

基于模糊遗传算法的工业过程控制参数优化研究

王 斌¹, 王孙安¹, 杜海峰²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安电子科技大学雷达处理重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对复杂工业过程控制要求多样性、控制参数难调整的问题, 提出了一种控制参数优化方法. 其中, 利用模糊评判方法设计了模糊适应度函数以改进标准遗传算法, 把控制要求分解成多个对控制结果模糊评判的因素, 由于其具有不同权重, 因此控制结果与控制要求的接近程度就转化成了对遗传算法中个体(控制参数)的适应度. 应用该算法优化了生物发酵罐温度控制器的控制参数, 实验表明, 控制器的控制精度、温度变化平稳性、能耗、电磁阀开关频率等指标均得到了改善, 能够较好地解决复杂工业过程中控制参数优化的问题.

关键词: 复杂工业过程; 模糊遗传算法; 参数优化

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2004)01-0056-04

Parameter Optimization in Industrial Process Control Based on Fuzzy Genetic Algorithm

Wang Bin¹, Wang Sun an¹, Du Haifeng²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China; 2. Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi an 710071, China)

Abstract: To solve the problem of the diverse control requirements and turning the control parameters in the modern complex industrial process, an approach for parameter optimization was proposed. In this approach, fuzzy evaluating approach was used to improve the simple genetic algorithms (SGA), and a fuzzy fitness function was designed to divide those control requirements into many evaluating factors of control result with different weights. The fitness of the individual shows the approximate degree of control requirements and the result controlled by individual (i. e. control parameters). The approach was used to optimize the control parameters of temperature controller in tower type fermenter. Experiments show that control indices, such as control error, the stableness of temperature change, energy consumption, and the frequency of electromagnetic value, are improved and this approach can successfully optimize the parameters in complex industrial process.

Key words: complex industrial process; fuzzy genetic algorithms; parameter optimization

在石油、电力、生物等工业过程的控制回路中, PID(Proportional Integral Differential)类控制器占有相当的地位,尤其是与 bang-bang 控制结合的 PID 控制器以其调整参数少、控制效果明显而得到广泛应用^[1]. 但是,随着生产水平的提高,复杂工业过程的控制要求也趋于多样化,并且这些过程一般具有

非线性特性和不确定性,因而控制器参数的调整变得非常复杂. PID 参数整定的方法自 Zeigler 和 Nichols 提出以来,已取得了丰硕的研究成果,尤其是 Astrom 提出的 PID 参数自整定方法和 Bristol 设计的基于模式识别的 PID 参数整定方法,在实际工业过程中应用较好^[1,2]. 近年来,国内也出现了模

收稿日期: 2003-04-15. 作者简介: 王 斌(1976~),男,博士生;王孙安(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2001x17).

糊自适应 PID 整定、专家 PID 参数整定等方法^[3,4],但是这些方法都基于某个确定的性能指标(如绝对误差积分(IAE)、误差平方积分(ISE)、时间与绝对误差乘积的积分(ITAE)等),难以满足用语言描述的非确定控制要求^[1~4].基于模糊逻辑的遗传算法具有处理非确定环境下的模糊信息的能力,因而成为近年来研究的热点.本文利用模糊评判方法,设计了模糊适应度函数以改进遗传算法,并用于生物发酵温度控制参数的整定.

1 系统描述

生物发酵为典型的复杂工业过程,是利用微生物的发酵功能生产有用物质的技术,发酵设备一般需要复杂精密的控制.啤酒发酵过程为啤酒生产中的关键环节,是通过控制发酵温度来实现的.发酵反应在大型露天发酵罐中进行,如图 1 所示,发酵罐有 3 段冷却夹套和 3 个温度检测点,分别位于发酵罐的顶部、中部和底部.发酵罐内的微生物在发酵时,放出热量使罐内温度上升,由冷媒流经冷却夹套带走罐体热量,使罐内温度降低,从而保证了发酵过程能在工艺要求的温度中进行.

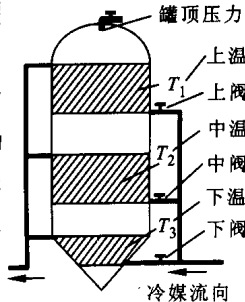


图 1 发酵罐结构图

发酵罐的温度控制采用与 bang-bang 控制结合的 PID 控制,其中控制率为

$$u(k+1) = \begin{cases} u_{\max} & (e(k) > r) \\ K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^m e(j) + K_d(e(k) - e(k-1)) & (|e(k)| < r) \\ 0 & (e(k) < -r) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 分别为 k 时刻、 $k-1$ 时刻的误差; $u(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的控制量; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分和微分参数; r 为切换阈值.当误差绝对值小于 r 时,采用 PID 控制,否则采用 bang-bang 控制.要调整的参数为 K_p 、 K_i 、 K_d 及 r .

发酵过程的温度控制又有着特殊的要求,从发酵机理的角度出发,发酵过程有微生物的参与,由于发酵温度直接影响发酵罐中微生物的生长、繁殖和代谢,因此发酵温度必须控制在工艺要求的范围内,而且对发酵温度的控制必须平稳,避免降温过激.从能耗角度出发,要求发酵过程中的能耗小,从设备维

护角度出发,要求开电磁阀门的频率低,以延长关键部件的使用寿命.发酵罐又具有时变和大惯性的特性^[5],因此很难找到合适的控制参数.

2 算法描述

目前,模糊理论和遗传算法的结合主要有 2 个方面:应用模糊规则,在线调整遗传操作的参数设置,形成动态的遗传算法,如利用模糊规则在线调整交叉率 P_c 和变异率 P_m ;借鉴模糊逻辑及模糊集合运算的思想,得到模糊编码和相应的模糊遗传操作,如利用遗传算法进行模糊规则的优化等^[6~8].针对啤酒发酵温度控制系统的特殊要求,本文利用模糊评判的方法改进了遗传算法,设计了模糊适应度函数,使其能够反映遗传算法优化的非确定性目标.首先,确定描述控制需求的评判因素,建立单个因素的评价论域和隶属度函数,隶属度越大越接近语言描述的情况.然后,由各个目标的隶属度构成评判矩阵,多个评判因素的权向量与评判矩阵相乘,就得出相对于理想情况的隶属度.最后,通过中心平均消除器的值即为个体的适应度值.设 A 和 B 是 2 个有限的论域

$$A = \{ a_1, a_2, \dots, a_n \}, B = \{ b_1, b_2, \dots, b_m \} \quad (2)$$

式中: A 为多个评判因素的集合; B 为评判因素的评语度集合.则综合评判结果 B 上的模糊集为

$$Y = X \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: X 为多个评判因素的权向量; Y 为综合评判的结果; a_{ij} 为第 i 个评判因素 a_i 在 b_j 上的隶属度.模糊适应度函数为

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot b_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (4)$$

因此,个体控制结果与理想情况的接近程度可用个体的适应度来表示,控制结果越接近理想情况,个体的适应度就越大.应用具有模糊适应度函数的遗传算法来优化复杂工业过程的控制参数,其流程为:随机产生初始种群,个体数目一定,每个个体为控制参数的编码;使用每个个体所对应的控制参数控制系统,对每个个体的控制结果进行模糊评价,并计算个体的模糊适应度,判断是否符合停止条件,若符合,最佳个体计算结束,否则转向;依据适应度采用轮盘赌选择再生个体,适应度高的被选中,适应度低的个体可能被淘汰;按照一定的交叉

率和单点交叉生成新个体;按照一定的变异率和基本位变异法生成新个体;由交叉和变异产生新一代的种群,并返回。

3 发酵罐温度控制的参数优化

3.1 模糊适应度函数

由发酵罐温度控制的论域

$$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} \quad (5)$$

式中: a_1 为控制温度误差绝对值的平均值(以控制周期为单位),反映控制温度与工艺温度的接近程度; a_2 为控制温度误差绝对值的最大值; a_3 为平均振荡次数,即控制温度穿越工艺温度曲线的次数除以2倍的控制周期数, a_2 和 a_3 反映了温度控制的平稳程度; a_4 为平均阀门开度(以控制周期为单位),反映控制发酵工艺温度的能耗; a_5 为平均开阀次数(以控制周期为单位),反映开关电磁阀门的频率。在发酵罐温度控制中,首先要保证按照发酵工艺温度来控制发酵罐的温度,其次关心能耗和设备的使用情况。评判因素的 X 体现了这种要求, $X = \{0.4, 0.15, 0.15, 0.2, 0.1\}$,有关发酵温度因素的权重占了70%。 B 分为好、中、差三档,并分别由 b_1 、 b_2 、 b_3 表示,评价得分为 $B = \{5, 3, 1\}$ 。采用三角隶属度函数,如图2所示,依据经验评价因素隶属度函数的中心值 c_{b_1} 、 c_{b_2} 和 c_{b_3} (如表1所示)。

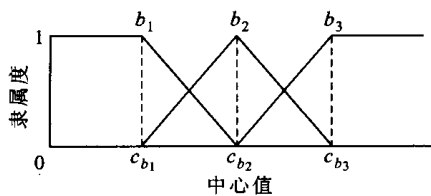


图2 隶属度函数

表1 评价因素隶属度函数的中心值

评价因素	c_{b_1}	c_{b_2}	c_{b_3}
a_1	0.10	0.20	0.50
a_2	0.15	0.25	1.50
a_3	0.02	0.05	0.10
a_4	0.10	0.20	0.40
a_5	0.20	0.40	0.80

3.2 参数优化

在啤酒发酵温度控制中,应用了与 bang-bang 控制结合的 PID 控制器,需要调整的参数为 K_p 、 K_i 、 K_d 和 r 。本文使用文献[9]中的发酵罐温度模

型,主要对发酵过程中前期恒温段的控制参数进行了优化。啤酒罐温度的初始值 $\theta = 8.13$,工艺温度为 8 ,控制周期为 10 min ,由于控制冷媒的阀门为开关阀,所以在一个控制周期内, u 即为阀门在开关状态的时间比,而 u_{\max} 为 100% 。每个控制参数采用8位二进制编码,由于发酵罐属于塔、换热器类的温度控制,所以控制参数的取值范围分别为: $K_p[0, 2]$; $K_i[0, 0.5]$; $K_d[0, 1]$; $r[0.1, 1.1]$ 。遗传算法的个体采用32位二进制编码,依次包含4个控制参数。在遗传操作中, $P_c = 0.6$, $P_m = 0.05$,种群的大小为60。采用具有模糊适应度函数的遗传算法,优化150代后的结果为 $K_p = 0.48$, $K_i = 0.11$, $K_d = 0.05$, $r = 0.2$ 。

4 实验结果

在山东某啤酒厂,对控制参数的优化前后做了2组对比实验,优化前的控制参数为 $K_p = 0.8$, $K_i = 0.3$, $K_d = 0.02$, $r = 0.25$,控制对象为第105号发酵罐,采样周期为 1 min ,控制周期为 10 min 。2组实验分别是恒温控制和降温控制,图3图4分别为它们的温度曲线和冷媒阀门控制量曲线,表2为它们各

表2 优化前后发酵罐的性能指标比较

优化性能指标	恒温控制		降温控制	
	优化前	优化后	优化前	优化后
温度误差绝对值的平均值/	0.149	0.104	0.364	0.111
温度误差绝对值的最大值/	0.728	0.151	0.634	0.558
平均振荡次数/次 控制周期 ⁻¹	0.055	0.003	0.010	0.006
平均阀门开度/%	0.347	0.065	0.511	0.366
平均开阀次数/次 控制周期 ⁻¹	0.773	0.399	0.970	0.920

:工艺温度为 8 ; :工艺温度为 $8 \sim 0.5$

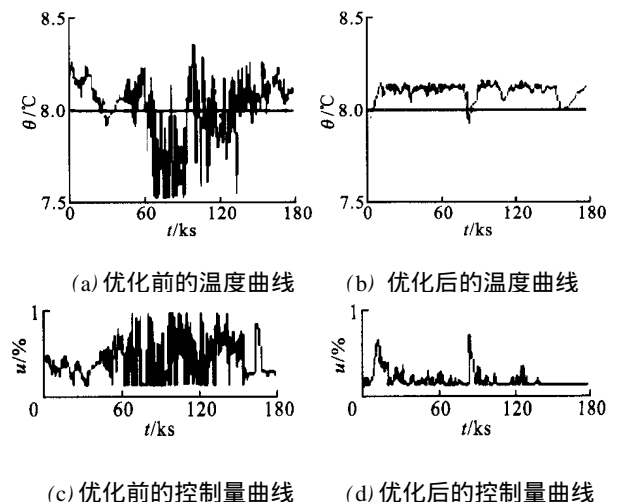


图3 发酵罐的恒温控制结果(8)

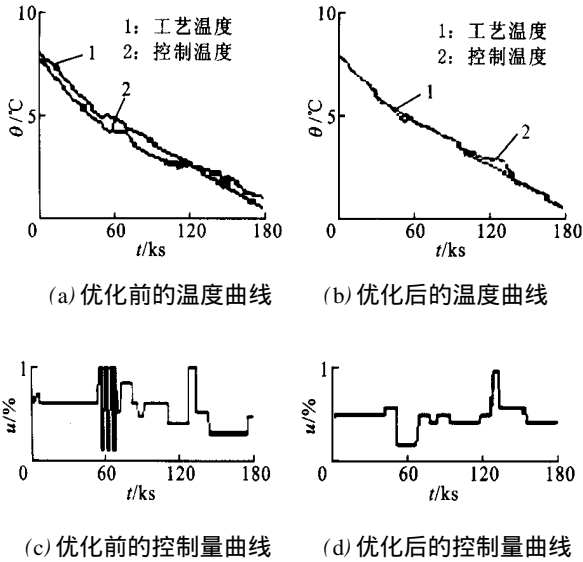


图4 发酵罐的降温控制结果(8~0.5)

项指标的比较.从实验对比的结果中,可看出控制参数被优化后,2组实验中的控制误差都减小了,温度变化更为平稳,能耗和恒温控制实验中电磁阀的开关频率都有明显的降低.

5 结论

由于在现代复杂工业过程中,对控制要求具有多样性,因此控制参数难以调整.本文针对这一问题,利用模糊评判方法改进了遗传算法,设计了模糊适应度函数,并在啤酒发酵的温度控制中用于优化控制参数.仿真实验表明,啤酒发酵温度的各项控制指标均有改善,与现有的控制参数调整方法相比,本文中的方法有以下优点:能够针对多样性的非确定性控制需求,优化控制器的控制参数;参数优化

不需对工业过程控制的人工经验.本文算法中的每个个体对应一组控制参数,所以在控制参数优化过程中有较大的计算量.由于控制参数与评价因素存在着一定关系,如比例系数过大会引起系统振荡,从而对温度误差绝对值的平均值、温度误差绝对值的最大值、平均振荡次数等的评价变差,所以如何利用这种关系减少计算量,还有必要做进一步的研究.

参考文献:

- [1] 王伟,张晶涛,柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报,2000,26(3):347~355.
- [2] Astrom KJ. Toward intelligent control[J]. IEEE Control Systems Magazine,1989,9(3):60~64.
- [3] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003. 63~81.
- [4] 何享文,胡晚霞. 智能在线自整定 PID 算法及在电加热炉控制系统中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,1998,12(1):65~69.
- [5] 薛福珍,庞国仲,林盛荣. 啤酒发酵过程的建模仿真与控制[J]. 中国科学技术大学学报,2001,31(4):502~508.
- [6] 李欣,王科俊. 模糊遗传算法综述[J]. 黑龙江自动化技术与应用,1998,17(3):16~19.
- [7] 庄健,王孙安. 自调节基因移民遗传算法的研究[J]. 西安交通大学学报,2002,36(11):1170~1172.
- [8] 杜海峰,王孙安. 基于粗糙集与模糊神经网络结合的多级压缩机故障诊断[J]. 西安交通大学学报,2001,35(9):954~957.
- [9] 董晓津. 啤酒发酵过程监控系统的研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院,2003.

(编辑 管咏梅)

[文摘预登]

弹体垂直侵彻混凝土靶体的柱形空腔膨胀理论分析

王延斌¹, 俞茂宏¹, 林俊德²

(1. 西安交通大学建筑工程与力学学院, 710049, 西安; 2. 西北核技术研究所, 710024, 西安)

采用统一强度理论作为混凝土材料的屈服准则,根据柱形空腔膨胀理论,求得了混凝土靶体在弹体垂直侵彻下的空腔膨胀压力和空腔膨胀速度的关系,给出了柱形空腔膨胀条件下卵形弹体侵彻靶体深度的理论计算公式,求出了弹体以 400~1100 m/s 的速度撞击混凝土靶体的侵彻深度,通过和试验结果比较,表明提出的模型具有一定的合理性.进一步的研究还表明,统一强度理论参数 b 、弹体质量和弹头形状对侵彻深度均有较大影响:当 $b=0$ 时侵彻深度较大,当 $b=1$ 时侵彻深度较小;弹体质量越大或弹头越尖,侵彻深度越大.