

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209089

四通道遥操作机器人的系统化设计研究^{*}温静^{1,2,3} 田大鹏^{1,2,3}

(1. 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室 长春 130033; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033;
3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 现有基于干扰观测器(DOB)的四通道双向控制遥操作系统能够不依赖力传感器实现一定的透明性。然而目前主/从控制器的设计多基于累试法,缺少一种系统化的设计方法,并且受到 DOB 工作带宽的限制,透明性难以得到提升。提出一种基于鲁棒控制理论的系统化设计控制器方法。通过求取主/从机器人之间位置响应误差和干扰残差的动力学方程,将遥操作四通道双向控制转化为两个一般反馈控制系统,基于 H_∞ 控制理论选取合适的权函数实现系统化的控制器综合。新方法给出了在无力传感器条件下实现主/从机器人力反馈双向控制的一种一般方法。实验表明,系统化方法设计出的控制器能够保障系统的稳定性和透明性,实现了两个电机位置的互相跟踪和作用力的传递,并且与传统基于 PD 控制设计的四通道双向控制相比对系统中的干扰和模型不确定性有更强的鲁棒性。

关键词: H_∞ 控制理论;系统化设计控制器;遥操作双向控制;四通道控制结构

中图分类号: TP241.3;TP13 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Research on systematic design of four-channel teleoperated robot

Wen Jing^{1,2,3} Tian Dapeng^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The existing four-channel bilateral control teleoperating system based on disturbance observer (DOB) can achieve a certain degree of transparency without relying on force sensors. However, the current master/slave controller design is mostly based on the trial and error method, lacks systematic design, and is limited by the DOB operating bandwidth, so transparency cannot be improved. In this work, a systematic method for designing controllers based on robust control theory is proposed. The teleoperated four-channel bilateral control is transformed into two general feedback control systems by obtaining the dynamic equations of the position response error and disturbance residual between the master/slave robot, then systematically integrated controller can be obtained through selecting appropriate weighting functions based on H_∞ control theory. The new method presents a general method to realize the bilateral control of master/slave robot under the condition of forceless sensor. Experiments show that the controller designed via the systematic method can ensure the system stability and transparency, and improve the tracking and force transfer between two motors. Besides, this design exhibits stronger robustness to disturbance and model uncertainty in the system compared with the traditional four-channel bilateral control based on PD control design.

Keywords: H_∞ control theory; systematic design controller; teleoperation bilateral control; four-channel control structure

0 引言

双向遥操作控制系统在应急救援、深空深海探测和远程医疗等领域有着极大的发展前景^[1-2]。遥操作系统中如何再现触觉并保证良好的透明性以及稳定性是最核心的指

标^[3-4]。日本庆应义塾大学 Ohnishi 教授等提出了基于加速度控制的四通道双向控制结构,利用干扰观测器(disturbance observer, DOB)在加速度层面上实现了位置和力的混合控制^[5]。该四通道双向控制结构实现了主、从机器人之间位置和力的相互跟踪,从而实现了良好的透明

收稿日期:2022-02-25

* 基金项目:国家自然科学基金(61673365)项目资助

性。文献[6]提出了一种新颖的四通道基于加速度的双向控制架构,在提出的架构中,通过 PD 控制将位置差控制为零。文献[7]提出了基于观测增益和速度反馈增益协同的双向四通道控制结构,以提高遥操作机器人的带宽。

然而,在上述研究中,最基本的四通道双向控制中各控制器的设计仍然是基于累试法设计的 PD 形式的控制器。双向控制器的设计依然要依赖于经验进行参数调节得到最终的控制[8-10]。显然,这样设计的控制器缺乏系统性。并且由于 DOB 存在工作带宽的限制,在中高频域无法有效补偿作用在主、从机器人上的外界干扰和模型不确定性。DOB 对外界干扰和模型不确定性的估计和补偿的残差仍然会进入到双向四通道控制回路中,造成系统透明性的下降。

为了避免经验化的参数调节,需要一种系统化的设计控制器方法。 H_∞ 控制是一种能够实现系统化控制器综合的方法,通过求解黎卡提方程实现控制器设计,并能够保证系统的鲁棒性[11]。文献[12]提出了具有范数有界参数不确定性和饱和执行器的不确定遥操作系统的鲁棒状态反馈 H_∞ 控制器设计,主要在双向控制中采用了线性矩阵不等式的方法。文献[13]为了实现遥操作中良好的触觉性能,通过 H_2 控制将力反馈和位置跟踪性能约束在传递频率内,通过 H_∞ 控制抑制测量噪声。基于 H_∞ 控制理论对一般反馈系统设计的控制器,能够有效避免规避不断调试参数的过程,通过权函数来约束不确定性和非线性干扰的作用能减轻外界干扰对系统输出的影响[14-16]。现有的 H_∞ 控制已在机械、电力及电力电子等领域得到了广泛的应用,既解决了实际工业问题,又支撑了 H_∞ 控制理论的发展[17-18]。

然而,当双向控制中存在 DOB 时,采用文献[11-12]描述的方法直接设计控制器会使得控制矩阵复杂,导致黎卡提方程求解困难。如何基于 H_∞ 控制理论开展四通道双向控制设计仍然有待解决。

本文在现有研究的基础上,针对基于 DOB 和 PD 控制的四通道双向控制在控制器综合的系统性方面的不足以及对干扰和模型不确定性存在补偿残差等问题,将 DOB 和 H_∞ 控制相结合,构建四通道双向控制的一般方法。首先基于 DOB 来对外界的干扰进行估计和补偿;再将带有 DOB 的主、从机器人双向控制问题通过求解两个机器人之间位置响应偏差及其位置响应平均值的动力学特性的方式,将四通道双向控制转化为两个相对独立的一般反馈控制问题,实现力控制和位置控制的解耦。考虑 DOB 补偿残差的存在,采用 H_∞ 控制理论实现控制器设计,使系统获得理想的透明性和鲁棒性。

1 问题描述

1.1 被控对象的不确定性

不失一般性地,对于电机驱动的主/从系统,其名义模型为:

$$\frac{1}{M_j s^2 + B_j s}, j = m, s \quad (1)$$

• 2 •

其中, M_j 和 B_j 分别为主从系统的名义质量和名义阻尼。实际系统的模型为:

$$\frac{1}{M_j s^2 + B_j s} [1 + \Delta P(s) W_2(s)], j = m, s \quad (2)$$

其中, $\Delta P(s)$ 是未知的摄动函数, $W_2(s)$ 表示 $\Delta P(s)$ 的摄动界函数,也称加权函数(一般是稳定传递函数)。

实际系统中,主/从系统被控对象并不是严格意义的二阶传递函数,实际系统和名义系统模型之间存在着传递函数误差。

1.2 系统的干扰残差

在主从系统中,为了获得良好的透明度,设计了 DOB 来估计和补偿扰动。通过被控对象和输入控制变量的逆模型估计等效扰动值,在此基础上设计 DOB。图 1 是电机控制系统中速度环干扰观测器的框图。干扰力 D_j 被施加到机器人上。DOB 估计出干扰力 $\hat{D}_j (j = m, s)$, 并补偿在被控对象中。低通滤波器估计的干扰力为:

$$\hat{D}_j = \frac{g_{dis}}{s + g_{dis}} D_j \quad (3)$$

其中, s 是拉普拉斯运算符, \hat{D}_j 是主/从机器人估计的干扰力。干扰力通过截止频率为 g_{dis} 的低通滤波器实时估计出来。

如图 1 所示,加速度控制是通过 DOB 实现的。机器人的加速度响应与参考加速度响应保持一致:

$$s^2 X_j = s^2 X_j^{ref} + \frac{D_j - \hat{D}_j}{M_j} \quad (4)$$

其中, $X_j^{ref} (j = m, s)$ 为主/从机器人的位置参考值。由式(4)看出,虽然 DOB 能够在一定的频率范围内实现干扰的补偿,但仍然存在一定的干扰残差。

H_∞ 控制既对系统中的被控对象传递函数变化具有强鲁棒性,又能稳定未知扰动,即能稳定干扰残差对系统的影响,所以遥操作系统中采用 H_∞ 控制器。

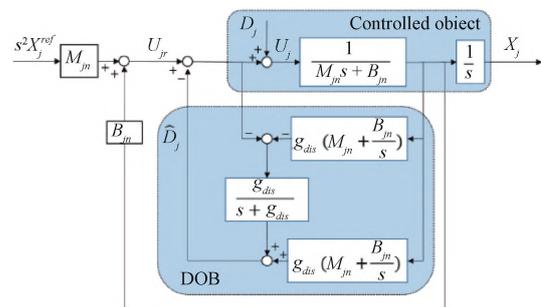


图 1 主/从机器人电机控制中速度环干扰观测器

2 遥操作双向控制器设计

2.1 双向控制中控制律的设计

通过设计包括力和位置信息的参考加速度来实现双向控制。双向控制律的设计:

$$\begin{cases} s^2 X_m^{ref} = C_{pm}(s)(X_s - X_m) - C_f(F_h + F_e) \\ s^2 X_s^{ref} = C_{ps}(s)(X_m - X_s) - C_f(F_h + F_e) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $C_f = K_f$ 为力控制器的设计, K_f 为力控制器增益。 $C_{pj}(s) (j = m, s)$ 为待设计的主端和从端的位置控制器, 为了方便, 主从位置控制器的结构设计相同即 $C_p(s) = C_{pm}(s) = C_{ps}(s)$ 。 $X_j (j = m, s)$ 是主/从机器人的位置响应, $-F_h$ 为操作者对主机施加的力, $-F_e$ 为环境对从机器人的反作用力。

2.2 双向控制位置控制器的设计

将式(5)中的两式相减, 得到:

$$s^2 X_m^{ref} - s^2 X_s^{ref} = 2C_p(s)(X_s - X_m) \quad (6)$$

由式(4)可知:

$$\begin{cases} s^2 X_m^{ref} = s^2 X_m - \frac{D_m - \hat{D}_m}{M_{mn}} \\ s^2 X_s^{ref} = s^2 X_s - \frac{D_s - \hat{D}_s}{M_{sn}} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $s^2 X_j^{ref} (j = m, s)$ 是主机和从机的参考加速度, $s^2 X_j (j = m, s)$ 是主机和从机的响应加速度。

令:

$$\tilde{D}_j = \frac{D_j - \hat{D}_j}{M_{jn}} (j = m, s) \quad (8)$$

$$P_0(s) = \frac{1}{s^2} \quad (9)$$

由式(6)~(9)可得:

$$(X_m - X_s) + 2C_p(s)P_0(s)(X_m - X_s) - P_0(s)(\tilde{D}_m - \tilde{D}_s) = 0 \quad (10)$$

则根据式(10)可得到一般的控制系统框图, 如图 2 所示, 图 2 是主机一侧双向控制系统变换后的一般控制系统框图。

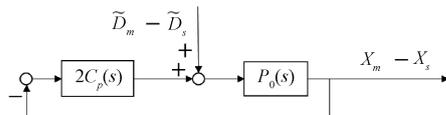


图 2 一般控制系统的框图

3 H_∞ 控制器设计

位置控制器的设计目标是在干扰 $(\tilde{D}_m - \tilde{D}_s)$ 的影响下, 使得位置控制差值 $X_m - X_s = 0$ 。为此, 选择了图 3 所

$$C_p(s) = 26\,338 \times \frac{(s + 8 \times 10^6)(s^2 + 11.61s + 64.43)(s^2 + 66.25s + 1.725 \times 10^4)(s^2 + 24.45s + 1.673 \times 10^4)}{(s + 3.111 \times 10^4)(s + 1 \times 10^4)(s + 54.51)(s + 0.000\,1)(s^2 + 56.44s + 1.296 \times 10^4)(s^2 + 66.77s + 2.246 \times 10^4)} \quad (14)$$

综合出的控制器的阶数很高, 为了使控制器实现更加简便, 所以对式(14)中的控制器降阶, 控制器的伯德图如图 6 所示, 降阶后为:

示的一般控制反馈控制系统模型。

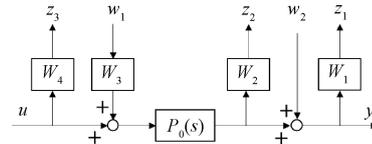


图 3 系统开环控制框图

图 3 中, w_2 和 z_2 是用于保证对乘法摄动鲁棒性的评价信号; z_3 是对控制输入 u 的评价信号; w_1 和 z_1 是用于干扰响应评价的信号。

建立控制系统的乘法不确定系统模型:

$$P(s) = [1 + \Delta P(s)W_2(s)]P_0(s), \quad \|\Delta P(s)\|_\infty < 1 \quad (11)$$

$P(s)$ 是实际系统的传递函数, $P_0(s)$ 是标称模型的传递函数。本文中:

$$P(s) = \frac{s^2 + 250s + 10\,000}{s^2 + 100s + 10\,000} \times \frac{1}{s^2} \quad (12)$$

$W_2(s)$ 表示乘法摄动的大小; 从图 4 中可以看出, $W_2(s)$ 以下区域皆被看作摄动。但是实际上摄动误差只不过是其中一部分。因此, 从这个意义上说, 上述控制对象集合的表达式(11)中包含了实际中并不存在的摄动, 因而导致产生保守性。为了抑制摄动范围的扩大, 应尽可能减少模型的保守性, 在选择加权函数时应不过分偏离实际摄动。

$W_1(s)$ 是性能评价加权函数, 表示干扰的动态特性; 干扰的频率特性基本上是在低频增益大, 所以干扰的加权函数为低通传递函数。

$W_3(s)$ 是用于调节的参数, 主要用于调整响应速度。

$W_4(s)$ 是用来调整输入大小的加权函数。输入加权函数的功能在于去除控制输入中的高频成分, 所以基本上都使用高通传递函数。

确定加权函数如下, 乘法摄动的加权函数、干扰加权和输入加权函数的伯德图如图 4 所示。

$$\begin{cases} W_1(s) = \frac{s + 100}{s + 1.0 \times 10^{-4}} \times 0.1 \\ W_2(s) = \frac{s^2 + 100s + 3 \times 10^3}{s^2 + 50s + 1.7 \times 10^4} \times 10 \\ W_3(s) = 500 \\ W_4(s) = \frac{s + 1.5 \times 10^4}{s + 1.1 \times 10^7} \times 2 \end{cases} \quad (13)$$

根据鲁棒控制理论, 系统化的设计出的控制器, 控制器的伯德图如图 5 所示。

$$C_p(s) = 3.879\,4 \times 10^6 \times \frac{(s + 1.308)(s^2 + 59.1s + 6\,424)}{(s + 4\,780)(s + 16\,402)(s + 52.33)(s + 0.000\,1)} \quad (15)$$

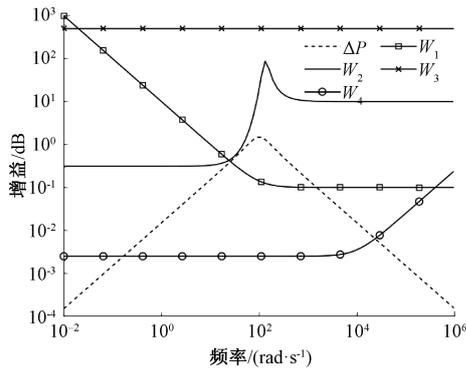


图 4 加权函数

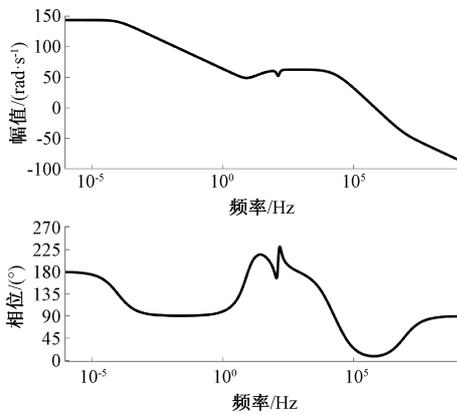


图 5 H_{∞} 控制器伯德图

最终得到的四通道双向控制结构如图 7 所示。

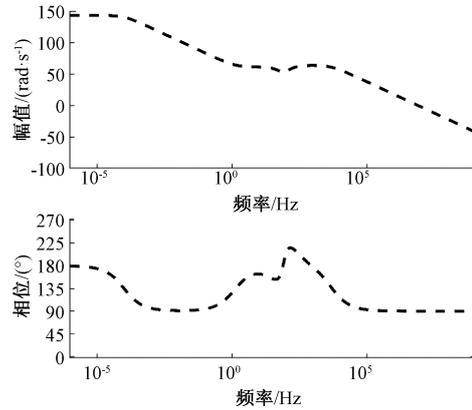


图 6 降阶后的 H_{∞} 控制器伯德图

4 实验

4.1 实验设置

实验采用两个完全相同的微型直流旋转电机作为主/从机器人,实验装置如图 8 所示,包括以 STM32F407 为处理器的实验电路板、电源、仿真器和主/从电机。将研究的干扰抑制算法以 C 语言编程的形式在嵌入式系统中实现。嵌入式处理器读取编码器转速、旋转方向等信息作为主从控制器的输入,利用控制算法计算控制量,PWM 占空比可调从而控制电机驱动电压值,实现主/从电机的旋转

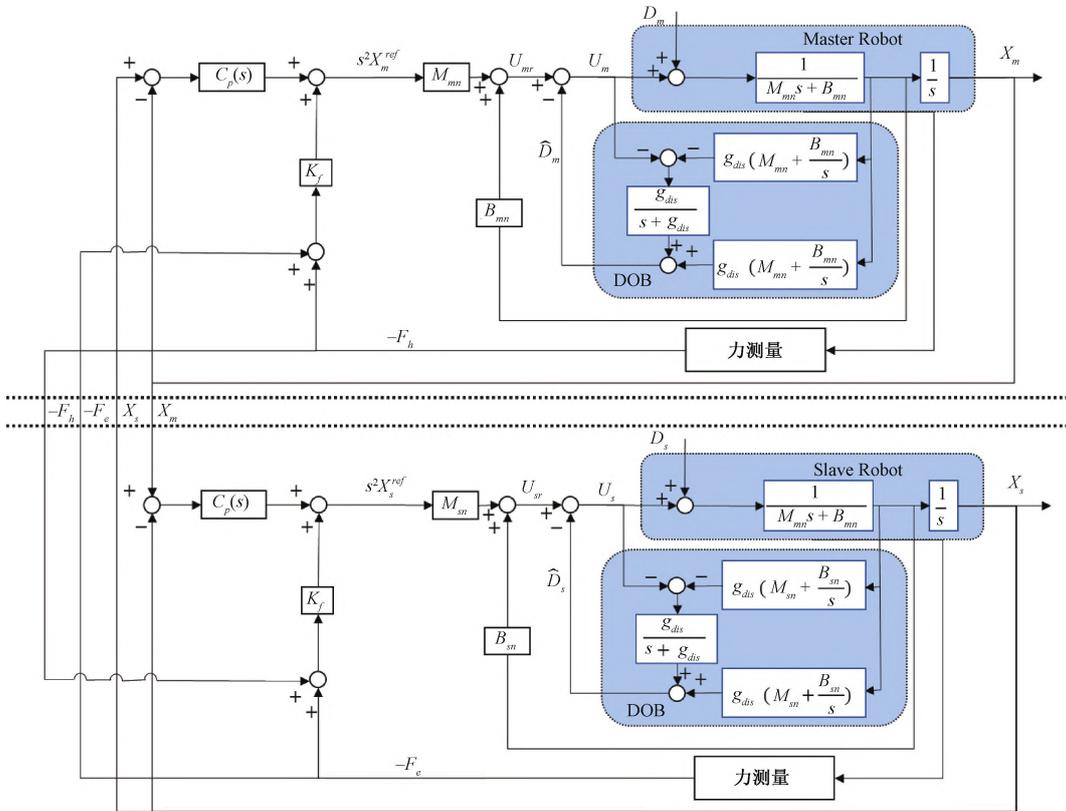


图 7 双向控制四通道控制结构

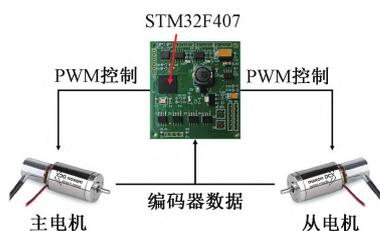


图 8 主/从电机实验装置

角度以及旋转角加速度的相互跟踪。实验的参数设置如表 1 所示。

表 1 实验参数设置

参数名称	符号	参数值
主-从机名义质量	$M_{mn} = M_{sn} = M_n$	0.03 kg
主-从机名义阻尼	$B_{mn} = B_{sn} = B_n$	0.9 kg/s
DOB 截止频率	g_{dis}	100.0 rad/s
力控制器增益	K_f	0.7 N/m

主机按照 $x_h(t) = 10\sin(0.2\pi t)$ 的位置轨迹自由运动,采样周期为 1 ms,从机跟随主机做相应的运动。

4.2 实验结果

对基于干扰观测器,位置控制器为 H_∞ 控制器和位置控制器为 PD 控制器的四通道双向控制系统进行实验,实验结果如图 9 所示。

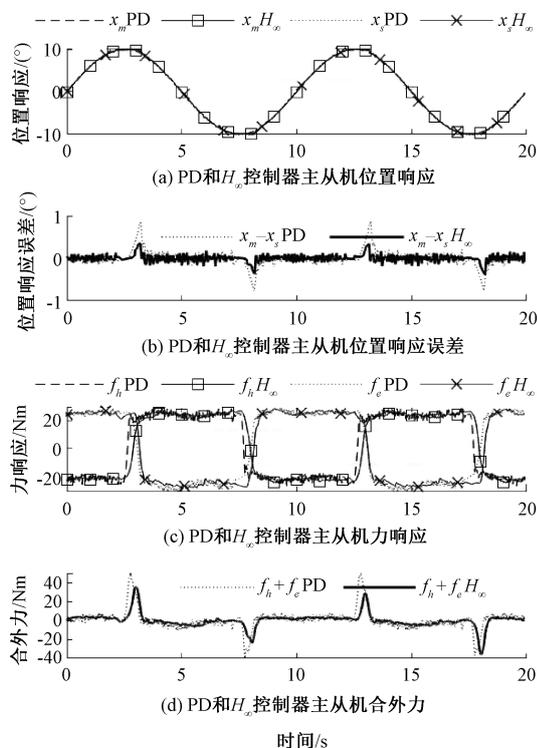


图 9 四通道双向控制结构实验结果

由图 9(a)中的主/从位置响应可知,PD 控制器和 H_∞ 控制器都可以使得主从位置响应保持一致。由图 9(b)位

置响应误差可知, H_∞ 控制器主/从位置误差旋转角度在 $\pm 0.4^\circ$ 之间,PD 控制器主/从位置误差旋转角度在 $\pm 1.0^\circ$ 之间,对比可知基于 H_∞ 控制器的位置误差明显减小。

由图 9(c)中的主/从力响应可知,PD 控制器和 H_∞ 控制器的主机和从机之间的力呈现出作用力和反作用力的形式。且由 9(d)中的合外力可以看出,当主/从机之间加速度很小的时候,合外力基本为 0。对比图 9(d)PD 控制器和 H_∞ 控制器中的合外力可以看出基于 H_∞ 控制器的合外力更小。

可见,基于 DOB 和 H_∞ 控制器的四通道结构,能够实现主/从位置和力的相互传递,且在电机的辨识模型和实际模型有差别的时候, H_∞ 控制器能够保证系统对模型不确定性的鲁棒性。对比 PD 控制器,采用 H_∞ 控制器使得主/从电机之间的位置响应得到了明显地改善,且力传递性能更好,系统的透明性得到了提升。

5 结 论

本文针对四通道遥操作双向控制结构,将双向控制主/从系统转换为两个一般控制系统,简化后系统化的设计出控制器。选取控制系统中合适的加权函数,设计出了满足控制目标的 H_∞ 控制器。实验结果表明, H_∞ 控制器在满足闭环系统内部稳定性的前提下,能够减轻外界干扰对系统输出的影响,并且在模型中不确定的影响下,能够实现主从机器人之间的相互跟踪。因此,系统化设计出的 H_∞ 控制器既能保证系统对模型不确定性的鲁棒性,对外部扰动有抑制作用,同时避免了传统控制器参数需要调节的问题,达到控制器系统化设计的目的。

参考文献

- [1] 王振斌, 李笑, 郭彦泽, 等. 遥操作水下工程机器人触觉可视化系统的研究[J]. 机械设计与制造, 2018(11): 241-244.
- [2] OMISORE O M, HAN S P, REN L X, et al. A teleoperated robotic catheter system with motion and force feedback for vascular surgery[C]. 2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems(ICCAS), IEEE, 2018: 172-177.
- [3] KOZUKI R, OHNISHI K. Bilateral control system with CDOB and band eliminate filter under time delay[C]. Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2015: 4745-4750.
- [4] 罗明, 黄晓鹏. 汽车 FlexRay 车载网络控制系统工作的稳定性和可靠性研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(12): 55-59.
- [5] KOZUKI R, OHNO Y, SUZUKI D, et al. Band eliminate filter design for bilateral control system under time delay[C]. IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, IEEE, 2014: 302-307.

- [6] SUZUKI A, OHNISHI K. Novel four-channel bilateral control design for haptic communication under time delay based on modal space analysis[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(3): 882-890.
- [7] SHIMMYO S, SAITO Y, NOZAKI T, et al. Bandwidth expansion of bilateral teleoperation based on synergy of observer gain and velocity feedback gain[C]. IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2019: 3597-3602.
- [8] 董昱, 魏万鹏. 基于 RBF 神经网络 PID 控制的列车 ATO 系统优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 103-109.
- [9] 真可知, 齐正. 基于改进 PID 控制算法的加热炉炉温控制系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(7): 62-67.
- [10] 胡鸿越, 胡立坤, 刘贻达, 等. 一种柔性下肢外骨骼控制策略研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 184-191.
- [11] 时维国, 唐志瑶. 非线性网络控制系统的双通道时延和丢包鲁棒 H_∞ 控制[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 7-11.
- [12] GORMUS B, YAZICI H. Robust state feedback H-infinity controller design for bilateral teleoperation system having saturated actuators [C]. 2021 7th International Conference on Automation, Robotics and Applications(ICARA), IEEE, 2021: 157-162.
- [13] HAMA R, IMAI J, TAKAHASHI A, et al. Force sensorless bilateral control using a dynamical asymmetric compensator [C]. 2014 International Power Electronics Conference(IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA), IEEE, 2014: 2470-2475.
- [14] BERGELING C, PATES R, RANTZER A. H-infinity optimal control for systems with a bottleneck frequency [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 66(6): 2732-2738.
- [15] YU P, WU M, SHE J H, et al. Robust tracking and disturbance rejection for linear uncertain system with unknown state delay and disturbance [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(3): 1445-1455.
- [16] CHEN X, ZHAO H, ZHEN S, et al. Novel optimal adaptive robust control for fuzzy underactuated mechanical systems: A nash game approach[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 29(9): 2798-2809.
- [17] 蔺香运, 张维海. 浅谈 H_∞ 控制理论的发展与应用[J]. 数学建模及其应用, 2020, 9(2): 1-12.
- [18] LIU X, ZHEN S, ZHAO H, et al. Fuzzy-set theory based optimal robust design for position tracking control of permanent magnet linear motor[J]. IEEE Access, 2019, 7: 153829-153841.

作者简介

温静, 硕士研究生, 主要研究方向为伺服控制。

E-mail: 1220298065@qq.com

田大鹏, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为运动控制理论与技术。

E-mail: d.tian@ciomp.ac.cn