

C-T 型棱镜透射式中阶梯光栅光谱仪谱图还原模型

张 锐^{1,2} 巴音贺希格¹ 杨 晋^{1,2} 尹 禄^{1,2} 崔继承¹ 李晓天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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 中阶梯光栅光谱仪通过交叉色散形成的二维光谱图,无法直接对入射光的波长进行光谱标定。为此,建立了 C-T 型棱镜透射式中阶梯光栅光谱仪的谱图还原模型,分别分析了棱镜和光栅色散方向的色散规律以及棱镜与光栅之间的相互作用关系,并且建立了波长与像面坐标的关系表达式。根据该类中阶梯光栅光谱仪的光路结构特点,以及光束在各个光学元件的传输特性,校正各光学元件引入的坐标计算误差,最终精确计算出波长所对应的像面坐标,完成谱图还原模型的建立。通过该方法建立的模型可快速准确地对该类型中阶梯光栅光谱仪二维谱图进行谱图还原及波长标定,模型的计算误差小于一个像元。

关键词 光谱学; 中阶梯光栅光谱仪; 二维光谱图; 谱图还原; 波长提取

中图分类号 TH744.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0723001

Reduction Model of the Transmission Prism Echelle Spectrometer with the C-T Structure

Zhang Rui^{1, 2} Bayanheshig¹ Yang Jin^{1, 2} Yin Lu^{1, 2} Cui Jicheng¹ Li Xiaotian¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract As the cross dispersion, the two-dimensional spectrum of echelle spectrometer cannot calibrate the wavelength spectrum directly, therefore the spectrum reduction model for the transmission prism echelle spectrometer with the C-T structure is built. The dispersion rule and relationship between prism and echelle is analyzed, and the relational expression of wavelength and image coordinates is also established. According to the optical structure and optical transmission characteristics, the deviation of coordinates caused by the element can be regulated, and the accurate image coordinates can be calculated. Finally the spectrum reduction model is accomplished. This model can recover the two-dimensional spectrum of echelle spectrometer quickly and accurately, and calibrate the wavelength. The error of image coordinates calculated by the model is less than one pixel.

Key words spectroscopy; echelle spectrometer; two-dimensional spectrum; spectra reduction; wavelength calibration

OCIS codes 300.6320; 080.2720; 080.2740; 100.3008

1 引 言

中阶梯光栅不同于一般衍射光栅,具有刻线密度低、衍射级次高、衍射角大、全波段闪耀等特点。以中阶梯光栅作为主要色散元件的中阶梯光栅光谱仪具有高分辨率、高色散率、高衍射效率、全谱瞬态直读等优点^[1-5]。因此,中阶梯光谱仪在物质探测、环境检测、宇宙探索等领域都有广阔的应用前景^[6-7]。但是,中阶梯光栅、探测器等元件发展水平的限制导致中阶梯光栅光谱仪发展缓慢,直到 20 世纪 90 年代,才开始有了较

收稿日期: 2016-01-26; 收到修改稿日期: 2016-03-17

基金项目: 国家 973 计划(2014CB049500)、国家自然科学基金(61505204)、国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ120351)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2008-1)、吉林省科技发展计划项目(20140203011GX, 20140204075GX)

作者简介: 张 锐(1990—),女,博士研究生,主要从事光谱仪器及其谱图处理方面的研究。

E-mail: zhangrui_grating@163.com

导师简介: 巴音贺希格(1962—),男,博士,研究员,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术等方面的研究。

E-mail: bayin888@sina.com (通信联系人)

深入的研究。第一台商品化的仪器是 2004 年由德国耶拿公司研制出连续光源原子吸收中阶梯光栅光谱仪 ContrAA。而我国对中阶梯光栅光谱仪的研究起步较晚^[8-12],在 2008 年才由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制出国内第一台中阶梯光栅光谱仪原理样机^[13]。

中阶梯光栅光谱仪经高级次工作状态下的中阶梯光栅色散之后,获得级次严重重叠的光谱,无法对其进行识别与标定。因此,需在光谱仪中加入二级色散元件将重叠的光谱分开。通常,两种不同的分光元件分别在相互垂直的方向上色散,得到无法直接对入射光波长进行光谱标定的二维谱图,这为其后续的数据处理增加了难度。因此,二维谱图的标定技术成为中阶梯光栅光谱仪的主要研究内容之一。目前,国外中阶梯光栅光谱仪的谱图还原方法主要是利用光学设计软件进行光线追迹^[14-15],这种方法需要进行大量的波长模拟,花费时间较长。因此,陈少杰等^[16-17]采用建立谱图还原模型的方法对棱镜反射式的 C-T 型中阶梯光栅光谱仪的二维谱图进行还原,该方法只需知道色散元件以及仪器的性能参数,即可迅速地通过建立的谱图还原模型,识别出有效信号光斑的信息,避免了光线追迹方法繁琐的波长模拟过程。但是,当中阶梯光栅光谱仪变为棱镜透射式结构时,各光学元件之间的非线性关系以及光路在其中的传输特性都将发生改变,原模型便不再适用,需重新建立相应的谱图还原模型。鉴于此,拟基于自主设计的中阶梯光栅光谱仪的结构及主色散元件(中阶梯光栅)、横向色散元件(透射式棱镜)的色散规律,建立 C-T 型棱镜透射式中阶梯光栅光谱仪谱图还原模型,并通过建立的模型给出相应算法。最终,旨在利用该模型运算速度快、运算方便的特点,实现对此类型中阶梯光栅光谱仪的谱图还原及波长的精确标定。

2 中阶梯光栅光谱仪

2.1 中阶梯光栅光谱仪结构

采用自主设计的中阶梯光栅光谱仪,结构如图 1 所示。

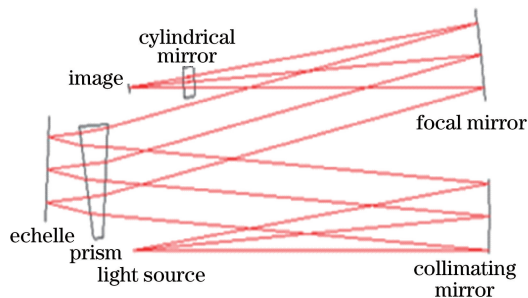


图 1 棱镜透射式中阶梯光栅光谱仪结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the prism-transmission-type echelle spectrometer

在该结构中,入射光先经过棱镜在弧矢方向完成初次横向色散后,由中阶梯光栅进行子午方向的主色散,然后再次进入棱镜完成二次横向色散。这种结构的光谱仪相较于棱镜反射式结构,可在不影响横向色散分辨率的情况下减小仪器的体积。但是,该光谱仪最终得到的二维谱图无法直接对入射光波长进行光谱标定,这为后期数据处理分析增加了难度。因此,如何建立可对中阶梯光栅光谱仪进行谱图还原及波长提取的二维谱图还原模型,成为一项很重要的研究工作。

2.2 中阶梯光栅光谱仪二维谱图

图 2 为汞(Hg)灯入射中阶梯光栅光谱仪所得二维谱图示意图。

从该二维光谱图中可获得光斑在像面上位置与光强的对应关系。其谱图数据可用一个矩阵表达,

$$I_{X,Y} = \begin{bmatrix} I_{X_1Y_1} & I_{X_1Y_2} & \dots \\ I_{X_2Y_1} & I_{X_2Y_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{X_pY_1} & I_{X_pY_1} & \dots \end{bmatrix} \quad (1)$$

该矩阵的行列数分别对应于面阵 CCD 靶面上的整像元坐标,矩阵中的值代表各像元位置上的光斑强

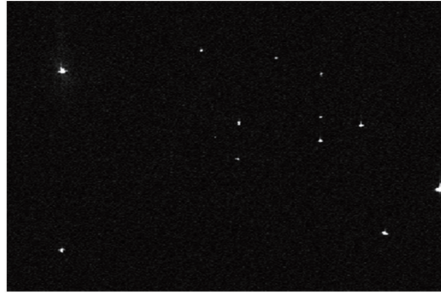


图 2 Hg 灯二维谱图示意图

Fig. 2 Schematic of two-dimensional spectrum of Hg lamp

度。在光谱仪使用时,通常需要获得光谱图中光斑所对应波长与光强的关系。因此,需要对其二维谱图进行还原并且提取出相应位置波长。

当中阶梯光栅光谱仪的两色散元件放置位置不同时,将导致其非线性关系发生改变。本文采用 C-T 型棱镜透射式中阶梯光栅光谱仪,光线先经过棱镜色散再入射至光栅,不同波长的光线在横向色散方向对应的光栅入射角不同,即光栅放置的偏置角不同,从而对光栅色散方向产生影响,改变了光栅色散后的像面坐标,导致文献[16-17]提出的谱图还原方法不再适用。因此,仅根据光栅与棱镜的色散规律计算入射光波长在像面上坐标是不正确的,还需推导出两种色散元件之间的相互作用关系。鉴于此,提出建立光谱仪所有工作范围内波长与谱图位置坐标关系数据库的思想,以探测器 CCD 靶面上的坐标系为基准,创建矩阵,确定自由光谱区内入射光波长与其像面位置坐标之间的关系。将该关系模型与光谱仪所得谱图相结合得到入射光波长关于光强的曲线,完成中阶梯光栅光谱仪的谱图还原。

3 谱图还原模型

3.1 主色散方向

中阶梯光栅光谱仪的主色散元件通常以一定偏置角放置,并且在准利特罗条件下工作。此时,光栅满足锥面衍射方程为

$$d(\sin i + \sin \theta)\cos \omega = m_j \lambda, \quad (2)$$

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta_i, i = 1, \dots, p, \quad (3)$$

式中 d 为光栅周期, i 为光栅入射角, θ 为主色散方向上的衍射角, ω 为光栅偏置角, m_j 为衍射级次, λ 为入射光波长, θ_0 为自由光谱区中心波长的衍射角, $\Delta\theta_i$ 为主色散方向上不同波长相对于中心波长衍射角的变化量。自由光谱区中心波长的衍射角等于入射角,此波长落在 Y 方向中心,而 $\Delta\theta_i$ 的存在,使得自由光谱区内其他波长的光对称于中心分布。 $\Delta\theta_i$ 可表达为

$$\Delta\theta_i = \frac{y_i}{f \cos \omega}, \quad (4)$$

式中 y_i 为主色散方向上像点距中心像点的距离, f 为系统成像焦距, ω 为光栅偏置角。将(3)式和(4)式代入(2)式可得^[13]

$$\lambda = \frac{d}{m_j} \left[\sin i + \sin \left(\theta_0 + \frac{y_i}{f \cos \omega} \right) \right] \cos \omega, \quad (5)$$

假设采用的面阵 CCD 分辨率为 $N \times N$, 像元尺寸为 $a \mu\text{m}$, 则任意波长的光线在 CCD 靶面上的坐标为

$$Y_0 = \frac{y_i}{10^{-3}a} + \frac{N}{2}. \quad (6)$$

采用棱镜透射式中阶梯光栅光谱仪,光线先经过棱镜色散后在棱镜色散方向以不同入射角入射至光栅,导致光栅实际使用偏置角随波长改变。而由(5)式可知,偏置角的计算值直接影响波长在光栅色散方向的像面坐标值(在此记为 Y 坐标值)。因此,在计算 Y 坐标值时,需联系棱镜方向的色散关系式对光栅偏置角进行计算,其计算模型如图 3 所示。

经推导其计算表达式为

$$\omega = \varphi - \gamma - \omega_0, \quad (7)$$

式中 φ 为棱镜 a 表面的光线出射角, γ 为棱镜 a 表面法线与其底面的夹角, ω_0 为光栅偏离光轴的夹角, ω 为光栅偏置角。

根据(2)~(7)式,可计算出光线经过光栅后在像面上的 Y 坐标。但是,中阶梯光栅光谱仪后端聚焦方式的不同,将导致波长最终在 CCD 靶面上的坐标值发生改变。本文光谱仪为了校正像散,在聚焦镜后端加入柱面镜。该柱面镜在子午方向有会聚作用,使 Y 坐标值产生相应变化。因此,在计算波长对应实际像面 Y 坐标时需分析柱面镜会聚特性,对 Y 坐标值进行校正。

图 4 表示光线通过聚焦镜及柱面镜的示意图,其中

$$Y_1 = L_1 \tan \epsilon_1, \quad (8)$$

$$Y_2 = L_2 \tan \epsilon_2, \quad (9)$$

$$Y_3 = L_3 \tan \epsilon_3, \quad (10)$$

$$Y = Y_0 - Y_1 - Y_2 - Y_3. \quad (11)$$

如图 4 所示, Y 为任意一条光线在像面的 Y 轴坐标, Y_0 为不经过柱面镜的任意一条光线在像面的 Y 轴坐标, Y_1 为任意一条光线入射至柱面镜时下降的距离, Y_2 为任意一条光线经过柱面镜下降的距离, Y_3 为任意一条光线从柱面镜到像面之间的 Y 轴坐标改变量, L_1 为球面会聚镜到柱面镜的距离, L_2 为柱面镜厚度, L_3 为柱面镜到像面的距离, ϵ_1 表示光线入射柱面镜 c 表面时与光轴的夹角, ϵ_2 表示光线出射柱面镜 c 表面时与光轴的夹角, ϵ_3 表示光线出射柱面镜 d 表面时与光轴的夹角。

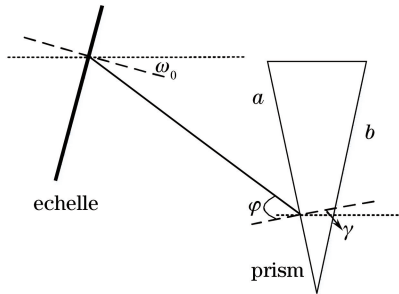


图 3 偏置角计算示意图

Fig. 3 Schematic of offset angle calculation

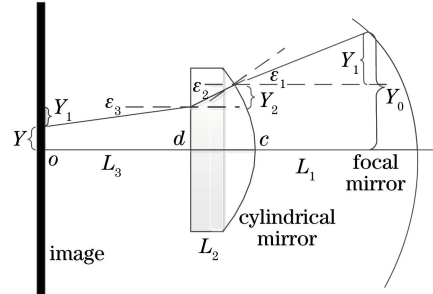


图 4 会聚镜到像面之间的光线示意图

Fig. 4 Schematic of light propagation from the cylindrical mirror to the image plane

由(2)~(11)式可计算出任意波长 λ_i 所对应 CCD 像元坐标 Y_i , 选取 m 个波长对 Y 坐标进行计算,

$$m > \frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda}, \quad (12)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为光谱仪波段范围, $\delta\lambda$ 为光谱仪能分辨的最小波长差。因此,当取 m 个波长对坐标值进行计算时,每个波长之间的差值都小于光谱仪所能分辨的最小波长差,算法精度满足光谱仪使用需求。由此建立表达式

$$Y = [Y_1, Y_2, Y_3 \cdots Y_i], i = 1, 2, 3, \cdots, m, \quad (13)$$

(2)~(13)式建立了 CCD 像元坐标 Y 与波长 λ 之间的关系表达式。

3.2 横向色散方向

中阶梯光栅光谱仪的棱镜色散方向与中阶梯光栅垂直。图 5 为棱镜的色散模型图,光线在经过光栅时只进行反射。

因此,任意一条光线经过中阶梯光栅光谱仪横向色散元件(棱镜)满足计算公式

$$n \sin \beta = \sin \left\{ d_m - \arcsin \frac{\sin \left\{ 2 \left(\frac{\pi}{2} - \gamma \right) + 2\omega - \arcsin \left[n \sin \left(d_m + \arcsin \frac{\sin \alpha}{n} \right) \right] \right\}}{n} \right\}, \quad (14)$$

式中 α 为光线在棱镜 b 表面上的入射角, β 为光线在棱镜 b 表面上的出射角, d_m 为棱镜顶角, n 为棱镜折射

率, ω 为光栅偏置角, γ 为棱镜 a 表面法线与其底面的夹角。根据中阶梯光栅光谱仪几何光路结构及横向色散元件色散特性建立了计算模型如图 6 所示。

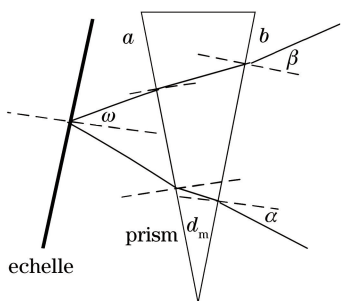


图 5 棱镜和中阶梯光栅之间的光线示意图

Fig. 5 Schematic of light propagation from the prism to the echelle

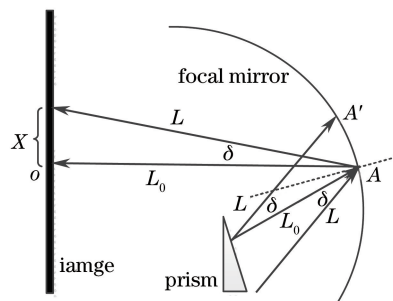


图 6 棱镜和像面之间的光线示意图

Fig. 6 Schematic of light propagation from the prism to the image plane

图 6 给出了光谱仪中棱镜、球面镜与接收像面之间的光线示意图。 L_0 为经过球面 A 点到像面中心位置 O 点的光线(设像面中心的 X 轴和 Y 轴坐标值均为 0), L 为经 A' 点的任意一条光线, 将其平移至经球面 A 点, X 为光线 L 在面阵 CCD 上的横坐标。已知 L_0 与 L 的夹角为 δ , 球面镜焦距为 f , CCD 探测器像元尺寸为 $a \mu\text{m}$, 分辨率为 $N \times N$ 。则 L 在 CCD 靶面上的 X 坐标值为

$$X = \frac{f \tan \delta}{10^{-3} a} \quad (15)$$

光线 L_0 与光线 L 的夹角为

$$\delta = \beta_1 - \beta_0, \quad (16)$$

式中 β_0 为光线 L_0 棱镜出射角, β_1 为光线 L 棱镜出射角。

从(14)~(16)式可得到像面坐标 X_i 与入射光波长 λ_i 的关系。当波长为 λ_i 时, 相应像面 X 坐标为 X_i 。建立表达式

$$X = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_i], i = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (17)$$

通过(2)式和(17)式可建立矩阵

$$\lambda_{X,Y} = \begin{bmatrix} \lambda_{X_1 Y_1} & \lambda_{X_1 Y_2} & \dots & \lambda_{X_1 Y_q} \\ \lambda_{X_2 Y_1} & \lambda_{X_2 Y_2} & \dots & \lambda_{X_2 Y_q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_{X_p Y_1} & \lambda_{X_p Y_2} & \dots & \lambda_{X_p Y_q} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

该矩阵的行列数分别对应于面阵 CCD 靶面上的整像元坐标 X, Y 值, 而矩阵中的每一元素值代表该位置处的波长值。因此, 通过该矩阵可得到整个像面对应面阵 CCD 的 X 和 Y 轴坐标位置与各波长的对应关系。其二维谱图还原模型如图 7 所示。

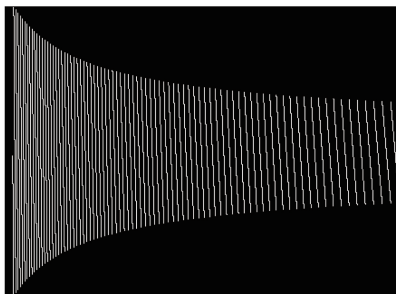


图 7 谱图还原模型图

Fig. 7 Spectral recovery model

结合(1)式与(18)式, 可获得光斑在任意坐标 (X, Y) 下的波长值, 完成谱图还原模型的建立。

4 谱图还原结果

利用中阶梯光栅光谱仪结构特点分别分析主色散及横向色散方向色散规律,建立两个方向上的谱图坐标计算模型,并编写出相应算法进行计算。其中,中阶梯光栅光谱仪设计性能参数如表 1 所示。

表 1 中阶梯光栅光谱仪性能参数

Table 1 Performance parameter of echelle spectrometer

Parameters of echelle spectrometer	
Prism apex angle /($^{\circ}$)	12.4
Prism incidence angle /($^{\circ}$)	1.2
Grating groove density /(g/mm)	54
Grating incidence angle /($^{\circ}$)	46
Grating offset angle /($^{\circ}$)	6.25
Focal length /mm	148

假设采用像元尺寸为 $0.26 \mu\text{m}$,像元数为 512×512 的面阵 CCD 作为像面接收器,对中阶梯光栅光谱仪谱图还原模型计算精度进行验证,其计算的波长对应像面位置坐标与软件仿真位置信息偏差如图 8 所示。

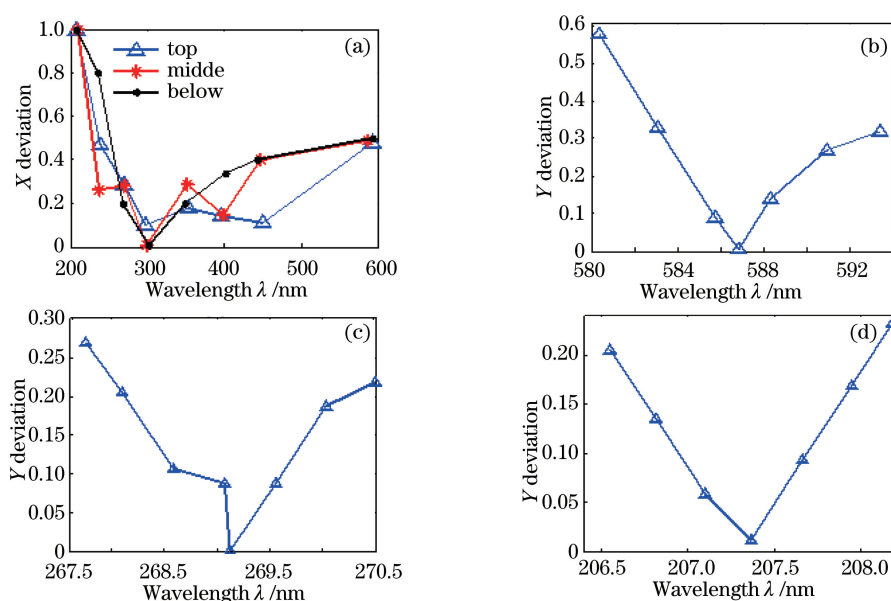


图 8 谱图还原模型计算的像面位置误差。(a) 像面上下边缘与中心 X 坐标偏差值;
(b)(c)(d) 像面左、中、右 Y 坐标偏差值

Fig. 8 Image coordinate errors of spectral recovery model. (a) Deviation of X coordinate on the top and bottom edge and center of the image plane; (b)(c)(d) deviation of Y coordinate on the left, middle, right of the image plane

中阶梯光栅光谱仪谱图还原模型计算的 Y 坐标误差影响波长提取精度是与分辨率相当的,而 X 方向偏差影响波长提取可能产生级次偏差,并且光谱仪系统中的畸变和谱线弯曲等像差对谱图边缘的成像坐标影响较大。因此,分别在 X 方向与 Y 方向对谱图还原模型计算的像面位置误差进行验证,其中图 8(a)中三条谱线分别表示像面上下边缘与像面中心 X 坐标偏差值。在同一 Y 坐标下,X 坐标偏差在像面中心与像面边缘相比较小。图 8(b)~(d)分别表示像面左右边缘与像面中心 Y 坐标偏差值。其中,在同一级次下,X 坐标近似相同,越靠近像面中心,模型计算偏差越小,但整体偏差都小于一个像元与实际情况相符,说明谱图还原模型能够满足使用要求。

5 结 论

建立了 C-T 型棱镜透射式中阶梯光栅光谱仪谱图还原模型。根据中阶梯光栅光谱仪的光路结构特点、光栅及棱镜的色散方程、光栅及棱镜之间的相互作用关系建立模型,同时得出以下结论:1) 当中阶梯光栅光

谱仪的色散元件(棱镜与光栅)以不同方式放置时,它们之间的非线性关系会发生改变。因此,对于不同结构的中阶梯光栅光谱仪,在建立可准确计算入射光波长与其相应坐标之间关系的谱图还原模型时,不仅要分别分析出光栅与棱镜的色散规律,还需推导出两种色散元件之间的相互作用关系。2) 中阶梯光栅光谱仪后端聚焦方式的不同,将导致波长最终在 CCD 靶面上的坐标值发生改变。因此,在计算波长对应准确坐标值时,需根据实际光路的传输特性计算出由于光学元件的改变所引起的坐标变化值,最终得到准确坐标值。3) 该方法建立的谱图还原模型可快速准确地对中阶梯光栅光谱仪二维谱图进行还原,在使用时只需输入光谱仪元件基本性能参数即可完成谱图还原,且计算的入射光波长所对应的像面坐标偏差都小于一个像元,实现了全波段快速高精度的谱图还原。

参 考 文 献

- 1 Yang Jin, Yin Lu, Yao Xuefeng, *et al.*. Optical design and stray light suppression of a new portable echelle spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0812001.
杨 晋, 尹 禄, 姚雪峰, 等. 新型便携式中阶梯光栅光谱仪光学设计与消杂散光研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0812001.
- 2 Furxhi O, Marks D L, Brady D J. Echelle crossed grating millimeter wave beam scanner [J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 16393-16407.
- 3 Korablev O, Montmessin F, Trokhimovsky A. Compact echelle spectrometer for occultation sounding of the Martian atmosphere: Design and performance [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 1054-1065.
- 4 Bykov S V, Sharma B, Asher S A. High-throughput, high-resolution echelle deep-UV Raman spectrometer [J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(8): 873-883.
- 5 Wood M P, Lawler J E. Aberration-corrected echelle spectrometer for measuring ultraviolet branching fractions of iron-group ions [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(35): 8407-8412.
- 6 Sakanoi T, Kasabaa Y, Kagitania M, *et al.*. Development of infrared echelle spectrograph and mid-infrared heterodyne spectrometer on a small telescope at Haleakala, Hawaii for planetary observation [C]. *SPIE*, 2014, 9147: 91478D.
- 7 Reynolds R O, Dettmann Lee. Adapting a very high resolution echelle spectrograph to an 8 meter class telescope [J]. *SPIE*, 2014, 9147: 91477X.
- 8 Zhang Yufeng, Wu Jianfen, Zhu Qingsong, *et al.*. Optical design of high resolution two dimension echelle spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0422005.
张瑜峰, 武建芬, 朱青松, 等. 二维全谱高分辨中阶梯光谱仪光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0422005.
- 9 Zhang Yinxin, Yang Huaidong, Deng Chao, *et al.*. Optical design of high-resolution echelle-prism cross-dispersion [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(6): 1706-1710.
张尹馨, 杨怀栋, 邓 超, 等. 高分辨率中阶梯光栅-棱镜交叉色散光路设计 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(6): 1706-1710.
- 10 Ning Chunli, Qi Xiangdong, Chen Shaojie, *et al.*. Optical design and performance analysis of light and small echelle spectrograph [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3406-3410.
宁春丽, 齐向东, 陈少杰, 等. 轻小型中阶梯光栅光谱仪光学设计及性能分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3406-3410.
- 11 Tang Yuguo, Song Nan, Bayanheshig, *et al.*. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 1989-1995.
唐玉国, 宋 楠, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 1989-1995.
- 12 Wu Xuhua, Zhu Yongtian, Wang Lei. Optical design of high resolution echelle spectrograph [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(5): 442-447.
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.
- 13 Chen Shaojie. Method for wide spectral coverage echelle spectrograph design and calibration [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
陈少杰. 宽波段中阶梯光栅光谱仪设计与标定方法研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
- 14 Liu K, Hieftie G M. Investigation of wavelength calibration for an echelle cross-dispersion spectrometer [J]. *J Anal At Spectrom*, 2003, 18(10): 1177-1184.
- 15 Sadler D A, Littlejohn D, Perkins C V. Automatic wavelength calibration procedure for use with an optical spectrometer

- and array detector[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1995, 10(3): 253-257.
- 16 Chen Shaojie, Bayanheshig, Pan Mingzhong *et al.*. Efficient algorithms for echelle spectrograph design and cross-dispersed spectra analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1030001.
陈少杰, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 中阶梯光栅光谱仪快速设计与谱图分析的数学模型[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1030001.
- 17 Tang Yuguo, Chen Shaojie, Bayanheshig, *et al.*. Spectral reducing of cross-dispersed echelle spectrograph and its wavelength calibration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2130-2136.
唐玉国, 陈少杰, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的谱图还原与波长标定[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(10): 2130-2136.