

基于模糊控制多工位自动装粉系统设计与试验

Design and experiment of multi-station automatic powder loading system based on fuzzy control

牟向伟^{1,2}南香港¹于新业²陈林涛²MOU Xiang-wei^{1,2} NAN Xiang-gang¹ YU Xin-ye² CHEN Lin-tao²

(1. 广西师范大学电子工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 广西师范大学职业技术师范学院, 广西 桂林 541004)

(1. Electronic Engineering College, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Teachers College for Vocational and Technical Education, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

摘要:目的:解决米粉工厂化生产自动装粉生产线效率低、自动控制难等技术问题。方法:提出一种基于模糊控制多工位自动装粉系统,选取粉料高度的检测值与预设值的偏差 E_1 、偏差变化率 EC_1 和装粉车当前位置与待装粉位置偏差的绝对值 E_2 作为输入变量,电动机转速 U_1 和装粉系统仓门开度 U_2 作为输出变量。通过模糊控制规则调节电动机转速和装粉系统的仓门开度来提高装粉系统的工作效率。在西门子 S7-1200 PLC 平台上搭建此控制系统,并进行现场试验。结果:在 6 工位自动装粉输送生产线上,试验控制系统可容纳的工位数比现有控制系统增加了 4 个,作业效率比现有控制系统提升了 103.2%,单位时间内各工位产量提升了 31.4%。结论:试验对提高工厂化米粉生产线自动化具有借鉴意义。

关键词:米粉;PLC;模糊控制;多工位;装粉系统

Abstract: Objective: In view of the technical problems such as low efficiency and difficult automatic control of the automatic powder production line for factory rice noodle production. **Methods:** This research proposed a multi-station automatic powder loading system based on fuzzy control, selecting the deviation E_1 between the detected value of the powder height and the preset value, the deviation change rate EC_1 and the deviation between the current position of the powder loading car and the position to be loaded. The absolute value E_2 was used as the input variable, and the motor speed U_1 and the opening degree of the bin door U_2 of the powder loading system were used as the output variables. The working efficiency of the powder loading system

was improved by adjusting the motor speed and the opening of the bin door of the powder loading system through fuzzy control rules. The control system was built on the Siemens S7-1200 PLC platform, and the field test was carried out. **Results:** The test showed that for the 6-station automatic powder loading and conveying production line, the operation efficiency of this control system was improved by 103.2% compared with the existing control system, and the output of each station per unit time was increased by 31.4%. **Conclusion:** The number of stations that the system can accommodate 4 points have been raised. The experiment can be used for reference in the design of the control system for realizing high efficiency and automation of the factory rice flour production line.

Keywords: rice; PLC; fuzzy control; multi station; powder loading system

米粉作为南方地区的一种传统主食,深受消费者青睐^[1]。其生产流程主要包括碾米、混料、搅拌、装粉输送、熟化挤丝、剪粉、蒸粉、包装等环节^[2-3]。其中装粉输送是米粉加工的关键环节,装粉效率直接影响整个生产线的效率和产量。传统装粉以人工操作为主,米粉生产效率低。

装料自动控制类问题在工业生产中涉及到食品加工、冶金、选矿布料等众多领域^[4]。苏方臣等^[5]引入料位信号传感器检测每个料仓的料位,通过 PLC 控制布料小车实现了自动化运行。张斌等^[6]提出了一种基于射频识别定位的卸料小车自动寻仓布料系统,将定位数据和料位数据采集通过无线通信传输,通过 PLC 控制实现自动寻仓布料功能。上述方案实现了自动化控制送料,但是仅靠往返送料控制方式相对简单,因此,需进一步优化控制策略来解决此类问题。高遵波等^[7]考虑了料位变化快慢对布料点的影响,并采用模糊推理控制方法智能判断最佳布料点。葛琳琳等^[8-9]提出了基于 PLC 的模糊控制

基金项目:广西重点研发计划项目(编号:2021AB38023);桂林市科技开发项目(编号:20210208-2);广西研究生教育创新计划项目(编号:XYCSZ2022014)

作者简介:牟向伟(1982—),男,广西师范大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:535236205@qq.com

收稿日期:2022-05-17 **改回日期:**2022-09-19

算法结合超声波料位计和激光测距仪的反馈信息,解决了布料过程中小车定位不准和布料不均匀的缺点,提高了自动化水平。段鑫^[10]通过分析运煤量影响速度,采用非线性控制算法中的模糊算法控制对多级带式输送机运输系统进行智能调速,实现了输送系统智能化控制。

上述方案都是通过模糊控制算法提高送料效率,此方法相对于传统的闭环控制效率有所提升,但仅设计单一的二维模糊控制器变量较少,随着工位数增多,普通二维模糊控制系统送料效率有一定上限,需进一步优化。因此,研究拟提出一种基于 PLC 模糊控制的多工位自动装粉系统。通过理论分析明确粉料高度、粉料高度变化和装粉车位置 3 个变量因素对装粉效率的影响规律,并搭建模糊自动控制系统,进行仿真测试。同时将控制系统接入现场工作平台进行实际试验,优化控制策略,旨在提高装粉的工作效率和米粉的总产量。

1 米粉生产线整机组成与工作原理

1.1 整机组成

米粉多工位装粉装置结构见图 1。装粉车内粉料由大料斗搅笼供给,各工位的接粉料斗由装粉车在轨道上运行进行装粉作业。

1.2 整机工作原理

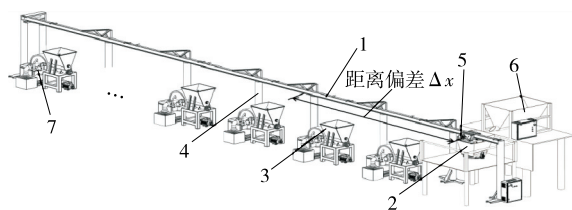
装粉车首先在大料斗搅笼零点处装满粉,每个工位上的超声波传感器间隔一定时间进行剩余粉料高度的采集,将高度信息反馈给 PLC 主控制器,按照接粉料斗需求量从大到小依次确定待装粉工位,PLC 输出控制信号驱动伺服电动机以设定的速度运行至该工位进行装粉,根据每个工位的实际需求控制装粉车的仓门大小。装粉车上装有开关量的最低位置检测粉料电容式传感器,当装粉车内粉料低于下限值将回到大料斗搅笼处进行补粉作业。

1.3 控制系统

控制系统结构见图 2。

控制系统硬件及功能:

(1) 控制器:选择西门子 S7-1200 PLC CPU 1215C DC/DC 系列,模拟量输出模块采用 SM1232,通信模块采用 CM1241(RS485)。



1. 轨道 2. 装粉车 3. 接粉料斗 4. 运行轨道固定装置 5. 伺服电动机 6. 大料斗搅笼 7. 熟化和挤粉装置

图 1 装粉生产线整机组成结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of the whole structure of the powder filling production line

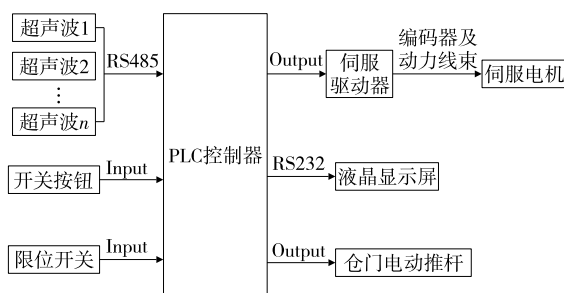


图 2 控制系统原理图

Figure 2 Schematic diagram of the control system

(2) 超声波传感器:使用电应普 DYP-A13-V1.0,电压范围为 5~24 V,测量范围为 25~200 cm。采用 RS485 的通信方式和 PLC 进行通信。超声波传感器安装在工位接料斗的左上方,主控制器根据不同的地址发送查询距离指令,PLC 可直接读取各工位的高度数据^[11]。

(3) 伺服电动机及驱动器:选用时代超群 130AEA15015-SH3 型号,额定工作电压 220 V,带刹车,额定功率 1.5 kW,转矩 10 N·m,额定转速 1 500 r/min。伺服控制器为 SD-300 与伺服电动机搭配使用。采用位置控制模式,通过接收的脉冲频率和数量来控制伺服电动机的距离和速度^[12]。使用大料斗搅笼处的限位开关来完成零点位置寻找。

(4) 仓门电动推杆:电动推杆安装在装粉车底部,伸缩可带动仓门的开度大小来控制实际的需求量。仓门开度大小和米粉的质量基本呈线性关系。使用控制器模拟量输出控制可调节行程完成对仓门开度的控制。

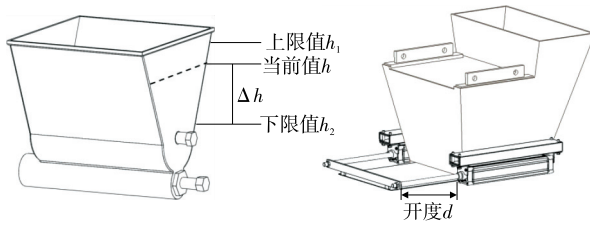
(5) 触摸屏:选用昆仑通态 TPC7062Ti 型号,用于监控系统的整体运行状态,设置相关参数,记录实际的生产数据。

(6) 限位开关:采用 NPN 型电感式接近开关传感器,金属片安装在装粉车底部,接近时限位开关导通发出控制信号。

2 制约装粉效率的变量因素

2.1 输入变量对装粉效率的影响

各工位接粉料斗内粉料高度 h 将直接影响后续熟化挤丝流程的质量以及该工位的产量。高度值 h 由超声波传感器进行采集,结合控制器通过滤波算法进行优化,取 5 个采样数据,去掉一个最高值和一个最低值,剩余 3 个采样数据求平均值^[13]。粉料高度值 h 有上限值 h_1 和下限值 h_2 要求,如图 3(a) 所示。粉料在此范围内熟化挤丝装置出粉顺畅效率高,粉料高度 h 低于下限值 h_2 将会导致熟化挤丝装置烧锅的故障,高于上限值 h_1 将导致下方的挤丝装置堵塞,均会造成该工位停产。将粉料高度 h 与高度下限值 h_2 的偏差 Δh 作为一个输入变量。考虑到每个工位熟化挤丝装置加工速度不同,导致各个工位接料斗剩余粉料高度变化的快慢程度不同。将粉料高度偏差变化率 $\Delta h / \Delta t$ 作为一个输入变量。



(a) 装粉接料斗上下极限示意图 (b) 仓门开度示意图

图3 接料斗上下限和仓门开度示意图

Figure 3 Schematic diagram of the upper and lower limits of the receiving hopper and the opening of the bin door

随着工位个数 n 的增加,装粉车运行距离随之增加,将装粉车当前的实际位置与待送工位位置偏差的绝对值记为 Δx 。位置偏差的大小将直接影响装粉的时间进而影响装粉效率,将其作为第3个输入变量,装粉车当前位置值由伺服电动机编码器反馈得出。

2.2 输出变量对装粉效率的影响

装粉车运行速度直接影响生产线效率,但运行速度过快产生的大惯性会导致装粉车定位不准。将装粉车运行速度 v 作为一个输出变量。为进一步提高装粉效率,实现一次多送的目标满足更多工位的生产需求,可根据每个接料斗内料粉高度和高度变化率来决定每个工位接料斗的实际需求量。如图3(b)所示,将装粉车仓门的开度 d 作为另一个输出变量,根据每个工位的接料斗实际需求实现精准装粉作业。

2.3 变量耦合关系

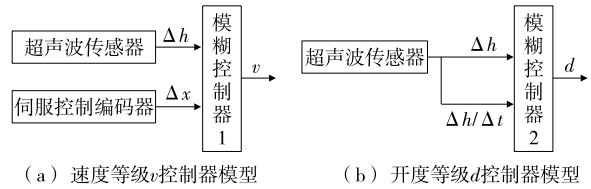
高度偏差 Δh 既与装粉车的运行速度 v 相关,也与装粉车仓门的开度 d 有关, Δh 越大, v 和 d 也相应地增大,变量之间存在耦合关系^[14]。利用模糊控制器本身解耦的特点,结合实际制约效率因素的关键变量,选取相关性较小高度偏差 Δh 和位置偏差 Δx 来共同决定装粉车行驶的速度 v ,装粉车速度等级 v 的控制采用如图4(a)所示的模型。选取相关性较大高度偏差 Δh 和高度偏差变化率 $\Delta h/\Delta t$,来决定料仓门的开度 d ,仓门开度等级 d 的控制采用如图4(b)所示的模型。

3 模糊控制算法

3.1 模糊控制系统模型

在模糊控制器中,选取粉料高度偏差 e_1 、位置偏差 e_2 和粉料高度偏差变化率 ec_1 作为输入变量,模糊化后分别用 E_1 、 E_2 和 EC_1 表示。电动机转速和装粉车的仓门开度作为输出语言变量,模糊化后分别用 U_1 和 U_2 表示,设计的模糊控制器结构如图5所示。

由图5可知, k_{e_1} 、 k_{ec_1} 、 k_{e_2} 为量化因子,用于将粉料高度偏差 e_1 、位置偏差 e_2 和粉料高度偏差变化率 ec_1 从物理连续值转化为模糊控制器输入变量 E_1 、 E_2 和 EC_1 。 k_{u_1} 和 k_{u_2} 为比例因子,用于将模糊控制器的输出量 U_1 和



(a) 速度等级 v 控制器模型 (b) 开度等级 d 控制器模型

图4 控制器模型原理图

Figure 4 Model of the controller

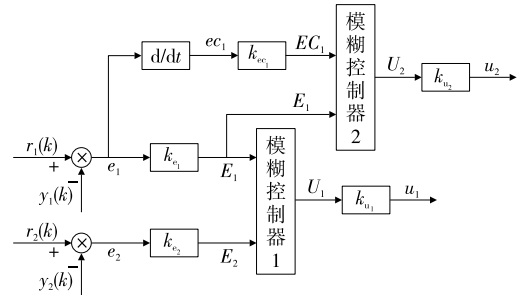


图5 模糊控制器结构图

Figure 5 The structure of the fuzzy controller

U_2 转换为实际的输出值 u_1 和 u_2 ^[15]。

$$e_1 = y_1(k) - r_1(k), \quad (1)$$

$$e_2 = y_2(k) - r_2(k), \quad (2)$$

$$ec_1 = [e_1(k-1) - e_1(k)]/T, \quad (3)$$

式中:

r_1 ——粉料高度下限值, m;

y_1 ——粉料高度的实际检测值, m;

$e_1(k)$ —— k 时刻的高度误差, m;

r_2 ——位置的设定值, m;

y_2 ——位置的检测值, m;

$e_2(k)$ —— k 时刻的位置误差, m;

$e_1(k-1)$ —— $k-1$ 时刻的高度误差, m;

T ——采样时间, $T=5 \text{ s}$ ^[16]。

3.2 模糊论域

根据米粉生产车间的实际情况,每个工位接料斗深度为1 m,设定接料斗的上限值为0.8 m,下限值为0.1 m,则接料斗的高度偏差的物理论域为 $e_1 = [0.1 \text{ m}, 0.8 \text{ m}]$,装粉车的位置偏差物理论域为 $e_2 = [0 \text{ m}, 30 \text{ m}]$ 、高度偏差变化率的物理论域为 $ec_1 = [-0.15 \text{ m/min}, 0.15 \text{ m/min}]$,将其转换为整数论域 $E_1 = [0, 1, 2, 3, 4]$ 、 $E_2 = [0, 1, 2, 3, 4]$ 和 $EC_1 = [-2, -1, 0, 1, 2]$,则量化因子为 $k_{e_1} = 5$ 、 $k_{e_2} = 0.133$ 和 $k_{ec_1} = 13.3$ 。电动机转速的物理论域为 $u_1 = [0 \text{ r/min}, 1000 \text{ r/min}]$,仓门开度的物理论域为 $u_2 = [0 \text{ m}, 0.6 \text{ m}]$,将其转化为整数论域 $U_1 = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]$ 、 $U_2 = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$,比例因子为 $k_{u_1} = 125$ 、 $k_{u_2} = 0.1$ ^[17]。

3.3 语言变量值和隶属度函数

语言值的个数将影响到模糊规则的复杂程度,结合

现场实际情况对输入变量 E_1 、 EC_1 和 E_2 ，输出变量 U_1 和 U_2 选用的模糊语言变量如表 1 所示。

在 MATLAB 中利用 FIS Editor 控件建立输入变量和输出变量的隶属函数，采用三角形隶属函数^[18]，如图 6 所示。

3.4 模糊规则表

为了提高装粉的生产效率，根据实际需求模糊规则设计的标准：高度偏差越大、位置偏差越远、高度变化率越快、速度越快、仓门开度越大；高度偏差适中、位置偏差适中、高度变化率为零、速度适中、仓门开度适中；高度偏差越小、位置偏差越近、高度变化率慢、速度越慢、仓门开度越小，建立模糊控制器的控制规则如表 2 所示。

3.5 模糊推理

在多输入多输出(MIMO)的模糊控制器中，每个输入均与输出在模糊规则表中相对应，而各个模糊规则之间又存在一定的联系，将这种对应的模糊蕴涵关系用 R_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 表示^[19]。在每个模糊蕴涵关系的互相互作用下，经运算后，能够搭建起一个总的模糊蕴涵关系^[20]。该系统中两输入的模糊控制器对应的模糊蕴涵关系搭建成

的总模糊推理规则为：

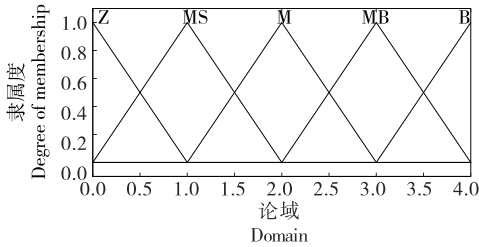
$$O_1 = [(E_1 \wedge E_2) \circ R_1] \vee [(E_1 \wedge E_2) \circ R_2] \vee \dots \vee [(E_1 \wedge E_2) \circ R_n], \tag{4}$$

$$O_2 = [(E_1 \wedge EC_1) \circ R_1] \vee [(E_1 \wedge EC_1) \circ R_2] \vee \dots \vee [(E_1 \wedge EC_1) \circ R_n], \tag{5}$$

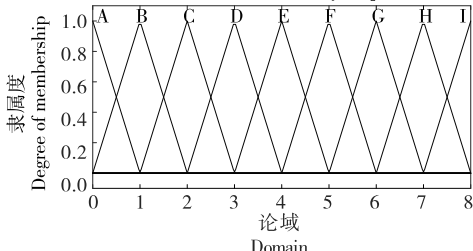
表 1 模糊语言变量表

Table 1 Fuzzy language variable table

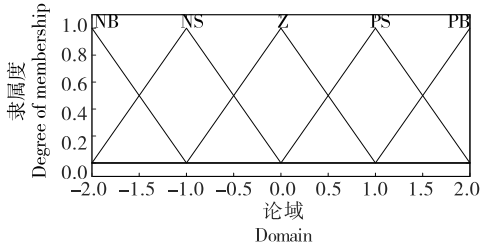
模糊语言	变量
不缺料(Z)、缺料(MS)、适中(M)、较缺料(MB)、严重缺料(B)	E_1 (高度偏差)
很近(Z)、较近(MS)、一般(M)、较远(MB)、很远(B)	E_2 (位置偏差)
负大(NB)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正大(PB)	EC_1 (高度偏差变化率)
最慢(A)、很慢(B)、慢(C)、较慢(D)、适中(E)、较快(F)、快(G)、很快(H)、最快(I)	U_1 (电动机速度)
较小(SS)、中小(MS)、小(S)、适中(M)、大(B)、中大(MB)、较大(BB)	U_2 (仓门开度)



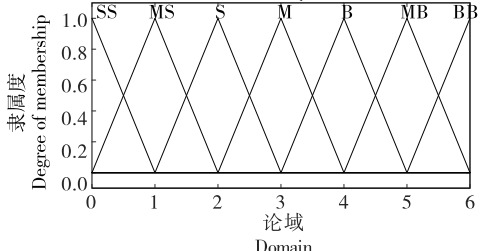
(a) 输出变量 E_1 和 E_2



(c) 输出变量 U_1 电动机转速



(b) 输出变量 EC_1 高度偏差率



(d) 输出变量 U_2 仓门开度

图 6 隶属度函数

Figure 6 Membership function

表 2 模糊控制器的控制规则

Table 2 Control rules of fuzzy controller

E_1	E_2					EC_1				
	Z	MS	M	MB	B	NB	NS	Z	PS	PB
Z	A	B	C	D	E	SS	MS	S	S	M
MS	B	C	D	E	F	MS	MS	S	M	B
M	C	D	E	F	G	MS	S	M	B	MB
MB	D	E	F	G	H	MS	S	M	B	MB
B	E	F	G	H	I	M	B	MB	MB	MB

式中:

O_1 ——模糊控制器的输出;

E_1, E_2, E_n ——模糊控制器的输入变量;

R_1, R_2, R_n ——模糊蕴涵关系;

$\wedge$ ——取交集;

$\vee$ ——取两者并集;

$\circ$ ——合成运算符。

在高度偏差 Δh 与位置偏差 Δx 之间蕴含的模糊推理规则为:

$$M_1 = [(\Delta h \wedge \Delta x) \circ R_1] \vee [(\Delta h \wedge \Delta x) \circ R_2] \vee \dots \vee [(\Delta h \wedge \Delta x) \circ R_{25}]。 \quad (6)$$

同理, O_2 在高度偏差 Δh 与 $\Delta h/\Delta t$ 高度偏差变化率之间蕴含的模糊推理规则为:

$$M_2 = [(\Delta h \wedge \Delta h/\Delta t) \circ R_1] \vee [(\Delta h \wedge \Delta h/\Delta t) \circ R_2] \vee \dots \vee [(\Delta h \wedge \Delta h/\Delta t) \circ R_{25}]。 \quad (7)$$

因此,选择最为直接的最大隶属度法对模糊集合进行解模糊处理。如果输出量模糊集合的隶属度函数有多个最大值,在工程中常采用最大值法等来获取输出量的

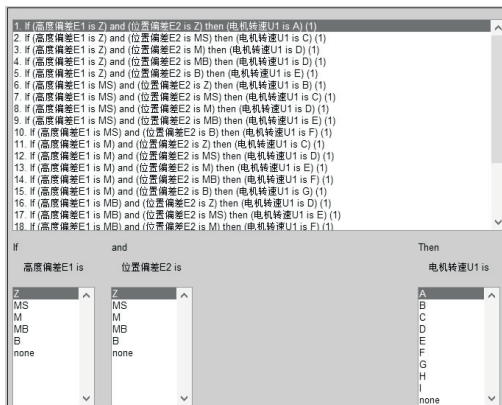
清晰值^[21]。代入计算 $\Delta h = 40, \Delta x = 15, \Delta h/\Delta x = 0$, 经过推理计算可得:

$$\{v = 500 \text{ r/min(电机转速)}、d = 0.3 \text{ m(仓门开度)}\}。 \quad (8)$$

3.6 仿真试验

采用 Matlab 2016b 中的模糊控制工具可设计输入隶属度和输出隶属度函数进行编辑,建立模糊控制规则,根据输入和输出隶属度函数的选取,每个模糊控制器总计共有 25 条规则,模糊控制规则是总结有经验的操作者或专家的控制知识经验,制定出的模糊条件语句的集合,通常简写成一个表即模糊控制规则表。通过 Mamdani 合成推理方法,采用“if A and B then C”的结构模式^[22]。设计窗口如图 7 所示。

由图 8(a)可知,电动机转速 v 由当前检测的高度偏差大小和位置偏差大小共同影响。当检测到高度偏差和位置偏差增大时,电动机输出的转速也随之增大,呈正相关关系。由图 8(b)可知,当高度偏差和高度偏差变化率增大时,仓门开度随之增大。综上,高度偏差对电动机的

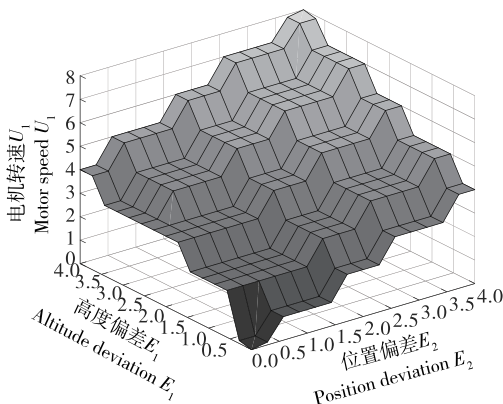


(a) 模糊控制器1

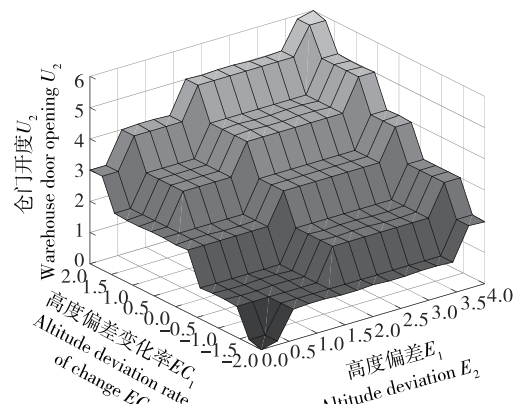


(b) 模糊控制器2

图 7 模糊控制规则
Figure 7 Fuzzy control rules



(a) 电动机转速大小三维关系图



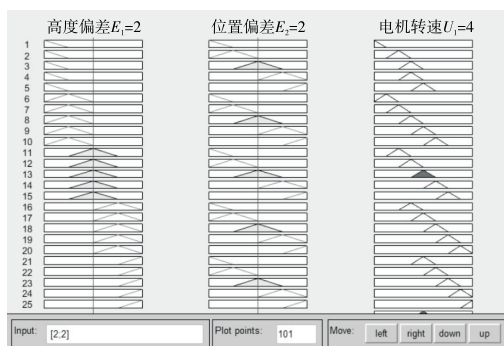
(b) 仓门开度大小三维关系图

图 8 模糊关系曲线图
Figure 8 Fuzzy relationship graph

转速和仓门的开度都有着直接的影响,验证了模糊规则和高度的耦合关系,说明试验设计的控制器符合预期设计的效果。

建立完控制规则表后,模糊控制系统建立完成、在模糊控制规则表中查看模糊控制规则,输出结果如图 9 所示。由高度偏差和位置偏差直接影响电动机的转速,高

度偏差和高度偏差变化率直接影响仓门开度,通过模糊观测器能够清楚地看到,当高度偏差为 2 时,位置误差为 2,高度变化率为 0,电动机转速为 4,仓门开度为 3。经清晰化处理后,高度偏差为 0.4,位置误差为 15,高度变化率为 0,电动机转速为 500 r/min,仓门开度为 0.3 m。与式(8)的结果一致。因此,验证了试验方案的可行性。



(a) 模糊控制器1



(b) 模糊控制器2

图 9 模糊控制观测器

Figure 9 Fuzzy control observer

4 PLC 自动控制系统设计

为了在 PLC 上实现模糊控制算法,选用博图 V15 对 S7-1200 进行上位机编程^[23]。主程序流程图如图 10 所示。主要编写的程序块:主程序位于 OB1 中,采样程序位于 FC1(包括采集和优化后各工位的粉料高度值和准粉车的当前位置值),将误差 E_1 、 E_2 和 EC_1 进行量化、输出量 U_1 和 U_2 进行比例清晰化的程序块 FB2(背景数据块 DB2)和程序 FC2,模糊控制器查询表程序块位于 FB3(背景数据块 DB3)和程序 FC3,装粉车速度控制和仓门开度控制的程序 FC4^[24]。装粉车的补料程序位于中断组织块中,其中 FB2、FB3 是模糊控制系统的关键组成部分。程

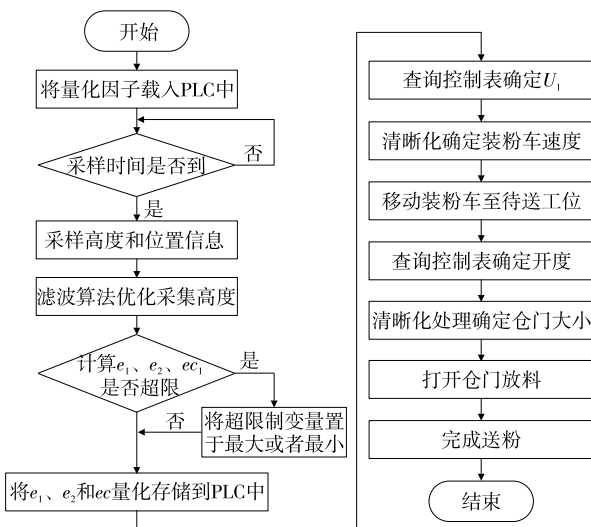


图 10 主程序流程图

Figure 10 Main program flow chart

序采用模块化设计,最终在主程序 OB1 块调用各个模块^[25-26]。

5 试验方案及结果

5.1 试验方案设计

在实验室搭建完整的控制系统硬件进行逻辑测试,验证控制程序逻辑可行性,并进行 6 工位现场试验和 n 工位仿真试验。

(1) 6 工位现场生产试验:2022 年 3 月 7 日,在广西桂林全州福坪工业园区康乐粉业有限责任公司米粉生产车间现有的 6 工位生产线进行现场试验。

(2) n 工位仿真试验:为最大程度发挥试验系统的效率,依据制定的模糊控制规则,在组态软件中按照对应比例设置进行仿真试验,如图 11 所示,计算出该系统能够满足的最大工位数 n 。

5.2 试验指标

以装粉的效率和单位小时总产量作为评价指标,并

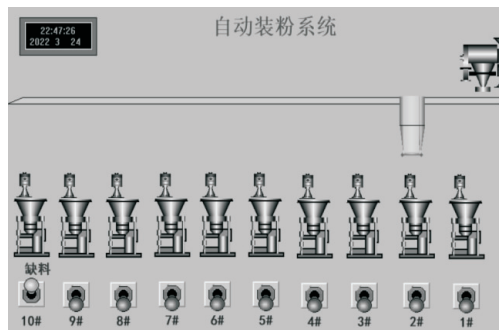


图 11 组态仿真界面图

Figure 11 Configuration simulation interface diagram

分别按式(9)和式(10)进行计算。其中,现有控制系统为普通的往返装粉系统,单趟只能装一个工位。

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_2} \times 100\%, \quad (9)$$

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100\%, \quad (10)$$

式中:

η ——装粉的效率提升,%;

t_1 ——现有控制系统的装粉时间,s;

t_2 ——试验控制系统的装粉时间,s;

P ——单位小时总产量提升,%;

P_1 ——试验控制系统的单位小时装粉产量,kg;

P_2 ——现有控制系统的单位小时装粉产量,kg。

5.3 试验结果及分析

(1) 6 工位现场试验:由表 3 可知,试验控制系统的装粉效率 η 比现有控制系统装粉作业提升了 103.2%,且装粉车有相当多的空余时间处于停留等待状态,为后续增加工位提供条件。在产量方面,经现场实际计算各工位的产量,试验控制系统单位小时内的总产量 P 比现有自动装粉的提升了 31.4%,均匀性也更好。

表 3 各工位装粉所需时间和单位小时装粉产量对比[†]

Table 3 Comparison of the time required for powder loading at each station and the output of powder loading per unit hour

工位号	装粉时间/s		单位小时装粉产量/kg	
	现有控制系统	试验控制系统	现有控制系统	试验控制系统
1#	38	42	144	196
2#	49	11	149	194
3#	59	52	151	195
4#	71	11	146	197
5#	80	63	151	199
6#	89	11	156	198

[†] 试验控制系统虽各个工位的装粉时间不固定但总时间为 190 s。

(2) n 工位仿真试验:最大工位的选取原则为记录 1# 工位加满粉料后,间隔一定时间读取当前的高度值 h ,可得出接料斗内粉料剩余高度 h 随时间 t 变化的拟合曲线。同时,记录各工位首次依次对各工位进行装粉的时间,相同时间内,系统能连续满足的最多工位数为试验系统的最大工位数 n 。

装粉车在搅笼处装满粉所需的时间为 30 s,装粉车一次最多可满足两个工位空仓补粉作业,接料斗的上限值 h_1 为 80 cm,下限值 h_2 为 10 cm。首次装粉按照从近到远的工位顺序进行补粉作业。由图 12 可知,当 n 为 11 时,考虑到装粉车还要回到远端的大搅笼处补粉,距离较

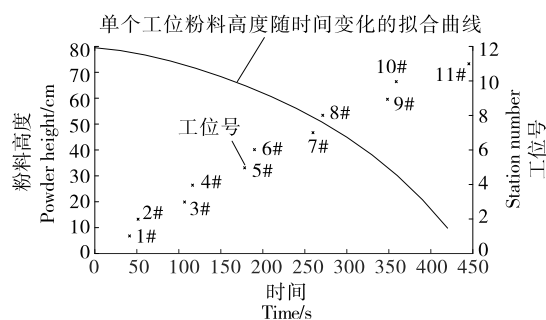


图 12 各工位装粉所需时间和单工位粉料高度随时间的变化

Figure 12 Comparison of the time required for powder filling at each station and the change of the powder height of a single station over time

远的工位粉料高度已低于粉料高度的下限值 h_2 。当装粉车首次装粉到 3 个及以上工位时,能满足的工位数更少,也不符合制定控制规则。

综上,粉料高度 h 直接影响输入变量高度偏差,曲线的斜率大小直接影响输入变量高度变化率,工位数和输入变量位置偏差直接相关,时间输出变量和电动机转速可由位置偏差 Δx 与时间 t 的比值得出。根据选取的输入输出变量和实际的物理论域在前文制定的模糊控制规则和约束条件下,试验系统能满足的最大工位数 n 为 10,工位个数提高了 4 个。10 工位单位时间内的总产量相比现有的 6 工位自动化装粉的提高了 117.9% 以上,米粉产量和质量都有了大幅度提升。

6 结论

(1) 将高度偏差、高度偏差变化率和位置偏差作为输出变量,将电动机转速和仓门开度作为输出变量,以两个二维模糊控制器组成一个模糊控制系统模型,解决了高度偏差变量的耦合问题,并进行仿真测试,验证了模糊控制器的可行性。

(2) 搭建了控制硬件系统,实现了 PLC 控制程序设计,并在实验室对控制程序进行了逻辑验证。与现有的控制方式相比,采用试验系统的米粉生产线单位小时内的米粉总产量提高了 31.4%,装粉效率提高了 103.2%。

(3) 对多工位进行了组态仿真试验,结果表明,试验系统最大可满足 10 个工位的满负荷连续运行,10 工位生产线单位小时总产量将比现有的 6 工位生产线提高 117.9% 以上。后续应进一步应用到称重和包装等更多的食品加工环节不断完善整个系统。

参考文献

- [1] 孙杰杰. 米粉加工原理与技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2006: 2-3.
- SUN Q J. Rice flour processing principle and technology [M]. Beijing: China Light Industry Publishing House, 2006: 2-3.

- [2] 关颖. 推动米线产业发展的挤压熟化新工艺[J]. 农产品加工, 2010(6): 34.
- GUAN Y. A new extrusion curing process to promote the development of rice flour industry[J]. Processing of Agricultural Products, 2010(6): 34.
- [3] 黄维安, 蒙毅, 陈磊, 等. 干米粉加工中常见问题的原因分析与对策[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(6): 158-165.
- HUANG W A, MENG Y, CHEN L, et al. Cause analysis and countermeasures of common problems in dry rice flour processing [J]. Grain, Oil and Food Technology, 2020, 28(6): 158-165.
- [4] 韦斌, 傅晓如, 吕齐明. 江西直条米粉与柳州螺蛳粉生产工艺的比较及创新[J]. 粮食与饲料工业, 2022(1): 32-33, 38.
- WEI B, FU X R, LU Q M. The comparison and innovation of the production technology of Jiangxi straight rice noodles and Liuzhou snail noodles[J]. Food and Feed Industry, 2022(1): 32-33, 38.
- [5] 苏方臣, 刘振, 刘波. 基于 PLC 的皮带卸料小车自动布料控制系统设计[J]. 工业控制计算机, 2015, 28(4): 167-168.
- SU F C, LIU Z, LIU B. Design of automatic distribution control system for belt unloading trolley based on PLC [J]. Industrial Control Computer, 2015, 28(4): 167-168.
- [6] 张斌, 邱立运, 邓平安. 基于射频识别定位的卸料小车自动寻仓布料系统[J]. 冶金自动化, 2022, 46(1): 90-97.
- ZHANG B, QIU L Y, DENG P A. Automatic silo-seeking and distribution system for unloading trolley based on RFID positioning [J]. Metallurgical Automation, 2022, 46(1): 90-97.
- [7] 高遵波, 徐庚举, 王兵. 基于 PLC 和模糊控制的卸料车自动布料系统设计[J]. 现代矿业, 2015, 31(8): 208-210.
- GAO Z B, XU G J, WANG B. Design of automatic distribution system for unloading car based on PLC and fuzzy control [J]. Modern Mining, 2015, 31(8): 208-210.
- [8] 葛琳琳. 模糊控制在布料小车定位系统中的应用[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2014, 34(5): 52-56, 69.
- GE L L. Application of fuzzy control in positioning system of cloth trolley[J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2014, 34(5): 52-56, 69.
- [9] 高强. 基于 PLC 的模糊控制在布料小车定位系统中的应用[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2014: 1-3.
- GAO Q. Application of PLC-based fuzzy control in positioning system of cloth trolley[D]. Anshan: Liaoning University of Science and Technology, 2014: 1-3.
- [10] 段鑫. 基于模糊控制算法的输送机智能控制系统的研究[J]. 机械管理开发, 2021, 36(3): 242-244.
- DUAN X. Research on conveyor intelligent control system based on fuzzy control algorithm [J]. Mechanical Management Development, 2021, 36(3): 242-244.
- [11] 朱艳艳, 张亮. 基于 VB.NET 的串行通信与分布式监测网络设计[J]. 电脑与电信, 2017(7): 29-32.
- ZHU Y Y, ZHANG L. Design of serial communication and distributed monitoring network based on VB.NET[J]. Computers and Telecommunications, 2017(7): 29-32.
- [12] 栾宗涛, 陶涛, 梅雪松, 等. 交流伺服系统脉冲序列位置控制研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 35-39.
- LUAN Z T, TAO T, MEI X S, et al. Research on pulse sequence position control of AC servo system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(12): 35-39.
- [13] LIU Z F, YANG C G, GONG Z F, et al. Adaptive digital filter for the processing of atmospheric lidar signals measured by imaging lidar techniques[J]. Applied Optics, 2020, 59(30): 9 454-9 463.
- [14] 耿标. 多变量耦合系统中变量对的选取问题[J]. 科技传播, 2010(14): 35, 41.
- GENG B. Selection of variable pairs in multi variable coupling systems[J]. Technology Communication, 2010(14): 35, 41.
- [15] 刘金琨. 智能控制[M]. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2021: 39-41.
- LIU J K. Smart controls[M]. 5th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2021: 39-41.
- [16] 张琳悦. 布料小车自动控制系统设计[D]. 唐山: 华北理工大学, 2019: 27-29.
- ZHANG L Y. Design of automatic control system for cloth trolley [D]. Tangshan: North China University of Technology, 2019: 27-29.
- [17] 从爽. 智能控制系统及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2013: 156-157.
- CONG S. Intelligent control system and its application[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2013: 156-157.
- [18] 郭俊欣. 翻滚目标逼近与跟踪的自适应控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 45-48.
- GUO J X. Adaptive control for approaching and tracking of rolling targets[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 45-48.
- [19] 宋璐, 卫亚博, 冯艳平. 基于模糊 PID 的温度控制系统的设计与仿真[J]. 电子设计工程, 2020, 28(21): 51-55.
- SONG L, WEI Y B, FENG Y P. Design and simulation of temperature control system based on fuzzy PID [J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(21): 51-55.
- [20] 李欣, 李海华. 基于模糊控制理论的交通信号控制算法研究[J]. 电子设计工程, 2012, 20(2): 75-77, 80.
- LI X, LI H H. Research on traffic signal control algorithm based on fuzzy control theory[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(2): 75-77, 80.
- [21] KELBOGILE M, LINDIWE B, KANZUMBA K, et al. Optimal power dispatch in a multi source system using fuzzy logic control [J]. Energy Reports, 2020, 6(S9): 1 443-1 449.
- [22] 王国杰, 母刚, 霍锦, 等. 基于模糊控制的南美白对虾冰—低温热泵干燥控制系统设计与试验[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 94-101.
- WANG G J, MU G, HUO J, et al. Design and experiment of penaeus vannamei freezing point and low temperature heart pump drying control system based on fuzzy control [J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 94-101.

(下转第 156 页)

- Southwest University, 2011: 2-15, 25-46.
 - [25] BRYANT B P, MEZINE I. Alkylamides that produce tingling paresthesia activate tactile and thermal trigeminal neurons[J]. Brain Research, 1999, 842(2): 452-460.
 - [26] 宋莹莹. 花椒贮藏过程中麻味物质含量降低机理的初步研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014: 28-38.
 - SONG Y Y. The preliminary studies on the mechanism of decrease in the content of numb taste components in *Z. Schinifolium* L.[D]. Chongqing: Southwest University, 2014: 28-38.
 - [27] YANG X G. Aroma constituents and alkylamides of red and green huajiao (*Zanthoxylum bungeanum* and *Zanthoxylum schinifolium*)[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2008, 56(5): 1 689-1 696.
 - [28] 曾剑超, 马力. 青花椒保鲜技术的研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2007, 26(2): 51-53, 56.
 - ZENG J C, MA L. Study on preservation technology of *Zanthoxylum Schinifolium* Sieb. et Zucc[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2007, 26(2): 51-53, 56.
 - [29] 蒋云华. 大红袍花椒小环境气调保鲜技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013: 19-21, 52.
 - JIANG Y H. Study on the preservation quality of Dahongpao pepper treated in modified atmosphere packaging conical flasks [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013: 19-21, 52.
 - [30] 常燕平. 减压贮藏新技术的研究与发展前景[J]. 粮油加工与食品机械, 2002(2): 8-9.
 - CHANG Y P. Research and development prospects of new technologies for decompression storage [J]. Cereals and Oils Processing (Electronic Version), 2002(2): 8-9.
 - [31] 刘锁兰, 高从元. 青花椒化学成分的研究[J]. 药学报, 1991, 26(11): 836-840.
 - LIU S L, GAO C Y. Study on the chemical constituents of *Zanthoxylum Schinifolium* Sieb. et Zucc[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 1991, 26(11): 836-840.
-
- (上接第 36 页)
- [21] XIE M Y, HAO X T, JIANG X, et al. Ultrasound-assisted dual-cloud point extraction with high-performance liquid chromatography-hydrate generation atomic fluorescence spectrometry for mercury speciation analysis in environmental water and soil samples[J]. Journal of Separation Science, 2021, 44(12): 2 457-2 464.
 - [22] 余益军, 孙兆海, 鲜放鸣, 等. 浊点萃取在环境有机分析中的影响因素及应用[J]. 理化检验: 化学分册, 2008, 44(7): 696-700.
 - YU Y J, SUN Z H, XIAN F M, et al. Recent progress on the application of cloud point extraction to the analysis of environmental organic pollutants[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2008, 44(7): 696-700.
 - [23] 张弛, 宋莹, 潘家荣, 等. 气相色谱-质谱大体积进样法测定果汁中 90 种农药残留[J]. 分析化学, 2015, 43(8): 1 154-1 161.
 - ZHANG C, SONG Y, PAN J R, et al. Determination of 90 pesticide residues in fruit juices using QuEChERS cleanup and programmable temperature vaporizer-based large volume injection by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2015, 43(8): 1 154-1 161.
-
- (上接第 60 页)
- [42] WU T, ZHAO J, DING M, et al. Preparation of selected spice microparticles and their potential application as nitrite scavenging agents in cured *Tilapia* muscle[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(9): 3 153-3 161.
 - [43] FRAQUEZA M J, LARANJO M, ALVES S, et al. Dry-cured meat products according to the smoking regime: Process optimization to control polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Foods, 2020, 9(1): 91.
 - [44] ZHONG A, CHEN W, DUAN Y, et al. The potential correlation between microbial communities and flavors in traditional fermented sour meat[J]. LWT, 2021, 149: 111873.
 - [45] 刘乃梁. 公共危机的社会共治: 制度逻辑与法治进路[J]. 江西财经大学学报, 2020(6): 114-124.
 - LIU N L. Social co-governance in public crisis: System logic and legal path [J]. Journal of Jiangxi University of Finance and Economics, 2020(6): 114-124.
-
- (上接第 80 页)
- [23] CHEN K, CHEN D X, SUN X S, et al. Container ocean-transportation system design with the factors of demand fluctuation and choice inertia of shippers [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 95: 267-281.
 - [24] 卢燕, 罗青华, 魏克新. PLC 实现的模糊 PID 控制器及在高炉布料系统中的应用[J]. 天津理工大学学报, 2008(2): 73-75.
 - LU Y, LUO Q H, WEI K X. The fuzzy PID controller realized by PLC and its application in blast furnace distribution system[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2008(2): 73-75.
 - [25] 丰会萍, 胡亚南, 闫琛钰, 等. 基于 TIA Portal 的多功能茶叶包装机控制系统设计[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 85-88.
 - FENG H P, HU Y N, YAN C Y, et al. Design of control system for multifunctional tea packaging machine based on TIA Portal[J]. Food & Machinery, 2017, 33(7): 85-88.
 - [26] RAJKUMAR K, THEJASWINI K, YUVASHRI P. Automation of sustainable industrial machine using PLC[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 1 979(1): 012049.