

基于改进 NSGA-II 的无纺布制袋机纠偏系统预测控制

沈正华, 黄金梭

(温州职业技术学院, 温州 325035)

摘要: **目的** 解决无纺布制袋机在制袋过程中出现的带材跑偏问题, 实现四路带材的纠偏控制, 减少废品率, 以提高控制精度和生产效率。 **方法** 针对某厂无纺布制袋机运行的特点, 采用一种基于改进 NSGA-II 的预测控制算法, 用于该机器的纠偏控制。由于系统为非线性, 采用支持向量机 SVM 模型作为被控对象来预测模型。同时, 针对模型非线性及基本遗传算法收敛速度慢、精度低等缺点, 利用一种改进的 NSGA-II 算法, 作为预测控制的滚动优化策略。最后将设计的预测控制器应用于实际系统中。 **结果** 该控制算法能满足系统实时稳定运行的要求, 制袋机在快速运行时, 纠偏误差基本控制在 ± 0.3 mm 以内, 废品率由原来的 0.80% 降为 0.40%。 **结论** 基于改进 NSGA-II 的无纺布制袋机纠偏预测控制系统具有纠偏误差小、废品率低、可靠性强等特点, 提高了生产效率。

关键词: 改进 NSGA-II; 预测控制; 纠偏控制

中图分类号: TB486; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)13-0176-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.13.029

Improved NSGA-II Based MPC on Strip Deviation Control System of Non-woven Bag Making Machine

SHEN Zheng-hua, HUANG Jin-suo

(Wenzhou Vocational & Technical College, Wenzhou 325035, China)

ABSTRACT: To solve strip deviation in non-woven making process, realize deviation Control of 4 strips, reduce rejection rate, improve the control precision and the productivity. According to the operation characteristics of a non-woven bag making machine in a factory, an improved NSGA-II based model predictive Control (MPC) algorithm was used in strip deviation controlling. The support vector machine (SVM) model was used as the predictive model of controlled object aiming to the nonlinear characteristics of this system. Meanwhile, an improved NSGA-II method was used as rolling optimization strategy of MPC, because of the model's nonlinear characteristics and basic genetic algorithm's slow convergence rate and low precision. Finally, the designed predictive controller was applied in the actual system. It could meet the requirement of real-time and stable operation of the system, the deviation error was basically controlled within ± 0.3 mm while fast running, and the rate of rejects was reduced from 0.80% to 0.40%. The improved NSGA-II based MPC method used on strip deviation control system of non-woven bag making machine was characteristic of little deviation error, low reject rate, strong reliability, and increased productivity.

KEY WORDS: Improved NSGA-II; MPC; Deviation control

无纺布制袋机在制袋过程中需要将无纺布、塑料薄膜、链条 A 和链条 B 四路带材的边缘按照既定位置和尺寸要求烫封压合在一起。四路带材在传输过程中存在传送材料厚度不均且张力不一、各处摩擦因数不一、带材抗拉强度不均衡、机器振动、机构安装位

置不正等因素, 可能会发生位置跑偏^[1]。如何实现带材在传输过程中的纠偏控制成了无纺布制袋机必须解决的技术问题。万苏文等^[1-4]根据制袋机的跑偏问题, 设计了纠偏控制系统装置, 利用传感器技术、PLC 或嵌入式技术等实现带材纠偏问题的解决, 但是没有

收稿日期: 2017-09-04

作者简介: 沈正华 (1984—), 女, 硕士, 温州职业技术学院讲师, 主要研究方向为自动控制技术。

对纠偏算法展开详细研究。SHIN K 等^[5-10]针对带材跑偏问题研究了控制算法,如 PID 控制、模糊控制、自适应神经模糊推理预测控制,但没有特别针对无纺布制袋机的跑偏控制算法展开研究。

为了实现高精度稳定控制,文中提出一种基于改进 NSGA-II 的预测控制算法。由于系统的非线性,采用支持向量机(SVM)建立预测模型,并采用收敛速度快、分布性好的改进 NSGA-II^[11-12]遗传算法实现在线优化。

1 无纺布制袋机纠偏系统硬件构架

无纺布制袋机控制系统硬件示意图 1。无纺布、塑料薄膜、链条 A 和链条 B 在传送时需将四路带材边缘对齐后热封压合,并按照规定尺寸裁切出成品袋子。如果带材边缘没有对齐,将导致袋子封口处有漏洞、链条合不拢或者袋子裁切歪斜,从而成为废品。纠偏系统采用传感器 S1—S4 分别检测四路带材的位置,检测信号送控制器做控制算法处理,再由控制器输出控制信号纠正带材偏移,使整个系统做到实时检测和实时纠偏。

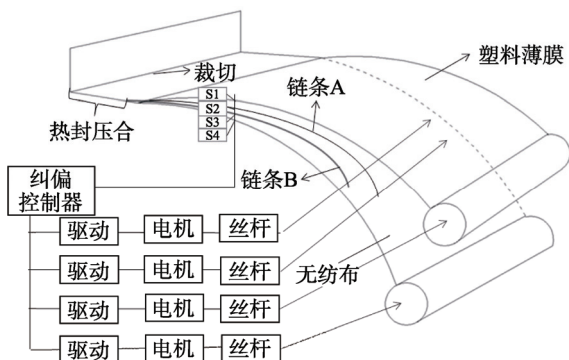


图 1 无纺布制袋机控制系统硬件

Fig.1 Hardware of non-woven bag making machine's control system

2 基于改进 NSGA-II 的无纺布制袋机纠偏系统预测控制算法设计

文中采用的预测控制算法框架见图 2,带材位置设定值经柔化处理形成预测控制算法对未来时刻

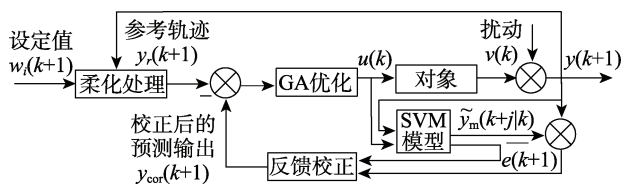


图 2 基于改进 NSGA-II 的预测控制算法

Fig.2 Predictive control algorithm based on improved NSGA-II

的参考轨迹,结合对系统输出的反馈校正信号,送给滚动优化环节,优化后形成控制信号作用于控制对象。

2.1 模型预测

由于各种扰动的存在及系统非线性特点,导致无纺布制袋机纠偏系统的机理模型很难建立,文中采用拓扑结构简单、泛化性好的支持向量机^[13]SVM 模型分析纠偏控制系统。用于回归估计的 SVM 的基本思想^[14]是利用已知训练样本集 $\{(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, l\}$ ($x_i \in R^N$ 为输入值, $y_i \in R$ 为对应的输出值)的输入输出特征,寻求 R^n 上的一个函数 $f(x)$,以便用 $y=f(x)$ 求出未知输入 x 所对应的输出 y 值,其算法描述见图 3。利用非线性函数 $\phi(x)$ 将输入向量映射到一个高维特征空间,在这个特征空间中构造最优分类超平面, $K(x_i, x_j) = \phi(x_i) \cdot \phi(x_j)$ 为核函数,函数的 $f(x)$ 输出是中间节点的线性组合。可利用拉格朗日乘子法通过求解二次规划问题来求出 $f(x)$,假定其形式为:

$$f(x) = \sum_{x_i \in SV} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad (1)$$

式中: α_i 和 α_i^* 为拉格朗日乘子; b 为常数。

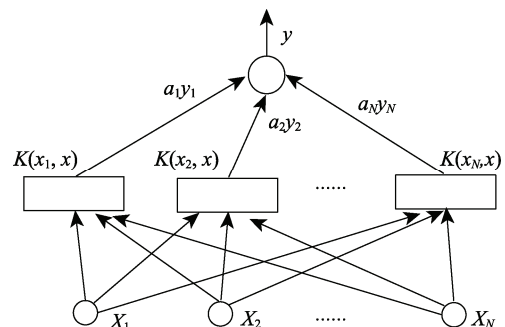


图 3 支持向量机结构

Fig.3 Structure of support vector machines

无纺布制袋机纠偏系统中共有 4 个纠偏子系统,实现塑料薄膜、链条 A、链条 B、无纺布等 4 种材料的纠偏,针对每一个纠偏子系统建立 SVM 模型。取优化时域 $P=2$ 和控制时域 $M=2$,设第 i 个子系统 SVM_i 模型的输入为 $X_i=[y_i(k), y_i(k-1), y_i(k-2), u_i(k), u_i(k-1), u_i(k-2)]$,输出为 $Y_i=y_i(k+1)$ 。其中, i 为子系统编号, $i=1, 2, 3, 4$; $y_i(k-j)$ 为第 $k-j$ 时刻位置子系统 i 的传感器检测到的位置偏移信号, $u_i(k-j)$ 为第 $k-j$ 时刻位置子系统 i 给出的电机控制信号。系统模型描述为 $y_i(k+1)=SVM_i[y_i(k), y_i(k-1), y_i(k-2), u_i(k), u_i(k-1), u_i(k-2)]$ 。

基于 SVM 的无纺布制袋机建模过程如下所述。

1) 针对每个子系统,选取 N 组经过粗大误差剔除处理后的现场数据用于 SVM 模型的训练,记为 X_{train} 和 Y_{train} ;选取 M 组经过粗大误差剔除处理后的现场数据用于测试所建模型的精确度,记为 X_{sim} 和

Y_{sim} 。

2) 将训练样本集 X_{train} 和 Y_{train} 做归一化, 让 SVM 模型的输入输出都在 0~1 之间, 可加快网络的收敛性。

3) 将归一化之后的数据进行模型的训练, 建成形式为式 (1) 的模型。选取核函数 $K(x_j, x_i) = \exp(-\|x - x_i\|^2 / \sigma^2)$, 通过求解二次规划问题, 求出 $a_i, a^*,$ 和 b 。

4) 将测试样本数据 X_{sim} 做归一化处理, 并代入 SVM 模型中, 求得用文中算法得到的输出 $\hat{Y}$ 。

5) 将 $\hat{Y}$ 反归一化为 Y'_{sim} , 并与 Y_{sim} 比较, 得到相对误差矩阵 $e = \frac{Y'_{sim} - Y_{sim}}{Y_{sim}} \times 100\%$ 。

6) 通过误差矩阵分析模型精度, 如果模型精度满足要求, 则模型训练完毕; 否则, 跳转到步骤 3), 重新通过求解二次规划问题得到 $a_i, a^*,$ 和 b 。

根据以上模型分析, 预测控制模型可描述为:

$$\begin{cases} \tilde{y}_{m,i}(k+j|k) = \\ SVM_i[y_{m,i}(k+j-1|k), y_{m,i}(k+j-2|k), \\ u_i(k+j-1), u_i(k+j-2)], j=1, 2, \dots \\ \tilde{y}_{m,i}(k+j|k) = y_i(k+j), j \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\tilde{y}_{m,i}(k+j|k)$ 为在 k 时刻预测的未来输出值, $u_i(k+j)$ 为在 $k+j$ 时刻的控制量, $y_i(k+j)$ 为在 $k+j$ 时刻的输出实际值。

2.2 反馈校正

由预测模型给出的预测输出值可能偏离实际输出值 $y(k+1)$, 需要利用实时信息进行反馈校正, 设两者误差为 $e_i(k+1) = y_i(k+1) - \tilde{y}_{m,i}(k+1|k)$, 经反馈校正后模型输出为 $\tilde{y}_{cor,i}(k+1) = \tilde{y}_{m,i}(k+1|k) + h \cdot e_i(k+1)$, 其中 h 为误差修正系数。

2.3 滚动优化

针对每种纠偏材料 ($i=1, 2, 3, 4$), 优化时域 $P=2$, 控制时域 $M=2$, 带材位置设定为 $w_i(k+j)$, $j=1, 2$, 滚动优化的目的是在每一时刻 k , 设计最优控制序列 $U_i = [u_i(k), u_i(k+1), u_i(k+2)]$, 使被控对象在未来 P 个优化时域内的预测输出校正值 $\tilde{y}_{cor,i}(k+j|k)$ 尽可能地接近给定的参考轨迹 $y_{r,i}(k+j)$ 时希望控制增量不要剧烈变化。其中, $y_{r,i}(k+j) = \alpha_r y_{r,i}(k+j-1) + (1-\alpha_r)w_i(k+j)$ 是位置设定值经柔化后的参考轨迹, α_r 为与控制系统鲁棒性和收敛性相关的柔化因子, $0 < \alpha_r < 1$ 。

由此, 滚动优化的目标函数为:

$$\min J_i = \sum_{j=1}^2 q_j [y_{r,i}(k+j) - \tilde{y}_{cor,i}(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^2 \lambda_j [u_i(k+j) - u_i(k+j-1)]^2 \quad (3)$$

式中: q_j 和 λ_j 为权系数, 它们分别表示对跟踪误差及控制量变化的抑制程度。

无纺布制袋机纠偏控制系统多目标优化总模型为:

目标:

$$\min J_i = \sum_{j=1}^2 q_j [y_{r,i}(k+j) - \tilde{y}_{cor,i}(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^2 \lambda_j [u_i(k+j) - u_i(k+j-1)]^2, i=1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

条件:

$$\begin{cases} \tilde{y}_{m,i}(k+j|k) = \\ SVM_i[y_{m,i}(k+j-1|k), y_{m,i}(k+j-2|k), \\ u_i(k+j-1), u_i(k+j-2)], j=1, 2, \dots \\ \tilde{y}_{m,i}(k+j|k) = y_i(k+j), j \leq 0 \\ y_{r,i}(k+j) = \alpha_r y_{r,i}(k+j-1) + (1-\alpha_r)w_i(k+j) \\ \tilde{y}_{cor,i}(k+1) = \tilde{y}_{m,i}(k+1|k) + h \cdot e_i(k+1) \\ e_i(k+1) = y_i(k+1) - \tilde{y}_{m,i}(k+1|k) \end{cases}$$

$$y_{i_lower} \leq y_i(k+1) \leq y_{i_upper}, i=1, 2, 3, 4$$

式中: $y_{i_lower}, i=1, 2, 3, 4$ 为位置偏移下限; $y_{i_upper}, i=1, 2, 3, 4$ 为位置偏移上限。

遗传算法作为一类随机优化方法, 对求解模型要求不高, 却可以有效地寻求系统最优解, 具有内在启发式群体搜索特性, 具备很强的鲁棒性、并行性和可扩展性。基本遗传算法收敛速度慢、精度低, 针对该系统的滚动优化问题, 文中采取改进的 NSGA-II 遗传算法实现目标函数的优化, 其具体实现步骤如下所述^[12]。

1) 在搜索空间内随机产生一个初始种群。

2) 对种群中的个体做约束处理和非支配排序^[15]。将不满足约束条件的个体置于最后一层非支配层, 使其尽快被淘汰。

3) 计算个体的拥挤度, 依据非支配排序和拥挤度对种群进行偏序排序^[16]。

4) 评价个体的适应度。适应度的评价采用一个综合考虑非支配关系和拥挤度的实数表示, 其整数部分为个体非支配关系, 小数部分为拥挤度关系。

5) 实施进化操作, 采用联赛选择机制和自适应交叉变异, 保证适应度高的个体以较大概率保存、交叉和变异。

6) 合并父代种群与子代种群, 并重复对新种群重复 2) 3) 步操作。

7) 新种群迁入操作。每隔一定进化代数判断是否迁入一批新种群, 如果是, 则迁入新种群, 如果不是, 跳转到下一步。

8) 判断是否满足进化终止条件, 如果满足, 终止进化, 算法结束, 否则, 转步骤 4)。

3 实验验证

将该控制系统运用于无纺布制袋机纠偏控制中，选取算法的相关参数如下：优化时域 $P=2$ ，控制时域 $M=2$ ，带材位置设定 $w_i(k+j)=0$ ，优化目标权系数 q_j 和 λ_j 分别为 1 和 0.9，误差修正系数 $h=0.5$ ，柔化因子 $\alpha_r=0.1$ 。在不同制袋速度下运行，每次运行采集 10 000 个样本，并对每个样本各路带材的跑偏情况做分析，定义纠偏误差为四路带材中跑偏最严重的位置偏差。经统计，发现纠偏误差基本上在 $\pm 0.3\text{ mm}$ 以内，误差分析及废品率数据见表 1。一般当无纺布袋的纠偏误差 $\geq \pm 0.2\text{ mm}$ 时，袋子通常会出现链条合不拢、边缘局部封口不严实、袋子形状歪斜、带材褶皱不平整等现象，该实验将纠偏误差 $\geq \pm 0.2\text{ mm}$ 并具有上述现象的袋子定义为废品，废品率=废品数量/样本数 $\times 100\%$ 。采用原纠偏控制系统的生产数据见表 2，样本数也为 10 000 个。

表 1 采用文中算法的纠偏控制系统数据
Tab.1 Data of deviation control system
adopting the proposed algorithm

制袋速度/ (个 $\cdot\text{min}^{-1}$)	袋子数/个			废品 率/%
	纠偏误差 $\geq \pm 0.3\text{ mm}$	纠偏误差 $\geq \pm 0.2\text{ mm}$	纠偏误差 $\geq \pm 0.1\text{ mm}$	
50	0	9	17	0.09
60	5	21	39	0.21
70	11	29	47	0.29
80	19	40	58	0.40

表 2 原纠偏控制系统数据
Tab.2 Data of original deviation control system

制袋速度/ (个 $\cdot\text{min}^{-1}$)	袋子数/个			废品 率/%
	纠偏误差 $\geq \pm 0.3\text{ mm}$	纠偏误差 $\geq \pm 0.2\text{ mm}$	纠偏误差 $\geq \pm 0.1\text{ mm}$	
50	11	15	28	0.15
60	28	45	33	0.45
70	47	69	55	0.69
80	53	80	92	0.80

纵向分析表 1 和表 2 可知，无论是原有纠偏系统还是文中所述纠偏系统，系统运行速度越快，同等偏差的袋子数越多，废品率也越多。横向对比表 1 和表 2 可知，基于改进 NSGA-II 的预测控制实现的无纺布制袋机纠偏系统相比原纠偏系统而言，控制效果较好，在同等运行速度下，纠偏误差性能较优，同程度偏差的袋子较少，废品率也低于前者；高速运行时，废品率由原系统的 0.80%降为 0.40%，在低速运行时，废品率只有 0.09%。

4 结语

针对无纺布制袋机纠偏控制系统，设计了一种基于改进 NSGA-II 的预测控制算法，采用支持向量机 SVM 建立非机理模型，利用改进 NSGA-II 遗传算法实现滚动优化。经分析表明，该算法减小了纠偏误差，降低了废品率，提高了生产效率。

参考文献：

[1] 万苏文. 基于热合包装机的纠偏控制系统设计[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 54—57.
WAN Su-wen. Design of the Error Correcting Control System Based on the Hot-seal Packing Machine[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5): 54—57.

[2] 陆荣鑑, 韩凌. 基于 ARM 嵌入式的制袋机控制系统设计[J]. 包装工程, 2012, 33(17): 88—93.
LU Rong-jian, HAN Ling. Design of Bag-making Machine Control System Based on ARM Embedded Technology[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 88—93.

[3] 韩东霖, 薛伟. 基于 STM32 的高速制袋机控制系统设计[J]. 信息技术, 2016(2): 43—46.
HAN Dong-lin, XUE Wei. Design of Making Machine Control System Based on the STM32[J]. Information Technology, 2016(2): 43—46.

[4] 陆兵, 束梅玲. 基于机器视觉的软包装边缘测量及纠偏系统[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(7): 2005—2008.
LU Bing, SHU Mei-ling. Soft Package Edge Measurement and Correction System Based on Machine Vision[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(7): 2005—2008.

[5] SHIN K, KWON S, KIM S, et al. Feedforward Control of the Lateral Position of a Moving Web Using System Identification[C]// Industry Applications Conference, 38th IAS Annual Meeting, Conference Record of the IEEE, 2003, 1(6): 345—351.

[6] 董娟, 段至善, 陈凯, 等. PID 控制器在带材跑偏控制系统中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2009(10): 91—93.
DONG Juan, DUAN Zhi-shan, CHEN Kai, et al. Application Research of the PID Controller in the Strip Running Offset Control System[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(10): 91—93.

[7] 陈德传, 陶宏斌. 带材收卷过程中的一种新型纠偏控制系统[J]. 杭州电子科技大学学报, 2008, 28(2): 74—77.
CHEN De-chuan, TAO Hong-bin. A New Deviation Control System for Strip Winding Process[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2008, 28(2): 74—77.

[8] 程军周, 刘渭苗, 崔卫华, 等. 分段 PID 在双反馈板带材纠偏系统中的应用[J]. 重型机械, 2012(2): 32—

34.
CHENG Jun-zhou, LIU Wei-miao, CUI Wei-hua, et al. Application of Piecewise PID Method in Double-feedback Strip Steel Center Position Control System[J]. Heavy Machinery, 2012(2): 32—34.
- [9] 马存乐, 曹跃进. 基于 ANFIS 的带材纠偏控制[J]. PLC & FA, 2009(4): 79—80.
MA Cun-le, CAO Yue-jin. Edge Position Control Based on ANFIS[J]. PLC & FA, 2009(4): 79—80.
- [10] 唐建阳, 瞿敏敏, 李银露, 等. 基于模糊控制的带钢跑偏电液伺服系统研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(3): 134—137.
TANG Jian-yang, QU Min-min, LI Yin-lu, et al. Simulation Research on Electric Deviation Correcting System Based on Fuzzy Control[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(3): 134—137.
- [11] DEB K. A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182—197.
- [12] 沈正华. 纸浆间歇蒸煮参数优化方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- SHEN Zheng-hua. Research on Optimization of Batch Digester Parameters[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [13] 白鹏, 张喜斌, 张斌, 等. 支持向量机理论及工程应用实例[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
BAI Peng, ZHANG Xi-bin, ZHANG Bin, et al. Support Vector Machine Theory and Engineering Application Example[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008.
- [14] 杜树新, 吴铁军. 用于回归估计的支持向量机方法[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1580—1586.
DU Shu-xin, WU Tie-jun. Support Vector Machines for Regression[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(11): 1580—1586.
- [15] JEFFREY H, NICHOLAS N, David E. Goldberg. A Niched Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization[J]. Proceeding of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, 1994, 1: 82—87.
- [16] JOSHUA D K, DAVID W C. Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy[J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(2): 149—172.