

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2023.01.041

# 固液分离设备滤带自动纠偏系统设计

宋斌,戚景观,吴文俊

(晋西车轴股份有限公司,山西太原 030027)

**摘要:**为满足固液分离设备滤带及时、精准的纠偏要求,设计一种滤带自动纠偏系统。根据设备的结构,设计自动纠偏系统的纠偏方式和整体布局。设计基于免疫粒子群优化算法求解最佳参数的PID控制器,建立自动纠偏系统的数学模型,并对纠偏系统进行仿真分析。搭建试验平台模拟设备运行环境,对搭载该系统的设备样机进行了滤带纠偏测试、验证。结果表明:该系统纠偏及时、精准,满足设备运行要求。

**关键词:**固液分离设备;滤带;自动纠偏系统;免疫粒子群算法

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)01-0166-04

## Design of Automatic Deviation Correction System for Filter Belt of Solid-liquid Separation Equipment

SONG Bin, QI Jingguan, WU Wenjun

(Jinxi Axle Company Limited, Taiyuan 030027, China)

**Abstract:** To meet the requirements of timely and accurate correction of filter belt of solid-liquid separation equipment, an automatic correction system of filter belt is proposed. According to the equipment structure, the correction mode of the automatic deviation correction system and its overall layout are designed. A PID controller based on immune-particle swarm optimization algorithm is designed to solve the optimal parameters, and the mathematical model of automatic deviation correction system is established, on which simulation and analysis are conducted. A test platform is built to simulate the equipment operation environment, and the filter belt deviation correction test and verification are carried out on the equipment prototype equipped with the system. The results show that the deviation correction of the system is timely and accurate, and meets the requirements of equipment operation.

**Keywords:** solid-liquid separation equipment; filter belt; automatic deviation correction system; immune particle swarm optimization

## 0 引言

固液分离设备是一种污水处理设备。该设备的分离方法是使用滤带将污水中某一尺寸的固体颗粒过滤,达到固液快速分离的目的。滤带首尾相接,套装在驱动辊、托辊、纠偏辊等辊子上,由驱动辊提供摩擦力驱动滤带运行。其运行模式与带式输送机输送带运行类似,而且具有运行距离短、工作空间封闭狭小、滤带薄等特点。

滤带空载运行时,能够保持较长时间不发生跑偏,但是在实际工作中,由于受到水流冲击,导致滤带张力和摩擦力不均匀,极易发生滤带在垂直于其运行方向上跑偏的情况。由于滤带薄且具有较强的韧性,容易将设备内部零件划伤而损坏设备,且滤带本身在跑偏时会发生撕裂的情况。因此,实现滤带及时、精准纠偏,对设备安全、稳定运行具有重要意义。

为了实现上述目的,本文参考了大量相关资料,文献[1]给出的纠偏装置以及文献[2]提出的Y型转臂结构的自动纠偏装置,结构简单,成本低,但是不适用于本设备空间狭小的特点;文献[3]提出的液压结构纠偏装置,实现了可控性,但液压系统结构复杂,成本较高;文献[4-5]

提出了基于PLC控制器,以气缸为驱动装置的自动纠偏系统,但控制精度不高;文献[6]提出的基于排序蚁群算法的输送带纠偏控制系统,控制精准,但纠偏装置结构不适用于本设备;文献[7]提出了一种适用于大型输送机纠偏的二级纠偏系统;文献[8]设计了一种结构简单,易于维护的纠偏装置;文献[9-10]做了智能控制应用方面的研究,给予本文一定的启示。

本文根据设备和滤带的特点,设计了自动纠偏系统,采用可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)控制调节电动缸运动方向和行程,推、拉纠偏辊自由端,使纠偏辊和滤带运行方向形成一定的夹角,提供纠偏力,实现纠偏。本文还采用了基于免疫粒子群优化算法优化PID(proportion integral differential)控制器参数,使系统获得了最佳的纠偏效果。

## 1 自动纠偏系统组成及纠偏原理

### 1.1 自动纠偏系统组成

自动纠偏系统由上位机、传感器、PLC控制器、伺服驱动器、电动缸(集成伺服电机)、纠偏辊等构成,其整体布

第一作者简介:宋斌(1983—),男,河南安阳人,工程师,硕士,研究方向为专用设备设计。

置如图 1 所示。

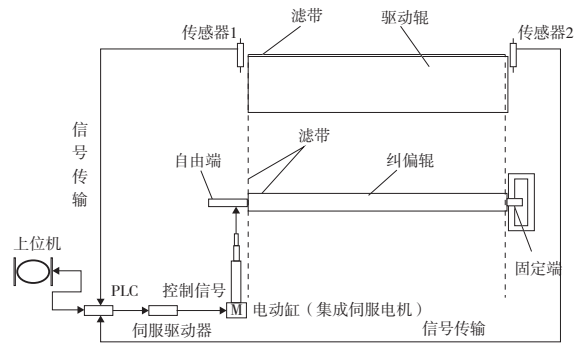


图 1 滤带自动纠偏系统

在滤带的工作段两侧设置传感器 1 与传感器 2 检测滤带偏移方向和偏移量,在滤带的回程段设置一个纠偏辊,以实现纠偏。

## 1.2 纠偏原理

当滤带跑偏打开传感器 1 时,传感器发生角度变化,将滤带的偏移量转化为角度的变化量并将信号传递给 PLC 控制器,PLC 将指令发送给伺服驱动器驱动电动缸丝杠伸缩并带动纠偏辊自由端绕固定端转动。触发传感器 2 时,丝杠做相反方向运动。

如图 2 所示,纠偏辊在电动缸的驱动下与滤带运行垂直的方向形成一个  $\alpha$  角,力  $F_1$  在水平方向产生一个与滤带跑偏方向相反的力,当这个力大于跑偏力  $F_2$  时,滤带开始回正,达到纠偏的目的,且  $\alpha$  角越大,提供的纠偏力就越大。

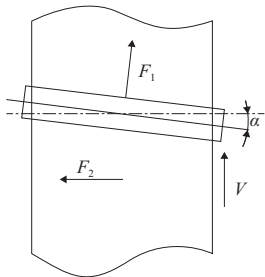


图 2 纠偏原理

## 2 数学建模及仿真分析

图 3 为滤带自动纠偏系统流程图,图中初始偏移量  $d_0=0$ ,电动缸处在中立位置,伸缩量  $s=0$ 。当滤带跑偏时,传感器将偏移量  $\Delta d$  传递给 PLC,PLC 向伺服驱动器发送控制信号,驱动电动缸推、拉纠偏辊完成滤带纠偏。单位时间内的偏移量越大,电动缸的丝杠运动越快,纠偏辊转动的角度  $\alpha$  也就越大。

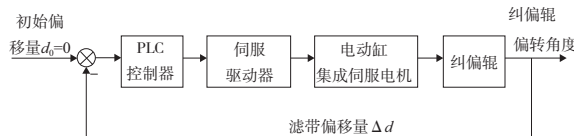


图 3 自动纠偏系统流程图

电动缸由伺服电机和滚珠丝杠两部分组成。直流伺服电机的传递函数采用下式计算：

$$G_1(s) = \frac{k_t}{J_m R s^2 + (k_e k_t + BR)s} \quad (1)$$

式中： $K_t$  为力矩系数； $J_m$  为转动惯量； $R$  为电枢电阻； $K_e$  为反电动势系数； $s$  为复变量； $B$  为阻尼系数。

滚珠丝杠传递函数为：

$$G_2(s) = r \times \rho_{h_a} \times \eta \% \quad (2)$$

式中： $r$  为伺服电机输出转速与滚珠丝杠输入转速的比值； $\rho_{h_a}$  为丝杠导程； $\eta\%$  为电动缸传递效率。

自动纠偏系统的传递函数为

$$G(s) = G_1 G_2 = \frac{k_t \times r \times \rho_{h_a}}{J_m R s^2 + (k_e k_t + BR)s} \times \eta \% \quad (3)$$

由于设备工作时,滤带和纠偏辊表面粘有水和微小颗粒,会改变滤带的摩擦系数,无法准确确定滤带跑偏量和纠偏辊旋转角度之间的数学关系。因此,本文采用增量式 PID(比例-积分-微分)对被控对象进行控制,其表达式如下：

$$\Delta U(k) = k_p \times e(k-1) + k_i \times e(k) + k_d \times [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4)$$

对上式进行 Z 变换后得：

$$\Delta U(Z) = k_p (1 - Z^{-1}) + k_i + k_d (1 - 2Z^{-1} + Z^{-2}) \quad (5)$$

式中  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  为 PID 控制器的参数。本文在确定 PID 参数时采用了工程上常用的试凑法以及免疫粒子群算法两种方法,对比取优。

用试凑法得到的参数值为  $k_p = 35.257$ ,  $k_i = 25.547$ ,  $k_d = 2.023$ 。

PID 控制器结构图如图 4 所示。

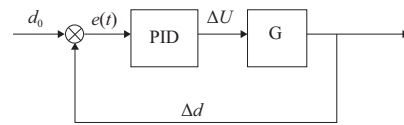


图 4 PID 控制器结构图

对于免疫粒子群算法,本文采用了  $U_{ITAE}$  函数作为系统的评价函数<sup>[6]</sup>,其表达式为

$$U_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (6)$$

当  $U_{ITAE}$  取得最小值时, $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的取值为 PID 的最佳参数值。该算法在基本粒子群算法的基础上结合了免疫算法的免疫部分<sup>[11]</sup>,可有效避免局部最优解的问题。

算法步骤为：

1) 在  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的取值范围构成的搜索空间中随机产生一组数量为  $n$  且具有一定速度的粒子  $s_n$ ,如图 5 所示。每一个粒子在空间的位置可描述为  $s_i = [s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}]$ ,其速度可描述为  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}]$ 。比较各粒子位置,使得  $U_{ITAE}$  值最小的粒子位置为全局最优,记为  $p_g$ ,其余粒子当前位置为当前个体最优,记为  $p_s$ 。

2) 速度和位置更新,按下式计算新的速度和位置。

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_{1j} [p_{ij}(t) - s_{ij}(t)] + c_2 r_{2j} [p_{gj}(t) - s_{ij}(t)] \quad (7)$$

$$s_{ij}(t+1) = s_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (8)$$

式中： $v_{ij}(t)$  为粒子  $i$  第  $j$  维第  $t$  代的运动速度； $\omega$  为速度的

惯性系数; $c_1$ 为自身认知系数; $c_2$ 为社会学习系数<sup>[2]</sup>; $r_{1j}, r_{2j}$ 为两个相互独立的随机数; $v_{ij}$ 为第  $t+1$  代粒子的速度; $s_{ij}(t+1)$ 为第  $t+1$  代粒子的位置。每迭代一次就进行一次比较,得到并更新 $p_g(t)$ 和 $p_s(t)$ 。

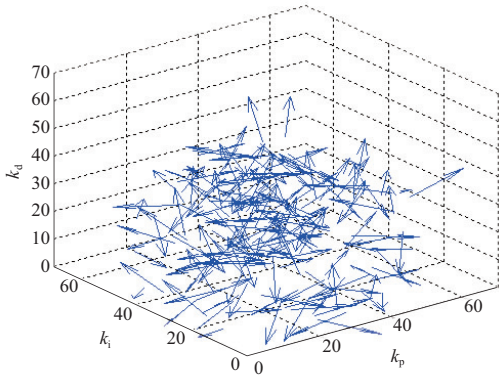


图5 粒子群示意图

3)免疫更新。每更新  $D_s$  代,检查全局最佳位置,如果没有明显变化,即  $U_{ITAE}$  最小值的差值小于某个给定的数值,则进行免疫。通过每个粒子的最佳适应度比和粒子浓度,计算替换概率。当替换概率达到某一给定的数值时,产生新的粒子替换掉旧的粒子再进行迭代寻优。替换概率按下式计算:

$$P_r(i) = \text{rand} \times P_f(i) + (1 - \text{rand}) \times P_D(i) \quad (9)$$

式中: $P_r(i)$ 为第  $i$  个粒子的替换概率; $\text{rand}$ 为随机生成的取值在 $[0, 1]$ 上的随机数; $P_f(i)$ 为第  $i$  个粒子的适应度比,计算公式为

$$P_f(i) = \frac{f_s(i)}{P_z} \quad (10)$$

式中: $f_s(i)$ 为第  $i$  个粒子的适应度值; $P_z$ 为最优个体适应度值的和; $P_D(i)$ 为个体浓度,计算公式为

$$P_D(i) = \frac{m}{n} \quad (11)$$

式中  $m$  为与第  $i$  个粒子的距离小于某个给定值的粒子个数。

4)终止迭代,如果粒子  $s_{ij}(t+1)$  所寻找到的近似解满足给定的精度要求,或者已经完成所设定的迭代次数,则停止,并输出  $s_{ij}(t+1)$  最佳粒子为近似解,否则返回 2)。

算法设定粒子数  $n=100$ ,最大迭代次数  $\text{Max}D_T=100$ ,免疫迭代次数  $D_s=10$ , $w=0.6$ , $c_1=2$ , $c_2=2$ ,选择单位阶跃信号为输入信号。伺服电机选择 AKM2x,查电机性能数据表以及机械设计手册<sup>[12]</sup>, $G_1, G_2$  参数取值见表 1。

表 1 电动缸主要参数

参数名	符号/单位	参数值
力矩系数	$K_t / (\text{Nm/A})$	0.36
转动惯量	$J_m / (\text{kg} \cdot \text{cm}^2)$	0.28
电枢电阻	$R / \Omega$	2.94
反电动势系数	$K_e / (\text{V} \cdot (\text{kr} \cdot \text{min})^{-1})$	23.4
阻尼系数系数	$B$	0.007 4
导程	$p_{h_a} / \text{mm}$	5
电动缸传动效率	$\eta / \%$	90
传动比	$r$	3

$$\text{传递函数为: } G(s) = \frac{4.86}{0.79s^2 + 8.45s}$$

搭建免疫粒子群优化算法的数学模型,如图 6 所示。

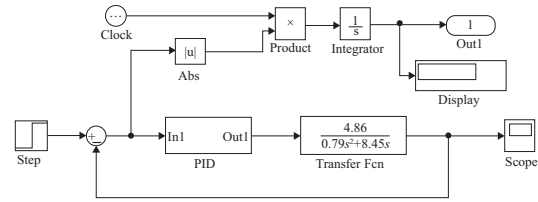


图 6 免疫粒子群优化算法数学模型

编写程序将算法中的  $k_p, k_i, k_d$  的值输入到上述模型中计算  $U_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$ , 将得到的值再输出至算法中进行比较得到最优解。

运行程序,得到  $U_{ITAE}$  迭代曲线如图 7 所示。 $k_p, k_i, k_d$  参数优化曲线如图 8 所示,得到最佳参数值  $k_p = 38.266 7$ ,  $k_i = 23.633 1$ ,  $k_d = 9.530 8$ 。

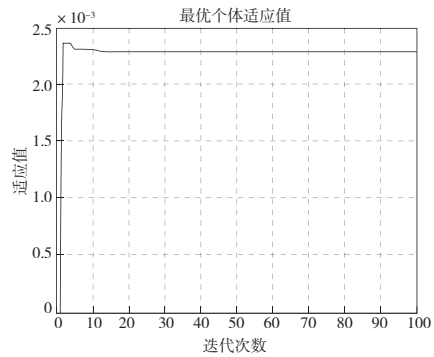


图 7  $U_{ITAE}$  优化曲线

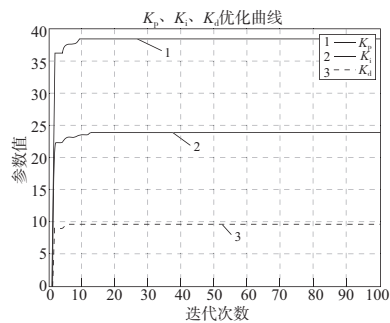


图 8 PID 参数优化曲线

免疫粒子群算法和试凑法的单位阶跃响应曲线对比如图 9 所示。

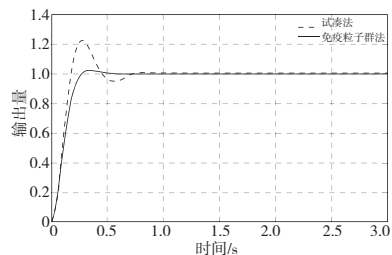


图 9 响应曲线

可以看出,采用免疫粒子群算法确定的PID参数值,其单位阶跃响应曲线综合情况明显优于试凑法。两种方法的阶跃响应的峰值时间 $t_p$ 、调节时间 $t_s$ 、超调量 $\sigma\%$ 、稳态误差 $e_{ss}$ 对比见表2。

表2 系统单位阶跃响应性能指标对比

方法	性能指标			
	$t_p/s$	$t_s/s$	$\sigma/\%$	$e_{ss}/\%$
试凑法	0.267	0.42	22.00	0
免疫粒子群法	0.325	0.23	2.12	0

### 3 设备试验

搭建试验平台,铺设循环水系统,模拟设备运行环境。将设备样机、控制柜固定在试验台上,连接好线路,试验系统如图10所示。



图10 样机试验

将免疫粒子群算法确定的PID参数输入,设置电动缸丝杠位移为50mm,打开循环水系统,运行设备。上位机显示丝杠位移曲线如图11所示。

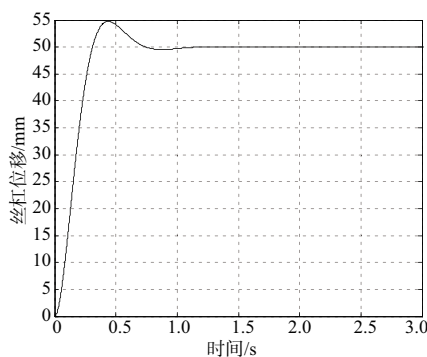


图11 丝杠位移曲线

系统性能指标如表3所示。

表3 系统性能指标

性能指标	$t_p/s$	$t_s/s$	$\sigma/\%$	$e_{ss}/\%$
数值	0.44	1.04	9.56	0

受系统构件及运行环境的影响,曲线和性能参数与仿真结果存在一定的差异。但系统整体响应快速、运行稳定。

### 4 结语

为了满足滤带及时、精准的纠偏要求,本文设计了一种固液分离设备滤带自动纠偏系统。包括自动纠偏系统的整体布局和纠偏方式。设计了基于免疫粒子群算法优化参数的PID控制器,提升了滤带自动纠偏能力。结果表明:本系统响应快速,超调量小,调节时间短;能够实现滤带及时、精准的纠偏要求。

#### 参考文献:

- [1] 孟文俊. 连续运输机械[M]. 太原:太原科技大学出版社, 2007.
- [2] 蔡金生,高贵鲁,许晓曦. 带式输送机新型自动纠偏装置[J]. 煤矿机械, 2016, 37(2): 110-111.
- [3] 李青,寇子明. 带式输送机液压调偏托辊装置的仿真研究[J]. 煤矿机械, 2013, 34(7): 48-49.
- [4] 王玉平,芦周红. PLC在水平带式过滤机纠偏系统中的应用[J]. 过滤与分离, 2010, 20(2): 36-38.
- [5] 刘立祥,王存刚. 脱水机滤带纠偏装置的改进[J/OL]. 城市建设理论研究(2013-09-01) [2022-04-15]. <https://doc.taixueshu.com/journal/20132949csjslyj.html>.
- [6] 曾飞,宋杰杰,胡文祥,等. 带式输送机输送带横向纠偏控制系统[J]. 现代制造工程, 2021(9): 107-111, 117.
- [7] 贾英新,靳晔,王勇,等. 基于视觉检测带式输送机输送带纠偏系统[J]. 煤矿机械, 2019, 40(9): 62-64.
- [8] 聂鹏飞. 基于光漫反射的真空皮带脱水机滤带纠偏原理[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(2): 103-106, 161.
- [9] 刘文平,李文斌,王维. 基于模糊控制技术的带式输送机自动纠偏装置的设计与仿真[J]. 煤矿机械, 2014, 35(11): 265-267.
- [10] 王巧灵,高晓智,王常虹. 基于群体智能免疫算法的PID自整定[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(6): 1062-1066.
- [11] 李士勇,李研,林永茂. 智能优化算法与涌现计算[M]. 北京:清华大学出版社, 2019.
- [12] 成大先. 机械设计手册-第4卷[M]. 5版. 北京:化学工业出版社, 2008.

收稿日期:2022-05-11