

基于自适应网络模糊推理系统的 γ 能谱 指纹模糊识别*

王崇杰[†] 刘媛媛 张博超 张倩妮 刘金艳 金鸽 张敏

(辽宁师范大学物理与电子技术学院, 大连 116029)

(2014年1月19日收到; 2014年3月5日收到修改稿)

提出了以自适应网络模糊推理系统参数为识别特征的 γ 能谱指纹模糊识别方法. 通过建模和仿真, 提取了 γ 能谱指纹的模糊系统特征参数, 并建立了关于系统特征参数的模糊集及模糊识别原则, 以较高的置信度实现了 γ 能谱指纹的类型识别和个体识别. 对实测 γ 能谱指纹进行了识别, 对方法的识别性能进行了研究和探讨. 研究表明, 该方法不但具有较强的类型识别能力和个体识别能力, 并具有较低的识别下限和较强的抗噪声能力.

关键词: γ 能谱指纹, 自适应网络模糊推理系统, 模糊集, 模糊识别

PACS: 28.41.Te, 29.30.Kv, 28.52.Nh

DOI: 10.7498/aps.63.122801

1 引言

作为一种辐射指纹, γ 能谱可以起到标识和鉴别放射性核材料的作用, 并已在核安全保障等领域得到了广泛应用^[1-5]. 与传统 γ 能谱分析技术的应用目的不同, γ 能谱指纹识别技术的主要任务是在不必要或不允许对待分析对象中的放射性核素进行定性和定量分析的情况下, 采用可靠、快捷的分析方法, 以较高的置信度对待分析的两套 γ 能谱指纹是否属于同一类型或同一个体做出“是”或“否”的判别^[1-4]. 目前, γ 能谱指纹识别通常采用模板匹配技术, 即根据两套 γ 能谱指纹特征参数之间的相似性或距离进行判别^[1,6,7]. 特征参数则主要采用全能峰、特征谱段计数或频域特征等. 全能峰虽然是 γ 能谱指纹的最显著也是最有效的特征, 但在寻峰过程中容易出现弱峰丢失和假峰现象, 这会给识别决策带来困难, 特别是在谱数据统计涨落较大的情况下, 难以确保对相同类型的两套 γ 能谱找到峰位和个数完全相对应的全能峰, 从而难以获得较

高的识别置信度. 以特征谱段计数为识别特征虽然避免了假峰和弱峰丢失问题, 但受统计涨落的影响较大, 抗噪声能力较弱^[6]. 以频域特征为识别特征, 在理论上也可以解决假峰和弱峰丢失的问题, 但由于 γ 能谱自身形成机制的特点, 低频成分的康普顿谱强度远远大于全能峰的强度, 并且全能峰的频谱与噪声的频谱交叠严重, 无论是傅里叶变换还是小波变换均难以在频率成分上提取出有效的指纹特征, 特别是对于差别甚微的不同类型和个体更是无能为力.

2003年和2008年, 王崇杰等^[2,8]通过建立关于全能峰的模糊集, 先后提出了以全能峰为识别特征的一维和二维 γ 能谱指纹模糊识别方法. 在此基础上, 本文则通过建模和仿真, 提取了相应模型的系统参数作为 γ 能谱指纹的识别特征, 通过建立关于模型系统参数的模糊集以及模糊识别原则, 实现了 γ 能谱指纹的类型识别和个体识别. 该方法不仅弥补了上述方法的不足, 获得了较高的识别置信度和较低的识别下限, 而且还具有较强的抗噪声能力. 同时, 该方法对待识别对象的敏感信息还具有一定

* 国家自然科学基金 (批准号: 51101080, E011002) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: wang_chongjie@163.com

的屏蔽作用.

2 基本原理

自适应网络模糊推理系统 (adaptive network-based fuzzy inference system, ANFIS) 是在模糊逻辑理论的基础上, 利用类似神经网络的结构表示模糊系统, 再用相应的学习算法来训练模糊系统 [9,10]. ANFIS 将模糊推理系统与神经网络有机地结合起来, 不但具有模糊系统符合人脑思维的模糊推理功能, 同时又具有神经网络的自学习和归纳能力. 已证明 ANFIS 具有以任意精度逼近非线性函数的能力, 并在非线性建模方面得到广泛应用 [9].

2.1 γ 能谱指纹的特征提取

用于 γ 能谱指纹仿真的 ANFIS 为单一输入单一输出系统, 其结构如图 1 所示 [9].

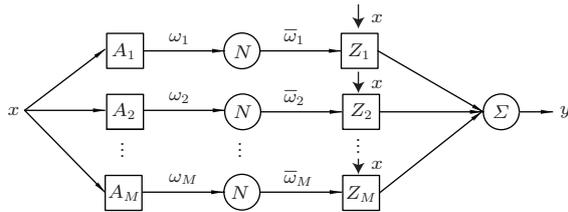


图 1 单一输入-单一输出的 ANFIS 结构图

图 1 中输入 x 为多道分析器的道址或 γ 射线能量, 输出 y 为相应道址或能量处的 γ 能谱计数. 节点 A_i 和 Z_i ($i = 1, 2, \dots, M$) 分别为前件函数和后件函数 [9], M 为前件函数和后件函数的个数. 前件函数的作用是计算输入量 x 的模糊隶属度, 即

$$\omega_i = \mu_{A_i}(x); \quad (1)$$

节点 N 的作用是对隶属度进行归一化, 即

$$\bar{\omega}_i = \omega_i / \sum_{j=1}^M \omega_j; \quad (2)$$

后件函数取一阶线性函数, 即

$$z_i = a_i x + b_i; \quad (3)$$

系统输出为

$$y = \sum_{i=1}^M \bar{\omega}_i (a_i x + b_i). \quad (4)$$

利用 γ 能谱指纹数据对网络进行训练, 便可得到相应的系统参数. 系统参数包括前件参数和后件参数, 前件参数是指隶属函数的参数, 后件参数则指后件函数参数 a_i 和 b_i . 研究表明, 系统的后件参数对 γ 能谱指纹数据具有较高的灵敏度, 因此本工作中提取 ANFIS 的后件参数作为 γ 能谱指纹的特征参数.

2.2 模糊识别原则

以 ANFIS 的后件函数参数 a 和 b 所构成的二维平面 S 为论域 $U^{[10]}$, 则特定 γ 能谱指纹的特征参数对 (a_i, b_i) ($i = 1, 2, \dots, M$) 便构成了论域 U 上的特征模式类 T_i , 并且各特征模式类所对应模糊集的元素为二维平面 S 上所对应的所有可能的点 $Q = (a, b)^T$. 各特征模式类所对应模糊集的隶属函数可表示为

$$\mu(Q) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} [S(Q - Q_{i0})] \cdot \mathbf{K}^{-1} \times [S(Q - Q_{i0})] \right\}, \quad (5)$$

(5) 式中 $Q_{i0} = (a_{i0}, b_{i0})^T$ 表示各特征模式类的中心, \mathbf{K} 为 a 与 b 的协方差矩阵, 且

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & r\sigma_a\sigma_b \\ r\sigma_a\sigma_b & \sigma_b^2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

(6) 式中 r 为 a 与 b 之间的相关系数, 由于 a 与 b 之间是无关系的, 因此 $r = 0$. 由于系统后件参数 a 和 b 在某种程度上反映了所仿真谱段的总体斜率和总计数大小, 因此协方差矩阵中 σ_a^2 和 σ_b^2 实质上反映了谱数据统计涨落的分布方差. 参数 S 为增强因子. 在 (5) 式中, 由于 σ_a^2 和 σ_b^2 与参数 S 的作用相同, 因此在识别过程中, 可取 $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = 1$, 识别灵敏度则可由参数 S 控制.

利用 (5) 式建立关于参考 γ 能谱指纹的各特征模式类的模糊集, 然后分别计算待识别 γ 能谱指纹相应特征参数 $Q_i = (a_i, b_i)$ ($i = 1, 2, \dots, M$), 相对参考 γ 能谱指纹相应各特征模式类的隶属度 $\mu(Q_i)$, 并采用“最小隶属原则”进行识别, 即如果 $\mu(Q_i)$ 中的最小值大于设定的隶属度阈值 μ_{Th} , 即

$$\min(\mu(Q_i), i = 1, 2, \dots, M) \geq \mu_{Th}, \quad (7)$$

则两指纹属于同一类型或同一个体, 否则不属于同一类型或同一个体.

3 实测 γ 能谱指纹识别及结果

为验证方法的实用性,对实测 γ 能谱指纹进行了识别研究. γ 能谱指纹的分类原则为:

不同类型 1) 两物体中所含核素成分不同; 2) 两物体中所含核素成分相同,但二者中所含的相应核素成分所占比例不同;

不相同个体 1) 两物体中所含核素成分及相应核素成分所占比例均相同,但相应核素成分的放射性活度不同; 2) 两物体中所含核素成分及各成分的放射性活度均相同,但包装容器的结构存在差异.

由于一套 γ 能谱指纹的数据量比较大,若对其进行一次性仿真,ANFIS的结构比较庞大,仿真时间较长.因此,在识别过程中采用分段逐步仿真,并选取谱数据段长度 $W = 100$ 个道址,前件函数和后件函数个数 $M = 25$.

3.1 仪器设备与测量方法

实验用 γ 能谱仪为美国EG&G ORTEC公司的HPGe γ 探测器-918A多道 γ 能谱仪,能量分辨率为2.0 keV (在1332.50 keV处),峰康比为56 : 1,相对效率为30%. 所用放射源为 ^{241}Am , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{22}Na 和 ^{152}Eu 标准点源.

测量方法: 利用放射源支架对放射源进行定位,确保实验重复性和探测方位的定位精度.

3.2 类型识别

对上述标准点源进行了不同组合和不同时间的测量,从而得到不同类型的模拟 γ 能谱指纹谱数据.为使各谱段的特征参数处在同一数量级上,在类型识别中,对各谱段进行了谱段计数“常数”归一化^[2],即首先对谱段进行归一化,然后再乘以一个常数 N ,在以下的识别过程中,取 $N = 10^3$.识别结果如表1所示.表中,“NCC”和“ENCC”分别表示 ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs 组合和 ^{152}Eu , ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs 组合.隶属度分别表示以其中之一谱数据为参考谱时对其他各谱进行识别所得的隶属度值.由结果可知,对不同核素组合及不同活度比的相同核素组合类型,隶属度阈值在0.005—0.950较宽的范围内取值,本文方法均给出了准确的识别结果,说明本文方法具有较强的类型识别能力.其中Co2Cs1与Co4Cs2两谱中核素成分相同,且各核素活度的比例亦相同,因此,被识别为同一类型.二者的区别需在类型识别的基础上,进一步进行个体识别.

3.3 个体识别

对上述点源的相同组合进行不同时间的测量,得到了相同类型的不同个体指纹谱.识别结果如表2所示,表中带“*”谱为参考谱.由表2可知,隶属度阈值在0.005—0.950较宽的范围内取值,本文方法也均给出了准确的识别结果.说明本文方法同样具有较强的个体识别能力.

表1 类型识别结果 ($S = 10^{-4}$)

谱文件	隶属度												
Co1h	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eu1h	0	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CsCo1	0	0	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Co2Cs1	0	0	0	1.00	0	0	0.99	0	0	0	0	0	0
Co2Cs2	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0	0	0	0	0
Co4Cs1	0	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0	0	0	0
Co4Cs2	0	0	0	0.99	0	0	1.00	0	0	0	0	0	0
Co2Na1	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.60	0	0	0	0
Co2Na2	0	0	0	0	0	0	0	0.60	1.00	0	0	0	0
C2C1E1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0	0	0
C2C1E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0	0
NCC1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0
ENCC1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00

4 识别下限与噪声抑制能力

4.1 识别下限

识别下限是指在特定测量条件下, 方法能够准确识别的两套 γ 能谱指纹间的最小差异. 为考察方法的识别下限, 对差异甚微的 γ 能谱指纹进行了识别研究. 两套 γ 能谱指纹差异甚微, 一是指能够用来区分二者的特征 γ 射线的数目占谱中特征 γ 射线总数的比例较小; 二是指核素成分相同, 只有部分成分的活度不同, 而且差值较小; 三是指放射性核素及相应核素成分的放射性活度均相同, 而包装容器结构存在微小差异.

4.1.1 核素及活度差异甚微的 γ 能谱指纹识别

考虑 ^{152}Eu 特征 γ 射线数目相对较多, 而 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 特征 γ 射线数目相对较少, 因此选取该3种点源的组合谱来模拟差异甚微的 γ 能谱指纹谱. 首先对 ^{152}Eu 点源进行10次重复性测量, 每次测量活时间均为1 h, 得到统计涨落谱Eu1ha—Eu1hj. 然后取下 ^{152}Eu 点源, 再分别换上 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 点源, 在 ^{152}Eu 谱数据的基础上, 每继续叠加测量5 min记录一套谱数据, 得到差异不同的指纹谱. 以Eu1ha为参考谱, 首先对统计涨落谱进行识别, 在所选识别参数确保统计涨落谱的识别隶属度均大于0.95的情况下, 再对叠加谱进行识别, 结果如表3所示. 表中第3列数据是参考谱与待识别谱之

表2 不同活度的个体识别结果 ($S = 10^{-4}$)

谱文件	隶属度	谱文件	隶属度	谱文件	隶属度	谱文件	隶属度
Am1h	0	Co1h	0	Cs1h	0	Na1h	0
Am2h	0	Co2h	0	Cs2h	0	Na2h	0
Am3h	0	Co3h	0	Cs3h	0	Na3h	0
Am4h	0	Co4h	0	Cs4h	0	Na4h	0
Am5h*	1.00	Co5h*	1.00	Cs5h*	1.00	Na5h*	1.00
谱文件	隶属度	谱文件	隶属度	谱文件	隶属度	谱文件	隶属度
Eu1h	0	CsCo1h	0	NCC1h	0	ENCC1h	0
Eu2h	0	CsCo2h	0	NCC2h	0	ENCC2h	0
Eu3h	0	CsCo3h	0	NCC3h	0	ENCC3h	0
Eu4h	0	CsCo4h	0	NCC4h	0	ENCC4h	0
Eu5h*	1.00	CsCo5h*	1.00	NCC5h*	1.00	ENCC5h*	1.00

表3 差异甚微的类型识别结果 ($S = 10^{-2}$)

谱文件	隶属度	谱总计数相对偏差/%	谱文件	隶属度	谱总计数相对偏差/%
Eu1ha*	1.000	0			
EuCs5	0.353	1.208	EuCo5	0.279	0.681
EuCs10	0.069	3.186	EuCo10	0.132	1.310
EuCs15	0.016	5.317	EuCo15	0.009	2.017
EuCs20	0.001	7.298	EuCo20	0.003	2.732
EuCs25	0	9.103	EuCo25	0	3.419
EuCs30	0	10.933	EuCo30	0	4.085

注: 表中带“*”谱为参考谱.

间全谱总计数的相对偏差. 由表3可知, 在谱总计数相对偏差较小的情况下, 隶属度阈值在0.40—0.95 较宽的范围内取值, 方法均能给出准确的识别结果, 表明方法对核素及活度差异甚微的 γ 能谱指纹具有较强的识别能力.

4.1.2 容器结构差异甚微的 γ 能谱指纹识别

为考察本文方法所能识别的来自被测对象的微小差异, 而非不可避免的探测条件的微小改变, 对统计涨落谱、距离变化谱和吸收片谱进行了个体识别.

在4.1.1中统计涨落谱测量条件的基础上, 首先, 改变点源到探测器之间的距离, 每增加2 mm 测量一个谱, 得到10个距离谱; 其次, 在点源与探测器之间加上不同厚度的铝质吸收片, 厚度每增加0.5 mm 测量一个谱, 得到5个吸收片谱. 以统计涨落谱中的Eu1ha为参考谱, 对其他统计涨落谱Eu1hb—Eu1hj进行识别, 在所选识别参数确保对统计涨落谱的识别隶属度均大于0.95的情况下, 再对距离变化谱和吸收片谱进行识别, 识别结果如图2所示. 由图2可看出, 在距离变化14 mm的情况下, 本文方法的识别隶属度仍大于0.93, 而吸收片厚度在0.5 mm的情况下, 识别隶属度小于0.89, 而且吸收片谱曲线斜率远大于距离变化谱曲线的斜率, 表明本文方法对探测距离不十分敏感, 而对吸收片厚度则相对十分敏感, 表明本文方法对容器结构差异甚微的 γ 能谱指纹也具有较弱的识别能力.

4.1.1和4.1.2的研究结果表明, 本文方法能够以较高的识别置信度, 对差异甚微的 γ 能谱指纹给出准确的识别结果, 说明本文方法具有较低的识别下限.

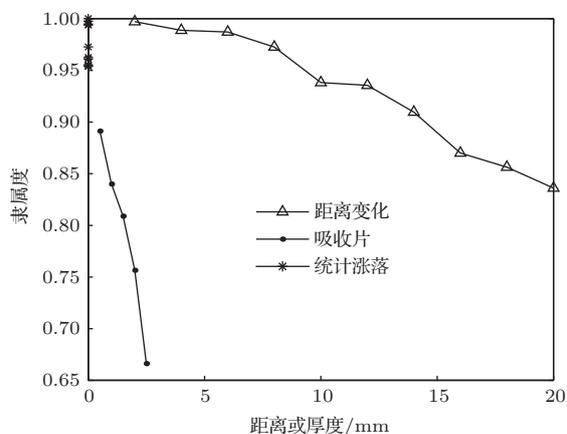


图2 识别下限

4.2 噪声抑制能力

在Eu1ha点源谱中, 分别加入3种不同分布类型的随机噪声: 均匀分布噪声、高斯白噪声和混合白噪声. 以原始谱Eu1ha为参考谱, 对噪声谱进行个体识别, 考察识别结果的隶属度随噪声分布方差的变化情况, 结果如图3所示. 图3中横坐标表示噪声谱的噪声分布方差与原始谱噪声分布方差的比值. 由图3可知, 噪声方差增至5000倍时, 本文方法仍能给出0.90以上的识别隶属度, 而噪声方差比在2500倍以内时, 隶属度值则在0.95以上, 说明本文方法具有较强的噪声抑制能力, 这一特性可保证在测量时间短、谱数据统计涨落较大的情况下亦能获得较高的置信度. 另外, 结果也表明, 高斯白噪声和混合白噪声对隶属度的影响基本一致, 而均匀分布噪声对隶属度影响相对较小.

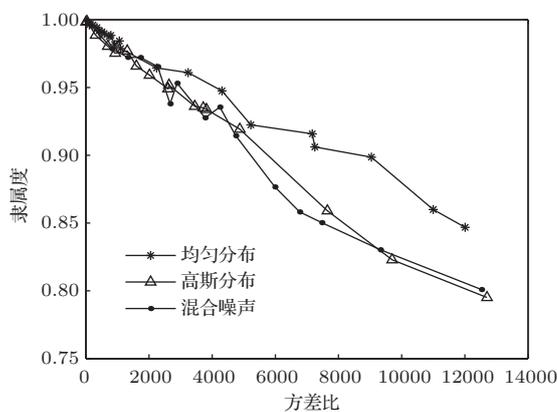


图3 抗噪声能力

5 结 论

由于ANFIS能够以任意的精度逼近 γ 能谱指纹, 其参数保留了相应 γ 能谱指纹的全部特征信息, 并且相关参数对 γ 能谱指纹的差异十分敏感, 因此, 本文提出的以ANFIS参数为识别特征的模糊识别方法具有较强的类型识别能力和个体识别能力.

由于采用同样结构的ANFIS对两套指纹谱进行仿真, 因此, 待识别谱和参考谱的特征参数总是完全相对应的, 从而避免了以全能峰为识别特征方法中因为弱峰丢失或出现假峰而带来的难以决策的问题, 并获得了较高的识别置信度.

ANFIS后件参数实质上反映了 γ 能谱指纹中相应谱段的特征, 而本文方法中所采用的“最小隶属原则”则表明, 只有在所有谱段都“相同”的情况下两套指纹谱才被识别为同一类型或同一个体, 而

只要有一个谱段“不同”，两套指纹谱便被识别为不同的类型或不同的个体。因此，这一模糊识别原则也是使该方法获得较高识别置信度的重要因素。

ANFIS还具有很强的噪声抑制能力，特别是可用作非线性滤波器，对有色噪声也有较强的抑制作用^[9]。因此，通过对 γ 能谱指纹进行仿真，ANFIS不但保留了 γ 能谱指纹的全部特征信息，而且还消除了噪声的干扰，从而使得该方法具有较强的噪声抑制能力。

由于该方法间接地以ANFIS参数为识别特征，因此对被识别对象的敏感信息还具有一定的屏蔽作用，这一特点在核武器核查中具有重要的实际意义^[3,11]。

综上所述，以ANFIS参数为识别特征的 γ 能谱指纹模糊识别方法是有效可行的。

参考文献

- [1] Liu S P, Wu H L, Gu D C, Gong J, Hao F H, Hu G C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2411 (in Chinese)[刘素萍, 伍怀龙, 古当长, 龚建, 郝樊华, 胡广春 2002 物理学报 **51** 2411]
- [2] Wang C J, Bao D M, Cheng S, Zhang A L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5361 (in Chinese)[王崇杰, 包东敏, 程松, 张爱莲 2008 物理学报 **57** 5361]
- [3] Hao F H, Hu G C, Liu S P, Gong J, Xiang Y C, Huang R L, Shi X M, Wu J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3523 (in Chinese)[郝樊华, 胡广春, 刘素萍, 龚建, 向永春, 黄瑞良, 师学明, 伍钧 2005 物理学报 **54** 3523]
- [4] Liu C A, Wu J 2007 *An Introduction of Verification Technology og Nuclear Arms Control* (Beijing: National Defence Industry Press) pp40–58 (in Chinese) [刘成安, 伍钧 2007 核军备控制核查技术概论 (北京: 国防工业出版社) 第40—58页]
- [5] Tian D F, Gong J, Wu J, Hu S D 2005 *The Techniques of Detecting and Analyzing the Characteristics of γ Ray from Nuclear Material* (Beijing: National Defence Industry Press) pp40–170 (in Chinese) [田东风, 龚建, 伍钧, 胡思得 2005 核材料 γ 特征谱的探测和分析技术 (北京: 国防工业出版社) 第40—170页]
- [6] Wang B, Zhang S B, Wu J 2008 *Nucl. Phys. Rev.* **25** 362 (in Chinese) [王冰, 张松柏, 伍钧 2008 原子核物理评论 **25** 362]
- [7] Ren L X, Liu Z G, Quan K B, Liu S P, Hu Y B 2011 *J. Southwest Univ. Sci. Technol.* **26** 54 (in Chinese) [任立学, 刘知贵, 全开波, 刘素萍, 胡永波 2011 西南科技大学学报 **26** 54]
- [8] Wang C J, Zhang A L 2003 *Spectrosc. Spectral Anal.* **23** 1028 (in Chinese) [王崇杰, 张爱莲 2003 光谱学与光谱分析 **23** 1028]
- [9] Lou S T, Hu C H, Zhang W 2001 *Analysis and Design of System Based on Matlab* (Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press) pp110–122 (in Chinese) [楼顺天, 胡昌华, 张伟 2001 基于Matlab的系统分析与设计 (西安: 西安电子科技大学出版社) 第110—122页]
- [10] Yao M 1999 *Processing Technology of Fuzzy Information by Computer* (Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Documentation Press) pp73–100 (in Chinese) [姚敏 1999 计算机模糊信息处理技术 (上海: 上海科学技术文献出版社) 第73—100页]
- [11] Liu S P, Gong J, Hu G C, Zhang J H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3203 (in Chinese)[刘素萍, 龚建, 胡广春, 张剑华 2006 物理学报 **55** 3203]

Fuzzy identification of γ ray fingerprints based on adaptive network-based fuzzy inference system*

Wang Chong-Jie[†] Liu Yuan-Yuan Zhang Bo-Chao Zhang Qian-Ni
Liu Jin-Yan Jin Ge Zhang Min

(College of Physics and Electric Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

(Received 19 January 2014; revised manuscript received 5 March 2014)

Abstract

An identification method of γ -ray fingerprints based on adaptive network-based fuzzy inference system is brought forward. By setting up model and performing simulation, the parameters of the system relevant to the γ -ray fingerprints are extracted as the identification features. The two-dimensional fuzzy set about the identification features is put forward, and the fundamental principle for identification is established. The types and the individuals of nuclear materials are identified successfully with high degree of confidence. The simulation materials as radiation sources are identified with the method, and the performance of the method is studied and discussed. The results show that the method has not only strong capabilities for identifying the types and the individuals of the radiation sources, but also strong de-noising capability and low identification limit, and it can be applied to the nuclear materials safeguard.

Keywords: γ -ray fingerprint, adaptive network-based fuzzy inference system, fuzzy set, fuzzy identification

PACS: 28.41.Te, 29.30.Kv, 28.52.Nh

DOI: [10.7498/aps.63.122801](https://doi.org/10.7498/aps.63.122801)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51101080, E011002).

[†] Corresponding author. E-mail: wang_chongjie@163.com