

空间反射镜面形校正技术实验系统设计

张冬旭, 周平伟, 马宏财

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 针对空间相机主镜面形在轨主动校正的工程需求, 设计了用于验证空间反射镜面形校正技术的实验系统; 该实验系统将一面口径为 676 mm 的 SiC 反射镜面形作为被控对象; 将 9 只基于无刷直流电机的力促动器作为执行机构; 将基于 PXI 总线的工控机和基于虚拟仪器技术的测控软件作为控制器; 将干涉仪作为面形检测模块; 可实现对反射镜面形的闭环控制; 实验结果表明: 所研制的力促动器达到了输出范围不低于 $-320 \sim +320$ N, 输出精度优于 0.1 N 的指标需求; 基于面形响应函数的校正方法可以有效地校正反射镜面形; 针对幅值为 0.5λ 像散和 0.5λ 三叶两种像差, 一次校正后的校正偏差分别为 6% 和 4%; 利用该实验系统, 力促动器的单机性能指标得到了测试与评估; 面形校正方法得到了有效验证。

关键词: 主动光学; 力促动器; 虚拟仪器

Development of Experiment System for Surface Correction Technology for Space Reflecting Mirror

Zhang Dongxu, Zhou Pingwei, Ma Hongcai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the engineering requirement of active correction for surface shape of the primary mirror of space camera in orbit, an experiment system verifying the technology of surface shape correction for space reflecting mirror was designed. The experiment system took the surface shape of a SiC reflecting mirror with a diameter of 676mm as the controlled object, nine force actuators based on brushless DC motor as the operating device, the industrial computer based on PXI bus and the measurement and control software based on virtual instrument technology as the controller, the interferometer as the surface shape detection module, and was able to realize the closed-loop control of the mirror surface shape. The experiment showed that the developed force actuator had met the requirements of the output range greater than $-320 \sim +320$ N and the output accuracy better than 0.1 N and the correction method based on surface shape influence function was able to correct the mirror surface shape effectively. Tasking the correction of 0.5 wave astigmatism and 0.5 wave trefoil as two examples, the correction deviations after one correction by the nine force actuators array were 6% and 4% respectively. Utilizing the experiment system, the performance of a single force actuator was tested and estimated and the correction method was also validated.

Keywords: active optics; force actuator; visual instrument

0 引言

随着生产力的不断发展, 人类探索宇宙、巡天查地的需求愈来愈强烈, “看得更遥远, 看得更清晰” 是空间相机设计者不断追求的目标。而实现这一目标最根本的手段是不断增大空间相机主镜的口径, 但镜体制造技术的局限又制约了反射镜口径的进一步增大。当前, 地基反射镜单镜的最大口径为 8 m 量级^[1], 这几乎是单镜口径的极限。在轨空间反射镜单镜的最大口径为 2 m 量级。为了获得高质量成像, 缓解大口径反射镜的制造与支撑困难, 主动光学技术应运而生^[2-3]。

主动光学技术的核心手段是将主动控制技术应用于光学系统。应用了主动光学技术的空间相机将具备成像质量在轨自动校正的能力。自动校正的过程为: 波前传感器检测光学系统的成像质量, 获得椭率、像差系数等成像质量

指标。计算机根据期望成像质量与实际成像质量间的偏差, 通过面形响应函数^[4-5]、矢量像差^[6-9]等方法解算出力促动器、多维运动平台等执行机构的调整量。各执行机构接收计算机的控制指令进行作动, 通过改变各自的输出力或输出位移, 来调整反射镜的面形或位姿, 对空间相机的成像质量进行校正。进而克服了因空间失重、温度变化、碳纤维桁架放气等因素对空间相机成像质量造成的不利影响。

力促动器是主动光学系统中的面形校正装置, 其本质是一种力伺服机构, 通常作用于主镜背部。通过其调整对主镜轴向主动支撑力的大小, 来校正主镜的面形。如果按照使用能源来分类, 力促动器可分为液压式、气压式、电动式三类, 电动式又可以再分为电磁式和压电式。针对空间相机的实际工作环境, 电动式力促动器是最为合适的选择。

当前, 主动光学技术已较为广泛地应用在了地基大口

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-11-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61705223)。

作者简介: 张冬旭(1986-), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 主要从事机电一体化系统设计方向的研究。

引用格式: 张冬旭, 周平伟, 马宏财. 空间反射镜面形校正技术实验系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(6): 228-233.

径光学系统中, 被校正的地基反射镜一般是径厚比很大的薄镜, 且其材质一般为微晶或硼硅酸盐^[10-11]。由于主动光学系统较为复杂, 出于对可靠性的考虑, 主动光学技术还尚未普遍地应用到现役空间光学系统中。为了验证将主动光学技术应用在空间大口径 SiC 反射镜上的可行性, 本文首先改造了一面现有的 SiC 球面反射镜; 然后设计了一种以无刷直流电机为核心的力促动器; 再次搭建了基于 PXI 总线的工控机测控模块; 并基于 Labwindows/CVI 平台利用虚拟仪器技术开发了针对力促动器阵列的测控软件; 最后开展了面形校正实验。利用该实验系统, 一方面可以对力促动器的单机性能进行测试和评估, 另一方面也可以对反射镜的面形校正方法进行验证, 推动空间主动光学技术的工程化应用。

1 实验系统的总体方案

实验系统由反射镜、力促动器、干涉仪、工控机组成。实验系统本身是一套将反射镜面形作为被控对象的反馈控制系统。如图 1 所示, 干涉仪检测反射镜的面形指标, 获取实际像差系数。工控机根据期望像差系数与实测像差系数间的偏差, 利用面形响应函数求得每只力促动器的标称输出力, 并驱动相应的力促动器进行输出力调整, 完成对所有力促动器的闭环控制, 从而实现反射镜的面形调整。经过若干次迭代, 完成对反射镜面形的校正。

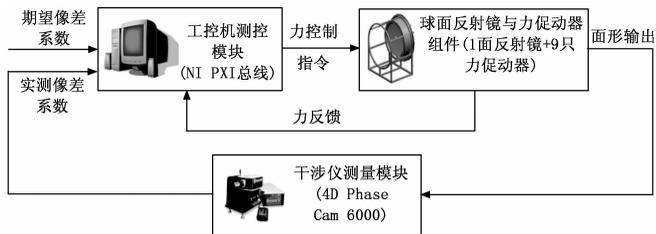


图 1 实验系统组成

实验系统所选用的 SiC 球面反射镜是某空间相机的备份主镜, 其口径为 676 mm, 厚度为 70 mm, 曲率半径为 1 910 mm。其原始支撑方式为被动支撑, 具体分布为背部采用三组 whiffletree 轴向支撑, 每组 whiffletree 支撑将单个支撑点转化为两个支撑点。侧面采用 3 只“ A 形框”构成 6 点侧向支撑。为了实现对该反射镜面形的主动校正, 且将像散和三叶两种像差作为主要校正对象, 需对原反射镜组件做必要的改造: 首先利用计算机辅助优化软件 Isight 从镜体背部筋交汇处的 33 个备选点中筛选出 9 个点作为主动支撑点^[12]; 其次通过特殊设计的工装夹具将 9 只力促动器集成到反射镜背部, 对反射镜施加轴向校正力。这样, 反射镜组件的支撑方式由被动支撑改造为主被动复合支撑 (如图 2 所示), 其中被动支撑结构起主要支撑作用, 力促动器阵列则作为辅助支撑。

2 实验系统硬件设计

2.1 力促动器设计

力促动器本身是一种力伺服机构, 其构成了空间主动

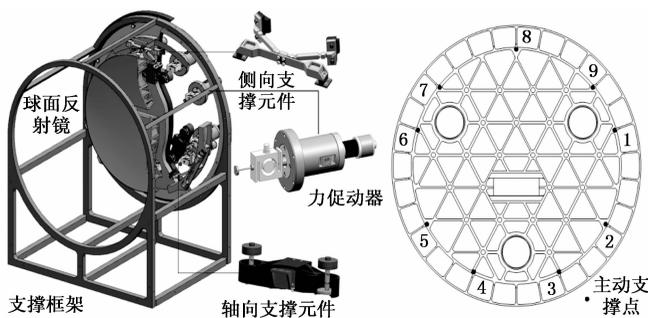


图 2 集成了力促动器的 SiC 球面反射镜及主动支撑点的分布

光学系统的内回路。主要由永磁无刷直流电机、行星减速器、梯形丝杠、光电编码器、柔杆、驱动器等组成, 具体结构如图 3 (a) 所示。永磁无刷直流电机是力促动器的原动机, 其具有功率密度大, 低速运行特性平稳等优点。行星减速器的输入与输出同轴, 易于同电机集成安装。梯形丝杠将电机输出的电磁转矩转换为力促动器的最终输出力, 并且使促动器具备断电自锁的功能。柔杆一端与力传感器连接, 另一端则通过殷钢垫同反射镜背面接触。

力传感器和光电编码器是促动器的反馈元件。力传感器的核心是一个惠思登电桥, 其用来测量促动器的输出力。光电编码器的类型为增量式编码器, 其同轴安装于电机的尾部, 用于反馈电机的运动信息。驱动器则通过电气接口与电机、编码器、工控机连接, 根据工控机指令完成对力促动器的驱动控制。

为满足力促动器的输出能力和输出分辨率要求, 促动器各部件参数需分别满足式 (1) 和式 (2):

$$\frac{2\pi T_N i \eta}{p} \geq [F] \tag{1}$$

$$k \frac{p}{2N} \leq [\Delta F] \tag{2}$$

其中: T_N 为电机的额定转矩; i 为行星减速器的减速比; p 为梯形丝杠的导程; η 为梯形丝杠的效率; N 为编码器的位数; k 为力促动器的轴向刚度; $[F]$ 与 $[\Delta F]$ 分别为需要的输出能力和输出分辨率。根据式 (1) 和式 (2) 的约束, 力促动器的主要参数如表 1 所示。

表 1 力促动器的主要参数

部件	生产商/型号	主要参数
电机	MAXON/EC-i40	$T_N = 52.8 \text{ mNm}$
编码器	MAXON/16 EASY	$N = 10$
减速器	MAXON/GP 32S	$i = 5.8 \quad \eta = 5.8$ $p = 2 \text{ mm}$
力传感器	HBM/S9M	量程 $\pm 500 \text{ N}$ 灵敏度 2 mV/V
驱动器	MAXON/EPOS 24/5	额定电压 24 V 额定电流 5 A

2.2 工控机测控模块

工控机测控模块是实验系统的核心, 一方面其需要解算每只力促动器的标称输出力; 另一方面要完成对 9 个通

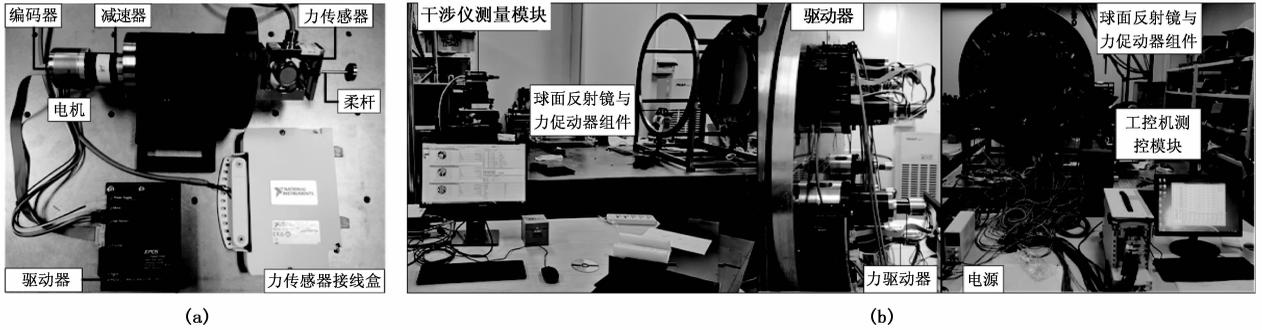


图 3 力促动器与实验系统

道力促动器的伺服控制。根据实际需求，实验系统选用 NI 公司生产的基于 PXI 总线的板卡和机箱，搭建工控机测控模块。测控模块包括 PXIe-1082 总线机箱、PXIe-8880 嵌入式控制器、PXIe-8430 串口通信卡、2 块 PXIe-4331 数据采集卡，具体结构如图 4 所示。

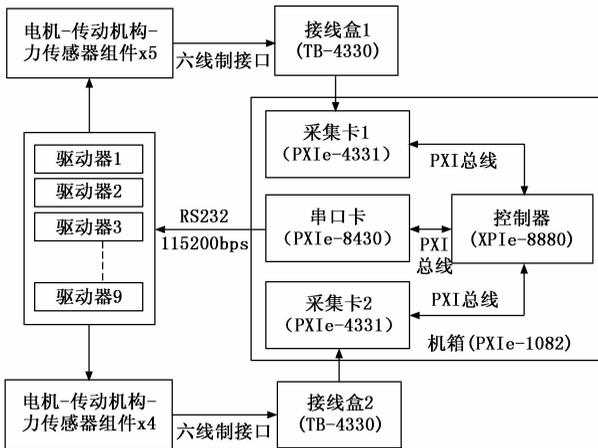


图 4 工控机测控模块框图

PXIe-1082 机箱单向最高传输速率可达 1 GB/s，其可为各板卡提供统一稳定的基准时钟信号（100 MHz），能够有效地进行多板卡信号的同步处理。各板卡及控制器通过 PXI 总线插槽集成在机箱中。PXIe-4331 是一种专门针对 6 线制惠思登电桥类型传感器的数据采集卡，其单卡具有 8 个采样通道，采样精度为 24 位，最大采样速率可达 102.4 K/s。实验系统中，2 块采集卡通过两个接线盒同 9 只力传感器连接，采集 9 只力促动器的实际输出力。采集的数据通过 PXI 总线反馈给控制器。PXIe-8880 控制器的核心为 8 核 16 线程的 Intel Xeon (R) E5-2618L 处理器，其搭载了 8 GB 的 DDR4 内存，控制带宽可达 24 GB/s，非常适合多通道数据的采集和处理。控制器根据像差校正量及面形响应函数解算出力促动器阵列的 9 个标称输出力，再读取采集卡采集到的 9 个实际输出力，利用数字 PID 控制律生成针对每只力促动器的控制指令。控制指令采用 RS-232 协议通过多通道串口通信卡 PXIe-8430 发送给对应的驱动器。驱动器是工控机的下位机，除接受控制指令外，还向工控机反馈电机的状态信息，用于系统参数的监控。搭建完毕的实验系统如图 3 (b) 所示。

3 实验系统软件设计

3.1 软件设计概述

实验系统软件利用 LabWindows/CVI 平台，基于虚拟仪器技术开发。“虚拟仪器”这一概念由 NI 公司于 1986 年提出，其技术思想是“软件就是仪器”。虚拟仪器技术将计算机处理器和多种通用功能模块通过总线组合在一起，利用软件实现传统电子测量仪器的功能，其将计算机技术、通讯技术、电子测试技术有机地融合在一起。LabWindows/CVI 是 NI 公司推出的基于虚拟仪器技术的交互式 C 语言软件开发平台，其以 ANSI C 为核心，自身具有丰富的应用函数库，同时还可以调用外部 C 函数。基于此平台可以方便地开发应用软件，实现对通信卡、采集卡、运动控制卡等多种通用功能模块的底层操作，完成对执行机构的驱动控制和传感器的数据采集。

实验系统软件解算力促动器阵列的标称校正力，并利用多线程技术对力促动器阵列进行闭环实时控制。图 5 为软件控制流程图；图 6 为实验系统的控制面板，其展示的是校正幅值为 0.5λ 三叶时控制器发送给力促动器阵列的控制指令以及力促动器阵列完成校正后的稳态输出。数据显示，力促动器阵列的最大输出力为 327.51 N，所有通道的控制偏差均小于 0.05 N。

驱动器是工控机测控模块与反射镜组件间的重要桥梁，其生产商 MAXON 公司提供了针对 EPOS 系列驱动器的 C 语言控制函数。函数功能包括驱动器的模式配置、电机状态参数的获取等。所有函数均被封装在同一个库文件中。软件开发时，首先将驱动器的函数库文件及函数定义头文件放置在软件项目的工程目录下；然后将二者添加至工程项目文件中；再次则可以调用相关函数编写程序实现对力促动器阵列的初始化、力传感器的数据采集、控制指令的生成与发送、电机参数的监视等功能。

3.2 多线程技术的运用

为了提高反射镜的面形响应速度，9 只力促动器需要同时作动，这就需要工控机对 9 个通道进行并行采样控制。与传统的单线程测控方法相比，运用多线程技术的测控软件能够更好地执行并行测控任务。多线程技术可以显著地减小运行时间和系统阻塞，有效地提高测控软件的性能和可靠性^[13]。

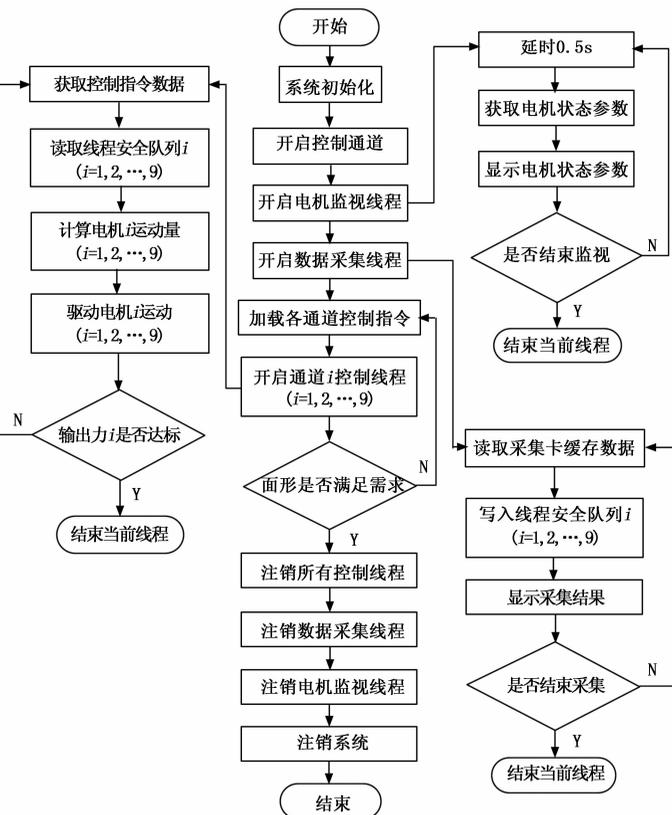


图 5 实验系统软件控制流程图

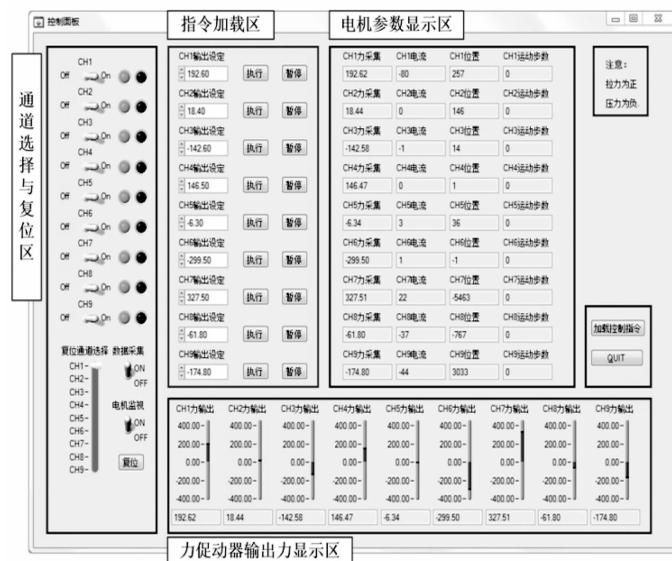


图 6 控制面板

实验系统测控软件共采用 12 个线程, 包括 1 个主线程、1 个数据采集次线程、9 个控制次线程和 1 个电机参数监视次线程。数据采集线程与控制线程均通过线程池创建。其中数据采集线程用于采集和显示 9 个力传感器的数据, 并通过线程安全队列将采集到的数据传递给对应的控制线程。控制线程则根据反馈和指令数据, 利用数字 PID 控制律对相关通道的力促动器进行闭环迭代控制。电机参数监视线

程通过异步定时器创建, 每隔 0.5 s, 监视线程采集一次各电机的状态参数并将其显示在控制面板上。当某只电机出现异常时, 监视线程会触发系统报警信号, 提示实验人员进行系统检查和复位操作。

在主线程的管理与调度下, 各次线程并行工作, 这有效地加快了反射镜的面形响应速度, 提高了系统的稳定性。与单线程测控方法相比, 反射镜的面形收敛时间减小了近 10 s。

4 面形校正实验

4.1 面形校正原理

在弹性范围内, SiC 的力学特性符合胡克定律, 因此反射镜的面形变化量具有叠加性。即反射镜的面形变化分布函数 $W(r, \theta)$ 等于力促动器阵列中每只促动器单独施力时的面形变化分布函数 $W_i(r, \theta)$ 之和; 且 $W_i(r, \theta)$ 与所施加的校正力 F_i 成正比。即:

$$W(r, \theta) = \sum_{i=1}^9 W_i(r, \theta) = \sum_{i=1}^9 F_i w_i(r, \theta) \quad (3)$$

式中, $w_i(r, \theta)$ 称为面形响应函数, 其为第 i 通道的力促动器单独施加单位力时反射镜的面形变化分布函数。

另一方面, 反射镜的面形变化分布可以用泽尼克多项式序列 $z_j(r, \theta)$ 的线性组合来描述, 即:

$$W(r, \theta) = \sum_{j=1}^{37} a_j z_j(r, \theta) \quad (4)$$

$$w_i(r, \theta) = \sum_{j=1}^{37} k_{ji} z_j(r, \theta) (i = 1, 2, \dots, 9) \quad (5)$$

将式 (3) 与式 (5) 联立并写成矩阵的形式, 同时根据泽尼克多项式在单位圆内的正交性质最终可得:

$$\begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \dots & k_{1,9} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \dots & k_{2,9} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{37,1} & k_{37,2} & \dots & k_{37,9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{37} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式 (6) 简写为:

$$\mathbf{K}F = a \quad (7)$$

k_{ji} 为像差系数 a_j 相对校正力 F_i 的灵敏度系数, \mathbf{K} 为像差矢量相对校正力矢量的灵敏度矩阵, 其与力促动器阵列的分布方式、反射镜的材料属性、被动支撑分布方式等因素有关。灵敏度矩阵可以通过有限元分析或干涉仪测量得到, 是已知量。 a 为像差系数增量矢量, 其因校正力矢量 F 的作用而产生。实验中, 已知灵敏度矩阵 \mathbf{K} 和期望的像差增量矢量 a , 根据式 (7), 利用阻尼最小二乘法就可以反解出需要施加的校正力矢量 F , 即:

$$F = (\mathbf{K}^T \mathbf{K} + \xi \mathbf{I})^{-1} \mathbf{K}^T a \quad (8)$$

其中: ξ 为阻尼因子, \mathbf{I} 为单位矩阵。

4.2 面形响应函数的测定

在面形校正实验开始前, 需测量反射镜的初始基准面形。初始基准面形反应了镜体在被动支撑结构作用下的重力面形误差和加工残差, 是面形校正的起点。

令反射镜组件处于如图 3 (b) 所示的状态 (光轴水平, 室温恒定 25 °C), 同时令 9 个通道的力促动器输出力均为

0 N。调整干涉仪位姿，令干涉仪出射光线汇聚点与反射镜的曲率中心重合，然后启动测量，获得反射镜初始基准面形的干涉测量图及泽尼克多项式系数（如图 7 所示）。反射镜的初始面形精度为 $RMS = 0.069\ 2\lambda, PV = 0.863\ 98\lambda (\lambda = 632.8\ \text{nm})$ 。

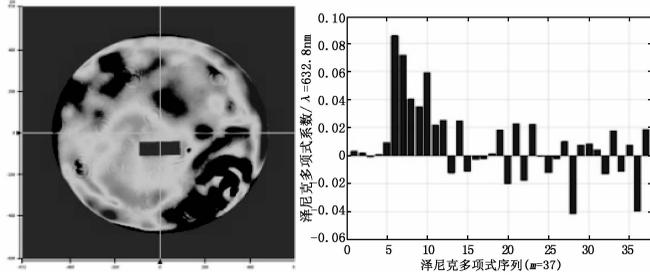


图 7 反射镜的初始基准面形

面形响应函数是反射镜组件一个重要的自身属性，得到了面形响应函数，就可以通过最小二乘法获得灵敏度矩阵 \mathbf{K} 。

为便于测量，令通道 1 的力促动器输出 100 N 推力，令其余 8 个通道的输出力均为 0 N。待 9 只力促动器均完成调整后启动干涉仪，测得此刻反射镜的面形干涉图，并用获得的干涉图减去图 7 所示的初始基准面形，两幅干涉图之差的百分之一则为通道 1 的面形响应函数图像，即 $w_1(r, \theta)$ 。如式(5)所示，以泽尼克多项式序列为基底，利用最小二乘法可求得 \mathbf{K} 中的 $k_{1,1} \sim k_{37,1}$ 。以此类推，可以依次获得通道 2~9 的面形响应函数，继而得到灵敏度矩阵 \mathbf{K} 。图 8 列举了 9 个通道的面形响应函数图像。

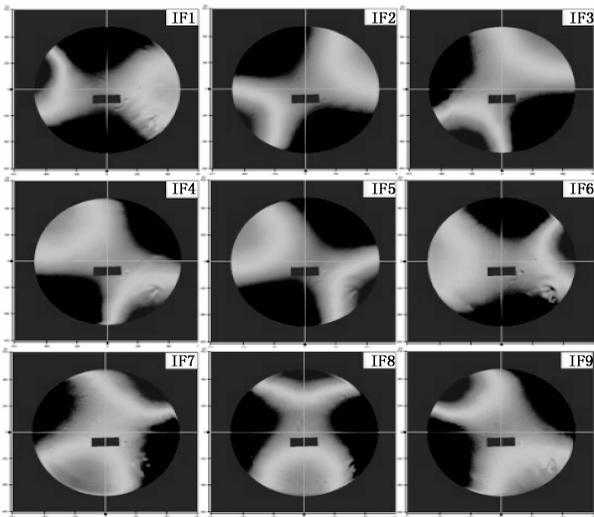


图 8 面形响应函数

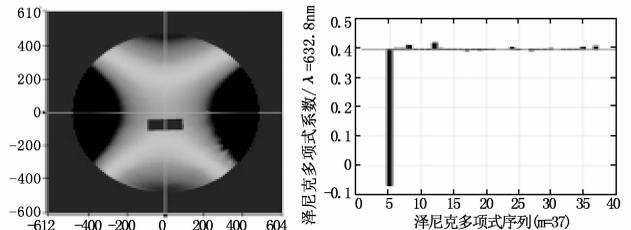
4.3 像散与三叶的校正

根据测量所获得的灵敏度矩阵 \mathbf{K} ，就可以针对特定的像差进行面形校正。令促动器阵列作动，使反射镜面形分别产生幅值为 0.5λ 的 0° 像散、 45° 像散、 0° 三叶和 30° 三叶。利用式分别求取此 4 种工况下力促动器阵列中各通道的标称校正力，计算结果如表 2 所示。

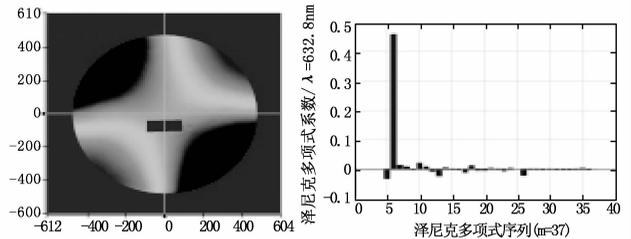
表 2 力促动器阵列标称校正力的计算值

通道	z_5 像散校 正力/N	z_8 像散校 正力/N	z_{10} 三叶校 正力/N	z_{11} 三叶校 正力/N
1	-53.7	-1.3	192.6	214.8
2	-45.4	52.5	18.4	-258.5
3	47.5	24.3	-142.6	128.9
4	51.6	-34.1	146.5	128.9
5	-38.3	-41.1	-6.3	-240.7
6	-75.7	-8.5	-299.5	122.4
7	46.4	87.8	327.5	77.2
8	38.7	-17.5	-61.8	-152.0
9	29.0	-62.2	-174.8	-21.0

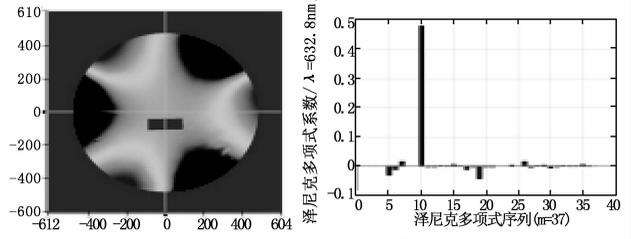
根据表 2 所示的 4 组计算结果，通过图 6 所示的控制面板依次加载控制指令，待所有促动器均调整完毕后，启动干涉仪测得反射镜的当前面形。将获得的干涉图与图 7 所示的初始面形干涉图做差，即得到了校正力矢量所产生的像差变化量。图 9 列举了表 2 中 4 组校正力所产生的像差，其幅值分别为 $0.47\lambda, 0.46\lambda, 0.48\lambda, 0.46\lambda$ 。可以看出，像散和三叶两种像差较好地得到了校正，校正偏差分别为



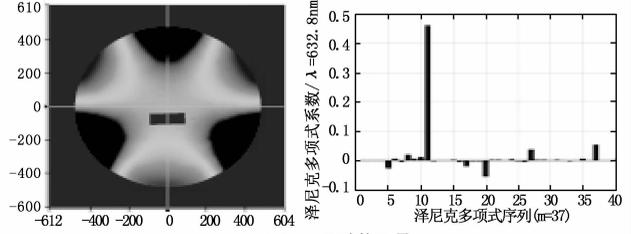
(a) z_5 像散校正量



(b) z_8 像散校正量



(c) z_{10} 三叶校正量



(d) z_{11} 三叶校正量

图 9 校正结果

6%、8%、4%和 8%。

5 结束语

为了验证将主动光学技术应用于空间光学系统的可行性, 满足空间 SiC 反射镜面形在轨自动校正的工程需求, 本文设计并搭建了一套针对 SiC 反射镜面形校正技术的主动光学实验系统。该实验系统以改造加装力促动器阵列后的 SiC 球面反射镜面形为被控对象, 通过测控软件对力促动器阵列实施闭环控制, 完成对反射镜面形的闭环校正。文中首先阐述了实验系统硬件和软件的设计准则以及关键部件的型号与参数, 然后测定了反射镜组件的面形响应函数, 最后针对像散和三叶两种低阶像差进行了校正实验。

实验结果表明: 所设计的力促动器的额定输出范围大于 $-320 \sim +320$ N, 校正力输出精度优于 0.05 N, 满足了系统需求。应用多线程技术, 测控软件可以稳定、快速、准确地控制力促动器阵列。基于面形响应函数, 力促动器阵列可以较好地校正像散和三叶两种低阶像差。当校正指令幅值为 0.5λ 时, 力促动器阵列通过一次校正, 像差的实际校正量可达 0.48λ 。该实验系统评估了力促动器的性能指标, 可以较好地作为面形校正策略的验证系统, 推进空间主动光学技术的工程化应用。

参考文献:

- [1] 徐宏, 杨利伟, 杨会生. 大型光学望远镜主镜主动支撑系统研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55 (10): 17-29.
- [2] Hardy J W. Active optics: a new technology for the control of light [J]. Proceedings of the IEEE, 1978, 66 (6): 651-697.
- [3] Ray F B. Active optics technology: an overview [C]. SPIE, 1991: 188-206.

(上接第 175 页)

通过机外数据监控, 可以对仪表测试的机外数据进行查看, 以判断雷达的运行状态。

5.3 实现的结果与分析

系统实现了对 CB 型新一代天气雷达站雷达系统及其相关附属设施的远程控制、监控和技术指标的测试, 实现了雷达无人值守时的远程开关机远程故障复位、远程雷达机内和机外的定标、雷达机房数据及图像监控以及雷达故障报警维护等功能; 实现了新一代天气雷达站在局站分离状态下的远程值守。

- 1) 实现雷达无人值守时的远程开关机;
- 2) 实现雷达远程机内和机外的在线定标;
- 3) 雷达故障报警维护;
- 4) 雷达机房数据及图像监控。

本系统在实际业务运行中仍存在以下情况有待完善: 数据库查询功能需进一步扩展; 实时监测数据刷新时间有待从 20 s 提升至 $5 \sim 10$ s; 增加机房空调设备、门禁、烟感及油机房温湿度、发电机参数状态监测。

6 结束语

系统研制完成后于 2017 年底通过了项目的验收和测

- [4] Zhou P W, Zhang D X, Liu G, et al. Development of Space Active Optics for a Whiffletree Supported Mirror [J]. Applied Optics, 2019, 58 (21): 5740-5744.
 - [5] 苏定强 崔向群. 主动光学——新一代大望远镜的关键技术 [J]. 天文学进展, 1999, 17 (1): 1-14.
 - [6] Ju G H, Yan C X, Gu Z Y, et al. Computation of astigmatic and Trefoil figure errors and misalignments for two-mirror telescopes Using Nodal-aberration Theory [J]. Applied Optics, 2016, 55 (13): 3373-3386.
 - [7] Ju G H, Yan C X, Gu Z Y, et al. Nonrotationally symmetric aberrations of off-axis two-mirror astronomical telescopes induced by axial misalignments [J]. Applied Optics, 2018, 57 (6): 1399-1409.
 - [8] Ju G H, Yan C X, Gu Z Y, et al. Aberration fields of off-axis two-mirror astronomical telescopes induced by lateral misalignments [J]. Optics Express, 2016, 24 (21): 24665-24703.
 - [9] Ma H C, Ju G H, Zhang X B. Optical design method of two-mirror astronomical telescopes with reduced misalignment sensitivities based on the nodal aberration theory [J]. Osa Continuum, 2018, 1 (1): 145-161.
 - [10] Neill D, Angeli G, Claver C, et al. Overview of the Lsst active optics system [A]. Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VI [C]. SPIE, 2014: 143-158.
 - [11] 李宏壮, 王建立, 林旭东, 等. 薄反射镜主动光学实验系统 [J]. 光电工程, 2009, 36 (6): 120-125.
 - [12] 胡佳宁. 基于 SiC 厚镜的大口径主镜面形校正技术的研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
 - [13] 单体强, 陈雷, 张万发. LabWindows/CVI 多线程技术的应用研究 [J]. 电子设计工程, 2012, 20 (15): 52-58.
- 试, 2018 年进行了一年的运行, 目前在台站的应用效果达到设计目标, 该站本系统远程排除雷达故障 10 余次, 取得了一定的社会效益。2019 年, 本系统的硬件模块和软件模块进行升级改造, 在其它天气雷达站试运行。科技发展日新月异, 新一代天气雷达站无人值守、远程雷达定标及远程技术支持已经不存在技术的障碍, 但现行雷达业务管理制度和考核对无人值守和远程定标缺乏指引, 是项目推广的主要困难。

参考文献:

- [1] 张初江, 陈利芳, 黎志波, 等. CINRAD/SA 雷达远程网络智能控制系统设计和应用 [J]. 气象科技, 2018, 46 (4): 835-839.
- [2] 弓宇恒, 李庆君, 蔺汝星. 雷达发射机灯丝电源故障维修 [J]. 气象科技, 2013, 41 (3): 587-590.
- [3] 李成伟. CB 型新一代天气雷达触发器故障分析 [J]. 气象科技, 2012, 40 (3): 354-355.
- [4] 张德玉, 魏荣妮, 王伏村. 多普勒天气雷达数据管理及运行保障系统 [J]. 气象科技, 2010, 38 (3): 332-335.
- [5] 李伟, 赵培涛, 郭启云, 等. 国产 GPS 探空仪国际比对试验结果 [J]. 应用气象学报, 2011, 22 (4): 453-462.