

# 脉冲辐射成像绝对测量方法研究

赵吉祯<sup>†</sup> 欧阳晓平 盛亮 魏福利 张美

(西北核技术研究所, 西安 710024)

(2013年5月7日收到; 2013年6月19日收到修改稿)

设计了一种高透过率、能量响应平坦的探测器, 利用该探测器将脉冲射线源图像与射线强度直接关联, 简化了图像诊断系统绝对测量的标定环节, 建立了脉冲辐射源图像诊断量化的新技术方法. 实验表明, 由该方法得到的射线绝对强度的不确定度为 33%.

**关键词:** 脉冲辐射成像, 绝对测量, 能量响应平坦

**PACS:** 52.70.La, 29.40.Mc, 32.70.Fw

**DOI:** 10.7498/aps.62.225203

## 1 引言

在核物理实验和脉冲辐射探测领域中, 射线源区射线图像诊断能够提供对源区物理过程的直观认识, 对于研究和诊断其物理过程特性具有重要价值<sup>[1-4]</sup>. 对成像有贡献的射线绝对量的测量, 不仅能够提高图像诊断系统数据处理结果的准确可信性, 而且能够实现图像绝对测量的目标, 将图像上每个像素与该处的绝对强度对应起来.

20 世纪 80 年代起, 已经展开了辐射射线绝对测量的相关研究<sup>[5]</sup>, 并且在各个领域得到了广泛的应用, 例如对紫外线和软 X 射线的绝对测量<sup>[6]</sup>、韧致辐射的空间和光谱特性的绝对测量<sup>[7]</sup>等, 能量分布从几千电子伏到百兆电子伏<sup>[8]</sup>.

但在图像诊断中的绝对测量鲜有报道, 通常只能给出尺寸分布和相对强度分布<sup>[9]</sup>. 图像诊断中对成像有贡献的射线绝对强度的测量, 通常是通过系统标定方法实现的, 即通过加速器或者单能射线源对探测系统进行绝对标定. 例如在 Marx 发生器上产生的 X 射线平均能量为 0.2—0.3 MeV, 难以获得全能谱的射线, 因此这种绝对测量的不确定度较高<sup>[10]</sup>. 如果使用系列单能辐射源进行标定, 可以实现系统的准确标定, 但这种方法造价较高, 实验周期很长, 并且系统不稳定因素较多. 本文通过使用

能量相应平坦的绝对强度探测器, 直接测量用于图像诊断的射线绝对强度, 避开了上述问题, 实现了图像诊断的绝对测量.

## 2 脉冲辐射源图像诊断绝对测量方法

图像诊断系统中通常包含脉冲辐射场测量系统, 其测量对象是辐射中的群粒子(量子), 通过对群粒子的探测, 获取脉冲辐射场的特征<sup>[11]</sup>, 从而建立与图像诊断的关联.

在如图 1 所示的图像诊断系统中加入绝对强度探测器, 放置在成像闪烁体前, 以测量对成像有贡献射线的绝对强度.

射线绝对强度探测器应当具备以下品质: 一是对之后的射线束影响小, 即对射线的吸收很少; 二是不同能量的射线通过探测器作用时, 在其中沉积的能量为平坦响应<sup>[12]</sup>.

在脉冲  $\gamma$  射线图像诊断系统中, 通过探测器可测量  $\gamma$  射线粒子总数为

$$N_{\gamma} = \frac{I}{S_{\gamma} \cdot E_{Co}} \cdot \Delta S \cdot \Delta t, \quad (1)$$

式中,  $N_{\gamma}$  表示  $\gamma$  射线粒子总数,  $I$  为探测器探测到的信号电流,  $S_{\gamma}$  为探测器在  $^{60}\text{Co}$  辐射源上标定的  $\gamma$  灵敏度,  $\Delta S$  为接收面积,  $\Delta t$  为曝光时间,  $E_{Co}$  为  $\gamma$  光子的能量, 这里射线源为钴源, 能量为 1.25 MeV.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zhaojizhen@163.com

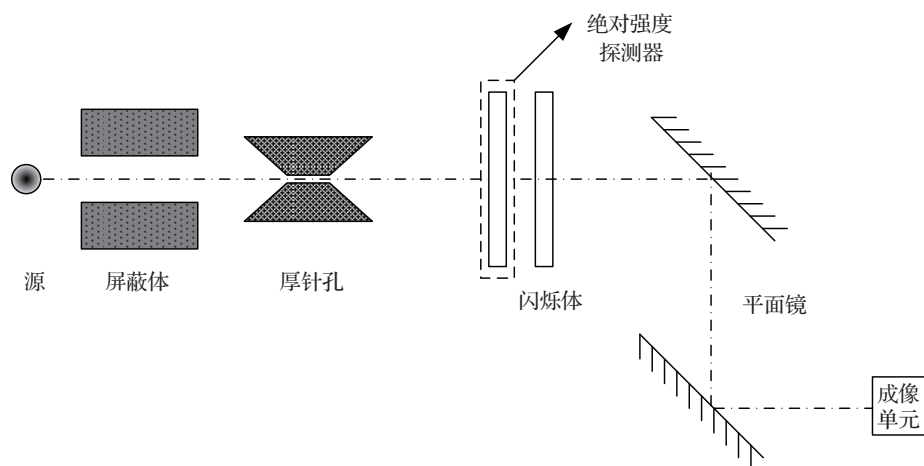


图1 图像诊断系统示意图

根据厚针孔成像原理可得  $\gamma$  射线粒子总数  $N_S$  为

$$N_S = N_\gamma / \beta_P, \quad (2)$$

式中,  $\beta_P$  即为厚针孔成像因子.

图像诊断系统得到的图像, 经过一系列本底及噪声处理之后, 对各像素的灰度值进行积分, 可得:

$$G_S = \sum_{i=1}^N g_i, \quad (3)$$

式中,  $G_S$  为图像上所有像素点的灰度值的总和,  $N$  为所得图像的像素数,  $g_i$  为每个像素对应的灰度值.

建立像素灰度值与射线粒子数的对应关系如下式:

$$N_\gamma = f(G_S), \quad (4)$$

当上式得知后, 即建立起诊断的图像的像素与射线源区的射线粒子数的对应关系如下式所示:

$$N_\gamma(x, y) = f(G(x, y)), \quad (5)$$

式中,  $G(x, y)$  为图像  $(x, y)$  处的灰度值,  $N_\gamma(x, y)$  为该处对应的  $\gamma$  射线绝对强度.

由于探测器不可能做到绝对的平坦响应, 根据(1)式获得的射线粒子数值存在一个误差. 根据不确定度的定义<sup>[13]</sup>, 可以得到射线粒子数的不确定度为

$$e_\gamma = \left| 1 - \frac{E_{Pi}}{E_P} \right| \times 100\%, \quad (6)$$

式中,  $E$  为探测器中总沉积能量,  $E_P$  为 1.25 MeV 的  $\gamma$  射线粒子在探测器中的沉积能量,  $E_{Pi}$  为能谱分布的不同能量  $\gamma$  射线粒子在探测器中的平均能量沉积.

由于被测源一般是未知谱分布的, 不妨设  $\gamma$  射线能量分布在  $E_{\gamma 1} - E_{\gamma 2}$ , 而这两个边界能量的  $\gamma$  射线在探测器中的能量沉积分别为  $E_{P1}$  和  $E_{P2}$ , 可知, 其最大不确定度为

$$e_\gamma = \max \left( \left| 1 - \frac{E_{P1}}{E_P} \right|, \left| 1 - \frac{E_{P2}}{E_P} \right| \right) \times 100\%. \quad (7)$$

## 2.1 像素灰度值与射线粒子数的对应关系

为了验证图像上像素的灰度值与射线粒子数的正比关系, 设计实验系统如图2所示.

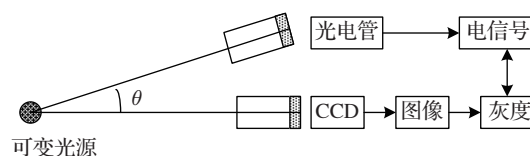


图2 图像灰度值与射线粒子数对应关系实验原理

光源为光强可变面光源, CCD 和光电管同时安置在被测源的等效位置上, 输出电流和灰度值总数变化曲线如图3所示.

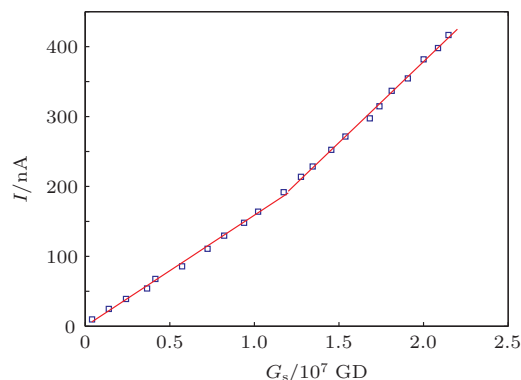


图3 输出电流和灰度值总数变化曲线

经过分段线性拟合得到图像上单位灰度值与射线粒子数的对应关系如下式:

$$I = \begin{cases} -0.038 + 1.589 \times 10^5 \cdot G_S \\ G_S \in [4.0 \times 10^5, 1.2 \times 10^7] \\ -85.141 + 2.319 \times 10^5 \cdot G_S \\ G_S \in [1.2 \times 10^7, 2.2 \times 10^7] \end{cases} \quad (8)$$

## 2.2 探测器设计

根据射线粒子数不确定度 (6) 式和最大不确定度 (7) 式可以得出, 误差来源主要是能量沉积的平坦性.

使用蒙特卡罗方法可以模拟计算射线在探测器中的能量沉积 [14]. 对 CZT, ZnO 和 ST401 三种探测器的能量沉积的平坦性和射线粒子数相对误差进行蒙特卡罗计算, 可以得到不同厚度的探测器在不同能谱范围下的参数, 如表 1 所示.

CZT 和 ZnO 两种探测器在粒子数最大相对误差方面占优势, 但是其透过率不如 ST401. 综合考虑其透过率、射线粒子数相对误差等因素, 拟选定 0.2 mm 厚度的 ST401 作为射线绝对强度探测器.

表 1 不同厚度的探测器的能量沉积的平坦性以及射线粒子数相对误差

探测器	厚度/mm	能量范围/MeV	透过率最小值/%	射线粒子数相对最大误差/%
ST401	0.2	0.5—2.0	99.99	32.65
	0.5	0.5—2.1	99.96	32.34
	1.0	0.9—2.1	99.87	31.69
CZT	0.2	0.9—2.1	99.86	30.71
	0.5	0.4—3.0	98.56	18.33
	1.0	0.3—3.0	94.93	17.66
ZnO	0.2	1.0—2.7	99.86	32.19
	0.5	0.7—3.0	98.87	27.97
	1.0	0.5—3.0	95.65	29.70

射线绝对强度探测器应具备两个重要特性: 一

是能量沉积要小, 二是要对能谱分布的射线源有平坦的响应. 另外, 探测器的选取和设计还应考虑到探测器的灵敏度及其刻度技术、电磁屏蔽、线性电流等参数 [15].

探测器内部构造和放置位置如图 4 所示. 探测器使用铜外壳封装, 前后窗使用铝膜进行封装以减小射线吸收. 在探测器内部, ST401 的圆形表面垂直于射线方向, 以提高探测效率; 光电倍增管 (PMT) 则放置在与 ST401 圆形表面平行的位置上.

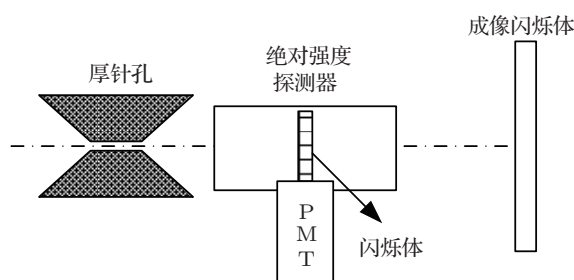


图 4 探测器内部构造和放置位置

## 3 实验与研究

绝对测量探测器选用 ST401 作为闪烁体, 厚度为 0.2 mm, 直径为 40 mm, 其  $\gamma$  灵敏度标定结果见表 2.

表 2 射线绝对强度测量探测器  $\gamma$  灵敏度的标定结果

闪烁体厚度/mm	0.2
本底电流/nA	54.339
信号电流/nA	355.27
单位能通量/MeV · cm <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup>	5.3656 × 10 <sup>9</sup>
$\gamma$ 灵敏度/A · cm <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> MeV <sup>-1</sup>	5.6085 × 10 <sup>-17</sup>

在感应电压叠加器 (IVA) 上进行的图像诊断射线绝对测量实验中, 通过对成像有贡献的射线的绝对量的测量, 对系统获得的图像数据进行了绝对强度的测量. 实验得到的波形及图像如图 5 所示.

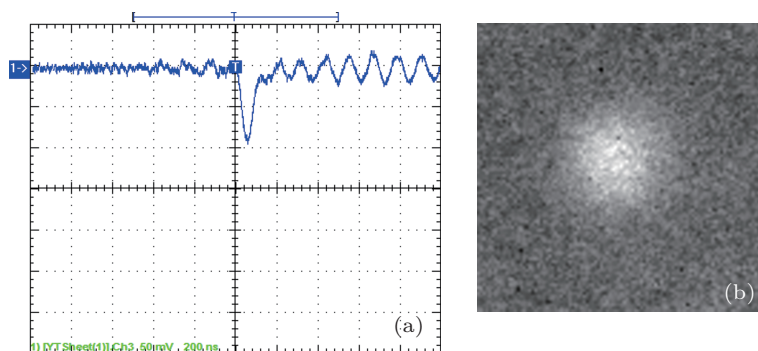


图 5 实验数据 (a) 波形; (b) 图像

根据探测器标定结果和 (1) 式, 可以得到射线绝对强度, 即对成像有贡献的射线粒子数为

$$N_{\gamma} = \frac{U}{S_{\gamma} \cdot R} \cdot \Delta S \cdot \Delta t / 1.25 \text{ MeV} = 4.12 \times 10^6,$$

式中,  $U$  为使用示波器探测到的信号幅值, 单位为  $V$ ;  $R$  为示波器的输入阻抗, 单位为  $\Omega$ . 根据射线粒子数和图像灰度值总数与射线粒子数的对应关系 (8) 式, 可得到图像上每个像素与射线粒子数的对应关系:

$$N_{\gamma}(x, y) = k(-0.038 + 1.590 \times 10^{-5} \cdot G_S(x, y)),$$

式中,  $k$  为对应系数, 由  $N_{\gamma} = \sum N_{\gamma}(x, y)$  可以得到  $k$  值的大小, 从而可以确定图像上每个像素与射线粒

子数的对应关系为

$$N_{\gamma}(x, y) = 3.278 \times 10^3 - 1.371 \cdot G_S(x, y).$$

根据射线强度分部和理论计算最大不确定度 (7) 式, 可以得出射线绝对强度的相对误差, 即:  $E_{\gamma} = 33\%$ .

## 4 结论

研究了一种用于图像诊断系统的射线绝对测量方法, 给出了推导过程和误差计算公式, 并针对该方法的两个难点进行了研究, 得到了像素灰度值与射线粒子数的对应关系和射线粒子数的相对误差, 并在此基础上设计了探测器. 经过实验和数据处理, 实现了预期目标.

- [1] Chen F X, Zheng J, Yang J L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5947 (in Chinese) [陈法新, 郑坚, 杨建伦 2006 物理学报 **55** 5947]
- [2] Wang K L, Lü M, Liu C F, Kang D C 1988 *SPIE* **1032** 938
- [3] Richard Lear 1984 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **31** 495
- [4] Xia F, Chen L Y, Han X Y, Li W B 2009 *Comput. Measur. Control* **7** 1264 (in Chinese) [夏凡, 陈燎原, 韩晓玉, 李维斌 2009 计算机测量与控制 **7** 1264]
- [5] Chen D, Zhang Q L, Chang Y F 1985 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-32** 71
- [6] Mast K F, Vallet J C, Andelfinger C, Betzler P, Kraus H, Schramm G 1991 *Rev. Sci. Instrum.* **62** 744
- [7] Carroll J J, Richmond D G, Sinor T W, Taylor K N, Hong C, Standiford J D, Collins C B, Huxel N, von Neumann Cosel P, Richter A 1993 *Rev. Sci. Instrum.* **64** 2298
- [8] von Przewoski B, Meyer H O, Pancella P V, Pate S F, Pollock R E, Rinckel T, Sperisen F, Sowinski J, Haerberli W, Pitts W K, Price J S 1991 *Phys. Rev. C* **44** 44
- [9] Rogers J D 2000 *Measur. Sci. Technol.* **11** 857
- [10] Lü M, Wang K L 2006 *Detecting Technology of Pulsed Ray in Nuclear Test* (Beijing: National Defence Industry Press) p406 (in Chinese) [吕敏, 王奎禄 2006 核试验脉冲射线测量技术 (北京: 国防工业出版社) 第 406 页]
- [11] Liu Q Z 1994 *The Diagnosis Technology of Pulse Radiation Field* (Beijing: Science Press) p60 (in Chinese) [刘庆兆 1994 脉冲辐射场诊断技术 (北京: 科学出版社) 第 60 页]
- [12] Hu M C, Chen F X, Li Z B, Tang Z K, Zhang S Y, Tang Z Y, Zhang J H 2005 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **6** 668 (in Chinese) [胡孟春, 陈法新, 李忠宝, 唐章奎, 张三阳, 唐正元, 张建华 2005 核电子学与探测技术 **6** 668]
- [13] Cheng Y J 1997 *Data Proceeding and Error Analysis on the Measurement of Pulse Radiation Field* (Beijing: National Defence Industry Press) p14 (in Chinese) [陈元金 1997 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析 (北京: 国防工业出版社) 第 14 页]
- [14] Wang T Q, Wei X D, Li H J, Lu W 2007 *Atom. Energy Sci. Technol.* **41** 399 (in Chinese) [王同权, 魏晓东, 李宏杰, 路伟 2007 原子能科学技术 **41** 399]
- [15] Ji C S 1990 *Handbook of Nuclear Radiation Detectors & Their Experiment Techniques* (Beijing: Atomic Energy Press) p189 (in Chinese) [汲长松 1990 核辐射探测器及其实验技术手册 (北京: 原子能出版社) 第 189 页]

# Absolute measurement of pulsed radiation imaging

Zhao Ji-Zhen<sup>†</sup> Ouyang Xiao-Ping Sheng Liang Wei Fu-Li Zhang Mei

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

(Received 7 May 2013; revised manuscript received 19 June 2013)

## Abstract

A high transmittance, flat energy spectrum response detector is designed. The relationship between the image and absolute intensity of the pulse radiation is established via a detector, which simplifies the calibration of the absolute measurement in the imaging system. And a new technical approach to the absolute imaging diagnosis for the pulsed radiation is developed. The experiments show that the uncertainty of the absolute intensity measured by this technology is 33%.

**Keywords:** pulsed radiation imaging, absolute measurement, flat energy spectrum response

**PACS:** 52.70.La, 29.40.Mc, 32.70.Fw

**DOI:** 10.7498/aps.62.225203

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhaojizhen@163.com