

气液联控柔顺力控制系统及其自适应试验研究

王洪艳¹, 赵克定¹, 徐秀芬², 刘翠翠¹

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 150001, 哈尔滨; 2. 大庆石油学院机电工程学院, 163318, 大庆)

摘要: 针对阻抗控制中力控制的难点在于不能精确知道外界环境的刚度和位置, 继而导致跟踪误差的问题, 采用滑模位置控制器及自适应控制方法, 设计了气液联控柔顺力控制系统. 在外界环境模拟系统分别做往返斜坡运动(8 mm/s), 以及在 0.1 Hz 正弦运动下, 进行了气液联控柔顺力控制的试验研究. 试验结果显示, 位移的最大相对误差分别为 1.85% 和 1.1%, 力跟踪的最大相对误差分别为 2.5% 和 1.85%, 表明此方法具有较好的鲁棒性, 可以克服系统对于环境参数精确性的依赖.

关键词: 气液联控; 阻抗控制; 柔顺力; 自适应控制

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-01106-04

Pneumatic Hydraulic Combination Compliant Force Control System with Adaptive Experiments

Wang Hongyan¹, Zhao Keding¹, Xu Xiufen², Liu Cuicui¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Mechatronics Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of force control in impedance control puzzled by unknown stiffness and position of environment to result in tracking error, the pneumatic hydraulic combination compliant force control system is designed via sliding position controller combining with adaptive control method. The compliant force control tests are conducted under the conditions that the environment moves at 8 mm/s repeatedly on a slope and 0.1 Hz sine movement respectively. The result shows the maximum relative position errors get to 1.85% and 1.1% and the maximum relative force tracking errors get to 2.5% and 1.85% respectively, which indicates the better robustness of the system to eliminate dependence of the precise parameter of the environment.

Keywords: pneumatic hydraulic combination control; impedance control; compliant force; adaptive control

气压伺服系统由于其介质的不易燃、不易爆、工作介质无污染和适于在恶劣环境下工作等特点, 因此得到了广泛的应用. 但是, 由于气体的可压缩性和低黏性, 导致气压伺服系统的固有频率低、阻尼比小、定位精度和定位刚度低、低速性能差, 使得气压伺服技术的应用受到限制. 气液联控伺服系统正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^[1-2].

机械手臂在执行装配、抛光、打毛刺等与环境相接触的复杂作业时, 面临的主要问题是手臂在约束环境中对产生任意作用力柔性的高要求, 以及在自由空间中对位置伺服刚度和机械结构刚度的高要求之间的矛盾. 解决矛盾的关键是使手臂对接触环境具有柔顺性, 即对工作环境具有一定的顺从能力.

阻抗控制是实现机器人柔顺力控制的主要方法, 其控制精度依赖于操作者对环境条件的精确了解, 而在实际应用中, 由于各种因素的影响, 对环境

的了解常常是很不精确或无法知道的,因此导致了阻抗控制有很大的力误差,在许多力控制精度要求较高的场合无法应用^[3].本文针对这一难点,应用自适应方法进行了试验研究,并采用二阶滑模控制器对位置控制器进行了气液联控伺服手臂的自适应柔顺力控制.

1 气液联控柔顺力控制系统的描述

1.1 原理和结构

如图1所示,系统由两部分组成:系统I为气液联控机械手臂,按照对气液介质控制方式的不同,气液联控伺服系统可分为液体固定阻尼式气液联控伺服系统、气体开关式气液联控伺服系统和气液并联控制气液联控系统^[4];系统II为外界环境模拟系统,本处简化为一弹性系统,试验中由一根弹簧和一块

质量可以忽略的薄板与气动系统连接组成.本文针对液体固定阻尼式气液联控伺服系统进行研究,液体介质只进行开环控制,通过设定液压高速开关阀在整个控制过程中的占空比,提供适当的固定液压阻尼,以提高系统的阻尼比,进而改善系统的动态特性.系统采用的元器件型号见表1.

气液联控机械手臂协调外界环境模拟系统的位

表1 元器件型号表

元器件名称	型号
气液缸	自制
气压高速开关阀	VQ110U-5G-M5
液压高速开关阀	SP010A
直线位移传感器	SGC-4
力传感器	BK-2Y
气缸	SCA2-LB

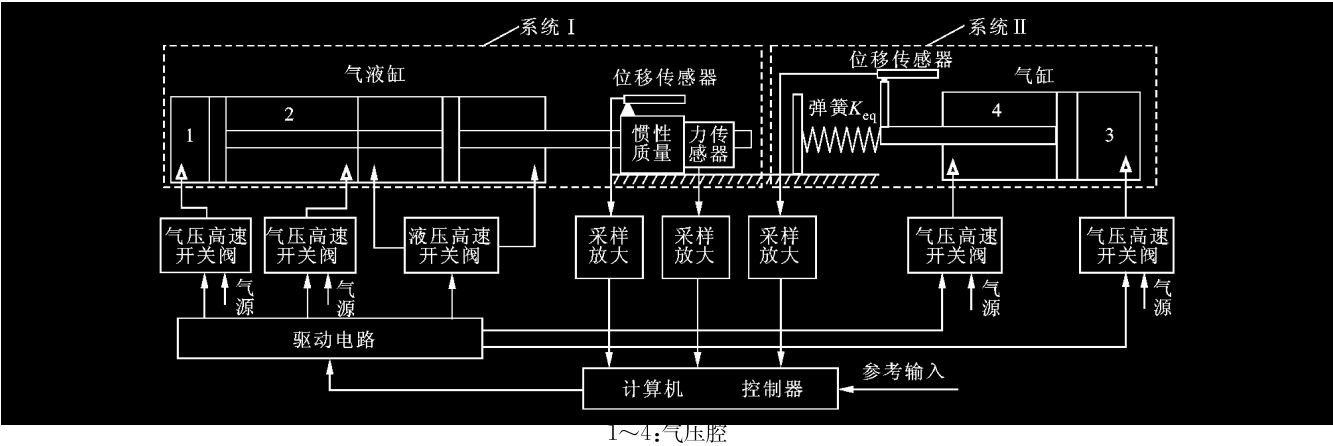


图1 气液联控柔顺力控制系统的构成示意图

置变化,利用阻抗控制策略,使机械手臂与环境之间的接触力跟踪期望力轨迹.在图1中,I与II为单独控制的两套系统,并不发生耦合控制,环境位置实时控制值并不作为机械手臂柔顺力控制中的实际环境位置值输入,即对于机械手臂来说,环境位置的实时值是未知的.

1.2 阻抗控制原理

阻抗控制是通过实现位置误差和力误差之间的某种理想的动态关系而实现的,按照目标阻抗的实现方式,阻抗控制通常可分为以下两类:基于位置的阻抗控制(PBIC)和基于力的阻抗控制^[3](FBIC).本文研究位置的阻抗控制,其工作原理如图2所示.

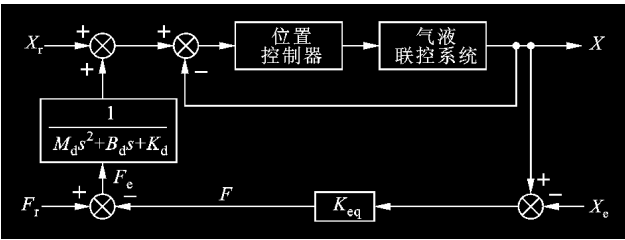
在阻抗控制中,末端的期望动力学方程常用一个二阶动力学系统,即质量-弹簧-阻尼系统来表示^[3].本文采用的目标阻抗模型为

$$M_d\ddot{X} + B_d\dot{X} + K_d(X - X_r) = F_e \quad (1)$$

为满足机械手臂由自由空间到约束空间过渡过程的稳定性,选择 M_d 、 B_d 和 K_d 时,必须首先满足下式^[4]

$$\left. \begin{aligned} \xi_d &= B_d / (2(K_d M_d)^{1/2}) \\ \xi_d &\geq 0.5((1+k)^{1/2} - 1) \\ k &= K_{eq} / K_d \gg 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: ξ_d 表示阻尼比; k 表示刚度比; F_e 为力误差.



X:机械手臂实际位置; X_r :机械手臂参考轨迹; X_e :环境位置;
 F :机械手臂实际力; F_r :机械手臂参考力; K_{eq} :等效刚度;
 M_d :目标质量; B_d :目标阻尼; K_d :目标刚度

图2 位置的阻抗控制原理图

2 系统建模

2.1 气液联控位置伺服系统

令图1中的活塞位移,活塞速度,气压腔1、2的压差与惯性负载质量之比,以及气压腔2的压力 p_2 为状态变量,即

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ (p_1 A_1 - p_2 A_2)/M \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

推导出的气液联控位置伺服系统的状态方程为

$$\dot{\mathbf{Z}} = [\dot{z}_1 \quad \dot{z}_2 \quad \dot{z}_3 \quad \dot{z}_4]^T = \begin{bmatrix} z_2 \\ z_3 - ((F_h + b_{L1} z_2 + K_{L1} z_1)/M) - (F_L/M) \\ (-k(z_3 M - A_2 z_4) A_1 z_2 + kRTA_1 Q_{m1}) / (M(V_{10} + A_1 z_1) - (kz_4 A_2^2 z_2 + kRTA_2 Q_{m2}) / M(V_{20} - A_2 z_1)) \\ (kz_4 A_2^2 z_2 - kRTA_2 Q_{m2}) / (M(V_{10} - A_2 z_1)) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: M 、 X 分别为系统I中的惯性负载质量和活塞位移; A_1 和 A_2 分别表示气压腔1、2的活塞有效截面积; p_1 和 p_2 分别表示气压腔1、2的压力; A_2 表示液压腔活塞有效面积; F_L 表示I、II系统之间的接触力; V_{10} 表示活塞开始运动之前对应腔的初始体积; k 表示气体等熵绝热指数,对于空气 $k=1.4$; T 为气压腔的温度, $T=298\text{ K}$; R 为气体常数,对于空气, $R=287$; Q_{m1} 和 Q_{m2} 为流入流出对应腔的质量流量变化^[5].

2.2 气动位置伺服系统

令图1II系统中的活塞位移,活塞速度,气压腔3、4的压差与惯性负载质量之比,以及气压腔4的压力 p_4 为状态变量,即

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ \dot{x}' \\ (p_3 A_3 - p_4 A_4)/m \\ p_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由此气动位置伺服系统的状态方程可表示为

$$\dot{\mathbf{Y}} = [\dot{y}_1 \quad \dot{y}_2 \quad \dot{y}_3 \quad \dot{y}_4]^T = \begin{bmatrix} y_2 \\ y_3 - ((b_{L2} y_2 + K_{L2} y_1)/m) - F_L/m \\ (-k(y_3 m - A_4 y_4) A_3 y_2 + kRTA_3 Q_{m3}) / (m(V_{30} + A_3 y_1) - (ky_4 A_4^2 y_2 + kRTA_4 Q_{m4}) / m(V_{40} - A_4 y_1)) \\ (ky_4 A_4^2 y_2 - kRTA_4 Q_{m4}) / (m(V_{30} - A_4 y_1)) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: x' 、 m 为系统II活塞的位移和惯性负载质量; p_3 和 p_4 分别表示气压腔3、4的压力; A_3 和 A_4 分别表示气压腔的活塞有效载面积; b_{L2} 为系统II的黏性阻尼系数; K_{L2} 为系统II的弹性负载刚度; V_{30} 和 V_{40} 分别表示活塞开始运动之前对应腔的初始体积; Q_{m3} 和 Q_{m4} 为流入流出对应腔的质量流量变化^[5].

3 自适应柔顺力控制系统的设计

滑模控制以其精度高、动态响应快、稳定性好及鲁棒特性等优点在控制领域得到了广泛应用,图1中的I和II系统的位置控制均采用了二阶滑模变结构的控制方法^[6].将环境等效为一个线性弹簧,环境与末端力传感器的等效刚度为 K_{eq} ,可知手臂与环境的接触力为

$$F = \begin{cases} K_{eq}(X - X_e) & (X > X_e) \\ 0 & (X \leq X_e) \end{cases} \quad (7)$$

此时手臂的实际位置 X 可以用力误差表示为

$$X = \frac{1}{K_{eq}} F + X_e = \frac{1}{K_{eq}} (F_r - F_e) + X_e \quad (8)$$

设参考位置 $X_r(t)$ 与误差 $F_e(t)$ 的关系^[7]为

$$X_r(t) = X_r(0) + f(t) + k_p(t) F_e(t) + k_d(t) \dot{F}_e(t) \quad (9)$$

式中: $X_r(0)$ 为手指的初始位置; $f(t)$ 为辅助项; $k_p(t)$ 、 $k_d(t)$ 分别是力误差的比例增益和微分增益.以模型式(9)为基础,最终的参考自适应算法为

$$\left. \begin{aligned} X_r(t) &= X_r(0) + f(t) + k_p(t) F_e(t) + k_d(t) \dot{X}(t) \\ f(t) &= f(0) + \gamma'_{00} \int_0^t q(t) dt + \gamma'_{01} q(t) \\ k_d(t) &= k_d(0) + \gamma'_{01} \int_0^t q(t) \dot{X}(t) dt + \gamma'_{11} q(t) \dot{X}(t) \\ k_p(t) &= k_p(0) - \gamma'_{20} \int_0^t q(t) F_e(t) dt - \gamma'_{21} q(t) F_e(t) \\ q(t) &= w_p F_e(t) - w_v \dot{X}(t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\gamma'_{00} = \gamma_{00} = \frac{\alpha_0 M_d}{K_d K_{eq}}; \gamma'_{01} = \gamma_{01} = \frac{\beta_0 M_d}{K_d K_{eq}}$$

$$\gamma'_{10} = w_v \gamma_{10} = w_v \frac{\alpha_1 M_d}{K_d K_{eq}}; \gamma'_{11} = w_v \gamma_{11} = w_v \frac{\beta_1 M_d}{K_d K_{eq}}$$

$$\gamma'_{20} = \gamma_{20} = \frac{\alpha_2 M_d}{K_d K_{eq}}; \gamma'_{21} = \gamma_{21} = \frac{\beta_2 M_d}{K_d K_{eq}}; w_v = \chi K_{eq}$$

式中: $f(0)$ 、 $k_d(0)$ 和 $k_p(0)$ 分别是 $f(t)$ 、 $k_d(t)$ 和 $k_p(t)$ 的初始值,均取为0; α_i ($i=0,1,2$)和 β_i ($i=0,1,2$)是大于0的任意常数; χ 为大于0的常数; w_p 为满足 $0 \leq w_p < 2\xi\omega$ 的常数; ξ 和 ω 分别为期望力跟踪系统的阻尼比和无阻尼自然频率.

4 气液联控阻抗控制系统试验研究

在试验中,环境的刚度为 10 kN/m,实际控制中 f 由手臂末端的力传感器测量得到. 图 3 和图 4

为系统 II 做 8 mm/s 往返斜坡运动和 0.1 Hz 正弦运动时的阻抗控制,在匀速运动时位移的最大相对误差为 1.85%,跟踪力的最大相对误差为 2.5%,突然的转向导致机械手臂与外界环境间的作用力变化

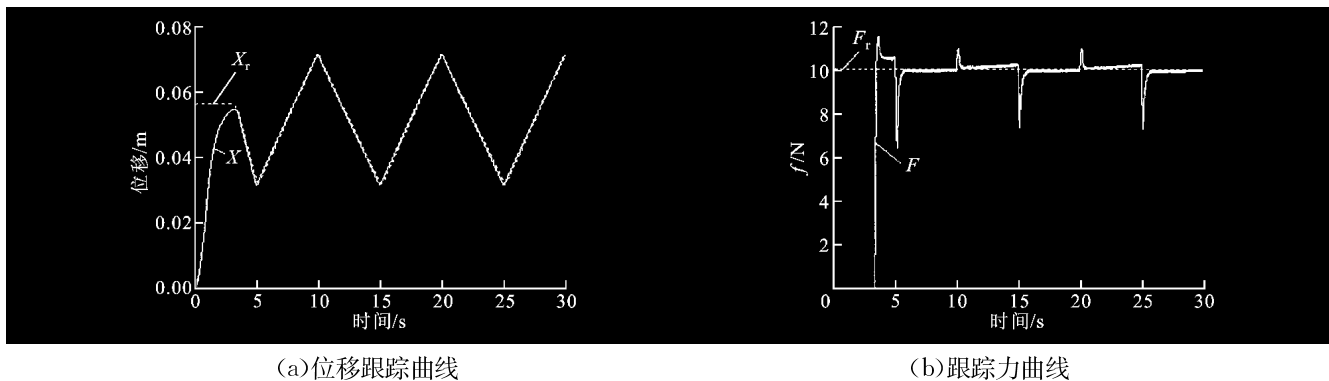


图3 自适应力控制试验结果(环境模拟系统做往复匀速运动)

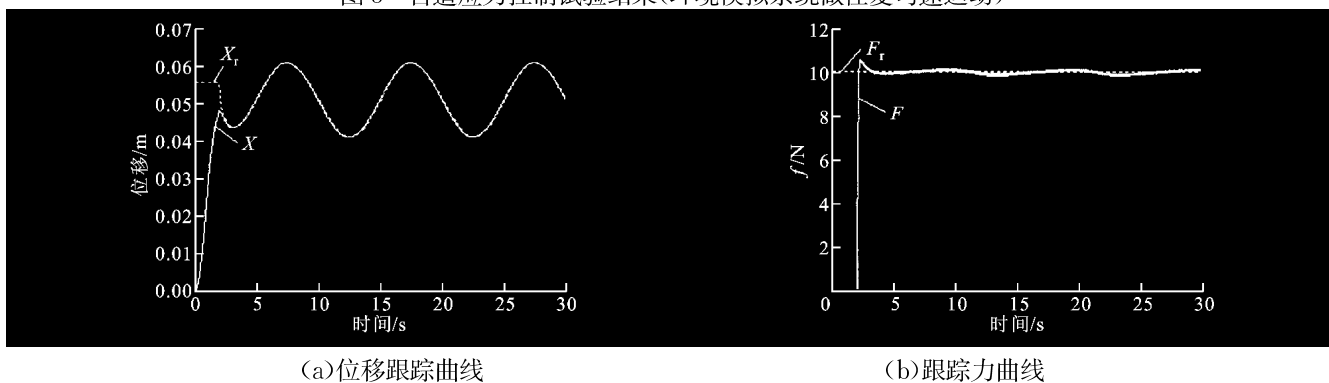


图4 自适应力控制试验结果(环境模拟系统做往复正弦运动)

较大,随后响应曲线很快跟踪期望力。

5 结 论

本文设计了气液联控柔顺力控制系统,并进行了柔顺力控制的试验与研究. 气液联控机械手臂和外界环境模拟系统均采用滑模变结构位置控制器,同时针对该系统设计了自适应柔顺力控制器. 试验结果表明,该方法能够较好地实现力跟踪,从而实现气液联控机械手臂的柔顺力控制,对于气液联控系统的应用有着实际意义.

参考文献:

- [1] 徐秀芬,赵克定,袁立鹏. 气液联控伺服系统工作性能分析及试验研究[J]. 西安交通大学学报,2005, 39(3): 266-269.
Xu Xiufen, Zhao Keding, Yuan Lipeng. Performance analysis and experimental investigation to pneumatic-hydraulic-combination-control system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2005, 39(3):266-269.
- [2] 许宏,吴盛林,赵克定. 气液联动与气液联控[J]. 机械工程学报,2001,37(7):93-95.
Xu Hong, Wu Shenglin, Zhao Keding. Pneumo-

hydraulic system and the pneumatic hydraulic combination control (PHCC) system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(7): 93-95.

- [3] 殷跃红,尉忠信,黄晓曦. 智能机器系统力觉及力控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2001: 33-37.
- [4] Surdilovic D, Cojbasic Z. Robust robot compliant motion control using intelligent adaptive impedance approach[J]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation, 1999(3):2128-2133.
- [5] 许宏. 气液联控位置伺服系统理论分析及其控制策略的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2001.
- [6] Wang Hongyan, Zhao Keding, Cui Xianghua. Sliding control approach to pneumatic hydraulic combination control (PHCC) servo system[C]//Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Piscataway, USA: IEEE, 2006: 2156 - 2159.
- [7] Drago M, Roman K, Tadej B. Adaptive impedance force control of an industrial manipulator[J]. Industrial Electronics,1999(1):129-133.

(编辑 管咏梅)