

· 机械电子工程 ·

基于自适应边界能量法的柔顺力控制研究

王洪艳¹, 刘春洁², 黄智¹

(1. 电子科技大学机械电子工程学院 成都 611731; 2. 黑龙江建筑职业技术学院 哈尔滨 150025)

【摘要】阻抗控制方法是有效的机器人接触控制方法,但是该方法只能在预估的环境参数范围内保证系统的稳定性。针对这一问题,该文提出一种新的自适应边界能量(Energy Boundary Method-EBM)方法,通过在线估计控制参数提高系统整体性能,保证系统的稳定性。在该控制方法下,系统在与超出预估范围内的不确定环境相接触时,仍可保持期望的稳定接触力,同时具备较强的鲁棒性。为证实该方法的可行性及有效性,以气液联控柔顺力控制系统为例,进行理论及仿真研究,理论性能及仿真结果分析证明了该方法的有效性。

关键词 自适应控制; 柔顺力控制; 边界能量算法; 阻抗控制

中图分类号 TP249 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.06.026

Compliant Control Research Based on Adaptive Energy Bounding Method

WANG Hong-yan¹, LIU Chun-jie², and HUANG Zhi¹

(1. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Heilongjiang Institute of Construction Technology Harbin 150025)

Abstract Impedance control is an effective method to deal with contact task of robot, but this method can only guarantee the stability of system for assumed range of environments. Aiming at this problem, this paper proposes a new adaptive energy boundary method (EBM), which improves system performance by on-line estimation of control parameters, and guarantees the stability of system. Under the control method, the system can keep expected contact force stably, and have strong robustness when contact with uncertain environment. To verify the effectiveness of the proposed method, theoretical and simulation researches are conducted to pneumatic hydraulic combination compliant control system, which prove the effectiveness of the method.

Key words adaptive control; compliant control; energy-bounding method; impedance control

近年来,工业机器人已经被广泛使用在许多工厂自动化领域。在机器人的众多执行任务中,与环境相接触的任务必不可少。机器人的接触任务不仅需要位置控制,而且也需要对接触力进行控制,这样才能保证机器人与环境之间的安全工作模式。以往,许多学者针对机器人稳定接触任务问题提出了力控制方法^[1-2]。其中,阻抗控制和位置/力混合控制是机器人力控制的两个主要策略^[3-4]。

通常的工业机器人具备精确且鲁棒性高的位置控制器。基于这一发展现状,以位置控制器作为控制内环的基于位置的阻抗控制策略(position based impedance control, PBIC)被首先应用于执行交互任务的工业机器人^[5]。该方法不需要修改任何传统的

位置控制器,能够完成系统由自由运动到接触运动的平稳转换。然而,当接触环境参数超出控制器设计阶段所预估值以外的情况,PBIC就很可能不能保证接触任务的稳定性^[6]。在这种情况下,由于系统的稳定性与外界环境参数密切相关,基于模型鲁棒控制方法的阻抗控制机器人必须对阻抗控制中的参数进行重新设计。为防止环境参数变化引起潜在的不稳定问题,针对未知不确定的环境参数离线估计方法、文献[7-8]提出在线识别方法以及自适应阻抗控制等方法。同时,基于神经网络和模糊控制等的智能力控制算法与传统控制方法结合,补充了其自身控制方法的不足,提高了系统性能^[9]。然而,这些控制算法难以解决环境参数巨幅变化的情况。

收稿日期: 2015-10-12; 修回日期: 2017-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51275078)

作者简介: 王洪艳(1979-),女,博士,主要从事机电液一体化系统建模及其智能控制方面的研究。

本文提出一种新的自适应边界能量(EBM)控制算法,该方法首先将工业机器人由位置控制模式变为基于位置的阻抗控制(PBIC)模式,然后根据实验或经验所得环境参数范围设计PBIC控制器。在通常情况下,由于实验和经验的限制,这些环境参数有可能是不确定参数或变量,而自适应边界能量法通过在线估计控制参数来提高性能。同时,当环境参数在初始预估的范围内时,这种自适应边界能量法能够保留最初的阻抗控制性能。该方法使用基于位置控制的阻抗模式完成接触力任务,并能保证具有鲁棒性的稳定接触,尤其适用于环境刚度巨幅变化的场合。

1 气液联控(PHCC)柔顺力控制系统描述及其建模

1.1 系统描述

气液联控伺服系统是基于克服或者补偿气体介质的根本缺点,将液体介质引入到常规气压伺服系统中,并进行控制而构成的一种新型的气、液介质复合控制系统^[10]。试验证明,这种气液联控系统既

能够保持气压伺服系统的快速性和柔顺性等特点,又能够提高定位精度和定位刚度,提高系统的低速性能^[11]。该系统具有刚柔兼并的优点,尤其适合应用于进行接触任务的机器人系统中,因此,本文以该系统为例验证自适应EBM算法的有效性。

气液联控柔顺力控制系统结构如图1所示,该系统可以划分成两部分。左侧是气液联控伺服系统,由气液串联缸、负载、两位三通电磁阀、位移传感器、力传感器及其驱动电路等组成。右侧为环境模拟系统,由气缸、位移传感器、两位三通电磁阀及其驱动电路等组成。

1.2 PHCC系统动力学建模

选取状态向量 $\mathbf{x}=[x_1 \ x_2 \ x_3]$, 其中 x_1 和 x_2 分别是负载 M 的位移和速度; x_3 是气液缸的加载力。则(pneumatic hydraulic combination control, PHCC), 系统在自由运动阶段的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{M(t)}x_3 + \frac{F_s}{M(t)} \\ \dot{x}_3 = F(\mathbf{x},t) + G(\mathbf{x},t)u \end{cases} \quad (1)$$

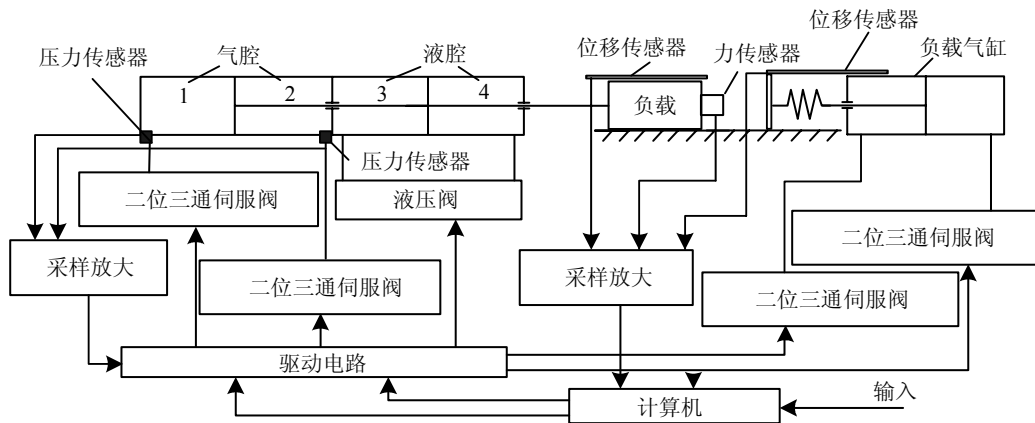


图1 气液柔顺系统结构示意图

式中, $F_s = F_h + F_{\text{other}}$; $F_h = \frac{A_s^3 x^2 \rho}{2 \tau_l^2 C_d^2 A^2}$ 是液体阻尼力; F_{other} 是摩擦力和系统弹性力等未建模部件的干扰力总和; τ_l 是液压高速开关阀占空比; C_d 是流量系数; A 是阀口面积; A_s 是液压腔活塞有效面积; ρ 是液体密度; $M(t)$ 是时变有效载荷的质量; $F(\mathbf{x},t)$ 和 $G(\mathbf{x},t)$ 的具体公式如下:

$$F(\mathbf{x},t) = -\frac{kP_1 A_1 x_2}{x_1} - \frac{kP_2 A_2 x_2}{L - x_1}$$

$$G(\mathbf{x},t) = k\sqrt{Rk} \left(\frac{A_{om}}{u_{\max}} \right) \left\{ \left[\frac{\text{sign}(u)+1}{2} \right] \left(\frac{\sqrt{T_s} \gamma_{1b} P_1}{x_1} + \frac{\sqrt{T_s} \gamma_{2b} P_2}{L-x_1} \right) \right\} + \left\{ \left[\frac{1-\text{sign}(u)}{2} \right] \left(\frac{\sqrt{T_s} \gamma_{1a} P_1}{x_1} + \frac{\sqrt{T_s} \gamma_{2a} P_s}{L-x_1} \right) \right\}$$

式中, P_1 和 P_2 分别是气缸1腔和2腔的压力; A_1 和 A_2 分别是气缸1腔和2腔活塞面积; x_3 可由关系式 $x_3 = P_1 A_1 - P_2 A_2 - P_a A_w$ 表示; P_a 是大气压; A_w 是活塞杆的横截面面积; k 是气体等熵绝热指数; R 是

气体常量; T_1 、 T_2 和 T_s 分别是气缸1腔、2腔和气源的温度; L 是气缸有效伸缩长度; P_s 是气源压力; γ_{ia} 和 γ_{ib} 是修改因子; A_{om} 是孔的最大区域面积; u_{max} 是比例方向控制阀的最大控制信号量。

2 基于位置的阻抗控制(PBIC)

对于通过位置控制器执行约束运动任务的机器人来说, 阻抗控制具有高鲁棒性和高精度的优势。传统的控制方法通过跟踪输入参考位置信号实现接触力的控制, 而阻抗控制通过调节执行机构的机械阻抗实现力控制。表明阻抗控制可以将机器人的初始阻抗变化为目标阻抗, 从而降低接触过程中位置控制机器人的高阻抗, 因此可以得到与外界环境的稳定交互。图2是一个典型形式的基于位置的阻抗控制(PBIC)结构图, 其中 X_0 是标称位置; X_e 是环境位置; G_p 是机器人位置反馈回路的传递函数; G_e 代表环境的传递函数。

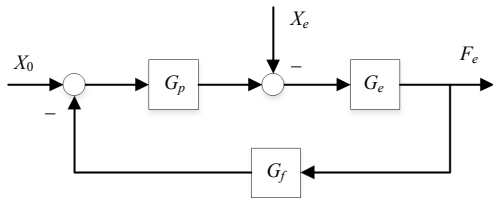


图2 PBIC原理框图

传递函数 G_f 可表示如下:

$$G_f(s) = \tilde{G}_p^{-1}(s)G_i^{-1}(s) = \frac{s^2 + as + b}{b} \cdot \frac{1}{M_i s^2 + B_i s + K_i} \quad (2)$$

式中, \tilde{G}_p 是机器人位置控制传递函数 G_p 的最小相位估计函数; G_i 是目标阻抗函数, 它是由目标质量 M_i 、目标阻尼 B_i 、目标刚度 K_i 构成的二阶函数。为确保被控系统的稳定接触, 在进行PBIC控制时, 必须满足以下条件^[12]:

$$\xi_i \geq \frac{1}{2}(\sqrt{1+2\kappa} - 1) \quad (3)$$

式中, 目标阻尼系数 $\xi_i = B_i / 2\sqrt{M_i K_i}$; 目标刚度系数 $\kappa = K_e / K_i \gg 1$; K_e 是环境刚度。因此, 当实际环境刚度超出设计之初预估的范围, 系统就可能出现不稳定的现象。但是, 如果将环境刚度幅值范围加大, 系统的性能将降低。

3 基于PBIC的自适应边界能量法

阻抗控制下, 单自由度机械手受力情况如图3所示。

在该控制结构下, 被控系统的动力学可表示为:

$$F_i(t) = M_i \dot{v}_i(t) + B_i v_i(t) + K_i x_i(t) + F_d^h(t) \quad (4)$$

$$v_i(t) = v_d(t) \quad (5)$$

式中, 假定传递函数 G_p 被有效去除, x_i 是机械手的实际位移; $v_i = \dot{x}_i$ 。

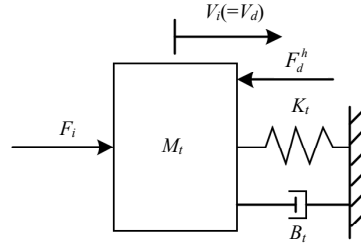


图3 阻抗控制下单自由度机械手受力示意图

图4为基于阻抗控制的自适应EBM网络能量流布示意图。

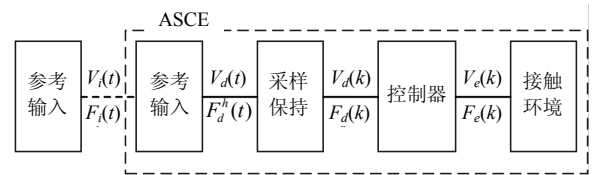


图4 基于阻抗控制的自适应EBM网络能量图

如果在任意时间段 $[0, t]$ 内, 端口吸收的净能量大于或等于在相同时间段内净能量存储的增加量, 那么这个单端口网络系统就是被动的, 即有:

$$\int_0^t F_i(\tau)v_i(\tau)d\tau \geq V_{ASCE}(t) - V_{ASCE}(0) \quad \forall t \geq 0 \quad (6)$$

式中, $V(\cdot)$ 是系统从网络中吸收的能量。

为了获得一个稳定的交互控制算法, ASCE系统可以分成两个子系统: 导纳子系统($1/Z_i^{-1}$)和SCE子系统。

首先, 在 $0 \leq t < nT$ 的时间内, 流入导纳子系统的净能量为:

$$E_A[n] = \int_0^{nT} \{F_i(t)v_i(t) - F_d^h(t)v_d(t)\}dt \quad (7)$$

式中, T 是外环采样周期; 离散值 $E_A[n]$ 等于连续值 $E_A[nT]$, n 是非负整数。

其次, 在 $0 \leq t < nT$ 的时间段内, 流入SCE子系统的净能量为:

$$E_{SCE}[n] = \int_0^{nT} F_d^h(t)v_d(t)dt = \sum_{k=0}^{n-1} F_d[k](x_d[k+1] - x_d[k]) \quad (8)$$

由式(7)~式(8)可知, 如果下式成立, 则整个机器人环境交互系统为被动系统:

$$E_A[n] + \sum_{k=0}^{n-1} F_d[k](x_d[k+1] - x_d[k]) =$$

$$E_A[n] + \sum_{k=0}^{n-1} F_d[k]\Delta x_d[k+1] \gg V_{ASCE}[n] - V_{ASCE}[0] \quad (9)$$

将式(4)带入式(7), 则有:

$$E_A[n] = V_A[n] - V_A[0] + \int_0^{nT} B_t v_d^2(t) dt \quad (10)$$

$$V_A[n] = M_t v_d^2[n]/2 + K_t x_d^2[n]/2 \quad (11)$$

式中, $\int_0^{nT} B_t v_d^2(t) dt$ 代表子系统导纳的耗散能量。

在式(10)中, 设 $V_{ASCE} = V_A + V_{SCE}$, 则式(9)可改写为:

$$\int_0^{nT} B_t v_d^2(t) dt + \sum_{k=0}^{n-1} F_d[k]\Delta x_d[k+1] \gg V_{CE}[n] - V_{CE}[0] \quad (12)$$

由于采样保持子系统中没有存储能量, 因此 $V_{SCE} = V_{CE}$ 。

利用Cauchy-Schwarz不等式, 有:

$$\int_0^{nT} B_t v_d^2(t) dt \geq \frac{B_t}{T} \sum_{k=0}^{n-1} \Delta x_d^2[k+1]$$

式(12)可变为:

$$\frac{B_t}{T} \sum_{k=0}^{n-1} \Delta x_d^2[k+1] + \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} (F_d[k] - F_d[k+1])\Delta x_d[k+1] \right\} + \quad (13)$$

$$\sum_{k=0}^{n-1} F_d[k+1]\Delta x_d[k+1] \geq V_{CE}[n] - V_{CE}[0]$$

将式(13)分成两个部分, 可以定义两个条件如下:

1)

$$\frac{B_t}{T} \sum_{k=0}^{n-1} \Delta x_d^2[k+1] + \sum_{k=0}^{n-1} (F_d[k] - F_d[k+1])\Delta x_d[k+1] \geq 0 \quad (14)$$

2)

$$\sum_{k=0}^{n-1} F_d[k+1]\Delta x_d[k+1] \geq V_{CE}[n] - V_{CE}[0] \quad (15)$$

式(13)能够成立的充分条件是同时满足条件1)和条件2)。

接触力的自适应EBM控制递归公式为:

$$F_d[n] = F_d[n-1] + \beta[n]\Delta x_d[n] \quad (16)$$

式中, 有:

$$\beta[n] = \frac{F_e[n] - F_e[n-1]}{\Delta x_d[n]} \quad \Delta x_d[n] \neq 0 \quad (17)$$

式中, $F_e[n]$ 是由力传感器测量得到的接触力。在式(16)中, 当 $\Delta x_d[n] = 0$ 时, 表明机械臂停止运动, 控制力 $F_d[n]$ 保持定值, 这与实际情况相符合。

图5为自适应EBM算法的整体框图。

为了同时满足条件1)和条件2), $\beta[n]$ 必须满足以下边界条件规则:

① 如果 $\beta[n] > \beta_{\max}[n]$, 则 $\beta[n] = \beta_{\max}[n]$;

② 如果 $\beta[n] < \beta_{\min}[n]$, 则 $\beta[n] = \beta_{\min}[n]$ 。

式中, $\beta_{\max}[n] = \min(c_1, \gamma_{\max}[n])$; $\beta_{\min}[n] = \gamma_{\min}[n]$ 。

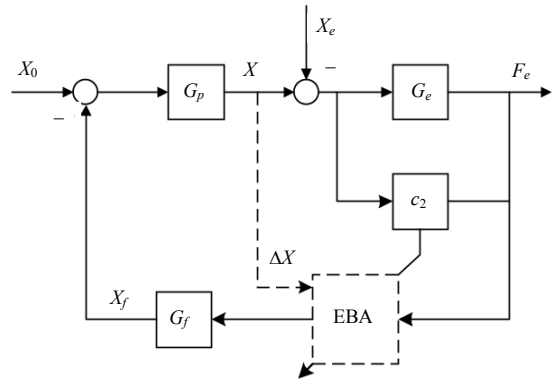


图5 自适应EBM算法框图

$$\gamma_{\max}[n] = c_2 - \frac{F_d[n-1]}{\Delta x_d[n]} + \sqrt{c_2^2 + \left(\frac{F_d[n-1]}{\Delta x_d[n]}\right)^2} \quad (18)$$

$$\gamma_{\min}[n] = c_2 - \frac{F_d[n-1]}{\Delta x_d[n]} - \sqrt{c_2^2 + \left(\frac{F_d[n-1]}{\Delta x_d[n]}\right)^2} \quad (19)$$

式中, c_1 和 c_2 是影响系统稳定性和性能的两个重要参数, 并且是满足 $c_1 \geq c_2$ 的正参数。

由式(14)和式(16)可得:

$$\sum_{k=0}^{n-1} \left(\frac{B_t}{T} - \beta[k+1] \right) \Delta x_d^2[k+1] \geq 0 \quad (20)$$

因此, 如果对于所有 k 都满足下式:

$$\beta[k+1] \leq c_1 \leq \frac{B_t}{T}, \text{ 则式(20)成立。}$$

对于固定刚度的环境, c_2 可选取如下:

$$c_2 \leq \min(K_e, c_1) \quad (21)$$

根据环境刚度的大小 (K_e) 和阻抗控制机器人的能量耗散能力 (c_1), 可归纳为以下两种情况:

1) 假设 $c_1 \geq K_e$, 则 c_2 可设为环境刚度 K_e ;

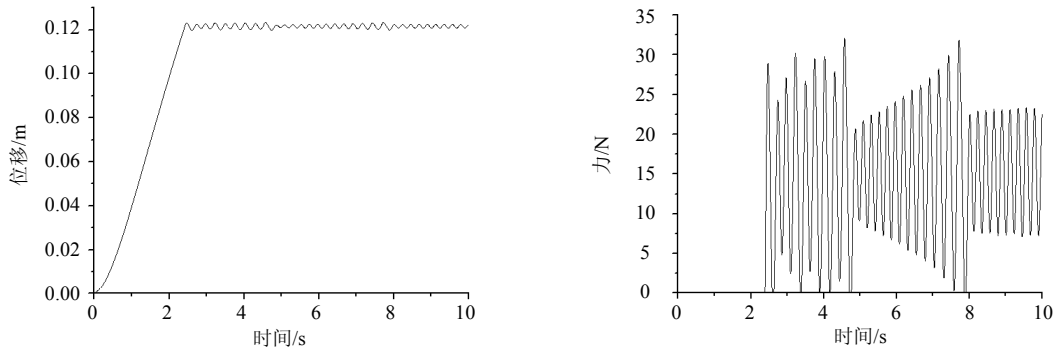
2) 假设 $c_1 \leq K_e$, 则 c_2 必须设为与 c_1 相等。

4 仿真研究

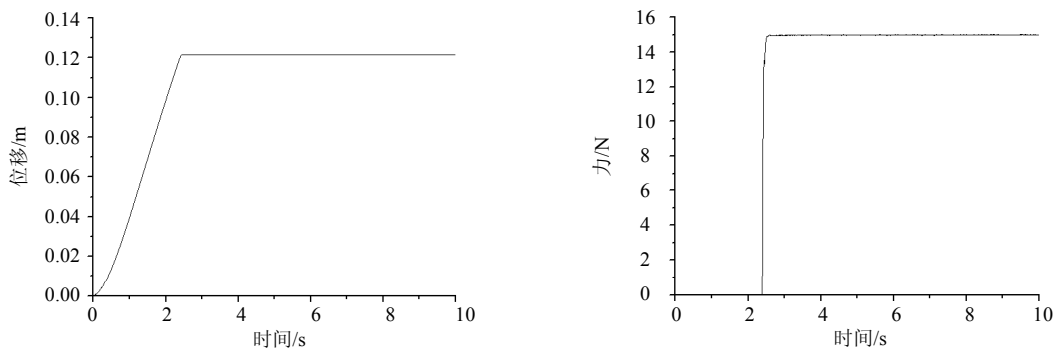
仿真中, 设定环境模拟系统中弹簧刚度值(1.1 N/mm)远远超出算法中对于环境刚度的预估值(0.6 N/mm)。图6和图7分别为环境模拟系统固定不动情况和作正弦运动的仿真结果图。其中, 图6a为采用常规自适应控制算法的仿真结果图, 图6b为采用自

适应EBM控制算法的仿真结果图。从仿真结果来看, 当环境刚度超出预估范围时, 常规的自适应控制算法不能保证系统正常运行, 出现不稳定的振荡现象。

而采用自适应EBM控制算法可以很好的保证系统的稳定性, 能够保证自由运动与接触运动稳定过渡, 系统柔顺力跟踪性能良好。

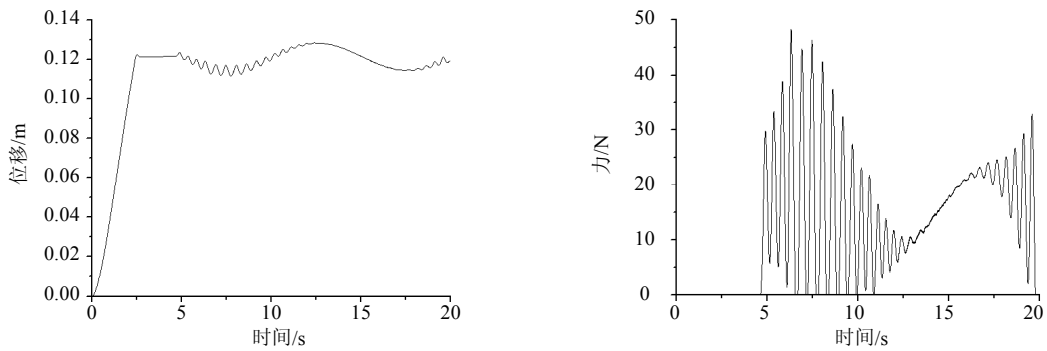


a. 常规自适应控制仿真结果图

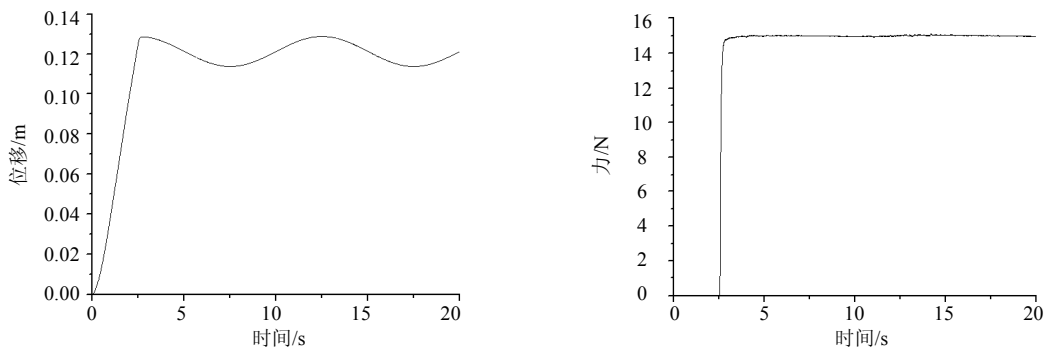


b. 自适应EBM算法控制仿真结果图

图6 环境模拟系统不动情况



a. 常规自适应控制仿真结果图



b. 自适应EBM算法控制仿真结果图

图7 环境模拟系统做正弦运动仿真结果图

5 结束语

本文针对阻抗控制中环境预估不精准对系统稳定性造成较坏影响的问题,提出一种自适应EBM控制算法。以气液柔顺力控制系统为例,进行了仿真研究。仿真结果表明,所提控制策略能够较好的实现系统的柔顺力控制。在保证系统具备良好动态性能的基础上,解决了当环境参数预估不准确情况下柔顺力控制的稳定性问题

参 考 文 献

- [1] CHIAVERINI S, SICILIANO B, VILLANI L. A survey of robot interaction control schemes with experimental comparison[J]. *Mechatronics*, 1999, 4(3): 273-285.
- [2] DE SANTIS A, SICILIANO B, DE LUCA A, et al. An atlas of physical human-robot interaction[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43(3): 253-270.
- [3] 姜力, 蔡鹤皋, 刘宏. 基于滑模位置的机器人灵巧手模糊自适应阻抗控制[J]. *控制与决策*, 2001, 16(5): 612-616.
JANG Li, CAI He-gao, LIU Hong. Fuzzy adaptive impedance control of dextrous robot hand based on sliding mode position control[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5): 612-616.
- [4] NAVEEN K, VIKAS P, NAGARAJAN S, et al. Neural network based hybrid force/position control for robot manipulators[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 3(12): 419-426.
- [5] AREVALO J C, GARCIA E. Impedance control for legged robots: an insight into the concepts involved[J]. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2012, 6(42): 1400-1411.
- [6] MEHDI H, BOUBAKER O. Stiffness and impedance control using lyapunov theory for robot-aided rehabilitation [J]. *International Journal of Social Robotics*, 2011, 1(4): 107-119.
- [7] JLASSI S, TLIBA S. An event-controlled online trajectory generator based on the human-robot interaction force processing[J]. *Industrial Robot*, 2014, 1(41): 15-25.
- [8] SHARIFI M, BEHZADIPOUR S, VOSSOUGH G. Nonlinear model reference adaptive impedance control for human-robot interactions[J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 1(32): 9-27.
- [9] MAI Thang-long, WANG Yao-nan. Adaptive-backstepping force/motion control for mobile-manipulator robot based on fuzzy CMAC neural networks[J]. *Control Theory and Technology*, 2014, 12(4): 368-382.
- [10] 王洪艳, 陆金波. PHCC平台下鲁棒性阻抗控制算法的研究[J]. *电子科技大学学报*, 2014, 31(5): 794-799.
WANG Hong-yan, LU Jin-bo. Robust impedance control method on PHCC system[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2014, 31(5): 794-799.
- [11] 王洪艳, 赵克定, 徐秀芬, 等. 气液联控柔顺力控制系统及其自适应试验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(9): 1106-1109.
WANG Hong-yan, ZHAO Ke-ding, XU Xiu-fen, et al. Pneumatic hydraulic combination compliant force control system with adaptive experiments[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(9): 1106-1109.
- [12] JUNG S, HSIA T C, BONITZ R G. Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, 3(12): 474-483.

编辑 黄 莘