

# 粒子群自整定变论域模糊控制算法 在全电动注塑机中的应用

## Application of Particle Swarm Self-tuning Variable Universe Fuzzy Control Algorithm in All Electric Injection Molding Machine

马立军<sup>1</sup>, 廖贵成<sup>2</sup>, 李瑞娟<sup>1(1)</sup>Ma Lijun<sup>1</sup>, Liao Guicheng<sup>2</sup>, Li Ruijuan<sup>1(1)</sup>

- 1 柳州职业技术学院, 广西 柳州 545006

2 广西科技大学, 广西 柳州 545006

- 1 Liuzhou Vocational and Technical College, Liuzhou 545006, China

2 Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China

## ● 摘要:

单一固定型号注塑机在不同的生产工艺与现场应用环境情况下,在注塑的不同阶段对温度的控制必须达到最优,这样注塑制品的次品率与效率才会得到保证。不同的熔融原料对温度控制又会产生较大的影响,所以固定PID参数控制注塑机注塑温度要么超调量过大、要么调整时间过长,都无法满足注塑要求。本文引入改进的自整定变论域模糊算法,通过帐篷映射序列构建粒子的多维空间,排除不同工况下的外界干扰,模糊算法自动对闭环控制参数进行寻优。搭建Matlab仿真平台,通过仿真实验验证了算法比定参数PID控制效果优良,鲁棒性与适用性更好。

## ● Abstract:

Under the conditions of different production processes and field application environments, the temperature control of a single fixed type injection machine must be optimized at different stages of injection molding, so that the defective rate and efficiency of injection molding products can be guaranteed. Different melting raw materials will have a greater impact on temperature control, so fixed PID parameters control injection temperature of injection molding machine either overshoot too much or adjust time too long, can not meet the requirements of injection molding. In this paper, an improved self-tuning variable universe fuzzy algorithm is introduced. The multi-dimensional space of particles is constructed by tent mapping sequence, which eliminates external interference under different conditions. The closed-loop control parameters are automatically optimized by the fuzzy algorithm. The simulation platform of Matlab is built, and the simulation experiment proves that the algorithm has better effect, robustness and applicability than the fixed parameter PID control.

## ● 关键词:

注塑机; 模糊控制; 粒子群算法; 帐篷映射; PID; Matlab

## ● Key words:

Injection molding machine; Fuzzy control; Particle swarm optimization; Tent mapping; PID; Matlab

## ● 中图分类号:

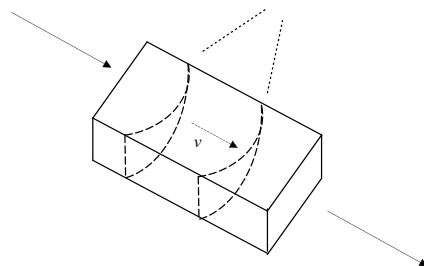
TQ320.52; TP301.6

● 文献标识码: A

全电动注塑机的射胶推动装置—滚珠丝杆是由伺服电机直接提供动力,因此其能源利用率较高、噪音小、产生的环境污染少。但是国内对伺服电机的控制仍然处于探索阶段,即使有成形的产品,其关键部件伺服控制器、控制策略等都依赖进口,所以推动全电动注塑机控制器的研发、探索其优良的控制方法仍然需要大家的努力<sup>[1]</sup>。

其中控制策略或者说控制方法中较为关键的是对速度的控制,注射速度与注射面积的关系如图1所示。速度是注塑机的射胶速度,也就是单位时间内螺杆的前向位移量。注射速度过慢或者过快

都会带来问题,过慢会使制品的密度不均匀、模具填充不饱满,过快会导致制品因不规则运动产生气泡,甚至出现烧焦现象<sup>[2]</sup>。

▲ 图1 注射速度( $v$ )与注射面积( $A$ )Fig.1 Injection rate ( $v$ ) and injection area ( $A$ )

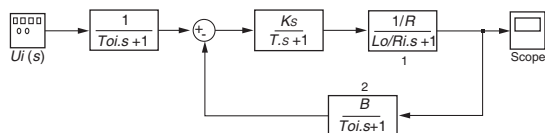
通常对注射速度采用PID控制,但是注塑机本身的压射过程是一个非线性、时变性较强的过程,传统的PID控制显然无法满足其控制要求。因此国内外很多专家对PID在注塑机中的应用进行了很多改良,例如神经网络自适应PID算法、蚁群改良PID控制算法、人工智能优化PID算法等,但是这些算法有的需要大量的先导数据,不能适应不同型号各种形态的电动注塑机的控制需求,有的过于简单,对于强时变性的控制系统无法获得快速的控制参数,这些控制算法都不同程度存在缺陷或者局限性。本文将变论域模糊控制算法应用于全电动注塑机的PID反馈控制中,模糊控制可以很好地适应非线性系统,变论域控制能够应对控制过程中的时变特性。另外引入粒子种群算法优化变论域参数,使输出的PID控制参数可以更好地优化,能够大大提高系统的快速性和准确度<sup>[3-4]</sup>。

## 1 注塑机射胶控制系统描述

注塑机射胶系统比较复杂,想要准确建立模型比较困难,研究算法只需建立通用的控制仿真模型,一般的双闭环控制(电流环、速度环)对于电机控制模型比较常用,但是注塑机螺杆的位置控制直接关系到制品的成型品质,所以必须加入位置环<sup>[5-6]</sup>。

### 1.1 电流环

电流环传递函数示意图2。如图2所示,电流环中的电流随着转速的增加逐渐增大,快速压射过程中电流环起到至关重要的作用。其中 $U_i(s)$ 系统输入的给定电流值,也就是一定负载、额定电压下需要速度对应的电流值; $T_{oi}(s)$ 为反馈回路中的时间常数; $T_s$ 、 $K_s$ 分别为直流逆变、交流逆变控制器的时间常数和放大倍数; $R$ 、 $L_o/Ri$ 分别为伺服电机等效阻抗和磁链时间常数。

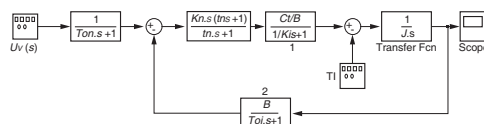


▲ 图2 电流环传递函数示意图

Fig.2 Schematic diagram of transfer function of current loop

### 1.2 速度环

速度环是电流环的一部分,采用比例积分传递函数,其中 $T_{on}$ 是系统传感器滤波时间常数; $B$ 是速度环的放大增益; $K_n$ 、 $t_n$ 分别是转速调节控制器的放大增益和滞后时间常数; $J$ 与 $C_t$ 分别是伺服电机电枢转动惯量和转矩系数。速度环传递函数示意图3。

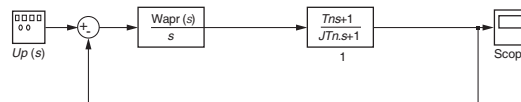


▲ 图3 速度环传递函数示意图

Fig.3 Schematic diagram of transfer function for speed loop

### 1.3 位置环

位置环是整个控制系统的最外环,也就是最终靠位置的移动控制整个滚珠丝杆才能将熔融料以合适的速度送入模具中。其中 $W_{apr}(s)$ 是系统的位置环调节器,一般根据不同的注塑机型号取适当的增益参数即可。位置环传递函数示意图4。



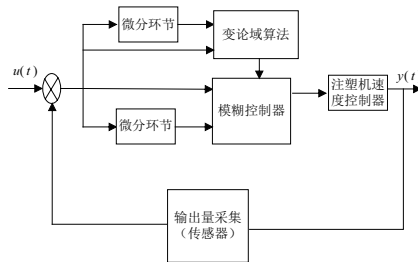
▲ 图4 位置环传递函数示意图

Fig.4 Schematic diagram of transfer function for position loop

## 2 自适应变论域模糊控制器搭建

### 2.1 变论域模糊控制算法原理及实现方法

由于模糊控制算法、模糊控制规则有单调性的特点,往往造成控制响应速度不够快、控制精度差的后果,所以考虑引入变论域算法,根据输入量的大小实时调整论域的大小,这样不仅能够更快地输出结果,而且也能够提高控制精度。变论域模糊控制器示意图5。



▲ 图5 变论域模糊控制器示意图

Fig.5 Schematic diagram of variable universe fuzzy controller

如果系统有一个输入量 $u(x)$ ,对应的论域伸缩因子为 $\alpha$ ,系统对应一个输出量 $y(x)$ ,对应的输出论域伸缩因子为 $\beta$ ,输入论域变化示意图如图6所示。

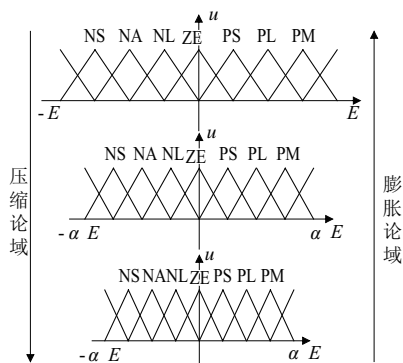


图6 伸缩因子影响论域变化示意图

Fig.6 Schematic diagram of influence of expansion factor on universe change

伸缩因子在论域上具有严格的对偶性(对称于 $y$ 轴)、正规性(在 $\pm E$ 处为1)、单调性(在论域内部严格递增或者递减)。输出域上面的变化类似于输入域,只不过将系数改为另一个参数,例如 $\beta$ 。

输入论域的伸缩因子较为常用的有:

$$\alpha(x) = 1 - ce^{-kx^2}, \quad c \in (0,1), k > 0 \quad (1)$$

其中 $x$ 为误差,  $c$ 与 $k$ 根据系统需要是可调节常数。

输出论域的伸缩因子较为常用的有:

$$\beta(x) = k \sum_{i=1}^n p_i \int_0^1 e_i(\tau) d\tau + \beta(0) \quad (2)$$

其中当输入系 $n$ 为1,  $k$ 和 $p_i$ 都是可调整参数,一般初值 $\beta(0)$ 可取1。

## 2.2 标准粒子群优化算法

粒子群优化算法是利用适应度函数判断出粒子在 $D$ 维空间中的最优位置 $x_{i,j}(t)$ ,这些粒子的最优位置就是所求问题的最优解。通常可以把这些粒子初始化,粒子的飞行速度定义为 $v_{i,j}(t)$ ,  $i$ 代表第 $i$ 个粒子,  $j$ 代表第 $j$ 维空间;粒子的最优位置和整个种群的最优位置分别定义为 $p_{i,j}(t)$ 和 $p_g(t)$ 。每迭代一次使用适应度函数计算粒子的适应度,每个粒子根据计算出的适应度决定继续保留自己的位置还是使用全局最优位置替代自己的位置,定义粒子的速度与位置公式如式(3)、(4)所示<sup>[7-8]</sup>:

$$v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1r_1[p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2r_2[p_{g,j} - x_{i,j}(t)] \quad (3)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), j = 1, \dots, d \quad (4)$$

其中,  $c_1$ 和 $c_2$ 可以理解成速度更新时个体与种群对粒子速度的影响,通常被称作影响因子(也称为学习因子);  $r_1$ 和 $r_2$ 为2个随机数,取值在0~1,可以从一定程度上避免种群早熟;  $t$ 表示第 $t$ 次迭代;  $w$ 是线性递减惯性权重,是Eberhart和Kennedy(粒子群算法创立者)最早提出的权重公式<sup>[9-10]</sup>。如下式所示:

$$w = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \times t / \text{gen} \quad (5)$$

其中,  $\text{gen}$ 为迭代时能达到的迭代上限,这个迭代上限一般可以预先规定好。使用全局的位置公式替代个体的位置公式算法的遍历性好,但是会扰乱其多样性,所以考虑使用有限邻居的最佳位置替代单个粒子的位置,将这个位置定义为 $p_{i,j}$ ,那么第 $i$ 个粒子的速度共识可以写为<sup>[11-12]</sup>:

$$v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1r_1[p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2r_2[p_{l,j} - x_{i,j}(t)] \quad (6)$$

## 2.3 混沌变异PSO算法

粒子群算法是群体智能算法的一种,与其余群体智能算法例如蚁群算法一样,易早熟、收敛过快,这样使其可以较快解决简单的问题,但是对于注塑机这种复杂多变的系统,随着迭代次数的增加,其搜索最优值的效率会大幅降低。所以一般会考虑引入其他智能算法改良粒子群算法,这里考虑将速度和位置公式进行混沌变异,利用混沌遍历搜索增加迭代的生命周期。

$$y_{i,j}(t+1) = \begin{cases} \mu y_{i,j}(t)(1 - y_{i,j}(t)), & 0 \leq y_{i,j}(t) < 1 \\ 2 - \mu(2 - y_{i,j}(t))(y_{i,j}(t) - 1), & 1 \leq y_{i,j}(t) \leq 2 \end{cases} \quad (7)$$

$$y_{i,j}(t) \in (0,2), \mu = 1$$

为了避免早熟的问题,使用混沌序列将位置公式变异,如式(7)所示,规定序列取值在(0,2)之间,也就是位置取值始终在(0,2)之间。由于混沌序列的高度敏感性,可以有效避免算法前期早熟的缺陷。

继续使用混沌变异算法将权重进行变异,线性递减权重也会使算法早熟,使用式(8)、(9)将其变异:

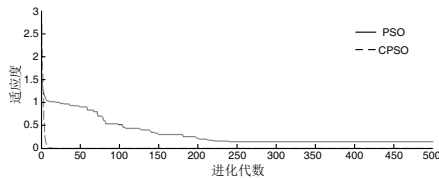
$$w_{\text{new}}(t) = w(t) \cdot y_{i,j}(t) \quad (8)$$

$$w(t) = w_{\min} + \left( \frac{t}{\text{gen}} \right)^{\text{gen}-t} (w_{\max} - w_{\min}) \quad (9)$$

其中 $w_{\max}$ 和 $w_{\min}$ 代表 $w$ 的最大值和最小值,速度公式可以改写为:

$$v_{i,j}(t+1) = w_{\text{new}}(t)v_{i,j}(t) + c_1r_1[p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2r_2[p_{g,j} - x_{i,j}(t)] \quad (10)$$

算法初始化时使用混沌序列变异,可以有效在前期防止算法早熟,但是在算法后期粒子群同样会出现聚类效应,所以考虑在算法后期添加变异的权重对算法进行干扰。使用Griewank函数验证算法添加变异的惯性权重后的收敛速度,如图7所示,虚线为扰动后的粒子群算法,其收敛速度明显快于单纯的粒子群算法<sup>[13-15]</sup>。



▲ 图7 Griewank函数适应度-进化代数曲线对比  
Fig.7 Comparison of Griewank function fitness-evolution algebraic curves

从图7可以发现,添加变异权重的算法会在迭代次数到达30次左右时产生聚类效应,所以必须再次进行混沌变异,将粒子群算法重新在解空间中打散,形象地说就是把聚集在一起的粒子重新打散在种群里。

$$p_{\text{gnew}} = \left( \frac{\sum_{j=1}^K p_{i1}}{K}, \frac{\sum_{j=1}^K p_{i2}}{K}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^K p_{iD}}{K} \right) \quad (11)$$

其中 $p_{\text{gnew}}$ 为随机最优位置,它是由 $K$ 个粒子的最优位置的平均值构成, $K$ 个粒子选取自解空间中,一共有 $D$ 维空间,所以有 $D$ 个粒子。定义混沌搜索半径为:

$$L_{ij} = s |p_{\text{gnew}} - p_{ij}| \quad (12)$$

这个半径包含了随机最优位置和个体最优位置,其中 $s$ 为人工调整比例因子,通过观察算法的收敛速度和收敛效果实时调整比例因子,在算法前期应加大 $s$ 的取值,在算法后期快要找到最优值的时候应减小 $s$ 的取值。

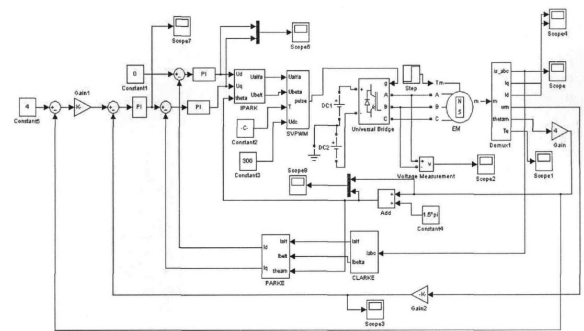
通过以上对粒子群算法前期的混沌变异和后期的混沌干扰,可以有效避免算法早熟,使得算法在整个生命周期内对最优值进行全面精细的搜索,从收敛速度、搜索范围、搜索精度对粒子群算法进行了全面改良。

全电动注塑机伺服系统控制步骤如下:

- (1)建立全电动注塑机数学模型;
- (2)规定好种群最大迭代次数,使用混沌序列初始化种群,启动迭代;
- (3)计算每个粒子的适应度,根据式(7)~(12)变异粒子群算法;
- (4)使用适应度函数作为判断标准,更新粒子的速度和位置 $p_i(t)$ 和 $v_i(t)$ ;
- (5)更新论域的取值范围,再次迭代;
- (6)使用粒子群优化的变论域模糊算法得到最优的PID控制参数。

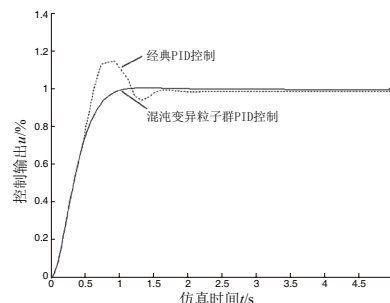
### 3 仿真实验及结果分析

图2、图3所示的电流环和速度环系统仿真模型如图8所示。



▲ 图8 注塑机电液比例仿真平台  
Fig.8 Electro-hydraulic proportional simulation platform for injection molding machine

对经典PID与变异粒子群PID的闭环控制结果进行仿真,如图9所示。



▲ 图9 经典PID与变论域模糊PID控制曲线对比  
Fig.9 Comparison of classical PID and variable universe fuzzy PID control curves



从图9可以看出,无论超调量还是调整时间,本文提出的算法都大大优于经典的PID闭环控制,拉长算法运行的时间,系统运行参数如表1所示。

▲ 表1 两种控制器运行参数对比

Tab.1 Comparison of operation parameters between two controllers

算法运行时间/s	控制器算法	调整时间/ms	超调量/%	适应度
80	经典PID	31.2	15.1	0.589
	混沌变异粒子群PID	28.3	4.3	0.112
120	经典PID	25.4	16.5	0.414
	混沌变异粒子群PID	20.6	3.2	0.163
160	经典PID	20.7	13.9	0.379
	混沌变异粒子群PID	10.9	2.4	0.071

从表1可以发现,随着算法的逐步推进,变论域模糊控制算法的调整时间、超调量、适应度指标呈现逐步优良的状态,而且与经典PID的各项指标逐步拉大,说明本文的控制算法优化效果明显、控制效果更佳。

## 4 结语

本文提出了一种混沌变异粒子群算法与变论域模糊PID闭环控制相结合的控制策略,对注塑机电液比例系统进行调整。根据速度环与电流环建立仿真模型平台,仿真实验充分验证了所提出算法的优越性能,对于改进全电动注塑机控制系统具有较高的推广应用价值。

### 参考文献:

- [1] 钟翠霞, 蔡军. 全电动注塑机运动控制器的设计与研究[J]. 机械设计与制造, 2010(7): 49-50.
- [2] 赵世霞. 全电动注塑机料管组参数化设计与螺杆计量段的仿真分析[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [3] 颜晓河. 全电动注塑机螺杆速度的控制研究[J]. 电工技术, 2014, 35(12): 52-53.
- [4] 滕乐天, 瞿金平, 张琳. 注塑机注射推进系统动力学仿真及动态特性[J]. 现代塑料加工应用, 2008, 20(1): 61-63.
- [5] 王平江, 李方甫, 唐小琦. 全电动注塑机机筒温度控制关键技术的研究与实现[J]. 中国塑料, 2013, 27(1): 98-104.
- [6] 王小华, 谢鹏程, 张攀攀, 等. 注射成型锁模力重复精度影响因素的研究[J]. 中国塑料, 2012, 26(1): 98-102.
- [7] 刘庆, 王洋, 李星, 等. 基因池操作遗传算法的应用层组播路由优化[J/OL]. 计算机工程与应用, 2019, [2019-06-03]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2127.TP.20190528.0902.002.html>.
- [8] 吴新锋, 段然, 周虎, 等. 基于改进二进制粒子群遗传算法的测试优选[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 146-150.
- [9] 李辰. 全电动注塑机合模机构的优化设计及弹流润滑分析[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [10] 赵一心. 基于模糊自适应PID注塑机电控系统研究[J]. 塑料工业, 2016, 44(8): 58-62.
- [11] 张杰. 全电动注塑机合模机构的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [12] 陈晓曼, 刘桂雄, 杨艳娟. 全电动注塑机智能分析与控制平台的设计及实现[J]. 制造业自动化, 2011, 33(15): 132-135.
- [13] 岑海洪. 电动注塑机曲柄滑块射胶伺服系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [14] 胡静, 张有忱. 全电动注塑机差动式合模机构的设计与分析[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(10): 79-82.
- [15] 刘晓彬, 杨于光, 董力群, 等. 基于遗传算法的全电动注塑机双曲肘内翻式合模机构优化设计[J]. 塑料, 2016, 45(5): 17-21.

## 行业动态

### 国风塑业微电子级聚酰亚胺膜项目投料试车

近日,国风塑业发布《关于聚酰亚胺膜项目进展情况的公告》,公告显示,其“年产180吨高性能微电子级聚酰亚胺膜材料项目”,在2018年12月开始进行设备安装与调试,于2019年6月进行2号线投料试车。投料后生产线设备及配套设施运行稳定,成膜情况良好,试车达到了预期目标。

国风塑业表示,公司计划于2019年7月初对1号线进行投料试车。

该项目产品初期规划主要应用在柔性电路板(FPC)的基板制造领域,未规划可应用在可折叠OLED屏幕上的产品,也暂未开展应用于可折叠OLED屏幕上的产品研发,暂未掌握生产可应用在可折叠OLED屏幕上产品的相关技术。

目前,该项目部分工艺参数需进一步优化调整,项目投料试车到全面达产还需一定的时间。