

## 低温真空环境光学系统波像差测试方法

阴刚华, 栗孟娟, 李 凌, 金忠瑞, 王兆明, 王向东

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** 为了能够预知空间低温光学系统成像质量, 提出了一种高精度测试低温真空环境下  $F$  数小、后截距短的光学系统波像差的方法。首先, 分析设计测试光路, 对低温光学系统、干涉仪以及平面镜等进行布局, 为波像差测试做好准备工作; 然后, 对低温真空标准透镜、标准平面镜、窗口玻璃等关键部件进行分析与设计, 测试时作为系统误差项扣除; 最后, 调试测试光路, 分别得到常温常压和低温真空环境(低温温度为 100 K, 压强为  $1 \times 10^{-4}$  Pa)下光学系统波像差。通过精度验证实验表明, 测量值与标准值偏差为  $0.010\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm), 差别很小, 证明了该测试方法的可行性。解决了光学遥感系统特别是  $F$  数小、后截距短在低温真空环境下波像差难以高精度测试或无法测试的难题。

**关键词:** 低温真空测试; 波像差; 干涉测量

**中图分类号:** TH74    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0717004

## Measurement method of the wave front aberration of optical system in cryogenic vacuum environment

Yin Ganghua, Li Mengjuan, Li Ling, Jin Zhongrui, Wang Zhaoming, Wang Xiangdong

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to predict the imaging quality of space cryogenic optical system, a method of high accuracy measuring the wave front aberration of the optical system with low  $F$  number and short back focal in cryogenic vacuum environment was presented. Firstly, the optical path was designed. The layout of cryogenic optical system, interferometer and flat mirror were prepared for wave front aberration testing. Then, the key components such as cryogenic vacuum standard lens, standard flat mirror and atmospheric window glass were analyzed and designed. The testing wave front aberration was removed as a system error term. Finally, the wave front aberrations of normal pressure and temperature and cryogenic vacuum environment (Temperature: 100 K, Pressure:  $1 \times 10^{-4}$  Pa) were obtained by debugging the optical path. The accuracy test showed that the deviation between the measured value and the standard value was  $0.010\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm), and the difference was very small, which proved the feasibility of the test method. The wave front aberration difference between the two stages was small. This method solved the difficult problem of the cryogenic vacuum optical system wave front aberration testing with low  $F$  number and short back focal in the cryogenic vacuum environment, which couldn't be accurately tested or even tested.

**Key words:** cryogenic vacuum test; wave front aberration; interferometry

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-03-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500500)

作者简介: 阴刚华(1986-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事低温光学系统装调与测试等方面的研究。Email: 20050263@163.com

## 0 引言

为提高空间光学系统的探测灵敏度,越来越多的空间技术开始研究应用于低温环境的光学遥感器中,红外系统在深空低温环境中对弱暗点目标进行探测,系统本身热辐射产生的杂散辐射背景会严重降低系统灵敏度<sup>[1-2]</sup>。因此为提高灵敏度,光学系统需在低温环境中运行<sup>[3]</sup>。

当空间光学系统在地面装调完成进入空间低温真空环境运行时,由于温度、压强变化等,常温装调后的系统将会发生较严重的刚体位移和表面变形,刚体位移会引起光学系统成像的倾斜和离焦,表面变形则将影响系统的波像差,从而大大地降低成像质量,甚至不能够进行探测。因此为了保证空间红外光学系统的成像与探测性能,研究低温真空环境光学系统波像差测试方法就成为必要<sup>[4-5]</sup>。

目前,国外对于低温真空环境下光学系统波像差测试已有一些应用案例,2007年,Haruyoshi Katayama等人将干涉仪放在真空环模系统外,得到测试系统干涉图,计算光学系统波像差 PV 值和 RMS 值等。这种方法的缺点是无法高精度测试甚至无法测试  $F$  数小、后截距短的光学系统;后来,Masahiro Suganuma等人将干涉仪放在真空环模系统中进行波像差测试,但该测试系统只能用于真空环境测试,无法进行低温( $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ )环境测试<sup>[6-7]</sup>。在国内,华北光电技术研究所彭晴晴等人提出基于相位补偿的低温光学系统常温测试方法,但模拟仿真计算很难精确得到低温光学系统的波像差,测试误差较大;北京空间机电研究所利用星点检验法测试低温红外镜头的像质,但不能定量获得系统的波像差<sup>[8-9]</sup>;而且,对于  $F$  数小、后截距短的光学系统,目前还没有直接在低温真空(低温温度为  $100\text{ K}$ ,压强为  $1\times 10^{-4}\text{ Pa}$ )环境下测试系统波像差的应用案例,当前主要是通过测试常温常压环境下光学系统波像差,然后建立仿真分析模型,预测低温真空环境下光学系统波像差,但是模拟仿真计算存在很大的不确定性,难以精确获得低温真空环境下光学系统的波像差。文中提出的测试方法将干涉仪放在常温常压箱内,低温真空标准镜头安装固定在常温常压箱窗口玻璃外,将干涉仪与低温真空标准镜头分开布局,在波像差测试时,低温真空

标准镜头可以无限接近该光学系统最后一个表面,解决了光学遥感系统特别是  $F$  数小、后截距短的光学系统在低温真空环境下波像差难以高精度测试或无法测试的难题<sup>[5,10-12]</sup>。

## 1 实验设计与布局

### 1.1 测试对象

此次实验的测试对象低温光学系统由主四镜、次镜、三镜、主支撑筒、次镜筒、三镜筒等组成,如图 1 所示,其光学系统为同轴四反式光学系统,低温光学系统元件和镜框均采用同种材料铝 6061-T651,使整个光学系统同比例缩放,避免温度大范围变化时可能出现较大的应力作用,从而尽量减小对低温像质的影响。表 1 列出了测试对象低温光学系统的性能参数,从测试对象性能参数可以看出,测试对象  $F$  数小、后截距短。

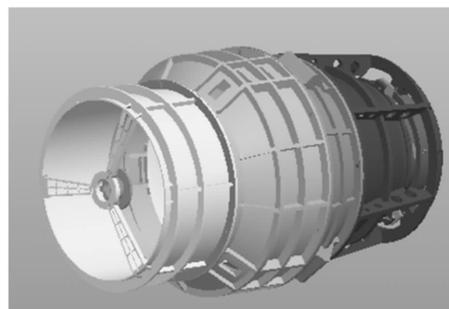


图 1 低温光学系统结构示意图

Fig.1 Structure schematic diagram of the cryogenic optical system

表 1 测试对象性能参数

Tab.1 Performance parameters of the test object

Name	Performance parameter
Work spectrum/ $\mu\text{m}$	5.5-7.5
Entrance pupil diameter/mm	300
Focal length/mm	438.13
Back focal length/mm	80

### 1.2 测试布局设计

该测试方法采用激光干涉仪结合常温常压箱测试低温真空光学系统在  $100\text{ K}$  时的波像差。为了得到低温真空环境(低温温度为  $100\text{ K}$ ,压强为  $1\times 10^{-4}\text{ Pa}$ )像质,低温光学系统应放入低温真空环模系统中制

冷。测试示意图如图 2 所示。激光干涉仪位于常温常压箱内,干涉仪发出平面波,经过干涉仪常压箱外的窗口玻璃、低温真空标准透镜,发出与低温光学系统相匹配的球面波,调整干涉仪,使干涉仪出射的球面波焦点位置与光学系统中心视场焦点位置重合。球面波进入低温铝镜头后,由四镜沿逆向光路入射,经平面镜反射自准直返回至干涉仪处与标准光发生干涉,得到干涉图,计算低温光学系统波像差 RMS 值。

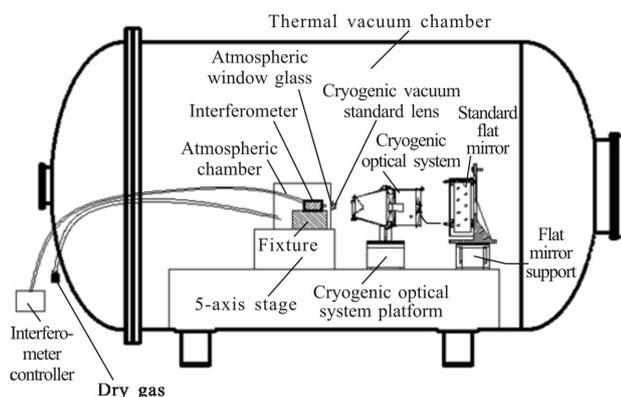


图 2 光学系统低温像质测试方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of cryogenic image quality test scheme for optical system

根据以上测试过程,对图 2 中的设备布局如下:

(1) 低温光学系统放在低温真空环模系统中。为了测试低温光学系统在低温真空条件下的像质,采用柔性导热索配合制冷机对光学系统制冷,对冷头处产生的振动予以控制,以避免制冷机振动直接传递到光学系统上,对整套设备作隔振处理,从而提高测试性能。

(2) 干涉仪置于常温常压箱内,内部有可调整的便于安装干涉仪的夹具;低温真空标准透镜安装固定在常压箱窗口外,然后将常温常压箱放在五维调整台上。

(3) 平面反射镜置于低温光学系统次镜后表面 250~350 mm 处,它与低温光学系统之间的距离依据真空容器内空间大小和制冷措施来确定。考虑到低温环境下,平面镜面形会发生变化,光学系统测试时会引入额外的波像差。因此,在系统测试时需要平面镜进行控温(控温温度为 20℃)。另外,开始测试前需先用干涉仪检测平面镜常温环境下的波像差,其测试结果在光学系统波像差测试时作为系统误差项扣除。

从以上分析与布局可以看出,干涉仪置于常温常压箱内,低温真空标准镜头安装固定在常温常压箱窗口外,与将干涉仪和标准镜头全部安装在常温常压箱内相比,在波像差测试时,标准镜头可以无限接近该光学系统最后一个表面(理论上可以接近于 0,即理论上可以测试后截距为 0 的光学系统);而且设计的低温真空标准镜头  $F$  数为 0.9,如果将标准镜头安装在常温常压箱内,干涉仪出射光焦点位置可能会聚在常温常压箱内,根本无法进行测试任务,而将标准镜头安装在常温常压箱外,干涉仪焦点位置是不可能聚在常温常压箱内,可顺利进行系统波像差测试任务。从以上分析可以看出,通过实验设计与布局,利用该测试方法可以高精度测试  $F$  数小、后截距短的光学系统波像差。

## 2 关键元件设计与分析

### 2.1 窗口玻璃设计与分析

干涉仪发出的光波要通过窗口玻璃。玻璃窗口在低温真空环境要承受接近 1 个大气压的压差,在受到巨大压力作用下,窗口玻璃的面形要发生变化,则在透射后的光束中会引入光程差,为了减小窗口玻璃的面形变化,需对窗口玻璃的厚度进行合理的设计。

Vukobratovich 给出了直径为  $A_w$  的光窗采用一种简单支撑侧边固定的方式,受到一个均匀的预载荷  $\Delta P_w$  而发生变形,则在透射后的光束中引入的光程差的近似计算公式:

$$OPD=0.00889(n-1)\Delta P_w^2 A_w^6 / (E_G^2 t_w^5) \quad (1)$$

式中: $n$  为窗口玻璃折射率; $E_G$  为窗口材料的杨氏模量。

如果光程差等于瑞利 1/4 波长的判断准则,可以由以下公式给出光窗的厚度:

$$t_w=0.5131[(n-1)\Delta P_w^2 A_w^6 / (E_G^2 \lambda)]^{0.2} \quad (2)$$

窗口玻璃直径  $A_w=150$  mm,最后计算得  $t_w=5.49$  mm,只要保证窗口玻璃的厚度大于  $t_w$  就可保证透射后的光束中引入光程差在误差允许范围内,最后综合考虑玻璃折射率以及透过率等问题,确定玻璃厚度为 8 mm。

### 2.2 低温真空标准透镜标定

低温真空标准透镜是 4D 公司特制镜头,其适

用压强范围为真空至一个标准大气压；温度范围为  $-173\sim+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

标定测试光路如图 3 所示，干涉仪置于常温常压箱(可保证常温常压环境),低温真空标准透镜安装在常温常压箱窗口外，然后将常温常压箱放在五维调整台上，干涉仪出射激光通过低温真空标准透镜 2 成为球面波，对真空低温下的球面标准镜 15 进行控温并测量,其测试结果在低温光学系统波像差测试时作为系统误差项扣除，图 4 为真空低温环境(低温温度为  $100\text{ K}$ ,压强为  $1\times 10^{-4}\text{ Pa}$ )球面标准镜面形测试结果。

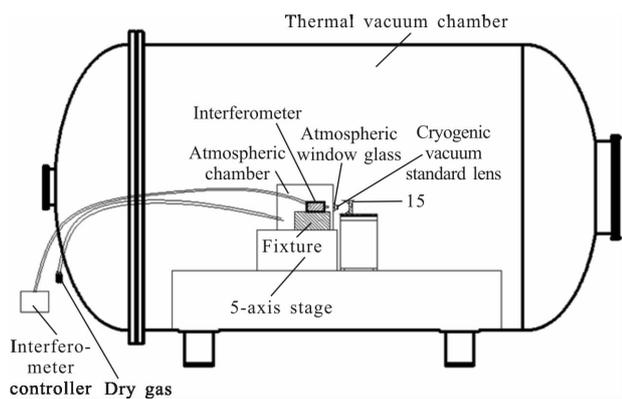


图 3 低温真空标准透镜标定示意图

Fig.3 Schematic diagram of calibration for cryogenic vacuum standard lens

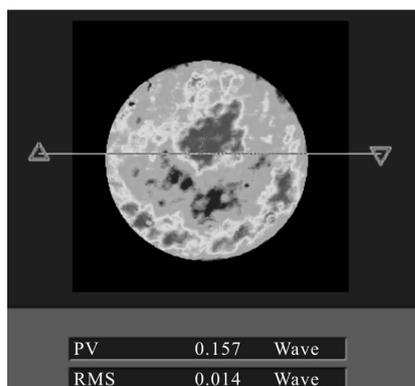


图 4 球面标准镜波像差测试结果

Fig.4 Test results of spherical standard mirror wavefront aberration

### 2.3 平面镜面形温控分析

平面反射镜口径  $\Phi 450\text{ mm}$ ,用  $32\text{ in}(1\text{ in}=2.54\text{ cm})$  干涉仪进行面形测试,由于低温真空环境波像差测试过程中平面反射镜有控温措施(温控小舱包多层,同时贴加热片控温),因此平面反射镜工作状况

比较稳定,只需测试常温常压条件下的面形。具体测试光路图如图 5 所示。

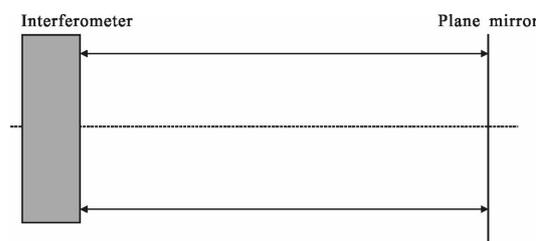


图 5 平面反射镜标定测试光路

Fig.5 Test light path of plane mirror calibration

对平面反射镜面形做分析,在低温真空环境中,平面镜处于常温,通过工装辐射控温,工装布置三路加热回路。图 6 是平面反射镜控温云图,平面镜温度为  $292.1\sim 292.8\text{ K}$ ,当控温在  $292.1\sim 292.8\text{ K}$  范围内时,平面反射镜面形变化如图 7 所示,RMS 约为  $1/4\lambda$ ,其测试结果在低温光学系统波像差测试时作为系统误差项扣除。

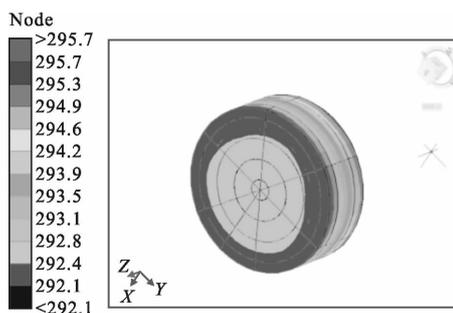


图 6 平面反射镜温度云图

Fig.6 Temperature nephogram of the plane mirror

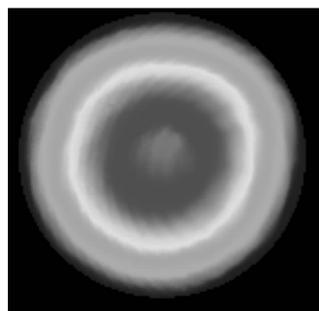


图 7 控温时平面反射镜波像差

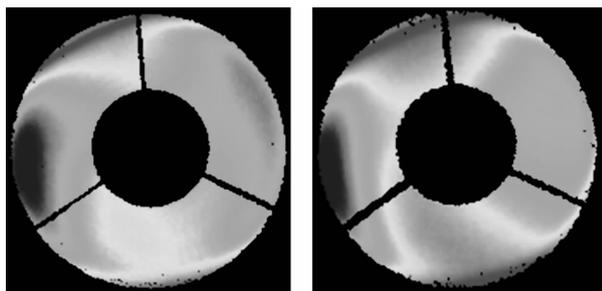
Fig.7 Wavefront aberration of plane mirror at controlled temperature

## 3 系统波像差测试及分析

测试对象低温光学系统为同轴四反式光学系

统, 低温光学系统光学系统元件和镜框均采用同种材料铝 6061-T651, 使整个光学系统同比例缩放, 避免温度大范围变化时可能出现的应力作用, 从而尽量减小对低温波像差的影响。

通过以上设计与布局, 实验测试了低温真空环境下该低温光学系统波像差。图 8(a)是在常温常压环境下, 去除 tilts 和 power 之后, 光学系统的波像差为  $1.023\lambda$ , 图 8(b)是环境温度为 100 K, 压强为  $1 \times 10^{-4} \text{Pa}$ , 去除 tilts 和 power 之后, 光学系统的波像差为  $1.338\lambda$ ; 图 9(a)是在常温常压环境下, 去除 tilts、power 以及像散之后, 光学系统的波像差为  $0.517\lambda$ , 图 10(b)是环境温度为 100 K, 压强为  $1 \times 10^{-4} \text{Pa}$ , 去除 tilts、power 以及像散之后, 光学系统的波像差为  $0.589\lambda$ 。

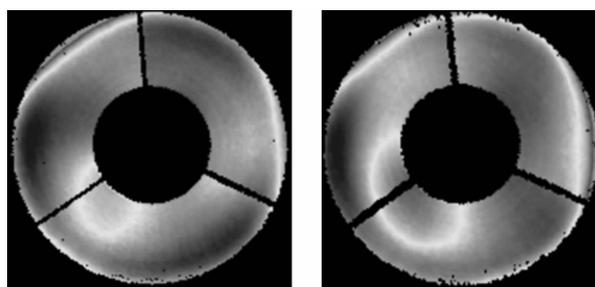


(a) 常温常压环境波像差图 (b) 低温真空环境波像差图  
(a) Wavefront aberration of normal pressure and temperature (b) Wavefront aberration of the cryogenic vacuum environment

图 8 未去除像散低温真空与常温常压环境面形对比图  
Fig.8 Wavefront aberration of spherical standard mirror in cryogenic vacuum environment

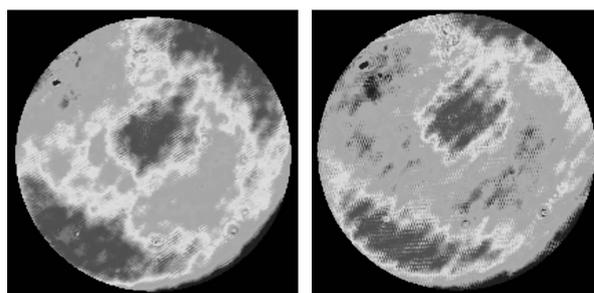
通过以上实验证明利用该方法可以测试  $F$  数小、后截距短的光学系统, 但不能验证该测试方法的精度。为了验证该测试方法的精度, 在低温真空环境下测试一个已标定的球面标准镜 (球面标准镜为微晶材料)。低温真空环境下球面标准镜波像差测试光路布局如图 2 所示, 干涉仪放在常温常压箱内, 低温真空标准镜头安装固定在常温常压箱外, 低温光学系统换作球面标准镜并安装固定在五维调整台上, 调整测试光路, 对低温真空环境下控温的 (控温温度为  $20^\circ\text{C}$ ) 球面标准镜进行测试。图 10(a)是标定的球面标准镜波像差为  $0.021\lambda$ , 图 10(b)是在低温真空环境下测试球面标准镜的波像差为  $0.023\lambda$ ; 图 10(c)是

利用干涉仪软件处理图 10(a)与图 10(b)波像差差值为  $0.01\lambda$ , 波像差差值很小。

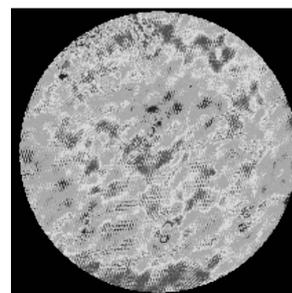


(a) 常温常压环境波像差图 (b) 低温真空环境波像差图  
(a) Wavefront aberration of normal pressure and temperature (b) Wavefront aberration of the cryogenic vacuum environment

图 9 去除像散低温真空与常温常压环境面形对比图  
Fig.9 Comparison of wavefront aberration between normal pressure and temperature and cryogenic vacuum environment after removing astigmatism



(a) 标定的球面标准镜波像差 (b) 低温真空环境球面标准镜波像差  
(a) Calibrated spherical standard mirror wavefront aberration (b) Spherical standard mirror wavefront aberration of cryogenic vacuum environment



(c) 图 10(a)与图 10(b)波像差差值  
(c) Difference of Fig.10(a) and Fig.10(b) wavefront aberrations  
图 10 球面标准镜波像差

Fig.10 Wavefront aberrations of spherical standard mirror

由于低温光学系统是在常温常压状态下装调,在低温真空环境下存在应力变形,系统产生额外像差。从图 8、9 可以看出,在未去除像散时,常温常压环境与低温真空环境下,波像差差别较大;去除像散后,常温常压环境与低温真空环境下,波像差差别相对较小。由此可以看出,低温真空环境下产生的应力变形等,对该低温光学系统像散影响较大,对彗差、球差影响相对较小。

综合分析以上低温光学系统波像差测试实验以及精度验证实验,可证明该测试方法用于低温真空环境测试是可行的。在后续工作中,需根据测试实验结果并结合仿真模型分析温度、压强对波像差影响变化规律。

## 4 结 论

由于光学系统在地面常温常压环境下装调完成之后,在空间低温真空环境使用,光学系统成像质量必然会发生变化。文中通过布局低温真空环境下测试光路、分析设计关键部件,完成了  $F$  数小、后截距短低温光学系统波像差测试实验以及精度验证实验,精度验证实验表明,测量值与标准值偏差为  $0.01\lambda$ ,差别很小。验证了该方法用于低温真空环境下光学系统特别是  $F$  数小、后截距短光学系统波像差测试的可行性。

## 参 考 文 献:

- [1] Qu Jinxiang, Lu Yan. Design of small vacuum experiment equipment of cryogenic optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 464–467. (in Chinese)
- [2] Timothy A R, Nicholas A B, Bradford W G, et al. Cryogenic optical test planning using the optical telescope element simulator with the james webb space telescope integrated science instrument module[C]// SPIE, 2016, 9951: 99510N.
- [3] Toshihiro Tsuzuki, Ryuji Suzuki, Hiroki Harakawa, et al. The Infrared Imaging Spectrograph (IRIS) for TMT: optical design of IRIS imager with "Co-axis double TMA" [C]// SPIE, 2016, 9908: 9908AE.
- [4] Zhang Faqiang, Fan Xiang, Zhu Bin, et al. Athermal design of long-wave infrared optical system with hybrid refractive/diffractive[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 45(4): 1158–1163. (in Chinese)
- [5] Zhang Faqiang, Fan Xiang, Kong Hui, et al. Influence of temperature on infrared optical system and athermal design [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 45(7): 854–860. (in Chinese)
- [6] Haruyoshi Katayama, Yasuji Yamamoto, Masashi Miyamoto, et al. Measurement of vibration environment of 6m diameter radiometer thermal vacuum chamber in JAXA [C]//SPIE, 2009, 7436: 74360Q.
- [7] Masahiro Sukanuma, Haruyoshi Katayama, Masataka Naitoh, et al. Development and tests of interferometry facility in 6-m diameter radiometer thermal vacuum chamber in tsukuba space center[C]//SPIE, 2010, 7731: 77313X.
- [8] Peng Qingqing, Luo Shoujun, He Wubin. Assembling and alignment of cryogenic optical system at room temperature based on phase compensation[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(4): 433–437. (in Chinese)
- [9] Li Tuotuo, Su Yun, Lan Liyan. Study on a method of data processing for star test of cryogenic infrared lens [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(4): 24–29. (in Chinese)
- [10] Zhi Xiyang, Wang Dawei, Tan Fanjiao, et al. Analytical method of temperature effects on space infrared optical system performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 45(S): 1–7. (in Chinese)
- [11] David L A, J Scott Smitha, Thomas P Z, et al. Wavefront-error performance characterization for the James Webb Space Telescope (JWST) Integrated Science Instrument Module (ISIM) science instruments[C]//SPIE, 2016, 9904: 990409.
- [12] Derek Sabatke, Steve Meyer, Noah Siegel, et al. Vertically configured collimator for cryogenic, vacuum testing of meter scale optical systems[C]//SPIE, 2007, 6671: 667108.