文章编号: 1000−8152(2009)07−0722−05

# 基于鲁棒滑模观测器的两关节柔性机械手控制

张袅娜[1,2], 张德江[1], 尤　文[1]

(1. 长春工业大学 自动化系, 吉林 长春 130012; 2. 吉林大学 汽车工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要**: 柔性机械手系统为非最小相位系统, 当控制有界时, 该特性阻碍其端点位移渐近跟踪期望轨迹. 本文首先重新定义柔性机械手系统的输出, 通过输入输出线性化, 将系统分解为输入输出子系统和零动态子系统; 然后提出一种用于观测柔性模态导数的鲁棒滑模观测器, 使状态估计达到预期的指标, 解决了柔性模态导数难以获得的问题; 设计积分滑模控制策略, 使输入输出子系统在有限时间收敛到零; 选择适当的控制器参数, 使零动态子系统在平衡点附近渐近稳定, 从而保证整个系统的渐近稳定. 本文提出的方法设计过程简单, 易于实现. 仿真结果证明了设计的有效性.

**关键词**: 观测器; 柔性机械手; 积分滑模
**中图分类号**: TP24　　　**文献标识码**: A

# Control for a two-link flexible manipulator based on the robust sliding-mode observer

ZHANG Niao-na[1,2], ZHANG De-jiang[1], YOU Wen[1]

(1. Department of Automation, Changchun University of Technology, Changchun Jilin 130012, China;
2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130012, China)

**Abstract:** Flexible manipulators system is a nonminimum-phase system. This characteristic hinders the asymptotic tracking of a desired tip trajectory with a bounded control input. The outputs of a a two-link flexible manipulator are redefined in dealing with this problem. First, the system is decomposed into input-output subsystem and zero dynamics systems by employing the input-output linearization, and then, a robust sliding mode observer is developed for generating the unmeasured derivative of the flexible modes. An integral sliding-mode control strategy is designed for the input-output subsystem to make them converge in a finite time. Moreover, the zero dynamics system can be asymptotically stable at the equilibrium point by properly adjusting controller parameters. Thus, the whole control system for the two-link flexible manipulator is guaranteed to be asymptotically stable. Furthermore, the control design procedure is simple and easy to be implemented. Simulation results validate the design.

**Key words:** observer; flexible link manipulator; integral sliding mode

## 1　引言(Introduction)

柔性机械手以其高负载/自重比, 低能耗, 高速, 适用于直接驱动模式等优点使其在机器人的应用领域极具吸引力. 但柔性机械手系统是强耦合、非线性、时变、多输入多输出的分布参数系统, 且本身固有振动特性, 动力学行为非常复杂. 因此对控制器的设计提出了很高的要求[1~3].

根据近来有研究人员提出的一种重新定义输出的解决方法[3~5], 本文采用关节电机转角和柔性模态变量的线性组合作为柔性机械手系统的输出, 通过输入输出线性化, 将系统分解为输入输出子系统和零动态子系统两部分; 然后设计积分滑模控制器, 使得输入输出子系统有限时间收敛, 并选择控制器参数, 使柔性机械手系统的零动态子系统在平衡点附近渐进稳定, 从而保证整个柔性机械手系统的渐近稳定. 由于柔性模态导数的获得一直是个难点[6~8], 本文提出一种用于观测柔性模态导数的鲁棒滑模观测器, 通过设计滑模, 可以调整观测器跟踪系统状态的收敛速度, 使状态估计达到预期的指标; 本文所提控制方法设计过程简单, 易于实现, 并且重新定义的系统输出中的设计参数多, 使得保证零动态子系统稳定的设计参数选择余地增大.

收稿日期: 2008−05−30; 收修改稿日期: 2008−10−14.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60474016).

## 2　双臂柔性机械手的动力学模型(Dynamic model of two-link flexible manipulators )

采用文献[9]推导出的双臂柔性机械手动力学模型. 该模型如图1所示. $OX_0Y_0$为固定的参考坐标, $OX_1Y_1$和$O'X_2Y_2$为分别绕中心$O$和$O'$旋转的局部坐标.

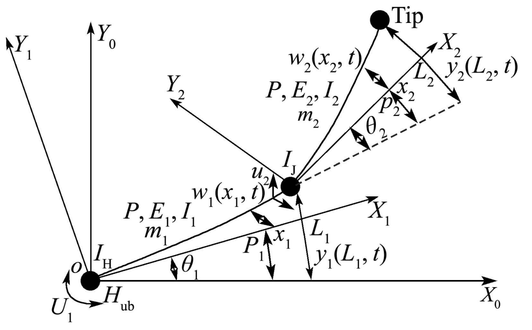


图 1　双臂柔性机械手模型示意图

Fig. 1　A two-link flexible manipulators

双臂柔性机械手的动力学方程简述如下[10]:

$$M(\theta,q)\begin{bmatrix}\ddot{\theta}\\ \ddot{q}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}f_{\mathrm r}+E_1\dot{\theta}\\ f_{\mathrm f}+Kq+E_2\dot{q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}I\\ 0\end{bmatrix}u(t).\quad(1)$$

其中: $\theta\in\mathbb{R}^2$为关节电机转角向量, $q\in\mathbb{R}^{2r}$为柔性模态向量, $u\in\mathbb{R}^2$为控制转矩向量, $f_{\mathrm r}\in\mathbb{R}^2$和$f_{\mathrm f}\in\mathbb{R}^{2r}$分别受重力、哥氏力和离心力影响的项, $E_1\in\mathbb{R}^{2\times2}$, $E_2\in\mathbb{R}^{2r\times2r}$分别为正定阻尼矩阵, $K\in\mathbb{R}^{2r\times2r}$为正定刚度矩阵, $M\in\mathbb{R}^{2(r+1)\times2(r+1)}$为正定惯量矩阵.

柔性机械手的端点位移为

$$y=L\theta+\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{q}.\quad(2)$$

式中: $L=\mathrm{diag}\{L_1,L_2\}$, $L_1,L_2$为两关节机械臂长度, $\boldsymbol{\Phi}\in\mathbb{R}^{2\times2r}$为模形函数矩阵.

首先定义矩阵$N(\theta,q)$如下:

$$N(\theta,q)=M^{-1}(\theta,q)=[N_{11},N_{12};N_{21},N_{22}].$$

定义系统状态变量为

$$x=[\theta,q,\dot{\theta},\dot{q}]^{\mathrm T}.$$

将柔性机械手系统方程(1)重新写为如下形式:

$$\dot{x}=f(x)+g(x)u,\quad(3)$$

$$f(x)=\begin{bmatrix}\dot{\theta}\\ \dot{q}\\ -N_{11}(f_{\mathrm r}+E_1\dot{\theta})-N_{12}(f_{\mathrm f}+Kq+E_2\dot{q})\\ -N_{21}(f_{\mathrm r}+E_1\dot{\theta})-N_{22}(f_{\mathrm f}+Kq+E_2\dot{q})\end{bmatrix},$$

$$g(x)=[0;0;N_{11}(\theta,q);N_{21}(\theta,q)].$$

重新定义柔性机械手系统的输出$z(t)$如下:

$$z(t)=\lambda_0\theta(t)+\lambda_1 q(t)=g_1^{\mathrm T}x(t).\quad(4)$$

式中: $g_1^{\mathrm T}=[\lambda_0,\lambda_1,0,0]$, 设计参数$\lambda_0$和$\lambda_1$分别为$2\times2$维和$2\times2r$维对角阵, 且$\lambda_0$对角线上的各个元素均为非零值.

下面对柔性机械手系统(3), 根据重新定义的输出(4), 进行输入输出线性化. 对式(4)两次求导后, 得到系统(3)的输入输出子系统如下:

$$\ddot{z}(t)=\alpha(\lambda_0,\lambda_1,x)+\beta(\lambda_0,\lambda_1,x)u(t),\quad(5)$$

$$\beta(\lambda_0,\lambda_1,x)=[\lambda_0N_{11}(\theta,q)+\lambda_1N_{21}(\theta,q)],$$

$$\alpha(\lambda_0,\lambda_1,x)=[-(\lambda_0N_{11}+\lambda_1N_{21})(f_{\mathrm r}+E_1\dot{\theta})-(\lambda_0N_{12}+\lambda_1N_{22})(f_{\mathrm f}+Kq+E_2\dot{q})].$$

从系统方程(3)得到柔性机械手的内部子系统:

$$\ddot{q}=-N_{21}(f_{\mathrm r}+E_1\dot{\theta})-N_{22}(f_{\mathrm f}+Hq+E_2\dot{q})+N_{21}u.\quad(6)$$

令输入输出子系统(5)等于零, 解得: $u(t)=\beta^{-1}\alpha(\lambda_0,\lambda_1,x)$, 带入内部子系统中, 得柔性机械手系统的零动态子系统:

$$\ddot{q}=[-N_{22}+N_{21}(\lambda_0N_{11}+\lambda_1N_{21})^{-1}(\lambda_0N_{12}+\lambda_1N_{22})](f_{\mathrm f}+Hq+D_2\dot{q}).\quad(7)$$

可见, 通过采用输入输出线性化法将柔性机械手系统(3)分解为输入输出子系统(5)和零动态子系统(7).

本文的控制目标: 提出一种用于观测柔性模态导数的鲁棒滑模观测器, 解决柔性模态导数难以获得的问题; 对输入输出子系统(5)设计积分滑模控制器, 实现输入输出子系统的有限时间控制; 将零动态子系统(7)在平衡点近似线性化, 在保证零动态子系统在平衡点附近渐近稳定的前提选择控制器的设计参数$\lambda_0$和$\lambda_1$, 从而保证了整个柔性机械手系统的渐近稳定.

## 3　柔性机械手鲁棒滑模观测器设计(Robust sliding mode observer design for flexible manipulators)

首先将双臂柔性机械手系统的模态方程(6)改写为如下形式:

$$\ddot{q}=N_1-N_{21}E_1\dot{\theta}-N_{22}K_q-N_{22}E_2\dot{q}+N_{21}u.\quad(8)$$

式中$N_1=[-N_{21}f_{\mathrm r}(\dot{q})-N_{22}f_{\mathrm f}(\dot{q})]$. 定义$q_{\mathrm o}=\hat{\dot{q}}$, 表示$\dot{q}$的估计值, 本文提出滑模控制策略实现机械臂的柔性模态导数的观测, 并基于自适应学习的RBF神经网络对未知上界进行估计. 观测器设计如下:

$$\dot{q}_{\mathrm o}=N_2-N_{21}E_1\dot{\theta}-N_{22}Kq+N_{21}u+N_{21}v-N_{22}E_2q_{\mathrm o}-G(\varPhi q_{\mathrm o}-\dot{y}_{\mathrm f}).\quad(9)$$

式中: $G$为设计参数矩阵, $N_2=[-N_{21}f_{\mathrm r}(q_{\mathrm o})-N_{22}f_{\mathrm f}(q_{\mathrm o})]$, $y_{\mathrm f}$为机械手的小弹性形变输出, $y_{\mathrm f}=$

$\Phi q$, $\dot{y}_{\rm f}=\Phi\dot{q}$; $v$为观测器输入. 定义$e=q_{\rm o}-\dot{q}$, $N_{\rm o}=N_2-N_1$; 则由系统(8)和(9)得偏差系统为

$$\dot{e}=N_{\rm o}+N_{\rm B}e+N_{21}v. \tag{10}$$

式中$N_{\rm B}=-N_{22}E_2-G\Phi$. 定义$\Omega_{\rm o}$为系统给定参考轨迹的邻域, 则在此区域内可合理的假设系统变量的变化范围均有界, 即有

$$\|\theta-\theta_{\rm r}\|\leqslant k_1,\ \|\dot{\theta}-\dot{\theta}_{\rm r}\|\leqslant k_2,$$
$$\|q\|\leqslant k_3,\ \|\dot{q}\|\leqslant k_4.$$

式中: $k_1$, $k_2$, $k_3$和$k_4$均为已知正常数, $\theta_{\rm r}$为机械臂给定转角的参考轨迹. 将式(10)中的$N_{\rm o}$在区域$\Omega_{\rm o}$内做Taylor级数展开, 可得

$$N_{\rm o}=\partial N_{\rm o}(\theta,\dot{\theta},q,q_{\rm o})/\partial\dot{q}|_{q_{\rm o}}q_{\rm o}+{\rm O}(q_{\rm o}^2).$$

式中${\rm O}(q_{\rm o}^2)$表示与$q_{\rm o}^2$同阶项. 可见在区域$\Omega_{\rm o}$内$N_{\rm o}$必定有界, 假设$\|N_{\rm o}\|\leqslant\bar{k}$. $\hat{\bar{k}}$为$N_{\rm o}$上界的估计值. $\hat{\bar{k}}=[\hat{\bar{k}}_1,\cdots,\hat{\bar{k}}_i,\cdots,\hat{\bar{k}}_n]$, $i=1,\cdots,n$, 本文采用RBF神经网络的方法对上界值进行估计. $\hat{\bar{k}}_i$表示如下:

$$\hat{\bar{k}}_i=\sum_{j=1}^{s}\hat{w}_{ij}h_j,\ h_j=\exp(-b_j^{-2}\|\hat{X}-A_j\|^2). \tag{11}$$

式中: $s$为隐层节点数, $\hat{w}_{ij}$为网络的权值; $h_j$为高斯函数, $\hat{X}=[\theta,\dot{\theta},q,q_{\rm o}]^{\rm T}$为网络的输入; $A_j=[a_{1j},\cdots,a_{kj}]^{\rm T}$, $b_j$为隐层节点$j$的基带参数. 令

$$\hat{W}_i=[\hat{w}_{i1},\cdots,\hat{w}_{ij},\cdots,\hat{w}_{is}]^{\rm T},$$
$$H_i=[h_1,\cdots,h_j\cdots,h_s]^{\rm T},$$

则

$$\hat{W}={\rm diag}[\hat{W}_1,\cdots,\hat{W}_i,\cdots,\hat{W}_n],$$
$$H=[H_1,\cdots,H_i,\cdots,H_n]^{\rm T}.$$

式(11)简化为

$$\hat{\bar{k}}=\hat{W}^{\rm T}H. \tag{12}$$

定义$\varepsilon_{\rm f}$为网络逼近误差, 网络的估计误差为$\varepsilon_0$. 网络权值采取自适应算法在线调整:

$$\dot{\hat{W}}=\sigma\left\|s^{\rm T}M\right\|H. \tag{13}$$

式中$\sigma=(\varepsilon_0+\varepsilon_{\rm f}+\mu)\|M\|>0$.

滑模面设计如下:

$$s=Me=F\Phi e=F(\Phi q_{\rm o}-y_{\rm f}). \tag{14}$$

式中: $M\in\mathbb{R}^{m\times n}$, $M=F\Phi$, $F\in\mathbb{R}^{m\times m}$. 因此, 滑模(14)设计问题即归结为参数矩阵$F$的设计.

**定理 1** 对于柔性机械手模态方程(8), 设计$\dot{q}$的观测器为式(9), 设计$G$使得$N_{\rm B}$(10)为Hurwitz矩阵, 采用如下控制策略(15), 则观测器(9)可以渐进估计出$\dot{q}$:

$$v=\begin{cases}-\dfrac{(s^{\rm T}MN_{21})^{\rm T}}{\|s^{\rm T}MN_{21}\|^2}((\hat{\bar{k}}+\mu)\|s^{\rm T}M\|+s^{\rm T}MN_{\rm B}e), & \|s^{\rm T}MN_{21}\|\neq 0,\\ 0, & \|s^{\rm T}MN_{21}\|=0.\end{cases} \tag{15}$$

式中$\mu>0$.

**证** 首先定义$\tilde{W}=W^*-\hat{W}$, 选取Lyapunov函数$V_1=2^{-1}s^{\rm T}s+2^{-1}\sigma^{-1}\tilde{W}^{\rm T}\tilde{W}$, 沿偏差系统(10), $V_1(s)$对时间的一阶导数为

$$\dot{V}_1=s^{\rm T}\dot{s}+\mu^{-1}\tilde{W}^{\rm T}\dot{\tilde{W}}=$$
$$s^{\rm T}MN_{\rm o}+s^{\rm T}MN_{\rm B}e+s^{\rm T}MN_{21}v+\sigma^{-1}\tilde{W}^{\rm T}\dot{\tilde{W}}.$$

将滑模策略(15)代入上式, 有

$$\dot{V}_1<\left\|s^{\rm T}M\right\|\|N_{\rm o}\|-(\hat{\bar{k}}+\mu)\left\|s^{\rm T}M\right\|-$$
$$(W^*-\hat{W})^{\rm T}\left\|s^{\rm T}{\rm M}\right\|H\leqslant$$
$$-\|s\|\|M\|(\varepsilon_{\rm f}+\varepsilon_0+\mu)=-\sigma\|s\|\leqslant 0.$$

因此, 状态变量的估计值与实际值的偏差(10)将收敛到零, 即观测器(9)可以估计出系统(8)的状态变量.

## 4 基于鲁棒滑模观测器的柔性机械手积分滑模控制(Flexible manipulators integral sliding mode control based on robust sliding mode observer)

针对输入输出子系统(5), 首先采用如下PID积分滑动模态:

$$s_1(t)=k_{\rm D}\dot{z}(t)+k_{\rm P}z(t)+k_{\rm I}\int_{0_-}^{t}z(t){\rm d}t. \tag{16}$$

下面提出定理2, 证明本文提出的基于鲁棒滑模观测器的柔性机械手滑模控制策略可以实现输入输出子系统状态收敛到零.

**定理 2** 对于输入输出子系统(5), 控制策略设计如下:

$$u(t)=u_{\rm eq}(t)+u_n(t), \tag{17}$$
$$u_{\rm eq}(t)=-\beta^{-1}(\alpha(\lambda,\theta,\dot{\theta},q,q_{\rm o})+$$
$$(k_{\rm P}/k_{\rm D})\dot{z}+(k_{\rm I}/k_{\rm D})z)+L,$$
$$u_n(t)=-\gamma\,\beta^{-1}{\rm sgn}\,s_1(t).$$

式中: $\gamma>0$; 观测器设计参数$\mu>0$, 满足

$$\|s_1\|\|(-k_{\rm D}(\lambda_0N_{12}+\lambda_1N_{22})E_2+k_{\rm P}\lambda_1)\|-$$
$$\|M\|\|M\|(\varepsilon_{\rm f}+\varepsilon_0+\mu)\leqslant 0. \tag{18}$$

则观测器(9)可估计出系统柔性模态导数, 并且输入输出子系统(5)的状态将渐近收敛到零.

**证** 考虑Lyapunov函数$V_2=2^{-1}{s_1}^{\rm T}s_1$, 对$V_2$求导, 将控制律(17)代入, 得

$$\begin{aligned}&\dot V_2 = s_1^{\mathrm T}\dot s_1 =\\&s_1^{\mathrm T}(k_{\mathrm D}(\alpha(\lambda,\theta,\dot\theta,q,\dot q)-\alpha(\lambda,\theta,\dot\theta,q,q_{\mathrm o})))+\\&k_{\mathrm P}(\dot z(\dot\theta,\dot q)-\dot z(\dot\theta,q_{\mathrm o}))-\gamma k_{\mathrm D}\mathrm{sgn}\, s_1\leqslant\\&s_1^{\mathrm T}(-k_{\mathrm D}(\lambda_0N_{12}+\lambda_1N_{22})E_2+k_{\mathrm P}\lambda_1)(\dot q-q_{\mathrm o}).\end{aligned}$$

令$V=V_1+V_2$, 则

$$\dot V=\dot V_1+\dot V_2,$$

$$\begin{aligned}\dot V\leqslant&(\|s_1\|\,\|(-k_{\mathrm D}(\lambda_0N_{12}+\lambda_1N_{22})E_2+k_{\mathrm P}\lambda_1)\|-\\&\|M\|\,\|M\|\,(\varepsilon_{\mathrm f}+\varepsilon_0+\mu))\,\|e\|\leqslant 0.\end{aligned}$$

根据Lyapunov稳定定理知, 观测器(9)可以渐进估计出系统柔性模态导数, 输入输出子系统(5)将到达滑模面, 由滑模的性质输入输出子系统(5)的状态将收敛到零.

## 5 基于零动态子系统渐进稳定的控制器参数设计(Controller parameter design based on zero dynamics asymptotical stable)

首先在平衡点$x=0$处将零动态子系统线性化, 定义$\Omega$ 为$x=0$的邻域, 在$\Omega$域上将矩阵$N$和$f_{\mathrm f}$在$x=0$处按泰勒级数展开:

$$N|_{x\in\Omega}=[N_{110},N_{120};N_{210},N_{220}]+f_{\mathrm{hot}}(x),\tag{19}$$

$$f_{\mathrm f}(\theta,q)|_{x\in\Omega}=f_{\mathrm{hot}}(x).\tag{20}$$

将式(19)和(20)都带入零动态子系统(7)中, 有

$$\begin{bmatrix}\dot q\\ \ddot q\end{bmatrix}=A(\lambda_0,\lambda_1)\begin{bmatrix}q\\ \dot q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ f_{\mathrm{hot}}(x)\end{bmatrix},\tag{21}$$

$$\begin{aligned}&A(\lambda_0,\lambda_1)=[0\ \ I;\ -P_0K\ \ -P_0E_2],\\&P_0=N_{220}-N_{210}(\lambda_0N_{110}+\lambda_1N_{210})^{-1}\cdot\\&\quad(\lambda_0N_{120}+\lambda_1N_{220}).\end{aligned}\tag{22}$$

如果$\lambda_0$和$\lambda_1$选取适当的值, 使得式(21)中矩阵$A$的特征值全为负值, 则柔性机械手系统的零动态子系统(7)将在平衡点处渐近稳定.

本文选择矩阵$A$的特征值为

$$s_{1,2}=-0.79\pm795.84\mathrm i,\ s_{3,4}=-0.99\pm390.28\mathrm i,$$

$$s_{5,6}=-1.26\pm87.59\mathrm i,\ s_{7,8}=-2.8\pm51.54\mathrm i,$$

因此求得

$$\lambda_0=\mathrm{diag}\{7.87,9.82\},$$

$$\lambda_1=\mathrm{diag}\{0.02,2.35,1.76,0.71\}.$$

综合上面的定理1和定理2, 对柔性机械手系统(3), 如果按式(4)重新定义其输出, 选取合适的参数$\lambda_0$和$\lambda_1$, 使得式(21)的矩阵$A$的特征值严格为负值, 并且滑模选取为式(16), 滑模控制器$u(t)$设计为式(17) 的形式, 观测器设计为式(9) 的形式, 则系统(3)将在平衡点附近渐近稳定, 其端点位移输出也渐近收敛到零.

## 6 仿真实例(Simulation)

为了评价定理2中提出的基于观测器的柔性机械手积分滑模控制策略的有效性, 选择机械手参数如下:

$$\begin{aligned}&L_1=L_2=0.8\ \mathrm m,\ \rho_1=1.1718\ \mathrm{kg/m(steel)},\\&\rho_2=0.5859\ \mathrm{kg/m(steel)},\ M_{t1}=0.5\ \mathrm{kg},\\&M_{t2}=0\ \mathrm{kg},\ EI_1=544.32\ \mathrm{Nm}^2,\\&EI_2=68.04\ \mathrm{Nm}^2,\ J_1=2.0\ \mathrm{kgm}^2,\\&J_2=0.4\ \mathrm{kgm}^2,\ J_h=0\ \mathrm{kgm}^2;\end{aligned}$$

系统状态初值选取如下:

$$\theta_1(0)=1,\ \theta_2(0)=0.5,$$

其他参数的初值为0. 观测器初值为$q_{\mathrm o1}=0.5$, $q_{\mathrm o2}=1$, 其余观测初值为零. 滑模设计为$k_{\mathrm D}=1$, $k_{\mathrm P}=2$, $k_{\mathrm I}=2$; 设计参数$\mu=1.1$. 根据定理1, 选取$F=$[0.8633 0; 0.8633 0].

仿真结果如图2～图5所示. 由仿真结果可见, 柔性机械手系统的端点位移渐近收敛到零, 并且柔性模态也渐近收敛, 观测器能正确观测出柔性模态导数变量, 因此本文针对柔性机械手的数学模型提出的基于观测器的积分滑模控制策略是有效的.

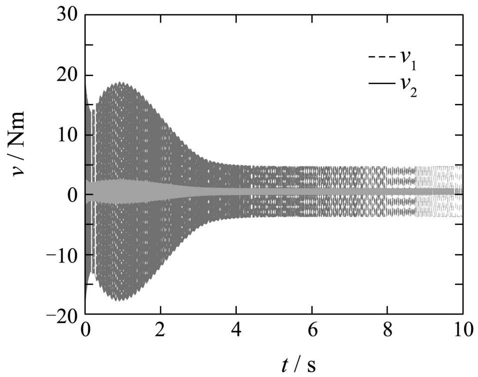


图 2 观测器的控制输入$v_1, v_2$

Fig. 2 Observor control input $v_1, v_2$

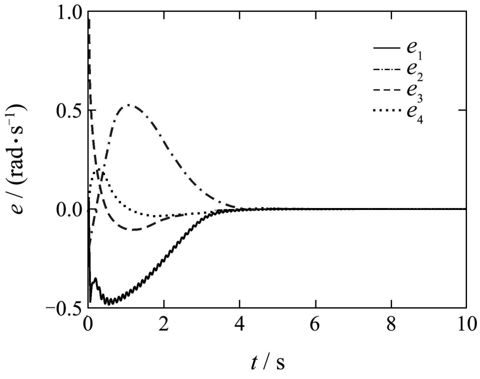


图 3 观测误差$e_1,e_2,e_3,e_4$

Fig. 3 Observor error $e_1,e_2,e_3,e_4$

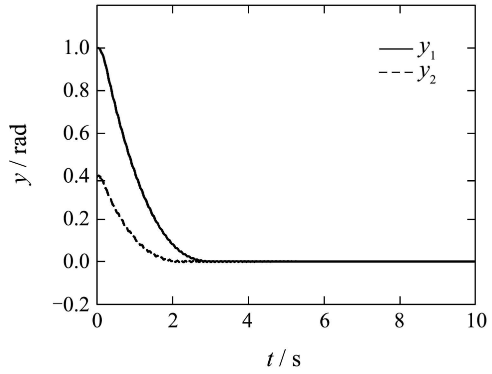


图4　机械手的端点位移$y_1, y_2$

Fig. 4　Manipulators tip position $y_1, y_2$

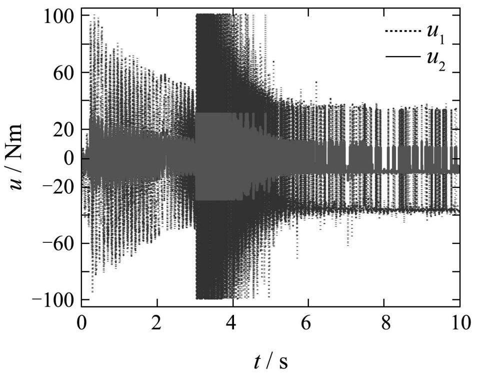


图 5　机械臂的控制输入$u_1, u_2$

Fig. 5　Manipulators control input $u_1, u_2$

## 7　结论(Conclusion)

1) 提出一种基于RBF神经网络的鲁棒滑模观测器, 用来对柔性模态变量的导数值进行估计, 所提出的鲁棒滑模观测器采用RBF神经网络对系统中不确定性的上界值进行自适应学习; 通过设计滑模, 可以调整观测器跟踪系统状态的收敛速度, 使状态估计达到预期的指标; 同时能保证对系统的非线性不确定性具有鲁棒性; 2) 重新定义柔性机械手系统的输出, 使其零动态子系统在平衡点附近为最小相位系统. 3) 采用积分滑模面, 提出了柔性机械手滑模控制策略, 可以保证输入输出子系统的状态在有限时间内收敛到零, 并通过选择合适的参数, 保证柔性机械手系统的零动态子系统在平衡点处渐近稳定, 从而保证整个柔性机械手系统的渐近稳定. 4) 本文提出的控制策略设计过程简单, 易于实现.

## 参考文献(References):

[1] SUBUDHI B. On the singular perturbation approach to trajectory control of a multilink manipulator with flexible links and joints[J]. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers*, 2002, 215(1): 587 – 598.

[2] 蔡鹤皋, 刘品宽, 孙立宁. 柔性臂机器人控制算法综述[J]. 电机与控制学报, 2002, 6(2): 158 – 161.
(CAI Hegao, LIU Pinkuan, SUN Lining. A survey of control algorithms for flexible links manipulators[J]. *Electric Machines and Control*, 2002, 6(2): 158 – 161.)

[3] FENG Y, BAO S, YU X. Inverse dynamics non-singular terminal sliding mode control of two-link flexible manipulators[J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2004, 19(2): 91 – 102.

[4] YIM W. End-point trajectory control, stabilization, and zero dynamics of a three-link flexible manipulator[C] *//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Atlanta, Georgia, USA: IEEE Computer Society Press, 1993, 2: 468 – 473.

[5] DAMAREN C J. Modal properties and control system design for two-link flexible manipulators[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1998, 17(6): 667 – 678.

[6] NAGARKATTI S P, RAH C D, DAWSO D M, et al. Observer-based modal control of flexible systems using distributed sensing[C] *//Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*. Orlando, Florida USA: IEEE, 2001: 4268 – 4273.

[7] 李鸿儒, 顾树生. 基于神经网络的PMSM自适应滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 461 – 464.
(LI Hongru, GU Shusheng. Neural network based adaptive sliding mode control for PMSM[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(3): 461 – 464.)

[8] WANG C H, LIU H L, LIN T C. Direct adatpive fuzzy-neural control with state observer and supervisory controller for unknown nonlinear dynamical systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2002, 10(1): 39 – 49.

[9] CHEN Y P, YEUNG K S. Sliding-mode control of multi-link flexible manipulators[J]. *International Journal of Control*, 1991, 54(2): 257 – 278.

[10] MOALLEM M, PATEL R V, KHORASANI K. *Flexible-link Robot Manipulators: Control Techniques and Structural Design*[M]. Singapore: Springer, 2000: 57 – 72.

## 作者简介:

**张袅娜**　(1972—), 女, 副教授, 目前研究方向为非线性系统控制, E-mail: zhangniaona@163.com;

**张德江**　(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制, E-mail: zhangdejiang@mail.ccut.edu.cn;

**尤　文**　(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为变结构控制、鲁棒控制等, E-mail: youwen@mail.ccut.edu.cn.