

文章编号 1004-924X(2009)03-0531-06

中阶梯光栅光谱仪光学系统的安装及检测

李娜娜^{1,2}, 安志勇¹, 崔继承³

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院 光电研究院 北京 100080;
3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为提高系统分辨率,保证成像质量,研究了中阶梯光栅光谱仪光学系统的安装及检测方法。通过对光学系统中狭缝、准直镜、棱镜、中阶梯光栅及聚焦镜的准确安装,使之达到设计精度要求。介绍了中阶梯光栅光谱仪所特有的光学元件的安装方法及保证精度的手段。最后,对光学系统的分辨率进行了检测,以瑞利判据为基础推导出分辨率的计算公式,并实际测量得出中阶梯光栅光谱仪的分辨率已达到10 000,满足了设计要求。提出的安装方法可为同类精密仪器的安装和调试提供参考。

关键词:中阶梯光栅光谱仪;分辨率;光学系统
中图分类号:TH744.1;TH703 **文献标识码:**A

Aligning and testing of optical system of echelle spectrography

LI Na-na^{1,2}, AN Zhi-yong¹, CUI Ji-cheng³

(1. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*
2. *Photo-electronic Research School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*
3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: To improve system resolution and image quality, the characteristics of echelle grating spectrography were introduced and a method of fixing and checking for the optical system of the echelle spectrograph was researched. Proposed method could reach the precision of the design through fixing the slot, collimation lens, prism, echelle grating and focusing lens. A special fixing method for the echelle grating spectrography during the fixing process was also introduced. Finally, a calculation formula was deduced based on Reyleigh principle to check the resolution of the echelle grating spectrography. The checked result shows that the resolution of the echelle grating spectrography meet the system requerement of 10 000. These results reported here mean that propose method can offer a reference for fixing and adjusting of other precision instruments.

Key words: echelle grating spectrography; resolution; optical system

1 引言

20 世纪 70 年代,天文高分辨率光谱仪多采用大面积普通闪耀光栅,以满足光通量方面的要求。普通闪耀光栅在实际应用中,为了避免级次重叠只能用于低级次(第一级或第二级),因此要获得高分辨率光谱只能采用大面积细刻划线光栅,仪器的尺寸十分庞大^[1-3]。为了克服高分辨率光谱仪体积庞大的缺点,在分光元件的选择上进行了改进,采用中阶梯光栅配合棱镜进行分光。中阶梯光栅的主要特点是具有较大的衍射角,同时可以用于很高的衍射级次,通常是 10~100 级,因此可以使光谱仪实现较小的体积同时获得极高的分辨率^[4-6]。

中阶梯光栅光谱具有检出极限低、动态范围大、无移动部件、结构紧凑、可实现多元素光谱的瞬态直读测量以及背景校正、波长自动标定等多种功能,因此,其内部光学系统的安装及检测手段也十分重要,它们与传统光谱的安装及检测手段不同。

2 中阶梯光栅光谱仪光学系统

区别于传统光谱仪的光学系统,中阶梯光栅光谱仪的光学系统有其自身的特点。该光谱仪采用低色散元件与高色散元件相搭配的设计思想,可以实现利用面阵 CCD 作为其接收器件,拓展了接收器件的选择范围。

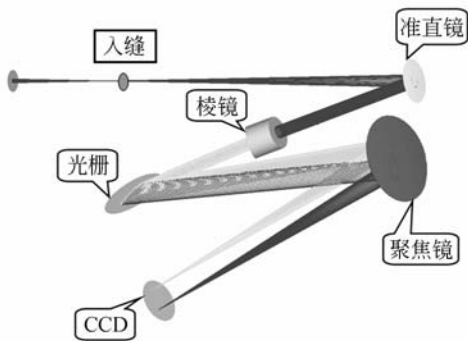


图 1 中阶梯光栅光谱仪光学系统示意图

Fig. 1 Optical system scheme of echelle grating spectrograph

中阶梯光栅光谱仪的光学系统主要由入缝、准直镜、棱镜、中阶梯光栅、聚焦镜及面阵 CCD 器件组成,其光路如图 1 所示。

该光学系统的特点是系统的主光线不处在一个固定的平面内;系统首先在垂直方向通过棱镜进行色散,其次在水平方向上通过中阶梯光栅进行色散,从而实现其立体色散的功能。

3 中阶梯光栅光谱仪光学系统的安装

本文以一款中阶梯光栅刻线密度为 54.49 lp/mm,闪耀角为 46°,接收器像元大小为 24 μm 的面阵 CCD,设计理论分辨率为 $R=11\ 000$ 的中阶梯光栅光谱仪为例,具体介绍中阶梯光栅光谱仪的安装方法及安装过程。在安装过程中,使用徕卡经纬仪作为调整和测量的工具,徕卡经纬仪的精度为 0.5"。

3.1 光谱仪中各光学元件的安装位置要求

由于整个中阶梯光栅光谱仪中光学系统的主光线不处在一个固定的平面内,寻找测量的基准就有许多麻烦。同时,凹面光学元件(主要是准直镜及聚焦镜)的曲率半径不大,表面面型弯曲得厉害,即使是平面的光学元件,因其尺寸小,作基准时精度受限,用光学元件的表面或直边作准直仪器测量参考边或者参考面也不合适,更多时候镜子或者光栅的边既不是水平又不是垂直方向放置,因此必须考虑建立基准和参考边的方法。中小型仪器对于位置的误差更加敏感,光学元件数目多且位置误差逐级积累放大,为了增加系统的结构稳定性,需尽量减少调节机构,这也提高了对安装调试过程的要求。

光学系统的安装就是要将各个光学元件按照一定的精度、一定的次序和一定的姿态装到指定的位置。

在安装之前,对各个光学元件的中心位置和

表1 光学元件的安装位置基本要求

Tab. 1 Position request of optical components

基本元件	表面中心位置			法线方向	外形尺寸		
	横向位置	纵向位置	高度位置		宽度	高度	厚度
	X	Y	Z				
入缝	0	0	0	X轴与x轴成 9°	15	15	0.2
准直镜	321.8	0	0		30	32	10
棱镜	179.14	-46.35	0	出射面法线与x轴成 18°	30	30	15
光栅	28.65	-95.25	-22.95	(198.45, 421.45, 100)	110	110	16
聚焦镜	343.4	-62.94	24.93	(305.03, 81.53, 100)	50	60	10
CCD接收器	53	-192.66	-24.03				

法线指向进行了计算,结果列于表1中。

同时,本文也利用光学追迹软件,对影响系统

像差的主要误差因素进行了分析,几种主要导致

系统中心波长光斑加宽的量列于表2。

表2 安装误差对于光斑的影响(μm)Tab. 2 Influence of aligning error on facular shape(μm)

准直镜安装误差类型		光栅安装误差类型		聚焦镜安装误差类型	
偏转角 1°	22	偏转角 0.5°	18	偏转角 1°	17
倾翻角 1°	21	倾翻角 1°	21	倾翻角 1°	17
自旋角 3°	17	自旋角 1°	22	自旋角 1°	很小
水平定位2 mm	13			水平定位2 mm	很小
垂直定为2 mm	13			垂直定为2 mm	10
入缝离焦1 mm			22		
CCD离焦1 mm			16		

从表2可以看出准直镜离轴角变化和光栅偏转角变化对系统的像差影响比较大,因此在安装过程中要格外注意。

根据所列各光学元件的安装位置及安装元件的公差要求,可以看出所选的经纬仪是能够满足使用要求的,因此可以进行光学系统的安装。

3.2 入缝的安装

中阶梯光栅光谱仪中的入缝实际上为一针孔,针孔装在一个小支架上,由于用于调试的针孔的直径只有 $12\ \mu\text{m}$,肉眼看不到,因此选择先装针孔。

在装针孔之前先架上激光器,使之与仪器入射光线方向相同,并调节成水平,光束高度调整到设计高度。然后,放上针孔架,让激光束能从针孔穿出,使用经纬仪对着穿出的光线方向观察,如果

针孔同入射光线方向不同则左右移动支架;如果针孔表面的反射光同入射光不自准直则转动支架;另有一经纬仪观察针孔安装的前后位置,如果不重合则前后移动针孔支架。

一旦针孔装好后,针孔的高度就被作为唯一的高度基准,其他元件的高度都换算为与此基准高度的相对值。用水准仪和高度尺将此针孔的高度引出标记到支架上,用经纬仪和卡尺将针孔的垂直位置引出标记到支架上,这两处标记可以作为辅助基准。作为整体结构的基准,所能达到的精度为经纬仪及卡尺的精度,分别为s级精度和 $0.02\ \text{mm}$,通过误差估算,满足系统的要求。

3.3 准直镜的安装和验证

为了能对入射针孔和准直镜的安装精度进行验证,在装准直镜之前,考虑先在准直镜的出射光

路上放置一块平面反射镜,对于这块平面镜只需控制其方向即可。具体作法是:架起另一激光器使光束调整到与准直镜的出射光路同向且保持水平,用水准仪看光束是否水平。然后,安装平面镜使得激光束恰好能够自准返回,同样可以使用经纬仪观察反射激光束偏转的情况而实现反射镜正确的定向。

因为各条边处于水平或垂直状态,准直镜的安装相对容易。

为了确定准直镜的安装方向,在其法线方向架起激光,使用水准仪把激光调成水平并处于指定的高度。为了保证激光光束通过设计的镜子中心,还必须同时使用经纬仪,观察不同距离处的激光光束是否在设定的平面内,如果不在则通过调整激光光束的左右偏角来保证激光光束和理想位置处的准直镜法线重合。

在安装准直镜之前,还需给出准直镜中心的理想位置信息。然而对于准直镜而言,其中心点是看不到的,要将准直镜的中心作为目标点进行定位,就必须对镜子做适当的标记,从而方便地通过这些标记找到镜子的中心来实现准直。本文使用高度尺在准直镜每条边的中点刻线处做标记,这些刻线即可作为定位准直镜中心的参照。

将准直镜安装到支架上,为了最后完成安装,还在两个方向架起经纬仪,在保持法线方向的激光束能自准直返回和支架垂直刻线落在法线经纬仪的视平面这两个前提下,前后移动支架,使得准直镜表面的激光光斑落在另一个方向经纬仪的视平面上,此时的准直镜就是理想位置。

在针孔和针孔前的激光器中间加一显微镜头将激光束聚焦在小孔处,通过小孔的激光束就有很大的扩散角,基本覆盖了准直镜,通过准直镜后的光束又被反射镜返回,二次经过准直镜,这时的准直镜起聚焦作用。经测量,聚焦后的光斑同针孔在水平方向一致,于是调节准直镜角度使得聚焦后的光斑准确进入针孔。

3.4 棱镜的安装

棱镜垂直于光线的水平方向位置不需要精确控制。对棱镜的安装,可使用它的一个垂直端面

和上平面作为参考面。由水准仪观察其端面可以控制其高度位置和两个角度,用经纬仪观察其端面可以控制其沿着光线的位置和两个角度。

高度基准的引出方法:一切高度都以针孔的位置为基准,棱镜上端面与针孔不处于同一个高度,因此还须使用高度尺和水准仪定出新的二次基准。

棱镜安装后需要微调,观察其端面对于从针孔过来激光束的返回光线聚焦位置情况,微调角度,使得聚焦后的光斑准确返回针孔。

3.5 聚焦镜的安装

安装之后对聚焦镜的位置和姿态的精度进行验证也是必须考虑的内容。在主光线进入聚焦镜的光路上放置一块平面镜,对这块平面镜只需控制其方向。在主光线和仪器像平面的焦点处装一针孔,针孔的一侧架激光器和显微镜头用于验证。具体作法参照 3.3. 平面镜的俯仰角度则是通过经纬仪的激光束自返回实现准直的。

聚焦镜与准直镜安装不同之处在于:聚焦镜的各条边不处于水平或垂直状态;聚焦镜的法线方向不是水平方向。

3.6 光栅的安装

在光栅法线方向架起激光器,激光器的光束是空中一条确定的直线,用前面介绍的方法把激光束正确地准直到这条直线上需要使用高度尺、水准仪和两台经纬仪。为了准确安装光栅,本文对光栅的衍射自准直也架起一台激光器,用这两台激光器定出光栅的姿态。在一个衍射自准直方向架起经纬仪,利用经纬仪自带的激光实现自准直。

然后,装上光栅支架,由于光栅衍射几次太多,不能区分哪一个是 0 级光,因此在装调支架时可用一个平面镜实现法线方向的激光束的自准直,调好支架的角度姿态。

在装光栅之前,先判断光栅闪耀方向,将光栅转到大约 46° 位置看各个衍射级次分布,如果没有明显衍射极大,则换个方向转到 46° 位置,即可找准中阶梯光栅衍射极大方向。

最后将光栅贴于支架上判断 0 级光,保持 0

级光和衍射光两个激光束处于自准直状态,通过前后移动光栅和支架,使得两束打在光栅表面上的激光光斑在光栅表面中心完全重合,这样光栅和支架的位置与姿态即可达到设计要求了。

4 系统安装精度的验证

主要光学元件安装就绪后,可测量各主要元件空间位置的实际情况。使用高度尺、经纬仪、水准仪及卡尺测量入射针孔在像平面上的成像位置。使用 He-Ne 激光,波长 632.82 nm,通过测量两个衍射级次之间的水平和垂直距离,对系统的安装精度就有了一个具体的评价。

用水准仪测量两个光斑的高度差,水平距离则用卡尺比对,仪器的偏转用经纬仪测量,得到各主要元件实际偏差值如表 3 所示。

表 3 各光学元件实际安装误差

Tab. 3 Practice errors of optical elements

准直镜安装误差类型		光栅安装误差类型		聚焦镜安装误差类型	
偏转角	0.1°	偏转角	0.2°	偏转角	0.1°
倾翻角	0.1°	倾翻角	0.1°	倾翻角	0.1°
自旋角	0.2°	自旋角	0.1°	自旋角	0.1°

从表中可以看出,对系统像差影响较大的安装误差均得到了很好地控制,用仪器观察,可以判断系统两光斑的相对转角误差在 0.3° 以内。同时将测量结果的误差带入 ZEMAX 中进行分析,证明满足使用要求,可以说安装过程是成功的。

5 系统的测试结果

本实验分别测量了 Cu、Fe 等空心阴极灯的光谱图,针孔采用 55 μm 直径,曝光时间选择 1.5 s。测到的全谱图像如图 2 和图 3 所示,CCD 像面可以覆盖 180~1 100 nm,因此实际记录的波长范围是从紫外一直到近红外,元素灯在 600~900 nm 的波长比较亮,且因为 CCD 在这一区间的量子效率比较高,容易出现饱和。曝光时间

越长,能出来的谱线越多,但出现饱和溢出的像素也变多。

图 3 是 Fe 元素空心阴极灯的谱线,左图和右图给出的是同一组数据在不同阈值下的图像显示效果,可以看到,设定低图像阈值可以显示更多的光谱线,但长波处的光斑也被不正确地夸大,设定高图像阈值显示的光谱线数目减少,长波处的光斑就接近其半高度的数值,这说明单纯从二维图像上看波长的分辨率情况是有比较大出入的。

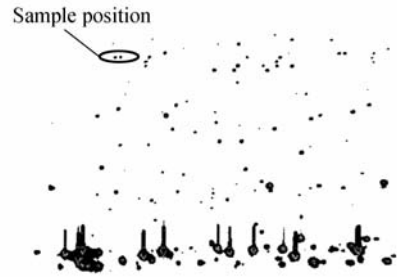


图 2 Cu 元素空心阴极灯谱线

Fig. 2 Spectrum of Cu element empty cathode lamp

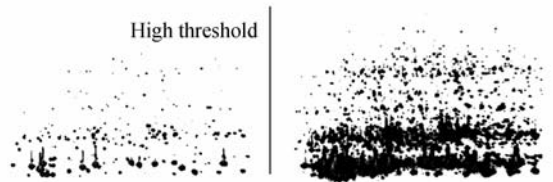


图 3 Fe 元素空心阴极灯谱线

Fig. 3 Spectrum of Fe element empty cathode lamp

为了计算仪器的分辨率,在图 2 中标记了两条谱线(波长在 220.6 nm 左右),在谱线的中心位置作水平切片分析,结果见图 4。这两条谱线

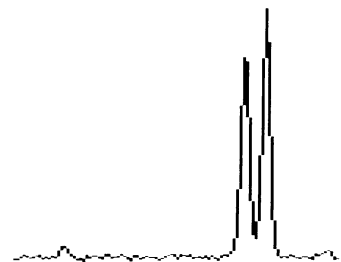


图 4 水平位置切片处谱线图

Fig. 4 Spectrum of level position slice

的间距是 6 个像素, 每条谱线的半高宽为 3 个像素。

根据分辨率公式:

$$R(k) = \frac{f(\sin \alpha + \sin \beta_0)}{kt \cos \beta_0},$$

式中, k 为两条谱线距离像素数; f 为系统的焦距; α 为系统入射角; β_0 为系统衍射角; t 为像元大小。

在本系统中, 系统焦距 $f = 321.8 \text{ mm}$, 入射角 $\alpha = 40^\circ$, 衍射角 $\beta = 52^\circ$, 像元大小为 0.024 mm , 带入上式得:

$$R(k) \approx \frac{321.8 \times (\sin 40^\circ + \sin 52^\circ)}{k \times 0.024 \times \cos 52^\circ} = \frac{31\ 160}{k},$$

按照瑞利准则以谱线的半高度计算, 即 3 个像素, 则对应的分辨率达到:

$$R(3) = \frac{31\ 160}{3} \approx 10\ 400,$$

因此可以判定该中阶梯光栅光谱仪的分辨率在 10 000 左右。

参考文献:

- [1] 武旭华, 朱永田, 王磊. 高分辨率阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光学精密工程, 2003, 13(5): 442-447.
WU X H, ZHU Y T, WANG L. Optical design of high resolution echelle spectrograph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 13(5): 442-447. (in Chinese)
- [2] HARRISON G R, ARCHER J E, CAMUS J. A fixed-focus broad-range echelle spectrograph of high speed and resolving power[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1952, 42(10): 706-712.

作者简介:



李娜娜(1978—), 女, 博士研究生, 工程师, 主要从事光电测控技术与仪器方面的研究。E-mail: lindali_2004@hotmail.com

崔继承(1976—), 男, 吉林长春人, 助理研究员, 主要从事各类光学设计、光谱仪设计及非成像理论的研究。E-mail: jicheng_cui@yahoo.com.cn

6 结 论

本文通过对中阶梯光栅光谱仪光学系统中各关键元件的精密装调保证了系统的成像质量, 最后的系统测试结果验证了提出的安装方法。对该中阶梯光栅光谱仪的分辨率进行了检测, 测试的结果表明分辨率已经达到了设计要求, 体现了小体积较高分辨率的特点。中阶梯光栅光谱仪以面阵 CCD 作为接收器件, 增加了在垂直方向的色散, 提高了光谱仪的分辨率。本文较为系统地介绍了中阶梯光栅光谱仪的安装过程及各种安装误差对于系统成像质量的影响, 为安装调试类似精密仪器提供了较有价值的参考。

- [3] ZHU Y, XU W. Optical and IR telescope instrumentation and detectors[C]. *Washington, USA: SPIE*, 2000: 141-147.
- [4] WANG SH G, SU D Q, CHU Y Q, et al.. Special configuration of a very large Schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(25): 5155-5161.
- [5] TULL R G. Instrumentation in astronomy VIII [C]. *Washington, USA: SPIE*, 1994: 674-684.
- [6] SCHROEDER D J. An echelle spectrometer-spectrograph for astronomical use[J]. *Applied Optics*, 1967, 6(11): 1976-1980.



安志勇, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电测控技术与仪器方面的研究。