

基于 MATLAB GUI 的谱线平滑处理

陈伟^{1,2} 莫磊¹ 周建斌² 方方² 洪旭² 丁卫撑² 喻杰² 周伟²

1 (成都航空职业技术学院 信息工程学院 成都 610100)

2 (成都理工大学 核技术与自动化工程学院 成都 610059)

摘要 谱线平滑可以去除实测核能谱中的统计涨落并保留谱峰重要信息。首先介绍了高斯平滑和 Savitzky-Golay (SG)平滑的原理与实现方法,然后基于矩阵实验室图形界面开发环境(Matrix Laboratory Graphical User Interface, MATLAB GUI)设计了谱线分析工具,对谱数据进行在线实时和离线批量处理。最后对石墨预衍射 X 荧光分析仪实测的 U 标准样数据作平滑分析,并引入相关系数来评价平滑效果。实验结果表明:当谱峰幅值较大时,高斯平滑的平滑度指标较好,当谱峰幅值较小时,SG 平滑显现优势;高斯平滑的参数设置较灵活,但运算较复杂,需用到矩阵计算,SG 平滑的算法较简洁,代码执行时间更短。因此,实际工程应用中,应综合考虑在维持较好平滑度和相关系数指标的情况下,合理选择平滑方法和参数。

关键词 谱线平滑,平滑度,相关系数, MATLAB GUI

中图分类号 TL311.1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.060401

Research on the spectrum smoothing method based on MATLAB GUI

CHEN Wei^{1,2} MO Lei¹ ZHOU Jianbin² FANG Fang² HONG Xu² DING Weicheng²
YU Jie² ZHOU Wei²

1(College of Information Engineering, Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China)

2(College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract [Background] Spectrum smoothing can remove the statistical fluctuations in the measured energy spectrum and retain important information of the spectral peaks. Each spectrum smoothing method has its own advantages, and is not always effective in any case. [Purpose] This study aims at the application of spectrum smoothing methods with different smoothing times and parameters, and evaluate smoothing methods based on smoothness and correlation coefficient respectively. [Methods] A spectrum analysis tool which is integrated Gauss smoothing and Savitzky-Golay (SG) methods is designed based on Matrix Laboratory Graphical User Interface, (MATLAB GUI). It is applicable to real-time and off-line batch processing of spectral data with a few necessary steps. One spectrum captured by the graphite pre-diffraction X fluorescence analyzer is processed by the designed tool, and the correlation coefficient is introduced to evaluate the smoothness. [Results] Experimental results show that the smoothness of the Gauss smoothing is better than SG when the peak amplitude is larger. Whilst SG outperform Gauss

国家重点研发计划项目(No.2016YFC1402505)、国家自然科学基金(No.11675028、No.41774140)、四川省教育厅资助科研项目(No.18ZA0041)、成都航院校级项目(No.061758)资助

第一作者: 陈伟, 男, 1978 年出生, 2008 年于成都理工大学获硕士学位, 现为博士研究生, 从事核测控技术研究

通信作者: 莫磊, E-mail: nqnt@163.com

收稿日期: 2017-11-28, 修回日期: 2018-03-10

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2016YFC1402505), National Natural Science Foundation of China (No.11675028, No.41774140), Scientific Research Fund of Sichuan Provincial Education Department (No.18ZA0041), Chengdu Aeronautic Polytechnic Project (No.061758)

First author: CHEN Wei, male, born in 1978, graduated from Chengdu University of Technology with a master's degree in 2008, doctoral student, engaged in nuclear measurement and control technology

Corresponding author: MO Lei, E-mail: nqnt@163.com

Received date: 2017-11-28, revised date: 2018-03-10

smoothing when the peak amplitude is small. The Gauss smoothing parameters are more flexible than that of SG, but the operation is more complex that needs matrix manipulation. The SG smoothing algorithm is simple and the execution time of the code is short. [Conclusion] The smoothing methods and parameters should be selected in accordance with actual conditions to maintain good smoothness and correlation coefficient for spectrum smoothing.

Key words Spectrum smoothing, Smoothness, Correlation coefficient, MATLAB GUI

放射性统计涨落和电子学噪声等因素会对实测核能谱的定性定量分析产生不利影响。谱线平滑处理可以去除谱线中的噪声, 保留谱峰全部重要的特性信息。常用能谱平滑方法有算术滑动平均法(移动平均平滑法)、重心法、快速傅里叶变换法、高斯法、小波分析等^[1-7], 随着研究深入, 更多处理方法正在出现。Savitzky 等^[3]提出在时域内用多项式卷积计算方法进行最小二乘拟合计算的 Savitzky-Golay 滤波器(简称 SG 平滑)。刘永刚^[2]采用 B 样条法对 γ 能谱平滑研究, 该方法不需设定初值, 具有较高的峰形分辨能力, 适用于谱线局部平滑; 对全谱平滑时需要高阶 B 样条函数, 且平滑速度较慢。黄洪全等^[4]结合核能谱的统计特性, 采用高斯混合模型对核能谱进行平滑滤波处理, 在模型的多次运算过程中实现更合理的平滑滤波。赵奉奎^[5]针对能量色散 X 射线荧光光谱, 提出平稳小波变换与交叉验证和最优阈值相结合的算法, 对能量色散 X 射线荧光光谱去噪, 有效避免 Gibbs 现象的发生, 提高信号的信噪比, 减小均方根误差。侯利桥等^[6]根据平滑要求和处理速度, 建立不同函数的径向基函数(Radical Basis Function, RBF)神经网络对核能谱进行平滑滤波。

各谱线平滑方法各有优势, 并不是在任何情况下总是有效的。MATLAB 是一种用于算法开发、数据可视化、数据分析以及数值计算的科学计算软件, 具备强大便捷的绘图功能和友好的界面。GUI (Graphical User Interface) 是 MATLAB 的另一个重要特色, 利用它可以开发易于使用的人机交互界面。为方便对谱线进行平滑处理, 本文基于 MATLAB GUI, 设计了能够脱离 MATLAB 运行的可执行界面程序。设计分析工具已实现谱线数据高斯平滑和 SG 平滑处理, 可对测量能谱进行在线实时和离线批量处理。

1 能谱数据平滑方法

1.1 高斯平滑

高斯平滑也称高斯滤波, 它是一种按照高斯函数的特性来计算权值的线性平滑滤波器, 对抑制服从正态分布的噪声非常有效。高斯滤波对谱图数据

进行加权平均, 每一个数据点的值, 都由其本身与邻域内的其他数据经加权平均后求得。高斯滤波的实现过程可以看作是用滤波模板(或称卷积、掩模)扫描谱图中的每一个数据, 用模板确定的邻域内数据的加权平均值去替代模板中心数据点的值^[7-8]。

高斯滤波模板由离散后的正态分布的概率密度函数求得:

$$h(k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(k-r)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中: σ 为滤波器的标准差, 表征高斯函数的宽度(决定平滑程度); r 为模板值, 数学模拟时一般取整数, 高斯模板长度 w (w 一般取奇数) 与 r 的关系为: $w=r \times 2-1$ 。

下面为实现高斯滤波模板的 MATLAB 程序:

```
h= zeros(1, 2*r-1);
```

```
for k=1 : 2*r-1
```

```
    h(k)=exp(-(k-r)^2/(2*sigma^2))/(sigma*sqrt(2*pi));
```

```
end
```

采用离散卷积滑动变换平滑方法, 可以实现能谱数据的快速高斯平滑, 其数学算法实质是取测量信号 $f(n)$ 和高斯滤波函数模板 $h(n)$ 的卷积。

数据序列 $f(n)$ 与 $h(n)$ 的卷积定义为:

$$g(n) = f(n) \otimes h(n) = \sum_{k=r}^{n-r} f(n-k)h(k) \quad (2)$$

算式中的 h 称为高斯卷积核。卷积实现高斯滤波的步骤如图 1 所示。

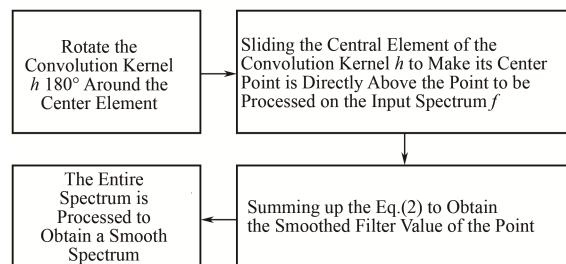


图 1 卷积实现高斯滤波步骤图

Fig.1 Flow chart of convolution Gaussian filter

分析高斯滤波的过程可知, 谱线的开头和结尾的 r 个数据无法滤波, 在实际处理谱数据时可采用

在谱线数据序列 $f(n)$ 的前后各补充 r 个 0，实现全谱滤波。

1.2 SG 平滑

SG 平滑最初由 Savitzky 等^[3]于 1964 年提出，在数据流平滑除噪中应用普遍。它是一种在时域内基于多项式，通过移动窗口位置，利用偏最小二乘法(Partial Least Squares, PLS)进行最佳拟合的方法。SG 平滑算法是对移动平滑算法的改进，其原理是：首先在拟合点 x_k 的左右两边各取 m 个数据点，共 $2m+1$ 个数据，然后对这 $2m+1$ 个数据进行多项式拟合，并使各个数据点的实际值与拟合值之差的平方和最小，最后移动 x_k ，做相同计算，完成谱线光滑^[3,9-10]。常用点次的 SG 平滑公式系数可直接查表获得^[3]，本文采用七点二次平滑系数，见表 1。

表 1 七点二次的平滑系数
Table 1 Coefficient of seven point two times smoothing

$1/42$	y_{k-a}	y_{k-2}	y_{k-1}	y_k	y_{k+1}	y_{k+2}	y_{k+a}
$\overline{y_1}$	32	15	3	-4	-6	-3	5
$\overline{y_2}$	15	12	9	6	3	0	-3
$\overline{y_3}$	3	9	12	12	9	3	-6
$\overline{y_k}$	-4	6	12	14	12	6	-4
$\overline{y_{n-2}}$	-6	3	9	12	12	9	3
$\overline{y_{n-1}}$	-3	0	3	6	9	12	15
$\overline{y_n}$	5	-3	-6	-4	3	15	32

表 1 中 $\overline{y_k}$ 是所在行为平滑谱线中间各点时的系数，其他各行分别为前面起始点和后面结束点的系数。从表 1 中可以写出七点二次平滑公式：

$$\overline{y_k} = \frac{1}{21}(-2y_{k-3} + 3y_{k-2} + 6y_{k-1} + 7y_k + 6y_{k+1} + 3y_{k+2} - 2y_{k+3}) \quad (3)$$

2 MATLAB GUI 设计

2.1 GUI 设计概述

MATLAB GUI 设计的方法通常有两种：一是用 .m 文件代码构建界面；二是直接利用自带的图形界面开发环境(Graph User Interface Developing Environment, GUIDE)来制作界面。GUIDE 交互性较强，用户只需在 GUIDE 中合理布局控件就可以搭建人机交互界面，通过简单的属性设置和少量的代码就可对控件进行控制^[11-12]。本文采用第二种方式，GUI 设计步骤如图 2 所示。

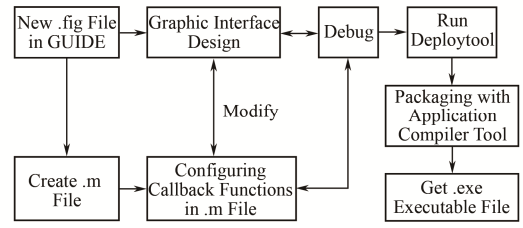


图 2 GUI 设计流程框图
Fig.2 Block diagram of GUI design

.fig 文件主要承载可视化图文界面。.m 文件中存储与 .fig 文件中各控件对应的回调函数，以及方便用于人机交互的 uigetfile、listdlg、questdlg 等对话框命令。调试完成后的程序用打包工具生成 exe 可执行文件。

2.2 数据平滑分析 GUI 设计

设计的谱线分析工具支持.txt、.xls、.pu（四川新先达测控技术有限公司的 CIT 系列能谱仪测量数据文件）文件格式，工作界面如图 3 所示。界面有“单文件处理”和“文件夹批处理”，通过 6 个步骤（界面中序号）实现谱线平滑分析。

步骤 1 中执行“打开文件”时可处理一条谱线，根据后续各步骤选取的功能对谱线平滑处理。处理后的谱数据自动在原文件名末尾加上 GS、SG、NH 并生成新文件，存储于与原文件同路径的 AfterSoomth 子目录中。平滑后的各谱线在新窗口中绘图显示。当执行“打开文件夹”时，会对文件夹内选定文件做批处理平滑并输出为新文件，数据处理后不绘图。



图 3 软件界面
Fig.3 Software interface

3 平滑数据分析

分析的实测能谱来源于石墨预衍射 X 荧光分析仪对 U 标准样的测量结果。在 MATLAB 中对实测谱线进行高斯平滑、SG 平滑, 平滑后的谱线与原始谱线在同一绘图窗口叠加显示, 用户可以直观地进行不同滤波方式的谱线比较, 此功能在此不赘述。下面针对本谱线分析工具输出的滤波后文件进行数据分析。

3.1 平滑评价

为了进一步分析平滑后谱线, 本文引入平滑度和相关系数指标。

平滑度是指去噪后信号的差分数平方和与原始信号差分平方和之比, 记为 r 。信号越光滑, 平滑度值越小, 去噪效果也越好。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (g(i+1) - g(i))^2}{\sum_{i=1}^{n-1} (f(i+1) - f(i))^2} \quad (4)$$

式中: $f(i)$ 和 $g(i)$ 分别为能谱平滑前后第 i 道的数据; n 为总道数。 r 值越趋近于 0, 平滑效果越好^[13]。

相关系数用于评价平滑信号与原始信号的相似度, 记为 ρ 。 ρ 越接近于 1, 则信号相关性越好; 当 ρ 为 0 时, 两者不相关^[14]。相关系数计算公式如式 (5) 所示。

$$\rho = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{(f(i) - \mu_f)(g(i) - \mu_g)}{\sigma_f \sigma_g} \right) \quad (5)$$

式中: μ_f 、 μ_g 分别为 $f(i)$ 和 $g(i)$ 的均值; σ_f 、 σ_g 分别为 $f(i)$ 和 $g(i)$ 的标准差。

3.2 平滑分析

选取 $500 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 U 标准样的实测能谱, 对其进行一次高斯平滑和 SG 平滑, 高斯平滑参数如下: 窗口宽度为 7, 滤波器标准差 σ 为 0.75; SG 平滑采用七点二次多项式滤波。原始能谱和平滑后数据分别用统计敏感的非线性迭代剥峰算法 (Statistics-sensitive Nonlinear Iterative Peak-clipping, SNIP) 方法扣除背景, 从上述处理后的数据中截取 U 特征峰对应的 1058~1118 道区域数据绘图, 如图 4 所示。对上述两种平滑数据做线性拟合, 如图 5 所示, 可得拟合优度 R^2 为 0.999 86。由此可以看出: 合适平滑参数的一次高斯平滑与一次 SG 平滑在特征峰上平滑效果相差不大。

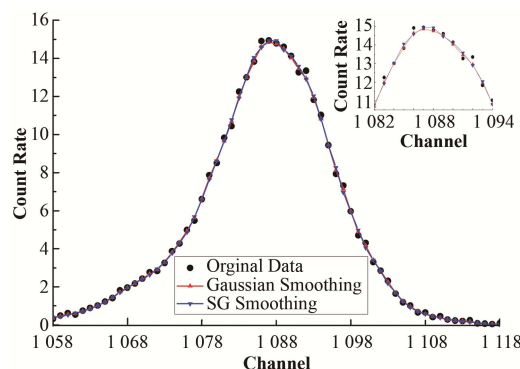


图 4 SNIP 方法扣除背景后的 U 特征峰
Fig.4 U characteristic peak after deducting background by SNIP method

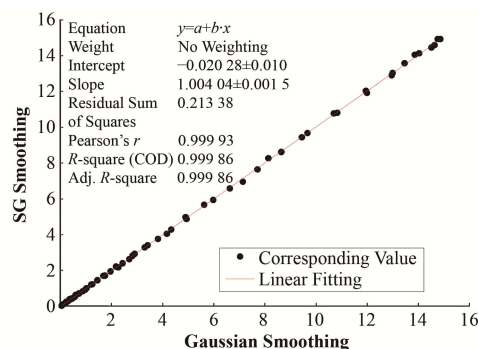


图 5 高斯平滑与 SG 平滑结果线性分析
Fig.5 Linear analysis of Gaussian smoothing and SG smoothing results

分别选取含量为 $1 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $5 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $10 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $50 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $100 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $500 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 U 标准样实测数据, 保持上述平滑参数不变, 进行一次高斯平滑和 SG 平滑, 截取 1058~1118 道 U 特征峰平滑后数据进行分析, 平滑度和相关系数指标如表 2 所示。分析表 2 数据可知, 高斯平滑的相关系数指标较好; 随着特征峰幅值的增加, 两种平滑方式的平滑度均变差, 低含量时, SG 平滑的平滑度优于高斯平滑, 特征峰幅值较大时, 高斯平滑较优。

选取 $500 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 U 标准样的实测能谱, 对原始能谱数据分别做不同次数和不同参数的高斯平滑和 SG 平滑, 然后截取 U 特征峰对应的 1058~1118 道区域平滑后数据进行分析, 结果如表 3 所示。

分析表 3 中不同 σ 时的一次高斯平滑处理数据可知, 选择较大的 σ , 有利于在维持较好的相关系数时, 提升处理后谱线的平滑度。

分析表 3 中数据可以看出, SG 七点二次平滑优于五点二次平滑的平滑度指标, 前者只需较少的平滑次数就可对特征峰所在的道址进行矫正。在高斯平滑中, 比较相同平滑次数下不同 σ , 以及相同 σ 不同平滑次数两组数据可知, 多次平滑和较大的 σ

表 2 一次平滑后的 U 特征峰能谱数据
Table 2 Energy spectrum data of U characteristic peaks after signal smoothing

U 含量 Contents of U / $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	平滑度 r Smoothness		相关系数 ρ Correlation coefficient	
	SG 七点二次平滑 Seven-spot double smoothing of SG	高斯平滑 Gaussian smoothing	SG 七点两次平滑 Seven-spot double smoothing of SG	高斯平滑 Gaussian smoothing
1	0.096 89	0.179 22	0.903 57	0.956 40
5	0.231 90	0.317 12	0.984 30	0.993 24
10	0.210 75	0.254 94	0.981 25	0.992 68
50	0.618 53	0.638 50	0.998 09	0.999 19
100	0.740 32	0.741 46	0.999 01	0.999 51
500	0.856 79	0.848 73	0.999 53	0.999 76
1 000	0.964 33	0.952 08	0.999 89	0.999 95

表 3 多次平滑后的 U 特征峰能谱数据
Table 3 Energy spectrum data of U characteristic peaks after multiple smoothing

平滑方式 Smoothing method	平滑次数 Smoothing times	标准差 σ Standard deviation	峰值 Peak	峰位道址 Peak position	平滑度 r Smoothness	相关系数 ρ Correlation coefficient
SG 五点两次平滑 Five-spot double smoothing of SG	1	—	15.126 29	1 087	0.868 50	0.999 61
	5	—	15.069 24	1 087	0.851 38	0.999 62
	10	—	15.033 85	1 087	0.846 80	0.999 58
	20	—	14.991 07	1 088	0.841 74	0.999 54
	30	—	14.988 95	1 088	0.838 30	0.999 51
SG 七点两次平滑 Seven-spot double smoothing of SG	1	—	15.069 05	1 087	0.856 79	0.999 53
	5	—	14.988 72	1 088	0.840 28	0.999 53
	10	—	14.976 14	1 088	0.833 33	0.999 47
	20	—	14.930 73	1 088	0.822 78	0.999 39
	30	—	14.877 58	1 088	0.813 38	0.999 31
高斯平滑 Gaussian smoothing	1	0.50	15.045 46	1 087	0.909 29	0.999 95
		0.75	15.003 35	1 087	0.848 73	0.999 76
		1.00	14.931 81	1 087	0.828 28	0.999 63
		1.25	14.846 06	1 087	0.813 03	0.999 54
		1.50	14.777 35	1 087	0.800 13	0.999 46
	5	0.50	14.917 35	1 087	0.827 13	0.999 66
		0.75	14.664 53	1 088	0.781 66	0.999 34
		1.00	14.414 65	1 088	0.737 07	0.998 90
		1.25	14.133 95	1 088	0.691 55	0.998 20
		1.50	13.876 70	1 088	0.652 69	0.997 35
	10	0.50	14.748 32	1 087	0.797 14	0.999 46
		0.75	14.342 58	1 088	0.725 03	0.998 74
		1.00	13.876 70	1 088	0.652 69	0.997 35
		1.25	13.383 33	1 088	0.583 69	0.995 16
		1.50	12.958 15	1 088	0.528 96	0.992 65
	20	0.50	14.492 51	1 088	0.750 54	0.999 06
		0.75	13.746 98	1 088	0.633 89	0.996 85
		1.00	12.958 15	1 088	0.528 96	0.992 65
		1.25	12.200 45	1 088	0.440 85	0.986 58
		1.50	11.308 27	1 088	0.350 45	0.976 70
	30	0.50	14.251 32	1 088	0.710 20	0.998 52
		0.75	13.219 21	1 088	0.562 06	0.994 27
		1.00	12.213 34	1 088	0.442 21	0.986 71
		1.25	11.308 27	1 088	0.350 45	0.976 70
		1.50	10.400 15	1 088	0.260 15	0.964 33

可改善谱线的平滑度。在相关系数指标上,虽然相关系数指标会随着平滑次数的增多有所下降,但利用 SG 五点二次平滑和七点二次平滑分别作单次和多次平滑的相关系数均在 0.999 以上;同理,高斯平滑中,增大平滑次数和 σ ,均会引起相关系数的下降,但其值仍能维持在 0.97 以上。以上各种方式的平滑数据,从 U 特征峰峰值来看,较大的参数设置会引起特征峰峰值的下降。

在算法实现上,高斯平滑参数 w 与 σ 的设置较灵活,但运算中需采用矩阵,计算较复杂,而 SG 平滑可通过查表获取常用点次的平滑公式。在 MATLAB 2016b 平台上测试,执行 10 次高斯平滑约需 2 700 ms,10 次 SG 平滑约需 1 300 ms。综合比较算法与代码执行时间可知,高斯平滑的参数选取更灵活,而 SG 平滑的算法更简洁,程序运行效率更高。

4 讨论

本文以 MATLAB GUI 为平台设计了对谱数据进行在线实时处理与离线批量分析的处理工具。文中引入了相关系数来评价平滑后谱数据与原始数据的相似度。对平滑后谱线分析发现,在维持较好相关系数指标条件下,当谱峰幅值较小时,SG 平滑的平滑度指标较优,当谱峰幅值较大时,高斯平滑较好。在算法实现上,SG 平滑的多项式系数可查表获得,算法更简洁,而高斯平滑的参数选择更加灵活,但运算中需用到卷积与矩阵,在代码执行时间上,SG 平滑优于高斯平滑,因此 SG 平滑更适于嵌入式设备中的谱线平滑应用。实际工程应用中,应综合考虑应用需求,在维持较好平滑度和相关系数指标的情况下,合理选择平滑方式与平滑参数。

参考文献

- 1 陈亮. 核素识别算法及数字化能谱采集系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
CHEN Liang. Nuclide identification algorithm and digital spectra acquisition system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- 2 刘永刚. γ 能谱谱数据分解方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
LIU Yonggang. Study on γ spectral the analysis methods[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- 3 Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. Analytical Chemistry, 1964, **36**(8): 1627–1639.
- 4 黄洪全, 方方, 龚迪琛, 等. GMM 模型在核能谱平滑滤波中的应用[J]. 核技术, 2010, **33**(5): 375–379.
HUANG Hongquan, FANG Fang, GONG Dichen, *et al.* An application of GMM model in nuclear spectrum smoothing filtering[J]. Nuclear Techniques, 2010, **33**(5): 375–379.
- 5 赵奉奎. 能量色散型 X 射线荧光光谱仪关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
ZHAO Fengkui. Research on key technologies of energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- 6 侯利桥, 方江雄, 管弦. RBF 神经网络在核能谱平滑中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2016, **36**(7): 669–672. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.07.001.
HOU Liqiao, FANG Jiangxiong, GUAN Xian. An application of RBF neural networks in nuclear spectrum smoothing filtering[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, **36**(7): 669–672. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.07.001.
- 7 李翠萍, 韩九强, 黄启斌, 等. 基于小波变换和高斯拟合的在线谱图综合处理方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(11): 3050–3054. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)11-3050-05.
LI Cuiping, HAN Jiuqiang, HUANG Qibin, *et al.* An integrated on-line processing method for spectrometric data based on wavelet transform and Gaussian fitting[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, **31**(11): 3050–3054. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)11-3050-05.
- 8 李弼程. 智能图像处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
LI Bicheng. Intelligent image processing technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- 9 贾小勇, 徐传胜, 白欣. 最小二乘法的创立及其思想方法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, **36**(3): 507–511. DOI: 10.3321/j.issn:1000-274X.2006.03.040.
JIA Xiaoyong, XU Chuansheng, BAI Xin. The invention and way of thinking on least squares[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2006, **36**(3): 507–511. DOI: 10.3321/j.issn:1000-274X.2006.03.040.
- 10 蔡天净, 唐瀚. Savitzky-Golay 平滑滤波器的最小二乘拟合原理综述[J]. 数字通信, 2011, **38**(1): 63–68. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3824.2011.01.017.
TANG Tianjing, TANG Han. A review of least squares fitting principle for Savitzky-Golay smoothing filter[J].

- Digital Telecommunications, 2011, **38**(1): 63–68. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3824.2011.01.017.
- 11 Attaway S. 鱼滨, 赵元哲, 王国华, 等, 译. MATLAB 编程与工程应用[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2013.
Attaway S. YU Bin, ZHAO Yuanzhe, WANG Guohua, *et al.* MATLAB: a practical introduction to programming and problem solving[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- 12 林木, 刘明哲, 庾先国, 等. 基于 MATLAB GUI 的 γ 能谱小波去噪方法对比研究[J]. 核电子学与探测技术, 2013, **33**(10): 1245–1247. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.10.018.
LIN Mu, LIU Mingzhe, TUO Xianguo, *et al.* A wavelet denoising method for gamma spectrometry analysis based on MATLAB GUI[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, **33**(10): 1245–1247. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.10.018.
- 13 陈强, 黄声享, 王伟. 小波去噪效果评价的另一指标[J]. 测绘地理信息, 2008, **33**(5): 13–14.
CHEN Qiang, HUANG Shengxiang, WANG Wei. An evaluation indicator of wavelet denoising[J]. Journal of Geomatics, 2008, **33**(5): 13–14.
- 14 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
SHENG Zhou, XIE Shiqian, PAN Chengyi. Probability and mathematical statistics[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2008.