

8 ~ 10m 级光学 / 红外望远镜 的高分辨率光谱仪

朱 永 田

(中国科学院南京天文光学技术研究所 南京 210042)

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要

介绍并比较 Keck、Subaru、VLT、HET 及 Gemini 中的 5 架 8~10m 天文望远镜的高分辨率光谱仪, 分析这些仪器与 2~4m 级望远镜的阶梯光栅光谱仪或 Coudé 光谱仪相比所采用的新设计思想和新技术。

关键词 光学望远镜: 高分辨率 — 阶梯光栅 — 光谱仪器

分类号 P111.4

1 引 言

20 世纪末世界上已有 10 架 8~10m 级光学 / 红外天文望远镜相继建成, 这些望远镜分别是: 由美国 Lick 天文台、加州理工学院 (California Institute of Technology)、夏威夷大学 (University of Hawaii) 和美国宇航局 (NASA) 共同研制的 2 架 10m 拼镜面望远镜 Keck I 和 Keck II, 这两架望远镜分别在 1994 年 2 月和 1996 年 10 月安装在夏威夷的 Mauna Kea^[1]。由美国、英国、加拿大、阿根廷、智利和巴西 6 个国家共同投资兴建的 2 架单镜面 8.2m 望远镜 Gemini, 其中 1 架 (Gemini North) 已于 1999 年初安装在夏威夷的 Mauna Kea, 另 1 架 (Gemini South) 将在 2001 年 3 月底安装在智利的 Cerro Pachon^[2]。由美国 McDonald 天文台、宾夕法尼亚州立大学、斯坦福大学和德国慕尼黑 Ludwig-Maximilians 大学、戈丁根 Georg-August 大学联合研制的 1 架 9.2m 望远镜 HET, 1997 年 10 月安装在美国德克萨斯州的 Fort Davis 山, 1999 年 10 月开始试观测^[3,4]。欧洲南方天文台 (ESO) 的 4 架 8m 望远镜 VLT, 1998~2000 年间安装在智利的 La Paranal 观测站^[5]。日本国立天文台联合夏威夷大学研制的 1 架 8.2m 望远镜 Subaru, 1998 年 12 月安装在夏威夷的 Mauna Kea^[6]。

此外, 还有 3 个计划共 4 架 8~10m 级望远镜正在研制之中, 它们是: 美国亚利桑那大学、德国马普天文研究所、意大利 Acetri 天文台、美国俄亥俄州立大学联合研制 1 架 8.4m 大双筒望远镜 LBT^[7], 西班牙 1 架仿 Keck 10m 望远镜 GTC(Gran Telescopio Canarias) 和南非 1 架仿 HET 10m 望远镜 SALT(Southern African Large Telescope) 都将在 2003 年底投入运行^[8,9], 届时世界上将有 14 架 8~10m 级光学 / 红外望远镜用于天文观测。

8~10m 光学 / 红外望远镜的建造为天文学家从事高分辨率光谱研究提供了新的机遇, 同时也给大望远镜高分辨率光谱仪设计者提出了新的挑战。光谱仪和望远镜之间的基本关系可以用以下公式描述^[10]:

$$R \times \phi = \frac{2 \sin \theta_b \cdot \cos \theta}{\cos \alpha} \times \frac{d_1}{D} \quad (1)$$

光栅工作在 Littrow 入射状态时, $\theta = 0$, 公式 (1) 简化为:

$$R \times \phi = 2 \tan \theta_b \times \frac{d_1}{D} \quad (2)$$

公式 (1) 同时又可表达为:

$$R \times \phi = 2 \sin \theta_b \cos \theta \times \frac{L}{D} \quad (3)$$

光栅工作在 Littrow 入射状态时, $\theta = 0$, 公式 (3) 简化为:

$$R \times \phi = 2 \sin \theta_b \times \frac{L}{D} \quad (4)$$

在公式 (1)~(4) 中, $R = \lambda/\delta\lambda$ 为光谱分辨率, ϕ 为狭缝对天空张角, d_1 为准直光束口径, D 为望远镜通光口径, L 为光栅刻划面长度, θ_b 为光栅闪耀角, α 为光栅入射角, θ 为偏离 Littrow 状态角 ($\theta = \alpha - \theta_b$)。由公式 (1)~(4) 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, 其困难主要体现在以下两方面: (1) 分辨率与光效率的矛盾。要获得 40000~120000 的高分辨率, 通常情况下光谱仪的狭缝只能开宽 $1'' \sim 0.3''$, 大部分星光被拒之缝外。(2) 8~10m 级望远镜的高分辨率光谱仪需要刻划面约 1m 的大尺寸阶梯光栅, 而现在的光栅刻划技术所能提供的光栅规格 ($\approx 408\text{mm}$) 远达不到 8~10m 望远镜的要求, 因此, 当今世界上 8~10m 级天文望远镜的高分辨率光谱仪和六七十年代 2~4m 级望远镜传统的阶梯光栅光谱仪或 coudé 光谱仪相比, 无论在性能方面还是结构方面都有所不同, 许多新技术已被用于 8~10m 级天文望远镜的高分辨率光谱仪, 比如: 有限元分析、先进的制造技术和计量方法、高性能大闪耀角的衍射光栅、光栅拼接新技术、新的光学玻璃、多层膜和高效率光学镀膜技术、CCD 拼接技术等, 这些新技术使得 8~10m 级天文望远镜的高分辨率光谱仪有许多创新之处。

这里将介绍已经完成或接近完成的用于 8~10m 望远镜的 5 台高分辨率光谱仪的总体方案, 它们包括 Keck-HIRES、Subaru-HDS、VLT-UVES、HET-HRS 和 Gemini-HROS, 分析评论各自的设计特点, 如: 白光孔径设计思想, 拼接光栅, 浸入光栅 (Immersed Grating) 和大口径快焦比照相机的设计等。

2 KECK 望远镜的高分辨率光谱仪 HIRES^[11]

HIRES (High Resolution Echelle Spectrograph) 是 Keck I 望远镜首批 5 个仪器计划之一, 由 Lick 天文台 Steven S. Vogt 负责研制, 这台仪器从 1988 年 9 月开始设计到 1993 年 1 月 16 日拍摄到第一幅天体光谱, 历时 5yr, 造价 410 万美元, 其光路如图 1 所示。

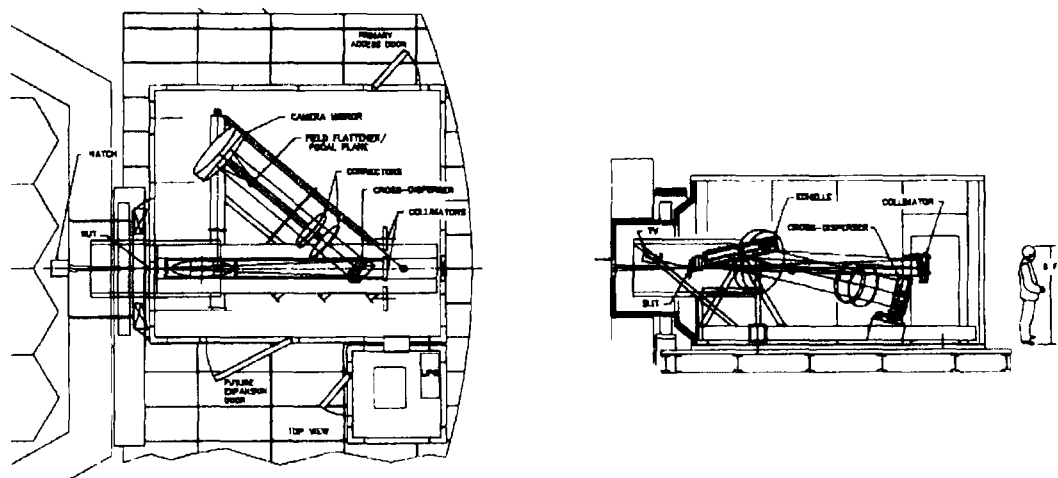


图 1 Keck 望远镜的高分辨率光谱仪 HIRES^[11]

HIRES 工作在 Keck I 的 Nysmyth 焦点, 焦比 $f/13.7$, 从该仪器总体设计方案来讲是一台经典的阶梯光栅分光仪, 狭缝前配有导星装置和光谱定标系统、像消转器、大气色散改正器和 Richardson 星像切割器。此外, 还有碘盒用来作高精度恒星视向速度工作, 视向速度精度高于几 m/s 。具有长缝摄谱能力, 最长狭缝 $70''$ 。配有 12 种滤光片以消除横向光栅的级次重叠和用于长缝单级次阶梯光栅光谱观测。

准直光束口径 $\phi 304.8\text{mm}$, 准直镜采用简单的倾斜球面反射镜, 倾斜角 1.75° , 倾斜球面反射镜对于长狭缝比离轴抛物面镜性能好而且价格便宜, HIRES 配备 2 块准直镜可方便地相互切换, 1 块镀银, 工作光谱区 $0.55 \times 1.1\mu\text{m}$, 另 1 块镀铝, 工作光谱区 $0.3 \sim 0.55\mu\text{m}$ 。阶梯光栅由 3 块 $R2.8(70.5^\circ)$ 、52.6 线/mm 的 $304.8\text{mm} \times 406.4\text{mm}$ 阶梯光栅拼接而成, 总尺寸 $304.8\text{mm} \times 1219.2\text{mm}$ 。横向色散光栅由 2 块 250 线/mm 的 $304.8\text{mm} \times 406.4\text{mm}$ 平面反射光栅拼接而成, 总尺寸 $609.6\text{mm} \times 406.4\text{mm}$, 横向色散光栅可工作在第一级和二级, 级间分离 $8 \sim 43''$, 目前只提供了 1 种横向色散光栅, 将来根据科学需要计划再增加 1 种横向色散光栅。

照相机的设计是 HIRES 研制中最具挑战性的工作, $\phi 762\text{mm}$ 通光口径, $f/1.0$ 全球面折反射照相机, 采用 2 块石英改正镜和 1 块 $f/0.76$ 的球面反射镜, 对于 $0.3 \sim 1.1\mu\text{m}$ 波段和 6.7° 视场无需调焦可得弥散斑直径 RMS 值 $12.6\mu\text{m}$ 的优良像质。

HIRES 光谱范围 $0.3 \sim 1.1\mu\text{m}$, 探测器 Tektronix 2048×2048 CCD, 像元尺寸 $24\mu\text{m}$, 最

高分辨率 $R = 67000$, 分辨率与狭缝宽度乘积 $R \times \phi = 39000''$, 峰值光效率 13%(不包括望远镜和狭缝损失)。

3 日本 Subaru 望远镜的高色散光谱仪 HDS^[12]

HDS(High Dispersion Spectrograph) 是 Subaru 望远镜第一代 7 个仪器计划之一, 由日本国立天文台 (NAOJ) 负责研制, 1997 年开始设计, 2000 年 3 月完成, HDS 的总体方案如图 2 所示。

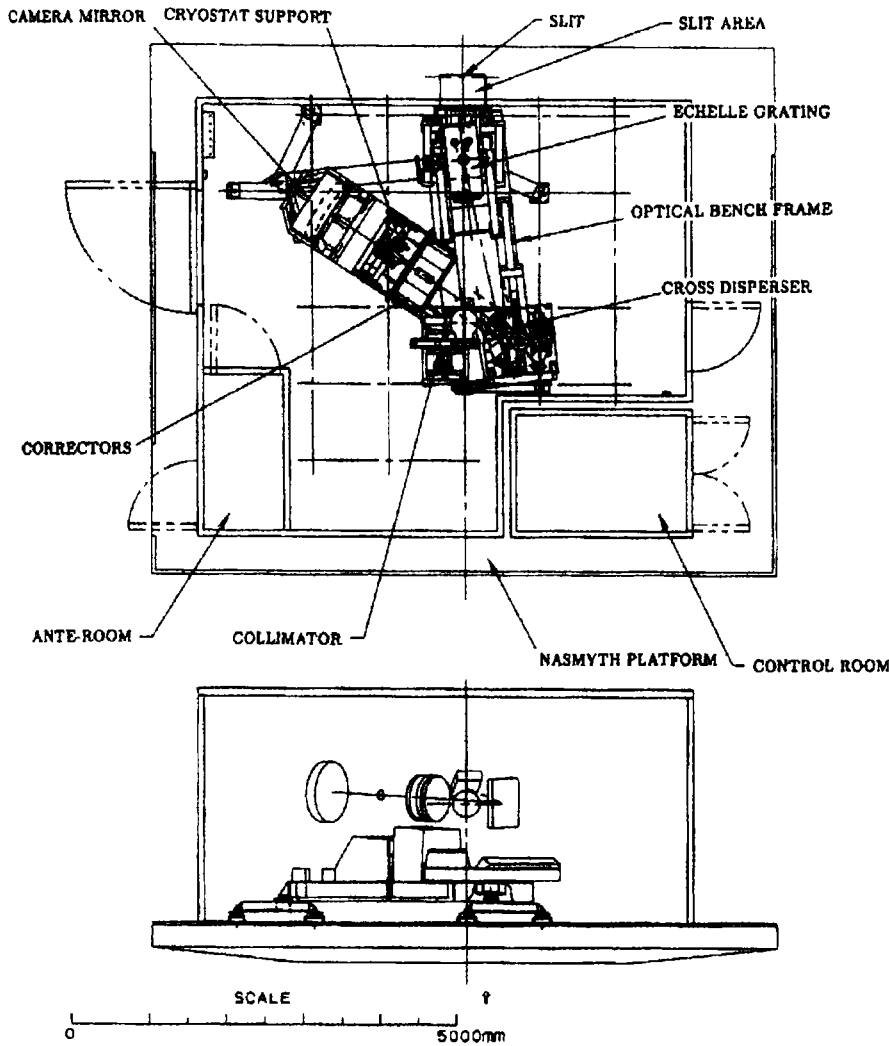


图 2 Subaru 望远镜的高色散光谱仪 HDS^[12]

HDS 工作在 Subaru 的 Nasmyth 焦点, 焦比 $f/12.5$, 狭缝前有导星装置和像消转器,

配有 Th-Ar 和 Fe-Ar 光谱灯和卤素灯。狭缝宽度调节范围 0.01~2mm, 高度 1~30mm。狭缝后有 6 种滤光片用于分离横向色散光栅的级次重叠和阶梯光栅单级次光谱长缝观测。

准直光束口径 $\phi 272\text{mm}$, 配备 2 块离轴抛物面准直镜可相互切换, 蓝区(短波)准直镜镀铝, 红区(长波)准直镜镀铝和多层膜。阶梯光栅由 2 块 $R2.8(70.5^\circ)$ 、31.6 线/mm 的 $304.8\text{mm} \times 406.4\text{mm}$ 阶梯光栅拼接而成, 总尺寸 $304.8\text{mm} \times 812.8\text{mm}$ 。横向色散转台放置两种光栅和 1 块平面镜, 横向色散光栅分别由 2 块 250 线/mm 和 400 线/mm 的 $304.8\text{mm} \times 406.4\text{mm}$ 平面反射光栅拼接而成, 总尺寸 $609.6\text{mm} \times 406.4\text{mm}$, 400 线/mm 光栅用于短波, 250 线/mm 光栅用于长波, 平面镜用于长缝单级次或近红外单级次观测, 横向色散光栅工作在第一级, 级间分离 $8 \sim 43''$ 。

HDS 照相机通光口径 $\phi 610\text{mm}$, $f/1.26$ 全球面折反射式系统, 采用 3 块石英改正镜和 1 块 $f/0.96$ 的球面反射镜, 对于 $0.3 \sim 1.1\mu\text{m}$ 波段和 6.3° 视场无需调焦可得弥散斑 90% 的能量集中在 $\phi 10\mu\text{m}$ 内。

HDS 光谱范围 $0.3 \sim 2\mu\text{m}$, 探测器由 2 块 2048×4096 CCD 拼接, 像元尺寸 $15\mu\text{m}$, 最高分辨率 $R = 100000$, 分辨率与狭缝宽度乘积 $R \times \phi = 38000''$, 峰值光效率 10%(不包括望远镜和狭缝损失)。

HDS 采用了与 Keck I-HIRES 相似的设计, 但有两点不同: (1) HDS 采用了离轴抛物面准直镜, 而 HIRES 用的是球面准直镜; (2) HDS 的照相机用 3 块改正透镜取代 HIRES 照相机的 2 块改正透镜, 获得非常好的成像质量。这两点改进对于 HDS 工作在 $R = 100000$ 或更高分辨率是非常重要的。

4 欧洲南方天文台 (ESO)VLT 的高分辨率光谱仪 UVES^[13]

UVES(UV-Visual Echelle Spectrograph) 工作在 ESO-VLT 的第二架望远镜 Kueyen 的 Nasmyth 焦点, 这项计划始于 1992 年 4 月, 1999 年 12 月完成, 造价 710 万德国马克, UVES 的总体布局如图 3 所示。

UVES 是红蓝双臂阶梯光栅分光仪, 蓝区光谱 $300 \sim 500\text{nm}$, 红区光谱 $420 \sim 1100\text{nm}$ 。狭缝宽度 $1''$ 时光谱分辨率 $R = 40000$, 最高分辨率: 红区 $R_{\text{max}} = 110000$, 蓝区 $R_{\text{max}} = 80000$ 。狭缝前设有像消转器、定标灯、碘盒、像切割器、滤光片、大气色散改正(ADC)和消偏振片等。VLT-Kueyen 望远镜的 Nasmyth 焦点焦比 $f/15$, 为减小光谱仪尺寸, 缝前还设有缩焦器, 将 $f/15$ 缩至 $f/10$ 光束再进入狭缝。

准直光束口径 $\phi 200\text{mm}$, 准直镜系统采用了白光孔径设计思想, 由 2 块参数相同的离轴抛物面组成。主色散采用 2 块 $R4(76^\circ)$ 阶梯光栅复制拼接在 1 块 Zerodure 玻璃材料上, 总尺寸 $210\text{mm} \times 836\text{mm}$ 。红区阶梯光栅 31.6 线/mm, 蓝区阶梯光栅 41.6 线/mm。红蓝两区各配置两块横向色散光栅, 工作在第一级, 最小级间分离 $10''$ 。

UVES 的照相机为全透射式系统, 红区照相机焦比 $f/2.5$, 蓝区照相机焦比 $f/1.8$ 。红蓝双区选用 3 片 CCD, 蓝区选用单片 EEV 的 $2\text{k} \times 4\text{k}$ CCD, 红区是由 EEV CCD 和 MIT CCID 拼接成 $4\text{k} \times 4\text{k}$, 像元尺寸 $15\mu\text{m}$ 。

UVES 采用的一些先进设计思想, 如白光孔径准直镜系统, 大闪耀角拼接的 $R4$ 阶

梯光栅和大透射相机等被越来越多的阶梯光栅光谱仪器所采用。HET 望远镜的 HRS、ESO1.5m 望远镜的 FEROS、意大利 3.5m 望远镜的 SARG 和德国-西班牙天文中心所属 Calar Alto 天文台的 2.2m 和 3.5m 望远镜的 FOCES 光谱仪都借鉴了 UVES 的设计。

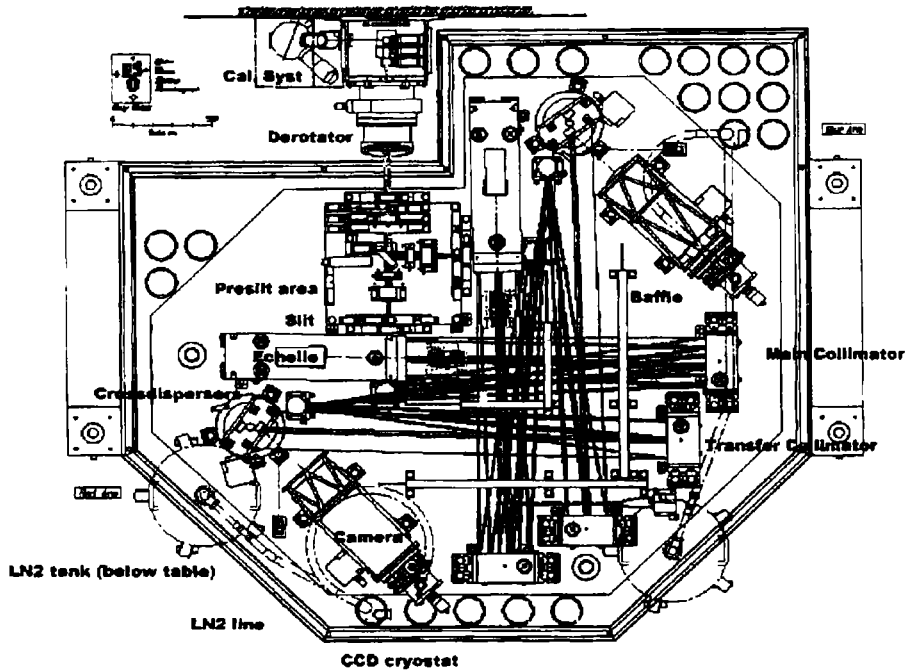


图3 VLT 第二架望远镜 Kueyen 的高分辨率光谱仪 UVES^[13]

5 美国 McDonald 天文台 Hobby-Eberly 望远镜的高分辨率光谱仪 HRS^[14]

HRS(High Resolution Spectrograph) 由 McDonald 天文台 Robert G.Tull 负责研制, 1994 年 3 月开始设计, 到 2000 年 11 月安装在 HET 望远镜建筑底层的光谱房内, 望远镜和光谱仪之间由光纤连接, 光谱范围 420~1100nm, 分辨率 30000~120000, 主色散的阶梯光栅由 2 块 R4 阶梯光栅复制拼接在 1 块 Zerodur 玻璃材料上, 31.6 线/mm, 总刻划面尺寸 210×836mm, 有 316 线/mm 和 600 线/mm 两种横向色散光栅供选择, 探测器为拼接的 4k×4k Orbit CCD, 当选用 316 线/mm 横向色散光栅时, 观测 420~1100nm 全段光谱需要 2 次积分时间, 而选用 600 线/mm 横向色散光栅时, 观测 420~1100nm 全段光谱需要 4 次积分时间。HRS 的光路如图 4 所示。

HRS 采用了 ESO-UVES 光谱仪的单通道(红区)设计, 引入改进后的 Baranne 白光孔径光谱仪概念, R4 拼接阶梯光栅在光路中工作在准 Littrow 入射状态以便获得最高光效率, 用平面光栅进行级次分离, 全透射相机由 Harland Epps 重新设计。HRS 与 UVES 在

设计方面有 4 点不同:

- (a) HRS 是单通道光谱仪;
- (b) HRS 取消了 UVES 准直镜系统里的 1 块小折叠平面镜, 减少 1 次反射损失;
- (c) 重新设计的全透射相机;
- (d) 望远镜和光谱仪之间由光纤连接, 采用光纤型像切割器。

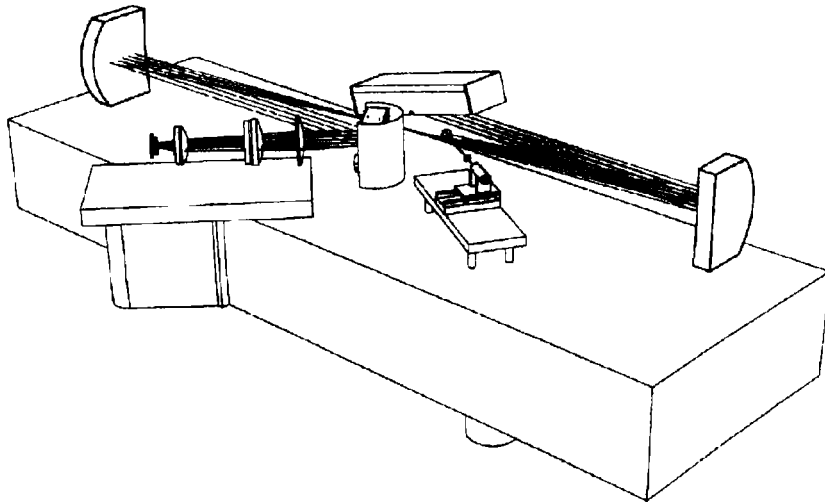


图 4 McDonald 天文台 Hobby-Eberly 望远镜的高分辨率光谱仪 HRS^[14]

6 智利 Cerro Pachon Gemini 望远镜高分辨率光谱仪 HROS^[15]

HROS(High Resolutin Optical Spectrograph) 由英国伦敦大学光学实验室设计, 工作在南 Gemini 望远镜的 Cassegrain 焦点, 1995 年 10 月开始研制, 预计 2001 年完成, 仪器预算 410 万美元, HROS 的光路如图 5 所示。

仪器尺寸 $2.3\text{m} \times 3\text{m}$, 准直光束 $\phi 160\text{mm}$, 准直镜是离轴抛物面镜, 离轴角 20° , 横向色散由 2 块大三棱镜组成, 准直光束先经过棱镜预色散, 然后再入射到主色散元件—浸渍阶梯光栅 (Immersed Echelle)。照相机为折反射系统, 由球面主镜和 3 块改正镜加 1 块平场镜组成, 探测器由 2 块 $2\text{k} \times 4\text{k}$ CCD 拼接, 像元 $13.5\mu\text{m}$ 。狭缝宽度 $0.6''$ 时光谱分辨率 $R = 50000$, 光效率在波长 500nm 处为 28%。

一般来讲, 4 m 和 8m 级望远镜的高分辨率光谱仪都工作在 Nasmyth 或 Coudé 焦点, 这是因为通常这类仪器大而重, 并且要求具有高稳定性。HROS 是目前唯一工作在 8m 望远镜的 Cassegrain 焦点的高分辨率光谱仪, Cassegrain 高分辨率光谱仪设计上要解决两方面技术挑战, 一是受 Cassegrain 焦点的空间限制, 仪器尺寸要足够小; 另外, 由于光谱仪与望远镜一起运动, 要克服重力变形对光谱仪波长稳定性的影响。HROS 独树一帜, 将 R2 阶梯光栅 (63°) 刻划面浸入熔石英材料中 (Immersed Echelle) 来获得高分辨率, 减小仪器尺寸满足 Cassegrain 焦点的要求, 而不是采用大准直光束达到高分辨率。

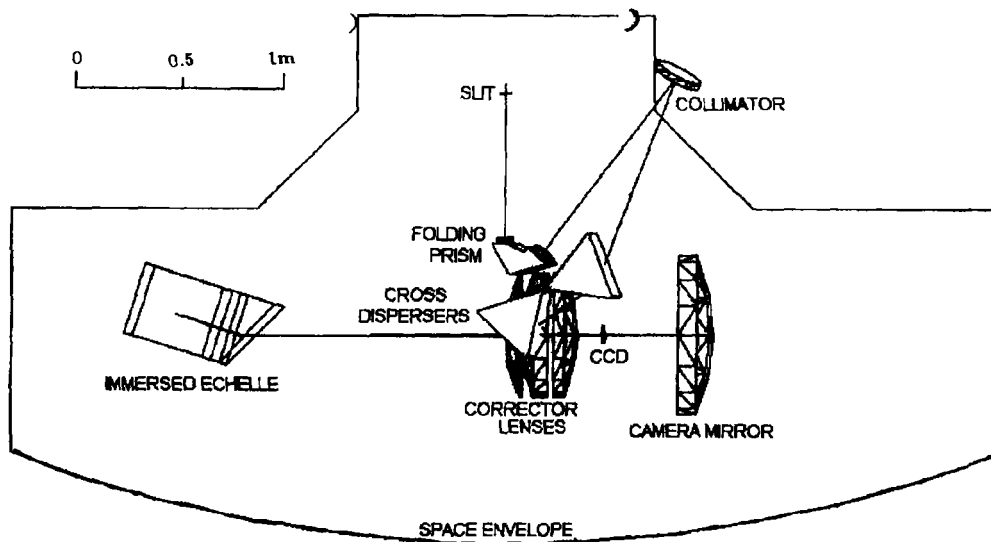


图 5 Gemini 望远镜的高分辨率光谱仪 HROS^[15]

7 讨 论

上述 5 台高分辨率光谱仪的主要设计特点和性能列于表 1^[16]。综观这些仪器的设计, 各具特色, 采用许多新思想和新技术解决大望远镜高分辨率光谱仪匹配中的难题, Keck-HIRES 和 Subaru-HDS 均采用机械方式拼接光栅, 主色散光栅选择 $R2.8$ 阶梯光栅, 因此准直光束较大才能获得高分辨率, 另外照相机为强焦比 $f/1.0$ 的折反射系统。VLT-UVES 和 HET-HRS 发展了 Baranne^[17] 白光孔径设计思想和拼接光栅新技术, 大闪耀角阶梯光栅 ($R4$) 复制时拼接在 1 块玻璃材料上, 由于引入白光孔径设计思想减小了横向色散元件尺寸, 横向光栅不需要拼接, 同时也减缓照相机焦比, 采用了全透射照相机。Gemini-HROS 则另辟蹊径, 采用“浸渍阶梯光栅” (Immersed Echelle) 新技术, 较小的准直光束即可获得高分辨率。

这些高分辨率光谱仪工作的位置有 Nasmyth 焦点和 Cassegrain 焦点, 也采用光纤连接光谱仪和望远镜。主色散元件选用大闪耀角阶梯光栅 ($R4$)、拼接阶梯光栅和浸渍阶梯光栅来获得高分辨率。作为横向色散元件, 平面反射光栅和棱镜在这些仪器中都有所应用, 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。

表 1 HIRES、HRS、UVES、HROS、HDS 的设计特点和性能^[16]

	Keck HIRES	HET HRS	VLT UVES	Gemini HROS	Subaru HDS
分辨率与缝宽之积	39000''	34000''	40000''	28500''	38000''
最高分辨率	67000	100000	120000	180000	100000
望远镜焦点	Nasmyth	光纤	Nasmyth	Cassegrain	Nasmyth
准直镜焦比	$f/15$	$f/10$	$f/10$	$f/16$	$f/12.5$
光谱范围 / μm	0.3~0.5 0.4~1.1	0.42~1.1	0.3~1.1	0.3~1.1	0.3~1.1 1.0~2.0
准直光束口径 /mm	305	200	200	160	272
阶梯光栅	1 × 3 拼接	1 × 2 拼接	1 × 2 拼接	浸渍	1 × 2 拼接
闪耀角	$R2.8$	$R4$	$R4$	$R2$	$R2.8$
横向色散	拼接光栅	光栅	光栅	棱镜	拼接光栅
最小级间分离	8''	4''	15''	8''	8''
探测器	CCD	CCD 拼接	CCD 拼接	CCD 拼接	CCD 拼接
规格	2048 × 2048	4096 × 4096	4096 × 4096	4096 × 4608	4096 × 4096
像元 / μm	24	15	15	13.5	15

参 考 文 献

- 1 McLean I S, Chffee F H. Proceedings of SPIE, 2000, 4008: 2
- 2 Mountain C M, Gillett F, Oschmann J. Proceedings of SPIE, 1998, 3352: 2
- 3 Ramsey L M, Adams M T et al. Proceedings of SPIE, 1998, 3352: 34
- 4 Barnes T G, Adams M T et al. Proceedings of SPIE, 2000, 4004: 14
- 5 Gray P M. Proceedings of SPIE, 2000, 4004: 2
- 6 Kaifu N. Proceedings of SPIE, 1998, 3352: 14
- 7 Hill J M, Salinari P. Proceedings of SPIE, 1998, 3352: 23
- 8 Alvarez P, Rodriguez-Espinosa J M et al. Proceedings of SPIE, 2000, 4004: 26
- 9 Buckley D A H. Proceedings of SPIE, 2000, 4008: 72
- 10 Tull R G. Proceedings of SPIE, 1994, 2198: 674
- 11 Vogt S, Allen B et al. Proceedings of SPIE, 1994, 2198: 362
- 12 Noguchi K, Ando H et al. Proceedings of SPIE, 1998, 3355: 19
- 13 Dekker H, Dodorico S et al. Proceedings of SPIE, 2000, 4008: 534
- 14 Tull R G. Proceedings of SPIE, 1998, 3355: 387
- 15 Darrigo P, Bingham R G et al. Proceedings of SPIE, 2000, 4008: 159
- 16 Pilachowski C et al. Publ. Astro. Soc. Pac., 1997, 107: 983
- 17 Baranne A. In: Lautsen S, Riz A eds. ESO/CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes. 1972: 227

High Resolution Spectrographs for 8~10m Class Optical/IR Telescopes

Zhu Yongtian

(*Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042*)

(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

Abstract

There are more than one dozen of 8~10m class optical/IR telescopes recently completed, presently under construction, or planned. The construction of these large telescopes in astronomy has brought new opportunities for astrophysical research using high-resolution spectroscopy, in the meanwhile, the designer of high resolution spectrographs for these large telescope must also respond to new challenges. In this paper, difficulties and constrains of designing high resolution spectrograph for very large telescope are analyzed. High-resolution spectrographs designed or built for the Keck, Subaru, VLT, Hobby-Eberly and Gemini telescopes are described and their design characteristics are summarized. Some new technology and novel design concepts developed in these spectrographs, such as white pupil, very steep replicated mosaic echelles and immersed grating are discussed.

Key words Optical/IR telescope: high resolution—echelle—spectrograph