

基于 S7-400 PLC 的啤酒发酵靶向温度控制系统

Targeted temperature control system for beer fermentation based on S7-400 PLC

张松宇¹ 徐 彬² 杨文斌³

ZHANG Song-yu¹ XU Bin² YANG Wen-bin³

(1. 内蒙古机电职业技术学院, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古计算机应用研究院,

内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 内蒙古煤矿设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

(1. Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Hohhot, Inner Mongolia 010070, China;

2. Inner Mongolia Institute of Computer Applications, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China;

3. Inner Mongolia Coal Mine Design Research Institute Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

摘要:针对啤酒发酵温控系统非线性、大时滞的特点,提出将靶向控温思想与模糊 PID 控制算法相结合,设计了基于靶向控温点实现控温的模糊 PID 控制器,以提高啤酒发酵温度控制的精确性。以西门子 S7-400 PLC 和 Braumat 软件平台为控制核心,设计啤酒发酵温度控制系统软硬件结构,实现对整个生产过程的控制与监测。现场实际应用表明:啤酒发酵温度控制误差为 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 控温效果好,满足实际生产要求。

关键词:啤酒发酵;靶向控温;模糊 PID 控制

Abstract: According to the characteristics of non-linear and large time delay in the temperature control system of beer fermentation, proposed the idea of target temperature control combined with fuzzy PID control algorithm, and designed a fuzzy PID controller based on target temperature control point to achieve temperature control, so as to improve the accuracy of temperature control of beer fermentation. Taking Siemens S7-400 PLC and Braumat software platform as the control core, the software and hardware structure of beer fermentation temperature control system was designed to realize the control and monitoring of the whole production process. The field application shows that the temperature control error of beer fermentation is $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the temperature control effect is good, which meets the actual production requirements.

Keywords: beer fermentation; targeted temperature control; fuzzy PID control

发酵是啤酒生产原料酿制成啤酒的关键工艺,而发酵温度是影响啤酒转化及发酵成败的关键因素,因此精准控制发酵温度是啤酒发酵工艺的首要任务。实际发酵过程中,发酵温度受生化反应进程、发酵罐容积、冷媒量、发酵时间等多重因素影响,致使啤酒发酵温控系统具有大时滞和非线性的特性^[1]。

目前,较多学者将模糊控制^[2-3]、神经网络控制^[4]、Smith 预估补偿^[5-7]等控制方法应用于啤酒发酵系统中,提高了啤酒发酵温度的控制精度。但是,几乎所有的控温方法都是将啤酒发酵液的发酵过程视为一个静态过程,忽略了发酵液在发酵过程中的动态循环规律。目前啤酒厂广泛使用大型发酵罐($\geq 400\text{ m}^3$),如果发酵过程中不考虑发酵液的动态循环规律,控温过程中,靠近罐壁的发酵液早已达到目标温度,但罐内中心发酵液温度离目标温度偏差较大,此时继续供给冷媒会导致控温效果差,甚至出现罐壁结冰现象。因此,要实现精确的温度控制,需充分利用发酵过程中由于温度不同造成的发酵液自循环规律,促进罐内发酵液的良好循环和热交换,以此提高控温效果。试验针对啤酒发酵各阶段内发酵液的动态特性,拟将发酵液循环规律与模糊 PID 算法相结合实现发酵温度控制,并在某啤酒厂的发酵罐群进行测试与应用,为有效提高啤酒发酵温控系统的控制精度提供理论依据。

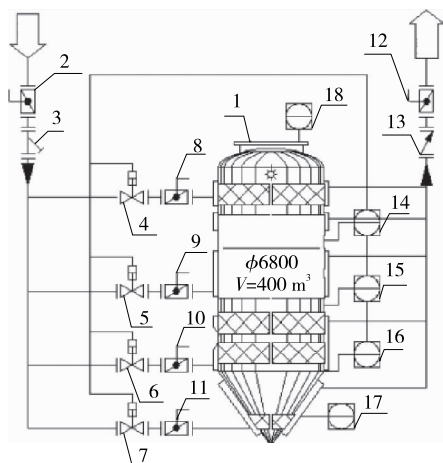
1 啤酒发酵温度控制原理

目前,中国啤酒厂广泛使用圆柱露天锥形发酵罐进行发酵。如图 1 所示,发酵罐容积 400 m^3 ,罐高 21 m ,直径 6.8 m ,为大型发酵罐,罐体设置 4 段冷带^[8],每段冷带为缠绕数周在罐壁上的夹套。为了使温度测量更加精确,在 4 段冷带上分别设置上温、中温、下温、锥温 4 个测温点^[9]。

基金项目:内蒙古自治区教育厅高等学校科学技术研究项目(编号: NJZY18272)

作者简介:张松宇(1984—),女,内蒙古机电职业技术学院讲师,硕士。E-mail: 82020753@qq.com

收稿日期:2019-09-28



1. 发酵罐 2. 手动截止阀 3. 过滤器 4. 冷媒阀 EV01 5. 冷媒阀 EV02 6. 冷媒阀 EV03 7. 冷媒阀 EV04 8~12. 手动截止阀 13. 单向阀 14. PT100 温度传感器 TIC01 15. PT100 温度传感器 TIC02 16. PT100 温度传感器 TIC03 17. PT100 温度传感器 TIC04 18. 罐顶压力变送器 PIC

图 1 啤酒发酵罐温度控制示意图

Figure 1 Temperature control diagram of beer fermentation tank

啤酒发酵温度控制原理^[1]:将 PT100 温度传感器插入发酵罐中,并通过三线制接法接入 RTD 模块,RTD 模块经过 A/D 转换将电阻信号转换成数字量信号传输给 PLC。PLC 依据发酵工艺设定温度值与温度传感器检测值进行比较得出偏差,再利用相应温控算法对偏差进行逻辑运算并输出相应控制量。冷媒调节阀依据 PLC 的控制信号自动调节阀门开度,改变冷媒流量,实现温度控制。

2 靶向控温思想

2.1 发酵液循环特性

啤酒发酵是麦汁在啤酒酵母的作用下进行的复杂的生化反应过程。啤酒发酵液最大密度时的温度可按式(1)计算^[10]。

$$T = 4 - (0.65\omega_P - 0.24\omega), \quad (1)$$

式中:

T ——啤酒发酵液最大密度时的温度,℃;

ω_P ——啤酒浓度,°P;

ω ——酒精浓度,g/100 g。

啤酒发酵液最大密度时的温度为 3℃ 左右,啤酒温度、密度与发酵液运动的关系如图 2 所示。

由图 2 可知,当啤酒温度>3℃ 时,发酵液密度随温度的升高而减小;当啤酒温度<3℃ 时,发酵液密度随温度的降低而减小;当啤酒温度为 3℃ 时,发酵液密度最大。发酵初期,由于酵母的剧烈代谢作用,发酵液出现沸腾现象。当糖分减少,酵母作用结束时,冷媒成为影响发

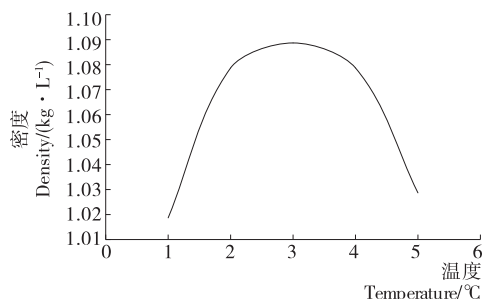


图 2 啤酒温度、密度与发酵液运动关系示意图

Figure 2 Diagram of the relationship between temperature, density and liquor movement when beer is cooled

酵液循环特性的主要因素,靠近罐壁的温度偏低,而中间区域的温度较高,因此形成内外温度差。与发酵初期不同,此时的内外温差成为促使发酵液运动的主要因素,使得温度低、密度高的靠近罐壁的发酵液向下运动,而温度高、密度小的中间区域的发酵液则向上运动。

2.2 靶向控温点

啤酒发酵温度工艺包括自然升温阶段(8~10℃)、主酵阶段(10℃)、升温阶段(10~12℃)、双乙酰还原阶段(12℃)、高温降温阶段(12~3℃)、低温降温阶段(3~0℃ 或 -1℃)和贮酒阶段(0℃ 或 -1℃)^[11]。发酵的各个阶段对温度的控制要求各不相同,与此对应的发酵液的动态循环状态也不相同,将能够促进发酵液动态循环的控温点称为靶向控温点。发酵过程中,若能够针对每一阶段的靶向控温点进行控温,会极大地缩短发酵过程,节约能源、提高生产效率。

(1) 自然升温到主发酵和双乙酰还原阶段(图 3):该阶段酵母活性最强,糖化后的醪液中含有足够的糖分,发酵液在罐壁内外温差和二氧化碳气体的双重作用下形成动态循环。此时,二氧化碳成为推动发酵液运动的主要因素,为了抑制其温度上升,促进循环,此阶段的靶向控温点应为上温和中温。

(2) 高温降温段(图 4):发酵基本结束,CO₂形成的上升力消失,罐内发酵液整体向下运动。此时冷媒导致的内外温差成为推动发酵液循环的主要因素,为了促进其向下运动,此阶段的靶向控温点也是上温和中温。

(3) 低温降温段(图 5):发酵液温度由 3℃ 降到 0℃ 或 -1℃。此时靠近罐壁的发酵液向上运动,中间发酵液向下运动。糖分已全部被消耗,罐壁的内外温差成为发酵液循环^[12]的主动动力,为了增加罐壁附近的发酵液向上运动的动力,促进循环,因此靶向控温点为锥温和中温。

(4) 贮酒段:此阶段的任务是保持温度不变,以利于澄清酒液,保证啤酒品质,发酵液循环方向与图 5 相同,靶向控温点依然是锥温和中温。

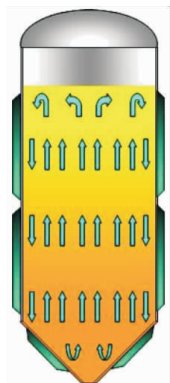


图 3 主发酵和双乙酰还原阶段循环示意图

Figure 3 Cycle diagram of main fermentation and diacetyl reduction stages

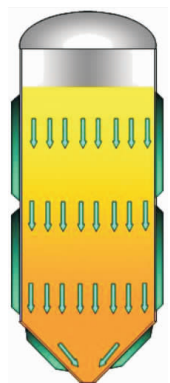


图 4 高温降温阶段循环示意图

Figure 4 Cycle diagram of high temperature cooling stage

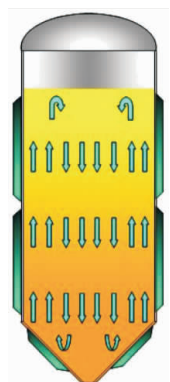


图 5 低温降温段与贮酒段循环示意图

Figure 5 Circulation schematic diagram of low temperature cooling section and liquor storage section

3 模糊 PID 温控算法

3.1 模糊 PID 温控原理

由于影响发酵温度的因素较多,导致运用传统的采用固定参数值的 PID 控制器难以满足温度控制要求。依

据啤酒发酵工艺,设计了基于靶向控温点实现温度控制的模糊 PID 控制器来调节啤酒发酵温度,原理图^[13]如图 6 所示。

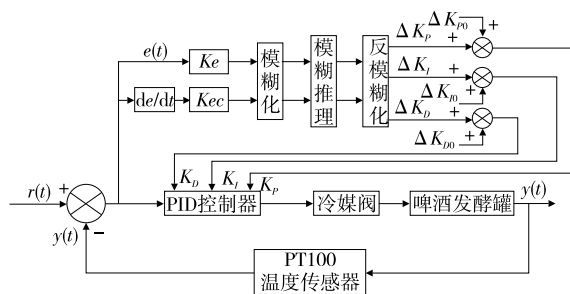


图 6 模糊 PID 温控原理图

Figure 6 Principle diagram of fuzzy PID temperature control

由图 6 可知,模糊 PID^[14]温控过程可分为 3 步:
① PT100 温度传感器检测啤酒发酵罐相应靶向控温点的实际温度 $y(t)$, PLC 将 $y(t)$ 与设定温度 $r(t)$ 进行逻辑运算后得出 $e(t)$ 和 $ec(t)$ 并作为模糊控制器的输入变量,经量化因子 Ke 和 Kec 后进行模糊化处理。
② 模糊控制器根据当前温度 $e(t)$ 、 $ec(t)$ 和预先制定的 PID 控制器修正参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 与发酵温度 $e(t)$ 、 $ec(t)$ 之间的模糊关系进行模糊推理获得模糊控制量,经反模糊化获得 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的精确值,再与 PID 控制器初始参数 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 求和运算后获得 PID 控制器的实时参数 K_p 、 K_i 、 K_d 并传给 PID 控制器^[13]。
③ PID 控制器根据当前参数值输出控制量,冷媒调节阀接收控制量自动调节阀门开度,改变冷媒流量,实现温度的精确调整。

3.2 模糊 PID 控制器设计

3.2.1 控制器参数的确定 将温度偏差 e 和偏差变化率 ec 作为模糊控制器的输入变量,将 PID 参数的修正值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为模糊控制器的输出变量^[15]。模糊 PID 控制器各参数见表 1。

3.2.2 选择隶属函数 典型的隶属函数有高斯型、三角形、Z 型^[16]等,为提高啤酒发酵温度控制系统的控制精度且方便计算,选择三角形隶属函数作为系统输入输出变量的隶属函数。

3.2.3 建立模糊规则 建立模糊规则是设计模糊控制器的关键步骤,将直接影响系统的输出结果。系统采用 If A and B then C^[17] 的结构并依据现场工程师多年累积的参数调整经验,总结得到以下模糊控制规则表^[18](表 2)。

在 Matlab 模糊逻辑工具箱图形界面窗口中,运行 View→Rules 命令,调出模糊规则观测器窗口,输入不同的模糊输入变量值 e 和 ec ,计算出与之对应的模糊输出变量值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,从而得到模糊控制查询表(表 3)。

表 1 模糊 PID 控制器相关参数[†]
Table 1 Parameters of fuzzy controller

变量	语言变量	基本论域	模糊子集	模糊论域	量化因子
e	E	$[-1,1]$		$[-3,3]$	3
ec	EC	$[-0.3,0.3]$		$[-3,3]$	10
ΔK_P	K_P	$[-0.6,0.6]$	$[NB,NMNS,Z0,PS,PMPB]$	$[-0.6,0.6]$	1
ΔK_I	K_I	$[-0.03,0.03]$		$[-0.03,0.03]$	1
ΔK_D	K_D	$[-3,3]$		$[-3,3]$	1

[†] NB 表示负大,NM 表示负中,NS 表示负小,Z0 表示零,PS 表示正小,PM 表示正中,PB 表示正大。

表 2 模糊规则表[†]
Table 2 Fuzzy rules

e	ec						
	NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NM	Z0/Z0/NM	Z0/Z0/NS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	Z0/Z0/NS	NS/Z0/Z0
NS	PM/NM/Z0	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	Z0/Z0/NS	NS/PS/NS	NS/PS/Z0
Z0	PM/NM/Z0	PM/NM/NS	PS/NS/NS	Z0/Z0/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/PS
PS	PS/NS/Z0	PS/NM/Z0	Z0/Z0/Z0	NS/PS/Z0	NS/PS/Z0	NM/PM/Z0	NM/PM/Z0
PM	PS/Z0/PM	Z0/Z0/PM	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	Z0/Z0/PB	Z0/Z0/PM	NS/PS/PM	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

[†] NB 表示负大,NM 表示负中,NS 表示负小,Z0 表示零,PS 表示正小,PM 表示正中,PB 表示正大。

表 3 模糊控制查询表
Table 3 Fuzzy control rules query table

e	ec						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	0.54/-0.03/1.00	0.54/-0.03/1.00	0.40/-0.03/-2.69	0.40/-0.02/-2.69	0.20/-0.01/-2.00	0.00/0.00/-2.00	0.00/0.00/-1.00
-2	0.54/-0.03/1.00	0.54/-0.03/1.00	0.40/-0.02/-2.69	0.20/-0.01/-2.00	0.20/-0.01/-2.00	0.00/0.00/-1.00	-0.20/0.00/0.00
-1	0.40/-0.02/0.00	0.40/-0.02/-1.00	0.40/-0.01/-2.00	0.20/-0.01/-2.00	0.00/0.00/-1.00	-0.20/0.01/-1.00	-0.20/-0.01/0.00
0	0.40/-0.02/0.00	0.40/-0.02/-1.00	0.20/-0.02/-1.00	0.00/0.00/-1.00	-0.20/0.01/-1.00	-0.40/0.02/-1.00	-0.40/0.02/1.00
1	0.20/-0.01/0.00	0.20/-0.01/0.00	0.00/0.00/0.00	-0.20/0.01/0.00	-0.20/0.01/0.00	-0.40/0.02/0.00	-0.40/0.02/2.00
2	0.20/-0.01/2.00	0.00/0.00/2.00	-0.20/0.01/1.00	-0.40/0.01/1.00	-0.40/0.02/1.00	-0.40/0.03/1.00	-0.54/0.03/2.69
3	0.00/0.00/2.69	0.00/0.00/2.00	-0.20/0.01/2.00	-0.40/0.02/1.00	-0.40/0.02/1.00	-0.54/0.03/2.00	-0.54/0.03/2.69

4 啤酒发酵控制系统设计

4.1 硬件配置

以中国某大型啤酒集团武汉工厂搬迁项目为例,依据现场控制需求和控制点数量进行合理设计与选型。该厂发酵罐区共有 36 个发酵罐,通过对系统控制点数进行统计可得:4-20 mA 型 AI 点数 36、电阻信号(RTD)型 AI 点数 144, AO 点数 180、DI 点数 180、DO 点数 216。选用西门子 S7-400 PLC 为控制器,利用 Step 7 软件实现啤酒发酵控制系统的硬件选型、组态等,系统硬件配置见表 4。

4.2 软件设计

利用 Step 7 软件设计模糊 PID 控制器控制程序,流程图见图 7。软件设计主要完成以下工作:① 根据啤酒发酵工艺流程,在上位机软件中设置啤酒发酵配方工艺,确保系统在发酵的各个阶段能严格按照温度工艺要求进行自动调节;② S7-400PLC 读取温度传感器检测的相应靶向控温点的温度值并与设定温度值进行比较;③ 若二者相等,则进行下一个扫描周期的温度实测值与设定值的比较;④ 若二者不相等,S7-400PLC 将二者逻辑运算结果送入模糊控制器,模糊控制器推理出最优的 PID 参数;⑤ PID 控制器依据当前参数输出控制量调节当前靶向控

表 4 硬件配置表

Table 4 Module configuration table of fermentation tank area

名称	用途	型号	规格	数量	单位	厂家
机架	PLC 安装底板	6ES7 400-1JA01-0AA0	槽机架	1	块	Siemens
电源模块	PLC 供电	6ES7 407-0DA02-0AA0	机架电源	1	块	Siemens
CPU 模块	PLC 主处理器	6ES7 416-3EM06-0AB0	20 M 内存及以上	1	块	Siemens
通讯模块	以太网通讯	6ES7443-1EX11-0XE0		1	块	Siemens
导轨	PLC 安装支架	6ES7 390-1AF30-0AA0	482 mm	8	块	Siemens
接口模块	PLC 通讯模板	6ES7 153-4AA01-0XB0	以太网接口模块	8	块	Siemens
模入模块	铂电阻输入	6ES7 331-7PF01-0AB0	8AI(RTD In)	16	块	Siemens
模入模块	模拟信号输入	6ES7 331-1KF02-0AB0	8AI(4-20 mA)	8	块	Siemens
模出模块	模拟信号输出	6ES7 332-5HF00-0AA0	8AO(4-20 mA)	24	块	Siemens
开入模块	开关量输入	6ES7 321-1BL00-0AA0	32DI(24VDC)	8	块	Siemens
开出模块	开关量输出	6ES7 322-1BL00-0AA0	32DO(24VDC)	8	块	Siemens
直流电源	驱动电源	6EP 1334-3BA00	输入 85-265VAC, 输出 24VDC, 10 A	8	台	Siemens

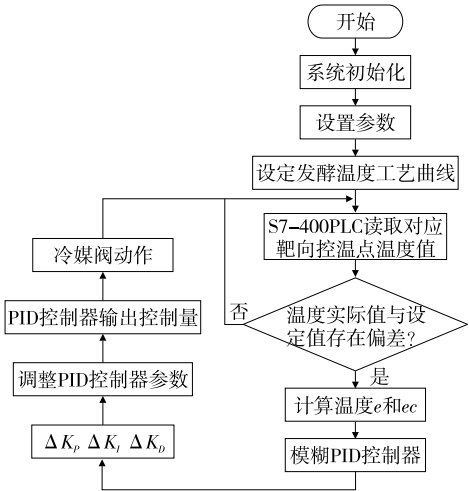


图 7 啤酒发酵温度控制程序流程图

Figure 7 Flow chart of beer fermentation temperature control program

温点冷媒阀开度,冷媒流量发生变化,从而改变发酵罐内的温度。

4.3 Braumat 平台设计

啤酒发酵系统上位机软件采用 Braumat 平台,其具有完善的订单/配方管理、趋势曲线记录等功能^[19]。将 Braumat 平台应用于啤酒酿造系统中,不仅可以提高啤酒品质,同时还可以与工厂的信息管理系统相连接,实现订单下达及生产信息上传等功能,提高啤酒生产智能化水平。配方编辑器画面(图 8)能清晰地显示工艺流程,同时也让工艺更改变得更加方便高效。发酵监控画面(图 9)能直观地显示生产过程参数,如发酵罐罐顶压力、各层温度、冷媒阀开度等参数信息。

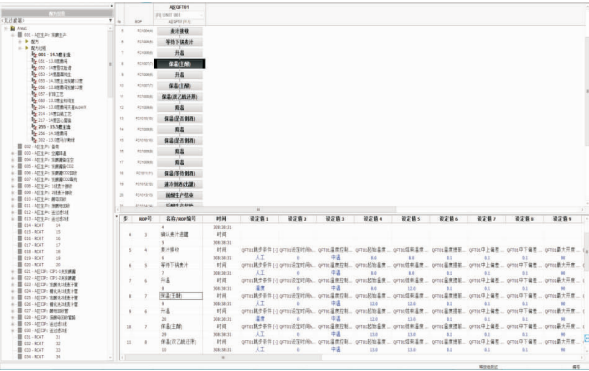


图 8 配方编辑器画面

Figure 8 Formulaeditor screen

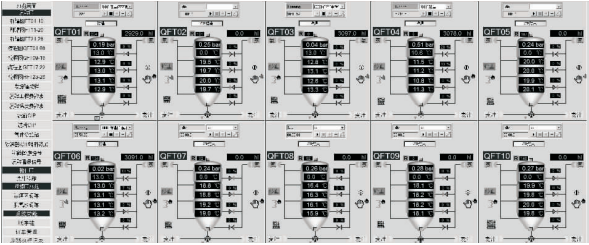


图 9 发酵过程监测画面

Figure 9 Fermentation process monitoring screen

5 测试与应用

课题所述的啤酒发酵温度控制系统已应用于中国某大型啤酒集团武汉工厂搬迁项目,发酵罐采用 4 段冷媒控温,4 段 PT100 铂电阻温度测温。在该厂搬迁前,发酵温度控制误差为±0.6℃,且温度波动频繁,偶尔会出现发酵罐结冰等现象。此次搬迁新建工厂采用了发酵靶向控温思想并结合模糊 PID 控温算法,获得采样中温曲线

(图 10)。由图 10 可知,中温曲线与给定温度曲线基本重合,温度误差达士 0.3°C ,且控温过程中发酵罐无结冰现象,表明靶向控温思想有效地促进了发酵液的循环,提高了控温精度,解决了发酵液制冷时受冷不均匀的问题,实际应用效果良好。

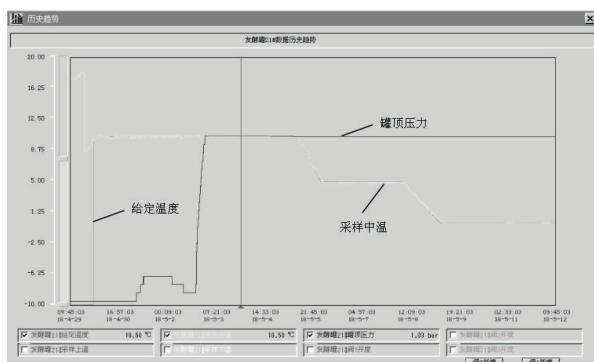


图 10 发酵罐温度历史趋势曲线

Figure 10 Fermentation process monitoring screen

6 结论

以 S7-400PLC 为控制器完成了系统的硬件配置、软件设计和 Braumat 平台设计。针对发酵液的动态循环特性,提出靶向控温思想并结合模糊 PID 温控算法对发酵温度进行控制。与现有的研究成果对比,试验发酵系统有效地提高了控温精度,解决了大型发酵罐发酵液制冷时受冷不均匀的问题,适合工厂应用。试验采用的温控算法较为简单,并且通过现场测试应用,解决了罐壁结冰,热交换过程缓慢的问题。但啤酒发酵过程本身是一个极其复杂的生化过程,继续跟踪生产,优化算法参数仍是下一步研究重点。

参考文献

- [1] 李鑫, 张煜星, 高博. 基于 S7-1200PLC 的啤酒发酵温度控制系统研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 116-152.
- [2] 苗荣霞, 王彬. 啤酒发酵温度的参数自整定模糊 PID 控制[J]. 西安工业大学学报, 2016, 36(2): 167-172.
- [3] 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.
- [4] ZHANG Jian-xin, LIU Jia-chao. BP neural network PID temperature control of beer fermentation tank[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1176(5): 178-184.
- [5] 徐玲, 徐保国. 基于遗传算法寻优的 Smith 预估模糊免疫 PID 啤酒发酵温度控制[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(2): 380-385.
- [6] 刘迪, 倪远平, 李正, 等. Smith 算法与改进 Smith 算法在啤酒发酵温控中的对比研究[J]. 酿酒科技, 2010(8): 62-64.
- [7] SHANG Ji-liang, WANG Chan-chan. Application study on

distributed predictive control of beer fermentation temperature[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014 (513): 4 525-4 528.

- [8] 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.
- [9] 尚继良, 任大海, 李玉伟. 啤酒发酵温度多变量解耦控制算法[J]. 青岛科技大学学报: 自然科学版, 2014, 35(1): 86-89.
- [10] 管敦仪. 啤酒工业手册[M]. 2 版. 北京: 中国轻工业出版社, 1999: 384-431.
- [11] 徐彬, 敖乐根, 郭鹏, 等. 啤酒发酵过程中的温度控制策略[J]. 内蒙古科技与经济, 2014(23): 71-73.
- [12] 刘瑞赛, 安家彦, 董文勇, 等. 利用计算流体力学技术分析啤酒发酵罐构型对温度和流动的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(9): 52-57.
- [13] 胡亚南, 李明辉, 霍蛟飞, 等. 基于 S7-1200PLC 的注射机料筒温度控制系统[J]. 塑料科技, 2019, 47(12): 93-98.
- [14] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 第 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2016: 296-307.
- [15] 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.
- [16] 胡亚南, 祁广利, 霍蛟飞, 等. 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.
- [17] 张震. 模糊控制在啤酒发酵系统中的研究与应用[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014: 60-66.
- [18] 张鹏, 冯显英, 霍睿, 等. 基于变论域自适应模糊 PID 的注塑机温度控制系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(7): 107-109.
- [19] 欧阳金真. 基于西门子 BRAUMAT 啤酒发酵控制系统的设计[D]. 上海: 华东理工大学, 2012: 46-60.