

# 激光与光电子学进展

## 面向微型光谱仪在线检测的光学系统误差校正方法

周风波<sup>1,3\*</sup>, 朱红求<sup>2</sup>, 李长庚<sup>3\*\*</sup>

<sup>1</sup>邵阳学院信息工程学院, 湖南 邵阳 422000;

<sup>2</sup>中南大学自动化学院, 湖南 长沙 410083;

<sup>3</sup>中南大学物理与电子学院, 湖南 长沙 410083

**摘要** 微型光纤光谱仪由于具有小型化、集成化、检测速度快等特点, 适用于工业现场多组分物质的在线检测。针对微型光谱仪由于受到仪器杂散光、光度噪声和光源波动等因素的影响, 导致测量光谱信号精度差的问题, 提出了一种面向微型光谱仪在线检测的光学系统误差校正方法。该方法首先使用光谱仪在线测量光谱强度, 并通过参考溶液和待测溶液获取光谱信号; 其次, 通过提出的自适应小波阈值去噪法, 消除光谱信号的光度噪声, 提升光谱信号的灵敏度; 然后, 提出了一种基于双波长光强比值不变性的光源稳定方法, 动态消除光源误差; 最后, 对铜钴离子的光谱信号进行动态校正, 并对校正曲线进行性能分析。结果表明, 所提出的方法简单快速, 适用于光谱信号的动态校正, 以满足多金属杂质离子在线检测的需求。

**关键词** 微型光纤光谱仪; 多金属离子检测; 光学系统误差校正; 自适应小波阈值法

中图分类号 O433.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0307001

## Optical System Error Correction Method for Online Detection of Miniature Spectrometer

Zhou Fengbo<sup>1,3\*</sup>, Zhu Hongqiu<sup>2</sup>, Li Changeng<sup>3\*\*</sup>

<sup>1</sup>School of Information Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000, China;

<sup>2</sup>School of Automation, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

<sup>3</sup>School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China

**Abstract** Due to its miniaturization, integration, and fast detection speed, the miniature optical fiber spectrometer was suitable for on-line detection of multi-component substances in industrial sites. In view of the problem that the micro spectrometer was affected by the stray light, photometric noise and light source fluctuation, the measurement accuracy of the spectral signal was poor, and an optical system error correction method was proposed for on-line detection of micro spectrometer. Firstly, a micro spectrometer was used to measure the spectral intensity online, and the spectral signal was obtained from the reference solution and the solution to be measured. Secondly, the adaptive wavelet threshold denoising method was used to eliminate the photometric noise of the spectral signal and improve the sensitivity of the spectral signal. Then, a light source stabilization method based on the invariance of the dual wavelength light intensity ratio was proposed to dynamically eliminate the light source error. Finally, the spectral signals of the copper and cobalt were dynamically corrected, and the performance analysis of the correction

收稿日期: 2021-04-23; 修回日期: 2021-04-30; 录用日期: 2021-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61533021)、湖南省教育厅优秀青年项目(19B518)

通信作者: \*fbzhou5018@126.com; \*\*lcgeng@csu.edu.cn

curve was performed. The results show that the method proposed in this paper is simple and fast, and it was suitable for dynamic correction of spectral signal to meet the needs of online detection of multi metal impurity ions.

**Key words** miniature fiber spectrometer; polymetallic ion detection; optical system error correction; adaptive wavelet threshold method

## 1 引言

传统的大型光谱仪一般包括光源、单色器、样品室和检测器四部分,设计结构为双光束光谱仪<sup>[1]</sup>。双光束紫外可见光谱仪通过光束分裂器产生两束相同的单色光,分别通过参比池和样品池,得到的吸收光谱为二者的吸收光谱之差<sup>[2]</sup>。双光束光谱仪采用光电倍增管检测器,可以抵消杂散光、电噪声以及光源波动的影响,有利于提高检测的准确度和稳定性,但是检测时间长、设备庞大、价格昂贵、且对环境要求苛刻,很难应用到工业现场中发挥作用<sup>[3]</sup>。

随着科学技术在微电子、光学技术、光纤、计算机软硬件和软件、精密仪器制造等领域的快速发展,集分光检测功能于一体的微型光纤光谱仪获得了突破性的进展,目前已有一些成熟的商业化产品,广泛应用于紫外光谱、红外光谱、拉曼光谱等领域的检测和分析<sup>[4-7]</sup>。美国 Ocean Optic (海洋光学)、美国 HACH (哈希)、荷兰爱万体斯 (Avantes) 公司、德国 Implen 等公司均有自己的成熟产品。国内微型光谱仪研究起步较晚,近几年依靠自身的科技创新也取得了快速蓬勃发展,目前生产公司主要有上海辰昶仪器设备有限公司、上海复享科技有限公司、长春海洋光电有限公司和厦门奥普天成光电有限公司<sup>[8-12]</sup>。这些公司生产的微型光谱仪均采用精密型的光学器件和 CCD 探测器,极大的减小了仪器的体积、减轻了仪器的重量、加快了检测速度和降低了仪器成本,普遍具有小型化、集成化和智能化的优点,适合用于工业生产的实时在线检测。

在湿法炼锌净化过程中,硫酸锌溶液中包含大量的基体锌 (Zn) 离子,以及铜 (Cu)、钴 (Co)、镍 (Ni) 等痕量杂质离子,目前企业生产仍采用人工离线分析电解液中杂质金属离子的浓度,过程繁琐、检测耗时、反馈信息滞后,导致净化后锌液杂质金属离子浓度波动大、锌粉消耗大、产品质量不合格、生产效率低等问题,制约了锌湿法冶金净化过程的高效绿色生产<sup>[13-17]</sup>。因此,亟待实现锌电解液中杂质多金属离子浓度的在线检测。微型光谱仪虽然适用于工业现场的在线检测,但是由于采用 CCD 检测器,设计结构为单光束光谱仪,需要对待测溶液和

参比溶液分别进行测量。因此,仪器的杂散光、光度噪声和光源波动对光谱检测的性能影响较大,导致分析的误差较高。针对微型光谱仪光源误差导致检测精度低的问题,提出了一种面向微型光谱仪在线检测的光学系统误差校正方法。实验结果表明,本文提出的方法简单快速,适用于光谱信号的动态校正,以满足多金属杂质离子在线检测的需求。

## 2 光学系统误差校正法

### 2.1 微型光谱仪检测原理

微型光谱仪采用单光束结构,单光束光谱仪只能同时采集和接收一束单色或者复色光,利用参考光和被测样品光的两次测量来进行光谱检测分析。仪器设置为计数模式,用于检测透射光的强度,检测步骤如下:

(1) 关闭或遮蔽测量光源,探测背景光谱,记为  $D_\lambda$ 。

(2) 放入参比试剂,打开测量光源,记录光源光谱,记为  $R_\lambda$ 。

(3) 放入样品试剂,记录光源光谱,记为  $S_\lambda$ 。

设入射光强为  $I_i$ ,参比试剂真实透射光强度为  $I_c$ ,样品试剂真实透射光强度为  $I_p$ ,则满足:

$$I_c = R_\lambda - D_\lambda, \quad (1)$$

$$I_p = S_\lambda - D_\lambda, \quad (2)$$

测量的吸光度表示为:

$$\begin{aligned} \Delta A = A_p - A_c &= \lg \frac{I_i}{I_p} - \lg \frac{I_i}{I_c} \\ &= -\lg \frac{I_p}{I_c} = -\lg \frac{S_\lambda - D_\lambda}{R_\lambda - D_\lambda}. \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.2 自适应小波阈值去噪法

小波阈值去噪法包括硬阈值法和软阈值法,但是硬阈值法在阈值处不连续以及软阈值法存在固定偏差,且无论使用哪种阈值准则,在不同分解层的阈值是固定的。针对小波阈值去噪法在信号去噪过程中存在的不足,根据小波分解中信号和噪声的不同尺度特性,提出了自适应小波阈值去噪方法,可以灵活的选取最优阈值<sup>[18]</sup>。

自适应阈值选取的基本思想是:与噪声相对应的小波系数均匀分布,幅度较小,但数量较多;与信

号对应的小波系数数量较少,但具有较大的幅度。基于上述理论,对原始信号进行  $M$  层小波分解,每层根据信号和噪声的小波系数设置初始阈值和步长,然后将绝对值小于阈值的小波系数设置为零。当阈值逐步增加时,小波系数绝对值的总和将在开始时迅速减小(噪声的小波系数被设置为零),当阈

值进一步增加时,小波系数绝对值的总和将缓慢变化并且趋于稳定,当相邻两个阈值的小波系数总和的相对误差小于量化比参数时,可以确定该层的最佳阈值。按照这种原则依次迭代确定所有  $M$  层的最佳阈值。自适应阈值算法的流程图如图 1 所示。

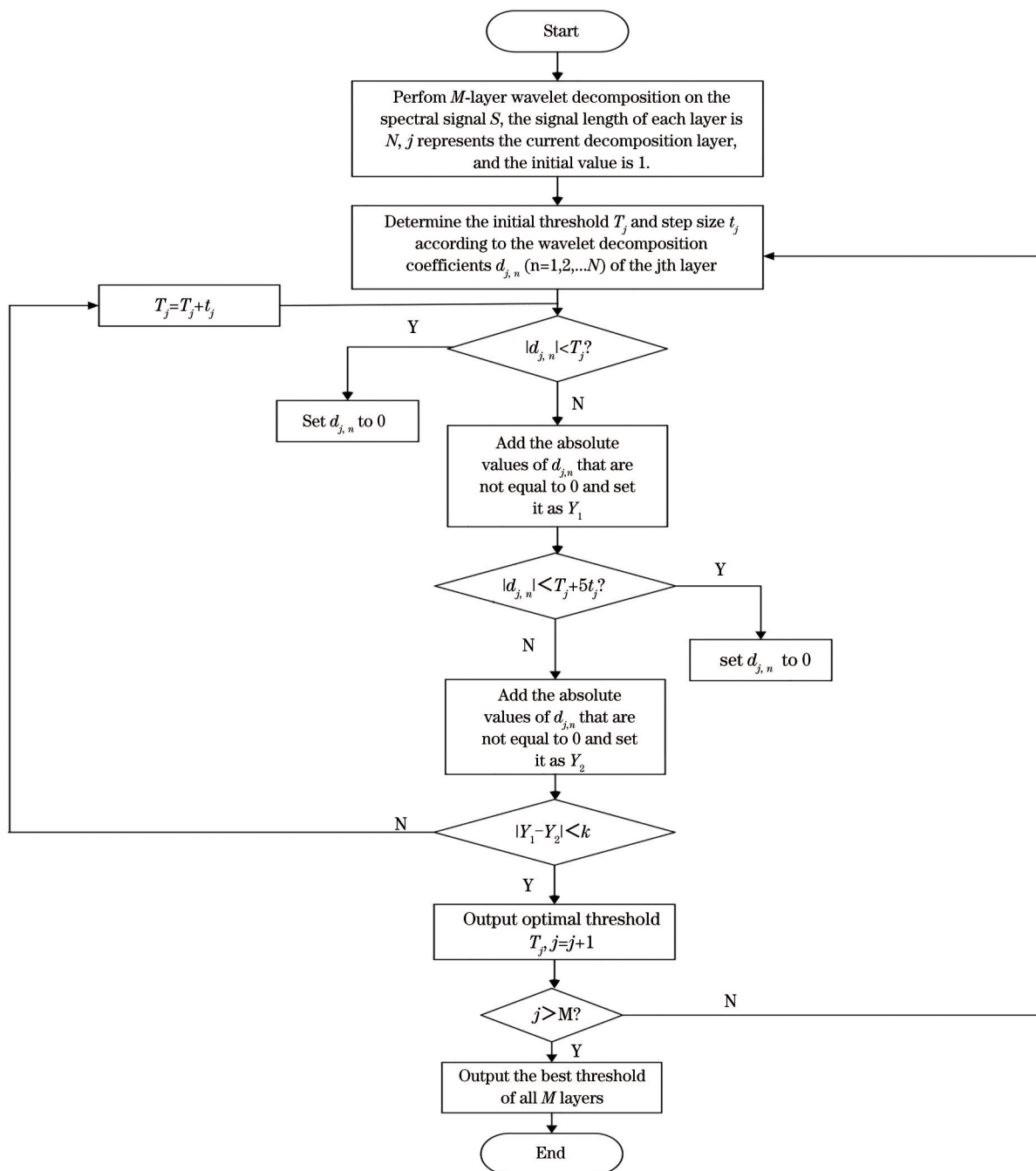


图 1 自适应小波阈值算法的流程图

Fig. 1 Flow chart of adaptive wavelet threshold algorithm

自适应阈值方法涉及三个主要相关参数： $T$  是初始阈值， $t$  是步长， $k$  是量化比参数。并定义如下：

$$T = \min(|d_j|), \tag{4}$$

$$t = [\max(|d_j|) - \min(|d_j|)] / N. \tag{5}$$

在(5)式中,  $d_j$ 表示在第  $j$ 层分解的小波细节系数,  $N$ 表示信号长度。  $k$ 是量化比参数。

### 2.3 光学系统的误差校正

光源为紫外可见光谱仪提供测量过程中所需的波段和能量。当一束复合光  $I_1$ 照射至待测溶液时,由于物质对光的选择性吸收,设穿透溶液的透射光强度为  $I_0$ 。  $I_1=[I_{11}, I_{12}, \dots, I_{1n}]$ 表示入射光的能量强度,其中  $I_{1n}$ 为入射光在第  $n$ 个波长点的强度。  $I_0=[I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0n}]$ 表示透射光的能量强度,  $I_{0n}$ 为透射光在第  $n$ 个波长点的强度。则光能量衰减偏差  $\Delta\eta$ 可以表示为:

$$\Delta\eta = I_1 - I_0 \quad (6)$$

根据入射光能量与透射光能量的偏差量,可以反映待测离子在不同波长段对光能量吸收程度的差异。根据朗伯-比尔定律,测量吸光度  $A$ 可以表述为:

$$A = \lg \frac{I_1}{I_0} = \epsilon d C \quad (7)$$

(7)式中,  $\epsilon$ 表示吸光系数,  $d$ 表示容器的厚度;  $C$ 表示待测物质的浓度。因此,对于同一种物质,在相同的测试条件下,吸光度  $A$ 与浓度  $C$ 成正比关系。若光源不稳定,在某个波段的能量值发生波动,则(7)式变化为:

$$\bar{A} = \lg \frac{I_1 \pm \Delta I}{I_0 \pm \Delta I} = \epsilon d \bar{C} \neq \lg \frac{I_1}{I_0} = \epsilon d C = A \quad (8)$$

(8)式中,  $\Delta I=[\Delta I_1, \Delta I_2, \dots, \Delta I_n]$ 表示光源在不同波长点的能量波动值,当  $\Delta I \neq 0$ 时,导致测量的吸光度  $\bar{A}$ 与实际的吸光度  $A$ 存在差异,从而使得检测的浓度  $\bar{C}$ 与实际的浓度  $C$ 存在较大的偏差。因此,光源的不稳定性严重影响检测结果的准确性和重复性。

基于光谱检测双波长光强比值不变性,研究了光谱吸光度曲线校正方法,用于动态消除光学系统的测量误差。对任一个被测溶液的光谱曲线,以其中某个吸光度较小的波长作为参考波长,设为  $\lambda_R$ ,对吸收光谱曲线进行校正,具体的思路如下:

$$A_c(\lambda) = A(\lambda) - A(\lambda_R) \quad (9)$$

(9)式中,  $A(\lambda)$ 为测试吸收光谱曲线,  $A(\lambda_R)$ 为参考波长  $\lambda_R$ 对应的吸光度值,  $A_c(\lambda)$ 为校正光谱曲线。对(9)式用光强可表示为:

$$A_c(\lambda) = \lg \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} - \lg \frac{I_0(\lambda_R)}{I(\lambda_R)} \quad (10)$$

(10)式中,  $I_0(\lambda)$ 和  $I_0(\lambda_R)$ 是检测参比体系的透

射信号光强,  $I(\lambda)$ 和  $I(\lambda_R)$ 是检测样品试剂的透射信号光强。对(10)式进行数学变换,可得:

$$A_c(\lambda) = \lg \frac{I(\lambda_R)}{I(\lambda)} - \lg \frac{I_0(\lambda_R)}{I_0(\lambda)} \quad (11)$$

从(11)式可以看出,校正光谱曲线  $A_c(\lambda)$ 是在不同波长处的光强信号比值运算。根据光谱检测双波长光强比值不变特性,校正光谱不会随光源信号的扰动或者漂移而变化,从而动态校正由光学检测系统引起的系统测试误差。

## 3 实验部分

### 3.1 仪器

实验中设计了一套用于高锌溶液中多金属离子浓度同时检测的硬件平台,如图2所示。光源使用氙卤混合光源(型号 iDH2000-BSC),可提供的波段为 215~2500 nm,使用寿命为 2000 h,满足紫外-可见波段光谱检测的需求。光纤用于传输光信号,选择型号为 FIB-600-DUV,适用波段为 200~1100 nm。样品槽选用量程为 1 cm 的标准石英比色皿,用于存放待测金属溶液。比色皿支架用于将石英比色皿固定,选择型号为 R4-ALL,可提供四组准直镜,用于将光纤传输的入射光以平行的方式通过比色皿溶液。微型光谱仪选择奥普天成公司生产的 ATP2000 光谱仪,该光谱仪的检测波长范围为 200~1100 nm,可提供串口协议的二次开发,满足光谱在线检测的任务需求。ARM 微处理器采用一款型号为 STM32F407 的高性能处理器,该处理器配备多重 AHB 总线矩阵和多通道 DMA 存储器,时钟

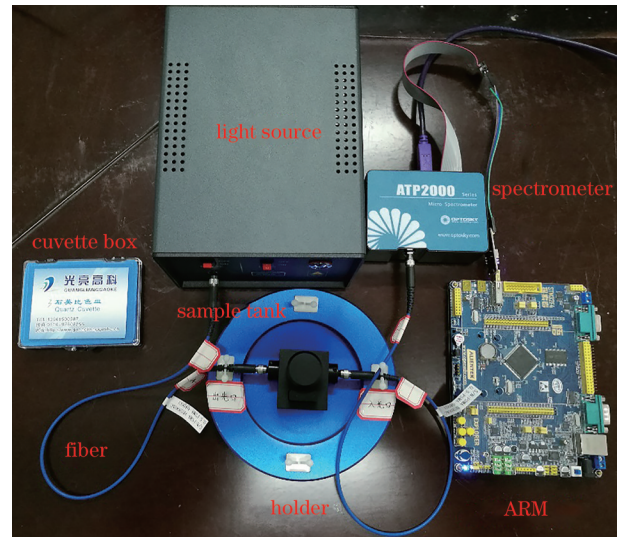


图2 光谱检测硬件平台

Fig. 2 Spectral detection hardware platform

频率可达 168 MHz,能够并行处理程序运行和数据传输,从而满足光谱采集过程中大量数据的传输和程序的实时处理。

### 3.2 试剂

所有化学品均为分析试剂,无需进一步纯化。使用去离子水进行实验中的溶解和稀释。用水作为溶剂分别制备 12.5 mg/L 铜,钴,镍的储备溶液。然后根据需要通过连续稀释从储备溶液制备标准溶液。通过将适当体积的纯乙酸和乙酸钠混合制备乙酸乙酸钠缓冲液(pH 为 5.5)。制备亚硝基 R 盐溶液作为显色试剂。

### 3.3 实验方法

将含有各种比例的铜,钴混合标准溶液,5.00 ml 0.4% 亚硝基 R 盐溶液,7.5 ml 乙酸乙酸钠缓冲液放置于 25 ml 校准烧瓶中,并用适当体积的蒸馏水稀释,以相同的方式制备空白溶液作为参

比。铜的最终浓度范围为 0.5~5 mg/L,钴的浓度范围为 0.3~3 mg/L。普析 T9 光谱仪用于测量以空白溶液为参比的标准溶液的光谱。在 350~800 nm 的波长范围内以 1 nm 的间隔进行扫描。

## 4 结果与讨论

### 4.1 光谱吸收曲线

使用 ATP2000 光谱仪按照上述步骤对 0.5 mg/L Cu 标准溶液进行测量,采集的光谱信号如图 3 所示。图 3(a)为关闭光源时测量的背景光谱信号强度,图 3(b)为测量空白溶液得到的参比光谱信号强度,图 3(c)为测量铜标准溶液得到的光谱信号强度。从图可以看出,图 3(c)中光谱强度小于图 3(b)中的光谱强度,原因是溶液中的铜离子对光具有吸收作用,从而降低了光的透射强度。根据(3)式进行计算,可得到图 3(d)铜的吸光度曲线。

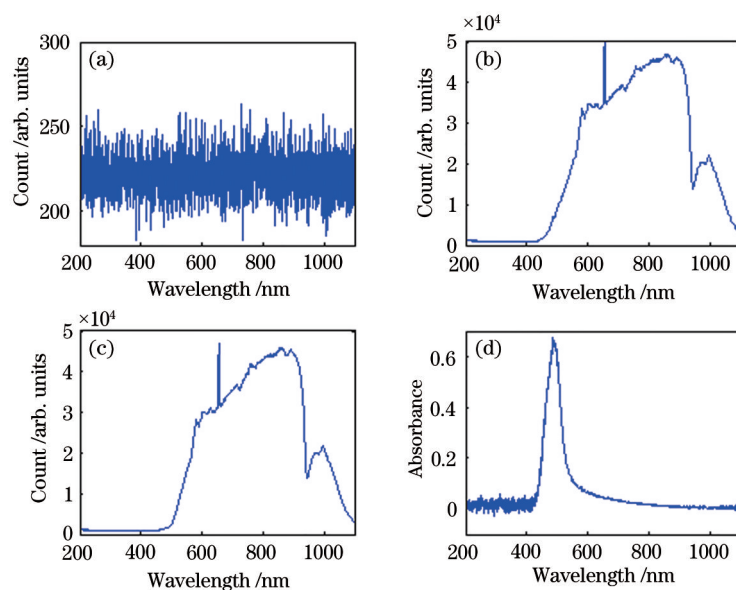


图 3 ATP2000 光谱仪采集的铜光谱信号。(a)背景光强;(b)参比光强;(c)样品光强;(d)吸光度模式

Fig. 3 Copper spectral signal collected by ATP2000 spectrometer. (a) Background light intensity; (b) reference light intensity; (c) sample light intensity; (d) absorbance curve

### 4.2 自适应小波阈值去噪法

图 4 显示了铜和钴离子在 200~1100 nm 波长范围内的紫外-可见吸收光谱,其中铜离子的浓度范围为 0.5~5.0 mg/L,钴离子的浓度范围为 0.3~3.0 mg/L。从图 4(a)和图 4(b)可以看出,铜和钴的光谱信号均受到噪声的影响,而且铜离子受噪声干扰程度更为严重。铜和钴光谱的最大吸收度对应的波长分别为 494.66 nm 和 503.47 nm。为了评估铜和钴信号的线性,分别使用谱峰吸光度和对应的浓度构建铜和钴离子的校正曲线,如图 4(c)和

图 4(d)所示。铜离子的校正方程和相关系数( $R^2$ )为: $A=0.1698 C_{Cu}+0.0048(R^2=0.9914)$ ,钴离子的线性方程和相关系数为: $A=0.2501 C_{Co}+0.5564(R^2=0.9937)$ 。由图可知,铜和钴离子在灵敏度最高的波长点,预测值和实际值偏离度较大,线性不好,其相关系数分别为 0.9877 和 0.9885。因此,有必要对光谱信号进行去噪预处理以提高检测精度。

使用提出的自适应小波阈值去噪方法对铜和钴的光谱信号进行信号增强预处理。图 5(a)为铜

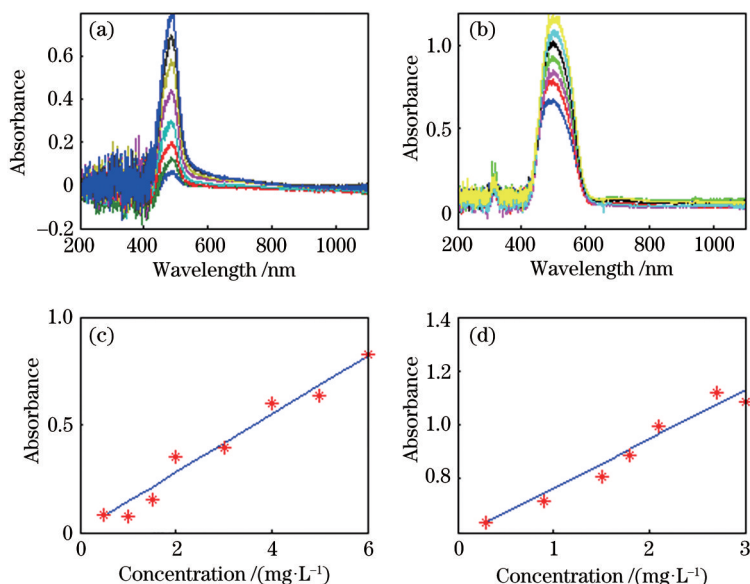


图 4 铜和钴光谱信号及校正曲线。(a)铜离子光谱信号;(b)钴离子光谱信号;(c)铜离子线性校正曲线;(d)钴离子线性校正曲线

Fig. 4 Spectral signal and calibration curve of copper and cobalt. (a) Spectral signal of copper; (b) spectral signal of cobalt; (c) linear correction curve of copper; (d) linear correction curve of cobalt

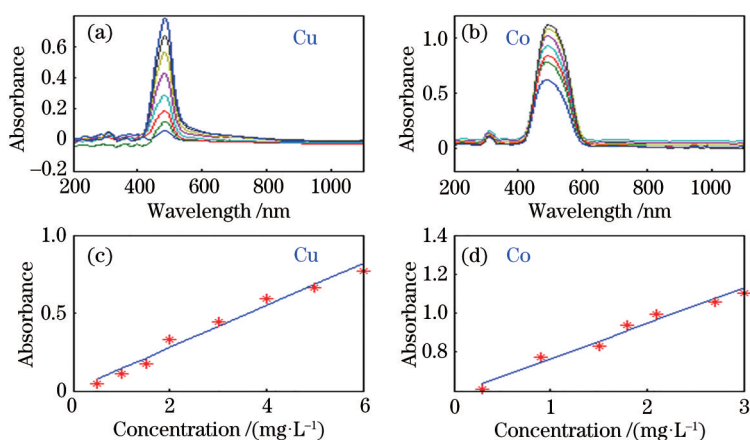


图 5 铜和钴离子去噪后的光谱信号及校正曲线。(a)铜离子光谱信号;(b)钴离子光谱信号;(c)铜离子线性校正曲线;(d)钴离子线性校正曲线

Fig. 5 Spectral signal and calibration curve of copper and cobalt after denoising. (a) Spectral signal of copper; (b) spectral signal of cobalt; (c) linear correction curve of copper; (d) linear correction curve of cobalt

离子去噪后的光谱信号,图 5(b)为钴离子去噪后的光谱信号。从图可以看出,噪声被完全消除,信号去噪后的曲线比较平滑且没有失真,光谱形状与实际情况基本一致。图 5(c)和图 5(d)分别为铜和钴光谱预处理后的校正曲线,铜钴的相关系数分别为 0.9904 和 0.9927,线性性得到明显提高。

### 4.3 双波长光强比值稳定性测试

由于光源扰动引起的光谱仪数据偏移,导致光谱仪检测系统存在较大的系统测量误差,对同样的溶液重复检测的结果不一致,从而影响检测结果的

重复性和准确性。针对这一问题,本课题组展开了系统的实验研究,发现在光源稳定工作的条件下(一般开机预热半小时后光源输出稳定),光谱信号的双波长光强比值具有不随时间变化的特性。

使用 iDH2000-BSC 氙卤光源,以 0.3 mg/L 铜离子溶液作为测试对象,对光源的双波长比值稳定性进行连续的测量和记录,如图 6 所示。图 6(a)是 445 nm 和 525 nm 处的光强比值随时间变化曲线,从光源开机稳定后连续测试 2 h,每间隔 5 min 进行测量和记录。从图可以看出,光强比值的波动范围

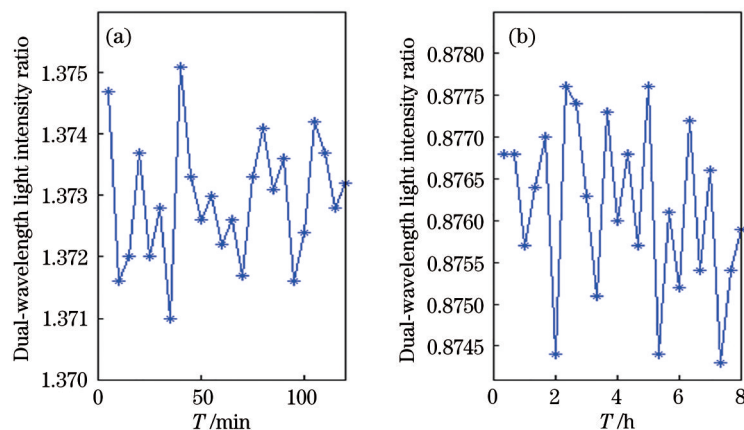


图 6 双波长光强比值变化曲线。(a)445 nm 和 525 nm 处的光强比值变化曲线;(b)456 nm 和 492 nm 处的光强比值变化曲线  
Fig. 6 Ratio curve of dual wavelength intensity. (a) Ratio curve at the wavelengths of 445 nm and 525 nm; (b) ratio curve at the wavelengths of 456 nm and 492 nm

在 1.3710~1.3751 之间,最大相对波动幅度为 0.29%。图 6(b)是 456 nm 和 492 nm 处的光强比值随时间变比曲线,从光源开机稳定后连续测试 8 h,每间隔 20 min 进行测量和记录。从图可以看出,光强比值的波动范围在 0.8743~0.8776 之间,最大相对波动幅度为 0.38%。显然,这种波动幅度在工程上近似为不变的。因此,可以得出结论,在光源开机稳定工作后,在不同的测试时刻,任意两个波长处光强的比值不随时间改变。

#### 4.4 光谱信号动态校正

根据光谱检测双波长光强比值不变特性,校正光谱不会随光源信号的扰动或者漂移而变化,因此,基于这一特性,通过对检测的吸收光谱曲线进行校正,能够动态校正由光学检测系统引起的测试误差,从而有效提升检测精度。使用 2.3 节提出的光谱曲线校正方法,对铜离子的原始光谱信号进行处理,校正前后的光谱信号如图 7 所示。图 7(a)是原始光谱曲线,图 7(b)是光谱校正曲线,图 7(c)是

光谱参考基线。从图可以看出,校正后的光谱曲线形状更规范,且重复性更高,有利于消除系统误差和提升检测精度。

#### 4.4 光谱校正算法性能分析

对微型光谱仪采集的光谱信号,经过光度噪声预处理和光谱误差校正处理后,能够提升光谱信号的灵敏度和分辨率。为了评估提出的光谱校正算法的性能,分别配置 10 组铜、钴标准溶液,其中铜离子的浓度范围为 0.5~5.0 mg/L,钴离子的浓度范围为 0.3~3.0 mg/L,然后在不同波长下对铜钴原始光谱信号和校正处理后的光谱信号进行线性校准,线性相关系数统计结果如表 1 所示。从表可以看出,经过信号处理后的铜钴光谱信号在不同波长下的线性相关系数得到了显著提高,铜和钴离子的最大相关系数分别为 0.9947 和 0.9959,结果表明铜和钴信号的线性得到了显著提升。因此,所提出的光学系统校正算法适用于原始采集的光谱信号,

表 1 铜和钴离子在不同波长下的线性相关参数

Table 1 Linear correlation parameters of copper and cobalt at different wavelengths

Wavelength / nm	Correlation coefficient of original spectral signal		Correlation coefficient after correction processing	
	Cu	Co	Cu	Co
	373.35	0.5123	0.6241	0.5515
415.82	0.5708	0.8667	0.6844	0.9227
447.57	0.5004	0.5815	0.7002	0.6943
492.34	0.9813	0.9765	0.9947	0.9922
517.41	0.9736	0.9788	0.9936	0.9959
543.73	0.9831	0.9866	0.9925	0.9934

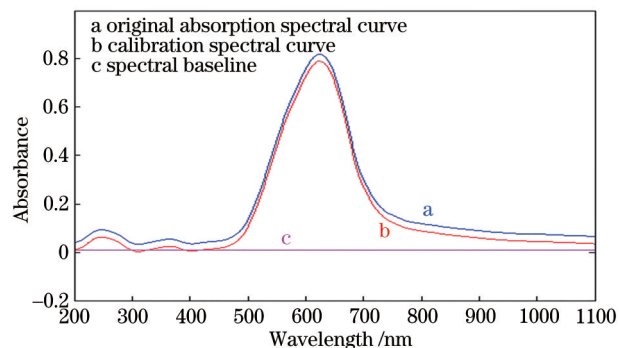


图 7 光谱信号校正曲线

Fig. 7 Spectral signal calibration curve

能够显著增强光谱信号,有利于提升多金属离子定量检测的精度。

## 5 结 论

传统的大型分光光度计仅局限于实验室,在工业生产过程中需要将采集的样品进行人工实验室离线分析,检测周期长和实时调整盲目,严重影响企业的产品质量和生产效率。微型光纤光谱仪由于具有小型化、集成化、检测速度快等特点,适用于工业现场在线检测。针对微型光谱仪由于受到仪器的杂散光、光度噪声和光源波动等因素的影响,导致测量的光谱信号精度差的问题,提出了一种基于双波长光强比值不变性的光学系统误差校正方法。结果表明,本文提出的方法简单快速,适用于光谱信号的动态校正处理,能够显著增强光谱信号,有利于提升金属离子定量检测的精度,以满足多金属杂质离子在线同时检测的需求。

## 参 考 文 献

- [1] Guo X Y, Bai H, Ma X X, et al. Online coupling of an electrochemically fabricated solid-phase microextraction probe and a miniature mass spectrometer for enrichment and analysis of chemical contaminants in infant drinks[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2020, 1098: 66-74.
- [2] Wang H Z, Nan L W, Han J W, et al. Long-term measurement of solar irradiance above, within, and under sea ice in polar environments by using fiber optic spectrometry[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019, 36(9): 1773-1787.
- [3] Jarosz P, Kusiak J, Małeckki S, et al. An attempt of optimization of zinc production line[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, 18(4): 1116-1122.
- [4] Wang X R, Cai X S, Chen J, et al. Analytical simulation of ultraviolet differential absorption spectra of benzene, toluene, and xylenes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 233004.  
王祥如, 蔡小舒, 陈军, 等. 苯、甲苯和二甲苯紫外差分吸收光谱解析模拟[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 233004.
- [5] Chen K, Guo M, Liu S, et al. Fiber-optic photoacoustic sensor for remote monitoring of gas micro-leakage[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4648-4659.
- [6] Wan X F, Liu Y, Chai X S, et al. A quint-wavelength UV spectroscopy for simultaneous determination of dichlorobenzene, chlorobenzene, and benzene in simulated water reduced by nanoscale zero-valent Fe/Ni bimetal[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2017, 181: 55-59.
- [7] Ding Y, Luo H Y, Shi H L, et al. New flat-field correction method for spatial heterodyne spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1930002.  
丁毅, 罗海燕, 施海亮, 等. 一种新型的空间外差光谱仪平场校正方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1930002.
- [8] Bao J G, Liu Z K, Chen H Y, et al. Development of micro-spectrometer with a function of timely temperature compensation[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(5): 1409-1413.  
宝剑光, 刘正坤, 陈火耀, 等. 带有实时温度补偿功能的微型光谱仪研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(5): 1409-1413.
- [9] Fletcher P, Sangwine S J. The development of the quaternion wavelet transform[J]. *Signal Processing*, 2017, 136: 2-15.
- [10] Sabouri M, Mousavi Khoei S M, Neshati J. Plasma current analysis using discrete wavelet transform during plasma electrolytic oxidation on aluminum[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2017, 792: 79-87.
- [11] Liu P, Nie Y Z, Xia Q L, et al. Structural and electronic properties of arsenic nitrogen monolayer[J]. *Physics Letters A*, 2017, 381(12): 1102-1106.
- [12] Xiao Z Y, Xia H, Yu T, et al. Gyrator transform of Gaussian beams with phase difference and generation of hollow beam[J]. *Optical Review*, 2018, 25(3): 323-329.
- [13] Liu L X, He D, Li M Z, et al. Identification of Xinjiang jujube varieties based on hyperspectral technique and machine learning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1111002.  
刘立新, 何迪, 李梦珠, 等. 基于高光谱技术与机器学习的新疆红枣品种鉴别[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1111002.
- [14] Rouis M, Ouafi A, Sbaa S. Optimal level and order detection in wavelet decomposition for PCG signal denoising[J]. *Biomedizinische Technik. Biomedical Engineering*, 2019, 64(2): 163-176.
- [15] Hu Y G, Jiang T, Shen A G, et al. A background elimination method based on wavelet transform for Raman spectra[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2007, 85(1): 94-101.
- [16] Wang Y F, Cao X M, Zhang J, et al. Detection and analysis of all-day atmospheric water vapor Raman lidar based on wavelet denoising algorithm[J]. *Acta*



Optica Sinica, 2018, 38(2): 0201001.

王玉峰, 曹小明, 张晶, 等. 基于小波去噪算法的全天时大气水汽拉曼激光雷达探测与分析[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0201001.

- [17] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation[J]. IEEE

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693.

- [18] Zhou F B, Li Y G, Zhu H Q, et al. Signal enhancement algorithm for on-line detection of multi-metal ions based on ultraviolet-visible spectroscopy [J]. IEEE Access, 2020, 8: 16000-16008.