制器。

根据以上准则, 并根据式 (34) 推得期望的传递函数为:

$$G_0(s) = \frac{\omega_0^2 (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} k}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (35)$$

式 (33)、(35) 代入 (34) 可得控制器的传递函数:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + (1 - k \cdot (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s}) \omega_0^2} \quad (36)$$

化简得:

$$U(s) = \frac{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s} \cdot E(s) - \frac{(1 - k(1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s}) \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s} \cdot U(s) \quad (37)$$

根据组合积分控制器的设计思路, 并结合系统自适应机构可以得到具有很好控制效果的组合积分自适应控制器。

由此得本文中 5 种组合积分对象的组合积分控制器设计依次如下:

$$u(s) = \frac{1}{k} e(s) + \frac{1}{\tau_1 s} (1 - e^{-\tau_1 s}) u(s) \quad (38)$$

$$u(s) = \frac{1}{k} e(s) + \frac{1}{\tau_1 s} (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} u(s) \quad (39)$$

$$u(s) = \frac{1}{k} e(s) + \frac{1}{\tau_1 s (Ts + 1)} (1 - e^{-\tau_1 s}) u(s) \quad (40)$$

$$u(s) = \frac{1}{k} e(s) + \frac{1}{\tau_1 s (Ts + 1)} (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} u(s) \quad (41)$$

$$\left\{ \begin{aligned} u(s) &= \frac{1}{k_1 + k_2} e(s) + \left[ \frac{k_1 / (k_1 + k_2)}{\tau_1 s} (1 - e^{-\tau_1 s}) e^{-\tau_2 s} + \right. \\ &\quad \left. \frac{k_2 / (k_1 + k_2)}{\tau_3 s} (1 - e^{-\tau_3 s}) e^{-\tau_4 s} \right] u(s) \\ \tau_1 &= \tau_1 + \tau_2 \end{aligned} \right. \quad (42)$$

控制效果如图 18 所示。

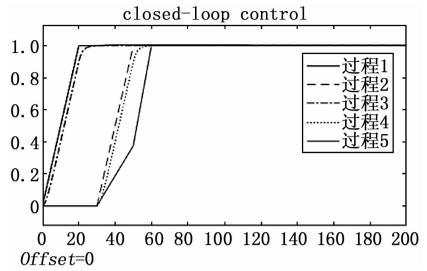


图 18 5 种组合积分控制器的控制效果

### 5 结论

本文以组合积分控制器设计思想为核心, 并利用相关性分析算法、递推最小二乘算法、PSO 寻优算法等进行了模型辨识与控制器参数设计, 首次实现了针对组合积分系统的自适应控制, 并且该组合积分自适应控制器可以推广到类似的时滞系统自适应控制过程中, 进一步改善了此类系统的自适应控制性能。最后, 本研究通过系统仿真进一步证明了该自适应控制算法具有较好的非线性跟踪能力与辨识效果, 在性能上增强了组合积分系统的抗干扰能力与鲁棒性。因此, 组合积分自适应控制系统的研究对于相关时滞系统的自适应控制有着广泛的应用价值与深刻的理论意义。

### 参考文献:

[1] 任正云, 郑 达. 流程工业的组合积分系统及其先进控制 [J]. 控制理论与应用, 2009 (9): 1009 - 1013.

[2] 李 娜. 基于组合积分系统先进滤波算法理论研究与应 [D]. 上海: 东华大学, 2015.

[3] 郑 达. 组合积分系统的控制理论与应用研究 [D]. 上海: 东华大学, 2009.

[4] 王燕平, 陈昕志. 利用相关分析法辨识系统脉冲响应 [J]. 郑州工业高等专科学校学报, 2003 (2): 1 - 2.

[5] 冀征难. 基于相关分析法的系统辨识算法对比及仿真 [J]. 电脑知识与技术, 2016 (9): 253 - 254.

[6] 庞中华, 崔 红. 系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.

[7] 徐志成. 基于粒子群优化算法的过程模型辨识 [J]. 电力自动化设备, 2007 (9): 75 - 78.

[8] Shi Y H, Eberhart R C, A modified particle swarm optimizer [A]. IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceeding [C]. 1997: 70 - 71.

[7] 杜立夫, 黄万伟, 刘晓东, 等. 考虑特征模型的高超声速飞行器全通道自适应控制 [J]. 宇航学报, 2016, 37 (6): 711 - 719.

[8] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.

[9] 周 端. 基于多目标优化的挠性航天器姿态快速机动鲁棒控制 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

[10] 饶卫东. 基于特征模型的挠性航天器姿态快速机动研究 [J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35 (3): 49 - 52.

[11] 孙多青, 吴宏鑫. 多变量线性时变系统的特征模型及自适应模糊控制方法 [J]. 宇航学报, 2005, 26 (6): 677 - 681.

[12] 龚宇莲, 吴宏鑫. 基于特征模型的高超声速飞行器的自适应姿态控制 [J]. 宇航学报, 2010, 31 (9): 2122 - 2128.

(上接第 75 页)

[4] Lu K, Xia Y, Zhu Z, et al. Sliding mode attitude tracking of rigid spacecraft with disturbances [J]. Journal of the Franklin Institute, 2012, 349 (2): 413 - 440.

[5] Wang Zhi, Lang Baohua. Compound control system design based on backstepping techniques and neural network sliding mode for flexible satellite [A]. Proceedings of the 2010 International Conference on Computer Design and Applications [C] Qinhuangdao: IEEE, 2010: 418 - 422.

[6] Wu H X, Liu Y W, Liu Z H, et al. Characteristic Modeling and the Control of Flexible Structure [J]. Science in China (Series F), 2001, 44 (4): 278 - 291.