

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.04.021

基于模糊 RBFNN-PID 的啤酒发酵温度控制系统

Temperature control system of beer fermentation based on fuzzy RBFNN-PID

胡亚南¹ 李鑫¹ 宁奎伟² 赵锦文¹HU Ya-nan¹ LI Xin¹ NING Kui-wei² ZHAO Jin-wen¹

(1. 西京学院, 陕西 西安 710021; 2. 陕西西微测控工程有限公司, 陕西 咸阳 712000)

(1. Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

2. Shaanxi Xiwei Automation Control Engineering Limited, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

摘要:基于模糊 PID 控制算法, 结合 RBF 神经网络算法优点, 设计具有逻辑判断和自我优化的模糊 RBFNN-PID 控制算法, 实现 PID 参数在线最优整定。以 CPU1214C 和 KP1500 触摸屏为核心, 设计啤酒发酵自动控制系统和人机交互界面, Matlab 仿真和试验测试结果表明: 该控制算法可以提升温度控制系统的稳定性、模型失配鲁棒性和抗干扰能力。

关键词: 发酵温度; 模糊 RBFNN-PID; 参数优化; 硬件组态

Abstract: Based on the fuzzy PID control algorithm, combined with the advantages of RBF neural network algorithm, a fuzzy RBFNN-PID control algorithm with logic judgment and self optimization is designed to realize the online optimal tuning of PID parameters. Taking CPU1214C and KP1500 touch screen as the core, the beer fermentation automatic control system and man-machine interface are designed. Matlab simulation and experimental results show that the control algorithm can improve the stability, model mismatch robustness and anti-interference ability of the temperature control system.

Keywords: fermentation temperature; fuzzy RBFNN-PID; parameter optimization; hardware configuration

啤酒是由大麦等谷物经糖化、发酵、灌装等主要工序生产制作的主流饮品, 其中, 发酵过程是决定啤酒品质和口感的关键环节, 直接影响厂家产品销售和经济效益^[1]。发酵过程中物料发生着复杂的生物、化学反应且伴随着热量的排放, 主要工艺对象为时间、压力、温度和糖度, 由

于糖度、时间控制取决于发酵温度、酵母活性(受温度影响), 而且压力变化同样受温度影响, 所以对啤酒发酵温度控制对产品的稳定性和精确性至关重要。

传统 PID 控制因结构简单、成熟、易实现等优点被应用于啤酒发酵温度控制, 但发酵过程存在微生物代谢、热量交换、反应放热及反应釜体积大等因素, 使温度控制系统具有时变、非线性、滞后特征, 需反复、繁琐整定 PID 参数, 造成温度控制系统超调和震荡。杜金钊等^[2]将模糊控制算法应用于啤酒发酵温度控制中, 并取得一定效果, 但模糊控制受专家主观性和盲目性影响且无法消除系统静差; 高锦等^[3]将 Smith 算法和非线性 PID 应用于啤酒发酵温度控制以解决系统温度偏差大、波动频繁的问题, 但非线性 PID 参数较多且最优参数获取较难; 宁奎伟等^[4]将遗传算法和 OPC 技术应用于啤酒温度控制, 仿真效果较好, 但未考虑系统模型失配及抗干扰能力。基于模糊 PID 控制算法, 试验拟提出一种具有自学习、自适应能力的径向基神经网络模糊 PID 控制算法(模糊 RBFNN-PID), 以实现啤酒发酵温度精确、稳定控制, 同时采用 PLC 和触摸屏组成控制系统, 对啤酒发酵工艺过程进行实质控制, 以达到优质、高效、低消耗的控制效果。

1 啤酒发酵温度控制系统

由图 1 可知, 啤酒发酵温度控制系统由 PLC、触摸屏(KP1500)、模拟量输出模块(SM1232 AO)、模拟量输入模块(SM1231 AI)、温度检测装置、气动调节阀组成。啤酒发酵过程需在一定工艺温度、时间条件下进行, 由于发酵罐体积较大, 为使发酵罐内温度均匀、稳定、调节迅速, 故在发酵罐外壁铺设上、中、下 3 层冷却管路, 同时在冷却管路安装 3 台气动调节阀(FV301、FV302、FV303)及在罐体安装 3 台温度检测装置(TIC301、TIC302、TIC303)。PLC 通过 PN 接口与 KP1500 通讯, 进行数据交互, 实现友好人机交互; 在 KP1500 设置啤酒发酵时间

基金项目:西京学院科研基金项目(编号: XJ190201); 陕西省重点研发计划资助项目(编号: 2018GY-042)

作者简介:胡亚南(1986—), 男, 西京学院讲师, 硕士。

E-mail: 2664961273@qq.com

收稿日期:2020-01-26

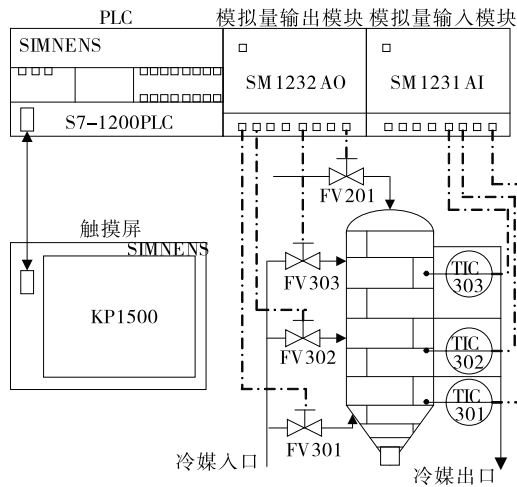


图 1 啤酒发酵温度控制系统

Figure 1 Temperature control system of beer fermentation

和温度值,安装在罐体内的热电阻 PT100 检测温度信号,温度变送器将温度信号转化成 4~20 mA 电流信号传输给 SM1231 AI 进行采样、转化,经内部总线将转化后数字量稳定信号送至 PLC;PLC 将温度设定值和检测值进行逻辑运算、分析后输出控制信号至 SM1232 AO 转化为 4~20 mA 电流信号调节气动阀门开度,改变进入发酵罐外壁的冷媒流量,实现发酵罐温度精确控制。

2 模糊 RBFNN-PID 温度控制策略

如图 2 所示,以啤酒发酵温度设定值 $r(k)$ 与检测值 $y(k)$ 的偏差 $e(k)$ 和偏差变化率 $ec(k)$ 为模糊 RBFNN 控制器的输入变量,以 PID 增量参数 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 为输出变量。模糊 RBFNN 以学习指标为目标不断优化模糊控制规则,输出最佳 PID 增量参数,以提高发酵温度控制效果。

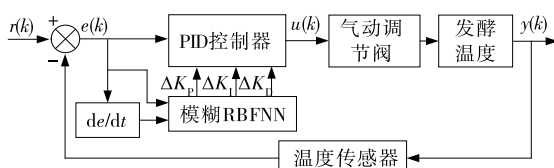


图 2 模糊 RBFNN-PID 的啤酒发酵温度控制

Figure 2 Temperature control of beer fermentation based on fuzzy RBFNN-PID

依据模糊控制结构和 PID 参数,设计 2-10-25-3 的 4 层模糊 RBFNN 控制器结构,如图 3 所示。

模糊 RBFNN 控制器第 1~4 层分别为输入层、模糊层、推理层和输出层,以 I、O 表示各层网络输入输出,以 I、O 下标表示层数,则:

第 1 层(输入层),输入变量为啤酒发酵温度 $e(k)$ 、 $ec(k)$,节点数 $m_1=2$ 。

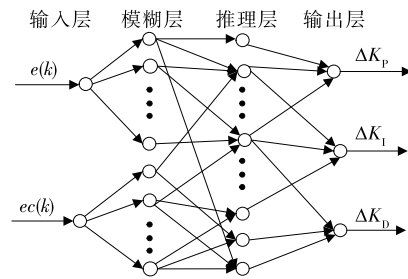


图 3 模糊 RBFNN 控制器结构

Figure 3 Structure of fuzzy RBFNN-PID controller

$$I_1(1) = e(k), \quad (1)$$

$$I_1(2) = ec(k), \quad (2)$$

$$O_1(i, j) = I_1(i) \quad (i = 1, 2; j = 1, 2 \dots n), \quad (3)$$

式中:

n ——模糊变量模糊子集个数。

第 2 层(模糊层),模糊层是将输入的精确量转化为模糊量,每个节点表示一个模糊子集;设定发酵温度 $e(k)$ 、 $ec(k)$ 的模糊子集均为 {NB(负大), NS(负小), ZO(零), PS(正小), PB(正大)},节点数 $m_2=10$;隶属度函数为高斯型函数^[5-6]。

$$O_2(i, j) = \frac{\exp\{-[O_1(i) - c_{ij}]^2\}}{(b_{ij})^2}, \quad (4)$$

式中:

c_{ij} 、 b_{ij} ——第 i 个模糊输入变量的第 j 个子集隶属度函数中心和基宽, $i=1, 2, j=1, \dots, 5$ 。

第 3 层(推理层),推理层的每个节点表示一条模糊规则,发酵温度 $e(k)$ 、 $ec(k)$ 的模糊子集数均为 5,则模糊控制规则数应为 25,故 $m_3=25$;将模糊层的模糊子集两两配对,实现各节点的模糊推理,节点输出应为所有输入信号的乘积。因此

$$O_3(t) = \prod_{i=1}^N O_2(i, j), \quad (5)$$

$$N = \prod_{i=1}^n N_i, \quad (6)$$

式中:

N_i ——模糊层节点数;

t ——模糊规则节点,取 $1, 2, \dots, 25$ 。

第 4 层(输出层),输出层节点输出为所有输入信号的加权和,模糊 RBFNN 输出量为 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D ,即节点数 $m_4=3$ 。

$$O_4(n) = \sum_{i=1}^n O_3(t) \cdot \omega_{ij} \quad (n = 1, 2, 3; t = 1, 2, \dots, 25), \quad (7)$$

式中:

ω_{ij} ——第 3、4 层节点连接权矩阵。

模糊 RBFNN 控制第 4 层对应的 PID 控制增量参数为:

$$\begin{cases} O_4(1) = \Delta K_P; \\ O_4(2) = \Delta K_I; \\ O_4(3) = \Delta K_D, \end{cases} \quad (8)$$

PID 控制器参数为:

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + \Delta K_P; \\ K_I = K_{I0} + \Delta K_I; \\ K_D = K_{D0} + \Delta K_D, \end{cases} \quad (9)$$

式中:

$\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ ——PID 增量参数;

K_P, K_I, K_D ——PID 参数;

K_{P0}, K_{I0}, K_{D0} ——PID 初始参数。

为使 PID 控制器适应复杂的啤酒发酵温度控制系统,利用学习算法对模糊 RBFNN 的 $c_{ij}, b_{ij}, \omega_{ij}$ 3 个参数进行自我调整和优化,可使模糊 RBFNN-PID 控制器具备逻辑判断能力及自我优化能力,利用梯度下降法对模糊 RBFNN 参数进行修正,模糊 RBFNN-PID 学习目标为^[7]:

$$E(k) = \frac{1}{2} [y(k) - r(k)]^2 = \frac{1}{2} e(k)^2. \quad (10)$$

$\omega_{ij}, c_{ij}, b_{ij}$ 参数的优化算法为:

$$\Delta \omega_{ij}(k) = -u \frac{\partial E(k)}{\partial \omega_{ij}(k)} + [\omega_{ij}(k) - \omega_{ij}(k-1)], \quad (11)$$

$$\Delta c_{ij}(k) = -u \frac{\partial E(k)}{\partial c_{ij}(k)} + \eta [c_{ij}(k) - c_{ij}(k-1)], \quad (12)$$

$$\Delta b_{ij}(k) = -u \frac{\partial E(k)}{\partial b_{ij}(k)} + \eta [b_{ij}(k) - b_{ij}(k-1)], \quad (13)$$

式中:

η ——惯性系数;

u ——学习速率。

其中,

$$\frac{\partial E(k)}{\partial \omega_{ij}(k)} = \frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \cdot \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_4} \cdot \frac{\partial O_4}{\partial \omega_{ij}(k)} = -e(k) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \cdot O_3, \quad (14)$$

$$\frac{\partial E(k)}{\partial c_{ij}(k)} = \frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \cdot \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_4} \cdot \frac{\partial O_4}{\partial O_3} \cdot \frac{\partial O_3}{\partial O_2} \cdot \frac{\partial O_2}{\partial c_{ij}(k)} = -e(k) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \cdot \omega \cdot O_3 \cdot \frac{2[I_1(i) - c_{ij}]^2}{b_{ij}^2}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial E(k)}{\partial b_{ij}(k)} = \frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \cdot \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_4} \cdot \frac{\partial O_4}{\partial O_3} \cdot \frac{\partial O_3}{\partial O_2} \cdot \frac{\partial O_2}{\partial b_{ij}(k)} = -e(k) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \cdot O_3 \cdot \frac{2[I_1(i) - c_{ij}]^2}{b_{ij}^2}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \text{sgn} \left[\frac{y(k) - y(k-1)}{\Delta u(k) - \Delta u(k-1)} \right]. \quad (17)$$

3 啤酒发酵控制系统设计

啤酒发酵控制系统以西门子 PLC 和触摸屏为核心部件,对啤酒发酵过程进行自动控制 and 数据处理,具备数据显示、存储、报警和打印功能。整个控制过程需对过程变量实时检测、数据分析,涉及检测装置和执行装置较多,且参数对象间存在一定耦合影响,故对控制系统要求较高。

3.1 硬件选型

3.1.1 PLC 选型 依据啤酒发酵控制需求和厂家控制要求,对现场 I/O 控制点进行计算,并冗余 20% 的 I/O 接口用于进行后期控制系统的维护、维修和功能扩展,系统共需 58 个 I/O 控制点^[8]。考虑到系统 I/O 点量、系统运算能力及经济性问题,选用西门子 CPU 1214C(6ES7214-1AG40-0XB0)作为系统 PLC,其集成 PROFINT 接口和强大的工艺功能,可满足啤酒发酵自动控制需求。

3.1.2 触摸屏选型 选用西门子 KP1500 精简型触摸屏,屏幕尺寸 391.16 mm,分辨率 1 280×800,1 600 万色,集成 2 个 PROFINT 接口;KP1500 能够实现啤酒发酵控制系统工艺流程显示、参数设置、历史曲线、报表生成、故障报警等功能,具有友好的人机界面。

3.1.3 检测装置选型 温度传感器选用天康 WZP-230 型号的 PT100 热电阻传感器,检测范围 -200~450 °C,检测精度 0.03 °C;液位传感器选用海联 HLY 超声波传感器,检测范围 0~6 m,检测精度 3 mm。

3.1.4 执行装置选型 选用力诺气动 ZSSV-16TK125-YPD2D 型调节阀,管径 DN125,防护等级 PN1.6。

啤酒发酵控制系统硬件选型列表如表 1 所示。

3.2 下位机硬件组态

啤酒发酵控制系统下位机设计基于 TIA Portal V13 平台进行设计,TIA Portal V13 注重用户体验自动化工

表 1 硬件选型表

Table 1 Hardware selection table

名称	设备型号/参数	数量
CPU1214C	14DI,10DO 继电器	3
KP1500	391.16 mm,1 280×800,1 PN	1
PM1207	120/230VAC,24VDC	1
导轨	35 mm DIN	3
AI 模块	8AI,电阻,RTD	3
AO 模块	4AO,14 位	6
DO 模块	8DO,24VDC	3
DI 模块温度	8DI,14 位	3
传感器	-200~450 °C,0.03 °C	12
液位传感器	0~6 m,3 mm	3
气动调节阀	DN125,PN1.6	15

具平台,包含 Step7 和 WinCC 两部分,可实现从过程控制到离散控制、从驱动到 HMI 的工控相关工具。启动 TIA Portal V13 后点击“创建新项目”,然后在 Portal 视图下的“设备与网络”中点击“添加新设备”后依据型号添加项目所需的 PLC 模块、PS 模块、IM 模块及 SM 模块,如图 4 所示。

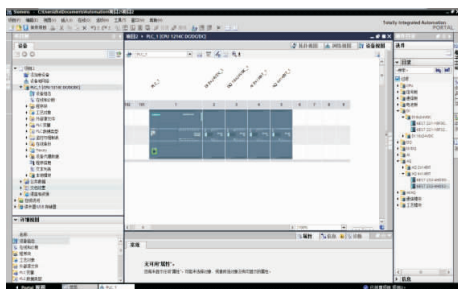


图 4 硬件组态图

Figure 4 Hardware configuration diagram

3.3 网络组态

TIA Portal V13 平台的“设备与网络”编辑器内打开网络视图,网络视图中包含啤酒发酵控制系统的各个子控制系统及 KP1500 监视器,分别点击 PLC 设备和 KP1500 监视器的 PN 端口拖动进行网络连接,然后选择“属性→常规→PROFINET 接口→以太网地址”修改设备 IP 地址和设备名称,编译检查无错误后进行保存^[9]。试验设计的啤酒发酵控制系统包含 3 台啤酒发酵罐设备,网络组态图如图 5 所示;Portal 平台相对于传统 STEP7+WinCC 平台网络搭建更加可视、便捷、高效。

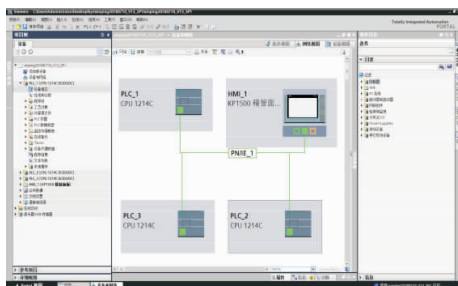


图 5 网络组态图

Figure 5 Network configuration diagram

3.4 人机界面设计

SIMATIC WinCC (TIA Portal) 相对于传统的 SIMATIC WinCC Flexible 软件对控制、可视化、驱动解决方案可使用同一编辑器设计,实现工程组态框架内完美交互;同时可以使用用户自定义对象库和面板库设计,可保证组态质量高度一致。如图 6 所示,在 Portal WinCC 软件平台开发啤酒发酵控制系统,包括可视化的工艺流程、控制参数设置、对象历史曲线及生产报表等界面,实现了啤酒发酵自动控制的解决方案。

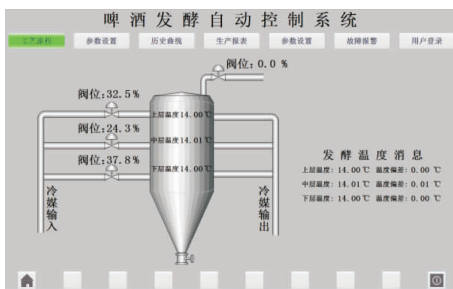


图 6 人机交互界面图

Figure 6 Human computer interface diagram

4 啤酒发酵模糊 RBFNN-PID 控制程序设计

基于 Portal STEP7 平台开发的啤酒发酵温度控制系统,可便捷、高效地实现系统设计、调试、仿真及故障查询。图 7 为啤酒发酵罐中层温度控制流程图,首先完成系统初始化设置,对啤酒发酵控制系统的相关预置参数进行输入,在 KP1500 设置中层温度设定值 SP302,启动啤酒发酵自动控制系统,SM1231 接收 TIC302 温度值并进行 A/D 转化,CPU1214C 对 SP302 值和 TIC302 值进行逻辑运算,按照采样周期 T 输出 $e(k)$ 和 $ec(k)$ 值^[10]。模糊 RBFNN 控制器依据 $e(k)$ 和 $ec(k)$ 值进行逻辑规则判断,同时依据学习目标 $e(k)$ 对参数 $c_{ij}, b_{ij}, \omega_{ij}$ 进行调整和优化,以实现发酵温度最佳控制并输出 PID 增量参数 $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 。按式(9)进行 PID 参数叠加,将

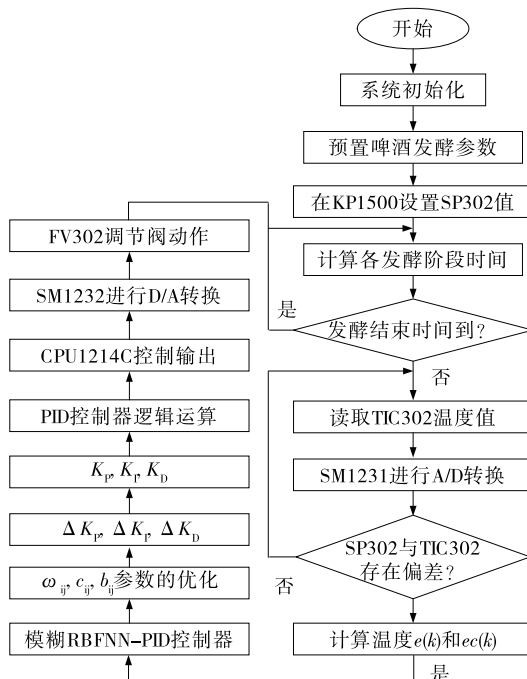


图 7 啤酒发酵罐中层温度控制流程

Figure 7 Middle temperature control process of beer fermenter

K_P 、 K_I 、 K_D 数据送至 PID 控制器进行控制运算; CPU1214C 将 PID 控制运算结果经 SM1232 进行 D/A 转化为 4~20 mA 电流信号后作用于气动调节阀 FV302, FV302 依据阀位值与电流值的线性比例调整阀位开度以改变进入发酵罐中层冷却管道的冷媒量,进而调整啤酒发酵罐中层温度值。

5 仿真与应用

5.1 仿真验证

利用 Matlab 软件平台建立模糊 RBFNN-PID 控制器、模糊 PID 控制器和 PID 控制器进行对比仿真,设置啤酒发酵温度为 12 ℃。吕宁等^[11]建立的啤酒发酵温度控制系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{1.0357e^{-116s}}{684.5s^2 + 52.4s + 1} \quad (18)$$

设置仿真运行时间为 2 000 s,在 $t = 1\ 200$ s 时向啤

酒发酵温度控制系统添加一个幅值为 3 ℃ (25%) 的阶跃信号模拟现场干扰信号,以验证 3 种控制器的性能和抗干扰能力。3 种控制器的 Simulink 仿真对比曲线和性能指标分别如图 8、表 2 所示。

由图 8、表 2 可知,模糊 RBFNN-PID 控制器上升时

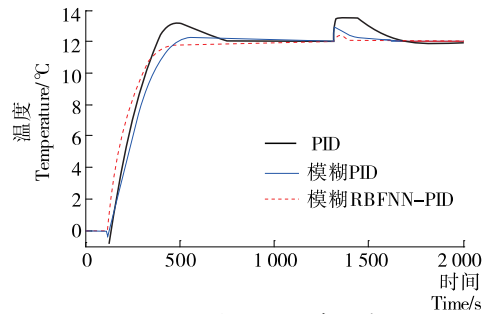


图 8 3 种控制器仿真曲线

Figure 8 Three kinds of controller simulation curves

表 2 3 种控制器性能指标

Table 2 Three performance indexes of controller

控制器	超调量/%	上升时间/s	稳态时间/s	干扰幅值/%	二次稳态时间/s
PID	9.89	381.5	1 140	12.5	684
模糊 PID	2.51	498.6	1 015	7.5	481
模糊 RBFNN-PID	0.02	656.2	657	3.3	276

间大于模糊 PID 和 PID 控制器,但其超调量最小、达到稳态时间最短、抗干扰能力最强。由于啤酒发酵过程,微生物代谢、热量交换及耦合、物料发酵非线性放热等因素均对啤酒发酵温度控制传递函数存在影响,所以将啤酒发酵温度控制系统传递函数的比例系数 K 增加 30%,以验证 3 种控制器的模型失配鲁棒性。如图 9 所示,当系统模型 K 增加 30% 后,PID、模糊 PID、模糊 RBFNN-PID 3 种控制器的超调量分别增加 21.71%、6.39%、0.38%;达到稳态时间分别增加 220、185、143 s,由此可见模糊 RBFNN-PID 控制模型失配鲁棒性最优。

5.2 试验测试

文中所述啤酒发酵自动控制系统是与陕西西微测控

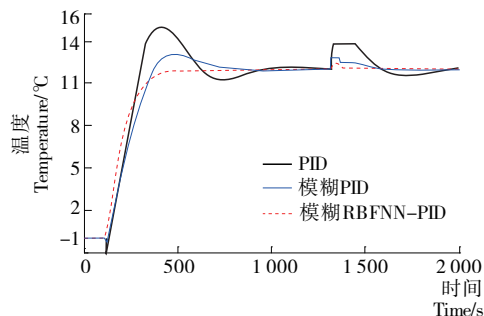


图 9 3 种控制器模型失配后仿真曲线

Figure 9 Simulation curve of three controller models after mismatch

工程有限公司共同开发的,以 200 L 啤酒发酵罐及相关装置为试验设备,以酵母、麦花、酒花为原料,按文中所述硬件组态和程序设计开发啤酒发酵自动控制系统进行试验测试。由图 10 可知,啤酒发酵温度误差为 ± 0.08 ℃、控制精度为 0.67%,温度控制系统具有较好的精确性和跟踪能力。

6 结论

设计了具备逻辑判断和自我优化能力的模糊 RBFNN-PID 控制策略,以 CPU1214C 和 KP1500 触摸屏为核心,完成控制系统的硬件组态、网络组态、人机界面设计,利用 Matlab 仿真和试验测试的方法进行算法验证。结果表明:模糊 RBFNN-PID 控制系统具有较好的稳

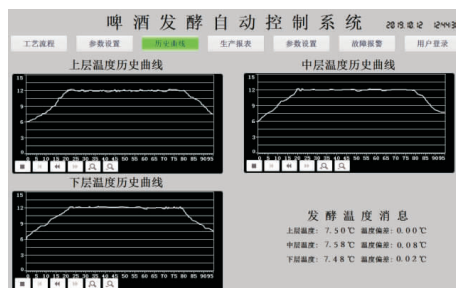


图 10 啤酒发酵温度历史曲线图

Figure 10 History curve of beer fermentation temperature

(下转第 175 页)

性显著提高。牡蛎多肽锌可以作为一种安全的锌来源,其富锌培养后的乳酸菌具有较强的体外抗氧化活性,较好的生物利用率和较低的肠释放率。后续将对富锌乳酸菌的益生性和体内消化稳定性以及潜在的生理活性进一步研究。

参考文献

- [1] 王英杰. 锌在酶中发挥功能的几种方式[J]. 生命的化学, 1994, 8(1): 45-52.
- [2] 李筠, 邓西平, 郭尚洙, 等. 转铜/锌超氧化物歧化酶和抗坏血酸过氧化物酶基因甘薯的耐旱性[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(4): 451-457.
- [3] GODWIN M A, MAHITHASHRI K, BHAGAT M, et al. Metal incorporated g-C₃N₄ nanosheets as potential cytotoxic agents for promoting free radical scavenging in cancer cell lines[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2019, 19(9): 5 448-5 455.
- [4] BURCH R E, HAHN H K, SULLIVAN J F. Newer aspects of the roles of zinc, manganese, and copper in human nutrition[J]. Clinical Chemistry, 2019, 9(4): 4-12.
- [5] 张青松. 乳酸菌对锌的富集特性及富锌乳酸菌对小鼠结肠炎的缓解作用[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 11-21.
- [6] 陈漪汶, 方若楠, 朱剑锋, 等. 5种乳酸菌及其灭活态体外抗氧化能力的比较研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(11): 85-90, 97.
- [7] SEKAR A, KIM M, JEONG H C, et al. Strain selection and optimization of mixed culture conditions for lactobacillus pentosus K1-23 with antibacterial activity and aureobasidium pullulans NRRL 58012 producing immune-enhancing β -glucan[J]. Journal of Microbiology & Biotechnology, 2018, 28(5): 697-706.
- [8] SUO Hua-yi, ZHAO Xin, QIAN Yu, et al. Lactobacillus fermentum suo attenuates HCl/Ethanol induced gastric injury in mice through its antioxidant effects[J]. Nutrients, 2016, 8(3): 155-162.
- [9] 刘文群, 黄丽婵, 韩伟. 乳酸菌同时富集硒铬锌的初步研究[J]. 食品与机械, 2007, 23(2): 45-46.
- [10] BLACKWELL K J, SINGLETON I, TOBIN J M. Metal cation uptake by yeast: A review[J]. Applied Microbiology Biotechnology, 1995, 43(4): 579-584.
- [11] 翟齐啸. 乳酸菌减除镉危害的作用及机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 2-13.
- [12] 杨靖鹏, 张利, 李尧, 等. 乳酸菌对于无机锌的富集及其生物活性研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18(6): 17-21.
- [13] 李艳, 杨晶, 姚瑶, 等. 基于主成分分析法的降血脂乳酸菌筛选[J]. 中国乳品工业, 2018, 46(5): 18-20.
- [14] 张香美, 赵玉星, 闫晓晶, 等. 1株具抑菌和抗氧化活性乳酸菌的筛选及鉴定[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 261-265.
- [15] 郭慧芬, 田建军, 景智波, 等. 新疆熏马肠中具有较高抗氧化活性乳酸菌的筛选鉴定[J]. 食品科技, 2017, 48(8): 25-30.
- [16] 张馨元, 徐梁棕, 汪少芸. 大豆分离蛋白肽-硒螯合物的制备及结构、抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 163-167.
- [17] 王曦, 罗霞, 许晓燕, 等. 不同乳酸菌菌株抗氧化能力的比较研究[J]. 食品科学, 2010, 15(9): 204-208.
- [18] 杨靖鹏. 乳酸菌对微量元素的富集及其生物活性评估[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017: 13-29.
- [19] MRVČIĆ J, PREBEG T, BARIŠIĆ L, et al. Zinc binding by lactic acid bacteria[J]. Food Technology Biotechnology, 2009, 47(4): 381-388.
- [20] 李维, 孙开济, 孙玉丽, 等. 乳酸菌缓解肠道氧化应激研究进展[J]. 动物营养学报, 2016, 28(1): 27-32.
- [21] 陈明, 柯文灿, 张娟, 等. 青藏高原牦牛酸奶中具有抗氧化活性乳酸菌的体内外益生特性[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 178-183.
- [22] 张明. 乳酸菌吸附锌离子的条件优化及富锌乳酸菌对断奶仔猪生长的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2012: 11-43.

(上接第 119 页)

定性、抗干扰能力和模型失配鲁棒性,发酵温度误差为 $\pm 0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、控制精度为0.67%,满足啤酒发酵温度控制要求。试验主要研究发酵温度控制及设备监控,未涉及啤酒制造过程中的能源与资源管理,下一步将利用西门子B.Data软件设计啤酒制造能源管理系统,实现企业信息化管理和绿色生产。

参考文献

- [1] 卢万银. 基于模糊控制技术的啤酒快速发酵控制[J]. 酿酒科技, 2012(9): 90-92.
- [2] 杜金钊, 巨里, 赵殿轩. 模糊控制在啤酒发酵温度控制中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(9): 108-110, 117.
- [3] 高锦, 章家岩, 冯旭刚. 基于 Smith 预估补偿的啤酒发酵温度控制策略[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 115-120.
- [4] 宁奎伟, 李明辉. 基于遗传算法的控制参数整定及其在温度控制中的应用[J]. 包装工程, 2016, 37(5): 141-145.
- [5] 胡亚南, 祈广利, 霍蛟飞. 基于模糊PID的FDM型3D打印机喷头温度控制系统[J]. 包装工程, 2017, 38(19): 173-178.
- [6] 王磐, 洪苑乾, 黄汉英, 等. 基于PLC的模糊PID控制器在热风干燥箱上的应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 100-104.
- [7] 赵世海, 韩雪. 基于模糊神经网络PID的焙烘机温度控制[J]. 天津工业大学学报, 2019, 38(4): 83-88.
- [8] 李鑫, 张煜星, 高博. 基于S7-1200PLC的啤酒发酵温度控制系统[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 116-120.
- [9] 王大鹏, 王涛, 苏孝国. 基于TIA Portal环境的S7-1200的OPC通讯[J]. 可编程控制器与工厂自动化, 2014(9): 97-101.
- [10] 成咏华, 张冉. 基于PLC的煤矿空压机变频调速系统优化设计[J]. 煤矿机械, 2019, 40(4): 173-175.
- [11] 吕宁, 徐佳, 彦鲁奇. 啤酒发酵系统温度优化控制仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(5): 355-338.