文章编号:1001-5078(2020)10-1155-09

·综述与评论 ·

大口径大视场校正镜组支撑与装配方法综述

唐 境¹² 张景旭¹ 安其昌¹ 刘昌华¹² 陈 涛¹ 明 名¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:校正镜组是大口径大视场望远镜的核心组件。为了满足透镜面形和成像质量等光学 设计要求 ,透镜支撑结构的设计与安装对准方式的选择尤为重要。本文详细介绍三种透镜支 撑结构 压圈隔圈支撑、RTV 弹性体支撑和柔性结构支撑 ,并对三种支撑方式优缺点进行比 较。结合实例总结了校正镜组的安装对准方式 ,对大口径大视场望远镜校正镜组的支撑结构 设计及安装方式确定具有非常好的借鉴意义。

关键词:校正镜组;支撑结构;安装对准;大口径大视场望远镜 中图分类号:TH751 文献标识码:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2020.10.001

Overview of wide field corrector support and assembly for large survey telescope

TANG Jing^{1,2} ZHANG Jing-xu¹ AN Qi-chang¹ LIU Chang-hua^{1,2} CHEN Tao¹ MING ming¹

(1.Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics ,Chinese Academy of Science , Changchun 130033 ,China; 2.University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China)

Abstract: Wide Field Corrector is the prime component of large aperture wide field telescope. In order to meet the requirements of optical design such as lens shape error and image quality the choice of lens support assembly and alignment is particularly important. In this paper three kinds of lens support structures pressure ring spacer support, RTV elastomer support and flexible support are introduced in detail and the advantages and disadvantages of the three support methods are compared. The installation and alignment mode of the calibration lens set with an example are summarized which has a very good reference significance for the design of the support structure of the calibration lens set of the large-diameter large-field telescope and the determination of the installation mode.

Keywords: wide field corrector; support assembly; alignment; large telescope with wide field-of view

1 引 言

建造新一代大视场巡天望远镜,提供大规模数 字图像巡天能力,在图像观测的灵敏度和时间分辨 率方面不断突破,已成为地面光学设备发展的主要 趋势之一^[1-2]。 望远镜的分辨能力与口径成正比(分辨细节的 能力=1.22 λ/D ,其中 λ 为观测波长 D 为有效的通 光孔径),增加口径可以有效地提高对临近目标的 探测能力;同时望远镜的集光能力与口径的平方成 正比,针对大视场望远镜 提升口径可以有效提升暗

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: 唐 境(1993-), 女,硕士研究生,研究方向为地基大口径望远镜校正镜组透镜支撑设计与分析。E-mail: tangjing171@ mails. 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。Email: zhangjingxu123@ sina. en

收稿日期: 2019-10-29;修订日期: 2019-12-04

弱目标观测数据信噪比,拓展极限探测能力,对更加 深远的宇宙进行探索^[3]。因此,大口径大视场望远 镜是未来发展时域天文的关键。

目前 国外拥有多台大视场数字巡天能力的终 端/望远镜 如图 1 所示。图 1(a) 4 m Mayall 望远 镜最新的主焦点终端,BigBoss 具有 3°视场,焦比为 f/2.7^[4]。图 1(b) Dark Energy Camera(DeCam) 是目 前最成功的大视场终端之一,Blanco 望远镜主镜口 径为4 m,利用其1.5°视场的主焦点巡天设备进行 暗物质与暗能量探索^[5]。图 1(c) VLT Survey Telescope(VST) 口径为 2.6 m 视场为 1° 其科学终端为 位于卡塞格林焦点处的 "OmegaCAM"^[6]。图 1(d) SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 望远镜口径为 2.5 m ,视场为 3°^[7]。图 1(e) 8.2 m 望远镜 Subaru Hyper Suprime-Cam 视场为 1.34°,采用主焦点式光 学系统 其能量损失最小 对于大视场系统有着特殊 的优势,目前Subaru在主焦点巡天方面,产生了大 量的科学产出^[8]。图 1(f) large synoptic survey telescope(LSST) 为 8.4 m 口径 视场 3.5°的下一代大口 径大视场望远镜^[9]。



图1 国外大口径大视场望远镜^[4-9]

Fig. 1 Foreign large aperture wide field of view telescope^[4-9]

校正镜组是望远镜成像前光束处理的重要组 件,消除系统残余的彗差、像散、色差和畸变^[10],提 高成像质量^[11]。虽然不同的大口径大视场望远镜 采用的光学形式不同,但是望远镜的校正镜组透镜 口径较传统望远镜均有明显的增加。因此为了保证 在重力和温度变化下透镜的面形精度和成像质量, 大口径大视场望远镜对校正镜组透镜支撑结构的设 计及其安装方式的选择,对望远镜系统具有十分重 要的意义。

本文系统总结了大口径大视场望远镜校正镜组 透镜的支撑结构及安装方式,并对现有结构和方法

的优缺点进行归纳,期望能够为大口径大视场望远 镜校正镜组的支撑设计提供帮助的相关技术。

2 校正镜组支撑的光学设计要求

校正镜组支撑结构一般需要满足以下几点设计 目标:

(1)透镜及支撑结构应力低^[12]

通过计算分析, Multiple Mirror Telescope (MMT)要求其校正镜组的光学元件最大许用应力 为 3. 4×10⁶ N/m²,支撑结构最大许用应力为124× 10⁶ N/m²。

(2) 透镜相对位移小^[12]

相对位移包括透镜的对中误差,倾斜误差和透 镜间误差等。例如 Blanco 望远镜中 DeCam 校正镜 组最大口径透镜的对中误差最大不超过±25 μm,倾 斜误差不超过±27 μm²。

(3) 透镜面形精度高^[12]

由于校正镜组为透射式光学系统,因此透镜的 面形精度包括每个透镜前后两面的面形误差 RMS 值。如 Large Binocular Telescope(LBT)校正镜组的 设计要求为,透镜面形误差 RMS 小于 50 nm^[14]。

(4) 成像质量要求高

一般来说透镜的支撑好坏主要由成像质量决 定。对于透镜成像质量的评价标准主要分为 PSF 点扩散函数 ,80 % 能量集中度和 FWHM 半高全宽 等。例如 Blanco 望远镜要求图像质量 RMS 半径小 于 9 μm^[13],Korea Micro-lensing Telescope Network (KMTNet) 校正镜组成像质量要求 FWHM 小 于 1"^[15]。

针对这些特点,可以看出大口径大视场望远镜 的校正镜组的加工、支撑以及装配环节均需要十分 细致的分析与工艺摸索。

3 透镜支撑结构形式

透镜支撑结构被动支撑,支撑位置位于透镜侧 面,多采用径向支撑和轴向边缘支撑相结合的方式。 主要分为压圈隔圈,RTV 弹性体支撑和柔性结构支 撑三条技术路线。其中压圈隔圈支撑为传统小口径 透镜支撑方法,选用 SDSS 望远镜相机,Gemini 望远 镜光谱仪和 European Extremely Large Telescope(E-ELT)光谱仪中透镜结构作为简述,本文重点列举 RTV 弹性体支撑和柔性结构支撑方式。

3.1 压圈隔圈支撑

由于大口径望远镜选用不同的光学形式 部分

望远镜科学终端内的校正镜组口径较小 ,可采用传 统的压圈隔圈的方式固定支撑透镜 ,与其他光学仪 器所采用的方法相同。

1998 年, SDSS 望远镜相机所选用的透镜支撑 方式为: 透镜压入固定有6块弹性支撑块的镜室中, 轴向支撑一端采用 Kapton 隔圈,另一端采用0型圈 的方式,如图2所示。镜室材料为铝,弹性支撑块材 料为玻璃纤维填充聚四氟乙烯。

2006 年,在 SDSS 设计的基础上, Stephen A. Smee 等对 Gemini 的宽视场光线多目标光谱仪 (WFMOS)进行了透镜支撑分析设计,结构与 SDSS 基本相同,尺寸为 SDSS 相机透镜 125 %。镜室材料 为铟钢 38^[16]。



Fig. 2 SDSS camera lens support assembly^[16]

在欧洲南方天文台(ESO) 建造的 E-ELT 望远 镜高角分辨率单片光学和近红外积分视场光谱仪 (HARMONI) 的透镜支撑设计中,同样采用径向定 位柔性结构和隔圈相结合的方式。该支撑方法已成 功应用在 Gran Telescopio Canarias(GTC) 近红外多 目标成像光谱仪(EMIR) 的准直透镜支撑中,如图 3 所示。



图 3 ELT 平行光管透镜支撑结构^[17] Fig. 3 ELT lens support assembly^[17]

该设备内透镜最大口径为 500 mm,径向支撑 结构采用2个定位和1个柔性弹簧支撑块,支撑块 沿圆周呈 120°分布。透镜材料为无水熔融硅,定 位支撑块为铝制,粘接有一定厚度的 PTFE 聚四氟 乙烯。柔性弹簧支撑块为钢制,支撑块上粘接有 一定厚度的 Teflon 弹性材料。轴向支撑为材料为 用于施加一定预紧力的 Teflon 压圈和铝制 CUBE 弹簧压圈^[17]。

3.2 RTV 弹性体支撑

由于可靠性高、结构复杂程度低等优点,大口径 望远镜校正镜组中大口径透镜支撑多采用 RTV 弹 性体支撑的方式。该支撑方式可分为离散 RTV 块 支撑,RTV 环支撑及 RTV 柔性结构相结合的三种支 撑方式。

1998 年,Robert Fat 等提出了宽视场校正器的 透镜设计结构,如图 4 所示。MMT 望远镜校正镜组 中的透镜最大直径为 800 mm。透镜组由离散 RTV 垫片统一固定在镜筒中,支撑结构由 24 个粘接有方 形 RTV 垫片的径向支撑块和 24 个轴向 RTV 垫片 支撑相结合。径向支撑为主支撑,其支撑块由 4 个 螺钉固定到镜室上的预留孔中。为了防止引入额外 热应力进而影响透镜成像质量,轴向 RTV 垫片仅单 面粘接到镜室上。透镜材料为熔石英,镜筒材料为 铟钢 39,弹性垫片材料为 RTV560,粘接 RTV 底漆 为 SS4155^[18]。



Fig. 4 MMT lens support assembly^[18]

基于 MMT 透镜支撑的原理 ,2008 年 A. P. Doel 等人提出 Blanco 望远镜 DeCam 的透镜支撑设计方 案 ,如图 5 所示。该结构透镜最大直径为 980 mm , 工作温度为-5~27 ℃ ,重力角度变化为 0~45°。与 MMT 校正镜组透镜支撑方式不同的是 ,DECam 单 片透镜安装在独立镜室中 ,各镜室与镜筒由柔性结 构连接。透镜径向支撑为 24 个粘有方形 RTV 垫片 的支撑块 轴向为 24 个 RTV 垫片支撑 ,粘接方式与 MMT 相同。挡板安装在主镜室顶部 ,防止在不同重 力角度下 RTV 垫片粘接失效后透镜脱落。螺栓将 镜室、镜筒与柔性结构镜筒间的定位钢环和隔圈固 定连接,以隔离机械振动,灵活调节透镜间距,完成 无热化设计。透镜材料为熔石英7980,镜筒材料为 钢,镜室材料为铟钢38,弹性垫片为厚度2 mm 的 RTV560^[13]。



图 5 DeCam 透镜支撑结构^[13]

Fig. 5 DeCam lens support assembly^[13]

2011 年 Peter Doel 和 Robert Besuner 等提出 Mayall 望远镜校正镜组的透镜支撑结构,如图 6 所 示。该透镜最大尺寸为 1143 mm。工作温度为-10~ 30 ℃,工作情况下重力变化角度为 0°~60°。透镜 支撑结构与 DECam 近似,主要区别为镜室轴向支撑 斜面加工为单独金属块 插入到镜室的预留孔中,便 于镜室加工及透镜安装。透镜材料为熔石英,镜室 材料为铟钢 38, 镜筒材料为 A36 钢^[4]。



图 6 Mayall 透镜支撑结构^[4]

Fig. 6 Mayall lens support assembly^[4]

在 William Herschel Telescope(WHT)的主焦 点校正器的设计分析中,Don Carlos Abrams等设 计如图 7 所示的透镜支撑结构。该透镜最大口 径为 1100 mm。透镜支撑方式采用 24 个直接粘 接到镜室的圆形径向 RTV 垫片和 24 个轴向方形 RTV 垫片,粘接方式与 MMT 相同。该透镜材料 为熔石英 7980,镜室材料为铟钢,弹性垫片材料 为 RTV^[19]。



图 7 WHT 透镜支撑结构^[19] Fig. 7 WHT lens support assembly^[19]

LBT 望远镜的双主焦点相机的透镜结构设计于 2004 年,由 Roberto Ragazzoni 等人提出,如图 8 所示。 透镜最大直径为 810 mm,该结构径向支撑为 6 个弹 性垫片 轴向支撑为 3 个硬点支撑和三个无定向杠 杆 在镜室和镜筒间装有钢制垫圈,以此来匹配材料 间的不同热膨胀系数。与上文望远镜所采用的全 RTV 垫片支撑相比,该结构参考了主镜支撑方法,采 用硬点固定透镜位置,无定向杠杆支撑结构以降低镜 室变形的敏感性。透镜材料为 BK7,镜筒材料为钢, 镜室材料为 Invar,弹性垫片材料为 DELRIN^[14]。



图 8 LBT 透镜支撑结构^[14] Fig. 8 LBT lens supportassembly^[14]

同年,Charles Delp 等提出透镜 RTV 环的支撑 方式,并成功应用于 William Herschel Telescope (DCT)校正镜组中。在透镜与镜室对准的条件下, 向镜室和透镜间缓慢注入 RTV 溶液,降低透镜及镜 室材料间由热膨胀系数不匹配而引起的热应力。透 镜口径为 1100 mm,透镜材料为熔石英^[20]。

Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System(Pan-STARRS)的 PS2 校正镜组透镜支撑结 构对直接注入 RTV 环的支撑方式进行了改进,如图 9 所示。透镜最大口径为 600 mm。其主镜室顶部 装有挡板以抑制校正镜组中的散射光。透镜侧面涂 深色底漆 降低白色 RTV 环反光程度。透镜材料为 熔石英,RTV环为厚度为3 mm的3122 RTV,镜室 材料为钢^[21]。



图 9 Pan-STARRS PS2 透镜支撑结构^[21] Fig. 9 Pan-STARRS PS2 lens support assembly^[21]

3.3 边缘柔性支撑

2017 年, A. Barto S. Winters 等借鉴了 Kepler 望 远镜的设计,对 LSST 相机的透镜支撑结构进行支 撑分析设计,支撑结构如图 10 所示。该透镜最大口 径为 1550 mm。最大口径的透镜由 24 个 Invar 垫片 进行径向支撑, Invar 垫由上下垫有球形垫圈的螺钉 连接在钛合金柔性结构上。L1L2 两个独立的透镜 单元由三角形截面的环形管状桁架结构支撑连接, 该环形结构为透镜提供径向支撑,优化支撑结构,在 减轻相机重量的同时保持足够的刚度和稳定性。支 撑结构材料为 Invar360,镜室材料为 K63712/ BT250E-1 伪各向同性碳纤维复合板,挡光环和管状 桁架材料为铝,柔性结构材料为钛合金^[9]。



图 10 LSST 透镜支撑结构^[9 22] Fig. 10 LSST lens support assembly ^[9 22] SDSS 望远镜校正镜组的透镜支撑结构则采用 30 个切向接触的柔性支架,均匀安装与透镜外侧, 切向杆厚度为 3 mm,柔性支架固定在镜筒上,如图 11 所示。透镜尺寸为 727 mm,透镜材料为熔石英 7940.镜室材料为钢^[23]。



图 11 SDSS 校正镜组透镜支撑结构^[23] Fig. 11 SDSS WFC lens support assembly^[23]

与 SDSS 透镜支撑结构类似,WIYN 望远镜的 One Degree Imager 校正镜组选用如图 12 所示的透 镜支撑结构。透镜最大口径为 591 mm。该支撑结 构主要由轴向支撑所承担,径向支撑结构为 18 个 L 型切向支撑垫片,镜室与径向支撑垫片由销钉连接, 径向支撑垫片与透镜间无预紧力,防止产生额外力 矩影响成像质量。轴向支撑结构为轴向预紧环,与 镜室由固定螺钉连接。支撑垫片与镜室间由支撑透 镜材料为 Schott Lithosil Grade Q2 Homogeneity H2, 支撑结构材料为铝合金,镜室材料为铟钢 36^[24]。



图 12 WIYN 透镜支撑结构^[24] Fig. 12 WIYN lens support assembly^[24]

加州大学洛杉矶分校(UCLA)的 J. M. M. Horn 等对 Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy (SOFIA)机载望远镜中红外开光测试实验相机 (FLITECAM)准直器的透镜进行支撑结构的设计, 如图 13 所示。透镜口径为 165 mm,材料为 LiF,由 于该材料易碎且易受热载荷和机械载荷的影响,因 此该透镜结构设计为 6 个弯曲柔性杆,隔离因重力 和温度变化而产生的载荷。支撑结构材料为铝^[25]。



图 13 SOFIA FLITECAM 透镜支撑结构^[25] Fig. 13 SOFIA FLITECAM lens support assembly^[25]

2006年, Robert Fata 等对 MMT 的 Binospec 光 谱仪中透镜支撑方式同样选用切向杆的原理,如图 14 所示。该结构透镜的最大口径为 356 mm。透镜 支撑方式为 12 个装有圆形凸台的切向柔性支撑臂。 透镜与镜室进行对中后,从镜室外的注胶孔中注入 粘接剂。镜框/柔性结构材料为铝合金 7050-T7451 圆形凸台材料为 304L 不锈钢,由于结构内 部流动有 LL5610 耦合剂(primer),该耦合剂与 RTV 材料产生反应,因此粘接剂材料选用 Hysol 9313 环 氧树脂混合 Siltex 44^[12]。



图 14 MMT Binospec 透镜支撑结构^[12] Fig. 14 MMT Binospec lens support assembly^[12]

由这种柔性切向杆支撑方式而衍生的设计还有 很多 如 2006 年 T. R. Froud ,等人对 Subaru 的近红 外相机的透镜结构的设计 如图 15 所示。该透镜最 大口径为 255 mm,工作温度为-173~-937 ℃。轴 向支撑为固定在镜室上的 8 个圆锥形 INVAR 弯曲 柔性臂。柔性臂与透镜间采用铟钢柔性垫进行粘 接。为使粘接剂形成薄膜,镜头周围采用硅酮胶贴 一圈绵纸(cotton paper)^[8]。



图 15 Subaru 近红外相机透镜支撑结构^[8]

Fig. 15 Subaru near infrared spectrograph lens support assembly ^[8]

欧洲航天局 EUCLID 中的近红外光谱仪成像光 度计(NISP) 同样在切向杆支撑的基础上进行部分 改进,如图 16 所示。透镜口径 170 mm,透镜材料为 CaF₂。若采用预紧力方式固定透镜镜室,预紧力载 荷与振动载荷将使透镜产生变形 因此选用粘接方 式进行固定连接,支撑结构如图 16 所示,该结构可 为透镜在不同工况下提供精确支撑力^[26]。



图 16 EUCLID NISP 透镜支撑结构^[26] Fig. 16 EUCLID NISP lens support assembly^[26]

2013 年 GMT 提出单边切向杆的柔性支撑方 式 如图 17 所示。透镜最大口径为 1540 mm ,材料 为 N-BK7。支撑采用 24 点径向切向杆支撑结构 支 撑杆一端由螺钉固定在镜室上,另一端粘接在透镜 侧面。切向杆为单边支撑,采用 9319 环氧树脂进行 粘接 粘接面圆形。直径 35.6 mm。切向杆及粘接 块材料为钛合金,镜室材料为铝合金^[27]。不同支撑 结构优缺点见表1所示。

表1 不同支撑结构优缺点

Tab. 1 The advantages and disadvantages

of	different	support	assembly	v
_			**********	

支撑方式	压圈隔圈	RTV 弹性体	柔性结构
支撑结构	压圈/径向弹性体	离散 RTV 垫/RTV 环	切向杆
谐振	高	低	高
应力	大	小	小
面形精度	低	高	高
系统复杂度	低	低	高
结构紧凑程度	一	低	高



图 17 GMT 透镜支撑结构^[27] Fig. 17 GMT lens support assembly^[27]

4 透镜对准/安装方式

校正镜组的对准及安装 其基本思想均为首先 对准透镜与镜室 将透镜与镜室安装固定为一个整 体后 再进行透镜组与镜筒间的对准与安装 本文主 要以 Blanco 望远镜 DeCam 校正镜组为例。

如图 18 所示, DECam 装调对准装置由 18 点 Whiffletree 支撑结构,Whiffletree 倾斜调整装置,镜 室支撑环 XY 平移台和精密千斤顶组成。



图 18 透镜及镜室安装结构^[28]

Fig. 18 Basic set up for lens and cell alignment^[28]

首先将透镜及镜室分别放置于 Whiffletree 支撑 结构和支撑环上,调整 Whiffletree 倾斜调整装置和 精密千斤顶,分别使用千分表测量透镜及镜室径向 表面,调整透镜和镜室至光轴垂直,如图 19 所示。



图 19 透镜镜室基准测量^[15] Fig. 19 Measurement of lens cell reference surface^[15]

将轴向 RTV 垫片粘接到镜室相应位置中,使用 Micro-Epsilon 光学位移传感器测量轴向 RTV 垫片 是否为同一高度,容许误差为±25 μm。Whiffletree 支撑结构材料为 PTFE,支撑点的端面与透镜具有相 同的曲率半径,端面上粘接有1 mm 厚的 Viton 橡胶 垫,使透镜与镜室装配实现面接触,防止出现应力集 中的现象。使用精密千斤顶和镜室支撑环上的精密 螺丝如图 20 所示,移动镜室至轴向 RTV 垫片与透 镜刚好接触。在透镜和径向 RTV 支撑块间插入与 胶层同厚度的纸张,以固定胶层厚度。取出纸张后 在透镜上涂底漆和 RTV 胶,将径向 RTV 支撑块拧 紧固定^[29]。



图 20 支撑环支撑结构和精密螺丝调整机构^[29] Fig. 20 Cell support ring showing roller supports and X-Y adjustment screws^[29]

在校正透镜与镜室装调满足公差要求之后,各 校正镜以组件形式进行装调检测,原理如图 21 所 示。校正镜组对准方式主要利用两台相机同时测量 激光光源发出的光,当透镜存在倾斜和偏心时,两台 相机能够对定量测量倾斜和偏心的值,根据相机的 反馈值对校正镜组的相对位置和倾斜量进行调整, 直到满足透镜装调的公差要求。



国 21 仪正说短旗儿孙准际连国

Fig. 21 Laser alignment system schematic^[30]

在激光对准测量的过程中,依次将透镜组件安 装入镜筒,通过检测相机成像的偏心值,结算校正透 镜的倾斜和偏心^[30]。利用校正透镜镜室上预留的 装调接口调整透镜组件的相对位置,达到校正镜组 装调的误差要求微米级,如图 22 为透镜组对齐后激 光对准反射光束图像。



图 22 C1-C4 透镜组反射光束图像^[30] Fig. 22 Image of reflected beams from C1-C4 lenses^[30]

5 结 语

目前的大口径大视场望远镜 透镜口径在 200 mm 以下的支撑结构多选用隔圈压圈或柔性切向杆方 式,大口径透镜(200~1600 mm)多采用 RTV 弹性体 和柔性结构支撑相结合的方式,透镜及透镜组的安 装对准方式多选用千分表和激光对准方式,对准精 度达到微米级。从目前形势来看,国内望远镜和光 学仪器的透镜口径较小且工况单一,已有的支撑结 构设计方案无法满足要求,与国际先进水平存在一 定差距,因此对校正镜组透镜支撑结构的设计研究 重要性日益突出。

从目前掌握的资料来看,大口径透镜支撑未来 发展趋势主要分为以下两个方面:

(1)校正镜组支撑后需要一套完整统一的成像 质量评价方法。目前国内多采用面形误差 RMS 值 评价透镜支撑结果的好坏程度,国外评价标准主要 采用光路追迹或观察点物实际成像的方式来评价成 像质量,如80%能量集中度、全宽半高(FWHM)等。

(2)柔性结构支撑技术将逐渐成为校正镜组支 撑方式的主流。随着望远镜视场的增大和技术要求 的提高 ,RTV 材料的非线性以及热匹配性能均遇到 极大的挑战。

参考文献:

- [1] Lou Z ,Liang M ,Yao D ,et al.Advanced optical design and manufacturing technology and astronomical telescopes and instrumentation-optical design study of the wide field survey telescope(WFST) [J]. Proceedings of the SPIE , 2016 ,10154: 101542A.
- [2] Chen G ,Wen Z Q ,Qiu C W. Superoscillation: from physics to optical applications [J].Light: Science & Applications 2019 8(4): 471-493.
- [3] Y Bely.The design and construction of large optical telescopes [M].New York: Springer 2003.
- [4] Sholl M J ,Kahan M A ,Bebek C ,et al.BigBOSS: enabling widefield cosmology on the Mayall Telescope [J]. SPIE Proceedings 2011 & 127: 81270D.
- [5] Roodman A ,Reil K ,Davis C J ,et al. Wavefront sensing and the active optics system of the dark energy camera [J].Proceedings of SPIE 2014 ,9145(1):51-79.
- [6] Hu Jianing ,Dong Jihong ,Zhou Weiping. Review on active support system of large ground-based telescope primary mirror [J]. Laser & Infrared 2017 ,47(1): 5-12.(in Chinese)

胡佳宁,董吉洪,周平伟.地基大口径望远镜主镜主动 支撑系统综述[J].激光与红外,2017,47(1):5-12.

- [7] Gunn J E Siegmund W A Mannery E J ,et al. The 2.5 m telescope of the sloan digital sky survey [J]. The Astronomical Journal 2006, 131(4): 2332-2359.
- [8] Miyazaki S , Komiyama Y , Nakaya H , et al. Hyper suprime: project overview [J].Proceedings of SPIE 2006 , 6269; 62690B.

- [9] Barto A ,Winters S ,Burge J ,et al. Design and component test results of the LSST Camera L1 – L2 lens assembly [C]//Society of Photo-optical Instrumentation Engineers. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series 2017.
- [10] Tibor Agócs ,Abrams D C ,Infantes D C ,et al.Preliminary optical design for the WEAVE two-degree prime focus corrector [C]//Ground-based and Airborne Telescopes IV.International Society for Optics and Photonics ,2012 , 8444: 84446J.
- [11] An Qichang Zhang Jingxu ,Yang Fei ,et al. Jitter measure of giant steerable science mirror prototype [J]. Optics and Precision Engineering 2018 26(6) : 1392-1397.(in Chinese)

安其昌 涨景旭 杨飞 將.巨型科学可控反射镜缩比模 型系统抖动检测 [J].光学 精密工程 ,2018 ,26(6): 1392-1397.

- [12] Fabricant D. Flexure mounts for high-performance astronomical lenses [J].ProcSpie 2006: 185.
- [13] Doel P ,Abbott T ,Antonik M ,et al. Design and status of the optical corrector for the DES survey instrument [C]// Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II.International Society for Optics and Photonics 2008.
- [14] Diolaiti E ,Ragazzoni R ,Pedichini F ,et al. Blue and red channels of LBC: a status report on the optics and mechanics [C] //Astronomical Telescopes & Instrumentation. International Society for Optics and Photonics 2003.
- [15] Poteet W M ,Cauthen H K ,Kappler N ,et al. Design and fabrication of three 1.6-meter telescopes for the Korea Microlensing Telescope Network (KMTNet) [J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering 2012.
- [16] Smee S A ,Barkhouser R H ,Glazebrook K. Design of a multi-object high-throughput low-resolution fiber spectrograph for WFMOS [J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering 2006 6269: 78.
- [17] J Sánchez-Capuchino, E Hernández, Bueno A, et al. Optical and mechanical design of the fore-optics of HAR– MONI

[C]//Spie Astronomical Telescopes+Instrumentation. 2014.

[18] Fata R G ,Fabricant D G. Design of a cell for the widefield corrector for the converted MMT [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering , 1993.

- [19] Abrams D C ,Dee K ,TiborAgócs ,et al. The mechanical design for the WEAVE prime focus corrector system [C]//Ground-based & Airborne Instrumentation for Astronomy V. International Society for Optics and Photonics 2014.
- [20] Delp C ,Duffy M A ,Neill D ,et al. Optomechanical design of the discovery channel telescope prime focus assembly [J].Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering 2004.
- [21] Morgan J S ,Kaiser N ,Moreau V ,et al. Design differences between the Pan-STARRS PS1 and PS2 telescopes [J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering 2012 8444.
- [22] http://www.opticsky.cn/index.php? m = cms&q = view&id=6891
- [23] Gunn J E ,Carr M ,Rockosi C ,et al. The sloan digital sky survey photometric camera [J]. The Astronomical Journal , 1998 ,116(6): 3040-3081.
- [24] Muller G P ,Harbeck D ,Jacoby G H ,et al.Mechanical design of the WIYN One Degree Imager(ODI) [C]//Spie Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics 2008.
- [25] Horn J M M , Becklin E E , Bendiksen O , et al. FLITECAM: a near-infrared camera for test and science

applications on SOFIA [J].Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering ,2000 ,4014: 65 -76.

- [26] Reutlinger A ,Mottaghibonab A ,Gal C ,et al. Glue test results for high-precision large cryogenic lens holder [J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering 2012 8450(Special) : 28.
- [27] Gmt System Level Preliminary Design Review Section 6.
- [28] Antonik M ,Doel P ,Brooks D ,et al. The design and alignment of the DECam lenses and modelling of the static shear pattern and its impact on weak lensing measurements [C]//Optical System Alignment ,Tolerancing ,& Verification III. International Society for Optics and Photonics 2009.
- [29] Doel P, Brooks D, Antonik M L, et al. Assembly, alignment and testing of the DECam wide field corrector optics [C]//Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV.International Society for Optics and Photonics 2012.
- [30] Ragazzoni R ,Giallongo E ,Pasian F ,et al. Double prime focus camera for the F/1.14 Large Binocular Telescope [J].Astronomical Telescopes and Instrumentation ,2000: 439-446.