

文章编号 1004-924X(2022)02-0199-11

# 天问一号高分相机主光机在线装调技术研究

王克军\*, 董吉洪, 朱时雨, 李威, 孟庆宇

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**天问一号高分相机采用了离轴三反光学系统,指标精度高,结构复杂,研制周期短。鉴于上述要求,对离轴三反光学系统的计算机辅助装调技术进行了深入研究,并应用到天问一号高分相机主光机结构的装调过程中,利用计算机辅助装调技术使天问一号高分相机主光机结构的装调指标迅速收敛。各个视场的平均系统波像差优于 $\lambda/14$ ,在特征频率57.1 lp/mm的平均传递函数0.381。此外,对主光机结构开展了一系列的环境模拟试验,包括力学应力筛选试验、高低温循环试验和失重环境适应性试验。在经历试验后,各技术指标均变化很小,基本满足总体设计指标要求。天问一号成功发射,传回了清晰的火星照片,进一步验证了计算机辅助装调技术的装调效果。

**关键词:**天问一号;空间遥感器;系统装调;离轴三反;力学试验

**中图分类号:**TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223002.0199

## Research on on-line alignment technology with main optical-mechanical structure of Tianwen-1 high-resolution camera

WANG Kejun\*, DONG Jihong, ZHU Shiyu, LI Wei, MENG Qingyu

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

\* Corresponding author, E-mail: wangkejun1@163.com

**Abstract:** The Tianwen-1 high-resolution camera adopts an off-axis three-mirror optical system, with a high precision index, complex structure, and short development cycle. In view of the above requirements, the computer-aided alignment technology of the off-axis three-mirror optical system is thoroughly investigated and applied to the alignment process of the main optical-mechanical structure of the Tianwen-1 high-resolution camera. The application of this technology causes the alignment index of the main optical-mechanical structure of the camera to converge rapidly. The average system RMS is better than  $\lambda/14$  for each field of view and the average transfer function is 0.381 at the characteristic frequency of 57.1 lp/mm. A series of environmental simulation tests, including a mechanical test, temperature cycling test, and weightlessness adaptability test, was conducted on the main optical-mechanical structure. Following the experiments, all the technical indexes changed only slightly, thus meeting the requirements of the overall design indexes. Finally, Tianwen-1 was successfully launched, and clear images of Mars were sent, thus proving the effectiveness of the computer-aided alignment technology.

**Key words:** Tianwen-1; space remote sensor; system alignment; off-axis three-mirror; mechanical test

收稿日期:2021-01-06;修订日期:2021-02-26.

基金项目:国家青年科学基金项目(No. 11703027)

## 1 引言

空间遥感相机的光学系统结构布局主要包括三种:折射式、折反式和全反式。光学系统全部由透镜组成的叫做折射式光学系统,既有透镜又有反射镜组成的叫做折反射式系统,全部由反射镜构成的叫做全反式系统。

简单的光学系统可凭借装调人员的装调经验、观察星点、鉴别率等完成光学系统的装调,周期长、费时费力。随着空间观测指标的增高,光学系统的复杂程度越来越高,尤其是对于复杂的离轴多反光学系统,传统的装调方法已经无能为力,计算机辅助装调技术应运而生。计算机辅助装调技术是通过实时检测光学系统,得到整个光学系统的系统波像差,对该波像差进行处理和优化,确定光学系统各个光学组件的调整方向及调整量,实现各个光学元件的最佳位置装配,保证光学系统的成像质量接近理论设计值<sup>[1-3]</sup>。

本文基于天问一号选用的离轴三反光学系统的高精度指标设计和短周期装调要求,深入研究了计算机辅助装调的基本理论,结合天问一号离轴三反光学系统的特点,实现在线快速装调,并对系统开展各项环模试验和测试。

## 2 离轴三反计算机辅助装调理论

光学系统的计算机辅助装调技术是利用实测的手段获得光学系统的波像差系数,利用计算机建立系统模型获得光学系统中各个光学元件的失调量大小以及方向,确定装调的开展方向,进行有限次数的迭代,保证最终的光学系统的光学像质接近光学系统的理论设计值,接近或达到系统的衍射极限。在理想情况下,光学系统的系统像差是能达到设计值的。在面形误差达到设计指标的前提下,如果光学元件存在失调,将带来系统像差的变化,光学元件的失调量与系统像差之间存在着对应关系。所以,如果已知系统像差,通过建立光学元件的失调量数学模型,也就是失调矩阵,可以获得光学元件的失调量。

建立光学元件失调量数学模型-失调矩阵是开展计算机辅助装调的必要环节,所建数学模型的精度与光学元件失调量求解的精度直接相关,建立失调量数学模型的常用方法有逆向优化法

(评价函数回归法)、灵敏度矩阵法、人工神经网络法、矢量像差法、差分波前采样法、遗传算法等<sup>[4-7]</sup>。在此,详细介绍应用较多的逆向优化法和灵敏度矩阵法。

### 2.1 逆向优化法

在进行光学系统的设计时,要对光学系统的各个参量进行整体优化,优化的目标是获得满足指标要求的光学系统,误差函数的值则代表了光学系统中的各个参数值与设计人员给出的设计目标值的偏差,在最理想情况下,误差函数值应该是零。在光学设计软件 CODE V 中误差函数如公式 1 所示:

$$\text{Error Function} = \sum W_j^2 (A_j - T_j)^2. \quad (1)$$

其中: $A_j$ 是系统优化过程中控制参数的当前值, $T_j$ 是系统优化过程中控制参数的目标值, $W_j$ 是各个参数的权重, $j$ 表示控制参数的个数。光学系统的系统波像差的干涉测量结果在装调过程中是用 Zernike 多项式来表示的,因此选择 Zernike 系数来作为系统优化的控制参数。首先将理想光学系统中可能的失调量设置为优化变量,将当前装调过程中光学系统的波像差实测 Zernike 系数当做目标值,开展整体优化。优化获得光学系统的误差函数值为零时,优化软件中的系统波像差 Zernike 系数与系统波像差的实测 Zernike 系数相等,这时从软件中获得的各变量的值即为系统的各变量失调量。

### 2.2 灵敏度矩阵法

光学系统的失调量是指光学元件在装调过程中,光学元件的平移、倾斜等位置参数与理想设计值存在的偏差值,光学元件的位置失调将会引入系统像差,继而导致系统像质恶化。从数学角度讲,光学系统的像差是各个光学元件失调量的数学函数。用  $F_j(j=1, 2, \dots, m)$  来表示系统像差,用  $x_i(i=1, 2, \dots, n)$  来表示各个光学元件的位置参数, $m$  表示考虑的系统像差的总数量, $n$  表示考虑的光学元件位置参数的总数量,函数关系式可表示为式(2):

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

光学系统失调量的计算问题从数学的角度来讲就是建立和求解式(2)所示的复杂的非线性方程组,根据系统要求的系统成像质量( $F_1, F_2,$

$\dots, F_m$ ),解方程组获得未知参数 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的值,也就是系统中各个光学元件的失调量。但在实际操作过程中,函数 $(f_1, f_2, \dots, f_m)$ 的具体表达式不能准确获得,需表示成自变量的幂级数,通过数值计算或实验的手段,获取足够个数采样点的函数值,列出足够数量的方程式,解算获得各幂级数的对应系数,确定函数 $(f_1, f_2, \dots, f_m)$ 的幂级形式表达式。为了简单易处理,选用幂级数的一次项,近似的用线性方程来代替失调量与系统像差系数之间的复杂函数关系,如式(3)所描述:

$$F_j = F_{0j} + \frac{\partial f_j}{\partial x_1} (x_1 - x_{01}) + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n} (x_n - x_{0n}), \quad (3)$$

其中: $F_{0j}$ 是光学系统在设计完成之后的剩余像差值, $x_n - x_{0n}$ 是光学系统中各光学元件位置参数相对于理想位置的变化量, $F_j$ 是光学系统中各像差的实际测量值。 $\left(\frac{\partial f_j}{\partial x_1} \dots \frac{\partial f_j}{\partial x_n}\right)$ 是不同的像差对光学元件不同位置参数的一阶偏导,用函数值相对于位置参数的差商 $\left(\frac{\partial f_j}{\partial x_1} \dots \frac{\partial f_j}{\partial x_n}\right)$ 近似替代微商 $\left(\frac{\partial f_j}{\partial x_1} \dots \frac{\partial f_j}{\partial x_n}\right)$ ,得到系统波像差与光学元件位置参数之间的近似线性方程组:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Delta x_n \\ \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \Delta x_n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

利用矩阵形式表示上述方程组可大大简化该表达式。

$$\begin{cases} \Delta F = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix} \\ \Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0n} \end{bmatrix} \\ M = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \end{cases}. \quad (5)$$

则(4)式可简单处理成:

$$M \Delta X = \Delta F. \quad (6)$$

方程(6)就是计算机辅助装调技术中利用灵敏度矩阵法获得光学元件各失调量的简化数学模型。其中: $\Delta X = X - X_0$ 是光学系统中各个光学元件失调量,即在装调过程中所要调整的变化量; $\Delta F = F - F_0$ 是光学系统在装调过程中各个实测像差系数值与理想设计值的差值,即系统的像差系数针对失调量的变化量,由当前光学系统的像差系数的实际测量值和光学设计结果共同确定;高精度光学系统在装调时均采用干涉测量来获得系统不同视场的像差系数,也就是波像差 Zernike 系数; $M$ 是光学系统的灵敏度矩阵,利用式(4)获得,光学设计软件可模拟获取系统不同位置参数的失调状态,灵敏度矩阵是由光学设计参数确定。

灵敏度矩阵法的使用前提是光学系统的像差和失调量函数关系符合线性关系,而实际情况是该线性关系只有在失调量很小的情况下近似成立;也就是说,装调误差很小时,计算出的失调量准确度高,失调量很大时,计算出的失调量误差很大,对装调来说意义不大。逆向优化法在失调量大的情况下也有很高的精度,克服了灵敏度矩阵法的缺点。但是,逆向优化法是基于光学设计软件的自动优化功能来获得系统失调量,假如光学系统失调量个数很多,优化耗时会很长。

### 3 光学系统及主光机结构形式

#### 3.1 光学系统

离轴三反光学系统是以三反消像散为基础发展而来,离轴三反光学系统舍弃光学对称性,增加镜面偏心和偏轴等自由度,增加了像差校正的自由度,增加了视场角度,常作为空间光学遥感光学系统的重要选型。天问一号遥感器的光学系统采用了离轴三反光学系统,其结构布局形式见图1。

天问一号高分相机光学设计参数为:

(a) 焦距  $f' = 4\ 640\ \text{mm}$ ;

(b) 通光口径  $D = 387\ \text{mm}$ ;

(c)  $F\# = 12$ ;

(d) 视场角  $2\omega = 2^\circ$  (9 km 幅宽对应视场角:  $2\omega = 1.95^\circ$ );

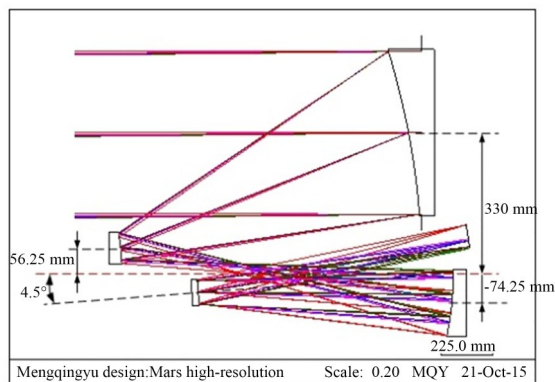


图1 天问一号高分相机光学系统结构布局

Fig.1 Layout of optical system of Tianwen-1 high-resolution camera

(e)系统波像差优于 $\lambda/14$ (包括加工残差和装配残差等);

(f)光学传递函数在632.8 nm谱段上的全视场静态平均MTF优于0.34@57 lp/mm(包括加工残差和装配残差等)。

(g)像面长度 $2x > 157.90$  mm(对应星下点9 km幅宽);

(h)像面宽度 $2y = 56.13$  mm(考虑TDI CCD拼接、彩色TDI CCD通道与面阵CMOS)。

### 3.2 光机结构

天问一号高分相机的主光机结构主要包括:框架、主镜、次镜、三镜和调焦镜,调焦镜将系统焦面折转到主三镜之间的位置,使得整个结构紧凑,主光机结构详见图2。主光机结构装调优劣的评价指标是系统波像差和传递函数。

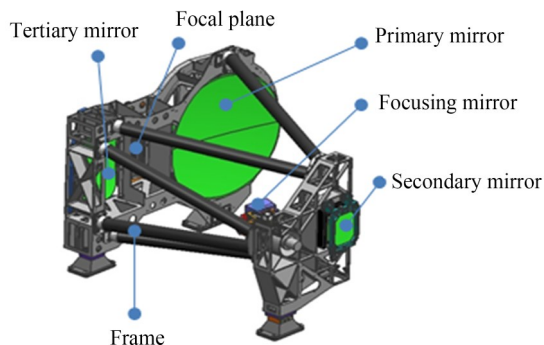


图2 天问一号高分相机主光机结构

Fig.2 Main optical-mechanical structure of Tianwen-1 high-resolution camera

## 4 主光机结构装调

### 4.1 装调技术要求与难点分析

(1)单镜面形RMS值优于 $\lambda/50$ ( $\lambda = 632.8$  nm);

(2)装调检测环境温度: $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

(3)各个视场的平均系统波像差优于 $\lambda/14$ ;

(4)MTF要求:采用位相法检测,在632.8 nm谱段全视场静态平均MTF优于0.34@57 lp/mm。

天问一号有效通光口径为387 mm,离轴三反光学系统,三块反射镜,每个反射镜有六个空间自由度,共计十八个空间自由度,空间定位难度大。

考虑发射成本,整个相机开展了高度的轻量化设计,尤其是反射镜组件和框架组件,轻量化率很大,刚度和强度均有大幅度的降低,对外界载荷如装配应力等因素的敏感度更高。

### 4.2 装调策略

天问一号高分相机主光机结构的系统装调分为粗调和精调,粗调采用补偿器穿轴的手段完成,精调采用计算机辅助装调技术灵敏度矩阵法来完成。粗调将各个反射镜调整到接近理论位置,作为利用灵敏度矩阵法进行计算机辅助装调的精度基础,而灵敏度法计算机辅助装调的前提恰恰是光学系统光学元件的各个自由度的失调量不能太大。

在离轴三反光学系统装调中,首先要确定需要调整的自由度参数。系统中共有三个反射镜,每个反射镜有6个自由度,共18个调整自由度。根据反射镜的公差情况,先固定一个反射镜,即可减少6个自由度;由于该光学系统三块反射镜共母轴且母镜镜面绕母轴回转对称,可去掉次、三镜绕光轴的旋转的自由度;所以,在装调中,需要调整的自由度为10个。

光机结构的装调过程就是调整参数的过程,主要是由理论计算和实际操作两部分构成。理论计算是确定装调方向和调整量,实际操作则是实现理论计算,装调流程见图3。

对光学加工完成后的各个光学反射镜进行检测,获得反射镜实际的光学参数(如半径,离轴量,面形等)。面形参数(顶点半径 $R$ 、二次曲面系数 $K$ 、离轴量等)的加工误差,可以通过调

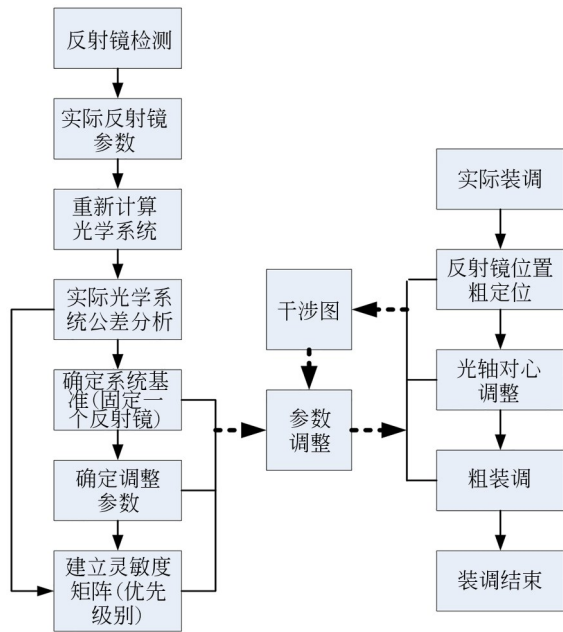


图 3 装调流程

Fig. 3 Process of alignment

节各镜面间间隔加以补偿;各个镜面和像面的位置误差,在地面装调时可以有多个相互补偿的环节,例如可通过控制像面的离焦量加以补偿。

将实际反射镜的光学参数重新带入到光学设计软件中,重新确定系统间隔等光学参数,从新公差分析得出各反射镜的公差,根据各反射镜的公差严格程度来判断装调基准,即公差最严的反射镜作为固定基准,其它参数就是要调整的参数。同时在公差分析中,对所确定的调整参数,分析计算出调整的灵敏度矩阵,确定调整参数的优先级,明确调整参数的先后顺序,从而指导装调迅速收敛<sup>[8-11]</sup>。

### 4.3 光学装调

选用高精度的大理石平台做基准平台,采用激光跟踪仪或便携式测量臂调整标定三个补偿器的空间位置,依据三个补偿器各自与对应反射镜的相对位置关系,利用基准传递,确定三个反射镜组件的空间位置,利用干涉仪粗调系统,检测系统波像差。以此系统波像差为基础,利用计算机辅助装调技术确定各个反射镜的失调量并调整,检测各个视场的像质和传函,监视三个反射镜组件的空间位置,调整框架,令主镜与框架无应力连接。按照理论位置安装调焦镜组件,将

焦面引出到主三镜组件的理论位置,监视系统像质及各个反射镜的空间位置,测量并修研次镜调整垫,将次镜与框架无应力连接。监视系统像质,测量及修研三镜组件修研垫,将三镜组件与框架无应力连接,修研调焦镜修研垫并连接,测量系统各个视场的像质、焦距、分辨率和静态传函,合格后将基准传递至框架,安装调整指向棱镜。

#### 4.3.1 光学系统粗装调

相机的三个非球面反射镜共计 18 个自由度,包括 9 个转动量和 9 个平移量,分解后单独测量、单独调整,角度用自准式光管和经纬仪测量,平移用高度尺、测杆测量。

光学系统的装调主要就是各个反射镜平移量和旋转量的调整,光学粗装调是低精度装调,粗装调的目的是快速建立精装调的基础。

粗装调前检测三个反射镜组件和调焦镜的镜面面形误差,确保每个组件的面形精度优于  $\lambda/50$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ),见图 4~图 7。

采用三坐标精测镜组件上与框架连接法兰面的平面度、框架上与镜组件连接法兰面的平面度,防止装配应力引入单镜组件面形的变化。

将主镜组件按照理论位置直接固定于桁架组件,配打销钉。利用主镜补偿器和干涉仪检测主镜面形,将主镜的位置基准传递到主镜补偿器上,按照主镜补偿器和三镜补偿器理论位置关系,以主镜补偿器作为基准,利用激光跟踪仪确定三镜补偿器的空间位置,再以三镜补偿器为基

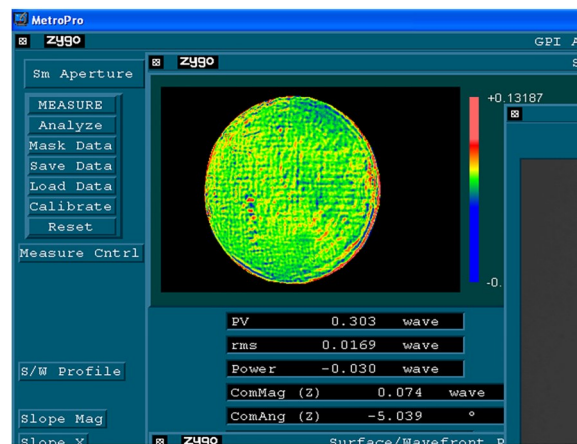


图 4 主镜组件面形误差

Fig. 4 Surface shape error of primary mirror assembly

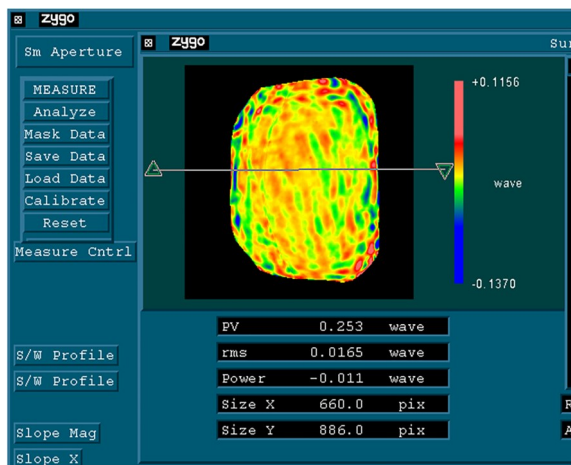


图 5 次镜组件面形误差

Fig. 5 Surface shape error of secondary mirror assembly

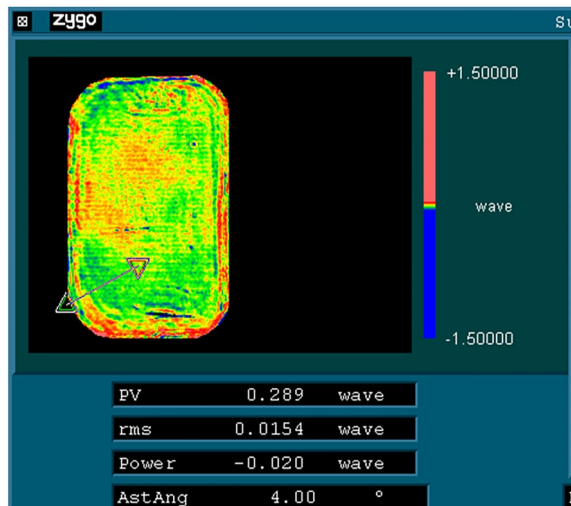


图 6 三镜组件面形误差

Fig. 6 Surface shape error of tertiary mirror assembly

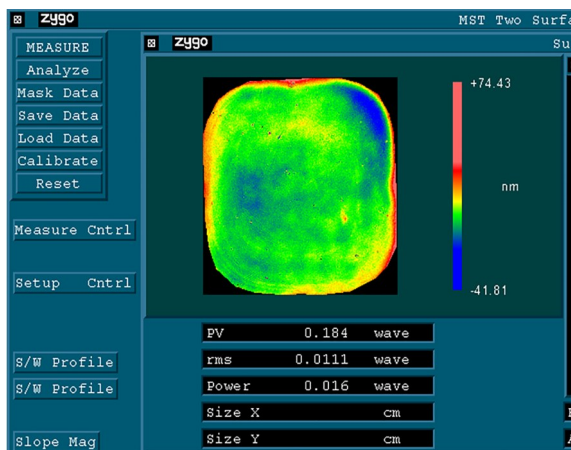


图 7 调焦镜组件面形误差

Fig. 7 Surface shape error of focusing mirror assembly

准,确定三镜组件的空间位置,位置精度在 0.05 mm 以内;同理,按照主镜补偿器与次镜补偿器之间的理论位置关系,以主镜补偿器为基准,同三镜组件的空间定位手段一样,确定次镜组件的空间位置关系,将调焦镜安装到理论位置,把焦面折转到实际的焦面位置。利用平面反射镜和干涉仪搭建系统光路,系统波像差检测光路见图 8,系统装调现场如图 9 所示。

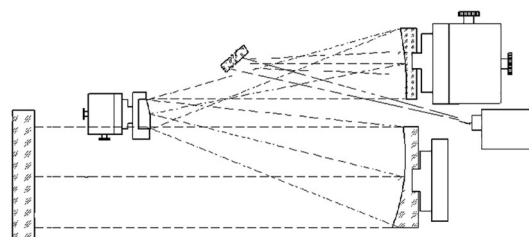


图 8 系统波像差检测光路

Fig. 8 Optical detection path of system wavefront aberration

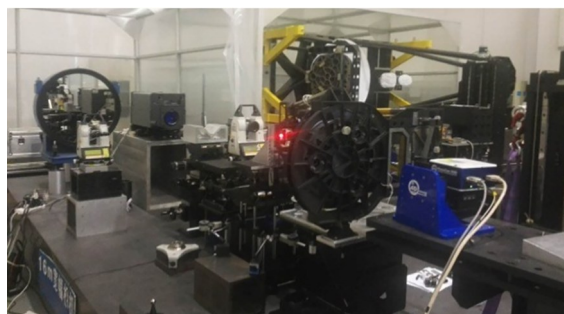


图 9 系统装调现场

Fig. 9 Enviroment of system alignment

将平面反射镜固定至大理石平台,调整小型球面干涉仪与平面镜使系统成像。检测 $(-0.1^\circ, -1^\circ)$ 视场、 $(+0.37^\circ, 0^\circ)$ 视场、 $(-0.1^\circ, +1^\circ)$ 视场等如图 10 所示的 9 个视场的像质情况。

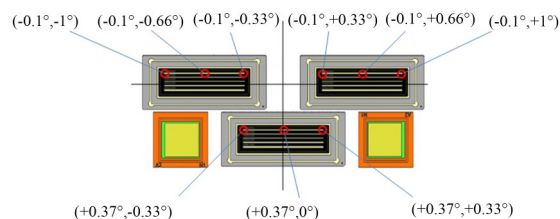


图 10 系统装调视场分布

Fig. 10 Field of view layout of system

粗装调完成后,系统的平均波像差为  $0.2025\lambda(\lambda/4.9)$ ,平均传递函数 0.110。

#### 4.3.2 光学系统精装调

光学系统精装调是在光学系统粗装调基础上开展的。精装调的目的是将光学系统的成像质量调整到最佳状态。

利用粗装调获得 9 个视场的系统波像差,计算出各视场出瞳处的 Zernike 多项式系数,根据多项式系数的大小确定出该系统中占主导地位的像差。光学装调只是对初级像差进行装调,所以只用三级像差来表示系统出瞳的波像差,也就是 Zernike 多项式的前 9 项即可;根据光学设计的公差分析,计算出各种三级像差相对于调整参数的灵敏度矩阵,确定每一种像差所对应的最敏感调整参数,从而确定针对不同像差的调整策略;

根据像差的灵敏度矩阵和实际干涉图计算出多项式系数,通过矩阵运算求解出针对特定像差的调整参数的失调量大小,对次、三镜的位移及旋转进行调整。系统离焦对次镜、三镜的平移( $DZ$ )敏感,像散对次镜角度( $TX$ 和 $TY$ )、三镜角度( $TX$ 和 $TY$ )、次镜的平移( $DX$ 、 $DY$ )和三镜的平移( $DX$ 、 $DY$ )都敏感,彗差对次镜平移( $DX$ 和 $DY$ )和三镜平移( $DX$ 和 $DY$ )敏感。随着装调过程进行,系统的主导像差也是在不断变化的。在装调过程中,逐项消除系统中的像差,即先消除主要像差,然后进行微量调整,经过四次迭代此过程,过程中的失调量计算见表 1,系统波像差收敛曲线见图 11,最终获得 9 个视场的最佳像质。9 个视场的系统波像差面形云图见图 12,各个视场的系统波像差及间接计算传递函数见表 2。

表 1 失调计算

Tab. 1 Values of misalignment

自由度	失调量							
	第一次		第二次		第三次		第四次	
	次镜	三镜	次镜	三镜	次镜	三镜	次镜	三镜
$DX/mm$	1.0	0.8	0.3	0.4	0.1	0.11	0.04	0.03
$DY/mm$	-0.6	-0.5	-0.18	-0.20	-0.07	-0.09	0.05	0.02
$DZ/mm$	-0.7	-0.4	-0.20	-0.19	-0.06	-0.05	0.02	0.01
$TX/''$	80	75	25	22	15	14	8	6
$TY/''$	60	55	20	16	10	8	6	6

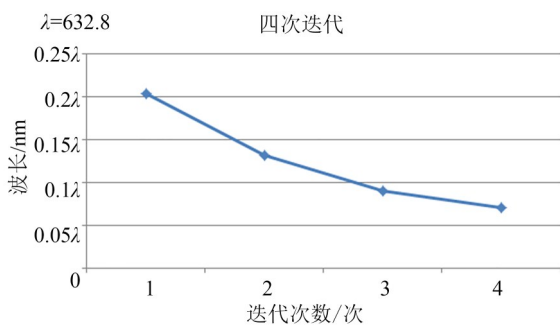


图 11 系统波像差收敛曲线

Fig. 11 System wavefront aberration convergence curve

利用计算机辅助装调使得系统的像质和传函快速收敛到最佳状态。系统的平均波像差  $0.0708\lambda$ ,优于  $\lambda/14$ ,平均传递函数 0.381。精装调后的指标相对粗装调后的指标有了明显的提升。

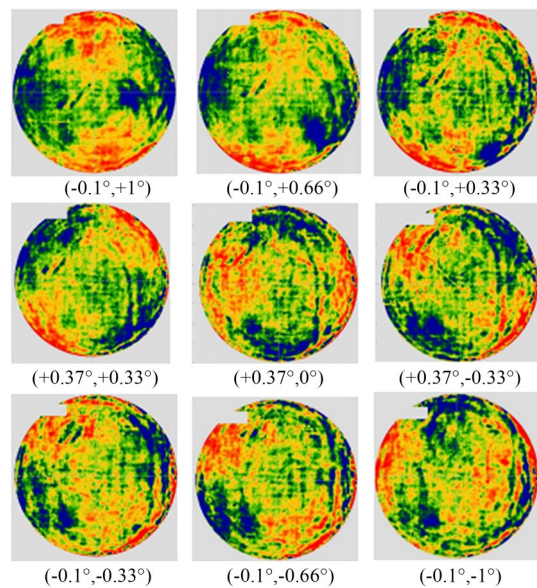


图 12 精装调后各视场系统波像差

Fig. 12 System wavefront aberration after precision alignment

表 2 粗调和精装调后各视场波像差及传函

Tab. 2 System wavefront aberration and transfer function after initial alignment and precision alignment

视场/(°)	粗装调		精装调	
	波像差 (λ)	传函	波像差 (λ)	传函
(-0.1, +1)	0.225 2	0.073	0.094 5	0.344
(-0.1, +0.66)	0.214 9	0.097	0.082 9	0.368
(-0.1, +0.33)	0.198 3	0.120	0.066 0	0.393
(+0.37, +0.33)	0.204 8	0.095	0.073 5	0.358
(+0.37, 0)	0.198 7	0.133	0.066 3	0.407
(+0.37, -0.33)	0.197 1	0.107	0.065 0	0.377
(-0.1, -0.33)	0.193 5	0.121	0.062 3	0.397
(-0.1, -0.66)	0.191 2	0.119	0.060 2	0.392
(-0.1, -1)	0.198 9	0.121	0.066 6	0.393
全视场平均	0.202 5	0.110	0.070 8	0.381

## 5 环境模拟试验

为充分验证主光机的环境适应能力,确保主光机结构具有抵抗外界干扰载荷的能力,对主光机结构开展了多项环境模拟试验,包括力学应力筛选试验、高低温循环试验和失重环境适应性试验<sup>[12-14]</sup>。

### 5.1 力学应力筛选试验

天问一号高分相机主光机结构装调完成后,对主光机系统进行了总均方根加速度 4g 的随机振动力学筛选试验,随机振动为 X、Y、Z 三个方向。试验现场见图 13。

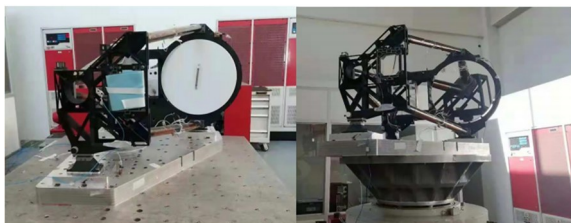


图 13 随机振动力学筛选试验

Fig. 13 Random vibration mechanical test

试验前后,分别检测了主光机系统的系统波像差和传递函数,基本不变。说明主光机结构对恶劣的外界振动环境有足够的适应能力。

### 5.2 高低温循环试验

天问一号高分相机工作于火星椭圆轨道,工作过程中温度环境很恶劣,为早期验证主光机结构的热适应能力。对主光机结构进行了 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高低温循环试验,共计 8 个循环,试验环境见图 14。



图 14 主光机结构高低温循环试验环境

Fig. 14 Temperature cycling test environment of main optical-mechanical structure

试验前后,分别对光学系统进行全视场像质和传递函数检测,基本没有变化。

### 5.3 失重环境适应性试验

光机装调是在重力场下进行的,相机发射入轨后重力消失(或处于微重力状态)。为验证相机无重力状态下的光学性能,使相机光机系统相对于装调状态翻转 $180^{\circ}$ ,检测系统波像差和传递函数,如图 15 所示。对 $0^{\circ}$ 和 $180^{\circ}$ 的系统波像差和传函进行比较,基本无变化,说明光机系统在无重力状态下具有良好的光学性能,对重力载荷的有无具有很好的适应性。

在历经各项环模试验后,复测主光机系统的系统波像差和传递函数,各个视场的系统波像差



图 15 失重环境适应性试验

Fig. 15 Weightlessness adaptability test of main optical-mechanical structure

面形云图见图 16,系统波像差和传递函数见表 3。

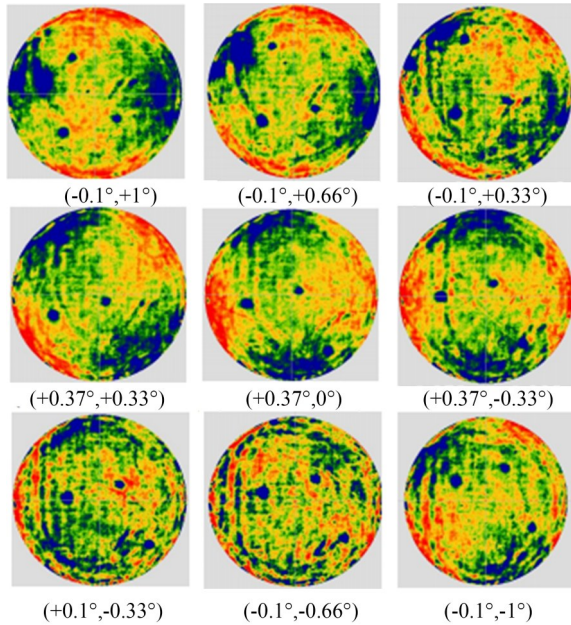


图 16 环模试验后各视场系统波像差

Fig. 16 System wavefront aberration after environmental simulation tests

表 3 环境试验后各视场波像差及传函

Tab. 3 System wavefront aberration and transfer function after environmental simulation tests

视场(°)	波像差( $\lambda$ )	传函
(-0.1, +1)	0.095 0	0.334
(-0.1, +0.66)	0.087 8	0.364
(-0.1, +0.33)	0.072 3	0.390
(+0.37, +0.33)	0.084 0	0.356
(+0.37, 0)	0.083 3	0.357
(+0.37, -0.33)	0.079 1	0.367
(-0.1, -0.33)	0.058 6	0.413
(-0.1, -0.66)	0.052 8	0.426
(-0.1, -1)	0.064 6	0.400
全视场平均	0.075 2	0.379

各个视场的平均系统波像差约  $\lambda/13.3$ , 接近光学系统的衍射极限,传递函数平均值 0.379, 大于 0.34。

天问一号火星探测相机于 2020 年 7 月 23 日 12 时 41 分在海南文昌航天发射场发射升空。历

经大约 7 个月到达火星环绕轨道,拍摄传回火星的图片见图 17(距离火星约 220 万公里)和图 18(拍摄距离火星表面约 330~350 km 高度,分辨率约 0.7 m)。

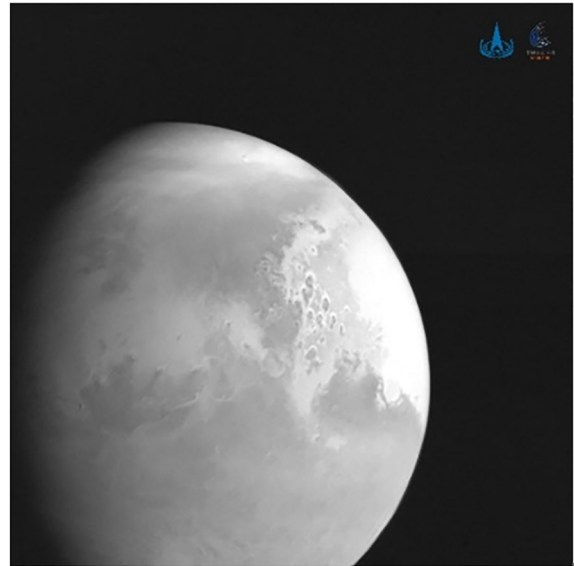


图 17 火星全貌

Fig. 17 Panorama of Mars

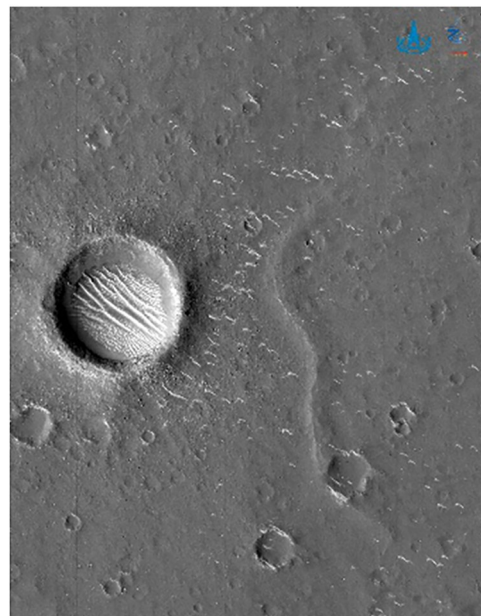


图 18 火星局部细节

Fig. 18 Local detail picture of Mars

## 6 结 论

针对天问一号高分相机的指标精度高和研

制周期短的要求,从研制周期占比较大的装调入手,深入研究了计算机辅助装调的原理,采用粗装调与精装调(计算机辅助装调)相结合的装调策略,使主光机系统的装调指标迅速收敛,短周期内完成了系统装调。在历经力学筛选试验、高低温循环试验和失重环境适应性试验后,各个视

场的平均系统波像差约 $\lambda/13.3$ ,接近光学系统的衍射极限,传递函数平均值0.379,大于指标要求的0.34。

天问一号拍摄传回的火星清晰图片非常也有力地证明了辅助装调的装调效果。该装调方法也可用于其它类似光学系统的装调。

#### 参考文献:

- [1] 王彬,伍凡,叶玉堂. 离轴三反系统计算机辅助装调[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1118006.  
WANG B, WU F, YE Y T. Computer aided alignment for off-axis TMA system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1118006. (in Chinese)
- [2] 孙敬伟. 地基大口径光电成像望远镜装调技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2011.  
SUN J W. *Study on the Alignment Technique of Large Ground-based Electro-optical Imaging Telescope* [D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [3] 2011. 张向明,姜峰,孔龙阳,等. 卡塞格林系统光学装调技术研究[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 526-530.  
ZHANG X M, JIANG F, KONG L Y, et al. Research on optical alignment technology for Cassegrain system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 526-530. (in Chinese)
- [4] 陈建军. 计算机辅助装调技术在离轴三反相机装调中的应用[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013.  
CHEN J J. *Application of Computer Aided Alignment Technique to an Three-mirror Off-axis Optical System*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [5] 庞志海. 离轴反射光学系统计算机辅助装调技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013.  
PANG Z H. *Study on Computer Aided Alignment Technology for Off-axis Optical System*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [6] 巩盾,田铁印,王红. 利用Zernike系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1754-1759.  
GONG D, TIAN T Y, WANG H. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1754-1759. (in Chinese)
- [7] 李蕾. 基于Zernike矢量多项式的离轴反射系统装调技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.  
LI L. *Alignment Technique for Off-axis Reflective Systems Based on Zernike Vector Polynomials*[D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [8] 朱时雨,张新,李威. 计算机辅助装调与传统基准传递技术相结合实现三镜消像散系统的装调[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 571-575.  
ZHU S Y, ZHANG X, LI W. Alignment of off-axis TMA system by combining computeraided adjustment and traditional benchmark pass method [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2011, 4(6): 571-575. (in Chinese)
- [9] 王春雨,黄阳,王聪,等. 离轴反射式系统面形误差高精度还原装调技术[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(2): 58-66.  
WANG C Y, HUANG Y, WANG C, et al. High precision reconstruction and adjustment technique for surface figure error of the off-axis reflective system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(2): 58-66. (in Chinese)
- [10] 梅贵,翟岩,曲贺盟,等. 离轴三反系统的无应力装调[J]. 光学精密工程, 2015, 23(12): 3414-3421.  
MEI G, ZHAI Y, QU H M, et al. Stress-free alignment of off-axis three-mirror system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3414-3421. (in Chinese)
- [11] 杨晓飞,韩昌元. 利用离轴三反镜光学系统确定各镜的装调公差[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 173-176.  
YANG X F, HAN C Y. Study on decision of

- alignment priority using mirror tolerance in a three mirror off-axis optical system [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(2): 173-176. (in Chinese)
- [12] 李宗轩. 主反射镜组件柔性环节随机振动响应分析与试验[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(S1): 101-107.
- LI Z X. Analysis and test on the response of primary mirror flexure under random vibration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 101-107. (in Chinese)
- [13] 张艳艳. 大相对口径离轴非球面补偿检验技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- ZHANG Y Y. *Null Test of Off-axis Aspheres with Large-relative Aperture* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [14] 王克军, 董吉洪, 宣明, 等. 空间遥感器大口径反射镜的复合支撑结构[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1719-1730.
- WANG K J, DONG J H, XUAN M, et al. Compound support structure for large aperture mirror of space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1719-1730. (in Chinese)

#### 作者简介:



王克军(1982—),男,山东乐陵人,博士,研究员,2006年、2008年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2016年于中国科学院大学获得工学博士学位。现主要从事空间遥感器光机结构设计。E-mail: wangkejun1@163.com