

# 一种新的广义梯形模糊数相似性度量方法及在故障诊断中的应用

文成林, 周 哲, 徐晓滨

(杭州电子科技大学自动化学院, 浙江杭州 310018)

**摘 要:** 当前, 研究模糊数(Fuzzy number, FN)或广义模糊数(Generalized fuzzy number, GFN)之间的相似性度量方法, 大多用于度量论域在单位区间上的标准模糊数. 然而在实际中, 非标准模糊数却十分常见, 而利用现有的多数方法则须先将其转化为标准模糊数再加以处理. 但是, 归一化的过程会因引起信息损失致使相似性度量结果不合理. 本文提出一种避免归一化过程的广义梯形模糊数(generalized trapezoidal fuzzy numbers, GTFN)相似性度量方法, 避免了归一化过程. 新的方法结合了广义梯形模糊数的指数距离、周长和面积等因素来计算相似度. 同时分析了新度量公式的一些性质. 然后, 利用 12 对典型的 GFN 与现有的主要方法进行比较. 结果验证新方法的效能. 最后, 将所提相似性度量方法应用于基于 Dempster-Shafer(DS)证据理论的故障诊断当中, 通过实际采集数据来验证本文所提方法的有效性.

**关键词:** 广义模糊数; 相似性度量; 故障诊断; DS 证据理论

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 3A-001-06

## A New Similarity Measure Between Generalized Trapezoidal Fuzzy Numbers and Its Application to Fault Diagnosis

WEN Cheng-lin, ZHOU Zhe, XU Xiao-bin

(School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract:** At present, some methods have been presented to calculate the degree of similarity between (Fuzzy numbers, FNs) or (Generalized fuzzy numbers, GFNs). Most of them are designed for standardized fuzzy numbers, i. e., the universe of the discourse of FNs lie in unit interval. In order to deal with the non-standardized fuzzy numbers common in practice, it is necessary to transform it into standardized fuzzy numbers, such that the degree of similarity can be calculated. However, normalization process tends to cause information loss and unreasonable results of similarity measure. This paper presents a new similarity measure between GTFNs avoiding normalization process. The new method combines the concepts of exponential distance, the perimeter and the area of GTFNs for calculating the degree of similarity. Some properties of the proposed similarity measure are also proved. And then 12 typical sets of GFNs are given to compare the proposed method with most of the existing methods. The results show that the new method is more efficient to a certain extent. Finally, a practical example is given to show that the proposed method can provide a useful way to deal with the problem of D-S evidence theory based machinery fault diagnosis.

**Key words:** generalized fuzzy number; similarity measure; fault diagnosis; DS evidence theory

### 1 引言

模糊数相似性度量在风险分析、模式分类、决策和指纹匹配等领域扮演着重要的角色. 近十年中, 已有一些度量方法被提出并成功得到应用<sup>[1-4]</sup>.

Chen(1996)提出了一种模糊数(FN)相似性度量方法并用于主观心理负荷评估和模糊风险分析问题. Lee(1999)提出一种梯形模糊数相似性度量方法并用于聚

合个体的模糊观点以得到最优的群体协同. 然而, 前两种方法都是用于处理 FN, 均不适用于广义模糊数(GFN).

为了解决这一问题, Chen & Chen(2003)结合了 GFN 的几何距离和重心距离等因素提出了一种新的 GFN 相似性度量方法并将其应用于处理模糊风险分析问题. Wei & Chen(2009)结合了 GFN 的几何距离、周长和高度等因素提出了一种度量方法也同样用于处理模糊风险

分析问题.

然而,上述四种方法均不能很好地处理非标准模糊数,亦即论域不在单位区间上的模糊数.这是因为在其度量公式中,几何距离都被作为一种影响相似度的因素考虑进来.在度量一些非标准模糊数时,会导致得到“负的相似度”这种不合理的结果.

针对上述问题,本文从 GTFN 距离和形状两个角度考虑,结合指数距离、周长和面积等因素,提出了一种新的 GTFN 相似性度量方法.其中引入的指数距离是为了克服多数方法不能很好处理非标准模糊数的这一严重缺点,而引入周长和面积是用于度量形状差异.新的度量方法既适用于标准的模糊数,又适用于非标准的.同时分析了新方法的一些性质.最后,将所提的相似性度量用于基于证据理论的机械故障诊断当中,用于从模糊型故障特征中提取诊断证据.实验表明本文提供了一种有效地处理机械故障诊断问题的方法.

## 2 基本概念和主要的相似性度量方法

### 2.1 基本概念

Chen(1999)将广义梯形模糊数  $A$  表示为  $A = (a, b, c, d; w)$ , 其中  $0 < w \leq 1$ ,  $a, b, c$  和  $d$  为实数<sup>[5]</sup>.

定义 1 广义模糊数  $A$  是定义在实数  $R$  上的一个模糊集,其隶属度函数  $\mu_A$  满足以下条件:

- (1)  $\mu_A$  是一个从  $R$  到闭区间  $[0, 1]$  上的连续映射.
- (2)  $\mu_A(x) = 0$ , 当  $-\infty < x \leq a$ .
- (3)  $\mu_A(x)$  在  $[a, b]$  上是严格增的.
- (4)  $\mu_A(x) = w$ , 当  $b \leq x \leq c$ .
- (5)  $\mu_A(x)$  在  $[c, d]$  上是严格减的.
- (6)  $\mu_A(x) = 0$ , 当  $d \leq x < \infty$ .

当  $w = 1$  时,广义梯形模糊数称为正规梯形模糊数,记为  $A = (a, b, c, d)$ . 当  $a = b$  且  $c = d$ , 此时  $A$  为一个确定的区间.当  $b = c$ ,  $A$  称为广义三角模糊数.当  $a = b = c = d$  且  $w = 1$ ,  $A$

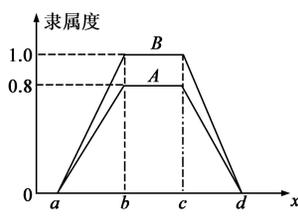


图 1 两个广义模糊数  $A$  和  $B$

为一实数.如图 1 所示,两个不同的广义梯形模糊数  $A = (a, b, c, d; w_1)$  和  $B = (a, b, c, d; w_2)$ , 这里  $w_1 = 0.8$ ,  $w_2 = 1.0$ .

### 2.2 现有的主要相似性度量方法

本节简要地回顾和分析一些主要的相似性度量方法.首先,令  $A$  和  $B$  为两个梯形模糊数,记  $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ ,  $B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ .

#### 2.2.1 Chen 的相似性度量方法

Chen(1996)提出一种 FN 相似性度量方法<sup>[1]</sup>.模糊数  $A$  和  $B$  之间的相似度  $S(A, B)$  定义为

$$S(A, B) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^4 (a_i - b_i)}{4} \quad (1)$$

#### 2.2.2 Lee 的相似性度量方法

Lee(1999)也提出了一种梯形模糊数相似性度量方法<sup>[3]</sup>.

$$S(A, B) = 1 - \frac{\|A - B\|_p}{\|U\|} \times 4^{-\frac{1}{p}} \quad (2)$$

其中

$$\|A - B\|_p = \left( \sum_{i=1}^4 (|a_i - b_i|)^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (3)$$

$$\|U\| = \max(a_4, b_4) - \min(a_1, b_1) \quad (4)$$

前这两种方法都是用于处理 FN, 均不适用于 GFN.为了解决这一问题,Chen-and-Chen(2003)提出了一种 GTNs 之间相似性度量方法.

#### 2.2.3 Chen 和 Chen 的相似性度量方法

Chen-and-Chen(2003)提出一种 GTNs 之间的相似性度量方法<sup>[2]</sup>,其中考虑了几何距离和重心距离等因素.

对于两个广义模糊数  $A = (a_1, a_2, a_3, a_4; w_A)$  和  $B = (b_1, b_2, b_3, b_4; w_B)$ ,  $0 \leq a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4 \leq 1$ ,  $0 \leq b_1 \leq b_2 \leq b_3 \leq b_4 \leq 1$ .  $A$  和  $B$  的重心分别为  $(x_A^*, y_A^*)$  和  $(x_B^*, y_B^*)$ .那么  $A$  和  $B$  之间的相似度  $S(A, B)$  定义为

$$S(A, B) = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^4 (a_i - b_i)}{4} \right] \times (1 - |x_A^* - x_B^*|)^{B(S_A, S_B)} \times \frac{\min(y_A^*, y_B^*)}{\max(y_A^*, y_B^*)} \quad (5)$$

其中

$$B(S_A, S_B) = \begin{cases} 1, & \text{if } S_A + S_B > 0 \\ 0, & \text{if } S_A + S_B = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$S_A = a_4 - a_1 \quad (7)$$

$$S_B = a_3 - a_2$$

$$y_A^* = \begin{cases} \frac{w_A \left( \frac{a_3 - a_2}{a_4 - a_1} + 2 \right)}{6}, & \text{if } a_1 \neq a_4 \\ \frac{w_A}{2}, & \text{if } a_1 = a_4 \end{cases} \quad (8)$$

$$x_A^* = \frac{y_A^* (a_3 + a_2) + (a_4 + a_1)(w_A - y_A^*)}{2w_A} \quad (9)$$

#### 2.2.4 Wei 和 Chen 的相似性度量方法

Wei-and-Chen(2009)也提出了一种 GTNs 相似性度量方法<sup>[4]</sup>,其定义为

$$S(A, B) = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^4 (a_i - b_i)}{4} \right] \times \frac{\min(P(A), P(B)) + \min(w_A, w_B)}{\max(P(A), P(B)) + \max(w_A, w_B)} \quad (10)$$

$$P(A) = \begin{cases} \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + w_A^2} + \sqrt{(a_3 - a_4)^2 + w_A^2} \\ + (a_3 - a_2) + (a_4 - a_1) \end{cases}$$

$$P(B) = \begin{cases} \sqrt{(b_1 - b_2)^2 + w_B^2} + \sqrt{(b_3 - b_4)^2 + w_B^2} \\ + (b_3 - b_2) + (b_4 - b_1) \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $P(A)$ 和  $P(B)$ 分别表示  $A$ 和  $B$ 的周长.

上述对几种常见的相似性度量方法分析表明,它们均不能很好的处理非标准模糊数.这是因为在其度量公式中都用了几何距离来度量相似性,而这在处理一些非标准模糊数时,常常会导致度量结果为负值的不合理结果.然而非标准模糊数在实际中十分常见,因此有必要提出一种既适用于标准模糊数的,又适用于非标准模糊数的相似性度量方法,以期解决现有主要方法存在的缺陷.

### 3 一种新的 GTFN 相似性度量方法

本节将提出一种新的 GTFN 相似性度量方法,它是结合 GTFN 的指数距离、周长和面积等个因素来计算相似度;同时也将证明新的相似性度量公式的一些性质.

假设有两个 GTFN,  $A = (a_1, a_2, a_3, a_4; w_A)$ 和  $B = (b_1, b_2, b_3, b_4; w_B)$ ,其中  $0 \leq a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4, 0 \leq b_1 \leq b_2 \leq b_3 \leq b_4, 0 < w_A \leq 1, 0 < w_B \leq 1$ .那么  $A$ 和  $B$ 的相似度  $S(A, B)$ 定义为

$$S(A, B) = e^{-|x_A^* - x_B^*|} \times \frac{\min(P(A), P(B)) + \min(a(A), a(B))}{\max(P(A), P(B)) + \max(a(A), a(B))} \quad (12)$$

其中

$$y_A^* = \begin{cases} \frac{w_A(\frac{a_3 - a_2}{a_4 - a_1} + 2)}{6}, & \text{if } a_1 \neq a_4, 0 < w_A \leq 1 \\ \frac{w_A}{2}, & \text{if } a_1 = a_4, 0 < w_A \leq 1 \end{cases}$$

$$x_A^* = \frac{y_A^*(a_3 + a_2) + (a_4 + a_1)(w_A - y_A^*)}{2w_A} \quad (13)$$

$$P(A) = \begin{cases} \sqrt{(a_2 - a_1)^2 + w_A^2} + \sqrt{(a_4 - a_3)^2 + w_A^2} \\ + (a_3 - a_2) + (a_4 - a_1), & \text{if } a_4 - a_1 \neq 0 \\ w_A, & \text{if } a_4 - a_1 = 0 \end{cases}$$

$$P(B) = \begin{cases} \sqrt{(b_2 - b_1)^2 + w_B^2} + \sqrt{(b_4 - b_3)^2 + w_B^2} \\ + (b_3 - b_2) + (b_4 - b_1), & \text{if } b_4 - b_1 \neq 0 \\ w_B, & \text{if } b_4 - b_1 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$a(A) = \frac{1}{2} \times [(a_2 - a_1) + (a_4 - a_3)] \times w_A + (a_3 - a_2) \times w_A$$

$$a(B) = \frac{1}{2} \times [(b_2 - b_1) + (b_4 - b_3)] \times w_B + (b_3 - b_2) \times w_B \quad (15)$$

式中  $P(A)$ 和  $a(A)$ 分别表示 GTFN  $A$ 的面积和周长,  $(x_A^*, y_A^*)$ 为  $A$ 的重心.

**性质 1**  $S(A, B) \in [0, 1]$

**证明** 因为

$$\min(P(A), P(B)) \leq \max(P(A), P(B)),$$

$$\min(a(A), a(B)) \leq \max(a(A), a(B)),$$

并且

$$0 \leq e^{-|x_A^* - x_B^*|} \leq 1.$$

所以,有  $S(A, B) \in [0, 1]$ .

**性质 2**  $S(A, B) = S(B, A)$

**证明** 因为绝对值、取小和取大运算均不影响交换性,所以相似性度量公式满足交换性.

**性质 3**  $S(A, B) = 1$  当且仅当  $A = B$

**证明** 充分性:如果  $A = B$ ,那么  $A$ 和  $B$ 的重心、周长以及面积均相等,所以有  $S(A, B) = 1$ .

必要性:如果  $S(A, B) = 1$ ,这意味着  $A$ 和  $B$ 的形状一样,且它们重心之间的距离为零,所以  $A = B$ .

### 4 几种相似性度量方法之间的比较

本节将利用 12 对典型的模糊数,如图 2 所示,对 2.2 节中的方法和本文在第 3 节中建立的方法进行比较.从图 2 和表 1 中可以看出,2.2 节中的方法存在以下缺点:

(1)对于图 2 中的 set 1 和 set 2,两个 FN 是不同的,但用 Chen 的方法计算会得到相同的相似度,这是不合理的.

(2)对于 set 3,其中的两个 GFN 是不同的,但 Chen 和 Lee 的方法得到的相似度均为 1,这也是不合理的.

(3)对于 set 4 和 set 5,两个 GFN 也不同,但 Chen 的方法和 Chen-and-Chen 的方法都得到的这两对 GFN 的相似度均相同,这是不合理的.

(4)对于 set 8 和 set 9,应用 Chen 和 Lee 的方法,得到 set 9 的相似度高于 set 8 中的这对 GFN 的相似度,这是不合理的.

(5)对于 set 10, Lee 的方法不能计算,因为这两个 GFN 退化为两个相同的实数,这使得其度量公式(2)中的分母为无穷大.而 Chen 的方法得到的相似度为 1,也是不合理的.

(6)对于 set 6 和 set 7,直观上 set 6 中的两个模糊数比 set 7 中的相似程度高.但 Chen-and-Chen 的方法却得到相反的结论.

(7)特别对于 set 11 和 set 12 来说,2.2 节中的所有方法均不能得到一个正确的结果,而本文所提的方法

可以给出一个合理的结果.

以克服现有主要方法的缺点.

综上所述,从图 2 和表 1,可以看出,本文所提的方法可

表 1 本文方法与 2.2 节中方法计算结果的比较

Sets	方法					Sets	方法				
	Chen	Lee	Chen-and -Chen	Wei-and -Chen	本文方法		Chen	Lee	Chen-and -Chen	Wei-and -Chen	本文方法
Set 1	0.7	0.4965	0.42	0.682	0.7018	Set 7	0.9	0.7643	0.9	0.7833	0.7731
Set 2	0.7	0.5	0.49	0.7	0.7408	Set 8	1	1	0.7	0.7209	0.7291
Set 3	1	1	0.8	0.8248	0.8324	Set 9	0.95	0.6464	0.9048	0.4143	0.3030
Set 4	0.5	0.495	0.25	0.4456	0.5103	Set 10	1	#	0.5	0.5	0.5000
Set 5	0.5	0.3211	0.25	0.1574	0.1144	Set 11	-1	0.75	1	-1	0.1353
Set 6	0.975	0.8821	0.8357	0.95	0.9473	Set 12	-0.2	0	-0.2	-0.2	0.3012

注:“#”表示此相似度无法计算;不合理的结果用黑斜体表示.

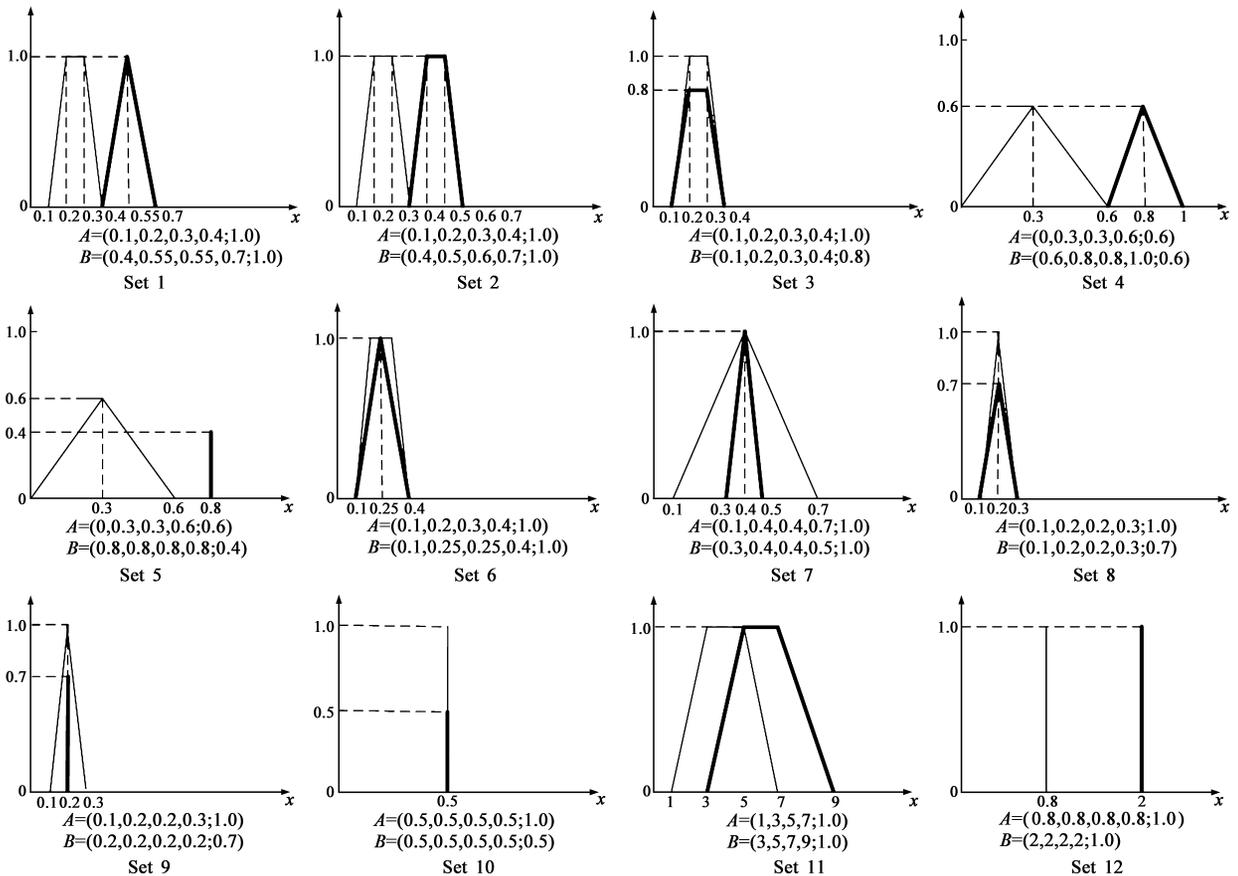


图 2 12对广义模糊数

### 5 故障诊断中的应用

由于故障诊断过程受到各种不确定性因素的干扰与影响,传统的基于单传感器、单因素监测和单模型的处于与评判方法已显不足;而利用多传感器进行测量已成普遍现象.因此,面对复杂的多源不确定性信息,利用信息融合的方法来提高诊断的精度和可靠性显得尤为重要.证据理论因其在处理不确定性、非精确信息方面的优势<sup>[6,7]</sup>,被成功地应用于诊断领域中<sup>[6,8~11]</sup>.

本节利用电机柔性转子故障诊断为例验证所提方

法的有效性.实验设备为 ZHS-2 型多功能柔性转子试验台,振动位移传感器和振动加速度传感器分别安置在转子支撑座的水平和垂直方向用于采集信号,对采集的信号进行特征提取,得到包括频域的 1X ~ 3X 倍频(基频为 25Hz)的振动幅值,时域的振动位移平均幅值等 4 种特征.将时域和频域信息进行融合做出综合决策.

一般来说,基于证据理论的信息融合故障诊断方法分以下几步:确定辨识框架;匹配故障样板模式和故障待检模式以获取基本概率指派(Basic probability as-

signment, BPA); 利用 Dempster 证据组合规则融合上一步得到的 BPA, 并根据融合结果和决策规则诊断故障. 诊断结构图如图 3 所示.

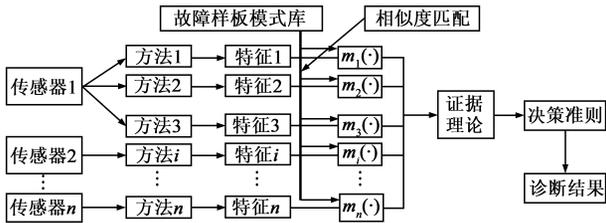


图3 故障诊断结构图

上述诊断过程中, BPA 的获取是最为重要的一步, 也是利用证据理论进行故障诊断首先要解决的问题. 在此实验中, 利用本文所提的相似性度量方法来确定 BPA. 这是因为考虑到信号采集和特征提取中的模糊性, 故障样板模式和待检模式均被表示为模糊数, 而其中一些为非标准模糊数. 此时, 2.2 节中的方法将不适用.

具体的方法步骤如下:

### Step 1 确定辨识框架

电机柔性转子平台可以模拟三种典型故障的运行模式,  $F_1 =$  转子不平衡,  $F_2 =$  转子不对中,  $F_3 =$  基座松动. 因此, 辨识框架可以确定为  $\Theta = \{F_1, F_2, F_3\}$ .

### Step 2 根据历史数据建立故障样板模式库

建立模糊数的方法较多, 这里采用 Cheng(2004)<sup>[12]</sup> 的方法来构建三角模糊数, 针对 3 种故障 4 种特征, 可以建立 12 个三角模糊数, 记为  $A_{ij}$  ( $i$  表示特征,  $j$  表示故障), 作为故障样板模式库, 如表 2 所示.

### Step 3 根据测试数据建立待检模式

将转子系统设置为不平衡故障模式, 经过信号采集, 特征提取. 然后利用 step2 中采用的方法构建三角模糊数, 可以得到 4 个模糊数, 记为  $B_i$  ( $i$  表示特征), 如表 3 所示.

### Step 4 根据本文的相似性度量方法确定 BPA

根据如下公式获取 BPA:

$$m(F_j) = S(A_{ij}, B_i) \quad (16)$$

$$m(\Theta) = 1 - \max[m(F_i)] \quad (17)$$

对式(15)、(16)的结果作归一化处理得到 BPA.

### Step 5 融合 BPA, 并根据融合结果和决策准则进行诊断

故障决策的基本准则为:

(1) 判定的故障类型应有最大的 BPA, 该值要大于某一门限, 这里规定必须大于 0.6.

(2)  $m(\Theta)$  必须小于某一门限, 这里规定必须小于 0.3.

(3) 判定的故障类型的 BPA 和其他 BPA 之差要大

于某一阈值, 这里规定必须不小于 0.15.

将匹配得到的 BPA 进行融合, 然后根据决策准则和融合结果进行诊断. 表 4 给出了融合和诊断结果, 从中可以判断转子不平衡故障发生, 这与当前转子系统的运行模式一致.

表 2 故障样板模式库

样板模式	三角模糊数
$A_{11}$	(0.1574, 0.1619, 0.1673; 1.0)
$A_{12}$	(0.1611, 0.1825, 0.2077; 1.0)
$A_{13}$	(0.3222, 0.3281, 0.3354; 1.0)
$A_{21}$	(0.1432, 0.1474, 0.1520; 1.0)
$A_{22}$	(0.3021, 0.3295, 0.3523; 1.0)
$A_{23}$	(0.3271, 0.3462, 0.3632; 1.0)
$A_{31}$	(0.1027, 0.1123, 0.1257; 1.0)
$A_{32}$	(0.1725, 0.2379, 0.3294; 1.0)
$A_{33}$	(0.1228, 0.1325, 0.1412; 1.0)
$A_{41}$	<b>(4.2630, 4.3562, 4.4748; 1.0)</b>
$A_{42}$	<b>(4.1059, 4.6836, 5.3085; 1.0)</b>
$A_{43}$	<b>(9.6209, 9.8108, 9.9846; 1.0)</b>

表 3 待检模式

故障特征	三角模糊数
$B_1$	(0.1507, 0.1630, 0.1721; 1.0)
$B_2$	(0.1285, 0.1472, 0.1601; 1.0)
$B_3$	(0.0939, 0.1120, 0.1243; 1.0)
$B_4$	<b>(4.0262, 4.1168, 4.2087; 1.0)</b>

表 4 本文方法计算得到的 BPA 和融合结果

故障特征	基本概率指派函数				诊断结果
	$m(F_1)$	$m(F_2)$	$m(F_3)$	$m(\Theta)$	
1X	0.3538	0.3428	0.3003	0.0031	不确定
2X	0.3719	0.3115	0.3093	0.0072	不确定
3X	0.3583	0.2879	0.3505	0.0032	不确定
位移	0.5835	0.2350	0.0023	0.1792	不确定
融合	<b>0.6573</b>	0.2341	0.1086	0.0000	不平衡

表 5 Wei & Chen(2009)的方法计算 BPA 和融合结果

故障特征	基本概率指派函数				诊断结果
	$m(F_1)$	$m(F_2)$	$m(F_3)$	$m(\Theta)$	
1X	0.3543	0.3464	0.2967	0.0026	不确定
2X	0.3779	0.3111	0.3060	0.0051	不确定
3X	0.3548	0.2959	0.3475	0.0018	不确定
融合	0.4271	0.2879	0.2850	0.0000	不确定

另外, 表 5 中给出了利用 Wei & Chen(2009)提出的相似性度量方法计算得到的 BPA 以及融合结果. 表中仅列出了从 3 个故障特征中获取的 BPA, 这是因为第 4 个特征被表示为非标准模糊数, 此时利用 Wei & Chen(2009)的方法无法得到合理的 BPA, 因此不能利用此故障特征信息. 而且, 从融合结果无法判定故障. 利用 2.2 节中的其它方法也面临同样的问题, 均无法综合利用故障特征信息, 进而导致无法正确判定故障. 这也说明本文所提方法可以更多的利用故障特征信息进行融合

诊断,此外相比传统的故障诊断方法,本文所提方法可以处理故障样板和待检模式同时具有模糊性的情况,避免了只考虑故障样板模式具有模糊性而带来的不确定性以及诊断精度较低等问题。

## 6 结论

论文针对广义模糊数的相似性度量问题,从距离和形状两方面考虑,提出了一种新的广义模糊数相似性度量方法,可以克服一些经典方法所存在的缺点。机械故障诊断实验验证了所提相似性度量方法的有效性。尽管相似性度量方法较多,且已经成功用于一些领域。但也有一些问题有待于进一步研究,比如:目前,还没有一个方法能够处理所有情况,多数方法在做比较时,都是通过反例来论证方法之间的优缺点;且度量结果的好坏也没有统一的评判标准。

## 参考文献

- [1] Chen S. New methods for subjective mental workload assessment and fuzzy risk analysis [J]. *Cybernetics and Systems*, 1996, 27(5): 449 - 472.
- [2] Chen S-J, Chen S-M. Fuzzy risk analysis based on similarity measures of generalized fuzzy numbers [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2003, 11(1): 45 - 56.
- [3] H S Lee. An optimal aggregation method for fuzzy opinions of group decision [A]. *IEEE Int Conf on SMC*, vol. 3 [C]. Tokyo, Japan, 1999. 314 - 319.
- [4] Wei S-H, Chen S-M. A new approach for fuzzy risk analysis based on similarity measures of generalized fuzzy numbers [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(1): 581 - 588.
- [5] Chen S-H. Ranking generalized fuzzy number with graded mean integration [A]. *proc of the eighth int fuzzy systems association world congress*, vol. 2 [C]. Taipei, Taiwan, Republic of China, 1999. 899 - 902.
- [6] Parikh C, Pont M, Barrie Jones N. Application of Dempster-Shafer theory in condition monitoring applications: a case study [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2001, 22(6-7): 777 - 785.
- [7] Rogova G. Combining the results of several neural network classifiers [J]. *Neural networks*, 1994, 7(5): 777 - 781.

- [8] Fan X, Zuo M. Fault diagnosis of machines based on DS evidence theory. Part 2: Application of the improved DS evidence theory in gearbox fault diagnosis [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(5): 377 - 385.
- [9] Jones R, Lowe A, Harrison M. A framework for intelligent medical diagnosis using the theory of evidence [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2002, 15(1-2): 77 - 84.
- [10] 徐晓滨, 王迎昌, 文成林. 基于模糊故障特征信息的随机集度量信息融合诊断方法 [J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(7): 1635 - 1640.
- [11] 朱大奇, 于盛林. 基于 D-S 证据推理的数据融合算法及其在电路故障诊断中的应用 [J]. *电子学报*, 2002, 30(2): 221 - 223.  
Zhu daqi, et al. Data fusion algorithm based on D-S evidential theory and its application for circuit fault diagnosis [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(2): 221 - 223. (in Chinese)
- [12] Cheng C. Group opinion aggregation based on a grading process: A method for constructing triangular fuzzy numbers [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2004, 48(10-11): 1619 - 1632.

## 作者简介



文成林 男, 1963 年生, 博士(后), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为: 多源信息融合技术, 系统安全检测、监控与故障诊断技术。  
E-mail: wenc@hdu.edu.cn



周哲 男, 1988 年生, 杭州电子科技大学自动化学院硕士研究生, 感兴趣的研究方向为模糊集理论和故障诊断。  
E-mail: zhouzhe.hdu@gmail.com

徐晓滨 男, 1980 年生, 杭州电子科技大学讲师, 博士, 主要研究方向为基于随机集理论及信息融合的系统可靠性分析与故障诊断方法研究、基于随机集理论的多目标跟踪。