

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.04.010

基于模糊 DE 算法的粉末液压机电液伺服系统 PID 参数优化研究*

戴本尧

(浙江工贸职业技术学院 汽车与机械工程分院, 浙江 温州 325000)

摘要:针对粉末液压机电液伺服系统具有时变性、非线性、易受干扰的特性,采用常规 PID 控制难以收到理想效果的问题,在分析电液伺服系统的基础上,建立了系统数学模型,并利用差分进化算法,结合模糊推理技术,提出了一种基于模糊推理技术的差分进化算法。将其用于电液伺服控制系统 PID 参数优化,提高了 PID 控制器对电液伺服系统的调节控制能力;在单位阶跃信号输入下,在 Matlab 中分别对 CNC 粉末液压机电液伺服系统的 FDE-PID 控制与常规 PID、DE-PID 控制效果进行了仿真分析。研究表明:相比于其他控制作用,FDE-PID 控制器在控制精度、抗干扰能力以及鲁棒性方面均表现出了出色的控制性能。

关键词:电液伺服控制系统;粉末冶金液压机;差分进化;模糊推理技术;PID 控制

中图分类号:TH39;TH137.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)04-0391-06

Optimization of PID parameters of powder hydraulic electro-hydraulic servo system based on fuzzy DE algorithm

DAI Ben-yao

(Branch of Automobile and Mechanical Engineering, Zhejiang Industry and Trade Vocational College, Wenzhou 325000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the time-varying, non-linear and easily disturbed characteristics of electro-hydraulic servo system of powder hydraulic system, it is difficult to achieve ideal results by using conventional PID control, based on the analysis of the electro-hydraulic servo system, the mathematical model of the system was established, and a differential evolution algorithm based on the fuzzy reasoning technology was proposed, which was used to optimize the PID parameters of the electro-hydraulic servo control system and improve the regulation control of the PID controller to the electro-hydraulic servo system. Under the input of unit step signal, FDE-PID control and conventional PID and DE-PID control effects of CNC powder hydraulic electro-hydraulic servo system were simulated and analyzed by Matlab respectively. The results show that the FDE-PID controller performs better in control accuracy, anti-jamming ability and robustness than other control functions.

Key words: electro-hydraulic servo control system; powder metallurgy hydraulic press; differential evolution (DE); fuzzy reasoning technology; PID control

0 引言

作为生产粉末冶金零件的关键设备,粉末冶金液压机在车辆、船舶、航空航天等各个工业领域都得到了

广泛的应用^[1]。阀控液压缸式位置伺服控制系统性能的优劣关乎液压机产品密度均匀性和尺寸精度^[2]。目前,工业上通常采用传统 PID 控制对其进行控制,然而电液伺服系统在实际工作环境中往往会受到如油液

收稿日期:2018-10-12

基金项目:浙江省教育厅一般项目(Y201840750)

作者简介:戴本尧(1980-),男,浙江温州人,硕士,实验师,主要从事机电设备一体化控制方面的研究。E-mail:16920491@qq.com

温度、粘度等多种参量影响,导致其控制过程表现出高阶、时变、非线性等特点,这就使得传统 PID 控制难以达到理想的控制效果。

近年来,将智能算法如模糊控制、粒子群算法、差分进化算法、模拟退火算法等用于 PID 控制器参数整定,已经成为一大研究热点^[3-5]。其中,对于具有时变、强干扰、不确定特点的系统,模糊 PID 控制可以很好地满足控制要求;而将进化算法应用到改进模糊 PID 控制中,也是当前另一研究的方向。作为一种基于群体智能的随机并行优化算法,差分进化算法由 STORN 和 PRICE^[6]于 1995 年首次提出,因其具有实现简单、可靠性高、鲁棒性好等优点,被广泛应用在数据挖掘、模式识别、人工神经网络各个领域,应用到了对 PID 参数的优化整定中^[7]。然而,由于差分进化算法是基于群体差异矢量来进行优化的,随着迭代次数的增加,群体间差异信息降低,导致算法过早陷入局部最优或停滞,特别是求解高维问题时,更易出现这种情况,严重降低了算法的性能。

为此,本文将模糊 PID 控制同改进 DE 算法结合,提出一种基于模糊推理技术的差分进化算法(fuzzy differential evolution, FDE)。

1 粉末冶金数控液压机电液伺服系统

1.1 电液伺服系统的组成

典型的阀控电液伺服系统通常是以恒压油源为能源,通过控制器和液压伺服元件对输入液压执行机构的流体流量和压力进行控制。常见的阀控电液伺服系统控制系统如图 1 所示。

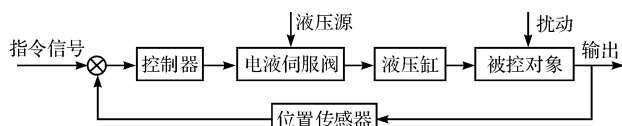


图 1 粉末液压机电液控制系统

系统由控制器、电液伺服阀、液压缸、位置传感器组成。位置传感器检测伺服系统实时位置,通过与指令信号进行对比作为控制器输入,经过控制器运算后输出控制作用于电液伺服阀,引起液压执行机构流体流量和压力变化,最终再作用到被控对象上形成闭环控制。

1.2 电液伺服系统数学模型的建立

首先,由电液伺服控制系统框图可以看出电液伺服阀作为接受电气信号将其转换为液压流量和压力信号的关键元件,其应当具有动态响应速度快、控制精度

高以及使用寿命长的优点。正是基于其动态响应速度高于执行元件液压缸的动态响应特性,可将伺服阀的传递函数采用二阶振荡环节来代替。因此,伺服阀的传递函数可以简化为:

$$G_{sv}(s) = \frac{k_{sv}}{\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\xi_{sv}}{\omega_{sv}}s + 1} \quad (1)$$

式中: k_{sv} —伺服阀的流量增益; ω_{sv} —伺服阀的频率; ξ_{sv} —伺服阀的阻尼比。

其次,液压缸作为电液伺服系统做直线往复运动(或摇动运动)的执行元件,在建立模型时,本文参考了文献[8-14]中阀的线性化流量方程、液压缸的流量连续方程以及液压缸与负载的平衡方程这 3 个方程,得到了液压缸的传递函数为:

$$\frac{X_p(s)}{X_v(s)} = \frac{\frac{k_{sv}}{A_h}}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1\right)} \quad (2)$$

式中: X_v —伺服阀的阀芯位移; X_p —液压缸活塞位移; A_h —液压缸活塞杆的面积; ξ_h —液压缸的阻尼比; ω_h —液压缸的响应频率。

最后,将式(1,2)的伺服阀和液压缸的传递函数联立相乘,可得粉末液压机的位置控制系统的开环传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{k_{sv}}{\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\xi_{sv}}{\omega_{sv}}s + 1} \cdot \frac{\frac{k_{sv}}{A_h}}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1\right)} \quad (3)$$

在实际应用中,由于电液伺服阀存在摩擦死区,输出曲线不随时间的变化而变化,表现出较强非线性。加之,液压缸采用线性简化分析系统的动态特性,导致建立电液伺服系统数学模型不够准确。另一方面,液压机在实际工作中液压阻尼比值 ξ_h 处于不断变化中,导致模型参数不确定性,使得系统具有时变、非线性的特性。针对这些特点以及存在的问题,为了满足实际的使用性能要求,研究者所设计的控制系统就必须具有很好的控制效果,当被控对象的数学模型在一定范围变化时,其抗干扰及鲁棒性仍然较好。

2 差分进化算法及改进

2.1 基本差分进化算法

DE 算法在可行搜索空间运用初始的解群体和遗传操作步骤来寻找最优解。在任何一代,每个解向量都可以将其表示为:

$$\mathbf{X}_i^G = (x_{i,1}^G, x_{i,2}^G, \dots, x_{i,D}^G), \quad i = 1, 2, \dots, NP \quad (4)$$

式中: \mathbf{X}_i —解向量; NP —种群的数量; D —解的维度; G —迭代次数。

通常,将这样一个解向量称为染色体或基因组。而DE算法包含变异、交叉和选择3大操作步骤。最初,包含 NP 个解的初始种群是通过均匀分布随机产生的。对于任何一代 G 的每一个解向量 \mathbf{X}_i 进行变异操作,随机从种群中选择3个个体,通过下式进行变异操作生成变异个体,即:

$$\mathbf{V}_i^G = \mathbf{X}_{r_1}^G + F(\mathbf{X}_{r_2}^G - \mathbf{X}_{r_3}^G), \quad r_1 \neq r_2 \neq r_3 \quad (5)$$

式中: F —变异因子因子,取值为 $[0,1]$ (影响差异向量的缩放,对于变异个体的多样性以及算法的搜索速度有着至关重要的作用); $\mathbf{X}_{r_1}, \mathbf{X}_{r_2}, \mathbf{X}_{r_3}$ —种群中随机选出个体; \mathbf{V}_i^G —变异个体。

其次,通过交叉操作将变异个体 \mathbf{V}_i^G 和父代个体 \mathbf{X}_i^G 信息交叉互换产生新的试验向量个体。交叉操作分为两种形式,即二项式和指数型。在常见的二项式交叉操作中,通过下式产生试验向量个体,即:

$$u_{i,j}^G = \begin{cases} v_{i,j}^G & (r_j \leq CR \text{ or } j = j_{\text{rand}}) \\ x_{i,j}^G & \text{otherwise} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, D \quad (6)$$

式中: r_j — $[0,1]$ 区间中提取的一个随机数; j_{rand} — $[1, 2, \dots, D]$ 区间内的随机产生的整数; CR — $[0,1]$ 区间中随机选取的交叉概率因子; \mathbf{U}_i^G —试验向量个体。

最后,选择操作是将父代个体 \mathbf{X}_i^G 与试验向量个体 \mathbf{U}_i^G 进行一对一竞争操作产生新的种群的过程。通过建立的适应度函数用来评价个体的优劣,以求解问题最小化为例,如果试验向量的值小于或等于父向量的值,则试验向量将进入下一代。否则,父代向量将存活到走向下一代。选择操作公式如下所示:

$$\mathbf{X}_i^{G+1} = \begin{cases} \mathbf{U}_i^G & \text{if } (f(\mathbf{U}_i^G) \leq f(\mathbf{X}_i^G)) \\ \mathbf{X}_i^G & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

2.2 模糊差分进化算法

DE算法的性能在很大程度上取决于两个参数,即变异因子 F 和交叉概率因子 CR 。较大的变异因子 F 在全局搜索中是有效的;另一方面,较小的变异因子可以加快收敛速度。同样,较大的交叉概率 CR 导致种群的更高的多样性。但是,较小的一个 CR 可以增加局部探索能力。因此,对于DE算法而言,选择一个适当的控制参数是相当重要的问题。而在传统DE算法中两个参数的设置为定值,导致算法不能够根据实际情况作出调整。

本文引入的模糊逻辑推理技术可动态调整每个个

体相对应的变异因子 F 和交叉概率因子 CR 。而对于模糊控制器的输入,由DE算法分析可以得到:种群迭代次数、种群多样性、个体优劣程度对于变异因子 F 和交叉概率因子 CR 的取值有着重要影响。因此,本文通过构建一个三输入二输出的模糊控制器来调整DE算法参数,达到平衡算法全局收敛和局部搜索能力、提高算法性能的目的。

为了描述算法的迭代次数,定义式如下:

$$\text{Iteration} = \frac{G}{G_m} Q \times 100\% \quad (8)$$

式中: Iteration —算法迭代百分数; G —当前代; G_m —算法最大迭代次数。

由式(8)可以看出,当算法开始运行时,迭代次数较低, $\text{Iteration} \rightarrow 0$,对于 F 和 CR 应当取较大值,增加种群的多样性,达到了增强算法的全局收敛能力的目的。随着算法逐渐运行到最大迭代次数时, $\text{Iteration} \rightarrow 100\%$, F 和 CR 应当取较小值,增加算法的局部收敛能力。

其次,为了描述群体的多样性程度,定义式如下:

$$\text{Diversity} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{NP} (f_{\text{best}} - f_i)^2 + 1}} \quad (9)$$

式中: Diversity —群体相似度; f_{best} —种群中最优个体适应值; f_i —种群中个体适应值。

当 $\text{Diversity} \rightarrow 0$ 时,表示群体相似度高种群多样性丰富, F 和 CR 应当取较小值,增加算法的局部收敛能力;当 $\text{Diversity} \rightarrow 1$ 时,表示群体相似度高种群多样性差,此时,对于 F 和 CR 应当取较大值,增加种群的多样性。

最后,为了描述个体优劣程度,定义式如下:

$$\text{Error} = \sqrt{\frac{f_i^2}{f_{\text{avg}}^2}} \quad (10)$$

式中: Error —个体优劣度; f_{avg} —当前父代群体的平均适应度。

以求最小值为例,当 $\text{Error} < 1$ 时,表示当前个体的适应度值较优, F 和 CR 应当取较小值,保留个体中的最优信息。反之,则表示个体较差, F 和 CR 应当取较大值,增加个体信息的扰动。

此外,为了能够真正实现模糊控制调整DE算法参数这个过程,还需要完成输入和输出变量的模糊化、模糊规则制定和推理以及模糊量的精确化这3部分内容。

(1) 输入和输出变量的模糊化。对于模糊控制器的输入变量迭代百分数 Iteration 、群体相似度 Diversity 、个体优劣度 Error 选择“低”、“中”、“高”为变量的模糊语言,即 $\{L, M, H\}$ 。而对于模糊控制器输出变量变异因子 F 和交叉概率因子 CR 选择“低”、“中低”、“中”、“中高”、“高”为变量的模糊语言,即 $\{L,$

ML, M, MH, H}。此外,本研究选用占内存空间最小的三角形隶属度曲线作为输入输出变量的隶属度函数。

那么,对于输出变量 *Iteration*、*Diversity*、*Error* 的隶属度函数如图 2 所示。

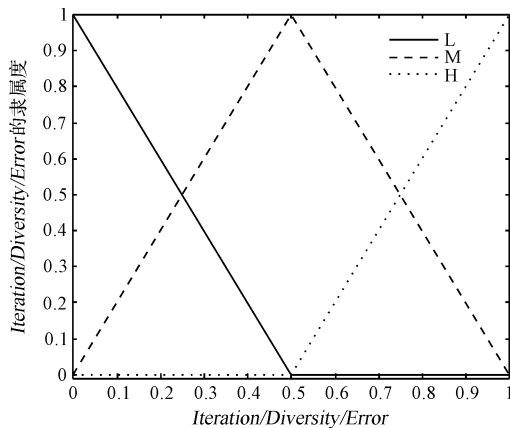


图 2 输入变量 *Iteration*/*Diversity*/*Error* 的隶属度函数

对于输出变量 *F*、*CR* 的隶属度函数如图 3 所示。

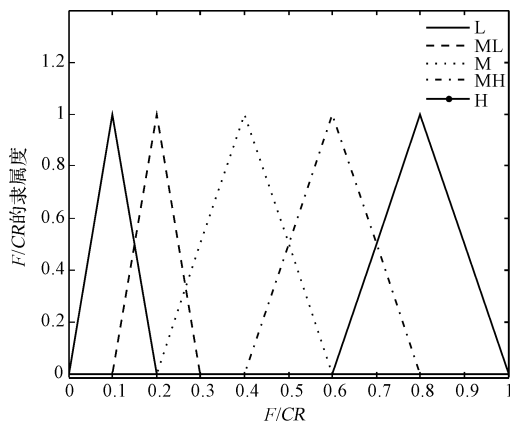


图 3 输出变量 *F*/*CR* 的隶属度函数

(2) 模糊规则选择与推理。根据前期对 *Iteration*、*Diversity*、*Error* 动态变化对输出变量 *F*、*CR* 取 大小的分析,从而得到模糊控制器的 27 条规则,如图 4 所示。

1. If (iteration is L) and (Diversity is L) and (Error is L) then (F is H)(CR is H) (1)
2. If (iteration is L) and (Diversity is L) and (Error is M) then (F is H)(CR is M) (1)
3. If (iteration is L) and (Diversity is L) and (Error is H) then (F is H)(CR is L) (1)
4. If (iteration is L) and (Diversity is M) and (Error is L) then (F is MH)(CR is H) (1)
5. If (iteration is L) and (Diversity is H) and (Error is L) then (F is ML)(CR is MH) (1)
6. If (iteration is L) and (Diversity is H) and (Error is M) then (F is ML)(CR is ML) (1)
7. If (iteration is L) and (Diversity is H) and (Error is H) then (F is M)(CR is L) (1)
8. If (iteration is L) and (Diversity is M) and (Error is M) then (F is M)(CR is ML) (1)
9. If (iteration is L) and (Diversity is M) and (Error is H) then (F is M)(CR is L) (1)
10. If (iteration is M) and (Diversity is L) and (Error is L) then (F is MH)(CR is MH) (1)
11. If (iteration is M) and (Diversity is L) and (Error is M) then (F is H)(CR is ML) (1)
12. If (iteration is M) and (Diversity is L) and (Error is H) then (F is H)(CR is L) (1)
13. If (iteration is M) and (Diversity is M) and (Error is L) then (F is MH)(CR is H) (1)
14. If (iteration is M) and (Diversity is M) and (Error is H) then (F is MH)(CR is ML) (1)
15. If (iteration is M) and (Diversity is H) and (Error is L) then (F is H)(CR is L) (1)
16. If (iteration is M) and (Diversity is H) and (Error is M) then (F is MH)(CR is ML) (1)
17. If (iteration is M) and (Diversity is H) and (Error is H) then (F is H)(CR is L) (1)
18. If (iteration is M) and (Diversity is M) and (Error is M) then (F is M)(CR is M) (1)
19. If (iteration is H) and (Diversity is L) and (Error is L) then (F is M)(CR is MH) (1)
20. If (iteration is H) and (Diversity is L) and (Error is M) then (F is M)(CR is M) (1)
21. If (iteration is H) and (Diversity is L) and (Error is H) then (F is M)(CR is L) (1)
22. If (iteration is H) and (Diversity is M) and (Error is L) then (F is MH)(CR is MH) (1)
23. If (iteration is H) and (Diversity is M) and (Error is M) then (F is MH)(CR is M) (1)
24. If (iteration is H) and (Diversity is M) and (Error is H) then (F is MH)(CR is ML) (1)
25. If (iteration is H) and (Diversity is H) and (Error is L) then (F is H)(CR is L) (1)

图 4 FDE 模糊控制规则

此外,本文采用 Mamdani 法进行模糊推理。

(3) 模糊量的清晰化。由于在本文中输出量 *F* 和 *CR* 的模糊论域与实际论域相同,可以将模糊控制器的输出直接作为 DE 算法的控制参数去动态调整。

3 基于 FDE 算法的电液伺服系统 PID 参数整定优化

本文设计的 FDE-PID 电液伺服系统控制结构如图 5 所示。

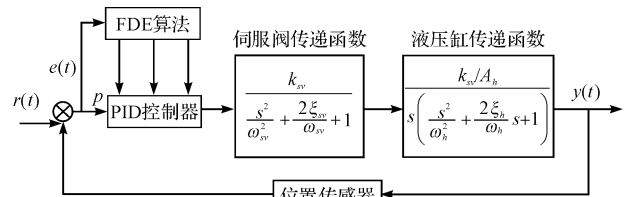


图 5 FDE-PID 电液伺服系统控制结构

$r(t)$ —位置设定值; $y(t)$ —位置当前值; $e(t)$ —偏差

PID 控制器参数 k_p 、 k_i 、 k_d 通过 FDE 算法进行优化整定。

3.1 基于 FDE 算法的 PID 控制器参数优化

常规 PID 控制器一般形式为:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

式中: k_p —比例系数; k_i —积分时间常数; k_d —微分时间常数。

首先,采用 FDE 算法对 PID 控制器参数优化,需要将 PID 控制器的 3 个控制参数比例系数 k_p 、积分时间常数 k_i 和微分时间常数 k_d 当做一个 3 维的解向量 $X(k_p, k_i, k_d)$,按照下式作为变量的可行搜索空间,即:

$$\begin{cases} a_{K_p}^* \leq k_p \leq \beta K_p^* \\ a_{K_i}^* \leq k_i \leq \beta K_i^* \\ a_{K_d}^* \leq k_d \leq \beta K_d^* \end{cases} \quad (12)$$

式中: K_p^* 、 K_i^* 、 K_d^* —经过 ZN 法整定出来比例系数、积分时间常数、微分时间常数; α 、 β —扩展系数。

其次,选用 *ITEA* 误差性能指标反应系统调节品质。为了防止控制量以及超调量过大,在目标函数中加入控制量输入的平方项和惩罚功能,系统最终的性能指标适应度函数为:

$$\text{if } ey(t) < 0 \quad J = \int_0^{\infty} (w_1 * |e(t)| + w_2 * u^2(t) + w_3 * |ey(t)|) dt \quad (13)$$

其中, $ey(t) = y(t) - y(t - 1)$ 。

式中: $e(t)$ —系统误差; $u(t)$ —控制器输出; t_u —上升时间; w_1 、 w_2 、 w_3 —权值,且 $w_3 \geq w_1$ 。

最后,利用 FDE 算法对 PID 控制器参数优化步骤

如下:

(1) 设置算法参数,如种群规模 NP 、问题维度 D 、最大迭代次数 G_m 、拓展系数和、权值 w_1 、 w_2 、 w_3 ;

(2) 初始化操作。按照 ZN 法求出 k_p 、 k_i 、 k_d 的初始值,按照式(12)进行确定解生成空间。按照初始化公式生成 $NP \times D$ 的种群;

(3) 评价当前群体中个体适应值,得到种群最优个体和最优值。同时,按照式(8~10)计算当前种群 $Iteration$ 、 $Diversity$ 、 $Error$,将其作为模糊控制器输入,经过模糊推理后,输出每个个体对应的变异因子 F 和 CR ;

(4) 判断是否满足迭代终止条件。若满足,输出最优解和最优值。若不,继续步骤(5);

(5) 按照式(5)进行变异操作;

(6) 按照式(6)进行交叉操作;

(7) 采用式(13)作为适应度函数,按照式(7)完成选择操作。返回步骤(3)。

FDE 算法优化 PID 参数流程图如图 6 所示。

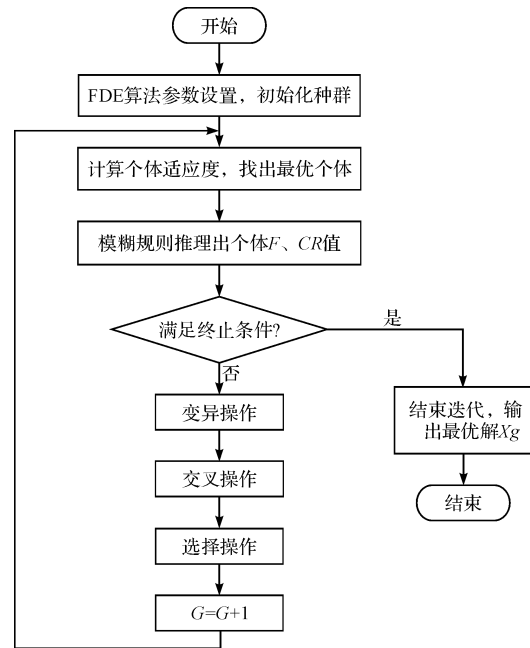


图 6 FDE 算法优化 PID 参数流程图

3.2 实验及结果分析

本文选择力士乐 4WS2EM6-2X 型伺服阀以及力士乐 CG280D630 型液压缸作为粉末液压机电液伺服系统的伺服阀与液压缸。根据查阅的伺服阀与伺服缸使用手册,确定控制系统各参数如表 1 所示。

将表 1 的参数值代入系统模型式(3)中,则可得被控液压伺服系统的开环传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{2.9936}{4.615 \times 10^{-9}s^5 + 2.1525 \times 10^{-6}s^4 + 5.204 \times 10^{-4}s^3 + 0.01307s^2 + s} \quad (14)$$

根据式(14)在 Simulink 中搭建对象模型,进行仿真研究。设定 FDE 算法参数,种群规模 $NP = 50$,最大迭代次数 $G = 100$,延拓系数 $\alpha = 0.2$ 、 $\beta = 6$, $w_1 = 0.99$ 、 $w_2 = 0.01$ 、 $w_3 = 100$ 。在 $t = 0$ s 时,给系统加入一个阶跃输入信号,仿真时间 $T = 5$ s,采样时间 $t_m = 0.001$ s。此外,为了验证控制器的抗干扰能力, $t = 3$ s 时,给系统加入干扰。经过 ZN 法整定系统参数为 $K_p = 13.12$ 、 $K_i = 0.012$ 、 $K_d = 0.0135$ 。在此基础上,采用 FDE 算法对上述对象进行 PID 参数优化整定,PID 控制器参数及性能指标为 $K_p = 6.85$ 、 $K_i = 0.000305$ 、 $K_d = 0.000348$ 、 $ITAE = 21.16$ 。

FDE 算法优化 PID 得到的性能指标 $ITAE$ 变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出:适应度值随着迭代次数的增加在优化中不断减小,具有较快的收敛速度。本研究通过 FDE 算法实现了较大范围内的参数寻优,使得设计出的 PID 控制器参数选择更加合理,实现了更好的控制效果。为了验证 FDE 算法整定 PID 参数的优越性,本研究在调节时间 t_s 、峰值时间 t_p 、超调量 δ 这 3 个方面将 FDE-PID、DE-PID 和常规 PID 进行仿真对比,结

表 1 电液伺服系统参数值

| 序号 | 参数 | 参数值 |
|----|---------------|---|
| 1 | k_{sv} | $0.094 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{A})$ |
| 2 | ω_{sv} | 320 rad/s |
| 3 | ξ_{sv} | 0.7 |
| 4 | A_h | 0.0314 m^2 |
| 5 | ω_h | 46 rad/s |
| 6 | ξ_h | 0.2 |

果如表 2、图 8 所示。

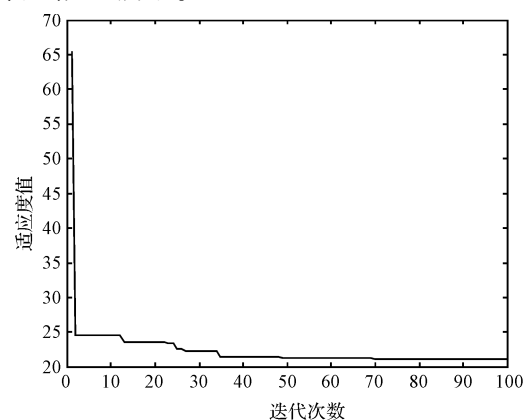


图 7 适应度值变化曲线

从图 8 可以看出:在阶跃响应初期,常规 PID 控制在达到稳态之前超调量很大、调整时间很长。而经过优化后的 DE-PID、FDE-PID 控制效果要明显优于常规 PID 控制,其中 FDE-PID 控制在超调量、调节时间和峰值时间上又相较于其他控制算法有比较明显的优势。当为系统加入干扰后,FDE-PID 控制器在 0.25 s 的时间内重新回到稳定状态,且没有持续波动,表现出了很好的抗干扰性。

而其他控制器在加入干扰后需要较长时间才能重新回到稳态,且在回到稳态的过程中有较大的持续波动。

表 2 控制性能指标对比

| 整定方法 | t_s/s | t_p/s | $\delta/(%)$ |
|---------|---------|---------|--------------|
| PID | 1.01 | 0.35 | 10.56 |
| DE-PID | 0.95 | 0.95 | 0 |
| FDE-PID | 0.25 | 0.25 | 0 |

另外,在前期分析中知道系统的参数具有时变性,为了检验 FDE-PID 控制器对时变系统的鲁棒性,本研究将系统的阻尼比 ξ_h 由 0.2 增加为 0.6,即得到变化后新的系统开环传递函数如下式所示:

$$G_p(s) = \frac{2.9936}{4.615 \times 10^{-9}s^5 + 2.3223 \times 10^{-6}s^4 + 5.96486 \times 10^{-4}s^3 + 0.030462s^2 + s} \quad (15)$$

ξ_h 参数改变后系统阶跃响应曲线如图 9 所示。

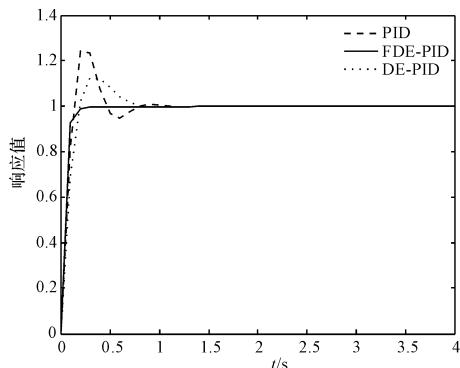


图 9 ξ_h 参数改变后系统阶跃响应曲线

由图 9 可以看出:当系统参数发生摄动时,FDE-PID 控制系统在 0.2 s 左右对阶跃信号快速响应、无超调量、响应过程平滑稳定;DE-PID 控制产生了较大超调量;常规 PID 控制则伴有持续的振荡,系统表现出很强的不稳定性。因此,可以看出 FDE-PID 同样具有很好的鲁棒性。

4 结束语

针对粉末冶金液压机的电液位置伺服系统具有时变性、强干扰等特性,采用传统 PID 控制无法满足控制要求,本文提出了一种模糊差分进化算法,以迭代次数、种群多样性、个体优劣程度作为模糊控制器输入变量,以变异因子和交叉概率因子作为模糊控制器的输出变量,实现对算法参数的自适应调整,均衡算法的局部搜索能力和全局探索能力。

笔者将其用于粉末液机电液伺服系统 PID 参数优化中。实验结果表明:相较于传统 PID、DE-PID 控制,FDE-PID 控制器在系统响应速度、抗干扰性、鲁棒性等

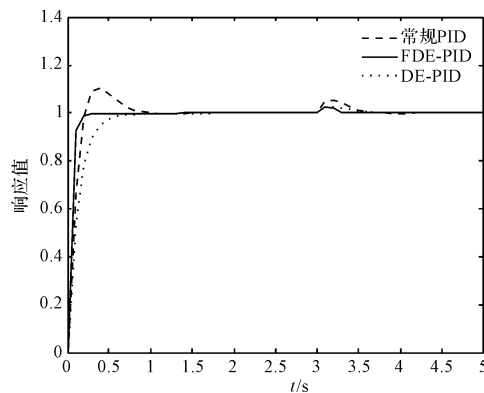


图 8 系统阶跃响应曲线

方面具有明显优势,研究结果具有一定的实用价值。

参考文献 (References):

- [1] 罗丽丽.全自动粉末冶金专用液压机成套设备[C].第十二届全国塑性工程学术年会第四届全球华人塑性加工技术研讨会,重庆:中国机械工程学会塑性工程学会,2011.
- [2] 俞建卫,徐 蕾,吴士鹏.基于遗传算法优化的模糊 PID 在粉末液压机伺服系统的应用研究[J].组合机床与自动化加工技术,2013,22(8):58-61.
- [3] 吕 磊,章国宝,黄永明.基于蝙蝠算法的 PID 参数整定[J].控制工程,2017,24(3):548-553.
- [4] 霍延军.基于量子粒子群算法的 PID 参数自整定方法[J].微电子学与计算机,2012,29(10):194-197.
- [5] 张家骏.基于粒子群算法的 PID 控制器参数优化研究[J].计算机仿真,2010,27(10):191-222.
- [6] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4):341-359.
- [7] 汪慎文,丁立新,张文生,等.差分进化算法研究进展[J].武汉大学学报:理学版,2014,60(4):283-292.
- [8] SARKER R, ELSAYED S M, RAY T. Differential evolution with dynamic parameters selection for optimization problems [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(5):689-707.
- [9] 王 慧,张晓曼. MATLAB 求解电液伺服阀的流量特性曲线[J].电子测量与仪器学报,2015,29(8):1236-1244.
- [10] 关景泰.机电液控制技术[M].上海:同济大学出版社,2003.
- [11] 赵江平,舒海威.机电液一体化联锁装置设计[J].液压气动与密封,2017(7):53-56.
- [12] 张春娟,林文茂,司良群.机电液系统故障特征提取方法分析与研究[J].液压气动与密封,2018(9):32-24.
- [13] 高钦和,龙 勇,马长林,等.机电液一体化建模与仿真技术[M].北京:电子工业出版社,2012.
- [14] 张茂力,朱海清,费宏伟.基于预估油压的安全阀在线校验技术研究[J].压力容器,2017,34(11):76-80.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

戴本尧.基于模糊 DE 算法的粉末液机电液伺服系统 PID 参数优化研究[J].机电工程,2019,36(4):391-396.

DAI Ben-yao. Optimization of PID parameters of powder hydraulic electro-hydraulic servo system based on fuzzy DE algorithm[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(4):391-396.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>