

文章编号: 1000-8152(2005)04-0661-05

实现比率遥操作系统稳定性与性能折衷的策略

刘少强¹, 王爱民², 樊晓平¹, 黄惟一²

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 东南大学 仪器科学与工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 临场感比率遥操作系统要求在保证系统稳定的同时能增强系统性能. 本文通过系统建模、引入二端口网络的莱威林(Llewellyn)绝对稳定性准则, 在定义比率系统的理想性能、导出实现理想性能的主从系统控制参数的约束条件后, 分析了实现理想性能时系统的稳定性; 基于莱威林准则, 在实现理想性能的基础上调节主从系统阻抗, 提出了在操作者与环境无源条件下能在系统绝对稳定性和增强性能之间折衷的控制策略. 仿真表明了此策略的有效性.

关键词: 比率遥操作系统; 控制策略; 稳定性与性能折衷; 绝对稳定性准则

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A

Control scheme for tradeoff between stability and performance in scaled telemanipulation

LIU Shao-qiang¹, WANG Ai-min², FAN Xiao-ping¹, HUANG Wei-yi²

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;

2. Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: It is necessary for the scaled telemanipulation system to guarantee the stability and enhance the performance simultaneously. By modeling the system and introducing Llewellyn two-port network absolute stability criteria, the ideal performance of the scaled telemanipulation is defined, the control parameters restrictions of the system to realize the ideal performance is induced and the stability of the system with the ideal performance is analyzed. Based on the absolute stability criteria and the regulation of impedance of the master slave manipulator the control scheme is presented which can realize tradeoff between absolute stability and performance enhancement of the system in the passivity of the both operator and environment. Simulation results show the validity of the proposed control scheme.

Key words: scaled telemanipulation; control scheme; tradeoff between stability and performance; absolute stability criteria

1 引言(Introduction)

力觉临场感比率遥操作系统是主从操作系统中的一个重要类别, 主要应用于医疗、微生物工程、微机械等领域(如显微外科手术、微机械装配).

力觉临场感比率遥操作系统(以下简称比率系统)因其交互的环境处于小尺度或微观世界中, 使得它与用于危险环境、太空等作业的一般主从遥操作系统有重要不同. 一方面因其主从系统两边的尺度不同而存在所谓“尺度效应”问题^[1], 另一方面不同作业任务对系统性能要求的侧重点不同. 因此比率系统的理想性能有别于一般临场感遥操作系统的理想性能(要求环境阻抗“透明”传输).

比率系统虽有特殊性, 其关键设计指标仍是系统稳定性与临场感性能. 遥操作系统的稳定性与性

能相互抵触, 必须在二者之间折衷^[2]. 对比率系统已有一些研究^[1,3,4], 其中文献^[4]采用的理想性能概念便于对系统性能的选择. 本文引入二端口网络的莱威林绝对稳定性准则^[5], 提出了能在系统绝对稳定性与增强性能之间折衷的控制策略.

2 系统模型(Modeling of system)

2.1 动力学模型(Dynamics model)

如图 1 所示, 力觉临场感遥操作系统一般由操作者、主机械手、通信控制系统、从机械手和环境构成. 操作者通过由主机械手、通信控制系统和从机械手组成的主从遥操作系统与环境交互. 对于比率系统, 通信控制系统按给定比率将主手传给从手和从手返回到主手的能量、信息进行变换.

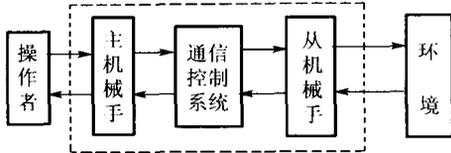


图1 力觉临场感遥操作系统框图

Fig. 1 Block diagram of telemanipulation system

为简化分析,下面对单自由度系统进行讨论.在操作者紧握主手、从手与环境稳定接触的条件下,系统的动力学方程如下^[6,7]:

$$\text{主手: } \tau_m + f_m = m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m; \quad (1)$$

$$\text{从手: } \tau_s - f_s = m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s; \quad (2)$$

$$\text{环境: } f_e = m_e \ddot{x}_s + b_e \dot{x}_s + k_e x_s; \quad (3)$$

$$\text{操作者: } f_h - f_m = m_h \ddot{x}_m + b_h \dot{x}_m + k_h x_m. \quad (4)$$

其中: m, b, k 分别是质量、阻尼和弹性系数, τ 是电机驱动力, x 是位移; 下标 m, s, e 和 h 分别代表主手、从手、环境和操作者; f_m 是操作者与主手的交互力, f_s 是从手与环境的交互力, f_h 是操作者输出的意愿力, f_e 是环境受到的作用力, $f_s = f_e$.

采用4通道结构通用控制方案^[8],主、从手的控制策略如下^[4,6]:

$$\tau_m = \left[k_{mpm} + k'_{mpm} \frac{d}{dt} + k''_{mpm} \frac{d^2}{dt^2} \quad k_{mfm} \right] \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} - \left[k_{mps} + k'_{mps} \frac{d}{dt} + k''_{mps} \frac{d^2}{dt^2} \quad k_{mfs} \right] \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\tau_s = \left[k_{spm} + k'_{spm} \frac{d}{dt} + k''_{spm} \frac{d^2}{dt^2} \quad k_{sfm} \right] \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} - \left[k_{sps} + k'_{sps} \frac{d}{dt} + k''_{sps} \frac{d^2}{dt^2} \quad k_{sfs} \right] \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix}. \quad (6)$$

这里: $k_{mpm}, k'_{mpm}, k''_{mpm}$ 和 k_{mfm} 分别是主边控制所用的主手位移、速度、加速度和力的反馈增益; $k_{mps}, k'_{mps}, k''_{mps}$ 和 k_{mfs} 分别是主边控制所用的从手位移、速度、加速度和力的增益, τ_m 由这8个参数定义. 同理, 由 $k_{spm}, k'_{spm}, k''_{spm}, k_{sfm}, k_{sps}, k'_{sps}, k''_{sps}$ 和 k_{sfs} 定义 τ_s .

2.2 二端口网络模型(Two-port network model)

根据动力学系统和电路系统的如下等效关系: 力 $f \leftrightarrow$ 电压 V 、驱动力 $\tau \leftrightarrow$ 电压 U 、速度 $\dot{x} \leftrightarrow$ 电流 I , 图1所示系统等价为图2所示的二端口网络. 相应的式(1), (2), (5), (6)由时域化到 S 域得

$$U_m + V_m = (m_m s + b_m) I_m = Z_m I_m, \quad (7)$$

$$U_s - V_s = (m_s s + b_s) I_s = Z_s I_s, \quad (8)$$

$$U_m = [P_m \quad Q_m] \begin{bmatrix} I_m \\ V_m \end{bmatrix} - [R_m \quad S_m] \begin{bmatrix} I_s \\ V_s \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$U_s = [P_s \quad Q_s] \begin{bmatrix} I_m \\ V_m \end{bmatrix} - [R_s \quad S_s] \begin{bmatrix} I_s \\ V_s \end{bmatrix}. \quad (10)$$

式中: Z 表示阻抗,

$$P_m = k''_{mpm} s + k'_{mpm} + k_{mpm}/s, \quad Q_m = k_{mfm},$$

$$R_m = k''_{mps} s + k'_{mps} + k_{mps}/s, \quad S_m = k_{mfs},$$

$$P_s = k''_{spm} s + k'_{spm} + k_{spm}/s, \quad Q_s = k_{sfm},$$

$$R_s = k''_{sps} s + k'_{sps} + k_{sps}/s, \quad S_s = k_{sfs}.$$

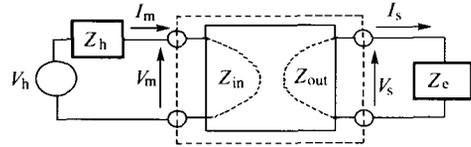


图2 力觉临场感系统等效电路模型

Fig. 2 Equivalent two-port model of the system

式(9), (10)代入式(7), (8)得

$$\begin{bmatrix} Z_m - P_m & -R_m \\ -P_s & -(Z_s + R_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_m \\ -I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Q_m & -S_m \\ Q_s & -(1 + S_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ V_s \end{bmatrix}. \quad (11)$$

由上式可得主从系统的二端口网络混合参数^[7]

$$h_{11} = \frac{(Z_m - P_m)(Z_s + R_s) + P_s R_m}{(1 + Q_m)(Z_s + R_s) - Q_s R_m}, \quad (12)$$

$$h_{12} = \frac{-(1 + S_s)R_m + S_m(Z_s + R_s)}{(1 + Q_m)(Z_s + R_s) - Q_s R_m}, \quad (13)$$

$$h_{21} = -\frac{(1 + Q_m)P_s + Q_s(Z_m - P_m)}{(1 + Q_m)(Z_s + R_s) - Q_s R_m}, \quad (14)$$

$$h_{22} = \frac{(1 + Q_m)(1 + S_s) - Q_s S_m}{(1 + Q_m)(Z_s + R_s) - Q_s R_m}. \quad (15)$$

3 稳定性(Concept of stability)

图2所示的二端口网络模型反映了操作者、主从系统和环境之间的能量交换特征,操作者和环境是分别连接到二端口两边的单口终端.二端口网络的输入输出信号对 $((V_m, V_s)$ 和 $(I_m, -I_s)$) 之间的关系用阻纳矩阵表示. 如果 $X_p^T u_p = V_m I_m + V_s (-I_s)$, 两矢量间的映射 $X_p = P u_p$ 称为阻纳映射; P 是表示输入输出对关系的任一种阻纳矩阵(阻抗、导纳、混合参数、逆混合参数矩阵)^[5,9].

当系统吸收的能量大于其产生的能量时称此系统是无源的,否则是有源的.如果一个线性时不变的二端口网络是无源的,则它与任一无源网络所连接成的系统是稳定的^[5].

根据 Hogan 的研究^[10],人手臂的阻抗具有高度的自适应性和时变性,驱动手臂的肌肉与神经反馈系统虽是有源的,但人手显示出无源特征,因而操作者可建模为一个状态独立的外部输入力和一个无源阻抗.对与系统交互的大部分环境而言,它们都吸收能量,是无源的.因此可假定操作者与环境是无源的.若主从系统是无源的,则整个系统是稳定的.

定义 1 一个二端口网络是无源的,当且仅当其阻纳映射 $X_p = Pu_p$ 对所有容许的输入输出对满足

$$\int_0^t X_p^T(\tau) u_p(\tau) d\tau \geq 0, \forall t \geq 0.$$

对一个线性网络而言这等价于要求 $P > 0$,即使一个线性网络无源,必须使 $P > 0$.

系统与无源环境交互时,无源性只是系统稳定的充分条件^[4,5],即为保证稳定而使系统保持无源性是保守的.由于二端口的稳定性不单凭它本身确定,还取决于所连接终端的情况^[5,9].因此有下述定义.

定义 2 一个线性二端口网络是绝对稳定的,当且仅当不存在任何无源单口阻纳,会使得其与此二端口连接成的系统不稳定.

定义 3 若一个二端口网络不是绝对稳定的,则它是潜在不稳定的.

无源网络是绝对稳定的,但绝对稳定的网络不是必定无源的.对线性二端口网络,莱威林准则则提供了绝对稳定的充分必要条件^[5,9].

定理 1 一个线性时不变的二端口网络在 $j\omega_0$ 处是绝对稳定的,当且仅当其满足下述条件:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(p_{11}) > 0, \operatorname{Re}(p_{22}) > 0, \\ \eta(j\omega_0) = \frac{2\operatorname{Re}(p_{11})\operatorname{Re}(p_{22}) - \operatorname{Re}(p_{12}p_{21})}{|p_{12}p_{21}|} > 1. \end{cases} \quad (16)$$

式中: p_{ij} 是 P 的元素, $\operatorname{Re}(p_{ij})$ 指实部, η 称为稳定性参数. $\eta > 1$ 绝对稳定程度高,它接近于 1 时,二端口网络就接近于绝对稳定与潜在不稳定的边界; $\eta = 1$ 时二端口网络处于临界状态.

实际应用所关心的是二端口网络在实频轴 ($j\omega$) 上的特性,并不关心其在整个闭复频面上的特性,故后述稳定性分析限定在实频轴上.因此对任意 $\omega_0 \geq 0$,若式(16)完全满足,则此网络绝对稳定.

由上可知,满足莱威林准则的主从系统与任意无源的操作者和环境构成的系统是稳定系统,且只要求主从系统是线性时不变的,而操作者与环境可以是非线性和时变的,只要他(它)们是无源的.

4 理想性能与系统稳定性(Ideal performance and stability of system)

根据比率系统的一般性能要求,这里定义理想性能作为性能定量评价指标和控制器设计指南.

定义 4 在操作者意愿力 f_h 作用下,对任意动态环境,若比率系统都可实现 $x_m = \xi_p x_s$,则称其可实现理想位置传输;若都可实现 $f_m = \xi_f f_s$,则称其可实现理想力传输;若都可同时实现 $x_m = \xi_p x_s, f_m = \xi_f f_s$,则称其可实现理想位置与力传输.其中 ξ_p, ξ_f 分别是位置和力比率因子,一般设为恒定值.对运动的实时性要求使上述理想性能可表示为

$$I_m = \xi_p I_s, V_m = \xi_f V_s.$$

由定义 4 可得实现理想性能的二端口网络的混合参数矩阵为^[7]

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \xi_f \\ -\xi_p^{-1} & 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

由式(12)~(15)及(17)知,为实现理想性能式(9)和(10)中的参数必须满足下述条件^[7]:

$$\begin{cases} 1 + S_s = \xi_f Q_s, \\ S_m = \xi_f(1 + Q_m), \\ R_m = \xi_p(P_m - Z_m), \\ Z_s + R_s = \xi_p P_s. \end{cases} \quad (18)$$

根据定理 1 和式(17)比率系统实现理想性能时有 $\operatorname{Re}(h_{11}) = \operatorname{Re}(h_{22}) = 0, \eta = \frac{\xi_f \xi_p^{-1}}{|\xi_f \xi_p^{-1}|} = 1$. 因此系统实现理想性能时处于临界状态,不是绝对稳定的.

5 稳定性与性能折衷的策略(Scheme for the tradeoff between stability and performance)

5.1 实现绝对稳定性(Absolutely stability realization)

由式(17)及混合参数的意义可知,实现理想性能意味着操作者和环境通过一根无质量刚体虚拟连接,取消了一切动力学特性.此时系统虽有最佳灵活性和可操纵性,但处于一种临界状态,仅惯性参数一个很小的误差就可能使无质量刚体变为负质量刚体.因此必须使主从系统动力学特性表现为可调节的阻抗,以增强系统的鲁棒稳定性.具体就是使

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(h_{11}) > 0, \operatorname{Re}(h_{22}) > 0, \\ \eta(j\omega) = \frac{2\operatorname{Re}(h_{11})\operatorname{Re}(h_{22}) - \operatorname{Re}(h_{12}h_{21})}{|h_{12}h_{21}|} > 1. \end{cases}$$

阻抗调节可通过在主从系统控制输出中各添加 P'_m, S'_m, P'_s, S'_s 项实现,即将式(9),(10)变为

$$U'_m = [(P_m - P'_m) \quad Q_m] \begin{bmatrix} I_m \\ V_m \end{bmatrix} - [R_m \quad (S_m + S'_m)] \begin{bmatrix} I_s \\ V_s \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$U'_s = [(P_s - P'_s) \quad Q_s] \begin{bmatrix} I_m \\ V_m \end{bmatrix} - [R_s \quad (S_s + S'_s)] \begin{bmatrix} I_s \\ V_s \end{bmatrix}. \quad (20)$$

令

$$\begin{cases} S'_m(Z_s + R_s) = S'_s R_m, \\ (1 + Q_m)P'_s = Q_s P'_m, \end{cases} \quad (21)$$

并以 U'_m, U'_s 代替式(7), (8) 中的 U_m, U_s , 联立式(12)~(15), 可得新的混合参数^[7]

$$h'_{11} = h_{11} + \frac{P'_m}{1 + Q_m}, \quad (22)$$

$$h'_{12} = h_{12}, \quad (23)$$

$$h'_{21} = h_{21}, \quad (24)$$

$$h'_{22} = h_{22} + \frac{S'_s}{Z_s + R_s}. \quad (25)$$

因 ξ_f, ξ_p^{-1} 为正, 所以选择合适 P'_m, S'_m 并满足式(21), 同时保持式(19), (20) 中其他参数值为实现理想性能时的值, 就能保证 $\text{Re}(h'_{11}) > 0, \text{Re}(h'_{22}) > 0$ 和 $\eta(j\omega) > 1$, 实现绝对稳定.

5.2 可实现的控制策略(Realizable control scheme)

根据系统稳定性与不同性能的要求, 主从系统待实现的目标特性可描述为

$$f_m - \xi_f f_s = m_r \ddot{x}_m + b_r \dot{x}_m + k_r x_m, \quad (26)$$

$$\ddot{e} + k_1 \dot{e} + k_2 e = \lambda \xi_f f_s. \quad (27)$$

式中: m_r, b_r, k_r 是调节阻抗 ($Z = m_r s + b_r + k_r/s$) 的质量、阻尼、弹性系数; λ 是用于位置性能调节的正常数, $e = x_m - \xi_p x_s$.

选择

$$P'_m = \frac{k_{mf} + 1}{2} (m_r s + b_r + k_r/s), \quad S'_s = \frac{\lambda}{2} \xi_f \xi_p^{-1} m_s,$$

相应地

$$P'_s = \frac{1 + k_{sf}}{2 \xi_f} (m_r s + b_r + k_r/s), \quad S'_m = -\frac{\lambda}{2} m_m \xi_f.$$

由式(19), (20) 可得控制策略

$$\begin{aligned} \tau_m = & \frac{m_m}{2} [\ddot{x}_m + \xi_p \dot{x}_s - k_1 (\dot{x}_m - \xi_p \dot{x}_s) - k_2 (x_m - \xi_p x_s)] + \\ & b_m \dot{x}_m + \frac{\lambda}{2} m_m \xi_f f_s - \frac{1 + k_{mf}}{2} (m_r \ddot{x}_m + b_r \dot{x}_m + \\ & k_r x_m) + \frac{k_{mf} - 1}{2} f_m - \frac{k_{mf} + 1}{2} \xi_f f_s, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\tau_s = \frac{m_s}{2} [\ddot{x}_s + \frac{\dot{x}_m}{\xi_p} + k_1 (\frac{\dot{x}_m}{\xi_p} - \dot{x}_s) + k_2 (\frac{x_m}{\xi_p} - x_s)] +$$

$$\begin{aligned} & b_s \dot{x}_s - \frac{\lambda}{2 \xi_p} m_s \xi_f f_s - \frac{1 + k_{sf}}{2 \xi_f} (m_r \dot{x}_m + b_r \dot{x}_m + \\ & k_r x_m) + \frac{1 + k_{sf}}{2 \xi_f} f_m - \frac{k_{sf} - 1}{2} f_s. \end{aligned} \quad (29)$$

式(29) 代入式(2) 可得式(27), 取 $\lambda = 0$ 和适当的 k_1, k_2 , 则有 $x_m = \xi_p x_s$, 即理想位置性能; 将式(28) 代入式(1) 并选取足够大的 k_{mf} 可得式(26), 若阻抗 Z 为零, 有 $f_m = \xi_f f_s$, 即理想力性能; 若 λ 和 Z 同时为零则完全实现理想性能.

6 仿真(Simulation)

6.1 模型与参数(Model and parameters)

主从系统模型参数^[4]:

$$m_m = 6.04 \text{ kg}, \quad m_s = 31.5 \times 10^{-3} \text{ kg}, \quad \xi_p = 5.77,$$

$$b_m = 0.00 \text{ Ns/m}, \quad b_s = 18.0 \times 10^{-2} \text{ Ns/m}, \quad \xi_f = 5.77^2.$$

操作者和环境模型时变参数:

$$m_h = 0.5 \text{ kg}, \quad b_h = 5.5(0.8 + 0.2 \cos(\frac{\pi}{4} t)) \text{ Ns/m},$$

$$k_h = 150(1 + 0.25 \sin(\frac{\pi}{4} t)) \text{ N/m},$$

$$m_e = 0.005 \text{ kg}, \quad b_e = 20(0.65 + 0.35 \sin(\frac{\pi}{4} t)) \text{ Ns/m},$$

$$k_e = 50(1 + 0.1 \cos(\frac{\pi}{4} t)) \text{ N/m}.$$

操作者意愿力 f_h 为幅值 1 N、周期 4 s 的方波力.

控制策略所用参数值:

$$k_1 = 40 \text{ 1/s}, \quad k_2 = 600 \text{ 1/s}^2,$$

$$k_{sf} = 0.3, \quad k_{mf} = 0.3,$$

$$m_r = 0.15 \text{ kg}, \quad b_r = 0.12 \text{ Ns/m},$$

$$k_r = 0.0 \text{ N/m}, \quad \lambda = 10^{-3} \text{ 1/kg}.$$

6.2 仿真结果(Simulation results)

采用本策略的系统对方波力输入的位置和力响应及比率跟踪误差分别如图 3, 4 所示. 图中: X 表示位移、 E_x 表从手对主手的比率位置跟踪误差, $E_x = x_m - 5.77 x_s$; f 表示力, E_f 表示主手对从手的力比率跟踪误差, $E_f = 33.2929 f_s - f_m$. 比率系统的操作在视觉辅助下进行, 一般侧重要求从手按比率精确跟踪主手位置, 并使从手与环境的交互力按给定比率呈现给紧握主手的操作者, 以实现精细操作. 图 3 表明本策略能使从手快速响应并按比率准确跟踪主手位置, 且最大位置比率跟踪误差不超过位移量的 1%; 图 4 表明本策略可准确实现主手对从手力的比率跟踪. 仿真还表明控制参数值不变而微环境与操作者的参数在一定范围内随时间变化时, 比率跟踪效果不受影响, 改变的只是位置与力的幅值. 因此本

策略能满足精细遥操作的要求。

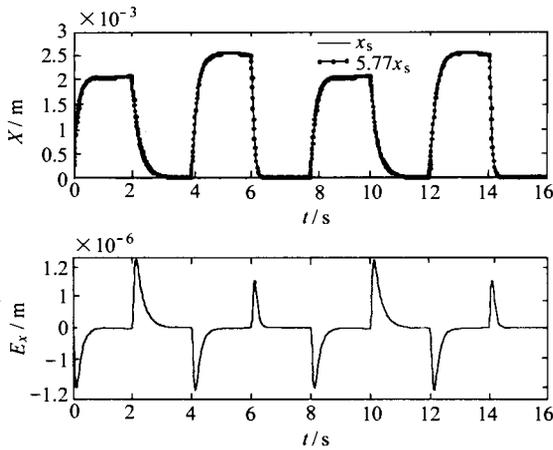


图3 $f_h = 1\text{ N}$ 方波时主从手位置响应及其比例跟踪误差
Fig. 3 Scaled displacement tracking and the error when $f_h = 1\text{ N}$

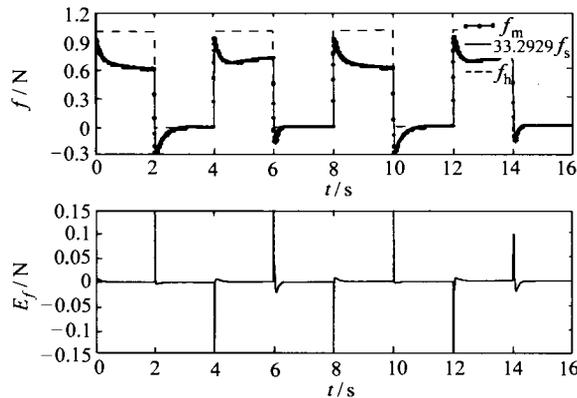


图4 $f_h = 1\text{ N}$ 方波时主从手力响应及其比例跟踪误差
Fig. 4 Scaled forces tracking and the error when $f_h = 1\text{ N}$

7 结论(Conclusion)

本文引入基于无源性的二端口网络绝对稳定性准则提出了实现比率遥操作系统稳定性与增强性能折衷的控制策略. 该策略是在实现理想性能的基础上,使系统的动力学特性表现为可调节阻抗来实现系统绝对稳定和增强性能的,并且只要求操作者和环境是无源的,可以是非线性和时变的. 仿真结果表明了该策略的有效性.

参考文献(References):

[1] COLGATE J. E. Robust impedance shaping telemanipulation [J].

IEEE Trans on Robotics and Automation, 1993, 9(4): 374 – 384.

[2] LAWRENCE D. A. Stability and transparency in bilateral teleoperation [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1993, 9(5): 624 – 637.

[3] KANEKO K. TOKASHIKI H. TANIE K. et al, Macro-micro bilateral teleoperation based on operational force feedforward [C]// *Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems*. Victoria BC, Canada; IEEE Press, 1998: 1761 – 1769.

[4] YOKOKOHI Y. HOSOTANI N. YOSHIKAWA T, Analysis of maneuverability of micro-teleoperation system [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. San Diego, CA: IEEE Rob and Auto Society, 1994, 1: 237 – 242.

[5] ADAMS R J, HANNAFORD B. Stable haptic interaction with virtual environments [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1999, 15(3): 465 – 474.

[6] 王爱民. 力觉临场感的应用基础研究[D]. 南京: 东南大学, 2001.
(WANG Aimin. *Research on application fundament of force telepresence* [D]. Nanjing: Southeast University, 2001.)

[7] 刘少强. 用于微创外科手术的力觉临场感比率遥控机器人理论及实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2002.
(LIU Shaoqiang. *Research on theory and experiment of scaled telemanipulator with force telepresence for minimally invasive surgery* [D]. Nanjing : Southeast University, 2002.)

[8] HASHTRUDI-ZAAD K, SALCUDEAN S. E. Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators [J]. *Int J of Robotics Research*, 2001, 20(6): 419 – 445.

[9] 陈惠开. 现代网络分析 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1992: 463 – 629.
(CHEN W. K. *Modern Network Analysis* [M]. Beijing: Post and Telecommunication Press, 1992: 463 – 629.)

[10] HOGAN N. Controlling impedance at the man/machine interface [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Scottsdale, AZ: IEEE Computer Society, 1989, 3: 1626 – 1631.

作者简介:

刘少强 (1964—), 男, 博士, 副教授, 1984年、1992年、2002年于东南大学分别获得学士、硕士、博士学位, 研究领域为遥控机器人、传感器与检测技术, E-mail: liussq@mail.csu.edu.cn;

王爱民 (1968—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为遥控机器人、机器人控制等;

樊晓平 (1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为机器人建模与控制、智能控制等;

黄惟一 (1933—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为遥控机器人、机器人传感器等.