

基于NDO与IWOA-FOPID的送标器张力控制

卢豆豆

江西理工大学, 电气工程与自动化学院, 江西 赣州

收稿日期: 2023年2月24日; 录用日期: 2023年3月12日; 发布日期: 2023年3月21日

摘要

为改善贴标机工作时, 其核心部件送标器张力控制的精度不高、抗干扰能力差的问题, 设计了基于改进鲸鱼优化算法(IWOA)的分数阶PID(FOPID)控制器, 以保证能够充分发挥FOPID控制器性能。考虑到送标器卷绕时存在诸多的多干扰, 以送标器状态空间模型为基础, 设计了非线性干扰观测器(NDO)用以抵消系统干扰。在MATLAB软件上, 对控制器各个部分性能做了对比验证。仿真结果表明, 改进后的IWOA改善了原算法过早收敛的缺点, 在与FOPID控制器结合后有效抑制了系统超调、加快了响应速度; 且加入NDO后, 系统因干扰产生的震荡能够减少82.94%, 提升了系统的鲁棒性, 有一定的实用价值。

关键词

贴标机, 送标器, 张力控制, 分数阶PID, 改进鲸鱼优化算法, NDO, 仿真, 卷绕系统

Tension Control of Label Feeder Based on NDO and IWOA-FOPID

Doudou Lu

School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Received: Feb. 24th, 2023; accepted: Mar. 12th, 2023; published: Mar. 21st, 2023

Abstract

In order to improve the low accuracy and poor anti-interference ability of the tension control of the core component of the labeling machine, a Fractional Order PID (FOPID) controller based on the improved whale optimization algorithm (IWOA) is designed to ensure that the performance of the FOPID controller can be fully exerted. Taking into account the multi disturbance in the winding of the marker, a nonlinear disturbance observer (NDO) is designed to cancel the system disturbance based on the state space model of the marker. On the MATLAB software, the performance of each part of the controller is compared and verified. The simulation results show that

the improved IWOA improves the premature convergence of the original algorithm, effectively suppresses the system overshoot and accelerates the response speed when combined with the FOPID controller; Moreover, after adding NDO, the oscillation caused by interference can be reduced by 82.94%, which improves the robustness of the system and has certain practical value.

Keywords

Labeling Machine, Standard Feeder, Tension Control, Fractional Order PID, Improved Whale Optimization Algorithm, NDO, Simulation, Winding System

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在食品、药品等行业的现代化包装中，贴标机已成为商品标签自动化粘贴不可或缺的设备[1]。送标器是贴标机的核心部分，负责将商品标签送达目标位置并粘贴。目前，采用擦贴法的卷轴式不干胶标签送标器，因其出标速度快、贴标位置准确等优点，被广泛应用于各种贴标设备中[2]。卷轴式送标器本质上是一套卷绕系统，要求保证送标过程中的张力稳定，否则：张力过大会造成标签带形变甚至断裂，张力过小会存在无法有效揭标或漏标等问题。

针对类似于送标器的非线性、时变、强耦合的卷绕系统[3] [4]，国内外学者提出过不同的张力控制方案。Hwang H 等[5]为了提高卷绕系统的鲁棒性，采用了前馈控制器 + 干扰观测器(DOB)的方式控制张力，还利用了卡尔曼滤波器处理反馈信号。Chu X 等[6]为解决卷绕加速过程的张力波动，利用泰勒展开法建立的加速阶段的动力学模型，引入了区间变量来表示时变和不确定参数，并在此基础上设计了鲁棒控制器。Raul P R 等[7]讨论了 MRA-PI 和基于继电器反馈技术的间接自适应 PI 控制器两种张力控制方案的特点，并与固定增益的 PI 控制进行了对比实验，得出了间接自适应 PI 控制器更适合自动化应用的结论。马海豹等[8]利用遗传算法在线调整自抗扰控制器参数，实现了分切机收卷过程的张力自适应调节，相较于 PID 控制，该控制器能够有效提高系统鲁棒性与收卷质量。

为了进一步提高卷绕系统张力的控制精度与抗干扰能力，本文以送标器为控制对象，采用了调节灵活性高、鲁棒性好的分数阶 PID (Fractional-Order PID)控制器调节张力[9]。引入了改进鲸鱼优化算法(Improved Whale Optimization Algorithm)整定分数阶 PID 的五个参数，并根据建立的数学模型设计了非线性干扰观测器(Nonlinear Disturbance Observer)，以达到在保证系统快速响应的同时最大程度抵消干扰。使用 MATLAB 软件对系统进行了仿真实验，验证了控制器的良好性能。

2. 控制系统分析与建模

2.1. 送标器张力控制方案

送标器的本质上是一个由松卷端和收纸端组成的收放卷系统，两端的线速度差是张力产生的原因。张力控制本质上是速度控制，但难以实现直接控制两端速度差恒定[10]。所以，一般在中间加入主动辊(或称牵引辊)，将卷绕系统分隔两部分，一端负责控制张力，另一端负责控制速度。张力闭环控制方案如图 1 所示。卷绕系统张力通过控制松卷辊转速来调节；而主动辊与收纸辊负责线速度控制，它们之间的卷带较短，可以通过缓冲辊自动适应张力变化。

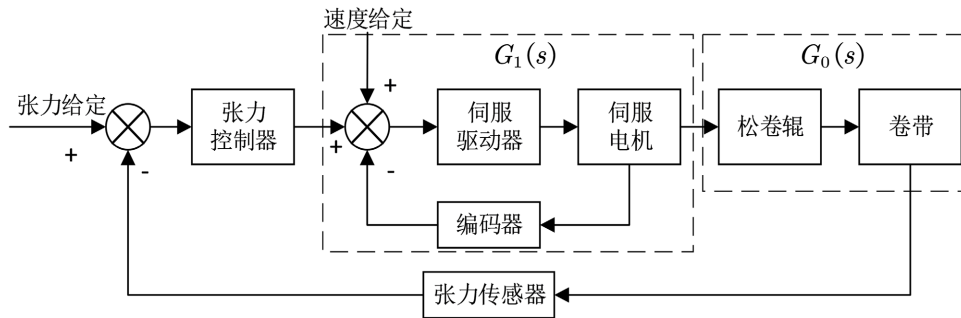


Figure 1. Tension closed loop control scheme
图 1. 张力闭环控制方案

2.2. 张力控制系统建模

张力控制部分简化结构如图 2 所示，图中 ω 为松卷辊转速， R 为标签卷半径， T 为卷带张力， V_0 为松卷端线速度， V_1 为主动端线速度。

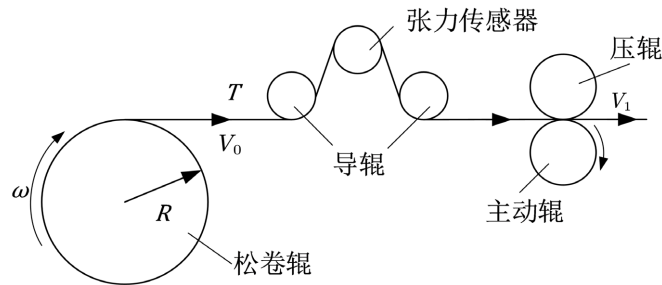


Figure 2. Simplified structure of tension control part
图 2. 张力控制部分简化结构

假设卷带在拉伸的过程中发生了纯弹性形变，且与辊之间有足够的摩擦，忽略温度对卷带形变的影响，由胡可定律可得：

$$T(t) = A\delta(t) = AE\varepsilon(t) \tag{1}$$

式中， A 表示卷带的横截面积(m^2)； $\delta(t)$ 表示卷带所受到的应力(N)； E 表示卷带的弹性模量(GPa)； $\varepsilon(t)$ 表示卷带产生的应变。根据文献[11]，对应变 $\varepsilon(t)$ 求导可得：

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = -\frac{1}{L}[V_1\varepsilon(t) - V_0(t)] \tag{2}$$

式中， L 为松卷辊到主动辊之间的卷带长度(m)，假设主动端线速度 V_1 为常数。对(2)式进行拉式变换并整理：

$$\varepsilon(s) = \frac{V_0(s)}{Ls + V_1} \tag{3}$$

对(1)式进行拉式变换并将(3)式代入整理可得：

$$\frac{T(s)}{V_0(s)} = \frac{AE}{Ls + V_1} \tag{4}$$

一般情况下，转速 ω 随时间的变化率要远远大于卷径 R 随时间的变化率，且送标器是间断式工作的，

所以可以认为在一个工作间隔内的 R 为定值。由此有： $V_0(s) = \omega(s) \cdot R$ ，则图 2 中卷带张力的传递函数 $G_0(s)$ 为：

$$G_0(s) = \frac{T(s)}{\omega(s)} = \frac{RAE}{Ls + V_1} \tag{5}$$

通过向伺服驱动器输入速度阶跃信号，观察电机速度响应曲线的方式，可以将张力控制方案中伺服控制部分的传递函数 $G_1(s)$ 辨识为一个一阶惯性系统[12]：

$$G_1(s) = \frac{1}{T_i s + 1} \tag{6}$$

式中， T_i 为时间常数(s)。综合式(5)、(6)可得张力控制系统的开环传递函数为：

$$G(s) = \frac{RAE}{LT_i s^2 + (V_1 T_i + L)s + V_1} \tag{7}$$

将上述传递函数转换成状态空间方程：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = A_0 u - B_0 x_2 - C_0 x_1 \end{cases} \tag{8}$$

式中， $A_0 = RAE/LT_i$ ； $B_0 = (V_1 T_i + L)/LT_i$ ； $C_0 = V_1/LT_i$ 。

3. 张力控制器设计

3.1. 控制器结构

为了更为精准的控制卷带张力，采用分数阶 PID 控制器作为控制器核心。但分数阶 PID 比传统 PID 更难调参，因此引入改进鲸鱼优化算法 IWOA 代替人工整定参数。为了兼顾调节时间和超调量，选用 ITAE 评价指标作为 IWOA 的适应度函数，该函数表达式为：

$$f(t) = \int_0^{T_u} |e(t)| \cdot t dt \tag{9}$$

式中， $e(t)$ 为张力给定值与反馈值之间的差值， T_u 为积分时间。

送标器间断工作意味着需要频繁启停，这非常容易在系统中产生瞬态干扰，加上传感器的测量噪声，整个卷绕系统几乎时刻处在干扰之中。为了提高系统的鲁棒性，根据控制对象的状态空间方程，设计了用以补偿系统干扰的非线性干扰观测器 NDO。控制器结构框图如图 3 所示，下文将对控制器的各个部分作详细说明。

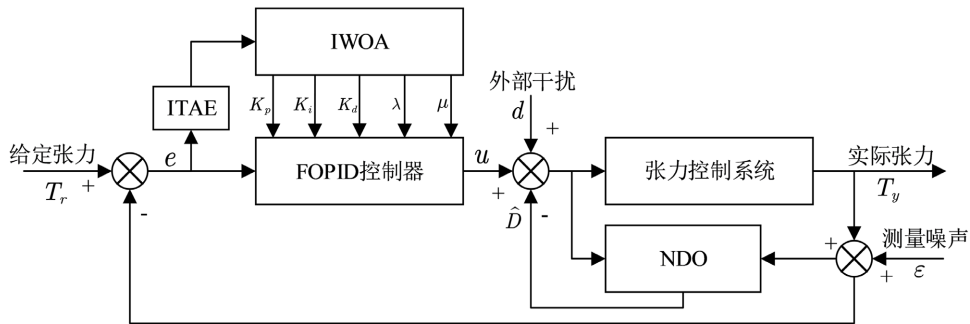


Figure 3. Structural block diagram of controller
图 3. 控制器结构框图

3.2. 分数阶 PID 控制器

1999 年, Podlubny [13] 基于分数阶微积分 Capotu 定义提出了 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器, 其传递函数形式为:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_I s^{-\lambda} + K_D s^\mu \quad (10)$$

式中, λ 与 μ 均大于零, 范围一般在 $[0, 1]$ 。该控制器在时域中的输出为:

$$u(t) = e(t) \cdot (K_p + K_I D^{-\lambda} + K_D D^\mu) \quad (11)$$

$PI^\lambda D^\mu$ 控制器在积分与微分部分增加了可以调节阶次的功能, 相比于传统 PID, 它继承了分数阶微积分的特点, 赋予了控制器更宽泛、梯度更小的调节范围, 适合高精度调控的环境。但由于非整数阶次的存在, 在工程应用中需要找到合适的滤波器近似分数阶微积分方程, 才能设计出实际意义上的 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器。在众多近似方法中, Oustaloup 滤波器使用的最为普遍。标准 Oustaloup 滤波器的近似方式为:

$$s^\alpha \approx G(s) = K \prod_{k=1}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (12)$$

式中, N 是滤波器阶次。该式零点为: $\omega'_k = \omega_b \omega_u^{\frac{2k-1-\alpha}{N}}$, 极点为: $\omega_k = \omega_b \omega_u^{\frac{2k-1+\alpha}{N}}$, 增益 $K = \omega_h^\alpha$; 其中 $\omega_u = \sqrt{\omega_h / \omega_b}$, ω_h 和 ω_b 为函数拟合的频率范围上下限。但标准 Oustaloup 滤波器存在边界近似效果较差的问题, 因此使用文献[14]提出了一种改进型 Oustaloup 滤波器:

$$s^\alpha \approx K' \left[\frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1-\alpha)s^2 + b\omega_h s + d\alpha} \right] \Pi \quad (13)$$

$$\begin{cases} K' = \left(\frac{d\omega_b}{b} \right)^\alpha \prod_{k=1}^N \frac{\omega_k}{\omega'_k} \\ \Pi = \prod_{k=1}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \end{cases} \quad (14)$$

式中, 参数 b 和 d 的建议取值为 10 与 9。

3.3. 非线性干扰观测器设计

在考虑扰动的情况下, (8)式可以表示为:

$$\dot{X} = HX + Wu + D \quad (15)$$

式中, $\dot{X} = [\dot{x}_1 \ \dot{x}_2]^T$; $X = [x_1 \ x_2]^T$; $H = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -C_0 & -B_0 \end{bmatrix}$; $W = [0 \ A_0]^T$; 包含外部干扰 d 与测量噪声 ε 的 $D = [d_1 \ d_2]^T$ 。根据(15)式设计的 NDO 形式如下:

$$\begin{cases} \hat{D} = N + LX \\ \dot{N} = -L(HX + Wu) - L\hat{D} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $L = [l_1 \ l_2]^T$, l_1 、 l_2 为观测器增益, 均大于 0。假设观测器观测的干扰误差为:

$$\tilde{D} = D - \hat{D} \quad (17)$$

一般认为干扰 D 随时间的变化量趋近于零[15], 即 $\dot{D} = 0$ 。因而有:

$$\begin{aligned}
 \dot{\tilde{D}} &= -\dot{\hat{D}} \\
 &= \dot{N} + L\dot{X} \\
 &= -L(HX + Wu) + L\dot{X} - L\hat{D} \\
 &= -L(HX + Wu - \dot{X}) - L\hat{D}
 \end{aligned} \tag{18}$$

根据(15)、(17)式, 可得:

$$\dot{\tilde{D}} = -L(D - \hat{D}) = -L\tilde{D} \tag{19}$$

为了证明上述 NDO 稳定, 选取李雅普诺夫函数 $V_t = \frac{1}{2}\tilde{D}^2$ 。由于:

$$\dot{V}_t = \dot{\tilde{D}}\tilde{D} = -L\tilde{D}^2 \leq 0 \tag{20}$$

所以, 根据李亚普诺夫第二方法, 证得该观测系统将稳定于 $\tilde{D} = 0$ 处, 能够达到干扰观测效果。

3.4. 改进鲸鱼优化算法

3.4.1. 鲸鱼优化算法

受座头鲸捕食鱼群行为的启发, Mirjalili [16]等学者于 2016 年提出了新型智能群优化算法: 鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)。该算法内容如下:

1) Encircling prey (包围猎物)

在最优解先验未知的情况下, 将鲸鱼群中最优个体位置视为假想的最优解位置, 并更新其他个体位置到该位置, 即向最优解聚集。位置更新方式为:

$$X_k^{t+1} = X_b - A \cdot |C \cdot X_b - X_k^t| \tag{21}$$

式中, t 为当前迭代次数; k 为个体序号; X_b 为当前最优解个体位置。需要注意的是, 仅当 $|A| \geq 1$ 时才选择该种方式更新位置。 A 与 C 根据下式计算:

$$A = 2a \cdot rand(0,1) - a \tag{22}$$

$$a = 2 - 2 \cdot \frac{t}{t_{\max}} \tag{23}$$

$$C = 2 \cdot rand(0,1) \tag{24}$$

式中, $rand(0,1)$ 表示范围属于 $[0, 1]$ 的随机数; t_{\max} 表示最大迭代次数。

2) Bubble-Net Attacking Method (气泡网攻击)

座头鲸的气泡网攻击行为可以分为两种策略: Shrinking Encircling Mechanism (收缩包围)和 Spiral Updating Position (螺旋式位置更新), 两种策略分别有 50% 的概率执行。具体可以由以下等式表述:

$$X_k^{t+1} = X_b - A \cdot |C \cdot X_b - X_k^t|, p < 0.5 \tag{25}$$

$$X_k^{t+1} = |X_b - X_k^t| \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X_k^t, p \geq 0.5 \tag{26}$$

式中, b 是与对数螺旋形状相关的常数; l 是范围属于 $[-1, 1]$ 的随机数; p 是范围在 $[0, 1]$ 的随机数, A 与 C 的定义与 Encircling Prey 一致。

3) Search for Prey (搜寻猎物)

座头鲸个体除了会向着猎物(最优解)方向移动外, 还会朝着随机个体位置游动, 属于算法的探索阶段。该步骤实现方式如下:

$$X_k^{t+1} = X_r^t - A \cdot |C \cdot X_r^t - X_k^t| \quad (27)$$

式中, X_r^t 为当前代数的随机个体位置。为了不与包围猎物的阶段冲突, 仅当 $|A| \geq 1$ 时选择搜寻猎物。同样, A 与 C 的定义与 Encircling Prey 一致。WOA 流程图如图 4 所示。

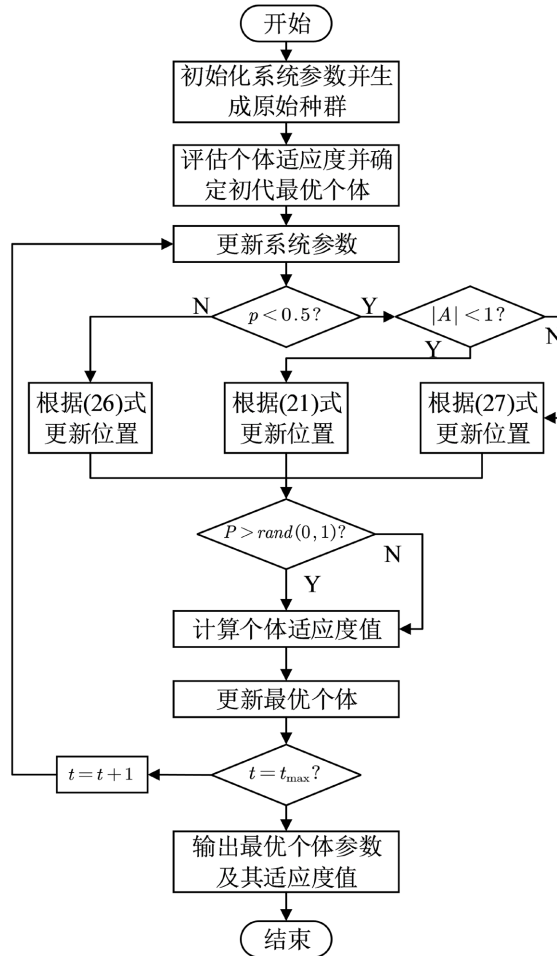


Figure 4. WOA flow chart
图 4. WOA 流程图

3.4.2. IWOA 改进策略

WOA 算法中, 鲸鱼个体选择向最优个体或随机个体更新位置的标准是 $|A|$ 的大小。根据(22)、(23)式可以观察到, 算法在迭代的过程中 $|A|$ 的值总是偏向小于 1 的部分。这使得 WOA 在前期收敛的非常快, 而中后期随着 $|A|$ 的浮动范围逐渐收缩, 算法基本处在“包围猎物”和“气泡网攻击”的策略循环中。总体来看, WOA 倾向于出现过早的收敛和停滞现象。为了改善以上问题, 本文引入了以下两方面的改进。

1) 优化位置更新方式

针对算法在“包围猎物”和“搜寻猎物”两方面选择概率不一的问题, 通过将(21)式与(27)式更改为下列形式缓解:

$$X_k^{t+1} = X_{\eta_1}^t - A \cdot |X_{\eta_1}^t - X_k^t|, |A| < 1 \quad (28)$$

$$X_k^{t+1} = X_{\eta_2}^t - A \cdot |X_{\eta_2}^t - X_k^t|, |A| \geq 1 \quad (29)$$

式中, X'_1 、 X'_2 均为当前代数的随机个体位置。在(31)式中使用 X'_1 替换原本的 X_b 和 X'_k 是为了在相对的加强算法在“搜寻猎物”方面侧重的同时, 增强种群的多样性; 而在两式中删除系数 C 是为了在更新位置时保证个体之间的均匀分布, 从而提升算法的鲁棒性[17]。此外, 为了进一步平衡“包围猎物”和“搜寻猎物”在算法中的比重, 对系数 a 的计算方式做出以下更改:

$$a = 2 \cdot \left(1 - \log_e \left(1 + (e-1) \cdot \frac{t}{t_{max}} \right) \right) \quad (30)$$

式中, e 为自然常数。

2) 引入扰动算子

在避免陷入局部最优方面, 通过在位置更新时加入扰动算子克服, 方式如下:

$$X'_k = X'_k, P \leq rand(0,1) \quad (31)$$

$$X'_k = X'_k + X'_k \cdot trnd(a), P > rand(0,1) \quad (32)$$

式中, $trnd(a)$ 为服从 t 分布 $t(a)$ 的随机数; P 为扰动概率因子。该式能够实现扰动随着迭代次数增加而降低, 使得算法在初期适应度差的时候增强其全局搜索能力, 在后期保证局部搜索能力。IWOA 流程图如图 5 所示。

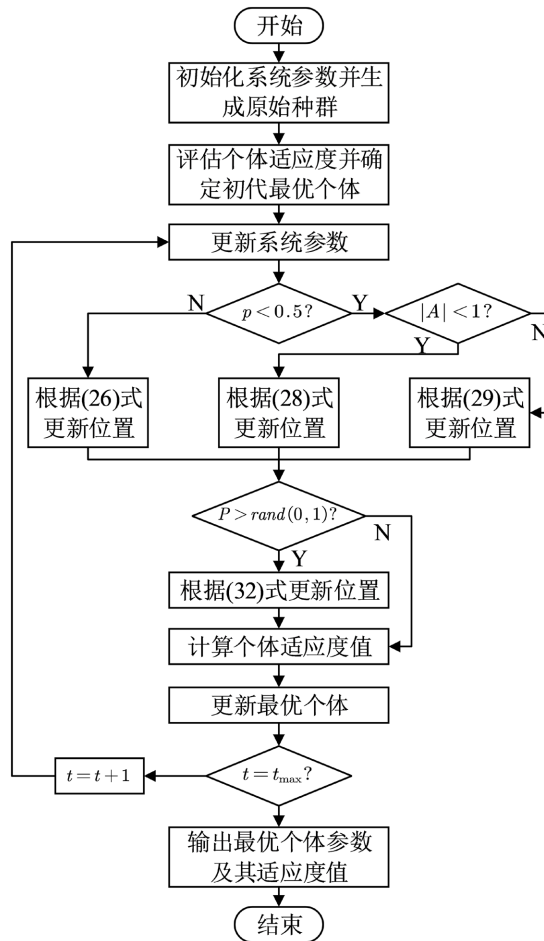


Figure 5. IWOA flow chart
图 5. IWOA 流程图

4. 仿真与分析

仿真实验平台为 Matlab2019a, 模型参数数值根据实际贴标机工况选取为: $R = 0.1 \text{ m}$, $E = 8 \text{ GPa}$, $A = 1.42 \text{ mm}^2$, $V_1 = 15 \text{ m/min}$, $L = 0.8 \text{ m}$, $T_i = 0.12 \text{ s}$; 分数阶 PID 的滤波器范围下限 $\omega_b = 10^{-3} \text{ rad/s}$ 、上限 $\omega_h = 10^3 \text{ rad/s}$, 滤波阶次 $N = 5$; 观测器增益 l_1 、 l_2 均取 20; IWOA 扰动概率因子 $P = 0.75$ 。

4.1. 优化算法性能对比验证

分别利用 PSO(粒子群算法)、WOA、IWOA 对分数阶 PID 五个参数进行参数整定实验, 控制对象传递函数为 $G(s) = \frac{11.83}{s^2 + 27.083s + 156.25}$ 。其中, PSO 计算步骤参考文献[18], 惯性因子取 0.8, 两个加速常数均设为 2。此外, 三种优化算法种群大小均为 30, 维数 5, 最大迭代次数 50。适应度随迭代次数变化对比图如图 6 所示。

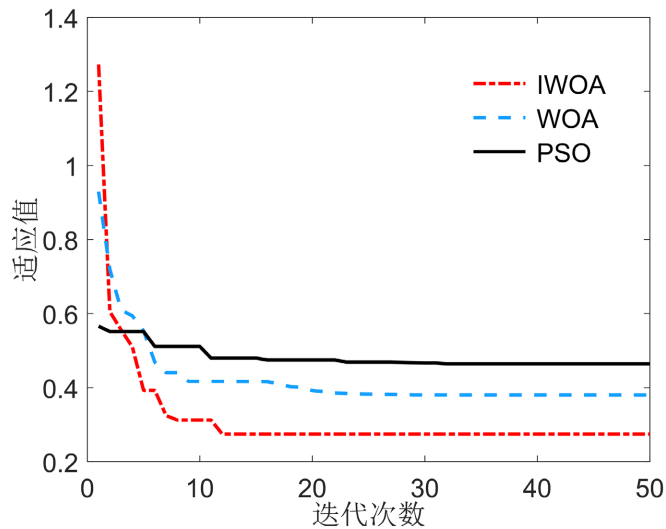


Figure 6. Comparison of fitness changes with iteration time
图 6. 适应度随迭代次数变化对比

为了不失客观性, 按上述条件再进行 10 次实验, 整理后的三种算法的实验数据见表 1。

Table 1. Experimental data of three algorithms
表 1. 三种算法的实验数据

算法类型	参数类型				
	最优值	最劣值	平均值	标准差	收敛代数均值
PSO	0.35089	0.70772	0.46191	0.13705	25.8
WOA	0.27435	0.50079	0.32848	0.08690	20.2
IWOA	0.26707	0.27694	0.27198	0.00303	19.4

表 1 中, 收敛代数的判断准则为: 适应度不再变化的最早迭代数。在图 6 与表 1 中均可观察到, 鲸鱼优化算法相比于粒子群算法, 寻优能力更强; 而 IWOA 在没有牺牲原算法快速收敛优势的同时, 明显改善跳出局部最优的能力, 且稳定性更高。

4.2. 干扰观测器性能验证

为了观察 NDO 对外部干扰的跟踪能力，在系统中先添加幅值为 0.2，频率为 25 的正弦干扰；延迟 1 s 后叠加终值为 10 的阶跃信号；在仿真时间 5 s 处再同时叠加终值为 10 的阶跃信号和幅值为 1、频率 15 的正弦信号。复合干扰观测仿真结果如图 7 所示。在验证 NDO 对噪声的观测能力方面，为了更加直观，在系统反馈通道中加入服从 $N(0, 50)$ 的随机噪声信号，噪声观测仿真结果如图 8 所示。在加入噪声后，系统的阶跃响应曲线在有无 NDO 情况下的对比图如图 9 所示。

在图 7 中，NDO 对复合干扰的跟踪效果较好，仅在干扰信号拐点处会有 0.07 秒左右的跟踪延迟，观测误差较小。在图 8、图 9 中，能够观察到观测器对高频噪声有良好的跟踪和补偿性能，经过测算，NDO 减小了系统 82.94% 的震荡幅度。

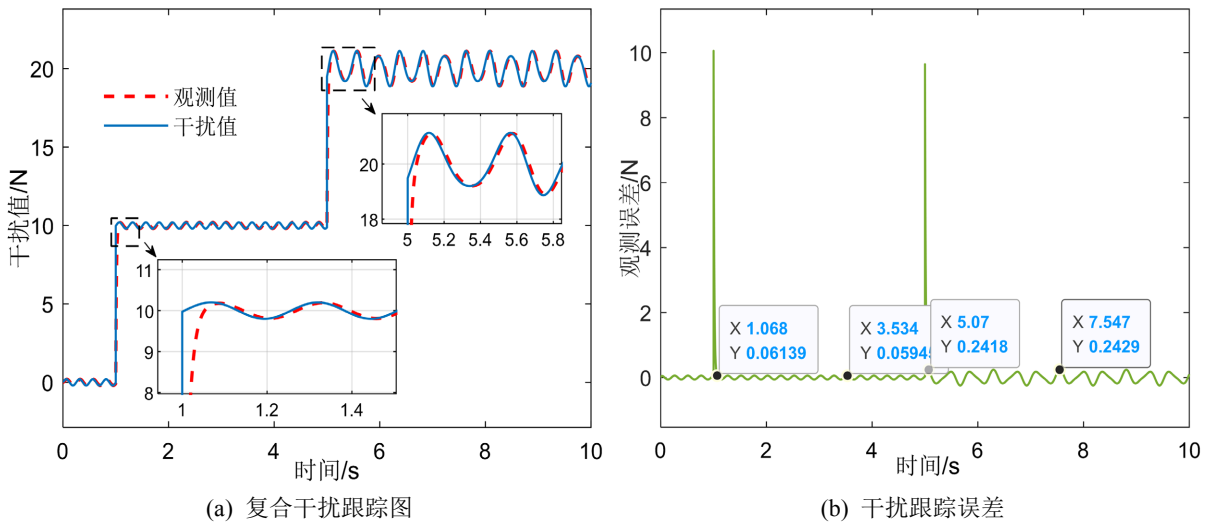


Figure 7. Simulation results of composite interference observation
图 7. 复合干扰观测仿真结果

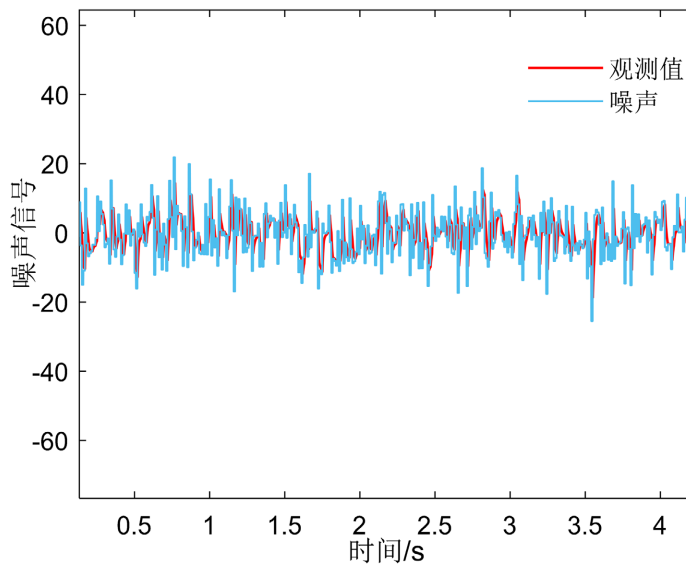


Figure 8. Noise observation simulation results
图 8. 噪声观测仿真结果

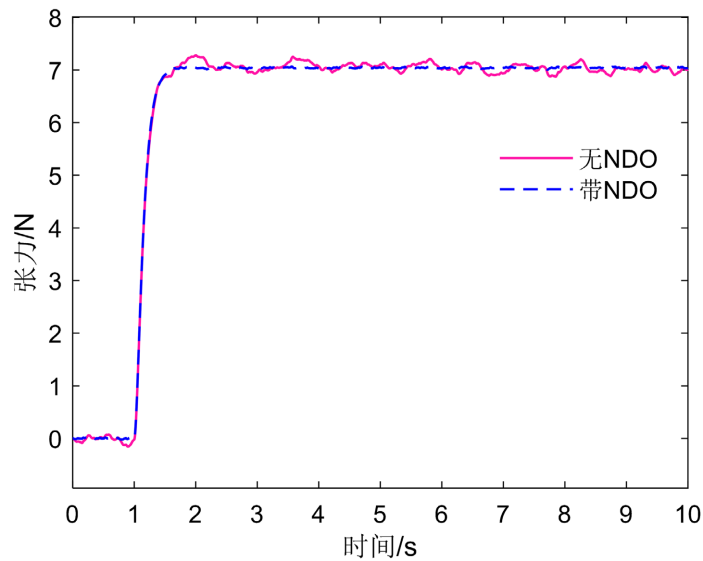


Figure 9. Comparison diagram of step response with and without NDO
图 9. 有无 NDO 下的阶跃响应对比图

4.3. IWOA-FOPID 控制器性能验证

设置目标张力为 20 N，在 5 s 处加入大小为 3 N 的扰动，通过对比不同控制方式的控制效果，来验证 IWOA-FOPID 控制器性能。系统阶跃响应与稳态受扰变化如图 10 所示。不同控制方式下的性能指标见表 2。

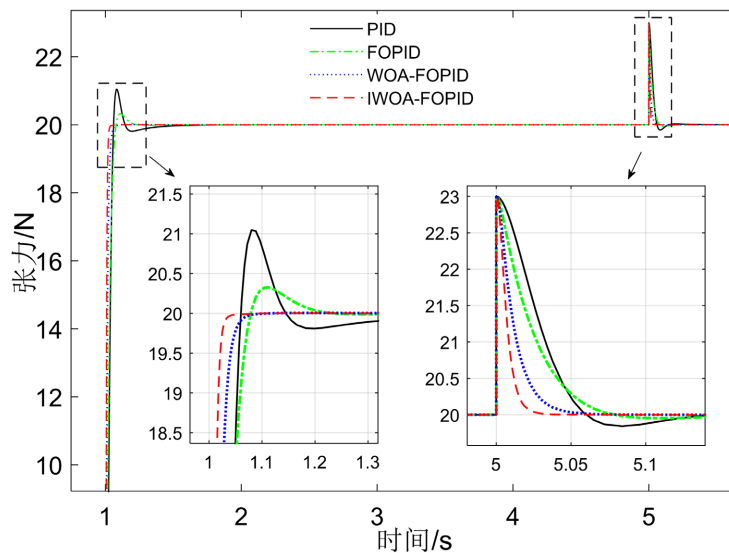


Figure 10. System step response and steady state disturbed change
图 10. 系统阶跃响应与稳态受扰变化

在图 10 中，相比于利用优化算法整定，利用经验法整定的 PID 控制器和 FOPID 控制器，都存在不同程度的超调。FOPID 控制器虽然在超调量上只有 PID 控制器的 31.43%，但是参数过多导致在人工整定时难以完整的发挥其性能，使得其在上升时间上略有落后。利用改进鲸鱼优化算法整定的 FOPID 控制器基本没有超调，且调节速度快，鲁棒性强。不同控制器性能参数见表 2。

Table 2. Performance parameters of different controllers
表 2. 不同控制器性能参数

控制方式	性能指标			
	上升时间/s	超调量/%	调节时间/s	受扰后调节时间/s
PID	0.039	5.25	0.12	0.045
FOPID	0.044	1.65	0.068	0.045
WOA-FOPID	0.013	≈0	0.043	0.023
IWOA-FOPID	0.012	≈0	0.022	0.013

5. 结论

针对贴标机送标器这种具有非线性时变特点的卷绕系统,本文提出了利用改进 WOA 优化分数阶 PID 控制参数的方式,旨在克服 FOPID 整定难的问题,充分发挥控制器精确调节的性能。同时,引入了非线性干扰观测器对系统可能存在的各种干扰进行有效预测和补偿。实验结果显示:IWOA-FOPID + NDO 控制器调节送标器张力控制系统时,具有抗扰能力强、调节迅速、超调量小、稳定性高的特点。但该控制器在实际应用中还是存在诸多限制,因此工程上如何实现将是本文下一步的探索重点。

参考文献

- [1] 金玉阳,姚锦博,马天驹,等. 航空行李自动贴标机的设计与实现[J]. 包装工程, 2020, 41(23): 223-229.
- [2] 邓浩,王怀明,李志杰,等. 贴标机剥离机构参数性能的研究[J]. 机械设计, 2019, 36(S1): 172-175.
- [3] 蒋林军,张华. 无传感参数自适应纱线卷绕张力控制方法[J]. 纺织学报, 2022, 43(4): 167-173.
- [4] 陈明霞,郑海涛,尹浚成,赵金迪. 基于模糊自适应 PID 的卷绕系统张力控制[J]. 毛纺科技, 2021, 49(3): 82-87.
- [5] Hwang, H., Lee, J., Eum, S. and Nam, K. (2019) Kalman-Filter-Based Tension Control Design for Industrial Roll-to-Roll System. *Algorithms*, **12**, Article No. 86. <https://doi.org/10.3390/a12040086>
- [6] Chu, X., Nian, X. and Fu, X. (2020) Tension Control of Web Winding Systems for Speed-up Phase. 2020 39th Chinese Control Conference (CCC), Shenyang, 27-29 July 2020, 1756-1761. <https://doi.org/10.23919/CCC50068.2020.9189375>
- [7] Raul, P.R. and Pagilla, P.R. (2015) Design and Implementation of Adaptive Pi Control Schemes for Web Tension Control in Roll-to-Roll (R2R) Manufacturing. *ISA Transactions*, **56**, 276-287. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.11.020>
- [8] 马海豹,赵世海. 遗传自抗扰在收卷张力控制系统中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2803-2809.
- [9] Meng, F., Liu, S. and Liu, K. (2020) Design of an Optimal Fractional Order PID for Constant Tension Control System. *IEEE Access*, **8**, 58933-58939. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983059>
- [10] 胡梁眉. 基于 PLC 的双头贴标机控制系统研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2019.
- [11] Homan, T., Seki, K. and Iwasaki, M. (2021) Tension Estimation and Control in Winding Process of Web Handling Systems. 2021 *IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Kyoto, 20-23 June 2021, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISIE45552.2021.9576320>
- [12] 张丹枫. 卷绕和飞剪的典型问题研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2019.
- [13] Podlubny, I. (1999) Fractional-Order Systems and PI/Sup /Spl Lambda//D/Sup /Spl Mu// -Controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **44**, 208-214. <https://doi.org/10.1109/9.739144>
- [14] Xue, D., Zhao, C. and Chen, Y. (2006) A Modified Approximation Method of Fractional Order System. 2006 *International Conference on Mechatronics and Automation*, Luoyang, 25-28 June 2006. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2006.257769>
- [15] 王坚浩,胡剑波,高鹏. 基于 NDO 的飞行模拟转台伺服系统跟踪控制[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(10): 2301-2305.
- [16] Mirjalili, S. and Lewis, A. (2016) The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, **95**, 51-67. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>

-
- [17] Xiong, G., Zhang, J., Shi, D. and He, Y. (2018) Parameter Extraction of Solar Photovoltaic Models Using an Improved Whale Optimization Algorithm. *Energy Conversion & Management*, **174**, 388-405.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.053>
- [18] 张官祥, 罗红俊, 廖李成, 等. 基于分数阶 PID 控制和粒子群算法的水电机组开机优化[J]. 中国农村水利水电, 2021(10): 110-115+121.