

大型中阶梯光栅衍射效率测试仪器设计与集成^{*}

何 煦¹, 成贤锴²

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033;
2. 中国科学院苏州医学工程技术研究所 苏州 215163)

摘 要: 光栅衍射效率反映光栅的设计与刻划质量, 对于使用者和制造者均至关重要。针对国内首台 500 mm × 400 mm 中阶梯衍射光栅刻划机的研制, 有必要构建相应的衍射效率测试系统, 以定量评价光栅的制作水平, 为光栅设计与制造工艺的改进提供必要的测试手段。基于串联色散相减原理, 改进了常规 C-T 结构的测量单色仪光路, 并对前置单色仪、测量单色仪光路进行联合优化, 设计了待测光栅多维调整台、探测器组件等。提出了 N. A. 为 0.1 的三光栅扫描前置单色仪的标定方法, 以及测试仪器的系统误差修正方法。前置单色仪标定结果表明, 其在 190 ~ 1 100 nm 光谱范围内的波长输出精度为 ± 2 nm, 程控狭缝开启精度为 0.002 mm。修正后的衍射效率测量精度为 2%, 重复精度为 0.5%。初步的测量结果显示, 测试设备可以满足 500 mm × 400 mm 中阶梯光栅衍射效率定量检测需求, 在工作谱段内实现衍射效率-波长连续曲线的自动测量。

关键词: 中阶梯光栅; 衍射效率; 测试仪器; 设计与标校

中图分类号: TH741.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4035

Design and integration of the measurement instrument for diffraction efficiency of large echelle

He Xu¹, Cheng Xiankai²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China;
2. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, CAS, Suzhou 215163, China)

Abstract: Diffraction efficiency reflects the design and ruling quality of grating, which is essential for the users and manufacturers. Aiming at the development of China's first 500 mm × 400 mm echelle ruling machine, it is necessary to establish a measurement instrument for the diffraction efficiency test to quantitatively evaluate the manufacture level of grating and provide necessary tools for the grating design and manufacture process improvement. Based on serial dispersion subtraction principle, the optical path of conventional C-T structured measuring monochromator is improved. The optical path between pre-monochromator and measurement monochromator is optimized jointly. The multidimensional adjustment stage for grating under test and probe assembly are designed. The calibration method for three grating scanning pre-monochromator with N. A. of 0.1 and the systematic error correction method of the test instrument are proposed. Calibration results of pre-monochromator show that the spectral output accuracy is ± 2 nm within the wavelength range of 190 ~ 1 100 nm, and the open accuracy of the programmable slit is 0.002 mm. The measurement accuracy of the corrected diffraction efficiency is 2%, and the repeatability accuracy is 0.5%. The preliminary measurement results show that the developed measurement equipment can meet the requirement of diffraction efficiency quantitative measurement of 500 mm × 400 mm large echelle, and achieve the automatic measurement of the continuous curve of diffraction efficiency-wavelength within the operating spectrum range.

Keywords: echelle; diffraction efficiency; measurement instrument; design and calibration

收稿日期: 2015-07 Received Date: 2015-07

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(61307114)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2008-4)资助

1 引言

由 Harrison G. R. 教授提出的中阶梯光栅^[1],在光谱分析、天文学、光通信、激光约束核聚变等领域应用广泛,是高性能光谱仪器的分光元件,具有体积小、质量轻、可简化仪器结构、无移动部件、利于面阵探测器接收等结构特性,以及高色散、高分辨率、宽谱段、高衍射效率和瞬态光谱直读等性能特点,有利于实现光谱仪器的智能化、自动化,代表了先进光谱技术的发展趋势^[2-4]。中阶梯光栅光谱仪不仅在民用领域取得巨大成功,还在诸如大规模杀伤武器释放的微量、痕量元素远程探测、地面固定或移动伪装目标侦察与打击、弹道导弹预警和拦截等军事领域显示了独特优势^[5-7]。

光栅元件的衍射效率是决定仪器光能传输效能和特性的主要因素,是衡量光栅性能的重要指标^[8-9],可以定量评价光栅刻划质量,并指导光栅设计与改进。对于光栅使用者,光栅衍射效率是必检的重要指标,对于光栅研制者,首先要对所制作光栅进行效率检测,以验证光栅的质量^[10]。作为重要的总体技术,光栅衍射效率检测水平的高低不仅代表光栅整体研制水平,也在一定程度上影响和制约着光栅技术的发展。

目前,反射式光栅衍射效率的测试方法多基于串联色散相减原理^[11-12]。国内对于衍射效率测量方法的研究始于20世纪60年代,早期的测试装置采用“谱线法”,通过手动操作获取若干条单个谱线的衍射效率值。目前对于常规的平面光栅,已经实现连续扫描测量,可用于光栅 Rayleigh 异常和共振异常等衍射特性观测^[13-14]。

国际上,光栅衍射效率测量设备多采用双单色仪结构,由前置单色仪为测量单色仪提供单色光,由探测器接收出射光通量,经数据解算后可获取待测光栅的衍射效率-波长连续曲线^[15]。美国 Newport 公司、日本 Hitachi 公司、法国 Jobin-Yvon 公司、长春光机所等均研制出全自动光栅衍射效率测试设备^[16],但目前针对大尺寸中阶梯光栅衍射效率检测所需的专用设备未见报道。

光栅衍射效率的测量设备并非通用产品,其用户也大多限于研制单位,而高端的衍射效率测试设备更难以引进,只能靠自主研制。结合我国首台刻划面积 500 mm × 400 mm 衍射光栅刻划机试制,配套研制了可用于 500 mm × 400 mm 中阶梯光栅衍射效率实验室检测的测试仪器。详述了衍射效率测试光路的改进方案,并对测试仪器的的工作原理、系统组成、设计方法、集成与标定技术、初步试验结果等工作进展进行介绍。

2 衍射效率测试原理

2.1 系统工作原理

图1为基于串联色散相减原理的光栅相对衍射效率

测试光路。



图1 光栅衍射效率测试原理图

Fig. 1 Principle diagram of grating diffraction efficiency test

测试光路由2台自准直光栅单色仪串联组成,其中前置单色仪与光源构成扫描单色光源,用于产生衍射效率测量所需的光谱带宽可调的单色光。测量单色仪由待测光栅(或参比反射镜)、光学准直系统、出射狭缝、探测器等构成,用于光栅衍射效率测量。待测光栅安置在转台上,当测量参比反射镜的反射能量时,转台上则更换为通光孔径与待测光栅相同的平面反射镜。在出射狭缝处是能量探测器,用于分别接收待测光栅与参比反射镜的出射光通量。

根据光栅衍射效率定义,光栅的相对衍射效率可表示为:

$$\eta(\lambda) = \frac{\phi_g(\lambda)}{\phi_r(\lambda)} = \eta'(\lambda) / r(\lambda) \quad (1)$$

式中: $\eta(\lambda)$ 代表光栅相对衍射效率, $\eta'(\lambda)$ 为其绝对衍射效率, $\phi_g(\lambda)$ 表示待测光栅衍射光通量, $\phi_r(\lambda)$ 表示参比反射镜反射光通量。基于单色仪出射光束的光通量表达式^[17-18],式(11)可改写为:

$$\eta(\lambda) = \frac{k_g(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau'_2(\lambda) \eta'(\lambda) B(\lambda) \Omega_g a h \Delta \lambda_g}{k_r(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau'_2(\lambda) r(\lambda) B(\lambda) \Omega_r a h \Delta \lambda_r} \quad (2)$$

式中: $\tau_1(\lambda)$ 和 $\tau'_2(\lambda)$ 分别表示前置单色仪透过系数,以及测量单色仪不计待测光栅的总透过系数,在测量过程中均为恒量。 Ω_g 和 $\Delta \lambda_g$ 分别表示待测光栅的衍射光束立体角,以及出射光谱宽度。 Ω_r 和 $\Delta \lambda_r$ 分别表示参比反射镜的反射光束立体角和出射光谱宽度, $r(\lambda)$ 为其光谱反射率。 $B(\lambda)$ 为光源辐射亮度, a 、 h 分别为狭缝宽度、高度, $k_g(\lambda)$ 和 $k_r(\lambda)$ 表示波长同步精度系数。

对于中阶梯光栅衍射效率测量,为满足式(1)相对衍射效率与绝对衍射效率的数学关系,需要测量装置尽可能满足如下条件:第一,出射光谱加宽相等,即 $\delta \lambda_r = \delta \lambda_g$;第二,衍射光束截面尽可能一致,即 $\Omega_r = \Omega_g$;第三,测试过程中,光源幅亮度 $B(\lambda)$ 保持恒定。根据式(1),在各谱线位置连续测量出待测光栅和参比镜对应的出射

光通量,即可绘制出连续的衍射效率—波长曲线。此外,上述3条原则也是测试装置设计过程中首要遵循的。

如图1所示,基于 Czerny-Turner(C-T) 型对称光路的串联色散相减系统,需要在测量单色仪中分别设置入射臂和出射臂,用于光束准直与聚焦。而待测中阶梯光栅刻划面积达到 $500\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,经计算需采用口径大于 $\Phi 640\text{ mm}$,焦距大于 3 m 的光学准直系统作为测量单色仪中的出/入射臂方可满足需求。而布置2台角度可调的大口径准直系统不仅会增加仪器尺寸与制造成本,还会延长光程,加剧环境扰动、杂散光等环境因素对测量精度的影响。为此,提出了如图2所示的光路改进方案作为衍射效率测试设备的光路结构。

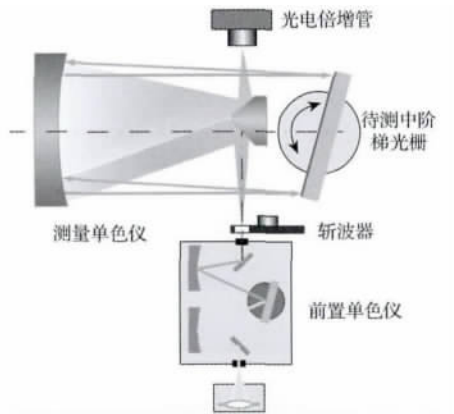


图2 光栅衍射效率测试系统光路图

Fig. 2 Optical path of the diffraction efficiency test system

如图2所示,将夹角为 90° 的正交双面反光棱镜偏置于球面镜光轴,实现光路两次折转,利用准直系统的轴外共轭焦点分别实现准直与聚焦。这样利用一套准直系统即可实现出/入射臂的功能。测试单色仪部分则包括大口径球面反射镜、待测中阶梯光栅(或参比反射镜)以及光栅多维调整台、光路折转棱镜、光电探测系统等。

前置单色仪输出经转向棱镜、光学系统准直后以中阶梯光栅的闪耀角 63.43° 斜入射至待测光栅表面,之后依据光栅色散公式以一定倾角(近似于入射角)反射回球面反射镜,再次经折光棱镜另一反射面后汇聚至光学准直系统的轴外焦点,并由焦点处的光电探测器接收。将待测光栅移出测试光路后,在待测光栅多维调台上放入参比反射镜。调整转台至光栅零级位置,使测量光束经平面反射镜反射后,再次汇聚至探测器。通过综合控制前置单色仪连续扫描,记录并解算2次光通量信息,即可得到所需光谱范围和衍射级次的光栅衍射效率—波长曲线。

2.2 系统组成与工作流程

根据上述工作原理与测量方法,中阶梯光栅衍射效率测试系统组成如图3所示。

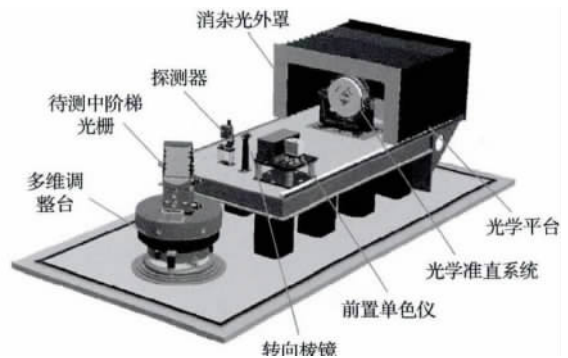


图3 衍射效率测试系统组成图

Fig. 3 Composition diagram of the diffraction efficiency test system

测试系统包括宽光谱复合光源组件、前置单色仪组件、前置单色仪电控多维调整台、口径 $\Phi 650\text{ mm}$ 反射式光学准直系统、折转分光棱镜、光电探测组件及多维调整台、待测光栅五维电控调整台、斩波器与锁相放大器、数据采集与处理系统、综合控制与显示系统等。

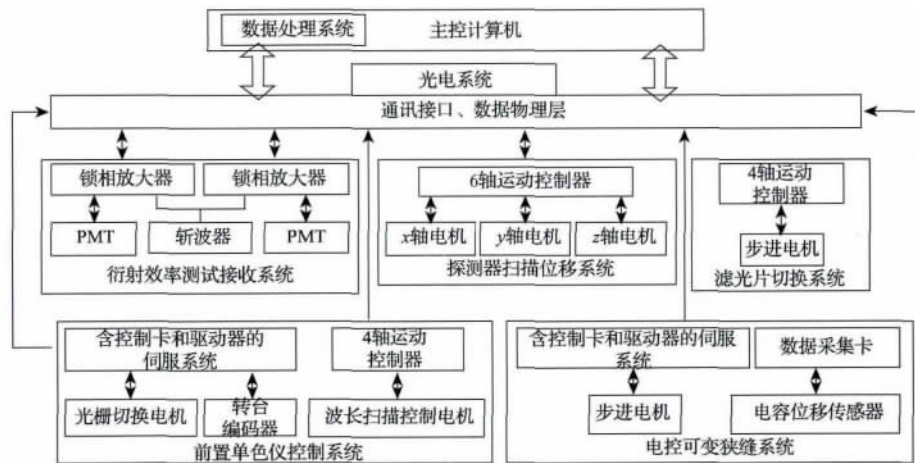


图4 系统工作流程框图

Fig. 4 System operation process block diagram

测试系统工作流程如图 4 所示。系统开启后由高压稳压电源给双光电倍增管提供稳定负高压,前置单色仪中的斩波器将光源发出的光信号调制成交变信号,并将其周期及频率通过外同步信号发送至锁相放大器中作为参考信号,以降低杂散光和气流扰动对测试精度的影响。

根据设置的测量光谱范围,前置单色仪自动控制光栅转台扫描、带通滤光片切换、出/入射狭缝自动开启至预设位置,并依次扫描至所需的谱线。同时焦面组件根据前置单色仪输出的波长值自动切换焦平面位置的探测器组件,使其分别工作在线性工作区内。同时待测中阶梯光栅五维调整台带动待测光栅自动旋转至测量级次对应的衍射角,并根据光电探测器反馈光通量值在初始设定点附近自动对准光路。

光电倍增管测量得到的信号发送至锁相放大器,锁相放大器对信号进行锁相放大,并显示结果。锁相放大器通过 RS232 串口与工控机建立通信,在测量软件的操作界面上进行图形化显示和数据处理。完成待测光栅扫描后,再移入参比反射镜,在光栅零级角度重复上述测量流程,并记录数据。最终由数据处理系统自动解算并绘制出衍射效率-波长测量曲线。

3 测试系统设计

3.1 前置单色仪

根据待测中阶梯光栅的工作光谱范围及相关指标,要求前置单色仪可实现光谱范围在 190 ~ 1 100 nm 的单色光连续输出,输出精度为 ± 2 nm,并且波长采样间隔多挡可调。据此对前置单色仪进行设计,其光路为非对称结构,并采用与测量单色仪中光学系统平衡慧差的设计,可改善谱线对称性并提高光学分辨率。其光学设计结果如图 5 所示,主要技术参数如表 1 所示。

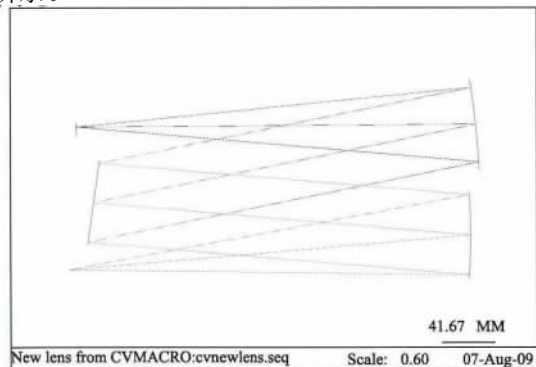


图 5 前置单色仪光学设计结果

Fig. 5 Pre-monochromator optical design result

使用光学设计软件分别模拟入射狭缝开启宽度为 0.008 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.5 mm 时,650 nm、650.5 nm 两谱线的分开情况如图 6 所示。根据瑞利判据,狭缝宽度在上述范围内微调时,若 650 nm、650.5 nm 两谱线可分开,方可满足前置单色仪光谱分辨率需求。

表 1 前置单色仪主要设计参数

Table 1 Main design parameters of the pre-monochromator

参数	数值
焦距	325 mm
数值孔径	0.1
相对孔径	1:4.6
扫描角	+1° ~ +18°
光谱范围	190 ~ 1 100 nm
精度	± 2 nm
光栅面积	70 mm × 70 mm
光栅闪耀波长和	250 nm@4.3°
闪耀角	430 nm@7.4°
	800 nm@13.9°

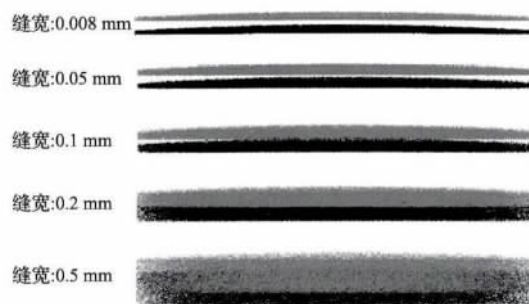


图 6 不同狭缝宽度对应的出射光谱点列图仿真

Fig. 6 Emission spectrum spot diagrams for different slit widths

前置单色仪光谱线宽即为测量单色仪的入缝宽度。因此,当测量单色仪入缝宽度与光栅对光谱线的展宽相当时,则会在测量结果中引入误差。从理论上说,希望狭缝无限窄,这样的测量精度最高,即入射狭缝对光谱线展宽无影响,但会使能量和信噪比大幅下降。当狭缝宽度达到一定值时,光谱线并不明显变细,此时光能还保留有极限光强的 2/3,称这一狭缝宽度为“正常狭缝宽度”,记作 a_0 ,并且 a_0 满足公式:

$$a_0 = \frac{\lambda f}{D} \quad (3)$$

式中: f 为前置单色仪焦距, D 为准直物镜口径, λ 为波长。前置单色仪的焦距为 325 mm,准直物镜直径 $D = 98.9$ mm,波长 λ 为 650 nm,则 $a_0 = 0.0021$ mm。因此狭缝需具有连续可调功能,步进精度优于 0.002 mm。根据上述分析结果,前置单色仪狭缝宽度的调节范围为 0.005 ~ 0.8 mm,并且狭缝开启的最小步进为 0.001 mm。采用常规结构的双开启狭缝难以满足上述精度,并且无法实现电控操作以及与主控系统集成。为此,设计了由

柔性铰链机构、步进电机、谐波减速机、凸轮机构组成的自动双开启狭缝系统。并使用电容传感器实时反馈狭缝开启宽度,实现狭缝控制闭环,设计结果如图7所示。

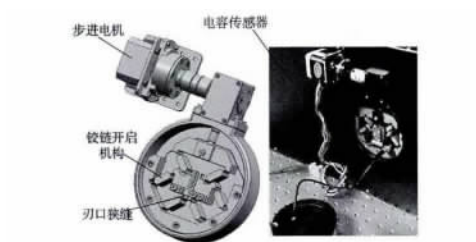


图7 电控双开启狭缝设计结果

Fig. 7 Real photo and design result of the electronically controlled dual-open slit

前置单色仪中内置斩波器,分析并严格设计了消杂散光挡板。其中三光栅切换台采用二维转台结构,分别实现光栅切换与扫描,可提高扫描线性度。光机系统采用常规设计,其设计结果与实物照片如图8所示。

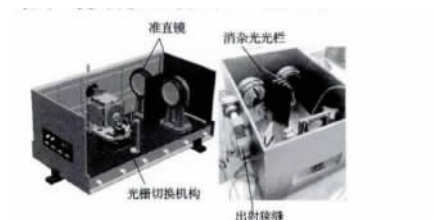


图8 前置单色仪设计结果

Fig. 8 Design result and real photo of the pre-monochromator

3.2 光学准直系统

光学准直系统用于测量单色仪中准直前置单色仪输出单色光至待测中阶梯光栅或参比反射镜,以及聚焦中阶梯光栅在 63.43° 闪耀角的衍射光至焦平面的光电探测器。根据探测器感光面积、量子效率、信噪比,以及待测光栅刻划面积等计算^[19],光学准直系统口径为 $\Phi 650\text{ mm}$,焦距为 $3\,000\text{ mm}$ 。包括前置单色仪的光学设计结果如图9所示,其中主镜为球面反射镜,次镜为平面反射镜,用于折转光路,两反射面的有效通光口径均为 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$,在测试单色仪光路中的遮拦比为 1.6% (参比反射镜)和 2.4% (待测光栅)。



图9 测量单色仪中光学准直系统设计结果

Fig. 9 Optical collimating system design result of the measurement monochromator

如前所述,测试设备需要保证衍射光束截面基本一致,才可提高衍射效率的测量精度。为此,根据图9的设计结果,在光学设计软件中加入闪耀角为 63.43° 的光栅,分别追迹光线两次入射至球面反射镜的结果如图10所示。结果表明,光学准直系统的设计结果可保证光栅衍射光束立体角与平面反射镜出射光束立体角基本一致,其差异值可在后期标中予以校正。

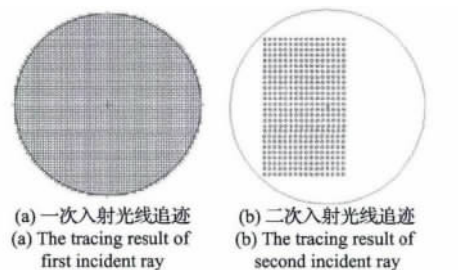


图10 球面反射镜上两次入射光束追迹结果

Fig. 10 Two beam tracing results of the incident ray on the spherical reflective mirror

3.3 待测光栅多维调整台

待测光栅多维调整台用于提供中阶梯光栅或普通衍射光栅不同衍射级次的转角,以及待测光栅与测量光路之间的对准。由于光栅刻线方向与光栅基准面之间存在垂直度误差,因此每次测量前均需要对待测光栅的俯仰角、滚转角进行微调,以保证待测光栅在整个测量光谱区内,其衍射光的聚焦位置不会随不同波长而改变,使光斑均在光电倍增管感光区域内。

如图11所示,五维调整包括 x 、 y 向平移,绕 x 、 y 、 z 轴的旋转。光栅调整台采用串联布局,绕 z 轴旋转的垂直转台精度为 $0.5''$ 、分辨力 $0.1''$,位于底层。 x 、 y 向平移台在设备整体集成后,不再进行大幅调整,位于串联结构的第2层。绕 x 、 y 轴旋转的俯仰与滚转调整台分辨力为 $0.5''$,用于待测光栅(或参比反射镜)对准光路,需频繁使用,位于串联结构的输出端,直接承载待测光栅。待测光栅多维调整台设计结果及实物照片如图11所示。

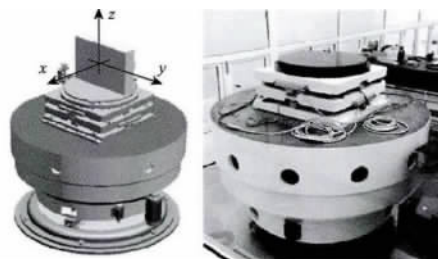


图11 待测光栅多维调整台设计结果

Fig. 11 Design result of the multidimensional adjustment stage for the grating under test

3.4 光电探测系统

选择光电倍增管(photo multiplier tube, PMT)作为衍

射效率测试系统的焦平面探测器,分别测量待测中阶梯光栅和参比反射镜的聚焦光斑能量。设计过程中,需依据光电倍增管的最小可探测噪声和量子效率-波长曲线,选择合适的型号。计算基于系统像面照度公式:

$$E' = \frac{n^2}{n^2} \tau \pi L \sin^2 U' \quad (4)$$

式中: E' 为焦平面处的辐照度, L 为光源幅亮度, τ 为系统透过率, U' 为准直物镜像方孔径角。对于衍射效率测试系统, E' 即为倍增管感光面处的辐照度。系统中各反射面在 190 ~ 1 100 nm 的平均反射率近似为 85%, 光栅的平均衍射效率近似为 50%, 待测光栅刻划面尺寸为 500 mm × 400 mm、前置单色仪输出波长为 600 nm 条件下, 测量单色仪焦面处的平均能量计算如下:

$$E' = \frac{n^2}{n^2} \tau \pi L \sin^2 U' = \frac{n^2}{n^2} \tau \pi L \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 = 0.0524 \times 3.14 \times 0.1 \times 30 \text{ cd/cm}^2 \times \left(\frac{550}{3000} \right)^2 = 0.0166 \text{ lx} \quad (5)$$

则对应的像面辐通量为:

$$\phi = E_{jm} \cdot A = 0.0166 \text{ lx} \cdot 0.00049 \text{ m}^2 = 8.12 \times 10^{-6} \text{ W} \quad (6)$$

因此,在忽略信号斩波与锁相放大的条件下,所选择的光电倍增管灵敏度(等效噪声)应小于 $8.12 \times 10^{-6} \text{ W}$, 这是探测器可响应的临界能量。此外,光电倍增管在 190 ~ 1 100 nm 光谱范围内应具有较高的量子效率。经筛选,选择 HAMAMATSU(滨松)公司型号为 R1527 和 R316-02 的光电倍增管作为能量接收器。其主要指标如表 2 所示,量子效率-波长曲线如图 12 所示。

表 2 光电倍增管主要参数

Table 2 Main parameters of the selected PMTs

Parameter	R1527	R316-02
感光面积	24 × 8 (mm)	Φ25 (mm)
响应波长	185 ~ 680 (nm)	400 ~ 1200 (nm)
窗口材料	UV glass	Borosilicate glass
级数	9	11
最大响应波长	400 (nm)	800 (nm)
等效噪声	$3.7 \times 10^{-17} \text{ W}$	

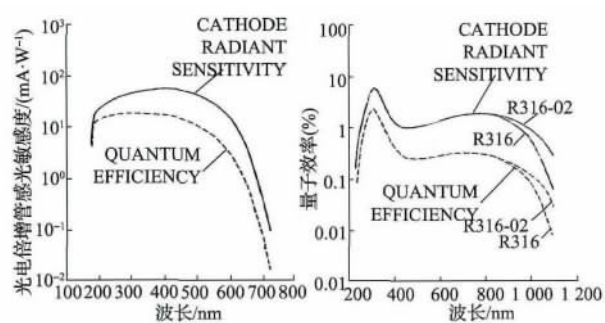


图 12 光电倍增管量子效率-波长曲线

Fig. 12 The curves of quantum efficiency vs. wavelength for the PMT

4 前置单色仪标定

如前所述,前置单色仪用于 190 ~ 1 100 nm 光谱范围内提供不同波长的谱线,以实现待测中阶梯光栅在整个光谱区域内衍射效率-波长曲线测量。因此,前置单色仪的波长输出精度、光谱分辨率等技术指标对于衍射效率测量精度和重复性均至关重要。

单色仪的常规标定方法采用标准汞灯光源,标定其特征谱线位置对应的光栅转角^[20]。由于前置单色仪中采用 3 块不同闪耀波长的衍射光栅,而汞灯光源在单色仪中对应长波和短波工作区的光栅上仅能覆盖一个标定点,难以确定光栅扫描转台的控制参数。为此,使用另一台工作谱段覆盖 190 ~ 1 100 nm 的标准单色仪通过耦合透镜提供标定谱线,再通过 PMT 接收,并综合处理、拟合不同谱线对应的光栅扫描角度,可获得光栅扫描转台的初步控制参数^[21-22],标定光路和实验现场如图 13 所示。

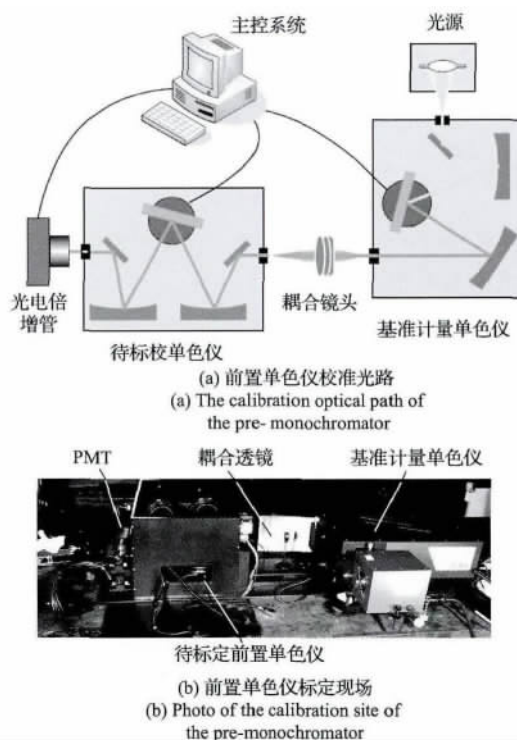


图 13 前置单色仪标定原理与实验现场

Fig. 13 Calibrated principle and experiment site of the pre-monochromator

上述标定实验中,使用自编标定软件控制前置单色仪的光栅扫描台旋转,并连续记录 PMT 采集并经锁相放大的信号,据此绘制出转台电机标定曲线。曲线峰值的 x 坐标为对应波长的转台转角,按照该方法每间隔 1 nm 采集一组数据,再通过插值算法可拟

合出“波长-转台转角”曲线。据此对前置单色仪中的每一块光栅进行标定,结果如图14所示,图中左侧为

波长与转台转角的标定曲线,右侧为其均方根误差在不同波长的分布曲线。

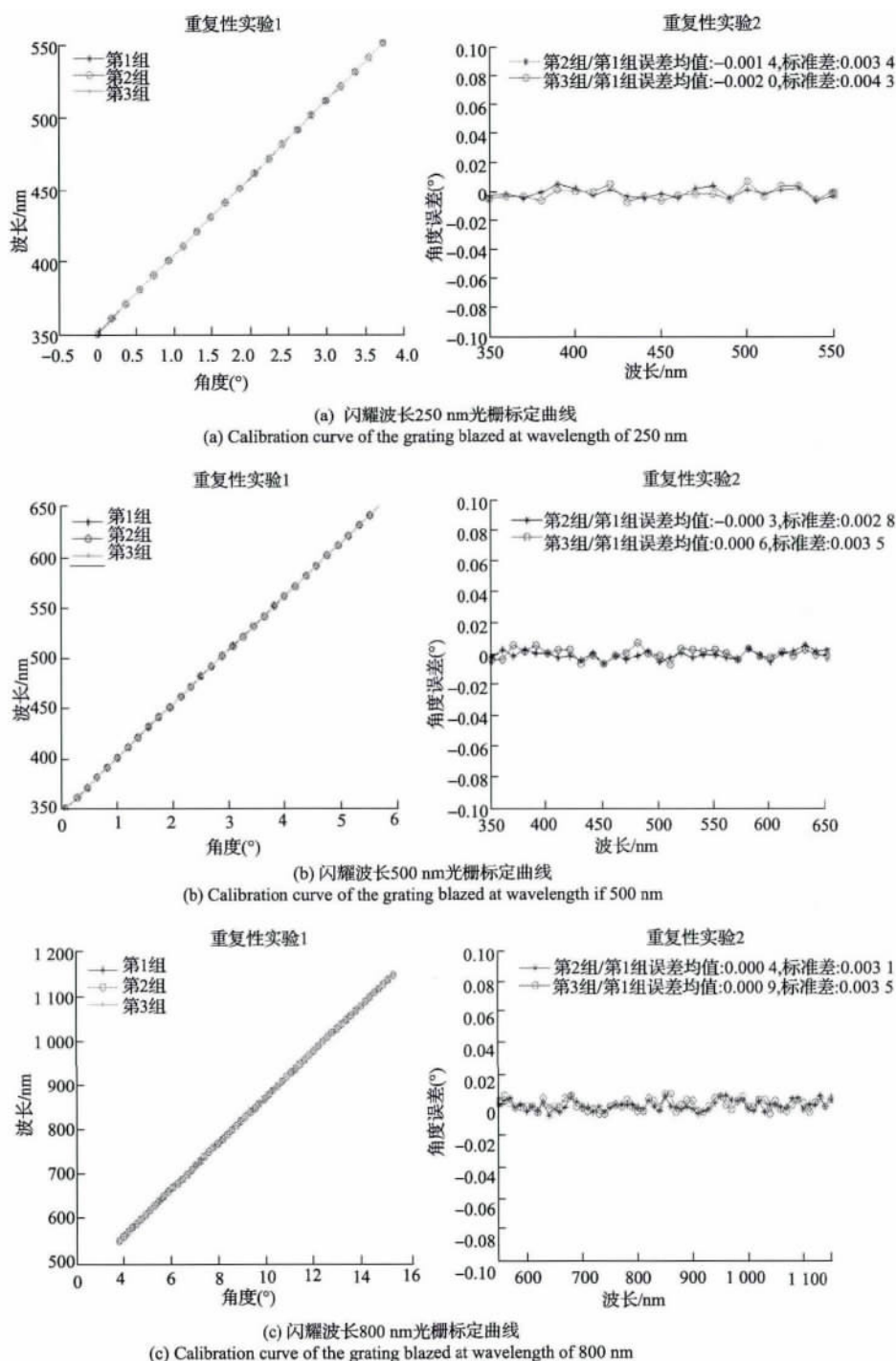


图14 前置单色仪标定曲线

Fig. 14 Calibration curves of the pre-monochromator

完成前置单色仪标定后,仍需对其实际波长输出精

度和重复性进行验证,试验现场如图15所示。

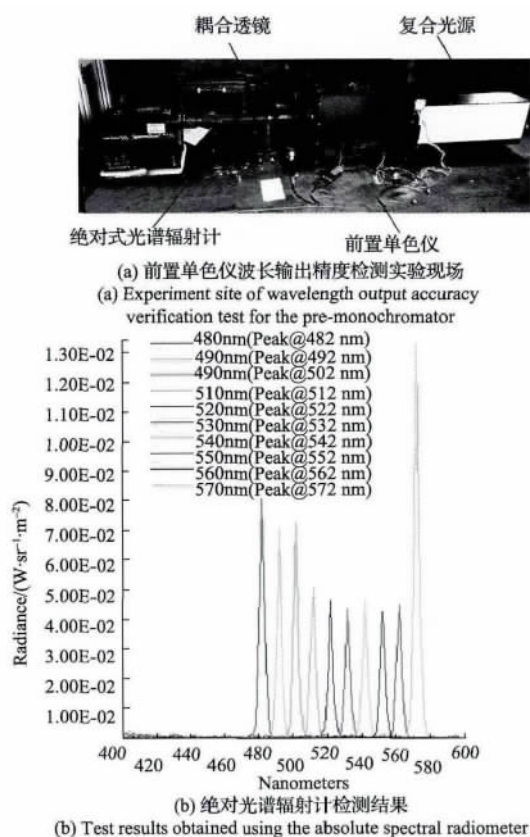


图15 前置单色仪输出光谱精度检测结果

Fig. 15 Test result of output spectrum precision for the pre-monochromator

采用精度为 ± 1 nm, 光谱范围为 350 ~ 1 100 nm 的绝对式光谱辐射计验证前置单色仪的波长输出精度。在前置单色仪自身复合光源工作条件下, 程控前置单色仪每间隔 10 nm 输出一条谱线, 并通过耦合镜、成像物镜将前置单色仪出射狭缝成像至绝对式光谱辐射计探测器感光面。并控制出射狭缝宽度与绝对式光谱辐射计采样区域的直径匹配。

部分验证试验结果如图 15(b) 所示, 使用绝对式光谱辐射计的标定试验数据表明, 前置单色仪在 350 ~ 1 100 nm 光谱范围内的波长输出精度达到 ± 2 nm, 重复精度优于 1 nm。

5 系统集成与测试

完成前置单色仪标定以及各子系统校验, 方可进行中阶梯光栅衍射效率测试系统整体集成与标定试验。光学系统的集成使用 4D 干涉仪、平面反射镜装调 $\Phi 650$ mm 光学准直系统。其系统波像差达到 0.07λ 。之后再标定出光学准直系统的焦面位置, 并将前置单色仪、光电探测组件装调至光学准直系统的共轭焦平面上, 现

场如图 16 所示。

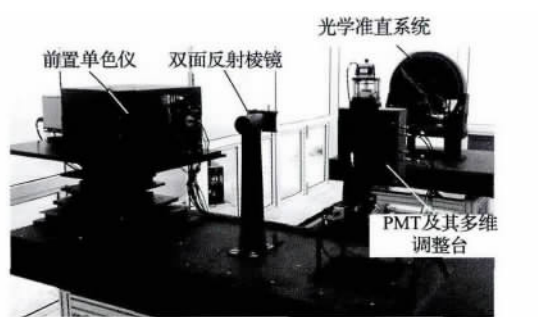


图16 光栅衍射效率测试实验现场

Fig. 16 Experiment site of grating diffraction efficiency test

完成上述系统集成后, 对多块刻划面积为 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ (刻线密度 1 200 线/毫米) 的平面光栅的衍射效率进行比对测试, 以标定并修正衍射效率测试设备的系统误差, 并且实际验证设备的重复测量精度。

在确保光源辐射亮度稳定以及波长同步精度的条件下, 由光栅色散导致的出射光谱增宽和光束截面微小变化依然会在衍射效率-波长测量曲线中引入系统误差, 需要通过标定加以修正。文献 [23-24] 报道了基于回归分析的衍射效率系统误差补偿方法, 可用于衍射效率测试设备系统误差修正。

该方法多用于分析多变量之间与实验样本的数学关系。其原理是通过实验获得 n 组数据: $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}; y_i, i = 1, 2, \dots, n)$, 并假定样本间存在如下数学关系:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

设 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_m$ 分别是系数 β 的最小二乘估计, 则回归方程为:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \cdots + \hat{\beta}_m x_m \quad (8)$$

根据最小二乘法, 存在如下关系:

$$\min \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{i1} - \cdots - \hat{\beta}_m x_{im})^2 \quad (9)$$

则方程组的解为 $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$, 其中:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

基于上述数学模型, 首先在严格计量校准过的衍射

效率测试仪(最大测量面积为 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$)上测试多块平面光栅的衍射效率-波长曲线,并以此作为真值。之后,在所研制的测试设备中再次测量其衍射效率-波长曲线,将其作为实测样本。实验首先验证重复测量精度,选取 $350 \sim 650\text{ nm}$ 波长范围,多次测量光栅 +1 级的衍射效率,测量结果如图 17(a) 所示。结果表明,衍射效率的重复测量精度优于 0.5% 。

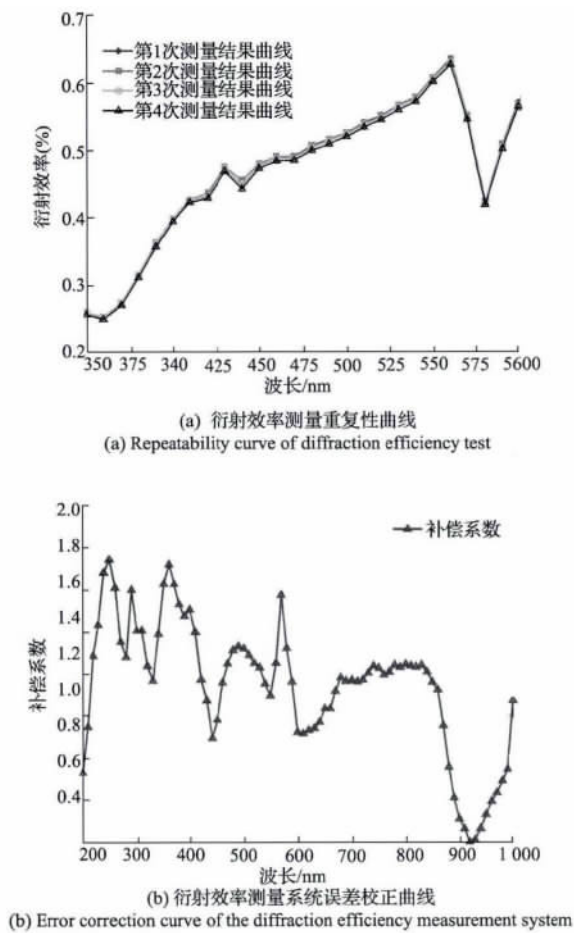


图 17 光栅衍射效率重复精度与系统误差标定结果
Fig. 17 Repeatability accuracy and system error calibration results of grating diffraction efficiency

再将实测数据代入数学模型中处理,可获得系统误差修正曲线(图 17(b)),并将其固化在衍射效率测试设备的数据处理软件中。

将上述误差修正曲线固化在测量软件后,再次测量一小尺寸中阶梯光栅的衍射效率-波长曲线,其与严格计量校准设备测量结果间的互差约为 2% ($@ 200 \sim 1\,000\text{ nm}$)。上述实验结果如图 18 所示,图中分别为校正后的相对衍射效率曲线、绝对衍射效率曲线,以及使用该设备实测的相对衍射效率曲线。

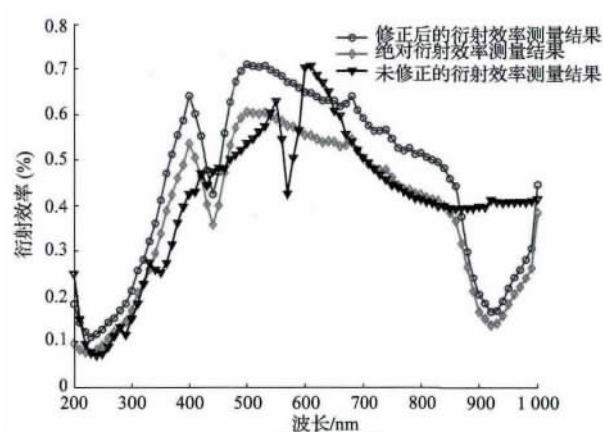


图 18 光栅衍射效率-波长曲线实测结果
Fig. 18 Test result of the diffraction efficiency-wavelength curve

6 结 论

中阶梯光栅可极大提高光谱仪器的分辨率和能量利用效率。为定量、客观评价 $500\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 中阶梯光栅的衍射效率,对相应的衍射效率测试仪器开展设计、制造、集成和标校。目前,利用 $500\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 参比反射镜验证了系统功能,并通过测量小尺寸光栅完成了误差修正与验证实验,实验结果表明:

- 1) 所研制的大型中阶梯光栅衍射效率测试设备功能满足自动化测量需求,可在实验室内根据所设定的参数自动获取衍射效率-波长测量曲线。
- 2) 在测量单色仪中利用一套准直系统代替 C-T 结构中的出/入射臂,可缩短光路结构并改善环境扰动对测量精度的影响。
- 3) 初步验证了设备的功能与精度,前置单色仪的波长输出精度优于 $\pm 2\text{ nm}$,相对衍射效率重复测量精度为 0.5% ,绝对测量精度为 2% 。

参考文献

- [1] HARRISON G R, ARCHER J E, CAMUS J. A fixed-focus broad-range echelle spectrograph of high speed and resolving power [J]. The Optical Society of America, 1952, 42(10): 706-712.
- [2] 李娜娜, 安志勇, 崔继承. 中阶梯光栅光谱仪光学系统的安装及检测 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 531-536.
LI N N, AN ZH Y, CUI J CH. Aligning and testing of optical system of echelle spectrography [J]. Optics Precision Engineering, 2009, 17(3): 531-536.

- [3] 谢品,倪争技,黄元申,等. 中阶梯光栅的应用研究进展[J]. 激光杂志, 2009, 30(2): 4-6.
XIE PI, NI ZH J, HUANG Y SH, et al. Application research progress in the echelle grating[J]. Laser Journal, 2009, 30(2): 4-6.
- [4] 张尹馨,杨怀栋,邓超,等. 高分辨率中阶梯光栅-棱镜交叉色散光路设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1706-1710.
ZHANG Y X, YANG H D, DENG CH, et al. Optical design of high-resolution echelle-prism cross-dispersion[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1706-1710.
- [5] ZHANG SH W, BAYAN H. Using the compensating effect for Rayleigh anomalies to design a type of broad-band mid-IR grating[J]. Optics Express, 2008, 16(10): 7049-7054.
- [6] WANG H J, XING F, YOU ZH, et al. Study of high-precision earth sensor with triple-FOV[J]. Instrumentation, 2014, 1(2): 23-29.
- [7] 冯玉涛,孙剑,李勇,等. 宽谱段空间外差干涉光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 48-55.
FENG Y T, SUN J, LI Y, et al. Broad-band spatial heterodyne interferometric spectrometer[J]. Optics Precision Engineering, 2015, 23(1): 48-55.
- [8] MICHELS D J, MIKES T L, HUNTER W R. Optical grating evaluator: A device for detailed measurement of diffraction grating efficiencies in the vacuum ultraviolet[J]. Applied Optics, 1974, 13(5): 1223-1229.
- [9] 张泽全,黄元申,张大伟,等. 具有特定滤波特性的防伪用亚微米光栅的设计和制作[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12): 2642-2645.
ZHANG Z Q, HUANG Y SH, ZHANG D W, et al. Design and fabrication of sub-micron grating with given filter character for anti-counterfeiting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12): 2642-2645.
- [10] MCMULLIN D R, JUDGE D L, TARRIO C, et al. Extreme-ultraviolet efficiency measurements of freestanding transmission gratings[J]. Applied Optics, 2004, 43(19): 3797-380.
- [11] 曹海霞,巴音贺希格,崔继承,等. 凹面光栅衍射效率测量值的影响因素及补偿方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(11): 3162-3166.
CAO H X, BAYANHESHIG X G, CUI J CH, et al. Research on influencing factors and compensation method of testing results for concave gratings diffraction efficiency[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(11): 3162-3166.
- [12] 王芳,齐向东,于宏柱,等. 平面反射光栅衍射效率自动测试仪的设计与分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(2): 556-560.
WANG F, QI X D, YU H ZH, et al. Design and analysis on automatic measurement instrument for the diffraction efficiency of plane reflection grating[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(2): 556-560.
- [13] 吴少波,叶连慧. LIBS 成分分析中元素谱线的自动识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 670-675.
WU SH B, YE L H. Automatic reorganization method of element emission lines in composition analysis with LIBS[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 670-675.
- [14] 印建平. 一种双光束自动测试光栅绝对与相对光谱衍射效率的原理性方案[J]. 光电工程, 1994, 21(4): 42-46.
YIN J P. A principle scheme of double light beam automatic measuring absolute and relative diffraction efficiency of gratings[J]. Opto-Electronic Engineering, 1994, 21(4): 42-46.
- [15] KUZNETSOV I G, WILKINSON E, BOUCARUT R A, et al. Grating efficiencies comparison study: Calculations versus metrology for various types of high groove density gratings at VUV-UV wavelengths[C]. International Society for Optics and Photonics, 2004, 5178: 267-277.
- [16] 陈健,凌振宝,陈鹏飞,等. 近红外光谱仪数据采集系统的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(1): 72-77.
CHEN J, LING ZH B, CHEN P F, et al. Design of data acquisition system of NIRS instrument[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(1): 72-77.
- [17] WOOD A P, ROGERS P J. Diffractive optics in modern optical engineering[C]. International Society for Optics and Photonics, 2005, 5865: 83-97.
- [18] 杨亮亮,崔庆丰,刘涛,等. 衍射光学元件衍射效率的测量[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 151-156.
YANG L L, CUI Q F, LIU T, et al. Measurement of diffraction efficiency for diffractive optical elements[J]. Acta optica Sinica, 2012, 32(4): 151-156.
- [19] 马洪涛,何煦,陈琦,等. 一种光栅检测光学系统: 中国发明专利, CN101839801. B [P]. 2011-09-28.
MA H T, HE X, CHEN Q, et al. An optical system for grating measurement: China, CN101839801. B [P]. 2011-09-28.
- [20] 何煦,向阳,马军. 三光栅单色仪标定方法研究[J]. 应用光学, 2011, 32(1): 27-31.
HE X, XIANG Y, MA J. Study of calibration methods for three gratings monochromator[J]. Journal of Applied

- Optics, 2011, 32(1): 27-31.
- [21] 杨家健, 卢小丰, 冯晓东, 等. 基于 LabVIEW 的光栅单色仪波长标定装置[J]. 电子测量技术, 2010, 33(4): 78-81.
- YANG J J, LU X F, FENG X D, et al. Wavelength calibration system of the grating monochrometer based on LabVIEW [J]. Electronic measurement technology, 2010, 33 (4): 78-81.
- [22] 杜璧秀, 米阳, 张淑梅. 变结构控制在高精度转台系统中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 68-71.
- DU B X, MI Y, ZHANG SH M. Application of variable structure control for high precision turntable [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33 (9): 68-71.
- [23] 寇婕婷, 巴音贺希格, 唐玉国, 等. 平面反射光栅衍射效率自动测试仪的设计与分析[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 556-560.
- KOU J T, BAYANHESHIG X G, TANG Y G, et al. Testing process and result revising on instrument for plane grating diffraction efficiency [J]. Acta optica Sinica, 2009, 29(2): 556-560.
- [24] 凌树森. 实验数据的统计处理和误差分析—回归分析[J]. 理化检验物理分册, 2001, 37(6): 271-276.

LING SH S. The statistical treatment and error analysis of experiment data-regression analysis [J]. Physical Testing, 2001, 37(6): 271-276.

作者简介



何煦(通讯作者), 2011 年于中科院长春光机所获理学博士学位, 现为长春光学精密机械与物理所副研究员, 主要研究方向为光学测试与仪器。

E-mail: hexu_ciomp@sina.com

HE Xu(Corresponding author) is currently an associate research fellow in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (CIOMP), CAS. He obtained his Ph. D. degree from CIOMP in 2011. His research interest includes optical test and measurement instrument.



成贤锴, 2010 年于南京理工大学获工学硕士学位, 现为苏州医学工程技术研究所助理研究员, 主要研究方向为伺服控制与图像处理。

E-mail: chengxk@sibet.ac.cn

Cheng Xiankai is currently an assistant research fellow in Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, CAS. He obtained his M. S. degree from Nanjing Institute of Technology in 2010. His research interest includes servo control technology and image processing.