

中阶梯光栅光谱仪快速设计与谱图分析的数学模型

陈少杰^{1,2} 巴音贺希格¹ 潘明忠¹ 朱继伟¹ 宋莹^{1,2} 齐向东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 由于中阶梯光栅光谱仪采用交叉色散的结构,在像面上呈现二维重叠光谱,光谱信息难以直接获取,所以使得光学系统设计与光谱信息处理较为繁琐。建立了一种基于边界限制的中阶梯光栅光谱仪快速设计与二维谱图的分析算法。讨论了中阶梯光栅光谱仪各性能参数的相互制约关系,建立了系统指标、结构参数与二维谱图的计算模型。该算法能够根据给定的系统指标快速计算出系统参数,根据系统参数构建二维谱图模型,并根据谱图模型评估结果对参数进行修正,提供中阶梯光栅光谱仪的快速设计与谱图分析方法。利用该数学模型设计了一台波段范围为200~900 nm,在200 nm处的分辨率为25000的中阶梯光栅光谱仪,经初步测试,仪器满足系统指标要求。

关键词 光学设计;中阶梯光栅光谱仪;光谱标定;交叉色散

中图分类号 TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1030001

Efficient Algorithms for Echelle Spectrograph Design and Cross-Dispersed Spectra Analysis

Chen Shaojie^{1,2} Bayanheshig¹ Pan Mingzhong¹ Zhu Jiwei¹

Song Ying^{1,2} Qi Xiangdong¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Echelle spectrograph has two-dimension spectra on the image plane for its cross-dispersion structure, which makes it hard to design and analysis. In order to overcome these difficulties, an efficient algorithm based on the limits of boundary is described. The mathematic model is developed between the system requirements, structure parameters and two-dimension echelle spectra. This algorithm can obtain the echelle spectrograph parameters quickly according to the system requirements, and establish the echelle spectra using these parameters, and then the parameters are modified according the results of echelle spectra, which provide a valuable method for designing echelle spectrograph and analysing spectra. Utilizing this model an echelle spectrograph is designed with the wavelength range of 200~900 nm and the spectral resolution of 25000 at 200 nm. After the measurement, this configuration can meet the needs of system.

Key words optical design; echelle spectrograph; spectrograph calibration; cross-dispersed

OCIS codes 120.4570; 300.6190; 120.6200; 220.2740; 300.6320

1 引言

中阶梯光栅光谱仪属于高端光谱仪,它以中阶

梯光栅为主色散元件,配合横向色散元件在像面形成重叠的二维光谱图像,具有波段范围宽、分辨率

收稿日期: 2013-01-06; **收到修改稿日期**: 2013-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(61108032)、国家重大科学仪器设备开发专项(11YQ120023)

作者简介: 陈少杰(1985—),女,博士研究生,助理研究员,主要从事光谱仪器研发及光谱信息处理技术等方面的研究。

E-mail: shaojie.csj@gmail.com

导师简介: 唐玉国(1967—),男,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等方面的研究。

E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

高、测量速度快和体积小等优点。随着光栅制造水平、探测器制造水平以及信息处理能力的提高,中阶梯光栅光谱仪优越的性能在越来越多的领域发挥着重要作用。早在 20 世纪 40 年代, Harrison^[1] 对中阶梯光栅性能进行了讨论。20 世纪 70 年代,一些学者对中阶梯光栅光谱仪在天文领域的应用进行了探索。但由于探测器性能水平的限制,直至 21 世纪初,中阶梯光栅光谱仪才被应用于工业生产领域^[2-6]。我国对中阶梯光栅光谱仪的研究起步于 21 世纪初,目前尚未有商品化仪器推出。

中阶梯光栅光谱仪采用交叉色散的结构,成像面积较大。同时,由于中阶梯光栅的级次重叠与横向色散元件的非线性色散等特性,使其二维光谱图像弯曲且倾斜,光谱信息可读性差。由于中阶梯光栅光谱仪结构与光谱信息分析过程烦琐,往往使得初始设计者无从下手。对于中阶梯光栅光谱仪的设计与二维谱图分析,国外学者做了大量研究,但其方法主要是利用光学设计软件进行光线追迹^[7]。如果利用该方法,则需要进行大量波长的模拟,花费较长时间。尤其当要求中阶梯光栅光谱仪具有更宽的波段范围与更高的分辨率时,需对系统结构参数与谱图特征进行更为全面的计算,往往需要反复调整才能确定中阶梯光栅光谱仪的系统参数。

本文通过合理的假设与逻辑推导,利用边界条件分析出中阶梯光栅光谱仪性能参数的约束关系,建立了系统性能指标、结构参数与二维谱图的计算模型。根据中阶梯光栅光谱仪结构参数与二维谱图的相互关系,分析出结构参数对二维光谱图像的影响,亦能根据二维光谱图像的特征精确反演出系统结构参数,根据谱图模型的评估结果对系统参数进行实时调整,直至满足设计要求。该模型的建立,减少了中阶梯光栅光谱仪设计中各参数的烦琐计算过程,并能快速构建出直观的二维重叠光谱图像,为光谱仪设计者提供便捷。将所获得的结构参数作为光学设计的初始结构参数,再利用光学设计软件对其进行设计优化,通过对二维光谱图像成像质量的评估,获得满足系统要求的优化结构参数。讨论了该数学模型的详细推导过程,根据系统设计要求,应用该数学模型计算出有效的中阶梯光栅光谱仪结构参数。基于该参数进行设计优化,给出了光学系统的设计结果以及原理样机的汞灯测试光谱,其指标满足系统要求。优化后的结构参数与利用该模型计算所得的结构参数一致性较好。

2 中阶梯光栅光谱仪性能参数分析

2.1 中阶梯光栅光谱仪原理

中阶梯光栅光谱仪采用“双 Z”型结构^[8,9],如图 1 所示。它以中阶梯光栅为主色散元件,采用棱镜或者低色散平面衍射光栅作为横向色散元件,在像面形成二维重叠谱图,如图 2 所示。这种结构形式在较小体积的情况下,可同时实现光谱仪的宽波段与高分辨率的设计。

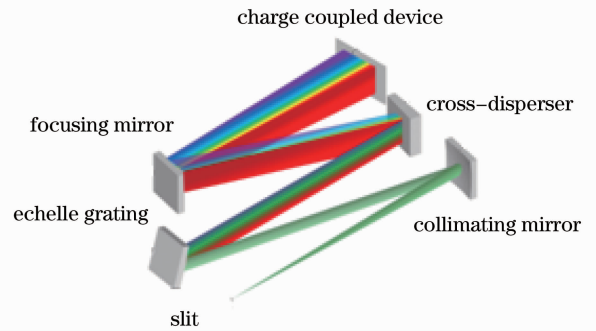


图 1 中阶梯光栅光谱仪结构示意图

Fig. 1 Scheme of echelle spectrograph

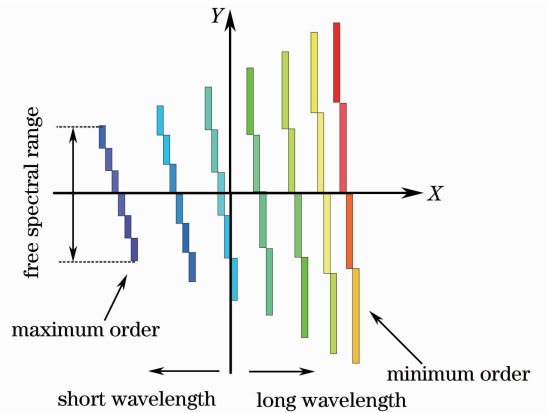


图 2 自由光谱区内的二维光谱示意图

Fig. 2 Sketch of two-dimensional spectra within free spectral range

2.2 系统结构参数的确定

2.2.1 探测器与中阶梯光栅的性能参数分析

中阶梯光栅是该仪器的核心元件,其性能参数直接决定系统的光谱分辨率。分析中阶梯光栅对系统结构参数的约束。为了使建立的模型具有更好的适用性,讨论广义条件下的中阶梯光栅工作特性。利用标量衍射理论,可推导出意角度入射的光栅方程^[10]:

$$m\lambda = d(\sin\theta\cos\gamma_m + \sin\beta\cos\gamma), \quad (1)$$

$$\sin\theta\cos\gamma_m = \sin\beta\cos\gamma, \quad (2)$$

其中 m 为衍射级次, λ 为波长, d 为光栅常数, θ 为入射角, β 为衍射角, γ_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 $\theta = \beta \approx \varphi$,由(2)式可得 $\gamma_m = \gamma$ 。于是,(1)式可简化为

$$m\lambda = 2d\sin\varphi\cos\gamma. \quad (3)$$

根据中阶梯光栅光谱仪特性,中阶梯光栅为主色散元件,在图2所示的二维谱图中,其色散方向为 Y 方向,各衍射级次谱线与 X 轴交点处的波长具有相同的衍射角度,并且与闪耀角相同。由此可计算出各衍射级次的中心波长:

$$\lambda_{\text{cen}} = \frac{2d\sin\varphi}{m}\cos\gamma. \quad (4)$$

根据光栅自由光谱区的性质,在某一衍射级次,其上下限波长与其他相邻级次不相重叠,则有如下关系^[11]:

$$m\lambda_{m(\max)} = (m+1)\lambda_{m(\min)}, \quad (5)$$

其中 $\lambda_{m(\max)}$, $\lambda_{m(\min)}$ 分别为 m 级的波长极大值与极小值。由(5)式可推导出 m 级的自由光谱区范围:

$$\Delta\lambda_m = \lambda_{m(\max)} - \lambda_{m(\min)} = \frac{\lambda_{m(\min)}}{m} = \frac{\lambda_{m(\max)}}{m+1}, \quad (6)$$

由(6)式可知,波长越长衍射级次越低,自由光谱区越大。由此可推导出中阶梯光栅光谱仪最大自由光谱区范围:

$$\Delta\lambda_{\max} = \frac{\lambda_{\max}}{m_{\min}}. \quad (7)$$

为了使自由光谱区内的光谱信息完全被接收,探测器的选取受到长波段自由光谱区的限制。如果探测器像面恰好覆盖最大自由光谱区,则可得到如下关系:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{W}{\Delta\lambda_{\max}}, \quad (8)$$

其中 W 为探测器主色散方向尺寸。为了充分利用探测器感应像面,并满足系统光谱分辨率的要求,所以中阶梯光栅线色散率应与探测器参数进行匹配。根据光栅方程(3)式可推导出中阶梯光栅的线色散率:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{mf}{d\cos\beta\cos\gamma}, \quad (9)$$

根据(7)~(9)式,即可确定探测器主色散方向尺寸与中阶梯光栅参数间的关系:

$$d = \frac{f\lambda_{\max}}{W\cos\varphi\cos\gamma}. \quad (10)$$

若系统参数中给定中阶梯光栅光谱仪分辨率:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \quad (11)$$

根据(7)式和(11)式即可确定探测器像元尺寸:

$$p = \frac{W\lambda_{\max}}{R\Delta\lambda_{\max}}. \quad (12)$$

通过以上分析,推导出系统指标限定下的探测器参数与中阶梯光栅参数的相互关系。在实际设计中,由于中阶梯光栅与探测器种类的限制,其参数并非可以任意选择,应根据实际情况进行选择匹配。

2.2.2 横向色散元件的性能参数分析

根据中阶梯光栅光谱仪设计经验以及查阅的大量文献,中阶梯光栅光谱仪中一般采用棱镜或低色散的衍射光栅作为横向色散元件。由于棱镜色散的非线性,使得仪器的长波段与短波的色散率存在较大的不均匀性^[12]。常规衍射光栅可以有效避免该问题,但是由于存在二级光谱,使其应用受到了很大的限制^[13]。因此,在确定横向色散元件时,需要根据系统波长范围、探测器尺寸进行详细计算。

横向色散元件将中阶梯各衍射级次沿 X 轴方向分开。设中阶梯光栅光谱仪入射针孔直径为 S ,系统放大率为 M ,探测器横向色散方向的像面宽度为 H 。由于谱线在像面上具有一定的宽度,所以为了满足探测的需要,横向色散元件的线色散率与探测器横向尺寸应满足

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{H - SM}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}. \quad (13)$$

通过(13)式求得的横向色散关系是在满足系统要求情况下的最大线色散率。在该色散关系下,系统波长范围恰好充分利用探测器的感应像面。但应注意(13)式求得的线色散率为常数,当系统采用棱镜作为横向色散元件时,其色散率难以用该关系进行衡量。当系统采用光栅作为横向色散元件时,其线色散率应小于该值。但是横向色散间距必须严格控制,避免级次间的干扰。

在光学设计中,当系统波长确定后,对于棱镜材料的选择具有一定的限制。折射率、顶角与入射角共同决定了棱镜的色散性能,其表达式为

$$\delta_\lambda = \arcsin\left\{n_\lambda\sin\left[\phi - \arcsin\left(\frac{\sin\alpha}{n_\lambda}\right)\right]\right\}, \quad (14)$$

其中 n_λ 为棱镜折射率, ϕ 为棱镜顶角, α 为棱镜入射角。为了避免相邻级次的干扰,相邻级次边缘至少留有一个完整像元的距离。将各级次中心波长带入(14)式,则可计算出相邻级次横向色散距离以及横向色散的总宽度。为了计算横向色散参数,应计算出中阶梯光栅衍射级次。根据系统波长范围可确定中阶梯光栅的最大衍射级次 m_{\max} 与最小衍射级次 m_{\min} 。

若系统参数中给定中阶梯光栅光谱仪分辨率

R , 中阶梯光栅光谱仪入射针孔直径为 S , 系统放大率为 M , 则可得出系统光谱带宽:

$$\Delta\lambda = SM \frac{d\lambda}{dl}. \quad (15)$$

根据(9),(10),(11),(15)式可以得出中阶梯光栅光谱仪的最小衍射级次:

$$m_{\min} = \frac{RSM}{W}. \quad (16)$$

若光栅的分辨率未知, 则可通过光栅方程推导出中阶梯光栅的最小衍射级次。假设中阶梯光栅工作在 Littrow 条件下, 且具有偏置角 γ 。则可得出中阶梯光栅的最小衍射级次:

$$m_{\min} = \frac{2d \sin \varphi \cos \gamma}{\lambda_{\max}}. \quad (17)$$

同理, 可以得出中阶梯光栅的最大衍射级次:

$$m_{\max} = \frac{2d \sin \varphi \cos \gamma}{\lambda_{\min}}. \quad (18)$$

在该条件下, 光栅方程右侧为常数, 由此可以得出中阶梯光栅光谱仪各级次的中心波长:

$$\lambda_{\text{cen}} = \frac{K}{m} m = m_{\min}, m_{\min+1}, \dots, m_{\max}. \quad (19)$$

为了快速确定横向色散元件的性能参数, 可仅计算出边界情况下的 m_{\min} 与 m_{\max} 色散距离以及长波范围($m_{\min}, m_{\min+1}$)相邻级次的距离即可。横向色散的总宽度决定探测器横向尺寸:

$$\Delta L_m = f \times (\delta_{\min} - \delta_{\max}), \quad (20)$$

长波段相邻级次的横向色散距离为

$$\Delta l_m = f(\delta_m - \delta_{m+1}), \quad (21)$$

由(21)式可确定是否存在级次间干扰。通过上述计算, 利用边界条件可确定出满足系统要求的各项棱镜参数。

若横向色散元件采用低色散的平面衍射光栅, 则应确定系统波长工作在光栅的自由光谱区范围内, 一般普通光栅工作在一级, 所以其自由光谱区可简化为

$$\Delta\lambda' = \lambda'_{\max} - \lambda'_{\min} = \frac{\lambda'_{\min} \lambda'_{\max}}{d'(\sin \theta' + \sin \beta')}, \quad (22)$$

其中 d' 为横向色散光栅的光栅常数, θ' 为其入射角, β' 为其衍射角。横向色散光栅的自由光谱区应满足中阶梯光栅光谱仪波段范围的要求。同时, 光栅的色散率应与横向色散率匹配, 光栅的线色散率为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{f}{d' \cos \beta'}, \quad (23)$$

为了满足系统要求, 光栅线色散率与横向色散相同, 则有

$$\frac{f}{d' \cos \beta'} = \frac{H - SM}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}. \quad (24)$$

由(20)~(24)式可以确定横向色散光栅性能参数。

通过以上分析可知, 棱镜色散具有非均匀性, 在短波范围色散能力较强, 而在长波范围色散能力较弱。为了避免长波范围的级次干扰并有效利用探测像面, 可以采用棱镜旋转或者复合棱镜的设计方法对结构进行优化。而光栅色散能力与波长成线性关系, 所以光栅在长波范围色散能力较强。在中阶梯光栅光谱仪设计中, 当工作波段在近红外或红外波段可选择光栅作为横向色散元件。

2.3 二维谱图模型的建立

2.3.1 二维谱图 Y 方向坐标的确定

由于中阶梯光栅光谱仪像面较大, 所以成像质量随着距离中心像点的距离增加而变差。同时, 由于横向色散元件的非线性, 使得中阶梯光栅二维谱图的各级次谱线弯曲并且倾斜^[14]。若构建二维谱图模型, 则需精确计算出各波长的坐标位置, 将二维重叠光谱还原为一维光谱信息, 实现中阶梯光栅光谱仪的精确标定^[15]。然而, 为了实现快速设计与分析, 只需对其二维谱图各衍射级次的边界值进行计算。从图2中可看出, Y 为中阶梯光栅主色散方向, X 为横向色散方向, 各级次光谱曲线近似为一条直线。为构建出该谱线, 应计算出各谱线上的坐标点, 然后计算出各谱线的斜率, 由此可近似构建出二维谱图的各衍射级次谱线。通过对主色散自由光谱区的讨论, 可以确定该衍射级次边界的纵坐标位置。

对光栅方程进行微分, 可得:

$$d\beta = \frac{m}{d \cos \beta \cos \gamma} d\lambda, \quad (25)$$

由于各衍射级次的色散能力不同, 所以自由光谱区长度也不同。对等式两边积分, 可得出任意级次自由光谱区范围的色散角:

$$\alpha_m = \frac{\lambda_m}{d \cos \varphi \cos \gamma}, \quad (26)$$

根据中心波长以及自由光谱区的定义, 可以得出

$$\lambda_{\max(m)} = \lambda_{\text{cen}(m)} + \frac{\lambda_{\text{cen}(m)}}{2m}, \quad (27)$$

$$\lambda_{\min(m)} = \lambda_{\text{cen}(m)} - \frac{\lambda_{\text{cen}(m)}}{2m}, \quad (28)$$

以各衍射级次中心波长为坐标原点, 根据(26)式得出任意级次上下两端点的 Y 坐标:

$$Y_{\text{high}(m)} = \frac{f \lambda_{\max(m)}}{2d \cos \varphi \cos \gamma}, \quad (29)$$

$$Y_{\text{low}(m)} = -\frac{f \lambda_{\min(m)}}{2d \cos \varphi \cos \gamma}, \quad (30)$$

通过主色散方向性能分析,可以直接得到各级次线色散关系:

$$\frac{d\lambda_m}{dy_m} = \frac{\Delta\lambda_m}{Y_{\text{high}(m)} - Y_{\text{low}(m)}}, \quad (31)$$

根据(27)~(31)式,可以计算出任意衍射级次中各波长在Y方向的坐标。

2.3.2 二维谱图X方向坐标的确定

根据中阶梯光栅光谱仪二维谱图分析,可知各衍射级次谱线可近似为一条直线。因此,可以利用点线法求出任一衍射级次各波长的坐标位置。计算出X方向各中心波长的位置坐标。假设最大衍射级次恰好在探测器的边界,则其坐标为

$$X_{\text{max}} = \frac{H - SM}{2}, \quad (32)$$

同理,衍射级次最小的X坐标为

$$X_{\text{min}} = -\frac{H - SM}{2}, \quad (33)$$

根据横向色散元件的线色散率以及中心波长的定义,可以计算出相邻级次中心波长的横向坐标 $[X_{\text{cen}(m)}, X_{\text{cen}(m-1)}]$ 的关系:

$$X_{\text{cen}(m)} = X_{\text{cen}(m-1)} - [\lambda_{\text{cen}(m-1)} - \lambda_{\text{cen}(m)}] \frac{dx}{d\lambda}, \quad (34)$$

各谱线倾斜的斜率为

$$q_m = \frac{dy}{dx} = \frac{d\lambda_m}{dy_m} \frac{dx}{d\lambda}, \quad (35)$$

利用点线法,可以推导出任意波长的在像面的坐标位置:

$$Y = \frac{\lambda - \lambda_{\text{cen}(m)}}{d\lambda_m/dy_m}, \quad (36)$$

$$X = X + \frac{Y}{q_m}. \quad (37)$$

通过以上分析,利用边界限制条件可根据系统要求确定中阶梯光栅光谱仪结构参数,根据系统的结构参数快速构建二维光谱模型。

3 设计结果

根据上述数学关系模型、系统要求和已有的限制参数可快速计算出中阶梯光栅光谱仪各项未知参数,并构建出二维谱图模型。根据谱图模型的合理性实时调整仪器结构参数,使其满足系统要求。同时,可借助该软件对已有谱图进行性能评价,并可根据实测谱图信号实现中阶梯光栅光谱仪参数的快速反演,有效提高仪器设计者计算中阶梯结构参数与模拟各波长成像位置的效率。

对中阶梯光栅光谱仪进行了设计分析。中阶梯光栅性能参数需要对探测器以及横向色散元件进行计算得到。由于中阶梯光栅光谱仪波长范围(200~900 nm)较宽,且属于紫外/可见波段范围,所以选用棱镜作为横向色散元件。同时,为了避免可见波段(500~900 nm)范围内级次间的干扰,选用 SiO_2 , CaF_2 两种材料组合的复合棱镜结构进行设计。应用该数学模型,获得了宽波段范围的中阶梯光栅光谱仪结构参数。将该结构参数作为光学设计初始结构,利用Zemax软件对该参数进行优化,根据像面上光斑成像质量的评估,获得最终的光学设计结果。图3为光学系统优化后点列图,以103级的中心波长为例,优化后的光学系统在103级光谱分辨力为0.0092 nm。

经光学系统优化后,最终确定系统结构参数。表1为系统结构参数计算结果与优化结果。

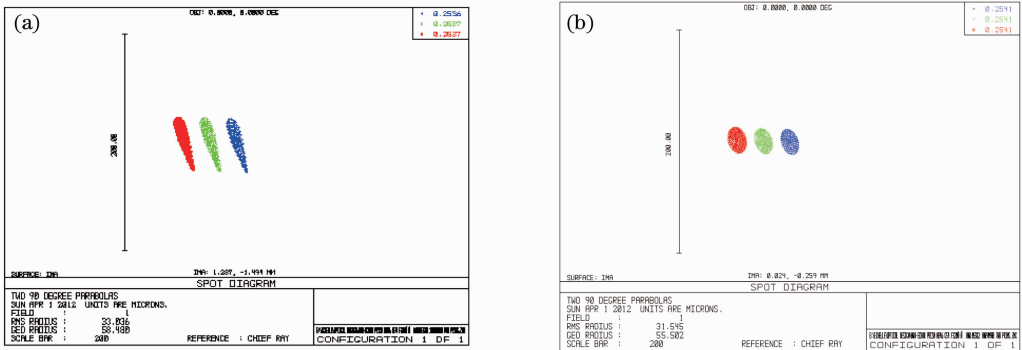


图3 103级中心波长点列图。(a) 253.643, 253.652, 253.661 nm; (b) 253.643, 254.120, 254.112 nm

Fig. 3 Spot diagrams of central wavelength for order 103. (a) 253.643, 253.652, 253.661 nm;

(b) 253.643, 254.120, 254.112 nm

表 1 中阶梯光栅光谱仪设计参数

Table 1 Design parameters of echelle spectrograph

System requirements	Calculated parameters	Optimized parameters
Wavelength range: 200~900 nm	Array size: 23.18 mm×22.66 mm	Array size: 24.57 mm×24.57 mm
Spectral resolution: 25000@200 nm	Pixel size: 26.29 μm ×26.29 μm	Pixel size: 24 μm ×24 μm
Focus length: <350 mm	Prism material: SiO ₂ /CaF ₂	Prism material: SiO ₂ /CaF ₂
Echelle grating	Apex angle: 13.2°/37°	Apex angle: 13.45°/37°
Line density: 54.49 line/mm	Incidence angle: 28°	Incidence angle: 28.12°
Blazed angle: 46°	Slit diameter: 26.29 μm	Slit diameter: 24 μm
Turning angle: <10°	Turning angle: 7.54°	Turning angle: 7.35°
	Focal length: 322 mm	Focal length: 321.35 mm

根据系统各项结构参数,利用该算法构建出中阶梯光栅光谱仪二维谱图模型如图 4 所示,二维谱图模型符合面阵探测器的边界限制。

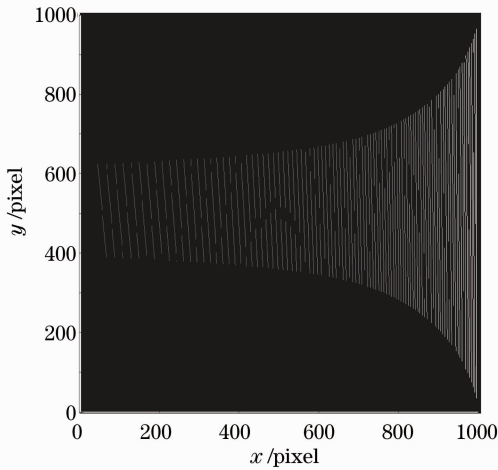


图 4 二维谱图模型

Fig. 4 Model of two-dimensional spectra

利用优化后的结构参数设计了宽波段中阶梯光栅光谱仪原理样机,并对其进行了汞灯光谱测试,拍摄的二维谱图结果如图 5 所示。利用构建的二维谱图模型对汞灯光谱进行标定,可获得波长与像面位置的相互对应关系^[15]。由于中阶梯光栅光谱仪分

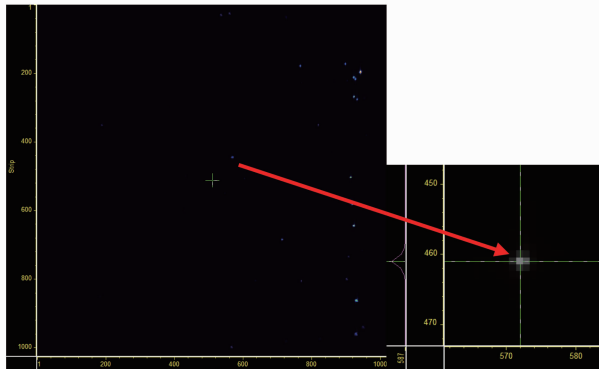


图 5 汞灯谱图

Fig. 5 Actual spectra of Hg

辨率较高,微小的结构变化都会产生较大的波长误差,所以需要对仪器进行精确装调^[16]。将实际测试谱图与所构建的二维谱图模型进行比较,反复进行调整直至二者一致。采用半宽度法对实际探测的光谱图像进行分析,汞灯的 253.652 nm 特征光谱的成像位置为(571 pixel,461 pixel),该处谱线带宽为 0.0098 nm,满足系统分辨率要求。

4 结 论

通过深入分析中阶梯光栅光谱仪特性,建立了仪器性能指标、结构参数与二维谱图之间的数学关系。利用该算法可以快速获得中阶梯光栅光谱仪的基本结构参数,为光学设计提供有效的初始结构。同时,利用该算法可快速构建中阶梯二维谱图模型,实现了中阶梯光栅光谱仪谱图的快速分析。但该算法并未考虑光学设计中像差的影响,在后续的研究中将进一步优化该算法,使该算法的计算结果与实际设计结果更为接近。

参 考 文 献

- 1 G R Harrison. The production of diffraction gratings I. development of the ruling art [J]. J Opt Soc Am, 1949, 39(6): 413-426.
- 2 Xie Pin, Ni Zhengji, Huang Yuanshen, *et al.*. Application research progress in the echelle grating [J]. Laser Journal, 2009, 30(2): 4-6.
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.
- 3 H B Ross, M Okrus, S Florek, *et al.*. Echelle-spectrograph as a tool for studies of structured background in flame atomic absorption spectrometry [J]. Spectrochimica Acta Part B. 2002, 57(10): 1493-1504.
- 4 Jean-Francois Lavigne, M Doucet, M Wang, *et al.*. Study of the image quality and stray light in the critical design phase of the compact echelle spectrograph for aeronautical research (CESAR) [C]. SPIE, 2010, 7735: 773539.
- 5 R Tousey, J D Purcell, D L Garrett. An echelle spectrograph for middle ultraviolet solar spectroscopy from rockets [J]. Appl. Opt., 1967, 6(3): 365-372.
- 6 H Becker-Ross, S Florek, U Heitmann, *et al.*. Continuum

- source atomic absorption spectrometry and detector technology; a historical perspective [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2006, 61(3): 1015–1030.
- 7 K Liu, G M Hieftje. Investigation of wavelength calibration for an echelle cross-dispersion spectrometer [J]. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2003, 18(1): 1177–1184.
- 8 P. Lindblom. New compact echelle spectrographs with multichannel time-resolved recording capabilities [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1999, 380(3): 353–361.
- 9 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.
- 10 Bayanheshig, Qi Xiangdong, Tang Yuguo. The vector diffraction theory analysis of chromatic dispersion characteristics of phase grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(5): 1157–1161.
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.
- 11 M. C. Hartley. *Diffraction Grating* [M]. Jia Huaiyi, Qin Xiaomei. Transl.. Guiyang: Guizhou People's Press, 1990.
哈特雷. 衍射光栅[M]. 贾怀义, 秦小梅译. 贵阳: 贵州人民出版社, 1990.
- 12 N Ebizuka, H Yokota, F Kajino, *et al.*. Novel direct vision prism and wollaston prism assembly for diffraction limit applications [C]. *SPIE*, 2008, 70184S: 1–6.
- 13 D H Rank, D P Eastman, W B Birtley, *et al.*. Echelle-type spectrograph for the near infrared [J]. *J Opt Soc Am*, 1960, 50(8): 821–825.
- 14 N E Piskunov, J A Valenti. New algorithms for reducing cross-dispersed echelle spectra [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2002, 385: 1095–1106.
- 15 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): 2130–2135.
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): 2130–2135.
- 16 Chen Shaojie, Cui Jicheng, Liu Yujuan, *et al.*. A method of precise adjustment and calibration for high-resolution echelle spectrograph [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(8): 2280–2285.
陈少杰, 崔继承, 刘玉娟, 等. 高分辨率中阶梯光栅光谱仪精确装调与标定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(8): 2280–2285.

栏目编辑: 李文誌