

间歇发酵过程放罐时机的 启发式模糊识别与预报

傅春生 陆建中 王树青 王骥程

(浙江大学)

摘 要

间歇发酵过程放罐时机的优化是提高产量,产率和降低能耗的一个重要方面。本文运用模糊集理论,并将统计学方法和人的经验合为一体,提出了一种放罐时机的启发式模糊识别、预报的建模方法。并且,根据一实际工业抗生素生产的历史资料和现场的分析,运用本文提出的方法建立了该过程放罐时机的识别与预报模型。同时构造了计算机时实识别系统,几批工业实验的结果表明,模型预报的效果良好。

关键词——间歇发酵过程,放罐时机,模型,模式,模糊识别。

一、引 言

对于任何一个间歇式生产过程,其终了点的选择都是过程优化的一个重要方面。间歇式微生物发酵过程也不例外。

以菌体的代谢物作为最终产品的间歇式抗生素发酵过程,一般可将它分成四个时期 $T_i (i = 1, 2, 3, 4)$, 即: 过程的迟缓期和菌丝的对数生长期 T_1 ; 菌丝生长的减速期和抗生素分泌物产生的初期 T_2 ; 抗生素分泌物的主要产生期 T_3 ; 以及菌丝开始衰老和抗生素分泌物产生的减速期 T_4 。由此可见,抗生素的产生是在菌体生长的后期(即合成期)才开始。进入合成期后,抗生素分泌速率达到最大。所以,合成期愈长,生产力也愈高。而到过程后期,抗生素分泌速率下降或者停止分泌,甚至可能会产生发酵单位下跌的现象。因此,放罐时机的正确判断对提高抗生素产量,产率和降低能耗、成本有极其重要的意义。

本文运用模糊集理论,提出了一种放罐时机的启发式模糊识别的建模方法,并经过一工业实例的具体应用和模型的现场调试,结果较为满意。

二、理论与方法

由于补料间歇式发酵过程放罐时机的识别依据牵涉到有静态和动态两个因素,尤其

是后者起着重要的作用。因此,总体来说,这是一个动态过程的选优问题。然而,由于生物对象本身所固有的复杂性,至今,人们还难以得到具有一定精度的能够描述补料间歇式工业发酵过程的数学模型。因此,采用现有的最优化方法寻找过程后期的最优轨线和终端均难以奏效。此外,菌种的变异和原料来源不同而造成培养基成分的差别等变化因素,使得微生物发酵过程的特征具有较大的随机性。并且,相同的外部信息所反映微生物本身生长和代谢情况不一定完全相同。这也说明了就该类过程而言,检测工具的相对落后,以及过程所反映的外部信息具有一定的模糊性。这就使我们不难理解,仅选用某种固定的模式作为放罐时机的识别依据是行不通的。这也是本文提出补料间歇式发酵过程放罐时机的启发式模糊识别方法的原因。

设放罐时机的启发式模糊识别输入论域为 X , 其相应的 m 个分域为

$$X_j \in X \quad (j = 1, \dots, m),$$

并有分域中的子集 $X_{ji} \in X_j \quad (i = 1, \dots, n_j)$ 。又设放罐时机的典范模式空间为 P , 相应于输入分域 X_j 有典范模式子空间 $P_j \in P$ 以及对应于输入 X_{ji} 有典范模式子族 P_{ji} 。又有 P, P_j 和 P_{ji} 分别为对应于 P, P_j 和 P_{ji} 的模糊空间, 模糊子空间和模糊子族。

再设放罐时机输出论域 Y 上的模糊集为 B 。并且, 取模糊集 B 是正规模糊集, 即: $\exists y \in Y$, 使得 $\mu_B(y) = 1$ 。

下面是建立放罐时机启发式模糊识别模型的一般步骤。

(1) 首先根据某一实际过程的历史资料(数据、曲线等)的分析和专家的经验确定各典范模式子族 P_{ji} , 并建立其相应的隶属函数 $\mu_{P_{ji}}(x_{ji})$ 。其中, $x_{ji} \in X_{ji} \quad (j = 1, \dots, m, i = 1, \dots, n_j)$ 。

(2) 整体的放罐时机的隶属度可取如下合成关系。

$$\mu_P = \min_j \left\{ \sum_{i=1}^{n_j} a_{ji} \mu_{P_{ji}}(x_{ji}) \right\}. \quad (2-1)$$

上式中 a_{ji} 是考虑各 Fuzzy 子模式对放罐时机 Fuzzy 识别重要性的差异而设定的权因子, 其值应满足:

$$\sum_{i=1}^{n_j} a_{ji} = 1, \quad (j = 1, \dots, m). \quad (2-2)$$

如上所述, 放罐时机的优化很大程度上是个动态问题。换句话说, 放罐时机的判决不仅要考虑发酵终了点某组静态值的选择, 更重要的是考虑发酵后期状态轨线的特性。从这个意义上讲, 各典范模式子族 P_{ji} 是时间 t 的函数。同样, 整个放罐时机的隶属度也是时间 t 的函数。又考虑到在实际过程中, 输入变量 x_{ji} 均是在线或离线的离散的采样数据, 故 (2-1) 式应为

$$\mu_P(x_{ji}, k) = \min_j \left\{ \sum_{i=1}^{n_j} a_{ji} \mu_{P_{ji}}(x_{ji}) \right\}. \quad (2-3)$$

式中 k 为一正整数, 它代表发酵过程后期过程状态连续较好地隶属于典范模式模糊空间的次数。

(3) 放罐时机成熟与否的识别与预报可以通过 (2-4) 式的判据完成。

$$\mu_B = \begin{cases} 1 & (\text{该放}) & \mu_P(x_{ji}, k) \geq \lambda, k \geq K \\ 0 & (\text{不该放}) & \mu_P(x_{ji}, k) < \lambda \text{ 或 } k < K \end{cases} \quad (2-4)$$

上式中 λ 是截因子， K 是与过程特性和采样间隔时间有关的常数。它们均可以通过历史经验的总结和放罐优化的原则，在现场调试加以确定。

间歇发酵过程放罐时机启发式模糊识别的结构如图 2-1 所示。其中 n 为

$$n = \sum_{j=1}^m n_j \quad (2-5)$$

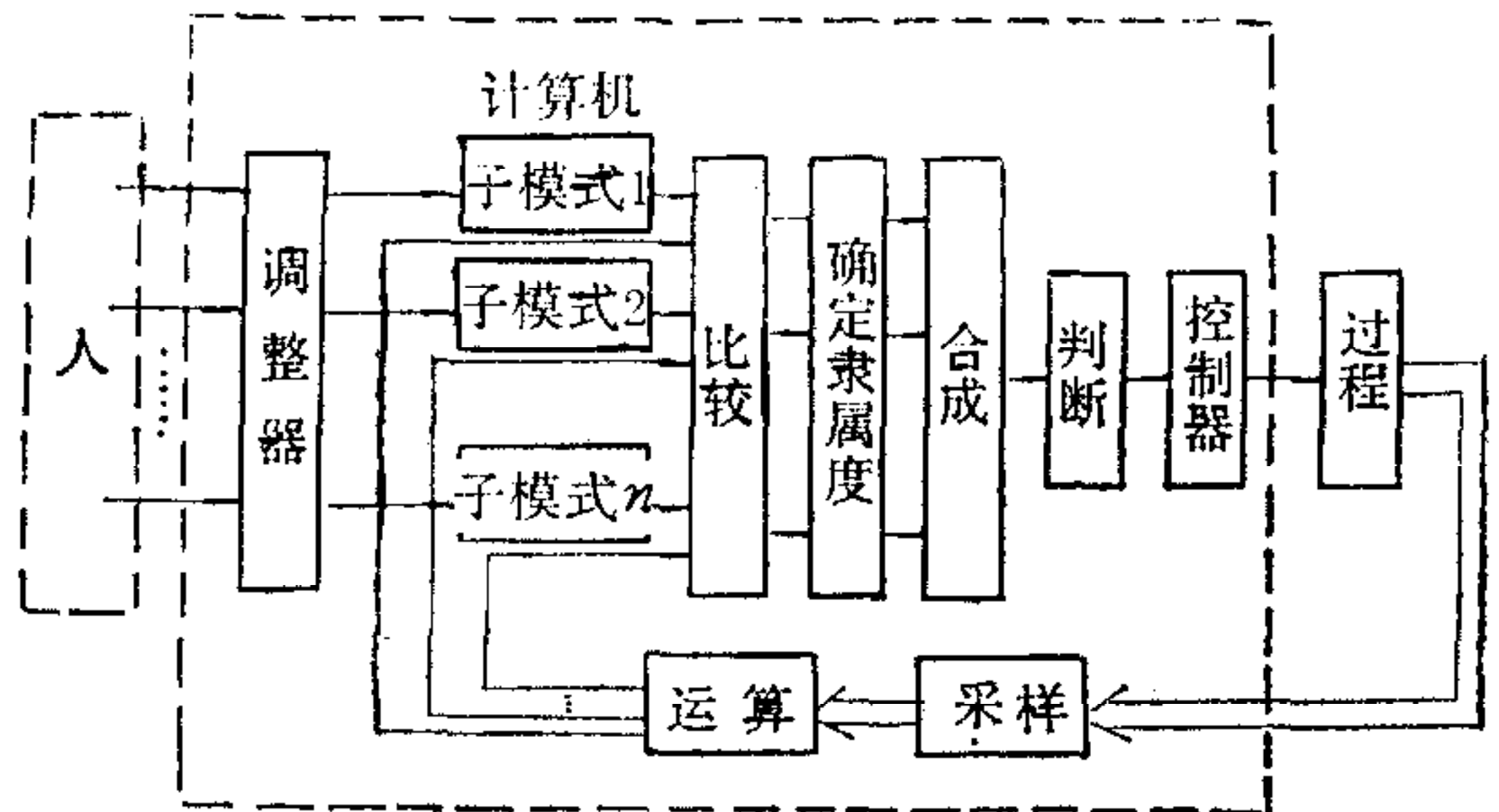


图 1 放罐时机启发式模糊识别结构图

如前所述，考虑到过程特性的变化，可以借助于人——机对话，通过调整器(软件)对各子模式进行适当的修正，如图 1 所示。

三、建模实例

经过一般时间对一特定的工业抗生素生产过程的现场观察和数据、图线的分析，我们选取尾气二氧化碳浓度变化率 DCO_2 ，发酵液的溶解氧浓度变化率 DDO ，总糖浓度变化率 DS ，氨基氮浓度变化率 DN 和 pH 五个输入因素组成输入论域 X 。并且，考虑到 DCO_2 和 DDO 是在线数据，而其余三个是离线数据，故又将这五个因素分成两组，即 DCO_2 和 DDO 分别对应于子集 X_{11} 和 $X_{12} (\in X_1)$ ，而 DS ， DN 和 pH 分别对应于子集 X_{21} ， X_{22} 和 $X_{23} (\in X_2)$ 。

各典范模式子族 $P_{ji} (j = 1, 2, i = 1, \dots, n_j, n_1 = 2, n_2 = 3)$ 的求取按本文上节步骤 (1) 的方法得到，其中各典范模式子族中的代表模式如图 2 和图 3 中所示。相应地根据历史资料的分析，并且部分地采用统计和曲线拟合的方法，得到各典范模式子族的隶属函数如式 (3-1) 至式 (3-5) 所示。

$$\mu_{P_{11}}(x_{11}) = \begin{cases} 1 & x_{11} < -0.6 \\ -0.0496(x_{11} + 0.0225) + 0.0126 & -0.6 \leq x_{11} \leq -0.225 \\ -0.024x_{11} + 0.0072 & -0.225 < x_{11} < 0 \\ 0 & x_{11} \geq 0 \end{cases} \quad x_{11} \in X_{11}. \quad (3-1)$$

$$\mu_{P_{12}}(x_{12}) = \begin{cases} 1 & x_{12} > 0.775 \\ \frac{x^2}{32.24} + 0.1364 & 0 \leq x_{12} \leq 0.775 \\ 0 & x_{12} < 0 \end{cases} \quad x_{12} \in X_{12}. \quad (3-2)$$

$$\mu_{P_{21}}(x_{21}) = 1.009e^{-1.5x_{21}^2} \quad x_{21} \in X_{21}. \quad (3-3)$$

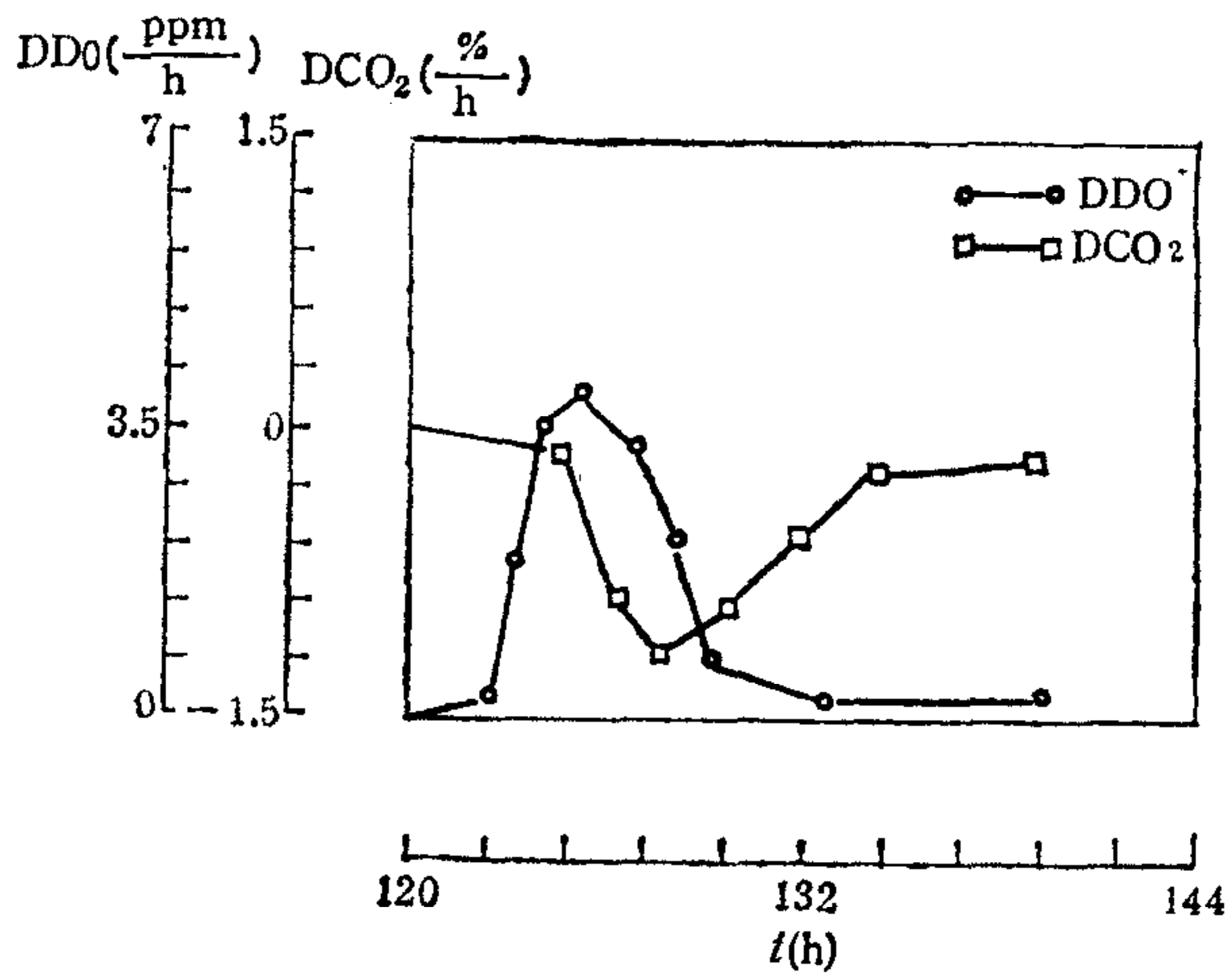


图2 DDO 和 DCO₂ 特性曲线

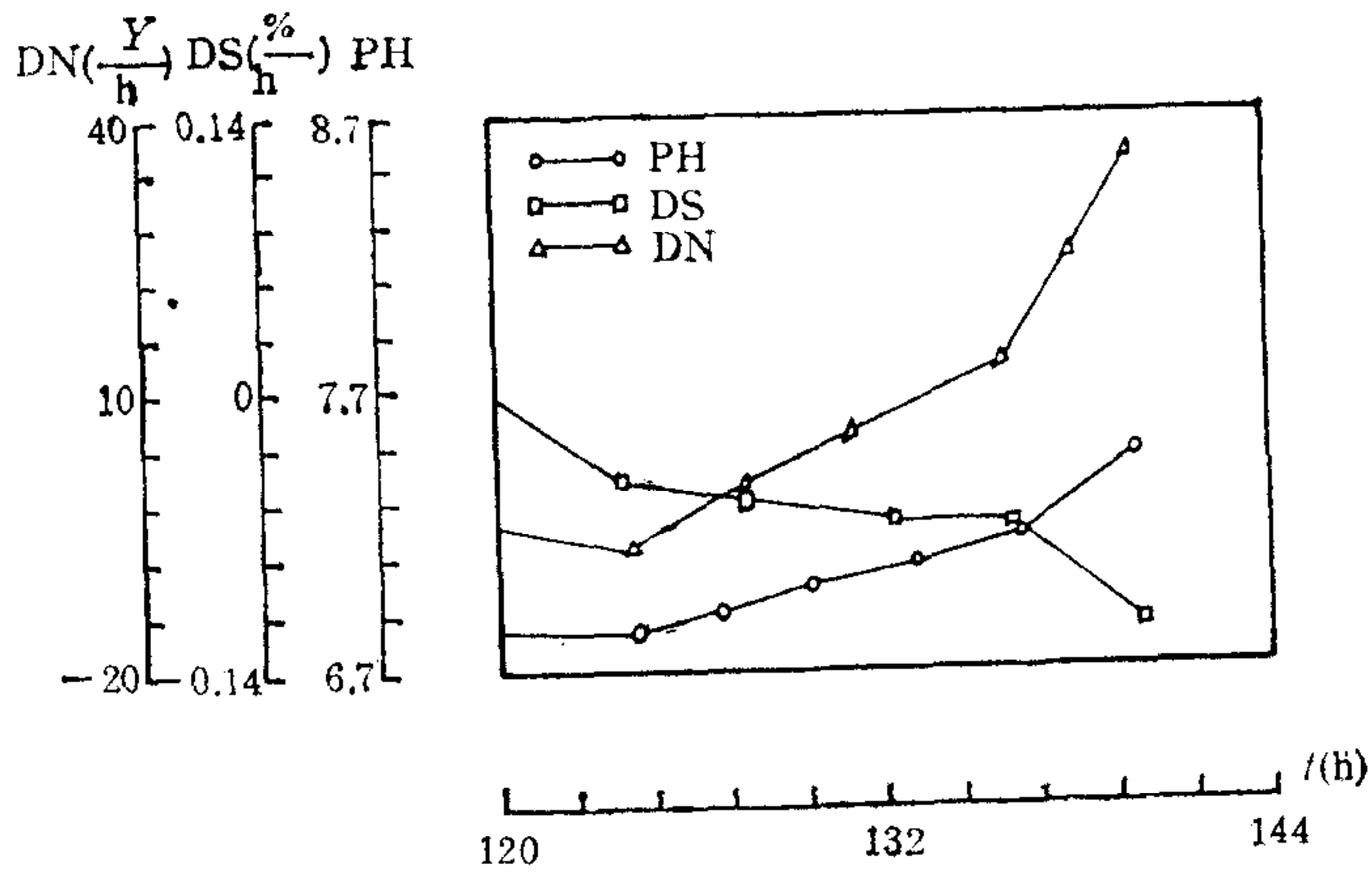


图3 pH, DS 和 DN 特性曲线

$$\mu_{E_{22}}(x_{22}) = \begin{cases} \frac{1}{13.5} \sqrt{x_{22} - 140} & 140 < x_{22} \leq 320 \\ 1 & 320 < x_{22} \leq 360 \\ \frac{1}{32890} (466 - x_{22}) & 360 < x_{22} \leq 466 \\ 0 & 466 < x_{22} \quad x_{22} \in X_{22} \end{cases} \quad (3-4)$$

$$\mu_{E_{23}}(x_{23}) = \begin{cases} 1 & 40 < x_{23} \\ 1 - e^{-\sqrt{0.24x_{23}}} & 0 < x_{23} \leq 40 \\ 0 & x_{23} \leq 0 \quad x_{23} \in X_{23} \end{cases} \quad (3-5)$$

整体放罐时机的隶属度为

$$\mu_E = \min_{j=1}^2 \left\{ \sum_{i=1}^{n_j} a_{ji} \mu_{E_{ji}}(x_{ji}) \right\}. \quad (3-6)$$

其中

$$a_1 = (a_{11} \ a_{12}) = (0.65 \ 0.35). \quad (3-7)$$

$$a_2 = (a_{21} \ a_{22} \ a_{23}) = (0.15 \ 0.25 \ 0.6). \quad (3-8)$$

放罐时机成熟与否的判据如上节步骤(3)中式(2-4)所示.其中, λ 取为0.8865, K 取为6.

将所建立的模型编写成 BASIC 语言的计算机程序,在现场对五批发酵过程进行了工业实验.其结果如表 3-1 中所示.从表 3-1 中可见.模型判断和人工判断均有差别,从发酵终点时间和总亿(反映产量)两个因素来看,模型判断均比人工判断更及时.并且,前者总亿对于发酵终点的相对值均高于后者,即模型判断的结果明显优越于人工判断的结果.

表 3-1 工业实验结果

批 号	模型判断		人工判断	
	终点时间 (hr.)	总亿 ($r \cdot m^3$)	终点时间 (hr.)	总亿 ($r \cdot m^3$)
1	124	2240	136	2180
2	112	1850	136	1420
3	136	2640	144	2690
4	124	1760	136	1520
5	144	2380	160	1960

四、结 论

正如本文开始所述,微生物的间歇式发酵过程放罐时机的识别是过程优化的一个重要方面.其主要原因是鉴于以下两方面的考虑.

(1) 提高生产率,降低成本.就抗生素发酵过程而言,要求在抗生素分泌率较高的情况下延长发酵时间,若分泌速率较小或停止时,应及时放罐,否则,一种情况是虽然这批产量略有提高,但单位产量的能耗会明显提高,生产率降低,成本也就相对增高.另一种情况,抗生素的效价单位反而下跌,这样,多消耗的电、气、水等使单位产量的能耗大幅度上升.同时,还增加了发酵的运转周期,使生产率下降,成本提高.

(2) 影响提炼质量.以后序提炼工段考虑,放罐时间太早,则过多的营养物质余留会对提炼不利.而放罐时间太晚,则菌体自溶会改变发酵液的性质,如滤速下降,会增加过滤工序的负担,还会降低提炼收率.

遗憾的是有关这类对象放罐时机的研究工作很少,主要原因是生物对象的特性比较复杂,难以较好地把握.所以,目前在实际生产中,放罐时机的判断往往是凭经验,这就难免带有一定的盲目性.而由此造成的误判断也很容易发生.本文运用模糊集理论提出的放罐时机的启发式模糊识别建模方法,除了借助于统计学方法外,还结合了人的成功经验.鉴于这个原因,要想提高模型精度,大量的历史资料和人的丰富经验两者缺一不可,这也是运用这种方法所建立的识别模型能够使放罐时机优化或次优化的关键所在.

本课题是国家“七、五”科技攻关项目,并得到了国家教委科学基金的资助,谨此致谢。
谢卫东同志对本文工作给予了很大帮助。

参 考 文 献

- [1] Zadeh, L. A. *Fuzzy Sets, Information and Control* 8(1965), 338.
- [2] Shichi Tamura, Shihaku Higuchi and Kokichi Tanaka, *Pattern Classification Based on Fuzzy Relation, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic*, 1(1971).
- [3] 汪培庄,模糊集合论及其应用,上海科技出版社,(1983年).
- [4] 赵沁平等,人工增雨有利条件的模糊识别与估计,模糊数学,1(1982),77.

HEURISTIC FUZZY RECOGNITION AND PREDICTION OF DRAW-OFF TIMING FOR BATCH FERMENTATION PROCESS

FU CHUNSHENG LU JIANZHONG WANG SHUQING WANG JICHENG
(Zhejiang University)

ABSTRACT

The optimization of draw-off timing for a batch fermentation process is very important to increase the yields, productivity and to reduce energy consumption. A modelling approach of the heuristic fuzzy recognition and prediction to the draw-off timing is developed by using the fuzzy set theory and combining the statistics method with human experience. Meanwhile, according to the analysis of the historical data and the process of a practical industrial antibiotic production, a model of the recognition and prediction to the draw-off timing of this process is established by means of the approach given in this paper. And, a real-time computer recognition system is designed. The result of several industrial tests shows that the effect of model recognition is satisfactory.

Key words ——Batch fermentation process; draw-off timing; model; pattern; fuzzy recognition.