

包装覆膜自适应恒张力控制方法研究

秦国防¹, 秦明辉²

(1. 济源职业技术学院, 河南 济源 459000; 2. 南京理工大学, 南京 210014)

摘要: 目的 为解决悬浮包装生产过程中薄膜张力不稳定等问题, 建立覆膜过程薄膜张力数学模型。方法 针对传统 PID 控制在薄膜张力控制中的诸多不足, 基于 BP 神经网络设计自适应 PID 薄膜张力控制方法。根据系统运行状态, 调节 PID 控制器的参数。通过神经网络的自身学习来调整权系数, 确保被控对象处于稳定工作状态。为进一步优化 BP 神经网络控制性能, 利用鱼群寻优算法实现初始阈值和权值优化。最后, 进行仿真和实验研究。结果 仿真和实验结果表明, 基于改进 BP-PID 控制算法进行张力控制时, 系统响应速度较快, 最大超调量较小。薄膜张力的最大相对误差只有 0.5 N, 误差值都比较小。结论 改进 BP-PID 算法具有较高的控制精度和稳定性, 可满足包装覆膜要求。

关键词: 包装覆膜; 张力控制; BP 神经网络; 鱼群算法

中图分类号: TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)15-0222-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.15.033

Adaptive Constant Tension Control Method of Packaging Coating

QIN Guo-fang¹, QIN Ming-hui²

(1. Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 459000, China;

2. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210014, China)

ABSTRACT: The work aims to establish a mathematical model of film tension in the process of film mulching, in order to solve the problem of film tension instability in the production process of suspended packaging. Aiming at the shortcomings of traditional PID control in film tension control, an adaptive PID film tension control method was designed based on BP neural network. The parameters of PID controller were adjusted according to the running state of the system. Through the self-learning of neural network, the weight coefficient was adjusted to ensure the stable working state of controlled object. In order to further optimize the control performance of BP neural network, the initial threshold and weight optimization were realized with the fish swarm optimization algorithm. Finally, the simulation and experimental research were carried out. Simulation and experimental results showed that, the system's response speed was fast and the maximum overshoot was small during tension control based on the improved BP-PID control algorithm. The maximum relative error of film tension was only 0.5 N, which was relatively small. The improved BP-PID algorithm has high control accuracy and stability, and can meet the requirements of packaging coating.

KEY WORDS: packaging coating; tension control; BP neural network; fish swarm algorithm

塑料薄膜在化工、包装、食品等领域的应用十分广泛, 其具有质量轻、强度高、耐磨性能好、绝缘性能好等特点。以包装行业为例, 覆膜不仅能够提高包

装的密封性而且可以起到一定的缓冲作用, 例如悬浮包装^[1-3]。一般情况下, 包装覆膜工艺的关键在于保持薄膜表面张力恒定。如果张力过大, 容易导致薄膜

收稿日期: 2019-11-12

作者简介: 秦国防 (1968—), 男, 硕士, 济源职业技术学院副教授, 主要研究方向为智能制造及自动控制技术。

断裂,影响产品的完整性。如果张力过小,密封和缓冲效果都会大打折扣,因此,保证包装过程薄膜张力的恒定性具有一定的实践意义^[4-6]。从本质上讲,薄膜张力控制系统具有非线性、强耦合、多干扰等特点,采用传统的 PID 控制恐怕很难取得理想控制效果。针对此问题,许多智能控制算法逐步应用到张力控制领域^[7-10]。例如:胥小勇等^[11]以流涎薄膜收换卷为研究对象,重点讨论薄膜张力控制算法;在建立系统数学模型的基础上,基于神经网络 PID 实现转速在线调整,进而确保张力稳定。李健等^[12]以印刷机放卷系统为研究对象,在建立系统非线性数学模型的基础上,进行动态线性化处理,基于线性矩阵不等式实现了张力的 H_∞鲁棒控制。周春雷等^[13]以非连续开卷为研究对象,局域自适应 PID 控制算法开展了相关仿真研究,结果表明,所述算法在响应速度、稳定性等方面具备一定优势。王瑞超等^[14]以薄膜生产过程为研究对象,在建立张力收卷数学模型的基础上,基于模糊神经网络 PID 控制算法实现转速控制,确保张力控制的准确性。但是上述控制方法均存在收敛速度比较慢,实时性稍差等问题,文中在现有研究基础上,采用神经网络算法实现薄膜张力自适应控制,为解决神经网络收敛速度慢容易陷入局部极小值等问题,采用鱼群算法实现网络初始值和权值优化。以悬浮包装覆膜过程张力控制为研究对象,建立覆膜过程薄膜张力数学模型,并设计张力自适应控制,通过仿真和实验进行相关验证。

1 张力控制系统建模

悬浮包装覆膜过程可描述为:中空盒固定在旋转支架上,并以一定的速度旋转,这样薄膜就会被缠绕在中空盒表面;张力传感器实时检测薄膜张力,然后传送至张力控制器;张力实际值和设定值进行比较,得到张力偏差值;该偏差数值通过一系列计算就会产生控制变量,以励磁电流形式输出;通过调节励磁电流实现磁粉制动器输出转矩的控制,从而完成薄膜张力调节^[15]。

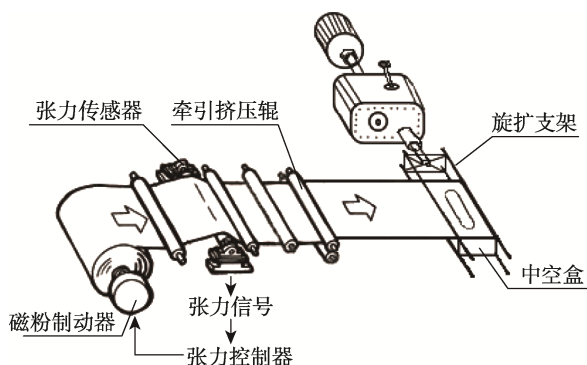


图 1 悬浮包装覆膜原理

Fig.1 Principle of suspended packaging coating

假设薄膜张力为 F , 卷轴角速度为 ω , 卷轴半径为 r , 薄膜卷半径为 R ; 对于薄膜, 定义放卷线速度为 v_1 , 缠绕线速度为 v_2 。整个过程中, 薄膜会受到制动力(来自于磁粉制动器)、摩擦力、牵引力(来自于旋扩支架)。综上所述, 可以建立动态力矩平衡方程, 即:

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = FR - M - B\omega \quad (1)$$

式中: J 为薄膜卷转动惯量; M 为制动力矩; B 为阻尼系数。

薄膜卷转动惯量可表示为:

$$J = J_R + J_r = \frac{1}{2} \rho \pi b R^4 + J_0 \quad (2)$$

式中: J_R 为薄膜转动惯量; J_r 为转轴转动惯量; ρ 和 b 分别为薄膜密度和宽度; J_0 为一个常数。考虑到加减速阶段卷径变化非常小, 可假设 $dR/dt=0$, 那么对式(2)求导可得:

$$\frac{dJ}{dt} = 0 \quad (3)$$

另外, 若以放卷角速度为研究对象, 则有:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dv}{dt} - \frac{v_1}{R^2} \frac{dR}{dt} = \frac{a}{R} \quad (4)$$

式中: a 为薄膜加速度。把式(2—4)依次带入式(1), 可得薄膜张力为:

$$F = \left(\frac{1}{2} \rho \pi b R^4 + J_0 \right) \frac{a}{R^2} + \frac{M}{R} + B \frac{v_1}{R^2} \quad (5)$$

由式(5)可以看出: 薄膜张力和放卷线速度、卷径、制动力矩、加速度等有关系。综合考虑, 通过调整磁粉制动器的制动力矩, 就能够确保不同速度、卷径的情况下张力保持恒定。

2 薄膜张力 BP 神经网络自适应 PID 控制

2.1 神经网络算法

基于 BP 神经网络自适应 PID 控制原理的薄膜张力控制系统结构见图 2。从图 2 中可以看出, 控制系统结构包括 PID 控制器、BP 神经网络控制器, 后者根据系统运行状态实时调节 PID 控制器参数。BP 神经网络控制器的输出对应 PID 控制器的 3 个参数 K_p , K_i , K_d 。

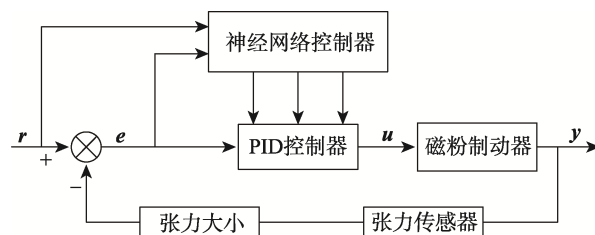


图 2 控制系统结构

Fig.2 Control system structure

定义张力控制误差为:

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (6)$$

式中: $r(k)$ 为薄膜张力实际值; $y(k)$ 为薄膜张力目标值; $e(k)$ 为控制误差。对 PID 进行离散化处理, 可得:

$$u(k) = u(k-1) + K_P [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (7)$$

式中: $u(k)$ 为控制器输出; K_P , K_I , K_D 为 PID 的 3 个调节参数。

BP 神经网络采用 3 层结构, 包含 4 个输入节点、5 个隐含节点、3 个输出节点。输入层输入变量为预设张力值、实际张力值以及二者偏差。隐含层输入变量可用输入层所有输出的加权和表示, 则有:

$$x_j^{(2)} = \sum_i^M w_{ij}^{(2)} x_i^{(1)} \quad (8)$$

式中: $i=1, 2, \dots, M$; $j=1, 2, \dots, L$; M 为输入层神经元数目; L 为隐含层神经元数目; 上标 (1) 为输入层; 上标 (2) 为隐含层; $w_{ij}^{(2)}$ 为输入层第 i 个神经元和隐含层第 j 个神经元之间的连接权值; $x_i^{(1)}$ 为输入层第 i 个神经元的输入值。

定义隐含层激活函数为:

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (9)$$

那么隐含层输出可表示为:

$$y_j^{(2)} = f(x_j^{(2)}) = \frac{e^{x_j^{(2)}} - e^{-x_j^{(2)}}}{e^{x_j^{(2)}} + e^{-x_j^{(2)}}} \quad (10)$$

输出层输入可表示为:

$$x_k^{(3)} = \sum_{j=0}^L w_{jk}^{(3)} y_j^{(2)} \quad (11)$$

式中: $k=1, 2, \dots, N$, N 为输出层神经元数量; 上标 (3) 表示输出层。定义输出层激活函数为:

$$g(x) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (12)$$

输出层的输出可表示为:

$$y_k^{(3)} = g(x_k^{(3)}) = \frac{e^{x_k^{(3)}}}{e^{x_k^{(3)}} + e^{-x_k^{(3)}}} \quad (13)$$

如上所述, 输出层的输出对应 PID 控制器的 3 个参数, 即:

$$\begin{cases} y_1^{(3)} = K_P \\ y_2^{(3)} = K_I \\ y_3^{(3)} = K_D \end{cases} \quad (14)$$

定义张力控制系统的性能指标函数为:

$$E = \frac{(r(k) - y(k))^2}{2} \quad (15)$$

按照梯度下降法修正网络权系数, 一般来说, 就是按照 E 沿加权系数的负梯度方向搜索调整, 同时附

加一个惯性项以加速收敛。那么网络输出层加权系数的学习算法可表示为:

$$\begin{cases} \Delta w_{jk}^{(3)}(k) = \alpha \Delta w_{jk}^{(3)}(k-1) + \eta \delta_k^{(3)} y_j^{(2)} \\ \delta_k^{(3)} = e(k) \operatorname{sgn} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial y_k^{(3)}} g'(x_k^{(3)}(k)) \end{cases} \quad (16)$$

同理, 可得隐含层加权系数的学习算法为:

$$\begin{cases} \Delta w_{ij}^{(2)}(k) = \alpha \Delta w_{ij}^{(2)}(k-1) + \eta \delta_j^{(2)} y_i^{(1)} \\ \delta_j^{(2)} = \sum_{k=1}^3 \delta_k^{(3)} w_{jk}^{(3)} f'(x_j^{(2)}(k)) \end{cases} \quad (17)$$

式中: η 为神经网络学习速率; α 为系统惯性系数。

2.2 基于鱼群算法的 BP 神经网络优化

虽然 BP 神经网络在解决非线性问题方面具有较大的优势, 但是也存在收敛速度慢、容易陷入局部极小值等问题, 所以需要对其进行优化设计。文中重点考虑初始阈值和权值优化问题。

定义感知距离为 V_{isual} , 移动步长为 S_{tep} , 拥挤因子为 σ 。鱼群算法的几种行为可以如下描述。

1) 觅食行为。定义鱼群当前状态为 X_i , 对应的适应度函数为 Y_i ; 在其感知范围内随机选取一个状态 X_j , 对应的适应度函数为 Y_j 。如果求取极大值, 当 $Y_i < Y_j$ 时, 向该方向前进一步, 即完成 $X_{i/\text{next}}$; 否则, 重新选择状态 X_j , 判断是否满足前进条件。若到达重复次数, 仍不能满足前进条件, 则随机移动一步。其数学表达式为:

$$X_{i/\text{next}} = \begin{cases} X_i + R_{\text{and}} \cdot S_{\text{tep}} \cdot \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|} & Y_i < Y_j \\ X_i + R_{\text{and}} \cdot S_{\text{tep}} & Y_i > Y_j \end{cases} \quad (18)$$

式中: R_{and} 为一个 (0,1) 范围内的随机数。

2) 聚群行为。定义鱼群当前邻域内的伙伴数目及中心状态为 X_c , 其对应适应度函数为 Y_c 。当 $Y_c > \sigma Y_i$ 时, 伙伴中心有较多食物而且周围不太拥挤, 此时可向伙伴中心位置向前移动一步; 否则, 执行觅食行为。其数学表达式可表示为:

$$X_{i/\text{next}} = \begin{cases} X_i + R_{\text{and}} \cdot S_{\text{tep}} \cdot \frac{X_c - X_i}{\|X_c - X_i\|} & Y_c > \sigma Y_i \\ \text{觅食行为} & Y_c < \sigma Y_i \end{cases} \quad (19)$$

3) 追尾行为。定义鱼群当前邻域内食物浓度最大状态为 X_{max} , 其对应适应度函数为 Y_{max} 。当 $Y_{\text{max}} > \sigma Y_i$ 时, X_{max} 状态具有较高的食物浓度而且周围不太拥挤, 此时可朝 X_{max} 向前移动一步; 否则, 执行觅食行为。其数学表达式可表示为:

$$X_{i/\text{next}} = \begin{cases} X_i + R_{\text{and}} \cdot S_{\text{tep}} \cdot \frac{X_{\text{max}} - X_i}{\|X_{\text{max}} - X_i\|} & Y_{\text{max}} > \sigma Y_i \\ \text{觅食行为} & Y_{\text{max}} < \sigma Y_i \end{cases} \quad (20)$$

在实际应用过程中,可将鱼群当前状态设置为初始权值和阈值,食物浓度设置为训练误差的倒数,食物浓度越大意味着误差越小,所以鱼群寻优过程就是不断调整阈值和权值的过程。

3 实验研究

3.1 仿真

为了验证 BP-PID 控制器对于塑料薄膜张力控制效果,采用 Matlab 软件分别对传统 PID 控制、BP-PID 控制和改进 BP-PID 控制分别进行仿真分析并对比结果。经过多次训练实验后,选取神经网络学习速率参数为 $\eta_P=0.5$, $\eta_I=0.45$, $\eta_D=0.4$, 惯性系数 $\alpha=0.05$ 。

将鱼群状态设为 BP 神经网络的初始权值和阈值,人工鱼数目取 50,移动步长为 0.3,感知距离为 0.6,拥挤因子取 0.62,仿真结果见图 3。从图 3 可以看出,基于改进 BP-PID 控制算法进行张力控制时,系统响应速度比较快,最大超调量比较小,基本实现了无静差跟踪,控制效果明显优于传统 PID 算法和 BP-PID 算法。

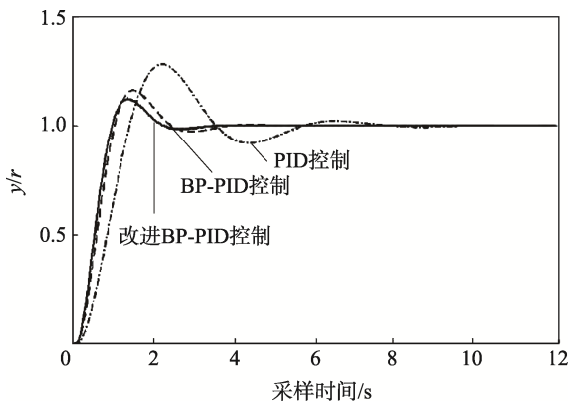


图 3 仿真结果
Fig.3 Simulation results

3.2 实验

为进一步验证改进 BP-PID 控制算法的控制精度,文中进行了相关实验研究并采集数据。以某工厂覆膜包装生产线为实验平台,移植所述张力控制系统,技术参数设定:薄膜卷初始半径为 1000 mm,厚度为 0.04 mm,宽度为 300 mm,卷轴半径为 200 mm,薄膜张力设定值为 80 N。实际包装效果见图 4。

从图 4 可以看出,包装效果比较理想,覆膜表面平整,可满足包装要求。系统运行稳定后,对薄膜张力进行多次采集,数据见表 1。

由实验数据可以看出,在 BP-PID 控制下,薄膜张力的最大相对误差为 3.1 N,且误差普遍都较大;相对而言,在改进 BP-PID 控制下,薄膜张力的最大相对误差只有 0.5 N,误差值都比较小。结果表明,

改进 BP-PID 算法具有较高的控制精度和稳定性。



图 4 实际包装效果
Fig.4 Actual packaging effect

表 1 实验数据
Tab.1 The experimental data

BP-PID 控制		改进 BP-PID 控制	
序号	实际值	序号	实际值
1	82.3	1	79.5
2	83.1	2	80
3	77.9	3	80
4	77.6	4	80.6
5	78.2	5	79.6
6	80.1	6	79.8
7	80.2	7	80
8	81.7	8	80
9	79.2	9	80
10	78.5	10	79.9
11	78.6	11	80.1
12	78.4	12	80.1
13	78.2	13	79.9
14	81	14	79.9
15	81	15	80

4 结语

以覆膜包装过程薄膜张力控制为研究对象,针对传统 PID 控制的不足,基于 BP 神经网络设计了一种薄膜张力控制系统。该系统可实现 PID 控制主要参数的在线调节,为进一步提高 BP 神经网络的性能,利用鱼群优化算法实现了其初始阈值和权值优化,具有一定的借鉴意义。实验结果表明,改进 BP-PID 控制算法具有较高的控制精度和稳定性。

参考文献:

- [1] 徐健, 刘晓玉, 王保升. 缓冲气柱袋在运输包装中的应用设计及研究现状[J]. 印刷技术, 2016(4): 40—42.
XU Jian, LIU Xiao-yu, WANG Bao-sheng. Application Design and Research Status of Buffer Air Column Bags in Transport Packaging[J]. Printing Technology, 2016(4): 40—42.
- [2] 巩桂芬, 王露露, 王古月, 等. 新型悬浮包装的设计与实现[J]. 包装工程, 2017, 38(23): 102—105.
KONG Gui-fen, WANG Lu-lu, WANG Gu-yue, et al. New Suspension Package Design and Implementation[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(23): 102—105.
- [3] HONG B P. The Platform Architecture of Digital Design and Manufacture for Printing and Die-cutting Machinery of Corrugated Board Based on MAS[C]// Intelligent Information Technology Application Association, Sustainable Construction Materials and Computer Engineering, 2011.
- [4] 陈作杰, 吴培德, 张义红. 模糊 PI 控制器在薄膜张力控制系统的应用研究[J]. 智能计算机与应用, 2014, 4(3): 42—44.
CHEN Zuo-jie, WU Pei-de, ZHANG Yi-hong. Application Research on Fuzzy PI Controller in Web Tension System[J]. Intelligent Computer and Applications, 2014, 4(3): 42—44.
- [5] 王力, 钱林方, 高强, 等. 磁粉制动器的建模与辨识研究[J]. 电气自动化, 2010, 32(5): 55—58.
WANG Li, QIAN Lin-fang, GAO Qiang, et al. Research on Modeling and Identification of Magnetic Particle Brake[J]. Electrical Automation, 2010, 32(5): 55—58.
- [6] 杨梅, 续明进. 基于 Matlab 的卷筒纸印刷机张力控制系统的建模与仿真[J]. 包装工程, 2011, 32(7): 22—25.
YANG Mei, XU Ming-jin. Modeling and Simulation of Tension Control System in Web Press Based on Matlab[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 22—25.
- [7] 魏立新, 张俊林, 刘青松. 基于改进人工鱼群算法的神经网络优化[J]. 控制工程, 2014, 21(1): 84—87.
WEI Li-xin, ZHANG Jun-lin, LIU Qing-song. Optimization of Neural Network Based on Improved Fish Algorithm[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(1): 84—87.
- [8] 雷莹. 吹膜机塑料薄膜张力的自适应神经网络 PID 控制[J]. 合成树脂及塑料, 2019, 36(3): 72—75.
LEI Ying. Adaptive Neural Network PID Control for Plastic Film Tension of Film Blowing Machine[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(3): 72—75.
- [9] 魏苗苗, 刘洲峰. 基于 BP 神经网络的卷染机温度控制技术[J]. 毛纺科技, 2019, 47(7): 71—75.
WEI Miao-miao, LIU Zhou-feng. Temperature Control Technology of Dyeing Machine Based on BP Neural Network[J]. Wool Textile Journal, 2019, 47(7): 71—75.
- [10] TANG Y. Waste Crops Resource for Corrugated Board Studies[C]// Information Engineering Research Institute, Proceedings of 2014 4th International Conference on Education and Education Management (EEM 2014 V68), 2014.
- [11] 胥小勇, 孙宇, 蒋清海. 薄膜张力控制系统的建模与设计[J]. 中国机械工程, 2013, 24(18): 2452—2457.
XU Xiao-yong, SUN Yu, JIANG Qing-hai. Modeling and Design of a Film Tension Control System[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(18): 2452—2457.
- [12] 李健, 梅雪松, 陶涛, 等. 放卷张力系统 H_∞ 鲁棒控制器的设计[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(1): 86—90.
LI Jian, MEI Xue-song, TAO Tao, et al. H_∞ Robust Control Design for Unwinding Tension System[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(1): 86—90.
- [13] 周春雷, 陈建魁, 尹周平. 薄膜非连续开卷张力控制建模仿真与实验[J]. 电气自动化, 2013, 35(3): 9—11.
ZHOU Chun-lei, CHEN Jian-kui, YIN Zhou-ping. Modeling, Simulation and Experiment of Tension Control in Film Non-continuous Unwinding System[J]. Electrical Automation, 2013, 35(3): 9—11.
- [14] 王瑞超, 孙宇, 胥小勇. 基于模糊神经网络的薄膜收卷锥度张力控制系统[J]. 化工自动化及仪表, 2013, 40(3): 316—320.
WANG Rui-chao, SUN Yu, XU Xiao-yong. Research of Cone Tension Control System in Film Winding Based on Fuzzy-neural Network[J]. Chemical Automation Instruments, 2013, 40(3): 316—320.
- [15] 汤伟, 王古月, 王露露. 新型悬浮包装中薄膜张力的模糊自适应 PID 控制[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 141—145.
TANG Wei, WANG Gu-yue, WANG Lu-lu. Fuzzy Adaptive PID Control of Film Tension in New Suspension Package[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 141—145.