

基于卡尔曼滤波遗传 PID 的黄酒发酵溶氧控制^①

邵金涛, 熊伟丽, 徐保国

(江南大学 物联网工程学院, 无锡 214122)

摘要: 黄酒发酵溶氧控制系统是一个多干扰的、时变的、非线性的不稳定系统。提出了一种新的黄酒发酵溶氧控制方法, 在 Labview 组态软件、西门子 PLC300 和溶氧传感器所组成的溶氧系统上, 引入卡尔曼滤波遗传 PID 控制策略, 实现溶氧 PID 控制参数的在线整定。应用卡尔曼滤波减小控制干扰和测量噪声对系统造成的影响, 并用 Matlab 进行仿真实验。仿真结果表明, 该控制方法对被控对象的适应性好, 抗干扰能力强, 具有较强的鲁棒性和较快的收敛速度。

关键词: 黄酒; 溶氧; 遗传算法; PID 控制; 卡尔曼滤波

DO Control for Rice Wine Fermentation Based on Kalman Filter and Genetic PID Control

SHAO Jin-Tao, XIONG Wei-Li, XU Bao-Guo

(School of IoT Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The Dissolved Oxygen (DO) control system for rice wine fermentation is an unstable system with multi-disturbance, time-varying and nonlinearity. A novel DO control method is proposed. The system is based on Labview, SIMATIC PLC300 and sensors, the Kalman filtering and Genetic PID control strategy are introduced. The PID control parameters are tuned by genetic algorithm on line, while a Kalman filter is used to reduce the impact of control interference and noise on system. Finally, a simulation experiment is performed by Matlab, and simulation result shows that the control method not only has a good adaptability and Anti-disturbance but also has strong robust ability and fast convergent rate.

Keywords: rice wine; dissolved oxygen; genetic algorithm; PID control; kalman filtering

1 引言

随着科技水平的快速提高和国民经济的不断发展, 我国的黄酒生产工业已由传统的手工制造向自动控制方向迈进。在黄酒产品的生产过程中, 前期发酵是一个非常重要的环节, 发酵过程中对溶氧值的控制和优化直接决定着黄酒的产量和质量, 而超大型发酵罐造成了罐内溶氧浓度响应的滞后和物料混合的不均匀, 使溶氧对象成为一个复杂的时滞系统, 传统的优化控制方式已经无法满足对罐内溶氧浓度的控制要求。

传统 PID 控制的特点在于其不需要特别精确的数学模型, 易于在线整定, 并且控制过程中鲁棒性较强;

但是其采用人工试凑的参数整定方法使得控制的精确性不高, 尤其在对象参数变动时无法实时提供寻优方法, 很难满足复杂生产过程的控制要求。遗传算法具有并行计算、编码操作、适合处理一些复杂的被控对象等特点, 然而进行遗传操作时, 交叉概率和变异概率的选取对控制效果影响很大, 选取不当容易产生早熟收敛问题^[1]。本文将遗传算法与 PID 控制器相结合, 并且采用自适应变异概率, 即克服了 PID 控制的变参数整定困难的问题, 又解决了遗传操作时交叉、变异的早熟收敛问题。在遗传 PID 控制的基础上引入卡尔曼滤波器, 对控制干扰和测量噪声都有很好的抑制作用。将其应用到绍兴女儿红黄酒发酵溶氧控制系统中,

① 基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(JUSRP10927)

收稿时间:2010-07-27;收到修改稿时间:2010-09-10

取得了良好的效果。

2 黄酒发酵溶氧控制系统总体设计

在黄酒发酵过程中,发酵罐的罐内压力、搅拌速度、空气流量以及发酵液的浓度等都会影响发酵液中溶氧含量的精确测量,所以在以往黄酒生产过程中对溶氧值的测量是一个空白。绍兴女儿红黄酒发酵控制系统中首次采用梅特勒 6950 溶氧传感器,该传感器增加了参比电极和保护电极,参比电极可以防止电解液出现氯化银沉淀,确保了操作过程中信号的稳定性;保护电极可防止侧向扩散效应对阴极的干扰,保证了溶氧控制的精确测量。

整个系统通过溶氧变送器将梅特勒 6950 溶氧传感器的测量值转换为 4~20mA 的电流信号,该电流信号送入西门子 PLC300,PLC 再将此信号送入上位机处理。上位机操作界面采用 Labview 组态软件编程,通过在工控机中建立 OPC 服务器实现操作界面与西门子 PLC300 之间的通讯,系统的操作界面可完成溶氧数据读取、显示、分析和故障报警等功能,还可利用智能算法程序通过 PLC 的模拟量模块控制生产现场的开耙调节阀,实现黄酒发酵溶氧控制参数的优化。黄酒发酵溶氧控制系统框图如图 1 所示。

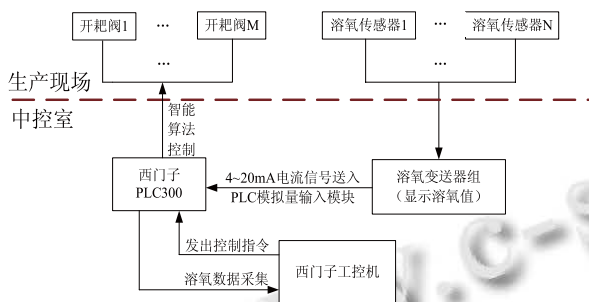


图 1 黄酒发酵溶氧控制系统框图

3 黄酒发酵过程溶氧浓度特性分析

溶氧(DO)是黄酒在前期发酵过程中酵母繁殖所必需的,它受通气量和搅拌速度等多方面因素的限制。DO之所以容易成为控制因素,是由于氧在物料中的溶解度极低。如果在发酵过程中停止供氧,物料中的DO会在几分钟之内耗竭。在黄酒的发酵阶段,DO有一个最适溶氧浓度范围,即不超过上限值和下限值。一般将溶氧控制在1%~3%(设空气中溶氧含量为

100%)这一范围内。本文中设定溶氧期望值为1.5%。

对黄酒溶氧值的控制(开耙控制)存在两个主要问题:第一,由于溶氧传感器测量地点距中央控制室较远,以及发酵罐体积过大而使物料反应不均等因素造成了溶氧系统的滞后性;第二,物料反应过程中罐内各层次浓度的变化和扰动的不确定造成了溶氧系统的时变性。这些问题对传统PID控制的参数静态整定提出了挑战,引入卡尔曼滤波遗传PID控制可以有效地解决上述问题,实现控制参数的动态优化。

根据相关的文献资料可知黄酒发酵溶氧特性为二阶惯性环节的开环传递函数,由于发酵过程存在滞后现象,所以传递函数中存在纯滞后环节^[2],即:

$$G(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (1)$$

式中, K 为发酵系统的无菌空气流量比值, τ 为发酵过程中输出滞后于输入的时间, T_1 , T_2 为发酵系统的惯性时间常数。

该系统对应的状态空间描述为:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2)$$

$$Y = CX + DU \quad (3)$$

其中 A, B, C 和 D 为黄酒发酵系统的常数矩阵,它们与时间无关,但与系统的结构和参数有关,由(1)式可以得到

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1 T_2} & -\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K e^{-\tau s}}{T_1 T_2} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T, D = 0.$$

4 卡尔曼滤波遗传PID控制的实现

4.1 基于遗传算法的PID控制

黄酒发酵溶氧控制系统采用气动调节阀作为执行机构,当发酵罐内的溶氧量发生变化时,气动调节阀接受控制器的输出信号来调整阀门的开度,控制输入的空气量,从而使罐内溶氧稳定在设定值。由于黄酒发酵溶氧控制系统是一个时变的、多干扰的复杂控制系统,传统的PID控制不能提供实时的优化控制参数,从而很难将控制系统所期望的指标保持在理想范围内。本文通过遗传算法中的生物进化原理(复制、交叉及变异操作)实时获取PID参数的动态最优解,实现开耙调节阀的开度整定,控制罐内溶氧含量。

遗传算法是模拟自然界中的遗传机制和生物进化过程而形成的一种自适应全局最优概率搜索方法。利

用遗传算法对PID参数的优化设计应主要关注于寻求其最优解上,包含的主要问题有参数编码方案、适应度函数设计、遗传算法参数选择等^[3-5]。算法中交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 对算法的收敛速度有很大影响,本文为加快收敛速度且防止陷入局部最优采用自适应变异概率方法,变异概率和交叉概率分别为:

$$P_m = 0.10 - [1:n] * [\exp(-n)], P_c = 0.85 \quad (4)$$

在PID参数整定过程中,为了得到满意的动态特性,将误差时间积分性能指标作为参数选择的目标函数^[6]。为了防止控制能量太大,在目标函数中加入控制输入的平方项。选用下式作为参数选取的最优指标:

$$J = \int_0^{\infty} (\omega_1 |e(t)| + \omega_2 u^2(t)) dt + \omega_3 t_u \quad (5)$$

式中, $e(t)$ 为系统误差, $u(t)$ 为控制器输出, t_u 为上升时间, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为权值。其中 ω_1 的作用是控制超调量、减小误差, ω_2 负责约束控制量, ω_3 用来调节控制时间。

为了避免超调,采用了惩罚功能,即一旦产生超调,将超调量作为最优指标的一项,此时最优指标为:

$$J = \int_0^{\infty} (\omega_1 |e(t)| + \omega_2 u^2(t) + \omega_4 |\omega(t)|) dt + \omega_3 t_u \quad (6)$$

式中, ω_4 是权值,且 $\omega_4 \gg \omega_1$, $\varepsilon(t) = y(t) - y(t-1)$, $y(t)$ 为溶氧对象的输出。

4.2 卡尔曼滤波遗传PID控制控制器设计

黄酒发酵过程中,发酵罐体积大,物料多。同一时间内,物料反应不均势必会对控制溶氧参数造成影响。溶氧传感器的检测是微弱信号的提取,会存在干扰和噪声波动。为了提高控制精度,采用对动态控制系统具有良好滤波效果的卡尔曼滤波器,抑制干扰信号和测量噪声信号对溶氧控制系统的影响。卡尔曼滤波理论采用时域上的递推算法在数字计算机上进行数据滤波处理,可以较好的解决噪声干扰。

通过计算机采样控制,将控制系统的连续状态方程转换为离散域方程。由式(2)、(3)连续系统状态方程得到离散域采样系统状态方程和测量方程分别为

$$\begin{aligned} X(k) &= AX(k-1) + B(U(k) + \omega(k)) \\ Y_v(k) &= CX(k) + v(k) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\omega(k)$ 为控制干扰信号, $v(k)$ 为测量噪声信号; ω_k 、 v_k 均为均值为零的白噪声序列。

离散卡尔曼滤波器递推算法为^[7-10]:

$$M_n(k) = \frac{P(k)C^T}{CP(k)C^T + R} \quad (8)$$

式中, $M_n(k)$ 为混合因数, $P(k)$ 为后验估计误差协方差。混合因数的作用是使后验估计误差协方差达到最小。

$$P(k) = AP(k-1)A^T + BQB^T \quad (9)$$

$$P(k) = (I_n - M_n(k)C)P(k) \quad (10)$$

$$X(k) = AX(k-1) + M_n(k)(Y_v(k) - CAX(k-1)) \quad (11)$$

$$Y_{out}(k) = CX(k) \quad (12)$$

误差的协方差为

$$err\ cov(k) = CP(k)C^T \quad (13)$$

通过上述公式可知,卡尔曼滤波是根据上一状态的估计值和当前状态的观测值推出当前状态的估计值的滤波方法,是一种递推的过程。将卡尔曼滤波器引入遗传PID溶氧控制系统中不仅保持了控制算法简单,工作可靠等优点,而且抑制了控制干扰和测量噪声,具有较强的鲁棒性和抗干扰性,通过并行处理,得到全局最优解,实现了更高的控制精度。卡尔曼滤波遗传PID控制系统框图如图2所示。由图可见,遗传算法PID控制器的输入量为溶氧量的偏差,输出量为PID控制参数 K_p 、 K_i 、 K_d ,通过卡尔曼滤波,得到稳定性能更高的系统输出。

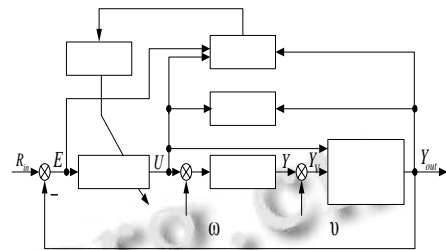


图2 基于卡尔曼滤波遗传PID控制系统框图

5 开耙控制曲线及分析

以绍兴女儿红黄酒生产线为例,选用的黄酒发酵

溶氧控制模型的传递函数为 $G(s) = \frac{200e^{-5s}}{6s^2 + 5s + 1}$,

溶氧变化的时滞时间 $\tau = 5s$,采样周期 $T = 0.01s$ 。样本个数 $n = 30$,参数 K_p 的变化范围为 $[0 \sim 20]$, K_i, K_d 的变化范围为 $[0 \sim 1]$,编码长度为10位。在幅值为1.5%的阶跃信号输入下,对溶氧对象分别使用单纯PID控制和基于卡尔曼滤波遗传算法整定的PID控制。图3和图4是在没有控制干扰和测量噪声的理想情况下,遗传PID和传统PID控制方法的仿真结果。图5和图6是在系统干扰和测量噪声存在的情况下,遗传PID控制和卡尔曼滤波遗传PID控制方法的仿真结果。

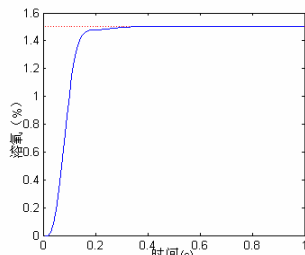


图 3 遗传算法 PID 控制下的响应曲线

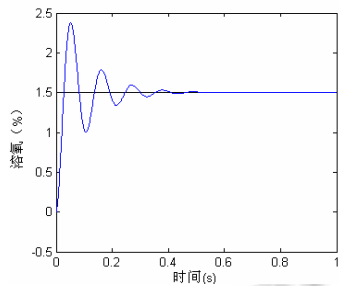


图 4 传统 PID 控制下的响应曲线

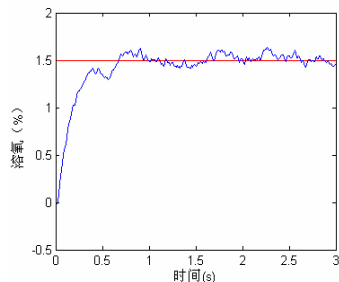


图 5 噪声下遗传 PID 控制控制方法的响应曲线

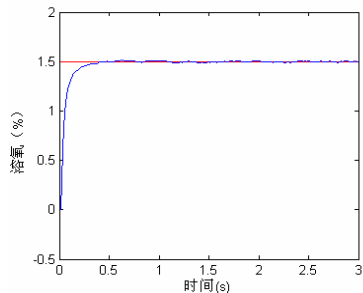


图 6 噪声情况下卡尔曼滤波遗传 PID 控制方法的响应曲线

由图 3 可以看出, 在没有控制干扰和测量噪声的情况下, 遗传算法 PID 控制具有较好的自适应能力和参数自调整能力, 控制参数基本没有超调。如果在控制过程中出现收敛效果不佳, 可以通过改变遗传操作的概率或者增加迭代次数的方式加快收敛速度, 使罐内溶氧在 0.4S 的调节时间内迅速达到稳定状态, 遗传算法对 PID 参数的寻优结果为 $K_p = 6.4182, K_i = 0.4656, K_d = 0.1202$, 最优目标函数为

$J_{Best} = 13.7157$ 。图 4 中, 传统 PID 控制下的罐内溶氧值则不能很好的适应被控对象的变化, 使得超调量很大, 达到了 0.9%左右; 调节时间需要约 0.45S, 稳定性差。

由图 5 和图 6 的仿真结果可以看出, 系统中存在控制干扰和测量噪声的情况下, 不带卡尔曼滤波的遗传 PID 控制不能抑制控制干扰和测量噪声; 而卡尔曼滤波遗传 PID 控制方法有效地抑制了扰动和噪声对控制系统的影响, 其响应曲线几乎无超调, 调节时间在 0.4S 以内, 在控制参数变化时的适应性和抗干扰性能优于遗传 PID 控制, 对于控制黄酒发酵过程中的溶氧等参数具有很强的应用价值。

6 结束语

本文将基于遗传算法 PID 结合卡尔曼滤波的控制方法应用于黄酒发酵过程溶氧控制系统。该方法具有适应性强、收敛速度快、鲁棒性好、超调量极小的特点, 在抑制扰动和适应对象参数变化能力方面优于单纯 PID 控制和遗传 PID 控制, 具有更好的稳定性和动态特性, 对于解决扰动环境下的黄酒发酵溶氧控制具有很好的实用价值。

参考文献

- 1 孙红艳, 王英博. 一种改进的小生境遗传聚类算法. 计算机系统应用, 2010, 19(2): 37-40.
- 2 陶永华主编. 新型 PID 控制及其应用. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2005. 300-317.
- 3 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- 4 张永, 邢宗义, 向嵘嵘, 胡维礼. 基于聚类和遗传算法的解释性模糊模型设计. 计算机工程, 2007, 33(8): 160-162.
- 5 焦竹青, 屈百达, 徐保国. 遗传算法在直流伺服系统摩擦补偿中的应用. 西安交通大学学报, 2007, 41(8): 944-948.
- 6 Zuo X, Zhang JF, Luo XL. Tuning PID parameters based on a combination of the expert system and the improved genetic algorithm. Petroleum Science, 2005, 2(4): 71-76.
- 7 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真. 北京: 电子工业出版社, 2003. 217-224.
- 8 高凤翔, 王长松, 陈晓, 张玉宝. 结晶器液位系统的卡尔曼滤波模糊自适应 PID 控制. 制造业自动化, 2009, 31(5): 18-21.
- 9 张池平, 刘宗尧. 一种改进的自适应模糊卡尔曼滤波算法. 计算机工程与应用, 2007, 43(28): 25-28.
- 10 Tian FH, Zhou CG, Tian LH. Prevention against lack in genetic algorithm. Mini-Micro Systems, 2000, 21(9): 947-949.