

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.z1.14

8 m 环形太阳望远镜关键技术的研究进展

戴懿纯

(中国科学院 云南天文台, 昆明 650011)

摘要: 中国巨型太阳望远镜 (Chinese Giant Solar Telescope, CGST) 是中国太阳物理界共同推进的中国下一代红外和光学望远镜计划, 8 m 的环形太阳望远镜 (Ring Solar Telescope, RST) 是其中的一个重要方案。RST 的一个重要特征是其主镜为外径 8 m, 环宽 1 m 的环带, 环形主镜中空和对称的结构为太阳望远镜的热控和高精度偏振测量带来了便利。作为 8 m 主镜的地基望远镜, 主动光学和自适应光学是确保其实现科学目标的关键技术。介绍了对 RST 环形主镜主动控制, 包括主动控制结构, 高精度倾斜探测, 控制系统动态性能分析等方面的研究进展, 以及在环形孔径自适应波前重构研究方面取得的进展, 为 RST 主动光学和自适应光学的实施提供了技术方案和技术指标。

关键词: 太阳望远镜; 环形孔径; 拼接镜面; 主动光学; 动态分析; 自适应光学

中图分类号: P111.41

文献标识码: A

1 引 言

中国巨型太阳望远镜 (Chinese Giant Solar Telescope, CGST) 是中国太阳物理界共同推进的中国下一代红外和光学望远镜计划^[1]。在目前的设计和研制阶段, CGST 有几个备选的方案, 其中较具有代表性的是 8 m 环形太阳望远镜 (Ring Solar Telescope, RST) 方案。RST 主要的特点是, 主镜为外径 8 m, 环宽 1 m 的环带, 其有效聚光面积为 22 m^2 , 等效于 5 m 口径的全孔径望远镜。其主要科学目标是实现太阳大气各层次的磁场和流场精细结构及其高时空分辨率演化过程的测量, 将在 $1 \mu\text{m}$ 波段实现太阳表面 20 km 精细结构的观测和研究。RST 基本的结构设计和光学设计如图 1 所示。环形望远镜作为太阳望远镜具有的优势在于: (1) 环形孔径具有全频率覆盖 (从 0 频至外径限制的最高频) 的特性, 并且比具有相同聚光面积的全孔径望远镜拥有更高的空间分辨率, 这意味着 RST 有能力在近红外波段观测到 4 级太阳望远镜在可见光波段才能观测到的太阳精细结构; (2) 由于主镜是环形的, RST 的副镜不在入射光路中, 仅有很小一部分副镜支架位于入射光路里, 这有利于红外观测; (3) 由于

资助项目: 国家自然科学基金 (11303090)

通讯作者: 戴懿纯, daiyichun@ynao.ac.cn

主焦点 (F1) 离入射光路和副镜 (M2) 的反射光路有足够的距离, RST 易于进行热光阑的热控设计; (4) 环形的对称结构消除了 (对消了) 光波各偏振态之间的交扰 (CrossTalk), 利于高精度的磁场探测与反演。而环形的结构也给 RST 主动光学和自适应光学的实现带来了挑战: 首先, 采用拼接镜面是 RST 主镜重点考虑的方案, 但是采用常规的探测方式, 会出现自由度探测不足的问题, 无法实现主动光学的闭环控制; 其二, 为了改善圆顶视宁度和镜面视宁度对像质的影响, RST 倾向采用开放式的结构进行开放式观测, RST 口径比现有和在建的太阳望远镜大得多, 而 RST 没有圆顶的保护, 因此风对 RST 的影响可能是致命的; 其三, 环宽如此窄的环形孔径是否能够实现波前的重构。结合目前的光学设计和望远镜结构设计, 本文将介绍我们在 RST 主动光学和自适应光学研究方面进行的探索和取得的进展。

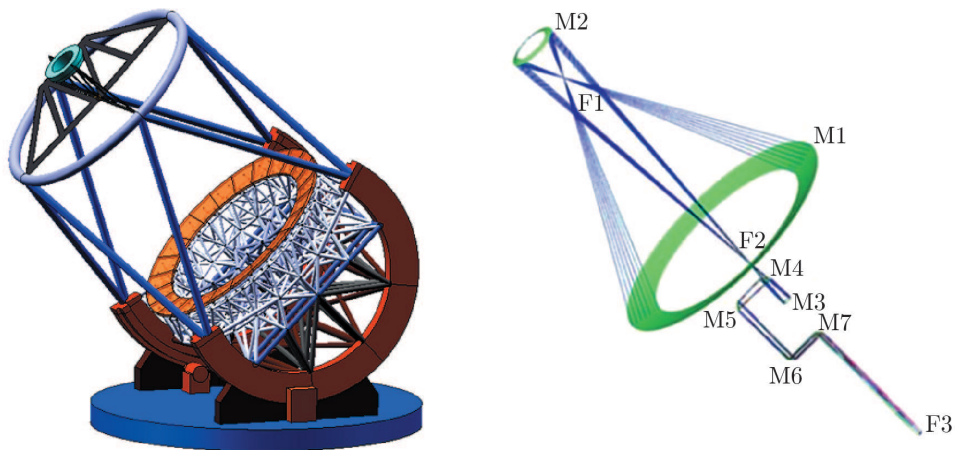


图 1 8 m RST 的 3D 模型和光学设计

2 RST 主动光学研究进展

主动光学技术是 8 m RST 实现的必要途径。RST 主镜有两种构成方案: (1) 采用一个整体的环形薄镜面。这个方案的面形探测和调整技术相对比较成熟, 目前正在建设的 DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope, 前身为 Advanced Technology Solar Telescope, ATST) 就采用了薄镜面主动调整的方案 (其主镜为 4 260 mm, 厚度为 73.66 mm, 使用了 120 个力促动器来调整面形), 由于其在开放式环境中的抗风性能较差, EST (European Solar Telescope) 计划采用中空的轻量化镜面 (其主镜为 4 200 mm, 厚度为 250 mm)。 (2) 采用子镜拼接的方式, 挑战在 $1 \mu\text{m}$ 波长上分离子镜的共相, 使 RST 成为世界上第一个拼接镜面的太阳望远镜。而作为采用环形拼接镜面的太阳望远镜, 要实现在 $1 \mu\text{m}$ 波长上的衍射极限成像, 其主动光学会面临以下两个主要难题, 这也是我们要重点解决的问题。

2.1 环形拼接镜面望远镜主动控制的结构

拼接镜面主动控制基本原理是采用刚性子镜拼接望远镜, 通过实时探测和调整子镜三个面外自由度, piston (子镜沿着法线的前后平移), tip 和 tilt (子镜绕平面内两个轴的旋转) 以

避免望远镜本身受到重力、温度和风等环境影响,使望远镜始终保持良好的像质。目前以 Keck 望远镜为代表的拼接镜面望远镜大多采用六角形子镜拼接,利用六角形子镜天然的自锁特性,在相邻子镜边缘放置传感器的形式,通过探测子镜边缘高度的变化反演出子镜 piston, tip 和 tilt 的变化。但是 RST 是环形主镜,为了更好地形成一个环, RST 计划采用 24 个面积约为 1 m^2 的梯形子镜拼接而成。这种拼接方式中,相邻子镜的边彼此平行,因此采用边缘探测的方式,只能反映子镜 piston 和径向倾斜两个自由度的变化,子镜圆周方向的倾斜无法获取,导致主动光学的闭环控制无法实现。为此我们从探测自由度的选择、拼接方式(单圈子镜拼接,两圈子镜拼接,箭头型子镜拼接等)、子镜加工的难易、误差传播量级等方面综合考虑了多种方案,最后选用了采用 24 个梯形子镜拼接,采用子镜边缘探测和子镜圆周方向倾斜探测的控制结构。针对这种控制结构,我们研究了两种探测精度匹配、误差传播对主动控制效果的影响,研究结果显示,在边缘探测精度为 5 nm , 倾斜探测精度为 0.01 arcsec 时, RST 能够实现在 $1 \mu\text{m}$ 波长上的衍射极限成像。图 2 给出了在上述探测精度下 RST 拼接主镜在不同波长上的模传递函数以及在 $1 \mu\text{m}$ 波长的点扩展函数。而要在波长更短的可见光实现衍射极限成像,倾斜探测的精度应该达到 0.004 arcsec 。

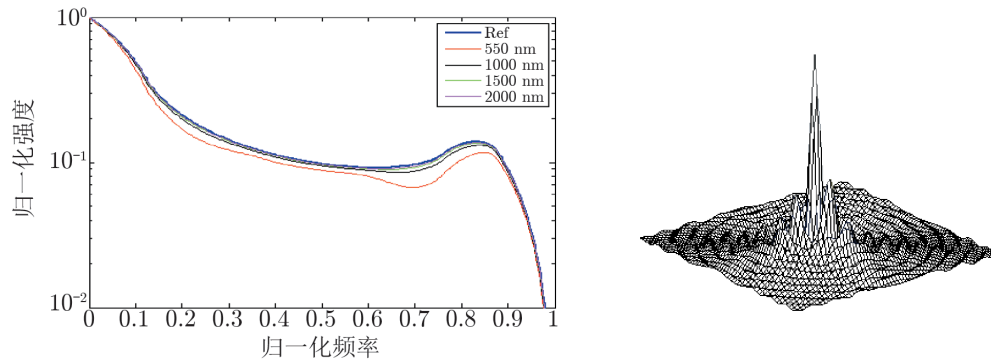


图 2 RST 主镜在不同波长上的模传递函数(左)以及在 $1 \mu\text{m}$ 波长的点扩展函数(右)

根据上述 RST 主动控制探测精度的技术要求,我们正在研究高精度和高频率的倾斜测量方案。采用机电型探测器往往精度不足,光学型探测会受到大气湍流的影响,提高精度往往需要增加曝光时间。袁沭博士研究了一个内光源的波前探测器,子瞳位置以及风速、风向对探测精度的影响^[2]。金振宇研究员最近提出了一种子镜边缘的 Shack-Hartmann (S-H) 探测方法,采用类似自适应的方式将子镜倾斜从波前信息中提取出来,该方法有望在不显著增加曝光时间的前提下有效地消除湍流大气干扰导致的低阶像差对 tip/tilt 测量的影响。

2.2 环境对拼接镜面太阳望远镜主动控制的影响

为了减少圆顶和镜面视宁度对像质的破坏,大口径太阳望远镜通常采用开放式的观测。但是开放式的工作环境对采用拼接镜面的 RST 可能会造成破坏性影响。首先,随机风载将直接作用在拼接主镜上,引起子镜位置的偏差,从而导致主镜像质的衰减,比相同口径量级具有圆顶保护的恒星拼接望远镜(如 Keck 望远镜,其圆顶能够将风的影响降低一个数量级)严

重得多。其二，风对望远镜的影响随着望远镜口径的增大而增强。DKIST 因为抗风性能差，因此采用了具有众多通风设计的圆顶。RST 的口径比 DKIST 大一倍，风对其的影响是不容小觑的。此外，大尺度结构动态与主动控制系统的相互作用会限制主动控制的带宽，从而影响主动控制系统对随机风压的改正效果。事实上，上述问题糅合在一起，迫切需要对 RST 拼接主镜在随机风压影响下的动态性能进行模拟，获得定量的评估数据，为望远镜结构的进一步优化，风挡设计和控制系统设计甚至主镜方案的选择提供依据。为此，我们建立了 RST 主动光学机电集成仿真平台，开展了随机风载对 RST 主镜影响的集成仿真研究。RST 集成建模的过程，RST 结构模型的模式分析详见文献 [3]。

根据 1 m 新真空太阳望远镜 (New Vacuum Solar Telescope, NVST) 风速监测的记录，我们分别模拟了 RST 拼接主镜在平均风速为 2 m/s 和 6 m/s 两种典型风压作用下主动控制开环和闭环的响应。模拟过程中我们采用了简单的积分控制器，发现主动控制带宽受到望远镜结构动态影响，增加控制系统的带宽会导致与子镜/促动器系统的 tip 谐振频率 (24 Hz) 相近模式的不稳定。通过计算模式回路的增益，主动控制的理论带宽上限为 0.55 Hz，而从实际的模拟结果看，为了确保控制的稳定性，带宽不能高于 0.3 Hz。表 1 给出了采用 0.3 Hz 的积分控制器主动控制实施前后每个子镜的平均误差值和平均的 RMS 值。图 3 显示了主动控制实施前后响应的主镜面形。模拟结果表明，在 2 m/s 的平均风速下，0.3 Hz 带宽的主动控制能够改正大部分风载的影响；而 0.3 Hz 的主动控制对平均风速 6 m/s 的风载几乎无效。因此，开放式观测必须为望远镜设计合理的风挡，并且需要更加刚性的结构支撑。

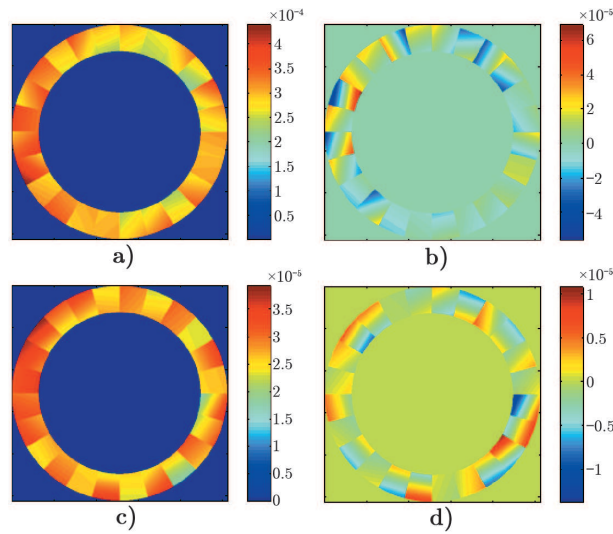
表 1 拼接镜面主动控制实施前后子镜的平均误差和平均 RMS 误差

	平均风速 2 m/s 时		平均风速 6 m/s 时	
	平均误差/nm	平均 RMS 误差/nm	平均误差/nm	平均 RMS 误差/nm
开环响应	293	33	2 746	400
闭环响应	4	21	39	442

3 RST 自适应光学研究进展

波前探测和重构是自适应光学的基础，RST 自适应光学的难点在于环形孔径的波前重构。我们在环形孔径上开展了基于 S-H 的波前探测和重构方法研究。根据波前的表达方式，波前重构有两种基本方式：模式法和区域法。模式法是将孔径上的波前用一系列正交的基(模式)函数和表示，通过测量的波前斜率反演出基函数的系数值，从而得到整体波前的相位。区域法是通过测量子孔径中的波前斜率反演出子孔径中的波前相位，从而得到整体波前的相位。

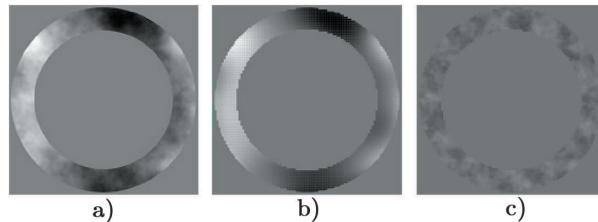
RST 主镜的遮挡比(环宽与半径的比值)为 0.75，因此需要采用在环形孔径上正交的遮挡比为 0.75 的环形 Zernike 多项式^[4]来对 RST 进行波前重构。模式法在环形孔径波前重构中会面临如下问题：首先，在 S-H 探测重构网络中与波前倾斜对应的是模式的导数函数，模式正交并不意味着其导数也正交；其二，环形 Zernike 多项式是通过递归的方式获得，高阶



注: a) 平均风速为 2 m/s 时主镜在开环状态下的面形; b) 平均风速为 2 m/s 时主镜在闭环状态下的面形; c) 平均风速为 6 m/s 时主镜在开环状态下的面形; d) 平均风速为 6 m/s 时主镜在闭环状态下的面形 (单位为 mm)。

图 3 拼接镜面主动控制实施前后主镜的面形

模式不可避免存在较大的累积误差, 其对应的导数函数也会有误差。由此引起的模式误差和交扰限制了模式法重构的效果。RST 采用模式法进行波前重构只能较好地重构出随机波前的低阶部分。图 4 是假设大气视宁度参数为 10 cm, 采用 8 cm 方形探测子孔径, 对某随机大气相位屏进行不包括 piston 在内的前 65 项模式重构的结果。我们还统计了探测噪声对模式重构精度的影响, 结果显示当探测噪声不大于 0.1", RST 前 65 项波前重构的剩余误差为 200 nm。

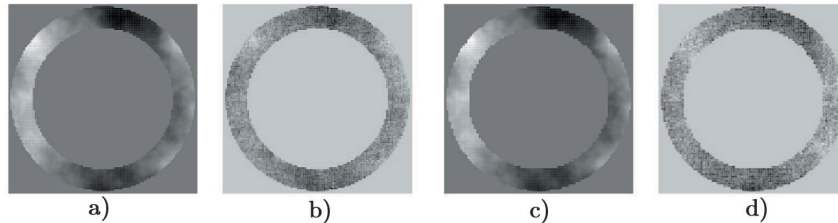


注: a) 大气视宁度参数为 10 cm 的某随机相位屏; b) 模式重构的相位屏; c) 重构后的波前剩余误差。

图 4 环形波前采用 8 cm 探测子孔径, 不包括 piston 在内的前 65 项模式重构结果

区域法重构没有对孔径形状的特殊限制, 我们模拟了在相同大气条件下, 采用不同子孔径排布形式、不同探测精度时环形孔径区域法波前重构的效果。结果显示, 采用方形子孔径排布, 探测子孔径为 8 cm 或者 10 cm, 探测噪声不大于 0.1", 环形波前区域法重构的剩余误差小于 70 nm。这个结果也表明采用上述方法能够满足 RST 在 1 μm 波长上衍射极限成像的要求。图 5 给出了 8 cm 和 10 cm 方形子孔径重构网络对图 4 中的相位屏进行区域重构的结

果。我们对区域法重构的结果进行了进一步的模式分析,发现其中包含较大的低阶像差,这些剩余低阶像差是由于目前区域重构的算法特性造成的,我们还将进一步探索能够在可见光实现衍射极限成像的波前重构算法。



注: a) 为 8cm 子孔径重构的相位屏; b) 为 8cm 子孔径重构的剩余波前; c) 为 10 cm 子孔径重构的相位屏; d) 为 10 cm 子孔径重构的剩余波前。

图 5 采用 8 cm 和 10 cm 探测子孔径, 区域法重构图 4 左侧随机相位屏的结果

4 讨论和展望

从目前的研究结果看,本文所述的环形拼接镜面主动光学和环形孔径的波前重构方法使 RST 有望达成在 $1\ \mu\text{m}$ 波长上实现衍射极限成像的目标,但是风险和难度也更明确地凸显出来。在开放式的观测模式下,风对 RST 具有非常不利的影响。事实上,我们也研究了随机风压对整体薄镜面(镜面厚度为 150 mm)主动控制方案的影响^[5],面对平均风速 6 m/s 的风压,薄镜面主动光学也基本失效,只是由于本身镜面连续,风造成的影响体现为低阶像差,如果没有超出自适应光学的捕捉范围,这些误差可能被自适应光学改正。然而,一个合理的风挡是 RST 必须采用的技术手段,接下来我们会加入风挡的情况进行分析和研究。主镜方案的选择还需要结合镜面加工、运输、支撑和镀膜等方面进行综合评估。此外,我们还将扩展现有的望远镜主动光学机电仿真平台,将光学建模部分包括进来,完成对 RST 副镜以及整体指向跟踪的设计和性能分析。最后将主动光学和自适应光学结合起来对 RST 整体的性能进行更全面的分析和评估,为 RST 方案的确立以及 CGST 在国家大科学工程中的立项提供重要的参考。

参考文献:

- [1] 刘忠, 邓元勇, 季海生, 等. 中国科学, 物理学力学天文学, 2012, 12: 1282
- [2] 袁沐, 金振宇, 李银柱, 等. 光学学报, 2012, 12: 26
- [3] Dai Y C, Yang D H, Zago L, et al. Proc SPIE, 2012, 8449: 84491A
- [4] Mahajan V N. J. Opt.Soc.Am, 1981, 71: 75
- [5] Dai Y C, Yang D H, Jin Z Y, et al. Proc SPIE, 2014, 9145: 914550

Research Progress on the Key Technologies of 8-m Ring Solar Telescope

DAI Yi-chun

(Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

Abstract: Chinese Giant Solar Telescope (CGST) is the next generation infrared and optical telescope of China, which is proposed by Yunnan Observatories CAS, National Astronomical Observatories CAS, Purple Mountain Observatory CAS, Nanjing University, Nanjing Institute of Astronomical Optical Technology and Beijing Normal University. 8-m Ring Solar Telescope (RST) is one of the important candidate schemes of CGST. The unique feature of RST is that its primary mirror is a ring of 8 meters in diameter and 1 meter in width, and the hollow and symmetric structure facilitates the thermal control and polarization measurement. As an 8-m ground based solar telescope, active optics and adaptive optics are crucial technologies to ensure high spatial image quality of the science requirements of RST. Research progress on active optics and adaptive optics of RST are introduced in this paper, which include active control structure, high precision tip measurement, dynamic analysis of active control system and wavefront reconstruction in ring aperture. Technical requirements for active optics and adaptive optics implementations are suggested at last.

Key words: solar telescope; ring aperture; segmented mirror; active optics; dynamic analysis; adaptive optics