

基于混沌遗传算法的柔性机械手滑模控制器优化设计

张袅娜^{1,2}, 张德江¹, 冯 勇²

(1. 长春工业大学 自动化系, 吉林 长春 130012; 2. 哈尔滨工业大学 电气学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对柔性机械手动力学方程的非最小相位特点, 本文提出一种柔性机械手的终端滑模控制方法, 将关节电机转角和柔性模态变量的线性组合定义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. 设计终端滑模控制策略, 使输入输出子系统在有限时间收敛到零; 利用混沌遗传算法优化控制器的设计参数, 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: 终端滑模控制; 柔性机械手; 混沌遗传算法

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

The optimal design of terminal sliding controller for flexible manipulators based on chaotic genetic algorithm

ZHANG Niao-na^{1,2}, ZHANG De-jiang¹, FENG Yong²

(1. Department of Automation, Changchun University of Technology, Changchun Jilin 130012, China;

2. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: To deal with the non-minimum-phase characteristic, a terminal sliding mode control strategy is proposed for a two-link flexible manipulator. The system output is redefined as a function of the joint angles and the variables of the flexible modes. Through input-output linearization, the system is decomposed into input-output subsystems and zero-dynamics subsystems. A terminal sliding mode control strategy is designed to make the outputs of the input-output subsystems converge in a finite time. By adjusting the parameters in the optimal controller, which is designed by chaotic genetic algorithm, the outputs of the zero-dynamics subsystems will be made asymptotically stable at the equilibrium point. Thus, the original two-link flexible manipulator control system is guaranteed to be asymptotically stable. The control design procedure is simple and easy to be implemented. Simulation results are presented to validate the design.

Key words: terminal sliding mode control; flexible link manipulator; genetic algorithm

1 引言(Introduction)

柔性机械手采用较轻的材料作为机械手的杆件, 具有高负载/自重比、低能耗、高速、适用于直接驱动模式等优点. 这使得柔性机械手在机器人的应用领域极具吸引力. 但是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, 对控制器的设计提出了很高的要求, 一些常用的控制策略有: PID控制^[1], 变结构控制^[2,3], 自适应控制^[4]等. 近来, 有研究人员提出了一种重新定义输出的解决方法^[5], 使得在新的系统输出定义下, 柔性机械手系统在平衡点附近由非最小相位系统变为易于控制的最小相位系统^[1].

本文利用重新定义系统输出的思想, 将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内部子系统两部分; 并在此基础上提出了一种终端滑模控制策略, 使得输入输出子系统有限时间收敛, 并利用混沌遗传算法优化控制器的6个设计参数, 使柔性机械手系统的零动态子系统在平衡点附近渐近稳定, 从而保证整个柔性机械手系统的渐近稳定.

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[6]推导出的双臂柔性机械手动力学模型. 该模型如图1所示. 通过两个安装在关节处的电

机驱动两个柔性臂转动, OX_0Y_0 为固定的参考坐标, OX_1 和 $O'X_2$ 为视两个柔性机械手臂为刚性时的中心线, OX_1Y_1 和 $O'X_2Y_2$ 为分别绕中心 O 和 O' 旋转的局部坐标.

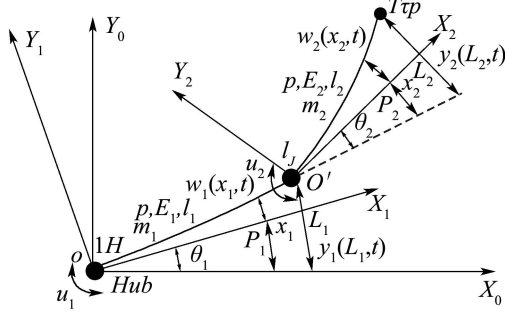


图1 双臂柔性机械手模型示意图

Fig. 1 A two-link flexible manipulators

双臂柔性机械手的动力学方程简述如下^[6]:

$$M(\theta, q) \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_r + E_1 \dot{\theta} \\ f_f + Kq + E_2 \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} u(t), \quad (1)$$

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; $f_r \in \mathbb{R}^2$ 和 $f_f \in \mathbb{R}^{2r}$ 分别受重力、哥氏力和离心力影响的项; $E_1 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$; $E_2 \in \mathbb{R}^{2r \times 2r}$ 分别为正定阻尼矩阵; $K \in \mathbb{R}^{2r \times 2r}$ 为正定刚度矩阵; $M \in \mathbb{R}^{2(r+1) \times 2(r+1)}$ 为正定惯量矩阵.

柔性机械手的端点位移为:

$$y_i(L_i, t) = L_i \theta_i + \sum_{j=1}^r \phi_{iej} q_{ij} = L_i \theta_i + \Phi_{ie}^T q_i, \quad (2)$$

其中 $i=1, 2$. 本文的控制目的为: 调节柔性机械手的端点位移从任意的初始状态精确且快速的到零, 既实现柔性机械手端点的点到点的调节.

3 双臂柔性机械手终端滑模控制(Terminal sliding control of two-Link flexible manipulators)

由于柔性机械手系统从转矩输入到端点位移输出的传函为非最小相位, 当控制有界时, 这个特性阻碍端点位移渐近跟踪期望轨迹, 本文将关节电机转角变量和柔性模态变量的线性组合重新定义为柔性机械手系统的输出, 并根据重新定义的系统输出对柔性机械手系统进行输入输出线性化, 将其分解为由重新定义的输出构成的输入输出子系统和由柔性模态构成的内部子系统两部分.

首先定义矩阵 $N(\theta, q)$ 如下:

$$N(\theta, q) = M^{-1}(\theta, q) = \begin{bmatrix} N_{11}(\theta, q) & N_{12}(\theta, q) \\ N_{21}(\theta, q) & N_{22}(\theta, q) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

定义系统状态变量为: $x = [\theta^T, q^T, \dot{\theta}^T, \dot{q}^T]$.

将柔性机械手系统方程(1)重新写为如下形式:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad (4)$$

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

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & N_{11}(\theta, q) & N_{21}(\theta, q) \end{bmatrix}.$$

重新定义柔性机械手系统的输出 $z(t)$ 如下:

$$z(t) = \lambda_0 \theta(t) + \lambda_1 q(t) = g_1^T x(t), \quad (5)$$

式中: $g_1^T = [\lambda_0, \lambda_1, 0, 0]$, 设计参数 λ_0 和 λ_1 分别为 2×2 维和 $2 \times 2r$ 维对角阵, 且 λ_0 对角线上的各个元素均为非零值, 其选择将在后面详细说明.

下面对柔性机械手系统(4), 根据重新定义的输出(5), 进行输入输出线性化. 对式(5)两次求导后, 得到系统(4)的输入输出子系统如下:

$$\ddot{z}(t) = \alpha(\lambda_0, \lambda_1, x) + \beta(\lambda_0, \lambda_1, x)u(t), \quad (6)$$

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

$$\alpha(\lambda_0, \lambda_1, x) = [-(\lambda_0 N_{11} + \lambda_1 N_{21})(f_r + E_1 \dot{\theta}) - (\lambda_0 N_{12} + \lambda_1 N_{22})(f_f + Kq + E_2 \dot{q})].$$

本文提出一种终端滑模控制器, 利用终端滑模有限时间到达的特点, 使得输入输出子系统有限时间收敛. 首先引入如下终端滑模超曲面 $s(t)$:

$$s(t) = z(t) + c_1 \dot{z}^{p/q}(t), \quad (7)$$

式中 $c_1 = \text{diag}\{c_{11}, c_{12}\}$, $c_{11}, c_{12} > 0$, $p > q$ 为奇数. 下面提出引理1, 证明本文提出的终端滑模控制策略可以保证输入输出子系统有限时间收敛.

引理1 对于输入输出子系统(6), 如果终端滑模超曲面选取为式(7)的形式, 控制输入 $u(t)$ 设计为式(8)形式:

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n(t), \quad (8)$$

$$u_{eq} = -\beta^{-1}(\lambda_0, \lambda_1, x)(\alpha(\lambda_0, \lambda_1, x) + \frac{q}{p} c_1^{-1} \dot{z}^{2-p/q}),$$

$$u_n = -\beta^{-1}(\lambda_0, \lambda_1, x) \frac{q (s^T c_1 \text{diag}(\dot{z}^{p/q-1}))^T}{p \|s^T c_1 \text{diag}(\dot{z}^{p/q-1})\|^2 \eta \|s\|},$$

式中: 假设 $\beta(\lambda_0, \lambda_1, x)$ 可逆, $\eta > 0$ 为设计参数. 则输入输出子系统(6)的状态 $z(t)$ 和 $\dot{z}(t)$ 将在有限时间内收敛到零.

证 选取Lyapunov函数 $V(s) = 0.5 s^T s$, 对 $V(s)$ 求导, 并将控制律(8)代入, 得

$$\dot{V}(s) = s^T \dot{s} = s^T (\dot{z} + c_1 \frac{p}{q} \dot{z}^{p/q-1} \dot{z}) =$$

$$s^T (\dot{z} + c_1 \frac{p}{q} \dot{z}^{p/q-1} (\alpha(\lambda_0, \lambda_1, x) + \beta(\lambda_0, \lambda_1, x)u)) =$$

$$\frac{p}{q} s^T c_1 \text{diag}\{\dot{z}^{p/q-1}\} \beta(\lambda_0, \lambda_1, x) u_n \leq -\eta \|s\|,$$

即当 $\|s\| \neq 0$ 时, $\dot{V}(s) < 0$. 因此, 系统(6)将在有限时间 $t_s = \eta^{-1} \sqrt{2} |V^{\frac{1}{2}}(0)|$ 到达滑模面, 在滑模面上滑动到原点的时间为 $t_{ri} = p[c_{1i}(p-q)]^{-1} z_i^{1-q/p}(t_s)$, $i = 1, 2$, 因此, 输入输出子系统状态从任意初始状态滑动到原点的有限时间为 $t_R = \max_{i=1,2}(t_{ri}) + t_s$.

综上所述, 如果终端滑模超曲面选取为式(7), 控制输入 $u(t)$ 设计为式(8)的形式, 则输入输出子系统(6)的状态将在有限时间内收敛到零.

由于柔性机械手系统为 $2(r+1)$ 维, 输入输出子系统仅为2维, 其余 $2r$ 维的系统状态即为柔性模态变量, 构成了柔性机械手系统的内部子系统. 从系统方程(4)得到

$$\ddot{q} = -N_{21}(f_r + E_1 \dot{\theta}) - N_{22}(f_f + Hq + E_2 \dot{q}) + N_{21}u.$$

柔性机械手系统的内部子系统动力学方程十分复杂, 难以对其进行分析, 一般代之以研究零动态子系统的特性. 根据输入输出子系统(6), 得

$$\ddot{z}(t) = \alpha(\lambda_0, \lambda_1, x) + \beta(\lambda_0, \lambda_1, x)u(t) = 0,$$

解得: $u(t) = -\beta^{-1}(\lambda_0, \lambda_1, x)\alpha(\lambda_0, \lambda_1, x)$, 带入内部子系统中, 得柔性机械手系统的零动态子系统如下:

$$\ddot{q} = [-N_{22} + N_{21}(\lambda_0 N_{11} + \lambda_1 N_{21})^{-1}(\lambda_0 N_{12} + \lambda_1 N_{22})](f_f + Hq + D_2 \dot{q}). \quad (9)$$

将零动态子系统(9)在平衡点 $x=0$ 处线性化. 定义 Ω 为 $x=0$ 的邻域, 在 Ω 域上将式(3)中的矩阵 N , $f_f(\theta, q)$ 在 $x=0$ 处按泰勒级数展开, 可得:

$$N(\theta, q)|_{x \in \Omega} = N_0 + f_{h.o.t}(x), \quad (10)$$

$$N_0 = N(\theta, q)|_{x=0} = [N_{110}, N_{120}; N_{210}, N_{220}],$$

$$f_f(\theta, q)|_{x \in \Omega} = f_{h.o.t}(x), \quad (11)$$

将式(10)(11)都带入零动态子系统(9)中, 可得:

$$\begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = A(\lambda_0, \lambda_1) \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ f_{h.o.t}(x) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$A(\lambda_0, \lambda_1) = [0, I; -P_0 K, -P_0 E_2],$$

$$P_0 = N_{220} - N_{210}(\lambda_0 N_{110} + \lambda_1 N_{210})^{-1} \cdot (\lambda_0 N_{120} + \lambda_1 N_{220}).$$

如果在系统平衡点处线性化后的系统是严格稳定的, 即 $A(\lambda_0, \lambda_1)$ 的特征值严格保证在复平面的左半平面, 则原非线性系统的平衡点是渐近稳定的.

引理 2 如果 λ_0 和 λ_1 选取适当的值, 使得式(12)中矩阵 $A(\lambda_0, \lambda_1)$ 的特征值全为负值, 则系统的零动态子系统(9)将在平衡点处渐近稳定.

证 由文献[7]中的定理3.1, 如果 λ_0 和 λ_1 选取适

当的值, $A(\lambda_0, \lambda_1)$ 的特征值全为负值, 则柔性机械手系统的零动态子系统(9)在平衡点处局部渐近稳定. 综合上面的引理1和引理2, 提出柔性机械手终端滑模控制系统设计的定理1如下:

定理 1 对柔性机械手系统(4), 如果按式(5)重新定义其输出, 选取合适的参数 λ_0 和 λ_1 , 使得式(12)的矩阵 A 的特征值严格为负值, 并且终端滑模选取为式(7), 滑模控制器 $u(t)$ 设计为式(8)的形式, 则系统(4)将在平衡点附近渐近稳定.

证 根据参数 λ_0 和 λ_1 , 按式(5)对柔性机械手系统(4)作输入输出线性化, 得到输入输出子系统(6). 由引理1可知, 如果终端滑模选取为式(7), 滑模控制器 $u(t)$ 设计为式(8)的形式, 输入输出子系统将在有限时间内收敛到零. 由引理2可知, 如果选取参数 λ_0 和 λ_1 使得式(12)的矩阵 A 的特征值严格为负值, 零动态子系统将在平衡点处渐近稳定. 因此原系统(4)也将在系统原点附近渐近稳定, 即原系统的端点位移动输出也渐近收敛到零.

4 利用混沌遗传算法进行参数的优化设计 (Optimization design of parameters based on chaos genetic algorithm)

本文采用混沌遗传算法(GA)对柔性机械手零动态子系统的参数矩阵 A 中的参数 λ_0 和 λ_1 进行寻优, 使得设定的系统性能指标最优.

首先将待寻优的参数 $\lambda_0 = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2\}$ 和 $\lambda_1 = \text{diag}\{\lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6\}$ 表示为遗传算法的基因, 所有的基因串联起来组成个体, 多个个体组成群体, 初始种群采用随机方法生成. 本文采用下列二次型性能指标作为适应度函数(13):

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (x^T Q x) dt, \quad (13)$$

并满足约束条件: $I = \max_{1 \leq j \leq 8} \text{Re}[\lambda_j(A)] < 0$, 式中, $Q \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$ 为正定对称阵, x 为式(12)中的状态向量. 下面利用单点交叉算子和基本位变异算子对父本进行操作, 以产生新个体. 令种群的交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 随父串的适应度值进行自适应调整[8]:

$$p_c(m) = \begin{cases} k_1 \frac{f_{\max}(m) - f_c(m)}{f_{\max}(m) - \bar{f}(m)}, & f_c(m) \geq \bar{f}(m), \\ k_3, & f_c(m) < \bar{f}(m), \end{cases}$$

$$p_m(m) = \begin{cases} k_2 \frac{f_{\max}(m) - f_m(m)}{f_{\max}(m) - \bar{f}(m)}, & f_m(m) \geq \bar{f}(m), \\ k_4, & f_m(m) < \bar{f}(m), \end{cases}$$

式中: m 为遗传代数; $f_{\max}(m), \bar{f}(m)$ 分别为种群中最大、平均适应度函数值; $f_m(m)$ 为变异串的适应度函数值; $f_c(m)$ 为交叉串中的较大适应度函数值; $0 < k_1, k_2, k_3, k_4 \leq 1$.

为防止GA算法的过早收敛,利用混沌运动的随机性、遍历性、规律性和对初值的敏感性等特点,构成混沌插入算子更新群体中的部分个体^[9].采用Logistic映射 $z_{k+1}=\mu z_k(1-z_k)$ 产生混沌序列 $\{z_k\}$,式中, $k=0,1,2,\dots, z_0\in(0,1)$.当 $\mu=4$ 时, $\{z_k\}$ 为完全混沌状态.选取新群体中的适应度较小的90%的个体 $\lambda_s^*=\lambda_{si}$, $\lambda_{si}\in(a_i,b_i)$, $i=1,\dots,6$, $s=1,\dots,r$;通过参数变换 $y_{si}^*=(s_i-a_i)/(b_i-a_i)$,映射到 $[0,1]$ 区间后形成矩阵 $y^*\in\mathbb{R}^{r\times 6}$;再通过Logistic映射得到混沌序列 z_k , $k=1,2,\dots,6r$,并形成矩阵 $y=\{y_{ij}\}\in\mathbb{R}^{r\times 6}$, $y_{ij}=z_{6i+j}$, $i=1,\dots,r$; $j=1,\dots,6$.将混沌序列矩阵 y 加到参数矩阵 y^* ,得 $y'=(1-\alpha)y^*+\alpha y$,式中 $\alpha=1-[(m-1)/m]^\beta$, m 为进化代数, $0<\alpha<1$.对矩阵 y' 进行参数反变换: $\lambda_{si}'=a_i+(b_i-a_i)y_{si}'$,变换到待优化参数的取值范围以内,得到新的个体集合 λ_s' ,以进行下一代的遗传搜索操作.利用混沌变量对子代群体进行微小扰动并随着搜索过程的进行逐渐调整扰动幅度,有效地避免单纯的GA局部收敛与早熟的问题.这样经过给定次数的迭代处理后,最好的个体即为优化问题的最优解.

控制系统框图如图2所示.

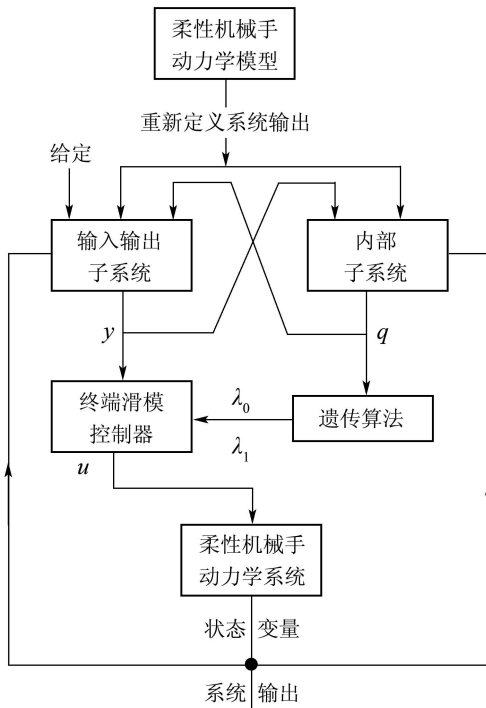


图2 机械手控制系统框图

Fig. 2 Portrait of manipulators control system

5 仿真实例(Simulation)

为了评价所提出的终端滑模控制策略的有效性,对柔性机械手进行仿真,机械手的参数如下: $L_1=L_2=0.8\text{ m}$, $\rho_1=1.1718\text{ kg/m(steel)}$, $\rho_2=0.5859\text{ kg/m(steel)}$, $M_{t1}=0.5\text{ kg}$, $M_{t2}=0\text{ kg}$,

$EI_1=544.32\text{ N}\cdot\text{m}^2$, $EI_2=68.04\text{ N}\cdot\text{m}^2$, $J_1=2.0\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $J_2=0.4\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $J_h=0\text{ kg}\cdot\text{m}^2$;首先说明采用混沌遗传算法优化设计参数 λ_0 和 λ_1 .选取种群规模 $N=30$,遗传代数 $m=200$, $k_1=1.0$, $k_3=0.05$, $k_2=0.5$, $k_4=0.025$, $\lambda_i\in[0,10]$,仿真结果如图3所示,可见经过200代寻优,利用GA算法找到了使得系统满足 J 最小的控制器参数 $\lambda_0=\text{diag}\{9.5279,4.3033\}$ 和 $\lambda_1=\text{diag}\{0.1208,2.8367,0.7565,0.4048\}$.然后根据定理1设计控制器, $c_1=0.5$, $p/q=5/3$.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.仿真结果如图4,5.图4为机械手的端点位移 $y_1(L_1,t)$ 和 $y_2(L_2,t)$,可见端点位移能够在有限时间快速收敛到零.图5为两个机械臂的控制转矩 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$,可见系统实现了终端滑模控制.

由仿真结果可见,采用本文提出的终端滑模控制策略实现了机械手端点位移渐近有限时间快速收敛到零.与文献[5]相比,重新定义的系统输出中的设计参数由原来的2个增至6个,参数的取值范围由原来的 $[0,1]$ 之间取值增至整个实数范围内取值,使得保证零动态子系统稳定的设计参数选择余地增大,系统的收敛速度加快.

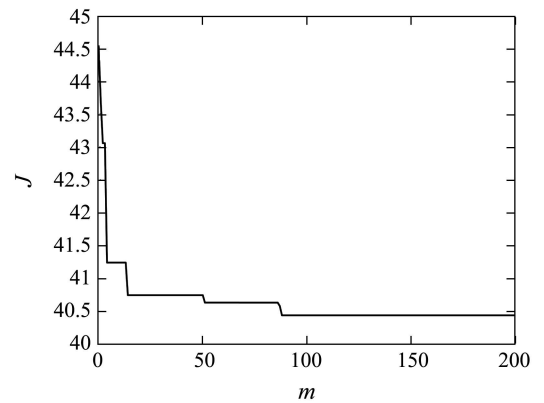


图3 适应度函数 J 的优化进程

Fig. 3 Fitness function

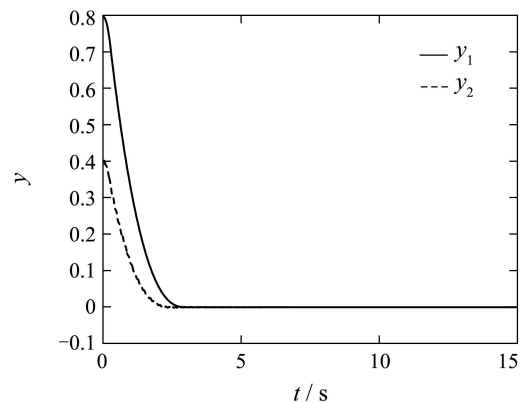
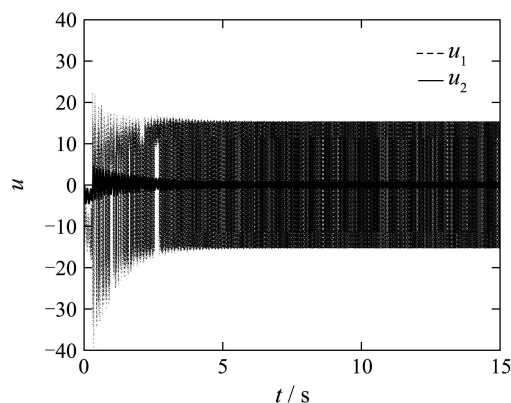


图4 机械手的端点位移 y_1, y_2

Fig. 4 Tip position y_1, y_2

图5 机械臂的控制输入 u_1, u_2 Fig. 5 Control input u_1, u_2

6 结论(Conclusion)

本文采用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;提出的终端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,并通过混沌遗传算法优化设计控制器的参数,保证柔性机械手系统的零动态子系统的平衡点渐近稳定。所提方法设计过程简单,易于实现,并且重新定义的系统输出中的设计参数多,使得保证内部子系统稳定的设计参数选择余地增大。可以有效地抑制柔性机械手系统的振动,从而保证整个柔性机械手系统的渐近稳定。

参考文献(References):

- [1] WANG D, VIDYASAGAR M. Transfer function for a single flexible link[C] // *Proceedings of the IEEE Internet Conference Robot Automation*. Scottsdale: [s.n.], 1989: 1042 – 1047.
- [2] FENG Y, YU X, MAN Z. Non-singular adaptive terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. *Automatica*, 2002, 38(12): 2159 – 2167.
- [3] CHENG Y H, WANG X S, YI J Q. Fuzzy variable structure control for trajectory tracking of two-link flexible manipulators[C] // *2003 Internet Conference Machine Learning and Cybernetics*. Guangzhou: [s.n.], 2003, 2: 711 – 714.
- [4] BAI M, ZHOU D H. Adaptive augmented state feedback control for an experimental planar two-link flexible manipulator[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 940 – 950.
- [5] MOALLEM M, PATEL R V, KHORASANI K. *Flexible-link Robot Manipulators: Control Techniques and Structural Design*[M]. Singapore: Springer Press, 2000: 57 – 72.
- [6] CAO W J. *Several new sliding surfaces and variable structure controllers-integration, analysis and applications*[D]. Singapore: National University of Singapore, 2000.
- [7] SLOTINE J J E, LI W P. *Applied Nonlinear Control*[M]. NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [8] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. *IEEE Transactions on SMC*, 1994, 24(4): 656 – 666.
- [9] 姚俊峰, 梅炽, 彭小奇, 等. 混沌遗传算法及其应用[J]. *系统工程*, 2001, 19(1): 89 – 95.
(YAO Junfeng, MEI Chi, PENG Xiaoqi, et al. A new optimization approach-chaos genetic algorithm[J]. *Systems Engineering*, 2001, 19(1): 89 – 95.)

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.ccit.edu.cn;

冯勇 (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: yfeng@hope.hit.edu.cn.