

# 基于量子遗传算法的注塑机PID控制系统

## PID Control System of Injection Machine Based on Quantum Genetic Algorithm

王浩<sup>1</sup>, 王继先<sup>2</sup> Wang Hao<sup>1</sup>, Wang Jixian<sup>2</sup>

- 1 平顶山技师学院, 河南 平顶山 467000

- 2 河南化工技师学院, 河南 开封 475004

- 1 Pingdingshan Institute Technology, Pingdingshan 467000, China

- 2 Henan Chemical Technician College, Kaifeng 475004, China

●摘要: 为提高注塑机液压伺服控制系统的精确度和稳定性, 提出了基于量子遗传算法的注塑机PID控制系统。引入量子遗传算法对注塑机PID系统参数进行全局寻优, 以累积误差作为目标函数, 根据实际工况动态调节PID参数。仿真实验和实测分析结果表明, 本控制系统在精度和稳定性上优于传统PID控制方法, 且超调量更小、运算速度更快, 有效确保了产品质量的一致性。

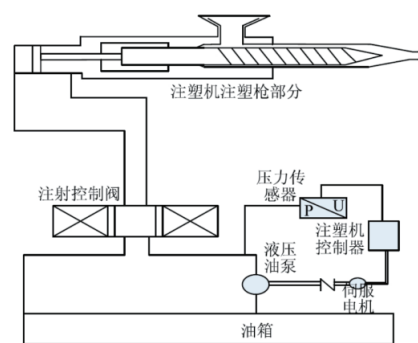
●Abstract: In order to improve the accuracy and stability of hydraulic servo control system of injection moulding machine, a PID control system of injection moulding machine based on quantum genetic algorithm was proposed. Quantum genetic algorithm is introduced to optimize the parameters of the PID system of injection moulding machine globally. The accumulated error is taken as the objective function to dynamically adjust the parameters of the PID system according to the actual working conditions. The results of simulation experiment and measurement analysis show that the control system is superior to the traditional PID control method in accuracy and stability, and has smaller overshoot and faster operation speed, which effectively ensures the consistency of product quality.

●关键词: 注塑机; 液压系统; PID; 量子遗传算法

●中图分类号: TP273 ●文献标识码: A

●Key words: Injection machine; Hydraulic system; PID; Quantum genetic algorithm

液压系统是注塑机的重要组成部分, 液压控制系统直接关系到塑料制品的质量和性能<sup>[1-3]</sup>。图1为注塑机伺服闭环控制系统, 该系统包含伺服电机、液压泵、液压阀等器件, 与注塑产品生产紧密关联。为保证注塑机稳定工作, 注塑机液压伺服系统主要采用PID闭环控制技术进行反馈调节。文献[4]将PID与神经网络融合, 实时调节液压控制系统相关参数, 显著提高了注塑制品的尺寸精度; 文献[5]使用PID分段控制液压系统, 提高了注塑机控制精度, 克服了PID固定参数引起控制精度下降的问题; 文献[6]结合变论域与自适应模糊PID控制理论设计了控制系统, 显著提高了注塑机液压系统的动态性能。上述方案均具有自动调节能力, 大幅提升了注塑制品的质量和生产效率, 但是在参数选择上仍然不够快速灵活, 存在调节时间过长等问题。



▲ 图1 注塑机伺服闭环控制系统

Fig.1 Drawing of servo closed loop control system for injection molding machine

近年来, 量子理论与经典优化算法的结合得到了国内外学者的广泛关注。文献[7]将量子理论与遗传算法结合, 进一步提高了遗传算法的收敛速度, 解决了敏捷成像卫星调度问题; 文献[8]将量子理论应用于菌群算法, 以更快的速度完成了PID参数整定; 文献[9]运用量子理论改进粒子群优化算

法,获得了更快的寻优速度。上述研究表明,量子优化算法具有更快的寻优速度、更高的寻优精度,适用于解决多参数全局寻优问题。

注塑机液压系统的PID控制系统参数关系到注塑制品质量,根据反馈信息对液压伺服系统的控制参数进行动态调整,有利于提高系统的稳定性。因此,本文引入量子遗传算法实时调节液压伺服系统的PID参数,以克服不确定因素带来的干扰,提升注塑机在生产过程的自适应能力。

## 1 问题描述

在生产过程中,注塑机液压伺服系统一方面要保证较高的响应速度,根据外界环境变化和产品生产过程及时调节;另一方面还要确保较高的控制精度,参数调节必须能够反应真实的生产需求。塑料融化过程中,压力处于时刻变化状态,需要对压力进行及时响应;熔料流入压力枪后,一旦出现压力不均衡的情况,将引起熔料在注塑枪内回流,对注塑制品质量产生严重影响。综上,必须使用具有全局快速寻优能力的算法对液压系统进行实时控制。

## 2 量子遗传算法

### 2.1 量子编码

与其他优化算法不同,量子遗传算法使用量子比特来表示种群中的每一个个体。在量子理论中,量子比特的表达式为:

$$|\phi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (1)$$

式(1)中,  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ 称为量子比特的基态,  $\alpha$ 和 $\beta$ 分别表示对应基态的量子概率幅。量子比特的量子概率幅在数学上必须满足约束条件:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (2)$$

由式(2)可得,  $\alpha, \beta \in [-1, 1]$ 。

$n$ 维寻优问题可以表达为:

$$\begin{cases} \max f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{s.t. } a_j \leq x_j \leq b_j; \quad j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$ , 为 $n$ 维寻优问题的最优解,  $a_j$ 和 $b_j$ 表示最优解 $X$ 的第 $j$ 个变量 $x_j$ 的临界

值。量子遗传算法使用式的量子概率幅对个体进行编码:

$$P_i(t) = \begin{bmatrix} \alpha_{i1} & \alpha_{i2} & \cdots & \alpha_{in} \\ \beta_{i1} & \beta_{i2} & \cdots & \beta_{in} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$P_i(t)$ 表示第 $t$ 代种群中第 $i$ 个个体。由于 $|\cos(x)|^2 + |\sin(x)|^2 = 1$ , 满足式(2)约束条件, 故使用 $\sin$ 和 $\cos$ 函数对式(4)进一步表达:

$$P_i(t) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{i1}) & \cos(\theta_{i2}) & \cdots & \cos(\theta_{in}) \\ \sin(\theta_{i1}) & \sin(\theta_{i2}) & \cdots & \sin(\theta_{in}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中,  $\theta_{ij}$ 表示角度,  $\theta_{ij} = 2\pi \times \text{rnd}$ ,  $\text{rnd}$ 为 $[-1, 1]$ 范围内的实数;  $i=1, 2, \dots, m$ , 表示种群个体;  $j=1, 2, \dots, n$ , 表示个体的量子比特。式(5)表明, 对于一个 $n$ 维的寻优问题, 每一个个体需要使用 $n$ 个量子比特。由此可得,  $n$ 维寻优问题实际上是在 $n$ 维量子空间 $I_n = [-1, 1]^n$ 内部搜索最优解的过程。

对于任意实数而言, 如果用余弦进行表示, 必然存在2个角度与之对应; 如果用正弦进行表示, 同样存在2个角度与之对应。因此对于一个实数必然存在4个角度值在量子空间与之对应。对于 $n$ 维的寻优问题而言, 如果实数空间 $R^n$ 存在 $M$ 个全局最优解, 在 $n$ 维量子空间 $I_n = [-1, 1]^n$ 中对应应有 $4^n M = 2^{n+1} M$ 个最优解<sup>[10-11]</sup>。这一结论表明, 将实数空间的解映射到量子空间, 全局最优解将以指数倍数增加, 极大增加了搜索到最优解的概率。

### 2.2 个体进化

量子遗传算法的个体进化更新时, 主要通过对自身量子比特概率幅进行改变, 通常通过量子旋转门完成:

$$U(\Delta\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) & -\sin(\Delta\theta) \\ \sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$U(\Delta\theta) \times \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \Delta\theta) \\ \sin(\theta + \Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\Delta\theta$ 为量子进化算法中的个体转角步长, 其取值大小直接关系到量子进化算法的搜索能力。  $\Delta\theta$ 过小容易陷入局部最优解, 不利于全局最优解寻找;  $\Delta\theta$ 过大能提高搜索速度, 但会降低精度, 影响控制对象的性能。

## 2.3 个体变异

在保证精度的前提下,如果只采用个体进化,往往难以跳出覆盖范围较大的局部最优解。因此,在进化过程中必须选择个体进行变异,大幅改变个体的量子比特状态,与当前种群形成显著差异。可采用量子非门完成个体变异:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

经过量子非门转换,结合式(4)和式(5)可知,此时量子比特的量子概率幅进行了调换,极大改变了量子比特状态,有助于摆脱当前种群局限,提高全局搜索能力。

## 2.4 解空间变换

量子比特寻找最优解范围在 $[-1,1]$ 区间,必须将 $[-1,1]$ 映射回实数空间才能得出最终结果。结合式(2),可以分别使用 $\alpha$ 和 $\beta$ 将量子空间的值换算为实数空间解。根据式(3)可知:

(1)如果使用基态 $|0\rangle$ 的量子概率幅 $\alpha$ ,则实数空间中最优解 $x$ 的第 $j$ 位转换式为:

$$X_{ij} = \frac{1}{2} [b_i(1 + \alpha_{ij}) + a_i(1 - \alpha_{ij})] \quad (9)$$

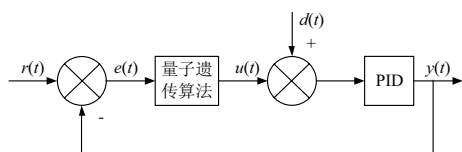
(2)如果使用基态 $|1\rangle$ 的量子概率幅 $\beta$ ,则实数空间中最优解 $x$ 的第 $j$ 位转换式为:

$$X_{ij} = \frac{1}{2} [b_i(1 + \beta_{ij}) + a_i(1 - \beta_{ij})] \quad (10)$$

综上,量子遗传算法的个体使用量子编码,但进化过程与传统的遗传算法基本一致,由于具有更多的全局最优解,因此其搜索速度更快,一定程度上避免了陷入局部最优解。

## 3 PID控制系统

基于量子遗传算法的注塑机PID控制系统如图2所示。



▲ 图2 基于量子遗传算法的PID控制系统  
Fig.2 Structure of PID control system based on quantum genetic algorithms

PID控制系统的输入输出关系为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

其中:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (12)$$

量子遗传算法用于对式(11)中的三个参数 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_D$ 进行寻优。由于系统具有滞后性,无法使用瞬时误差 $e(t)$ 判断当前参数是否为最优参数,本文采用累积误差作为目标函数:

$$J = \int_0^\infty t |e(t)| dt \quad (13)$$

## 4 实验分析

### 4.1 仿真分析

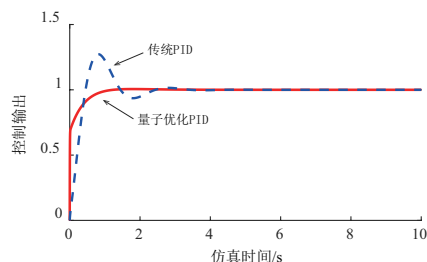
利用MATLAB的Simulink对本文所提PID控制系统进行测试,信号输入为阶跃信号。参数设置参考200T注塑机,具体参数如表1所示。

▲ 表1 仿真实验控制参数

Tab.1 Control parameters of simulation experiment

螺杆初始位置/mm	注射速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	注射压力/Pa	螺杆行程/mm
50	100	80	100

图3为仿真实验结果,仿真时间10 s,系统输入为1。传统PID系统根据经验将三个参数设置为 $K_p=2$ 、 $K_i=0.08$ 、 $K_D=0.03$ 。从图3可以看出,基于量子遗传算法的注塑机PID控制系统超调量更小,输出波动更小。与传统PID相比,量子优化PID系统的参数随着反馈动态调节,输出控制更加平稳,调节速度更快,有利于保证产品质量。



▲ 图3 仿真实验结果  
Fig.3 Experimental results of simulation

### 4.2 实测分析

以200T伺服型注塑机进行实测分析。起始位置设置为31 mm,注塑完毕位置设置为80 mm,表2

为注塑前后螺杆位置对比。

▲ 表2 注塑前后螺杆位置

Tab.2 Front and back position of screw injection molding

实验次数	注塑前位置/mm	注塑后位置/mm
1	31.1	80.0
2	31.2	80.1
3	30.7	79.6
4	31.0	79.9
5	30.9	79.8

从表2可以看出,注塑前螺杆的位置最大值为31.2 mm,最小值为30.7 mm;注塑后螺杆的位置最大值为80.1 mm,最小值为79.6 mm。误差均在1%以内,说明本文提出的控制系统具有较高精度。

以30 g注塑产品为例检测其质量,结果如表3所示。从表3可以看出,所有产品质量误差均在1%以内,说明基于量子遗传算法的注塑机PID控制系统具有良好的稳定性,能充分保证产品质量的一致性。

▲ 表3 注塑产品的质量

Tab.3 Weight of injection molded products

实验次数	质量/g
1	29.95
2	29.96
3	29.96
4	29.97
5	29.95

## 5 结论

将量子遗传算法引入传统PID控制,动态调节

注塑机液压伺服系统的PID控制参数,有效提高了控制系统的精确度和稳定性。量子遗传算法具有较高的全局寻优能力,能够针对外部环境变化和产品生产反馈信息实时调整参数。与传统PID控制系统相比,基于量子遗传算法的注塑机PID控制系统能够以较小的超调量、较快的运算速度获得质量稳定的注塑制品,为注塑机控制提供了一种有效途径。

参考文献:

- [1] 焦志伟,安瑛,谢鹏程,等. 新型注塑机合模机构内循环节能机理[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 153-159.
- [2] 曾广胜,瞿金平,江太君,等. 一种注塑机锁模系统的理论计算与模拟分析[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(2): 169-173.
- [3] 刘浩. 注塑机领域的研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2018, 35(4): 99-102.
- [4] 党霞. 基于自适应神经网络PID的注塑机温度控制[J]. 合成树脂及塑料, 2018, 35(6): 83-86.
- [5] 陶西孟,罗亮,刘知贵. 基于分段PID的注塑机料筒温度控制算法研究与仿真[J]. 塑料, 2015, 44(3): 68-70.
- [6] 张鹏,冯显英,霍睿,等. 基于变论域自适应模糊PID的注塑机温控系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(7): 107-109, 115.
- [7] 王海蛟,贺欢,杨震. 敏捷成像卫星调度的改进量子遗传算法[J]. 宇航学报, 2018, 39(11): 1 266-1 274.
- [8] 刘璐,单梁,戴跃伟,等. 非线性动态自适应旋转角的量子菌群算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(12): 2 137-2 144.
- [9] 张艺瀛,金志刚. 一种高维多模态优化的量子粒子群优化算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(11): 50-58, 82.
- [10] 刘志刚,许少华,李盼池,等. 基于量子衍生布谷鸟的脊波过程神经网络及TOC预测[J]. 控制与决策, 2017, 32(6): 1 115-1 120.
- [11] 张强,李盼池,刘丽杰. 基于量子混合蛙跳算法的油田开发规划多目标优化[J]. 信息与控制, 2014, 43(1): 116-122.

## 行业动态

### 科思创购入全新混合注塑机扩产CFRTP

科思创正在进一步开发连续纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)产品和产能,以响应市场趋势和满足客户不断增长的需求。Maezio™ CFRTP复合材料由连续碳纤维的热塑性树脂,例如聚碳酸酯制成。

正在开发的是基于热塑性聚氨酯(TPU)的CFRTP,其在宽温度范围内具有优异的耐化学性和柔韧性。这种功能强大而多样化的产品市场需求强劲,特别是在鞋类和运动器材行业。

据悉,热塑性复合材料能够显著提高批量生产的速度,并且能够通过模塑成型几近一次成型,进而消除了许多二次加工的需要。

一台混合注塑机将复合材料半成品部件的热成型与模内注塑成型相结合,形成全自动的一步法加工技术,从而缩短生产时间,并提高复合材料部件批量生产的效率。