生物工程学报 5(2):146—153，1989
Chinese Journal of Biotechnology

模糊集理论在生化过程中的应用
——一种新的故障诊断的模型化方法

傅春生　王树青　王骥程
（浙江大学工业控制研究所，杭州）

模糊集理论的问世为我们进行生化过程的模型化工作开辟了可喜的前景。本文就故障诊断问题，以模糊集理论为基础，提出了一种新的模型化方法。同时，运用这种方法，针对一个工业抗生素生产过程中的染菌故障问题，建立了行之有效的诊断模型。理论分析和现场调试的结果表明，该方法还可作为类似故障诊断问题模型化工作的参考。

关键词　隶属函数；故障诊断；发酵；染菌

抗生素发酵生产是纯种培养过程，但有时会因操作不当或其他原因，使过程染上杂菌。而一旦染菌事故发生，其后果不仅消耗培养基中的营养成分，而且，杂菌的作用还会对抗生素产生菌的生长和代谢产生抑制，使生产率下降，甚至得不到产品。由此可见，染菌的危害很大。但只要发现及时，区别情况采取适当措施，是可以尽量减少染菌的影响和损失的。

污染杂菌的种类很多，原因错综复杂。并且，在染菌初期，借助于现有的测量仪器所能得到的异常的外部信息往往也是非常模糊的。这就使我们用经典的数学方法来解决这类过程的故障诊断问题碰到了很大困难。模糊集理论的问世，为我们处理和研究这类问题提供了可喜的前景。

本世纪70年代末，E.Sanchez 和 Y.Tsukamoto 等人就偿试建立模糊诊断模型并付诸应用[1-3]。近来这方面的应用性文章越来越多[4-6]。但就所提出的模糊诊断模型而言，大多数都是以Lukasiewicz逻辑为基础，且通过其“非”，“合取”，“析取”和“蕴涵”四种连结词的运算规则，将原始命题转化成复合命题，以此进行演绎推理。

本文通过多级模糊函数的构造，提出了一种过程故障模糊诊断模型的建模方法。并用这种方法建立了一个工业抗生素发酵生产过程染菌故障的模糊诊断模型，经现场工业试验，效果良好。

理论和方法

设A和A_j（$j=1,2,\cdots,m$，$A_j\in A$）是含有各种待诊断状态的输出全集和子集。因为在一些复杂过程中待诊断的状态常呈现模糊性，故定义模糊集$\underset{\sim}{A}$和模糊子集$\underset{\sim}{A}_j$分别用来描述实际过程中的A和A_j。

设论域是一个由n维向量张成的可测的输出空间，即

$$X=(x_1,\ x_2,\ \cdots,\ x_n) \tag{1}$$

其中，x_i是X的第i个分量。通过x_i的值的大小可以模糊地预测A_j的发生情况（$i=1,\ \cdots,\ n, j=1,\cdots,\ m$）。再按待测故障的类型将$m$个模糊子集$\underset{\sim}{A}_j$分成$k$组，亦即

$$\underset{\sim}{A}=\{\underset{\sim}{A}_1,\cdots,\underset{\sim}{A}_m\}$$

本文于1988年4月2日收到。
浙江大学的陆建中，赵鹏程和何声亮同志在本课题进行过程中给予了热情支持和帮助，特此致谢。

$$=\{(\underset{\sim}{A}_{11},\cdots,\underset{\sim}{A}_{1p_1}),\cdots,(\underset{\sim}{A}_{k1},\cdots,\underset{\sim}{A}_{kp_k})\} \qquad (2)$$

显然其中的p_i满足

$$\sum_{i=1}^{k} p_i = m \qquad (3)$$

之所以将$\underset{\sim}{A}$中的某几个模糊子集分在一组，是因为考虑它们存在某种程度的联系，如一类故障所具有的不同程度的表现。若对每一个$\underset{\sim}{A}_j$都建立起隶属函数$\mu_{\underset{\sim}{A}_j}(x_i)(i=1,\cdots,n,\ j=1,\cdots,m)$，以表示$X$的分量$x_i$隶属于模糊子集$\underset{\sim}{A}_j$的隶属度。

而关于隶属函数的确定有如下定义。

〔定义〕对于模糊集

$$\underset{\sim}{A}=\{(\underset{\sim}{A}_{11},\cdots,\underset{\sim}{A}_{1p_1}),\cdots,(\underset{\sim}{A}_{k1},\cdots,\underset{\sim}{A}_{kp_k})\}$$

中的每一组模糊子集$(\underset{\sim}{A}_{q1},\ \cdots,\ \underset{\sim}{A}_{qp_q})$ $(q=1,\cdots,k)$，选定一个λ——截的有限序列$F=\{\lambda_{qp}\}\begin{matrix}1\leqslant q\leqslant k\\1\leqslant p\leqslant p_k-1\end{matrix}$，使得

$$0<\lambda_{q1}<\cdots<\lambda_{qp_q-1}<1 \quad (q=1,\cdots,k) \qquad (4)$$

则相应的隶属函数的确定希望符合

$$\begin{cases}\text{若}\quad \lambda_{qp_q-1}\leqslant\mu_{\underset{\sim}{A}_{qp_q}}(x_i)\leqslant 1 \quad \text{则} x_i\rightarrow A_{qp_q}\\ \text{若}\quad \lambda_{qp_q-2}\leqslant\mu_{\underset{\sim}{A}_{qp_q-1}}(x_i)<\lambda_{qp_q-1} \quad \text{则} x_i\rightarrow A_{qp_q-1}\\ \cdots\cdots\cdots\\ \text{若}\quad 0\leqslant\mu_{\underset{\sim}{A}_{q1}}(x_i)<\lambda_{q1} \quad \text{则} x_i\rightarrow \underset{\sim}{A}_{q1}\end{cases} \qquad (5)$$

其中，“$x_i\rightarrow A_{qp}$”$(p=1,\cdots,p_q)$的意思是可测量x_i满足故障$\underset{\sim}{A}_{qp}$发生的条件。由（5）式可见，某类故障的隶属函数被分成了几级，如$\mu_{\underset{\sim}{A}_q}$就被分为$p_q$级，即，$\mu_{\underset{\sim}{A}_{q1}}$，…，$\mu_{\underset{\sim}{A}_{qp_q}}$。

考虑到从论域X到$\underset{\sim}{A}$是一种空间向量的映射，因此，若将$\mu_{\underset{\sim}{A}_j}(x_i)$ $(j=1,\cdots,m,\ i=1,\cdots,n)$叫做1阶隶属函数，用$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_j}(x_i)$表示，我们可选定2阶隶属函数$\mu^2_{\underset{\sim}{A}_j}(x_d,\cdots,x_g)$，$(1\leqslant d<g\leqslant n)$，它可为各1阶隶属函数的加权和，如

$$\mu^2_{\underset{\sim}{A}_j}(\cdot)=\sum_{i=d}^{g}\omega_i\mu^1_{\underset{\sim}{A}_j}(x_i) \qquad (6)$$

其中$\omega_i(i=d,\cdots,g)$是权重因子，其值大小取决于x_i对于$\underset{\sim}{A}_j$的灵敏性，即，x_i对于$\underset{\sim}{A}_j$的反应愈灵敏，则其权因子ω_i应取得愈大。反之，x_i对于$\underset{\sim}{A}_j$的反应愈不灵敏，则其权因子应取得愈小。灵敏性的强弱一般可根据过程的历史数据分析得到。同时，最好通过现场调试最后确定各权因子的值。各权重因子间一般应满足

$$\sum_{i=d}^{g}\omega_i=1 \qquad (7)$$

显然，2阶隶属函数具有类似于多级1阶隶属函数的特性，即对应于第q组模糊子集$(\underset{\sim}{A}_{q1},\ \cdots,\ \underset{\sim}{A}_{qp_q})$，$(1\leqslant q\leqslant k)$，有如下关系

$$\begin{cases}\text{若}\quad \lambda_{qp_q-1}\leqslant\mu^2_{A_{qp_q}}(\cdot)\leqslant 1 \quad \text{则} X'\rightarrow \underset{\sim}{A}_{qp_q}\\ \text{若}\quad \lambda_{qp_q-2}\leqslant\mu^2_{A_{qp_q-1}}(\cdot)<\lambda_{qp_q-1} \quad \text{则} X'\rightarrow \underset{\sim}{A}_{qp_q-1}\\ \cdots\cdots\\ \text{若}\quad 0\leqslant\mu^2_{\underset{\sim}{A}_{q1}}(\cdot)<\lambda_{q1} \quad \text{则} X'\rightarrow \underset{\sim}{A}_{q1}\end{cases} \qquad (8)$$

其中$X'=(x_6, \cdots, x_8)$。

故障诊断的判据为

$$\begin{cases} \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{QP}}(\cdot)=\max[\mu^2_{\underset{\sim}{A}_{11}}(\cdot), \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{12}}(\cdot), \cdots, \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{1p_1}}(\cdot) \\ \qquad \cdots, \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{k1}}(\cdot), \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{k2}}(\cdot), \cdots, \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{kp_k}}(\cdot)] \\ \lambda_{QP-1} \leqslant \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{QP}}(\cdot) < \lambda_{QP} \\ \lambda_{QP-1}, \lambda_{QP} \in F, 1 \leqslant Q \leqslant k, 1 \leqslant P \leqslant p_k - 1 \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{QP}}(\cdot)=\max[\mu^2_{\underset{\sim}{A}_{11}}(\cdot), \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{12}}(\cdot), \cdots, \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{1p_1}}(\cdot), \\ \qquad \cdots, \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{k1}}(\cdot), \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{k2}}(\cdot), \cdots, \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{kp_k}}(\cdot)] \\ \mu^2_{\underset{\sim}{A}_{QP}}(\cdot) < \lambda_{Q1} \\ \lambda_{Q1} \in F, 1 \leqslant Q \leqslant k, 1 \leqslant P \leqslant p_k - 1 \end{cases} \tag{10}$$

即若（9）式成立，则诊断结果为$\underset{\sim}{A}_{QP}$故障发生。而若式（10）成立，则诊断结果为无故障发生。

工 业 试 验

根据一工业抗生素发酵生产过程历史数据的分析，我们把发酵过程所可能染的杂菌分成三类：噬菌体$\underset{\sim}{A}_1$，一般好氧菌$\underset{\sim}{A}_2$，一般厌氧菌$\underset{\sim}{A}_3$（即$k=3$）。同时，将每类杂菌在诊断意义下所得的结果分为三级，即“肯定”，“可能”和“没有”染菌，分别用符号“1”，“?”和“非”表示。从而在诊断意义下对于三类染菌故障有9个模糊子集，即

$$\underset{\sim}{A}=\{(\underset{\sim}{A}_{11},\underset{\sim}{A}_{12},\underset{\sim}{A}_{13}), (\underset{\sim}{A}_{21}, \underset{\sim}{A}_{22},\underset{\sim}{A}_{23}),(\underset{\sim}{A}_{31},\underset{\sim}{A}_{32},\underset{\sim}{A}_{33})\} \tag{11}$$

通过对几十批历史数据的分析，在可测的状态变量中，按模式识别理论中特征提取的原则[7-9]，我们选择了5个状态变量作为染菌故障诊断的依据，即构成一个5维的论域空间$X=[x,y,z,u,v]$，其中各分量如下。

- 尾气二氧化碳浓度(x)[%]；
- 尾气二氧化碳浓度变化率(y)[%/h]；
- 搅拌电流变化率（z）[A_m/h]；
- 发酵液溶解氧浓度变化率（u）[ppm/h]；
- 发酵液的pH值（v）

事实上，在发酵过程的不同时期染菌故障的外部表象是不同的。为了处理上的方便，我们将该抗生素发酵生产过程分为两个时期，即前期和后期。经过几十批原始数据的统计分析，三类故障与各状态变量间的近似关系确定为如表1中所示。

设任意一状态变量s对于$\underset{\sim}{A}$中任意类别和程度的故障$\underset{\sim}{A}_{qp}$（$q,p=1,2,3$）的1阶隶属函数为$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s)$。而$s$对于$\underset{\sim}{A}_{qp}$的变化区间为$[s^-_{qp}, s^+_{qp}]$。这样，参照上节的定义，并鉴于该过程的特点，经过多种方法的分析比较[10-15]和反复试算，考虑$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s)$的具体形式按以下8种情况选择处理。

表1　染菌故障分类一览表

Table 1 Table for trouble classification of contamination

故障级 \ 故障类 状态变量	前期			故障级 \ 故障类 状态变量	后期		
	$\underset{\sim}{A}_1$	$\underset{\sim}{A}_2$	$\underset{\sim}{A}_3$		$\underset{\sim}{A}_1$	$\underset{\sim}{A}_2$	$\underset{\sim}{A}_3$
$x < 0.03$	!	#	#	$x < 0.03$	!	#	#
$x \in [0.03, 0.04]$	?	!	#	$x \in [0.03, 0.2]$	!	!	#
$x \in (0.04, 0.5]$	?	?	#	$x \in (0.2, 1]$	?	!	#
$x \in (0.5, 1]$	#	?	?	$x \in (1, 1.5]$	?	?	#
$x > 1$	#	#	!	$x \in (1.5, 2]$	#	?	?
				$x \in (2, 3]$	#	#	?
				$x > 3$	#	#	!
$y < -0.27$	!	#	#	$y < -0.6$	!	#	#
$y \in [-0.27, -0.08)$	?	!	#	$y \in [-0.6, 0)$	?	!	#
$y \in [-0.08, 0)$	?	?	#	$y \in [0, 0.1]$	#	?	#
$y \in [0, 0.13]$	#	#	?	$y \in (0.1, 0.4]$	#	#	?
$v > 0.13$	#	#	!	$y > 0.4$	#	#	!
$z < -0.7$	!	#	!	$z < -1$	!	!	!
$z \in [-0.7, -0.5)$	!	!	?	$z \in [-1, 0)$	?	!	?
$z \in [-0.5, 0]$	?	?	?	$z \in [0, 0.07]$	#	?	#
$z \in (0, 0.08]$	?	?	#	$z > 0.07$	#	#	#
$u < -0.7$	#	#	!	$u < -1$	#	#	!
$u \in [-0.7, -0.3]$	#	#	?	$u \in [-1, -0.3]$	#	#	?
$u \in (-0.3, 0]$	#	?	#	$u \in (-0.3, 0.2]$	#	?	#
$u \in (0, 0.2]$	?	?	#	$u \in (0.2, 0.5]$	?	!	#
$u \in (0.2, 1]$	?	!	#	$u \in (0.5, 1.5]$	!	!	#
$u > 1$	!	#	#	$u > 1.5$	!	#	#
$v > 7.4$	!	#	#	$v > 7.4$	!	#	#
$v \in [7, 7.4]$	?	#	#	$v \in [7, 7.4]$	?	#	#
$v \in [6.6, 7)$	?	?	?	$v \in [6.6, 7)$	?	?	?
$v \in [6, 6.6)$	#	?	?	$v \in [6, 6.6)$	#	?	?
$v < 6$	#	!	!	$v < 6$	#	!	!

对应于$\mu^{1}_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s) > \lambda_{qp-1}$的 4 种情况为

(a) 若　$s > s^{-}_{qp}$和$s^{-}_{qp} \geqslant 0$，则

$$\mu^{1}_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s) = 1 - (1 - \lambda_{qp-1}) \cdot s^{-}_{qp} \cdot \mathrm{sgn}(s)/s \tag{12}$$

(b) 若　$s > s^{-}_{qp}$和$s^{-}_{qp} < 0$，则

$$\mu^{1}_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s) = 1 - (1 - \lambda_{qp-1}) s / s^{-}_{qp} \tag{13}$$

(c) 若　$s < s^{+}_{qp}$和$s^{+}_{qp} \leqslant 0$，则

$$\mu^{1}_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s) = 1 - (1 - \lambda_{qp-1}) s^{+}_{qp} \mathrm{sgn}(s)/s \tag{14}$$

(d) 若 $s<s^+_{qp}$和$s^+_{qp}>0$，则

$$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s)=1-(1-\lambda_{qp-1})s/s^+_{qp} \tag{15}$$

对应于$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s)<\lambda_{qp}$的4种情况为

(e) 若 $s>s^-_{qp}$和$s^-_{qp}<0$，则

$$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s)=\lambda_{qp}(1-(s^-_{qp}-s)/s^-_{qp}) \tag{16}$$

(f) 若 $s>s^-_{qp}$和$s^-_{qp}>0$，则

$$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s)=\lambda_{qp}(1-(s-s^-_{qp})/s^-_{qp}) \tag{17}$$

(g) 若 $s<s^+_{qp}$和$s^+_{qp}<0$，则

$$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s)=\lambda_{qp}(1-(s-s^+_{qp})/s^+_{qp}) \tag{18}$$

(h) 若 $s<s^+_{qp}$和$s^+_{qp}>0$，则

$$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s)=\lambda_{qp}(1-\mathrm{sgn}(s)(s^+_{qp}-s)/s^+_{qp}) \tag{19}$$

其中，λ_{qp}是λ——截序列F中的元素，其数值是根据经验和模型的仿真、调试加以确定的。对于该过程取$\lambda_{q2}=0.8$，$\lambda_{q1}=0.2$ $(q=1,2,3)$。同时规定当$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s)>\lambda_{q2}$时，就$s$而言$\underset{\sim}{A}_q$类染菌发生；当$\lambda_{q1}\leqslant\mu^2_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s)<\lambda_{q2}$时，就$s$而言$\underset{\sim}{A}_q$类染菌可能发生；而当$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{pq}}(s)<\lambda_{q1}$时，就$s$而言$\underset{\sim}{A}_{qp}$类染菌没有发生。由此，建立各状态变量与各类、各种程度染菌故障间的隶属函数，并经过适当的整理，列表于表2中。其中，“a”是将相应的λ_{q2}或λ_{q1}和s^-_{qp}或s^+_{qp} $(q,p=1,2,3)$代入式(12)至(19)中某一合适的式中计算后所得的常数。

表中字母“h”代表sgn(s)，即

$$h=\mathrm{sgn}(s)=\begin{cases}1 & s>0\\ 0 & s=0\\ -1 & s<0\end{cases} \tag{20}$$

为了便于理解表2，取构造$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{1p}}(s)(p=31)$对于情况“!”为例如下。

从表1可得，故障$\underset{\sim}{A}_1$在情况“!”（即$\underset{\sim}{A}_{13}$）的条件为

$x<0.03=x^+_{1p}$；$y<-0.27=y^+_{1p}$；$z<-0.5=z^+_{1p}$；

$u>1=u^-_{1p}$；$v>7.4=v^-_{1p}$

则对应于$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{1p}}(s)>\lambda_{12}=0.8$，由式(15)得

$$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{1p}}(x)=1-(1-0.8)x/0.03=1-6.66x \tag{21}$$

由式(14)得

$$\begin{aligned}\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{1p}}(y)&=1+0.27(1-0.8)\mathrm{sgn}(y)/y\\&=1+0.054h/y\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{1p}}(z)&=1+0.5(1-0.8)\mathrm{sgn}(z)/z\\&=1+0.1h/z\end{aligned} \tag{23}$$

表 2　染菌故障诊断模型一览表

Table 2 Table for model of trouble diagnosis to contamination

故障级	p,i	$\mu^{1}_{A1p}(s)$	a		$\mu^{1}_{A2p}(s)$	a		$\mu^{1}_{A3p}(s)$	a	
			前　期	后　期		前　期	后　期		前　期	后　期
对于情况 "!"	31,1	1+ax	-6.66	-1	1+a/x	-0.006	-0.06	1+ah/x	-0.2	-0.6
	31,2	1+ah/y	0.054	0.12	1+ay	0.74	0.74	1+ah/y	-0.036	-0.08
	31,3	1+ah/z	0.1	0.1	1+ah/z	-0.126	-0.38	1+ah/z	-0.06	-0.2
	31,4	1+ah/u	-0.2	-0.1	1+au	-0.134	-0.134	1+ah/u	-0.14	-0.214
	31,5	1+ah/v	-1.49	-1.49	1+av	-0.034	-0.034	1+av	-0.032	-0.032
	32,1				1+ax	-0.4	-0.2			
	32,2				1+ah/y	-0.016	-0.016			
	32,3				1+ah/z	-0.08	-0.39			
	32,4				1+ah/u	-0.04	-0.2			
	32,5				1+av	-0.034	-0.034			
对于情况 "?"	21,1	1.6+ax	-26.67	-8	1.6+ax	-1.6	-0.8	ax	0.8	0.267
	21,2	ay	-4	-1.3	ay	-10	-10	(1-h)(0.8+ay)	-4.4	-2
	21,3	az	-1.6	-1.6	az	-2	-2	1.6+az	-2.67	-0.8
	21,4	(1-h)(0.8+au)	-0.8	-1.6	(1+h)(0.8+au)	-4	-4	1.6+au	1.14	0.75
	21,5	av	0.11	0.11	1.6+av	-0.13	-0.13	1.6+av	-0.13	-0.13
	22,1	1+ax	-0.8	-1.2	1+ax	-0.8	-0.4	1+a/x	-0.4	-1.2
	22,2	1+ah/y	-0.008	-0.008	1+ah/y	-0.008	-0.08	1+ah/y	-0.08	-0.16
	22,3	1+az	-10	-40	1+az	3.44	0.056	1+a/z	0.008	0.008
	22,4	1+ah/u	-0.008	-0.128	1+au	2.64	0.24	1+ah/u	-0.24	-0.24
	22,5	1+a/v	-0.528	-0.528	1+av	-0.112	-0.112	1+av	-0.12	-0.12
对于情况 "#"	11,1	0.4+ax	-0.2	-0.13	0.4+ax	-0.2	-0.1	ax	0.4	0.13
	11,2	0.4+ay	-20	-20	0.4+ay	-20	-2	(1-h)(0.2+ay)	-2	-1
	11,3	0.4+az	-2.5	-2.5	0.4+az	-2.68	-2.68	0.4+az	-20	-20
	11,4	0.4+au	20	20	0.4+au	0.67	0.67	au	-0.67	-0.67
	11,5	av	0.03	0.03	0.4+av	-0.028	-0.028	0.4+av	-0.03	-0.03

由式（12）得

$$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{1p}}(u)=1-(1-0.8)\mathrm{sgn}(u)/u$$

$$=1-0.2h/u \tag{24}$$

$$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{1p}}(\nu)=1-7.4(1-0.8)\mathrm{sgn}(\nu)/\nu$$

$$=1-1.49h/\nu \tag{25}$$

考虑到每类染菌情况可由上述5个状态变量值的大小综合加以评判，故确定如下2阶隶属函数

$$\mu^2_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(\cdot)=\omega_1\mu^1_{\underline{\underset{\sim}{A}}_{qp}}(x)+\omega_2\mu^1_{\underline{\underset{\sim}{A}}_{qp}}(y)+\omega_3\mu^1_{\underline{\underset{\sim}{A}}_{qp}}(z)+\omega_4\mu^1_{\underline{\underset{\sim}{A}}_{qp}}(u)+\omega_5\mu^1_{\underline{\underset{\sim}{A}}_{qp}}(\nu) \tag{26}$$

其中

$$\mu^1_{\underline{\underset{\sim}{A}}_{qp}}(s)=\max\{\min[\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s),\ 1],\ 0\} \tag{27}$$

权重因子的分配为，对于前期

$$\omega=(\omega_1,\ \omega_2,\ \omega_3,\ \omega_4,\ \omega_5)$$

$$=(0.1,\ 0.2,\ 0.1,\ 0.3,\ 0.3) \tag{28}$$

对于后期

$$\omega=(0.3,\ 0.2,\ 0.1,\ 0.2,\ 0.2) \tag{29}$$

借助于本文建立的诊断模型进行染菌故障在线诊断的步骤如下：

（1）测取在线或离线的状态变量的采样数据。

（2）将采样数据代入表2中，计算各1阶隶属函数$\mu^1_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(s)$。

（3）用式（26）至（29）计算各2阶隶属函数$\mu^2_{\underset{\sim}{A}_{qp}}(\cdot)$。

（4）以式（9）和（10）为基础，比较各2阶隶属函数值的大小，从而确定并预报染菌情况。

结 论

生产过程中由于误操作等原因所造成的事故有时是难免的。但如果能在大故障发生之前给予尽早的预报，以便采取合适的措施，是可以减少损失的。本文运用模糊集理论，提出了一种多级模糊函数诊断故障的模型化方法。它以生产过程中的历史数据和人的经验为依据，运用数理统计方法进行适当的数据处理，建立各级故障与可测状态变量间的隶属函数。再根据实际情况确定合适的故障判据的逻辑关系。最后用BASIC语言编写成计算机程序，经现场Apple-Ⅱ机器上调试，运行效果良好。对于所试验的9批染菌故障（工业过程），模型预报有8批与发酵液取样镜检结果符合。同时，由理论和试验的结果表明，这是一种实际可行的在线故障诊断的模型化方法，并可以作为类似诊断问题模型化方法的借鉴。

参 考 文 献

〔1〕Sanchez, E. Medical Diagnosis and Composite Fuzzy Relations, Advance in Fuzzy Sets and Applications, Publ:North-Houand, p.437, 1979.

〔2〕Tsukamoto, Y. and Terano, T.: Failure Diagnosis by Using Fuzzy Logic, IEEE Conference on Decision and Control, p.1390, 1977.
〔3〕Tsukamoto, Y.:Fuzzy Logic Based on Lukasiewicz Logic and Its Application to Diagnosis and Control, Ph.D.Dissertation, Tokyo Institute of Technology, 1979.
〔4〕吴秋峰等：信息与控制，3:53；1981.
〔5〕傅光永、朱绍庐：大连海运学院学报，2:72—83，1982.
〔6〕李燕杰等：模糊数学，3:95，1983.
〔7〕Kaufmann, A.: Introduction to the Theory of Fuzzy subsets, Vol.I, Academic Press, 1975.
〔8〕Oja, E. Subspace Methods of Pattern Recognition, Research Studies Press Ltd., 1983.
〔9〕Pavlidis, T.:Structure Pattern Recognition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1977.
〔10〕陈洪，黄金丽：模糊数学，2:75—80，1983.
〔11〕吴望名等，应用模糊数学，北京大学出版社，1985.
〔12〕陈世权：模糊数学，2:37—40，1987.
〔13〕王蕴清：模糊数学，3:63—70，1983.
〔14〕李安华：模糊数学，3:87—92，1984.
〔15〕涂象初，汪培庄：模糊数学，3:81—85，1985.

APPLICATION OF FUZZY SET THEORY TO BIOCHEMICAL PROCESS—A NEW MODELLING APPROACH FOR TROUBLE DIAGNOSIS

Fu Chunsheng　Wang Shuqing　Wang Jicheng
(Research Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University, Hangzhou)

The advent of fuzzy set theory provides a gratifying basis for us to study the modelling for a biochemical process. As for the problem in trouble diagnosis, a new modelling approach is developed on the basis of fuzzy set theory. Meanwhile, a practicable model for trouble diagnosis is established by using the approach for the problem of contamination trouble in an industrial antibiotic production process. Results of theoretical analysis and testing on site show that this approach also can be used as a reference for midelling similar diagnostic problems.

Key words

Fuzzy sets; membership function; trouble diagnosis; model; fermentation; contamination