

# 脉冲中子、伽马探测系统性能表征与设计技术

欧阳晓平

(西北核技术研究所,西安 710024)

**[摘要]** 探测系统是获取辐射场特征信息的核心器件,是实施脉冲辐射探测的关键和技术基础,其性能直接决定测试数据的质量和测试方法的选择。对影响脉冲辐射探测的性能指标进行系统描述、表征是探测系统设计、研制、实际应用和综合性能评价的基础。用于复杂能谱脉冲中子、伽马混合辐射场时间谱、强度谱测量的探测系统,主要性能包括探测灵敏度、时间响应、能量响应、线性电流和中子、伽马分辨能力等指标参数,这些参数的获得与实现,需要根据中子、伽马射线与物质相互作用的基本原理,构建相应的探测结构和技术原理。在设计上,综合权衡能量收集和电荷收集方式选择、几何效率完备和高信噪比结合、信号响应和直照响应分离、探测效率与时间特性兼顾、综合性能与使用可靠性一致等设计原则,综合应用这些原则构成了探测系统设计方法。

**[关键词]** 中子、伽马混合场;脉冲辐射探测;探测系统;设计原理;性能参数

**[中图分类号]** TL81 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)05-0044-10

## 1 前言

认识瞬态核裂变、聚变反应系统发生的剧烈核反应过程及其规律,需要探测其释放的脉冲辐射场特征参量<sup>[1]</sup>。脉冲辐射场诊断学是为获取辐射场重要特征数据,研究这类核反应现象所形成新的学科分支,而探测系统研制和测量方法建立是其技术核心。

原子核之间,原子核与中子、伽马射线等其他粒子之间所发生的各种相互作用将导致原子核内部状态的变化,这种变化通常以发射粒子和射线为特征,这个过程被称之为核反应。这种发生在 $10^{-13} \sim 10^{-12}$  cm 微观尺度的作用过程,无法用常规手段、方法进行观测、感知和描述。辐射探测研究的主要对象是发展和建立获取核反应信息的手段和途径。它涉及稳态、准稳态辐射场和瞬态辐射场两类探测问题。对于稳态和准稳态辐射场,探测系统在设计上需满足待测辐射场粒子能量、计数率、粒子鉴别等测量要求,其工作方式主要是脉冲计数模式。例如,脉

冲电离室、正比计数器、多道系统、质谱仪、磁分析系统等。而对于随时间剧烈变化的核反应过程产生的脉冲辐射场,特别是核能系统核反应过程释放的辐射场通常是包含中子、伽马射线、带电粒子、X射线等多种不同的粒子束和电磁脉冲组成的混合辐射场,此类辐射场探测,需要对粒子种类和所需信息进行筛选,并不畸变地记录核反应发生的时间历程、特定能量粒子数目及其随时间变化规律等,这类探测系统性能需要诸多特征参量进行描述,其设计方法遵从一定原则和规律。诱发这类脉冲辐射场的核反应过程有时在极短时间内完成,中子、伽马射线、电磁脉冲相互混合并互为干扰,中子、伽马强度变化范围很大,能量分布范围宽,探测系统在工作时不能进行人为干预,工作环境恶劣,测试受诸多工程条件限制等,这些特点要求探测系统具备常规核物理实验探测器所不具备的特殊脉冲探测性能,对其性能稳定性和工程应用的可靠性也有更高要求。笔者详细探讨用于这类瞬态核裂变和聚变过程产生的脉冲中子、伽马射线混合场诊断的探测系统的性能特征与

**[收稿日期]** 2009-03-18

**[作者简介]** 欧阳晓平(1961-),男,湖南宁远县人,西北核技术研究所研究员,博士生导师,从事脉冲中子诊断技术研究;E-mail:oyxp2003@ yahoo. com. cn

设计技术。

## 2 脉冲辐射探测系统性能描述

### 2.1 脉冲探测器信号收集方式分类<sup>[2]</sup>

脉冲辐射探测器件就其信号收集方式而言可分为能量收集型和集电型两种。

能量收集型探测器通过收集来自辐射转换体的高能带电粒子在探测介质中沉积的能量转换为电子-空穴对、荧光光子而形成的电信号,其信号携带着待测粒子在辐射转换靶上产生可供探测的次级带电粒子的能量信息,信号幅度与粒子携带的电荷数目无关,探测器件通常具有几个量级的信号放大作用。因此,该类探测器对脉冲射线束的探测灵敏度高,其中子/伽马射线灵敏度可达  $10^{-10} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$ ,并可在  $10^{-10} \sim 10^{-20} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$  范围内进行设计和选择。用于脉冲中子、伽马射线探测的 PIN 半导体探测系统、闪烁体探测器、狭缝外延式高灵敏裂变中子探测系统、夹层式统计增强型大面积厚 PIN 探测阵列都属于这一类。

集电型(电荷收集型或充电型)探测器是指以收集射线在辐射转换体上产生的带电粒子电荷来实现对脉冲射线束探测的探测器件,信号幅度决定于带电粒子携带的电荷数目,与其能量大小无关。脉冲高能中子探测中的无源介质快中子探测器、同轴法拉第筒探测系统、 $n-\gamma$  分辨快中子探测系统、集电型高  $n/\gamma$  分辨聚变中子探测器,脉冲伽马射线探测中的真空和介质康普顿二极管、ICI 探测器等都属于集电型探测器。集电型探测器直接收集射线束与探测器辐射转换靶(体)作用产生的初始带电粒子或其诱发的次级带电粒子的电荷量,而不是其能量沉积产生的电荷量,因而其信号不能反映待测粒子在辐射转换体上产生的,作为探测对象的次级带电粒子的能量信息,信号收集过程一般没有明显的放大作用。这类探测器系统的射线灵敏度相对较低,通常在  $10^{-20} \sim 10^{-25} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$  量级,甚至更低。

### 2.2 脉冲辐射探测系统性能表征<sup>[3]</sup>

脉冲辐射探测系统是将来自辐射场的脉冲射线束(中子、伽马、X 射线等)时间-强度波形转换成脉冲电信号或脉冲光信号波形的装置,记录从探测系统输出的脉冲电信号或光信号,并通过严格的数据处理和综合分析,可以获得脉冲射线束的辐射特征,进而实施对辐射场特性的诊断。理想的脉冲辐射探测系统,在将脉冲射线束时间-强度波形转

换为脉冲电信号的过程中,能够不畸变地再现待测辐射场的全部细节特征,其中包括信号的幅度特性、时间特性等,进而提取诊断所需的特征信息。然而,在实际的科学研究实践中研制的探测系统,很难拥有完美理想的性能,它在实施对脉冲射线束的测量时,总是或多或少地要改变原有脉冲辐射场的一些细节,仅能在一定程度上近似地反映和再现待测辐射场的信息特征。为描述探测器系统在信号探测过程中的这种近似程度和其他响应特性,需要一些特征参数来表征系统的脉冲探测性能。归结起来,这些性能参数主要有:探测器(系统)对脉冲射线束的探测灵敏度、时间响应、测量动态范围、电流线性电荷线性、绝对测量性质、能量响应特性、探测统计性、群探测的兼容性、粒子鉴别(分辨)能力、抗过载能力、抗辐射干扰和抗电磁干扰能力、工作条件依赖性及使用时的可靠性、性能稳定性和快速反应能力等。此外,制造成本也是探测器的一项重要技术指标,在大量使用时必须考虑。表征辐射探测系统脉冲性能的特征量叙述如下:

1) 探测灵敏度。探测器的射线探测灵敏度(或辐射灵敏度)是它最重要的性能指标之一。探测器在脉冲射线束作用下产生的脉冲电信号输出与其对辐射响应的灵敏度有关。探测器对辐射的灵敏度定义为单个粒子在探测器单位灵敏面积中产生的脉冲电信号输出,其国际单位为  $\text{C} \cdot \text{cm}^2$ 。探测灵敏度与探测技术原理、探测器结构、尺寸及射线能量等参数有关。由于线性电流的限制和当前示波器脉冲信号记录最低灵敏度的要求,对不同强度射线束的探测,灵敏度要求不同。低强度脉冲辐射探测,要求探测器具有高的射线灵敏度,而对高强度脉冲射线束的探测,则要求探测器系统具有较低的射线灵敏度,对于给定源强的脉冲射线束的探测,需要根据探测器的线性电流输出,设计适当的射线探测灵敏度。

2) 时间响应。脉冲辐射探测器(系统)的时间响应定义为其对单位  $\delta$  脉冲射线源的输出响应。通常可用脉冲宽度比其响应时间小得多(如 5 倍以上)快脉冲射线源近似作为  $\delta$  脉冲辐射源来获得探测系统的时间响应。探测系统时间性能通常用其对  $\delta$  脉冲射线束响应函数的上升时间  $t_r$  或响应波形半高宽(FWHM)等来表征。

在脉冲射线束测量中,探测器工作在电流模式,被测信号具有一定的时间宽度或时间-强度分布。探测系统将脉冲辐射信号转换为脉冲电信号输出。

要真实反映脉冲辐射源的时间行为特征,而不发生可观测的畸变,就要求探测系统的时间响应比所记录的脉冲辐射波形的时间宽度小得多。探测器的时间性能越好,其时间响应波形的特征量  $t_r$ , FWHM 就越小,因而对测试波形的畸变也越小。因此,探测器的时间响应实际上是对测试信号时间信息畸变大小的一种量度,是决定其是否适合给定时间宽度脉冲辐射特征参数探测的重要参量,是脉冲辐射探测性能的一个重要指标。

探测系统的时间响应一般由射线在其探测单元中输运引起的信号时间弥散和信号在探测系统中的电信号形成时间构成。前者与粒子种类、探测器结构有关,后者主要由探测系统的电容和等效电路常数(RC)等确定。因此,要获得快响应的探测系统,其探测单元的尺寸及电荷收集距离应尽量短,探测器电荷收集极相对于外壳的电容应尽量小。

3) 最大线性电流。探测系统在脉冲射线辐照下,探测灵敏单元将产生脉冲电流输出,记录脉冲电流波形的时间、幅度等参数,并通过换算可获得脉冲射线束的有关数据。通常,探测系统输出的脉冲电信号与辐照的射线束强度在一定范围内具有线性关系,当射线强度增加到足够大时,辐射诱发的电场将导致系统电流输出开始偏离线性关系。此时,探测系统输出的电流定义为系统的最大线性电流输出。在强流脉冲辐射源特性诊断中,信号传输电缆有时长达 1 km 以上,为了扩展其传输带宽,需要对高频同轴电缆组成的传输系统进行频带补偿。这时,传输系统对所输送的脉冲电信号幅度将有较大的衰减,如 30 ~ 200 倍,此时探测器系统大的线性电流输出对脉冲测量的信号记录、测量的动态范围都有重要影响。此时,探测器大的线性电流输出可以提高系统的抗辐射干扰和电磁干扰能力,有助于提高获取信号的质量。显然,探测器系统的线性电流输出越大,测量的动态范围也越宽,获取数据的质量就越高。探测器系统的线性电流与探测器电荷收集原理及收集器件特性密切相关。

4) 能量响应。探测器的能量响应是指其辐射灵敏度与射线能量的依赖关系。在进行脉冲射线测量时,探测器系统工作在电流模式,所获信号是大量不同能量粒子与系统共同作用结果的集体表征,无法像计数型探测那样,单个粒子的能量特征(分布)可通过多道分析器的不同道数指示出来,因而测量信号无法指示单个粒子的能量特征。探测器对单能

脉冲射线束的敏感程度主要通过其灵敏度对不同粒子能量的响应来表示,这种敏感程度可用来实施对射线能量的卡阈测量。例如,在强流脉冲中子探测中,经常设置能量探测阈值,阈值能量以下的中子,在探测器中引起的响应很小或灵敏度很低。探测灵敏度随射线能量的变化关系,就是探测器对射线的能量响应。探测器灵敏度随射线能量变化愈剧烈,表明探测器对射线能量愈敏感。在未知能谱的中子总数测量中,能量响应对测量结果的精度会产生决定性影响。在聚变中子测量中,由于其能谱范围相对较窄且集中(通常其 FWHM < 1 MeV),能量响应的影响相对较小;对于能谱很宽的裂变中子总数测量,探测器的能量响应对测试精度影响很大。因此,高精度的裂变中子总数测量要求探测器系统对中有平坦的能量响应,裂变法是这类裂变中子总数测量较理想的探测方法。

5) 探测统计性。在低强度脉冲射线束测量中,探测统计性对测量数据的质量有直接的影响。射线探测的统计性主要依赖射线与探测灵敏单元作用的概率和电荷收集效率。能量收集型的探测系统,射线在探测灵敏单元产生的每一个带电粒子都会创生许多可供记录的次级带电粒子,例如带电粒子在闪烁体中发射的荧光光子、在 Si - PIN 半导体探测器中产生的电子 - 空隙对,其数目都将远大于射线与探测器作用产生的初始带电粒子数目,它们显著提高了信号的输出幅度,但这并不能增加测量的统计性。对于集电型探测器,可分为两种情况,通常的一种情形,射线在探测单元产生的带电粒子只有一部分能够被电荷收集极所收集,这时收集效率对测量的统计性产生制约。另一种情形,射线在探测灵敏单元产生的初级带电粒子会诱发更多的次级带电粒子,若以收集次级带电粒子电荷作为信号输出,能够显著增加探测器的灵敏度,但这种增加,不会提高测量的统计性。例如,在裂变箔中子探测中,中子在裂变材料中产生的裂变碎片在穿出材料表面时,能够创生出几百个作为信号输出的二次电子。探测统计性与射线作用概率、电荷溢出概率和收集效率的乘积相关,但最大不会超过其与探测灵敏单元作用几率相应的统计性。探测统计性满足测量要求时,可以通过脉冲放大技术来提高探测器的输出信号幅度,扩展其测量下限和动态范围。阵列探测器的设计就采用了这一原理。

6) 群探测的兼容性。探究瞬态核反应过程机

理,需要从不同侧面对反应特性进行诊断,采用多种探测器对反应过程释放的各种射线束参数进行联合测量,即要实施群探测。在采用大量的探测系统对辐射场进行群探测和分析时,须确保各个体探测器在群探测中的兼容性。所谓群探测的兼容性,是指单个探测器在实施对脉冲辐射场的探测过程中,对后续或周围其他探测器系统同时进行辐射探测的影响程度。这种影响主要来源于探测单元对通道辐射场强度、能谱和其他特征参数的改变程度。兼容性良好的探测系统,在实施对脉冲辐射场的探测过程中,对射线束流强度、能谱等辐射源参数的改变很小,甚至可以忽略,前置探测器系统的存在不会明显影响后续探测系统对束流的探测。群探测兼容性的另一特征是,探测器系统暴露在束流通道中的部分,与射线束的散射作用不会对周围其他探测器造成严重的干扰。群探测兼容性要求,同一束流通道可以放置多个(种)探测器以实施对不同束流参数的探测,进入后置探测器的辐射场参数不会因前端探测器的存在而发生明显改变,也不会受到前置探测器散射的干扰。因此,群探测兼容性是脉冲辐射探测器的重要特性。例如,以聚乙烯为辐射转换靶的反冲质子 PIN 半导体探测系统和同轴法拉第筒探测系统等聚变中子探测系统中,通常采用 0.1 ~ 1 mm 厚的聚乙烯材料作为 n - p 转换靶,在探测 14 MeV 中子束时,中子与转换靶的作用总概率一般不大于  $5 \times 10^{-3}$ ,对置于束流后端的探测系统辐射场不会构成显著影响。有的探测器,例如介质型康普顿探测器,其探测原理要求探测介质与束流中 90 % 以上的伽马射线发生作用,因而探测灵敏介质较厚,与通道束流的作用概率接近为 1,这时通道束流特性被改变,其后放置的其他探测器将受到影响。同时,在此类以“强相互作用”作为探测原理的辐射探测器周围进行辐射探测,还需要解决由它引起的散射(散射中子、伽马)造成的干扰。

7) 粒子鉴别能力。核爆炸形成由超强的脉冲中子、伽马射线、X 射线、电磁脉冲构成的混合辐射场。在脉冲中子辐射场诊断中,一般都伴随有强度相当甚至更高的脉冲伽马辐射,为获取脉冲中子的有关诊断信息,探测系统必须具有一定的粒子甄别能力:n/ $\gamma$  分辨能力。同样,在伴随很强中子辐射的脉冲伽马辐射场诊断中,伽马探测器也需具备一定的  $\gamma$ /n 分辨能力。此外,中子和伽马探测系统还需同时具有 n/n'(中子/中子)和  $\gamma/\gamma'$ (伽马/伽马)甄

别能力。例如,在聚变中子探测中,要求探测系统对低能裂变中子不敏感,在伽马射线探测中,要求探测系统对裂变过程产生的总低能伽马射线不灵敏等。探测器的粒子甄别能力常用探测器对不同粒子的探测灵敏度来表示。具有良好 n/ $\gamma$  分辨能力的中子探测器系统,其对中子的探测灵敏度要远高于对伽马射线的探测灵敏度。探测器的粒子甄别能力与所甄别粒子的能量有关,实际测量中对探测系统粒子甄别能力的要求,与辐射场中待测信号与伴随干扰信号的强度比值有关,两者强度差异愈大,测量对探测器的本征粒子分辨能力要求就愈低。

8) 输出电荷线性。输出电荷线性是指,当某时刻照射在探测器灵敏区的射线束流强度很强,并与该时刻探测器输出的电流强度将偏离线性关系(超过最大线性电流)时,探测器输出电流波形面积(输出电荷总量)与脉冲射线束波形面积(入射粒子总量)依然保持正比关系的特性。在探测器输出电荷线性范围,射线强度的增加不影响输入、输出波形面积的线性关系,粒子总数测量结果将不受最大线性电流影响。但随着照射粒子强度的增加,探测器在超强束流照射时达到深度饱和时,探测器内电场不断增强,逐渐对探测器输出产生实质性影响,最终将偏离电荷线性关系。

9) 饱和特性与过载能力。探测器的饱和特性与过载能力是其在探测强辐射时的重要性能指标。在强流脉冲辐射下探测器出现的饱和现象划分为两类:a. 强度饱和。探测器输出电流超过线性电流,其时间响应将明显变慢,此时不能用某时刻的电流值推得该时刻的射线强度,但输出电流波形面积与脉冲射线波形面积依然成正比,不影响波形面积测量结果。强度饱和只是在一定程度上改变探测器的时间响应,所产生的电荷仍然能够输出并保持信号积分面积不变的特性。例如,当 Si - PIN 探测器受强流射线束辐照,其输出信号在一定程度超出它的最大线性电流时(轻微、中度饱和),实验证明,其脉冲输出波形将因电荷收集时间特性的变化而变宽,此时载流子电子 - 空穴对的复合效应并不明显,输出电流积分面积(收集的电荷量)不会明显减小。b. 波形面积饱和。当射线强度使探测器的电流输出远远超出其线性电流时,输出电流波形面积与射线强度波形面积不再满足正比关系时的深度饱和现象,称之为波形面积饱和。

过载能力是指探测器在受高强度脉冲辐射场照

射时,其输出电流波形出现深度饱和之后,当辐射场强度减弱时仍能够保持其灵敏度和辐射响应特性,探测性能不明显变坏的能力,它是指示探测器抗过载程度的物理量。在脉冲波形后沿的测量中,探测器需具有超强的抗过载能力。在极强的脉冲射线束照射下,需考虑探测灵敏介质、器件抗辐照性能变化对探测器性能的影响。

10) 抗辐射与电磁干扰能力。探测器的抗辐射干扰能力主要是指其对待测信号以外的散射中子、散射伽马射线的敏感程度。探测器对散射中子、散射伽马射线愈不敏感,它愈能抵抗来自辐射通道以外散射粒子的干扰。因此,常用探测器系统对辐射的直照灵敏度与信号灵敏度的比值来描述探测器的抗辐射干扰能力。在核试验现场诊断测量中,探测器系统总是处在充满散射干扰的辐射环境之中。因此,常采用探测器系统对辐射的直照灵敏度直接影响测量的信噪比。探测器对散射束流灵敏度愈低,散射引起的干扰就愈小,同时在脉冲辐射场诊断中,探测器系统还同时处在强电磁辐射环境中,因而须具备很强的抗电磁干扰能力。为此用作实际测量的探测系统常被置于一个封闭的金属导体构成的探头箱中。探测器自身抗辐射干扰能力的获得,主要是设计合适的探测结构。将探测灵敏单元置于一个封闭的金属外壳之中,可以实现对环境中的强电磁脉冲的屏蔽。

11) 工作条件依赖性。探测器系统的工作特性是指探测器对工作环境的依赖和工作条件高低的要求。脉冲辐射场诊断探测器,通常工作在特殊而恶劣的环境中,工作过程出现故障无法进行人为干预,对工作条件的依赖性愈大,要求愈高,其使用就愈困难,应用时的可靠性就愈差。例如,有的探测器需要同时提供真空和高压环境才能正常工作,一旦条件没有满足,测量结果就不可用。有的探测器工作时只须提供真空,而不需要高压,而另一些探测器工作时则既不需要真空,也不需要高压,有的需要高真空,有的低真空即可,有的需要几千伏的高压电源,有的则需要几百伏的高压电源等,显示出不同的工作条件依赖性。

探测器对工作条件的依赖性直接影响探测器应用的可靠性,显然,工作条件的提供增加了探测器的使用环节。从概率论的角度分析,正常工作时需要的环境和环节愈多,制约其应用可靠性的因素就越多。例如,现场使用的  $n-\gamma$  分辨快中子探测系统

必须提供高真空和数千伏的高压才能正常工作,PIN 和同轴法拉第筒探测系统,正常工作时也需要提供低真空和高压。如果某一条件在试验零时没有得到满足,那么系统获得的测量信号就无法使用或存在较大的不确定度。无源介质快中子探测器、集电型高  $n/\gamma$  分辨裂变中子探测器、ICI 探测器等,既不需要高压也不需要真空工作条件,显示出很高的可靠性。

12) 性能稳定性与快速反应能力。探测器系统性能的稳定性和快速反应能力是探测器的重要品质。设计高性能、高可靠性和具有快速反应能力的探测器是研制者追求的主要目标。探测器的稳定性取决于构成探测灵敏介质材料的稳定性,包括其物理性能随环境温度、湿度等变化的稳定性。例如,有的探测器中的晶体材料容易潮解,有的材料性能随温度湿度变化明显等。探测系统的快速反应能力是指下列 3 个时间的总和:a. 从提出研制需求到研制完成,再到可提供现场使用所需要的最短时间;b. 探测器物理性能的标定、测试时间;c. 探测器现场准备、安装调试所需要的时间。例如,需要提供真空条件的探测系统在试验现场需要进行较长时间的真空获取、静态保持实验等工作,考查和检验其真空度能否满足现场安装约一个月静态保持的时间要求。

13) 探测器噪声。探测器噪声是指在工作状态下,没有射线辐照时输出电流的大小,是探测器性能的一个重要指标。探测器噪声通常为直流噪声,对脉冲信号探测影响很小。但探测器的噪声水平直接影响探测器灵敏度的标定和性能研究,尤其是在现有中子、伽马射线源强都较低的情况下,对标定精度影响很大。探测器噪声越小,性能标定越容易,在脉冲信号测量时基线抬高也越小。

14) 探测器制作成本。在进行探测器研制和使用时,探测器成本是一个必须考虑的因素。这涉及到性价比和经济承受能力。如果某一类探测器性能十分理想,但其研制或购买价格昂贵得无法承受也无现实意义。显然满足测量基本性能要求的探测器,其制作或应用成本愈低愈好。

### 3 脉冲辐射探测系统性能设计技术

脉冲辐射场诊断探测系统设计,关键是通过某种技术原理和探测结构获得辐射场测量所需的技术性能。技术原理设计上,要综合权衡能量收集和电荷收集方式选择、几何效率完备和高信噪比结合、信

号响应和直照响应分离、探测效率与时间特性兼顾、综合性能与使用可靠性一致等设计原则。技术途径上,有高灵敏度设计的能量收集与几何效率完备性结合;高可靠性设计的件弱工作条件或无工作无条件依赖; $n/\gamma$ 分辨设计的辐射转换元件选择与探测器件分离;线性电流设计的电荷收集与器件选择;超快时间响应设计的电荷收集与超快器件结合。能量响应的反应机理与能量沉积均衡。综合应用这些原则构成了探测系统设计技术。

### 3.1 高灵敏度设计技术

在脉冲辐射探测中,探测系统的高灵敏度设计有三方面作用:

1) 拓展探测下限。探测器系统输出的脉冲电信号幅度与辐射灵敏度成正比。而模拟或数字示波器对输入信号的记录有最小幅度限制,灵敏度过低输出电信号微弱,加之传输系统常有的信号衰减,示波器记录将出现困难。因此,在低强度脉冲射线测量中探测系统的高灵敏度设计在保证测试信号有效传输和记录条件下可以拓展射线强度测量下限。

2) 拓展单个探测器的量程范围。例如,在输出信号分路后,采用单信道放大技术提高探测灵敏度,利用探测器最大线性电流输出,可以使单个探测器获得最大的测量动态范围。

3) 获得高信噪比。在脉冲辐射探测中,输出信号由两部分组成:a. 通过预留辐射通道到达探测系统的源射线粒子束,它们是待测信号;b. 来自辐射通道以外的散射粒子与探测器作用引起的直照本底,是需要去除的干扰成分。二者都将汇入输出信号之中,高的信号灵敏度能够提高输出信号的信噪比,获取高质量的数据。

实现高灵敏度有如下途径:

1) 能量收集与几何效率完备性相结合。决定探测系统灵敏度有多种因素,但起决定作用的主要有两种:a. 信号收集方式。能量收集比电荷收集探测模式具有更高的灵敏度。在满足其他探测性能要求的前提下,能量收集型探测器件具有数个量级的信号放大作用。图1为反冲质子探测系统的原理图。在聚乙烯辐射转换靶和其他几何条件一定时,采用能量收集型Si-PIN半导体探测器、CVD金刚石薄膜探测器或闪烁体探测器等作探测器件,其灵敏度可在 $10^{-14} \sim 10^{-20} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$ 范围内变化,选择电荷收集型同轴法拉第筒作探测元件收集质子电荷,其灵敏度在 $10^{-23} \sim 10^{-25} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$ 变化。因此获得

高灵敏度的途径之一是采用能量收集的探测方法或器件。b. 几何完备性。脉冲中子、伽马射线探测器分别有辐射转换器件和信号探测器件。它们有的相互独立,有的二者合一或紧邻。采用辐射转换体与探测器件分离的探测结构,其优点是信号探测器件可以偏离辐射通道,不受通道束流直照,测量信号质量高。但不足之处是粒子数目受几何因子 $1/4\pi R^2$ 衰减,灵敏度与二合一或紧邻结构相比要降2~5个量级,同时需要为反冲质子、电子飞行提供真空条件。反冲质子、电子在辐射转换器件和探测器件间飞行会出现时间弥散,影响系统的时间响应。而对于辐射转换器件和探测器件二者合一的探测结构,则不存在几何衰减,即具有待测粒子接收几何的完备性,很小的飞行时间弥散可实现快的时间响应,不足之处是探测器件在辐射通道中要受到束流的直接照射,干扰不可避免。裂变箔探测器, $n-\gamma$ 分辨快中子探测器、无源介质快中子探测器都是这种结构<sup>[4-6]</sup>。由于具有信号收集的几何完备性,因而这些探测系统的灵敏度比反冲质子法拉第筒探测系统要高2~3个量级,时间响应可达亚纳秒级( $10^{-10} \text{ s}$ )。由此可见,在探测技术原理建立中,器件分离的测量模式能够使探测器件不受束流直照,器件不易损坏,但灵敏度因几何衰减而降低;辐射转换器件与信号探测器件二者合一或紧邻的探测结构,能够获得高的探测效率和更快的时间性能。但需要解决直照干扰问题。它们各有优点和不足。如果能够将二者完美结合起来,将是较为优化的设计了。

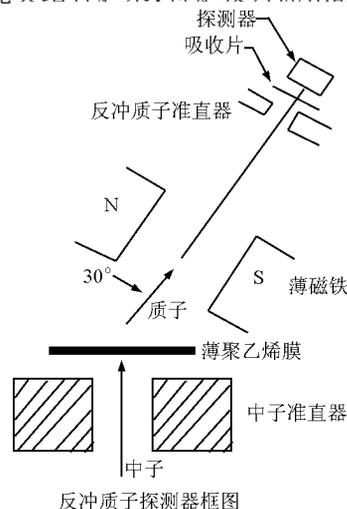


图1 反冲质子探测系统原理图( $30^\circ$ )<sup>[4]</sup>

Fig. 1 The schematic diagram of a recoil proton neutron detection principle

注:也可选用 $35^\circ, 45^\circ$ 等角度

能量收集与接收几何完备性相结合设计原则应用举例。在狭缝外延式高灵敏冲裂变中子探测系统设计中基本实现了能量收集与几何完备性的结合。外延式狭缝探测结构如图 2 所示,采用大面积 Si - PIN 半导体探测器收集中子在<sup>235</sup>U 裂变靶产生的裂变碎片能量,以每个碎片平均 50 MeV 的能量计算,其在 PIN 探测器中产生的电子 - 空穴对数目约为 10<sup>7</sup>,采用狭缝准直结构,避免了探测器受束流直照,同时,裂变靶到探测器的距离约 1 cm,几何衰减较小,实现了能量收集与几何完备性的有机结合。国外的裂变箔探测结构<sup>[4]</sup>具有几何完备性,但采用电荷收集方式,尽管每个碎片穿出材料表面能够产生 200 ~ 300 e,但其裂变中子灵敏度比狭缝外延式高灵敏裂变中子探测系统低 4 个量级。裂变伽马探测器(原理见图 3)通过探测中子在<sup>238</sup>U 材料中产生的裂变伽马来实现对中子的探测,其探测过程通过两次辐射转换:中子转换为伽马射线,伽马射线转换为电子,以收集电子电荷作为探测信号。伽马穿透能力强,因而<sup>238</sup>U 材料可以较厚,伽马转换系数和几何效率高,但由于采用电荷收集而不是能量收集的信号探测方式,其总中子灵敏度与裂变箔探测器相当,而这类探测器还要通过几何结构设计抵消来自通道内强流伽马射线的干扰,实现高 n/γ 分辨非常困难。狭缝探测系统经过结构优化,其 n/γ 分辨最高可达 30 倍以上,同时实现高的中子灵敏度和 n/γ 分辨。

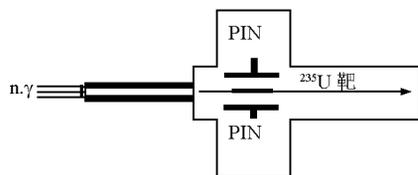


图 2 狭缝外延式高灵敏裂变中子探测系统设计原理图<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of a high sensitive neutron detector system with a lead slot collimator

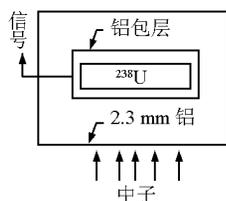


图 3 裂变伽马探测原理示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of a fission gamma - ray detector

2) 信号探测与放大器件相结合。获得高灵敏度还有另外两条途径。a. 在闪烁探测器设计中,选择发光效率高的闪烁体材料与不同放大倍数的光电器件(光电倍增管和光电管)匹配,可以构成不同灵敏度的探测器,光电器件放大倍数最高可达 10<sup>7</sup> 以上,但信号放大不改变测量统计性。b. 在信号输出端直接与宽频低噪声脉冲放大器耦合,这类方式同时适合于电荷收集型和能量收集型探测器。在信号输出端接入放大器,可在满足测量统计性要求的情况下,大幅度提高探测器的灵敏度。如果在测量中采用单信道放大方式,示波器可记录的探测器输出电流可从毫安量级下降到几个微安,探测器的可测强度范围也相应向下拓展 100 倍甚至更多。

### 3.2 平坦能量响应设计技术

核反应过程释放的粒子数目可用于研究核反应过程的放能,探测器对射线束平坦的能量响应是获得高精度粒子数目数据的基础。

在脉冲辐射探测中,探测器工作在电流模式。无论是能量收集型还是电荷收集型探测方式,探测器都不具备对入射粒子能量的分辨能力,裂变中子和伽马射线能量分布在 0 ~ 15 MeV,不同能量的粒子在探测器中产生的幅度差别有时非常大,在强度测量中不可能做到测量结果完全与入射粒子能量无关,实现真正意义上的“数个数”。例如,在有机闪烁体作为辐射转换器件构成的探测器中,一个 500 keV 的中子和一个 14 MeV 的中子在其中产生的信号幅度相差达 100 多倍,而脉冲辐射探测中无论是粒子数目的绝对测量还是射线能谱的相对测量,其结果都是某时刻粒子数目(强度)随时间的变化曲线,其实质是数单位时间粒子的数目,因而要求探测器对不同能量粒子输出的信号幅度相同,即其比值应为 1:1,而不是 1:100,否则测量结果将出现很大偏差。显然,脉冲裂变中子、伽马辐射场诊断的难度之一是对能量分布在 0 ~ 15 MeV 的裂变中子、伽马射线,通过何种机理使得其能量相差几倍甚至几十倍、上百倍的粒子在探测器中产生的信号幅度基本相同。这种采用与能量相关的探测方法(器件)要求获取与能量不相关的测量结果,即射线数目的绝对测量技术已成为脉冲辐射探测机理研究和探测器件研制的永恒主题。但探测器在脉冲工作状态时,其灵敏度对能量响应越不敏感(或能量响应越平坦),测量结果与实际值偏差越小,数据质量越高。

1) 利用核反应机理。在辐射转换过程中选择合适的核反应,并基此选择探测器件可以获得较为平坦的能量响应。例如,在裂变中子探测中,选择裂变反应作为辐射转换过程,如选择 $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{237}\text{Np}$ , $^{231}\text{Th}$ 作为裂变材料,其在一定能区裂变截面随能量变化相对较小,采用能量收集方式探测中子在上述裂变材料中诱发的裂变碎片能量,可以使探测系统获得较平坦的能量响应。

2) 研制对射线能量响应不敏感的探测器件。在伽马射线和 X 射线探测中,选择合适的探测器件可以使探测器在较宽能区获得较平坦的能量响应。例如,在伽马射线测量中,选择一定几何结构的碲锌镉(CZT)探测器,其在 0.5 ~ 14 MeV 能区其灵敏度变化小于 15 %<sup>[8]</sup>;在闪烁体与光电探测器构成的探测器中,采用不同厚度的 ZnO 作辐射转换体,在几十到几百 keV 能区能够获得较平坦的能量响应<sup>[9]</sup>;采用 0.1 mm 厚的有机薄膜闪烁体作为辐射转换元件,可以明显改善 0.5 ~ 3 MeV 裂变中子能量响应等<sup>[10]</sup>。

3) 辐射转换与探测过程能量响应互补。通常,脉冲射线探测中,辐射转换过程和探测过程均随能量变化,此时,可采用两过程相互补偿的方式实现较平坦的能量响应。例如,用于伽马射线探测的电子散射式闪烁探测器,其设计采用补偿方式<sup>[11]</sup>。不同能量的伽马光子在辐射转换靶上产生康普顿散射电子的几率、能量和角分布都不同,此时,选择一定厚度的闪烁体作为探测器件,使高能伽马和低能伽马产生的电子在闪烁体中沉积的能量和基本相同,进而获得了 0.5 ~ 4 MeV 较为平坦的能量响应。

### 3.3 超快时间响应设计技术

时间响应反映探测器的脉冲特性,探测器良好的脉冲特性来自于结构设计和器件选择。

1) 辐射转换与探测器件二合一原则。脉冲辐射探测有两个过程:射线转换和射线探测。中子、伽马和 X 射线都是非带电粒子,探测过程中首先需将其转换为质子、裂变碎片、电子带电粒子。探测来自辐射转换体的带电粒子,如果辐射转换器件与探测器件二者合一,或者二者紧联,这样探测过程不存在明显的带电粒子飞行时间弥散,同时,对探测器外壳和探测芯子结构进行适当设计,使其对地电容不影响信号输出的时间特性即可。探测系统的时间响应实际上分为两部分:a. 射线束及其产生的带电粒子在探测介质中的飞行时间弥散引起的时间过程。b.

信号形成时间。采用这一原则设计的电荷收集探测模式的无源介质快中子探测器,高  $n/\gamma$  分辨集电型聚变中子探测器都具有亚纳秒时间响应,而原有反冲质子同轴法拉第筒探测系统,由于带电粒子从辐射转换器件到法拉第筒探测器件的飞行时间弥散达 1 ns 以上,很难实现亚纳秒的时间响应。对于能量收集型探测器件,例如 Si - PIN 探测器,由于其信号形成时间相对较慢,不如电荷收集型探测器件时间性能优异。为了满足快信号探测的需要,通常需要缩小探测器件的表面积以减小器件电容,但此时的灵敏度和探测效率将大幅减小。

2) 超快器件耦合原则。采用超快闪烁体 + 超快光电器件构成的辐射探测器,其时间响应也可以达到亚纳秒量级。但超快闪烁体通常荧光转换效率较低,若直接放置在辐射通道使用,光电器件的直照响应会影响探测器的信噪比。对于这类光电转换式脉冲辐射探测,由于光子不存在飞行时间弥散,可以将探测用的光电器件设计在偏离辐射通道的位置上。

3) 研制超快探测器件。研制超快探测器件可以获得良好的脉冲响应。例如,研制具有高探测效率和超快时间响应的 ZnO: Ga, ZnO: In 无机闪烁体,通过吸收或反射等方法去掉  $\text{Ba}_2\text{F}$  闪烁体中的慢成分等,可以获得亚纳秒脉冲探测器件。

### 3.4 本征 $n/\gamma$ 分辨设计技术

$n/\gamma$  分辨设计是用于混合场中子、伽马探测器设计的重要方面。高的  $n/\gamma$  本征分辨能力能够在探测时对中子和伽马信号进行甄别和选择。

获得高本征  $n/\gamma$  分辨能力,对于电荷收集型和能量收集型探测器有不同的设计方法,也有共同的途径。对于电荷收集型探测器,可采用信号抵消分辨结构,而对于能量收集型探测器,采用材料与结构参数选择、偏离辐射通道和磁偏转等设计技术。

1) 偏离辐射通道设计。在聚变中子反冲质子同轴法拉第筒和 Si - PIN 半导体探测系统设计中,采用偏离辐射通道 ( $45^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 20^\circ$ ) 接收反冲质子,束流不能直接照射在探测元件上,采用磁场清扫伽马射线在聚乙烯靶上产生的康普顿电子,使之不能到达探测元件,而高能质子则不受磁场影响,从而可获得高  $n/\gamma$  本征分辨能力。

在用于脉冲伽马探测的散射式闪烁探测器设计中,在偏离康普顿散射靶某个角度用薄闪烁体接收电子,这种设计,使得中子在靶上散射产生的散射中

子在薄闪烁体中沉积的并转换为荧光能量远低于康普顿电子,进而实现高的  $n/\gamma$  分辨。

2) 干扰信号抵消结构。集电型脉冲辐射探测器可采用干扰信号抵消结构设计实现对混合场干扰粒子的甄别。集电型聚变中子探测器采用反冲质子卡阈方法,以收集中子在辐射转换靶上产生的高能反冲质子及其诱发的二次电子电荷为探测原理。束流中的伽马射线在电荷收集极上会引起电子发射并接收来自前后端介质发射的电子,它们产生的输出信号正负相消,显然这种抵消作用只存在于电荷收集型探测器中。通过介质结构参数选择可使前后介质发射的,到达电荷收集极电子和其发射的电子数目基本相同,进而实现对伽马射线的抵消作用和  $n/\gamma$  分辨。无源介质快中子探测器和  $n-\gamma$  分辨快中子探测器均采用这一方法,可获得 10 倍左右的  $n/\gamma$  分辨能力。在此基础上,如果能够同时提高探测器的中子灵敏度,就可获得更高的  $n/\gamma$  分辨,集电型高  $n/\gamma$  分辨聚变中子探测器采用多灵敏探测单元作为探测介质,各探测单元输出的中子信号相互叠加,聚变中子灵敏度提高一个量级左右,并通过  $n/\gamma$  抵消的系统结构设计,其  $n/\gamma$  分辨本领可大于 100 倍<sup>[12]</sup>。

3) 探测材料与几何参数选择。对于能量收集型脉冲辐射探测器,探测介质各部分干扰信号输出极性相同,无法相互抵消,此时则需根据射线与物质的相互作用机理,选择探测器材料及其几何参数。例如,闪烁薄膜中子探测器采用有机闪烁体来实现对中子的探测。为消除伽马干扰,根据反冲质子和康普顿电子在有机薄膜材料中的输运和发光特性,选择薄膜几何实现  $n/\gamma$  分辨。薄膜厚度取决于辐射场中子和伽马射线能量。在裂变中子本底下探测低强度伽马射线强度时,选用夹层式厚 Si - PIN 探测阵列,其机理是利用<sup>28</sup>Si(n,p)<sup>28</sup>Al [ $E_{th} = 3.86$  MeV],<sup>28</sup>Si(n, $\alpha$ )<sup>25</sup>Mg [ $E_{th} = 2.66$  MeV]反应的阈值特性,在裂变能区实现对中子的  $n/\gamma$  分辨<sup>[12]</sup>。脉冲伽马射线探测中采用无机闪烁体探测器和非含氢物质,也是基于此原理。

### 3.5 高阈值设计技术

在脉冲裂变中子和聚变中子探测中,有时需要探测某一能量以上的束流信号,因而要求探测系统具有一定的卡阈能力。尤其是在聚变中子时间谱测量中,需要通过卡阈来剔除裂变中子和散射中子对测量的干扰。在裂变中子测量中,有时需要获得某一能量以上的中子波形。设计这类探测器主要有两

种方法:阈能反应和吸收片卡阈。而在伽马射线探测中,一般较难进行吸收片的阈值测量,但在高能伽马探测中,采用契伦柯夫效应,实施卡阈测量<sup>[13]</sup>。

1) 阈能反应卡阈法。在中子探测中,可以通过反应阈值剔除阈值以下低能中子对测量信号的干扰。例如,在裂变法中子探测中,常采用<sup>237</sup>Np(n,f) [ $E_{th} = 0.4$  MeV],<sup>238</sup>U(n,f) [ $E_{th} = 1.5$  MeV]等核反应过程消除束流中低能中子和周围散射低能中子对测量结果的影响。

2) 吸收片卡阈法。采用吸收片卡阈消除低能中子影响,是脉冲聚变中子探测的基本方法。这类探测系统利用(n,p)反应产生反冲质子,在偏离束流方向的某一角度 $\theta$ 上,设置卡阈吸收片(一定厚度的 Au 或 Al 片)滤掉低能部分,而后反冲质子信号由能量收集型或电荷收集型探测元件收集。但在偏离束流方向吸收卡阈,其阈值通常为 7~10 MeV。实施高卡阈则需要 0°方向,采用厚吸收片,或者蜂窝准直器+厚吸收片可以实现高卡阈测量。

## 4 结语

笔者较为系统地给出了探测器性能的描述,这些描述为评价探测系统提供了参考。同时给出了获得某些性能可能采用的设计技术,探测系统设计实践性、综合性很强,这里仅举一些例子。在探测技术原理设计上,采用能量收集还是电荷收集方式,不仅与灵敏度相关,还涉及脉冲时间响应,因为通常,电荷收集灵敏度低但其脉冲响应性能优异,需要平衡二者关系;同时,获得信号收集几何效率的完备往往探测器件会被束流直照,如何避免直照,获得高信噪比,将信号响应和直照响应分离,探测效率与时间特性兼顾、综合性能与使用可靠性一致等需要掌握的设计技术。笔者提供了一些设计技术和原则,综合应用这些技术、原则构成了探测系统设计方法。

严格说来,不同性质的辐射场只有采用相适应的探测系统才能实施准确测量,获得高质量的数据。因此,在探测器设计中,根据射线与物质相互作用的基本原理,待测辐射场性质,例如脉冲的时间特性、能谱特性、强度特性和测试工程条件,综合运用一些基本的设计技术,可以研制出满足辐射场测量要求的、性能优良的探测器或系统。脉冲辐射场的复杂性和绝对测量要求,为我们不断探索新的原理提供了可能。脉冲辐射探测器研制是一项原创性的工作,探索性强,研制完全满足复杂辐射场诊断技术的

探测系统,仍需探索新的探测技术原理,研制新的探测器件。

#### 参考文献

- [1] 杜祥琬,主编.核试验诊断理论[M].绵阳:中国工程物理研究院,1992
- [2] 阿利比科夫 3 A 等.脉冲电离辐射探测器[M].北京:原子能出版社,19832
- [3] 欧阳晓平.脉冲辐射探测技术[J].中国工程科学,2008, 10(4):44-552
- [4] Ebert P J. A Survey of Nuclear - Explosive Prompt Diagnostics [R]. UCRL ~ 537242
- [5] 欧阳晓平,黄 豹,曹锦云. n -  $\gamma$  分辨快中子探测系统及应用技术[R],北京:原子能出版社,1997
- [6] Ouyang Xiaoping, et al. A charge - collection method for measurements of pulsed fast - neutron flux[J]. Nuclear Instruments and

- Methods in Physics Research. 2002, A 481:493 - 501
- [7] 欧阳晓平,李真富,霍裕昆.狭缝外延式高灵敏裂变中子探测系统[J].物理学报,2005,54(10):4643-4647
- [8] 潘洪波.碲锌镉探测技术研究[D].西安:西北核技术研究所,2008
- [9] 刘金良.蒙特卡罗方法在探测器研究中的应用[D].北京:清华大学,2008
- [10] 欧阳晓平.低强度脉冲裂变中子探测技术研究[D].上海:复旦大学,2002
- [11] 夏良斌.基于散射电子的脉冲伽马闪烁探测技术研究[D].北京:清华大学,2008
- [12] 欧阳晓平,李真富,霍裕昆.具有统计增强效应的(CF<sub>2</sub>)<sub>n</sub>-PIN 夹层探测阵列[J].高能物理与核物理,2006,30(7):704-708
- [13] 胡华四,等.脉冲  $\gamma$  射线测量技术[M].西安:西北核技术研究所,1999

## Detectors for pulsed neutron and gamma-ray measurement

Ouyang Xiaoping

(Northwest Institute of Nuclear Technology ,Xi'an 710024 ,China)

[Abstract] Detection system makes the core equipment for collecting feature information of radiation fields, and is the key point and technical basis for carrying out pulsed radiation detection. Its performance directly determines the choice of measuring method and the quality of measured data. A systematic description of characteristic parameters affecting its performance in pulsed radiation detection is the basis for the design, development, application and comprehensive performance assessment of the detection system. Main parameters of detection systems for measuring time spectrum and intensity of mixed pulsed neutron/gamma radiation fields include detection sensitivity, time response, energy response, linear current and discrimination of neutron to gamma rays, etc. To realize these parameters in designing a detection system, certain detection construction and technical principles have to be established in accordance with the basic interaction principles of neutron/gamma rays with materials. Designing principles include balancing energy collection with charge collection, geometry efficiency with high signal - noise ratio, separation of signal response from irradiation response, detection sensitivity with time response, overall performance with application reliability, etc. The designing technology of radiation detection systems can be developed with an integrated utilization of these principles.

[Key words] mixed neutron gamma - ray fields; pulsed radiation detection; detecting system; designing techniques; performance parameter