

非线性状态误差反馈控制律——NLSEF*

韩京清

(中国科学院系统科学研究所·北京, 100080)

摘要 给出一种独立于对象数学描述的新型状态误差反馈控制律——NLSEF方案, 跟踪—微分器能够很好地估计出不确定对象的“扩张状态”, 从而为实现“状态反馈”和“模型、外扰补偿”提供了可能性。这种“模型补偿”实质上等价于非线性系统的“反馈线性化”。在这个方案中不必为消除外扰引起的稳态误差而采用“积分器”, 大量计算机仿真实验表明, 本文给出的控制律——NLSEF具有很好的“适应性”和很强的“鲁棒性”。

关键词 非线性反馈, 适应性, 鲁棒性, 模型补偿

1 前言

我们曾在文[1]中利用跟踪—微分器^[2]来改进经典PID, 给出了新型非线性控制器结构——NLPID, 并在文[3]中又利用另一种形式的跟踪—微分器^[4]来估计对象的实时运动状况以实现模型和外扰补偿。本文将把文[3]中的这个结果给于一般化, 提出新型“非线性状态误差反馈”(NLSEF)控制律结构。在这里利用“扩张状态观测器”^[5]提取为实现“状态反馈”、“模型和外扰补偿”所需的信息。在“NLSEF结构”中, 系统的“模型”和“外扰”处于同等地位, 均可用“扩张状态观测器”估计出其实时作用量而给以“补偿”。“扩张状态观测器”是把有未知外扰的非线性不确定对象用非线性状态反馈化为“积分器串联型”, 是一种对非线性不确定对象实现反馈线性化的结构。把系统化化为“积分器串联型”以后, 就能对他用“状态误差反馈”来设计出理想的控制器。当然, 这里的“状态误差反馈”不必局限在“线性”形式上, 应采用更合适的“非线性配置”。这样就产生了“非线性状态误差反馈”——NLSEF控制律。

在经典调节理论中为消除“静差”而采用了“积分器”。这点在现代线性控制理论中曾用著名的“内模原理”^[6]来解释的。但在“NLSEF结构”中, 由于“扩张状态观测器”能实时估计“未知外扰和系统模型”的实时作用而给以补偿, “线性设计”所需的“内模原理”不再必要了, 从而在常值扰动下为消除“静差”而采用的“积分器”也不再必要了。

当然, 在“NLSEF结构”中, “扩张状态观测器”和“状态误差反馈”的“非线性配置”不依赖于描述对象的具体数学表达式和外扰的具体形式, 因此只要适当选好了有关非线性函数及其参数, “NLSEF结构”将对一定范围的对象具有很好的适应性和鲁棒性。

2 非线性状态误差反馈律——NLSEF

设有未知外扰作用的不确定受控对象

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

其中, $f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t)$ 为未知函数, $w(t)$ 为未知外扰, $x(t)$ 为可量测被调量, u 为控制量。

* 国家自然科学基金资助项目

对受控对象(1)而言,其“扩张状态观测器”^[5]还应以控制量 $u(t)$ 为其输入,即取如下形式

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - g_1(z_1 - x(t)) \\ \vdots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - g_n(z_1 - x(t)) + u(t) \\ \dot{z}_{n+1} = -g_{n+1}(z_1 - x(t)) \end{cases} \quad (2)$$

利用这种扩张状态观测器和 n 阶跟踪—微分器^[2]可以构造如图1的“非线性状态误差反馈”——NLSEF控制器结构:

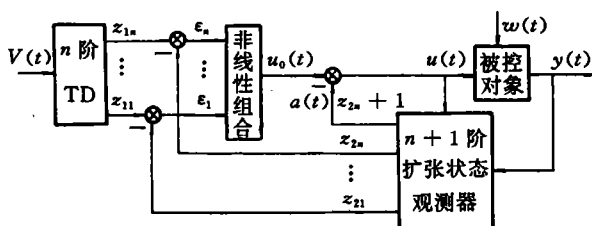


图1 NLSEF控制器结构

这里 z_{21}, \dots, z_{2n} 相当于对象的状态变量,而 $z_{2n+1}(t)$ 为未知外扰 $w(t)$ 和不确定模型的实时作用值

$$a(t) = f(x(t), \dot{x}(t), \dots, x^{(n-1)}(t), t) + w(t)$$

若能用量 $a(t)$ 实现模型和外扰补偿,并令

$$u(t) = u_0(t) - a(t)$$

则由 $u_0(t)$ 到 $y(t)$ 的开环传递关系将是 n 个积分器串联型,从而这种补偿就是不确定系统反馈线性化的具体实现。这样,剩下的就是如何用反馈来设计 $u_0(t)$ 使它控制好“ n 阶积分器串联型”对象的问题。由于 z_{11} 是安排的过渡过程^[1], z_{12}, \dots, z_{1n} 为这个过渡过程的各阶导数,而 z_{21}, \dots, z_{2n} 又相当于对象的状态变量,因此这两组变量之间的误差

$$\varepsilon_1 = z_{11} - z_{21}, \quad \varepsilon_2 = z_{12} - z_{22}, \dots, \varepsilon_n = z_{1n} - z_{2n}$$

就是对象跟踪参考输入 $v(t)$ 时的状态误差。用这些误差的如下“非线性配置”来实现“非线性状态误差反馈”:

$$u_0 = bt_1 \text{fal}(\varepsilon_1, \alpha, \delta) + \dots + bt_n \text{fal}(\varepsilon_n, \alpha, \delta) \quad (3)$$

其中, bt_1, \dots, bt_n 为可调参数,而

$$\text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sgn}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \delta \\ \varepsilon/\delta^{1-\alpha}, & |\varepsilon| \leq \delta \end{cases}$$

这是一种“独立”于对象模型的非线性控制器结构,其控制律主要由(3)式决定,因此称它为“非线性状态误差反馈”(NLSEF)控制律。

大量数值仿真实验表明,在适当选择函数 $g_1(z), \dots, g_{n+1}(z)$ 和参数 bt_1, \dots, bt_n ,这个控制器有很好的适应能力和很强的鲁棒性。

3 对低阶对象的具体形式和仿真结果

3.1 一阶对象的“NLSEF”结构

对一阶对象

$$\dot{x} = f(x, t) + w(t) + u$$

相应的“NLSEF”结构如图 2 所示。

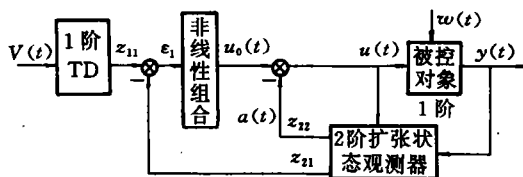


图 2 一阶对象的 NLSEF 结构

其控制器方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_{11} = -R_1 \text{fal}(z_{11} - v(t), \alpha_0, \delta_0) \\ \varepsilon = z_{21} - y \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - bt_{01} \text{fal}(\varepsilon, \alpha_1, \delta_1) + u(t) \\ \dot{z}_{22} = -bt_{02} \text{fal}(\varepsilon, \alpha_1, \delta_1) \\ \varepsilon_1 = z_{11} - z_{21} \\ u_0 = bt_1 \text{fal}(\varepsilon_1, \alpha, \delta) \\ u = u_0 - z_{22} \end{cases} \quad (4)$$

例 1 设有一阶受控对象

$$\dot{x} = x \cos(x) + \text{sgn}(\cos(0.3t)) + u$$

其中, $\text{sgn}(\cos(0.3t)) = w(t)$ 为外扰。对此系统用控制器(4)所作的数值仿真结果见图 3。图中 $a(t)$ 为 $x(t)\cos(x(t)) + \text{sgn}(\cos(0.3t))$ 的估计。

3.2 二阶对象的“NLSEF”结构

二阶对象的“NLSEF”结构如图 4 所示。其控制器方程为

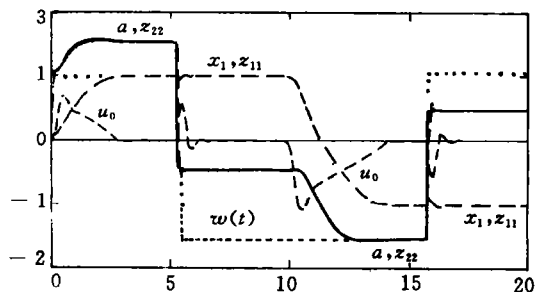


图 3 例 1 的数值仿真结果

$$\begin{cases} \dot{z}_{11} = z_{12} \\ \dot{z}_{12} = -R_1 \text{sat}(z_{11} - v(t) + |z_{12}| z_{12} / 2R_1, \delta_0) \\ \varepsilon = x_{21} - y \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - bt_{01} \text{fal}(\varepsilon, \alpha_1, \delta_1) \\ \dot{z}_{22} = z_{23} - bt_{02} \text{fal}(\varepsilon, \alpha_1, \delta_1) + u(t) \\ \dot{z}_{23} = -bt_{03} \text{fal}(\varepsilon, \alpha_1, \delta_1) \\ \varepsilon_1 = z_{11} - z_{21} \\ \varepsilon_2 = z_{12} - z_{22} \\ u_0 = bt_1 \text{fal}(\varepsilon_1, \alpha, \delta) + bt_2 \text{fal}(\varepsilon_2, \alpha, \delta) \\ u = u_0 - z_{23} \end{cases} \quad (5)$$

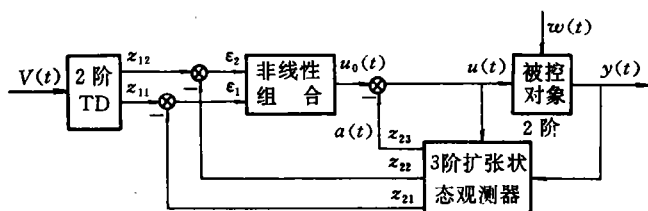


图4 二阶对象的NLSEF结构

例2 设有二阶受控对象

$$\ddot{x} = \log(1 + |x|) + \log(1 + |\dot{x}|)$$

$$+ \operatorname{sgn}(\cos(0.3t)) + u$$

对此系统用控制器(5)所作的数值仿真结果见图5。其中 $a(t)$ 为

$$\log(1 + |x(t)|) + \log(1 + |\dot{x}(t)|)$$

$$+ \operatorname{sgn}(\cos(0.3t))$$

的估计。

3.3 三阶对象的“NLSEF”结构

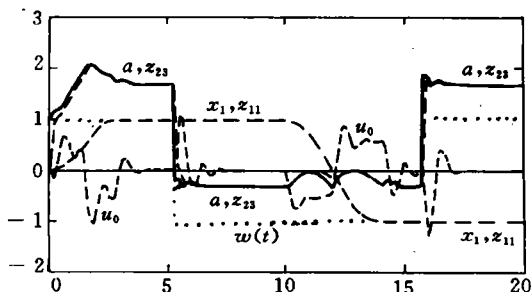


图5 例2的数值仿真结果

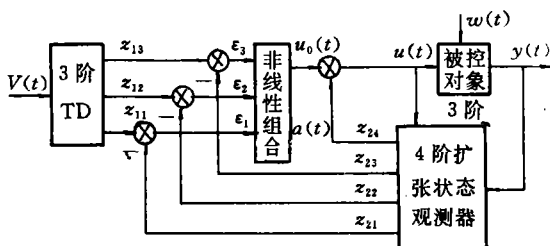


图6 三阶对象的NLSEF结构

三阶对象的“NLSEF”结构如图6所示。其控制器方程为

$$\begin{aligned} \dot{z}_{11} &= z_{12} \\ \dot{z}_{12} &= z_{13} \\ A_0 &= \operatorname{sat}(z_{11} - v(t) + |z_{12}|z_{12}/2R_1, \delta_1) \\ A_1 &= A_0 z_{12} + z_{13}^3/2R_1 \\ A_2 &= z_{11} - u_0 + z_{13}^3/3R_1^2 + A_0(z_{12}z_{13} + A_1 \sqrt{A_1 R_1})/R_1 \\ \dot{z}_{13} &= -R_1 \operatorname{sat}(A_2, \delta_1) \\ \epsilon &= z_{21} - y \\ \dot{z}_{21} &= z_{22} - bt_{01} \operatorname{fal}(\epsilon, \alpha_1, \delta_1) \\ \dot{z}_{22} &= z_{23} - bt_{02} \operatorname{fal}(\epsilon, \alpha_1, \delta_1) \\ \dot{z}_{23} &= z_{24} - bt_{03} \operatorname{fal}(\epsilon, \alpha_1, \delta_1) + u(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_{24} = -bt_{04}\text{fal}(\epsilon, \alpha_1, \delta_1) \\ \epsilon_1 = z_{11} - z_{21} \\ \epsilon_2 = z_{12} - z_{22} \\ \epsilon_3 = z_{13} - z_{23} \\ u_0 = bt_1\text{fal}(\epsilon_1, \alpha, \delta) + bt_2\text{fal}(\epsilon_2, \alpha, \delta) + bt_3\text{fal}(\epsilon_3, \alpha, \delta) \\ u = u_0 - z_{24} \end{cases}$$

例 3 设有三阶受控对象

$$\begin{aligned} \ddot{x} = & x + (1 - x^2)\dot{x} + \frac{1}{(1 + x)} \\ & + 0.5\text{sgn}(\cos(0.3t)) + u \end{aligned}$$

对此系统用控制器(6)所作的数值仿真结果见图 7。其中 $a(t)$ 为

$$\begin{aligned} x(t) + (1 - x^2(t))\dot{x}(t) + \frac{1}{(1 + x(t))} \\ + 0.5\text{sgn}(\cos(0.3t)) \end{aligned}$$

的估计。

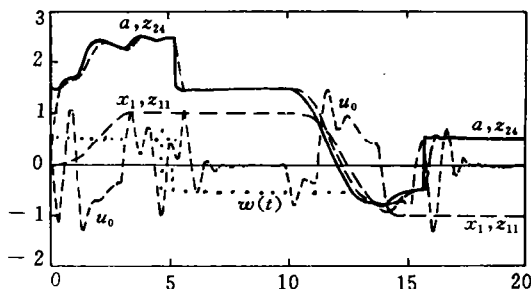


图 7 例 3 的数值仿真结果

4 结束语

本文提出了一种新型控制器结构——NLSEF,它含有三个主要部分:处理参考输入的“跟踪—微分器”;估计对象“扩张状态变量”的“扩张状态观测器”和状态误差的“非线性配置”部分。

NLSEF 的三个主要部分中“跟踪—微分器”是安排过渡过程并提取其微分信号的机构,是不依赖于其他两部分的。大量数值仿真实验表明,只依对象状态估计的要求来设计“扩张状态观测器”,而“非线性配置”是对“积分器串联型”的控制要求来设计。因此,这三个部分可相互“独立地进行设计”,即可用“分离性原理”来进行 NLSEF 的设计。

另外,“扩张状态观测器”的输出 $a(t)$ 能够有效地“补偿”未知模型和外扰作用,对它来说对象数学模型的作用和外扰的作用并无区别,不必采取“干扰解耦”的特别措施,即在“非线性设计”中可以不要“内模原理”^[6],从而也就没有必要再用“积分器”来“消除静差”了。

本文的结果表明,采用“非线性结构”完全改变“线性设计”的面貌。在“非线性领域”是存在着“独立”于系统“模型”和“外扰”的高效的“控制器结构”。本文给出的只是一种可能的“结构”,肯定会有许许多多更有效的新结构,这就需要我们去探讨,开发利用这些新结构。

参 考 文 献

- 1 韩京清. 非线性 PID 控制器. 自动化学报, 1994, 20(4): 487—490
- 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. 一种新型控制器—NLPID. 控制与决策, 1994, 9(6): 401—407
- 4 韩京清, 王伟. 非线性跟踪—微分器的另一种形式. 智能控制与智能化(下卷), 北京: 科学出版社, 1993, 2355—2362
- 5 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
- 6 W M Wonham. Linear multivariable control. Springer-Verlag, Berlin, 1974

(下转第 231 页)

Generalized Open—Loop Decoupling Control for Multivariable Systems

Li Ping, Wang Shuqing, Wang Jicheng

(Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University)

Abstract A decoupling control algorithm for discrete multivariable systems is presented. It can effectively handle time delays, nonminimum phase and open—loop instability. The algorithm is simple to understand and easy to implement. Only one parameter need to be tuned for per loop. The results of simulation show that it has satisfactory tracking performance, good robustness and the powerful ability to suppress disturbances.

Key words multivariable systems, pole—placement, decoupling control, internal model control

作者简介

李 平 31 岁,讲师。1984 年和 1987 年分别本科和研究生毕业于西北工业大学自控系,1995 年在浙江大学获工学博士学位。目前研究方向为自适应控制、模型预测控制以及它们在化工生产过程中的应用。

王树青 55 岁,教授,博士生导师。1964 年毕业于浙江大学化工自动化专业并留校任教,1985—1986 年在英国拉夫堡大学访问工作。目前研究领域是神经网络控制、自适应控制和非线性控制以及这些理论在生物化工、石油化工生产中的应用。

王骥程 见本刊第 9 卷第 4 期第 305 页。

~~~~~  
(上接第 225 页)

## Nonlinear State Error Feedback Control Law—NLSEF

*Han Jingqing*

(Institute of Systems Sciences, Academia Sinica)

**Abstract** In this paper, a new type of nonlinear state error feedback control law (NLSEF) is given, which is independent on the mathematical expression of the object. By making of the "extended state observer" that can be used to estimate successfully the "extended state" of uncertain system, it is possible to realize the "state feedback" and "model, external disturbance compensation". This "model compensation" is really equivalent to the "feedback linearization" for the nonlinear system. Furthermore in this control scheme the integrator is not needed anymore to eliminate the steady error caused by external disturbance. Our computer simulations also demonstrate that this NLSEF has good adaptability and robustness.

**Key words** nonlinear feedback, adaptability, robustness, model compensation

### 作者简介

韩京清 见本刊第 10 卷第 1 期第 88 页。