文章编号：1000-8152(2000)01-0079-03

# 用模型补偿自抗扰控制器进行参数辨识*

张 荣 韩京清 0235
(重庆大学工商管理学院·重庆, 400044) (中国科学院系统科学研究所·北京, 100080)

**摘要**：自抗扰控制器中扩张状态观测器的输出提供了进行系统参数辨识的足够信息.受控对象若有已知部分，把此部分补偿给扩张状态观测器输入项，能提高扩张状态观测器的逼近精度，从而也能提高其输出值来进行参数辨识的精度.

**关键词**：自抗扰控制器；扩张状态观测器；参数辨识
**文献标识码**：A

# Parameter Identification by Model Compensation Auto Disturbance Rejection Controller

ZHANG Rong
(College of Business Administration, Chongqing University·Chongqing, 400044, P. R. China)
HAN Jingqing
(Institute of Systems Science, Academia Sinica·Beijing, 100080, P. R. China)

**Abstract**: The output of ESO of ADRC has sufficient information to identify the parameter. If the controlled plant has known part and we use this part to compensate the input of ESO, the estimation precision of ESO can be improved, and the precision of parameter identification can thus be improved.

**Key words**: auto disturbance rejection controller; extended state observer; parameter identification

## 1 问题的提出(Introduction to problem)

对受控对象的结构已知而对未知参数为线性的系统，文[1]给出了利用扩张状态观测器(ESO)来辨识未知参数的方法.此方法的前提是调好了 ESO 的参数.我们在文[2]中对二阶 ESO 给出了详尽的误差估计和参数调整规律，然而对高阶 ESO 调出较理想参数还是有一定难度.从 ESO 的结构和误差分析知，当观测对象的不确定性范围缩小时，ESO 的适用参数范围就会扩大，这就提示我们，能否用初步设定的 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？文[3]给出的自抗扰控制器(ADRC)具有这样的结构特征：被控对象模型若有已知部分，把此已知部分补偿给 ADRC 中 ESO 的输入项，就能提高 ESO 估计被控对象模型未知部分的逼近能力.这就提示我们逐步改善模型补偿项的办法来逐步提高参数辨识精度的新思路.下面针对模型结构确定而对未知参数线性的被控对象介绍这种新的参数辨识方法和数值仿真结果.

## 2 模型补偿自抗扰控制器(Model compensation auto disturbance rejection controller)

若被控对象

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

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，这时的控制器方程(见文[3])为：

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

以上为跟踪微分器方程，$v_0$ 为设定值.

$$e = z_1 - y,$$

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}\mathrm{fal}(e, a_1, \delta), \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{01}\mathrm{fal}(e, a_2, \delta) + f_0(\dot{y}, y, t) + b_0 u, \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}\mathrm{fal}(e, a_3, \delta), \end{cases} \tag{3}$$

* 基金项目：国家自然科学基金(G69574033)及国家攀登计划资助项目
收稿日期：1998-5-12；收修改稿日期：1998-12-23.

以上为扩张状态观测器方程.

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

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 $y$、$\dot{y}$ 和模型未知部分 $f_1(\dot{y}, y, t) + \Delta bu$. 这就是下面给出的逐步提高辨识精度方法的主要依据.

## 3 参数辨识的逐次精法(Parameter identification by algorithm of successive approximations)

下面讨论利用模型补偿 ADRC 来辨识被控对象

$$\ddot{y} = a_1 f_1(\dot{y}, y, t) + a_2 f_2(\dot{y}, y, t) + bu \tag{5}$$

参数的问题,其中,$f_1$,$f_2$ 已知,$a_1$,$a_2$,$b$ 为未知参数.

假定对未知参数先有一个估计:$a_{10}, a_{20}, b_0$,令记

$$\begin{cases} a_1 = a_{10} + \Delta a_1,\ a_2 = a_{20} + \Delta a_2,\ b = b_0 + \Delta b, \\ f_0(\dot{y}, y, t) = a_{10} f_1(\dot{y}, y, t) + a_{20} f_2(\dot{y}, y, t). \end{cases} \tag{6}$$

原系统变成

$$\ddot{y} = f_0(\dot{y}, y, t) + \Delta a_1 f_1(\dot{y}, y, t) + \Delta a_2 f_2(\dot{y}, y, t) + \Delta bu + b_0 u. \tag{7}$$

现在把模型的已知部分 $f_0(\dot{y}, y, t)$ 补偿到 ADRC 中,那么 ESO 的输出 $z_1, z_2, z_3$ 估计的分别是 $y$、$\dot{y}$ 和模型的未知部分

$$\Delta a_1 f_1(\dot{y}, y, t) + \Delta a_2 f_2(\dot{y}, y, t) + \Delta bu. \tag{8}$$

于是得如下近似方程:

$$z_3(t) = \Delta a_1 A_1(t) + \Delta a_2 A_2(t) + \Delta bu(t). \tag{9}$$

其中, $A_1(t) = f_1(z_2(t), z_1(t), t)$, $A_2(t) = f_2(z_2(t), z_1(t), t)$. 由于 $z_3(t)$, $A_1(t)$, $A_2(t)$, $u(t)$ 均为可获数列(按时间序列),因此可用适当方法(如最小二乘法)估计出参数 $\Delta a_1$, $\Delta a_2$, $\Delta b$. 当然,这个估计值仍然是近似值,把它们补充到原估计值上,并作替代

$$a_{10} = a_{10} + \Delta a_1, a_{20} = a_{20} + \Delta a_2, b_0 = b_0 + \Delta b, \tag{10}$$

然后返回到式(6),重复式(6),(9)(或下面的式(11))、(10)的过程,以此逐步提高估计精度.

这个重复估计主要是在过渡过程阶段分时进行的,即把过渡过程时间分成若干子区间 $[T_0, T_1]$, $[T_1, T_2]$, $[T_2, T_3]$, $\cdots$. 并依次用每个子区间的数据来进行估计.

当然,这里有如下两个问题:

1) 方程(9)是否好解,即在各子区间 $[T_i, T_{i+1}]$ 上的三个函数 $A_1(t)$, $A_2(t)$, $u(t)$ 的 Gram 矩阵的条件数是否好?

2) 上述叠代过程是否收敛?

关于第一问题,在每个子区间上函数 $A_1(t)$, $A_2(t)$ 线性无关的假设下,对控制信号 $u(t)$ 上叠加适当激励信号 $\gamma\sin(\omega t)$,并把 ESO 方程(3)的第二项和控制量表达式中的 $f_0(\dot{y}, y, t)$ 均改成 $f_0(\dot{y}, y, t) + b_0\gamma\sin(\omega t)$,那么 ESO 的输出中的 $z_3$ 的估计将是

$$\Delta a_1 f_1(\dot{y}, y, t) + \Delta a_2 f_2(\dot{y}, y, t) + \Delta b(u + \gamma\sin(\omega t)).$$

因此方程(9)变成

$$z_3(t) = \Delta a_1 A_1(t) + \Delta a_2 A_2(t) + \Delta b(u(t) + \gamma\sin(\omega t)). \tag{11}$$

可以改善方程的条件数,加入了激励信号,系统进入稳态也能分时实施上述迭代过程,可进一步提高辨识精度.

对于第二个问题,其主要依据是 ESO 的估计误差性质,对不确定系统 $\ddot{y} = w(t) + bu$, $w(t)$ 为未知扰动项,满足 $|w(t)| < w_0$. 用ESO估计系统状态和未知扰动时,其估计误差主要由 $\left(\frac{w_0}{\beta_{03}}\right)^{1-a_1}$ 所决定(见文[2]).因此 $w_0$ 越小,ESO的估计精度越高,大量仿真研究表明,对较小的 $w(t)$,有很大范围的 $\beta_{01}$, $\beta_{02}$, $\beta_{03}$,上述 ESO 都能给出较好的估计.在上述重复过程中,式(6)是"扩大"受控对象已知部分 $f_0(\dot{y}, y, t)$ 而"缩小"式(8)表示的未知部分的过程.因此实施这个迭代过程能逐步提高估计精度.

当然,要实施这个迭代过程,首先要给出参数 $b$ 的粗估计 $b_0$,然后调出"大致"能跟上跟踪-微分器安排的过渡过程的 ESO 参数 $\beta_{01}$, $\beta_{02}$, $\beta_{03}$ 和决定 $uu$ 反馈增益 $\beta_1$, $\beta_2$.

## 4 数值仿真例子(Simulation examples)

**例 1** 设系统

$$\ddot{y} = a_1 y^2 + a_2 \dot{y}^2 + bu$$

中的参数 $a_1, a_2, b$ 的真值分别为 $-1, 1, 1$. 首先,$b$ 的初估计就取其真值 1, 那么要估计的参数将是 $-1, 1, 0$. 对控制输入 $u$ 叠加激励信号 $0.01\sin(6.28t)$ 后,用上述方法(其中方程(11)是用最小二乘算法求解)辨识的结果为:$-1.000031$, $0.999522$, $0.000069$(见

图1)、再对系统输出叠加1%白噪声后所得的辨识结果为：-0.980547，1.029358，0.000620(见图2).

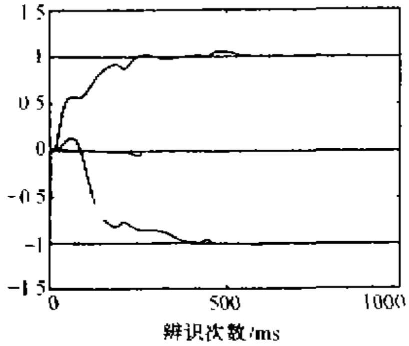


图1　例1的辨识结果

Fig. 1　Identification result of exampre 1

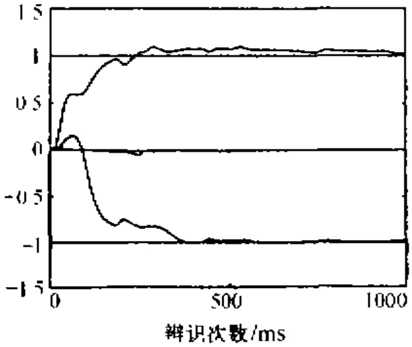


图2　加入噪声时例1的辨识结果

Fig. 2　Identification result of example 1 with noise

**例2**　设线性系统

$$\ddot{y} = a_1 y + a_2 \dot{y} + bu$$

中参数 $a_1, a_2, b$ 的真值分别为 -169，-26，300 这里取 $b$ 的初估计值 $b_0 = 500$，因此需要估计的参数将是 -169，-26，-200. 对控制输入 $u$ 叠加和例1同样激励信号所得辨识结果为：-169.126927、-26.022580，-199.774672(见图3). 而对 $y(t)$ 叠加1%白噪声后所得结果则是：-174.956715、-27.190790，-186.289104(见图4).

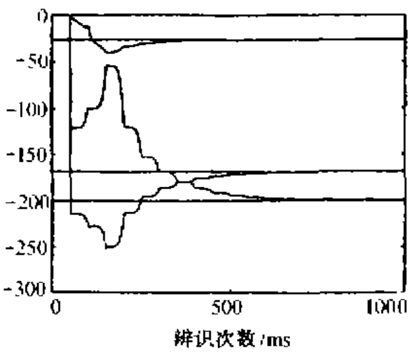


图3　例2的辨识结果

Fig. 3　Identification result of example 2

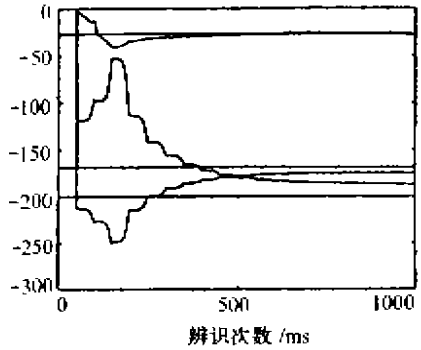


图4　加入噪声时例2的辨识结果

Fig. 4　Identification result of example 2 with noise

这些辨识结果是令人满意的.

实际上，这个辨识过程也是在ADRC中逐步完善“模型补偿”的过程，因此也是逐步改善ADRC控制器品质的过程.

## 5　小结(Conclusion)

ADRC中的ESO输出信息足以进行被控对象参数的辨识，而模型补偿ADRC机制又提供了逐步精化此过程的可能性. 本文结合这两者，提出了在闭环系统中辨识对象参数的逐步求精法. 这个方法实际上也成为逐步改善ADRC控制品质的过程. 当然，本文提出的方法中仍有如何调整ADRC参数的问题. 但是，我们的仿真研究表明，内含逐步求精法的模型补偿ADRC，其参数的调整远比无求精法的ADRC容易得多.

## 参考文献(References)

[1]　黄远灿，韩京清. 用扩张状态观测器辨识连续系统参数[J]. 控制与决策，1998，13(4)：381-383

[2]　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)：465-471

[3]　韩京清，张文革. 模型配置自抗扰控制器[A]. 中国控制会议[C]，宁波，1998，273-276

## 本文作者简介

**张　荣**　1969年生. 1992年，1995年和1998年分别在四川师范大学、北京工业大学和中国科学院系统科学所获学士，硕士，博士学位. 主要研究方向为控制系统的非线性设计，混沌及经济理论.

**韩京清**　1937年生. 1958年毕业于吉林大学数学系，1963-1966年在前苏联莫斯科大学攻读研究生学位. 现为中国科学院系统科学所研究员. 主要学术方向为最优控制理论、导引理论，线性、非线性控制，控制系统CAD软件，人口理论.