

# 遥操作机器人系统时延控制方法综述<sup>1)</sup>

景兴建 王越超 谈大龙

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳 110016)

(E-mail: xjjing@ms.sia.ac.cn)

**摘要** 遥操作机器人系统的应用和研究是目前机器人学一个重要的研究领域. 尤其是网络遥操作系统的产生, 更进一步扩大了应用领域, 并对控制系统的设计带来了新的挑战. 该文主要从控制的角度, 面向各种性质的时延(如确定的或未知的, 时变的或固定的等)对遥操作系统所带来的稳定性和透明度等问题, 针对近年来为解决这些问题所提出的新的控制方法和理论进行系统的综述和分析, 指出现有各种方法的优缺点, 并提出了今后控制方法的研究方向和应具有的特点.

**关键词** 遥操作机器人, 稳定性, 透明度, 时延, 综述

**中图分类号** TP24; TP18

## Control of Time-Delayed Tele-Robotic Systems: Review and Analysis

JING Xing-Jian WANG Yue-Chao TAN Da-Long

(Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(E-mail: xjjing@ms.sia.ac.cn)

**Abstract** Due to its great potential value in applications and theory, bilateral tele-robotic systems have been a focus in the literature. Especially, Internet-based teleoperation systems are emerging in recent years, which greatly challenge the control theory to stabilize or control such systems. In this paper, for problems such as stability and transparency, incurred by time-delay of the systems, a review and some necessary analysis on the control theories and methods proposed in recent years are given. Some new ideas about the possible future methods for the control problems of tele-robotic systems are proposed.

**Key words** Tele-robotic system, stability, transparency, time-delay, review

1) 国家自然科学基金(60131160741, 60334010)资助

Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China(60131160741, 60334010)

收稿日期 2003-01-09 收修改稿日期 2003-07-26

Received January 9, 2003; in revised form July 26, 2003

## 1 引言

遥操作系统能将人所在的主端的命令和行为传到并作用在远端,实现对远端环境的期望的操作和控制,从而极大地提高操作者的安全性和工作效率,节俭成本,更高效合理地利用人力资源,实现多方协调作业等.尤其是如今将 Internet 网络系统作为遥操作系统信号传输的媒介,即网络遥操作系统,系统的低成本、高效率、易维护性、可重构性等特点将更加明显.因此,遥操作系统在诸如建设、服务、医疗、国防等远端平台或机械装备的操作方面和领域都将有着巨大的应用前景<sup>[1~3]</sup>.

最早的遥操作系统用于地面平台对太空设备的控制上<sup>[1]</sup>,由于电磁波传播速度及信号的收发处理等方面的局限性所带来的时延,往往会对遥操作系统的知觉感受和操作性能产生极大影响<sup>[4]</sup>.于是在原有遥操作系统的基础上,就逐步增加了信号反馈尤其是力反馈,形成双向反应遥操作系统.然而,虽然增加力反馈能够提高遥操作系统的操作性能<sup>[5]</sup>,但由于时延的存在,系统的稳定性却受到影响<sup>[6]</sup>.因此,在存在时延、各种扰动和误差等干扰的情况下,实现较好的稳定性和临场感等性能是遥操作系统设计的基本指标,即控制器的设计除了保证稳定性外,还要能克服时延甚至是未知或变化的时延等的影响,实现遥操作系统与环境之间较好的动觉耦合(kinesthetically coupling).为此,共享柔顺控制、阻抗控制、监督控制和预测控制等控制策略<sup>[1,3,7]</sup>相继在遥操作系统上被提出或应用.然而这些方法对遥操作系统控制问题的解决远远没达到满意的程度,尤其是近年来,Internet 网络引入遥操作系统作为主从端信号传输的媒介,遥操作系统的控制问题又增加了新的困难. Internet 网络系统由于其特殊的信号传递方式和机制,信号在传递过程中会遇到时延、丢失、乱序和同步等问题,而且这种时延是随机时变的,还可能是未知的<sup>[8]</sup>,这就使得网络遥操作系统的控制更具复杂性和难度.

正因为如此,近年来具有较大的信号时延的双向反应遥操作机器人系统的控制成为机器人学和控制学领域一个研究热点问题.鉴于目前国内从控制理论和方法的角度对遥操作系统的研究,尤其是其最新进展,阐述的文章尚不多见.因此,本文对近年来提出的一些新方法进行综述,讨论各种方法的优缺点,希冀在分析和研究现有方法的基础上,能对该类遥操作机器人系统的控制问题找出一种新的更好的解决途径.

## 2 遥操作系统模型

遥操作系统一般由主端、从端、信号传输三个基本部分组成,主从端分别为具有一定运动自由度的动力学系统,信号传输媒介可以是数据专线也可能是 Internet 网络系统.

主从端的动力学模型可分别表示为

$$M_m(x_m)\ddot{x}_m + D_m(x_m, \dot{x}_m) = F_h + \tau_m \quad (1a)$$

$$M_s(x_s)\ddot{x}_s + D_s(x_s, \dot{x}_s) = -F_e + \tau_s \quad (1b)$$

其中  $m$  代表主端,  $s$  代表从端,  $F_h$  为操作者施加给主端的最终力矩,  $F_e$  为从端施加给环境的力矩,  $\tau_m$  和  $\tau_s$  分别为主从端的马达驱动力矩. 对于信号传输模块,可表示为映射  $C_{\eta_i}: R^n(t) \rightarrow R^n(t)$ , 其中  $R^n(t)$  是实数域  $R$  上的时间  $t$  的  $n$  维矢量函数的集合,  $\eta_i \in R^n(t)$ , 且  $0 \leq \eta_{ii} \leq$



$\eta_{l_{\max}}$ , 对  $\forall x \in R^n(t)$ , 有  $x_{di}(t) = C_{\eta_l}(x)_i = x_i(t - \eta_{li})$ ,  $l \in \{m, s\}$ ,  $l=m$  表示从主端到从端的时延,  $l=s$  表示从端到主端的时延.

2.1 双端口网络模型<sup>[2,9~11]</sup>

可将遥操作系统映射为相应的双端口网络模型 (图 1). 假定操作者和环境可描述为线性时不变阻抗模型, 则有

$$F_h = F_h^* - Z_h V_m, \quad F_e = F_e^* + Z_e V_s$$

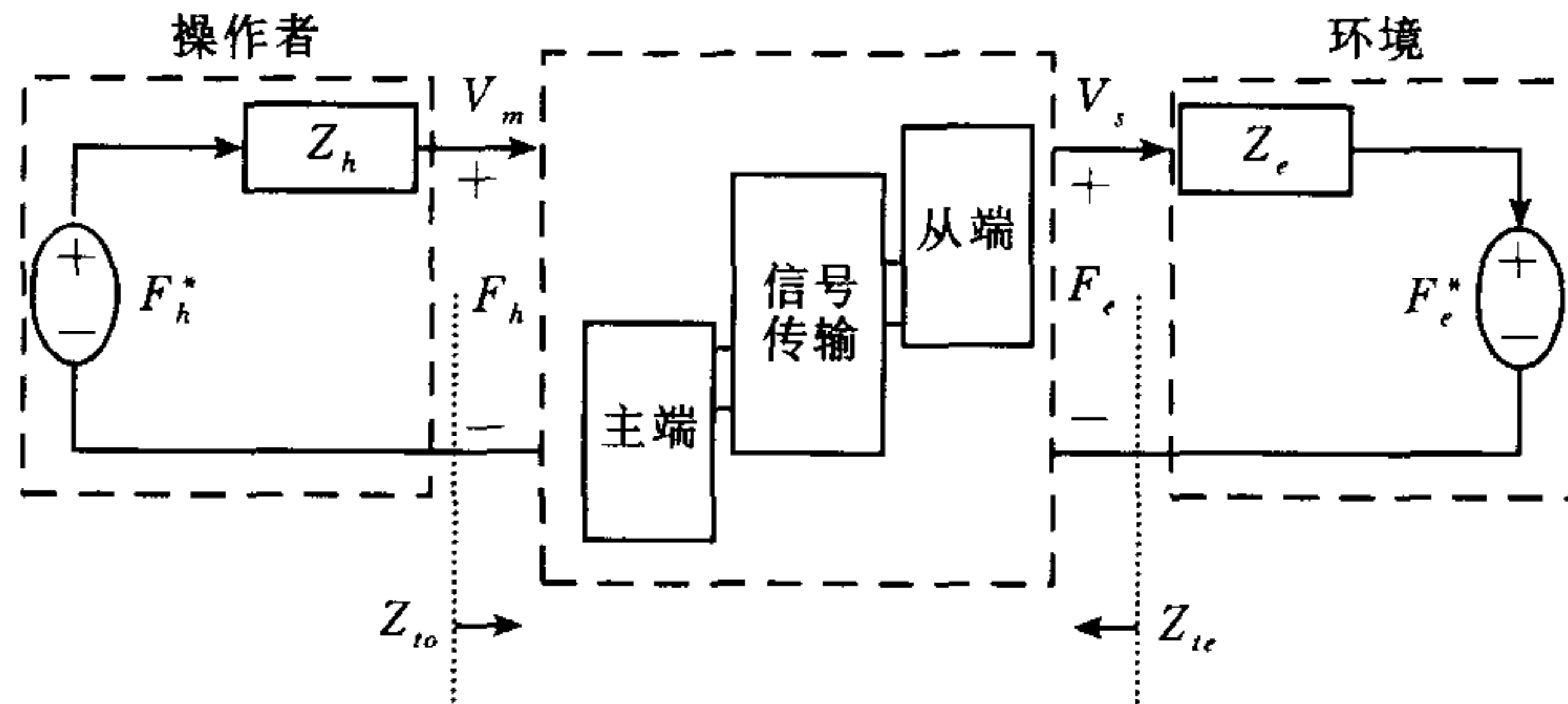


图 1 双端口网络模型  
Fig. 1 Two port network model

其中  $Z_h, Z_e, F_h^*, F_e^*$  分别为操作者和环境的阻抗, 由操作者和环境产生的对系统的外力输入. 由此得系统混合矩阵模型为

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ F_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $H(h_{ij})(i, j=1, 2)$  是系统主从端动力学模型及相应控制器参数的函数. 在此基础上电学系统的有关概念可引入到遥操作系统的控制中, 如无源性等. 如果系统是无源的则表明系统不会对外产生能量. 此外, 无源系统一定是绝对稳定的, 但绝对稳定性不一定满足无源性. 文献[9]讨论了两端口系统绝对稳定的充要条件. 借助双端口网络模型, 可引入系统性能评价的透明度概念.

**概念 1.** 透明度反映遥操作系统动觉耦合效果的好坏, 如果主端命令能在从端等效执行并等效反馈从端信息, 如同操作者直接作用在从端环境上一样, 则透明度高, 否则为低. 因此完全透明可以被表示为阻抗匹配条件  $Z_{to} = Z_e$  或  $Z_{te} = Z_h$ . 其中

$$Z_{te} := \frac{F_e}{-V_s} \Big|_{F_h^*=0} = \frac{h_{11} + Z_h}{h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21} + h_{22}Z_h}$$

$$Z_{to} := \frac{F_h}{-V_m} \Big|_{F_e^*=0} = \frac{h_{11} + (h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})Z_e}{1 + h_{22}Z_e}$$

由此可得完全透明条件为

$$h_{11} = h_{22} = 0 \text{ 且 } h_{12}h_{21} = -1 \quad (3)$$

再定义  $Z_{to \min} := Z_{to} \Big|_{Z_e=0} = h_{11}$  和  $Z_{to \max} := Z_{to} \Big|_{Z_e \rightarrow \infty} = h_{11} - h_{12}h_{21}/h_{22}$ . 从而可得  $Z_{\text{width}} = Z_{to \max} - Z_{to \min} = -h_{12}h_{21}/h_{22}$ . 完全透明的情况下应有  $|Z_{to \min}| \rightarrow 0, |Z_{\text{width}}| \rightarrow \infty$ . 文献[9]借助一个更一般化的四通道网络控制体系结构, 论述了遥操作系统的绝对稳定性和透明度之间是一个相互对立的关系. 系统性能的评价还可从频域<sup>[11]</sup>的角度来进行.

### 2.2 具有状态时延的连续系统模型

如果信号传输模块是一个时间连续的过程(如数据专线),则遥操作系统是一个具有状态时延的动力学系统<sup>[12~17]</sup>.针对遥操作系统的动力学特点,对于式(1),如果选择混合状态变量 $[x_m^T, x_s^T]^T$ ,假定时延  $\eta(t) (\forall i, l)$  相互独立,系统动力学模型可描述成如下形式:

$$\dot{x}(t) = \sum_{k=0}^q F_k x(t - \eta_k(t)) + f(x, x_l, t) \tag{4}$$

其中  $\eta_k(t)$  既可能是主端到从端的时延,也可能是从端到主端的时延,也可能是两者之和,视具体情况而定.  $f(x, x_l, t)$  代表非线性不确定项.

对于系统(4),对其不依赖于时延的渐进稳定性的讨论可见文献[18,19]等,但不依赖于时延的稳定往往比较保守,不少文章讨论了其与时延有关的稳定性<sup>[13]</sup>.

### 2.3 离散系统模型

如果信号传输时延是随机的,如 Internet 网络情况,如图 2. 记  $T = \eta_m + \eta_s$ ,  $T_k$  是每次采样的时延. 假定有  $0 < T_k < lh, l \geq 1$  且  $kh + T_k < (k+1)h + T_{k+1}$ . 忽略干扰,系统模型可描述为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad t \in [kh + T_k, (k+1)h + T_{k+1}) \tag{5a}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{5b}$$

$$u(t^+) = -Kx(t - T_k), \quad t \in \{kh + T_k, k = 0, 1, 2, \dots\} \tag{5c}$$

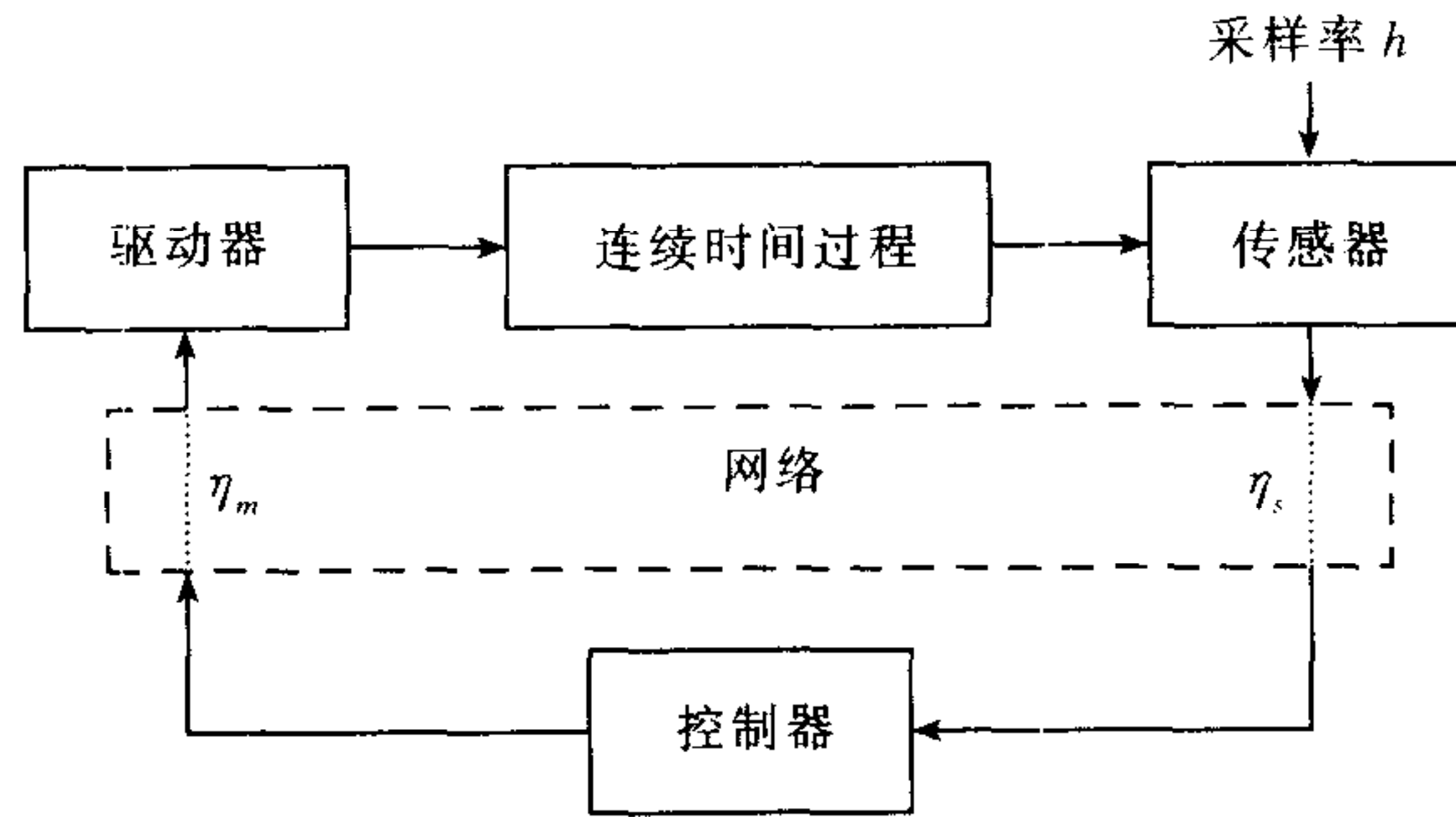


图 2 网络遥操作系统  
Fig. 2 Networked teleoperation system

其中  $u(t^+)$  是分段连续的,仅在  $kh + T_k$  更新其值. 如果  $T_k$  的变化是完全任意的,则系统离散化和控制设计非常复杂,为此假定有  $T_k < h$ ,则系统(5)的采样模型可描述为<sup>[20~22]</sup>

$$x((k+1)h) = \Phi x(kh) + \Gamma_0(T_k)u(kh) + \Gamma_1(T_k)u((k-1)h) \tag{6a}$$

$$y(kh) = Cx(kh) \tag{6b}$$

这里  $\Phi = e^{Ah}, \Gamma_0(T_k) = \int_0^{h-T_k} e^{At} B dt, \Gamma_1(T_k) = \int_{h-T_k}^h e^{At} B dt$ . 定义增广状态向量为  $z(kh) = [x^T(kh), u^T((k-1)h)]^T$ , 则增广的闭环系统可写为  $z((k+1)h) = \Phi_z(k)z(kh)$ , 其中  $\Phi_z(k)$

$$= \begin{bmatrix} \Phi - \Gamma_0(T_k)K & \Gamma_1(T_k) \\ -K & 0 \end{bmatrix}$$

### 2.4 混合系统模型

如果在遥操作系统中如网络遥操作系统,连续系统信号如运动、力等和离散信号如状态逻辑切换等同时存在,则可以利用混合系统的理论对其进行建模和分析<sup>[21,23,24]</sup>.



考虑文献[23]中的一个线性混合系统模型

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f(z(t), t), \quad t \in II \setminus \Theta \quad (7a)$$

$$u(t^+) = Cx(t) + Du(t) + \phi(z(t), t), \quad t \in \Theta \quad (7b)$$

其中符号意义同文献[23], 且  $\|f(z_1, t) - f(z_2, t)\| \leq L_1 \|z_1 - z_2\|^{1+\alpha_1}$ ,  $\|\phi(z_1, t_1) - \phi(z_2, t_1)\| \leq L_2 \|z_1 - z_2\|^{1+\alpha_2}$ .

系统(5)可以化为系统(7)的一般形式. 系统(7)的渐进稳定性可归结为下列矩阵是否是 schur 的(即矩阵的最大特征值小于 1)

$$H = \begin{bmatrix} e^{Ah} & B_B \\ Ce^{Ah} & CB_B + D \end{bmatrix}$$

其中  $B_B = \int_0^h e^{A(h-s)} ds \cdot B$ .

基于此, 对于系统(5), 可以得到如下稳定性结论.

**定理 1.** 对于系统(5), 假定  $\exists K$  使  $\varphi(u(t), t) = K \int_0^{T(t)} e^{-As} Bu(t+s-T(t)) ds$  满足  $\exists L_2$ ,  $\alpha_2 > 0$ ,  $\forall t \in \{kh + T_k, k=0, 1, 2, \dots\}$ ,  $\|\varphi(u_1, t) - \varphi(u_2, t)\| \leq L_2 \|u_1 - u_2\|^{1+\alpha_2}$ , 其中  $0 < T(t) < T_m$ ,  $|u(t)| < U_{\max}$ , 则系统(5)渐进稳定, 如果  $\begin{bmatrix} e^{Ah} & B_B \\ -Ke^{A(h-T_k)} & -Ke^{-AT_k} B_B \end{bmatrix}$  是 schur 矩阵.

(证略)

### 3 遥操作系统控制方法和理论

#### 3.1 基于无源性理论的方法

由无源性定理<sup>[26]</sup>知, 只要系统满足一定的无源性条件和系统初始状态及连续条件, 则总存在反馈控制律使系统平衡点处渐进镇定<sup>[25, 27]</sup>. 无源性理论为系统控制的分析和设计提供了一个很好的手段, 在遥操作控制系统的分析和设计中, 不少方法都是基于无源性理论提出的<sup>[28~31]</sup>. 这里介绍基于无源性理论的波变量法.

考虑系统(2), 记  $S(s) = \text{diag}(1, -1)(H(s) - I)(H(s) + I)^{-1}$ , 则系统(2)是无源的当且仅当  $\|S\| \leq 1$ , 也即  $\sup_{\omega} \lambda^{1/2}(S^*(j\omega)S(j\omega)) \leq 1$ <sup>[29]</sup>. 考虑遥操作系统信号传输模块, 假定有  $F_{md}(t) = F_s(t-T)$ ,  $V_{sd}(t) = V_m(t-T)$ . 将其表达为系统(2)的形式可以验证  $\|S\| = \infty$ ,

信号传输模块是有源的. 若加入适当的校正模块, 使得  $H(s) = \begin{bmatrix} z_0 \tanh(sT) & -\text{sech}(sT) \\ \text{sech}(sT) & \frac{1}{z_0} \tanh(sT) \end{bmatrix}$ ,

则得  $S(s) = \begin{bmatrix} 0 & -e^{-sT} \\ e^{-sT} & 0 \end{bmatrix}$ . 可见校正后的传输模块是无损耗的(lossless). 为此引入波变

量  $u_l = \frac{b\dot{x}_l + F_l}{\sqrt{2b}}$ ,  $v_l = \frac{b\dot{x}_l - F_l}{\sqrt{2b}}$ ,  $l \in \{m, s\}$ , 可以验证它和上述传输函数是一致的, 满足无源

性条件而且是无损耗的. 可见基于无源性理论, 只要保证遥操作系统主从端的无源性, 波变量可以克服由于时延而造成的不稳定问题, 即使在变时延的情况下<sup>[29, 30]</sup>. 但由无源性对系统的稳定性来说是保守的, 过高的稳定性要求必然牺牲系统的透明度.

### 3.2 基于事件的控制方法

在遥操作系统中,如果时延很大或者是随机的或不可预测的,如网络遥操作系统,传统的很多控制方法一般都难以达到实际期望的控制效果.基于事件的控制方法<sup>[32,33]</sup>就是为系统寻找一个与时间无关或不是时间显函数的参变量  $s$  即事件,控制系统的规划和设计都是基于这个新的事件变量  $s$  来进行.在新的参变量下,如果原系统在时间参变量下是稳定的,假定非时间变量是时间  $t$  的非减函数,则在  $s$  下系统仍是稳定的<sup>[33]</sup>.

既然基于事件的控制系统不直接依赖于时间,因而时延对控制系统的稳定性将不会产生任何影响,而不管系统时延的性质如何.但基于事件的方法,关键在于为系统找到一个合适的非时间参变量.遥操作系统的透明度等操作性能以及控制器设计的难易会因不同参变量的选取而发生较大的变化.

### 3.3 LQG 最优控制器

对于网络遥操作系统,如果时延的性质能满足一定的限制,则可以利用最优控制理论对其设计 LQG 控制器<sup>[20~22]</sup>.考虑图 2 所示控制体系结构和离散控制系统模型(6),并考虑存在系统干扰或扰动情况,系统的最优控制性能指标可为

$$J_N = x_N^T Q_N x_N + E \sum_{k=0}^{N-1} \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix}$$

在此基础上,即可以设计 LQG 最优控制器<sup>[19]</sup>.

在假定系统信号时延是随机独立过程的情况下,也可以借助其它控制技术如 Backstepping 技术或 Lyapunov-like 技术等,从随机控制的角度,将遥操作系统看作一个具有状态或输出时延的系统来进行控制<sup>[34]</sup>.显然,通过控制器性能指标的合理设定,LQG 等随机优化控制方法可以得到比较满意的系统透明度等操作性能,但其关键要对系统的时延有足够的了解,并往往有较为苛刻的限制或假定,这就带来局限性.

### 3.4 基于 $H_\infty$ 理论的控制方法

$H_\infty$  控制理论可以将有界扰动对系统的影响降低到期望的程度,而不管这种扰动的性质如何<sup>[35]</sup>.对于遥操作系统的  $H_\infty$  控制,考虑定常时延的情况即有  $(\forall i, l) \eta_{li} = T/2$ ,并假定从端和环境充分接触.系统控制体系结构见图 3<sup>[14]</sup>.  $f_h, f_s, f_b$  分别为主从端操作力和扰动,  $P_m, P_s$  为主从端的传递函数,  $K_m, K_s$  为主从端的局部控制器.设计目标为设计  $K_c$  使得保证整个系统的鲁棒稳定性,减小速度误差  $v_m - v_s$ ,减小从端力跟踪误差  $f_s - (\tau_{m1} + \tau_{m2})$ ,控制力矩在允许范围内.也即设计  $K_c$  使得从  $\omega$  到  $z$  的  $H_\infty$  范数最小.

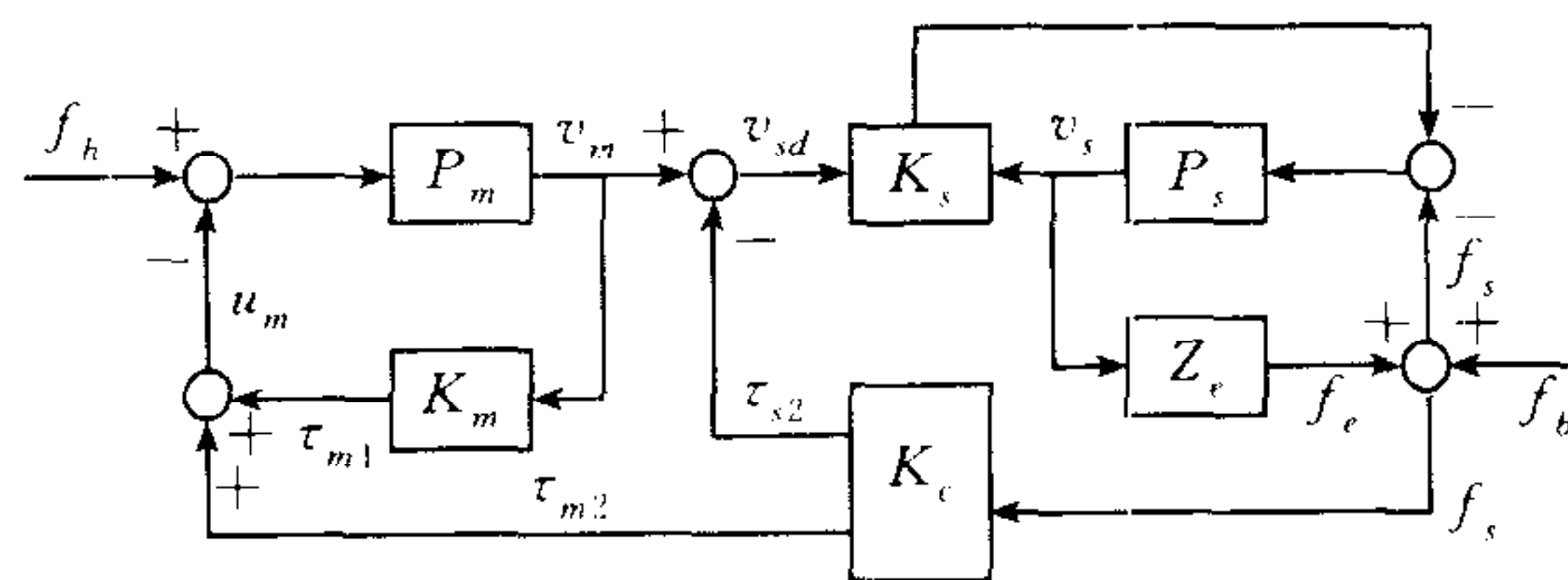


图 3  $H_\infty$  控制  
Fig. 3  $H_\infty$  control

由此可见,对于有界时延情况下的遥操作系统,利用  $H_\infty$  控制理论不仅可以得到期望的稳定控制,还能将时延对系统的影响降到最小,能够满足系统一定的性能要求,同时对可能



存在的系统其它方面的扰动等不确定性也具有鲁棒性. 但上述  $H_\infty$  控制方法难以处理任意时延的情况.

### 3.5 基于 Lyapunov-like 函数的方法

对于遥操作系统也可利用 Lyapunov-Krasovski 或 Lyapunov-Razumikhin 函数, 借助 Lyapunov 稳定理论, 得到系统与时延有关或与时延无关的稳定控制<sup>[12]</sup>. 尤其是利用 Razumikhin-type 定理, 对于具有任意变化的时延的系统, 都可以得到其稳定性代数判据.

但这类方法得到的结果和频域分析相比往往都有较大的保守性, 而且虽然借助这类 Lyapunov-like 函数方法, 和  $H_\infty$  控制方法一样, 可以实现稳定性和操作性能兼顾的控制效果, 但 Lyapunov-like 函数方法一般需要知道时延的界, 甚至时延的变化率, 所得判据只是个充分条件.

### 3.6 基于滑模控制的方法及其它

在具有不确定性的系统的研究和应用中, 滑模控制一直是一个非常有效的控制方法. 对于具有信号传输时延的双向反应遥操作系统, 也可以应用滑模控制来实现.

文献[17]考虑主端采取阻抗控制, 而从端采用滑模控制, 以消除时延对系统的影响. 设计滑动面为

$$s_d(t) = \dot{\tilde{x}}_d(t) + \lambda \tilde{x}_d(t), \tilde{x}_d(t) = x_s(t) - k_p x_{md}(t)$$

根据滑模控制原理可设计从端滑模控制为

$$\tau_s(t) = B_s v_s(t) + f_e(t) - \frac{k_p M_s}{M} \{ B v_{md}(t) - f_{hd}(t) + k_f f_e(t - \eta_m - \eta_s) + K x_{md}(t) \} - M_s \lambda \dot{\tilde{x}}_d(t) - K_{\text{gain}} \text{sat} \left( \frac{s_d}{\Phi} \right), \quad K_{\text{gain}} > M_s \xi$$

由此可见, 只要时延大小可以得到, 滑模控制可以实现变时延情况下遥操作系统的稳定控制, 且这种稳定性与时延性质无关. 但滑模控制本身所固有的问题如高频颤动等对系统操作性能将会产生影响; 从控制律来看, 时变的时延必将影响主从端控制输入的连续性, 这也将是影响系统性能的一个因素.

另外, 对于遥操作系统, 还有其它一些控制方法如预测控制、监督控制、共享柔顺控制、阻抗控制等, 在遥操作系统的研究和应用中都有着很重要的作用<sup>[1]</sup>. 此外, 对于网络遥操作系统, 系统控制问题的解决还取决于网络控制或网络协议的改善, 如果能够通过网络控制或网络协议的修改实现网络信号传输的高可靠性和实时性, 时延、丢包、乱序、同步等问题可能不再是困扰遥操作系统稳定性和操作性能的主要因素<sup>[8,36]</sup>. 由于本文仅从控制的角度来阐述遥操作系统的问题, 因此对这方面的问题不做讨论.

## 4 问题讨论和研究展望

通过上述对遥操作系统的控制理论和方法的综述, 可以看出为了保证系统的稳定性并能实现期望的操作性能, 现有的方法虽然解决了一定的问题, 但仍然存在着很多困难, 本文认为有以下问题值得进一步地分析和探讨.

A) 遥操作系统模型的建立和分析是稳定控制的基础, 建立什么样的模型能更具普遍性或能更合理方便地分析和设计控制系统及系统性能至关重要.



B) 遥操作系统操作性能的评价和分析,对控制系统的设计来说也至关重要.虽然透明度的概念可以较好地评价一个系统性能的好坏,但由于它与系统稳定性相矛盾的特点,如何将其与系统稳定性相结合,转变为一种合理的优化指标则有待进一步研究.

C) 现有的方法往往仅解决系统的某方面问题. LOG 控制、 $H_\infty$  控制和 Lyapunov-like 函数等方法虽然可以得到较好的系统性能或在优化指标意义下的稳定控制,但都需要对系统的时延有足够的了解. 无源性只是系统稳定性的一个充分条件,具有较大的保守性,系统在不满足无源性的条件下仍可能是稳定的<sup>[37]</sup>. 基于事件的方法也可以得到对任意时延的稳定控制,且不需知道时延的任何特征,但系统的操作性能却有待改善,尤其是如何寻找到一个合理的非时间参考变量是个艺术问题. 而滑模控制方法除了自身固有的缺陷如抖动外,在系统操作性能方面现有结果也不理想.

因此,如何在保证系统稳定性的基础上,尽可能地提高系统透明度满足期望的操作性能,仍是遥操作系统控制设计的难点. 本文认为,新的控制策略应具有这样的特点:a) 自适应性,即能针对不同的时延特点来调整控制参数,如网络遥操作下能对网络的 QoS 自适应,这在我们以前的研究中已有了一定的探索<sup>[29]</sup>; b) 系统稳定性与透明度的动态平衡性,即随着系统状态在稳定性和透明度之间找到一个合理的折中,使得系统在稳定的基础上尽可能提高操作性能;c) 自学习性,能对操作者的操作经验进行学习,从而辅助操作者进行系统操作和控制;d) 对于网络遥操作系统,由于网络信号传输所特有的特点,既然从控制的角度往往只能解决其一部分的问题,因此也许应该采取控制与协议改善相结合的办法,以期达到最佳的遥操作系统控制效果.

## 5 结论

双向反应遥操作机器人系统有着巨大的应用价值和理论研究意义,因而近年来在该方面的应用和研究十分活跃. 针对时延所带来的问题,本文对近年来双向反应遥操作机器人系统方面所提出的新的控制方法和理论进行了系统的综述和分析,并对一些结果作了必要的推论和评价,指出了现有各种控制方法的优势和特点,以及其存在的问题,并在此基础上从个人的角度,提出了今后控制方法的研究方向和应具有的特点.

## References

- 1 Sheridan T B. Space teleoperation through time delay: Review and prognosis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, **9**(5):592~606
- 2 Lawrence D A. Stability and transparency in bilateral teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, **9**(5):624~637
- 3 Kim W S, Hannaford B, Bejczy A K. Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, **8**(2):176~185
- 4 Ferrell W R. Remote manipulation with transmission delay. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 1965, **HFE-6**(1):
- 5 Ferrell W R. Delayed force feedback. *IEEE Transactions on Human Factors Electronics*, 1966, **HFE-8**:449~455
- 6 Anderson R J, Spong M W. Bilateral control of teleoperators with time delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, **34**(3):494~501
- 7 Kim W S, Hannaford B, Bejczy A K. Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators



- with time delay. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, **8**(2): 176~185
- 8 Chen N. Qos strategy for tele-robotic system[Ph D dissertation]. Shenyang; Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2002( in Chinese)
- 9 Keyvan Hashtrudi-Zaad, Salcudean S E. Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 2001, **20**(6): 419~445
- 10 Keyvan Hashtrudi-Zaad, Salcudean S E. Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(1): 108~114
- 11 Yokokohji Y, Yoshikawa T. Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling—formulation and experiment. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, **10**(5): 605~620
- 12 Mrdjan Jankovic. Control Lyapunov-Razumikhin functions and robust stabilization of time delay systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, **46**(7): 1048~1060
- 13 Eusebi A, Melchiorri C. Force reflecting telemanipulators with time-delay; Stability analysis and control design. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, **14**(4): 635~640
- 14 Leung G M H, Francis B A, Apkarian J. Bilateral controller for teleoperators with time delay via  $\mu$ -synthesis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995, **11**(1): 105~116
- 15 Sano A, Fujimoto H, Tanaka M. Gain-scheduled compensation for time delay of bilateral teleoperation systems. In: Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven, Belgium; 1998. 1916~1922
- 16 Lee Hyoung-ki, Tanie K, Chung Myung Jin. Design of a robust bilateral controller for teleoperators with modeling uncertainties. In: Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Kyongju, Korea; 1999. 1860~1865
- 17 Park J H, Cho H C. Sliding-mode controller for bilateral teleoperation with varying time delay. In: Proceeding of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Atlanta, USA; 1999. 311~316
- 18 Kamen E W. On the relationship between zero criteria for two variable polynomials and asymptotic stability of delay differential equations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1980, **25**(25): 983~984
- 19 Brierley S D, Chiasson J N, Lee E B, Zak S H. On stability independent of delay for linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1982, **27**(2): 252~254
- 20 Nilsson J. Real-time control systems with delays[Ph D dissertation]. Sweden: Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology. 1998
- 21 Zhang Wei, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, **16**(2): 84~99
- 22 Walsh G C, Ye Hong. Scheduling of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, **16**(2): 57~65
- 23 Branicky M S. Stability of hybrid systems: State of the art. In: Proceedings of IEEE Conference Decision and Control. San Diego, CA; 1997. 120~125
- 24 Zefran M, Bullo F, Stein M. A notion of passivity for hybrid systems. International Conference Decision and Control. Orlando, FL; 2001
- 25 Kelkar A G, Joshi S M. Robust control of non-passive systems via passification. In: Proceedings of American Control Conference. Albuquerque, New Mexico; 1997
- 26 Calcev G, Gorez R, De Neyer M. Passivity approach to fuzzy control systems. *Automatica*, 1998, **34**(3): 339~344
- 27 Santibanez V, Kelly R. Energy shaping based controllers for rigid and elastic joint robots; analysis via passivity theorem. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque, New Mexico; 1997. 2225~2231
- 28 Anderson R J, Spong M W. Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delay. *The International Journal of Robotics Research*, 1992, **11**(2): 135~149
- 29 Niemeyer G. Using wave variables in time delayed force reflecting teleoperation[Ph. D. dissertation]. Massachu-

- setts Institute of Technology, 1996
- 30 Yokokohji Y, Imaida T, Yoshikawa T. Bilateral control with energy balance monitoring under time-varying communication delay. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, CA; 2000. 2684~2689
  - 31 Kosuge K, Murayama H. Bilateral feedback control of telemanipulator via computer network in discrete time domain. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque, New Mexico; 1997. 2219~2224
  - 32 Elhajj I, Xi Ning, Liu Yun-Hui. Real-time control of internet based teleoperation with force reflection. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, CA; 2000. 3284~3289
  - 33 Xi N, Tarn T J. Action synchronization and control of internet based telerobotic systems. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit, Michigan; 1999. 2964~2969
  - 34 Ray A. Output feedback control under randomly varying distributed delays. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1994, **17**(4):701~711
  - 35 Shen T. *H<sub>∞</sub> Control Theory and Application*. Beijing: Tsinghua University Press, 1996(in Chinese)
  - 36 Imer O C, Compans S, Basar T, Srikant R. Available bit rate congestion control in ATM networks. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, **16**(1):38~56
  - 37 Wang Q P, Tan D L. The control oriented QoS: Analysis and prediction. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea; 2001. 1897~1912

**景兴建** 1998年获浙江大学理学学士,现在中国科学院沈阳自动化研究所机器人学开放实验室攻读博士学位.研究兴趣为遥操作机器人、鲁棒控制、运动规划和智能计算.

(**JING Xing-Jian** Received his bachelor degree from Zhejiang University in 1998, Ph. D. candidate in Robotics Laboratory at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include tele-robotics, robust control, motion plan, and intelligent computing. )

**王越超** 研究员,博士生导师,中国科学院沈阳自动化研究所机器人学开放实验室主任.研究兴趣为机器人学、自动化和控制.

(**WANG Yue-Chao** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, and the director of Robotics Laboratory, Chinese Academy of Sciences. His research interests include mainly robotics, automation, and control. )

**谈大龙** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员,博士生导师.研究兴趣为机器人学.

(**TAN Da-Long** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include robotics, automation, and control. )