

模糊综合评价法在微生物发酵过程优化中的应用

陈 敏 王静馨 刘力卉

(烟台大学化学工程系, 烟台 264005)

摘要 本文将模糊综合评价应用于微生物发酵过程条件优化。以模糊综合评价值作为复合形优化指标,对锌酵母发酵过程中的 pH 和温度参数进行了优化。

关键词 模糊综合评价,优化,复合形,微生物发酵

在微生物发酵过程优化中,多目标决策问题很多,多个指标有时互相矛盾,确定一个合适的解具有模糊性。本文将模糊综合评价法^[1]应用于微生物发酵过程,以模糊综合评价值作为优化指标推进复合形^[2],对锌酵母发酵过程的控制参数 pH 和温度进行了优化。

1 材料和方法

1.1 评价指标集

选择发酵终止时锌酵母干重 ($X_f, g/L$)、糖

1994-03-01 收稿

转化率 (S_x , g/g)、残糖浓度 (S_f , g/L) 为评价指标集, $U = \{X_f, S_x, S_f\}$ 。优化的目的是使 X_f 、 S_x 高, X_f 低。

1.2 建立隶属函数

建立隶属函数时, 要求评价指标集中各因素对评价级的隶属度大小与该因素在综合评价中的重要程度相适应。建立以下隶属函数:

$$\mu(X_f) = \begin{cases} \frac{X_f - 7}{15 - 7} & X_f > 7 \\ 0 & X_f \leq 7 \end{cases}$$
$$\mu(S_x) = \begin{cases} 1 & S_x \geq 0.5 \\ \frac{S_x}{0.5} & S_x < 0.5 \end{cases}$$
$$\mu(S_f) = \begin{cases} 1 & S_f = 0 \\ 1 - \frac{X_f}{10} & S_f > 0 \end{cases}$$

1.3 确定权重分配集

在锌酵母发酵优化中, 评价指标重要性排序是 $X_f > S_x > S_f$ 。权重模糊子集确定为 $A = (0.5, 0.3, 0.2)$

1.4 模糊运算方法选择

模糊变换 $B = A \circ R$, 本文采用加权平均型算子 $M(\cdot, \oplus)^{[3]}$, $\cdot$ 表示相乘, $\oplus$ 表示有上界 1 求和。

1.5 复合形初始点

pH 和温度的约束条件定为: $4.3 \leq \text{pH} \leq 5.0$; $25.0^\circ\text{C} \leq T \leq 33.0^\circ\text{C}$ 。

初始可行点取 $X^{(0)} = [\text{pH}, T]^T = [4.6, 29.0]^T$ 。复合形顶点数取 $k = 4$ 。其余三个顶点用随机试验法序贯产生, 方法为: $X_i^{(j)} = a_i + (b_i - a_i)r_i^{(j)}$, 式中, $r_i^{(j)}$ 为 n 个在 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的随机数, n 为变量数, $j = 1, 2, 3$ 。由计算机产生的伪随机数分别为 $[0.5, 0.9]$ 、 $[0.1, 0.15]$ 、 $[0.9, 0.33]$, 由上式计算得到三个点分别为: $[4.6, 32.6]^T$, $[4.4, 29.6]^T$, $[4.9, 30.3]^T$ 。经检验均为可行点。

1.6 实验材料与设备

菌种为啤酒酵母 CY 26。发酵在上海制药机械四厂 BIII-6 型 6L pH 和温度自动控制发酵罐中进行。发酵培养基按文献 [4]。每次实验控制初始糖浓度、发酵液体积、接种量、流加糖浓度和流加量、通气量等条件不变。总发酵时间 12h。发酵结束测定菌体干重^[4]和残糖浓度^[4], 计算糖转化率。pH 和温度条件按要求的控制。

2 实验结果

2.1 序贯实验法

以复合形初始顶点的 pH 和温度参数安排发酵实验, 实验结果如表 1 中前 4 项所示。

表 1 序贯试验法复合形推进过程

试验序号	pH	T	X_f	S_x	S_f	μ_{x_f}	μ_{s_x}	μ_{s_f}	b_i
1	4.6	29.0	14.174	0.318	5.8	0.897	0.636	0.42	0.723
2	4.7	32.6	12.165	0.249	6.8	0.643	0.498	0.32	0.535
3	4.4	29.6	12.923	0.293	6.3	0.740	0.586	0.37	0.619
4	4.9	30.3	12.643	0.269	6.8	0.705	0.538	0.32	0.578
5	4.6	26.6	12.676	0.272	5.0	0.672	0.544	0.50	0.599
6	4.4	27.5	12.645	0.277	4.4	0.706	0.554	0.56	0.631
7	4.5	28.7	12.837	0.277	4.4	0.730	0.554	0.56	0.643
8	4.5	27.2	12.556	0.281	4.6	0.694	0.562	0.54	0.623
9	4.6	28.0	14.231	0.341	6.0	0.904	0.682	0.40	0.737
10	4.7	29.9	12.923	0.293	6.3	0.740	0.586	0.37	0.620
11	4.6	29.2	14.053	0.306	5.5	0.881	0.612	0.45	0.714
12	4.7	28.9	14.392	0.327	3.8	0.924	0.654	0.62	0.782
13	4.6	28.5	14.486	0.324	3.6	0.936	0.652	0.64	0.792
14	4.6	28.6	14.495	0.327	3.6	0.937	0.654	0.64	0.793
15	4.8	28.9	13.080	0.295	6.2	0.760	0.590	0.38	0.633

按照本文建立的隶属函数计算隶属度, 建立模糊评价矩阵 R

$$R = \begin{bmatrix} 0.897 & 0.643 & 0.740 & 0.705 \\ 0.636 & 0.498 & 0.586 & 0.538 \\ 0.42 & 0.32 & 0.37 & 0.32 \end{bmatrix}$$

综合评价向量 $B = A \circ R$, 经 $M(\cdot, \oplus)$ 模糊运算, 得到综合评价值 $b_j (j = 1, 2, 3, 4)$, 一并列于表 1 中。

$$B = A \circ R = (0.5, 0.3, 0.2)$$

$$\cdot \begin{bmatrix} 0.897 & 0.643 & 0.740 & 0.705 \\ 0.636 & 0.498 & 0.586 & 0.538 \\ 0.42 & 0.32 & 0.37 & 0.32 \end{bmatrix}$$

$$= (0.723 \quad 0.535 \quad 0.619 \quad 0.578)$$

根据综合评价值推进复合形, 具体推进过程在表 1 中(略去不可行点收缩过程)。由表 1 看出, 最佳条件是 $\text{pH} = 4.6$, $T = 28.3^\circ\text{C}$ 。

2.2 规划法

在 pH 和温度约束范围内, 选择 12 组不同 pH 和温度组合条件进行发酵实验, 以 pH 和温度为自变量, 对 X_f 、 S_x 和 S_f 进行回归分析, 得到三个回归方程及回归方程的复相关系数如下:

$$\begin{aligned} X_f &= 128.1284\text{pH} + 4.9883T \\ &\quad - 17.81437\text{pH}^2 - 0.19068T^2 \end{aligned}$$

$$+ 1.27138\text{pH} \cdot T - 252.3877$$

$$R = 0.9712$$

$$S_x = 3.5017\text{pH} + 0.1474T$$

$$- 0.46682\text{pH}^2 - 0.0049T^2$$

$$+ 0.02878\text{pH} \cdot T - 9.9481$$

$$R = 0.9765$$

$$S_f = 139.2755\text{pH} + 7.4357T$$

$$- 15.27915\text{pH}^2 - 0.13034T^2$$

$$+ 0.17500\text{pH} \cdot T - 438.4411$$

$$R = 0.9823$$

仍以前述复合形初始顶点开始搜索, 以回归模型计算 X_f 、 S_x 、 S_f 值, 计算模糊矩阵 R 及模糊综合评价值 b_j , 推进复合形, 得到最佳点 $\text{pH} = 4.6$, $T = 28.4^\circ\text{C}$ 。两种方法优化结果一致。以优化的结果进行三批平行发酵实验, 产酵母平均干重 14.454g/L , 糖转化率 0.325g/g , 残糖 5.46g/L 。

参 考 文 献

- [1] 贺仲雄. 模糊数学及其应用. 天津: 天津科学技术出版社, 1985, 190—193.
- [2] 薛履中. 工程最优化技术. 天津: 天津大学出版社, 1989, 172—177.
- [3] 彦炳. 实用模糊数学. 重庆: 科学技术文献出版社, 1989, 188—191.
- [4] 林稚兰, 李爱芬, 邓昌亮, 等. 微生物学通报, 1992, 19(4): 207—210.