

中子编码孔径成像技术

冯玉中 席禹 张译文

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1. 认识中子

中子是构成原子核的基本粒子之一,它的静止质量略微比质子的质量稍重,不带电荷,属于一种中性粒子,如表1所示。1932年,英国物理学家查德威克首次发现了中子,此后中子在物理学和核科学中扮演着重要的作用。中子研究像是一把打开原子核的“钥匙”,是核科学技术的基础,中子研究也是核能与核技术创新发展的源泉。

表1 质子、中子及电子属性

	质子	中子	电子
质量	1.6726×10^{-27}	1.6748×10^{-27} kg	9.1096×10^{-31} kg
电荷	$+1.6 \times 10^{-19}$ C	中性	-1.6×10^{-19} C
寿命	至少 10^{35} 年	877.75秒	∞

粒子或辐射不能被直接观测到,只有通过它们与物质的相互作用才能间接探测,现如今对于核探测技术的研究,主要探测的对象为 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线和中子。而中子不带电,与原子核之间的相互作用相对较弱,在同等能量下的这些粒子当中,中子的相对能量损失较小,穿透性是最强的,很难通过外加屏蔽完全遮挡,如图1所示。同时天然本底中中子的计数极低,通过探测中子实现对放射性物

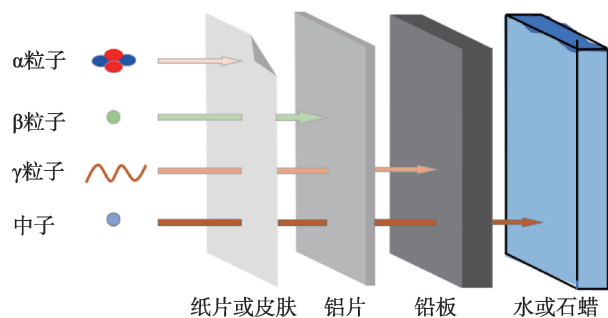


图1 不同粒子的穿透能力

质分析定位不易产生误判。

依据中子所具有的特点,可以进行中子照相、中子测井、硼中子俘获治疗及核材料检测等技术的研究,在核能工业的发展过程中,中子在多个领域都有着至关重要的作用。

2. 中子探测技术

中子探测主要指对中子的数量和能量进行测量。在核能的利用、放射性同位素的产生和应用核物理研究领域都需要对中子进行探测,然而中子本身呈电中性,不会引起电离等作用,不产生直接可观测的效果。中子探测是通过检测中子与介质原子核相互作用产生的次级粒子来实现的。

在核材料应用领域,核设备或设施中铀和钚的监测中,通常利用中子探测来进行。铀或钚同位素一般会产生 γ 射线,并且伴随着中子的产生。但是 γ 射线相对中子来说,其穿透能力更差,很容易通过外加屏蔽的方式进行阻挡,同时本底较强,因此对 γ 射线的探测常伴有噪声并且不易探测到。而中子具有本底计数率低和高穿透性的特点,在较难探测到 γ 射线的情况下,可以通过中子与探测物质的相互作用来获得特殊核材料的组成及位置信息,达到监管或监测的目的。

常用的中子辐射剂量监测手段通常以数值、声光报警的方式给出探测结果,但是这种方式对放射源进行探测需要与放射源进行近距离接触,会增加操作人员的辐射剂量,对身体造成损伤。比如切尔诺贝利事故处置过程中,3位负责打开水泵阀门的敢死队员通过携带放射性剂量计的方式来检测放

射源的存在性以及放射剂量,这对敢死队员来说是一种极大的伤害。因此需要一种可远距离识别放射源、以图像方式反映放射性源位置分布并且可以配合融合光学相机显示放射源热点在环境中的位置的辐射成像技术替代常规的中子辐射剂量监测手段。

3. 什么是编码孔径成像?

在说编码孔径成像之前,我们先看一看小孔成像。小孔成像是利用光的直线传播原理,光线透过一个小孔就能够在像平面成一个倒立的像。但是小孔成像有一个缺点,如果孔径非常小,透光量就比较少,分辨率虽然高但是成像效率非常低;如果孔径稍微大一些,透光量比较多,成像效率会变高

但是分辨率却降低了;如果增加小孔的数量,透光量虽然增加了,但是图像会出现混叠,变得比较模糊,如图2所示,分辨率与成像效率不可兼得。我们能否从混叠的图像中重建出放射源的图像信息呢?当然可以,编码孔径成像就是一种解决方案。

编码孔径成像被提出是为了在不牺牲分辨率的情况下增加射线束的透光量保证成像质量,1968年,迪克(Dicke)和阿布尔斯(Ables)首次提出多孔径编码成像方式,编码孔径成像系统的编码板是由若干个开孔以及闭孔组成的,这样的设计使得光通量大大增加,所以它具有小孔成像高分辨率以及编码成像的高成像效率的优点。编码孔径成像系统示意图如图3所示,假设编码板是理想的编码板,也就是说在没有小孔的地方,粒子束完全被阻挡不能通过。

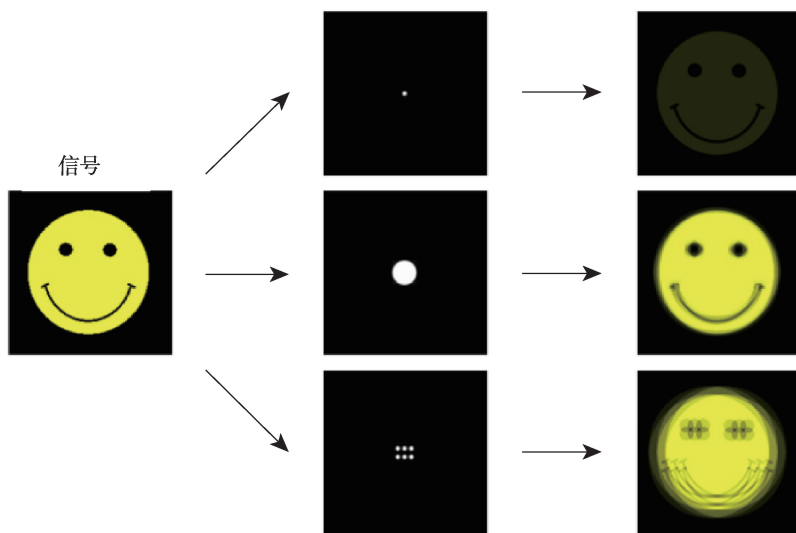


图2 多个小孔成像示意图

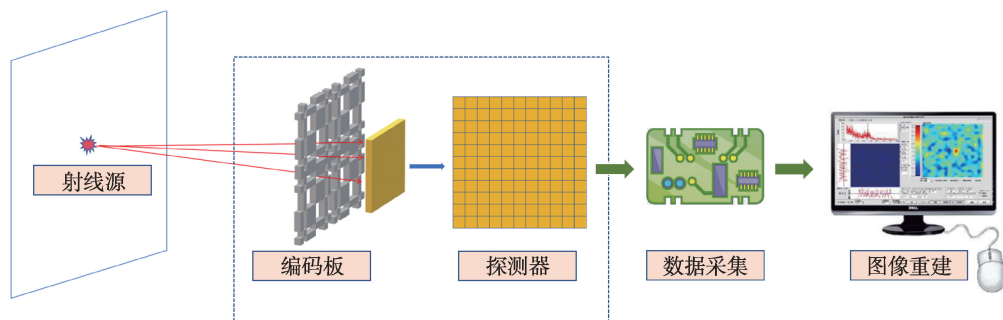


图3 编码孔径成像系统示意图

射线束经过编码板调制之后,到达探测器平面上就可以得到编码图案的投影,探测器得到的投影图案根据放射源入射方向的不同而不同,但对于同一个入射方向,投影图案是唯一的。这样我们才能根据该投影图案结合算法重建出放射源的位置信息。

3.1 编码的方式

编码孔径成像系统的核心就是设计编码函数和解码函数,因为在图像重建过程中,探测器所得到的投影为编码函数的基本编码图案样式,投影和解码函数做互相关卷积进而得到核辐射成像分布图。特定编码矩阵的点扩展函数的优劣直接影响成像系统的几何本征分辨率、信噪比和成像灵敏度,所以编码板的图案样式是极其重要的。

最开始被提出的编码方式是随机阵列,也就是说编码板上开孔与闭孔像素的位置是随机选择的。但是这种编码方式会存在系统伪影,也就是成像结果会有固有噪声。为了解决随机编码存在固有噪声的问题,后续提出了很多种解决办法。1971年,非

冗余阵列被提了出来(Non-Redundant Arrays);1978年,均匀冗余阵列(Uniformly Redundant Arrays)^[1]被提了出来;1989年,修正均匀冗余阵列(Modified Uniformly Redundant Arrays)^[2]被提了出来;1997年,大洪水算法(Great Deluge Algorithm)^[3]被提了出来,该算法通过迭代计算寻得的结果略逊于均匀冗余阵列和修正均匀冗余阵列。现在最常用的编码板是修正均匀冗余阵列,其具有开孔率高(约为50%),系统噪声低的优点,并且其编码板的设计都是方形的,所以在放射源成像中被广泛使用。如图4所示,从左到右分别为19×19的非冗余阵列、31×29的均匀冗余阵列、31×31的修正均匀冗余阵列。

3.2 编码孔径成像原理

编码孔径成像基本原理如图5所示,成像过程可分为编码投影和解码重建两个过程。位于视野范围内不同方位角的点源,在探测器平面形成一个唯一的关于编码板的开孔图样。对于某个分布的放射源,会得到若干码板图样的叠加像,即编码投

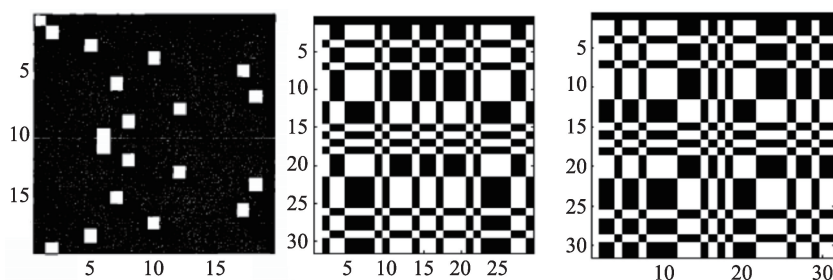


图4 三种不同的编码方式

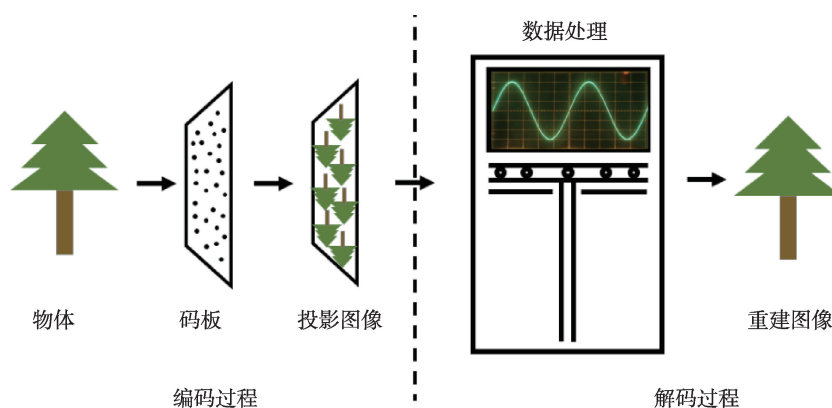


图5 编码孔径成像基本原理

影。针对码板开孔方式可设计相应的解码重建算法来还原放射源图像,即解码重建。

我们以编码数为5的随机编码方式来演示解码重建放射源分布的过程,首先随机生成一个 5×5 像素的编码板,开孔和闭孔各占50%的比例,如图6(a)所示,假定其为理想的编码板,然后循环嵌套后形成如图6(b)所示的图案。探测器与编码板的排列方式如图3所示,并且探测器的面积为编码板的 $1/4$,这个时候如果远处一个粒子束沿着编码板轴心方向入射,在探测器上的投影必定如图6(c)所示。得到这个投影图案后,与解码函数进行互相关卷积运算就可以重建出放射源。

对于每一种编码板,都对应着一个解码函数,而随机编码方式的解码函数与编码板的形式是一样的,解码函数形式与卷积运算的过程如图7所示,卷积运算过程其实与图像处理领域里面的卷积运算是一样的,把投影图案当作卷积核,然后在解码矩阵上面的每一个 5×5 的小矩阵上面进行卷积运算,最终会得到如图8所示的 5×5 的矩阵以及其热点图。可以观察到,放射源分布图存在固有伪影,

也就是在非最大值处不为零,在实际应用当中,编码数大的随机编码板带来的伪影可以忽略,编码数较小的情况,就会引进较为严重的固有噪声。

在3.1节提到修正均匀冗余阵列具有开孔率高,系统噪声低的优点,在这里给出关于 19×19 的修正均匀冗余阵列成像示意图,如图9所示,重建图象经过插值处理,可以看出重建出的热点分布图除最大值处外,其余地方都为零,这也验证了修正均匀冗余阵列的确具有系统噪声低的优点,也正是在放射源成像中修正均匀冗余阵列被应用广泛的原因之一。

4. 中子编码孔径成像技术

我们之前讨论的都是理想情况下的编码板和探测器,也就是射线束在闭孔的地方能被完全阻挡,而打到探测器上的粒子都能被记录下来。但实际上不是这样的,编码板并不一定能完全阻挡射线,并且射线也有可能穿过探测器而不留下任何信息。这样投影图案也不会是理想的投影图案。因此为了获得更优的系统成像性能,希望编码板能够对中子射线有较好的阻挡作用,探测器尽可能对中

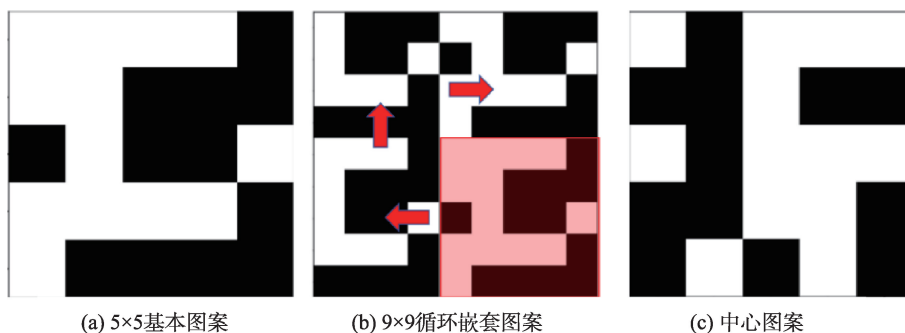


图6 5×5 随机编码图案示意图

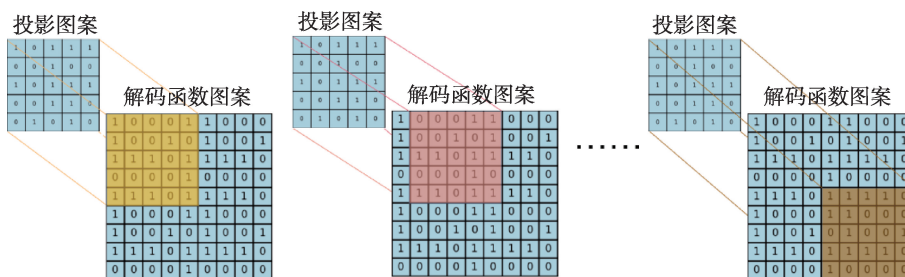


图7 互相关卷积运算示意图

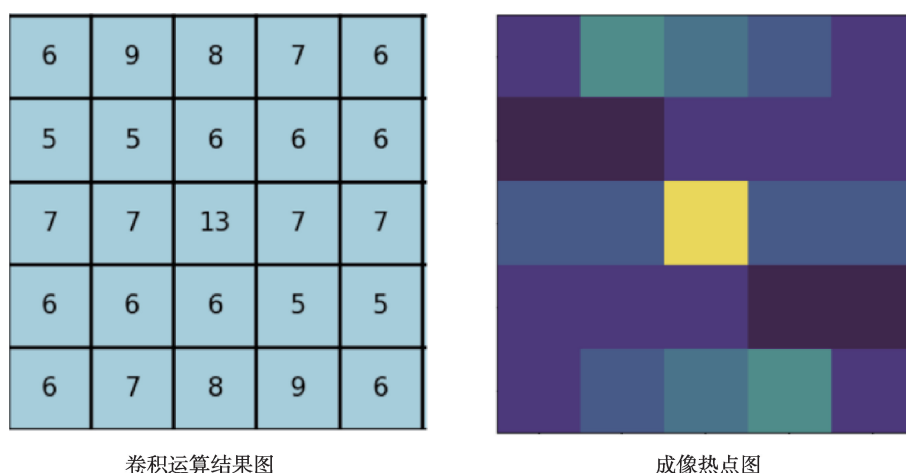


图8 理论成像结果示意图

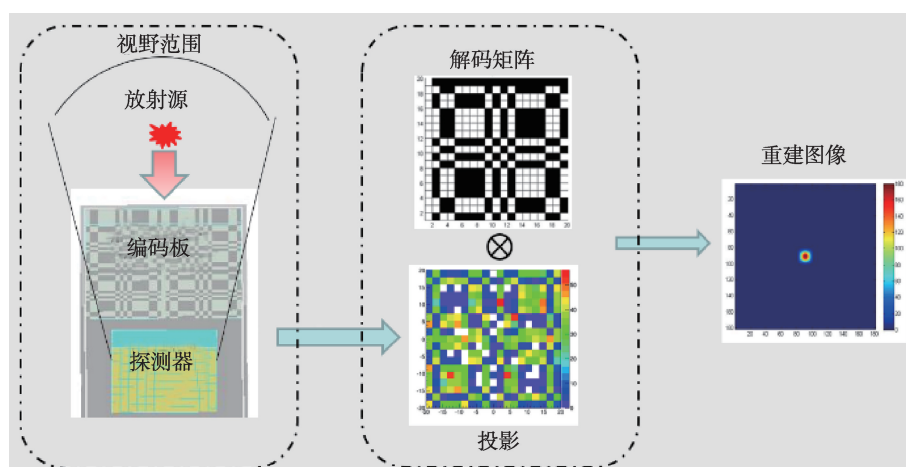


图9 19×19修正均匀冗余编码成像示意图

子有较高的探测效率。

4.1 编码板材料的选择

中子编码孔径成像按照能量划分可以分为热中子编码孔径成像和快中子编码孔径成像。这两种方式在编码板和探测器的材料选择上是不一样的。

对于热中子来说,一般容易被 ^{10}B 、 ^6Li 、 ^3He 俘获然后发出次级带电粒子,我们可以选择容易与热中子发生俘获反应的核素来阻挡它。目前的热中子编码相机大多使用镅片作为编码板材料。

对于快中子编码孔径成像,编码板就选择对快中子阻挡能力较强的材料,而快中子一般通过与探测物质发生弹性散射反应被带走一部分能量并且

逐渐慢化,慢化后的中子被屏蔽材料吸收并放出次级粒子或 γ 射线。但有时候 γ 射线也会与探测器发生相互作用,从而被探测器探测到,破坏在探测器上的投影图案。因此理想的快中子屏蔽材料需要满足对快中子的慢化以及慢中子和次级 γ 射线的吸收。含氢多的材料如水,高密度聚乙烯是慢化快中子较好的屏蔽材料,含锂或硼的材料可以吸收慢中子并且减少次级 γ 射线的产生,因此通常将中子慢化材料和慢中子吸收材料按照一定的比例混合制作成快中子码板材料。

4.2 探测器材料的选择

对于中子探测器,其实和编码板有“异曲同工

之妙”，编码板吸收中子能量，起到阻挡射线的作用，而探测器需要让中子在其内部沉积能量，以反映中子的信息。这样看来，编码板和探测器都有一个共同之处——吸能。对此，探测器在材料的选择上，热中子探测器常选掺 ^{10}B 、 ^6Li 等热中子截面大的材料，快中子探测器则通常选择含氢元素较多的材料，以提高对中子的探测效率。然而，热中子一般在闪烁体探测器内经过多次散射，热中子的成像结果并不能准确指示入射中子源的方向。因此，中子编码孔径成像领域的研究主要集中在快中子成像。

在此基础上，探测器还需要具有较好的 n/γ 甄别能力。 n/γ 甄别是指区分中子信号和 γ 射线信号的过程。理想情况下，探测器只应该收集从编码板前面入射的中子，但在实际探测过程中，环境中的 γ 射线本底及中子源所伴随的 γ 射线也不可避免地混入其中，这会极大地影响中子探测的准确性。同时，中子在探测器中会发生散射，导致一个中子会在多个探测器上发生能量沉积。为了解决上述问题，需要对实验数据进行分析处理，以期达到理想的成像结果。当然，在中子探测器的选择上，除了以上两点，还有探测器的一些固有属性，如发光效率、光衰减时间等因素需要我们考虑。

5. 中子编码孔径成像应用场景

中子编码孔径成像能干什么呢？除了对中子源进行成像，在核能工业、核反恐、特殊核材料的定位和搜寻等领域也可以提供有效的手段。例如，在

911事件之后，各国高度防范核与辐射恐怖事件；近年来，全球核材料丢失事件频发，国际原子能机构每年都有近200起关于核材料丢失或黑市交易的案例，由于核材料发射的 γ 射线容易被不法分子采用屏蔽材料阻挡，通过快中子成像可探测到故意隐藏的核辐射物质和材料。在核燃料处理方面，核燃料生产和处理设施中可能出现管道的堵塞，而快中子因为易穿透金属管道，因此通过快中子成像探测就可以准确知道异常的位置。这些应用领域偏向于国防，由于国防领域的特殊性，我们仅展示一些国内外中子源的成像结果。

自2002年起，美国布鲁克海文国家实验室开展了大量对热中子编码相机的研究，美国桑迪亚国家实验室和橡树岭国家实验室则自2009年开始合作开展了大量对快中子编码相机的研究。相比之下，国内高能物理研究所在这一领域起步较晚。

2005年，美国布鲁克海文国家实验室利用 ^3He 探测器和镉制编码板组成的热中子编码孔径相机，对光子轰击U-235产生的缓发中子进行成像^[4]，其成像结果如图10所示，图中热点可以很明显地显示出中子源的位置。

2009年，美国橡树岭国家实验室利用 19×19 高密度聚乙烯的修正均匀冗余编码板和EJ-309探测器组成的快中子编码孔径相机，对铀-混合氧化物燃料棒进行成像^[5]，成像结果如图11所示，图中的热点形状与铀-混合氧化物的形状分布大致一样。

2019年，中国科学院高能物理研究所研制了一

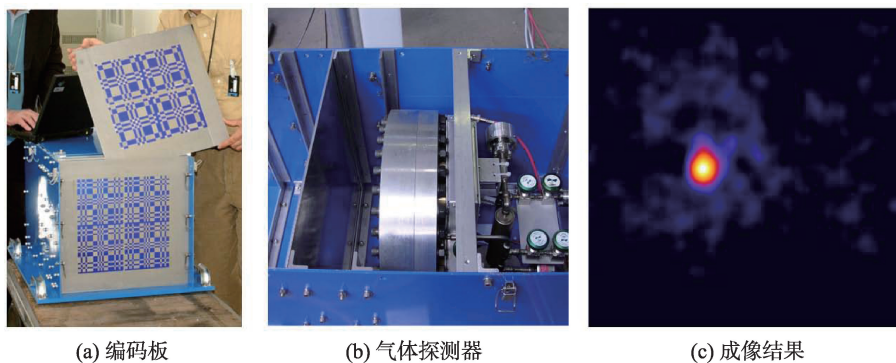


图10 美国布鲁克海文国家实验室研制的热中子编码孔径相机及其成像结果

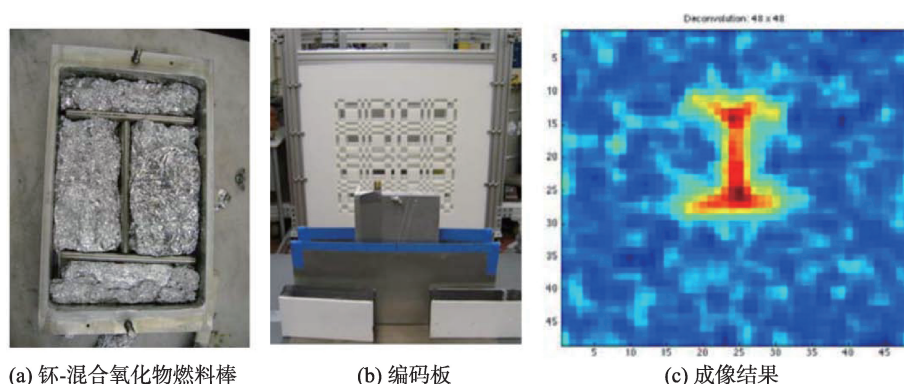


图11 美国橡树岭国家实验室研制的快中子编码孔径成像系统以及成像结果

台便携式中子编码孔径相机,利用 11×11 高密度聚乙烯的修正均匀冗余编码板和EJ-276探测器组成的快中子编码相机,结合光学摄像头对Am-Be中子

源进行成像,其编码重建热点与光学图像融合结果如图12所示,可以清晰地判断出中子源在环境中的位置。



图12 中国科学院高能所研制的便携式快中子编码相机以及对Am-Be中子源成像结果

总的来说,中子编码孔径成像是一种可以准确定位中子源的科技技术,在核安全、核反恐、特殊核材料的定位和搜寻等领域具有广泛的应用前景。随着技术的不断进步,中子编码相机的分辨率和成像速度将不断提高,成本也将逐渐降低。中子编码孔径成像技术能够准确定位中子源,为核安全和其他领域提供了重要的技术手段。未来,随着成本的降低和性能的提高,中子编码孔径成像技术将成为解决核安全和其他领域挑战的重要工具。

参考文献

[1] Fenimore E E, Cannon T M. Coded aperture imaging with uniform-

ly redundant arrays[J]. Applied Optics, 1978, 17(3): 337-347.

[2] Gottesman S R, Fenimore E E. New family of binary arrays for coded aperture imaging[J]. Applied Optics, 1989, 28(20): 4344-4352.

[3] Busboom A, Elders-Boll H, Schotten H. Combinatorial Design of Near-Optimum Masks for Coded Aperture Imaging[C]//Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on. IEEE Computer Society, 1997, 4: 2817-2817.

[4] Norman D R, Jones J L, Haskell K J, et al. Active nuclear material detection and imaging[C]//IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2005. IEEE, 2005, 2: 1004-1008.

[5] Hausladen P, Blackston M. Passive and active fast-neutron imaging in support of APCI safeguards campaign[J]. Oak Ridge National Laboratory Report No. ORNL/TM-2009/210, 2009.