

文章编号: 1001-5078(2020)04-0387-09

· 综述与评论 ·

大口径大视场望远镜探测器平面度检测方法综述

郭宁馨 张景旭 刘昌华 陈 涛 安其昌 明 名
(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: 为了更好地适应大口径大视场望远镜的成像要求,在相机焦平面拼接多个 CCD 使其能够覆盖望远镜的全视场成为大口径大视场望远镜光学相机设计的重点。本文系统地总结了当前国内外探测器平面度测量方法的最新研究进展,对比了应用较广的扫描白光干涉仪、三角激光测量仪以及激光同轴位移器的特点。文章还结合了国外大口径大视场望远镜中的相机焦平面靶面拼接特点,对其测量方法及设备进行了详细介绍和总结分析,为大口径大视场地基光电望远镜焦平面拼接探测器的平面度测量提供一定的经验参考。

关键词: CCD; 平面度; 测量仪器; 大口径大视场地基光电望远镜

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.04.001

Overview of CCDs flatness test method for large aperture and wide-field telescope

GUO Ning-xin ZHANG Jing-xu LIU Chang-hua CHEN Tao AN Qi-chang MING ming
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to better adapt to the imaging requirements of large aperture and wide-field of view telescope, the combination of multiple CCDs in the focal plane of camera makes it possible to cover the full field of view of the telescope. In this paper, the latest research progress of target plane flatness measurement methods at home and abroad is summarized systematically, and the characteristics of scanning white light interferometer, triangle laser measuring instrument and laser coaxial displacer, which are widely used, are compared. This paper also introduces and summarizes the measurement methods and equipment of the focal plane target splicing characteristics of large aperture and wide-field of view telescopes abroad, and provides some experience for the flatness measurement of the focal plane splicing target surface of large aperture and wide-field of view telescopes.

Keywords: CCD; flatness; measuring instrument; large aperture and wide-field ground-based photoelectric telescope

1 引 言

望远镜是天文观测的重要工具,其分辨能力决定着人们可观测到的宇宙空间的大小。望远镜从诞生至今已经经历了 400 余年的发展历史,口径由厘米级扩大到米级,用途也由纯天文观测发展成对地

球外层空间人造目标的普查编目、监视定轨及成像识别^[1]。

由光学系统可知,相机的焦平面靶面面积与望远镜光学系统的视场角和焦距有关,如式(1)所示。

$$S_{\text{CCD}} = 2f \tan(\omega/2) \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 11703026; No. 11803034); 白求恩医学工程与仪器中心基金项目(No. BQEGCZX2019042)资助。

作者简介: 郭宁馨(1993-)女,硕士研究生,研究方向为地基大口径望远镜 CCD 拼接。E-mail: guoningxin17@ucas.edu.cn

通讯作者: 张景旭(1964-)男,研究员,博士生导师,主要从事大型地基光电望远镜光机结构总体技术等方面的研究。E-mail: zhangjingxu123@sina.cn

收稿日期: 2019-07-17; 修订日期: 2019-08-05

式中 f 为光学系统焦距; ω 是光学系统的视场角。

传统光学元件和系统的分辨率一直被认为满足经典瑞利准则^[2]。现有单片 CCD 受半导体材料和制造工艺水平的限制,面积大小不能满足大视场的要求,若想在短期内开发出集成度更高、像元数更高的 CCD 器件也是非常困难的,所以拼接 CCD 成为大口径大视场望远镜相机光学系统设计的重点。

成像光学系统是外界被照明物体(或发光物体)所发出的球面波集合通过透镜系统后,在系统的理想平面上获得清晰的像,这一平面叫做光学系统的焦平面。由于实际光学系统经像差矫正后,除在理想焦平面上获得清晰的像外,常把理想波面的参考点沿轴向离焦,使波差不超过 $\lambda/2$ 时也能得到清晰的像则所对应的离焦量称作焦深,如式(2)所示。

$$\Delta\delta = 4\lambda \left(\frac{f}{D} \right)^2 \quad (2)$$

式中 λ 为入射光波长; f 为光学系统焦距; D 为光学系统入射光瞳直径; f/D 为光学系统的 $F^\#$ 数。

在焦深范围内,成像质量仍然能满足光学系统性能需求。光学系统成像原理图如图 1。

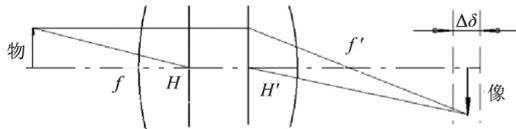


图 1 光学系统成像原理图

Fig. 1 Optics system imaging elements

由此可知对于给定的光学系统, CCD 靶面倾角误差应严格地限制在焦深范围,否则将使部分靶面脱离光学系统像面,在光学系统视场范围内使得图像有虚有实,达不到系统的使用要求^[3]。

因此,焦平面靶面拼接后的对平面度要求一般需要达到 $20 \sim 30 \mu\text{m}$,实际上,这是一个十分具有挑战性的要求。在误差分配环节,有很多因素影响大口径大视场望远镜焦平面上的靶面达到微米级别的平面度控制。这些影响因素主要包括各个独立组件之间的集成组装,以及随着时间渐变的表面精度,最后的设计和装配方案是要在充分考虑分析仿真以及实验测试的基础上才能得出。因此,在集成组装的过程中需要多次测量平面度,根据结果进行多次微调和分析,才能得到满足要求的拼接靶面。

2 靶面拼接平面度测量要求

对于单个 CCD 的测量侧重于对 CCD 性能的检验,单块 CCD 的平面度要求达到 $10 \mu\text{m}$ 左右,干涉仪具有纳米级的分辨率和精度,能够满足测量目的。拼接后 CCD 的测量侧重于对整体靶面平面度的检验和装调,平面度要求在室温下达到 $20 \mu\text{m}$ 左右, CCD 拼接后产生的拼缝会影响测量结果,不能选用干涉仪测量。工作状态 CCD 的测量需要透过窗口,对于仪器要求有一定的测量距离(比如 HSC 的窗口的厚度 37 mm , CCD 到窗口的距离 5 mm ^[4]),平面度要求拼接 CCD 在冷却和真空环境下达到 $30 \mu\text{m}$ 左右。这限制了测量 CCD 的各种可能技术平面度,要保证测量方法和测量结果不能受到窗口和测量距离的影响。

因此,靶面拼接平面度测量的需求主要有三种,首先是单个 CCD 芯片的平面度检测,用于检验;其次是多个 CCD 拼接过程中的检测,用于装调;最后是拼接 CCD 冷却后,透过低温杜瓦的窗口检测,测量结果不能受到窗口的影响。

3 CCD 平面度检测现有技术

3.1 目测法^[5]

欧洲南方天文台(ESO)采用了一种非常简单的方法来测量 CCD。肉眼观察千分表在 CCD 表面测量的显微镜物镜的位移,在 $x-y$ 坐标系上精确移动 CCD,并在被测 CCD 上的多个位置重复测量目标之间的高低差、角度以及偏移量。

由于显微镜镜头到 CCD 距离较近,这种方法无法测量前面设置有窗口的 CCD。这就给 CCD 带来了环境粉尘污染和测量过程中意外损坏的风险。同时这种方法还需要有经验的人执行测量,以实现可重复的结果,所有的定位、对焦、记录等步骤都必须手工完成,测量过程非常耗时。

3.2 激光与相机探测系统^[5]

加州大学和利克天文台采用了更自动化和先进的测量系统。他们将激光束投射到 CCD 的表面,并检测由于 CCD 倾斜而产生的光束偏转。图 2 描述了系统的几何形状。

该系统由一个激光器、一个放置 CCD 的 $X-Y$ 平移台、两个反射镜和一个用于探测反射激光束位置的照相机组成。激光束由第一面镜子定向到被测表面上,然后从 CCD 表面反射到第二个镜子引导光

束到相机探测系统。如果移动被测 CCD ,其表面的局部坡度发生变化 ,相机就会记录下光点的移动。通过扫描整个表面和记录光电运动 ,可以重建 CCD 的表面特征。

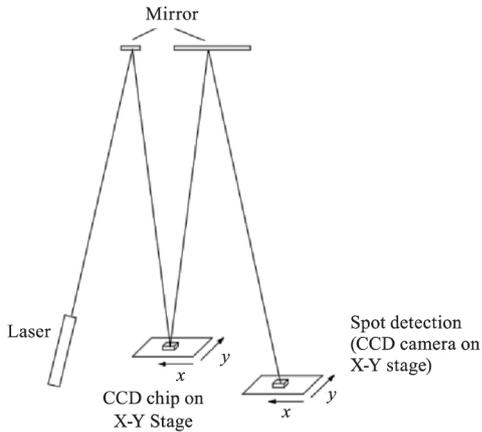


图2 加州大学/利克天文台用于 CCD 平面度测量的装置示意图^[5]
Fig. 2 Diagram of the set up used for CCD flatness measurements used at the Lick Observatory and University of California

用这种方法测量物体表面特征的初始条件是物体的表面必须是连续的 ,所以不能用来测量拼接 CCD 之间的高度差。而且还要求 CCD 的反射光束不能模糊 ,如果相机上的光点变得模糊 ,就很难准确的定位。

3.3 基于哈特曼掩模的测量方法^[5]

格林威治天文台 (RGO) 开发了一个基于哈特曼掩模的程序。在该系统中 ,光透过一个透镜和位于光轴上带有两个孔的掩模 ,将两个收敛光束锥投射到一个有源 CCD 上。如果探测器恰好位于投影系统的焦平面上 ,那么 CCD 图像中只有一个点;如果探测器在焦平面外 ,输出的图像中就有两个点 ,两个点之间的距离与探测器表面到焦平面的偏差成正比。为了得到 CCD 的表面特征 ,需要在一次曝光时扫描整个表面 ,并检测图像中的点位置 ,从而得到位置上的偏移量。

这一过程可以测量探测器表面高度差 ,测量表面是否连续不影响结果。因此 ,利用该系统可以对多个 CCD 的拼接平整度进行测量。图 3 为 RGO 测量方法光学原理图。

这种技术的缺点是 CCD 必须是处于接通电源以及冷却状态的 ,并且冷却需要很长时间 ,这大大延长了校正周期所需的时间 ,包括测量地形、校正倾斜度以及再次测量。所以需要很长的测量周期 ,此外 ,它还无法测量机械样品。

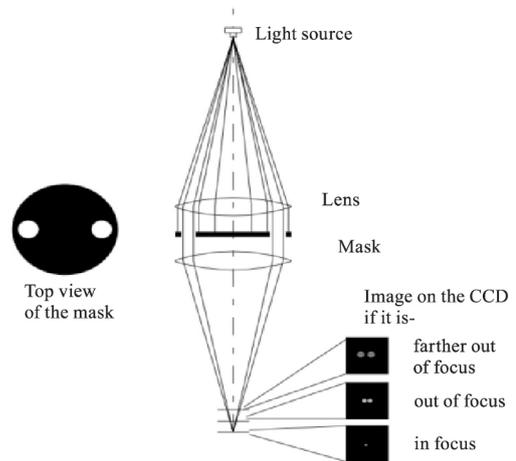


图3 RGO 测量方法光学原理图^[5]
Fig. 3 Optical schematic for the technique used by RGO for flatness measurement of CCDs

3.4 干涉仪测量法

干涉法是最常用的光学表面形貌测量方法。干涉测量是一种基于光波叠加原理 ,分析处理干涉场中亮暗变化、条纹形状变化或其他条纹数的变化 ,从中获取被测量的有关信息。

通过在干涉仪的一支光路中引入被测量 ,干涉仪的光程差就会发生变化 ,干涉条纹也会随之变化 ,这时可测量出干涉条纹的变化量 ,就可以获得与介质折射率和几何路程有关的一系列物理量和几何量^[6]。干涉仪测量原理图如图 4 所示。

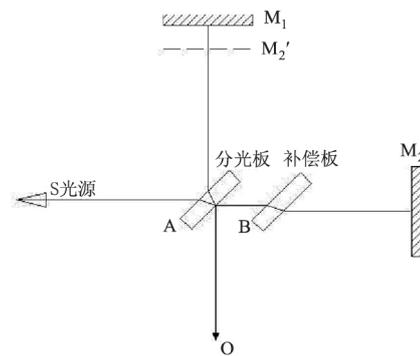


图4 干涉仪测量原理图^[7]

Fig. 4 Schematic diagram of interferometer measurement

为了重建 CCD 的形状 ,需要分析了非常窄的带通光条纹图 ,CCD 之间的拼接间隙会打断干涉条纹图样 ,这种方法无法计算拼接 CCD 之间的高度差 ,因此干涉测量法在大口径大视场望远镜拼接靶面平面度测量中应用度较低。

3.5 扫描白光干涉仪

白光干涉仪是将白光分解、传输和叠加后 ,对形

成的干涉条纹进行分析处理的仪器,其基本原理就是通过不同的光学元件,把白光分解成参考光路和检测光路,然后在每束光中引入一定的光程差,最后将这些经过不同光路的光叠加起来,从而形成明暗相间的干涉条纹。白光干涉条纹的特点是中央零件条纹精确定位,据此可以为测量提供一个绝对坐标^[8],实现数据的精确测量。

基于 Twyman-Green 干涉仪的垂直扫描白光干涉仪(如图 5 所示)产生的相干光束被分束器分成参考部分和信号部分。参考部分来自一个可移动的镜子,并与来自研究对象的信号光束叠加反射回分束器,沿着这束光即可观察到干涉,从而得到基准平面镜和被测表面的相对差值^[9]。

当参考光路中的反射镜以连续的速度移动时,用光电二极管或者相机检测组合光束的强度,当路径长度的差值大于相干长度时,则没有发生构造干涉。当两个长度相等时,则在光电二极管处产生相长干涉。由于反射镜的连续运动,在光电二极管的位置上不断形成和破坏干涉区,记录光强的波动,同时测量反射镜的位置。通过分析相长干涉的频率和特性,可以更准确地测量出这段距离^[9]。

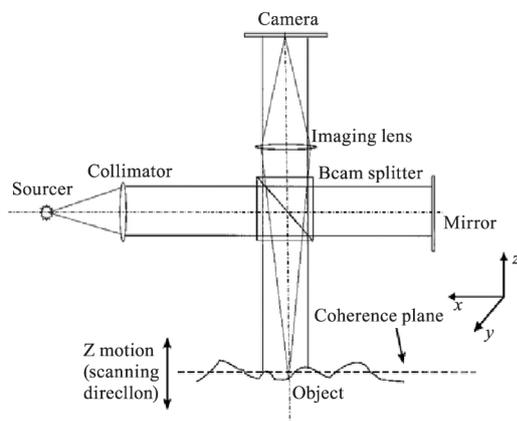


图 5 基于 Twyman-Green 干涉仪的垂直扫描白光干涉仪原理图^[9]

Fig. 5 Schematic of a vertical-scanning white-light interferometer based on a Twyman-Green interferometer

这个测量方法克服了测量窗口后面探测器的问题。白光干涉仪的窗口反射与 CCD 自身信号之间的路径长度之差大于相干长度,因此不会影响测量结果。

3.6 激光同轴位移器测量法

激光同轴位移器通常将一束光聚焦到目标上,采用辐条式光纤探针进行表面离焦检测,检测出物

体表面是否在这个焦点上以及物体表面离焦点有多远^[10]。可安装于龙门自动影像测量仪,基于算法以非接触方式测量表面位置坐标和倾角,可以获得表面形貌、表面倾角和距离,实现生产过程中尺寸和形状的在线监测。

测量系统布置示意图如图 6 所示,传感器系统的主要组成部分是一个像辐条一样排列的光纤束,使用一种对于相干性或单色性没有特殊要求的光源,这种光束通过透镜系统对准目标并聚焦,然后以投射的方式反射回光学系统,使用分束器或光栅准直后,反射光被定向到入射光束路径。分析光从表面反射的方式,该系统可以确定目标是否在照明光学的焦点上以及偏移量和偏移方向^[10]。

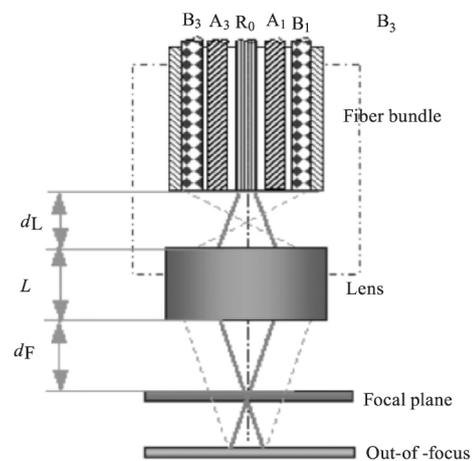


图 6 激光同轴位移器^[10]

Fig. 6 Focus sensors measurement principle

激光同轴位移器的移动质量一般非常小,能比较快的系统扫描一个表面,可达到较高的精度、灵敏度。由于大多数对焦检测系统只能在很小的范围内工作,因此平稳的移动整个系统,减小机械误差使光点始终聚焦在表面上是重点。

3.7 三角激光测量法

激光位移传感器是采用三角法实现物体位移的非接触测量,原理图如图 7 所示,用一束激光以某一角度聚焦在被测物体表面,然后从另一角度对物体表面上的激光光斑进行成像,物体表面激光照射点的位置不同,所接受散射或反射光线的角度也不同,用位敏探测器测出光斑像的位置,即可计算出物体表面激光照射点的位置。当物体沿激光线方向发生移动时,测量结果就将发生改变,从而实现用激光测量物体的位移^[11]。

使用三角激光测量仪进行测量时,通过一维电位

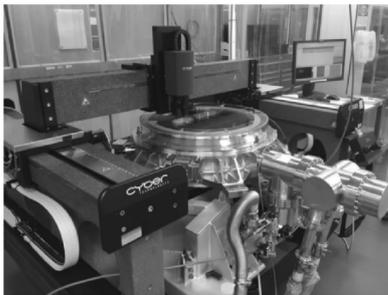


图 9 使用 OGP_SmartScope Vantage 300 测量 KMTNet 拼接探测器的平面度^[17]

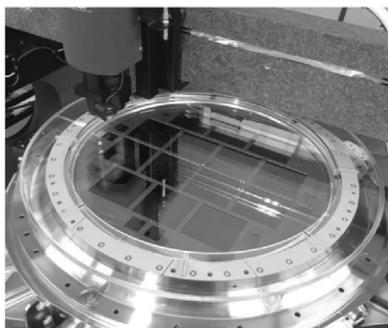
Fig. 9 OGP_SmartScope Vantage 300 measure the flatness of the KMTNet focal plane

4.3 J-PAS

J-PAS 项目是 OAJ (Observatorio Astrofísico de Javalambre) 在西班牙特鲁埃尔进行的一个为期五年的巡查项目。项目中使用口径为 2.55 m 大视场望远镜对北天区进行重子声波振荡 (BAO) 测量。该望远镜的相机焦平面由 14 块用于成像的 $9\text{ k}\times 9\text{ k}$ e2v CCD290-99, 8 块用于波前传感传输的 $2\text{ k}\times 2\text{ k}$ e2v CCD44-82, 4 块用于自动导引传输的 $1\text{ k}\times 1\text{ k}$ e2v CCD47-20 拼接安装在直径约 500 mm 精密焦平面冷板上。拼接后靶面平面度要求为峰谷值相差小于 $27\text{ }\mu\text{m}$ ^[18], 如图 10 所示。



(a) CT1000 测量过程



(b) 放置在低温杜瓦内的探测器

图 10 CT1000 非接触式几何测量系统, 焦平面温度为 $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[18]

Fig. 10 CT1000 non-contact measurement system, focal plane temperature is $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$

J-PAS 靶面平面度测量选用了 CT1000 非接触

式三维测量系统, 该系统通过彩色白色传感器利用光点和光谱仪进行测量。由不同波长组成的光被投射到不同的高度, 分光计分析强度与波长的关系, 当分光计中某一波长的强度达到最大值时, 就会产生高度读数。Z 轴移动精度可达到 $1.5\text{ }\mu\text{m}$, X 和 Y 轴移动精度可达到 $10\text{ }\mu\text{m}$ ^[18]。

4.4 VST

VST 是欧洲南方天文台 (ESO) 在智利的帕拉纳尔天文台 (Paranal Observatory) 2005 年投入使用的口径 2.6 m 巡天望远镜, OmegaCAM 安装在 VST 的卡塞格林焦点处, 焦平面由 32 块 $15\text{ }\mu\text{m}$ 像元尺寸的 $2\text{ k}\times 4\text{ k}$ 的 e2v CCD44-82 拼接而成, 拼接后测量平面度可以达到峰谷值 $18\text{ }\mu\text{m}$ 左右^[19]。

VST 平面度测量选用了 Keyence 的 LK-H082 三角激光测量探头以及 labview 数据处理, 在单个曲面探测器和 OmegaCam 拼接靶面的测量中得到了很好的应用。Keyence LK-H082 可以同时测量多个表面, 没有预热和过热的问题, 可以隔着杜瓦窗口进行即时测量。测量范围 $-17.6\sim +14.5\text{ mm}$, 可以表征倾斜表面和三维曲面探测器, 速度快, 精度高, 在 76.7 mm 的工作距离下提供更大的测量范围。

内部编程的 LabView 2010 模块能够在 X、Y 轴机动运动的面板上校正 X 和 Y 的初始位置, 实时屏幕读出激光传感器的 Z 值。激光位移传感器由控制软件 LK-Navigator 提供, 用于激光三角测量传感器的定位和调整, 每一次新的测量运行前都要对反射面选择、采样时间、频率和信号质量检查进行调整。所使用的激光三角测量传感器安装在一个精确的 X-Y-Z 平移台上, 可以对下方区域进行自动扫描, 在 Z 轴上采用手动线性平移^[20], 测量过程如图 11 所示。



图 11 Keyence LK-H082 测量过程^[20]

Fig. 11 Keyence LK-H082 measure the flatness of the VST OmegaCAM focal plane

4.5 DES

DES 与 NOAO 合作在塞罗-托洛洛国际天文台 (CTIO) 在建造了口径 4 m 的 Blanco 望远镜,用于对南部银河系范围 5000 平方度的测量。DECam 是暗能量测量的主要仪器,焦平面阵列由 62 块用于成像 $2\text{ k}\times 4\text{ k}$ CCD,12 块用于引导和聚焦 $2\text{ k}\times 2\text{ k}$ CCD 拼接而成,CCD 由劳伦斯伯克利国家实验室 (LBNL) 开发。拼接后靶面平面度要求峰谷值相差小于 $25\ \mu\text{m}$ ^[21]。

FNAL 公司利用 Micro-Epsilon 公司的共焦色散位移测量系统开发了一套平面度扫描系统。该设备从卤素灯泡中获取光,并将其定向,使不同频率的光聚焦在距离仪器头部不同距离的地方。该系统可检测到从焦点反射回来的光的频率,并提示被照表面与仪器头部之间的距离。线性 24 mm 范围内精度约为 $7\ \mu\text{m}$,最大工作距离约为 $250\ \text{mm}$ ^[22]。

测量过程中直线度的变化将直接影响测量精度,因为用于引导扫描头的定位系统必须具有特殊的直线度,才能达到仪器的精度。所以选用了 Physik 的一套仪器,精度为每运行 100 mm 直线度 $1\ \mu\text{m}$,系统的运行范围为 $300\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$,不足以测量的整个相机靶面,但它能够测量很大一部分,整个阵列的平面度可以通过少量重叠的测量部分进行映射,扫描系统如图 12 所示^[22]。

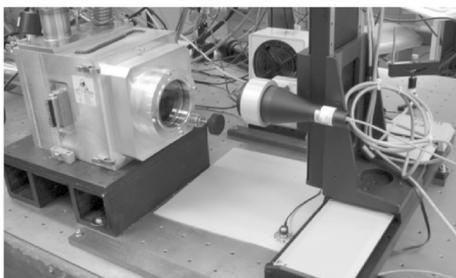


图 12 共焦彩色 CCD 平面度扫描系统定位于其中一个试验台^[22]

Fig. 12 Scanning system is located in one of the test plane

4.6 Subaru

超级主焦点相机 (HSC) 是用于下一代主焦点形式的口径 8.3 m 视场 1.5° 的大口径大视场 Subaru 望远镜的相机,HSC 的大视场由 116 个 $15\ \mu\text{m}$ 像素的 $2\text{ k}\times 4\text{ k}$ 全耗尽型背照式 CCD 组成,全工作时可覆盖 1.5° 直径视场,这些 CCD 由 HAMAMATSU Photonics K. K 和日本国立天文台 (NAOJ) 研制。焦平面平面度测量后峰谷值相差小于 $45\ \mu\text{m}$ ^[23]。

在室温下用 Mitaka-Koki NH3-SP 高度测量系统 (如图 13 所示) 测量了每个 CCD 的平面度,Mitaka-Koki NH3-SP 高度测量系统是一个非接触式 3D 表面高度测量系统,具有 $0.5\ \mu\text{m}$ 的测量精度。整体 CCD 组件测量选用了 Mitaka-Koki 公司的 NH-3SN 型非接触式坐标测量仪 (测量精度 $1\ \mu\text{m}$),测量了 116 个 CCD 组件的厚度和平面度,测量结果安装在焦平面上的所有 CCD 的整体平面度不超过 $40\ \mu\text{m}$,厚度变化在 $35\ \mu\text{m}$ 之内^[24]。



图 13 Mitaka-Koki NH3-SP 高度测量系统^[23]

Fig. 13 Mitaka-Koki NH3-SP measurement system

对于冷板的平面度测量方法,采用 Mitsutoyo 公司的接触式坐标测量仪 (CMM) LEGEX9100,通过测量每个 CCD 的安装中心点来确认其平面度。该 CMM 的可测量工作范围为 1 m,直径 620 mm 的冷板表面的测量精度可以达到 $1\ \mu\text{m}$ 。冷板通过三个特质垫片安装在 CMM 的坐标测量仪上,这样避免了引入的位置表面变形^[24]。

4.7 LSST

LSST 是由 NOAO 赞助,由 Michael Strauss 主导的大口径大视场的地基巡天望远镜项目,口径 8.4 m 视场 3.5° ,主要对暗能量和暗物质、太阳系地图、光学瞬变、星系天文学四个重点科学项目进行观测。相机焦平面采用圆形靶面形式,共有 189 块 $4\text{ k}\times 4\text{ k}$ 像元尺寸 $10\ \mu\text{m}$ 的 CCD 组成的阵列,为了保证其正常工作,所有 CCD 是采用 3×3 的组件形式安装于峰谷值平面度 $6.5\ \mu\text{m}$ 的基筏之上,靶面平面度要求为峰谷值相差小于 $10\ \mu\text{m}$ ^[25]。

LSST 的拼接 CCD 平面度测量采用 Keyence LT-9030M 三角激光共焦距离测量仪结合一套 Aerotech ATS-3220 开放式中心 $x-y$ 高精度气浮平

台完成,该仪器的工作原理是基于共焦显微镜系统和一种新颖的内部波束扫描机制,该测量方法不仅用于拼接 CCD 的实验室组装监测,也用于透过透镜窗口玻璃进行装配后的外部检测。LT-9030M 可达到为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的测量精度,光学头高度测量范围为 $3\ \text{mm}$ 与镜头前方的距离为 $30\ \text{mm}$ 。这个距离能够通过低温恒温器的窗口进行测量,结合气浮平台扫描范围为 $200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ ^[26]。

Fisba $200\ \text{mm}$ 口径的 Twyman-Green 相位测量干涉仪可以对每个传感器进行干涉测量,以确定其平面度特性。利用 Fisba 干涉仪或 Keyence 系统,可以通过低温恒温器窗口对拼接靶面进行平面度监测^[26]。

5 结 语

由上述可知,目前国际上大口径大视场望远镜拼接靶面的平面度测量方法普遍采用三角激光测量法或者彩色激光同轴位移测量法,测量精度一般可以达到 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$,能够满足拼接 CCD 的测量精度,并且可以满足隔着杜瓦窗口测量工作状态 CCD 的目的。

国际上 $30\ \text{米}$ 级口径地基光学望远镜已经开始建造,而我国目前的光学望远镜制造水平尚驻留于 $4\ \text{米}$ 级,与国际先进水平存在不小的差距^[27]。大口径大视场焦平面靶面拼接在国外已有多年研究,取得了许多成功的应用并积累了大量的经验,而国内对于拼接 CCD 平面度的测量仪器与测量方法的研究尚处于起步探索阶段,可借鉴的经验也少,缺乏成熟的使用成果和商品化的软件产品。可见,进行平面度高精度仪器的测量方法的研究,未来发展趋势主要集中在以下几个方面:

(1) 提高测量焦平面 CCD 平面度的准确性和精确性,减少大口径巡天望远镜性能的系统性错误。比如减小拼缝对焦平面 CCD 的拼接精度的影响,测量方法不受制冷和真空的条件的影响。

(2) 国内大口径大视场望远镜的 CCD 平面度测量方法需要一套完善的误差分析系统和针对于误差的解决方法。

(3) 针对提高检测焦平面拼接靶面平面度精度的方法,进行实验验证可行性,并对测量结果进行数据处理和迭代。

参考文献:

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

[1] Zhang Jingxu. Overview of structure technologies of large

aperture ground-based telescope [J]. Chinese Optics, 2012, 8: 328-329. (in Chinese)

张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述 [J]. 中国光学, 2012, 8: 328-329.

[2] Gang Chen, Zhong-Quan Wen, Cheng-Wei Qiu. Super-oscillation: from physics to optical applications [J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 471-493.

[3] Wang Zhi. Optical measurement method of angle error between CCD target surfaces and locating faces [J]. Infrared Technology, 2012, 34(4): 213-216. (in Chinese)

王志. CCD 靶面与安装定位面夹角误差的光学检测方法 [J]. 红外技术, 2012, 34(4): 213-216.

[4] Komiyama Y, Aihara H, Fujimori H, et al. Hyper supprime-cam: camera design [J]. Proc Spie, 2010, 7735(1): 54-58.

[5] Stover R J, Wei M, Li Y. CCD Flatness Measuring System at UCO/Lick Observatory [M] // Optical Detectors for Astronomy. Netherlands: Springer, 1998.

[6] Zhai Baoquan. A flat crystal shape measurement system based on laser plane interferometer [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)

翟保全. 基于激光平面干涉仪的平晶面形测量系统 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

[7] Yu Daoyin, TAN Hengying. Optical engineering [M]. 4th ed. Beijing: CRC Press, 2017. (in Chinese)

郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2017.

[8] Deng Zhi, Wang Yunbo, Gao Junxiong, et al. White-light interferometer data acquisition system based on FPGA design [J]. Computer & Digital Engineering, 2012(2): 137-140. (in Chinese)

邓志, 王耘波, 高俊雄, 等. 基于 FPGA 的白光干涉仪数据采集系统的设计 [J]. 计算机与数字工程, 2012(2): 137-140.

[9] Artur Olszak. Lateral scanning white-light interferometer [J]. Appl Opt, 2000, 39(22): 3906-3913.

[10] Liao Yanbiao. Fiber optic off-focus sensor for surface topography measurement [J]. Optical Engineering, 2003, 42(3): 670-674.

[11] Zhu Wanbin. Laser displacement sensor using in shape measurement [J]. OME Information, 2010, 27(10): 70-72. (in Chinese)

朱万彬. 激光位移传感器在物体表面形状测量中的应用 [J]. 光机电信息, 2010, 27(10): 70-72.

[12] Yang Mengfang, Chen Lei, Zhang Dengwei, et al. Research on high speed and non-contact angle detection based on

- laser measurement [J]. *Laser & Infrared*, 2017(5) : 595–599. (in Chinese)
- 杨梦放 陈磊 张登伟 等. 基于激光测量的高速非接触角度检测技术研究[J]. *激光与红外*, 2017(5) : 595–599.
- [13] Lehner M J , Wang S Y , Cook K H , et al. The transneptunian automated occultation survey (TAOS II) [J]. *Proceeding of Spie the International Society for Optical Engineering* 2012 ,9145.
- [14] TAOS- II The transneptunian automated occultation survey cameras [DB/OL]. <https://taos2.asiaa.sinica.edu.tw>.
- [15] Science; Resarchers at Changbuk National University release new data on astronomy reasearch. Kmtnet: a network of 1.6 m wide-field optical telescopes installed at three southern observatories [J]. *Journal of the Korean Astronomical Society* 2016 ,49(1) : 37–44.
- [16] OGP Quality Vision International Inc ,OPTICAL GAGING PRODUCTS [DB/OL]. (2002) . [2019. 6. 26]. <https://www.ogpnet.com>.
- [17] TELEDYNE E2V ,Space & Astronomy [DB/OL]. 2012. [2019.6.26]. www.e2v.com/space.
- [18] Robbins M S ,Bastable M ,Bates A ,et al. Performance of the e2v 1.2 GPix cryogenic camera for the J-PAS 2.5m survey telescope [C]// *Ground-based & Airborne Instrumentation for Astronomy VI*. International Society for Optics and Photonics 2016.
- [19] Iwert O ,Baade D ,Balestra A ,et al. The OmegaCAM 16 k×16 k CCD detector system for the ESO VLT Survey Telescope (VST) [J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering* 2006 ,6276(8) : 345–352.
- [20] Deiries S ,Iwert O ,Stroebele S. Precise topographic surface measurements of warm and cold large image detectors for astronomical instrumentations [C]// *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation International Society for Optics and Photonics* 2014.
- [21] Estrada J ,Alvarez R ,Abbott T ,et al. Focal plane detectors for Dark Energy Camera (DECam) [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering* , 2010 ,7735(1) : 1–11.
- [22] Dorn D A ,Holland A D. High energy optical and infrared detectors for astronomy II [J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering* 2008 ,7742.
- [23] Kamata Y ,Miyazaki S ,Nakaya H ,et al. Evaluation of the fully-depleted back-illuminated CCD for Subaru Suprime-Cam [J]. *Proceeding of Spie the International Society for Optical Engineering* 2008 ,7021: 70211S–70211S–9.
- [24] Obuchi Y ,Komiya Y ,Kamata Y ,et al. Hyper Suprime-Cam: implementation and performance of the cryogenic dewar [C]// *Ground-based & Airborne Instrumentation for Astronomy IV*. International Society for Optics and Photonics 2012.
- [25] Gilmore K ,Kahn S ,Nordby M ,et al. The LSST camera overview: design and performance [C]// *Society of Photo-optical Instrumentation Engineers. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* 2008.
- [26] Takacs P Z , O'Connor P ,Radeka V ,et al. Lsst detector module and raft assembly metrology concepts. [C]// *Optomechanical Technologies for Astronomy*. International Society for Optics and Photonics 2006.
- [27] Yang Fei ,Am Qichang ,Zhang Jing ,et al. Seeing metrology of large aperture mirror of telescope [J]. *Optics and Precision Engineering* 2017 (10) : 37–44. (in Chinese)
- 杨飞 安其昌 张静 等. 大口径光学系统的镜面视宁度检测 [J]. *光学 精密工程* 2017 (10) : 37–44.