

## 基于自抗扰控制的机械臂末端力/位置控制<sup>①</sup>

郑宏伟<sup>②</sup> 刘福才<sup>③</sup>

(燕山大学智能控制系统与智能装备教育部工程研究中心 秦皇岛 066004)

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

**摘要** 针对机械臂末端力/位置控制问题,提出一种基于自抗扰控制(ADRC)的间接力/位置混合阻抗控制方案,将间接力/位置混合控制与阻抗控制相结合,在机械臂未与环境接触时采用位置控制,在与环境接触后切换为间接力控制,并体现出阻抗特性。该方案将混合阻抗控制与 ADRC 相结合,根据机械臂与环境接触时的阻抗模型建立 ADRC 控制器,并将阻抗参数视为系统总扰动的一部分,利用扩张状态观测器进行估计补偿,实现在无需计算阻抗参数的情况下使间接力/位置混合阻抗控制器在面对扰动时有较好的稳定性和鲁棒性。完成二自由度机械臂模型的仿真,并与传统阻抗控制器进行了比较,结果验证了所提出的基于 ADRC 的间接力/位置混合阻抗控制方案的有效性。

**关键词** 机械臂;间接力/位置混合控制;自抗扰控制(ADRC);阻抗控制

随着工业自动化的发展,机械臂控制技术在包括传统工业制造、物流仓储、航空航天技术等许多领域中都扮演着越来越重要的角色,相关应用如协作机械臂<sup>[1]</sup>、空间机械臂<sup>[2]</sup>等都离不开机械臂控制技术的研究。目前商业应用的机械臂通常采用位置控制方法。然而,在某些任务中需要机械臂在动态变化的环境中进行力控制<sup>[3-5]</sup>,例如物料装配、协作搬运、研磨抛光、手术机器人等。因此,国内外很多学者进行了有关机械臂力/位置控制方法的研究。一般来说,机械臂力/位置控制方法可以分为力/位置混合控制<sup>[6]</sup>和阻抗控制<sup>[7]</sup>2种,力/位置混合控制方法需要将机械臂的力和运动控制解耦为相互正交的力和位置2个独立的子空间分别控制。而阻抗控制方法的思路是利用阻抗模型构建力和位置的动态关系,不单独控制力和位置。由于机械臂系统的非线性、不确定性和外界干扰等因素,上述传统控制方法在实际应用中存在控制效果不佳或无法抵抗干扰的不足。因此,在上述2种方法的基础上,业界提出许

多更高级的力/位置控制方法。文献[8]在阻抗控制方法的基础上加入了自适应神经网络,利用自适应神经网络对系统不确定性进行补偿,提高力/位置跟踪精度。文献[9]利用小波神经网络对机械臂外部环境进行在线学习,实现阻抗参数的自适应调整,解决传统阻抗控制无法适用于未知变化环境的缺陷。文献[10]提出在自适应阻抗控制的基础上加入模糊增益动态面的控制方法,通过调谐动态面增益对外部干扰进行观测并克服扰动从而提升系统对外部干扰的鲁棒性。文献[11]将基于速度的自适应变阻抗控制方法应用到商用工业机器人中。文献[12]设计了基于神经网络观测器的补偿控制系统,利用神经网络逼近机械臂动力学模型的不确定项,实现机械臂在动力学模型不确定情况下的力/位置控制。文献[13]提出将阻抗控制与滑模控制相结合的阻抗滑模控制方法,相比于传统阻抗控制提升了系统快速性和稳定性。文献[14]在力/位置混合控制的基础上加入一种多层神经网络控制器,提

① 载人航天领域预研项目(2016040301),河北省自然科学基金(F2022203043)和省级重点实验室绩效补助经费(22567612H)资助项目。

② 男,1997年生,硕士生;研究方向:机器人控制技术;E-mail:2557738437@qq.com。

③ 通信作者,E-mail:lfc@ysu.edu.cn。

(收稿日期:2023-07-24)

高了系统抵抗干扰的能力。文献[15]提出将变结构控制应用于力/位置混合控制中,改善了系统鲁棒性和动、静态性能。上述控制方法均在传统控制方法的基础上加入了智能控制策略,如自适应方法<sup>[8-9,11]</sup>、模糊方法<sup>[10]</sup>、神经网络方法<sup>[12-14]</sup>、滑模方法<sup>[13]</sup>和变结构方法<sup>[15]</sup>等,提升了系统控制性能和鲁棒性。在上述研究的基础上,本文研究一种应用于汽车轮毂表面缺陷检测及标注机器人的机械臂力/位置控制方法。汽车轮毂表面缺陷检测及标注机器人为传统工业机器人的一种,可以通过其末端夹持的标记工具来完成对汽车轮毂表面缺陷的标记任务。文献[14,15]中的控制方法需要对机械臂的关节力矩直接控制,而传统的工业机械臂一般只能进行位置控制<sup>[16-17]</sup>,故在不改造或重新设计其控制器的情况下,上述方法不能直接应用于汽车轮毂表面缺陷检测及标注机器人中,且轮毂表面为非规则曲面,其表面缺陷的位置标注具有一定的随机性。而文献[8-13]中设计的控制方法结构比较复杂,需要利用神经网络或自适应方法等智能控制方法根据外部环境的变化在线计算阻抗模型参数以保证控制效果,因而需要比较大的计算量,并且存在实时性差的缺点。完全基于阻抗控制的各种方法使机械臂在执行任务的全过程保持在力交互状态<sup>[11]</sup>,显然这对于需要人机交互的应用场景是合适的,但是对于汽车轮毂表面缺陷检测及标注的生产环境中的机械臂,一般只需要在其末端与环境接触时控制接触力的大小,而无需在执行任务的全过程保持力交互的状态。

针对上述问题,本文提出一种基于自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)的机械臂力/位置控制方法,设计了间接力/位置混合阻抗控制器。首先,控制器设计是基于位置的,无需直接控制机械臂的关节力矩,故可以适用于包含位置控制的工业机器人在内的大部分机器人,适用性广泛;其次,结合了力/位置混合控制和阻抗控制的优点,在机械臂与环境无接触时执行位置控制,接触环境后切换为间接力控制,并体现出阻抗特性,提高了力空间和位置空间的控制精度。最后,将ADRC控制方法<sup>[18]</sup>与阻抗控制相结合,相比于文献[8-13]中需

要利用各种先进策略对阻抗模型参数进行精确计算的控制方法,ADRC的实现相对简单有效,可以将阻抗模型各参数视为系统总扰动的一部分,由扩张状态观测器进行估计补偿,无需实时计算阻抗参数便可以有效地实现系统的稳定性和鲁棒性。

## 1 机械臂动力学模型

在进行机械臂力/位置控制算法的设计与仿真时,首先需要建立机械臂动力学模型。本文采用二连杆机械臂进行仿真实验。常用的机械臂动力学模型推导方法有2种,其一是基于牛顿-欧拉公式进行分析,其二是基于拉格朗日力学方程进行分析。考虑到机械臂本身可视为多自由度的系统,而拉格朗日力学方程适用于描述多自由度的系统,可以方便地将系统的动能和势能与运动状态相关联。因此,本文选用拉格朗日力学方程,在忽略机械臂自身摩擦力和外部干扰的情况下,建立简化的机械臂动力学模型如式(1)所示。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(q)\ddot{q} + \mathbf{B}(q, \dot{q})\dot{q} + \mathbf{G}(q) \quad (1)$$

式中,  $q$  和  $\dot{q}$  分别代表关节角度和关节角速度,  $\mathbf{M}(q)$  为机械臂惯性矩阵,  $\mathbf{B}(q, \dot{q})$  表示离心力和哥氏力,  $\mathbf{G}(q)$  为重力项,  $\boldsymbol{\tau}$  为控制力矩。机械臂模型如图1所示。

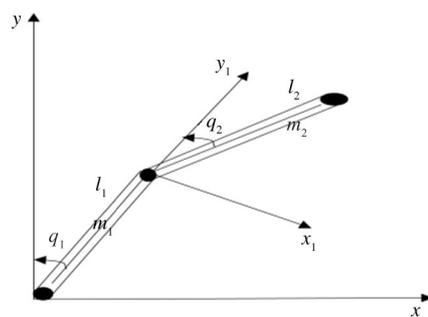


图1 二连杆机械臂模型

图1中,  $[x, y]$ 、 $[x_1, y_1]$  分别为基座坐标系、关节1坐标系;  $m_i$  表示第  $i$  个连杆的质量 ( $i = 1, 2$ );  $l_i$  是第  $i$  个连杆的长度 ( $i = 1, 2$ );  $q_i$  为机械臂第  $i$  个关节角度 ( $i = 1, 2$ )。假设每个连杆的质量都集中在连杆的末端,故式(1)中各矩阵参数可具体化为



环境可以用弹簧系统的简化模型表述,表达式为

$$x = f/k_t + x_t \quad (7)$$

式中,  $k_t$  为环境刚度;  $x_t$  为机械臂与环境的初始接触位置。当系统到达稳态时,有  $\ddot{f}_d = \dot{f}_d = 0$ 、 $\ddot{x}_d = \dot{x}_d = 0$ , 故将式(7)代入式(6)可得系统稳态时的二阶线性微分方程:

$$\ddot{f} = (k_t f_d - b\dot{f} - (k + k_t)f - kk_t x_t + kk_t x_d)/m \quad (8)$$

### 2.2.2 ADRC 控制器设计

目前,如何提高系统对干扰,如环境刚度变化、测量噪声等的抵抗能力是机器人力/位置控制研究的难点。而 ADRC 控制器有着突出的抗干扰能力,故设计采用 ADRC 控制器作为力控制器以提高机械臂力/位置控制系统的鲁棒性。

ADRC 控制器的系统框图如图 2 中 ADRC 部分所示,包含跟踪微分器(tracking differentiator, TD)、线性状态误差反馈控制律(linear state error feedback, LSEF)和扩张状态观测器(extended state observer, ESO)3 部分。图中  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$  为状态观测量,  $a$  是扰动补偿因子,用来调节输出对扰动补偿的强弱;  $f_d$  为期望接触力,  $x_d^f$  表示力控制方向上的期望位置。ADRC 控制器接收期望接触力后计算出力控制方向上的期望位置,将其输入到机械臂位置内环。

根据式(8),选取状态变量  $x_1 = f$ ,  $x_2 = \dot{f}$ ,  $x_3 = \omega$ ,  $\omega = (k_t f_d - b\dot{f} - (k + k_t)f - kk_t x_t)/m$ , 其中  $\omega$  为力/位置控制系统的总扰动,如外部环境刚度变化和阻抗模型未知参数等。取  $a = kk_t/m$ ,  $u = x_d$ ,  $y = x_1$ , 得到式(8)所对应阻抗模型的二阶对象方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + au \\ x_3 = \omega \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $x_3$  为扩张的状态变量,包含了可能影响力/位置控制稳定性的未知扰动。自抗扰控制器可以通过对  $x_3$  的实时跟踪观测,最后进行估计补偿达到抑制干扰对系统影响的效果。由式(9)可以建立如下扩张状态观测器:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ f_e = fal(e, 0.5, \delta) \quad f_{e1} = fal(e, 0.25, \delta) \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}f_e + au \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}f_{e1} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $f_e$ 、 $f_{e1}$  为关于  $e$  的非线性函数,为了方便后续计算,可将其线性化为  $e$ , 得:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}e + au \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}e \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$ 、 $\beta_{03}$  为误差反馈增益,  $e$  为输出误差。取  $y$  为系统输出,  $u$  为系统输入,可将式(11)改写为状态空间的形式:

$$\begin{cases} \dot{z} = \mathbf{A}z + \mathbf{B}u + \mathbf{L}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = \mathbf{C}z \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{式中, } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = [0 \quad a \quad 0]^T, \mathbf{L} =$$

$$[\beta_{01} \quad \beta_{02} \quad \beta_{03}]^T, \mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 0], z = [z_1 \quad z_2 \quad z_3]^T, \hat{y} \text{ 为 } y \text{ 的观测值。由式(12)整理可得:}$$

$$\dot{z} = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})z + [\mathbf{B} \quad \mathbf{L}] \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中,  $z$  为状态观测器的输出;矩阵  $[u \quad y]$  为状态观测器的输入。构造状态矩阵  $\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C}$ ,  $\bar{\mathbf{B}} = [\mathbf{B} \quad \mathbf{L}]$ 。为使观测器最终可以准确观测到系统状态,可以使用极点配置法,将观测器系统的极点配置到  $s$  平面的左半平面。观测器系统的特征多项式为

$$|s\mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}}| = s^3 + \beta_{01}s^2 + \beta_{02}s + \beta_{03} \quad (14)$$

将所有极点都配置到  $-\omega_0$  处,  $\omega_0$  为系统带宽,可得:

$$|s\mathbf{I} - \bar{\mathbf{A}}| = (s + \omega_0)^3 = s^3 + 3\omega_0 s^2 + 3\omega_0^2 s + \omega_0^3 \quad (15)$$

因此,由式(14)和式(15)对比可得  $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$ 、 $\beta_{03}$  分别为  $3\omega_0$ 、 $3\omega_0^2$ 、 $\omega_0^3$ 。

设计跟踪微分器用来安排过渡过程,传统力/位

置控制方法无法解决因机械臂力外环的输出只能是连续值而非跳变值,而期望的接触力大小是跳变值所造成的力控制器设计无法兼顾快速性与无超调的问题。但是为代表期望接触力的系统输入信号安排合理的过渡过程,可以有效解决这一问题,实现力控制的快速无超调。本文采用的跟踪微分器形式为

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = -r \operatorname{sign}\left(v_1 - f_d + \frac{v_2 |v_2|}{2r}\right) \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $f_d$  为跟踪微分器的输入;  $r$  为速度因子,用于调节过渡过程的快慢;  $v_1$ 、 $v_2$  为跟踪微分器的输出,其中  $v_1$  为  $f_d$  的跟踪信号;  $v_2$  为  $\dot{f}_d$  的跟踪信号。通过该跟踪微分器可以将跳变的系统输入信号转化为连续信号输入到线性状态误差反馈控制环节中,改善系统的动态性能。

设计线性状态误差反馈控制律的表达式如下:

$$u_0 = k_p(v_1 - z_1) + k_D(v_2 - z_2) \quad (17)$$

将系统总扰动表达式  $\omega = (k_f \dot{f}_d - b \dot{f} - (k + k_i) f - k k_i x_i) / m$  代入式(8),可得:

$$\ddot{f} = \omega + a u \quad (18)$$

取系统输入  $u$  的表达式为

$$u = (u_0 - z_3) / a \quad (19)$$

当观测器能够准确观测扰动时,有  $\omega = z_3$ , 结合式(17)、(18)和(19),化简可得:

$$\ddot{f} = k_p(v_1 - z_1) + k_D(v_2 - z_2) \quad (20)$$

对式(20)进行拉式变换可以得到机械臂力/位置控制系统模型的闭环传递函数如式(21)所示。

$$G(S) = \frac{f(s)}{f_d(s)} = \frac{k_D s + k_p}{s^2 + k_D s + k_p} \quad (21)$$

在实际工程应用中为了便于调节参数,可以取系统带宽为  $-\omega_1$ , 此时由系统特征方程  $s^2 + k_D s + k_p = (s + \omega_1)^2$ , 可以得到  $k_p = \omega_1^2$ 、 $k_D = 2\omega_1$ 。此时系统所有闭环极点均在  $s$  平面左半平面,系统闭环稳定。

### 3 仿真实证

#### 3.1 仿真参数设定

为了验证所设计控制方案的有效性,评估控制效果,本文利用 Matlab 的 Simulink 工具箱和  $s$  函数以二连杆机械臂模型为实验对象,对所设计的力/位置控制系统进行了建模仿真,其中基于 ADRC 的 Simulink 仿真模型如图 3 所示,基于传统阻抗控制方法的 Simulink 仿真模型如图 4 所示。二连杆机械臂的动力学模型由式(1)给出,其中,取参数  $m_1 = 0.3 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 0.3 \text{ kg}$ ,  $l_1 = 3 \text{ m}$ ,  $l_2 = 3 \text{ m}$ ,  $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  为重力加速度。机械臂末端的位置约束条件为

$$\begin{cases} x = -l_1 \sin q_1 - l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ y = l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos(q_1) \end{cases} \quad (22)$$

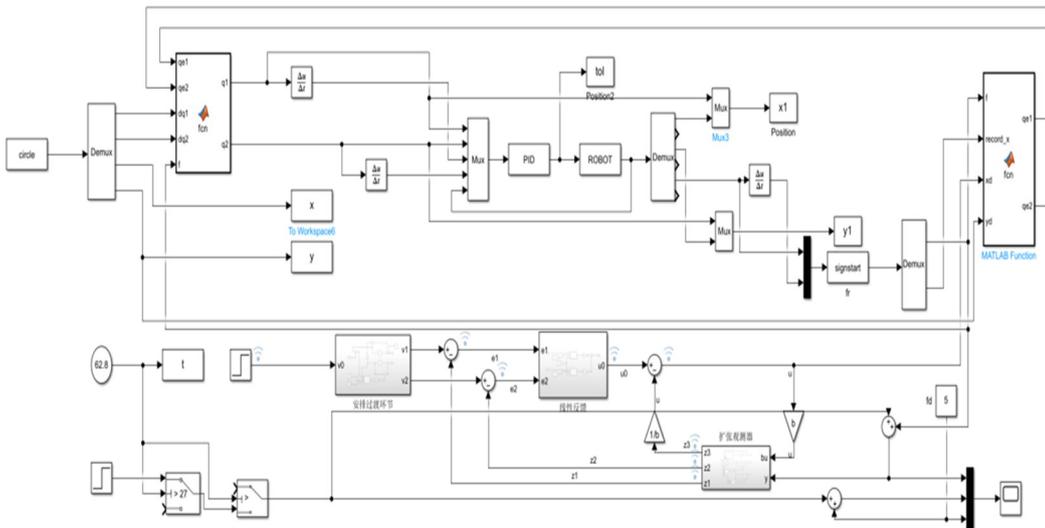


图 3 基于 ADRC 的机械臂力/位置控制系统仿真模型

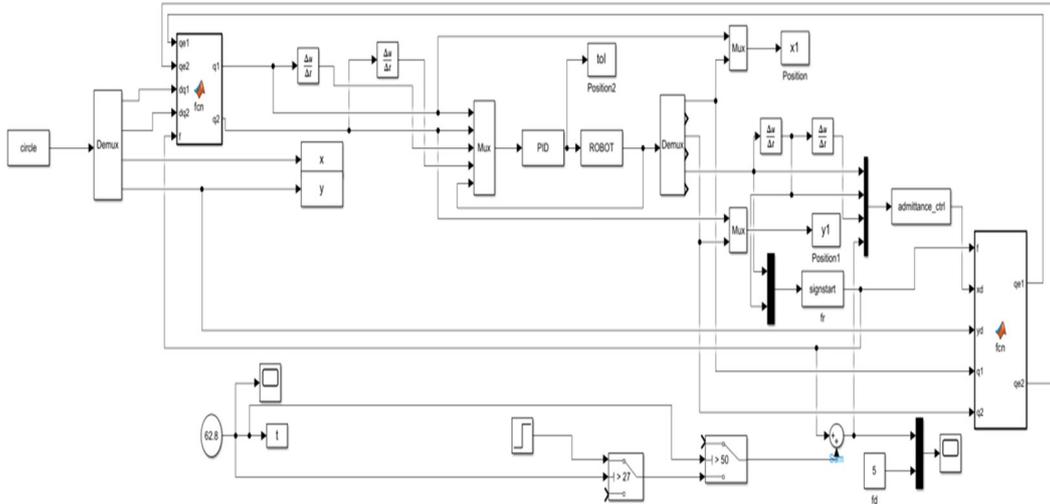


图 4 基于传统阻抗控制的机械臂力/位置控制系统仿真模型

式中,  $x$  为机械臂在  $x$  坐标方向上的位置;  $y$  为机械臂在  $y$  坐标方向上的位置。仿真中给定机械臂末端轨迹曲线为

$$\begin{cases} x = 3 + \cos(t) \\ y = 3 + \sin(t) \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $t$  为 Simulink 仿真步长, 这里取值为  $0.001 \text{ s}$ 。

取  $x$  坐标方向为机械臂的力控制方向, 故机械臂在  $x$  方向上的位置受到约束, 而  $y$  方向为位置不受约束的方向。取机械臂末端在  $x$  方向上与环境的期望接触力大小为  $5 \text{ N}$ 。环境模型由式(7)给出, 其中取初始环境刚度  $k_t = 200 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ , 初始环境位置  $x_t = 2.8 \text{ m}$ 。

机械臂末端在  $x$  轴方向上的力与位置的动态约束关系由式(8)给出, 其中的参数  $k, b, m$  为未知量, 本文设计的 ADRC 控制器可以对模型参数未知的系统进行控制, 故将  $k, b, m$  参数统一视为未知扰动项不做具体取值。

ADRC 控制器参数根据迭代法和工程调试经验得到, 在本文设计的仿真模型中, 取  $\omega_0 = 3.27, \omega_1 = 1.35, r = 10$  可以得到较好的控制效果。

为了便于评估控制效果, 在力控制部分分别采用传统的阻抗控制方法和 ADRC 方法进行控制效果的对比。传统阻抗控制仿真模型参数为  $m = 0.001 \text{ kg}, k = 130 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}, b = 0.51 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 3.2 仿真结果分析

在上述仿真参数的设定下, 选择仿真时间为

$68 \text{ s}$ , 仿真结果如图 5 ~ 10 所示。

#### (1) 位置跟踪

机械臂末端位置跟踪曲线如图 5 所示, 虚线为给定末端轨迹, 实线为实际跟踪轨迹。机械臂从起始位置出发, 跟踪由式(23)所设定的圆形轨迹。当机械臂末端在  $x$  方向上的位置到达  $2.800 \text{ m}$  时, 机械臂开始与环境接触, 机械臂末端在  $x$  方向上的控制方式由位置控制切换为力控制, 并使环境产生了沿  $x$  方向上的约  $-0.024 \text{ m}$  的形变, 此时机械臂末端与环境接触力的大小为  $5 \text{ N}$ 。同时机械臂继续沿  $y$  方向运动直到脱离环境后切换为位置控制模式继续运动到轨迹终点。

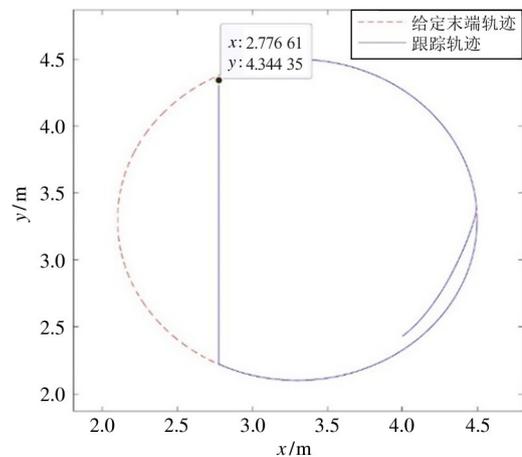


图 5 位置跟踪曲线

#### (2) 力跟踪

基于 ADRC 的力跟踪曲线和传统阻抗控制的

力跟踪曲线对比图如图 6 所示,横坐标为仿真时间,纵坐标为力的大小。由图 6 可以看出,虽然 ADRC 是基于无模型设计的控制方法,无需提前知道模型参数,而阻抗控制需要设定准确的模型参数,但是其两者在无扰动的前提下控制效果差别不大,力调节时间均不大于 1 s,且均无超调量,稳态误差为 0。可见基于 ADRC 的力控制器相比于传统阻抗控制器可以在不改变控制效果的前提下简化控制器设计难度。

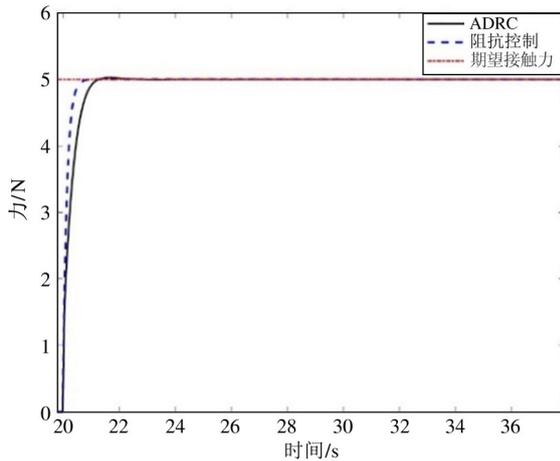


图 6 期望力跟踪曲线

### (3) 环境变化适应性

当环境刚度  $k_i$  发生突变,本文中  $k_i$  从 200 突变到 300 时,基于 ADRC 的期望力跟踪曲线和传统阻抗控制的期望力跟踪曲线对比图如图 7 所示,其扰动部分的力跟踪局部放大对比图如图 8 所示。由图 7 和图 8 分析可知,选取  $\pm 5\%$  误差带,ADRC 控制

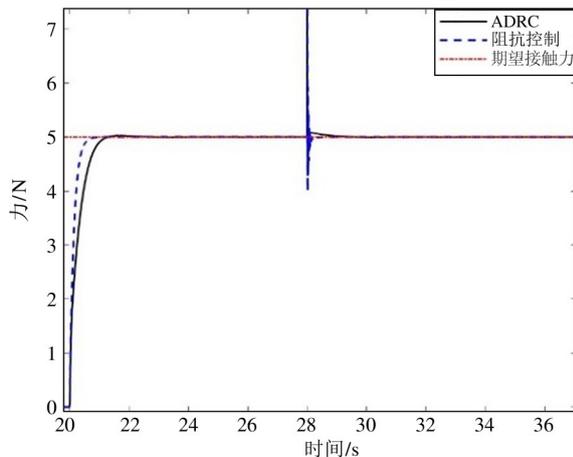


图 7 期望力跟踪曲线对比图(环境刚度变化)

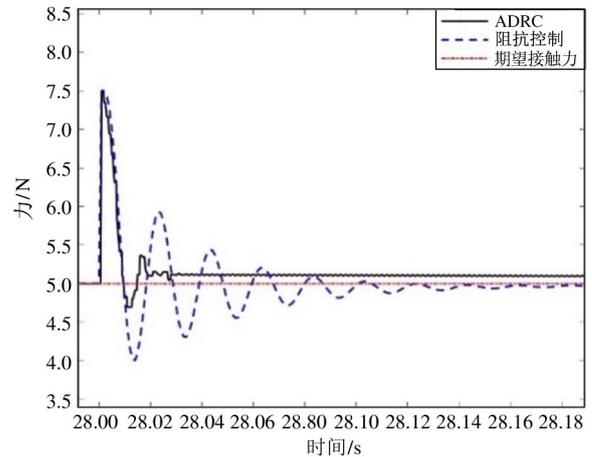


图 8 扰动部分局部对比图(环境刚度变化)

器在环境刚度突变后的恢复时间为 0.02 s,传统阻抗控制器在面对环境刚度突变时的恢复时间为 0.10 s,ADRC 控制器比传统阻抗控制器的恢复时间缩短了 80%。故基于 ADRC 的控制器比传统阻抗控制器有更好的适应环境变化的能力。

### (4) 抗干扰能力

当机械臂末端力传感器对接触力的测量受阶跃信号噪声干扰时,其中阶跃信号终值为 0.5 N,基于 ADRC 的期望力跟踪曲线和传统阻抗控制的期望力跟踪曲线对比图如图 9 所示,其扰动部分的力跟踪局部放大对比图如图 10 所示。由图 9 和 10 分析可知,选取  $\pm 5\%$  误差带,基于 ADRC 的力控制器在系统受到阶跃噪声干扰后的恢复时间为 0.012 s,动态降落为 10.0%,传统阻抗控制器在系统受到阶跃噪声干扰后的恢复时间为 0.160 s,动态降落为 72.0%,基于 ADRC 的力控制器比传统阻抗控制器的恢复时

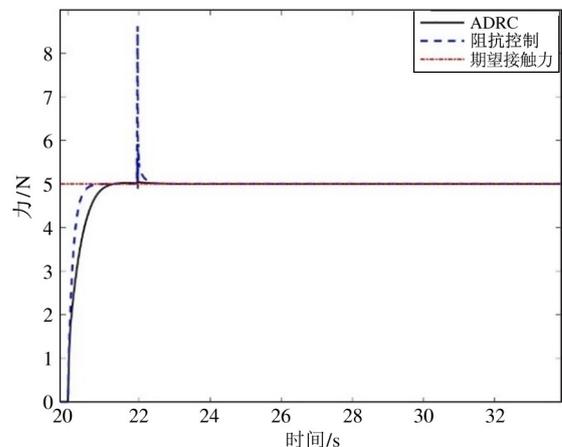


图 9 期望力跟踪曲线对比图(阶跃信号噪声干扰)

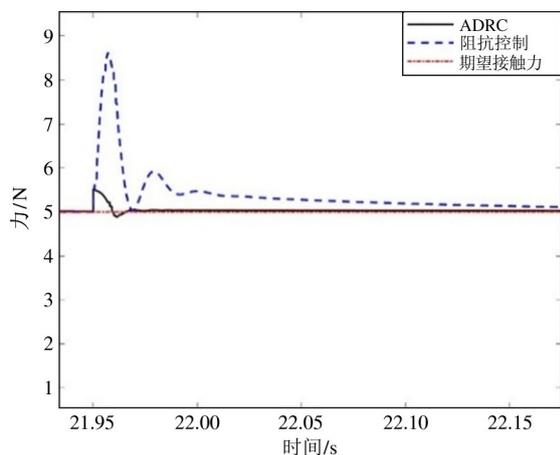


图 10 扰动部分局部对比图(阶跃信号噪声干扰)

间缩短了 92.5%, 动态降落减少 62.0%。故基于 ADRC 的控制器比传统阻抗控制器在应对阶跃信号噪声干扰时有更好的抑制效果。

## 4 结论

本文设计了一种基于 ADRC 的机械臂力/位置控制系统,采用可以适用于包含位置型机械臂在内的大多数机械臂的间接力/位置混合阻抗控制策略。由 ADRC 控制器构成机械臂力控制外环,PD 控制器构成机械臂位置控制内环。通过分析适用于描述机械臂力与位置动态关系的阻抗模型所对应的二阶微分方程设计了 ADRC 控制器的扩张状态观测器。将阻抗模型中的未知参数视为系统总扰动中的一种,相比于传统阻抗控制大幅简化了控制器设计难度。

仿真实验分别对比了 ADRC 控制器和传统阻抗控制器在应对环境刚度突变和阶跃信号噪声干扰时的控制效果。仿真结果表明,ADRC 控制器能够在环境刚度突变和系统受到阶跃噪声干扰的情况下仍然具有较好的鲁棒性和控制效果,尤其在系统受到扰动后的恢复过程中,ADRC 有更小的恢复时间和动态降落,解决了传统阻抗控制无法应对外界干扰或在外界干扰下控制效果变差的不足。该结果验证了基于 ADRC 的机械臂力/位置控制系统具有更好的控制性能和较强的抵抗干扰的性能,解决了在传统控制方法下设计的机械臂力/位置控制器抵抗

干扰能力不足的难题。

## 参考文献

- [ 1 ] 夏浩,崔奇,滕游,等. 基于 DMPC 的多机械臂协同操作控制[J]. 高技术通讯, 2023,33(4):428-435.
- [ 2 ] 刘福才,赵文娜,孟玲聪. 不同重力环境下空间机械臂切换控制[J]. 高技术通讯, 2020,30(10):1049-1055.
- [ 3 ] SANJURJO E, DOPICO D, LUACES A, et al. State and force observers based on multibody models and the indirect Kalman filter[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018,106:210-228.
- [ 4 ] HUANG J, XIE Z, JIN M, et al. Adaptive impedance-controlled manipulator based on collision detection[J]. Chinese Journal of Aeronautics(English Edition), 2009, 22(1):105-112.
- [ 5 ] SERAJI H. Adaptive admittance control: an approach to explicit force control in compliant motion[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego, USA: IEEE, 2002:2705-2712.
- [ 6 ] CRAIG J J, RAIBERT M H. A systematic method of hybrid position/force control of a manipulator[C] // IEEE International Computer Software and Applications Conference. Chicago, USA: IEEE, 1979:446-451.
- [ 7 ] HOGAN N. Impedance control an approach to manipulation. I-Theory. II-Implementation. III-Applications[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1985,107:304-313.
- [ 8 ] YANG Z Q, PENG J Z, LIU Y H. Adaptive neural network force tracking impedance control for uncertain robotic manipulator based on nonlinear velocity observer[J]. Neurocomputing, 2019,331:263-280.
- [ 9 ] HAMEDANI M H, SADEGHIAN H, ZEKRI M, et al. Intelligent impedance control using wavelet neural network for dynamic contact force tracking in unknown varying environments[J]. Control Engineering Practice, 2021,113: 104840.
- [ 10 ] HAMEDANI M H, ZEKRI M, SHEIKHOESLAM F, et al. Recurrent fuzzy wavelet neural network variable impedance control of robotic manipulators with fuzzy gain dynamic surface in an unknown varied environment[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2021,416:1-26.
- [ 11 ] DONG J, XU J, ZHOU Q, et al. Physical human-robot interaction force control method based on adaptive varia-

- ble impedance [J]. Journal of the Franklin Institute, 2020,357(12):7864-7878.
- [12] 王泰华,马彬彬,李亚飞. 基于神经网络观测器的机械臂力/位置控制[J]. 制造业自动化, 2023,45(2):184-188.
- [13] 魏徐正. 基于阻抗滑模控制器的系泊机械臂力/位置控制研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2020.
- [14] LEWS F L, YESILDIREK A, LIU K. Neural net robot controller:structure and stability proofs[J]. Journal of Intelligent and Robotic System, 1995,12:277-299.
- [15] 周其节, 苏春翌. 变结构理论在机器人控制中的应用[J]. 机器人,1989,3(5):61-64.
- [16] DUAN J J, GAN Y H, CHEN M, et al. Symmetrical adaptive variable admittance control for position/force tracking of dual arm cooperative manipulators with unknown trajectory deviations[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019,57:357-369.
- [17] DUAN J, GAN Y, CHEN M, et al. Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018,102:54-65.
- [18] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013,12(30):1499-1510.

## ADRC-based end-effector force/position control for robotic arm

ZHENG Hongwei, LIU Fucai

(Engineering Research Center of Ministry of Education for Intelligent Control System and Intelligent Equipment, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

### Abstract

A novel approach is proposed for the end-effector force/position control of a robotic arm based on active disturbance rejection control (ADRC) called the indirect force/position mixed impedance control scheme. This scheme combines indirect force/position mixed control with impedance control, where position control is utilized when the robotic arm is not in contact with the environment, and switches to indirect force control with impedance characteristics upon contact with the environment. Furthermore, this scheme integrates mixed impedance control with ADRC by establishing an ADRC controller based on the impedance model of the robotic arm when in contact with the environment. The impedance parameters are treated as part of the total disturbance of the system. A extended state observer is employed to estimate and compensate for these parameters, thereby achieving better stability and robustness of the indirect force/position mixed impedance controller in the presence of disturbances without the need for computing impedance parameters. Finally, simulation using a two-degree-of-freedom robotic arm model is done, and the proposed ADRC-based indirect force/position mixed impedance control scheme is compared with traditional impedance controllers. The effectiveness of the proposed scheme is verified.

**Key words:** robotic arm, indirect force/position mixed control, active disturbance rejection control (ADRC) is done, impedance control