文章编号:1674-2974(2026)02-0047-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026155

基于改进粒子群算法的蜘蛛手抓烟速差优化设计

吴长德[1],赵隆涛[1],符国强[2],李俊锋[2],周长江[1†]
(1. 湖南大学 整车先进设计制造技术全国重点实验室,湖南 长沙 410082;
2. 中烟机械集团 常德烟草机械有限责任公司,湖南 常德 415000)

摘 要:为解决超高速卷接机组双倍长烟支传递中的掉丝与空头问题,提出一种基于改进粒子群算法(IPSO)的优化方法,通过降低蜘蛛手抓烟速差进而提升系统稳定性.探究抓烟过程中烟支与蜘蛛手吸爪速差形成机理,建立以速差为目标的优化模型.通过引入自适应调整机制,提高了粒子群算法的收敛速度和搜索效率.采用改进后的粒子群算法求解速差优化模型,并对抓烟速差优化结果进行了对比分析.结果表明,改进粒子群算法在抓烟速差优化问题中具有更高的收敛效率和稳定性,优化后的蜘蛛手在抓烟瞬间的速差显著降低,其中75 mm、84 mm和90 mm烟支的抓烟速差分别降低62.1%、99.9%和31.1%.该优化设计方法可根据不同长度烟支的生产需求进行灵活调整,为蜘蛛手烟支交接系统的优化升级提供理论依据.

关键词:烟支传送;蜘蛛手;抓烟稳定性;粒子群算法;自适应调整;速差优化
中图分类号:TH132 **文献标志码**:A

Velocity difference optimization design of cigarette spider handover based on improved particle swarm optimization algorithm

WU Changde[1], ZHAO Longtao[1], FU Guoqiang[2], LI Junfeng[2], ZHOU Changjiang[1†]
(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Changde Tobacco Machinery Co., Ltd., China Tobacco Machinery Group, Changde 415000, China)

Abstract: To address the issues of fiber drop and hollow head in the handover of double-length cigarettes in ultra-high-speed cigarette making and receiving units, an optimization method based on the improved particle swarm optimization (IPSO) algorithm is proposed, which enhances system stability by reducing the velocity difference between the spider hand and the cigarette during the grabbing process. The mechanism of velocity difference formation between the cigarette and the spider hand's suction claw during the grasping process is investigated, and an optimization model targeting the velocity difference is established. By introducing adaptive adjustment mechanisms, the convergence speed and search efficiency of the particle swarm optimization algorithm are enhanced. The improved particle swarm optimization algorithm is used to solve the velocity difference optimization model, and the results are compared and analyzed. The findings indicate that the improved particle swarm optimization algorithm demonstrates higher convergence efficiency and stability in the optimization of the grasping velocity difference. The velocity difference between the spider hand and the cigarette at the moment of

* **收稿日期**:2025-01-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075153),National Natural Science Foundation of China(52075153)
作者简介:吴长德(1963—),男,湖南长沙人,湖南大学副教授,硕士生导师
† 通信联系人,E-mail:yangtsezhou@hnu.edu.cn

grasping is significantly reduced after optimization, with reductions of 62.1%、99.9%, and 31.1% for cigarettes of 75 mm, 84 mm, and 90 mm lengths, respectively. This optimization design method can be flexibly adjusted according to the production requirements of cigarettes of different lengths, providing a theoretical foundation for optimizing and upgrading the spider-hand cigarette handover system.

Key words: cigarette handover; spider hand; cigarette grabbing stability; particle swarm optimization algorithm; adaptive adjustment; velocity difference optimization

蜘蛛手在烟支生产过程中连接卷制成型机和接装机,利用负压系统抓取半成品烟支,其抓烟效果直接影响生产稳定性和烟支质量.蜘蛛手结构尺寸等因素可能导致抓烟速差过大,易引发稳定性问题和烟支损伤.通过优化蜘蛛手结构以降低速差,可以提升抓烟稳定性.

为提高烟支生产效率和产品质量,众多研究聚焦于卷烟设备的优化.吴树清等人[1]对卷烟机烟支导板装置进行改进,降低了烟支缺陷率.燕振振等人[2]通过设计VE工艺参数的正交实验,探究得到卷接机组VE工艺参数对烟支质量稳定性的影响规律.陈荣林等人[3]和李正伟等人[4]分别提出了基于负压控制系统和自动清洁装置的优化措施,提升了设备稳定性和卷烟质量.潘恒乐等人[5]通过设计一种自动清洁装置,有效解决了搓板堵塞问题.刘世明等人[6]则是通过改进卷接机组接装纸输送系统,实现了自动纠偏,提升了系统稳定性.何鹏程等人[7]设计了一种新型胶前导纸块,通过优化结构实现快速调整,降低了接装纸更换用时,显著提高了作业效率和设备稳定性.王先明等人[8]优化了ZJ116B卷接机组的关键零部件,提高了烟丝束紧头的密度,降低了空头剔除率.张海超等人[9]通过仿真分析设计新型多点面支承的接烟轮承烟槽,显著减少了细支烟表面皱纹缺陷,提升了烟支外观质量和生产稳定性.为进一步优化蜘蛛手的抓烟和传递过程,欧育健等人[10]和周长江等人[11]建立了运动仿真模型,分析了传送系统的运动轨迹和稳定性,提出了优化设计方案以应对抓烟时速差增大带来的掉丝现象.这些研究为蜘蛛手的运动学分析和优化设计奠定了理论基础.此外,粒子群(优化)(PSO)算法在烟草机械优化设计中展现出高效性.叶倩琳等人[12]分析了多目标粒子群优化算法的性能,并探讨了其在多领域的应用及未来发展方向.曹一家等人[13]基于不同操作方法特征提出的改进自适应多目标粒子群算法提高了算法的有效性.张英杰等人[14]提出的基于双子群的改进粒子群优化算法提高了算法全局搜索能力和收敛速度.吴大飞等人[15]提出一种多策略融合的改进粒子群优化算法,融合中垂线算法与爆炸粒子策略,提升收敛速度与精度.鄢红章等人[16]结合微波检测技术与PSO,提高了卷接机的控制精度.樊志海等人[17]则通过EDEM数值模拟技术和PSO解决了加料均匀性问题.这些研究为优化算法的选择和应用提供了重要参考.

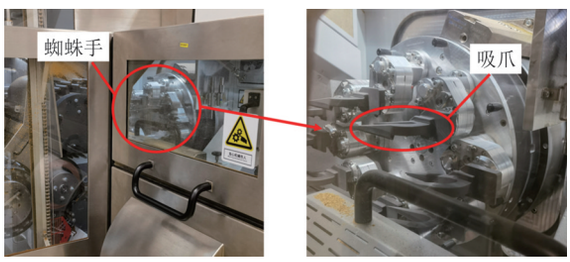
尽管已有研究在蜘蛛手的运动仿真和PSO算法改进方面取得了进展,但针对抓烟位置速差的系统化优化研究仍有待深入.抓烟位置速差是影响烟支传递稳定性和质量的关键因素.本文建立优化模型,采用改进粒子群(优化)算法(IPSO)优化蜘蛛手结构尺寸,以降低抓烟瞬间速差为目标,结合实际生产需求,提出针对性策略,有效提升烟支传递稳定性和产品质量.综上,基于前人研究,本文通过系统化优化模型和改进优化算法,为蜘蛛手烟支抓取速差优化提供新方案,推动卷烟设备优化领域研究进展.

1 蜘蛛手模型与抓烟速差机理

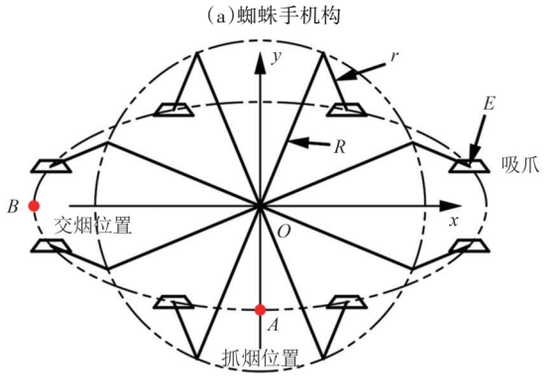
1.1 蜘蛛手模型

基于蜘蛛手的工作原理,建立机构解析模型(见图1),其中A、B分别为抓烟位置和交烟位置,位于椭圆最低点与最左端,根据运动形式,设置轮体和转臂尺寸分别为R和r.以抓烟位置为起始位置,根据蜘蛛手运动规律,得到吸爪中心点E的轨迹方程,见式(1).由图1与式(1)可知,蜘蛛手吸爪中心点的轨迹是以长半轴为(R+r),短半轴为(R−r),圆心在(0,0)的椭圆.

$$\frac{x^2}{(R+r)^2}+\frac{y^2}{(R-r)^2}=1 \tag{1}$$



(a)蜘蛛手机构



(b)解析模型

图 1　蜘蛛手机构与解析模型

Fig.1　Spider hand mechanism and analytical model

1.2　抓烟速差机理

蜘蛛手运动到最低点的抓烟位置 A 时,会因导轨上烟条速度与吸爪速度不同而产生速差,该速差由蜘蛛手结构尺寸、烟支长度以及生产速度共同决定,较大的速差会严重影响烟支生产质量,降低烟支抓取的稳定性.蜘蛛手抓烟位置见图 2.

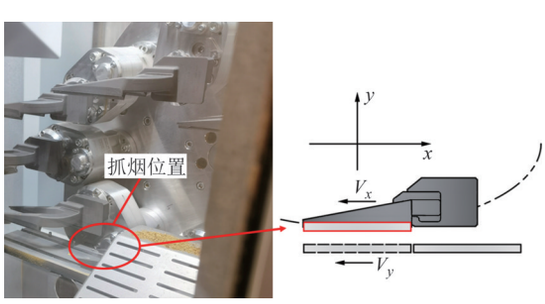


图 2　蜘蛛手抓烟位置

Fig. 2　Spider hand gripping cigarette position

在相同生产速度下,根据蜘蛛手运动原理以及烟支输送速度得到以下方程组,见式(2):

$$\begin{cases}\omega=2\pi\dfrac{N}{60ZQS}\\ V_x=-\omega(R+r)\cos(\omega t)\\ V_y=\dfrac{NL_i}{60Q}\\ V_C=V_z-V_y\end{cases} \tag{2}$$

式中:ω 为蜘蛛手轮体转动角速度;N 为烟支生产速度;Z 为转臂个数,研究对象为 8 转臂蜘蛛手;Q 为烟道数;S 为烟长倍数,采用双倍长双烟道生产模式,两者均为 2;V_x 为吸爪水平速度;V_y 为烟支速度;L_i 为无滤嘴烟支单倍长度;V_C 为抓烟速差;V_z 为抓烟最低点速度.

整理后得到抓烟速差的计算式:

$$V_C=\frac{N[2\pi(R+r)-ZSL_i]}{60ZQS} \tag{3}$$

蜘蛛手为 8 爪双烟道生产双倍烟长时,针对不同烟支长度的生产需求,通过优化轮体与转臂尺寸,减小不同烟长下$|\pi(R+r)-8L_i|$的值,可以降低蜘蛛手的抓烟速差,提高烟支的生产质量.

2　抓烟速差优化模型

优化设计通过系统的方法寻找最优方案以满足特定目标.在保持蜘蛛手交烟速度不变和结构无干涉的前提下,探讨其最小抓烟速差.确定以抓烟时的速差为优化目标,轮体和转臂尺寸为设计变量,并根据性能要求确定相应的约束条件,采用改进后的粒子群算法(IPSO)进行迭代求解.

2.1　目标函数与设计变量

抓烟位置的稳定性对烟支生产流程具有重要影响,若抓烟位置存在较大的速差,烟支在离开导轨时与吸爪之间仍存在相对运动,进而导致烟支掉落,影响生产效率.为了提高抓烟稳定性,降低掉丝率、空头率和改善表面质量,以最小化蜘蛛手吸爪与不同长度烟支之间速差为优化目标,基于速差的产生机理,为不同长度的烟支分配相应权重,构建目标函数:

$$\min f(R,r)=\sum_{i=1}^{n}W_i\frac{N[\pi(R+r)-8L_i]}{960} \tag{4}$$

式中:W_i 为不同长度烟支的权重;N 为烟支生产速度;L_i 为无滤嘴烟支单倍长度;R、r 为轮体与转臂尺寸.

根据同一生产速度下不同长度烟支的生产量,确定各烟长的权重,根据国家标准要求:滤嘴长度需要达到 19 mm,得到不同长度烟支权重 W_i 与生产过程中无滤嘴烟支单倍长度 L_i 关系,如表 1 所示.

在生产速度固定时,烟支速度由其长度决定,而蜘蛛手吸爪在抓烟位置的速度由轮体半径和转臂长度决定.因此在构建抓烟速差优化模型时,可通过轮

表 1 不同烟支长度与权重对应关系

Tab.1 The corresponding relationship between different cigarette lengths and weights

烟支长度/mm	无滤嘴烟支单倍长度L_i/mm	权重W_i
75	56	0.15
84	65	0.7
90	71	0.05
100	81	0.1

体和转臂的尺寸确定速差的值.在目标函数中,存在N、R、r三个变量,其中生产速度N是烟支生产中较为重要的性能评价指标,因此在探究速差最小化问题时,采用统一的、较高的生产速度,并将蜘蛛手轮体半径R、转臂长度r作为设计变量,通过优化结构尺寸以得到较好的优化结果.

2.2 约束条件

为了减小抓烟速差,根据蜘蛛手功能与烟支传递性能要求,从蜘蛛手转臂不干涉、交烟速度要求、烟支传递质量三个方面进行约束条件的设置.其中几何约束确保蜘蛛手转臂在转动过程中不发生干涉,这是设计中必须满足的基本条件;交烟速度保证交烟位置的速差不会增大;烟支质量约束满足蜘蛛手在传送过程中的烟支质量要求.这些约束条件共同保障了蜘蛛手的正常工作和烟支传送性能,为优化设计提供了可靠的理论基础.

2.2.1 几何约束

为了避免蜘蛛手在运行过程中转臂与转臂之间发生干涉,对轮体与转臂尺寸进行约束.转臂在回转过程中,旋转中心点之间的距离a和转臂长度r为定值,因此转臂在与旋转中心连线重合位置间距l_0最小,该位置最容易发生干涉,见图3.

根据易干涉位置与内部传动比得到不发生干涉的必要不充分条件为:

$$g_1(R,r)=\begin{cases} l_0 > r+2d \\ 2R\sin(22.5^\circ)=l_0+r \end{cases} \tag{5}$$

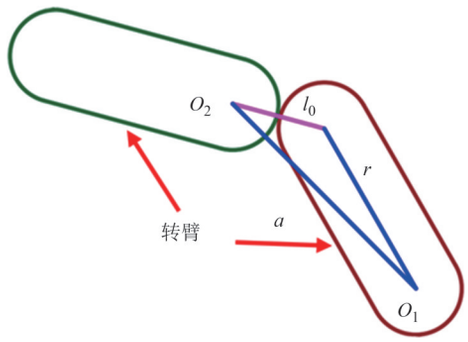
化简后约束条件为:

$$R\sin(22.5^\circ)-r-d>0 \tag{6}$$

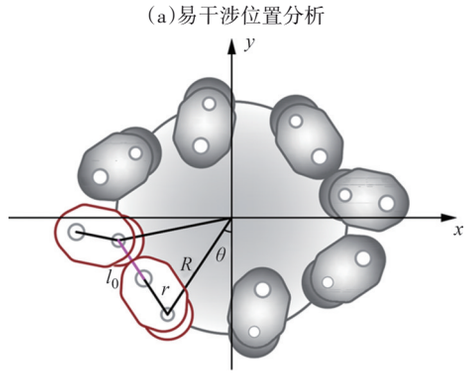
式中:l_0为转臂头部与旋转中心的距离;R、r为轮体与转臂尺寸;d为转臂壁厚,设置为2 mm.

2.2.2 交烟速度约束

在整个烟支传递过程中,要求蜘蛛手在抓烟位置与交烟位置的速差绝对值均减小,在此将交烟速度差作为约束条件,交烟位置速差由蜘蛛手运动到最左端时速度与接烟轮速度不一致造成,烟支交接位置如图4所示.



(a)易干涉位置分析



(b)转臂位置与姿态

图3 蜘蛛手转臂姿态与易干涉位置

Fig.3 Spider hand rotating arm posture and position easy to interfere

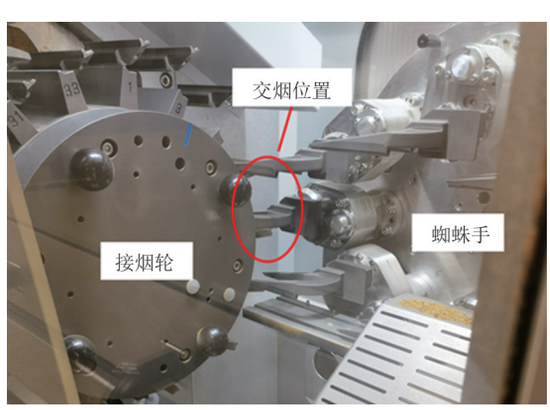


图4 蜘蛛手交烟位置

Fig.4 Spider hands over the cigarette position

根据烟支交接原理得到交烟位置速度差计算式为:

$$V_{JC}=V_z-V_J \tag{7}$$

通过分析蜘蛛手的运动方程和规律,推导出交烟位置的速度约束条件为:

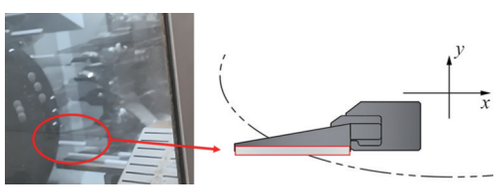
$$g_2(R,r)=|V_z-V_J|\leqslant|V_{z0}-V_J|= |\omega(R-r)-V_J|-|\omega(R_0-r_0)-V_J|\leqslant 0 \tag{8}$$

式中:ω为蜘蛛手轮体转动角速度,生产速度为16 000支/min时取52.359 9 rad/s;R、r为优化后的尺寸;R_0、r_0

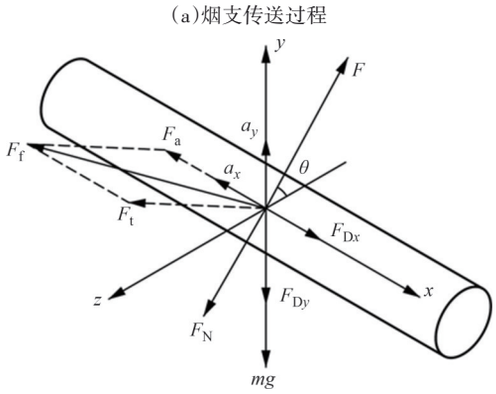
为优化前的尺寸,分别为148 mm和55 mm;V_J为接烟轮交烟位置速度,生产速度为16 000 支/min 时取 4 333.150 7 mm/s.

2.2.3　烟支质量约束

在蜘蛛手抓取烟支并传递至交接位置的过程中,见图5(a),负压吸附力是传递烟支的主要作用力.在此过程中,烟支受到负压吸附力、摩擦力、重力、风阻以及运动惯性力的共同作用.由于工作时加速度的变化,不同位置所能吸附的烟支质量存在差异.为减少传送过程中的掉烟现象,需计算能够吸附的最大烟支质量.烟支传递过程中的受力情况见图5(b).



(a)烟支传送过程



(b)烟支受力分析

图5　烟支传递过程及受力分析

Fig.5　Delivery process and force analysis of cigarette

根据烟支在传递过程中受力平衡得到如下方程:

$$\begin{cases} a_x = \omega^2(R+r)\sin(\omega t) \\ a_y = \omega^2(R-r)\cos(\omega t) \\ (ma_y + mg + F_{Dy})^2\cos^2\theta + (ma_x + F_{Dx})^2 - \\ \mu_s{}^2\left[F - (ma_y + mg + F_{Dy})\sin\theta\right]^2 = 0 \end{cases} \tag{9}$$

式中:m为烟支质量;a_x、a_y为吸爪的加速度;t为从抓烟最低点经历的时间;ω为轮体转动角速度,16 000 支/min时为52.359 9 rad/s;F_{Dy}、F_{Dx}为烟支受到的纵向和轴向风阻,风阻系数取0.47;μ_s为静摩擦系数,取值为0.4;F为负压吸附力,根据吸爪口与压差计算得到,为3.75 N;θ为吸爪负压口与水平面夹角,取45°.

通过计算方程(8)中m的值,得到在生产速度为16 000 支/min,无滤嘴烟支长度为56~81 mm时,能够传递最大质量m的范围为2 653.25~2 654.96 mg,其中m是R和r的函数,为保证稳定性,要求能够抓取烟支的质量要大于最大值,因此烟支质量约束条件为:

$$g_3(R,r) = m - 2\,654.96 \geqslant 0 \tag{10}$$

得到的最终数学优化模型为:

$$\min f(R,r) = \sum_{i=1}^{n} W_i \frac{N[\pi(R+r) - 8L_i]}{960}$$

subject to:

$$\begin{aligned} g_1(R,r) &= R\sin(22.5^\circ) - r - t > 0 \\ g_2(R,r) &= |\omega(R-r) - V_J| - \\ &\quad |\omega(R_0 - r_0) - V_J| \leqslant 0 \\ g_3(R,r) &= m(R,r) - 2\,654.96 \geqslant 0 \end{aligned} \tag{11}$$

目标函数$f(R, r)$旨在最小化抓烟位置的速差,设计变量为R和r.约束条件包括几何约束g_1、交烟速度约束g_2和质量约束g_3,确保优化后的设计在实际应用中是可行的.在目标函数中,权重W_i用于平衡不同项的贡献.具体权重值由前文设置为:W_1=0.15;W_2=0.7;W_3=0.05;W_4=0.1.质量约束g_3中,$m(R, r)$是关于R和r的函数,具体定义见模型说明部分.

3　优化算法与结果分析

3.1　抓烟速差优化算法

改进粒子群算法(IPSO)是在粒子群算法(PSO)的基础上,通过调整惯性权重,引入扰动机制或结合遗传算法(GA)等方式,克服了原始粒子群算法易陷入局部最优、多样性不足的问题,提高了算法的性能和适应性.相较于其他优化算法,IPSO收敛速度快、参数较少且易于调整,在抓烟速差优化问题上表现出显著优势.此外,在抓烟速差优化问题中,IPSO相较于遗传算法和模拟退火(SA)算法表现出更优的全局搜索能力和收敛效率,能够有效避免局部最优陷阱,从而更有可能找到全局最优解.故选用IPSO作为优化算法,以提高蜘蛛手抓烟速差优化问题的求解效率与精度.

在初始化阶段,采用基于种子点的方法对粒子位置进行初始化,以维持种群多样性并加速收敛,设置轮体半径148 mm、转臂长度55 mm为种子点,随机偏移范围±5 mm,以确定粒子初始位置.粒子初始位置为:

$$x_i = x_{seed} + \delta \tag{12}$$

式中:x_i为第i个粒子位置;x_{seed}为种子点;δ为随机偏移距离.

采用归一化的Logistic混沌序列对粒子速度进行初始化,确保速度的初始分布具有混沌特性,从而增强算法的全局搜索能力和鲁棒性.Logistic映射公式为:

$$x_{n+1}=\lambda x_n(1-x_n) \tag{13}$$

式中:x_{n+1}为下一个值;λ为混沌因子,取值范围为(3.57, 4];x_n为当前值.

在算法的优化过程中,使用随机惯性权重调整策略平衡算法的全局与局部搜索能力,其中随机惯性权重公式为:

$$\omega=\omega_{\max}-(\omega_{\max}-\omega_{\min})\text{rand} \tag{14}$$

式中:$\omega_{\max}$和$\omega_{\min}$分别为惯性权重的最大值和最小值;rand为[0,1]之间的随机数.

通过引入正态分布随机扰动进行精细的局部搜索,即在粒子位置更新公式中加入正态分布随机扰动$\varepsilon\sim N(0,\sigma^2)$,其中$N$表示正态分布,$\sigma^2$为方差.

加入惩罚函数以有效处理约束并找到高质量的解,从而提升算法在寻找最优速差时的速度和稳定性,使算法能更快且更稳定地收敛.惩罚函数一般形式为:

$$P(x)=\sum_{i=1}^{m}\max(0,g_i(x))^p \tag{15}$$

式中:$g_i(x)$为第i个约束条件;m为约束条件个数;p为惩罚因子.

最终得到粒子的速度更新公式为:

$$v_i=\omega v_i+c_1\text{rand}(p_i-x_i)+c_2\text{rand}(p_g-x_i)+\varepsilon \tag{16}$$

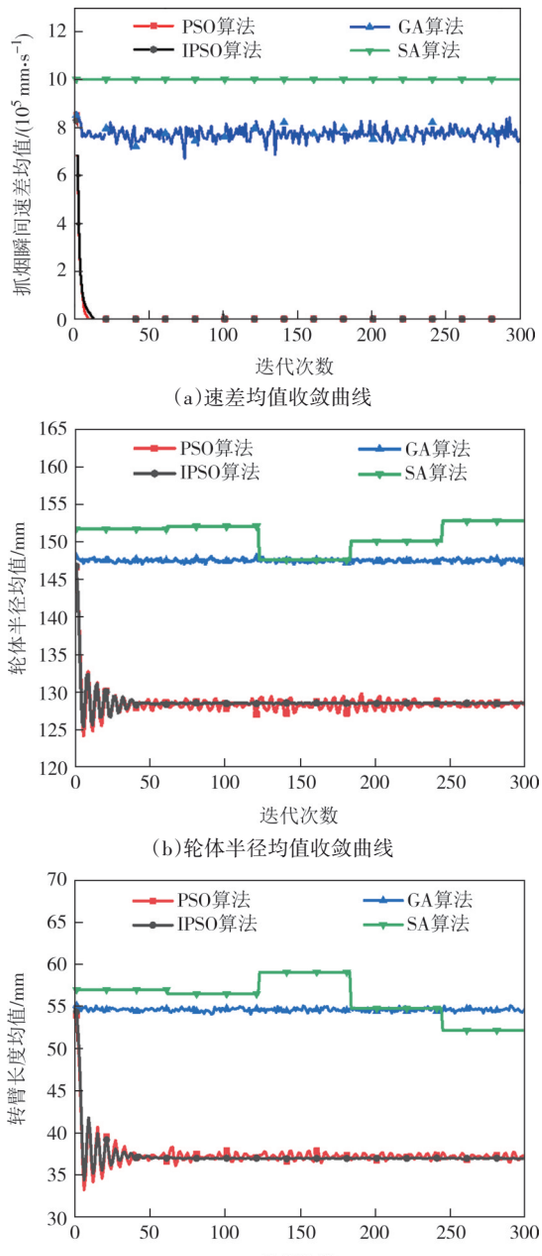
式中:ω为惯性权重;c_1和c_2为学习因子;p_i为粒子个体最优位置;p_g为粒子群体最优位置;x_i为粒子当前位置;ε为正态分布随机扰动项.

粒子位置更新公式为:

$$x_i=x_i+v_i \tag{17}$$

3.2 优化结果分析

以蜘蛛手在不同烟支长度下的速差作为目标函数,蜘蛛手轮体与转臂尺寸作为设计变量,设置粒子种群数为200,迭代次数为300,误差阈值为10^{-6},调用程序进行优化求解.优化结果显示,在使用遗传算法和模拟退化算法对优化问题进行求解时,容易陷入局部最优,同时模拟退火算法在解决速差问题时收敛效果较差,粒子群算法更容易跳出局部最优,从而找到全局最优解,使用改进粒子群算法可以进一步加快粒子群算法的收敛速度,相较于传统粒子群算法,其收敛效率和稳定性得到显著提升,收敛趋势详见图6.



(a)速差均值收敛曲线

(b)轮体半径均值收敛曲线

(c)转臂长度均值收敛曲线

图6 优化过程收敛曲线

Fig.6 Convergence curve of optimization process

优化前后轮体尺寸、转臂长度及速差对比如表2所示.

从表2数据对比可知:优化前后速差分别为1 923.2 mm/s和434.108 2 mm/s,优化后速差降低了

表2 优化前后结果对比

Tab.2 Comparison of results before and after optimization

项目	优化前	优化后
轮体R/mm	148	129
转臂r/mm	55	36.5
速差f/(mm·s^{-1})	1 923.2	434.108 2

77.4%,使用改进粒子群算法对蜘蛛手抓烟瞬间速差进行优化,可以得到较小的速差值.优化后的蜘蛛手结构尺寸略有减小,但仍处于设计容许范围内.

3.3　优化前后对比验证

优化后蜘蛛手尺寸的改变,不仅降低了速差,同时在运动轨迹变动与加速度减小方面也具有一定优势.对优化前后吸爪中心点轨迹进行对比分析,见图7.结果显示,优化后的蜘蛛手在y轴方向的位移较小,需调整x轴方向的位置,尺寸改动对整个生产线的影响较小.

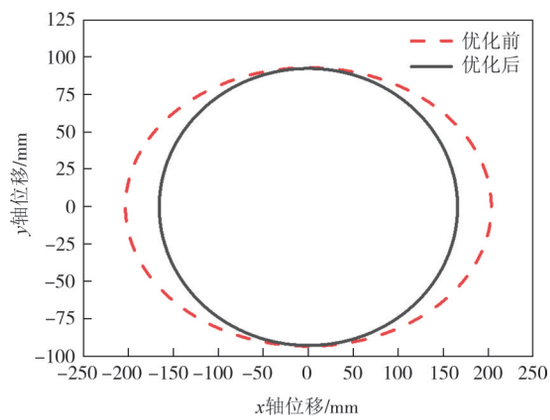


图7　优化前后轨迹对比

Fig.7　Comparison of trajectory before and after optimization

在烟支交接位置,较高的加速度会引发掉丝问题,分析蜘蛛手结构改变对抓烟和交烟位置加速度的影响,发现较小的加速度有助于提高烟支抓取和交接的稳定性,进而提升生产质量.计算生产速度为16 000 支/min时优化前后蜘蛛手吸爪的加速度,见图8.结果显示,优化后的蜘蛛手在四分之一周期,即交烟位置,具有更小的加速度,与优化前相比降低了18.5%,表明在交烟位置烟支受到的冲击更小,有助于提高交烟质量.

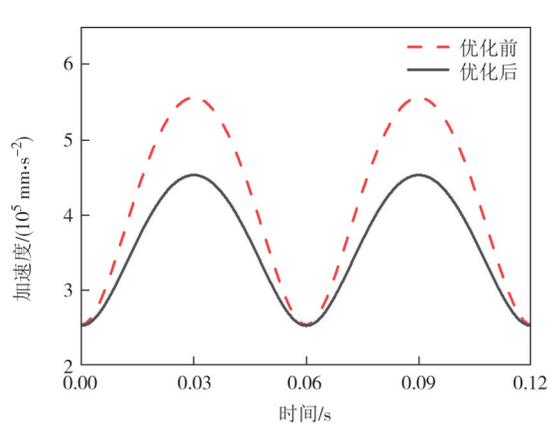


图8　优化前后加速度对比

Fig.8　Comparison of acceleration before and after optimization

在抓烟时,负压打开位置为最低点前1.5°,其间轮体转动3° 利用负压吸附烟支使其与吸爪保持静止.对最低点前后1.5° 蜘蛛手吸爪与烟支速度变化进行分析,优化前后吸爪与烟支之间速度与速差分别见图9与图10.结果显示,烟支速度随烟支长度增加而增大;优化后的蜘蛛手在抓烟瞬间速度小于优化前;随着烟支长度的增加,烟支与优化前的蜘蛛手吸爪速差先减小后略微增大,与优化后的速差先减小后增大;优化后的蜘蛛手在抓取90 mm及以下长度烟支时,具有更小的速差.鉴于蜘蛛手的结构设计与工作原理的固有特性,其无法在单一优化模型下同时实现所有长度烟支的速差最小化.因此,在本研究的优化模型中,当对90 mm以上烟支长度分配的权重相对较小时,优化结果更倾向于短烟支.但通过合理调整不同长度烟支的权重分配,可以有效优化模型以更好地适应长烟支的生产需求.这种灵活的权重调整机制为优化模型提供了更广泛的适用性,使其能够在不同烟支长度的生产场景中实现更优的性能表现.

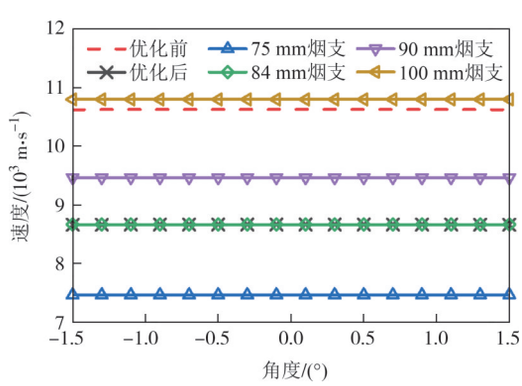


图9　不同长度烟支与优化前后速度对比

Fig.9　Comparison of cigarette lengths and velocity before and after optimization

生产速度为16 000 支/min时优化前后速度差如表3所示.从速差对比数据可以得到,优化后的蜘蛛手在生产烟长为75 mm、84 mm、90 mm的烟支时具有更小的速差,减小率分别为62.1%、99.9%、31.1%,该结果在前人研究蜘蛛手运动分析的基础上由理论计算得到.由此可以得出以下结论:优化后的蜘蛛手在生产90 mm及以下烟支时在抓烟位置具有更小的速差,理论上烟支生产稳定性更好,掉丝率、空头率更低,减少了因速差引起的烟支表面褶皱、磨损等问题;优化前的蜘蛛手结构尺寸更适合生产长烟支.考虑到国内市场目前仍以84 mm烟支为主,优化后的蜘蛛手在抓烟速差方面仍具有更大的优势.

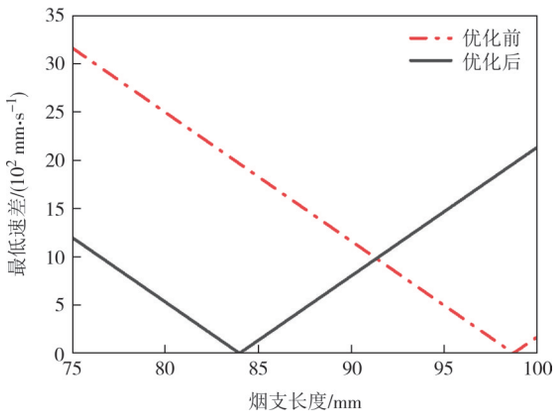


图 10 优化前后速差对比

Fig.10 Comparison of velocity difference before and after optimization

表 3 优化前后速差对比

Tab.3 Comparison of velocity difference before and after optimization

烟长/mm	优化前/(mm·s^{-1})	优化后/(mm·s^{-1})	减小率/%
75	3 162.4	1 198.9	62.1
84	1 962.4	1.1	99.9
90	1 162.4	801.1	31.1
100	170.94	2 134.4	—

4 结 论

基于卷接机组蜘蛛手烟支交接原理,深入分析了抓烟速差的产生机理,在此基础上提出了蜘蛛手抓烟速差优化设计的目标函数、设计变量与约束条件,构建了速差优化模型,并使用改进粒子群算法(IPSO)对其进行求解.该算法在提高收敛速度和搜索效率的同时,解决了传统粒子群算法中全局搜索和局部搜索能力不平衡的问题.优化结果显示,改进粒子群算法在抓烟速差优化问题中具有更高的收敛效率和稳定性;优化后的蜘蛛手在 90 mm 及以下长度烟支的生产过程中,抓烟速差显著降低,抓烟稳定性得到了有效提升,最大加速度明显降低.目前国内主要生产 84 mm 长度烟支,该优化设计在抓烟稳定性、烟支掉丝率、空头率、表面质量和抓烟负压要求等方面具有明显优势.

未来将拓展优化模型至更多烟支长度与生产速度场景,考虑振动等复杂因素,进一步提升蜘蛛手性能.同时,深入研究改进粒子群算法(IPSO)在复杂优化问题中的应用,优化算法参数,提高其适应性和求解效率,为卷接机组蜘蛛手设计提供更高效的解决方案.

参考文献

[1] 吴树清,孙勇,杨芳,等. YJ19 卷烟机烟支导板装置改进[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 124-128.
WU S Q, SUN Y, YANG F, et al. Improvement on cigarette guide plate device of YJ19 cigarette maker [J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 124-128. (in Chinese)

[2] 燕振振, 王永红, 王柏朝, 等. ZJ118 卷接机组 VE 工艺参数对烟支质量稳定性影响[J]. 中国烟草学报, 2023, 29(5): 55-60.
YAN Z Z, WANG Y H, WANG B C, et al. Effects of VE process parameters of ZJ118 cigarette maker on cigarette quality stability [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2023, 29(5): 55-60. (in Chinese)

[3] 陈荣林, 陈杰, 朱登科, 等. ZJ118 卷接机组切纸轮负压控制系统的设计[J]. 烟草科技, 2023, 56(8): 107-112.
CHEN R L, CHEN J, ZHU D K, et al. Design of negative pressure control system for tipping paper cutting drum in ZJ118 filter cigarette maker [J]. Tobacco Science & Technology, 2023, 56(8): 107-112. (in Chinese)

[4] 李正伟, 魏浪城, 龚小军, 等. ZJ118 卷接机组二次分切圆刀自动清洁装置的研制[J]. 烟草科技, 2023, 56(4): 91-97.
LI Z W, WEI L C, GONG X J, et al. Development of automatic cleaning device for second cut circular knife in ZJ118 filter cigarette maker [J]. Tobacco Science & Technology, 2023, 56(4): 91-97. (in Chinese)

[5] 潘恒乐, 冯雄伟, 王俊. ZJ116A 型卷接机组搓接自动清洁装置研制[J]. 食品与机械, 2020, 36(6): 122-124.
PAN H L, FENG X W, WANG J. The design of auto-cleaning equipment for cigarette assembling device in ZJ116A cigarette maker [J]. Food & Machinery, 2020, 36 (6): 122-124. (in Chinese)

[6] 刘世明,周福儒,王剑,等. ZJ17 卷接机组接装纸输送系统的改进[J]. 食品与机械,2020,36(2):119-121.
LIU S M, ZHOU F R, WANG J, et al. Improvement of tipping paper conveying system for ZJ17 cigarette machine [J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 119-121. (in Chinese)

[7] 何鹏程, 朱岩, 刘志崇, 等. ZJ116 卷接机组可快速更换接装纸规格的胶前导纸块设计[J]. 中国烟草学报, 2024, 30(3): 69-74.
HE P C, ZHU Y, LIU Z C, et al. Design of a pre-glue guide paper block for quick change of tipping paper specifications on the ZJ116 cigarette making machine unit [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2024, 30(3): 69-74. (in Chinese)

[8] 王先明,秦承刚,盖志强,等. ZJ116B 卷接机组烟丝束紧头成形研究与改进[J]. 机械工程师,2023(10):71-74.
WANG X M, QIN C G, GAI Z Q, et al. Research and modification of tobacco rod densed end trimming in ZJ116B cigarette maker [J]. Mechanical Engineer, 2023(10): 71-74. (in Chinese)

[9] 张海超, 毛龙所, 李浩, 等. 基于 COMSOL Multiphysics 仿真分析的 ZJ118 型卷接机组接烟轮承烟槽的改进设计[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(2): 66-75.

ZHANG H C, MAO L S, LI H, et al. Improved design of cigarette carrying slot in the ZJ118 cigarette making and assembling machine based on COMSOL multiphysics simulation analysis[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2025, 31(2): 66-75.(in Chinese)

[10] 欧育健, 周长江, 杜国锋. PROTOS2-2蜘蛛手—接烟轮系统建模及交接稳定性研究[J]. 烟草科技, 2014, 47(3): 17-20.
OU Y J, ZHOU C J, DU G F. Modeling and cigarette transfer stability of PROTOS2-2 spider-transfer drum system[J]. Tobacco Science & Technology, 2014, 47(3): 17-20.(in Chinese)

[11] 周长江, 孙银方, 李小平. PROTOS2-2卷接机组蜘蛛手机构抓烟速度计算与掉丝测试[J]. 烟草科技, 2014, 47(10): 20-23.
ZHOU C J, SUN Y F, LI X P. Calculation of spider speed in PROTOS2-2 cigarette maker and test on cut tobacco fallout[J]. Tobacco Science & Technology, 2014, 47(10): 20-23.(in Chinese)

[12] 叶倩琳,王万良,王铮. 多目标粒子群优化算法及其应用研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(6): 1107-1120.
YE Q L, WANG W L, WANG Z. Survey of multi-objective particle swarm optimization algorithms and their applications[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(6):1107-1120.(in Chinese)

[13] 曹一家, 曹丽华, 李勇, 等. 改进的自适应多目标粒子群算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(10): 84-90.
CAO Y J, CAO L H, LI Y, et al. Improved adaptive multiobjective particle swarm algorithm[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(10):84-90.(in Chinese)

[14] 张英杰,李亮,张英豪,等. 一种基于双子群的改进粒子群优化算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(1):84-88.
ZHANG Y J, LI L, ZHANG Y H, et al. An improved particle swarm optimization algorithm based on two-subpopulation[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(1): 84-88.(in Chinese)

[15] 吴大飞, 杨光永, 樊康生, 等. 多策略融合的改进粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(11): 3358-3364.
WU D F, YANG G Y, FAN K S, et al. Improved particle swarm optimization algorithm with multi-strategy fusion[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(11):3358-3364.(in Chinese)

[16] 鄢红章, 张艮水, 兰志超, 等. 基于粒子群算法的烟草卷接机控制系统设计与优化[J]. 机械与电子, 2023, 41(3): 27-29.
YAN H Z, ZHANG G S, LAN Z C, et al. Design and optimization of tobacco coiler control system based on particle swarm optimization[J]. Machinery & Electronics, 2023, 41(3): 27-29.(in Chinese)

[17] 樊志海, 鲁纪平, 苑宝龙, 等. 基于数值模拟的片烟加料机参数优化设计[J]. 烟草科技, 2024, 57(4): 100-107.
FAN Z H, LU J P, YUAN B L, et al. Parameter optimization of tobacco strip casing cylinder based on numerical simulation[J]. Tobacco Science & Technology, 2024, 57(4): 100-107.(in Chinese)