中国巨型太阳望远镜

刘忠^{1,2*}, 邓元勇³, 杨德华⁴, 季海生⁵, 金振宇¹, 林隽¹

1. 中国科学院云南天文台, 昆明 650011;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京100049;

3. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

4. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106;

5. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034

*联系人, E-mail: lz@ynao.ac.cn

收稿日期: 2018-09-05; 接受日期: 2018-10-24; 网络出版日期: 2019-02-25

国家自然科学基金(编号: U1831210, 11833010, 11727805)和云南省万人计划资助

摘要 建设中国下一代大型地面太阳望远镜是我国太阳物理学科的共识. 与当代1 m量级口径的地面大型太阳望远镜相比, 下一代地面大型太阳望远镜更关注太阳和恒星物理的基本问题, 对分辨率和磁场测量精度提出了更高的要求. 计划中的中国巨型太阳望远镜是一架分辨率口径达到8 m, 有效聚光面积不小于20 m²的望远镜, 可探测太阳大气的基本结构及其演化. 中国巨型太阳望远镜将为人类最终解决恒星磁场的起源、日冕加热等基本物理问题提供详尽的观测证据, 为准确预报空间天气提供必要的理论和观测依据.

关键词 太阳物理, 太阳望远镜, 高分辨率, 磁场

PACS: 96.60.-j, 95.55.-n, 95.55.Ev

1 地面及空间太阳望远镜简述

太阳主导着空间关系及地球的生态环境. 作为一颗“近在咫尺”的恒星, 太阳也是人类研究宇宙中许多基本问题的最佳实验室. 从恒星演化时标及星系空间尺度来看, 作为一颗处于主序阶段的G2V型恒星, 太阳是非常稳定的. 可是, 当以人类生活时标来观察太阳的精细结构时, 太阳则是一颗随时活动和变化着的恒星. 突发的剧烈太阳活动可对地球及其周围空间环境产生显著影响, 而太阳的长周期变化则深刻影响着

地表生态系统的演变. 因此, 对太阳及其活动的观测和研究始终是天文学最重要的任务之一.

目前人类已建立了一个地空一体化的太阳监测网络, 开始了全波段、全时域、高分辨、多尺度、多视角和高精度探测太阳的时代. 空间方面, 以Hinode^[1], STEREO^[2], SDO^[3], IRIS^[4]等太阳空间望远镜为代表, 地面建成了以美国1.6 m GST^[5]、瑞典1 m SST^[6]、我国1 m NVST^[7](新真空太阳望远镜)和德国1.5 m Gregor^[8]为代表的多架大型太阳望远镜. 因为没有地球大气的吸收、散射和湍动效应, 在空间观测太阳有很多

引用格式: 刘忠, 邓元勇, 杨德华, 等. 中国巨型太阳望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 059604

Liu Z, Deng Y Y, Yang D H, et al. Chinese Giant Solar Telescope (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 059604, doi: 10.1360/SSPMA2018-00314

优点, 例如: 日冕高温环境下形成的紫外(UV)和极紫外(EUV)谱线因为地球大气的瑞利散射和臭氧层的吸收, 几乎无法在地面进行观测. 此外, 选择适当的轨道, 空间望远镜可以不受(或少受)地球昼夜变化的限制, 从而实现对太阳的不间断观测. 随着高分辨率成像技术(如自适应光学)的发展, 地面望远镜已能克服地球湍流大气对成像分辨率的影响, 因此, 现代地面大口径太阳望远镜更多地承担着对太阳进行高分辨率光学观测的任务. 为显示“地空一体化”观测的必要性, 表1比较了对太阳进行空间和地面光学观测的利弊, 必须说明的是, 这个比较是基于目前技术水平进行的, 内容也并不全面.

2 地面太阳望远镜的核心科学目标

地面大型太阳望远镜的定义与其所处年代和当时的科学目标有关. 目前正在运行的大型地面太阳望远镜泛指口径达到或接近1 m的太阳望远镜. 此外, 还隐含着这样一个标准: 对太阳(光球和色球)观测的空间分辨率应当接近0.1". 基本满足上述条件的地面大型太阳望远镜包括: 美国1.6 m GST, 瑞典1 m SST, 中国1 m NVST以及德国1.5 m Gregor. 这个定义, 尤其是0.1"空间分辨率的要求涉及这些望远镜设计之初的一个重要的科学目标: 当时普遍认为太阳磁场的基本结构(磁元^[9])约为0.1", 这对应了太阳表面约70 km的尺度. 因此, 上述这些太阳望远镜的口径均被设计为1 m左右. 讨论到1 m级太阳望远镜的科学目标时, 还应该提及一架球载的太阳望远镜: 日出球载太阳望远镜

(Sunrise Balloon-Borne Solar Telescope), 简称Sunrise^[10]. 这架望远镜利用氢气球牵引, 可升空至35 km以上高度对太阳大气及其磁场进行高分辨率观测. Sunrise每次升空可连续工作5 d, 至今仅进行过两次顺利的升空, 但其观测数据非常重要, 很好地补充了地面望远镜不易观测的近紫外波段(200–370 nm). 拥有高分辨率成像能力的1 m级望远镜确实看到了一些之前没有观测到的精细结构^[11–13], 但未能如愿观测到所谓的“磁元”, 其观测结果预示着太阳大气中应当存在更小尺度的磁流体结构(图1), 人类需要更大口径的地面望远镜以提高观测的空间分辨率和磁场测量精度.

另一方面, 数值模拟的结果^[14,15]也表明, 太阳光球应当具有显著小于0.1"的磁场超精细结构, 1 m量级的太阳望远镜已经不能分辨这些超精细结构以及它们的演化过程. 例如: “磁元”或微尺度磁流管、可能存在的微尺度磁重联及其能量过程(纳耀斑)、亮点的结构及演化等. 有一种简单的方法可以大致估算太阳光球可能拥有的最小结构, 依据太阳光球的特征参数(包括流场和磁场)计算光球层湍流的耗散尺度, 得到的结果与数值模拟的结论是基本一致的: 太阳光球可以存在10–20 km (0.015"–0.03")的较稳定的超精细结构. 探测这些太阳大气中最基本的磁流体结构及其演化已成为下一代地面大型太阳望远镜的核心科学目标. 与此直接关联的尚待解决和完善的重大和重要科学问题包括: 恒星可观磁场起源、日冕加热机理、局地发电机

表1 空间太阳望远镜与地面大型太阳望远镜的比较
Table 1 Comparisons between space solar telescopes and large ground-based solar telescopes

空间太阳望远镜	地面大口径太阳望远镜
没有地球大气的吸收、散射和湍动效应	无法克服地球大气散射和吸收效应, 可克服大气湍动对成像的影响
可设计为不受昼夜限制	受限于地球昼夜变化
光谱(频谱)覆盖非常宽	可见光、近红外波段
口径较小, 目前最大0.5 m	大口径, 目前1 m量级, 正在研制4–8 m级
受限于载荷, 仪器较小, 功能单一	可配备复杂的多功能大型仪器
设备寿命较短, 不易维护	设备寿命很长, 易于维护

图1 NVST拍摄的太阳光球(706 nm)精细结构
Figure 1 Fine structures of photosphere (Taken by NVST at 706 nm).

过程、太阳活动的触发机制、网络内磁场内禀性质等.

总体来说, 下一代地面大型太阳望远镜的核心任务可以概括为: 高分辨率和高精度. 高分辨率主要指空间分辨率要达到 $0.03''$, 相应地, 时间分辨率也要比目前的 1 m 级太阳望远镜提高近1个量级. 高精度主要指磁场测量精度, 由于太阳表面的磁场测量主要是基于塞曼效应进行的, 所以高精度磁场测量几乎等同于高精度偏振测量. 通常, 下一代地面大型太阳望远镜的偏振测量精度(Accuracy)要好于 10^{-4} . Wang等人^[16]在1995年给出了磁场可测性的公式和判据并指出, 探测网络内磁场, 不仅需要高空间分辨率, 也需要高精度的磁场测量. 如果测量精度不够, 磁通量会成为隐藏的磁通量(Hidden Flux), 没有磁场会被测量到.

由核心科学目标可知, 工作于可见光和近红外波段的下一代大型地面太阳望远镜, 其有效口径应该达到 4 m 以上. 美国正在研制一架 4 m 口径的大型地面太阳望远镜DKIST^[17,18], 预期2019年开始进行试观测. 欧洲正在设计 4 m 口径的大型地面太阳望远镜EST(European Solar Telescope)^[19]. 中国也于2010年正式提出研制 8 m 口径的太阳望远镜: 中国巨型太阳望远镜(Chinese Giant Solar Telescope, CGST)^[20-22](图2). 随着科学目标升级, 大型地面太阳望远镜的定义也发生了变化, 在本文随后的部分, 大型地面太阳望远镜是指口径显著大于 1 m , 空间分辨率和偏振(磁场)测量精度可以满足上述核心科学目标要求的太阳望远镜. 狭义的

定义, 下一代大型地面太阳望远镜是指: 4 m DKIST, 4 m EST以及 8 m CGST.

CGST的核心科学目标可以概括为: 揭示太阳和恒星磁场的起源, 解决日冕(星冕)加热难题, 在太阳爆发机理等重大课题上取得突破, 奠定准确预报灾害性空间天气的观测和理论基础. 对这个高度概括的科学目标有如下解读: CGST将专注于探测太阳大气的基本等离子体结构, 以使人类能理解在湍动等离子体内磁场的产生、凝聚和增强过程. 同时, 还应当配备一台大口径日冕仪, 以便更好地研究太阳大气中能量的存储、传输和释放机制, 并在兆米尺度上, 以较高的精度探测日冕磁场. CGST加上计划研制的地面大口径日冕仪合称为: 先进地基太阳天文台(Advanced Ground-Based Solar Observatory, ASO-G).

3 CGST及其关键技术

与用于夜间观测的天文望远镜相比, 太阳望远镜面临两个关键技术难题: 如何控制望远镜内部因太阳辐射而产生的热量、如何保障磁场测量精度. 人类主要依据塞曼效应进行太阳磁场测量, 也就是说, 通过测量谱线的分裂程度(裂距)及偏振状态(I , Q , U , V)确定光源所处位置的矢量磁场. 因此, 偏振测量精度将决定磁场测量精度. 众所周知, 来自太阳的辐射会在望远镜内部产生剧烈的湍流, 从而造成像质的严重衰减. 在透明度较好的台址, 来自太阳的热功率常高于 1000 W/m^2 . 为了降低湍流对成像的影响, 美国 1.6 m GST和正在研制的 4 m DKIST均采用离轴的格里高利光学系统以获得良好的热控效果, 该系统有效降低了望远镜内部湍流, 然而系统的不对称产生了显著的偏振串扰(Cross Talk), 降低了磁场测量精度. 我国 1 m NVST采用对称真空系统来消除镜筒内部湍流并获得较好的仪器偏振特性, 但真空封窗也会带来偏振串扰, 且因封窗的红外截止特性, 真空望远镜不适合在“塞曼效应”更为显著的红外波段进行磁场测量. 考虑到大口径封窗的制造难度, 超过 1 m 口径的望远镜不宜再设计为真空系统. 德国 1.5 m Gregor和设计中的 4 m EST则采用了敞开式的对称光路辅以复杂的热控系统以期获得更高的偏振测量精度并保持足够的空间分辨率. 由于系统的复杂性, 1.5 m Gregor太阳望远镜的运行状态没能达到设计预期.

图2 8 m CGST现行方案图

Figure 2 The current scheme of 8 m CGST.

3.1 CGST及其技术特点

CGST的原型方案是云南天文台2006年提出的5 m环形太阳望远镜(Ring Solar Telescope, RST)^[23]. 之后在科学目标和技术方案上又融入了国家天文台、紫金山天文台、南京天文光学仪器研究所以及南京大学等多个单位的其他计划和设计方案. 8 m口径的CGST将利用红外谱线对磁场更为敏感的特点, 在近红外波段(如1.083和1.56 μm)观测太阳大气的基本结构. CGST也特别关注中远红外波段, 如10.5和12.3 μm , 希望通过10 μm 附近的磁敏谱线, 以直接测量塞曼裂距的方式测量太阳大气普遍存在的弱磁场. CGST的重要科学指标如表2所示.

CGST的关键技术指标有如下3个: (1) 分辨率口径不小于8 m, 保证在1 μm 波段能获得与4 m口径望远镜相同的空间分辨率; (2) 有效聚光面积不小于20 m^2 , 等效于5 m全镜面的光子收集能力; (3) 偏振测量精度应该达到 2×10^{-4} 量级. CGST能满足以上较高的指标, 主要得益于其特殊的结构. 图3为CGST的两个前期方案, 这两个方案都是外径8 m的对称系统, 具有较高的偏振测量精度. 与全孔径望远镜不同的是, 此类方案可依靠环形孔径(或环形排布的孔径)的中空部分获得优良的热控效果.

图2所示的CGST现行方案是综合考虑了多个系统的特点后优化得到的. 该方案的主光学系统与NVST相近, 仍然是一个修正的格里高利系统, 其主镜是一个接近抛物面的二次曲面, 副镜为一个椭球面, 主镜的外径为8 m, 宽度约2 m, 无渐晕视场为3". 与前期8 m环形太阳望远镜方案不同之处主要是: 将环宽由1 m左右增加至2 m, 主镜的焦比也有适当的增加. CGST现行方案的关键技术指标见表3. 由表2和3可知, 除了

表2 中国巨型太阳望远镜重要科学指标

Table 2 Primary scientific parameters of CGST

参数	数值
图像空间分辨率	0.03" @ 1 μm
磁场测量精度	1 Gs (纵场), 10 Gs (横场)
光谱覆盖范围	0.3–15 μm
成像时间分辨率	常规1 s, 最高可达10 ms
磁场测量时间分辨率	最高可达10 s
有效观测视场	约3'

图3 8 m CGST的两个前期方案

Figure 3 Two early schemes of CGST.

空间分辨率和偏振测量精度要求较高, 其余指标对于一架现代化的大型天文望远镜而言是易于实现的. 因此, 那些与提高空间分辨率及磁场测量精度紧密相关的技术才是CGST的关键技术.

3.2 CGST关键技术研究进展

主光路的对称性对实现高精度偏振测量至关重要. 离轴系统虽然易于进行热控, 但却会带来较为严重的偏振串扰. 式(1)是一个4 m离轴望远镜主副镜系统的偏振串扰矩阵, 显示了在0.5 μm 波段4个斯托克斯参数(I , Q , U , V)之间的串扰:

表3 中国巨型太阳望远镜关键技术指标^{a)}

Table 3 Key technical parameters of CGST

参数	说明
主光学系统	格里高利系统
主镜参数*	有效外径8 m, 宽度约2 m, 焦比1.5
副镜参数*	有效外径2 m
自适应光学系统	1000单元以上的两层共轭系统
高分辨率视场	在1'内, 斯特利尔比接近0.5左右
系统偏振测量精度	全系统偏振测量精度达到 2×10^{-4}
主体结构	地平开放式桁架结构
指向精度	任意方位5"
跟踪精度	任何时候0.3"(rms)
天顶盲区	正负1°

a) *主镜宽度、副镜的外径与热控系统所需空间直接相关.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.0048 & 0 & 0 \\ -0.0048 & 0.9997 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9986 & -0.0474 \\ 0 & 0 & 0.0474 & 0.9982 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由该矩阵可见, U , V 分量之间的串扰已接近5%. 由于偏振测量的复杂性, 即便经过仔细的校准(Calibration)后, 能修正其中的99%已属不易, 该系统的偏振测量精度将很难达到好于 5×10^{-4} 的要求, 这是CGST选择对称主光路的主要原因. 具有对称主光路仅仅是具备了进行高精度磁场测量的基础. 为了确保CGST能达到 10^{-4} 量级的偏振测量精度, CGST项目组已开展与此相关的多项研究工作, 包括: 偏振校正单元设计、后续光路的消偏振结构设计、地球大气及其湍流对电磁波偏振特性的影响等.

CGST的热控压力非常大. 现行设计方案的最大聚光面积高达 38 m^2 , 以 1000 W/m^2 估算, 入射到主镜的最大热功率为 38000 W . 这些热功率将在F1焦点(主镜焦点, 图4)汇聚到直径约 110 mm 的圆内, 若采取90%反射, 10%吸收的热光阑方案, 望远镜主焦热控还要处理 3800 W 热功率且热控装置温度不能显著超出气温(温差最好小于 10°C). 云南天文台光电实验室、中国科学院光电技术研究所(简称光电所(成都))以及中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所(简称南京天光所)均对此开展了数值模拟及大量实验, 在主焦热控方面取得显著进展. 光电所成功设计了用于 1.8 m 太阳望远镜^[24]的F1热光阑及热控系统, 分析了其对成像质量的影响, 完成了该系统的实测实验^[25]. 南京天光所也成功设计了一个 2.5 m 太阳望远镜的F1热光阑并完成了模拟和实验. 通过CGST的 $3'$ 视场光阑进入后续光路的热功率仍然大于 300 W . 后续仪器, 尤其是位于F2焦点的偏振校准单元仍然需要再次进行热量控制.

图 4 CGST光学设计
Figure 4 Optical layout of CGST.

CGST的主镜也需要进行精密热控, 若反射率为90%, 主镜将吸收 3800 W 的热功率. 虽然主镜面积较大, 但为了保证不形成显著的镜面视宁度(Mirror Seeing), 热量控制的要求比F1要高. 一个较严格的控制目标, 是镜面与环境空气的温差应当控制在 1°C 以内.

自适应光学是CGST实现高分辨率观测的基础. 口径 1 m 的NVST确实可以不依靠自适应光学系统就得到逼近衍射极限的高分辨率图像(图1)^[26,27], 得益于抚仙湖太阳观测站优良的视宁度^[28], 仅用斑点掩模法(Speckle Masking)和选帧位移叠加法(Shift and Add), 就可对NVST约50%以上的观测数据实现高分辨率重构. 但如果没有良好的自适应光学系统, 口径 8 m 的CGST是无法开展高分辨率观测的. 当望远镜的有效口径增大时, 空间频率的冗余量随聚光面积的增加而相应增大. 在大气湍流的影响下, 空间频率的冗余将显著降低信号的信噪比. 按照目前方案, CGST的有效面积约为 38 m^2 , 是NVST有效面积的50倍, 仅使用传统的统计重建方法已不能实现高分辨率成像. 目前, NVST的151单元自适应光学系统已经投入试观测^[29], 为CGST千单元自适应光学系统的设计研制提供了较好的基础. 传统的单层自适应光学系统并不能满足CGST对高分辨率观测视场(表3)的要求, 因为受限于等晕区(Isoplanatic Area), 单层自适应系统仅有不到10个角秒的有效改正视场. 为此, 云南天文台与光电所(成都)合作开展了多层共轭自适应光学系统(MCAO)的多项研究工作^[30], 已在NVST完成了近地面层自适应光学系统(GLAO)的实验并完成了大气湍流分层测量实验, 即将开始进行两层MCAO系统的装调工作. 必须说明的是, 即便具备较好的自适应光学系统, 仍然需要对输出信号进行处理才能得到最终的高分辨率数据. 因此, 以斑点掩模法和选帧位移叠加法为代表的高分辨率图像重构算法一直是CGST所需的关键技术之一.

除了在上述关键技术领域取得较大进展, 项目组还对CGST的光学系统(含主动光学)、机械系统、控制系统(含远程观测)、海量数据采集系统以及仪器系统等多个系统及其相关技术开展了较深入的研究工作并取得预期进展^[31-34].

4 CGST主要观测仪器

CGST的仪器主要分为3类: 第一类是高分辨率成

像仪器及二维光谱仪, 主要依靠双折射滤光器及法珀(F-P)干涉仪沿色散方向进行扫描并得到单色像和二维光谱; 第二类是高精度高分辨率的磁场(偏振)测量仪器; 第三类是基于光栅的场积分光谱仪.

多通道高分辨率成像系统(MHIS)是CGST的第一批仪器之一, 具有9个通道, 可对太阳的光球及色球进行多波段高分辨率成像, 主要参数见表4. 工作波段中的色球波段包括但不限于: Ca II, H α , He I单色像, 覆盖了从低至高的色球层面. 光球的窄带连续谱通道是G-band, TiO和1.56 μm , 分别位于可见光光谱的两端和近红外波段. 除了典型的色球谱线和光球通道, MHIS还将通过两台低色散场积分光谱仪(IFU)实现对太阳光球精细结构的高分辨率测光, 为研究等离子体基本结构的辐射特性提供完备的数据, 这将有助于实现CGST的核心科学目标.

近红外磁像仪(NIM)也是CGST的第一批仪器之一. NIM将利用1.56 μm 附近的铁线(Fe I)进行光球的二维磁场测量. 滤光器选用级联F-P干涉仪, 偏振分析器采用液晶调制, 纵向磁场和横向磁场测量精度的目标值均为10 Gs. NIM的空间分辨率要好于0.05", 完成一次矢量磁场测量的时间应当小于10 s. NIM和MHIS是探测太阳光球基本结构, 实现CGST核心科学目标的主要科学仪器. 图5为NVST大色散光谱仪在1.56 μm 波段拍摄的黑子光谱, 可见由黑子磁场导致的塞曼分裂.

在10 μm 附近的磁场测量设备也是CGST的重要仪器. 由于CGST具有8 m的分辨率口径, 即使到了10 μm 的中红外波段, 空间分辨率也将达到约0.3". 该系统将采用旋转波片的偏振分析器和红外傅里叶光谱

图 5 NVST拍摄的黑子光谱(1.56 μm)
Figure 5 Spectrum of sunspot (Taken by NVST at 1.56 μm).

仪(图6)进行磁场测量, 所选择的谱线是12.3 μm 镁线. 这条线可以提供足够宽的塞曼裂距来直接测量温度极小区的磁场. 温度极小区位于光球层的上部, 是太阳大气温度反常上升的拐点, 也是磁能传输的重要环节. 国家天文台怀柔太阳观测站设计了该系统并将在一台1 m口径的离轴望远镜上进行实测.

CGST还将配备其他多台(套)先进的仪器, 包括: 光纤阵列光谱仪、多通道二维实时光谱仪以及上文未提及的位于其他波段的成像及光谱仪器, 例如基于极窄波段滤光器的成像仪器^[35].

5 CGST样机简介

美国设计研制4 m DKIST的原型系统是位于大熊湖的1.6 m GST, 这两架太阳望远镜拥有几乎相同的设计理念和相似的主体结构: 开放式离轴系统. 欧洲4 m EST的原型系统是位于加纳利群岛的1.5 m Gregor, 这两架望远镜均采用开放式对称系统, 设计和研制思路并未发生较大变化. CGST的多项关键技术, 包括自适应光学、偏振校准及磁场测量技术均在我国1 m

表 4 CGST多通道高分辨率成像系统参数表

Table 4 Parameters of multi-channel high resolution image system

波段 (Å)	带宽 (Å)	备注
6562.8	0.1, ± 5 扫描	级联F-P
3968, 3933	0.25, ± 5 扫描	Lyot滤光器
8542	0.25, ± 10 扫描	Lyot滤光器
10830	0.2, ± 10 扫描	级联F-P
4300	5, 10 可选	干涉滤光片
7058	5, 10 可选	干涉滤光片
15650	10, 30 可选	干涉滤光片
4000–10000	1	低色散IFU
10000–25000	2	低色散IFU

图 6 用于红外磁场测量的傅里叶光谱仪
Figure 6 FTIR for infrared magnetic field measurement.

NVST上开展了预先研究和实验,但由于NVST是典型的真空系统,与CGST将采用的开放式对称结构具有本质的区别.有必要专门研制一台样机以完成CGST主体结构及基本功能的测试.

云南天文台自2016年开始研制一台2 m口径的环形太阳望远镜(Ring Solar Telescope, RST).作为CGST的原型样机,这台望远镜的光学系统基本就是CGST光学设计的缩样.为了最大限度降低研制难度和成本,2 m RST结构比较简单(图7),不再配备专门的仪器平台.目前,该望远镜的光学系统已进入加工阶段(图8),仪器系统和结构系统也在设计研制之中,望远镜将安装在抚仙湖太阳观测站.虽然是一台样机,但2 m RST的空间分辨率还是按照衍射极限进行设计的.由于没有折轴系统和水平仪器平台,简化的仪器系统只能直接安装在副镜焦点(F2)上.如果仅从样机研制的角度出发,项目组最希望测试的是开放式环形望远镜的热控技术和成像效果.然而,完全对称的光学系统为高精度磁场测量带来了便利,2 m RST可能将具备高于1 m NVST的磁场测量精度.事实上,2 m RST确实承担着比较单一的科学目标:精确测量太阳活动区磁场.

6 CGST选址及其他进展

为了推进CGST立项,我国太阳物理^[36]界召开了多次CGST科学目标及关键技术研讨会,成立了专家委员会、科学委员会及项目推进委员会.项目推进委员会又下设了科学目标组、望远镜方案组、仪器设计组、选址组等多个工作组.科学目标组已基本完成CGST科学目标征集及汇总的工作计划,望远镜方案组和仪器设计组也在关键技术预研、望远镜及仪器概念设计方面取得了较大的进展.

CGST的选址工作于2010年正式开始实施,一个由云南天文台、紫金山天文台及国家天文台联合组成的

图 7 2 m 环形太阳望远镜及基墩
Figure 7 2 m RST and its installation pier.

图 8 正在抛光的2 m RST主镜
Figure 8 The primary mirror of 2 m RST is being polished.

西部太阳选址队在川滇藏交界处的高原地区以及西藏两个候选区域进行了为期5年的天气气象参数测量^[37,38].选址工作于2015年基本完成,勘选出川西稻城无名山和西藏纳木错两个备选址点.其中川西稻城无名山址点满足CGST建设及运行所需要的天文和气象指标.

致谢 感谢太阳选址团队为CGST的设计和预研提供了重要的参数和依据,感谢在CGST科学目标研讨中提出意见和建议的学者,特别感谢汪景琇教授.

参考文献

- 1 Kosugi T, Matsuzaki K, Sakao T, et al. The Hinode (Solar-B) mission: An overview. *Sol Phys*, 2007, 243: 3–17

- 2 Kaiser M L, Kucera T A, Davila J M, et al. The STEREO mission: An introduction. *Space Sci Rev*, 2008, 136: 5–16
- 3 Pesnell W D, Thompson B J, Chamberlin P C. The solar dynamics observatory (SDO). *Sol Phys*, 2012, 275: 3–15
- 4 De Pontieu B, Title A M, Lemen J R, et al. The interface region imaging spectrograph (IRIS). *Sol Phys*, 2014, 289: 2733–2779, arXiv: [1401.2491](#)
- 5 Goode P R, Cao W, BBSO Team. The 1.6 m off-axis new solar telescope (NST) in big bear. *Proc SPIE*, 2012, 8444: 844403
- 6 Scharmer G B, Bjelksjo K, Korhonen T K, et al. The 1-meter Swedish solar telescope. *Proc SPIE*, 2003, 4853: 341–350
- 7 Liu Z, Xu J, Gu B Z, et al. New vacuum solar telescope and observations with high resolution. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 705–718
- 8 Schmidt W, von der Lühe O, Volkmer R, et al. The 1.5 meter solar telescope GREGOR. *Astron Nachr*, 2012, 333: 796–809
- 9 Berger T E, van der Voort L H M R, Löfdahl M G, et al. Solar magnetic elements at 0".1 resolution. *Astron Astrophys*, 2004, 428: 613–628
- 10 Barthol P, Gandorfer A, Solanki S K, et al. The Sunrise mission. *Sol Phys*, 2011, 268: 1–34, arXiv: [1009.2689](#)
- 11 Ji H, Cao W, Goode P R. Observation of ultrafine channels of solar corona heating. *Astrophys J*, 2012, 750: L25
- 12 Yang S, Zhang J, Xiang Y. Magnetic reconnection between small-scale loops observed with the new vacuum solar telescope. *Astrophys J*, 2014, 798: L11, arXiv: [1412.1314](#)
- 13 Xue Z, Yan X, Cheng X, et al. Observing the release of twist by magnetic reconnection in a solar filament eruption. *Nat Commun*, 2016, 7: 11837
- 14 Stein R F, Nordlund A. Solar small-scale magnetoconvection. *Astrophys J*, 2006, 642: 1246–1255
- 15 Stein R F, Lagerfjård A, Nordlund Å, et al. Solar flux emergence simulations. *Sol Phys*, 2011, 268: 271–282, arXiv: [0912.4938](#)
- 16 Wang J, Wang H, Tang F, et al. Flux distribution of solar intranetwork magnetic fields. *Sol Phys*, 1995, 160: 277–288
- 17 Keil S L, Rimmele T R, Wagner J, et al. Advanced technology solar telescope: A status report. *Astron Nachr*, 2010, 331: 609–614
- 18 Warner M, Rimmele T, Pillet V M. Construction update of the Daniel K. Inouye Solar Telescope project. *Proc SPIE*, 2018, 10700: 107000V
- 19 Matthews S A, Collados M, Mathioudakis M, et al. The European Solar Telescope (EST). *Proc SPIE*, 2016, 9908: 990809-1
- 20 Liu Z, Deng Y Y, Jin Z Y, et al. Introduction to the Chinese Giant Solar Telescope. *Proc SPIE*, 2012, 8444: 844405
- 21 Liu Z, Ji H S, Jin Z Y, et al. Science cases in the integrated modelling of Chinese Giant Solar Telescope. *Proc SPIE*, 2016, 10012: 1001204
- 22 Liu Z, Deng Y Y, Ji H S, et al. Ground-based giant solar telescope of China (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42: 1282–1291 [刘忠, 邓元勇, 季海生, 等. 中国地基大太阳望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 1282–1291]
- 23 Liu Z, Jin Z Y, Lin J, et al. Introduction to the 30 m ringy interferometric telescope (in Chinese). *Astron Res Tech*, 2006, 3: 64–72 [刘忠, 金振宇, 林京, 等. 30米环形干涉望远镜. 天文研究与技术, 2006, 3: 64–72]
- 24 Rao C, Gu N, Zhu L, et al. 1.8-m solar telescope in China: Chinese Large Solar Telescope. *J Astron Telesc Instrum Syst*, 2015, 1: 024001
- 25 Liu Y, Gu N, Rao C. Quantitative evaluation on internal seeing induced by heat-stop of solar telescope. *Opt Express*, 2015, 23: 19980
- 26 Zhong L, Beckers J M. Comparative solar seeing and scintillation studies at the Fuxian Lake solar station. *Sol Phys*, 2001, 198: 197–209
- 27 Liu Y, Xiang Y, Erdélyi R, et al. Studies of isolated and non-isolated photospheric bright points in an active region observed by the new vacuum solar telescope. *Astrophys J*, 2018, 856: 17
- 28 Yan X L, Xue Z K, Pan G M, et al. The formation and magnetic structures of active-region filaments observed by NVST, SDO, and Hinode. *Astrophys J Suppl Ser*, 2015, 219: 17
- 29 Rao C, Zhu L, Rao X, et al. Instrument description and performance evaluation of a high-order adaptive optics system for the 1 m new vacuum solar telescope at Fuxian solar observatory. *Astrophys J*, 2016, 833: 210
- 30 Rao C H, Zhang L Q, Kong L, et al. First light of solar multi-conjugate adaptive optics at the 1-m new vacuum solar telescope. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 089621
- 31 Dai Y C, Yang D H, Zago L, et al. Dynamic analysis of active control system for CGST. *Proc SPIE*, 2012, 8449: 84491A
- 32 Dai Y C, Jin Z Y. Analysis of wavefront reconstruction in 8 meter ring solar telescope. *Proc SPIE*, 2016, 9909: 990940
- 33 Liu Z, Jin Z Y, Yuan S, et al. The progresses of Chinese Giant Solar Telescope. *Proc SPIE*, 2014, 9145: 914528
- 34 Yuan S, Fu Y, Jin Z Y. Polarization modeling for the main optics of Chinese Giant Solar Telescope. *Proc SPIE*, 2016, 10012: 1001205
- 35 Yang Y, Cheng X W, Dou X K, et al. Hyperspectral solar observation based on the sodium atomic filter (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 069602 [杨勇, 程学武, 窦贤康, 等. 钠原子滤光的太阳高光谱分辨成像观测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 069602]
- 36 Fang C. Recent progress of solar physics research in China. *Res Astron Astrophys*, 2011, 11: 1377–1402
- 37 Liu Y, Zhao L. The preliminary analysis of sunshine durations with meteorological data for the Chinese Giant Solar Telescope site survey. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 434: 1674–1680
- 38 Song T F, Wen Y M, Liu Y, et al. Automatic solar seeing observations at Mt. Wumingshan in western China. *Sol Phys*, 2018, 293: 37

Chinese Giant Solar Telescope

LIU Zhong^{1,2*}, DENG YuanYong³, YANG DeHua⁴, JI HaiSheng⁵,
JIN ZhenYu¹ & LIN Jun¹

¹ Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China;

² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

⁴ College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

⁵ Purple Mountain Observatory, Chinese Academic of Sciences, Nanjing 210034, China

Developing a next generation ground-based large solar telescope is the consensus of Chinese solar research community. Compared with the current one-meter-scale solar telescopes, next generation large solar telescopes are more focused on fundamental issues of solar physics and stellar physics. Therefore, the resolving power and measuring accuracy of magnetic field are required to be higher. The Chinese Giant Solar Telescope (CGST) is a reflecting telescope with a diameter of 8 m and a light-collecting area of not less than 20 m². CGST is expected to detect the fundamental structures and the evolution of the solar atmosphere. It will provide detailed observational evidences for the final solution to fundamental physical problems such as the origin of stellar magnetic field and corona heating, providing the necessary theoretical and observational basis for accurate space weather prediction.

solar physics, solar telescope, high resolution, magnetic field

PACS: 96.60.-j, 95.55.-n, 95.55.Ev

doi: [10.1360/SSPMA2018-00314](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00314)