

宽光谱高分辨率光谱分析系统设计

杜杉^{1,2}, 张国玉¹, 韩欣欣², 徐阳², 迟明波^{2**}, 吴一辉^{2*}

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 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

摘要 结合光学像差理论和光栅色散原理, 采用像元分辨率匹配方法, 提出了一种宽光谱高分辨率光栅光谱仪初始结构设计方法。在综合考虑机械加工装调和光谱仪通光效率的基础上, 将其应用于波长为 200~1000 nm、分辨率为 0.01 nm 的 Czerny-Turner 型光栅光谱仪光学系统初始结构设计中。运用 ZEMAX 软件对光谱仪光学结构进行了仿真和优化, 结果表明, 该设计方法可以同时兼顾光谱探测范围、分辨率、通光孔径等各项设计要求, 仪器设计性能均能满足各项指标要求。

关键词 光谱学; 光栅光谱仪; 初始结构; 像元匹配; ZEMAX

中图分类号 O439; O433.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.083003

Design of Wide-Spectrum High-Resolution Spectral Analysis System

Du Shan^{1,2}, Zhang Guoyu¹, Han Xinxin², Xu Yang², Chi Mingbo^{2**}, Wu Yihui^{2*}

¹ School of Optical Photoelectric Engineering, China Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² State Key Laboratory of Applied Optics, China Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract With the help of optical aberration theory, grating dispersion theory and pixel resolution matching theory, we design an initial structure of a wide-spectrum high-resolution grating spectrometer. Based on the comprehensive consideration of the mechanical processing and the efficiency of the spectrometer, this method is applied to the initial structural design of the optical system of a Czerny-Turner grating spectrometer with a wavelength range from 200 nm to 1000 nm and a resolution of 0.01 nm. The ZEMAX software is used to simulate and optimize the optical structure of this spectrometer. The results show that this design method can simultaneously meet various design requirements such as spectral detection range, resolution and clear aperture, so that the instrument design performance can meet the requirements of various indicators.

Key words spectroscopy; grating spectrometer; initial structure; pixel match; ZEMAX

OCIS codes 300.6190; 120.6200

1 引言

现代光谱分析技术^[1-4]作为一种成熟的检测、分析手段, 通过对物质光谱的探测与研究可以完成对物质化学组成及其含量的分析。光谱分析技术具有测量范围大、速度快及分析精度高等优势^[5]。为了满足更多实验及应用研究的需求, 光谱分析仪器也在进行不断优化和改进, 色散系统的模式逐步从棱

镜色散过渡至光栅色散, 光栅光谱仪具有原理简单、性能稳定、色散均匀、光谱分辨率高、谱线弯曲小、色畸变小等优点^[6], 随着光栅刻划技术的逐步改善, 光栅光谱仪目前已经在光谱分析仪器^[7-10]中占据了主导地位^[5]。在光栅光谱仪中, 光谱仪色散率越高, 系统的像元分辨率越高, 分辨率越高导致能够探测到的光谱波段越窄, 因此对光栅光谱仪来说宽光谱范围和高分辨率存在一定的矛盾关系。如天津港东

收稿日期: 2018-10-31; 修回日期: 2018-11-27; 录用日期: 2019-01-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61605198)、吉林省科技发展计划项目优秀青年人才基金(20180520230JH)

* E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn; ** E-mail: chimb@sklao.ac.cn

WGD-8 组合式多功能光栅光谱仪采用两块光栅使探测波段范围达到 200~800 nm, 探测分辨率为 0.1 nm; 北京赛凡 71GF10 定光栅光谱仪采用双狭缝, 双光栅使探测波段范围达到 400~1000 nm, 探测分辨率为 0.5 nm。为解决宽光谱范围和高分辨率之间的矛盾, 一般在光谱仪中设置多块不同光栅常数的光栅^[11], 使光谱仪具有不同测量范围和不同分辨率。但这种方法依然不能同时获得高分辨率和宽光谱范围。为进一步解决分辨率与光谱探测范围之间的矛盾, 利用扫描机构使光栅旋转, 通过改变光栅上入射光线与法线的夹角来改变探测器的光谱测量范围, 从而近似连续地实现宽波段高分辨率扫描。因此在该类光栅光谱仪设计中, 不同的波长范围对应不同的光学结构, 目前在光谱仪光学设计中大多数参数选择以中心波长为准, 而忽略边缘波长的光学结构。因此本文提出一种初始结构计算方法并采用像元分辨率匹配方法, 在初始结构参数选择过程中兼顾中心波长与边缘波长处的光学结构, 从而在全波段上均获得良好的光学性能, 在完成初始参数计算后运用 ZEMAX 软件对其进行仿真和优化, 完成光学色散系统的设计。

2 光谱仪基础原理及初始结构计算方法

2.1 光谱仪基础原理

反射式平面衍射光栅作为光谱仪中重要分光元件, 影响仪器光学系统的整体性能, 光栅方程为

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

式中: d 为光栅常数; m 为光栅衍射级次; i 为入射角; θ 为衍射角; λ 为波长。在光栅的色散面内, 平行光入射到光栅上, 刻槽对光束发生衍射作用, 不同波长的光线被光栅衍射后方向各不相同, 并依次排列, 形成光谱^[12], 这就是光栅光谱仪的分光原理。

目前平面光栅光谱仪光路结构大多采用 Czerny-Turner 光路, 即用两面凹面反射镜分别作为准直镜和聚焦镜, 采用这种光路的优点是不仅可以避免二次或多次衍射^[6], 而且便于光学元件的加工与装调^[13]。本文此次设计的光谱仪也采用 Czerny-Turner 型结构, 如图 1 所示。入射光线分别经过狭缝 L、准直镜 M_1 、衍射光栅 G、聚焦镜 M_2 最后成像于 CCD 探测器 L' 上, 图中 O 和 E 分别为两面反射镜的曲率中心, H_1 和 H_2 分别为准直镜和聚焦镜的离轴量, h 为光栅长度, β 为像面倾斜角度, ϕ 为光栅入射角和衍射角的夹角, 其关系满足式

$$i + \phi = \theta, \quad (2)$$

ϕ_1 和 ϕ_2 分别为光谱仪中准直镜和聚焦镜的离轴角, ϕ_1 、 ϕ_2 与 ϕ 的关系满足

$$\phi_1 + \phi_2 = \phi. \quad (3)$$

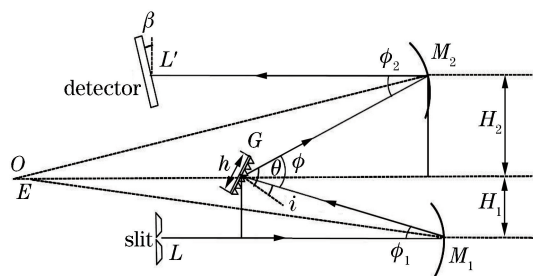


图 1 Czerny-Turner 型光谱仪结构图

Fig. 1 Schematic of Czerny-Turner spectrometer structure

由(1)式和(2)式可得

$$d[\sin i + \sin(\phi + i)] = m\lambda, \quad (4)$$

对(4)式两边 i 和 λ 进行微分得

$$\Delta i \cos i + \Delta i \cos(\phi + i) = \frac{m \Delta \lambda}{d}, \quad (5)$$

整理得

$$\Delta i [\cos i + \cos(\phi + i)] = \frac{m \Delta \lambda}{d}. \quad (6)$$

联立(4)~(6)式可知: 随着入射角的改变, 像面波长相应改变, 从而实现光谱扫描。光栅扫描机构最终采用精密角位移平台, 扫描方式采取分段线性扫描^[5], 将扫描出来的谱图采用算法拼接技术将其拼接成完整的高分辨率谱图。

2.2 光谱仪初始结构计算方法

在计算光谱仪初始结构时, 不仅考虑光学像差, 还要考虑机械加工装调的可行性和光谱仪的通光口径。鉴于此, 提出一种宽光谱高分辨率的光栅光谱仪初始结构计算方法。在扫描光栅光谱仪中, 入射狭缝、准直镜、聚焦镜、探测器像面位置保持不变, 通过转动光栅改变光栅平面法线位置, 进而通过改变入射角和衍射角来实现探测器像面上的光谱扫描。在传统的光学设计中, 通常仅以中心波长处的像差等性能指标为优化目标来确定初始结构参数, 但在扫描光栅光谱仪的初始结构参数选择中, 同样需要考虑边缘波长处的光学性能指标。本研究将边缘波长情况考虑到计算范围内, 选择合适的初始结构参数, 在消除中心波长处像差影响的同时, 保证边缘波长处具有良好的光学性能。

Czerny-Turner 型光谱仪中的准直反射镜和聚焦反射镜均在离轴条件下使用会产生一定的彗差^[14], 彗差不仅打破了成像的对称性, 使谱线单边扩散^[6], 而且降低了光谱分辨率, 容易造成假谱线,

因此必须将彗差校正到合理的水平之内^[14]。Shafer提出了消除彗差的方法^[15],即光路满足

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\sin(\phi_1/2)}{\sin(\phi_2/2)} = \left(\frac{\cos \theta}{\cos i}\right)^3 \quad (7)$$

为保证系统在 200~1000 nm 的探测波段范围内均具有良好的光学性能,综合考虑,在计算初始结构时将 500 nm 作为中心波段,其中光谱仪准直镜离轴角 ϕ_1 、聚焦镜离轴角 ϕ_2 、初始入射角 i 及衍射角 θ 的关系满足(1)~(3)式。

在满足(7)式消除彗差的条件下,选取中心波长初始入射角 i 的取值范围为 $10^\circ \sim 25^\circ$,分度值为 0.1° ,根据光栅衍射方程(1)式可计算出不同中心波长初始入射角对应中心波长的衍射角 θ ,根据(2)式求出衍射角与初始入射角的差值 ϕ ,当 ϕ 为定值时,在中心波长消彗差的情况下可联立(3)式和(7)式分别计算出准直镜的离轴角 ϕ_1 和聚焦镜的离轴角 ϕ_2 。在光栅转动下,入射角和衍射角的夹角 ϕ 不

变,利用中心波长处入射角和衍射角的变化,计算出边缘波长入射角和衍射角,确定初始结构。由此光栅公式变为

$$d [\sin \theta + \sin(\theta - \phi)] = m\lambda \quad (8)$$

根据(8)式求出边缘波长在 200 nm 和 1000 nm 处的入射角和衍射角。如图 2(a)和(b)所示,当中心波长在 500 nm 处初始入射角选取 $13^\circ, 15^\circ, 18^\circ, 20^\circ$ 时,边缘波长在 200 nm 处和 1000 nm 处对应衍射角的关系图,从图中可知,随着中心波长为 500 nm 处初始入射角逐渐增大,边缘波长在 200 nm 处和 1000 nm 处衍射角逐渐减小。图 1 中光栅长度为 h ,故聚焦镜通光口径 T 和衍射角 θ 满足

$$T = (h/2) \cos \theta \quad (9)$$

通过(9)式可知:衍射角越大,聚焦镜的通光口径越小,系统光通量越小,探测灵敏度越低,同时,未被利用的光信号会变为杂散光信号,影响系统的检测精度。

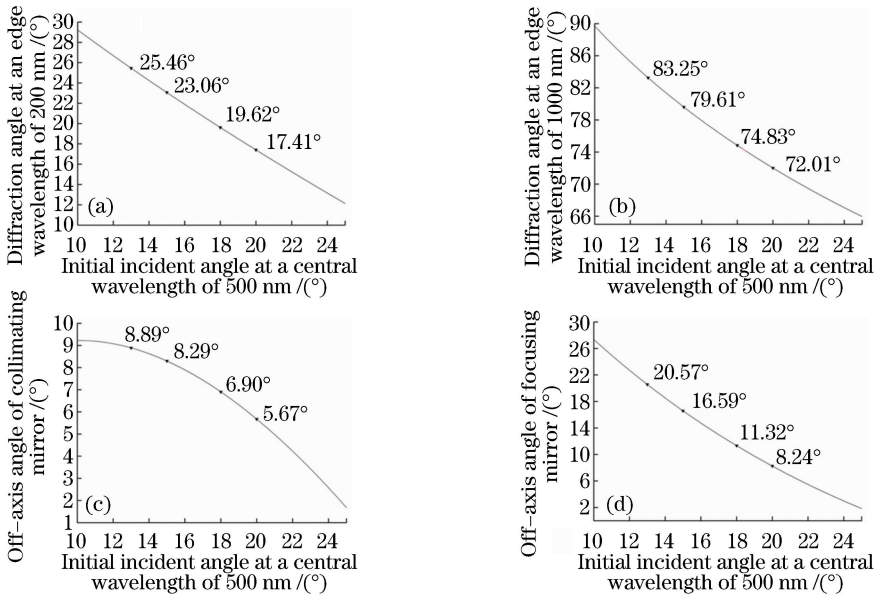


图 2 500 nm 处初始入射角对衍射角及聚焦镜和准直镜离轴角的影响。(a)边缘波长 200 nm 处衍射角; (b)边缘波长 1000 nm 处衍射角;(c)准直镜离轴角;(d)聚焦镜离轴角

Fig. 2 Effects of initial incident angle at 500 nm on diffraction angle and off-axis angles of focusing mirror and collimating mirror. (a) diffraction angle at an edge wavelength of 200 nm; (b) diffraction angle at an edge wavelength of 1000 nm; (c) off-axis angle of collimating mirror; (d) off-axis angle of focusing mirror

综上所述,在 200 nm 处,系统的衍射角较小,通光孔径较大,对系统光通量影响相应较小,但在边缘波长 1000 nm 处,衍射角较大,通光孔径较小,对系统光通量影响较大。如图 2(b)所示,在 1000 nm 处,随着中心波长处初始入射角增大,边缘波长处的衍射角相应减小,例如中心波长入射角为 13° 和 15°

时,边缘波长处衍射角分别为 83.25° 和 79.61° ,其衍射角较大,均接近 90° 。当衍射角等于 90° 时,入射光线不能通过光栅衍射到聚焦镜。同时,利用 ZEMAX 软件仿真计算发现,对中心波长初始入射角 $13^\circ, 15^\circ, 18^\circ, 20^\circ$ 时的光学系统进行仿真,得到的不同 Y 方向方均根半径 Y_{RMS} 值如图 3 所示。

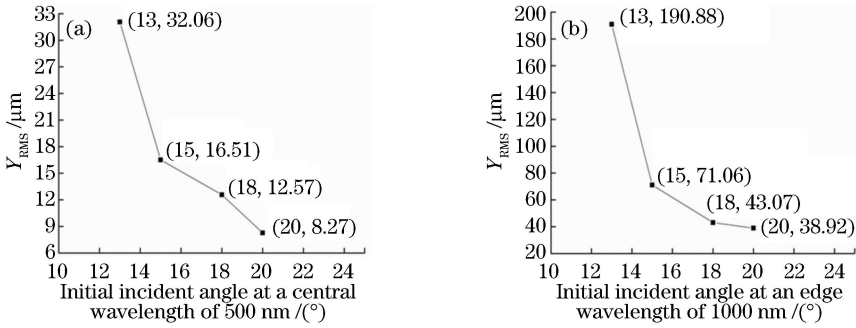


图3 不同初始入射角对应的 Y_{RMS} 值。(a)中心波长500 nm处初始入射角;(b)边缘波长1000 nm处初始入射角
Fig. 3 Y_{RMS} values for different initial incident angles. (a) Initial incident angle at a central wavelength of 500 nm;
(b) initial incident angle at an edge wavelength of 1000 nm

由图2(b)可知在中心波长初始入射角 13° 和 15° 时,边缘波长1000 nm处衍射角接近 90° 导致聚焦镜通光口径 T 降低,此时由图3(b)可知,边缘波长1000 nm处光学系统 Y_{RMS} 值过大,影响光学系统像差矫正和光谱仪的分辨率。因此综上所述,中心波长初始入射角不能过小。

图2(c)、(d)所示为中心波长500 nm初始入射角为 $13^\circ, 15^\circ, 18^\circ, 20^\circ$ 对应准直镜离轴角 ϕ_1 和聚焦镜离轴角 ϕ_2 的关系。由图中可知中心波长初始入射角逐渐增大,准直镜和聚焦镜的离轴角逐渐减小。再由图1可以看出准直镜和聚焦镜离轴角 ϕ_1 和 ϕ_2 越小,离轴量 H_1 和 H_2 就越小,离轴量过小会使光栅干涉入射光线影响光谱仪正常运作,因此中心波长初始入射角不能过大。

在设计光谱仪光学结构时,中心波长入射角的选择不仅影响边缘波长入射角和衍射角的变化,也影响聚焦镜的通光口径和整个系统的离轴量。所以中心波长的入射角选取不能过大或过小。考虑到后期机械设计的可实施性,避免光栅下的转台安装时和狭缝安装出现冲突,准直镜离轴角 ϕ_1 和聚焦镜离轴角 ϕ_2 不能过小。为方便机械设计,离轴量 H_1 、 H_2 要大于光栅转台、狭缝和探测器安装需求的长度。在初始结构满足中心波长的测试条件时,还需验证该结构在光通量、光学像差、机械结构调试等方面是否在边缘波长下也满足条件。最终选定光谱仪初始结构在中心波长500 nm时入射角 i 为 18° ,衍射角 $\theta=36.23^\circ$, $\phi=18.23^\circ$, $\phi_1=6.90^\circ$, $\phi_2=11.33^\circ$ 。

2.3 像元分辨率匹配确定入射狭缝大小

光谱分辨率是光谱仪的重要性能指标之一,评价光谱仪系统的光谱分辨率性能的主要参数是半波带宽,即光谱响应函数相对于中心波长50%时的光谱带宽^[12],半波带宽越窄说明光谱仪的分辨力越

高。研究计算入射狭缝、光电探测器等因素对分辨率的影响,对光谱仪的设计具有十分重要的意义。入射狭缝作为光谱仪的视场光阑,光谱成像系统焦平面上所成像的宽度由入射狭缝的宽度决定,其关系满足

$$\delta\lambda_s = \frac{a_1 d}{m f_1} \times \cos i, \quad (10)$$

式中:半波带宽 $\delta\lambda_s$ 为入射狭缝所成的像对应的波长范围;入射狭缝宽度 a_1 和光栅常数 d 成正比,与光栅衍射级次 m 和准直镜的焦距 f_1 成反比。

光电探测器由一系列像元组成,通过对探测器面上的光谱强度轮廓采样来获取光谱信息。由于探测器上每个像元都具有固定的大小,因此采样的值实际是像元内光能量的积分,采样过程符合采样定理^[16],即像元分布的空间频率应为光谱轮廓变化频率的2倍。 $\delta\lambda_c$ 为光电探测器单个像元成像对应的波长范围,本次所采用的探测器单个像元尺寸 p 为 $16 \mu\text{m}$,所以其关系满足

$$\delta\lambda_c = \frac{2dp}{m f_2} \times \cos \theta. \quad (11)$$

由(11)式可知:半波带宽 $\delta\lambda_c$ 和探测器单个像元尺寸 p 和光栅常数 d 成正比,与光栅衍射级次 m 和聚焦镜的焦距 f_2 成反比。联立(10)式和(11)式,当 $\delta\lambda_s = \delta\lambda_c$ 时,即可求出狭缝宽度 a_1 大小。对于光谱仪的探测器,选用像元尺寸为 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$,图像面积为 $25.6 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ 的探测器(DU970P, ANDOR, 英国), (11)式中的 p 为 $16 \mu\text{m}$, f_1 、 f_2 均为系统的焦距1000 mm。此时狭缝宽度 $a_1 = 27.14 \mu\text{m}$ 。

2.4 光谱仪结构参数

在光谱仪整个光学设计中,除了彗差对整个光学系统的影响,还要将球差控制在允许的范围之内,从而达到控制整个系统球差的目的。球差的相对孔

径应满足关系式

$$f \leq 256\lambda F^4, \quad (12)$$

式中: F 为光谱仪的 F 数, $F = f/D$, f 为光谱仪的有效焦距, D 为准直镜和聚焦镜的通光孔径。在考虑光谱仪像差的同时,还要考虑前置光学系统和光谱仪的数值孔径匹配以及光通过狭缝进入光谱仪后的通光效率,因此 F 数不能过小也不能过大。选择 F 数为 8, 通光孔径 $D = f/F$ 为 125 mm。至此可以得到光谱仪的基本光学元件特征参量,如表 1 所示,表 1 中 W 为狭缝的宽度, f_1 和 D_1 为准直镜的有效焦距和通光孔孔径, f_2 和 D_2 为聚焦镜的有效焦距和通光孔孔径, W' 和 n 为平面光栅的栅距和栅线对数。

表 1 光学元件特征参量

Table 1 Specification of the optical elements

Optical element	Parameter	Value
Slit	$W / \mu\text{m}$	27.14
	f_1 / mm	1000
Collimating mirror	D_1 / mm	125
	n	1800
Planar grating	W' / mm	110
	f_2 / mm	1000
Focusing mirror	D_2 / mm	125

确定光学元件特征参量后,再确定光谱仪光学系统的结构参数。因光栅衍射角随波长变化,为满足宽波段不同视场的像差校正,需要衍射角随波长、视场变化不敏感。由图 1 可知狭缝到准直镜的距离 L_{LM1} 和光栅到聚焦镜距离 L_{GM2} 需满足

$$L_{LM1} = L_{GM1} = f_1 / \cos(0.5\phi_1), \quad (13)$$

$$L_{GM2} = L_{L'M2} = f_1 / \cos(0.5\phi_2), \quad (14)$$

式中: L_{GM1} 为光栅到准直镜的距离; $L_{L'M2}$ 为 CCD 探测器到聚焦镜的距离。至此可以得到中心波长 500 nm 处的光学系统相关结构参数如表 2 所示。

表 2 光学系统初始结构参数

Table 2 Initial structural parameters of the optical system

Parameter	Value	Parameter	Value
L_{LM1} / mm	1002.63	i	18°
L_{GM1} / mm	1002.63	θ	36.23°
L_{GM2} / mm	1010.57	ϕ	18.23°
$L_{L'M2} / \text{mm}$	1010.57	ϕ_2	11.33°
ϕ_1	6.90°	β	0°

3 实验仿真结果

得到光学元件结构特征参量并计算出光学系统初始结构参数后,用 ZEMAX 软件对整个光谱仪系

统进行光学仿真并优化。在对光学系统进行光线追迹时,波长范围控制在 200~1000 nm,且探测器像面不能过大。为保证聚焦镜能够将光栅色散出来的光线全部入射到电荷耦合器件(CCD)探测器中,用 ZEMAX 软件仿真时,添加一组多重结构来模拟光栅旋转,可以令光栅表面随着不同入射波长改变位置,进而改变入射角和衍射角的大小。图 4 所示为光谱仪光学系统优化之前的初始结构图。

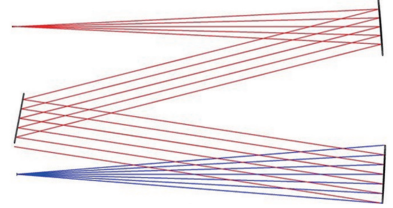


图 4 优化之前的初始结构图

Fig. 4 Initial structure diagram before optimization

为保证 200~1000 nm 光谱仪的分辨率达到要求,需使探测器接收不同波段范围子午方向的 Y_{RMS} 值均小于两个像元即 $32 \mu\text{m}$,在优化光学系统像散和场曲的同时还要满足机械加工、装调方面的需求,因此将像面倾角 β , CCD 探测器到聚焦镜的距离 $L_{L'M2}$, 准直镜和聚焦镜的曲率半径设置成变量。手动添加控制准直镜和聚焦镜曲率变化的优化操作数,通过优化函数对其进行优化。在优化过程中,为保证各个光学元件机械加工时的离轴量在装调允许范围之内,变动光栅到准直镜和到聚焦镜的距离 (L_{GM1} 和 L_{GM2}),以及变动后的光学系统像差仍保持不变。图 5 为优化完成后光路图。

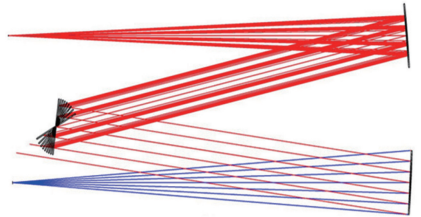


图 5 优化之后的光路图

Fig. 5 Optimized light path diagram

优化后的光学系统聚焦镜到 CCD 像面的距离是 1010.01 mm,像面倾角为 2.95° ,准直镜到光栅的距离 L_{GM1} 为 904.02 mm,光栅到聚焦镜的距离 L_{GM2} 为 905.89 mm,像面旋转角度为 2.96° 。且从 200~1000 nm 波段光学系统的子午方向 Y_{RMS} 值均小于 32 nm,且模拟仿真的光学系统能够在整个波段分辨出 2 组相距 0.01 nm 的波长,设计出来的光学系统能够清晰地分辨出 2 组不同的波长,说明整个系

统的分辨率达到甚至优于 0.01 nm,符合最初的设计条件。整体光学系统长 1008.35 mm,宽 286.53 mm,满足机械设计装调所需空间,由于整个光学系统需要权衡机械加工等各方面要求,因此在实际设计出来的光学系统的分辨率可能比理论计算出的稍微大一些,但已能达到分辨率 0.01 nm 的要求。如再增加入射角,改变 F 数、镜子曲率等可进一步提高光谱仪分辨率。

4 结 论

在光栅光谱仪设计中,通过旋转光栅实现光谱扫描,可以解决宽光谱范围与高分辨率之间的矛盾,但光栅转动在系统光学设计中会引入多重结构,导致不同探测波长处,系统光学结构不同。结合光栅色散原理以及光学像差理论所提出的初始结构计算方法可有效兼顾中心波长与边缘波长处系统的性能需求,从而使光谱仪初始结构在保证实现全波段光谱探测的基础上,尽可能提高系统成像质量,满足系统设计的要求,为后期优化设计打下良好的基础。

参 考 文 献

- [1] Chu X L, Yuan H F, Lu W Z. Research and applications of near infrared spectroscopy in China in recent years [J]. Analytical Instrumentation, 2006 (2): 1-10.
褚小立,袁洪福,陆婉珍.近年来我国近红外光谱分析技术的研究与应用进展[J].分析仪器,2006(2): 1-10.
- [2] Liu K L, Wang Y S, Zhang J P, *et al.* Progress in atomic spectrochemical analysis and its application [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30 (8): 2248-2252.
刘克玲,王云山,张金平,等.原子光谱分析的进展及其应用[J].光谱学与光谱分析,2010,30(8): 2248-2252.
- [3] Wang S, Zeng H S. Real-time *in vivo* Raman spectroscopy and its clinical applications in early cancer detection [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(2): 0207002.
王爽, Zeng Haishan.实时拉曼光谱分析技术及其在临床早期癌症检测中的应用[J].中国激光,2018, 45(2): 0207002.
- [4] Zhang X P, Chen J Z, Guo Q L, *et al.* The current development of laser-induced plasma spectral analysis technique [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(3): 656-662.

- 张晓萍,陈金忠,郭庆林,等.激光等离子体光谱分析技术的发展现状[J].光谱学与光谱分析,2008, 28(3): 656-662.
- [5] Chi M B. Development of array slit coding spectrometer and its key technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
迟明波.阵列狭缝编码光谱仪的研制及其关键技术[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2016.
- [6] Peng X F, Wei K H, Liu Y P, *et al.* Optical system design of Czerny-Turner spectrometer with high resolution[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(10): 156-160.
彭雪峰,魏凯华,刘艳萍,等.高分辨率 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计[J].光子学报,2014, 43(10): 156-160.
- [7] Han W S, Wang L Q. Application of spectral technologies in analyzing pigments of colored relics [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32 (12): 3394-3398.
韩炜师,王丽琴.光谱分析技术在彩绘文物颜料分析中的应用[J].光谱学与光谱分析,2012,32(12): 3394-3398.
- [8] Hao A H, He F T, Li L B, *et al.* Design of wide-field and flat-spectrum holographic concave grating spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0230003.
郝爱花,贺锋涛,李立波,等.宽场平谱面全息凹面光栅光谱仪的设计[J].光学学报,2018,38(2): 0230003.
- [9] Tang B. Research of key technologies on water quality multi-parameter measurement system based on UV-VIS spectroscopy[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
汤斌.紫外-可见光谱水质检测多参数测量系统的关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [10] Rong X, Huang S S, Liu H. Progress in application of Raman spectroscopy on the cell biology studies[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2010, 19(1): 136-142.
荣曦,黄庶识,刘红.拉曼光谱分析技术在细胞生物学研究中的应用进展[J].激光生物学报,2010,19 (1): 136-142.
- [11] Cao H X, Zhao Y F, He M, *et al.* Design of small-size high resolution echelle grating spectrometer with divided spectral coverage [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1105002.
曹海霞,赵英飞,何淼,等.小型分段式高分辨率中

- 阶梯光栅光谱仪的设计[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1105002.
- [12] Xue Q S. The study on limb imaging spectrometer for space-based atmospheric remote sensing [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
薛庆生. 用于空间大气遥感的临边成像光谱仪研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [13] Xue Q S, Wang S R, Lu F Q. Aberration correction of Czerny-Turner imaging spectrometer carried by satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 35-40.
薛庆生, 王淑荣, 鲁凤芹. 星载车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正的研究[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 35-40.
- [14] Liu J P, Tang Y, Huang G, *et al.* Design method of optical system of improved Czerny-Turner imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322007.
刘健鹏, 唐义, 黄刚, 等. 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322007.
- [15] Shafer A B, Megill L R, Droppelman L. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. Journal of the Optical Society of America, 1964, 54(7): 879-886.
- [16] Han C Y. Basic theory of information optics and its application[M]. Changchun: Changchun Publishing House, 1989.
韩昌元. 信息光学基础理论及其应用[M]. 长春: 长春出版社, 1989.