

文章编号: 1000-8152(2011)03-0438-05

## 输入有饱和的轧机液压伺服系统的多模型切换控制

方一鸣, 范志远, 欧发顺, 焦晓红

(燕山大学 电气工程学院 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对轧机液压伺服系统随工况变化而存在的弹性负载力和外负载力跳变所引起的结构跳变问题, 建立并优化了考虑控制输入饱和特性的、系统连续工作时不同工况下的轧机液压伺服系统被控对象的多模型集. 对每一模型采用线性矩阵不等式(LMI)方法设计了抗饱和和状态反馈控制器, 并制定了整个系统的切换策略, 分析了具有饱和输入和外部扰动的切换系统的稳定性. 对轧机液压伺服系统的仿真研究结果表明, 本文所设计的控制系统具有良好的稳定性和动静态性能.

**关键词:** 控制输入饱和; 液压伺服系统; 多模型; 切换控制

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Multi-model switching control with input saturation for hydraulic servo system in rolling mill

FANG Yi-ming, FAN Zhi-yuan, OU Fa-shun, JIAO Xiao-hong

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, College of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

**Abstract:** To deal with the structure jump problem caused by the abrupt change of elastic load force and the external load force in mill hydraulic servo system, we develop and optimize a set of models for the controlled system with control input saturation in different continuous operation conditions. An anti-saturation state-feedback controller is designed by using the linear matrix inequality(LMI) method for each model, and a switching control scheme is proposed for the whole system. The stability is analyzed for the designed switched system with input saturation and external disturbances. Simulation result for the mill hydraulic servo system demonstrates that the designed control system has a good stability and desired static/dynamic performance.

**Key words:** control input saturation; hydraulic servo system; multi-model; switching control

### 1 引言(Introduction)

液压伺服系统具有响应速度快、承载能力强等优点, 通常被用作执行机构. 在轧机液压伺服系统实际工作过程中, 被控对象具有较大的参数时变性, 尤其随着工艺过程的进行, 存在系统弹性负载力和外负载力跳变而导致模型结构跳变的问题. 针对液压伺服系统正常工作时存在参数不确定性, 国内外学者作了大量工作. A. Bonchis<sup>[1]</sup>、韩崇伟<sup>[2]</sup>设计变结构控制器对液压伺服系统进行控制, 一定程度上克服了系统负载变化大、参数不确定等不良影响, 提高了系统的鲁棒性; 方一鸣<sup>[3]</sup>、陈平<sup>[4]</sup>分别用鲁棒控制、智能控制方法对液压伺服系统进行应用基础研究, 削弱了系统参数时变的不良影响. 但是, 当系统模型存在结构和参数跳变时, 仅采用常规PID控制, 或采用适于参数慢时变的自适应控制、鲁棒控制等方法难以获得良好的动态性能. 多模型切换控制思想给解决液压伺服系统结构、参数跳变问题提供了

可能性. 同时, 在液压伺服控制系统中存在执行机构饱和问题, 饱和特性的介入, 会使系统出现大的超调, 甚至引起系统不稳定. 因此建立考虑执行机构饱和特性的、系统连续工作时不同工况下的液压伺服系统被控对象的多模型集, 进行多模型切换控制器的设计, 可以提高液压伺服系统的稳定性, 以及大范围工况下的动态性能, 提高被轧带材的质量, 具有实际应用价值.

对于多模型切换系统的研究, K.S. Narendra<sup>[5]</sup>对多模型切换控制做了系统研究, 给出多模型切换系统的基本结构、自适应建模以及基本切换算法; 在建模方面, ZHAI Junyong<sup>[6]</sup>提出了多模型切换控制的分层结构建模方法, 有效减少了模型的数量和模型参数的辨识时间; 而Fotis N. Koumboulis<sup>[7]</sup>对切换过程中的抖动问题提出逐步切换的方法, 保证系统平滑切换. 针对切换系统含有输入饱和的情况, SONG Yang<sup>[8]</sup>以普通Lyapunov和多Lyapunov两种方

法研究了含饱和的标准切换系统的稳定性问题, 并给出了扩大系统饱和吸引域的方法; LU Liang, LIN Zongli<sup>[9]</sup>在具有饱和特性的子系统并不一定全部稳定的情况下, 设计切换策略使整个切换系统在原点处局部稳定. 关于多模型切换控制的应用研究还较少. 本文在文献[10]基础上, 针对含有饱和输入的轧机液压伺服系统, 采用多模型切换控制, 解决了系统参数和结构跳变引起的不良影响. 在有界外部扰动情况下设计了抗饱和和切换控制器, 并分析了系统稳定的饱和吸引域, 进一步制定合适的切换策略来扩大系统的饱和吸引域. 仿真结果表明所设计的系统具有良好的动态性能.

## 2 具有饱和特性的液压伺服系统数学模型 (Mathematical model of hydraulic servo system with saturation)

液压伺服系统的伺服阀流量方程为

$$Q_L = K_q x_v - K_c P_L, \quad (1)$$

式中:  $K_q$ 为流量增益,  $K_c$ 为压力增益,  $x_v$ 为伺服阀阀芯位移,  $P_L$ 为负载压力.

把伺服放大器和伺服阀等效成比例环节, 有

$$K_p = I/u, \quad K_{sv} = x_v/I, \quad (2)$$

式中:  $K_p$ 为伺服放大器放大系数,  $K_{sv}$ 为伺服阀增益,  $I$ 为伺服放大器输出电流,  $u$ 为控制电压. 定义  $K_{qsv} = K_q K_p K_{sv}$ , 则式(1)写成

$$Q_L = K_{qsv} u - K_c P_L. \quad (3)$$

油缸流量连续方程为

$$Q_L = A_p \dot{x}_p + C_t P_L + \frac{V}{4\beta_e} \dot{P}_L, \quad (4)$$

式中:  $A_p$ 为液压缸活塞有效面积,  $x_p$ 为活塞位移,  $C_t$ 为液压缸外泄漏系数,  $V$ 为液压缸油腔总体积,  $\beta_e$ 为体积弹性模量.

活塞的力平衡方程为

$$A_p P_L = M \ddot{x}_p + B_p \dot{x}_p + K x_p + F_L, \quad (5)$$

式中:  $M$ 为活塞和负载的总质量,  $B_p$ 为活塞的粘性阻尼系数,  $K$ 为弹性刚度系数,  $F_L$ 为作用在活塞上的外负载力.

取状态  $x_1 = x_p - x_{pd}$ ,  $x_2 = \dot{x}_p$ ,  $x_3 = P_L - P_{Ld}$ , 则根据式(1)(4)(5)可得到如下状态空间表达式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{K}{M}x_1 - \frac{B_p}{M}x_2 + \frac{A_p}{M}x_3 - \frac{F_L}{M}, \\ \dot{x}_3 = -\frac{4\beta_e A_p}{V}x_2 - \frac{4\beta_e(K_c + C_t)}{V}x_3 + \frac{4\beta_e K_{qsv}}{V}u. \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $x_{pd}$ 和  $P_{Ld}$ 分别为希望的位移和压力,  $K$ 和  $F_L$ 均为跳变参数, 在油缸活塞接触到刚性负载前后存

在从0到一个很大值的跳变.

考虑执行机构饱和情况, 根据不同工作点参数的变化, 式(6)系统可写成如下多模型切换系统:

$$\dot{x} = A_i x + B_i \sigma(u) + E_i w, \quad (7)$$

其中:

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -K_i/M & -B_p/M & A_p/M \\ 0 & -4A_p\beta_e/V & -4\beta_e(K_c + C_t)/V \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 4\beta_e K_{qsv}/V \end{bmatrix}, \quad E_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -F_{L_i}/M \\ 0 \end{bmatrix},$$

$i = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$ 表示多模型的个数;  $\sigma(\cdot)$ 为标准饱和函数, 可表示为

$$\sigma(u) = k_i(u)u, \quad k_i(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq \lambda, \\ \lambda/|u|, & |u| > \lambda, \end{cases} \quad (8)$$

其中  $\lambda$ 为控制量的饱和幅值.

不失一般性, 假设扰动  $w$  满足  $w(t)^T w(t) \leq 1$ , 则(7)式可写成如下规范形式:

$$\dot{x} = A_i x + B_i k_i(u)u + E_i w, \quad (9)$$

这里:  $k_i(u) \in (0, 1]$ , 当  $k_i(u) = 1$  时表示第  $i$  个子系统没有饱和,  $k_i(u)$  越小表明第  $i$  个子系统的饱和程度越深.

## 3 具有饱和特性的切换系统的稳定性分析 (Stability analysis of switching system with saturation)

假设系统控制器采用第  $i$  个子系统的状态反馈控制器, 即

$$u = u_i = F_i x, \quad (10)$$

因此, 闭环系统的状态模型可写为

$$\dot{x} = A_i x + B_i k_i(u) F_i x + E_i w = (A_i + B_i F_i) x + B_i (k_i(u) - 1) F_i x + E_i w.$$

令  $\tilde{A}_i = A_i + B_i F_i$ , 则

$$\dot{x} = \tilde{A}_i x + B_i (k_i(u) - 1) F_i x + E_i w. \quad (11)$$

定义  $k_i := \min(k_i(u))$ , 对于饱和子系统  $i$  的工作状态区域:

$$\Omega_i = \{x \in \mathbb{R}^n, |F_i x| \leq \lambda/k_i\}. \quad (12)$$

进行控制器设计, 必须要解决的问题是保证系统稳定, 对于具有饱和特性的切换系统, 本文考虑了以下两个方面:

- 1) 所设计的控制器保证每个子系统稳定.
- 2) 整个多模型切换系统在允许范围内(如图1中

两个子系统的工作区域 $\Omega_1 \cup \Omega_2$ 切换.

考虑以上两个方面, 针对具有饱和特性的切换系统(11)有如下结论:

**定理 1** 考虑式(11)所示切换系统, 如果存在正定矩阵 $P$ 和正实数 $\alpha, \beta, r_i, s_i$ , 且 $r_i \geq s_i$ 使得

$$\tilde{A}_i^T P + P \tilde{A}_i + P(s_i^2 B_i B_i^T + \beta E_i E_i^T) P + r_i^{-2} F_i^T F_i + \alpha P < 0, \quad (13)$$

$$\alpha \lambda P - (1 - s_i/r_i)^2 \beta^{-1} F_i^T F_i > 0, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} P & k_i F_i^T \\ k_i F_i & \alpha \beta \lambda^2 \end{bmatrix} \geq 0, \quad (15)$$

则 $w \neq 0$ 时, 系统在区域 $\phi = \{x \in \mathbb{R}^n : x^T P x \leq \lambda/(\alpha \beta)\}$ 内稳定. 当 $w = 0$ 时, 闭环系统是渐近稳定的. 并且控制变量满足的约束条件为

$$|u_i| \leq \lambda/(1 - s_i/r_i), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (16)$$

其中 $\lambda$ 为控制量的饱和幅值.

**证** 构建如下李雅普诺夫函数:

$$V(x) = x^T P x.$$

对 $V(x)$ 沿着式(11)所示切换系统求导如下:

$$\dot{V}(x) = x^T [\tilde{A}_i^T P + P \tilde{A}_i] x + 2x^T P E_i w + 2x^T P B_i (k_i(u) - 1) F_i x. \quad (17)$$

因为:  $2XY \leq \beta X^T X + \beta^{-1} Y^T Y, \beta > 0$ , 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &\leq x^T (\tilde{A}_i^T P + P \tilde{A}_i) x + r_i^{-2} x^T F_i^T F_i x + \\ &r_i^2 x^T P B_i (k_i(u) - 1)^2 B_i^T P x + \\ &\beta x^T P E_i E_i^T P x + \beta^{-1} w^T w \leq \\ &[r_i^2 (k_i(u) - 1)^2 - s_i^2] x^T P B_i B_i^T P x - \\ &\alpha x^T P x + \beta^{-1} w^T w. \end{aligned} \quad (18)$$

由式(14)得

$$\alpha \beta \lambda P - (1 - s_i/r_i)^2 \beta^{-1} F_i^T F_i > 0, \quad (19)$$

即

$$\alpha \beta \lambda x^T P x > (1 - s_i/r_i)^2 x^T F_i^T F_i x = (1 - s_i/r_i)^2 |u_i|^2. \quad (20)$$

在区域 $\phi = \{x \in \mathbb{R}^n : x^T P x \leq \lambda/(\alpha \beta)\}$ 内可得

$$|u_i| \leq \lambda/(1 - s_i/r_i). \quad (21)$$

考虑式(8), 从而有

$$\begin{cases} k_i(u) = 1, & |u| \geq \lambda, \\ k_i(u) \geq (1 - s_i/r_i), & |u| < \lambda. \end{cases} \quad (22)$$

根据式(18)(22)可得

$$\dot{V}(x) \leq -\alpha V + \beta^{-1} w^T w.$$

两端同乘以 $e^{\alpha t}$ 得 $\frac{d(e^{\alpha t} V)}{dt} \leq \beta^{-1} e^{\alpha t}$ ; 两边积分, 可得 $V(x) \leq \frac{1}{\alpha \beta}$ , 从而 $\dot{V}(x) \leq 0$ . 即存在正定矩阵 $P$ 使得, 当 $w \neq 0$ 时, 所有子系统在不变集 $\phi = \{x_0 \in \mathbb{R}^n : V(x_0) \leq \lambda/(\alpha \beta)\}$ 内稳定. 当 $w = 0$ 时, 所有子系统是渐近稳定的.

由式(12)可以得到

$$x(t) \in \Omega_i \Leftrightarrow k_i^2 |F_i x|^2 / \lambda^2 \leq 1. \quad (23)$$

利用Schur补引理<sup>[11]</sup>, 由式(15)可得

$$\alpha \beta - k_i F_i P^{-1} k_i F_i^T \geq 0 \Rightarrow k_i^2 F_i P^{-1} F_i^T \leq \alpha \beta,$$

所以

$$\begin{aligned} k_i^2 |F_i x|^2 &= k_i^2 |F_i P^{-1/2} P^{1/2} x|^2 \leq \\ k_i^2 \|F_i P^{-1/2}\|^2 \|P^{1/2} x\|^2 &= \\ k_i^2 F_i P^{-1} F_i^T x^T P x &\leq \alpha \beta \lambda^2 x^T P x \leq \lambda^2, \end{aligned} \quad (24)$$

因此, 可得到 $k_i^2 |F_i x|^2 / \lambda \leq \alpha \beta x^T P x \leq 1$ , 得 $\phi \subset \Omega_i$ , 即 $\phi \subset \bigcap_{i=1}^m \Omega_i$ ,  $m$ 表示多模型的个数. 即于对任意的切换规则, 整个切换系统都稳定. 证毕.

#### 4 状态反馈控制器设计(Design of the state feedback controller)

定理1给出使整个切换系统稳定的充分条件, 针对本文轧机液压伺服多模型系统有如下结论:

**定理 2** 对于式(7)所示开环系统, 如果存在正常数 $\alpha_i, \beta, 0 \leq \theta_i = s_i/r_i < 1, h_i > 0$ , 对称正定阵 $Q$ , 矩阵 $L_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ , 使得如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} Q A_i^T + A_i Q + B_i L_i^T + L_i B_i^T + \alpha_i Q + & L_i \\ \beta E_i E_i^T + \theta_i^2 h_i B_i B_i^T & \\ & L_i^T & -h_i I \end{bmatrix} < 0, \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_i Q & (1 - \theta_i) L_i \\ (1 - \theta_i) L_i^T & \beta \lambda I \end{bmatrix} > 0, \quad \begin{bmatrix} P & k_i F_i^T \\ k_i F_i & \alpha_i \beta \lambda^2 \end{bmatrix} \geq 0. \quad (26)$$

则当 $w \neq 0$ 时, 可使闭环子系统在不变集 $\phi_i = \{x_0 \in \mathbb{R}^n : V(x_0) < \lambda/(\alpha_i \beta)\}$ 内稳定; 当 $w = 0$ 时, 闭环子系统渐近稳定. 状态反馈控制器为 $u_i = L_i^T Q^{-1} x$ , 且控制变量满足约束条件 $|u_i| \leq \lambda/(1 - s_i/r_i)$ . 结合切换规则 $\delta(\delta = 1, 2, \dots, m)$ , 则整个切换系统是渐近稳定的. 切换规则 $\delta$ 如下:

1) 如果 $x \in (\phi_i \setminus \phi) \cap \Omega_i$ , 则采用第 $i$ 个子系统的控制器控制工作;

2) 如果 $x \in \phi$ , 则可选择满足定理条件的任意子系统的控制器控制工作.

其中:  $\theta_i$ 为各子系统的饱和系数矩阵,  $L_i, Q$ 可利用LMI方法求解式(25)和(26)得到.

证 1) 在切换规则 $\delta$ 下, 当 $x \in (\phi_i \setminus \phi) \cap \Omega_i$ , 采用第 $i$ 个子系统的控制器工作, 根据定理1, 对于每一个子系统都有

$$(A_i + B_i F_i)^T P + P(A_i + B_i F_i) + \alpha_i P + P(B_i s_i^2 B_i^T + \beta E_i E_i^T) P + r_i^{-2} F_i^T F_i < 0, \quad (27)$$

$$\alpha_i \lambda P - (1 - s_i/r_i)^2 \beta^{-1} F_i^T F_i > 0, \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} P & k_i F_i^T \\ k_i F_i & \alpha_i \beta \lambda^2 \end{bmatrix} \geq 0. \quad (29)$$

令 $Q = P^{-1}$ ,  $0 \leq \theta_i = s_i/r_i < 1$ , 由Schur补引理<sup>[11]</sup>可得, 式(27)(28)等价于

$$\begin{bmatrix} Q A_i^T + A_i Q + B_i F_i Q + Q F_i^T B_i^T + Q F_i^T & & \\ \alpha_i Q + \beta E_i E_i^T + s_i^2 B_i B_i^T & & \\ F_i Q & & -r_i^2 I \end{bmatrix} < 0, \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha Q & (1 - \theta_i) Q F_i^T \\ (1 - \theta_i) F_i Q & \beta \lambda I \end{bmatrix} > 0. \quad (31)$$

令 $L_i = Q F_i^T$ ,  $h_i = r_i^2$ , 则式(30)(31)等价于式(25)(26). 根据定理1可得, 此时闭环子系统在切换规则 $\delta$ 下均稳定.

2) 在切换规则 $\delta$ 下, 当 $x \in \phi$ 时, 即定理1所述情况, 即对于任意满足条件的子系统处于激活状态时, 都能保证整个切换系统稳定.

综上所述, 定理2得证.

**注 1** 求解控制器时, 需要将参数 $\alpha_i$ 和 $\theta_i$ 取某一固定值,  $k_i = 1 - \theta_i$ , 此时式(25)和(26)是线性的.

**注 2** 如图1所示,  $\Omega_i$ 为 $l_{ia}$ 和 $l_{ib}$ 之间的区域. 图中:  $l_{ia} := F_i x + \lambda/k_i = 0$ ,  $l_{ib} := F_i x - \lambda/k_i = 0$ , 定理1说明不变集 $\phi \subseteq \bigcap_{i=1}^m \Omega_i$ , 见图中阴影部分 $\phi$ ; 根据定理2可得 $\phi_1 \subset \Omega_1$ ,  $\phi_2 \subset \Omega_2$ , 在 $\phi_i$ 中设计的控制器可使子系统 $i$ 稳定, 而在 $\phi$ 内设计的控制器可使任意子系统达到稳定.

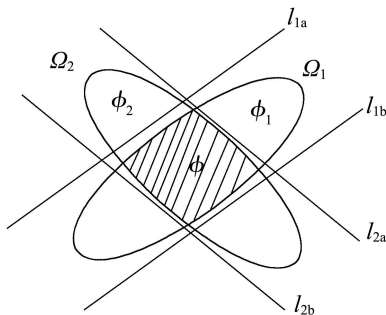


图 1 系统稳定性图解

Fig. 1 Illustration of system stabilization

### 5 仿真研究(Simulation)

仿真所用的轧机系统的标称参数如下:

$$A_p = 0.1256 \text{ m}^2, B_p = 2.25 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s/m},$$

$$M = 1500 \text{ kg}, C_t = 0, K_c = 4 \times 10^{-12},$$

$$V = 3.768 \times 10^{-3} \text{ m}^3, \beta_e = 7 \times 10^8 \text{ Pa},$$

$$K_q = 2.5, K_{sv} = 0.01 \text{ m/A}, K_p = 0.0125 \text{ A/V},$$

$$k_0 = 2.5 \times 10^9 \text{ N/m}, F_{L0} = 2 \times 10^6 \text{ N}.$$

即

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1.5 \times 10^3 & 8.37 \times 10^{-5} \\ 0 & -9.33 \times 10^{10} & 2.97 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1.67 \times 10^6 & -1.5 \times 10^3 & 8.37 \times 10^{-5} \\ 0 & -9.33 \times 10^{10} & 2.97 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 8.75 \times 10^5 \end{bmatrix},$$

$$E_1 = 0, E_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.33 \times 10^3 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

根据文献[10]中结论, 不变集随着系统饱和系数的增大而变大, 但当饱和系数过大时, 跟踪性能下降. 因此, 经过反复验证, 选择 $\theta_1 = \theta_2 = 0.5$ ,  $\alpha_1 = 0.73$ ,  $\alpha_2 = 0.81$ , 取控制量饱和幅值 $\lambda = 1$ ,  $k_i = 1 - \theta_i$ , 得控制器 $F$ , 调整后如下:

$$F_1 = [1.0014 \times 10^3 \quad -4.0183 \times 10^2 \quad 1.0325 \times 10^{-6}],$$

$$F_2 = [1.4533 \times 10^2 \quad -3.8021 \times 10^2 \quad 1.1055 \times 10^{-8}].$$

系统仿真结果如图 2 所示, 在  $t = 0.3 \text{ s}$  时假定油缸活塞接触到刚性负载, 此时弹性负载刚度系数和外负载力发生跳变, 即 $K$ 和 $F_L$ 分别由0跳变到 $K_0$ 和 $F_{L0}$ . 而在实际工况中, 这两个参数很难直接测量. 弹性负载力和外负载力跳变也会直接影响负载压力(状态 $x_3$ )的变化, 由于参数跳变幅度较大, 状态 $x_3$ 成为主要影响因素, 且可直接测量, 容易控制. 因此采用状态 $x_3$ (即负载压力 $P_L$ )作为标识工作状态的参数, 按如下规则切换:

1) 在弹性负载刚度系数和外负载力发生跳变之前,  $P_L$ 为0, 此时选择控制器 $F = F_1$ ;

2) 在弹性负载刚度系数和外负载力发生跳变之后, 此时 $P_L$ 非零, 选择控制器 $F = F_2$ .

由仿真结果可见, 所设计的状态反馈控制器能够保证系统稳定, 轧机液压伺服系统的各状态控制性能优良.

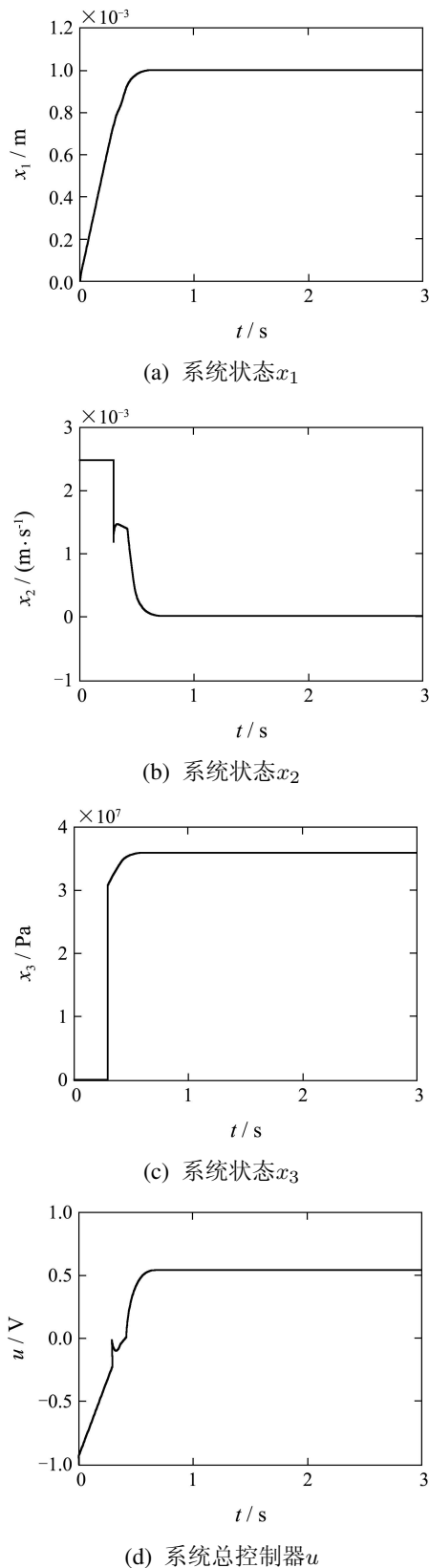


图2 系统的状态和总控制器曲线  
Fig. 2 State and controller of system

## 6 结论(conclusions)

液压伺服系统在轧机中应用广泛,文章针对具有控制输入饱和特性的轧机液压伺服系统,建立并优化了其不同工况下的多模型集,利用LMI方法设计

了抗饱和稳定控制器,并证明了其稳定性;制定了系统的切换策略,保证了系统在大范围工况下的稳定性.仿真结果表明,所设计的闭环控制切换系统具有良好的动静态性能.

## 参考文献(References):

- [1] BONCHIS A, CORKE P I, RYE D C, et al. Variable structure methods in hydraulic servo systems control[J]. *Automatica*, 2001, 37(13): 589 – 595.
- [2] 韩崇伟, 林廷圻. 电液伺服系统滑动模态变结构控制[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(5): 821 – 826.  
(HAN Zongwei, LIN Tingqi. Variable structure control of the electro-hydraulic servo system[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2002, 14(5): 821 – 826.)
- [3] 方一鸣, 嵇胜龙, 王益群, 等. 液压伺服驱动位置控制系统的鲁棒性能设计[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(3): 467 – 469.  
(FANG Yiming, JI Shenglong, WANG Yiqun, et al. Robust performance design of the position system driven by hydraulic servo[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2002, 14(3): 467 – 469.)
- [4] 陈平, 裘丽华. 液压伺服系统的直接自适应神经网络控制[J]. 机床与液压, 2001, 73(2): 40 – 42.  
(CHEN Ping, QIU Lihua. Directly self-adaptive control using neural network and its application in hydraulic servo system[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2001, 73(2): 40 – 42.)
- [5] NARENDRA K S, BALAKRISHNAN J. Adaptive control using multiple models[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(2): 171 – 187.
- [6] ZHAI J Y, FEI S M, SHI S G, et al. Multiple models adaptive control based on hierarchical structure[C] //25th Chinese Control Conference, CCC2006. Beijing: Beihang University Press, 2006: 1018 – 1022.
- [7] FOTIS N KOUMBOULIS, ROBERT E KING, ANNA STATHAKI. Logic-based switching controllers-A stepwise safe switching approach[J]. *Information Sciences*, 2007, 177(2): 2736 – 2755.
- [8] SONG YANG, XIANG Z R. Control of switched systems with actuator saturation[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2006, 4(1): 38 – 43.
- [9] LU L, LIN Z L. Design of switched linear systems in the presence of actuator saturation[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(5): 1536 – 1542.
- [10] 方一鸣, 刘仙. 考虑执行机构饱和和特性的轧机速度鲁棒控制研究[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 776 – 780.  
(FANG Yiming, LIU Xian. Speed robust control of rolling mill with actuator saturation[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(4): 776 – 780.)
- [11] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 8 – 9.  
(YU Li. *Robust Control-Methods Dealing with LMIs*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 8 – 9.)

## 作者简介:

方一鸣 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂系统建模仿真与控制、自适应鲁棒控制理论与应用、冶金自动化、系统集成与控制, Email: fyiming@ysu.edu.cn;

范志远 (1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为多模型切换控制、自适应控制理论与应用, Email: fzy8508593@yahoo.com.cn;

欧发顺 (1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为时滞系统鲁棒自适应控制研究, Email: oufashun02@yahoo.com.cn;

焦晓红 (1966—), 女, 教授, 主要研究方向为非线性系统控制理论及应用, Email: jiaoxh@ysu.edu.cn.