

DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90126

基于模糊神经网络的啤酒灌装精度控制技术

Beer filling precision control technology based on fuzzy neural network

刘 伟

LIU Wei

(吉林电子信息职业技术学院电气工程学院, 吉林 吉林 132000)

(School of Electrical Engineering, Jilin Technology College of Electronic Information, Jilin, Jilin 132000, China)

摘要:目的:解决目前啤酒灌装机工作效率低、灌装精度不高的问题。方法:分析啤酒灌装机的结构和工作原理,确定以二次补灌的重量偏差为指标的控制方式;在 PLC 控制器的基础上,利用模糊算法抗干扰能力强以及神经网络算法自适应性好的特点,提出一种基于模糊神经网络的 PID 控制策略,并进行仿真分析和灌装测试。结果:在设定目标范围内,灌装重量的最大偏差仅为 1.7 g,灌装合格率为 100%。与传统 PID 控制相比,该算法的响应速度提高了 55%,灌装精度提高了 50%。结论:试验方法可有效提高灌装精度和灌装效率,能够满足自动生产线运行稳定、快速、可靠的要求。

关键词:啤酒;灌装机;模糊 PID 控制;神经网络算法;PLC 控制

Abstract: Objective: Solve the problems of low working efficiency and low filling accuracy of beer filling machine. **Methods:** The structure and working principle of beer filling machine were analyzed, and the control mode based on the weight deviation of secondary supplementary filling was determined; On the basis of PLC controller, using the characteristics of strong anti-interference ability of fuzzy algorithm and good self-adaptability of neural network algorithm, a PID control strategy based on fuzzy neural network was proposed, and simulation analysis and filling test were carried out. **Results:** Within the set target range, the maximum deviation of filling weight was only 1.7 g, and the filling qualification rate was 100%. Compared with the traditional PID control, the response speed of the algorithm was improved by 55% and the filling accuracy was improved by 50%. **Conclusion:** The test method can effectively improve the filling accuracy and filling efficiency, and can meet the requirements of stable, fast and reliable operation of automatic production line.

Keywords: beer; filling machine; fuzzy PID control; neural network algorithm; PLC control

基金项目:吉林省科技发展计划项目(编号:20190302099GX)

作者简介:刘伟(1982—),女,吉林电子信息职业技术学院讲师,硕士。E-mail: liuwe321@126.com

收稿日期:2021-12-03

随着自动化技术的发展以及市场竞争的加剧,全自动灌装机成为灌装生产线上不可或缺的设备,在食品、医药等行业中扮演着十分重要的角色^[1-2]。灌装的效率和精度是衡量企业生产能力的重点指标,但就实际生产而言,部分企业还依靠人工手动调整灌装精度,生产效率低,生产成本低。虽然也有企业采用了自动化生产设备,但精度低、稳定性差。

灌装是啤酒生产过程中的关键环节。灌装机系统复杂,控制要素多,既要实现对流量、压力以及重量等指标的过程控制,还要同步控制传动系统的运动速度和位置^[3]。传统灌装过程需要人工复检,效率低,成本高,且采用的常规 PID 控制方法参数不能实时调节,有一定的局限性。因此,学者们^[4-7]不断将模糊算法、神经网络算法等先进控制理念融入到灌装过程中。其中,模糊控制具有抗干扰能力强的特点,能有效解决多变量、非线性等问题,但模糊规则的制定受主观因素影响大,缺乏自学习能力;神经网络控制是模拟人脑结构机理来实现对复杂系统的控制,具有很强的自学习能力,但不适用于表达基于规则的知识,容易陷入局部最优问题。

针对饮料产品自身特点及食品生产要求,研究拟将模糊算法与神经网络算法相结合,提出一种模糊神经网络 PID(FNN-PID)控制策略,使系统既具备推理归纳能力,又具有自适应能力,从而实现 PID 参数的动态调整,旨在为提高啤酒灌装机的精确性和稳定性提供依据。

1 灌装机结构及工作流程

灌装机工作流程包括清洗、传送、灌装、封装等,其中灌装是灌装机的核心工序^[8]。灌装机主要由传送带伺服机构 M_1 、灌装伺服机构 M_2 、称重装置、液体充灌装置以及重量检测装置等组成(图 1)。

该灌装机采用重力式灌装方式,分为称重区、灌装区以及检测补灌区 3 个工位。为提高灌装速度,共设 5 个主灌装接头和 5 个补灌接头,可根据生产需求在触摸屏上设置传送带速度、灌装重量以及灌装时间等参数。当按下启动按钮后,传送带将称重后的空瓶送至灌装区,灌

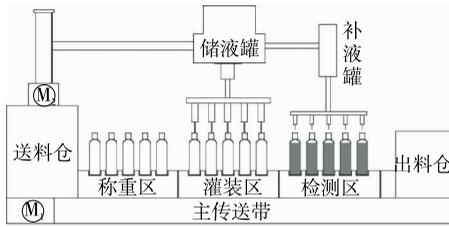


图 1 灌装机结构

Figure 1 Structure of filling machine

装接头下降至灌装位置,开启阀门,完成初次灌装任务。受泡沫、喷溅等因素影响,灌装的容积或重量存在一定误差,因此灌装完成后,需对灌装结果进行精度检测,不满足条件的需进行二次灌装。试验目的是验证控制策略在灌装机上的应用效果,因此只对二次补灌过程进行控制,以重量偏差为研究指标,具体灌装步骤为:

- (1) 称重区进行空瓶称重,并确认是否有灌装瓶。
- (2) PLC控制伺服电机 M_1 带动传送带将待灌装的空瓶传送到灌装区。
- (3) 伺服电机 M_2 驱动灌装接头下降至灌装位置。
- (4) 按照设定参数开始第一次灌装。
- (5) 初次灌装完成后,传送带将灌装好的饮料瓶送至检测区,并将未灌装的空瓶同步送至灌装区,做好下一次灌装准备。
- (6) 对已灌装的饮料瓶进行重量检测,计算瓶内液体的重量。
- (7) 计算重量偏差,采用 FNN-PID 控制器进行二次补灌。
- (8) 当检测值与设定值相同时,灌装完成。

2 控制系统设计

2.1 控制系统组成

控制系统由上位机、PLC 控制器、传感器、伺服电机、驱动器以及电磁元件等模块组成(见图 2)。PLC 控制器是系统的核心,在收到传感器采集的流量、位置、重量等数据信息后,根据设计要求向执行元件发送控制指令,控制伺服电机、电磁开关等执行器工作^[9-11]。上位机主要用来监测灌装过程,实现人机交互,具有参数设定、故障报警、数据监控等功能。

2.2 模糊神经 PID 控制器结构

为保证灌装精度,需解决系统存在的时变性问题。模糊神经网络结合了模糊控制精度高和神经网络自学习能力强的特点,在控制参数发生变化时只需更新样本数据重新训练即可,可移植性较强^[12-13]。因此,采用模糊神经网络在线更新 PID 参数,模糊神经网络 PID 控制器结构如图 3 所示。

试验设计的模糊神经网络采用双输入结构,输入神经元是灌装重量的偏差和偏差变化率,输出神经元为 PID 的 3 个性能指标参数 K_p 、 K_i 、 K_d ,包括输入层、模糊化层、模糊推理层以及输出层 4 个层级结构(见图 4)。

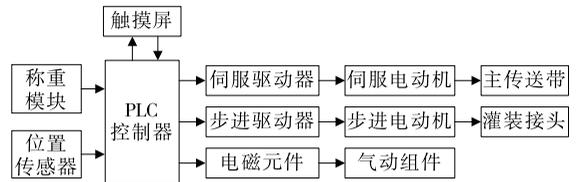


图 2 灌装控制系统组成

Figure 2 Composition of filling control system

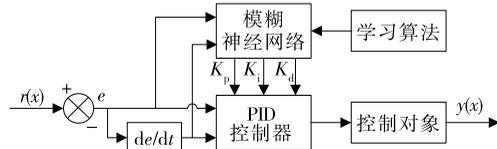
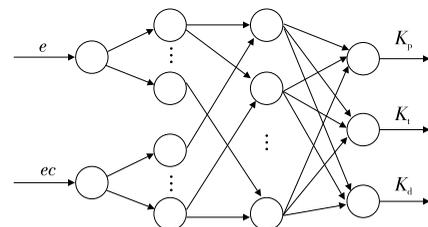


图 3 模糊神经网络 PID 控制器结构

Figure 3 Fuzzy neural network PID controller structure



输入层 模糊化层 模糊推理层 输出层

图 4 模糊神经网络结构

Figure 4 Fuzzy neural network structure

(1) 输入层:两个输入变量分别代表灌装重量的偏差 e 和偏差变化率 ec ,分别对应两个神经元节点,并通过激活函数输出到模糊化层,其表达式为

$$f_1(x_1) = x_1 \quad (1)$$

(2) 模糊化层:将输入变量 e 和 ec 模糊化,利用高斯函数[式(2)]作为评价标准,计算各语言变量作为隶属度函数的输入变量,从而达到模糊化的目的。

$$f_2(i, j) = \exp\left\{-\frac{[f_1(i) - c_{ij}]^2}{\sigma_{ij}^2}\right\} \quad (2)$$

式中:

c_{ij} 、 σ_{ij} ——高斯函数的中心位置和宽度。

(3) 模糊推理层:该层中节点和模糊规则是一一对应的,作用是进行模糊推理,用于计算每条规则对于各自节点的适应度,所采用的激活函数为

$$f_3(j) = \prod_{i=1}^N f_2(i, j) \quad (3)$$

式中:

N ——神经元之和。

(4) 输出层:实现变量的反模糊化,连接 PID 控制器的 3 个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 。所采用的激活函数为

$$f_4(i) = \omega \cdot f_3 = \sum_{j=1}^N \omega(i, j) \cdot f_3(j) \quad (4)$$

即

$$\begin{cases} K_p = \sum_{j=1}^N \omega(1,j) \cdot f_3(j) \\ K_i = \sum_{j=1}^N \omega(2,j) \cdot f_3(j) \\ K_d = \sum_{j=1}^N \omega(3,j) \cdot f_3(j) \end{cases} \quad (5)$$

式中：

ω —— 模糊推理层与输出层之间的连接权重。

根据系统控制特点，采用 $\Delta(x)$ 函数确立学习规则，使用梯度下降法实现网络训练的调控，进行隶属度参数及输出权值的学习训练，实现系统自适应和快速逼近实际值的目的，其目标函数为：

$$E(k) = \frac{1}{2} [r(k) - y(k)]^2, \quad (6)$$

式中：

$r(k)$ —— 理想输出；

$y(k)$ —— 实际输出。

2.3 模糊推理规则

将训练样本输入到模糊神经网络的输入层中进行离线训练，直到满足设定要求。利用映射关系将模糊逻辑和神经网络相结合，将模糊规则、隶属度函数转化为模糊神经网络的权重，利用神经网络的自学习能力来修正权重，不断逼近设定值，达到模糊推理的目的。

对模糊子集的语言变量进行设置：定义模糊子集为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，即 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}， e, ec 的论域均为 $[-1, 1]$ 。控制规则是模糊控制器的核心，取决于专家的经验 and 推理。针对灌装的工作特点制定 $\Delta K_p, \Delta K_d, \Delta K_i$ 的模糊控制规则如表 1~表 3 所示。

2.4 灌装控制流程

将 FNN-PID 控制算法应用于二次灌装控制过程中，进一步提高灌装精度。在完成初次灌装后进入检测区进行称重，根据两次称重结果计算灌装液体的重量，利用测量值与目标值之间的重量偏差进行补灌控制，FNN-PID 控制流程如图 5 所示。

3 仿真与结果分析

为验证所设计控制方法的有效性，在 MATLAB 软件

表 1 ΔK_p 控制规则表

Table 1 Control rule table of ΔK_p

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	ZO	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB

中使用 Simulink 建立仿真模块，将 FNN-PID 控制算法调入模型中进行阶跃响应仿真分析，并与常规 PID 及模糊 PID 进行对比，结果如图 6 所示。

为进一步说明几种算法的控制效果，将图 6 中曲线进行量化处理，从峰值时间、峰值、超调量、调节时间 4 个指标进行对比分析，结果见表 4。

由表 4 可知，与其他算法相比，FNN-PID 算法超调量最小，达到稳定状态时仅需 2.81 s。与常规 PID 控制相比，FNN-PID 的超调量和调整时间分别提高了 67% 和 55%，具有控制精度高、响应速度快、鲁棒性好等特点，符合灌装生产高效、准确的控制要求。

4 实验验证

搭建灌装试验平台，因灌装装置只在补灌工序中实

表 2 ΔK_i 控制规则表

Table 2 Control rule table of ΔK_i

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS
NM	NB	NB	NB	NB	NS	PB	ZO
NS	NM	ZO	PS	PM	PB	PS	PB
ZO	ZO	PS	PS	ZO	PS	PS	PM
PS	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	NS
PM	PM	NS	NS	PS	NB	NB	NB
PB	NS	NM	NM	NB	NB	NB	NB

表 3 ΔK_d 控制规则表

Table 3 Control rule table of ΔK_d

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NM	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NB	NM	NM	PS
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	PB	ZO	ZO	NM	NS	NS	ZO
PS	PB	PB	PB	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PM	PM	PM	PB	PS	PS	PB
PB	PM	PM	PM	PM	PS	PS	PB

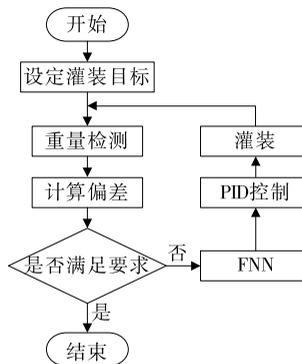


图 5 FNN-PID 控制流程

Figure 5 FNN-PID control flow

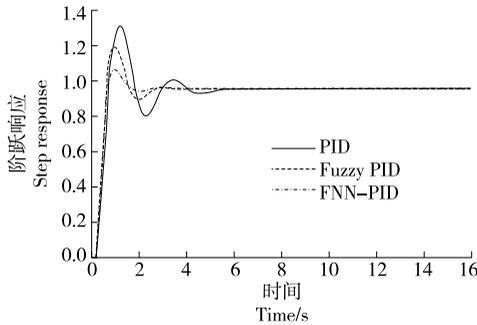


图 6 阶跃响应对比情况

Figure 6 Step response comparison

施了模糊神经控制,所以测试中忽略初次灌装工序,只对补灌流程进行性能测试。试验中先以 100 g 为目标重量进行灌装,共进行 3 组测试,每组测试分别采用常规 PID、模糊 PID 以及 FNN-PID 进行控制灌装。每个补灌接口各灌装 12 瓶,5 个接口共灌装 60 次,即 3 种控制方法各灌装 20 次。要求灌装精度为 ± 3 g,产品合格率要求 $\geq 98.5\%$,灌装完成后,在同一测量装置上进行称量并记录结果,忽略测量误差,结果见表 5。采用同一方法以 200 g 为目标重量进行第二次测试,要求灌装精度为 ± 5 g,产品合格率要求 $\geq 98.5\%$,结果见表 6。

表 5 灌装目标为 100 g 时的结果

Table 5 Results of the filling target with 100 g

灌装接口	常规 PID	模糊 PID	FNNPID	灌装接口	常规 PID	模糊 PID	FNNPID
1	102.5	99.5	100.8	3	101.9	99.6	99.6
1	101.8	102.4	99.6	3	102.4	98.2	99.7
1	99.5	102.6	99.1	4	99.6	98.8	99.9
1	102.1	101.8	100.6	4	102.5	102.6	100.9
2	98.2	103.5	100.2	4	104.2	99.5	100.1
2	102.6	98.3	100.6	4	101.5	100.5	100.5
2	102.5	100.4	99.3	5	99.2	102.6	99.9
2	100.9	99.2	100.9	5	98.1	98.3	99.8
3	96.7	98.8	100.7	5	97.7	100.8	100.4
3	98.5	102.9	99.2	5	102.6	99.2	99.3

表 6 灌装目标为 200 g 时的结果

Table 6 Results of the filling target with 200 g

灌装接口	常规 PID	模糊 PID	FNNPID	灌装接口	常规 PID	模糊 PID	FNNPID
1	203.1	202.6	201.4	3	203.9	197.6	201.3
1	202.6	197.4	198.5	3	197.2	196.3	202.4
1	196.2	196.8	198.9	4	204.9	198.5	199.2
1	195.4	203.5	202.2	4	194.5	204.6	201.2
2	203.6	202.8	202.1	4	198.8	203.4	203.2
2	195.2	204.1	202.5	4	196.6	197.2	198.4
2	198.3	196.9	198.8	5	202.4	198.3	200.3
2	204.6	197.3	201.2	5	204.3	196.6	202.7
3	205.7	205.1	198.7	5	198.2	204.7	202.6
3	199.2	204.2	198.8	5	204.1	201.2	198.6

表 4 仿真对比结果

Table 4 Simulation comparison results

控制方式	峰值	峰值时间/s	超调量/%	调节时间/s
常规 PID	1.36	1.270	36	6.25
Fuzzy PID	1.24	0.954	24	4.32
FNN-PID	1.12	0.936	12	2.81

由表 5 可知,当灌装目标为 100 g 时,PID 控制平均灌装误差为 2.0 g,最大绝对误差为 4.2 g;模糊 PID 控制平均灌装误差为 1.5 g,最大绝对误差为 3.5 g;FNN-PID 控制平均灌装误差为 0.5 g,最大绝对误差为 0.9 g。由表 6 可知,当灌装目标为 200 g 时,PID 控制平均灌装误差为 3.5 g,最大绝对误差为 5.7 g;模糊 PID 控制平均灌装误差为 3.2 g,最大绝对误差为 5.1 g;FNN-PID 控制平均灌装误差为 1.7 g,最大绝对误差为 3.2 g。从合格率角度看,3 种控制方案的合格率分别为 90%,95%,100%。为使分析更为直观,将以上结果进行绘图对比(见图 7、图 8)。

由图 7、图 8 可知,FNN-PID 控制精度高、稳定性好,与常规 PID 及模糊 PID 控制相比,平均精度分别提高了 49.5%,44.5%。

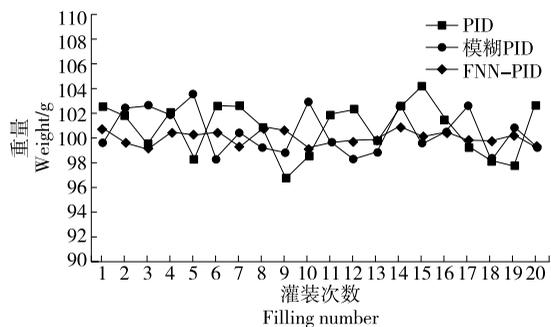


图 7 灌装目标为 100 g 时对比曲线

Figure 7 Comparison curve of the filling target with 100 g

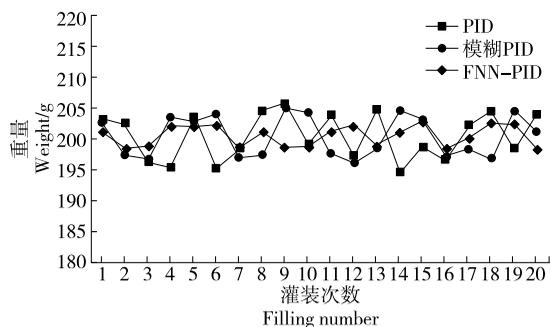


图 8 灌装目标为 200 g 时对比曲线

Figure 8 Comparison curve of the filling target with 200 g

5 结论

以 PLC 控制为基础,结合模糊算法抗干扰能力强以及神经网络算法自学习能力好的优势,提出了一种基于模糊神经网络的灌装机 PID 控制算法,并将其应用于饮料灌装过程中。结果表明,基于模糊神经网络的灌装机 PID 控制算法响应速度快,相比常规 PID 控制提高了 55%,可大大提高灌装机的效率。基于模糊神经网络的灌装机 PID 控制算法具有较高的控制精度,最大偏差仅 1.7 g,灌装合格率为 100%,灌装精度相比常规 PID 控制的提高了 50%,满足自动生产线运行稳定、快速、可靠的要求。后续可对整个灌装流程进行优化。

参考文献

[1] 刘成伟, 闻娜, 沈海军. 基于 PLC 的旋转型液体灌装机控制系统研究[J]. 食品工业, 2017, 38(12): 204-206.
LIU Cheng-wei, WEN Na, SHEN Hai-jun. Research on control system of rotary liquid filling machine based on PLC[J]. The Food Industry, 2017, 38(12): 204-206.

[2] 张柯, 张琦. 饮料食品定量灌装智能控制系统设计[J]. 食品工业, 2020, 41(11): 229-232.
ZHANG Ke, ZHANG Qi. Design of intelligent control system for quantitative filling of beverage and food [J]. The Food Industry, 2020, 41(11): 229-232.

[3] 肖明杰. 基于滑模变结构的灌装多电机系统高性能协同控制方法研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2021: 11-13.

XIAO Ming-jie. Research on high performance cooperative control method of filling multi-motor system based on sliding mode variable structure[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2021: 11-13.

[4] 陈思, 柴春雷. 基于模糊切换的食品灌装机压力自动控制方法[J]. 食品工业, 2021, 42(10): 205-209.
CHEN Si, CHAI Chun-lei. Automatic pressure control method of food filling machine based on fuzzy switching [J]. The Food Industry, 2021, 42(10): 205-209.

[5] 杨勇, 赵崇杰, 王佳欣, 等. 贮液缸液位系统双模糊 PID 控制研究[J]. 广东技术师范大学学报, 2021, 42(3): 33-38.
YANG Yong, ZHAO Chong-jie, WNAG Jia-xin, et al. A study on the control of the liquid level system of liquid storage tanks based on double fuzzy PID[J]. Journal of Guangdong Polytechnic Normal University, 2021, 42(3): 33-38.

[6] 周洁, 郑维, 张玉芳. 基于 RBF 神经网络的灌装机控制系统设计[J]. 包装工程, 2021, 42(19): 254-259.
ZHOU Jie, ZHENG Wei, ZHANG Yu-fang. Design of filling machine control system based on RBF neural network[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(19): 254-259.

[7] 申超群, 宰守香. 基于 RBF-PID 的啤酒灌装机贮液缸内液位控制[J]. 包装工程, 2017(5): 45-48.
SHEN Chao-qun, ZAI Shou-xiang. Liquid storage tank liquid level control of beer filling machine based on RBF-PID[J]. Packaging Engineering, 2017(5): 45-48.

[8] 杨静, 陈彩霞, 罗哲辉, 等. 多工位回转式灌装饮料包装旋盖机设计[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 125-129.
YANG Jing, CHEN Cai-xia, LUO Zhe-hui, et al. Design of multi-station rotary capping machine for filing beverage packaging [J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 125-129.

[9] 杨忠. 基于 PLC 的电子灌装计量系统设计[J]. 包装工程, 2011, 32(17): 87-90.
YANG Zhong. Design of PLC-based electronic measurement filling system[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(17): 87-90.

[10] 李新华, 蔡大宇, 彭辉, 等. 一种高速灌装自适应控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1 738-1 746.
LI Xin-hua, CAI Da-yu, PENG Hui, et al. Adaptive control approach for high-speed filling process[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1 738-1 746.

[11] 龙飞帆, 李荣隆, 刘芳. 多颗粒态油辣椒物料自动灌装机控制系统研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 114-116.
LONG Fei-fan, LI Rong-long, LIU Fang. Study on the control system of the automatic filling machine for the oil and pepper with multi particle state[J]. Food & Machinery, 2020, 36(7): 114-116.

[12] 李强. 高精度液体灌装动态称重控制系统研究[D]. 成都: 四川大学, 2021: 27-29.
LI Qiang. Research on high precision liquid filling dynamic weighing control system[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021: 27-29.

[13] CHENG Yan-ming, LIU Cheng, WU Jing, et al. Design of liquid filling machine positioning system based on RBF neural network active disturbance rejection controller[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(18): 172-176.