

一种电液位置伺服系统线性自抗扰控制策略

黄碧媛¹, 张兴兰¹, 欧阳奇², 谢鹏², 李美琪²

(1. 重庆理工大学 计算机科学与工程学院, 重庆 400054;

2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘要: 针对电液伺服系统中存在的压力油泄露、参数摄动、滞后、振荡等问题, 提出一种线性自抗扰控制方法, 该方法利用二阶线性扩张状态观测器实时主动估计系统的内外扰动, 并利用带加速度前馈的比例积分控制律抑制系统的内外扰动; 针对线性自抗扰参数难以整定的问题, 提出一种改进遗传算法对线性自抗扰控制器参数进行优化, 搜索最佳参数组合, 提高系统控制性能及抗扰能力; 通过仿真与实验分析, 系统在受扰状态下扰动抑制能力提升了 66.8%, 位置跟踪精度提高了 60.2%, 验证了所提方法的稳定性, 揭示了线性自抗扰参数对控制性能的影响规律。

关键词: 电液伺服系统; 线性自抗扰; 线性扩张状态观测器; 改进遗传算法; 参数整定

A Linear Self Anti-interference Control Strategy for Electro-hydraulic Position Servo System

HUANG Biyuan¹, ZHANG Xinglan¹, OUYANG Qi², XIE Peng², LI Meiqi²

(1. College of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming at the problems of pressure oil leakage, parameter fluctuation, hysteresis, and oscillation in electro-hydraulic servo systems, a linear self-immunity control method is proposed. A second-order linear expansion state observer is used to actively estimate the internal and external perturbations of the system in real time, with a proportional-integral control law with acceleration feed-forward suppressing this perturbations. For the difficulty of adjusting the linear self-immunity parameters, an improved genetic algorithm is proposed to optimize the parameters of the linear self-immunity controller, searching for the best parameter combinations to improve the system control performance and anti-interference ability. Through simulation and experimental analysis, the anti-interference ability of the system is improved by 66.8% under the disturbed state, and the position tracking accuracy is improved by 60.2%, which verifies the stability of the proposed method, and reveals the influence of linear self anti-interference parameters on control performance.

Keywords: electro-hydraulic servo system; linear self anti-interference; linearly expanding state observer; improved genetic algorithm; parameter tuning

0 引言

电液伺服系统具有功率质量比大、响应快、刚度高、信号处理灵活等优点, 被广泛应用于装备制造业、运动模拟器、仿真机器人和振动试验台等多个领域^[1]。液压系统固有的非线性、时变性、耦合效应、不确定性导致其难以建立精确的数学模型, 电液位置伺服系统控

制特性变得尤为复杂, 系统稳定性、控制精度、抗干扰性能均受到限制。

为实现电液伺服系统高性能跟踪控制, 各类基于模型的控制方法被应用至电液位置伺服系统中, 如: 模糊控制、鲁棒控制、内膜控制、神经网络控制、自适应控制等^[2-5]。但单纯基于模型设计控制时, 系统会陷入不稳定状态。电液伺服系统中负载变化、传感器噪声、未

收稿日期:2024-09-09; 修回日期:2024-10-16。

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4702100)。

作者简介:黄碧媛(1999-),女,硕士研究生。

通讯作者:欧阳奇(1971-),男,博士,教授,博士生导师。

引用格式:黄碧媛,张兴兰,欧阳奇,等. 一种电液位置伺服系统线性自抗扰控制策略[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(10):119-126,143.

建模动力学等不确定因素会极大影响上述控制策略对系统的控制效果。高性能位移跟踪控制需要一种抗扰能力强、鲁棒性强、不依赖于精确模型的控制方法。

基于扩张状态观测器的自抗扰控制器是一种有效的控制方法,不需要准确的系统模型信息,采用观测器来估计系统的状态和干扰,从而能够及时地对干扰进行预测和补偿,实现快速的系统响应,在需要快速调节和响应的应用场景中具有优势^[6]。到目前为止,自抗扰控制技术在电气系统、机器人等工业系统中取得了一定的成果。文献[7]提出了一种模糊线性自抗扰控制器(Fuzzy-LADRC)用于中高压配电网的有源电力滤波器(IHAPF),使其在动态跟踪和抗干扰性能上优于传统PI控制器。文献[8]提出了一种预设性能自适应抗扰控制器,利用自适应扩张状态观测器和神经网络辅助控制有效抑制了电液伺服系统中内外扰动。文献[9]提出了一种基于自抗扰的新型位移控制器,用于永磁片式电机的悬浮力检测,有效缩短了转子浮动稳定时间和扰动恢复时间,并减少了振动位移。文献[10]提出了改进型一阶LADRC控制器以优化配电静止同步补偿器(D-STATCOM)的控制性能,提高其抗干扰能力和动态响应速度。文献[11]通过引入低通滤波器和新的扰动估计调节参数,增强了电液伺服系统的扰动抑制能力和位置跟踪精度。文献[12]采用高增益自抗扰控制方案,通过降阶处理系统模型和引入超前补偿信号,以简化控制器结构、减少参数调整,提高电液位置伺服系统的控制性能和抗扰能力。文献[13]提出了一种参数自整定的滑模自抗扰控制(SM-ADRC)方法,通过结合子模块、扩张状态观测器和非线性状态误差反馈,采用模拟退火粒子群优化算法实现最优配置,以降低调节参数数量,并在永磁直线同步电机驱动系统中取得了良好效果。

合适的参数设置可以提高控制系统的性能,使其具有更快的响应速度、更好的稳定性和更高的鲁棒性。线性自抗扰控制器效果受到多个参数的影响,参数之间存在相互作用,传统的手动调节或简单的优化方法往往无法充分考虑到系统的复杂性。目前常见的智能优化算法有粒子群优化算法、蚁群算法、遗传算法等。文献[14]提出了基于强化学习的记忆粒子群优化算法(RLMPSO)用于自抗扰控制的参数调整,所提方法以更高的性能满足负载频率控制中频率偏差稳定为零的要求。文献[15]提出了一种基于遗传算法的液压球形运动执行器鲁棒自抗扰参数优化方法,提高了其跟踪性能和适应模型不确定性的能力。文献[16]提出了一种基于最大最小蚂蚁算法和模拟退火策略的不完全微分PD控制器设计方法,用于直驱式电液伺服转叶舵机,实现了在线搜索最优PD控制参数。

本文首先对电液伺服系统建立数学模型,分析阀控系统的输入输出响应特性,合理选取自抗扰阶次,利用二阶线性扩张状态观测器实时主动估计系统的内外扰动,并利用带加速度前馈的比例积分控制控制律抑制系统的内外扰动,通过改进遗传算法优化线性自抗扰控制器参数,搜索参数空间中的最优解,与传统的穷举搜索或梯度下降等方法相比,遗传算法通常具有较强的全局搜索能力、自适应性和高效性。联合仿真和实验验证了所提方法的稳定性,揭示了线性自抗扰参数对控制性能的影响规律,验证了所提方法的可行性和有效性。

1 电液伺服系统模型

电液伺服系统如图1所示。控制器运行时,通过位移传感器实时测量负载位移,经A/D转换器转换成数字信号,与给定的参考信号作比较,并作为控制器的输入。控制器的输出是由双极性D/A转换电路输出的不超过10V的直流电压。控制信号作用于液压伺服阀的驱动装置,驱动装置使阀芯移动改变阀口的开启程度,使液压油流经伺服阀的不同通道,从而改变液压系统中的流量和压力,进而控制伺服阀的运动速度、方向和力度,实现对系统的精确控制。线性自抗扰不需要精确的电液伺服系统模型,但是模型信息对控制器的设计与控制质量的提高提供了理论依据,因此,基于物理参数标称值,构建了电液伺服系统的动力学机理模型。

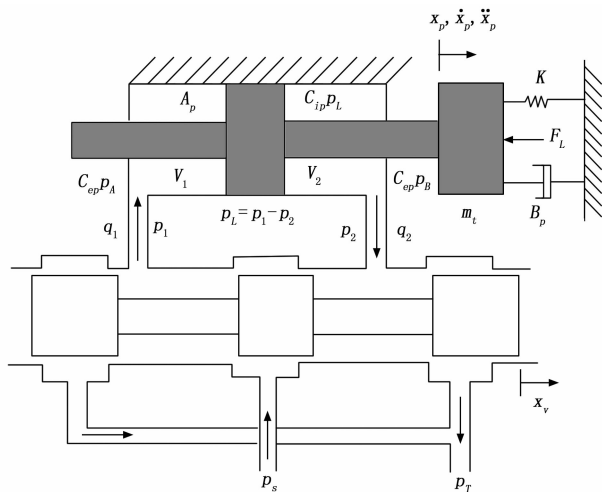


图1 阀控对称液压缸模型

伺服阀的线性化负载流量为 q_L ：

$$q_L = K_q x_v - K_c p_L \quad (1)$$

式中, x_v 为滑阀位移; p_L 为负载压力, $p_L = p_1 - p_2$; K_q 和 K_c 为线性化的流量增益和流量压力系数。

因液压缸存在泄露及压力容腔体内工作性质的可压缩性,实际流入液压缸的流量 q_1 与流出液压缸的流量 q_2 并不相等,为简化分析,定义负载流量为:

$$q_L = \frac{q_1 + q_2}{2} \quad (2)$$

流入液压缸某一工作腔的流量 q_1 为:

$$q_1 = A_p \frac{dx_p}{dt} + C_{ip}(p_1 - p_2) + C_{ep}p_1 + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} \quad (3)$$

液压缸另一腔流出的流量 q_2 为:

$$q_2 = A_p \frac{dx_p}{dt} + C_{ip}(p_1 - p_2) - C_{ep}p_2 - \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} \quad (4)$$

式中, A_p 为缸有效面积, x_p 为液压缸活塞位移, C_{ip} 为缸内泄露系数, C_{ep} 为液压缸外泄露系数, β_e 为液压油的等效体积弹性模量, V_1 和 V_2 为液压缸左右两腔的容积, $V_1 = V_{01} + A_p x_p$ 、 $V_2 = V_{02} - A_p x_p$, V_{01} 和 V_{02} 为缸左右两室的初始容积, 综上可得液压缸流量连续性方程:

$$q_L = A_p \frac{dx_p}{dt} + \left(C_{ip} + \frac{C_{ep}}{2}\right)p_L + \frac{1}{2\beta_e} \left(V_1 \frac{dp_1}{dt} - V_2 \frac{dp_2}{dt}\right) \quad (5)$$

进一步设总泄露系数 $C_{ip} = C_{ip} + \frac{C_{ep}}{2}$, 液压缸的受压容积 $V_t = V_1 + V_2$, 且 $V_1 = V_2$, 即液压缸活塞处于行程的中间位置, $V_{01} = V_{02} = V_0 = \frac{V_t}{2}$ 且 $A_p x_p \ll V_0$,

$\frac{dp_1}{dt} + \frac{dp_2}{dt} \approx 0$, 则液压缸流量连续性方程简化为:

$$q_L = A_p \frac{dx_p}{dt} + C_{ip}p_L + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{dp_L}{dt} \quad (6)$$

液压缸的输出力与负载力的平衡方程为:

$$A_p p_L = m_t \frac{d^2 x_p}{dt^2} + B_p \frac{dx_p}{dt} + K x_p + F_L \quad (7)$$

式中, m_t 为活塞总质量, 包括总惯性负载质量, B_p 为活塞、活塞杆及负载的总粘性阻尼系数, F_L 为外负载力, 包括了作用在活塞上的等效力负载, K 为弹性负载等效弹簧刚度。在电液伺服阀设计中, 伺服阀的带宽一般远大于系统的液压固有频率, 因此可以把它当作比例环节。由此建立控制信号 u 与伺服阀阀芯位置 x_v 的关系模型:

$$x_v = K_v u \quad (8)$$

其中: K_v 为伺服阀的增益。将式 (1)、(6)、(7) 进行拉式变换, 可得以下 3 个方程:

$$\begin{cases} Q_L = K_q X_v - K_c P_L \\ Q_L = A_p s X_p + C_{ip} P_L + \frac{V_t}{4\beta_e} s P_L \\ A_p P_L = m_t s^2 X_p + B_p s X_p + K X_p + F_L \end{cases} \quad (9)$$

伺服阀阀芯位移 x_v 到活塞位移 x_p 的开环位置传递函数可表示为:

$$x_p = \frac{K_q X_v - \frac{K_c}{A_p} \left(\frac{V_t}{4\beta_e} s + 1\right) F_L}{m_t s^2 + B_p s + K}$$

$$\frac{m_t V_t}{4\beta_e A_p^2} s^3 + \left(\frac{m_t K}{A_p^2} + \frac{B_p V_t}{4\beta_e A_p^2}\right) s^2 + \left(1 + \frac{B_p K}{A_p^2} + \frac{K V_t}{4\beta_e A_p^2}\right) s + \frac{K K_c}{A_p^2} \quad (10)$$

式中, $K_c = K_c + K_{ip}$ 为总流量压力系数。

一般情况下 $\frac{K_c B_p}{A_p^2} \ll 1$, 当只考虑输入不考虑外负载时, 系统的传递函数为:

$$\frac{X_p}{X_v} = \frac{\frac{K_q}{A_p}}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (11)$$

其中: $\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e A_p^2}{m_t V_t}}$ 为液压固有频率, $\zeta_h = \frac{K_c}{A_p} \sqrt{\frac{\beta_e m_t}{V_t}} + \frac{B_p}{4A_p} \sqrt{\frac{V_t}{\beta_e m_t}}$ 为液压阻尼比。

2 自抗扰控制策略建立

2.1 自抗扰控制策略

电液伺服系统的标称模型是一个高阶非线性不确定系统。可以通过对电液伺服系统进行分析, 适当的简化模型以方便设计控制方法。其中, 选择被控对象的阶数成为自抗扰控制器设计的首要问题。电液位置伺服系统本质上是控制输入电压来调整电液伺服阀开度, 实现对进出油缸两端流量的调节, 进而实现对活塞工作速度的调节, 最后实现对活塞位移的控制。

由于:

$$\begin{cases} Q_1 = A_p \dot{x}_p \\ Q_2 = A_p \dot{x}_p \end{cases} \quad (12)$$

考虑到电液伺服系统存在时滞, 从控制输入 u 到活塞输出, 位移 x_p 可以用 $e^{-\tau s}$ 表示^[17], τ 是一个未知不确定的时间常数。

Zhao 等人^[18] 提出了一种改进的适应时延的自抗扰控制器设计方法。如果延迟时间已知, 则在控制信号中引入一个等效的延迟, 将该延迟同步进入观测器的信号。一般来说, 时延可以用一阶惯性系统近似表示:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1}{1 + \tau s} \quad (13)$$

综合考虑式 (8)、(12)、(13), 进行拉普拉斯变换。控制输入电压 u 与活塞输出位移 x_p 之间的关系可以近似为二阶系统:

$$\frac{x_p(s)}{u(s)} = k \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{1 + \tau s} \quad (14)$$

k 为时变常数, 时滞传递函数可以描述为:

$$G(s) = e^{-\tau s} \quad (15)$$

频率特性为:

$$\begin{cases} G(j\omega) = e^{-j\tau\omega} = \cos(-\tau\omega) + j\sin(-\tau\omega) \\ A(\omega) = \sqrt{[\cos(\tau\omega)]^2 + [-\sin(\tau\omega)]^2} = 1 \\ \varphi(\omega) = -\tau\omega \end{cases} \quad (16)$$

由式 (16) 可知, 时滞只影响相位, 不影响振幅。因此, 采用式 (14) 的二阶系统来描述电液伺服系统是

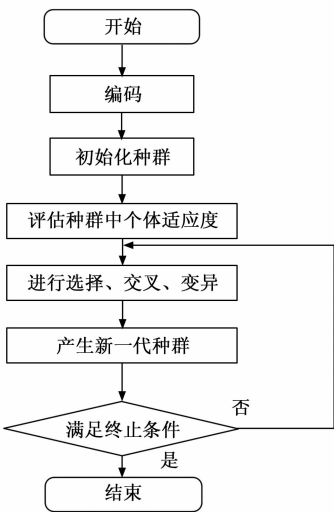


图 3 遗传算法流程图

遗传算法主要优化观测器带宽 ω_0 、控制器带宽 ω_c 和 b_0 共 3 个参数。首先分别对这 3 个参数进行二进制编码, 随机产生初始种群, 对种群中个体进行适应度评估, 适应度值越高越容易被选中作为父代个体, 父代经过交叉、变异产生子代个体, 对于新生成的子代个体, 在每次迭代中, 根据适应度函数的反馈, 遗传算法会不断调整参数, 使得逐步逼近或达到最优解。本文以跟踪误差 $e(t)$ 、控制输出 $y(t)$ 和响应超调 $\sigma(t)$ 的组合函数作为 LADRC 动态响应的评价依据, 其中 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为目标函数权重系数。适应度公式为:

$$J = \int_0^{\infty} \omega_1 t |e(t)| dt + \omega_2 y^2(t) dt + \omega_3 \sigma^2(t) dt$$

相比于传统的遗传算法, 本文在交叉和变异步骤进行了改进, 简单的单点交叉算子主要影响编码的低位变化, 只改变了较小的数值, 且交叉混合的速度较慢, 极易陷入局部最优解, 多点交叉虽然能够增强算法的全局寻优能力, 但也可能导致交叉后的个体失去了某些有利的基因组合, 从而影响优化的效果。针对这一缺点, 本文使用均匀交叉, 均匀交叉将每个点都作为潜在的交叉点, 依次扫描染色体的每个基因, 以概率 ps 决定哪个父个体向子个体提供变量值, 当概率大于设定值时与对位基因进行交叉, 对基因的破坏程度由概率来控制, 这种方法能够更灵活地保留父代个体的特性, 并且产生更多样化的子代个体。采用逆转变异的方式, 在选定个体基因序列中选择随机两个位置进行逆转操作。逆转变异可以在种群中引入局部变化, 有助于维持种群的多样性, 防止陷入局部最优解。

3 实验研究

3.1 联合仿真实验

为了更好地模拟真实的电液伺服系统的特性, 同时

也为了验证自抗扰控制器的抗干扰能力, 与改进遗传算法的寻优效率, 分别在 AMESim 和 Matlab/Simulink 软件中搭建联合仿真模型。

AMESim 仿真模型选用的是双杆液压缸驱动负载, 以模拟实际工况。为接近实际应用, 仿真模型参数设置中考虑了执行机构的内泄漏、静摩擦、库伦摩擦、粘滞摩擦等因素, 所设置系统模型参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数名称	数值
伺服阀固有频率/Hz	80
伺服阀阻尼比	0.8
活塞直径/mm	63
活塞杆直径/mm	45
活塞杆行程/m	0.3
负载质量/kg	120
粘滞摩擦系数/(Ns/m)	500
供油压力/MPa	7
质量块/kg	120
内泄露指数 L /(min/bar)	0.057
库伦摩擦力/N	320
静摩擦力/N	400

本文仿真实验选用的双杆液压缸的活塞杆行程为 0.3 m, 零点位置为 0.15 m 处。为了分析 LADRC 的 3 个参数对控制器控制性能的影响, 在电液伺服系统负载端有外部扰动的前提下, 分别改变 LADRC 的 3 个参数值进行仿真实验。整个仿真实验控制指令的输出范围为 $-40 \sim +40$ mA, 仿真步长为 0.001 s, 求解器为 ode3。

3.1.1 控制增益估计 b_0 的变化对控制性能的影响

将反馈控制器和 LESO 的带宽分别设计为 $\omega_0 = 220$ rad/s、 $\omega_c = 150$ rad/s, 设定 $\mathbf{b}_0 = [4.4 \quad 4.7 \quad 5.0 \quad 5.0 \quad 5.3 \quad 5.6 \quad 5.9 \quad 6.2]$ 。在仿真过程中, 对电液伺服系统执行机构的负载端施加了 3 000 N 的扰动力以及频率为 100 Hz、幅值为 500 N 的正弦扰动力。在采用 LADRC 控制下, 电液伺服系统的输出如图 4 所示, 图中 x_p 是活塞杆的实际位置。

LADRC 的控制增益估计值 b_0 在配置好 ω_c 和 ω_0 且保持不变的情况下, 可以有较大的取值范围。给定信号的上升阶段, 电液伺服系统的跟踪误差最大不超过 1 mm, 系统稳定后, 稳态误差不超过 0.1 mm, 这表明 LADRC 具有良好的跟踪性能。 b_0 在一定范围内变化对 LADRC 的跟踪性能没有较大的影响, 但随着 b_0 的值逐渐偏离实际值, 动态跟踪误差 e 会逐渐增大, 超调量也会增加。

3.1.2 LESO 带宽 ω_0 的变化对控制性能的影响

为了验证 LESO 对带宽 ω_0 变化的鲁棒性, 设定以下值: $\omega_0 = [170 \quad 200 \quad 230 \quad 260 \quad 290 \quad 320 \quad 350]$ rad/s。将控制增益估计和状态反馈控制器带宽分别设

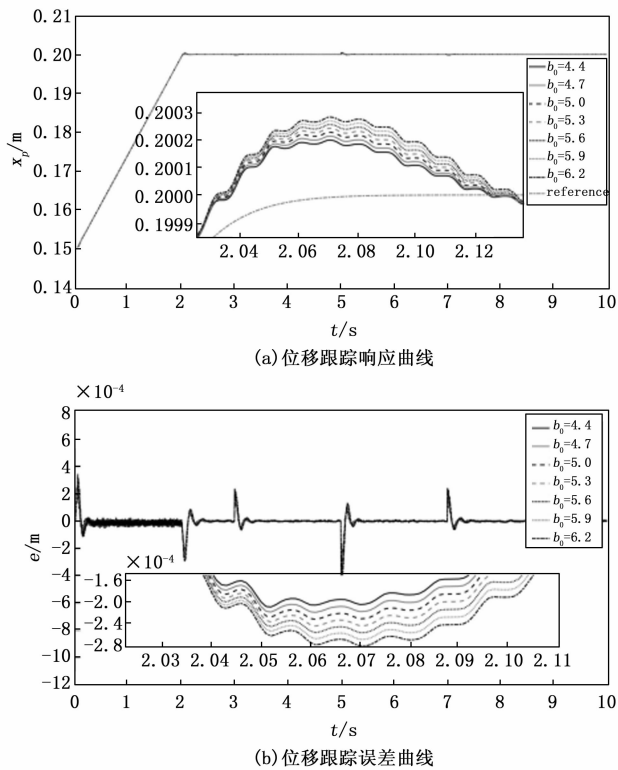


图 4 不同控制增益估计值下的系统跟踪响应曲线

计为 $b_0 = 5.9$ 和 $\omega_c = 150$ rad/s。与测试 b_0 时相同，添加相同的外部扰动，仿真结果如图 5 所示。

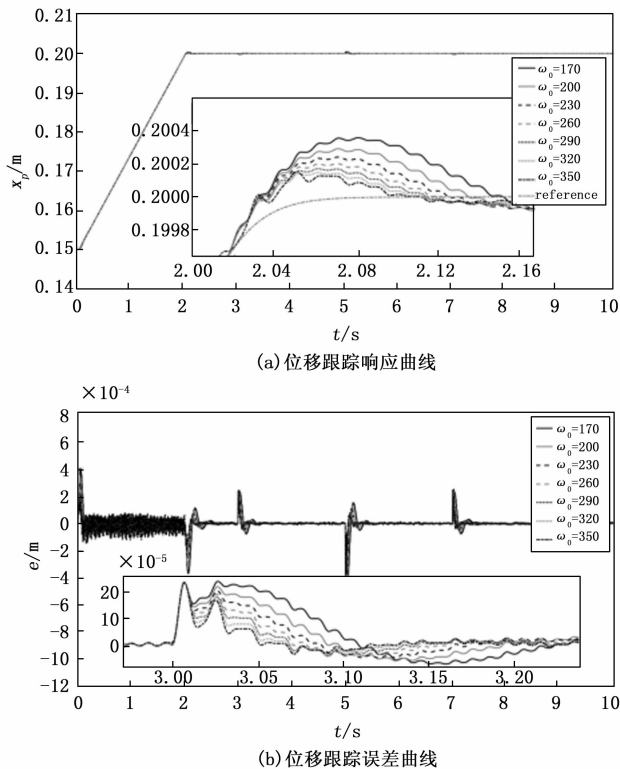


图 5 不同观测器带宽下的系统跟踪响应曲线

当控制器参数 b_0 和 ω_c 保持恒定时，观测器带宽可

以在较大范围内取值。系统输出在给定信号稳定之后，在较快时间内达到稳态。随着 ω_0 的增大，系统的精度逐渐提高，活塞位移跟踪误差逐渐减小。当 ω_0 继续增大，系统的响应速度保持不变，状态估计精度下降，稳态误差增大。在 LADRC 控制框架下，LESO 不仅是一个状态观测器，还是一个高频滤波器。只要观测器带宽在合理范围内就能有效抑制高频测量噪声，实时准确估计系统状态。

3.1.3 ω_c 变化的鲁棒性

为了验证 LESO 对带宽 ω_c 变化的鲁棒性，设定以下值： $\omega_c = [112 \ 114 \ 116 \ 118 \ 120 \ 122 \ 124]$ 。控制增益和观测器带宽分别设计为： $b_0 = 5.9$ 和 $\omega_0 = 300$ rad/s，添加了相同的外部扰动，仿真结果如图 6 所示。

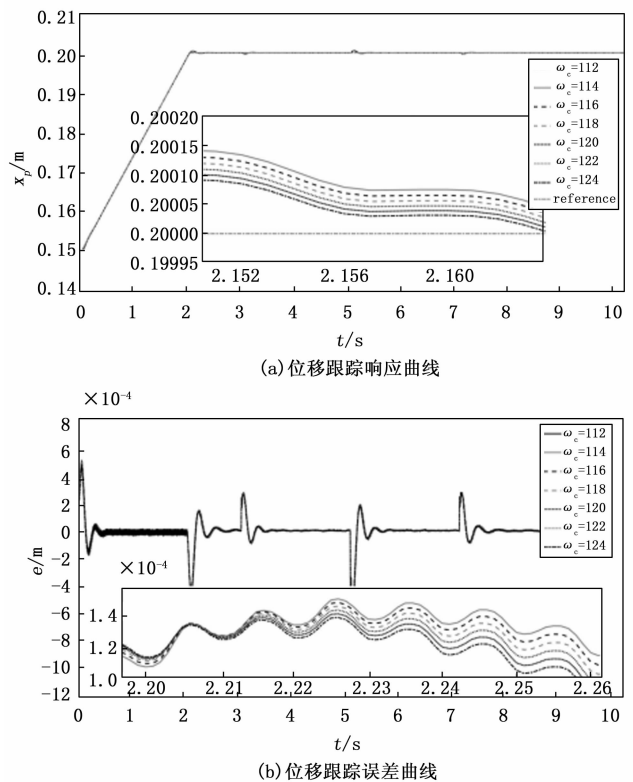


图 6 不同控制器带宽下的系统跟踪响应曲线

当控制器参数 b_0 和 ω_0 保持恒定时，随着 ω_c 的增大，电液伺服系统稳态误差绝对值相对于液压缸位移来说相差不大。从图中可以看出 ω_c 越大，系统的响应速度越快。

3.1.4 改进遗传算法参数优化

为验证改进遗传算法参数寻优的进步性，设置种群大小为 50，最大迭代次数 50，交叉概率 $p_c = 0.9$ ，变异概率 $p_m = 0.2$ ，代沟 $GGAP = 0.9$ ， b_0 的范围为 $[0, 10]$ ， ω_0 和 ω_c 的范围为 $[0, 1000]$ 。随机生成大小为 50 的初始种群，计算其适应度值，通过轮盘赌的方式选择

出较优个体作为父代, 生成一个 $[0, 1]$ 随机数, 当值小于 0.9 时进行 PMX 交叉, 采用逆转变异的方式, 逆转变异可以在种群中引入局部变化, 有助于维持种群的多样性, 防止陷入局部最优解。仿真结果如图 7 所示, 分别为优化前与优化后。

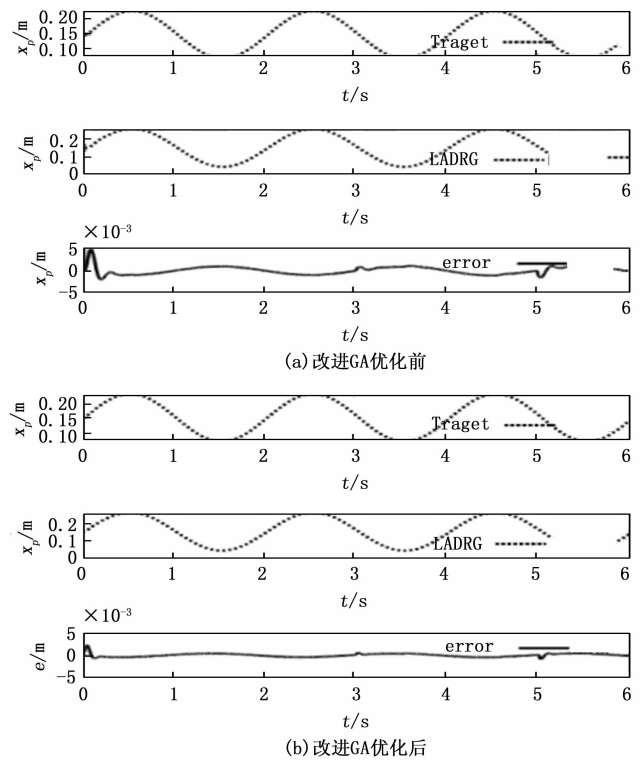


图 7 改进 GA 优化前与优化后

系统优化前设定的参数值为: $b_0 = 8$, $\omega_c = 100$, $\omega_0 = 300$, 改进遗传算法经过线性自抗扰控制器优化问题的评价目标函数值越低时适应度越高, 染色体所代表个体的存活率越高, 在迭代到 12 代后已经收敛到全局最优值, 在收敛速度快的同时避免陷入局部最优解, 最佳参数组合为 $b_0 = 6$, $\omega_c = 118$, $\omega_0 = 396$ 。

3.1.5 抗干扰性能仿真实验

在电液伺服系统执行机构的负载端有频率为 100 Hz、幅值为 500 N 的正弦扰动力, 同时在 3 s、5 s 以及 7 s 时添加了阶跃扰动。将 LADRC 与经典的 PID 控制进行对比, 设 PID 参数为: $k_p = 2$, $k_i = 10$, $k_d = 0$; LADRC 参数为: $b_0 = 6$, $\omega_c = 118$, $\omega_0 = 396$ 。正弦波跟踪结果如图 8 所示。

在施加了外部阶跃扰动后, LADRC 的跟踪效果没有明显变化, 而 PID 控制性能急剧下降, 跟踪误差曲线有明显的波动。

3.2 波形跟踪实验

现场实验的单通道电液伺服控制系统主要包括液压站、控制箱和上位机 3 个部分。液压站由双杆液压缸、

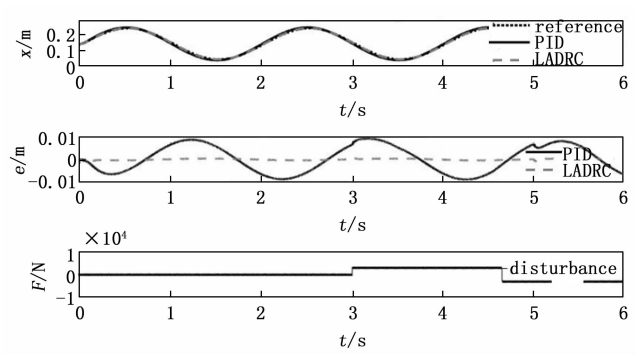


图 8 正弦波跟踪响应曲线

LVDT 传感器、电液伺服阀、油源和冷却系统等组成。控制模块由背板、信号采集板卡以及液压伺服从站控制器组成。

为验证线性自抗扰控制算法的控制效果, 在液压系统中分别采用了经典 PID 控制算法和 LADRC 控制算法, 其中 PID 参数为: $k_p = 4.9$, $k_i = 2.9$, $k_d = 0$; LADRC 参数为: $b_0 = 340$, $\omega_c = 359$, $\omega_0 = 10\ 056$, 给定正弦波为 1 Hz, 波形幅值为 45 mm。液压缸跟踪效果如图 9 所示, 可以看出在此幅值及频率下, PID 和线性自抗扰的控制效果良好, 最大跟踪误差均小于 2 mm 但 PID 控制方法的波形跟踪误差较大。

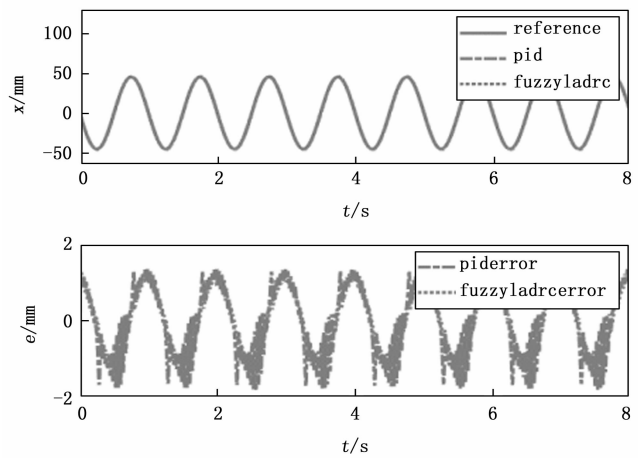


图 9 正弦波跟踪响应曲线

给定波形 $45\sin(0.5\pi t) + 15\sin(\pi t) + 15\sin(2\pi t)$ 。液压缸跟踪效果如图 10 所示, 可以看出在此幅值及频率下, PID 控制方法的波形跟踪误差较大, 线性自抗扰的控制效果良好, 最大跟踪误差小于 2 mm, 相比于 PID 控制方法最大误差减小约 60.2%, 由此可见, 线性自抗扰控制方法的性能要优于 PID 控制方法。

测试 LADRC 控制方法以及 PID 控制方法的抗干扰能力, 给定正弦波为 1 Hz, 波形幅值为 60 mm, 在控制器输出信号端添加 0.33 V 的扰动。液压缸跟踪效果如图 11 所示, 可以看出在此幅值及频率下, PID 与 LADRC 控制方法的波形跟踪误差相近, 线性自抗扰控

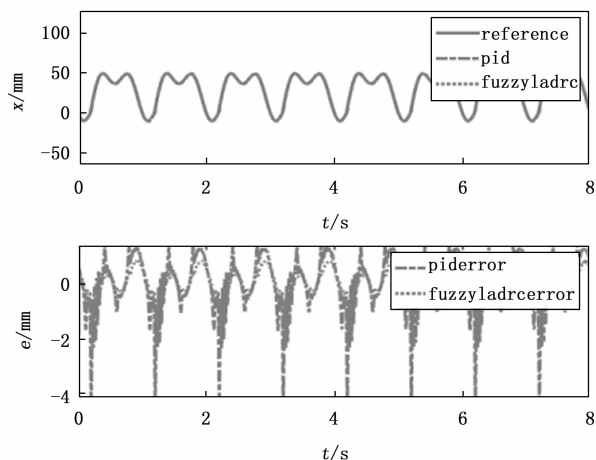


图 10 正弦波跟踪响应曲线

制方法在系统受扰状态下扰动抑制能力相较于 PID 控制方法提升了 66.8%，线性自抗扰控制方法的抗干扰性能要优于 PID 控制方法。

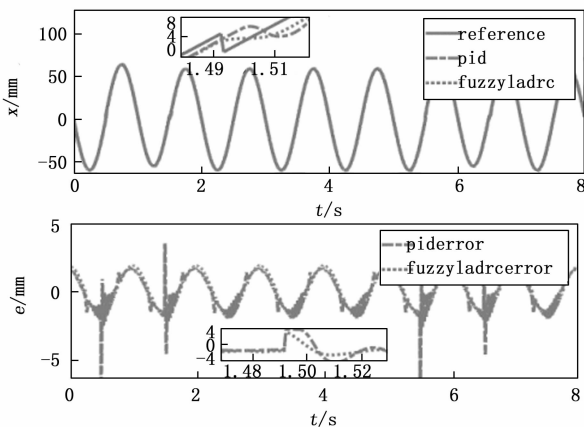


图 11 正弦波跟踪响应曲线

4 结束语

电液伺服系统是一种复杂的动态系统，具有不确定性、多时变性和高度非线性，精确建立其数学模型较为困难，自抗扰控制器不需要精确的数学模型也能很好控制系统这一优点很好地解决了这一难点问题。本文利用自抗扰技术为电液伺服系统设计了线性自抗扰跟踪控制器，利用二阶线性扩张状态观测器实时主动估计系统的内外扰动，并利用带加速度前馈的比例积分控制控制律抑制系统的内外扰动，针对自抗扰参数难以整定这一问题，提出了一种改进遗传算法对线性自抗扰的多个参数进行优化，以搜索到最佳参数组合。仿真结果和实验结果表明：LADRC 在面对复杂、不确定或难以建模的系统时表现优越，具有较强的鲁棒性和适应性。改进遗传算法可以搜索到最优的 LADRC 控制器参数组合，从而使得系统的控制性能得到最大程度的提升，适用于电液伺服控制器多参数整定。

参考文献:

- [1] WANG X, YANG Z, CHUN H, et al. Research on model-free adaptive control of electro-hydraulic servo system of continuous rotary motor [J]. IEEE Access, 2022, 10: 31165–31174.
- [2] LI Z, XING K. Application of fuzzy PID controller for electro-hydraulic servo position control system [C] //2017 3rd IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering, 2017: 158–162.
- [3] GUO Q. Optimal robust control of electro-hydraulic system based on Hamilton-Jacobi-Bellman solution with backstepping iteration [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2023, 31: 459–466.
- [4] REN H, JIAO S, WANG X, et al. Fractional order integral sliding mode controller based on neural network: theory and electro-hydraulic benchmark test [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27: 1457–1466.
- [5] TAN W, FU C. Linear active disturbance-rejection control: analysis and tuning via IMC [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63: 2350–2359.
- [6] 刘成, 胡建辉, 尚静. 基于改进自抗扰控制的共直流母线开绕组永磁同步电机转矩脉动抑制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (2): 779–789.
- [7] ZHOU X, CUI Y, MA Y. Fuzzy linear active disturbance rejection control of injection hybrid active power filter for medium and high voltage distribution network [J]. IEEE Access, 2021, 9: 8421–8432.
- [8] 田川, 刘鹏博, 刘灿, 等. 电液伺服系统的预设性能自适应抗扰控制 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (14): 76–84.
- [9] ZHANG W, ZHU H, XU Y, et al. Direct control of bearingless permanent magnet slice motor based on active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30: 1–5.
- [10] ZHOU X, ZHONG W, MA Y, et al. Control Strategy Research of D-STATCOM using active disturbance rejection control based on total disturbance error compensation [J]. IEEE Access, 2021, 9: 50138–50150.
- [11] 张祝新, 孙辉亮, 王立新, 等. 基于噪声抑制的电液位置伺服系统自抗扰控制方法 [J]. 农业机械学报, 2024, 55 (2): 450–458.
- [12] 神英淇, 李侃, 王羽熙, 等. 电液位置伺服系统高增益自抗扰控制 [J]. 机床与液压, 2024, 52 (4): 168–174.
- [13] YUAN C, GUO L, ZHANG X, et al. Novel active disturbance rejection-based sliding-mode control for permanent magnet linear synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2023, 19 (1): 119–129.

(下转第 143 页)