文章编号 1004-924X(2017)02-0304-08

中阶梯光栅光谱仪波段范围校正装置

姚雪峰[1,2*],崔继承[1],尹 禄[1,2],宋 楠[1],孙 慈[1]
(1 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;2 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了保证中阶梯光栅光谱仪能够具有足够的波段范围,设计了一套校正装置,对该校正装置的校正原理、波段校正范围、校正分辨率等问题进行了讨论和研究。首先,对中阶梯光栅光谱仪的光学元件进行了公差分析,并介绍了自动光谱校正的原理和流程。选定聚焦镜作为调整环节并根据 CCD 接收器像面的利用情况给出了调整分辨率要求,然后设计了校正装置,并对校正装置的分辨率进行了理论计算。最后,对校正装置的校正效果进行了实验验证。实验结果表明:校正装置在方位方向的校正分辨率可达 0.006 25°、俯仰方向的分辨率可达 0.006 25°、前后方向的分辨率可达 0.005 mm。校正装置可以将 10 像素的波段偏移调整回 CCD 正常接收范围内,从而保证光谱仪器的全谱段波段范围。

关 键 词:中阶梯光栅光谱仪;自动光谱校正;波段范围
中图分类号:TH744.1;TP394.1 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20172402.0304

Calibration devices for band range of echelle spectrometer

YAO Xue-feng[1,2*], CUI Ji-cheng[1], YIN Lu[1,2], SONG Nan[1], SUN Ci[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: yaoxf@qq.com*

Abstract: In order to ensure full waveband range of echelle spectrometers, a set of calibration devices was designed. The principle, range and resolution of the calibration were discussed and studied. First, tolerance analysis of optical elements in the echelle spectrometer was performed, and the principle and process of auto spectrum calibration were introduced. Taking the focusing mirror as the adjusting object, the requirement of adjusting resolution was given according to the usage of the CCD image. Furthermore, a set of calibration device was designed, and the calibration resolution of the devices was calculated and experimentally verified. The results show that the azimuth calibration resolution is up to 0.006 25°, the resolution of the pitching direction is up to 0.006 25° and the resolution of the front and rear direction is up to 0.005 mm. The calibration devices can adjust the 10 pixels band offset to the normal reception range of the CCD, thus ensuring the full spectral band range of the spectrometer.

Key words: echelle spectrometer; auto spectrum calibration; band range

收稿日期:2016-06-15;**修订日期**:2016-09-06.
基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项项目(No. 2014YQ120351);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2014CB049500);国家自然科学基金资助项目(No. 61605204);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20140204075GX)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　引　言

中阶梯光栅光谱仪通常采用中阶梯光栅-棱镜交叉色散的光路结构，是一种高分辨率、高精度的新型光谱仪。所摄光谱具有二维光谱性质，其光谱分辨率最高可以达到几万甚至几十万[1-3]，因此光学、机械结构参数的微小偏差会严重影响其分辨率和波长标定精度[4-6]。中阶梯光栅光谱仪器的使用场合比较广泛，包括炼钢厂、野外物探、机载勘察等一些恶劣的测试环境[7-10]。在上述恶劣的测试环境中，测试会受到高温、超低温、高低温交替变化和振动冲击等不利因素的影响，尽管在设计过程中会针对这些不利的环境因素采取整机温控、防震处理等一些预防措施，但光谱仪的光学、机械结构参数还是会不可避免地产生一些变动，从而给光谱仪的测试精度带来比较大的影响。

针对上述问题，国内外的一些光谱仪器厂家研发了自动光谱校正功能，实现途径如下：在光谱仪内部置入汞灯用作定标光源，该光源的定标光纤通过光纤耦合器与正常入射光纤耦合。校正时切换汞灯作为光源将定标光束输入到后端的分光模块中。通过对比汞灯某一特征波长在接收器上的实际光斑位置与理论光斑位置来计算出当前的系统误差，然后通过软件方法校正该误差，从而可以保证仪器在受到外界环境因素干扰时还能够具有较高的光谱测试精度。

自动光谱校正可以在一定程度上校正由于温度变化、机械振动等因素导致的光谱精度下降。然而为了在最大程度上保证中阶梯光栅光谱仪的光谱分辨率，CCD 接收器像元的利用率都比较高，谱图几乎覆盖了整个 CCD 接收器的探测范围。当仪器处于特别恶劣的测试环境或者经过长时间的颠簸运输后，其光学、机械参数的变动会很大，此时经过光谱自动校正后会有一部分边缘波长的光斑落到接收器的探测范围之外，造成波段损失。本文设计了一套波段范围校正装置，目的是在不降低光谱测试精度的同时保证光谱仪的光谱测试范围足够大。

2　中阶梯光栅光谱仪光学系统以及自动校正原理

2.1　中阶梯光栅光谱仪的光学结构

图 1 为中阶梯光栅光谱仪的光学结构示意图。它主要由入射模块、准直镜、中阶梯光栅、棱镜、聚焦镜、柱面镜、接收器以及自动光谱校正模块组成。入射模块包括 SMA905 光纤接头、入射针孔和光阑，自动光谱校正模块包括汞灯光源和 SMA905 光纤接头。光线经准直镜以平行光入射到中阶梯光栅衍射面上进行垂直（垂直于纸面）方向色散，然后入射到棱镜上进行水平（平行于纸面上下）方向色散，最终经聚焦镜、柱面镜成像在面阵接收器上。为了提高能量传输效率和校正像差，在光栅色散方向上采用准 Littrow 结构，在棱镜色散方向上采用 Czerny-Turner 结构，并在探测器前端加入柱面镜。

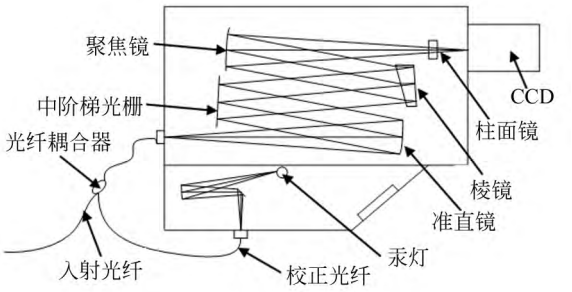

图 1　中阶梯光栅光谱仪光学结构示意图

Fig. 1　Optical block diagram of echelle spectrometer

2.2　各光学元件调整量对成像光斑的影响

中阶梯光栅光谱仪主要有准直镜、中阶梯光栅、棱镜、聚焦镜、柱透镜 5 个易受环境影响的光学模块，因此需要分别对这 5 个光学模块进行公差分析，从而指导校正装置的设计。由于越靠近像面边缘的光斑对误差反应越敏感，因此选择位于像面边缘的 549.11 nm 和 189.42 nm 波长的特征光斑进行误差分析；同时考虑到像面中心光斑的代表性，把 242.04 nm 波长的特征光斑也一并考虑进去。各光学模块的公差主要有水平（左右）位移、垂直（上下）位移、轴向（前后）位移以及

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

方位、俯仰、滚转6个自由度。成像光斑的大小和位置都会直接影响到光谱仪的测试精度。在上述中阶梯光栅光谱仪的光学系统中，调整成像光斑位置，成像光斑的大小也会相应地变化，因此需要考虑调整成像光斑位置对成像光斑大小的影响。完整的误差分析需大量的模拟仿真和计算，且会产生数量巨大的数据，为简化起见，结合以往的仪器研发经验，以各光学模块水平、垂直、轴向变动0.1 mm，俯仰、方位变动0.01°，滚转变动0.05°为调整变量进行误差分析。表1给出了光学仿真软件模拟的理论光斑尺寸的RMS值以及加入调整变量后实际光斑尺寸的RMS值。

表1 光斑尺寸的公差分析结果

Tab.1 Tolerance analysis of size of optical spot (μm)

光斑尺寸 RMS	正向公差			负向公差		
	549.11 nm	242.04 nm	189.42 nm	549.11 nm	242.04 nm	189.42 nm
理想位置光斑尺寸	28.47	26.8	28.44	28.47	26.8	28.44
准直镜垂直位移 0.1 mm	28.47	26.8	28.44	28.47	26.8	28.44
准直镜水平位移 0.1 mm	28.49	26.93	26.67	28.49	26.71	28.24
准直镜轴向位移 0.1 mm	28.48	26.83	28.51	28.52	26.82	28.41
准直镜俯仰 0.01°	28.58	27.18	29.12	28.41	26.55	27.75
准直镜滚转 0.05°	28.64	27.03	28.61	28.25	26.61	28.45
准直镜方位 0.01°	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
光栅垂直位移 0.1 mm	28.53	26.87	28.50	28.43	26.77	28.43
光栅水平位移 0.1 mm	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
光栅轴向位移 0.1 mm	28.49	26.82	28.46	28.46	26.80	28.45
光栅俯仰 0.01°	28.73	26.96	28.22	28.64	27.14	28.84
光栅滚转 0.05°	28.57	26.87	28.39	28.54	27.10	29.10
光栅方位 0.01°	28.49	26.95	28.73	28.47	26.75	28.24
棱镜垂直位移 0.1 mm	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
棱镜水平位移 0.1 mm	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
棱镜轴向位移 0.1 mm	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
棱镜俯仰 0.01°	28.61	26.85	28.27	28.33	26.76	28.62
棱镜滚转 0.05°	28.75	27.11	28.90	28.52	26.82	28.62
棱镜方位 0.01°	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
聚焦镜垂直位移 0.1 mm	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
聚焦镜水平位移 0.1 mm	28.46	28.69	28.22	28.50	26.94	28.68
聚焦镜轴向位移 0.1 mm	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
聚焦镜俯仰 0.01°	28.60	26.90	28.52	28.35	26.68	28.38
聚焦镜滚转 0.05°	28.48	26.78	26.38	28.55	26.95	28.66
聚焦镜方位 0.01°	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
柱面镜垂直位移 0.1 mm	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
柱面镜水平位移 0.1 mm	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
柱面镜轴向位移 0.1 mm	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
柱面镜俯仰 0.01°	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
柱面镜滚转 0.05°	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44
柱面镜方位 0.01°	28.47	26.80	28.44	28.47	26.80	28.44

通过分析表1数据可以得出以下结论：系统对柱面镜的容差比较大；当各光学元件水平、垂直、前后位移量不大于0.1 mm，方位、俯仰角度调整量不大于0.01°，滚转角度调整量不大于0.05°时，调整量对成像光斑尺寸RMS值的影响小于2%，此时调整量对仪器测试精度的影响基

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本可以忽略。因此，只要在调整过程中将误差控制在上述范围内就可以保证仪器的测试精度。

2.3　中阶梯光栅光谱仪自动光谱校正流程

当光学元件姿态偏差不大时，自动光谱校正可以实时自动完成波长校正，具体过程如下：首先，获取汞灯谱图并采用数据处理方法对汞灯谱图进行去噪。接着分析汞灯谱图各特征波长的位置，由于特征波长 404.656 nm 对应的光斑光强大、成像质量优且其周围特征光斑分布特点鲜明、唯一，因此确定 404.656 nm 波长为参考光斑。仪器光学、机械参数在一定范围内的变化不会改变汞灯特征点之间的相对位置。将以 404.656 nm 波长特征光斑为中心的 60×60 像素的区域作为考察对象，在此区域内另选 4 个特征点，以这 5 个特征点间的相对位置关系作为判别依据来找寻 404.656 nm 波长特征光斑的最终位置。首先初步选择一 60×60 像素区域作为起始窗口，考察窗口内的区域是否满足判别标准；若不满足则移动一个像素长度重复前面的判别步骤，直到找到 404.656 nm 波长特征光斑，并确定其质心坐标。根据 CCD 接收器的像元数以及光斑分布情况，自动光谱校正范围大约为 20×16 像素。当判断的 404.656 nm 波长特征光斑的坐标偏差超出了这个范围时，自动校正功能无法在完成光谱校正的同时保证全谱段的光谱范围，但可以根据偏差的大小和方向指导机械调整。若判断的 404.656 nm 波长特征光斑的坐标没有超出容限范围，可以根据此坐标反演算法的输入参数，用反演得到的参数替换之前算法的输入参数，完成光谱校正。自动光谱校正流程如图 2 所示。

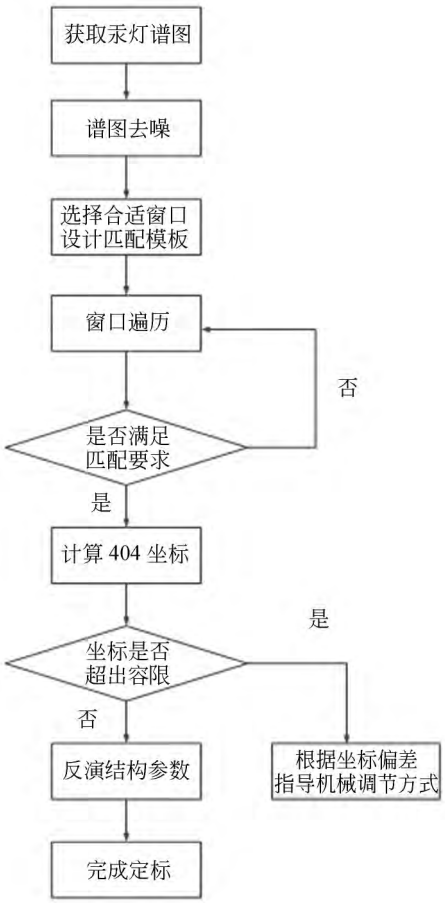

图 2　自动光谱校正流程

Fig. 2　Process of auto spectrum calibration

3　中阶梯光栅光谱仪校正装置的设计

3.1　调整对象的选择及校正装置的结构设计

由于光学设计时在 CCD 接收器 x 方向的两个边缘各留有 10 个像素，因此如果成像光斑的质心位置偏差小于 10 个像素时则可以读取全谱段的光谱信息。调整对象离 CCD 接收器越近越好，考虑到光斑位置对柱面镜姿态变化的不敏感性，选择前一环节的聚焦镜作为校正调整对象。经过光学软件仿真计算，以光斑移动 10 个像素为输入条件时，聚焦镜在方位和俯仰方向的调整分辨率应小于 0.03°、在滚转方向的调整分辨率应小于 0.3°、轴向位移的调整分辨率应小于 0.1 mm。由于聚焦镜为球面反射镜，球面以其光轴为中心呈对称分布，因此不需要考虑聚焦镜在滚转自由度上的调整问题。考虑到调整光斑位置对光斑大小的影响，校正装置的调整分辨率指标如下：方位、俯仰角度的调整分辨率小于 0.01°，前后位移的调整分辨率小于 0.1 mm。

图 3 所示为校正装置的三维结构示意图。如图所示，校正装置可以对聚焦镜的方位、俯仰以及轴向位移 3 个自由度进行调整。其中：方位方向的调整对应特征光斑在 CCD 像面 X 方向的移动；俯仰方向的调整对应特征光斑在 CCD 像面 Y 方向的移动；前后方向的调整影响特征光斑在 CCD 像面上的成像尺寸。聚焦镜通过胶黏的方式与聚焦镜安装板连接，因此可以在水平方向和竖直方向调整到合适位置后再通过胶水进行固定。校正装置按功能可以分成两个部分：一部分负责前后自由度的调整，另一部分负责方位、俯仰

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

自由度的调整。前后自由度的调整通过一维平移位移台来实现，旋转前后调整旋钮带动旋钮杆转动，通过可伸缩的联轴节将角度位移传递给一维位移台的进给丝杠，位移台的台面在进给丝杠的驱动下实现前后自由度的调整。方位、俯仰自由度的调整通过进给丝杠、回转球铰机构以及弹簧柱销一起完成。进给丝杠和弹簧柱销分别位于回转球铰机构两侧的对称位置，调整时转动调整旋钮带动旋钮杆转动，通过万向联轴节、伸缩联轴节后再经万向联轴节将角度位移传递给进给丝杠，使其产生轴向位移，驱动聚焦镜安装板以回转球铰机构为回转中心转动，弹簧柱销位于回转球铰机构另一侧的对称位置，起封闭作用。

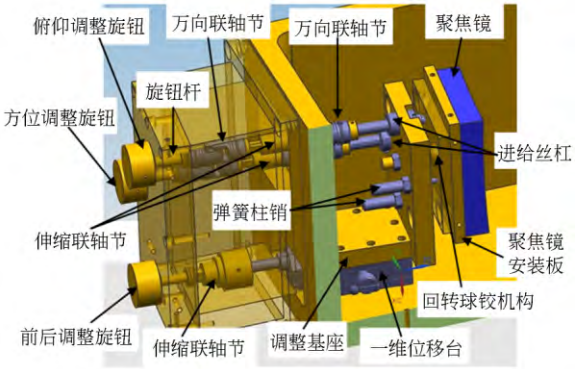

图 3 校正装置的三维结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of three-dimensional structure of calibration devices

图 4 所示为中阶梯光栅光谱仪的实物图(不包括 CCD 接收器)，校正装置处在图中的方框区域内。校正装置的轴向位移台选用市售商品一维位移台，侧面设计有螺纹锁紧装置，其主要技术指标如表 2 所示。方位、俯仰调整机构的进给丝杠螺距为 0.25 mm，螺母的材质为不锈钢，在垂直于螺纹轴线方向上加工有螺纹孔，可以在聚焦镜调整到合适的姿态位置后通过锁紧顶丝锁定位置状态。

表 2 一维位移台的主要技术指标

Tab. 2 Main technical specifications of one-dimensional stage

进给丝杠螺距/mm	行程/mm	上下摆动	左右摆动
0.5	±6.5	25″	15″

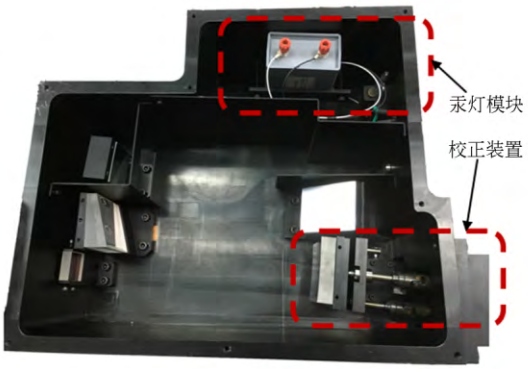

图 4 中阶梯光栅光谱仪实物图

Fig. 4 Picture of echelle spectrograph

3.2 校正装置调整分辨率计算

校正装置的调整分辨率对调整效果有着非常明显的影响，因此这里分别对前后、方位和俯仰自由度的调整分辨率进行了理论计算。

3.2.1 前后调整分辨率计算

聚焦镜的前后调整通过一维位移台实现，而一维位移台移动由进给丝杠驱动，因此进给丝杠可达到的进给分辨率即为校正装置的调整分辨率。

一维位移台上进给丝杠的螺距 $P_1=0.5$ mm，参照螺旋千分尺，手动旋转旋钮的角度分辨率 $\Delta_\theta=3.6°$，则位移台进给丝杠的手动调整分辨率为：

$$\Delta_1=\frac{P_1\times\Delta_\theta}{360°}=0.005\ \text{mm}. \tag{1}$$

即一维位移台的前后手动调整分辨率为0.005 mm。由 2.2 小节的仿真分析可知，该分辨率下前后位移调整对光斑大小的影响可以忽略不计。

3.2.2 方位、俯仰调整分辨率计算

聚焦镜方位、俯仰调整通过两个与回转球铰机构回转中心连线正交的进给丝杠配合弹簧柱销来完成的。进给丝杠螺距 $P_2=0.25$ mm，进给丝杠头部与回转中心的距离 $L=23$ mm，参照螺旋千分尺，手动调整进给丝杠的角度分辨率 $\Delta_\theta=3.6°$，则聚焦镜方位、俯仰两个方向的角度调整分辨率为：

$$\Delta_2=\arctan\frac{P_2\times\Delta_\theta}{360°\times L}=0.006\ 25°. \tag{2}$$

由 2.2 小节的仿真分析可知，该分辨率下方位、俯仰角度的调整对光斑大小的影响可以忽略不计。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　测试实验与结果

为了验证理论分析的正确性和结构设计的合理性，对校正装置的光谱校正效果进行了实验测试。由于篇幅有限，本文不对谱图算法进行介绍，详细的谱图还原过程请参考文献[2]。仪器的设计波段为 190～600 nm，CCD 接收器的像元数为 1 024×1 024，像元大小为 13 μm×13 μm，算法上采用四像元合并，CCD 接收器的有效像元数变为 512×512，等效像元大小为 26 μm×26 μm。实验装置通汞灯光源进行测试，理论上汞灯 253.652 nm 波长特征光斑的坐标值为（286，275）；190 nm 波长特征光斑的 x 坐标为 13；600 nm 波长特征光斑的 x 坐标为 504。图 5 所示为校正前 CCD 接收器拍摄的图像。从图中可以看到，校正前 253.652 nm 波长特征光斑对应的坐标为（297，276），在 x 方向和 y 方向分别偏离理论位置 11 pixel 和 1 pixel；546.075 nm 波长特征光斑的 x 坐标为 507，处在探测器右侧的边缘位置，576.961 nm 和 579.067 nm 波长的特征光斑落到了 CCD 接收器探测范围之外，造成波段范围损失。

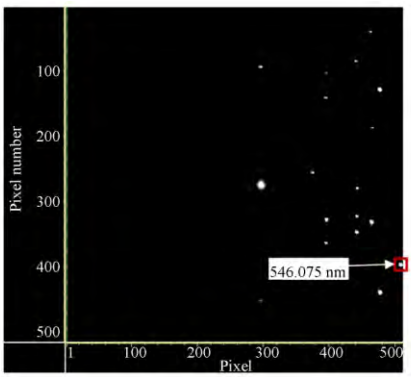

图 5　校正前 CCD 拍摄图像

Fig. 5　Image captured by CCD before calibration

针对汞灯一部分特征光斑在 x 方向偏离出 CCD 接收器探测范围的问题，通过校正装置进行了方位方向的机械调整，图 6 为调整后拍摄的图像。从图中可以看到，汞灯 253.652 nm 波长特征光斑的坐标为（286，275），546.075 nm 波长特征光斑在 x 方向的坐标为 496，576.961 nm 波长特征光斑在 x 方向的坐标为 501，579.067 nm 波长特征光斑在 x 方向的坐标为 502，经过计算得到该状态下 190 nm 波长特征光斑在 x 方向的理论坐标值为 13，600 nm 波长特征光斑在 x 方向的理论坐标值为 504。实验结果表明，该校正装置可以将超出 CCD 探测范围的谱图校正回 CCD 探测范围之内。

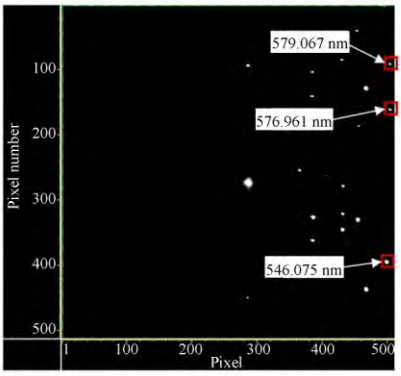

图 6　校正后 CCD 拍摄图像

Fig. 6　Image captured by CCD after calibration

5　结　论

本文针对中阶梯光栅光谱仪在外界环境温度变化、振动等因素的影响下不能同时保证光谱测试精度和光谱测试波段范围的问题，设计了一种可以在仪器外部操作的机械调整装置。首先，介绍了中阶梯光栅光谱仪的光学结构，接着对各主要光学元件进行了公差分析，然后阐述了光谱自动校正原理，在此基础上选定位于光路后端的聚焦镜作为调整的作用对象，并设计了一套基于一维位移台和进给丝杠的前后、方位以及俯仰的调整装置，接着计算出该调整装置在前后、方位、俯仰 3 个自由度的调整分辨率，分别为 0.005 mm、0.006 25°和 0.006 25°。最后，通过一组对比实验来验证机械调整装置的校正效果。实验结果显示，校正之前 253.652 nm 波长特征光斑在 x 方向的坐标为 297，546.075 nm 波长特征光斑在 x 方向的坐标为 507，576.961 nm和 579.067 nm 波

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

长特征光斑落到了CCD接收器的探测器范围之外，造成波段损失。通过机械装置进行调整后，253.652 nm波长特征光斑在x方向的坐标为286，相当于将整个谱图整体向左平移了11个像素，546.075，576.961，579.067 nm波长特征光斑在x方向的坐标分别为496，501，502，此时190，600 nm波长特征光斑在x方向的理论坐标值分别为13和504，190～600 nm波段的特征光斑均能落在CCD接收器的探测范围之内。上述结果说明，该校正装置可以实现波段范围的调整功能。

参考文献：

[1] 唐玉国，宋楠，巴音贺希格，等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光学 精密工程，2010，18(9)：1989-1995.

TANG Y G, SONG N, BAYANHESHIG, *et al*.. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1989-1995. (in Chinese)

[2] 唐玉国，陈少杰，巴音贺希格，等. 中阶梯光栅光谱仪的谱图还原与波长标定[J]. 光学 精密工程，2010，18(10)：2130-2136.

TANG Y G, CHEN SH J, BAYANHESHIG, *et al*.. Spectral reducing of cross-dispersed echelle spectrograph and its wavelength calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2130-2136. (in Chinese)

[3] 陈少杰，巴音贺希格，潘明忠，等. 中阶梯光栅光谱仪快速设计与谱图分析的数学模型[J]. 光学学报，2013，33(10)：1030001.

CHEN SH J, BAYANHESHIG, PAN M ZH, *et al*.. Efficient algorithms for echelle spectrograph design and cross-dispersed spectra analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1030001. (in Chinese)

[4] 尹禄，巴音贺希格，崔继承，等. 基于谱图还原的中阶梯光栅光谱仪有效波长提取算法[J]. 光谱学与光谱分析，2015，35(3)：850-855.

YIN L, BAYANHESHIG, CUI J CH, *et al*.. An effective wavelength detection method based on echelle spectra reduction [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(3): 850-855. (in Chinese)

[5] 杨晋，尹禄，姚雪峰，等. 新型便携式中阶梯光栅光谱仪光学设计与消杂散光研究[J]. 光学学报，2015，35(8)：129-136.

YANG J, YIN L, YAO X F, *et al*.. Optical design and stray light suppression of a new portable echelle spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 129-136. (in Chinese)

[6] 何淼，唐玉国，陈少杰，等. 中阶梯光栅光谱仪信号光斑位置的质心提取算法[J]. 光谱学与光谱分析，2012，32(3)：849-853.

HE M, TANG Y G, CHEN SH J, *et al*.. Position acquiring of signal spots in the echelle spectrograph [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(3): 849-853. (in Chinese)

[7] 潘明忠，刘玉娟，陈少杰，等. 中阶梯光栅光谱仪CCD相机的设计[J]. 光学 精密工程，2012，20(8)：1725-1731.

PAN M ZH, LIU Y J, CHEN SH J, *et al*.. Design of echelle spectrograph CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1725-1731. (in Chinese)

[8] 宁春丽，齐向东，陈少杰，等. 轻小型中阶梯光栅光谱仪光学设计及性能分析[J]. 光谱学与光谱分析，2012，32(12)：3406-3410.

NING CH L, QI X D, CHEN SH J, *et al*.. Optical design and performance analysis of light and small echelle spectrograph [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3406-3410. (in Chinese)

[9] 朱文煜，陈少杰，撖芃芃，等. 分波段式中阶梯光栅原子发射光谱仪[J]. 光学 精密工程，2014，22(4)：870-876.

ZHU W Y, CHEN SH J, HAN P P, *et al*.. Echelle-emission spectrometer with divided spectral coverage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 870-876. (in Chinese)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[10] 冯帆，段发阶，伯恩，等. 一种小型中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光电工程，2014，41(7)：20-25.
FENG F, DUAN F J, BO E, *et al*.. An optical design of small-size echelle spectrograph [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41 (7): 20-25. (in Chinese)

作者简介：

姚雪峰(1985－)，**男，吉林永吉人，博士研究生，助理研究员**，2007 **年**、2009 **年于吉林大学分别获得学士、硕士学位，主要从事精密机械设计制造及检测方面的研究**。E-mail：yaoxf@qq.com

崔继承(1976－)，**男，吉林长春人，博士，研究员，主要从事光学设计、光谱仪器设计开发和光谱理论的研究工作**。E-mail：jicheng_cui@yahoo.com.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net