

双连杆机械臂自抗扰控制器设计

熊 涛¹, 齐乃明², 宋志国²

(1. 北京卫星环境工程研究所, 100094 北京; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 150001 哈尔滨, szglvlnm@163.com)

摘 要: 针对双连杆机械臂非线性耦合系统, 对2个关节分别设计了自抗扰控制器, 运用自抗扰控制技术中的扩张状态观测器对系统进行动态补偿线性化, 从而实现了2个关节的解耦控制. 通过适当选择自抗扰控制器的控制参数, 实现了机械臂的精确轨迹跟踪控制, 仿真结果证明了自抗扰控制器的有效性和较强的鲁棒性, 为机械臂的轨迹跟踪控制提出了新的思路.

关键词: 双连杆机械臂; 自抗扰控制器; 解耦控制; 轨迹跟踪

中图分类号: TP241

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)05-0131-04

Auto-disturbance resistant controller design of two-link manipulators

XIONG Tao¹, QI Nai-ming², SONG Zhi-guo²

(1. Beijing Institute of Satellite Environment Engineering, 100094 Beijing, China;

2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, szglvlnm@163.com)

Abstract: For the nonlinear coupled system of two-link manipulators, ADRC (auto-disturbance resistant control) controllers are designed for the two joints, in which the ESO of ADRC for linearization via dynamic compensation is used to realize the decoupling control of two joints. Accurate tracking control of manipulator is achieved by selecting the control parameters of ADRC properly. Simulation results show the effectivity and the robustness of ADRC and put forward a new way for the tracking control of manipulator.

Key words: two-link manipulators; ADRC; decoupling control; tracking

机械臂是熟知的具有可控轨线机械系统问题, 双连杆机械臂在机器人领域已得到了广泛的应用. 但是, 它是强耦合、非线性、多输入多输出的复杂系统, 如何对它进行有效的控制一直是研究人员关注的热点. 目前的研究方法中多采用滑模变结构控制^[1]、自适应控制^[2]、神经网络控制^[3]等控制方法, 这无疑要增加控制器设计的复杂性.

自抗扰控制技术是发扬传统 PID 优点、吸收现代控制理论成果、开发运用非线性技术而形成的新型实用技术, 因此, 凡是能够应用传统 PID 的地方, 经过数字化就可以运用自抗扰控制器, 使得控制效果和控制精度大幅提高, 尤其是在模型不确定、多变量、外干扰强烈的情况下, 自抗扰控制器更能显示其优越性.

本文根据自抗扰控制器在解决多变量、非线性系统方面的优越性. 针对双连杆机械臂设计了双杆解耦控制的自抗扰控制器, 并对机械臂进行了轨迹跟踪控制. 本文设计的控制器由自抗扰控制技术中的扩张状态观测器, 非线性控制率, 动态补偿线性化组成, 对于解决系统状态之间的耦合以及对系统不确定性的估计、外干扰的补偿都具有良好的控制效果. 自抗扰控制器来源于传统 PID, 控制器设计简单, 物理意义明确, 因此为机器人复杂系统的控制提出了一种新的思路.

1 双连杆机械臂数学模型

本文考虑如图 1 所示的刚性双连杆机械臂, 通过拉格朗日方程, 可以得出机械臂的动态方程如下^[4-5]:

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -h\dot{q}_2 & -h(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ h\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}.$$

收稿日期: 2010-05-25.

基金项目: 航天科技创新基金资助项目(CASC200902).

作者简介: 熊 涛(1967—), 男, 高级工程师;

齐乃明(1962—), 男, 教授, 博士生导师.

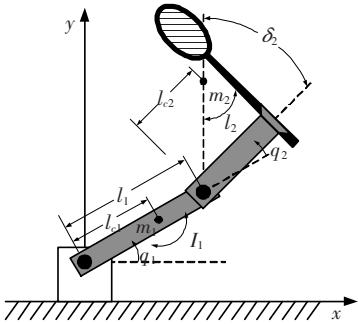


图 1 双连杆机械臂示意

其中:

$$H_{11} = a_1 + 2a_3 \cos q_2 + 2a_4 \sin q_2,$$
$$H_{12} = H_{21} = a_2 + a_3 \cos q_2 + a_4 \sin q_2,$$
$$H_{22} = a_2,$$
$$h = a_3 \sin q_2 - a_4 \cos q_2.$$

式中:

$$a_1 = I_1 + m_1 l_{c1}^2 + I_2 + m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1^2,$$
$$a_2 = I_2 + m_2 l_{c2}^2,$$
$$a_3 = m_2 l_1 l_{c2} \cos \delta_2,$$
$$a_4 = m_2 l_1 l_{c2} \sin \delta_2.$$

并且 $q_1、q_2$ 为 2 个关节角, $q = [q_1 \quad q_2]^T$; $\tau_1、\tau_2$ 为 2 个关节输入,且 $\tau = [\tau_1 \quad \tau_2]^T$; $l_1、l_{c1}、l_{c2}$ 分别为杆长和两杆的质心距离; $m_1、m_2$ 分别为两杆质量, $I_1、I_2$ 分别为两杆转动惯量. 为了便于自抗扰

控制器的设计,将式(1) 简写如下:

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

其中, $H(q)$ 是机械臂的惯性矩阵, $C(q,\dot{q})\dot{q}$ 是二维向心力和科里奥利力矩. 控制系统的设计过程中,认为系统的状态,即关节角向量和关节角速度向量已经测量. 控制的任务是完成机械臂的轨迹跟踪. 由于惯量矩阵为对称正定阵,可以得到便于控制器设计的非线性模型为

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

在不引起歧义的情况下简写为

$$\ddot{q} = -H^{-1}C\dot{q} + H^{-1}\tau. \tag{1}$$

2 双连杆机械臂自抗扰控制器设计

由于双连杆机械臂的 2 个杆之间存在耦合,因此,本文运用自抗扰控制技术中的核心——ESO,通过动态补偿线性化对机械臂进行解耦控制. 由于 ESO 可以估计模型的不确定性,因此并不要求模型以及参数是精确的. 结合自抗扰技术在多变量方面的应用设计自抗扰控制器.

将式(1) 改写为如下形式:

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = f_1(q_1, q_2) + b_{11}\tau_1 + b_{12}\tau_2, \\ \ddot{q}_2 = f_2(q_1, q_2) + b_{21}\tau_1 + b_{22}\tau_2. \end{cases} \tag{2}$$

其中 $f_1(q_1, q_2)、f_2(q_1, q_2)$ 为存在不确定性的方程. 构建如图 2 所示的双连杆机械臂自抗扰控制器.

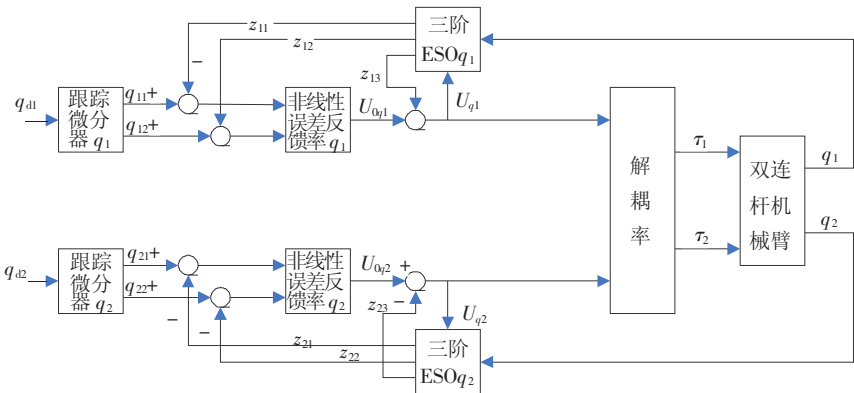


图 2 双连杆机械臂自抗扰控制器

在式(2) 中,取

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix},$$

并引入“虚拟控制量” $[U_{q1} \quad U_{q2}]^T$,则

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = B^{-1} \begin{bmatrix} U_{q1} \\ U_{q2} \end{bmatrix},$$

对双通道构造相同结构的自抗扰控制器进行

解耦控制. 用虚拟控制量控制形成的整个自抗扰控制器具体算法如下^[6-7]:

$$\begin{cases} fh = fhan(q_{11} - q_1, q_{12}, r_0, h), \\ q_{11} = q_{11} + hq_{12}, \\ q_{12} = q_{12} + hfh. \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} e = z_{11} - q_1, fe = fal(e, 0.5, h), fe_1 = fal(e, 0.25, h), \\ z_{11} = z_{11} + h(z_{12} - betq_{11}e), \\ z_{12} = z_{12} + h(z_{13} - betq_{12}fe + U_{q1}), \\ z_{13} = z_{13} + h(-betq_{13}fe_1). \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} e_1 = q_{11} - z_{11}, e_2 = q_{12} - z_{12}, \\ U_{0q1} = -fhan(e_1, e_2, r, h_1), \\ U_{q1} = U_{0q1} - z_{13}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} fh = fhan(q_{21} - q_2, q_{22}, r_0, h), \\ q_{21} = q_{21} + hq_{22}, \\ q_{22} = q_{22} + hfh. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} e = z_{21} - q_2, fe = fal(e, 0.5, h), fe_1 = fal(e, 0.25, h), \\ z_{21} = z_{21} + h(z_{22} - betq_{21}e), \\ z_{22} = z_{22} + h(z_{23} - betq_{22}fe + U_{q2}), \\ z_{23} = z_{23} + h(-betq_{23}fe_1). \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} e_1 = q_{21} - z_{21}, e_2 = q_{22} - z_{22}, \\ U_{0q2} = -fhan(e_1, e_2, r, h_1), \\ U_{q2} = U_{0q2} - z_{23}. \end{cases} \quad (8)$$

其中 $fhan(x_1, x_2, r, h)$ 为韩京清研究员针对离散系统

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k), \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hu, |u| \leq r. \end{cases}$$

构造的最速控制综合函数, 具体算法如下:

$$\begin{aligned} d &= rh, \\ d_0 &= hd, \\ y &= x_1 + hx_2, \end{aligned}$$

$$a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|},$$

$$a = \begin{cases} x_2 + 0.5(a_0 - d)\text{sign}(y), & |y| > d_0; \\ x_2 + y/h, & |y| \leq d_0, \end{cases}$$

$$fhan = - \begin{cases} r\text{sign}(a), & |a| > d; \\ ra/d, & |a| \leq d. \end{cases}$$

$fal(e, a, \delta)$ 为如下定义的非线性函数:

$$fal(e, a, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta; \\ |e|/\delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta. \end{cases}$$

且

$$0 < \alpha < 1, \delta > 0.$$

该算法中, 式(3)和(6)分别为 2 个通道的二阶跟踪微分器, 式(4)和(7)分别为 2 通道的三阶扩张状态观测器, 式(5)和式(8)为非线性误差反馈率. 通过该算法, 可以将双通道耦合系统化为如下所示的单通道独立串联积分系统, 实现解耦控制:

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = U_{0q1}, \\ \ddot{q}_2 = U_{0q2}. \end{cases}$$

以上便是自抗扰控制实现双连杆机械臂解耦控制的原理, 产生的单通道独立串联积分系统采用非线性误差反馈率进行控制. 由于积分会产生积分饱和等负面作用, 因此, 非线性误差反馈率中舍弃了积分作用, 用非线性特性来进行补偿. 虽然有一定的稳态误差, 但是却消除了积分的副作用.

3 仿真分析

在 MATLAB 的 Simulink 环境下, 通过 S 函数实现自抗扰控制器, 按照图 2 搭建仿真框图, 进行数学仿真. 仿真分析中的模型参数选取如下:

$$\begin{aligned} m_1 &= 1 \text{ kg}, l_1 = 1 \text{ m}, I_1 = 0.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \\ l_{c1} &= 0.5 \text{ m}, m_2 = 2 \text{ kg}, \delta_2 = 30^\circ, \\ I_2 &= 0.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, l_{c2} = 0.6 \text{ m}. \end{aligned}$$

仿真初始值选取如下:

$$q_1(0) = 0, q_2(0) = 0.$$

双关节分别跟踪如下轨迹:

$$\begin{aligned} q_{d1}(t) &= 30^\circ(1 - \cos(0.5\pi t)), \\ q_{d2}(t) &= 45^\circ(1 - \cos(0.5\pi t)). \end{aligned}$$

仿真结果如图 3~4 所示.

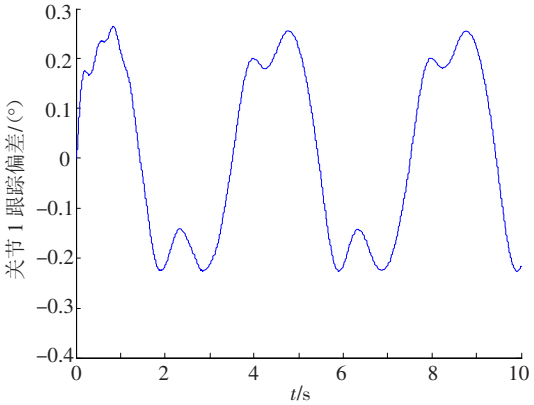


图 3 q_1 轨迹跟踪偏差图

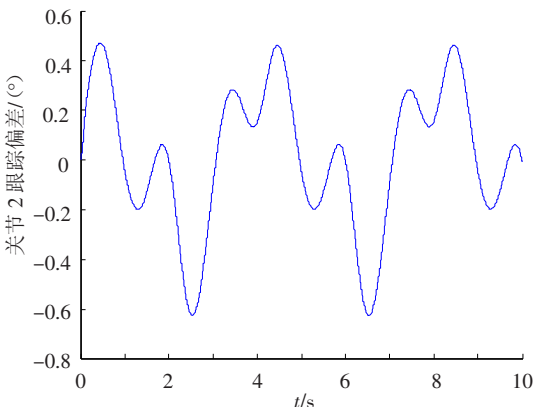


图 4 q_2 轨迹跟踪偏差图

从图 3、图 4 可以看出, 2 个关节角的跟踪效果相当好, 通过比较 2 个关节的轨迹跟踪误差可得, 跟踪角度误差在 $\pm 0.5^\circ$ 以内, 可见, 设计的自抗扰控制器能够实现双连杆机械臂的解耦控制, 并且可以获得很好的控制效果.

为了验证设计的自抗扰控制器的滤波特性以及鲁棒性, 在输入信号中加入幅值为 5° 的噪声干扰, 得到图 5 ~ 6 所示的轨迹跟踪图.

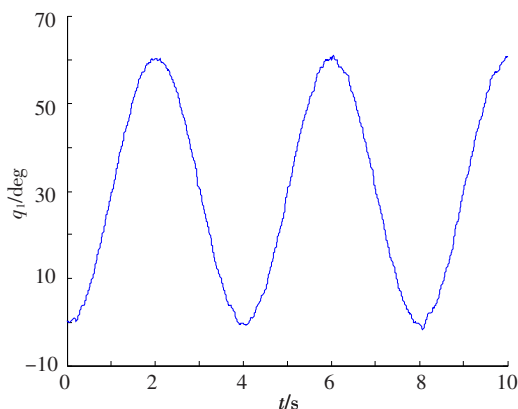


图 5 噪声干扰下 q_1 轨迹跟踪图

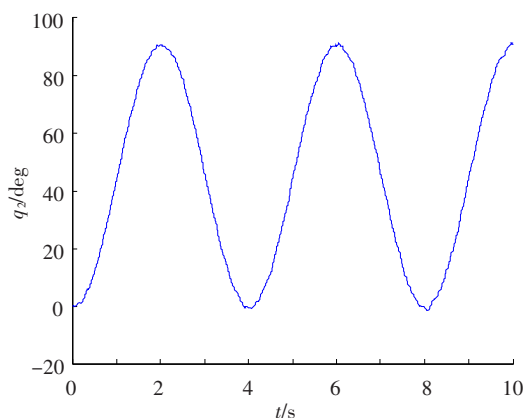


图 6 噪声干扰下 q_2 轨迹跟踪图

由图 5、图 6 可以看出, 自抗扰控制器的滤波特性和抗干扰能力相当强, 自抗扰控制器很好

的解决了传统 PID 对噪声的放大作用. 因此对工程应用具有实际意义.

5 结 论

本文针对机器人中常用的双连杆机械臂, 设计了双通道自抗扰控制器, 实现了双臂之间的解耦控制. 虽然本文采用的是双连杆机械臂刚体模型, 但是设计的控制器同样可以推广到柔性臂的控制中. 最后, 通过仿真验证了设计的自抗扰控制器具有相当好的控制效果, 即使在有强烈干扰的情况下, 控制器仍然能获得较好的控制品质, 具有很好的滤波特性和强鲁棒性. 为复杂非线性、强耦合的机械臂控制提供了新的思路.

参考文献:

- [1] 高道祥, 薛定宇. 基于终端滑模的机械手鲁棒自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(6): 913 - 917.
- [2] SLOTTINE J J E, LI W. Composite adaptive control of robot manipulators [J]. Automatica, 1989, 25(4): 509 - 519.
- [3] 胡慧, 刘国荣. 机械手的在线鲁棒自适应神经网络跟踪控制[J]. 2009, 26(3): 337 - 341.
- [4] SLOTTINE J J E, LI Weiping. 应用非线性控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] CARACCIOLO R, RICHIEDEI D, TREVISANI A, et al. Robust mixed-norm position and vibration control of flexible link mechanisms [J]. Mechatronics, 2005, 15(7): 767 - 791.
- [6] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85 - 88.
- [7] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪——微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177 - 183.

(编辑 张 宏)