

偏轴式扫描三光栅单色仪

陈建军^{1,2}, 崔继承¹, 刘嘉楠^{1,2}, 杨晋^{1,2}, 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: 为了获得宽波段高分辨率的单色光, 对成像光谱仪进行了波长标定, 设计了一款扫描式三光栅单色仪。光栅扫描系统采用蜗轮蜗杆机构, 针对传统安装方式带来的光栅有效口径损失及杂散光等问题, 创造性地提出了蜗轮蜗杆转台偏轴安装的方法, 通过蜗轮蜗杆转台初始位置的偏移, 有效抑制了扫描过程中光栅实际有效口径的减小和仪器杂散光增加等问题。单色仪光学系统采用水平式 C-T 结构, 通过三块光栅实现 280~2 240 nm 的宽波段输出, 保证整个波段内的高衍射效率和光谱分辨率; 并针对蜗轮蜗杆的非线性扫描, 使用多种数学模型对单色仪系统进行了光谱定标。最终的实验和测量证明, 仪器在 280~560 nm、560~1 120 nm、1 120~2 240 nm 三个波段的光谱分辨率分别为 0.1、0.2、0.4 nm, 波长重复性分别为 0.094、0.186、0.372 nm, 波长准确度分别为 0.096、0.191、0.382 nm, 达到了设计目标, 满足成像光谱仪波长定标的使用要求。

关键词: 光栅单色仪; 光学设计; 蜗轮蜗杆; 光谱标定

中图分类号: TH744 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0220002

Off-axis scanning three-grating monochromator

Chen Jianjun^{1,2}, Cui Jicheng¹, Liu Jia'nan^{1,2}, Yang Jin^{1,2}, Sun Ci¹

(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)

Abstract: In order to obtain wide-band and high-resolution monochromatic light, the wavelength of the imaging spectrometer was calibrated, and a scanning monochromator was designed. The grating scanning system was driven by worm and worm wheel mechanism, and an off-axis installation method was designed to install the worm gear, thus solving the problem of the traditional installation method, such as the decrease of the effective aperture of the grating, and the increase of the stray light. The monochromator optics system used the horizontal Czerny-Turner structure. It used three gratings to achieve 280–2 240 nm wide band output, which achieved the high diffraction efficiency and guaranteed the spectral resolution in the whole wavelength range. The output wavelength and the motor step number was non-linear in the process of worm gear scanning, so the monochromator system was calibrated by different mathematical models. The final experiment and the measurement proved that the spectral resolution of the monochromator was better than 0.1, 0.2, 0.4 nm at 280–560 nm, 560–1 120 nm,

收稿日期: 2017-08-05; 修订日期: 2017-10-03

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ12035102); 国家重点基础研究发展计划(2014CB049500)

作者简介: 陈建军(1992-), 男, 博士生, 主要从事光谱仪器光学设计方面的研究。Email: whhitcj@qq.com

导师简介: 崔继承(1976-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光学设计、光谱仪器设计开发、光谱理论方面的研究。Email: jicheng_cui@163.com

1 120–2 240 nm respectively. Simultaneously the wavelength repeatability reached to 0.094, 0.186, 0.372 nm, and the precision reached to 0.096, 0.191, 0.382 nm. The monochromator achieves the design goals, and meets the requirements of the wavelength calibration of the imaging spectrometer.

Key words: grating monochromator; optical design; worm and worm wheel; spectral calibration

0 引言

单色仪是光谱测量及分析领域的基本光学仪器,应用十分广泛^[1-3]。利用高分辨率的光栅单色仪可以分析复色光在各波长处光能量的分布,即对发光物质的发射光谱进行分析,从而确定发光物质的元素组成;还可通过单色仪获得准单色光,对溶液或透明物质进行吸收光谱的分析,通过分析物质的吸收光谱,定性甚至定量分析物质的组成成分^[4]。另外,因为单色仪可以提供连续、稳定、高分辨率的单色光,所以它还能对其他精密的光谱仪器进行光谱定标^[5-6]。

成像光谱仪是成像技术与光谱技术的融合,可在获得目标图像信息的同时获得其对应光谱信息,在诸多的科学研究领域具有重要的应用^[7-8]。随着日益增长的光谱分析需求和成像光谱技术的发展,覆盖整个太阳光谱波段的成像光谱仪的研制,成为国内成像光谱仪器研究的重要方向,而成像光谱仪在投入使用之前必须进行精确的光谱定标,因此相应的宽波段高光谱分辨率的单色仪技术的研究是十分必要的。

针对成像光谱仪的光谱标定,设计了一款高分辨率的光栅单色仪,可实现 280~2240 nm 的宽波段单色光输出,光谱分辨率为 0.2 nm@840 nm。文中主要研究内容有三方面:第一,根据单色仪的使用要求,进行理论计算确定光学系统的主要参数,通过光学设计软件搭建光路进行优化设计;第二,使用蜗轮蜗杆机构实现光栅扫描,创造性地提出了蜗轮蜗杆偏轴安装的方法,以减小扫描过程中边缘波长有效口径的损失、有效减小仪器杂散光,并对其影响进行了仿真和对比;第三,利用多种数学模型对单色仪系统进行了光谱定标,验证了仪器的实际性能,最终结果显示仪器达到了预定的设计效果。

1 光学设计

单色仪系统采用水平式 Czerny–Turner 光路结

构,运用非对称式的设计,消除中间波长的慧差,更好地平衡边缘波长彗差,使整个工作波段像质均匀。受光栅衍射效率的限制,为实现 280~2 240 nm 的宽波段输出,并保证分辨率要求,需采用三块不同闪耀波长的平面衍射光栅,对应输出不同波段范围的单色光。

1.1 光学系统主要参数的计算

根据成像光谱仪波长标定的使用需求,提出了表 1 所列的光栅单色仪主要技术指标。

表 1 三光栅单色仪的光学参数

Tab.1 Optical parameters of the three-grating monochromator

Spectral range λ/nm	D/f	Wavelength range λ/nm	Precision $d\lambda/\text{nm}$
		280–560	≤ 0.1
280–2 240	1/6	560–1 120	≤ 0.2
		1 120–2 240	≤ 0.4

对基本光栅方程^[9] $d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda$ 应用三角关系和化积进行变换,得到扫描式光栅方程:

$$\sin \phi = \frac{m\lambda}{2d \cos \frac{\delta}{2}} \quad (1)$$

式中: $\delta = i - \theta$ 为入射光线与衍射光线之间的夹角; $\phi = (i + \theta)/2$ 为光栅的转角; m 为光栅衍射级次; d 为光栅刻线密度,扫描式单色仪中入射光与衍射光的夹角 δ 为固定角,故对公式(1)进行微分得角色散率公式:

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{m}{2d \cos \frac{\delta}{2} \cos \phi} \quad (2)$$

由公式(2)可以看出,光栅刻线密度越高,可将两波长分开的角度越大,即光栅的分辨本领越强,同时考虑实际条件,为 280~560 nm、560~1 120 nm、1 120~2 240 nm 三个波段分别选定刻线密度为 2 400、1 200、600 gr/mm 的三块光栅。

假设狭缝宽度调节为 $d_l = 30 \mu\text{m}$, 针对中间波段 560~1 120 nm,对公式(2)代入波长分辨率 $d\lambda = 0.2 \text{ nm}$,

近似地,求得 $f_2'=250\text{ mm}$,为充分保证系统的分辨率,选定 $f_2'=300\text{ mm}$,由此,三个波段的理论分辨率分别优于 $0.1、0.2、0.4\text{ nm}$ 。由公式(1)可以看出,狭缝变窄可实现更高的波长分辨率,但是考虑到系统的衍射属性,由爱里斑直径公式:

$$d = \frac{1.22\lambda \times f}{D} \quad (3)$$

代入相对孔径 $D/f=1/6$, $\lambda_{\max}=2\ 240\text{ nm}$,得艾里斑直径的最大值 $d_{\max}=16.397\ \mu\text{m}$,因此,为保证系统的光强,狭缝宽度应大于 d_{\max} ,综合考虑系统的像差增宽、装调误差以及入射能量等因素,实际使用中狭缝宽度 $d \geq 20\ \mu\text{m}$ 。

设定入射光线与衍射光线之间的夹角 $\delta=20^\circ$,求得各波段所对应的光栅转角列于下表,从表 2 中可以看出,由于划分的波段与选择的光栅刻线数都成严格倍数关系,使得每块光栅所对应输出波段范围所需的光栅转角具有一致性,简化了光学、机械设计与电学控制。

表 2 各波段对应的光栅转角

Tab.2 Grating corner of each wavelength range

Grating groove density /gr·mm ⁻¹	Wavelength λ/nm	Corner θ/(°)
2 400	280	19.948
	560	43.028
1 200	560	19.948
	1 120	43.028
600	1 120	19.948
	2 240	43.028

1.2 光学系统仿真设计

利用光学设计软件对单色仪系统进行仿真设计,针对中间波段 $560\sim 1\ 120\text{ nm}$,根据前述参数搭建水平式非对称 Czerny-Turner 光路结构。为消除中间波长的彗差,根据单色仪像差理论^[10]来设定两反射镜 M1 和 M2 的偏心角,使其满足彗差消除的条件:

$$\frac{\sin\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \left(\frac{\cos i}{\cos \theta}\right)^3 \left[\frac{\cos\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}\right]^3 \quad (4)$$

式中: i 为光栅的入射角; θ 为光栅的衍射角; $r_1、r_2$ 分别为准直镜 M1 和聚焦镜 M2 的曲率半径,通常准直镜 M1 离轴角 $\alpha_1/2$ (一般为 $4^\circ\sim 6^\circ$)和成像镜 M2 离轴角 $\alpha_2/2$ (一般为 $8^\circ\sim 10^\circ$)都较小,故 $\cos(\alpha_1/2)^3 \approx \cos(\alpha_2/2)^3 \approx 1$,

两反射镜焦距 $f=300\text{ mm}$,即 $r_1=r_2=600\text{ mm}$ 。最终确定两反射镜的离轴角分别为: $\alpha_1/2=4.5^\circ, \alpha_2/2=8.5^\circ$,满足彗差消除条件。

光栅单色仪是非成像光学系统,通常只关心其光谱分辨率,因此在光学设计过程中只考虑其子午像差。设计过程中,利用反射镜折转光路,使光路更加紧凑,压缩仪器体积,同时也能够有效地减少仪器杂散光,并且使光学元件分布均匀,便于机械设计、加工以及光学装调。光学结构设计结果如图 1 所示,光线像差曲线和点列图分别如图 2 和图 3 所示。由图 2 以看出,中心波长处彗差得到消除,只残留较小的球差,边缘波长处则表现为彗差为主,就整个波段看来像差不大,分布均衡。从图 3 中的点列图可以看出,中心波段 $560\sim 1\ 120\text{ nm}$ 分辨率达到了 0.2 nm 。

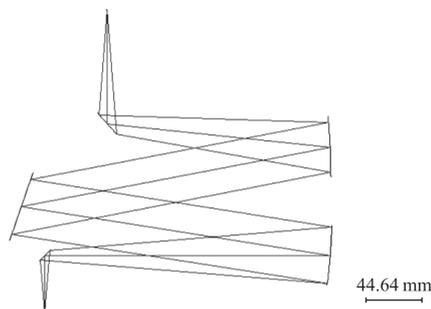


图 1 光学系统示意图

Fig.1 Schematic of optical system

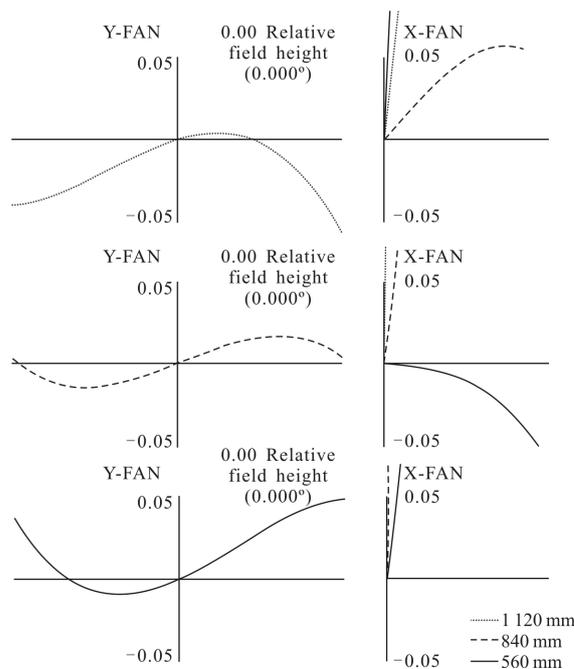


图 2 光学系统的光线像差曲线

Fig.2 Ray difference curves of optical system

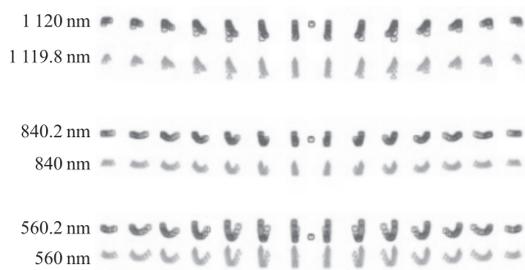


图 3 光学系统点列图

Fig.3 Spot diagram of optical system

由于划分的波段与选择光栅的刻线数都成严格倍数关系，所以设计结果显示各波段的光路结构、光线像差曲线和相应分辨率的点列图是对应一致的。波段 280~560 nm 和 1 120~2 240 nm 的理想情况下点列图分别如图 4(a)和图 4(b)所示，由图 4 可以看出，280~560 nm 和 1 120~2 240 nm 波段所对应的分辨率分别为 0.1 nm 和 0.4 nm，满足光学设计要求。

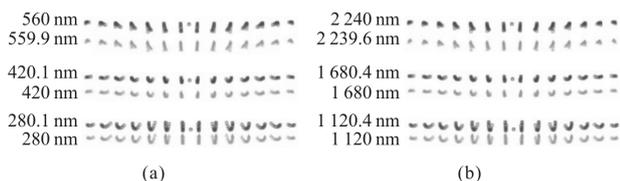


图 4 光学系统点列图

Fig.4 Spot diagram of optical system

2 蜗轮蜗杆扫描方案的设计

三光栅单色仪工作过程中，需要通过光栅的切换和扫描来实现不同波段、不同波长的单色光输出，因此需要设计光栅转动机构。采用蜗轮蜗杆^[1]扫描方式，可以实现光栅转台的 360°旋转，结构简单，成本低，系统整体示意图如图 5 所示。三块光栅 G1、G2、G3 以正三角形排布固定在蜗轮蜗杆转台上，蜗轮蜗杆的旋转中心即转台的中心，蜗轮蜗杆转台转动可实现光栅的切换和扫描。

不难发现，在转台转动扫描的过程中，光栅在光路中的位置会发生变动，这导致了来自准直镜的光束，并不能全部打到光栅上，相当于系统实际相对孔径的减小，同时还会增加仪器内的杂散光，这一现象由图 6(a)~(c)可直观地看出。

针对蜗轮蜗杆扫描方式存在有效孔径减小的问题，进行了具体的计算与仿真设计，提出了蜗轮蜗杆

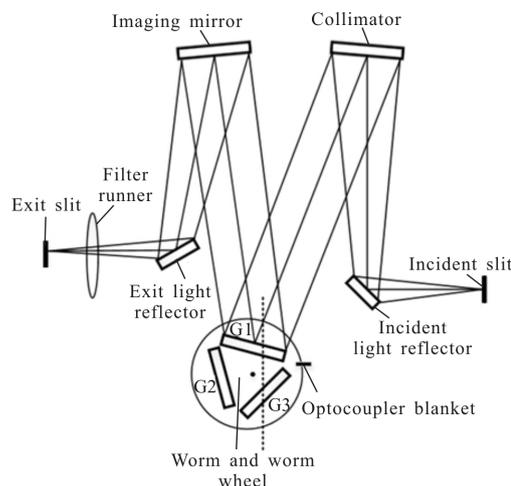


图 5 蜗轮蜗杆扫描系统

Fig.5 Scanning system of worm and worm wheel

偏轴安装的方法，有效提高了单色仪的性能。蜗轮蜗杆偏轴安装的基本理念是保证单色仪输出三个波段的中心波长时，来自准直镜的平行光束可以全部照射到光栅上，实际相对孔径为理论设计值 $D/f=1/6$ ，这样，可同时平衡扫描过程中两边缘波长处实际相对孔径的变化。

图 6(a)~(c)为蜗轮蜗杆转台传统安装方式的情形，蜗轮蜗杆转台的旋转中心在系统中心轴(图 6

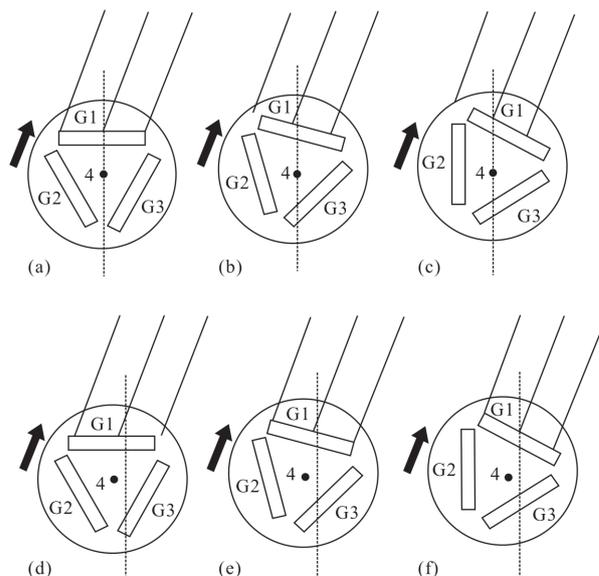


图 6 蜗轮蜗杆不偏轴与偏轴安装对比示意图

Fig.6 Schematic of worm and worm wheel on-axis compared with off-axis

中的虚线)上，可以看出光栅 G1 未开始扫描，即位于零级光位置时，来自准直镜的光束刚好充满整个口

径,而在光栅扫描的过程中,随着光栅位置的转动,实际的有效口径不断减小,对应工作波段的光栅扫描角度是 $19.95^\circ \sim 43.03^\circ$,根据光栅的理论有效口径 $L_{G1}=60\text{ mm}$,光栅表面到旋转中心的距离即旋转半径 $R=30\text{ mm}$,通过几何关系,可求得输出短波边缘波长和长波边缘波长时光栅的实际有效口径 $L_{G1}'=49.58\text{ mm}$, $L_{G1}''=39.84\text{ mm}$ 。

即对于三块光栅,扫描过程中短波边缘波长的实际有效口径损失约为理论口径的 17.4%,长波扫描的过程中有效口径损失越来越严重,而长波边缘波长达到了 33.6%,会严重影响单色仪的实际性能。

图 6(d)~(f)为蜗轮蜗杆转台偏轴安装的情形,为保证三块光栅输出对应波段的中心波长,即光栅扫描角度 $\Delta\theta=29.76^\circ$ 时,刚好使来自准直镜的光束完全充满整个光栅口径,通过几何关系计算,应使光栅的旋转中心相对系统中心轴偏移 $\Delta L=15.35\text{ mm}$,蜗轮蜗杆偏轴安装后,同样可以计算出两边缘波长处的有效口径 $L_{G1}'=52.85\text{ mm}$, $L_{G1}''=56.79\text{ mm}$ 。

短波边缘的有效口径损失为 11.9%,长波边缘损失 5.35%,即在扫描过程中光栅有效口径的损失先随着扫描角度的增加从 11.9%减小到中间波长处的零损失,再随着扫描角度的增加而增加到 5.35%,相比蜗轮蜗杆转台传统的安装方式得到了明显改善。

应用光学设计软件对蜗轮蜗杆偏轴安装时的光路进行近似仿真,在光栅面前加特定的光阑面,遮挡光栅的边缘口径,以模拟蜗轮蜗杆扫描过程中有效口径的损失,仿真结果显示:光线相差曲线等无明显变化,由于扫描过程损失的是边缘口径,使得点列图的能量集中度略有提高,光学系统的分辨率等性能未受影响。

图 7 为三光栅单色仪系统实物图,单色仪机身为

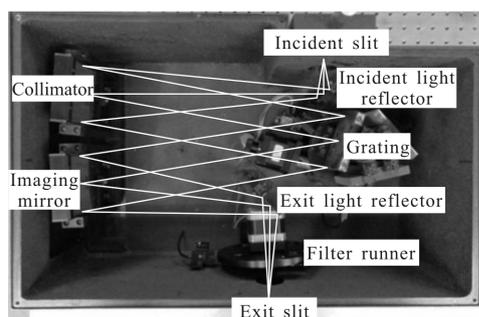


图 7 三光栅单色仪结构图

Fig.7 Structure diagram of the three-grating monochromator

两层结构,上层为光学系统与光栅扫描系统,下层为电气控制系统,整体体积为 $430\text{ mm} \times 270\text{ mm} \times 215\text{ mm}$ 。

3 单色仪的光谱定标

单色仪光谱定标使用汞灯作为光源,利用其可见光谱区的特征谱线及其高级光谱进行光谱定标^[12]。定标的基本过程是,由汞灯发出的光从入射狭缝进入单色仪,通过计算机控制蜗轮蜗杆转台转动,切换光栅并实现光栅扫描,以控制输出波长,用读数显微镜在出射狭缝处观察谱线。通过蜗轮蜗杆转台上安装的光耦挡片(如图 5 所示),配合固定于仪器底座的三个光耦,可确定三块光栅的初始位置,从初始位置扫描到汞灯的各条特征谱线,转台扫描过程中,计算机控制软件可记录步进电机步进次数,从而可确立汞灯特征谱线与电机步进数的对应关系。

此处以中间波段为例详细阐述定标过程,剩余两边缘波段可用同样方法完成标定。实验中,通过反复测量,得到中间波段 $560 \sim 1120\text{ nm}$ 中,汞灯特征谱线所对应电机步进数列于表 3 中。

表 3 不同输出波长对应的步进电机步进数

Tab.3 Step number of stepper motor at different wavelengths

Spectral order	Standard line /nm	Corner of the grating/(°)	Step number
1	435.83	15.398 568	4 922
1	546.07	19.432 518	6 537
1	576.96	20.580 088	6 995
1	579.07	20.658 785	7 027
2	435.83	32.077 377	11 594
2	546.07	41.712 468	15 447

根据扫描光栅方程:

$$\sin(n \times d\theta) = \frac{m\lambda}{2d \cos \frac{\delta}{2}} \quad (5)$$

式中: n 为电机步进数; $d\theta$ 为电机每步所转动的角度,可以看出,蜗轮蜗杆扫描方式的单色仪中,输出波长和电机步进数成非线性关系,因此选用正弦函数,三次、四次多项式等数学模型,利用最小二乘法对输出波长与电机步进数进行拟合结果显示四次多

项式拟合满足分辨率要求,且波长偏差最小,故选用四次多项式的拟合结果作为描述输出波长与电机步进数数学关系的定标函数,即:

$$\lambda = 1.743 \times 10^{-15} \times n^4 - 8.826 \times 10^{-11} \times n^3 + 8.148 \times 10^{-7} \times n^2 + 0.06634 \times n + 99.08 \quad (6)$$

定标函数曲线如图 8 所示,各条特征谱线的波长偏差列于表 4,最大波长偏差 0.020 1 nm,远小于相应分辨率 0.2 nm,表明定标函数的准确度满足光谱定标要求。

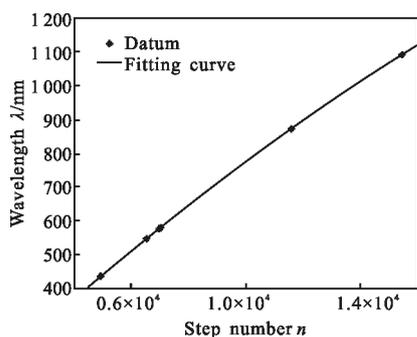


图 8 光谱定标曲线

Fig.8 Curve of spectral calibration

表 4 光谱定标波长误差

Tab.4 Wavelength error of spectral calibration

Standard line/nm	Fitting wavelength/nm	Wavelength error/nm
435.83	435.829 9	-0.000 1
546.07	546.071 4	0.001 5
576.96	576.939 9	-0.020 1
579.07	579.088 6	0.018 6
871.66	871.659 6	-0.000 4
1 092.14	1 092.138 6	-0.001 4

对定标函数公式(6)求导得到:

$$d\lambda = (6.972 \times 10^{-15} \times n^3 - 2.648 \times 10^{-10} \times n^2 + 1.629 \times 10^{-6} \times n + 0.06634) \times dn \quad (7)$$

当 $dn=1$ 时, n 取各输出波长所对应的电机步进数,可求得各输出波长处电机单步扫描的波长。如图 9 所示是步进电机单步扫描波长的理论值与拟合值的对比曲线,两曲线基本吻合,印证了定标函数的准确性,此外,由图 9 可直观地看出蜗轮蜗杆扫描方式的非线性。

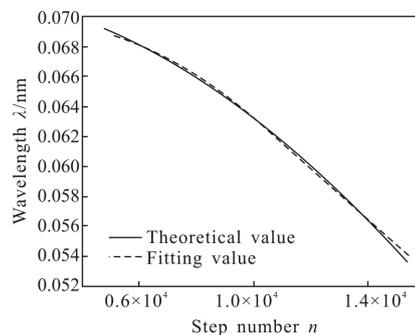


图 9 步进电机单步扫描波长的理论值与拟合值的对比曲线

Fig.9 Contrast curve of theoretical value and fitting value of stepper motor single step scanning wavelength

应用上述定标方法,对两边缘波段 280~560 nm 和 1 120~2 240 nm 分别进行了光谱标定,将整个工作波段 280~2 240 nm 的定标结果应用到单色仪系统,通过反复测量和验证,证明单色仪在 280~560 nm、560~1 120 nm、1 120~2 240 nm 三个波段的光谱分辨率分别优于 0.1、0.2、0.4 nm,波长重复性为 0.094、0.186、0.372 nm,波长准确度为 0.096、0.191、0.382 nm,均达到设计目标。

4 结论

针对成像光谱仪波长标定,设计了一款宽波段高分辨率单色仪,仪器在 280~560 nm、560~1 120 nm、1 120~2 240 nm 三个波段的光谱分辨率分别为 0.1、0.2、0.4 nm,满足成像光谱仪波长定标的使用要求。仪器的主要特点为:(1) 通过三块光栅切换工作,打破了单色仪系统中宽波段与高分辨率这对固有矛盾,使仪器实现了宽波段和高分辨率单色光的输出。通过巧妙的波段范围划分和光栅常数选择,简化了光学、机械设计和电学控制,也使加工和装调得以化简;(2) 采用蜗轮蜗杆扫描方式实现光栅的切换和扫描,创造性地提出了蜗轮蜗杆偏轴安装的方法,有效抑制了扫描过程中光栅有效口径的减小,降低了仪器杂散光,保证了系统的性能;(3) 采用多种数学模型进行光谱定标,通过对比选择波长偏差最小的四次多项式拟合,保证了定标的准确性,也验证了仪器的实际性能。该仪器巧妙的设计思路和方法可为其他单色仪或相关光谱仪器的研发提供借鉴和启发。

参考文献:

[1] Fang L, Li G, Yang H, et al. Tunable Fabry-Perot filter and

- grating hybrid modulator to improve dispersive spectrometer resolution[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(5): 145.
- [2] Liu Shuqin, Wang Binyong, Xu Rui, et al. Broad-spectral-range AOTF performance analysis system based on multi-band acquisition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1343–1348. (in Chinese)
刘书勤, 王斌永, 徐睿, 等. 基于多谱段集成检测的宽光谱 AOTF 性能测试系统 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1343–1348.
- [3] Xia Zhiwei, Wang Kai, Fang Wei, et al. Applications and development of radiation calibration in orbit based on space monochromator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1880–1891. (in Chinese)
夏志伟, 王凯, 方伟, 等. 基于航天单色仪的在轨辐射定标应用与发展[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1880–1891.
- [4] Sullivan J V, Walsh A. The application of resonance lamps as monochromators in atomic absorption spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta*, 1966, 22(11): 1843–1852.
- [5] Wei Wei, Cui Jicheng, Tang Yuguo, et al. Spectral calibration of medical microscopic imaging spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1015–1020. (in Chinese)
魏巍, 崔继承, 唐玉国, 等. 医用显微成像光谱仪的光谱定标技术[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1015–1020.
- [6] Liu Yujuan, Cui Jicheng, Bayanheshig, et al. Design and application of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2012, 20 (1): 52–57. (in Chinese)
- [7] Zhang Jing, Wang Shurong, Huang Yu, et al. Status and development of limb imaging spectrometers [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 692–700. (in Chinese)
张晶, 王淑荣, 黄煜, 等. 临边成像光谱仪的发展现状与进展[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 692–700.
- [8] Cui Jicheng, Liu Yujuan, Pan Mingzhong, et al. The integrative design for imaging spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(3): 839–843. (in Chinese)
崔继承, 刘玉娟, 潘明忠, 等. 成像光谱仪一体化设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(3): 839–843.
- [9] Wu Guoan. Spectral Instrument Design [M]. Beijing: Science Press, 1978: 101–105. (in Chinese)
吴国安. 光谱仪器设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 101–105.
- [10] Hao Aihua, Hu Bingliang. Research and design of astigmatism-free for C-T imaging spectrometer under non-parallel grating illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2132–2136. (in Chinese)
郝爱花, 胡炳樑. 非平行光束光栅照明 C-T 成像光谱仪消像散研究与设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2132–2136.
- [11] Deng Shihu, Zhang Rongjun, Ni Weiming, et al. Development of intelligentized multi-grating monochromator [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, 21(S1): 133–137. (in Chinese)
邓世虎, 张荣君, 倪卫明, 等. 智能化多光栅单色仪的研制 [J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(S1): 133–137.
- [12] Li Zhigang. High accuracy spectroradiometric standard light source based on detector standard [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 909–918. (in Chinese)
李志刚. 基于探测器标准的高精度光谱辐射标准光源 [J]. 中国光学, 2015, 8(6): 909–918.