

30 m级光学/红外望远镜的宽视场多目标光谱仪*

季杭馨^{1,2,3†} 胡中文^{1,2‡} 朱永田^{1,2} 许明明^{1,2} 戴松新^{1,2}
章华涛^{1,2} 汤振^{1,2} 王晋峰^{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(南京天文光学技术研究所) 南京 210042)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 宽视场多目标光谱仪具有宽波段、多分辨率模式和高通光效率的特点,是极大望远镜终端仪器使用率最高的通用型仪器. 30 m级望远镜的宽视场多目标光谱仪因体量和成本急剧增加而面临重要挑战,同时天文学的不断发展对天文新技术的发展提出了更高的要求,尤其是多个巡天项目对于多目标光谱后随观测的迫切需求. 综述了几类宽视场多目标光谱仪的发展现状,介绍了国际3架30 m望远镜宽视场多目标光谱仪概念设计的最新进展和仪器特点,着重介绍了中国参与研制的30 m望远镜(TMT)中的宽视场多目标光谱仪的相关进展.

关键词 仪器: 光谱仪, 望远镜, 技术: 成像光谱技术, 技术: 光谱学, 方法: 分析

中图分类号: P111; **文献标识码**: A

1 引言

天文学和天文仪器的发展是一个相互促进的过程,天文学自身的发展不断推动技术的创新,而每一项技术的突破又促进天文观测能力的提升. 最近几十年,天文学和天文仪器都取得了巨大的进展,十几架8–10 m级光学/红外望远镜和各类天文终端相继建设完成并开始在下—代仪器的研发中运用最新技术^[1–4],但是随着天文技术本身的不断发展和天文观测的深入,尤其是多个地基/空基巡天项目光谱后随观测的迫切需求,如:大型综合巡天望远镜(LSST)^[5]、詹姆斯韦伯太空望远镜(JWST)^[6]等,天文学家希望建造更大口径的望远镜来探索宇宙奥秘和生命起源,世界上包括我国在内的多个国家提出建造30 m级地面光学/红外望远镜的研究计划,目前主要的国际合作项目包括:美国的巨型麦哲伦望远镜(GMT)^[7]、30 m望远镜(TMT)^[8]以及欧洲39 m极大望远镜(ELT)^[9].

2019-02-12收到原稿, 2019-04-09收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11503059、11603054、U1831108、11603053、11503061)资助

†hxji@niaot.ac.cn

‡zwhu@niaot.ac.cn

宽视场多目标光谱仪是8–10 m级望远镜终端仪器中使用率最高的通用型仪器,这类仪器具备宽视场的同时兼顾了光谱覆盖、中等分辨率和高通光效率的特点,可有效地进行天光背景扣除,适合开展暗弱天体的多目标光谱观测.为了更深入地研究第1代天体,理解第1代恒星、星系的形成和演化,揭秘宇宙再电离的完整过程,需要在多个巡天项目海量成像数据的基础上进行光谱后随观测,因此30 m级望远镜都计划配置宽视场多目标光谱仪(MOS).

在未来的10 yr,很多关键技术的发展将对30 m级望远镜MOS的研制产生巨大的影响^[10].自适应光学的发展将极大地解决地基望远镜受大气扰动的影响并提高望远镜的空间分辨率,如GLAO (Ground Layer Adaptive Optics)可改善视宁度对MOS的影响^[11];汽车和航空航天工业新型超轻量化材料有可能作为新型镜胚材料应用于地基、空间望远镜和科学仪器的研制,这将大幅度减轻仪器的质量和结构设计的难度;大口径高透过率玻璃材料工艺的发展,将极大地减轻MOS相机系统的设计压力,而大口径非球面加工工艺和检测技术的发展,将极大地提高光学器件的加工和制造能力^[12];宽波段、高效率、长寿命反射膜^[13]和透射膜的应用^[14]可以进一步提高MOS的通光效率、延长维护周期;大口径透射光栅^[15]及其拼接技术的发展^[12,16]将使得整个仪器非常紧凑,仪器的通光效率也会大大提高;30 m级望远镜MOS的体量非常庞大,一般随望远镜的运动或旋转会产生结构变形,主动柔性补偿技术^[17–19]的发展能够有效补偿因结构变形引起的图像漂移,确保仪器的性能稳定;CCD拼接技术^[20–22]、红外探测器^[23–25]和高速CCD^[26]的发展可以实现宽视场、近红外和高时域天文的观测,极大地拓展天文观测能力.另外,光纤和光纤定位技术的发展,如PFS (Prime Focus Spectrograph)的Cobra^[27],4MOST (4 metre Multi-Object Spectroscopic Telescope)的AESOP (Australian European Southern Observatory Positioner)^[28]和TAIPAN (Transforming Astronomical Imaging-surveys through Polychromatic Analysis of Nebulae)的Starbugs^[29],使MOS可搭载不同的光纤单元实现多种观测模式并存,而且新的观测策略可有效提高光纤MOS天空背景扣除精度^[30],这也成为其越来越受天文学家欢迎的关键之一.

本文将对比不同类型MOS的特点,以30 m级望远镜的3台MOS为例,介绍其在概念设计阶段的总体方案和技术发展对设计思想的影响,它们包括GMT-GMACS (GMT Multi-object Astronomical and Cosmological Spectrograph)、TMT-WFOS (Wide-Field Optical Spectrograph)和ELT-MOSAIC (MOS for Astrophysics, IGM and Cosmology),通过分析评论它们的设计特点,希望可作为国内极大望远镜中同类仪器研制的借鉴.

2 几种MOS的比较

MOS按照天文仪器的发展主要有以下几种类型^[31]:物棱镜多目标光谱仪、狭缝多目标光谱仪、光纤多目标光谱仪和积分视场光谱仪,其工作原理如图1所示.

物棱镜多目标光谱仪一般由大视场望远镜和一个小角度的棱镜组成,棱镜色散之后的星光经过望远镜被照相底片或探测器接收.该类光谱仪一次可获得有效视场内所有目标的光谱信息且系统光效率很高,但是受到大口径棱镜材料的限制,因此在早期的小口径巡天望远镜中应用较多^[32],而且仪器本身受视宁度影响较大,存在光谱重叠、分辨率

相对较低、极限星等较亮和定标精度较差等问题。

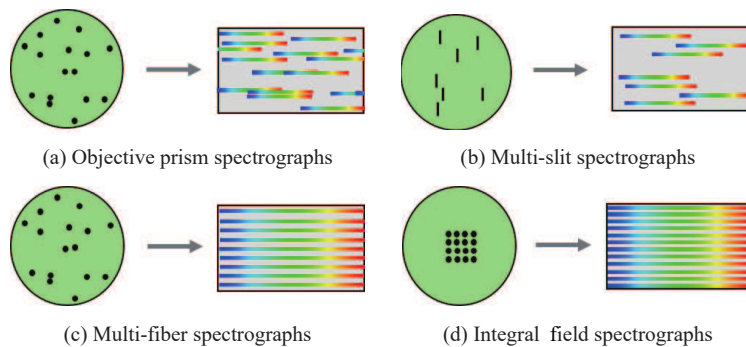


图 1 不同类型的多目标光谱仪原理图

Fig. 1 The schematic diagram of different multi-object spectrographs

狭缝多目标光谱仪由焦面的狭缝面板和光谱仪组成, 通常既可以成像也可以进行光谱观测, 多目标的数量与狭缝面板空间方向的长度、光谱分辨率和探测器大小等因素有关, 一般能够同时获得几个到近百个目标的光谱信息. 狭缝多目标光谱仪相比于物棱镜光谱仪分辨率可以更高, 极限星等受天空背景和光谱重叠的影响小, 可观测更暗的天体. 但早期的狭缝多目标光谱仪对不同天区的观测需要更换不同狭缝面板且过程复杂^[33], 因此观测效率很低, 但是随着狭缝面板快速制作和自动切换技术的逐渐成熟, 该问题在8–10 m级望远镜类似终端仪器的研制中得到极大的缓解. 表1给出了8–10 m级望远镜已经配备的狭缝多目标光谱仪, 除了DEIMOS^[34]和IMACS^[35]放置在耐焦平台外, 其他仪器基本都放置在卡焦, 因此需要考虑仪器随望远镜运动引起的结构变形的影响^[17]; 另外狭缝多目标光谱仪以中低分辨率为主, 视场相对不大, 多目标数量一般 < 100 ; 由于近红外波段需要低温制冷, 狭缝面板的切换设计难度较大^[36], 因此狭缝多目标光谱仪的波段范围以近紫外-可见光为主, 而且狭缝面板后期的运维成本相对较高, 需要根据观测计划进行切换; 狭缝多目标光谱仪的相机系统设计难度也很大, 主要原因是相机视场较大、可用的大口径玻璃材料较少^[37], 一般由7–10个透镜组成, 其中有若干个非球面和大口径CaF₂镜片^[38].

光纤多目标光谱仪由焦面的光纤系统和多台长缝光谱仪组成, 光纤系统一端接收望远镜不同视场的星光, 另一端沿着光谱仪的狭缝排列, 光谱信息在探测器上的排布固定. 相比于狭缝多目标光谱仪, 其探测器的利用率和视向速度测量精度更高, 而且随着光纤定位系统的发展和大视场巡天项目对于光谱后随观测的迫切需求, 多个在建或已经建成的望远镜都将配备多目标光纤光谱仪^[39], 我国自主建设完成的郭守敬望远镜(LAMOST)更是实现了4000根光纤的光谱巡天^[40]. 光纤多目标光谱仪的视场可以很大, 而每台光谱仪的光纤数量与设计难度和成本相关, 一般其同时观测的目标数量可比狭缝多目标光谱仪高一个数量级以上, 但是目标数量越多需要的光谱仪越多. 另外, 相比于狭缝光谱仪, 光纤多目标光谱仪工作波段以可见光为主, 部分可以到近红外1.8 μm ^[41], 这主要与光纤在紫外和近红外的特性有关; 光谱分辨率也以中低分辨率为主, 相对于狭缝光谱仪可以略高; 光纤光谱仪最大的问题在于天空背景的扣除没有狭缝光谱仪

好, 不过随着新的观测策略的实现, 定标精度 $< 1\%$ 可以满足大部分的科学需求.

表 1 8–10 m 级望远镜现有 MOS 对比
Table 1 Comparison of current MOS from the 8–10 m class telescopes

| Telescope | Instrument | FOV ^a | $\lambda/\mu\text{m}$ | Resolution(R) | Multiplex | Focus | Commission year |
|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------|-----------------|
| Keck-II ^d | DEIMOS ^j | (2)16.3' \times 5' | 0.39–1.1 | 500–8000 | ~ 130 | NA ^b | 2002 |
| Keck-II | ESI ^k | 2' \times 8' | 0.39–1.1 | 1000–6000, 13000 | ~ 50 | CA ^c | 1999 |
| Keck-I ^e | LRIS ^l | 6' \times 7.8' | 0.32–1.1 | 300–5000 | ~ 40 | CA | 1993 |
| Keck-I | MOSFIRE ^m | $\phi 6.9'$ | 0.97–2.41 | 3500 | ~ 46 | CA | 2012 |
| GTC ^f | OSIRIS ⁿ | 7.8' \times 7.8' | 0.365–1.0 | 300–2500 | 40 \sim 60 | CA | 2009 |
| Subaru | FOCAS ^o | 6' \times 6' | 0.37–1.0 | 250–7500 | ~ 30 | CA | 2001 |
| Subaru | nuMOIRCS ^p | (2)4' \times 3.5' | 0.9–2.5 | 500, 1300, 3000 | ~ 50 | CA | 2004 |
| VLT ^g | VIMOS ^q | (4)7' \times 8' | 0.37–1.0 | 200–2500 | ~ 200 | CA | 2002 |
| VLT | FORS2 ^r | 6.8' \times 6.8' | 0.33–1.1 | 200–1800 | ~ 19 | CA | 1999 |
| Gemini | (2)GMOS ^s | 5.5' \times 5.5' | 0.35–1.0 | 500–4400 | 30 \sim 60 | CA | 2002/2003 |
| LBT ^h | MODS ^t | 6' \times 6' | 0.32–1.0 | 150–500, 2000 | ~ 24 | CA | 2011 |
| Magellan | IMACS ^u | 15' \times 15' | 0.365–1.1 | 1800–10000 | ~ 400 | NA | 2003 |
| | | 27' \times 27' | 0.39–1.05 | 1800–10000 | ~ 400 | NA | 2003 |
| MMT ⁱ | Binospec | (2)8' \times 15' | 0.39–1.0 | 1340–3900 | ~ 75 | CA | 2017 (1995) |

^aField Of View, for example: (2)16.3' \times 5' means 2 square FOV with size of 16.3' \times 5', and $\phi 6.9'$ means circular FOV with diameter of 6.9'; ^bNasmyth focus; ^cCassegrain focus; ^dThe second Keck telescope; ^eThe first Keck telescope; ^fGran Telescopio Canarias; ^gVery Large Telescope; ^hLarge Binocular Telescope; ⁱMultiple Mirror Telescope; ^jDeep Imaging Multi-Object Spectrograph; ^kEchelle Spectrograph and Imager; ^lLow Resolution Imaging Spectrometer; ^mMulti-Object Spectrometer For Infra-Red Exploration; ⁿOptical System for Imaging and low Resolution Integrated Spectroscopy; ^oFaint Object Camera and Spectrograph; ^pnew upgrade Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph; ^qVisible Multi-Object Spectrographs; ^rThe second generation of FOcal Reducer/low-dispersion Spectrograph; ^sGemini Multiobject Spectrograph; ^tMulti-Object Double Spectrograph; ^uInamori-Magellan Areal Camera and Spectrograph.

积分视场光谱仪由积分视场单元和光谱仪组成. 积分视场单元可以将2维视场内的展源目标连续切割成若干单元, 重新排列后进入光谱仪器. 积分视场光谱仪的多目标可以理解为视场内每个目标利用积分视场单元接收, 然后通过光谱仪记录光谱信息和相应的空间信息, 如HET (Hobby Eberle Telescope)的VIRUS (Visible Integral-field Replicable Unit Spectrograph)^[42]、VLT的近红外多目标积分视场光谱

仪(KMOS)^[43]和VIMOS^[44]等. 该类光谱仪是近年来应用较多的一种, 尤其是自适应光学的发展可实现很高的空间分辨率, 因此需要配套相应的积分视场单元.

从几种多目标光谱仪的对比可以发现, 如何设计望远镜的焦面接收单元和相应的光谱仪是重点, 现有大望远镜配置的多目标光谱仪充分考虑了当时相应技术的发展状况和科学需求, 而在即将到来的30 m级望远镜时代, 多目标光谱仪的线性尺寸将进一步扩大, 虽然各项天文技术日新月异趋于成熟, 但每个类型的多目标光谱仪都有内在的优缺点, 仍需充分进行方案的论证和研制风险评估.

3 30 m级光学/红外望远镜MOS的研究现状

3.1 GMT望远镜的MOS—GMACS

GMACS是GMT望远镜的首光仪器, 可对暗弱天体的光学波段开展宽视场、多目标、中等分辨率的光谱观测. 该仪器是一台通用型的MOS, 它的最主要目的是能够快速对DES (Dark Energy Survey)和LSST进行后随精细光谱观测. GMACS在2006年完成了可行性设计方案^[45]; 2011年完成了初步的概念设计报告^[46]; 2016年对概念设计的光学方案进行了调整, 完成了初步概念设计方案; 2017年开始了仪器更为详细的设计, 目前处于概念设计的最终阶段, 预计2019年3月完成评审; GMACS计划在2025年开始正式科学观测^[47].

GMT-MOS的主要设计要求如下^[47]:

- 视场: 30–50 arcmin²
- 波长覆盖: 0.32–1.0 μm
- 光谱分辨率: 在0.7''狭缝宽度下, 红、蓝通道 $1000 \leq R \leq 6000$
- 仪器效率: 工作波段 $\geq 40\%$
- 成像质量: 80%能量包络0.15''
- 光谱稳定性: 0.1–0.3分辨单元/h
- 光栅数量: ≥ 2
- 狭缝面板: ≥ 12

基于这些设计指标, 放置在GMT卡焦端的GMACS已经对多个设计方案进行了对比和选择. 早期的GMACS方案是经典的狭缝多目标光谱仪^[45], 它将 $9' \times 18'$ 的视场分割成4个离轴的 $4.5' \times 9'$ 视场, 每个视场分别对应一个双通道光谱仪. 随着光纤技术的发展, 尤其是新型光纤定位系统Starbugs的日渐成熟, 它将极大地提高多目标数量和仪器视场, 搭载不同的光纤、像切割器或积分视场单元可实现不同的观测模式和分辨率, 而且切换时间短. MANIFEST (MANy Instrument FibEr SysTem)^[48]正是澳大利亚天文台(AAO)为GMT设计的焦面光纤系统, 可以使得GMT的仪器具有更多功能和拓展性, 如: 增大所有仪器的视场到20'; 提高多目标数量; 根据科学目标和未来自适应光学的发

展配备不同的IFU (Integral Field Unit); 利用像切割器可将仪器的分辨率提高3-8倍; 探测器在光谱和空间方向的利用率更为有效; 多个仪器可同时观测; 同时也将光谱仪放置在稳定平台而避免随望远镜运动的可能性等.

经过权衡考虑, GMACS新的概念设计充分考虑了与MANIFEST的结合, 一是舍弃分视场方案, 增加焦面系统的切换空间; 二是提高光谱仪的设计要求, 满足与光纤相匹配的更细狭缝获得更高的仪器分辨率^[49]. GMACS方案的主要设计参数见表2.

表 2 GMACS概念设计的主要参数
Table 2 The main parameters of the conceptual design of GMACS

| Item | Design Parameter |
|--------------------------------|--|
| Resolution | 1000-6000 (0.7'' slit) |
| FOV | $\phi 7.4'$ |
| Collimator exit pupil diameter | 270 mm |
| Collimator System | F/8.2; Collimator focal lengths: 2200 mm |
| Wavelength Coverage | Blue: 320-600 nm; Red: 500-1000 nm |
| Camera System | F/2.2; Camera focal lengths: 594 mm |
| Detector | Mosaic CCD: 4 k \times 4 k@15 μ m (2 by 3) |

GMACS最大的特点是宽视场、宽波段、高效率和多分辨率模式, 因此在考虑方案设计时将权衡现有玻璃材料的可行性、大口径透镜加工难度、高衍射效率光栅的工艺和项目成本限制等风险. 图2是GMACS目前的设计方案^[49]: 在GMT的焦面通过切换狭缝面板和MANIFEST的光纤狭缝面板实现多种观测模式, 其中狭缝面板对应的视场约 $\phi 7.4'$, 而光纤对应的视场约 $\phi 20'$; 光谱仪本体利用分色镜分成红蓝两个通道, 实现0.32-1.0 μ m的工作波段; 每个通道利用切换光栅或旋转光栅和对应相机系统实现不同的光谱分辨率和光谱覆盖, 当然也可切换不同的狭缝面板实现更高的分辨率模式.

GMT望远镜采用了格里高利系统, 最佳焦面是弯向准直系统的球面, 此时准直系统采用透射式较为合适, 而 $\phi 7.4'$ 视场的焦面约450 mm, 能够满足工作波段的大口径透镜材料比较少, 结合准直镜的设计难度、后续光栅与相机的口径限制和光谱仪对分辨率的要求, GMACS选择的准直口径为270 mm并分成红蓝两个通道. 为了分担设计难度, 两个通道的准直系统、色散系统和相机独立设计. 在准直系统和相机的设计时, 主要的设计约束在于可供应的大口径高透过率材料、透镜和非球面数量, 尤其是蓝通道, 可用的大口径材料只有熔石英和CaF₂. 准直系统共用口径最大的场镜, 然后分别利用3个透镜进行准直并将望远镜光瞳成像到光栅表面. 相机系统是GMACS最大的设计难点, 具体表现在: (1)需要满足光谱仪高性能像质的需求; (2)相机系统要通过旋转来匹配不同光栅, 而旋转机构会增加结构设计复杂度并降低仪器的稳定性; (3)相机系统作为主动补偿器件需要对系统柔性变形引起的图像漂移进行矫正. 可行性设计阶段的相机系统^[50]口径约440 mm, 接近或超过了部分材料的最大口径, 而且为了减少玻璃面-空气面数量选择了填充折射率匹配液的设计方案, 风险比较大; 新的相机系统充分考虑了研制风险, 将口径减小到接近400 mm, 也放弃了浸没型相机系统的设计思路. 色散系统采用高衍射效率

的VPHG (Volume Phase Holographic Grating)光栅, 通过切换不同的光栅实现不同分辨率模式, 同时根据光栅本身闪耀效率轮廓^[51]的特点, 利用同一块光栅和带通滤光片实现不同的波长覆盖. 因探测器尺寸较大, GMACS利用较为成熟的4 k × 4 k芯片进行拼接, 但是在设计思路, 为了减小拼接缝隙尝试开展样机试验实现单侧读出.

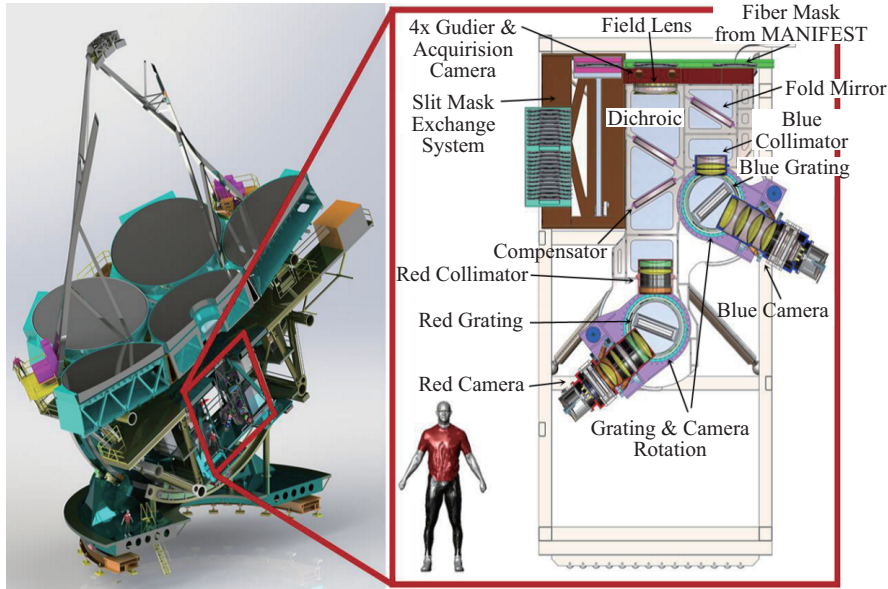


图2 GMACS概念设计示意图

Fig. 2 The schematic drawing of conceptual design about GMACS

3.2 TMT望远镜的MOS—WFOS

WFOS是TMT望远镜的首光仪器, 也是TMT望远镜运行前10 yr中最重要的科学仪器之一. WFOS是工作在视宁度限的成像光谱仪, 同时具备未来应用近地自适应光学(GLAO)的潜力, 它可在全光学波段对暗弱天体进行成像和中低分辨率光谱观测.

WFOS是极具挑战的一台仪器, 从2005年开始可行性设计^[52], 通过前期努力对几个方案进行了对比, 选择了MOBIE (Multi-Object Broadband Imaging Echellette)作为概念设计的模型方案^[53], 并于2008年开始MOBIE方案的概念设计, 经过多个阶段的研究后发现MOBIE方案存在多个方面的研制风险. 2017年, WFOS提出两个新的概念设计方案并分别对其进行技术、风险和成本的论证. 目前, WFOS已经完成两个方案的最终选择, 即将在2019年启动WFOS新概念设计的第2阶段, 该阶段将着重对基于X-change的MOS方案进行更为细致的设计. 预计2020年完成WFOS的概念设计, 2025年完成详细设计, 2029年实现WFOS的科学观测.

TMT-MOS的主要设计要求如下:

- 视场: $\geq 25 \text{ arcmin}^2$ (目标: 40.5 arcmin^2)
- 波长覆盖: 310–1000 nm
- 光谱分辨率: 在 $0.75''$ 狭缝宽度下, 1000–5000

- 狭缝长度: $\geq 500''$
- 光谱空间采样: $\leq 0.15''/\text{pixel}$
- 仪器效率: 工作波段 $\geq 30\%$
- 光谱稳定性: $\leq 0.15''$

WFOS安装在TMT耐焦平台, 整个仪器将绕水平轴转动以消除视场旋转引起的像旋, 因此WFOS与GMACS类似将受到由于重力方向改变或温度变化引起的结构变形. 早期MOBIE方案正是由于主动补偿系统的失效而尝试通过改变阶梯光栅和棱镜的工作角度来获得更好的效果, 但是重新优化后的色散系统使得相机系统的设计难度提高, 相机系统的口径非常大, 现有的玻璃材料导致相机产生很大的渐晕, 研制风险极大. 因此, WFOS提出了多种新方案, 经过近2 yr的进一步研究和对比, 最终选择了基于X-change的WFOS方案而放弃了基于光纤的MOS方案, 主要依据在于该方案可满足更多的科学需求和具有未来拓展性, 而且整体尺寸和成本可控. WFOS的主要设计参数见表3.

表 3 WFOS概念设计的主要参数

Table 3 The main parameters of the conceptual design of WFOS

| Item | Design Parameter |
|--------------------------------|--|
| Resolution | 1500–7500 (0.7'' slit) |
| Field of View | 8.3' \times 3' |
| Collimator exit pupil diameter | 300 mm |
| Collimator System | F/15; Collimator focal lengths: 4500 mm |
| Wavelength Coverage | Blue: 310–560 nm; Red: 540–1000 nm |
| Camera System | F/2.0; Camera focal lengths: 600 mm |
| Detector | Mosaic CCD: 4 k \times 4 k@15 μm (4 by 3) |

基于X-change的WFOS方案由加州理工学院(CIT)的Jason Fucik参照KCWI (Keck Cosmic Web Imager)设计提出, 如图3所示, 属于狭缝多目标光谱仪, 设计思路与GMACS设计思路类似, 主要通过切换平面镜和光栅实现不同的观测模式, 其中低分辨模式可以一次曝光覆盖整个工作波段, 而中高分辨率模式需要多次曝光并同时旋转光栅和相机系统. TMT望远镜采用了改进型卡塞格林系统, 最佳焦面是弯向望远镜的球面, 此时准直系统选用反射式最为合适. WFOS利用分色镜将光谱仪分成两个通道, 准直系统由共用的离轴非球面镜和分通道优化的一组球面改正镜组成. 离轴非球面镜尺寸非常大, 需要轻量化设计, 而且由于作为主动补偿器件需要两维倾斜和离焦调整, 因此准直系统对结构的设计要求很高. WFOS也考虑利用TMT的轴上视场, 采用三反镜作为准直系统, 该设计的最大优势在于像质更好, 整体仪器包络更小, 但是准直系统本身的成本有所增加, 而且由于环柱面镜存在加工风险, 需要对两个方案进行更深入的评估. 在色散系统的设计上, 为了减小结构设计难度和增加仪器稳定性, WFOS还将考虑双VPHG光

栅^[54]或者光栅与棱镜组合方案^[55], 这样的设计可使得相机系统不需要旋转, 但是增加元器件会增加效率损失, 因此需要更深入的权衡分析. WFOS的工作波段比GMACS更宽, 而VPHG光栅在紫外波段效率相对较低, 因此在方案设计时也考虑采用近年来发展迅速的熔石英刻蚀光栅(FSE)^[56], 但是该光栅现有工艺最大口径约270 mm, 而WFOS准直口径在300 mm, 存在一定的风险, 需要在概念设计阶段提前开展大口径光栅试制. WFOS的相机系统视场和光瞳口径比GMACS更大, 在设计难度上非常大, 但是基本设计思路与GMACS类似, 在充分考虑像质要求、材料限制和加工难度的原则下, 分别对红蓝通道的相机系统进行了优化设计并开展了相应的加工工艺评估. WFOS的探测器也是拼接CCD, 为了使每个通道的效率最大化, WFOS在考虑商业化芯片的同时也尝试对分波段效率优化的探测器进行了工艺评估.

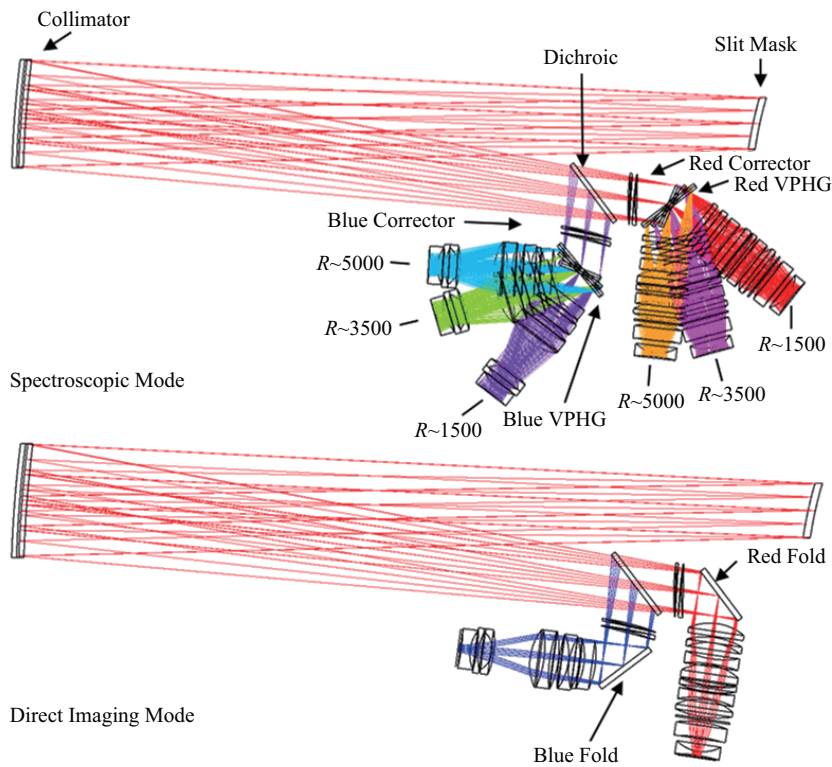


图3 基于X-change设计方案的光谱和直接成像光路图

Fig. 3 The optical layout of X-change design with spectrograph and direct imaging mode

3.3 ELT望远镜的MOS—MOSAIC

ELT的首光仪器包含可见光/近红外积分视场光谱仪(HARMONI)、近红外自适应校正成像仪(MICADO)和中红外成像光谱仪(METIS). MOSAIC虽然不是ELT的首光仪器, 但是随着更暗天体成像巡天时代JWST和Euclid的到来, 众多科学案例都需要高灵敏度和高空间分辨率的宽视场多目标光谱仪进行后随光谱观测来认证和测量天体物理参数^[57], 因此MOSAIC在设计时就考虑利用ELT的大口径和自适应光学带来的高空间分

分辨率的优势. ELT从2007年开始征集终端仪器方案, 2010年完成多个仪器的Phase A阶段的可行性设计, 其中包含3个宽视场多目标光谱仪方案: 自适应多积分视场单元近红外光谱仪(EAGLE)、宽视场成像和中低分辨率狭缝光谱仪(OPTIMOS-DIORMAS)和可见光/近红外光纤多目标光谱仪(OPTIMOS-EVE). 2015年完成MOSAIC的科学白皮书并开始征集MOS新的概念设计方案. 2016年MOSAIC获得了新一轮Phase A阶段的资助, 并将3个宽视场多目标光谱仪方案集成在一起, 主要目的是使MOSAIC成为21世纪20年代最具竞争力的一台宽视场多目标光谱仪. MOSAIC在2018年3月完成Phase A阶段的评审, 预计2019年进入初步设计阶段Phase B, 2029年完成安装测试并开始观测^[58].

MOSAIC最大的特点是兼顾了多目标和近红外波段高空间分辨率的观测需求, 属于光纤多目标光谱仪. MOSAIC在可见光波段虽然也考虑了GLAO可能带来的优势, 但是在短波实现整个科学视场 $\phi 7.4'$ 的自适应光学还是非常困难的, 因此主要按照视宁度限和衍射限两种模式进行设计, 其中多目标模式(High Multiplex Mode, HMM)和星际介质模式(Inter-Galactic Medium Mode, IGMM)工作在视宁度限, 而多功能积分视场模式(High Definition Mode, HDM)工作在MOAO (Multi Object Adaptive Optics). MOSAIC几种工作模式的主要设计指标如表4^[58].

表 4 MOSAIC不同模式的指标要求
Table 4 The specification requirements of MOSAIC with different modes

| Specification | HMM-VIS ^a | HMM-NIR ^a | HDM | IGMM |
|---|------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Adaptive Optics (AO) | Seeing Limited/GLAO | Seeing Limited/GLAO | MOAO | Seeing Limited |
| FOV/arcmin ² | ~ 32 | ~ 32 | ~ 32 | ~ 32 |
| Wavelength/ μm | 0.45–0.8 | 0.8–1.8 | 0.8–1.8 | 0.8–1.8 |
| Multiplex | 200 | 100 | 10 | 10 |
| Diameter of the aperture on sky/'' | 0.8 | 0.6 | 2.0 × 2.0 | 2.0 × 2.0 |
| Fibers/Object | 19 | 19 | 493 | 221 |
| R | 500, 15000 | 500, 15000 | 5000 | 5000 |
| Limiting Magnitude | $M_{R,AB}^b = 26$ | $M_{H,AB}^b = 28$ | $M_{J,AB}^b = 28$ (40 h) | $M_{J,AB} = 28$ (40 h) |
| Spatial pixel size/ (mas-pixel ⁻¹) | - | - | 75 | 75 |

^a VIS: Visible, NIR: Near InfraRed.

^b Limiting Magnitude in the R/H/J bands based on the AB magnitude system.

MOSAIC放置在ELT的耐焦平台, 为了实现主要的科学需求, MOSAIC在设计上与传统的光纤光谱仪不同, 它利用微透镜光纤阵列或可自适应调整的中继光学系统ORM (Optical Relay Module)实现不同模式的切换, 然后各工作模式的光纤模块按照工作波段进入各自的狭缝光谱仪获得相应的光谱信息. WFOS为了消除视场旋转的影响

需要旋转整个仪器, 而MOSAIC只有焦面系统需要旋转, 光谱仪本身放置在固定的平台. MOSAIC的焦面系统为了实现不同的观测模式, 在设计上较为复杂, 各功能模块如图4所示^[59], 在科学视场内, MOSAIC分布着两类摆臂单元“Type A”和“Type B”; 科学视场四周有4组激光导引星系统(LGS); 最外圈按照正八边形放置了24组ORM模块. 摆臂单元“Type A”搭载一个可调焦的微透镜光纤束单元, 可实现1'视场内的目标搜寻并导向HMM-VIS; “Type B”搭载一个HMM-VIS微透镜光纤束单元、一对HMM-NIR微透镜光纤束单元和一个可多自由度调整的转向平面镜, 其中转向平面镜可分别导向HDM、IGMM或自然导星(NGS)的ORM模块, 搭载的每个模块通过切换系统相互转换. 值得注意的是, 摆臂单元中HMM模块的搜寻视场大于转向平面镜的视场, MOSAIC也计划在科学视场外放置仅搭载平面镜的摆臂单元“Type C”用于导向NGS系统^[60].

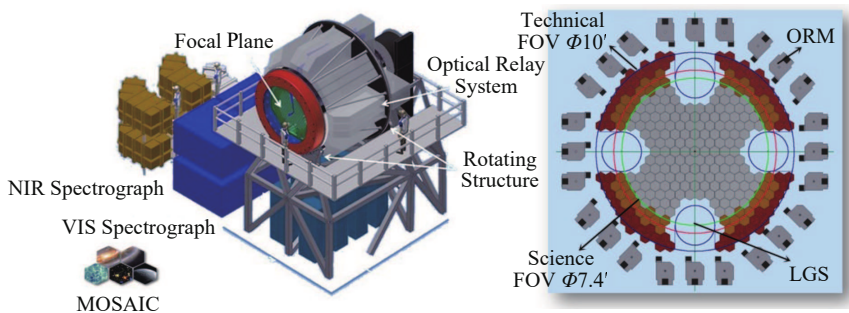


图4 MOSAIC焦面单元和整个系统布局图

Fig. 4 The layout of MOSAIC focal unit and whole system

MOSAIC焦面系统中比较有特色的一个模块是ORM, 主要包含: 倾斜镜、光程补偿镜、成像镜、折转平面镜或可变形镜、微透镜阵^[59]. ORM的主要作用是将望远镜科学视场内的目标通过转向平面镜传输到焦面外围的中继光学系统, 由于焦面不同位置的目标光程差不一致, 需要光程补偿镜微调每个光瞳的位置到折转平面镜或可变形镜, 其中可变形镜主要是为了实现HDM模式开环的自适应校正, 而折转平面镜符合IGMM在视宁度限的设计需求.

MOSAIC光谱仪的配置如图5所示^[58], HDM和HMM-NIR两种工作模式最后都进入同一个近红外光谱仪, 而IGMM和HMM-VIS进入可见光光谱仪. 每个波段的光谱仪各有5台, 每台光谱仪中HDM和IGMM各由2组积分视场单元(IFUs)组成, 每组IFUs根据空间分辨率的需求配备不同的光纤束单元; 而HMM的两个工作波段均由40组光纤微透镜阵组成, 每组由190根光纤组成, 光纤芯径同样根据观测需求进行配置.

MOSAIC光谱仪本体的设计思路: 通过光栅和相机的旋转实现不同分辨率. 基于目前的概念设计^[60], MOSAIC光学波段光谱仪系统设计与WFOS类似, 准直系统由离轴非球面和两个改正镜组成, 中分辨率模式通过切换3块光栅实现不同的工作波长覆盖, 高分辨率模式通过2块光栅实现不同的工作波长覆盖; MOSAIC近红外波段的光谱仪设计比较有特点, 为了减小旋转机构的尺寸, 不同分辨率模式的切换只需要光栅切换而不需要相机旋转, 但是需要2套准直系统. MOSAIC在相机系统的设计上与GMACS和WFOS类似, 但是为了减少相机系统的透镜数量来提高仪器效率, MOSAIC也开展了弯曲探测器

芯片的工艺调研.

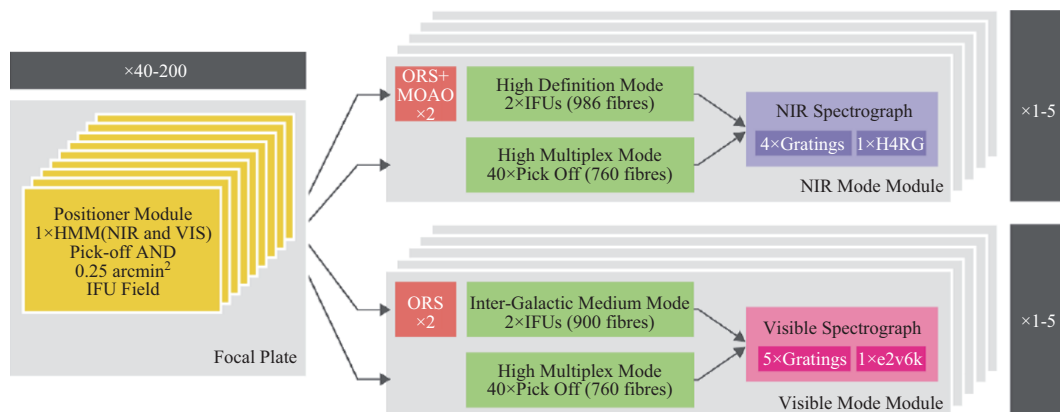


图 5 MOSAIC各子系统的组成. 其中, H4RG是Teledyne公司的4 k近红外探测器, e2v6k是e2v公司的6 k CCD

Fig. 5 The subsystem of the MOSAIC. H4RG is the 4 k near infrared detector from Teledyne, and e2v6k is the 6 k CCD from e2v

4 MOS概念设计与关键技术的研究

2014年以中国科学院国家天文台为代表的相关国内单位参与了TMT首光仪器WFOS Mini-Study阶段关键技术的研究. 国家天文台(NAOC)开展了数十亿像元的大型CCD低噪声控制电路ASIC (Application Specific Integrated Circuit)芯片的研制; 长春光学精密机械与物理研究所(CIOMP)对WFOS大口径中阶梯光栅的研制进行了论证; 上海光学精密机械研究所(SIOM)针对大口径分色镜的高精度面型控制进行了研究; 上海交通大学(SJTU)和厦门大学(XMU)分别对WFOS大型光机系统和1.6 m口径大气色散校正系统进行了可行性分析; 中国科学技术大学(USTC)对WFOS多缝焦面板的全自动切换进行了技术论证, 后期也开展了新型光纤定位系统的研究; 南京天文光学技术研究所(NIAOT)针对WFOS的超大尺寸准直镜, 开展了轻量化设计、主动柔性补偿系统优化和宽带高效率紫外增强反射膜的研究, 已经先后完成4阶段的工作包, 目前正承担WFOS基于X-change方案第2阶段的部分概念设计任务. Mini-Study阶段, 国内外的分工情况见表5.

准直系统是WFOS的重要组成器件, 其主要作用是将望远镜的光进行准直, 同时在光栅处形成一个清晰的光瞳像. WFOS整体绕着望远镜光轴旋转, 各个子系统将因为重力和温度变化引起的形变造成图像漂移, 准直系统的另一个作用是作为主动补偿器件, 提供2维倾斜调整和离焦调节, 而且准直系统由WFOS红蓝两个通道共用, 因此需要在310–1100 nm全光学波段具有较高的反射率. 因此准直系统的设计是一个复杂的系统工程, 需要进行多学科的优化.

表 5 TMT-WFOS在Mini-Study阶段的任务分工情况
Table 5 Task assignment during Mini-Study phase of TMT-WFOS

| Tasks | Managing Institution | Participating Institutions |
|--|----------------------|--|
| Mask Exchanger System Trade-off and Fabrication | USTC | UCO ^a , NAOJ ^b , ASIAA ^c , USTC |
| Acquisition, Guiding, and Wavefront Sensing | USTC | IIA ^d , IUCAA ^e , NIAOT, USTC |
| Instrument Modelling | UCO | IIA, HZDZ ^f , SJTU, UCO |
| Off-axis Collimator Mirror | NIAOT | HZDZ |
| Atmospheric Dispersion Corrector | USTC | SIOM, NIAOT, XMU, UCO |
| Metrology, Calibrations and Instrument simulations | UCO | IIA, ARIES ^g , UCO |
| Spectrograph Camera Systems | NAOJ | NAOJ, CIT |
| Folding Optical System and Dichoric | SIOM | HZDZ, SIOM |
| Grating Exchange System | CIOMP | USTC, XMU, UCO, CIOMP |
| End-to-End Optical Design and Stray Light Analysis | CIT | NIAOT, IIA, ARIES, CIT |
| Motion Controllers | IIA | UH ^h , UCO, ARIES, IIA |
| Science Detectors | UH | NAOC, IUCAA, UH, UCO |

^aUniversity of California Observatories; ^bNational Astronomical Observatory of Japan;

^cAcademia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics; ^dIndian Institute of Astrophysics;

^eInter-University Center for Astronomy and Astrophysics; ^fHangzhou Dianzi University;

^gAryabhata Research Institute of Observational Sciences; ^hUniversity of Hawaii.

4.1 WFOS准直镜的轻量化设计

WFOS的准直镜是一个离轴抛物面镜(长1600 mm, 宽800 mm, 离轴量600 mm), 尺寸非常大, 为了提高结构支撑的可靠性, 必须进行轻量化设计, 保持一定的刚度使得面型满足设计需求. 南京天文光学技术研究所相关技术团队在Mini-Study阶段对不同玻璃材料进行了对比, 轻量化率均可达到70%, 通过初步的结构优化, 碳化硅材料镜面面型峰谷值 < 60 nm, 微晶材料镜面面型峰谷值 < 155 nm^[61], 虽然碳化硅材料的刚性和面型结果较好, 但是研制难度和成本相对微晶材料大. 为了控制成本和研制风险, 在后续的研究中, 该技术团队通过多目标遗传算法对准直镜的轻量化结构重新优化, 设计方案采用集成优化分析法, 将几何建模、有限元分析、准直镜面型和轻量化率等边界条件与遗传算法有机结合, 可根据设计目标自动在参数设计范围内寻找所有满足条件的全局最优解, 大大提高了设计效率. 最终获得微晶材料下采用三角形轻量化孔的最优解, 优化后的轻量化率保持70%不变, 镜面面型峰谷值降低至85 nm, 而采用矩形孔的轻量化率75.3%, 镜面面型峰谷值 < 107 nm, 通过进一步分析, 矩形轻量化方案轻量化率虽然更高, 但是综合性能上不如三角形方案^[62].

4.2 WFOS准直镜的主动补偿方法和样机研制

WFOS准直镜的另一个主要功能是实现结构柔性变形的主动补偿, 补偿之后的残余漂移量一般需要小于1/10个分辨单元, 具体精度与相关的设计有关, WFOS需要实现 < 1 像元的精度. 为了实现大口径准直镜的高精度主动补偿, 南京天文光学技术研究所的相关团队对这一关键技术进行了研究, 并获得了国家自然科学基金青年基金、面上基金和天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费的支持, 分别对结构变形的实时主动补偿方法、利用主动光学技术实现系统准直和WFOS准直系统实验样机开展了研究.

在主动补偿算法的研究上, 研究团队利用动态数据交换完成Python对光学设计软件(ZEMAX)的控制, 获得各个器件的灵敏度矩阵; 然后利用随机引入变形量或导入结构仿真的结果, 通过选择不同的主动补偿器件, 利用盆地跳跃(Basin Hopping)算法进行全局最优解搜索; 最后通过残余漂移对主动补偿算法的可行性进行评估, 同时根据评价结果对光学设计进行优化. WFOS正是基于主动补偿仿真结果对原有MOBIE方案进行了设计上的优化, 图6利用准直镜和探测器实现了WFOS中分辨率模式下两个工作通道的主动补偿, 补偿前漂移量 > 20 像元, 经过10次优化之后的补偿结果均满足 < 1 个像元的要求.

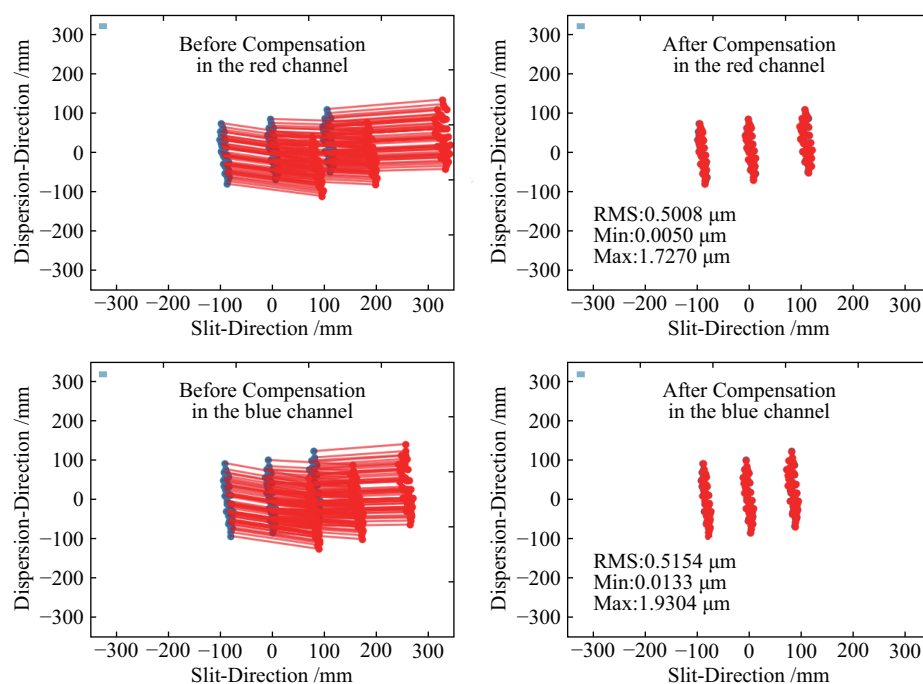


图 6 WFOS红蓝两通道中分辨率模式补偿前后图像漂移情况. 漂移线尺度进行了1000倍的放大. 左上角矩形框代表1个像元大小

Fig. 6 The image motion results before and after the compensation at the medium resolution mode of WFOS in each channel. The image motion zoomed in 1000 times. The rectangular box at the top left shows one pixel size

在柔性补偿结构的实现方式上, 相关团队在实验室搭建了一套缩小版的WFOS准直镜样机, 重点对柔性结构的优化设计和控制系统进行实验测试. 柔性结构的设计是该实

验系统最大的难点,它不但需要一定的刚度来维持镜面面型,还需要具有一定的柔性实现主动补偿功能.经过前期的相关研究,实验样机的柔性结构采用了与ESI (Echelle Spectrograph and Imager)^[63]类似的6杆结构,但在柔性材料的选择有所不同,本样机采用了弹簧钢60Si2Mn,虽然在性能上不如钛合金,但是成本可控,同时结合应力测试系统可实现实时监测功能,有利于设计模型和实验模型进行交叉对比.图7是WFOS缩尺模型实验在线检测镜面面型的照片,整个桁架结构放置在底座上,整体可绕着中心旋转,准直镜通过6个柔性杆固连在3个运动电机上,通过电机的运动实现准直镜的倾斜和调焦运动.通过初步的样机测试,柔性结构的实现难度极大,尤其是在整个设计和装调工艺的可行性上遇到了不少工程问题,同时在线检测方案的结果也发现虽然结构优化结果非常好,但是实际的镜面支撑由于所选择的环氧胶残余应力较大而变差,后期应结合实际工艺开展关键技术的研究.



图7 WFOS实验样机的测试照片

Fig. 7 The photo of WFOS prototype test

4.3 金增强型反射膜在WFOS中的应用前景

WFOS在紫外波段的效率要求很高,紫外增强银膜和宽带介质膜是目前应用较多的两种宽波段高效率反射膜.紫外增强银膜由于高效率、长寿命且工艺发展较为成熟,在多个望远镜和仪器中得到成功应用^[64];宽带介质膜相对于紫外增强银膜在紫外波段具有更高的效率,但是由于膜系厚存在较大的应力将导致反射镜面形改变以及膜层表面龟裂,而且后期维护可能需要重新抛光,目前多应用于部分小口径的反射镜中^[65].

南京天文光学技术研究所很早就开始研究针对天文应用的高效率反射膜.2015年率先提出并实施了金增强型反射膜的全新方案,2016年首次在实验室成功研制可工作在近紫外、可见光与近红外的金增强型反射膜.该膜不但具有宽反射带宽、高反射效率、较低的膜层应力以及优异的环境稳定性,而且使用寿命媲美介质膜反射镜,非常适合于大型天文望远镜与终端仪器的反射镜面.2017年,金增强型反射膜第1次成功应用于LAMOST光谱仪的准直镜,使得工作波段内的平均反射率优于98%,极大地提高了仪器的效率.该团队的核心成员,多年来一直参与WFOS准直镜高效率反射膜的概念设计,并将金增强型反射膜拓展至紫外310 nm,理论设计曲线如图8所示.可预见,宽带宽、高效率、低应力和长寿命的金增强型反射膜必将出现在中国大型望远镜和同类终端仪器的研制中.

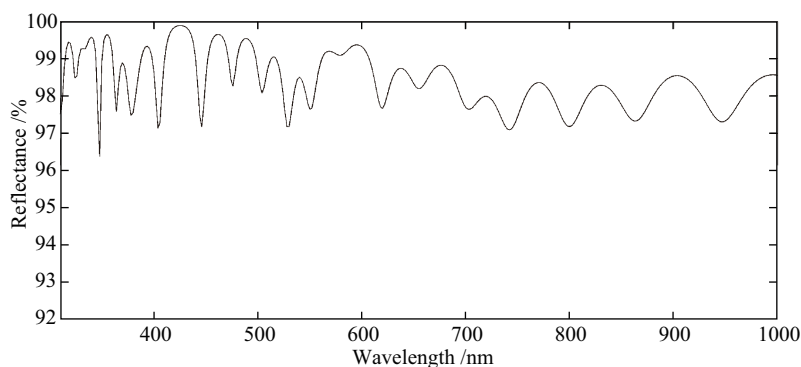


图 8 WFOS金增强型反射膜理论效率曲线

Fig. 8 The curve of UV enhanced gold coating for WFOS

4.4 WFOS基于光纤多目标的概念设计

基于光纤多目标(Fiber-WFOS)的设计是WFOS重点研究的方案, 该方案最大的特点就是多目标数量比X-change方案多一个数量级. Fiber-WFOS的每个目标由一组光纤束接收, 每台光谱仪可排布约90个目标, 因此需要多台光谱仪实现共计700个目标. Fiber-WFOS每台光谱仪的设计与LAMOST的低分辨率光谱仪类似, 采用分通道设计实现整个波段的高衍射效率和分辨率需求, 而在具体方案的实现上需要进行多个方案的对比和权衡. 为了达到整体成本和风险的可控性目标, 需要将方案进行优化并进行详细对比, 本团队通过承担WFOS的2个阶段工作包, 完成了以下几个方面的工作:

(1)通过建立光纤芯径、准直口径、多通道数量、探测器大小和相机系统焦比等关键参数的关系模型, 求得最优的参数组合; (2)完成分辨率 $R = 3500$ 和 $R = 5000$ 不同模式下3通道方案与4通道方案的设计和对比; (3)完成不同准直系统的设计和性能对比, 实现不同通道2种超快焦比F/1相机系统的设计.

相机系统的设计类型一般有折射式、折反射式和反射式3种^[66]. Fiber-WFOS为了实现焦比F/1的相机系统设计一般只能选择折反射式, 该类相机系统视场较大、像质优良, 但是探测器一般放置在光路中央存在遮挡, 引起一定的渐晕. Fiber-WFOS设计原则的其中一条是满足设计要求的前提下尽量控制成本, 因此对两种设计的各个方面进行了综合对比. 两种相机设计, 一种是基于Houghton式的相机系统“M-Camera”^[67], 如图9(a)所示, 由两个改正镜、反射镜和场镜组成; 另一种是Delabre^[68]建议的应用于MOONS (Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph)的相机系统“W-Camera”, 如图9(b)所示, 由改正镜、反射镜和场镜组成. 两种相机的部分参数对比见表6, 相机系统的准直口径300 mm, 焦比F/1. 两种相机有各自的特点, “W-Camera”相机系统本身的像质很好, 虽然反射镜和透镜的口径略小, 但是渐晕较大, 不满足WFOS $\leq 15\%$ 的要求, 场镜需要与改正镜胶合, 且探测器芯片需要放置在改正镜中孔内部, 比较适合进行整体制冷, 另外紫外-蓝通道的透镜材料需要选择价格较高的CaF₂; “M-Camera”像质也非常好, 渐晕较小, 满足WFOS $\leq 15\%$ 的要求, 而且透镜材料都是熔石英, 透过率和价格都较低, 但是反射镜和透镜口径略大, 也多了一块透镜. 最终选择哪个相机设计主要依据还是成本和风险的控制.

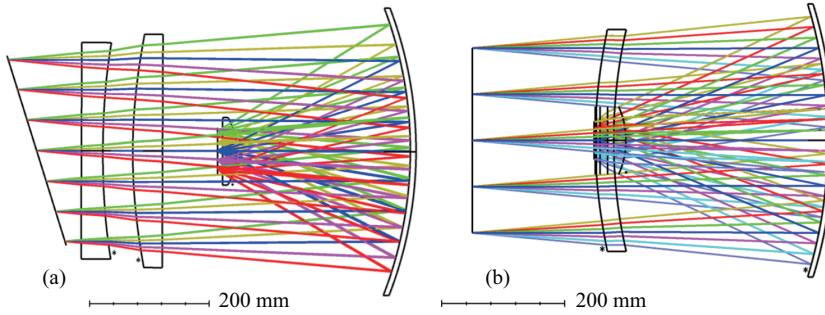


图9 Fiber-WFOS快焦比相机系统光学设计示意图. (a) “M-Camera”, (b) “W-Camera”

Fig. 9 The optical layout of fast focal ratio camera design in Fiber-WFOS. (a) “M-Camera”, (b) “W-Camera”

表6 两种相机系统的主要参数对比

Table 6 Main parameters comparison of the two camera design

| Camera Type | M-Camera | W-Camera |
|---------------------------|---|---|
| FOV | $10^\circ \times 11.5^\circ$ | $10^\circ \times 11.5^\circ$ |
| Image Quality | RMS Spot radius $< 15 \mu\text{m}^{\text{a}}$ | RMS Spot radius $< 15 \mu\text{m}^{\text{b}}$ |
| Vignetting | 10% | 20% |
| Aspherical Surface Number | 3 | 3 |
| Mirror size | $< 490 \text{ mm}$ | $< 450 \text{ mm}$ |
| Max. Lens size | $< 400 \text{ mm}$ | $< 360 \text{ mm}$ |
| Lens Materials | F-SILICA | FK5 or CaF2 (F-SILICA) |

^a RMS means root mean square. The image quality of whole system, including the collimator system.

^b The image quality of the camera system.

5 总结和展望

30 m级望远镜MOS的概念设计以技术发展较为成熟的狭缝多目标光谱仪和光纤多目标光谱仪为主, 虽然具体方案的实现由于望远镜和主要科学目标的不同存在差异, 但是宽波段、多分辨率模式和高通光效率是它们最大的特点. 因此3台MOS在光谱仪本体的设计思路上大同小异, 基本都分成两个波段并通过切换光栅或旋转光栅相机组合实现不同的分辨率模式, 唯一的差别在于各自的焦面系统. GMACS和WFOS都是一代仪器, 目前GLAO技术发展的局限性导致其只能工作在视宁度限, 但在设计上都保留了未来的可拓展性, 尤其是GMACS焦面切换系统引入MANIFEST的设计思路极大地提高了其在未来的竞争力, 而WFOS也在考虑引入像切割器以适应未来GLAO带来的视宁度改善; MOSAIC近红外波段可利用望远镜自适应光学优势工作在衍射限, 因此其焦面系统的设计必须同时考虑两种工作模式, 这在一定程度增加了设计复杂度, 但是带来的优势也是巨大的, 尤其是光谱仪本体不必像GMACS和WFOS那样考虑主动补偿系统而相

对稳定. 我们可以看到, 3台仪器都处于概念设计阶段, 不同子系统的实现仍需要根据具体要求进行权衡评估, 而且很多天文技术的发展仍会不断影响设计方案, 尤其是近年来集成光子器件的发展、新型探测器技术的突破, 很可能完全改变未来MOS的设计思路. TMT是中国主要参与的30 m望远镜国际合作项目, WFOS也是其中的重要部分, 多个国际团队的共同参与不仅体现了大型终端仪器的研制难度, 而且也是关键技术优势互补的最好证明. 中国团队通过参与WFOS项目, 将增加中国在大型地面光学天文仪器方面的国际显示度, 同时极大地促进了国内天文关键技术的发展, 为未来大型天文终端的研制在科学、技术、工程、管理等多个方面积累重要经验.

参 考 文 献

- [1] Kassis M, Chan D, Kwok S, et al. SPIE, 2018, 10702: 1070207
- [2] Pasquini L, Hubin N. SPIE, 2018, 10702: 1070204
- [3] Diaz R, Goodsell S, Kleinman S, et al. SPIE, 2018, 10702: 107023R
- [4] Cabrera-Lavers A, Corradi R L M. SPIE, 2016, 9908: 990803
- [5] Krabbendam V L, Sweeney D. SPIE, 2010, 7733: 77330D
- [6] Beichman C, Benneke B, Knutson H, et al. PASP, 2014, 126: 1134
- [7] Shectman S, Johns M. SPIE, 2010, 7733: 77331Y
- [8] Stepp L M, Strom S E. SPIE, 2004, 5382: 67
- [9] McPherson A, Spyromilio J, Kissler-Patig M, et al. SPIE, 2012, 8444: 84441F
- [10] Cunningham C. ExA, 2009, 26: 179
- [11] Rigaut F. Ground Conjugate Wide Field Adaptive Optics for the ELTs. European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings, Venice, May 7-10, 2002
- [12] Spanó P, Zerbi F M, Norrie C J, et al. AN, 2006, 327: 649
- [13] Schneider T, Stupik P. SPIE, 2018, 10700: 1070048
- [14] Stilburn J R. SPIE, 2000, 4008: 1361
- [15] Pazder J S, Clemens J C. SPIE, 2008, 7018: 70184U
- [16] Zheng J R, Gers L, Heijmans J. SPIE, 2013, 8838: 88380G
- [17] Walker D D, D' Arrigo P. MNRAS, 1996, 281: 673
- [18] Kibrick R I, Faber S M, Phillips A C, et al. SPIE, 2003, 4841: 1385
- [19] Ribeiro R A S, Schmidt L M, Jones D, et al. SPIE, 2018, 10702: 107029B
- [20] Luppino G A, Tonry J L, Stubbs C W. SPIE, 1998, 3355: 469
- [21] Jordan P R, Jordan D, Jerram P A, et al. SPIE, 2014, 9154: 91540M
- [22] Dekany R, Smith R M, Belicki J, et al. SPIE, 2016, 9908: 99085M
- [23] Zandian M, Farris M, McLevige W, et al. SPIE, 2016, 9915: 99150F
- [24] Blank R, Anglin S, Beletic J W, et al. The HxRG Family of High Performance Image Sensors for Astronomy. Solar Polarization 6, Maui, May 30-June 4, 2011
- [25] Rieke G H, Ressler M E, Morrison J E, et al. PASP, 2015, 127: 665
- [26] Daigle O, Turcotte J, Artigau É, et al. SPIE, 2018, 10709: 107090A
- [27] Fisher C D, Braun D F, Kaluzny J V, et al. SPIE, 2012, 8450: 845017
- [28] Smedley S, Baker G, Brown R, et al. SPIE, 2018, 10702: 107027Z
- [29] Brown D M, Case S, Gilbert J, et al. SPIE, 2014, 9151: 91511A
- [30] Puech M, Rodrigues M, Yang Y, et al. SPIE, 2014, 9147: 91476L
- [31] Hearnshaw J. Astronomical Spectrographs and Their History. New York: Cambridge University Press, 2009: 140-193
- [32] Parker Q A, Hartley M. Objective-Prisms on Schmidt Telescopes: Past Activity and Future Prospects//Kontizas E, Kontizas M, Morgan D H, et al. Wide-Field Spectroscopy. Dordrecht: Springer, 1997: 17-23

- [33] Fort B, Mellier Y, Picat J P, et al. SPIE, 1986, 0627: 321
- [34] James E, Cowley D, Faber S M, et al. SPIE, 1998, 3355: 70
- [35] Dressler A, Bigelow B, Hare T, et al. PASP, 2011, 123: 288
- [36] Kassis M, McLean I S, Steidel C C, et al. SPIE, 2016, 9908: 99080E
- [37] Jedamzik R, Petzold U, Dietrich V, et al. SPIE, 2016, 9912: 99123E
- [38] Epps H W. SPIE, 1998, 3355: 111
- [39] Zhang K, Zhu Y T, Hu Z W. SPIE, 2016, 9908: 99081P
- [40] Zhu Y T, Hu Z W, Zhang Q F, et al. SPIE, 2006, 6269: 62690M
- [41] Cirasuolo M, Afonso J, Carollo M, et al. SPIE, 2014, 9147: 91470N
- [42] Hill G J, Tuttle S E, Lee H, et al. SPIE, 2012, 8446: 84460N
- [43] Sharples R, Bender R, Bennett R, et al. NewAR, 2006, 50: 370
- [44] Bonneville C, Prieto E, LeFevre O, et al. SPIE, 2003, 4841: 1771
- [45] DePoy D L, Allen R, Barkhouser R, et al. SPIE, 2012, 8446: 84461N
- [46] Schmidt L M, Ribeiro R, Taylor K, et al. SPIE, 2016, 9908: 9908A4
- [47] DePoy D L, Schmidt L M, Ribeiro R, et al. SPIE, 2018, 10702: 107021X
- [48] Lawrence J S, Brown D M, Brzeski J, et al. SPIE, 2014, 9147: 914794
- [49] Ribeiro R A, Schmidt L M, Jones D, et al. SPIE, 2018, 10702: 107029B
- [50] Prochaska T, Sauseda M, Beck J, et al. SPIE, 2016, 9908: 9908A3
- [51] Baldry I K, Bland-Hawthorn J, Robertson J G. PASP, 2004, 116: 403
- [52] Pazder J S, Roberts S, Abraham R, et al. SPIE, 2006, 6269: 62691X
- [53] Bigelow B C, Bernstein R A. SPIE, 2010, 7735: 773527
- [54] Epps H W, Cohen J G, Clemens C J. PASP, 2010, 122: 201
- [55] Ji H X, Zhu Y T, Hu Z W, et al. SPIE, 2018, 10702: 1070224
- [56] Erdmann M, Kley E B, Zeitner U. SPIE, 2017, 10565: 105651N
- [57] Hammer F, Barbuy B, Cuby J G, et al. SPIE, 2014, 9147: 914727
- [58] Morris S, Hammer F, Jagourel P, et al. SPIE, 2018, 10702: 107021W
- [59] Calcines A, Dubbeldam M, Morris T J, et al. SPIE, 2018, 10702: 107029P
- [60] Janssen A W, Sokolova E, Pragt J, et al. SPIE, 2018, 10702: 107029F
- [61] Chen H, Chen Y, Hu Z W, et al. SPIE, 2015, 9672: 967207
- [62] 许明明, 胡中文, 季杭馨, 等. 应用光学, 2019, 40: 45
- [63] Sheinis A I, Bolte M, Epps H W, et al. PASP, 2002, 114: 851
- [64] Vucina T, Boccas M, Araya C, et al. SPIE, 2006, 6273: 62730W
- [65] Morrissey P, Matuszewski M, Martin C, et al. SPIE, 2012, 8446: 844613
- [66] 季杭馨, 朱永田, 胡中文. 光学学报, 2019, 39: 0330003
- [67] Marasco A, Romano A. IJES, 2006, 44: 959
- [68] Oliva E, Delabre B, Tozzi A, et al. SPIE, 2016, 9908: 99087R

Wide Field Multi-object Spectrograph for 30 m Class Optical/Near Infrared Telescope

JI Hang-xin^{1,2,3} HU Zhong-wen^{1,2} ZHU Yong-tian^{1,2} XU Ming-ming^{1,2}
DAI Song-xin^{1,2} ZHANG Hua-tao^{1,2} TANG Zhen^{1,2} WANG Jin-feng^{1,2}

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

(2 CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical
Optics & Technology, Nanjing 210042)

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

ABSTRACT Due to its wide wavelength coverage, multi-resolution mode, and high efficiency, wide field multi-object spectrograph become the work-horse general purpose instrument for the extremely large telescope. It's still a great challenge to build wide field multi-object spectrograph for a 30 m class telescope with sharply increasing volume and budget. With the great development of astronomy and astrophysics, new astronomical technology is essentially required. In this paper, the research progress of different wide field multi-object spectrographs is illustrated and reviewed, especially with the introduction about the recent status of conceptual design and their instrument features from three 30 m class telescope international projects. It also introduces the current effort made by the China's team to the TMT (Thirty Meter Telescope)-WFOS (Wide Field multi-Object Spectrograph).

Key words instrumentation: spectrographs, telescope, techniques: imaging spectroscopy, techniques: spectroscopic, methods: analytical