

具有时变时滞的不确定时滞系统的输入-输出能量解耦

毛维杰, 褚健

(浙江大学 工业控制技术国家重点实验室 先进控制研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 提出一种针对具有时变时滞的范数有界不确定线性时滞系统的能量解耦方法, 即从输入-输出的能量关系上实现解耦, 使得任何一个输入的能量主要控制对应的一个输出的能量, 对其它输出能量的影响尽可能小. 所有结论均由线性矩阵不等式描述, 求解非常方便.

关键词: 不确定线性系统; 时变时滞; 近似解耦; 线性矩阵不等式(LMI)

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Input-output energy decoupling of uncertain linear systems with time-varying delay

MAO Wei-jie, CHU Jian

(National Lab of Industrial Control Technology, Institute of Advanced Process Control, Zhejiang University, Zhejiang Hangzhou 310027, China)

Abstract: An input-output energy decoupling method is proposed for norm-bounded uncertain linear systems with time-varying delay. It is an approximate decoupling method, by which the energy of every input mainly controls the energy of a corresponding output and has little effect on the energy of the other outputs. The results are obtained by LMIs so that the problem is easy to be solved.

Key words: uncertain linear systems; time-varying delay; approximate decoupling; linear matrix inequality

1 引言(Introduction)

解耦控制是多变量系统控制的有效手段^[1-5], 已有学者尝试把解耦控制方法推广到时滞系统中, 但基本上都是 Morgan 问题在时滞系统中的适当延伸, 如 Sename 等人^[6,7]. 这是一种基于精确对消的解耦方法, 遇到被控对象的任何一点摄动, 都会导致解耦性的破坏, 这是上述方法的主要缺陷. 考虑到不确定性在实际工业过程中的广泛存在, 必须在解耦中考虑不确定性因素的影响, 但由于不确定性系统的精确解耦实际上存在可能性方面的问题, 因此 Morgan 方法在处理这些问题时自然是困难重重.

从解耦的时间特性上来看, 解耦控制又能分为动态解耦与静态解耦. 从控制效果上来看, 当然动态解耦比较理想, 但其设计与实现的代价比较高. 特别是针对时滞系统, 动态解耦往往意味着控制器的非因果性. 本文试图寻找一种折衷的方法, 即从输入-输出的能量关系上实现近似解耦, 使得任何一个输入的能量主要控制对应的一个输出的能量, 对其它

输出能量的影响尽可能小, 因此称之为输入-输出能量解耦方法.

2 问题的提出(Problem formulation)

考虑如下具有时变时滞的不确定时滞系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [A_0 + \Delta A_0(t)]x(t) + [A_1 + \Delta A_1(t)]x(t-h(t)) + [B + \Delta B(t)]u(t), \\ y(t) = [C + \Delta C(t)]x(t) + [D + \Delta D(t)]u(t), \\ x(t) = \Phi(t), t \in [-h_{\max}, 0). \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统状态, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 为系统输入, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ 为系统输出, 同时满足 $m \leq n$, A_0, A_1, B, C, D 分别为具有相应维数的定常矩阵, 且 $\det D \neq 0$, $\Delta A_0, \Delta A_1, \Delta B, \Delta C, \Delta D$ 为描述系统时变不确定性的实函数矩阵, 满足

$$\begin{bmatrix} \Delta A_0(t) & \Delta B(t) \\ \Delta C(t) & \Delta D(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} L_0(t) [E_1 \quad E_2],$$
$$\Delta A_1(t) = H_3 L_1(t) E_3.$$

其中 $H_1, H_2, H_3, E_1, E_2, E_3$ 为具有相应维数的定常

实矩阵, $L_0(t) \in \mathbb{R}^{r_1 \times r_2}$, $L_1(t) \in \mathbb{R}^{s_1 \times s_2}$ 为未知的实函数矩阵, 满足

$$L_0^T(t)L_0(t) \leq I, L_1^T(t)L_1(t) \leq I.$$

$\Phi(t)$ 是一个连续的矢量初值函数, $h(t)$ 表示系统的时变时滞, 且满足

$$0 \leq h(t) \leq h_{\max} < \infty, \dot{h}(t) \leq d < 1.$$

式中 $h_{\max}$, d 均为常数. 寻求状态反馈与输入变换控制率

$$u(t) = Fx(t) + Gv(t) \quad (2)$$

使得闭环系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [A_0 + \Delta A_0(t) + (B + \Delta B(t))F]x(t) + \\ \quad [A_1 + \Delta A_1(t)]x(t - h(t)) + \\ \quad [B + \Delta B(t)]Gv(t), \\ y(t) = [C + \Delta C(t) + (D + \Delta D(t))F]x(t) + \\ \quad [D + \Delta D(t)]Gv(t) \end{cases} \quad (3)$$

的任何一个输入的能量主要控制对应的一个输出的能量, 而对其它输出能量的影响尽可能小, 其中 $v(t) \in \mathbb{R}^m$ 为变换后新的系统输入, F, G 分别为具有相应维数的定常矩阵. 上述输入-输出能量解耦过程可归纳为: 寻求 $F \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $G \in \mathbb{R}^{m \times m}$, 满足

$$\begin{cases} \int_0^\tau y_i^T(t)v_i(t)dt \geq \alpha_i \int_0^\tau v_i^T(t)v_i(t)dt, \\ \forall \tau \geq 0, v_j = 0 (j \neq i), i = 1, 2, \dots, m, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \int_0^\tau y_i^T(t)g_i(t)dt \leq \beta_i \int_0^\tau v_i^T(t)v_i(t)dt, \\ \forall \tau \geq 0, v_j = 0 (j \neq i), i = 1, 2, \dots, m. \end{cases} \quad (5)$$

其中 $g_i(t) \in \mathbb{R}^{m-1}$ 表示 $y(t)$ 中除 $y_i(t)$ 分量外的所有其它分量组成的向量, α_i, β_i 为给定的正常数.

本文的输入-输出能量解耦思想参照了 Rosenbrock 的近似解耦思想, 具体的求解过程可归纳为对条件(4), (5)的求解. 考虑到系统的稳定性是系统设计中的首要目标, 因此下面提出的能量解耦条件将同时保证闭环系统的渐近稳定性.

定义 1 对于具有时变时滞的不确定时滞系统(1), 如果存在矩阵 F, G , 满足条件(4), (5), 且闭环系统渐近稳定, 则称该系统为输入-输出能量 $(\alpha, \beta | F, G)$ 解耦的.

3 主要结果(Main results)

对于具有时变时滞的不确定时滞系统(1), 如果其本身是渐近稳定的, 则式(2)可简化为仅具输入变换部分, 即

$$u(t) = Gv(t). \quad (6)$$

此时, 系统(1)变为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [A_0 + \Delta A_0(t)]x(t) + [A_1 + \Delta A_1(t)]x(t - h(t)) + [B + \Delta B(t)]Gv(t), \\ y(t) = [C + \Delta C(t)]x(t) + [D + \Delta D(t)]Gv(t). \end{cases} \quad (7)$$

定理 1 不确定时滞系统(1)为输入-输出能量 $(\alpha, \beta | 0, G)$ 解耦的, 如果存在矩阵 $X_i, Y_i > 0, i = 1, 2, \dots, 2m$, 标量 $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \delta_{i1}, \delta_{i2} > 0, i = 1, 2, \dots, m$, 满足

$$\begin{bmatrix} X_i A_0^T + A_0 X_i + \lambda_{i1} H_1 H_1^T + \lambda_{i2} H_3 H_3^T + A_1 X_{m+i} A_1^T & X_i & B g_i - X_i C_i^T - \lambda_{i1} H_1 H_2^T & X_i E_1^T & X_i E_3^T \\ X_i & -(1-d)X_{m+i} & 0 & 0 & 0 \\ g_i^T B^T - C_i X_i - \lambda_{i1} H_2 H_2^T & 0 & 2\alpha_i I + \lambda_{i1} H_2 H_2^T - (D_i g_i + g_i^T D_i^T) & g_i^T E_2^T & 0 \\ E_1 X_i & 0 & E_2 g_i & -\lambda_{i1} I & 0 \\ E_3 X_i & 0 & 0 & 0 & -(1-d)\lambda_{i2} I \end{bmatrix} < 0, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} Y_i A_0^T + A_0 Y_i + \delta_{i1} H_1 H_1^T + \delta_{i2} H_3 H_3^T + A_1 Y_{m+i} A_1^T & Y_i & B g_i & Y_i \hat{C}_i^T + \delta_{i1} H_1 \hat{H}_2^T & Y_i E_1^T & Y_i E_3^T \\ Y_i & -(1-d)Y_{m+i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_i^T B^T & 0 & -\beta_i^2 I & g_i^T \hat{D}_i^T & g_i^T E_2^T & 0 \\ \hat{C}_i Y_i + \delta_{i1} \hat{H}_2 H_1^T & 0 & \hat{D}_i g_i & -\beta_i^2 I + \delta_{i1} \hat{H}_2 \hat{H}_2^T & 0 & 0 \\ E_1 Y_i & 0 & E_2 g_i & 0 & -\delta_{i1} I & 0 \\ E_3 Y_i & 0 & 0 & 0 & 0 & -(1-d)\delta_{i2} I \end{bmatrix} < 0. \quad (9)$$

其中 $g_i \in \mathbb{R}^m$ 表示 G 的 i 列, $\hat{C}_i \in \mathbb{R}^{(m-1) \times n}$ 表示 C 中除 C_i 行外的所有其它行向量组成的矩阵, $\hat{D}_i \in \mathbb{R}^{(m-1) \times m}$ 表示 D 中除 D_i 行外的所有其它行向量组成的矩阵, $\hat{H}_{2i} \in \mathbb{R}^{(m-1) \times r_1}$ 表示 H_2 中除 H_{2i} 行外的所有其它行向量组成的矩阵.

证 基于系统(7)的每一个输入 $v_i(t)$, 系统(7)可分解为下述子系统

$$\dot{x}(t) = [A_0 + \Delta A_0(t)]x(t) + [A_1 + \Delta A_1(t)]x(t - h(t)) + [B + \Delta B(t)]g_i v_i(t),$$

$$y^{(i)}(t) = [C + \Delta C(t)]x(t) + [D + \Delta D(t)]g_i v_i(t),$$

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

根据线性系统的叠加原理, 系统的实际输出为上述子系统输出的叠加, 即 $y = y^{(1)} + y^{(2)} + \dots + y^{(m)}$. 由于在以下的推导过程中都是针对某个特定子系统, 为描述方便(否则上下标太复杂), 将省去 $y^{(i)}$ 的上标. 针对上述每个子系统, 构造二次函数

$$V_i(t, x) = x^T(t) P_i x(t) + \int_{t-h(t)}^t x^T(\sigma) P_{m+i} x(\sigma) d\sigma,$$

$$W_i(t, x) = x^T(t) Q_i x(t) + \int_{t-h(t)}^t x^T(\sigma) Q_{m+i} x(\sigma) d\sigma.$$

其中 $P_i, Q_i > 0, i = 1, 2, \dots, 2m$. 进一步定义

$$M_i(t) = \frac{d}{dt} V_i(t, x) - 2y_i^T v_i + 2\alpha_i v_i^T v_i =$$

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h(t)) \\ v_i(t) \end{bmatrix}^T S_0 \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h(t)) \\ v_i(t) \end{bmatrix} +$$

$$2x^T(t) P_i H_3 L_1(t) E_3 x(t-h(t)) +$$

$$2[x^T(t) P_i H_1 - v_i^T(t) H_{2i}] L_0(t) [E_1 x(t) + E_2 g_i v_i(t)] \leq$$

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h(t)) \\ v_i(t) \end{bmatrix}^T (S_0 +$$

$$\begin{bmatrix} P_i(\lambda_{i1} H_1 H_1^T + \lambda_{i2} H_3 H_3^T) P_i & 0 & -\lambda_{i1} P_i H_1 H_{2i}^T \\ 0 & \frac{1}{\lambda_{i2}} E_3^T E_3 & 0 \\ -\lambda_{i1} H_{2i} H_1^T P_i & 0 & \lambda_{i1} H_{2i} H_{2i}^T \end{bmatrix} +$$

$$\frac{1}{\lambda_{i1}} \begin{bmatrix} E_1^T \\ 0 \\ g_i^T E_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 & 0 & E_2 g_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h(t)) \\ v_i(t) \end{bmatrix},$$

$$N_i(t) = \frac{d}{dt} W_i(t, x) - \beta_i^{\frac{1}{2}} v_i^T v_i + \beta_i^{\frac{1}{2}} g_i^T g_i =$$

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h(t)) \\ v_i(t) \\ \beta_i^{-\frac{1}{2}} g_i \end{bmatrix}^T T_0 \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h(t)) \\ v_i(t) \\ \beta_i^{-\frac{1}{2}} g_i \end{bmatrix} +$$

$$2x^T(t) Q_i H_3 L_1(t) E_3 x(t-h(t)) +$$

$$2[x^T(t) Q_i H_1 + \beta_i^{-\frac{1}{2}} g_i^T \hat{H}_{2i}] L_0(t) [E_1 x(t) + E_2 g_i v_i(t)] \leq$$

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h(t)) \\ v_i(t) \\ \beta_i^{-\frac{1}{2}} g_i \end{bmatrix}^T (T_0 +$$

$$\begin{bmatrix} Q_i(\delta_{i1} H_1 H_1^T + \delta_{i2} H_3 H_3^T) Q_i & 0 & 0 & \delta_{i1} Q_i H_1 \hat{H}_{2i}^T \\ 0 & \frac{1}{\delta_{i2}} E_3^T E_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \delta_{i1} \hat{H}_{2i} H_1^T Q_i & 0 & 0 & \delta_{i1} \hat{H}_{2i} \hat{H}_{2i}^T \end{bmatrix} +$$

$$\frac{1}{\delta_{i1}} \begin{bmatrix} E_1^T \\ 0 \\ g_i^T E_2^T \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 & 0 & E_2 g_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h(t)) \\ v_i(t) \\ \beta_i^{-\frac{1}{2}} g_i \end{bmatrix}.$$

其中

$$S_0 =$$

$$\begin{bmatrix} A_0^T P_i + P_i A_0 + P_{m+i} & P_i A_1 & P_i B g_i - C_i^T \\ A_1^T P_i & -(1-d) P_{m+i} & 0 \\ g_i^T B^T P_i - C_i & 0 & 2\alpha_i I - (D_i g_i + g_i^T D_i^T) \end{bmatrix},$$

$$T_0 =$$

$$\begin{bmatrix} A_0^T Q_i + Q_i A_0 + Q_{m+i} & Q_i A_1 & Q_i B g_i & \hat{C}_i^T \\ A_1^T Q_i & -(1-d) Q_{m+i} & 0 & 0 \\ g_i^T B^T Q_i & 0 & -\beta_i^{\frac{1}{2}} I & g_i^T \hat{D}_i^T \\ \hat{C}_i & 0 & \hat{D}_i g_i & -\beta_i^{\frac{1}{2}} I \end{bmatrix}.$$

令

$$X_i = P_i^{-1}, Y_i = Q_i^{-1},$$

$$X_{m+i} = [(1-d) P_{m+i} - \frac{1}{\lambda_{i2}} E_3^T E_3]^{-1} > 0,$$

$$Y_{m+i} = [(1-d) Q_{m+i} - \frac{1}{\delta_{i2}} E_3^T E_3]^{-1} > 0, i = 1, 2, \dots, m,$$

则当条件(8),(9)成立时, 经过简单变换就有 $M_i(t) \leq 0, N_i(t) \leq 0$, 对其分别从0到 τ 积分, 利用零初始条件, 可以得到

$$\int_0^\tau M_i(t) dt =$$

$$V_i(\tau, x(\tau)) - \int_0^\tau (2y_i^T v_i - 2\alpha_i v_i^T v_i) dt \leq 0,$$

$$\int_0^T N_i(t) dt =$$

$$W_i(\tau, x(\tau)) + \int_0^\tau (\beta_i^{-1/2} \dot{y}_i^T \dot{y}_i - \beta_i^{1/2} v_i^T v_i) dt \leq 0.$$

因此,对所有 $\tau \geq 0$, 总有

$$\int_0^\tau y_i^T v_i dt \geq \alpha_i \int_0^\tau v_i^T v_i dt, \int_0^\tau \dot{y}_i^T \dot{y}_i dt \leq \beta_i \int_0^\tau v_i^T v_i dt.$$

另外,把二次函数 $V_i(t, x)$ 或 $W_i(t, x)$ 作为 Lyapunov 函数,很容易验证当 $v(t) = 0$ 时,

$$\frac{d}{dt} V_i(t, x) < 0, \frac{d}{dt} W_i(t, x) < 0,$$

即条件(8)或(9)可保证系统渐近稳定.定理得证.

$$\begin{bmatrix} XA_0^T + A_0X + Z^TB^T + BZ + & X & Bg_i - \lambda_{i1}H_1H_{2i}^T - & XE_1^T + & \\ \lambda_{i1}H_1H_1^T + \lambda_{i2}H_3H_3^T + A_1X_{m+i}A_1^T & & XC_i^T - Z^TD_i^T & Z^TE_2^T & XE_3^T \\ X & -(1-d)X_{m+i} & 0 & 0 & 0 \\ g_i^TB^T - \lambda_{i1}H_{2i}H_1^T - C_iX - D_iZ & 0 & 2\alpha_iI + \lambda_{i1}H_{2i}H_{2i}^T - & g_i^TE_2^T & 0 \\ & & (D_i g_i + g_i^TD_i^T) & & \\ E_1X + E_2Z & 0 & E_2g_i & -\lambda_{i1}I & 0 \\ E_3X & 0 & 0 & 0 & -(1-d)\lambda_{i2}I \end{bmatrix} < 0, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} XA_0^T + A_0X + Z^TB^T + BZ + & X & Bg_i & X\hat{C}_i + Z^T\hat{D}_i^T + & XE_1^T + & \\ \delta_{i1}H_1H_1^T + \delta_{i2}H_3H_3^T + A_1Y_{m+i}A_1^T & & \delta_{i1}H_1\hat{H}_{2i}^T & Z^TE_2^T & XE_3^T \\ X & -(1-d)Y_{m+i} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_i^TB^T & 0 & -\beta_i^{1/2}I & g_i^T\hat{D}_i^T & g_i^TE_2^T & 0 \\ \hat{C}_iX + \hat{D}_iZ + \delta_{i1}\hat{H}_{2i}H_1^T & 0 & \hat{D}_i g_i & -\beta_i^{1/2}I + \delta_{i1}\hat{H}_{2i}\hat{H}_{2i}^T & 0 & 0 \\ E_1X + E_2Z & 0 & E_2g_i & 0 & -\delta_{i1}I & 0 \\ E_3X & 0 & 0 & 0 & 0 & -(1-d)\delta_{i2}I \end{bmatrix} < 0. \quad (11)$$

其中 $g_i \in \mathbb{R}^m$ 表示 G 的 i 列, $\hat{C}_i \in \mathbb{R}^{(m-1) \times n}$ 表示 C 中除 C_i 行外的所有其它行向量组成的矩阵, $\hat{D}_i \in \mathbb{R}^{(m-1) \times m}$ 表示 D 中除 D_i 行外的所有其它行向量组成的矩阵, $\hat{H}_{2i} \in \mathbb{R}^{(m-1) \times r_1}$ 表示 H_2 中除 H_{2i} 行外的所有其它行向量组成的矩阵.且状态反馈矩阵为

$$F = ZX^{-1}. \quad (12)$$

4 实例(Example)

考虑具有时变时滞的线性时滞系统(1),其中

$$A_0 = \begin{bmatrix} -0.25 & 1.2 \\ 0.2 & 0.25 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0.75 & 0.8 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.2 & 0.5 \\ 0.5 & 1.0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1.5 & 0.8 \\ 0.6 & 1.0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 \\ 0.3 & 0.7 \end{bmatrix},$$

对于不确定时滞系统(1),如果其本身是不稳定的,一种比较简单的输入-输出能量解耦方法是,先通过状态反馈镇定系统(1),然后再按照上述方法设计输入变换矩阵实现能量解耦.这样分步设计的结果是,由于没有充分利用状态反馈资源,可能导致设计的保守性,即本来可以通过状态反馈和输入变换实现输入-输出能量解耦的系统,按照上述方法,有可能未必实现解耦.下面考虑同时具有状态反馈和输入变换的能量解耦问题.

定理 2 不确定时滞系统(1)为输入-输出能量 $(\alpha, \beta | F, G)$ 解耦的,如果存在矩阵 Z 及矩阵 $X > 0$, X_{m+i} , $Y_{m+i} > 0$, 标量 $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \delta_{i1}, \delta_{i2} > 0, i = 1, 2, \dots, m$, 满足

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0.7 & 0.6 \end{bmatrix}, H_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 \\ 0.1 & 0.3 \end{bmatrix}, H_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 \\ 0.4 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_1 = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.3 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix}, E_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 \\ 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}, E_3 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 \\ 0.1 & 0.3 \end{bmatrix},$$

$$h(t) = 10 + 10 * \cos(0.03t).$$

本例中系统开环不稳定,可利用定理 2 结论求解.由已知条件可得 $d = 0.3$, 取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5, \beta_1 = \beta_2 = 1.0$, 求解线性矩阵不等式(10), (11), 可得

$$F = \begin{bmatrix} -4.4465 & -1.5982 \\ 0.9198 & -0.9010 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 5.8829 & -2.2472 \\ -2.5119 & 3.1030 \end{bmatrix}.$$

分别取 $L_0 = L_1 = I$ 与 $L_0 = L_1 = -I$, 通过对闭环系统进行阶跃响应仿真,可验证闭环系统渐近稳定

且具有良好的解耦效果,仿真曲线略。

5 结论(Conclusions)

本文提出了针对具有时变时滞的范数有界不确定线性时滞系统的输入-输出能量解耦方法,该解耦方法把降低系统的输入-输出能量关联性作为首要目标,物理概念清楚,易于为现场工程师理解和接受。输入-输出能量解耦方法兼有静态解耦与动态解耦的优点,特别适用于时滞系统的解耦控制问题。本文的所有结论均由 LMI 描述,目前 LMI 的解法已非常成熟,这些不等式可直接由 Matlab 的 LMI 工具箱求解。

参考文献(References):

- [1] MORGAN B S. The synthesis of linear multivariable systems by state-variable feedback [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1964, 9(5): 405 - 411.
- [2] FALB P L, WOLOVICH W A. Decoupling in the design and synthesis of multivariable control systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1967, 12(6): 651 - 659.

- [3] MORSE A S, WONHAM W M. Status of noninteracting control [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1971, 16(6): 568 - 581.
- [4] DESCUSSE J, LAFAY J F, MALABRE M. Solution to Morgan's problem [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1988, 33(8): 732 - 739.
- [5] ROSENBROCK H H. *Computer Aided Control System Design* [M]. New York: Academic Press, 1974.
- [6] SENAME O, RABAH R, LAFAY J F. Decoupling without prediction of linear systems with delays: a structured approach [J]. *Systems & Control Letters*, 1995, 25(3): 387 - 395.
- [7] SENAME O, LAFAY J F. Decoupling of square linear systems with delays [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(5): 736 - 742.

作者简介:

毛维杰 (1969—),男,1991年毕业于浙江大学,1996年获浙江大学工学博士学位,现为浙江大学副教授,主要研究方向为电气传动与控制,时滞系统控制,解耦控制,鲁棒控制等理论与应用。Email: wjmiao@iipc.zju.edu.cn;

褚健 (1963—),男,1982年毕业于浙江大学,1986年~1989年留学日本京都大学,1989年获工学博士学位,现为浙江大学教授,博士生导师,“长江学者奖励计划”特聘教授,主要研究方向为时滞系统控制,非线性控制,鲁棒控制等理论与应用。

(上接第72页)

参考文献(References):

- [1] LEVIN A U, NARENDRA K S. Control of nonlinear dynamical systems using neural networks: controllability and stability [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1993, 4(3): 192 - 206.
- [2] NARENDRA K S, PARTHASARATHY K. Gradient methods for the optimization of dynamical systems containing neural networks [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1991, 2(2): 252 - 262.
- [3] CALISE A J, RYSDYK R T. Nonlinear adaptive flight control using neural networks [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1998, 18(6): 14 - 25.
- [4] SCHMITENDORF W E, BARMISH B R. Robust asymptotic tracking for linear systems with unknown parameters [J]. *Automatica*, 1986, 22(3): 355 - 360.

- [5] HOVAKIMYAN N, RYSDYK R T, CALISE A J. Dynamic neural networks for output feedback control [J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2001, 11(1): 23 - 39.

作者简介:

王源 (1968—),男,南京航空航天大学自动化学院博士生,研究方向为智能自修复控制;

胡寿松 (1937—),男,1960年毕业于北京航空航天大学自动控制专业,现为南京航空航天大学首席教授,博士生导师,中国自动化学会理事,近期研究方向为故障诊断,鲁棒控制及智能自修复控制。Email: liuyaly@263.net;

吴庆尧 (1955—),男,南京航空航天大学教授,发表论文40余篇,著作4部,获省部级成果奖12项,目前主要研究方向为鲁棒控制,工业过程控制等。