

# 服务机器人自抗扰控制器参数整定优化技术研究

李盛前<sup>1</sup>, 张小帆<sup>2</sup>

(1. 广东机电职业技术学院 电气技术学院, 广州 510550;

2. 广东技术师范大学 汽车与交通工程学院, 广州 510665)

**摘要:** 针对服务机器人自抗扰控制器多个参数的整定, 主要采用经验试法或某种优化算法进行整定, 存在参数整定过程困难、整定结果陷入局部最优等问题, 为了解决这些问题, 提出了一种基于人工免疫遗传算法优化的服务机器人自抗扰控制器参数整定技术方法; 该方法主要充分融合了人工免疫和遗传算法各自的优点, 解决了单种智能优化算法出现的过于“早熟”问题, 使得自抗扰控制器参数整定实现最优解, 增强了控制器抗干扰能力; 最后搭建仿真平台进行了实验验证, 仿真实验结果表明了该方法提高了自抗扰控制器控制精度、稳定性和鲁棒性, 有效验证了提出方法的有效性。

**关键词:** 服务机器人; 自抗扰控制器; 人工免疫遗传算法; 参数整定; 优化

## Research on Parameter Tuning Optimization of ADRC for Service Robot

LI Shengqian<sup>1</sup>, ZHANG Xiaofan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Guangdong Mechanical & Electrical Polytechnic, Guangzhou 510550, China;

2. School of Automobile and Transportation Engineering Guangdong Polytechnic Normal University,

Guangzhou 510665, China)

**Abstract:** Aimed at the multiple parameters setting of active disturbance rejection controller (ADRC) for service robot, empirical test or some optimization algorithms are mainly used to set the parameters, there are the problems of difficult parameter setting process and non-optimal setting results, in order to solve these problems, a parameter optimization setting method of ADRC for service robot based on artificial immune genetic algorithm is proposed in this paper. The advantages of artificial immunity and genetic algorithm are fully integrated to solve the premature problem in single intelligent optimization algorithm, makes the parameter setting of ADRC realize the optimal solution, and enhances the anti-interference capability of the controller. Finally, the simulation platform is built to verify by the experiment. Experimental results show that the method improves the control accuracy, stability and robustness of ADRC, which effectively verifies the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** service robot; ADRC; artificial immune genetic algorithm; parameter setting; optimization.

## 0 引言

服务机器人作为一种具有不确定性、强耦合性、多时变性、高度非线性的复杂系统, 在实际应用中, 服务机器人系统本身特有的这些特性和各种类扰动因素都无法忽略, 使得各研究学者很难对其建立精确的数学模型, 因此利用经典的 PID 控制方法直接用于服务机器人的自动跟踪控制抓取等工作任务, 难以满足控制性能要求。而针对类似于服务机器人的系统运动控制, 出现了很多机器人运动控制方法, 如自抗扰控制、滑模变结构控制、模糊控制、神经网络、人工智能控制等, 其中自抗扰控制器近年来在移动机器人跟踪控制技术中得到了较为广泛的应用。自抗扰控

制方法是从 PID 控制方法中改进演变过来的新兴实用控制技术, 其包含了 PID 的所有控制优点及思想, 这样使得自抗扰控制是一种不依赖被控对象精确数学模型为基础的控制。自抗扰控制器主要由几部分组成, 其中扩张状态观测器是其核心部分, 其扩张状态观测器可以估算来自外部不确定的扰动量并实时精确补偿抵消扰动, 自抗扰控制具有的这些特性, 使得其在机器人运动控制领域得到广泛应用。文献 [1-2] 主要采用自抗扰扩张状态观测器对机器人轨迹跟踪过程所受到的外部扰动量进行实时估算补偿, 抵消掉外部扰动的影响, 有效解决了精确数学建模的问题, 提高焊接机器人运动稳定性和鲁棒性。文献 [3-4] 主要研究自抗扰控制技术在并联机器人轨迹跟踪的应用, 为六自由度

收稿日期: 2022-05-18; 修回日期: 2022-07-05。

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2011AA040201); 广东机电职业技术学院校级资助项目(Gccrcxm-202007); 2021年广东省教育厅高校科研项目(2021KTSCX205); 2021年广东机电职业技术学院校级科研项目(YJZD2021-54)。

作者简介: 李盛前(1983-), 男, 广西南宁人, 博士, 博士后, 讲师, 主要从事机器人智能控制、机器人视觉、水下焊接机器人方向的研究。

通讯作者: 张小帆(1983-), 女, 江西人, 博士, 讲师, 主要从事电池技术方向的研究。

引用格式: 李盛前, 张小帆. 服务机器人自抗扰控制器参数整定优化技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 65-70, 78.

并联机器人的轨迹跟踪设计了自抗扰控制器,但其为了减轻自抗扰控制器的估算任务,忽略了重力估算补偿,从实验结果看,该控制器轨迹跟踪效果满足设计要求。文献 [5] 针对难以精确建立移动机器人动力学模型、估计各种外部干扰等问题,结合滑模控制技术特点,构造出一种快速终端滑模自抗扰控制器,提高了控制系统对外部干扰量的估算能力和速率,实现移动机器人高速高精度轨迹跟踪控制目标。文献 [6] 针对机器人跟踪控制过程中分别利用自抗扰和滑模变结构产生的抖振问题研究,抖振原因主要对外部扰动量估计不足而导致的抖振,论文最终结合自抗扰和滑模变结构控制特点进行研究解决跟踪过程中的抖振问题。文献 [7] 分析了自抗扰控制技术和模糊控制方法特点,结合水下环境机器人特有的相关运动学及动力学方程模型,根据不同的控制环境特征,利用切换控制方法策略,取自抗扰和模糊控制各自的优点,联合建立设计了欠驱动水下机器人模糊自抗扰跟踪控制器。文献 [8] 首先建立了基于外部干扰量估计的机器人非线性反馈控制系统,在此基础上提出一种适用于机器人跟踪控制的新型自抗扰控制器,该控制器不需实时计算估计复杂的机器人动态模型进行补偿,使得该运动控制器对量测噪声具有抑制作用,提高了控制器的鲁棒性。文献 [9] 分析模糊控制和神经网络的特点,结合系统特性,融合了模糊神经网络与专家系统组成的一种复合控制算法,对焊接机器人运动控制过程中的外部扰动量有效精确补偿,提升了焊接运动的稳定性,有效控制脉冲 GTAW 过程中的焊接速度与焊缝宽度。文献 [10-15] 都是利用模糊控制、滑模控制以及自适应等多种控制方法相结合而生成的一种复合控制方法,从实验结果来看这些复合控制方法都能较好实现机器人运动控制跟踪。

虽然利用自抗扰控制器具有估计外部不确定干扰量并实时进行精确补偿的能力,提高机器人动态跟踪控制性能和鲁棒性,但是自抗扰控制器结构和设计过程都比较复杂,其涉及的变化参数较多,即不同的参数取值组合,自抗扰控制器控制性能都会发生很大变化。同时,这些参数取值没有规律可循,没有一套完整可靠的参数选择参考标准形式,以往大多数技术人员都是依靠经验试测进行选取,总之,自抗扰控制器的参数取值必有一个最优组合。为了寻找这个最有组合,为了使自抗扰控制器控制性能达到最佳,论文对这些参数取值组合进行人工智能优化整定研究。目前较常见的人工智能优化算法有:粒子群优化算法、遗传算法、人工免疫算法等仿生算法。文献 [16] 研究利用改进的蜻蜓算法对快速反射镜自抗扰控制器的参数进行优化整定,参数整定速度较快,能快速响应速度要求,实验跟踪效果精度满足要求。文献 [17] 基于双种群鲨鱼优化算法对自抗扰机械臂轨迹跟踪控制器参数优化计算,优化了控制器的控制性能,提高了机械臂控制的抗干扰能力。文献 [18] 设计了 PMSM 位置伺服系统的复合自抗扰控制器,利用神经网络对非线性自抗扰控制律的参数进行在线实时优化整定,而对于神经网络自身需要整定的重要参数,作

者引入了遗传算法对神经网络的重要参数进行优化,实现了整个控制器所有参数的整定。文献 [19-21] 对设计的 ADRC 控制器采用遗传算法对其多参数整定进行优化,极大改善了经验法和试测法取值组合的不足,但是优化结果容易陷入局部最优。

综合上述文献可得遗传算法作为一种目前比较成熟的、流行的优化算法,普遍受到学者们的欢迎,同时,在各类优化实际问题得到有效应用,但对于自抗扰控制器多参数整定优化问题时,该算法存在优化过程收敛速度慢,并且极易陷入局部极值的“早熟”现象而无法得到全局最优值。对此,论文研究引入具有多样性特点的人工免疫算法,融合遗传算法和人工免疫算法优点,有效提出了一种基于人工免疫遗传算法优化的自抗扰控制器参数优化整定方法,最后对参数整定优化后的控制器进行仿真实验验证论文提出算法的有效性。

## 1 自抗扰控制器原理及结构分析

自抗扰控制器 (active disturbances rejection controller, ADRC) 作为一种新型非线性反馈控制方法<sup>[22]</sup>,该控制方法是由我国著名学者韩京清研究员基于 PID 控制技术提出来的,该控制器的控制核心思想主要采样“预测+补偿”的控制方法,这就很好的融合利用了经典控制理论和现代控制理论的优点,解决了无论是单独利用经典控制理论或现代控制理论进行控制所带来的缺陷,经典控制理论设计控制器简单,但需要精确模型为基础;而现代控制理论设计控制器复杂,但无需建立精确数学模型,这样融合两者设计的控制器无需建立被控对象的精确数学模型,这种方法就能很好地解决具有非线性、不确定性、时变性、强耦合性系统的控制性能要求。自抗扰控制器作为一种非线性反馈控制器,在 PID 控制结构的框架下,分别设计了跟踪器 (TD)、非线性状态误差反馈控制律 (NLSEF)、扩张状态观测器 (ESO) 三部分,自抗扰控制器将这三部分有机组合成的控制器就无需建立被控对象精确数学模型也能很好的抑制外部扰动干扰,较好的控制被控对象。典型的二阶自抗扰控制结构框架如图 1 所示,其中虚线部分即为自抗扰控制器的几个组成模块以及各模块之间的关系。

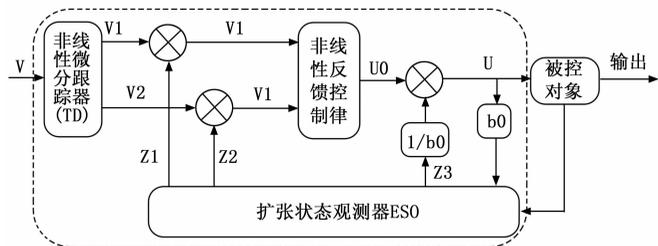


图 1 自抗扰控制器结构图

由图 1 可以看出,自抗扰控制器无需建立被控对象精确数学模型为控制基础,该控制器的工作过程为:首先对系统采集的输入信息  $V$  利用非线性微分跟踪器 TD 处理,经过 TD 处理后输出较高质量的微分跟踪信号  $V1/V2$ ,有

效预测系统变化趋势, 解决了原始 PID 控制器遗留的快速性与超调性之前的相互矛盾问题; 接着利用扩张状态观测器 ESO 观测估计系统状态变化、未知干扰等各种扰动量并实施预测补偿, 即实现了“预测+补偿”的核心控制算法, 使得扩张状态观测器 ESO 是整个控制器的核心组成部分; 最后由非线性反馈控制律生成控制量输出控制被控对象, 实现不确定性、非线性、时变、强耦合性系统控制的稳定性和鲁棒性要求。下面主要针对这三部分数学模型推导及原理功能分别介绍:

### 1.1 非线性跟踪微分器 TD

非线性跟踪微分器有更高的效率, 在噪声抑制方面有更好的表现。非线性跟踪微分器为:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + h \cdot v_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h \cdot f \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $f = -h \cdot \text{sign}(v_1(k) - v_0(k) + v_2(k) \cdot |v_2(k)| / 2r)$ , 其中  $\text{sign}()$  函数为符号函数, 由于上式在高频噪声时, 存在明显的抖振现象, 于是, 根据文献 [1] 采用最速控制综合函数改善系统的高频抖振, 最速控制综合函数  $\text{fhan}(v_1, v_2, v_0, r, h_1)$  的表达式为:

$$\text{fhan}(v_1, v_2, v_0, r, h_1) = \begin{cases} -r \cdot \text{sign}(a), & |a| > d \\ -r \frac{a}{d}, & |a| \leq d \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $d = rh_1$ 、 $d_0 = h_1d$ 、 $y = v_1 - v_0 + h_1v_2$ 、 $a_0 =$

$$\sqrt{d^2 + 8r|y|}, a = \begin{cases} v_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sign}(c), & |y| > d_0 \\ v_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases}, \text{ 其}$$

中  $h$  为采样步长,  $h_1$  为滤波因子, 其对噪声具有抑制的作用, 其值越大, 对信号的滤波效果越强,  $r$  为速度因子, 其主要调节系统无振荡跟踪到达稳定的速度。

因此, 综合上述, 非线性跟踪微分器最终表达式形式为:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + h \cdot v_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h \cdot \text{fhan}(v_1 - v_0, v_2, r, h_1) \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2 扩张状态观测器 ESO

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h[z_1(k) - \beta_1 \cdot \text{fal}(e(k), a_1, \delta)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h[z_2(k) - \beta_2 \cdot \text{fal}(e(k), a_2, \delta) + bu(k)] \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h \cdot \beta_3 \cdot \text{fal}(e(k), a_3, \delta) \end{cases} \quad (4)$$

式中, 其中非线性函数  $\text{fal}(e(k), a, \delta)$  采用如下形式:

$$\text{fal}(e(k), a, \delta) = \begin{cases} |e|^a \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ e/\delta^{1-a}, & |e| \leq \delta \end{cases}$$

其中:  $\text{fal}(e(k), a_1, \delta)$  的形式并不是规定一直不变的, 可根据情况, 该函数可采用线性函数或非线性函数, 其具有小误差, 采用大增益, 大误差, 采用小增益的特性。

### 1.3 非线性反馈误差控制律 (NLSEF)

自抗扰控制器中普遍采用的非线性状态误差反馈控制律为:

$$\begin{cases} e_1(k+1) = v_1(k+1) - z_1(k+1) \\ e_2(k+1) = v_2(k+1) - z_2(k+1) \\ u_0(k+1) = \beta_4 \cdot \text{fal}(e_1(k+1), a_4, \delta) + \beta_5 \cdot \text{fal}(e_2(k+1), a_5, \delta) \\ u(k+1) = u_0(k+1) - \frac{z_3(k+1)}{b} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\frac{z_3(k+1)}{b}$  为经过扩张非线性观测器对扰动估计结果。

至此自抗扰控制器原理结构的数学推导过程结束, 这样二阶自抗扰控制器的具体模型为:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + h \cdot v_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h \cdot \text{fhan}(v_1 - v_0, v_2, r, h_1) \\ e(k) = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h[z_1(k) - \beta_1 \cdot \text{fal}(e(k), a_1, \delta)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h[z_2(k) - \beta_2 \cdot \text{fal}(e(k), a_2, \delta) + bu(k)] \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h \cdot \beta_3 \cdot \text{fal}(e(k), a_3, \delta) \\ e_1(k+1) = v_1(k+1) - z_1(k+1) \\ e_2(k+1) = v_2(k+1) - z_2(k+1) \\ u_0(k+1) = \beta_4 \cdot \text{fal}(e_1(k+1), a_4, \delta) + \beta_5 \cdot \text{fal}(e_2(k+1), a_5, \delta) \\ u(k+1) = u_0(k+1) - \frac{z_3(k+1)}{b} \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 就是自抗扰控制器数学模型, 可以看出, 控制器含有多个调整参数, 各个参数取值的不同, 对整个系统的控制性能都存在差异, 使得控制性能不稳定, 非线性微分跟踪器 TD 中的参数  $h_1$  滤波因子影响系统的滤波效果; 而参数  $r$  速度因子可以提高系统达到稳定性的速度; 扩张状态观测器 ESO 决定系统观测估计输出状态的能力, 参数  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$  等 5 个参数对系统状态的观测估计精度和速度都有影响; 非线性反馈误差控制律 (NLSEF) 是非线性微分跟踪器 TD 和扩张状态观测器 ESO 的非线性组合, 其性能主要由  $\text{fal}(e(k), a, \delta)$  函数中的参数决定,  $\delta$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$  参数改善系统性能, 极大发挥系统的比例、积分作用, 为了使自抗扰控制器控制性能达到最佳, 需对这些参数进行优化整定。

## 2 基于人工免疫遗传算法优化的自抗扰控制器参数整定

### 2.1 人工免疫遗传算法原理

#### 2.1.1 遗传算法原理

遗传算法 (GA, Genetic Algorithm), 也称为进化算法。其借鉴自然界生物的优胜劣汰进化过程而提出的一种启发式搜索算法, 它能在搜索过程中自适应不断更新有关搜索空间信息, 最后得到最优解<sup>[23]</sup>。

遗传算法是基于达尔文的“物竞天择, 适者生存”的自然界生物进化论的一种随机化搜索算法, 首先通过对某类群体进行个体基因编码组成表示群体, 接着对具有某种结构形式的基因个体进行遗传编码操作, 即基因染色体变

异,从而进化生成新的种群,实现优胜劣汰的形式,一代比一代进化逼近问题的最优解。在求解实际问题过程中设定一个固定数量的种群方案,种群中的每个个体都对应问题的一个最优可能解,基因个体被自然环境选择的程度用适应度函数来衡量,适应度差的基因个体被环境淘汰,即不是问题的最优解,舍弃;适应度好的个体得以继续生存繁殖后代,繁殖后代的过程中可能要经过选择、交叉、变异 3 个步骤,实现优胜劣汰生成新的种群个体,这样不断的迭代反复进化变异,最终在末代种群中得到个体最优基因,即问题最优解,这就是遗传算法计算过程,其流程如图 2 所示。

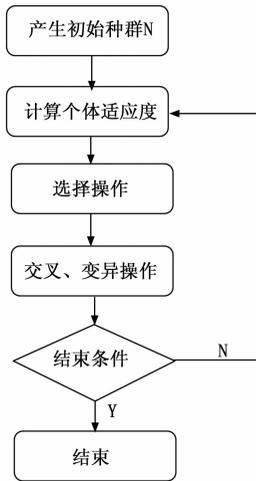


图 2 遗传算法流程图

因此,遗传算法实现过程中主要有以下几个基本要素和步骤:

1) 个体编码:

由于不能直接利用解空间的数据,遗传算法必须把个体“解”通过编码的形式组成类似遗传空间的基因型串数据。目前,遗传算法常用的编码方式有整数编码、二进制编码、浮点数编码、混合编码等。

2) 个体适应度:

个体适应度度量某个个体对于生存环境的适应程度,决定这个体遗传到下一代的机会多少,是区分群体中某个体的好坏标准。

3) 遗传算子:

遗传算法包括变异、交叉、选择 3 种。选择运算借鉴生物适者生存、优胜劣汰的进化原则,根据个体适应度的概率从当前种群中选择个体适应度高的个人作为父代繁殖下一代;交叉运算借鉴生物的基因重组方式,以一定的概率交叉两个个体中某个位置的基因码,得到两条新的染色体;变异运算借鉴生物进化过程中基因突变的机理,以一定的概率对某个基因上的某个位置发生变异等为等位基因。

4) 终止条件:

遗传算法通过不断的对种群进行选择、交叉、变异操作得到新的种群而最终找出问题的最优解,这个不断循环

过程的终止条件一般设为最大进化代数或最优解的精度要求,计算过程达到最大进化代数或最优解已经满足精度要求就终止计算,最后输出问题的解。其中,遗传算法优化应用关键主要有以下几个问题:

1) 串的编码方式:

这本质是问题编码。一般把问题的各种参数用二进制编码,构成子串;然后把子串拼接构成“染色体”串,串长度及编码形式对算法收敛影响极大。

2) 适应函数的确定:

适应函数 (fitness function) 也称对象函数 (object function),这是问题求解品质的测量函数,往往也称为问题的“环境”。一般可以把问题的模型函数作为对象函数,但有时需要另外构造。

3) 遗传算法自身参数设定:

遗传算法自身参数有 3 个,即群体大小  $n$ 、交叉概率  $p_c$  和变异概率  $p_m$ 。

2.1.2 免疫遗传算法

生物免疫系统 (biology immune system, BIS) 是由许多分布式的具有一定功能的个体 (T 细胞、B 细胞、抗体等) 通过相互作用、学习、自我调整和具有自动调节平衡的复杂大系统。人工免疫系统 (artificial immune system, AIS) 是模拟、借鉴生物免疫系统机制和免疫理论学而发展起来的各种人工处理技术、计算方法等的统称。它根据生物免疫系统自我调节、学习、自适应平衡等机理,构造出了相应的信息处理算法。研究学者,为了解决工程上的实际问题,受到生物免疫系统机理的启发,从中演变出一些类似模型算法,一般人工免疫算法流程如图 3 所示。

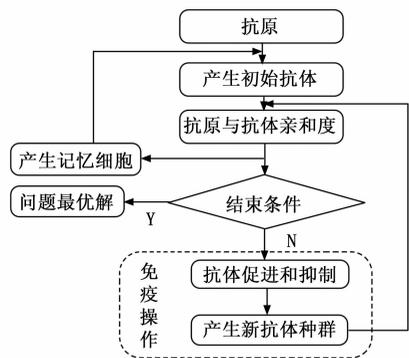


图 3 人工免疫算法流程图

因此,借鉴人工免疫系统的多样性、自我调节能力以及训练记忆,使得人工免疫算法过程避免陷入“早熟”收敛情况,同时加快了系统得到最优解的速度。

根据以上分析知,遗传算法和人工免疫算法各自都存在优缺点,为了取长补短,将两种算法结合起来生成人工免疫遗传算法 (artificial immune genetic algorithm, AIGA)。该算法在遗传算法框架基础上引入免疫系统的免疫记忆库和浓度控制机制生成免疫遗传算法,使得遗传算法具备了免疫功能,人工免疫遗传算法流程如图 4 所示。

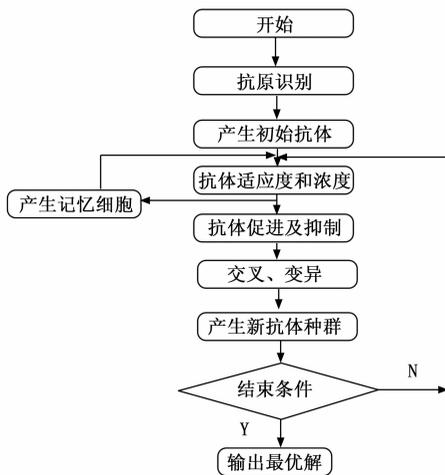


图 4 人工免疫遗传算法流程图

利用人工免疫遗传算法解决工程实际数学问题过程中, 根据生物免疫系统机理和实际解决问题之间的对应演变规范, 把实际问题的目标函数及约束条件对应于外来入侵的抗原, 待求解的优化设计问题的解对应于免疫系统产生的抗体。然后生成初始抗体群体, 计算每个抗体的适应度值和浓度, 根据适应度值和浓度对抗体(个体)进行选择、交叉、变异操作更新抗体。于是, 保持了抗体的多样性, 最后判断针对问题抗原与抗体描述可行解与最优解之间的亲和力, 找出问题的最优解。生物免疫系统根据外来抗原自动产生抗体来抵御外来的侵入, 这一行为称为免疫应答。该过程中, 部分抗体会被记忆保存下来, 当下次相同的抗原入侵时, 系统将比初次作出更迅速的正确反映进行防御, 体现出抗体的训练记忆功能。同时, 抗体与抗体之间也产生相互促进和抑制, 根据抗体的浓度, 系统抗体自我调节平衡, 维持抗体种群的多样性, 这也是人工免疫算法可以防止过早收敛的主要原因。因此, 根据以上流程图, 其算法步骤如下。

- 1) 抗原输入: 把求解问题的目标函数和约束条件对应为免疫系统的抗原入侵;
- 2) 初始抗体生成: 初始计算迭代, 根据在问题解空间随机取一个解作为初始抗体;
- 3) 亲和力计算: 分别计算问题解空间中抗原与抗体之间的亲和力度、抗体与抗体之前的亲和力度;
- 4) 记忆库更新: 将于抗原亲和度高的抗体加入到记忆库中, 同时去除原来记忆库与抗原亲和度最高的抗体;
- 5) 抗体促进与抑制产生: 考虑抗原与抗体之间的亲和力度, 高亲和力促进, 反止亦然, 同时也考虑抗体浓度, 浓度越高, 则越受抑制, 反之亦然, 这一步保持了抗体的多样性;
- 6) 新抗体产生: 对父代抗体进行交叉、变异操作, 新一代抗体产生;
- 7) 重复步骤 3) ~6), 直到满足终止条件;

8) 满足终止条件, 退出计算, 输入问题最优解。

## 2.2 自抗扰控制器参数优化整定

根据自抗扰控制器数学模型, 相比于 PID 控制器, 其控制性能较优越, 无需建立被控对象的精确模型, 但是自抗扰控制器参数变量较多, 各参数都能影响控制器的控制性能, 为了使控制器达到最优控制性能, 需要对各组成参数进行整体, 这样需要整定的参数较多, 有  $h$ 、 $r$ 、 $h_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$ 、 $b$ 、 $\delta$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$  等, 由于目前还没有一套完整的参数整定规律及方法, 如果这么多的参数全部整定, 整定过程将会复杂繁琐, 工作量极大, 也没必要对全部参数整定, 根据自抗扰控制器各模块参数可以相互独立整定的特点, 有些参数可以根据经验及实验预先选择固定不变, 参考相关文献, 可取  $h$ 、 $r$ 、 $h_0$ 、 $b$ 、 $\delta$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$  为固定值, 而扩展状态观测器 ESO 为自抗扰控制器的核心部分, 其观测和补偿直接影响到整个系统的控制性能, 而  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$  参数是决定观测和补偿效果。因此, 只对自抗扰控制器中的  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$  5 个参数进行优化整定, 其参数优化整定过程如图 5 所示。

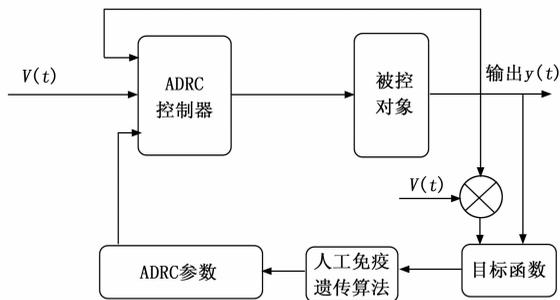


图 5 基于人工免疫遗传优化的自抗扰控制器框图

根据上节讨论研究的人工免疫遗传优化算法可以对多个参数变量目标函数进行参数寻优, 人工免疫遗传优化算法过程中, 选择算子是根据计算适应度函数值大小对抗体进行选择, 适应度函数代表着抗体的优劣程度。于是, 该优化算法的寻优过程即为适应度函数具有最大值得过程, 因此, 可利用其对本文自抗扰控制器中的  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$  5 个参数进行优化整定, 得到控制性能最优的自抗扰控制器。对自抗扰控制器中的  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$  5 个参数整定过程的目标函数与适应度函数密切相关, 即自抗扰控制器优化问题的评价目标函数对应为人工免疫遗传算法的适应度函数。根据本系统要求跟踪控制过程相应速度快、超调量小、跟踪误差小的动态稳定性能, 采用 ITAE 标准作为评价目标函数, 其利用输出误差绝对值与时间乘积并积分结果性能作为问题求解的最小目标函数。因此, 本问题优化的评价目标函数表达式为:

$$J = \int_0^T t | e(t) | dt$$

式中,  $e(t)$  为系统输出误差、 $t$  为时间, 由于自抗扰控制器优化问题的评价目标函数值越小越好, 而人工免疫遗传优化算法则要求抗体个体适应度函数值越大越好。因此,

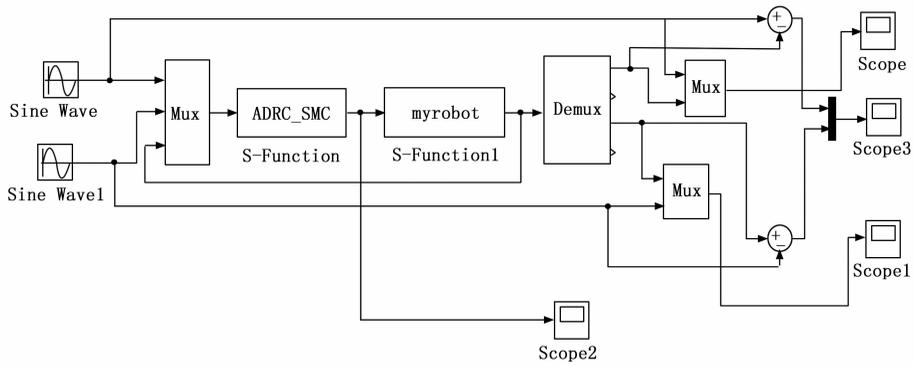


图 6 ADRC Matlab/Simulink 仿真图

需要把评价目标函数的倒数结果作为人工免疫遗传优化算法的适应度函数。

### 3 仿真实验比较

自抗扰控制器参数较多, 根据以上分析, 现只对自抗扰控制器影响性能较大的参数  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$  优化整定, 其余参数取预先固定值不变, 即为  $h$ 、 $r$ 、 $h_0$ 、 $b$ 、 $\delta$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$ 。为了验证论文提出算法的有效性, 首先在 Matlab7.0/Simulink 平台中搭建设计机器人的自抗扰控制器仿真模型, 如图 6 所示。

然后采用本免疫遗传算法、人工免疫算法和遗传算法分别对自抗扰控制器参数优化整定仿真, 各算法整定优化最终使得控制器收敛稳定输入, 对应的整定优化过程的评价目标函数变化曲线如图 7 所示。

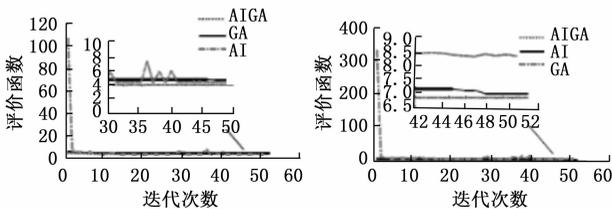


图 7 算法优化自抗扰控制器参数对比图

从曲线图中可以看出, 论文的免疫遗传算法 (AIGA) 结果的评价函数值为最小, 这也说明了 AIGA 算法计算速度快、超调量小、结果误差小的特性; 同时, 论文人工免疫遗传算法相比另外两种算法具有较好的初值寻优, 并且迭代次数少, 收敛快, 加快了搜索速度, 同时具有全局寻优、改善遗传算法陷入局部最小值缺点, 从整体上提高了算法的优化效率。

### 4 结束语

针对服务机器人进行精确运动控制过程中, 服务机器人作为一种不确定性、时变性、耦合性、高度非线性的一个完整系统, 其动力学数学模型很难精确建立的问题, 为了解决这个难题, 论文对服务机器人手臂的每个关节独立设计了自抗扰跟踪控制器, 这种控制器无需精确的数学模型为基础, 但是自抗扰控制器的多个参数需要进行整定组

合, 并且参数整定利用遗传算法优化计算时, 收敛容易陷入局部最优, 存在过于“早熟”的缺陷, 导致控制器性能达不到全局最优, 为了解决这些问题, 提出了一种基于人工免疫遗传算法优化的服务机器人自抗扰控制器参数整定技术, 融合了人工免疫和遗传算法两种算法的优点, 实现了服务机器人手臂每个关节自抗扰控制器参数整定的全局最优化。最后仿真实验结果表明人工免疫遗传算法 (AIGA) 具有全局寻优能力, 从根本上改善遗传算法过于陷入“早熟”的缺点, 抗干扰能力强, 并且整体加快了算法速率, 提高了算法的优化效率, 验证了论文提出方法的有效性和鲁棒性, 提高了自抗扰控制器控制的稳定性能。

### 参考文献:

- [1] 叶恭宇. 基于自抗扰控制的机器人关节控制系统 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [2] 李盛前. 基于视觉技术的水下焊接机器人系统研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [3] 李殿起, 段勇. 用跟踪微分器实现机器人自抗扰控制 [J]. 兵工学报, 2016, 37 (9): 1721-1729.
- [4] 游恒浩. 基于自抗扰的 Delta 机构轨迹跟踪控制 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [5] NGUYEN V T, LIN C Y, SU S F, et al. Global finite time active disturbance rejection control for parallel manipulators with unknown bounded uncertainties [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020 (99): 1-12.
- [6] CAO Z B, YANG W, SHAO X L, et al. Trajectory tracking and obstacle avoidance method for robots based on fast terminal sliding mode [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2020, 11 (1): 78-86.
- [7] 万磊, 张英浩, 等. 复杂环境下的欠驱动智能水下机器人定深跟踪控制 [J]. 上海交通大学学报, 2015, 49 (12): 1849-1854.
- [8] 周微. 三自由度柔性并联机构自抗扰控制研究 [J]. 中国工程机械学报, 2019, 17 (6): 501-505.
- [9] RAHMANI M, GHANBARI A, ETTEFAGH M M. Hybrid neural network fraction integral terminal sliding mode control of an Inchworm robot manipulator [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2016, 80: 117-136.

(下转第 78 页)