

宽谱段高分辨扫描光谱定标技术

迟明波¹, 韩欣欣^{1,2}, 徐 阳¹, 舒风风¹, 吴一辉^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了满足原子发射光谱仪在紫外至近红外宽谱段范围内的高光谱分辨率快速检测需求, 采用精密角位移平台直接驱动光栅, 配合面阵探测器, 实现高精度光谱分段快速扫描探测。但在扫描过程中, 探测器像元波长增量与光栅转角呈非线性关系, 且不同像元的波长增量不同, 这对该光谱仪波长定标造成障碍。为校正光栅色散的非线性, 基于光栅方程精确计算光栅转角与探测器首尾两端像元波长的映射关系, 针对同一光栅转角, 探测器其余像元波长利用首尾像元波长按照局部线性色散规律计算得到, 从而完成全谱段光谱定标。依据定标所得转角与探测波段对应关系依次驱动光栅转动, 实现宽谱段范围内的分段高精度光谱快速扫描探测。利用汞灯光源对该定标方法的波长检测精度进行检验, 在200~800 nm的宽谱段范围内, 波长准确度优于0.018 nm, 波长重复性优于0.001 nm。

关键词: 光谱仪; 光栅色散; 色散非线性; 波长定标

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20201302.0249

Broad band and high resolution scanning spectrum calibration technology

CHI Ming-bo¹, HAN Xin-xin^{1,2}, XU Yang¹, SHU Feng-feng¹, WU Yi-hui^{1*}

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn

Abstract: In order to achieve rapid and high spectral resolution detection in the broad band from ultraviolet to near infrared with an atomic emission spectrometer, an ultra-precision rotation stage is used to drive grating rotation to realize spectral segment-scan with high speed and high precision functioning together with an imaging CCD. However, during the scan, the wavelength increment of detector pixel changes nonlinearly with the angle of the grating, and the wavelength increments of different pixels are different, which becomes an obstacle to accurate spectral calibration. To compensate for the nonlinearity of the grating dispersion, the corresponding relationship between the wavelengths of the pixels at both ends of the detector and the rotational angles of the grating is calculated based on the grating equation while the wavelengths of the other pixels are calculated by using the wavelengths of the pixels at both ends with the linear dispersion law. Thus, with this methodology,

收稿日期: 2019-08-27; **修订日期:** 2019-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61605198, No. 6172780105), 吉林省科技发展计划项目(No. 20180520230JH)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61605198, No. 6172780105), Science and Technology Development Project of Jilin Province (No. 20180520230JH)

the calibration of the full band of wavelength is implemented. After calibration, according to the corresponding relationship between the angle and the detection wavelength band, the grating is driven to rotate successively to realize the spectral segment-scan with high resolution and high speed in broad band. The wavelength accuracy and repeatability with this method are tested by using a mercury lamp. The results show that the wavelength accuracy is better than 0.018 nm and the wavelength repeatability is better than 0.001 nm in the wave band from 200 nm to 800 nm.

Key words: spectrometer; grating dispersion; spectral nonlinearity; wavelength calibration

1 引言

光谱分析技术通过对物质光谱的探测实现对其化学组成及含量的分析,目前广泛应用于农业、工业、医疗健康、大气观测等诸多领域^[1-7]。随着科技的发展,新的分析技术的出现对光谱仪器等检测设备的性能提出了更高要求,例如在痕量多组分高放射性样品原子发射光谱分析中,要求光谱分析仪在紫外至可见宽波段内实现皮米级分辨率快速高精度光谱扫描^[8-9]。传统以光电倍增管为探测器的逐波长扫描光谱仪很难满足这一需求,紫外至可见全波段扫描通常需要近十万步,数十分钟甚至几小时才能完成一次全谱扫描。近年来,高灵敏度面阵 EMCCD 探测器^[10]有望替代传统光电倍增管,应用于高灵敏度光谱探测之中,推动光栅光谱仪由逐波长扫描到分谱段扫描甚至全谱直读发展,将全谱扫描时间降低至数分钟甚至一分钟之内,极大提高光谱仪的检测速度。

另一方面,波长精度,主要包括波长准确度和波长重复性,是光谱仪器的核心指标^[11],也是保障光谱分析准确度的前提。光栅色散分辨率高、线性度好,广泛应用于紫外至近红外波段的光谱分析仪器之中^[12]。但在宽波段、高分辨率光谱分析中,光栅色散依然会表现出非线性,进而影响探测的波长精度。为在宽波段高精度扫描中校正光栅色散的非线性,使像元上的波长增量与系统控制输入呈线性关系,目前光谱仪一般采用正弦机构^[13-15]作为波长扫描机构,其摆杆转角的正弦值与波长增量呈线性关系。但是,在采用面阵探测器进行逐波段扫描时,探测器不同像元所对应的光栅入射光线与衍射光线夹角不同,导致不同像元上随摆杆转角变化产生的波长增量不一致,难

以针对所有像元均实现波长准确定标,并且正弦机构中,电机步进量与摆杆转角之间并非是严格的正弦关系,从而在定标过程中产生波长准确度误差。同时,丝杠的重复定位误差是正弦机构波长重复性误差的主要来源,在高精度光谱扫描应用中,对丝杠的重复定位精度将具有极为苛刻的要求^[16]。

为实现宽波段范围内的高分辨、高精度、快速光谱扫描,本文创新性地提出一种分段线性光谱定标技术,以解决宽波段光谱探测中光栅色散非线性引入的波长定标难题,从而替代传统的正弦波长扫描机构,使用体积更小、定位精度更高、扫描速度更快的角位移平台直接驱动光栅转动实现波长快速扫描。该方法首先根据特征谱线探测数据定标面阵探测器不同像元上光栅入射光线与衍射光线夹角,基于定标结果依次迭代计算全波段内各扫描波长范围与光栅转角的对应关系。光谱扫描探测时,通过精密角位移平台直接驱动光栅,使其按照计算所得的一组离散角度依次旋转,即可实现宽波段内高分辨率分段扫描探测。与当前世界范围内采用正弦波长扫描机构的同规格光谱仪器相比,该定标方法所研制的光谱分析仪具有更高的波长准确度和波长重复性。该方法在原子发射光谱复杂元素痕量检测等宽波段、高分辨、快速光谱检测领域具有较高应用价值。

2 宽波段高分辨分段光谱扫描

2.1 宽波段高分辨分段光谱扫描系统

图1为宽波段光栅直驱分段光谱扫描系统的原理设计图。它主要由入射狭缝、滤光片切换系统、光栅色散扫描系统、数据采集及信号处理系统等组成。入射光信号被狭缝调制后经准直反射镜

准直,平行照射光栅进行色散,不同波长的光信号被聚焦反射镜聚焦成像于探测器像面不同像元处。

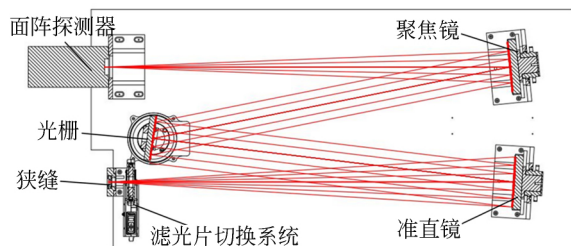


图1 宽波段高分辨光谱扫描分析系统

Fig. 1 Spectral scanning system with broadband and high resolution

受探测器尺寸限制,在宽波段高分辨率光谱色散系统中,单一探测器很难满足全波段探测需求,因此通过精密角位移平台旋转光栅,进而改变探测器平面上的波段范围,通过逐段扫描的方式实现宽波段内高分辨率探测,在光谱逐段扫描过程中,动态切换入射狭缝后方的带通滤光片,以消除光栅色散的二级光谱。探测器采集各波段光谱信号后,经过滤噪、基线校正等信号处理过程后通过拼接获得全波段的光谱信号。

2.2 光栅色散及波长扫描原理

光栅色散及扫描原理如图2所示,光栅能够对入射光信号进行振幅或者相位的空间周期性调制,从而实现对入射信号的光谱分析,光栅色散方程^[7]如公式(1)所示。

$$d(\sin i \pm \sin \theta) = m\lambda, \quad (1)$$

其中, λ 为光信号波长, d 为光栅常数, m 为光栅衍射级次。如图2所示, i 为光栅入射角,即入射光线与光栅平面法线夹角, θ 为光栅衍射角,即衍射光线与光栅平面法线夹角。在入射角一定的情况下,同一级次色散中不同波长对应的衍射角不同,从而实现光谱色散。

高分辨光栅光谱仪中,大色散距离使得光谱仪的线色散率较高,从而可以获得极高的分辨率,但受探测器尺寸影响,单幅CCD探测器所对应的波段范围大幅减少,因此在宽范围光谱探测中,需要旋转光栅来实现光谱扫描,扫描原理如图2所示。

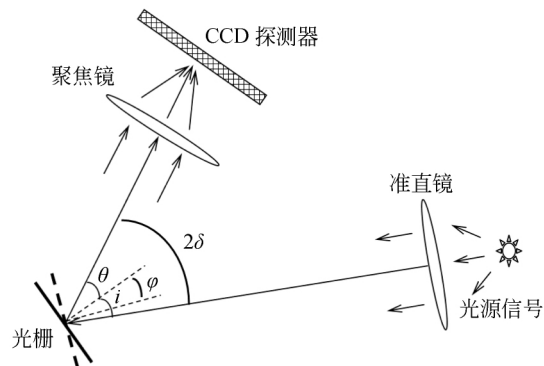


图2 光栅色散及扫描原理

Fig. 2 Grating dispersion and spectral scanning principle

在扫描光栅光谱仪中,准直镜、聚焦镜以及探测器的位置固定不变,光栅是唯一可动部件且仅有一个转动自由度,因此,对于探测器上确定位置像元而言,光源发出的光信号到达该像元的光路是唯一的。因此对于同一像元,在光栅平面处,入射光线与衍射光线的夹角恒为定值,在本文中设置为 2δ 。

以入射光线与衍射光线分居法线两侧为例,假设以发生零级衍射的位置作为光栅的初始位置,此时光栅入射角 i 与衍射角 θ 相等。当光栅平面转过角度 φ 时,光栅法线随之旋转相同角度,根据光栅方程可以推导出探测器像元上波长与光栅转角 φ 的关系为^[6]:

$$\lambda = \frac{2d}{m} \cos \delta \sin \varphi. \quad (2)$$

因此对于单一像元而言,其波长变化量与光栅转角成正弦关系,使用正弦扫描机构可以近似校正光栅色散的非线性,但是当采用阵列探测器时,不同像元所对应的入射光线与衍射光线的夹角不一致,因此不同像元处波长增量随光栅转角的变化关系也不一致,这就给采用阵列探测器的分段扫描光谱仪精确光谱定标造成了极大的困难。

3 分段线性光谱扫描算法

3.1 探测器首尾像元入射与衍射光线夹角定标

为解决高精度分段光谱扫描定标技术难题,本文提出一种分段线性光谱定标方法,通过采集

汞灯等特征光源的光谱数据,计算探测器首尾像元所对应的入射光线与衍射光线夹角,进而计算出光栅不同转角对应的首尾像元处的波长值。考虑到在窄波段范围内,光栅色散线性度较好,因此在探测器单帧数据所对应的波段范围内,根据首尾像元的波长值,线性定标探测器其余像元波长值,从而完成全谱段光谱定标。

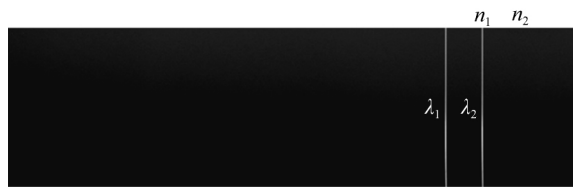
在图 2 所示系统中,为同时考虑入射光线和衍射光线分居法线两侧和位于法线同侧的情况,规定光线以锐角转向光栅面法线,逆时针方向角度为正,顺时针方向角度为负,则入射角 i 与衍射角 θ 存在如下关系:

$$i - \theta = 2\delta, \quad (3)$$

本文的定标方法需要借助于标准元素灯获得已知波长的特征谱线,初始定标数据如图 3 所示,定标时通过调节角位移平台转角,使至少两条特征谱线(波长分别为 λ_1 和 λ_2) 位于探测器像面上,根据光谱仪的中心波长以及单帧波段范围选择合适的定标光源及特征谱线。记录下此时角位移平台转角 ψ ,以及两条谱线在探测器上的像元位置 n_1 、 n_2 ,继续调节角位移平台转角,使波长为 λ_2 的谱线移动至原 λ_1 谱线所在的 n_1 像元处,如图 3(b) 所示,记录下此时角位移平台转角 ψ' 。



(a) 转角为 ψ 时的光谱定标数据
(a) Calibration data at angle ψ



(b) 转角为 ψ' 时的光谱定标数据
(b) Calibration data at angle ψ'

图 3 光谱定标数据

Fig. 3 Spectral calibration data

在上述两次定标数据采集过程中,光栅平面法线转角为:

$$\varphi = \psi' - \psi. \quad (4)$$

同时, n_1 像元上的波长由 λ_1 变为 λ_2 , 该像元所对应的光栅入射角与衍射角均改变了 φ , 代入光栅方程, 可得:

$$\sin i_1 + \sin \theta_1 = \frac{m\lambda_1}{d}, \quad (5)$$

$$\sin(i_1 + \varphi) + \sin(\theta_1 + \varphi) = \frac{m\lambda_2}{d}. \quad (6)$$

对公式(6)进行三角函数变换,可以得到:

$$\cos i_1 + \cos \theta_1 = \frac{m(\lambda_2 - \lambda_1 \cos \varphi)}{d \sin \varphi}. \quad (7)$$

令:

$$a_1 = \frac{m\lambda_1}{d}, a_2 = \frac{m(\lambda_2 - \lambda_1 \cos \varphi)}{d \sin \varphi}, \quad (8)$$

将公式(5)与公式(7)左右两边平方后相加,可以求得:

$$\cos 2\delta_1 = \cos(i_1 - \theta_1) = \frac{a_1^2 + a_2^2 - 2}{2}. \quad (9)$$

将定标数据代入公式(9),即可求出 n_1 像元所对应入射光线与衍射光线的夹角 $2\delta_1$, 根据公式(1),公式(3),以及三角函数方程,可以获得此时 n_1 像元上入射角 i_1 正弦值为变量的一元二次方程,如公式(10)所示:

$$\sin^2 i_1 - a_1 \sin i_1 + \frac{a_1^2 - \sin^2 2\delta_1}{2(1 + \cos 2\delta_1)} = 0. \quad (10)$$

在已知 a_1 与 $2\delta_1$ 的情况下,求解上述方程,即可求出此时 n_1 像元所对应的光栅入射角 i_1 。根据光栅色散系统的特点,相同光栅转角下,探测器所有像元所对应的光栅入射角相同,因此,转角为 ψ 时,探测器像面上所有像元对应的光栅入射角均为 i_1 。

根据图 3(a) 的测试结果,已知汞灯特征谱线 λ_1, λ_2 在探测器像元位置 n_1, n_2 的情况下,窄波段范围内,波长随像元位置呈线性分布,则可以求出此时探测器第 n 个像元处的波长:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{n_2 - n_1}(n - n_1) + \lambda_1. \quad (11)$$

假设探测器有效像元范围内起始像元为 n_a , 终止像元为 n_b , 根据公式(11),可以求出转角为 ψ 时起始像元与终止像元的波长值 λ_a, λ_b , 在光

栅入射角已经求出的情况下,根据公式(1),可以求出此时不同像元上的衍射角,根据公式(3),即可确定首尾像元处入射光线与衍射光线的夹角 $2\delta_a, 2\delta_b$,同时完成初始帧的波长定标。

3.2 全波段波长扫描策略

完成初始帧光栅转角与探测器像面波段范围定标后,需要控制角位移平台转动,对相邻谱段进行扫描。如图4所示,以向短波方向扫描为例,根据首尾像元波长,可以求出此时起始像元前一像元处的波长值 λ_{a-1} ,通过控制角位移平台带动光栅平面旋转以实现波长扫描,当光栅转角由 ψ 变为 ψ' ,使终止像元 b 的波长变为 λ_{a-1} ,精确求解 ψ' ,即可完成由初始波段向相邻波段的扫描。

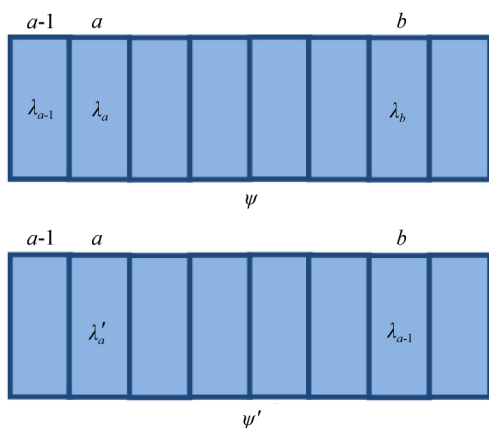


图4 相邻波段扫描策略

Fig. 4 Scanning strategy for adjacent bands

已知终止像元 b 在光栅转动前后的波长值 λ_b, λ_{a-1} ,同时通过3.1部分定标求得终止像元 b 所对应的光栅入射光线与衍射光线夹角 $2\delta_b$,将上述参数代入公式(10),通过求解方程即可得到此时光栅入射角 i_b' 。根据图2可知,光栅入射角的变化量与光栅平面转动的角度相等,在3.1部分定标中已经求得转角为 ψ 时,像元 b 处光栅入射角为 i_b ,因此根据下式可以求出此时角位移平台的转角:

$$\psi' = \psi + i_b' - i_b. \quad (12)$$

同时,由于同一光栅转角下,探测器所有像元上的光栅入射角相同,因此,此时起始像元 a 所对应的光栅入射角同样为 i_b' ,根据标定所得起始像

元上入射光线与衍射光线夹角 $2\delta_a$,根据公式(3),可以求出此时光栅衍射角,则根据公式(5),可以求出此时像元 a 处的波长值为:

$$\lambda_a' = \frac{d(\sin i_b' + \sin(2\delta_a - i_b'))}{m}. \quad (13)$$

如图4下图所示,此时的光栅转角 ψ' 对应起始像元 a 至终止像元 b 的波段范围为 $(\lambda_a', \lambda_{a-1})$,根据公式(11)线性定标即可获得所有像元上的波长值,完成该波段的定标,随后依次重复上述过程,即可完成短波方向的全谱段定标,长波方向定标过程与短波方向几乎一致,只是通过光栅旋转使起始像元 a 的波长变为终止像元 b 右方相邻像元的波长值。综合所有定标数据,即可获得与各波段对应的分立光栅转角值。定标完成后,对目标波段范围进行探测时,只需要根据定标结果查询该波段所对应的光栅转角及探测器上的像元位置。

4 定标实验结果

在本文所设计的光栅色散系统中,色散距离约为1 m,光栅常数为1 800 line/mm,探测器选择英国 ANDOR 公司 Newton DU970 EMCCD,单像元尺寸为16 μm ,角位移平台选择德国普爱纳米公司 UPR120 型精密角位移平台,双向重复精度为0.000 1°。该光谱仪在500 nm处的理论像元分辨率约为6.7 pm,若采用单点探测器在200~800 nm宽波段内逐波长扫描时,需进行约九万步扫描,但当采用面阵CCD作为探测器进行逐波段扫描时,按照本文所述分段线性定标算法在200~800 nm的光谱定标结果,单帧像面有效像元数设置为1 000,则仅需88次扫描即可完成全谱段光谱探测,如果设置探测器每一帧的积分时间为2 s,实际完成全谱段扫描所需要的时间仅为3~4 min,而传统PMT光谱仪通常需要数十分钟甚至数小时,相对而言,该光谱仪的检测速度大幅提高。

采用标准元素灯检测方法^[8-9]对波长定标结果进行检测,选择海洋光学 HG-1 型汞氙灯作为定标光源,定标后,550~600 nm波段范围内,光栅转角与探测器像面上波段范围的对应关系如表1所示。

表 1 550 ~ 600 nm 波段定标结果

Tab. 1 Results of calibration at 550 ~ 600 nm

定标 序号	光栅转角 /(°)	起始像元 波长/nm	终止像元 波长/nm	像元分辨 率/pm
1	61.608 6	545.720 3	552.749 3	6.87
2	61.185 4	552.756 1	559.743 6	6.83
3	60.762 9	559.750 4	566.696 1	6.79
4	60.341 1	566.702 8	573.606 5	6.75
5	59.92	573.613 2	580.474 5	6.71
6	59.499 6	580.481 2	587.299 8	6.66
7	59.079 9	587.306 4	594.082	6.62
8	58.660 9	594.088 7	600.821	6.58

由上述定标结果可以看出,在不同波段范围内,探测器像面上单个像元对应的平均波段范围即像元分辨率在不断改变,这主要是受光栅色散非线性影响,其也是宽范围内光谱定标波长误差的主要来源。通过精确计算每一帧像元首尾像元的波长值,可以对光栅色散非线性进行标定,大幅减少定标误差。为了对定标准确性进行验证,对扫描过程中探测器像元与定标波长值的函数对应关系进行拟合,如图 5 所示。拟合结果显示,波长定标函数满足正弦函数分布,与公式(2)的相关推论一致,函数各参量拟合误差小于千分之一,说明利用本文算法可以精确获得光谱波长与光栅转角、探测器像元的对应函数关系,从而减少由光栅色散非线性引入的波长定标误差。

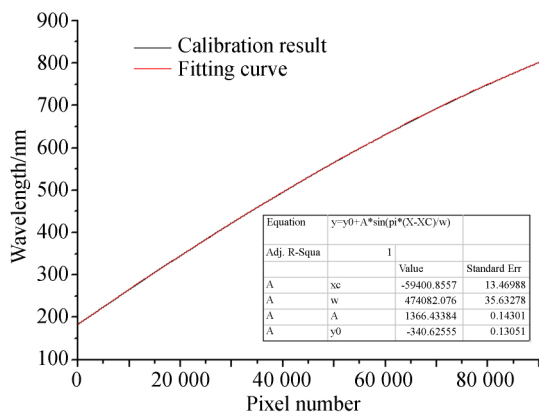


图 5 波长定标函数及正弦拟合

Fig. 5 Wavelength calibration function and sine fitting

为进一步对定标结果进行检验,采用 HG-1 汞氙灯作为定标光源,依据定标结果,对其在 200 ~ 800 nm 波段光谱进行扫描探测,积分时间设置为 2 s,全谱段扫描所需时间为 231 s,扫描探测结果如图 6 所示。

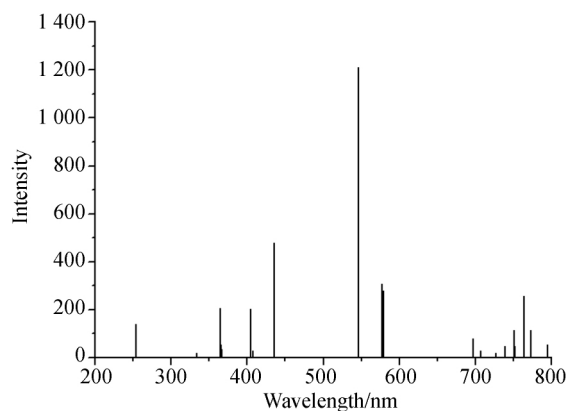


图 6 探测汞灯光谱

Fig. 6 Detected spectrum of mercury lamp

表 2 波长精度测试结果

Tab. 2 Wavelength accuracy test results (nm)

标准 波长	测试 波长一	测试 波长二	测试 波长三	波长 准确度	波长 重复性
253.652	253.655	253.655	253.655	0.003	<0.001
404.656	404.675	404.674	404.674	0.018	0.001
546.074	546.091	546.091	546.091	0.017	<0.001
576.96	576.967	576.967	576.967	0.007	<0.001
763.511	763.515	763.515	763.515	0.004	<0.001
800.616	800.62	800.62	800.62	0.004	<0.001

为衡量定标波长的精度,在相同条件下对汞灯光源进行 3 次光谱扫描,并记录 3 次测量中 253.652、404.656、546.074、576.960、763.511、800.616 nm 等 6 条特征谱线的波长测量值。对于单一特征峰,以 3 次测量的波长均值与理论值的偏差来衡量定标的波长准确度,以 3 次测量结果中的最大值与最小值之差来衡量定标的波长重复性,测量结果如表 2 所示。

综合上述结果可以发现,基于本文所提出的光谱定标方法,所研制的光谱分析仪在 200 ~ 800 nm 宽波段范围内直接获得的光谱数据中,定

标的波长准确度误差最大为 0.018 nm,波长重复性误差优于 0.001 nm。为了验证本文所提出的光谱仪性能,与国际知名光谱仪器供应商法国 HORIBA JY 公司相同规格的 1000M 型光谱仪进行对比。该光谱仪使用正弦机构进行光谱扫描,其定标的波长准确度为 0.05 nm,波长重复性为 0.005 nm,本文所提出的波长定标方法可以提供更高的波长定标精度。

5 结 论

为满足痕量元素原子发射光谱宽光谱范围、

高分辨率、快速检测需求,采用光栅直驱型分段光谱扫描的设计方案,为校正光栅在宽光谱范围内色散的非线性,实现高精度光谱定标,本文提出基于元素特征谱线的新型定标方法,精确计算出探测器首尾像元对应的入射光线与衍射光线夹角,进而推导出光栅转角与探测器像面波段范围的对应关系,实现宽谱段内高精度光谱定标。通过汞灯 6 条谱线的测试结果证明,采用该定标方法,在保证光谱扫描探测速度的同时,光谱仪的波长准确度为 0.018 nm,波长重复性优于 0.001 nm,定标精度相比目前世界同规格光谱分析仪器具有更大优势。

参考文献:

- [1] 高升,王巧华,李庆旭,等. 基于近红外光谱的红提维生素 C 含量、糖度及总酸含量无损检测方法 [J]. 分析化学, 2019, 47(6): 941-949.
GAO SH, WANG Q H, LI Q X, *et al.*. Non-destructive detection of vitamin C, sugar content and total acidity of red globe grape based on near-infrared spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(6): 941-949. (in Chinese)
- [2] 何秋菊,王丽琴,张亚旭. 基于光谱分析技术的宣纸用铝盐施胶沉淀剂作用机理研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(2): 418-423.
HE Q J, WANG L Q, ZHANG Y X. Study of mechanism of aluminum sizing precipitant on Xuan paper based on spectral analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(2): 418-423. (in Chinese)
- [3] 高颖,戴连奎,朱华东,等. 基于拉曼光谱的天然气主要组分定量分析 [J]. 分析化学, 2019, 47(1): 67-76.
GAO Y, DAI L K, ZHU H D, *et al.*. Quantitative analysis of main components of natural gas based on raman spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(1): 67-76. (in Chinese)
- [4] 刘亚超,李永玉,彭彦昆,等. 近红外漫透射光补偿法无损快速检测大米直链淀粉 [J]. 分析化学, 2019, 47(5): 785-793.
LIU Y CH, LI Y Y, PENG Y K, *et al.*. Non-destructive rapid detection of rice amylose content by near-infrared diffuse transmission optical compensation method [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(5): 785-793. (in Chinese)
- [5] 李茂刚,闫春华,薛佳,等. 近红外光谱结合小波变换-随机森林法快速定量分析甲醇汽油中甲醇含量 [J]. 分析化学, 2019, 47(12): 1995-2003.
LI M G, YAN CH H, XUE J, *et al.*. Rapid quantitative analysis of methanol content in methanol gasoline by near infrared spectroscopy coupled with wavelet transform-random forest [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(12): 1995-2003. (in Chinese)
- [6] 饶刚福,黄林,刘木华,等. 基于激光诱导击穿光谱的微生物种类鉴别研究 [J]. 分析化学, 2018, 46(7): 1122-1128.
RAO G F, HUANG L, LIU M H, *et al.*. Discrimination of microbe species by laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(7): 1122-1128. (in Chinese)
- [7] LOMBARDINI A, MYTSKANIUK V, SIVANKUTTY S, *et al.*. High-resolution multimodal flexible coherent raman endo-

- spectroscopy [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 10.
- [8] 肖元芳, 王小华, 杭纬. 中国原子光谱发展近况概述 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(9): 2377-2387.
- XIAO Y F, WANG X H, HANG W. Recent development of atomic spectrometry in China [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(9): 2377-2387. (in Chinese)
- [9] 曾坤, 马源源, 郭庆中, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法快速测定对苯二甲酰氯中氯化亚砷残留量 [J]. *分析化学*, 2019, 47(3): 410-414.
- ZENG K, MA Y Y, GUO Q ZH, *et al.*. Determination of thionyl chloride residue in terephthaloyl chloride by inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(3): 24-29. (in Chinese)
- [10] 何家维, 何昕, 魏仲慧, 等. 高灵敏度 EMCCD 导航相机的设计 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(12): 3019-3027.
- HE J W, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Design of high-sensitivity EMCCD navigation camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(12): 3019-3027. (in Chinese)
- [11] 张子辉, 王淑荣, 黄煜, 等. 宽波段单色仪多级谱高精度波长定标 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(10): 2870-2874.
- ZHANG Z H, WANG SH R, HUANG Y, *et al.*. High-precision wavelength calibration of wide-band monochromator [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(10): 2870-2874. (in Chinese)
- [12] 施建华, 伏思华, 谢文科. 光栅光谱仪光谱响应误差校正 [J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 483-490.
- SHI J H, FU S H, XIE W K. Error correction of spectral response characteristic of grating spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 483-490. (in Chinese)
- [13] 卢启鹏, 宋源, 龚学鹏, 等. 极高分辨变包含角平面光栅单色器关键技术及检测方法研究 [J]. *中国光学*, 2016, 9(2): 284-295.
- LU Q P, SONG Y, GONG X P, *et al.*. Key technologies and the performance measuring methods in variable included angle plane grating monochromator [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 284-295. (in Chinese)
- [14] 刘怡轩, 颜昌翔, 李先锋, 等. 分光测色仪中的光谱仪系统 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1965-1971.
- LIU Y X, YAN CH X, LI X F, *et al.*. Design of spectrometer in color measuring spectrophotometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1965-1971. (in Chinese)
- [15] 吴坤, 薛松, 卢启鹏, 等. SX-700 单色器光栅正弦机构转角重复精度的模拟分析与测量 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 45-51.
- WU K, XUE S, LU Q P, *et al.*. Simulation analysis and measurement of rotation angle repeatability for grating sine mechanism of SX-700 monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 45-51. (in Chinese)
- [16] 曹佃生, 林冠宇, 杨小虎, 等. 紫外双光栅光谱仪结构设计与波长精度分析 [J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 219-230.
- CAO D SH, LIN G Y, YANG X H, *et al.*. Structure design and wavelength accuracy analysis of ultraviolet double grating spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 219-230. (in Chinese)
- [17] 郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)
- [18] 陶琛, 李春生, 王宏霞, 等. 基于数字微镜器件的原子荧光色散检测技术研究 [J]. *分析化学*, 2018, 46(12): 1878-1885.
- TAO CH, LI CH SH, WANG H X, *et al.*. Research on dispersive detection technology based on digital micromirror device by atomic fluorescence spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(12): 1878-1885. (in Chinese)

- [[9]] 崔继承,朱继伟,崔弘,等. 基于元素灯的多通道光谱仪定标研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(5): 584-588.
CUI J CH, ZHU J W, CUI H, et al.. Multi-channel spectrometer calibration based on elemental lamp[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(5): 584-588. (in Chinese)

作者简介:



迟明波(1987—),男,山东烟台人,博士,副研究员,2010年于中国科学技术大学获得学士学位,2013年、2017年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事生物细胞拉曼光谱鉴别、原子发射光谱等应用光谱分析及阿达玛编码光谱仪、受激拉曼光谱仪等光谱分析仪器研究。E-mail: chimb@sklao.ac.cn



吴一辉(1965—),女,浙江温州人,博士,国家二级研究员,中国科学院特聘研究员,博士生导师,1996年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事微光机电系统技术的研究。E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地址:长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

电话:(0431) 6176059

E-mail: yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50元/期

网址:www.yjyxs.com