

文章编号 2097-1842(2023)06-1442-08

狭缝高度对单色仪光谱分辨率的影响

张靖^{1,2}, 张博¹, 刘凯³, 王楷炆^{1,2}, 冯树龙¹, 李文昊¹, 姚雪峰^{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;

3. 长春光机科技发展有限责任公司, 吉林 长春 130033)

摘要:单色仪广泛应用于光谱定标、物质分析等方面,因此,对于高光谱分辨率单色仪系统的研究具有重要意义。本文基于矢量光栅方程推导考察了入射狭缝高度对光谱仪器谱线弯曲的影响程度,给出了谱线弯曲同波长、狭缝高度的解析表达式,进而提出了一种基于狭缝高度抑制谱线弯曲的单色仪光谱分辨率优化方案。结合高灵敏度、超快时间响应探测器的性能指标要求,设计了一款光谱分辨率为0.1 nm,波段范围为185 nm~900 nm的三光栅单色仪光学系统,并搭建样机验证狭缝高度对谱线弯曲的影响,进一步探究了狭缝高度对光谱分辨率的影响规律。实验结果表明:在狭缝宽度一定时,对狭缝高度进行优化,可将光谱分辨率从0.32 nm提高至0.1 nm。

关键词:单色仪;谱线弯曲;狭缝高度;光谱分辨率

中图分类号:TP394.1;TH691.9

文献标志码:A

doi:10.37188/CO.2023-0004

Effect of slit height on the spectral resolution of a monochromator

ZHANG Jing^{1,2}, ZHANG Bo¹, LIU Kai³, WANG Kai-yang^{1,2}, FENG Shu-long¹,

LI Wen-hao¹, YAO Xue-feng^{1*}

(1. 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;

3. Changchun Optical Machinery Technology Development Co., Ltd., Changchun 130033, China)

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

Abstract: Monochromators are widely used in spectral calibration, material analysis and other aspects, so research of high spectral resolution monochromator systems is of great significance. Based on the vector grating equation, the influence of the height of the incident slit on the spectral line bending of a spectrometer is investigated, and the analytical expressions of the spectral line bending at the same wavelength and the slit height are given. An optimization scheme of the spectral resolution of the monochromator based on the suppression of spectral line bending by the slit height is proposed. According to the performance index requirements of a highly sensitive and ultra-fast time response detector, a three-grating monochromator optical system with a spectral resolution of 0.1 nm and a band range of 185–900 nm was designed, and a prototype was

收稿日期:2023-01-03; 修订日期:2023-02-05

基金项目:吉林省科技发展计划(No. 20210203053SF)

Supported by Jilin Provincial Science and Technology Development Plan (No. 202103053SF)

built to verify the influence of the slit height on spectral line bending, and to explore the influence of slit height on spectral resolution on the above basis. The experimental results show that the spectral resolution can be improved from 0.32 nm to 0.1 nm by optimizing the slit height when the slit width is fixed.

Key words: monochromator; spectral line bending; slit height; spectral resolution

1 引言

光栅单色仪属于典型的光栅色散型光学系统。它是精密光谱学和光谱分析中最重要的实验设备,其仪器性能会受到系统中光栅性能的影响。光谱仪器的入射狭缝高度的方向平行于光栅刻槽方向,垂直于光栅的主截面方向,且直狭缝中心高度点主光线的入射面与光栅的主截面重合,但是直狭缝边缘高度点的主光线的入射面会与光栅的主截面产生夹角,从而产生谱线弯曲。光谱系统采用离轴视场,系统谱线弯曲随着视场的增大而增大。此外,聚焦镜和准直镜的偏斜角度不当,也将加剧系统的谱线弯曲^[1-2]。光栅单色仪中会设置入射和出射狭缝,从而确保光谱中很窄的一部分光照射到单像元探测器上。对光谱进行扫描,当有较大的谱线弯曲时,会导致仪器的光谱分辨率明显下降,难以满足单色仪高分辨、小型化和紧凑化的发展要求。

光谱仪器的分辨率作为表征仪器性能的重要参数指标,会对实验测试、分析结果产生很大的影响^[3]。目前,对于提高光谱仪器光谱分辨率的研究主要集中在光学设计和光谱算法处理两个方向^[4-6]。华中科技大学的曾延安团队基于实验室自主开发的光谱仪平台,利用修正岭估计方法建立反演模型,重建光谱立方体以改善光谱分辨率,极限条件下,光谱分辨率可改善40%以上,具有非常好的应用前景和潜力。复旦大学的陈良尧团队利用10个1200线密度的光栅组成复合光栅,产生独立的光谱分区来实现200~1000 nm波段内0.07 nm的光谱分辨率^[7]。上述方法都有效地提高了仪器的光谱分辨率,但是耗费成本较高,实现难度较大,无法在工程上广泛应用。

光栅型光谱仪的谱线弯曲方向为长波方向^[7],为了校正由于入射狭缝高度不为零而导致的谱线弯曲,验证狭缝高度对光栅单色仪的光谱分辨率的影响程度,本文通过设置不同的狭缝高度来修

正由谱线弯曲导致的光谱分辨率的下降。

2 物理模型及关系推导

由于光栅非主截面色散之间存在差异,所以光栅色散型光谱仪器存在固有的谱线弯曲^[8]。基于矢量光栅方程对仪器谱线弯曲公式进行推导。其中,需考虑光栅常数、使用波长、入射狭缝高度、系统焦距等可能影响因素。

图1(a)是波长为 λ 的平面波通过入射狭缝 S_1S_2 以及焦距为 f_1 的准直物镜倾斜入射到光栅上,平面光栅刻槽平行于 z 轴方向, xoy 坐标面与光栅主截面重合。向量 $\vec{n}(\alpha, \beta, \gamma)$ 代表入射平面波方向矢量,向量 $\vec{n}'(\alpha', \beta', \gamma')$ 代表衍射平面波方向矢量。图1(b)为入射光束和衍射光束入射到主截面内的示意图。图1(c)为入射光束和衍射光束入射到非主截面内的示意图,可以得到如下形式的矢量光栅方程:

$$\begin{cases} \gamma' = -\gamma \\ \alpha + \alpha' = \frac{m\lambda}{d} \\ \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = \alpha'^2 + \beta'^2 + \gamma'^2 = 1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中, d 表示光栅槽距, λ 表示入射波长, m 表示光栅的衍射级次。

一般情况下,相对于主截面倾斜入射的光束在透过狭缝时会形成锥面衍射,造成谱线弯曲^[7-8]。如图1(a)所示, \vec{n} 和 \vec{n}' 表示入射光束和衍射光束的方向矢量,矢量值取为1,二者与主截面的夹角分别为 δ 和 δ' 。倾斜入射的光线及其衍射光线在主截面的投影与 y 轴的夹角分别为 θ_i 和 θ_k 。

当入射光束和衍射光束均位于 xoy 坐标平面,即光栅主截面内,如图1(b)所示,则有:

$$\sin\varphi + \sin\varphi' = \frac{m\lambda}{d}, \quad (2)$$

其中, φ 和 φ' 分别代表 \vec{n} 和 \vec{n}' 与 y 轴,即光栅法线的夹角。

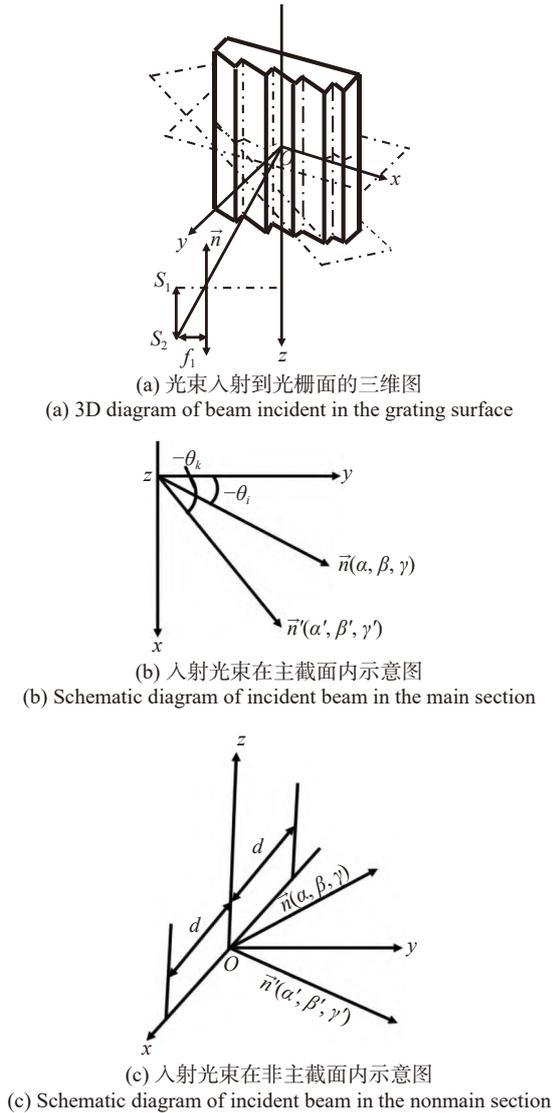


图 1 光束入射到光栅的物理模型

Fig. 1 Physical model of the light beam incident on the grating

\vec{n}_x 、 \vec{n}_y 、 \vec{n}_z 分别表示入射光束在 x 轴、 y 轴以及 z 轴的投影。 \vec{n}'_x 、 \vec{n}'_y 、 \vec{n}'_z 分别表示衍射光束在 x 轴、 y 轴和 z 轴的投影,其表达式如式(3)~式(4)所示:

$$\begin{cases} \vec{n}_x = \cos \delta \sin \theta_i \\ \vec{n}_y = \cos \delta \cos \theta_i \\ \vec{n}_z = \sin \delta \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \vec{n}'_x = \cos \delta' \sin \theta_k \\ \vec{n}'_y = \cos \delta' \cos \theta_k \\ \vec{n}'_z = \sin \delta' \end{cases}, \quad (4)$$

沿着光栅的刻槽方向, 衍射光线发生镜面反

射, 即;

$$\vec{n}_z = -\vec{n}'_z, \quad (5)$$

也可表示当 $\delta = -\delta'$, 平行光束倾斜主截面入射时, 将入射光束和衍射光束投影在主截面内, 此时入射光束与主截面的夹角 $\delta = 0$, 则 $\cos \delta = 1$ 。将其带入光栅方程中有;

$$\cos \delta \sin \theta_i + \cos \delta \sin \theta_k = \frac{m\lambda}{d}. \quad (6)$$

化简后得到;

$$\sin \theta_i + \sin \theta_k = \frac{m\lambda}{d \cos \delta}. \quad (7)$$

由式(7)可知, 相对于主截面倾斜的光线被光栅偏折的角度较大, 故会造成较大的谱线弯曲, 且波长越长, 谱线弯曲越严重^[9-13]。最终谱线形成在聚焦镜的焦平面上。光线偏折角 $\Delta\theta_k$ 会使谱线沿着色散的方向移动。狭缝中心点的光线 $\delta = 0$, 直入射狭缝上各点的入射角都相等, 即 $\theta_i = \theta_{i0}$, 分别将 θ_i 、 θ_k 、 θ_{i0} 和 θ_{k0} 带入式(7)中, 相减可得式(8);

$$\sin \theta_k - \sin \theta_{k0} = \frac{m\lambda}{d} \left(\frac{1}{\cos \delta} - 1 \right). \quad (8)$$

对于小 δ 值, $\Delta\theta_k = \theta_k - \theta_{k0}$ 的值很小, 而且存在如下近似:

$$\sin \theta_k = \sin(\theta_{k0} + \Delta\theta_k) \approx \sin \theta_{k0} + \Delta\theta_k \cos \theta_{k0}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{\cos \delta} \approx 1 + \frac{\delta^2}{2}. \quad (10)$$

将式(9)带入式(8), 可得;

$$\Delta\theta_k = \frac{m\lambda}{d \cos \theta_{k0}} \cdot \frac{\delta^2}{2}. \quad (11)$$

谱线最终经过焦距为 f' 的准直透镜会聚在狭缝处, 狭缝半高为 $\frac{h}{2}$, 对应半角 $\delta = \frac{h}{2f'}$, 光沿着色散方向偏移的距离 $\Delta\sigma$ 的表达式如式(12)所示:

$$\Delta\sigma = f' \Delta\theta_k = \frac{m\lambda}{8df' \cos \theta_{k0}} h^2. \quad (12)$$

同时, 光谱线的方程式为抛物线, 其曲率可以近似表示为:

$$r = \frac{df' \cos \theta_{k0}}{m\lambda}. \quad (13)$$

将光栅方程微分, 可得:

$$\Delta\lambda = \cos\theta_{k0} \frac{d}{m} \Delta\theta_k \quad (14)$$

将 $\Delta\theta_k$ 代入式(14)中,可以得到由光束锥面衍射引起的沿出射狭缝高度的谱线宽度 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \lambda \frac{h^2}{8f^2} \quad (15)$$

式中, $\Delta\lambda$ 代表光线沿狭缝高度的谱线弯曲, λ 代表入射光束的波长, f 代表系统的焦距, h 代表狭缝高度。

由式(15)可以知道,谱线弯曲会受到系统焦距、狭缝高度和波长等因素的影响。通过上式还可以知道,谱线弯曲与入射波长和狭缝高度成正比,与系统焦距成反比。增大入射狭缝高度或者缩短系统焦距都会加剧谱线弯曲,降低仪器的光谱分辨率。

3 光学系统设计

3.1 三光栅单色仪光学系统

相比于透射式系统,反射式光学系统不会产生色差,不受光谱范围的限制,可以避免系统因能量衰减而产生的谱线展宽,所以在设计时,优先考虑反射式光学系统。结合上述光学系统指标,采用非对称 Czerny-Turner 型光路结构。图2为单色仪三维和二维光路结构图,高稳定性的氙灯光源发出的复色光线经由入射狭缝,折转反射镜入射到准直物镜,经过某一角度光栅色散,获得对应波长的单色光,入射到会聚物镜。基于光栅方程,当光栅转台的转动角度范围为 $7.030^\circ \sim 76.336^\circ$ 时,可以覆盖 $185 \sim 900 \text{ nm}$ 的光谱范围^[14-21]。

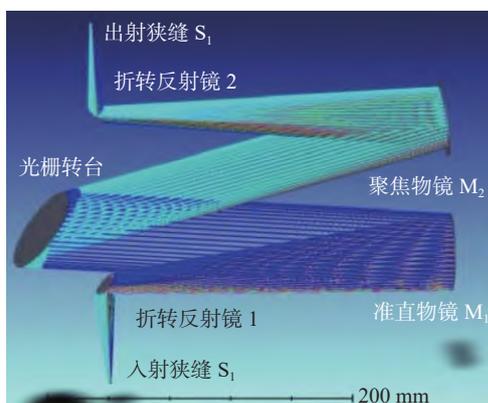


图2 单色仪光路结构图

Fig. 2 Optical path structure of the monochromator

图3为单色仪的机械结构图,单色仪采用了高精度光栅转台,其电机的转角精度可以达到 0.001° ,以保证仪器的波长精度满足指标要求。为抑制仪器内部的杂散光,避免因能量弱造成的谱线展宽,装配时仪器内壁和夹具均做发黑处理,吸收仪器内部的漫反射光和杂散光^[22-23]。

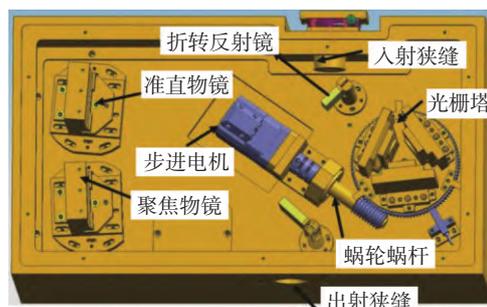


图3 单色仪机械结构图

Fig. 3 Mechanical structure of the monochromator

从图2~图3中可以看出,单色仪光路之间无遮拦,视场完整。在设计时,不设置狭缝以获得尽可能大的光通量。点列图可以表征物面某点经过存在像差的光学系统后的弥散分布状态,因此以不同波长点列斑 RMS 的分开程度作为标准,评价系统的光谱分辨率。图4(彩图见期刊电子版)为 ZEMAX 软件中经过优化后的光路在 365 nm 、 404 nm 、 435 nm 、 546 nm 、 724 nm 等波长处的点列图。箭头方向为狭缝高度方向,垂直狭缝高度为狭缝宽度方向,不同波长的光沿着狭缝宽度的方向色散。

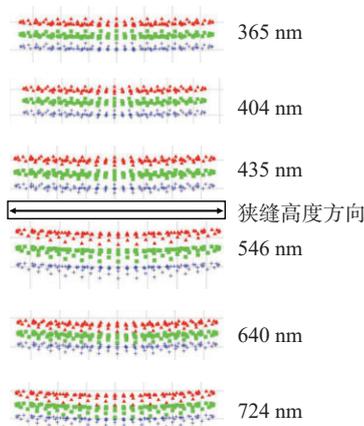


图4 不同波长处的点列图

Fig. 4 Point diagram at different wavelengths

图4中不同颜色的点列斑表示不同波长光在

像面会聚而成的光斑, 365 nm 处的红色点列斑表示波长为 364.9 nm 的光束在像面处的光斑, 绿色点列斑表示波长为 365 nm 的光束在像面处的光斑, 蓝色点列斑表示波长为 365.1 nm 的光束在像面处的光斑。可见, 波长相差 0.1 nm 的光在经过单色仪后完全分开, 两个点斑之间不存在重叠, 即不同波长的光线被完全分离。同理, 波长为 404 nm、435 nm、546 nm、640 nm 和 724 nm 的点列斑之间也不存在重叠的情况。由此可知, 单色仪在 185~900 nm 波段范围内的分辨率优于 0.1 nm, 满足系统在全波段全视场的指标要求。同时, 由点列图可以看出, 随着波长的增大, 谱线弯曲程度增大, 系统的光谱分辨力降低。

3.2 光阑优化模拟分析

光阑可以对光学系统中的光束进行限制, 将

光阑片贴近狭缝时, 其限制了狭缝高度上的通光量, 从而改变了狭缝高度。下文通过对光阑高度进行优化, 研究狭缝高度对谱线弯曲和光谱分辨率的影响。

在相同的系统参数设置下, 固定狭缝宽度为 10 μm , 在光路中模拟不同的光阑, 研究狭缝高度对谱线弯曲的影响。设置 4 mm、6 mm、8 mm 和 10 mm 四个不同高度的光阑, 对 365 nm、404 nm、435 nm、546 nm、640 nm 以及 724 nm 波长的光边缘视场进行追迹, 以此来表征不同光阑高度下的谱线弯曲程度, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 当波长一定时, 光阑高度越低, 谱线弯曲的程度越小, 系统光谱分辨率越高; 当光阑高度一定, 波长越长, 谱线弯曲的程度越大, 系统的光谱分辨率越低。

表 1 不同光阑高度下边缘视场各个波长的点列斑 RMS 半径值

Tab. 1 RMS radius of the spot array at each wavelength of the edge field-of-view under different aperture heights (μm)

光阑高度/mm	365 nm	404 nm	435 nm	546 nm	640 nm	724 nm
10	463.356	464.985	466.487	469.361	473.763	483.237
8	445.155	446.408	447.574	449.903	463.947	470.064
6	427.317	428.212	429.059	430.771	436.474	437.252
4	409.840	410.396	410.943	412.967	419.346	429.801

4 实验验证

图 5(彩图见期刊电子版)为实际装调光路后光谱分辨率的测试场景, 图 6 为不同高度的光阑片。

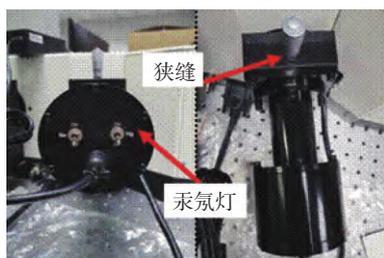


图 5 测试场景图

Fig. 5 Test scenario diagram

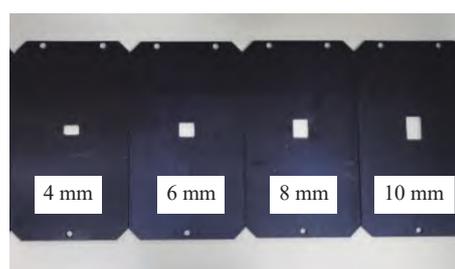


图 6 不同高度的光阑片

Fig. 6 Apertures with different heights

在测试时, 将实际谱线的半高峰宽定义为仪器的光谱分辨率。选用汞灯特征波长分别为 365.016 nm、404.656 nm、435.833 nm、546.075 nm、640.225 nm 以及 724.511 nm 对单色仪的光谱分辨率进行测试。将汞灯固定在入射狭缝处, 调整狭缝宽度为 10 μm , 通过在狭缝前设置高度不同的光阑片, 来改变狭缝的高度。在狭缝高度分别

为 10 mm、8 mm、6 mm 和 4 mm 时, 对汞灯谱线

进行扫描, 结果见图 7~8(彩图见期刊电子版)。

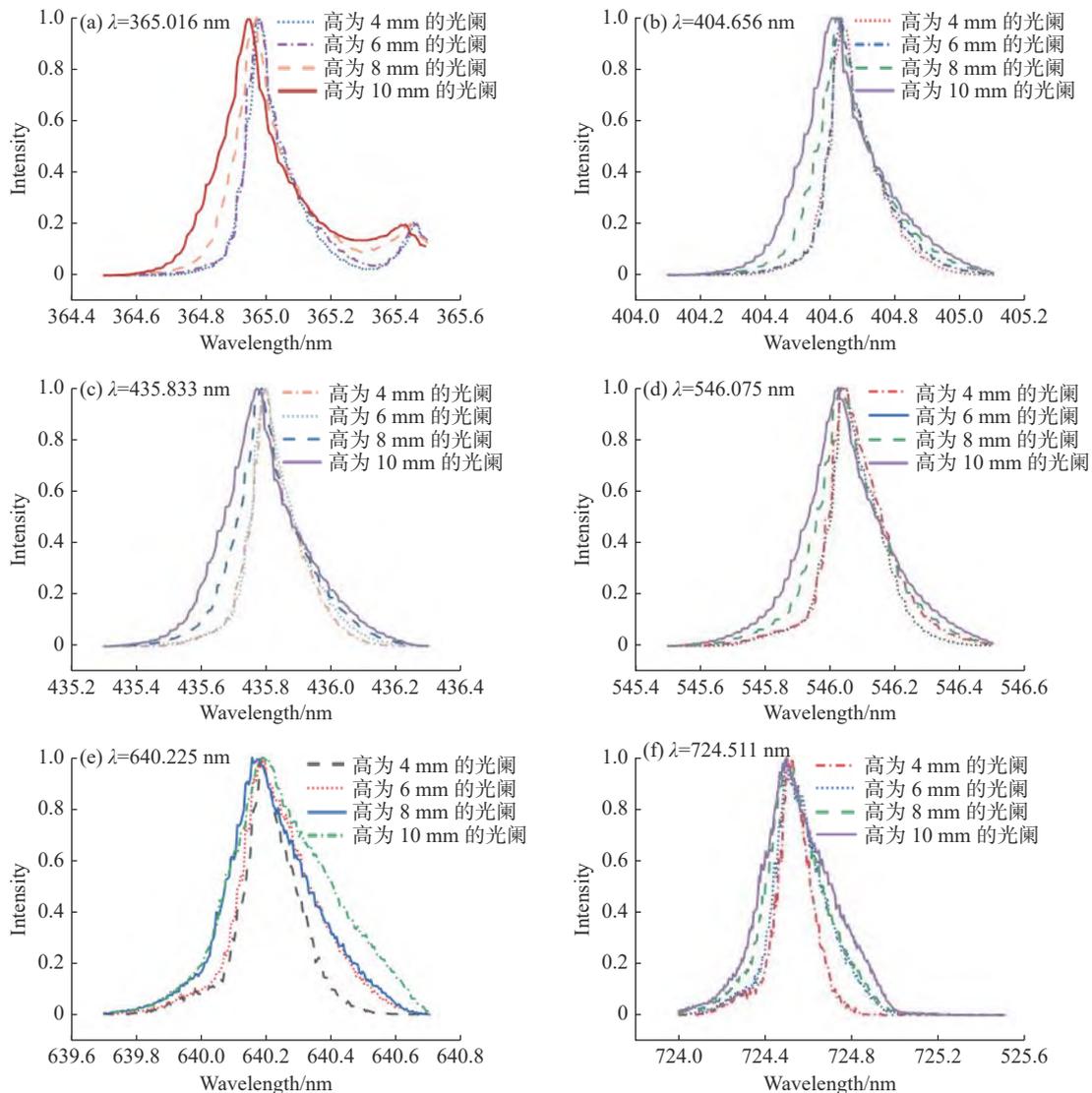


图 7 不同光阑高度下, 几种波长入射光的测试谱线

Fig. 7 Test spectral lines of mercury lamp with different wavelengths at different aperture heights

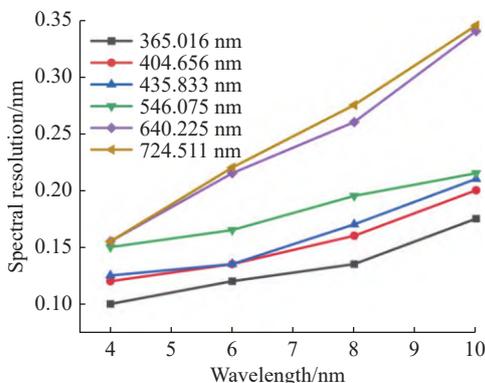


图 8 不同波长和光阑高度对应的光学系统光谱分辨率

Fig. 8 Spectral resolution of the optical system corresponding to different wavelengths and aperture heights

从图 7 可知, 当入射波长 λ 一定时, 光阑高度越小, 仪器测得的汞灯谱线越尖锐, 光谱分辨率越高, 调整光阑高度, 仪器的光谱分辨率可在 0.1 nm~0.32 nm 范围内调节。同时, 当光阑高度一定时, 波长越长, 光谱分辨率越差, 由狭缝造成的谱线弯曲越严重。通过减少入射狭缝的高度可以修正光学系统的光谱分辨率, 有利于提高仪器的实际性能。然而, 减小狭缝高度不可避免地会导致光谱仪通光量减少, 同理, 减少狭缝宽度来提高光谱仪的分辨率也会导致仪器通光量减少。光谱分辨率和通光量是相互矛盾的, 在实际应用中, 需要针对应用场景的不同参数要求, 来对二者进行权衡, 以达到最佳的应用效果。

仪器实际光谱分辨率与设计结果中 0.1 nm 的光谱分辨率并不相符。这是因为在实际情况中,由于光栅缺陷引起的光栅衍射分辨率下降、谱线弯曲以及光学反射面的加工误差都会影响光谱仪器的分辨率,同时也会使得狭缝高度对谱线弯曲的影响不符合公式推导的情况。

5 结 论

本文基于矢量光栅方程,研究了入射狭缝高度对光谱仪器谱线弯曲的影响。给出了谱线弯曲

同波长、狭缝高度的解析表达式。仿真和实验验证了入射狭缝高度对 Czerny-Turner 式单色仪光谱分辨率的影响。实验结果表明:降低狭缝高度,可以抑制谱线弯曲,有效优化单色仪的光谱分辨率。在此基础上,本文还提出了一种通过光阑片优化狭缝高度的方法,可以有效抑制谱线弯曲,对单色仪的光谱分辨率进行优化。发现光阑高度由 10 mm 变化至 4 mm 时,可以在 0.1~0.32 nm 范围内调节单色仪的光谱分辨率。本文研究结果对单色仪的研制和装调具有重要的理论指导作用,也为同类型仪器提高性能提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] 武志昆,石恩涛,王咏梅. 消谱线弯曲 PGP 型成像光谱仪系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(6): 20200433.
WU ZH K, SHI E T, WANG Y M. Design of PGP imaging spectrometer with eliminating spectral line bending[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20200433. (in Chinese)
- [2] 张尹馨,段文浩,李婉卓. 结合三反消像散光学系统的中阶梯光栅光谱仪设计[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2022, 55(5): 519-526.
ZHANG Y X, DUAN W H, LI W ZH. Design of echelle spectrometer with a three-mirror anastigmat system[J]. *Journal of Tianjin University (Natural Science and Technology)*, 2022, 55(5): 519-526. (in Chinese)
- [3] 曾英杰,支瑜亮,范贤光,等. 小型一体式针尖增强拉曼光谱仪设计与评价[J]. *分析化学*, 2022, 50(1): 39-46.
ZENG Y J, ZHI Y L, FAN X G, et al.. Design and evaluation of small integrated point-enhanced Raman spectrometer[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 50(1): 39-46. (in Chinese)
- [4] 程军杰,曹智,杨灿然,等. 便携式远程激光诱导击穿光谱系统及其定量分析性能[J]. *应用化学*, 2022, 39(9): 1447-1452.
CHENG J J, CAO ZH, YANG C R, et al.. Portable remote laser-induced breakdown spectroscopy system and its quantitative analysis performance[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(9): 1447-1452. (in Chinese)
- [5] 贾辉,姚勇. 微小型光栅光谱仪光学系统的特点与光谱分辨率的提高[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(8): 1653-1656.
JIA H, YAO Y. Characteristics of typical optical systems with diffractive gratings of micro-spectrometers and improvement of spectrometer's resolution[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(8): 1653-1656. (in Chinese)
- [6] 代锦辉. 基于修正岭估计模型提高成像光谱仪光谱分辨率[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
DAI J H. Improving spectral resolution of imaging spectrometer based on modified ridge estimation method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 毛靖华,王咏梅,石恩涛,等. 星载高光谱成像光谱仪狭缝函数测试方法的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 1286-1290.
MAO J H, WANG Y M, SHI E T, et al.. Study on the slitfunction test method based on hyperspectral imaging instrument[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(4): 1286-1290. (in Chinese)
- [8] 陈洪福,巩岩,骆聪,等. 消谱线弯曲棱镜-光栅型成像光谱仪设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 09220004.
CHEN H F, GONG Y, LUO C, et al.. Design of prism-grating imaging spectrometer with eliminating spectral line curvature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 09220004. (in Chinese)
- [9] 王凯平. 基于谱线展宽和线移方法的激光等离子体状态诊断研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
WANG K P. Study on laser produced plasma state diagnosis based on spectral line broadening and shifting methods[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020. (in Chinese)
- [10] 徐艳,李春来,刘世界,等. 均匀分布狭缝阵列编码光谱成像系统的仿真与验证[J]. *半导体光电*, 2021, 42(4): 562-567.
XU Y, LI CH L, LIU SH J, et al.. Simulation and verification of uniformly distributed-slit array coded spectral imaging

- system[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(4): 562-567. (in Chinese)
- [11] 李继峰. 多角度双波段大气探测光谱仪设计与研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2022.
LI J F. Design and research of multi-angle and double-band atmospheric sounding spectrometer[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [12] 张晓龙, 范欣雨. 消像散Czerny-Turner光谱成像系统的设计[J]. 光学技术, 2020, 46(1): 33-40.
ZHANG X L, FAN X Y. Design of anastigmatic Czerny-Turner spectral imaging system[J]. *Optical Technique*, 2020, 46(1): 33-40. (in Chinese)
- [13] 刘彪, 张敏, 李东波. 一种C-T结构改进型光谱仪的光路结构设计[J]. *机械设计与制造工程*, 2022, 51(2): 15-20.
LIU B, ZHANG M, LI D B. Optical path structure design of a C-T structure improved spectrometer[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2022, 51(2): 15-20. (in Chinese)
- [14] 吴云鹏, 王军. M型Czerny-Turner光谱仪结构优化设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1130002.
WU Y P, WANG J. Structural optimization design and analysis of M-type Czerny-Turner spectrometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1130002. (in Chinese)
- [15] 张佳伦. 大视场自由曲面成像光谱仪光学系统设计方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2022.
ZHANG J L. Research on design method of optical system of large field of view imaging spectrometer with freeform surface[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [16] 王宏霞. 基于数字微镜的原子荧光分析测试方法及软件研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
WANG H X. Research on analytical & test methods and software of atomic fluorescence spectrometry based on digital micromirror device[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [17] 张松涛, 王樱蕙, 张洪杰. Nd³⁺离子敏化的荧光纳米探针用于近红外二区血管成像[J]. 应用化学, 2022, 39(4): 685-693.
ZHANG S T, WANG Y H, ZHANG H J. Nd³⁺ sensitized fluorescent nanoprobes for vascular imaging in the second near infrared window[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(4): 685-693. (in Chinese)
- [18] 吴长坤, 张为, 郝亚喆. 可见/近红外实时成像光谱仪控制系统设计[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 348-354.
WU CH K, ZHANG W, HAO Y ZH. Design of a control system for a visible/near-infrared real-time imaging spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 348-354. (in Chinese)
- [19] 范纪泽, 李博, 张璐, 等. 应用于作物荧光检测的改进型Offner光谱仪设计[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1459-1467.
FAN J Z, LI B, ZHANG L, et al.. Design of an improved Offner spectrometer for crop fluorescence detection[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1459-1467. (in Chinese)
- [20] 单秋莎, 谢梅林, 刘朝晖, 等. 制冷型长波红外光学系统设计[J]. 中国光学, 2022, 15(1): 72-78.
SHAN Q SH, XIE M L, LIU ZH H, et al.. Design of refrigerated LWIR optical system[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 72-78. (in Chinese)
- [21] 李寒霜. 紫外—真空紫外太阳光谱仪及光谱/辐射定标研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2019.
LI H SH. Study on UV-VUV solar spectrometer and spectral/radiation calibration[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [22] 蔡东浩, 李雅灿, 魏立冬, 等. 高光谱成像仪中曲面棱镜的装调公差研究[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0608001.
CAI D H, LI Y C, WEI L D, et al.. Fabricating tolerance of curved prisms in hyperspectral spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0608001. (in Chinese)
- [23] 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.
YANG J, YIN L, YAO X F, et al.. Optical design and stray light suppression of a new portable echelle spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0812001. (in Chinese)

作者简介:



张靖(1997—),女,山西吕梁人,硕士研究生,2020年于太原理工大学获得学士学位,主要从事光谱仪器的光学设计的研究。E-mail: ciompzxx@163.com



姚雪峰(1985—),男,吉林永吉人,博士,副研究员,2009年于吉林大学获得硕士学位,2018年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事新型光谱仪器以及天文光谱仪器方面的研究。E-mail: yaoxf@ciomp.ac.cn