

文章编号: 1000-8152(2001)01-0021-05

## 基于状态观测器的非理想输入不确定组合大系统的 输出反馈分散镇定\*

刘粉林 刘媛

王银河 张嗣瀛

(解放军信息工程大学信息安全学院·郑州, 450002) (东北大学自动控制系·沈阳, 110006)

**摘要:** 基于状态观测器, 讨论了不确定相似组合系统的鲁棒分散输出反馈镇定问题, 系统的输入是非理想的, 不确定项存在于系统内部和各子系统的关联项中, 它们可能是非线性或时变的, 且满足通常的匹配条件. 使用变结构原理设计控制器, 所设计的控制器保证系统渐近稳定. 研究表明, 系统的相似性有助于简化对系统的分析和设计; 仿真结果表明, 本文的方法是有效的.

**关键词:** 非理想输入; 相似组合系统; 分散变结构控制; 输出反馈; 状态观测器

**文献标识码:** A

## Based State Observer Decentralized Output Feedback Stability of Uncertainty Composite Systems with Imperfect Inputs

LIU Fenlin and LIU Yuan

(School of Information Security, the People's Liberation Army University of Information Engineering·Zhengzhou, 450002, P. R. China)

WANG Yinhe and ZHANG Siying

(Department of Automatic Control, Northeast University·Shenyang, 110006, P. R. China)

**Abstract:** The problem of the robust decentralized output feedback stabilization for uncertain similar composite systems with imperfect inputs based on state observer is investigated. The uncertainties exist in every subsystems and interconnections. These uncertainties may be nonlinear or time-varying and meet the matching condition. The system asymptotic stability can be guaranteed by controller designed with variable structure theory. The system similarity can be help to simplify the analysis and design of the system. The simulation result is shown that the control scheme given in this paper is effectiveness.

**Key words:** imperfect inputs; similar composite system; decentralized variable-structure control; output feedback; state observer

### 1 引言(Introduction)

系统的镇定是控制界研究的一个重要课题, 状态反馈是人们解决一些问题的的重要手段, 状态反馈镇定问题受到人们的普遍重视, 并取得了许多成果. 然而对于实际系统来说, 其状态一般是不可知或部分可知的, 于是, 就必须考虑用估计状态和系统的输出来研究系统的镇定问题, 而且量测系统的输出和构造观测器在工程中较易实现. 因而用估计状态和系统输出对系统实施镇定具有重大的理论和实际价值.

变结构控制方法对系统参数的变化及外部干扰具有较强的鲁棒性, 并可人为规定控制系统动态过程、为不确定性系统的控制提供有效途径<sup>[1-4]</sup>. 而分散控制将大系统的控制简化为每个子系统的单独

控制, 简化了控制系统的设计, 提高了系统的可靠性<sup>[4,5]</sup>. 而二者的结合使得分散变结构控制在大型系统研究中得到了广泛的重视<sup>[6-8]</sup>.

在以上的讨论中, 他们的工作都是基于理想的输入-输出系统. 然而, 在实际中, 由于系统物理特性的限制, 激励器的非线性特性(饱和函数和死区函数)及其影响是不能被忽视的(如液压伺服阀、电动机等<sup>[9]</sup>). 在设计控制律时, 若把实际系统当作理想的输入-输出模型, 而忽视对激励器非线性特性的讨论, 则所设计的控制律将会严重地降低预期闭环系统的性能, 甚至可能导致实际系统是完全不稳定的, 为此, 关于这类系统必须寻求一种有效的控制方法. 目前, 这类非理想输入-输出系统已引起一些控制理论工作者的重视<sup>[10-13]</sup>, 文[10, 11]中讨论了这类系

\* 基金项目: 国家自然科学基金(69774005), 国家教委博士点基金(97014508)和国家攀登计划资助项目.

收稿日期: 1999-03-29; 收修改稿日期: 1999-12-21.

统的鲁棒半全局镇定问题;文[12,13]采用变结构原理分别对一般系统和大系统的镇定问题进行了讨论.然而,他们的工作也是在状态已知的基础上得到的,利用状态观测器和系统输出实施动态输出反馈,这方面的研究目前尚未见到.

本文考虑具有非理想输入不确定相似组合系统的鲁棒分散镇定问题,基于状态观测器,通过变结构原理给出了系统经动态输出反馈镇定的条件;系统的不确定项满足通常的匹配条件,它们可能是非线性或时变的;所设计的控制律保证系统渐近稳定,并使这类系统和理想输入-输出系统一样具有较强的鲁棒性.同时分散控制器的结构与系统的相似特性密切相关,相似条件的运用简化了系统的分析和设计.

## 2 系统的描述与预备知识(System description and preliminaries)

考虑如下系列非线性不确定组合大系统

$$\begin{cases} \dot{x}_i = Ax_i + B[\Phi_i(u_i) + f_i(x_i, u_i, v_i, t) + \\ \sum_{j \neq i, j=1}^N (H_{ij}(x_j) + \Delta H_{ij}(x_j, t))], \\ y_i = Cx_i, \quad i, j = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (1)$$

其中  $x_i \in \mathbb{R}^n$ ,  $u_i, y_i \in \mathbb{R}^m$  分别表示第  $i$  个子系统的状态、控制输入和量测输出.  $(A, B, C)$  是能稳定和可检测的.  $f_i(x_i, u_i, v_i, t)$  描述了第  $i$  个子系统的不确定性和外部干扰;  $H_{ij}(x_j)$  和  $\Delta H_{ij}(x_j, t)$  描述了第  $j$  个子系统对第  $i$  个子系统的已知关联和关联不确定性,且满足  $H_{ij}(0) = 0$ ;  $\Phi_i: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$  是连续向量值函数,  $\Phi_i(0) = 0$ ; 我们总假定,对任意初始状态  $x_i(t_0) = x_{i0} \in \mathbb{R}^n$ 、参数  $v_i \in \mathbb{R}^l$  和控制输入  $u_i(t)$ , 系统(1)存在唯一解  $x_i(t, x_{i0}, u_i(t), v_i(t))$ . 我们称系统(1)具有相似结构是指系统(1)的每个标称子系统具有下列结构:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = Ax_i + B\Phi_i(u_i), \\ y_i = Cx_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (2)$$

关于系统(1)有如下假设和引理:

**假设 1** 关联项  $H_{ij}(x_j)$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, N$ , 在  $\mathbb{R}^n$  上满足 Lipschitz 条件

$$\|H_{ij}(x_j) - H_{ij}(x_j')\| \leq \delta_{ij} \|x_j - x_j'\|, \quad \forall x_j, x_j' \in \mathbb{R}^n. \quad (3)$$

其中  $\delta_{ij} \geq 0$  是 Lipschitz 常数.

**假设 2** 存在已知非负函数  $\rho_i(t, y_i)$ ,  $\rho_{ij}(t, y_j)$  和非负常数  $k_i$  使得

$$\begin{cases} \|f_i(x_i, u_i, v_i, t)\| \leq \rho_i(t, y_i) + k_i \|u_i\|, \\ \|\Delta H_{ij}(x_j, t)\| \leq \rho_{ij}(t, y_j), \quad i, j = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\rho_{ij}(t, 0) = 0$ .

**假设 3** 传递函数矩阵  $C(sI - A)^{-1}B$  是最小相位的,  $\det(CB) \neq 0$ .

**假设 4** 假定系统(1)的非理想输入  $\Phi_i(u_i)$  满足

$$u_i^T \Phi_i(u_i) \geq r_i u_i^T u_i. \quad (5)$$

其中  $r_i > k_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $k_i$  在式(4)中.

**引理 1**  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ,  $(A, B, C)$  是能稳定和可检测的,若

1)  $C(sI - A)^{-1}B$  是最小相位的;

2)  $\det(CB) \neq 0$ .

则存在正定矩阵  $P$  和非奇异矩阵  $K$  使得

$$(A - BKC)^T P + P(A - BKC) + \gamma I < 0, \quad B^T P = KC. \quad (6)$$

其中  $\gamma > 0$ .

引理 1 是文[14]定理 3.3 的直接推论.

**引理 2**<sup>[13]</sup> 若非线性输入  $\Phi_i(u_i)$  满足(5), 则存在连续函数:  $\phi_i: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ ,  $\phi_i(0) = 0$ , 且  $\phi_i(p) > 0$  ( $p > 0$ ), 若令  $\|u_i\| = \phi_i(p)$ , 则

$$r_i u_i^T u_i \geq p \phi_i(p), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

## 3 鲁棒观测器设计(Design of robust observer)

构造系统(1)的鲁棒观测器如下:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + B[\Phi_i(u_i) + \sum_{j \neq i, j=1}^N H_{ij}(\hat{x}_j) + \\ &KC(x_i - \hat{x}_i) + L_i^a + L_i^b], \quad i, j = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$L_i^a = \begin{cases} \frac{KC(x_i - \hat{x}_i)}{\|KC(x_i - \hat{x}_i)\|} (\rho_i(t, y_i) + k_i \|u_i\| + \\ \sum_{j \neq i, j=1}^N \rho_{ij}(t, y_j)), \quad KC(x_i - \hat{x}_i) \neq 0, \\ 0, \quad KC(x_i - \hat{x}_i) = 0, \end{cases} \quad (9a)$$

$$L_i^b = \frac{\alpha v_i}{2} KC(x_i - \hat{x}_i). \quad (9b)$$

其中  $\gamma > \frac{1}{\alpha} \sum_{j \neq i, j=1}^N \delta_{ij}^2$ ,  $v_i$  是函数集合  $\{H_{ij}(x_j): 1 \leq j \leq N, i \neq j\}$  中非零函数的个数, 常数  $\gamma$  和矩阵  $K$  由式(6)给出.

**注 1** 在鲁棒观测器(8)中引入  $L_i^a$  和  $L_i^b$ , 其中  $L_i^a$  是用来补偿系统中的不确定性  $f_i$  和  $\Delta H_{ij}$ , 而  $L_i^b$  是用来补偿关联项  $H_{ij}$  中的部分作用,  $\alpha$  为设计参数.

**定理 1** 考虑系统(1)满足假设 1 ~ 3, 则系统(8)是系统(1)的鲁棒渐近观测器.

证 定义误差状态为  $e_i = x_i - \hat{x}_i, i = 1, 2, \dots, N$ , 利用系统(1)和(8)得到误差方程为:

$$\dot{e}_i = (A - BKC)e_i + B \left[ \sum_{j=1}^N (H_{ij}(x_j) - H_{ij}(\hat{x}_j)) + f_i + L_i^a + L_i^b \right]. \quad (10)$$

关于误差系统(10)构造如下 Lyapunov 函数:

$$V(e) = \sum_{i=1}^N e_i^T P e_i. \quad (11)$$

其中  $P$  由式(6)确定, 则式(11)沿系统(10)的导数由下式给出

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^N [2e_i^T P(A - BKC)e_i + \sum_{j=1}^N 2e_i^T P B (H_{ij}(x_j) - H_{ij}(\hat{x}_j)) + 2e_i^T P B (f_i(x_i, u_i, v_i, t) + \sum_{j=1}^N \Delta H_{ij}(x_j, t) - L_i^a - L_i^b)]. \quad (12)$$

由式(6)可得

$$2e_i^T P(A - BKC)e_i \leq -\gamma e_i^T e_i. \quad (13)$$

利用假设 1, 2 和式(6)得:

$$2e_i^T P B \sum_{j=1}^N (H_{ij}(x_j) - H_{ij}(\hat{x}_j)) \leq \alpha v_i \|KCe_i\|^2 + \frac{1}{\alpha} \sum_{j=1}^N \delta_{ij}^2 e_j^T e_j, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & 2e_i^T P B [f_i + \sum_{j=1}^N \Delta H_{ij} - L_i^a - L_i^b] \leq \\ & 2 \|KCe_i\| [\rho_i(t, y_i) + k_i \|u_i\| + \sum_{j=1}^N \rho_{ij}(t, y_j)] - \\ & 2 \|KCe_i\| [\rho_i(t, y_i) + k_i \|u_i\| + \sum_{j=1}^N \rho_{ij}(t, y_j)] - \\ & \alpha v_i \|KCe_i\|^2 = \\ & -\alpha v_i \|KCe_i\|^2. \end{aligned} \quad (15)$$

利用等式

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \delta_{ij}^2 e_j^T e_j = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \delta_{ji}^2 e_i^T e_i. \quad (16)$$

和式(13)~(15)知式(12)可变为:

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^N (\gamma - \frac{1}{\alpha} \sum_{j=1}^N \delta_{ji}^2) e_i^T e_i. \quad (17)$$

由式(9)关于  $\alpha$  的设置和式(17)知, 系统(8)是系统(1)的渐近状态观测器.

#### 4 基于观测器的分散镇定 (Based observer decentralized stabilization)

##### 4.1 分散滑动模态的建立 (Design of the decentralized sliding mode)

由于  $\det(CB) \neq 0, (A, B)$  是能稳的, 故存在可逆变换  $T$  使得

$$TAT^{-1} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ 0 & 0 & A_{33} \end{pmatrix}, \bar{B} = TB = \begin{pmatrix} I_{m \times m} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

关于系统(8), 令  $z_i = (z_{i1}^T, z_{i2}^T, z_{i3}^T)^T = T\hat{x}_i, z_{i1} \in \mathbb{R}^m, z_{i2} \in \mathbb{R}^{(n-l-m)}, z_{i3} \in \mathbb{R}^l$ , 则系统(8)变为:

$$\dot{z}_{i1} = A_{11}z_{i1} + A_{12}z_{i2} + A_{13}z_{i3} + \Phi_i(u_i) + \sum_{j=1}^N H_{ij}(T^{-1}z_j) + L_i^a + L_i^b, \quad (18a)$$

$$\dot{z}_{i2} = A_{21}z_{i1} + A_{22}z_{i2} + A_{23}z_{i3}, \quad (18b)$$

$$\dot{z}_{i3} = A_{33}z_{i3}. \quad (18c)$$

其中,  $A_{33}$  是 Hurwitz 稳定的, 而且

$\left( \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} I_{m \times m} \\ 0 \end{pmatrix} \right)$  是可控对, 由文[15]知  $(A_{22}, A_{21})$  亦是可控对, 现关于系统(18)设计滑动面如下:

$$\bar{S}_i = \bar{F}z_i = 0, \quad (19)$$

其中  $\bar{F} \in \mathbb{R}^{m \times n}, \bar{F} = (I_{m \times m}, \bar{F}_1, 0), \bar{F}_1 \in \mathbb{R}^{m \times (n-l-m)}$ , 则  $\bar{F}\bar{B} = I_{m \times m}$ , 称  $\bar{F}$  为系统(18)的切换矩阵.

由  $\bar{S}_i = 0$  和  $\bar{F}$  的选取得  $z_{i1} = -\bar{F}_1 z_{i2}$ , 则可将(18b)、(18c)改写为

$$\begin{cases} \dot{z}_{i2} = (A_{22} - A_{21}\bar{F}_1)z_{i2} + A_{23}z_{i3}, \\ \dot{z}_{i3} = A_{33}z_{i3}. \end{cases} \quad (20)$$

由  $(A_{22}, A_{21})$  是可控对, 故可选取  $\bar{F}_1$  使得  $A_{22} - A_{21}\bar{F}_1$  是 Hurwitz 稳定的, 由  $A_{33}$  是 Hurwitz 稳定的, 从而可知系统(18)是渐近稳定的. 当系统(18)的状态进入滑动模态后, 系统(18)的动态特性将由(20)来确定. 令  $F = \bar{F}T$ , 则  $FB = \bar{F}TT^{-1}\bar{B} = \bar{F}\bar{B} = I_{m \times m}$ , 系统(8)的滑动面可设计为:

$$S_i = F\hat{x}_i = FT^{-1}F\hat{x}_i = \bar{F}z_i. \quad (21)$$

则系统(8)将产生滑动运动而渐近稳定.

##### 4.2 分散变结构控制律的设计 (Design of decentralized variable-structure control law)

本文提出如下分散变结构控制律

$$u_i = -\frac{S_i(t)}{\|S_i(t)\|} \varphi_i(\hat{x}_i, y_i, t). \quad (22)$$

其中

$$\begin{cases} S_i(t) = F\hat{x}_i, \\ \varphi_i(\hat{x}_i, y_i, t) = \\ \frac{1}{\xi} [(\|FA - (\frac{\alpha v_i}{2} + 1)KC\| + \\ \sum_{j=1}^N \delta_{ji} \| \delta_{ji} \| \| \hat{x} \| + (\frac{\alpha v_i}{2} + 1) \| K \| \| y_i \| + \\ \rho_i(t, y_i) + \sum_{j=1}^N \rho_{ji}(t, y_j)]. \end{cases} \quad (23)$$

$0 < \xi_i < r_i - k_i$ ,  $F$ 由式(21)确定. 则我们有如下结论:

**定理 2** 不确定组合大系统(1) 满足假设 1~4, 若采用(22)、(23)型的控制律, 则鲁棒观测器(8)的状态将渐近趋向于滑动面  $S_i(t) = Fx_i = 0$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ).

证 根据文[3], 观测器(8)的状态趋向于滑动面  $S_i = 0$ 的一个充分条件是

$$\sum_{i=1}^N \frac{S_i^T \dot{S}_i}{\|S_i\|} < 0. \tag{24}$$

而事实上, 当采用式(24)、(25)的控制律时

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \frac{S_i^T \dot{S}_i}{\|S_i\|} = & \sum_{i=1}^N \frac{S_i^T}{\|S_i\|} [FAx_i + \Phi_i(u_i) + \sum_{j \neq i, j=1}^N H_j(x_j) + \\ & \frac{KC(x_j - \hat{x}_j)}{\|KC(x_j - \hat{x}_j)\|} (\rho_i(t, y_i) + k_i \|u_i\| + \\ & \sum_{j \neq i, j=1}^N \rho_{ij}(t, y_j)) + (\frac{\alpha v_i}{2} + 1)KC(x_i - \hat{x}_i)]. \end{aligned} \tag{25}$$

利用

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i, j=1}^N \rho_{ij}(t, y_j) = \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i, j=1}^N \rho_{ji}(t, y_j), \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i, j=1}^N H_j(x_j) = \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i, j=1}^N H_j(x_i), \end{cases} \tag{26}$$

可得:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \frac{S_i^T \dot{S}_i}{\|S_i\|} \leq & \sum_{i=1}^N [(\|FA - (\frac{\alpha v_i}{2} + 1)KC\| + \sum_{j \neq i, j=1}^N \delta_{ji}) \|x_i\| + \\ & (\frac{\alpha v_i}{2} + 1) \|K\| \|y_i\| + \rho_i(t, y_i) + k_i \|u_i\| + \\ & \sum_{j \neq i, j=1}^N \rho_{ji}(t, y_j) + \frac{S_i^T}{\|S_i\|} \Phi_i(u_i)]. \end{aligned} \tag{27}$$

由引理 2 和式(22)可得:

$$\begin{aligned} u_i^T \Phi_i(u_i) = - \frac{S_i^T}{\|S_i\|} \varphi_i(x_i, y_i, t) \Phi_i(u_i) \geq & \\ r_i u_i^T u_i = r_i \varphi_i^2(x_i, y_i, t), \end{aligned} \tag{28}$$

进而

$$\frac{S_i^T}{\|S_i\|} \Phi_i(u_i) \leq - r_i \varphi_i(x_i, y_i, t). \tag{29}$$

由式(27)、(29)和式(23)可得:

$$\sum_{i=1}^N \frac{S_i^T}{\|S_i\|} \dot{S}_i \leq - \sum_{i=1}^N (r_i - k_i - \xi_i) \varphi_i(x_i, y_i, t) < 0. \tag{30}$$

即可知系统(8)的状态将渐近趋于滑模面  $S_i = 0$ ,

$i = 1, 2, \dots, N$ .

**推论 1** 不确定组合大系统(1) 满足假设 1~4, 若  $r_i - k_i > 0$ ,  $S_i = Fx_i$ ,  $F$ 由式(21)确定, 则系统(1)和观测器(8)及控制律(22)、(23)构成的闭环系统是渐近稳定的.

### 4.3 收敛控制指数的设计 (Design of converging control rate)

在 4.2 部分中设计的控制律(22)、(23)能使观测器的状态渐近到达滑动面  $S_i = 0$ , 但没有讨论该运动的收敛速度, 现在讨论这个问题.

**定理 3** 若系统(1)仍满足假设 1~4, 控制律由下式给出

$$u_i = - \frac{S_i^T}{\|S_i\|} [\varphi_i(x_i, y_i, t) + \frac{q_i}{\xi_i} \|S_i\|]. \tag{31}$$

式中  $q_i \in \mathbb{R}_+$  是预先给定的, 则鲁棒观测器(8)的状态将以指数  $q$  收敛于滑动面  $S_i = 0$ , 其中  $q = \min(q_1, q_2, \dots, q_N)$ .

## 5 仿真 (Simulation)

考虑由双倒立摆系统的标称模型添加不确定因素而组成的不确定系统

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} [\Phi_1(u_1) + \Delta H_{12} + f_1], \\ y_1 = \theta_1 + \dot{\theta}_1, \end{cases} \tag{32}$$

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} [\Phi_2(u_2) + \Delta H_{21} + f_2], \\ y_2 = \theta_2 + \dot{\theta}_2. \end{cases} \tag{33}$$

其中

$$\Phi_1(u_1) = (0.5 + 0.3 \sin u_1 + e^{0.2|\cos u_1|}) u_1,$$

$$\Phi_2(u_2) = (0.3 + 0.5 e^{1+\cos u_2}) u_2,$$

$$\Delta H_{12} = \cos(t \theta_2)(\theta_2 + \dot{\theta}_2),$$

$$\Delta H_{12} = \sin^2(t \theta_1)(\theta_1 + \dot{\theta}_1),$$

$$f_1 = (0.5 + 0.2 \sin^2(t \theta_1)(\theta_1 + \dot{\theta}_1) + 0.05 e^{1+\cos \theta_1}) u_1,$$

$$f_2 = (1 - 0.3 \cos(t \theta_2)(\theta_2 + \dot{\theta}_2) + 0.2 \cos u_2 - 0.3 u_2).$$

设计参数选择如下:

$$r_1 = 1.2, r_2 = 0.8, \delta_{12} = \delta_{21} = 0,$$

$$k_1 = 0.37, k_2 = 0.3, \rho_1(t, y_1) = 0.7 |y_1|,$$

$$\rho_2(t, y_2) = 1.3 |y_2| + 0.2,$$

$$\rho_{12}(t, y_2) = |y_2|, \rho_{21}(t, y_1) = |y_1|.$$

取  $K = 2$ , 则按定理 1 设计观测器如下:

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{\theta}}_1 \\ \dot{\hat{\theta}}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} [\Phi_1(u_1) + 2y_1 - 2(\hat{\theta}_1 + \dot{\hat{\theta}}_1) + L_1^a + L_1^b], \quad (34)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{\theta}}_2 \\ \dot{\hat{\theta}}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\theta}_2 \\ \hat{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} [\Phi_2(u_2) + 2y_2 - 2(\hat{\theta}_2 + \dot{\hat{\theta}}_2) + L_2^a + L_2^b]. \quad (35)$$

其中

$$L_1^a = (0.7 |y_1| + 0.37 |u_1| + |y_2|) \operatorname{sgn}(y_1 - \hat{\theta}_1 - \dot{\hat{\theta}}_1),$$

$$L_1^b = 0,$$

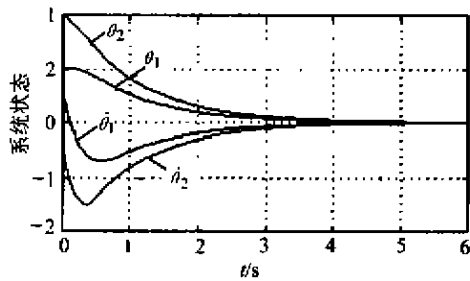


图 1 系统 (32) 和 (33) 的状态响应  
Fig. 1 States response of the system (32) and (33)

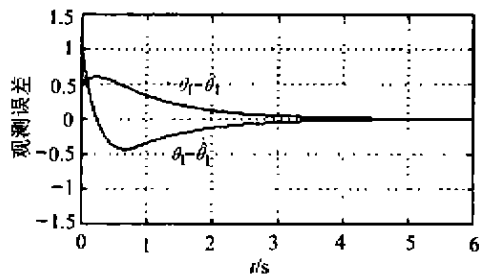


图 3 子系统 (32) 的观测误差  
Fig. 3 Error of observation in subsystem (32)

$$L_1^a = (1.3 |y_2| + 0.2 + 0.3 |u_2| + |y_1|) \operatorname{sgn}(y_2 - \hat{\theta}_2 - \dot{\hat{\theta}}_2),$$

$$L_2^b = 0.$$

取  $F = (1, 1)$ , 则  $S_1 = \hat{\theta}_1 + \dot{\hat{\theta}}_1, S_2 = \hat{\theta}_2 + \dot{\hat{\theta}}_2$ ; 取  $\xi_1 = 0.8, \xi_2 = 0.4$ . 则按定理 2 可得如下控制律:

$$u_1 = -\varphi_1(\hat{\theta}_1, \dot{\hat{\theta}}_1, y_1, t) \operatorname{sgn} S_1,$$

$$u_2 = -\varphi_2(\hat{\theta}_2, \dot{\hat{\theta}}_2, y_2, t) \operatorname{sgn} S_2. \quad (36)$$

其中

$$\begin{cases} \varphi_1(\hat{\theta}_1, \dot{\hat{\theta}}_1, y_1, t) = 1.25 [1.4142 \|(\hat{\theta}_1, \dot{\hat{\theta}}_1)\| + 3.7 |y_1|], \\ \varphi_2(\hat{\theta}_2, \dot{\hat{\theta}}_2, y_2, t) = 2.5 [1.4142 \|(\hat{\theta}_2, \dot{\hat{\theta}}_2)\| + 4.3 |y_2| + 0.2], \end{cases} \quad (37)$$

取  $(\theta_1, \dot{\theta}_1) = (0, 1), (\theta_2, \dot{\theta}_2) = (-0.5, 2), (\hat{\theta}_1, \dot{\hat{\theta}}_1) = (-1, 0.5), (\hat{\theta}_2, \dot{\hat{\theta}}_2) = (-1, 1)$  仿真.

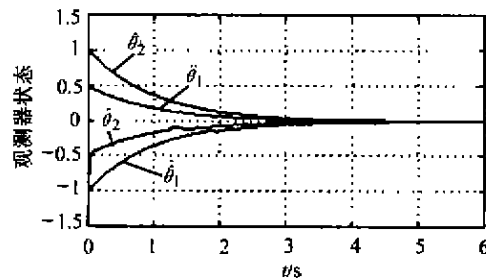


图 2 观测器 (34) 和 (35) 状态响应  
Fig. 2 States response of observer (34) and (35)

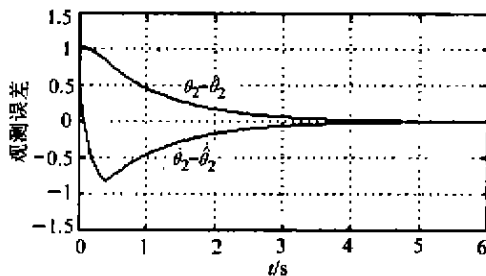


图 4 子系统 (33) 的观测误差  
Fig. 4 Error of observation in subsystem (33)

## 6 结束语 (Conclusion)

本文针对具有非理想输入不确定相似组合大系统, 采用变结构原理设计出分散控制律, 该控制律具有以下特点:

- 1) 仅利用各子系统输出和对应子观测器状态的信息, 在工程实际中容易实现;
- 2) 分散滑动模态是建立在对子观测器上的, 所设计的控制律能保证观测器状态到达滑动面;
- 3) 系统观测器状态到达滑动面的时间能被控制;
- 4) 所设计的控制律能使这类系统和理想的输

入-输出系统一样具有较强的鲁棒性;

5) 相似条件的运用使得控制律的设计在结构上也具有某种相似性, 从而简化系统的分析与设计.

## 参考文献 (References)

- [1] Gao Weibing. Base on Control Theory of Variable Structure [M]. Beijing: Chinese Science & Technology Press, 1990 (in Chinese)
- [2] Itkis U. Control System of Variable Structure [M]. New York: Wiley, 1976

试验结果表明,与图象三值分割法相比,采用 Marr 算子焊缝边缘检测法可有效提高焊缝跟踪精度.即使在焊前定位偏差较大的情况下,如图 9(a)所示,系统也能迅速地使焊炬对中焊缝,控制系统体现出了较强的鲁棒性.



(a) “弧形”线焊缝



(b) “折线”焊缝

图 9 焊缝照片

Fig. 9 Seam pictures

## 5 结论(Conclusion)

本文研究计算机视觉在焊缝跟踪控制中的应用,重点论述识别焊缝边缘的图象处理,确定出基于梯度和 Marr 等算子的焊缝边缘检测法.在恶劣的电弧焊条件下,对焊缝信息量进行有效处理,为控制系统提供了可靠的焊缝位置数据,实现了焊缝的精确跟踪.

## 参考文献(References)

- [1] Suga Y, Muto A and Kumagai M. Automatic tracking of welding line by autonomous mobile robot for welding of plates (tracking of linear and angled welding lines)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), Part C, Tokyo, Japan, 1997, 63 (612): 2918 - 2924
- [2] Gao Xiangdong, Huang Shisheng and Yu Shiwei. An intelligent control system called HFGZ-KY for weld seam tracking [J]. Robot, 1998, 20(5): 17 - 23 (in Chinese)

## 本文作者简介

高向东 1963年生,博士,副教授.1996年在日本九州大学留学.研究领域为智能控制应用及光机电一体化.

黄石生 1938年生,教授,博士生导师.1964年毕业于华南理工大学.长期从事弧焊机器人,焊接过程智能控制和弧焊电源的教学和科研工作.

余英林 1932年生,教授,博士生导师.从事神经网络和图象处理等方面的研究.

(上接第 25 页)

- [3] Shyu K and Yan J. Variable-structure model following adaptive control for systems with time-varying delay [J]. Control Theory and Advanced Technology, 1994, 10(4): 513 - 521
- [4] Gao Weibing and Huo Wei. Base on Stability of Large-Scale Systems, Decentralized Control and Dynamically Hierarchical Control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1990 (in Chinese)
- [5] Chia-chi Chu and Fan-ren Chang. Some results on the problem of decentralized reliable stabilization [J]. Int. J. Control, 1991, 53(6): 1343 - 1538 (in Chinese)
- [6] Matthews G and De-Cario R. Decentralized tracking for a class of interconnected nonlinear systems using variable structure control [J]. Automatica, 1988, 24(2): 187 - 193
- [7] Xu X, Wu Y and Huang W. Variable structure control approach of decentralized model-reference adaptive systems [J]. IEE Proc.-D, 1990, 137(5): 302 - 306
- [8] Wang W J and Lee J L. Decentralized variable structure control design in perturbed nonlinear systems [J]. J. of Dynamic System, Measurement, and Control, 1993, 115(3): 551 - 554
- [9] Truxal J G. Control Engineer's Handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 1958
- [10] Lin Z. Robust semi-global stabilization of linear systems with imperfect actuators [J]. Systems & Control Letters, 1997, 29: 215 - 221
- [11] Lin Z. Semi-global stabilization of linear systems with position and rate-

limited actuators [J]. Systems & Control Letters, 1997, 30: 1 - 11

- [12] Hsu K C. Variable structure control design for uncertain dynamic systems with sector nonlinearities [J]. Automatica, 1988, 34(4): 550 - 508
- [13] Hsu K C. Decentralized variable-structure control design for uncertain large-scale systems with series nonlinearities [J]. Int. J. Control, 1997, 68(6): 1231 - 1240
- [14] Gu G X. Stabilizability condition of multivariable uncertain systems via output feedback control [J]. IEEE Trans. Automatic Control 1990, 35(8): 925 - 927
- [15] Chen C. Linear System Theory and Design [M]. Holt, USA: Rinehart and Winston, 1984

## 本文作者简介

刘勤林 1964年生,解放军信息工程大学副教授.1991年在哈尔滨工业大学获理学硕士学位,2000年3月在东北大学获工学博士学位.研究方向:复杂系统结构分析,鲁棒控制等.

刘 嫒 1965年生,解放军信息工程大学副教授,博士生.1992年在哈尔滨工业大学获理学硕士学位.研究方向:系统分析,军事密码学等.

王银河 1962年生,东北大学、青岛大学副教授.2000年3月在东北大学获工学博士学位.研究方向:复杂系统结构分析,鲁棒控制等.

张嗣瀛 1925年生.1948年毕业于武汉大学机械系.1957年至1959年赴前苏联莫斯科大学数学力学系进修.现为东北大学自动控制系、青岛大学教授,中国科学院院士.主要研究方向:对策理论及复杂控制系统结构分析.