

基于凹面光栅的特定蛋白分析仪结构设计及性能分析

李俊伟¹, 倪屹^{1*}, 郭瑜¹, 张啸天¹, 钟道鸿¹, 樊俊星²

¹江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122;

²无锡克劳斯麦迪医疗仪器有限公司, 江苏 无锡 214028

摘要 为解决罗兰光栅光谱成像不易直接读取、平面场凹面光栅成像算法复杂等问题,设计了一种基于全息凹面光栅原理的用于特定蛋白分析仪生化检测的分光光度计。该结构以罗兰光栅为基底,采用双透镜作为过渡元件,将罗兰光栅的曲面成像过渡成平场光谱,同时采用光学设计软件 Zemax 对该结构进行模拟和优化。优化结果表明,分光光度计能够实现光谱平场化,工作波段为 320~800 nm,最高分辨率可达 0.5 nm,整体分辨率优于 1.7 nm,可被光电二极管阵列直接读取,结构特性满足特定蛋白分析仪的测量要求。样机实验结果与模拟结果一致,仪器重复性、准确度、稳定性及线性度均达到行业标准。

关键词 光谱学; 特定蛋白分析仪; 全息凹面光栅; Zemax; 仪器性能

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0830002

Structural Design and Performance Analysis of Specific Protein Analyzer Based on Concave Grating

Li Junwei¹, Ni Yi^{1*}, Guo Yu¹, Zhang Xiaotian¹, Zhong Daohong¹, Fan Junxing²

¹School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²Wuxi Cross Medical Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214028, China

Abstract In order to solve such problems as difficulty in directly reading the spectral imaging of Rowland grating and the complex imaging algorithm for flat-field concave gratings, we design a spectrophotometer based on principle of the holographic concave grating for biochemical detection of specific protein analyzers. This structure is based on the Rowland grating, and uses two lenses as the transition elements to transform the curved surface imaging of Rowland grating to the flat-field spectrum. Meanwhile, we simulate and optimize the structure with the optical design software Zemax. The optimization results show that the spectrophotometer whose working band is 320-800 nm with the highest resolution of 0.5 nm and the overall resolution of 1.7 nm, can be directly read by the photodiode array and can achieve plane spectrum. The structural characteristics meet the measurement requirements of specific protein analyzers. The experimental results of the prototype are consistent with the simulation results, and the repeatability, accuracy, stability, and linearity of the instrument are all up to the industry standards.

Key words spectroscopy; specific protein analyzer; holographic concave grating; Zemax; instrument performance

OCIS codes 300.6550; 050.1950; 120.4570; 090.6186

1 引 言

特定蛋白分析仪(SPA)是通过分光光度法^[1]及光谱分析法^[2]检测抗原抗体反应,用电信号来反映血清、血浆或尿液中特定蛋白、酶的浓度,进行体外诊断(IVD)的仪器。可测定谷丙转氨酶、血清总蛋白、前白蛋白等多种蛋白的浓度,并根据蛋白浓度来判定人体肌体组织是否发生病变。目前的研究主

要集中于仪器的自动化、智能化,对光学系统研究较少。此外,以光谱分析为基础的检测模块常用三棱镜、干涉滤光片或者光栅作为分光器件。三棱镜的分光精度低^[3];滤光片受潮易发生霉变,且透射率、半峰全宽、峰值波长都会因温度、湿度等参数变化而变化^[4-6];罗兰光栅光谱不易检测,即使已有研究^[7]可使会聚到罗兰圆上的光谱过渡到平面场,但算法复杂,不易应用;平场光栅的衍射约束条件繁琐,需

收稿日期: 2019-03-13; 修回日期: 2019-04-10; 录用日期: 2019-04-23

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金(BK20160190)

* E-mail: niy2011@163.com

要求解不同像差项的非线性方程组以消除具体像差与补偿像面,且工艺复杂^[8]。光谱仪常用的 Czerny-Turner 型光栅^[9]结构复杂,不易小型化,光强与通量衰减明显。

针对以上问题,本文以罗兰光栅为基底,摆脱复杂算法与工艺,利用双透镜结构将其曲面成像光谱过渡到平像场,可供平面光电二极管阵列直接读取全光谱信号。

2 光学检测原理

特定蛋白分析仪主要由光学检测模块、样本模块、试剂模块和温控模块组成。其中,检测模块为整台仪器的核心,对分析结果具有重要影响。光学检测方法有荧光免疫法、透射光法和散射光法等^[10],检测模块采用基于后分光技术^[11]的透射光法,如图 1 所示。

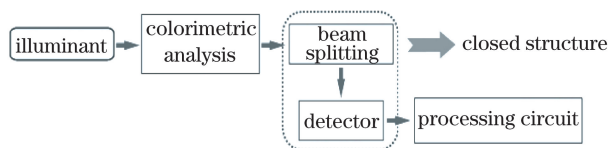


图 1 后分光技术

Fig. 1 Post-spectral technology

当试剂与样本发生生化反应时,入射光通过反应溶液的光吸收效应^[12]会引起透射光强的衰减,而后经分光光度计产生单色光。该过程可用 Lambert-Beer 定律进行分析,即

$$A = \lg \frac{I_0}{I} = \epsilon bc, \quad (1)$$

式中: A 为吸光度; I_0 为入射光强度; I 为透射光强度; ϵ 为吸光系数(单位: $L \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$); c 为溶液浓度(单位: $\text{mol} \cdot L^{-1}$); b 为液层厚度(单位:cm)。 A 在一定范围内与 ϵb 乘积成正比。探测器可记录单色光强,通过电信号来反映样本浓度。透射光法又可分为比色法与比浊法,比色法为样本和试剂反应产生特定颜色复合物,当试剂过量时,显色强度与蛋白质的浓度成正比。比浊法类似,通过浊度反映样本浓度。一般采用标准曲线法或标准溶液法进行分析,测量样本溶液吸光度,与同等条件(ϵb 值固定)下的标准溶液吸光度进行对比,进而得到样本溶液浓度。计算公式为

$$C_x = \frac{C_s(A_x - A_0)}{(A_s - A_0)}, \quad (2)$$

式中: A_s 、 C_s 分别为标准溶液浓度与吸光度; A_x 、 C_x 分别为样本溶液浓度及吸光度; A_0 为试剂空白或水

空白的吸光度。

3 光学系统设计

3.1 全息凹面光栅原理

全息凹面光栅的结构如图 2(a) 所示,光栅曲率半径为 R ,球面中心与坐标原点 O 重合; Z 轴方向为光栅刻蚀方向; Y 轴方向垂直于刻蚀方向; X 轴方向为光栅法线方向,光栅表面满足球面方程。复合光通过狭缝 S 上一点 $M(x, y, z)$ 经凹面光栅上任一点 $P(\kappa, \lambda, \mu)$ 衍射后成像点为 $N(x', y', z')$ 。其中,入射臂长 OM 定义为 r_M ,出射臂长 ON 定义为 r_N ,记录光源点 C 、 D 臂长分别为 r_C 、 r_D ,四臂与 XOY 的夹角依次为 α 、 β 、 γ 、 δ ,且均位于 XOY 面内。当全息凹面光栅为罗兰圆型光栅时, M 、 N 两点位于罗兰圈上,且罗兰圈半径为光栅曲率半径的 $1/2$,如图 2(b) 所示。当光束从狭缝入射到光栅 G 时,光谱成像为球面如图中 $\lambda_1 \sim \lambda_2$,故光电探测器只有动态读取时才可获取全光谱。

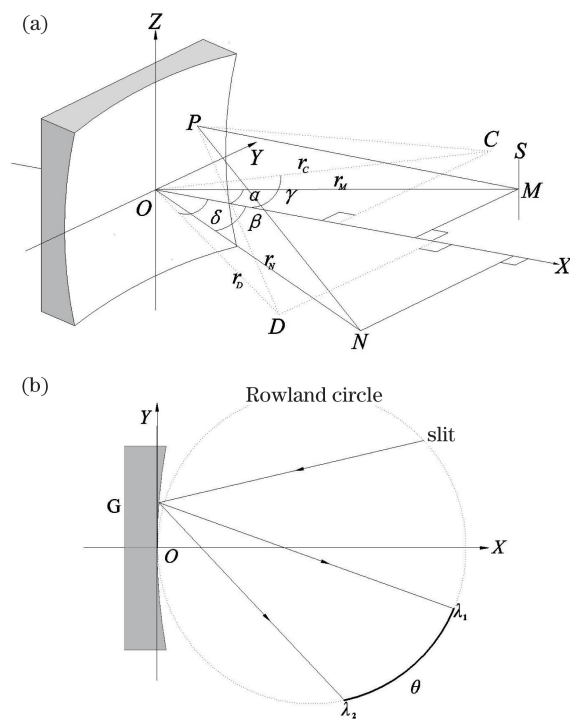


图 2 光栅衍射原理。(a) 全息凹面光栅;(b) 罗兰光栅

Fig. 2 Grating diffraction principle. (a) Holographic concave grating; (b) Rowland grating

全息凹面光栅有色散和衍射功能,可将光线会聚成点斑,克服了平面光栅谱线弯曲和色畸变的缺陷^[13]。衍射成像原理可用方程 $d(\sin \alpha + \sin \beta) = k\lambda$ 描述^[14]。其中, d 为光栅条纹间距; α 为入射光角度即上述入射臂 OM 与面 XOY 的夹

角; β 为衍射光角度即上述出射臂 ON 与面 XOY 的夹角; k 为衍射光级次; λ 为衍射光波长。实际上,光栅在成像时都会因刻蚀结构和球面基底出现像差^[15]。根据相关理论^[16],像差与光线追迹可用 $F=MP+NP+k\lambda/d$ (MP 及 NP 为光程距离)推算出的主光线 MPN 光程函数 $F(y,z)$ 的幂级数展开式表示为

$$F(y,z) = F_{00} + F_{10}y + \frac{1}{2}F_{20}y^2 + \frac{1}{2}F_{02}z^2 + \frac{1}{2}F_{30}y^3 + \frac{1}{2}F_{12}yz^2 + \dots, \quad (3)$$

式中: F_{ij} 为像差系数, i,j 对应 $y^i z^j$ 的幂指数。 F_{20} 为离焦; F_{02} 为像散; F_{30} 为子午彗差; F_{12} 为弧矢彗差。随着像差幂次的升高,光程函数所受影响逐渐降低。另外,(3)式中像差系数 F_{ij} 均由使用结构与记录结构组成,可用公式描述为^[17]

$$F_{ij} = M_{ij} + \frac{k\lambda}{\lambda_0} H_{ij}, \quad (4)$$

式中: λ_0 为光栅制作的记录波长; M_{ij} 为使用结构像差参数,与光源点 M 以及成像点 N 的位置有关; H_{ij} 为记录结构像差参数,与记录光源点 C,D 有关。理论上,达到理想成像效果即 $F(y,z) \equiv 0$ 时,要求(3)式中各项系数为0,但实际上这是无法实现的。为获得较为理想的光斑质量,可在一定程度上消除某些像差,或使其相互抵消^[18],将影响降到最低。

3.2 结构模拟与优化

特定蛋白分析仪所用波长为340~800 nm,即可见光区域与近紫外和近红外区域。根据结构要求,利用Zemax对光路进行仿真与优化,图3(a)和图3(b)分别为设计的基于罗兰光栅的分光结构和整体检测光路图,主要包含9个部分:1(光源)、2(聚焦透镜)、3(比色皿前表面)、4(比色皿后表面)、5(会聚透镜)、6(罗兰光栅)、7(前透镜)、8(后透镜)、9(成像面)。

两个透镜成一定角度,将光线过渡至平面;透镜7前表面为球面,后表面为平面,透镜8结构与其相同,而面型顺序相反。两个透镜间成一定角度,可将光栅原本呈现出的曲面点列图过渡成平面图像。光路主要技术参数如表1所示。

通过光线追迹,分别对340,405,505,600,660,790 nm处的点列图进行分析,如图4所示。图5所示为工作范围光谱点列图在 Y' 轴(Zemax中分光结构所在三维坐标系)的均方根(RMS)与波长的关系。

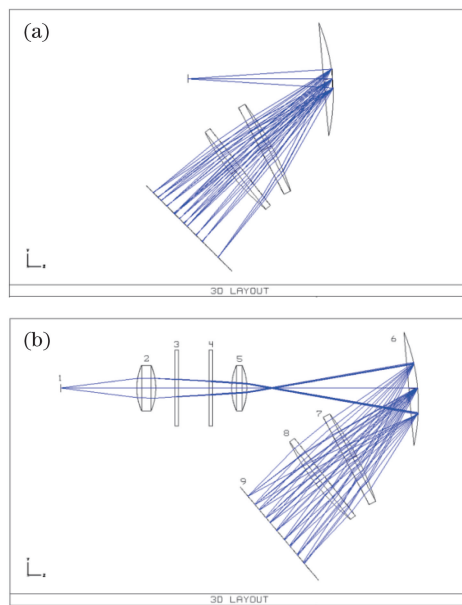


图3 3D原理图。(a)分光结构;(b)整体光路图
Fig. 3 3D principle schematic. (a) Spectroscopic structure; (b) overall light path

表1 光路主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of optical path

Parameter	Value
Spectral range /nm	320-800
Grating density /($g \cdot mm^{-1}$)	950
Radius of grating /mm	49.8
Diffraction order	-1
Radius of lens 1 (7) /mm	80.0
Radius of lens 2 (8) /mm	60.1
Angle between lens 1 and lens 2 /($^\circ$)	10.4
Distance from slit to grating center /mm	39.2

从图4(a)~(f)可以看出,各波长处分辨率分别为0.5,1.0,1.0,1.6,1.7,1.7 nm。分析可知,短波长处成像效果较好,精度较高,在其他波段效果略差,整体精度优于1.7 nm。图5中,Field 1~3分别对应视场角为 0° 、 0.15° 及 0.3° 时的均方根,波长为412~550 nm时均方根小于 $15 \mu m$,在其余波段均方根小于 $20 \mu m$ 。实际设计中,可通过优化狭缝的宽度以及各元件坐标来提高成像分辨率;另外,可在特定波长处添加条形滤光片,以进一步提高精度。

4 光电结构设计与实验分析

根据Zemax模拟结果,绘制光电结构示意图并研发样机,如图6(a)和图6(b)所示。发散的光源光

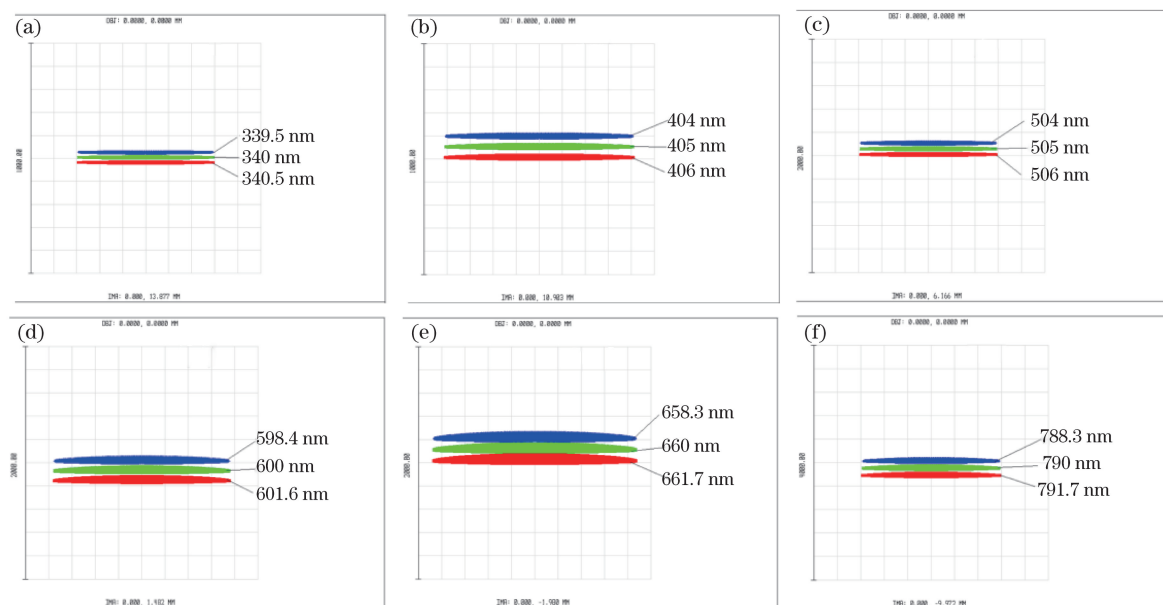


图 4 点列图。(a) 340 nm 处点列图;(b) 405 nm 处点列图;(c) 505 nm 处点列图;(d) 600 nm 处点列图;
(e) 660 nm 处点列图;(f) 790 nm 处点列图

Fig. 4 Spot diagrams. (a) Spot diagram at 340 nm; (b) spot diagram at 405 nm; (c) spot diagram at 505 nm;
(d) spot diagram at 600 nm; (e) spot diagram at 660 nm; (f) spot diagram at 790 nm

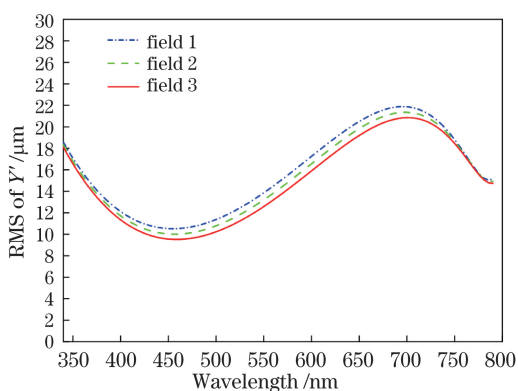


图 5 Y'轴方向点列均方根与波长的关系
Fig. 5 RMS of Y' versus wavelength

束经椭球反射镜面后会聚在透镜处,后经比色皿到达聚焦透镜,该透镜采用螺纹结构固定,可通过调节螺纹调整光线;随后,光线通过狭缝后因光栅发

生衍射和会聚;最后,光线通过 lens 1 及 lens 2,平面光谱被光电探测器直接读取。实际光谱如图 7 所示。

探测器因光照射产生光电流,光电流被放大器经初级放大转换成电压,后再经过放大、数/模(A/D)转换后被处理。图 8 为光电流转化为电压的放大原理。其中 U1 为运算放大器,I 为电流激励源,R1、R2 及 Rf 分别为输入端电阻、输出端电阻及反馈电阻,C1、C2 及 C3 分别为输入端电容、输出端电容及滤波电容。V1 及 V2 则分别为 +5 V 直流电源及 -5 V 直流电源,I1 及 I2 分别为噪声电流及脉冲电流。TD 为第一个脉冲相对于 0 时刻的延迟时间,TR 为脉冲上升时间,TF 为脉冲下降时间,PW 为脉冲宽度,PER 为脉冲周期。OS1 及 OS2 为调零端,OUT 为输出端。

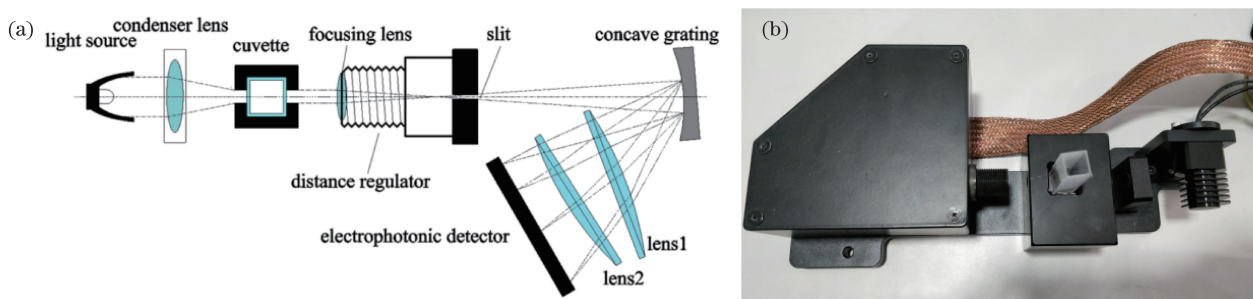


图 6 样机。(a)分光光度计结构图;(b)实物图

Fig. 6 Prototype structure. (a) Schematic of spectrophotometer structure; (b) photograph

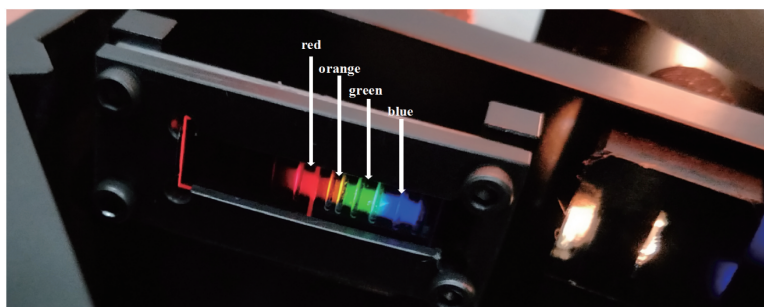


图 7 实际光谱

Fig. 7 Actual spectrogram

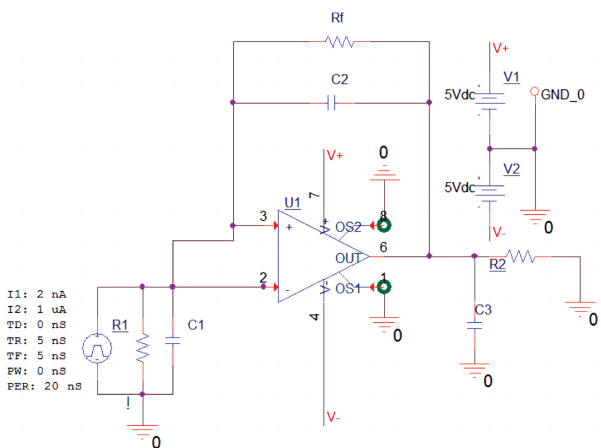


图 8 电流-电压放大原理图

Fig. 8 Schematic of current-voltage amplification principle

经过检测后,参考行业标准,对结构进行重复性、准确度、稳定性及线性度测试,并与同批次研发的基于平场凹面光栅的分析仪进行对比,对比项目为准确度、稳定性及线性度。

4.1 重复性测试

目前,特定蛋白分析仪的行业标准尚未出台,本课题参照标准《YYT 0654—2017 全自动生化分析仪》^[19],用 UV2600 系列分光光度计进行辅助分析。配置了测试所需的重铬酸钾溶液、橘黄 G 溶液及硫酸铜溶液,依次检测仪器在 350,475,800 nm 处的重复性。图 9(a)~(c)依次为 350,475,800 nm 处两次测量的吸收值曲线,两次测量结果以虚、实线区分。

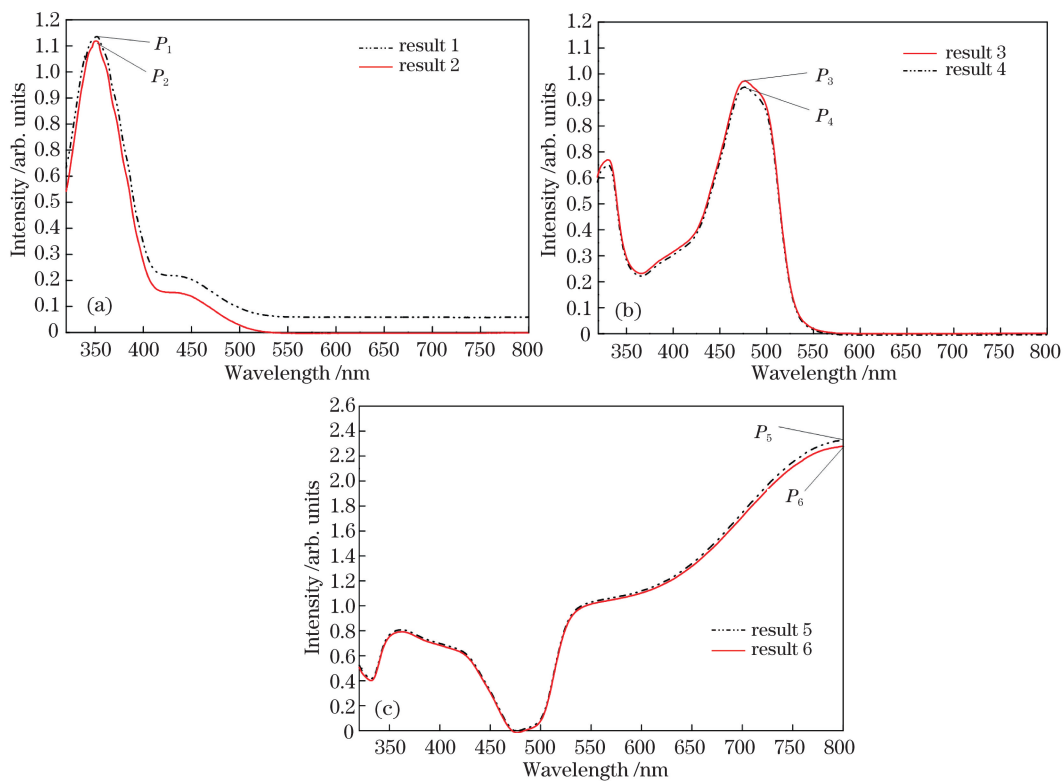


图 9 重复性测试。(a)350 nm 处重复性;(b)475 nm 处重复性;(c)800 nm 处重复性

Fig. 9 Repeatability test. (a) Repeatability at 350 nm; (b) repeatability at 475 nm; (c) repeatability at 800 nm

图 9(a)中曲线 1 峰值坐标为 $P_1(352.0, 1.136)$, 曲线 2 峰值坐标为 $P_2(351.5, 1.119)$; 图 9(b)中曲线 3 峰值坐标为 $P_3(477.0, 0.974)$, 曲线 4 峰值坐标为 $P_4(476.0, 0.950)$; 图 9(c)中曲线 5 峰值坐标为 $P_5(800.0, 2.326)$, 曲线 6 峰值坐标为 $P_6(799.0, 2.279)$ 。由此可见, 仪器在紫外光区域、蓝绿光区域及红光区域的吸收值误差较小, 具有较好的重复性。

4.2 准确度测试

根据要求, 以去离子水为参比, 在 340 nm 处分别测量标准吸光度为 1.0 和 0.5 的 $K_2Cr_2O_7$ 标准溶液, 允许误差分别为 ± 0.07 和 ± 0.025 。实际配制的溶液吸光度略有偏差, 分别为 1.0060 和 0.5080。以标准步骤对模块进行 15 次吸光度测试, 并与同批次研发的分析仪作对比, 两台仪器编号依次为 #1、#2, 比较结果如表 2 所示。

表 2 两台仪器的准确度结果
Table 2 Accuracy of two devices

Item	Measured absorbance /arb. units			
	#1		#2	
Max	0.9865	0.4975	0.9805	0.4972
Min	0.9861	0.4965	0.9769	0.4942
Average	0.9862	0.4970	0.9780	0.4955
Accuracy	-0.0198	-0.0110	-0.0280	-0.0125

从表 2 可以看出, 测试结果均分布在 0.936~1.076 及 0.483~0.533 范围内, 达到行业标准要求, #1 样机准确度整体优于 #2 分析仪的准确度。

4.3 稳定性测试

分别配制吸光度均为 0.50 的 $K_2Cr_2O_7$ 溶液及 $CuSO_4$ 溶液。在 340 nm 处测量 $K_2Cr_2O_7$ 溶液稳定性; 在 660 nm 处测量 $CuSO_4$ 溶液稳定性, 要求吸光度变化值不大于 0.01。仪器 #1、#2 稳定性对比结果如表 3 所示。

表 3 两台仪器的稳定性结果
Table 3 Stability of two devices

Item	Measured absorbance /arb. units			
	$K_2Cr_2O_7$ (340 nm)		$CuSO_4$ (660 nm)	
	#1	#2	#1	#2
Max	0.4955	0.4954	0.5170	0.5207
Min	0.4941	0.4906	0.5143	0.5176
Average	0.4948	0.4935	0.5156	0.5192
Stability	0.0014	0.0048	0.0027	0.0031

通过表 3 分析可知, 仪器 #1 在 340 nm 处吸光

度稳定性明显优于仪器 #2; 在 660 nm 处仪器 #1 吸光度稳定性略优于仪器 #2。总体而言, 仪器 #1 吸光度稳定性满足行业标准要求。

4.4 线性度测试

根据要求, 在色素原液($K_2Cr_2O_7$ 或 $C_6H_5NO_3$) 中加入稀释液, 通过控制原液与稀释液的体积比例, 得到 11 种浓度梯度的混合溶液。假设 $K_2Cr_2O_7$ 原液浓度为 T , 则 11 种 $K_2Cr_2O_7$ 混合溶液的浓度依次为 $0, 0.1T, 0.2T, \dots, 0.9T, T$, 其相对浓度可依次表示为 $0, 1, 2, \dots, 9, 10$ 。其中, 浓度为 0 (相对浓度为 0) 的溶液即为稀释液, 浓度为 T (相对浓度为 10) 的溶液即为原液。 $C_6H_5NO_3$ 溶液配制方法类似。在 340 nm 波长处测定 11 种浓度的 $K_2Cr_2O_7$ 溶液的吸光度。同理, 在 405 nm 波长处测定 11 种浓度的 $C_6H_5NO_3$ 溶液的吸光度。以相对浓度为横轴, 吸光度均值为纵轴, 用最小二乘法对相对浓度为 0, 1, 2, 3 的溶液对应的吸光度值数据进行线性拟合, 得到斜率与纵轴截距。图 10(a)~(d) 依次为仪器 #1 在 340 nm 处检测的 $K_2Cr_2O_7$ 溶液拟合直线、仪器 #1 在 405 nm 处检测的 $C_6H_5NO_3$ 溶液拟合直线、仪器 #2 在 340 nm 处检测的 $K_2Cr_2O_7$ 溶液拟合直线, 以及仪器 #2 在 405 nm 处检测的 $C_6H_5NO_3$ 溶液拟合直线。

图 10(a) 拟合直线斜率为 0.3539, 截距为 0.0020; 图 10(b) 拟合直线斜率为 0.3743, 截距为 0.0043; 图 10(c) 拟合直线斜率为 0.3622, 截距为 0.0020; 图 10(d) 拟合直线斜率为 0.3658, 截距为 0.0030。依据测定数据及拟合直线, 计算相对浓度依次为 4, 5, \dots , 9, 10 时溶液对应的吸光度的相对偏移 D_n , 要求 D_n 在 $\pm 5\%$ 范围内, n 为相对浓度, 可取 4, 5, \dots , 10。结果如表 4 所示。

根据图 10 与表 4 绘制相对浓度与 D_n 绝对值的关系曲线, 如图 11 所示。由图可知, 两台仪器的 D_n 都随浓度的上升而递增。比较发现, 仪器 #1 在 340 nm 与 405 nm 处 D_n 均小于 #2 的结果, 表明仪器 #1 线性度优于仪器 #2。另外, 仪器 #1 在高浓度处仍能达到行业标准, 表明其在高浓度处具有较高灵敏度, 吸光度测量范围宽; 而仪器 #2 在相对浓度为 9、10 时吸光度 D_n 值(图 11 虚线方框区域所示) 已超出行业标准范围。

4.5 仪器性能参数对比与讨论

对设计的分光光度计 #1 与 4 种商品化便携式光谱仪器进行性能参数对比, 对比结果如表 5 所示。

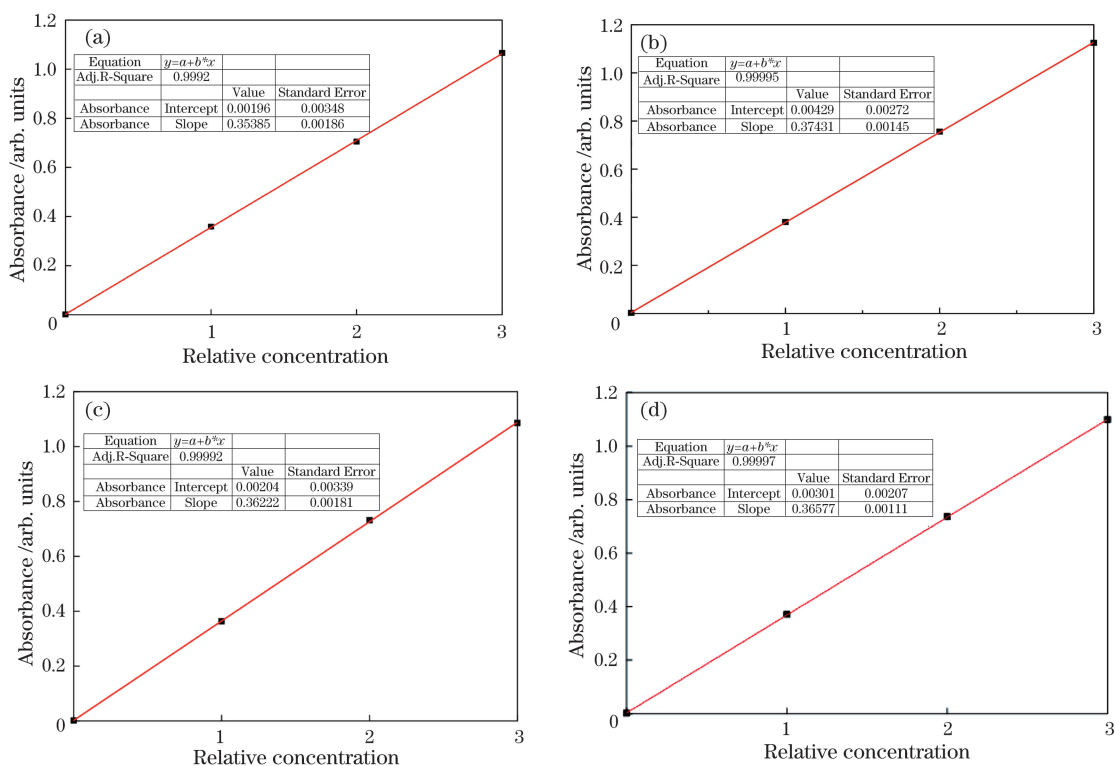


图 10 拟合直线。(a) #1 340 nm 处拟合直线;(b) #1 405 nm 处拟合直线;(c) #2 340 nm 处拟合直线;
(d) #2 405 nm 处拟合直线

Fig. 10 Fitted lines. (a) Fitted line at 340 nm of #1; (b) fitted line at 405 nm of #1;
(c) fitted line at 340 nm of #2; (d) fitted line at 405 nm of #2

表 4 两台仪器线性度相对偏移参数

Table 4 Relative bias parameters of two devices

Relative concentration	Average absorbance /arb. units				$D_n / \%$			
	$K_2Cr_2O_7$		$C_6H_5NO_3$		$K_2Cr_2O_7$		$C_6H_5NO_3$	
	#1	#2	#1	#2	#1	#2	#1	#2
4	1.4130	1.4473	1.4938	1.4574	-0.324	-0.243	-0.515	-0.601
5	1.7757	1.7897	1.8551	1.8074	0.236	-1.287	-1.102	-1.342
6	2.1234	2.1341	2.2227	2.1462	-0.092	-1.888	-1.217	-2.346
7	2.4694	2.4543	2.5637	2.4941	-0.399	-3.275	-2.314	-2.713
8	2.7981	2.8029	2.9164	2.8282	-1.237	-3.335	-2.745	-3.453
9	3.1261	3.0976	3.2594	3.1206	-1.915	-5.034	-3.368	-5.300
10	3.4452	3.4413	3.6084	3.4537	-2.704	-5.041	-3.707	-5.662

通过表 5 分析可知,国内仪器的高精度基于较为复杂的光路系统,易出现光强损失;仪器 #1 与国内仪器相比,具有简单的光路结构与光学元件,波长重复性与准确度达到光谱仪分光要求,具有明显优势;国内仪器的高精度基于较为复杂的光路系统,易出现光强损失。与国外仪器相比,仪器 #1 器件组合方式简单,吸光度稳定性好,可检测浓度范围宽,易于推广;国外仪器的高性能需要高精度光学器件支撑,造价昂贵。另外,仪器 #1 尚处于初步测试阶

段,其准确度及光谱范围等参数均可实现进一步改进和优化。

5 结 论

采用光学元件代替复杂算法获取平面场光谱,利用 Zemax 模拟与优化实现了罗兰光栅光谱平场化,分辨率达到 0.5 nm,整体精度优于 1.7 nm,样机测试结果与模拟结果一致。仪器在紫外光区域、蓝绿光区域及红外光区域均具有较好的重复性,最高

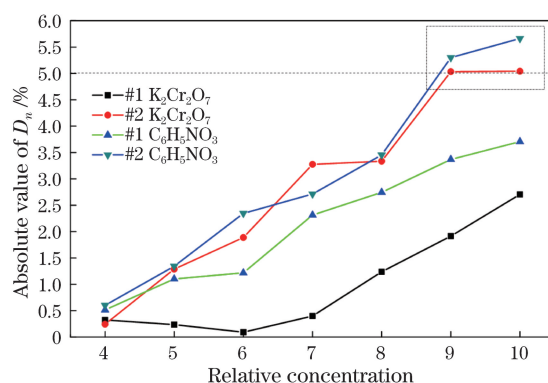


图 11 相对偏移绝对值与相对浓度的关系

Fig. 11 Relationship between absolute value of relative bias and relative concentration

表 5 仪器性能对比

Table 5 Comparison of instrument performance

Model	721	UV-1800	DR3900	7100 VIS	# 1
Optical structure (elements)	Grating & mirror	C-T	Concave grating & filter	LED & monochromator	Rowland Grating & lens
Spectral range /nm	340-1000	200-1100	320-1100	320-1100	320-800
Wavelength repeatability /nm	1.0	0.3	0.1	0.5	0.5
Wavelength accuracy /nm	2.0	0.5	1.5	1.0	1.0
Absorbance accuracy /arb. units	-	0.004	0.005-0.02	0.003-0.01	0.01-0.02
Absorbance stability /arb. units	0.002	-	-	0.002	0.001
Absorbance range /arb. units	-0.301-3.0	-0.301-3.0	0-3.0	0-3.3	0-3.6
Place of origin	Shanghai	Beijing	USA	Germany	-

可达 0.5 nm;吸光度稳定性好,准确度高。仪器在 340 nm 和 405 nm 处线性度好,相对偏移依次为 -2.704% 和 -3.707%,在高浓度区域仍具有较好的灵敏度,明显优于同批次仪器,满足特定蛋白分析仪的精度要求,达到商品化分光光度计标准。综上所述,该结构具有工艺简单、光路简洁、精度高、可小型化、实用性强等特点,具有良好的应用前景,后续将进一步对结构的其他指标进行检测,并与仪器整体系统相结合进行研究。

参 考 文 献

[1] Liu L J, Xu H Y, Zhao F, *et al.* Application of UV-Vis spectrophotometry in quantitative monitoring sustained release of 2, 3, 5-triiodobenzoic acid[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(2): 20-25.
刘来俊, 徐海燕, 赵帆, 等. 紫外-可见分光光度法在定量监测 2, 3, 5-三碘苯甲酸缓释中的应用[J]. 纺织学报, 2019, 40(2): 20-25.

[2] 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): 0922004.

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): 0922004.

[3] Chen Y, Wang Y M. Optical design of prism spectrometer system with a small incident angle[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0922002.
陈杨, 王跃明. 小入射角棱镜成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0922002.

[4] Chen K, Xiao Z X. Research and design of biochemical analyzer optical system[J]. Optical Technique, 2006, 32(s1): 374-376, 379.
陈宽, 萧泽新. 生化分析仪光学系统的研究与设计[J]. 光学技术, 2006, 32(s1): 374-376, 379.

[5] Ren X D, Lei W H, Zeng L Q, *et al.* Thermal and mechanical effect of the narrow band filter irradiated by laser at oblique incidence[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(11): 1114001.
任晓东, 雷武虎, 曾凌清, 等. 激光斜入射窄带滤光片的热力效应[J]. 光子学报, 2018, 47(11): 1114001.

[6] Liu Q, Zhou J S, Nie Y F, *et al.* Study of spectral property and measurement of linear variable filters[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(4):

- 1142-1145.
柳青, 周锦松, 聂云峰, 等. 线性渐变滤光片光谱分光特性及检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(4): 1142-1145.
- [7] Li C M, Wu J H, Tang M X. Design of flat field holographic concave grating[J]. Laser Journal, 2005, 26(2): 57-58.
李朝明, 吴建宏, 唐敏学. 平场全息凹面光栅的设计[J]. 激光杂志, 2005, 26(2): 57-58.
- [8] Cheng L, Chen Y P, Zhu R B, *et al.* Optimum design of flat-field holographic concave grating for micro-spectrometers[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(2): 312-316.
程梁, 陈燕平, 朱若波, 等. 微型光谱仪平场全息凹面光栅的优化设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(2): 312-316.
- [9] Xia G, Wu S, Huang S, *et al.* Design of crossed-asymmetric Czerny-Turner spectrometer optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 0422003.
夏果, 吴骝, 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): 0422003.
- [10] Yang X Q. Design of testing system of multifunctional medical analyzer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
杨晓琦. 多功能医疗分析仪检测系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [11] Wang H. Research on the key technology of automatic biochemical analyzer[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017.
王虎. 全自动生化分析仪关键技术研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
- [12] Kong W P, Wu T, Nie W, *et al.* Influence of water vapor absorption on NO₃ radical measurement based on broad-band cavity-enhanced absorption spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0230001.
孔维平, 吴涛, 聂玮, 等. 水汽吸收对基于宽带腔增强吸收光谱的 NO₃ 自由基测量的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0230001.
- [13] 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.
- [14] Xu F, Yan H, Zhang Y H, *et al.* Ultra-narrow linewidth spectral filtering technology based on double gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0811003.
许放, 颜宏, 张永红, 等. 基于双光栅的超窄线宽光谱滤波技术[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0811003.
- [15] Zhao X L, Bayanheshig, Li W H, *et al.* Integrated design to complement aberrations of spherical focusing mirrors and concave holographic gratings in spectrometers[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0605002.
赵旭龙, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 光谱仪中球面聚焦反射镜和凹面全息光栅像差互补的一体化设计[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0605002.
- [16] Noda H, Namioka T, Seya M. Geometric theory of the grating[J]. Journal of the Optical Society of America, 1974, 64(8): 1031-1036.
- [17] Zhao X L. Study on design method extend and testing technology of holographic concave gratings[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
赵旭龙. 全息凹面光栅设计理论扩展及曝光系统检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2017.
- [18] He W X, Wen Z Y, Zhou Y. Design and performance test of practical near infrared micro-spectrometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 063002.
何文馨, 温志渝, 周颖. 实用化微型近红外光谱分析仪的设计与性能测试[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 063002.
- [19] China Food and Drug Administration. Automatic chemistry analyzer: YY/T 0654-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
国家食品药品监督管理总局. 全自动生化分析仪: YY/T 0654-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.