

LAMOST 低分辨率光谱仪体位相全息 光栅的参数测量*

熊 芬^{1,2,3†} 汤 振¹ 王 磊¹ 王家宁¹ 胡中文¹

(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 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 对 LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope) 16 台低分辨率光谱仪共 34 块体位相全息光栅 (VPHG) 的参数进行了系统测试, 给出了测试方法和测量结果, 测量参数包括光栅的刻线密度、闪耀角、衍射效率曲线以及闪耀角偏差对衍射效率的影响等, 测量的数据为 LAMOST 光谱仪的安装提供了依据。

关键词 仪器: 光谱仪, 方法: 实验室, 技术: 光谱, 望远镜
中图分类号: P 111; **文献标识码:** A

1 引言

LAMOST 是大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜的简称, 是一架视场为 $5^\circ \times 5^\circ$ 、横卧于南北方向的中星仪式反射施密特望远镜, 它的光学系统包括: $5.72 \text{ m} \times 4.4 \text{ m}$ 的反射施密特改正镜 MA (由 24 块六角形子镜拼接而成), $6.67 \text{ m} \times 6.05 \text{ m}$ 的球面主镜 MB (由 37 块球面子镜拼接而成) 和焦面 3 个部分. 其中 MA 在观测天体的过程中随着时间的改变可实时地变化成需要的非球面面形. 应用主动光学技术控制反射改正板, 使它成为大口径兼大视场光学望远镜的世界之最. 由于它的大口径, 在曝光 1.5 h 内可以观测到暗达 20.5 mag 的天体. 而由于它的大视场, 在焦面上放置 4 000 根光纤, 将遥远天体的光分别传输到多台光谱仪中, 同时获得它们的光谱, 成为世界上光谱获取率最高的望远镜.

为了获取大量天体的光谱信息, LAMOST 配置了 16 台多目标低分辨率光纤光谱仪. 每台光谱仪可安插 250 根光纤, 光纤芯径 3.3", 光谱仪观测范围分红蓝两区, 光谱范围 370 ~ 900 nm, 蓝区 370 ~ 590 nm, 红区 570 ~ 900 nm. 光谱仪配置 VPHG 作为色散元件以获取更高衍射效率^[1].

相比其他类型的光栅, VPHG 的典型特点有: 对于不同波长或不同衍射级次可通过改变 VPHG 的入射角获得高效率, 在满足布拉格条件时理论衍射效率可达 100%; 偏振效

2011-01-17 收到原稿, 2011-04-11 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10873023) 资助

† fxiong@niaot.ac.cn

应小; 鬼象和杂散光明显好于其他光栅; VPHG 封闭在两块玻璃材料中间、防尘、易于清洁、寿命长、性能不衰减等等.

目前 LAMOST 光谱仪共配置了 32 块低分辨率光栅和 2 块中分辨率光栅, 对这些光栅进行系统的测量, 获取光栅参数的准确值对大科学工程的作用是不言而喻的.

2 VPHG 的参数测量意义

2.1 VPHG 的工作原理

VPHG 的制作利用了光的干涉原理: 两束相干平行光在光学乳胶中形成干涉场, 形成明暗相间的等间隔的条纹, 乳胶的折射率发生周期性变化, 周期由这两束近平行光的夹角和波长所决定, 经过漂白、干燥而成型. 制作 VPHG 的乳胶一般选用重铬酸盐明胶, 这种胶具有高衍射效率、高澄清、低散射、低吸收、长寿命等特性, 乳胶成型后前后两面分别用镀有相应的 AR 抗反射膜的平面玻璃进行封装, 结构如图 1 所示^[2]. n_0 为光栅使用环境的介质折射率, n_1 为光栅的保护玻璃的折射率, n_2 为光栅的折射率; d 为光栅厚度; γ 这里为 90° , 表示的是光栅条纹方向垂直于光栅表面; ν 为光栅频率.

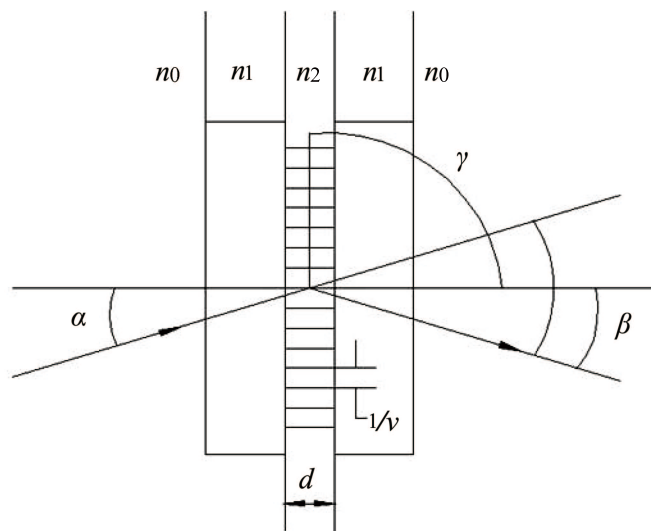


图 1 条纹刻线垂直于光栅表面的透射 VPHG 衍射示意图

Fig.1 Schematic diagram of VPHG diffraction with carving groove perpendicular to its surface

与经典的刻划光栅不同, VPHG 是通过调制夹在两块玻璃中间的介质材料的折射率实现对光的衍射, 折射率调制的频率 (条纹数) 和光栅介质的厚度是决定 VPHG 性能的重要参数. 光线衍射角作为入射角和折射率调制频率的函数, 满足经典光栅衍射方程, VPHG 的衍射效率与入射角、衍射角有关, 当这种关系满足布拉格条件时, VPHG 的衍射效率最高, 理论上接近 100% 是可能的.

透射式 VPHG 方程可以由 (1) 式表示:

$$m\nu\lambda = \sin\alpha - \sin\beta, \quad (1)$$

其中 α 为入射角, β 为衍射角, m 为衍射级次, λ 为入射光波长.

2.2 LAMOST 光谱仪对 VPHG 参数测量的意义

VPHG 是 LAMOST 光谱仪中的核心元件, 为将厂商提供的光栅参数的理论数据的误差降到最低, 保证 LAMOST 光谱仪的最佳工作状态, 我们有必要对光谱仪的核心元件 VPHG 进行全面的测量, 具体测量意义如下:

(1) 光栅刻线密度是指光栅每毫米的刻线数, 其数值跟光谱仪的分辨率直接相关, VPHG 折射率调制的频率 (即线密度) 是决定光谱仪工作的重要参数, 因此需要对其进行精确的测量.

(2) 衍射效率指的是给定级次的单色光入射到光栅表面, 其衍射光与入射光的比值; 光栅衍射效率愈高, 则信号损失愈小, 光效率是天文光谱仪器的重要指标之一, 高光效率历来是天文学家不断追求的目标, 因此对 LAMOST 低分辨率光谱仪的核心元件 VPHG 进行衍射效率的测量有着实际的需要.

(3) LAMOST 光栅使用过程中最重要的事情, 首先是要保证光栅工作角度是准确的, 即需要精确掌握光谱范围内波长的闪耀角信息以达到最高的峰值衍射效率, 因此对光栅的闪耀角进行精确测量是保证 LAMOST 达到最高光效率的重要前提.

(4) 测试闪耀角偏差对 VPHG 衍射效率的影响, 同时观察闪耀波长和闪耀角的数值关系, 掌握改变单色光波长时闪耀角的变化趋势, 为光谱仪切换光谱波段时的安装调整提供理论参考.

3 VPHG 参数的测量方案

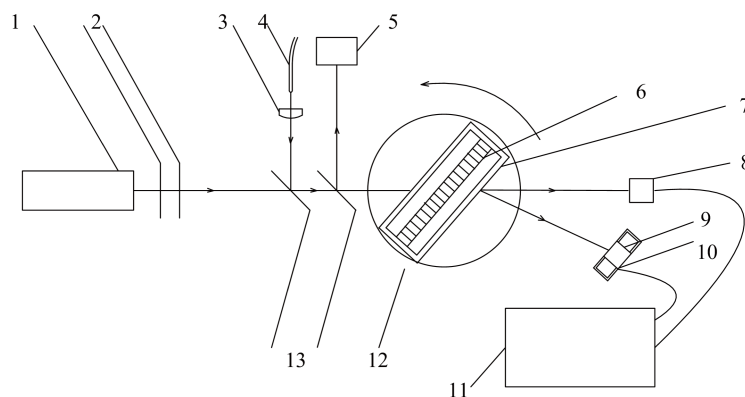
3.1 VPHG 参数测量系统的建立

如图 2 所示, 线密度的测量采用衍射法通过绝对角度测量获得, 通过角度扫描得到入射角 α , 使得衍射角 $\beta = -\alpha$, 出射的激光经过两级衰减通过光栅自准直到 CCD 中接收, 对光栅面进行二维采样共取 15 个点进行测量, 光栅各点可以通过二维电动平移台的移动切换. 将 α 和 β 代入 (1) 式中计算得出光栅的线密度^[3].

衍射效率通过使用单色光源和探测器进行直接测量. 光纤提供的单色光波长为 370 ~ 900 nm, 首先分别用红区光栅和蓝区光栅的中心波长的光经过半透半反镜反射到光栅上, 通过电动平移台驱动 2 号探测器 (见图 2 中的“9”) 接收光栅的一级衍射光功率, 以 0.25° 步长的角度分别测量不同角度的一级光谱的衍射效率峰值, 通过最高的衍射效率峰值找到对应的光栅的中心波长处的闪耀角, 然后改变光纤提供的单色光的波长, 通过电动平移台带动 2 号探测器扫描光谱仪光谱范围内一系列单色光的一级衍射效率峰值^[4].

3.2 测量系统的误差分析

针对主要误差源引起的线密度测量不确定度, 估算如下:



1 Laser 2 Attenuator 3 Lens 4 Fiber 5 CCD 6 Grating 7 Grating holder
8 Detector-1 9 Detector-2 10 Electric control
11 Powermeter 12 Two-dimensional rotator 13 Beam splitter

图 2 VPHG 参数测量装置图

Fig.2 Equipment of measurements of VPHG's parameters

主要误差源	误差源的不确定度	测量误差
转台	15''	$3.7 \times 10^{-4}''$
平移导轨	8''	$2.0 \times 10^{-4}''$
激光束漂移	10''	$2.5 \times 10^{-4}''$
波长变化 (普通激光器)	2.0×10^{-5}	
CCD 探测灵敏度	1.0×10^{-5}	
总测量不确定度	4.9×10^{-4}	

而对于光效率的测量, 则与光源的稳定度相关, 多次测试的结果表明误差在 3% 左右.

4 LAMOST 光谱仪中 VPHG 参数测量结果

4.1 LAMOST 16 台低分辨率光谱仪中 VPHG 参数测量结果

表 1 中所示为 LAMOST 低分辨率光谱仪 VPHG 理论设计参数, 以下测量结果均与表 1 中理论参数对比分析, 且测量范围比实际工作范围广.

4.1.1 线密度测量结果

由于第 1 台低分辨率光谱仪的两块 VPHG 是厂家提供的第 1 套光栅, 效率不是最优的, 而第 2 台到第 16 台低分辨率光谱仪光栅是在第 1 套光栅的基础上改进后加工的, 所以以下测量结果第 1 台低分辨率光谱仪 VPHG 和其他 15 台低分辨率光谱仪 VPHG 有较大差别.

表 1 LAMOST 低分辨率光谱仪 VPHG 理论设计参数

Table 1 VPHGs' theoretical designed parameters of low-resolution spectrographs of LAMOST

Gratings	Grating 1	Grating 2	Grating 3	Grating 4
Number of units	16	16	1	1
Spatial frequency(line/mm)	540	800	1680	2750
Wavelength range(nm)	570 ~ 900	370 ~ 590	830 ~ 890	510 ~ 540
Center wavelength(nm)	740.46	2.033	862.65	526.25
External AOI($^{\circ}$)	8.63	8.17	43.9	43.9
External AOD($^{\circ}$)	14.46	14	49.1	49.1
Physical dimensions(mm)	220×220×20	220×220×20	310×220×22	310×220×22
Resolution	1000 ~ 2000	1000 ~ 2000	5000 ~ 10000	5000 ~ 10000

在线密度测量中, 因测量的结果中每块光栅的 15 个点整体无大的差异, 故不做详细的分析.

通过测量 LAMOST 16 台低分辨率光谱仪红区和蓝区 VPHG 的线密度得到第 1 台低分辨率光谱仪红区 VPHG 的光栅线密度为 547 line/mm; 蓝区 VPHG 的光栅线密度为 811 line/mm; 第 2 到 16 台低分辨率光谱仪红区 VPHG 的光栅线密度均为 548 line/mm; 蓝区 VPHG 的光栅线密度均为 813 line/mm. 结合表 1 中理论刻线密度对比得知, 线密度的整体一致性较好.

4.1.2 闪耀角测量结果

通过电机带动电动平移台扫描得到红区 VPHG 的最高衍射效率在中心波长 740 nm 处, 16 台低分辨率光谱仪中第 12 台和第 13 台光谱仪红区 VPHG 的闪耀角为 6.9° , 其余的红区 VPHG 闪耀角均为 8.2° , 16 台光谱仪中所有的蓝区 VPHG 的闪耀角均为 8.6° , 总体偏差不大.

4.1.3 衍射效率测量结果

如图 3 和图 4 所示分别为 LAMOST 16 台低分辨率光谱仪红区 (570 ~ 900 nm) 和蓝区 (370 ~ 590 nm) VPHG 在闪耀角时一级光谱衍射效率峰值曲线, 由于第 1 台光谱仪 VPHG 是第 1 批试制, 因此衍射效率较之其他的稍微偏低; 而第 2 台到第 16 台低分辨率光谱仪 VPHG 均经过优化, 因此衍射效率达到了较高的数值.

图 5 为 LAOMST 16 台低分辨率光谱仪红区 (中心波长为 740 nm) 和蓝区光栅 (中心波长为 480 nm) 闪耀角处的一级光谱衍射效率峰值.

图 6 为低分辨率光谱仪光栅工作角度误差分别为 $\pm 1^{\circ}$ 和 $\pm 2^{\circ}$ 时的一级光谱衍射效率峰值误差曲线, 从图中可看出: 闪耀角有 1° 偏差, 衍射效率平均降低 5%. 由于待测光栅表面已镀膜, 因此上述测量结果均为膜层和光栅的共同作用.

4.2 LAMOST 中分辨率光谱仪 VPHG 测量结果

4.2.1 线密度和闪耀角测量结果

红区 VPHG 线密度为 1 703 line/mm, 蓝区 VPHG 为 2 777 line/mm.

红区 VPHG 中心波长处闪耀角为 43.5° ; 蓝区 VPHG 中心波长处闪耀角为 44.7° ; 闪耀角的误差对衍射效率的影响如图 6 所示, 从图中可以看出, 闪耀角有 1° 偏差, 衍射

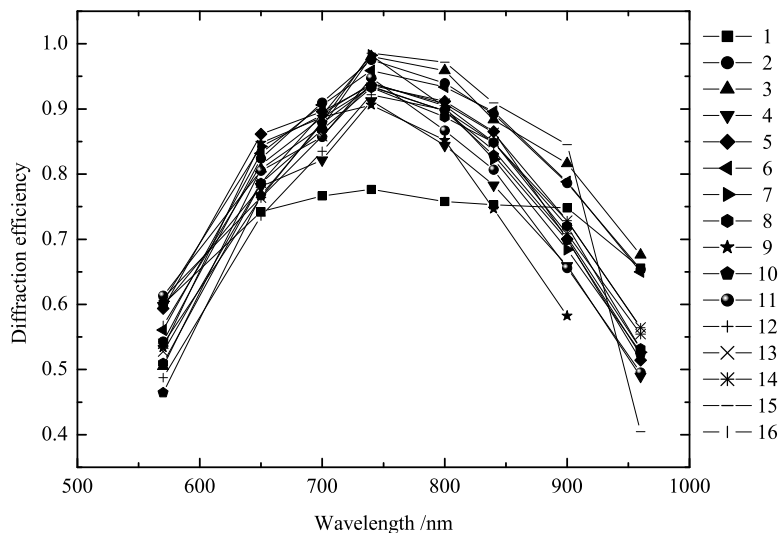


图 3 LAMOST 16 台低分辨率光谱仪红区 VPHG 中心波长闪耀角处光谱的一级衍射效率曲线
Fig. 3 VPHGs' first-order diffraction efficiencies at blazing angles in the center wavelengths of the red regions of 16 low-resolution spectrographs of LAMOST

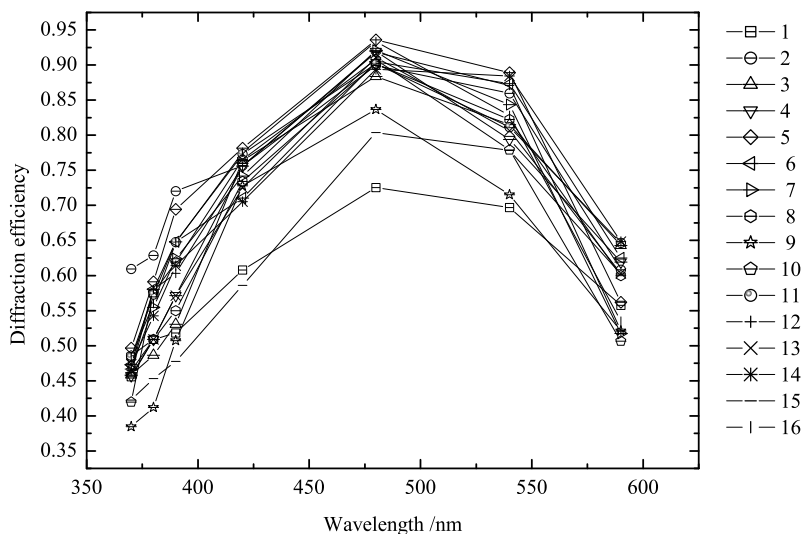


图 4 LAMOST 16 台低分辨率光谱仪蓝区 VPHG 中心波长闪耀角处光谱的一级衍射效率曲线
Fig. 4 VPHGs' first-order diffraction efficiencies at blazing angles in the center wavelengths of the blue regions of 16 low-resolution spectrographs of LAMOST

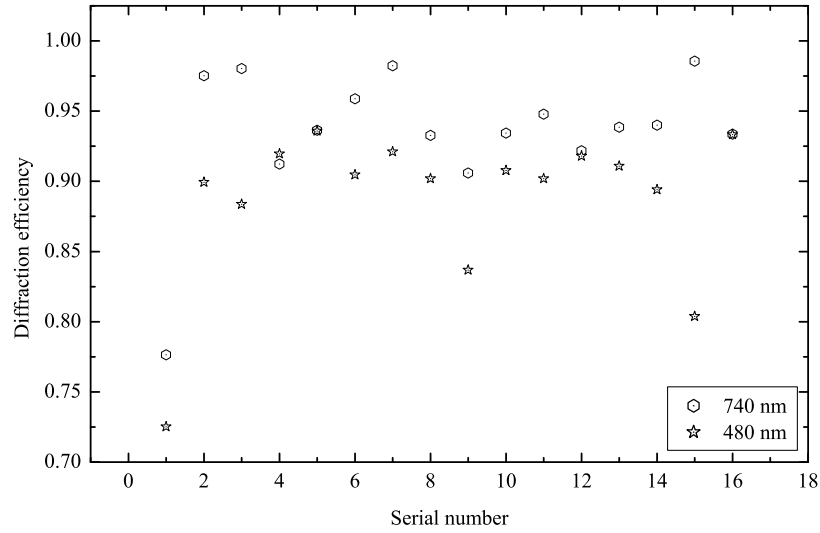


图 5 16 台低分辨率光谱仪 VPHG 中心波长处的一级衍射效率峰值

Fig. 5 VPHGs' first-order diffraction efficiencies of 16 low-resolution spectrographs in center wavelengths

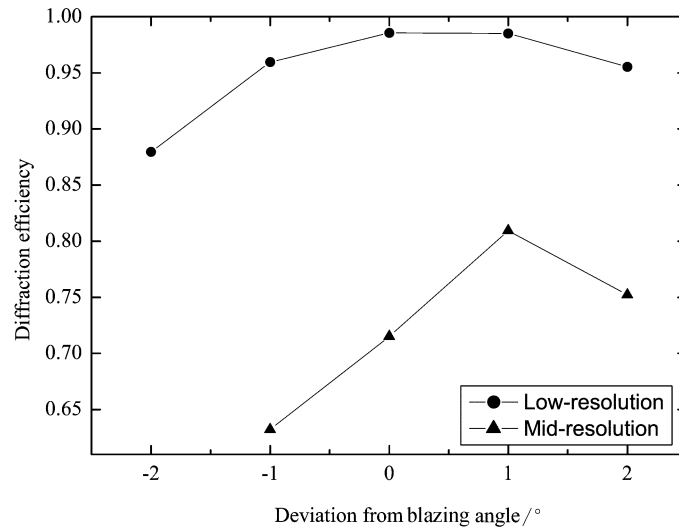


图 6 低分辨率和中分辨率光谱仪 VPHG 闪耀角误差与一级衍射效率峰值的关系

Fig. 6 VPHGs' first-order diffraction efficiencies of low-resolution and mid-resolution spectrographs influenced by the deviation from blazing angle

效率平均降低 5%, 可见中分辨率光谱仪 VPHG 比低分辨率光谱仪 VPHG 敏感; 因此对光栅进行的闪耀角的准确测量可使光栅达到最高的衍射效率, 从而提高光谱仪的观测性能.

4.2.2 衍射效率测量结果

图 7 为 LAMOST 中分辨率光谱仪红区 (800 ~ 920 nm) 和蓝区 (480 ~ 570 nm) VPHG 在各自光谱范围内的一级光谱衍射效率, 从图 7 可以看出红区 VPHG 高达 90%, 蓝区则为 81%.

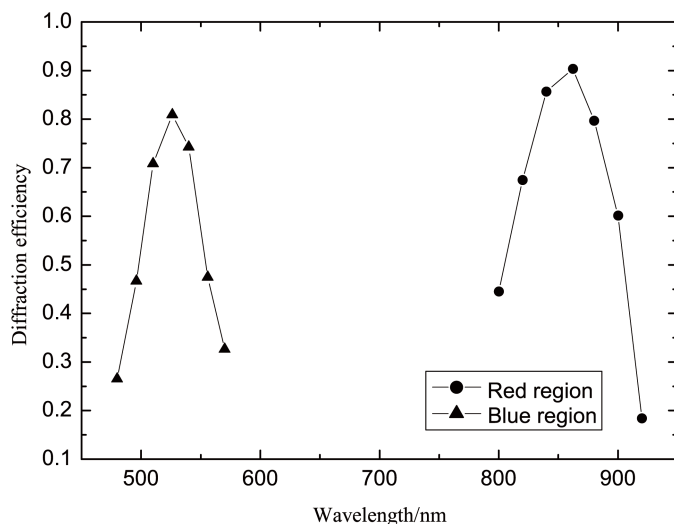


图 7 LAMOST 中分辨率光谱仪红区和蓝区 VPHG 中心波长闪耀角处光谱的一级衍射效率

Fig. 7 VPHGs' first-order diffraction efficiencies at blazing angles in the center wavelengths of red and blue regions of mid-resolution spectrographs of LAMOST

5 结论

通过对 LAMOST 16 台低分辨率光谱仪共 34 块体位相全息光栅的衍射效率峰值进行扫描测量, 得到光栅闪耀角, 测得线密度精确值, 并对低分辨率光谱仪光栅红区为 570 ~ 960 nm、蓝区为 370 ~ 590 nm 及中分辨率光谱仪光栅红区为 800 ~ 920 nm、蓝区为 480 ~ 570 nm 的光谱范围内的衍射效率进行了测量.

LAMOST 光谱仪中 VPHG 的参数测量结果为 LAMOST 低分辨率光谱仪在实际工作中提供了准确的安装角度和位置, 为 LAMOST 光谱仪在工作时能达到最高的效率提供了基本的依据和有效的装调指导.

参 考 文 献

- [1] 朱永田, 王磊, 胡中文, 等. LAMOST 低分辨率光谱仪 VPHG 方案: LAMOST 技术报告, 2005: 9
- [2] 张青峰, 朱永田. 光学技术, 2007, 33: 150

- [3] 朱永田. 阶梯光栅摄谱仪光学方案研究. 南京: 中国科学院紫金山天文台, 1989
- [4] 胡中文, 王磊, 王家宁, 等. 光栅的线密度和衍射效率测试系统方案: LAMOST 技术报告, 2008

The Measurement of VPHGs' Parameters for Low-resolution Spectrographs of LAMOST

XIONG Fen^{1,2,3} TANG Zhen¹ WANG Lei¹ WANG Jia-ning¹ HU Zhong-wen¹

(1 *National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042*)

(2 *Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042*)

(3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT The Volume Phase Holographic Grating (VPHG) is applied to astronomy in recent years, owe to its characteristic advantages. For instance, it can gain large grating, high diffraction efficiency, close to 100%, super blazing, etc. The large scientific project — LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope), can acquire the spectra of 4000 goals from distance objects. In order to improve the transmission efficiency maximally, the VPHG is equipped as a disperse element. It is the first application in domestic astronomy. In this paper, we carry out a test of the VPHG's parameters with a high-precision device and propose the measured results such as linear density, diffraction efficiency, blazing angle, and the effect of the deviation from the blazing angle on the diffraction efficiency.

Key words instrumentation: spectrographs, methods: laboratory, techniques: spectroscopic, telescopes