

基于模糊免疫算法的民爆企业自动化 包装线集成控制方法

吴建进[†]

(云南戎合投资控股有限公司, 云南 昆明 650000)

摘 要:在实际运行中,民爆企业的自动化包装线由于环境变化和原料波动等因素的影响,具有复杂的非线性动态变化,导致生产线存在生产效率不稳定问题。为此,提出了基于模糊免疫算法的民爆企业自动化包装线集成控制方法。基于自动化包装线的组成结构和受力特点,计算结构的力学参数,并采用包装线极限承载力特征分析方法,建立包装线结构的力学分析模型。结合控制需求,设计滑膜自适应控制器,并采用模糊免疫算法对控制器的参量进行调整,以优化控制器的性能,进而输出自动化包装线的控制量,实现包装线的集成控制。实验结果表明,利用该方法对自动化包装线进行集成控制后,控制速度能够准确跟踪预设速度,可以保证包装线的产出率超过了87%,提高了生产效率。

关键词:模糊免疫算法;民爆企业;自动化包装线;集成控制;生产效率

中图分类号:TH166

文献标识码:A

Integrated Control Method for Automated Packaging Line of Civil Explosive Enterprises Based on Fuzzy Immune Algorithm

WU Jianjin[†]

(Yunnan Ronghe Investment Holding Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: In actual operation, the automated packaging line of civil explosive enterprises has complex nonlinear dynamic changes due to environmental changes and fluctuations in raw materials, leading to unstable production efficiency in the production line. Therefore, a fuzzy immune algorithm based integrated control method for the automated packaging line of civil explosive enterprises is proposed. Based on the composition structure and force characteristics of the automated packaging line, the mechanical parameters of the structure are calculated, and the analysis method of the ultimate bearing capacity characteristics of the packaging line is adopted to establish a mechanical analysis model of the packaging line structure. Combined with the control requirements, a sliding membrane adaptive controller is designed, and the fuzzy immune algorithm is used to adjust the parameters of the controller to optimize its performance, thereby outputting the control quantity of the automated packaging line and achieving integrated control of the packaging line. The experimental results show that using this method for integrated control of automated packaging lines can accurately track the preset speed, ensuring that the output rate of the packaging line reaches over 87% and improving production efficiency.

Key words: fuzzy immune algorithm; civil explosive enterprises; automated packaging line; integrated control; production efficiency

作为特种行业的重要组成部分,民爆企业自动化包装线的运行效率和安全性直接关系到企业的生产效率和公共安全^[1]。然而,面对民爆产品的特点和生产线的复杂环境,传统的控制方法往往难以平衡控制精度和稳定性。因此,如何有效地应对其复杂多变的控制要求已成为亟待解决的问题。

文献[2]中采用可编程逻辑控制器作为控制系统的核心,并设计一个用户友好的界面,使操作员能够直观地监控生产线的运行状态,并输入控制命令,实现对生产线上各种设备的精确控制。该方法确保了生产过程中的各种参数均处于最佳状态,从而提高了产品的质量和稳定性。然而,该方法电气自动化控制系统涉及多个子系统和复杂的技术环节,使系统的设计和调试变得困难,导致无法保证生产效率。文献[3]根据控制需求分析结果,利用嵌入式处理器、硬件电路、控制软件等实现对生产线上各种设备的精确控制。该方法具有极高的实时性能,可以保证对生产线上各种设备的精确控制,提高产品质量。但该方法开发难度高,一旦环境发生变化,可能需要重新开发和调试,因此无法保证生产过程的效率。文献[4]根据系统设计的要求,选择 CPU 模块、输入/输出模块、电源模块等作为软件,并集成和安装硬件,使用西门子 Step 7 开发 PLC 控制程序,实现设备的控制和协调运行。该方法可根据生产工艺调整随时修改控制程序,灵活性强。但此方法在面向复杂生产工艺的需求时,存在较大局限性。文献[5]基于云边缘协作框架,构建了一个云边缘协同任务调度模型,采用改进的遗传模拟退火调度算法,对生产线任务列表中的任务进行合理调度,并持续监控生产线的运行状态。同时,将实时监测结果反馈到云端,形成闭环控制。该方法可以自动学习和优化,提高了智能水平。然而,该方法的性能高度依赖于网络环境。网络的稳定性问题或中断情况有可能干扰控制系统的正常运作。

基于上述分析,本文提出了一种基于模糊免疫算法的民爆企业自动化包装线集成控制方法。该方法旨在引入模糊逻辑来处理生产线中的不确定性,同时利用生物免疫系统强大的适应性和抗干扰能力,构建高效稳定的控制策略,以期保证生产安全和效率。

1 民爆企业自动化包装线集成控制方法设计

民爆企业自动化包装线集成控制是一个复杂的过程,主要涉及对整个包装流程的自动化监控与调度。通过集成多个自动化技术和设备,实现对包

装线上各个环节的精准控制与协调,以提高生产效率和保证产品质量的一致性,并进一步确保生产过程中的安全、高效和稳定^[6]。在民爆企业自动化包装线中,各个设备的运行状态与包装作业的安全性和稳定性具有直接关系,因此,为实现连续的包装作业,应根据预设的工艺流程,结合产品特性和安全要求,设计一种能够对包装线的运行参数进行自动调整的控制技术,以确保设备正常运行。

在民爆企业的自动化包装线中,速度参数控制是集成控制的一个重要组成部分,所以,本文将包装线的运行速度作为控制参量,通过对其进行优化与调试,以保证生产线的整体稳定性,得到更高的生产效率和更好的产品质量。

1.1 自动化包装线结构力学分析

对包装线结构进行力学分析能够评估包装线各个组成部分的承载能力、刚度和稳定性,用作后续调整包装线速度的依据,以实现自动化包装线的整体优化与性能提升。

根据包装线结构的几何尺寸、材料属性等基础数据,确定动态运行时的平均载荷,并结合结构的受力特点,运用力学原理来计算结构中的应力、应变和位移等力学参数^[7]。计算公式如下:

$$\begin{cases} p_t = \frac{\epsilon_b}{g_s} \times \frac{\eta_g}{a_s} \\ j_0 = \frac{d_g}{C_h} \\ z_c = \frac{\gamma_h \times k_d}{v_0 \times F_l} \end{cases} \quad (1)$$

式中, ϵ_b 表示结构受到的弯曲承载力; g_s 表示应力响应特征; η_g 表示结构的弹性模量; a_s 表示结构泊松比; p_t 表示结构最大应力; d_g 表示经典屈服破坏模量; C_h 表示一阶滞后函数; j_0 表示结构的最大应变; γ_h 表示结构的残余屈服量; v_0 表示结构的许用应力; k_d 表示梁的弯曲正应力; F_l 表示界面惯性矩; z_c 表示结构位移。

根据包装线梁与中性轴的距离,计算梁的挠度和剪切应力^[8],表达式如下:

$$\begin{cases} w_c = \frac{p_t \times j_0 \times \beta_c}{h_c} \\ f_k = z_c \times \sum_{i=1}^n \frac{V_s}{m_0} \end{cases} \quad (2)$$

式中, h_c 表示简支梁的跨度; n 表示包装线布设的测点数量; V_s 表示长度因数; m_0 表示集中力; w_c 、 f_k 分别表示简支梁的挠度和剪切应力。

基于此,通过应用包装线极限承载力特征分析方法^[9]建立包装线结构的力学分析模型如下:

$$M = \frac{w_c \times f_k}{\sqrt{\nu_c \times j_s}} + \left\| \frac{\theta_f \times l_q}{G_k} \right\|^2 \quad (3)$$

式中, v_c 表示剪切面内的第一部分面积对中性轴的静矩; j_s 表示截面厚度; θ_f 表示垂直于应力方向的应变; G_k 表示压杆稳定性; l_q 表示包装线承载力的增量系数。

基于自动化包装线的组成结构和受力特点, 计算结构的力学参数, 并采用包装线极限承载力特征分析方法, 建立包装线结构的力学分析模型, 为接下来包装线集成控制器的构造奠定基础。

1.2 构造自动化包装线集成控制器

在民爆企业自动化包装线中, 集成控制器是实现速度集成控制的关键。通过读取生产线上的速度传感器数据, 集成控制器能够实时掌握包装线的运行速度, 并根据预设的控制策略调整速度, 确保集成控制效果。

根据控制需求和原理, 本文通过设计滑膜自适应控制器完成对包装线的集成控制。结合上述包装线结构力学分析结果, 综合考虑不同扰动因素, 得到控制器的滑膜函数^[10], 表达式如下:

$$h(x) = \frac{M}{x_r} \times \frac{\xi_c \times I_0}{d_e} \quad (4)$$

式中, x_r 表示包装线空间荷载分布集; x_r 表示系统状态变量; d_e 表示等效控制矩阵; I_0 表示分辨系数。

进一步确定控制时间常数, 以确保包装线系统状态能够到达并保持在滑膜面上^[11]。计算公式如下:

$$u_r = h(x) \times \mu_c \times w_q \quad (5)$$

式中, μ_c 表示观测值; w_q 表示符号判别函数。

为了提高控制器的适应性和鲁棒性, 引入自适应函数来调整控制器的估计误差^[12], 表达式为:

$$D_e = \left[\frac{u_r}{\bar{\omega}_g} \right] \times t_r \quad (6)$$

式中, $\bar{\omega}_g$ 表示李雅普诺夫函数; s_0 表示随机矢量; t_r 表示控制器参数估计值的集合。

进而可采用下式描述构造的包装线集成控制器, 将包装线运行参数作为输入变量, 输出集成控制变量, 即:

$$A = D_e \times (1 + J_r) \times a_s \quad (7)$$

式中, J_r 表示控制增益; a_s 表示控制率。

由式(7)可知, 滑膜自适应控制器的控制性能主要取决于控制增益 J_r 和控制率 a_s 。因此, 为保证自动化包装线的最优控制, 接下来对以上两个控制参量进行调整优化。

1.3 基于模糊免疫算法的控制器参量优化

模糊免疫算法是将模糊逻辑和免疫算法相结合的一种优化方法。在包装线集成控制器参量优化中, 模糊免疫算法能够处理复杂的控制参数空

间^[13], 通过模糊逻辑来改进免疫算法的搜索过程, 从而提高优化效率和精度。

首先随机生成一组抗体, 且每个抗体包含多个基因, 根据免疫反馈原理, 计算抗原对抗体的亲和度^[14], 公式为:

$$r_e = \sum_{e=1}^N \frac{j_c \times u_y}{o_\pi} \quad (8)$$

式中, N 表示抗体数量; j_c 表示采样点数; o_π 表示采样间隔; u_y 表示抑制因子。

依据控制器的误差和误差变化率, 定义模糊规则和模糊集合, 从而对控制过程进行模糊化表示, 获取模糊隶属度函数, 即:

$$R(x) = r_e \times \bar{\omega}_g \times v_a \quad (9)$$

式中, $\bar{\omega}_g$ 表示调整比例因子; v_a 表示离散系数。

基于亲和度挑选抗体进行克隆和变异处理, 从而产生新一代的抗体群体, 并利用重心法对进化过程进行去模糊化处理, 得到抗体和抗原的适应度值^[15], 公式为:

$$\begin{cases} W_l = \sum_{l=1}^N \frac{R(x) \times \phi_0 \times \kappa_g}{S_p} \\ E_f = \sum_{f=1}^M \frac{\vartheta_0}{T_0} \end{cases} \quad (10)$$

式中, ϕ_0 表示选定的非线性函数; κ_g 表示第 g 模糊规则对应的输出; S_p 表示刺激因子; M 表示抗原数量; ϑ_0 表示平衡超参数; T_0 表示衰减常数; W_l 、 E_f 分别表示抗体和抗原的适应度。

当算法达到最大迭代次数时, 将具有最高适应度值的抗体和抗原作为包装线集成控制器的控制增益 J_r 和控制率 a_s , 以此完成对控制器参数的优化, 改进控制器的控制性能, 从而输出包装线集成控制量, 实现民爆企业自动化包装线的集成控制。

2 实例论证分析

本次测试主要是针对基于模糊免疫算法的民爆企业自动化包装线集成控制方法的实际应用效果进行验证与研究, 并通过对比实验的方式分析本文方法的性能有效性。

2.1 实验准备

本文实验以某民爆企业现有的自动化包装线设备为研究对象。该设备主要包括自动上料系统、自动输送带、封底机以及捆扎机等关键设备构成。其简化结构如图 1 所示。

根据图 1 所示的结构, 在 MATLAB/Simulink 平台上搭建相关模型, 并运用此模型开展仿真研究。仿真参数的具体配置详见表 1。

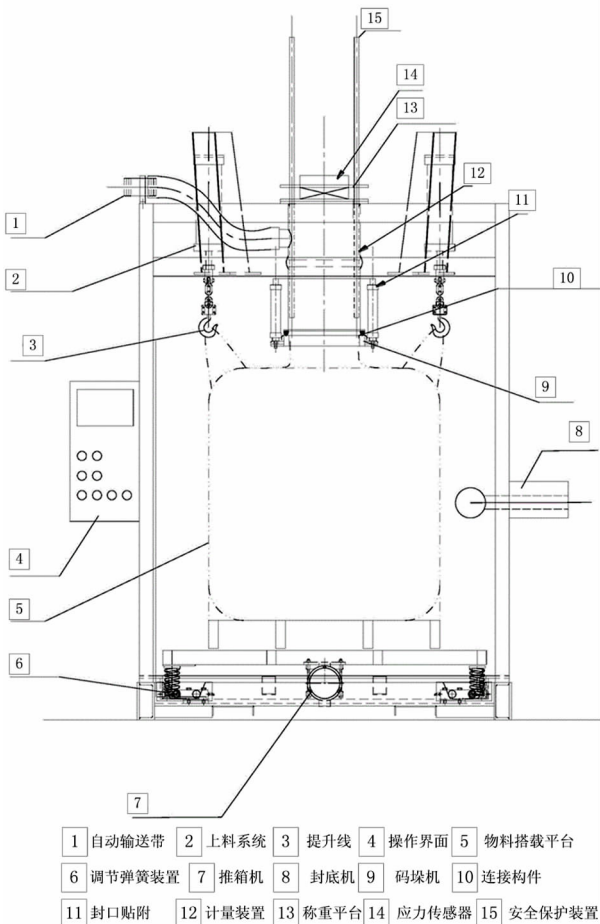


图 1 某自动化包装线简化结构

表 1 仿真参数

序号	参数	数值/描述
1	原料供给速率	50 kg/min
2	封口温度	180 ℃
3	输送机速度	1 m/s
4	控制系统响应时间	<100 ms
5	数据采集频率	1 次/s
6	计量精度	±0.5%
7	封口时间	2 s
8	仿真时间	100 s
9	仿真步长模式	变步长
10	最大步长	0.1 a
11	绝对误差容限	1e ⁻⁶
12	堆叠层数	10 层

基于以上准备,在仿真软件中设置仿真参数,并集成本文设计的控制方法,对该自动化包装线进行控制,并根据实验结果测试本文方法的有效性。

2.2 实验说明

实验环境硬件平台包括自动化包装线、人机界面和数据采集系统。其中,人机界面用于设置参数、监控运行状态和显示生产数据;数据采集系统用于实时记录生产过程中的产量、合格率、故障率

等各种数据。软件平台包括 MATLAB/Simulink、PLC 编程软件和 SPSS 数据分析软件。

实验过程如下:在没有任何原材料的情况下启动包装线,添加实际生产所需的原材料,逐步将参数调整到最佳水平,并记录生产数据;使用数据分析软件处理收集到的数据,并设计相应的集成控制策略,采用模糊免疫算法对控制器的控制参数进行优化调整。本文采用的模糊免疫算法的参数设定如表 2 所示。

表 2 模糊免疫算法参数设定

项目	取值
种群大小	$N_p = 200$
抗体维数	$G = 4$
变异概率	$P_m = 0.02$
克隆倍数	$n_c = 5$
隶属度阈值	$\theta_t = 0.5$
模糊规则数量	$m_s = 8$
相似度阈值	$\delta_g = 0.2$
激励度系数	$\alpha_k = 1.2$
最大迭代次数	$Q_n = 120$

利用优化后的控制器对自动化包装线进行集成控制,输出控制结果并分析。

实验采用对比的形式进行,选取当前较为成熟的文献[2] 基于电气自动化技术的方法(方法 1)、文献[3]基于嵌入式控制系统的方法(方法 2)包装线控制方法作为对照组方法,本文方法作为实验方法,并基于实验结果分析不同方法的实际应用能力。

2.3 自动化包装线集成控制结果

首先利用本文提出的方法对该自动化包装线进行集成控制,结果如图 2 所示。

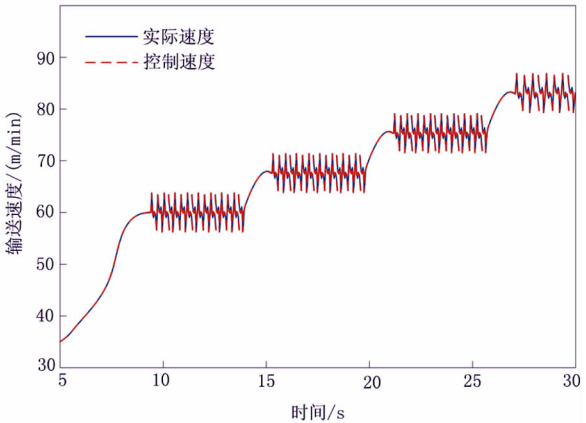


图 2 基于本文方法的包装线集成控制结果

根据图 2 可以看出,本文设计的方法能够较好地实现对自动化包装线实际输送速度的估计与跟

踪,从而达到对包装线集成控制的目的。

为验证本文控制方法的正确性,分别采用 3 种方法对该自动化包装线进行集成控制,统计不同方法下包装线不同时间内包装完成的产品数量,从而衡量控制后包装线的生产效率。实验结果如图 3 所示。

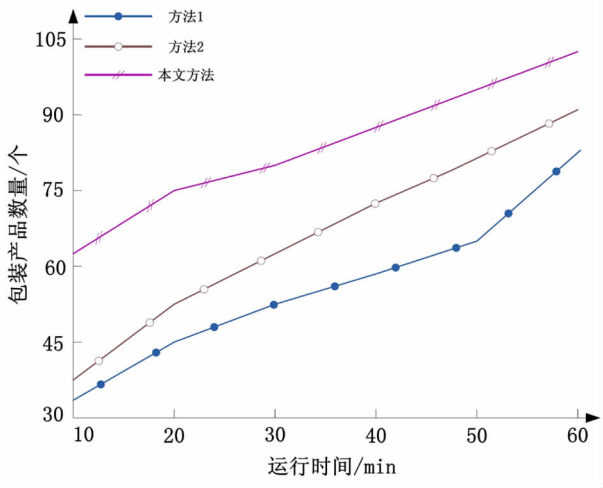


图 3 自动化包装线控制后的生产效率对比

从对比表格和分析可以看出,采用本文所描述的控制方法对包装线进行集成控制后,能够显著提高单位时间内包装完成的产品数量,从而提升了自动化包装线的生产效率。

2.4 对比实验与分析

在上述实验基础上,为综合体现本文控制方法在提高包装线生产效率方面的可行性,采用产出率作为评估指标。该指标指的是实际完成的产品数量与包装线理论生产能力的比值。数值越高,表明经过相应方法控制后,包装线的产能闲置越低,生产效率越高。对比结果如表 3 所示。

表 3 对比结果			
实验次数/次	产出率/%		
	方法 1	方法 2	本文方法
1	54.7	65.2	88.5
2	60.9	77.4	87.6
3	62.4	75.2	90.2
4	77.1	60.3	92.5
5	68.7	57.9	89.6
6	80.3	61.8	94.3

通过表 3 中的数据可知,利用对照组方法对包装线进行集成控制,对于包装线产出率的提升效果有限。相比之下,本文方法在包装线集成控制后能够实现更高的产出率提高,由此证明了本文方法在包装线集成控制应用中的优越性能。

3 结 论

本文提出的民爆企业自动化包装线集成控制技术,利用生物免疫系统的自我调节机制和模糊逻辑的灵活性和鲁棒性,有效解决了包装线上的不确定性干扰,并通过优化控制器参数,实现了包装线的智能化控制。该方法的应用不仅显著提高了民用爆炸物品包装的效率和安全性,还拓展了模糊免疫算法在工业自动化领域的应用边界,为解决类似复杂控制问题提供了新思路,具有重要的学术价值和实践指导意义。

参考文献

[1] 陈建丽. 汽车外壳加工焊接生产线的工艺流程与集成控制技术 [J]. 科技与创新, 2023, (19): 69—71.

[2] 江知航. 基于电气自动化技术的冷轧轧钢生产线自动控制研究 [J]. 邯郸职业技术学院学报, 2023, 36 (3): 31—32+45.

[3] 左志军. 嵌入式控制系统在汽车自动化生产线的研究与应用 [J]. 自动化博览, 2023, 40 (5): 68—73.

[4] GAO M. Application analysis of PLC technology in automatic control of ship auxiliary machinery[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 115(1): 130—132.

[5] 宋煜, 纪妙, 刘西尧. 基于云—边协同的烟草数控加工生产线智能控制方法 [J]. 微型电脑应用, 2023, 39 (2): 131—134.

[6] 王永贵, 王洋, 王强, 等. 基于西门子 PLC 控制系统的冲压机器人自动化生产线设计 [J]. 机器人技术与应用, 2023, (4): 32—36.

[7] 孙晋豪, 杨毅, 杜瑞, 等. 飞机总装生产线节拍闭环控制模型设计与分析 [J]. 航空制造技术, 2023, 66 (8): 38—46.

[8] 韦有共. 宽幅双向拉伸薄膜生产线 2 台横拉电机主从速度控制研究 [J]. 装备制造技术, 2023(4): 181—185.

[9] 陈平, 李攀, 秦明辉. 筒子纱自动包装生产线控制系统设计 [J]. 包装工程, 2021, 42 (19): 282—286.

[10] 王海鹏, 程学祥, 项丛政. 冶金生泥综合利用自动化生产线工艺控制 [J]. 工业炉, 2023, 45 (1): 62—64.

[11] 何瑞. 电机无速度传感器控制技术在包装生产线中的应用 [J]. 包装工程, 2022, 43 (7): 233—237.

[12] 杨晓华, 王传存. 岸桥平衡梁机器人智能焊接生产线 MES 控制方法 [J]. 制造业自动化, 2022, 44 (3): 154—157.

[13] 秦丽娜. 基于多 Agent 技术的混合微组装生产线协同控制方法 [J]. 制造业自动化, 2022, 44 (3): 176—179.

[14] 段汝林. 计算机控制技术在垃圾分拣生产线上的应用研究 [J]. 机械设计, 2021, 38 (11): 159—160.

[15] 李小鹏, 郭鹏. PLC 控制系统及模块编程设计在自动贴附生产线中的应用 [J]. 电子工业专用设备, 2023, 52 (3): 55—61.