

大时滞系统的自抗扰控制*

韩京清 张文革

(中国科学院系统科学研究所·北京, 100080)

摘要 一个高阶被控对象含有几个小时间常数惯性环节时,可简化成低阶时滞系统。依据这种认识,可用高阶自抗扰控制器来控制低阶大时滞对象。数值仿真结果显示了自抗扰控制器控制大时滞系统的有效性。

关键词 自抗扰控制器,时滞系统,不确定系统

分类号 TP 301

1 引言

文献[1,2]提出了“自抗扰控制器(ADRC)”结构及其在时变系统、多变量系统、最小相位系统中的应用实例。本文则讨论用高阶ADRC控制低阶大时滞对象的问题。

关于线性时滞对象的控制,当时滞不甚大且模型比较准确时,现有的一些控制方法(如Smith补偿等)尚可应用。但当时滞 τ 大于系统时间常数 T 几倍以上,或对象模型不确定、时变、强非线性时,尚无有效的控制方法。文献[3,4]分别用模糊控制、专家控制等方法考察了大时滞系统的控制问题,得到了较好结果,但是显得较为复杂。

过程控制对象中许多低阶模型的描述实际上是对高阶对象的某种简化描述。这里有两方面问题:一方面,既然对象被化成低阶对象,就可用低阶ADRC来实现控制;另一方面,简化之前是高阶的,因此也可用高阶ADRC来实现控制。

本文讨论如何用ADRC控制低阶大时滞对象的问题。文中首先介绍ADRC结构,然后论述用高阶ADRC来控制低阶时滞对象,最后给出时滞对象的数值仿真实例。

2 ADRC 结构

n 阶自抗扰控制器结构如图1所示,其中点线所框部分为 n 阶ADRC。 n 阶TD是安排过渡过程并给出其各阶导数的跟踪-微分器; $n+1$ 阶ESO是跟踪对象输出 y 并估计对象的各阶状态变量和对象总扰动实时作用量的扩张状态观测器;非线性组合是安排的过渡过程和对象状态变量之间误差的非线性控制策略,是控制 n 阶积分器串联型对象所需控制量的形式。适当选择TD、ESO及非线性组合中的非线性函数和参数,上述ADRC能控制比较广泛的一类不确定对象

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, w(t)) + b_0 u \\ y = x(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $w(t)$ 为扰动。

实现自抗扰控制需要利用控制输入放大系数 b_0 。为了强调 b_0 的作用,则说“用 b_0 来实现 n

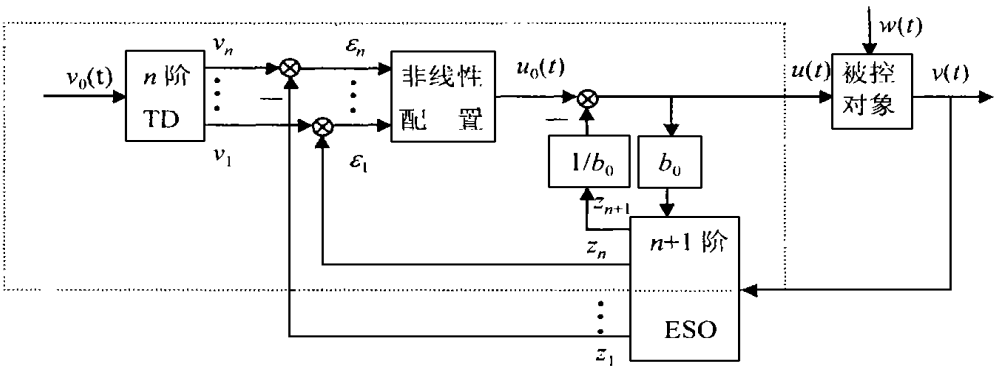


图 1 自抗扰控制器结构

阶自抗扰控制”。以二阶 ADRC 为例, 控制器方程如下

$$\left\{\begin{array}{l} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = -r_0 f_0(z_1 - v_0, z_2 / r_0) \\ e = z_3 - y \\ \dot{z}_3 = z_4 - \beta_{01} g_1(e) \\ \dot{z}_4 = z_5 - \beta_{02} g_2(e) + b_0 u \\ \dot{z}_5 = -\beta_{03} g_3(e) \\ e_1 = z_1 - z_3 \\ e_2 = z_2 - z_4 \\ uu = \beta_1 f_1(e_1) + \beta_2 f_2(e_2) \\ u = uu - z_5 / b_0 \end{array}\right. \quad (2)$$

其中, y 为对象输出, u 为控制量, v_0 为输入信号, f_0 为适当的非线性函数; z_1, z_2 是跟踪 - 微分器^[5] 的输出, z_1 是安排的过渡过程, z_2 是该过渡过程的微分信号; g_1, g_2, g_3 是适当的非线性函数, 使扩张状态观测器的状态变量 z_3, z_4 能很好地跟踪对象状态变量, 且使 z_5 估计出对象扰动的总和作用量 $f(x(t), \dot{x}(t), w(t))$ ^[1]。在 u 的表达式中, $-z_5/b_0$ 起着扰动的“补偿”作用; f_1, f_2 为适当的非线性函数, 使 uu 成为控制二阶纯积分环节, 跟踪 z_1 的控制量。

3 ADRC 控制时滞对象的可能性

首先分析如下两个惯性环节串联的系统

$$\left\{\begin{array}{l} \dot{x}_1 = -ax_1 + bx_2 \\ T_2 \dot{x}_2 = -(x_2 - u) \\ y = x_1 \end{array}\right. \quad (3)$$

其中, 第二个系统是以 T_2 为时间常数, 放大系数为 1 的稳定惯性环节; 第一个系统的时间常数和放大系数分别记为 $T_1 = 1/a, K = b/a$ 。该系统的传递函数为

$$w(s) = \frac{K}{T_1 s + 1} \frac{1}{T_2 s + 1} \quad (4)$$

如果时间常数 T_2 足够小, 那么 $x_2(t)$ 很快地跟踪 $u(t)$, 可近似看作 $x_2(t) = u(t - \tau)$, 从而

(4) 式可简化成

$$w(s) = \frac{K}{T_1 s + 1} e^{-\tau s} = \frac{b}{s + a} e^{-\tau s} \quad (5)$$

其中时滞 τ 与 T_2 的数量级相当。若时滞 τ 足够小, 则(5) 式可进一步化成

$$w(s) = \frac{b}{s + a} \quad (6)$$

如果 T_2 与 T_1 数量级可比, 那么系统(4) 就不能再简化。

从 ADRC 的控制能力看, 不管对象(4) 中 T_1 与 T_2 的数量级有何区别, 均可用二阶 ADRC 来控制。当对象(4) 能简化成一阶系统(6) 时, 就可用一阶 ADRC 实现控制, 但当时滞 τ 大到一定程度时, 仍用一阶 ADRC 进行控制就会不尽人意。

对一般的三个惯性环节串联所成的对象

$$w(s) = \frac{b_1}{s + a_1} \frac{b_2}{s + a_2} \frac{b_3}{s + a_3} \quad (7)$$

只要 $T_2 = 1/a_2, T_3 = 1/a_3$ 比 $T_1 = 1/a_1$ 小得多, 就可化成(5) 或(6) 的形式。这里 $b = b_1 b_2 b_3 / a_1 a_2 a_3$ 。(7) 式所描述的对象等价于

$$\ddot{y} = -c_1 \dot{y} - c_2 y - c_3 \ddot{y} + b_0 u(t) \quad (8)$$

其中 $b_0 = b_1 b_2 b_3$ 。因为 $T_2 = 1/a_2, T_3 = 1/a_3$ 都比较小, 这个 b_0 与(5), (6) 式中的 b 相比, 则有

$$b_0 = b_1 b_2 b_3 > (b_1 b_2 b_3) (T_1 T_2 T_3) = b$$

因此, 把(6) 作为对象(7) 的近似, 可用三阶 ADRC 进行控制, 但实现自抗扰控制所需的 b_0 应比(6) 所给的 b 大。当对象(7) 能简化成一阶对象(6) 时, 也可用一阶 ADRC 来实现满意的控制。

根据以上分析可给出如下直观的结论:

- 1) 低阶对象可用高阶 ADRC 进行控制。
- 2) 若高阶对象含有足够小的小时间常数稳定环节, 则可用低阶 ADRC 来控制。
- 3) 当时滞系统

$$\begin{cases} \dot{y} = f(y, t) + bu(t - \tau) \\ \ddot{y} = f(y, \dot{y}, t) + bu(t - \tau) \end{cases} \quad (9)$$

中的时滞 τ 不能忽略时, 可用高阶 ADRC 进行控制。但实现自抗扰控制所需的 b_0 要调整, 一般是在大于对象所给 b 的范围内进行。时滞 τ 越大, 所需 b_0 就越大。

4 仿真例子

$$\begin{aligned} \text{例 1} \quad 1) \quad & \ddot{x} = -x - (3 - x^2)\dot{x} + w(t) + u(t - 20) \\ 2) \quad & \ddot{x} = -x - (3 - x^2)\dot{x} + w(t) + u(t - 10) \end{aligned}$$

其中外扰 $w(t)$ 设定为: 当 $100s < t < 200s$ 时等于 0.1, 其余均等于 0。文献[4] 所讨论的例子就是这里 $w(t) = 0$, 且将 $(3 - x^2)$ 变为 2 时的特例。

对这两个对象采用结构和参数完全相同的三阶 ADRC 进行控制, 但因 1) 和 2) 的时滞相差较大, 需采用不同的 b_0 。对三阶 ADRC, 其过渡过程可安排如下

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = u_0 \end{cases}, u_0 = \begin{cases} u_1, & t < T_0/4 \\ -u_1, & T_0/4 < t < 3T_0/4 \\ u_1, & 3T_0/4 < t < T_0 \\ 0, & T_0 < t \end{cases}$$

其中, $u_1 = 32v_0/T_0^3$, v_0 为设定值。这两个对象的闭环单位阶跃响应仿真结果分别示于图 2 和图 3。图中 z_1 为安排的过渡过程, y 为对象输出, $u/2$ 为控制量的一半。可见, 系统无外扰时输出很快跟踪设定值, 扰动到来时输出偏离设定值, 然后又很快恢复。时滞越大, 偏离设定值的时间越长, 但过后都能恢复过来。

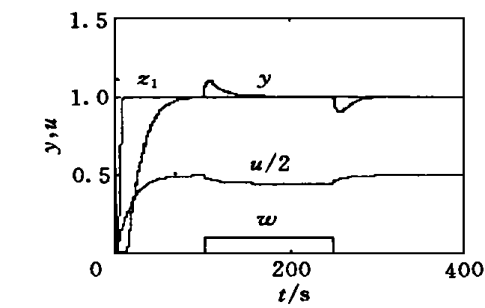


图 2 例 1 对象 1 仿真结果

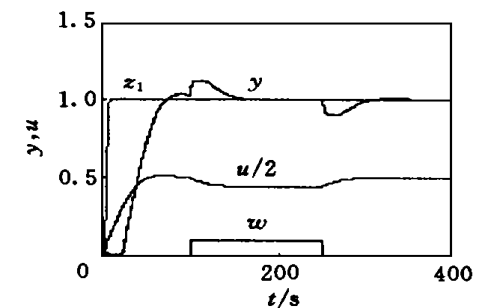


图 3 例 1 对象 2 仿真结果

例 2

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{K_1 e^{-\tau_1 s}}{T_1 s + 1} & 0 \\ \frac{K_1 K_2 e^{-(\tau_1 + \tau_2)s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} & \frac{K_2 e^{-\tau_2 s}}{T_2 s + 1} \end{bmatrix}$$

该例取自文献[3], 其中 $K_1 = 0.54$, $K_2 = 0.59$, $T_1 = 2.4s$, $T_2 = 2.59s$, $\tau_1 = \tau_2 = 3s$ 。
两个通道中采用相同的二阶 ADRC, 对标称参数已调好 ADRC 参数。参数摄动为: $\delta K_i = 40\%$, $\delta T_i = -20\%$, $\delta \tau_i = 50\%$ 。仿真结果如图 4 所示。

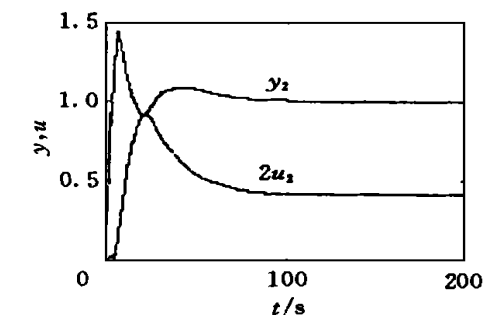
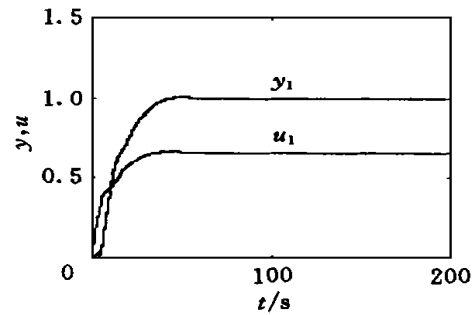


图 4 例 2 对象参数仿真结果

(a) y_1, u_1 的仿真 (b) $y_2, 2u_2$ 的仿真

5 结 语

本文的讨论和相应数值仿真结果表明, 高阶 ADRC 能有效地控制低阶大时滞系统, 但需要 b_0 作为 ADRC 的可调参数来调整。从大量的仿真研究中发现, 控制器的参数与对象的时间常数有一定关系, 但这些关系是相当宽松的, 一旦进入使闭环稳定的参数范围, 调整起来还是比较容易的。本文给出的仿真实例表明, 自抗扰控制器不仅对控制一般的不确定对象有效, 而且对控制不确定大时滞对象也是简单而有效的。

参考文献

1 韩京清. 非线性状态误差反馈控制律——NLSEF. 控制与决策, 1995, 10(3): 221– 225
2 韩京清. 自抗扰控制器及其应用. 控制与决策, 1998, 13(1): 19– 23
3 唐晏, 孙优贤. 多变量过程的专家系统控制. 信息与控制, 1997, 26(4): 241– 247
4 徐嗣鑫, 李奇, 何炬. 基于模糊预测的间歇 PID 控制器. 信息与控制, 1997, 26(5): 327—331
5 韩京清, 王伟. 非线性跟踪- 微分器. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177– 183

ADRC Control for Large Time- delay Systems

H an Jingqing, Zhang Wenge

(Institute of Systems Science, Academic Sinica)

Abstract When a high order controlled plant contains several small time constant inertia units, it can be simplified to low order time- delay system. According to the point of view, the low order larger time- delay system can be controlled by the high order ADRC. Numeric simulation results shows the availability of ADRC controlling the large time- delay system.

Key words auto- disturbances- rejection controller(ADRC), time- delay systems, uncertain systems

作者简介

韩京清 见本刊 1998 年第 1 期第 23 页。

张文革 1966 年生。1991 年在北京化工学院自动化系获硕士学位, 现为中国农业 大学电子电力工程学院讲师, 中科院系统科学研究所博士生。研究方向为非线性控制系统的理论与应用, 计算机控制与仿真。