

# 变时延力反馈遥操作机器人系统的内模控制

鉴 萍, 李歧强

(山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 针对遥操作机器人通讯信道变化时延破坏系统稳定性和透明性的问题, 为力反馈遥操作系统建立了内模控制结构, 设计了两端控制器, 并给出了有界时延摄动下系统鲁棒稳定和满足鲁棒性能准则的控制器参数范围, 使系统在变时延下依然稳定并具有良好的透明性. 给出的控制方法不仅对时延状况适应性强, 而且控制器参数少, 相关度低, 依据不同性能要求进行选取的灵活性大.

**关键词:** 遥操作; 变时延; 内模; 鲁棒控制; 稳定性; 透明性

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** A

## Internal model control for force-reflecting teleoperation systems with varying time-delay

JIAN Ping, LI Qi-qiang

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China)

**Abstract:** Time-varying delays in force-reflecting teleoperation system communication channels always destroy the stability and transparency of the system. For these problems, internal model control structure is applied to the system, and controllers for both manipulators are designed. The bounds of the controllers' parameters which can guarantee the robust stability and satisfy the robust performance criterion under arbitrary bounded time delay are also given. The method ensures both the stability and good transparency of the system even under time-varying delay and has good adaptation to different delay conditions. There are few controller parameters to be specified, and they are hardly correlative with each other. When needed, they can be selected to achieve various performance specification flexibly.

**Key words:** teleoperation; time-varying delay; internal model; robust control; stability; transparency

### 1 引言(Introduction)

遥操作机器人已被广泛应用到空间、深海、工业生产及人民生活的各个领域, 在操作者的安全性和工作效率得到提高的同时, 严重的不足也暴露出来: 遥操作系统固有的时滞特性影响着系统的正常工作, 时延较大或变化时, 将降低操作性能, 甚至造成系统的不稳定. 对于固定时延, 可以采用Smith预估、状态预测等预见控制方法<sup>[1,2]</sup>来保证系统的稳定性和透明性. 对于变时延系统的控制则复杂得多, 特别是近年来随着Internet遥操作技术的兴起, 时延变化的复杂性和随机性成为遥操作研究领域的一大挑战.

针对变化时延的特点, Kosuge<sup>[3]</sup>提出虚拟时延的概念, 在从手端加入时延缓冲器, 将变时延固定为常值, 然后用解决常时延问题的方法解决变时延问题,

缺点是这一时延常值不易选取. Leung<sup>[4]</sup>将 $H_\infty$ 最优控制与 $\mu$ 综合方法引入到稳定性分析上, 把时延当作扰动, 克服变化时延对系统稳定性的影响. Niemeyer和Slotine<sup>[5]</sup>对基于波变量的无源控制算法进行改进, 提出了基于“波积分”的变时延无源控制算法. Park和Cho<sup>[6]</sup>提出了基于滑模的控制方法, 利用滑模对参数的鲁棒性补偿时延的变化.

以上的控制方法有些只能给出较保守的稳定性条件, 有些则仅针对系统的稳定性展开讨论, 对系统在变时延下的透明性和动静态性能分析较少. 本文将内模控制结构引入力反馈遥操作系统, 设计控制器分别实现主从机械手力和速度的跟踪, 将在一定范围内变化的时延看作系统被控对象的参数不确定, 给出使系统鲁棒稳定以及满足 $H_\infty$ 鲁棒性能准则的控制器参数的取值范围. 通过调整控制器参数可

以灵活实现稳定和跟踪性能要求, 兼顾变时延下系统的稳定性与透明性. 理论分析和仿真结果证明该控制方法有效.

## 2 力反馈遥操作系统(Force-reflecting teleoperation system)

力反馈遥操作系统是为了实现操作者的力觉临场感而采用的一种将从机械手与环境的作用力反馈给主端的控制系统, 结构如图1所示.

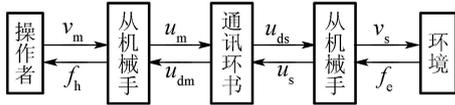


图1 力反馈遥操作系统

Fig. 1 Force-reflecting teleoperating system

考虑单自由度情况, 图1所示遥操作系统的动力学模型可以表示为

$$\begin{cases} M_m \dot{v}_m + B_m v_m = f_h - \tau_m, \\ M_s \dot{v}_s + B_s v_s = -f_e + \tau_s, \\ M_e \dot{v}_s + B_e v_s + C_e \int v_s dt = f_e. \end{cases} \quad (1)$$

$M, B, C$ 分别表示质量、阻尼和弹性系数; 下标 $m, s, e$ 分别表示主机械手、从机械手和环境;  $v_m, v_s$ 表示主从手速度;  $\mathbf{u}_m$ 是需要传送给从端的位置和力信息,  $\mathbf{u}_m = [x_m, v_m]$ , 经过传输后表示为 $\mathbf{u}_{ds}$ ,  $\mathbf{u}_{ds} = [x_{ds}, v_{ds}]$ ;  $x_m, x_{ds}$ 是相对于 $v_m, v_{ds}$ 的位置量;  $\mathbf{u}_s$ 是从手反馈给主手的状态, 在本结构中 $\mathbf{u}_s = f_e$ . 经反馈传输后表示为 $\mathbf{u}_{dm}$ ;  $f_h$ 是操作者对主机械手的作用力,  $f_e$ 是从机械手和环境的相互作用力,  $\tau_m$ 和 $\tau_s$ 分别为主从机械手控制器输出.

图2为力反馈遥操作系统的控制结构.

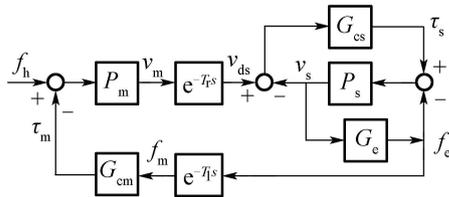


图2 力反馈遥操作系统控制结构

Fig. 2 Control structure of force-reflecting teleoperation system

$P_m$  和  $P_s$  分别是主从机械手的动力学模型:

$$P_m(s) = \frac{v_m}{f_h - \tau_m} = \frac{1}{M_m s + B_m},$$

$$P_s(s) = \frac{v_s}{\tau_s - f_e} = \frac{1}{M_s s + B_s}.$$

$G_{cm}, G_{cs}$  为主从机械手控制器,  $G_e$  是环境阻抗

$$G_e(s) = \frac{f_e(s)}{v_s(s)} = \frac{M_e s^2 + B_e s + C_e}{s}.$$

分别用 $T_r$ 和 $T_l$ 表示前向通道和反馈通道通讯时延, 主从端变量存在以下关系:

$$v_{ds}(t) = v_m(t - T_r(t)),$$

$$f_m(t) = f_e(t - T_l(t)).$$

根据无源性理论, 通讯时延会带给遥操作系统一个“能量发生器”, 使一个无源系统变成有源系统, 从而使系统变得不稳定<sup>[7]</sup>.

另一方面考虑系统的透明性. 对于(1)所描述的动力学系统, 操作者感觉到的阻抗和环境阻抗分别为

$$Z_t = \frac{f_h(s)}{v_m(s)}, Z_e = G_e = \frac{f_e(s)}{v_s(s)}.$$

如果操作者感觉到的阻抗与从机械手和环境作用的阻抗相等, 即 $Z_t = Z_e$ , 操作者感觉像在直接对环境进行操作, 则说这个系统是透明的. 文献[8]指出, 系统要达到透明, 除了阻抗匹配以外, 还要实现主从手之间行动和力的跟踪, 即:  $v_s = v_m, f_e = f_h$ . 显然, 由于时延的存在, 速度和力的信息滞后, 系统完全透明是无法实现的. 因此, 让从手运动整体落后于主手, 预测从手与环境的作用力( $f'_m$ 表示预测值), 用 $v_s = v_{ds}, f'_m = f_h$ 代替 $v_s = v_m, f_e = f_h$ 和阻抗匹配一起作为控制目标, 以实现主从手良好的动静态跟踪性能和透明性. 针对这一目标, 拟用内模控制结构, 在从端构成本地速度控制闭环, 主机械手控制器则在保证变时延下系统鲁棒稳定的同时实现力的鲁棒跟踪控制. 系统对从端环境力的预测功能使操作者具有良好的力觉临场感.

## 3 力反馈遥操作系统的内模控制(Internal model control for force-reflecting teleoperation system)

内模控制是一种模型控制方法, 它对被控对象建模, 把实际输出与模型输出的差作为反馈量, 鲁棒性强. 为力反馈遥操作系统建立如图3所示的内模控制结构: 把正反向时滞环节和所有从端元素的组合看作内模控制的被控对象 $G_P$ , 建内部模型 $\tilde{G}_P$ ,

$$\tilde{G}_P = \tilde{G}_{PM} e^{-\tilde{T}s},$$

$$G_P = \tilde{G}_P e^{-\delta s} = \tilde{G}_{PM} e^{-Ts}.$$

其中 $T = T_r + T_l = \tilde{T} + \delta, |\delta| \leq \bar{\delta}$ .

$T$ 是系统实际传输时延,  $\tilde{T}$ 是对 $T$ 的估计,  $\bar{\delta}$ 是时延的界.  $\tilde{G}_{PM}$ 是 $\tilde{G}_P$ 中不含时延的部分.

$$\tilde{G}_{PM} = \frac{f_e}{v_{ds}} = \frac{G_{cs} G_e}{G_{cs} + G_e + P_s^{-1}}.$$

$G_M$ 包含主机械手控制器和主机械手动力学模型, 它与 $\tilde{G}_{PM}$ 一起构成反馈控制器 $Q(s)$ . 把时延的

变化看作被控对象的不确定摄动 $\Delta$ (本文中仅考虑时延的不确定, 除时延参数以外认为模型匹配).

$$\Delta(s) = e^{-\delta s} - 1, |\delta| \leq \bar{\delta}.$$

考虑单位阶跃输入, 为基于内模控制结构的力反馈遥操作系统设计主从手控制器.

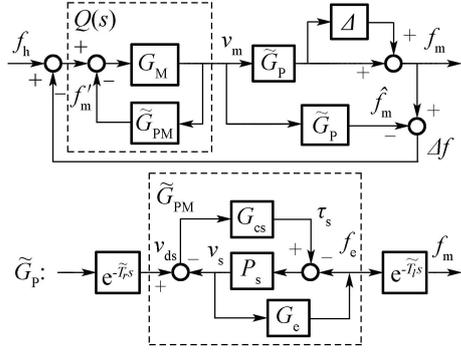


图 3 力反馈系统带有预测的内模控制结构

Fig. 3 Predictive internal model structure for force-reflecting teleoperation system

### 3.1 控制器设计(Controller design)

因为从端在本地构成速度闭环控制, 从机械手对主机机械手的速度跟踪独立于基于内模结构的鲁棒控制, 所以首先设计从机械手控制器 $G_{cs}$ 实现 $v_s$ 对 $v_{ds}$ 的跟踪, 设

$$G_v(s) = \frac{v_s}{v_{ds}} = \frac{G_{cs}}{G_{cs} + G_e + P_s^{-1}}.$$

令 $G_v(s) = 1$ , 得 $G_{cs} \rightarrow \infty$ , 引入可实现因子 $g(s) = \frac{1}{\eta s + 1}$ , 其中 $\eta$ 是待定的实常数. 令

$$G_v(s) = \frac{G_{cs}}{G_{cs} + G_e + P_s^{-1}} = \frac{1}{\eta s + 1}. \quad (2)$$

显然,  $\eta$ 取值越小, 跟踪效果越好,  $\eta \rightarrow 0$ 时, 实现速度的动态跟踪. 此外, 由式(2)可知:  $G_v(s)|_{s=0} = 1$ , 满足式(2)的控制器 $G_{cs}$ 可以实现速度的无静差跟踪. 解式(2)得

$$G_{cs}(s) = \frac{(M_e + M_s)s^2 + (B_e + B_s)s + C_e}{\eta s^2} = \frac{\tau_s}{v_{ds} - v_s},$$

对其进行拉氏反变换, 得从机械手控制律

$$\tau_s = \frac{M_e + M_s}{\eta}(v_{ds} - v_s) + \frac{B_e + B_s}{\eta}(x_{ds} - x_s) + \frac{C_e}{\eta} \int (x_{ds} - x_s) dt. \quad (3)$$

设计控制器 $G_m$ 实现力 $f_h$ 和 $f'_m$ 的跟踪.

图3所示系统的灵敏度函数

$$\varepsilon(s) = \frac{f_h - f_m}{f_h} = 1 - \frac{(f_h - \Delta f)Q G_P}{f_h}$$

$$\frac{1 - Q\tilde{G}_P}{1 + Q(G_P - \tilde{G}_P)}.$$

相对应的标称控制系统灵敏度函数

$$\tilde{\varepsilon}(s) = 1 - Q\tilde{G}_P.$$

当 $\tilde{\varepsilon}(a) = 0$ , 即 $Q\tilde{G}_P = \frac{f'_m}{f_h} = 1$ 时, 系统具有最佳跟踪性能. 因为 $\tilde{G}_P$ 中含有延迟环节, 我们取 $Q\tilde{G}_{PM} = 1$ . 又知

$$Q(s) = \frac{G_M}{1 + G_M\tilde{G}_{PM}}.$$

联立上两式得到的 $G_M \rightarrow \infty$ . 引入可实现因子:  $h(s) = \frac{1}{\lambda s + 1}$ ,  $\lambda$ 是待定的实常数. 令

$$G_f(s) = \frac{f'_m}{f_h} = Q\tilde{G}_{PM} = \frac{G_M\tilde{G}_{PM}}{1 + G_M\tilde{G}_{PM}} = \frac{1}{\lambda s + 1}. \quad (4)$$

有 $\tilde{\varepsilon} = 1 - h(s)e^{-\tilde{T}s} = 1 - \frac{e^{-\tilde{T}s}}{\lambda s + 1}$ .

$\lambda$ 取值越小, 跟踪效果越好,  $\lambda \rightarrow 0$ 时, 实现 $f'_m$ 对 $f_h$ 的动态跟踪. 同时, 由式(4)可知,  $G_f(s)|_{s=0} = 1$ , 满足式(4)的控制器 $G_M$ 可以实现力的无静差跟踪.

可以看出, 当 $\eta = \lambda$ 时,  $G_v(s) = G_f(s)$ , 即 $\frac{v_s}{v_{ds}} = \frac{f'_m}{f_h}$ , 又因为:  $f'_m = f_e e^{T_s s}$ ,  $v_{ds} = v_m e^{-T_s s}$ , 阻抗匹配条件得到满足.

将式(2)的结论带入 $\tilde{G}_{PM}(s)$

$$\tilde{G}_{PM}(s) = \frac{f_e}{v_{ds}} = \frac{f_e}{v_s} \cdot \frac{v_s}{v_{ds}} = G_e(s)G_v(s) = \frac{M_e s^2 + B_e s + C_e}{s(\eta s + 1)}. \quad (5)$$

得满足式(4)的控制器

$$G_M(s) = \frac{\eta s + 1}{\lambda(M_e s^2 + B_e s + C_e)} = \frac{v_m}{f_h - f'_m}. \quad (6)$$

拉氏反变换得主机机械手控制律

$$\tau_m = (\lambda M_e - M_m)\dot{v}_m + (\lambda B_e - B_m)v_m + \lambda C_e x_m + (1 - \eta)f_h + \eta f'_m - \int (f_h - f'_m) dt. \quad (7)$$

### 3.2 稳定性分析(Stability analysis)

**定理 1** 对于具有预测内模控制结构的力反馈遥操作系统(1), 主从机械手采用式(7)和式(3)的控制律, 当主从端可实现因子的参数满足:

- 1)  $\eta > 0$ ;
- 2)  $\lambda > \bar{\delta} \sqrt{\sup_{\omega} \frac{1 - 2 \cos(\omega \bar{\delta})}{(\omega \bar{\delta})^2}}$  时, 系统对不确定

界 $\bar{\delta}$ 以内的任意传输时延具有鲁棒稳定性.

**证** 首先证明标称系统的稳定性.

内模控制系统内模控制器(包括反馈控制器 $Q$ 和内部模型 $\tilde{G}_P$ )的传递函数

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - \tilde{G}_P(s)Q(s)}.$$

系统传递函数

$$G(s) = \frac{C(s)\tilde{G}_P(s)}{1 + C(s)\tilde{G}_P(s)} = Q(s)\tilde{G}_P(s).$$

系统的稳定性由反馈控制器 $Q$ 和标称系统被控对象 $\tilde{G}_P$ 的稳定性决定. 在图3所示系统中

$$Q(s) = \frac{G_M}{1 + G_M\tilde{G}_{PM}}.$$

将式(5)和式(6)带入上式, 得

$$Q(s) = \frac{s(\eta s + 1)^2}{(\lambda s + 1)(\eta s + 1)(M_e s^2 + B_e s + C_e)}.$$

被控对象 $\tilde{G}_P(s) = e^{-\tilde{T}s}\tilde{G}_{PM}$ , 将 $\tilde{G}_{PM}(s)$ 带入, 并考虑纯时滞环节的一阶Pade近似, 得

$$\tilde{G}_P(s) = \frac{M_e s^2 + B_e s + C_e}{s(\eta s + 1)(\tilde{T}s + 1)}.$$

观察以上 $Q(s)$ 和 $\tilde{G}_P(s)$ 的表达式, 实际物理系统 $M_e, B_e, C_e \in \mathbb{R}^+$ , 只要 $\eta > 0$ 且 $\lambda > 0$ ,  $Q(s)$ 和 $\tilde{G}_P(s)$ 的特征根就都分布在左半复平面, 而且 $Q(s)$ 分子中的 $s$ 消除了 $\tilde{G}_P(s)$ 分母中的 $s$ 对稳定性的影响, 标称系统能够稳定运行.

由 $\Delta(j\omega) = e^{-j\omega\delta} - 1$ ,  $|\delta| \leq \bar{\delta}$ 不难得到以下结论:

$$\bar{\Delta}(j\omega) = |e^{-j\omega\bar{\delta}} - 1|, \omega\bar{\delta} \leq \pi,$$

$$\bar{\Delta}(j\omega) = 2, \omega\bar{\delta} > \pi.$$

$\bar{\Delta}(j\omega)$ 是 $\Delta(j\omega)$ 的界:

$$\max |\Delta(j\omega)| \leq \bar{\Delta}(j\omega), \forall \omega.$$

图3的系统可以表示成图4所示的一般形式.

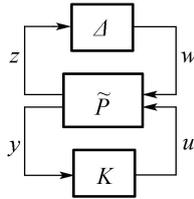


图4 不确定闭环系统

Fig. 4 Uncertain closed-loop system

$\tilde{P}$ 表示标称系统,  $K$ 是控制器. 若用 $F_L(\tilde{P}, K)$ 表示 $w$ 到 $z$ 的传递函数, 则对于图3所示系统:

$$F_L(\tilde{P}, K) = Q(s)\tilde{G}_P(s) = Q(s)\tilde{G}_{PM}(s)e^{-\tilde{T}s}.$$

将(4)带入上式, 得 $F_L(\tilde{P}, K) = \frac{e^{-\tilde{T}s}}{\lambda s + 1}$ .

$$\|F_L(\tilde{P}, K)(j\omega)\bar{\Delta}(j\omega)\|_\infty = \sup_\omega |F_L\bar{\Delta}| =$$

$$|e^{-j\omega\tilde{T}}| \cdot \sup_\omega \frac{\bar{\Delta}(j\omega)}{|j\omega\lambda + 1|} = \sup_\omega \frac{\bar{\Delta}(j\omega)}{\sqrt{1 + \omega^2\lambda^2}}.$$

1)  $\omega\bar{\delta} \leq \pi$ 时, 取 $\lambda > \bar{\delta}\sqrt{\sup_\omega \frac{1 - 2\cos(\omega\bar{\delta})}{(\omega\bar{\delta})^2}}$ , 带入上式:

$$\frac{\bar{\Delta}(j\omega)}{\sqrt{1 + \omega^2\lambda^2}} = \frac{|e^{-j\omega\bar{\delta}} - 1|}{\sqrt{1 + \omega^2\lambda^2}} = \sqrt{\frac{2 - 2\cos(\omega\bar{\delta})}{1 + \omega^2\lambda^2}} <$$

$$\sqrt{\frac{2 - 2\cos(\omega\bar{\delta})}{\sup_\omega (2 - 2\cos(\omega\bar{\delta}))}} < 1,$$

$$\|F_L\bar{\Delta}\|_\infty < 1.$$

通过图解法或区间套法可以得出 $\sqrt{\sup \frac{1 - 2\cos x}{x^2}}$ 的值在 $[0.676, 0.678]$ 之间.

2)  $\omega\bar{\delta} \geq \pi$ 时,  $\bar{\Delta}(j\omega) = 2$ , 又 $\lambda > 0.676\bar{\delta}$ , 所以 $\omega\lambda > 0.676\pi$ .

$$\frac{\bar{\Delta}(j\omega)}{\sqrt{1 + \omega^2\lambda^2}} < \frac{2}{\sqrt{1 + (0.676\pi)^2}} < 1,$$

$$\|F_L\bar{\Delta}\|_\infty < 1.$$

由以上分析可得结论:  $\lambda > \bar{\delta}\sqrt{\sup_\omega \frac{1 - 2\cos(\omega\bar{\delta})}{(\omega\bar{\delta})^2}}$ 时,  $\|F_L\bar{\Delta}\|_\infty < 1$ .

综上所述, 对于具有预测内模控制结构的力反馈操作系统(1), 主从机械手采用式(7)和式(3)的控制律, 当参数 $\eta > 0$ ,  $\lambda > \bar{\delta}\sqrt{\sup_\omega \frac{1 - 2\cos(\omega\bar{\delta})}{(\omega\bar{\delta})^2}}$ 时, 标称系统稳定,  $\|F_L\bar{\Delta}\|_\infty < 1$ ; 且 $G_P = \tilde{G}_{PM}e^{-\tilde{T}s}$ ,  $\tilde{G}_P = \tilde{G}_{PM}e^{-\tilde{T}s}$ ,  $G_P$ 和 $\tilde{G}_P$ 在 $s$ 闭右半平面极点的个数相同, 由不确定性系统鲁棒稳定性定理<sup>[9]</sup>可知, 系统对不确定界 $\bar{\delta}$ 以内的任意传输时延具有鲁棒稳定性.

图5是 $\lambda$ 分别取 $0.350\bar{\delta}$ ,  $0.678\bar{\delta}$ ,  $1.000\bar{\delta}$ 时 $|F_L\bar{\Delta}|$ 的曲线. 一般取 $\lambda > 0.7\bar{\delta}$ , 以保证系统良好的鲁棒稳定性.

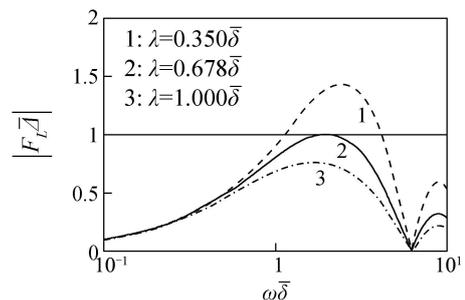


图5  $\lambda$ 取不同值时的 $|F_L\bar{\Delta}|$

Fig. 5  $|F_L\bar{\Delta}|$  for different values of  $\lambda$

### 3.3 透明性分析(Transparency analysis)

根据以上分析, 对标称控制系统有如下结论:

**结论 1** 对于采用力反馈内模预测控制结构的遥操作机器人系统(1), 针对标称控制系统 $(\tilde{P}, K)$ 当主从端控制器分别取式(7)和式(3)的控制律时, 可以实现系统主从机械手速度和力的无静差跟踪, 而且可实现因子的参数:

- 1)  $\eta, \lambda$  越小, 跟踪性能越好,  $\eta, \lambda \rightarrow 0$  时, 实现速度和力的动态跟踪;
- 2)  $\eta = \lambda$  时, 系统阻抗匹配;
- 3)  $\eta = \lambda$  且  $\eta, \lambda \rightarrow 0$  时, 系统透明.

未建模动态 $\Delta$ 的存在不影响机械手的速度跟踪性能, 但使系统的力跟踪性能遭到破坏, 系统透明性降低. 下面利用 $H_\infty$ 鲁棒性能准则为系统选择控制器参数 $\lambda$ , 使得系统在 $\Delta$ 存在时仍具有较好的力跟踪性能和良好的透明性.

问题描述:

- 1) 被控对象:  $G_P = \tilde{G}_{PME}^{-Ts}$ ;
- 2) 输入: 阶跃输入;
- 3) 控制目标: 力跟踪对阶跃输入无静差, 灵敏度函数 $\varepsilon$ 最大值:  $W^{-1} = 2.5$ ;
- 4) 系统不确定性:  $\Delta(j\omega) = e^{-j\omega\delta} - 1, |\delta| \leq \bar{\delta}, \max |\Delta(j\omega)| \leq \bar{\Delta}(j\omega), \forall \omega$ .

$H_\infty$ 鲁棒性能准则:

对不确定界内的任意 $G_P$ , 有

$$\|\varepsilon W\|_\infty = \sup_\omega |\varepsilon(j\omega)W(j\omega)| < 1.$$

由文献[10]可知它等价于

$$|F_L \bar{\Delta}| + |\varepsilon W| < 1, \forall \omega.$$

即

$$\left| \frac{1}{j\omega\lambda + 1} \cdot \bar{\Delta}(j\omega) + \left(1 - \frac{e^{-j\omega\tilde{T}}}{j\omega\lambda + 1}\right)W \right| < 1, \forall \omega. \quad (8)$$

当机械手力控制器的可实现因子参数 $\lambda$ 满足式(8)时, 力的跟踪能够实现以上所述时延不确定下的性能指标, 一致抑制变化时延对跟踪品质的影响.

图6是 $\tilde{T} = 1, \bar{\delta} = 0.30$ ,  $\lambda$  分别取0.20, 0.66, 1.00时的 $|F_L \bar{\Delta}| + |\varepsilon W|$ 曲线.

可以看出,  $\tilde{T} = 1, \bar{\delta} = 0.30$ 时,  $\lambda$ 取值在0.66左右,  $|F_L \bar{\Delta}| + |\varepsilon W|$ 达到临界值. 根据式(8)和以上的分析可知:

**结论 2**  $\tilde{T}, \bar{\delta}$  越大, 满足鲁棒性能准则的临界 $\lambda$ 越大; 性能要求越高( $W$ 越大), 满足鲁棒性能准则的临界 $\lambda$ 也越大.

**结论 3** 使系统鲁棒稳定的 $\lambda$ 的取值仅与时延的界 $\bar{\delta}$ 有关, 满足鲁棒性能准则的 $\lambda$ 的取值与 $\tilde{T}$ 和 $\bar{\delta}$ 都

有关, 而且鲁棒稳定条件 $\|F_L \bar{\Delta}\|_\infty < 1$ 是鲁棒性能准则 $\|\varepsilon W\|_\infty < 1$ 的一个必要条件, 满足 $H_\infty$ 鲁棒性能准则的参数 $\lambda$ 定能使系统鲁棒稳定.

可见在变时延情况下, 遥操作系统的稳定性控制已经包含在了力的跟踪控制中, 可以完全根据性能准则来选择参数 $\lambda$ 同时保证稳定性和良好的力跟踪性能; 但是由结论1可知,  $\lambda$ 越小系统的动态跟踪性能越好, 而依鲁棒性设计的参数 $\lambda$ 往往较大, 会严重影响力跟踪的动态性能. 此外, 为了尽可能使阻抗匹配, 速度跟踪参数 $\eta$ 要随 $\lambda$ 一起取较大的值, 机械手速度和力的跟踪性能都变差, 即使满足了阻抗匹配条件, 透明性也会下降严重. 为了缓和这一矛盾, 应用中可以在满足鲁棒稳定条件的前提下适当减小参数 $\lambda$ 的值, 或降低阻抗匹配要求,  $\eta$ 选择较小的值以提高速度跟踪的动态性能.

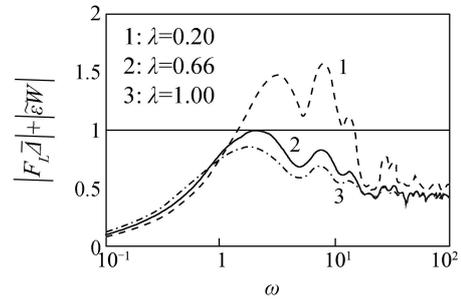


图 6  $\lambda$ 取不同值时的 $|F_L \bar{\Delta}| + |\varepsilon W|$

Fig. 6  $|F_L \bar{\Delta}| + |\varepsilon W|$  for different values of  $\lambda$

### 4 仿真结果(Simulation results)

对上文给出的内模控制遥操作系统进行仿真, 前向通道传输时延 $T_r$ 和反馈通道传输时延 $T_l$ 的设置均如图7所示: 0~7 s取0.5 s; 7 s时变为0.65 s; 13 s时变为0.35 s. 整个被控对象通道的传输时延变化范围为0.7~1.3 s. 内部模型的时延 $\tilde{T}$ 选为1s, 建模误差为 $\pm 0.30$  s, 即 $\bar{\delta} = 0.30$ . 其他系统参数选择如下:  $[M_m \ B_m \ M_s \ B_s \ M_e \ B_e \ C_e] = [50 \ 5 \ 50 \ 5 \ 30 \ 50 \ 50]$ .

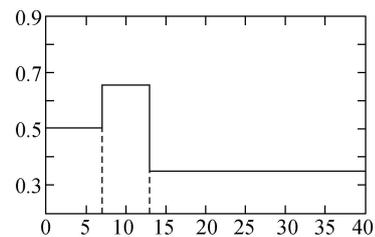


图 7 仿真时延设置

Fig. 7 Time-delay for simulation

输入是由阶跃信号叠加的矩形信号. 图8是控制器参数取 $\eta = 0.3, \lambda = 0.7$ 时的主从手力与速度的跟踪曲线.

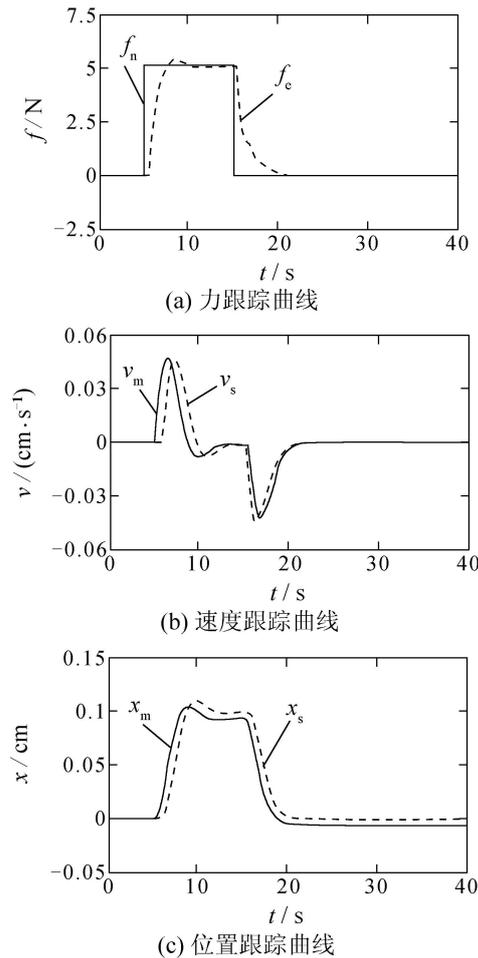


图8 仿真结果

Fig. 8 Simulation curves

仿真结果表明: 主从机械手工作稳定, 力、速度和位置跟踪效果良好. 为了增强速度跟踪性能,  $\eta$  选得比  $\lambda$  略小.

## 5 结论(Conclusion)

稳定性和透明性是遥操作系统最核心的两种性能. 在变时延条件下采用基于内模控制结构的  $H_\infty$  鲁棒控制, 得到了使系统鲁棒稳定和满足力跟踪鲁棒性能准则的控制器参数的取值范围, 使系统在变时延下依然保持稳定并具有较好的跟踪性能和透明性. 因为控制参数的选择只和变化时延的界有关, 不必考虑时延的变化规律, 所以该控制系统对不同的时延状况有较强的适应性, 同时时延界的参与使稳

定性控制不至过于保守. 此外, 系统的内部模型、反馈控制器都在主端实现, 简化了从端设备, 提高了系统的可靠性.

内模控制是模型控制方法, 被控对象模型的精度与系统性能息息相关. 可采用神经网络等建模方法实现从端的在线建模, 或采用自适应内模控制, 自动改变内部模型来适应被控对象的变化, 以增强系统的实用性.

## 参考文献(References):

- [1] MUNIR S, BOOK W J. Internet based teleoperation using wave variables with prediction[J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2001, 7(2): 124 – 133.
- [2] MUNIR S. *Internet Based Teleoperation*[M]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2000.
- [3] KOSUGE K, MURAYAMA H, TAKEO K. Bilateral feedback control of telemanipulators via computer network[C]// *Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems*. Osaka, Japan: IEEE Press, 1996: 1380 – 1385.
- [4] LEUNG G M H, FRANCIS B A, APKARIAN. Bilateral controller for teleoperators with time delay via  $\mu$ -synthesis[J]. *IEEE Trans on Robots and Systems*, 1995, 11(1): 105 – 116.
- [5] NIEMEYER G, SLOTINE J-J E. Towards force-reflecting teleoperation over the Internet[C]// *Proc of Int Conf on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium: IEEE Press, 1998: 1019 – 1025.
- [6] PARK J H, CHO H C. Sliding-mode controller for bilateral teleoperation with varying time delay[C]// *Proc of Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics*. Atlanta, USA: IEEE Press, 1999: 311 – 316.
- [7] ANDERSON R J, SPONG M W. Bilateral control of teleoperators with time delay[J]. *IEEE Trans on Automation Control*, 1989, 34(4): 494 – 501.
- [8] HASHTRUDI-ZAAD K, SALCUDEAN S E. On the use of local force feedback for transparent teleoperation[C]// *Proc of Int Conf on Robotics and Automation*. Detroit, USA: IEEE Press, 1999: 1863 – 1869.
- [9] 申铁龙.  $H_\infty$  控制理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. (SHEN Tielong.  $H_\infty$  *Control Theory and Application*[M]. Beijing: Tsinghua Publisher, 2003.)
- [10] DOYLE J C. Structured uncertainty in control system design[C]// *Proc of Int Conf on Decision and Control*. New York, USA: IEEE Press, 1985: 260 – 265.

## 作者简介:

鉴萍 (1982—), 女, 硕士研究生, 研究方向为遥操作机器人控制、网络控制, jian\_bing1982@163.com;

李歧强 (1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为复杂系统优化调度的建模和算法、系统工程方法、智能控制以及计算机网络控制系统.