

基于改进遗传算法的二自由度PID控制注射机液压控制系统

楼天良¹, 楼懋恩¹, 蔡金亚²

(1. 义乌工商职业技术学院, 浙江 义乌 322000; 2. 浙江广厦建设职业技术大学, 浙江 东阳 322100)

摘要: 基于二自由度PID控制器的注射机液压控制系统, 采用改进遗传算法进行二自由度参数整定。半实物仿真实验表明: 改进遗传算法通过优化选择算子和变异算子提高算法搜索速度并保证全局最优性, 具有更快的搜索速度和全局最优性, 在最优参数的控制下液压系统具有理想的控制效果。

关键词: 改进遗传算法; 注射机; 液压控制; 二自由度PID

中图分类号: TP301

文献标识码: B

文章编号: 1005-3360(2020)10-0096-04

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2020.10.026

Two-Degree-of-Freedom PID Control Hydraulic Control System of Injection Molding Machine Based on Improved Genetic Algorithm

LOU Tian-liang¹, LOU Mao-en¹, CAI Jin-ya²

(1. Yiwu Industrial & Commercial College, Yiwu 322000, China;

2. Zhejiang Guangsha Vocational and Technical University of Construction, Dongyang 322100, China)

Abstract: The hydraulic control system of the injection molding machine based on the two-degree-of-freedom PID controller adopts an improved genetic algorithm for two-degree-of-freedom parameter tuning. The hardware-in-the-loop simulation experiment shows: the improved genetic algorithm increases the search speed of the algorithm and guarantees the global optimality by optimizing the selection operator and the mutation operator. It has faster search speed and global optimality. The hydraulic system has a very ideal control effect under the control of the optimal parameters.

Key words: Improved genetic algorithm; Injection molding machine; Hydraulic control; Two-degree-of-freedom PID

注射成型设备以生产效率高、成本低、全自动化流程等优点, 广泛应用于交通、建材、包装等领域^[1], 注射成型是将一定温度下的熔融塑料聚合物, 通过螺杆加压射入模腔后冷却固化成型的过程^[2]。注射过程中需要克服熔融塑料流体存在的流动阻力以及与模具型腔间的气压差, 导致液压系统存在非线性和时变性特点^[3]。因此, 实现注射机液压系统的精密控制具有重要意义。

常规PID控制器由于结构简单以及易于实现等优点广泛应用于注射机液压控制。但常规PID控制器的控制参数固定, 对非线性以及时变性系统的控制效果差, 系统动态响应和稳态精度无法兼顾^[4]。为了改善PID控制器对非线性时变系统的控制性能, 提出利用量子遗传算法^[5]、粒子群算法^[6]、PB神经网络^[7]、模糊控制^[8]等方法在线调节PID控制参数以适应液压系统的时变非线性, 减小系统超调, 提高控制精度, 但系统动态响应和稳态性能仍然无法

实现统一。

为克服常规PID控制存在的局限性, 本研究将二自由度PID控制器结构引入注射机液压控制系统, 采用改进遗传算法对二自由度PID控制参数分别整定, 同时改善注射机液压系统的动态响应特性和稳态特性, 通过半实物仿真平台对所提控制方案的控制性能进行实验验证。

1 注射机液压控制系统

注射机液压控制系统主要包括伺服电机、液压油泵和注射控制阀^[9], 图1为注射机液压闭环控制系统。

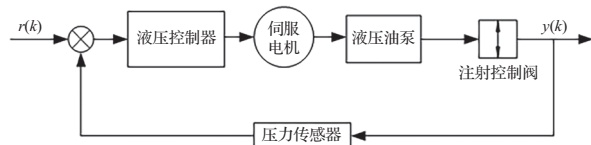


图1 注射机液压闭环控制系统

Fig.1 Hydraulic closed-loop control system of the injection molding machine

操作人员通过伺服电机的人机交互界面设置液压油泵压力, 给定压力通过液压控制器转化为伺服电机的驱动电信号控制永磁同步电机运转转速和转矩。液压油泵受

收稿日期: 2020-03-01

联系人, ltl521@163.com

到伺服电机的驱动实时调整注射控制阀(执行器)以实现注射压力的控制。在液压油泵出口处设置压力传感器,将压力信号反馈至液压控制器以调整输出控制信号,实现整个液压系统的闭环控制。

图2为注射机液压控制半实物仿真平台构成图,表1为实验主要参数。

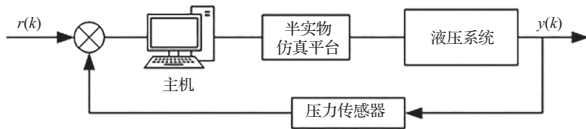


图2 注射机液压控制半实物仿真平台

Fig.2 Semi-physical simulation platform for hydraulic control of injection molding machine

表1 液压系统主要参数

Tab.1 Main parameters of hydraulic system

项目	参数
伺服电机	型号 230B18K4-A1XNG1 额定转矩/(N·m) 234 额定转速/(r·min ⁻¹) 1500 最高转速/(r·min ⁻¹) 2000 转子惯量/(kg·m ²) 0.035
驱动器	型号 NAS4D290XZ 最大压力/MPa 17.5 最大流量/(L·min ⁻¹) 150 驱动控制频率/kHz 6 最大输出电流/A 90 额定输出电流/A 54

采用通用半实物仿真平台(型号NI sb9632, 仿真环境AMESim)连接控制器和控制液压系统, 液压系统的输出量经由压力传感器采集数据并传输给上位机。上位机根据设定压力信号与反馈压力信号计算下一时刻的控制输出信号, 通过半实物仿真平台施加于液压系统, 形成液压控制闭环。

2 二自由度PID控制器

常规PID控制器属于一自由度PID控制器, 仅具有一组控制参数, 在设定控制参数时无法兼顾控制系统的动态特性和稳态特性。上升时间、调节时间和超调量作为衡量系统动态特性的主要参数, 反映系统的动态响应速度和对外部扰动的抑制能力; 稳态特性主要指标为稳态误差, 反应系统对设定目标值的跟踪精度。在常规PID控制系统中, 动态特性最佳的PID控制参数与稳态特性最佳的PID控制参数间差别很大。因此, 一自由度PID控制器在理论上和实践上均无法达到理想的控制效果。

二自由度PID控制器具有2组可独立调整的控制参数, 分别独立地整定动态特性最优控制参数和稳态特性最优控制参数, 使系统的动态响应速度、外部扰动抑制能力及控制精度同时达到最佳。图3为目标值滤波器型二自由度PID控制系统框图^[10]。目标滤波器的传递函数为 $H(s)$, 主控制器的传递函数为 $C(s)$, 模块 $C(s)$ 和模块 $F(s)$ 共同构成微分先行型PID控制器, 被控对象传递函数为 $G(s)$, 外部扰动传递函数为 $D(s)$ 。其中, $G(s)$ 和 $D(s)$ 为给定的不可操作部分, $C(s)$ 、 $F(s)$ 及 $H(s)$ 为可操作部分。

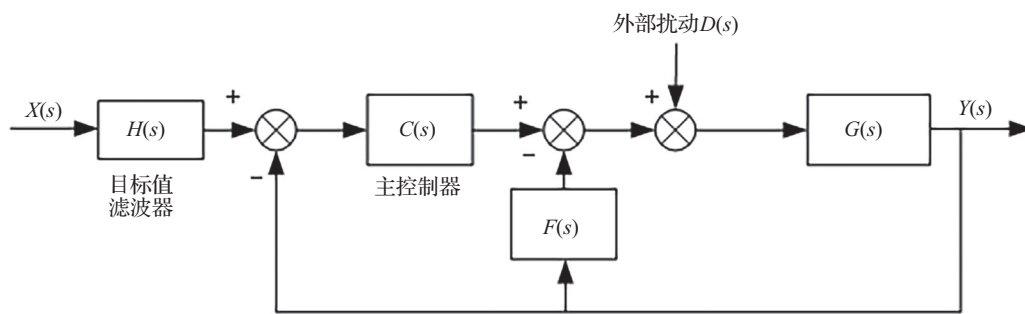


图3 目标值滤波器型二自由度PID控制系统

Fig.3 Two-degree-of-freedom PID control system of the target value filter type

从图3可推导出目标值滤波器型二自由度PID控制系统的响应表达式为:

$$Y(s) = \frac{H(s) \cdot C(s) \cdot G(s)}{1 + G(s) \cdot [F(s) + C(s)]} \cdot X(s) + \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot [F(s) + C(s)]} \cdot D(s) \quad (1)$$

$$\text{式(1)中: } C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s}\right); F(s) = K_p \cdot \left(\frac{T_D \cdot s}{1 + \lambda T_I \cdot s}\right);$$

K_p 为PID控制器比例系数; T_I 为积分时间常量; T_D 为微分时间常量; λ 为微分增益系数的倒数, $0.1 \leq \lambda \leq 1$ 。

式(1)包含2项, 第1项反映了输出 $Y(s)$ 受到输入量 $X(s)$ 影响而产生的分量, 第2项反映了外部扰动 $D(s)$ 对输出产生的影响。

针对式(1)中的第2项应用期望合成控制算法, 当外部扰动 $D(s)$ 改变时, 可通过调整可操作部分 $[F(s) + C(s)]$ 使得控制器具有最佳外部扰动抑制能力。能够实现外部扰动抑制的算法为:

$$F(s) + C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + \frac{T_D \cdot s}{1 + \lambda T_i \cdot s}\right) \quad (2)$$

根据式(2)确定 $[F(s)+C(s)]$ 后,第1项中针对输入量 $X(s)$ 变化时剩下的可操作部分为 $H(s) \cdot C(s)$ 。能够实现对输入量 $X(s)$ 精确跟踪的控制算法为:

$$H(s) \cdot C(s) = K_p \left(a + \frac{1}{T_i \cdot s} - \frac{b}{1 + T_i \cdot s}\right) + \frac{c T_D \cdot s}{1 + \lambda T_i \cdot s} \quad (3)$$

定值控制要求当系统达到稳定状态后,目标滤波器应满足终值定理^[11]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s H(s) = 1 \quad (4)$$

式(4)中: $a(0 \leq a \leq 1)$ 为二自由度比例增益系数; $b(0 \leq b < 1)$ 为二自由度积分时间系数; $c(0 \leq c < 2)$ 为二自由度微分时间系数。

联立式(2)和(3)可得 $H(s)$ 的表达式为:

$$H(s) = \left(\frac{c T_D \cdot s}{1 + \lambda T_i \cdot s} - \frac{b}{1 + T_i \cdot s}\right) \cdot \frac{T_i \cdot s}{1 + T_i \cdot s} + \frac{1 + a T_i \cdot s}{T_i \cdot s} \quad (5)$$

根据式(2)~(5)确定标值滤波器型二自由度PID控制系统各模块的控制算法。图4为目标值滤波器型二自由度PID控制传递函数框图。

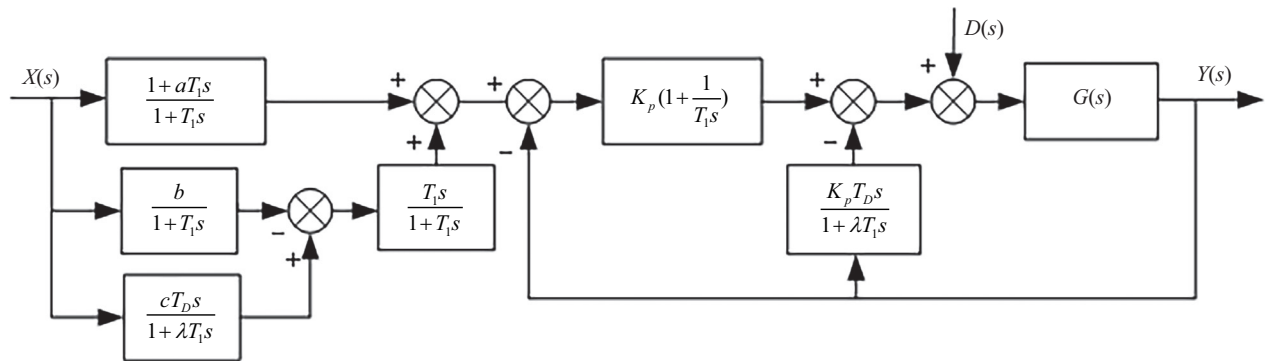


图4 目标值滤波器型二自由度PID控制传递函数框图

Fig.4 Target value filter type two-degree-of-freedom PID control transfer function block diagram

3 改进遗传算法参数整定

常规二自由度PID控制器的参数整定过程为:选定常规一自由度PID控制器的控制参数 K_p 、 T_i 和 T_D ,使系统外部扰动抑制效果最佳;确定二自由度PID控制器的控制参数 a 、 b 、 c ,使整个系统满足稳定性要求。一自由度控制参数和二自由度控制参数的整定方法均采用试凑法和经验选取,参数调节过程花费大量时间和人力,无法满足实时控制的要求且无法保证得到最佳的控制效果。采用遗传算法对PID参数整定具有结构简单以及鲁棒性强等优点,能够实现参数自整定,同时实时性强^[12]。考虑到遗传算法在实际应用中存在早期成熟、收敛速度慢等问题,为保证搜索准确性,采用改进遗传算法整定二自由度PID控制参数。

遗传算法的选择算子设置不合理是造成遗传算法早期成熟的主要因素,针对该现象改进选择算子。此外,遗传算法的局部搜索能力差导致收敛速度慢,因此,对用于局部搜索的变异算子也进行优化。采用改进遗传算法搜索二自由度PID控制参数的具体步骤为:

(1)依据经验确定二自由度PID控制参数的取值区间,选择实数编码方式。

(2)确定适应度函数:

$$J = \frac{1}{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N e(k)^2 + 1} \quad (6)$$

式(6)中: $e(k)$ 为 k 时刻的系统误差; J 为适应度函数, J 越小代表个体的适应度越强。

(3)改进选择算子:采用选择误差较小的无放回余数随机选择算子代替比例选择算子。在进行选择操作之前,将种群中重复的个体淘汰,剩下个体构成新种群,并在新种群中通过无放回余数法进行随机选择。

(4)交叉算子:在区间 $[0, 1]$ 产生随机数,当这个随机数大于指定阈值则进行交叉操作。设交叉概率为 p_c ,由个体 x 和 y 交叉产生新个体 z 的算法为:

$$z = p_c \cdot x + (1 - p_c) \cdot y \quad (7)$$

(5)改进变异算子:在进行几轮迭代后,筛选出适应度强的几个优良种群并对其进行特殊的变异操作。在优良种群附近采用大概率变异操作,在避免搜索陷入局部极小值的同时加快算法收敛速度。

(6)若当前进化代数达到最大迭代数或参数已收敛到指定精度,则结束计算,否则返回步骤(3)继续执行。

4 注射机液压控制实验

实验运行参数为: $K_p \in [0, 100]$; $T_i \in [0, 5]$; $T_D \in [0, 1]$; $a \in [0, 2]$; $b \in [0, 2]$; $c \in [0, 2]$ 。种群大小设为 $n=50$,最大迭代数为500,无放回余数随机选择,交叉概率 $p_c=0.5$,变异概率 $p_m=0.05$,优良种群变异概率 $p_{am}=0.3$,伺服电机的设定转速为200 r/min。图5为改进遗传算法和普通遗传算法在相

同设定参数条件下迭代50次的每代种群平均训练误差图,图6为注射机液压控制系统对阶跃输入信号的响应曲线。

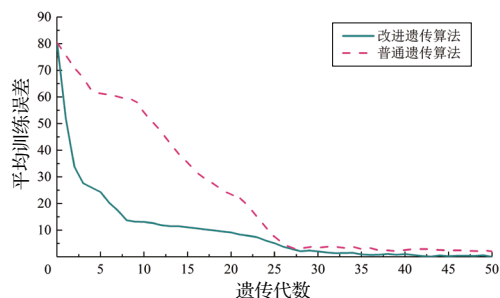


图5 种群平均训练误差曲线

Fig.5 Average training error curve of population

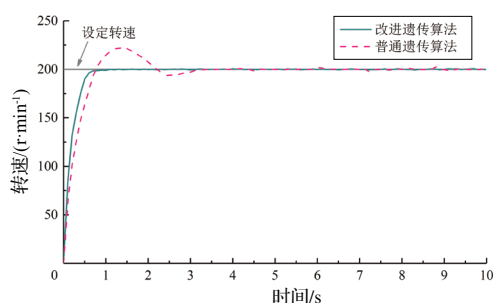


图6 注射机液压控制系统对阶跃输入信号的响应曲线

Fig.6 Response curve of hydraulic control system of injection molding machine to step input signal

从图5和图6可以看出,改进遗传算法整定二自由度PID控制参数具有明显的优越性。普通遗传算法在第27代左右时陷入局部极小值,并在该极小值附近不断进化直到最后,而改进遗传算法能够不断搜索直到找到全局最优解,且具有更快的搜索速度。同时,基于遗传算法优化的二自由度PID控制器具有更小的超调量、更快的响应速度以及更高的稳态控制精度。

5 结论

为实现注射机液压系统高精度控制及理想动态响应,本研究利用改进遗传算法整定二自由度PID控制参数,基于半实物仿真平台实现注射机液压系统控制。实验表明:改进遗传算法通过优化选择算子和变异算子提高算法搜索速度并保证全局最优性,利用改进遗传算法整定的二自由度PID控制参数在阶跃响应实验中能够兼顾系统的稳态特性和动态特性,表现出快速响应、0超调的理想动态特性,且系统稳态误差小、控制精度高。

参考文献

- [1] Shen C. An improved algorithm for the simulation of injection-molding filling process[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2005, 24(7): 691-698.
- [2] Yuan W M, Chen F X, Cao Y R, et al. Hydraulic control system of high-speed response for servo injection molding machine[J]. Light Industry Machinery, 2018, 36(5): 87-92.
- [3] 杜巧连,陈旭辉. 液压注塑机伺服控制系统设计[J]. 河南科技, 2015(2): 48-50.

- [4] Xu L P, Fu H C. Design of improved PID algorithm-based model for hydraulic control in process of automobile transmission[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(16): 90-93.
- [5] 王浩,王继先. 基于量子遗传算法的注塑机PID控制系统[J]. 塑料科技, 2019, 47(9): 99-102.
- [6] Ye Y, Yin C B, Gong Y, et al. Position control of nonlinear hydraulic system using an improved PSO based PID controller[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 83: 241-259.
- [7] Li W L, Shi D L, Wang Y J. RBF neural network based PID control for electro-hydraulic proportional loading system[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2015, 13(4): 342-346.
- [8] Zhang F, Zong S, Li X, et al. Hydraulic gap control of rolling mill based on self-tuning fuzzy PID[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2016, 31(6): 2 985-2 997.
- [9] Syedhidayat S, Wang Q, Mohsen A H, et al. Choice and exchange of lubricating oil for injection molding machine[J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2019, 12(4): 378-382.
- [10] Chen S Y, Chen C S, Yang Z W. Self-tuning cross-coupled two degree-of-freedom PID control for position synchronization of dual linear motors[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 64: 214-234.
- [11] Pachauri N, Singh V, Rani A. Two degree of freedom PID based inferential control of continuous bioreactor for ethanol production[J]. Isa Transactions, 2017, 68: 235-250.
- [12] Rajarathinam K, Gomm J B, Yu D L, et al. PID controller tuning for a multivariable glass furnace process by genetic algorithm[J]. International Journal of Automation and Computing, 2016, 13(1): 64-72.