

# 受限柔性机器人臂的鲁棒变结构 混合位置/力控制<sup>1)</sup>

樊晓平

(长沙铁道学院信息与控制工程研究所 长沙 410075)

(E-mail: xpfan@csru.edu.cn)

徐建闽 毛宗源 周其节

(华南理工大学自动控制工程系 广州 510641)

**摘要** 针对一类平面双连杆受限柔性机器人臂提出一种混合位置/力控制方案,采用鲁棒变结构控制策略对控制方案进行修正,以改善该柔性机器人系统的鲁棒性,控制机器人终端执行器的位置和接触力.通过引入变结构鲁棒控制器,可确保输出跟踪误差在有限时间内收敛到零,或一致终结有界.计算机仿真结果证明了这种控制方案的可行性和有效性.

**关键词** 柔性机器人臂,受限运动,混合位置/力控制,鲁棒性,变结构控制.

## ROBUST VARIABLE STRUCTURE HYBRID POSITION FORCE CONTROL FOR CONSTRAINED FLEXIBLE-LINK MANIPULATORS

FAN Xiaoping

(Institute of Information and Control Engineering, Changsha Railway University, Changsha 410075)

(E-mail: xpfan@csru.edu.cn)

XU Jianmin MAO Zongyuan ZHOU Qijie

(Dept. of Automatic Control Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

**Abstract** In this paper, a hybrid position/force control scheme is presented for a class of planar two-link constrained flexible manipulators to control the tip position and contact force of the end-effector. In order to enhance the controller's robustness, the scheme is revised by introducing a variable structure control strategy, which can guarantee the convergence of the output tracking error in a finite period of time or the uniformly ultimately bounded tracking errors. Computer simulation results show the feasibility and effectiveness of the control scheme.

1) 国家自然科学基金(69406004,69975003)和湖南省自然科学基金(98JJY2044)资助项目.

收稿日期 1998-02-23 收修改稿日期 1999-05-21

**Key words** Flexible-link manipulators, constrained motion, hybrid position/force control, robustness, variable structure control.

## 1 引言

近十几年来,随着机械制造、航空航天、国防等应用领域对控制对象的控制效果要求越来越高,人们逐渐认识到具有高速、低耗、质轻、灵便等特点的柔性机器人具有特别的优越性,因而对其建模与控制问题的研究,便形成了一个新的热点<sup>[1,2]</sup>.但是,目前这方面的研究工作多集中在末端自由运动的柔性机器人上.当机器人终端执行器要求沿着某一预先设定的轨道运行时,所对应的受限运动控制问题则相对研究得较少.

受限柔性机器人的运动控制包含两方面的内容:机器人终端执行器的末端位置控制和终端执行器与约束面之间的接触力控制.一般而言,位置控制较容易实现,如采用传统的独立关节 PD 控制等<sup>[1]</sup>;接触力控制则相对较难.目前已有学者针对混合位置/力控制问题进行研究<sup>[3,4]</sup>,但系统鲁棒性较差.为克服受限柔性机器人的动力学建模过程中不可避免的建模误差或不确定性(如外部扰动、参数和结构摄动、零动力学、未建模动力学等)的影响,在对其进行控制时,必须恰当设计控制器,使系统各种性态都具有较好的鲁棒性.一种行之有效的鲁棒控制方案是采用变结构或滑动模控制,这种控制方法在刚性机器人的控制中已获得成功应用,但对于受限柔性机器人的控制,其应用尚不多见.本文试图利用这种鲁棒控制方法,基于文献[5,6]所建立的受限柔性机器人臂简化动力学模型,开展混合位置/力控制研究,以提高系统的鲁棒性.

## 2 受限柔性机器人臂动力学模型

考虑图1所示,在水平面上由两台电机驱动的双自由度柔性机器人臂,其中连杆1假设为刚性的,由电机1的转子驱动,连杆长度为  $L_1$ , 惯性矩为  $J_1$ ; 连杆2假设为柔性杆,由固连在连杆1末端的电机2的转子驱动,其连杆长度为  $L_2$ , 惯性矩为  $J_2$ . 同时假设连杆1和连杆2单位长度的均匀质量密度分别为  $\rho_1, \rho_2$ , 柔性前臂的均匀柔性刚度为  $EI$ , 连杆2的末端有一个集中质量  $M_2$ , 且始终在约束面上移动. 忽略连杆2末端(即机器人终端执行器)与约束面之间的摩擦. 机器人终端执行器要求始终在约束面  $\Phi(X, Y) = 0$  上移动.

由于连杆1假设为刚性杆,故不会产生任何变形. 连杆2是柔性杆,在运行过程中则要发生变形. 设  $\theta_1$  为连杆1的实际关节角,  $\theta_2$  是连杆2的虚拟关节角,即对应刚性机器人臂的实际关节角,  $w(x_2, t)$  为连杆2在时刻  $t$  和空间坐标  $x_2$  点处 ( $0 \leq x_2 \leq L_2$ ) 的横向(挠曲)变形(见图1). 此时,约束方程式变为:  $\Phi(\theta_1, \theta_2) = 0$ .

由文献[5]知,该刚性-柔性机器人系统关节角  $\theta = [\theta_1 \quad \theta_2]^T$  的运动方程和广义坐标  $q$

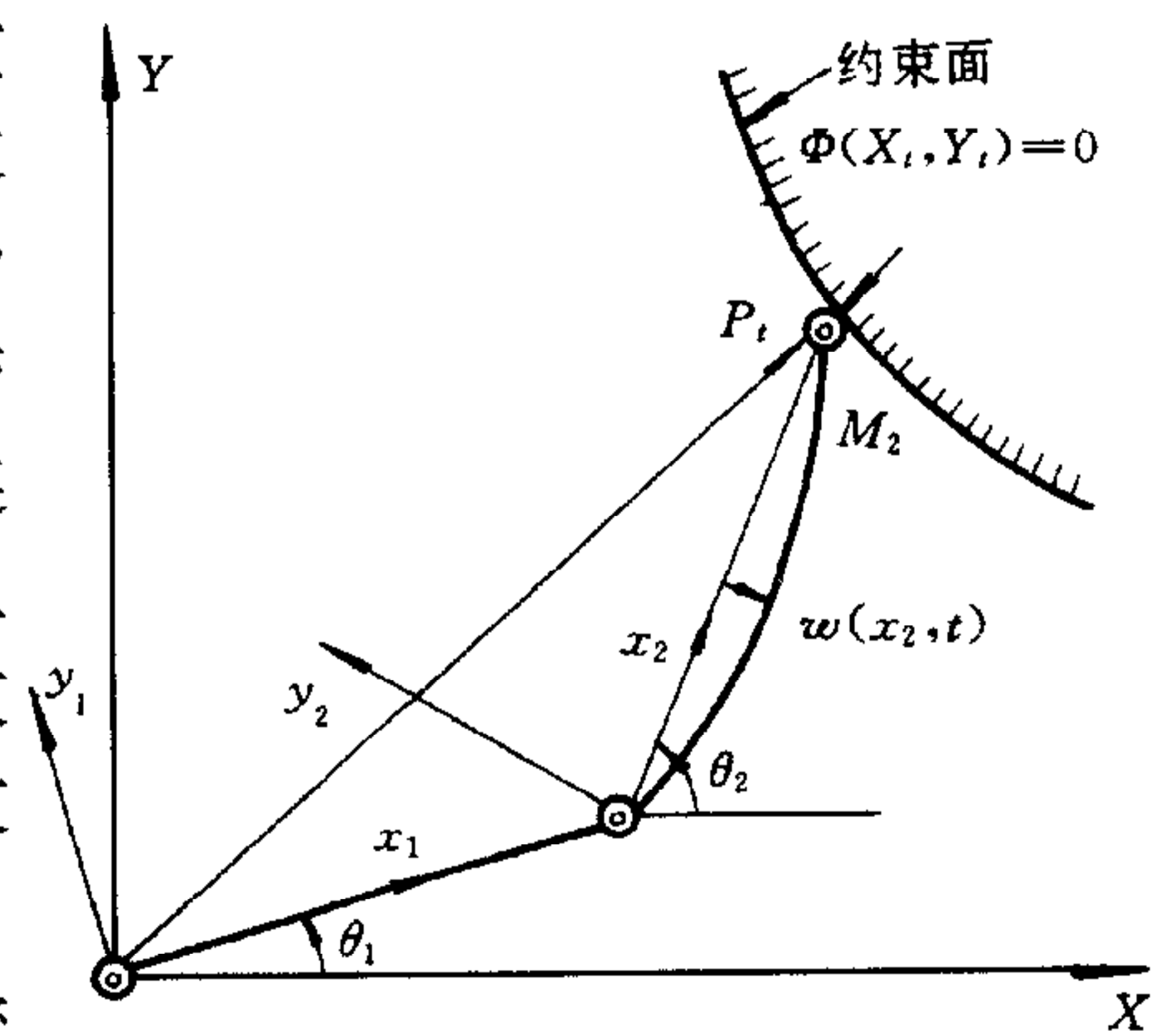


图1 平面双自由度柔性机器人臂结构

$= [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$  所隐含的柔性连杆的振动方程可以写成如下向量-矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} M_{11}(\theta, q) & M_{12}(\theta, q) \\ M_{21}(\theta, q) & M_{22}(\theta, q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11}(\theta, \dot{\theta}, q, \dot{q}) & D_{12}(\theta, \dot{\theta}, q, \dot{q}) \\ D_{21}(\theta, \dot{\theta}, q, \dot{q}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1(\theta, q) \\ g_2(\theta, q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中各分量的具体构成见文献[5].

经过整理和简化,该机器人臂的简化动力学模型最终可表达为<sup>[6]</sup>

$$E_1^T \tilde{M} E_1 \ddot{v}_1 + E_1^T \tilde{C} = E_1^T T^T \tau, \quad (2)$$

$$E_2^T \tilde{M} E_1 \ddot{v}_1 + E_2^T \tilde{C} = E_2^T T^T \tau + E_2^T T^T \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \lambda, \quad (3)$$

$$M_{22}(v, q) \ddot{q} + h(v, q, \dot{v}, \dot{q}) = -N(v, q) \left( \tau + \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right), \quad (4)$$

式中  $E_1 = [1 \ 0]^T$ ,  $E_2 = [0 \ 1]^T$ ,  $v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 - \Omega(\theta_1) \end{bmatrix} = \Psi(\theta)$ ,  $\theta_2 = \Omega(\theta_1)$  是由约束方程式引出的隐函数方程,其他各分量的含义见文献[6]. 其中(2)式中  $\left( E_1^T T^T \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \lambda \right)$  易证为零.

对于(2),(3)两式,可以有如下解释<sup>[7]</sup>:微分方程(2)描述了机器人系统在约束流形上的运动,而(3)式可视为一个代数方程,表示受限约束力与机器人臂在约束流形上的运动之间的关系.

因为轴向力  $Q(t)$  可以利用安装在柔性连杆末端的力传感器进行测量,所以 Lagrange 乘子  $\lambda$  可以由下式求得:

$$\lambda = - \frac{Q(t)}{\left( \frac{\partial \Phi}{\partial X_t} \cos \theta_2 + \frac{\partial \Phi}{\partial Y_t} \sin \theta_2 \right)}. \quad (5)$$

令  $f_n^d$  为希望的接触力,  $\lambda^d$  为对应于理想接触力  $f_n^d$  的 Lagrange 乘子. 于是,由(5)式有

$$\lambda^d = - \frac{f_n^d}{\left( \frac{\partial \Phi(\theta_1^d, \theta_2^d)}{\partial X_t} \cos \theta_2^d + \frac{\partial \Phi(\theta_1^d, \theta_2^d)}{\partial Y_t} \sin \theta_2^d \right)}. \quad (6)$$

显然,若能恰当选择控制律使得  $\theta_1 \rightarrow \theta_1^d$ ,  $\theta_2 \rightarrow \theta_2^d$ ,  $\lambda \rightarrow \lambda^d$  则必有  $f_n \rightarrow f_n^d$ . 这就意味着若输入力矩能使机器人关节角控制到希望位置,且使 Lagrange 乘子等于希望值时,则将同时实现对接触力的控制,也就是说,可以实现混合位置/力控制.

### 3 混合位置/力控制器设计

可以看到,简化模型中的(2)式仅与系统输出位置有关,(3)式则还同时与机器人系统末端的接触力有关. 因此,可以设计一个混合位置/力控制器,以同时实现对该受限柔性机器人末端的位置与接触力的控制. 为此,可将控制力矩设计为

$$\tau = (T^T)^{-1} [\tilde{M} E_1 \{ \ddot{v}_1^d - K_v (\dot{v}_1 - \dot{v}_1^d) - K_p (v_1 - v_1^d) \} + \tilde{C} -$$

$$T^T \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \lambda^d + E_2 K_f E_2^T T^T \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} (\lambda - \lambda^d)], \quad (7)$$

式中  $v_1^d (= \theta_1^d)$  是电机1的期望转角,  $\lambda^d$  是与期望接触力相对应的期望 Lagrange 乘子,  $K_v$ ,  $K_p$  是正常数,  $K_f \neq 1$  是力反馈增益. 将(7)式的控制力矩代入系统方程(2)、(3), 便得到如下闭环系统:

$$\tilde{m}_{11} \{\ddot{v}_1 - \ddot{v}_1^d + K_v(\dot{v}_1 - \dot{v}_1^d) + K_p(v_1 - v_1^d)\} = 0, \quad (8)$$

$$\tilde{m}_{21} \{\ddot{v}_1 - \ddot{v}_1^d + K_v(\dot{v}_1 - \dot{v}_1^d) + K_p(v_1 - v_1^d)\} = (1 + K_f) \frac{\partial \Phi}{\partial \theta_2} (\lambda - \lambda^d). \quad (9)$$

显然, 由(8), (9)二式及约束条件和  $\theta_1 \rightarrow \theta_1^d$ , 有

$$v_1 \rightarrow v_1^d(\theta_1 \rightarrow \theta_1^d), \quad \lambda = \lambda^d, \quad \theta_2 \rightarrow \theta_2^d. \quad (10)$$

以上分析表明, 利用控制律(7)即可实现对所论受限柔性机器人臂的混合位置/力控制. 相应的广义坐标则可由(4)式解出.

期望转角  $\theta_1^d$  可在每个采样周期进行计算. 设柔性机器人臂末端位置为  $(X_d, Y_d)^T$ , 则容易求得

$$X_d \cos \theta_1^d + Y_d \sin \theta_1^d = \frac{L_1^2 + X_d^2 + Y_d^2 - L_2^2}{2L_1}. \quad (11)$$

而期望转角  $\theta_2^d$  和期望 Lagrange 乘子  $\lambda^d$  则可分别由约束方程式和(6)式求出.

## 4 修正的变结构鲁棒控制器设计

当考虑到受限柔性机器人臂动力学模型中可能存在外部干扰以及未建模动力学等不确定性因素时, 系统动力学模型可以重写为

$$E_1^T \tilde{M} E_1 \ddot{v}_1 + E_1^T \tilde{C} = E_1^T T^T (\tau + f), \quad (12)$$

$$E_2^T \tilde{M} E_1 \ddot{v}_1 + E_2^T \tilde{C} = E_2^T T^T (\tau + f) + E_2^T T^T \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \lambda, \quad (13)$$

式中  $f \in R^2$  代表外部干扰以及未建模动力学等不确定性项.

取控制输入为

$$\tau = \tau_0 + \tau_c, \quad (14)$$

式中  $\tau_0$  为设计的混合控制策略, 即

$$\begin{aligned} \tau_0 = & (T^T)^{-1} [\tilde{M} E_1 \{\ddot{v}_1^d - K_v(\dot{v}_1 - \dot{v}_1^d) - K_p(v_1 - v_1^d)\} + \tilde{C} - \\ & T^T \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \lambda^d + E_2 K_f E_2^T T^T \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} (\lambda - \lambda^d)], \end{aligned} \quad (15)$$

而  $\tau_c$  为本节将要讨论的修正的鲁棒控制策略.

将(14), (15)式分别代入(12), (13)式, 有

$$E_1^T \tilde{M} E_1 \{\ddot{v}_1 - \ddot{v}_1^d + K_v(\dot{v}_1 - \dot{v}_1^d) + K_p(v_1 - v_1^d)\} = E_1^T T^T (\tau_c + f), \quad (16)$$

$$\begin{aligned} E_2^T \tilde{M} E_1 \{\ddot{v}_1 - \ddot{v}_1^d + K_v(\dot{v}_1 - \dot{v}_1^d) + K_p(v_1 - v_1^d)\} = & E_2^T T^T (\tau_c + f) + \\ & (1 + K_f) E_2^T T^T \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} (\lambda - \lambda^d). \end{aligned} \quad (17)$$

因为  $(E_1^T \tilde{M} E_1)$  是非奇异的, 在(16)式两端均左乘  $(E_1^T \tilde{M} E_1)^{-1}$ , 便有

$$\ddot{v}_1 - \ddot{v}_1^d + K_v(\dot{v}_1 - \dot{v}_1^d) + K_p(v_1 - v_1^d) = (E_1^T \tilde{M} E_1)^{-1} E_1^T T^T (\tau_c + f). \quad (18)$$

令  $e_1 = v_1 - v_1^d, e_2 = \dot{v}_1 - \dot{v}_1^d$ , 则(18)式可写成

$$\dot{e} = Ae + b(\tilde{\tau}_c + \tilde{f}), \quad (19)$$

式中  $e = [e_1 \ e_2]^T$  是误差向量,  $\tilde{\tau}_c = E_1^T T^T \tau_c$  是等效控制力矩,  $\tilde{f} = E_1^T T^T f$  是等效不确定性项;  $A, b$  分别是系统矩阵和控制向量, 其具体构成如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K_p & -K_v \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ (E_1^T \tilde{M} E_1)^{-1} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

显然, 系统矩阵  $A$  是 Hurwitz 的.

利用变结构控制方法来讨论控制策略  $\tau_c$  的设计问题. 设计一个变结构或滑动模控制器的本质就是在误差状态空间上选择一个滑动面, 并设计相应的鲁棒控制器使得系统误差在有限时间内收敛. 为此, 定义切换面或滑动面为

$$s(t) = K_e e_1^\delta + e_2, \quad K_e > 0, \quad (21)$$

式中  $\delta = \delta_1 / \delta_2$ , 其中  $\delta_2$  可以选作任何奇正整数,  $\delta_1$  则可是满足  $0 < \delta_1 < \delta_2$  的任何整数. 若通过设计控制器能使得  $s(t)$  收敛到零, 就说切换面变量  $s(t)$  到达滑动模

$$K_e e_1^\delta + \dot{e}_1 = 0. \quad (22)$$

容易证明  $0 < \delta < 1$ , 且对于所有有界初始条件, 跟踪误差  $e_1$  能够在有限时间内在滑动模上收敛到零. 令  $e_1$  在  $t=0$  时刻的初始值为  $e_1(0)$ , 于是, 系统(22)的一个解的持续时间  $\hat{t}$  可以求得为

$$\hat{t} = \lim_{e_1 \rightarrow 0} K_e^{-1} \int_{e_1(0)}^{e_1} \frac{1}{e_1^\delta} de_1 = \frac{1}{K_e(1-\delta)} e_1^{1-\delta}(0). \quad (23)$$

式(23)也意味着输出误差能够在有限时间内在端点滑动模上收敛到零.

为分析方便, 不失一般性, 假设(19)式中的不确定性项  $\tilde{f}$  具有如下已知的不确定边界:

$$|\tilde{f}| \leq a_2 \|e\|^2 + a_1 \|e\| + a_0, \quad (24)$$

式中  $a_k > 0 (k=0, 1, 2)$ .

**定理1.** 考察(19)式的误差动力学方程及其假设(24). 如果设计修正的控制输入  $\tilde{\tau}_c$ , 使得

$$\tilde{\tau}_c(e_1, t) = \begin{cases} -\frac{s(t)}{|s(t)|} \rho(t), & |s(t)| \neq 0; \\ 0, & |s(t)| = 0; \end{cases} \quad (25)$$

成立, 式中

$$\rho(t) = E_1^T \tilde{M} E_1 \{K_p |e_1| + K_v |e_2| + K_e \delta |e_2| \cdot |e_1|^{\delta-1}\} + a_2 \|e\|^2 + a_1 \|e\| + a_0, \quad (26)$$

则输出跟踪误差  $e_1$  在有限时间内收敛到零.

证明. 取候选的 Lyapunov 函数为  $V = \frac{1}{2} s^2(t)$ . 于是, 有

$$\dot{V} = s\dot{s} = s[-K_p e_1 - K_v e_2 + K_e \delta e_1^{\delta-1} e_2 + (E_1^T \tilde{M} E_1)^{-1}(\tilde{\tau}_c + \tilde{f})]. \quad (27)$$

利用控制律(25), 式(27)可以重写为

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -[|s|(K_p |e_1| + K_v |e_2|) + s(K_p e_1 + K_v e_2)] - \\ & [|s|K_e \delta |e_2| \cdot |e_1|^{\delta-1} - sK_e \delta e_1^{\delta-1} e_2] - \\ & [|s|(E_1^T \tilde{M} E_1)^{-1}(a_2 \|e\|^2 + a_1 \|e\| + a_0) - s(E_1^T \tilde{M} E_1)^{-1} \tilde{f}] \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - [ |s| (E_1^T \tilde{M} E_1)^{-1} (a_2 \|e\|^2 + a_1 \|e\| + a_0) - s (E_1^T \tilde{M} E_1)^{-1} \tilde{f} ] = \\ & - \xi(t) (E_1^T \tilde{M} E_1)^{-1} |s|, \end{aligned} \quad (28)$$

式中

$$\xi(t) = (a_2 \|e\| + a_1 \|e\| + a_0) - \frac{s}{|s|} \tilde{f} > 0, \quad |s| \neq 0. \quad (29)$$

因为  $(E_1^T \tilde{M} E_1)$  是正定的, 于是

$$\dot{V} \leq - \xi(t) (E_1^T \tilde{M} E_1)^{-1} |s| < 0, \quad |s| \neq 0. \quad (30)$$

恰当地选择边界参数使得  $a_k > 0 (k=0, 1, 2)$  且使  $\xi(t)$  大于某一正数, 这样, (30) 式就意味着切换面  $s(t)$  在有限时间内收敛到零, 亦即输出跟踪误差在有限时间内收敛到零 (参见 (23) 式).

由于控制律 (25) 在穿越滑动面  $s(t)=0$  时是不连续的, 因而容易激发不希望的高频动力学, 引起抖振. 为了消除抖振影响, 采用如下边界层控制律加以改进:

$$\tilde{\tau}_c(e_1, t) = \begin{cases} - \frac{s(t)}{|s(t)|} \rho(t), & |s(t)| \geq \sigma; \\ - \frac{s(t)}{\sigma} \rho(t), & |s(t)| < \sigma. \end{cases} \quad (31)$$

其中  $\sigma > 0$  为边界层宽度. 在后面的仿真计算中将会看到, 适当地选取  $\sigma$ , 既能保证较高的控制精度, 又能得到光滑的控制力矩.

**定理 2.** 如果修正的鲁棒控制输入  $\tilde{\tau}_c$  取为 (31) 式的形式, 则系统 (21) 的解  $e(t)$  一致终结有界 (Uniformly Ultimately Bounded).

证明. 类似于定理 1 的证明, 并参照一致终结有界的定义, 该定理容易得证. (限于篇幅, 此处从略.)

上面得到的只是修正的鲁棒控制输入  $\tilde{\tau}_c$ , 实际修正控制输入  $\tau_c$  与  $\tilde{\tau}_c$  之间满足非线性关系

$$\tilde{\tau}_c = E_1^T T^T \tau_c \quad \text{或} \quad \tau_{1c} + \frac{d\Omega}{d\theta_1} \tau_{2c} = \tilde{\tau}_c. \quad (32)$$

因此, 只要选择实际修正控制力矩  $\tau_{1c}$  和  $\tau_{2c}$  (即  $\tau_c$ ) 使之满足 (32) 式, 再加上上一小节讨论的混合位置/力控制策略  $\tau_0$ , 即构成变结构混合位置/力控制器的控制信号  $\tau$  (见 (14) 式), 从而实现对所论受限柔性机器人臂的鲁棒性变结构运动控制.

基于上一节类似的分析, 可以证明, 在本节设计的修正的鲁棒控制策略作用下, 同样有

$$\theta_1 \rightarrow \theta_1^d, \quad \theta_2 \rightarrow \theta_2^d, \quad \lambda_1 \rightarrow \lambda^d. \quad (33)$$

即同时完成对柔性机器人终端执行器的末端位置和接触力的控制作用, 而柔性连杆的振动则仍由 (4) 式所刻划.

## 5 计算机仿真

考虑一台双连杆受限柔性机器人臂, 其结构参数如表 1 所示. 要求该机器人的终端执行器

表 1 双连杆受限柔性机器人臂参数

参 数	连杆 1	连杆 2
杆 长	$L_1=1.2\text{m}$	$L_2=2.0\text{m}$
转动惯量	$J_1=1.0\text{kgm}^2$	$J_2=0.1\text{kgm}^2$
质量密度	$\rho_1=2.0\text{kg/m}$	$\rho_2=1.0\text{kg/m}$
连杆刚度		$EI=4.91\text{kgm}^2$
集中质量		$M_2=0.5\text{kg}$

在约束面上以希望速度沿预定轨道运行,且沿约束表面法线方向接触力保持为希望值.

设约束面为一条直线  $Y=AX+B$ , 式中  $A, B$  是给定常数. 如此选定的约束方程可以避免出现奇异结构. 在实际仿真中, 取  $A=-1, B=3$ . 于是, 对应的约束条件变为

$$\Phi(\theta_1, \theta_2) = 1.2(\sin\theta_1 + \cos\theta_1) + 2.0(\sin\theta_2 + \cos\theta_2) - 3.0 = 0. \quad (34)$$

从中容易得到约束方程式所对应的隐函数关系  $\theta_2 = \Omega(\theta_1)$ , 其中  $\theta_1 \in (-0.684, 2.255)$ .

假设要求机器人系统终端执行器与约束面之间的接触力为  $f_n^d = 5N$ . 于是, 从(6)式可容易地求得系统的期望 Lagrange 算子  $\lambda^d$ . 取柔性连杆弹性变形的截断项数为  $n=2$ . 于是, 利用上述模型参数和前述控制算法, 采用 MATLAB<sup>®</sup>进行编程对系统进行计算机仿真计算, 分别得到该机器人系统的实际输出位置与接触力响应曲线, 如图2, 3所示. 当引入 0.1 的边界层时, 输出位置曲线和实际接触力曲线将大为改善, 可抑制和减弱因控制信号断续所引起的抖振现象.

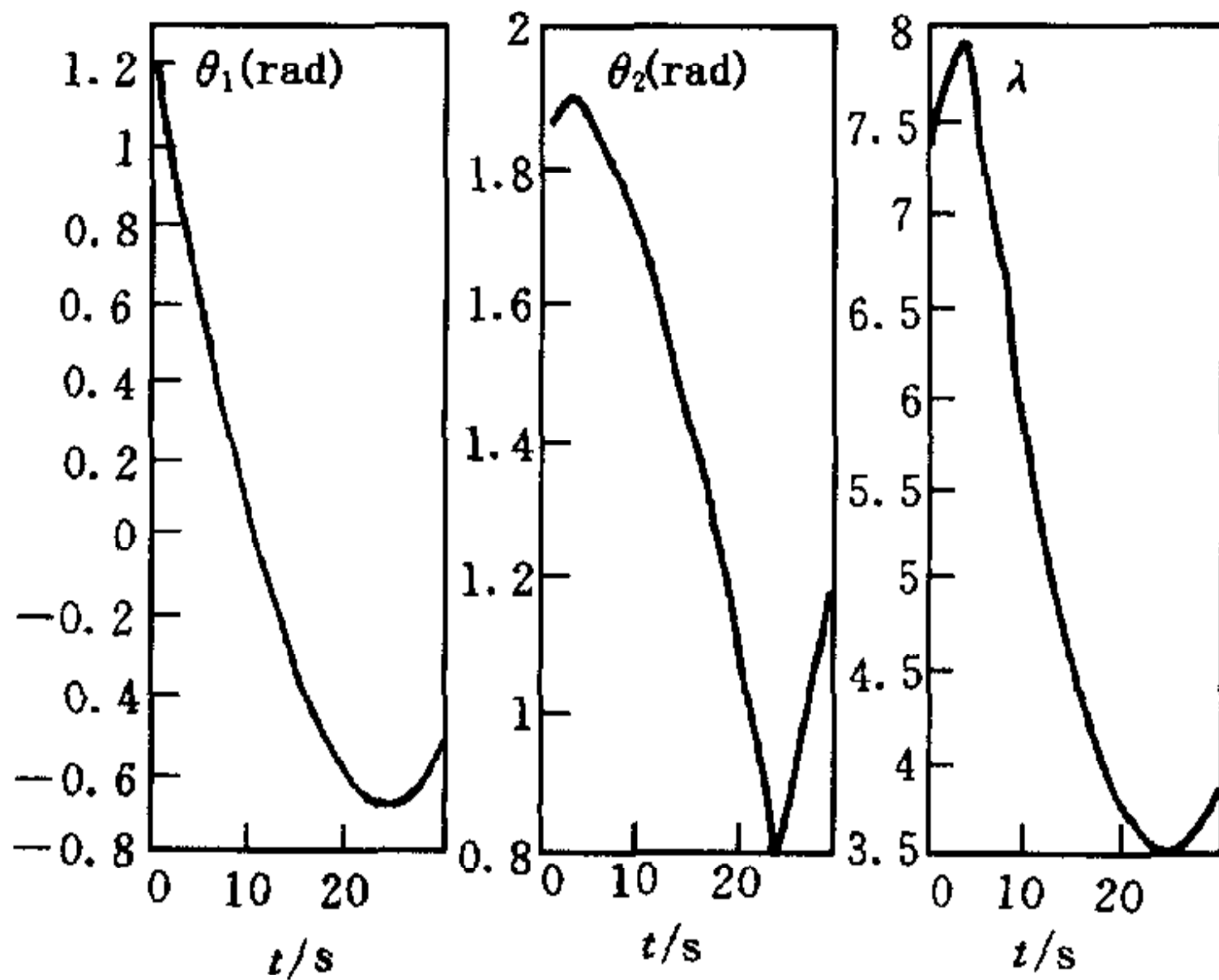


图2 柔性机器人臂实际输出转角  
与 Lagrange 算子

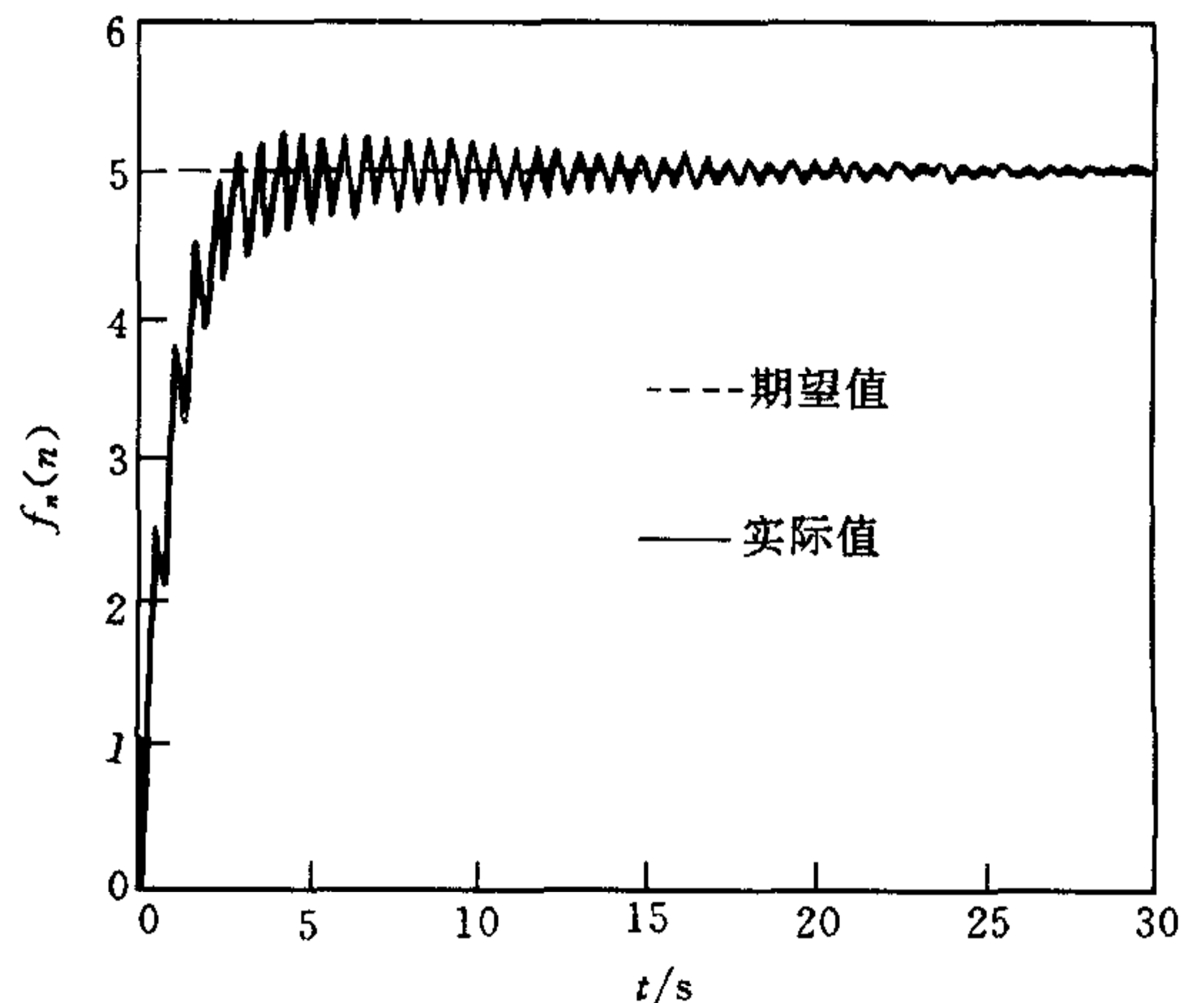


图3 柔性机器人臂末端  
实际接触力  $f_n$

## 6 结 论

本文基于文献[5,6]建立的受限柔性机器人臂简化动力学模型, 首先提出了受限柔性机器人混合位置/力控制算法. 考虑到实际机器人系统中不可避免地会存在一些诸如外部扰动、参数摄动、未建模动力学等不确定性因素, 上述混合控制策略具体实现时也将引入误差等, 作者利用变结构滑动模控制方法对前述混合位置/力控制算法进行了修正. 结果表明, 在一定条件下, 按照文中设计的变结构控制策略, 机器人系统的跟踪误差将在有限时间内收敛到零. 对于滑动模切换时的高频抖振问题, 则采用边界层方法予以克服和消除. 计算机仿真结果说明了文中理论结果的正确性和可行性.

## 参 考 文 献

- 1 樊晓平, 徐建闽, 周其节, 梁天培. 柔性机器人的动力学建模与运动控制. 控制理论与应用, 1997, **14**(3): 318~329
- 2 Book W J. Modeling, Design, and control of flexible manipulator arms: A tutorial review. In: Proc. of the 29th IEEE Conf. on Decision and Control, 1990, 500~506
- 3 Matsuno F, Yamamoto K. Dynamic hybrid position/force control of a two degree-of-freedom flexible manipulator. *J. Robotic Systems*, 1994, **11**(5): 355~366
- 4 Matsuno F, Asano T, Sakawa Y. Modeling and quasi-static hybrid position/force control of constrained planar two-link flexible manipulators. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1994, **10**(3): 287~297
- 5 樊晓平, 颜全胜, 徐建闽, 毛宗源, 周其节. 平面双连杆受限柔性机器人臂的动力学建模. 控制理论与应用, 1998, **15**(6): 933~938
- 6 樊晓平, 徐建闽, 毛宗源, 周其节. 平面双连杆受限柔性机器人臂的模型简化及其控制. 高技术通讯, 1998, **8**(10): 15~20
- 7 蔡刚强. 受限机器人的力-位置控制 [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学自动化系, 1993

**樊晓平** 1961年生. 1982年1月、1984年9月和1998年3月分获工学学士、硕士和博士学位. 1995年12月至1996年12月在香港理工大学机械工程学系作访问研究. 现为长沙铁道学院教务处处长、信息与控制工程研究所所长、教授, 铁道部青年科技拔尖人才. 目前的研究领域为智能控制、柔性机器人建模和运动控制、CIMS 等.

**徐建闽** 1960年生. 1982年1月在江西工学院电机工程系获工学学士学位, 1988年和1994年分别在华南理工大学自动化系获工学硕士和博士学位. 现任华南理工大学科研处处长、教授、博士生导师. 主要研究领域为自适应控制、鲁棒控制、智能控制、现代交通工程、CIMS、机器人控制等.

**毛宗源** 1936年生. 1962年大连工学院船厂船舶电气自动化专业毕业. 现为华南理工大学自动控制工程系教授、博士生导师. 主要研究领域为工业自动化、模糊控制、神经网络、智能控制等.

**周其节** 1930年生. 1955年哈尔滨工业大学研究生毕业. 现为华南理工大学自动控制工程系教授、博士生导师. 主要研究领域为非线性系统理论、自适应控制、变结构控制、小波分析、机器人控制等.