

力反馈时延遥操作系统的时延相关稳定性分析

邓启文¹, 韦 庆¹, 李泽湘²

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073; 2. 香港科技大学 电机及电子工程学系, 香港)

摘要: 当力反馈双边控制系统的主从端之间存在时延时, 系统的稳定性和透明性会遭到破坏. 无源性方法能保证系统的时延无关稳定性, 但由于稳定性和透明性冲突, 系统的透明性较差. 本文利用绝对稳定性理论推导出一种新的双边控制算法, 它以时延相关稳定性代替时延无关稳定性作为控制设计的目标, 牺牲一部分不必要的稳定裕度以改善系统的透明性. 它在保证系统稳定性的前提下使系统具有更好的透明性, 最后用仿真进行了验证.

关键词: 时延; 稳定性; 透明性; 绝对稳定; 时延相关稳定性; 遥操作

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Analysis of delay-dependent stability for time-delay teleoperating systems with force-reflection

DENG Qi-wen¹, WEI Qing¹, LI Ze-xiang²

(1. College of Mechatronics and Automation, Nation University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China;

2. Department of Electrical and Electronic Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: When there exist a time-delay between the master and slave of bilateral systems with force-reflection, the stability and transparency of system gets worse. The algorithm based on passivity can guarantee the delay-independent stability. However, because the stability and transparency are in conflict, the transparency of this algorithm gets worse. In this papers, a new bilateral control algorithm based on absolute stable theory is put forward, which aims at the time-delay teleoperating system with force reflection from slave directly. In the new control algorithm, delay-dependent stability instead of delay-independent stability was taken as the aim of control design, it sacrifices some excessive stability to improve transparency. This control algorithm guarantees the stability and better transparency. Finally, a simulation is given to illustrate this approach.

Key words: time-delay; stability; transparency; absolute stability; delay-dependent stability; teleoperator

1 前言(Introduction)

遥操作系统是指在远端、人难以达到的环境中用遥操作机器人完成操作者在本地端操作的机器人系统. 当本地端和远端相距遥远时, 主从间的通讯会引入时延, 此时系统为时延遥操作系统. 从端的力反馈把遥操作系统变为一个双端口网络, 系统结构如图1所示. 对于操作人员来说, 他感受到远端机械手与环境的作用力, 同时给出远端机械手的运动速度; 对于远端机械手来说, 它跟从操作人员的速度指令运动, 同时将与环境的作用力反馈给遥操作人员. 遥操作系统的力反馈能减轻操作者的负担, 缩短任务完成时间, 同时使操作者产生身临其境的感觉, 提高系统的可靠性和安全性, 完成一些复杂的任务. 遥操作系统在20世纪40年代随着核工业的发展提出, 但直到近十几年空间探索得到越来越得到重视, 它才得到了快速的发展.

当操作端与远端存在通讯时延时, 远端力反馈会破坏系统的稳定性. 各种不同的控制方法被提出以保证系统的稳定性, 如无源性方法^[1], 波变量方法^[2~4], 四通道方法^[5], 基于李雅普诺夫的方法^[6]. 这些方法都能保证系统的稳定性, 而且稳定条件与时延无关, 即能保证系统在任何时延条件下的稳定性. Lawrence^[5]指出, 力反馈时延遥操作系统的无源性(稳定性)和透明性是两个相互矛盾的指标, 一个指标的改善是以牺牲另一个指标为代价的. 实验也证明了这些方法不能保证系统具有很好的透明性, 特别是时延比较大的时候. 在实际的应用中, 时延一般都在某一范围之内, 并不要求对任何时延控制算法都能保证系统的稳定性. 由稳定性和透明性的对立性, 如果我们牺牲一部分不必要的稳定性, 得到系统的时延相关稳定性, 应能改善系统的透明性. 本文以绝对稳定性理论为手段, 以时延相关稳定性为目

标, 得到保证力反馈时延遥操作系统的稳定性和透明性的双边控制方法。

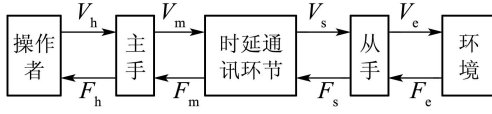


图1 力反馈双边控制示意图

Fig. 1 Sketch of bilateral control with fore-reflection

2 绝对稳定性理论(Absolute stable theory)

绝对稳定性是相对于潜在不稳定来说的。对于一个双口网络, 如果可能选择到一个无源的单口阻抗, 当将其接到双口网络的两个端口时会产生一个不稳定的网络, 则称此双口网络为潜在不稳定的网络。如果找不到这样的阻纳, 则该双口网络称为绝对稳定网络^[7]。直接由此来判断一个网络是否绝对稳定是很困难的, 一个线性时不变网络的稳定性可以用莱威林(Liewellyn)准则进行判断^[7]。

定理1 莱威林(Liewellyn)准则: 一个线性时不变双口网络 $Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}$, 当且仅当满足下列条件:

- 1) $z_{11}(s)$ 和 $z_{22}(s)$ 在右半平面没有极点;
- 2) $z_{11}(s)$ 和 $z_{22}(s)$ 在虚轴上的极点不是对称的, 且其对应的留数为正实数;
- 3)

$$\operatorname{Re}(z_{11}) > 0, \quad (1)$$

$$\operatorname{Re}(z_{22}) > 0, \quad (2)$$

$$\frac{2\operatorname{Re}(z_{11})\operatorname{Re}(z_{22}) - \operatorname{Re}(z_{12}z_{21})}{|z_{12}z_{21}|} > 1 \quad (3)$$

是绝对稳定的, 此处所有参数都在 $s = j\omega$ 处求值。

当有力反馈时, 遥操作系统可以表示为双口网络模型, 所以如果能保证力反馈遥操作系统对应的控制参数满足定理1, 就能保证系统的稳定性。

3 主要结果(Main results)

3.1 系统模型原理(Theory of system model)

文[8,9]中利用绝对稳定性理论对力反馈遥操作系统进行了控制, 但它从从端反馈回主端的是从端的位置而不是从端所受的力。这种方法中时延对系统透明性有更大的影响, 因为它把当前主端位置和 T_2 时刻前从端位置的误差引入了主端感受到的力中。如直接把从端的力反馈回主端, 将能得到更好的透明性。从端力直接反馈的遥操作模型如图1所示。

主手的动力学模型:

$$M_m \dot{V}_m(t) + B_m V_m(t) = F_h(t) - F_s(t - T_2). \quad (4)$$

从手的动力学模型:

$$M_s \dot{V}_s(t) + B_s V_s(t) = F_s(t) - F_e(t). \quad (5)$$

F_s 为从手控制力, 其数学模型为:

$$F_s = K_c (X_m(t - T_1) - X_s(t)). \quad (6)$$

其中:

X_m, X_s 分别表示主手和从手的位置;

M_m, M_s 分别表示主手和从手的质量;

B_m, B_s 分别表示主手和从手的速度阻尼系数;

F_h, F_e 分别表示操作者施加的力和从手与环境的作用力;

T_1 表示由主手端到从手端的时延;

T_2 表示由从手端到主手端的时延;

K_c 表示从端虚拟力的位置误差系数。

由式(4)(5)(6)可得其双口网络模型为:

$$\begin{bmatrix} F_h \\ F_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_m s + B_m + \frac{K_c}{s} e^{-s(T_1+T_2)} & \frac{K_c}{s} e^{-sT_2} \\ \frac{K_c}{s} e^{-sT_1} & M_s s + B_s + \frac{K_c}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ -V_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.2 系统稳定性分析(Stability analyse)

显然, z_{11} 和 z_{22} 的唯一极点为 $s = 0$, 位于虚轴, 留数为正实数 K_c , 莱威林准则的1), 2)成立, 下面讨论莱威林准则3)。

由式(7)可得

$$\operatorname{Re}(z_{11}) = \operatorname{Re}\left(M_m s + B_m + \frac{K_c}{s} e^{-s(T_1+T_2)}\right) = B_m - \frac{K_c}{\omega} \sin(\omega(T_1 + T_2)). \quad (8)$$

由莱威林准则的条件3.1, 即式(1)得到保证系统绝对稳定的条件1):

$$B_m > \frac{K_c}{\omega} \sin(\omega(T_1 + T_2)), \quad (9)$$

同样, 由式(7)可得

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(z_{22}) &= \operatorname{Re}\left(M_s s + B_s + \frac{K_c}{s}\right) = \\ &= \operatorname{Re}\left(M_s j\omega + B_s + \frac{K_c}{j\omega}\right) = B_s. \end{aligned} \quad (10)$$

由莱威林准则的条件2), 即式(2), 得到保证系统绝对稳定的条件2):

$$B_s > 0, \quad (11)$$

同样由式(7)可得

$$z_{12}z_{21} = \frac{K_c}{s} e^{-sT_2} \frac{K_c}{s} e^{-sT_1} = \left(\frac{K_c}{s}\right)^2 e^{-s(T_1+T_2)}. \quad (12)$$

把式(8)(10)(12)代入莱威林准则的条件3), 即式(3),

得到

$$\frac{2\operatorname{Re}(z_{11})\operatorname{Re}(z_{22}) - \operatorname{Re}(z_{12}z_{21})}{|z_{12}z_{21}|} = \frac{2(B_m - \frac{K_c}{\omega} \sin(\omega(T_1 + T_2)))B_s}{|(\frac{K_c}{j\omega})^2 e^{-s(T_1+T_2)}|} - \frac{\operatorname{Re}((\frac{K_c}{j\omega})^2 e^{-s(T_1+T_2)})}{|(\frac{K_c}{j\omega})^2 e^{-s(T_1+T_2)}|} \geq 1, \quad (13)$$

得到保证系统绝对稳定的条件3):

$$B_m B_s \geq K_c^2 \frac{(T_1 + T_2)^2}{4} + \frac{K_c B_s}{2\omega} \sin(\omega(T_1 + T_2)), \quad (14)$$

系统绝对稳定的3个条件(9) (11) (14)中, 只有条件二直接给出了控制参数的取值范围, 其余两个条件都与频率 ω 有关, 不能直接确定控制参数, 下面用作图法对其进行研究.

下面首先讨论条件1), 即式(9).

令 $y_1 = \frac{K_c}{\omega} \sin(\omega(T_1 + T_2))$, 给定 $K_c = 1$, $T_1 = 3$ s, $T_2 = 3$ s, 用MATLAB得到如图2所示的 y_1 关于 ω 的变化曲线.

可以看出式(9)右端的值随着 ω 的增大收敛于一个固定值, 选择合适的 B_m 就可使式(9)成立.

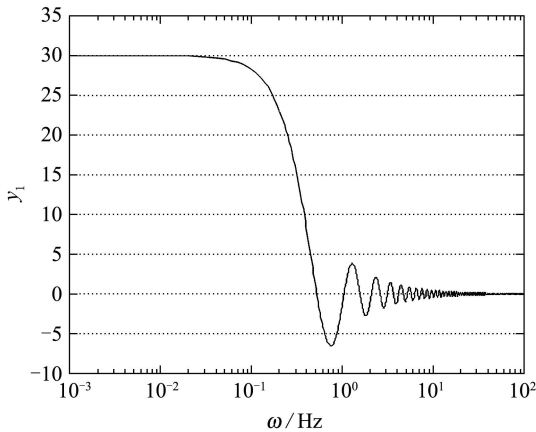


图2 y_1 关于 ω 的变化曲线

Fig. 2 Curve of y_1 with respect to ω

下面讨论条件3), 即式(14). 令

$$y_2 = K_c^2 \frac{(T_1 + T_2)^2}{4} + \frac{K_c B_s}{2\omega} \sin(\omega(T_1 + T_2)),$$

给定 $K_c = 1$, $T_1 = 3$ s, $T_2 = 3$ s, 用MATLAB得到如图3所示的 y_2 关于 ω 的变化曲线.

由图3可以看出(14)的右端的值随着 ω 的增大收敛于一个固定值, 对任意给定的 K_c , B_s , T_1 , T_2 , 选择合适的 $B_m B_s$ 就总可使式(14)成立.

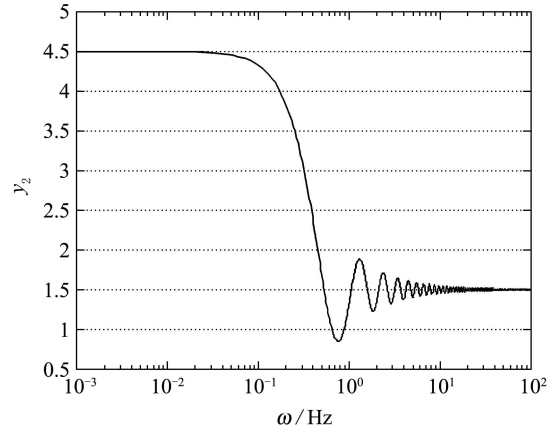


图3 y_2 关于 ω 的变化曲线

Fig. 3 Curve of y_2 with respect to ω

莱威林准则的条件2), 即式(14)显然很容易满足.

综上所述, 选择合适的参数, 莱威林准则的3个条件都能满足, 从而保证系统的稳定性. 由式(9)(14)可以看出, 稳定参数与时延有关, 某一给定的参数只能保证某一时延范围内系统的稳定性, 此即时延相关稳定性. 这种相关也不是严格的, 对某一给定的参数能保证时延小于某一值时系统都稳定.

3.3 透明性分析(Transparency analyse)

一个双边控制系统完全透明要求主端操作者感受到的阻抗 Z_h 完全匹配从端环境阻抗 Z_e , $Z_e = F_e/V_s$, $Z_h = F_h/V_m$, 把此两式代入式(7)可得

$$Z_h = Z_{11} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_e + Z_{22}}, \quad (15)$$

在式(7)中令 $Z_m = M_m s + B_m$, $Z_s = M_s s + B_s$, $Z_f = K_c/s$ 分别表示主手、从手、从端PID控制器的阻尼. 则由式(15)可得

$$Z_h = Z_m + Z_f e^{-s(T_1+T_2)} - \frac{Z_f^2}{Z_e + Z_s + Z_f} e^{-s(T_1+T_2)} = Z_m + \frac{(Z_e + Z_s) Z_f e^{-s(T_1+T_2)}}{Z_e + Z_s + Z_f}. \quad (16)$$

从式(16)出发, 分两种极端的情况讨论系统的透明性:

1) 从端自由运动, 即 $Z_e \rightarrow 0$; 此时

$$Z_h = Z_m + \frac{Z_s Z_f e^{-s(T_1+T_2)}}{Z_s + Z_f}, \quad (17)$$

由于 $Z_s > 0$, $Z_f > 0$, 所以 $Z_h > Z_m$, 系统不能完全透明, 为了得到尽可能好的透明性, 要求

$$\frac{Z_s Z_f e^{-s(T_1+T_2)}}{Z_s + Z_f} \rightarrow 0. \quad (18)$$

由于 Z_s 固定, 则 Z_f 越小, 系统的透明性越好.

2) 从端与环境硬接触, 即 $Z_f \rightarrow 0$. 此时,

$$Z_h = Z_m + \frac{(1 + \frac{z_s}{z_e})Z_f e^{s(T_1+T_2)}}{1 + \frac{Z_s}{Z_e} + \frac{Z_f}{Z_e}} \approx Z_m + Z_f e^{s(T_1+T_2)},$$

由于 Z_m 固定, 则 Z_f 越大, 系统的透明性越好.

由前面分析, 在从手控制力直接反馈的控制算法中, 控制参数的选取应满足下面几个条件: 1) 任何条件下都满足式(11)以及图2和图3所示的约束条件, 以保证系统的稳定性; 2) 从端自由运动时, 其位置控制的位置误差控制参数尽可能小, 以减小反作用于操作者的力. 3) 从端与环境硬接触时, 其位置控制的位置误差参数尽可能大, 使操作者对从端与环

境的作用敏感. 条件1保证系统的稳定性, 条件2和条件3保证系统的透明性, 由此得到的双边控制同时具有良好的稳定性和透明性.

4 实验结果 (Experiment result)

用MATLAB的Simulink中的SinMechanics子模块构建仿真系统, 从端采用位置控制. 主端的速度命令和从端反馈回主端的力命令都直接传递.

仿真系统的基本控制参数如表1所示, 从端控制参数的值分两种情况: 1) 从端自由运动; 2) 从端与环境硬接触, 此时 K_c 的值为自由运动时 K_c 值的5倍. 图4为从端力直接反馈的控制效果, 图5为双边PID控制时的控制效果(上图为主端位置曲线; 下图为主端感受到的力).

表1 基本控制参数

Table 1 Basic control parameters

控制参数	T_1/s	T_2/s	$\max T_1 /m$	M_m/kg	M_s/kg	$B_m/(Nm \cdot s^{-2})$	$B_s/(Nm \cdot s^{-2})$
参数值	1	1	0.5	3.8942	3.8942	0.1	0.1

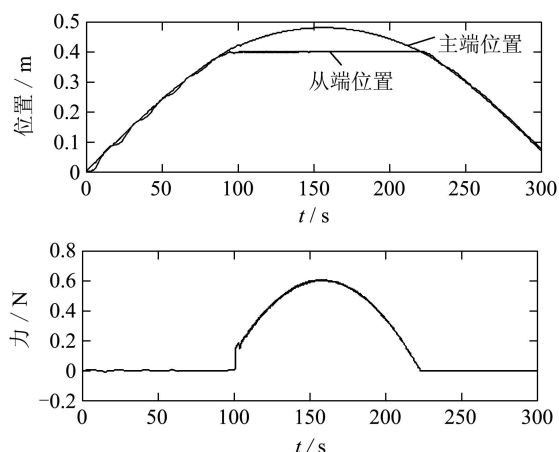


图4 力反馈时的主从端位置、力曲线

Fig. 4 Position and force of the master and slave when force is feedback

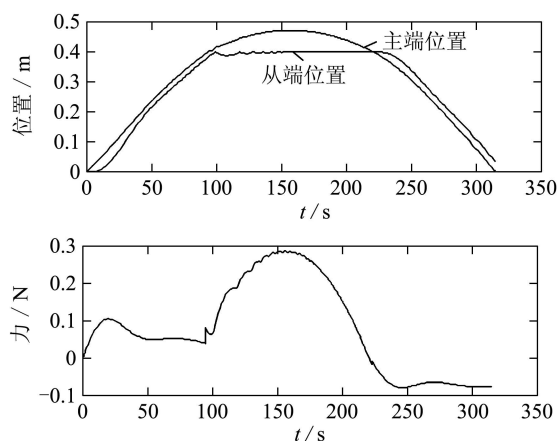


图5 位置反馈时的主从端位置、力曲线

Fig. 5 Position and force of the master and slave when force is feedback

由图4、图5可以看出, 直接力反馈控制比双边PID控制有更好的透明性, 特别是在从端自由运动时: 直接力反馈控制中操作者感受到的力几乎为零, 而双边PID控制中操作者能感受到明显的力.

5 结论 (Conclusion)

本文提出的双边控制算法综合了Anderson^[1]算法中的直接力反馈思想和文[8,9]中的绝对稳定思想, 以时延相关稳定性代替时延无关稳定性, 牺牲一部分不必要的稳定性换取透明性的提高, 使力反馈时延遥操作系统的性能得到很大的改善. 对得到的复杂的参数约束条件用作图的方法进行处理, 得到简单、直接的结果.

参考文献 (References):

- [1] ANDERSON R J, SPONG M W. Bilateral control of teleoperators with time delay[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1989, 34(5): 494 – 501.
- [2] NIEMEYER G E. *Using wave variables in time delayed force reflecting teleoperation*[D]. Cambridge, USA: [s.n.], 1996.
- [3] NIEMEYER G E, SLOTINE J J. Using wave variables for system analysis and robot control[C]// *IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. New York, USA: IEEE Press, 1997: 1619 – 1625.
- [4] NIEMEYER G E, SLOTINE J J. Stable adaptive teleoperation[J]. *IEEE J of Oceanic Engineering*, 1991, 16(1): 152 – 162.
- [5] LAWRENCE D A. Stability and transparency in bilateral teleoperation[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1993, 9(5): 624 – 637.
- [6] DAS H, ZAK H, et al. Operator performance with alternative manual control modes in teleoperation[J]. *Teleoperators and Virtual Environments*, 1992, 1(2): 201 – 218.

- [4] 胡国龙, 孔亚广, 孙优贤. 基于模糊规则的动态矩阵预测控制及其应用[J]. 中国造纸学报, 2002, 17(1): 103 – 106.
(HU Guolong, KONG Yaguang, SUN Youxian. Fuzzy rules-based dynamic matrix predictive control and its application[J]. *Trans of China Pulp and Paper*, 2002, 17(1): 103 – 106.)
- [5] ABONYI J, NAGY L, SZEIFERT F. Fuzzy model-based predictive control by instantaneous linearization[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 120(1): 109 – 122.
- [6] 胡品慧, 袁璞. 状态反馈预测控制的结构性能及应用实例[J]. 信息与控制, 2002, 31(1): 9 – 13.
(HU Pinhui, YUAN Pu. Structure and performance of state feedback model predictive control system and its application[J]. *Information and Control*, 2002, 31(1): 9 – 13.)
- [7] 胡品慧, 袁璞. 状态反馈预测控制系统的设计及应用[J]. 基础自动化, 2000, 7(5): 9 – 12.
(HU Pinhui, YUAN Pu. State feedback model predictive control systems: design and application[J]. *Basic Automation*, 2000, 7(5): 9 – 12.)
- [8] 胡品慧, 袁璞. 关于状态反馈预测控制系统的极点配置[J]. 控制与决策, 2001, 17(6): 910 – 913.
(HU Pinhui, YUAN Pu. On pole placement of state feedback model predictive control systems[J]. *Control and Decision*, 2001, 17(6): 910 – 913.)
- [9] HENSON M A, SEBORG D E. Input output linearization of general nonlinear processes[J]. *AIChE J*, 1990, 36(11): 1753 – 1758.

作者简介:

王书斌 (1977—), 男, 博士, 中国石油大学(北京)自动化研究所, 目前研究方向为模糊、预测控制及应用, E-mail:wsbwyy@126.com;

胡品慧 (1959—), 男, 教授, 博士, 中国石油大学(北京), 研究领域为控制理论与应用、预测控制、先进过程控制, E-mail:hupnh@cup.edu.cn;

林立 (1954—), 男, 教授, 博士生导师, 中国石油大学(北京), 主要从事石油机械机电一体化技术的研究工作。

(上接第814页)

- [5] ALSPACH D L, SORENSON H W. Nonlinear bayesian estimation using Gaussian sum approximation[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Control Systems*, 1972, 17(4): 439 – 448.
- [6] CARPENTER J, CLIFFORD P, FEARNEHEAD P. Improved particle filter for nonlinear problems[J]. *IEE Proc-Radar, Sonar and Navigation*, 1999, 146(1): 2 – 7.
- [7] SANJEEV ARULAMPALAM M. A tutorial on particle filters for on-line nonlinear/non-gaussian bayesian tracking[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2002, 50(2): 174 – 188.

作者简介:

张高煜 (1972—), 男, 工学博士, 目前研究方向为数据融合与智能控制, E-mail: farwind1972@yahoo.com.cn;

江水 (1970—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为分布式计算/数据库, E-mail: jiangshui@ecict.com.cn;

梁继民 (1971—), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向为信息融合、图像处理和生物特征识别, E-mail: jimleung@mail.xidian.edu.cn;

赵恒 (1975—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为数据挖掘和图像处理, E-mail: hengzhao@mail.xidian.edu.cn.

(上接第818页)

- [7] 陈惠开, 吴新余, 吴叔美. 现代网络分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1992.
(CHEN Huikai, WU Xinyu, WU Shumei. *Modern Network Analyzing*[M]. Beijing: Peoples Posts and Telecommunication Publishing House, 1992.)
- [8] IMAIDA T, YOKOKOHJI Y. Ground-space bilateral teleoperation experiment using ETS-VII robot arm with direct kinesthetic coupling[C] // *IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2001: 1031 – 1038.
- [9] 邓启文, 韦庆, 李泽湘. 大时延力反馈双边控制系统[J]. 机器人, 2005, 27(5): 410 – 413.
(DENG Qiwen, WEI Qing, LI Zexiang. Force-reflection bilateral

control system with large time-delay[J]. *Robot*, 2005, 27(5): 410 – 413.)

作者简介:

邓启文 (1977—), 男, 博士研究生, 研究领域为机器人技术、大时延遥操作技术, E-mail: dengqiwen@nudt.edu.cn;

韦庆 (1969—), 男, 教授, 研究领域为机器人力控制、智能机器人、大时延遥操作技术;

李泽湘 (1961—), 男, 教授, 研究领域为机器人技术、运动控制、机床数控系统。