

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.07.001

双能 X 射线透射系统的噪声 分析与滤波方法研究*

杨 斌¹, 叶文华^{1*}, 熊田忠^{1,2}, 毛冬辉¹, 王祺奥¹, 胡品龙³

(1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏南京 210016; 2. 三江学院电气与自动化工程学院, 江苏南京 210012; 3. 江苏华宏科技股份有限公司, 江苏江阴 214423)

摘要: 针对原始双能 X 射线透射信号包含的噪声复杂且滤波困难的问题, 根据双能 X 射线透射分选技术的工作原理, 建立了双能 X 射线透射信号采集与分析系统, 对双能 X 射线透射信号中所包含的背景噪声、孤立噪声、电路互连串扰噪声和探测随机噪声的来源及其特性进行了研究; 对探测随机噪声的高斯分布特性、孤立噪声的无规律性和探测板之间的串扰噪声的固定性进行了归纳, 提出了一种改进的邻域相关自适应中值滤波法, 进行了 6009 铝合金块的双能 X 射线透射分析实验, 对比分析了中值滤波法和所提出算法的滤波效果。研究表明, 所提出的改进的邻域相关自适应中值滤波法能有效地滤除双能 X 射线透射信号中的噪声。

关键词: 双能 X 射线; 噪声; 滤波; 透射

中图分类号: TH741

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)07-0891-07

Noise analysis and filtering methods of dual energy X-ray transmission system

YANG Bin¹, YE Wen-hua¹, XIONG Tian-zhong^{1,2},

MAO Dong-hui¹, WANG Qi-ao¹, HU Pin-long³

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Electrical & Automatic Engineering, Sanjiang University, Nanjing 210012, China; 3. Jiangsu Huahong Technology Stock Co., Ltd., Jiangyin 214423, China)

Abstract: Aiming at the problem that the noise of the original dual-energy X-ray transmission signal is very complicated and difficult to filter, the dual-energy X-ray transmission signal acquisition and analysis system was established based on the operational principle of dual-energy X-ray transmission separation technology. The sources and characteristics of background noise, isolated noise, circuit interconnect crosstalk noise and detection random noise contained in the original dual-energy X-ray transmission signal were studied. The Gauss distribution of detection random noise, irregularity of isolated noise and the fixity of crosstalk noise between detection boards were researched, a new improved adaptive median filtering method based on the statistic of the neighborhood pixels was proposed. Dual-energy X-ray transmission analysis experiment was tested on 6009 aluminum alloy block, the filtering effect of median filtering method and the proposed method was analyzed comparatively. The results indicate that the noise in the original dual-energy X-ray transmission signal can be effectively filtered by the improved adaptive median filtering method.

Key words: dual-energy x-ray; noise; filtering; transmission

收稿日期: 2015-03-12

基金项目: 江苏省科技支撑计划资助项目(BE2013715); 江苏省科技成果转化专项资金资助项目(BA2014067)

作者简介: 杨 斌(1990-), 男, 江西新余人, 主要从事有色金属分选技术方面的研究. E-mail: ybnuaa79@163.com

通信联系人: 叶文华, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: whye@nuaa.edu.cn

0 引 言

将废金属物料按元素种类进行分离是废金属再生利用的前提。双能 X 射线透射分选技术是一种利用物质对高、低能 X 射线吸收程度不同实现物料识别和分类的新技术,该技术具有受物料表面状况影响小、辨识范围广等优点。国外已有一些学者和企业进行了相关研究。M. B. Mesina 等^[1]利用双能 X 射线透射技术自动分选废金属中的轻有色金属(如铝、镁)组分与重有色金属(如铜、锌等)组分,并取得了良好的分选效果。目前,挪威 TOMRA 公司和德国 STEINERT 公司已生产了可用于自动分选金属的双能 X 射线透射分选机。

双能 X 射线分选设备主要利用线阵列探测系统来获取双能 X 射线透射信号。在实时检测过程中,由于环境和设备等因素的影响,双能 X 射线透射信号中包含多种噪声。为了提高物料元素种类判定的准确性,必须得到 X 射线在透射物料的过程中产生的真实衰减情况,因此研究双能 X 射线透射信号中所包含的噪声及其滤波算法具有重要意义。

文献[2]指出了影响 X 射线探测系统的各种噪声和干扰,主要包括光信号的起伏、背景的干扰、光波传播通道带来的调制噪声和干扰、光电信号的放大与处理带来的噪声,并详细分析了各类噪声的来源及其特性,主要包括光信号本身的噪声、大气传播带来的噪声、光电转换带来的噪声以及光电探测器信号处理电路产生的噪声等。周日峰等^[3]利用蒙特卡罗法模拟分析闪烁体材料为 CdWO₄ 的各探测器之间串扰噪声的特性,分析了隔离层的厚度、入射 X 射线束的面积、X 光子的能量、探测器闪烁体大小以及材料等因素对探测器串扰噪声的影响。陈树越等^[4-5]分析了 X 射线源量子起伏特性,提出可以适当增加 X 射线强度来避免量子起伏。王东明等^[6]通过实验分析了均值滤波、中值滤波、维纳滤波等方法对 X 射线透射信号中随机噪声的滤除效果,得出了中值滤波的滤波效果更好的结论。荣峰等^[7]对高速线阵探测器的本底噪声、随机噪声和孤点噪声进行了分析,采用差值法滤除本底噪声,采用二维卡尔曼滤波法滤除随机噪声,采用改进的中值滤波法滤除孤立噪点;但是其研究对象是二维 X 射线透射图像,而且没有考虑探测器的电路互连串扰噪声。卡尔曼滤波法以最小均方误差为最佳估计准则,在测量方差已知的情况下,利用前一时刻的估计值和当前时刻的观测值来求出当前时刻的估计值,一维滤波时比较复杂^[8-9]。

为了满足双能 X 射线透射分析的快速性要求,本研究直接采用双能 X 射线探测系统输出的一维数据,省略生成二维图像的步骤,在分析双能 X 射线透射系统的背景噪声、孤立噪声、电路互连串扰噪声和探测随机噪声的来源及特性的基础上,提出一种改进的邻域相关自适应中值滤波算法,并通过实验验证所提算法的有效性。

1 双能 X 射线透射信号分析

1.1 双能 X 射线透射信号采集与分析系统

X 射线穿透物料的透明度是指 X 射线穿透物料后的强度与其初始强度的比值^[10]。

其表达式为:

$$T_M = \frac{I}{I_0} = \frac{\int_0^{E_M} \frac{dP}{dE}(E_M, E) e^{-\mu(E, Z)t} dE}{\int_0^{E_M} \frac{dP}{dE}(E_M, E) dE} \quad (1)$$

式中: $P(E_M, E)$ —最高能量为 E_M 的 X 射线能谱分布; Z —物料的有效原子序数; t —物料的厚度; $\mu(E, Z)$ —能量为 E 的 X 射线在物料中的线吸收系数。

透明度是定量分析 X 射线穿透物质的衰减程度的变量,其值可以通过统计 X 射线光子数来得到。而光所激发的光电子数正比于投射到探测器上的光子数,因此可以通过探测器的光电子统计信号值来分析 X 射线的辐射强度^[11]。上式还反映出单能量 X 射线透射信号同时受到物料的元素种类和物料厚度的影响,因此采用单能量 X 射线透射无法确定出物料的元素种类。

由于同一物料对两种不同能量 X 射线的线吸收系数不同,本研究采用双能 X 射线探测器,利用高、低能 X 射线透射信号值计算与物料原子序数有关的值 R ,从而实现物料的元素种类分辨^[12-13]。

假设 H 和 L 分别表示高能 X 射线和低能 X 射线, R 值计算公式如下:

$$R = \frac{\ln(T_H) - \ln(T_L)}{-\ln(T_H)} = \frac{\ln[(I_H/I_L) \cdot (I_{L0}/I_{H0})]}{\ln(I_{H0}/I_{L0})} \quad (2)$$

双能 X 射线透射信号采集与分析系统主要由 X 射线源子系统、X 射线探测子系统、物料运输装置和控制计算机组成,双能 X 射线透射信号采集与分析系统如图 1 所示。

其中, X 射线探测系统主要由 X 射线探测板、数据处理板、控制单元、传输接口模块、控制软件、机械结构和电源附件等组成^[14]。为了适应探测范围的变化, X 射线探测系统一般采用一个数据处理板和 n 块 X

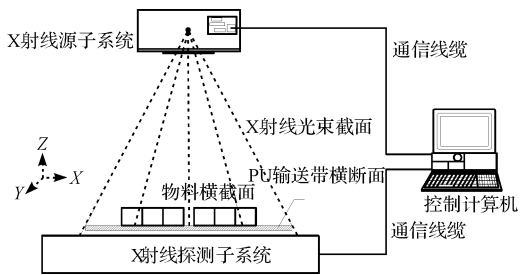


图1 双能 X 射线透射信号采集与分析系统

射线探测板组合使用的方式,各探测板通过 CPU 总线将信号传输至数据处理板。

每块探测板由若干 16 像元的带闪烁体的硅光电二极管探测阵列组成,每个像元对应一个探测通道,一般有 16m 个探测通道(m 为硅光电二极管探测阵列的数目)。双能量 X 射线探测板由上、下两层分布的硅光电二极管探测阵列和夹在中间的铜滤波片组成,入射的 X 射线光谱先被上层的低能探测阵列接收,经过铜滤波片后,低能 X 射线光谱被滤除,高能 X 射线光谱再被下层的高能探测阵列接收,每块探测板的输出信号以先高能后低能的数据结构串行输出,从而实现 X 射线探测器高能量和低能量的 X 射线透射信号的同时输出。

在线检测时,物料跟随输送带沿 Y 向运动,高、低能 X 射线光子穿透物料后,投射到闪烁体通道上进行光电转换,然后 X 射线探测板和数据采集板对电信号进行放大、模数转换等处理,再通过传输接口板和工业以太网将数据传送到控制计算机。X 射线探测子系统的输出是每个探测通道的光电子统计信号值,通过设计处理程序就可以利用该信号值进行双能 X 射线透射分析。

1.2 信号中的噪声来源分析

在 X 射线光强起伏、背景干扰、光电信号的采集与处理电路等影响下,双能透射信号中夹杂着多种噪声。无物料时在 X 射线照射下得到的原始信号曲线如图 2 所示。

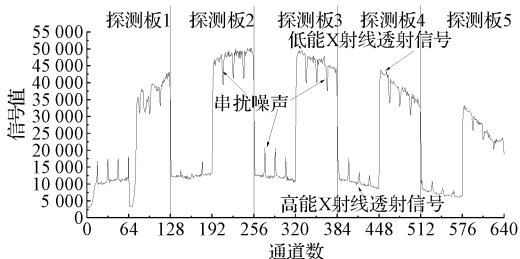


图2 无物料时高能和低能混合的原始信号曲线

图2 信号中的高、低能透射信号分开表达的双能曲线如图 3 所示。图中信号曲线出现尖峰、振荡等现

象是由噪声造成的。

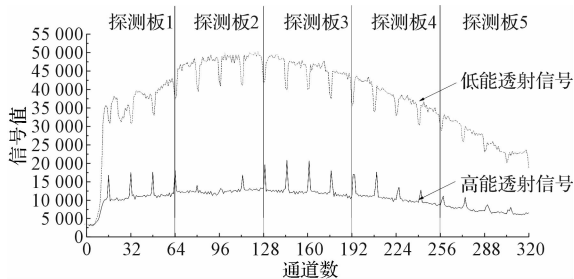


图3 高能和低能分离处理后的双能曲线

此外,双能曲线出现中间往两边衰减的现象,这是由于射线源的焦点在中间,X 射线光束的强度是中间最强、往两边逐渐减弱的,可通过增益修正。根据噪声来源及其特性,将双能 X 射线透射信号中噪声分为:背景噪声、孤立噪声、电路互连串扰噪声和探测随机噪声。

1.2.1 背景噪声

线阵探测系统的背景噪声是指在没有 X 射线投射到探测器表面时探测器的微小输出信号,这种噪声是由光电二极管的暗电流与电路中运算放大器的偏置电流等产生的,背景噪声曲线如图 4 所示。

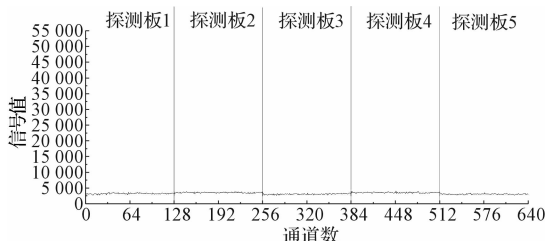


图4 背景噪声曲线

1.2.2 孤立噪声

X 射线在透射物料的同时会发生散射现象,一些散射信号没有经过物料的吸收,直接到达探测器感光区,这些通道的信号值和它周围通道的信号值有明显差别,可称之为孤立噪声。受废金属物料形态不规则、X 射线光子的运动轨迹不固定等因素影响,散射的发生具有偶然性,孤立噪声是杂乱的、无规律性的。笔者通过实验研究了孤立噪声的产生情况,发现在探测器扫描速度慢时,散射产生的光电流远小于探测器正常探测产生的光电流,孤立噪声不明显;在探测器扫描速度快时,散射产生的光电流接近于探测器正常探测产生的光电流,孤立噪声明显。

1.2.3 电路互连串扰噪声

探测器系统一般采用高速电路来满足扫描速度的要求。但是,高速电路要求信号频率变高、边沿变陡、印刷电路板的尺寸变小、布线密度变大,这会带来严重

的电路互连串扰噪声问题。在线阵列探测器系统中,电路互连串扰噪声主要表现为同一探测板通道间的串扰噪声和探测板之间的串扰噪声。

同一探测板通道间的串扰噪声是指每块双能 X 射线探测板自身的串扰噪声。X 射线入射到探测通道后,产生的散射光子和电子被相邻的探测通道接收,这是探测板通道间串扰噪声产生的主要原因。探测通道间的串扰噪声会影响到探测器的信噪比,过大时甚至会导致探测器完全不能工作。双能 X 射线透射信号曲线存在周期性的尖峰信号(如图 2 所示),通过分析多次采样得到的双能 X 射线透射信号曲线(如图 3 所示),确定这些尖峰每隔 16 个通道出现一次,且出现的通道位置是固定的。前文也提到本研究采用的探测器由若干 16 像元的硅光电二极管阵列组成,由于两个硅光电二极管连接处隔离相对困难,导致串扰噪声骤然变大,从而产生此类尖峰,这类尖峰信号是探测板通道间的异常串扰噪声。

探测板之间的串扰噪声主要受到探测系统数据处理与传输方式的影响而产生的。每块探测板采集的高能信号和低能信号同时传输至数据处理板进行处理,所有探测板的数据都处理完后一起输出,输出信号以先高能信号后低能信号的结构型式串行输出,这导致前一块探测板部分通道的低能信号与后一块探测板部分通道的高能信号产生干扰,导致后一块探测板中存在异常信号点,而且离数据处理板越远的探测板输出信号中的异常信号点越多。多次实验发现,在一个探测器系统中,这种噪声出现的探测通道位置时固定不变的。

1.2.4 探测随机噪声

探测随机噪声是指在进行物料的双能 X 射线透射分析时,由于 X 射线源子系统和信号处理电路带来的噪声。在双能 X 射线透射检测的过程中,随着 X 射线源的管电压、管电流的起伏波动,连续谱 X 射线光束的强度也会产生相应的波动,这部分波动以随机噪声的形式反映在透射信号中。

此外,X 射线光管的阴极发射电子的随机性会产生 X 射线源的量子噪声。量子噪声也是 X 射线源系统随机噪声的一部分,可以通过增强 X 射线强度的方式减小这部分噪声。线阵列探测系统的随机噪声主要是由信号处理电路产生的随机噪声和光电子统计涨落产生的随机噪声等组成。信号处理电路产生的随机噪声与光辐射无关,主要来源于电子元器件的热噪声,其方差与均值是稳定不变的,是一种高斯白噪声。探测器输出的光电子统计信号值是一定采样时间内的积分

值,根据光辐射统计理论,探测结果产生统计起伏,而且随着扫描速度越快,随机噪声会越强。

2 双能 X 射线透射信号滤波方法

根据上文分析,提取可用通道传输的信号后需要进行相应噪声的滤波处理,而且考虑双能 X 射线透射信号中噪声的成分繁多,因此本研究针对不同噪声的特性,提出以下滤波过程:

采用差值滤波法滤除背景噪声,采用改进的邻域相关自适应中值滤波法消除或减少孤立噪声、电路互连串扰噪声和探测随机噪声。

2.1 差值法滤波法

背景噪声是一种加性噪声,可以采用差值法滤除。假设透射信号值 $T_i = P_i + B_i$ (式中 B_i 表示背景噪声),与高、低能透射信号相比,背景噪声波动很小。

为了提高滤波算法的运行效率,将 X 射线源子系统关闭的条件下,X 射线探测子系统多次采样结果的均值 B_0 作为探测器背景噪声,在线检测时将采样数据与 B_0 做差值运算后的结果 $P_i = T_i - B_0$,作为下一步滤波算法的初值。

2.2 改进的邻域相关自适应中值滤波法

中值滤波的基本原理是采用一个含有奇数个数据点的采样窗口,通过对窗口邻域内的采样数据进行排序并取得中值来决定窗口中心点的值,从而消除孤立的噪声点。中值滤波可以有效地滤除多种随机噪声,但是中值滤波法不仅改变了噪声点,也改变了信号点,这会影响到双能曲线分析法的准确性。

针对这一问题,近年来很多学者提出了许多改进中值滤波法,如开关中值滤波(SM)、最大最小滤波(MM)、极值中值滤波(EM)等等,这些算法也具有一些很好的滤波特点,但是在实际应用中还是存在一定的局限性,如 SM 只适用噪声密度较低的情况,MM 和 EM 误判率较高^[15-17]。

双能 X 射线透射信号中包含一些明显的尖峰噪声信号,这些信号的存在会影响双能 X 射线透射分析法的准确性,必须加以滤除。探测板 2 的后 40 个双能通道给出的有物料与无物料时双能 X 射线透射曲线对比图如图 5 所示。从图 5 可知,由于物料的衰减吸收,物料所在通道内的信号值会明显减小,在进行信号滤波时需要区分噪声和真实信号。此外,对于电路互连串扰噪声,尤其是探测板之间的串扰噪声,需要根据实际噪声情况设计合理的滤波算法。

为了解决以上问题,本研究提出了改进的邻域相

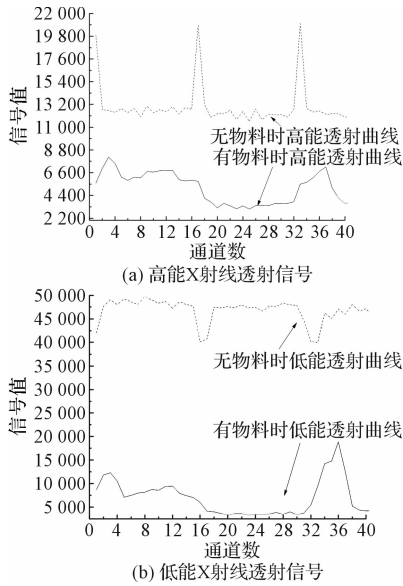


图5 有物料与无物料时探测板2后40通道的双能X射线透射曲线对比图

关自适应中值滤波法,该算法主要包含:噪声点的探测与判定、滤波窗口自适应变换和中值提取等步骤。本算法的思想是只对有效通道数据进行正确的噪声处理,提高滤波快速性和准确性。该算法的基本思路是:基于邻域信息自适应阈值,实现噪声点的准确判定;根据邻域相关性自适应变换滤波窗口大小,以保持图像的细节,达到高效滤除探测随机噪声、孤点噪声目的;对于探测板之间的串扰噪声,多次试验发现这类噪声只在固定的信号通道产生,为简化滤波算法,提高双能X射线透射信号滤波的速度,将这几个通道预先标记,在处理时按照电路互连串扰噪声的滤除方法处理。

定义: H 和 L 分别表示高、低能X射线透射信号存放空间, W 表示探测板之间的串扰噪声信号存放空间, $H \subseteq P_i, L \subseteq P_i, W \subseteq P_i$ 。 q 表示有效通道总数, $H_j (j=1, 2, \dots, q/2)$ 和 $L_k (k=1, 2, \dots, q/2)$ 分别表示 H 和 L 中的元素, $A_k = 2k+1 (k=1, 2, \dots)$ 表示邻域大小, $\{f_1, f_2, \dots, f_{2k+1}\}$ 表示邻域内元素集, f_m, f_{\min} 分别表示 $f_1, f_2, \dots, f_{2k+1}$ 的中间值和最小值。

本研究采用的改进的邻域相关自适应滤波算法如下:

步骤1:令 $H_{\max} = \max\{H\}, H_{\min} = \min\{H\}, L_{\max} = \max\{L\}, L_{\min} = \min\{L\}, MH_0 = \sum_{i=1}^{q/2} H_i, ML_0 = \sum_{i=1}^{q/2} L_i$,阈值 $Q_{H0} = H_{\max} - M_{H0}, Q_{L0} = M_{L0} - L_{\min}$ 。

步骤2:若 $f_i - H_{\min} < 0$ 或 $f_i - L_{\min} < 0 (i=1, 2, 3)$ 不成立,令 $f_1 = f_{i+1}$,邻域大小为 A_1 ,形成新邻域。否则,继续步骤3。

步骤3:若 $f_i \notin W (i=1, 2, 3, \dots)$,继续步骤4。若有且仅有 $f_1 \in W$,则 $f_1 = (f_2 + f_3)/2$,转至步骤7;若有且仅有 $f_2 \in W$,则邻域大小为 $A_1 + 1, f_2 = (f_3 + f_4)/2$,转至步骤7;若有且仅有 $f_3 \in W$,则邻域大小为 $A_2, f_3 = (f_4 + f_5)/2$,转至步骤7;若 $\{f_1, f_2, f_3\}$ 有2个或3个元素属于 W ,生成新邻域 $\{f_4, f_5, f_6\}, f_i = (f_4 + f_5 + f_6)/3 (i=1, 2, 3, \text{且} f_i \in W)$,转至步骤7。

步骤4:定义判断值 $C = \{C_H, C_L\}$,阈值 $Q = \{Q_{H0}, Q_{L0}\}$,若 $f_i \in H, C = C_H, Q = Q_{H0}$;若 $f_i \in L, C = C_L, Q = Q_{L0}$ 。

步骤5:如果 $|f_i - f_{\min}| < C$,以 f_m 作为当前邻域中心值输出,转至步骤7;若有且仅有一个 $f_i (i=1, 2, 3)$,使 $|f_i - f_{\min}| > C$ 并接近于 Q ,那么这个点是噪声点,以 f_m 作为当前邻域中心值输出,转至步骤7;若有两个 $f_i (i=1, 2, 3)$,使 $|f_i - f_{\min}| > C$ 并接近于 Q ,邻域大小为 A_2 ,继续步骤6。

步骤6: $|f_i - H_{\min}| < 0$ 或 $|f_i - L_{\min}| < 0 (i=1, 2, 3)$ 成立时,以当前邻域中间值 f_m 作为当前邻域中心值输出,转至步骤7;若 $|f_i - H_{\min}| < 0$ 或 $|f_i - L_{\min}| < 0$ 不全成立时,去掉使 $|f_i - f_{\min}| > C$ 并接近于 Q 的数据点,在去掉使 $|f_i - H_{\min}| < 0$ 或 $|f_i - L_{\min}| < 0$ 不成立的数据点,以剩下数据点的平均值作为邻域中心值输出,转至步骤7。

步骤7:邻域前移1位,再从步骤2开始循环。

3 实验与结果分析

3.1 实验系统的建立

为了进行双能X射线透射分析实验,本研究依照双能X射线透射信号采集与分析系统图(如图1所示),采用Spellman公司的XR200P&N400型射线源、Sens-Tech公司的LINX1605-301双能探测器以及定制的输送机搭建实验系统平台。其中,射线源最大功率为400W,最大管电压200kV;双能探测系统总通道数为640,因结构限制,有效通道数为500,低能探测范围为20keV~100keV,高能探测范围为150keV~300keV,像元尺寸为1.6mm。

为了验证本研究提出的滤波方法的实际效果,笔者设置X射线源管电压为160kV、管电流为1mA,选用长为40mm、宽为35mm、高为35mm的6009铝合金块进行双能X射线透射实验。因为此时X射线源产生的高能谱线和低能谱线都能穿透厚度35mm的铝合金块,而且高、低能谱线产生的信号值有明显差别。

3.2 实验结果分析

实验时,本研究将铝合金块送到X射线光束照射,

区域内有效通道为第 25 ~ 274 号双能通道,物料主要分布在第 2、3、4 三块探测板上方,对应通道为第 59 ~ 264 号双能通道。其中,第 0 ~ 58 通道上方没有放置物料,第 59 ~ 264 号通道上方有铝块物料,铝块物料分两组放置,中间留有一定间隙,间隙对应的通道为 145 ~ 176。

物料静止时得到的双能 X 射线透射原始信号曲线如图 6 所示。曲线存在尖峰、曲线振荡等现象,说明信号曲线确实存在第 1.2 节所分析的各种噪声。

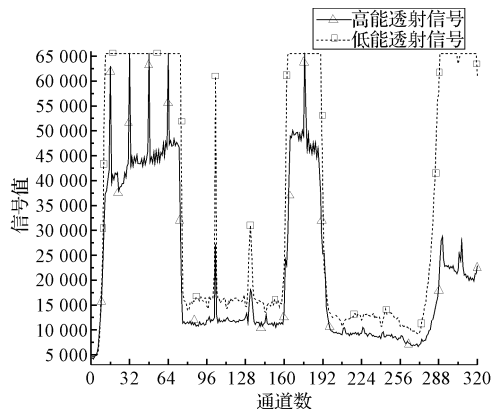


图 6 双能 X 射线透射原始信号曲线

笔者采用中值滤波法和本研究所提出的滤波算法得到的双能 X 射线透射信号曲线如图 7、图 8 所示。

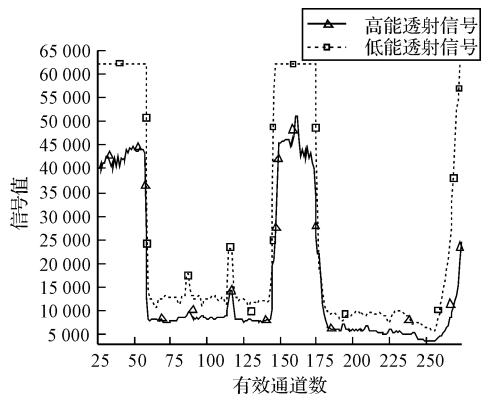


图 7 采用中值滤波法处理后的信号曲线

根据滤波后信号曲线的尖峰数分析:采用中值滤波法后信号曲线仍存在尖峰,而采用本研究所提出的算法所有尖峰均被滤除。另外,笔者从不同通道区间内的最大信号值与最小信号值的差值,对本研究所提算法与中值滤波算法的效果进行对比,结果如表 1 所示。其中,通道区间的划分依据高能信号通道和低能信号通道以及通道上方是否有物料进行划分。

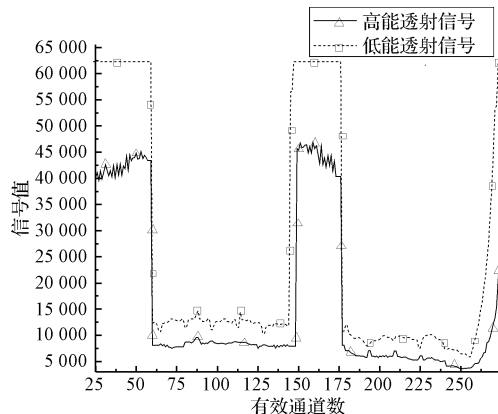


图 8 采用本研究算法处理后的信号曲线

表 1 滤波后最大信号值与最小信号值的差值对比

	低能 X 射线透射信号				高能 X 射线透射信号			
C	25 - 58	59 - 144	145 - 176	177 - 264	25 - 58	59 - 144	145 - 176	177 - 264
M	0	13 001	30 677	12 799	18 199	6 706	31 348	3 484
P	0	2 092	5 679	2 799	5 491	4 318	6 456	3 575

注:C—通道数,M—中值滤波,P—采用本研究算法滤波

通过图 7 和图 8 的滤波效果图以及表 1 所示滤波后最大信号值与最小信号值的差值对比数据,可以发现,所提出的滤波算法对孤立噪声、探测随机噪声和电路互连串扰噪声的滤除效果明显优于中值滤波法,从而能够更好地保证双能 X 射线分析法的准确性。

此外,该算法能够更好地保护物料信号边界。

4 结束语

为了提高采用双能 X 射线透射识别技术进行物料分类的准确性,笔者从分析噪声信号来源出发,研究了本底噪声、探测随机噪声、孤点噪声和电路互连串扰噪声的特性,提出了采用差值滤波法消除背景噪声、改进的邻域相关自适应中值滤波法减少探测随机噪声、孤立噪声和串扰噪声等方法。改进的邻域相关自适应中值滤波法首先根据信号的特点提取出有效通道信号,然后综合邻域内元素信息和阈值对信号进行自适应中值滤波,在滤波的过程中根据噪声的特点,自适应地改变邻域窗口大小和中值计算方法。

为了验证所提出算法的性能,本研究以铝合金块为样品进行了双能 X 射线透射实验,对比分析了中值

(下转第 908 页)

本文引用格式:

杨 斌,叶文华,熊田忠,等. 双能 X 射线透射系统的噪声分析与滤波方法研究[J]. 机电工程,2015,32(7):891-896,908.

YANG Bin, YE Wen-hua, XIONG Tian-zhong, et al. Noise analysis and filtering methods of dual energy X-ray transmission system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(7):891-896,908.