

# 机器人自适应模型跟踪变结构控制

苏春翌

(华南理工大学自动化系, 广州)

梁天培

(香港理工学院机械与轮机工程系)

周其节

(华南理工大学自动化系, 广州)

## 摘 要

本文提出了一种机器人自适应模型跟踪变结构控制方案。它具有所要求的瞬态特性, 其控制规律以显式的方式给出, 而且不需知道系统参数的变化范围, 因而适用于多关节的机器人系统。

**关键词:** 机器人, 变结构控制, 自适应, 模型跟踪。

## 一、引 言

在目前机器人的控制中, 自适应模型跟踪控制是非常重要的方法, 近年来有许多这方面的成果<sup>[1]</sup>。但一般仅能保证系统与模型之间的跟踪误差为零, 而其瞬态特性无法给出。变结构模型跟踪控制<sup>[2,3]</sup>作为另一种方法则可给出误差的瞬态特性。但缺点是其控制规律由一组很复杂的代数不等式所限定, 不易确定。本文针对上述问题, 给出了一种自适应变结构控制律。它保持变结构系统原有的特点, 且其控制规律以显式的方式给出, 增益按自适应规律调节, 不必预先确定每个参数的变化范围, 也没有模型跟踪中的严格正实性要求。

## 二、机器人动力学模型

$n$  个关节的机器人动力学模型为

$$D(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + B(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}) = \mathbf{u}(t), \quad (1)$$

其中  $\mathbf{q} \in R^n$  为关节角位置向量;  $D(\mathbf{q}) \in R^{n \times n}$  为正定惯性矩阵;  $B(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \in R^n$  中含有哥氏力、向心力以及摩擦力等;  $G(\mathbf{q}) \in R^n$  是重力作用向量;  $\mathbf{u}(t) \in R^n$  是作用于每个关

节的广义力矩向量。

系统(1)的状态空间表示为

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ D^{-1}(\mathbf{q})(-B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - G(\mathbf{q})) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D^{-1}(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (2a)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_1 & A_2 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (2b)$$

$$= A\mathbf{x} + B\mathbf{u}, \quad (2c)$$

其中  $\mathbf{x} = [\mathbf{q}^T \ \dot{\mathbf{q}}^T]^T \in R^{2n}$ 。

取参考模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_m \\ \dot{\mathbf{q}}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_{m1} & A_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_m \\ \dot{\mathbf{q}}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_{m1} \end{bmatrix} \mathbf{r} \quad (3a)$$

$$= A_m \mathbf{x}_m + B_m \mathbf{r}, \quad (3b)$$

其中  $\mathbf{x}_m = [\mathbf{q}_m^T \ \dot{\mathbf{q}}_m^T]^T \in R^{2n}$ ,  $A_m \in R^{2n \times 2n}$ ,  $B_m \in R^{2n \times 2n}$  为常数矩阵;  $\mathbf{r} \in R^n$  为参考输入。

### 三、自适应模型跟踪变结构控制

综合的目的是: 已知参考输入  $\mathbf{r}$ , 选择滑动流形  $\mathbf{s} = 0$ , 确定控制律  $\mathbf{u}$ , 使得状态误差  $\mathbf{e} = \mathbf{x}_m - \mathbf{x} \in R^{2n}$  沿流形  $\mathbf{s} = 0$  滑动至零。

这里取滑动流形为一超平面, 即

$$\mathbf{s} = G\mathbf{e} = 0, \quad (4)$$

其中  $G \in R^{n \times 2n}$  为常数矩阵, 其选择如下:

设  $\mathbf{e} = [\boldsymbol{\varepsilon}^T \ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^T]^T$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{q}_m - \mathbf{q}$ ,  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\mathbf{q}}_m - \dot{\mathbf{q}}$ , 则

$$\mathbf{s} = [G_1 \ G_2] \mathbf{e} = G_1 \boldsymbol{\varepsilon} + G_2 \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = 0. \quad (5)$$

不失一般性, 设  $G_2$  为非奇异矩阵, 根据变结构理论<sup>[4]</sup>, 在滑动状态下, 滑动方程为

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = -G_2^{-1} G_1 \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (6)$$

方程(6)仅与  $G$  有关, 而与系统的参数无关。如何选择  $G_2$  和  $G_1$ , 使系统具有理想的瞬态特性可见参考文献[5]。

为了导出变结构控制律, 设下述条件成立:

A1) 对于所有  $(\mathbf{x}, t) \in R^{2n} \times R_+^1$ , 有

$$a) (I - BB^+)B_m = 0, \quad (7a)$$

$$b) (I - BB^+)(A_m - A) = 0, \quad (7b)$$

$$c) (I - BB^+)(A_m + A_n) = 0. \quad (7c)$$

$$A_n = \begin{bmatrix} 0 & -I \\ G_2^{-1}G_1 & (I + G_2^{-1}G_1) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ 。由于  $B, B_m, A, A_m, A_n$  的结构及  $B_1$  的正定性, 上述条件总是可以满足的。

设自适应模型跟踪变结构控制为

$$\mathbf{u} = K_1 \mathbf{x} + K_2 \mathbf{r} + K_3 \mathbf{e} + \phi_1 \mathbf{x} + \phi_2 \mathbf{r} + \phi_3 \mathbf{e}, \quad (9)$$

其中  $K_1 \in R^{n \times 2n}$ ,  $K_2 \in R^{n \times n}$ ,  $K_3 \in R^{n \times 2n}$  为常数阵,  $\phi_1 \in R^{n \times 2n}$ ,  $\phi_2 \in R^{n \times n}$ ,  $\phi_3 \in R^{n \times 2n}$  为不连续函数矩阵。此时的滑动模方程为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} &= G\dot{\mathbf{e}} = G(A_m \mathbf{x}_m + B_m \mathbf{r} - A\mathbf{x} - B\mathbf{u}) \\ &= G(A_n(\mathbf{x} - \mathbf{x}_m) + (A_m + A_n)\mathbf{x}_m + B_m \mathbf{r} - (A + A_n)\mathbf{x} - B\mathbf{u}) \\ &= -\mathbf{s} + G[0 \quad I]^T B_1 [(B^+(A_m - A) - K_1 - \phi_1)\mathbf{x} + (B^+B_m - K_2 \\ &\quad - \phi_2)\mathbf{r} + (B^+(A_m + A_n) - K_3 - \phi_3)\mathbf{e}]. \end{aligned} \quad (10)$$

注意,  $A_n$  的引入是非常重要的,一方面可以用李亚普诺夫函数来导出控制律。另一方面可使条件 (7c) 式满足。

$$A2) a) 0 < \beta_1 \leq \|G_2 B_1\| \leq \beta_2 < \infty, \quad (11a)$$

$$b) \|B^+(A_m - A) - K_1\| < \sum_{i=1}^3 \alpha_i \|\mathbf{e}\|^{i-1}, \quad (11b)$$

$$c) \|B^+B_m - K_2\| < \alpha_4, \quad (11c)$$

$$d) \|B^+(A_m + A_n) - K_3\| < \alpha_5. \quad (11d)$$

其中  $\alpha_i > 0$ ,  $\beta_i > 0$  为常数。由于机器人的机械特性及参考模型的有界性,上述条件是成立的。

A3) 矩阵  $G_2 B_1 G_2^T$  的最小特征值满足

$$\lambda_{\min}(G_2 B_1 G_2^T) > \beta_1. \quad (12)$$

选择合适的  $\beta_1$ , 上式总是成立的。

此时控制律(9)式中,若选择  $\phi_i (i = 1, 2, 3)$  为

$$\phi_1 = \begin{cases} \sum_{i=1}^3 \hat{c}_i \|\mathbf{e}\|^{i-1} \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \operatorname{sgn}(\mathbf{x})^T, & \|\mathbf{s}\| \neq 0, \\ 0, & \|\mathbf{s}\| = 0, \end{cases} \quad (13a)$$

$$\phi_2 = \begin{cases} \hat{c}_4 \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \operatorname{sgn}(\mathbf{r})^T, & \|\mathbf{s}\| \neq 0, \\ 0, & \|\mathbf{s}\| = 0, \end{cases} \quad (13b)$$

$$\phi_3 = \begin{cases} \hat{c}_5 \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \operatorname{sgn}(\mathbf{e})^T, & \|\mathbf{s}\| \neq 0, \\ 0, & \|\mathbf{s}\| = 0, \end{cases} \quad (13c)$$

$$\hat{c}_j = g_j \|\mathbf{e}\|^{j-1} \|\mathbf{s}\| \sum_{i=1}^{2n} |x_i|, \quad j = 1, 2, 3, \quad (14a)$$

$$\hat{c}_4 = g_4 \|\mathbf{s}\| \sum_{i=1}^n |r_i|, \quad (14b)$$

$$\hat{c}_5 = g_5 \|\mathbf{s}\| \sum_{i=1}^{2n} |e_i|. \quad (14c)$$

其中  $g_i > 0$ ,  $i = 1, \dots, 5$  为常数。此时有

**定理 1.** 考虑机器人系统(1), 取滑动流形为(4)式, 若控制律取为(9)、(13)、(14)式, 当条件 A1), A2) 和 A3) 满足时, 则跟踪误差  $\mathbf{e}$  在某个时刻  $t_1$  后沿滑动流形收敛至零.

证明. 考虑李亚普诺夫函数

$$V(t) = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s} + \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^5 (c_i - \hat{c}_i)^2 / g_i \right\} \beta_1, \quad (15)$$

其中  $c_i$  满足  $c_i > \alpha_i \beta_2 / \beta_1$ ,  $\hat{c}_i$  为其估计.

对  $V$  微分, 根据(10)、(11)、(12)、(13)、(14) 式, 并且注意到  $(\mathbf{s}^T G_2 B_1 G_2^T \mathbf{s}) \geq \lambda_{\min}(G_2 B_1 G_2^T) \|\mathbf{s}\|^2$ , 则

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} + \left\{ \sum_{i=1}^5 (c_i - \hat{c}_i)(-\dot{\hat{c}}_i) / g_i \right\} \beta_1 \\ &= -\mathbf{s}^T \mathbf{s} + \mathbf{s}^T (G_2 B_1) [(B^+(A_m - A) - K_1) \mathbf{x} + (B^+ B_m - K_2) \mathbf{r} \\ &\quad + (B^+(A_n + A_m) - K_3) \mathbf{e}] \\ &\quad - \mathbf{s}^T (G_2 B_1) \left\{ \sum_{j=1}^3 \hat{c}_j \|\mathbf{e}\|^{j-1} \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \operatorname{sgn}(\mathbf{x})^T \mathbf{x} + \hat{c}_4 \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \operatorname{sgn}(\mathbf{r})^T \mathbf{r} \right. \\ &\quad \left. + \hat{c}_5 \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \operatorname{sgn}(\mathbf{e})^T \mathbf{e} \right\} \\ &\quad - \sum_{j=1}^3 (c_j - \hat{c}_j) \|\mathbf{e}\|^{j-1} \|\mathbf{s}\| \sum_{i=1}^{2n} |x_i| \beta_1 \\ &\quad - (c_4 - \hat{c}_4) \|\mathbf{s}\| \sum_{i=1}^n |r_i| \beta_1 - (c_5 - \hat{c}_5) \|\mathbf{s}\| \sum_{i=1}^{2n} |e_i| \beta_1 \\ &\leq -\mathbf{s}^T \mathbf{s} + \|\mathbf{s}\| \beta_2 \sum_{j=1}^3 \alpha_j \|\mathbf{e}\|^{j-1} \sum_{i=1}^{2n} |x_i| + \|\mathbf{s}\| \beta_2 \alpha_4 \sum_{i=1}^n |r_i| \\ &\quad + \|\mathbf{s}\| \beta_5 \alpha_5 \sum_{i=1}^{2n} |e_i| - \|\mathbf{s}\| \beta_1 \sum_{j=1}^3 c_j \|\mathbf{e}\|^{j-1} \sum_{i=1}^{2n} |x_i| \\ &\quad - \|\mathbf{s}\| \beta_1 c_4 \sum_{i=1}^n |r_i| - \|\mathbf{s}\| \beta_1 c_5 \sum_{i=1}^{2n} |e_i| + \sum_{j=1}^3 \hat{c}_j \|\mathbf{e}\|^{j-1} \|\mathbf{s}\| \\ &\quad \times \sum_{i=1}^{2n} |x_i| \beta_1 + \hat{c}_4 \|\mathbf{s}\| \sum_{i=1}^n |r_i| \beta_1 \\ &\quad + \hat{c}_5 \|\mathbf{s}\| \sum_{i=1}^{2n} |e_i| \beta_1 - \lambda_{\min}(G_2 B_1 G_2^T) \left\{ \sum_{j=1}^3 \hat{c}_j \|\mathbf{e}\|^{j-1} \|\mathbf{s}\| \sum_{i=1}^{2n} |x_i| \right. \\ &\quad \left. + \hat{c}_4 \|\mathbf{s}\| \sum_{i=1}^n |r_i| + \hat{c}_5 \|\mathbf{s}\| \sum_{i=1}^{2n} |e_i| \right\} \leq -\mathbf{s}^T \mathbf{s} < 0, \end{aligned}$$

由变结构理论, 定理得证.

上述定理表明,当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\mathbf{q} \rightarrow \mathbf{q}_m$ ,  $\dot{\mathbf{q}} \rightarrow \dot{\mathbf{q}}_m$ . 故控制律(9)、(13)、(14)式是全局稳定的,具有零的跟踪误差.

说明:

- 1) 在上述定理中,无一般模型跟踪中的严格正实性要求.
- 2) 上述定理给出了一般的机器人模型跟踪变结构控制律,而不必用所谓递阶控制的方法<sup>[4]</sup>.
- 3)  $K_i$  的选择标准是使  $\alpha_i$  为最小,这意味着减小  $\hat{c}_i$  的幅度,使产生  $\psi_i$  的能量最小.

## 四、消除抖动

由控制律(9)、(13)和(14)式可见,控制是不连续的,因而导致抖动,由此可能会激发高频未建模动态特征. 采用文献[6]的方法,通过引入边界层  $E(t) = \{\mathbf{x}(t), \|\mathbf{s}(\mathbf{x})\| < \delta\}$ ,  $\delta > 0$ , 在边界层内,用  $\delta$  代替  $\|\mathbf{s}\|$ , 从而消除了抖动,但导致跟踪精度下降. 所以必须在边界层厚度与所要求的跟踪精度之间折衷. 此时控制算法(13)式为

$$\Psi_1 = \begin{cases} \sum_{i=1}^3 \hat{c}_i \|\mathbf{e}\|^{i-1} \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \operatorname{sgn}(\mathbf{x})^T, & \text{if } \|\mathbf{s}\| > \delta_1, \\ \sum_{i=1}^3 \hat{c}_i \|\mathbf{e}\|^{i-1} \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\delta_1} \operatorname{sgn}(\mathbf{x})^T, & \text{if } \|\mathbf{s}\| \leq \delta_1. \end{cases}$$

$$\Psi_2 = \begin{cases} \hat{c}_4 \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \operatorname{sgn}(\mathbf{r})^T, & \text{if } \|\mathbf{s}\| > \delta_2, \\ \hat{c}_4 \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\delta_2} \operatorname{sgn}(\mathbf{r})^T, & \text{if } \|\mathbf{s}\| \leq \delta_2. \end{cases}$$

$$\Psi_3 = \begin{cases} \hat{c}_5 \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \operatorname{sgn}(\mathbf{e})^T, & \text{if } \|\mathbf{s}\| > \delta_3, \\ \hat{c}_5 \frac{G_2^T \mathbf{s}}{\delta_3} \operatorname{sgn}(\mathbf{e})^T, & \text{if } \|\mathbf{s}\| \leq \delta_3. \end{cases}$$

应用控制律(9)、(16)和(14)式,仍可证明系统跟踪误差进入边界层,在边界层内滑动至零. 故有

**定理 2.** 设  $\delta_i (i = 1, 2, 3)$  为设定常数,取滑动流形  $\mathbf{s}$  为(4)式,若控制律取为(9)、(16)和(14)式,当条件 A1), A2) 和 A3) 满足时,则跟踪误差收敛至区域

$$E(\delta_i) = \{\mathbf{e}(t), \|\mathbf{s}(\mathbf{e})\| < \delta_i\}.$$

## 五、计算机仿真

考虑文献[7]给出的两关节机器人,其方程由下式描述:

$$\begin{bmatrix} D_{11}(\phi) & D_{12}(\phi) \\ D_{12}(\phi) & D_{22}(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{12}(\phi)\dot{\phi}^2 + 2B_{12}(\phi)\dot{\theta}\dot{\phi} \\ -B_{12}(\phi)\dot{\theta}^2 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} q_1(\theta, \phi)g \\ q_2(\theta, \phi)g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix},$$

其中

$$\begin{aligned} D_{11}(\phi) &= (m_1 + m_2)r_1^2 + m_2r_2^2 + 2m_2r_1r_2\cos(\phi) + J_1, \\ D_{12}(\phi) &= m_2r_2^2 + m_2r_1r_2\cos(\phi), \\ D_{22}(\phi) &= m_2r_2^2 + J_2, \\ B_{12}(\phi) &= m_2r_1r_2\sin(\phi), \\ q_1(\theta, \phi) &= -((m_1 + m_2)r_1\cos(\phi) + m_2r_2\cos(\phi + \theta)), \\ q_2(\theta, \phi) &= -m_2r_2\cos(\phi + \theta). \end{aligned}$$

参数值  $r_1 = 1\text{m}$ ,  $r_2 = 0.8\text{m}$ ,  $J_1 = 5\text{kgm}$ ,  $J_2 = 5\text{kgm}$ ,  $m_1 = 0.5\text{kg}$ ,  $m_2 = 6.25\text{kg}$ .  
取参考模型为

$$\dot{\theta}_{ri} = A_{ri}\theta_{ri} + B_{ri}r_i, \quad i = 1, 2,$$

其中

$$A_{ri} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{1i} & a_{2i} \end{bmatrix}, \quad B_{ri} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_i \end{bmatrix},$$

$$a_{11} = a_{12} = a_{21} = a_{22} = -1, \quad b_1 = b_2 = 1.$$

设  $\varepsilon_1 = \theta_{r1} - \theta$ ,  $\varepsilon_2 = \theta_{r2} - \phi$ , 选取滑动流形为

$$\begin{aligned} s_1 &= G_{11}\varepsilon_1 + \dot{\varepsilon}_1, \\ s_2 &= G_{21}\varepsilon_2 + \dot{\varepsilon}_2, \end{aligned}$$

其中  $G_{11} = G_{21} = 5$ .

取

$$\begin{aligned} K_1 &= \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad K_2 = \begin{bmatrix} 15.75 & 4 \\ 4 & 9 \end{bmatrix}, \\ K_3 &= \begin{bmatrix} 67.5 & 17 & 75 & 20 \\ 17 & 40 & 20 & 45 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

设初值在

$$\begin{aligned} \theta_{r1}(0) &= \theta(0) = -1.57, \quad \theta_{r2}(0) = \phi(0) = 0, \\ \dot{\theta}_{r1}(0) &= \dot{\theta}_{r2}(0) = \dot{\theta}(0) = \dot{\phi}(0) = 0, \\ \hat{c}_1(0) &= \hat{c}_2(0) = \hat{c}_3(0) = 25, \quad \hat{c}_4(0) = 10, \quad \hat{c}_5(0) = 30, \\ r_1 &= r_2 = 1, \quad \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0.05. \end{aligned}$$

在控制律(9)、(16)和(14)式的作用下,图1表示关节1的跟踪误差,其最大跟踪误差

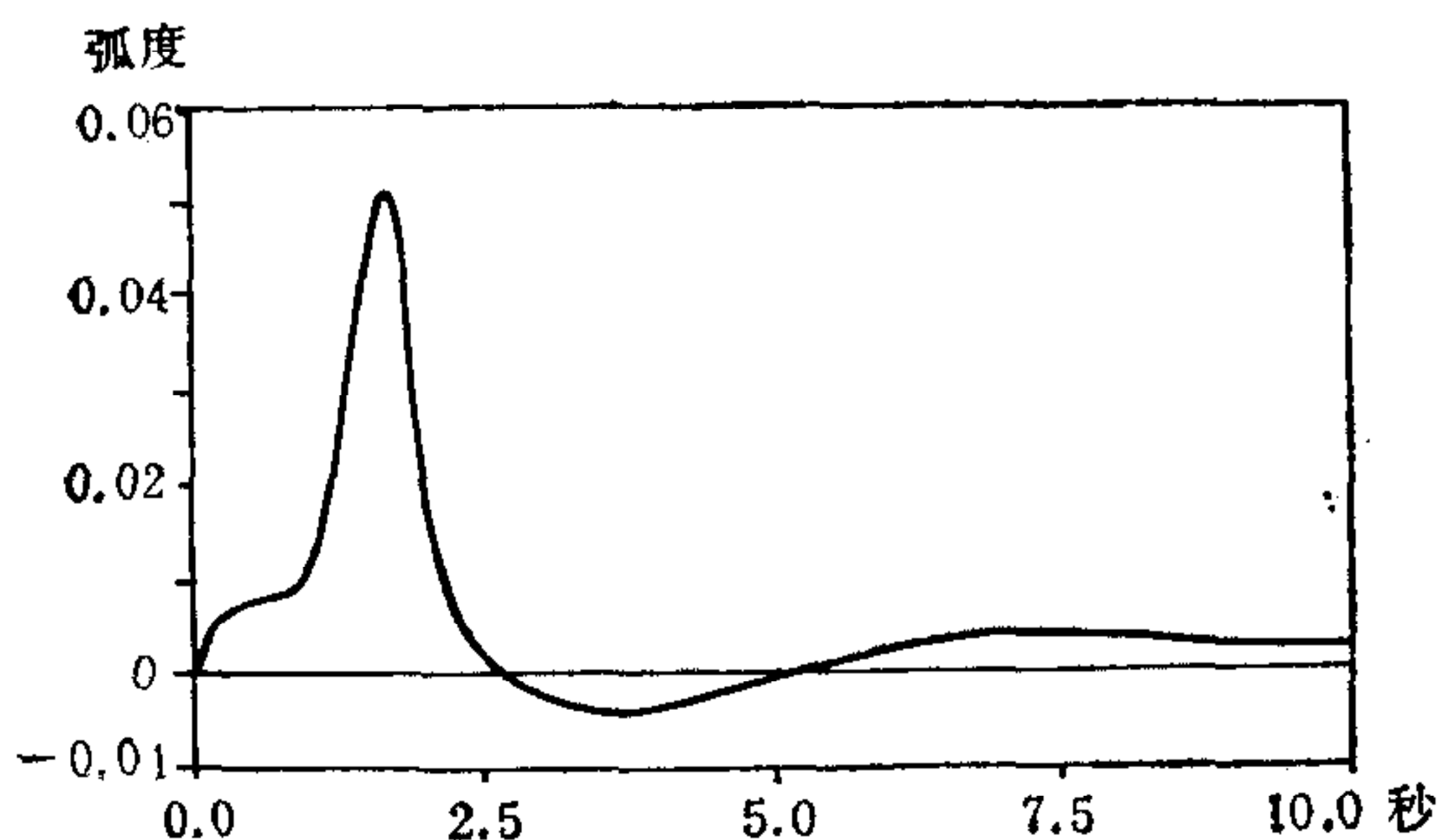


图1 关节1的跟踪误差

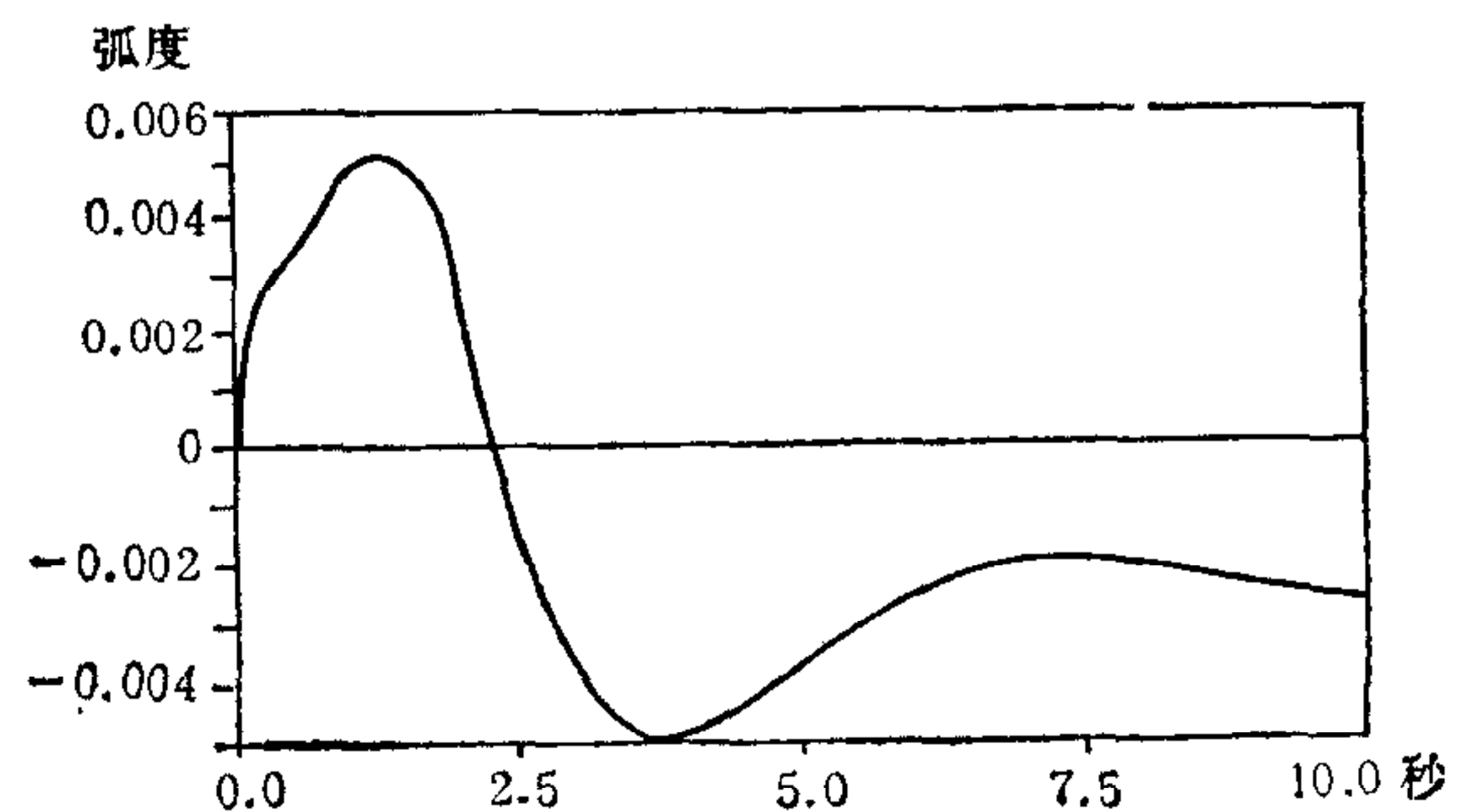


图2 关节2的跟踪误差

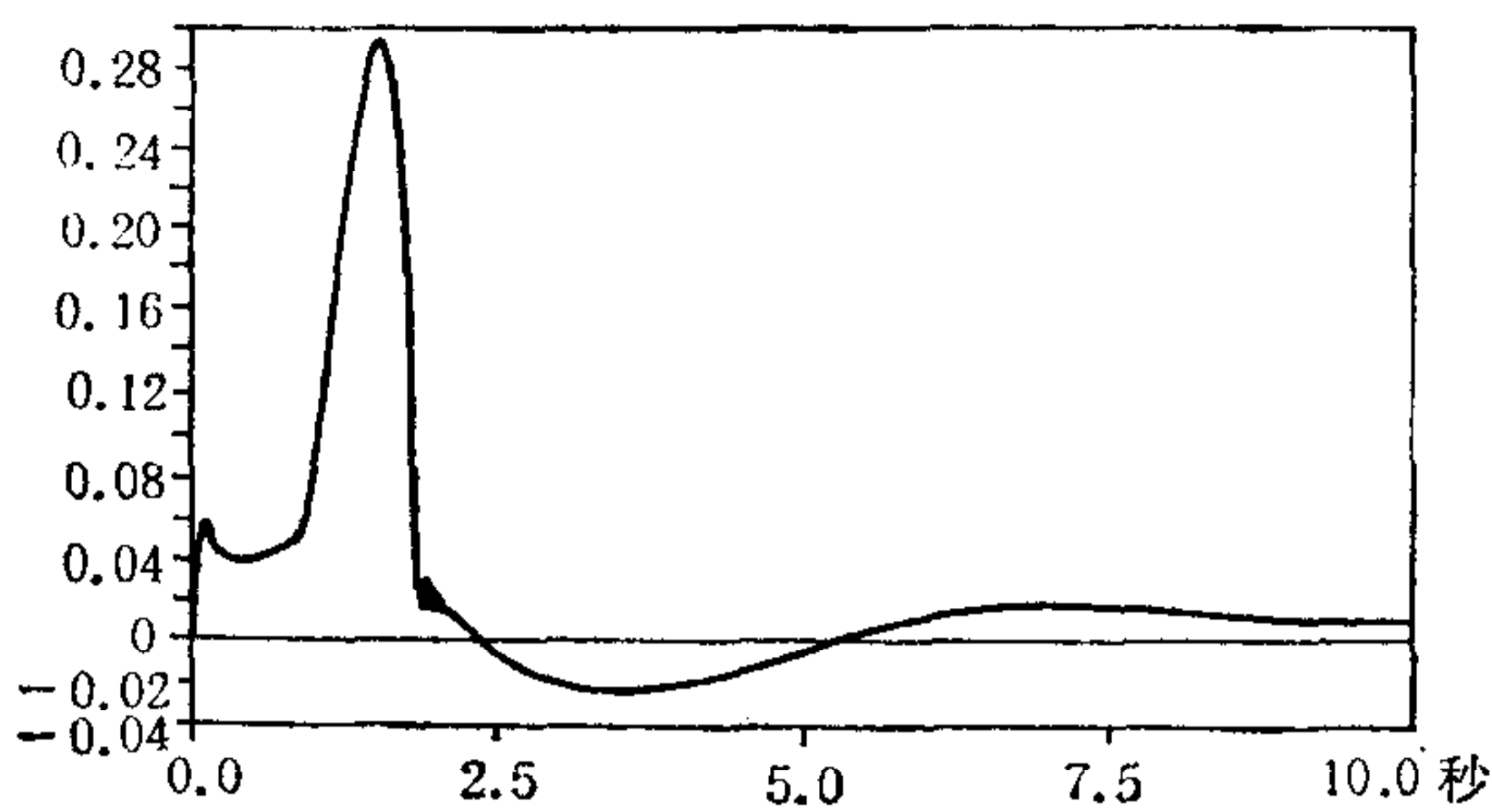
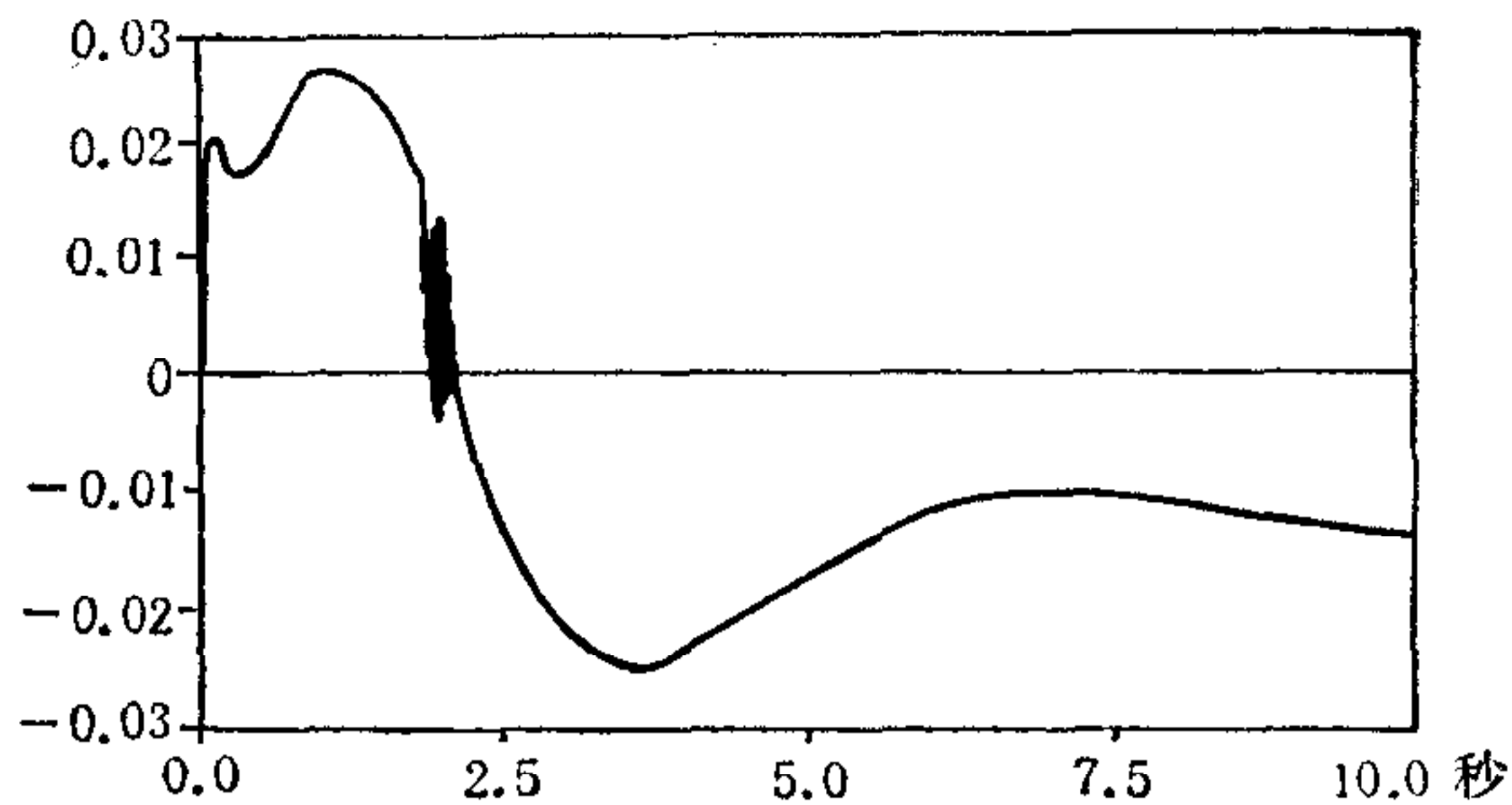
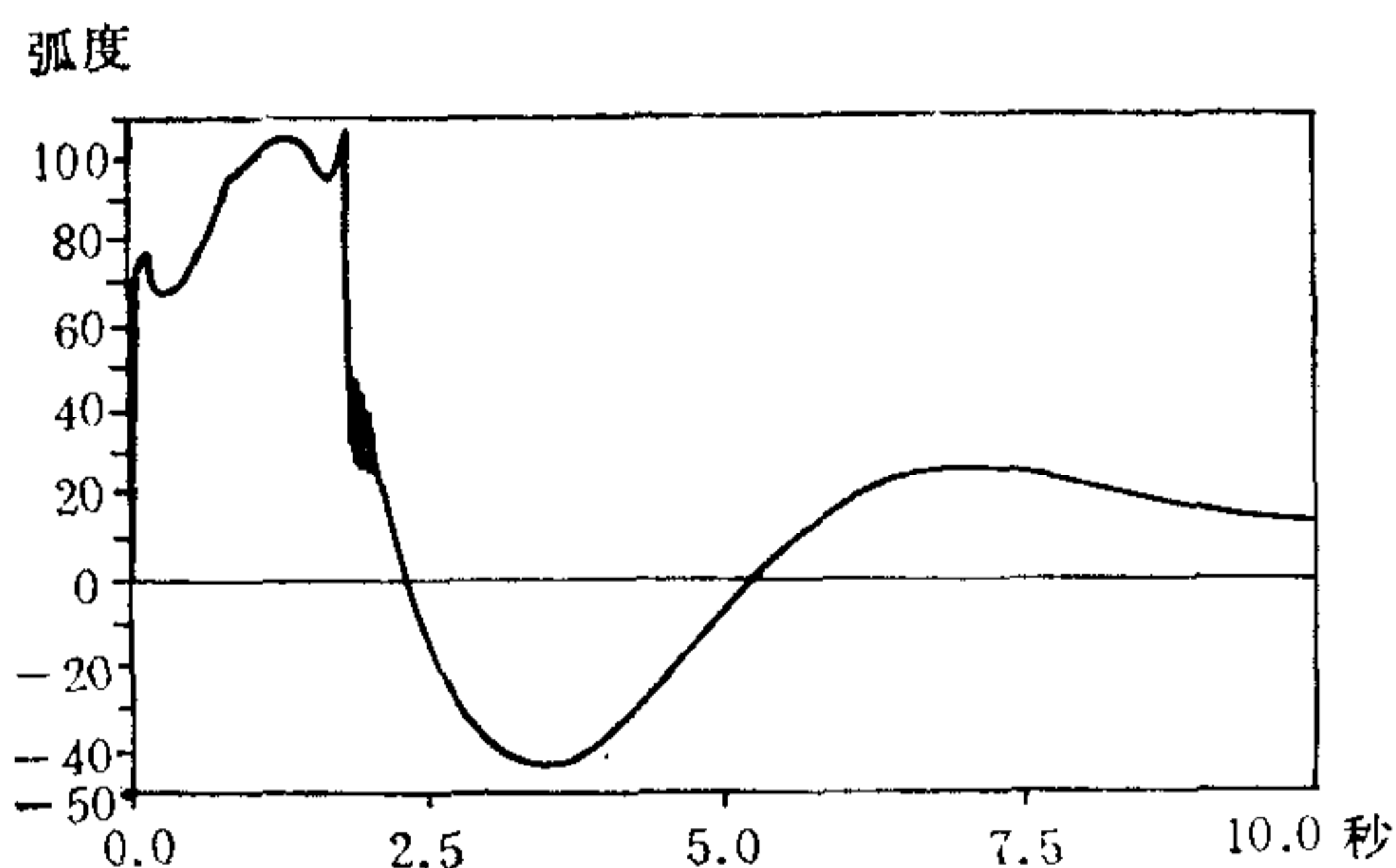
图 3 滑动流形  $s_1$ 图 4 滑动流形  $s_2$ 

图 5 作用于关节 1 的力矩

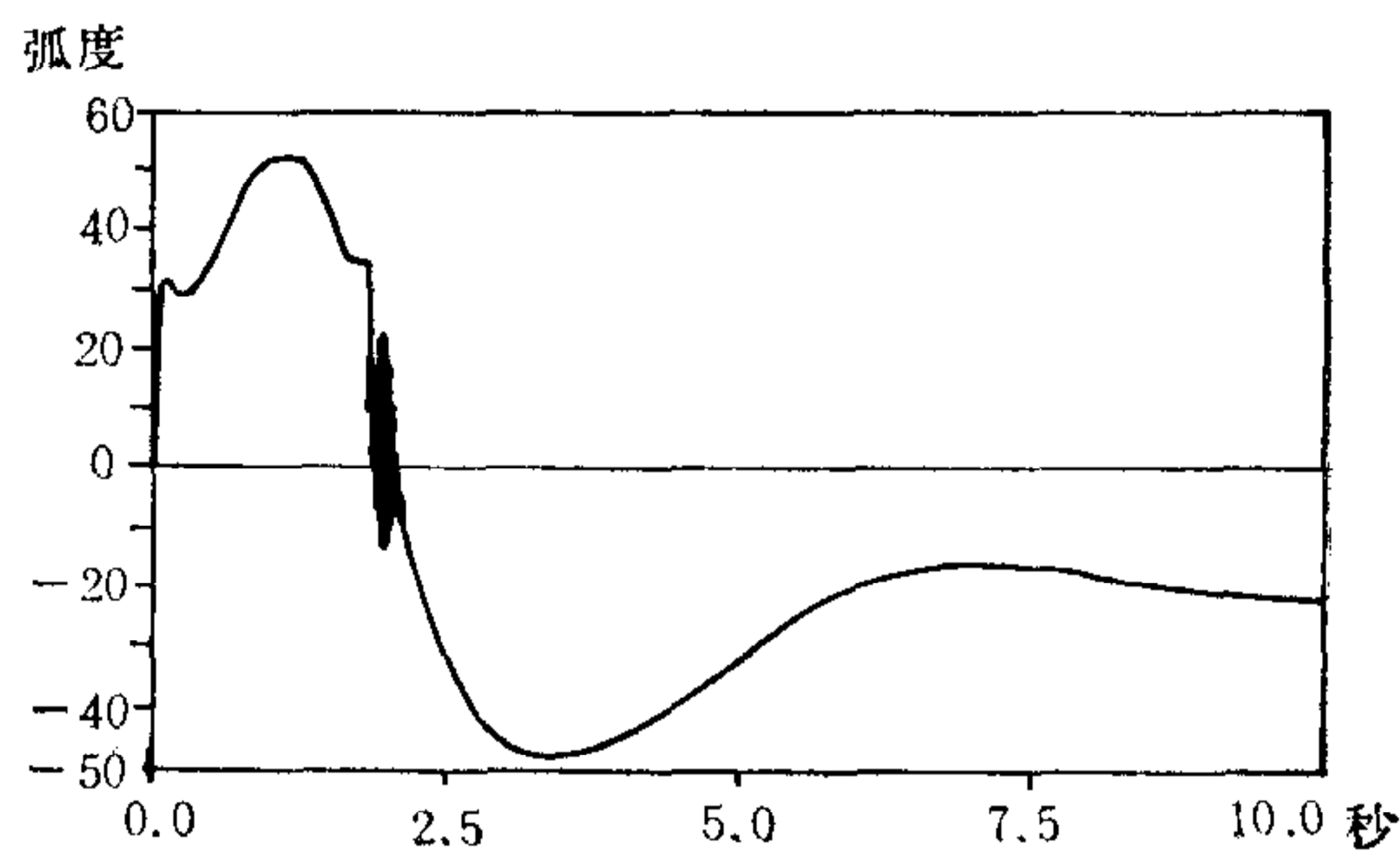


图 6 作用于关节 2 的力矩

为 0.054 弧度。图 2 表示关节 2 的跟踪误差,其最大跟踪误差为 0.006 弧度。图 3 表示流形  $s_1$ , 图 4 表示流形  $s_2$ , 图 5 表示作用于关节 1 的力矩,图 6 表示作用于关节 2 的力矩。

本文提出的机器人自适应模型跟踪变结构控制方法,是通过引入一特殊结构的矩阵,使得用李亚普诺夫函数成为可能,而不必用变结构理论中的递阶方法。此外,通过自适应调节控制增益,不需要预先给出系统参数的变化范围,因而适用于多关节机器人系统。经计算机仿真,其结果是令人满意的。

### 参 考 文 献

- [1] Hsia, T. C., Adaptive Control of Robot Manipulator-A Review, *IEEE Int Conf. Robotics and Automation*, San Francisco, (1986), 183—189.
- [2] Young, K. D., A Variable Structure Model Following Control Design for Robotic Application, *IEEE J. Robotics and Automation*, 4(1988), 5, 556—561.
- [3] Guzzela, L. and Geering, H. P., Model Following Variable Structure Control for a Class of Uncertain Mechanical Systems, *Proc. IEEE Int. Conf. Decision and Control*, Athen, 1986, 312—316.
- [4] Utkin, V. I., Sliding Modes and Their Applications, Mir, Moscow, 1978.
- [5] Dorling, C. M., and Zinober, A. S. I., Robust Hyperplane Design in Multivariable Variable Structure Control System, *Int. J. Control* 48(1988), 5, 2043—2054.
- [6] Slotine, J. J. E., Sastry, S. S., Tracking Control of Nonlinear System Using Sliding Surface, with Application to Robot Manipulators, *Int. J. Control*, 38(1983), 2, 465—492.
- [7] Young, K. D., Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure System, *IEEE Trans. System, Man, and Cybernetics*, 8(1978), 2, 101—109.

# THE ADAPTIVE MODEL FOLLOWING VARIABLE STRUCTURE CONTROL FOR ROBOT MANIPULATORS

SU CHUNYI

*(Dept. of Automation, South China University of Technology)*

T. P. LEUNG

*(Dept. of Mechanical and Marine Engineering, Hong Kong Polytechnic)*

ZHOU QIJIE

*(Dept. of Automation, South China University of Technology)*

## ABSTRACT

An adaptive model following variable structure control scheme for robot manipulator is presented in this paper. It has the prescribed transient response, and the control law can be expressed in united formula and the information on possible size of system parameters is not required. Thus, it can be easily extended to the case of higher number of links.

**Key words:** Robot; variable structure control; adaptation; model following.

## 补 遗

本刊第 17 卷第 1 期发表的“DEDS 的集结与输入-输出等价”一文,该课题部分工作得到国家自然科学基金资助。