·仪器研发·

便携式交叉 C-T 光谱仪设计与分析

荣健铭[a] 曹林博[a] 李远翔[a] 蒋子骏[a] 李美琪[b*]

（北京大学 a.工学院；b.生命科学学院，北京 100871）

【摘要】 为了满足便携性、低成本的需求以促进光谱仪的广泛应用，本文针对不同的光谱仪类型进行了对比分析，以交叉式切尼-特纳（Czerny-Turner, C-T）光路为参考，设计并实现了一种基于交叉式C-T结构的便携式光纤光谱仪，采用正交交叉式双球面反射镜结构压缩光路尺寸，并且搭建了样机系统进行了实验验证。通过对器件的优化选型，开发了一款具备高便携性与强功能性的低成本光谱仪。本文针对搭建的样机系统进行了波长校准，并对像差进行了简单分析，最终本系统可以在381～716 nm范围内实现1 nm的光谱探测分辨率。该设计解决了传统光纤光谱仪体积与性能的制约问题，在快速检测和即时光谱分析中具有应用价值。

【关键词】 便携式光纤光谱仪；交叉式C-T结构；低成本设计

【中图分类号】 TH74 【文献标识码】 A 【DOI】 10.11876/mimt202504013

Design and analysis of portable crossed Czerny-Turner spectrometer

Rong Jianming[a], *Cao Linbo*[a], *Li Yuanxiang*[a], *Jiang Zijun*[a], *Li Meiqi*[b*]

(*a. College of Engineering*; *b. School of Life Sciences*, *Peking University*, *Beijing 100871*, *China*)

【Abstract】 To meet the demand for portability and low cost to facilitate the widespread application of spectrometers, this paper presents the comparative analysis of different spectrometer types. Taking the crossed Czerny-Turner (C-T) optical path as a reference, we designed and implemented a portable fiber-optic spectrometer based on a crossed C-T structure. An orthogonal crossed dual spherical mirror configuration was adopted to compress the optical path dimensions, and a prototype system was constructed for experimental validation. Through optimized component selection, a low-cost spectrometer with high portability and strong functionality was developed. The prototype system underwent wavelength calibration, and its aberrations were briefly analyzed. Ultimately, the system achieves a spectral resolution of 1 nm within the 381～716 nm wavelength range. This design resolves the traditional trade-off between size and performance in fiber-optic spectrometers, demonstrating significant application value for rapid detection and real-time spectral analysis.

【Key words】 Portable fiber-optic spectrometer; Crossed Czerny-Turner configuration; Low-cost design

光学光谱仪是科学和工业研究中最为强大和广泛使用的表征工具之一。传统的台式光谱仪通常依赖于庞大色散光学元件、长光路、探测器阵列和可移动部件的组合，这些特点阻碍了它们在一些对尺寸、成本和功耗有最小化需求的场景中的应用[1]。近年来也出现了很多便携式、集成式的小型光谱仪系统，应用于食品加工、环境检测、文物修复等众多领域[2-6]。很明显，在这些场景中，获得指示性、即时性、现场性结果通常远比将样品运送到实验室进行超高分辨率分析更为可取。国际上对光谱仪的研究起步较早，美国的赛默飞、海洋光学及德国布鲁克等公司在微型化技术方面已取得显著成果，在精密检测领域处于垄断地位。国内近年来在便携式光谱仪方面也持续发力，聚光科技、钢研纳

第一作者：荣健铭，男，在读本科，研究方向：超分辨荧光显微成像；曹林博，男，在读本科，研究方向：计算成像

通信作者：李美琪，女，博士研究生，工程师，研究方向：超分辨荧光显微成像

克等企业通过高分辨率电感耦合等离子体光谱仪（inductively coupled plasma spectrometer, ICP）等产品缩小技术差距，抢占环保、农业等市场[3]。

当前便携式光谱仪在分辨率、稳定性和数据分析能力等方面仍与实验室级设备存在差距。如何在保持体积轻巧的同时提高其性能指标，仍是目前便携式光谱仪研究的关键问题。尽管当前已有赛默飞TruScan™ RM、海洋光学USB4000、布鲁克BRAVO等便携式光谱仪广泛应用于现场检测，但是它们通常存在价格昂贵、结构复杂、功耗较高或分辨率有限等问题。例如，TruScan™ RM基于拉曼光谱，价格较高，仅适用于特定分子结构识别；USB4000尽管做到了小型化便携性，但系统可拓展性低，同时价格也较高；BRAVO尽管支持原位检测，但系统灵活性差、成本昂贵。因此，研究开发低成本、易部署且具备良好可拓展性的便携式光谱仪，对于推动光谱技术在环境监测、食品安全及应急检测等领域的广泛应用具有重要意义。

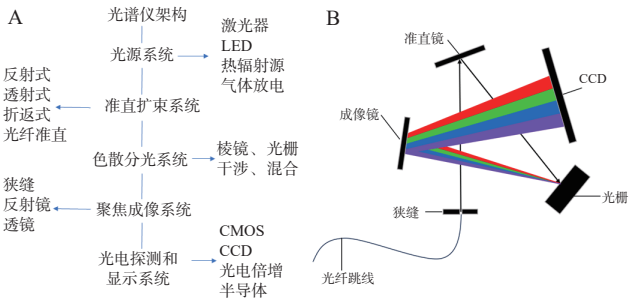
本研究旨在围绕便携式光谱仪的关键技术瓶颈，基于交叉式切尼–特纳（Czerny–Turner, C–T）结构，构建具有便携性、高灵敏度、低成本特性的光纤光谱仪。通过对器件的优化选型，本研究将光谱仪的硬件成本控制在1 000元左右，并采用正交交叉式双球面反射镜结构来压缩光路尺寸，做到170 mm × 140 mm × 80 mm（L × W × T）的尺寸大小。同时，结合针对光学信号的数据处理算法，提升便携式光谱仪在复杂环境下的光谱识别能力与数据解码精度，提升分辨光谱能力。经测试验证，搭建的光谱探测系统可以在381 ~ 716 nm范围内实现1 nm的光谱探测分辨率，超低的成本使得它在不同场景下的快速检测和即时光谱分析中具有应用价值。

1 光谱仪结构设计与参数计算

光谱仪作为一种将复色光分解为各单色光并分析其波长与强度分布的仪器，其核心是光信号的变换和检测，因此离不开光学成像系统和光电检测系统。为实现光谱仪的小型化目标，目前主流技术分为4类：①小型化色散光学器件，具有结构简单、实时性好等优势；②窄带滤波系统，适用于特定波段分析但波段覆盖有限；③傅里叶变换干涉仪，其高光通量和分辨率优势适用于近红外区域，但系统结构和相位稳定性要求较高；④重构式微型光谱仪则基于压缩感知或稀疏重构算法，具备优异的小型化与波段覆盖能力，但对重构模型和计算资源依赖较大。上述技术各具优势与局限，本研究以小型化、环境适应性强、低成本等为出发点，选择了小型化色散光学器件作为突破口。色散型光谱仪通常包含光源、准直扩束、色散分光、聚焦成像和光电探测5大子系统[4]。光源系统根据应用分为热辐射源、激光、发光二极管（light emitting diode, LED）等类型[5]；准直扩束系统控制光束方向和直径，提升信噪比；色散系统如光栅或棱镜将不同波长光分离；聚焦系统将光集中至探测器，提高成像质量；探测与显示系统完成光电转换并输出光谱图，光电探测器作为重要组成部件，分为光电倍增管、电荷耦合元件（charge coupled device, CCD）、互补金属氧化物半导体（complementary metal oxide semiconductor, CMOS）等多种类型，大大提高了检测的精度和灵敏度，方便实现数字化和自动化[6]。

光谱仪性能主要由分辨率、光谱测量范围、色散率、信噪比、灵敏度和动态范围决定。分辨率表示最小可分辨波长差，受限于光栅、狭缝和像素等；光谱测量范围依赖于探测器材料，如硅、铟砷化镓（InGaAs）；色散率反映波长随位置变化的能力；信噪比和灵敏度影响微弱信号的探测；动态范围表示其测量强弱信号的能力总幅度。这些参数共同决定了光谱仪的分析精度和应用范围。

基于光谱范围和色差的分析，本研究选择使用反射式光学系统中的交叉式C–T光学系统，它采用了水平成像和非对称设计，广泛应用于便携式光谱仪中。光谱仪结构见图1。



注：C–T为切尼–特纳；LED为发光二极管；CMOS为互补金属氧化物半导体；CCD为电荷耦合器件。

图1 光谱仪结构[5] A为光谱仪组成系统；B为交叉式C–T光学系统光路图

如图 1B 所示，交叉式 C–T 系统的基本组成部分是光纤跳线、狭缝、准直镜、衍射光栅、成像镜、探测器。光纤跳线固定了光线的入射角度，同时也可以有效控制光的通量。狭缝可以限制进入光谱仪的光束宽度，提高了信噪比。准直镜和聚焦镜是一对凹球面反射镜，其焦距决定了光谱仪的整体大小。衍射光栅作为分光的主要元件，分为闪耀光栅、复制光栅、全息光栅，它的刻线密度、闪耀波长（blaze wavelength）、闪耀角（blaze angle）都会影响光谱仪的分辨率和探测范围。综合考虑衍射效果和低成本的要求，我们最终选用了金涛光电 1200L 型闪耀光栅（blazed grating），刻线密度为 1 200线/mm，闪耀波长为 500 nm，使用波段在 400 ~ 1 000 nm，1级衍射效率达 60%以上，尺寸公差 ±0.1 mm。对于光栅的入射角设置，采用非 Littrow配置，通过光栅方程和闪耀条件（blaze condition）来配置入射角。光栅方程为：

$$d\left(\sin\alpha+\sin\beta\right)=m\lambda \tag{1}$$

闪耀条件计算公式：

$$\alpha+\beta=2\gamma \tag{2}$$

入射角计算公式：

$$\alpha=\gamma+\arcsin\left(\frac{m\lambda}{2d\cos\gamma}\right) \tag{3}$$

其中，γ为光栅闪耀角，γ =17.46 °；λ为闪耀波长，λ =500 nm；m为衍射级次，m=1；d为光栅刻线密度，d=8.33 × 10^{-7} m。将参数值代入公式，得到入射角 α = 35.8°，衍射角 β = –0.88°。对于准直镜焦距的选择，主要从光谱带宽和整个光谱仪的体积两个方面考虑。光谱带宽计算公式[5]：

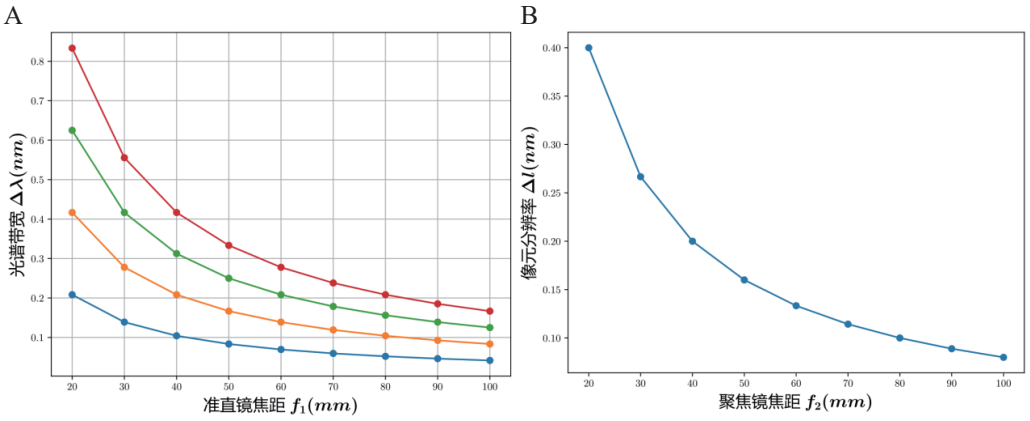
$$\Delta\lambda=\frac{ad}{mf_1}\times\cos\alpha \tag{4}$$

其中，a为狭缝宽度，d为光栅常数，m为衍射级次，f_1为准直镜的焦距，α为光栅的入射角。探测器感光长度 =29.184 mm，光栅长度 =25 mm。如图 2A 所示，可以看到焦距 50 mm后差别不大，同时考虑焦距对设备大小的影响，以及狭缝对进光量的限制，选择f_1=50 mm。最终选用了嘉兴匠才精密机械的 ZXG–1.0–20狭缝，狭缝宽度 20 μm，宽度公差 ± 3 μm。

聚焦镜的选择与光电探测器的像元分辨率有很大关系。像元分辨率计算公式[5]：

$$\Delta l=\frac{dP\cos\beta}{mf_2} \tag{5}$$

其中，Δ l为像元分辨率，d为光栅常数，P为像元尺寸，β为光栅的衍射角，m为衍射级次，f_2为成像镜的焦距，如图 2B 所示，综合考虑成像效果以及整体布局，我们采用 30 mm焦距的聚焦镜。



注：A图中不同颜色代表狭缝宽度，其中，红色为20μm，绿色为15μm，橙色为10μm，蓝色为5μm。

图 2 准直镜、聚焦镜焦距选择 A为光谱带宽与狭缝宽度和准直镜焦距的关系；B为像元分辨率随聚焦镜焦距的变化

光电传感器以结构简单、精度高、响应速度快等优点，常被用于接收响应[7]。CCD是一种由大量像素点组成的数字式成像器件，具有高分辨率、高灵敏度和低噪声等特性，为保证分辨率，我们选择了基于 12位 Analog–to–Digital（AD）驱动板的东芝 TCD1304DG线阵 CCD作为探测器，其像元尺寸为

8 μm，像元数为3 648个，工作波长范围为200～1 000 nm，在25 ℃、积分时间10 ms条件下，最大光子响应非均匀性为10%，典型暗信号电压约为2 mV[8]。选择的元件参数及品牌如表1所示，所有元件在0～40 ℃范围内性能稳定，可满足便携式应用的适应性要求。

表1 元件参数及品牌

器件名称	参数	厂家及型号
闪耀光栅	刻线密度1 200线/mm	金涛光电1200L
准直镜	焦距50 mm，直径12.5 mm	联合光科K9平凹球面反射镜270073
聚焦镜	焦距30 mm，直径25.0 mm	联合光科K9平凹球面反射镜270087
狭缝	宽度20 μm	嘉兴匠才精密机械ZXG–1.0–20
光纤跳线	芯径200 μm	深圳赞比特通信200/220光纤FC/APC–FC/APC
探测器	像元规格8 μm × 3 648个	东芝TCD1304DG

2 光路仿真

理论参数确定后，还需要进一步进行仿真验证结构合理性。为此，我们通过Zemax OpticStudio软件对光谱仪进行仿真，进而对光谱仪的理论分辨率进行分析，并对光谱仪的体积进行初步预估，以满足实际应用中对便携性、高分辨率光谱仪的需求。将参数输入到软件中，同时设置多种波长，得到三维仿真结果，并绘制出其在像面上的点列图。

由图3A的三维仿真结果我们可以看出，所有的波长最终都被探测器接收，并由图3C可知，各色光均匀分布，图3D展示了间隔为1 nm的560 nm、561 nm、562 nm处的点列图，3个不同波长色光可以被清晰地分隔开而不产生交叉，说明该光谱仪的理论分辨率小于1 nm。如图3E所示的轴向相差图中，在光瞳半径为0.25 mm条件下，其色球差足够小，各波长光近乎平行，相差角度较小。

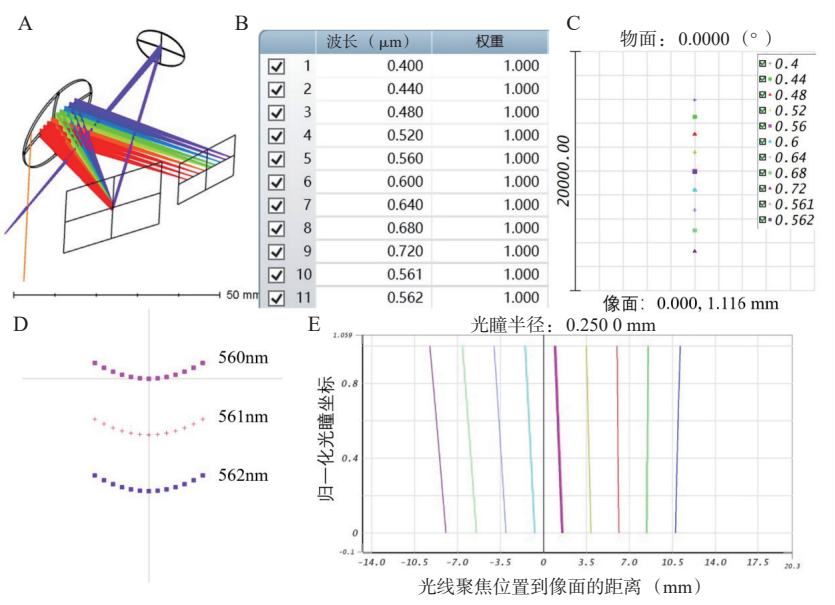


图3 Zemax仿真结果 A为Zemax三维仿真结果；B为Zemax波长设置；C为Zemax仿真点列图；D为560 nm、561 nm、562 nm处放大点列图；E为轴向相差图

3 光路搭建

在完成光路仿真并对像差进行初步分析之后，我们对光路进行了搭建，应用3D打印件代替了部分光学支架，同时保留自由度，设计制作了样机，并对最后的成像效果进行测试。3D打印材料我们选择了具备优越抗氧化、抗晒、抗老化和耐水能力的丙烯腈–苯乙烯–丙烯酸酯共聚物（acrylonitrile styrene–acrylate copolymer, ASA），其热变形温度高达100 ℃，刚度1 920 MPa，强度65 Mpa，非常适合长期在户外使用，可保证整体系统稳定性。整体外壳和支架打印耗材275.48 g，核算价格为23.1元。实验中使用的拓竹X1–Carbon 3D打印机为实验室已有设备，因此成本仅核算了打印耗材费用。在设计中，为了调节位置，我们充分考虑了各个元件的可调自由度，同

时兼顾了结构的复杂度和使用便捷性，最后，我们使用了可以两自由度调节的反射镜光学调整架作为调节器件，同时，其他的器件支架通过螺丝固定在底座上，可以后期改变其位置。模型机搭建见图 4。

如图 4A 所示，选用 200/220、FC/APC–FC/APC 的光纤跳线，芯径 200 μm 的单模光纤，以提高光学系统的整体进光量；随后光经过狭缝，选用型号为 ZXG–1.0–20、宽度为 20 μm 的狭缝，如 4B 所示，较小的狭缝宽度不仅可以增大光谱仪的分辨率，同时也提高了精度；如图 4C 所示，光从狭缝射出后首先经过准直镜，将发散光准直为平行光，之后以 35.8° 的入射角入射闪耀光栅，其中准直镜由光学调整架固定，可以在两个自由度上调整其俯仰，保证光轴平行于底面；之后光栅分光束被聚焦镜接住，将其汇聚到探测器上，如图 4D 所示。最终，我们成功地将整个光路集成在 17 cm × 14 cm × 8 cm 的矩形外壳里，并且内置数据传输接口，实现了便携性的设计初衷，图 4E 为使用 SolidWorks 软件建模的仿真模型图，图 4F 为样机实物图。表 2 为成本核算。

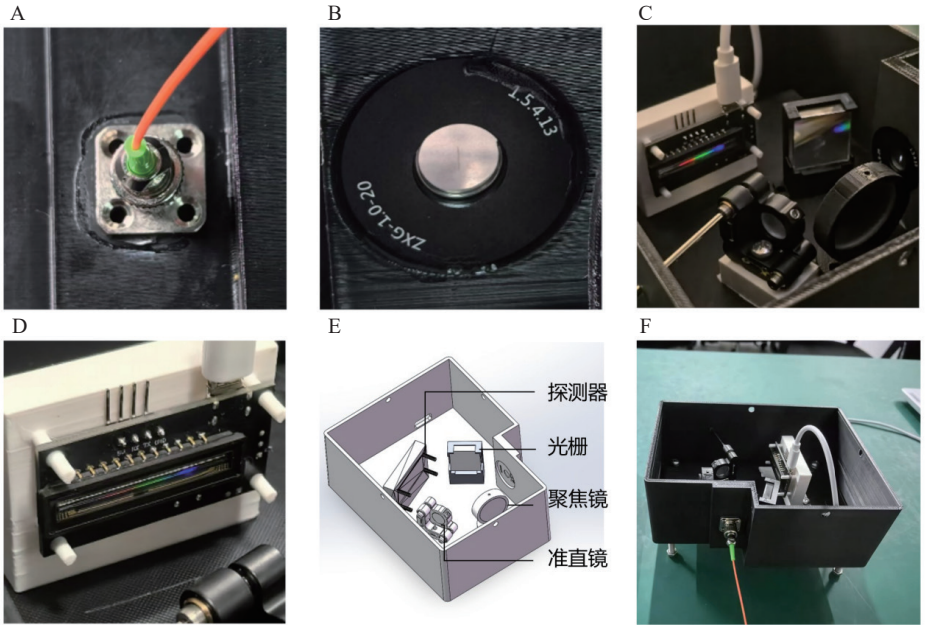


图 4 模型机搭建 A 为光纤接口；B 为狭缝；C 为分光光路；D 为探测器；E 为 SolidWorks 仿真模型；F 为样机实物图

表 2 成本核算

元件	价格（元）
3D 打印	23
光栅	330
反射镜	363
CCD	266
光纤	100
光纤接头	15
狭缝	130
总计	1 227

注：CCD 为电荷耦合器件。

4 算法设计与数据采集

在经过光学系统变换得到待检测光后，我们需要通过规范的数据采集与适度的数据处理，实现光谱仪对色散光的高质量捕捉与分辨，方便后续成分分析。数据的处理分析包括：归一化、基线校正、滤波降噪、波长映射。

光谱处理技术旨在消除光谱数据中由仪器、样品或环境因素引起的噪声和干扰，提高光谱精度，有时可改善光谱与分析物浓度之间的线性关系[9]，帮助我们了解物质信息。首先，光谱信号要进行数据变换以统一不同数据的衡量尺度，规范定义光谱强弱[10]。例如，光谱数据归一化能在不改变数据形状的前提下将数据分布至 0 ~ 1 的区间内；标准正态变换能使数据服从标准正态分布。其次，由于仪器漂移、背景散射和荧光效应等现象，所得光谱会被低频信号所干扰，我们需要对非峰值区域（主要包含背景信号）估计基线，区分目标光谱和背景光谱的形状[11]。常用的基线估计方法有多项式拟合、导数光谱法等，这些方法能够帮助我们准

确地识别和测量信号的真实特征。随后的滤波降噪也相当重要，收集到的光谱数据常有高频噪声干扰，数学定义为光谱曲线不平滑、无导数。我们可以通过盒式平滑、傅里叶域平滑和萨维茨基–戈莱（Savitzky–Golay, S–G）平滑等方法减少数据噪声。例如，S–G滤波器[12]对一定长度窗口内的数据点进行k阶多项式拟合，在整体光谱中实现移动窗口的加权平均以减轻噪声。最后，为将光谱仪输出的像素位置映射至实际波长，需记录标准光源光谱特征峰对应的像素位置与强度信息，将其与对应的已知波长进行配对，基于近似线性假设，利用最小二乘法构建像素值与波长之间的映射关系。

我们采用了麓邦LBHG1汞氩灯校准光源对光谱仪进行了波长校准，并分别测量了手电白光和473 nm、561 nm、640 nm激光器的光谱数据，对归一化后的数据分别进行基线校正和去噪，相应方法的参数如表3所示。

表3 基线校正与去噪方法及参数

方法	参数
基线校正方法	
多项式	degree=3; scale=0.5
最小二乘	lam=1e7; p=0.04; niter=30; scale=0.5
滑动窗口	window_size=1000
去噪方法	
滑动平均	window_size=10
S–G滤波器	window_size=20; polyorder=2
高斯滤波器	sigma=2.5

注：多项式中degree为多项式阶数，scale为缩放系数；最小二乘中lam为基线平滑度，p为峰偏离度，niter为迭代次数，scale为缩放系数；滑动窗口中window_size为窗口大小；滑动平均中window_size为窗口大小；S–G滤波器中window_size为窗口大小，polyorder为多项式阶数；高斯滤波器中sigma为高斯核标准差。

值得注意的是，上述涉及窗口的算法，其窗口均值是以当前点为中心对称取前后总长度为window_size的区间。例如，基线校正中的滑动窗口法，对于每一个点，其基点为该点前后长window_size/2区间的最小值。

如图5所示，在基线校正中，多项式拟合适合背景趋势稳定、峰值影响较小的情况；最小二乘法在保留峰形同时有效校正非线性基线方面具有较好的平衡性；滑动窗口法则在处理局部复杂漂移与强峰干扰方面更具鲁棒性。在去噪方面，滑动平均适合于对平滑程度要求较高、峰结构不复杂的初步处理任务；S–G滤波器更适合高分辨率光谱中保留细节的精细处理；而高斯滤波器则在降噪效果与形状保持之间提供了稳健的平衡，适用于多数典型光谱预处理场景。

为了达到最佳效果，我们需要根据算法选择进行参数优化。针对基线校正方法，我们通过对比不同参数的校正结果并结合光谱曲线的整体平滑性与背景趋势一致性，选择能够最有效消除背景漂移并保持谱峰形态的方法。该策略保证了背景信号的合理扣除，使校正后的光谱能够满足后续分析所需的精度与稳定性；针对去噪方法，我们基于473 nm光谱，在峰值左右各取半高全宽长度作为信号区域，选取峰值向右100 ~ 500区间作为噪声区域，基于公式$SNR=10\log\frac{p_{\text{signal}}}{p_{\text{noise}}}$计算信噪比，其中，$p_{\text{signal}}$表示信号平方的均值，$p_{\text{noise}}$表示噪声平方的均值。经过一系列算法实验，以信噪比强度为依据进行参数选择，我们得出高斯滤波器最佳参数为sigma=2.5；滑动平均最佳参数为window_size=10；S–G滤波器最佳参数为window_size=20及polyorder=2。选取信噪比最高的算法及对应参数作为后续进行数据处理的流程方法，得到最佳信噪比为250:1。

随后我们使用汞氩灯通过对标已知波长峰值进行线性回归，计算斜率及截距，建立像素位置（P）与波长（λ）的线性关系$\lambda=a\times P+b$。相关统计数据及可视化如图6所示，图6A上蓝点为实际数据，红线为线性回归曲线，浅蓝色区域为95%置信区间。图中置信区间线宽小，几乎紧密包围拟合曲线，说明线性回归效果极佳，可用于波长映射。图6B为残差分析，数据几乎为0，均位于2σ区间内，均方根也达到了0.36的理想值。

5 光谱分析

从2个方面展示便携式光谱仪的性能与应用效果：①光谱仪的性能表征，包括波长校准精度、分辨率与信噪比等关键指标；②实际光谱测量结果，通过对白光光源、标准汞氩灯以及激光器光谱的采集与处理，验证系统在不同光源条件下的测量能力，并与商用光谱仪进行对比分析。

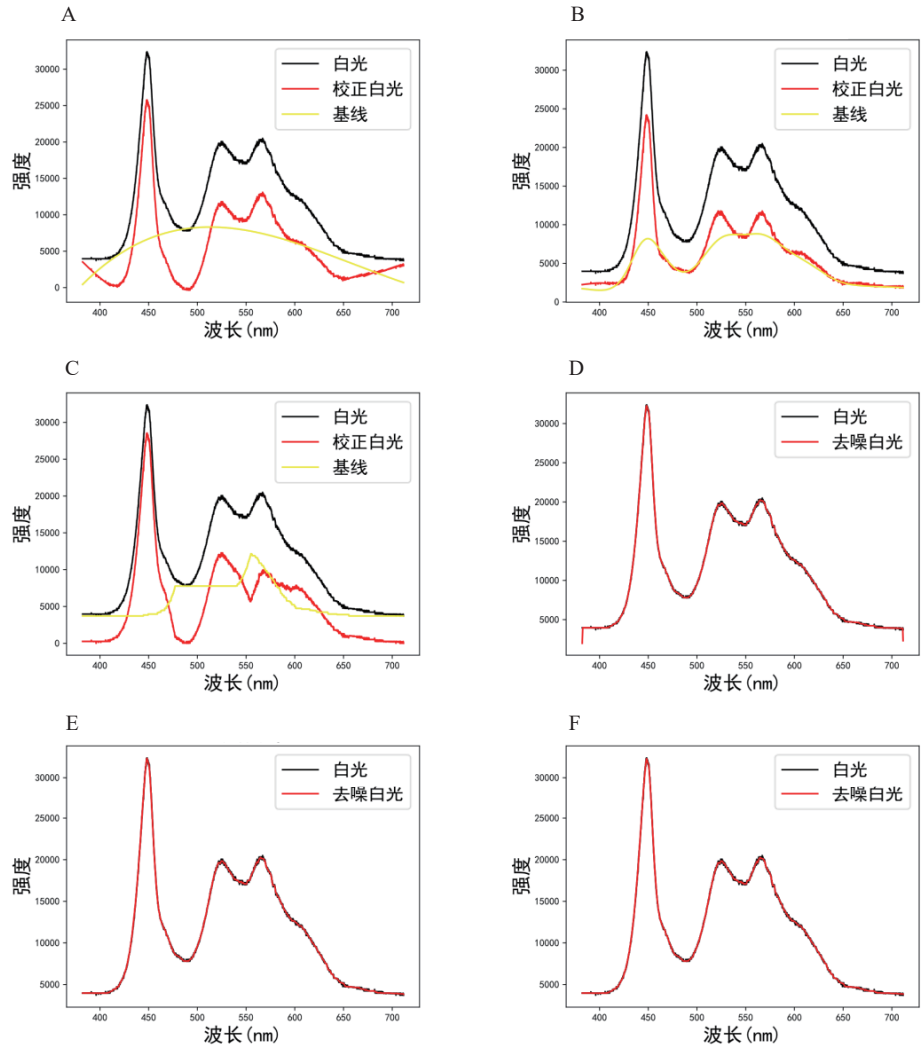
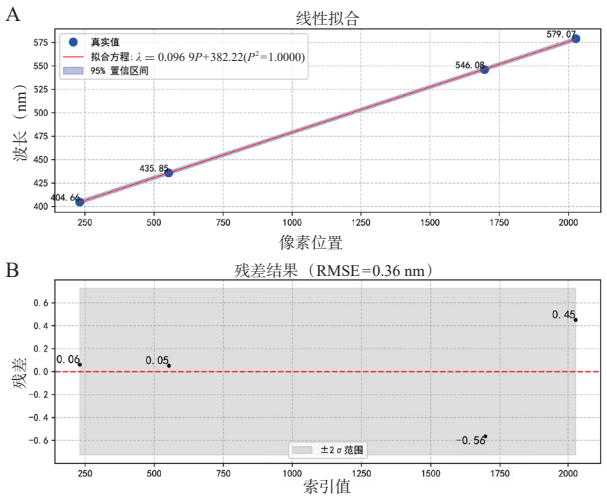


图 5 基线校正与去噪结果 A 为基线校正多项式法；B 为基线校正最小二乘法；C 为基线校正滑动窗口法；D 为去噪滑动平均法；E 为去噪 S-G 滤波器法；F 为去噪高斯滤波器法



注：RMSE 为均方根误差。

图 6 波长映射建立 A 为线性回归结果；B 为针对线性回归的统计分析

处理后白光光源光谱图如图 7A 所示。针对 473 nm 激光器我们进行归一化及多次去噪处理，得到光谱结果如图 7B 所示。为了展示光谱的准确性，我们用市售海洋光学 USB4000 光谱仪实验测得的 473 nm 激光光谱与样机光谱仪测得的 473 nm 激光光谱进行对比。为了展示光谱仪的分辨能力，针对 473 nm 激光光谱的半高全宽进行了 5 次重复测量，统计结果为 1.18 nm，海洋光学 USB4000 光谱仪测量光谱的半高全宽结果为 0.79 nm（图 7C），同时，相较于 USB4000 光谱仪 300:1 的信噪比，本研究构建的光谱仪可以达到 250:1 的信噪比。虽在分辨率和信噪比上有微小差距，但本研究构建的光谱仪很好地权衡了成本与性能，将价格控制在 1 000 元左右，仅为 USB4000 光谱仪价格的 1/10。

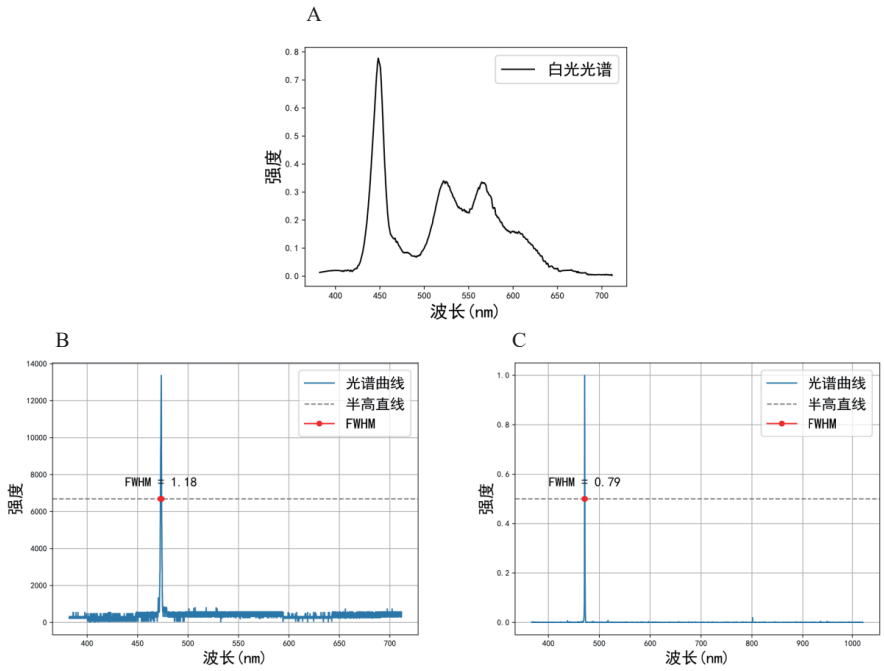


图7 光源光谱测量结果及相关特性分析 A为数据处理后的某手电白光光谱图；B为用本研究构建的便携式光谱仪测量473 nm激光光谱的半高全宽；C为用海洋光学USB4000光谱仪测量473 nm激光光谱的半高全宽

为了进一步验证系统在不同窄带光源下的测量能力，我们选取561 nm激光器和640 nm激光器作为测试对象。如图8所示，经归一化与基线校正处理后，本系统均获得了清晰、单峰分布的光谱曲线。测得的谱峰位置分别稳定地出现在561 nm与640 nm附近，与激光器标称值保持高度一致，说明本研究构建光谱仪的波长映射关系可靠。

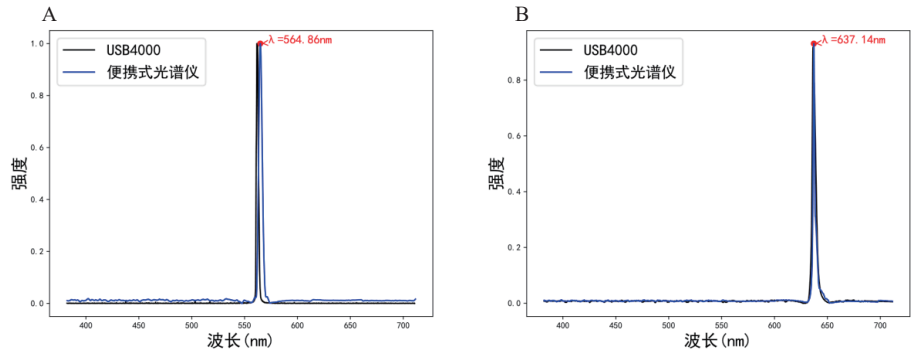


图8 激光光谱测量结果 A为561 nm处的光谱测量结果；B为640 nm处的光谱测量结果

将上述结果与USB4000光谱仪的测量结果进行对比，两者在光谱中心位置和整体形态上基本一致，表明本系统能够准确表征不同波长的窄带光源信号。虽然在谱线细节分辨能力上略逊于USB4000，但总体光谱形态与峰值定位均高度一致，进一步验证了该便携式光谱仪在实际测量中的有效性和稳定性，同时突出其相较于USB4000光谱仪低成本的优势。

6 交叉验证与误差传递分析

本研究对理论计算结果、Zemax仿真结果与样机实测结果进行了定量交叉验证，并分析了主要光学参数误差对最终性能的传递效应。在473 nm波长处，理论分辨率由公式 $\Delta\lambda = \frac{ad}{mf_1} \times \cos\alpha$ 计算得到约为0.27 nm；Zemax光学仿真结果为1 nm；而实际测量得到的分辨率为1.18 nm。由此可见，三者之间呈现出理论分辨率＞仿真分辨率＞实际分辨率。这是由于在理论计算中我们将模型简化为仅由衍射级次（m），空间色散与狭缝宽度（a）决定，忽略像差与探测器采样限制带来的误差；而在实际测量中由于元件制造公差及温度漂移、机械振动等对光路稳

定性的影响，导致实际分辨率略大于理论分辨率，同时由于使用球面反射镜，存在球差、彗差等固有几何像差，且未引入消像差光学补偿元件，因此像差为系统固有属性，基于这一点，本文不对像差进行单独的理论分析，而直接将其视为系统分辨率的固定约束背景，在实际测试中体现。

从光传播路径的角度看，狭缝实际存在加工误差，反射镜及光栅等光学元件存在角度装配偏差及光学像差，探测器存在暗电流和读出噪声等，都会淹没弱信号，这些非人工误差都会对光谱仪最终效果造成影响。

为了探究各部分误差对最终分辨率 $\Delta\lambda$ 的影响，我们使用计量学中常用的弹性系数绝对值，即对一影响变量 x 以 $|S|=\left|\frac{\partial(\ln\Delta\lambda)}{\partial(\ln x)}\right|=\left|\frac{\partial\Delta\lambda}{\partial x}\frac{x}{\Delta\lambda}\right|$ 消除量纲影响，表征其对最终分辨率的影响程度。计算结果表明，狭缝宽度和光栅常数的弹性系数绝对值都等于 1，表明在同等相对误差下，狭缝宽度与光栅常数对分辨率的影响等强；入射角的弹性系数绝对值为 0.45，表明入射角的影响为其自身的 45%。除此之外，其他元件带来的制造及机械误差都会在不同程度上影响光谱仪性能。需要指出的是，该方法假设误差在小范围内线性传递，对非线性效应及系统性误差未作深入讨论。

7 总结与展望

综上所述，本研究开发了一款具备高便携性与强功能性的低成本光谱仪，以满足资源探测、工业监测等多领域在野外及现场等复杂环境下对快速、便捷光谱分析的需求。经过严格的光谱标定测试，系统在 381 ~ 716 nm 可见光波段内实现 1 nm 级别的光谱分辨率。机械结构方面，采用 3D 打印技术，使用 ASA 材料构建蜂窝状支撑外壳，在显著降低整机重量和尺寸的同时保证了外壳稳定性。同时，通过优化的原件选择，整体成本可以控制在 1 000 元左右，极大地降低了制造成本。本研究的优势是在极低的成本、极高的便携性和较高的分辨率之间找到了很好的平衡点，拓展了光纤光谱仪在现场检测和应急响应场景中的应用。

未来，便携式光纤光谱仪的设计将继续朝着小型化、高分辨率与低成本方向推进。当前系统依赖于市场上已有透镜进行选型，系统体积仍相对较大，未来依托定制化光学元件制造，准直镜与聚焦镜的焦距有望进一步缩短，使整体结构更为紧凑并提升系统集成度；同时通过对入射角度的精细调控，减小系统的像差，从而进一步提高光谱分辨率和成像质量；此外，本系统目前依托电脑上位机进行数据传输，为适应多样化应用场景的快速响应需求，未来将建立更加规范化和自动化的数据处理流程，实现数据采集和分析一体化，提升光谱数据分析的效率与稳定性。本研究设计的低成本便携式交叉 C-T 光谱仪，具备极大的扩展潜力，在结合算法调教与嵌入式系统优化后，有望在生物医学、食品安全、环境检测、实验教学等领域实现更广泛的应用。

[参 考 文 献]

[1] Yang Z, Albrow-Owen T, Cai W, et al. Miniaturization of optical spectrometers [J]. Science, 2021, 371(6528): eabe0722.

[2] Pu Y, Pérez-Marín D, O'Shea N, et al. Recent advances in portable and handheld NIR spectrometers and applications in milk, cheese and dairy powders [J]. Foods, 2021,10(10): 2377.

[3] 中国光谱仪市场爆发式增长：2025年3月中标金额同比激增背后的机遇与挑战 [EB/OL].(2025-04-29) [2025-07-02]. https://www.yiqi.com/news/detail_596ab38b1f41c803.html.

[4] 庞亚军. 小型化高分辨率多次色散光栅光谱仪研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.

[5] Xia L, Liu Y, Chen R T, et al. Advancements in miniaturized infrared spectroscopicbased volatile organic compound sensors: a systematic review [J]. Applied Physics Reviews, 2024, 11(3): 031306.

[6] 张国栋. 便携式光纤光谱仪光学系统设计与分析 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.

[7] Zheng C. The application and development of photoelectric sensor [C]//Intelligence Computation and Evolutionary Computation. Advances in Intelligent Systems and Computing. Berlin: Springer, 2013: 671-677.

[8] TOSHIBA CCD linear image sensor CCD (charge coupled device) [EB/OL]. (2001-10-15) [2025-07-02]. https://spectrecology.com/wp-content/uploads/2021/03/Toshiba-TCD1304AP-CCD-array.pdf.

[9] Sun D W. Infrared spectroscopy for food quality analysis and control [M]. Pittsburgh: Academic Press, 2009.

[10] Pizarro C, Esteban-díez I, Nistal A J, et al. Influence of data pre-processing on the quantitative determination of the ash content and lipids in roasted coffee by near infrared spectroscopy [J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 509(2): 217-227.

[11] Goyal R, Singha P, Singh S K. Spectroscopic food adulteration detection using machine learning: current challenges and future prospects [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 146: 104377.

[12] Frizzarin M, Caponigro V, Domijan K, et al. Lactose prediction in dry milk with hyperspectral imaging: a data analysis competition at the "International Workshop on Spectroscopy and Chemometrics 2024" [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2025, 258: 105279.