

# 啤酒发酵控制技术的研究

高艳丽, 慕星光

(山东轻工业学院电子信息与控制工程学院, 山东 济南 250353)

**摘要:** 介绍了基于 ARM 处理器 LPC2200 的嵌入式啤酒发酵控制系统的硬件设计方案, 对系统原理及构成进行了说明。针对啤酒发酵过程中的大时滞、时变性等特点, 在控制算法上采用了双控制器方案, 并对系统进行了仿真。结果表明: 双控制器方案控制输出稳定、能够获得良好的设定值、跟踪特性和扰动抑制能力, 鲁棒性好, 并且对模型不敏感。

**关键词:** 啤酒发酵; ARM; 温度控制; 双控制器

中图分类号: TS262.5; TS261.4; TP27

文献标识码: A

文章编号: 1001-9286(2009)10-0054-03

## Research on the Control Techniques for Beer Fermentation

GAO Yan-li and QI Xing-guang

(Department of Electrical Information and Control Engineering, Shandong Institute of Light Industry, Ji'nan, Shandong 250353, China)

**Abstract:** The hardware design of beer fermentation control system based on ARM processor LPC2200 was introduced and the construction and the principles of the system were explained. Double-controller was used to simulate the system in consideration of the characteristics in beer fermentation such as large time-delay and time-varying etc. The simulation results showed that the double-controller program insensitive to the model could get stable output and good robustness and it had good performance in both set-point and tracking and disturbance rejection.

**Key words:** beer fermentation; ARM; temperature control; double-controller

啤酒发酵是一个复杂的生化反应过程, 其中发酵温度的控制是影响啤酒发酵好坏的主要因素。本文介绍了采用基于 ARM7 内核的处理器 LPC2200 为核心的嵌入式控制系统设计方案, 在控制算法上应用双控制器方案来解决发酵过程中的大时滞、时变性等特点。

### 1 系统原理及构成

啤酒发酵温控系统的工作原理是: 上位机设定好罐内各指定部位的温度值, 并将数值传到 ARM 处理器中。温度传感器对发酵罐中的发酵液进行温度采集经过 A/D 转换传入 ARM 处理器中。处理器根据设定温度与实际检测温度之差, 通过控制算法计算出控制阀门的开度值。该数值经 D/A 与 V/I 转换为 4~20 mA 的电流信号, 控制执行冷媒阀的开度, 通过改变阀门的冷媒流量, 从而调节发酵罐内的温度, 实现罐温及时精确的自动控制。

#### 1.1 ARM 嵌入式处理器 LPC2200

LPC2200 处理器内外设: 8 路 10 位 A/D 转换器, 转换时间低至 2.44  $\mu$ s; 2 个 32 位定时器 (4 路捕获和 4 路比较通道)、PWM 单元 (6 路输出)、实时时钟和看门狗; 多个串行接口, 包括 2 个 16C550 工业标准 UART, 高速 I<sup>2</sup>C 接口 (400 Kbps) 和 2 个 SPI 接口; 多达 112 个可承受 5 V

电压的通用 I/O 口以及 12 个独立外部中断引脚等, 能够大大简化系统的外围电路设计。较小的封装和极低的功耗使 LPC2200 可理想地应用于中小型系统中<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 温度检测部分

温度测量采用 pt100 热电阻, 它的精度高, 而且适宜在环境较恶劣的场合使用。在温度作用下, pt100 电阻丝的电阻值随温度变化而变化, 它的测量范围为 -200~600  $^{\circ}$ C。变送单元采用 SWBZ 系列热电阻变送器, 这种变送器是 DDZ 系列仪表中的现场安装式温度变送器单元, 与热电阻配套使用, 将工业热电阻信号转换成与输入信号成线性的电流输出信号。由于 LPC2200 内的 A/D 转换接受电压信号, 因而电路中串联相应的电阻, 将电流信号转变为相应的电压信号。

#### 1.3 冷媒阀调节

锥形发酵罐分为上中下 3 段, 每段有 1 个测温点, 故有 3 路温度监测点和 3 路温度控制点, 温度的控制是通过先进的控制算法调节, 再将数字量通过 DAC7611 转换芯片转换为电压信号, DAC7611 芯片具有 12 位 D/A 转换, 具有价廉、接口简单和转换控制方便, 且精度较高的特点。电压模拟信号再经过 AD694 转换成 4~20 mA

收稿日期: 2009-07-06

作者简介: 高艳丽 (1984-), 女, 山东青岛人, 在读硕士研究生, 研究方向为工业过程智能检测及仪器方向。

的电流信号,将电流信号作用于冷媒电动阀门,实现阀门的连续开动。在阀门的挑选上,采用带有自我保护的电动阀门,这样控制的精度更高、效果更好。阀门开度越大,进入管道中的冷媒就多,从而使该处的温度降低。

#### 1.4 串口通信设计

由于实际工作中上位机与由 LPC2200 构成的控制系统相距较远,并且数据传输通道环境比较恶劣。为了保证发酵罐的温度数据能高速、及时、安全、可靠地传至上位机,所以将 LPC2200 构成的控制系统与 PC 机之间采用 RS485 协议实现串行通信方式。

LPC2200 片内有 2 个独立的 UART 控制器,将 UART0 用作 RS485 串口。RS485 采用平衡发送和差分接收,因此具有抑制共模干扰的能力,相对于传统的 RS232 具有更远的通信距离和更高的传输速率,完全符合系统的应用要求。UART0 接口连接 232 转 485 收发器来实现 RS485 通信,由于 PC 机串口是 RS232 电平,因此与 PC 机连接时需要使用 485 转 232 收发器。

#### 1.5 上位机设计

上位机即 PC 机,编程软件可以采用西门子 WinCC。在 WinCC 中的图形编辑器中直接加入 ActiveX 控件 MSComm,实现串行通讯<sup>[2]</sup>。通过程序的编写可以实现人机友好界面,方便操作人员的使用并且能保证系统高效稳定运行。上位机需要实现:

- 各参数(温度、压力等)信号的显示。
- 各参数(温度、压力、阀门开度等)历史趋势记录。
- 实时、动态、直观地显示各控制点的工艺流程曲线图。

●可以显示报警画面:当系统出现故障时,工作人员可以通过画面直观地看到报警信号的工号、报警类型、报警时间和当前值,点击报警项就会切换到报警工号对应的操作界面,工作人员可进行相应的修改,当修改结束后报警可以通过复位键进行复位。

●历史报告画面:可以查询操作人员的操作记录和操作的详细时间,包括系统的启停、各参数修改前和修改后的值等。

- 数据的保存与打印。

## 2 控制算法的选择

### 2.1 控制对象

在啤酒发酵控制过程中,要使酵母的繁殖和衰减、麦汁中糖度的消耗等方面达到最佳状态,发酵各阶段的温度必须进行严格控制,使其在给定的 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围内。发酵罐温度可近似为纯滞后的一阶惯性环节,即:

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: $K$ 为被控对象的比例系数; $T$ 为被控对象的时间常数; $\tau$ 为纯滞后时间<sup>[3]</sup>。

由于被控对象有大滞后环节存在,因此必须进行补偿,并且由于发酵罐中物质的量和位置是经常变化的,使得纯滞后时间 $\tau$ 不断发生变化,而且在发酵过程中存在着外界的干扰,因而提高系统的鲁棒性至关重要。

### 2.2 双控制器控制方案

针对啤酒发酵过程中的大时滞环节,大多数系统都采用了 Smith 补偿,补偿后闭环系统的特征方程式中不再含有纯滞后环节,只是它的输出滞后了一个 $\tau$ 的时间。但是 Smith 预估器在运用的过程中,只有当满足过程动态模型与真实过程一致时才能发挥其作用,并且当系统受到复合扰动时,将不再稳定。在啤酒发酵过程中,随着发酵时间的变化,被控对象模型在不断改变并且生产环境中存在着外界干扰,因而 Smith 预估器不能达到理想的控制效果,而采用双控制器方案,一方面分离闭环系统的设定值响应和扰动响应,从而同时获得良好的设定值跟踪性能和扰动能力;另一方面对模型不敏感,从而具有良好的鲁棒性。图 1 为双控制器系统的结构图。 $r(s)$ 为信号的输入, $d(s)$ 为扰动信号的输入。

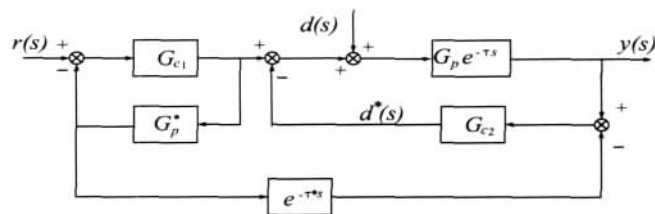


图 1 双控制器系统的结构图

当模型精确时, $G_p^*(s) = G_p(s)$ ,以及 $\tau^* = \tau$ 。系统输出与模型输出之差反馈到扰动控制器 $G_{c2}(s)$ 上,从而扰动响应由 $G_{c2}(s)$ 决定而与 $G_{c1}(s)$ 和过程模型无关。设定值响应不仅与 $G_{c1}(s)$ 有关,还与 $G_{c2}(s)$ 和过程模型有关。模型精确时,设定值响应近似由 $G_{c1}(s)$ 决定,并与扰动响应分离。

### 2.3 双控制器设计

#### 2.3.1 设定值跟踪器的设计

$$\text{被控对象为: } G_p(s) e^{-\tau s} = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} \quad (2)$$

$$\text{过程模型为: } G_p^*(s) e^{-\tau^* s} = \frac{K^*}{T^* s + 1} e^{-\tau^* s} \quad (3)$$

其中: $K^*$ 为等效的比例系数; $T^*$ 为等效的时间常数; $\tau^*$ 为等效的纯滞后时间。

将跟踪控制器 $G_{c1}(s)$ 设为 PI 控制,即:

$$G_{c1}(s) = K_{c1} \left( 1 + \frac{1}{T_{c1} s} \right) \quad (4)$$

当模型准确时,设定值跟踪回路控制器 $G_{c1}(s)$ 和被

控对象不含纯滞后的部分  $G_p(s)$  组成,则:

$$H_r(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_p(s)}{1+G_{c1}(s)G_p(s)} e^{-\tau s} \quad (5)$$

其中,  $H_r(s)$  为设定值响应传递函数。

应用直接综合法,对于一阶加纯滞后过程模型,设  $H_r(s)$  的期望值  $H_{re}(s)$  为一阶加纯滞后,即:

$$H_{re}(s) = \frac{1}{T_e s + 1} \quad (6)$$

其中,  $T_e$  为期望时间常数,令  $H_r(s) = H_{re}(s)$ ,可以导出 PI 跟踪控制器  $G_{c1}(s)$  的参数为:

$$K_{c1} = \frac{T^*}{K^* T_e}; T_{c1} = T^*; \quad (7)$$

$T_e$  不宜太小<sup>[4]</sup>。

本设计中,被控对象模型参数  $K^*=1, T^*=10, \tau^*=180$ <sup>[3]</sup>。在仿真中进行调试后,取  $T_e=10$ ,因而控制器  $G_{c1}(s)$  各控制参数为  $K_{c1}=1, T_{c1}=10$ 。

### 2.3.2 扰动控制器的设计

当模型准确时,负载扰动控制回路由被控对象  $G_p(s)e^{-\tau s}$  和扰动控制器  $G_{c2}(s)$  组成。扰动控制器采用 PI 控制,利用修正 Haalman 整定方法来确定  $G_{c2}$  的参数,对于在啤酒发酵过程中被控对象模型是一阶惯性环节加纯滞后环节近似描述过程,按下列公式整定 PI 扰动控制器  $G_{c2}$  的参数:

$$K_{c2} = \frac{2aT^*}{3K^*\tau^*}, T_{c2} = aT^* \quad (8)$$

其中,  $a \geq 1$  为公共修正系数<sup>[4]</sup>。

通过对被控对象的仿真,取  $a=6$  时,系统性能较好,相应的  $G_{c2}$  的参数为  $K_{c2}=6/27, T_{c2}=60$ 。

## 3 仿真结果

仿真所用的信号为  $t=0$  时引入的,  $t=200$  时引入了负单位阶跃扰动。当模型准确时,双控制器系统仿真结果见图 2,图 3 为  $\tau=170$  时双控制器系统仿真结果图。

从图 2、图 3 的对比中可以看出,当被控对象纯滞后时间  $\tau$  发生改变时,系统依然保持稳定,表现出较强的鲁棒性,对模型不敏感。

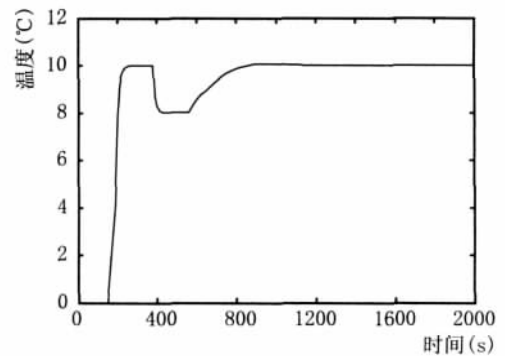


图 2 当模型准确时双控制器系统仿真结果图

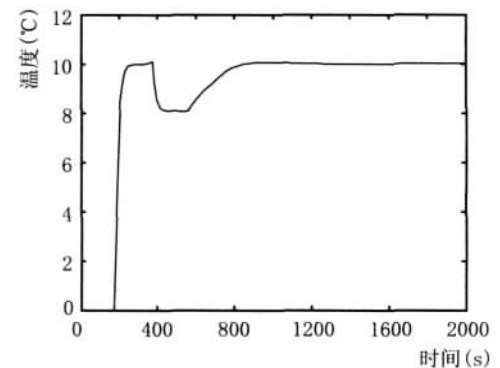


图 3  $\tau=170$  时双控制器系统仿真结果图

## 4 结论

在系统硬件的控制方案中采用基于 ARM 处理器 LPC2200 的嵌入式系统是为了精简系统的外设结构,提高精度。双控制器方案使得跟踪控制器和扰动控制器独立设计,同时获得了良好的设定值、跟踪特性和扰动抑制能力,被控对象发生改变时,仍保持稳定,系统表现出良好的鲁棒性。

### 参考文献:

- [1] 周立功. ARM 嵌入式系统基础教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [2] 林英芸,杨煜普.在 WinCC 中实现串行通信的两种方法[J].电子测量技术,2006,29(2):115-116.
- [3] 陈艾华,尹利霞,胡耀斌,等.模糊 PID 控制在啤酒发酵过程中的应用[J].机电工程,2007,24(1):56-57.
- [4] 田玉楚.大时滞工业过程的双控制器结构[J].自动化学报,1999,25(6):825-827.

(上接第 53 页)

- Journal of the American Society of Brewing Chemists, 1999, 57(1):34-37.
- [3] Andersen M L, Henrik O, Skibsted L H. Modification of the levels of polyphenols in wort and beer by addition of hexamethylenetramine or sulfite during mashing[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49:5232-5237.
  - [4] Sakuma S, Kikuchi C, Kowaka M. Automated analysis of the total polyphenols content of beer and wort using an intelligent

- autosampler[J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 1995, 53(1):29-32.
- [5] 管敦义.啤酒工业手册(修订版)[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
  - [6] Walters M T. Comparison of (+)-catechin and ferulic acid as natural antioxidants and their impact on beer flavor stability. Part 1: Forced-aging[J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 1997, 55(2): 83-98.