

文章编号:1000-582x(2000)05-0139-03

# 基于串联型自抗扰控制器的逐次求精法

张 荣

(重庆大学工商管理学院,重庆 400044)

TM 57

**摘 要:**利用模型补偿自抗扰控制器辨识系统参数,对于低阶系统取得了满意的辨识效果。但在用上述方法进行高阶系统参数的辨识时,还存在扩张状态观测器参数不易调整的问题。笔者将串联型扩张状态观测器构成的自抗扰控制器运用于参数辨识的逐次求精法,能有效地辨识出系统的参数。特别是在辨识高阶系统参数时,具有扩张状态观测器参数易调的优点。

**关键词:**串联型扩张状态观测器;自抗扰控制器;参数辨识

中图分类号: TP 13

文献标识码: A

逐次求精法

对受控对象的结构已知而对未知参数为线性的系统,文献[1]给出了利用模型补偿自抗扰控制器(ADRC<sup>[2]</sup>)来辨识未知参数的逐次求精方法。此方法充分利用当观测对象的不确定性范围缩小时,扩张状态观测器(ESO)的适用参数范围就会扩大,用初步设定的ESO来粗估计对象参数,使观测对象的不确定性范围缩小,并以此提高ESO的逼近精度,从而提高对系统参数的辨识能力。

然而,在用上述方法进行高阶系统参数的辨识时,效果不是十分满意。这主要是由于高阶ADRC的ESO参数不易调整,初步设定的ESO来粗估计对象的参数与系统参数偏离很远,于是就难以缩小观测对象的不确定性范围,反过来就难以提高ESO的逼近精度,从而对系统参数的辨识效果就不很理想。笔者就探讨如何利用串联型ESO构成的ADRC来辨识高阶系统参数的逐次求精法的问题。

## 1 基于串联型自抗扰控制器的逐次求精法

### 1.1 辨识系统参数的逐次求精法

利用ADRC中ESO的输出提供的进行系统参数辨识的足够信息,对有已知部分的受控对象,把此部分补偿给ESO的输入项,能提高ESO的逼近精度,从而也提高了其输出值来进行参数辨识的精度。对受控对象的结构已知而对未知参数为线性的系统,给出了其参数辨识的方法,下面以二阶系统

$$\ddot{y} = f_0(\dot{y}, y, t) + f_1(\dot{y}, y, t) + (b_0 + \Delta b)u \quad (1)$$

为例,来说明其主要思路。其中,  $f_0(\dot{y}, y, t)$  已知,那么以  $f_0(\dot{y}, y, t)$  作为模型补偿项,用  $b_0$  实现自抗扰控制,其ADRC结构方程如下:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = -rsat(v_1 - v_0 + v_2 | v_2 | / (2r), \delta) \end{cases}$$

跟踪微分器(TD),  $v_0$  为设定值 (2)

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}fal(e, a_1, \delta) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}fal(e, a_2, \delta) + f_0(\dot{y}, y, t) + b_0 u, \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}fal(e, a_3, \delta) \end{cases}$$

扩张状态观测器 (3)

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ uu = \beta_1 e_1 + \beta_2 e_2 \\ u = uu - (z_3 + f_0(\dot{y}, y, t)) / b_0 \end{cases} \quad (4)$$

在ESO方程的第二项和控制量  $u$  的最终表达式中加入模型已知项  $f_0(\dot{y}, y, t)$  就起模型补偿作用。这时ESO的输出  $z_1, z_2, z_3$  估计的分别是被控对象的状态

· 收稿日期:1999-12-15

作者简介:张荣(1969-),男,重庆市渝北区人,重庆大学博士后。主要从事控制系统的非线性设计等研究工作。

$y, \dot{y}$  和模型未知部分  $f_1(\dot{y}, y, t) + \Delta bu$ , 然后选用适当方法(如最小二乘法)估计出参数, 这就是逐步提高辨识精度方法的主要思路。

上述方法在用于阶数较低系统参数的辨识时, 很容易得到比较满意的效果, 但当系统阶数  $n \geq 3$  时, 由于高阶 ESO 参数不易调整, 使 ESO 的输出  $z_1, z_2, z_3$  估计与被控对象的状态  $y, \dot{y}$  和模型未知部分  $f_1(\dot{y}, y, t) + \Delta bu$  相差甚远, 于是用这些数据来进行初步估计的参数与系统真实的参数差异较大, 就很难用逐次求精法来缩小观测对象的不确定性范围, 反过来就难以提高 ESO 的逼近精度, 从而对系统参数的辨识效果就不很理想。文献[3]提出了用串联型 ESO 构成的 ADRC 来控制高阶系统, 它具有 ESO 参数易调的优点。下面首先介绍其主要思想, 然后将其运用于逐次求精法, 以提高参数的辨识效果。

### 1.2 串联型 ESO 构成的 ADRC

通常的 ADRC 由跟踪微分器(TD), ESO 及控制量  $u$  等 3 部分构成。以二阶系统

$$\ddot{y} = f(\dot{y}, y, t) + bu \quad (5)$$

为例, 其跟踪微分器的方程见式(2), ESO 及控制量分别由下面(6), (7) 式给出:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} fal(e, a_1, \delta) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} fal(e, a_2, \delta) + b_0 u, \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} fal(e, a_3, \delta) \end{cases} \quad \text{扩张状态观测器(ESO)} \quad (6)$$

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ uu = \beta_1 e_1 + \beta_2 e_2 \\ u = uu - z_3/b_0 \end{cases} \quad (7)$$

上述控制系统方程里的 3 个部分里看似含有比较多的参数, 但其中的 TD 及控制量里含有的参数比较容易给出, 最关键部分是 ESO 参数的调试, 在系统的阶数  $n \geq 3$  时, 要调出令人满意的参数是比较困难的。文[4]中仔细分析了二阶 ESO 的误差估计及参数调整的一般规律, 于是可将  $n$  阶系统的 ESO 改变为由  $n$  个二阶 ESO 串联而成<sup>[3]</sup>, 这样参数的调整就容易多了。仍以二阶系统(5) 为例, 其串联型 ESO 的方程为:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - z_0, z_0 = y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} fal(e_1, a_1, \delta) \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02} fal(e_1, a_2, \delta) + b_0 u \\ e_3 = z_3 - z_2 \\ \dot{z}_3 = z_4 - \beta_{01} fal(e_3, a_1, \delta) + b_0 u \\ \dot{z}_4 = -\beta_{02} fal(e_3, a_2, \delta) \end{cases} \quad (8)$$

虽然从形式上看,  $n$  阶系统的串联型 ESO 的方程有  $2n$  个, 比通常  $n$  阶系统 ESO 的  $n + 1$  个方程要多( $n \geq 2$  时), 比如上面二阶系统的串联型 ESO 方程的个数是 4 而不是 3, 但由于其主要的参数只有两个  $\beta_{01}$  和  $\beta_{02}$ , 与通常的 ESO 相比, 其参数的调整要容易得多。

### 1.3 基于串联型 ADRC 的逐次求精法

在 1.1 及 1.2 的基础上, 将串联型 ESO 运用于模型补偿 ADRC 辨识参数的逐次求精法, 用于对受控对象的结构已知而对未知参数为线性的系统的参数辨识。以  $n$  阶系统

$$y^{(n)} = f(y^{(n-1)}, \dots, \dot{y}, y, t) + bu \quad (9)$$

为例, 其核心部分串联型 ESO 的方程变为

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - z_0, z_0 = y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} fal(e_1, a_1, \delta) \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02} fal(e_1, a_2, \delta) \\ \dots \\ e_{2(n-2)-1} = z_{2(n-2)-1} - z_{2(n-1)} \\ \dot{z}_{2(n-2)-1} = z_{2(n-2)} - \beta_{01} fal(e_{2(n-2)-1}, a_1, \delta) \\ \dot{z}_{2(n-2)} = -\beta_{02} fal(e_{2(n-2)-1}, a_2, \delta) \\ e_{2(n-1)-1} = z_{2(n-1)-1} - z_{2(n-3)} \\ \dot{z}_{2(n-1)-1} = z_{2(n-1)} - \beta_{01} fal(e_{2(n-1)-1}, a_1, \delta) \\ \dot{z}_{2(n-1)} = -\beta_{02} fal(e_{2(n-1)-1}, a_2, \delta) \\ e_{2n-1} = z_{2n-1} - z_{2(n-1)} \\ \dot{z}_{2n-1} = z_{2n} - \beta_{01} fal(e_{2n-1}, a_1, \delta) + f_0 + b_0 u \\ \dot{z}_{2n} = -\beta_{02} fal(e_{2n-1}, a_2, \delta) \end{cases} \quad (10)$$

其中  $f = f_0 + (f - f_0)$ ,  $f_0$  是已经辨识出的部分。此串联型 ESO 参数主要有两个, 只要扩大不等式

$$\frac{\beta_{01}^2}{4} > \beta_{02} > \max\{y_i^*, i = 2, \dots, n + 1\}$$

就能使误差满足跟踪要求, 其具体分析类似于文[3]。于是按照逐次求精法的思路, 受控对象的不确定性  $f$

-  $f_0$  就会逐步缩小,从而逐步提高辨识精度。

### 2 数值仿真例子

下面给出3个二阶ESO的串联型和4个二阶ESO的串联型所构成的ADRC分别辨识三阶和四阶被控对象参数的仿真例子。

#### 例1 设系统

$$y = a_1 \log(1 + y) + a_2 \dot{y} + a_3 \ddot{y} + bu$$

中的参数  $a_1, a_2, a_3, b$  的真值分别为 1.5, 10, -3, 3。首先,  $b$  的初估计  $b_0$  取 5, 那么要估计的参数将是 1.5, 10, -3, -2。用上述方法辨识的结果为: 1.502 980, 10.029 991, -2.985 211, -1.992 577(见图1)。再对

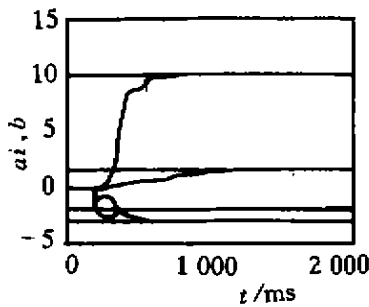


图1 例1的辨识结果

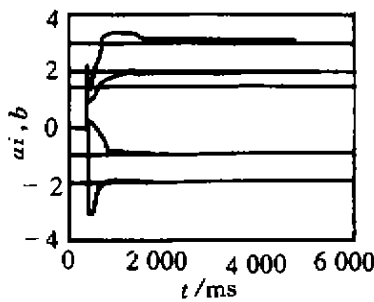


图3 例2的辨识次数

在这两个例子中,串联型ESO的每个二阶子系统的参数都取成  $a_1 = 1, a_2 = 0.25, \beta_{01} = 2000, \beta_0 = 1500, \delta = 0.0001$ 。这些辨识结果是令人满意的。

### 3 小结

在用文[1]的方法进行高阶系统参数的辨识时,要得到满意的辨识效果不是很容易的。笔者将逐次求精法与串联型ESO相结合,使得在辨识高阶系统的参数时,调整ESO参数的难度大大降低。仿真研究表明,此参数辨识的逐次求精过程也是ADRC控制品质提

系统输出叠加1%白噪声后所得的辨识结果为: 1.486 306, 10.055 834, -2.985 791, -1.983 098(见图2)。

#### 例2 设系统

$$y^{(4)} = a_1 y + a_2 (1 - y^2) \dot{y} + a_3 / (1 + y) + a_4 \log(1 + |y|) + bu$$

中的参数  $a_1, a_2, a_3, a_4, b$  的真值分别为 -1, 1.5, 2, 3, 3。首先,  $b$  的初估计  $b_0$  取 5, 那么要估计的参数将是 -1, 1.5, 2, 3, -2。用上述方法辨识的结果为: -0.998 028, 1.487 702, 1.995 887, 3.043 522, -2.006 485(见图3)。再对系统输出叠加1%白噪声后所得的辨识结果为: -1.070 10, 1.488 614, 2.029 259, 3.059 432, -1.993 328(见图4)。

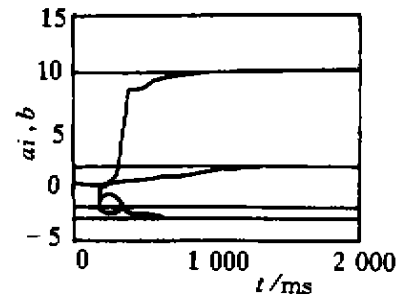


图2 加入噪声时例1的辨识结果

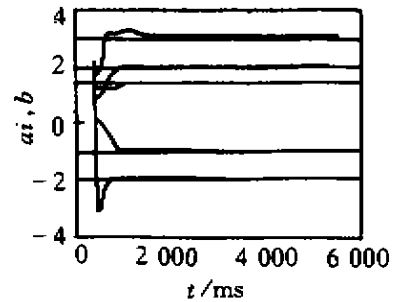


图4 加入噪声时例2的辨识结果

高的过程。

#### 参考文献:

- [1] 张荣,韩京清. 用模型补偿自抗扰控制器进行参数辨识[J]. 控制理论及应用, 2000, 17(1): 79-81.
- [2] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [3] 张荣,韩京清. 串联型扩张状态观测器构成的自抗扰控制器[J]. 控制与决策, 2000, 15(1): 122-124.
- [4] 韩京清,张荣. 二阶扩张状态观测器的误差分析[J]. 系统科学与数学, 1999, 19(4): 268-273

(下转 154 页)

