

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.03.009

基于RBF神经网络的柔性机械臂位置控制

李光, 杨韵

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对复杂的柔性机械臂位置控制问题, 提出一种结合极点配置技术的自适应滑模控制方法。变结构滑模应用于柔性臂的刚性运动和弹性振动抑制的控制, 极点配置用以设置滑模面的极点, 以获得良好的动态响应特性。利用RBF网络自适应性学习系统不确定量的上界, 神经网络的输出用于自适应修正控制律的切换增益。实例仿真结果表明, 该控制方法能在对机械臂位置控制的同时有效地抑制柔性臂的弹性振动, 对不确定参数具有鲁棒性。

关键词: RBF网络; 滑模控制; 自适应; 柔性机械臂; 极点配置

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)03-0041-06

Flexible Manipulator Position Control Based on RBF Neural Network

Li Guang, Yang Yun

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the complicated flexible manipulator position control problem, puts forward an adaptive sliding mode control method, which combined with pole assignment technology. The variable structure sliding mode control is applied to the rigid motion and elastic vibration suppression of flexible manipulator and the pole assignment is used to set the sliding mode surface pole to obtain good dynamic response. By means of RBF network adaptive learning system upper bound of the uncertainties, the neural network output is used for adaptive correcting the switch gain of control law. Instance simulation results show that the proposed scheme is capable of manipulator position control, and meanwhile it can effectively restrain the elastic vibration of flexible arm and is robust to uncertain parameters.

Keywords: RBF network; sliding mode control; adaptive; flexible manipulator; pole assignment

0 引言

相对于传统的刚性机械臂, 柔性机械臂具有轻质量、操作快速方便、低能耗、高运载能力等优点, 已经成为机器人研究领域的热点。与刚性机械臂相比, 柔性机械臂虽然没有高速运动时产生的巨大惯性力, 但是在执行动作过程中产生的振动使得其建模与控制要比刚性臂复杂许多。因为在实现常规控

制功能(如轨迹跟踪、位置调节控制)的同时还需要补偿重力造成的机械手末端位置偏差以及减小振动的幅值、持续时间^[1]。

针对这样一个复杂的控制对象, 学者们提出了多种控制策略, 如线性反馈控制方法^[2]、奇异点摄动控制方法^[3]和基于模型的控制方法^[4]等。以上方法对系统动力学模型的依赖程度较强, 特别是在系统存在时变不确定项时, 难以得到良好的控制效果。近

收稿日期: 2014-03-25

作者简介: 李光(1963-), 湖北孝感人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事机器人动力学和控制等方面的研究,

E-mail: liguangw@126.com

通信作者: 杨韵(1990-), 湖南常德人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为包装机械, E-mail: hongkongyang@163.com

年来更多的研究者将注意力转向智能控制、滑模变结构算法^[5]、迭代学习控制算法^[6]和神经网络控制算法等。其中神经网络由于具有全局逼近、自学习和自适应能力,在柔性机械臂的控制器设计中,得到了广泛的使用。文献[7]以柔性机械臂为例,进行简单的逆运动学分析,并采用小脑模型神经网络方法对机械臂的逆运动学进行了数值仿真分析;文献[8]结合机械臂的结构特点,将神经网络与预测控制、滚动优化理论相结合,设计出用于柔性机械臂轨迹跟踪的神经网络动态优化调整的智能控制系统,从而能够以良好的控制柔性机械臂跟踪各状态量的期望值,并同时达到末时刻速度调节的目的。

本文首先基于假设模态法建立单连杆柔性机械臂的动力学模型,在动力学模型的基础上设计滑模面和建立滑模控制律,同时满足对连杆刚性转角的调节控制和端点振动的抑制;通过对滑模平面极点的合理配置,获得可控的动态过程。利用神经网络的逼近能力,实现了对控制输入端干扰的观测,从而实现对干扰的有效补偿,利用神经网络控制法逼近不确定量的上限,获取较小的切换增益,有效地抑制了控制器的抖振。

1 动力学模型

如图1所示长为 L ,总质量为 m 的匀质单连杆柔性机械臂,其中一端固定于驱动电机输出轴,另一端自由且带有质量块 m_p 。 XOY 为绝对坐标, xoy 为固定在柔性机械臂上的移动坐标, x 的方向与梁未弯曲的方向一致; θ 表示柔性机械臂的刚性转角;控制输入力矩为 T_θ 。

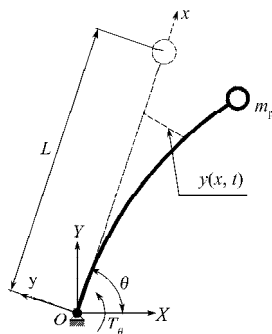


图1 单连杆柔性机械臂

Fig. 1 One-link flexible manipulator

针对以上条件下的柔性臂建立动力学方程:假定柔性臂符合 Euler-Bernoulli 梁的假设条件,则可以进行如下的动力学建模分析。

首先,对柔性机械臂采用假设模态法离散,柔性臂在移动坐标系中的变形为

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) q_i(t), \quad (1)$$

式中: $\phi_i(x)$ 为第 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 阶振动模态;

$q_i(t)$ 为第 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 阶变形的广义坐标。

可知柔性机械臂上任意点的位移为

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y(x, t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

柔性机械臂系统的动能总为

$$T = T_1 + T_2 + T_3. \quad (3)$$

其中:

T_1 为连接柔性臂和电动机关节的动能, $T_1 = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2$;

T_2 为柔性臂端点质量块转动动能,

$$T_2 = \frac{1}{2} J_p \left(\dot{\theta} + \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \right) \right)^2;$$

T_3 为柔性臂和端点质量块的动能,

$$T_3 = \frac{1}{2} \rho \int_0^L \dot{\mathbf{r}}^T(x) \dot{\mathbf{r}}(x) dx + \frac{1}{2} m_p \dot{\mathbf{r}}_e^2;$$

J 为关节处的转动惯量;

J_p 为柔性臂端点处质量块的转动惯量;

ρ 为柔性臂的密度;

\mathbf{r}_e 为端点质量块的位移(即 \mathbf{r} 中 $x=L$ 时)。

考虑柔性臂因弯曲变形而产生的重力变化以及端点质量块的重力势能,则柔性机械臂系统的势能总和为

$$V = V_1 + V_2 + V_3, \quad (4)$$

式中: $V_1 = \frac{1}{2} \rho EI \int_0^L \left[\frac{\partial^2 \phi_i(x)}{\partial x^2} \right]^2 dx$,为柔性臂弹性势能;

$V_2 = \frac{1}{2} \rho \int_0^L [0 \ 1] \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{r} dx$,为柔性臂重力势能;

$V_3 = \frac{1}{2} m_p \mathbf{g} [0 \ 1] \cdot \mathbf{r}_e$,为柔性臂端点质量块的重力势能;

EI 为抗弯系数。

将系统的动能和势能代入 Lagrange 方程中

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} + \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Q}. \quad (5)$$

式中: $\mathbf{q} = [\theta \ q_1 \ \dots \ q_n]^T$ 为坐标向量;

$\mathbf{Q} = [T_\theta \ 0 \ \dots \ 0]$ 为总外力。

则可以推导出整个系统的动力学方程为^[9]

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_0 \\ v_k \end{bmatrix} = [T_\theta \ 0 \ \dots \ 0]^T, \quad (6)$$

式中:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_0 & b_1 & b_2 & \cdots & b_n \\ b_1 & m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ b_2 & 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n & 0 & 0 & \cdots & m_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_0 & \mathbf{b}^T \\ \mathbf{b} & \mathbf{W} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} v_1 + J_p \phi_{1c}'^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & v_2 + J_p \phi_{2c}'^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & v_n + J_p \phi_{nc}'^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} w_1 + m_p L \phi_{1c} + J_p \phi_{1c}' \\ w_2 + m_p L \phi_{2c} + J_p \phi_{2c}' \\ \vdots \\ w_n + m_p L \phi_{nc} + J_p \phi_{nc}' \end{bmatrix},$$

$$m_0 = \frac{1}{3} m L^2 + m_p L^2 + \sum_{i=1}^n (v_i q_i^2) + J_p + J,$$

$$v_0 = 2 \dot{\theta} \sum_{i=1}^n (v_i q_i \dot{q}_i) + \frac{1}{2} m g L \cos \theta - \sum_{i=1}^n (z_i \cdot q_i) \sin \theta +$$

$$m_p g L \cos \theta - m_p g \sum_{i=1}^n (\phi_{ic} q_i) \sin \theta;$$

$v_k =$

$$\begin{bmatrix} k_1 \cdot q_1 - \dot{\theta}^2 \cdot q_1 \cdot v_1 + z_1 \cdot g \cdot \cos \theta + m_p \cdot g \cdot \phi_{1c} \cdot \cos \theta \\ k_2 \cdot q_2 - \dot{\theta}^2 \cdot q_2 \cdot v_2 + z_2 \cdot g \cdot \cos \theta + m_p \cdot g \cdot \phi_{2c} \cdot \cos \theta \\ \vdots \\ k_n \cdot q_n - \dot{\theta}^2 \cdot q_n \cdot v_n + z_n \cdot g \cdot \cos \theta + m_p \cdot g \cdot \phi_{nc} \cdot \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$v_i = \rho \int_0^L (\phi_i(x))^2 dx + m_p (\phi_{ic}(x))^2; i=1,2,\dots,n$$

$$w_i = \rho \int_0^L x \phi_i(x) dx, i=1,2,\dots,n;$$

$$z_i = \rho \int_0^L \phi_i(x) dx; i=1,2,\dots,n;$$

$$k_i = EI \int_0^L \left(\frac{\partial^2 \phi_i(x)}{\partial x^2} \right)^2 dx; i=1,2,\dots,n_0$$

2 滑模控制器的设计

设计滑模面为

$$s = c \cdot e + \dot{e} + \sum_{i=1}^n (p_i \cdot \phi_{ic} \cdot q_i + p_i' \cdot \phi_{ic} \cdot \dot{q}_i). \quad (7)$$

系统的状态变量误差为

$$e = \theta - \theta_d,$$

以上式中 θ_d 为给定柔性臂期望角度值; c, p_i 和 p_i' ($i=1, 2, \dots, n$) 为待定系数。

若 p_i 和 p_i' 均为零, 滑模面将是用来控制刚性机械臂, 所以为了实现对柔性机械臂的控制 p_i 和 p_i' 不能为零。将式 (7) 对时间求导, 并省略二阶无穷小量 q_i^2 , 可得到下式:

$$\Delta \cdot \dot{s} = \Delta \cdot c \cdot \dot{e} + \Delta \cdot \ddot{e} + \Delta \cdot \sum_{i=1}^n (p_i \cdot \phi_{ic} \cdot \dot{q}_i + p_i' \cdot \phi_{ic} \cdot \ddot{q}_i) \equiv$$

$$T_\theta - \frac{1}{2} m g L \cos \theta - m_p g L \cos \theta - 2 \cdot \dot{\theta} \cdot \sum_{i=1}^n (v_i \cdot q_i \cdot \dot{q}_i) +$$

$$\sum_{i=1}^n (z_i \cdot \dot{q}_i) \cdot \sin \theta + m_p \cdot g \cdot \sum_{i=1}^n (\phi_{ic} \cdot \dot{q}_i) \cdot \sin \theta +$$

$$\Delta \cdot c \cdot \dot{e} + \Delta \cdot \sum_{i=1}^n (p_i \cdot \phi_{ic} \cdot \dot{q}_i + p_i' \cdot \phi_{ic} \cdot \ddot{q}_i) +$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\begin{array}{l} (w_i + m_p L \phi_{ic} + J_p \phi_{ic}') \cdot m_i^{-1} \cdot \\ \left(k_i \cdot q_i - q_i \cdot v_i \cdot \dot{\theta}^2 + z_i \cdot g \cdot \cos \theta + \right) \\ \left(m_p \cdot g \cdot \phi_{ic} \cdot \cos \theta \right) \end{array} \right) =$$

$$T_\theta + f_a, \quad (8)$$

式中: $\Delta = m_0 - \mathbf{b}^T \cdot \mathbf{W}^{-1} \cdot \mathbf{b}$; $f_a = f(\theta, \dot{\theta}, q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i, t)$ 。

由式 (6) 可知 Δ 为惯性矩阵 M 的行列式的值, 故 $\Delta > 0$ 。

f_a 中含有 \ddot{q}_i 项, 然而在实际中是很难测定的, 故采用 RBF 神经网络对其中不确定项 f_a 进行自适应逼近。输入层、隐层和输出层共同组成了 RBF 神经网络结构, RBF 的有效映射为:

$$\hat{f}(x, \hat{\theta}) = \boldsymbol{\kappa}^T \cdot \boldsymbol{\psi}(x),$$

$$\phi_i = g \cdot (\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_i\|^2 / h_i^2),$$

式中: $\boldsymbol{\psi} = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$ 为高斯基函数; h_i 为网络基宽; \mathbf{x} 为网络输入信号, 在本设计中取 $(T, \theta_1, \dot{\theta}, q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2, f_a)$ 为输入信号, 其中 T 为网络训练时的控制输入; \mathbf{c} 为神经网络参数; $\boldsymbol{\kappa}$ 为神经网络数值。

故根据 RBF 神经网络自适应控制法可以设计出控制律为

$$T_\theta = -K \cdot \text{sign}(s) - \hat{f}(x, \hat{\theta}), \quad (9)$$

式中: $\hat{f}(x, \hat{\theta})$ 为 f_a 的逼近值; K 为滑模控制增益常数; $\hat{f}(x, \theta^*)$ 为 f_a 的理想逼近值。

将式 (9) 代入式 (8) 中有:

$$\Delta \cdot \dot{s} = -K \cdot \text{sign}(s) - \hat{f}(x, \hat{\theta}) + f_a =$$

$$-K \cdot \text{sign}(s) + f_a - \hat{f}(x, \theta^*) +$$

$$\hat{f}(x, \theta^*) - \hat{f}(x, \hat{\theta}) =$$

$$-K \cdot \text{sign}(s) + \eta + \boldsymbol{\kappa}^{*T} \cdot \boldsymbol{\psi}(x) - \hat{\boldsymbol{\kappa}}^T \cdot \boldsymbol{\psi}(x) =$$

$$-K \cdot \text{sign}(s) + \eta - \tilde{\boldsymbol{\kappa}}^T \cdot \boldsymbol{\psi}(x),$$

其中: $\theta^*, \hat{\theta}$ 分别表示 θ 的理想逼近值和估计值; η 为 f_a 与 $\hat{f}(x, \hat{\theta})$ 的差值; $\hat{\boldsymbol{\kappa}}, \boldsymbol{\kappa}^*$ 为 RBF 神经网络逼近时的网络权值; $\tilde{\boldsymbol{\kappa}}^T$ 为 $\hat{\boldsymbol{\kappa}}^T$ 与 $\boldsymbol{\kappa}^{*T}$ 的差值; $\boldsymbol{\psi}(x)$ 为 RBF 神经网络法逼近时的高斯基函数。

定义 Lyapunov 函数为 $U = \frac{1}{2} \Delta \cdot s^2 + \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\kappa}}^T \cdot \tilde{\boldsymbol{\kappa}}$, 将上式对时间求导数得

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \Delta \cdot s \cdot \dot{s} + \tilde{\mathbf{k}}^T \cdot \dot{\tilde{\mathbf{k}}} = \\ & \left[-K \cdot \text{sign}(s) + \eta - \tilde{\mathbf{k}}^T \cdot \boldsymbol{\psi}(x) \right] \cdot s + \tilde{\mathbf{k}}^T \cdot \dot{\tilde{\mathbf{k}}} = \\ & -K \cdot |s| + \eta \cdot s - \tilde{\mathbf{k}}^T \cdot \boldsymbol{\psi}(x) \cdot s + \tilde{\mathbf{k}}^T \cdot \dot{\tilde{\mathbf{k}}} = \\ & -K \cdot |s| + \eta \cdot s + \tilde{\mathbf{k}}^T \cdot \left(\dot{\tilde{\theta}} - \boldsymbol{\psi}(x) \cdot s \right) = \\ & -K \cdot |s| + \eta \cdot s + \tilde{\mathbf{k}}^T \cdot \left(\dot{\tilde{\theta}} - \boldsymbol{\psi}(x) \cdot s \right) \circ \end{aligned}$$

其中 $\tilde{\theta}$ 为 $\hat{\theta}$ 与 θ^* 的差值。

取 $\dot{\tilde{\mathbf{k}}} = \hat{\mathbf{k}} = \boldsymbol{\psi}(x) \cdot s$ ，由上式可得

$$\dot{U} = -K \cdot |s| + \eta \cdot |s| \quad (10)$$

很显然在式(10)中，若 $K > |\eta|$ ，则 $\dot{U} < 0$ ，根据

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ b_1 & m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ b_2 & 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n & 0 & 0 & \cdots & m_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{e} \\ \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & p'_1 \cdot \phi_{1e} & p'_2 \cdot \phi_{2e} & \cdots & p'_n \cdot \phi_{ne} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} c & p_1 \cdot \phi_{1e} & p_2 \cdot \phi_{2e} & \cdots & p_n \cdot \phi_{ne} \\ 0 & k_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & k_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} + g \cdot \cos \theta_d$$

式中 q_{1d}, \dots, q_{nd} 表示刚性转角到达期望位置后广义坐标的稳定值。

对上式等号左边后两项进行合并即可得到与误差相关的方程。并推导出方程(12)的特征方程的特征根，首先，为了使方程(12)转化为齐次线性微分方程，需合并方程左边的后两项，即可组建成与误差有关的齐次线性微分方程，各对应的项分别相等，需满足以下条件：

$$\begin{cases} \lambda + c = 0, \\ (w_{n-1} + m_p L \phi_{(n-1)e} + J_p \phi'_{(n-1)e}) \cdot \lambda^2_{(n-1)} = 0, \\ (w_n + m_p L \phi_{ne} + J_p \phi'_{ne}) \cdot \lambda^2_n = 0, \\ p'_{n-1} \phi_{(n-1)c} \lambda + p_{n-1} \phi_{(n-1)e} = 0, \\ p'_n \phi_{nc} \lambda + p_n \phi_{ne} = 0 \end{cases}$$

及式(13)~(14)，即

$$(v_{n-1} + J_p \phi'^2_{(n-1)e}) \cdot \lambda^2_{n-1} + k_{n-1} = \frac{-z_{n-1} \cdot g \cdot \cos \theta_d}{q_{(n-1)d}}, \quad (13)$$

$$(v_n + J_p \phi'^2_{ne}) \cdot \lambda^2_n + k_n = \frac{-z_n \cdot g \cdot \cos \theta_d}{q_{nd}} \quad (14)$$

计算式(13)和式(14)可以得到 λ_{n-1} 和 λ_n ，同时在线性齐次微分方程的特征方程中，将上式计算出

Lyapunov函数稳定性可知，上式保证了系统状态从任意一点到达滑模面，并沿着该滑模面运动，即 $s=0$ 。

3 滑模面待定常数的确定

为保证系统能进入滑模面，并且能保持在滑模面上运动，滑模面满足以下条件：

$$s = c \cdot e + \dot{e} + \sum_{i=1}^r (p_i \cdot \phi_{ie} \cdot q_i + p'_i \cdot \phi_{ie} \cdot \dot{q}_i) = 0 \quad (11)$$

将式(11)代入式(6)第1行关于刚性角度的方程中，则原方程可以改写为与误差有关的方程：

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{z_1}{q_{1d}} & \frac{m_p \cdot \phi_{1e}}{q_{2d}} & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{m_p \cdot \phi_{2e}}{q_{1d}} & \frac{z_2}{q_{2d}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \frac{m_p \cdot \phi_{ne}}{q_{1d}} & 0 & \cdots & \frac{z_n}{q_{nd}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q_{1d} \\ q_{2d} \\ \vdots \\ q_{nd} \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

的 λ 值代入下式：

$$\begin{vmatrix} \lambda + c & p'_1 \phi_{1e} \lambda + p_1 \phi_{1e} & p'_2 \phi_{2e} \lambda + p_2 \phi_{2e} & \cdots & p'_n \phi_{ne} \lambda + p_n \phi_{ne} \\ b_1 \lambda^2 & m_1 \lambda^2 + k_1 & 0 & \cdots & 0 \\ b_2 \lambda^2 & 0 & m_2 \lambda^2 + k_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n \lambda^2 & 0 & 0 & \cdots & m_n \lambda^2 + k_n \end{vmatrix} = 0 \quad (15)$$

方程(15)的根(系统动力学方程的极点)需要同时满足式(13)和式(14)，这样选定的极点值才能使得动力学系统有期望的动态响应过程。

将式(15)按照第一行展开，可得式(16)，即

$$f_c(\lambda) \cdot (\lambda + c) - \sum_{i=1}^r (p'_i \phi_{ie} \lambda + p_i \phi_{ie}) \cdot f_{pi}(\lambda) = 0 \quad (16)$$

式中： $f_c(\lambda) = (\lambda^2 + X_1)(\lambda^2 + X_2) \cdots (\lambda^2 + X_n)$ ；

$$f_{pi}(\lambda) = f_c(\lambda) \cdot Y_i \cdot \lambda^2 / (\lambda^2 + X_i)；$$

$$X_i = k_i / (v_i + J_p \phi'^2_{ie}), \quad i = 1, 2, \dots, n；$$

$$Y_i = b_i / (v_i + J_p \phi'^2_{ie}), \quad i = 1, 2, \dots, n \circ$$

方程(16)的阶数为 $2n+1$ ，由动态系统稳定性可知，方程(15)的根分布在复平面左半平面能使动力学系统很快稳定，根的取值为

$$\{\lambda_0, \lambda_i, \lambda'_i\}, i=1, 2, \dots, n,$$

式中: λ_0 为实根; λ_i 和 λ'_i 为 2 个实根或者一对共轭虚

根。将同时满足式 (13), (14), (15) 的特征根代入式 (16) 中, 可得:

$$\begin{bmatrix} f_c(\lambda_0) & -\phi_{1c} f_{p1}(\lambda_0) & -\phi_{1e} \lambda_1 f_{p1}(\lambda_1) & \dots & -\phi_{1e} \lambda_n f_{p1}(\lambda_n) \\ f_c(\lambda_1) & -\phi_{1c} f_{p1}(\lambda_1) & -\phi_{1e} \lambda_1 f_{p1}(\lambda_1) & \dots & -\phi_{1e} \lambda_n f_{p1}(\lambda_n) \\ f_c(\lambda'_1) & -\phi_{1c} f_{p1}(\lambda'_1) & -\phi_{1e} \lambda'_1 f_{p1}(\lambda'_1) & \dots & -\phi_{1e} \lambda'_n f_{p1}(\lambda'_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_c(\lambda_n) & -\phi_{1c} f_{p1}(\lambda_n) & -\phi_{1e} \lambda_n f_{p1}(\lambda_n) & \dots & -\phi_{1e} \lambda_n f_{p1}(\lambda_n) \\ f_c(\lambda'_n) & -\phi_{1c} f_{p1}(\lambda'_n) & -\phi_{1e} \lambda'_n f_{p1}(\lambda'_n) & \dots & -\phi_{1e} \lambda'_n f_{p1}(\lambda'_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ p_1 \\ p'_1 \\ \vdots \\ p_n \\ p'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_c(\lambda_0) \cdot \lambda_0 \\ -f_c(\lambda_1) \cdot \lambda_1 \\ -f_c(\lambda'_1) \cdot \lambda'_1 \\ \vdots \\ -f_c(\lambda_n) \cdot \lambda_n \\ -f_c(\lambda'_n) \cdot \lambda'_n \end{bmatrix}, \quad (17)$$

当选取满足条件的不同 λ 值时, 控制律中的待定系数能够唯一确定。

4 仿真实例

根据式 (6) 系统动力学方程, 进行柔性机械臂的实例仿真, 取到二阶振动模态, 系统的结构参数如下。

柔性机械臂的长度: $L=1 \text{ m}$;

抗弯系数: $EI=200 \text{ N} \cdot \text{m}^2$;

柔性机械臂的密度: $\rho=0.2 \text{ kg/m}$;

柔性机械臂末端质量块: $m_p=0.1 \text{ kg}$;

关节处的转动惯量: $J=0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;

柔性臂端点处质量块的转动惯量: $J_p=0.0005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;

柔性臂初始角度值为 0° , 期望角度值为 30° 。

为了实现柔性机械臂快速到达期望角度同时末端的振动很快被抑制, 在极点配置法确定参数时的极点选取为:

$$\lambda_0 = -7, \lambda_1 = -8 + j34.6725, \lambda'_1 = -8 - j34.6725, \lambda_2 = -5 + j64.0909, \lambda'_2 = -5 - j64.0909.$$

由式 (10) 选定 $K=1$ 时, 则滑模面中待确定参数为:

$$c=6.3326, p_1=-7.1592, p'_1=0.2807, p_2=-67.7634, p'_2=-1.6701.$$

分别以以下 2 种控制方法进行仿真分析: 1) 直接取滑模控制增益 $K=18$; 2) 采用本文提出的 RBF 逼近不确定项 f_a , 取到较小的 $K=1$ 。图 2 表示 2 种控制方式下刚性转角的运动; 图 3 表示端点振动; 图 4 显示了 RBF 对不确定函数的逼近效果; 图 5 表示 2 种控制方式下控制器输出。

从仿真结果可以看出, 本文提出的滑模控制方法, 可以实现对柔性机械臂的位置调节, 同时具有较好的减振效果。为了进一步地改善滑模控制品质, 采用可以 RBF 神经网络法逼近未知非线性项, 减小滑模控制增益, 可以极大地减小控制输入的振幅。

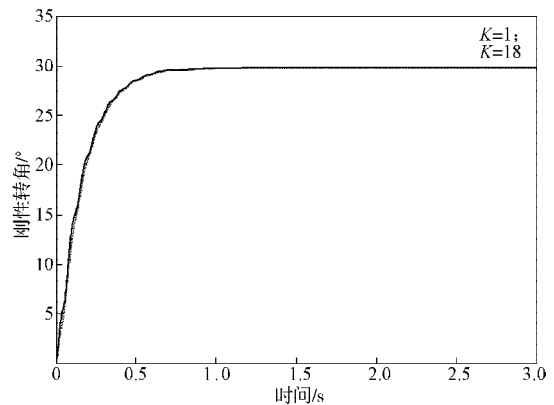


图2 刚性转角运动轨迹

Fig. 2 Trajectory of rigid angle

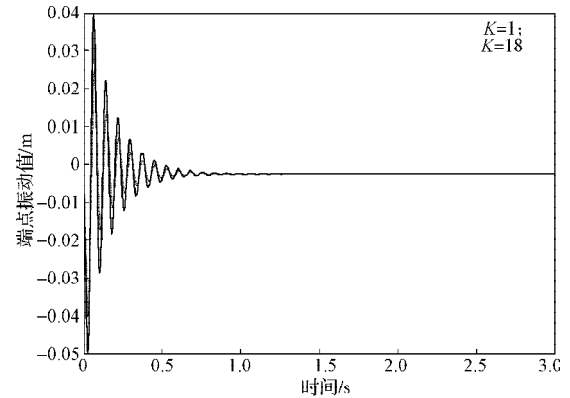


图3 端点振动

Fig. 3 Deflection of link

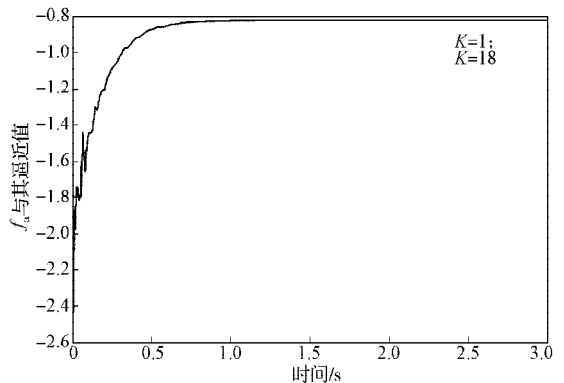


图4 RBF对不确定函数的逼近

Fig. 4 RBF approximation to the uncertain function

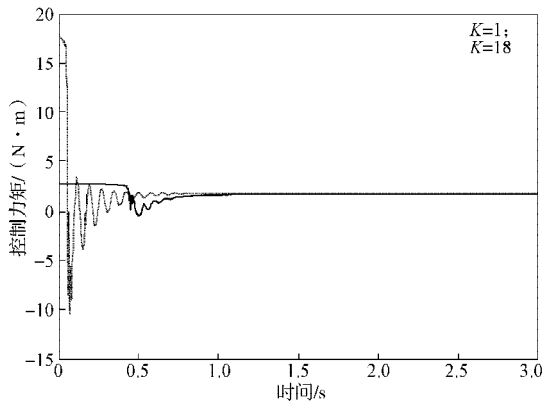


图5 控制力矩

Fig. 5 Control torque

5 结语

本文利用RBF神经网络逼近滑模控制律中不确定项的上界,并结合极点配置技术确定控制律中待定系数,由此提出了基于RBF神经网络法的滑模控制方法,用于对柔性机械臂位置调节和端点抖振的控制。通过Lyapunov稳定性判据,证明了系统的稳定性,从仿真实例可以看出柔性机械臂能快速到达预期角度,同时端点的振动能被快速的抑制。进一步的工作可以将本方法推广至多连杆柔性机械臂控制。

参考文献:

- [1] 戴学丰,孙立宁,刘品宽,等.柔性机械臂控制算法综述[J].电机与控制学报,2002,6(2):158-161.
Dai Xuefeng, Sun Lining, Liu Pinkuan, et al. Review of Flexible Manipulator Control Algorithms[J]. Electric Machines and Control, 2002, 6(2): 158-161.
- [2] Moallem M, Patel R V, Khorasani K. Flexible-Link Robot Manipulators[M]. London: Springer, 2000: 1-10.
- [3] Matsuno F, Murachi T, Sakawa Y. Feedback Control of Decoupled Bending and Torsional Vibration of Flexible Beams[J]. Journal of Robotic System, 1994, 7(1): 341-

353.

- [4] 刘德满,刘宗富.机器人自适应控制:计算力矩法[J].机器人,1989,9(6):9-15.
Liu Deman, Liu Zongfu. Robot Adaptive Control: Computed Torque Method[J]. Robot, 1989, 9(6): 9-15.
- [5] 席雷平,陈自力,齐晓慧.具有抖振抑制特性的机械臂快速滑模变结构控制[J].电机与控制学报,2012,8(2):97-102.
Xi Leiping, Chen Zili, Qi Xiaohui. Fast Sliding Mode Variable Structure Control for Manipulators with Chattering Suppression Effect[J]. Electric Machines and Control, 2012, 8(2): 97-102.
- [6] 谢胜利.迭代学习控制的理论与应用[M].北京:科学出版社,2005:45-60.
Xie Shengli. Iterative Learning Control Theory and Application[M]. Beijing: Science Press, 2005: 45-60.
- [7] 邹建奇,郎英彤,张宪滨.采用神经网络方法研究柔性机械臂逆运动学问题[J].吉林建筑工程学院学报,2011,7(2):5-7.
Zou Jianqi, Lang Yingtong, Zhang Xianbin. Using Neural Network Method of Flexible Manipulator Inverse Kinematics Research[J]. Journal of Jilin Architecture and Civil Engineering Institute, 2011, 7(2): 5-7.
- [8] 李鲤,刘善春.柔性机械臂速度控制研究[J].自动化与仪器仪表,2012,9(5):15-16.
Li Li, Liu Shanchun. Research of Flexible Manipulator Speed Control[J]. Automation and Instruments, 2012, 9(5): 15-16.
- [9] Yeung K S, Chen Y P. Regulation of a One-Link Flexible Robot Arm Using Sliding-Mode Technique[J]. International Journal of Control, 1989, 49(6): 1965-1978.
- [10] 刘金琨.机器人控制系统的设计与Matlab仿真[M].北京:清华大学出版社,2008:35-40.
Liu Jinkun. Robot Control System Design and Matlab Simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 35-40.

(责任编辑:申剑)

