

镉大米在能量色散 X 射线荧光光谱仪中的检测应用研究

伊相心¹, 罗秋凤¹, 杨光明², 顾冉³, 王海涛¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211106;

2. 烟台三环锁业集团股份有限公司, 山东 烟台 264000;

3. 无锡瑞迪声科技有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 以光谱分析法为原理, 采用新型的硅漂移探测器和高性能的低功率 X 射线管搭建了一台便携式能量色散 X 射线荧光光谱仪检测系统, 为使 X 射线管的激发有效增强和探测器的工作效率提高, 重新整合了硬件平台, 优化了光路系统的几何布局; 简单介绍了光谱仪的工作原理和上、下位机的结构组成以及光谱数据的采集, 着重介绍了光谱数据的形式和上位机数据预处理过程以及镉大米的定性定量方法; 结果表明, 设计的检测系统寻峰的绝对误差在 3% 以内, 定量的相对误差可控制在 10% 以内, 样品测量的平均时间为 900 s; 上位机分析软件是基于 .NET Framework 平台用 C# 语言结合 MATLAB 语言进行的混合编程, 定量分析的检出限为 0.0515 ppm, 定量限为 0.1716 ppm; 精度和稳定性满足要求, 具有误差小、操作简单、方便快捷、安全稳定等特点, 为现场原位检测镉大米提供了另一种方法。

关键词: 光谱分析法; X 射线荧光; 镉大米; 定性定量; 原位检测

Study on Detection of Cadmium Rice in EDXRF Spectrometer

Yi Xiangxin¹, Luo Qiufeng¹, Yang Xianming², Gu Ran³, Wang Haitao¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Yantai Tri-Circle Lock Group Co., Ltd., Yantai 264000, China;

3. Radiasence Technology Inc, Wuxi 214000, China)

Abstract: Based on the principle of spectral analysis, a portable energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer detection system was built by using a new type of silicon drift detector and high performance low power X-ray tube. In order to effectively enhance the excitation of the X-ray tube and work efficiency of the detector, re-integration of the hardware platform to optimize the geometric layout of the optical system. The working principle of the spectrometer and the structure of the upper and lower machines and the acquisition of the spectral data are introduced simply. The form of the spectral data and the data pretreatment process of the upper machine and the qualitative and quantitative methods of the cadmium rice are introduced emphatically. The results show that the peaks finding absolute error of the designed detection system is less than 3%, the quantitative relative error can be controlled within 10% and the average time of the sample measurement is 900s. The upper machine analysis software is based on the .NET Framework platform with C# language combined with MATLAB language for mixed programming. The detection limit is 0.0515 ppm, and the limit of quantitation is 0.1716 ppm. The precision and stability of the system meet the requirements, with small error, simple operation, fast, convenient, safe and other characteristics, which provides another new method for the in-situ detection of cadmium rice.

Keywords: spectral analysis method; X-ray fluorescence; cadmium rice; qualitative and quantitative methods; in-situ detection

0 引言

2013 年 5 月, 广州市食品药品监督管理局公布了当年第一季度广州餐饮环节抽检的情况, 其中大米及米制品合格率最低, 镉超标率达 44.4%。消息一出, “镉”大米成为了舆论和公众关注的话题。长期食用镉含量超标的大米会对人体健康产生危害, 如何选用一个快速高效、应用方便、成本低的检测方

法或仪器进行镉大米的检测是一个关键问题。

镉大米的检测方法主要有石墨炉原子吸收光谱法, 高效液相色谱法, ICP-MS 法 (inductively coupled plasma mass spectrometry, 电感耦合等离子体质谱), 阳极溶出伏安法, 紫外分光光度法等。这些方法均存在着操作复杂, 测试周期长, 分析速度慢等缺点。并且一些化学方法还需要繁杂的样品预处理过程, 这些方法均不适合大批量样品的快速检测^[1]。

EDXRF (energy dispersive X ray fluorescence, 能量色散 X 射线荧光) 光谱仪是依据光谱分析原理制成的仪器, 具有无损、多元素同时检测、准确性高、分析速度快、环保等优点, 对样品不需要进行繁杂的前期处理, 对镉大米的检测是一个不错的选择^[2-5]。

张辉等人用 EDX 3200 Plus 光谱仪测定了大米中的镉含量, 分析了仪器的检出限和定量限、准确性、台间差、稳定性等性能指标^[6]。廖学亮等人分析了实验所需的条件、样品致密

收稿日期: 2017-07-07; 修回日期: 2017-08-29。

基金项目: 国家质量监督检验检疫总局公益性行业科研专项 (2015424068)。

作者简介: 伊相心 (1993-), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事信号处理方面的研究。

罗秋凤 (1970-), 女, 江西吉安人, 研究员, 硕士研究生导师, 主要从事无人机飞控系统研发与质量控制方向的研究。

度和样品量的影响, 优化了样品杯的形状, 同样量化了仪器的精密性、定量限和检出限, 最后对比了 EDXRF 与 ICP-MS 两种方法定量的准确度^[1]。但二者均未详细说明所采集的光谱数据的具体形式以及数据分析和处理的具体过程。

1 荧光分析原理和下位机硬件

1.1 荧光分析原理

荧光的产生依据是光子与原子相互作用的过程, 当原级射线的能量大于原子某一轨道电子的结合能时, 就可从中逐出一个轨道电子而出现一个空穴, 这时处于较高能级的电子将依据一定的规则跃迁来填补该空穴, 这一过程将使整个原子的能量降低, 可以自发进行^[7]。而多余的能量以特征 X 射线荧光的形式放射出来, 这些 X 射线荧光的频率因为来源于样品中不同的元素种类而会有所区别, 是元素的标识特征, 因此称之为“特征” X 射线荧光, 可以利用这个现象来做元素识别。

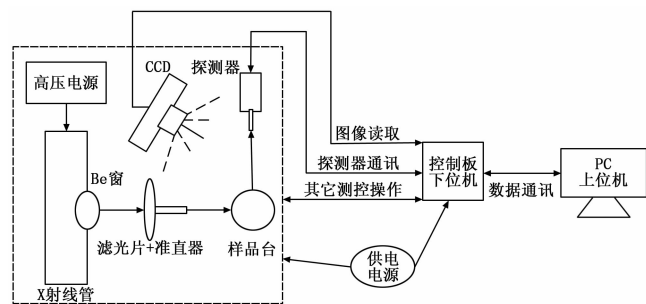


图1 EDXRF 光谱仪结构示意图

1.2 光谱仪硬件平台

本文搭建了基于 SDD (silicon drift detector, 硅漂移探测器) 的能量色散 X 射线荧光光谱仪检测系统, 该检测系统由上位机和下位机两部分组成。下位机部分包括硬件和软件设计, 以同时兼顾性能和实时性的设计理念实现了样品的激发和光谱数据的采集。下位机通过 USB-Hub 方式与上位机进行通信。上位机基于 .NET Framework 平台用 C# 语言进行编写, 采用多线程的软件编写方式, 使得数据的采集与处理相分离, 提高系统的快速性与实时性。结合 MATLAB 强大的数据处理功能和可连接其他编程语言等优点, 采用 MATLAB 与 C# 混合编程的方法设计上位机软件。

光谱仪硬件部分主要包括测量单元和记录单元两个部分。前者的作用是激发样品并采集光谱数据, 后者的作用是转换经探测器采集的光谱信息^[8]。如图 1 所示, 光谱仪结构主要包括光路系统, 电源系统, 控制系统和 PC 机。虚线框内为测量部分, 记录部分位于下位机控制板中, 转换的过程如图 2 所示。

信号具体的传输过程为: 首先 X 射线管产生的原级 X 射线照射到样品上, 样品所产生的 X 射线荧光被探测器采集, 然后以电脉冲的形式输出。控制板与探测器进行通信, 将采集到的电脉冲首先由前置放大器放大并转换成低压脉冲, 低压脉冲的幅度严格正比于 X 射线荧光的能量。再经带有脉冲堆积排除器和基线恢复器的放大器进一步放大, 然后由模数转换器将电脉冲信号转换成数字信号, 整形分检, 形成带有高度信息的脉冲计数, 按不同的高度存储于多道分析器中。

上位机的首要功能是实现与下位机的通信完成相应的控制, 包括高压电源和步进电机的控制、滤光片和准直器切换的控制、X 射线管管压管流的读取和输出控制、高压互锁控制以

及步进电机到位信号和接近开关信号的检测等。上位机软件的另一主要功能为实现数据的分析, 并以直观的图形界面显示采集到的数据^[9]。通过光谱仪硬件平台采集到的原始光谱数据是与能量相关的谱线, 如图 3 所示。横坐标为道址, 物理意义为数字化的能量, 范围为 1~2 048, 单位为道。纵坐标为计数, 物理意义为对应某一能量的特征 X 射线荧光的强度, 单位为个。

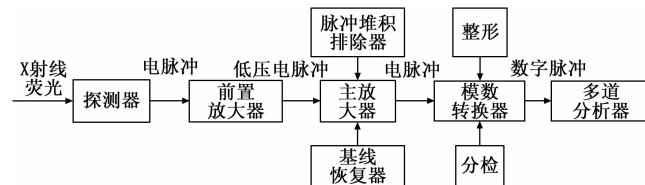


图2 控制板处理探测器信号的过程

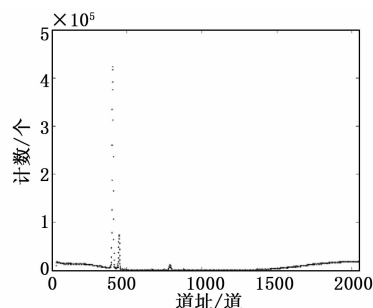


图3 原始光谱数据

2 上位机数据分析和处理

通过下位机采集光谱数据, 要想准确找到 Cd 元素的特征峰和相应的 Cd 含量, 还需通过上位机软件进行光谱数据的处理:

1) 定性定量基础。

特征 X 射线荧光在光谱图中表现为具有一定宽度的谱峰, 谱峰位置处对应的能量即为该特征 X 射线荧光的能量, 谱峰的面积表征该特征 X 射线荧光的强度。当得到某一特征 X 射线荧光对应的能量之后, 根据莫塞莱公式 (式 (1) 所示) 便可分析得到激发出该特征 X 射线荧光的元素种类, 实现元素识别。通过相关算法找到元素含量与谱峰面积的关系, 可实现元素定量。

$$\sqrt{\nu} = Q(Z - \sigma) \quad (1)$$

其中: $\nu = \frac{1}{\lambda}$, Q 为常数, Z 为原子序数, σ 为屏蔽常数。

2) 原始数据的分析。

理论上, 每种元素的特征 X 射线是多条能量单一的线状谱, 不同元素的 X 荧光在光谱图中位置相对独立。由于原子能级宽度、探测器探测效率和分辨率的影响, 实际中 X 荧光在光谱图中表现为具有一定宽度的谱峰 (如图 3), 从而对定性分析造成了影响。加之如果样品是混合物, 不同元素的特征 X 射线能量相差不大, 进而导致谱峰重叠。再加上电子学噪声、其他辐射带来的干扰, 使得通过谱线寻峰更加困难^[10]。

由图 3 可知, 实际采集到的光谱数据存在大量噪声和由其他辐射或干扰射线造成的背景累积, 这必然影响到分析的准确性和方法的检出限。为了准确找到特征峰的位置和预测元素含

量,需要对谱数据进行一系列处理。首先进行预处理,包括滤波和背景扣除,数据处理流程如图 4 所示。此外,数据处理的每一阶段都可能对分析结果的准确性产生影响。

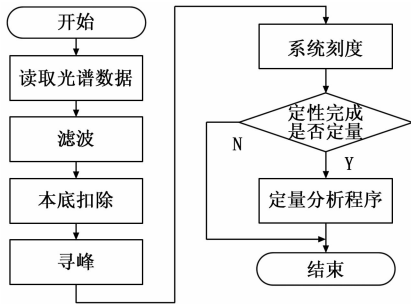


图 4 光谱数据处理流程图

2.1 滤波

由于光谱仪内电子学噪声的影响,实际采集到的光谱数据内散落着一定的统计涨落,噪声的存在必然对仪器分析的准确性造成影响。本文采用重心法与小波分析相结合的方法进行光谱数据的滤波,如图 5 所示为放大后的滤波前后对比图。经过大量实验验证,重心法采用五点光滑法,公式如式(2)所示。小波去噪选取 bior3.9 小波基,尺度水平选取该信号的最大小波分解层数^[11],阈值选择默认阈值。

重心法的原理是光滑后的数据是原始数据的重心,权因子都是正数,计算简单,易实现,数据可靠性高,但仅适用于能谱图中平坦部分的光滑。对于非平坦部分,例如特征峰附近,由于起伏较大,重心法的平滑效果较差,所以这部分的光滑则采用小波多分辨率分析。小波多分辨率的思想是将信号投影到不同频率下的子空间(噪声频率较高,真实信号频率较低),利用阈值将经过小波变换后的小波系数进行处理,高于阈值的去除,低于阈值的保留。再将阈值化后的小波分解结构进行小波重构,便可达到滤除高频噪声的目的。小波消噪的关键因素包括母小波、分解层数和小波系数阈值的选取,其中最重要的就是如何选取阈值和进行阈值量化,是谱线光滑质量的关键。

$$\bar{y}_i = 1 \times y_{i-2} + 4 \times y_{i-1} + 6 \times y_i + 4 \times y_{i+1} + 1 \times y_{i+2} \quad (2)$$

其中: \bar{y}_i 为滤波后的数据, y_i 为滤波前的数据。

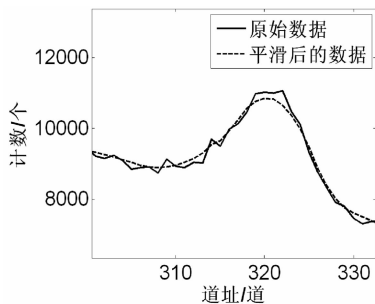


图 5 滤波前后对比图

2.2 本底扣除

光谱信号可认为由噪声信号,背景信号和真实信号等三部分组成。若从频域的角度分析,背景信号比较平坦,相比于噪声信号和真实信号的频率较低。本文采用小波多分辨率技术将光谱数据投影到各个频率下的子空间中,直接重构尺度水平较

高的即对应频率较低的信号分量,获取背景信号,再从原信号中扣除^[12]。如果得到的背景信号不够理想,可将背景信号再次分解进行较高尺度水平信号的重构,重复此过程多次可得到较满意的背景信号。

经过大量实验验证,本文最终选取 bior3.9 小波,尺度水平选择 9,重复过程为 100 次,对去噪后的能谱图进行背景的逼近和扣除。如图 6 所示为放大后的背景扣除前后对比图,扣除效果良好。

对于滤波和本底扣除中涉及到的小波基和分解水平的选取,对于前者主要考虑母小波的对称性、紧支撑与支撑宽度以及正交性,兼顾不失真、数据处理速度以及数据冗余度折中选择。后者则是采取实验验证的方法选取。

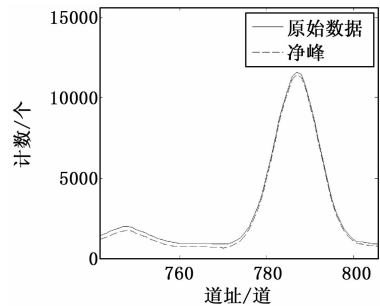


图 6 本底扣除前后对比图

2.3 寻峰

预处理之后的关键问题是如何从预处理后的能谱图中准确找到谱峰的位置。由于光谱数据十分复杂以及噪声和背景的影响,很难从光谱图中找到全部存在的峰,特别是高背景上的弱峰和位置相距很近造成荧光计数叠加的重峰。为了解决上述两种情形,需要从数学分析的角度来校正。

由探测器探测能量随机性的原理可知,元素特征峰的峰型近似一个高斯函数。常用的峰位找寻方法是导数法,由导数的基本原理可知:极大值点的一阶导数为向下的过零点,拐点的一阶导数是极值,极大或极小(根据曲线凹凸性);极大值点的二阶导数变为极小值,拐点的二阶导数变为零点。本文联合一阶和二阶导数法进行寻峰,一阶导数寻峰法简单快速、灵敏度高、精确度也较高,但其对重峰不够敏感;二阶导数寻峰法则具有较强的分辨重峰能力、寻找弱峰能力和抑制假峰能力^[13]。因此,本文对于孤立的峰采用一阶导数法,对于可能存在重峰的谱段则采用二阶导数法。Cd 元素采用 L_{β} 特征谱线寻峰,其余元素则采用 K_{α} 和 K_{β} 特征谱线,元素识别结果如图 7 所示。寻峰误差计算见表 1,寻峰的绝对误差在 3% 以内。

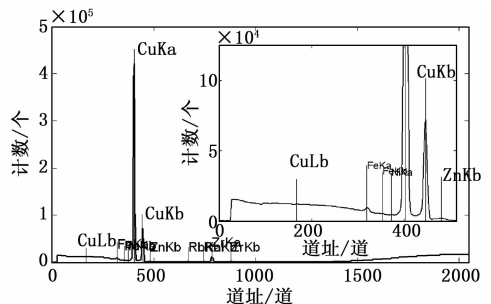


图 7 一阶、二阶导数法联合寻峰结果

表 1 寻峰误差计算 单位:KeV

线系	实际峰位道址	实际峰位能量	理论峰位能量	绝对误差
CdL _β	166	3.3087	3.3160	0.73
CuK _α	403	8.0602	8.041	1.92
CuK _β	446	8.9223	8.9070	1.53
ZrK _α	787	15.759	15.7460	1.30
ZrK _β	882	17.664	17.6870	2.30
FeK _α	320	6.3962	6.4000	0.38
FeK _β	353	7.0578	7.0590	0.12
NiK _α	373	7.4588	7.4720	1.32
RbK _α	669	13.393	13.3750	1.80
RbK _β	748	14.977	14.9710	0.60

2.4 系统刻度

系统刻度目的就是将找寻的特征峰的峰位道址转化为峰位能量, 包括初始化和能量刻度两部分。道址与能量的关系近似线性关系, 选取一次函数为系统刻度表达式。若考虑到系统中非线性因素的影响, 还可选取二次或更高阶次多项式来描述道址与能量的关系。

本文中所选用的探测器中的 MCA (multiple channel analyzer, 多道分析器) 的道址范围为 1~2 048 道, X 荧光光子的能量约为 10³~10⁴ 数量级 eV (电子伏特), 因此常选择 20 eV/道的能量刻度。初始化选取的是 MnK_α 线系, 其能量在 5.8 950 KeV 附近, 按照 20 eV/道的刻度计算, 将 MnK_α 线的道址设定为 295。能量刻度则选取其他纯元素, 如 CuK_α。在能谱图中确定出 CuK_α 线的峰位道址, 代入公式便可计算出系统刻度表达式为 $E = 0.0201 \times ch - 0.1218$ 。该方法简单快速, 误差在可容许的范围内, 可以满足实际使用要求。

刻度的精度也会影响元素识别的准确性, 系统应当周期性刻度, 以减少系统偏移所带来的误差。系统刻度的步骤是:

- 1) 首先使光谱仪工作于稳定状态, 测量几种已知的纯元素标样或一种含有多条独立特征峰的混合标样, 得到能谱图;
- 2) 根据能谱图, 找到各个特征峰的峰位道址, 根据各个元素的特征 X 射线能量来拟合所选取的系统刻度表达式, 并保存系统刻度系数于 XML 文件中, 按照时间顺序命名, 方便上位机分析软件随时调用。

2.5 元素数据库的建立

元素数据库建立的目的是用于能量的匹配, 对于已获得峰位能量的特征峰, 通过数据库查询的方式得到对应元素的名称, 从而达到元素识别的目的。本文选取在 SQL Server 2008 R2 中建立数据表的方式存储纯元素的各个线系的特征 X 射线荧光能量数据。以 Cd 为例, 数据表的结构如表 2 所示, 在上位机分析软件中通过 ADO.NET 数据库访问技术来加以实现^[14]。在与数据库匹配时还需要一个能量匹配的阈值, 阈值的确定主要受全能峰的半高宽、系统的最大漂移量以及元素库中相邻两元素能量的最小间隔等因素的影响。为了尽可能多地匹配元素, 经过大量实验验证, 本文选取的 K_α 特征线系的能量阈值为 0.0200 KeV, K_β 特征线系的能量阈值为 0.0600 KeV, Cd 元素的 L_β 特征线系的能量阈值为 0.080 KeV。

表 2 数据表的结构 单位:KeV

ID	Name	Eka	Ekb	ELa	ELb
48	Cd	23.109	26.143	3.130	3.316

2.6 大米中镉元素的定量分析

定量分析实现将测得的特征 X 射线荧光光谱强度转换为相应的元素浓度。本文开展了最常用且有效的基于标样的定量分析, 即先测得一些已知元素含量的标样, 利用计算得到的特征值建立特征值与含量的关系曲线, 作为标准工作曲线, 将未知样的特征值代入标准工作曲线中计算出相应的含量。Cd 的含量与其特征峰面积呈正相关关系, 并且不受其他元素的干扰 (例如二次、三次荧光等)。理论上对于线状谱, 谱峰高度表征相应特征 X 射线荧光强度, 特征值应选为谱峰高度。但实际上特征峰是有宽度的, 本文选取的特征值为特征谱段的梯形面积, 定量标准工作曲线如图 8 所示, 横坐标单位为个, 纵坐标单位为 ppm。标样和未知样均需在相同的测试条件下进行分析, 通过实验验证, 为使样品得到有效的激发和减少其他辐射带来的影响, 本文的测试条件为管压 60 kV、管流 130 mA、测量时间 900 s, 选用纯钨滤光片。

选用 4 组标样建立标准曲线, 另外 2 组标样作为测试样, Cd 定量结果见表 3, 相对误差可控制在 10% 以内, 定量精度良好。

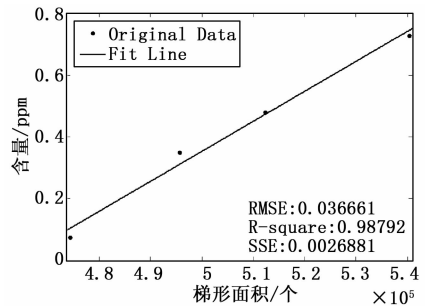


图 8 标准定量曲线

表 3 镉大米的定量误差分析表 单位:ppm

序号	真实值	测量值	相对误差(%)
1	0.2110	0.1902	9.86
2	0.4100	0.3811	7.05

对于本文所提出方法的检出限和定量限分别按照空白标样的 3 倍标准差和 10 倍标准差来计算。所谓空白标样就是指与待测样品组成完全一致但不含待测元素 (Cd) 的样品。选取一个空白大米样品, 使用本文提出的方法进行测定, 重复测量 10 次, 结果如表 4 所示。由表计算可得标准差为 0.017 2 ppm, 故检出限为 0.051 5 ppm, 定量限为 0.171 6 ppm。

表 4 空白样测定 10 次

样品序号	含量/ppm
1	0.012
2	0.023
3	0.037
4	0.031
5	0.040
6	0.046
7	0.052
8	0.026
9	0.062
10	0.008

3 结论

本文采用新型的硅漂移探测器和高性能的低功率 X 射线管搭建了一款便携式能谱仪，针对普通仪器对大米 Cd 检测灵敏度不高的问题，重新整合了硬件平台，优化了光路系统的几何布局，使 X 射线管的有效激发增强和探测器的探测效率提高。通过光谱数据预处理，有效提高了信噪比，并降低了其他因素对有效信号的干扰。本文所提出的数据预处理方法和 Cd 元素定性定量方法原理和操作均简单，并且不需要对大米样品做前期处理，可将大米样品放在样品杯内直接进行检测。并且设计了简单有效的上位机分析软件，提高了系统的实时性和快速性。定量实验所建立的标准曲线的工作范围为 0.074 ~ 0.728 ppm，寻峰的绝对误差在 3% 以内，镉元素的定量相对误差在 10% 以内，样品测量的平均时间为 900 s。分析软件定量分析的检出限为 0.051 5 ppm，定量限为 0.171 6 ppm，具有误差小、操作简单快速、方便携带、安全稳定等特点，能够满足 Cd 大米的现场原位检测要求。但是在实际应用中，也要根据样品的性质修改数据处理流程中相应步骤的参数。

参考文献:

[1] 廖学亮, 沈学静, 刘明博, 等. 台式能量色散 X 射线荧光光谱直接检测大米中的 Cd [J]. 食品科学, 2014, (24): 169-173.
 [2] 曲月华, 王一凌. X 射线荧光光谱分析技术 [J]. 鞍钢技术, 2013 (3): 7-10.
 [3] 胡波, 武晓梅, 余韬, 等. X 射线荧光光谱仪的发展及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (12): 97.

数据时, 被引导装备能够快速捕获并跟踪到飞行目标, 从 GPS 发送引导数据到装备跟踪到目标时间统计如表 4 所示, 各装备在未使用引导平台情况下, 在原有引导模式下各装备跟踪到目标的平均用时如表 5 所示。

表 4 GPS 为引导源时各装备跟踪到目标时间统计表

航次 装备	1	2	3	4	5
装备 1	3.2s	3.6s	3.8s	4.7s	3.5s
装备 2	4.4s	5.4s	5.2s	4.9s	6.1s
装备 3	2.5s	3.2s	4.6s	3.3s	4.7s

表 5 原引导模式下各装备跟踪到目标平均用时统计表

装备	装备 1	装备 2	装备 3
原引导模式下装备跟踪到目标平均用时	12s	18s	11s

通过测试可以得出, 试验引导平台作为所有参加装备测量数据交互和共享的平台, 它能够及时的实现任意两台装备之间测量数据的实时传输, 使得任意一台装备都能够为其它所有装备提供引导服务, 极大的缩短了装备发现目标、跟踪目标和测量目标飞行数据的时间, 降低了装备录取数据的丢包率, 为事后数据处理提供了更加真实、可靠的飞行数据。

5 结束语

本文针对飞行试验中不同原理、不同体制、不同性能、不同布站环境的多套参试装备同时跟踪测量飞行目标而导致的捕获、跟踪、丢失目标时间长短不一的问题, 设计了一种基于信

[J]. 核电子学与探测技术, 2015 (7): 695-702.

[4] 章连香, 符斌. X-射线荧光光谱分析技术的发展 [J]. 中国无机分析化学, 2013 (3): 1-7.
 [5] Mantler M. The electronic age; energy-dispersive X-ray analysis and other modern techniques to the present and beyond [J]. Powder Diffraction, 2014, 29 (2): 127-132.
 [6] 张辉, 余正东, 吴敏, 等. ED-XRF 法快速测定大米中镉元素的实用性分析 [J]. 食品工业, 2015 (12): 259-263.
 [7] 赵军霞, 江楠, 游刚, 等. X 射线荧光分析及发展 [J]. 广东化工, 2016 (4): 84-86.
 [8] Feldman Jason E (US), George Thomas (US), Wilcox Jaroslava Z (US). Atmospheric electron x-ray spectrometer [P]. : US6452177, 2002-9-17.
 [9] 糜蓉, 王永, 熊显名. 基于 Android 平台的微型光谱仪数据传输与显示研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (12): 97.
 [10] 岳璐璐. 基于便携式谱仪的能谱数据处理 [D]. 上海: 上海应用技术学院, 2015.
 [11] 马翠红, 刘立业. 基于小波分析的光谱数据处理 [J]. 冶金分析, 2012 (1): 34-37.
 [12] 胡耀垓, 赵正予, 王刚. 基于小波的光谱信号基线校正和背景扣除 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2011 (6): 36-40.
 [13] 张林艳. 能量色散 X 射线荧光光谱线分析算法的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2010.
 [14] 王森, 刘增灿. 地面目标雷达与红外特性数据库构建 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (12): 38.

息共享的网络引导平台, 运用数学方法对引导源数据进行优化, 使得网络中的每一个节点可以快速得到其他装备的最优引导数据, 以最短的时间捕获跟踪上飞行目标, 从而提高装备的整体测量能力和使用效率。

参考文献:

[1] 马廷. 基于 UKF 的自适应野值剔除算法 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (8): 40.
 [2] 魏毅强, 张建国, 张洪斌, 等. 数值计算方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
 [3] 吴赛飞, 王新华, 贾森, 等. 基于红外视觉的固定翼无人机自动着陆引导系统 [J]. 电子测量技术, 2016, 39 (3): 131-135.
 [4] 朱华统. 常用大地坐标系及其变换 [M]. 北京: 解放军出版社, 1990.
 [5] 熊介. 椭球大地测量学 [M]. 北京: 解放军出版社, 1988.
 [6] 董文永, 刘进, 丁建利, 等. 最优化技术与数学建模 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
 [7] 桂阳. 基于异构传感器的弹道导弹主动段融合跟踪 [J]. 电子测量技术, 2016, 39 (3): 110-113.
 [8] 黄朝美, 杨马英. 基于信息融合的移动机器人目标识别与定位 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (11):
 [9] 陈庆良, 高山, 姬新阳. 飞行目标航迹显示中的数据拟合方法 [J]. 舰船电子工程, 2016 (12): 55-57.
 [10] 毛洋方, 逸远, 周敬烈. 基于混合模型的炮位外推算法研究 [J]. 电子测量技术, 2015, 38 (12): 36-40.
 [11] 包国忱. 电子装备试验数据处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
 [12] 黄丁发, 张勤, 张小红, 等. 卫星导航定位原理 [M]. 武汉: 武汉大学出版, 2015.