

基于 Smith 预估补偿的啤酒发酵温度控制策略

Control strategy of beer fermentation temperature based on Smith predictable compensation

高 锦 章家岩 冯旭刚

GAO Jin ZHANG Jia-yan FENG Xu-gang

(安徽工业大学电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

(College of Electrical Engineering and Information, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China)

摘要:在啤酒发酵过程中,发酵液的温度控制具有大时滞、非线性和分阶段性等特点,这些特点造成发酵罐内发酵液的温度波动频繁,偏差较大。为了更好地对啤酒发酵温度进行控制,在常规 PID 控制的基础上,提出了基于 Smith 预估补偿的非线性 PID 控制策略。在对啤酒发酵温度控制系统的辨识模型进行 Matlab 仿真分析的基础上,将该控制策略用于实际生产。结果表明:该控制策略可以有效改善控制系统的稳定性和抗干扰能力。

关键词:啤酒发酵;温度控制;Smith 预估补偿;非线性系统

Abstract: Beer fermentation is an extremely complicated process, in which the control of fermentation temperature has a great influence on the final taste and quality of the beer. The temperature control of the fermentation liquor has the characteristics of large time delay, nonlinear and staged characteristics, and they cause the temperature of the fermented liquor in the fermentation tank to fluctuate frequently with large. According to the technological characteristics of the beer fermentation temperature control system, a nonlinear PID control strategy was processed based on Smith predictable compensation. After modeling the beer fermentation temperature control system and performing Matlab simulation analysis, it was found that the algorithm could retain the advantages of simple PID parameter adjustment and high steady-state accuracy, as well as the greater anti-interference ability.

The system was robust to the parameter perturbations and disturbances. The final production results showed that this control strategy could effectively improve the dynamic quality and anti-jamming ability of the control system and obtain better application achievement.

Keywords: beer fermentation; temperature control; Smith predictable compensation; non-linear system

啤酒发酵是啤酒酿造过程中最为关键的环节,该生产环节控制效果的好坏对于最终所生产酿造出的啤酒口感和质量起着决定性作用。发酵环节是一个复杂的生物化学反应过程,其中发酵罐中的压力、温度以及发酵液中的酵母浓度等均会影响到最终产品的质量。由于发酵液温度的变化会影响发酵罐内部压力以及发酵液中的酵母浓度,所以对于发酵温度的调节控制显得更加重要^[1-4]。

常规的 PID 控制因其控制结构简单、良好的稳态性能等特点,而被许多啤酒生产厂商用于啤酒发酵过程中的温度控制。但该控制方法参数整定时间长,并且无法针对不同的温度控制条件修改控制参数,因此会导致控制系统的动态控制效果不佳^[5-6]。目前国内外学者针对啤酒发酵温度控制问题开展了先进的控制策略的研究^[7-8],杜金钊等^[7]采用模糊控制器控制啤酒发酵的温度,获得了良好的动态特性,但稳定性不理想;孙家琪等^[8]提出了预测控制策略并进行了仿真,结果表明该方法具有良好的抗干扰性,但并未考虑模型失配的情况,在实际的应用中会有一定的偏差。

试验提出一种基于 Smith 预估补偿的非线性 PID 控制策略,以解决常规 PID 存在动态响应慢、超调量大等问题,提高系统的控制性能,确保啤酒发酵温度控制的准确性和快速性达到平衡,保证啤酒生产质量。

基金项目:安徽省自然科学基金(编号:1908085ME134);安徽省重点研究与开发计划项目(编号:1804a09020094);安徽省高校自然科学基金重点项目(编号:KJ2018A0054, KJ2018A0060)

作者简介:高锦,男,安徽工业大学在读硕士研究生。

通信作者:章家岩(1963—),男,安徽工业大学教授,硕士。

E-mail: jjayan@ahut.edu.cn

收稿日期:2019-04-03

1 啤酒发酵温度分析及建模

1.1 啤酒发酵温度控制

啤酒发酵由于涉及到大量的生物化学反应,因而成为啤酒生产过程中最耗时的环节。简而言之,啤酒发酵就是糖化麦汁通过酵母菌的发酵作用,最终分解成 C_2H_5OH 、 CO_2 、 H_2O 的过程。在此期间,发酵罐内会产生诸如双乙酰、高级醇等产物。虽然此类产物的量极小,但其对啤酒最终的口感与质量却影响很大^[9]。在正常情况下,较低的发酵温度可以降低酵母活性,影响发酵速率,并最终实现较小的发酵中间产物量;较高的发酵温度可以提高酵母活性,加快发酵速率,并最终提高生产效率和经济效益。所以实现对啤酒发酵过程中温度的精确控制是确保啤酒最终质量的重要举措。

啤酒的发酵是在体积较大的封闭发酵罐中进行的,罐内发酵原料的温度分布存在一定的梯度。因此,通常采取 3 段式温控策略,即分别设置上部、中部及下部 3 段温度冷却带,分别设置 3 个阀门,每层的温度检测采取 3 个温度检测器件均匀分布同时检测,最后取其平均值作为最终该层的温度检测值。该温度检测值作为最终所要实现的控制目标,同时可作为一个被控量用来指导调节阀开度,即控制每层冷媒介质的流量值。

由于啤酒发酵罐中存在热对流现象,并且上部冷媒介质流量的大小也会影响中下部的发酵液温度。因此啤酒发酵温度控制系统是一个输入和输出之间存在耦合的系统。并且随着时间的变化,啤酒发酵所要求的温度会有所变化,因此该系统还是一个时变系统。通过对大量现场采集的数据进行分析,可确定本系统的多输入多输出之间虽然存在耦合关系,但耦合作用不是很强,基本上每层的温度控制回路就可以进行单独控制。由于发酵罐上部的液体大多是气液混合物,而发酵罐下部通常为酵母堆积的液体,因而上部测温点和下部测温点所检测到的温度值通常不作为控制量。因此将中部测温点检测到的温度值作为主要控制量。

啤酒发酵的工作原理:控制系统通过温度传感器实时测量发酵罐中的温度变化,并将其传送到 PC,进而传送给 PLC 控制器,控制器向电磁阀传输信号以调节阀门的开度,从而改变冷媒介质流量。冷媒介质通过发酵罐壁与发酵罐内发酵液进行热交换,最终使得发酵液的温度控制在理想的温度范围内。

从图 1 可以看出,啤酒发酵温度工艺主要可以分为 1 个自然升温阶段、3 个保温阶段以及 2 个降温阶段三部分。其中前期的自然升温阶段由于是生化反应放热速率慢,因而调控简单,采用常规 PID 控制即可满足控制要求。3 个保温阶段主要指的是前酵阶段、还原阶段和低温贮酒阶段,由于该阶段的主要控制目标是保持温度不变,

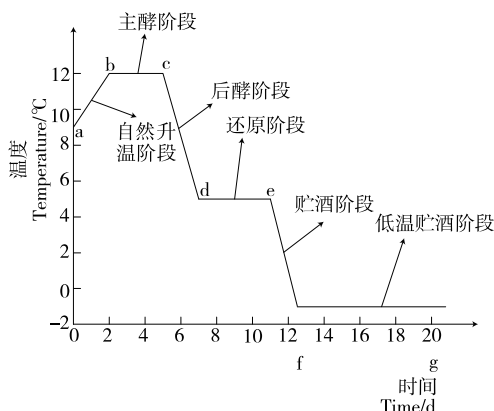


图 1 啤酒发酵过程中的温度工艺曲线

Figure 1 Temperature curve during beer fermentation

不出现较大的超调或者抖动,因而对其进行控制也不难。主要的控制难点在两个降温阶段,因为降温阶段要求等速降温,而自然升温阶段所产生的热量较少,另外,使用冷媒冷却降温会有时间滞后,所以采用常规 PID 对啤酒发酵温度进行调节控制会产生较大超调量,较慢的响应调节,进而导致温度的误差偏大,影响最终的啤酒质量^[10-11]。基于此,选择更加先进的控制算法来实现对两个降温阶段的温度控制尤为重要。

根据啤酒发酵过程中的温度工艺要求,设计了一种基于 Smith 预估补偿的非线性 PID 控制器来调节啤酒发酵温度,如图 2 所示。

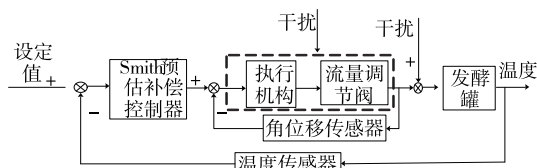


图 2 啤酒发酵温度控制原理

Figure 2 The temperature control principle of beer fermentation

考虑到啤酒生产过程中的复杂环境,作用在流量调节阀的各种干扰将导致其开度不准确。因此,执行器与调节器之间采用闭环控制,最终实现流量调节阀的准确定位。由于啤酒发酵过程中,微生物在发酵罐中持续不断的生化反应,发酵罐内的温度不断变化,因此为了保证发酵温度按照理想的发酵温度曲线进行变化,需要对发酵罐中温度进行监测并反馈给温度设定值,最终实现自动控制。

1.2 啤酒发酵温度模型

由于啤酒发酵的反应机理复杂,采用机理建模方法很难获得精确的温度模型,但可以据此对发酵温度模型所具有的一些动态特性进行分析^[12-14]。因此,可以根据发酵过程中生物化学反应的热平衡原则来对啤酒发酵温

度模型进行近似描述^[15]。由于发酵罐的体积大,因此进行模型构建时,需做出如下假设:

- ① 考虑某固定时间段的一段发酵过程;
- ② 忽略微生物生长产生的热;
- ③ 忽略热传递时的热损失;
- ④ 忽略冷媒介质、发酵罐壁和发酵液三者之间的温度变化梯度。

根据热平衡原理和以上假设,可以建立以下方程:

(1) 发酵液和发酵罐壁两者之间的热平衡方程^[16]:

$$CM \frac{d\theta}{dt} = E - kS(\theta - \theta_0), \quad (1)$$

式中:

C —— 比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;

M —— 发酵液的总质量, kg ;

θ —— 发酵液的实时检测温度, $^\circ C$;

θ_0 —— 发酵罐壁的平均温度值, $^\circ C$;

E —— 发酵反应产生的热量, J/s ;

k —— 发酵罐壁和发酵液之间的传热系数, $J/(m^2 \cdot s \cdot ^\circ C)$;

S —— 发酵液和发酵罐内壁之间的接触面积, m^2 。

(2) 冷媒介质和发酵罐壁两者之间的热平衡方程^[17-19]:

$$C_1 M_1 \frac{d\theta_0}{dt} = kS(\theta - \theta_0) - k_1 S_1(\theta_0 - \theta_1), \quad (2)$$

式中:

C_1 —— 发酵罐壁的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;

M_1 —— 发酵罐壁的总质量, kg ;

k_1 —— 发酵罐壁和冷媒介质之间的传热系数, $J/(m^2 \cdot s \cdot ^\circ C)$;

S_1 —— 发酵罐壁和冷媒介质之间的接触面积, m^2 ;

θ_1 —— 冷媒介质的平均温度值, $^\circ C$ 。

(3) 冷媒介质的热平衡方程:

$$k_1 S_1(\theta_0 - \theta_1) = \rho Q C_2(\theta_3 - \theta_2), \quad (3)$$

式中:

ρ —— 冷媒介质的密度, kg/m^3 ;

Q —— 冷媒介质的流量, m^3/s ;

C_2 —— 冷媒介质的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;

θ_2 —— 冷媒介质的入口温度值, $^\circ C$;

θ_3 —— 冷媒介质的出口温度值, $^\circ C$ 。

根据式(1)~(3),可推导出:

$$s(T_1 s + 1)\theta(s) = -aQ(s) + b(T_2 s + 1)E(s), \quad (4)$$

整理后得:

$$\theta(s) = \frac{-a}{s(T_1 s + 1)}Q(s) + \frac{b(T_2 s + 1)}{s(T_1 s + 1)}E(s), \quad (5)$$

式中:

$E(s)$ —— 啤酒发酵时产生的热量, J/s ;

$Q(s)$ —— 冷媒介质的流量, m^3/s ;

a, b —— 常值;

T_1, T_2 —— 时间常数。

在啤酒发酵过程中,发酵液温度是影响酵母活性的重要因素,而酵母活性则是反应过程活跃程度的衡量标准,酵母活性高,反应速率也就高,反之反应速率低。因此,根据阿伦尼乌斯(Arrhenius)公式,发酵反应速率和发酵温度之间的关系可表示成^[20]:

$$\mu = \alpha \times \exp\left(\frac{-\beta}{\theta}\right), \quad (6)$$

式中:

μ —— 发酵反应速率, $mol/(L \cdot min)$;

α, β —— 常数;

θ —— 发酵液的实时检测温度, $^\circ C$ 。

由于发酵罐中没有搅拌装置,所以发酵罐中热量的交换传递主要通过发酵罐内的发酵液相互对流的方式进行。基于此,在对发酵温度对象的特性进行分析研究时, θ 既是时间上的函数,也是空间上的函数。综上所述,通常将发酵液的实时检测温度 θ 和冷媒介质的流量 Q 之间的关系近似描述为二阶时滞特性,其表达式如下:

$$G(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)}, \quad (7)$$

式中:

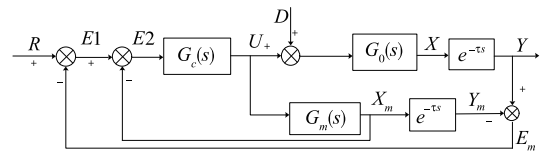
T_3, T_4 —— 时间常数;

τ —— 滞后时间, s ;

K —— 增益系数。

2 啤酒发酵温控系统算法

由于啤酒发酵过程中不同时间段对应的工艺要求以及温度控制要求有所区别,因此常规 PID 控制无法有效满足。在这种情况下,试验依据自适应控制和智能控制的基本思想并借助于计算机的优势而采用非线性 PID 控制算法^[21]。另外,由于啤酒发酵温度控制系统的大延迟和非线性,使用 Smith 预估器对其进行补偿。图 3 为采用 Smith 预估补偿的非线性 PID 的控制系统框图。



$G_c(s)$. 控制器的传递函数 $G_0(s)$. 控制系统实际的模型 $G_m(s)$. 控制系统的参考模型 R . 系统的给定量 D . 系统的扰动量 Y . 系统的实际输出 Y_m . 参考输出 τ . 该系统的纯滞后时间常量

图 3 Smith 预估补偿的非线性 PID 控制系统

Figure 3 Smith predictive compensation nonlinear PID control system

非线性 PID 控制器 $G_c(s)$ 的设计基于高斯函数。构造如下非线性函数 k_p, k_i, k_d :

$$k_p[e(t)] = a_p + b_p \{1 - \exp[-(e[t]/c_p)^2]\}, \quad (8)$$

式中, a_p, b_p, c_p 为正常数。当误差 $e(t) \rightarrow \pm \infty$ 时, k_p 取最大值 $a_p + b_p$; 当 $e(t) = 0$ 时, k_p 取最小值 a_p ; b_p 为 k_p 的变化区间; c_p 的大小是 k_p 变化的速率。

$$k_d[e(t)] = a_d + b_d \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{e[t] - d_d}{c_d}\right)^2\right]\right\}, \quad (9)$$

式中, a_p, b_p, c_p 为正实数, a_d 为 k_d 的最小值, $a_d + b_d$ 为 k_d 的最大值, 当 $e(t) = 0$ 时, $k_d[e(t)] = a_d + b_d \{1 - \exp[-(d_d/c_d)^2]\}$, k_d 的变化速率可通过调整 c_d 大小来进行调节。

$$k_i[e(t)] = a_i \exp[-(e(t)/c_i)^2], \quad (10)$$

式中, k_i 的取值范围为 $(0, a_i)$, $e(t) = 0$ 时, k_i 取最大值。 c_i 的取值决定了 k_i 的变化快慢程度。

比例增益参数 k_p 函数的变化曲线如图 4(a) 所示。从图 4(a) 中可以看出, 当 $e(t) > 0$ 时, 为保证系统有更快的响应速度和更小的超调量, k_p 随着 $e(t)$ 的增大而增大。当 $e(t) < 0$ 时, 随着 $|e(t)|$ 的增大, 为了保证系统具有好的快速性和小的超调量, k_p 也随之增大; 当 $|e(t)|$ 减小时, 为使系统尽快回到稳定点, k_p 也应减小。

微分增益参数 k_d 函数的变化曲线如图 4(b) 所示。从图 4(b) 中可以看出, 当系统的超调增加时, k_d 迅速增大, 反向控制作用随之增强, 因此系统超调量被有效抑制。

积分增益参数 k_i 函数的变化曲线如图 4(c) 所示。从图 4(c) 中可以看出, 当 $e(t)$ 较大时, 为了避免系统的响应产生振荡和减小系统的超调量, k_i 不应该选取取得过大; 当 $e(t)$ 较小时, 为了消除系统的稳态误差, k_i 要增大。

非线性 PID 调节器的控制输出为

$$\mu(t) = k_p[e(t)]e(t) + k_i[e(t)] \int_0^t e(t)dt + k_d[e(t)] \frac{de(t)}{dt}. \quad (11)$$

非线性 PID 调节器中的增益参数会随控制误差而变化, 因而其抗干扰能力强于常规线性 PID 控制器。

3 试验仿真及分析

在对一 200 L 的小型啤酒发酵罐的发酵温度控制系统进行建模之后, 确定数学模型为

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_3 s + 1)(T_1 s + 1)} = \frac{1.0357e^{-116s}}{684.5s^2 + 52.4s + 1}, \quad (12)$$

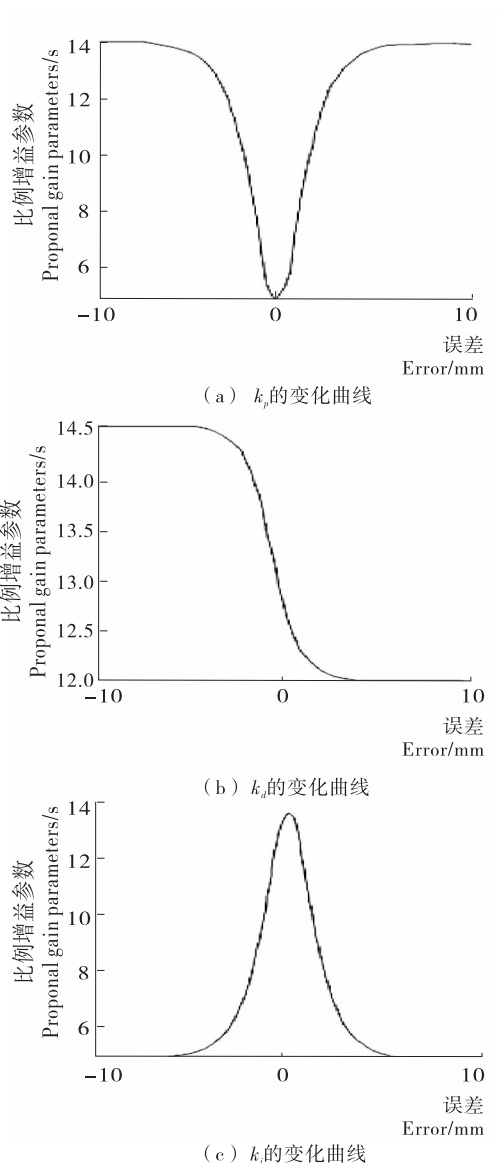


图 4 k_p, k_d, k_i 的变化曲线
Figure 4 k_p, k_d, k_i change curve

式中:

K ——放大系数, $K=1$;

T ——时间常数, $T=8$;

τ ——滞后时间常数, $\tau=3$ 。

通常情况下, 当 $\frac{\tau}{T} > 0.3$, 默认此过程为大滞后过程。

常规 PID 和基于 Smith 预估补偿的非线性 PID 的仿真曲线图如图 5 所示。

运行时间为 2 000 s。当运行时间为 1 000 s 时, 向系统添加一个幅值为 0.05 的阶跃信号作为干扰信号。根据仿真结果, 基于 Smith 预估补偿的非线性 PID 控制具有更好的抗干扰性。表 1 为两种控制器的动态性能指标对比情况。

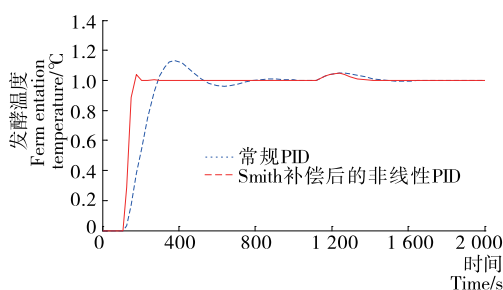


图5 啤酒发酵温度控制仿真曲线

Figure 5 Simulation curve of beer fermentation temperature control

表1 控制器的动态性能指标

Table 1 Controller dynamic performance indicators

控制器	超调量/%	上升时间/s	峰值时间/s
常规 PID	13.09	127.9	373.6
Smith 预估补偿	2.68	33.8	185.2

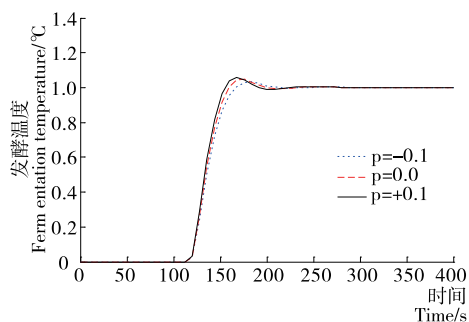
从图5和表1可以看出,Smith 预估补偿的非线性 PID 控制优于常规 PID 控制,具有更好的动态性能和抗干扰性,更短的响应时间,更小的超调量。

在实际的啤酒发酵温度控制系统中,由于阀门等设备的老化、校测中存在的误差等原因,整个系统具有不确定性,所以采用参数摄动对其进行描述。被控对象随机摄动可写成如下形式:

$$G(s) = \frac{K(1+p)e^{-\tau s}}{(T_3s+1)(T_4s+1)} = \frac{1.0357(1+p)e^{-116s}}{684.5s^2 + 52.4s + 1}, \quad (13)$$

式中,选取 p 的摄动区间为 $[-0.1, +0.1]$,即被控对象的3种摄动情况分别为 $p=+0.1, p=0, p=-0.1$ 。阶跃信号用于仿真分析, K 的摄动仿真曲线如图6所示。

由图6可知,当 K 在摄动区间 $[-0.1, +0.1]$ 随机波动时:如果增益 K 增大,则该控制器跟随设定值的响应速度变快,调节时间变短;如果增益 K 减小,则该控制器跟随设定值的响应速度变慢,调节时间变长。但最终所有

图6 K 的摄动仿真曲线Figure 6 K 's perturbation simulation curve

的均可趋于稳态。因此,当参数 K 摄动时,试验所设计的控制系统可以保持比较好的鲁棒性和动态控制品质。

4 应用案例

对于 200 L 的小型啤酒发酵罐的啤酒发酵温度控制系统,使用现有的西门子 S7-300PLC 作为控制器,用力控组态软件进行上位机监控程序的开发,控制器调节周期设置为 7~9 s。用 SCL 语言进行编程,将编写的 FB1 作为非线性 PID 控制器,而编写的 FC1 用于计算 k_p, k_i, k_d 的值。上位机可显示啤酒发酵温度的变化趋势。图7、8分别为应用常规 PID 和 Smith 预估补偿的非线性 PID 时的啤酒发酵温度波动曲线图。图7中3个保温阶段的温度控制范围分别为 $\pm 1.0, \pm 0.5, \pm 0.7$ °C。图8中3个保温阶段的温度控制范围分别为 $\pm 0.30, \pm 0.25, \pm 0.30$ °C。后者具有比前者更高的控制精度,而后者对于外部的扰动具有很强的抗干扰能力。

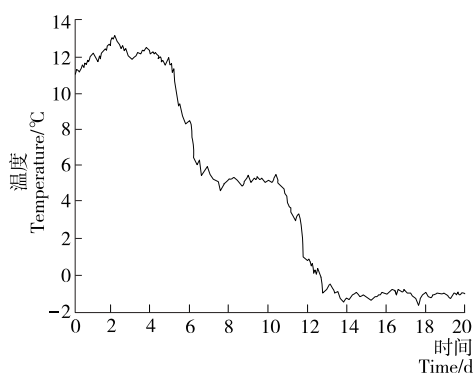


图7 常规 PID 应用曲线

Figure 7 Application curve of conventional PID

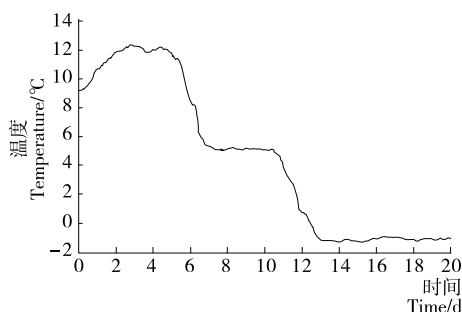


图8 Smith 补偿的非线性 PID 应用曲线

Figure 8 Smith compensation nonlinear PID application curve

5 结论

研究介绍了啤酒发酵温度控制的工艺流程,针对啤酒发酵温度所具有的大时滞性和分阶段性等特点,提出基于 Smith 预估补偿的非线性 PID 控制策略。与已有的研究差异在于有效地提高了温度控制的快速性和稳定性,并具有较强的抗干扰能力,此外,研究运算简单,适合

工厂的应用,可以满足啤酒发酵温度的控制要求。

尽管研究的控制策略较简单且实用,但啤酒发酵温度是个建模难的过程,研究也只针对几个重要的特点来设计控制器,寻找更精确的对象模型是下一步研究的重点,而且建模过程中的影响因素较多,需要较多的实际经验,都有待于进一步的研究。

参考文献

- [1] 李楠楠,袁文杰,王娜,等. 菊粉酶基因在酿酒酵母中的表达及乙醇发酵[J]. 生物工程学报, 2011, 27(7): 1 032-1 039.
- [2] 俞静,江佳稀,张永强,等. 鹰嘴豆孢克鲁维酵母利用菊芋原料同步糖化与发酵生产乙醇[J]. 生物工程学报, 2010(7): 982-990.
- [3] 汪伦记,董英,以菊芋粉为原料同步糖化发酵生产燃料乙醇[J]. 农业工程学报, 2009(11): 263-268.
- [4] 庞会利,李景原,秦广雍. 耐高温乙醇酵母的研究现状及进展[J]. 酿酒科技, 2008(2): 99-102.
- [5] 焦晓红,方一鸣,吴晓明. 连铸结晶器振动位置环的非线性 PID 控制器设计及应用[J]. 自动化仪表, 2001, 22(7): 4-5.
- [6] 姜琳,刘衍珩,关立文,等. 基于模糊神经网络与动态规划的控制优化算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2 229-2 230.
- [7] 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.
- [8] 孙家琪,蒋念平. 啤酒发酵罐温度的快速抗干扰预测控制[J]. 信息技术, 2014(12): 9-12, 16.
- [9] 毕德成,张道雷,郭东波. 工业生产中啤酒发酵度影响因素的研究[J]. 中国酿造, 2012(12): 116-118.
- [10] 任晓璞,李明杨,陈胜慧子,等. 乳酸菌分离及混菌培养对酿酒酵母乙醇发酵的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 255-259.
- [11] 李丙才,姜映红,叶碧成. 啤酒发酵过程模糊智能 PID 控制[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(6): 68-71.
- [12] WANG De-jin. Synthesis of PID controllers for high-order plants with time-delay[J]. Journal of Process Control, 2009(10): 1 763-1 768.
- [13] 赵莎茹. 发酵过程中温度模糊控制的研究[J]. 天津工业大学学报, 2008, 27(4): 70-73.
- [14] 王建国,顾延权,曹广益,等. 时滞系统的最优 PID 控制与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 2 995-2 998.
- [15] 杜锋,雷鸣. 啤酒发酵过程温度控制策略[J]. 酿酒, 2002(6): 50-52.
- [16] TORSTEN B, ANDREAS G. Optimal control of beer fermentation processes with Lipschitz-constraint on the control[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2014, 120(4): 444-458.
- [17] 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.
- [18] 才辉,张光新,周泽魁. 基于 T-S 模型的动态预测在啤酒发酵温度控制中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2005(S2): 745-747.
- [19] 薛福珍,庞国仲,林盛荣. 啤酒发酵过程的建模仿真与控制[J]. 中国科学技术大学学报, 2001, 31(4): 502-508.
- [20] TRELEA I C, TITICA M, LANDAUDS, et al. Predictive modelling of brewing fermentation: From knowledge-based to black-box models[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2001(4): 405-424.
- [21] 章家岩,钱宏,冯旭刚,等. 基于 Smith 预估补偿的连铸结晶器液位控制策略[J]. 中国机械工程, 2012, 23(16): 1 947-1 951.
- [13] 蒋梅胜,李恒,李林书,等. 基于 CFD-DEM 耦合法的灭风机风筒优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 104-111.
- [14] 施重驹,张宪,钟江,等. 基于多相流耦合的热风杀青过程与杀青机结构优化研究[J]. 机电工程, 2015, 32(8): 1 050-1 055.
- [15] 张丽丽,王相友. 红外辐射加热技术在果蔬脱水干燥中的应用研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 193-195.
- [16] 顾强,张世豪,安晓红,等. 基于 FLUENT-EDEM 耦合的爆炸抛掷特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(5): 611-616.
- [17] 石林榕,吴建民,赵武云,等. 基于 CFD-EDEM 耦合的小区玉米帘式滚筒干燥箱数值模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 273-278.
- [18] 李志杰,王素芬,黄剑虹,等. 基于 EDEM 绿茶滚筒杀青机温度场研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(23): 235-237.
- [19] 黄思. 流体机械数值仿真研究及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2015: 105.
- [20] 何磊,张宪,赵章风,等. 基于 PFC3D 的茶叶杀青过程数值模拟和设备参数分析[J]. 茶叶, 2013, 39(1): 17-23.

(上接第 109 页)

- [5] 袁海波,许勇泉,邓余良,等. 绿茶电磁内热滚筒杀青工艺优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 250-258.
- [6] 詹星星,赵章风,钟江,等. 茶叶杀青机电磁加热过程模拟及关键参数设计[J]. 机电工程, 2018, 35(1): 43-47.
- [7] 王相友,操瑞兵,孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2007(7): 177-182.
- [8] 孙传祝,王相友. 红外玉米穗干燥机设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 137-140.
- [9] 渠琛玲,王红亮,刘畅,等. 粮食辐射干燥的研究进展[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 186-189.
- [10] 吴全金,孙威江,吴占富. 远红外加热技术在茶叶加工及制品中的研究进展[J]. 农机化研究, 2014, 36(4): 220-224.
- [11] 虞文俊,熊爱华,刘仲寿,等. 基于 LabVIEW 和 Arduino 的茶叶红外杀青机控制系统设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 110-114.
- [12] 戴聪聪,龙小建,罗小燕,等. 基于 FLUENT-EDEM 耦合的离心选矿机搅拌器仿真分析[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(7): 93-98.

- [13] 蒋梅胜,李恒,李林书,等. 基于 CFD-DEM 耦合法的灭风机风筒优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 104-111.
- [14] 施重驹,张宪,钟江,等. 基于多相流耦合的热风杀青过程与杀青机结构优化研究[J]. 机电工程, 2015, 32(8): 1 050-1 055.
- [15] 张丽丽,王相友. 红外辐射加热技术在果蔬脱水干燥中的应用研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 193-195.
- [16] 顾强,张世豪,安晓红,等. 基于 FLUENT-EDEM 耦合的爆炸抛掷特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(5): 611-616.
- [17] 石林榕,吴建民,赵武云,等. 基于 CFD-EDEM 耦合的小区玉米帘式滚筒干燥箱数值模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 273-278.
- [18] 李志杰,王素芬,黄剑虹,等. 基于 EDEM 绿茶滚筒杀青机温度场研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(23): 235-237.
- [19] 黄思. 流体机械数值仿真研究及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2015: 105.
- [20] 何磊,张宪,赵章风,等. 基于 PFC3D 的茶叶杀青过程数值模拟和设备参数分析[J]. 茶叶, 2013, 39(1): 17-23.