

基于定量反馈理论的液压机驱动系统复合鲁棒控制

范彬^{1,2}, 潘晴¹

(1. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙410083; 2. 湖南城市学院机电工程学院, 湖南益阳413002)

摘要:针对液压机驱动系统参数摄动和不确定性的特点,建立了系统数学模型,提出了动梁速度外环控制和压力内环控制的分级复合鲁棒控制策略。外环级应用定量反馈理论,设计了鲁棒性较强的速度跟踪控制器和前置滤波器。内环级设计了基于径向基函数的神经网络扰动观测补偿器,运用 Lyapunov 稳定性定理证明了提出的干扰观测器对扰动抑制的有效性,可在不确定因素存在的情况下实现期望的系统压力跟踪控制。仿真结果表明:该控制方案对系统不确定性的抑制作用明显,且能提高液压机驱动系统的跟踪性能,具有较好的鲁棒稳定性,可有效实现速度切换瞬态过程的平顺性。

关键词:鲁棒控制;不确定系统;干扰抑制;定量反馈理论;液压机;速度控制;神经网络

中图分类号:TP271

文献标志码:A

Hybrid Robust Control for Drive System of Hydraulic Press Machine Based on QFT

FAN Bin^{1,2}, PAN Qing¹

(1. College of Mechanical and Electrical Eng., Central South University, Changsha 410083, China;

2. College of Mechanical and Electrical Eng., Hunan City Univ., Yiyang 413002, China)

Abstract: In view of the characteristics of parameter perturbation and uncertainty for drive system of hydraulic press, the mathematical model of drive system was established and a hybrid multi-level robust control scheme that employed inner-loop pressure tracking and outer-loop velocity control was proposed. The outer-loop velocity output tracking controller and prefilter were designed by using the Quantitative Feedback Theory. In the inner-loop level, a nonlinear disturbance observer based upon radial basic function neural network was developed to track desired pressure with system uncertainties. Also, the ability of disturbance rejection for the disturbance observer was proved based on Lyapunov stability theorem. Simulation results show that the presented control strategy can improve the dynamic performance of the driven system and restrain the system uncertainty evidently. Furthermore, the proposed approach is able to realize the smoothness with strong robust stability during the velocity switching transient period effectively.

Key words: robust control; uncertain systems; disturbance rejection; quantitative feedback theory; hydraulic press; velocity control; neural network

液压机广泛用于国防工业、能源装备、航空航天、冶金工业等领域,主要用于生产铝合金、钛合金整体锻件。锻造新工艺的发展对液动机梁驱动控制精度、响应速度以及鲁棒性等提出了更加苛刻的要求。然而由于油液可压缩性、非线性摩擦、大范围负载扰动、本体大惯量滞后等诸多因素的影响,参数摄动和不确定性给液压机驱动系统速度切换瞬态过

程控制增加了难度^[1-2]。为此,亟需开展液压机驱动系统鲁棒性和高品质跟踪性能的研究。

国内外学者针对液压系统中存在的上述关键问题进行了多种控制策略的研究。文献[3]采用级联系统分层控制策略研究了液压机负载扰动抑制问题。文献[4]利用 H_∞ 鲁棒控制方法研究了液压系统内部参数摄动情况下跟踪性能控制问题;文献[5]

收稿日期:2015-11-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205420);中南大学自由探索计划资助项目(2011QNZT055);湖南教育厅科学研究项目(14C0208)

作者简介:范彬(1979—),男,讲师,博士生。研究方向:复杂机电液动态系统研究。E-mail:8563524@qq.com

网络出版时间:2016-09-13 15:22:31 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160913.1522.004.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

设计了鲁棒自适应控制方法对六自由度机器人多缸协同驱动跟踪控制策略进行了研究。此外,积分反步自适应控制器^[6]、自适应滑模控制器^[7]、预测控制器^[2,8]等也被用于补偿电液伺服系统的参数不确定的研究。

然而,上述控制方法通常适用于慢时变系统,设计的控制器因过于复杂而不能直接应用^[9-10],往往需要降阶处理,且在实际复杂工况(如外部大范围扰动)下系统瞬态响应性能欠佳^[11-12]。因此,研究适合此类参数大范围摄动下不确定系统的控制策略尤为必要。

定量反馈理论(quantitative feedback theory, QFT)是美国加州大学 Horowitz 教授提出的一种针对系统不确定性的鲁棒控制方法,在工程界得到了广泛的应用。而在系统不确定性逼近方面,神经网络由于其强大的学习和逼近能力,在智能控制领域受到了广泛的关注。谢晓竹等^[13]针对一种不确定性系统提出了将定量反馈与 BP 神经网络融合控制方法,利用 QFT 设计方法克服系统的不确定性,采用神经网络应对被控对象的非线性,结果表明该控制方法不仅满足鲁棒性较好,而且能够满足动态性能要求。Xiang 等^[14]针对一种气动缸位置系统提出了一种 QFT 内外双闭环的级联控制方法,设计外环 QFT 控制器使得位移跟踪误差趋于零,内环考虑摩擦补偿误差、线性化误差等因素,设计相应的 QFT 控制器,实验表明利用该控制方案能够在保证系统稳定的同时,提高系统的控制性能。

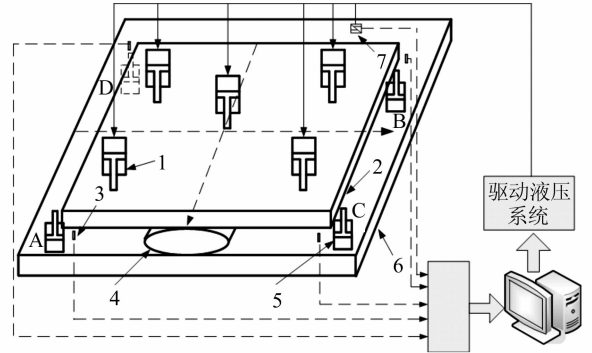
针对液压机液压驱动系统参数摄动、负载大范围扰动的特点,采用定量反馈理论和基于径向基函数的神经网络(radial basic function neural network, RBFNN)动态干扰补偿器相结合的复合鲁棒控制方法对动梁速度切换瞬态过程的平顺性进行了研究,并将控制效果与常规 PID 控制进行了比较分析。该控制方案可为实现液压机高品质精良驱动性能控制开辟一条新思路。

1 系统建模与分析

1.1 液压机驱动系统描述

液压机驱动系统如图 1 所示,是一种典型的电液伺服系统,主要由主工作缸(以下简称主缸)、同步缸、活动横梁、电液伺服阀、伺服放大器、传感器、工控机等组成。五支并联主工作缸固定于上横梁上,同步缸固定于下横梁上。活动横梁是液压机施力部件,位于上横梁与下横梁之间,动梁随主缸柱塞

上下运动,从而压制工件。活动横梁位移由安装于动梁四角的位移传感器测得,经 A/D 模块反馈至控制器。控制器产生的电压信号输入伺服放大器从而驱动电液伺服阀工作。主缸由电液伺服阀驱动,主缸柱塞与活动横梁通过球铰相连,同步缸活塞与活动横梁铰接。



1. 主工作缸;2. 活动横梁;3. 位移传感器;4. 锻件;
5. 同步缸;6. 基座;7. 压力传感器。

图 1 液压机驱动系统

Fig. 1 Drive system of hydraulic press machine

1.2 液压机驱动系统数学模型

考虑图 1 所示的驱动系统,动梁的水平度由同步系统保证,不考虑动梁倾覆力矩的影响。根据牛顿第二定律,主缸柱塞及动梁运动微分方程:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg + p_1 A_1 - F_r - F_L - \sum_{i=1}^4 A_2 p_{2i} - B \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

式中, m 为活动横梁及柱塞的质量, x 为活动横梁及柱塞位移, g 为重力加速度, p_1 为主缸油液压力, p_{2i} 为回程缸油液压力, A_1 为主缸柱塞有效作用总面积, A_2 为单个回程缸柱塞有效作用面积, B 为油液粘性阻尼系数, F_r 为摩擦力, F_L 为变形抗力。

锻件分阶段压制,塑性变形过程的锻压力模型采用刚塑性模型,在工程计算中变形抗力模型表示如下:

$$F_L = Kx + F_0 \quad (2)$$

式中, K 为工件变形的等效弹性刚度, F_0 为锻件初始变形抗力。

驱动缸流量连续性方程:

$$q_L = A_1 \frac{dx}{dt} + c_1 p_1 + \frac{V_0 + A_1 x}{\beta_e} \cdot \frac{dp_1}{dt}$$

式中, c_1 为主缸泄露系数, β_e 为油液体积弹性模量, V_0 为柱塞缸进油腔及进油管路初始容积。

令 $V = V_0 + A_1 x$, 则上式可以写成:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\beta_e}{V} q_L - \frac{\beta_e}{V} \frac{dx}{dt} - \frac{\beta_e}{V} c_1 p_1 \quad (3)$$

电液伺服阀采用四通伺服方向阀,因此得到伺服阀压力流量方程^[3-4]如下:

$$\begin{cases} q_L = C_d W x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - \frac{x_v}{|x_v|} p_1)}, \\ x_v = k_v k_a u \end{cases} \quad (4)$$

式中, C_d 为阀的流量系数, W 为阀口面积梯度, x_v 为伺服阀主阀芯位移, ρ 为油液密度, p_s 为供油压力, k_v 为放大器增益, k_a 为伺服阀流量增益, $u(t)$ 为输入至伺服放大器的电压信号。

实际工况中系统参数油液弹性模量 β_e 、液压缸粘性阻尼系数 B 、负载刚度 K 会发生改变,而这些参数会对系统动态特性产生显著影响。

2 控制策略分析

根据上述数学模型表达式(1)和式(3),将上述两式分别变形整理可得到式(5),也即耦合驱动系统分解为以下 2 个级联系统:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = p_1 A_1 - R, \\ \dot{p}_1 = \frac{\beta_e}{V} q_L - \frac{\beta_e A_1}{V} \dot{x} - \frac{\beta_e c_t}{V} p_1 + d \end{cases} \quad (5)$$

式中: R 为考虑摩擦和负载扰动的系统总干扰, $R = F_r + F_0 + \sum_{i=1}^4 A_2 p_{2i} - mg$, 考虑到系统的未建模动态以及系统不确定性; d 表示扰动; V 为液压缸进油腔油液体积, $V = A_1 x$, 考虑系统模型的耦合特性,由级联系统的控制思想^[3,10],设计两级分层控制。首先对式(5)子系统应用定量反馈理论分别进行鲁棒稳定性、干扰抑制和跟踪性能设计,所得到的的状态变量作为式(5)子系统的跟踪信号,将系统互联视为孤立子系统所受到的扰动,对第二级子系统设计基于神经网络非线性扰动预估的控制器,最后通过系统互联形成整个大系统的输出。所采用的控制结构如图 2 所示。 $F(s)$ 为前置滤波器, $C_1(s)$ 和 $C_2(s)$ 为控制器, $r(t)$ 为参考信号, $v(t)$ 为动梁速度。

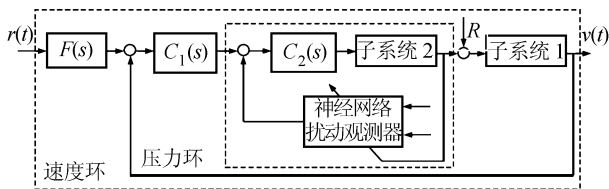


图 2 QFT 复合鲁棒控制结构

Fig. 2 Hybrid robust control structure based on QFT

3 QFT 鲁棒控制设计

定量反馈理论考虑系统参数扰动和鲁棒性,用

定量的方式将系统参数不确定性和系统性能指标在 Nichols 图上表征为鲁棒稳定边界、跟踪边界和干扰抑制边界,以对基准对象进行分析和综合。

3.1 不确定对象模板建立

在不同的系统参数下,被控对象的频率特性也不相同。根据实际工况确定系统参数如 β_e 、 B 、 K 等的变化范围,如此即确定了不确定性对象模板。根据伺服系统工作频率范围,选择一组频率点 $\omega = \{0.1, 1, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1\ 000, 1\ 200\}$ rad/s, 在每个频率点处计算形成如图 3(a) 所示对象模板。同时选取极端情况下的被控对象作为标称模型^[15]。

3.2 设计要求及鲁棒边界

1) 鲁棒稳定性指标

对于大惯量的液压驱动控制系统,在速度切换瞬间必须抑制超调引起的系统振荡。为保证 5.4 dB 的最小幅值裕度和 50° 的最小相位裕度,确定闭环系统稳定裕度指标如下:

$$\left| \frac{C_1(s)G(s)}{1 + C_1(s)G(s)} \right| \leq 1.2, \omega \in [0, \infty], \forall G(s) \in \Omega \quad (6)$$

2) 抗干扰指标

液压机驱动系统外部干扰主要是摩擦及负载,且变化范围大,因此对输入干扰加以抑制。干扰抑制要求如下:

$$\left| \frac{V(s)}{R(s)} \right| < 0.02, \omega \in [0, 200] \quad (7)$$

3) 跟踪性能指标

为表征系统不确定性引起的闭环频响扰动范围,跟踪特性为:

$$T_1(s) < \left| F(s) \frac{C_1(s)G(s)}{1 + C_1(s)G(s)} \right| < T_u(s), \omega \in [0, \infty] \quad (8)$$

跟踪指标上、下界确定如下

$$T_u(s) = \frac{5.5(s + 30)}{s^2 + 51s + 165} \quad (9)$$

$$T_1(s) = \frac{62.7}{s^3 + 43s^2 + 125s + 62.7} \quad (10)$$

根据上述设计要求,分别计算鲁棒稳定边界、抗干扰边界和跟踪边界,三者的交集形成了图 3(b) 所示的鲁棒混合边界。

3.3 控制器设计

控制器 $C_1(s)$ 的设计实际上是对标称模型开环频率响应进行校正和回路整形的过程。通过对标称

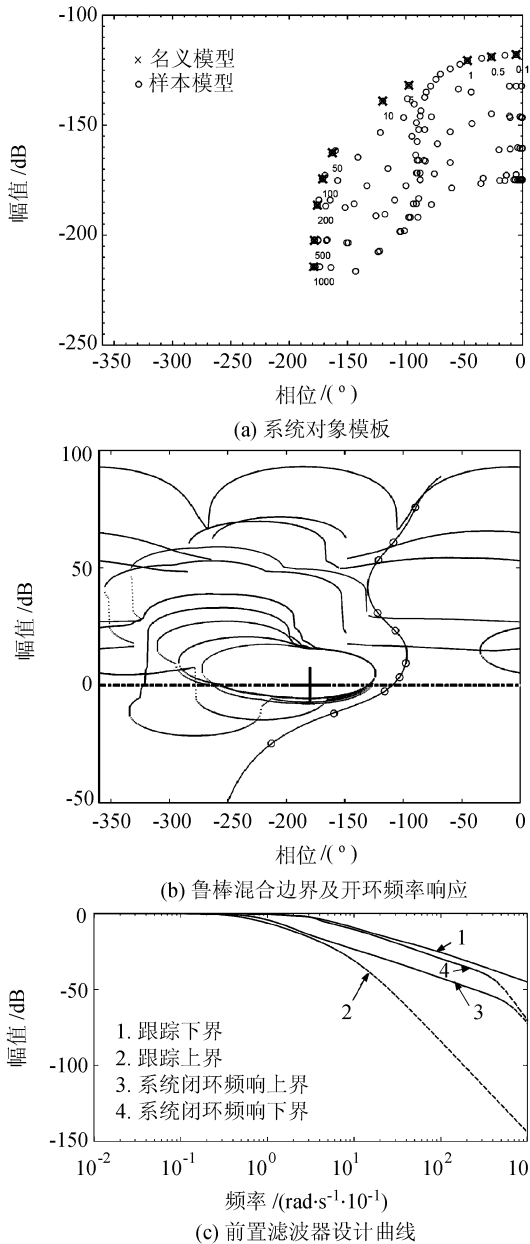


图3 QFT 控制器设计曲线

Fig.3 QFT controller design curves

模型添加增益、零极点,使系统的低频开环 Nichols 曲线位于响应频率点约束边界之上,并尽可能靠近边界;而高频部分幅相曲线位于鲁棒稳定边界之外。重复上述回路整形过程,得到图 3(b) 所示的整形后名义模型开环幅相曲线,其控制器形式为:

$$C_1(s) = \frac{3.326 \times 10^{12}(s + 5.93)(s + 10.22)}{(s + 0.008\ 562)(s^2 + 907.83s + 420\ 487.4)} \quad (11)$$

前置滤波器 $F(s)$ 的设计是使闭环频率响应曲线限定在期望的跟踪边界之内,以满足跟踪性能要求。如图 3(c) 所示的 Bode 图,可见系统在参数扰动情况下闭环频率响应边界位于跟踪性能边界之内,

因此设计的前置滤波器形式为:

$$F(s) = \frac{3.24(s^2 + 4.55s + 8.07)}{(s + 1/93)(s^2 + 7.22s + 13.58)} \quad (12)$$

从上述设计过程可以发现, QFT 鲁棒控制综合考虑被控对象的不确定性,以系统稳定鲁棒性和性能鲁棒性为指标,而使得系统具有期望的鲁棒特性。

4 神经网络动态干扰补偿器设计

考虑到神经网络非线性逼近的能力,以神经网络推理模型为基础,设计一种非线性干扰观测器。对于 1 阶非线性系统

$$\dot{p}_1 = f_1(p_1, t) + f_2(p_1, t)u + d \quad (13)$$

式中, $f_1(p_1, t)$, $f_2(p_1, t)$ 分别对应式(5) 相应部分,其名义模型分别表示为 $f_1^*(p_1, t)$ 和 $f_2^*(p_1, t)$ 。定义 $\Delta f_1 = f_1(p_1, t) - f_1^*(p_1, t)$, $\Delta f_2 = f_2(p_1, t) - f_2^*(p_1, t)$;跟踪误差 $e = p_1 - p_{1d}$ 。

控制律 u 取下式

$$u = \frac{\dot{p}_{1d} - f_1^*(p_1, t) - \hat{h} - k_1 e}{f_2^*(p_1, t)} \quad (14)$$

式中, $k_1 > 0$, \hat{h} 为扰动估计值。将(14)式代入(13)式可得:

$$\dot{e} + k_1 e = \Delta f_1 + \Delta f_2[\dot{p}_{1d} - f_1^*(p_1, t) - \hat{h} - k_1 e] + d - \hat{h} \quad (15)$$

因此取该子系统不确定部分为:

$$h(\theta, \varphi) = \Delta f_1 + \Delta f_2[\dot{p}_{1d} - f_1^*(p_1, t) - \hat{h} - k_1 e] + d \quad (16)$$

采用径向基函数神经网络(RBFNN)对不确定项 $h(\theta, \varphi)$ 进行自适应逼近。根据神经网络逼近定理^[16]可知:给定逼近误差上界 $\varepsilon_0 = \sup \|h(\theta, \varphi) - \hat{h}(\theta^*, \varphi)\| > 0$,存在有限的高斯函数和具有上界的理想神经网络权值 θ^* ,使得 RBFNN 在紧集上一致连续逼近连续函数 $h(\theta, \varphi)$ 。

RBFNN 的输出信号为:

$$\hat{h}(\theta, \varphi) = \theta^T \varphi \quad (17)$$

式中, $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_m]^T \in \mathbf{R}^{m \times 1}$ 为权值向量, $\varphi = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_n]^T \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为径向基向量, φ_i 为高斯函数;

定义 $\tilde{\theta} = \theta^* - \hat{\theta}$,取 ε 为逼近误差即

$$\varepsilon = h(\theta, \varphi) - \hat{h}(\theta^*, \varphi) \quad (18)$$

因此,式(15)变为:

$$\dot{e} + k_1 e = \varepsilon - \theta^T \varphi \quad (19)$$

定理 1 考虑系统(13)及控制律(14),当自适应律选为:

$$\dot{\theta} = -\varphi e^T - \lambda \|e\| \theta, \lambda \in \mathbf{R}^+ \quad (20)$$

并且满足式(25)或(26)时,则干扰观测动态系统所有信号有界。

证明:定义如下 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} e^T e + \frac{1}{2} \text{tr}(\theta^T \theta) \quad (21)$$

将 V 对时间求导,并将式(19)、(20)代入可得:

$$\begin{aligned} V' &= -k_1 e^T e + e^T \varepsilon + \text{tr}\{\theta^T (\dot{\theta} - \varphi e^T)\} = \\ &= -k_1 e^T e + e^T \varepsilon + \lambda \text{tr}\{\theta^T (\theta^* - \theta)\} \|e\| \end{aligned} \quad (22)$$

根据文献[17],有下式成立

$$\text{tr}\{\theta^T (\theta^* - \theta)\} \leq \|\theta^T\| \|\theta^*\| - \|\theta\|^2 \quad (23)$$

因此有

$$\begin{aligned} V' &\leq -k_1 \|e\|^2 + \varepsilon_0 \|e\| + \lambda \|e\| \{ \|\theta^T\| \|\theta^*\| - \|\theta\|^2 \} = \\ &= -k_1 \|e\|^2 + \varepsilon_0 \|e\| + \lambda \|e\| \cdot \\ &\cdot \left\{ -\left(\|\theta^T\| - \frac{1}{2} \|\theta^*\| \right)^2 + \frac{1}{4} \|\theta^*\|^2 \right\} = \\ &= -\|e\| \left\{ k_1 \|e\| + \lambda \left(\|\theta^T\| - \frac{1}{2} \|\theta^*\| \right)^2 - \right. \\ &\left. \left(\varepsilon_0 + \frac{1}{4} \lambda \|\theta^*\|^2 \right) \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

故当

$$\|e\| \geq \frac{4\varepsilon_0 + \lambda \|\theta^*\|^2}{4k_1} \quad (25)$$

或

$$\|\theta^T\| \geq \frac{1}{2} \|\theta^*\| + \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\lambda} + \frac{1}{4} \|\theta^*\|^2} \quad (26)$$

上述两式任一成立时,有 $V' < 0$ 成立。因此可通过选择合适干扰观测器参数,使得跟踪误差收敛至任意小紧集。证毕。

5 仿真结果分析

为验证所提出的控制策略的有效性,对活动横梁速度响应进行仿真分析,并与常规 PID 控制进行比较。

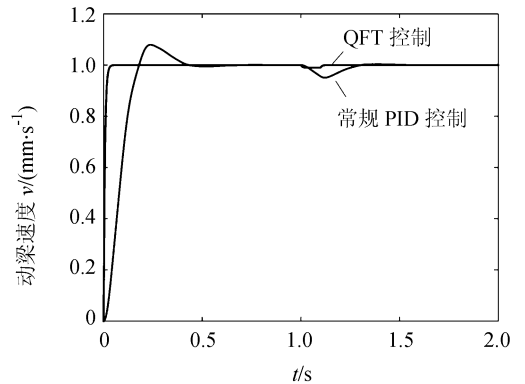
系统参数如表 1 所示。

表 1 液压机驱动系统主要参数

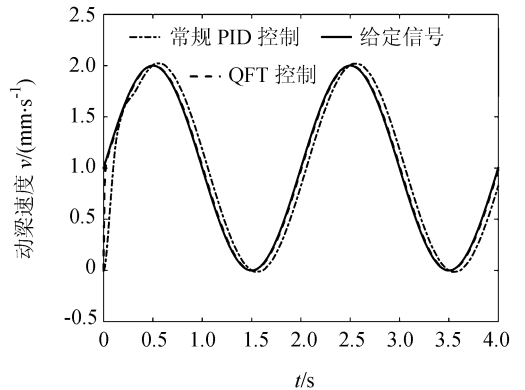
Tab. 1 Parameters of drive system for the machine

参数	数值
动梁质量 m/kg	6 698.95
液压缸粘性阻尼系数 $B/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	800 ~ 1 500
油液弹性模量 β_e/MPa	700 ~ 1 400
负载刚度 $K/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-1})$	0 ~ 70
主缸总有效作用面积 A/m^2	0.127
油液密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	875
泄露系数 $c_l/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$	5×10^{-11}
柱塞质量 m_s/kg	204.37
主缸进油腔初始容积 V_0/m^3	0.008

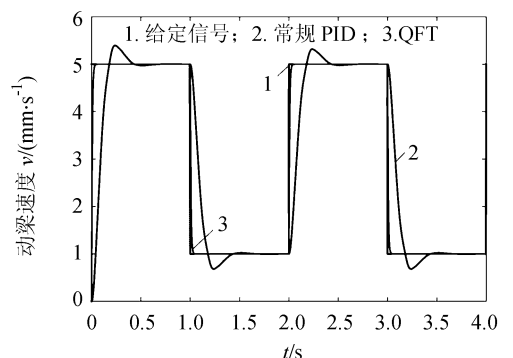
控制效果比较如图 4 所示。



(a) 单位阶跃响应曲线



(b) 正弦跟踪曲线



(c) 平顺性控制曲线

图 4 控制效果比较

Fig. 4 Comparison of control effects

系统阶跃响应如图4(a)所示。为检验系统干扰及参数摄动的抑制效果,在锻压仿真模型中将时变参数按照正弦振荡形式变化。由图4(a)可知,采用常规PID控制时,系统超调量很大,调节时间约为0.5 s,且在出现参数摄动时,稳态阶跃响应波动范围较大;而采用QFT复合鲁棒控制时,系统无超调,但调节时间大于前者,而参数摄动对系统输出影响很小,表现出了比较好的鲁棒性。为检验驱动系统的跟踪性能,采用给定的正弦信号进行仿真实验,得到跟踪效果曲线如图4(b)所示。从图4(b)中可以看出,采用常规PID控制时,在正弦信号峰值处波动范围大,最大跟踪误差较大;采用QFT复合控制在正弦信号峰值处波动范围小,但存在相位滞后。为验证该控制方案在驱动系统速度切换瞬态过程的控制效果,以常规PID控制方案为对比对象,给定速度切换方波信号,采用两种控制策略的速度输出结果如图4(c)所示。由图4(c)可见,采用常规PID控制在速度切换瞬间响应快速,但是产生了较大超调,容易引起系统振荡,而QFT复合鲁棒控制可以实现速度变化瞬态过程的平顺切换。

6 结论

1)通过对液压机驱动系统的研究,考虑系统参数变化和非结构不确定性,建立了能恰当描述实际被控电液伺服驱动系统的不确定性模型。

2)应用基于QFT和神经网络干扰补偿器的复合鲁棒控制方法,不仅能提高液压机驱动系统的鲁棒稳定性和动态跟踪性能,还能有效抑制干扰,对系统参数摄动和不确定性表现出很好的鲁棒性能。

3)与常规PID控制相比,该控制方法可使系统速度切换瞬态过程无超调因而不产生系统振荡,可实现速度平稳切换。此外,液压锻造过程中存在的滞后问题是后续控制算法研究的重点。

参考文献:

[1] Yang C F, Zheng S T, Lan X J, et al. Adaptive robust control for spatial hydraulic parallel industrial robot[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15(1): 331 - 335.

[2] Chalupa P, Novak J. Modeling and model predictive control of a nonlinear hydraulic system[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2013, 66(2): 155 - 164.

[3] Lu X J, Huang M H. System-decomposition-based multilevel control for hydraulic press machine[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(4): 1980 - 1987.

[4] Tan Jianping, Huang Changzheng, Liu Bin, et al. Control-strategy of hydraulic operation control system under the transient load in giant hydraulic press[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(11): 272 - 276.

[谭建平,黄长征,刘彬,等.瞬变载荷下巨型水压机液压操作控制策略[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(11): 272 - 276.]

[5] Pi Y J, Wang X Y. Trajectory tracking control of a 6-DOF hydraulic parallel robot manipulator with uncertain load disturbances[J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(2): 185 - 193.

[6] Choux M, Hovland G. Adaptive backstepping control of nonlinear hydraulic-mechanical system including valve dynamics[J]. *Modeling, Identification and Control*, 2010, 31(1): 35 - 44.

[7] Guan C, Pan S X. Adaptive sliding mode control of electro-hydraulic system with nonlinear unknown parameters[J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(11): 1275 - 1284.

[8] Balau A E, Caruntu C F, Lazar C. Simulation and control of an electro-hydraulic actuated clutch[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(6): 1911 - 1922.

[9] Amiri M A A, Gharib M R, Moavenian M, et al. Modelling and control of a SCARA robot using quantitative feedback theory[J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2009, 223(17): 919 - 928.

[10] Ni Jing, Peng Lihui, Xiang Zhanqin. Nonlinear modeling and control of electro-hydraulic servo system of pipe expanding procession[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(5): 250 - 255. [倪敬,彭丽辉,项占琴.扩轧管电液伺服系统非线性建模与控制[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(5): 250 - 255.]

[11] Karpenko M, Sepehri N. On quantitative feedback design for robust position control of hydraulic actuators[J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(3): 289 - 299.

[12] Karpenko M, Sepehri N. Electrohydraulic force control design of a hardware-in-the-loop load emulator using a nonlinear QFT technique[J]. *Control Engineering Practice*, 2012, 20(6): 598 - 609.

[13] Xie Xiaozhu, Liu Zaozhen, Liu Min. Study and design on fusion of QFT and PID based on BP neural network[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(1): 312 - 315. [谢晓竹,刘藻珍,刘敏.定量反馈理论和神经网络的融合控制与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(1): 312 - 315.]

[14] Xiang F, Wikander J. QFT control design for an approximately linearized pneumatic positioning system[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2003, 13(7): 675 - 688.

[15] Wang Zuwen, Meng Xianchao, Bao Gang. Robust control employed QFT for a pneumatic position servo system using ON/OFF solenoid valves[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(7): 75 - 80. [王祖温,孟宪超,包钢.基于QFT的开关阀控气动位置伺服系统鲁棒控制[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(7): 75 - 80.]

[16] Zhu Liang, Jiang Changsheng, Zhang Chunyu. Adaptive trajectory linearization control for aerospace vehicle based on RBFNN disturbance observer[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(3): 673 - 677. [朱亮,姜长生,张春雨.基于径向基神经网络干扰观测器的空天飞行器自适应轨迹线性化控制[J]. *航空学报*, 2007, 28(3): 673 - 677.]