DOI: 10.3901/JME.2019.15.124

基于阻抗控制的机器人旋拧阀门轴向位置 自适应跟踪*

邢宏军 丁亮 高海波 夏科睿 刘振 陶建国 邓宗全
(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150080)

摘要: 针对核电救灾环境机器人作业需求,面向旋拧阀门末端接触力的鲁棒性问题,开展了基于阻抗控制的阀门轴向位置自适应跟踪研究,实现了自适应阻抗控制对阀门轴向位置的有效跟踪。阻抗控制可以较好地实现对接触力/位置动态响应的调节却无法做到精确的位置跟踪,且对末端接触不稳定的鲁棒性较差。为在旋拧阀门中解决该问题,设计了一种鲁棒性更好的新型阻抗模型,并结合自适应控制设计了基于新型阻抗模型的位置跟踪策略,较好地解决了对阀门手轮轴向位置的跟踪。在SolidWorks、ADAMS和Matlab/Simulink联合仿真平台上进行了机器人旋拧阀门仿真,并在搭建的机器人旋拧阀门作业平台进行了试验验证。结果表明,该自适应方法可以精确地实现对阀门手轮轴向位置的跟踪,同时提高了作业系统对末端接触不稳定问题的鲁棒性。

关键词: 旋拧阀门; 阻抗控制; 自适应控制; 位置跟踪; 联合仿真

中图分类号: TP24

Adaptive Tracking of Axial Position for Valve-turning with a Robot Based on Impedance Control

XING Hongjun DING Liang GAO Haibo XIA Kerui LIU Zhen
TAO Jianguo DENG Zongquan

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

Abstract: Aim at the working requirement for rescue robots in nuclear disaster, and orient to the robust problem of end contact force in valve-turning, research on adaptive tracking of the axial position of valve handle based on impedance control has been carried out, and effective tracking of the axial handle position utilizing adaptive impedance control has been realized. Impedance control can preferably realize the adjustment of the dynamic response of force/position of the contact ends, but it cannot achieve precise position tracking, and has poor robustness to end contact instability. To solve these problems in valve-turning, a novel impedance model, which has better robustness, has been designed, and combining with adaptive control, a position tracking strategy based on the novel impedance model has been devised, which can solve the tracking of valve handle axial position problem satisfactorily. Robotic valve-turning simulation has been done based on the SolidWorks, ADAMS and Matlab/Simulink joint simulation platform, and physical experiment has also been executed using the established valve-turning platform. The results show that this adaptive method can relatively precisely realize the tracking of valve handle axial position, and at the same time, the robustness of the operating system to end contact instability has been improved.

Key words: valve-turning; impedance control; adaptive control; position tracking; joint simulation

0 前言

救灾应急能力已成为衡量救灾机器人作业能力

的重点指标。在类似核电站这样的重工业基地中,没有良好的救灾应急预案将会带来巨大的隐患^[1]。近年来,在美国国防高级研究计划局(DARPA)机器人挑战赛的影响下,机器人执行救灾作业受到国内外高校和研究机构的广泛关注^[2-4]。

阀门在核电站中有着广泛的应用。及时开启/关闭相关阀门将极大地降低核事故造成的危害,同时,使用机器人进行相关作业将是一个很好的选择,

* 国家重点基础研究发展计划(973计划, 2013CB035502)、“111”创新引智计划(B07018)、机械系统与振动国家重点实验室课题(MSV201610)和国家自然科学基金创新研究群体项目(51521003)资助项目。20180828收到初稿, 20190607收到修改稿

一方面这将避免核辐射给操作员带来伤害, 另一方面也将提高作业效率。旋拧阀门作业作为核电救灾的基本作业形式之一, 利用机器人高效地完成该项任务将给灾后救援工作的展开带来极大便利。

机器人旋拧阀门作业起源于上世纪末, 随着核电技术的快速发展, 利用机器人执行核电站内的相关作业逐渐引起了人们的重视。美国田纳西大学的 TRIVEDI 等^[5]在 20 世纪 80 年代提出了一种带有工业机器人的旋拧阀门试验平台, 该平台利用计算机视觉系统建立作业环境和物体分布布局图, 再通过多种传感器的反馈信息进行旋拧阀门作业。日本 YOON 等^[6]将旋拧阀门作业进行了操作步骤规划, 并结合力/位混合控制, 获得了较好的作业效果。AHMADZADEH 等^[7-8]针对阀门位置估计与跟踪、阀门旋拧分别设计了模仿学习和力/运动混合控制策略, 实现了移动机器人自主旋拧阀门的作业目标。在 DARPA 机器人挑战赛中, 双臂操作或单臂操作的形式是多数参赛队伍的选择, 这两种方法都可以较好的完成设定的作业目标, 但双臂作业涉及到双臂之间的协调问题, 控制难度要大得多^[9-10]。

针对作业对象位置柔顺跟踪问题, 目前主要采用的方法是阻抗控制和力/位混合控制, 并通过自适应控制或神经网络等智能方法改善其性能^[11]。由于机器人末端位置测量相对困难, 在文献中一般采用末端作用力作为位置跟踪性能的衡量指标。SERAJI 等^[12]提出了一种自适应阻抗方法, 该方法将阻抗模型中的参考位置等效为力跟踪误差的 PD 信号并基于李雅普诺夫函数设计了自适应控制律, 试验结果表明该方法具有良好的环境位置跟踪效果。WANG 等^[13]基于神经网络提出了一种自适应力跟踪方法, 通过神经网络获得系统未知参数并通过梯度下降法获得自适应控制律, 同时运用李雅普诺夫稳定性理论证明了该方法的稳定性。段星光等^[14]将阻抗控制与力/位混合控制交互使用, 实现了在不确定环境下跟踪一般曲面的轮廓。陈金宝等^[15]将阻抗控制运用于机器人关节空间中, 通过控制末端接触力, 实现了在强力抓取物体时对机器人和作业对象的保护。XU^[16]提出了一种基于位置的改进型阻抗控制方法, 实现了对恒定接触力和时变接触力的跟踪, 并通过奈奎斯特稳定判据证明了闭环耦合系统的稳定性。柯贤锋等^[17]结合柔顺控制的思想, 提出了一种将主动柔顺控制与被动柔顺相结合的新方法, 该方法较好地实现了足式机器人柔顺性触地。

目前有关于机器人旋拧阀门的研究大多关注于如何识别阀门位置和规划旋拧阀门的路径, 而忽视

了旋拧阀门过程中阀门手轮的轴向位置变化问题, 同时也很少涉及对末端接触不稳定问题的分析及处理。该问题若得不到有效处理, 将造成机器人在旋拧阀门的过程中产生过大的末端接触力, 且系统的作业稳定性也难以保证。而在位置跟踪研究上, 目前大多数相关研究以环境位置不变动为前提, 导致在环境位置发生改变时, 很多方案的位置跟踪效果不理想。

本文基于阻抗控制方法, 设计了一种对末端接触不稳定具有更强鲁棒性的新型阻抗模型, 并运用李雅普诺夫稳定性理论设计了自适应控制律, 该方法实现了对阀门轴向位置的实时估计。本文在此基础上进行了机器人旋拧阀门的联合仿真和样机试验, 仿真和试验结果表明该方法可以有效解决机器人旋拧阀门时由手轮轴向位置变动和接触不稳定带来的问题。

1 机器人旋拧阀门问题分析

为完成相关的问题描述及分析, 本文搭建了机器人旋拧阀门作业平台, 如图 1 所示, 主要由机器人作业系统和阀门安装系统组成。机器人作业系统由移动平台、摄像头、6R 机械臂、六维力传感器和末端执行器组成, 其中六维力传感器安装于机械臂和末端执行器连接处, 用于测量末端接触力。阀门安装系统由阀门和阀门安装架组成, 其中阀门安装架可用于调节阀门安装的高度和方向, 便于对不同方位的阀门进行旋拧试验。

图 1 机器人旋拧阀门作业平台

通过移动平台将机械臂移动至阀门前方, 之后根据获得的阀门位置信息进行机械臂轨迹规划, 使末端执行器的手指端进入阀门手轮内, 利用机械臂的第 6 关节转动进行旋拧阀门作业。

作为核电救灾作业的重点之一, 机器人旋拧阀门作业在执行中需要考虑两个问题。

(1) 在实际应用中, 由于工业阀门形式的多样

性,有些阀门手轮在转动的同时将产生轴向位移,若不考虑该问题,将造成旋拧阀门过程中,机械臂末端执行器和手轮间产生过大接触力,直接损伤作业系统。

(2) 工业阀门的手轮形式主要存在以下三种:三轮辐式、四轮辐式和五轮辐式^[15]。为配合不同形式的手轮,末端执行器的末端手指应设计成多指形式。当阀门转轴和末端执行器转轴间存在侧向位姿偏差时,在旋拧阀门过程中,实际与手轮轮辐产生轴向接触的末端手指是周期性变化的,在受力末端手指的切换过程中,末端轴向力将发生变化。本文采用的是五轮辐式阀门,末端执行器为三指型,三个手指间的夹角分别为 72° , 144° 和 144° ,这种三指型手指的设计主要是为了便于末端手指进入阀门手轮中,手指个数与轮辐个数的不同并不是产生轴向力变化的根本原因。图 2 所示为旋拧阀门中的接触位置变化示意,在旋拧阀门时将产生三根手指轮流与手轮轮辐接触的情形,极不利于末端执行器与手轮间产生稳定轴向接触。

图 2 旋拧阀门中的接触位置变化

综合以上分析,本文的研究点是设计一种新型控制策略以保证机器人在旋拧阀门过程中可实时跟踪阀门手轮轴向位置,避免过大轴向接触力的产生,同时提高作业系统对末端接触不稳定问题的鲁棒性。

2 阻抗控制的跟踪特性分析

阻抗控制由 HOGAN 于 1985 年提出,该方法的目标是实现机器人末端位置和末端接触力的理想动态关系,因而无法实现精准的位置跟踪。但阻抗控制适应性较强,可以同时适用于自由空间和约束空间的机器人运动控制设计。

根据阻抗控制的定义,可将其描述成如下二阶模型

$$\begin{cases} M\Delta\ddot{X} + B\Delta\dot{X} + K\Delta X = -F_e \\ \Delta X = X - X_d \end{cases} \quad (1)$$

式中, M 、 B 和 K 分别为机器人的理想惯量、理想阻尼和理想刚度; X 和 X_d 分别为实际位置和期望位置; F_e 为机器人末端与环境接触力。

同时,将机器人末端与环境间的接触力模型简

化为弹簧模型

$$F_e = \begin{cases} K_e(X - X_d) & X \geq X_d \\ 0 & X < X_d \end{cases} \quad (2)$$

式中, K_e 为环境刚度, X_e 为环境位置。

由于阻抗控制中的期望位置为定值,当实际接触位置与期望位置出现偏差时,必然出现较大接触力,无法进行精确的位置跟踪。以下内容将分析阻抗控制中精确位置跟踪的条件。为简化表达形式,后文的分析将以 x 、 x_d 、 x_e 、 f_e 、 k_e 、 m 、 b 和 k 分别代替 X 、 X_d 、 X_e 、 F_e 、 K_e 、 M 、 B 和 K 。

在机器人旋拧阀门过程中,末端手指与手轮轮辐轮流接触会造成末端轴向力突变或抖动,阻抗控制由于对末端接触力变化不敏感,无法对轴向接触力进行更快速的调节。

为提高作业系统对阀门手轮轴向位置跟踪的精度,必须加强控制系统对末端接触力突变或抖动的敏感性。为此,本文将阻抗控制式(1)中的表达式进行了修改

$$m\Delta\ddot{x} + b\Delta\dot{x} + k\Delta x = -k_p f_e - k_D \dot{f}_e \quad (3)$$

式(3)可看成是在原阻抗模型式(1)的基础上引入了接触力的比例-微分控制,微分项的存在可提高模型对末端接触力变化的敏感性。调节 k_p 可进一步减小位置跟踪误差,调节 k_d 可改变模型对接触力变化的敏感度,从而整体提高模型的位置跟踪性能。 k_p 和 k_d 的整定和末端手指与手轮轮辐接触性质有关。当接触刚度较大时,可以选择较小的 k_p 以避免产生过大位移;当接触刚度较小时,可以选择较大 k_p 以提高系统的响应能力。 k_d 根据试验获得的接触力抖动情况设定。此外,由于阀门的轴向移动速度较为缓慢,在分析中可将期望位置视为常量,式(3)可改写为

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + k(x - x_d) = -k_p f_e - k_D \dot{f}_e \quad (4)$$

以 f_d 表示期望力,以 $e = f_d - f_e$ 表示力跟踪误差。由环境接触模型式(2)可知,位置 x 可表达为

$$x = \frac{1}{k_e} f_e + x_e = \frac{1}{k_e} (f_d - e) + x_e \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)中,得

$$m\ddot{e} + b'\dot{e} + k'e = m\ddot{f}_d + b'\dot{f}_e + k'\dot{f}_e + k k_e x_e - k k_e x_d \quad (6)$$

式中, $b' = b + k_D k_e$, $k' = k + k_p k_e$ 。

对式(6)进行拉氏变换并整理

$$E(s) = F_d(s) + \frac{k k_e (X_e(s) - X_d(s))}{m s^2 + b' s + k'} \quad (7)$$

力跟踪稳态误差为

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \left[F_d(s) + \frac{kk_e(X_e(s) - X_d(s))}{ms^2 + b's + k'} \right] \quad (8)$$

改进型阻抗模型更进一步地减小了力跟踪稳态误差, 因为由式(8)可知, k_p 和 k_D 只影响力跟踪稳态误差表达式中的分母。引入接触力的比例-微分控制后, 当增加增益 k_p , 将更容易实现力跟踪误差零输出, 这直接说明了该模型优于传统阻抗模型。

当设定的期望力为恒力时, 即: $F_d(s)=f_d/s$; 环境位置为 $X_e(s)=x_e/s$ 。此时的力跟踪稳态误差为

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{k'f_d + kk_e x_e - kk_e s X_d(s)}{k'} \quad (9)$$

若要使力稳态误差 $e_{ss}=0$, 则期望位置 x_d 必须是一个定值, 且满足

$$x_d = x_e + \frac{(k + k_p k_e) f_d}{kk_e} \quad (10)$$

在式(10)中, 参数 k 、 k_p 和 f_d 由操作员根据实际接触情形设定。因此, 实现力误差为零的跟踪目标的关键是能实时计算出环境位置 x_e 和刚度 k_e 。有关于 x_e 和 k_e 的估计, 将在下节介绍。

3 自适应控制器设计

本文的研究目标是实现对环境位置(阀门位置)的有效跟踪, 但由于环境位置不易精确测量, 本文采用的是通过对末端接触力的跟踪来间接实现对环境位置的跟踪。由式(10)可知, 若环境位置 x_e 和刚度 k_e 可被测量或估计, 则可计算出力跟踪误差为零时的期望位置 x_d , 从而实现对期望力的零误差跟踪, 也即实现了对环境位置的有效跟踪。

参考文献[10]中提出的间接自适应控制方法, 本文将期望位置 x_d 定义为

$$x_d = \hat{x}_e + \frac{(k + k_p \hat{k}_e) f_d}{k \hat{k}_e} \quad (11)$$

式中, $\hat{x}_e$ 、 $\hat{k}_e$ 分别 x_e 、 k_e 的实时估计值。下面采用自适应方法对式(11)中的 $\hat{x}_e$ 、 $\hat{k}_e$ 进行在线估计。

由环境接触模型式(3)可知

$$f_e = k_e(x - x_e) = k_e x - k_x \quad (12)$$

式中, $k_x = k_e x_e$ 。根据 $\hat{x}_e$ 和 $\hat{k}_e$ 可知接触力实时估计值 $\hat{f}_e$ 为

$$\hat{f}_e = \hat{k}_e(x - \hat{x}_e) = \hat{k}_e x - \hat{k}_x \quad (13)$$

式中, $\hat{k}_x$ 为 k_x 的估计值。定义 $\varepsilon_k = \hat{k}_e - k_e$, $\varepsilon_x = \hat{k}_x - k_x$, 且 $\varepsilon = [\varepsilon_k, \varepsilon_x]^T$ 。由式(12)、(13)可知

$$\hat{f}_e - f_e = [x \quad -1]\varepsilon \quad (14)$$

若 $\hat{f}_e = f_e$, 由式(12)、(13)可知

$$f_e = \hat{k}_e x - \hat{k}_e \hat{x}_e \quad (15)$$

结合式(11)和式(15)可知

$$f_e = \hat{k}_e x - \hat{k}_e \hat{x}_e = -\hat{k}_e(x_d - x) + \frac{k + k_p \hat{k}_e}{k} f_d \quad (16)$$

则

$$x - x_d = -\frac{e}{\hat{k}_e} - \frac{k_p}{k} f_d \quad (17)$$

将式(17)代入改进型阻抗模型式(3)中, 并结合期望力恒定的前提, 可知

$$m\ddot{e} + (b + k_D \hat{k}_e)\dot{e} + (k + k_p \hat{k}_e)e = 0 \quad (18)$$

在稳态时, 由式(18)可知 $(k + k_p \hat{k}_e)e = 0$ 。由于环境刚度 $k_e > 0$, 所以 $\hat{k}_e > 0$, 即 $k + k_p \hat{k}_e > 0$ 。因此, 力跟踪误差 $e = f_d - f_e = 0$ 。即当 $\hat{f}_e \rightarrow f_e$ 时, $f_e \rightarrow f_d$ 。只要满足 $\hat{f}_e \rightarrow f_e$, 就可实现力误差为零的位置跟踪。

采用李雅普诺夫稳定性理论设计 $\hat{k}_e$ 和 $\hat{k}_x$ 的更新算法实现 $\hat{f}_e \rightarrow f_e$ 。定义候补李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} \varepsilon^T \Pi \varepsilon \quad (19)$$

式中, Π 为 2 阶正定对称方阵, 不妨设为

$$\Pi = \begin{bmatrix} 1/\gamma_1 & 0 \\ 0 & 1/\gamma_2 \end{bmatrix}, \quad \gamma_1 \text{ 和 } \gamma_2 \text{ 为正标量常值。}$$

定义 $\dot{\varepsilon}$ 为

$$\dot{\varepsilon} = -\Pi^{-1} \begin{bmatrix} x \\ -1 \end{bmatrix} (\hat{f}_e - f_e) \quad (20)$$

则候补李雅普诺夫函数沿着 $\dot{\varepsilon}$ 方向的导数为

$$\dot{V} = \varepsilon^T \Pi \dot{\varepsilon} = -\varepsilon^T \begin{bmatrix} x \\ -1 \end{bmatrix} (\hat{f}_e - f_e) = -(\hat{f}_e - f_e)^2 \quad (21)$$

由此可知, 当估计误差 ε 按式(20)给出的方向变化时, 自适应系统对 $\hat{f}_e$ 渐进稳定, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\hat{f}_e \rightarrow f_e$, 从而 $f_e \rightarrow f_d$ 。

结合 ε 的定义和式(20), 可知

$$\begin{cases} \dot{\hat{k}}_e = -\gamma_1 x (\hat{f}_e - f_e) \\ \dot{\hat{k}}_x = \frac{\hat{f}_e - f_e}{\hat{k}_e} (\gamma_1 x \hat{x}_e + \gamma_2) \end{cases} \quad (22)$$

综上, 期望位置 x_d 的自适应控制器设计如下

$$x_d = \hat{x}_e + \frac{(k + k_p \hat{k}_e) f_d}{k \hat{k}_e} \quad (23a)$$

$$\hat{k}_e(t) = \hat{k}_e(0) - \gamma_1 \int_0^t x (\hat{f}_e - f_e) dt \quad (23b)$$

$$\hat{x}_e(t) = \hat{x}_e(0) + \int_0^t \frac{\hat{f}_e - f_e}{\hat{k}_e} (\gamma_1 x \hat{x}_e + \gamma_2) dt \quad (23c)$$

$$\hat{f}_e = \hat{k}_e (x - \hat{x}_e) \quad (23d)$$

式(4)和式(23)给出了基于阻抗控制的零力误差

位置跟踪自适应方法。但需要注意的是,式(23)在系统存在建模误差时,无法保证 ε 的有界性,同时也无法保证 $\hat{x}_e$ 和 $\hat{k}_e$ 的有界性。因此,在进行仿真或试验时,需要在预判的基础上设定 $\hat{x}_e$ 和 $\hat{k}_e$ 的极限值,即 $\hat{k}_e(t) \in [\hat{k}_e^-, \hat{k}_e^+]$, $\hat{x}_e(t) \in [\hat{x}_e^-, \hat{x}_e^+]$ 。

图3 位置跟踪自适应控制框图

图3为所设计的位置跟踪自适应控制框图。其中, x_c 是阻抗控制器的下发控制指令,当忽略机器人位置控制误差时, $x_c = x$; 参数估计器如式(23b)~(23d)所示; 自适应控制器如式(23a)所示; 改进型阻抗模型如式(4)所示。

假设机器人的位置控制无误差,本文在 Matlab/Simulink 中对所设计的自适应控制系统位置跟踪性能进行了仿真分析。图4是阻抗控制、改进型阻抗控制和改进型自适应阻抗控制以相同控制参数分别在不同工况下的位置跟踪性能仿真结果。其中, $m=1$, $b=6.32$, $k=10$, $k_p=5$, $k_d=4$, $f_d=0.2$ N, $\gamma_1=\gamma_2=10$ 。期望力 f_d 设定值较小,可以减小改进型自适应阻抗控制由于期望力造成的位置跟踪误差,便于与其他方法进行比较。

图4 不同工况下的位置跟踪误差

各个工况的说明如下:图4a中的环境位置不变,环境刚度为20 N/mm;图4b中的环境位置以1 mm/s的速度进行移动,环境刚度同上;图4c中的环境位置在5 s时发生了1 mm的突变,环境刚度同

上;图4d中的环境刚度在5 s时从20 N/mm变为40 N/mm。

如图4a所示,当环境位置与刚度不变时,阻抗控制可实现稳定的位置跟踪,但由于期望位置与环境位置间存在误差,控制系统无法对环境位置进行准确跟踪;相对而言,其他两种控制方法的跟踪误差小很多,其中,改进自适应型阻抗控制可以实现对环境位置的零误差跟踪。

由图4b可知,当环境位置呈线性变化时,尽管改进型阻抗控制对环境位置的跟踪性能要优于阻抗控制,但两者都已失去对环境位置的跟踪能力,而改进自适应型阻抗控制仍能较好地实现对环境位置的跟踪,当环境位置的移动速度为1 mm/s时,其位置跟踪误差为0.05 mm。

从图4c的结果可看出,当环境位置突变时,改进型与改进自适应型阻抗控制的瞬态响应都较快,但改进自适应型出现了较大的超调现象,这主要是期望力 f_d 设置过小引起的,由式(23a)可知, f_d 过小,期望位置的更新较慢,从而无法对环境位置的变化进行快速响应。该缺点可通过适当增大 f_d 解决,但 f_d 过大,又将带来系统对环境位置的跟踪误差,因此, f_d 的取值需要依实际要求而定。

图4d反映的是环境刚度突变时的位置跟踪性能。当环境刚度突变时,改进型阻抗控制的响应速度比阻抗控制快,且调整时间较短,但两者的跟踪性能均逊于改进自适应型阻抗控制,由图4d可知,环境刚度的突变对改进自适应型阻抗控制的位置跟踪结果基本没影响,因为在自适应控制律中,环境刚度的估计值不随环境刚度的突变而突变。

以期望力为 $f_d=10$ N,对改进自适应型阻抗控制的接触力估计值进行了仿真分析,工况仍为上述四种,仿真结果如图5所示。

图 5 不同工况下的力估计值

由图 5 结果可知，在不同工况下，接触力估计值 f_e 收敛于期望力 f_d ，再次证明了前述稳定性分析结论的正确性。

4 联合仿真与试验

4.1 联合仿真平台的搭建

工业阀杆螺距和机器人旋拧阀门速度的不同将造成手轮轴向位移速度的差异，且阀门手轮刚度也各不相同。为充分验证上述改进自适应型阻抗控制在跟踪阀门轴向位置的性能，本文搭建了基于 SolidWorks、ADAMS 和 Matlab/Simulink 的机器人旋拧阀门联合仿真平台。其中，旋拧阀门仿真模型如图 6 所示。在图 6 中，末端执行器与阀门手轮接触的末端手指设计成带凸起末端的结构，便于在轴向勾住手轮轮辐，防止末端手指在轮辐上滑动。

图 6 旋拧阀门仿真模型

联合仿真平台搭建步骤如下：① 在 SolidWorks 中绘制仿真平台的三维模型；② 将模型适当简化，仅保留必要的驱动关节及结构，导入至 ADAMS 中，在 ADAMS 中完成运动副、约束与接触参数的设置；③ 将 ADAMS 模型导入 Simulink 中，并按图 3 所示的自适应控制框图在 Simulink 中搭建控制系统，完成整个仿真平台的建立；④ 在 Simulink 中设置

仿真参数，实现机器人旋拧阀门联合仿真。

4.2 仿真实验

如图 6 所示，操作者通过对移动平台的控制将机器人作业平台移动至目标阀门前方，通过机械臂轨迹规划使末端执行器进入阀门手轮内，之后通过自适应阻抗控制方法实现在旋拧阀门过程中对阀门手轮轴向位置的跟踪。旋拧阀门运动实际上只涉及机械臂第 2、3、5 和 6 关节，第 6 关节输出旋拧力矩，第 2、3、5 关节的综合运动提供末端执行器轴向位移。

表 1 6R 机械臂关节质量

关节	质量/kg
1	3.2
2	3.2
3	2.0
4	2.0
5	1.2
6	1.2

如图 3 所示，本文设计的基于阻抗控制的位置跟踪自适应方法，采用位置内环/力外环的控制策略。在位置控制器中，本文采用 PID 控制器作为关节控制器，仿真模型中机械臂各关节的质量如表 1 所示，各关节质心均位于其几何中心处。末端执行器质量为 5.6 kg，质心距第六关节末端约 0.350 m。机械臂的尺寸参数详见参考文献[18]。

表 2 关节位置控制器参数

关节	PID 参数		
	P 参数	I 参数	D 参数
2	6.9	3.2	0.2
3	4.9	3.1	0.8
5	8.3	2.4	0.4
6	2.1	0.4	0.04

通过拉格朗日方法获得机械臂各关节的重力项并对各关节进行重力补偿，之后通过对关节控制器 PID 参数的不断调整，最终获得了较为理想的位置跟踪效果。此时的关节 PID 参数如表 2 所示，在该参数下，关节 5 的位置运动误差最大，但也不超过 $\pm 1^\circ$ ，满足控制需求。

在联合仿真中，阻抗参数为 $m=1$ ， $b=6.32$ ， $k=10$ ；比例-微分器参数为 $k_p=0.1$ ， $k_D=0.1$ ；期望力为 $f_d=10\text{ N}$ ，标量参数为 $\gamma_1=\gamma_2=1$ 。仿真模型中，阀门阻力矩为 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ ，末端执行器与阀门手轮间的接触刚度设为 0.1 N/m 。机器人旋拧阀门过程如图 7 所示，其中，图 7a 为旋拧阀门的起始位姿；图 7b 为过渡运动，使末端执行器运动至阀门手轮上方；图 7c 为直线运动，使末端执行器以直线方式运动至阀门手轮内部；图 7d 为旋拧运动，实现机器人旋拧阀门作业，本文提出的基于阻抗控制的位置跟踪自适应方法将作用于该阶段。

图7 机器人旋拧阀门过程

仿真中,为验证该自适应方法在不同工况的位置跟踪效果。设置机械臂第6关节的旋拧速度为30%,阀门阀杆的转动螺距分别设为0 mm、6 mm和12 mm,以此来模拟手轮轴向位移速度为0 mm/s、0.5 mm/s和1 mm/s的工况,旋拧运动时长设为12 s,旋拧阀门一圈。仿真结果分别如图8~11所示。

图8 轴向速度为0 mm/s 仿真结果

图9 轴向速度为0.5 mm/s 仿真结果

图10 轴向速度为1 mm/s 仿真结果

图8~10中,(a)~(c)为机械臂旋拧阀门时,机械臂第2、3、5关节的关节角变化图,(d)为末端执行器与阀门手轮实际接触力 f_e 和估计接触力 $\hat{f}_e$ 的变化图。由图中知,机械臂从第45 s开始进行旋拧作业,在大约46 s时,末端执行器和阀门手轮间产生

轴向接触力。在三种工况下, 实际接触力和估计接触力都可以在较短时间内收敛到期望力, 这一点可以从图 8d、9d、10d 中看出; 同时, 从关节角变化图中可看出, 在自适应算法的执行过程中, 机械臂的运动较为平顺, 不会引起较大震荡或抖动。

图 11 三种工况下的末端接触位置运动曲线

图 11 所示为在上述三种工况下, 末端接触位置沿手轮旋转轴线方向的运动曲线, 当阀门手轮轴向位置不变时(0 mm/s), 末端执行器轴向位置也保持不变; 当阀门手轮轴向位置以 0.5 mm/s 的速度移动时, 末端执行器的轴向位移速度约为 0.498 mm/s, 速度误差为 0.4%; 当阀门手轮轴向位置以 1 mm/s 的速度移动时, 末端执行器的轴向位移速度约为 0.964 mm/s, 速度误差为 3.6%。从图 11 中的位置跟踪仿真结果和实际接触力仿真结果都可看出, 本文提出的基于阻抗控制的位置自适应跟踪方法具有良好的跟踪效果, 同时可实现对不同期望力的跟踪。但值得注意的是, 当环境位置(x_e)变化太快时, 该方法的位置跟踪精度将有所下降。

4.3 试验验证

在第 4.2 节仿真的基础上, 运用本文提出的自适应方法, 采用上下位机主从式控制策略, 下位机基于 VC++6.0 编译平台编写了机器人旋拧阀门的控制程序, 并进行旋拧阀门试验。

为验证基于阻抗控制的自适应跟踪方法在阀门轴向位置跟踪上相比于阻抗控制有更好的跟踪性能, 本文以研制的机器人旋拧阀门作业平台分别进行了基于阻抗控制和基于位置自适应控制的对比试验。试验所选取的参数如下: 阻抗参数均为 $m=1$, $b=6.32$, $k=10$; 位置自适应控制其他参数为 $k_p=0.5$, $k_D=0.1$, $\gamma_1=\gamma_2=0.01$ 。本质上, 阻抗控制可视为一种期望力为零的控制策略, 为便于将两者进行对比, 同时考虑到力传感器的精度问题, 将位置自适应控制期望力设为 $f_d=2$ N。以旋拧过程中无轴向位移和有轴向位移两种工况进行了试验, 试验结果分别如图 12、13 所示。

图 12 无轴向位移试验结果对比

图 13 有轴向位移试验结果对比

图 12 为无轴向位移工况的对比试验结果, 由于试验条件所限, 本文以机械臂末端直接接触阀门手轮而不旋拧阀门的方式模拟该工况。从图中可看出, 阻抗控制中的接触力大约维持在 12 N, 与期望的零接触力相差较大, 这是由于实际接触位置和期望位

置间存在偏差,同时,从关节角和接触力反馈信息均可看出,阻抗控制解决末端接触不稳定问题的能力不理想。相较而言,本文提出的自适应方法在阀门轴向位置不变时可以较好地解决接触不稳定问题,同时也能实现对期望接触力的跟踪,进而保证对阀门手轮轴向位置的精确跟踪。

图13为有轴向位移工况的对比试验结果。试验中阀门阀杆的螺距约为6 mm,机械臂第6关节的旋转速度为15 %s,此时手轮轴向移动速度约为0.25 mm/s。在试验时,先直接旋拧阀门,当检测到较大轴向力矩时,即说明手指已和轮辐接触,此时停止旋拧阀门并启动轴向位置跟踪系统,实现机器人与阀门轮辐的稳定接触,图12和图13中0~20 s显示的就是稳定接触调整过程。在20 s后机械臂开始进行旋拧阀门作业。从结果可看出阻抗控制在阀门轴向位置发生变化时无法实现机器人对手轮轴向位置的稳定跟踪,两者间的接触力将越来越大,同时,当接触手指发生变化时,接触力突变也较严重。而自适应方法在该工况下仍能保持较好的跟踪效果,依然能实现以恒定接触力跟踪阀门手轮,同时对接触位置不稳定问题的鲁棒性也较好。

图14 无轴向位移试验结果

在上述两种工况下,以不同期望力对位置自适应跟踪方法的性能进行了试验分析。试验参数同上,期望力 f_d 分别为10 N和20 N。试验结果分别如图14和图15所示。

图15 有轴向位移试验结果

图14所示为无轴向位移工况的试验结果。当期望力为10 N时,从图14a~14c可看出,末端执行器与阀门手轮在约12 s时实现稳定接触并产生约为10 N的恒定轴向接触力;当期望力为20 N时,从图14a~14c可看出,末端执行器与阀门手轮在约6 s时实现稳定接触并产生约为20 N的恒定轴向接触力。

图15所示为有轴向位移工况的试验结果。在17 s后机械臂开始进行旋拧阀门作业,从图15d可看出,在不同期望力 f_d 下,末端执行器均可以恒定接触力稳定地跟踪阀门手轮轴向位置。

由以上试验结果可知,本文设计的基于阻抗控制的位置自适应跟踪方法较阻抗控制对阀门手轮轴向位置具有更好的跟踪效果,且对末端接触不稳定问题具有更强的鲁棒性。

5 结论

(1) 分析了阻抗控制实现精确位置跟踪的条件,基于阻抗模型设计了一种对末端接触不稳定具有更强鲁棒性的新型阻抗模型。同时,结合阻抗控制无法跟踪时变接触位置的缺点,基于李雅普诺夫稳定性理论设计了环境位置自适应跟踪控制器。

(2) 搭建了基于SolidWorks、ADAMS和Matlab/Simulink的机器人旋拧阀门仿真平台,并以该仿真

平台进行了旋拧阀门仿真试验, 以不同工况验证了所提出方法在位置跟踪上的优势。仿真结果表明, 在适宜参数下, 当阀门轴向移动速度较小时($<1\text{ mm/s}$), 末端执行器的速度跟踪误差不超过5%, 且可以实现较为精确的期望力跟踪, 避免产生较大的末端轴向接触力。

(3) 进行了机器人旋拧阀门作业的试验研究。以搭建的机器人旋拧阀门平台进行了相关试验。试验结果表明, 本文提出的基于阻抗控制的位置自适应跟踪方法能够较好地跟踪阀门手轮的轴向位置, 且对末端接触不稳定问题有较强的鲁棒性, 同时实现了末端期望接触力的可调节。

值得注意的是, 在试验中, 本文仅考虑了机器人旋拧阀门时轴向位置的跟踪, 没涉及末端执行器和手轮间径向作业误差的调整, 这在后续研究中有待进一步改善。本文提出的作业方法对机器人旋拧阀门研究的开展具有一定的意义, 同时, 该方法也可作为其他相关作业的位置跟踪策略。

参 考 文 献

- [1] 栾伟玲, 韩延龙, 张晓霓, 等. 用于核救灾机器人的电机驱动器安全防护[J]. 机械工程学报, 2017, 53(21): 9-15.
LUAN Weiling, HAN Yanlong, ZHANG Xiaoni, et al. Safety protection of motor driver in nuclear rescue robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(21): 9-15.
- [2] LIM J, LEE I, SHIM I, et al. Robot system of DRC-HUBO+ and control strategy of team KAIST in DARPA robotics challenge finals[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(4): 802-829.
- [3] CHEN Z, GAO F, PAN Y. Novel door-opening method for six-legged robots based on only force sensing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(5): 1227-1238.
- [4] KROTKOV E, HACKETT D, JACKEL L, et al. The DARPA robotics challenge finals: Results and perspectives[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(2), 229-240.
- [5] TRIVEDI M, CHEN C X, MARAPANE S B. A vision system for robotics inspection and manipulation[J]. Computer, 1989, 22(6): 91-97.
- [6] YOON W, SUEHIRO T, ONDA H, et al. Task skill transfer of circle handle valve manipulation[C]//IEEE International Workshop on Robots and Human Interactive Communication, Nashville, TN, USA: IEEE, 2005: 505-511.
- [7] CARRERA A, AHMADZADEH S, AJOUDANI A, et al. Towards autonomous robotic valve turning[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2012, 12(3): 17-26.
- [8] AHMADZADEH S, KORMUSHEV P, JAMISOLA R, et al. Learning reactive robot behavior for autonomous valve turning[C]// 14th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Madrid, Spain: IEEE, 2014: 366-373.
- [9] WANG S, MEI T, ZHU K, et al. Trajectory planning to open valves for dual-arm robots[C]// 11th IEEE International Conference on Control & Automation, Taichung, Taiwan, China: IEEE, 2014: 133-138.
- [10] DEDONATO M, DIMITROV V, DU R, et al. Human-in-the-loop control of a humanoid robot for disaster response: A report from the DARPA robotics challenge trials[J]. Journal of Field Robotics, 2015, 32(2): 275-292.
- [11] XIA K, GAO H, DING L, et al. Trajectory tracking control of wheeled mobile manipulator based on fuzzy neural network and extended Kalman filtering[J]. Neural Computing & Applications, 2018, 30(2): 447-462.
- [12] SERAJI H, COLBAUGH R. Force tracking in impedance control[J]. The International Journal of Robotics Research, 1997, 16(1): 97-117.
- [13] WANG W, LEE C. Fuzzy neural network-based adaptive impedance force control design of robot manipulator under unknown environment[C]// 2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Beijing, China: IEEE, 2014: 1442-1448.
- [14] 段星光, 韩定强, 马晓东, 等. 机械臂在未知环境下基于力/位/阻抗的多交互控制[J]. 机器人, 2017, 39(4): 449-457.
DUAN Xingguang, HAN Dingqiang, MA Xiaodong, et al. Multi-interaction control for manipulators in unknown environments based on hybrid position-impedance-force control[J]. Robot, 2017, 39(4): 449-457.
- [15] 陈金宝, 韩冬, 王小涛, 等. 灵巧机械手多指协调控制技术[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 42-47.
CHEN Jinbao, HAN Dong, WANG Xiaotao, et al. Multi-fingered coordinated control for dexterous robotic hand[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 42-47.
- [16] XU W. Robotic time-varying force tracking in position-based impedance control[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2016, 138(9): 1-12.
- [17] 柯贤锋, 王军政, 何玉东, 等. 基于力反馈的液压足式机器人主/被动柔顺性控制[J]. 机械工程学报,

2017, 53(1): 13-20.

KE Xianfeng, WANG Junzheng, HE Yudong, et al. Active/passive compliance control for a hydraulic quadruped robot based on force feedback[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(1): 13-20.

- [18] 邢宏军. 基于主被动柔顺的机器人旋拧阀门作业研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

XING Hongjun. Research on robot screwing valve based on hybrid active/passive compliance[D]. Harbin:

Harbin Institute of Technology, 2017.

作者简介: 邢宏军, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人柔顺控制。

E-mail: xinghj@hit.edu.cn

丁亮(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为特种机器人, 星球探测车。

E-mail: liangding@hit.edu.cn

高海波, 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为特种机器人, 星球探测车。

E-mail: gaohaibo@hit.edu.cn