

文章编号: 1672-2892(2011)06-0698-05

核部件探测技术算法研究初探

胡世鹏^a, 刘知贵^a, 张活力^b, 任立学^c

(西南科技大学 a.信息工程学院; b.招生就业中心; c.国防科技学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 基于军控核查技术发展和国际核裁军的需求, 针对国外研究的状况和发展趋势, 对当前国内外主要核部件的探测技术及核信号的分析测量方法进行了论述与评价, 探讨核部件的数据信号处理与特征提取分析算法及其发展趋势, 阐述了时间关联分析与符合分析相结合的噪声分析方法, 为进一步探测核部件的存在、质量、丰度等属性提供工作基础与发展方向。

关键词: 核探测; 时间关联; 频谱分析; 宏观噪声

中图分类号: TN911.6

文献标识码: A

Survey on algorithm of nuclear component detection technology

HU Shi-peng^a, LIU Zhi-gui^a, ZHANG Huo-li^b, REN Li-xue^c

(a.College of Information Engineering; b.Admission and Employment Center; c.College of National Defense Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: This article presents the exploration techniques and algorithms of nuclear component, as well as the measurement methods of nuclear signal based on the requirements of international arms control verification and nuclear disarmament. The research status abroad are introduced, including the data processing and the characteristic parameters extraction of nuclear signal, etc. A method of noise analysis about time-dependent technique combined with coincidence analysis is described. The future trend is also predicted. This work can lay a foundation for further exploration of the properties of nuclear components such as presence, quality, abundance, etc.

Key words: nuclear detection; time-dependent; frequency spectrum analysis; macroscopic noise

核技术是现代科学技术的重要组成部分,是20世纪人类文明史上一个重要里程碑,是当代最主要的尖端技术之一,也是社会现代化的重要标志之一。随着国际局势的转变以及核不扩散保障监督系统的不断完善,各核大国都被迫开始进行核裁军,并研究与之相匹配的核查技术以备核武器拆卸与销毁的需要。美国很早就开始了探测核部件属性的研究,20世纪60年代末建立了1 MHz采样率的²⁵²Cf随机脉冲源测量系统,用于实验室测量次临界核部件的瞬发中子衰减常数,现如今采样率已经达到1 GHz。20世纪80、90年代研制了核武器辨别系统(Nuclear Weapon Identification System, NWIS),该系统使用²⁵²Cf源作为主动诱发中子源,采用时域和频域分析方法处理探测数据,提取特征参数,用于含有高浓铀部件的质量、丰度等属性的研究,是美国最早针对铀部件使用区别于 γ 能谱测量方法的时间关联探测技术的研究^[1-2];此外,基于NWIS方法的扩展应用,美国又研发了核材料识别系统,增加了裂变材料属性参数的分析处理和获取功能,利用D-T中子源为激发源,增加3~5路不同数量的中子、 γ 射线探测器用于探测铀部件的裂变粒子信号,使其更加适应未来核部件管制与问责制的核裁军核查活动^[3-5]。

现今,美国橡树岭、洛斯阿拉莫斯、圣地亚国家实验室,英国哈威尔原子能研究所等发达国家的研究机构都致力于核探测技术的研究。国内的核探测技术起步较晚,主要围绕核部件信息系统测量理论、数据获取与处理分析、以及模板测量技术算法等方面。国内相关研究人员利用 γ 能谱分析技术,可在与现有核谱库对比的基础上鉴别核部件的属性;对基于裂变中子源²⁵²Cf的核信息系统进行频谱分析研究,在获得核信号数据后,按数据块进行采样,基于此分块,采用相关估计和功率谱估计,得到所需的功率谱密度比等特征参数^[6]。该工作只是对核探测系统的测量原理进行了初步探索,其信号处理方法及算法有待进一步改进和完善,而且在分析核部件的特征参数、反演核部件质量和丰度等属性方面的研究并未涉及,因此对核部件特征参数的物理意义以及特征属性的识别工作需要进一步的研究。

1 核部件探测技术方法

鉴于国际军控核查与核裁军的迫切需求,美国和俄罗斯在研究核探测技术方法、分析核部件特征信号参数和如何推断核部件特征属性等方面做了大量开拓性的研究,并不断提高其技术的有效性和可靠性。由于核材料具有放射性、对特种射线具有良好的吸收性和可裂变性,因此,可利用灵敏的辐射探测器探测核部件辐射出的中子、 γ 射线,或主动引入中子、 γ 射线诱发核裂变等方法来检测裂变材料的存在及其特征^[7]。下面对一些核探测技术方法作简要介绍。

1.1 符合分析法

符合分析法是目前核保障领域探测核部件特性的常用方法,它是研究2个以上一定时间间隔内先后接连放出或同时放出的粒子相互关联事件的方法。如果只是对中子进行响应分析,它可排除单个中子事件(包括 α, n 、本底中子)的影响,即只对裂变中子(包括自发裂变和诱发裂变)进行分析。核部件的探测,主要是鉴别高浓铀和钚的相关属性,它包含2种方式:无源符合中子分析法(被动法)和有源符合中子分析法(主动法)^[8]。

对武器级钚部件,其同位素发射的 γ 射线能量和自发裂变中子率都很高,每千克钚材料自发裂变中子数约为 $(2.73 \sim 5.46) \times 10^4$ 个/秒,主要来源于同位素 ^{240}Pu 的自发裂变,因此,钚部件的测量通常采用无源方式进行,即利用钚的放射性衰变,直接测量自发裂变过程中产生的粒子^[9-10]。文献[11]指出,美国Los Alamos实验室于1975年就开始研究用无源符合中子法测量含钚核材料中钚的总量,并且研制了多种高计数率中子计数器产品。对于钚部件的探测,技术比较成熟,方法也较多,除了“被动法”之外,也可采用“主动法”或者 γ 射线频谱分析法测量。

与钚部件比较,铀部件的自发裂变中子数和 γ 射线发射强度都比较弱, γ 射线能量也比较低,约为185 keV,比钚少5个等量级,每千克 ^{235}U 的中子发射率为0.312个/秒,每千克 ^{238}U 的中子发射率为14个/秒。铀核发生裂变时,会产生2个或2个以上的裂变碎片,裂变瞬发中子占全部裂变中子的99%以上,而且伴随裂变在约 10^{-14} s的时间内便释放完,而缓发中子延缓的时间从小于1 s到数分钟。由于高密度物质对 γ 射线有很强的吸收屏蔽作用,对中子的贯穿作用影响较小,但是铀的同位素自发裂变发中子很少,采用被动探测比较困难,因而采用“主动法”测量,即外加1个中子源诱发表(^{252}Cf 源或者D-T源),当入射粒子和核材料进行反应后,会产生不同的直射与散射粒子,再用敏感探测器测量生成粒子的时间分布,分析其特性,从而确定铀部件的属性,其原理如图1所示,这种方法的测量置信度较高,判断较准确^[12]。

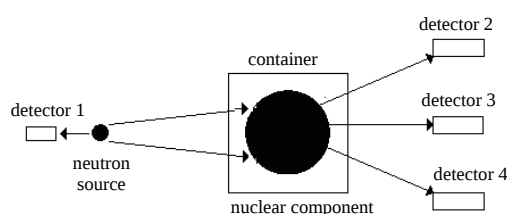


Fig.1 Schematic of nuclear detection
图1 核探测原理图

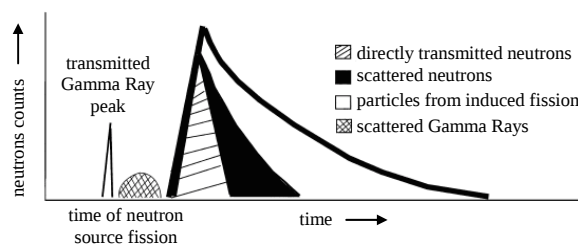


Fig.2 Schematic sketch of induced fission
图2 诱发裂变粒子示意图

1.2 时间关联计数法

当采用外部中子源等放射性同位素源来诱发铀核裂变,通过测量裂变后的粒子(如瞬发中子、 γ 射线、缓发中子等)分析核部件的属性时,核部件裂变后会先产生直穿 γ 射线和直射中子,这些都是源自中子诱发表,稍后是散射 γ 射线和散射中子,最后到达探测器的才是诱发裂变的 γ 射线和中子,当然这些粒子到达探测器的时间会有些许重叠,如图2诱发裂变粒子示意图所示^[4,13]。由于裂变材料的链式裂变反应,裂变粒子往往以时间分布的形式构成核信号脉冲序列,处于同一链上的中子存在相关性且与裂变事件相关联,诱发粒子的入射时间和裂变粒子的发射时间可以通过探测器确定,所以可以分析相关探测器的探测裂变粒子计数来求取铀部件的属性,如图3所示的裂变相关原理图。由此,美国橡树岭国家实验室与Y-12工厂联合发展了时间关联计数法,通过对裂变事件的相关测量,并对采集到的裂变事件的时间序列进行采样分析,建立相关回归方程,从而间接表征铀部件的属性。当然,这种方法也可用来探测钚部件,但钚的特性比铀活跃,没有必要采用外加中子源法。如,一次 ^{252}Cf 源裂变平均产生3~4个中子和6个 γ 射线,外源中子进入铀部件后会产生散射、吸收、诱发裂变,诱发裂变产生的中子又被散射或引起下一代的诱发裂变,裂变所产生的中子、 γ 射线都有不同程度的减弱,到达探测器的时刻就会有不同程度的差异,因此多代裂变后就形成了时间上相关联的裂变序列,如图4链式裂变反应示意图所示^[14-15]。

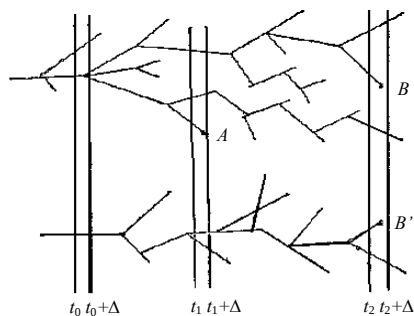


Fig.3 A and B are the same chain of neutron, A and B' are different

图3 A,B 为同一链相关中子, A,B' 为不同链不相关中子

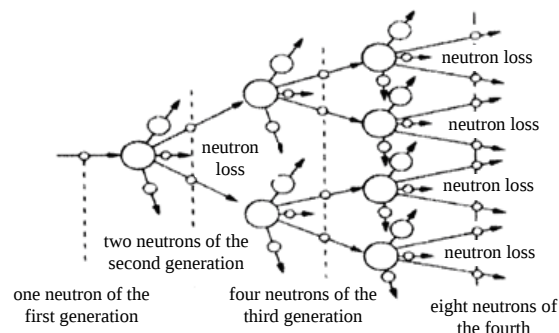


Fig.4 Fission chain reaction

图4 链式裂变反应

1.3 反应堆噪声分析技术

堆噪声分析技术有微观和宏观之分,这种技术可以在不干扰反应堆的状态下,根据反应堆的输出信号围绕其稳态平均值随机涨落的变化来确定反应堆动态参数或者对反应堆进行安全检测。

微观噪声分析技术以测量不连续的单个中子所引起的统计计数作为基础。在核探测方面运用微观噪声分析法探测瞬发中子衰减常数等参数,技术也比较成熟,像Rossi- α 法、费曼(Feynman)的方差平均值比法等;而宏观噪声分析技术则是利用相关分析和频谱分析,以测量连续的大量中子所引起的平均电流(或电压)的统计涨落作为测量基础。在核材料的探测中,通常采用各种核辐射探测器来感受和传递核随机信号,并把它转换成电信号。目前发展较快的数字信号处理技术有时域、频域分析及及时频分析,而时域分析和频域分析中采用的相关分析法和频谱分析法正是宏观噪声分析的主要分析方法。

1.3.1 相关分析法

相关分析主要研究核信号的自相关函数与互相关函数,探测器的自相关函数的分析实际上就是单个探测器的Rossi- α 测量,揭示裂变材料的反应特性;而探测器互相关函数的分析相当于2个探测器的Rossi- α 测量。离散形式的自相关函数可利用式(1)计算:

$$R_x(k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n+m) \quad (1)$$

式中: $x(n)$ 为离散时间的信号采样; m 为滞后时间, $x(n+m)$ 为滞后时间 m 后的信号采样。

当观察点的值 N 为有限值时,相关函数的估计为有偏估计,式(1)可变为:

$$\hat{R}_x(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x(n)x(n+m) \quad (2)$$

当相关函数的估计为无偏估计时,式(1)可变为:

$$\hat{R}_x(m) = \frac{1}{N-|m|} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x(n)x(n+m) \quad (3)$$

实际测量中,通过源探测器与目标探测器之间或者目标探测器之间的相关分析,可以清楚地辨别裂变物质随时间的变化图谱,从而为核部件的属性探测提供基础。

1.3.2 频谱分析法

从数学的角度来看,相关函数和频谱密度互为对傅里叶变换和逆变换;从方法来看,相关分析和频谱分析是等价的。核信号的频域分析主要是研究功率谱密度与互功率谱密度,而功率谱估计又有经典谱估计方法与现代谱估计方法之分。

经典谱估计又分为直接法(周期图法)和间接法(BT法或自相关法)。周期图法就是直接利用傅里叶变换求取功率谱。由于大量用到傅里叶变换,把随机的信号视为确定性的信号处理,所以容易造成频谱的模糊与失真,降低了频谱分辨率,导致谱估计的质量降低。为了改进周期图法的性能,发展了2种修正方法:平滑法和平均法。BT法实际上就是对周期图法的平滑,利用相关函数间接求取功率谱,通过加窗改善周期图法估计的方差性能,但是平滑后的谱性能不佳,偏差变大。而平均改进法的思想是把一段数据分成 N 段,分别求每一段的功率谱,然后加以平均,弥补直接法缺少统计平均的缺陷,例如: Bartlett法、Welch法和 Nuttall法。

实际应用中,还是多以经典谱分析为主,但当能够利用的数据量较小时,就会显现出它在分辨力及稳定性

间的矛盾,于是发展了现代谱估计。现代谱估计可以改善谱估计的质量,主要分为参数模型谱和非参数模型谱,前者有AR(Auto Regressive)模型、MA(Moving Average)模型、ARMA模型、Prony指数模型等;后者有最小方差方法、多信号分类方法等。

1.3.3 方法分析

相关分析是最基本的、有效的随机信号功率谱估计方法。时域分析方法相对简单、直观,频域分析方法相对复杂,但能够获得更为细节的信息,而且减小了本底、噪声、裂变物质自身形状的影响^[16-17]。由于核探测器所获得的数据量大,数据特征信号提取相对复杂,相关分析方法较多,谱密度分析中的方差和分辨率又是一对矛盾体,因此在提取核部件信息时需要探寻一种折衷、高效的分析方法。从文献[1,13,18-20]中美国 and 国内相关单位做的关于多通道、时间关联技术探测铀部件的研究来看,他们通过测量中子裂变时间链,运用经典谱估计方法中的分块相关法结合快速傅里叶变换做频谱分析。考虑到经典谱估计的优劣性,可以探索进一步优化算法,如研究经典谱估计改进法或者加入现代谱的分析方法,分析、对比多种频谱分析方法,提高算法的有效性;结合快速傅里叶变换和小波变换,利用功率谱密度法和宏观噪声分析技术得出核信号粒子在时间上自相关与互相关特征及信号的傅里叶变换频率特性,并作回归分析,构建回归方程,在准确获取核部件的特征参数后,分析裂变产物的特征,从而推断核部件的属性信息以辨别核材料。

国际的核材料探测技术还有很多,通过主动轰击法或被动放射法分析核材料自身放射出来的物质来辨别核材料的技术在核普查中占有十分重要的地位。文献[12]讨论了采用缓发中子探测核弹头的可行性,结果证实可以辨别是否含有铀材料,但对辨别真假核弹头尚有一定局限性,需配合其他方法;文献[21-22]采用中子输运和与时间相关的中子符合概率法模拟核弹头的裂变特征,但是局限于核武器的保密性与结构,此方法需有对应的参照标准,在实际探测中有待进一步研究。根据文献[23]的描述,美国建立的多通道、中子闪烁探测器探测裂变中子系统,从时域和频域分析时间上相关联的随机信号特征参数,以判定核部件的性质,但是根据国内某些学者的研究分析,此系统的核心是纯硬件化的快速傅里叶变换,只能处理高频脉冲,且灵活性较差;近年来,他们也开展了多通道核裂变系统的研究,研制出了不同形式和频率的高速存储分析系统,但未涉及具体如何辨别、反演核材料丰度、质量等属性。

2 结论

综上所述,本文通过对研究现状的分析,将其发展前景与趋势归结为如下几点:

1) 通过上述资料的对比分析,国内研究人员在相关领域的试验方法和技术手段都有待进一步提高,除了利用“模板”测量法和“属性”测量法之外,可以结合符合中子法与时间关联法研究诱发核部件产生的、具有时间关联性的核数据信号,并以合适的特征向量为对象直接分析核部件属性。

2) 从查阅大量的资料来看,虽然国内外都在致力于核探测技术的研究,但至今没有任何研究机构明确提出基于核反应堆宏观噪声分析方法的核部件技术的研究,因此,可以在国外研究的基础上,利用堆噪声分析技术,结合现有的大量谱估计方法,对比它们的频谱性能,研究优化核部件探测技术的算法。

3) 针对铀部件裂变的不活跃性,现在一般都是采用“主动法”诱发铀部件裂变,然而,外界的中子诱发可能也会导致铀部件内部结构以及特性的改变,对铀部件的状态起到影响。因此,探测铀部件属性的方法有待进一步升级,发展无损检测技术更适应未来核探测趋势。

随着核部件探测技术算法实验研究的不断深入,多种核探测技术配合将是实现核部件快速、安全、可靠探测的发展趋势,通过对核信号频谱的有效分析建立裂变物质的属性库,发展便携式、低功耗、无辐射以及远距离的探测能力以辨别核部件,不断提高探测的适用性、可靠性。

参考文献:

- [1] Mattingly J K, Mihalczo J T, Mullens J A, et al. Physical and Mathematical Description of Nuclear Weapons Identification System(NWIS) Signatures[R]. US Department of Energy Report No Y/LB-15.946-R3, 1997.
- [2] Mattingly J K, Valentine T E, Mihalczo J T. NWIS Measurements For Uranium Metal Annular Castings[R]. US Department of Energy Report No Y/LB-15.971, 1998.
- [3] Hausladen P A, Bingham P R, Neal J S, et al. Portable Fast-Neutron Radiography with the Nuclear Materials Identification System for Fissile Material Transfers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B, 2007, 261(1-2): 387-390.

- [4] Mihalcz J T, Matting J K, Valentine T E, et al. Physical Description of Nuclear Materials Identification System(NMIS) Signatures[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2000, 450(2/3):531-555.
- [5] Grogan B R. Estimating the Mass of UO₃ Powder in a Container Using MCNP-PoliMi Simulations of NMIS Measurements[D]. United States: The University of Tennessee, 2008.
- [6] WEI Biao, REN Yong, FEN Peng, et al. Spectrum Analysis of Nuclear Information System Based on ²⁵²Cf Fission Neutron Source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(12):1898-1902.
- [7] HAO Fanhua. Detection of Nuclear Warheads and Protection of Sensitive Information about Real Nuclear Disarmament in the Future[C]// Proceedings of Arms Control and Verification of CAEP in 2003. Mianyang:[s.n.], 2003.
- [8] MENG Yantai, WANG Xiaozhong, ZHU Liqun. Application of Neutron Measurement Technology in Nuclear Safeguards[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, 28(4):707-712.
- [9] Mihalcz J T, Matting J K, Neal J S, et al. NMIS Plus Gamma Spectroscopy for Attributes of HEU, PU and HE Detection[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2004, 213:378-384.
- [10] XIANG Yongchun, ZHANG Chuanfei, ZHANG Jianhua, et al. Simulating Distinguish Enriched Uranium from Depleted Uranium by Activation Method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(6):1380-1385.
- [11] WANG Xiaozhong, JIA Xiangjun, LIU Jiangang, et al. Total Pu Measurement in Material With Passive Coincidence Neutron Count[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1998, 32(3):233-238.
- [12] XIANG Yongchun, XIONG Zonghua, HAO Fanhua, et al. On the Method of Actively Detecting the Depleted Uranium[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(2):376-379.
- [13] Matting J K, Valentine T E, Mihalcz J T. Use of the Nuclear Materials Identification System(NWIS) For Enhanced Receipt Confirmation Measurements at the Oak Ridge Y-12 Plant[R]. U.S. Department of Energy Report No. Y/LB-16.025, 2000.
- [14] LIU Chengan, WU Jun. Topic of Nuclear Arms Control Verification Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.
- [15] DU Ke. Spectral Analysis of the Random Nuclear Signal Information System[D]. Chongqing: University of Chongqing, 2008.
- [16] WANG Xiaoshuang. Application of the Digital Processing Method in Shock Signal Analysis[J]. Information and Electronic Engineering, 2005, 3(3):217-219.
- [17] HE Xiaodong, DING Li. Design of High-speed Data Acquisition System Based on Band-pass Sampling[J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(3):314-317.
- [18] Mihalcz J T. Radiation Detection From Fission[R]. Oak Ridge National Laboratory: ORNL/TM-2004/234, 2004.
- [19] Mullens J A, Hausladen P A, Bingham P, et al. Use of Imaging for Nuclear Material Control and Accountability[J]. Esarda Bulletin, 2008, 38:25-31.
- [20] Mullens J A, Neal J S, Hausladen P A, et al. Fast Coincidence Counting with Active Inspection Systems[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2005, 241(1-4):804-809.
- [21] WU Jun. Numerical Simulation of Nuclear Warhead Detection Technology[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2003.
- [22] WU Jun, ZHANG Benai, Hu Side. Technical Analysis on Verifying Nuclear Warhead by Neutron Coincidence Detecting[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 38(3):200-203.
- [23] REN Yong, WEI Biao, FEN Peng, et al. Design of Compatible Processing and Analyzing System for Nuclear Signals[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(9):1054-1058.

作者简介:



胡世鹏(1986-), 男, 安徽天长人, 在读硕士研究生, 主要研究领域为核探测技术. email: hushipeng123@yahoo.com.cn.

刘知贵(1966-), 男, 四川射洪人, 博士, 教授, 主要研究方向为控制理论、计算机技术及应用.

张活力(1970-), 女, 重庆黔江人, 助理会计师, 主要从事项目成本核算研究.

任立学(1978-), 男, 河北承德人, 硕士, 主要研究方向为计算机网络安全.