

文章编号 :1009-038X(2001)01-0016-04

# 酵母流加发酵过程中的模糊控制器

李景川, 苗志奇, 元英进

(天津大学生物化学工程系, 天津 300072)

**摘要:**通过分析酵母发酵过程中的影响因素,建立了控制酵母发酵过程中流加速率的模糊控制器.该模糊控制器的模糊规则可以根据专家经验方便地修改以提高控制效果.实验表明在模糊控制器控制下酵母产量比恒速流加时提高了一倍.

**关键词:**模糊控制器,流加发酵,酵母

中图分类号:Q 939.97

文献标识码:A

## A Fuzzy Controller in Fed-Batch Fermentation of Yeast

LI Jing-chuan, MIAO Zhi-qi, YUAN Ying-jin

(Department of Biochemical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** By analyzing the effects of biomass on the growth rate of yeast in fermentation, a fuzzy controller, which controlled feed rate in fed-batch fermentation of yeast, was established in this paper. The fuzzy rule in the controller can be easily modified by experts experience to enhance control effect. The results showed that the production of yeast by fuzzy controller mounted up to 2 times as the control under constant speed fed-batch mode.

**Key words:** fuzzy controller; fed-batch fermentation; yeast

通过自动控制使发酵体系中的底物浓度保持在最佳水平,实现底物利用率和目的产物产率的提高及能耗的降低已成为近年来研究的热点<sup>[1]</sup>.然而发酵过程具有非线性、时变性、复杂性和不确定性,很难建立描述其过程的精确数学模型.而传统 PID 控制难以保证底物处于最佳浓度,达到提高目的产物产率的目的.

作为智能控制的一个组成部分,模糊控制不需要被控过程的精确数学模型,它可以根据专家或操作人员的定性经验建立模糊控制规则库,利用模糊推理确定过程的流加量<sup>[2~4]</sup>.

作者通过对酵母流加发酵过程影响因素的分析,建立了控制葡萄糖流加速率的模糊控制器,使酵母产量比恒速流加时提高了一倍.

### 1 酵母流加发酵系统简介

发酵过程在 5 升 NBS BIOFLO 发酵罐中进行,整个系统如图 1 所示.

从空气压缩机出来的气体经滤水滤油环节后通过空气流量计调整其流量,最后经无菌过滤膜进入发酵罐.而废气经冷却与无菌过滤后排空,水蒸

收稿日期 2000-01-24,修订日期 2000-11-01.

基金项目 国家自然科学基金项目(29476248)及国家教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金项目资助课题.

作者简介 李景川(1975-),女,内蒙古包头人,生化工程博士研究生.

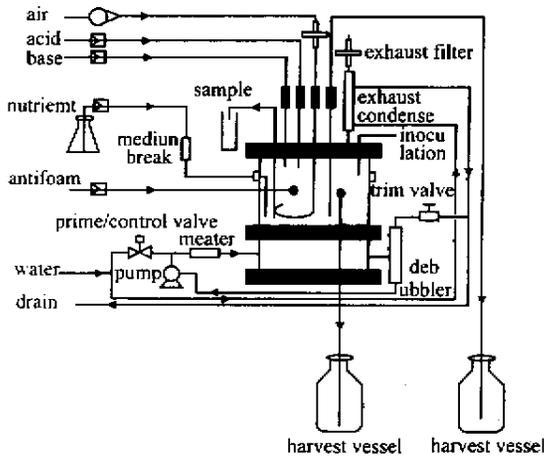


图 1 发酵体系示意图

Fig.1 The Sketch map of fermentation system

气冷凝后回流。

流加的酸、碱、消泡剂等按照控制机柜发出的指令通过蠕动泵送入发酵罐。控制机柜通过 PID 控制酸碱的流加量以保持 pH 值的恒定。

发酵罐温度控制以水作为温控介质。自来水过滤后进入加热盘管，由 PID 根据水温与设定温度确定加热电流。水加热到设定温度后泵入发酵罐的水夹套。

菌种由接种口加入，培养基在灭菌前加入，一部分葡萄糖以流加方式在发酵过程中补加进入发酵体系，从而保持最佳葡萄糖浓度。

## 2 模糊控制器的建立

模糊控制器的建立过程分为模糊控制器输入与输出变量的选取、模糊子空间的划分与模糊控制规则的建立、模糊推理算法的选择。

### 2.1 模糊控制器输入与输出变量的选取

通过实验确定了酵母发酵过程中葡萄糖的最佳浓度为 200 ~ 300 mmol/L。当葡萄糖浓度过低时，难以提供生长所必须的碳源与能量，导致菌体生长速率下降；当葡萄糖浓度过高时，产生底物抑制，葡萄糖到乙醇的转化率提高，菌体目的产物的产率将下降，因此葡萄糖浓度必须作为确定流加速率的参数之一。

另外，实验结果表明在细胞的不同生长阶段葡萄糖的最佳浓度不同，在适应期最低，对数前期最高，对数后期与平缓期的最佳底物浓度呈逐渐下降趋势，因此必须引入参数来表征菌体生长的不同阶段。

判断菌体生长阶段的方法之一是利用菌体密

度与菌体密度的微分值，作者采用差分来代替微分（即采用菌体密度在两次采样期间的差值），并结合当前菌体密度来判断菌体的不同生长阶段。菌体密度小且生长缓慢时菌体处于适应期，菌体密度适中且生长迅速时菌体处于对数期，菌体密度较大且生长缓慢时菌体处于平缓期。其中菌体生长速率可以用菌体密度的增量来表示。

本文的模糊控制器的输入变量为葡萄糖浓度、菌体密度和采样间隔内菌体密度增量，输出变量为葡萄糖流加速度。

### 2.2 模糊子空间的划分与模糊控制规则的建立

2.2.1 模糊子空间的划分 葡萄糖浓度划分为 5 个模糊子空间：S（低），MS（较低），M（中），MB（较高），B（高）；菌体密度划分为四个模糊子空间：S（低），MS（较低），MB（较高），B（高）；菌体密度增量划分为两个模糊子空间：S（小），B（大）。各模糊子空间的隶属度函数采用高斯函数，如图 2-4 所示。

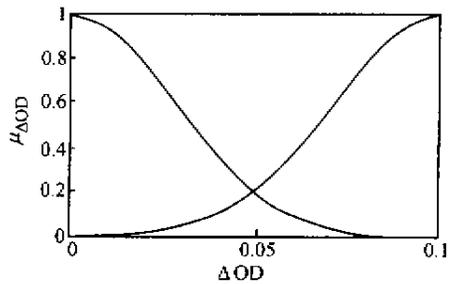


图 2 菌体密度增量论域中模糊子空间的划分及其隶属度函数

Fig.2 The division of fuzzy subspace and its membership functions of OD increment

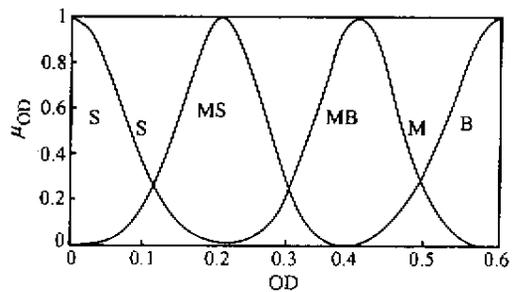


图 3 菌体密度论域中模糊子空间的划分及其隶属度函数

Fig.3 The division of fuzzy subspace and membership functions of OD

### 2.2.2 模糊规则库的建立

模糊控制规则分为两部分，一部分为根据菌体密度与密度增量判定菌体生长阶段的模糊规则，另一部分为根据菌体生长阶段与葡萄糖浓度确定葡萄糖流加速率的模糊规则。

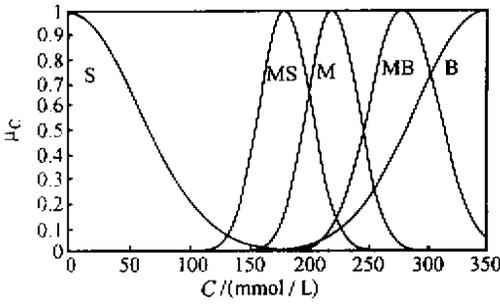


图4 葡萄糖浓度论域中模糊子空间的划分及其隶属度函数

Fig.4 The division of fuzzy subspace and membership functions of glucose concentration

作者将菌体生长期划分为适应期、对数前期、对数后期、平缓期,分别用(1)(2)(3)(4)表示.从菌体密度与菌体密度增量判断菌体所处生长阶段的模糊规则形式如下(所有的模糊规则都列于表中)结果见表1~2.

if  $OD \in S$  and  $\Delta OD \in S$  Then 菌体处于适应期 (Phase = 1) (1)

if  $OD \in MS$  and  $\Delta OD \in B$  Then 菌体处于对数前期 (Phase = 2) (2)

表1 判断菌体生长阶段的模糊规则表

Tab.1 The fuzzy rules for determination of yeast growth

ODt	$\Delta ODt$	
	S	B
S	1	2
MS	1	2
MB	4	3
B	4	3

判断流加速率的原则为:当葡萄糖浓度低于最佳浓度时,采用一个大于零的流加速度,且偏离越大,流加速度相应越大;在接近最佳浓度时采用小的流加速度以防止调整过度、葡萄糖浓度偏高;当菌体处在对数期时,细胞生长旺盛,葡萄糖消耗较快,因此应在原基础上适当加大流加速度.最后形成的模糊控制规则如下:

if Phase = 1 and  $C \in S$  Then 葡萄糖流加速度为 25 (3)

if Phase = 3 and  $C \in M$  Then 葡萄糖流加速度为 15 (4)

根据表2分析,若采用从菌体密度、密度增量和葡萄糖浓度直接推测葡萄糖流加速度则模糊控制规则共有  $4 \times 2 \times 5 = 40$  个.其一般形式如下:

if  $OD \in OD_i$  and  $\Delta OD \in \Delta OD_i$  and  $C \in C_i$ , Then  $f = f_i$  万方数据 2 ... A0 (5)

其中  $OD_i, C_i, \Delta OD_i, f_i$  分别表示模糊控制规则中菌体密度、葡萄糖浓度、菌体密度增量对应的模糊子空间、葡萄糖流加速度.

表2 判断流加速率的模糊规则表

Tab.2 The fuzzy rules for determination of feeding rate

菌体生长期	葡萄糖浓度 (mmol/L)				
	S	MS	M	MB	B
1	25	5	0	0	0
2	50	45	25	5	0
3	45	25	15	0	0
4	35	15	5	0	0

### 2.3 模糊推理原则

当收集到系统当前状态的菌体密度、菌体密度增量以及葡萄糖浓度的具体数值后,首先计算这3个量对其论域中各模糊子空间的隶属度.然后根据这些隶属度数值确定模糊规则库中各模糊控制规则的真值( $w_i$ ),具体方法如下:

$$w_i = \mu_{OD_i}(OD) \wedge \mu_{C_i}(C) \wedge \mu_{\Delta OD_i}(\Delta OD) \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, A0$

其中  $\wedge$  表示“与”运算;  $\mu_{OD_i}(OD), \mu_{C_i}(C), \mu_{\Delta OD_i}(\Delta OD)$  分别表示菌体密度、葡萄糖浓度、菌体密度增量对上述子空间的隶属度.

由于在本文的模糊规则库中,葡萄糖流加速度用一个确定的数值表示,因此对应流加速度可以用下式来合成:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^{40} w_i f_i}{\sum_{i=1}^{40} w_i} \quad (7)$$

## 3 结果与讨论

为检验模糊控制器的控制效果,采用间歇发酵和 20 mL/h 的恒速流加作为对照实验,恒速流加与模糊控制器流加实验中流加速度与葡萄糖浓度的时变曲线如图5、图6所示.

从图5、图6中可以看出模糊控制器控制下的流加速度随菌体生长的不同情况进行适当调整,在菌体生长旺盛、葡萄糖消耗速率高的对数期采用了较大的流加量,避免了恒速流加中对数期葡萄糖浓度偏低,而适应期与平缓期糖浓度偏高的问题.

模糊控制器流加保持了对数期较高的葡萄糖浓度,同时保证了适应期与平缓期相对较低的糖

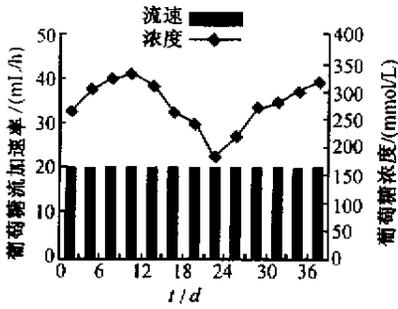


图 5 恒速流加发酵葡萄糖浓度与流加速率

Fig.5 The concentration and feeding rate of glucose in constant speed fed - batch fermentation

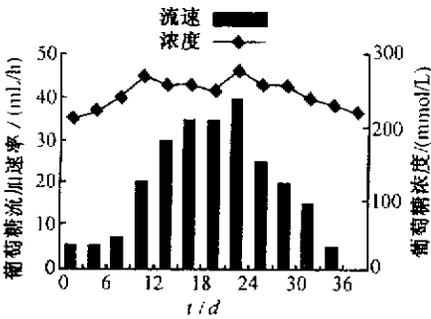


图 6 模糊控制流加发酵葡萄糖浓度与流加速率

Fig.6 The concentration and feeding rate of glucose in fed - batch fermentation under fuzzy control

浓度,即保障了菌体生长对作为碳源与能源的葡萄糖的需求,又减弱了葡萄糖浓度过高对菌体生长的

抑制作用,因此与恒速流加发酵相比,菌体的最终产量提高了一倍,比间歇发酵提高 1.3 倍.如图 7 所示.

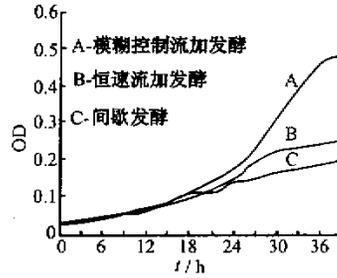


图 7 恒速流加、间歇发酵与模糊控制流加发酵过程菌体生长曲线

Fig.7 The time course of yeast growth in constant speed fed - batch ,batch and fuzzy fed - batch

### 4 结 论

模糊控制器可以不依靠发酵过程的精确数学模型,而根据对发酵过程影响因素的分析与定性专家经验形成模糊控制规则,构建模糊控制系统.实验结果表明,在酵母流加发酵中,模糊控制器控制下的葡萄糖浓度接近于预期水平,菌体产量比恒速流加时提高了一倍.

### 参考文献：

[ 1 ] SHIMIZU K , YE K M. Development of intelligent bioreactor system[ J ]. *Sensors and material* , 1995 , ( 4 ) 233 ~ 247 .

[ 2 ] SIIMES T , LINKO P. Real-time fuzzy-knowledge-based control of baker ' s yeast production[ J ]. *Biotechnology and Bioengineering* , 1995 , 45 : 135 ~ 143 .

[ 3 ] HU Z D , YUAN Y J. Fuzzy growth kinetics of immobilized C. roeus cells in polyurethane foams[ J ]. *Chemical Engineering Science* , 1995 , 50 ( 20 ) 3297 ~ 3301 .

[ 4 ] XU J X , LIU C , HANG C C. Modified tuning of a fuzzy logic controller[ J ]. *Engng Appic-Artif Intell* , 1996 , ( 1 ) 65 ~ 74 .

(责任编辑 朱 明)