

啤酒发酵罐温度的计算机控制 及 仿 真 研 究

康 赐 荣

(电子工程系)

摘 要

本文研讨啤酒发酵罐温度的计算机控制及调节规律。利用仿真技术对 PID 参数、静态前馈系数进行优化。并对带与不带纯滞后补偿的反馈及前馈-反馈控制系统的性能进行了比较。仿真结果表明,加前馈控制后,控制质量有显著的提高。

前 言

麦汁发酵是啤酒生产中的一道关键工序。锥形罐内装有酵母及经糖化后的麦汁(图1)。麦汁在发酵过程中温度要升高,同时分解出一些气体。为使麦汁在良好的温度条件下进行发酵,以提高啤酒的质量和产量,需对温度按工艺要求(图2)进行自动调节,还要求上、中、下层之间温差不超过 0.5°C 。为此需分别检测上、中、下层液温,根据相应调节规律,分别控制上、中、下层冷却液的流量。

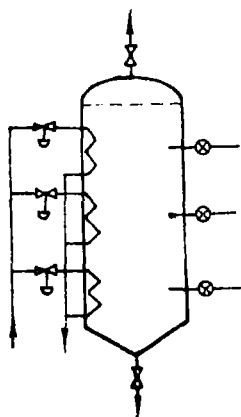


图 1 罐温检测及控制配置图

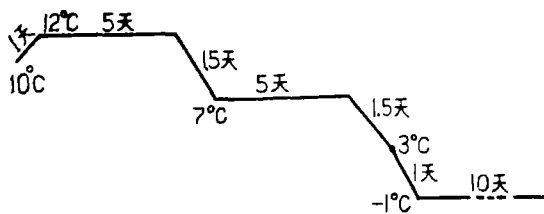


图 2 温度的工艺曲线

本文1986年1月11日收到。

一、反 馈 控 制

按被调量与给定值偏差的比例、积分和微分控制(简称PID控制)是过程控制中应用最广泛的一种控制规律。计算机控制系统利用采样方式不断对各测温点进行巡回检测和控制。对这种离散系统(图3)的PID可用下列差分方程表示

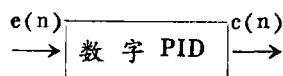


图3 数字PID控制器

$$c(n) = c(n-1) + K_p \{e(n) - e(n-1)\} + \frac{T_s}{T_i} e(n) + \frac{T_d}{T_s} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \quad (1)$$

式中, $e(n-2)$ 、 $e(n-1)$ 、 $e(n)$ 分别为第 $(n-2)$ 、 $(n-1)$ 、 n 次采样所获得的偏差信号; $c(n-1)$ 、 $c(n)$ 分别为第 $(n-1)$ 、 n 采样周期PID调节器的输出信号; K_p 、 T_i 、 T_d 分别为PID调节器的比例系数、积分时间常数、微分时间常数; T_s 为采样周期。

下面导出便于参数寻优用的算式。对式(1)进行z变换得:

$$C(z) = z^{-1}C(z) + K_p \{E(z) - z^{-1}E(z)\} + \frac{T_s}{T_i} E(z) + \frac{T_d}{T_s} [E(z) - 2z^{-1}E(z) + z^{-2}E(z)]$$

整理得

$$D(Z) = \frac{C(z)}{E(z)} = \frac{A + Bz^{-1} + Cz^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (2)$$

式中

$$A = K_p \left(1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right)$$

$$B = -K_p \left(1 + \frac{2T_d}{T_s} \right)$$

$$C = K_p \frac{T_d}{T_s}$$

而

$$K_p = -(B + 2C)$$

$$T_d = \frac{CT_s}{K_p}$$

$$T_i = \frac{K_p T_s}{A - K_p - C}$$

二、前馈-反馈控制

对于大纯滞后和大时间常数的对象,从干扰出现,到被调量发生变化,进而改变控制作用,延迟时间长,被调量波动大。若调节器一检测到干扰的出现,就立即产生相应的控制作用,则被调量波动小,控制“及时”,这种控制称为前馈控制。因此,常把前馈控制与反馈控制结合起来,组成前馈-反馈控制(图4)。

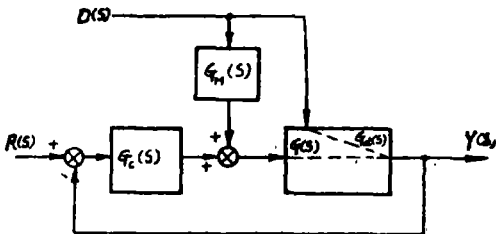


图 4 前馈-反馈控制系统方框图

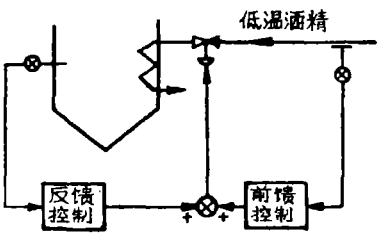


图 5 啤酒发酵罐温度的前馈-反馈控制系统

由于低温酒精入口压力的变化，因此对应于同样阀门开度，酒精流量不同，为了控制及时，需对酒精入口压力进行前馈控制(图 5)。

由完全补偿要求可得

$$G_M(s) = - \frac{G_d(s)}{G(s)} \tag{3}$$

式(3)就是理想的前馈调节器的调节规律。式中 $G(s)$ 为对象控制通道的传递函数， $G_d(s)$ 为对象干扰通道的传递函数。

当干扰通道和控制通道的动态特性相近，时间常数相差不大时，采用静态前馈即可。这时

$$G_M(s) = - \frac{G_d(s)}{G(s)} \approx K_f \tag{4}$$

式中， K_f —静态前馈系数。下面将用仿真方法由参数寻优确定。

三、纯 滞 后 补 偿

可以证明，对图 6 所示的单回路控制系统，可用图 7 所示的纯滞后补偿控制系统来补偿

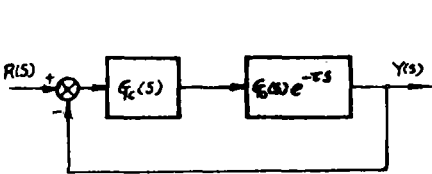


图 6 纯滞后对象的单回路控制系统

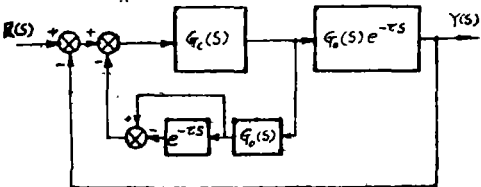


图 7 具有纯滞后补偿的控制系统

对象的纯滞后。图中 $G(s) = G_0(s)e^{-\tau s}$ ， $G_0(s)$ 为对象不包括纯滞后部分的传递函数， $e^{-\tau s}$ 为对象纯滞后部分的传递函数。

由图 7 不难导出该系数的传递函数为：

$$\begin{aligned} G_{cr}(s) &= \frac{Y(s)}{R(s)} \\ &= \left[\frac{G_c(s)G_0(s)}{1+G_c(s)G_0(s)} \right] e^{-\tau s} \end{aligned} \tag{5}$$

可见，经纯滞后补偿后， $e^{-\tau s}$ 在闭环控制回路之外，它不影响系统的稳定性及其质量指标，仅使控制过程在时间轴上推迟了时间 τ 。

四、仿 真 研 究

1. 传递函数

广义对象(包括发酵罐、检测元件、执行元件等)的传递函数，及有关参数可用计算或实验方法获得。本文参考了文献[2]、[3]中的处理方法，考虑了广义对象的两个主要的容积效应，它们分别以反应液温度对冷却管壁温度响应的时间常数 T_1 和冷却管壁温度对冷却液温度响应的时间常数 T_2 来表征，其余容积效应一并归入纯延迟中，又温度以阀门全开所对应的温度为基准值的标么值表示，时间常数、纯延迟时间以采样周期($T_s=10$ 分)为基准值的标么值表示，阀门开度以全开度的标么值表示，这样，广义对象的控制通道的传递函数取为

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{T(s)}{l(s)} \\ &= \frac{e^{-3.7s}}{(5s+1)(0.45s+1)} \\ &= \frac{0.444e^{-3.7s}}{s^2+2.422s+0.444} \end{aligned} \tag{6}$$

式中， T 为罐内液温； l 为阀门开度。

压力波动所对应的对象干扰通道的传递函数取为

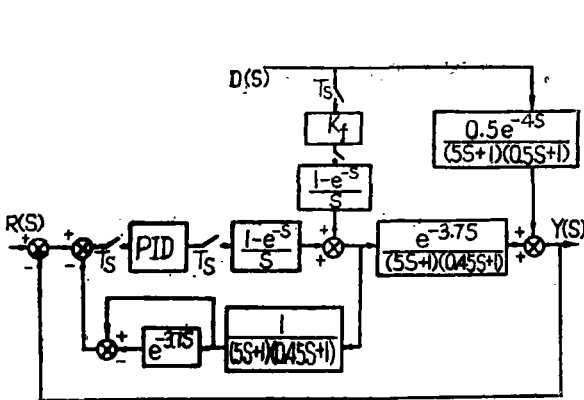


图 8 带有纯滞后补偿的前馈-反馈控制系统框图

$$\begin{aligned} G_d(s) &= \frac{T(s)}{P(s)} \\ &= \frac{0.5e^{-4s}}{(5s+1)(0.5s+1)} \\ &= \frac{0.2e^{-4s}}{s^2+2.2s+0.4} \end{aligned} \tag{7}$$

式中， P 为低温酒精调节阀前压力。

2. 参数优化

图 8 为带有纯滞后补偿的前馈-反馈控制系统框图。图 9 为相应的仿真图。目标函数取为 $Q = \int_0^{T_2} t|e(t)|dt$ ， T_2 为总仿真时间。利用 ZFX 仿真程序包(包括几个自定义模块)对 PID 参数，

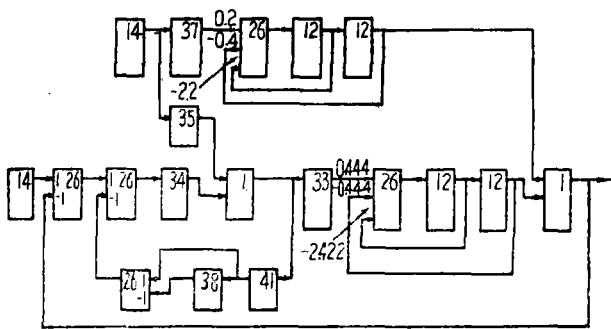


图 9 图 8 的仿真图
35—自定义模块，功能同34
37、38—自定义模块，功能同33。

及静态前馈系数进行寻优，结果如表 1。

表 1				
	K_p	T_i	T_d	K_f
对象控制通道不带纯滞后补偿	0.902	6.01	1.289	-0.526
对象控制通道带纯滞后补偿	3.058	20.25	0.049	-1.93

3. 控制系统性能

在各自最优参数下，对各种情况进行仿真研究，结果如图 10 和图 11 所示。图 10 为单位阶跃给定量作用下，被调量(罐内液温)的变化情况。由 PDP—11/34 计算机打印出的数据，

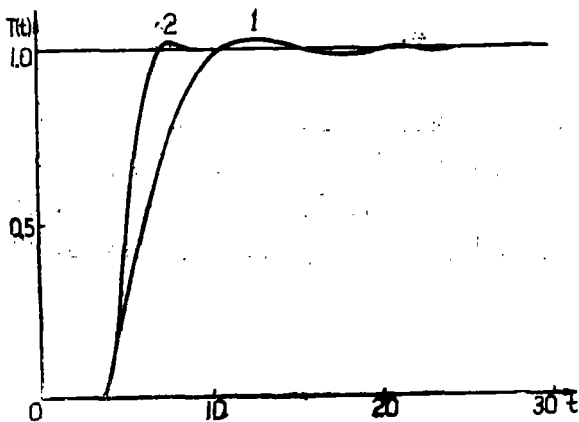


图 10 单位阶跃给定值作用下被调量的变化
1—不带纯滞后补偿；2—带纯滞后补偿

可得表 2 的结果。

表 2

	超调量 σ_p	到达第一极值时间 t_p	过渡过程时间 t_s (取 $\Delta = 0.02$)
对象控制通道不带纯滞后补偿	0.0269	12.3	13.5
对象控制通道带纯滞后补偿	0.011	7.8	6.9

图 11 是幅值为 0.2 的阶跃干扰作用下，被调量的变化情况。

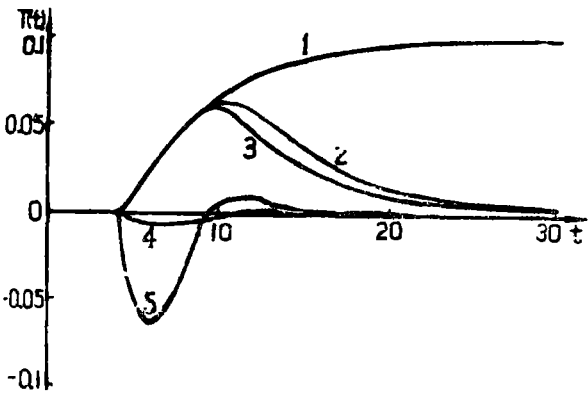


图 11 幅值 0.2 阶跃扰动下被调量的变化

- 1—不控；
2—无纯滞后补偿，反馈控制；
3—有纯滞后补偿，反馈控制；4—无纯滞后补偿，前馈—反馈控制；
5—有纯滞后补偿，前馈—反馈控制。

结 论

1. 经参数优化后，系统的控制质量是令人满意的。
2. 在前馈—反馈控制下，被调量波动小，且很快趋于稳定。
3. 带有对象控制通道纯滞后补偿的系统，在给定值改变时，被调量反应迅速，超调量小。但它要求确知对象特性。因此，是否有必要加入纯滞后补偿，由现场调试情况确定。

参 考 文 献

- [1] 《啤酒工业手册》编写组, 啤酒工业手册, 轻工业出版社, (1983).
- [2] F. G. 欣斯基, 过程控制系统, 化学工业出版社, (1982).
- [3] 俞金寿, 传热设备的自动调节, 化学工业出版社, (1981).
- [4] 涂植英, 过程控制系统, 机械工业出版社, (1983).
- [5] 蒋嗣荣, 计算机控制技术, 西北电讯工程学院出版社, (1985).
- [6] 韩慧君, 系统仿真, 国防工业出版社, (1985).

Computer Control of Beer Fermenter Temperature and Simulation Research

Kang Cirong

Abstract

This paper discusses computer control and regulation rules of beer fermenter temperature. By means of simulation technique, PID parameters and steady feed-forward coefficient are optimized, and the characteristics of feedback and feedforward-feedback control system, with or without pure lag compensation, are compared to each other. The results obtaining from simulated conditions show that feedforward-feedback control has a control quality much higher than that of feedback control.