

# 电液伺服遥操纵机器人主-从位置控制器<sup>\*</sup>

巩明德 赵丁选 冯汝扬

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

**【摘要】** 针对电液伺服遥操纵机器人主-从双向伺服位置控制中存在的非线性和不确定性, 提出主-从侧分别使用带干扰观测器的最优控制和有鲁棒补偿的 PD 反馈控制算法, 以克服主动侧各液压缸因动态特性差异造成的位置跟随误差和从动侧外界环境的随机干扰对系统稳定性的影响。分别设计了观测器跟踪扰动的二次型控制器和有动态鲁棒补偿的位置控制器, 通过仿真和试验验证了所设计控制器的有效性。试验结果表明, 所设计的位置控制器, 既提高了主-从位置跟随精度, 又具有较强的自适应性和鲁棒性; 提高了力反馈电液伺服遥操纵机器人系统的操作性。

**关键词:** 电液伺服 双向伺服控制 位置控制器 状态观测器 鲁棒控制

**中图分类号:** TP242

**文献标识码:** A

## Master-slave Position Controller of Electron-hydraulic Servo Telerobot

Gong Mingde Zhao Dingxuan Feng Ruyang

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

### Abstract

To eliminate the errors of cylinders' dynamic output positions of master side and the influence of random disturbance of slave side, disturbance state observer optimal control and robust dynamic compensate PD feedback control algorithm was presented for master-slave side, which is aiming at the nonlinearity and uncertainty of master-slave position control in the electro-hydraulic servo telerobot. A linear quadratic with disturbance observer and a dynamic robust compensator position controller were developed. Simulation and experimental results were given to demonstrate the availability of the proposed algorithm. The experimental results show that the designed controllers both improve position tracking precision for master-slave side and possess of good adaptive ability and robustness in existence of out side disturbance, enhances the operation of electro-hydraulic servo telerobot with force feedback.

**Key words** Electro-hydraulic servo, Bilateral servo control, Position controller, State observer, Robust control

### 引言

以主-从机器人为核心的临场感遥操作系统可以在人难以接近或对人有害的环境下进行复杂操纵作业。遥操纵机器人的临场感可通过力觉、视觉、听觉等多种感觉信息实现。对未知或变化的操作任务和环境, 机器人位置信息有着十分重要的作用, 操作者只有得到精确的位置信息, 才能操纵机器人完成

未知或变化环境下的精确操作任务<sup>[1~4]</sup>。

液电伺服驱动的遥操纵机器人运动机构是一个时变非线性、各关节之间互相耦合的系统。其主-从侧驱动器均采用单出杆非对称液压缸, 其伺服阀阀口流量呈非线性, 液压缸两腔面积不对称, 也呈非线性, 对系统产生很大影响<sup>[5~6]</sup>。另外, 由于环境的不确定性, 使得被操作控制对象具有不确定性和严重的非线性。而力反馈遥操纵机器人要求很高的实

时性和对力、位置变化的跟踪能力,所以传统的控制方法难以满足高性能控制指标的要求<sup>[7~8]</sup>。

本文提出主-从侧分别使用带干扰观测器的最优控制和有鲁棒补偿的 PD 反馈控制算法,以克服主动侧各液压缸因动态特性差异造成的位置跟随误差和从动侧外界环境的随机干扰对系统稳定性的影响。设计既满足系统精确位置控制需要,又能提高系统对非线性和不确定性适应能力的控制器。

### 1 状态观测器跟踪法仿真

本文研究的主-从动侧遥操纵系统是由吉林大学工程机器人实验室自行研制的基于 6-DOF Stewart 并联机构平台系统,主动侧操纵手柄如图 1 所示。由操纵者操作该主动侧操纵手柄控制从动侧机构完全相同、但尺寸不同的同构液压伺服并联机构运动。因主-从动侧液压平台各液压缸摩擦力的不同、控制硬件(比如控制阀及电子元件)的差异及油温变化的影响,会导致液压缸在相同输入时的响应有所不同,操作后产生的位移可能与期望的位移产生差异,从而影响主-从位置跟随控制精度。

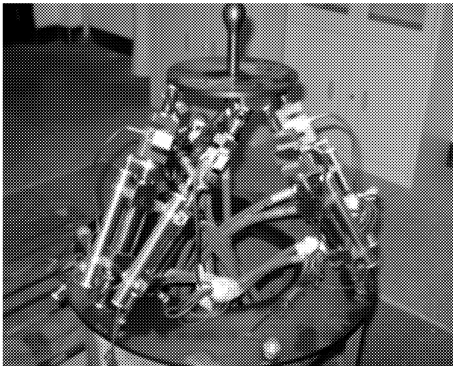


图 1 主动侧 6 自由度遥操纵手柄

Fig.1 Six DOF tele-operation master side manipulator

设  $X$  为活塞位移,取状态变量  $X_1 = X, X_2 = \dot{X}, X_3 = \ddot{X}$ ,则液压缸状态空间方程<sup>[9]</sup>

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -444\ 440 & -1\ 056 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 555\ 560 \end{bmatrix} U$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}$$

式中  $U$ ——输入控制量,即主动侧手柄位移

将上述方程表示为  $\dot{X}(t) = A_0 X(t) + B_0 U(t), Y(t) = C_0 X(t)$ 。式中  $A_0$  为系统矩阵,  $B_0$  为输入矩阵,  $C_0$  为输出矩阵。设干扰信号  $d$  由观测器跟踪测得,其观测信号为  $\hat{d}$ 。设计  $\hat{d}$  一维观测器,首

先将  $\hat{d}$  引入状态变量,可得系统增广矩阵的状态方程和输出方程分别为

$$X_i(t) = \begin{bmatrix} \dot{X}(t) \\ \hat{d} \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} X(t) \\ d \end{bmatrix} + B_i U_i = \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(t) \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_0 \\ 0 \end{bmatrix} U \quad (i=1\sim 6) \quad (1)$$

$$Y = C_i \begin{bmatrix} X(t) \\ d \end{bmatrix} = [C_0 \ 0] \begin{bmatrix} X(t) \\ d \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $i$ ——液压缸序号

观测器需要另建一个状态  $q, \hat{d}$  一维观测器方程为

$$\begin{cases} \dot{q} = Dq + FX_i + EU_i \\ q = TX_i \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中各矩阵系数满足

$$\begin{cases} TA_i - DT - F = 0 \\ E = TB_i \end{cases} \quad (4)$$

式中  $D, E, F, T$ ——矩阵系数

为简化  $\hat{d}$  观测器结构,取  $F = [1 \ 1 \ 1 \ 0]$ ,将  $T = [t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4]$  代入式(4),取  $D = -860$ ,解得各分量系数  $t_1 = -0.001\ 2, t_2 = 1.610\ 3, t_3 = 0.003\ 1, t_4 = -2.011\ 4$  及  $E = 1\ 729.9$ 。

因  $q = TX_i = t_1 X_1 + t_2 X_2 + t_3 X_3 + t_4 \hat{d}$ ,则

$$\hat{d} = \frac{1}{t_4} (q - t_1 X_1 - t_2 X_2 - t_3 X_3)$$

将  $F = [1 \ 1 \ 1 \ 0], X_i = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ \hat{d}]$  代入式(3),得

$$q = Dq + X_1 + X_2 + X_3 + EU_i$$

建立 Simulink 仿真结构如图 2 所示。仿真时取 6 种不同的干扰信号,表示各液压缸的差异。操纵手柄的 6 个液压缸在使用干扰观测器前的响应如图 3 所示,使用干扰观测器后的响应如图 4 所示。可见,状态观测器跟踪法消除了操纵手柄 6 个通道液压缸响应的差异。

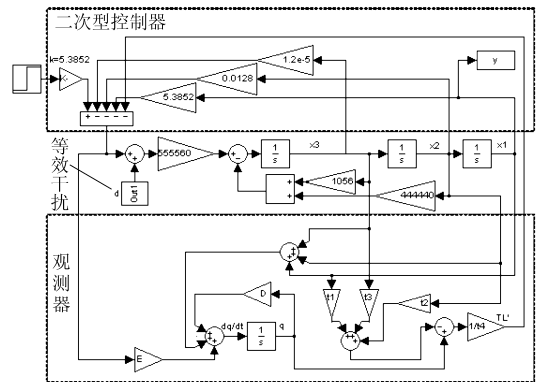


图 2 观测器跟踪扰动二次型控制系统的 Simulink 结构  
Fig.2 Simulink structure of quadratic control with disturbance observer

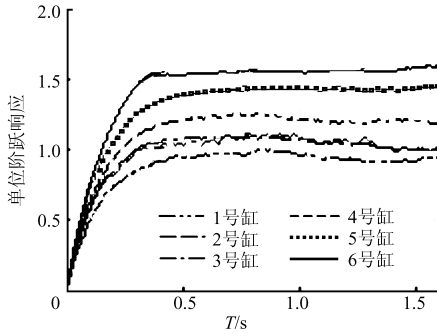


图3 使用干扰观测器前6个缸的响应

Fig.3 Response before applying disturbance observer

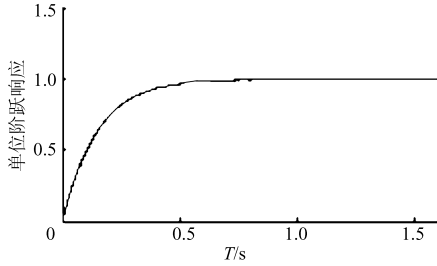


图4 使用干扰观测器后6个缸的响应

Fig.4 Response after applying disturbance observer

## 2 动态鲁棒补偿位置控制器

干扰观测器的设计前提是获得所有状态量,通过观测器设计来重构状态,这会使系统控制器设计复杂化。本文研究不需要全部状态量的方法,即在PD输出反馈控制系统上增加动态鲁棒补偿器。设被控对象的传递函数

$$W_{yu}(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{N(s)}{D(s)}$$

式中,  $N(s)$ 、 $D(s)$  为不能既约的关于  $s$  的多项式

$$D(s) = s^n + \alpha_{n-1}s^{n-1} + \dots + \alpha_1s + \alpha_0$$

$$N(s) = s^m + \beta_{m-1}s^{m-1} + \dots + \beta_1s + \beta_0$$

式中  $n \geq m$ , 系统为理想线性时有

$$D(s)y'(s) - N(s)u'(s) = 0$$

当存在非线性因素或有干扰等不确定性因素时,可将其等价为一个等效干扰,并由此造成了模型不准确。表现在控制量和输出量上有

$$y' \rightarrow y = y' + \Delta y \quad u' \rightarrow u = u' + \Delta u$$

此时  $D(s)y(s) - N(s)u(s) \neq 0$ , 可得

$$q(s) = [D(s) \quad -N(s)] \begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

本系统中

$$q(s) =$$

$$[1.8 \times 10^{-6}s^3 + 0.19 \times 10^{-2}s^2 + 0.8s \quad -1] \begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix}$$

式中  $q$ ——等效干扰

将式(5)分解,可得

$$q(s) = [D(s) \quad -N(s)] \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta u_1(s) \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(5)、(6)得

$$D(s)y(s) - N(s)u(s) = 0$$

式中  $u(s) = u_1(s) + \Delta u_1(s)$

由式(6),得归零因子传递函数

$$W_{qu}(s) = \frac{\Delta u_1(s)}{q(s)} = -\frac{1}{N(s)} = -1$$

令  $P(s) = [D(s) \quad -N(s)] =$

$$[1.8 \times 10^{-6}s^3 + 0.19 \times 10^{-2}s^2 + 0.8s \quad -1]$$

则有归零因子环节

$$K(s) = W_{qu}(s)P(s) = \begin{bmatrix} -\frac{D(s)}{N(s)} & 1 \end{bmatrix} =$$

$$[-1.8 \times 10^{-6}s^3 - 0.19 \times 10^{-2}s^2 - 0.8s \quad 1]$$

将  $u(s)$ 、 $y(s)$  引入  $K(s)$  生成补偿量  $\Delta u_1(s)$ , 其框图如图5所示。当存在干扰  $T_L$  或不确定因素,即  $N(s)$ 、 $D(s)$  有参数变化时,将产生  $\Delta u_1(s)$ 。用此加入系统输入端使  $\Delta u_1(s)$  归零,以消除不确定因素对系统品质的影响。

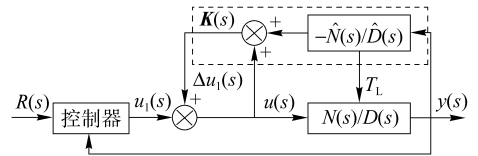


图5 归零因子环节示意图

Fig.5 Schematic diagram of return-to-zero factor

考虑到系统开环频率特性的低频段决定闭环系统的稳态特性,其开环频率特性中频段决定闭环系统的动态特性。鲁棒补偿器引入低通滤波器  $F(s)$  后,将引起补偿信号的变化。为了保证对不确定因素实施有效补偿,  $F(s)$  的设计还须满足:具有一定高的阶次使  $K(s)F(s)$  正则;  $F(s)$  具有足够的带宽;  $F(s)$  幅频特性为 1 或者 0 dB,相频特性为  $0^\circ$ ;  $|F(s)| = 1$  以满足系统具有所期望鲁棒性的稳态特性,即仍保证系统有好的低频与中频特性。根据上述条件,本文系统选取低通滤波器

$$F(s) = \frac{f^3}{(s+f)^3} \quad (7)$$

建立如图6所示使用动态鲁棒补偿器的 Simulink 仿真结构。式中  $f$  取 860。

从动侧由于环境不确定性,常存在输出干扰,即未建模动态影响,系统实际输出与理论输出存在误差,其对随机干扰补偿结果如图7所示。另外液压伺服系控制对象存在非线性特性,使得传统 PD 控制响应曲线控制精度不高,其对非线性补偿结果如图8所示。由仿真结果可知,动态鲁棒补偿器对随机干扰和非线性特性具有良好调节能力。

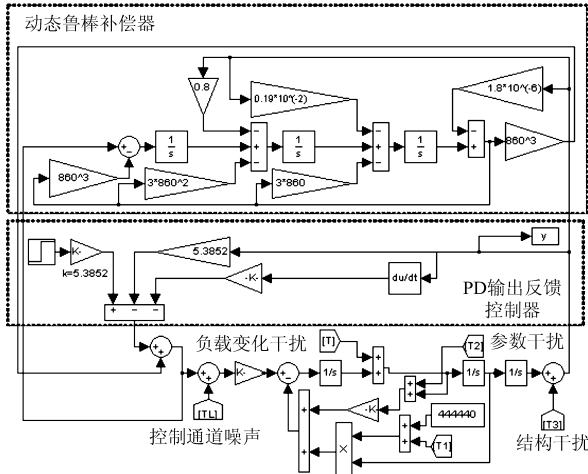


图6 有动态鲁棒补偿器的控制系统 Simulink 结构  
Fig.6 Simulink structure of dynamic robust compensator position controller

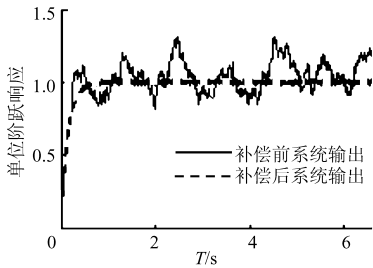


图7 结构干扰的随机干扰补偿

Fig.7 Random compensation of structure disturbance

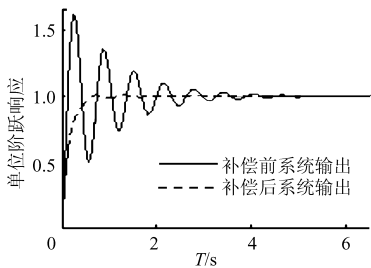


图8 结构干扰的非线性补偿

Fig.8 Nonlinear compensation of structure disturbance

### 3 控制策略与试验

系统采用双向伺服控制策略如图9所示。操纵手柄的操纵力经放大后减去从动机械手工作阻力所得的力偏差信号驱动从动机械手产生位移；主、从动侧之间的位置差控制主动侧操纵手柄位移，使主动侧位移完全跟随从动侧位移的双向伺服控制策略。前向通道中，采用台湾研华公司生产的PCL-812PG数据采集卡，16路单端模拟输入(使用4路)，12位分辨率；后向通道中，采用台湾研华公司生产的PCL-726六通道D/A卡(使用两通道)，模拟量输出范围双极性±5V。位移测量元件采用直流差动变压器式FX-11型位移传感器，精度指标基本误差±0.2%，线性度误差±0.2%。力测量元

件对液压缸杆受力进行检测，要求具有较高的检测精度。本系统选择S型NS-WL1拉压传感器，额定载荷5~20000kg，非线性不大于±0.02%F.S。

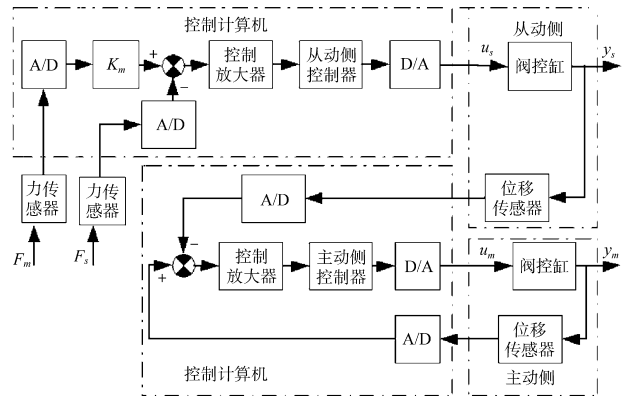


图9 双向伺服控制策略框图

Fig.9 Schematic diagram of bilateral servo control strategy

主-从动侧控制器分别使用干扰观测器的最优控制器和有动态鲁棒补偿的PD反馈控制器。在从动侧空载与接触弹性负载时，分别进行单自由度试验。

从动侧空载时位移和力响应曲线如图10所示。由图10a可知，从动侧空载时，主-从位移跟随误差很小，主动侧手柄位移完全跟随从动侧位移，证明所设计主动侧观测器跟踪扰动的二次型控制器对非线性影响具有良好的补偿作用。由于主动侧位移跟随从动侧位移，因而从动侧位移相位超前于主动侧位移相位。由图10b可知，从动侧负载力近似为零；主动侧力为操作者驱动操纵手柄的驱动力，其值很小，主要为克服手柄的惯性和摩擦力。在试验中，操作者能够自如地操纵而感觉不到反馈力。即从动侧的力信息能很好地被操作者感知。

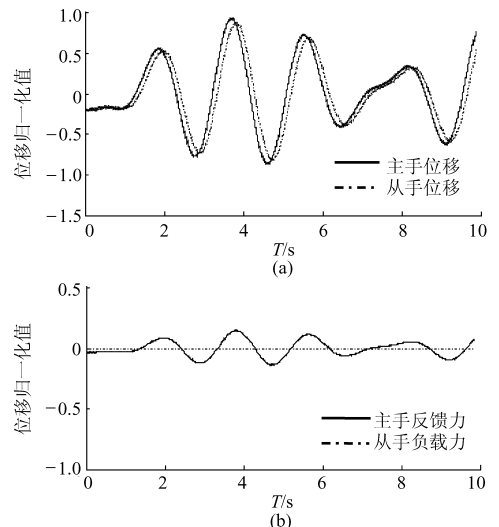


图10 从动侧空载时响应曲线

Fig.10 Response curves of slave side in free space  
(a) 主-从位移响应曲线 (b) 主-从力响应曲线

从动侧作用弹性负载时响应曲线如图 11 所示。由图 11a 可知,主-从位移跟随误差仍很小,主动侧手柄位移完全跟从动侧位移,证明所设计主动侧观测器跟踪扰动的二次型控制器对非线性影响具有良好的补偿作用。由图 11b 可知,在约 3.4 s 时从动侧负载力受外界干扰突然增大时,主动侧位移与反馈力并没有冲击出现,证明所设计的有动态鲁棒补偿的控制器可有效消除干扰反馈力冲击。在试验中,操作者能够真实平顺地感知到反馈力。

#### 4 结束语

仿真与试验结果表明,所设计的主-从侧观测器跟踪扰动的二次型控制器和有动态鲁棒补偿的位置控制器,既提高了主-从位置跟随精度,又具有较强的自适应性和鲁棒性,提高了力反馈电液伺服遥操纵机器人系统的操作性。

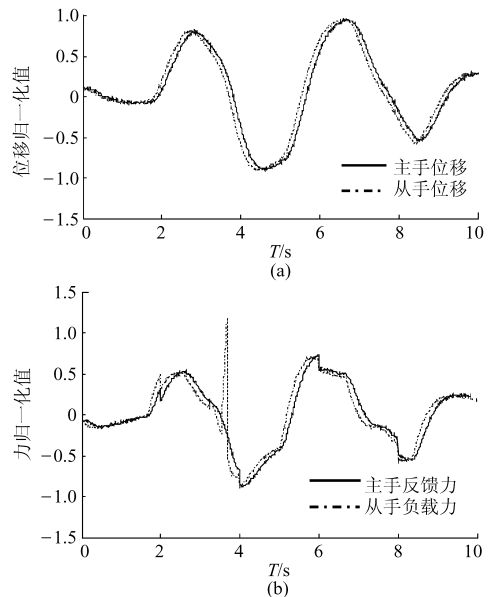


图 11 从动侧作用弹性负载时响应曲线  
 Fig. 11 Response curves of slave side in spring load  
 (a) 主-从位移响应曲线 (b) 主-从力响应曲线

#### 参 考 文 献

- Kato H, Yamada H, Muto T. Master-slave control for a tele-operation system of construction robot (improved method of control compared with a variable gain symmetric-position)[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Fluid Power, 2002, 1(2):513~518.
- Yamada H, Muto T. Development of a hydraulic tele-operated construction robot using virtual reality-new master-slave control method and an evaluation of a visual feedback system[J]. International Journal of Fluid Power, 2003, 4(2):35~42.
- Zhao D X, Xia Y P, Yamada H, et al. Control method for realistic motion in a construction tele-robotic system with 3-DOF parallel mechanism[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2003, 15(4):361~368.
- 巩明德,赵丁选,宫文斌,等.基于神经网络的电液伺服机械手位置控制[J].吉林大学学报:工学版,2002, 32(3):15~19.  
Gong Mingde, Zhao Dingxuan, Gong Wenbin, et al. The position control of electro-hydraulic servo manipulator based on neural network[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2002, 32(3):15~19. (in Chinese)
- 赵丁选,冯石柱,巩明德,等.遥操作工程机器人改进力反馈控制方法[J].吉林大学学报:工学版,2008, 38(3):575~579.  
Zhao Dingxuan, Feng Shizhu, Gong Mingde, et al. Improved force feedback control method for construction telerobot[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(3):575~579. (in Chinese)
- 邓乐,王岩,李新,等.主从机器人系统新型力觉双向伺服控制方法[J].机械与电子,2005(4):52~54.  
Deng Le, Wang Yan, Li Xin, et al. Novel bilateral servo control scheme of master slave system with force telepresence[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2005(4):52~54. (in Chinese)
- 孙斌,周云龙,关跃波,等.基于连续小波变换和 RBF 神经网络的气液两相流型识别方法[J].吉林大学学报:工学版,2007, 37(4):833~837.  
Sun Bin, Zhou Yunlong, Guan Yuebo, et al. Identification method of gas-liquid two-phase flow pattern based on continuous wavelet transform and RBF neural network[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(4):833~837. (in Chinese)
- Salcudean S E, Hashtrudi-Zaad K, Tafazoli S, et al. Bilateral matched-impedance teleoperation with applications to excavator control[J]. Control Systems Magazine, 1999, 19(6):29~37.
- 冯汝扬.遥操纵系统主-从双向伺服控制技术[D].长春:吉林大学,2008.  
Feng Ruyang. Research on master-slave bilateral servo control technology of telemanipulator system[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)