

基于预测函数控制的煮沸锅温度控制系统

尚继良, 苗建

(青岛科技大学自动化学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 针对啤酒煮沸这个复杂的带有时滞的非线性过程, 设计了一种多模型预测函数控制算法来实现温度的精确控制。仿真结果表明, 该控制算法能实现温度的快速平滑上升, 过程无超调, 满足生产工艺的要求。

关键字: 啤酒生产; 预测函数控制; 煮沸锅; 时滞时变

中图分类号: TS262.5; TS261.4; TP27 文献标识码: A 文章编号: 1001-9286(2009)10-0048-03

Boiler Temperature Control System Based On Predictive Functional Control

SHANG Ji-liang and MIAO Jian

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266042, China)

Abstract: In view of the complex time-varying delay nonlinearized process of beer boiling, a multi-model predictive functional control algorithm was proposed to achieve accurate control of the temperature. The simulation results showed that such control algorithm could realize temperature rise fast and smoothly and there was no overshoot in the whole process, which met the requirements of beer production.

Key words: beer production; predictive functional control; boiler; time-varying delay

近年来, 中国啤酒工业已经取得了令人瞩目的成就, 不仅在产量方面跃居世界第二位, 而且在质量、技术、装备水平等方面也都有了较大幅度的提高。但我国啤酒与世界发达国家相比, 仍有很大差距, 一些中小型啤酒厂的规模太小, 投资低, 装备自控水平较为落后。针对某啤酒厂生产过程中煮沸锅的温度控制这一实际被控对象, 由于采用传统的 PID 控制不能满足实际要求, 本文将多模型预测函数控制算法 (MMPFC-multi-model predictive functional control) 应用于煮沸锅的温度控制中, 满足了实际要求, 提高了效率, 消除了人为因素的影响。

1 啤酒煮沸过程

煮沸锅的溢锅现象在啤酒厂糖化生产中比较常见。煮沸过程可分为 3 个阶段, 即预热、初沸与煮沸。

预热指的是在过滤麦汁没过加热器表面后进行, 这个时候的蒸汽量开得较小。预热过程的目的主要是考虑在过滤期间, 麦汁会自然冷却, 使温度降下来, 若等滤完后再加热, 耗费时间长, 所以预热过程可以起到保温和缓慢升温的作用(或用热水通过薄板换热器预热)。此时的主要加热方式是传导, 此时不会产生溢锅。

初沸即麦汁开始沸腾, 初沸的时间不应该超过 30 min, 此阶段的蒸汽量还没开足, 蒸汽量不是很大, 洗糟过程仍在进行, 此阶段的作用是为蒸发作准备, 一旦洗

糟完毕, 立即可以进行蒸发。初沸阶段的主要加热方式是传导和对流兼而有之。靠近加热面的麦汁, 达到汽化温度, 产生大量气泡溢出麦汁外面; 而不靠近加热面的麦汁还没有达到汽化温度, 不能形成强烈对流。因此, 不能把上面的气泡打破, 因而易形成溢锅现象。

煮沸阶段蒸汽量开到最大, 使麦汁保持激烈的沸腾状态。此时的主要加热方式是对流。煮沸质量的好坏, 对麦汁的清亮度和可凝固性氮含量有着明显的影响, 通常以煮沸强度来评价。

麦汁进入煮沸锅后, 便开始升温进行煮沸。通常情况下, 麦汁温度达到 100℃后开始计算煮沸时间。当然, 应根据啤酒的品种、工艺以及质量要求, 来具体确定麦汁的煮沸时间。合理地延长煮沸时间, 对蛋白质凝固、提高酒花利用率和还原物质的形成是有利的, 但对泡沫性能不利; 过分地延长煮沸时间, 不仅会消耗大量能源, 麦汁质量也会下降。煮沸时间一般为 70~90 min。

溢锅的一般原因为煮沸锅加热面积小, 蒸汽压力不强, 致使初沸阶段时间过长, 而出现溢锅现象。所以应尽可能提高初沸阶段的蒸汽压力, 缩短初沸时间。同时, 麦汁在管束中流速较低, 如果蒸汽压力控制不好而造成蒸汽温度过高时, 就会出现麦汁局部过热现象, 导致麦汁色泽加深、口味变差, 从而影响成品啤酒的质量。

溢锅现象直接影响煮沸强度, 而煮沸强度的好坏对

收稿日期: 2009-07-03

作者简介: 尚继良(1956-), 男, 副教授, 从事工业过程建模与控制研究; 苗建(1984-), 男, 硕士研究生, 从事工业过程建模与控制研究。

麦汁质量的好坏十分重要。良好的煮沸强度可以增加洗糟水用量,多回收浸出物,提高原料利用率;可以缩短煮沸时间,提高设备利用率;有利于蛋白质性凝固;有利于麦汁澄清,可以多挥发一些风味不好的成分;有利于酒花中有效成分的溢出,以及 α -酸的异构化,提高酒花利用率等。因此,选择合适的控制方法尤为重要。

2 预测函数控制的基本原理

预测函数控制是在保持模型预测控制优点的同时,将使所产生的控制输入更具规律性,并且可有效地减少算法计算量,从而能适应一类快速响应被控对象对控制算法的快速要求。

2.1 基函数

在预测函数控制中,把控制输入规范为确保控制系统输出满足参考轨迹的关键。因此,在PFC中新引入的控制输入表示为若干已知基函数 $f_j(j=1,2,\dots,n)$ 的线性组合:

$$u(k+i) = \sum_{j=1}^n \mu_j f_j(i) \quad (i=0,1,\dots,p-1)$$

式中: $f_j(j=1,2,\dots,n)$ 为基函数, μ_j 是线性组合权函数, $f_j(i)$ 表示基函数 f_j 在 $t=iT$ 时的值, P 为预测步长。当 $i=0$ 时, $u(k) = \sum_{j=1}^n \mu_j f_j(0)$ 为当前实际的控制输入,表示基函数中至少有一个函数 $f_j(0) \neq 0$,以确保控制输入不为零。

函数的选择,主要取决于参考轨迹和受控对象的特性,可取为阶跃、斜坡、指数函数等。此外,为保证 n 个加权系数必须从 P 个预测点求取,因此,必须使 $P \geq n$ 。

2.2 预测模型

在预测函数控制中,用内模来预测对象输出作为预测模型。对于单输入-单输出系统,模型预测值可由模型自由输出和模型函数输出两部分组成。

(1) 模型自由输出

$$y_m(k+i) = F(X(k)) \quad (i=1,2,\dots,p)$$

式中: $X(k)$ 矢量为已知信息,包括过去时刻的控制量和输入量,以及对未来控制输入的设定,如 $u(k+i)=0$ 或 $u(k+i)=u(k-1)$ 等; F 是对象预测模型的数学表达式。模型自由输出是指 k 时刻的输出预测值是尚未考虑该时刻新加入的控制作用前的输出。

(2) 模型函数控制

$$y_f(i) = \sum_{j=1}^n \mu_j h_j(i) \quad (i=1,2,\dots,p)$$

式中: $h_j(i)$ 为基函数响应, μ_j 是加权系数。它表示 k 时刻起加入控制作用 $u(k+i)$ 后新产生的模型输出。

2.3 参考轨迹

这是一条要求模型输出值最终趋近于设定值的轨迹。它完全决定于预测控制器设定该系统闭环响应的要求,对于渐进稳定系统而言,通常取为一阶指数函数,如设定值为 $y_s(k+i)$ 与参考轨迹 $y_r(k+i)$ 间的误差 $e(k+i)$,即:

$$e(k+i) = y_s(k+i) - y_r(k+i) = a_r^i e(k)$$

式中:衰减系数 $a_r = \exp(-\frac{T_s}{T_r})$, T_s 为采样周期, T_r 为到达95%的参考轨迹的过渡时间;则一阶指数形式的参考轨迹为:

$$y_r(k+i) = y_s(k+i) - a_r^i (y_s(k) - y_p(k))$$

式中: $y_p(k)$ 为 k 时刻模型输出预测值,设定值通常以多项式给出:

$$y_s(k+i) = y_s(k) + \sum_{l=1}^m y_{sl}(k) i^l$$

式中: m 是多项式阶数; $y_{sl}(k)$ 是 k 时刻设定值 $y_s(k)$ 的 l 阶导数。

2.4 滚动优化算法

优化目标就是寻求一组加权系数 $\mu_j(j=1,2,\dots,n)$,使预测输出在优化时域内尽量接近参考轨迹。通常优化目标一般是 $\min[Y(k+i) - Y_f(k+i)]$,则取二次型性能指标为:

$$\begin{aligned} \min J_p &= \sum_{i=1}^p [y_f(i) - y(k+i)]^2 = \sum_{i=1}^p [y_f(k+i) - y_r(k+i)]^2 \\ &= \sum_{i=1}^p [y_m(k+i) + y_f(i) + e(k+i) - y_r(k+i)]^2 \end{aligned}$$

这是一个对加权系数 $\mu_j(j=1,2,\dots,n)$ 的参数优化问题,在解出 μ_j 后,可得到 k 时刻有基函数产生的控制输入 $u(k+i)(i=0,1,\dots,P-1)$ 。

综上所述,预测函数控制基本原理见图1。

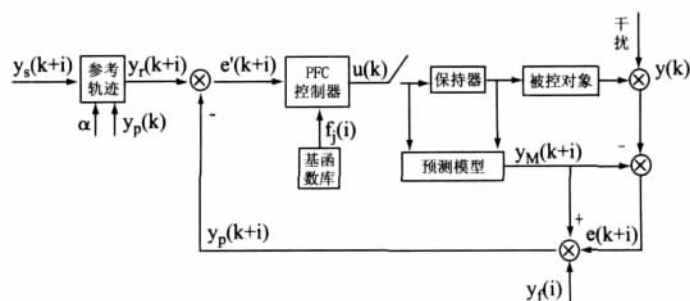


图1 预测函数控制基本原理图

3 多模型 PFC 算法的切换

由于煮沸锅系统在加热段和煮沸段的模型不同,如啤酒煮沸过程实际工艺如图2所示,对实际过程辨识得

加热阶段和加压煮沸阶段的传递函数如下:

$$G_1(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}, G_2(s) = \frac{K_2}{T_2 s + 1} e^{-\tau s}$$

采用一个阶跃基函数时,加热阶段和加压煮沸阶段参考模型的传递函数如下:

$$G_{r1}(s) = \frac{K_{r1}}{T_{r1} s + 1} e^{-\tau s}, G_{r2}(s) = \frac{K_{r2}}{T_{r2} s + 1} e^{-\tau s}$$

采用多模型控制算法时,如果在 P 步导前预测过程中,预测模型发生了改变,则要根据不同的模型进行输出预测。因此, K 时刻 P 步导前模型预测值 $y_m(k)$ 可分为 3 种情况求解,得到相应的控制输出值分别为:

(1) 当 $k+P \leq k_0$ 时,控制输出为:

$$u(k) = \frac{c(k+P) - \beta^p c(k) - \gamma(k)(1 - \beta^p) + y_m(k)(1 - a_1^p)}{K_{m1}(1 - a_1^p)}$$

(2) 当 $k_0 < k+P \leq k_0+P$ 时,令 $P_0 = k_0 - k$,控制输出为:

$$u(k) = \frac{c(k+P) - \beta^p c(k) - \gamma(k)(1 - \beta^p) + y_m(k)(1 - a_{m2}^{P-P_0} a_{m1}^{P_0})}{K_{m1} a_{m2}^{P-P_0} (1 - a_{m1}^{P_0}) + K_{m2} (1 - a_{m2}^{P-P_0})}$$

(3) 当 $k+P > k_0+P$ 时,控制输出为:

$$u(k) = \frac{c(k+P) - \beta^p c(k) - \gamma(k)(1 - \beta^p) + y_m(k)(1 - a_2^p)}{K_{m2}(1 - a_2^p)}$$

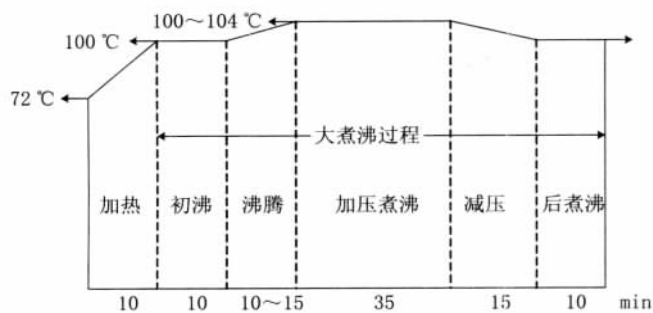


图 2 煮沸的温度曲线图

4 仿真示例

煮沸锅的温度控制对象可近似为一个带有纯滞后的二阶时变系统,参考模型可按式选择:

$$G(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s},$$

式中: K 、 T 、 τ 可选取为实际过程近似的比例增益、响应时间和滞后时间。

对实际过程辨识得加热阶段和加压煮沸阶段的传递函数如下:

$$G_1(s) = \frac{0.55}{150 s + 1} e^{-30s}, G_2(s) = \frac{0.32}{190 s + 1} e^{-30s}$$

相应的取加热阶段和加压煮沸阶段参考模型的传递

函数如下:

$$G_{r1}(s) = \frac{0.61}{140 s + 1} e^{-30s}, G_{r2}(s) = \frac{0.35}{200 s + 1} e^{-30s}$$

取采样时间为 10 s, 延迟时间为 3 个采样时间, 即 30 s。取预测时域优化长度为 10 时, 并与传统 PID 控制比较, 仿真结果见图 3。

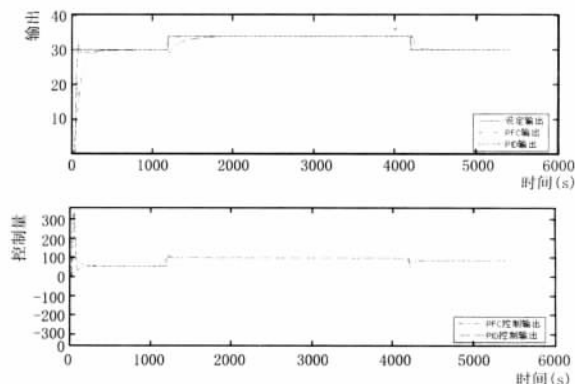


图 3 煮沸锅温度控制系统仿真效果图

由图 3 可以看出, 多模型预测函数控制比普通 PID 控制更能获得良好的动态性能, 稳定速度快, 并且无超调, 抗干扰能力强。

5 结论

本文针对啤酒煮沸锅系统提出了一种多模型预测函数控制算法, 与传统的 PID 控制算法相比, 该算法具有在线计算量小、控制输入较平滑等特点。通过进行控制过程仿真, 并与函数控制效果进行比较, 说明了该算法具有响应速度快、无超调量、抗干扰能力强、鲁棒性好的优点, 结果表明, 该算法比传统 PID 控制有更好的控制品质。

参考文献:

- [1] 林兴华, 刘飞鸣, 胡锡文, 等. 煮沸锅的传热与流动研究—煮沸锅的传热(1)[J]. 啤酒科技, 2004, (10): 23-25.
- [2] 宁瑾, 张泉灵, 苏宏业. 多变量一阶加纯滞后系统的预测函数控制[J]. 信息与控制, 2007, 36(6): 702-707.
- [3] Wolfgang Kunze. 啤酒工艺实用技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.
- [4] 黄德先, 叶心宇, 竺建敏, 等. 化工过程先进控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] Richalet J, Abuel Ata-Doss S, Arber D, et al. Predictive functional control: Application to fast and accurate robots[A]. Proc of IFAC 10th World Congress[C], Munich, 1987. 251-258.

欢 迎 订 阅 《 酿 酒 科 技 》