

模糊辨识在电力设备故障诊断中的应用^{*}

徐文 王大忠 周泽存
(东南大学电气系·210096·南京)

李益民
(太原第一热电厂)

【摘要】 模糊理论在电力设备故障诊断中有着广泛的应用。运用模糊关系矩阵,由输入或输出,可以得出相应的结论^[1]。但是电力设备的故障诊断中存在着大量不确定因素,而模糊关系矩阵一般是由专家经验评估而来,造成人为因素影响甚大。模糊辨识技术是一种根据已知的输入和输出,辨识模糊模型的方法。用这种方法建模可以减少人为因素干扰,保证诊断的正确性。

【关键词】 故障诊断 模糊辨识 变压器

1 模糊理论与模糊诊断

图1是一种故障诊断模式,由输入量,经过运算(代数和逻辑)、分析,得出结论。

由于诊断过程中不可避免的会出现一定的不确定性,因此输入、输出和模型显然都具有模糊性。模糊语义表示和模糊关系矩阵是解决不确定性问题的有效方法。

1.1 模糊语义表示

模糊语义是将语言变量——在故障诊断中,指的是输入和输出,经过量化处理,转化为模糊数值。

电力设备故障诊断,有很多模糊性语言变量,如“合格”(\tilde{R}),“有问题”(\tilde{M}),“不合格”(\tilde{F})等。用集合 $\tilde{A} = \{\tilde{R}, \tilde{M}, \tilde{F}\}$ 表示,用隶属函数 $u_{\tilde{A}}$ 表示集合 \tilde{A} 各元素取值大小;若 $u_{\tilde{A}}(\tilde{R}) = 0.7$, $u_{\tilde{A}}(\tilde{M}) = 0.2$, $u_{\tilde{A}}(\tilde{F}) = 0.1$,则 $\tilde{A} = \{0.7, 0.2, 0.1\}$,表示集合 \tilde{A} 中“合格”的可能性为 0.7,“有问题”的可能性为 0.2,“不合格”的可能性为 0.1。按取最大隶属度原则,认为事件 \tilde{A} 应属于“合格”范围。

对于一些数值型的语言变量的量化,下文将按实际,采取不同的方法进行处理。

对于模糊语义的量化处理,应使量化值都满足 $\in [0,1]$ 。

1.2 模糊关系矩阵和模糊诊断

量化处理后,可得到输入阵 $X = [\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2 \cdots \tilde{x}_m]$,输出阵 $Y = [\tilde{y}_1 \ \tilde{y}_2 \cdots \tilde{y}_n]$,则由模糊关系方程 $R \cdot X^T = Y^T$,其中 R 是模糊关系矩阵,可得:

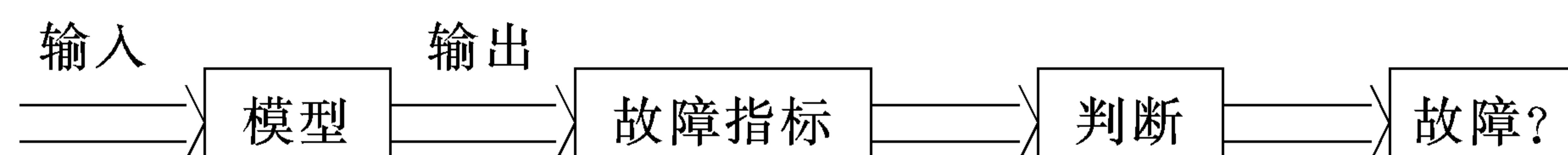


图1 故障诊断过程图
Fig. 1 Diagram of fault diagnosis process

* 1995-05-10收稿, 1995-10-13改回。

徐文,男,1967年生,在读博士生,从事电力系统故障诊断研究与开发。

王大忠,男,1936年生,副教授,从事高电压技术和电力系统计算分析的研究。

周泽存,男,1933年生,教授,长期从事高电压技术和电气技术的研究。

$$\begin{bmatrix} \tilde{r}_{11} & \tilde{r}_{12} & \cdots & \tilde{r}_{1m} \\ \tilde{r}_{21} & \tilde{r}_{22} & \cdots & \tilde{r}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \tilde{r}_{n1} & \tilde{r}_{n2} & \cdots & \tilde{r}_{nm} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 & \tilde{x}_2 & \cdots & \tilde{x}_m \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \tilde{y}_1 & \tilde{y}_2 & \cdots & \tilde{y}_n \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式中 \circ 表示 max-min 算法, 由(1)可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max[\min(\tilde{r}_{11}, \tilde{x}_1), \min(\tilde{r}_{12}, \tilde{x}_2), \dots, \min(\tilde{r}_{1m}, \tilde{x}_m)] = \tilde{y}_1 \\ \vdots \\ \max[\min(\tilde{r}_{n1}, \tilde{x}_1), \min(\tilde{r}_{n2}, \tilde{x}_2), \dots, \min(\tilde{r}_{nm}, \tilde{x}_m)] = \tilde{y}_n \end{array} \right. \quad (2)$$

已知 R 和 X , 可得出结论 Y 。

2 辨识理论的引入

从以上分析看出, X 阵和 R 阵正确与否是模糊诊断的关键。 X 阵用模糊语义加以处理, 用辨识技术确定 R 阵。所谓的系统辨识, 是利用“灰箱”理论, 由已知的若干输入和输出以及确定的对应法则, 辨识出系统的数学模型。

对于电力设备故障诊断, 我们已知的是众多经过采样处理的数据和由此数据分析得来的结论。但是大部分数据与结论之间的关系(即诊断模型)难以描述。对进一步的故障诊断造成困难。此问题的解决, 可采用辨识技术确定这些不确定的诊断模型。

3 辨识的最小二乘法^[2]

最小二乘法是辨识技术中最常用的方法之一。常规的最小二乘法表示如下:

设 $X_{(k)}$ 、 $Y_{(k)}$ 是标准输入、输出, R 是待辨识的矩阵参量, $\epsilon_{(k)} = [e(1), e(2), \dots, e(k)]^T$, $e(1)、e(2)、\dots、e(k)$ 是标准输出值与计算输出值之差, 则有方程:

$$X_{(k)} \cdot R = Y_{(k)} + \epsilon_{(k)}$$

则经过配方, 计算出残差平方和 J ,

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=1}^k e^2(i) = \epsilon_{(k)}^T \epsilon_{(k)} \\ &= [X^T X R - X^T Y]^T (X^T X)^{-1} [X^T X R - X^T Y] + [Y^T Y - Y^T X (X^T X)^{-1} X^T Y] \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式中第二项与参数估计无关, 且为常数项。为使 J 达到最小, 则有: $X^T X R = X^T Y$, 转换为:

$$R = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

只要 $(X^T X)$ 满秩, 则矛盾方程组解是唯一的。

由于常规的最小二乘法是一种代数运算, 而模糊诊断中应用多是逻辑运算, 因此, 必须对此做一番改进^[3], 形成如下递推算法步骤:

- (1) 设待辨识的参数初值矩阵, $R^{(0)} = [0]$, 表示 $R^{(0)}$ 是一参数为 0 的零矩阵。
- (2) 由 $R^{(0)} \circ X^T$ 得出 $Y^{(0)}$, 可得残差阵 $E^{(0)} = (Y^{(0)} - Y)^2$, 其中 $e_{ij}^{(0)} = (y_{ij}^{(0)} - y_{ij})^2$; 设 $\epsilon > 0$, 若任意 $e_{ij}^{(0)} < \epsilon$, 则停止运算; 反之, 进行到下一步。
- (3) 取修正因子 $1 > w > 0$, 则 $R^{(1)} = R^{(0)} + w \cdot E^{(0)} \cdot X^T$, 再由 $R^{(1)} \circ X^T$ 计算出 $Y^{(1)}$, 从而得出 $E^{(1)}$; 同样, 任意 $e_{ij}^{(1)} < \epsilon$, 停止运算; 反之, 进行到下一步。
- (4) 同理, 可得 $Y^{(n)}$ 、 $E^{(n)}$, 直到计算出合理的结果。

4 应用实例

变压器是一种重要的电力设备。以变压器故障诊断为例说明问题，具有一定的代表性。

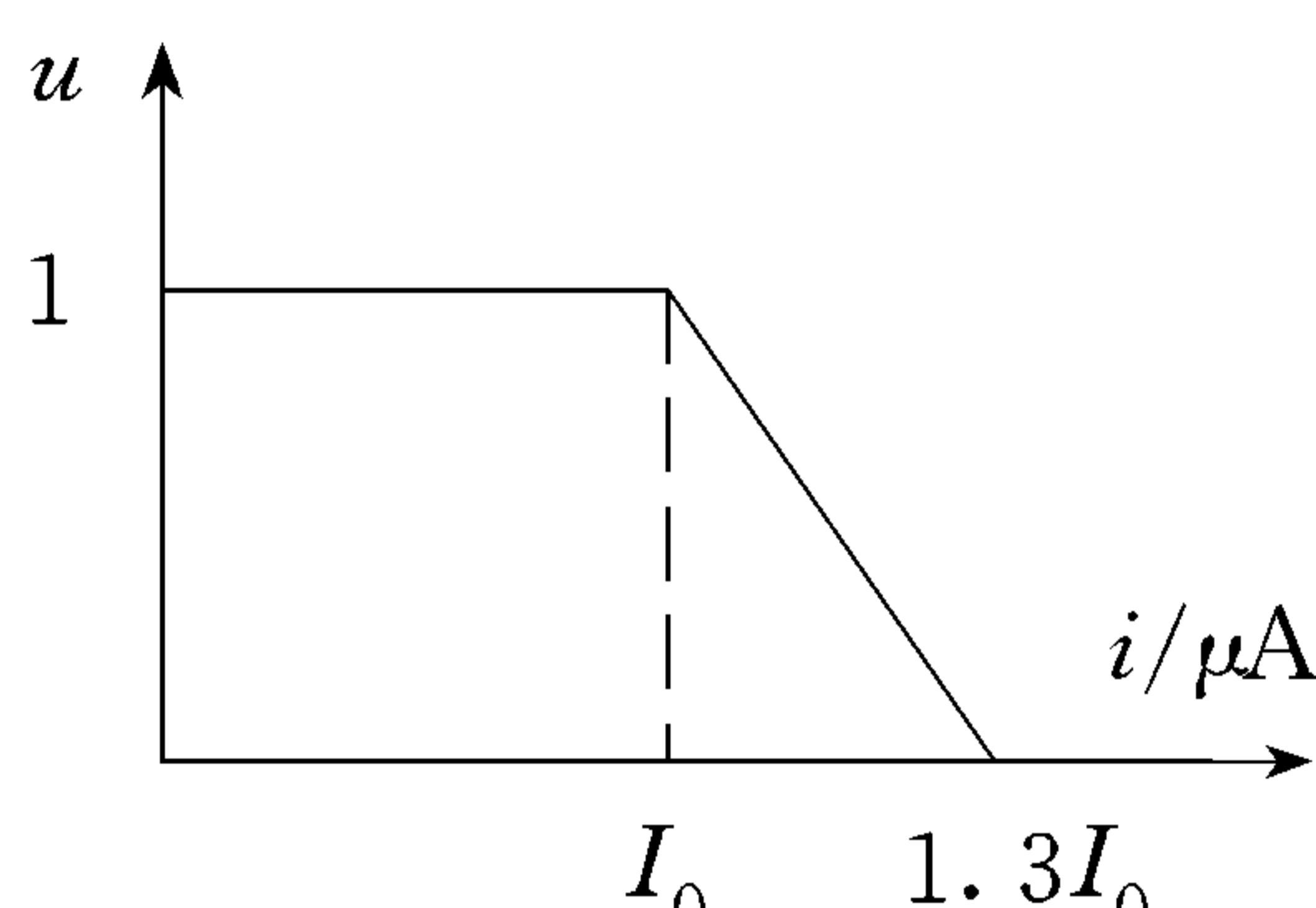
绝缘故障是变压器经常发生的故障类型。变压器的绝缘电阻、吸收比、泄漏电流和介质损等电气试验能灵敏地反映变压器绝缘状况的优劣^[4]。这些试验的机理和对问题的反映各有不同的侧重点，因此，应将这几种试验数据和结果综合考虑，运用模糊辨识技术，得出诊断模型，以此进行分析判断。

4.1 模糊输入矩阵 X 形成^[5]

由于泄漏电流试验和绝缘电阻试验的机理完全一样，所以两者取其一。将泄漏电流、介质损、吸收比和绝缘电阻与历年相比的变化率作为输入，根据规程和相应隶属函数，进行量化处理，形成 X 阵。

i —— 泄漏电流量化处理：

用降半梯形函数确定 u ：



$$u = \begin{cases} 1 & i \leq I_0 \\ \frac{1.3I_0 - I}{0.3I_0} & i > I_0 \end{cases}$$

式中 I_0 是规程规定的参考值，如表1所示。

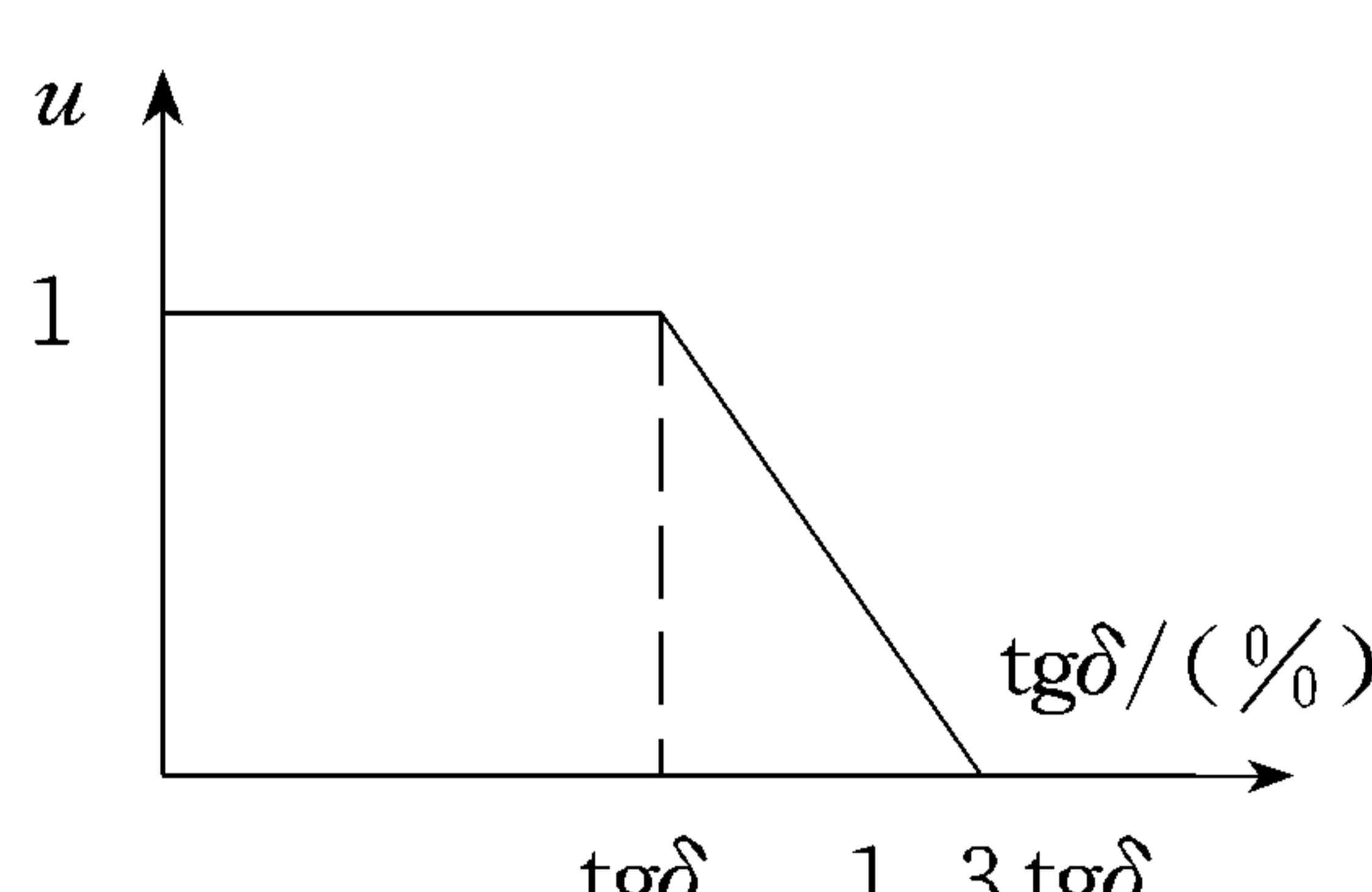
若不是在参考温度下的测量值，应用下面公式转换到最接近的参换温度，再比较。

$$i_2 = i_1 \cdot e^{0.05(t_2 - t_1)}$$

式中 t_1 为实测温度； t_2 为换算温度；
 i_1 为实测值； i_2 为换算值。

$\operatorname{tg}\delta$ —— 介质损量化处理：

同样用降半梯形函数确定 u 。



$\operatorname{tg}\delta_0$ 可按表2取值。

可用 $(\operatorname{tg}\delta)_2 = (\operatorname{tg}\delta)_1 \cdot 1.3^{0.1(t_2 - t_1)}$ 进行换算。

式中 $(\operatorname{tg}\delta)_1$ 为实测值； $(\operatorname{tg}\delta)_2$ 为换算值；
 t_1 、 t_2 为实测温度及换算温度。

x_s —— 吸收比量化处理：

可用升半梯形函数确定 u 。

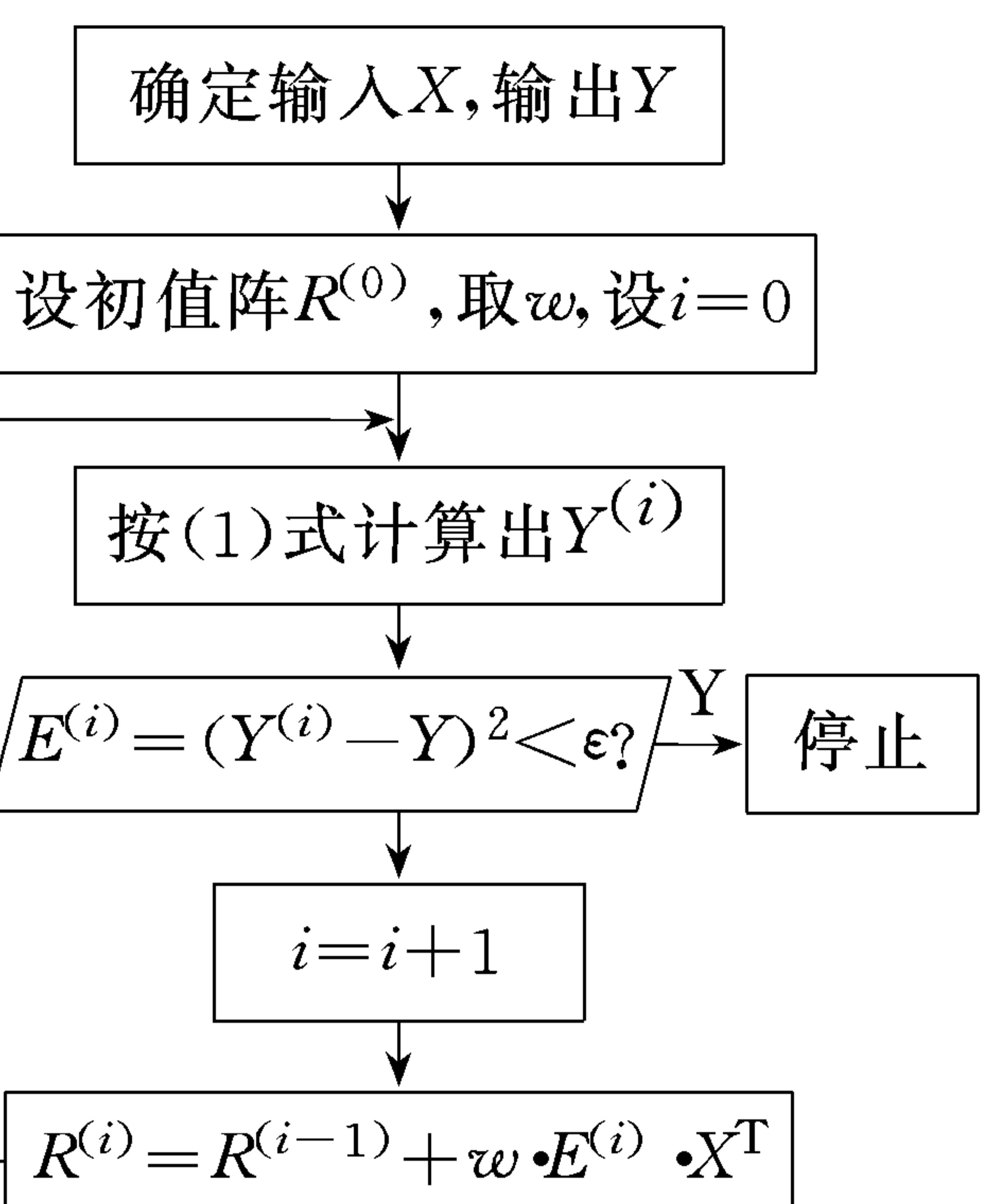


图2 辨识程序图

Fig. 2 Diagram of identification program

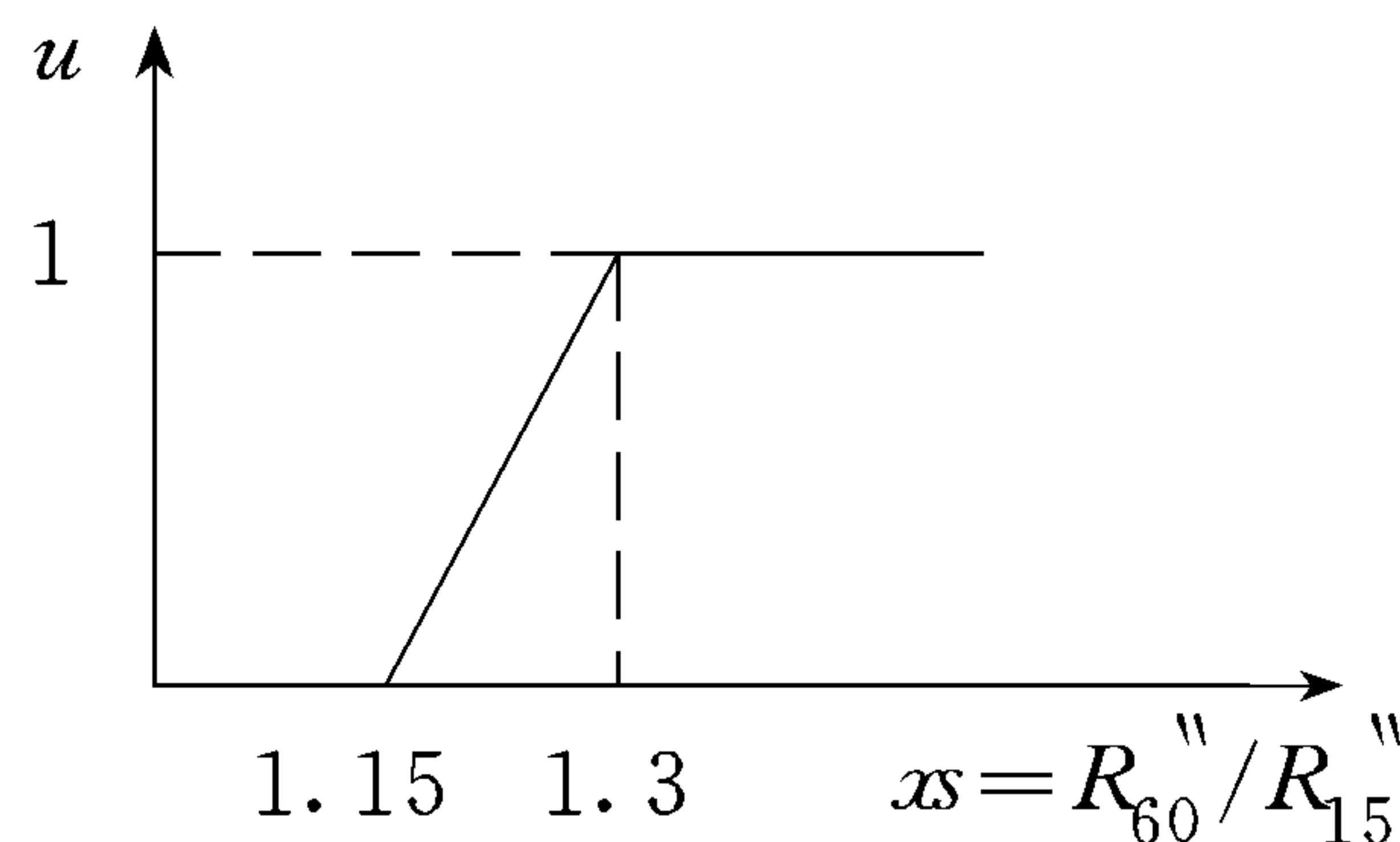
表1 泄漏电流参考值 单位：μA
Table 1 Reference value of leakage current Unit: μA

额定电压 /kV	直流试验 电压/kV	温 度 /℃						
		10	20	30	40	50	60	70
6~15	10	22	33	50	77	112	166	250
20~35	20	33	50	74	111	167	250	400
63~330	40	33	50	74	111	167	250	400
								570

$$u = \begin{cases} 1 & \operatorname{tg}\delta \leq \operatorname{tg}\delta_0 \\ \frac{1.3\operatorname{tg}\delta_0 - \operatorname{tg}\delta}{0.3\operatorname{tg}\delta_0} & \operatorname{tg}\delta > \operatorname{tg}\delta_0 \end{cases}$$

表2 $\operatorname{tg}\delta$ 参考允许值
Table 2 Reference value of $\operatorname{tg}\delta$

电压等级	温 度 /℃						
	10	20	30	40	50	60	70
35 kV 以上	1%	1.5%	2%	3%	4%	6%	8%
35 kV 及以下	1.5%	2%	3%	4%	6%	8%	11%



$$u = \begin{cases} 1 & xs \geq 1.3 \\ \frac{-xs + 1.15}{-0.15} & xs < 1.3 \end{cases}$$

c —— 绝缘电阻与历年相比的变化率量化处理:

对于绝缘电阻与历年相比变化率可用如下方法取得:

(1) 设本次试验绝缘电阻为 R_0 ; 按距本次试验时间由近到远, 取3次合格的绝缘试验的绝缘电阻, 分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 。

(2) 若这4次试验温度不一样, 可按 $R^2 = R^1 \cdot 10^{0.025(t_2 - t_1)}$ 换算至同温度。

式中 R^1 为实测值; R^2 为换算值; t_1 、 t_2 为实测温度及换算温度。

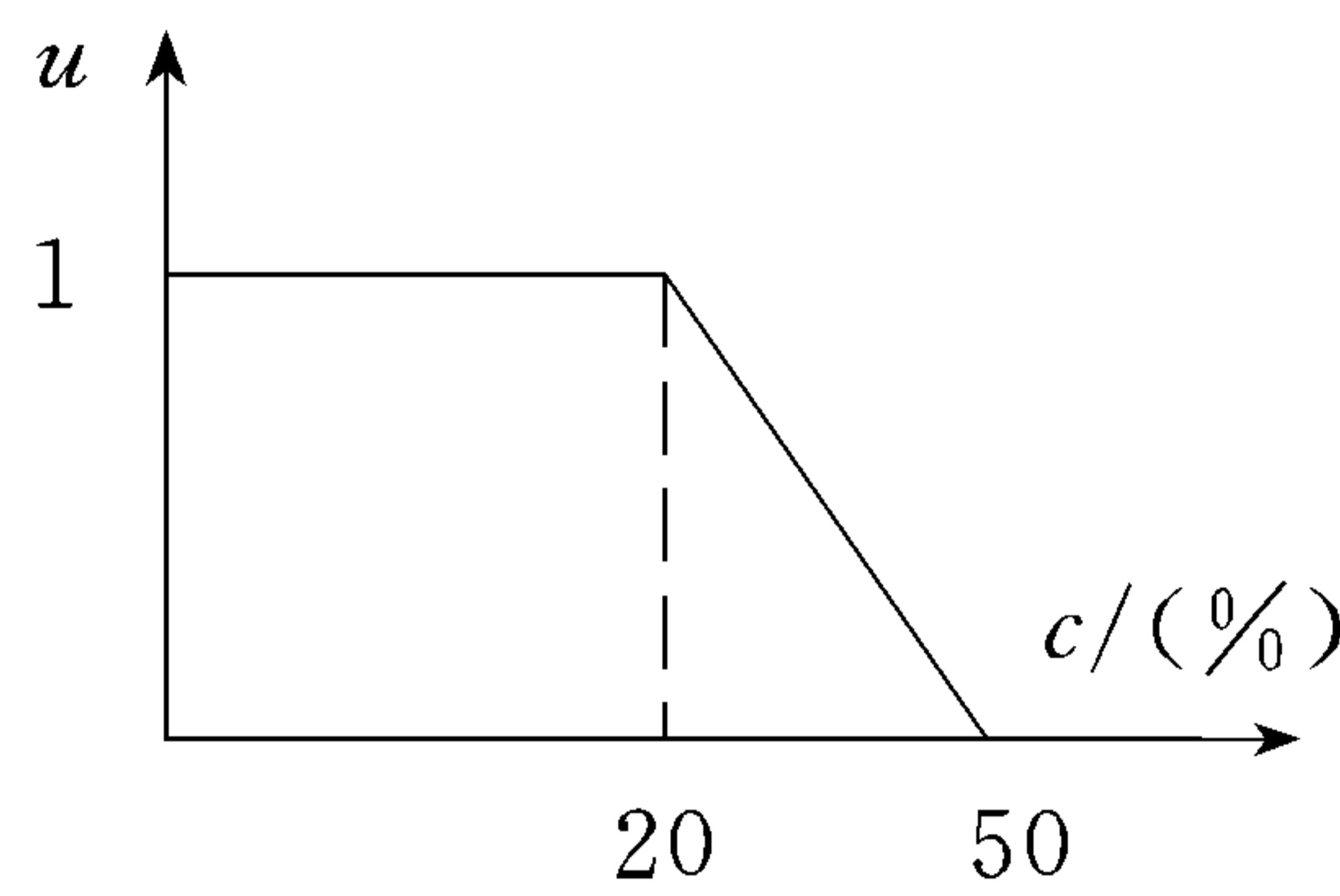
(3) 取权重集 $w_1 = (0.6 \quad 0.25 \quad 0.15)$, 表示距本次试验越近, 受到影响就越大; 反之, 则越小。

(4) 计算 c

$$c = \frac{(R_0 - R_1) \cdot 0.6 + (R_0 - R_2) \cdot 0.25 + (R_0 - R_3) \cdot 0.15}{\left(\frac{R_0 + 0.6 \cdot R_1 + 0.25 \cdot R_2 + 0.15 \cdot R_3}{2} \right)} \cdot 100\%$$

(5) 当 $c < 0$ 时, 设 $c = 0$ 。

量化处理 c 值, 可用降半梯形函数确定 u :



$$u = \begin{cases} 1 & c \leq 20 \\ \frac{-c + 50}{30} & c > 20 \end{cases}$$

4.2 输出阵 Y 形成

运用以上介绍的模糊语义表示法, 将绝缘状况三种类型: 合格(\tilde{R}), 有问题(\tilde{M}), 不合格(\tilde{F})进行量化处理, 形成 Y 阵。

例如某台变压器绝缘试验如下: 类型 SFSL-31500/121, 油温10 °C, 吸收比 $xs = R_{60}''/R_{15}'' = 1.13$, 泄漏电流(40 kV) $i = 29 \mu\text{A}$, $\text{tg}\delta = 0.8\%$, 试验时间是1980年3月1日, 变化率计算得 $c = 15\%$ 。

试验结论是合格, 但吸收比较低。

由此形成输入、输出矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} i & \text{tg}\delta & xs & c \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} \tilde{R} & \tilde{M} & \tilde{F} \\ 0.8 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

4.3 辨识结果

利用这台变压器10组试验数据, 依次进行量化处理, 可得:

$$X^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0.15 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0.17 & 0.78 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0.9 & 0.33 & 1 & 0.33 & 1 & 0.67 & 0.2 & 1 \\ 1 & 0.4 & 0.9 & 0 & 0.8 & 0.9 & 1 & 0 & 1 & 0.7 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.4 & 1 & 0.4 & 0.7 & 0.8 & 1 & 0.8 & 0.9 & 1 \\ 0.2 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

运用图2所提的程序框图, 取 $\epsilon = 0.08$, $w = 0.01$, 经过47步迭代, 得出:

$$R = \begin{bmatrix} 0.69 & 0.70 & 0.54 & 0.61 \\ 0.10 & 0.17 & 0.22 & 0.13 \\ 0.02 & 0.04 & 0.06 & 0.04 \end{bmatrix}$$

R 阵得出后, 可以利用模糊诊断技术进行诊断。即由 $R \cdot X^T = Y$, 对新的试验数据进行判断。

5 结束语

(1) 模糊诊断正确与否关键在于模糊诊断模型的正确性。本文运用最小二乘法, 辨识出模糊诊断模型, 以减少人为因素影响。

(2) 在电力设备故障诊断中, 大量试验数据和结论是已知的。因此, 有条件进行模糊辨识, 只要保证数据和结论的可靠性, 则模型辨识结果是可信的。

(3) 在辨识过程中, 如果 ϵ 取值不当, 或输入、输出阵量化不合理, 难以得出正确的结果。本文提出的算法, 一旦出现无法辨识成功现象时, 则 $R = [1]$, 即 R 阵中所有元素都等于1。如何使量化值更为合理, 以后将作进一步研究。

参 考 文 献

- 1 李天云, 陈化钢. 模糊关系方程及其在故障诊断中的应用. 高电压技术. 1993. 1
- 2 姜伟. 系统辨识技术. 化学工业出版社. 1986. 11
- 3 Lee Ying Chin, Hwang Chyi, Shih Yen Ping. A Combined Approach to Fuzzy Model Identification. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics. 1994, 24(5)
- 4 雷国富, 陈占梅. 高压电气设备绝缘诊断技术. 水利电力出版社, 1994. 6
- 5 李洪兴, 汪培庄. 模糊数学. 国防工业出版社, 1994. 2

APPLICATION OF FUZZY MODEL IDENTIFICATION ON FAULT DIAGNOSIS OF POWER EQUIPMENTS

Xu Wen, Wang Dazhong, Zhou Zecun (Southeast University, 210096, Nanjing, China)

Li Yiming (Taiyuan No. 1 Thermal Power Plant, Taiyuan, China)

Abstract Fuzzy set theory is widely utilized on fault diagnosis of power equipments. Fuzzy membership matrix helps us obtain the corresponding results from the input data or the output data. Since fuzzy membership matrix is usually depend on experts' experience, it is deeply affected by the man-made factors. Fuzzy model identification is an approach to determine fuzzy model which is based on the input-output data. This method can decrease the man-made influence and increase the correctness of fault diagnosis.

Keywords fault diagnosis fuzzy model identification transformer