

核试验地震核查的模糊逻辑推理综合识别方法*

宋江杰, 曾新吾

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要 建立了一种增强性模糊推理方法, 用来满足综合地震事件识别判据的需求。利用这种推理方法进行了地震事件模糊逻辑推理综合识别方法研究, 给出了方法的框架。实例研究表明这种综合识别方法在核试验地震监测中有减少可疑事件数量的能力。

关键词 核试验, 地震, 综合识别方法, 模糊逻辑推理

中图分类号: TB115 文献标识码: A

A Synthetic Discrimination Method in Nuclear Seismic Monitoring with Fuzzy Logic Illation

SONG Jiang-jie ZENG Xin-wu

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract We designed a kind of fuzzy illation method with enhancement property to synthesize some kinds of seismic event discrimination criterions. Using this method, we researched a synthetic discrimination method of nuclear test seismic monitoring with fuzzy logic illation, and listed its theory framework. The case study showed that by this method we will be able to decrease the population of suspicious seismic events in nuclear test seismic monitoring.

Key words nuclear test seismic, synthetic discrimination method, fuzzy logic illation

为了满足《全面禁止核试验条约》对于监控地震事件的要求, 近年来各国地震学家发展了很多种区域识别判据, 以便将核爆炸事件和其他种类的地震事件(主要是天然地震)区分开来。区域识别判据研究虽然取得了很大的进步, 但是还是有相当数量的地震事件不能被筛选掉^[1], 这样客观上就需要发展新的识别方法。发展新的识别方法有两个比较明显的方向^[2], 一是发展具有坚实的物理基础的判据, 另一个方向是发展综合识别方法。综合识别方法是将现有的判据通过某种数学手段联立起来提高事件的正确识别率, 常见的综合识别方法有基于统计方法的^[2~4]、基于人工神经网络的^[5, 6]和基于模糊逻辑的^[7]三类。

1 核试验地震核查模糊逻辑推理方法

1.1 判据模糊集合与隶属函数

每一个判据上都可以定义一组模型集合, 作为初步的研究, 在每一个判据上定义一个模糊集合: 爆炸性。如何建立模糊集合的隶属函数, 目前仍无统一方法可循, 一般根据实际经验来进行对应法则的探寻。

为了得到某个区域的识别判据, 往往需要分析成百上千个地震事件(其中包括这个区域所有可能得到地震图的核爆炸事件和众多的在地理位置上尽可能均匀分布的天然地震事件), 然后在这些事件结果统计分析的基础上得到判据。在统计基础上得到的识别判据一般具有这样的性质: 在一个较小的判据值(简单记为 C_1)以下的事件具有接近百分之百的概率是一类地震事件(如天然地震事件); 同时在一个较大的判据值(简单记为 C_2)以上的事件具有接近百分之百的概率是另一类地震事件(如核爆炸事件);

* 收稿日期 2003 - 12 - 27

作者简介 宋江杰(1976—), 男, 博士生。

对于判据值在 C_1 和 C_2 中间的事件就不能简单地判断其性质,但一般来讲,地震事件的判据值越靠近 C_1 或 C_2 ,就越容易判断事件的性质。基于识别判据的这种性质,选择了梯形分布(如图 1)作为隶属函数的基本形式,梯形分布的转折点根据上面提到的 C_1 和 C_2 确定。

1.2 模糊推理算子

每个判据反映了震源特性的某一方面,如果这些判据都反映出了爆炸的可能性,那么事件是爆炸事件的可能性就应该更大,相反,事件是天然地震的可能性就更大。为了满足地震模糊推理识别的这种要求,就需要有一种具有增强性质的模糊算子。尽管现在模糊数学中已经发展了很多算子(如常用的 Zadeh 算子(\vee, \wedge)、环和算子($\hat{+}$),比较复杂的 Einstein 算子、Hamacher 算子和 Yager 算子等)^[8,9],但是还没有一种算子能够满足地震模糊推理识别

的要求。为此,在环和算子($\hat{+}$)的基础上发展了一种增强模糊算子(简单记为 $\check{+}$)。

增强型模糊算子的基本要求是对于任意的 $a, b, c, d \in [0, 1]$,有

- ① $\check{+}(0, 0) = 0, \check{+}(1, 1) = 1$;
- ② 若 $a \leq c, b \leq d$ 则 $\check{+}(a, b) \leq \check{+}(c, d)$;
- ③ $\check{+}(a, b) = \check{+}(b, a)$;
- ④ $\check{+}(\check{+}(a, b), c) = \check{+}(a, \check{+}(b, c))$;
- ⑤ $\check{+}(0.5, 0.5) = 0.5$;
- ⑥ $\check{+}(a, b) > \max(a, b)$ if $a, b > 0.5$;
- ⑦ $\check{+}(a, b) < \min(a, b)$ if $a, b < 0.5$;
- ⑧ $\check{+}(a, b) = (a + b)/2$ if $a > 0.5$ and $b < 0.5$ 。

前面的 4 个要求是模糊算子的基本要求。后面 4 项是地震模糊推理识别增强性质的要求:对一个地震事件而言,如果两个判据爆炸性的隶属函数都等于 0.5,那么就不知道这个事件是那种类型的事件的可能性更大一点,所以推理结果的隶属度还是 0.5;如果两个判据爆炸性的隶属度都大于 0.5,那么这个事件是爆炸性的可能性就会增大,根据经验选择了要求⑥;同样,如果两个判据爆炸性的隶属度都小于 0.5,那么这个事件是爆炸性的可能性就会减小,所以有了条件⑦;如果两个判据爆炸性的隶属度一个大于 0.5,另一个小于 0.5,那么事件的爆炸性的隶属度应该处于两者之间,用条件⑧来反映这种情况。

对于 $a_i \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, N$,把 $\{a_i\}$ 分成两类 A_1 和 $A_2, A_1 = \{a_i | a_i \geq 0.5\}, A_2 = \{a_i | a_i < 0.5\}$,假定 $\{a_i\}$ 中前 M 个元素属于集合 A_1 ,后面 $N - M$ 个元素属于集合 A_2 ,满足上面 8 个要求的算子 $\check{+}$ 可以表示为:

$$\check{+}(a_1, a_2, \dots, a_N) = (T_1(A_1) + T_2(A_2))/2$$

$$T_1(A_1) = \check{+}((a_1 - 0.5) \times 2, \dots, (a_i - 0.5) \times 2, \dots, (a_M - 0.5) \times 2)/2 + 0.5, a_i \in A_1$$

$$T_2(A_2) = 1 - \check{+}(-(a_{M+1} - 0.5) \times 0.2, \dots, -(a_i - 0.5) \times 2, \dots, -(a_N - 0.5) \times 2)/2, a_i \in A_2$$

其中环和算子 $\check{+}(a, b) = a + b - a \times b, \check{+}(a, b, c) = \check{+}(\check{+}(a, b), c)$

1.3 推理句

模糊推理句往往是专家经验的总结,对于不同的问题总是要具体设计。在地震识别研究中,不同的区域使用不同的判据组合,就会产生不同的推理句组。现在的研究主要是以方法研究为主,为此简单的设计了一种推理句:

if 判据 1 爆炸性 判据 2 爆炸性 ... 判据 n 爆炸性 then 事件爆炸性

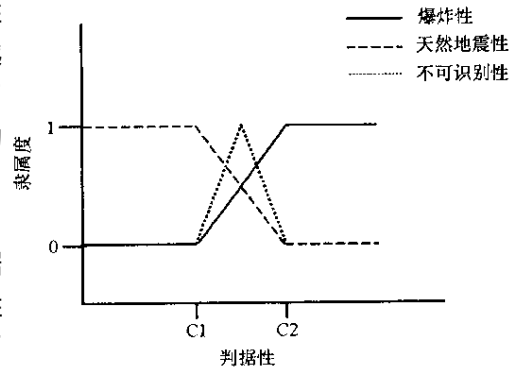


图 1 判据爆炸性的梯形隶属函数

Fig. 1 Trapezium membership function of explosion fuzzy sets

1.4 去模糊化方法

去模糊化常用的方法有阈值法、最大值法。具体方法的选择要根据研究问题的性质确定。对于上面设计的模糊集合和推理句, 阈值法是一种比较合适的方法。设定两个阈值 σ_1 和 σ_2 ($\sigma_1 < \sigma_2$), 如果推理结果小于 σ_1 , 那么事件就是天然地震事件; 如果推理结果大于 σ_2 , 那么事件就是核试验事件。否则, 事件的性质还是不能识别。

2 模糊逻辑推理综合识别方法举例

作为模糊逻辑推理综合识别方法的一个应用实例, 对中国西北部及其邻近区域的天然地震和核试验事件进行研究。分析中一共使用了 30 个地震事件和 3 个区域判据, 这些事件至少不能被这 3 个区域判据中的一个正确识别其性质, 所以依靠这 3 个判据不能简单地判断这 30 个事件的性质。我们用这个实例来验证该方法的识别效果。

2.1 中国西北部及其临近区域的识别判据

中国西北部及其临近区域有两个核试验场, 中国的罗布泊试验场 (Lop Nor) 和前苏联的哈萨克斯坦试验场 (KTS), 历史上曾进行了很多次核试验。另外, 这个区域最近几十年也发生了数量众多的天然地震事件。因此, 这个区域有利于地震核查判据的比较研究, 是核试验地震核查非常感兴趣的一个区域。利用从美国地震学联合会 (IRIS) 数据中心取得的乌鲁木齐 (WMQ) 台站的区域地震图对这个区域的 P/S 判据进行了研究。P/S 判据是指地震信号的 P 波震相和 S 波震相的幅值比, 其中, $P(1.5-3\text{Hz})/L(1.5-3\text{Hz})$, $P(1.5-3\text{Hz})/L(1.5-3\text{Hz})$ 和 $P(3-6\text{Hz})/L(0.75-1.5\text{Hz})$ 这 3 个 P/S 判据的结果分别如图 2 (a)(b)(c) 所示。图 2 中, 正方形表示核爆事件, 三角形表示天然地震事件。应该提到的是这几种判据在该区域并不是最优 P/S 判据, 这里主要是为了检验应用这几种判据进行模糊推理的识别效果。

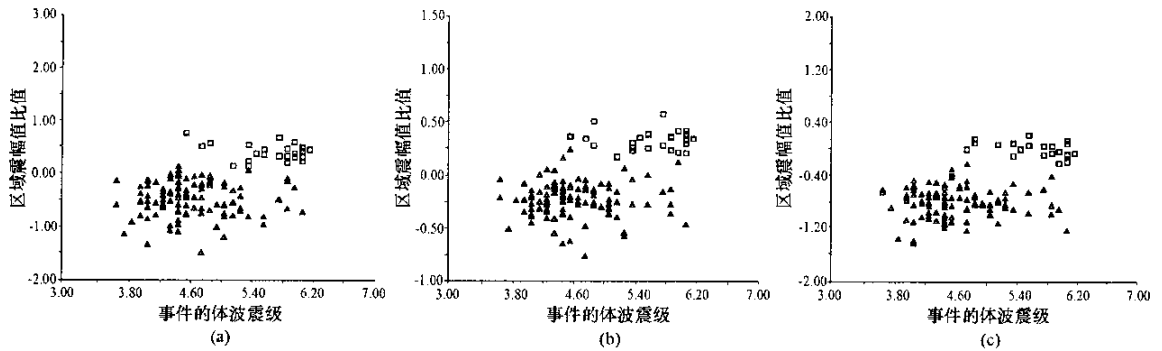


图 2 中国西北部及其临近区域的三种 P/S 判据结果

Fig. 2 The results of three kinds of P/S criteria in North-West China and nearby area

从图 2 可以看出, 这 3 个判据并不能完全将天然地震事件和核试验事件分开。将所有核试验事件判据值的最小值作为下限, 这里认为小于下限的事件就是天然地震事件; 将所有天然地震事件判据值的最大值作为上限, 同样认为大于上限的事件就是核试验事件, 那么对于处于上限和下限之间的事件就不容易确认其性质。这 3 个判据的上限和下限列在表 1 中, 另外表中还列出了不能识别的天然地震和核爆炸数目。表 1 中共有 30 个事件 (8 个核试验事件、22 个天然地震事件) 的判据值处在至少一个判据的上限和下限之间, 这些事件单凭一个判据很难说明其性质, 利用模糊推理综合识别方法处理多个判据的结果来提高对事件性质判断的把握。

表 1 P/S 判据在中国西北部及其临近区域的识别效果

Tab.1 The results of P/S criteria in North - West China and nearby area

判据名	上限	下限	X 不能识别数 / X 总数	Q 不能识别数 / Q 总数
$Pf(1.5 - 3\text{Hz}) / Lg(1.5 - 3\text{Hz})$	0.145	-0.141	3/25	19/108
$Pg(1.5 - 3\text{Hz}) / Lg(1.5 - 3\text{Hz})$	0.240	0.167	5/25	1/108
$Pg(3 - 6\text{Hz}) / Lg(.75 - 1.5\text{Hz})$	-0.225	-0.422	1/25	2/108

注 :X 表示核试验事件 ,Q 表示天然地震事件

2.2 中国西北部及其临近区域的模糊逻辑推理综合识别方法

在 $Pf(1.5 - 3\text{Hz}) / Lg(1.5 - 3\text{Hz})$ 、 $Pg(1.5 - 3\text{Hz}) / Lg(1.5 - 3\text{Hz})$ 和 $Pg(3 - 6\text{Hz}) / Lg(.75 - 1.5\text{Hz})$ 这 3 个判据上 ,分别定义爆炸性模糊集合 \tilde{A}_1 、 \tilde{A}_2 和 \tilde{A}_3 ,转折点利用表 1 列出的上限和下限 ,这样它们的隶属函数为 :

$$\tilde{A}_1 = \begin{cases} 0, & x < -0.141 \\ \frac{x + 0.141}{0.286}, & -0.141 \leq x \leq 0.145 \\ 1, & x > 0.145 \end{cases}$$

$$\tilde{A}_2 = \begin{cases} 0, & x < -0.167 \\ \frac{x - 0.167}{0.073}, & 0.167 \leq x \leq 0.240 \\ 1, & x > 0.240 \end{cases}$$

$$\tilde{A}_3 = \begin{cases} 0, & x < -0.422 \\ \frac{x + 0.422}{0.197}, & 0.422 \leq x \leq -0.225 \\ 1, & x > -0.225 \end{cases}$$

推理算法采用增强性模糊推理算法^[3] ,去模糊化方法采用阈值法。事件性质按照阈值分成 3 类 :

- (1) 爆炸事件—— $\check{+}(\tilde{A}_1(x), \tilde{A}_2(x), \tilde{A}_3(x)) > 0.7$;
- (2) 天然地震事件—— $\check{+}(\tilde{A}_1(x), \tilde{A}_2(x), \tilde{A}_3(x)) < 0.3$;
- (3) 不能识别事件—— $0.3 \leq \check{+}(\tilde{A}_1(x), \tilde{A}_2(x), \tilde{A}_3(x)) \leq 0.7$ 。

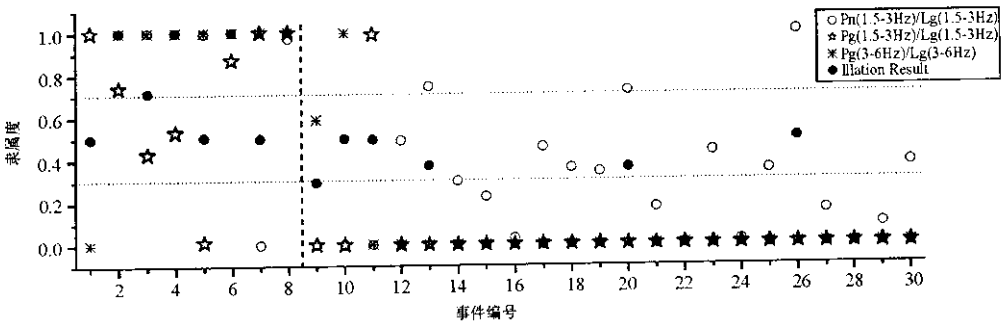


图 3 推理条件隶属度及推理结果隶属度

Fig.3 Degrees of membership of illation condition fuzzy sets and illation result

在上面推理方法的约束下 ,这 30 个事件的模糊推理条件隶属度和推理结果隶属度可以表示为如图 3 所示。图中横坐标为事件编号 ,竖虚线表示核试验和天然地震的区分线 ,其中前 8 个是核试验事件 ,后面 22 个是天然地震事件 ;• 表示推理结果 ,其它 3 种符号表示 3 种推理条件句的隶属度 ;图中的两条横虚线表示去模糊化的阈值。从图 3 的推理结果可以看出 ,这种方法可以将 8 个核试验中的 5 个正确识别出来 ,另外 3 个不能识别 ,可以将 22 个天然地震事件中的 17 个正确识别出来 ,另外 5 个不能正确

识别。总的来看,在这个实例中,这种方法可以将 77.3% 的事件正确识别出来,对 22.7% 的事件没有识别能力,并且没有误识事件。

其中 3 号和 9 号事件的识别过程很有意思。3 号事件在 $\text{Pr}(1.5 - 3\text{Hz})/\text{Lg}(1.5 - 3\text{Hz})$ 、 $\text{Pg}(1.5 - 3\text{Hz})/\text{Lg}(1.5 - 3\text{Hz})$ 和 $\text{Pg}(3 - 6\text{Hz})/\text{Lg}(0.75 - 1.5\text{Hz})$ 这 3 个判据的爆炸性模糊集合上隶属度分别为 1、0.429 和 1,推理结果隶属度为 0.714(爆炸事件)。对这个事件,有两个判据认定为爆炸事件,但是 $\text{Pg}(1.5 - 3\text{Hz})/\text{Lg}(1.5 - 3\text{Hz})$ 显示这个事件是天然地震的可能性比是爆炸的可能性稍大一点点,而利用模糊推理方法得到结论是爆炸事件。我们认为这种推理结果是合理的,因为在地震观测中经常有地震事件由于震源区域介质或地震波传播过程的影响造成某些判据不能准确地反映其震源的性质,3 号事件的 $\text{Pg}(1.5 - 3\text{Hz})/\text{Lg}(1.5 - 3\text{Hz})$ 判据可能就是这种情况。同样对于 9 号事件也有一个判据与另外两个判据显示的事件性质相反,而模糊推理综合识别方法成功地将事件的性质识别出来。

3 结论

建立了一种增强性模糊推理方法,并用这种方法进行了地震事件模糊逻辑推理综合识别方法研究,给出了方法的框架。在此基础上,结合中国西北部及其临近区域的一些 P/S 判据进行了这种综合识别方法的实例研究。实例研究中,这种方法可以将原来的三种 P/S 判据不能说明性质的 30 个事件的 77.3% 正确识别出来,对 22.7% 的事件没有识别能力,并且没有误识事件。这种模糊逻辑推理综合识别方法应用于地震监测,可能会有效地减少可疑事件的数量。

参考文献:

- [1] Hans E H, Aaron A V. An Interesting Regional Seismic Event From QingHai Province, China[R]. 22nd S. R. S., New Orleans, U. S. A., 2000.
- [2] Dale N A, Steven R T. Application of Regularized Discrimination Analysis to Regional Seismic Event Identification[J]. B. S. S. A., 2002, 9(6): 2391 - 2399.
- [3] Donat F, Karl K. Discrimination between Earthquakes and Chemical Explosions by Multivariate Statistical Analysis: A Case Study for Switzerland[J]. B. S. S. A., 2002, 9(5).
- [4] Mark D F, Henry L G, Gray D M. Regional Event Discrimination without Transporting Threshold[J]. B. S. S. A., 1996, 8(5): 1545 - 1558.
- [5] Farid U D, Steven R T, Russell W A. Seismic Discrimination with Artificial Neural Networks: Preliminary Results with Regional Spectral Data[J]. B. S. S. A., 1990, 8(5): 346 - 373.
- [6] Musil M, Plesinger A. Discrimination between Local Microearthquakes and Quarry Blasts by Multi-layer Perceptrons and Kohonen map[J]. B. S. S. A., 1996, 8(4): 1077 - 1090.
- [7] Thomas J S Jr, Darrin D W. A Fuzzy-Logic Approach to Regional Seismic Event Identification: Application to the Novaya Zemlya Event on 31 December 1992[R]. AD - A387 465, 1993.
- [8] 谌红. 模糊数学在国民经济中的应用[M]. 广州: 华中理工大学出版社, 1994.
- [9] 刘普寅, 吴孟达. 模糊理论及其应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.

