

遥操作系统力觉接口的无源性设计

刘彦文¹, 李 佳¹, 何 朕², 王广雄²

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 力觉接口是指人和遥操作机械手之间的接口, 用来给操作人员提供操作时的一种虚拟环境. 无源性是这种接口系统设计的主要要求, 但是前人得出的无源性条件过于保守. 本文从采样控制系统的频率特性出发推导了一个没有保守性的接口系统无源性的条件. 文中并指出无源性只是接口的一个属性, 要正确设计还需考虑到伺服设计的一些基本要求, 诸如系统的带宽、阻尼等. 文中还结合例子给出了接口系统无源性设计的步骤.

关键词: 力觉接口; 采样系统; 无源性; 虚拟环境

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Passivity design of a haptic interface for the remote servo manipulator

LIU Yan-wen¹, LI Jia¹, HE Zhen², WANG Guang-xiong²

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The haptic interface provides the virtual environment for the remote servo manipulator. Passivity is the main requirement of the interface design. However, the conditions of passivity given in existing work are too conservative. Based on the frequency response of a sampled-data control system, a non-conservative passivity condition for the interface system is derived. It is pointed out that passivity is just one of the properties of the interface. For a proper design, the basic requirements of a servo design must also be considered, such as the bandwidth of the system, the damping of the system. The passivity design procedure for the interface is illustrated by an example.

Key words: haptic interface; sampled-data system; passivity; virtual environment

1 引言(Introduction)

力觉接口是指人和遥操作机械手之间的接口, 用来给操作人员提供操作时的一种虚拟环境. 例如, 如果对单个质量(物体)进行操作, 那么这个接口反过来作用在操作员手上的力就应该比例于加速度, 如果对象是个弹性体, 那么接口产生的力应该是与位移成比例的. 如果遥操作机械手遇上了墙体, 那么接口要产生相当大的力来表示行程受阻. 近年来由于应用的增多, 相关的研究工作也呈增长的态势^[1~3].

这种接口装置也可以看成是一个机械阻抗, 就像电路中电流通过阻抗产生压降一样, 这里的阻抗表示速度与产生的力之间的关系. 例如上面的例子中, 当表示遇上了墙体的情况时, 这个阻抗就非常大. 力觉接口的性能一般用阻抗的动态范围来表示, 阻抗的上限一般是受到稳定性的限制, 所以接口系统常用遇到墙体时的大阻抗情况进行研究.

人通过接口操纵机械手, 接口系统同时反馈给操纵手一个虚拟环境的信号(力), 也就是说人和接口系统形成了一种闭环系统的关系. 闭环系统的主要

性能就是稳定性. 但是这种闭环系统中包含有人, 由于人有主观能动性, 甚至还可能由于操作不当, 通过手柄激发起振荡. 所以对于这种闭环系统的稳定性分析宜采用无源性分析的方法. 因为从无源性理论可知, 由两个无源性系统构成的负反馈系统仍是无源的, 即是稳定的. 在人操纵接口装置的手柄时, 人的响应特性可以视为是无源的^[4], 所以如果接口系统也是无源系统, 那么由人和接口装置形成的闭环系统就是稳定的, 而且构成虚拟环境的接口装置的无源性要求也符合实体环境的物理特点. 因为如果(机械手)遇上了墙体, 墙体本身就是无源的, 不会激起振荡, 即不可能输出能量. 所以无源性是这类系统设计的基础.

文献[5, 6]给出了系统无源性的条件, 但是这些条件存在着一些疑点(见下面分析). 文献[1]从频域提升的观点对这无源性条件的不等式又重新进行了论证. 本文则直接从采样系统频率特性的角度^[7]来给出这个无源性的条件, 并与已有的条件进行对比和分析.

2 无源性与无源性条件(Passivity and the condition for passivity)

图1是一个单自由度力觉系统的模型, 图中: m 表示执行结构(直线电机)可动部分的质量, b 是粘滞摩擦系数, H 表示零阶保持器, S 表示采样, K_d 为离散控制器, 用来模拟虚拟墙体. 本文在具体计算中设 $m = 0.5 \text{ kg}$, $b = 0.1 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$.

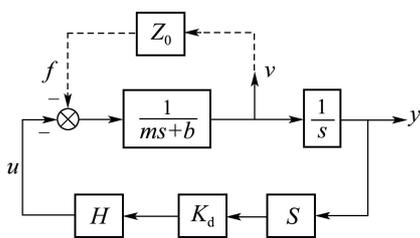


图 1 力觉系统模型

Fig. 1 Model of a haptic system

对一个力觉接口来说, 输入的功率是施加的力 $f(t)$ 和速度 $v(t)$ 的乘积. 如果这个接口是无源的, 那么这个功率的积分将大于或等于零, 即

$$\int_0^t f(\tau)v(\tau)d\tau \geq 0, \forall f(t), t \geq 0. \quad (1)$$

从系统的角度来说, 若输入是 $f(t)$, 输出为 $v(t)$, 则满足式(1)的系统称为无源系统. 所以力觉系统取 $v(t)$ 为输出. 至于有些文献中用 Z_0 来代表操纵手, 应该说这个 Z_0 代表操作时人感受到的一种速度, 代表施加力时的一种感觉(haptic).

当操作遇到墙体时的环境应该是非线性的, 但是为了便于进行分析和处理, 可以用一个大的阻抗来表示这个虚拟环境, 这时对应的刚度 $K \approx 2000 \sim 8000 \text{ N/m}^{[5]}$.

$$K_d(z) = K + B \frac{z-1}{Tz}, \quad (2)$$

式中 T 为采样周期.

文献[5, 6]在讨论无源性条件时是将采样系统在离散信号处断开, 见图2的虚线所示. 图中 Z_0 代表进行操作的人, 认为人是有源的, 即认为 $Z_0(j\omega)$ 只分布在右半平面(正实性), 然后按图2所分开的两部分, 用Nyquist判据分析这个离散系统的稳定性. 如果系统在任何情况(指参数)都稳定, 其相应的条件便是接口无源性条件. 文献[5]接着给出了一个以 $\alpha = B/(KT)$ 和 $\beta = b/B$ 为参数的一条手绘的曲线, 将 $\alpha - \beta$ 平面划分为无源和有源两个部分. 文献[6]的工作似乎已比较成熟, 文中不再提文献[5]的这条曲线, 而是另外给出一个化简整理后的表达式:

$$b > \frac{KT}{2} + B. \quad (3)$$

如果将式(3)整理成 $\alpha - \beta$ 曲线, 则是

$$\frac{b}{B} > \frac{KT}{2B} + 1,$$

即

$$\beta > \frac{1}{2\alpha} + 1. \quad (4)$$

图3(见后面)中的曲线①就是当式(4)为等号时的一条划分线. 曲线以上部分为无源区.

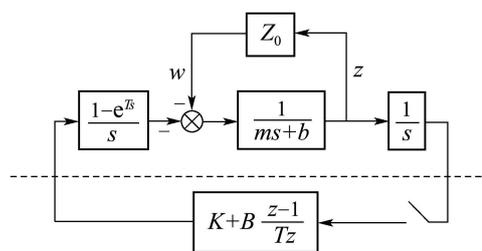


图 2 无源性分析中系统的划分

Fig. 2 System partition for passivity analysis

式(4)的无源性条件自给出以来几乎已被普遍接受^[8~10], 但是上述的文献[5, 6]的论点是有疑点的. 文献[5, 6]认为两个无源环节构成的系统是稳定的, 那么与一个无源环节 Z_0 (图2)构成的系统如果都能稳定, 则另一部分(从 w 到 z)一定是有源的. 按照这个思路就可推导出无源性条件, 即式(3). 这相当于是无源性定理的逆定理. 可是无源性理论中并不存在这么一个逆定理. 其次, 文献[5, 6]因为是在离散信号之间将系统分隔开的(图2), 用的是离散信号之间的关系, 而无源性要考虑的却是连续信号 w 到 z 之间的关系. 有鉴于此, 文献[1]采用了能考虑到采样信号之间连续性的提升法, 利用频域提升的方法来计算从 w 到 z 的频率响应(FR)算子. 但是提升法有其局限性^[11,12], 而且文献[1]也仍是基于文献[5, 6]那种并不存在的逆定理的观点来进行推导的, 最后的结果也与[5, 6]一样.

由于存在上述疑点和问题, 本文采用笔者在文献[7]中提出的计算采样控制系统频率特性的方法, 直接从 $w \rightarrow z$ 的频率特性 $T_{zw}(j\omega)$ 上来讨论无源性的条件. 因为对线性系统来说, 无源性就是正实性, 无源性的条件就是 $T_{zw}(j\omega)$ 正实性的条件. 现结合图2的系统来进行讨论. 先定义连续对象的几个传递函数. 设 G_{11} 是对象的第1个输入 w 到第1个输出 z 的传递函数, G_{12} 是第2个输入 u 到 z 的传递函数,

$$G_{11}(s) = \frac{1}{ms+b}, \quad G_{12}(s) = \frac{-1}{ms+b}. \quad (5)$$

同理, 从第1个输入和第2个输入到对象第2个输出 y 的传递函数分别是

$$G_{21}(s) = \frac{1}{s(ms+b)}, \quad G_{22}(s) = \frac{-1}{s(ms+b)}. \quad (6)$$

文献[7]指出,采样控制系统的频率响应可根据如下的线性分式变换来计算:

$$T_{zw} = G_{11} + G_{12}K_d(I - G_{22d}K_d)^{-1}G_{21d}, \quad (7)$$

式中下角标d表示是相应的离散化传递函数. 因为现在处理的是SISO系统, 式(7)中的逆也可用分子分母相除来表示. 将式(5)代入(7)可得

$$T_{zw} = \frac{1}{ms+b} \left(1 - \frac{K_d G_{21d}}{1 - G_{22d} K_d}\right).$$

根据式(6)可知, $G_{22d} = -G_{21d}$, 故上式整理后可得

$$T_{zw} = \frac{1}{(ms+b)} \frac{1}{(1 - G_{22d} K_d)}. \quad (8)$$

式中 G_{22d} 是离散化传递函数, 当用频率 ω 来表示频率特性时, 为

$$G_{22d}(j\omega) = \frac{1}{T} \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1 - e^{-j(\omega+n\omega_s)T}}{j\omega + jn\omega_s} G_{22}(j\omega + jn\omega_s),$$

式中 $\omega_s = 2\pi/T$, 故上式中的指数项可提出, 得

$$G_{22d}(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T}}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{G_{22}(j\omega + jn\omega_s)}{j\omega + jn\omega_s}. \quad (9)$$

注意到上式中的求和项 \sum 是指包括沿频率轴的所有项, 而一般设计时只要考虑主频段($n = 0$). 这里要说明的是, 对常规的采样控制系统来说, 信号采样后均有低通的抗混叠滤波器, 只是因为滤波器的时间常数很小, 在主要的参数设计中一般都将其略去. 也就是说图2虽然没有画出抗混叠滤波器, 但在系统实现中是有的. 由于有抗混叠滤波器, 所以在常规的设计中, 对象在主频段的特性理论上不会出现混叠, 即式(9) \sum 号内的 G_{22} 在主频段就等于 $G_{22}(j\omega)^{[13]}$. 因此当考虑主频段时, 即 $0 \sim \omega_s$ 频段时, 可将式(9)写成

$$G_{22d}(j\omega) = \frac{1}{T} \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega} G_{22}(j\omega). \quad (10)$$

注意式(10)中的

$$H_0(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega} = T \frac{\sin(\omega T/2)}{\omega T/2} e^{-j\omega T/2}. \quad (11)$$

这就是零阶保持器的频率特性. 一般系统的工作频带在 $0.1\omega_N$ 以内, ω_N 为Nyquist频率, $\omega_N = \omega_s/2 = \pi/T$. 当 ωT 以 $0.1\omega_N T = 0.1\pi$ 代入时可得零阶保持器的增益 $|H_0(j\omega)| = 0.9958 T$, 故为简化讨论, 今后将零阶保持器的增益视为常数 T , 即式(11)可写成

$$H_0(j\omega) = T e^{-j\omega T/2}. \quad (12)$$

将式(12)代入式(10), 可得本例中的离散化对象 G_{22d}

为

$$G_{22d}(j\omega) = G_{22}(s) e^{-(T/2)s} = -\frac{e^{-(T/2)s}}{s(ms+b)} \Big|_{s=j\omega}. \quad (13)$$

将式(13)(2)代入式(8)可得采样系统的连续的输入信号与输出信号之间的频率特性

$$T_{zw}(j\omega) = \frac{1}{(ms+b)} \frac{1}{1 + \frac{e^{-(T/2)s}}{s(ms+b)} \left[K + \frac{B}{T} (1 - e^{-sT}) \right]} \Big|_{s=j\omega} = \frac{s}{ms^2 + bs + \left(K + \frac{B}{T} - \frac{B}{T} e^{-sT} \right) e^{-(T/2)s}} \Big|_{s=j\omega}. \quad (14)$$

式(14)的分子比较简单, 这表明用 $T_{zw}(j\omega)$ 的倒数来进行讨论将更为方便. 事实上,

$$\operatorname{Re}\{T_{zw}(j\omega)\}^{-1} > 0 \Rightarrow \operatorname{Re}\{T_{zw}(j\omega)\} > 0, \quad (15)$$

所以只要要求 T_{zw}^{-1} 是正实就可以了. 根据式(14)可得

$$\operatorname{Re}\{T_{zw}(j\omega)\}^{-1} = b - \frac{KT + B}{2} \frac{\sin(\omega T/2)}{\omega T/2} + \frac{3B}{2} \frac{\sin(3\omega T/2)}{3\omega T/2} > 0. \quad (16)$$

上式中第2项的 $\frac{\sin(\omega T/2)}{\omega T/2}$ 的最大值为1, 故要求 $\operatorname{Re} > 0$ 的条件就是

$$b > \frac{KT + B}{2}. \quad (17)$$

至于式(16)中的第3项在开始低频段是正的, 中间有一频率段上是负的, 但其值随 ω 增加衰减很快, 故在式(17)的条件中不予考虑.

式(17)尚可进一步整理如下:

$$\frac{b}{B} > \frac{KT}{2B} + \frac{1}{2},$$

即

$$\beta > \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{2}. \quad (18)$$

式(18)与式(4)相比很是相似, 这就是上面的推导中要做一些假设的原因, 例如对象在主频段上不发生混叠, 零阶保持器的增益为常数, 等等, 都是为了得到一个可与前人工作对比的, 简洁的表达式.

再进一步, 对于当前的技术来说, 采样周期已经可以做到ms级, 这时式(2)中的差分作用与连续的微分已相当接近, 如果以连续的PD控制律来代替式(2),

$$K(s) = K \left(1 + \frac{B}{K} s\right) = K(1 + T_d s), \quad (19)$$

则根据上面同样的推导, 可得这时的正实条件为

$$\beta > \frac{1}{2\alpha}. \quad (20)$$

图3给出了式(4)(18)(20)的无源性划分曲线, 曲线的上部对应各自的无源区域. 从图可见, 文献[1, 5, 6]上给出的无源区最窄. 由于力觉接口要求的刚度较高, 或者说都是一些高阻抗系统, 从下一节的例子中可以看出, 对应的参数都是在图3右下的三角区域内, 如果从文献[5, 6]的结果来看, 已不满足无源性条件(4), 不可能做到无源性. 这显然是不符合实际的, 也是文献[1, 5, 6]的矛盾所在.

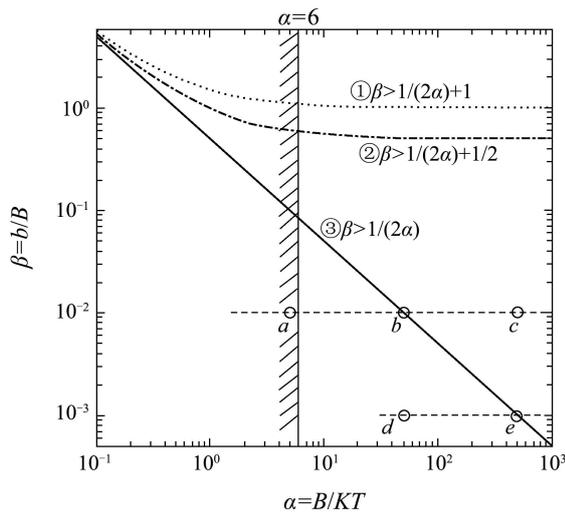


图 3 参数平面上无源性划分
Fig. 3 Passivity regions in the parametric plane

为节省篇幅, 本节对无源性不再进行单独验证. 因为下一节设计问题的分析计算, 实际上也是对这里的无源性划分的一种验证.

3 系统设计(System design)

上面的无源性要求只是力觉接口系统的一个属性. 但是力觉系统又是一个负反馈系统, 作为反馈系统来说, 还需要考虑到反馈系统的一些基本特性, 例如带宽, 系统的阻尼等. 因为即使一个系统做到了无源性, 但如果其主导极点为一对复数极点, 那么其响应特性上会出现超调, 在实际操作时会感觉到有抖动. 又如果带宽设计过宽, 在实际系统中会激起未建模动态的振荡模态, 影响到这个虚拟环境的真实感觉.

由此可见还应该从负反馈的角度来对图3的参数区域加上一些限制. 这里的讨论中将采用连续系统中的一些概念, 以便使结果更为简单明了. 例如对应连续系统来说, 这里的 B/K 就是微分校正的时间常数 $T_d = B/K$, 因此可将 α 整理如下:

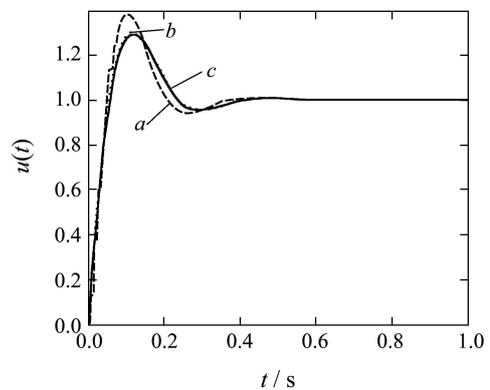
$$\alpha > \frac{B}{KT} = \frac{T_d}{T} = \frac{1}{\pi} \frac{\omega_N}{\omega_d},$$

式中: $\omega_d = 1/T_d$, $\omega_N = \pi/T$. 一般采样系统设计中系统的穿越频率 $\omega_c < 0.1\omega_N$, 而微分校正环节的转折频率 $\omega_d \approx 0.5\omega_c$, 代入上式可得

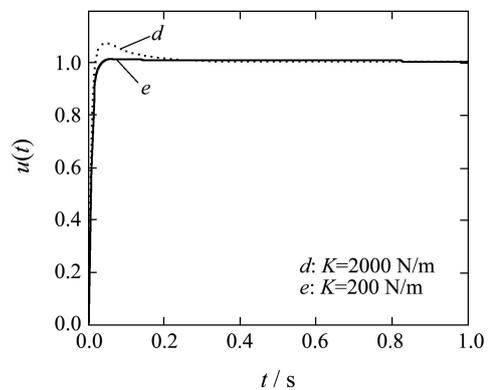
$$\alpha > 6, \quad (21)$$

故从伺服设计的角度来说, $\alpha > 6$ 的区域(图3中阴影线之右侧)才是无源性设计的参数可选区域.

现在再来考察 $\alpha > 6$ 范围内的参数设计问题. 注意到对象中的 b 是执行机构的阻尼, 在具体的设计问题中此值是固定的(本例中 $b = 0.1$), 故图3纵坐标的点只与 B 有关, 即图3中水平线段对应的 B 的值是不变的. 若 K 值不变, 则图3中横线所对应的系统特性基本是相似的, 只是由于采样周期 T 不同而有不同的稳定程度. 以图3中的 b 点 ($T = 0.001$ s) 为例, 其左侧的 a 点 ($T = 0.01$ s) 已在无源区之外, 而且超调也增大, 见图4(a)所示.



(a) $\beta = 10^{-2}$, $B = 10 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $K = 200 \text{ N/m}$



(b) $\beta = 10^{-3}$, $B = 100 \text{ N} \cdot \text{s/m}$

图 4 反馈力的阶跃响应曲线

Fig. 4 Step response of the feedback force

在 α - β 参数图上, 从纵向方向看, 越往下, 对应的 B 值越大, 用近似的连续系统来解释, 微分校正的时间常数 T_d 随着 B 而增大, 即系统的阻尼加大了, 超调就会下降, 试比较从 b 点到 d 点 ($T = 0.001$ s, 已进入有源区), c ($T = 10^{-4}$ s) 点到 e ($T = 0.001$ s) 点

的响应曲线(图4(b)). 已知图3中的斜线(对应 $\beta = 1/(2\alpha)$)是采样周期 T 较小时系统无源性的边界线, 其上的 e 点既可使系统成为无源的, 对力的响应又可做到无超调. 所以 e 点应是本例中的最佳设计点. 图5就是 e 点所对应的频率特性 $T_{zw}(j\omega)$, 都分布在右半面, 即具有正实性. 如果执行机构的参数(m, b)不同, 则也可以参照上面所述的方法在线 $\beta = 1/(2\alpha)$ 上找到最佳的工作点的参数.

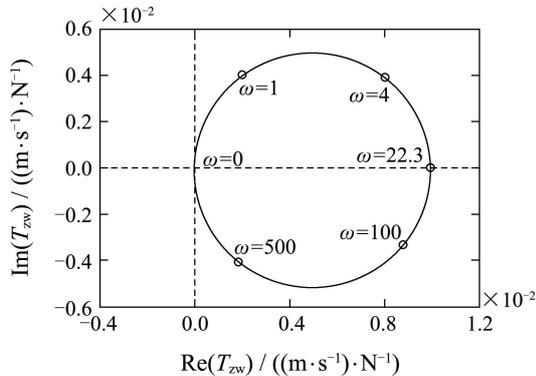


图5 e 点的频率特性 T_{zw}

Fig. 5 Frequency response T_{zw} at point e

按照无源性要求来设计的接口装置在与人组成闭环系统时可以稳定工作, 又根据上述要求保证接口系统有适当的带宽和足够的阻尼, 使操作时不会出现抖动, 使这虚拟环境更具有真实感.

4 结论(Conclusions)

1) 无源性是力觉接口的设计基础, 而关于无源性的条件, 前人的工作过于保守, 与实际的设计结果往往不符. 本文直接从采样控制系统频率特性的正实性要求来给出无源性条件, 推导过程清楚了, 可用于实际的无源性设计.

2) 无源性只是力觉接口的一个属性, 还应该加上带宽和校正等反馈设计理念才能设计出一个完善的接口.

参考文献(References):

- [1] FARDAD M, BAMIEH B. A Necessary and sufficient frequency domain criterion for the passivity of SISO sampled-data systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(3): 611 – 614.
- [2] LEE K, LEE D Y. Adjusting output-limiter for stable haptic rendering in virtual environments[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(4): 768 – 779.
- [3] GIL J J, RUBIO A, SAVALL J. Decreasing the apparent inertia of an impedance haptic device by using force feedforward[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(4): 833 – 838.
- [4] COLGATE J E, SCHENKEL G. Passivity of a class of sampled-data systems: Application to haptic interfaces[J]. *Journal of Robotic Systems*, 1997, 14(1): 37 – 47.
- [5] COLGATE J E, GRAFING P E, STANLEY M C, et al. Implementation of stiff virtual walls in force-reflecting interfaces[C] // *Virtual Reality Annual International Symposium*. Piscataway, NJ: IEEE, 1993: 202 – 207.
- [6] COLGATE J E, SCHENKEL G. Passivity of a class of sampled-data systems: Application to haptic interfaces[C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 1994: 3236 – 3240.
- [7] 刘彦文, 王广雄, 何朕. 采样系统的频率响应和 L_2 诱导范数[J]. *控制与决策*, 2005, 20(10): 1133 – 1136. (LIU Yanwen, WANG Guangxiong, HE Zhen. Frequency response and the L_2 -induced norm of sampled-data systems[J]. *Control and Decision*, 2005, 20(10): 1133 – 1136.)
- [8] KAWAI M, YOSHIKAWA T. Haptic display of movable virtual object with interface device capable of continuous-time impedance display by analog circuit[C] // *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE, 2002: 229 – 234.
- [9] KIM J P, RYU J. Energy bounding algorithm based-on passivity theorem for stable haptic interaction control[C] // *Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. Piscataway, NJ: IEEE, 2004: 351 – 357.
- [10] GIL J J, AVELLO A, RUBIO A, et al. Stability analysis of a 1 DOF haptic interface using the Routh-Hurwitz criterion[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, 12(4): 583 – 588.
- [11] 王广雄, 刘彦文, 何朕. 采样控制系统提升技术的10年[J]. *电机与控制学报*, 2006, 10(1): 44 – 48. (WANG Guangxiong, LIU Yanwen, HE Zhen. Ten years of the lifting technique for sampled-data control systems[J]. *Control and Decision*, 2006, 10(1): 44 – 48.)
- [12] WANG G X, LIU Y W, HE Z. H_∞ design for sampled-data systems via lifting technique: conditions and limitation[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 32(5): 1 – 5.
- [13] FRANKLIN G F, POWELL J D, WORKMAN M. *Digital Control of Dynamic Systems*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

作者简介:

刘彦文 (1976—), 女, 博士, 副教授, 目前研究方向为采样系统和鲁棒控制系统设计, E-mail: zhwyw@163.com;

李佳 (1981—), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为鲁棒 H_∞ 控制和采样系统, E-mail: liuyanwen@hrbeu.edu.cn;

何朕 (1972—), 女, 博士, 副教授, 目前研究方向为鲁棒 H_∞ 估计, E-mail: hezhen@hit.edu.cn;

王广雄 (1933—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为 H_∞ 控制理论及应用、控制系统的鲁棒设计, E-mail: gxwang@hit.edu.cn.