

张力线速度复合控制系统的应用分析

朱国明 施志诚 张汝惠 高为炳

(北京航空航天大学)

摘 要

张力线速度复合控制系统在工业生产中有着大量的应用,它的一个重要特点是变参数性质。本文利用笔者已取得的一些理论结果对这类系统进行了分析,所得到的仿真结果令人满意。

关键词——自动控制系统;工业自动化;大系统控制。

一、引 言

张力控制问题广泛存在于工业生产过程的各机械中,例如,印刷机械、纺织机械和拉丝等机械中都存在着张力控制问题。张力线速度复合控制系统则是张力控制系统中的一大类。它的主要特点是系统的某些参数是在一个范围内变化,而在解决实际张力线速度的控制问题时,从原理简单,控制系统便于维修和成本低的角度出发,一般均选用不随参数变化的确定性控制进行镇定,以达到满意的控制效果,这类控制系统过去虽已进行了许多研究和应用,但在理论上分析和研究却很少。本文利用笔者过去对大系统和区间参数系统的研究结果来分析一个实际张力线速度复合控制系统——杜美丝涂硼过程张力线速度复合控制系统并进行动态特性模拟,得到了较满意的结果。值得说明的是,这一系统的具体实现已于1983年完成并应用于生产机械中,取得了良好的效果^[1]。

二、杜美丝涂硼过程张力线速度复合控制系统

杜美丝主要用于灯泡、显像管等电子产品的引出线。为保证灯泡、显像管不漏气,要求杜美丝的膨胀系数和玻璃的膨胀系数相同。在杜美丝生产过程中,通过在杜美丝上涂硼来调节杜美丝的膨胀系数。硼涂得过薄、过厚都会使杜美丝的膨胀系数达不到要求,从而使灯泡、显像管慢性漏气。因此,涂硼工艺是生产杜美丝的关键。杜美丝涂硼过程张力线速度复合控制系统的原理见图1。

杜美丝的涂硼工艺是通过保持线速度恒定来保证杜美丝的涂硼厚度均匀;通过保持杜美丝的张力恒定来保证杜美丝不变形和在烘箱中不被烧断。杜美丝涂硼张力线速度复

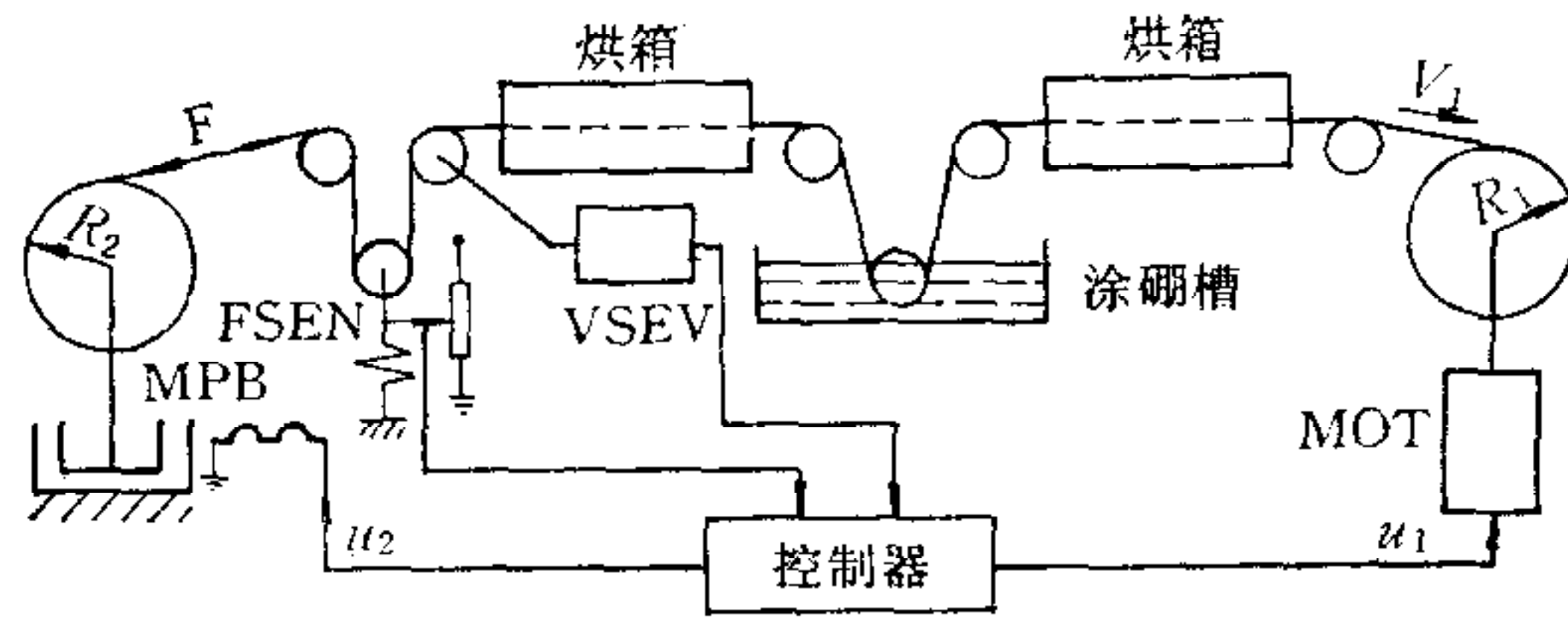


图 1 杜美丝涂硼过程 and 控制系统组成

合控制系统选用 24 伏直流电机 (MOT) 为收卷线速度控制元件,磁滞制动器 (MPB) 为放卷张力控制元件,以及光电线速度传感器 (VSEN) 和位移式张力传感器 (FSEN)。由图 1 可给出控制系统的方块图见图 2。图中 R_a 、 T_a 、 $C_m\phi$ 、 $C_e\phi$ 为直流电机结构参数, J_1 为收卷转动惯量, K_m 、 K_ω 为磁滞制动器的结构参数, K_s 为杜美丝的弹性系数, R_1 、 R 分别为收放卷半径。

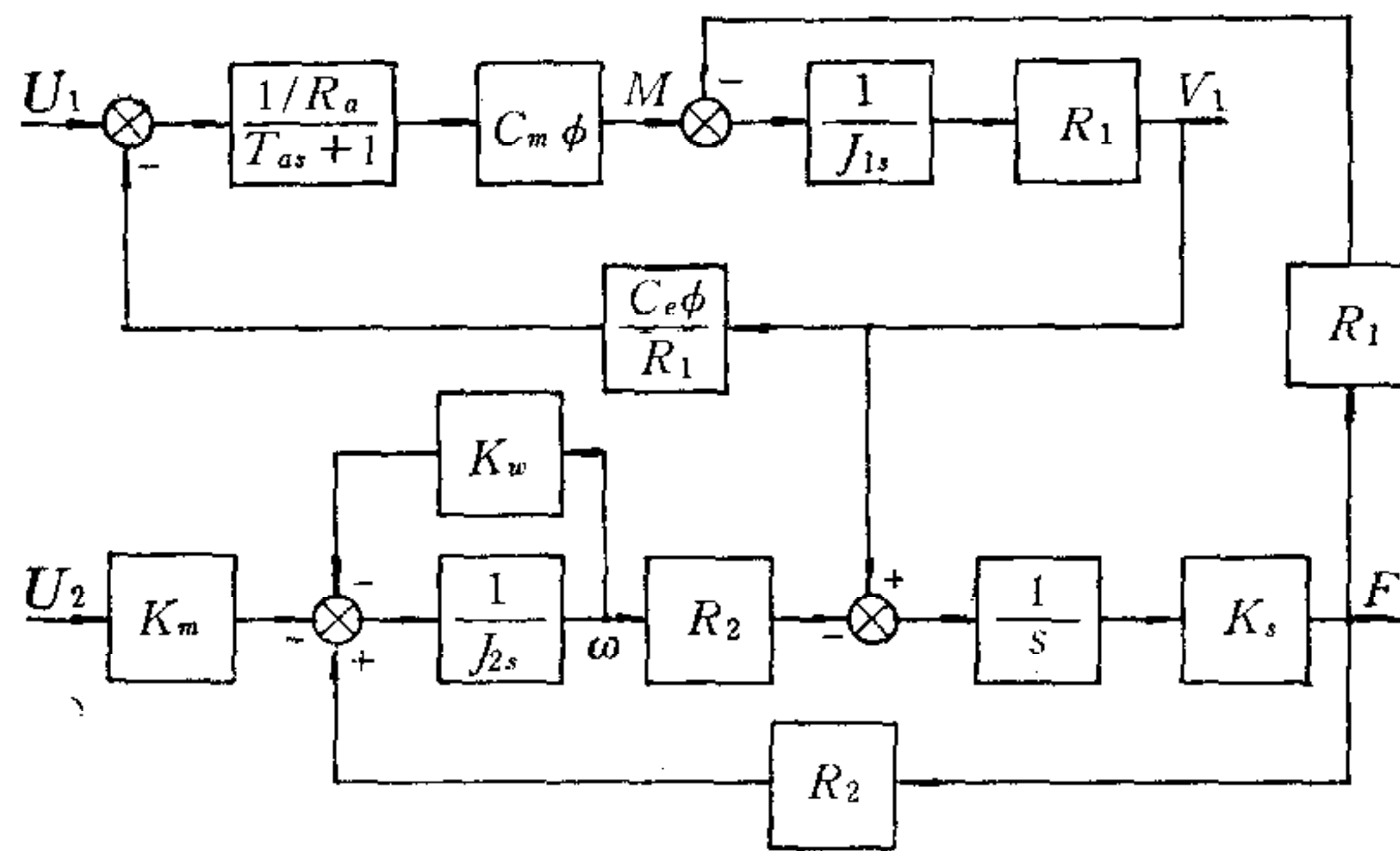


图 2 张力线速度复合控制系统方块图

令 $x_1 = M$, $x_2 = V_1$, $x_3 = \omega$, $x_4 = F$, 则系统模型方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_a} & \frac{-C_e C_m \phi^2}{T_a R_a R_1} & 0 & 0 \\ R_1 / J_1 & 0 & 0 & -R_1^2 / J_1 \\ 0 & 0 & -K_\omega / J_2 & R_2 / J_2 \\ 0 & K_s & -K_s R_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_m \phi / R_a T_a & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -K_m / J_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

代入实际数值则系统(1)为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & -0.1507 / R_1 & 0 & 0 \\ 833.3 R_1 & 0 & 0 & -833.3 R_1^2 \\ 0 & 0 & -50 & 1000 R_2 \\ 0 & 50 & -50 R_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 36 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1000 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

其中, $0.038 \leq R_1, R_2 \leq 0.055$, 且 $R_1^2 + R_2^2 = 0.00447$.

现在选择的反馈形式为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

从而闭环系统为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & 0.1507/R_1 + \bar{k}_1 & 0 & 0 \\ 833.3R_1 & 0 & 0 & -833.3R_1^2 \\ 0 & 0 & -50 & 1000R_2 + k_2 \\ 0 & 50 & -50R_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中 $\bar{k}_1 = 36k_1$; $\bar{k}_2 = -1000k_2$; $R_2 = \sqrt{0.00447 - R_1^2}$. 为了方便, 记系统(3)为 $S(R_1, \bar{k}_1, \bar{k}_2)$, 其所对应的矩阵为 $A(R_1, \bar{k}_1, \bar{k}_2)$,

这一系统有如下特点:

(1) 系统是由张力控制系统和线速度控制系统所组成. 为了运行可靠, 要求所进行的控制是局部分散输出反馈;

(2) 系统是变参数的, 且参数的变化是非线性的, 在一个区间上进行的;

(3) 反馈矩阵是确定性的, 不能随参数变化;

(4) 系统的动态特性要求高, 如超调量很小, 调节时间短等;

(5) 张力控制系统的收敛速度比线速度控制系统的收敛速度快一倍以上.

为了便于对这一系统进行很好地控制与分析, 在此给出区间参数系统稳定性的一些结果.

三、区间参数系统的稳定性

考虑系统

$$\dot{x} = \left[A_0 + \sum_{i=1}^m r_i A_i \right] x, \quad (5)$$

其中 $A_i \in \mathcal{R}^{n \times n}$, $i = 0, 1, \dots, m$, $p_i \leq r_i \leq q_i$; p_i, q_i 为有限实数, $i = 1, 2, \dots, m$. 称系统(5)为区间参数系统. 如果对任意 $r_i \in [p_i, q_i]$, $i = 1, 2, \dots, m$, 均有系统(5)是渐近稳定的, 则称区间参数系统(5)是稳定的.

区间参数系统最近有了一些研究, 取得了一些结果^[2,3]. 下面仅列出一个本文所用到的结果.

$$\text{记: } \mathcal{M}[p, q] = \left\{ \bar{A} = A_0 + \sum_{i=1}^m \bar{r}_i A_i \mid \bar{r}_i = p_i \text{ 或 } \bar{r}_i = q_i, i = 1, 2, \dots, m \right\}.$$

定理1. 如果存在正定阵 G , 使得对任意 $\bar{A} \in \mathcal{M}[p, q]$, 均有 $G\bar{A} + \bar{A}^T G$ 负定, 则区间参数系统(5)是稳定的.

从这一结果可以看出, 在一定的条件下, 当区间参数系统中的参数取边界值时系统是稳定的, 就能保证整个区间参数系统是稳定的, 从而使判别变得较为简单。

进一步考虑一类区间非线性参数系统:

$$\dot{x} = \left[A_0 + \sum_{i=1}^m f_i(r) A_i \right] x, \quad (6)$$

其中 $A_i \in \mathcal{R}^{n \times n}$, $i = 0, 1, \dots, m$, $p \leq r \leq q$; p, q 为有限实数, $f_i(r)$ 为连续有界实函数, $i = 1, 2, \dots, m$.

对于这一类系统的稳定性判别, 采取以下方法:

(1) 将区间 $[p, q]$ 分成若干个充分小的小区, 记为 $[p^{(j)}, q^{(j)}]$, $j = 1, 2, \dots, l$. 其中:

$$p = p^{(1)} < q^{(1)} = p^{(2)} < q^{(2)} = p^{(3)} < \dots < q^{(l-1)} = p^{(l)} < q^{(l)} = q,$$

使得 $f_i(r)$ 在每个小区间 $[p^{(j)}, q^{(j)}]$ 上近似为线性函数 $a_{i_0}^{(j)} + a_{i_1}^{(j)} r$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, l$.

(2) 对每个区间参数系统:

$$\dot{x} = \left[\left(A_0 + \sum_{i=1}^m a_{i_0}^{(j)} A_i \right) + \left(\sum_{i=1}^m a_{i_1}^{(j)} A_i \right) r \right] x, \quad (7)$$

其中 $p^{(j)} \leq r \leq q^{(j)}$, $j = 1, 2, \dots, l$ 如果存在正定阵 $G^{(j)}$, 使得:

$$G^{(j)} \left[\left(A_0 + \sum_{i=1}^m a_{i_0}^{(j)} A_i \right) + \left(\sum_{i=1}^m a_{i_1}^{(j)} A_i \right) p^{(j)} \right] + \left[\left(A_0 + \sum_{i=1}^m a_{i_0}^{(j)} A_i \right) + \left(\sum_{i=1}^m a_{i_1}^{(j)} A_i \right) q^{(j)} \right]^T G^{(j)}$$

和

$$G^{(j)} \left[\left(A_0 + \sum_{i=1}^m a_{i_0}^{(j)} A_i \right) + \left(\sum_{i=1}^m a_{i_1}^{(j)} A_i \right) q^{(j)} \right] + \left[\left(A_0 + \sum_{i=1}^m a_{i_0}^{(j)} A_i \right) + \left(\sum_{i=1}^m a_{i_1}^{(j)} A_i \right) p^{(j)} \right]^T G^{(j)}$$

均负定, $j = 1, 2, \dots, l$, 则由定理 1, 区间参数系统(7)是稳定的, 从而区间非线性参数系统(6)是稳定的。

四、系统的控制和分析

下面利用前面的结果对系统(4)进行控制和分析。容易看出, 系统(4)是一个区间非线性参数系统。在未加控制之前, 即 $\bar{k}_1 = 0$, $\bar{k}_2 = 0$ 时, 系统(4)的动态特性是非常不好的, 这可以从参数取二个边界点时的系统 $S(0.038, 0, 0)$ 和 $S(0.055, 0, 0)$ 的动态响应曲线看出(见图 3(a) 和 (b))。速度超调量过大, 则会造成涂硼不均, 使生产的杜美丝不合格。另外, 在有外界干扰的情况下, 也易引起杜美丝的涂硼不均匀。张力响应速度过慢或超调量过大会使杜美丝在开车和受干扰时达不到规定的要求。若杜美丝张力太小则会引起杜美丝碰烘箱壁而被烧断。这些因素都使得系统很难正常工作。因此, 必须设计适

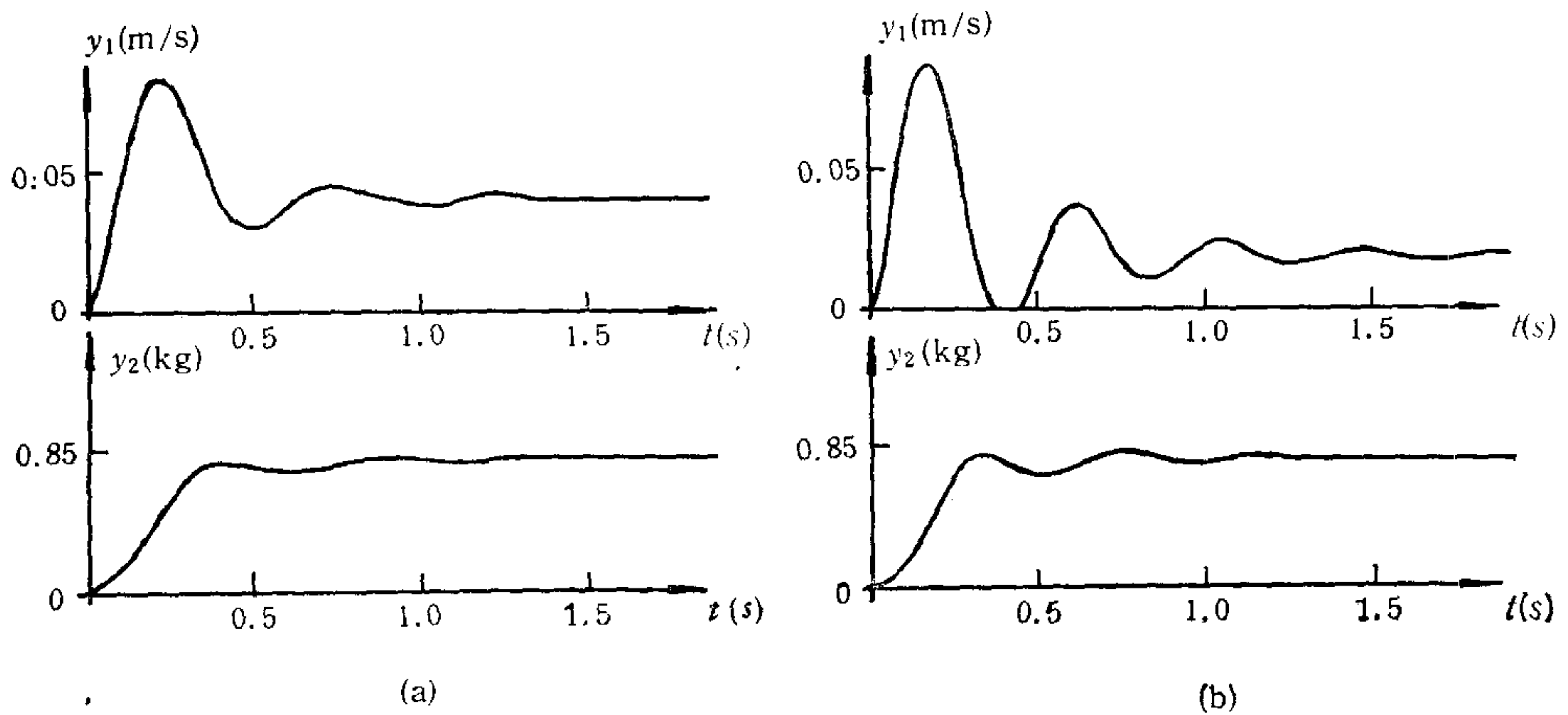


图 3 未加控制时系统(4)的响应

表 1

R_1	特征多项式	特 征 值
0.038	$s^4 + 60s^3 + 1792s^2 + 18454s + 104027$	$-6.38 \pm 7.37i, -23.62 \pm 23.16i$
0.039	$s^4 + 60s^3 + 1770s^2 + 18329s + 102070$	$-6.50 \pm 7.33i, -23.50 \pm 22.59i$
0.040	$s^4 + 60s^3 + 1771s^2 + 18438s + 101929$	$-6.58 \pm 7.28i, -23.42 \pm 22.59i$
0.041	$s^4 + 60s^3 + 1749s^2 + 18331s + 100497$	$-6.71 \pm 7.27i, -23.29 \pm 22.00i$
0.042	$s^4 + 60s^3 + 1727s^2 + 18217s + 98960$	$-6.85 \pm 7.26i, -23.15 \pm 21.39i$
0.043	$s^4 + 60s^3 + 1705s^2 + 18097s + 97352$	$-6.99 \pm 7.24i, -23.01 \pm 20.76i$
0.044	$s^4 + 60s^3 + 1684s^2 + 18007s + 96465$	$-7.15 \pm 7.28i, -22.85 \pm 20.11i$
0.045	$s^4 + 60s^3 + 1663s^2 + 17923s + 95377$	$-7.34 \pm 7.30i, -22.66 \pm 19.42i$
0.046	$s^4 + 60s^3 + 1665s^2 + 18056s + 95545$	$-7.45 \pm 7.24i, -22.54 \pm 19.40i$
0.047	$s^4 + 60s^3 + 1644s^2 + 17980s + 94726$	$-7.66 \pm 7.29i, -22.34 \pm 18.66i$
0.048	$s^4 + 60s^3 + 1623s^2 + 17900s + 93860$	$-7.90 \pm 7.33i, -22.10 \pm 17.89i$
0.049	$s^4 + 60s^3 + 1602s^2 + 17832s + 93331$	$-8.15 \pm 7.42i, -21.85 \pm 17.05i$
0.050	$s^4 + 60s^3 + 1558s^2 + 17515s + 91467$	$-8.56 \pm 7.68i, -21.44 \pm 15.23i$
0.051	$s^4 + 60s^3 + 1538s^2 + 17472s + 91231$	$-8.94 \pm 7.87i, -21.06 \pm 14.13i$
0.052	$s^4 + 60s^3 + 1518s^2 + 17417s + 91115$	$-9.33 \pm 8.16i, -20.67 \pm 12.87i$
0.053	$s^4 + 60s^3 + 1498s^2 + 17367s + 90878$	$-9.28 \pm 8.56i, -20.18 \pm 11.33i$
0.054	$s^4 + 60s^3 + 1478s^2 + 17335s + 91009$	$-10.30 \pm 9.24i, -19.70 \pm 9.34i$
0.055	$s^4 + 60s^3 + 1436s^2 + 17076s + 90357$	$-10.16 \pm 10.83i, -19.84 \pm 3.99i$

当的控制器,使得反馈后的系统对任意在给定范围上取得参数值均具有良好的动态响应.首先利用大系统的方法求得 $\bar{k}_1 = 1.97, \bar{k}_2 = 370$,使得 $S(0.038, 1.97, 370)$ 的特征多项式为 $s^4 + 60s^3 + 1792s^2 + 18454s + 104027$,特征值为 $-6.38 \pm 7.37i, -23.62 \pm 23.16i$; $S(0.055, 1.97, 370)$ 的特征多项式为 $s^4 + 60s^3 + 1436s^2 + 17076s + 90357$,特征值为 $-10.16 \pm 10.83i, -19.84 \pm 3.99i$;它们的动态响应曲线分别见图 4(a) 中的曲线 1 和图 4(b)中的曲线 3. 可以看出,超调量很小,过渡时间很短,具有良好的动态特性.在说明这一局部输出分散反馈控制对所有的参数均适用之前,先考虑参数 $R_1 = 0.039, 0.040, 0.041, 0.042, 0.043, 0.044, 0.045, 0.046, 0.047, 0.048, 0.049, 0.050, 0.051, 0.052, 0.053, 0.054$ 时系统(4)的动态特性. 它们的特征多项式和特征根见表 1.

由此可见,在所取的反馈下,系统(4)在参数取这些点时的动态特性是相当好的。其中的一些动态曲线见图4。图4(a)中的曲线2和3分别为 $S(0.044, 1.97, 370)$ 和 $S(0.050, 1.97, 370)$ 的动态曲线;图4(b)中的曲线1和2分别为 $S(0.041, 1.97, 370)$ 和 $S(0.047, 1.97, 370)$ 的动态曲线。

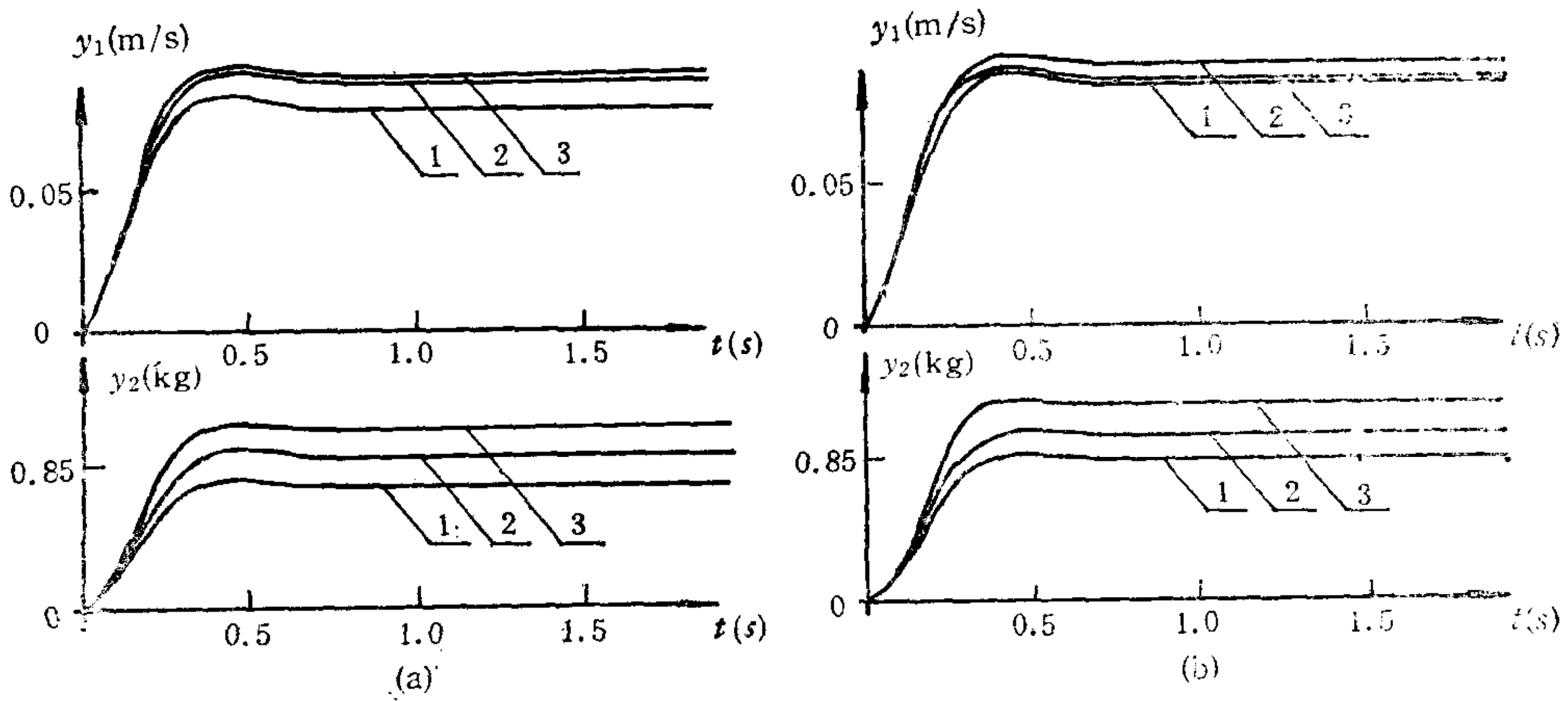


图4 $\bar{k}_1 = 1.97, \bar{k}_2 = 370$ 时系统(4)的动态曲线

为了说明当参数取任何点时系统(4)均有好的动态特性,将 R_1 分区间进行研究。考虑实对称矩阵:

$$P(a, b, c) = \begin{bmatrix} a & 100 & 0 & 0 \\ 100 & b & -10 & 0 \\ 0 & -10 & 1 & -10 \\ 0 & 0 & -10 & c \end{bmatrix},$$

记: $P_1 = P(170203, 10403, 343)$, $P_2 = P(179354, 10085, 347)$,
 $P_3 = P(185447, 9686, 350)$, $P_4 = P(194798, 9431, 356)$,
 $P_5 = P(206211, 9232, 362)$, $P_6 = P(218066, 9051, 370)$,
 $P_7 = P(233010, 8885, 377)$, $P_8 = P(243130, 8618, 382)$,
 $P_9 = P(254657, 8372, 385)$, $P_{10} = P(270820, 8234, 393)$,
 $P_{11} = P(287345, 8133, 402)$, $P_{12} = P(313646, 8162, 416)$,
 $P_{13} = P(339480, 8170, 429)$, $P_{14} = P(363406, 8067, 439)$,
 $P_{15} = P(386514, 7974, 449)$, $P_{16} = P(413667, 7908, 460)$,
 $P_{17} = P(453404, 8008, 479)$.

容易验证, P_i 是正定阵, $i = 1, 2, \dots, 7$.

记: $A_1 = A(0.038, 1.97, 370)$, $A_2 = A(0.039, 1.97, 370)$,
 $A_3 = A(0.040, 1.97, 370)$, $A_4 = A(0.041, 1.97, 370)$,
 $A_5 = A(0.042, 1.97, 370)$, $A_6 = A(0.043, 1.97, 370)$,
 $A_7 = A(0.044, 1.97, 370)$, $A_8 = A(0.045, 1.97, 370)$,
 $A_9 = A(0.046, 1.97, 370)$, $A_{10} = A(0.047, 1.97, 370)$,
 $A_{11} = A(0.048, 1.97, 370)$, $A_{12} = A(0.049, 1.97, 370)$,

$$A_{13} = A(0.050, 1.97, 370), \quad A_{14} = A(0.051, 1.97, 370),$$

$$A_{15} = A(0.052, 1.97, 370), \quad A_{16} = A(0.053, 1.97, 370),$$

$$A_{17} = A(0.054, 1.97, 370), \quad A_{18} = A(0.055, 1.97, 370).$$

可以验证, $P_i A_i + A_i^T P_i$ 是负定的, $i = j, j+1; j = 1, 2, \dots, 18$. 由于当 $R_1 \in [0.038 + 0.001 \times (j-1), 0.038 + 0.001 \times j]$ 时, $j = 1, 2, \dots, 18$, 系统 $S(R_1, 1.97, 370)$ 可以视为区间参数系统, 从而由上一节的结果可以得到, 对任意 $R_1 \in [0.038, 0.055]$ 均有系统 $S(R_1, 1.97, 370)$ 是稳定的. 同时也容易看到, 对任意 $R_1 \in [0.038, 0.055]$, 系统 $S(R_1, 1.97, 370)$ 具有良好的动态特性.

五、实际应用结果

本张力线速度复合控制系统是 1983 年应用于 HBTV-1 杜美丝连续涂硼机上的. 在此以前, 我国生产杜美丝的涂硼工艺设备均采用手调张力和线速度的方法进行生产. 由于涂硼不均匀, 致使生产的杜美丝产品合格率很低, 而且由于杜美丝的膨胀系数一致性不好, 也影响了用杜美丝作原料的其它产品(灯泡、显像管等)的质量. HBTV-1 杜美丝连续涂硼机的张力和线速度均实现了自动控制, 控制系统精度高, 稳定可靠, 减轻了工人的劳动强度, 提高了杜美丝的质量. 该机运行一年后, 由它生产的约 800 公斤杜美丝已向全国 24 个单位供货, 用户反映该机生产的杜美丝涂硼色泽均匀, 延伸率一致, 与原产品比较, 产品质量明显提高.

过去我国生产的杜美丝质量不过关, 用它做彩色显像管的引出脚, 由于慢性漏气, 彩色显像管的寿命仅为 800 小时; 使用日本的杜美丝, 寿命可达到 18000 小时以上. HBTV-1 杜美丝连续涂硼机研制成功后, 用它生产的杜美丝在彩色显像管上进行了实验, 寿命达到 18500 小时以上, 从而解决了用国产杜美丝取代进口杜美丝的技术难题. 这也说明了本张力线速度复合控制系统的应用是成功的.

参 考 文 献

- [1] 朱国明, 数字变参数张力线速度复合控制系统, 北京航空学院硕士论文, 1984 年.
- [2] Shi, Z. C. and Gao, W. B., The Stability of Interval Parameter Matrices, *Int. J. Control*, **45** (1987), No. 3, 1093-1101.
- [3] Shi, Z. C. and Gao, W. B., The Stability of Interval Parameter Matrices and Its Applications, 10th IFAC World Congress, Munich, July, 1987.

AN ANALYSIS OF THE CONTROL SYSTEM FOR TENSILE STRESS AND LINEAR VELOCITY

ZHU GUOMING SHI ZHICHENG ZHANG RUHUI GAO WEIBING

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

The control system for tensile stress and linear velocity is widely used in industrial production. One of the important features of this kind of control system is that the parameters in the system are variables. In this paper, based on the theoretical results of the authors, an analysis of this kind of control system is made, and satisfactory simulation results are obtained.

Key words — Automatic control system; industrial automation; control of large scale system.