

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.02.011

基于改进麻雀算法的卷绕张力控制系统

谭龙彪, 肖金凤

(南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421200)

摘要:为了在卷绕系统中建立稳定的张力控制系统,课题组使用自抗扰控制器设计了控制系统。提出采用麻雀算法(SSA)优化整定自抗扰控制器的参数。针对SSA以跳跃的方式寻优、已陷入局部最优和原点收敛性强的缺点,提出基于粒子群算法(PSO)的改进麻雀算法(PGSSA);该方法引入了PSO的速度算子,修改麻雀算法的发现者和跟随者的位置来更新公式,增强麻雀算法的全局搜索能力。由于麻雀算法的种群多样性比较差,提出引入遗传算法的交叉和变异操作,以保证种群的多样性,避免PGSSA过早陷入局部最优。选择复卷机的收卷过程作为控制对象模型,利用MATLAB/Simulink软件平台,分别采用PGSSA和SSA对ADRC控制器和PID控制器参数进行仿真。结果表明:PGSSA的收敛速度和精度都优于SSA。ADRC控制器对扰动的反应速度和抑制能力、阶跃响应的性能指标优于PID控制器。

关键词:卷绕系统;张力控制系统;自抗扰控制器;麻雀算法;粒子群算法

中图分类号:TH165.2;TP273 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)02-0067-07

Winding Tension Control System Based on Improved Sparrow Algorithm

TAN Longbiao, XIAO Jinfeng

(Department of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421200, China)

Abstract: In order to establish a stable tension control system in the winding system, the control system was designed using active disturbance rejection controller. It was proposed to optimize and tune the parameters of the auto disturbance rejection controller using the sparrow search algorithm (SSA). Aiming at the shortcomings of SSA seeking optimization by jumping, falling into local optimality and strong convergence of the origin, the improved sparrow search algorithm (PGSSA) based on particle swarm optimization (PSO) was proposed. The PSO speed operator was introduced and the positions of the discoverers and followers of the sparrow search algorithm was modified to update the formula and enhance the global search capability of the sparrow search algorithm. Because of the relatively poor population diversity of the sparrow search algorithm, it was proposed to introduce the crossover and mutation operations of the genetic algorithm to ensure the diversity of the population and prevent the PGSSA from falling into the local optimum prematurely. The winding process of the rewinder in the winding system was taken as the control object model. Using MATLAB/Simulink software platform, PGSSA and SSA were adopted for the simulation of the ADRC controller and PID controller parameters respectively. The results show that the convergence speed and accuracy of PGSSA are better than SSA, and the ADRC controller has better performance indexes than the PID controller in terms of response speed and suppression ability to disturbances.

Keywords: winding system; tension control system; active disturbance rejection controller; sparrow search algorithm; particle swarm algorithm

收稿日期:2021-09-16;修回日期:2022-01-20

第一作者简介:谭龙彪(1997),男,湖南茶陵人,硕士研究生,主要研究方向为群智能算法在控制系统中的运用。E-mail: 981138437@qq.com

设备中的收卷、放卷系统对设备的运行速度和产品质量有较大的影响。卷绕速度快,控制不容易稳定,产品质量差;卷绕速度慢,虽然产品质量得到了保障,但生产效益不高。因此一个稳定的张力控制系统对保障产品质量和提高运行速度至关重要。

现有的卷绕控制系统大多运用 PID 控制理论。即使 PID 控制理论运用得十分成熟了,但还是有局限性,而韩京清在针对 PID 的控制误差的计算、误差的提取、PID 加权和和积分反馈的副作用 4 个方面提出了更好的控制策略,即安排过渡过程、合理提取微分和跟踪(TD)、非线性组合(NF)和扰动估计的扩张状态观测器(expansion state observer, ESO),并提出了新型控制器自抗扰控制器^[1]。自抗扰控制器(active disturbance rejection control, ADRC)不仅保留 PID 控制理论,而且还对控制对象的模型精确性要求很低,也就是既可以是未知的模型,也可以是完全了解的模型。

麻雀算法(SSA)是近年来新提出的群智能算法。SSA 是通过模拟麻雀种群觅食过程中的行为进行迭代计算获取最优解。虽然麻雀算法具有迭代计算过程简单、调节参数少和收敛速度快等优点^[2],但也具有群智能算法的易陷入局部最优的通病。通过对 SSA 进行仿真可以发现:其容易收敛到原点;其次,SSA 的位置更新是以跳跃的方式向当前最优靠近,容易忽略某些较优的解。针对 SSA 的这 2 个缺点,提出引入粒子群算法(PSO)的速度更新算子。PSO 中粒子是以参考当前最优位置和个体最优位置实时修改粒子的速度进行寻优^[3],并对 SSA 的发现者和跟随者位置更新公式进行修改,改进 SSA 对最优解的收敛性和寻优过程,减弱对原点的收敛。为保持麻雀种群的多样性,在更新警戒者位置后,再对麻雀个体进行遗传算法(GA)的交叉、变异操作,GA 中的基因交叉、变异计算符合遗传规律,可为种群的基因库保持多样性^[4]。

SSA 算法适用于多目标优化,如机器人路径规划、图像处理和组合优化等问题^[5],目前还没有用于 ADRC 参数的整定方面,且 ADRC 需整定的参数有 6 个。综上,课题组将改进的麻雀算法(PGSSA)用来整定 ADRC 控制器的参数,建立了一个以 ADRC 作为控制器的张力控制系统。

1 张力控制系统模型

为了研究复卷机的张力控制系统,选择其收卷过程作为研究对象。

1.1 收卷过程问题描述

收卷过程容易受到各种因素的影响,如放卷过程线速度、牵引辊的线速度、卷径及外部扰动等。产品的质量取决于收卷过程张力的稳定控制。运行中,若张力过小,卷轴上的材料不易卷紧,材料会出现褶皱;若张力过大,会使材料外层挤压内层易造成变形,甚至会发生材料断裂。通过研究和计算,发现收卷过程中卷材上的张力主要是受到线速度和卷径的影响,即保持稳定的线速度运行条件下,通过卷径的变化可以控制张力^[6]。也就是根据卷径的变化改变驱动电机输出转矩来控制张力:

$$F_{zl} = M_{eo}/r_0。 \quad (1)$$

式中: M_{eo} 为收卷轴的扭矩, r_0 为收卷轴的卷径。

1.2 收卷张力控制系统的传递函数

整机中采用变频器控制电机的输出转矩,而张力控制系统中需要控制的设备为变频器和收卷电机。因为 ADRC 控制器对于控制对象模型的要求不高,为了简化计算,将变频器和收卷电机都设定为惯性环节^[7]。收卷电机为型号 YVF2-112M-4 的三相异步变频调速电动机,额定功率为 4 kW,额定电压为 380 V,额定电流 8.8 A,额定频率 50 Hz,额定转矩 25.4 N·m,其传递函数简化为:

$$G_d(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1}。 \quad (2)$$

式中: K_m 为电动机传递函数的前向增益, T_m 为电动机传递函数的惯性时间常数。

选用型号为 HD50-T 的变频器,其传递函数 G_b 与 G_d 一样,只是参数有差别,通过查手册可计算得控制系统中被控对象的传递函数为:

$$G(s) = G_d(s)G_b(s) = \frac{3.2}{s^2 + 2.46s + 1}。 \quad (3)$$

2 改进麻雀算法

2.1 麻雀算法

由薛建凯和沈波于 2020 年提出的麻雀算法是一种新型的群智能算法。通过模拟麻雀群体中个体觅食

和群体觅食还有在觅食过程对危险预警的运动规律,建立数学模型进行迭代寻优的新型群智能优化算法^[8]。经过众多学者对其进行仿真和多方面测试,麻雀算法具有一些特点:参数就只有 Q, β, K , 且都是随机数,不需要进行繁琐的参数调整;收敛速度快,在求解原点附近的解时迭代寻优的性能很高,若是最优解不在原点附近其性能就会下降;算法步骤清楚简洁,公式简单易于实现;麻雀群体多样性差,容易陷入局部最优解;在收敛过程中,个体解是直接跳跃到目前最优解附近的移动方式,也就产生“早熟”,寻找的最优解很可能就是局部最优,这说明麻雀算法的全局搜索能力比较弱。

麻雀算法通过麻雀觅食时不同的行为特征,将麻雀群体分为发现者(占群体的 10% ~ 20%)和跟随者(群体剩下的麻雀),发现者具有较好的适应值,负责搜索食物丰富且安全的区域,跟随者通过监控发现者的行为,跟随发现者觅食,且两者之间的身份不是固定的,取决于适应值。除此之外还有预警者(随机出现,占群体的 10% ~ 20%),这是在发现者和跟随者中发现危险并发出预警的麻雀。

2.2 改进麻雀算法

针对麻雀算法的以跳跃的方式移动而陷入局部收敛和原点收敛性强的特点,通过引入粒子群算法的速度算子(式(4)),代替原麻雀算法公式中的 $\exp()$ 部分,改变麻雀的跳跃移动方式向当前最优解收敛,使得每只麻雀以速度 v 向当前最优解移动,增强麻雀算法向最优解的搜索能力和全局搜索能力。

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + C_2 r_2 [X_{gbest} - X_i(t)]。 \quad (4)$$

式中: X_{gbest} 为全局最佳位置, $v_i(t)$ 为第 i 只麻雀第 t 次迭代时的速度, $X_i(t)$ 为第 i 只麻雀第 t 次迭代时的位置, ω 为惯性系数影响搜索能力,且 ω 采用范围为 $[0.8, 1.2]$ 的锥度控制; C_2 为大于零的学习因子,用于调节自身位置的步长; r_2 是 $[0, 1]$ 之间的随机数。

改进后发现者位置更新为:

$$X_i(t+1) = \begin{cases} X_i(t) + v_i(t+1), R_2 < S_i; \\ X_i(t) + Q, R_2 \geq S_i. \end{cases} \quad (5)$$

式中: Q 为正态分布的随机数, R_2 为随机数。

当警戒值 R_2 小于警戒阈值 S_i 时,发现者会带着

跟随者在附近范围为内寻找最优值;当大于时,说明有危险,发现者会离开这个地方寻找安全的区域觅食。

改进后跟随者位置更新为:

$$X_i(t+1) = \begin{cases} X_i(t) + Q, i > n/2; \\ X_i(t) + v_i(t+1), i \leq n/2. \end{cases} \quad (6)$$

适应值较好的跟随者,说明离发现者位置近更容易获取食物;而适应值较差的跟随者,会因为距离远抢不到食物,就得尝试换个区域觅食。

改进后警戒者位置更新为:

$$X_i(t+1) = \begin{cases} X_i(t+1) + \beta [X_i(t+1) - X_{ibest}(t)], f_i > f_g; \\ X_i(t+1) + \beta [X_{tworst}(t) - X_{ibest}(t)], f_i = f_g. \end{cases} \quad (7)$$

式中 β 是服从均值为 0, 方差为 1 的正态分布随机数。

采用式(7),改变麻雀预警到危险时会以 β 步长在全维度上向当前最优位置移动。

而针对麻雀算法多样性差的问题,可以选择引入遗传算法中的交叉算子和变异算子。就如群体中偶尔会出现不安分的麻雀,会不按照常规改变自身当前的位置,从而增加算法的个体多样性。

2.3 适应度函数

收卷张力控制系统具有快速性、稳定性、准确性且抗扰能力强的特点。结合性能指标,如上升时间、峰值时间、最大超调量和调节时间等,选择时间乘绝对误差的误差积分准则 ITAE 作为目标函数^[9];考虑到控制量可能会过大,且为了避免超调量,也将超调量作为 ITAE 中的一项:

$$J = \int_0^{\infty} [w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)] dt + w_3 t_s。 \quad (8)$$

当 $ey(t) < 0$ 时,

$$J = \int_0^{\infty} [w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_4 |ey(t)|] dt + w_3 t_s。 \quad (9)$$

式中: w_1, w_2, w_3, w_4 为权值且 $w_4 \gg w_1$, 取值为 $w_1 = 0.999, w_2 = 0.001, w_3 = 2.000, w_4 = 100.000$; $e(t)$ 为误差; $u(t)$ 为控制量; t_s 为上升时间; $ey(t) = y(t) - y(t-1)$; $y(t)$ 为被控对象输出。

将基于上述改进方法的麻雀算法应用到改进自抗扰控制器参数优化中,具体步骤为:

1) 初始化麻雀种群,设定好种群数量、迭代次数、

麻雀类型比例和搜索空间维度等参数,并且初始化每个麻雀的位置和速度。

2) 将每个麻雀的位置作为 ADRC 的参数进行控制,根据 ITAE 计算适应值。

3) 根据适应值大小对麻雀进行排序。

4) 更新麻雀个体的速度。

5) 根据适应值重新选择发现者和跟随者,并更新位置。

6) 随机产生数名警戒者,并更新位置。

7) 对所有麻雀个体进行交叉、变异操作。

8) 判断是否达到迭代次数,若没到,则从步骤 2) 重复计算;若达到则结束计算,并且输出最佳适应值和最优 ADRC 控制参数。

改进 SSA 算法步骤如图 1 所示。

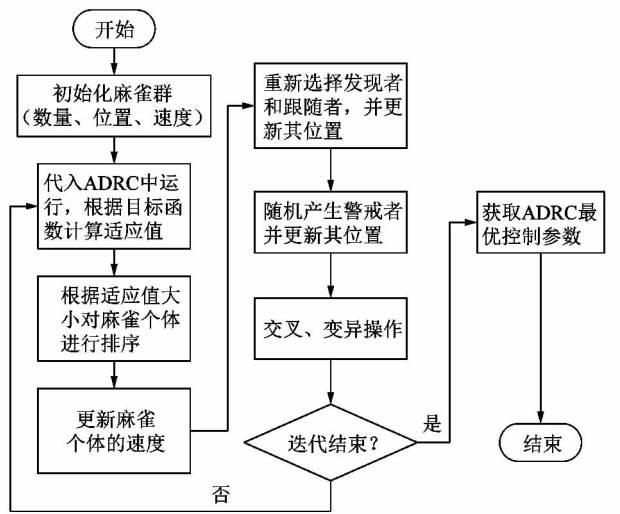


图 1 改进 SSA 算法步骤

Figure 1 Improved SSA algorithm steps

3 自抗扰控制器

基于韩京清解决控制问题的新思路——在系统运行过程中施加控制力来达到控制目的的过程控制^[10-11],以及在 PID 控制技术的基础上结合现代优秀控制技术,再经过仿真提出了自抗扰控制技术。该技术的核心控制原理是将系统的未建模动态和未知扰动都归结为对系统的总扰动而进行估计并补偿。自抗扰控制技术主要由 3 个子技术组成的:跟踪微分器(TD)、扩展状态观测器(ESO)、非线性反馈效应(NLSEF),ADRC 结构图如图 2 所示。

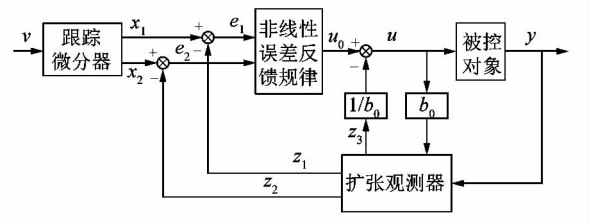


图 2 自抗扰控制器结构图

Figure 2 Structure diagram of active disturbance rejection controller

自抗扰控制器的控制过程为:

1) 安排过渡过程,将输入信号 v 通过跟踪微分器过渡为跟踪信号 x_1 ,同时输出对应的微分信号 x_2 。

2) 建立过扩张状态观测器,将被控对象的输入信号 u 和输出信号 y ,计算得到被控对象的状态信号 z_1 , z_2 和被控对象受到的总扰动 z_3 。

3) 计算出系统的状态误差 $e_1 = x_1 - z_1$, $e_2 = x_2 - z_2$,并且根据状态误差 e_1, e_2 确定非线性反馈效应中的误差反馈律。

4) 用系统受到的总扰动值 z_3 对误差反馈控制量 u_0 进行补偿,以此来确定控制被控对象的控制量 u 为:

$$u = u_0 - \frac{z_3}{b_0} \text{ 或者 } u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} \quad (10)$$

3.1 跟踪微分器

本研究中的过渡过程采用离散形式非线性的跟踪微分器,离散形式可以避免进入稳态时产生的高频振荡^[11],TD 的形式为:

$$\left. \begin{aligned} fh &= fhan(x_1(k) - v(t), x_2(k), r, h_0); \\ x_1(k+1) &= x_1(k) + hx_2(k); \\ x_2(k+1) &= x_2(k) + fh. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: v 为输入信号, x_1 和 x_2 分别为对应的输入跟踪信号和微分信号, h 为积分步长, r 为速度因子(决定跟踪速度), h_0 为滤波因子(对噪声滤波),函数 $fhan(\cdot)$ 为离散系统的最速控制综合函数。

3.2 扩张状态观测器

状态观测器是利用被控对象的输入信号和输出信号来确定其状态的装置;而扩张状态观测器其实就是在状态观测器的基础上扩张新的状态观测量。自抗扰控制器中扩张状态观测器扩张的状态变量是被控对象

受到的总扰动,也就使得 ADRC 能够实时估计系统扰动^[12],并且对该扰动进行补偿。ESO 在离散系统中的形式为:

$$\left. \begin{aligned} e(k) &= z_1(k) - y(k); \\ z_1(k+1) &= z_1(k) + h[z_2(k) - \beta_{01} \text{fal}(e(k), \alpha_1, \delta_1)]; \\ z_2(k+1) &= z_2(k) + h[z_3(k) - \beta_{02} \text{fal}(e(k), \alpha_2, \delta_1) + b_0 u(k)]; \\ z_3(k+1) &= z_3(k) - h\beta_{03} \text{fal}(e(k), \alpha_3, \delta_1) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: b_0 为补偿系数; $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 是可调参数,决定了 ESO 对状态的估计能力;一般情况下取 $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0.5, \alpha_3 = 0.25$;参数 δ_1 根据实际情况选取。

3.3 非线性状态误差反馈律

非线性状态误差反馈律是将经典 PID 控制技术中 P、I 和 D 三者的加权和改成非线性组合,也就是非线性 PID 的控制方法,其在离散系统中的形式为:

$$\left. \begin{aligned} e_1(k) &= x_1(k) - z_1(k); \\ e_2(k) &= x_2(k) - z_2(k); \\ u_0(k) &= \beta_1 \text{fal}(e_1(k), \alpha_4, \delta_2) + \beta_2 \text{fal}(e_2(k), \alpha_5, \delta_2); \\ u(k) &= u_0(k) - \frac{z_3(k)}{b_0} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: β_1, β_2 为可调参数,是比例和微分增益,对控制量有着关键作用,一般情况下取 $\alpha_4 = 0.75, \alpha_5 = 1.25$;参数 δ_2 与控制精度有关。

综上所述,即便自抗扰控制器的表达式中有着很多参数,但实际上需要进行最优化整定的参数为 $\{\beta_{01},$

$\beta_{02}, \beta_{03}, \beta_1, \beta_2, b_0\}$, 其他的相关参数可以根据实际经验确定为恒定值。控制系统结构如图 3 所示。

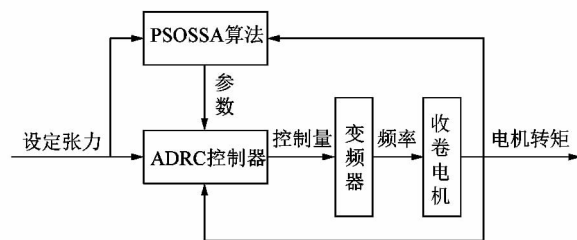


图3 基于 PSOSSA 的 ADRC 系统框图

Figure 3 Block diagram of ADRC system based on PSOSSA

4 实验仿真分析

结合上述的分析和理论,采用 MATLAB 和 Simulink 软件平台,对收卷张力控制系统整定 ADRC 控制器的参数进行仿真。采样时间设定为 $t_c = 10 \text{ ms}$,将系统设定的阶跃信号作为输入信号。PSOSSA 和 SSA 算法仿真对比,麻雀群的大小为 30;迭代次数为 1 000,变量数(空间维度)为 6,预警值为 0.8;发现者比例为 0.2;预警者比列为 0.2;ADRC 整定参数为 $\{\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, \beta_1, \beta_2, \beta_0\}$,其最小值的设定为 $\{0, 0, 0, 0, 0, 0\}$,其最大值的设定为 $\{50, 200, 1\,000, 50, 50, 10\}$;ADRC 控制器的速度因子 r 为 300,滤波因子 h 为 0.2。

4.1 无扰动仿真

在不存在扰动影响的条件下,对 2 种算法分别进行同样次数的仿真,如表 1 所示。

表1 仿真优化整定的 ADRC 参数

Table 1 ADRC parameters adjusted by simulation optimization

算法	β_{01}	β_{02}	β_{03}	β_1	β_2	b_0	J
PGSSA	50.000 0	97.101 6	423.966 2	34.900 6	31.765 8	10.000 0	38.812 7
SSA	45.737 1	129.024 8	907.600 7	14.589 4	30.264 4	9.947 2	44.531 9

2 种算法的适应度函数计算的最优适应值如图 4 所示。

ADRC 控制系统应用 2 种算法整定后参数的无扰动阶跃响应曲线如图 5 所示。

根据阶跃响应的性能指标进行分析,两者的数据如表 2 所示。

表2 阶跃响应性能指标

Table 2 Step response performance indicators

算法	延迟时间 t_d/s	上升时间 t_r/s	峰值时间 t_p/s	调节时间 t_s/s	超调量 $\sigma/\%$
PGSSA	0.38	0.80	0.00	0.00	0
SSA	0.47	0.82	1.15	2.28	9

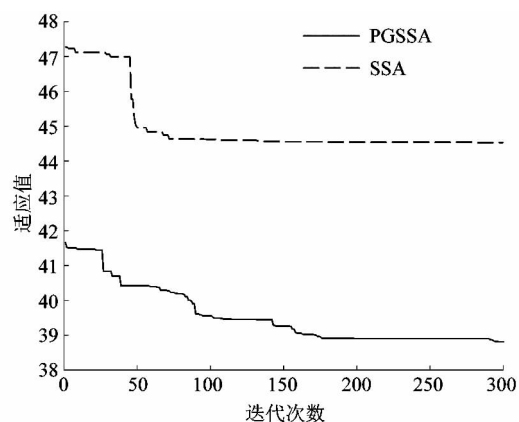


图4 最优适应值

Figure 4 Optimal fitness value

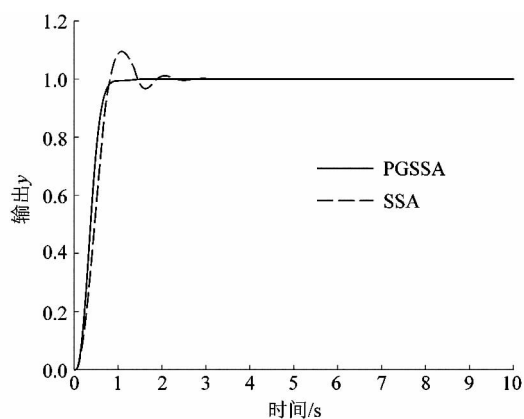


图5 无扰动阶跃曲线

Figure 5 Undisturbed step curve

通过表1和图4,可以了解到基于粒子群算法改进的麻雀算法整定优化ADRC控制系统参数的收敛速度和收敛精度要优于普通的麻雀群智能算法。而从表2和图5无扰动阶跃曲线,PGSSA算法整定后的ADRC控制系统在延迟时间和上升时间要小于SSA算法整定后的控制系统,而且还没有出现超调量和震荡,处于稳定输出状态。

4.2 ADRC有扰动仿真

在4.5~5.5 s期间存在 $u_0 = 2.2$ 的扰动,对控制系统进行仿真,阶跃响应曲线如图6所示。

由图6可知,PGSSA算法整定后的控制系统对扰动有很强的抑制作用,在扰动消失后,系统能很快稳定下来,且没有出现大的震动和超调量;而SSA算法整定后的系统,在扰动出现后有较大超调量和4次振荡,且在扰动消失后经历约1.5 s才重新稳定下来。

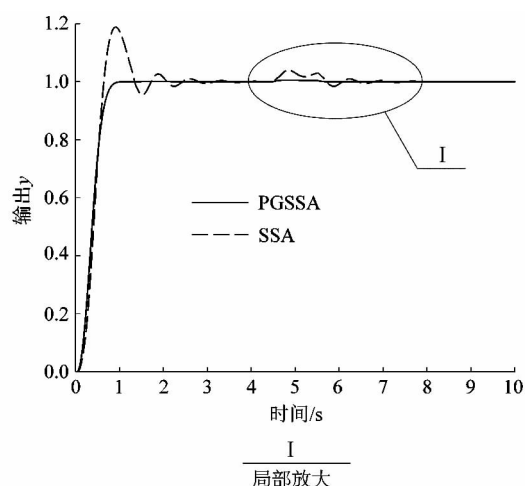


图6 有扰动阶跃曲线

Figure 6 Step curve with disturbance

4.3 PID有扰动仿真

PID控制系统在4.5~5.5 s期间存在 $u_0 = 2.2$ 的扰动的阶跃响应曲线如图7所示。

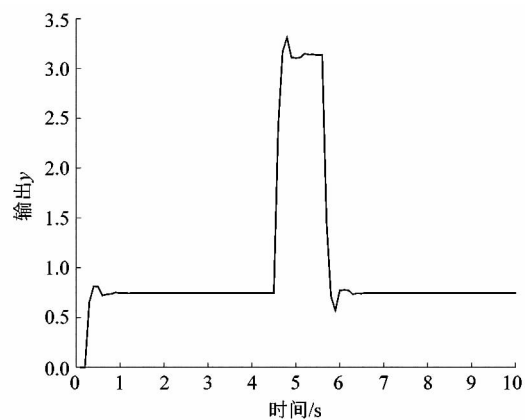


图7 PID有扰动阶跃曲线

Figure 7 PID step curve with disturbance

由图6~7中的ADRC扰动阶跃曲线和PID扰动阶跃曲线可分析出,PID控制系统对扰动没有很好的抑制作用,而且扰动存在期间对输出也有很大的影响,扰动消失后经过1 s左右进入稳定。在相同时间出现

同样的扰动时,ADRC 控制系统明显比 PID 控制系统对扰动抑制作用强,而且在扰动消失后能更快更平稳地进入稳定状态。

5 结论

课题组通过建立复卷机收卷端张力控制运动数学模型,分析其主要受到放卷辊上卷材的线速度和卷径的影响,设计采用闭环转矩张力 PADRC 控制方法,构建稳定的张力控制系统。

针对 PID 控制器的缺点,选择利用 ADRC 作为控制器。经过仿真对比发现,PID 控制系统对大扰动调节时间慢,没有有效地减弱扰动对系统输出的影响。而 ADRC 控制系统对扰动有很强的抑制作用,而且扰动消失后调节速度快。

针对 SSA 算法以跳跃方式搜索和易陷于局部最优的缺陷,提出引入粒子群算法中的速度算子以速度 v 的移动方式进行搜索,以免忽略某些较优值;并且采用遗传算法中的交叉和变异操作,用来保持麻雀种群的多样性,以增强算法的全局搜索能力。在对 PGSSA 算法和 SSA 算法分别进行整定仿真,可以得出,在同样的初始条件下,PGSSA 算法在收敛速度和收敛精度都要优于 SSA 算法,而且 PGSSA 仿真得出的阶跃响应的性能指标(如延迟时间、上升时间及超调量等)也比较优越。

参考文献:

- [1] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程,2002,9(3):13-18.
- [2] 赵巧静. 基于改进麻雀搜索算法的 MPPT 方法[J]. 电源技术,2020,45(7):911-915.
- [3] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]// International Conference on Neural Networks. Perth, Australia: IEEE, 1995:1942-1948.
- [4] 龚纯,王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2012:313-314.
- [5] XUE J K, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020,8(1):22-34.
- [6] 张立冬,寇子明,吴娟,等. 输送带收卷装置设计及其恒张力控制研究[J]. 机电工程,2021,38(3):388-392.
- [7] 彭鞍红. 通用变频器异步电动机的传递函数[J]. 鞍山钢铁学院学报,2000,23(6):487-499.
- [8] 薛建凯. 一种新型的群智能优化技术的研究与应用[D]. 上海:东华大学,2020:15-20.
- [9] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 2 版. 电子工业出版社,2004:210-211.
- [10] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学,2007(1):24-31.
- [11] 韩京清,袁露林. 跟踪-微分器的离散形式[J]. 系统科学与数学,1997,19(3):268-273.
- [12] 韩京清. 自抗扰控制技术:估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008:256-258.