

大口径巡天望远镜校正镜弹性体支撑

唐 境^{1,2}, 张景旭¹, 安其昌^{1*}, 李洪文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: 为了探究宇宙起源与演化过程, 大口径巡天望远镜将突破已有的探测深度和广度, 帮助人类解决更多科学前沿领域问题。大口径校正镜组不同于普通的透射式光学系统, 为了使校正镜组性能满足设计要求, 总结分析了透镜支撑设计的基本原理和一般方法, 建立了弹性体有限元模型, 进行了参数化分析并优化了支撑结构关键部位。着重考虑透镜和镜室在不同重力载荷下的位移变形、应力变化和成像质量要求。结果显示, 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 俯仰角变化范围内, 弹性体支撑的透镜标准化点源敏感性值最小值为 0.973 1, 其面形误差、应力和位移等方面均满足系统设计要求, 以上的工作对于类似的大口径系统设计与优化有着一定指导意义。

关键词: 大口径光学系统; 支撑结构; 有限元分析; 校正镜组

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200124

Elastomer support for large survey telescope corrector

Tang Jing^{1,2}, Zhang Jingxu¹, An Qichang^{1*}, Li Hongwen¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to explore the origin and evolution of the universe, the large survey telescope will break through the existing detection depth and observation area to help humans solve more scientific frontiers unresolved issues. The meter-level corrector is different from ordinary transmission optical systems. To make the performance of the corrector meet the design requirements, the basic principles and general methods of lens support design were summarized and analyzed, a finite element model of elastomer support was established, and the analysis of key parts in the support structure was optimized. At the same time, the displacement and deformation, stress changes and imaging quality changes of the lens and the cell under different gravity loads were considered. The results show that when the elevation angle changes from 0° to 90° , the normalized point source sensitivity (PSSn) value of the elastomer

收稿日期: 2020-04-04; 修订日期: 2020-06-09

基金项目: 中国科学院青年创新促进会(2020221); 国家自然科学基金(11703026, 11803034); 国家重点研发计划(2017YFE0102900);

白求恩医学工程与仪器中心基金项目(BQEGCZX2019042)

作者简介: 唐境(1993-), 女, 硕士生, 主要从事大口径透射系统设计与仿真分析等方面的研究。Email: tangjing171@mails.ucas.edu.cn

导师简介: 张景旭(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事大型光电望远镜结构总体技术方面的研究。

Email: zhangjx@ciomp.ac.cn

通讯作者: 安其昌(1988-), 男, 助理研究员, 博士, 中国科学院青年创新促进会成员, 主要从事大口径光机系统检测装调方面的研究。Email: anjj@mail.ustc.edu.cn

support at least 0.973 1, and its surface shape error, stress and displacement also meet the system design requirements. The work has guiding significance for the design and optimization of similar large aperture systems.

Key words: large aperture optical system; supporting structure; finite element analysis; corrector

0 引言

天体集光能力与光学望远镜的有效通光口径成正比,为了探测更加暗弱的星体,地基大口径光学望远镜主镜的单镜口径从 1 m 增大至 8 m 以上,如 8.4 m Subaru Telescope (Subaru), 8.4 m Large Binocular Telescope(LBT)等,如今逐渐发展到在建或计划中的巨型拼接主镜望远镜,如 25 m 口径的 Giant Magellan Telescope (GMT), 30 m 口径的 Thirty Meter Telescope (TMT) 和 40 m 口径的 The European Extremely Large Telescope(E-ELT)等。大口径大视场望远镜的发展可追溯到 18 世纪 40 年代中期,其中视场大于 1° 的望远镜大多配备了大口径校正镜组。1979 年,史密森学会和亚利桑那大学成功研制了 Multiple Mirror Telescope(MMT)望远镜,其视场为 1° ,采用卡式焦点光学系统,校正镜组最大口径透镜直径为 800 mm。4 m Mayall 望远镜坐落于美国亚利桑那州的基特峰国立天文台,采用卡氏焦点光学系统,最新的主焦点终端 BigBoss 具有 3° 视场,校正镜组中最大透镜的直径为 1 143 mm。LBT 望远镜建成并投入使用,该望远镜采用两个并列安装且口径为 8.4 m 的主镜,相当于 11.8 m 的通光口径,其视场为 0.5° ,焦比为 $f/1.14$,采用广域主焦点光学系统^[1]。Dark Energy Camera (DECam)是目前最成功的大视场终端之一,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,校正镜组首块透镜口径为 980 mm^[2]。8.2 m Subaru 望远镜 Hyper Suprime-Cam 是继 Subaru Suprime-Cam 后的下一代主焦点科学终端,其视场为 1.34° ,校正镜组的最大口径为 850 mm。Large Synoptic Survey Telescope (LSST) 为 8.4 m 主镜口径,视场 3.5° 的下一代大口径大视场望远镜,透镜最大尺寸可达 1 550 mm^[3]。

校正镜组支撑结构一般需要满足以下几点设计目标^[4]:(1) 透镜及支撑结构应力低;(2) 透镜相对位移小;(3) 透镜面形精度高。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。

透镜支撑方式是被动支撑,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,室温硫化硅橡胶(Room Temperature Vulcanizing, 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。文中重点研究基于标准化点源敏感性理论(normalized Point Source Sensitivity, PSSn)的透镜性能评价方法和 RTV 弹性体支撑。

1 基于 PSSn 的全频段评价方法

光学望远镜成像主属性由四个部分组成:成像评价方式,光度零点(Photometric Zeropoint),天体比例尺(Astrometric Scale)和背景强度(Background Intensity level)^[5]。评价方式反映光学系统成像结果的能量分布,光度零点用来计算观测天体强度,图像位置则由天体比例尺决定,观测背景为图像提供影响成像质量的额外光强。大天区巡查的大口径大视场望远镜更加需要控制光束通过校正镜组的光能损失,因此选用合适的评价方式对星形形状测量、恒星天体测量和精确光度测量等天文工作至关重要。

大口径校正镜组系统的性能评价是涉及面较广、环节较多的系统工程,需要考虑刚体位移、透镜变形、面形拟合误差和像差等因素对整体成像质量的影响。传统评价方法难以对整体成像质量进行评价,合成传递与分解均存在着诸多不足^[6]。因此文中从频域角度获得系统性能评价指标,利用光学波前频域评价性能和镜面不同频率误差对光学系统整体成像质量不同方面的影响进行了深入研究^[7-8]。

美国 30 m 望远镜(TMT)提出 PSSn 进行整体性能评价、面形评价及系统误差的估算分配,合理表现了传统方法所无法检测的高频误差对望远镜整体性能的影响,准确反映望远镜在观测时间内的效率损失^[9]。

PSSn 基本定义为点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 强度平方的平均, 如公式(1)所示:

$$PSSn = \frac{\int \left| PSF_{t+a+e}(\vec{\theta}) \right|^2}{\int \left| PSF_{t+a}(\vec{\theta}) \right|^2} \quad (1)$$

或可用光学传递函数 (Optical Transfer Function, OTF) 表示, 如公式(2)所示:

$$PSSn = \frac{\int \left| OTF_e(\vec{\theta}) \right|^2 \left| OTF_{t+a}(\vec{\theta}) \right|^2}{\int \left| OTF_{t+a}(\vec{\theta}) \right|^2} \quad (2)$$

式中: PSF_e 为大气环境中望远镜误差的时间平均点扩散函数; PSF_{t+a} 为大气环境中理想望远镜的时间平均点扩散函数; OTF_e 为望远镜误差的光学传递函数; OTF_{t+a} 为在大气环境中理想望远镜的光学传递函数^[10]。

PSSn 是对全部成像区域内 PSF 的积分, 简单、准确评价在不同影响因素下的综合误差, 其连乘合成特性使得合成损失较少, 更为准确。透镜在不同支撑结构和工况中同样面临多项误差叠加和大气视宁度影响等问题。在完成检测之后, 利用 PSSn 与波前以及光学传递函数之间的关系, 可以建立其离散口径平行光管检测前提下系统 PSSn 的估计^[11]。校正镜组位于望远镜的主焦点位置, 设计过程中需要严格控制校正镜组的质量, 合理优化设计, 最大限度地减小透镜支撑结构对入射光线的遮拦。在大口径校正镜组设计过程中选用基于 PSSn 的全频段评价方法, 在充分考虑大气背景对能量传递影响的同时, 能够更加全面地估计不同影响因素对整体误差的评价结果。

2 基于 PSSn 的弹性体支撑方案设计

基于 MMT 透镜支撑的原理, 2008 年 Doel 等提出 DECam 的透镜支撑设计方案。该结构透镜最大直径为 980 mm, 工作温度为 $-5 \sim 27^\circ\text{C}$, 重力角度变化为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 。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。

文中的校正镜组通光口径为 850 mm, 第一面曲率半径为 611 mm, 第二面曲率半径为 1 937 mm, 中心厚度为 175 mm。透镜材料为熔石英, 材料密度为 2.201 g/cm^3 , 杨氏模量为 $72\,700 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.16, 热膨胀系数为 $/\text{K}$ 。文中采取的弹性体支撑结构如图 1 所示, 透镜材料是与熔石英 7980 具有相同热胀系数的铟钢材料, 这样可以保证校正镜组具有良好的温度适应性。透镜底支撑为粘接有 12 个轴向 RTV 垫片的支撑点, 支撑点的端面与透镜具有相同的曲率半径, 使透镜与镜室装配时可以实现良好的面接触, 防止出现应力集中的现象。镜室的侧面设计为 12 个侧支撑块, 侧支撑块与透镜接触面具有相同的曲率半径, 在径向 RTV 垫片与透镜粘接前, 要先与侧支撑块进行粘接, 再在侧支撑块接触面均匀涂抹环氧树脂胶与透镜粘接, 安装到位后螺钉拧紧固定, 最后安装透镜安全挡环。

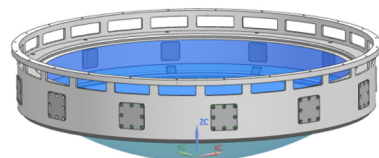


图 1 透镜弹性体支撑结构

Fig.1 Lens elastomer support structure

图 2 为该支撑结构的爆炸图。

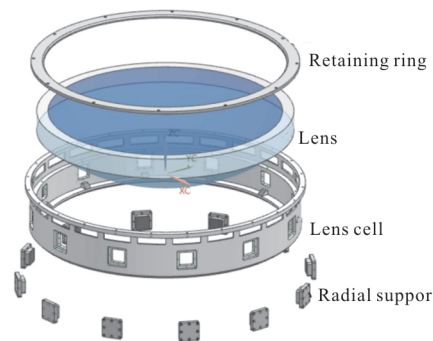


图 2 透镜弹性体支撑爆炸图

Fig.2 Explosion diagram of lens elastomer support

对于弹性体支撑结构来说,弹性体 RTV 的尺寸和厚度在控制透镜的变形和位移方面起着至关重要的作用,设计因素中弹性体的形状因子 S 很大程度影响了弹性体的机械性能^[12], S 可定义如公式(3)所示:

$$S = \frac{\text{loaded area}}{4 \times \text{free area}} = \frac{a^2}{4 \times a \times t} \quad (3)$$

设 RTV 受载面积为正方形,式中 a 为受载面积的长和宽, t 为 RTV 的厚度,见图 3。

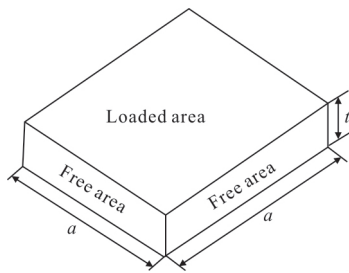


图 3 RTV 尺寸图

Fig.3 RTV size chart

实验证明,受约束 RTV 的热膨胀系数与材料本身的热膨胀系数有显著差异,因此引入热膨胀校正系数 K_T ,热膨胀系数的关系如公式(4)所示:

$$\alpha_{\text{RTV}} = K_T \alpha_0 \quad (4)$$

式中: α_0 为 RTV 材料本身的热膨胀系数; α_{RTV} 为受载情况下 RTV 垫片的热膨胀系数。 S 决定的热膨胀校正系数 K_T 如公式(5)所示:

$$K_T = \frac{\delta}{\alpha_0 \Delta T t} \quad (5)$$

式中: δ 为在热载荷下 RTV 厚度改变量; ΔT 为工作温度改变量。图 4 为形状因子和校正系数关系图,不同 S 值对应不同的热膨胀系数校正因子。当 $S > 4$ 时,

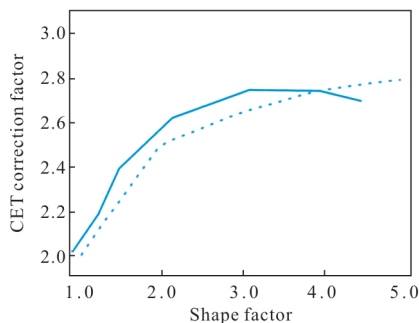


图 4 热膨胀因子校正系数随影响因子变化曲线^[10]

Fig.4 Shape factor dependence curve of CTE correction factor^[10]

K_T 始终为 2.9。根据经验公式和形状因子与热膨胀系数曲线图(图 4),RTV 设计过程中取 $K_T=2.75$ 。

径向垫片的厚度可以通过 Bayar 等式、Deluzio 等式和 Muench 等式表达。设 T_0 为加工温度, R_m 为金属镜室半径, R_g 为透镜的半径。Bayer 等式如公式(6)所示:

$$t_{\text{simple}} = \frac{R(\alpha_{\text{cell}} - \alpha_{\text{lens}})}{\alpha_{\text{RTV}} - \alpha_{\text{cell}}} \quad (6)$$

式中: R 为透镜的半径; α_{cell} 为镜室的热膨胀系数; α_{lens} 为透镜的热膨胀系数。

Deluzio 等式如公式(7)所示:

$$t_{\text{Deluzio}} = \frac{R(1-\nu_{\text{pad}})}{1+\nu_{\text{pad}}} \left(\frac{\alpha_{\text{cell}} - \alpha_{\text{lens}}}{(\alpha_0 - \alpha_{\text{cell}}) - \frac{(7-6\nu_{\text{pad}})(\alpha_{\text{cell}} - \alpha_{\text{lens}})}{4(1+\nu_{\text{pad}})}} \right) \quad (7)$$

式中: ν_{pad} 为 RTV 垫片的泊松比。

Muench 等式如公式(8)所示:

$$t_{\text{Muench}} = \frac{R(1-\nu_{\text{pad}})(\alpha_{\text{cell}} - \alpha_{\text{lens}})}{\alpha_0 - \alpha_{\text{cell}} + \nu_{\text{pad}}(\alpha_0 - \alpha_{\text{cell}})} \quad (8)$$

式中:泊松比约为 0.5,因此等式可以简化为:

$$t_{\text{Muench}} = \frac{R(\alpha_{\text{cell}} - \alpha_{\text{lens}})}{3\alpha_0 - 2\alpha_{\text{cell}} - \alpha_{\text{lens}}} \quad (9)$$

弹性体支撑结构中,透镜半径 $R=425 \text{ mm}$,RTV560 材料的热膨胀系数 $\alpha_0=198 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$,熔融石英透镜的热膨胀系数 $\alpha_{\text{lens}}=198 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$,铟钢镜室的热膨胀系数 $\alpha_{\text{cell}}=2.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

弹性体支撑采用径向支撑和底面边缘轴向支撑的方式^[13],径向 RTV 提供径向支撑和部分轴向支撑,径向支撑 RTV 选用双面粘接,一边粘接到侧支撑块,一边粘接到透镜。轴向 RTV 除了提供轴向支撑外还要考虑不能引入额外的热应力,因此采用单面粘接,只粘接在支撑块上。粘接面数不同也同样影响压缩模量,其中单面和双面粘接的压缩模量如公式(10)、(11)所示:

$$E_c^1 = \frac{10}{9} E_0 \left(1 + \frac{5}{8} k S^2 \right) \quad (10)$$

$$E_c^2 = E_0 (1 + 2k S^2) \quad (11)$$

式中: E_c^1 、 E_c^2 分别代表单面粘接和双面粘接压缩模量; E_0 为 RTV560 未受载的弹性模量; k 为经验刚度

修正系数。表 1 为不同硬度对应不同的 k 值, RTV560 的硬度为 55, 因此对应的经验刚度修正系数 $k=0.64$ 。

表1 橡胶硬度和弹性模量关系

Tab.1 Rubber hardness and elastic moduli conversion

Hardness IRHD or shore A	Elastic modulus, E_0 /MPa	Shear modulus, G /MPa	k	Bulk modulus, E_∞ /MPa
35	1.158	0.365	0.89	979.055
45	1.765	0.524	0.80	979.055
55	3.171	0.793	0.64	1 061.792
65	5.722	1.344	0.54	1 179.003

热膨胀系数决定径向 RTV 的厚度 t , 如果厚度过大, 在重力载荷作用下支撑结构对透镜的对中性不好; 如果厚度小, 则无法平衡镜室的不规则度, 镜室的表面精度要求变高。在受载条件下, 径向和轴向 RTV 的挠度变形都要低于 10%。厚度决定 RTV 垫片的变形量, 由公式(12)表示:

$$\delta = \frac{Pt}{AE_c} \quad (12)$$

式中: P 为垫片载荷; A 为垫片受载面积; E_c 为垫片的压缩模量。

变形量大于 10% 则不满足要求, 所以整个经验

公式要来回循环迭代优化, 计算 RTV 的最初目标尺寸。表 2 为迭代优化后的 RTV 尺寸计算结果, 表中 t_{Mean} 为 3 个等式计算结果的平均值。

考虑到透镜边缘厚度和材料等因素, 取 $a=30$ mm。通过计算可得, $S=4.75$, $t=1.6$ mm。轴向垫片不仅需要向透镜提供轴向支撑, 还需要足够的厚度来平衡镜室轴向支撑点平面的不规则, 因此设计轴向 RTV 垫片尺寸为 10 mm×10 mm×0.9 mm, 计算后得到径向 RTV 垫片压缩量为厚度的 1.8%, 轴向垫片压缩量为厚度的 0.6%, 完全满足设计要求。

借助有限元分析软件 ANSYS Workbench 对透镜进行建模分析。由于 RTV 弹性体设计尺寸较薄, 有限元分析过程中弹性体与透镜接触位置网格密度过大, 采用在支撑面添加弹簧单元代替弹性体进行透镜有限元分析。对透镜施加不同方向的重力, 其中单元选择 Solid186 六面体单元, 网格大小为 40 mm, 约束弹簧单元在连接镜室端 x 、 y 、 z 3 个方向的自由度。有限元分析如图 5 所示。

弹簧材料的弹性模量 $E=95$ MPa, 结构函数曲线如图 6 所示, 可见与单纯的理想点固定的情况相比, 系统透射波前的起伏尺幅变多。弹性体支撑带来了印透, 即产生的新起伏与之前的起伏合成, 其 $\text{PSSn}=0.997\ 5$ 。图 7 为通过 matlab 数据处理后的透射波前结果和引入的大气扰动误差。

表 2 弹性体尺寸计算结果

Tab.2 Calculation results of elastomer size

S	K_T	$\alpha_{\text{RTV}}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{simple}}/\text{mm}$	$t_{\text{Deluzio}}/\text{mm}$	$t_{\text{Muench}}/\text{mm}$	$t_{\text{Mean}}/\text{mm}$	a/mm	E_c/MPa
5.5	2.82	5.58E-04	1.628	1.570	1.538	1.579	34.738	125.952
5.25	2.81	5.56E-04	1.634	1.570	1.538	1.581	33.200	115.044
5	2.8	5.54E-04	1.640	1.570	1.538	1.583	31.658	104.643
4.75	2.78	5.50E-04	1.652	1.570	1.538	1.587	30.150	94.749
4.5	2.77	5.48E-04	1.658	1.570	1.538	1.589	28.599	85.363
4.25	2.75	5.45E-04	1.670	1.570	1.538	1.593	27.079	76.485
4	2.75	5.45E-04	1.670	1.570	1.538	1.593	25.486	68.113
3.75	2.74	5.43E-04	1.676	1.570	1.538	1.595	23.924	60.249
3.5	2.73	5.41E-04	1.682	1.570	1.538	1.597	22.358	52.892

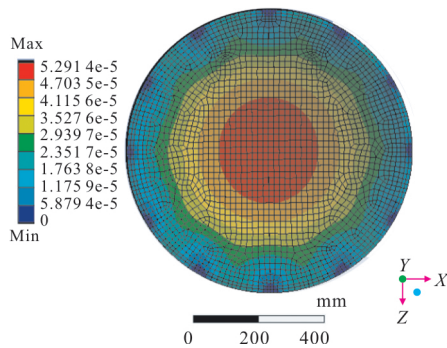


图 5 透镜节点位移变化

Fig.5 Displacement change of the lens node

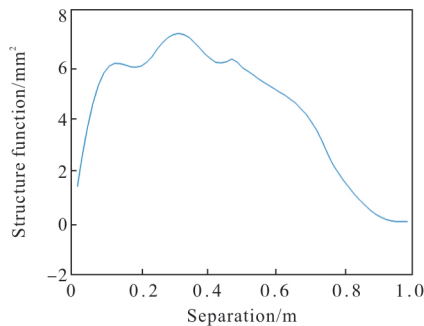
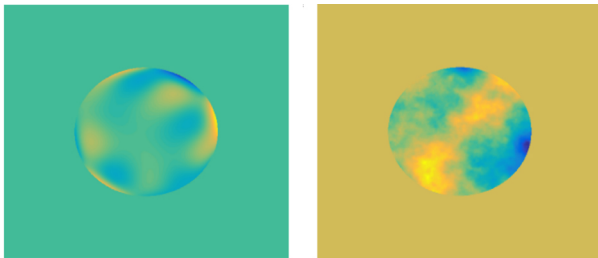


图 6 结构函数变化曲线

Fig.6 Structural function change curve



(a) 透射波前

(b) 大气扰动

(a) Transmission wavefront

(b) Atmospheric perturbation

图 7 弹性体支撑的透镜分析结果

Fig.7 Results of lens analysis of elastomer support

由于透镜的最大许用应力为 3.4 MPa,分析得到透镜最大应力为 0.167 MPa,完全满足要求。接着分析在不同重力工况下的透镜前后 RMS,PSSn 与透镜偏心量数据如表 3 所示。从分析中可以看出,当重力方向与光轴方向成 90°时 RMS 值最大,成像质量最好。总的来说,采用弹性体结构支撑,透镜面形、成像质量及相对位移满足设计要求。

表 3 不同重力角度的分析结果

Tab.3 Analysis results of different gravity angles

Analysis result/(°)	Lens maximum stress/MPa	Face1 RMS/nm	Face2 RMS/nm	PSSn	Lens eccentric error/mm
0	0.203	4.492	4.874	0.982 6	1.42E-04
45	0.164	4.173	3.711	0.996 5	7.50E-05
90	0.144	6.932	6.591	0.998 2	4.80E-05

透镜单元与主焦点系统的接触面使用柔性支撑结构。由于透镜镜室的材料为钢制,为了避免材料热膨胀系数的差异引起的过多变形,在镜室单元设计了柔性连接环节^[14-15],如图 8 所示,该安装方式能够较好地匹配热膨胀系数的差异。

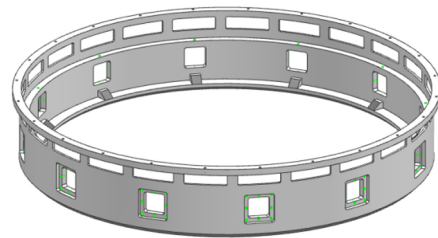


图 8 透镜镜室结构

Fig.8 Structure diagram of lens cell

为了保障镜室柔性环节具有足够的支撑刚度,对镜室单元进行了有限元分析,设柔性支撑臂的轴向宽度为 B ,约束镜室与镜筒连接的上平面在 x,y,z 3 个方向的位移。其中单元同样选择 Solid186 实体单元,钢制材料的密度为 7.85 g/cm³,杨氏模量为 20 000 MPa,泊松比为 0.3,热膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}/K$,计算可得最大许用应力为 124 MPa。

在满足位移要求和应力要求的情况下,参数化分析镜室柔性支撑臂的宽度。如图 9 和图 10 所示,在两种不同重力方向的作用下,柔性支撑臂宽度小于 20 mm 时,位移和应力变化骤然增加,考虑到结构轻量化等因素,选用柔性支撑臂宽度为 30 mm。当 $B=30$ mm 时,镜室质量从未轻量化的 70.004 kg 优化至 67.180 kg,最大应力为 3.347 MPa,节点最大位移为 1.324×10^{-3} mm,受镜室影响,透镜成像质量的 PSSn 降低至 0.973 1,满足设计要求。

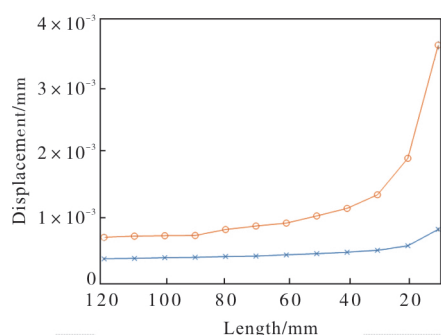


图 9 透镜镜室位移变化

Fig.9 Displacement of the lens cell

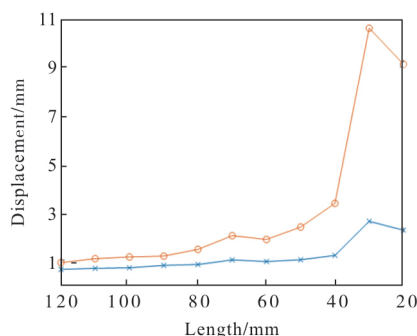


图 10 透镜镜室应力变化

Fig.10 Stress change of change the lens cell

3 结 论

大口径巡天望远镜的校正镜组透镜尺寸较大,其成像质量评价方法和支撑结构均与常见透射系统不同,文中选用根据基于 PSSn 的全频段评价方式,设计大口径透镜的弹性体支撑方案。根据经验公式计算选用合理的 RTV 尺寸后,建立弹性体结构模型,对其进行有限元分析。分析结果表明,透镜最大应力为 0.203 MPa, PSSn=0.973 1,透镜偏心量最大为 1.42×10^{-4} mm,镜室的最大应力为 3.347 MPa,镜室最大位移为 1.3249×10^{-3} mm。在保证位移、刚度和成像质量的前提下,在不同重力方向下弹性体支撑结构在成像质量、面形误差和应力等方面均满足要求。

4 展 望

目前国内的透镜支撑口径相对较小且工况单一,与国际先进水平存在一定差距,因此设计校正镜组支撑结构需要十分细致的分析与探索。文中主要通过理论计算和有限元仿真的手段,优化分析了静力

状态下校正镜组中透镜的弹性体支撑结构。未来需要根据实际工况和分析设计的支撑结构方案,深入研究支撑位置和支撑面积等支撑信息和周期特性对透镜性能(如固有频率分裂,振型耦合以及振动扭曲等)产生的影响,进一步调整被动支撑结构的结构尺寸。

参考文献:

- [1] 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.
 - [2] 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.
 - [3] 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 (SPIE) Conference Series, 2017, 104010N: 2274808.
 - [4] Fabricant D. Flexure mounts for high-performance astronomical lenses [C]//Proc SPIE, 2006, 6269: 672634.
 - [5] Peterson J R, Jernigan J G, Kahn S M, et al. Simulation of astronomical images from optical survey telescopes using a comprehensive photon Monte Carlo approach [J]. *Astrophysical Journal Supplement*, 2015, 218(1): 1-24.
 - [6] Peterson J R, Peng E, Burke C J, et al. Deformation of optics for photon Monte Carlo simulations [J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 873(1): 1-14.
 - [7] An Qichang, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Evaluation of the performance of large telescope based on normalized point source sensitivity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1218001. (in Chinese)
 - [8] Zhang Jiaming, Chen Yu, Tan Haiqi, et al. Optical system of bionic compound eye with large field of view [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1012-1020. (in Chinese)
 - [9] An Qichang, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Normalized point source sensitivity analysis of large sparse telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 567-574. (in Chinese)
- 安其昌, 张景旭, 杨飞, 等. PSSn 在大口径望远镜误差评估中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 1218001.
- 张家铭, 陈宇, 覃海琪, 等. 大视场并列型仿生复眼光学系统 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28(5): 1012-1020.
- 安其昌, 张景旭, 杨飞, 等. 大型合成孔径望远镜标准化点

- 源敏感性分析[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 567–574.
- [10] Seo B J, Nissly C, Angeli G Z, et al. Analysis of normalized point source sensitivity as a performance metric for the thirty meter telescope [C]//SPIE Astronomical Telescopes +Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2008, 7017: 7017T.
- [11] An Qichang, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. On middle frequency error distribution of large telescope based on structure function [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 433–440. (in Chinese)
- 安其昌, 张景旭, 杨飞, 等. 基于结构函数的大口径望远镜中频误差分配研究[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(2): 433–440.
- [12] Fata R G, Kradinov V, Fabricant D. Mounting large lenses for the MMT's $f/5$ wide-field corrector: lessons learned[C]//Ground-based Instrumentation for Astronomy. International Society for Optics and Photonics, 2004, 5492: 553F.
- [13] Gao Zechao, Hao Liang, Wang Fuguo, et al. Design and optimization of active adjusting lateral support mechanism for 2 m telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0814001. (in Chinese)
- 高则超, 郝亮, 王富国, 等. 2 m 级望远镜主动调节侧向支撑机构设计与优化 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(8): 0814001.
- [14] Zhang Limin, Han Xida, Lv Tianyu, et al. Topological optimization design for SM system of large aperture telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0818008. (in Chinese)
- 张丽敏, 韩西达, 吕天宇, 等. 大口径望远镜次镜系统的拓扑优化设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 0818008.
- [15] Liu Xiangyi, Wang Fuguo, Zhang Jingxu, et al. Study on moment correction method of primary mirror semi-active support [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0518003. (in Chinese)
- 刘祥意, 王富国, 张景旭, 等. 主镜半主动支撑的力矩校正方法研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 0518003.