

一种大口径平面镜支撑结构的仿真与实验

王全全, 王彦钧, 韩森, 徐春风

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为提高600 mm大口径立式平面镜沿光轴旋转90°后的表面面型测量精度, 对多孔支撑结构下5种不同材料的平面镜重力变形进行有限元仿真分析, 并通过实验测量探究旋转后的静置时间对面型精度的影响等问题。结果表明, 该多孔支撑结构下的平面镜表面由重力导致的轴向变形量不超过14 nm, 满足精度要求。该多孔结构支撑的平面镜沿光轴旋转90°静置1 h后达到稳定状态, 与静置2 h后的面型结果PV值仅相差0.337 nm, RMS值相差0.081 nm, 实验探究了静置时间对面型结果的影响。研究发现, 在至多去除6%外口径的条件下可以大幅降低平面镜表面面型PV值, PV值降低超过50 nm, 由此提出一种制造大口径平面镜时通过设置支撑结构缓冲区以提高面型精度的方法, 可以有效提高大口径平面镜的面型精度。

关键词: 大口径平面镜; 有限元仿真; 干涉测量; 旋转测量; 实验验证

DOI: 10.11907/tjdx.231207

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: TP391.9; TH74

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2024)003-0055-07

Simulation and Experiment of A Large Aperture Flat Mirror Support Structure

WANG Quanquan, WANG Yanjun, HAN Sen, XU Chunfeng

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of the surface profile of a 600 mm large diameter vertical plane mirror rotated 90° along the optical axis, the finite element simulation analysis of the gravity deformation of the plane mirror with five different materials under the porous support structure was carried out, and the influence of the standing time after rotation on the surface profile accuracy was explored through the experimental measurement. The results show that the axial deformation of the plane mirror surface caused by gravity under the porous support structure is less than 14 nm, which meets the accuracy requirements. The planar mirror supported by the porous structure rotated 90° along the optical axis and reached a stable state after standing for 1 h. The PV and RMS values of the planar mirror supported by the porous structure were only 0.337 nm and 0.081 nm different from the planar mirror results after standing for 2 h. The influence of the standing time on the planar mirror results was explored. Then, it is found that the PV value of the surface profile of the plane mirror can be greatly reduced under the condition of removing at most 6% of the outer diameter, and the PV value can be reduced by more than 50 nm. A method is proposed to improve the profile accuracy of the large diameter plane mirror by setting the buffer of the supporting structure, which can effectively improve the profile accuracy of the large diameter plane mirror.

Key Words: large aperture flat mirror; finite element simulation; interferometric measurement; rotation measurement; experimental verification

0 引言

当前, 大口径高精度光学元件已广泛应用于航空航天、天文观测、惯性约束聚变、光刻等高科技领域, 并发挥了重要作用。各国正大力研究的惯性约束聚变(Inertial

Confinement Fusion, ICF)项目, 仅用于惯性约束聚变的高功率固体激光装置就需要上万件大口径光学元件^[1]。美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)需要口径为0.5~1.0 m范围的光学元件约7 360余件, 面形质量要求均方根值(Root Mean Square, RMS)达到6 nm。我国的神光III也使用了3 000余件大口径光学元件。在光学元件加工

收稿日期: 2023-04-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0607704)

作者简介: 王全全(1996-), 男, 上海理工大学光电信息与计算机工程学院硕士研究生, 研究方向为大口径平面镜重力变形; 王彦钧(2000-), 男, 上海理工大学光电信息与计算机工程学院硕士研究生, 研究方向为光学干涉测量。

制造领域中,加工离不开检测,检测设备的精度往往会起到决定性作用。

光学干涉测量技术是一种以光波干涉原理为基础的计量测试方法,是目前公认的检测光学元件最有效、最准确的方法之一。激光干涉仪作为应用干涉测量技术检测大口径平面镜的典型测量仪器,其检测结果是基于参考镜面形的相对测量,因此干涉仪的面形检测精度受限于参考镜的面形精度。理论上可以通过研究绝对检测的方法,以去除参考镜面型对检测结果的影响。目前常用的绝对检测方法主要有三平面互检法、伪剪切法、旋转平移法等^[2]。在大口径光学元件检测中,由于其口径较大,因而自身重力也较大,而应用三平面互检法及扩展方法时均需要对待测元件进行大幅度翻转操作,实验表明旋转操作会影响实验结果^[3-5],遂发现可以通过合理设计支撑结构以降低其影响。

国内外学者对光轴竖直放置的光学元件支撑结构进行了大量研究。文献[6]对3点支撑结构的100 mm水平放置光学元件进行绝对检验,用实验的方法测量分析了平晶自重变形量。文献[7]通过使用数值分析、有限元分析、实验验证相统一的方法,对3点支撑的镜面自重变形进行了详细研究,完善了重力变形与光学元件本身厚度和口径的关系函数,为自重变形量后续计算提供了理论依据。由于每个支撑点对镜子的支撑力约为1/3的镜子重量,随着光学元件尺寸的增加,重量变形影响越来越大,因此3点支撑在绝大部分研究中仅作为对比方案。相较于3点支撑方案,8点支撑方案等具有更多支撑点的方案支撑效果更好,被广泛选择用作大口径光学元件的支撑方案^[8]。

相较于研究较多的光轴竖直放置光学元件的支撑方案,其各支撑点处力的方向均为竖直向上,而光轴水平放置时由于支撑点处的力为水平与竖直两个方向的合力,因而研究较少。本文针对600 mm大口径平面镜光轴水平放置时,表面受重力影响及旋转后稳定性等问题,采用有限元仿真与实验研究相结合的方式,分析了多孔支撑结构下平面镜表面型受重力的影响。该多孔支撑结构相较于其他支撑方式例如背部支撑、运动学支撑等,具有安装便捷、成本低、易于实现、不遮挡通光口径等特点,比较适用于大口径平面镜在面型检测时的支撑。通过旋转平面镜测量面型实验,探究旋转后稳定时间对面型的影响等问题,为大口径立式光学元件的支撑设计提供了一定参考。

1 有限元仿真

有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)起源于20世纪60年代,经历60~70年的发展,已广泛应用于各工程领域。本文使用在有限元仿真领域常用的COMSOL Multiphysics仿真分析软件,该软件的仿真范围涵盖电磁、结构、声学、流体、传热、化工等众多领域,还能够进行多物理场

仿真分析。

1.1 有限元分析方法与软件

1.1.1 有限元分析方法

有限元分析是在工程问题求解时一种常用的数值分析方法。有限元分析的核心思想是将研究的物体建模后拆分成有限个单位,在每个单元体上划分出一定数量的节点,利用节点之间传递应力。

1.1.2 有限元分析软件

COMSOL Multiphysics是1998年瑞典的COMSOL公司研发的一款专门针对大型物理场的数值仿真软件,经过20多年的改进与功能集成,已经具有丰富的预置多物理场建模接口,自带CAD建模工具,已然成为高校研究物理场仿真的首要工具之一。COMSOL Multiphysics仿真建模流程清晰,模型开发器从最开始的全局定义,再到建模后的边界条件设定,最后是仿真结果分析处理,过程环环相扣。COMSOL Multiphysics有限元仿真工作流程如图1所示。

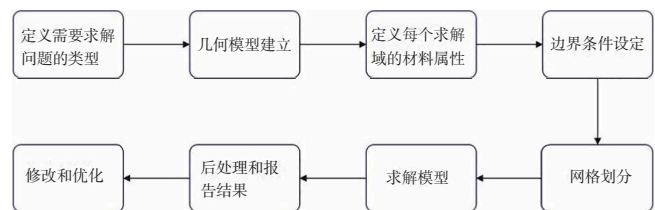


Fig. 1 Finite element simulation flow

图1 有限元仿真流程

(1)定义需要求解问题的类型。本文研究的主要内容是大口径平面镜的自重变形,故所选择的物理场接口是结构力学中的固体力学,空间维度为三维,研究类型为一般研究中的稳态研究。

(2)几何模型建立。本文选择了COMSOL Multiphysics自带的建模功能进行建模。操作中的输入数据可以基于参数进行参数化扫描从而求得最优解。

(3)定义每个求解域的材料属性。本文通过在材料库中添加新材料的方式,将仿真所需的各物理属性(含材料密度、泊松比和杨氏模量等)输入到对应位置。

(4)边界条件设定。在使用有限元进行仿真的过程中,正确的边界条件和准确的约束极其重要。因为对于大口径光学元件,其支撑结构通常比较复杂,这是进行仿真时的一个关键环节。

(5)网格划分。对结果进行比较发现,采用“超细化”还是“极细化”网格划分方案,对本次仿真的影响可以忽略不计。继而考虑到本文研究的对象存在细小的研究域,故选择了比“常规”更精细的“超细化”网格划分。

(6)求解模型。COMSOL Multiphysics会读取有限元仿真模型及约束信息,内部求解器通过建立方程组求解。

(7)后处理和报告结果。后处理就是对求解器结果进行检查、分析、再处理。本文用到的再处理之一是绘制平面镜面型结果的等值线图。

(8)修改和优化。通过优化边界条件、材料、模型结构

以及参数化扫描等手段,得到最接近真实情况的仿真结果,这也是有限元仿真的最终目标。

1.2 有限元仿真及结果

1.2.1 定义求解问题类型

常用的研究类型有特征频率分析、频域、稳态和瞬态分析等。本文研究的主要内容是大口径平面镜的自重变形,故所选择的物理场接口是结构力学中的固体力学,空间维度为三维,研究类型为一般研究中的稳态研究。

1.2.2 建模与材料属性

本次仿真设计的 600 mm 口径平面镜的支撑结构如图 2 所示,在选择平面镜材料时既要确保其具有良好的光学面型,同时还能在特定工作条件下保持可靠性能。因此,最终选用了 5 种常用的玻璃材料进行仿真,根据径厚比的经验将平面镜的厚度选择为 100 mm。

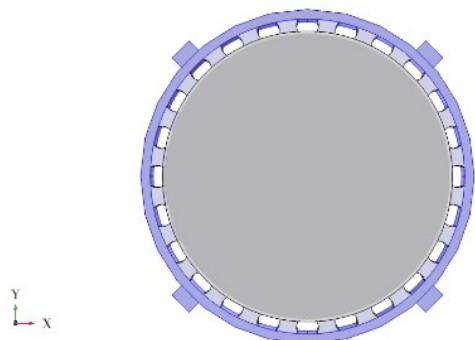


Fig. 2 Flat mirror support structure model

图 2 平面镜支撑结构模型

大口径光学元件的支撑固定通常是在光学玻璃和金属结构之间填充胶粘剂。金属结构件分别为铝框和 4 个铝制固定把手,胶粘剂选择环氧树脂,仿真中所有材料参数如表 1 所示。

Table 1 Simulation material parameter

表 1 仿真材料参数

Materials	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	E/GPa	ν
K9	2 520	88	0.215
ULE	2 200	67.7	0.17
Single silicon	2 330	112.4	0.28
Silica glass	2 200	72.5	0.14
Zerodur	2 530	91	0.243
Aluminum	2 700	71.7	0.33
Epoxy resin	1 180	10	0.38

1.2.3 边界条件设定与网格划分

支撑结构材料选择线性弹性材料,载荷设置为平面镜受到沿 Y 轴方向向下的重力作用,固定约束设置为 4 个安装把手为固定约束,铝框、胶粘剂和平面镜为自由。

平面镜多孔支撑模型网格划分选择“超细化”,共划分出了 502 992 个网格单元。仿真结果表明,继续加密网格对面型结果影响很小。

1.2.4 仿真结果与分析

图 3 所示为该多孔支撑结构下 600 mm 平面镜在竖直

放置时表面受重力变形的仿真结果。由于在使用干涉仪测量平面镜面形时,仅考虑重力变形在平面镜的光轴方向分量对表面面型的影响,故通过处理数据,将平面镜重力变形的轴向位移分解出来,得到的面型如图 4 所示。

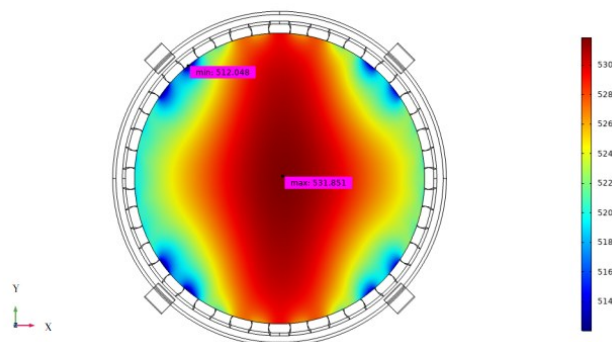


Fig. 3 Total displacement of gravitational deformation of flat mirror

图 3 平面镜重力变形总位移

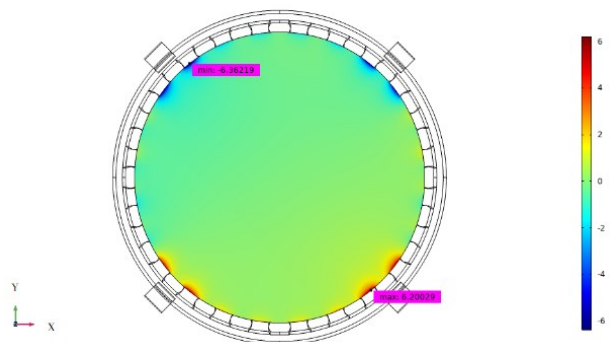


Fig. 4 Axial displacement of gravitational deformation of plane mirror

图 4 平面镜重力变形轴向位移

观察图 4 发现,重力变形的轴向分量集中在平面镜的边缘部分,通过分别去除 5% 和 10% 的外口径,将剩余的 95% 和 90% 内口径面型分别进行面型数据分析,得到如表 2 所示结果。在 5 种不同材料下,仿真平面镜表面轴向重力变形并测量 PV (Peak to Valley, PV) 值,以及每截取 5% 口径相对于截取前的表面面型 PV 值所降低的百分比。

Table 2 Gravity deformation PV value and reduction percentage of flat mirrors with different materials and residual apertures

表 2 不同材料、不同剩余口径平面镜重力变形 PV 值及降低百分比

材料	100% 口	95% 口径	降低百分	90% 口径	降低百分
	径 PV/nm	PV/nm		比/%	
K9	13.2	4.9	62.8	3.0	14.4
ULE	13.9	4.8	65.5	2.8	14.4
Single silicon	10.6	4.2	60.4	2.8	13.2
Silica glass	12.6	4.1	67.5	2.4	13.5
Zerodur	13.3	5.1	61.7	3.2	14.3

从表 2 可以看出,本文仿真设计的多孔支撑结构,由于重力变形导致平面镜表面轴向位移 PV 值小于 14 nm,优于 $1/40 \lambda (\lambda = 632.8 \text{ nm})$,结果远小于 $1/20 \lambda$ 的精度要求。通过第一次截取掉 5% 的外口径,5 种材料表面的重力变形

PV 值降低均超过 60%，而第二次截取掉 5% 的外口径时重力变形量 PV 值降低效果至 14% 左右。此时，再通过截取掉外口径的方式降低重力对表面面型影响的效果将不再显著。

2 实验验证

2.1 干涉仪测量环境准备

平面镜面型测量使用实验室自主研发的 24 寸卧式斐索干涉仪，为避免外部环境的振动导致平面镜共振引起应力集中使面型产生变化，将整个干涉仪实验装置放置在气浮隔振平台上，如图 5 所示，气浮平台以较大的自重和气浮状态保持台面稳定，以过滤掉低频振动。实验证明，微振动加速度造成的镜面变形比自重变形小 2 个量级以上，满足实验要求^[9-11]。此外，在检测实验中也发现，周末或夜间测试可以有效减弱环境中震动因素对实验的干扰，干涉仪单次面型测量成功率达 98% 以上。

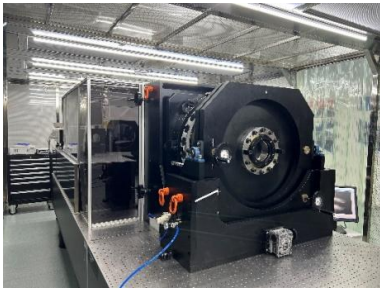


Fig. 5 Experimental instrument

图 5 实验装置

为了消除气流扰动对干涉条纹的影响，对超净实验室内的整个实验平台设计了全包围密封罩，如图 6 所示。该密封罩在保持气流稳定的同时，也对实验温度数值变化以及温度梯度变化具有良好的稳定作用。

研究表明^[12-15]，实验环境温度变化在 ± 0.5 °C 时，测得的面型分布基本一致，在容限范围内。通过在围挡内东西南北 4 个方位分别放置高精密度温度计，实时监测温度变化，温度记录显示整个实验均在 20.5 ± 0.5 °C 下进行，每组 5 次测量，每组测量持续时间为 5 min，5 min 内实验环境温度控制在 ± 0.1 °C，将温度变化对实验结果的影响降至最小。



Fig. 6 Experimental environment

图 6 实验环境

2.2 实验过程与结果

按照仿真设计的平面镜多孔支撑模型，通过在平面镜与铝框之间预置橡胶棒后灌胶，待胶粘剂在室温固化后取出橡胶棒，即完成了平面镜多孔支撑结构的前期装配。

将多孔结构支撑的平面镜固定安装到旋转测试工装上，如图 7 所示。将其沿光轴旋转 90° 后静置 0.5 h、1 h、1.5 h、2 h、2.5 h、3 h 各进行一组实验测量，为降低偶然误差的影响，将连续测试 5 次的面型结果取平均面型，记为一组数据。测量结果如图 8(a)–(f) 所示。为了验证更长的静置时间对面型测量结果的影响很小，又对静置 22.5 h 后的面型测量了 5 次，并求得平均值，结果如图 9 所示。

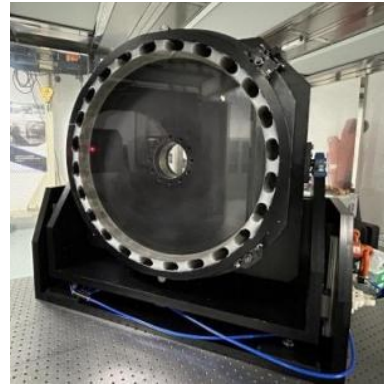


Fig. 7 Physical picture of porous support structure

图 7 多孔支撑结构实物

将实验结果进行处理，得到了表面面型的 RMS 和 PV 随时间变化图，如图 10 和图 11 所示。从结果可以发现，600 mm 平面镜旋转静置 1 h 后面型的 RMS 和 PV 值较静置 0.5 h 后的测量结果均有大幅降低，与静置 1 h 后基本达到稳定。但同时发现随时间变化的面型数据有波动，分析原因可能是温度漂移影响导致平面镜面型变化。虽然在实验前和实验过程中尽可能控制温度变化，但激光器电子设备长时间工作散热和人员进出调整设备而使得实验环境温度有所上升。

为证实是温度漂移对实验结果的影响，通过关闭实验仪器，静置更长时间，待温度降低稳定在 20 °C 再进行实验测量，在静置 22.5 h 后温度稳定在 20 °C，测量结果显示静置 22.5 h 的平面镜面型 PV 值为 127.353 nm，较静置 3 h 的面型 PV 值降低了 1.415 nm，此测试结果表明温度上升确实一定程度上影响了面型结果。此外，通过对该支撑结构进行结构热膨胀仿真发现，温度升高 0.1 °C 后，面型 PV 值提高了 4.64 nm。由于旋转后静置不同时间测量实验的时间跨度长，实验环境温度受人员进出、机器散热等因素影响而出现变化，因而对实验结果造成影响。

同时，实验结果与仿真结果相比，还混入了由于结构胶凝固引起的装配应力误差，导致平面镜仿真面型数据与实验结果相差较大。为验证该说法，本文对平面镜每旋转 90° 进行一组测量，每次旋转后均静置 1 h 以上的时间。每组对面型进行 10 次测量取平均面型，共旋转 4 次，获得 4

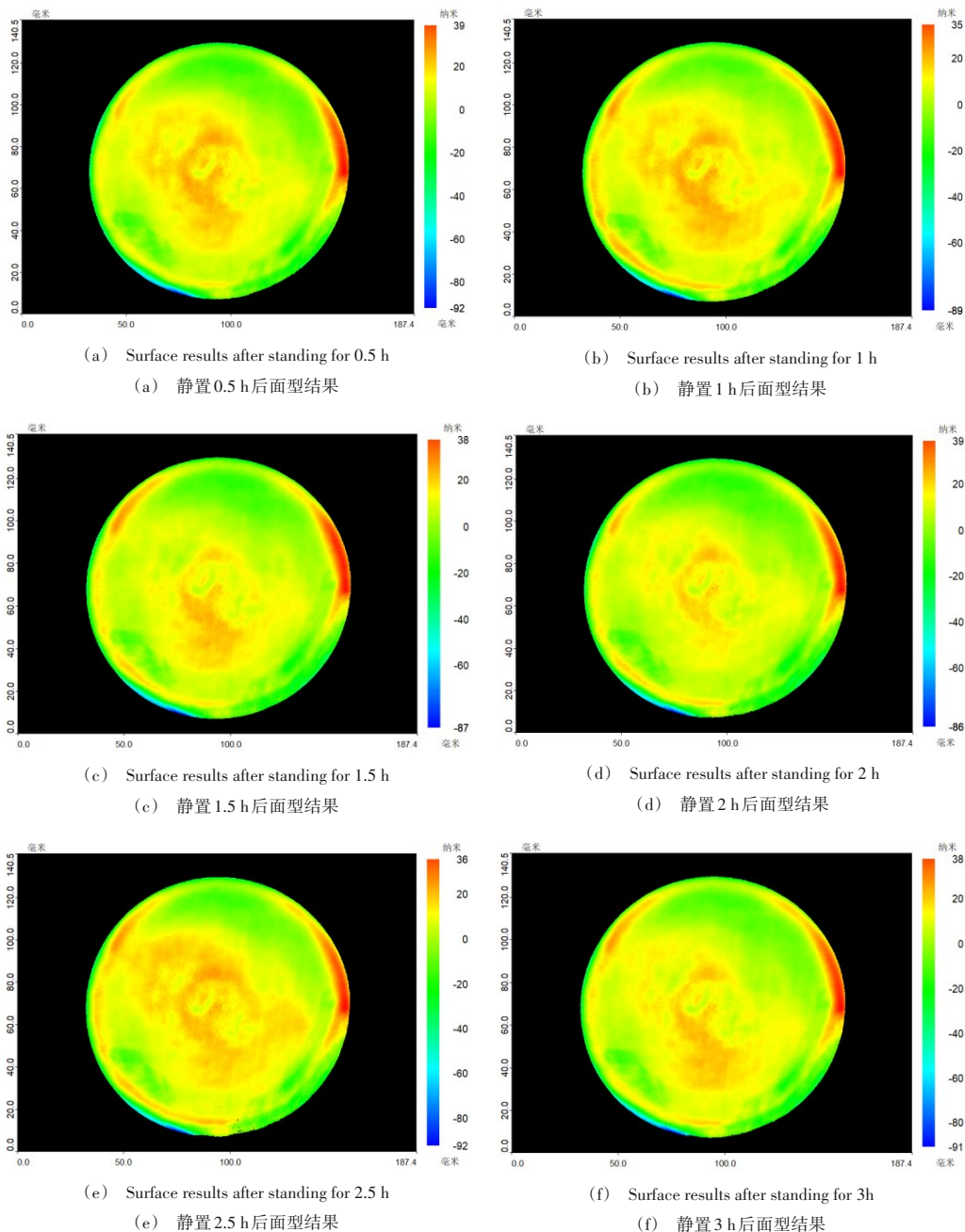


Fig. 8 Surface measurement results after standing for 0.5 to 3 h

图 8 静置 0.5~3 h 后的面型测量结果

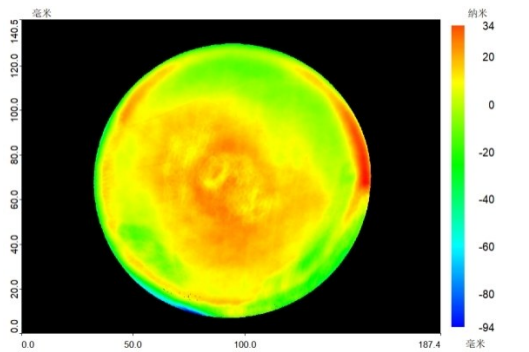


Fig. 9 Surface results after standing for 22.5 h

图 9 静置 22.5 h 后的面型测量结果

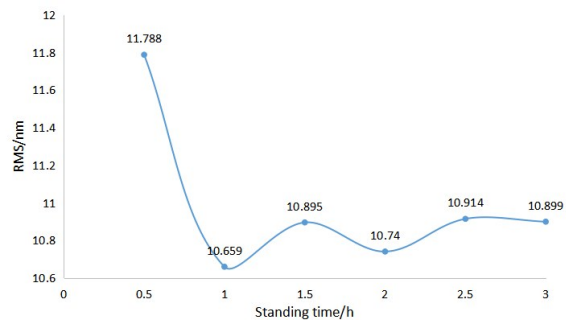


Fig. 10 RMS varies with the standing time

图 10 表面面型 RMS 值随静置时间变化

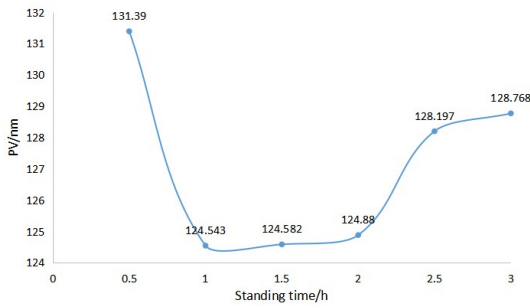


Fig. 11 PV varies with the standing time

图 11 表面面型 PV 值随静置时间变化

组面型测量数据如表 3 所示。

Table 3 Surface data for rotation measurements

表 3 旋转测量面型数据

旋转测量	PV/nm	RMS/nm
第一组	132.517	15.776
第二组	121.387	12.199
第三组	137.699	12.891
第四组	130.433	10.901
匀化面型数据	91.750	9.726

对以上 4 组面型进行叠加后取平均,得到匀化后的面型结果接近平面镜的绝对面型。匀化处理是将平面镜重力变形、装配应力变形等非旋转对称误差进行匀化。处理得到的面型结果如图 12 所示,可以看出,剔除重力变形、装配应力变形等非旋转对称误差后的平面镜表面面型 PV 值为 91.75 nm,相较于第二组面型数值平均结果,剔除的非旋转对称误差为 29.637 nm。仿真结果表明,重力变形量为 12.6 nm,则包含装配应力在内的,剩余非旋转对称误差为 17.037 nm。

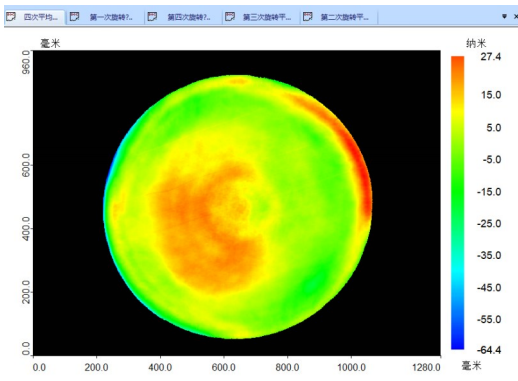


Fig. 12 Surface data after homogenization

图 12 匀化面型数据

以上分析表明,本文设计的平面镜多孔支撑结构具有低重力变形、低装配应力变形等特点,同时能够满足大口径光学元件旋转测量需求。平面镜旋转静置 1 h 后即能够进行表面面型测量,测量所得表面面型数据基本稳定。

3 重力变形仿真与实验对比

选择平面镜旋转静置 1 h 后的单次测量数据,通过算

法对 600 mm 平面镜全口径(记为 100%)测量面型结果的外口径依次进行截取操作并记录。每次去除掉全口径的 5%,以此累积进行了 10 次截取操作,在第 10 次去除后剩余口径占全口径的 50%,测试数据处理结果如图 13 所示。对应的仿真分析数据处理结果如图 14 所示。

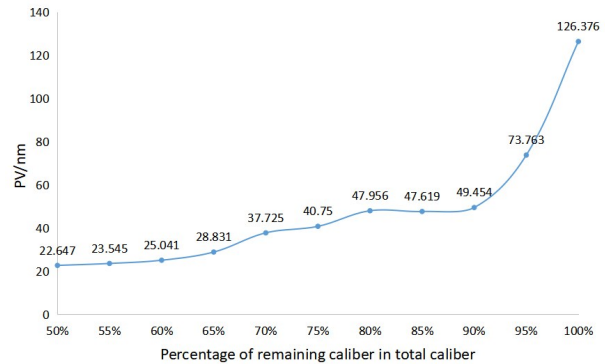


Fig. 13 Experimental data of surface PV varies with aperture

图 13 面型 PV 随口径变化实验数据

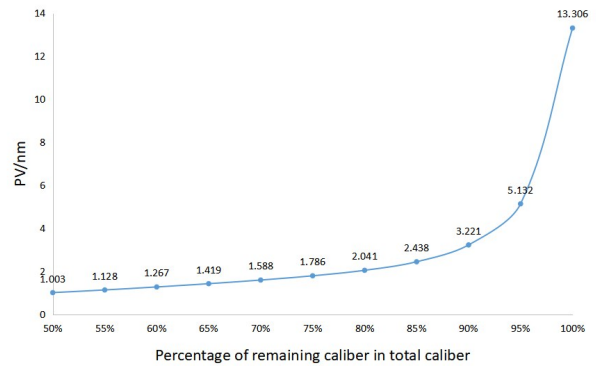


Fig. 14 Simulation data of surface PV varies with aperture

图 14 面型 PV 随口径变化仿真数据

从图 14 的数据计算得出,仿真去除 5% 的外口径使得平面镜表面 PV 值降低了 61.4%;从图 13 的数据计算得出,实验测量去除 5% 的外口径使得平面镜表面 PV 值降低了 41.6%。

对比图 13 和图 14 发现,平面镜表面 PV 值变化量随去除外口径的变化趋势具有一致性。但由于仿真分析时的各项条件均为理想条件,平面镜表面为理想平面,而在平面镜测量结果中除引入环境误差等外,还混入粘合剂固化引起的装配应力对平面镜变形的影响,此外平面镜还存在着不可忽略的加工误差。因此,仿真所得平面镜面型结果要优于实验测量结果。

在至多去除 10% 外口径的前提下,研究平面镜表面 PV 值变化随去除外口径的变化趋势。选择充分静置后的平面镜进行 5 次面型测试,通过算法对 600 mm 平面镜全口径(记为 100%)面型测量结果的外口径依次进行截取操作并记录。每次去除掉全口径的 1%,以此累积进行 10 次截取操作,第 10 次去除后剩余口径占全口径的 90%,结果如图 15 所示。

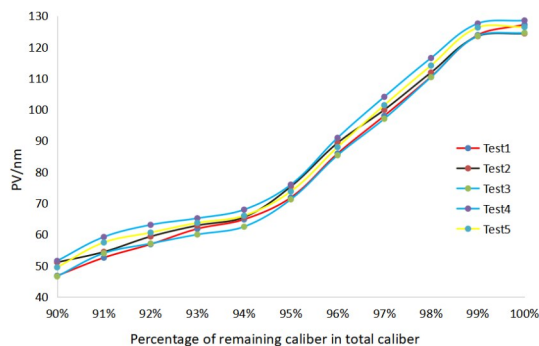


Fig. 15 PV variation with the percentage of remaining caliber to the total caliber

图15 面型PV随剩余口径占全口径百分比变化

从图15可以发现,在剩余口径占全口径的94%以上时,平面镜的表面面型PV值随口径变化较大,剩余口径占全口径低于94%时,平面镜表面PV值变化随口径趋于平缓。去除超过6%的外口径后,继续增大去除口径对面型精度的提高不再显著。对数据进行处理,当剩余口径占全口径的94%,此时5次测量数据平面镜表面面型PV值降低占全口径面型PV值的比例分别为:49.0%、47.3%、49.8%、47.1%、47.8%。该数据说明,在制造平面镜时可以选择适当增加口径作为支撑结构影响的缓冲区,能够大幅提高有效口径的面型精度。建议缓冲区口径设置不超过全口径的6%,6%全口径缓冲区的存在将使得平面镜表面面型PV值至少降低47%。

4 结语

本文设计了一种能够应用于600 mm等立式大口径平面镜的低重力变形多孔支撑结构,并提出了6%支撑结构缓冲区的平面镜支撑设计方法,可以有效提高平面镜的面型精度。通过仿真与实验相结合的方式,得出以下规律:①在该多孔支撑结构下的平面镜,表面的轴向重力变形量PV不超过14 nm,满足面型精度要求;②该支撑结构下的平面镜旋转90°测量时,旋转后静置时间不足会影响面型精度,静置1 h后达到稳定状态,继续增加静置时间对面型效果不会有进一步改善;③重力使平面镜表面的轴向重力变形分量集中分布在平面镜边缘部分,实验证明去除6%的外口径,平面镜表面PV值降低47%以上。去除超过6%的外口径后,继续增大去除口径对面型精度的改善不再显著。

本文对研究大口径立式平面镜支撑方案提供了参考,也为降低重力对表面面型影响和提高测量精度提供了思路。将来可以在制造大尺寸光学元件时,适当增大尺寸作为缓冲区以提高有效口径的面型精度。

参考文献:

[1] DONG D Y, LI Z L, XUE D L, et al. Simulation and experiment of self-weight deformation of large aperture long strip mirror assembly[J]. Optics

and Precision Engineering, 2016, 24(6): 1424-1431.

董得义,李志来,薛栋林,等. 大口径长条形反射镜组件自重变形的仿真与试验[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1424-1431.

[2] MENG X H, WANG Y G, LI W Q, et al. Zero-gravity surface machining of large aperture aspherical mirror is realized by rotating method[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(12): 2517-2524.

孟晓辉,王永刚,李文卿,等. 应用旋转法实现大口径非球面反射镜零重力面形加工[J]. 光学精密工程, 2019, 27(12): 2517-2524.

[3] ZHAO S W, TIAN A L, WANG D S, et al. Influence of clamping dead weight deformation on absolute surface shape detection of large caliber[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(2): 147-153.

赵思伟,田爱玲,王大森,等. 夹具自重变形对大口径绝对面形检测的影响[J]. 光子学报, 2018, 47(2): 147-153.

[4] YOU J J, XIE Q M, KANG J, et al. Study on optimization of elastic fixture and clamping deformation of large diameter thin optical parts[J]. Tool Engineering, 2022, 56(2): 38-42.

游津京,谢启明,康杰,等. 大口径薄型光学零件弹性夹具优化及夹持变形研究[J]. 工具技术, 2022, 56(2): 38-42.

[5] ZHOU Y M, YANG Q S, MENG X H, et al. Verification and application of gravity flip test method for large aperture optical components[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2019, 40(3): 33-39.

周于鸣,杨秋实,孟晓辉,等. 大口径光学组件重力翻转测试方法验证及应用[J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(3): 33-39.

[6] VENTSEL E, KRAUTHAMMER T. Thin plates and shells—theory: analysis, and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.

[7] WU D C, GAO S T, WU Z H, et al. Study on dead weight deformation of high precision optical plate under three-point support[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 157-165.

武东城,高松涛,吴志会,等. 高精度光学平板在三点支撑下自重变形的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 157-165.

[8] WU X H. Research on key techniques of $\phi 300$ mm phase-shifting interferometer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. 武旭华. $\phi 300$ mm 移相干涉仪的关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007.

[9] FAIRMAN P S, WARD B K, OREB B F. 300-mm-aperture phase-shifting Fizeau interferometer[J]. Optical Engineering, 1999, 38(8): 123437574.

[10] KONG L. Research on absolute test technique of $\Phi 300$ mm optical flat crystal[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.

孔璐. $\Phi 300$ mm 光学平晶绝对检验技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2020.

[11] MA Z Y, CHEN L, ZHENG D H, et al. System error calibration for $\Phi 300$ mm vertical Fizeau interferometer based on liquid reference[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(2): 20210880.

马文静,徐振源,曹庭分,等. 大口径反射镜低应力夹持优化设计[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 187-192.

[12] KIM C J, WYANT J C. Sub-aperture test of a large flat on a fast aspheric surface[J]. Optical Society of America, 1981, 71: 1587.

[13] MA W J, XU Z Y, CAO T F, et al. Optimal design of low stress clamp for large aperture mirror[J]. Chinese Laser Press, 2020, 47(11): 187-192.

马文静,徐振源,曹庭分,等. 大口径反射镜低应力夹持优化设计[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 187-192.

[14] SUN Y X, LUO S K, GAO C, et al. Optimization method of gravity unloading for large aperture space mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(1): 279-287.

孙熠璇,罗世魁,高超,等. 大口径空间反射镜的重力卸载优化方法—孙熠璇[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(1): 279-287.

[15] CHEN J Y, WANG H C, LI B, et al. Bipod measurement technique of zero gravity surface shape for supporting large aperture mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 347-352.

陈佳夷,王海超,李斌,等. Bipod支撑大口径反射镜的零重力面形测试技术[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 347-352.

(责任编辑:孙娟)