

自抗扰控制器及其应用*

韩京清
(中国科学院系统科学研究所·北京, 100080)

摘 要 自抗扰控制器是自动检测系统的模型和外扰实时作用并予以补偿的新型控制器。介绍自抗扰控制器对时变系统、多变量系统、最小相位系统等不同对象的使用方法。
关键词 自抗扰控制, 鲁棒控制, 不确定系统
分类号 O157.21

1 引 言

我们曾在文献[1]中提出了“非线性误差反馈”(NLSEF)控制器结构和数值仿真结果。在这个非线性误差反馈律中有一个补偿分量,它是自动检测系统模型和外扰实时作用并予以补偿的分量。若把系统的模型作用当作系统的内扰,那么它同系统的外扰一起,均可作为对系统的扰动。这个补偿分量并不区分内扰和外扰,直接检测并补偿它们的总合作用——对系统的总扰动。由于这个分量的补偿作用,被控对象实际上被化成积分器串联型而易于构造出理想的控制器,这个补偿分量的作用实质上是一种抗扰作用。因此,我们将此控制器称为“自抗扰控制器”(ADRC)。

本文介绍自抗扰控制器在时变系统、多变量系统、最小相位系统中的使用方法,并给出相应数值仿真例子。

2 自抗扰控制器的应用

对带有未知扰动的不确定对象

$$\dot{y} = f(y, \dot{y}, w(t)) + bou \tag{1}$$

其中, $f(x, y, z)$ 及 $w(t)$ 均未知。文献[1]提出了图1所示的“非线性状态误差反馈”(NLSEF)控制方案,其中虚线所框部分为“自抗扰控制器”(ADRC)。

图1中,TD的作用是安排过渡过程并给出此过程的微分信号;ESO给出对象状态变量的

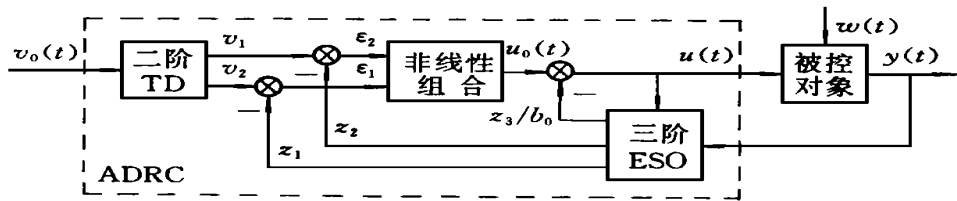


图1 自抗扰控制器结构

* 国家自然科学基金资助课题

估计 $z_1(t)$ 、 $z_2(t)$ ，以及系统扰动的实时作用量 $a(t) = f(y(t), \dot{y}(t), w(t))$ 的估计 $z_3(t)$ ，而 $z_3(t)/b_0$ 的反馈将起补偿扰动的作用。这是一个具有自动补偿系统扰动的反馈结构。实际上，这个结构中控制量被分成两部分，即

$$u(t) = u_0(t) - z_3(t)/b_0 \quad (2)$$

其中， $-z_3(t)/b_0$ 是补偿扰动的分量，而 $u_0(t)$ 是用状态误差 e_1 、 e_2 的非线性反馈来控制积分器串联型的分量。用控制律(2)进行控制称为用 $b_0 u$ 来实现自抗扰控制。

2.1 时变系统的控制

设有如下时变系统

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w(t)) + b(t)u \quad (3)$$

其中， f, w, b 均为不确定函数， $b_2 > b(t) > b_1 > 0$ 。取 $b(t)$ 变化范围内的某一中间值 b_0 ，则(3)式可改写成

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w(t)) + (b(t) - b_0)u + b_0 u \quad (4)$$

可以将 $(b(t) - b_0)u(t)$ 当作新的扰动项。实际上，扩张状态观测器的输出 $z_3(t)$ ，当 $(b(t) - b_0)$ 不甚大时能较好地估计出实时作用量

$$a(t) = f(y(t), \dot{y}(t), w(t)) + (b(t) - b_0)u(t) \quad (5)$$

从而能用 $b_0 u$ 来实现自抗扰控制，即用 $z_3(t)/b_0$ 来实现 $a(t)$ 的补偿。

例 1

$$\begin{cases} \ddot{y}_1 = \frac{a_1(t)}{1 + \dot{y}^2} + a_2(t) y \dot{y} + w(t) + (1 + b(t))u \\ \ddot{y} = Y_1 y^{0.6} + w(t) + (1 + b(t))u \end{cases}$$

其中

$$a_1(t) = Y_1 \cos(\omega t), \quad a_2(t) = Y_2 \cos(\omega t)$$

$$w(t) = Y_3 \text{sign}(\cos(\omega t)), \quad b(t) = Y_4 \cos(\omega t)$$

$$Y_1 = 0.7, \quad Y_2 = -1, \quad Y_3 = 0.2, \quad Y_4 = 0.2$$

$$\omega = 0.5, \quad \omega = 0.7, \quad \omega = 0.3, \quad \omega = 2$$

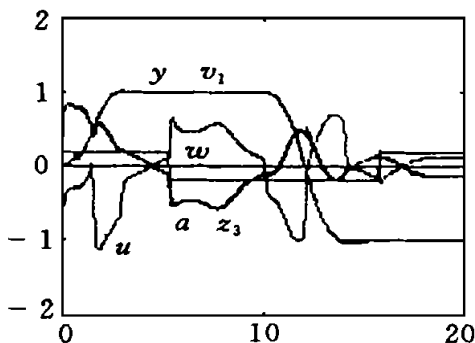


图 2 例 1 对象 1 仿真结果

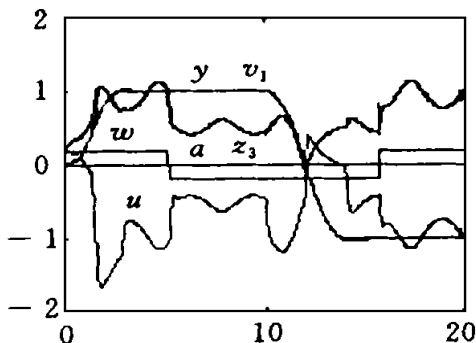


图 3 例 1 对象 2 仿真结果

这两个对象的仿真结果如图 2、图 3 所示，图中显示了安排的过渡过程 $v_1(t)$ ，实际过程 $y(t)$ ，控制量 $u(t)$ ，总扰动 $a(t)$ 及其估计 $z_3(t)$ 和外扰 $w(t)$ 。其中总扰动分别为

$$a(t) = \frac{a_1(t)}{1 + \dot{y}^2} + a_2(t) y \dot{y} + w(t) + b(t)u(t)$$

$$a(t) = Y_1 y(t)^{0.6} + w(t) + b(t)u(t)$$

2.2 多变量系统解耦控制

以双输入双输出系统为例来说明解耦控制方法。设有被控对象

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = f_1(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2, w_1(t)) + b_{11}(t)u_1 + b_{12}(t)u_2 \\ \dot{y}_2 = f_2(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2, w_2(t)) + b_{21}(t)u_1 + b_{22}(t)u_2 \end{cases}$$

(6)

其中 f_1, f_2 为不确定函数, $w_1(t), w_2(t)$ 为未知外扰。令

$$\begin{cases} U_1 = b_{11}(t)u_1 + b_{12}(t)u_2 \\ U_2 = b_{21}(t)u_1 + b_{22}(t)u_2 \end{cases}, \quad B(t) = \begin{bmatrix} b_{11}(t) & b_{12}(t) \\ b_{21}(t) & b_{22}(t) \end{bmatrix}$$

(7)

在此假定矩阵 $B(t)$ 可逆。如果矩阵 $B(t)$ 已知, 那么 U_1 和 U_2 分别将

$$\begin{cases} a_1(t) = f_1(y_1(t), \dot{y}_1(t), y_2(t), \dot{y}_2(t), w_1(t)) \\ a_2(t) = f_2(y_1(t), \dot{y}_1(t), y_2(t), \dot{y}_2(t), w_1(t)) \end{cases}$$

(8)

作为各自的系统扰动而实现自抗扰控制, 这样就能实现解耦控制。

如果矩阵 $B(t)$ 不确定, 则在 $B(t)$ 的变化范围内取一可逆矩阵 B_0 , 并把 $(B(t) - B_0) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$ 当作系统新的外扰项。若矩阵 $B(t) - B_0$ 不甚大, 那么就能用 U_1 和 U_2 分别实现各自通道的自抗扰控制, 从而最终实现解耦控制。

例 2

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = \frac{\gamma_1}{(1 + \dot{y}_1)^2} + \dot{y}_1 \exp(\gamma_2(1 + \dot{y}_1)/10) \\ \quad + \gamma_3 y_2 \dot{y}_2 + \dot{y}_2 + w(t) + u_1 + b_1(t)u_2 \\ \dot{y}_2 = \gamma_1 \log(0.5 + \dot{y}_1) + \gamma_2 \log(0.5 + \dot{y}_1) \\ \quad + \gamma_3 \cos(y_2 \dot{y}_2) + \dot{y}_2 + b_2(t)u_1 + u_2 \end{cases}$$

其中

$$\begin{aligned} b_1(t) &= 0.1 \cos(0.9t), \quad b_2(t) = -0.2 \sin(1.2t) \\ w(t) &= 0.2 \operatorname{sign}(\cos(0.3t)) \\ \gamma_1 &= 1.0, \quad \gamma_2 = 1.0, \quad \gamma_3 = 0.8 \end{aligned}$$

这两个对象的仿真结果如图 4、图 5 所示, 图 4 显示的是 $v_{11}(t), y_1(t), u_1(t)$, 第一通道的总扰动 $a_1(t)$ 及其估计 $z_{13}(t), w(t)$; 而图 5 显示的是 $v_{21}(t), y_2(t), u_2(t)$, 第二通道的总扰动 $a_2(t)$ 及其估计 $z_{23}(t), w(t)$ 。这里

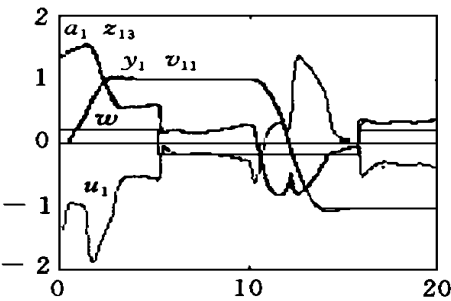


图 4 例 2 对象 1 仿真结果

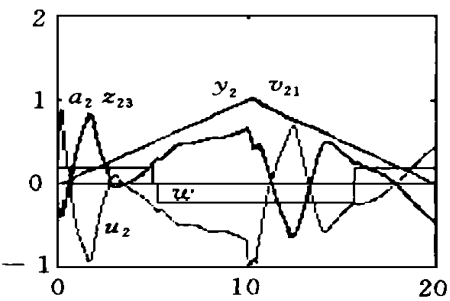


图 5 例 2 对象 2 仿真结果

$$\begin{aligned}
 a_1(t) &= \frac{Y_1}{(1 + \dot{y}_1)^2} + \dot{y}_1 \exp(Y_2(1 + \dot{y}_1)/10) \\
 &\quad + Y_3 y_2 \ddot{y}_2 + \ddot{y}_2 + w(t) + b_1(t)u \\
 a_2(t) &= Y_1 \log(0.5 + \dot{y}_1) + Y_2 \log(0.5 + \ddot{y}_2) \\
 &\quad + Y_3 \cos(y_2 \ddot{y}_2) + \ddot{y}_2 + b_2(t)u
 \end{aligned}$$

2.3 最小相位系统控制

设有三阶最小相位系统

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}, \ddot{x}, w(t)) + bu, \quad y = c_1 x + \dot{x} \quad (9)$$

其中, f, w 不确定, $c_1 > 0, y$ 为被控输出量, $s = -c_1$ 称为系统的零点。

若取 y 和 \dot{y} 作为状态变量, 那么可得如下二阶系统

$$\ddot{y} = c_1 \ddot{x} + \ddot{x} = c_1 \ddot{x} + f(x, \dot{x}, \ddot{x}, w(t)) + bu \quad (10)$$

这里, 原三阶系统的解 $x(t)$ 可当作外扰来处理。

例3

$$\begin{cases}
 \ddot{x}_1 = -x_1 + \dot{x}_1 + \ddot{x}_1 + w(t) + bu \\
 w(t) = 0.5 \operatorname{sign}(\cos(0.8t)), \quad y_1 = x_1 + \dot{x}_1 \\
 \ddot{x}_2 = -x_2 + \dot{x}_2 - \ddot{x}_2 + bu + b(t)u \\
 b(t) = 0.3 \cos(0.8t), \quad y_2 = 1.5x_2 + \dot{x}_2
 \end{cases}$$

这两个对象的仿真结果如图6、图7所示, 图中显示了 $v_1(t), y(t), u(t), a(t), z_3(t), w(t)$ 和 $v_1(t), y(t), u(t), a(t), b(t)$ 。其中 $a(t)$ 分别为

$$\begin{aligned}
 a(t) &= c_1 \ddot{x} + \ddot{x}(t) + \dot{x}(t) + \ddot{x}(t) + w(t) \\
 a(t) &= c_1 \ddot{x} - \ddot{x}(t) + \dot{x}(t) - \ddot{x}(t) + b(t)u(t)
 \end{aligned}$$

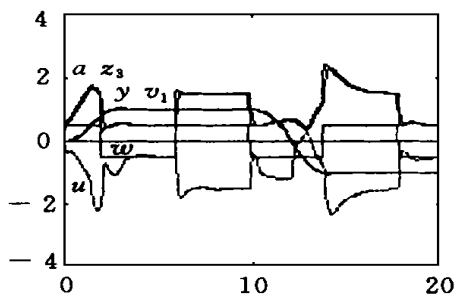


图6 例3对象1仿真结果

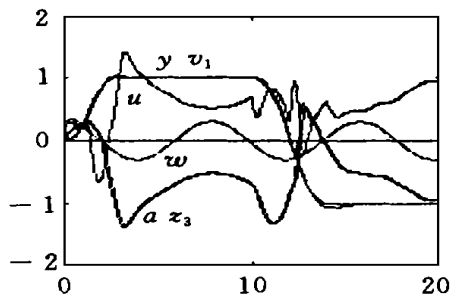


图7 例3对象2仿真结果

3 结 语

本文介绍了自抗扰控制器对三类对象的应用方法及相应数值仿真结果。在这三类仿真例中, 所用的控制器是同一个控制器(结构和参数均相同), 这足以说明这种控制器的适应性和鲁棒性。这种控制器的最大特点是, 它将系统模型和外扰作用均当作对系统的扰动而自动估计并给于补偿。我们与一些部门前后对机械手、发电机、电炉、液压机、控调器、噪音控制、磁悬浮等不同对象, 或作数值仿真实验, 或用计算机和单片机作实际过程控制实验, 均取得了令人满意的效果。

对于给定的自抗扰控制器究竟适应什么范围的对象?对选定的实际对象如何调整自抗扰控制器的参数?虽有一些初步研究成果,但仍需进行更深入的研究。根据我们的研究和他人的实调经验,自抗扰控制器参数的调整远比常规 PID 调节器参数的调整容易得多,显示出其强大的实用前景。

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, 王伟. 非线性跟踪- 微分器. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177– 183
- 3 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

Auto- disturbances- rejection Controller and Its Applications

Han Jingqing

(Institute of Systems Sciences, Academia Sinica)

Abstract Auto- disturbances- rejection controller (ADRC) is a new type of controller which can automatically detect the real time effect of the model and the external disturbances and then automatically compensate it. We first introduced the structure and the function of ADRC. Then we discussed ADRC applications in time- varying systems, multi- variable systems, minimum- phase systems.

Key words auto- disturbances- rejection controller (ADRC), robust control, uncertain systems

作 者 简 介

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数学系攻读研究生学位。现为中国科学院系统科学研究所研究员, 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。

下 期 要 目

化工批处理过程调度	王朝晖 等
并行工程中的活动规划	钟 谦 郑应平
参数不确定非线性系统的自适应控制和鲁棒控制	秦 滨 等
非线性状态空间模型遗忘性研究	郭朝晖 吴铁军
广义 BP 算法及网络容错性和泛化能力的研究	董 聪 刘西拉
含约束的非线性不确定系统的鲁棒控制	周玉成 等
基于遗传算法的退火精确罚函数非线性约束优化方法	吴志远 等
求多峰函数在全部全局最优解的胞腔排除遗传算法	翟海峰 赵明旺
多模型自适应控制及其在三轴转台中的应用	赵志魁 等