

# 双能 X 射线检测技术的能谱滤波参数优化设计

项 安, 陈瑞焘

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 提出了使用金属片过滤高能 X 射线的方法, 并采用蒙特卡罗方法模拟双能 X 射线检测系统, 结合建立的代价函数确定最佳滤波金属材料与金属片厚度. 利用 X 射线安检机进行测试, 结果表明使用本文提出的金属滤波方法及优化的滤波参数显著提高了 X 射线双能检测系统的性能, 证明了该方法的有效性.

**关键词:** 双能 X 射线; 金属滤波; 蒙特卡罗方法; 能谱重叠; 代价函数

**中图分类号:** TL99

**文献标志码:** A

## Optimization Design of Filter Parameters for Energy Spectrums Used in Dual-energy X-ray Inspection

XIANG An, CHEN Ruıtao

(College of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** This paper puts forward a method to use metal slice to filter high-energy X-ray. In order to eliminate the overlap as well as the unbalanced total energy between two energy spectrums as much as possible, this paper develops a dual-energy inspection system model based on the Monte-Carlo Method and creates a cost function to choose the optimum metal material and thickness. A practical X-ray inspection machine is used to test this method. The result indicates that this metal filter method and concerned filter parameters obviously contribute to the performance improvement of dual-energy inspection system, which attests to the effectiveness of this method.

**Key words:** dual-energy X-ray; metal filter; Monte-Carlo Method; overlap of energy spectrums; cost functions

双能 X 射线透射技术已广泛应用于安全检查领域<sup>[1]</sup>. 该方法主要是使用高能 X 射线透射信号  $T_H$  与低能 X 射线透射信号  $T_L$  相结合的方法来区分物

质<sup>[2]</sup>, 如下式所示:

$$R = \frac{\ln(T_{0H}/T_H)}{\ln(T_{0L}/T_L)} = \sigma(Z, E_1)/\sigma(Z, E_2) \quad (1)$$

式中:  $T_{0H}$  和  $T_{0L}$  分别是高、低能 X 射线通过没有障碍物自由空间时的透射信号;  $R$  为双能值;  $\sigma(Z, E_1)$  与  $\sigma(Z, E_2)$  分别是有效原子序数为  $Z$  的物质与能量为  $E_1$  和  $E_2$  的 X 射线反应总截面, 该值与物质的原子序数及光子能量  $E$  有确定的关系<sup>[3-4]</sup>. 根据式(1), 在双能 X 射线的能量  $E_1$  和  $E_2$  确定时, 物质的双能值与其原子序数  $Z$  有一一对应的关系. 通过检测透射信号并计算, 可以得到物质的双能值  $R$ , 并根据对应关系得到物质的原子序数, 从而达到区分物质的目的. 但是该理论要求 X 射线光源发射的光子必须具有确定的能量值  $E_1$  和  $E_2$ , 而实际使用的 X 射线光源的能量是从零到峰值全能量谱分布的, 即存在射线能谱分布. 图 1 为本文研究使用的 X 射线管的高能 145 keV 和低能 75 keV 的能谱分布.

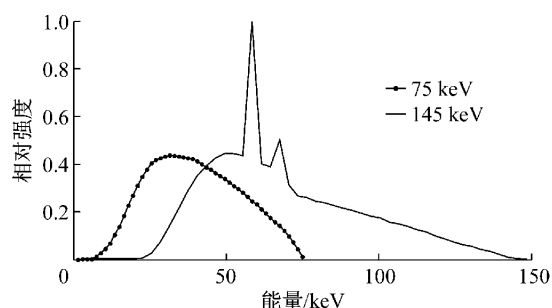


图 1 本文使用的 X 射线管高、低能谱分布曲线  
Fig.1 High and low energy spectrums of the X-ray tube used in this paper

从图 1 可知, 两曲线在 20~75 keV 能量范围内有较大的重叠区域. 能谱重叠效应导致双能透射检测技术难以发挥优势. 此外, 从图 1 还可以看到, 高、低能谱的总能量, 即两个能谱曲线下方的面积不平衡, 从而降低了双能 X 射线系统的性能<sup>[1]</sup>. 为了解决以上问题, 本文提出使用金属薄片过滤高能 X 射

线的方法,采用蒙特卡罗仿真软件 MCNP (Monte Carlo Neutron and Photon transport Code) 构建 X 射线透射检测模型,对比不同材料的滤波效果. 构建了代价函数,得到最佳滤波材料与厚度,并通过实际双能 X 射线检测机验证其有效性.

## 1 蒙特卡罗方法及 MCNP 软件简介

蒙特卡罗方法,也称随机模拟方法,其基本思想是:为了求解数学、物理、工程技术以及生产管理等方面的问题,首先建立一个概率模型或随机过程,使它的参数等于问题的解,然后通过对模型或过程的观察或抽样实验来计算所求参数的统计特征,最后给出所求解的近似值,而解的精确度也可以用估计值的标准误差来表示.

MCNP 是美国阿拉姆斯 (Los Alamos) 国家实验室研制开发的一个大型多功能蒙特卡罗程序,其可解决中子、光子、电子或者偶合中子、光子、电子的运输. 本文利用 MCNP 软件模拟双能透射中 X 射线光子的运输过程.

## 2 双能谱的蒙特卡罗模拟

为了利用 MCNP 软件模拟双能透射,首先要模拟 X 射线光源,且模拟光源与实际使用的 X 射线源具有相同的能谱分布<sup>[3-6]</sup>. Xie<sup>[3]</sup> 根据半实验模型推导出的轫致辐射理论模型如式(2)所示.

$$N(E)dE = \frac{N_A \rho}{A} \int_E^{T_0} \left(1 + \frac{T}{m_0 c^2}\right) \frac{Z^2}{T} \left[ 0.503 - 0.946 \frac{E}{T} + 0.1553 \left(\frac{E}{T}\right)^2 + 1.1632 \left(\frac{E}{T}\right)^3 - 0.6818 \left(\frac{E}{T}\right)^4 \right] \frac{dE}{E} \exp \left\{ \left[ -a_1 - a_2 \left(\frac{E}{100}\right)^{-1.6} - a_3 \left(\frac{E}{100}\right)^{-2.7} - a_4 \left(\frac{E}{100}\right)^{-3.5} - a_5 \left(\frac{E}{100}\right)^{-4.5} \right] \left( \frac{T_0 - T^2}{\rho C \sin \alpha} \right) \right\} \left( \frac{1}{A_{\text{msp}} + B_{\text{msp}} e^{-\pi C_{\text{msp}}}} \right) dT + K_\alpha + K_\beta \quad (2)$$

式中:  $N(E)$  表示能量为  $E$  到  $E+dE$  的光子数,  $dE$  为能量间隔,  $N_A$  为阿弗加德罗常数,  $A$  为靶金属原子相对原子质量,  $T$  为电子动能,  $T_0$  为撞击靶金属的初始电子动能,其他参数可以参考文献[3].

将高、低能谱均分为 100 个区间,即 75 keV 能谱可以分为  $E_i = 0, 0.75, 1.50, \dots, 75.00$  keV, 其中  $i=0 \sim 100$ . 根据式(3),分别计算  $N(E_i)$ ,在 MCNP

软件中建立模拟光子源,并输入  $E_i$  及其对应的  $N(E_i)$  参数,再添加模拟光子接收器,可以得到模拟射线源的能谱分布,并与实际 X 射线源对比,如图 2 所示. 图中实测能谱为 GE 公司 Maxray 射线管在 75 keV 和 145 keV 的实测能谱曲线,仿真能谱为基于 Xie<sup>[3-4]</sup> 的光源模型在 MCNP 软件中建立模拟光源得到的能谱曲线.

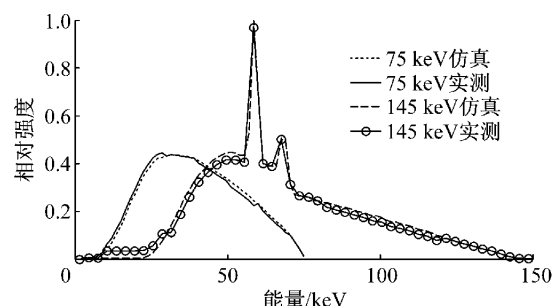


图2 X射线模拟光源与实际光源能谱比较

Fig. 2 Comparison of energy spectrums of simulative and practical radiation source

## 3 能谱优化方法

为解决双能谱重叠以及能量不平衡问题,将高能 X 射线经过金属薄片,使得穿透性能较差的低能量光子被滤除,高能量光子被保留,减少双能 X 射线能谱重叠区域. 使用金属片滤波期望达到式(3)和(4)所示的目标.

$$\int_0^\infty I_L(E) I_H(E) dE = 0 \quad (3)$$

$$\int_0^\infty I_L(E) dE = \int_0^\infty I_H(E) dE \quad (4)$$

式中:  $I_L(E)$  和  $I_H(E)$  分别是高、低能谱曲线上能量为  $E$  的 X 射线强度.

式(3)表示高、低能谱没有重叠区域,实现两能谱的完全分离. 高能 X 射线的滤波金属片越厚就越接近这个目标. 式(4)表示高、低能谱曲线总能量平衡. 滤波金属片厚度必须适中,太厚的滤波片可能导致高能射线的总能量过低,高、低总能量不平衡,无法得到精确的双能值. 由于难以同时达到这两个目标,为了达到最优效果,构建式(5)所示的代价函数.

$$C_1 \left[ \int_0^\infty I_L(E) dE - \int_0^\infty I_H(E) dE \right]^2 + C_2 \int_0^\infty I_{H,t}(E) I_L(E) dE \quad (5)$$

式中:  $C_1$  是双能谱能量平衡的权重系数,  $C_2$  是高、低能谱重叠效应的权重系数,  $I_{H,t}(E)$  指由厚度为  $t$  的金属片滤波后的高能谱分布. 优化的目标是寻找最

佳金属片材料类型和厚度  $t$ , 使得代价函数具有最小值。

#### 4 仿真模型和结果分析

为了利用 MCNP 软件模拟双能检测技术, 首先建立了仿真模型, 如图 3 所示。

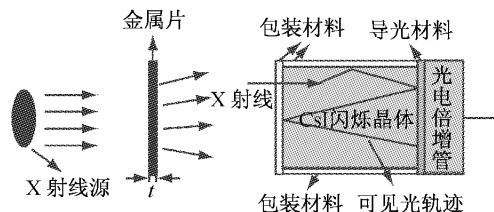


图 3 MCNP 软件中构建的 X 射线检测模型

Fig.3 Inspection model of X-ray inspection developed in the MCNP

X 射线源使用厚度为 1 cm 扁平面源, 距离金属片 15 cm, 金属薄片距离闪烁晶体 15 cm。金属片厚度为  $t$ , 闪烁晶体为 CsI(碘化铯), 密度为  $4.51 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。闪烁晶体后端通过导光材料接到光电倍增管, 闪烁晶体其他表面与包装材料直接接触, 要求包装材料对可见光有较高的反射率。入射到晶体的 X 射线光子与晶体原子相互作用, 产生次级带电粒子, 这些带电粒子又与晶体原子相互作用, 发射光子。带电粒子沉积在闪烁晶体中的能量与发射的荧光强度成一定的比例, 故在仿真模型中, 只要用 \* F6 命令记录闪烁晶体栅元内的电子沉积能量, 再根据式(6)即可算得光电倍增管检测得到的光子数<sup>[7-10]</sup>。

$$Q_{pe} = n_p \eta q M \quad (6)$$

式中:  $Q_{pe}$  是光电倍增管输出的电子数,  $n_p$  是晶体沉积能量后产生闪烁光的光子数,  $\eta$  是闪烁光在晶体中传输直到被光电倍增管光阴极收集的传输效率,  $q$  是光阴极将光子转化为电子的量子效率,  $M$  是光电倍增管放大倍数。根据实验测定, 闪烁晶体中可见光波长大约为 540 nm, 对应  $q=8.7$ 。对于本文使用 150 keV 及以下 X 射线,  $n_p \approx 10\%$ ,  $\eta$  值参照文献[9]设定, 沉积能量不同时,  $\eta$  取值也不同。

闪烁晶体除光电倍增管读出端以外, 均使用白色 Teflon 材料(FR104-1, 上海三爱富新材料股份有限公司生产) 包装。晶体与光电倍增管之间有 1 mm 的硅脂, 作为导光材料。晶体为长方体, 尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。

利用以上仿真模型, 分别检测 75 keV 和 145 keV 的 X 射线源在无滤波金属片情况下的能谱分布情况, 以及 145 keV 的 X 射线源在不同材料与厚度

金属片滤波后的能谱分布情况。选取了铝、铜、铅、不锈钢四种原子序数相差较远的金属进行仿真, 其中不锈钢为奥氏体型普通不锈钢 1Cr18Ni9Ti。厚度变化范围为 0.25~2.00 mm, 图 4~7 列出了 0.25~2.00 mm 范围内部分厚度的铜片、铝片、铅片及不锈钢片滤波的能谱曲线与原双能谱曲线的比较。

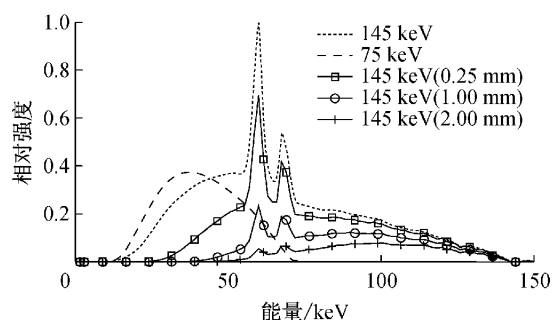


图 4 不同厚度铜片滤波的能谱曲线与原双能谱曲线的比较

Fig.4 Comparison of dual energy spectrums with and without copper filter of various thicknesses

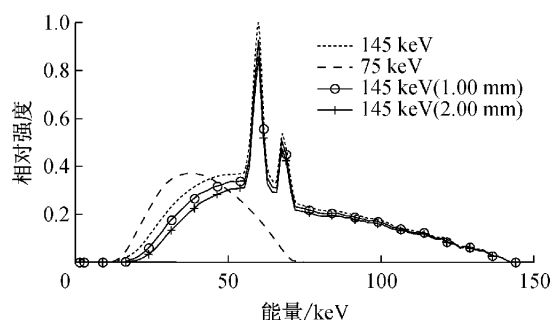


图 5 不同厚度铝片滤波的能谱曲线与原双能谱曲线的比较

Fig.5 Comparison of dual energy spectrums with and without aluminum filter of various thicknesses

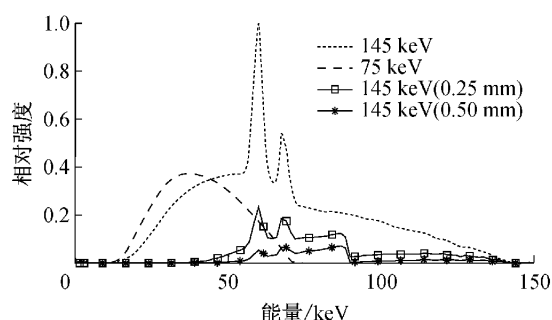


图 6 不同厚度铅片滤波的能谱曲线与原双能谱曲线的比较

Fig.6 Comparison of dual energy spectrums with and without lead filter of various thicknesses

由图 4 可以看到, 随着滤波金属厚度增加, 高、低能谱重叠区域逐渐减少, 但是当厚度太大时, 高能谱总能量太低。根据式(3)计算的四种材料对应的能谱重叠效应随滤波金属片厚度的变化如图 8 所示。根据式(4)计算的四种材料对应的双能总能量不平

衡效应随滤波金属片厚度的变化如图9所示。

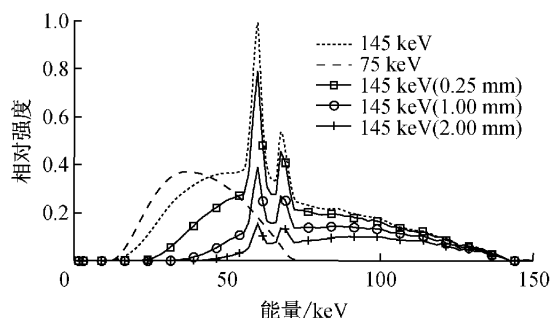


图7 不同厚度不锈钢片滤波的能谱曲线与原双能谱曲线的比较

Fig. 7 Comparison of dual energy spectrums with and without stainless steel filter of various thicknesses

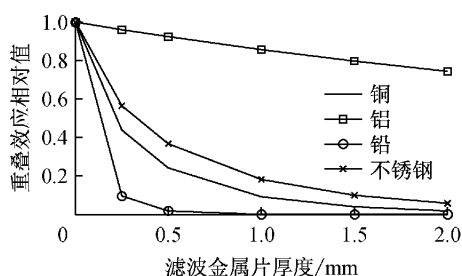


图8 能谱重叠效应随滤波金属片厚度的变化  
Fig. 8 Variance of the effect of overlap with different filter thicknesses

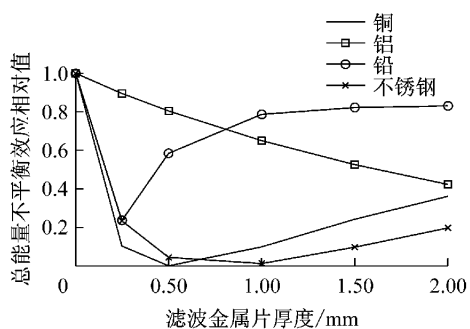


图9 双能总能量不平衡效应随滤波金属片厚度的变化  
Fig. 9 Variance of the effect of unbalanced total energy with different filter thicknesses

对于式(5)所示的代价函数,分别令  $C_1 = C_2 = 0.5$  或  $C_1 = 0.4$  和  $C_2 = 0.6$ ,代入铜的高、低能谱数据,可以得到不同滤波金属片厚度下代价函数值,如图10所示。

因为高、低能谱总能量的不平衡可以通过后级放大电路的放大系数来调节以达到最佳效果,所以重点考虑能谱重叠效应。采用  $C_1 = 0.4$  和  $C_2 = 0.6$  时的结果,四种金属材料的代价函数值随滤波金属片厚度变化的曲线如图11所示。

从图11可知,四种金属材料代价函数的最小值

是铜在 1.00 mm 处的代价函数值,不锈钢在 1.50 mm 处的代价函数也非常接近最小值。综上所述,可以使用 1.00 mm 的铜片或者 1.50 mm 的不锈钢进行双能 X 射线检测系统的高能谱滤波。

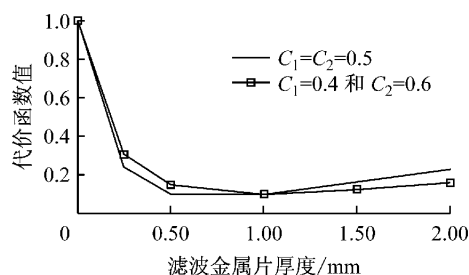


图10 铜的代价函数值随滤波金属片厚度的变化  
Fig. 10 Variance of the cost function with different copper filter thicknesses

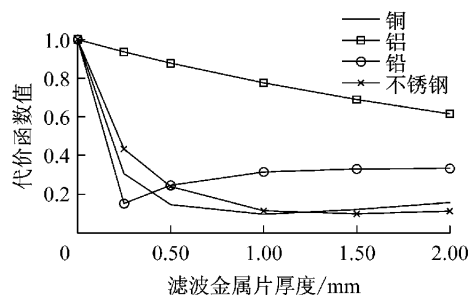


图11 四种金属材料的代价函数值随滤波金属片厚度的变化 ( $C_1 = 0.4$ ,  $C_2 = 0.6$ )

Fig. 11 Comparison of cost functions of four different filter materials

## 5 实验测试

选择 1.00 mm 的铜片滤波验证以上结论,利用上海太易公司的双能 X 射线异物检测机进行了测试。选用铝、聚乙烯以及有机玻璃作为检测对象。图12分别显示了使用铜片滤波后,75 keV 与 145 keV 光源下不同厚度三种材料的透射图像,图中不同的台阶数代表不同的厚度,台阶颜色越深说明被检测材料越厚。对三种被检测材料,用式(1)分别在有滤波和无滤波情况下计算不同厚度时的双能值,据此求得不同厚度双能值的均值与标准差,如表1所示。用式(1)计算时,  $T_H$  和  $T_L$  取图12中对应台阶的灰度值。根据表1算得每种材料双能值的平均值相互之间的差值,比较有无滤波时的差异,如表2所示。

从表2可知,加了 1.00 mm 的铜片滤波后,有机物和无机物之间(如铝与有机玻璃)的差值提高了将近3倍。测得双能值后要对被检测物质的材料进行分类,使用本文所述滤波方法后不同材料的分类

边界更为清晰,更利于分辨不同种类的材料,有效地优化了双能 X 射线检测技术。

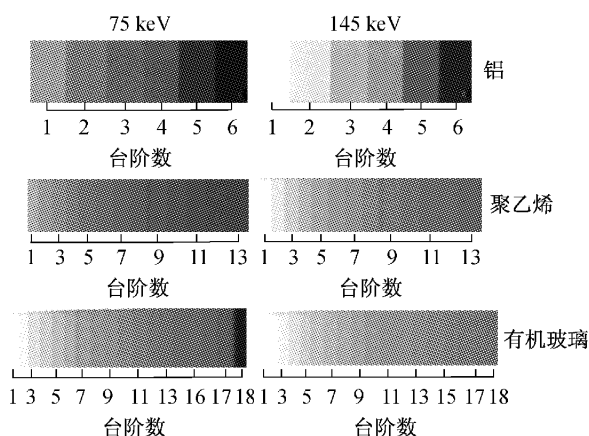


图 12 75 keV 与 145 keV 光源下不同厚度三种材料的铜片滤波透射图像

Fig.12 Transmission images of three different materials in 75 keV X-ray and 145 keV X-ray with the copper filter

表 1 三种材料双能值的均值与标准差

Tab.1 Mean value and standard deviation of dual-energy values of three kinds of materials

材料	无滤波	
	均值	标准差
铝	1.838	0.104
聚乙烯	1.318	0.048
有机玻璃	1.409	0.113
材料	有滤波	
	均值	标准差
铝	2.843	0.465
聚乙烯	1.404	0.056
有机玻璃	1.534	0.132

表 2 三种材料双能值均值之差

Tab.2 Difference among three materials' dual energy values

材料	无滤波		
	铝	聚乙烯	有机玻璃
铝	—	0.519 8	0.428 6
聚乙烯	0.519 8	—	0.091 2
有机玻璃	0.428 6	0.091 2	—
材料	有滤波		
	铝	聚乙烯	有机玻璃
铝	—	1.438 7	1.308 9
聚乙烯	1.438 7	—	0.129 8
有机玻璃	1.308 9	0.129 8	—

## 6 结论

(1)建立的双能 X 射线检测技术的蒙特卡罗模

型能够有效模拟 X 射线的检测过程。

(2)使用金属薄片对高能 X 射线进行滤波,且 1.00 mm 的铜片或者 1.50 mm 的不锈钢片可使代价函数最小,滤波效果最佳。

(3)通过实际双能 X 射线检测机验证,该滤波方法可行并且有效。

## 参考文献:

- [1] 王琪,陈志强,郭小平,等. X 射线安全检查技术综述[J]. CT 理论与应用研究,2004(1):32.  
WANG Qi, CHEN Zhiqiang, WU Xiaoping, *et al.* Review of X-ray security inspection technology [J]. CT Theory and Applications, 2004, 13(1):32.
- [2] FU K. Performance enhancement approaches for a dual energy X-ray[D]. San Diego: University of California, 2010.
- [3] Xie W. Simulation of X-ray imaging systems for luggage inspection[D]. Blacksburg Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995.
- [4] Abbott A L, Connors R W, Xie W, *et al.* Simulation of X-ray imaging for luggage inspection[J]. Proceedings of the Second Explosives Detection Symposium & Aviation Security Conference, 1996(11):248.
- [5] Yuflegontova E, Bakaleinikov L A. Monte-Carlo simulation of X-ray source characteristics using Mcperts and Mcnp codes for mammography[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2010, 51(1):65.
- [6] Llovet X, Sorbier L, Campos C S, *et al.* Monte-Carlo simulation of X-ray spectra generated by kilo-electron-volt electrons[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(7):3844.
- [7] 岳珂,徐珊珊,梁晋洁,等. 基于 GEANT4 的 CsI(Tl)闪烁体探测器的 Monte-Carlo 模拟[J]. 原子核物理评论, 2010, 27(4):445.  
YUE Ke, XU Hushan, LIANG Jinjie, *et al.* Monte-Carlo simulation of CsI scintillator detector based on Geant4 [J]. Nuclear Physics Review, 2010, 27(4):445.
- [8] 牛胜利,雷林峰,赵军,等. LSO 闪烁晶体探测器能量响应研究[J]. 核电子学与探测技术, 2003, 23(2):129.  
NIU Shengli, LEI Linfeng, ZHAO Jun, *et al.* Study of energy response of LSO scintillator detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, 23(2):129.
- [9] Hull G, Chong W S, Moses W W, *et al.* Measurements of NaI (Tl) electron response: comparison of different samples[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(1):331.
- [10] Aitken W D, Beron L B, Yenicy G, *et al.* The fluorescent response of NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na) and CaF<sub>2</sub>(Eu) to X-rays and low energy gamma rays[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1967, 14(1):468.