

# 机器人在任务空间的变结构跟踪控制<sup>1)</sup>

韩珂 李耀通

(中国科学院自动化研究所, 北京 100080)

## 摘 要

本文提出了一种面向任务空间的机器人变结构控制算法。该算法不需要从任务空间到关节空间的坐标变换, 直接利用任务坐标计算控制力矩。变结构控制的主要思想在于将复杂的切换条件问题离线进行, 从而庞复的动力学实时控制的计算问题可以迎刃而解。

**关键词:** 机器人控制, 变结构, 任务空间。

## 一、引 言

现在的工业机器人绝大多数都是不带传感控制的示教再现型机器人, 示教再现将一个任务的完成分为二个阶段, 即轨线规划阶段和执行阶段, 由于任务一般都是在任务空间加以描述的, 因此轨线规划不可避免地要求解机器人运动学的逆, 以便将任务空间的运动变量转化成机器人的关节变量, 虽然到目前为止求解运动学逆的方法有若干种, 但都普遍存在着计算机耗时和运动学求逆的奇异问题。因此, 能否根据任务空间的轨迹规划直接控制机器人的关节驱动力矩是近年来非常引人注目的课题。在示教再现的第二个阶段, 即执行阶段, 机器人的控制问题实际上是个轨线跟踪问题。目前的工业机器人几乎全部采用独立的 PID 关节控制方法, 很少有将动力学模型纳入算法的, 造成当机器人运动速度提高时出现较大的跟踪误差和明显的振动。已经提出的各种动力学控制方法普遍存在的问题是计算复杂而难于在机器人上用计算机微机加以实现。作者早些时候提出了一种基于任务空间和关节空间变换灵敏度的机器人直角坐标控制方案<sup>[1]</sup>, 实现了机器人在任务空间的闭环反馈控制。这种方法不需求解运动学的逆。本文在此基础上再提出一种机器人在任务空间的动力学跟踪控制方案, 目的是找到一种计算简单从而易于实时计算的、对参数变化具有鲁棒性的, 直接在任务空间进行而不需坐标变换的动力学控制方法。

变结构控制理论对机器人控制是有吸引力的。因为变结构控制不需要知道精确的动力学模型, 只需要参数的误差范围或变化范围即可。其次, 变结构控制对有界干扰和参数变化不敏感, 这一方面可消除粘性摩擦力等外界干扰, 另一方面也可消除由于负载变化而引起的模型变化的影响。第三, 变结构控制本身是解耦的, 可以很容易的规定并实现系统

本文于1991年8月31日收到。

1) 国家自然科学基金资助的课题。本文曾在1990年全国控制理论与应用年会上(杭州)宣读。

的指标。它的主要缺点是高频切换会引起机械共振。最早把变结构理论应用于机器人控制的是 young<sup>[2]</sup>。他采用了变结构控制中典型的递阶控制方法来确定控制量  $U_i^+$  和  $U_i^-$ ，但文中只是重点讨论了逼近设定点的控制——调节器问题。这种控制方案的缺点是系统必须依次在每个子流形  $s_i = 0$  上产生滑动，从而在流形  $s = 0$  上产生滑动模，因而控制受一组复杂的代数不等式的限制，这些条件显得太苛刻。Harashima 和 Hashimoto<sup>[3,4]</sup> 则将控制取为  $U = U_{e,q} + \Delta U$  ( $U_{e,q}$  为由等效控制方法得到的控制)，这样做的好处是可以减少颤动，然后由条件  $s_i \cdot \dot{s}_i < 0$  来确定  $\Delta U_i$ 。在确定  $\Delta U$  时 要对转动惯量矩阵  $H(q)$  求逆，而实际系统很难精确地确定  $H(q)$ ，故只能用近似的  $\bar{H}(q)$  来代替  $H(q)$ 。他们给出了用  $\bar{H}(q)$  代替  $H(q)$  的条件，但无法验证。Bailey<sup>[5]</sup> 选  $V(s) = \frac{1}{2} s^T H(q) s$

为 Lyapunov 函数，由此给出了一种简单的选择  $U_i^+$  和  $U_i^-$  的方法，但未考虑参数变化的情况。Yeung<sup>[6]</sup> 选取了同样的 Lyapunov 函数，给出了另一种确定  $U_i^+$  和  $U_i^-$  的准则，这个方法简单实用。Slotine<sup>[7]</sup> 利用机器人参数辨识理论中的一个参数线性分离的结论，把滑动模的思想引入自适应控制，提出了一种运用于关节坐标间的跟踪控制算法。该算法既是全局渐近稳定的，又可以在线辨识未知参数。但该方法用于多自由度的机器人时计算很复杂，难于实现<sup>[8,9]</sup>。

以上介绍的几种变结构控制方案都是在关节坐标下施行的，在任务坐标系下的变结构控制方案，现在还不多见。为了既能避免运动学逆问题，又能克服参数的不确定性，本文给出了一种任务空间的变结构跟踪控制。

## 二、算 法 介 绍

考虑一个  $n$  自由度的机器人，其动力学方程如下：

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau. \quad (1)$$

式中  $q$  是机器人各关节的位置坐标向量； $\dot{q}$  与  $\ddot{q}$  是相应的速度和加速度； $H(q)$  是转动惯量矩阵； $C(q, \dot{q})$  是科里奥利力和向心力矩阵； $G(q)$  是重力矩向量； $\tau$  是控制向量。

机器人的关节速度和手臂末端在直角坐标系下的线速度之间有如下关系：

$$\dot{x} = J\dot{q}, \quad (2)$$

式中  $\dot{x}$  是机器人在直角坐标系下手臂末端的线速度； $J$  是雅可比矩阵。假设雅可比矩阵可逆，则有

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{x},$$

且

$$\ddot{q} = J^{-1}\ddot{x} + \dot{J}^{-1}\dot{x}.$$

将上述关系代入方程(1)，并且左乘  $[J^{-1}]^T = J^{-T}$ ，可得

$$H_c(x)\ddot{x} + C_c(x, \dot{x})\dot{x} + G_c(x) = \tau_c, \quad (3)$$

式中

$$H_c(x) = J^{-T}H(q)J^{-1},$$



$$\begin{aligned} C_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) &= J^{-T} H(\mathbf{q}) j^{-1} + J^{-T} C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) J^{-1}, \\ G_c(\mathbf{x}) &= J^{-T} G(\mathbf{q}), \\ \boldsymbol{\tau}_c &= J^{-1} \boldsymbol{\tau}. \end{aligned}$$

上面方程即是机器人在直角坐标系下的动力学方程。由推导过程和各项表达式可以看出, 这个方程的计算是极其复杂的, 下面将讨论解决计算量的途径。以方程式(3)为基础, 推导出直角坐标系下的机器人变结构控制规律。

设切换曲面的方程为

$$\mathbf{s} = (\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_d) + A(\mathbf{x} - \mathbf{x}_d), \quad (4)$$

其中  $\mathbf{x}$  是机械手末端在直角坐标系下的实际位置;  $\mathbf{x}_d$  是理想位置;  $\dot{\mathbf{x}}$  与  $\dot{\mathbf{x}}_d$  是相应的速度;  $A$  是正定对称矩阵。

选择如下的 Lyapunov 函数:

$$v = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \cdot H_c(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{s}, \quad (5)$$

显然,  $v$  是正定的。对  $v$  求时间的导数

$$\dot{v} = \mathbf{s}^T H_c(\mathbf{x}) \dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \dot{H}_c(\mathbf{x}) \mathbf{s}. \quad (6)$$

可以证明矩阵  $\left[ \frac{1}{2} H_c(\mathbf{x}) - C_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \right]$  是旋转对称的, 即有

$$\mathbf{s}^T \left[ \frac{1}{2} H_c(\mathbf{x}) - C_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \right] \mathbf{s} = 0, \quad (7)$$

代入(6)式可得

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \mathbf{s}^T H_c(\mathbf{x}) \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{s}^T C_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \mathbf{s} \\ &= \mathbf{s}^T [\boldsymbol{\tau}_c - H_c(\mathbf{x}) \ddot{\mathbf{x}}_d - (H_c(\mathbf{x}) \cdot A + C_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}))(\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}) \\ &\quad - C_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) - C_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \dot{\mathbf{x}} - G_c(\mathbf{x})]. \end{aligned}$$

为了使上面的 Lyapunov 函数的导数负定, 选择如下形式的控制力矩  $\boldsymbol{\tau}$

$$\boldsymbol{\tau} = J^T [\alpha \cdot \ddot{\mathbf{x}}_d + \beta(\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}) + \gamma(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) + \eta \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{r}], \quad (8)$$

其中  $\alpha, \beta, \gamma, \eta$  是待定的系数矩阵;  $\mathbf{r}$  是待定的向量。利用关系

$$\boldsymbol{\tau}_c = J^{-T} \boldsymbol{\tau},$$

把  $\boldsymbol{\tau}$  代入  $v$ , 可得

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \mathbf{s}^T \{ [\alpha - H_c(\mathbf{x})] \ddot{\mathbf{x}}_d + [\beta - H_c(\mathbf{x}) A - C_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})] \\ &\quad (\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}) + [\gamma - C_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) A] (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) + [\eta - C_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})] \dot{\mathbf{x}} \\ &\quad + [\mathbf{r} - G_c] \}. \end{aligned}$$

为使  $\dot{v}$  为负定的, 将逐项选择  $\alpha, \beta, \gamma, \eta, \mathbf{r}$  矩阵, 从而使  $\dot{v}$  中的每一个乘积项都是负的。

为描述系统动力学的不确定性, 设定机器人的动力学参数向量为  $\boldsymbol{\varphi}$ , 并且使  $\boldsymbol{\varphi}$  在参数空间  $\Phi$  内变化,  $\Phi$  空间概括了参数变化的最大范围。

为了便于讨论, 在关节坐标系下定义机器人的工作空间  $\Theta$ , 并使  $\Theta$  中不包含任何奇

异点。\$\Theta\$ 概括了关节坐标变化的最大范围。

有这些定义后,即可逐项确定 \$\alpha\$ 到 \$\mathbf{r}\$ 的各矩阵。

### 1. \$\alpha\$ 矩阵的确定

由前面的推导可知,矩阵

$$H_c(\mathbf{x}) = J^{-T}(\mathbf{q})H(\mathbf{q})J^{-1}(\mathbf{q})$$

的各元素仅仅是关节坐标 \$\mathbf{q}\$ 的函数。由于在工作空间 \$\Theta\$ 中不包含任何奇异点,故 \$H\_c(\mathbf{x})\$ 在 \$\Theta\$ 中有定义,这样即可以在执行控制之前离线地计算出矩阵 \$H\_c(\mathbf{x})\$ 的各元素在整个工作空间 \$\Theta\$ 和整个参数空间 \$\Phi\$ 中的极大值和极小值。定义 \$H\_c(\mathbf{x})\$ 中各元素的极值为

$$\bar{h}_{oij} = \text{maximum}\{h_{oij}(\mathbf{q}, \varphi), \forall \mathbf{q} \in \Theta, \forall \varphi \in \Phi\},$$

$$h_{oij} = \text{minimum}\{h_{oij}(\mathbf{q}, \varphi), \forall \mathbf{q} \in \Theta, \forall \varphi \in \Phi\}.$$

计算 \$\bar{h}\_{oij}\$ 和 \$h\_{oij}\$ 需要很大的计算量,但因为是离线完成的,所以这部分计算和控制律的在线实现无关。在算出了 \$\bar{h}\_{oij}\$ 和 \$h\_{oij}\$ 之后,按如下的规则在线确定 \$\alpha\$ 矩阵的各个元素

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \bar{h}_{oij}, & \text{若 } \mathbf{s}_i \cdot \ddot{\mathbf{x}}_{dj} < 0, \\ h_{oij}, & \text{若 } \mathbf{s}_i \cdot \ddot{\mathbf{x}}_{dj} > 0. \end{cases}$$

有了这样定义的 \$\alpha\$ 矩阵,很容易看出, \$\dot{v}\$ 中的第一项是负定的,即

$$\mathbf{s}^T[\alpha - H_c(\mathbf{x})]\ddot{\mathbf{x}}_d \leq 0.$$

### 2. \$\eta\$ 矩阵的确定

由于 \$C\_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})\$ 矩阵中含有与速度有关的变量,而速度必须在线测量,所以相应的 \$\eta\$ 矩阵的确定也就比较复杂一些。因为

$$C_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = J^{-T}H(\mathbf{q})\dot{J}^{-1} + J^{-T}C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})J^{-1}.$$

故可证明,矩阵 \$C\_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})\$ 中的每一个元素都是关于机器人关节速度的线性组合,即

$$C_{oij}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = C_{oij1}(\mathbf{q})\dot{q}_1 + \cdots + C_{oijn}(\mathbf{q})\dot{q}_n,$$

式中 \$C\_{oijk}(\mathbf{q})(k = 1, 2, \dots, n)\$ 只是关节坐标 \$\mathbf{q}\$ 的函数,因此可以离线地求出这些函数的极值,把它们定义为

$$\bar{C}_{oijk} = \text{maximum}\{C_{oijk}(\mathbf{q}, \varphi), \forall \mathbf{q} \in \Theta, \forall \varphi \in \Phi\},$$

$$\underline{C}_{oijk} = \text{minimum}\{C_{oijk}(\mathbf{q}, \varphi), \forall \mathbf{q} \in \Theta, \forall \varphi \in \Phi\}.$$

有了这些极值以后,在线测量各关节的角速度 \$\dot{q}\$,即可以在线计算另一个层次的极值,即 \$C\_c(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})\$ 矩阵的元素 \$C\_{oijk}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})\$ 的极值。定义

$$\bar{C}_{oijk} = \sum_{k=1}^n C'_{oijk}\dot{q}_k, \quad \underline{C}_{oijk} = \sum_{k=1}^n C''_{oijk}\dot{q}_k.$$

其中

$$C'_{oijk} = \begin{cases} \bar{C}_{oijk}, & \text{如果 } \dot{q}_k > 0. \\ \underline{C}_{oijk}, & \text{如果 } \dot{q}_k < 0. \end{cases}$$

$$C''_{oijk} = \begin{cases} \underline{C}_{oijk}, & \text{如果 } \dot{q}_k > 0. \\ \bar{C}_{oijk}, & \text{如果 } \dot{q}_k < 0. \end{cases}$$

由此,即可按下列规则确定矩阵 \$\eta\$ 的各元素

$$\eta_{ij} = \begin{cases} \bar{C}_{oij}, & \text{若 } \mathbf{s}_i \cdot \dot{\mathbf{x}}_j < 0, \\ \underline{C}_{oij}, & \text{若 } \mathbf{s}_i \cdot \dot{\mathbf{x}}_j > 0. \end{cases}$$

容易看出,这样定义的矩阵  $\eta$  一定能使  $\dot{v}$  中的第四项负定,即

$$\mathbf{s}^T[\eta - C_c]\dot{\mathbf{x}} < 0.$$

$r, \beta, \gamma$  三个矩阵的计算方法与  $\alpha, \eta$  矩阵基本相同,故不赘述.

### 三、仿真实验

为简便起见,仿真实验在一个二自由度的平面机器人上进行,其臂为  $l_1 = l_2 = 0.5\text{m}$ . 假设每个臂的质量只集中在该臂的端点,分别为  $m_1$  和  $m_2$ , 在这里考虑的不确定性因素主要是质量  $m_1$  和  $m_2$  的大小不确定. 给出的一系列实验主要是以不同的速度,在不同的质量条件下跟踪同样的一条空间轨线,并比较实验结果,分析其与理论上的预测是否符合.

被跟踪的轨线是平面上的一个椭圆,其长轴为  $0.7\text{m}$ , 短轴  $0.4$  米,方程为

$$\begin{cases} x = 0.7 \cos \omega t, \\ y = 0.4 \sin \omega t, \end{cases}$$

式中  $t$  是时间;  $\omega$  是调整速度的参数.

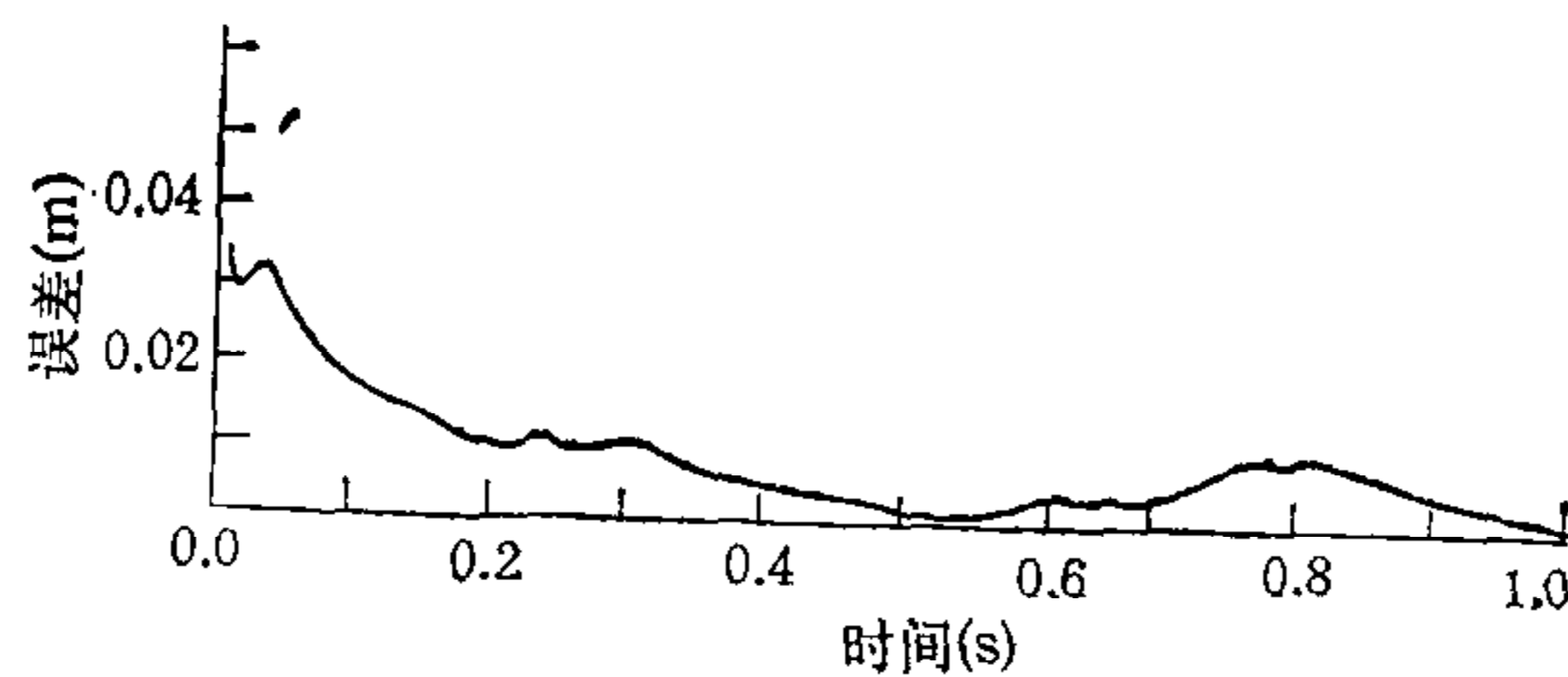


图1  $m_1 = 30\text{kg}$ ,  $m_2 = 20\text{kg}$ ,  $f = 10^3\text{Hz}$ ,  $v = 4\text{m/s}$  时的跟踪误差

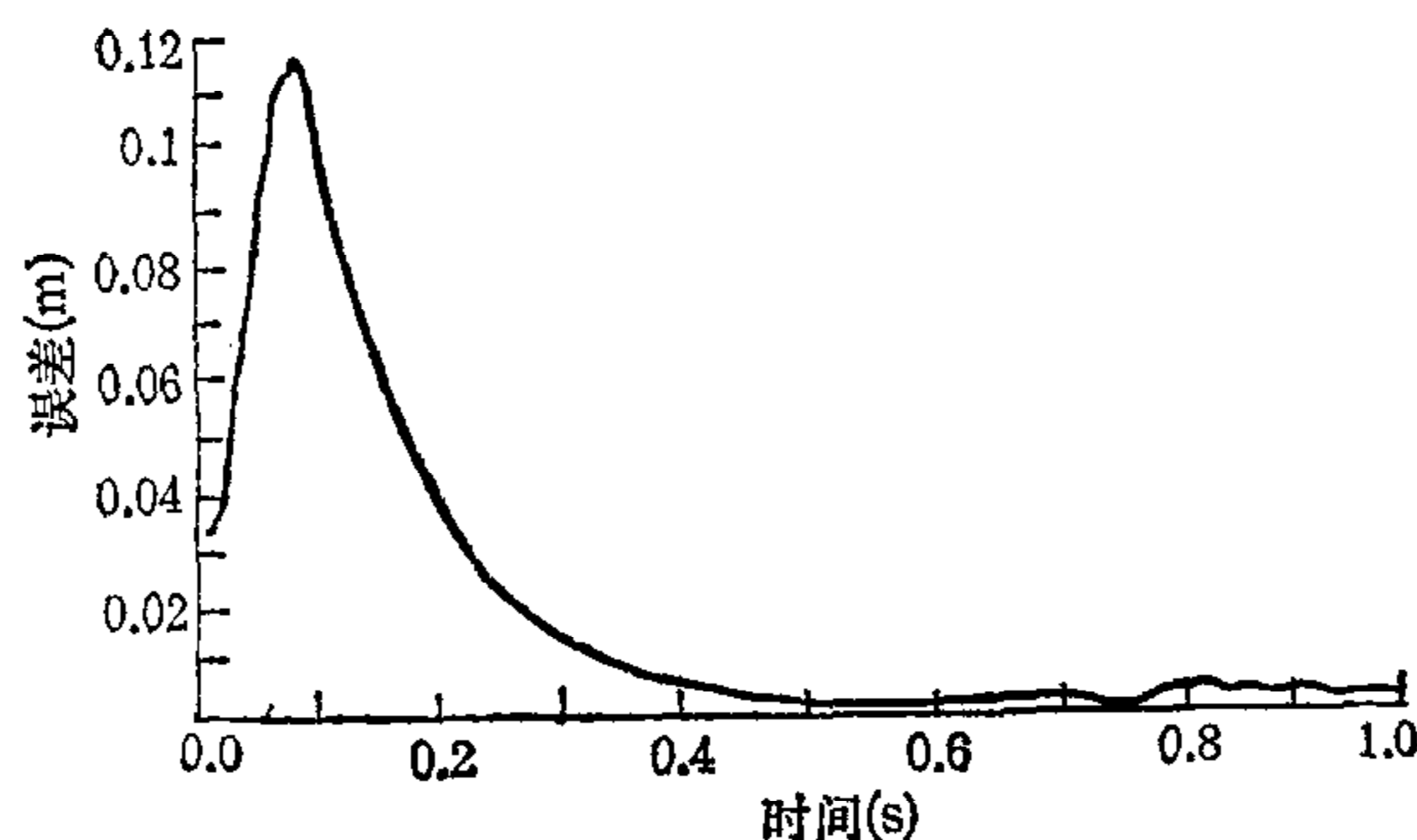


图2  $m_1 = 90\text{kg}$ ,  $m_2 = 60\text{kg}$ ,  $f = 10^3\text{Hz}$ ,  $v = 4\text{m/s}$  时的跟踪误差

图1和图2显示了质量参数变化对控制系统性能指标的影响. 图1中令质量  $m_1 = 30\text{kg}$ ,  $m_2 = 20\text{kg}$ , 采样频率  $f = 1000\text{Hz}$ , 跟踪速度1周/秒, 相当于线速度  $4\text{m/s}$ . 从图1中可以看到, 稳态时, 跟踪误差不超过  $2\text{mm}$ . 图2中, 把各质量变化到原来的3倍, 即  $m_1 = 90\text{kg}$ ,  $m_2 = 60\text{kg}$ , 而不对控制量做任何改变, 同时保持原来的跟踪速度  $4\text{m/s}$  和采样频率  $1000\text{Hz}$ , 可以看到稳态跟踪误差不超过  $1\text{mm}$ . 由仿真结果看到, 该算法对动力学参数变化的鲁棒性是非常强的, 在参数剧烈变化的情况下(300%)性能指



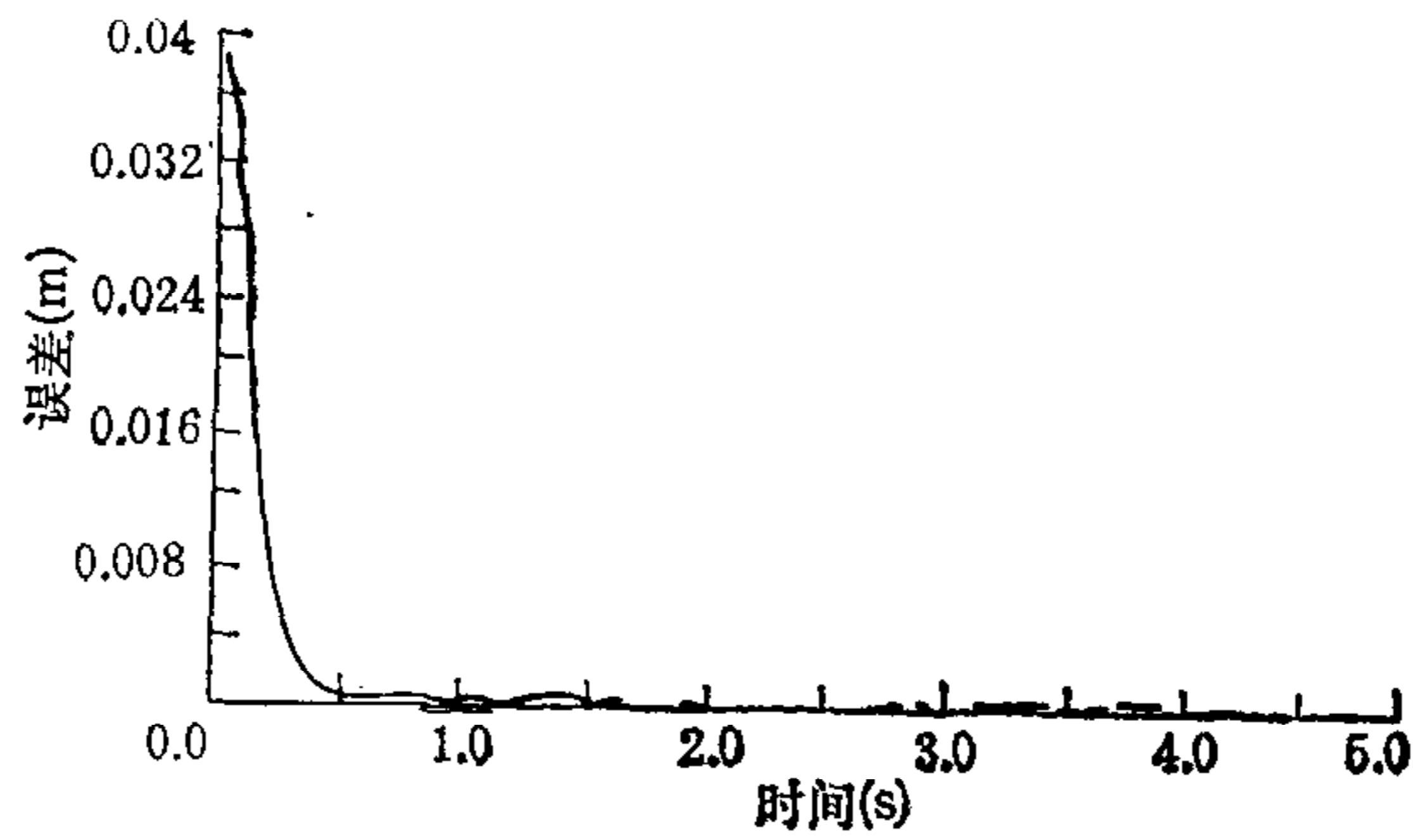


图 3  $m_1 = 30\text{kg}$ ,  $m_2 = 20\text{kg}$ ,  $f = 10^3\text{Hz}$ ,  $v = 0.8\text{m/s}$  时的跟踪误差

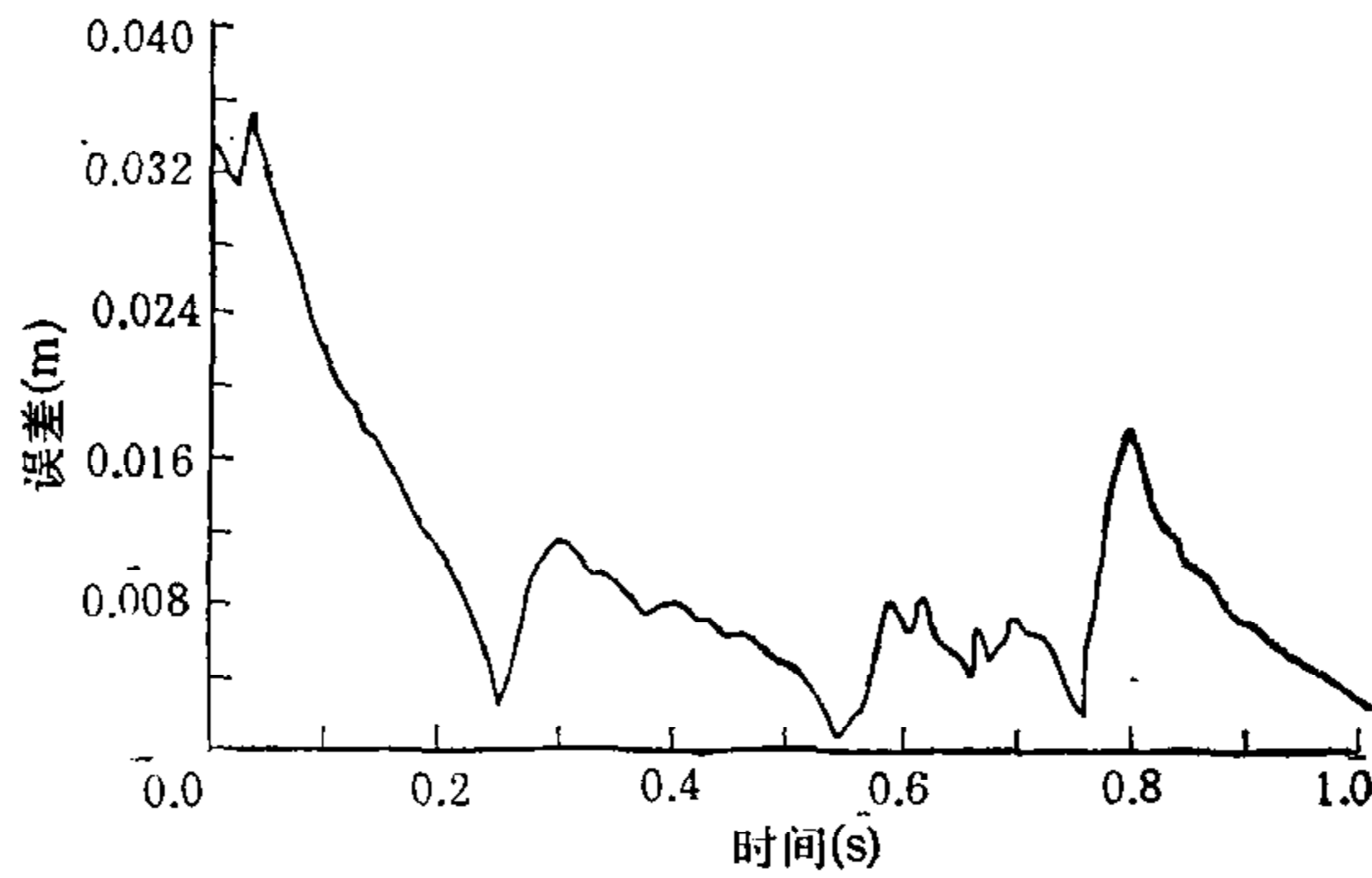


图 4  $m_1 = 30\text{kg}$ ,  $m_2 = 20\text{kg}$ ,  $f = 400\text{Hz}$ ,  $v = 4\text{m/s}$  时的跟踪误差

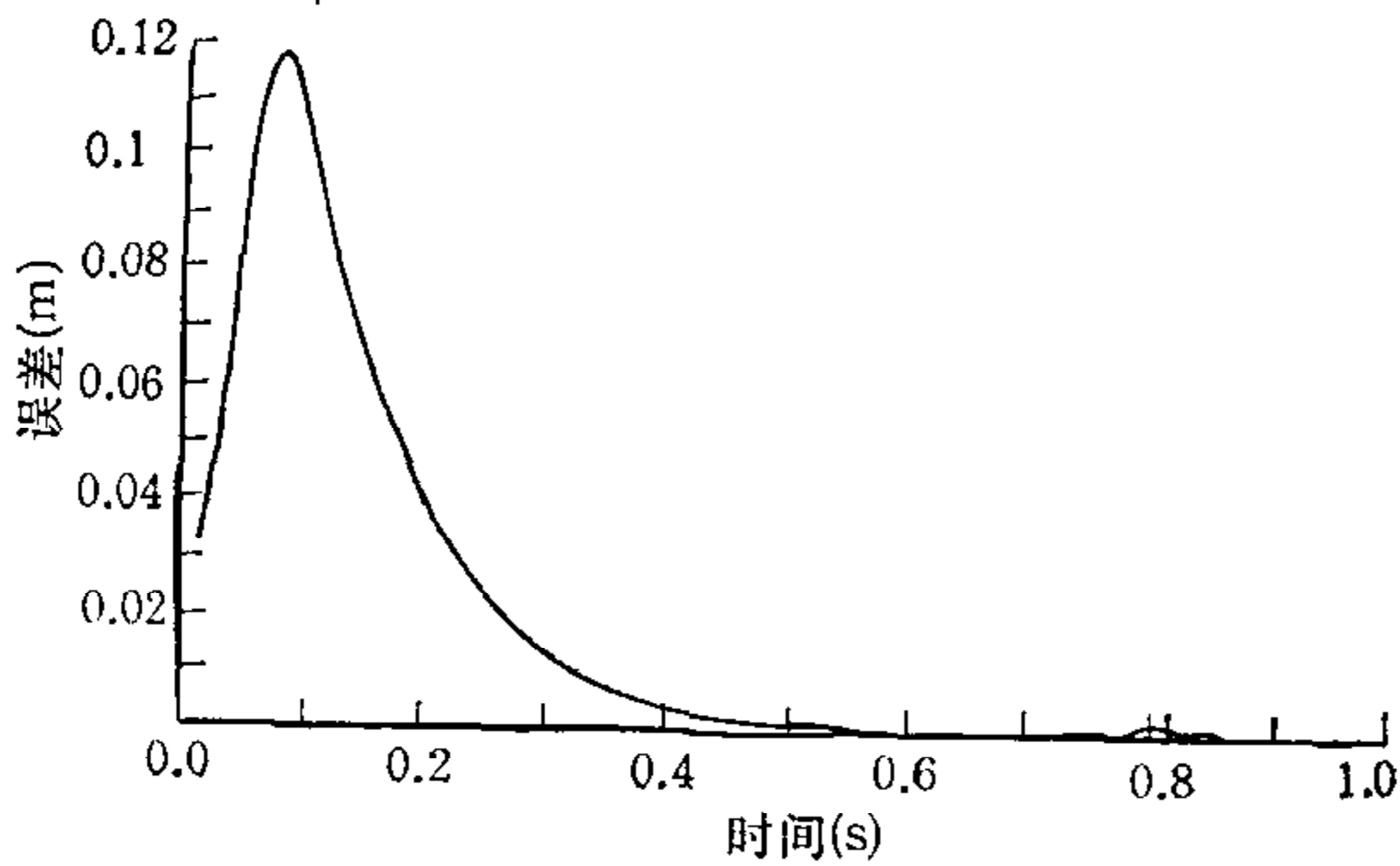


图 5  $m_1 = 30\text{kg}$ ,  $m_2 = 20\text{kg}$ ,  $f = 10^4\text{Hz}$ ,  $v = 4\text{m/s}$  时的跟踪误差

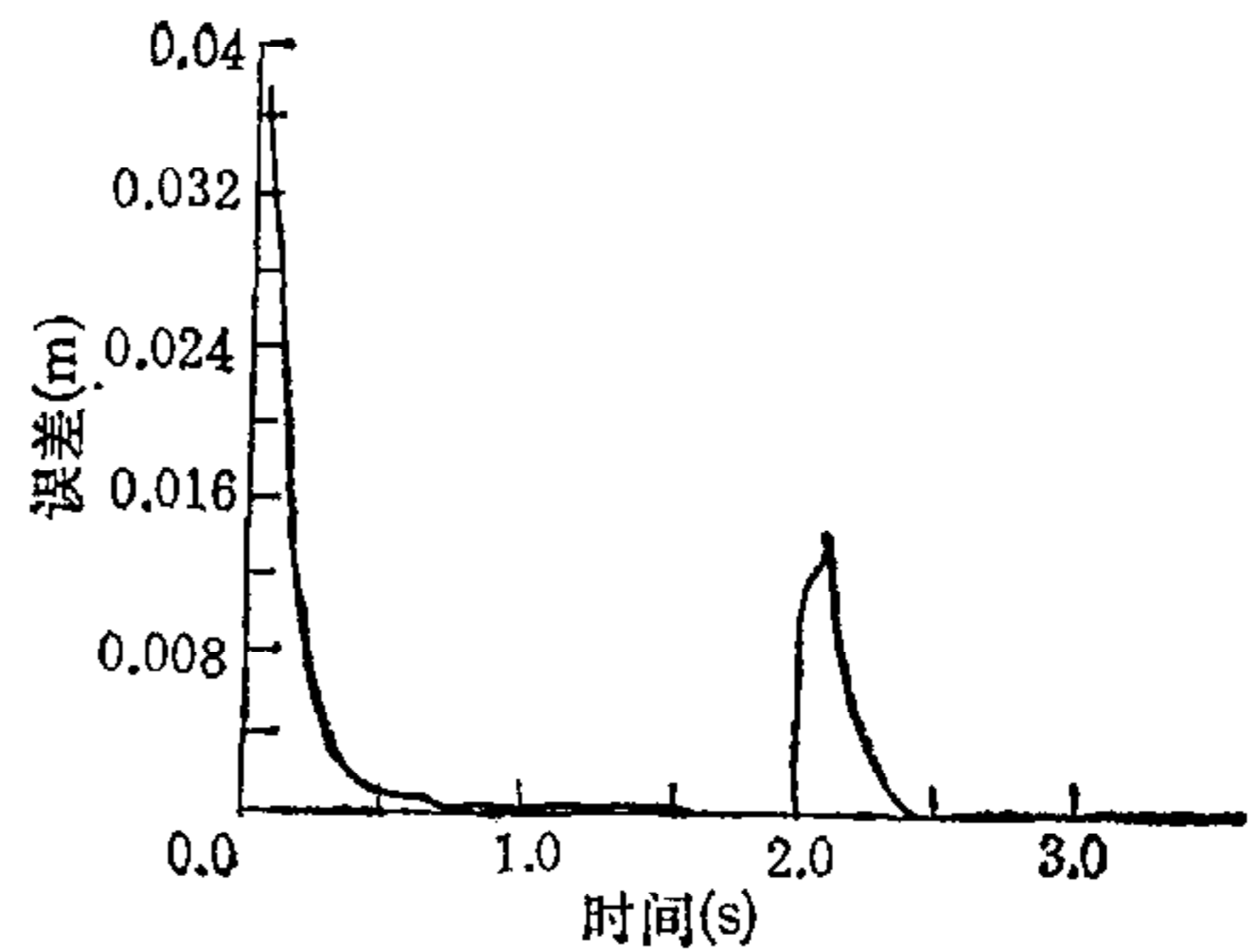


图 6 在图 3 所示系统中,突然加入一个质量为 80 公斤,初速度为 0 的负载后,系统的跟踪误差

标基本不受影响,仍然能保持较高的跟踪精度.

图 3 说明了跟踪速度对精度的影响,在图 3 中,保持  $m_1 = 30\text{kg}$ ,  $m_2 = 20\text{kg}$ , 采样频率  $f = 1000\text{Hz}$ , 而把跟踪速度从 1 周/秒降到 0.2 周/秒,相当于  $0.8\text{m/s}$ , 可以看到稳态误差降到  $0.1\text{mm}$  之下.

图 4 和图 5 显示了采样频率对跟踪误差的影响. 在图 4 中,保持  $m_1 = 30\text{kg}$ ,  $m_2 = 20\text{kg}$ , 跟踪速度仍为  $4\text{m/s}$ , 而采样频率从  $1000\text{Hz}$  下降到  $400\text{Hz}$ . 和图 1 相比,稳态误差从  $10^{-3}\text{m}$  数量级增大到  $10^{-2}\text{m}$  数量级,在图 5 中,其它条件不变,只把采样频率上升

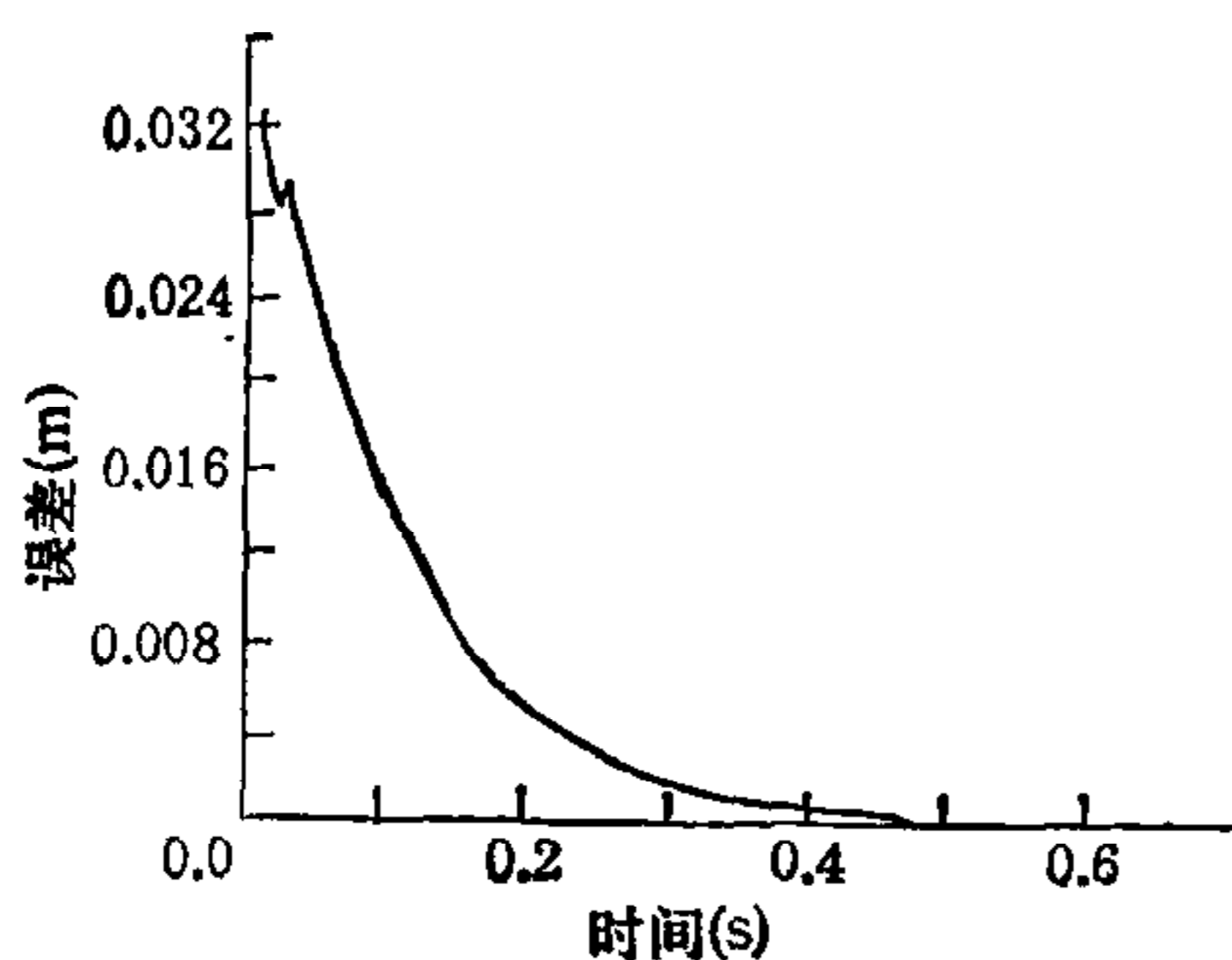


图7  $m_1 = 90\text{kg}$ ,  $m_2 = 60\text{kg}$ ,  $f = 10^4\text{Hz}$ ,  $v = 4\text{m/s}$ ,  $A$  的特征值为 10 时的跟踪误差

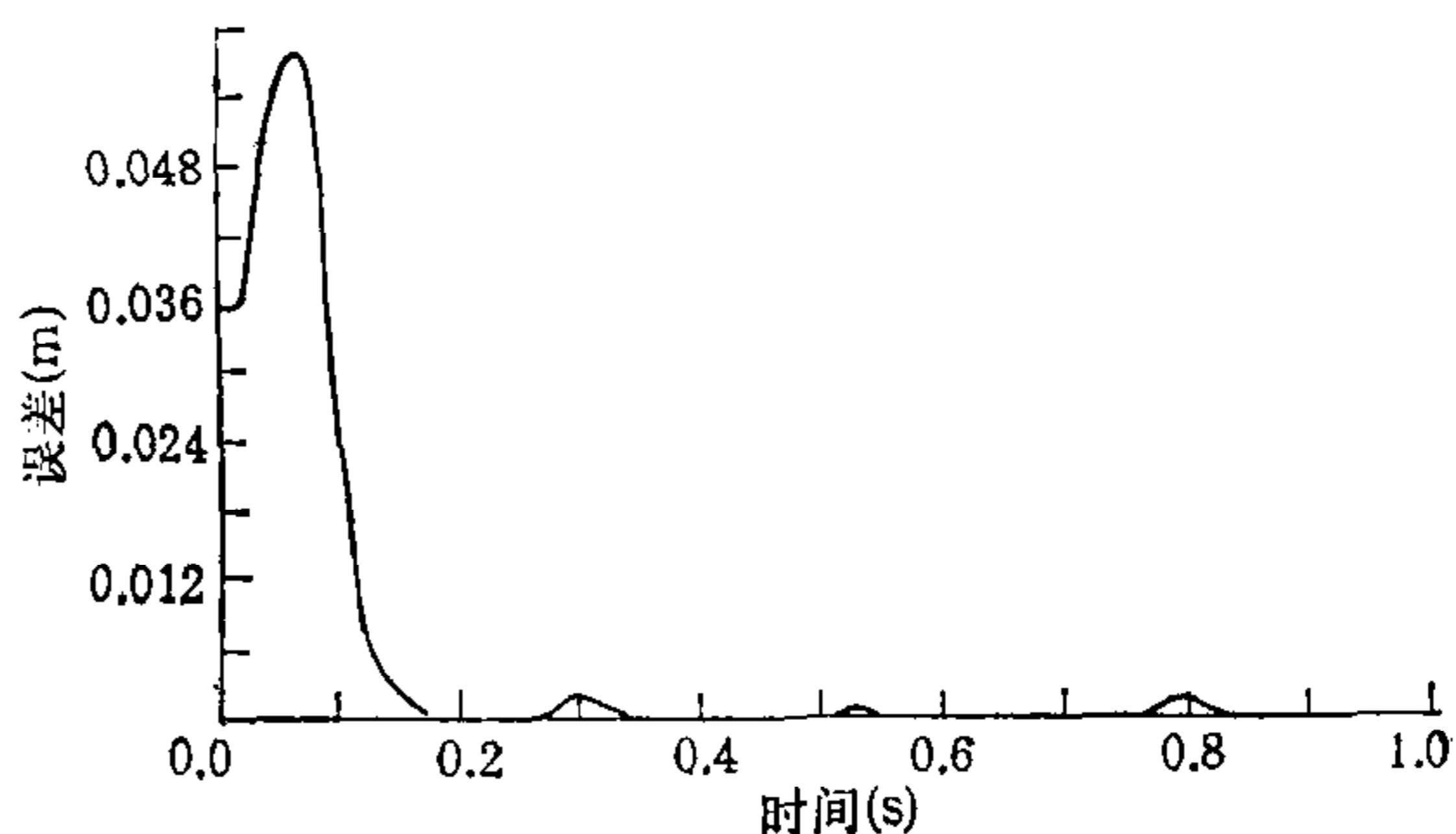


图8 将图7中的  $A$  矩阵的特征值改为 50 后, 系统的跟踪误差

到  $10^4\text{Hz}$ , 跟踪误差又降到  $10^{-4}\text{m}$  以下。由此可见, 采样频率对系统的性能指标影响极大, 采样频率越高, 跟踪效果越佳。

图6显示了该算法克服负载扰动的能力。和图3相比, 图6中的其它未变, 只是在  $t = 2\text{s}$  时, 跟踪进入稳态之后, 突然给机器人末端加上一个质量为  $m_2$  的4倍 ( $80\text{kg}$ ) 而速度为零的负载, 可以看到跟踪误差突然增大, 但很快被克服了, 甚至下降到  $10^{-5}\text{m}$  之下, 由此说明, 该算法有很强的克服负载扰动的能力。

图7与图8, 显示了滑动曲面  $s = (\dot{x} - \dot{x}_d) + A(x - x_d)$  之中的  $A$  矩阵对误差收敛速度的影响。图7中,  $m_1 = 90\text{kg}$ ,  $m_2 = 60\text{kg}$ 。跟踪速度  $4\text{m/s}$ , 采样频率  $10^4\text{Hz}$  (这样高的采样频率是不现实的, 本文为了提供一个理想的条件以突出  $A$  矩阵的影响), 取  $A$  的两个特征值都为 10, 此时误差收敛到  $10^{-3}\text{m}$  之下需要  $0.3\text{s}$ , 特征值增大到 50, 误差收敛到  $10^{-3}\text{m}$  之下, 需要  $0.1\text{s}$ 。可见,  $A$  矩阵越“大”, 误差收敛越快, 这点和理论上的预测是完全相符的。

## 四、结 论

本文提出的变结构控制策略的基本特点是:

(1) 该算法是面向直角坐标系的。由于将直角坐标系下的位置误差和速度误差直接引入控制回路, 可以更方便更有效地提高机器人的工作质量。

(2) 该算法对参数的变化范围几乎是没有限制的。

(3) 计算简单。由于求极值的复杂运算都在控制执行之前离线地完成了, 因而使在线的控制运算非常简单, 为在线实现提供了方便。为了说明这一点, 本文做一个比较, 分解运动控制对于一个六自由度的机器人, 在一个采样周期内要完成 3348 次乘法和 3118 次加法, 而本文提出的算法, 若不计雅可比矩阵的计算, 只需 552 次乘法和 534 次加法。而且由算法结构知, 该算法还可方便地分为五个并行的部分。

## 参 考 文 献

- [1] 李耀通, 韩 珂, 一种基于 Lyapunov 的机器人在直角坐标系下的轨线控制, 自动化学报, 17(1991), 1, 33-39.

- [2] Young, K-K. D, Controller Design for Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems, *IEEE Trans SMC.*, 8 (1978), 2.
- [3] Harashima, F., Hashimoto, H., Ishizu, K., Noninteracting Control of Robotic Manipulator with Sliding Mode, Proc. of IECON84, 1984, 399—404.
- [4] Harashima, F., Hashimoto, Marayama, K., Practical Robust Control of Robotic Arm Using Variable Structure System IEEE Conf. on Robotics and Automation, 1986.
- [5] Bailey, E., Araposlathis, A., Simple Sliding Mode Control Scheme Applied to Robotic Manipulator, *Int. J. Control*, 45(1987), (5).
- [6] Yeung, K. S., Chen, Y. P., A New Controller Design for Manipulators Using theory of Variable Structure Systems, *IEEE Trans. on Automatic Control*, 33(1988), (2).
- [7] Slotine, J. J. E., Li, W. P., On the Adaptive Control of Robot Manipulators, *The International Journal of Robotics Research*, 6(1987), (3).
- [8] Vadim I. Utkin, Variable Structure Systems with Sliding Modes, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 22(1977).
- [9] DeCarlo, R. A., Zak, S. H., Matthews, G. P., Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial, Proc. of the IEEE, 76(3) March, 1988.

## A VARIABLE STRUCTURE CONTROL SCHEME FOR ROBOT CARTESIAN TRACKING

HAN KE LI YAOTONG

(Institute of Automation, Academia Sinica P. O. Box 2728, Beijing, China 100080)

### ABSTRACT

This paper proposes a variable structure control scheme for robot tracking control in the operational space. The control algorithm of the proposed scheme does not require the conventional coordinate transformation from the Cartesian space to the joint space as the joint torques are computed directly upon the desired trajectories specified in the operational space so that it is time efficient and not prone to the singularity problem. The fundamental idea of this paper is to find a simple swithing law that can be predetermined according to the bounds of the parameter uncertainties off-line, and execute the law on-line to achieve a real time variable structure control.

**Key words:** Robot; variable structure control; operational space; real time.





**韩 珂** 1965 年生于沈阳。1987 年 7 月毕业于中国科学技术大学系统与管理科学系，获工学学士，1990 年 5 月毕业于中国科学院自动化研究所，获工学硕士，现在美国加州大学戴维斯攻读博士学位。



**李耀通** 1943 年生于北京。1967 年毕业于清华大学自动控制系，1981 年获核工业部西南物理研究院硕士，1986 年获美国威斯康辛大学博士。现任中国科学院自动化所副研究员。主要研究工作在机器人和非线性系统控制等领域。