

共相装置镜面组件模态测试及动力有限元修正

莫宇霄 周子夜 范晨光 杨宇静 田振

Modal testing and kinetic finite element correction of mirror assemblies for co-phase devices

MO Yuxiao, ZHOU Ziye, FAN Chenguang, YANG Yujing, TIAN Zhen

引用本文:

莫宇霄, 周子夜, 范晨光, 等. 共相装置镜面组件模态测试及动力有限元修正[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1147–1157. DOI: 10.5768/JAO202445.0601006

MO Yuxiao, ZHOU Ziye, FAN Chenguang, et al. Modal testing and kinetic finite element correction of mirror assemblies for co-phase devices[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1147–1157. DOI: 10.5768/JAO202445.0601006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拼接主镜共相校正装置设计与测试

Design and test of co-phase correction device of segmented-mirrors

应用光学. 2021, 42(1): 36–42 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101006>

用于铝板缺陷无损检测的激光超声有限元模拟研究

Finite element simulation in laser ultrasound for non-destructive testing of aluminum defect materials

应用光学. 2019, 40(1): 150–156 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107004>

基于有限元分析的小口径离轴抛物面反射镜支撑结构设计

Design of support structure for small caliber off-axis parabolic reflector based on finite element analysis

应用光学. 2019, 40(6): 1160–1166 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0605004>

高低温试验装置中多光谱光学窗口组件设计

Design of multispectral optical window assembly for high and low temperature test device

应用光学. 2023, 44(3): 661–667, 683 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0305001>

数字微镜器件反射效率测试方法及装置

Test method and device for reflection efficiency of digital micro-mirror device

应用光学. 2022, 43(4): 714–718 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0403004>

某光电装置光轴一致性改进分析

Improvement and analysis of optical axis consistency of an electro-optical device

应用光学. 2023, 44(2): 239–245 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0201001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1147-11

共相装置镜面组件模态测试及动力有限元修正

莫宇霄¹, 周子夜^{2,3}, 范晨光¹, 杨宇静¹, 田 振¹

(1. 西南交通大学 力学与航空航天学院, 四川 成都 611756; 2. 中国科学院 自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;
3. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要: 为了抑制微振动对拼接式望远镜成像的影响, 针对共相装置镜面组件进行了模态测试及动力有限元修正。由于其结构和接触复杂, 将模型进行了简化; 基于模态测试结果, 采用改进正交模型-正交模态法 (improve cross mode-cross mode method, ICMCM) 对有限元模型进行动力修正; 对修正后模型进行了阶跃响应求解, 并与实测结果对比, 以验证模型修正的有效性。测试结果表明: 修正后的模型一阶频率误差由 5.2% 下降至 0.2%, 阶跃响应与仿真 6 个测试点的位移峰值、峰值时间基本一致, 位移峰值最大误差为 8.8%。研究结果表明, 将镜面组件简化后再通过 ICMCM 法修正, 在提升计算效率的同时可保持模型的准确性。

关键词: 模态测试; 有限元修正; 共相装置; 改进正交模型-正交模态法

中图分类号: TH751; O329

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0601006

Modal testing and kinetic finite element correction of mirror assemblies for co-phase devices

MO Yuxiao¹, ZHOU Ziyue^{2,3}, FAN Chenguang¹, YANG Yujing¹, TIAN Zhen¹

(1. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
2. Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: In order to suppress the influence of microvibration on the imaging of the spliced telescope, modal tests and kinetic finite element correction were performed for the mirror assembly of the co-phase devices. Due to its complex structure and contact, the model was simplified, and then based on the results of the modal test, the improved cross mode-cross mode method (ICMCM) was used to correct the dynamics of the finite element model. The step response of the corrected model was solved and compared with the measured results to verify the validity of the model correction. The test results show that the first-order frequency error of the corrected model decreases from 5.2% to 0.2%, the step response is basically the same as the displacement peaks and peak time of the six measurement points of the simulation, and the maximum error of the displacement peak is 8.8%. The research results show that after simplification of mirror assemblies and correction of ICMCM, the accuracy of the model can be maintained while improving the computational efficiency.

Key words: modal testing; finite element correction; co-phase device; improved cross mode-cross mode method

引言

传统单体大口径望远镜由于受到镜体加工工艺和制造成本等多种因素的限制, 难以满足日益

提升的需求。由 NELSON J E 博士^[1]等人首次提出拼接镜设计方案, 因为在重量、成本、制造、装配和维护方面展现出许多优点^[2], 拼接式望远镜

收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-10-20

基金项目: 四川省自然科学基金 (2023NSFSC0068)

作者简介: 莫宇霄 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构设计与振动分析研究。E-mail: 1252529415@qq.com

通信作者: 范晨光 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构动力学研究。E-mail: weight_80@163.com

在20世纪后期开始广泛研究并应用于深空探测。

拼接式望远镜的性能由子镜之间共相位水平来决定,在望远镜工作过程中受到重力、温度等不同因素影响,子镜之间共相位关系会发生变化,目前大多采用主动校正光学系统来维持共相位稳定^[3]。在高精度光学成像系统中,由于外部激励接近系统固有频率而产生的振动是成像误差的主要来源^[4]。因为在陆地上难以模拟太空中天文望远镜的工作环境,因此,为研究共相位调节机构在发射后的力学性能和机械性能,更多地依赖于有限元仿真手段,准确的动力学仿真是抑制微振动的重要参考依据^[5]。然而,共相装置零件繁多,镜面组件几何结构和接触关系尤其复杂,难以直接通过有限元计算分析获得准确的模态性质。因此,考虑通过模态测试结果对有限元模型进行修正。

关于望远镜机构的模态分析,近年已有文献进行了深入分析。胡守伟^[6]等采用质量单元对非结构仪器和反射镜进行建模,弹簧单元用于模拟望远镜方位和高度轴系静压油垫支撑以及直接驱动,再通过实体单元建立其余部分,为大型望远镜的模态分析提供技术参考。

现阶段有限元模型修正方法主要分矩阵型方法^[7]和参数型方法^[8]两大类。其中矩阵型方法的修正对象为有限元系数矩阵,参数型方法的修正对象为有限元建模的设计参数。

HU S L J^[9]等提出了一种不依赖于灵敏度分析的参数修改法——正交模型正交模态法(CMCM)。李剑等^[10]基于CMCM法提出了一种改进正交模型正交模态修正方法(ICMCM),该方法解决了CMCM法在修正过程中容易存在数值病态以及无法修正整体建模误差的问题。李伟明等^[11]在基于ICMCM方法基础上,对某贮箱结构进行了有限元模型修正,使用模态拓展与ICMCM提高了修正后模型的可靠性,且计算效率较高。

本文采用激光扫描测振方法对共相装置镜面组件进行模态测试,基于模态测试结果对有限元模型进行修正,得到修正因子。将修正后的镜面组件模型替换原共相装置有限元模型中的镜面组件,进行瞬态动力学仿真计算,将仿真结果与阶跃响应试验结果进行对比,验证了模型精度。

1 镜面组件结构特点与研究方法

共相装置通常由粗调级组件、精调级组件、镜

面组件构成^[12],各组件由众多零件组成。在镜面进行共相调整时,由粗调作动器、精调作动器等装置共同作用^[13],使得镜面位姿达到期许值。

镜面典型支撑方案主要有Grubb方案、Hindle方案、Lassell方案以及Bipod方案^[14-15]。基于镜面组件的重量、体积、拼接镜口径以及展开状态等因素,整体支撑习惯上采用3点支撑的Bipod方案^[16]。在镜面背面设计了3组Bipod双脚架。Bipod双脚架^[14]由2个杆件和4个球铰链转动副组成,以120°均匀分布,由修正之后的Kutzbach Gruebler公式可以计算出支撑系统的空间自由度数为0,实现静定约束。

镜面组件结构如图1所示。镜面组件由镜面、镜面框架和后边57个压电条组成,通过压电条的伸缩改变镜面曲率。在镜面组件后边,在镜面短边处均匀分布3组压电作动器,每组3个,如图2红框所示(为方便观察隐藏了连接件)。在进行粗调级调整时,进行较大幅度的角度调整,不因为外界震动等干扰产生位移整体变形,在镜面曲率调整中镜面又会由于压电条致动伸缩产生变形,因此,镜面组件有限元组件的刚度匹配度要求较高。

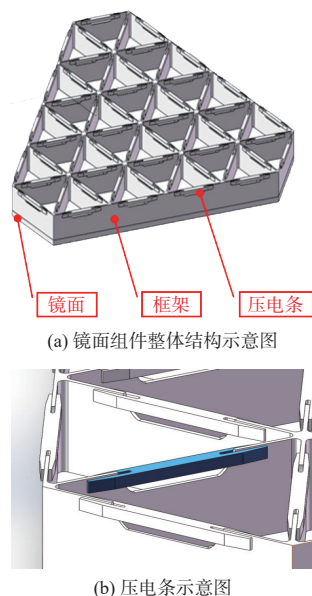


图1 镜面组件结构

Fig. 1 Structure diagram of mirror assembly

本文对镜面组件建立有限元模型是为了建立共相装置整体有限元模型,获得其整体模态,并不关注压电条的局部模态,同时压电条接触多,接触刚度难以确定,不便于进行有限元仿真。因此,本

文将压电条和镜面框架简化为一体, 具体简化方式在下面详细描述, 再通过有限元修正手段修正其刚度和质量。为验证修正后有限元模型与实物模型的匹配度, 对镜面后边 3 组压电作动器中的一组施加较大的阶跃信号, 使镜面发生较大幅度变形。对阶跃响应测试结果与对应仿真结果进行对比, 若对比结果基本一致, 则证明实物与有限元模型匹配度较好。本文具体技术路线如图 3 所示。

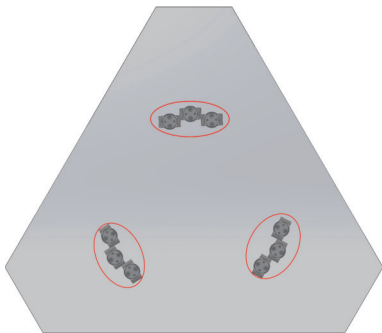


图 2 压电作动器位置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of piezoelectric actuator position

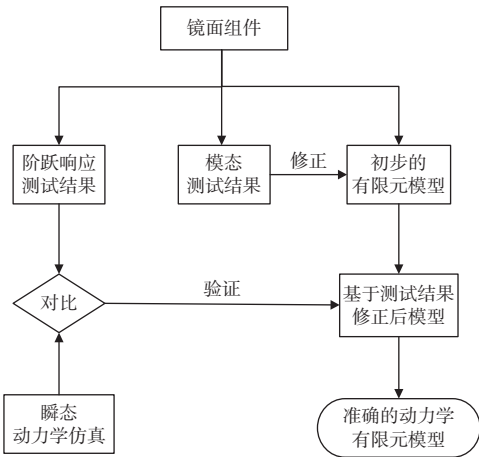


图 3 本文技术路线
Fig. 3 Technical route

2 有限元仿真及修正方法
2.1 模态分析

经过综合分析, 材料参数取值如表 1 所示。镜面模型如图 4 所示。对铝基碳化硅的镜面、镜面框架及后边的压电条作动器分别建模。镜面设置为铝基碳化硅, 压电条为压电陶瓷, 框架为铝。按照实验模型设置镜面框架与镜面的接触、压电条和铝制框架的接触均为绑定。

表 1 本文采用的材料参数
Table 1 Material parameters

材料	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$	E/GPa	ν
铝合金	2.92	71.7	0.3
铝基碳硅	2.7	200	0.15
结构钢	7.8	200	0.31
压电陶瓷	7.5	76.5	0.32

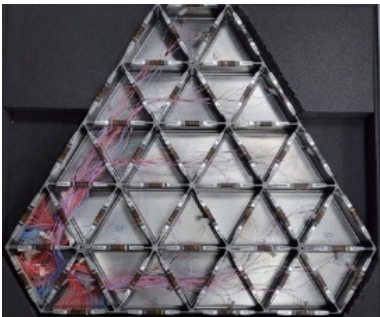
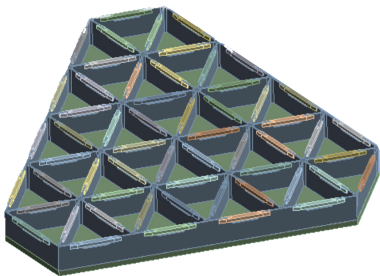
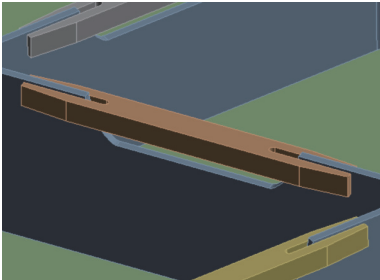


图 4 镜面组件的实物模型
Fig. 4 Physical model of mirror assembly

简化前的模型如图 5 所示, 简化后的模型如图 6 所示。对未简化模型仿真, 结果显示, 在二阶模态之后, 集中存在大量压电条局部模态, 如图 7 所示。



(a) 简化前镜面组件示意图



(b) 简化前压电条示意图

图 5 简化前模型

Fig. 5 Model before simplification

为排除压电条局部模态影响, 找到镜面组件整体模态, 将压电条和镜面框架视为一体, 简化压电条几何结构以减少网格数量, 瞬态动力学仿真时

可提高计算效率。简化前后网格数对比如表2所示。

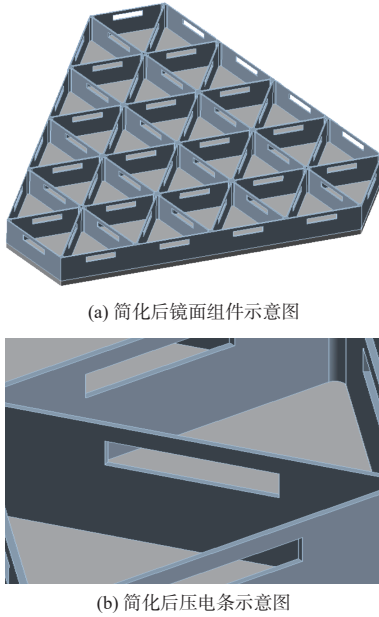


图6 简化后模型

Fig. 6 Model after simplification

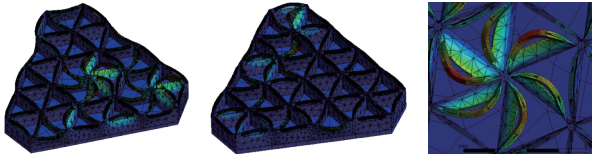


图7 压电条局部模态

Fig. 7 Piezoelectric strip local mode

表2 模型简化前后网格数量对比

Table 2 Comparison of the number of meshes before and after model simplification

	网格数	节点数
简化前	51 146	263 878
简化后	7 613	16 994

2.2 修正方法

基于测试结果,采用正交模型-正交模态方法(ICMCM)进行修正。此方法相比于其他有限元修正方法优点在于可以不依赖灵敏度来进行计算修正,并且无需迭代。

ICMCM方法^[10]中假设有限元模型与试验模型之间存在如下关系。

$$\begin{cases} K^* = T^T K T + \sum_{n=1}^{Ne} a_n T^T K_n T \\ M^* = T^T M T + \sum_{n=1}^{Ne} \beta_n T^T M_n T \end{cases} \quad (1)$$

式中: K^* 、 M^* 分别为试验数据的刚度矩阵和质量矩阵; K 、 M 分别为初始有限元模型的刚度矩阵和质量矩阵, K_n 、 M_n 分别为有限元模型第 n 个子单元的刚度矩阵、质量矩阵对系统整体矩阵的贡献; α_n 、 β_n 分别为第 n 个子单元的刚度修正因子和质量修正因子; Ne 表示单元的个数。

为求得刚度修正因子、质量修正因子组成的矩阵 p , ICMCM方法中给出,即求最小二乘意义解:

$$[CE]p = Gp = f \quad (2)$$

式中:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11,1} & \cdots & C_{11,Ne} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{nf \times nf,1} & \cdots & C_{nf \times nf,Ne} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$E = \begin{bmatrix} E_{11,1} & \cdots & E_{11,Ne} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{nf \times nf,1} & \cdots & E_{nf \times nf,Ne} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$p = [\alpha_1, \cdots, \alpha_{Ne}, \beta_1, \cdots, \beta_{Ne}]^T \quad (5)$$

$$f = [f_{11}, \cdots, f_{nf \times nf}]^T \quad (6)$$

式中: p 矩阵为所求矩阵; C 、 E 、 f 矩阵中各值由式(7)给出:

$$\begin{cases} C_{ij,n} = (\varphi_i)^T K_n (\varphi_j)^T \\ E_{ij,n} = -\lambda_j^* (\varphi_i)^T M_n \varphi_j^* \\ f_{ij} = (\lambda_j^* - \lambda_i) (\varphi_i)^T M \varphi_j^* \end{cases} \quad (7)$$

式中: φ_i 为仿真模态参数振型; φ_j^* 为测试模态参数振型。特征值数据由频率结果直接给出,即:

$$\begin{cases} \lambda_j^* = 2\pi w_j^{*2} \\ \lambda_i = 2\pi w_i^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, w_j^* 与 w_i 为试验得到的 j 阶与仿真得到的第 i 阶频率。 M 和 K 可在有限元模型中直接获取,进行特征值计算后可得到仿真模态振型 φ 。试验模态振型 φ^* 无法直接识别,使用传统的模态扩展方法,即将有限元模态振型代替试验模态振型:

$$\varphi_i^* = \varphi_i \quad (9)$$

K^* 和 M^* 也在有限元模型中直接获取,但由于单元矩阵维度大小与振型矩阵不匹配,需要对单元矩阵进行扩维。将原节点值保留,其余值用0插空,扩充矩阵维度。例如,若某单元具有 b_1, d_2 2个节点,每个节点有2个自由度,则其单元刚度矩阵为

$$K_n = \begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} \\ K_{2,1} & K_{2,2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

对该矩阵进行扩维,可以写为

$$\begin{bmatrix} K_{l_1, l_1} & K_{l_1, l_2} \\ K_{l_2, l_1} & K_{l_2, l_2} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & K_{l_1, l_1} & \dots & K_{l_1, l_2} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & K_{l_2, l_1} & \dots & K_{l_2, l_2} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 K_{l_i, l_i} 为 2×2 矩阵。按照节点完成分类后, 对总节点编号进行扩维, 被省略部分值均为 0。

对镜面组件的修正可通过提取出有限元模型节点信息矩阵, 集成出(2)式所需所有矩阵后进行计算, 修正大纲如图 8 所示, 有限元修正的具体流程如图 9 所示。通过以上计算流程, 得到所求矩阵 p , 即刚度修正因子和质量修正因子。最后以求得的刚度修正因子和质量修正因子为标准, 修改原始有限元模型, 即可得到修正后的有限元模型。

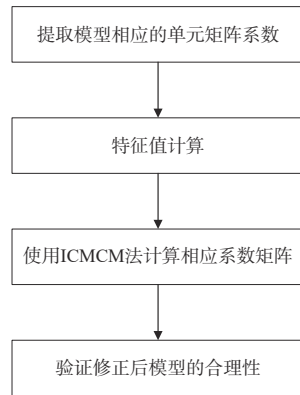


图 8 有限元修正大纲

Fig. 8 Outline of finite element correction

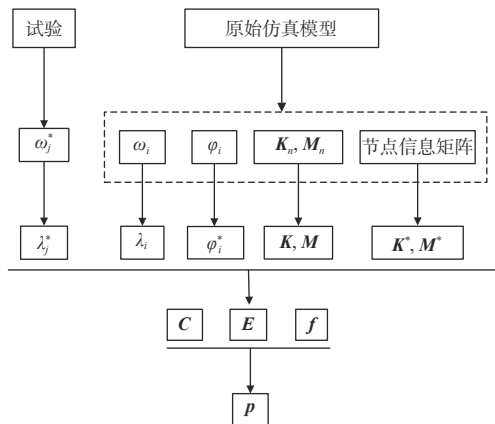


图 9 有限元修正参数流程

Fig. 9 Flow chart of finite element correction parameters

为评价本次修正结果, 引入模态置信准则 (MAC)^[17], MAC 是用 1 个数反映 2 个模态的相关程度。MAC 阵中每个元素代表对解析振型和试验振型的相关系数, 取值范围为 0~1。若 $MAC(i, j)$

越接近 1, 则第 i 阶计算模态与第 j 阶测试模态相关性越好。因此, MAC 阵角元越接近 1, 辅元越接近 0, 代表模态相关性越好, 也说明了有限元模型可以可靠地预测实际结构的动力响应。MAC(i, j) 可表示为

$$MAC(i, j) = \frac{(\varphi_i^T \psi_j)^2}{(\varphi_i^T \varphi_i)(\psi_j^T \psi_j)}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

式中: (i, j) 为 MAC 阵中第 i 行、第 j 列元素; n 为有限元计算的模态阶数; m 为试验获得的模态阶数; φ_i 为第 i 阶计算模态; ψ_j 表示第 j 阶测试模态。修正前和修正后模型的 MAC 阵计算结果如图 10 所示。从图 10 可以看出, 模型计算的 MAC 阵中主对角元素均大于 0.9, 辅元素均小于 0.1, 表明模态相关性较好。

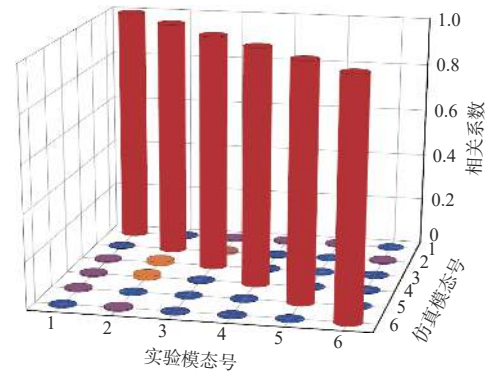


图 10 MAC 阵检验模型修正合理性

Fig. 10 Correction rationality of MAC array testing model

2.3 基于修正模型的瞬态动力学求解方法

压电陶瓷材料 (PZT) 属于各向异性材料^[18], 本文使用的压电陶瓷材料 PZT-4 的参数设置如下:

$$C^E = \begin{bmatrix} 13.9 & 7.78 & 7.43 & 0 & 0 & 0 \\ 7.78 & 13.9 & 7.43 & 0 & 0 & 0 \\ 7.43 & 7.43 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.06 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.56 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.56 \end{bmatrix} \times 10^{16} N \cdot m^{-2}$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -5.2 \\ 0 & 0 & -5.2 \\ 0 & 0 & 15.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12.7 & 0 \\ 12.7 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times C \cdot m^{-2}$$

$$[k^s] = \begin{bmatrix} 728.5 & 0 & 0 \\ 0 & 728.5 & 0 \\ 0 & 0 & 634.5 \end{bmatrix}$$

瞬态仿真设为 3 个子步, 设定自适应步长时

范围为 0.000 5 s~0.01 s。在镜面组件下压电装置分别定义为零势能面和施加电压面,施加 90 V 方波激励,可得到时域内的位移响应。

3 模态测试

3.1 试验仪器及试验条件

在对镜面组件模态测试中,需要测试高阶模

态,且对试验精度要求较高,传统接触式测振仪测点布置操作复杂,需要粘接测试探头和连线,这些附加质量会影响测试结果,并且由于镜面组件结构复杂,测点的布置量更多,因此,本试验采用非接触式德国 Polytec 公司 PSV-500-Xtra 扫描式激光测振仪、VGO-200 激光位移传感器两套设备进行测试。主要实验仪器性能如表 3 所示。

表 3 主要试验仪器性能
Table 3 Performance parameters of main test instruments

序号	设备名称	型号	主要技术参数
1	激振器	MS-20	峰值激振力 20 N
2	激光位移传感器	VGO-200	最高频率 100 kHz
3	多通道数据采集仪	LMS	64通道
4	扫描式激光测振仪	PSV-500-Xtra	速度分辨率0.01 μm·s ⁻¹ /Hz, 最高采样率6 MHz
5	信号发生器	RIGOL DG1022U	2通道, 6位/秒采样率100 MSa·s ⁻¹

扫描式激光测振仪和激光位移传感器采用多普勒测振技术,利用多普勒效应和外差干涉原理^[19]测量目标物体表面振动。多普勒激光测振仪具有高精度、高灵敏度、不受物体尺寸影响、不受温度和位置影响、可大量布置测点、测量距离更远、空间分辨率更高、测量时间更短、无附加质量等优势^[20]。

本文所有试验均在常温常压封闭试验室中展开,排除了振动的环境因素。针对自由模态测试下对模型约束的要求,镜面框架预留了外接吊耳安装孔,以方便使用弹性悬吊绳进行约束。基于悬吊绳具有高柔度和轻质的特点,该约束方式可很好地近似为无约束时的自由模态,约束方式如图 11 所示。胡守伟^[6]等研究指出,望远镜连接件的刚度对有限元分析结果影响较大,本文通过实体单元建立了柔性双脚架,用于拟合在压电响应测试中的约束状态。

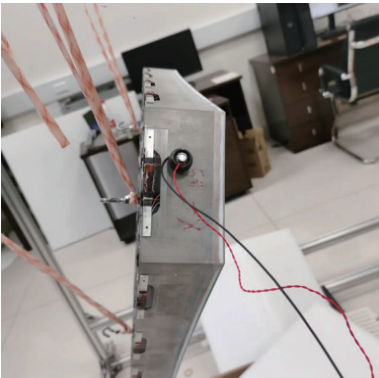


图 11 试验装配图

Fig. 11 Physical drawing of test assembly

3.2 模态试验方法

镜面组件结构如图 12 所示,包括镜面组件、柔性铰链等结构。在镜面结构的工作面,按照结构框架节点布置激光测点。激振器激励点由于镜面结构容易损坏且不测试压电条模态,考虑选在镜面框架上。

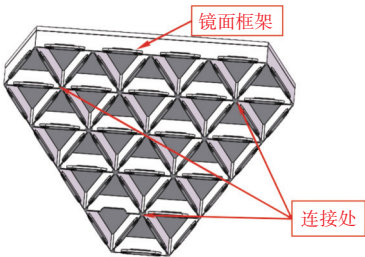


图 12 结构示意图

Fig. 12 Structure diagram

通过柔性绳将镜面组件悬挂于模态试验支架上,并根据有限元初步仿真结果及结构特点,在镜面组件上布置了约 250 个测点,连接激振器采用单点激励、多点拾振测试方案进行 0~2000 Hz 扫频测试。模态测试图如图 13 所示。为保证精确度,每个测点进行 3 次扫频测试,取 3 次测试结果的平均值作为最终结果。测量完成后,在 Polytec 后处理软件中可以获得镜面组件的频响曲线、模态频率和对应振型。

3.3 阶跃响应测试方法

在阶跃响应测试前进行对应有有限元仿真,提取各边在只激励一组压电作动器时的位移情况,结果如图 14 所示。图 14 中由蓝至红的颜色代表位

移的大小,其中红色最大,蓝色最小。从图 14 可以看出,各边最大位移与最小位移点均为六边形顶点,对比各边位移最大与最小点更有参考性。另外,考虑到 VGO-200 激光位移传感器需要手动选择测点和镜面内测点,其位置会出现偏差,并在定位过程中对光滑柔软的镜面造成损伤。为保证仿真与试验测点坐标一致性以及测试件安全,选择六变形顶点为位移响应的测点,阶跃响应测试点布置如图 15 所示。

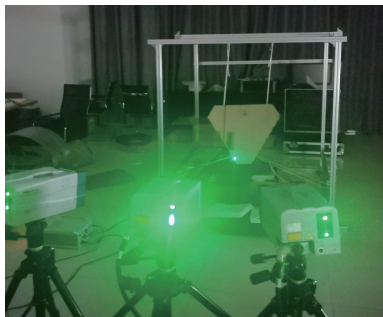


图 13 模态测试图
Fig. 13 Modal test experiment

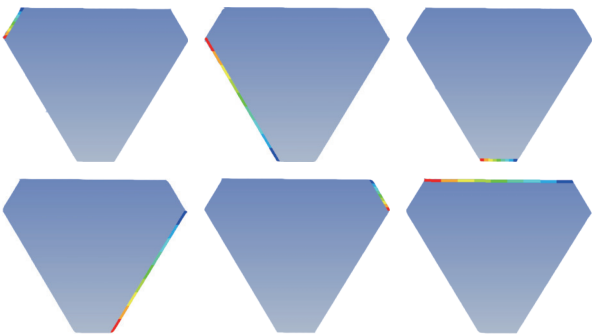


图 14 阶跃响应的各边位移云图
Fig. 14 Cloud atlas of displacement on each side of step response

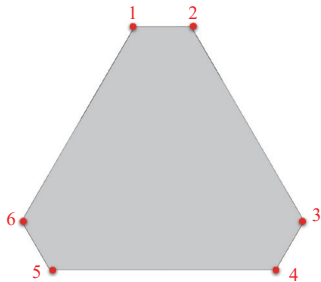


图 15 阶跃响应测试点布置示意图
Fig. 15 Schematic diagram of step-response test points arrangement

阶跃响应测试时,使用信号发生器给 1 号和 2 号测点后的压电作动器施加 0.1 Hz、90 V 的方波激励,通过 PolytecVGO-200 激光位移传感器测量

选定的各测点,采用 DASP 分析软件记录时程图。具体阶跃试验流程如下:在给定脉冲激励下,测试获得各组件关键点位置,特别是镜面组件上表面关键测点的响应时间历程曲线,提取振动幅值、响应时间、响应主频、对数衰减率等参数进行分析。利用激光测振仪测试振动信号,获取所要分析的物理量,将阶跃响应测试结果与修正后的有限元模型仿真分析结果对比,验证模态测试的动力学参数的拟合程度。

4 结果对比

4.1 模态仿真与试验结果对比

通过 PSV-500-Xtra 扫描式激光测振仪,测得模型在 0~3 000 Hz 的响应,如图 16 所示,其中红、绿、蓝 3 条曲线分别代表 x、y、z 3 个方向的响应。在 Polytec 后处理软件中获得前六阶模态振型,模态频率及振型如表 4 所示。

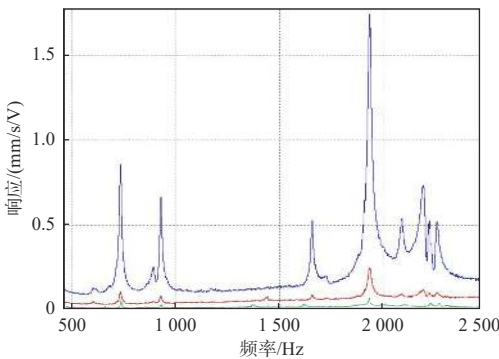


图 16 镜面组件模态试验频响曲线
Fig. 16 Frequency response curves of mirror assembly modal test

对初步有限元模型仿真分析发现,试验频率差距与仿真模态频率误差较大,但是试验与仿真模态又保持着极高相似性。对镜面组件进行简化及修正后误差下降,修正结果如表 5 所示。

由表 5 可知,镜面组件修正后,一阶频率误差由原先的 5.2 % 降低至 0.2 %,二阶频率误差由 1.8 % 上升到 2.3 %,三阶频率误差由 14.3 % 降低至 9.7 %。其中二阶频率误差略有上升,这一现象产生的原因是,本次修正的主要对像为一阶频率,修正中为保证整体模态的正交性,使高阶模态结果出现小范围变化。

修正完成后仿真频率与试验频率前三阶误差均不超过 10 %,修正后模型能够满足仿真精度要求。对模型进行自由状态下模态分析,得到前六阶振型以及对应频率,如表 4 所示。

表 4 镜面组件的模态试验测试结果与仿真结果

Table 4 Modal test results and simulation results of mirror assembly

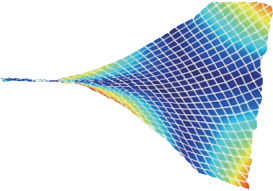
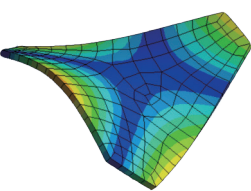
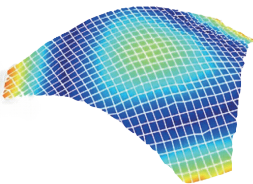
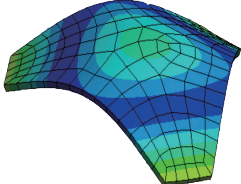
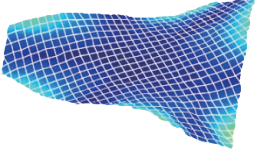
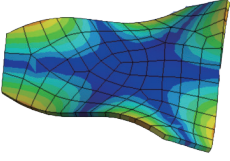
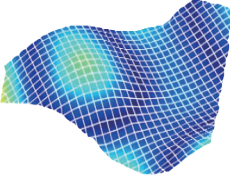
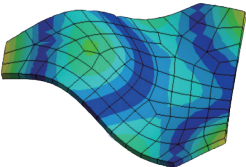
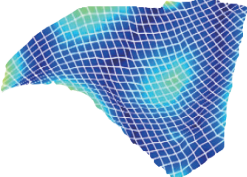
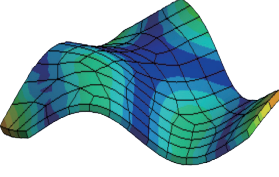
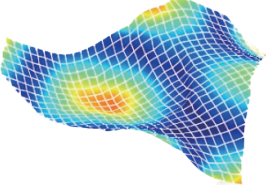
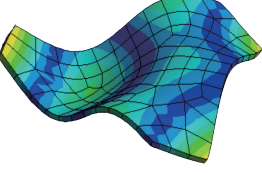
阶数	试验模态振型及频率/Hz	仿真模态振型及频率/Hz(括号内为修正前的频率)
1	 731.25	 732.10 (770.65)
2	 928.12	 906.75 (945.02)
3	 1 659.40	 1 837.40 (1 934.00)
4	 1 934.40	 2 136.50
5	 2 087.50	 2 183.10
6	 2 193.80	 2 347.90

表 5 镜面组件模型修正结果

Table 5 Correction results of mirror assembly model

阶数	试验频率/Hz	仿真频率/Hz	修正频率/Hz	原始误差/%	修正误差/%
1	731.30	770.70	732.10	5.2	0.2
2	928.10	945.02	906.75	1.8	2.3
3	1 659.40	1 934.00	1 837.40	14.3	9.7

4.2 阶跃响应测试与仿真结果对比

对粗调平台阶跃仿真得出的结果与试验测试结果进行对比,如图17所示。从图17中可以看出,6个测点的位移峰值与峰值时间基本一致,位移峰值最大误差为8.8%,验证了简化后镜面模型组件通过有限元修正拟合实物模型的准确性。注意到阶跃响应测试与仿真结果有一定偏差,是因为有限元修正对象只是质量与刚度,不涉及阻尼修正,阻尼的差距导致阶跃响应测试与仿真结果略有差异。

除特制模型外,一般模型阻尼比均小于0.1,因此,试验测试时阻尼比对模态频率及振型影响极小,在模态仿真中若不特殊说明,均指实模态的有限元仿真,实模态仿真时忽略了阻尼影响,也就是仿真计算时令运动学方程中阻尼矩阵为0。本文建立有限元模型是为了实现模态仿真及减振,因此阻尼项的差异对本文有限元模型准确性无影响。

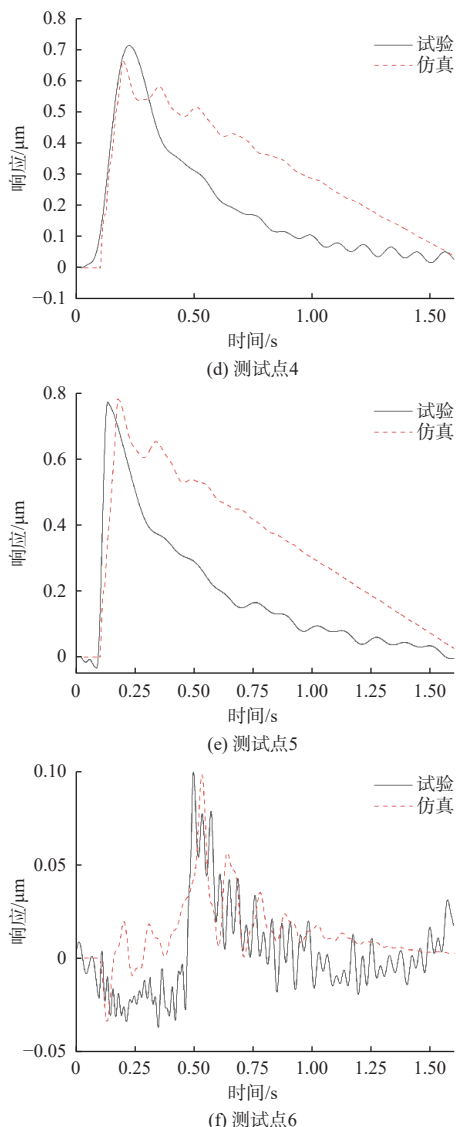
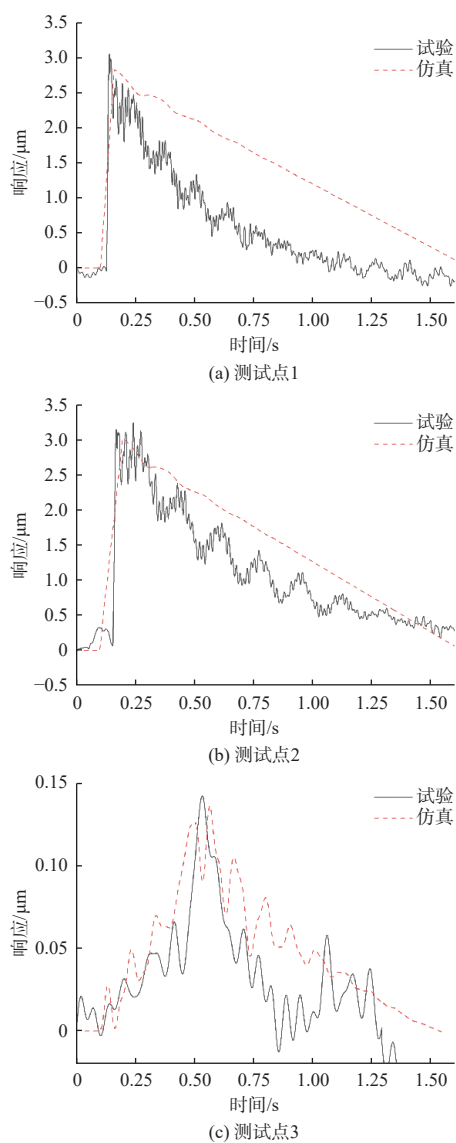


图17 阶跃响应测试结果与仿真结果对比

Fig. 17 Comparison between test results and simulation results of step response

5 结论

本文基于试验测得了模态结果,对初步复杂有限元模型进行简化后再修正有限元模型,利用修正所得有限元模型进行阶跃响应计算,将模拟结果与阶跃响应测试结果进行对比,可得如下结论:

1) 研究得到镜面组件一阶自由模态为单侧扭转变形,二阶模态为镜面基于平衡位置的弯曲变形,三阶模态为三边二阶弯曲的组合变形,高阶主要是基于约束处的弯曲变形。

2) 本文经过简化后的模型网格数量下降约为原来的14%,修正后的频率误差均下降到10%以内,其中一阶误差控制达到0.2%;提升了计算效

率。基于模态试验结果利用 ICMCM 法简化原始复杂模型并修正的方法, 具有较好的简化效率与计算精度, 具有一定工程实用价值。

3) 修正模型的瞬态动力学仿真与阶跃响应测试中测点峰值误差都在 10% 以内, 证明了修正后有限元模型的准确性, 为工程中接触条件复杂、复杂多样的结构有限元分析提供了一定参考。

参考文献:

- [1] NELSON J E, MAST T S, FABER S M. The design of the Keck observatory and telescope [R]. Waimea: Keck Observatory, 1985.
- [2] 霍银龙, 杨飞, 王富国. 大口径光学望远镜拼接镜面关键技术综述[J]. *中国光学(英文)*, 2022, 15(5): 973-982.
HUO Yinlong, YANG Fei, WANG Fuguo. A review of key technologies for splicing mirrors of large aperture optical telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 973-982.
- [3] 李浩田. 分块主镜式相机共相位检测系统研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
LI Haotian. Research on the common phase detection system of chunked primary mirror type camera[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [4] XU H, YANG L, YANG H, et al. Recent progress of active support system for large optical telescope primary mirror[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 17-29.
- [5] 李旭鹏, 石进峰, 王伟, 等. 大口径空间主反射镜拼接化结构技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 28-40.
LI Xupeng, SHI Jinfeng, WANG Wei, et al. A review of spliced structure technology for large aperture space primary mirrors[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2018, 55(3): 28-40.
- [6] 胡守伟, 张勇, 王跃飞, 等. 三十米中国未来巨型望远镜主桁架结构的概念设计[J]. *光电工程*, 2022, 49(6): 33-44.
HU Shouwei, ZHANG Yong, WANG Yuefei, et al. Conceptual design of the main truss structure of the thirty-meter Chinese future giant telescope[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2022, 49(6): 33-44.
- [7] AHMADIAN H, GLADWELL G W L, ISMAIL F, et al. Finite element model identification using modal data[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, 172(5): 657-669.
- [8] COLLINS J D, HART G C, HASSELMAN T K, et al. Statistical identification of structures[J]. *AIAA Journal*, 1974, 12(2): 185-190.
- [9] HU S L J, LI H, WANG S. Cross-model cross-mode method for model updating[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(4): 1690-1703.
- [10] 李剑, 洪嘉振, 李伟明. 模型修正的正交模型-正交模态改进法[J]. *动力学与控制学报*, 2008(1): 61-65.
LI Jian, HONG Jiazhen, LI Weiming. Orthogonal model-orthogonal modal improvement method for model correction[J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2008(1): 61-65.
- [11] 李伟明, 时亚州, 王君, 等. 自由度匹配技术在某贮箱结构模型修正中的应用[J]. *上海航天*, 2014, 31(5): 60-64.
LI Weiming, SHI Yazhou, WANG Jun, et al. Application of degree-of-freedom matching technique in the modeling of a storage tank structure[J]. *Shanghai Aerospace*, 2014, 31(5): 60-64.
- [12] 鲜文挺. 拼接主镜共相校正装置设计[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2021.
XIAN Wenting. Design of a spliced primary mirror co-phase correction device [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Photovoltaic Technology, Chinese Academy of Sciences), 2021.
- [13] 鲜文挺, 樊新龙, 周子夜, 等. 拼接主镜共相校正装置设计与测试[J]. *应用光学*, 2021, 42(1): 36-42.
SHEN Wenting, FAN Xinlong, ZHOU Ziye, et al. Design and testing of a common phase correction device for spliced primary mirrors[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(1): 36-42.
- [14] 周宇翔. 空间反射镜 Bipod 支撑技术研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2016.
ZHOU Yuxiang. Research on space reflector Bipod support technology[D]. Shanghai: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2016.
- [15] NIJENHUIS J, HEIJMANS J, BREEJE R D, et al. Designing the primary mirror support for the E-ELT[J]. *SPIE*, 2016, 9906: 462-471.
- [16] 崔永鹏, 何欣, 张凯. 采用三点定位原理的反射镜支撑结构设计[J]. *光学仪器*, 2012, 34(6): 56-61.
CUI Yongpeng, HE Xin, ZHANG Kai. Design of mirror support structure using three-point localization principle[J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(6): 56-61.
- [17] ALLEMANG R, BROWN D L. A correlation coefficient

- for modal vector analysis[C]//Proc. of the 1st IMAC. Orlando, USA: Shock and Vibration Center, 1982: 110-116.
- [18] CAIN M G, STEWART M. Standards for piezoelectric and ferroelectric ceramics[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014: 267-275.
- [19] 刘丹, 郑宾, 郭华玲, 等. 基于外差干涉的微振动测量技术研究[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 858-861.
- LIU Dan, ZHENG Bin, GUO Hualing, et al. Research on microvibration measurement technique based on aberration interference[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5): 858-861.
- [20] 周健, 龙兴武. 差动激光多普勒测速仪在固体速度测量中的应用[J]. 应用光学, 2009, 30(2): 334-337.
- ZHOU Jian, LONG Xingwu. Application of differential laser doppler velocimetry in solid velocity measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(2): 334-337.