

文章编号:1000-582X(2010)12-084-04

²⁵²Cf 裂变中子源实时测量瞬发中子的衰减常数

米德伶^a, 唐跃林^a, 魏彪^a, 任勇^b, 冯鹏^a, 金晶^a

(重庆大学 a. 光电技术及系统教育部重点实验室; b. 通信工程学院, 重庆 400044)

摘要:瞬发中子衰减常数是衡量中子链式反应一个不可或缺的参量。针对核裂变系统对瞬发中子衰减常数测量的实时性要求, 研究了一种基于²⁵²Cf 裂变中子源、利用 PC 平台中子脉冲序列高速实时频谱分析系统的实时瞬发中子衰减常数测量方法。该方法以²⁵²Cf 源信号作为随机脉冲源和起始信号, 利用其中一路探测器通道在高达 1 GHz 采样率下采集获得中子脉冲序列并按多道时间分析器的原理实时进行多道数据转换, 得到核裂变系统的瞬发中子衰减图谱, 再进行指数的最小二乘曲线拟合得到瞬发中子衰减常数。实验结果表明, 利用系统测得的瞬发中子衰减图谱进行单指数最小二乘曲线拟合, 获得了瞬发中子衰减常数为 $1.033 \mu\text{s}^{-1}$, 这为实时测量核裂变系统的瞬发中子衰减常数提供了一种新的途径。

关键词: ²⁵²Cf; 中子脉冲频谱分析; 中子链式反应; 瞬发中子衰减常数; 实时测量

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Real-time measurement of the prompt neutron decay constant based on ²⁵²Cf source

MI De-ling^a, TANG Yue-lin^a, WEI Biao^a, REN Yong^b, FENG Peng^a, JIN Jing^b

(a. Key Laboratory of Opto-electronics Technology & System, Ministry of Education;

b. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Prompt neutron decay constant is a key parameter in neutron action. Due to the real-time measurement demand for prompt neutron decay constant, a measurement method for prompt neutron decay constant is developed based on ²⁵²Cf Source and neutron pulse frequency spectrum measurement system. Triggered and initiated by ²⁵²Cf random neutron source, the pulse from detector is acquired and real-time converted to multi-channel data up to 1 GHz sample rate. The prompt decay constant can be acquired by utilize least squares of single exponential fitting to prompt decay curve based on prompt decay spectrum. The experimental result shows that prompt decay constant is $1.033 \mu\text{s}^{-1}$ and the proposed method is a novel method for real-time measurement of prompt neutron decay constant.

Key words: ²⁵²Cf; neutron pulse frequency spectrum analysis; neutron action; prompt neutron decay constant; real-time measurement

瞬发中子衰减常数是瞬发中子增殖率常数的负值, 而瞬发中子增殖率常数则是表征核裂变系统性的一个本征值, 它是衡量中子链式反应一个不可

或缺的参量。因此, 瞬发中子衰减常数的测量技术及其相关技术成为核临界安全试验技术的重要部分^[1], 而实时进行瞬发中子衰减常数的测量对于现

收稿日期: 2010-07-23

基金项目: 重庆市科委攻关项目(CSTC2009AC3048); 中央高校基本科研业务费联合资助(CDJZR11120006)

作者简介: 米德伶(1958-), 男, 重庆大学教授, 主要从事光电测控与成像技术及系统研究, (E-mail)mideling@163.com。

场快速核查具有重要意义。

瞬发中子衰减常数的测量方法大致有 2 类。一类是测量瞬时引入核裂变系统的大量中子一起产生的衰变,即所谓的脉冲中子源法;另一类是重复观测单个中子裂变链的行为,直到观测了足够多的裂变链,致使所得到的瞬发中子衰减常数有足够的统计可靠性,此法一般统称为噪声分析法,其中,最具代表性的是 Rossi- α 方法^[2-3]。

随着人们对原子核内部特征和规律研究的深入发展,对核辐射和原子核所携带的信息进行测量提出了更高的要求,以便更好地表征核系统性质的本征特性。为此,美国 Oak Ridge 实验室的 J. T. Mihalcz 首先提出了²⁵²Cf 随机脉冲源技术^[4]。随后,约在上个世纪 90 年代中期,J. T. Mihalcz 等人开展了基于²⁵²Cf 随机中子源的核材料识别系统(NMIS, Nuclear Materials Identification System)^[5-11],借助于 NMIS 系统进行了瞬发中子衰减常数、反应性等参数的测量。

采用基于 PC 微机平台的中子脉冲序列的高速、实时频谱分析系统^[12-13]进行数据的高速实时采集(采样率高达 1 GHz),并根据多道时间分析器的原理实时进行数据转换,获得中子衰减图谱。基此进行指数的最小二乘拟合,从而得到瞬发中子衰减常数,在国内率先实现了基于²⁵²Cf 裂变中子源的瞬发中子衰减常数实时测量研究工作。

1 基于²⁵²Cf 测量瞬发中子衰减常数的基本原理

基于²⁵²Cf 的随机脉冲中子源方法是通过测量导入系统的²⁵²Cf 自发裂变中子引起的瞬发中子裂变链的衰减,测量系统的瞬发中子衰减常数。²⁵²Cf 电离室中的²⁵²Cf 源的每次自发裂变,除很小概率不产生瞬发裂变中子外,一般产生一至数个瞬发裂变中子(平均每次自发裂变产生 3.47 个瞬发裂变中子),形成一个弱中子脉冲。该弱中子脉冲的发射时刻是随机的,若其平均有效重复频率远远小于系统的瞬发中子衰减常数,则由 2 个或 2 个以上的自发裂变引发的瞬发中子链重叠的机率非常小,即²⁵²Cf 自发裂变中子在核系统内诱发的裂变链在时间上相互独立,互不产生影响。通常,采用多道时间分析器进行测量,将其将电离室置于核系统旁,1 次²⁵²Cf 自发裂变时,电离室探测 1 个裂变碎片,可以准确地测定裂变时刻,相应地给出²⁵²Cf 自发裂变中子入射核系统的时刻信号,以此作为起始信号触发多道时间分析器。对于裂变链泄漏中子的探测,则采用快响应

中子探测器,以此准确确定泄漏中子入射探测器的时刻,同时用多道时间分析器记录泄漏中子入射时刻分布。

多道时间分析器的 1 次测量的量程 T 由裂变链衰减时间确定^[14]。在 1 次测量时间量程范围内,若无中子信号,达到满量程后,多道时间分析器自动停止,恢复到初始状态,等待下 1 次²⁵²Cf 自发裂变提供的起始信号。若有中子信号,多道时间分析器记录各中子脉冲信号到达的时刻分布,达到满量程后,时间分析器自动停止、恢复,等待下一次起始信号。整个过程重复上千万次,即可获得核系统裂变链泄漏中子数随时间的统计分布,也就是得到了瞬发中子衰减时间分布谱。

根据中子裂变的统计分析,当 1 次²⁵²Cf 自发裂变中子入射核系统时,在该时刻 t 后的 dt 时间内探测到的与入射²⁵²Cf 中子相关的裂变泄漏中子的概率为^[15]

$$P(t) = C\Delta t + Qe^{-\alpha t} \Delta t, \quad (1)$$

其中:

$C = \epsilon_2 \bar{F}$, 表示系统的平均裂变率;

$Q = c_0 \epsilon_2 D_v \frac{k_p^2}{2(1-k_p)l}$, 表示反应堆特性的相关参数。

由于脉冲中子源方法从瞬发中子链的引发时刻就开始测量它的衰减,²⁵²Cf 自发裂变中子源又在系统的某个很小的局部处,所以,瞬发中子衰减的初始部分就表现出很明显的高阶模式造成的瞬变现象。在对瞬发中子衰减的测量数据进行最小二乘拟合时,对后面的时间道部分可以按式(1)的单指数进行拟合。其中,式(1)的右第 1 项为测量本底贡献的,第 2 项代表了瞬发中子衰减项。因此,拟合中可以去掉本底或仅仅选取指数衰减部分即对 $Qe^{-\alpha t} \Delta t$ 进行拟合。而当拟合数据包含较多前面的时间道部分时,应按照双指数函数,即 $A + Be^{-\alpha_1 t} + Ce^{-\alpha_2 t}$,甚至三指数函数,即 $A + Be^{-\alpha_1 t} + Ce^{-\alpha_2 t} + De^{-\alpha_3 t}$ 的函数形式进行拟合。其中,指数绝对值最小的指数函数项表征基本模式的贡献,该项指数的绝对值,即是所测得的瞬发中子衰减常数^[1]。

2 测量结果与数据处理

在基于²⁵²Cf 裂变中子源的 PC 核信息频谱分析系统测量平台中,采用²⁵²Cf 源通道和 1 个测量通道对核材料进行了测量,系统测量的原理如图 1 所示。测量中,²⁵²Cf 快裂变电离室作为随机中子发射源,同时通过探测裂变碎片作为中子发射的起始时刻,一路探测器置于核材料另一端进行探测。两路通道

输出的都是标准 NIM 快逻辑负脉冲信号,高速数据采集卡对输入的 NIM 信号以高达 1 GHz 采样率进行采集、处理。系统可以在最短至 1 ns 的时间仓内判断,当出现中子脉冲的时刻采集的数据记为“1”,没有中子脉冲出现时刻采集的数据则记为“0”,数据构成由“0”、“1”组成的中子脉冲序列。采集开始信号,是由 ^{252}Cf 源通道的裂变碎片给出,系统两路数据采集通道同步精度为 1 ns,由此保证了测量通道的同步实时采集。

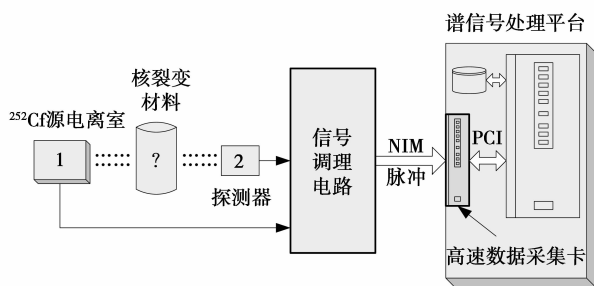


图 1 系统测量原理图

在数据采集过程中,以 ^{252}Cf 源信号为起始信号,将另一探测通道的数据进行实时转换,模拟数据进入多道的方式,即可得到泄漏中子随时间的统计分布。多道数据的转换,如图 2 所示。可见,当 ^{252}Cf 源给出起始信号时,采集数据以此信号作为 1 次进道开始信号,当在道宽 d 内出现脉冲(1 个或几个)时,则在该道内记为 1 个脉冲,而在道宽 d 内没有脉冲出现则记为 0,如此循环采集转换。数据采集到一定长度,可以对统计数据进行拟合,即可得到瞬发中子衰减常数。

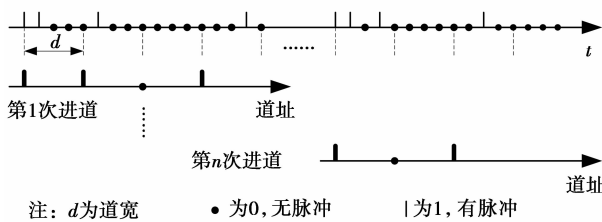


图 2 实时采集数据多道转换原理图

测量中,首先设置多道宽度为 5 ns,数据块(Data block)长度为 1 024,采样率为 1 GHz,共采集 1×10^5 数据块。通过高速、实时采集并经多道转换得到了泄漏中子随时间分布的图谱,如图 3 所示。该瞬发中子衰减谱可以采用单指数进行最小二乘拟合,以此求得瞬发中子衰减常数。由于瞬发中子衰减常数仅与指数有关,因此,为避免高次项和本底的影响,拟合中仅仅选取了指数衰减部分,对应于第

200 道至第 500 道的数据。同时,按照单指数进行拟合,图谱及拟合结果如图 4 所示。拟合的指数函数结果为 $y = 222.6e^{-1.033x}$,由此,可得到瞬发中子衰减常数为 $1.033 \mu\text{s}^{-1}$ 。

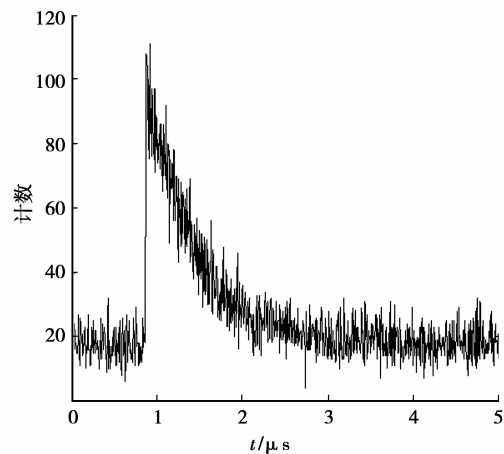


图 3 中子多道测试图谱

需要指出的是,近年来,国内虽已利用 PC 计算机和采集卡组成的数字式多道时间分析器进行瞬发中子衰减常数的测量^[16],但其只能以离线方式进行数据处理,且数据采集卡的采样频率仅为 20 MHz,难以满足高精度实时测量瞬发中子衰减常数之需要。因此,基于 ^{252}Cf 裂变中子源随机中子脉冲频谱实时测量系统,为高速、实时测量瞬发中子衰减常数创造了条件。

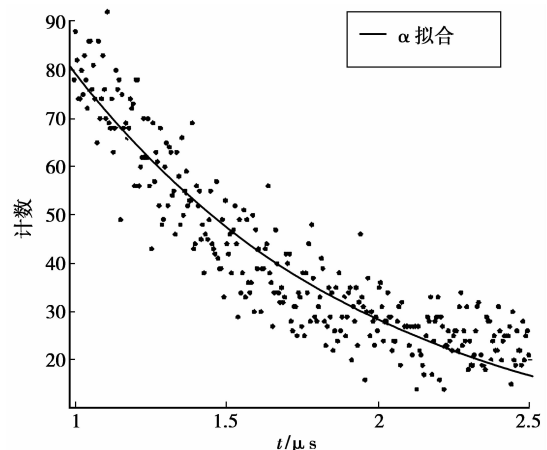


图 4 瞬发中子衰减曲线及指数拟合结果

3 结 论

瞬发中子衰减常数是衡量中子链式反应 1 个不可或缺的参量。利用基于 PC 平台的中子脉冲序列高速实时频谱分析系统,在 1 GHz 采样率下进行核裂变泄漏中子的高速数据采集与分析。以 ^{252}Cf 源

信号作为随机脉冲源和起始信号,利用其中一路探测器通道采集获得中子脉冲序列并按多道时间分析器的原理实时进行多道数据转换,得到核裂变系统的瞬发中子衰减图谱。据此进行单指数最小二乘曲线拟合,可以得到瞬发中子衰减常数。试验研究结果表明,利用系统测得的瞬发中子衰减图谱进行单指数最小二乘曲线拟合,获得了瞬发中子衰减常数为 $1.033 \mu\text{s}^{-1}$, 这为核裂变系统的实时测量瞬发中子衰减常数提供了一种新的途径。

参考文献:

- [1] 阮可强. 核临界安全[M]. 北京:原子能出版社,2005.
- [2] ORNDOFF J D. Prompt neutron periods of metal critical assemblies[J]. Nuclear Science & Engineering, 1957, 30(2): 450-460.
- [3] FEYNMAN R P, HOFFMANN F D, SERBER R. Dispersion of the neutron emission in U-235 fission[J]. Journal of Nuclear Energy, 1954,33(2): 64-66.
- [4] MIHALCZO J T. The use of californium ²⁵²Cf as a randomly pulsed neutron source for prompt neutron decay measurements[J]. Journal of Nuclear Energy, 1974,53(5): 393-414.
- [5] VALENTINE T E, MIHALCZO J T, PEREZ R B, et al. Physics of the ²⁵²Cf-source-driven noise analysis measurement [C/OL] // American Nuclear Society International Meeting on Advanced Reactors Safety, Orlando Florida, June 1-5,1997,112-173[2009-10-12]. http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=486154.
- [6] MATTINGLY J K, MIHALCZO J T, MULLENS J A, et al. Physical and mathematical description of nuclear weapons identification system (NWIS) signatures [R]. Washington: US Department of Energy, 1997.
- [7] VALENTINE T E. Review of subcritical source-driven noise analysis measurements [R]. Washington: US Department of Energy, 1999.
- [8] MIHALCZO J T, VALENTINE T E, MATTINGLY J K, et al. Active neutron interrogation for verification of storage of weapons components at the oak ridge Y-12 plant [R]. Washington: US Department of Energy, 1998.
- [9] MATTINGLY J K, MARCH-LEUBA J A, MIHALCZO J T, et al. Passive NWIS measurements to estimate shape of plutonium assemblies[R]. Washington: US Department of Energy, 1998.
- [10] PEREZ R B, VALENTINE T E, MIHALCZO J T, et al. Determination of the multiplication factor and its bias by the ²⁵²Cf-source technique: a method for code benchmarking with subcritical configurations[R]. New York: US Department of Energy, 1997.
- [11] MATTINGLY J K, VALENTINE T E, MIHALCZO J T. NWIS measurements for uranium metal annular castings [R]. Washington: US Department of Energy, 1999.
- [12] 唐跃林,魏彪,任勇,等. SSE 在中子脉冲序列核信号实时频谱分析中的应用[J]. 核技术,2009,32(1):70-75. TANG YUE-LIN, WEI BIAO, REN YONG, et al. Application of SSE to real-time frequency spectrum analysis for neutron pulse signal [J]. Nuclear Techniques, 2009, 32(1): 70-75.
- [13] 任勇,魏彪,冯鹏,等. 随机脉冲序列的 ns 级时间检测及峰值检测 [J]. 强激光与粒子束,2009,21(7): 1101-1105. REN YONG, WEI BIAO, FENG PENG, et al. Time detection and peak detection for random pulse sequence at ns level[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(7): 1101-1105.
- [14] 宋凌莉,周浩军,金宇,等. ²⁵²Cf 随机脉冲源法测量深次临界瞬发中子衰减常数[J]. 原子能科学技术,2006,40(6):714-717. SONG LING-LI, ZHOU HAO-JUN, JIN YU, et al. Measurement of prompt neutron decay constant for deep subcritical assembly using ²⁵²Cf as randomly pulsed neutron source[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2006,40(6):714-717.
- [15] 罗璋琳,罗安仁. 实验反应堆物理[M]. 北京:原子能出版社,1987.
- [16] 罗皇达,史永谦,朱庆福. 数字式 Rossi- α 测量系统[J]. 核电子学与探测技术,2008,28(3):548-550. LUO HUANG-DA, SHI YONG-QIAN, ZHU QING-FU. Digital Rossi- α measurement system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, 28(3): 548-550.

(编辑 陈移峰)