

文章编号: 1007-4627(2012)03-0272-07

小波分析及神经网络方法在核物理及核工程中的应用

于国梁¹, 侯龙¹, 张笑鹏¹, 王朝辉¹, 康国国¹, 王琦¹, 苏晓斌¹, 张一云²

(1. 中国原子能科学研究院核物理所, 北京 102413;

2. 四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610065)

摘要: 介绍了小波分析和神经网络方法在核物理及核工程领域的应用现状。分别对小波分析及神经网络方法的基本原理进行了介绍, 详细讨论了小波变换中的多分辨分析方法在 γ 能谱平滑以及核电站设备监测等方面的应用, 讨论了连续小波变换在 γ 能谱分析、粒子种类鉴别以及核反应堆安全监测等领域的应用。同时, 还详细介绍了神经网络方法在以上各领域的发展现状。最后, 展望了两种方法在核安全检测、核辐射防护以及核电站实时监控等领域的发展趋势。

关键词: 小波分析; 神经网络; 多分辨分析

中图分类号: TL814; TL76; TL362⁺.1

文献标志码: A

1 引言

随着我国核电事业的飞速发展, 核电站安全问题变得日益突出, 这对核电站运行的实时监测技术提出了更加严格的要求。操作员希望核电站在运行过程中如果出现某种异常或故障, 他们能够及时地确定故障的类型和部位, 然后能迅速、正确地采取应对措施, 以避免事故的发生或将事故的影响减小到最低。此外, 基于对日益严峻的反恐形势的需要, 在机场、车站和海关等人流比较多的场合, 需要对物品中是否含有放射性物质做出快速和准确的判断; 在核武器检查和环境放射性监测等工作中也需要同样的判断。这些问题的解决需要从硬件和软件两方面进行提高和突破。硬件主要指探测器和传感器和电子学线路等硬件装置, 软件主要指后续的数据分析系统。

目前, 数据分析通常采用数据拟合、傅立叶变换和微积分等传统手段, 而以小波分析和神经网络方法为代表的现代数字信号处理技术代表了更为先进的数据分析方法。它们已经在 γ 能谱学、粒子种类鉴别、核反应堆安全监控以及核电厂设备监测等方面应用较为广泛。但是迄今为止, 还未见文献详细而全面地介绍过这些方法在核领域的应用现状。本文首先简单介绍小波分析和神经网络方法的基本

原理, 然后详细讨论和评价这些方法在核领域的应用现状, 最后展望未来它们在该领域的发展方向及趋势。

2 小波变换

小波是具有波动性的函数, 并且它的平均值为零, 也就是它必需满足以下的容许性条件^[1]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0. \quad (1)$$

通过对这一小波进行伸缩和平移可得到一族小波, 它们非常相似, 可用以下公式表示^[1]:

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right). \quad (2)$$

2.1 连续小波变换

通常, 连续小波变换可通过对信号 $f(t)$ 与小波 $\Psi_{a,\tau}(t)$ 进行卷积计算得到^[1]:

$$W_s(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt. \quad (3)$$

连续小波变换将信号 $f(t)$ 中的一维信息变换到二维平面上, $W_s(a, \tau)$ 代表这一变换的结果, 被称为小波系数。其中, a 和 τ 分别被称为尺度和平

移因子，它们分别代表了信号的频率和位置信息，且 a 与频率呈反比关系。因此，在 $W_s(a, \tau)$ 二维平面上可对信号的频率及其位置同时进行定位，这叫做小波分析的时-频局域性。

2.2 离散的小波变换和多分辨率分析

根据抽样定理，通过对尺度和位置(时间)进行二进制抽样，得到了离散小波变换，它用最少的数据表示了尽可能多的信息，可用以下公式表示：

$$D_w(j, k) = \omega(2^j, k2^j) \quad k, j \in Z. \quad (4)$$

小波函数系列并不是一组完备基函数，它与另外一组与其正交的函数系列——尺度函数一同构成了空间的完备基函数，从而构成小波分析方法一个重要实现方式——分辨率分析。图 1 是多分辨率分析方法的示意图，这种方法将信号 $f(t)$ 逐渐分解为低频成份 a 和 高频成份 d ，它们分别代表了信号的轮廓和细节。这一过程可用如下公式表示^[2]：

$$f = a_j + d_j + d_{j-1} + \dots + d_1. \quad (5)$$

通过对高频系数 d 进行量化处理，是小波分析方法实现对信号滤波的基本手段。

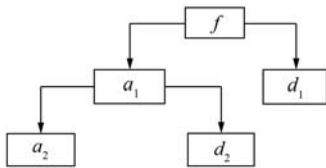


图 1 多分辨率分析示意图

3 人工神经网络算法

人工神经网络(ANN)简称神经网络，是在对人脑组织以及出现在其中的物理化学过程的研究基础上，提出的一种数学模型和算法，用来模拟人类的信息处理和知识获取方法。实践证明这是一种高效的信号或数据处理方法，它较高的学习、纠错、记忆和推理能力。人工神经网络的基本信息处理单元是神经元，神经元由以下基本元素构成：输入 (x) 、网络权值 (ω) 、求和单元、传递函数 f 和输出 y ，可用下式表示：

$$y_k = f\left(\sum_{i=1}^m \omega_{ik} x_i + b_k\right). \quad (6)$$

由大量神经元通过一定的结构组织起来，构成

群体并行式处理的计算结构，则这种结构就是人工神经网络。它的基本拓扑结构如图 2 所示，主要由输入层、隐层和输出层构成。

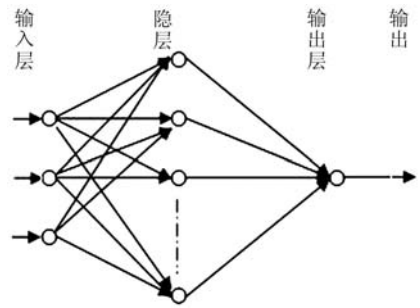


图 2 神经网络基本结构

根据神经网络不同的结构以及学习能力，可将其分成许多种类，如多层感知器(MLP)、具有反传算法的网络(BP 网络)、自组织竞争网络(SOFM)及径向基函数网络(RBF)等。至今为止，在核物理和核工程领域，BP 网络是应用最为广泛的网络结构。它是多层前馈型网络，可以实现由输入到输出的任意非线性映射，它体现了神经网络的精华。

4 γ 能谱学中的应用

4.1 小波分析方法的的应用

小波分析方法的实现方式主要有连续小波变换和多分辨率分析。多分辨率分析方法属于离散小波变换，它可用于对 HPGe 探测器的 γ 能谱进行平滑处理，以消除统计涨落对特征峰的影响。这种方法一般是对谱数据进行两层分解(如图 1 所示)，然后对高频系数进行阈值量化处理，最后对谱数据进行重构得到平滑后的谱数据。2001 年，肖刚等^[3-4]首先采用这种方法对 γ 能谱数据进行了平滑处理。结果表明，该方法能够在保持峰的形状和位置不变的前提下，有效地消除谱中的统计涨落。2005 年，于国梁等^[5]对 γ 能谱的高频小波系数采用分段自适应阈值的方法进行了处理。图 3 显示了 ^{133}Ba 核素在 201 ~ 628 keV 能区的 γ 谱被处理前、后谱形的变化情况。由图 3 可见，小波分析方法显著提高了 γ 能谱中弱峰的检测能力。此外，杨祎刚等^[6]、张佳眉等^[7]、Zhang^[8]、闫学昆等^[9]也分别报道了多分辨率分析方法在消除谱数据统计涨落中的应用。

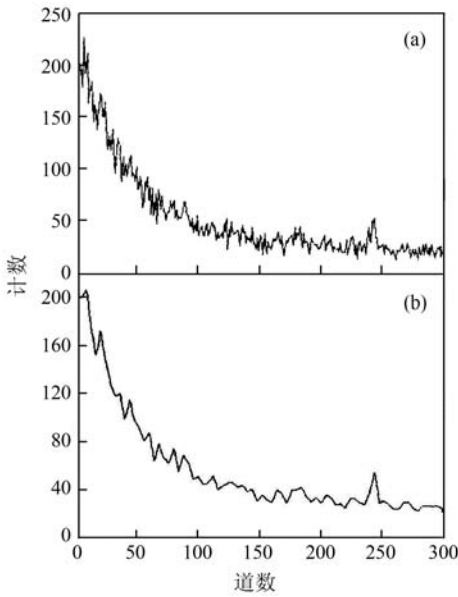


图 3 ¹³³Ba 核素在 201~628 keV 能区的 γ 谱(a)和分段自适应阈值处理后的谱形(b)

连续小波变换在 γ 能谱分析中主要用于特征峰的快速和准确定位, 以实现放射性同位素的鉴别。2004—2006 年, Sullivan 等^[10-11]报道了连续小波变换模极大值方法在这一领域的应用研究结果。结果表明, 模极大值方法可对 NaI 闪烁探测器的低分辨率 γ 能谱的特征峰进行快速和准确的定位。此外, 于国梁等^[12]详细研究了连续小波变换在 HPGe

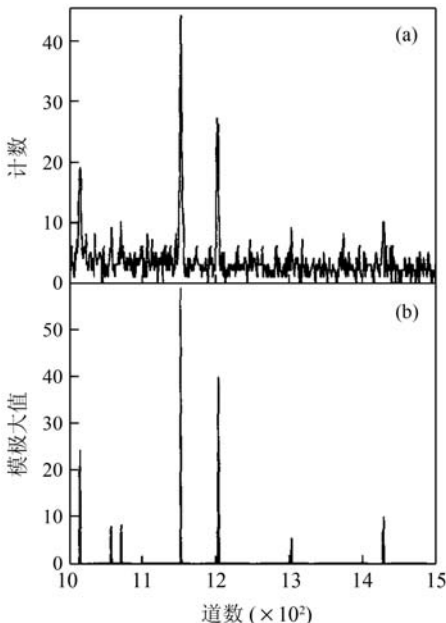


图 4 土壤样品的 γ 能谱(a)和小波分析法的检测结果(b)

探测器获取的 γ 能谱分析中的应用。研究发现, 采

用 bior2.6 小波函数对谱数据进行连续小波变换后, 特征峰小波系数(又称“模极大值”)随尺度逐渐增加, 并且在特定尺度上与峰面积呈线性关系。据此, 发展了一种新的适用于复杂 γ 能谱的快速分析方法。该方法能快速实现对 γ 能谱中弱特征峰的准确定位, 并可以计算峰的强度。图 4 显示了该方法对土壤样品所含¹³⁷Cs 核素的 661 keV(位于谱中 1301 道附近)特征峰的检测结果。由图 4 可见, 小波分析方法成功检测到了该特征峰的存在。

4.2 神经网络方法的应用

由于神经网络具有较高的学习、纠错、记忆和推理能力, 并且有较快的计算速度, 因此它常被用于核材料监控、核安全检查和核保障等工作之中。采用神经网络对在这些工作中获取的 γ 能谱进行分析, 可在较短的时间内获得较准确的结果。其谱分析的基本步骤是: 首先用标准谱数据作为输入, 对网络进行训练; 然后, 用训练过的网络对未知谱数据进行分析, 进而确定样品中核素的种类及活度。1996 年, Vigeron 用平面型 Ge 探测器测量了含有 UO₂ 的样品的低能区 γ 能谱, 用 BP 神经网络分析后实现了对²³⁵U 富集度的准确计算^[13]。Pilato 等^[14]和 Yoshida 等^[15]则先后构造了适用于同轴型 HPGe 探测器 γ 能谱分析的网络系统。1996 年, 清华大学陈泽民等^[16]发表文章指出, 用训练过的神经网络对 BaF₂ 闪烁探测器的 γ 能谱分析之后, 可准确判断出被检测物品中是否含有爆炸物。田东风等^[17]、申慧等^[18]和许鹏等^[19]采用误差反传算法的 BP 神经网络, 通过对核裂变材料中不同核素的 γ 能谱分析得出结论, 神经网络方法能够实现裂变材料及有关核装置的无损检测。2003 年, 四川大学白立新等^[20]采用 Matlab 程序实现了 OLAM 和 BP 两种网络模型的 NaI(Tl) γ 能谱分析方法。表 1 列出了这两种网络模型对含有⁶⁰Co, ⁵⁴Mn 和¹³⁷Cs 3 种核素 γ 能谱的分析结果。对结果对比不难看出, OLAM 比 BP 网络模型更适合用于 NaI(Tl) γ 能谱的谱分析工作。

除了以上应用, Dragovic 等^[21-22]还用神经网络预测测量结果的误差、 γ 能谱的峰本比等重要参数。这种经过训练的网络, 可以根据对误差的要求确定所需要的测量时间, 同时使 γ 谱的峰本比满足统计要求。2006 年, Kucuk 构造了基于 BP 算法的

神经网络系统,这种系统可以准确预测 γ 射线在通过不同厚度和不同材料的屏蔽层后在NaI(Tl)探测器中的能量沉积谱^[23]。2008年,Kucuk采用多层感知器网络(MLP)计算了不同能量的 γ 射线在不同物质中的能量吸收增强因子^[24]。

表1 神经网络分析NaI(Tl) γ 能谱结果

	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn	¹³⁷ Cs
标准值($\times 10^4$ bq)	0.888	0.361	8.23
百分误差/%	3	5	5
OLAM网络($\times 10^4$ bq)	0.915	0.367	8.44
百分误差/%	3.0	1.8	2.6
BP网络($\times 10^4$ bq)	0.745	0.375	8.54
百分误差/%	-16.0	3.9	3.8

5 用于对粒子种类的鉴别

5.1 小波分析在粒子鉴别中的应用

由于发光机制的区别,导致了闪烁探测器获取的不同粒子的脉冲波形也是有区别的,这是在放射性测量中进行粒子鉴别的一个重要依据。而小波分析的主要优势就在于能够根据信号的形状进行有效的特征提取,以实现信号种类的鉴别。因此,用闪烁探测器进行辐射测量时,小波分析方法可用于对粒子种类的快速鉴别。Yousefi等^[25]报道了用这种方法对BC501液体闪烁探测器的脉冲信号进行n- γ 鉴别的研究。结果表明,当采用硬件方法时,鉴别能力 $M=0.95$;而采用基于连续小波变换的方法 $M=1.72$ 。其中参数 M 的定义如下:

$$M = \frac{L}{FWHM_n + FWHM_\gamma}, \quad (7)$$

式中: $FWHM_n$ 和 $FWHM_\gamma$ 分别代表分辨谱中中子峰和 γ 峰的半高宽; L 是两者之间的距离。此外,Yousefi还将这种方法用于由三层不同闪烁体构成的一种闪烁探测器的 γ - β 粒子种类的鉴别,也得到了比较理想的结果^[26]。

5.2 神经网络在粒子鉴别中的应用

神经网络也是进行粒子鉴别的一种不错的方法,尤其是对于闪烁探测器获取的脉冲信号,它具有很好的n- γ 鉴别能力^[27]。2009年,Liu等^[28]详细

研究了神经网络方法对于EJ-301液体闪烁探测器输出脉冲信号的n- γ 鉴别能力。这种n- γ 鉴别系统由2个基本单元组成,采用拟合方法的信号堆积甄别系统和基于神经网络的粒子鉴别系统。通过对模拟及实验数据分析得出结论,这种方法具有较好的鉴别能力,可适用于EJ-301,BC501及NE213等不同型号的液体闪烁体探测系统。Ronchi等^[29]构造了由2个BP神经网络组成的n- γ 鉴别系统,一个用于堆积信号判断,一个用于粒子鉴别。通过比较电荷积分、上升时间以及BP神经网络等不同方法的n- γ 鉴别能力得出结论,在200~600 keV能区,神经网络比前两种方法具有更好的鉴别能力。Liu和Ronchi的研究结果都说明,神经网络方法用于粒子鉴别时具有较好的抗噪声的能力,因此对于低能粒子的鉴别比传统方法有优势。此外,四川大学陈满采用式(8)模拟了液闪探测系统的脉冲信号,信号由不同比例的快和慢成份构成。公式中第2项代表慢成份,其余2项合起来代表信号的快成份,文章详细讨论了在不同 B 值条件下,BP神经网络对于信号的甄别能力^[30]。

$$V'(t) = [-Be^{-t/t_f} - (1-B) \times e^{-t/t_s} + e^{-t/t_{rc}}] \quad (8)$$

由半导体探测器构成的 ΔE - E 探测系统常被用于确定重带电粒子的种类和能量,Iaconomanno等^[31]和Scrimaglio等^[32]通过研究发现,神经网络方法可显著提高系统的数据处理速度及准确度。

6 核工程中的应用

6.1 小波分析在核反应堆分析中的应用

衰减率和中子功率谱主频是表征沸水反应堆稳定性的2个重要参数。至今为止,已经发展了多种分析方法用于估计这2个重要参数,以实现反应堆的实时监控。以加窗傅里叶变换、连续小波变换以及多分辨分析为代表的时-频分析方法是开展这一工作的主要手段。对反应堆的中子功率谱进行时-频变换后,在时-频平面上可以清楚地显示由中子功率谱震荡导致的频率随时间的变化规律,进而可以对反应堆稳定性进行判断。2004年,Tambouratzis和Antonopoulos-Domis首先报道了该方法在核电站实时监控中的应用研究^[33]。2006年,Car-

rera 等^[34]采用了以上 3 种方法对 Laguna Verde 和 Forsmark 核电站在不同操作条件下的功率谱信号进行了时-频分析,并计算了衰减率随时间的变化规律。分析表明,加窗傅里叶变换可给出稳定情况下功率谱的主频,小波分析则可以根据频率的改变迅速检测出功率谱的震荡。2009 年, Carrera 采用同样的方法对总流量信号进行分析,成功检测出了 Laguna Verde 核电站的双稳态流动现象^[35]。Paredes 等^[36]也通过小波分析方法对 Ringhals 核电站在不同操作条件下的中子功率谱进行时-频分析,得出了与 Carrera 一致的结论。

6.2 神经网络在核工程中的应用

目前,国内外已有大量文献报道了神经网络方法在核电站实时监控和故障预测中的应用研究。它主要通过分析核电站的各项参数来实现对反应堆的运行状态及设备的监测,并进行故障的诊断,以便操作员及时和正确地采取应对措施。这种方法采用核电站在发生故障状态下的各项参数训练网络模型,然后用训练过的网络对实际运行的核电站进行实时监控。它几乎不需要任何知识,只是从训练事件中抽取各种故障类型的特征,就可以对故障类型、性质及部位迅速作出判断。Uhrig 等^[37]最早报道了神经网络方法在核电站瞬态辨识中的应用,报道指出这种方法能很早期地对瞬态进行辨识,可给操作员提供足够的时间来采取应对措施。1990 年,美国亚利桑那大学的 Jouse 指出,自适应神经网络在反应堆加热瞬态控制过程中可以控制系统稳定的加热和加压^[37]。2000 年以后,神经网络方法在核电站实时监控中的应用研究逐渐成为国内的热点问题。姚良忠等^[38]先后对这种方法在核电站实时监测中的应用做了详细的报道。喻海滔等^[39]详细讨论了神经网络的基本原理以及在该领域应用神经网络的实现步骤,周刚等^[40]则全面介绍了神经网络在核电站各种设备实时监控中的应用。2006 年,哈尔滨工程大学 Shi 等^[41]采用基于遗传算法的 RBF 神经网络实现了核电站故障类型的监测和诊断,该网络可在 3 s 内对所发生故障的类型做出判断^[41]。

7 展望

由于神经网络需要用标准样本数据进行训练,

因此对于未知的情况,神经网络往往不能做出响应。而小波分析方法需要采用合适的小波函数以及合理的变换尺度,否则,达不到理想的检测结果。因此,不同网络模型相结合、神经网络与小波分析相结合或者二者与其它方法结合可以构成功能更为强大的数据处理系统,这代表了现代数字信号处理技术新的发展方向。清华大学窦伶俐等^[42]和上海交通大学张晓文等^[43]将模糊系统与神经网络相结合用以核反应堆及核电站设备的实时监控。2007 年,刘峰等^[44]及其合作者 Yu 等^[45]用 BP 网络与 RBF 网络构成了复合型网络模型,该模型对没有学习过的核电站故障也能做出响应。此外,小波分析与神经网络结合构成的小波神经网络兼有二者的优点,既能充分利用小波变换的局部化性质,又具有神经网络的自学习能力。因此,这种方法具有较强的逼近和容错能力以及较快的收敛速度和较好的预测效果。将小波分析与神经网络相结合主要有以下两种途径:

(1) 松散型结合,即小波分析作为神经网络的前置处理手段,为神经网络提供输入特征向量。

(2) 紧致型结合,小波和神经网络相融合,小波函数和尺度函数构成神经元。

至今为止,小波神经网络在核领域的应用研究主要是采用松散型的结合方式,但相关文献比较少,还处于刚刚起步阶段。例如,通过对核电站沸腾曲线变化规律的分析,可以确定临界热流量(CHF)和最小模沸腾起始点(q_{\min})这两个参数,而 CHF 是核电站安全分析的一个非常重要的参数。2009 年,Wei 等^[46]研究发现,小波分析和神经网络结合起来对这 2 个参数的预测误差在 10% 以内。此外,白立新等^[20]构造的用于 NaI 探测器的 γ 能谱分析软件,就是由小波分析和神经网络组成的复合系统,神经网络的输入数据经过了小波分析的预处理。

总之,以小波分析和神经网络为代表的现代数字信号处理技术在核物理及核工程领域得到了广泛应用,它们提供了在该领域解决问题的新途径和新方法。这些研究充分显示了现代数字信号处理技术解决问题的优越性,未来它们在核电站的实时监控、核安全检查、环境监测以及辐射防护等工作中必将发挥越来越重要的作用。

参考文献(References):

- [1] HU Changhua, ZHANG Junbo. System Analysis and Design based on MATLAB-Wavelet Analysis[M]. Xi'an, Xidian University Publishing House, 1999: 13-18(in Chinese).
(胡昌华, 张军波. 基于 MATLAB 的系统分析与设计—小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 13-18.)
- [2] FENG Xiangchu, GAN Xiaobing. Numerical Functional and Wavelet Theory[M]. Xi'an: Xidian University Publishing House, 2003: 105-108.
(冯象初, 甘小冰. 数值泛函与小波理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版, 2003: 105-108.)
- [3] XIAO Gang, QIU Xiaolin. Nuclear Techniques, 2001, **24**(2): 85(in Chinese).
(肖刚, 邱晓林. 核技术, 2001, **24**(2): 85.)
- [4] XIAO Gang, LI Deng. Journal of Nuclear Science and Technology, 2004, **41**(1): 73.
- [5] YU Guoliang, ZHANG Yiyun. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2005, **42**(2): 334(in Chinese).
(于国梁, 张一云. 四川大学学报(自然科学版), 2005, **42**(2): 334.)
- [6] YANG Yigang, WANG Rushan, LI Yuanjing, *et al.* Nuclear Techniques, 2002, **25**(4): 241(in Chinese).
(杨祎刚, 王汝瞻, 李元景, 等. 核技术, 2002, **25**(4): 241.)
- [7] ZHANG Jiamei, SHI Quanlin. Atomic Energy Science and Technology, 2005, **39**(4): 349(in Chinese).
(张佳媚, 师全林. 原子能科学技术, 2005, **39**(4): 349.)
- [8] ZHANG Qidao. Meas Sci Technol, 2006, **17**: 731.
- [9] YAN Xuekun, LIU Mingjian. Atomic Energy Science and Technology, 2007, **41**(4): 505(in Chinese).
(闫学昆, 刘明建. 原子能科学技术, 2007, **41**(4): 505.)
- [10] SULLIVAN C J. Wavelet Analysis of Gamma-Ray Spectra. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2004, **1**: 281.
- [11] SULLIVAN C J. Wavelet Analysis of Sodium Iodide Spectra. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, **53**(5): 2916.
- [12] YU Guoliang, ZHANG Yiyun. Atomic Energy Science and Technology, 2008, **42**(11): 984(in Chinese).
(于国梁, 张一云. 原子能科学技术, 2008, **42**(11): 984.)
- [13] VIGERON V, MOREL J. Nucl Instr and Meth A, 1996, **369**: 642.
- [14] PILATO V, TOLA F. Nucl Instr and Meth A, 1999, **422**: 423
- [15] YOSHIDA E, SHIZUMA K, Nucl Instr and Meth A, 2002, **4484**: 557.
- [16] CHEN Zemin, LI Mingtao. Nuclear Techniques, 1996, **19**(8): 449(in Chinese).
(陈泽民, 李明涛, 核技术, 1996, **19**(8): 449.)
- [17] TIAN Dongfeng, XIE Dong, HUO Yukun, *et al.* Chinese Journal of computation Physics, 2000, **17**(12): 71(in Chinese).
(田东风, 解东, 霍裕昆, 等, 计算物理, 2000, **17**(12): 71.)
- [18] SHEN Hui, LIU Zhigui, LIU Suping, *et al.* Computer Engineering & Science, 2008, **30**(8): 57(in Chinese).
(申慧, 刘知贵, 刘素萍, 等, 计算机工程与科学, 2008, **30**(8): 57.)
- [19] XU Peng, WANG Zhe, LI Tiantuo, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, **25**(6): 721(in Chinese).
(许鹏, 王哲, 李天舵. 核电子学与探测技术, 2005, **25**(6): 721.)
- [20] BAI Lixin, XU Jiayun. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, **23**(5): 404(in Chinese).
(白立新, 徐家云. 核电子学与探测技术, 2003, **23**(5): 404.)
- [21] DRAGOVIC S. Nucl Instr and Meth A, 2005, **540**: 455.
- [22] DRAGOVIC S. Applied Radiation and Isotopes, 2005, **63**: 363.
- [23] KUCUK N. Annals of Nuclear Energy, 2006, **33**: 401.
- [24] KUCUK N. Annals of Nuclear Energy, 2008, **35**: 1787.
- [25] YOUSEFI S. Nucl Instr and Meth A, 2009, **598**: 551.
- [26] YOUSEFI S, LUCCHESI L. Nucl Instr and Meth A, 2009, **599**: 66.
- [27] ESPOSITO B, FORTUNA L, RIZZO A. Proceedings of the IEEE Conference on Neural Networks, 2004, **4**: 2931.
- [28] LIU G, ASPINALL M D. Nucl Instr and Meth A, 2009, **607**: 620.
- [29] RONCHI E, SODERSTROM P A. Nucl Instr and Meth A, 2009, **610**: 534.
- [30] CHEN Man, CAI Yuerong, YANG Chaowen, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, **26**(4): 458(in Chinese).
(陈满, 蔡跃荣, 杨朝文, 等. 核电子学与探测技术, 2006, **26**(4): 458.)
- [31] IACONOMANNO C M, TUDISCO S. Nucl Instr and Meth A, 2000, **443**: 503.
- [32] SCRIMAGLIOA R, FINETTI N, D'ALTORIO L, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2004, **524**: 152.
- [33] TAMBOURATZIS T, ANTONOPOULOS-DOMIS M. Annals of Nuclear Energy, 2004, **31**: 2077.
- [34] NUÑEZ-CARRERA A, ESPINOSA-PAREDES G. Progress in Nuclear Energy, 2006, **48**: 540.
- [35] NUÑEZ-CARRERA A, PRIETO-GUERREROB A. Nuclear Engineering and Design, 2009, **239**: 2942.
- [36] ESPINOSA-PAREDES G. Nuclear Engineering and Design, 2007, **237**: 1009.
- [37] UHRIG R E, TSOUKALAS L H. Progress in Nuclear Energy, 1999, **34**(1): 13.
- [38] YAO Liangzhong, MAO Peilin. Nuclear Power Engineering,

- 1995, **16**(1): 30(in Chinese).
 (姚良忠, 毛蓓琳. 核动力工程, 1995, **16**(1): 30.)
- [39] YU Haitao, ZHANG Liangju. Nuclear Power Engineering and Technology, 2000, **13**(1): 28(in Chinese).
 (喻海滔, 张良驹. 核电工程与技术, 2000, **13**(1): 28.)
- [40] ZHOU Gang, ZHANG Dafa, CAI Zhangsheng, *et al.* Nuclear Techniques, 2004, **27**(3): 237(in Chinese).
 (周刚, 张大发, 蔡章生. 核技术, 2004, **27**(3): 237.)
- [41] SHI Xiaocheng, XIE Chunling. Journal of Marine Science and Application, 2006, **5**(3): 57.
- [42] DOU Ling, WANG Ruipian. Computer Engineering and Applications, 2002, **1**: 254(in Chinese).
 (窦伶, 王瑞偏. 计算机工程与应用, 2002, **1**: 254.)
- [43] ZHANG Xiaowen, SHEN Cheng. Process Automation Instrumentation, 2001, **22**(12): 6(in Chinese).
 (张晓文, 沈承. 自动化仪表, 2001, **22**(12): 6.)
- [44] LIU Feng, YU Ren. Nuclear Power Engineering, 2007, **28**(2): 95(in Chinese).
 (刘峰, 余刃. 核动力工程, 2007, **28**(2): 95.)
- [45] YU Ren, LIU Feng. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2010, **12**(1): 1.
- [46] WEI H M, SU G H, TIAN W X, *et al.* Nuclear Engineering and Design, 2009, **239**: 2317.

Applications of Wavelet Analysis and Neural Networks in Nuclear Physics and Engineering

YU Guo-liang^{1, 1)}, HOU long¹, ZHANG Xiao-peng¹, WANG Zhao-hui¹, KANG Guo-guo¹,
 WANG Qi¹, SU Xiao-bin¹, ZHANG Yi-yun²

(1. Institute of Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Applications of wavelet analysis and neural networks in the field of nuclear physics and engineering are reviewed. The principle of these two methods are introduced briefly, and then the applications of multiresolution analysis technique in the smoothing of γ -ray spectroscopy, and in nuclear power plant monitoring are discussed in detail. Applications of the continuous wavelet analysis method in γ -ray spectroscopy analysis, in particle identification, and in nuclear reactor safety monitoring are also talked over. In addition, the applications of neural networks in above fields are introduced. Finally, the trends of the future development for these two methods are prospected.

Key words: wavelet analysis; neural network; multiresolution analysis