

串联型扩张状态观测器构成的自抗扰控制器*

张 荣

韩京清

(重庆大学工商管理学院 400044) (中国科学院系统科学研究所)

摘 要 利用自抗扰控制器控制 m 阶对象, 需要调整扩张状态观测器的 $m + 1$ 个参数。结构和参数相同的 m 个二阶扩张状态观测器串联而成的串联型扩张状态观测器, 具有 $m + 1$ 阶扩张状态观测器的功能。用其构成的自抗扰控制器参数易于调整, 便于工程应用。

关键词 自抗扰控制器, 扩张状态观测器, 不确定系统

分类号 TP 301

Auto-disturbances Rejection Controller Constructed by Cascade Extended State Observer

Zhang Rong

Han Jingqing

(Chongqing University) (Institute of Systems Science, Academia Sinica)

Abstract Using auto-disturbances rejection controller to control m th order controlled systems, $m + 1$ parameters of extended state observer need to be adjusted. Cascade extended state observer constructed by cascading m second order extended state observers has the same function of $(m + 1)$ th order extended state observer. The auto-disturbances rejection controller based on such cascade extended observer has a property of adjusting parameter easily and is convenient to practical problems.

Key words auto-disturbances rejection controller, extended state observer, uncertain system

1 引 言

自抗扰控制器(ADRC)在被控对象阶数小于 3 时, 根据对象模型的变化范围适当调整控制器参数, 会取得较好的控制效果。但当对象阶数大于 3 时, 要调出一组满意的控制器参数并非易事。调整 ADRC 参数, 关键是调整其中的扩张状态观测器(ESO)的参数。ESO 的作用本质上是由对象输出观测出其各阶导数。根据对象输出, 要获得其 m 阶的各阶导数, 按原 ESO 结构^[1], 需建立 $m + 1$ 阶 ESO 并调出 $m + 1$ 个参数。这可按如下方法实现: 取 $m_1 < m$, 建立以对象输出作输入的 $m_1 + 1$ 阶 ESO 和其 m_1 阶导数作输入的 $m - m_1 + 1$ 阶来共同完成, 即把高阶 ESO 分解成低阶 ESO 的串联来实现。低阶串联所成 ESO 的总阶数比原来高, 但每个低阶 ESO 参数的调整较容易, 从而给总体调整带来了便利。

文献[2, 3]分析了二阶 ESO 的误差估计和参数调整的一般规律。本文用此结果, 把 ADRC 中的 $m + 1$ 阶 ESO 用 m 个相同参数的二阶 ESO 的串联来代替, 从而将 ESO 中 $m + 1$ 个参数的调整简化为两个参数的调整。对高阶受控对象的仿真研究表明, 该方法是十分有效的。

2 串联型扩张状态观测器构成的自抗扰控制器

控制 m 阶不确定对象

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

的原 ADRC 由如下 3 部分组成:

- 1) 由参考输入安排过渡过程并提取其各阶导数的 m 阶跟踪-微分器(TD);
- 2) 由对象输出提取其各阶导数及系统扰动总

* 国家自然科学基金项目(G69574033) 和国家攀登计划项目
1998 - 05 - 12 收稿, 1998 - 07 - 13 修回

和量的 $m + 1$ 阶 ESO;

3) 由这两组导数之差及扰动总和量的估计值来产生控制量的“函数发生器”。

欲使 ADRC 很好地工作, 关键是根据对象的一定特性调好 $m + 1$ 阶 ESO。原 ESO 方程为

$$\begin{cases} \dot{e} = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}g_1(e) \\ \vdots \\ \dot{z}_{m-1} = z_m - \beta_{0m-1}g_{m-1}(e) \\ \dot{z}_m = z_{m+1} - \beta_{0m}g_m(e) + bu(t) \\ \dot{z}_{m+1} = -\beta_{0m+1}g_{m+1}(e) \end{cases} \quad (2)$$

在函数 $g_i(e)$ ($i = 1, \dots, m + 1$) 已确定的情况下, 需要调整参数 β_{0i} ($i = 1, \dots, m + 1$)。但是, 当 $m > 2$ 时, 欲调好 β_{0i} 并非易事。

如果用 m 个具有同一参数的二阶 ESO 串联型方程

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = z_1 - z_0, \quad z_0 = y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}g_1(e_1) \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02}g_2(e_1) \\ \vdots \\ \dot{e}_{2(m-2)-1} = z_{2(m-2)-1} - z_{2(m-3)} \\ \dot{z}_{2(m-2)-1} = z_{2(m-2)} - \beta_{01}g_1(e_{2(m-2)-1}) \\ \dot{z}_{2(m-2)} = -\beta_{02}g_2(e_{2(m-2)-1}) \\ \vdots \\ \dot{e}_{2(m-1)-1} = z_{2(m-1)-1} - z_{2(m-2)} \\ \dot{z}_{2(m-1)-1} = z_{2(m-1)} - \beta_{01}g_1(e_{2(m-1)-1}) \\ \dot{z}_{2(m-1)} = -\beta_{02}g_2(e_{2(m-1)-1}) + bu \\ \dot{e}_{2m-1} = z_{2m-1} - z_{2(m-1)} \\ \dot{z}_{2m-1} = z_{2m} - \beta_{01}g_1(e_{2m-1}) + bu \\ \dot{z}_{2m} = -\beta_{02}g_2(e_{2m-1}) \end{cases} \quad (3)$$

代替 $m + 1$ 阶 ESO (式(2)) 时, 如何选择其参数 β_{01} , β_{02} ? 对系统(1) 的状态变量, 记

$$\begin{cases} y_i = y^{(i)}, \quad i = 0, 1, \dots, m - 1 \\ y_m = y^{(m)} - bu = f(y, \dot{y}, \dots, y^{(m-1)}, w(t)) \\ y_{m+1} = d(f(y, \dot{y}, \dots, y^{(m-1)}, w(t))) / dt = \dot{y}_m \end{cases} \quad (4)$$

我们希望(3) 中的 z_{2i} 能跟踪 $y^{(i)} = y_i$ ($i = 1, \dots, m - 1$), 而 z_{2m} 能估计出系统扰动的总和和作用 y_m 。则经适当近似处理后, 可得误差 $e_{2i-1} = z_{2i-1} - z_{2(i-1)}$ 所满足的方程

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \beta_{01}g_1(e_1) \\ \dot{e}_2 = -y_2 - \beta_{02}g_2(e_1) \\ \vdots \\ \dot{e}_{2(m-1)-1} = e_{2(m-1)} - \beta_{01}g_1(e_{2(m-1)-1}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{e}_{2(m-1)} = -y_m - \beta_{02}g_2(e_{2(m-1)-1}) \\ \dot{e}_{2m-1} = e_{2m} - \beta_{01}g_1(e_{2m-1}) \\ \dot{e}_{2m} = -y_{m+1} - \beta_{02}g_2(e_{2m-1}) \end{cases} \quad (5)$$

这里, 每个二阶系统

$$\begin{cases} \dot{e}_{2i-1} = e_{2i} - \beta_{01}g_1(e_{2i-1}) \\ \dot{e}_{2i} = -y_{i+1} - \beta_{02}g_2(e_{2i-1}) \end{cases} \quad (6)$$

其结构、参数相同, 且相互独立, 只有不确定项 $-y_{i+1}$ 有所不同。现假定这些不确定量的变化范围有限, 由常数 y_{i+1}^* 所限定, 即 $|y_i| < y_i^*$ 。

文献[2] 对形如(6) 的二阶方程 $g_1(e_j) = e_j$, $g_2(e_j) = |e_j|^\alpha \text{sign}(e_j)$ 进行了误差分析。其稳态误差主要由 $(y_{i+1}^*/\beta_{02})^{1/\alpha}$ 决定, 而进一步缩小误差的办法是扩大不等式

$$(\beta_{01})^2/4 > \beta_{02} > y_i^*$$

为此在(5) 中让 β_{01} , β_{02} 扩大, 使不等式

$$(\beta_{01})^2/4 > \beta_{02} >$$

$$\max\{y_i^*, i = 2, \dots, m + 1\}$$

就能使误差满足跟踪要求。这样就把(2) 中调整 $m + 1$ 个参数的难题简化成调整(3) 中的两个参数的问题, 为 ADRC 的实用化带来极大便利。

3 仿真例子

现给出 3 个二阶 ESO 串联型和 4 个二阶 ESO 串联型所构成的 ADRC, 分别控制三阶和四阶被控对象的仿真例子。若按原 ADRC, 仿真中需调整的 ESO 参数分别是 4 个和 5 个, 而采用串联型 ESO 构成的 ADRC, 需调整 ESO 参数均减少为 2 个。这样就大大降低了调整参数的难度。

例 1 三阶被控对象为

$$y^{(3)} = y + (1 - y^2)\dot{y} + \frac{1}{1 + |y|} + 0.5 \text{sign}(\cos(0.4t)) + u$$

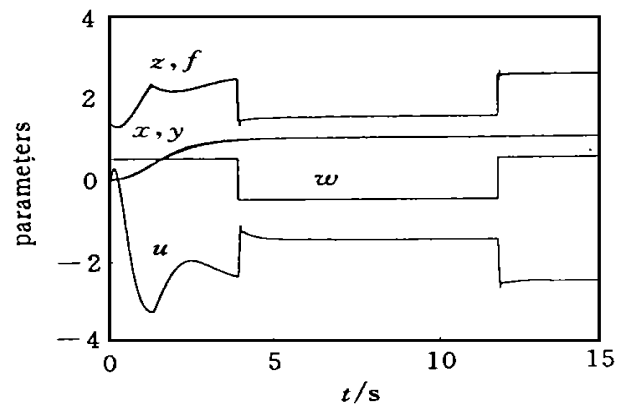


图 1 例 1 仿真结果

其阶跃响应仿真结果如图1所示。

例2 四阶被控对象为

$$y^{(4)} = -y - (1 - y^2)y' - \frac{1}{1 + y^2}$$

$$\log(1 + |y^{(3)}|) + 0.5 \operatorname{sign}(\cos(0.4t)) + u$$

其仿真结果如图2所示。

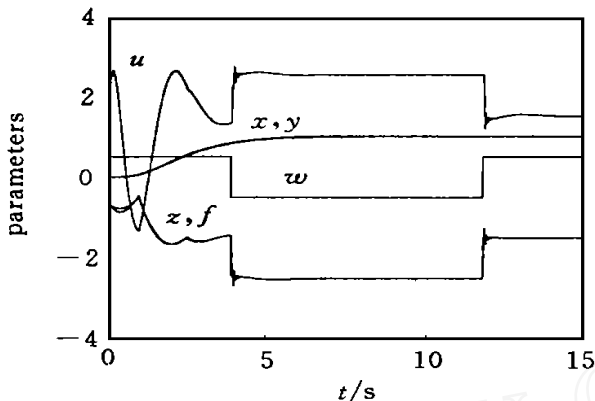


图2 例2仿真结果

这两个例子中, $w(t) = 0.5 \operatorname{sign}(\cos(0.4t))$ 是方波外扰。串联型 ESO 的每个二阶子系统的参数都取 $\alpha = 0.2$, $\beta_{01} = 1000$, $\beta_{02} = 100$ 。图中, x 是安排的过渡过程, y 是实际响应, u 是控制量, f 是对象右端除 u 以外的扰动总和量, 而 z 是扰动总和量的估计, 几乎重合。

4 结 语

高阶 ADRC 结构中所含高阶 ESO 的参数是较难调整的。为此本文提出了用低阶 ESO 串联型代替高阶 ESO 的方法。该方法尽管提高了 ESO 的阶数, 但对参数调整却带来了极大方便, 并且用串联型 ESO 改造的 ADRC 控制高阶对象仍十分有效。

参 考 文 献

- 1 韩京清 一类不确定对象的扩张状态观测器 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88
- 2 韩京清, 张荣 二阶扩张状态观测器的误差分析 系统科学与数学, 1999, 10(4): 465-471
- 3 Hong Yiguang, Zhang Rong, Han Jingqing Nonlinear observer design and application. 见: 控制理论及其应用 98 年会议论文集 宁波, 1998 233-236

作 者 简 介

张 荣 男, 1969 年生。1998 年于中国科学院系统科学研究所获系统理论博士学位, 现于重庆大学技术经济与管理博士后流动站工作。主要研究领域为控制系统的非线性设计, 混沌理论。

韩京清 见本刊 1998 年第 13 卷第 1 期第 23 页。

(上接第 88 页)

- 3 章新华. 神经网络在声纳目标识别中的研究进展. 火力与指挥控制, 1998, 3(1): 2-7
- 4 Duda R O, Hart P E. Pattern classification and scene analysis Menlo Park: John Wiley Publishers, 1973
- 5 Hush D, Abdallah C, Horne B. Recursive neural network for signal processing and control In: Proc of the First IEEE-SP WNNSP. Albuquerque, 1991. 523-532
- 6 蔡悦斌, 黄采金, 史可智, 等. 动态神经元模型在水下目标识别中的应用. 模式识别与人工智能, 1998, 6(2): 199-205

作 者 简 介

刘 韬 男, 1975 年生。解放军空军工程大学工程学院通信与信息系统专业硕士研究生。目前主要从事航空电子综合化系统, 自动化指挥系统等方面的科研工作。

张殿治 男, 1939 年生。空军工程学院教授。多年从事电路与系统, 功率电子学, 神经网络与模糊控制及其应用等方面的研究工作。

赵学云 女, 1963 年生。1999 年毕业于空军工程大学工程学院研究生部, 现为海军航空技术学院教员。目前主要研究自适应信号处理理论。

李 映 女, 1970 年生。西安电子科技大学博士研究生。目前主要研究神经网络与进化算法在电子系统中的应用。