

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.019

# 重载足式机器人单关节驱动系统 $H_\infty$ 控制器的设计\*

王天玉, 叶正茂\*, 佟志忠, 张 辉  
(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对某节能型重载足式机器人单关节电液伺服驱动系统动态跟踪问题,对重载足式机器人节能型单关节电液伺服驱动系统特性、 $H_\infty$  控制等方面进行了研究,建立了系统数学模型,提出了采用扩展  $H_\infty$  混合灵敏度控制,引入了转换环节,将实际对象虚轴极点转换到传递函数或控制器中,解决了因单关节电液伺服驱动系统传递函数分母存在积分环节引起的奇异  $H_\infty$  问题。通过采用扩展  $H_\infty$  混合灵敏度三块加权函数法求解  $H_\infty$  控制器,选择适当的加权函数,基于 Matlab/Robust 工具箱,设计了扩展  $H_\infty$  混合灵敏度控制器,基于 Matlab/Simulink 平台搭建了系统仿真模型,对扩展  $H_\infty$  控制的单关节电液伺服驱动系统动态跟踪特性及其系统稳定性进行了评价。仿真实验结果表明, $H_\infty$  控制系统满足鲁棒性及鲁棒性能要求,控制系统动态响应满足 2 Hz 正弦信号双十指标要求。

**关键词:**关节电液伺服驱动系统;扩展  $H_\infty$  控制;混合灵敏度控制

中图分类号:TH39;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1386-06

## $H_\infty$ controller of hydraulic actuators for burden legged robot joint

WANG Tian-yu, YE Zheng-mao, TONG Zhi-zhong, Zhang Hui

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of dynamic frequency and phase tracking performance for the joints hydraulic actuators system for burden legged robot, the characteristics and  $H_\infty$  control of the system was researched. The math mold of system was built. The extended  $H_\infty$  mixed sensitivity control was presented to solve the singular  $H_\infty$  control problem which caused by the integrator block of system math model. The appropriate weighting functions was selected and the extended  $H_\infty$  controller was designed. The the system dynamic frequency and phase tracking performance were evaluated based on the Matlab/Simulink. The dynamic frequency and phase tracking performance of the  $H_\infty$  controller was examined in the joints hydraulic actuators system for burden legged robot simulation system. The results indicate that the extended  $H_\infty$  controller satisfies the robust performance and the dynamic frequency and phase tracking performance.

**Key words:** joints hydraulic actuators system; extended  $H_\infty$  control; mixed sensitivity control

## 0 引 言

重载足式机器人具有稳定性好、承载能力高、地形

适应性强等优点,但是,重载足式机器人普遍存在着高能耗及低效率缺点,这也成为其进一步应用的限制条件之一。相同条件下,减少机器人的能耗不仅能够使

收稿日期:2016-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575121)

作者简介:王天玉(1989-),男,黑龙江北安人,硕士研究生,主要从事电液伺服控制系统方面的研究. E-mail:wangtianyu\_hit@163.com

通信联系人:叶正茂,男,副教授,硕士生导师. E-mail:yezhm@hit.edu.cn

重载足式机器人行走距离加长,而且可以减小自身尺寸,也能够降低成本。本研究以一款重载足式机器人为背景,需要驱动系统出力约为  $10^5$  N,最大行进速度约为 5 km/h,爬坡应大于  $45^\circ$ 。液压驱动相较于气动和电机驱动,具有功率密度高、无极变速、能承受较大的冲击载荷、系统的刚度高、响应快、精度高等优点。针对重载足式机器人要求驱动系统出力大、结构紧凑等要求,液压驱动成为其驱动系统的首要选择。相对于阀控液压驱动形式,直驱式容积控制电液伺服系统没有节流损失,能效大大提高,因此,针对重载足式液压机器人高能耗及低效率等缺点,采用直驱式液压驱动系统可以达到节能的目的,且直驱式液压驱动系统结构紧凑,便于集成。

本研究所述关节驱动系统采用电动机和双联定量液压泵组合即一种新型直驱式容积控制电液伺服系统。设计时,需要对双联定量齿轮泵排量与非对称液压缸两腔面积的进行匹配。通过匹配,系统的正逆运动特性一致。Cleasby KG 教授和 Plummer AR 教授<sup>[1]</sup>对该泵控电液伺服位置系统输入频率为 0.2 Hz、幅值为 0.010 6 m、加速度为  $1.5 \text{ m/s}^2$  的连续平稳信号,其能耗仅为普通阀控系统的 1/10 左右,节能效果明显。

目前,PID 控制是泵控电液伺服位置控制手段中最为常用也最为成熟的控制算法,易于实现。但当其遇到负载扰动和噪声时,其控制参数和结构会随时间和工况的变化而变化,控制效果较差。针对泵控电液伺服系统存在严重饱和、死区非线性、时变性与时滞性等特点,PID 控制很难达到精确控制。 $H_\infty$  混合灵敏度控制作为一种典型的鲁棒控制方法,设计过程中充分考虑了对象模型的不确定性,能够很好地协调系统瞬态性能、鲁棒性及抗干扰能力。文献[2]针对典型的泵控电液位置伺服控制系统的模型形成的奇异  $H_\infty$  问题采用  $H_\infty$  回路成型法设计  $H_\infty$  控制器,并通过仿真及试验验证,与传统的 PID 控制系统对比, $H_\infty$  控制系统响应速度快,精确性高,抗干扰能力强。文献[3]针对模拟转台位置伺服系统的特点和性能要求,采用混合灵敏度控制方法设计了  $H_\infty$  控制器,仿真结果表明,与经典 PID 控制结果比较, $H_\infty$  灵敏度控制具有良好跟踪特性和对参数摄动的鲁棒性。文献[4]针对一款液压足式机器人单关节液压驱动系统参数的不确定性和时变性,应用定量反馈理论设计了单关节鲁棒控制器。仿真表明,该控制器对斜坡干扰和正弦干扰都具有较强的鲁棒性,实验结果与仿真结果一致。文献[5]针

对一款全方位移动轮式机器人因系统未知的不确定性引起不能正确跟踪期望的轨迹的问题,采用鲁棒自适应控制,仿真结果表明,针对不同幅值的不确定性输入,机器人系统仍能正确跟踪期望轨迹。文献[6]针对非线性摩擦特性对柔性关节机器人控制性能的影响,采用鲁棒控制原理设计鲁棒  $H_\infty$  控制器,时域仿真结果表明,所设计控制器不仅具有鲁棒性,并且具有快速、准确地跟踪轨迹指令的能力以及抑制干扰的作用。文献[7]基于一款三自由度并联机器人,采用  $H_\infty$  混合灵敏度方法设计  $H_\infty$  多变量控制器,实验结果表明,最大跟踪误差为传统 PID 的 80%,负载变化时, $H_\infty$  多变量控制器具有较好的鲁棒性。

针对一款重载足式机器人关节驱动控制系统存在参数时变性和模型不确定性等特点,本研究将扩展的  $H_\infty$  混合灵敏度控制理论引入关节驱动控制系统中,建立关节驱动电液伺服系统的数学模型,设计基于扩展的  $H_\infty$  混合灵敏度的  $H_\infty$  控制器,选取恰当的加权函数,求解出扩展的  $H_\infty$  鲁棒控制器,通过系统对阶跃信号、正弦信号的响应仿真及实验验证控制器的性能。

## 1 关节驱动系统工作原理

这种系统是由英国巴斯大学 Cleasby KG 教授和 Plummer AR 教授率先提出的,系统原理图如图 1 所示。

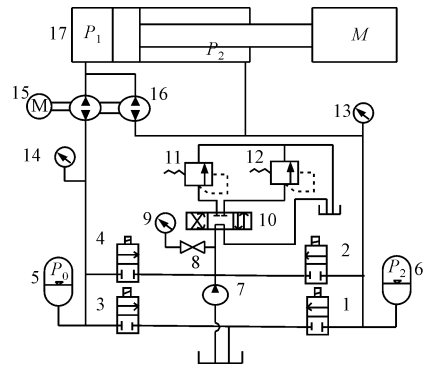


图 1 关节驱动系统原理图

1,2,3,4—电磁截止阀;5—低压蓄能器;6—高压蓄能器;7—补油泵;8—单向阀;9,13,14—压力表;10—电磁换向阀;11,12—溢流阀;15—电动机;16—齿轮泵;17—油缸

系统采用两个双向定量泵并联布置,电动机驱动双联齿轮泵工作。两个齿轮泵同时工作,两个泵的排量相等,液压缸面积比近似为 1/2,蓄能器 6 的容积变化很小,可认为蓄能器 6 的压力和有杆腔的压力保持不变。在运动中,泵两侧压差很小,电机扭矩保持很

小,同时起平衡作用的液压蓄能器随负载位置变化贮存或放出能量,起到能量回收利用的作用,这种带液压蓄能器的设计比普通的直驱系统还要节能。两个蓄能器的压力的设定可通过电磁换向阀 10、溢流阀 11、12 实现。将电磁换向阀 10 调节至中位,通过调节电磁截止阀 1、2、3、4 的开关实现高低压蓄能器的充放液。

## 2 系统数学模型的建立

### 2.1 泵控缸系统数学模型的建立

考虑到可压缩流体的连续性以及液压缸的内外泄漏,液压缸无杆腔的流量连续性方程为:

$$\omega(D_1 + D_2) - C_{im}(p_1 - p_2) - C_{ip}(p_1 - p_2) - C_{ip}(p_1 - p_0) - C_{em}p_1 - 2C_{ep}p_1 = A_1 \frac{dy}{dt} + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} \quad (1)$$

式中: $D_1, D_2$ —双联泵排量,有  $D_1 = D_2, m^3/s$ ;  $\omega$ —双联泵转速,rad/s;  $V_1$ —无杆腔体积,  $m^3$ ;  $y$ —液压缸活塞位移,  $m$ ;  $C_{im}$ —非对称缸内泄漏系数,  $m^5/(N \cdot s)$ ;  $C_{em}$ —非对称缸外泄漏系数,  $m^5/(N \cdot s)$ ;  $C_{ip}$ —齿轮泵内泄漏系数,  $m^5/(N \cdot s)$ ;  $C_{ep}$ —齿轮泵外泄漏系数,  $m^5/(N \cdot s)$ ;  $A_1$ —液压缸无杆腔面积,  $m^2$ ;  $p_1$ —液压缸无杆腔压力,  $pa$ ;  $p_2$ —液压缸有杆腔压力,  $pa$ ;  $p_0$ —低压蓄能器设定压力,  $pa$ ;  $\beta_e$ —体积弹性模量,  $N/m^2$ 。

液压缸力平衡方程:

$$A_1 p_1 - A_2 p_2 = M \frac{d^2 y}{dt^2} + B_c \frac{dy}{dt} \quad (2)$$

式中: $M$ —折算到负载的总质量,  $N$ ;  $B_c$ —粘性摩擦系数,  $N \cdot s/m$ 。

在小范围内线性化,并进行拉式变换可得:

$$Y(s) = \frac{\omega(s)(D_1 + D_2)}{A_1 s \left( \frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h s}{\omega_h} + 1 \right)} \quad (3)$$

式中: $C$ —综合泄漏系数,  $C = C_{im} + C_{em} + 2C_{ip} + 2C_{ep}$ ;  $\omega_h$ —液压固有频率,  $\omega_h = \sqrt{A_1^2 \beta_e / M V_0}$ , rad/s;

$\xi_h$ —液压阻尼比,  $\xi_h = \frac{C}{2A_1 \sqrt{M \beta_e}} + \frac{B_c}{2A_1 \sqrt{M \beta_e}}$ , 无因次。

### 2.2 交流调速系统数学模型的建立

由于交流伺服电机的频宽远高于执行机构频宽,

模型可简化为一个惯性环节<sup>[8]</sup>:

$$\frac{N(s)}{U(s)} = \frac{K}{T_e s + 1} \quad (4)$$

式中: $N$ —交流调速系统输出转速,rad/s;  $U$ —交流调速系统输入电压,  $V$ ;  $K$ —交流调速系统速度增益, rad/(s · V);  $T_e$ —交流调速系统的时间常数,  $s$ 。

根据系统实际参数,可以得出关节驱动伺服位置控制系统等效负载 471.9 kg 时系统开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.053}{s(0.0037s + 1) \left( \frac{s^2}{237.1^2} + \frac{2 \times 0.163s}{237.1} + 1 \right)} \quad (5)$$

系统等效负载为 618.8 kg 时,其开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.053}{s(0.0037s + 1) \left( \frac{s^2}{207.1^2} + \frac{2 \times 0.185s}{207.1} + 1 \right)} \quad (6)$$

## 3 H<sub>∞</sub> 混合灵敏度控制器设计

### 3.1 扩展 H<sub>∞</sub> 混合灵敏度问题

扩展 H<sub>∞</sub> 问题示意图如图 2 所示。

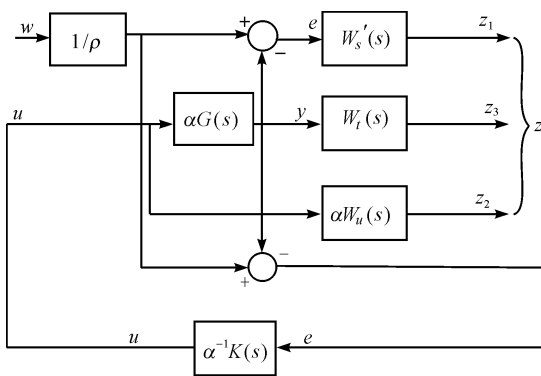


图 2 扩展 H<sub>∞</sub> 混合灵敏度三块加权函数法框图

扩展 H<sub>∞</sub> 法处理实际对象存在虚轴极点情况时,通过回路变换,引入转换环节,将实际对象虚轴极点转换到传递函数或控制器中,并有很好的效果<sup>[9]</sup>。引入  $\alpha$  项,其中  $\alpha$  项与实际控制对象引起奇异问题的虚轴极点零极点对消,将奇异的 H<sub>∞</sub> 问题转化成标准 H<sub>∞</sub> 问题,其中,  $\tilde{G} = \alpha G, \tilde{K} = \alpha^{-1} K, \tilde{W}_u = \alpha W_u, \rho$  为调节参数。

广义系统输入为  $w, u$ , 广义系统输出为  $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T, e$ , 则有:

$$\begin{bmatrix} z \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W'_s & W'_s \tilde{G} \\ 0 & \tilde{W}_u \\ 0 & W'_l \tilde{G} \\ I & -\tilde{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (7)$$

合理选择权函数并调节  $\rho$  使得控制器及加权函数满足下式,则  $H_\infty$  控制器满足系统鲁棒性能要求:

$$\left\| \begin{bmatrix} W'_s \tilde{S} \\ \tilde{W}_u \tilde{R} \\ W'_l \tilde{T} \end{bmatrix} \right\|_\infty \leq 0.707 \quad (8)$$

### 3.2 加权函数 $W_s(s)$ 的选取

考虑到实际对象传递函数模型有一个积分环节,存在虚轴极点,根据扩展  $H_\infty$  理论可知<sup>[10]</sup>,  $W_s(s)$  应该具有积分环节,同时  $W_s(s)$  阶次尽量低,  $W_s(s)$  在中低频段内尽量大,抑制系统干扰,使系统有良好的信号跟踪能力,所以  $W_s(s)$  为一低通环节,其通频带应该略小于系统要求带宽同时,保证  $W_l(s)$  和  $W_s(s)$  频带不重叠,系统性能要求对输入为 2 Hz 幅值适当的正弦信号达到双十指标,由于  $W_s(s)$  的选择是否恰当决定着系统的跟踪能力,  $W_s(s)$  的选择应满足系统性能要求。设计指标可表述为:

(1) 在要求频带内即  $0 < \omega < \omega_a = 2$  Hz,闭环系统幅值误差  $\sigma$  满足  $|\sigma| \leq \sigma_1$ ;

(2) 在要求频带内即  $0 < \omega < \omega_a = 2$  Hz,闭环系统相位滞后满足  $0 < \varphi < \varphi_0$ 。

设系统位置输入为输入正弦信号,

$$y = A \sin(\omega t) \quad (9)$$

式中: $A$ —输入正弦信号幅值, $m$ ; $\omega$ —输入正弦信号角频率,rad/s。

实际系统位置稳态输出

$$y_1 = A_1 \sin(\omega t - \varphi) \quad (10)$$

式中: $A_1$ —输出正弦信号幅值, $m$ ; $\varphi$ —输出正弦信号的相位滞后角度,deg; $\sigma = A_1/A - 1$ 。

补灵敏度函数有:

$$T(j\omega) = (1 + \sigma) e^{-j\varphi} \quad (11)$$

$$|S(j\omega)| = \sqrt{(2 - 2\cos\varphi)\sigma + \sigma^2}, 0 < \omega < \omega_a \quad (12)$$

可知上式在  $\varphi = \varphi_0 = 10^\circ, \sigma = \sigma_1 = 0.1$  时取得极大值,有:  $|W_s(j\omega)| \geq 1/\sqrt{(2 - 2\cos\varphi_0)\sigma_1 + \sigma_1^2}, 0 < \omega < \omega_a$ 。

代入数值,  $\omega = 4\pi, \varphi_0 = 10^\circ, \sigma_1 = 0.1$ , 有:  $|W_s(j4\pi)| \geq 3.39$ 。

由于  $W_s(s)$  含有积分环节,进行  $H_\infty$  控制器求解

时,不满足标准  $H_\infty$  控制条件,需对积分环节进行处理,采用非零极点逼近法处理权函数积分环节,经过大量仿真,选择的  $W_s(s)$  为:

$$W_s(s) = 0.7 \frac{0.1s + 100}{s + 1 \times 10^{-6}} \quad (13)$$

### 3.3 加权函数 $W_T(s)$ 的选取

$W_l(s)$  在中低频段内尽量小,在系统高频段,系统高频模型不确定性对系统影响较大,高频段  $W_T(s)$  幅值较大,  $W_l(s)$  为高通环节,其通频带应该略大于系统要求带宽  $\omega_c$ ,同时保证  $W_l(s)$  和  $W_s(s)$  频带不重叠。

本研究采用乘性不确定性描述系统模型不确定性,即把实际对象  $G_a(j\omega)$  与标称模型  $G_0(j\omega)$  的相对差描述为系统的不确定性,高频模型摄动表达式为式(13)所示,在机器人腿部摆动时,对于不同的摆动状态,驱动系统对惯量变化较为敏感,惯量增大时,系统稳定性变差,而粘性摩擦系数在机器人腿部摆动时,对于不同的摆动状态,几乎不变化,当环境温度变化引起粘性摩擦系数大范围变化时,可影响液压控制系统阻尼比,进而影响稳定性,笔者针对因粘性摩擦系数变化引起的高频模型不确定性,进行了仿真分析,仿真表明,粘性摩擦系数大范围变化时,对系统跟踪特性及稳定性影响效果较小,限于篇幅限制,因此,本研究只考虑因负载惯量变化引起的高频模型不确定性。控制器设计要求是等效负载在 324.9 kg ~ 618.8 kg 变化范围内,系统满足鲁棒稳定性及鲁棒性能要求,在摄动范围内,选择一个标称模型  $G_0(j\omega)$ ,负载增大时,关节驱动系统液压固有频率高,阻尼比变小,相同条件下,系统稳定性变差。

因此,本研究选取等效负载为 471.9 kg 时,系统模型为标称模型,边界函数及实际对象  $G_a(j\omega)$  选取为等效负载 618.8 kg 时关节驱动系统的数学模型。选择补灵敏度函数的权函数  $W_l(s)$ ,使其在高频段覆盖住  $G_m(j\omega)$ ,即满足下式:

$$\left| \frac{G_a(j\omega) - G_0(j\omega)}{G_0(j\omega)} \right| < W_l(j\omega) \quad (14)$$

仿真并调整参数,确定系统补灵敏度的权函数为:

$$W_l(s) = \frac{4.5s}{s + 1000} \quad (15)$$

模型摄动加权函数  $W_l(s)$ 、跟踪及控制性能加权函数  $W_s(s)$  及摄动函数  $G_m(s)$  bode 图如图 3 所示。

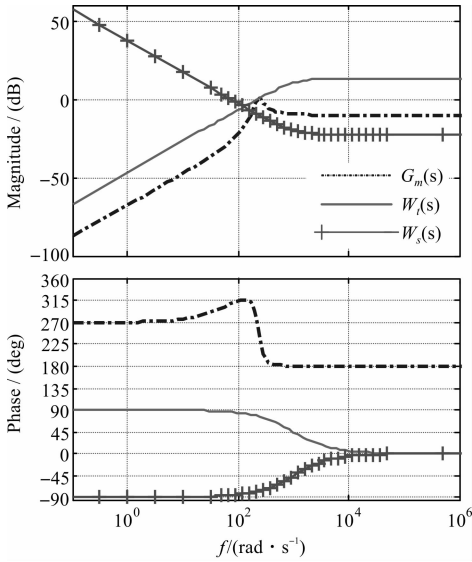


图 3 加权函数及扰动函数 bode 图

由图 3 可知,加权函数  $W_l(s)$  与  $W_s(s)$  无公共频带,且  $W_l(s)$  能够在全频域范围内覆盖扰动界函数,满足式 (14) 对模型扰动加权函数  $W_l(s)$  及扰动界函数  $G_m(s)$  要求。

### 3.4 加权函数 $W_u(s)$ 的选取

加权函数  $W_u(s)$  是对系统控制量的加权,避免引起控制系统饱和现象,还可以避免奇异  $H_\infty$  问题,选取  $W_u(s)$  为很小常数,即  $W_u(s) = 0.000\ 01$ 。中间环节为:

$$\alpha = \frac{s}{s + 1} \quad (16)$$

利用 Matlab 软件包中 Robust 设计工具箱,按照求出的加权函数求解扩展的  $H_\infty$  混合灵敏度问题,求出控制器为扩展后的  $H_\infty$  控制器,还应乘以式 (14),得出:

$$K(s) = \frac{3.117\ 9 \times 10^8 (s + 270.3)(s + 100\ 0)(s^2 + 77.31s + 562\ 30)}{(s + 727.3)(s^2 + 186.9s + 885\ 600)(s^2 + 643.2s + 577\ 500)} \quad (17)$$

设计传统 PID 控制器,控制器为:

$$K_1(s) = 1\ 600 + \frac{200}{s} + 0.01\ s \quad (18)$$

## 4 仿真实验及结果分析

$H_\infty$  鲁棒控制系统开环增益为 67.9, PID 控制系统开环增益为 10.56。PID 控制器及  $H_\infty$  鲁棒控制器幅频特性曲线如图 4 所示。

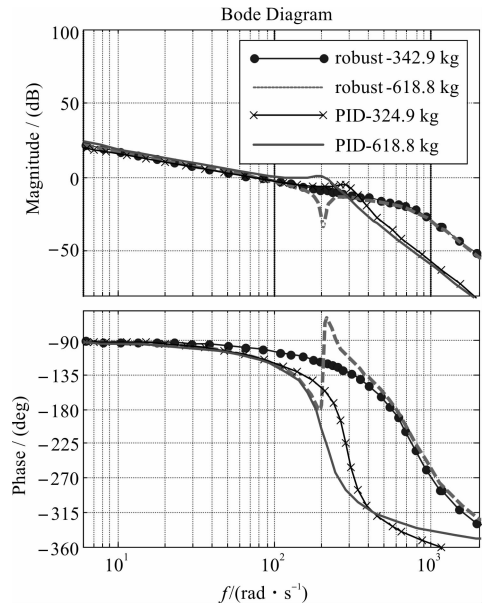


图 4 PID 控制器及  $H_\infty$  控制器幅频特性曲线

负载变化时, PID 控制系统稳定性变差,当负载为 618.8 kg 时 PID 控制系统不稳定,  $H_\infty$  鲁棒控制稳定性变化较小,  $H_\infty$  鲁棒控制稳定裕度大。

等效负载变化时,分别采用  $H_\infty$  控制器、PID 控制器控制,输入幅值为 0.02 m 阶跃信号,  $H_\infty$  控制系统响应曲线如图 5 所示。

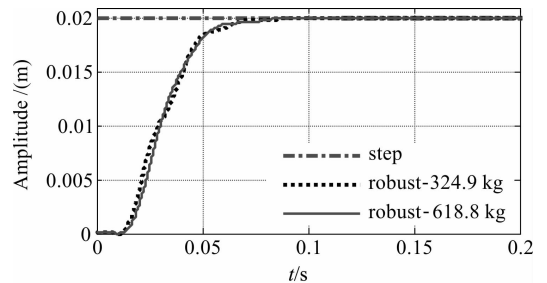


图 5 负载变化时,  $H_\infty$  控制阶跃响应

仿真结果表明,当负载发生变化时,  $H_\infty$  控制阶跃响应几乎不发生变化,而 PID 控制趋于不稳定状态,体现了  $H_\infty$  鲁棒控制对参数变化不敏感的特点。

PID 控制系统响应曲线如图 6 所示。

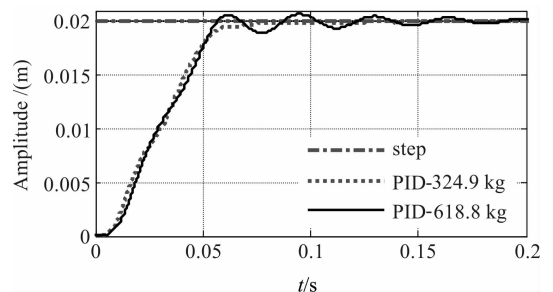


图 6 负载变化时, PID 控制阶跃响应

系统对频率 2 Hz、幅值 0.02 m 的正弦信号响应,如图 7 所示。

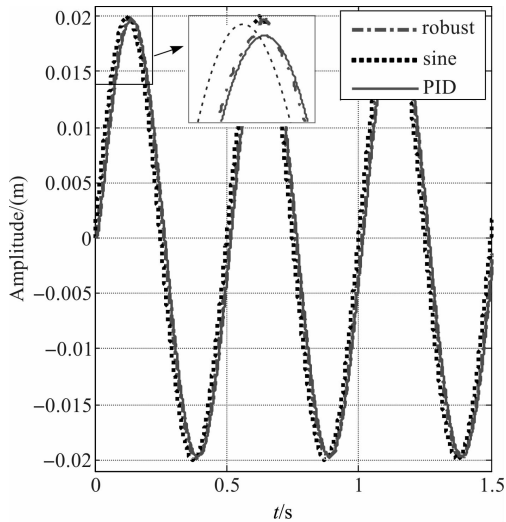


图 7  $H_\infty$  控制器及 PID 控制跟踪正弦信号对比曲线

仿真结果表明, PID 控制器及  $H_\infty$  控制器对频率为 2 Hz、幅值为 0.02 m 的正弦信号动态响应满足双十指标要求,但 PID 控制器动态响应速度比  $H_\infty$  控制慢,相位滞后大于  $H_\infty$  控制。

## 5 结束语

本研究介绍一款节能型重载足式机器人单关节电液伺服驱动系统,采用扩展的  $H_\infty$  混合灵敏度控制,设计扩展  $H_\infty$  控制器。仿真结果表明,传统 PID 控制及  $H_\infty$  鲁棒控制的动态性能达到所要求的指标即系统对频率为 2 Hz 正弦信号双十指标,两种控制器在小惯量负载时满足动态指标,随着系统负载惯量增大,  $H_\infty$  控制系统控制性能变化较小,能够满足系统鲁棒性及鲁棒性能要求,而 PID 控制趋于不稳定状态, PID 满足系统大惯量负载稳定性要求时,不能满足小惯量负载时快速性。

## 参考文献 (References):

- [1] CLEASBY KG, PLUMMER AR. A novel high efficiency electro-hydrostatic flight simulator motion system [M]. UK: Fluid Power and Motion control, 2008.
- [2] ZHAI L, VIRVALO T, MATTILA J, et al. Design of  $H_\infty$  Loop-Shaping Controller for a Hydraulic Servo System [C]// Aachen: International Fluid Power Conference, 2010.
- [3] 吴艳敏, 崔光照, 姚莉娜, 等. 模拟转台位置伺服系统的  $H_\infty$  混合灵敏度控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(1): 121-124.
- [4] 王 岩, 秦玉福, 郭生荣. 基于定量反馈理论的液压机器人单关节鲁棒控制器 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(13): 1724 - 1727.
- [5] ALAKSHENDRA V, CHIDDARWAR S S. Design of robust adaptive controller for a four wheel omnidirectional mobile robot [C]// International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics. Kochi: IEEE, 2015.
- [6] CHEN Han, GE Lian zheng, LI Rui feng. Design of robust controller for robot flexible joint with friction characteristic [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2005, 45(6): 1906-1912.
- [7] RACHEDI M, HEMICI B, BOURI M. Design of an  $H_\infty$  controller for the Delta robot: experimental results [J]. **Advanced Robotics**, 2015, 29(18): 1165-1181.
- [8] WHEELER P W, CLARE J C, APAP M, et al. Power supply loss ride-through and device voltage drop compensation in a matrix converter permanent magnet motor drive for an aircraft actuator [C]// Aachen: Poulter Electronics Specialists Conference (PESC), 2004.
- [9] 王广雄, 刘淑焕.  $H_\infty$  设计中奇异问题的处理 [J]. 电机与控制学报, 2000, 4(3): 148-150.
- [10] QI R D, TSUJI T. On the mixed sensitivity  $H_\infty$  control problem with poles on the imaginary axis [J]. **Journal of the Franklin Institute**, 1996, 333(1): 85-100.

[编辑: 周昱晨]

### 本文引用格式:

王天玉, 叶正茂, 佟志忠, 等. 重载足式机器人单关节驱动系统  $H_\infty$  控制器的设计 [J]. 机电工程, 2016, 33(11): 1386 - 1391.

WANG Tian-yu, YE Zheng-mao, TONG Zhi-zhong, et al.  $H_\infty$  controller of hydraulic actuators for burden legged robot joint [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(11): 1386 - 1391.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>