

化工装置可靠性模糊评估技术的研究*

戴树和

(南京化工学院化机系, 南京 210009)

摘 要 结合化工装置中的某些具体实例, 运用模糊集理论, 在模糊评判、模糊极值函数方面对可靠性评估技术进行了探讨, 研究成果用于工程实际, 取得较佳效果。

关键词 工程不确定性 可靠性分析 模糊集理论

1 引 言

工程问题中存在大量的不确定性, 按照传统方式分析化工装置特性时, 总是将材料的强度指标(如拉伸屈服极限、强度极限等)、装置负荷、工作温度和其它工艺参数作为确定值, 实际上, 即使同一牌号、同一炉冶炼成型材料, 其强度亦不尽相同, 至于装置的工作载荷、温度和其它操作运行条件也都不是不变量; 除此以外, 工程问题中尚存在另一种不确定性, 它涉及人们的判断、经验与决策。为了区分, 一般将工程不确定性分为随机性和模糊性两类。

随机性或称偶然性, 如材料性质实验数据分散所引起的不确定性; 设计参数仅仅从小容量试样的数据进行估计所引起的不确定性; 由于尺寸效应、加工工艺、装配等所引起的不确定性等。随机性的因素常用概率方法处理。

模糊性涉及模棱两可或难以用截然界限分清的内容, 如人们所谓的“经验”、科学研究方案的可行性以及施工的难易等均具有模糊性。模糊性用模糊集理论求解^[1]。

可靠性工程学是建立在经典概率论基础上的, 它能够有效地解决工程上的随机性不确定性问题, 但对模糊性不确定性问题却无能为力。而在可靠性理论基础上, 借助于模糊集理论来处理工程中的模糊现象, 则是十分有效的, 是可靠性工程学研究发展的趋势。本文结合化工装置运行中某些失效事件的具体实例, 在大量试验工作的基础上, 按照可靠性工程学的方法, 应用模糊集理论, 在模糊评判、模糊极值函数方面进行研究。经过工程实际考验, 证明研究结果是恰当的, 并取得了较佳的经济和社会效益。

2 模 糊 评 判

模糊性用模糊集表示。在这样的集中, 一个元素的从属关系, 不能简单地用“是”或“否”、“真”或“伪”来回答, 而是一个渐变过程。模糊集的特征函数称为隶属函数, 记作 $\mu_A(x)$, 表示元素 x 对于论域 $X = \{x\}$ 上的模糊子集 A 的隶属程度, 其值在 $[0, 1]$ 区间连续选取。

1992-01-09 收到初稿, 1992-05-05 收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

模糊评判广泛应用于方案可行性决策。它可分为一级模型和多级模型。利用一级模型进行综合评判的步骤如下^[2,3]：

(1) 确定评判对象的因素集

$$X = \{x_i\} \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

(2) 假设决策集

$$Y = \{y_j\} \quad j = 1, \dots, m \quad (2)$$

(3) 建立从 X 到 Y 的模糊映射, 导出模糊关系单因素评判矩阵

$$R = [a_{ij}] \quad 0 \leq a_{ij} \leq 1 \quad (3)$$

(4) 确定因素集中各因素的权重

$$B = \{b_i\} \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

权重应满足 $\sum_{i=1}^n b_i = 1$

(5) 综合评判

$$C = B \cdot R \quad (5)$$

模糊矩阵相乘是按先取小而后取大的原则进行计算。举一个简单例子：

$$A = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.7 \\ 0.5 & 0.3 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 \\ 0.6 & 0.9 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{则 } A \cdot B &= \begin{bmatrix} (0.8 \wedge 0.2) \vee (0.7 \wedge 0.6) & (0.8 \wedge 0.4) \vee (0.7 \wedge 0.9) \\ (0.5 \wedge 0.2) \vee (0.3 \wedge 0.6) & (0.5 \wedge 0.4) \vee (0.3 \wedge 0.9) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0.6 & 0.7 \\ 0.3 & 0.4 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

如果因素集 X 的因素过多, 权重分配很难合理, 难以真实反映各因素在整体中的影响。针对这种情况, 宜采用多级模型^[3]。

本研究曾对一台被劳动部门判为“监控使用”的大型压力容器裂纹萌生和防治的可行性进行模糊评判, 并据此对实施这项诊断和防治技术做出决策。该压力容器自 1980 年起, 连年检查, 连年发现裂纹, 而且情况趋于严重。针对裂纹萌生的特性, 进行了故障树分析 (FTA), 求得各影响因素的重要度, 其值示于表 1。略去表 1 中顺序号为 8 和 9 的两个次要因素, 对于主要影响因素进行分析, 探讨防治裂纹萌生的方案, 并对此方案可行性进行综合评判。

按照上述进行模糊评判的步骤, 令因素集 [式 (1)] 为

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_7\}$$

式中, $x_1, x_2, \dots, x_7$ 代表的因素详见表 1。

技术方案的可行性主要指的是在技术先进、经济合理的前提下, 该方案容易实施。为此, 定义决策集为描述可行程度的模糊集 [式 (2)]

$$Y = \{\text{很容易实施 } y_1; \text{容易实施 } y_2; \text{较难实施 } y_3; \text{很难实施 } y_4\}$$

它们的隶属函数取值, 可用表 1 中顺序号为 1 的因素作为例子予以说明。最佳的打磨补焊修理工艺是否容易实施, 要受到许多因素的影响, 包括操作工人的经验、施工熟练程度和现场施工条件等。如果很容易实施, 则在决策集 Y 中元素“很容易实施”的隶属函数取值为 1, 元素“很难实施”的隶属函数取值为 0。倘若既不容易实施又不很难, 其隶属函数值在 $[0, 1]$ 区间, 根据具

表 1 结构重要度^[4]
Table 1 Structural importance

影响因素	结构重要度	顺序	因素
容器制造时组焊及维修打磨补焊工艺	0.332	1	x_1
制造组装约束	0.152	6	x_6
操作运行条件	0.066	8	—
制造过程中产生的缺陷	0.066	9	—
应力腐蚀开裂的特征	0.113	7	x_7
容器运行时介质性质	0.301	2	x_2
容器存在漏检裂纹	0.262	4	x_4
容器投入运行时温度波动(急冷)	0.152	5	x_5
容器筒体材料性能	0.270	3	x_3

体情况选取。选取的方法参见文献^[5]。

按表 1 中顺序号的各因素隶属函数为

$$x_1 \rightarrow (0.5/y_1, 0.7/y_2, 0.6/y_3, 0.5/y_4)$$

即:因素 x_1 “很容易实施”的程度为 0.5,“容易实施”的程度为 0.7,“较难实施”的程度为 0.6,“很难实施”的程度为 0.5。或可写成

$$x_1 \rightarrow (0.5, 0.7, 0.6, 0.5)$$

仿此,可写出其它因素的隶属函数关系

$$x_2 \rightarrow (0.1, 0.3, 0.5, 0.9)$$

$$x_3 \rightarrow (0, 0.1, 0.8, 1)$$

$$x_4 \rightarrow (0, 0.2, 0.8, 1)$$

$$x_5 \rightarrow (0.8, 1, 0.3, 0.2)$$

$$x_6 \rightarrow (0, 0.1, 0.9, 1)$$

$$x_7 \rightarrow (0.2, 0.5, 0.6, 1)$$

现以 x_3 为例,对其取值作进一步说明。该因素是“容器筒体材料性能”(参阅表 1 中顺序号 3)。对于本研究对象压力容器而言,因已制造组装完毕投入运行,欲改变筒体材料的性能,显然极为困难。所以“很容易实施”的程度为 0,“很难实施”的程度为 1。但是如果用某些表面处理(如喷漆、衬里等)措施改变其耐腐蚀性,也不是完全不可能,尽管困难较大,参见文献^[5]的方法,“容易实施”的程度取 0.1,“较难实施”的程度取 0.8。

单因素构成的模糊评判矩阵[式(3)]

$$R = \begin{matrix} & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.5 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.9 \\ 0 & 0.1 & 0.8 & 1 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 1 \\ 0.8 & 1 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.9 & 1 \\ 0.2 & 0.5 & 0.6 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

各因素在可行性决策过程中,它们的影响并不是等同的,这种影响可用各自的权重表示。

表 2 各因素的权重

Table 2 Weighted values of the influence factors

因素	结构重要度	权重值	因素	结构重要度	权重值
x_1	0.332	1	x_5	0.152	0.178
x_2	0.301	0.858	x_6	0.152	0.178
x_3	0.270	0.717	x_7	0.113	0
x_4	0.262	0.680			

FTA 所求得的结构重要度的大小正是表示各因素相对重要程度。将表 1 中各因素的重要度换算成 $[0,1]$ 区间的数值,即为各因素的权重。详见表 2。

权重值也可以表示成如下的模糊集[式(4)]

$$B = \{1, 0.858, 0.717, 0.68, 0.178, 0.178, 0\}$$

据此,可以按下列关系进行综合评判[式(5)]

$$C = B \cdot R$$

$$C = (1, 0.858, 0.717, 0.68, 0.178, 0.178, 0) \cdot \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.5 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.9 \\ 0 & 0.1 & 0.8 & 1 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 1 \\ 0.8 & 1 & 0.3 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.9 & 1 \\ 0.2 & 0.5 & 0.6 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= (0.5, 0.7, 0.717, 0.858)$$

或者, $C = (0.5/\text{很容易实施} + 0.7/\text{容易实施} + 0.717/\text{较难实施} + 0.858/\text{很难实施})$

式中“+”不是数学“和”,而是集合论中的“并”。

C 的数值表示欲抑制这台压力容器裂纹的萌生,针对 FTA 方法求得的诸因素进行分析,并改善各因素相应基本事件的状况,按照这种综合治理的方法所制订的研究方案,“很难实施”的隶属函数最大,“很容易实施”的隶属函数最小,“容易实施”与“较难实施”的隶属函数居中,二者相差不大。说明本方案实施的可行性虽然有相当大的困难,但不是不可以解决的,这就是综合评判的结论,可作为决策参考。

3 模糊极值函数

在规划或设计工程结构或设备时,结构型式、几何尺寸、选材和加工工艺等各方面,应该满足多目标决策的需要。而这些多目标决策中,往往存在相互矛盾的要求,也常常伴有某些模糊含义。例如:“尽可能小”、“尽可能安全”、“尽可能可靠”或“如果可能”等模糊条件。在进行这类多目标决策时,应用模糊极值函数求解。

若 X 是给定的非空模糊集, $f(x)$ 是定义在 X 上的有界实值函数,它的低界与高界分别为

$$\inf(f) = \inf_{x \in X} f(x) \quad \sup(f) = \sup_{x \in X} f(x)$$

$f(x)$ 在 X 上的极大集是一个模糊集 M_f , Zadeh^[6] 定义这个极大集的隶属函数为

$$\mu_{M_f}(x) = \frac{f(x) - \inf(f)}{\sup(f) - \inf(f)}, \quad \forall x \in X \quad (6)$$

若 A 是 X 的模糊子集, X 中满足下列条件的点 x^* 称为 $f(x)$ 在 A 上的模糊条件极大点。
 $f(x^*)$ 称 $f(x)$ 在 A 上的模糊条件极大值

$$\mu_M(x^*) = \sup_{x \in X} [\mu_M(x) \wedge \mu_A(x)] \quad (7)$$

该式的物理意义与普通集合求极值的条件相似。倘若 A 是 X 的普通子集, $f(x)$ 在 A 上的极大点是 x^* ($x^* \in X$), 应满足 $f(x^*) = \sup_{x \in X} f(x)$ 。这一条件对于模糊集合而言, 它等价于式(7)^[7]。

下面以工程实例说明模糊极值函数的求解方法。

将化工容器内壁焊缝及其热影响区涂有一层牺牲阳极的阴极保护涂层。该容器投入运行前, 在内壁 20 个部位实测涂层厚度, 经历一年运行之后, 进行大修检查。在原测点位置测量涂层厚度, 并从涂层减薄量计算相应的腐蚀速率, 它们的数值示如表 3 中第 2 和第 4 列。根据这些数据, 本研究对: ①涂层寿命可能出现的极大值和极小值; ②该化工容器的最佳运行周期, 即运行多少时间后进行检查修理为宜等问题进行了探讨。

首先计算涂层寿命可能出现的极大值。在最大涂层厚度情况下, 具有最小腐蚀速率, 此时的寿命即为极大值。计算步骤为:

(1) 该容器内壁涂层厚度和腐蚀速率实测点的集

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{20}\}$$

表 3 实测数据和计算汇总^[8](求寿命极大值)

Table 3 Test data and the calculated results of membership functions

X	涂层厚度 /mm	$\mu_M(x)$	腐蚀速率 /mm·a ⁻¹	$\mu_A(x)$	$\mu_M(x) \wedge \mu_A(x)$	$\sup_{x \in X} [\mu_M(x) \wedge \mu_A(x)]$
1	2	3	4	5	6	7
x_1	0.17	0.35	0.0113	0.93	0.35	
x_2	0.19	0.45	0.0452	0.73	0.45	
x_3	0.16	0.3	0.01695	0.9	0.3	
x_4	0.12	0.1	0.0226	0.87	0.1	
x_5	0.20	0.5	0.01695	0.9	0.5	
x_6	0.10	0	0.0565	0.67	0	
x_7	0.18	0.4	0.0678	0.6	0.4	
x_8	0.11	0.05	0	1	0.05	
x_9	0.28	0.9	0.0791	0.53	0.53	
x_{10}	0.28	0.9	0.0565	0.67	0.67	0.67
x_{11}	0.30	1	0.12995	0.23	0.23	
x_{12}	0.30	1	0.113	0.33	0.33	
x_{13}	0.16	0.3	0.0678	0.6	0.3	
x_{14}	0.16	0.3	0.08475	0.5	0.3	
x_{15}	0.255	0.625	0.0339	0.8	0.625	
x_{16}	0.20	0.5	0.07345	0.57	0.5	
x_{17}	0.12	0.1	0.0113	0.93	0.1	
x_{18}	0.15	0.25	0.1017	0.4	0.25	
x_{19}	0.17	0.35	0.14125	0.17	0.17	
x_{20}	0.20	0.5	0.1695	0	0	

(2) 语言变量“最大涂层厚度”。根据实测值,最大厚度为 0.30mm(见表 3 中 x_{11}, x_{12}),最小厚度为 0.1mm(见表 3 中 x_8),故有

$$M = (1/0.30, \dots, 0/0.1)$$

式中,1/0.30 表示厚度 0.30mm 作为“最大涂层厚度”的隶属函数值为 1;余类推。

(3) 语言变量“最小腐蚀速率”。根据实测涂层厚度减薄量计算的腐蚀速率最大值为 0.1695 $\approx$ 0.17mm/a(见表 3 中 x_{20}),最小值为 0 mm/a(见表中 x_8),故有

$$A = (1/0, \dots, 0/0.17)$$

式中,1/0 表示腐蚀速率为 0 mm/a 作为“最小腐蚀速率”的隶属函数值为 1;余类推。

(4) 模糊极大值可以从式(7)求得。表 3 中第 3 列与第 5 列相对应数值间取小值,其结果示如该表第 6 列;再从第 6 列各数值中取大者,即

$$\mu_M(x^*) = \sup_{x \in X} [\mu_M(x) \wedge \mu_A(x)] = 0.67$$

所对应的测点是 x_{10} ,涂层厚度为 0.28mm,腐蚀速率为 0.0565mm/a(参见表 3)。故涂层寿命可能出现的极大值为 0.28/0.0565 $\approx$ 5a。

涂层寿命可能出现的极小值,可从最小涂层厚度情况下具有最大腐蚀速率的相应数据求得。计算步骤与上述求寿命极大值相同。

至于寻求这台容器的最佳运行周期。首先选定计算基准:涂层厚度 δ 取 1987 年底这台容器大检修后投入运行前实测的涂层厚度均值 0.1968mm;1986 年底至 1987 年底涂层挂片实测的腐蚀速率 y 平均值为 0.04719mm/a,且呈正态分布。根据所选定的计算基准,本问题可陈述如下:腐蚀速率大约为 0.04719mm/a 情况下,寻求涂层厚度平均值为 0.1968mm 的涂层最大寿命。

“腐蚀速率大约为 0.04719mm/a”是模糊语言,其模糊集用 A 表示,根据文献^[9], A 的隶属函数可写成

$$\mu_A(y) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - 0.04719}{k} \right)^2 \right] \quad (8)$$

若基本事件空间是连续的实数域,则模糊事件 A 的概率 $P(A)$ 是其隶属函数的期望值^[9],即

$$P(A) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_A(y) g(y) dy \quad (9)$$

式中, $g(y)$ 为概率密度函数,根据挂片实测数据的统计有如下关系^[4]

$$g(y) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中 $\mu = 0.04719\text{mm/a}$ $\sigma = 0.00965\text{mm/a}$

将式(8)、式(10)代入式(9)得

$$\begin{aligned} P(A) &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - 0.04719}{k} \right)^2 \right] \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] dy \\ &= \frac{k}{\sqrt{k^2 + \sigma^2}} \exp \left[-\frac{\mu - 0.04719}{2(k^2 + \sigma^2)} \right] \end{aligned}$$

已知 $\mu = 0.04719$,故有

$$P(A) = k / \sqrt{k^2 + \sigma^2} \quad (11)$$

极大集 M 的隶属函数可从式(6)求得。上限值: $\sup(f) = 5$;下限值: $\inf(f) = 0$

$$\mu_M(y) = \frac{f(y) - \inf(f)}{\sup(f) - \inf(f)} = \frac{\delta/y - 0}{5 - 0} = \frac{0.1968}{5y}$$

模糊极大点 y^* 可按下法求得

$$\mu_M(y^*) = \mu_A(y^*)$$

或

$$\frac{0.1968}{5y^*} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^* - 0.04719}{k}\right)^2\right]$$

式中, 系数 k 可从模糊概率 $P(A)$ 的给定值按式(11)求出。极大点 y^* 及相应的涂层寿命计算值列于表 4。

表 4 涂层寿命计算结果

Table 4 Calculated results of life of coating layer

腐蚀速率大约为 $0.04719\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的概率 $P(A)/\%$	$y^*/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	涂层寿命/a
50	0.04445	4.43
60	0.04383	4.49
70	0.04313	4.56
80	0.04230	4.65
85	0.04179	4.71
90	0.04119	4.78
99.73(3 σ 定律)	0.03943	4.99

如果选用模糊概率为 70%~80%, 从表 4 所列计算结果可知, 涂层寿命为 4.56~4.65a。据此, 本研究向拥有这台容器的工厂提出如下建议: 每 4 年左右停车大修 1 次, 不必年年停车检修。这项建议已被该厂采纳, 正按此实施。目前该容器运行正常, 节省了由于每年停车检修的耗资。

4 结 语

虽然模糊不确定性的评价方法包含人们的主观因素, 不同的人可能提出不同的判断。然而, 人们有能力理解这种模棱两可的程度, 并加以利用, 这是传统的工程或科学研究分析所办不到的。

语言变量是自然语言, 较之确定性单一数值有更大的灵活性, 能包容更宽广的含义, 在处理工程问题、涉及经验、决策和评价技术等内容特别有用。它的另外优点是可以使用计算机进行分析。

在可靠性理论分析基础上, 借助于模糊集理论来处理工程中模糊现象, 是当今可靠性工程学研究中的前沿课题, 受到了广泛的重视。本研究仅是结合化工容器中某些具体案例, 在这个领域中进行的初步探索, 更深入的研究工作尚待开发。

符 号 说 明

A —— 模糊(子)集, 模糊事件

a —— 元素

B —— 权重集

b —— 元素

C —— 综合评判集

$f(x)$ —— 有界实值函数

$g(x)$ ——概率密度函数 k ——常数 M ——模糊集 P ——概率 R ——模糊关系 X ——论域,因素集 x ——元素 Y ——决策集 y ——元素,腐蚀速率,mm/a δ ——涂层厚度,mm μ ——隶属函数,均值 σ ——标准差

参 考 文 献

- 1 Zadeh Lotfi A. Information and Control, 1965, 8, 338~353
- 2 Zimmermann Hans Jurgen. Fuzzy Sets Theory and Its Applications. Boston: Kluwer-Nijhoff Publishing Company, 1985. 11~37
- 3 葛苏林. 模糊子集 模糊关系 模糊映射. 北京: 北京师范大学出版社, 1985. 106~123
- 4 Dai Shu-Ho, Wang Ming-O. Applications of Fuzzy Mathematics and Statistical Testing Method to the Analysis of Reliability of a Pressure Vessel. New York: The American Society of Mechanical Engineers. ASME paper 89-PVP-3
- 5 楼世博, 孙章, 陈化成. 模糊数学. 北京: 科学出版社, 1985. 72~77
- 6 Zadeh Lotfi A. On Fuzzy Algorithms Memo. Berkeley, CA: UCB/ERI, M325. 1972
- 7 吴锡名, 陈永义, 黄金所等. 应用模糊集方法. 北京: 北京师范大学出版社, 1985. 237~241
- 8 Dai Shu-Ho, Wang Ming-O. Reliability Analysis in Engineering Applications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, 330
- 9 王世同, 夏祖勋, 陈剑夫. 模糊数学在人工智能中的应用. 北京: 机械工业出版社, 1991. 40~46

FUZZY ASSESSMENT OF PROCESS EQUIPMENT RELIABILITY

Dai Shuhe

(Department of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Chemical Technology, Nanjing 210009)

Abstract Practical Engineering situations are very often uncertain in a number of ways. Randomness and fuzziness are two types of uncertainty. The first type of uncertainty is described by stochastic models. The second type of uncertainty is solved by the theory of fuzzy sets.

Although the theory of fuzzy sets is relatively new, the calculus of fuzzy sets is well developed with various applications in engineering. The fuzzy sets theory can make it possible to study complex and ill-defined system which include uncertainties caused by fuzziness or vagueness.

In this work, the reliability assessment of process equipment was studied by using the theory of fuzzy sets such as fuzzy synthetic evaluation and extrama of fuzzy function. The research results were successfully used in engineering practice.

Keywords engineering uncertainty, reliability analysis, fuzzy sets theory