

文章编号 1004-924X(2010)10-2130-07

中阶梯光栅光谱仪的谱图还原与波长标定

唐玉国¹, 陈少杰^{1,2}, 巴音贺希格¹, 崔继承^{1,2}, 陈今涌¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:研究了与中阶梯光栅光谱仪相关的二维重叠光谱的实时还原与波长自动标定技术。基于分光系统主色散及横上色散规律及它们之间的相互关系,建立了 3 个变换矩阵 M_1 , M_2 和 M_3 , 由此给出了中阶梯光栅光谱仪面阵 CCD 上所有接收点处空间坐标与波长关系的谱图矩阵 $M_{\lambda-XY}$, 利用中心波长与自由光谱区特性获得了理想的无重叠谱图数据模型。提出了信号光斑识别方法,并对信号光斑位置坐标进行准确定位;结合所建立的谱图数据模型,实现了对二维重叠谱图的快速还原与标定。实验结果表明:该方法在中阶梯光栅光谱仪谱图分析中不仅实时性强,而且波长精度可达 0.01 nm,满足中阶梯光栅光谱仪高分辨率、全谱瞬态直读等要求。

关键词:中阶梯光栅;谱图还原;波长标定;中心波长;自由光谱区

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101810.2130

Spectral reducing of cross-dispersed echelle spectrograph and its wavelength calibration

TANG Yu-guo¹, CHEN Shao-jie^{1,2}, Bayanheshig¹, CUI Ji-cheng^{1,2}, CHEN Jin-yong¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The key technologies for cross-dispersed echelle spectrography, spectral reducing in real time and wavelength calibration, were researched. Based on the main dispersion, cross-dispersion and the relationship between them, the matrixes M_1 , M_2 and M_3 were established, and then the cross-dispersed echelle spectral matrixe $M_{\lambda-XY}$ with the space coordinate on area CCD and the corresponding wavelength were given. By the characteristics of central wavelength and the free spectral range, the ideal data model without wavelength overlapping were obtained. A method to recognize the signal spots was proposed to locate the signal spot coordinate precisely. Using the data model without wavelength overlapping and the signal spot recognition, the two-dimensional overlapping echelle spectra were reduced and the wavelength was calibrated efficiently. By the result, this method is not only strong real-

收稿日期:2009-11-17;修订日期:2009-12-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60478043);“十一五”国家科技支撑计划重大项目(No. 2006BAK03A02);
国家创新方法工作专项基金资助项目(No. 2008IM040700);国家重大科研装备研制项目(No. ZBYZ2008-1);
中国科学院重大科研装备研制项目(No. YZ200804);吉林省重大科技攻关项目(No. 09ZDGG005);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20070523, No. 20086013)

time in the echelle spectral analysis, but the wavelength accuracy is up to 0.01 nm. It can satisfy the requirements of echelle spectrograph for high resolutions, high precisions and rapid reading full spectra.

Key words: echelle grating; spectral reducing; wavelength calibration; central wavelength; free spectral range

1 引言

中阶梯光栅(Echelle Grating)是一类特殊的衍射光栅,它以较高的衍射级次(几十级至几百级)和较大的衍射角工作,具有高色散、高分辨率和全波闪耀特性,经光栅或棱镜对级次重叠的中阶梯光栅光谱进行二次色散后可形成二维面阵光谱,适于面阵探测器接收。与常规光谱仪相比,它具有检出限低、波段宽、无移动部件、结构紧凑、无需多次扫描曝光便可实现多元素光谱的瞬态测量的特点,利于实现高度智能化和自动化,代表了先进光谱技术的发展趋势^[1-5]。但是,由于中阶梯光栅、面阵探测器等关键元件的限制,直到 20 世纪 90 年代,中阶梯光栅光谱仪才受到各领域的普遍关注。随着面阵 CCD 探测器技术逐渐趋于成熟,中阶梯光栅光谱仪从最初的天文观测逐步走向民用化,已经成为近年来光谱分析领域的研究热点^[6]。2004 年德国耶拿公司研制出第一台商品化连续光源原子吸收中阶梯光栅光谱仪 contrAA,它被称为是对光谱仪器的发展具有划时代意义的事件。但是,它并未充分发挥中阶梯光栅光谱仪的瞬态测量优势,仍采用扫描记录方式。

中阶梯光栅光谱仪瞬态谱图属于二维重叠光谱,谱图还原分析技术在中阶梯光栅光谱仪研制过程中起着非常重要的作用,通过谱图还原不仅可以获得探测目标丰富的光谱信息,而且谱图数据模型可用于指导仪器调试,验证仪器结构设计是否满足目标要求等。如何将中阶梯光栅光谱仪复杂的二维重叠光谱还原为一维光谱信息,实现全谱快速分析与波长自动标定是中阶梯光栅光谱仪亟待解决的关键技术之一。目前,国外中阶梯光栅光谱仪的谱图还原方法多是根据仪器的结构参数,通过光线追迹或几何成像原理推导出波长与像面坐标的关系,由此确定各波长的理想成像位置^[7]。这些方法不仅对仪器结构的依赖性大,并且计算也较为复杂。鉴于此,本文通过分析

仪器光学结构的特点,提出一种基于主色散元件(中阶梯光栅)和二次色散元件(反射式棱镜)分光规律的二维重叠光谱谱图还原算法,它不必对仪器的各光学元件进行光线追迹,只需知道色散元件的主要性能参数与聚焦镜的焦距即可建立谱图分析模型,并根据所建立模型,给出有效的信号光斑识别方法。最后,通过实验验证了算法的谱图快速还原功能,并实现了波长的自动标定。

2 谱图还原算法

2.1 光谱仪原理及谱图坐标系

由于光谱仪采用面阵探测器,要求分光系统具有平场成像特性,以确保期望的光谱分辨率,为此,选择了离轴抛物镜作为准直和成像物镜,中阶梯光栅光谱仪结构示意图如图 1 所示。入射光被准直后入射到中阶梯光栅上,其衍射光被横向色散元件棱镜二次色散,再经聚焦后在面阵 CCD 上形成复杂的二维重叠光谱。所谓的二维谱图还原技术,就是将二维重叠光谱图像展成一维光谱信号的手段。分析图 1 所示中阶梯光栅光谱仪的光学结构特点可知,谱图上像点坐标位置直接取决于中阶梯光栅和棱镜的性能参数以及聚焦镜的焦

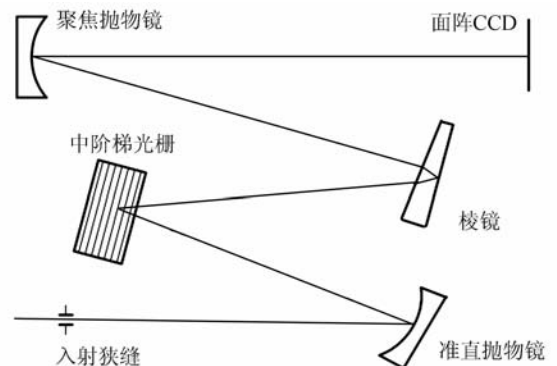


图 1 中阶梯光栅光谱仪结构示意图(俯视图)

Fig. 1 Schematic of echelle spectrograph

距,与其它光学元件的位置及性能参数无直接关系^[8]。根据这一特点建立了中阶梯光栅光谱仪谱图数据模型,该模型是一个行列数与像面探测器横纵像素数相同的矩阵,每一个矩阵元代表实际像面的一个像元,矩阵元的数值为相应像元处的波长值。模型建立后,即可确定像面上任意位置对应的波长值,也可确定仪器工作波长范围内任意波长值对应的成像位置。通过此方法,可将像面二维坐标与波长一维坐标对应起来,实现二维光谱图像与一维光谱信号的转换。

谱图模型的计算基于图 2 所示的坐标系。将横纵两个方向色散的坐标原点平移至聚焦镜的中心。

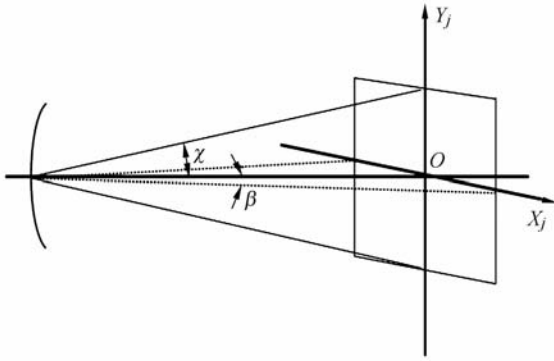


图 2 谱图计算坐标模型

Fig. 2 Coordinate model of the spectra

通过计算主光线色散,即可得出像面上所有光线的像点位置。其中, χ 为中阶梯光栅的色散角, β 为棱镜的色散角。

系统主要性能参数为:

光栅常数: $d=54.49 \text{ g/mm}$

光栅入射角: $i=46.058^\circ$

光栅转角: $\delta=6.7^\circ$

棱镜顶角: $\alpha=24.4^\circ$

棱镜入射角: $\phi=27.76^\circ$

聚焦镜焦距: $f=321.8 \text{ mm}$

2.2 中心波长与自由光谱区

对于中阶梯光栅光谱仪而言,中心波长与自由光谱区是两个重要参数。由于使用中阶梯光栅的高衍射级次以获得高分辨率,所以存在严重的级次重叠问题,在未经横向色散元件二次色散时,各级次谱线重叠在一起,并且各级次的中心波长重叠于一点^[9]。由此可知,各级次中心波长的衍

射角相同。由光栅方程式

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

可知,方程(1)右侧为一常量,即

$$m\lambda = K, \quad (2)$$

$$\lambda_{m-\text{cen}} = \frac{K}{m}, \quad (3)$$

其中, m 为衍射级次, λ 为闪耀波长, θ 为衍射角, $\lambda_{m-\text{cen}}$ 为 m 级次的中心波长。由此可得相邻级次的中心波长差:

$$\Delta\lambda_{\text{cen}} = \lambda_{m-\text{cen}} - \lambda_{m+1-\text{cen}}, \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_{\text{cen}} = \frac{\lambda_{m-\text{cen}}}{m+1} = \frac{\lambda_{m+1-\text{cen}}}{m} \quad (5)$$

根据光栅自由光谱区性质,在某一衍射级次,其上下限波长有其他相邻衍射级次不相重叠,则有如下关系^[10]:

$$m\lambda_{m-\text{max}} = (m+1)\lambda_{m-\text{min}} \quad (6)$$

其中, $\lambda_{m-\text{min}}$ 和 $\lambda_{m-\text{max}}$ 分别为 m 级的波长极小值与波长极大值。由式(6)推导可以得到 m 级自由光谱范围,即:

$$\Delta\lambda_m = \lambda_{m-\text{max}} - \lambda_{m-\text{min}} = \frac{\lambda_{m-\text{min}}}{m} = \frac{\lambda_{m-\text{max}}}{m+1}. \quad (7)$$

依据标量衍射理论,给定级次波长 λ_m 的光谱强度 I_m 与中心波长的强度 $I_{m-\text{cen}}$ 之间满足如下关系:

$$\frac{I_m}{I_{m-\text{cen}}} = \left\{ \frac{\sin \left[m\pi \left(1 - \frac{\lambda_{m-\text{cen}}}{\lambda_m} \right) \right]}{m\pi \left(1 - \frac{\lambda_{m-\text{cen}}}{\lambda_m} \right)} \right\}^2, \quad (8)$$

如果每个级次取 $\lambda_{m-\text{min}} \sim \lambda_{m-\text{max}}$, $\lambda_{m-\text{min}}$ 和 $\lambda_{m-\text{max}}$ 分别为 m 级的波长极小值与波长极大值,将不同的级次拼接起来,可获得无重叠连续光谱信号,且具有优化的效率特性^[11],即 $\lambda_{m-\text{max}} = \lambda_{m+1-\text{min}}$, $I_{m-\text{min}} = I_{m-\text{max}}$ 。根据此原则进一步推导,可求出各级次谱线的极限波长 $\lambda_{m-\text{max}}$ 与 $\lambda_{m-\text{min}}$:

$$\lambda_{m-\text{max}} = \lambda_{m-\text{cen}} + \frac{\Delta\lambda}{2m-1}, \quad (9)$$

$$\lambda_{m-\text{min}} = \lambda_{m-\text{cen}} - \frac{\Delta\lambda}{2m+1}, \quad (10)$$

由此,可得到各级次的自由光谱范围的近似公式:

$$\Delta\lambda_m = \lambda_{m-\text{max}} - \lambda_{m-\text{min}} = \frac{\lambda_{m-\text{cen}}}{m \left(1 - \frac{1}{4m^2} \right)} \approx \frac{\lambda_{m-\text{cen}}}{m}, \quad (11)$$

2.3 主色散

与一般的光谱仪不同,中阶梯光栅光谱仪中的光线并非在光栅主截面内入射,而是与光栅主

面成 δ 角入射,此入射方式即为锥面衍射。根据矢量衍射理论可推导出任意角度入射的光栅方程^[12-14]:

$$m\lambda = d(\sin \theta \cos \delta_m + \sin i \cos \delta), \quad (12)$$

$$\sin \theta \sin \delta_m = \sin i \sin \delta. \quad (12)$$

其中, δ_m 为各衍射级次与主截面的夹角。

考虑仪器的效率特性,光谱仪设计为 Littrow 设置入射,即 $\theta = i$,由式(13)可得 $\delta_m = \delta$ 。于是,该形式下的锥面衍射光栅方程可简化为:

$$m\lambda = d(\sin \theta + \sin i) \cos \delta. \quad (14)$$

根据图 2 所示坐标系,以面阵 CCD 的像面中心点为主色散原点,则像面上沿主色散方向各像素对应的衍射角为:

$$\chi_j = \theta + p_j, \quad (15)$$

其中, p_j 为沿主色散方向上随像素变化的衍射角变化量,即

$$P_j = \frac{y_j}{f \cos \delta}, \quad (16)$$

其中, y_j 为 Y 方向距离中心点的像素位置, f 为聚焦镜的焦距。此时,式(14)可以写为:

$$m\lambda = d \left[\sin i + \sin \left(\theta + \frac{y_j}{f \cos \delta} \right) \right] \cos \delta. \quad (17)$$

为了将波长与空间坐标联系起来,把式(17)改写为

$$\lambda_j = \frac{d}{m} \left[\sin i + \sin \left(\theta + \frac{y_j}{f \cos \delta} \right) \right] \cos \delta, \quad (18)$$

由此式可知, λ_j 随 y_j 与 m 变化。由此建立二维矩阵,该矩阵的行序号为像面上纵方向偏离中心像素点的位置 y_j (向上偏离为正,向下偏离为负),列序号为衍射级次 m ,矩阵中各元素值为各该级次纵方向像素对应的波长值 λ_j 。将该矩阵记为 \mathbf{M}_1 ,即

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} \lambda_{y_1 m_1} & \lambda_{y_1 m_2} & \cdots & \lambda_{y_1 m_q} \\ \lambda_{y_2 m_1} & \lambda_{y_2 m_2} & \cdots & \lambda_{y_2 m_q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{y_p m_1} & \lambda_{y_p m_2} & \cdots & \lambda_{y_p m_q} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

利用式(18)的关系,推导出 \mathbf{M}_1 中各元素波长所对应的纵坐标 Y_j (以 CCD 像面顶端为坐标原点),从而建立矩阵 \mathbf{M}_2 ,它的纵横序号的物理量与 \mathbf{M}_1 一致,即

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} Y_{y_1 m_1} & Y_{y_1 m_2} & \cdots & Y_{y_1 m_q} \\ Y_{y_2 m_1} & Y_{y_2 m_2} & \cdots & Y_{y_2 m_q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{y_p m_1} & Y_{y_p m_2} & \cdots & Y_{y_p m_q} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

2.4 横向色散

采用棱镜作为横向色散元件,根据仪器的工作波长范围选定不同材料的棱镜。由棱镜色散原理,进一步推导可得如下公式

$$\beta_\lambda = \arcsin \left\{ n_\lambda \sin \left[\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin \phi}{n_\lambda} \right) \right] \right\}, \quad (21)$$

其中, n_λ 为不同波长的棱镜折射率。由式(21)可知,不同波长的光线对应不同的出射角,出射角的大小决定了谱线在像面上 X 方向的坐标位置,有

$$X_j = f(\beta_\lambda - \omega), \quad (22)$$

其中 ω 为像面中心波长经棱镜色散后的转角,该角度根据结构设计而定,由此可求出像面上各对应波长的 X_j 坐标。

由于前面已求出矩阵 \mathbf{M}_1 ,由式(21)、(22),即可求出 \mathbf{M}_1 中各波长 X 方向坐标 X_j ,记作矩阵 \mathbf{M}_3 ,即

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} X_{y_1 m_1} & X_{y_1 m_2} & \cdots & X_{y_1 m_q} \\ X_{y_2 m_1} & X_{y_2 m_2} & \cdots & X_{y_2 m_q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{y_p m_1} & X_{y_p m_2} & \cdots & X_{y_p m_q} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

2.5 谱图数据模型

通过分析两个方向的色散关系,建立了 3 个关键矩阵 $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3$,其纵横方向的物理量一致, \mathbf{M}_1 中的元素为像面上各级次的波长值 λ_j , $\mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3$ 中的元素分别为与 λ_j 相对应的 Y、X 方向的坐标值 Y_j, X_j 。

分析可知,如果给出一坐标 (X_j, Y_j) ,由 \mathbf{M}_3 便可得到 X_j 相应的级次。根据谱图特征^[9],在同一级次上同一坐标 X_j 的 λ_j 并不唯一,在 \mathbf{M}_3 的查找中,会得到唯一一个级次值(横向序号)和一系列的纵向序号。再由所给定的 Y_j 值,以及所确定的级次值,通过矩阵 \mathbf{M}_2 便可唯一确定一个纵方向的序号。通过 $\mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3$ 的查找,可唯一确定一对矩阵的纵横方向序号,由此序号在矩阵 \mathbf{M}_1 中便可唯一确定一个波长值。根据此算法,则可建立起中阶梯光栅光谱仪面阵 CCD 上所有接收点处空间坐标与波长关系的谱图矩阵 $\mathbf{M}_{\lambda-X,Y}$,即

$$\mathbf{M}_{\lambda-X,Y} = \begin{bmatrix} \lambda_{x_1 y_1} & \lambda_{x_1 y_2} & \cdots & \lambda_{x_1 y_l} \\ \lambda_{x_2 y_1} & \lambda_{x_2 y_2} & \cdots & \lambda_{x_2 y_l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{x_w y_1} & \lambda_{x_w y_2} & \cdots & \lambda_{x_w y_l} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

该矩阵的横向物理量为 X_j ,纵向物理量为 Y_j ,每一元素为相应像素位置的波长值 λ_j 。根据仪器实际工作波长范围以及前面求出的中心波长与自由

光谱区,便可以确定该仪器的级次范围以及相应级次的中心波长与自由光谱区,将 M_{A-XY} 矩阵中非使用级次与非自由光谱区的波长值置 0,即可得到理想的无重叠谱图数据模型,如图 3 所示。

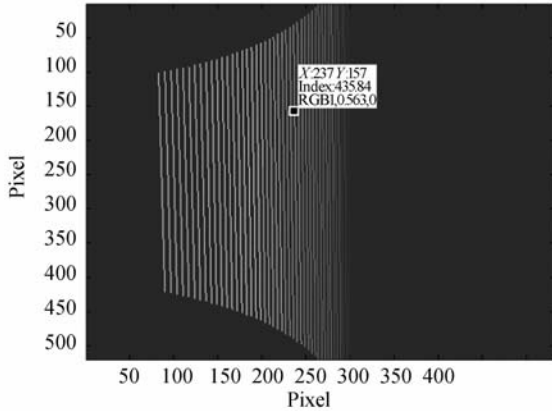


图 3 理想的无重叠谱图(波长:300~600 nm, 衍射级次:45~89 级)

Fig. 3 Mode of ideal echelle spectra at wavelength of 300-600 nm and diffractive order of 45-89

在实际测量中,每一个波长在像面上的位置并不唯一,谱图建立过程中已考虑波长优化选取问题。该谱图模型的建立,将像面上的光谱信号按光谱级次拼接起来,从而获得了无重叠连续光谱信号,实现了像面二维光谱图像与一维光谱信号的转换。

3 波长标定与分析

由于光学系统难免存在各种像差与杂散光的干扰,所以面阵 CCD 拍摄的图像信息中,实际光斑形状与理想成像存在偏差,同时存在一些杂散光所产生的噪声光斑^[15]。当拍摄的图像信息为连续光谱时,像面上信号光斑非常丰富,如果逐点查询逐点标定,不仅速度比较慢,而且难以分辨出信号光斑与噪声光斑,同时由于像差的存在光斑质心的准确读取也比较困难。

本文提出了一种简便有效的信号光斑识别方法。首先,将光学系统调整至成像较为理想的成像状态,关注汞灯的特征谱线,使其成像的空间坐标位置与所建立的理想谱图模型一致。在调试过程中,理想的无重叠谱图模型可指导仪器结构调整,且该谱图模型具有补偿、校正功能。首先对仪器进行粗调,当调整到一定精度范围时,软件可控

制谱图模型自动适应实际图谱,使二者快速一致。根据前面的色散原理分析,若二者的特征谱线位置重合,可以肯定其他波长的位置均重合。根据探测对象的特征,设定相应的阈值,去除背景噪声,并将拍摄图像信息进行处理。再将拍摄图像数据矩阵与所建立的理想无重叠谱图模型矩阵相作用,便可有效去除噪声光斑。通过以上过程,有效地确定出信号光斑的成像位置坐标。利用 M_{A-XY} 矩阵可获得信号光斑的波长值,并通过实测图像读出相应光斑的强度值,从而建立波长与相对强度的二维曲线关系。图 4 为面阵探测器实际拍摄的汞灯谱图;图 5 为经过模型处理后得到的一维谱图信息。

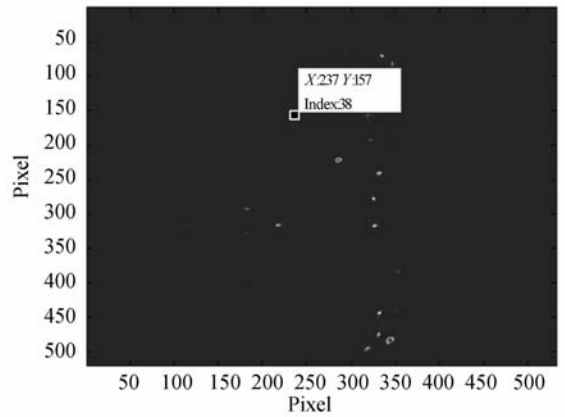


图 4 探测器拍摄的图像

Fig. 4 Measured image

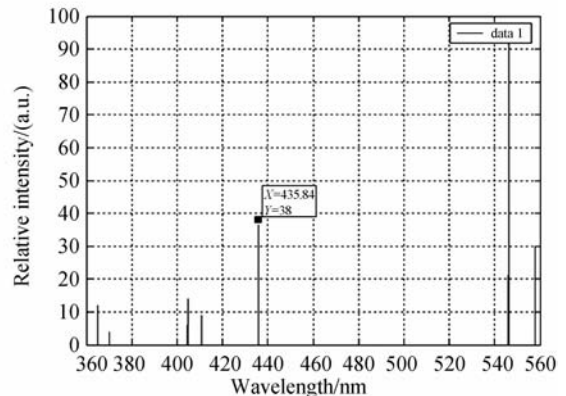


图 5 标定后光谱图像

Fig. 5 Spectra after calibration

用标准汞灯对仪器进行校正,汞灯特征谱线的标定结果如表 1 所示。分析探测器实际拍摄的图像,分别确定汞灯的紫色谱线、蓝色谱线、绿色谱线光斑的位置坐标,再经本文所建立的中阶梯

谱图数据模型计算,确定相应光斑处的波长。由于系统像素分离度为 0.02 nm,所以当波长差小于 0.02 nm 时,则认为特征谱线的标准波长与标定结果的波长值一致。经系统补偿校正后,波长标定精度可达 0.01 nm,实验证明,标定结果已达到该精度。

表 1 汞灯标定结果

Tab. 1 Results of calibration for mercury lamp

| 特征谱线 | 紫色谱线 | 蓝色谱线 | 绿色谱线 |
|------|------------|------------|------------|
| 谱图坐标 | (216,318) | (237,157) | (284,222) |
| 实测坐标 | (217,318) | (237,157) | (284,222) |
| 标准波长 | 404.649 nm | 435.833 nm | 546.074 nm |
| 实测波长 | 404.64 nm | 435.84 nm | 546.08 nm |

4 结 论

二维重叠光谱的实时还原与波长自动标定

技术对中阶梯光栅光谱仪的发展有着重要意义。本文根据分光系统主色散及横向色散规律,利用中心波长与自由光谱区特性,给出了中阶梯光栅光谱仪谱图还原算法,结合信号光斑识别方法,实现了对二维重叠谱图的快速还原与标定。该方法考虑了锥面衍射情形,采用由矢量衍射理论导出的光栅方程一般表达式,减少了求取近似值的环节,提高了波长与坐标计算结果的准确度。得到的物理图像清晰,谱图还原算法简单,不必对仪器的各光学元件进行光线追迹,只需知道色散元件的性能参数、使用状态与聚焦镜的焦距即可。提出的理想的谱图模型可用于指导仪器调试,同时具有自动校正功能。当仪器调整到一定精度范围时,软件可控制谱图模型自动适应实际图谱。另外,建立的还原算法和对全幅谱图的快速标定方法,其准确性和精度在实验中已得到证实,实时性强,波长精度可达 0.01 nm,满足实际需要。

参考文献:

- [1] TOUSEY R, PURCELL J D, GARRETT D L. An echelle spectrograph for middle ultraviolet solar spectroscopy from rockets [J]. *Applied Optics*, 1967,6(3):365-372.
- [2] 武旭华,朱永田,王磊. 高分辨率阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2003,11(5):442-447.
- [3] 谢品,倪争技,黄元申,等. 中阶梯光栅的应用研究进展[J]. *激光杂志*, 2009,30(2):4-6.
- [4] 李娜娜,安志勇,崔继承. 中阶梯光栅光谱仪光学系统的安装及检测[J]. *光学精密工程*, 2009,17(3):531-536.
- [5] LI N N, AN Z Y, CUI J C. Aligning and testing of optical system of echelle spectrography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(3):531-536. (in Chinese)
- [6] RANK D H, EASTMAN D P, BRTLEY W B, et al.. Echelle-type spectrograph for the near infrared [J]. *Journal of Optical society of America*, 1960, 50(8):821-825.
- [7] 赵复垣. 刻划阶梯光栅的原理和应用特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 1993,13(3):101-107.
- [8] ZHAO F Y. The principle and characters for applying of echelle[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1993,13(3):101-107. (in Chinese)
- [9] BALLESTER P, ROSA M R. Modeling echelle spectrographs [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1997,126:563-571.
- [10] ROSA M R. Calibrating echelle spectra using instrument modes [J]. *Space Telescope Science Institutr*, 1997:533-536.
- [11] ANDERW A. Dantzlaer. Echelle spectrograph software design aid [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(24):4504-4508.
- [12] M. C. 哈特雷著,贾怀义,秦小梅译. 衍射光栅 [M]. 贵阳:贵州人民出版社,1990.
- [13] M. C. Hartley composing, JIA H Y, QIN X M version. *Diffraction Grating* [M]. Guiyang: GuiZhou People's Press. 1990. (in Chinese)
- [14] 胡中文. 广义光栅方程与光栅密度测试及二维 CCD 全谱仪的研制[D]. 合肥:中国科学技术大学,2005.
- [15] HU Z W. *Study of generalized grating equation, measurement of grating spacings and CCD echelle spectrograph* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China. 2005. (in Chi-

nese)

- [12] 巴音贺希格, 齐向东, 唐玉国. 位相光栅色散特性的矢量衍射理论分析[J]. 物理学报, 2003, 52(5): 1157-1161.

BAYANHESHIG, QI X D, TANG Y G. The vector diffraction theory analysis of chromatic dispersion characteristics of phase grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(5): 1157-1161. (in Chinese)

- [13] 巴音贺希格. 衍射光栅的第二类角色散及其特性分析[J]. 物理学报, 2004, 53(7): 2118-2122.

BAYANHESHIG. The second kind angular dispersion and its analysis of characteristics of diffrac-

tion grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(7): 2118-2122. (in Chinese)

- [14] 张善文, 巴音贺希格. 宽波段金属光栅设计中闪耀波长对光栅异常的补偿效应[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 990-1000.

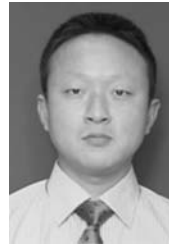
ZHANG S W, BAYANHESHIG. The compensating effect of blazed wavelength to grating anomalies in the design of broadband metallic diffraction gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 17(5): 990-1000. (in Chinese)

- [15] PISKUNOV N E. New algorithms for reducing cross-dispersed echelle spectra[J]. *Astronomy & Astrophysic*, 2002, 385: 1095-1160.

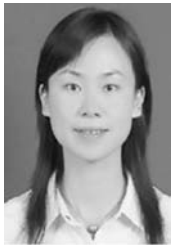
作者简介:



唐玉国(1967—), 男, 吉林人, 理学博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱仪器及医用光谱技术的研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com



崔继承(1976—), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事光学设计理论及光谱仪器设计的研究。E-mail: jicheng_cui@yahoo.com.cn



陈少杰(1985—), 女, 黑龙江宁安人, 硕士研究生, 主要从事光谱仪器研发及光谱信息处理技术的研究。E-mail: sha-objie.csj@gmail.com



陈今涌(1939—), 男, 江苏泰州人, 研究员, 主要从事光谱仪器设计的研究。E-mail: chenjy@ciomp.ac.cn



巴音贺希格(1962—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 理学博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术的研究。E-mail: bayin888@sina.com