文章编号 2095-1531(2019)01-0148-08

LAMOST 高分辨率光谱仪研制

张天一[1,2,3*],朱永田[1,2,3],侯永辉[1,2,3],张 凯[1,2],胡中文[1,2],
王 磊[1,2],陈 忆[1,2],姜海娇[1,2],汤 振[1,2],许明明[1,2],姜明达[1,2]
(1. 中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所,南京 210042;
2. 中国科学院 天文光学技术重点实验室,南京 210042;
3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了充分利用 LAMOST 望远镜,实现对银河系不同星族的分布与整体性研究,以及极端贫金属星元素丰度测定等科学目标,研制了 LAMOST 高分辨率光谱仪,光谱分辨率 $R \geqslant 30\,000$,光谱覆盖范围 380 ~ 740 nm。在充分考虑台址因素与现有条件后,采用中继倍率 0.7 倍的准白瞳设计方案,使用大芯径光纤、拼接大光栅、棱栅组合式横向色散器、缝前像切分器等措施来满足性能要求。进行了效率估算与杂散光分析,光谱仪本体效率峰值大于 30%,杂散光照度占 CCD 总照度的 2.55%,信噪比为 16.01 dB。试运行阶段实测了太阳光谱,温度稳定性达到 ±0.03 ℃,光谱仪效率峰值约为 33.5%,满足稳定、高效的运行要求。

关 键 词:光谱仪;分辨率;通光效率;杂散光
中图分类号:O439; TB133 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20191201.0148

Construction of a LAMOST high resolution spectrograph

ZHANG Tian-yi[1,2,3*], ZHU Yong-tian[1,2,3], HOU Yong-hui[1,2,3], ZHANG Kai[1,2], HU Zhong-wen[1,2],
WANG Lei[1,2], CHEN Yi[1,2], JIANG Hai-jiao[1,2], TANG Zhen[1,2], XU Ming-ming[1,2], JIANG Ming-da[1,2]
(1. *National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210042, *China*;
2. *Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210042, *China*;
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: tyzhang@niaot.ac.cn*

Abstract: In order to make full use of the LAMOST telescope, as well as to achieve scientific goals such as the distribution and integrity of different stellar populations in the galaxy or the measurement of elemental abundance in extremely metal-poor stars, a LAMOST high-resolution spectrometer was developed with a spectral resolution of $R \geqslant 30\,000$ and spectral coverage range of 380 – 740 nm. After fully considering the factors of the site and its existing conditions, a quasi-white pupil design scheme with a repeater magnification of 0.7 × was

收稿日期:2018-04-03;**修订日期**:2018-04-26
基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11473049, No. 11473048, No. 11603056)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 11473049, No. 11473048, No. 11603056)

applied, using a large-core fiber, a large-diameter tiled-grating, a prism-grating disperser, and an image slicer to meet the perfermence requirment. Efficiency estimation and stray light analysis were performed. The peak efficiency of the spectrograph was more than 30%, the stray light illumination accounted for 2.55% of the total CCD illumination and the signal-to-noise ratio was 16.01dB. The solar spectrum was measured during the trial run with a temperature stability of ±0.03 ℃ and a peak efficiency of approximately 33.5%, thus meeting requirements for stable and efficient operation.

Key words: spectrograph; resolution; light efficiency; stray light

1　引　言

郭守敬望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope, LAMOST)是我国自主创新研制的主动反射施密特望远镜。它是目前世界上口径最大的大视场望远镜，同时也是世界上光谱获取率最高的望远镜。LAMOST 科学委员会确立了以大规模银河系光谱巡天及多波段天体光谱认证为核心科学目标的巡天计划[1-2]。截止 2017 年 6 月一期巡天结束时，共获得 900 余万条光谱，远超过国际其他巡天项目发布的光谱集合，为世界上最大的光谱样本集。在国际上率先实现了天区覆盖连续、统计无偏大样本银河系光谱巡天。中国、美国、德国、比利时、丹麦等国家和地区的 59 所科研机构和大学正在利用这些数据开展研究工作，并取得一系列高显示度的科研成果。LAMOST 一期巡天配备 16 台低分辨率光谱仪，用以进行大样本、低分辨率的光谱红移巡天观测[3]。在完成一期巡天后，将开展对特殊天体的精细观测，实现高分辨率、高信噪比的星际参数和化学元素丰度测量，而我国目前精测望远镜的口径只有 2 m 级，急需配置一台单目标高分辨率光谱仪开展后续精细观测，并在不适合对暗弱目标进行低分辨率观测等条件下，使用高分辨率光谱仪进行高分辨率观测，以达到充分利用 LAMOST 的目的。出于以上考虑，LAMOST 将升级配备新的高分辨率光谱仪(LAMOST-HRS)。结合台址和望远镜现有条件，拟采用大芯径光纤、拼接大光栅、棱栅组合式横向色散器、缝前像切分器等技术措施来满足性能要求[4-6]。

2　LAMOST 高分辨率光谱仪设计方案

2.1　光谱分辨能力

光纤光栅光谱仪的色分辨能力可由公式(1)给出[7]：

$$R \times \Phi = 2\xi \tan\theta_b \times \frac{D_1}{D_T}, \qquad (1)$$

其中，R 为光谱分辨率，Φ 代表狭缝对天空张角，D_1、D_T 分别代表准直光束口径与望远镜通光口径，θ_b 为光栅闪耀角，ξ 为光纤焦比蜕化。目前常见的 4 种阶梯光栅按闪耀角的正弦值分别命名为 R2、R3、R4、R5(如闪耀角为 63.4°的阶梯光栅，其正弦值为 2，故命名为 R2 光栅)。3 种阶梯光栅的光谱分辨能力曲线如图 1 所示，可见无论是单块或是拼接光栅，R4 光栅(闪耀角为 76°)在相同准直口径下都表现出更强的光谱色散能力，因此拟采用 R4 拼接大光栅作为主色散元件。此外为达到既定高分辨率，在缝前增设双切分像切分器来平衡高分辨率和高光效率之间的矛盾，实现在不限缝下光谱分辨率$R \geqslant 30\,000$。

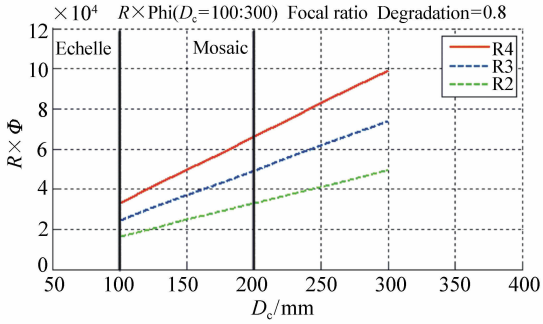

图 1　光谱分辨能力 $R \times \Phi$ 曲线

Fig. 1　Curve of spectral resolution $R \times \Phi$

2.2 分辨率、相机焦比、光谱覆盖

在色散方向上，有公式(2)[8]：

$$S = \omega' \times \frac{\Delta\lambda}{\mathrm{d}\lambda} = \frac{R\Phi D}{\xi}F' \times \frac{\Delta\lambda}{\lambda_b}, \quad (2)$$

其中 ω' 为狭缝缝宽，R 为光谱分辨率，D 为望远镜通光口径，ξ 为光纤焦比蜕化，$\Delta\lambda$ 为单次采样光谱覆盖范围，λ_b 为光栅闪耀波长。光谱在探测器上的覆盖尺寸 S，即自由光谱范围 FSR。当光谱分辨率 R 和相机焦比 F'_2 确定时，可通过其计算出每个级次的自由光谱范围 FSR = $\Delta\lambda$ 在探测器上的覆盖尺寸 S，如图 2 所示。

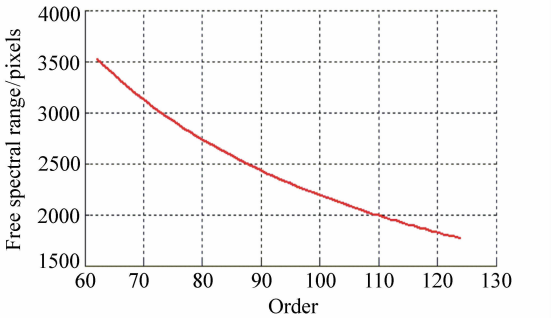

图 2 各级次的自由光谱范围

Fig. 2 Free spectral range of all levels

在级次分离方向上，所有级次在探测器上的覆盖尺寸 S_x 表示为式(3)：

$$S_x = \omega' \frac{\Delta\lambda_x}{\mathrm{d}\lambda_x} = \omega' \times \frac{\Delta\lambda_x}{P_x\omega'} = \frac{\Delta\lambda_x}{P_x}, \quad (3)$$

其中 P_x 代表横向色散的倒线色散系数；$\Delta\lambda_x$ 代表级次方向的中心波长覆盖范围。S_x 与 S 共同评价了探测器的利用率，是选择图像传感器(CCD)的标准之一。

2.3 级次间隔、光谱覆盖

当使用像切分器时，星像沿狭缝线性排列，长狭缝要求光谱仪在空间方向上拥有更高的横向色散能力来分开各个级次。常用的横向色散元件有光栅、棱镜和棱栅 3 种。但由于光栅与棱镜产生的级次间隔对波长敏感，均会造成红蓝端级次间隔差别悬殊，不利于在有限的探测器上容纳所要求的光谱覆盖范围，遂选择棱栅来平衡红蓝两端级次间隔差异，如图 3 所示。同时从制造工艺上考虑，拟使用体相位全息光栅(VPHG)和独立三角棱镜的组合方式作为所研制光谱仪的横向色散元件。

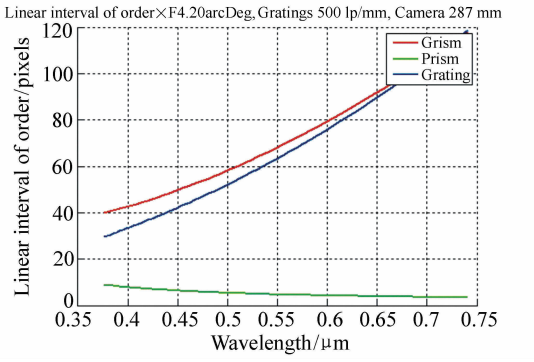

图 3 级次间隔分布曲线

Fig. 3 Curves of linear interval of order

3 仪器的组成与主要性能指标

3.1 缝前单元、定标灯单元

光谱仪缝前单元由光束变焦比系统与像切分器组成，如图 4 所示。星光经过一次变焦比系统，

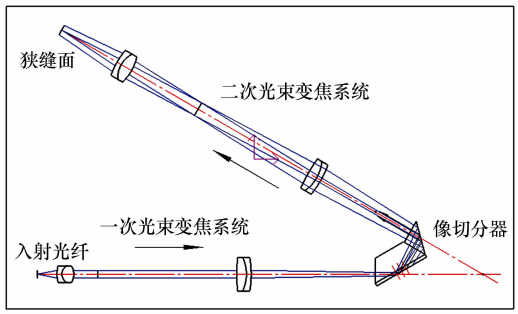

图 4 缝前单元系统组成示意图

Fig. 4 Composition of the unit before slit

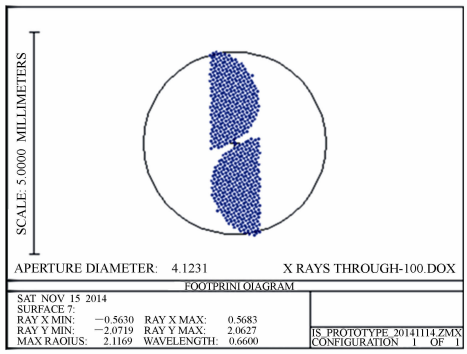

图 5 像切分效果示意图

Fig. 5 Simulation of image segmentation

转变为像切分器要求的慢焦比，再由二次变焦比系统将切分后的像斑透射在狭缝处。其中像切分器采用双切分结构，切分效果如图 5 所示。

定标灯单元提供稳定的钍氩和平场灯源，并以匹配望远镜的焦比耦合进灯源光纤，放置在室内远离光谱仪处并与光谱仪相连。灯箱由复消色透镜组成，附加光阑和遮光罩去除杂散光。平场光源和定标光源共用一套光纤耦合系统保证两光源的入射焦比和耦合效率相近，以远程控制灯源切换，如图 6 所示。

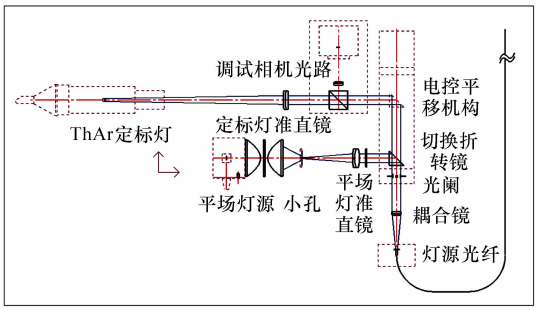

图 6　定标灯单元光学系统

Fig. 6　Optical system of calibrating light unit

3.2　光谱仪本体单元

光谱仪本体单元包括本体光机系统、探测器单元、电控电源和隔温罩。本体单元采用 0.7 × 中继倍率的准白瞳设计方案，准直光束口径为 Φ 205 mm，相机焦比为 $F/2$。本体光学方案和三维模型如图 7 所示。通过狭缝的切分光束经主准直镜和拼接大光栅色散后，再由主准直镜、折转平面镜和中继准直镜缩束成 145 mm 光瞳的平行光束群。为提供足够且较均匀的级次间隔，使用 VPH 光栅与棱镜组成的横向色散器。横向色散后的光束群由照相机（7 片高透过率透镜组成）成像到探测器 CCD 靶面上。其中相机首镜的第一光学面为高次非球面，第二镜为胶合镜，双凹末镜为探测器的真空封窗。

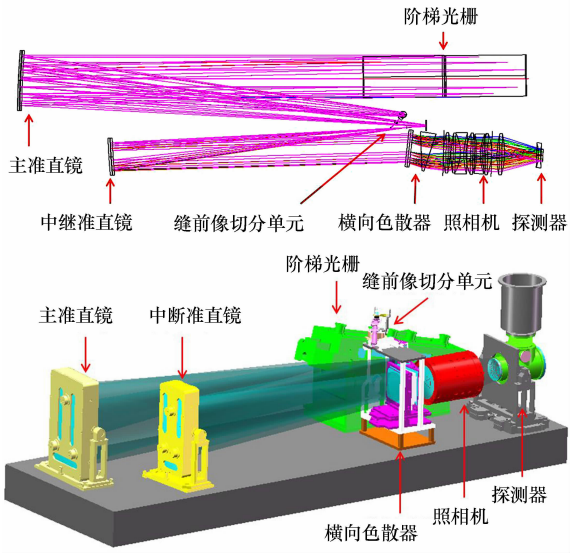

图 7　光谱仪本体光学方案和三维模型

Fig. 7　Optical design and 3D model of spectrograph body

表 1　LAMOST-HRS 主要技术指标

Tab. 1　Main specifications of LAMOST-HRS

项目	参数
光谱分辨率	无限缝下 $R\geqslant 30\ 000$
波长覆盖范围/nm	380 ~ 740
狭缝对天空张角/(″)	2.25
准直光束口径/mm	205
中继倍率	0.7 ×
相机焦比	$F/2$
阶梯光栅刻线密度/(lp·mm^{-1})	41.6
横向色散器刻线密度/(lp·mm^{-1})	500
光效率峰值	>30%

3.3　光谱仪光效率计算

计算光谱仪的效率时应考虑如下因素：镀膜后光学系统的效率损失；光线、像切分器的光学损耗；色散元件效率，包括阶梯光栅、横向色散器的光栅衍射效率和三角棱镜的光效率；CCD 光电转换的量子效率和光敏面的膜层效率。图 8 给出了

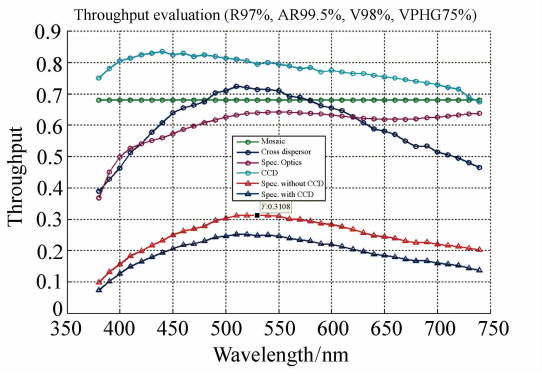

图 8　光谱仪本体效率估算曲线

Fig. 8　Estimate of the efficiency of spectrograph body

光谱仪光效率理论峰值估算情况，在不计 CCD 效率的情况下，本体效率峰值约为 31%。

3.4 杂散光分析

杂散光可以定义为未遵循预定路径而到达焦面的光线。系统的非成像杂散光一般来源有两类[9]：其一是非成像光束在像平面产生的亮背景，主要为机械系统缝隙外光线以及视场外光线没有进行有效的遮拦而到达探测器上形成的。此类杂散光路径遵循菲尼尔折反射定律和衍射公式，可以通过光线追迹的形式进行分析。其二是系统因散射产生的非定向杂散光，这部分杂散光是由于表面的不绝对光滑造成的。散射不遵循既定公式，只能用统计学的方法，通过散射理论模拟杂散光。在光谱仪器中，引起散射的因素主要为光学面加工时的残余粗糙度、表面颗粒污染、机械表面黑处理等因素。这些复杂的散射很难用一种形式来描述，因此将利用双向散射分布函数（BSDF）来描述光线经过散射表面的宏观行为[10-12]。

本文通过杂散光分析软件针对上述两类杂散光进行仿真分析。假设光在光学元件和机械零件表面的散射特性定义如下：（1）机械表面涂表面黑处理涂料 Aeroglaze Z306，其 BSDF 如图 9 所示。（2）光学面镀膜由 McLeod 膜系设计导入。（3）光学面粗糙度引起的散射由哈维（Harvey）模型描述，如式（4）所述。式（4）中，b_0 为图像峰值，L 描述峰值的宽度，S 描述了大散射角下的对数下降情况。θ_{scatter}、θ_{specular} 分别为入射光经过光学面的散射角，反射角，β、β_0 为与之对应的正弦值，r 为光学面曲率半径。通过粗糙度测量数据计算 Harvey 模型关键参数。（4）由光学面颗粒污染引起的散射由米氏散射理论与 IEST-STD-CC1246D 颗粒分布模型描述。由表面颗粒污染引起的散射 BSDF 如图 10 所示[13-14]。

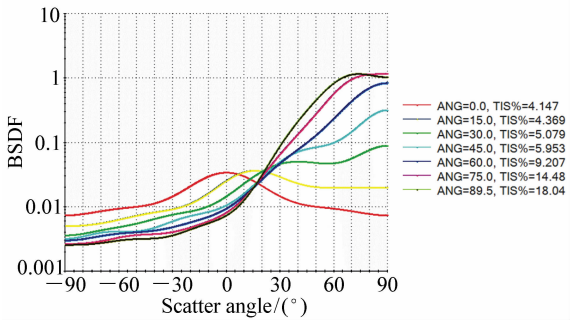

图 9 Aeroglaze Z306 BSDF 绘图

Fig. 9 BSDF scatter plot: Aeroglaze Z306

$$BSDF(\beta,\beta_0) = b_0\left[1+\frac{(\beta-\beta_0)^2}{L^2}\right]^{s/2} Sr^{-1}$$
$$\beta = \sin(\theta_{\text{scatter}})$$
$$\beta_0 = \sin(\theta_{\text{specular}}) \quad (4)$$

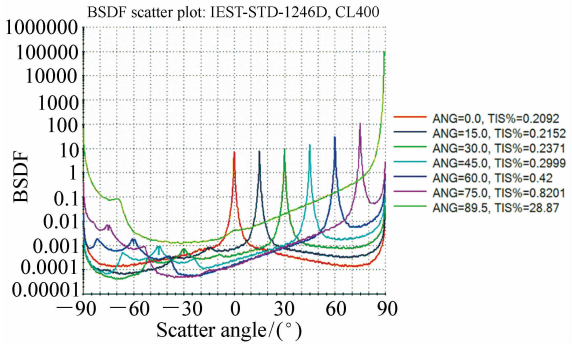

图 10 颗粒散射 BSDF 绘图

Fig. 10 BSDF scatter plot: IEST-STD-CC1246D

杂散光分析以狭缝为光源，选取 150 个参考波长进行分析，设置入射能量为 1，不考虑衍射效率。执行高级光线追迹，表 2 为预估杂散光背景，

表 2 预估杂散光背景

Tab. 2 Estimate of background of stray light

	鬼像		散射	
级次	1 级	2 级	1 级	2 级
机械结构	0%	0%	0%	0.01%
光学面	0.07%	0.13%	2.49%	0.04%

表 3 杂散光分析结果

Tab. 3 Results of stray light analysis

项目	结果
CCD 面总照度	3.15E-01
平均照度	5.75E-05
标准差	1.06E-03
杂散光照度	0.79E-02
信噪比	16.01 dB
CCD 面杂散光百分比	2.55%

可以看出对于 LAMOST-HRS，在任何不同级次下，杂散光都由散射主导，鬼像能量微弱。最终杂散光分析报告如表 3 所示，杂散光照度占 CCD 面照度 2.55%，信噪比为 16.01 dB。

4　LAMOST-HRS 试运行

为保证光谱仪工作状况，开展了为期 3 个月的光谱仪试运行与测试阶段。期间实测了太阳光谱，并与美国 NOAO 太阳光谱进行对比，如图 11 所示，结果理想。

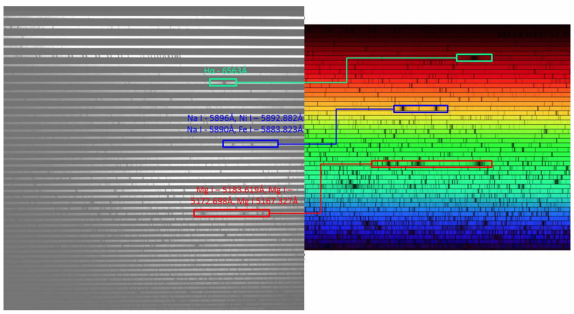

图 11　LAMOST-HRS 太阳光谱（左图）与美国 NOAO 太阳光谱对比（右图）

Fig. 11　Comparison between the LAMOST-HRS solar spectrum (left) and the American NOAO solar spectrum (right)

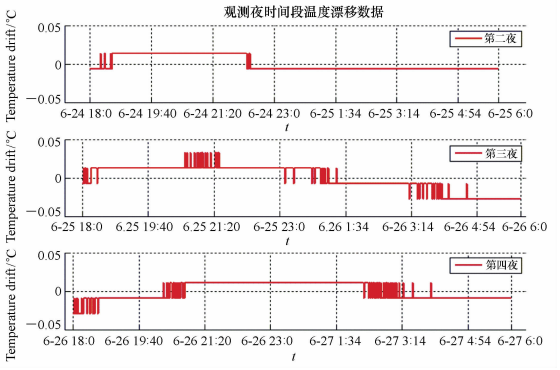

图 12　单夜温度稳定性测试结果

Fig. 12　Test results of temperature stability in single night

为保证光谱仪稳定运行，进行了温度性能测试。测试结果表明：每个观测时段，温度稳定性达到 ±0.03℃，如图12所示。本体光效率峰值测试结果如图 13 所示，可见，光谱仪在波长为 543.5 nm 处效率峰值约为 33.8%，阶梯光栅每个衍射级次内的衍射效率均随波长变化而变化，根据测试波长 543.5 nm 偏离中心波长对应的衍射效率换算，光谱仪本体在第 86 级光谱可获得光效率峰值大于 35%，符合理论计算预期与设计方案要求[15]。

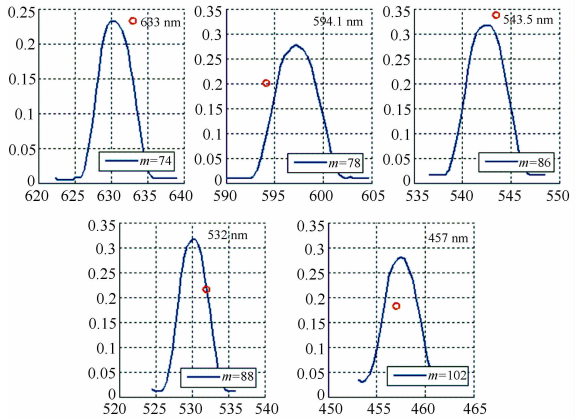

图 13　光谱仪本体光效率测试结果（蓝色为理论曲线；红色为测试值）

Fig. 13　Light efficiency test results of spectrograph body (blue is the theoretical curve; red is the test value)

5　结　论

LAMOST 高分辨率光谱仪是一台配属于 4 米级望远镜、覆盖 B、V、R 波段的高性能、高稳定性天文光谱设备。充分考虑台址和望远镜的实际情况，方案增设缝前切分单元来满足科学观测对仪器的技术要求，更换大芯径光纤降低台址视宁度下降的影响，采用双拼接大光栅的准白瞳光学结构，使用体相位全息光栅（VPHG）和三角棱镜组合的横向色散器来满足大级次间隔和高光效率的要求。根据理论计算与分析可知，光谱仪的本体光效率峰值约为 31%，像面杂散光占比为 2.55%，信噪比为 16.01 dB。在开展了 3 个月的光谱仪试运行与测试后，测得太阳光谱，并将其与美国 NOAO 发布的太阳光谱相比较，结果理想。测试光谱仪效率峰值大于 30%，温度稳定性达到 ±0.03 ℃，满足稳定、高效的运行要求。

参考文献：

[1] CUI X. Preparing first light of LAMOST[C]. Ground-based and Airborne Telescopes II, US, 2008, 7012: 701204

[2] ZHAO G, ZHAO Y H, CHU Y Q, *et al*.. LAMOST spectral survey—An overview[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(7): 723-734.

[3] BAI Z R, ZHANG H T, YUAN H L, *et al*.. Sky subtraction for LAMOST[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2017, 17(9), doi: 10.1088/1674-4527/17/9/91.

[4] 张凯. LAMOST高分辨率光谱仪的研制进展[C]. 中国天文学会2014年学术年会论文摘要集, 2014:
ZHANG K. Development of LAMOST high resolution spectrometer[C]. The China Astronomical Society 2014 Annual Conference Paper Abstract Collection, 2014. (in Chinese)

[5] 崔向群. 中国大型光学红外望远镜[C]. 全国光学测试学术交流会, 2016.
CUI X Q. China Large-scale optical infrared telescope[C]. National Optical Testing Academic Conference, 2016. (in Chinese)

[6] 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, 11(5): 442-447.
WU X H, ZHU Y T, WANG L. Optical design of high resolution echelle spectrograph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 442-447. (in Chinese)

[7] 朱永田. 8～10 m级光学/红外望远镜的高分辨率光谱仪[J]. 天文学进展, 2001, 19(2): 336-345.
ZHU Y T. High-resolution spectrometer for 8 to 10 m optical/infrared telescopes[J]. *Progress in Astronomy*, 2001, 19(2): 336-345. (in Chinese)

[8] 朱永田, 胡中文, 王磊, 等. LAMOST多目标光纤光谱仪的研制及试运行[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(11): 1337-1341.
ZHU Y T, HU ZH W, WANG L, *et al*.. Construction and commissioning of LAMOST low resolution spectrographs[J]. *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron*, 2011, 41(11): 1337-1341. (in Chinese)

[9] 张天一, 季杭馨, 侯永辉, 等. 像切割器技术积分视场三维光谱仪[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 531-536.
ZHANG T Y, JI H X, HOU Y H, *et al*.. Integral field spectroscopy imaging technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 531-536. (in Chinese)

[10] NICODEMUS F E, RICHMOND J C, HSIA J J. *Geometrical Considerations and Nomendature for Reflectance*[M]. Unite States, US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1977.

[11] 宋延嵩, 安岩, 李欣航, 等. 激光准直系统中的杂散光分析与抑制[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 663-670.
SONG Y S, AN Y, LI X H, *et al*.. Analyzing and suppressing of stray light in laser collimating system[J]. *Chine Optics*, 2016, 9(6): 663-670. (in Chinese)

[12] 葛城显, 吴振森, 白靖, 等. 微粗糙光学表面与多个镶嵌粒子差值散射场特性[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(2): 268-275.
GE CH X, WY ZH S, BAI J, *et al*.. Difference field scattering properties between multiple inlaid redundant particles and slightly rough optical surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(2): 268-275. (in Chinese)

[13] 谭乃悦, 许中杰, 韦可, 等. 透射光学系统像平面一阶散射光照度分布规律研究[J]. 物理学报, 2017, 66(4): 78-84.
TAN N Y, XU ZH J, WEI K, *et al*.. The research on the illumination distribution law of the first-order scattered light in the focal plane of transmission optical system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(4): 78-84. (in Chinese)

[14] 宋延松, 杨建峰, 李福, 等. 基于杂散光抑制要求的光学表面粗糙度控制方法研究[J]. 物理学报, 2017, 66(19): 69-77.
SONG Y S, YANG J F, LI F, *et al*.. Method of controlling optical surface roughness based on stray light requirements [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(19): 69-77. (in Chinese)

[15] HOU Y H, WANG L, HU Z, *et al*.. The LAMOST low resolution spectrograph stability performance[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, 2012: 60.

作者简介:

张天一(1989—),男,吉林长春人,博士研究生,2011 年于长春理工大学获得学士学位,2015 年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事望远镜终端仪器光学设计及杂散光分析方面的研究。E-mail:tyzhang@ niaot. ac. cn

朱永田(1964—),男,吉林长春人,硕士,研究员,博士生导师,1986 年于长春理工大学获得学士学位,1989 年于中国科学院紫金山天文台获得硕士学位,主要从事天文光谱和高分辨率成像技术、太阳系外行星探测技术等方面的研究。E-mail:ytzhu@ niaot. ac. cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4 开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/O4;国内外公开发行,邮发代号:国内 12-140,国外 BM6782。

★ 荷兰 Scopus 数据库
★ 美国《乌利希国际期刊指南》
★ 美国《化学文献》
★ 波兰《哥白尼索引》
★ 俄罗斯《文摘杂志》
★ 美国工程索引(Ei)数据库
★ 美国 ESCI 数据库
★ 中国精品科技期刊
★ 中国科技核心期刊
★ 中国光学学会会刊
★ 中国科技论文与引文数据库
★ 中国期刊全文数据库
★ 万方数字化期刊全文数据库
★ 中国科技期刊数据库
★ 中国光学期刊网数据库

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院
主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室
编辑出版:《中国光学》编辑部
投稿网址:http://chineseoptics. net. cn
邮件地址:chineseoptics@ ciomp. ac. cn; zggxcn@ 126. com
联系电话:0431-86176852; 0431-84627061　　传　　真:0431-84627061
编辑部地址:长春市东南湖大路 3888 号(130033)