

文章编号:1673-1689(2008)06-0121-05

发酵过程中基于动态解耦的仿人智能协调控制

冯 茜, 李胜玉*

(内蒙古科技大学 信息工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 以青霉素发酵过程为对象, 建立了能够反映发酵过程中比生长速率和 pH 值变化的动态数学模型, 并将仿人智能协调控制和仿人智能模糊控制融入到发酵过程的优化控制中进行仿真, 对发酵补料系统进行动态解耦控制, 实现发酵过程控制的智能化处理, 达到优化发酵生产的目的。

关键词: 仿人智能协调控制; 仿人智能模糊控制; 动态解耦; 补料控制

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

The Study for Human-Simulated Intelligent Coordinated Control System Based on Dynamic Decoupling

FENG Qian, LI Sheng-yu*

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: With the penicillin fermentation process as a model. And it has established the dynamic mathematical model for specific growth rate and pH value which can reflect the fermentation process was established. The Human-Simulated intelligent coordinated control and Human-Simulated intelligent fuzzy control are incorporated into the optimization control of the fermentation process for simulation. The fermentation appending stuff system has been carried the dynamic decoupling control into execution. This algorithm has accomplished intelligent disposal in the fermentation process control and achieved purpose of the optimization control for the fermentation production.

Key words: Human-Simulated intelligent coordinated control ; Human-Simulated intelligent fuzzy control; dynamic decoupling; appending stuff control

在青霉素发酵过程中, pH 值的控制主要通过补加糖和氨水实现, 而加糖量的控制又主要以比生长速率为依据, 同时比生长速率又会受到环境因素 pH 值的影响, 即比生长速率会间接受到加入氨水量的影响。由此得出结论: 在青霉素发酵过程中, 加糖量和加氨水量的改变均会导致 pH 值和比生长速率的变化。也就是说, 加糖量、加氨量和比生长

速率、pH 值构成了一个二输入二输出的耦合控制系统。

针对这种严重耦合的系统, 以往所采取的控制方案通常是按单变量进行控制, 把本来含有耦合的系统输出信息当作没有耦合影响的信息来利用, 采用加糖量控制比生长速率, 加氨量控制 pH 值, 形成两套单独的回路。在本文中, 根据仿人智能协调控

收稿日期: 2007-09-10.

作者简介: 冯茜(1980-), 女, 河北石家庄市人, 控制理论与控制工程硕士研究生。

* 通讯作者: 李胜玉(1947-), 男, 天津人, 副教授, 主要从事信息工程研究. Email: wl2005188@163.com

制的思想设计了新的控制方案,即先不对比生长速率和 pH 值解耦,而是将二者放在一起控制,经过仿人智能协调控制系统的逻辑智能回路的选通后,被选通的仿人智能模糊控制器将直接作用于控制对象并对控制对象进行调节。

1 仿人智能协调控制

基本思路^[1]如下:多变量系统的手动控制过程中,一个熟练的操作人员能对系统应如何控制迅速做出判断和决策,最终达到满意的控制效果。操作人员凭借经验的积累和逻辑判断,通过相互协调的方式来消除耦合的影响。协调是人控制器所具有的最重要的功能之一。仿人智能控制对这种协调功能的模仿,可以通过一套基于特征辨识的多模态控制算法和一个协调机构的共同作用来实现。协调机构实现对多变量系统的静态解耦,即同时对控制器的多个输出进行协调。每个控制器基于特征辨识的多模态控制算法总是在尽量保证本回路的控制性能的同时实现对多变量系统的动态解耦。

而基于特征辨识的仿人智能控制,通过信息空间的划分和控制模态的设置,充分利用熟练操作者对耦合特征的认识,对耦合信息的处理,实时消除动态耦合的不利影响。这就是基于特征辨识的仿人智能控制在处理多变量系统耦合问题上特有的“智能解耦”特性。

依据特征模型,可在线判断系统是否因为耦合的影响已经形成振荡,或已具有形成振荡的趋势。若系统已经出现振荡或振荡的趋势,协调的作用是适当减小控制量,减小注入系统的附加能量,抑制振荡或振荡产生的趋势。当相轨迹在第二、第四象限时,为使其输出尽快地跟踪输入,应保持该回路按单回路仿人智能控制所需的控制量。此外,为了防止振荡的形成,当识别到形成振荡的趋势时,应提前考虑加以抑制。这样的方法可以尽量减小回路间正反馈的影响,使系统在正反馈控制的综合作用中呈现负反馈的性质,从而保持系统具有一定的稳定裕度。

对于两回路的输出误差响应相平面构成的耦合特征模型可能出现以下 3 种情况:①系统两个回路的响应都处于输出远离输入目标,即处于相位相反的偏离平衡位置的振荡状态;②系统一个回路的输出处于远离输入目标,偏离平衡位置的状态,而另一个回路的输出则处于跟踪输入目标,回复平衡位置的状态;③系统两个回路均处于跟踪输入目标,回复平衡位置或者均处于偏离平衡位置,但两

回路间耦合作用可忽略。

相应的控制模态为:

$$u'_1 = u_1 \times k_1 u'_2 = u_2 \times k_2 \quad (1)$$

式(1)中, k_1, k_2 ,为耦合抑制系数,一般应根据系统耦合强弱进行选取。耦合强的取值小,耦合弱的取值大,处于情况③时有 $k_1 = k_2$ 。具体可根据系统回路间耦合的静态增益确定,但是他们的值满足不等式

$$0 < k_1 \leq k_2 < 1 \quad (2)$$

2 仿人智能模糊控制

仿人智能模糊控制^[2]是用智能算子(包括数学算法与直觉逻辑推理)来仿效或近似模拟人的控制行为,设计出智能控制器。仿人智能模糊控制算法是基于模糊逻辑并将仿人智能有机融合的一种设计方法,采用“观察→控制→等待→再观察→再控制→再等待”方法,当误差及误差变化率往绝对值变大的方向变化时,控制器加以闭环控制;当误差及误差变化率往绝对值变小的方向变化时,控制器加以开环控制。

如果采用多模态的控制方式,根据系统所处的不同状态和控制过程的不同时间的不同要求,采取不同的控制策略和相应的控制模式,就有可能同时兼顾控制系统对多种性能指标的要求。因此,采用不同控制方式分段实现控制。

1)当偏差大于某阈值时,用比例控制,以提高系统的响应速度,加快响应过程;

2)当偏差减小到阈值以下时,切换输入模糊控制,以提高系统的阻尼性能,减小响应过程中的超调。

这样就综合了比例控制和模糊控制的优点。在这种方法中,模糊控制的论域仅是整个论域中的一部分,这就相当于模糊控制论域已被压缩,所以这也就等效于模糊控制的语言变量的语言值即分档数增加,提高了控制的灵敏度和精度。

在作者所应用的仿人智能模糊控制子系统中,比生长速率或 pH 值给定值与实际值的偏差 E 和偏差变化率 E_c 可完整地表达系统的运动特性,选它们为输入量论域,补糖量或补氨水量变化量 ΔU 为输出量论域。实际工程中, $E, \Delta E$ 和 ΔU 有确定的连续变化范围 $[X_1, X_n]$,在模糊控制中,按下式将它们化为 $[-n, +n]$ 之间的离散论域:

$$Y = [2n/(X_n + X_1)][X - (X_n + X_1)/2], \\ X \in [X_1, X_n], Y \in [-n, +n] \quad (3)$$

其中 n 为量化等级,本文取 $n = 3$,即 E, E_c 及

ΔU 均按下述等级进行量化:

$$\{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$$

E, E_c 及 ΔU 的模糊集均定义为: {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}

E 和 E_c 及 ΔU 的隶属函数均取为三角形函数, 分析补料过程并总结实际操作经验, 可归纳出控制规则表, 见表 1。

表 1 仿人智能模糊控制规则表

Tab.1 Fuzzy control and human-simulation intelligent control rule table

ΔU E	E_c	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB		NB	NB	NB	NB	ZE	ZE	ZE
NM		NB	NB	NM	NM	ZE	ZE	ZE
NS		NB	NM	NM	NS	ZE	ZE	ZE
ZE		NM	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PM
PS		ZE	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB
PM		ZE	ZE	ZE	PM	PM	PB	PB
PB		ZE	ZE	ZE	PB	PB	PB	PB

表 1 给出 $7 \times 7 = 49$ 条控制规则, 每条可写成:

IF E_i And E_c Then ΔU_{ij} ,

$$i = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2, \dots, 7 \quad (4)$$

由仿人智能模糊控制规则表可以查出对应的补料变化量为 ΔU_{ij} , 利用加权平均法清晰化得到的实际补料调节量为 ΔU ,

$$U = U' + \Delta U \quad (5)$$

其中, U 为本次控制量, U' 为上一次的补糖量或补氨量。

3 青霉素发酵动态模型

3.1 基于青霉素机理模型的优化模型

基于物料衡算和 Monod 经验方程 $\mu = \mu_{\max} C_s / (K_s + C_s)$, 在 $\lim^{[3]}$ 等人研究的基础上, Cuthrell 和 Biegler^[4] 提出青霉素发酵过程的动力学模型, 如式 (6) 所示,

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = h_1(X, S)X - \frac{X}{V}u, \\ \dot{P}(t) = h_2(X, S)X - kP - \frac{P}{V}u, \\ \dot{S}(t) = -h_3(X, S)X + \frac{S_F - S}{V}u, \\ \dot{V}(t) = u \end{cases} \quad (6)$$

其转化方程如下^[5]:

$$\begin{cases} h_1 = 0.11 \frac{S}{\mu_1 X + S}, \\ h_2 = 0.0055 \frac{S}{\pi_1 + S(1 + 10S)}, \\ h_3 = \frac{h_1}{0.47} + \frac{h_2}{1.2} + 0.029 \frac{S}{\pi_1 + S} \end{cases} \quad (7)$$

约束条件为: $0 \leq X \leq 40, 0 \leq S \leq 25, 0 \leq V \leq$

$10, 0 \leq \mu \leq 0.1$

初始条件为: $X(0) = 1.5, P(0) = 0, S(0) = 0, V(0) = 7$

该模型由青霉素发酵过程中 4 个主要状态变量的微分方程组成, 其中 X 为菌丝浓度, P 为青霉素浓度, S 为基质浓度, V 为发酵液总体积, u 为补糖速率, $k = 0.01, S_F = 500, \mu_1 = 0.006, \pi_1 = 0.0001$ 。

3.2 pH 值变化的动态模型

在青霉素发酵过程中, 流加糖以及糖浓度的增加会引起 pH 值下降; 而加入氨水会引起 pH 值的上升; 在发酵后期随着产物浓度的不断增加, 菌丝自溶, pH 值上升。由此得出 pH 值的动态模型:

$$\frac{d(\text{pH})}{dt} = c_1 \cdot F_{\text{NH}} + c_2 \cdot P + c_3 \cdot S^{0.8} \quad (8)$$

式中: c_1, c_2, c_3 为常数, F_{NH} 为加入氨水的量。

3.3 温度和 pH 值对比生长速率的影响

温度对细胞内所进行的各种生化反应和其生长速率都有很大的影响。温度对反应速率的影响用传统的 Arrhenius 公式进行关联。

$$\mu_{\max} = A \exp(-E_x/RT) \quad (9)$$

pH 也是影响细胞生长的一个重要因素, pH 值的变化会引起各种酶活力的改变, 反应过程中存在一个最佳 pH 值, 由此可以认为 pH 值的变化与反应速率的关系基本上满足抛物线关系。当处于最佳 pH 值时反应速率达到最大, 而偏离此值都致使反应速率的减小。青霉素产生菌生长的合适 pH 值范围为 6.2~7.0。

考虑到温度和 pH 值对反应速率的共同影响, 则得到如下的反应速率的动力学表达式:

$$\mu_x = \mu_m \cdot k_x \cdot e^{-E_x/RT} \cdot (a_1 \cdot (\text{pH})^2 + a_2(\text{pH}) + a_3) \quad (10)$$

式中 a_1, a_2, a_3, k_x ——方程的常数系数

综合以上分析, 得到了青霉素发酵过程中比生长速率和 pH 值的动态数学模型。

4 仿人智能协调控制系统设计

首先, 将比生长速率和 pH 值分别以给定值为中心, 划分成正偏差区和负偏差区。如图 1 所示, 图中, $\Delta\mu_+, \Delta\mu_-$ 分别表示比生长速率的正、负偏差

值, ΔpH_+ 、 ΔpH_- 分别表示 pH 值的正、负偏差值, 图中的阴影区域为比生长速率和 pH 值正常运行区域。然后, 将比生长速率和 pH 值的区间进行组合, 形成判别条件。最后, 根据比生长速率和 pH 值偏差落在不同区域来确定是用加糖量进行控制还是用加氮量进行控制, 也就是决定具体用哪一个仿人智能控制器进行控制, 此回路的输出信号将送至逻辑智能回路。4 个仿人智能模糊控制器是: 仿人智能模糊控制器 HSIFC I (加糖量-比生长速率控制器)、仿人智能模糊控制器 HSIFC II (加糖量-pH 值控制器)、仿人智能模糊控制器 HSIFC III (加氮量-比生长速率控制器)、仿人智能模糊控制器 HSIFC IV (加氮量-pH 值控制器), 它们将比生长速率和 pH 值调节在各自的正常范围之内。

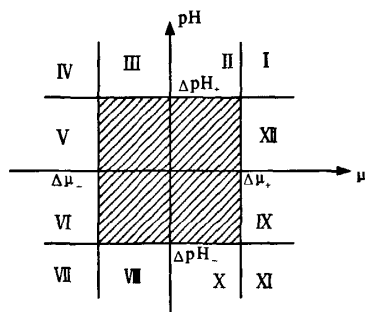


图1 比生长速率和 pH 值分布

Fig. 1 Specific growth rate and pH value distribution curve

仿人智能协调控制系统根据来自仿人智能逻辑选择回路的逻辑信号, 选通相应的仿人智能模糊控制器进行控制。所有的仿人智能模糊控制器均模仿有经验的操作人员的控制决策思想并采用仿人智能模糊控制算法来进行控制。图2为仿人智能协调控制系统示意图, 其中 μ_0 表示比生长速率给定值, pH_0 表示 pH 值给定值。

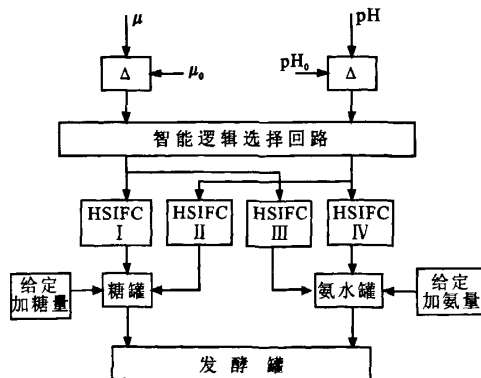


图2 仿人智能协调控制系统示意图

Fig. 2 Human-simulated intelligent coordinated control schematic

5 系统仿真

青霉素发酵中、后期给定比生长速率^[6]为 0.005, 偏差范围为 $[-0.0003, 0.0003]$, 即比生长速率的正常范围是 $[0.0047, 0.0053]$; 给定 pH 值为 6.65, 偏差范围是 $[-0.03, 0.03]$, 即 pH 值的正常范围是 $[6.63, 6.67]$ 。

此时, 利用 Simulink^[7], 对仿人智能协调控制系统进行仿真, 由仿真结果发现: 发酵过程中有 3 个仿人智能模糊控制器被选通, 分别是 HSIFC I、III、IV。并且 3 个仿人智能模糊控制器交替对发酵系统进行控制。具体控制结果见图3, 图4, 图5。

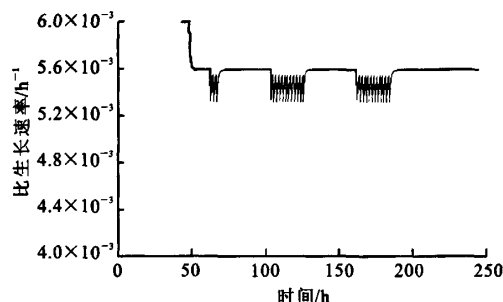


图3 HSIFC I 调节比生长速率曲线

Fig. 3 The regulation curve of specific growth rate by HSIFC I

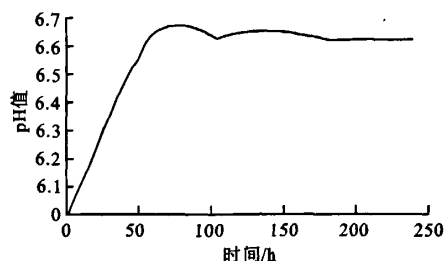


图4 HSIFC III 调节 pH 值曲线

Fig. 4 The regulation curve of pH value by HSIFC III

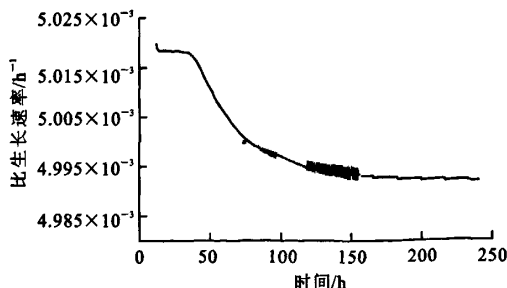


图5 HSIFC IV 调节比生长速率曲线

Fig. 5 The regulation curve of specific growth rate by HSIFC IV

通过以上3个图中的比生长速率和pH值调节曲线可以发现,从青霉素发酵数学模型反馈回来的数据每次都要进入仿人智能协调控制器进行判断,经过智能逻辑回路选通的仿人智能模糊控制器直接作用于被控对象,进而对偏差量进行调节。

本文介绍的仿人智能协调控制方法具有以下

特点:控制系统的设计不需要对象模型,方法简单,便于工程应用,特别适用于对象模型难以确定而又需要实现解耦控制的情况;能对多变量系统实行有效的动态解耦控制;仿人智能模糊控制算法适用于大滞后、强耦合、时变、非线性发酵过程。

参考文献(References):

- [1] 李祖枢,涂亚庆. 仿人智能控制[M]. 北京:国防工业出版社,2003:246—258.
- [2] 王耀南. 智能控制系统[M]. 长沙:湖南大学出版社,1996.
- [3] Lim H C, Tayeb Y J, Modak J M, et al. Computational algorithms for optimal feed rates for a class of fed-batch fermentation; numerical results for penicillin and cell mass production[J]. *Biotech & Bioeng*, 1986, 28: 1408—1420.
- [4] Cuthrell J E, Biegler LT. Simultaneous optimization and solution methods for batch reactor control profiles[J]. *Comput Chem Eng*, 1989, 13: 49.
- [5] 于乃功,阮晓钢. 青霉素发酵过程优化问题研究[C]. 第二十二届中国控制会议论文集. 武汉:武汉理工大学出版社,2003: 141—145.
- [6] 徐亲民. 生物合成调控的青霉素发酵数学模型与过程优化[J]. 中国抗生素杂志, 2003(6): 328—333.
XU Qin-min. Modeling and optimization of biosynthesis regulation for penicillin fermentation[J]. *Chinese Journal of Antibiotics*, 2003(6): 328—333. (in Chinese)
- [7] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

(责任编辑:秦和平,杨萌)

您的包装能否确保产品的质量安全?

肉眼看得见的问题 您来解决
肉眼看不见的问题 Labthink 来解决



Labthink

查了, 查责任!

历经生产、运输、仓储、上架销售等各个环节, 如果包装存在任何质量隐患, 都可能导致产品出现霉变、潮解、破损、保质期缩短等严重问题。Labthink兰光——包装检测国际知名品牌, 为您提供全方位包装质量与安全解决方案。

济南兰光机电技术有限公司
咨询热线: 0531-85021155
E-mail: labthink@labthink.cn
WWW.LABTHINK.CN