

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.60135

# 基于模糊控制与 Transformer 的食品智能温控方法

由春辉<sup>1</sup> 李如成<sup>2</sup> 刘艳飞<sup>3</sup> 赵峰<sup>3</sup>(1. 新乡职业技术学院, 河南 新乡 453006; 2. 河南工业大学, 河南 郑州 450001;  
3. 郑州轻工业大学, 河南 郑州 450002)

**摘要:** [目的] 针对传统的温控方法(如 PID 控制)在应对动态、多变量复杂场景时存在响应迟缓、超调显著以及无法充分利用预测信息的局限性, 提出一种结合模糊控制与 Transformer 预测模型的食品智能温控方法, 旨在提高方法的温控精度、响应速度以及能耗效率。 [方法] 利用 Transformer 对未来多时间步的环境温度和目标温度进行趋势预测, 基于模糊逻辑进行实时的温度偏差控制, 并以披萨坯的温控为例进行实验验证。 [结果] 试验提出的智能温控方法在预测和控制性能方面均优于传统方法。与其他两种预测模型对比, 在 3 种时间序列预测中, Transformer 模型的平均绝对误差 (MAE) 降低了 21.30% (从 0.19 °C 降低到 0.15 °C), 均方根误差 (RMSE) 降低了 16.67%~25.00%。在冷藏库温控场景中, 与其他 4 种方法相比, 试验方法的温度超调量降低了 15.73%~39.27%, 响应时间缩短了 14.24%~33.52%, 稳态误差减小至 33.30%~62.50%。在烘焙炉温控场景中, 与其他 4 种方法相比, 试验方法的温度超调量降低了 11.24%~33.05%, 响应时间缩短了 11.54%~33.03%, 稳态误差减小至 40.00%~71.43%。 [结论] 结合模糊控制与 Transformer 的智能温控方法在复杂食品贮藏与加工场景下表现出卓越的预测精度和控制效果, 相较于其他方法具有显著的性能优势。

**关键词:** 模糊控制; Transformer; 智能温控; 食品保鲜; 预测控制

## Intelligent food temperature control method based on fuzzy control and Transformer

YOU Chunhui<sup>1</sup> LI Rucheng<sup>2</sup> LIU Yanfei<sup>3</sup> ZHAO Feng<sup>3</sup>

(1. Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang, Henan 453006, China; 2. Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 3. Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China)

**Abstract:** [Objective] In response to the limitations of traditional temperature control methods (such as PID control), including slow response, significant overshoot, and the inability to fully utilize predictive information in dynamic, multi-variable complex scenarios, an intelligent food temperature control method combining fuzzy control and the Transformer prediction model is proposed. This method aims to improve temperature control accuracy, response speed, and energy consumption efficiency. [Methods] The Transformer model is used to predict the trend of future multi-time-step ambient temperature and target temperature, and real-time temperature deviation control is implemented based on fuzzy logic. The proposed method is experimentally validated using pizza billet temperature control as an example. [Results] The experimental results show that the proposed intelligent temperature control method outperforms traditional methods in both prediction and control performance. Compared with other prediction models, the mean absolute error (MAE) of the Transformer model is reduced by 21.30% (from 0.19 °C to 0.15 °C), and the root mean square error (RMSE) is reduced by 16.67% to 25.00% across three time-series predictions. In the cold storage temperature control scenario, compared with the other four methods, the temperature overshoot is reduced by 15.73%~39.27%, the response time is shortened by 14.24%~33.52%, and the steady-state error is reduced by 33.30%~62.50%. In the oven temperature control scenario, compared with the other four methods, the temperature overshoot is reduced by 11.24%~33.05%, the response time is shortened by 11.54%~33.03%, and the steady-state error is reduced by 40.00%~71.43%. [Conclusion] The intelligent temperature control method combining fuzzy control and Transformer shows excellent prediction accuracy and control performance in complex food storage and processing scenarios, with significant performance advantages over other methods.

**Keywords:** fuzzy control; Transformer; intelligent temperature control; food preservation; predictive control

基金项目: 河南省科技厅技术研究项目(编号: 231023200602); 河南省高等学校重点科研项目(编号: 23B5320106)

通信作者: 由春辉(1983—), 男, 新乡职业技术学院讲师。E-mail: youch019@sina.com

收稿日期: 2024-09-11 改回日期: 2025-01-09

食品贮藏和加工过程中,温度控制是一项至关重要的任务,其直接影响食品的品质、安全性和贮藏寿命。例如,在冷链物流中,温度的轻微波动可能导致食品的快速变质,而在烘焙过程中,温度的不稳定会对产品的口感和外观产生负面影响<sup>[1]</sup>。食品温控过程受环境因素和设备性能的多重影响,其动态性和非线性特性给控制方法的设计带来了挑战<sup>[2]</sup>。随着食品工业向智能化和高效化发展,对温控方法提出了更高的要求:不仅要能够实时响应环境变化,还需具备对未来趋势的预测能力,同时在能耗和运行成本上保持竞争力<sup>[3]</sup>。

目前,国内有关温控技术的研究主要集中在优化传统的PID控制方法上,如通过参数自适应调整提升控制性能,该方法简单易行,但对于复杂的非线性温控场景,其性能提升有限<sup>[4-5]</sup>。此外,模糊控制作为一种基于规则的非线性控制方法被广泛应用于食品温控中。模糊控制能够很好地应对环境的不确定性,但在处理多时间步趋势预测方面能力不足。刘向勇等<sup>[2]</sup>对传送带速度和温度控制回路进行了单独处理,设计了用于食品冷冻温度控制的模糊控制系统;测试结果表明,所设计的控制系统通过选择允许快速响应。相比之下,国外研究更加关注智能化和数据驱动的方法。例如,基于深度学习的预测模型[如长短期记忆网络(LSTM)和门控循环单元(GRU)]在时间序列预测中表现良好,但其高计算复杂度限制了其在嵌入式平台中的应用<sup>[6-7]</sup>。强化学习技术也被引入食品温控领域,通过优化控制策略提升方法性能<sup>[8]</sup>。然而,其训练过程的高复杂性和模型的不稳定性使其应用难度较大<sup>[9]</sup>。此外,国外还尝试基于多模态数据融合的控制方法,通过整合温度、湿度、光照等信息构建复杂控制系统,但该方法增加了系统设计的实施成本<sup>[10-11]</sup>。

尽管现有研究在温控技术上取得了显著进展,但仍存在不足。首先,传统PID控制和模糊控制方法难以适应动态复杂的多变量环境,其实时性和精度受到限制<sup>[12]</sup>。其次,大多数控制方法仅基于当前状态进行调节,缺乏对未来温度趋势的预测能力,难以实现前瞻性的优化控制<sup>[13]</sup>。再者,尽管深度学习模型具有强大的预测能力,但其高计算复杂性限制了其在嵌入式设备中的应用<sup>[14]</sup>。此外,多模态融合方法的实现需要高成本的传感器部署和复杂的算法设计,对普通食品场景的适用性较低<sup>[15]</sup>。

研究拟提出一种结合模糊控制与Transformer模型的智能温控方法。Transformer模型则通过其强大的时间序列预测能力,提供未来多时间步温度趋势预测,为控制方法的优化提供前瞻性支持<sup>[16]</sup>;模糊控制模块利用其在处理非线性和不确定性问题上的优势,实现实时温度调节。并以披萨坯的温控为例,开展所提方法的实验验证,旨在为食品行业的智能化温控提供一种创新解决方案。

## 1 温控方法

试验方法从方法架构、模糊控制模块、预测模块及协同机制4个方面进行阐述,其具体架构如图1所示。

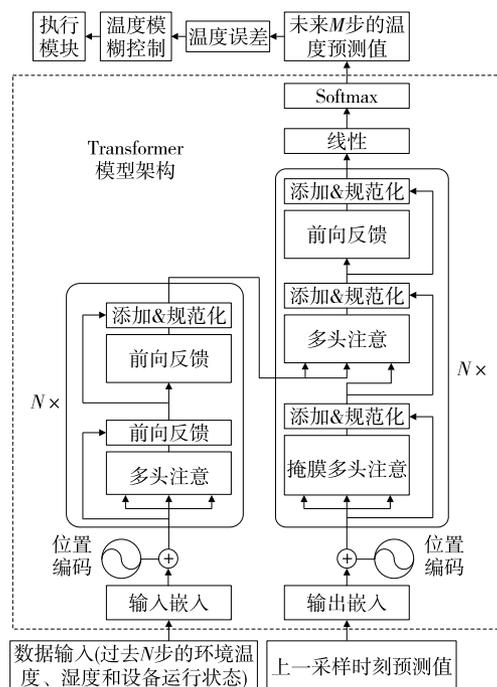


图1 温控方法框架图

Figure 1 Framework of the proposed temperature control method

### 1.1 方法架构

试验方法架构主要分为数据采集、模糊控制、预测控制和执行单元4个模块。

(1) 数据导入模块:导入实时采集的环境温度、湿度和设备运行状态等多模态数据。

(2) 预测控制模块:基于Transformer模型预测未来多步温度趋势,为模糊控制提供前瞻性调整信号。

(3) 模糊控制模块:对当前温度误差进行实时分析并输出控制信号。

(4) 温控模块:输出温控信号,完成温度调节。

### 1.2 模糊控制模块

1.2.1 模糊控制原理 模糊控制是一种基于规则的非线性控制方法,通过将温度偏差转化为模糊量,实现温度调节<sup>[17]</sup>。传统模糊控制的设计通常忽略未来温度趋势,仅基于当前状态进行控制,存在响应迟缓的问题。为此,结合预测控制信号对模糊规则进行动态调整,可增强方法的适应性。

1.2.2 模糊控制器设计 模糊控制器的输入为温度误差 $e(t)$ 和误差变化率 $\Delta e(t)$ ,输出为控制量 $u(t)$ 。输入变量的模糊化采用三角隶属度函数<sup>[18]</sup>,定义为:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$a, b, c$ ——隶属度函数的参数(表示模糊变量的范围)。

模糊规则:

(1) 如果  $e(t)$  为正大, 且  $\Delta e(t)$  为正, 则  $u(t)$  为快速降温。

(2) 如果  $e(t)$  为负小, 且  $\Delta e(t)$  为负, 则  $u(t)$  为缓慢加热。

1.2.3 对模糊控制的改进 对传统模糊控制进行两点改进。

(1) 动态规则调整: 结合预测模块的趋势信号  $P(t)$ , 动态调整模糊规则的优先级。例如, 当预测显示未来温度快速上升时, 模糊规则的降温权重增加, 其调整式为:

$$R_{adjusted} = R_{base} + k \cdot P(t), \quad (2)$$

式中:

$R_{adjusted}$ ——调整后的模糊规则优先级;

$R_{base}$ ——基础规则;

$k$ ——调节系数。

(2) 基于历史数据的自适应隶属度优化: 通过历史数据对隶属度函数的参数  $a, b$  进行优化。

### 1.3 Transformer 预测模块

1.3.1 Transformer 结构 Transformer 采用编码器—解码器架构, 能够高效处理时间序列数据。其核心为基于多

头自注意力机制(Multi-Head Attention)的特征提取<sup>[19]</sup>:

$$A_{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V, \quad (3)$$

式中:

$Q, K, V$ ——查询、键和值矩阵;

$d_k$ ——键矩阵的维度。

试验中, Transformer 的输入为过去  $N$  步的环境温度、湿度和设备运行状态, 输出为未来  $M$  步的温度预测值。

1.3.2 损失函数设计 模型训练中采用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)作为损失函数<sup>[20]</sup>:

$$L_{MAE} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |y_i - \hat{y}_i|, \quad (4)$$

$$L_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (5)$$

式中:

$y_i, \hat{y}_i$ ——实际温度和预测温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.4 模糊控制与预测模块的协同机制

试验方法创新之处在于模糊控制与预测模块的协同工作机制。预测模块提供未来多时间步的温度趋势信息, 模糊控制模块根据这些趋势动态调整控制策略, 从而实现更为精准的温控效果。协同控制流程如图 2 所示, 具体包括:

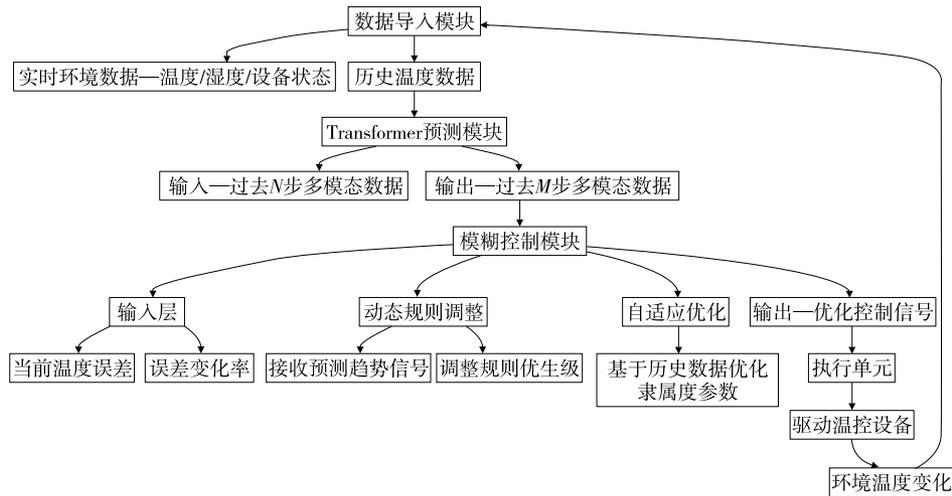


图 2 协同控制流程

Figure 2 Coordinated control process

(1) 预测模块通过 Transformer 输出未来温度趋势  $P(t)$ 。

(2) 模糊控制模块根据  $P(t)$  动态调整规则优先级和控制输出。

(3) 执行单元根据调整后的控制信号  $u(t)$  驱动设备, 实现温度调节。

## 2 试验与结果

为验证试验方法的有效性, 在某一食品加工厂, 以披萨坯的温控为例, 对试验方法冷藏库温控场景和烘焙炉

温控场景下的控制性能、能耗效率等进行现场测试。速冻披萨坯生产线如图 3 所示。

### 2.1 试验设计

2.1.1 试验目标 试验旨在验证提出的基于模糊控制与 Transformer 模型的食品智能温控方法在控制精度、响应速度、稳态性能和能耗效率等方面的改进效果, 并与传统方法进行全面对比。

#### 2.1.2 试验场景与条件

(1) 冷藏库温控场景: 目标温度为  $4^{\circ}\text{C}$ ; 环境温度在



图3 速冻披萨坯生产线

Figure 3 Frozen pizza billet production line

0~10℃范围内随机波动;保持温度稳定在目标值附近,响应外部环境变化,最小化超调和稳态误差。

(2) 烘焙炉温控场景:目标温度为180℃;环境温度模拟波动为±15℃;快速达到目标温度,减少波动,实现温度精确控制。

试验中,采用基于数学模型的环境温度波动模拟。为了模拟环境温度在0~10℃范围内随机波动(冷藏库温控场景)和±15℃烘焙炉温控场景波动,使用随机波动算法,该算法根据预定的波动范围(即±15℃)生成具有随机性的温度数据。模拟的波动范围设定为目标温度上下波动。该波动模型能够模拟环境温度在该范围内的不规则波动,确保模拟结果的真实性。

2.1.3 试验对比方法 为验证试验方法的有效性,采用5种方法进行对比。

(1) 比例—积分—微分(PID)控制:传统比例—积分—微分控制方法,利用手动调参完成整定。

(2) 模糊控制:基于实时输入数据的模糊控制<sup>[2]</sup>。

(3) LSTM+RNN:结合LSTM和RNN的智能温控方法<sup>[21]</sup>。

(4) PID+模糊控制+LFPSO:结合PID、模糊控制和LFPSO的智能温控方法<sup>[22]</sup>。

(5) 试验方法:结合模糊控制与Transformer预测模块的智能温控方法。

2.1.4 试验评价指标

(1) 超调量:温度首次超过目标值的最大偏差。

(2) 响应时间:系统从初始状态达到目标温度所需时间。

(3) 稳态误差:系统达到稳定状态后实际温度与目标温度之间的偏差。

(4) 预测误差:使用MAE和RMSE评估Transformer模型预测性能。

(5) 能耗效率:对不同方法的运行功率进行累积分布,计算单位时间内的能耗。

## 2.2 结果与分析

### 2.2.1 冷藏库温控场景

(1) 控制性能对比:冷藏库温控场景下5种方法的控制性能对比结果见表1。

由表1可知,冷藏库场景下,试验方法相比传统PID控制、模糊控制、LSTM+RNN、PID+模糊控制+LFPSO在各项指标上均表现更优。试验方法的预测模块可有效

表1 冷藏库温控场景下5种方法的控制性能对比

Table 1 Comparison of control performance of the five methods in the cold storage temperature control scenario

方法	超调量/℃	响应时间/s	稳态误差/℃
PID控制	1.18	12.02	0.15
模糊控制 <sup>[2]</sup>	0.98	10.11	0.10
LSTM+RNN <sup>[21]</sup>	0.90	9.12	0.08
PID+模糊控制+LFPSO <sup>[22]</sup>	0.89	9.10	0.08
试验方法	0.79	8.05	0.05

抑制快速降温引起的过冲问题,与PID控制、模糊控制、LSTM+RNN、PID+模糊控制+LFPSO相比,试验方法的超调量分别降低了33.05%,19.39%,12.22%,11.24%。试验方法具有良好的动态温度调控能力,与PID控制、模糊控制、LSTM+RNN、PID+模糊控制+LFPSO相比,试验方法用时分别缩短了33.03%,20.38%,11.73%,11.54%。改进的模糊控制与Transformer预测模型的协同调控,有效提升了试验方法对温度的控制精度,其稳态误差较小,接近理想值。

(2) 能耗效率对比:冷藏库温控场景下,5种方法的能耗效率对比结果见表2。

表2 冷藏库温控场景下5种方法的能耗效率对比

Table 2 Comparison of energy consumption efficiency of five methods in the cold storage temperature control scenario

方法	能耗/(W·h <sup>-1</sup> )	与PID控制相比的降低程度/%
PID控制	1.35	
模糊控制 <sup>[2]</sup>	1.20	11.1
LSTM+RNN <sup>[21]</sup>	1.16	14.8
PID+模糊控制+LFPSO <sup>[22]</sup>	1.15	14.8
试验方法	1.05	22.2

由表2可知,通过准确预测并减少设备启动频次,试验方法具有更好的节能效果。与PID控制、模糊控制、LSTM+RNN、PID+模糊控制+LFPSO相比,试验方法能耗分别减少了22.22%,11.11%,9.48%,8.70%。

## 2.2.2 烘焙炉温控场景

(1) 控制性能对比: 烘焙炉温控场景下, 5 种方法的控制性能对比结果见表 3。在烘焙炉温控场景下, 试验方法相比传统 PID 控制、模糊控制、LSTM+RNN、PID+模糊控制+LFPSO 在各项指标上均表现更优。

表 3 烘焙炉温控场景下 5 种方法的控制性能对比

Table 3 Comparison of control performance of the five methods in the temperature control scenario of the oven

方法	超调量/ $^{\circ}\text{C}$	响应时间/s	稳态误差/ $^{\circ}\text{C}$
PID 控制	2.47	18.02	0.25
模糊控制 <sup>[2]</sup>	1.98	14.98	0.18
LSTM+RNN <sup>[21]</sup>	1.80	14.03	0.14
PID+模糊控制+LFPSO <sup>[22]</sup>	1.78	13.97	0.14
试验方法	1.50	11.98	0.10

(2) 能耗效率对比: 烘焙炉温控场景下, 5 种方法的能耗效率对比结果见表 4。

表 4 烘焙炉温控场景下 5 种方法的能耗效率对比

Table 4 Comparison of energy consumption efficiency of five method in the temperature control scenario of the oven

方法	能耗/ $(\text{W}\cdot\text{h}^{-1})$	与 PID 控制相比的降低程度/%
PID 控制	3.25	
模糊控制 <sup>[2]</sup>	3.02	7.08
LSTM+RNN <sup>[21]</sup>	2.86	12.00
PID+模糊控制+LFPSO <sup>[22]</sup>	2.83	12.92
试验方法	2.62	19.38

由表 4 可知, 与 PID 控制、模糊控制、LSTM+RNN、PID+模糊控制+LFPSO 相比, 试验方法的能耗分别减少了 13.25%, 8.39%, 9.48%, 7.42%。

在冷藏库温控场景和烘焙炉温控场景中, 试验方法的优势虽有不同, 但在各项指标上均明显优于所对比方法。

2.2.3 Transformer 预测性能分析 在 3 种时间序列预测中, 采用 Transformer 模型对未来 1, 5, 10 s 温度趋势进行预测, 其性能数据见表 5。

由表 5 可知, Transformer 模型在短期预测(1~5 s)和长期预测(10 s)中的误差均低于 LSTM 和 LFPSO 模型。尤其在未 10 s 的长时间步预测中, 与 LSTM 和 LFPSO 模型相比, Transformer 的 MAE 和 RMSE 分别减少了约 21.3% 和 18.6%, 这直接提升了预测信号的可靠性, 为试验方法中模糊控制器进行温控提供更准确的前瞻性

表 5 不同方法的预测性能对比

Table 5 Comparison of prediction performance of different methods

方法	未来 1 s		未来 5 s		未来 10 s	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
LSTM	0.04	0.06	0.12	0.18	0.19	0.28
LFPSO	0.05	0.07	0.14	0.19	0.20	0.30
Transformer	0.03	0.05	0.10	0.15	0.15	0.23

支持。

综上, 试验方法通过引入预测模块有效提高了温控方法的响应速度和稳态精度, 显著降低了温度超调量。与已有方法相比, 在冷藏库和烘焙炉场景中温控用时分别缩短了 11.54%~33.03%, 14.24%~33.52%; 超调量分别降低了 11.24%~33.05%, 15.73%~39.27%; 稳态误差分别减小了 37.50%~66.67%, 28.57%~60.00%。尤其在动态复杂场景下, 预测信号为模糊控制提供了可靠依据, 使得调控更加灵活高效。在能耗优化方面, 通过减少设备的频繁启动和过度响应, 试验方法的能耗在冷藏库和烘焙炉场景中比已有方法分别降低了 8.70%~22.22%, 7.42%~13.25%。在模型性能方面, Transformer 模型在时间序列预测中的卓越表现, 对未来 1, 5, 10 s 温度趋势的预测效果优于已有方法。

## 3 结论

试验提出了一种结合模糊控制与 Transformer 模型的食品智能温控方法, 旨在应对动态复杂环境下的温控需求。结果表明, 试验方法在冷藏库场景和烘焙炉温控场景中, 超调量分别降低至 0.79, 1.50  $^{\circ}\text{C}$ , 响应时间分别缩短至 8.05, 11.98 s, 稳态误差分别减弱至 0.05, 0.10  $^{\circ}\text{C}$ , 控制性能优于其他方法。此外, 试验方法通过减少设备的频繁启动和过度响应, 将能耗降低了 15%~22%, 节能效果优于结合其他深度学习模型的方法。尽管试验方法表现出优异的食品温控效果, 但仍存在数据强、计算复杂性大的局限性, 后续可进行进一步优化和扩展, 使其能更广泛适用于食品工业及其他动态复杂场景中。

## 参考文献

- [1] 丁浩晗, 宋晓东, 董冠军, 等. 牛奶罐装运输全过程质量控制研究[J]. 中国乳品工业, 2024, 52(10): 23-29.  
DING H H, SONG X D, DONG G J, et al. Research on quality control in the entire process of milk canning and transportation [J]. China Dairy Industry, 2024, 52(10): 23-29.
- [2] 刘向勇, 高雪飞, 董强, 等. 用于食品冷冻温度控制的模糊控制系统设计[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 116-124.  
LIU X Y, GAO X F, DONG Q, et al. The design of fuzzy control system for food freezing temperature control[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 116-124.

- [3] 朱颖, 邱丽单, 朱秀清. 冷冻处理对食品组分及品质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(11): 483-493.  
ZHU Y, QIU L D, ZHU X Q. The effects of freezing treatment on food composition and quality[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(11): 483-493.
- [4] 于超, 陈书法, 钮硕硕, 等. 夹心海苔隧道式烘烤设备优化设计与试验[J]. 食品与机械, 2024, 40(5): 96-100, 179.  
YU C, CHEN S F, NIU S S, et al. Optimization design and experimental research of sandwich seaweed tunnel baking equipment[J]. Food & Machinery, 2024, 40(5): 96-100, 179.
- [5] 罗一, 石艳. 基于模糊PID控制的窖池温度监控设计[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 85-90.  
LUO Y, SHI Y. The environment monitoring system of cellar based on fuzzy PID control[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 85-90.
- [6] 张建华, 商建伟, 王唱, 等. 基于LSTM和IGA-BP的酒精度预测模型[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 71-77.  
ZHANG J H, SHANG J W, WANG C, et al. Research on alcohol prediction model based on LSTM and IGA-BP[J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 71-77.
- [7] 祝玉华, 张钰涵, 李智慧, 等. 基于TCN-BiGRU结合自注意力机制的储粮温度预测研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(12): 133-139.  
ZHU Y H, ZHANG Y H, LI Z H, et al. Research on temperature prediction of grain storage based on TCN-BiGRU combined with self-attention mechanism[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 133-139.
- [8] 张博, 潘福成, 周晓锋, 等. 基于二阶价值梯度模型强化学习的工业过程控制方法[J]. 计算机应用研究, 2024, 41(8): 2 434-2 440.  
ZHANG B, PAN F C, ZHOU X F, et al. Industrial process control method based on second-order value gradient model reinforcement learning[J]. Application Research of Computers, 2024, 41(8): 2 434-2 440.
- [9] KHAN M I H, SABLANI S S, NAYAK R, et al. Machine learning-based modeling in food processing applications: state of the art[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(2): 1 409-1 438.
- [10] SINGH R, NISHA R, NAIK R, et al. Sensor fusion techniques in deep learning for multimodal fruit and vegetable quality assessment: a comprehensive review[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(9): 8 088-8 109.
- [11] ZOU Y F, WU J Z, WANG X F, et al. An improved artificial neural network using multi-source data to estimate food temperature during multi-temperature delivery[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 351: 111518.
- [12] 梁旭茹, 岳淑丽, 张硕, 等. 响应型食品包装的研究现状及前景展望[J/OL]. 现代食品科技. (2024-10-16) [2024-12-02]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1437>.  
LIANG X R, YUE S L, ZHANG S, et al. A review on development status and prospects of stimuli-responsive food packaging[J/OL]. Modern Food Science and Technology, (2024-10-16) [2024-12-02]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1437>.
- [13] 梁子勇. 基于交叉污染视角的冷链食品质量控制分析[J]. 食品安全导刊, 2024(19): 47-49.  
LIANG Z Y. Analysis of quality control of cold chain food based on cross contamination perspective[J]. China Food Safety Magazine, 2024(19): 47-49.
- [14] ULUOCAK I, BILGILI M. Daily air temperature forecasting using LSTM-CNN and GRU-CNN models[J]. Acta Geophysica, 2024, 72(3): 2 107-2 126.
- [15] HUANG W T, YIN M S, XIA J, et al. A review of cross-scale and cross-modal intelligent sensing and detection technology for food quality: mechanism analysis, decoupling strategy and integrated applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 151: 104646.
- [16] 樊宏鹏, 于鹏飞, 杨森. 基于视觉Transformer的马铃薯薯形与大小自动分级[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 111-116.  
FAN H P, YU P F, YANG S. Automatic grading of potato shape and size based on visual Transformer[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 111-116.
- [17] 何宇驰, 陈永乐, 贺良, 等. 基于STM32的茶叶揉捻机揉捻桶转速模糊PID设计[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 74-80.  
HE Y C, CHEN Y L, HE L, et al. Fuzzy PID design for rotating speed of rolling drum of tea twisting machine based on STM32[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 74-80.
- [18] 李云峰, 王聪, 李玉琴. 多算法融合的并联食品分拣机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 72-77.  
LI Y F, WANG C, LI Y Q. Multi algorithm fusion based trajectory tracking control method for parallel food sorting robots[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 72-77.
- [19] 刘川正, 马景余, 白雪瑞, 等. 基于电子舌和电子鼻结合CNN-Transformer模型的绿茶种类识别[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 34-42, 52.  
LIU C Z, MA J Y, BAI X R, et al. Green tea species recognition based on electronic tongue and electronic nose combined with CNN-Transformer model[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 34-42, 52.
- [20] 涂井先, 冀占江, 覃桂菡, 等. 基于统计模型的麦克风阵列语音增强算法[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(11): 335-340.  
TU J X, JI Z J, QIN G J, et al. Microphone array speech enhancement algorithm based on statistical models[J]. Computer Applications and Software, 2024, 41(11): 335-340.
- [21] PENG F L, QIAO Y K, YANG C. A LSTM-RNN based intelligent control approach for temperature and humidity environment of urban utility tunnels[J]. Heliyon, 2023, 9(2): e13182.
- [22] ZHOU H Y, WU J H, ZHENG X N, et al. Fuzzy-PID controller based on improved LFPSO for temperature and humidity control in a CA ripening system[J]. Journal of Food Process Engineering, 2024, 47(6): e14651.