

基于模糊 PID 的不同液蛋配比控制系统研究

迟媛¹ 刘聪¹ 黄子龙¹ 王振浩¹ 赵国羽¹ 迟玉杰²

(1. 东北农业大学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: [目的] 优化液蛋生产中蛋黄液和蛋清液(全蛋液)的配比控制系统。[方法] 单片机通过触摸屏输入的蛋黄液和蛋清液(全蛋液)配比指令, 通过模糊 PID 控制算法, 控制变频器的频率及泵的转速, 与电导率仪在线监测的反馈信号进行比较, 以实现蛋清液和蛋黄液的实时精确配比; 并应用 Matlab 软件中的 Simulink 仿真比较了传统 PID 算法、粒子群优化 PID 算法和模糊 PID 算法的性能。[结果] 仿真结果表明, 模糊 PID 的超调量小、调整时间短且动态响应能力强。在配比试验中, 模糊 PID 算法的液蛋配比控制系统的最大电导率误差为 0.17 mS/cm, 蛋黄质量分数与实际值相差 3.4%, 系统达到稳定所需时间为 10 s 左右, 稳定时蛋黄质量分数最大误差为 0.8%。[结论] 试验设计的液蛋配比控制系统能够有效减小配比误差、响应速度快、稳定性好, 可实现实时在线监测与配比控制, 提高液蛋生产设备的智能化水平。

关键词: 液蛋; 模糊 PID; 控制系统; 质量配比

Control system of different ratios of liquid eggs based on fuzzy PID

CHI Yuan¹ LIU Cong¹ HUANG Zilong¹ WANG Zhenhao¹ ZHAO Guoyu¹ CHI Yujie²

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China;
2. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: [Objective] To optimize the ratio control system for egg yolk and egg white (liquid whole egg) in liquid egg production. [Methods] The microcontroller inputs ratio signals of egg yolk and egg white (liquid whole egg) via the touch screen. The frequency of the frequency converter and the speed of the pump are controlled through a fuzzy PID control algorithm. Compared with the feedback signal monitored online by the conductivity meter, a real-time and accurate ratio of egg white and egg yolk liquid is obtained. The performance of the traditional PID algorithm, particle swarm optimization PID algorithm, and fuzzy PID algorithm is compared by Simulink in Matlab software. [Results] The analysis results show that Fuzzy PID has a smaller overshoot, shorter adjustment time, and stronger dynamic response ability. In the ratio test, the liquid egg ratio control system based on fuzzy PID has a maximum conductivity error of 0.17 mS/cm, and the difference between yolk mass content and actual value is 3.4%. The time for the system to reach stability is around 10 s, with a maximum yolk mass fraction error of only 0.8%. [Conclusion] The designed liquid egg ratio control system can effectively reduce ratio errors, respond quickly, and maintain stability. The real-time online monitoring and ratio control are both realized, and the intelligence of the liquid egg production equipment is improved.

Keywords: liquid egg; fuzzy PID; control system; mass ratio

液蛋是指禽蛋经过分拣、清洗、打蛋、过滤、蛋黄液和蛋清液分离、均质、巴氏杀菌、灌装而加工得到的可以代替鲜蛋的产品^[1-2]。液蛋产品主要分为蛋清液、蛋黄液、全蛋液。蛋清液具有良好的起泡性和凝胶性被应用于蛋糕、冰淇淋、鱼糜制品和肉制品等^[3-8]; 蛋黄液具有良好的

乳化性被应用于沙拉酱、蛋黄酱^[8-13]; 全蛋液是意大利面、面包等食品的主要原料^[14-15]。食品工业中常利用蛋清液和蛋黄液的特性, 按照不同的蛋黄液和蛋清液(或全蛋液)配比制备具有不同功能特性的专用型蛋液。

目前, 先进的液蛋生产设备主要由荷兰 MOBA、法国

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(编号: 2022YFD2101005)

通信作者: 迟玉杰(1963—), 女, 东北农业大学教授, 博士。E-mail: yjchi323@126.com

收稿日期: 2024-10-25 改回日期: 2025-03-28

引用格式: 迟媛, 刘聪, 黄子龙, 等. 基于模糊 PID 的不同液蛋配比控制系统研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 112-120.

Citation: CHI Yuan, LIU Cong, HUANG Zilong, et al. Control system of different ratios of liquid eggs based on fuzzy PID[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 112-120.

ACTINI、丹麦 SANOVO、日本 NABEL 等公司生产^[16], 中国蛋品生产设备龙头企业主要生产上蛋、打蛋、洗蛋设备。液蛋加工企业无论采用进口设备还是国产设备, 不同蛋黄液和蛋清液(或全蛋液)配比制备均采用计量称重的方法, 根据配比计算所需蛋黄液和蛋清液(或全蛋液)的质量, 利用蛋黄液和蛋清液(或全蛋液)储罐底部的传感器称重后注入混合罐中, 获得所需配比的蛋液, 但无法实现液蛋产品配比的在线实时动态监测。通过液蛋配比控制, 不仅能够保证蛋液特性以满足产品需求, 还能提升生产效率和产品质量, 减少人工操作, 有效降低生产成本。

在配比控制方面, 王庆华等^[17]利用模糊 PID 算法构建了水肥配比模型, 通过控制阀门开度调节水肥溶液的配比。Fu 等^[18]提出了一些基于粒子群优化的水肥一体化系统, 但需要在调配罐搅拌混合后监测, 等待监测的时间较长, 无法实时监测配比。隋明鹏等^[19-20]应用模糊算法设计了一种乳化液自动配比装置, 但其设计过程相对复杂。目前, 有关液蛋配比控制领域的研究较少, 且液蛋产

品配比无法实现在线实时监测。

试验拟针对液蛋生产加工设备智能化程度低, 无法在线监测液蛋产品和实时控制液蛋配比的问题, 进行不同液蛋配比控制系统研究。单片机通过触摸屏输入的蛋黄液和蛋清液(全蛋液)配比指令, 通过模糊 PID 控制算法, 控制变频器的频率及泵的转速, 并与电导率仪在线监测的反馈信号进行比较, 以实现蛋清液和蛋黄液的实时精确配比。通过 Matlab 模拟仿真试验和实验室液蛋配比试验评价设计的控制系统, 旨在为实现在线监测液蛋产品并实时控制液蛋配比, 增加液蛋生产的智能化水平。

1 液蛋配比控制系统总体设计

1.1 液蛋产品加工工艺流程

液蛋产品加工工艺流程如图 1 所示, 将新鲜鸡蛋通过装载和上蛋机构送入清洗装置, 洗净的鸡蛋经打蛋机破壳分离为蛋清液和蛋黄液, 并分别贮藏至对应储料罐中。储料罐中的蛋清液、蛋黄液和添加酶的蛋液通过泵泵出, 经均质机均质后进行巴氏杀菌, 最后灌装为成品。

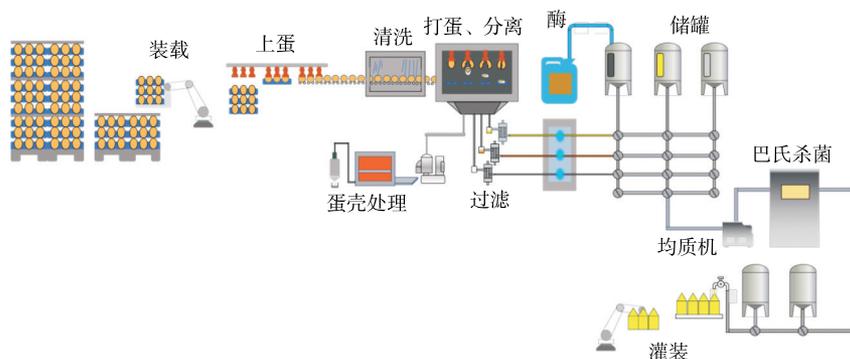
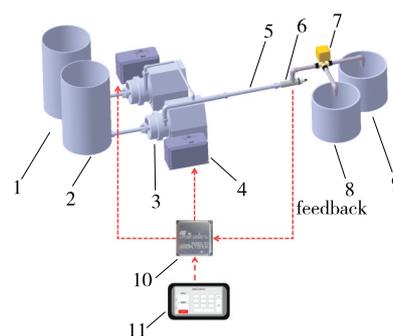


图 1 液蛋产品加工工艺流程

Figure 1 Process of liquid egg product processing

1.2 系统整体设计

实验室中不同液蛋配比控制系统装置主要由蛋黄液罐 1、蛋清液罐 2、离心泵 3、变频器 4、静态混合器 5 和在线配比检测仪器 6 等组成(见图 2)。在静态混合器 5 后端连接在线配比监测仪器 6, 可以实时监测液蛋产品配比。工作时, 操作人员操作触控屏 11 输出配比信号, 向单片机 10 发出指令, 单片机 10 将信号传递给变频器 4, 通过变频器 4 控制离心泵 3, 蛋清液和蛋黄液被泵入管道内, 最终于静态混合器 5 中汇合并充分混匀, 混匀后的蛋液流经在线配比监测仪器 6, 该仪器可实时监测并通过控制系统反馈液蛋配比, 与输入指令信号进行比较并向单片机传输信号进行反馈调节, 当监测到配比的蛋液不满足配比指令要求时, 蛋液经电动三通换向球阀 7 进入废液桶 8 中; 当蛋液达到要求时, 蛋液进入成品储料罐 9 中进行后续巴氏杀菌, 该过程为一次完整的液蛋配比控制过程。



1. 蛋黄液罐 2. 蛋清液罐 3. 离心泵 4. 变频器 5. 静态混合器 6. 在线配比监测仪器 7. 电动三通换向球阀 8. 废液桶 9. 成品储料罐 10. 单片机控制器 11. 触控屏

图 2 不同液蛋配比控制系统结构示意图

Figure 2 Structure of control system for different ratios of liquid eggs

1.3 液蛋配比控制系统

1.3.1 液蛋配比调配模块 在液蛋配比调配模块中, STM32单片机接收来自触控屏的数据和指令,通过 I/O 口将指令下达到执行机构,且单片机可以接收来自后端配比监测模块的模拟电压数据并进行处理。由于单片机输出的模拟量电压峰峰值为 3.3 V,但控制变频器需要的模拟量电压值为 0~10 V,因此需要通过 STM32 芯片输出 PWM 信号至 PWM 转模拟量电压模块,将 PWM 0%~100% 的占空比转换为 0~10 V 的模拟量电压,进而对应控制 0~50 Hz 变频器频率,从而实现离心泵转速的控制,调节泵输出蛋液流量,进而控制液蛋基料配比。

1.3.2 液蛋配比监测模块 通过前期试验发现,含不同蛋黄质量分数的蛋液电导率存在明显差异,因此不同蛋清液和蛋黄液质量配比可以用电导率来衡量,采用电导率仪作为在线配比监测仪器。不同种类鸡蛋蛋液的电导率有差异,因此用 HACH 便携式电导率仪测定褐壳蛋、粉壳蛋和白壳蛋的电导率与蛋黄质量分数之间的关系,该电导率测量范围为 0.01~200.00 mS/cm,测定结果及拟合曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,蛋黄质量分数与电导率极显著相关,拟合效果较好。褐壳蛋、粉壳蛋和白壳蛋的电导率与蛋黄质量分数的拟合式分别见式(1)~式(3)。

$$\sigma = 7.40 - 0.05n, \tag{1}$$

$$\sigma = 8.63 - 0.06n, \tag{2}$$

$$\sigma = 8.43 - 0.06n, \tag{3}$$

式中:

σ ——电导率, mS/cm;

n ——蛋黄质量分数, %。

按式(4)计算蛋黄质量分数。

$$n = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100\%, \tag{4}$$

式中:

m_1 ——蛋黄液质量, g;

m_2 ——蛋清液质量, g。

因此,在实际在线监测液蛋配比中,可以利用电导率

仪测定液蛋电导率的方法在线监测液蛋产品的蛋黄质量分数。该电导率仪可以实时监测读取电导率值,监测范围为 0.02~20.00 mS/cm,通过串口通信。在配比监测模块中,由电导率仪内部的 CPU 读取监测的电导率数值,通过串口将采集到的模拟量数值实时传递给液蛋配比调配模块中的 STM32 单片机,转换为配比信号,经过信号处理,与输入值比较得到偏差信号,且在整个控制过程中融合了模糊 PID 控制算法,最后实现配比的自动调整。

1.4 液蛋配比控制系统硬件设计

1.4.1 主控芯片的选型 不同液蛋配比控制系统中众多元器件都必须由单片机发出指令进行调控与操作,因此选择 ARM Cortex-M3 架构的 STM32F103ZET6 单片机,该单片机具有丰富的外设接口和高达 128 kB 的 Flash 存储器和 20 kB 的 SRAM 存储器,可以满足各种应用的需求。

划分 I/O 口的功能并分配对应外部器件,将配比监测模块的反馈接口接入 PA4 引脚,将单片机的 PA0 和 PA1 引脚作为 PWM 的两个输出端口,PA3 作为通信端口。

1.4.2 PWM 转模拟量电压模块设计 PWM 转模拟量电压模块电路原理如图 4 所示,其控制核心为 GP8101-F50-N-SW 芯片,该芯片可将 PWM 信号输入转换为模拟电压输出,这种转换不仅准确度高,且响应速度快,能够快速变化的 PWM 信号。此外,该芯片还具有低功耗的特性,使其在需要长时间运行的设备中具有良好的性能。

74LVC1G14GV 芯片具有高增益和低失真,以及快速响应速度和低功耗的特点,该芯片在电路中快速响应输入信号并提供清晰的输出信号,同时消除噪声和干扰,此外,它还能保护电路免受过电压和过电流的伤害,确保电路的稳定性和可靠性。

L6N137 芯片主要用于隔离高电压和低电压电路之间的信号传输。在 PWM 转模拟量电压模块电路中, L6N137 芯片的作用是确保信号的稳定传输,同时防止电气干扰。其隔离功能可以有效防止不同电压等级之间的干扰,提高电路的整体性能。

此外,模块中自带 LED 电路,主要用于显示 PWM 转模拟量电压模块是否处于供电状态和工作模式。

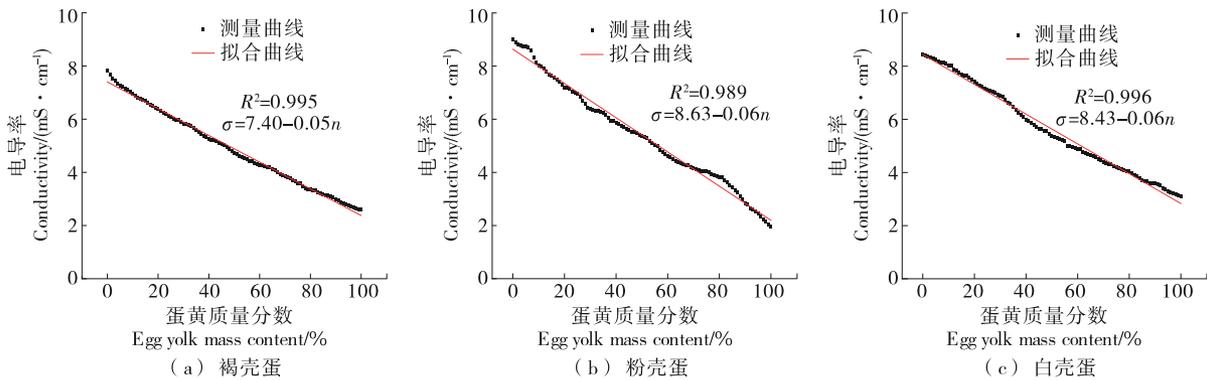


图 3 液蛋电导率与蛋黄质量分数的关系

Figure 3 Relationship between conductivity of liquid eggs and mass fraction of egg yolk

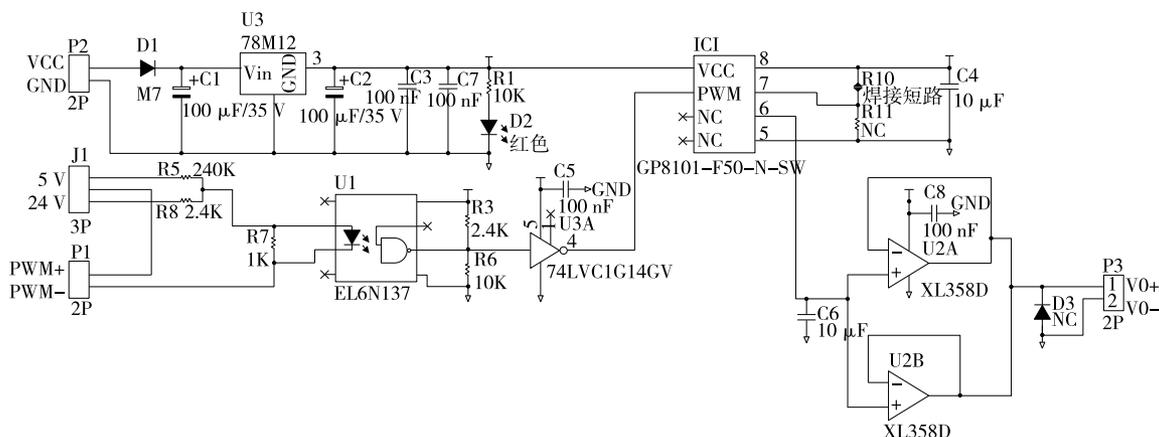


图4 PWM转模拟量电压模块原理图

Figure 4 PWM turn analog voltage module

1.4.3 电源模块电路设计 根据控制系统各模块、各器件的供电需求,分析得出电源所必需的一系列电压要求。离心泵,以及变频器需搭配380V三相电源;PWM转电压模块需搭配15V直流电源;触摸屏、STM32F103ZET6单片机需要搭配5V直流电源。

根据电源需求分析设计电源电路,直流电源由24V电源适配器提供,电源适配器具有稳定的输出电压和足够的电流供应能力,由于PWM转模拟量电压模块供电电压为15V,因此需要电源适配器搭配如图5所示的DC-DC电源模块。该模块的功能是将高电压转换为低电压,通过LM2596S-ADJ芯片可以将24V电压降为15V以满足设计需求,该芯片最高输入电压达60V,最大输出电流为3A。在电路中配备W103电压电位器,可以调节输出的电压,另配有LED电路,以通过指示灯显示DC-DC降压模块的工作状态。

2 模糊PID控制器设计

2.1 数学模型的建立

液蛋配比控制系统执行环节由变频器和离心泵组成。离心泵配备的电机为三相异步电机,在建立执行环节为异步电机的控制系统数学模型时,通常忽略异步电机的电磁惯性,将电机整体数学模型看作一个单输入单输出的一阶线性环节。输入变量为电源频率,输出变量

为电机转速^[21]。三相交流异步电动机的数学模型可以通过式(5)所示的近似线性化传递函数来描述:

$$G_m(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1}, \quad (5)$$

式中:

K_m ——三相异步电机传递函数的前向增益;

T_m ——时间惯性常数。

变频器采用的变频调速控制方式为压频比控制,在计算数学模型时通常将V/f变频器数学模型用一个一阶惯性环节来描述,即:

$$G_s(s) = \frac{K_s}{T_s s + 1}, \quad (6)$$

式中:

K_s ——变频器频率额定电压值与其输出频率的比值;

T_s ——V/f变频器升频时间的1/4。

根据电机铭牌,电机最大转速6000 r/min,最大电压380V,时间惯性常数取0.2,三相异步电机传递函数的前向增益 K_m 为3.3。变频器额定电压值为380V,输出频率为50Hz, K_s 为7.6。升频时间为1s,因此 T_s 取0.25。

将式(3)和式(4)相乘并代入数值得到系统整体的传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{25.08}{0.05s^2 + 0.45s + 1}. \quad (7)$$

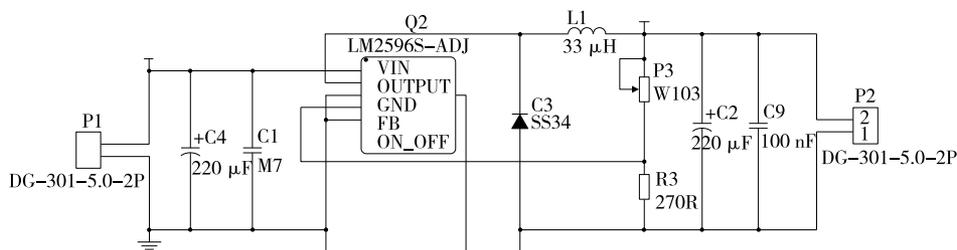


图5 DC-DC电源电路原理图

Figure 5 DC-DC power supply circuit

2.2 模糊PID控制器设计及仿真

由于PID控制具有操作简单、可靠性高、稳定性好等特点,被广泛应用于工业生产和科学研究中。但在液蛋生产中,需要更好的动态性能和适应能力,因此在传统PID的基础上引入模糊控制算法^[22-23]。模糊PID原理图如图6所示。

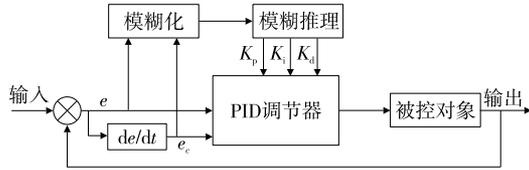


图6 模糊PID原理图

Figure 6 Fuzzy PID

2.2.1 模糊化 泵的最大流量为16.7 L/min,根据系统中对流量控制的要求与测试经验,建立 e 和 e_c 的基本论域为 $[-2, 2]$,模糊论域为 $[-3, 3]$, ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊论域均为 $[-3, 3]$,则 e 、 e_c 、 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 对应的量化等级为 $\{-3 -2 -1 0 1 2 3\}$ 。为进行模糊推理,调节模糊控制系统参数,通过量化因子实现基本论域到模糊论域中的离散化映射^[24]。

分别按式(8)、式(9)计算求得误差的量化因子 $K_e=1.5$ 和误差变化率的量化因子 $K_{e_c}=1.5$ 。

$$K_e = \frac{2e}{e_1 + e_2} \tag{8}$$

$$K_{e_c} = \frac{2e_c}{e_{c1} + e_{c2}} \tag{9}$$

式中:

- e ——误差的模糊论域;
- e_c ——误差变化率的模糊论域;
- e_1, e_2 ——误差的基本论域;
- e_{c1}, e_{c2} ——误差变化率的基本论域。

2.2.2 模糊控制规则 三角形隶属函数在模糊逻辑中具有简单、灵活、易于处理、适用广泛和直观等优点。在模

糊控制规则制定时,若误差较大且误差变化率较大,需要快速响应以减少误差;若误差较小且变化率趋近零,需要更平稳的调节以避免系统振荡。设定模糊语言为 $U = \{\text{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}\}$,表示为 $\{\text{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}\}$ ^[25],三角形隶属函数如图7所示。

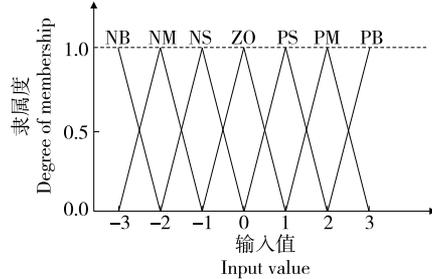


图7 三角形隶属函数

Figure 7 Triangle membership function

糊PID控制根据系统运行的不同状态,选取偏差 e 和偏差变化率 e_c 为输入,选取3个参数的增量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 为输出,利用模糊语言 U ,针对液蛋配比控制系统制定模糊控制规则表,综合考虑控制系统的稳定性、超调量及响应速度等,设计并开发得到的模糊控制规则见表1。

最后,通过模糊规则表进行模糊推理得到各参数的输出模糊向量,常见的解模糊方法有最大值隶属度法、重心法和加权平均法等。在不同液蛋配比控制系统中,使用重心法对每个输出模糊向量进行加权平均解模糊,即可得到 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 在模糊论域上的值,乘相应的比例因子即可得到 K_p 、 K_i 、 K_d 的实时值^[25]。

3 结果与分析

3.1 模糊PID仿真试验

3.1.1 阶跃仿真试验 利用Matlab软件中的Simulink工具箱针对模糊PID算法、粒子群优化PID算法(PSO-PID)和传统PID算法进行如图8所示的程序设计。

将模糊控制规则输入到Matlab中,模糊控制器模糊规则云图如图9所示。

表1 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rule of ΔK_p , ΔK_i , and ΔK_d

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

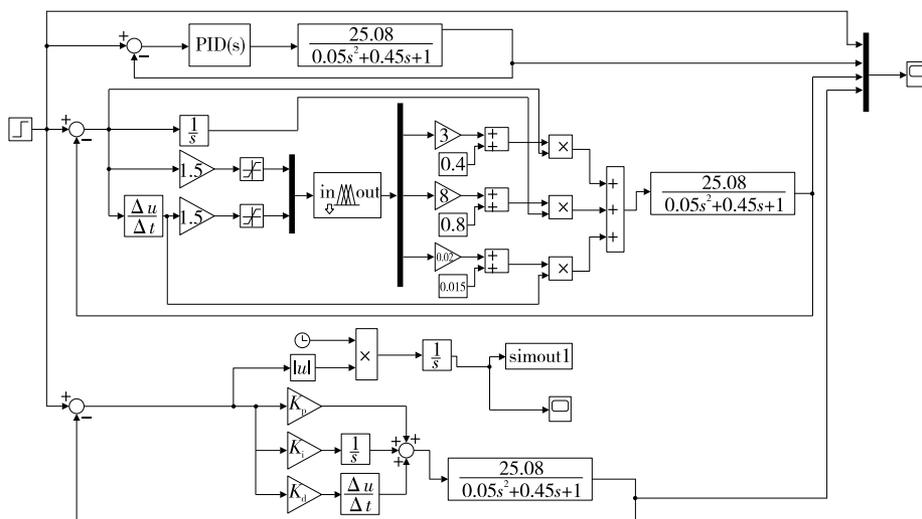


图8 模糊PID算法和传统PID算法对比仿真

Figure 8 Comparative simulation of fuzzy PID algorithm and traditional PID algorithm

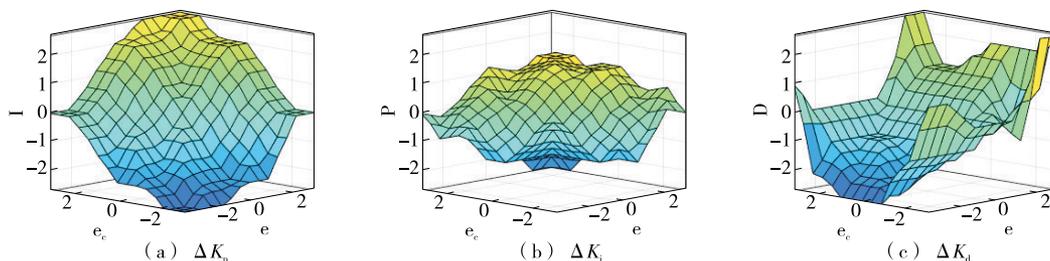


图9 模糊控制规则云图

Figure 9 Cloud images of fuzzy control rule

选取幅值为 16.7 L/min 的阶跃信号作为仿真系统的输入量;用试凑法设置传统 PID 算法与模糊 PID 算法的初始参数值,若比例系数过大,可能会导致系统过度反应,产生振荡或不稳定;若比例系数过小,系统可能响应不足,无法有效地减少误差。若积分系数过大,可能会导致系统积分过度,产生积分饱和或振荡;若积分系数过小,可能无法有效地消除稳态误差。若微分系数过大,可能会导致系统对噪声干扰过于敏感,产生不必要的调整;若微分系数过小,可能无法有效地预测偏差的变化趋势。因此,通过试凑法设置传统 PID 算法与模糊 PID 算法的初始参数值 $K_{p0}=0.4$ 、 $K_{i0}=0.8$ 、 $K_{d0}=0.015$;设定模糊 PID 算法中 P、I、D 的比例因子 $k_1=3$ 、 $k_2=8$ 、 $k_3=0.02$;通过粒子群优化 PID 算法 (PSO-PID),设置迭代次数和种群大小为 50,得到 P、I、D 的值分别为 2.760 2、0.980 8、0.093 1。设置仿真步长为 0.001 s,通过观察示波器得到仿真结果如图 10 所示。

由图 10 可知,传统 PID 算法、粒子群优化 PID 算法、模糊 PID 算法的最大超调量分别为 15.7%、6.2%、4.6%。因此,模糊 PID 算法降低了响应曲线的超调量,能够更有效地抑制系统的超调现象。超调量的降低不仅有助于提升系统的稳定性,还能优化其动态性能,使系统在面对各

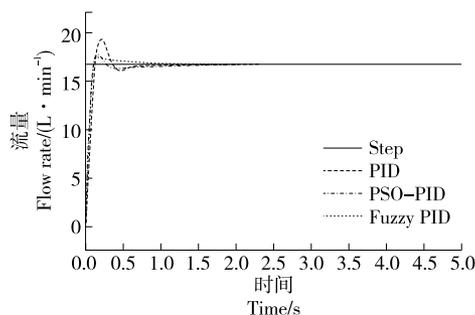


图 10 模糊PID算法和传统PID算法对比仿真结果

Figure 10 Simulation results of fuzzy PID algorithm and traditional PID algorithm

种变化时更加稳健。

传统 PID 算法、粒子群优化 PID 算法、模糊 PID 算法的调整时间分别为 2.230、2.617、1.597 s,应用模糊 PID 算法能够更快速地达到稳定状态,减少系统振荡或不稳定的可能性,提高系统的稳定性和可靠性。

综上,模糊 PID 控制器液蛋配比控制系统在超调量和调整时间上的表现均优于传统 PID 控制器,因此具有更好的控制性能。在液蛋配比控制系统中应用模糊 PID 算法,

不仅可以提高系统的响应速度,还能大大减少不合格蛋液的产生,降低加工成本。

3.1.2 跟踪性能仿真试验 在不同液蛋配比控制系统工作过程中,泵的流量需要实时调节。为确保配比的精确性和稳定性,泵流量的调节必须快速、精准,需要对控制

系统进行跟踪性能测试。在跟踪性能测试中,选取振幅为 16.7 L/min 正弦信号波作为输入信号,以模拟流量需求在实际工作环境中的动态变化情况。设置追踪时间为 5 s 进行仿真试验,3 种控制方式下控制系统对输入信号的追踪能力如图 11 所示。

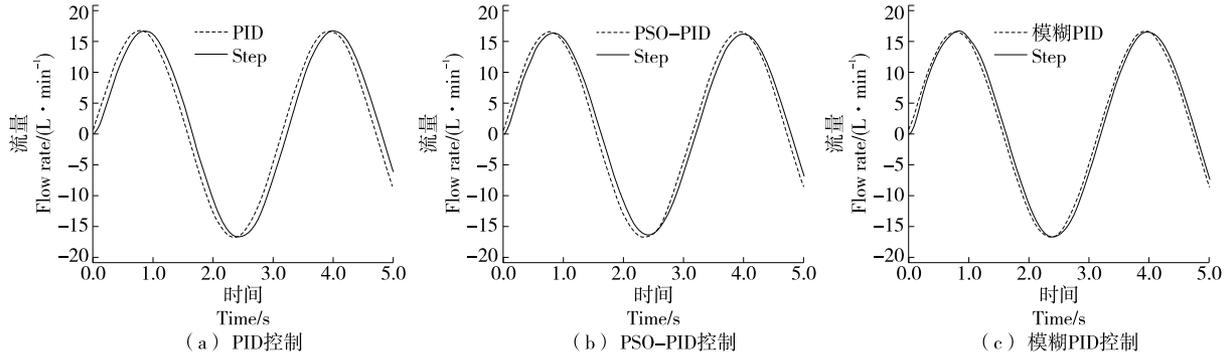


图 11 跟踪性能测试结果

Figure 11 Tracking performance test results

由图 11 可知,3 种控制方式下,跟踪信号和输入信号的曲线均较为接近,实际上二者之间存在幅度上的误差,这些误差即为跟踪信号与输入信号之间的误差。通过对

输入的正弦信号和跟踪输出信号进行对比运算,得出二者之间的跟踪误差。如图 12 所示,通过示波器的“Signal Statistics”模块读取最大误差数值见表 2。

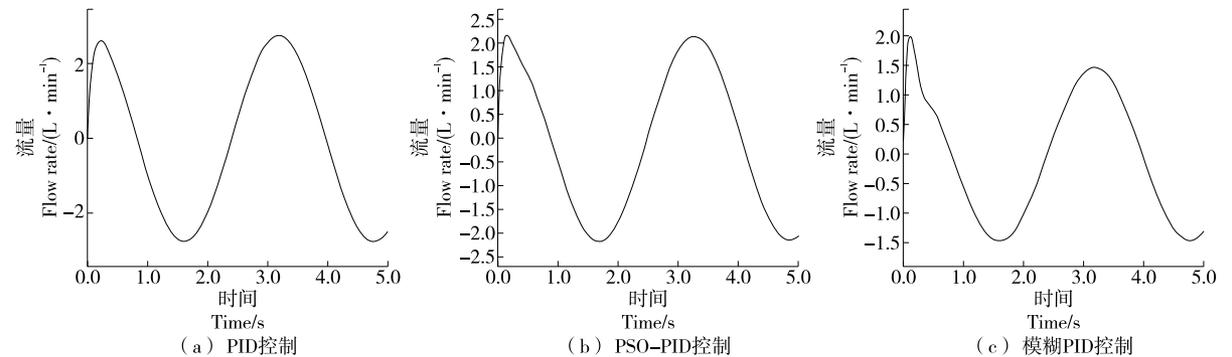


图 12 跟踪性能测试误差曲线图

Figure 12 Curves of tracking performance test errors

表 2 跟踪误差

Table 2 Tracking errors

控制方式	稳态跟踪误差/(L·min ⁻¹)
PID	2.76
PSO-PID	2.16
模糊 PID	2.01

由图 12 和表 2 可知,传统 PID、PSO-PID、模糊 PID 控制下系统达到稳定后的最大误差分别为 2.76, 2.16, 2.01 L/min。与传统 PID 和 PSO-PID 控制相比,模糊 PID 控制下的误差显著降低。

3.2 模糊 PID 液蛋配比控制试验

3.2.1 试验材料 在中国近 3 000 万鸡蛋产量中褐壳蛋

占比 81%、粉壳蛋占比 15%、白壳蛋占比 4%^[26]。因此,选取产自黑龙江省双城市农场生产当天的同一批次海兰褐(褐壳蛋)鸡蛋为试验原料,经清洗打蛋后用蛋液分离器分离蛋清和蛋黄,去除系带和附着在蛋黄上的蛋清,得到纯净的蛋清液和蛋黄液并分别持续搅拌。

3.2.2 模糊 PID 液蛋配比控制精确度试验 通过操作触控屏幕,输入配比指令,按下启动开关,使电机驱动泵工作, $m_{\text{蛋清液}}:m_{\text{蛋黄液}}$ 分别为 1:0,0:1,1:1,1:2,1:3,1:4,1:5,1:9,2:3,2:5,3:4,3:5,3:7,4:5,2:1,3:1,4:1,5:1,3:2,5:2,7:3,4:3,5:3,5:1,9:1 共 25 组,采用模糊 PID 算法进行配比试验。试验结果如图 13 所示。

由图 13 可知,最大电导率误差为 0.17 mS/cm,蛋黄质量分数与实际值相差 3.4%,有效减小了由于信号干扰等

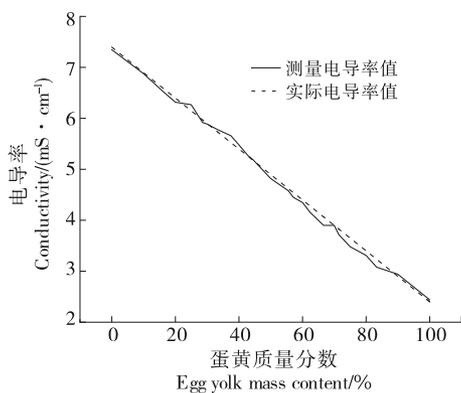


图13 控制精确度试验结果

Figure 13 Control precision test results

带来的误差,证明了模糊PID算法在液蛋配比控制系统中的优越性。

3.2.3 模糊PID液蛋配比控制稳定时间试验 操作触控屏,输入 $m_{\text{蛋清液}}:m_{\text{蛋黄液}}$ 为 2:1,60 s 后,将 $m_{\text{蛋清液}}:m_{\text{蛋黄液}}$ 调整为 5:4。每隔 1 s 记录电导率,并读取存储器中蛋黄质量分数,绘制蛋黄质量分数随时间变化曲线如图 14 所示。

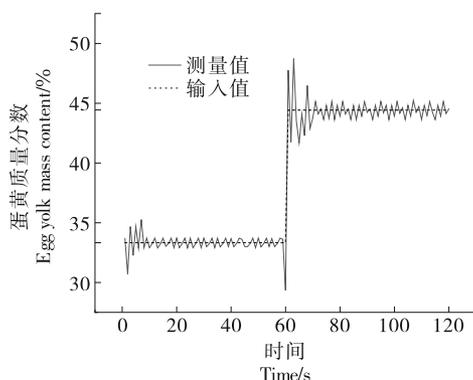


图14 蛋黄质量分数与时间的曲线

Figure 14 Curves of egg yolk mass fraction and time

由图 14 可知,系统达到稳定所需时间为 10 s 左右,达到稳定所需时间短,可以有效降低生产成本。在配比初始阶段蛋黄质量分数最大误差为 4.32%,但系统调节稳定后,蛋黄质量分数误差在 0.8% 以内,无较大偏差,试验设计的基于模糊PID算法的液蛋配比控制系统稳定,控制效果良好。

4 结论

(1) 设计了以 STM32F103ZET6 芯片为核心,基于模糊PID算法的液蛋配比控制系统。单片机通过触摸屏输入蛋黄液和蛋清液(全蛋液)配比指令,结合模糊PID控制算法控制变频器的频率及泵的转速,与电导率仪在线监测的反馈信号比较,可实现蛋清液和蛋黄液的实时精确配比。

(2) 根据变频器和三相电机数学模型及传递函数建立了液蛋配比控制系统的仿真控制模型。采用 Matlab 软件的 Simulink 工具箱对设计的控制系统进行模糊PID算法、粒子群优化PID算法及传统PID算法的对比分析,证明试验设计的基于模糊PID控制算法的不同液蛋配比控制系统较传统PID的超调量小、调整时间短,大大改善了液蛋配比控制系统的动态性能和稳定性。

(3) 试验设计的基于模糊PID算法的液蛋配比控制系统的最大电导率误差为 0.17 mS/cm,蛋黄质量分数与实际值最大相差 3.4%,有效减小了由于信号干扰等原因带来的误差,系统达到稳定所需时间为 10 s 左右,稳定时蛋黄质量分数最大误差为 0.8%,证明了模糊PID算法在该系统中具有控制优势,稳定性好。

参考文献

- [1] 袁宇涵,王岩,张亮,等.蛋制品加工技术与副产物综合利用研究进展[J].中国调味品,2022,47(10):192-197.
YUAN Y H, WANG Y, ZHANG L, et al. Research progress on processing technology of egg products and comprehensive utilization of their by-products[J]. China Condiment, 2022, 47(10): 192-197.
- [2] 温佳奇,王梓宁,马玉帛,等.二氧化氯结合加热法处理蛋源对液蛋产品特性的影响[J].食品研究与开发,2020,41(1):1-6.
WEN J Q, WANG Z N, MA Y B, et al. Effects of chlorine dioxide combined with heating method on the properties of liquid egg products[J]. Food Research and Development, 2020, 41(1): 1-6.
- [3] ATILGAN M R, UNLUTURK S. Rheological properties of liquid egg products (LEPS) [J]. International Journal of Food Properties, 2008, 11(2): 296-309.
- [4] 张根生,李婷婷,丁健,等.巴氏杀菌鸡蛋清液磷酸化改性及性质研究[J].食品与机械,2017,33(1):11-15.
ZHANG G S, LI T T, DING J, et al. Study on phosphorylated modification and properties of pasteurized egg white[J]. Food & Machinery, 2017, 33(1): 11-15.
- [5] 张根生,李琪,黄昕钰,等.蛋清蛋白凝胶改性及其在肉制品加工中的应用[J].食品与机械,2023,39(4):198-204.
ZHANG G S, LI Q, HUANG X Y, et al. Egg white protein gel modification and its application in meat processing[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 198-204.
- [6] LI P S, SUN Z, MA M H, et al. Effect of microwave-assisted phosphorylation modification on the structural and foaming properties of egg white powder[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 97: 151-156.
- [7] 段汝清,苏宇杰,王俊伟,等.瓜尔豆胶酶液改性蛋清蛋白凝胶性质的研究[J].食品与生物技术学报,2018,37(7):714-721.
DUAN R Q, SU Y J, WANG J W, et al. Effect of guar gum hydrolysate on gel properties of egg white protein[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(7): 714-721.

- [8] 张根生, 苏文文, 徐桂杨, 等. 低聚糖改性对蛋清蛋白凝胶性影响研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 228-232, 240.
ZHANG G S, SU W W, XU G Y, et al. Progress in the effect of oligosaccharide modification on gelability of egg white protein [J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 228-232, 240.
- [9] ZHAO W F, CHI Y J, CHI Y. Tracking transformation behavior of soluble to insoluble components in liquid egg yolk under heat treatment and the intervention effect of xylitol[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 254: 127272.
- [10] 帅益武, 张维, 阎微, 等. 焙烤食品中蛋黄夹心料的研制[J]. 食品与机械, 2007, 23(3): 151-154.
SHUAI Y W, ZHANG W, YAN W, et al. Research on processing of yolk mixture baking food[J]. Food & Machinery, 2007, 23(3): 151-154.
- [11] 张根生, 徐旖梦, 遇仕友, 等. 蛋黄凝胶形成机理及影响因素研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 1-5.
ZHANG G S, XU Y M, YU S Y, et al. Research progress on formation mechanism and influencing factors of egg yolk gel [J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 1-5.
- [12] MA Z H, CHI Y J, CHI Y. Cryoprotective role of saccharides in frozen egg yolks: water/ice tailoring effect and improved freeze-thaw stability[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109161.
- [13] 马婕, 杨晓雪, 迟玉杰, 等. 超声协同壳聚糖处理对蛋黄液乳化性质及蛋黄蛋白质结构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 81-89.
MA J, YANG X X, CHI Y J, et al. Effect of ultrasound-assisted chitosan treatment on emulsification properties of liquid egg yolk and structure of egg yolk proteins[J]. Food Science, 2023, 44(21): 81-89.
- [14] 刘鑫, 王步明, 曹龙泉, 等. 三聚磷酸钠对热诱导全蛋液凝胶性质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 202-206, 220.
LIU X, WANG B M, CAO L Q, et al. Effects of sodium tripolyphosphate on the gel properties of whole egg by thermal induction[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 202-206, 220.
- [15] ROSSI M, CASIRAGHI E, PRIMAVESI L, et al. Functional properties of pasteurised liquid whole egg products as affected by the hygienic quality of the raw eggs[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(3): 436-441.
- [16] 王勇, 朱静, 王晓峰, 等. 江苏省蛋品深加工与品牌蛋产销现状调研分析[J]. 中国家禽, 2019, 41(12): 75-80.
WANG Y, ZHU J, WANG X F, et al. Research and analysis on production and marketing situation of deep processing and brand of eggs in Jiangsu Province[J]. China Poultry, 2019, 41(12): 75-80.
- [17] 王庆华, 周晶, 侯俊才. 基于变论域模糊PID的水肥控制策略研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(11): 144-154.
WANG Q H, ZHOU J, HOU J C. Irrigation and fertilizer control strategy based on variable domain fuzzy PID[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2023, 51(11): 144-154.
- [18] FU C X, MA X, ZHANG L X. Fuzzy-PID strategy based on PSO optimization for pH control in water and fertilizer integration[J]. IEEE Access, 2021, 10: 4 471-4 482.
- [19] 隋明鹏, 张强. 一种乳化液自动配比装置的设计[J]. 自动化应用, 2020(10): 24-26.
SUI M Q, ZHANG Q. The design of an automatic emulsion proportioning device[J]. Automation Application, 2020(10): 24-26.
- [20] 张强. 基于模糊控制的乳化液自动配比系统的研究[J]. 矿山机械, 2018, 46(9): 13-16.
ZHANG Q. Research on automatic emulsion preparation system based on fuzzy control[J]. Mining & Processing Equipment, 2018, 46(9): 13-16.
- [21] 曹硕桐. 水电站机组油雾排放控制技术的研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021: 19.
CAO S T. Research and implementation of oil mist emission control technology for hydropower station units[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021: 19.
- [22] SOMWANSHI D, BUNDELE M, KUMAR G, et al. Comparison of fuzzy-PID and PID controller for speed control of DC motor using LabVIEW[J]. Procedia Computer Science, 2019, 152: 252-260.
- [23] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊PID控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172.
WANG S Y, SHI Y, FENG Z C. A method for controlling a loading system based on a fuzzy PID controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166-172.
- [24] 贺刚, 蔡晓华, 白阳, 等. 基于模糊PID的犍牛代乳粉奶液温度控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 266-276.
HE G, CAI X H, BAI Y, ZHU L, et al. Design and test of temperature control system of calf milk replacer solution based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 266-276.
- [25] 朱德兰, 阮汉铨, 吴普特, 等. 水肥一体机肥液电导率远程模糊PID控制策略[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 186-191.
ZHU D L, RUAN H C, WU P T, et al. Strategy on remote fuzzy PID control for fertilizer liquid conductivity of water fertilizer integrated machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 186-191.
- [26] 窦文浩, 王海岭, 黄子龙, 等. 基于电导率的多指标联合技术在蛋液组分检测中的应用[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 94-101.
DOU W H, WANG H L, HUANG Z L, et al. Application of conductivity combined with various other instrumental analyses in the detection of the freshness and yolk-to-white ratio of liquid egg[J]. Food Science, 2024, 45(5): 94-101.