

文章编号 1004-924X(2003)05-0442-06

高分辨率阶梯光栅光谱仪的光学设计

武旭华, 朱永田, 王 磊

(中国科学院 国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 简述阶梯光栅的基本原理和在天文学中的应用, 分析并比较了阶梯光栅光谱仪与普通平面闪耀光栅光谱仪的区别。为正在研制中的一架国产 4 m 通光口径的光谱巡天望远镜(简称 LAMOST) 设计了高分辨率阶梯光栅光谱仪的光学方案, 该设计方案采用了白光孔径准直镜系统, 大闪耀角的 R4 阶梯光栅和无遮拦的离轴折叠 Schmidt 照相机。

关键词: 天文光学; 光谱仪; 阶梯光栅

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A

Optical design of high resolution echelle spectrograph

WU Xu-hua, ZHU Yong-tian, WANG Lei

(National Astronomical Observatory/ Nanjing Institute of Astronomical
Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: The general theories behind echelle and its applications in astronomy are briefed, and the differences between echelle spectrograph and plane grating spectrograph are analyzed and compared. An optical design, which features the use of white pupil collimator system, R4 echelle with large blaze angle, and the fold and off-axial Schmidt camera without center obstruction, has been made for a high resolution echelle spectrograph (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope) under development, a more powerful tool for astrophysical research using high-resolution spectroscopy in China.

Key words: astronomical optics; spectrograph; echelle grating

1 引言

20 世纪 70 年代前, 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 1 级或第 2 级), 因此要获得高分辨率光谱只能采用大面积细刻线光栅, 仪器尺寸非常庞大。这种一维排列的光谱仪要求焦距 4 m, 通光口径 1.5 m 的大型照相机, 探测元件只好采用低效率的照相乳胶和高噪声的 Reticon。

G. R. Harrison 于 1949 年研制出一种新的衍

射光栅——阶梯光栅(echelle), 并对这种光栅的刻划技术做了开拓性的工作^[1-3]。阶梯光栅实质上是一种粗光栅, 具有较大的闪耀角, 典型的是 63°26'、69°和 76°, 可以用于很高的干涉级次, 通常 10~100 级, 因此可获得极高的分辨率。阶梯光栅在光谱学的许多领域都是非常有用的, 特别是它集中了宽波段、高色散、高分辨率等特点, 引起了天文学家的极大兴趣, 率先得到天文应用^[4]。

二维高效光电成像探测器件的出现, 尤其是大面积低噪声高量子效率 CCD 的发展, 引起了人

收稿日期: 2003-04-07; 修订日期: 2003-08-01.

们对二维色散光谱仪的兴趣。利用阶梯光栅为主色散元件,辅以横向色散元件进行级次分离,用面阵CCD可同时记录下很宽光谱范围的高分辨率($R = 10^5 \sim 10^6$)光谱,这样的光谱仪可以用来研究天体的化学元素丰度和天体的磁场及大气运动等现象。

20世纪80年代,随着刻划技术的发展,高质量的阶梯光栅复制成功,世界上许多2~4 m级天文望远镜都配置了阶梯光栅光谱仪^[5-6],至20世纪末,世界上已有10架8~10 m级光学/红外望远镜用于天文观测,这些甚大望远镜均配置高分辨率阶梯光栅光谱仪^[7]。

1995年我国研制成功2.16 m望远镜折轴阶梯光栅分光仪,该仪器是我国首次研制的大型阶梯光栅光谱仪器,其研制成功为我国天文界开展高分辨率光谱研究提供了有效的观测手段,曾多次参加国际天文联测,已获大批天文成果,得到了中外天文学家的高度评价。目前正在研制中的国家“九五”重大科学工程项目——大天区面积多目标光纤光谱望远镜(简称LAMOST),将配置16台低分辨率多目标光纤光谱仪和1台高分辨率阶梯光栅光谱仪^[8]。

2 阶梯光栅的原理及特点

由光栅的角色散公式可知,如果用低级次光谱(第1或第2级),只有细刻线光栅才能获得高角色散;如果用高级次光谱(几十或上百级),则粗光栅同样可以获得高角色散。为利用高级次光谱和大入射角而特殊设计的一种光栅——阶梯光栅

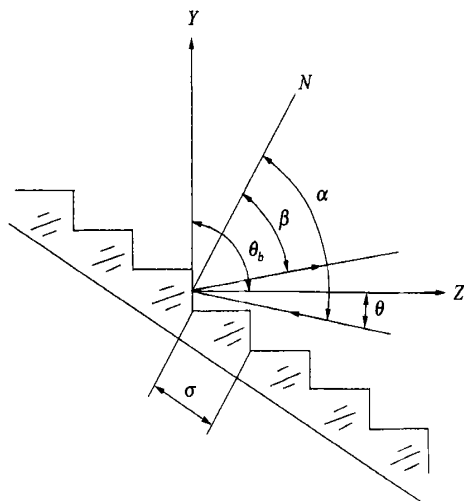


图1 阶梯光栅的基本结构

Fig. 1 Physics and structure of echelle grating

(Echelle)^[9],如图1所示。

阶梯光栅衍射方程:

$$m\lambda = \sigma \cos \gamma (\sin \alpha + \sin \beta), \quad (1)$$

式中 m 为衍射级次; σ 为光栅常数; α, β 分别为入射角和衍射角,在 $y-z$ 平面内从阶梯光栅的法线 N 量起; γ 为入射光束与 $y-z$ 平面的夹角; θ_b 为光栅法线 N 与刻划面法线 Z 的夹角,称阶梯光栅闪耀角; θ 为在 $y-z$ 平面内入射光与刻划面法线 Z 的夹角。

在闪耀位置 $\beta = \theta_b - \theta$, 方程(1)简化为:

$$m\lambda = 2\sigma \cos \gamma \sin \theta_b \cos \theta, \quad (2)$$

角色散:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{\sigma \cos \gamma \cos \beta} = \frac{2 \tan \theta_b}{\lambda}, \quad (3)$$

自由光谱范围:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m}, \quad (4)$$

单个级次色散角:

$$\Delta\beta = \Delta\lambda \cdot \left(\frac{d\beta}{d\lambda}\right) = \frac{\lambda}{\sigma \cos \gamma \cos \beta}. \quad (5)$$

阶梯光栅的特点:

- (1) 每级都可以获得高的角色散;
- (2) 许多级次重叠在一起,用横向色散元件将级次分离后得到二维光谱,因此一次曝光可得很宽波长范围的光谱;
- (3) 单个级次的色散角小,一般只有几度,自由光谱范围内的波长都将出现在该级闪耀峰值附近,因此一个阶梯光栅对所有波长都是有效闪耀,阶梯光栅成为高效率闪耀光栅。

阶梯光栅用于高干涉级次,有许多级次重叠在一起,需用一个与阶梯光栅色散方向垂直的辅助色散元件将重叠的级次分开。作为横向色散元件,平面反射光栅和棱镜在阶梯光栅光谱仪中都有应用,相比之下平面反射光栅的优点在于可获得大的阶梯光栅级次分离,但缺点是低光效率和色散对波长的严重不均匀性,二级光谱必须消除,通常需要两块横向光栅分别工作在不同波段获得合适的横向色散。棱镜具有高光效率和更加均匀的横向色散等优点,另外由于棱镜不存在闪耀和光谱级次重叠问题,因此可工作在非常宽的光谱范围。许多中小型望远镜的阶梯光栅光谱仪选择棱镜作为横向色散,但大望远镜的光谱仪需要大光束口径才能达到宽狭缝高分辨率的目的,所以多数设计者选择了

光栅而不用棱镜,大棱镜的材料昂贵,加工困难,除非采用拼接棱镜的办法。

3 LAMOST 项目的高分辨率光谱仪光学设计

LAMOST 是一台横卧于南北方向的中星仪式反射施密特望远镜。它由在北端的反射施密特改正板 M_A 、在南端的球面主镜 M_B 和在中间的焦面构成。 M_B 及焦面固定在地基上, M_A 作为定天镜跟踪天体的运动,望远镜在天体经过中天前后时进行观测。天体的光经 M_A 反射到 M_B ,再经 M_B 反射后成像在焦面上。LAMOST 的基本结构如图 2 所示^[10]。

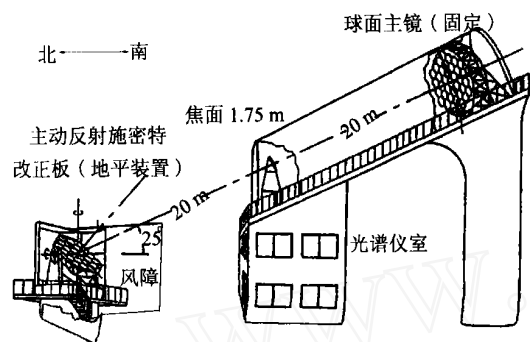


图 2 大天区面积多目标光纤光谱望远镜(LAMOST)

Fig. 2 Perspective view of LAMOST

由于地球大气的影,恒星这类点光源在地面望远镜的焦面上总不能成为理想像点,而是有一定角直径的视圆面,这个角直径就是常说的大气宁静度,它与时间、地点有关。当光谱仪的分辨率完全由大气宁静度限定时,望远镜光谱仪系统所能达到的光谱分辨率由下式给定^[11]:

$$R \times \phi = \frac{2 \sin \theta_b \cos \theta}{\cos \alpha} \cdot \frac{D_c}{D_t}, \quad (6)$$

光栅工作在利特洛(Littrow)入射状态时, $\theta = 0$, 公式(6)简化为:

$$R \times \phi = 2 \tan \theta_b \times \frac{D_c}{D_t}, \quad (7)$$

公式(6)同时又可表达为:

$$R \times \phi = 2 \sin \theta_b \cos \theta \cdot \frac{L}{D_t}, \quad (8)$$

光栅工作在利特洛(Littrow)入射状态时, $\theta = 0$, 公式(8)简化为:

$$R \times \phi = 2 \sin \theta_b \cdot \frac{L}{D_t}, \quad (9)$$

在公式(6)~(9)中, $R = \lambda / \delta \lambda$ 为光谱分辨率, ϕ 为大气视凝度, D_c 为准直光束口径, D_t 为望远镜通光口径, L 为光栅刻划面宽度, θ_b 为光栅闪耀角, α 为光栅入射角, θ 为偏离利特洛(Littrow)状态角 ($\theta = \alpha - \theta_b$)。

从公式(6)~(9)可知,光谱仪的分辨率与望远镜的口径成反比。随着望远镜口径的不断加大,其高分辨率光谱仪的设计越来越难,这就出现了高分辨率光谱仪与大望远镜匹配的难题。大望远镜的高分辨率光谱仪一定要采用大面积的平面光栅或者大闪耀角的阶梯光栅,放在好的台址上。

3.1 LAMOST 高分辨率光谱仪设计指标

与光谱仪设计有关的望远镜参数:

通光口径 $D_t = 4 \text{ m}$

焦距 $f_t = 20 \text{ m}$

焦比 $F_t = 5$

焦面比例尺 0.097 mm/arcsec

光纤芯径 $\omega = 0.2 \text{ mm}$ (对天空张角 $\phi = 2^\circ$)

光纤输出端焦比 $F/4$

光谱仪主要性能指标:

光谱范围 $420 \sim 1\,100 \text{ nm}$

分辨率 $R = 30\,000 \sim 100\,000$

探测器为 $2\,048 \times 2\,048 \text{ CCD}$,

像元为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$

3.2 阶梯光栅的选取

目前,市场上可提供的阶梯光栅典型的闪耀角 θ_b 分别为 63.26° 、 69° 和 76° ,对应的正切值分别是 2、2.6 和 4,分别称之为 R2、R2.6 和 R4 阶梯光栅。图 3 和图 4 分别表示 4 m 口径望远镜 ($D_t = 4 \text{ m}$) 的高分辨率光谱仪采用上面 3 类阶梯光栅情况下, $R \times \phi$ 值与准直光束口径 (D_c) 及光栅尺寸 L 间关系,要获得相同的光谱分辨率,所需 3 种阶梯光栅的刻划面宽度 L 相近,但采用 R4 阶梯光栅时准直光束口径最小,因而光谱仪的尺寸最小,造价也最低。

LAMOST 高分辨率光谱仪的主色散采用 R4 阶梯光栅,由美国 Richardson 光栅实验室的 R4 阶梯母光栅复制在 Zerodur 玻璃材料上,光栅常数 31.6 l/mm ,闪耀角 $\theta_b = 76^\circ$,刻划面尺寸 $105 \text{ mm} \times 408 \text{ mm}$ 。为覆盖全 $420 \sim 1\,100 \text{ nm}$ 光谱范围,对应该阶梯光栅的光谱级次从 145 级至 60 级。根据公式(9), $R \times \phi \approx 40\,000$ 。

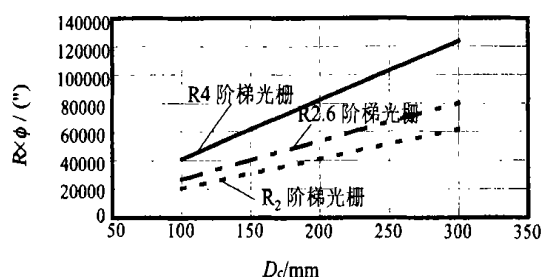


图3 分辨率与准直光束口径之间的关系

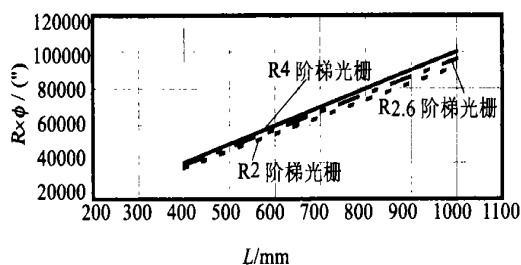
Fig. 3 Resolution-luminosity product ($R \times \phi$) as function of collimated beam size

图4 分辨率与光栅刻划面宽度之间的关系

Fig. 4 Resolution-luminosity product ($R \times \phi$) as function of echelle size

阶梯光栅工作在 145 级至 60 级,共有 85 级光谱重叠在一起,配置 300 l/mm 和 150 l/mm 两种平面光栅将重叠的光谱分离,根据观测需要选择不同的横向光栅,横向色散光栅工作在 +1 级,最小级间分离 4.5".

3.3 准直系统

来自望远镜的星光以焦比 $F/5$ 入射进芯径 0.2 mm 的光纤,由于光纤对焦比的衰减,经实验测定,从光纤出射的光 95% 能量集中在焦比 $F/4$ 范围内。 $F/4$ 的光束再经一组缩焦镜变成焦比 $F/10$ 进入狭缝。 $F/10$ 的光束经过一块离轴抛物面反射镜 M_1 准直为 $\phi 105$ mm 的平行光入射到 R4 阶梯光栅上,R4 阶梯光栅在光路中工作在准 Littrow 入射状态,即 $\theta = 0, \gamma = 0.8^\circ$,以便获得最高光栅效率。经 R4 阶梯光栅色散后的光束经准直镜系统 M_1 和 M_2 成平行光入射到横向色散平面光栅上,将重叠的阶梯光栅级次分离开。准直镜系统采用了白光孔径设计思想^[12],由 2 块参数相同的离轴抛物面镜 M_1 和 M_2 组成,离轴量 6.52°,顶点曲率半径 2 100 mm,在光路中它们具有共同的母光轴和焦点。

R4 阶梯光栅经 M_1 和 M_2 恰好成像在横向色散平面光栅处,使横向色散光栅不会因接收主色散光束而扩大,准直光路如图 5 所示。

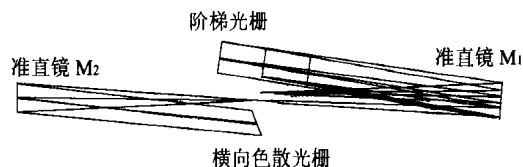


图5 LAMOST 高分辨率阶梯光栅光谱仪准直光路

Fig. 5 Collimator of high resolution spectrograph for LAMOST

3.4 照相机

照相机焦距 400 mm,焦比 $F/4$,视场角 $\pm 3^\circ$,光学系统采用离轴折叠施密特 (Schmidt) 系统,如图 6 所示。孔径光阑在横向色散光栅位置,为避开光栅入射光束,Schmidt 改正板远离孔径光阑 200 mm,离轴 Schmidt 改正板的通光口径扩大到 140 mm,而离轴量 120 mm,因此照相机焦比相当于 $F/1.05$ 。焦面附近设置场镜获得平面,场镜靠近焦面的一面为柱面,以校正准直系统的场曲。场镜同时兼作 CCD 杜瓦瓶的封窗。这种相机的特点是无中心遮拦,可使接收器放在光路外面,很方便地更换接收器。

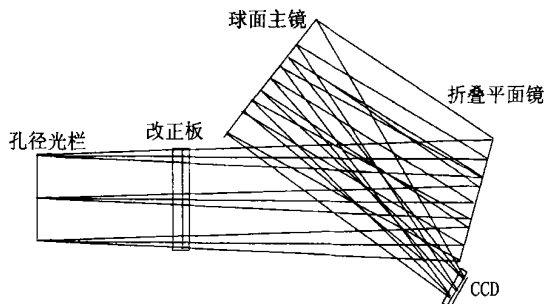


图6 离轴折叠 Schmidt 照相机光路

Fig. 6 Optical layout of off-axis and folded Schmidt camera

3.5 设计结果

LAMOST 高分辨率光谱仪的总体光学方案如图 7 所示。望远镜和光谱仪之间由光纤连接,在狭缝后设置了一块小平面镜,将狭缝前的装置折转到光路外面,以避免遮挡星光。主色散采用 R4 阶梯光栅,光栅常数 31.6 l/mm,刻划面尺寸 105 × 408 mm,当狭缝宽度 1"~0.33' 时,可以获得分辨率 $R =$

30 000 ~ 100 000, 如图 8 所示。设置 300 l/mm 和 150 l/mm 两种横向色散光栅可方便地切换, 当选用 300 l/mm 横向色散光栅时, 观测 420 ~ 640 nm 波段光谱, 而选用 150 l/mm 横向色散光栅时, 观测 640 ~ 1 100 nm 波段光谱。探测器为 2 048 × 2 048 CCD, 像元 15 μm × 15 μm 时, 两次曝光可记录下 420 ~ 1 100 nm 光谱。用光学设计软件 ZEMAX 对 LAMOST 高分辨率光谱仪总的光学系统进行了光线追迹, 并对其中的 Schmidt 改正板和平场透镜的面形进行优化, 在 CCD 靶面上的光学成像质量如图 9 所示。

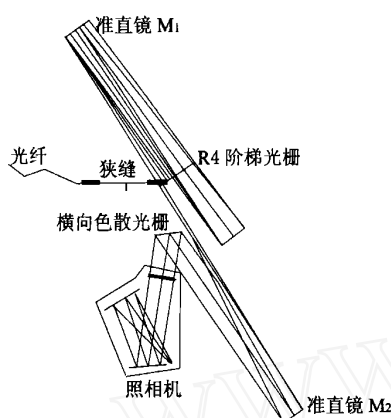


图 7 LAMOST 高分辨率阶梯光栅光谱仪光路

Fig. 7 Optical layout of high resolution spectrograph for LAMOST

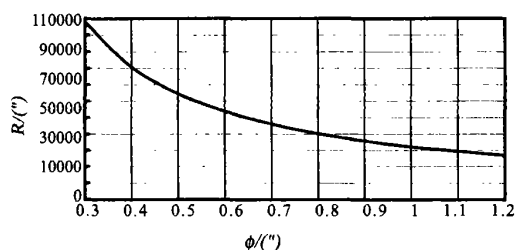
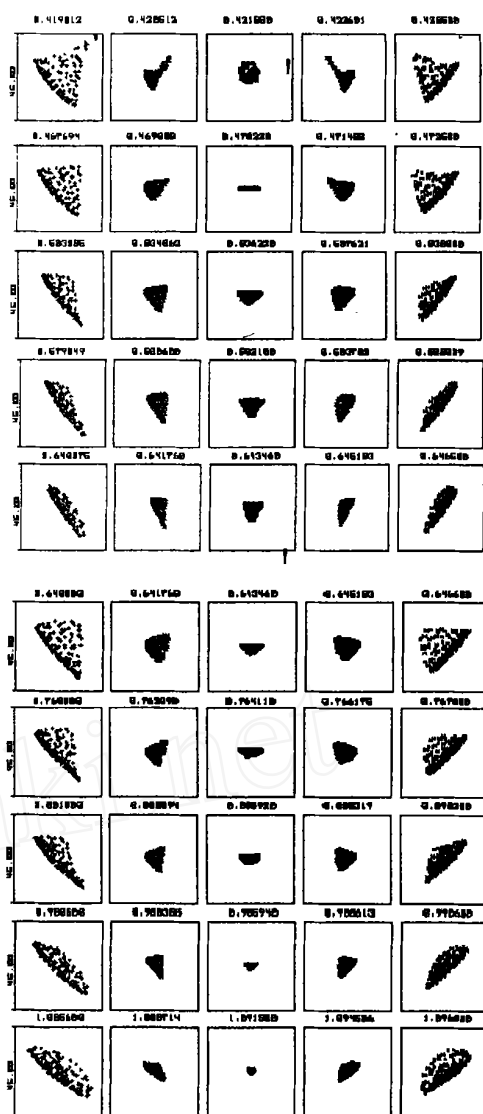


图 8 光谱分辨率与狭缝宽度对应曲线

Fig. 8 Resolution as function of slit width



- 15(4):971-975.
- [4] SCHROEDER D J. An echelle spectrometer-spectrograph for astronomical use[J]. *Appl Opt*, 1967,6(11):1976-1980.
- [5] WAL KER D D, DIEGO F. *Very large telescopes, their instrumentation and programs* [C]. Garching, Germany: International Astronomical Union,1984. 499-513.
- [6] VOGT S. The lick observatory Hamilton echelle spectrometer[J]. *Publ Astron Soc Pac*, 1987,99(621):1214-1228.
- [7] 朱永田. 8~10 m 级光学/ 红外望远镜高分辨率光谱仪[J]. *天文学进展*,2001, 19(9):336-344.
- ZHU Y T. High resolution spectrographs for 8~10 m class optical/ IR telescopes[J]. *Progress in Astronomy*, 2001, 19(9):336-344.
- [8] ZHU Y, XU W. *Optical and IR telescope instrumentation and detectors* [C]. Washington, USA: SPIE, 2000. 141-147.
- [9] SCHRODER D J. *Astronomical optics* [M]. San Diego, USA: Academic Press, INC, 1987. 236-243.
- [10] WANG S, SU D, *et al.* Special configuration of a very large Schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation[J]. *Appl Opt*, 1996, 35(25):5155-5161.
- [11] TULL R G. *Instrumentation in astronomy* [C]. Washington, USA: SPIE, 1994. 674-684.
- [12] BARANNE A. *On auxiliary instrumentation for large telescopes* [A]. *Proc. ESO/ CERN Conf* [C]. Garching, Germany:ESO[C], 1972, 227-239.

作者简介:武旭华(1977 -),女,河北石家庄人,中国科学院南京天文光学技术研究所硕士,从事天文光谱仪器的研究。