

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615026

基于衍射调控与柱透镜协同的 Czerny-Turner 光谱仪宽波段像散校正方法*

王腾飞, 陶传义, 邹宇航, 杨文博

(重庆理工大学物理与新能源学院 重庆 400054)

摘 要: Czerny-Turner (C-T) 光谱仪因结构紧凑、稳定性好、色散均匀等优势, 被广泛应用于近红外光谱检测领域, 但球面反射镜的离轴使用会引入严重像散, 导致宽波段成像质量下降、能量利用率低、光谱分辨率受限。针对这一难题, 提出一种基于衍射调控与柱透镜协同的宽波段复合消像散方法。该方法利用离轴抛物面反射镜实现光源准直, 通过非对称入射狭缝引入夫琅禾费单缝衍射, 使子午方向光束产生可控发散、弧矢方向保持准直状态, 从而调控光束在两个正交方向的传输特性; 在此基础上, 在聚焦镜与探测器之间引入柱透镜, 利用其单向会聚特性补偿弧矢方向剩余像散, 实现全波段像散校正。该研究建立子午面与弧矢面光路传输模型, 推导柱透镜关键参数的解析表达式, 完成 1 250~1 650 nm 近红外波段光谱仪的光学设计与优化。仿真结果表明, 相较于传统 C-T 结构, 该复合消像散方案可使系统在 1 550 nm 处弧矢、子午方向光斑均方根 (RMS) 半径分别降低 99.42% 与 90.42%, 像散得到显著抑制。样机实验测试显示, 光谱仪在中心波段 (1 550 nm 附近) 分辨率优于 0.5 nm, 边缘波段 (1 310 nm、1 610 nm) 分辨率优于 0.63 nm, 波长重复性优于 0.3 nm, 全波段扫描速度达 30.53 nm/s。该方法成本低、易工程化, 在保留传统 C-T 结构优势的同时显著提升宽波段成像质量, 可为高性能近红外光谱仪设计提供有效技术参考。

关键词: 光学设计; C-T 光谱仪; 消像散; 单缝衍射; 柱透镜; 复合方法

中图分类号: TH703 TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Broadband astigmatism correction method for Czerny-Turner spectrometer based on synergistic diffraction control and cylindrical lens

Wang Tengfei, Tao Chuanyi, Zou Yuhang, Yang Wenbo

(School of Physics and New Energy, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Czerny-Turner (C-T) spectrometers are widely used in near-infrared spectral detection due to their compact structure, high stability and uniform dispersion. However, off-axis spherical use of mirrors introduce severe astigmatism, degrading broadband imaging quality, reducing energy utilization and limiting spectral resolution. To address this issue, a broadband composite astigmatism correction method based on diffraction control and a cylindrical lens is proposed. An off-axis parabolic mirror collimates the light source, and Fraunhofer single-slit diffraction from an asymmetric entrance slit produces controlled meridional divergence while maintaining sagittal collimation, regulating beam propagation in two orthogonal directions. Furthermore, a cylindrical lens is inserted between the focusing mirror and the detector to compensate for the residual sagittal astigmatism via its unidirectional focusing characteristic, achieving full-band astigmatism correction. Optical models for meridional and sagittal planes are established, analytical expressions for cylindrical lens parameters are derived, and an optical design is optimized for a 1 250~1 650 nm near-infrared spectrometer. Simulations show that compared with the traditional C-T structure, the proposed method reduces the sagittal and meridional spot root-mean-square (RMS) radius at 1 550 nm by 99.42% and 90.42%, respectively, significantly suppressing astigmatism. Prototype tests demonstrate spectral

收稿日期: 2026-03-16 Received Date: 2026-03-16

* 基金项目: 重庆理工大学研究生创新项目 (gzlcy20253333) 资助

resolution better than 0.5 nm in the central band (near 1 550 nm) and 0.63 nm at the edge bands (1 310 nm, 1 610 nm), wavelength repeatability better than 0.3 nm, and a full-band scanning speed of 30.53 nm/s. This method is low-cost and highly engineerable, significantly improving broadband imaging quality while retaining the advantages of traditional C-T spectrometers, and provides an effective reference for designing high-performance near-infrared spectrometers.

Keywords: optical design; C-T spectrometer; astigmatism correction; single slit diffraction; cylindrical lens; composite method

0 引言

C-T (Czerny-Turner) 光谱仪作为一种经典的光栅光谱仪器,凭借其紧凑结构、性能稳定以及色散均匀性等优势,广泛应用于单色仪、辐射计、传感解调及成像光谱领域^[1-4]。其核心光路由入射狭缝、准直镜、平面光栅、成像镜及探测器构成,通过光栅衍射实现分光^[5]。然而,该系统因球面镜的子午与弧矢方向焦距差异,导致显著的像散问题,严重制约成像质量与光能利用效率^[6]。

为消除像散,学界提出多种校正策略。基于光栅照明方式的创新,Bates 等^[7]提出发散光束通过平面光栅的非平行光路方案,补偿离轴反射引起的像散。此方法简洁且无需新增光学元件,但受限于多项式近似条件,宽波段边缘的剩余像散仍需优化。Masayuki 等^[8]采用超环面子午与弧矢曲率半径不同的特性,直接校正中心波长像散。但超环面加工及检测复杂,成本高昂,难以普及。Xia 等^[9]提出复曲面镜与柱面透镜联合方案,利用矢量和公式推导补偿剩余像散,在近红外波段实现均方根光斑尺寸小于 14 μm 。Lee 等^[10]通过在聚焦镜后添加透射式柱镜,利用其弧矢与子午光焦度差异反转剩余像散趋势,结合发散光路优化全波段平衡。刘健鹏等^[11]进一步改进为柱面反射镜,提出光焦度平衡公式,简化设计流程并避免紫外吸收问题。李欣航等^[6]提出的一阶消像散结合柱镜的复合方案是近年来的重要进展:通过光栅的自身像散补偿(控制离轴角)校正中心波段,再利用柱镜的光焦度特性补偿边缘波长的剩余像散,最终实现近红外 900~1 700 nm 波段光斑均方根(root mean square, RMS)半径<14 μm ,验证了复合方法的普适性。

这些方法各有优势,并且在 C-T 光路消像散方面做出巨大贡献。本文则基于前人研究的基础,提出一种基于衍射调控与柱透镜协同的复合消像散设计方法,通过协同调控单缝夫琅禾费衍射效应与柱透镜的像散补偿特性实现系统优化。本研究通过建立子午面与弧矢面光路传输模型,推导出柱透镜最佳配置参数的解析表达式。基于该理论构建的 C-T 光谱仪光路经仿真验证表明:相较于传统 C-T 结构,改进方案在 1 250~1 650 nm 波段内像散量显著减小。最终研制样机的实测数据显示,系统光谱分辨率在中心波动优于 0.5 nm,边缘波段优于 0.63 nm,验证了该方法的有效性。

1 复合方法消像散分析

1.1 入射狭缝处的夫琅禾费单缝衍射分析

在 C-T 光谱仪设计中,抑制光束能量分散的关键在于控制狭缝的衍射效应^[12]。根据夫琅禾费衍射理论,当平行光通过狭缝时,其衍射角 φ 与入射光波长 λ 、狭缝宽度 a 满足式(1)^[13]。

$$\varphi \approx \frac{\lambda}{a} \quad (1)$$

如图 1 所示为本文构建的基于衍射调控与柱透镜协同复合消像散的 C-T 光谱仪结构(简称:复合消像散光谱仪)。

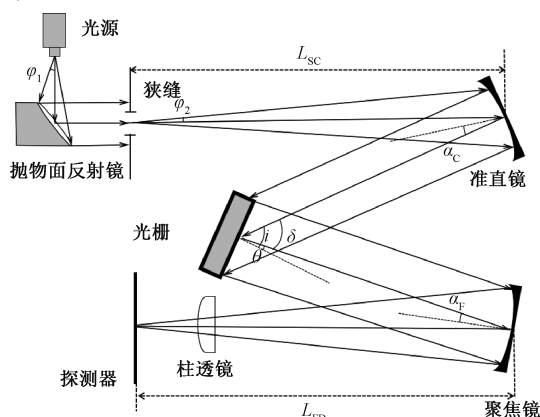


图1 复合消像散光谱仪的光路结构

Fig. 1 Optical structure of composite astigmatism-corrected spectrometer

系统采用离轴抛物面反射镜(off-axis parabolic mirrors, OAP)对光源进行准直,离轴抛物面反射镜具有无球差与彗差的特点^[14],确保入射狭缝处为高质量平行光束^[15]。入射狭缝采用非对称结构设计,子午方向宽度为 λ 量级($\sim 30 \mu\text{m}$),而弧矢方向宽度达 mm 级,这种差异化的几何约束使得:子午方向,受夫琅禾费衍射主导,光束按式(1)发散,形成扇形光场分布;弧矢方向,因 $a \gg \lambda$,光束保持准直特性。

通过精确匹配柱透镜的焦距与衍射发散角,系统可实现子午方向与弧矢方向的焦点重合,从而消除传统 C-T 结构中因像散导致的能量弥散。这种将衍射效应从干扰因素转化为调控手段的设计思路,为微型化高精度

光谱仪开发提供参考。

如图2所示为准直镜之前部分光路的放大示意图。

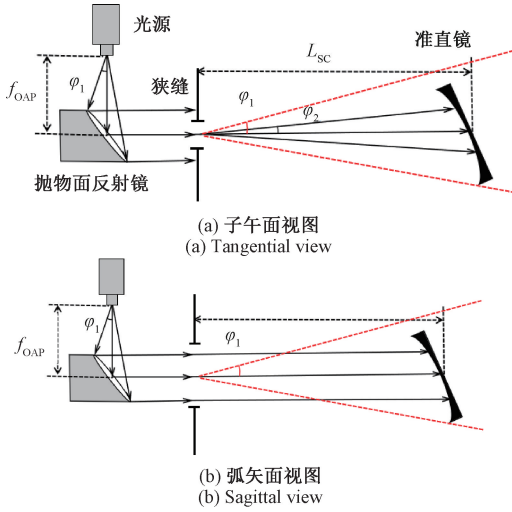


图2 准直镜之前部分光路的放大图

Fig. 2 Enlarged view of the optical path section before the collimator

在传统 C-T 光谱仪结构中,发散光源通常采用单模光纤直接置于入射狭缝前,其发散角 φ_1 可通过单模光纤的数值孔径(numerical aperture, NA) 计算得出。而在本研究的衍射结构中,经衍射调控后的子午光束发散角 φ_2 显著减小,弧矢光束则调整为平行光,由于光束入射高度减小,系统数值孔径减小,准直镜产生的球差得以有效抑制^[16]。

1.2 柱透镜校正像散

除球差外,像散在 C-T 光谱仪光路中的影响更为显著。在成像光谱仪中,像散会导致点扩散函数呈现各向异性,表现为子午方向与弧矢方向的焦点分离(焦面呈椭圆或线状弥散斑),直接造成空间分辨率和成像对比度的双重下降^[17]。而在近红外光谱仪中,像散的危害主要表现为能量在光轴方向的扩散分布^[1],这种能量弥散会降低探测器的有效光通量,导致信噪比的剧烈衰减。像散作为 C-T 光谱仪中的固有像差,主要由球面反射镜在离轴使用时子午焦距与弧矢焦距不一致导致。此时的球面反射镜的子午焦距和弧矢焦距可由式(2)和(3)计算^[17]:

$$f_T = \frac{r_T \cos \alpha}{2} \quad (2)$$

$$f_s = \frac{r_s}{2 \cos \alpha} \quad (3)$$

其中, f_T 和 f_s 分别是球面反射镜的子午焦距和弧矢焦距, r_T 和 r_s 分别对应子午和弧矢方向的曲率半径, α 为球面反射镜的离轴角。

由于衍射效应使得入射光部分的子午方向与弧矢

方向产生明显差异,光路的像散问题发生变化。如图3所示,在聚焦镜与探测器之间的部分,子午光束会聚,子午像点的位置可由聚焦镜的焦距确定;而弧矢光束是平行的。

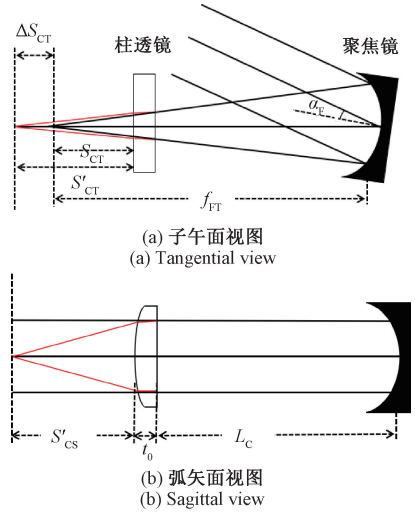


图3 柱透镜校正像散原理

Fig. 3 Schematic diagram of astigmatism correction with cylindrical lens

因此可以使用柱透镜单独会聚弧矢光束,从而校正像散。柱透镜具有单方向调制光束的能力,在子午面内相当于平板玻璃,而在弧矢面内则相当于球面镜。在聚焦镜与探测器之间添加柱透镜,子午光束会产生轴向位移,其轴向位移量可记为 ΔL_T ,其关系如式(4)所示。

$$\Delta L_T = [(n - 1)/n] t_0 \quad (4)$$

其中, n 表示柱透镜的折射率, t_0 表示柱透镜的厚度。

弧矢光束将会在柱透镜焦距处会聚,如式(5)所示,其聚焦的位置由柱透镜的焦距确定:

$$S'_{CS} = f_{\text{cylinder}} \quad (5)$$

其中, f_{cylinder} 表示柱透镜的焦距。

加入柱透镜后,新的子午像点和弧矢像点重合时,可视为消除了像散。此时,满足式(6)与(7):

$$S'_{CS} = S'_{CT} = S_{CT} + \Delta L_T \quad (6)$$

$$S_{CT} = f_{FT} \quad (7)$$

其中, S_{CT} 表示引入柱透镜前子午像点相对柱透镜的位置, S'_{CT} 和 S'_{CS} 分别是引入柱透镜后新的子午像点和弧矢像点与柱透镜间的相对距离, f_{FT} 表示聚焦镜的子午焦距。

根据图3中几何关系,并将式(2)、(4)、(5)和(7)代入式(6)可求得柱透镜距离聚焦镜的相对位置 L_C 如式(8)所示。

$$L_C = S'_{CS} - f_{\text{cylinder}} - t_0 \quad (8)$$

2 设计实例

为验证本文提出的复合消像散理论,本研究设计并搭建一台工作于近红外波段的复合消像散光谱仪原型系统。光纤通信的范围为 O-L (original-long wavelength) 波段(1 260~1 625 nm),因此测量这个波段对于通信领域有重要意义。针对实际应用需求,系统参数设置为:光谱覆盖范围包含全部 O-L 波段(1 250~1 650 nm),关键波长设定为 1 550 nm,入射/出射狭缝宽度均为 30 μm,光栅刻线密度 600 lines/mm。基于图 1 所示的光路结构参数设计,按照 1.2 节的复合消像散理论框架,并结合 Shafer 消慧差条件进行优化计算,确保系统在宽波段范围内同时实现像散与彗差的校正。在光谱仪物镜设计中,球面反射镜的球差控制是关键挑战之一。当采用球面反射镜作为成像物镜时,其几何像差会导致光斑弥散,严重时超出系统设计的像差容限(通常要求波前误差 RMS 值小于 1/4 个波长)。根据 Seidel 像差理论,球差引起的最大光斑直径 $W_{S(max)}$ 可由式(9)计算^[18]:

$$W_{S(max)} = \frac{y_{max}^4}{8r^3}$$

(9)

进一步推导可以得到式(10):

$$f \leq 256\lambda \left(\frac{f}{D}\right)^4$$

(10)

其中, y_{max} 表示球面反射镜的半直径; r 表示球面反射镜的曲率半径; f 表示球面反射镜的焦距; D 为球面反射镜的直径; λ 则表示光谱仪的中心波长。本文根据实际情况选择直径为 25.4 mm、焦距为 250 mm 的球面反射镜作为准直镜和聚焦镜,代入数据计算,结果满足式(10),这表明本系统的球差满足要求。

Shafer 提出在 M 型 C-T 光谱仪中,两个球面反射镜按相反的离轴方向设置,可以消除慧差^[19],具体需要满足式(11):

$$\frac{\sin \alpha_F}{\sin \alpha_C} = \frac{r_F^2 (\cos \alpha_F)^3 (\cos i)^3}{r_C^2 (\cos \alpha_C)^3 (\cos \theta)^3}$$

(11)

其中, α_C 和 α_F 分别为准直镜和聚焦镜的离轴角; r_C 和 r_F 分别为准直镜和聚焦镜的曲率半径; i 和 θ 分别表示光栅的入射角和衍射角。

此外,本研究采用高精度电动旋转平台驱动光栅转动以实现波长扫描功能。探测器则使用单点探测器以确保高灵敏度光谱探测。在光栅的旋转过程中,入射角和衍射角的夹角 δ 保持恒定,其几何关系满足式(12)~(14)。

$$2(\alpha_C + \alpha_F) = \delta$$

(12)

$$i - \theta = \delta$$

(13)

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

(14)

系统工作波段为 1 250~1 650 nm,选取中心波长 $\lambda_0 = 1 550$ nm,光栅常数 $d = 1/600$ mm,衍射级次取 $m = 1$,代入光栅方程(14)得:

$$\sin(i) + \sin(\theta) \approx 0.93$$

(15)

结合 C-T 光谱仪离轴光路工程设计常规,衍射角 θ 需控制在 $5^\circ \sim 15^\circ$ (过大易致色散畸变与光路遮挡,过小则色散能力不足),且入射角远大于衍射角,同时对全波段边界进行验证:若 $i < 45^\circ$,长波边界衍射角会超出工程常规;若 $i > 50^\circ$,短波边界衍射角为负角,衍射光无法被聚焦镜收集。综合光栅方程物理约束、全波段边界验证及工程设计原则,最终推导入射角与衍射角的合理取值区间为 $i \in [45^\circ, 50^\circ]$ 、 $\theta \in [8^\circ, 12^\circ]$,由此确定夹角 $\delta = i - \theta$ 的可选范围为 $35^\circ \sim 42^\circ$ 。同时为避免机械结构部件间的接触或重叠,经过多次实验测试,综合考虑机械结构空间安排,确定将 δ 设置为 38° 。再将该值代入式(11)~(13)以及(15),可得到 $i = 48.35^\circ$, $\theta = 10.35^\circ$, $\alpha_C = 14.25^\circ$, $\alpha_F = 4.75^\circ$ 。

针对弧矢方向像散校正,选用材料为 H-K9L 玻璃,折射率 n 为 1.516 8,厚度为 3.5 mm 的柱透镜。基于上文推导的柱透镜像散校正理论,代入数据可计算得到柱透镜相对聚焦镜的轴向位置 L_C 为 204.268 mm。最终确定复合消像散光谱仪初始结构参数,如表 1 所示。

表 1 光路系统固定结构参数

Table 1 Fixed structure parameters of the optical system

参数	值
$\alpha_C/(^\circ)$	14.25
$\alpha_F/(^\circ)$	4.75
$i/(^\circ)$	48.35
$\theta/(^\circ)$	10.35
$\delta/(^\circ)$	38.00
f_C/mm	250.00
f_F/mm	250.00
$f_{\text{cylinder}}/\text{mm}$	40.00

采用光学仿真软件对复合消像散光谱仪初始结构参数进行建模与优化,优化后的结构参数如表 2 所示。

表 2 初始结构参数及优化后的结构参数

Table 2 Initial structure parameters and optimized parameters

参数	初始值	优化后
L_{SC}	250.000	242.340
L_{FD}	250.000	248.014
L_C	204.268	205.400

3 结果与讨论

3.1 仿真结果对比

针对系统特有的子午方向光束发散与弧矢方向准直

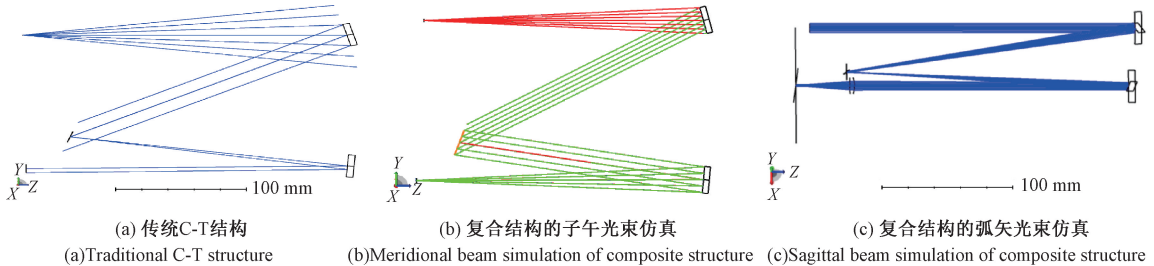


图 4 光路仿真

Fig.4 Optical path simulation diagram

C-T 光谱仪的像散校正效果可通过探测器处光斑质量直观表征。图 5 对比了两种结构在 1 250~1 650 nm 波段的成像性能,其中:RMS-X(弧矢面),复合消像散光谱仪在 1 550 nm 处达到 5.955 μm (传统结构为 1 022 μm),实现 99.42% 的改善;RMS-Y(子午面),在 1 550 nm 处降至 4.822 μm (传统结构为 50.37 μm),降幅达 90.42%。证明基于复合消像散方法设计的 C-T 光谱仪具有更小的像散。

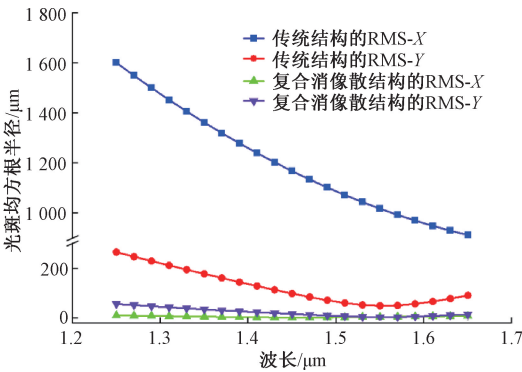


图 5 两种结构的 RMS-X 与 RMS-Y 对比

Fig.5 Comparison of RMS-X and RMS-Y between two structures

引入柱透镜的同时,由于材料色散因素,使得系统对不同波长产生了焦点偏移现象(离焦)。为分析柱透镜引入对系统宽波段离焦特性的影响,在 1 250~1 650 nm 工作波段内以 50 nm 为间隔进行离焦扫描仿真,获取各波长对应的最佳像面离焦量。

结果表明,系统离焦量随波长呈连续、平滑、近似线性的变化规律(如图 6 所示)。

特性,分别构建独立的光线追迹模型;在子午面内重点优化发散角控制与能量利用率,在弧矢面着重校正像散。如图 4 所示,为量化评估系统性能提升,依据表 1 和 2 参数设置建立传统 C-T 光谱仪(数值孔径 $\text{NA}=0.14$,除光束发散角外其余器件及结构参数与复合消像散光谱仪完全一致)对照模型,开展多维度对比分析。

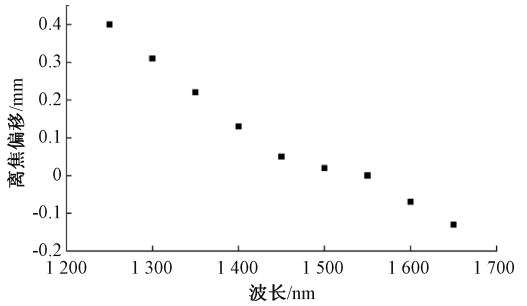


图 6 全波段离焦量测试结果

Fig.6 Full-waveband defocus measurement results

由短波 1 250 nm 处的 +0.40 mm 逐步向长波过渡,在中心波长 1 550 nm 处达到基准 0 mm,最终在 1 650 nm 处为 -0.13 mm,全波段最大离焦偏移为 0.53 mm。

从工程应用角度来看,该离焦量处于宽波段光谱仪的常规可接受范围内(0.3~0.8 mm),并未出现因色散导致的长波段焦点急剧偏移或光斑显著弥散。结合系统实测光谱分辨率优于 0.5 nm 的实验结果可知,引入柱透镜在实现像散有效校正的同时,其所带来的色散型离焦处于系统容许范围之内,不会对成像质量与光谱分辨能力产生实质性影响。

3.2 实验与结果分析

复合消像散光谱仪实物图如图 7(a)所示。使用步进电机来控制光栅的旋转,实现波长扫描。步进电机最小步距角为 1.8° ,最大细分数为 32,旋转台传动比为 90:1。因此计算机输入一个脉冲可以使旋转台转动 $0.000\ 625^\circ$,精确控制光栅转动角度。使用铟镓砷(三元化合物半导体)(InGaAs)单点探测器,可在 900~1 700 nm 波长范围快速响应。当光栅转动时,不同波长的光会从出

射狭缝到达探测器,最后通过波长标定算法得到光谱响应曲线。

为测试光谱仪的性能,针对光谱分辨率、光谱范围、测量重复性以及测量速度共 4 个参数进行测量。

设计如图 7(b) 所示的光谱分辨率测试系统,包含以下器件:宽带光源(amplified spontaneous emission, ASE)、光纤环形器(Circulator)及光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)串的组合光源。FBG 同时作为一种新型光纤传感器,具有体积小、重量轻以及不受电磁干扰等特点^[20-21],因此对其波峰进行光谱测量十分重要。采用 6 个中心波长间隔 2 nm 的 FBG ($\lambda_1 = 1\,548\text{ nm}$ 至 $\lambda_6 = 1\,558\text{ nm}$) 构成窄线宽光源阵列。宽带光源发出的光,进入光纤环形器的 1 端口,在 2 端口到达 FBG 串后被反射回环形器,最后由环形器的 3 端口将 FBG 串的反射谱输出到光谱仪。光谱仪测量得到的光谱图应包含与 FBG 数量对应的波峰。

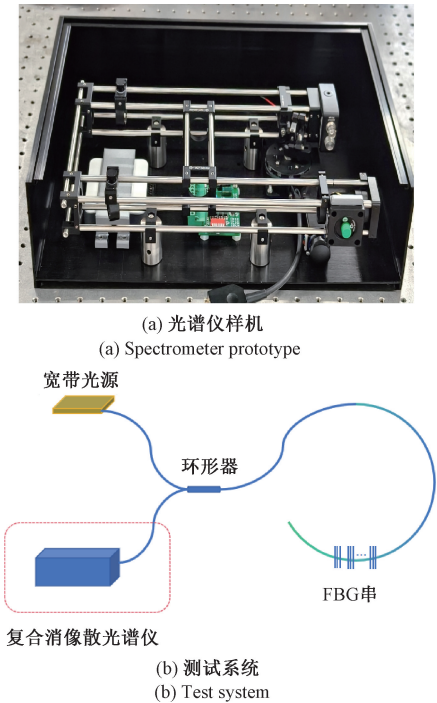


图 7 复合消像散光谱仪测试系统

Fig. 7 Composite astigmatism-corrected spectrometer testing system

光谱分辨率可以通过测试高单色性的特征峰值谱线半高全宽来表征,测量半峰宽越窄(越接近理论半峰宽)则光谱分辨率越高。如图 8 所示为使用复合消像散光谱仪测量的 1 250~1 650 nm 波段光谱图中 1 535~1 565 nm 波段放大图。

其中,纵轴为将探测器响应信号强度经 A/D 转换后归一化处理后的值,横轴则为波长。另外,光谱分辨率通

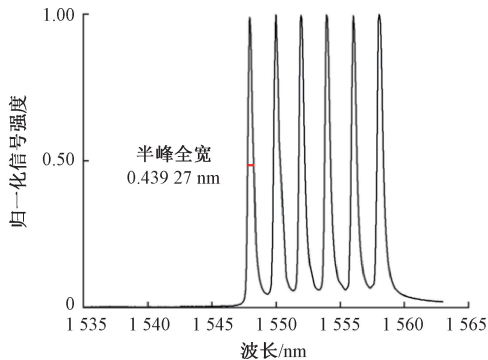


图 8 实测 FBG 串谱线

Fig. 8 Measured FBG array reflection spectra

过测量 FBG 反射光谱半高全宽(full width at half maximum, FWHM)评估,其理论半高全宽已知为 0.4 nm,由光谱数据可以计算 FBG 反射光谱波峰的 FWHM 和平均 FWHM(如表 3 所示)。复合消像散光谱仪测得的平均 FWHM 为 0.475 2 nm,优于 0.5 nm。影响光谱分辨率的因素可能包括:光栅扫描机构角分辨率限制及探测器上升(下降)时间限制等。

表 3 复合消像散光谱仪测量 FBG 波峰的半峰全宽

Table 3 FWHM of spectral peaks of FBG measured by composite astigmatism-corrected spectrometers

FBG 波峰	半峰全宽/nm
FBG1	0.439 27
FBG2	0.487 59
FBG3	0.477 58
FBG4	0.477 41
FBG5	0.460 23
FBG6	0.509 12
平均	0.475 20

为测量光谱分析仪在宽波长范围内的工作性能,选择将 1 310、1 490 和 1 610 nm 的激光光源进行耦合并使用自开发光谱分析仪进行全波段扫描。测量结果如图 9 所示,记录对应波峰的半高全宽于表 4。

表 4 宽波段光谱分辨率

Table 4 Wide-band spectral resolution

波长/nm	半峰全宽/nm
1 310	0.623 58
1 490	0.484 39
1 610	0.512 39

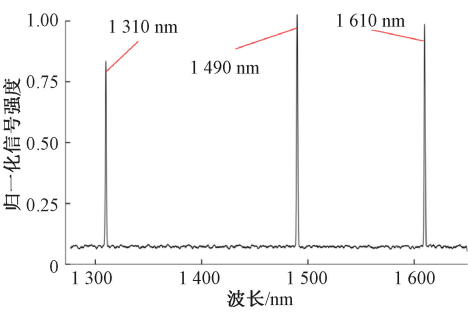


图 9 光谱范围测试
Fig. 9 Spectral range test

结果显示消像散光谱仪在边缘波段的光谱分辨率最低降至 0.623 58 nm, 优于 0.7 nm。产生这一现象的原因有:1)光学设计时以 C 波段为核心波段进行分析与优化;2)柱透镜材料色散产生的宽波段离焦。

使用标准波长为 1 550 nm 的可调谐激光光源每隔 5 min 测量 1 次,连续测量 10 次,每次测量结果与标准波长间的误差如图 10 所示。

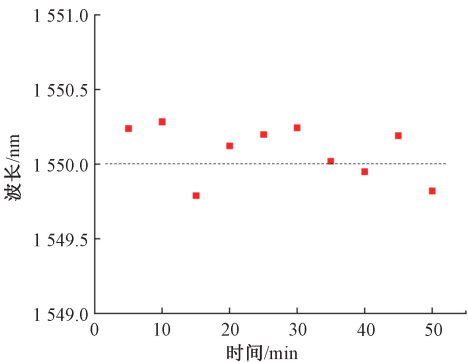


图 10 重复性测试结果
Fig. 10 Repeatability test results

重复性测量数据显示,多次测量的波峰误差最大为 0.29 nm,因此自开发光谱分析仪的重复测量误差在 0.3 nm 以内。发生重复测量误差的原因既可能是可调谐激光器输出的不稳定性,也可能是步进电机的随机性丢步造成的。

另外,记录每次全光谱扫描所用时间用于表征光谱分析仪的扫描速度,数据见表 5。结果表明,复合消像散光谱仪在 1 250~1 650 nm 全波段扫描的平均耗时为 13.1 s,平均速度为 30.53 nm/s。

在探测器性能方面,实测噪声性能未达预期,其前置放大电路引入的噪声电流达 0.7 mA,显著高于 25 nA 的理论暗电流值。为优化信噪比,拟采取增设热电制冷模块实现探测器温控。在工程实现层面,系统光学元件(包括球面反射镜、平面闪耀光栅及 H-K9L 柱透镜)均选用标准化

表 5 全波段扫描测量速度
Table 5 Full band scanning measurement speed

次数	时间/s	速度/(nm·s ⁻¹)
第 1 次	13.20	30.30
第 2 次	13.05	30.65
第 3 次	13.10	30.53
第 4 次	13.12	30.49
第 5 次	13.03	30.70
平均	13.10	30.53

商用产品,相较于定制化光学系统,制造成本降低约 40%。最终整理复合消像散光谱仪的性能参数如表 6 所示。

表 6 光谱分析仪性能参数
Table 6 Performance parameters of spectral analyzer

性能参数	数值
波长范围	1 250~1 650 nm
波长重复性	0.3 nm
中心波长分辨率	0.5 nm
边缘波长分辨率	0.63 nm
测量速度	30.53 nm/s
采样率	0~50 kS/s
光纤接口	FC/APC
电源要求	9~42 V, 2.5 A

尽管实验验证了复合消像散方案的有效性,但测试数据同时揭示了两项关键技术瓶颈:(1)单缝衍射效应呈现显著波长依赖性,当入射狭缝宽度固定为 30 μm 时,子午面发散角随波长增加从 1 550 nm 处的 2.96°线性增至 1 650 nm 处的 3.15°;(2)柱透镜材料色散,柱透镜的色散特性导致长波段弧矢光束焦点发生偏移(离焦)。针对问题(1),计划开发压电陶瓷驱动的动态狭缝结构,根据扫描波长实时调节缝宽,以控制衍射角稳定性。针对问题(2),可基于光学仿真设计消色差非球面柱透镜以减小焦点偏移,但此举会增加加工难度和系统成本。

4 结 论

本文通过探究夫琅禾费单缝衍射在 C-T 光谱仪中的应用,结合柱透镜校正了像散,从而提出基于衍射调控与柱透镜协同的 C-T 光谱仪宽波段像散校正方法。通过理论上的分析,得出使用衍射光能够减少能量损失以及减小球差的结论。对复合消像散光谱仪结构进行仿真优化,并与传统 C-T 光谱仪对比,结果表明复合消像散光谱仪的 X 方向和 Y 方向 RMS 都更小。尤其是 X 方向,复合

消像散光谱仪的光斑 RMS 远小于传统 C-T 光谱仪,体现了复合消像散方法对像散的校正作用。

搭建复合消像散光谱仪样机,实验测试表明在 1 250~1 650 nm 波长范围内中心波段光谱分辨率优于 0.5 nm,边缘波段光谱分辨率优于 0.63 nm,体现了复合消像散方法的优越性。

参考文献

- [1] 周颖, 黄云彪, 李东玲, 等. 一种改进型非交叉非对称 C-T 结构近红外微型光谱仪设计[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 25-33.
- ZHOU Y, HUANG Y B, LI D L, et al. Design of the improved micro near spectrometer based on non-cross asymmetric C-T structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 25-33.
- [2] 吕金光, 梁静秋, 赵百轩, 等. 微型光学光谱仪及成像光谱仪研究进展[J]. 微纳电子技术, 2026, 63(4): 9-29.
- LYU J G, LIANG J Q, ZHAO B X, et al. Research advances in micro optical spectrometer and imaging spectrometer [J]. Micronanoelectronic Technology, 2026, 63(4): 9-29.
- [3] 邢宇航, 李红, 孙广开, 等. 光纤光栅光谱分光解调与接入光纤芯径相关性分析[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(1): 54-64.
- XING Y H, LI H, SUN G K, et al. Fiber grating spectral spectral demodulation and access fiber core diameter correlation analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(1): 54-64.
- [4] 刘书锋, 刘银年, 曹开钦, 等. “高分五号”卫星高光谱相机结构与验证[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(5): 70-80.
- LIU SH F, LIU Y N, CAO K Q, et al. Structural design and verification of the hyperspectral imager for the Gaofen-5 Satellite [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(5): 70-80.
- [5] 陈可, 李柏承, 徐邦联, 等. 光谱仪器的设计与应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(19): 105-121.
- CHEN K, LI B CH, XU B L, et al. Research progress in the design and application of spectroscopic instrument[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(19): 105-121.
- [6] 李欣航, 董科研, 安岩, 等. 近红外宽波段下的 Czerny-Turner 结构复合方法消像散设计[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 447-456.
- LI X H, DONG K Y, AN Y, et al. Anastigmatic design with Czerny-Turner structure composite method on near-infrared broadband [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 447-456.
- [7] BATES B, MCDOWELL M, NEWTON A C. Correction of astigmatism in a Czerny-Turner spectrograph using a plane grating in divergent illumination [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1970, 3(3): 206-210.
- [8] MASAYUKI F. Astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer with toroidal focusing mirror [J]. Applied Optics, 2002, 41(15): 2871-2879.
- [9] XIA G, WU S, WANG G D, et al. Astigmatism-free Czerny-Turner compact spectrometer with cylindrical mirrors [J]. Applied Optics, 2017, 56(32): 9069-9073.
- [10] LEE K S, THOMPSON K P, ROLLAND J P. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer [J]. Optics Express, 2010, 18(22): 23378-23384.
- [11] 刘健鹏, 唐义, 黄刚. 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): 242-248.
- LIU J P, TANG Y, HUANG G. Design method of optical system of improved Czerny-Turner imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 242-248.
- [12] 马娜. 激光显微拉曼光谱仪的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007: 31-32.
- MA N. Research on laser micro-Raman spectrometer [D]. Xi'an: Xidian University, 2007: 31-32.
- [13] BUDAK V P, EFREMENKO D S, SMIRNOV P A. Fraunhofer diffraction description in the approximation of the light field theory [J]. Light & Engineering, 2020, 28(5): 25-30.
- [14] CHEN L, GAO ZH SH, YE J F, et al. Construction method through multiple off-axis parabolic surfaces expansion and mixing to design an easy-aligned freeform spectrometer [J]. Optics Express, 2019, 27(18): 25994-26013.
- [15] 武艳艳, 谢微. 基于自由曲面的成像光谱仪设计[J]. 光子学报, 2025, 54(8): 37-47.
- WU Y Y, XIE W. Design of imaging spectrometers based on freeform surfaces [J]. Acta Photonica Sinica, 2025, 54(8): 37-47.
- [16] 夏果, 吴骥, 黄禅, 等. 交叉非对称型 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 21-28.

- XIA G, WU S, HUANG CH, et al. Design of crossed-asymmetric Czerny-Turner spectrometer optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 21-28.
- [17] 唐义, 郑成, 南一冰, 等. 消像散型 Czerny-Turner 成像光谱仪图像变形校正研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 212-219.
- TANG Y, ZHENG CH, NAN Y B, et al. Study of anamorphose correction of astigmatism-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 212-219.
- [18] 刘佳畅, 李书成, 邵荣君, 等. Czerny-Turner 型光栅光谱仪光学系统优化设计[J]. 光学技术, 2018, 44(4): 395-399.
- LIU J CH, LI SH CH, SHAO R J, et al. Optical system optimization design of Czerny-Turner grating spectrometer[J]. Optical Technique, 2018, 44(4): 395-399.
- [19] SHAFER A B, MEGILL L R, DROPPLEMAN L. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. Journal of the Optical Society of America, 1964, 54(7): 879-887.
- [20] 王威, 陶传义, 朱悦青, 等. 光纤光栅传感器阵列在撞击定位监测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 76-82.
- WANG W, TAO CH Y, ZHU Y Q, et al. Application of fiber Bragg grating sensor array in impact location monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 76-82.
- [21] 蒋宇飞, 陶传义, 李梦影, 等. 基于光纤光栅的紧凑型高频振动传感器的设计与应用[J]. 仪器仪表学

报, 2023, 44(12): 252-260.

JIANG Y F, TAO CH Y, LI M Y, et al. Design and application of compact high-frequency vibration sensor based on fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 252-260.

作者简介



王腾飞, 2023 年于重庆理工大学获得学士学位, 现为重庆理工大学硕士生, 主要研究方向为光谱分析仪开发。

E-mail: 317217776@qq.com

Wang Tengfei received his B.Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2023. He is currently a M.Sc. candidate at Chongqing University of Technology. His main research interest is spectrum analyzer development.



陶传义 (通信作者), 2005 年于重庆大学获得学士学位, 2007 年于重庆大学获得硕士学位, 2011 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为光谱分析仪开发与光纤传感系统。

E-mail: taochuanyi@cqut.edu.cn

Tao Chuanyi (Corresponding author) received his B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees all from Chongqing University in 2005, 2007, and 2011, respectively. He is currently a professor and master advisor at Chongqing University of Technology. His main research interests include spectrum analyzer development and optical fiber sensing systems.