

15~600 keV 脉冲硬 X 射线能谱测量*

苏兆锋, 来定国, 邱孟通, 任书庆, 徐启福, 杨 实

(强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室(西北核技术研究院), 西安 710024)

摘 要: 介绍了基于吸收法的脉冲硬 X 射线能谱测量的基本原理及设计思路, 完成了探测器及吸收片的选型, 设计了射线准直系统, 研究了散射对测量的影响, 以 12 路 PIN 探测器阵列及铜、铝吸收片为测量核心部件研制了脉冲硬 X 射线能谱测量系统。实验测量了真空环境下“闪光二号”加速器串级二极管产生的脉冲硬 X 射线强度, 获得了不同衰减程度的实验波形, 通过解谱获得了脉冲硬 X 射线的能谱, 光子最高能量约 600 keV, 平均能量约 89.1 keV, 与理论计算的结果比较符合。

关键词: “闪光二号”加速器; 脉冲硬 X 射线; PIN 探测器阵列; 吸收法; 能谱

中图分类号: TL81 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.190354

Energy spectrum measurement for pulsed hard X-ray from 15 keV to 600 keV

Su Zhaofeng, Lai Dingguo, Qiu Mengtong, Ren Shuqing, Xu Qifu, Yang Shi

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect (Northwest Institute of Nuclear Technology), Xi'an 710024, China)

Abstract: This paper introduces the basic principle and design ideas of absorptive method for X-ray energy spectrum measurement. Si-PIN detectors array and Cu, Al attenuation materials were used to design the energy spectrometer combining theoretical calculation and experimental study. The collimating and anti-interference system was developed to obtain higher signal-to-noise ratio waveforms. The influence of scattering was researched. The different attenuation waveforms of pulsed hard X-ray at Shanguang II accelerator were measured experimentally in the vacuum environment. The energy spectrum was calculated. The maximum energy of X-ray was about 600 keV, and the average energy was about 89.1 keV, which agreed with the calculation results.

Key words: Shanguang II accelerator; pulsed hard X-ray; Si-PIN detectors array; absorptive method; energy spectrum

近几十年来,在脉冲功率技术领域,国内外对脉冲 X 射线能谱测量有着比较深入的研究。特别是以吸收法^[1-7]、荧光法^[8-9]、康普顿散射法^[10]及透射系数法^[11-12]等测量方法为代表的测量系统种类繁多,测量手段丰富,在多个能段都有很好的进展。而对于脉冲宽度为 50~60 ns、最高能量 600 keV、平均能量 80~120 keV 的脉冲硬 X 射线的能谱测量,由于受脉冲硬 X 射线源发展等诸多因素的限制,适用于该能段范围内的 X 射线能谱测量装置较为少见。所以,迫切需要研究一种适用于该能段的脉冲 X 射线能谱测量的方法,研制测量装置,以适应脉冲硬 X 射线束流诊断技术发展的需求。以“闪光二号”加速器为平台的高能注量硬 X 射线源于“十二五”期间建成,二极管电压 600 keV,电流 300 kA,束流宽度约 55 ns。射线能谱是该设备重要的束流参数考核指标,其实验测量结果对于评估设备的设计水平和束流能量大小具有重要意义。本文旨在研究使用 PIN 探测器阵列配合不同厚度的吸收片,建立一套能量分辨率高、散射影响小、信噪比高的能谱测量装置,并对能量在 600 keV 以下的硬 X 射线进行实验测量,通过解谱获得加速器产生的射线能谱。

1 基本原理

X 射线能谱测量方法很多,吸收法是具有代表性的一种方法。其测量原理是利用不同能量 X 射线在吸收片中衰减特性的差异,使被测 X 射线穿透不同厚度的吸收片,依据其衰减程度来反推能谱。

高功率脉冲电子加速器会产生一定能量的电子束,被聚焦后轰击到高原子序数材料上(如钨,钨等),产生韧致

* 收稿日期:2019-09-14; 修订日期:2019-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(11875214);国家自然科学基金青年基金项目(11705150)

作者简介:苏兆锋(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事脉冲辐射场测量与诊断工作; suzhaofeng@nint.ac.cn。

辐射 X 射线, 经过准直后照射在被测物质上, 同物质发生光电效应、康普顿散射及电子对效应 (对于待测硬 X 射线, 只存在前两种作用), 使得 X 射线逐步被吸收。不同能量的 X 射线穿过不同吸收片的透射率不同, 且与吸收片材料与厚度有关。射线在物质中的吸收近似服从指数衰减规律^[13], 即

$$I = I_0 e^{-\mu_m x_m} \quad (1)$$

式中: I_0 是射线进入吸收物质前的强度; I 是穿过吸收物质后的强度; μ_m 是质量衰减系数, 单位是 cm^2/g ; x_m 是吸收物质的质量厚度, 单位是 g/cm^2 。将吸收片放在探测器前端, 置于准直孔中, 构成一个测量模块, 多个模块形成阵列, 可以采集到一组衰减程度不同的 X 射线强度数据, 通过数据处理可以得到对应于各能量段的射线强度, 从而得到 X 射线的能谱分布。

首先将光子离散化并分为合适的能段, 各部分的能谱分布为 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$, 则有如下方程组

$$\begin{aligned} E_{11}I_1 + E_{12}I_2 + E_{13}I_3 + E_{14}I_4 + \dots + E_{1(n-1)}I_{n-1} + E_{1n}I_n &= A_1 \\ E_{21}I_1 + E_{22}I_2 + E_{23}I_3 + E_{24}I_4 + \dots + E_{2(n-1)}I_{n-1} + E_{2n}I_n &= A_2 \\ E_{31}I_1 + E_{32}I_2 + E_{33}I_3 + E_{34}I_4 + \dots + E_{3(n-1)}I_{n-1} + E_{3n}I_n &= A_3 \\ &\dots \\ E_{n1}I_1 + E_{n2}I_2 + E_{n3}I_3 + E_{n4}I_4 + \dots + E_{n(n-1)}I_{n-1} + E_{nn}I_n &= A_n \end{aligned} \quad (2)$$

利用 Monte-Carlo 程序计算得到处于第 m 能段的光子在第 n 个探测器上产生的能量沉积, 用 E_{ij} 表示, 将各能段所有光子在探测器上产生的能量沉积累加, 即为该探测器上的总能量沉积, 对应于实验中射线在探测器上的沉积能量, 用 A_i 表示。方程组写成矩阵形式

$$EI = A \quad (3)$$

求解以上方程组可以得到各能量区间的射线强度, 从而得到能谱。

2 能谱仪结构设计

2.1 吸收片选择

吸收片选择主要涉及材料元素的种类及厚度。一般来说, 轻元素材料密度较低, 对光子能量分辨率较低; 高 Z 元素一般密度较大, 但 K 层吸收边能量偏大, 接近硬 X 射线的主要能段区域, 波形有突变, 给后续解谱带来困难。根据调研国内外相关领域资料及以往测试数据和经验, 铜和铝材料比较适合硬 X 射线能段光子的能谱测量。材料的厚度通过不同能量射线的衰减程度、探测器灵敏度和线性范围来确定。

X 射线与物质互相作用截面与元素的质量衰减系数有如下关系^[14]

$$\mu_m = \frac{N_A}{M} \times 10^{-24} \times \sigma \quad (4)$$

式中: N_A 为阿伏伽德罗常数; σ 为总截面; M 为元素的摩尔质量, 单位是 g/mol 。以铜吸收片为例, 对于某一能段光子, 可以通过作用截面计算得到铜元素在该能段光子下对应的质量衰减系数, 结合式 (1) 即可算出该能段光子的透射率。然后把各个能段的光子透射吸收片的能量叠加, 即可得到入射光谱经过该厚度吸收片后的总的透射率, 该透射率是确定吸收片厚度的重要依据。对于求解能谱而言, 探测器测得的数据越均匀越有利于后期的数据分析。为此, 测量介质厚度的选取必须使透射率达到良好的梯度。

理论计算可知, 待测硬 X 射线大部分光子能量分布在 $50 \sim 200 \text{ keV}$ 之间, 可以细化该能段的光子能谱, 使得多数的吸收片对该部分能段的光子具有较高的分辨能力, 而大于 300 keV 的光子个数少, 能段和吸收片的设置可以宽泛一些。针对能量低于 200 keV 的光子, 使用厚度 7 mm 以下的铜及铝吸收片, 可以使光子衰减几倍到上百倍, 形成良好的衰减梯度。针对能量大于 200 keV 的光子, 可以使用 $6 \sim 13 \text{ mm}$ 厚的铜吸收片, 这些吸收片吸收了大部分的低能光子, 对稍高能光子分辨能力强。

吸收片的材料和厚度最终确定为: $0, 1.00 \text{ mm Cu}, 2.16 \text{ mm Cu}, 4.10 \text{ mm Cu}, 5.01 \text{ mm Cu}, 7.00 \text{ mm Cu}, 7.98 \text{ mm Cu}, 10.07 \text{ mm Cu}, 12.00 \text{ mm Cu}, 3.00 \text{ mm Al}, 7.11 \text{ mm Al}, 11.03 \text{ mm Al}$, 以上均为实测数据。吸收片加工工艺的良莠对测量结果影响很大, 需要严格考核吸收片材料的加工精度, 包括材料内部质量均匀性、是否有空鼓或气泡、表面突起或缺陷、材料元素的纯度等。同一厚度的吸收片可以加工多片, 逐一考核遴选。

2.2 散射控制

对于硬 X 射线能谱测量, 散射是不可忽略的因素, 完全避免散射的影响是不可能的, 只能通过有效手段和措施降低散射的比例, 增加探测器收集粒子来源的合理性。理论计算结果显示, 加大吸收片与探测器之间的距离可以

减少散射的比例。利用 MCNP 程序理论计算了能谱仪选用的 11 种不同厚度的铜吸收片的散透射比 (Y) 随探测器距离 (D) 的变化趋势。以 0.2 cm 厚的吸收片为例, 图 1 显示了散透射比与探测器距离之间的关系。

图中曲线显示, 随着吸收片和探测器之间的距离增加, 散射的比例明显降低。取散透射比 5% 为设计标准, 图 1 中的红线表示散透射比为 5%, 它与曲线的交点即为散透射比 5% 时对应的探测器与吸收片的距离。表 1 列出了不同厚度的吸收片散透射比为 5% 时的探测器与吸收片的距离。通过在吸收片及探测器之间加置不同厚度隔离套筒的方式来控制探测器与吸收片的距离。

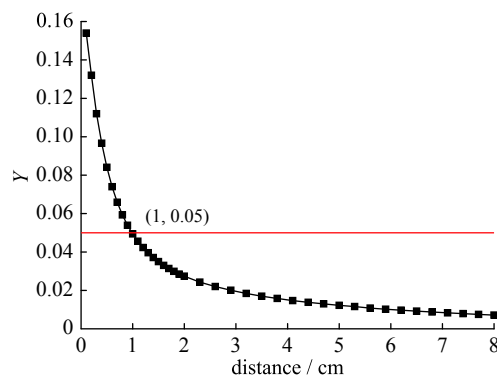


Fig. 1 Change of scatter-transmission ratio under difference distance of the detectors

图 1 散透射比例随探测器距离的变化趋势

表 1 散透射比为 5% 时对应的探测器与铜吸收片的距离

Table 1 Distance between the detector and the copper absorption plate when scatter-transmission ratio is 5%

thickness of the copper absorption plate/mm	1.00	2.16	4.10	5.01	7.00	7.98	10.07	12.00
distance between the detector and the copper absorption plate/cm	0.42	1.0	1.8	2.6	2.9	3.5	4.4	5.1

2.3 测量模块与准直系统

一般来说, 测量模块越多, 能谱越精细, 但会增加后期解谱的难度, 而且模块越多, 能谱仪的体积越大, 每个测量模块接受到的光照差异越大, 影响同一性。PIN 探测器体积小、入射窗很薄、能量分辨率高、时间响应快、动态测量范围大, 可用于脉冲辐射场的测量和诊断等物理研究。经过综合考虑, 测量模块的数量确定为 12 个, 它们均匀地分布在一个长方形的铅准直器内。准直器共有 16 个准直孔, 其中 4 个为备用, 内部依次放置探测器、隔离套筒、吸收片和电缆座。每个准直孔前端设有一个台阶, 台阶厚度 3 mm, 宽度 3 mm, 便于吸收片的定位及固定。

准直器的长和宽分别为 161 mm, 141 mm, 厚度为 62 mm, 孔直径为 29 mm, 和探测器的外径尺寸紧密配合。各通孔之间铅的厚度为 3 mm, 用于防止射线的互相串扰。准直系统的后面是一个具有 16 个孔的后盖板, 后盖板和铅体用螺杆固定, 孔内仅仅露出测量和高压电缆头。如此, 测量系统整体较为固定, 测量部件加装完毕后, 如无特殊情况, 无需拆卸。图 2 为单个探测器准直结构示意图。

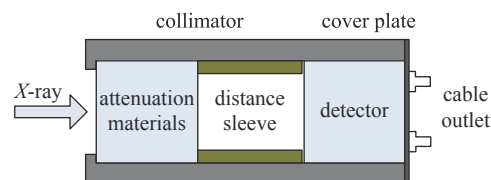


Fig. 2 Collimating device of the detector

图 2 单个探测器准直结构示意图

2.4 能量沉积计算

根据设计的能谱仪模型, 结合二极管结构和具体实验环境, 利用 Monte-Carlo 程序模拟了光子在探测器中的输运过程。所使用的 PIN 探测器的灵敏半径为 5 mm, 灵敏厚度为 0.5 mm, 光子能量范围是 0~600 keV, 共分 12 个能段, 用 Monte-Carlo 程序模拟计算了所有能段光子经过不同质量厚度的吸收片后在 PIN 探测器灵敏区的能量沉积, 图 3 是计算得到的能量沉积曲线, 曲线中的数值即为公式 (2) 中的能量沉积 E_{ij} 。

3 实验结果和讨论

以“闪光二号”加速器串级二极管为实验平台, 用能谱仪对加速器产生的硬 X 射线进行了测量。由于二极管需要工作在 10^{-3} Pa 的真空环境, 其末端有 5 mm 厚的铝制真空盖板, 吸收了部分 X 射线, 导致能谱仪无法探测到全部出射的光子, 给测量带来误差。为此, 在串级二极管末端设计真空封膜机和转接段, 后端与 4 m 长的真空延伸段相连, 能谱仪置于延伸段的尾部, 信号通过筒体末端的封真空电缆阵列引出。由此, 既保证了二极管区域的高真空度, 又使出射的 X 射线无遮挡地照射到能谱仪上。图 4 为能谱测量的实验布局照片。

图 5 为能谱仪测量得到的实验波形。可以看出, 未加吸收片的探测器信号峰值最高, 积分最大, 说明光子沉积的能量也最多。随着吸收片质量厚度的增加, 信号的峰值、半高宽及积分随之减小, 说明低能部分的光子被逐渐加厚的吸收片吸收, 只有高能部分的光子透过, 这一现象也符合光子在物质中的衰减规律, 波形的积分对应着 X 射线的衰减程度。图 5 所示波形畸变小, 信噪比高, 对二极管的工作状态的判断有一定的参考作用, 可以作为求

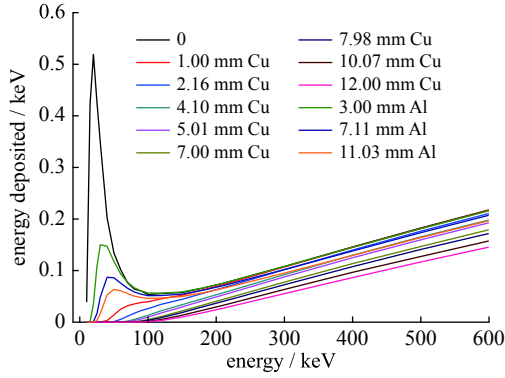


Fig. 3 Energy deposition curves of photon on the detectors after absorption plate of different mass thickness

图 3 光子经过不同质量厚度的吸收片后在探测器上的能量沉积曲线

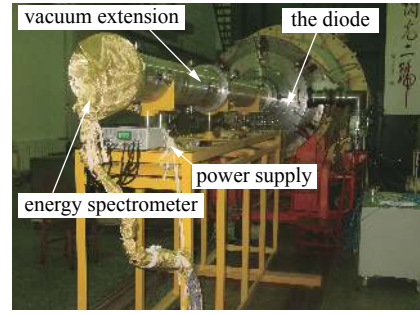


Fig. 4 Photograph of the energy spectrometer in the experiment

图 4 能谱仪实验布局照片

解能谱的原始数据。

提高能谱求解的可信度是目前能谱测量工作的关键技术及核心技术。根据实验测量结果和理论模拟的束流强度的等量关系,重点研究了以奇异值分解法为代表的求解病态矩阵的方法,该方法无须假定初始能谱,适应范围广,噪声小,具体思路为:首先对解谱的系数矩阵 $AX=B$ 中的系数 A 进行奇异值分解^[15]

$$A = USV^T \tag{5}$$

则广义逆为

$$A^+ = VS^+U^T \tag{6}$$

求解可得

$$B = USV^T X, A = A^+ B = VS^+U^T B \tag{7}$$

令 $g = U^T B, P = S^+ g$, 则能谱分布 $X_i = \sum_{j=1}^n (V_{i,j}, P_j)$ 。

图 6 为解谱得到的脉冲硬 X 射线的能谱与理论计算结果的对比,横轴为光子的能量,纵轴是光子的相对个数。测量结果表明,光子的最高能量约为 600 keV,平均能量为 89.1 keV,理论计算值为 93.6 keV,实验结果和理论计算值吻合较好,能量上限及谱形分布基本一致。在能量 120~300 keV 部分,实测能谱较理论模拟偏硬,究其原因因为实验中散射成分比理论偏重,实验环境复杂,理论建模时无法完全与实验环境相符。

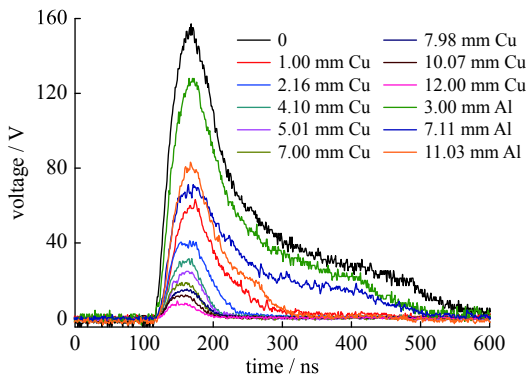


Fig. 5 Measured waveforms of the spectrometer

图 5 能谱仪的测量波形

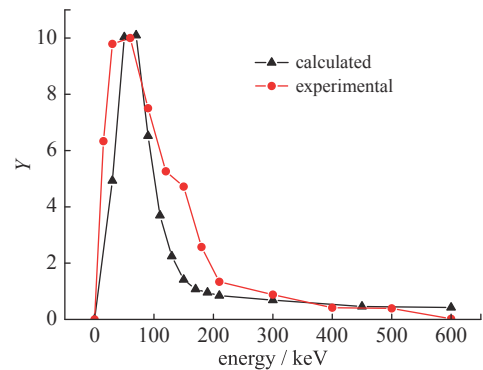


Fig. 6 Spectrum comparison between experiment energy and theoretical calculation

图 6 能谱实验结果和理论计算对比

4 结 论

阐述了吸收法测量脉冲硬 X 射线能谱的基本原理,完成了探测器和吸收片的选型,进行了数值计算和实验验证,研制了硬 X 射线能谱测量系统。研究了散射对测量结果的影响,确定了影响散射的主要因素,并通过优化探测器结构把散射比控制在 5% 以下。在真空环境下,实验测量了“闪光二号”加速器产生的脉冲硬 X 射线的能谱,光子的最高能量约为 600 keV,平均能量为 89.1 keV。测量结果对于评估和考核硬 X 射线设备的设计水平和束

流能量大小具有重要意义。

在后续的探测方法、系统研制、实验研究及数据处理中,需要结合实际情况,开展针对性研究,努力提高探测器的能量分辨及目标粒子识别能力,优化能谱求解技术,加强测量技术的规范性和标准化,提高能谱结果的可信度。随着本领域研究的不断深入,会有越来越多的关键技术等待攻克,需要扎实推进相关基础研究。

参考文献:

- [1] 陈楠,戴曼,高峰,等. 圆形阵列法在能谱测量中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(11):2995-2998. (Chen Nan, Dai Man, Gao Feng, et al. Energy spectrum measurement with circular array method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(11): 2995-2998)
- [2] 苏兆锋,杨海亮,邱爱慈,等. 高能脉冲X射线能谱测量[J]. *物理学报*, 2010, 59(11): 7729-7735. (Su Zhaofeng, Yang Hailiang, Qiu Aici, et al. Measurements of energy spectra for high energy pulsed X-ray[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(11): 7729-7735)
- [3] Carlson G A, Lorence L J. A differential absorption spectrometer for determining flash X-ray spectra from 10 keV~2000 keV[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1988, 35(6): 1255-1259.
- [4] Steven G G, Pereira N R. Differential absorption spectrometer for pulsed bremsstrahlung[J]. *Rev Sci Instrum*, 1999, 64(7): 1835-1840.
- [5] 全林,郑伟博,屠荆,等. 快脉冲硬X射线能谱测量实验研究[J]. *原子能科学技术*, 2009, 43(7): 658-662. (Quan Lin, Zheng Weibo, Tu Jing, et al. Spectra measurement for fast pulsed hard X-ray[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009, 43(7): 658-662)
- [6] 苏兆锋,杨海亮,孙剑锋,等. 强脉冲 γ 射线能谱测量仪研制[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(5): 1137-1140. (Su Zhaofeng, Yang Hailiang, Sun Jianfeng, et al. Development of intense pulse γ -ray spectrometer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(5): 1137-1140)
- [7] 王毅,李勤,江孝国,等. 衰减透射法测量高能X射线能谱[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(6): 1466-1470. (Wang Yi, Li Qin, Jiang Xiaoguo, et al. High-energy X-ray spectrum estimation by attenuated transmission method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1466-1470)
- [8] 宋朝辉,王宝慧,王奎禄,等. 热释光探测器在脉冲硬X射线能谱测量中的应用[J]. *核电子学与探测技术*, 2003, 23(1): 46-49. (Song Zhaohui, Wang Baohui, Wang Kuilu, et al. Application of thermoluminescence dosimeter on the measurement of hard X-ray pulse energy spectrum[J]. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2003, 23(1): 46-49)
- [9] 李朝光,何小安,张文海,等. 5~88 keV能区硬X光能谱精密测量[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 112007. (Li Chaoguang, He Xiaohan, Zhang Wenhai, et al. Measurement of hard X-ray spectrum at 5-88keV[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 112007)
- [10] Reims N, Sukowski F, Kilicarslan K. Developing a Compton spectrometer for determination of X-ray tube spectra[C]//IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record. 2012: 3265-3268.
- [11] 王继虎,马文彦,翁秀峰,等. 期望最大法用于脉冲 γ 射线解谱的理论模拟与分析[J]. *现代应用物理*, 2014, 5(3): 169-173. (Wang Jihu, Ma Wenyan, Weng Xiufeng, et al. Simulation and analysis of spectrum reconstruction of pulsed γ -rays using expectation maximization method[J]. *Modern Applied Physics*, 2014, 5(3): 169-173)
- [12] 肖开宇,崔高显,刘浩才,等. 6MV X射线能谱的实验测定[J]. *原子能科学技术*, 1998, 32(6): 499-502. (Xiao Kaiyu, Cui Gaoxian, Liu Haocai, et al. Experimental measurements of bremspectrum from 6 MV X-ray[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1998, 32(6): 499-502)
- [13] 陈元金. 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 169-169. (Chen Yuanjin. Pulsed radiation field measurement data processing and error analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 169-169)
- [14] 汲长松. 核辐射探测器及其实验技术手册[M]. 北京: 原子能出版社, 1990: 75-75. (Ji Changsong. Handbook of nuclear radiation detectors and their experiment techniques[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990: 75-75)
- [15] 何昌礼. 解病态线性方程组的奇异值分解法及其应用[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1990: 109-111. (He Changli. Singular value decomposition method for solving ill-conditioned linear equations and its application[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1990: 109-111)