

文章编号 2095-1531(2020)06-1194-15

地基大口径拼接镜面主动控制技术综述

范文强, 王志臣, 陈宝刚, 李洪文, 陈涛, 安其昌*, 范磊
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要: 拼接镜面技术是光学合成孔径望远镜的三种实现方式之一, 是未来大口径望远镜的重要研究方向。由于拼接镜面主动控制系统直接影响拼接镜面等效大口径镜面的光学性能, 本文着眼于地基大口径望远镜的拼接镜面主动控制技术, 由地基拼接镜面望远镜的发展过程展开, 阐述拼接镜面主动控制系统的主要结构, 对国内外拼接镜面主动控制系统发展概况进行分析和总结。归纳了拼接镜面主动控制系统实现主动调整和主动保持的关键技术, 明确了深度学习理论在闭环控制, 共相检测与校正和系统级仿真建模技术中的逐步应用和未来发展方向, 为国内下一代地基大口径望远镜拼接镜面的控制方案设计提供相应的指导。

关键词: 地基望远镜; 拼接镜面; 主动控制系统; 主动调整; 主动保持

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2020-0032

Review of the active control technology of large aperture ground telescopes with segmented mirrors

FAN Wen-qiang, WANG Zhi-chen, CHEN Bao-gang, LI Hong-wen, CHEN Tao, AN Qi-chang*, FAN Lei
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn

Abstract: Segmented mirror technology is one of the three ways to realize optical synthetic aperture telescope, and it is an important area of development for future large aperture telescopes. A telescope's active control system of its segmented mirrors directly determines its large aperture mirror's optical performance. This paper focuses on the active control technology of large aperture ground telescopes with segmented mirrors. In this paper, we introduce the development process of a segmented mirror telescope and the main structure of the segmented mirror active control system, then summarize and analyze the domestic and foreign development of active control systems of segmented mirrors. In this paper, the key technologies of segmented

收稿日期: 2020-03-02; 修订日期: 2020-04-24

基金项目: 中国科学院青年创新促进会(No. 2020221), 白求恩医学工程与仪器中心基金项目(No. BQEGCZX2019042), 国家自然科学基金项目(No. 11703026, No. 11803034)资助

Supported by Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No. 2020221), Bethune Medical Engineering and Instrument Center Foundation (No. BQEGCZX2019042), National Natural Science Foundation of China (No. 11703026, No. 11803034)

mirror active control systems and how they achieve active adjustment and active maintenance are summarized. Their applications and the direction of their development are also proposed with respect to deep learning theory in closed-loop control, co-phase detection and correction, system-level simulation modeling technology. This paper provides guidance for the design of a segmented mirror control system in the next generation of ground-based large aperture telescopes in China.

Key words: ground-based telescope; segmented mirror; active control system; active adjustment; active maintenance

1 引言

随着人类对太空和外界信息获取需求的不断增大,为了获得更大的集光面积和分辨能力,望远镜的口径需求不断增大。大口径单镜受制造工艺、运输和成本限制,无法将口径做的很大,因此,光学合成孔径技术逐步得到发展和重视。所谓光学合成孔径,就是通过一系列易于制造的小孔径系统组合拼接成大孔径光学系统^[1]。合成孔径按其技术实现方式可以分为独立子孔径结构和子孔径拼接镜面结构。独立子孔径结构中,子孔径是独立的望远镜,具有各自独立的主、副镜光学系统,又称位相阵列系统(Phased Array),例如 VLTI(Very Large Telescope Interferometer)望远镜。子孔径拼接镜面结构中,所有子孔径共用一个副镜,根据拼接镜面子孔径的形状和是否接触,具体又可分为扇形子孔径,六边形子孔径拼接镜面(Segmented Mirror)和稀疏孔径(Sparse Aperture)等,京都大学 3.8 米望远镜^[2]是扇形拼接,Keck 望远镜是六边形拼接,中国的 8 m 巨型太阳望远镜^[3](Chinese Giant Solar Telescope, CGST)为扇形子孔径环形拼接,巨型麦哲伦望远镜^[4](Giant Magellan Telescope, GMT)是圆形拼接的稀疏孔径望远镜。为了获得等效大口径光学系统的高分辨率成像,世界上现有和在建的大型望远镜大多数应用六边形子孔径拼接,各子镜可实现相对位置互锁和镜面拼接。拼接镜面技术是未来大口径望远镜的重要发展方向,国内外众多科研机构都开展了相关研究。

2 地基拼接镜面望远镜的发展概况

20 世纪 70 年代末,国外兴起建造 10 米级望远镜的热潮,随后陆续建成 Keck 望远镜^[5]、Hobby-Eberly 望远镜(Hobby Eberly Telescope, HET)^[6]、南部非洲大望远镜(Southern African Large Telescope, SALT)^[7]和加那利望远镜(Gran Telescope Canarias, GTC)^[8]等拼接镜面望远镜。

Keck 望远镜是第一架也是最成功的一架拼接镜面望远镜,其验证了拼接镜面式望远镜方案的可行性和优良性能。国内 2008 年建成并通过验收的大天空区域多目标光纤光谱望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)^[9]标志着中国也已掌握拼接镜面式望远镜研制的关键技术。

进入 21 世纪,随着天文观测需求的日益增长,世界各国陆续提出各自下一代地基大口径望远镜的研制规划。除了西方主导规划的 30 米望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)^[10]、欧洲极大望远镜(European Extremely Large Telescope, E-ELT)^[11]和巨型麦哲伦望远镜(GMT)外,近年,印度也计划研制一台 10~12 米口径的光学近红外拼接望远镜(National Large Optical Telescope, NLOT)^[12],目前正通过 1.5 米拼接镜面望远镜原理样机(Prototype Segment Mirror Telescope, PSMT)的研制。同时,中国天文界下一代地基大口径望远镜的规划是建设一台主镜由 24 块扇形子孔径环形拼接而成的 8 m 口径太阳望远镜^[3](CGST)和一台主镜由 84 块六边形子镜拼接组成的 12 m 口径的光学红外望远镜^[13](Chinese Large Optic/IR Telescope)。

拼接镜面主动控制系统是拼接镜面能获得等效大口径主镜成像分辨率的关键,随着未来望远

镜口径的继续增大,下一代地基大口径拼接镜面望远镜的拼接子镜数目也由 Keck 的 36 个增加到 TMT 的 492 个和 E-ELT 的 798 个^[11],促动器和边缘传感器的数目也相应增多,控制系统更加复杂,对拼接镜面的主动控制策略和系统设计的要求更高。因此,有必要对国内外拼接镜面主动控制系统进行总结和归纳,为未来中国的 8 m 太阳望远镜和 12 m 光学红外望远镜拼接镜面的主动控制系统设计提供借鉴和参考。

3 拼接镜面主动控制系统结构

以典型的卡塞格林三镜系统为例,拼接镜面望远镜系统结构如图 1 所示,系统主要由拼接主

镜、次镜 (M2)、三镜 (M3)、主动光学控制系统、跟踪架控制系统、主镜支撑桁架和科学终端等组成。主动光学控制系统主要包括拼接镜面主动控制系统和次镜控制系统两部分,用于实现对拼接主镜和次镜的主动光学控制,校正由加工、装调和外界扰动引起的光学系统像差。

拼接镜面主动控制系统主要由 3 部分组成,分别是子镜定位系统,主动调整系统和主动保持系统。具体控制系统框图如图 2 所示,主动调整系统和主动保持系统共同组成串级控制系统,通过实时主动保持和定期主动调整可保证各拼接子镜能在外界动态扰动(风、温度、重力变化、地震等)下,达到所要求的等效镜面的面形和位置精度。

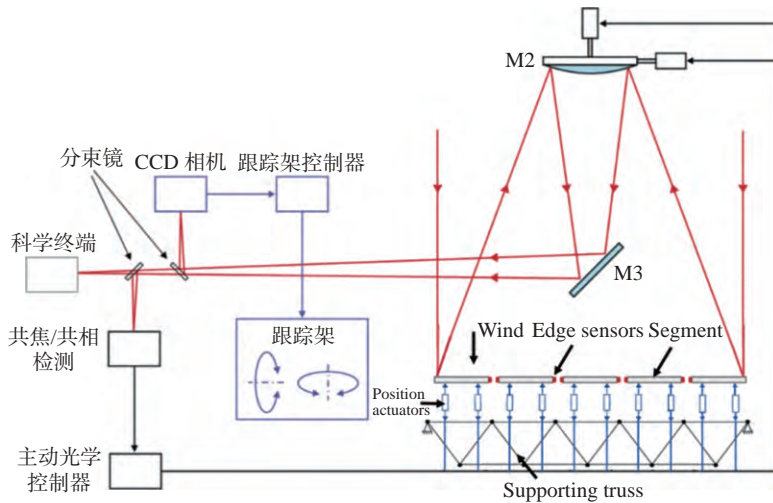


图 1 拼接镜面望远镜系统结构图^[14]

Fig. 1 Structure diagram of the segmented mirror telescope system^[14]

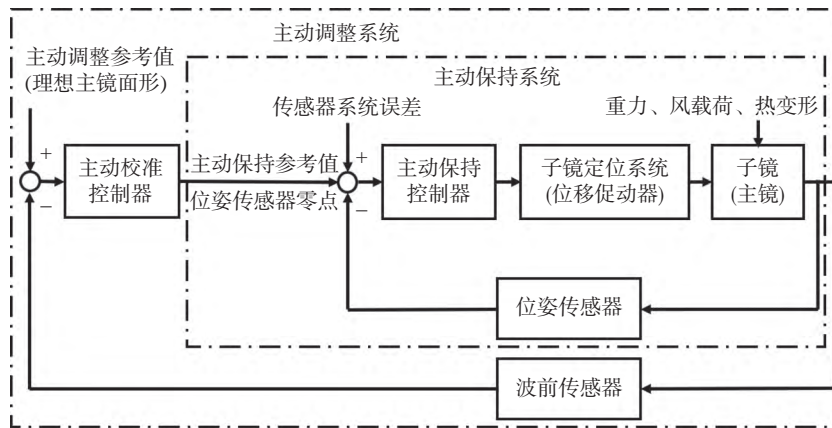


图 2 拼接镜面主动控制系统框图^[15]

Fig. 2 Block diagram of the segmented mirror active control system^[15]

子镜定位(Segment Position)系统是主动调整系统和主动保持系统控制的终端执行系统, 其主要包括子镜背部的主动支撑结构和连接主动支撑结构与子镜固定支撑的3个位移促动器。其中, 主动支撑结构用于实现对子镜平面内运动的约束, 3个位移促动器用于实现子镜平面外3个自由度(子镜沿自身法线的前后移动 Piston, 子镜沿自身平面内两个轴的旋转 Tip, Tilt)的运动控制。子镜定位系统中各促动器可基于自身编码器反馈, 设计局部闭环控制, 调整子镜系统刚度和阻尼, 防止与支撑桁架结构发生共振。

主动调整系统主要是通过共焦共相(Alignment and Phasing)检测子系统(波前传感器)对拼接镜面进行定期波前检测, 从而控制子镜定位系统(位移促动器)以对主镜支撑桁架上各子镜位置的共焦或共相进行调整, 并更新此时的位姿传感器数值作为参考值(即标为零点)。具体主动调整周期取决于系统温漂等低频漂移的速度, 频率一般为1周左右。共焦(Alignment)以对准为基础, 将光点集中到同一位置, 粗共相, 即消除各子镜之间 2π 的光学波前相位误差, 精共相, 即在一个波长内对各子镜光学波前进行共相操作。拼接式光学系统子镜共相过程可概括为: 子镜共焦(Co-focus)→子镜粗共相(Coarse phasing)→子镜精共相(Fine phasing)。

主动保持(Active Maintaining)系统在主动调整周期内, 利用全局边缘传感器反馈的各子镜的相对位置信号, 实现子镜定位系统(位移促动器)的闭环控制, 抵抗扰动, 实时保持各子镜相对位置和拼接镜面共焦/共相, 闭环校正频率一般为数赫兹。根据全局边缘传感器和促动器相关控制矩阵的不同, 又分为全局控制(Global Control), 模式控制(Model Control)和局部控制(Local Control)。全局控制器基于估计的子镜位姿(Piston, Tip, Tilt, PTT)进行设计, 根据边缘传感器反馈信号到子镜位姿的映射关系计算每个子镜的参考位姿(uPTT), 控制子镜定位系统(位移促动器)的实际位姿趋向于参考位姿, 从而实现控制闭环。模式控制器基于估计的镜面模式进行设计, 通过边缘传感器和促动器交互矩阵(Interaction Matrix)的奇异值分解, 首先将边缘传感器反馈信号映射

到镜面模式上, 然后将计算出的控制器命令进一步映射到子镜位姿上, 控制子镜定位系统(位移促动器)的实际位姿, 使其趋向于参考位姿, 从而实现控制闭环。局部控制, 即对于每个子镜, 仅利用其邻近子镜的边缘传感器反馈值重建其位置误差, 其可减少计算量, 限制边缘传感器噪声传递的影响。模态控制器计算量比全局控制器大, 但是可以为每个模式单独设计不同的控制器, 控制带宽可逐模调节, 以使噪声传播和扰动抑制达到最佳平衡。

4 国内外拼接镜面主动控制系统发展概况

4.1 Keck 拼接镜面主动控制系统

Keck 望远镜^[5]是第一架也是最成功的一架采用了拼接镜面技术的光学望远镜, 其主镜直径为10 m, 是由36块对角1.8米六边形子镜拼接而成的抛物面, 具体主镜拼接形式如图3所示, 圆圈表示促动器的位置, 开口圆圈表示传感器位置。

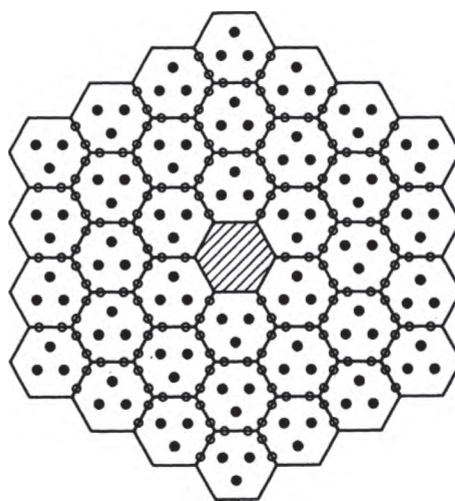


图3 Keck 望远镜主镜拼接形式^[16]

Fig. 3 Segment form of the main mirror of the Keck telescope^[16]

如图4所示, Keck 望远镜的子镜定位系统将子镜通过36点被动支撑的杠杆 Whiffle-tree 结构与3个促动器相连, 以调整子镜的 PTT, 通过中孔膜片侧支撑(Diaphragm)实现对子镜的径向支撑, 约束子镜在 X 、 Y 方向的位置和在平面内的旋转,

并通过连接在杠杆 Whiffle-tree 上的翘曲弹簧结构(Warping-Harnesses), 微量主动调节子镜面形, 以校正低阶像差。

拼接主镜主动控制系统控制回路如图 5 所示, 主动调整系统每 3~4 周利用标定相机系统(Phasing Camera System)^[17] 主动对各拼接子镜进行共面检测, 控制各子镜定位系统使各子镜位置实现共相调整, 更新边缘传感器参考值, 避免由于外界扰动和边缘传感器数值的电子漂移导致促动器行程无法校正的拼接误差。

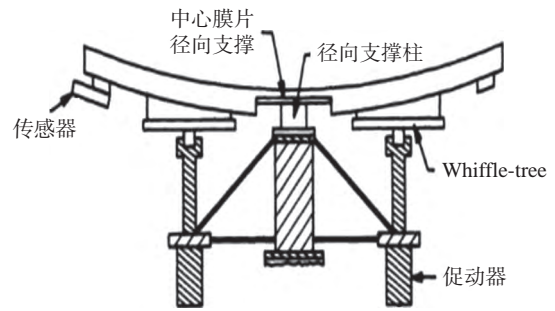


图 4 Keck 望远镜子镜定位系统^[16]

Fig. 4 Segment position system of the Keck telescope^[16]

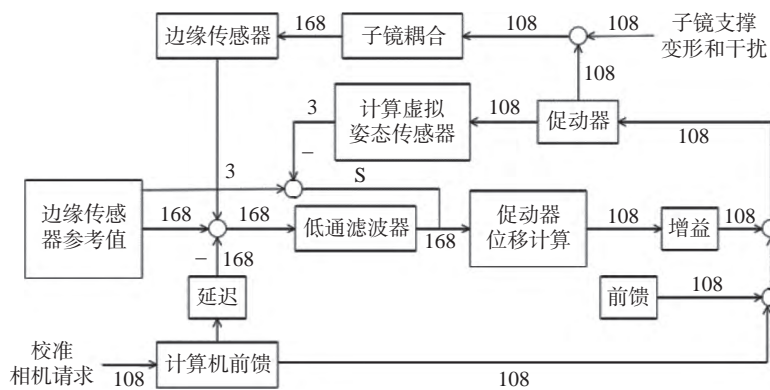


图 5 Keck 望远镜拼接主镜主动控制系统控制回路图^[16]

Fig. 5 Control loop diagram of the active control system for segmented mirror of Keck telescope^[16]

主动保持系统采用全局控制策略, 在各子镜主动调整周期内, 每秒对各子镜重新定位两次, 根据边缘传感器实际值与参考值的差值, 将滤波后的传感器值与由子镜耦合的影响函数得到的控制矩阵相乘, 计算促动器位移, 最终驱动子镜控制系统实现对各子镜拼接误差的校正。计算虚拟姿态传感器并不是真实存在的传感器, 而是通过 168 个边缘传感器值计算得到的拼接主镜整体位姿, 以通过 108 个位置促动器校正主镜整体的平移和倾斜误差。低通滤波器是为了限制系统带宽, 防止子镜支撑系统发生共振。

4.2 HET 拼接镜面主动控制系统

HET^[6] 由美国奥斯汀德克萨斯大学和宾西法尼亚州立大学等单位共同研制, 安放在德克萨斯州的海拔 2003 m 的麦克唐纳天文台 (McDonald Observatory)。HET 是一座主要用于光谱巡天的天文望远镜, 具体结构如图 6 所示。HET 的主镜是由 91 块对角线长 1.15 m, 厚 50 mm 的六边形

子镜拼接而成的球面镜, 曲率半径为 26.164 m, 有效口径为 9.2 m。HET 采用等高仪式的固定高度轴(固定高度角为 55°)结构, 观测中望远镜主镜和镜筒不跟踪, 利用主焦点探测器进行跟踪, 类似于 300 米球面射电望远镜 Arecibo。

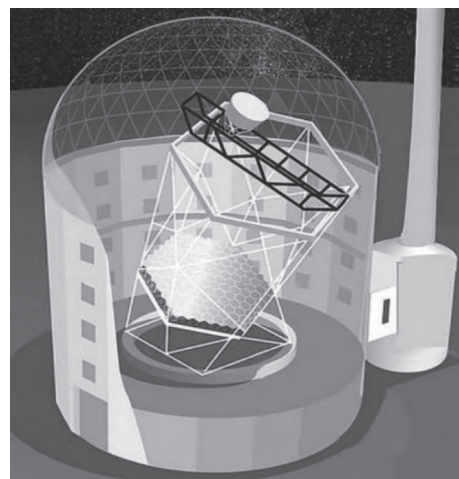


图 6 HET 望远镜结构图^[6]

Fig. 6 Structure diagram of the HET telescope^[6]

HET 拼接镜面主动控制系统^[18]由曲率中心对准传感器 (Center-of-Curvature-Alignment-Sensor, CCAS), 子镜对准保持系统 (Segment Alignment Maintenance System, SAMS) 和子镜定位系统 (Segment Position System, SPS) 3 部分组成, 如图 7 所示。其通过简单的球面仪测量和子镜定位系统调整各子镜位置来保证各拼接子镜之间的 piston 光学误差, 从而使各子镜拼接成一个球面主镜。

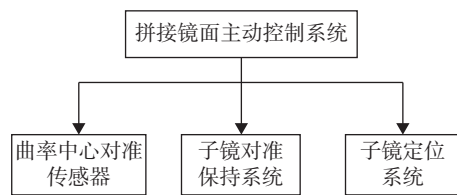


图 7 HET 望远镜拼接镜面主动控制系统组成^[18]

Fig. 7 Configuration of the active control system for the segmented mirror of the HET telescope^[18]

子镜定位系统采用 9 点 Whiffle-tree 轴向支撑和中孔膜片侧支撑实现对子镜的约束, 利用三个位移促动器校正子镜的平移和倾斜。

图 6 中圆顶附近高塔上的曲率中心对准传感器 (CCAS) 是拼接镜面主动调整系统的核心光学检测元件, 其位于主镜球心处, 可以测量出 10 μm 内的 piston 误差。定期转动望远镜的方位轴, 将主镜对准面形检测传感器以检测其面形, 一旦各子镜实现光学对准, 感应式边缘传感器就会对各子镜的相对位置进行亚微米级精确反馈, 并更新参考值。

子镜对准保持系统 (SAMS)^[19] 是利用边缘传感器反馈的主动保持系统, 利用 480 个边缘传感器测量各子镜边缘的相对剪切运动, 实现由于外部影响 (如温度急剧变化和机械应力) 引起的位置变化的信息反馈, 并在望远镜巡天跟踪观测时计算各子镜 tip、tilt 和 piston 位置误差并进行补偿。

HET 建成后, 为保持 HET 未来强大的观测优势, 对 HET 进行大视场升级, 将 HET 的视场从 4' 增加到 22'^[20], 对其拼接镜面主动控制系统也进行了更新升级, 校正周期由 90 s 减少为 30 s, 各子镜对准球心误差在 0.0625 角秒内, piston 误差

在 25 μm 以内^[21]。

4.3 SALT 拼接镜面主动控制系统

南部非洲大望远镜 (SALT)^[7] 是南非主导的一座基于 HET 首创的“光学 Arcicibo”, 它是固定高度为 43° 的光谱巡天望远镜, 安放在南半球南非北开普省的苏蓝德高原。SALT 主镜 (M1) 是由 91 块对角 1.2 m, 厚 50 mm 的六边形子镜拼接而成的球面镜, 曲率半径为 26.165 m, 有效口径为 9.2 m。

由图 7 可见, 和 HET 类似, SALT 拼接镜面主动控制系统^[22] 也由曲率中心对准传感器, 子镜对准保持系统和子镜定位系统组成, 根据反馈信息对各拼接子镜位置进行主动调整, 使 36 个拼接子镜面形保持为一个球面。

曲率中心对准传感器^[23] 是一种改进的 Shack-Hartmann 传感器, 它通过光学方法将各子镜周期性校准为理想球面, 其是主动调整系统的核心检测元件。其安装在对准塔上拼接主镜的曲率中心处, 具体位置可以通过三维运动台进行调整以适应拼接主镜的曲率中心因望远镜结构和对准塔温度变化而产生的移动。具体主动调整过程如下: 定期用 CCAS 对拼接镜面进行校准测量, 将各子镜的 tip, tilt, piston 和全局曲率半径校正反馈给拼接镜面控制系统, 拼接镜面控制系统依次使用促动器的装配位置模型来计算所需的位移促动器行程, 输入子镜定位系统, 控制位移促动器运动, 以实现各子镜位置主动调整。

SALT 的对准和保持系统 (SAMS-I)^[24] 最初的设计是一个由 480 个电容式边缘传感器和复杂的电子促动器组成的系统, 边缘传感器负责测量各子镜之间的相对运动, 每隔 10 s, 控制器矩阵会将 480 个传感器的读数转换为 273 个位移促动器行程, 控制子镜定位系统 (促动器) 实现对各子镜位置的校准和保持, 以保持拼接镜面的“完美”球面。系统设计要求各子镜 tip/tilt 控制在 <0.1 角秒 RMS, 并且在连续 5 天/夜的时间内保持对准精度, 恶化率小于 10%, 具体控制流程如图 8 所示。为减小温度对传感器读数的影响, 边缘传感器连接在子镜边缘低热膨胀系数的薄板上。

由于 SALT 站址萨瑟兰 (Sutherland) 一天内

的相对湿度变化很大,经过长时间的望远镜内外测试,发现最初设计的电容式边缘传感器性能受温度和相对湿度影响较为严重,达不到 SALT 的精度要求,2008 年初,SALT 放弃了使用电容式边缘传感器的尝试^[25],目前正在探索其它的传感器技术以应用于 SALT。D. A. H. Buckley 等^[26]研

制了一种基于干涉扫描原理的新型光学边缘传感器,并将其在南非天文台(South African Astronomical Observatory)和欧洲南方天文台(European Southern Observatory, ESO)进行了测试,以便将来应用于 SALT 和 E-ELT 望远镜。

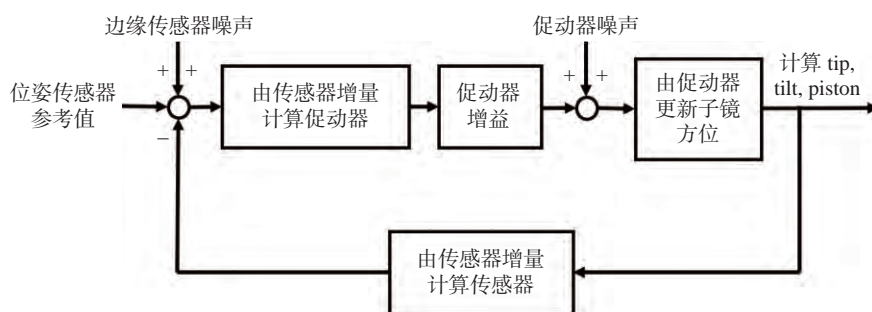


图 8 SALT 望远镜对准和保持系统控制流程图^[22]

Fig. 8 Control flow diagram of the alignment and maintenance system of the SALT telescope^[22]

4.4 GTC 拼接镜面主动控制系统

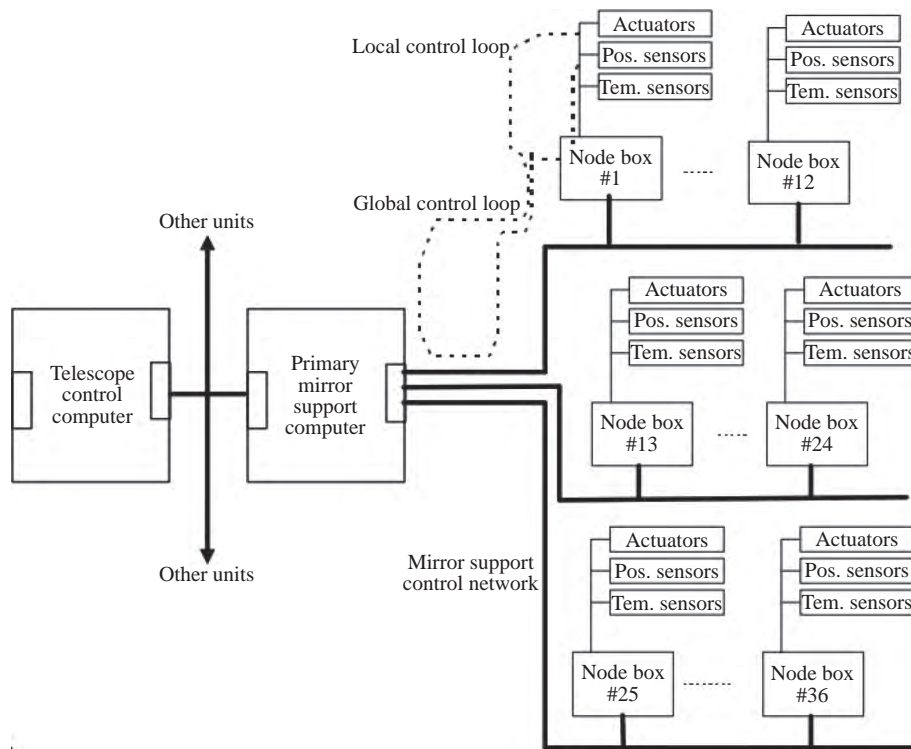
2007 年投入使用的 GTC^[8],是目前世界上已建成的最大的采用拼接镜面的光学和红外天文望远镜。GTC 是一个经典的 Ritchey Chrétien 反射望远镜,其主镜由 36 块正六边形子镜拼接而成,口径为 10.4 m,位于北半球最佳的观测站址之一,西班牙的拉帕尔玛岛。

GTC 拼接主镜主动控制系统^[27]参考 Keck 望远镜控制系统,也由子镜定位系统,主动调整系统和主动保持系统组成。其子镜定位系统结构也参考 Keck,通过 3 个位置促动器实现子镜位置调整(Piston, Tip, Tilt),同时基于 Warping-harnesses 原理,在每个 Whiffle-tree 支架上安装 6 个线性促动器,通过杠杆臂将扭矩传递到 Whiffle-tree 支撑点,校正望远镜由方位和俯仰角变化引起的拼接镜面低阶光学像差。

主动保持系统通过 168 个安装在相邻子镜之间的电容式位移传感器的实时反馈,计算各位置促动器所需的校正量,动态调整 36 个子镜的位置,使拼接镜面的表面误差最小,近似表现为全局双曲面面形。同时,利用 216 个温度传感器(PT100)监测主镜温度梯度,以预测结构膨胀,反馈给主动保持系统,进行子镜位姿校正。

为了获得更高的控制带宽,GTC 设计为如图 9 所示的分布式可扩展实时控制系统^[28],其分布式计算机控制架构由一个主节点(主镜支撑计算机)和 36 个具有一定嵌入式智能控制的子镜从节点(每个子镜一个,称为节点盒)组成,每一个本地控制器控制一个子镜。每个节点盒(Node Box)负责管理实现子镜运动的 3 个促动器和 3~6 个位置传感器(连接到子镜的传感器的一半),以及与子镜相关的其他辅助设备,比如温度传感器。这种控制结构本质上是可伸缩的,并不严格依赖于组成主镜的子镜数。

控制系统同时执行两个控制回路级。外部回路是由主镜支持计算机(Primary Mirror Support Computer)执行的全局策略(Global Control),它使用由本地控制器收集的所有传感器测量值以相对缓慢的更新频率(2~5 Hz)更新所有促动器运动控制,校正各子镜的相对位置误差,同时计算虚拟传感器位置,校正拼接镜面整体位姿误差。内部层是在每个子镜的节点盒(Node Box)处执行的本地策略(Local Control),每个本地控制回路使用其本地子镜传感器的测量值以相对较快的更新频率(50~100 Hz)更新连接到节点盒的 3 个促动器的运动控制,保持子镜的位姿。

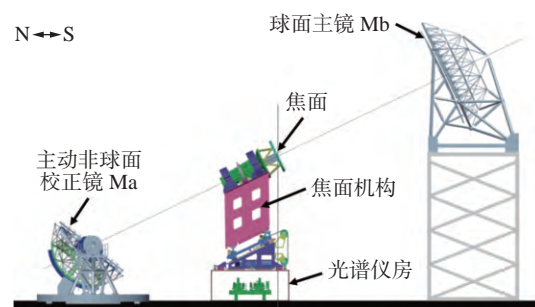
图 9 加那利望远镜分布式可扩展实时控制系统架构图^[26]Fig. 9 Architecture diagram of the distributed extensible real-time control system for the GTC telescope^[26]

4.5 LAMOST 拼接镜面主动控制系统

我国的国家重大科学工程大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜 LAMOST 是一种新型大口径子午线主动反射施密特结构的望远镜^[9], 位于北京兴隆观测站, 通光口径为 4 m, 焦距为 20 m, 具有大口径、宽视场的特点, 可以实现大尺度的光谱测量观测。如图 10 所示, LAMOST 在结构上由 3 部分组成: 反射施密特改正板 Ma, 球面主镜 Mb 和焦面, 焦面上放置 4000 根光纤, 由光纤将天体的光传输到光谱仪房内的科学终端。Mb 在观测的过程中固定不动, 由施密特改正板 Ma 实现对天体的跟踪。

LAMOST 首次在一个光学系统中同时使用了两个大口径拼接反射镜, 主动光学系统^[29-30]分为 Ma 主动光学控制系统和 Mb 主动光学控制系统, 通过开环控制和辅助闭环控制方法分别实现对 Ma 和 Mb 的主动光学控制。在一次观测中, 由于 Ma 的最大高度变化仅为 0.34°(1.5 小时观测)^[31], 重力变化很小, 故不需要对重力变形进行主动修正。而 Mb 在观测中固定不动, 只受热变

形影响, 并且由于热变化很慢, 因此仅需在每次观测前对 Mb 和 Ma 进行主动共焦调整即可。

图 10 LAMOST 望远镜结构图^[9]Fig. 10 Structure diagram of the LAMOST telescope^[9]

球面主镜 Mb 由 37 块对角线长 1.1 m, 厚 75 mm 的六边形球面子镜拼接组成, Mb 在观测过程中固定不动。其主动光学控制系统 (Mb AOCS) 采用拼接镜面主动光学技术, 利用每个子镜背部的 3 个位移促动器 (可变固定点) 修正 Mb 支撑系统的缓慢热变形。

LAMOST 主动光学系统的共焦主动调整原理如图 11 所示, 在每次观测之前, 依次完成 Mb

和 Ma 的共焦主动调整。对 Mb 进行共焦主动调整时, 先将焦面机构移出 Mb 共焦校正检测光路, 同时在 LAMOST 焦点处通过光纤发出标准光源, 使用位于 Mb 曲率中心即 Ma 几何中心的 Mb 波前传感器和 Mb 微位移促动器进行波前传感和子镜位置调整, 通过闭环迭代校正, 使 Mb 的 37 个子镜共球心, 并更新边缘传感器的参考值, 从而实现对各子镜共焦的主动调整。在实现主动调整

后, 再将焦面机构移回。观测时, 根据边缘传感器测量的子镜相对位置的实时反馈值, 利用主动保持系统实现各子镜位移促动器的闭环控制, 保持 37 个子镜的共焦。由于热变形变化非常缓慢, Mb 每晚只需用 Shack-Hartmann 波前传感器进行一次主动共焦标定。LAMOST 的波前测量精度为 $0.15^{\mu\text{m}}$ 。

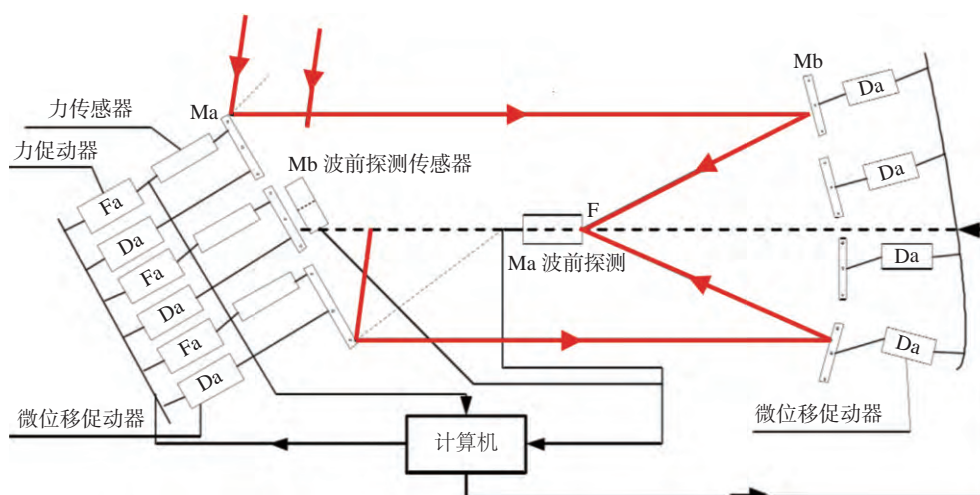


图 11 LAMOST 望远镜主动光学系统的共焦主动调整原理图^[27-28]

Fig. 11 Principle diagram of the active adjustment mechanism of active optical system in LAMOST telescope^[27-28]

反射施密特改正板 Ma 由 24 块对角线长 1.1 m, 厚 25 mm 的六边形平面子镜拼接组成, 如图 11 所示, 其主动光学控制系统(Ma AOCS)同时采用薄镜面主动光学和拼接镜面主动光学两种技术。在每个子镜的背面, 有 34 个简单的力促动器, 每个都有一个力传感器(负载传感器)和 3 个位移促动器(可变固定点), 修正由重力、热变化、制造和对准误差引起的望远镜误差, 并且在 Ma 巡天观测跟踪时实时校正 Ma 24 个子镜的非球面形状。

在 Mb 完成共焦主动调整, 并获得合格波前检测图像后, 通过观测一颗恒星, 对 Ma 进行共焦主动调整。以 Mb 波前检测图像为理想波前, 利用在 LAMOST 焦点处的 Ma 波前传感器获得光学系统波前信息, 通过 Ma 传感器和 Mb 传感器的波前差获得 Ma 的波前校正量, 解算出各位移促动器的主动调整校正量。通过使 Ma 传感器与 Mb 传感器的图像重合叠加实现对各子镜的共焦, 并

更新边缘传感器的参考值。在 Ma 天体跟踪观测过程中, 利用拼接镜面主动保持系统保持各子镜的相对位置和共焦状态, 通过 LAMOST 焦点处的 Ma 波前传感器的实时反馈, 基于薄镜面主动光学技术, 同理解算出各子镜力促动器的主动校正量, 获得所需非球面面形, 通过计算知表面形状所需的最大变形量约为 $10 \mu\text{m}$, 调整 Ma 的最大时间间隔为 2 min^[31]。

4.6 TMT 拼接镜面主动控制系统

三十米望远镜(TMT)^[10]是由美国, 加拿大, 日本, 中国, 印度等国家和研究机构联合倡议的下一代地基光学与红外望远镜, 规划站址为夏威夷的莫纳克亚山(Mauna Kea), 其主镜拼接形式和 Keck 望远镜类似, 光学口径为 30 m, 子镜数目增加为 492 块。

TMT 的拼接镜面主动控制系统^[33]由于子镜定位系统, 主动调整系统和主动保持系统组成, 在准

静态重力、热变形和风湍流力的外界扰动下, 实现对各拼接子镜位置的调整 and 保持, 拟合成抛物面主镜。子镜定位系统采用 3 个“软”音圈促动器^[34] 配合类似于 Keck 望远镜的主动支撑结构以对子镜 piston, tip 和 tilt 进行调整。

主动调整系统每 2~4 周通过使用共焦和共相系统(Alignment and Phasing System, APS)^[35] 的光学波前信息设定一次边缘传感器的参考值。主动

保持系统具体控制模型如图 12 所示, 分为上下两个闭环校正回路。上面的控制回路通过 2772 个边缘传感器的信息校正各子镜之间的拼接误差。下面的控制回路利用相邻子镜之间的差动电容传感器测量相对边缘的高度不连续性和子镜之间的二面角变化, 以获得拼接镜面 piston, tip, tilt 和焦面的变化情况, 校正主镜整体的 piston, tip 和 tilt 误差, 闭环保持各子镜位置。

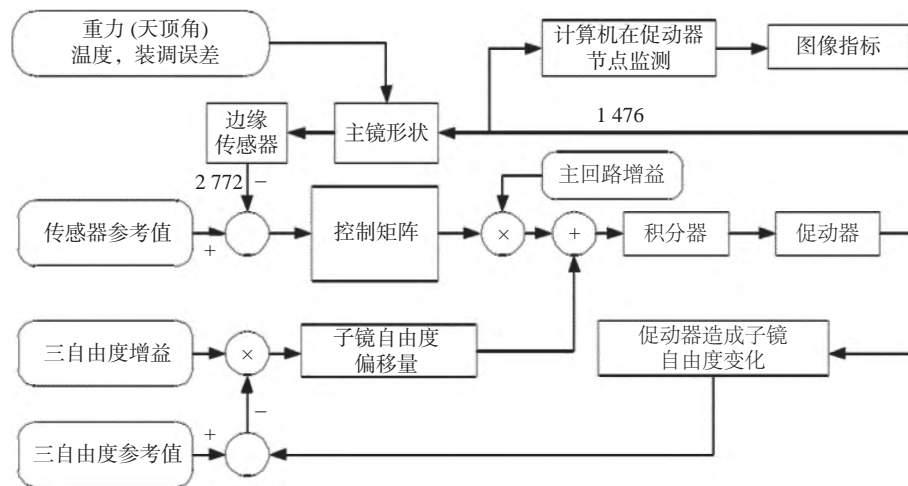


图 12 TMT 望远镜拼接镜面主动保持系统控制模型图^[31]

Fig. 12 Control model diagram of active maintenance system of segmented mirror in TMT telescope^[31]

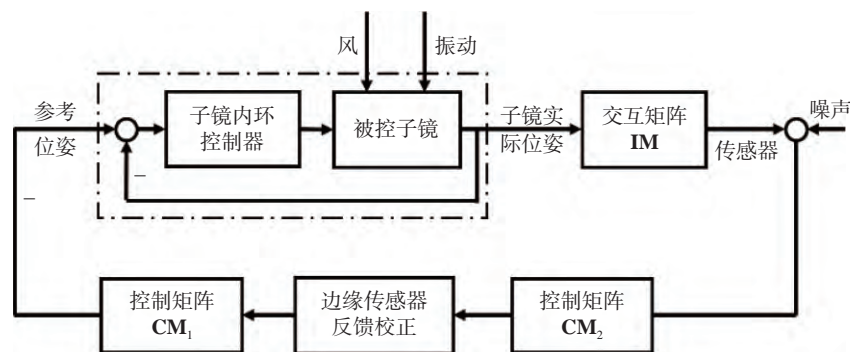
4.7 E-ELT 拼接镜面主动控制系统

欧洲极大望远镜(E-ELT)是由欧洲南方天文台(ESO)14 个成员国和巴西等国共同承建的下一代地基光学天文望远镜, 站址规划于智利北部的阿塔卡马沙漠的山顶。2012 年, 出于成本预算考虑, E-ELT 望远镜的主镜直径由 42 m 改为 39 m, 由 798 个对角 1.4 m 的准六边形子镜拼接组成^[11]。

E-ELT 的子镜定位系统由 3 层 Whiffle-trees 轴向支撑结构和 3 个位置促动器(PACT)组成。PACTs 用于控制各拼接镜平面外运动的 PTT。内置在 Whiffle-trees 上的 Warping-harnesses 结构可以实现对子镜面形的半主动校正。

考虑风载和外界扰动对控制系统的动态影响, E-ELT 的拼接镜面主动控制系统可以表达为如图 13 所示的 MIMO 控制系统^[36], 其主动保持控制系统有两个回路, 一个是全局边缘传感器反馈控制的拼接误差校正回路, 一个是促动器局部

伺服回路。促动器局部伺服回路由自身的编码器实现内部计量反馈, 调整子镜刚度和阻尼, 隔离子镜与背部结构的振动, 实现促动器的精确位移输出, 这个回路并不是必须的。拼接误差校正回路采用模式控制策略, 通过边缘传感器和促动器交互矩阵(Interaction Matrix)的奇异值分解, 首先将边缘传感器反馈信号映射到镜面模式上, 然后将计算出的控制器命令进一步映射到子镜位姿上, 控制子镜定位系统(位移促动器)使其实际位姿趋向于参考位姿, 从而实现控制闭环。该控制策略解决了支撑结构交互耦合时的风抑制和传感器噪声问题。其中, 交互矩阵 \mathbf{IM} 表示子镜拼接误差到传感器的转化关系。控制矩阵 \mathbf{CM}_2 是由边缘传感器偏差值到奇异值分解获得的镜面模式的传递矩阵, 控制矩阵 \mathbf{CM}_1 是奇异值分解获得的镜面模式到子镜位姿的传递矩阵。

图 13 E-ELT 望远镜拼接镜面主动控制系统框图^[36]Fig. 13 Block diagram of active control system for segmented mirror in E-ELT telescope^[36]

5 拼接镜面主动控制发展趋势及关键技术研究展望

5.1 拼接镜面主动控制发展趋势

通过对国内外拼接镜面主动控制技术发展趋势的总结和分析,可以看出下一代大口径望远镜系统更加庞大和复杂,拼接镜面主动控制系统各模块之间的数据交互和外界干扰更加难以准确衡量,进一步增加了控制系统设计和优化难度。而深度学习通过多层处理,组合低层特征形成更加抽象的高层表示属性类别或特征,以发现数据的分布式特征表示,特别适合于分析复杂系统多数数据量之间的复杂关系,在克服扰动的闭环控制、拼接镜面共相检测与校正和系统级集成建模计算机仿真等关键技术中有广泛应用,逐渐成为未来主动控制系统设计的一个发展趋势,使望远镜主动光学系统更加智能化。

5.2 关键技术研究展望

5.2.1 克服扰动的闭环控制研究^[37-43]

国内外拼接镜面主动控制系统的闭环控制系统的设计都非常重视对外界扰动的定量表征和合理建模,对控制模型进行不同程度的建模简化,以期尽可能真实反映闭环控制系统的动态特性。除此之外,不管是在主动保持系统基于边缘传感器反馈的闭环控制还是主动调整系统基于波前传感器反馈的闭环控制,大部分都是采用传统的比例积分(Proportional-Integral, PI)控制和相应算法,严重依赖于边缘传感器/波前传感器与促动器的响应模型,为保证控制性能,需要不断对响应模型

进行标定。但是随着下一代拼接镜面控制系统子镜数量和不断增多,系统更加复杂,外界扰动影响环节增多,很难建立明确的系统动态模型,这给相关响应模型的标定和精度维持带来困难。但深度学习方法强大的学习和模式分析能力,为上述问题的解决提供了思路。Xu 等^[44]提出了一种基于深度学习控制模型的波前像差补偿控制方法,消除了对变形镜响应矩阵的依赖。利用深度学习方法的控制系统具有良好的适应性和稳定性,通过自学习可以提高系统的收敛精度和调整容忍度,是未来智能控制系统的发展趋势和方向,也可以为我国 8 m 巨型太阳望远镜和 12 m 光学红外望远镜的拼接镜面主动闭环控制系统设计提供参考和借鉴。

5.2.2 拼接镜面共相检测与校正研究^[45-54]

HET 和 SALT, LAMOST 都是光谱望远镜,仅能获得有限分辨率的光学信息。目前成熟的共相检测和校正技术还是在 Keck 望远镜中所应用和验证的。

对于共相阶段的精密调整,传统上使用相关分析将获得的图像与已知子镜相对位置的由经验或模拟所获得的图像进行相关分析,获得所需调整量。但是随着共相调整子镜数目的增多,共相检测和调整过程中所产生的复杂、非线性的对应关系将给传统分析方法带来巨大挑战。深度学习强大的模式分析和数据学习能力,为问题的解决带来新的思路。Li 等^[55]引入卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN),通过深度学习方法在更大尺度上区分每个子镜的 piston 误差。中国下一代地基大口径望远镜中,12 m 光学红外

望远镜主镜为84块六边形子镜拼接而成,8m巨型太阳望远镜主镜为由24块扇形子孔径环形拼接而成,各子镜均需要经过复杂的主动光学准直和共相调整,才能实现共相。利用深度学习技术对干涉图进行模式相关分类判断,将提高我国下一代拼接镜面望远镜各子镜共相的检测精度,获得更优的共相调整策略,这是未来主动共相检测和调整的发展趋势。但与此同时,对于地基望远镜而言,实现拼接镜面共相后还需要配合采用自适应光学校正,以减小大气扰动的影响,从而才能获得等效大口径的衍射极限像。Xuan等^[56-57]研究的液晶自适应光学系统和已成熟应用的变形镜自适应光学系统都是可供选择的自适应光学系统方案。

5.2.3 系统级集成建模计算机仿真研究

在望远镜系统设计中,系统级集成化建模计算机仿真技术是基于光学系统设计、机械结构设计及分析和自动控制系统设计,建立各自相对独立的计算机模型,该模型结合了传感检测系统和各种影响因素。经仿真分析得到了望远镜的各种响应乃至最终成像质量,据此评价望远镜的工作性能并优化设计方案。

下一代大口径大视场望远镜将拥有数量巨大的传感器和执行元件,涉及到光学-机械-热力学等多个方面,系统优化设计过程将变得更加复杂,系统级集成化建模仿真技术已经成为除实际样机试验之外的又一种系统级优化设计方法,并逐渐得到广泛应用。为了支撑主动控制系统设计过程,需要建立一套成熟可行的控制建模仿真框架和系统,实现有限元模型、控制系统建模和光学成像分析的闭环系统仿真,通过像质评估拼接镜面控制系统静态和动态性能,进行单项误差和行程预算分配,指导各子系统进行指标分解和设计参数优化。

与此同时,为了提高光学系统成像质量对外界温度的适应性,目前主要采用无热化光学系统设计^[58]和配备主动热控系统两种方式。由于拼接镜面光学系统无热化设计难度较大,因此多采

用配备主动热控系统方式。为简化对拼接镜面系统的主动控制,可考虑将主动热控系统也纳入智能主动光学的范畴,利用深度学习对探测器信息进行融合,对力-热复合载荷下的模型进行修正,完成主动光学的数据分析和信息融合处理,以确定最优化的热控策略(加热电阻丝功率控制,气刀气流速度控制)。利用离线、在线误差标校方法,建立热-力耦合工况下的修正、预测模型(先验/后验,高斯/非高斯),进一步发挥主动光学的校正能力,使望远镜主动光学系统实现智能化,是未来主动控制系统设计的一个发展方向,也是我国8m巨型太阳望远镜和12m光学红外望远镜系统级建模过程的一个可选路径。

6 结 论

对已建和在建的地基望远镜的拼接镜面主动控制系统进行介绍。归纳了拼接镜面主动控制系统设计的发展趋势和关键技术,总结了深度学习理论在闭环控制、共相检测与校正和系统级仿真建模技术中的未来发展方向和趋势。

(1)利用深度学习,构建多层学习网络,建立在线学习的响应模型,可以实现系统模型的在线辨识和自适应控制。这是未来闭环控制系统设计的发展趋势和方向,也是提高主动控制系统性能的必然选择。

(2)基于拼接镜面共焦、共相过程中所产生的大量数据以及数据间的复杂内在联系,利用深度学习强大的模式分析能力,确定子镜的移动策略,是未来拼接镜面主动光学共相检测和调整的发展趋势。

(3)望远镜系统级集成化建模计算机仿真一直是设计决策中不可或缺的组成部分,深度学习方法与望远镜系统级建模的结合,将提高模型的保真度和柔性,更加真实地反映复杂望远镜系统的性能特性,是提高主动光学系统的主动调节精度与效率的重要技术途径,同时也是充分发挥望远镜探测能力的必经之路。

参考文献:

- [1] 周程灏,王治乐,朱峰.大口径光学合成孔径成像技术发展现状[J].中国光学,2017,10(1):25-38.

- ZHOU CH H, WANG ZH L, ZHU F. Review on optical synthetic aperture imaging technique[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 25-38. (in Chinese)
- [2] KURITA M, OHMORI H, KUNDA M, *et al.*. Light-weight telescope structure optimized by genetic algorithm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7733: 77333E.
- [3] 刘忠, 邓元勇, 杨德华, 等. 中国巨型太阳望远镜[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(5): 059604.
LIU ZH, DENG Y Y, YANG D H, *et al.*. Chinese giant solar telescope[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(5): 059604. (in Chinese)
- [4] BERNSTEIN R A, MCCARTHY P J, RAYBOULD K, *et al.*. Overview and status of the giant Magellan telescope project[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9145: 91451C.
- [5] NELSON J E, GILLINGHAM P R. Overview of the performance of the W. M. Keck Observatory[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2199: 82-93.
- [6] RAMSEY L W, ADAMS M T, BARNES T G, *et al.*. Early performance and present status of the Hobby-Eberly Telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3352: 34-42.
- [7] STOBIE R, MEIRING J G, BUCKLEY D A H. Design of the southern African large telescope (SALT)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4003: 355-362.
- [8] CASTRO LOPEZ-TARRUELLA F J, FERNANDEZ IBARZ J M, ANDERSEN T. Global model of the Gran Telescopio canarias[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4757: 93-102.
- [9] GONG X F, CUI X Q, CHEN H Y, *et al.*. Design and analysis of support system of the LAMOST primary mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4837: 667-674.
- [10] NELSON J, SANDERS G H. The status of the Thirty Meter Telescope project[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 70121: 70121A.
- [11] MCPHERSON A, SPYROMILIO J, KISSLER-PATIG M, *et al.*. E-ELT update of project and effect of change to 39m design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8444: 84441F.
- [12] PARIHAR P P, DESHMUKH P, JACOB A, *et al.*. Prototype segmented mirror telescope: a pathfinder of India's Large Optical-NIR telescope project[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10700: 107001A.
- [13] CUI X Q, ZHU Y T. Chinese Large Optic/IR Telescope (LOT): planning for the next decade[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9906: 990607.
- [14] PREUMONT A, BASTAITS R, RODRIGUES G. Scale effects in active optics of large segmented mirrors[J]. *Mechatronics*, 2009, 19(8): 1286-1293.
- [15] 陆金娴. 光学镜面位姿检测与主动校正方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
LU J X. Research on optical mirror position detection and active correction[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese).
- [16] JARED R C, ARTHUR A A, ANDREAE S, *et al.*. W. M. Keck Telescope segmented primary mirror active control system[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1236: 996-1008.
- [17] CHANAN G A, NELSON J E, MAST T S, *et al.*. W. M. Keck Telescope phasing camera system[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2198: 1139-1150.
- [18] KRABBENDAM V L, SEBRING T A, RAY F B, *et al.*. Development and performance of Hobby-Eberly Telescope 11-m segmented mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3352: 436-445.
- [19] ADAMS M T, PALUNAS P, BOOTH J A, *et al.*. Hobby-Eberly Telescope segment alignment maintenance system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4837: 693-701.
- [20] HILL G J, DRORY N, GOOD J M, *et al.*. Completion and performance of the Hobby-Eberly telescope wide field upgrade[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10700: 107000P.
- [21] HÄUSER M, RICHTER J, KRIEL H, *et al.*. Upgrade of the HET segment control system, utilizing state-of-the-art, decentralized and embedded system controllers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9906: 990602.
- [22] SWIEGERS J, GAJJAR H. Completion of the Southern African Large Telescope (SALT) primary mirror system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5489: 881-891.
- [23] WIRTH A, GONSIOROWSKI T, ROBERTS J, *et al.*. Developing and testing an optical alignment system for SALT's

- segmented primary mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5489: 892-902.
- [24] SWIEGERS J, GAJJAR H, ROZIERE D, *et al.* A unique edge sensing system for aligning SALT's primary mirror segments[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004.
- [25] STRYDOM O J, LOVE J, GAJJAR H. Results from bonding of the SALT primary mirror edge sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9912: 991244.
- [26] BUCKLEY D A H, BUOUS S, GAJJAR H, *et al.* A novel optical sensor for mirror edge sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7739: 773912.
- [27] LEFORT B, CASTRO J. The GTC primary mirror control system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7019: 701901.
- [28] FUERTES J M, DE MIGUEL S, VILLA R, *et al.* Dynamic analysis of a segmented telescope test bed[C]. *Proceedings of 1997 European Control Conference (ECC)*, IEEE, 1997: 2898-2903.
- [29] XU X Q, XU L ZH, JIN G P. Overview of LAMOST control system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4837: 484-493.
- [30] CUI X Q, SU D Q, WANG Y N, *et al.* The optical performance of LAMOST telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7733: 773309.
- [31] SU D Q, CUI X Q. Active optics in LAMOST[J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2004, 4(1): 1-9.
- [32] ZHANG Y. Progress of LAMOST wavefront sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7012: 70123H.
- [33] MACMYNOWSKI D G, THOMPSON P M, SHELTON J C, *et al.* Control system modeling for the thirty meter telescope primary mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8336: 83360R.
- [34] LORELL K R, AUBRUN J N, CLAPPIER R R, *et al.* Design of a prototype primary mirror segment positioning actuator for the Thirty Meter Telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6267: 62672T.
- [35] TROY M, CHANAN G, MICHAELS S, *et al.* A conceptual design for the Thirty Meter Telescope alignment and phasing system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7012: 70120Y.
- [36] DIMMLER M, ERM T, BAUVIR B, *et al.* E-ELT primary mirror control system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7012: 70121O.
- [37] THOMPSON P M, MACMYNOWSKI D G, REGEHR M W, *et al.* Servo design and analysis for the Thirty Meter Telescope primary mirror actuators[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7733: 77332F.
- [38] 李爱华, 周国华, 李国平, 等. 射电望远镜主动反射面系统的控制[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1711-1718.
LI A H, ZHOU G H, LI G P, *et al.* Control of active reflector system for radio telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1711-1718. (in Chinese)
- [39] WITVOET G, DEN BREEJE R, NIJENHUIS J, *et al.* Dynamic analysis and control of mirror segment actuators for the European Extremely Large Telescope[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2015, 1(1): 019003.
- [40] DESHMUKH P G, PARIHAR P, BALASUBRAMANIAM K A, *et al.* Dynamic loading assembly for testing actuators of segmented mirror telescope[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2017, 6(3): 1750006.
- [41] 王贞艳, 贾高欣. 压电陶瓷作动器非对称迟滞建模与内模控制[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(10): 2484-2492.
WANG ZH Y, JIA G X. Asymmetric hysteresis modeling and internal model control of piezoceramic actuators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2484-2492. (in Chinese)
- [42] SEDGHI B, MULLER M, BAUVIR B. Dynamical simulation of E-ELT segmented primary mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8336: 83360D.
- [43] 郭泰, 戴懿纯, 杨德华, 等. 环形拼接太阳望远镜主镜控制系统的频率特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1122001.
GUO T, DAI Y CH, YANG D H, *et al.* Frequency characteristics of primary mirror control system in segmented ring solar telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1122001. (in Chinese)
- [44] XU ZH X, YANG P, HU K, *et al.* Deep learning control model for adaptive optics systems[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 1998-2009.
- [45] CHANAN G, TROY M, DEKENS F, *et al.* Phasing the mirror segments of the Keck telescopes: the broadband phasing algorithm[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(1): 140-155.
- [46] CHANAN G, OHARA C, TROY M. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes II: the narrow-band phasing algorithm[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(25): 4706-4714.

- [47] 林旭东, 王建立, 刘欣悦, 等. 拼接镜主动光学共相实验[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1520-1528.
LIN X D, WANG J L, LIU X Y, *et al.*. Co-phase experiment of active optics for segmented-mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1520-1528. (in Chinese)
- [48] CHANAN G, TROY M, SIRKO E. Phase discontinuity sensing: a method for phasing segmented mirrors in the infrared[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(4): 704-713.
- [49] CHANAN G A, TROY M, OHARA C M. Phasing the primary mirror segments of the Keck telescopes: a comparison of different techniques[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4003: 188-202.
- [50] 郑彬, 陈永和, 傅雨田. 拼接式反射镜共焦误差检测[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 26-33.
ZHENG B, CHEN Y H, FU Y T. Co-focus error detection of segmented mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 26-33. (in Chinese)
- [51] LI B, YU W H, CHEN M, *et al.*. Co-phasing experiment of a segmented mirror using a combined broadband and two-wavelength algorithm[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(32): 8871-8879.
- [52] BONNET H, ESSELBORN M, KORNWEIBEL N, *et al.*. Fast optical re-phasing of segmented primary mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9145: 91451U.
- [53] 李斌, 刘燕德, 谢锋云. 拼接镜新型粗共相检测方法[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2647-2653.
LI B, LIU Y D, XIE F Y. Coarse co-phasing detection of segmented mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(11): 2647-2653. (in Chinese)
- [54] SIMAR J F, STOCKMAN Y, SURDEJ J. Smart co-phasing system for segmented mirror telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9906: 99065F.
- [55] LI D Q, XU SH Y, WANG D, *et al.*. Large-scale piston error detection technology for segmented optical mirrors via convolutional neural networks[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(5): 1170-1173.
- [56] 宣丽, 李大禹, 刘永刚. 液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望[J]. 液晶与显示, 2015, 30(1): 1-9.
XUAN L, LI D Y, LIU Y G. Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 1-9. (in Chinese)
- [57] 李大禹. 基于多GPU的液晶自适应光学波前处理器[J]. 液晶与显示, 2016, 31(5): 491-496.
LI D Y. Liquid crystal adaptive optics wavefront processor based on multi-GPU[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(5): 491-496. (in Chinese)
- [58] 廖劲峰, 丁亚林, 姚园. 机载折反式光学系统的无热化设计[J]. 液晶与显示, 2019, 34(1): 39-46.
LIAO J F, DING Y L, YAO Y. A thermalization design of airborne mirror-lens optical system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(1): 39-46. (in Chinese)

作者简介:



范文强(1993—), 男, 江西鹰潭人, 硕士, 研究实习员, 2018年于华中科技大学获得硕士学位, 主要从事大型光电望远镜光机结构和拼接镜面主动控制技术的研究。E-mail: fwqhust@163.com



安其昌(1988—), 男, 山西太原人, 博士, 助理研究员, 中国科学院青年创新促进会成员, 2011年于中国科学技术大学获得工学学士学位, 2018年于中国科学院大学获得博士学位, 研究方向为大口径光机系统检测装调。Email: anjj@mail.ustc.edu.cn