低温镜头能量集中度测试及其误差分析

宋俊儒,邢 辉,裴景洋,杨天远,穆生博

(北京空间机电研究所 先进光学遥感技术北京市重点实验室,北京 100094)

摘 要:低温镜头多用于深空低温环境下对暗弱点目标的探测,能量集中度是评价该类镜头性能的重要指标。以采用热卸载设计的某红外低温镜头为实验目标,设计了低温镜头能量集中度测试方案,并对测试误差进行了分析。该方案采用星点靶标成像,利用低温精密调焦技术实现对像点的精确采集,通过高斯曲面拟合计算质心和两次反卷积数据处理,实现了 200 K 低温下红外镜头的能量集中度测试。分析了测试系统的误差源并标定了各项误差值,通过误差和不确定度分析得到了精确的测试结果。实验结果表明,所述的低温镜头能量集中度测试精度优于 7.5%,具有工程应用价值。

关键词:低温镜头; 星点成像; 能量集中度; 误差分析

中图分类号:TP73 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0717007

Measurement and error analysis of encircled energy of cryogenic lens

Song Junru, Xing Hui, Pei Jingyang, Yang Tianyuan, Mu Shengbo

(Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Cryogenic lens is usually used to detect faint point targets in deep space and low temperature environment. Encircled energy is an important index for evaluating such lens. An infrared cryogenic lens with thermal unloading structure was used as the test object. A test and error analysis scheme of encircled energy of cryogenic lens was designed. A point target was received after imaging by the lens and a cryogenic precision focusing technology was used to acquire data. Centroid extraction and Gaussian curve fitting and deconvolution had been applied to data processing. Encircled energy test was implemented of infrared lens at 200 K, and errors of the test system were analyzed and calibrated. Uncertainly analysis was also evaluated to improve the test accuracy. The experimental results show the test accuracy is better than 7.5%. The method can be used in engineering application.

Key words: cryogenic lens; point source imaging; encircled energy; error analysis

收稿日期:2019-02-05; **修订日期**:2019-03-03

基金项目:国家重大科技专项

作者简介:宋俊儒(1987-),男,工程师,硕士,主要从事光学遥感器的装调与测试方面的研究。Email:sjr1987bit@163.com

0 引 言

低温镜头是指光学元件及其支撑结构在低于270 K 温度环境下工作的光学系统。1960 年代,美国率先对低温光学技术进行研究，并在八十年代以后逐步实现了空间飞行。随后欧洲、日本也先后开展了低温光学遥感器研制，低温光学已成为目前热门研究领域[1-6]。低温镜头通常在常温下进行装调,在深冷低温环境下工作,工作状态与装调状态不一致[7]。相对于常温,低温会对光学系统产生一系列影响,如折射率和曲率半径等光学元件参数的变化、结构发生形变并传递到光学镜头等[8-10],这些都会造成镜头像质的下降。因此,为了准确地评价低温镜头的工作性能,在完成镜头装调后,需要模拟深低温环境开展镜头性能测试，最大真实地评价低温镜头的在轨工作状态。经过长期发展,国外在低温光学系统测试方面取得了较大的成就，代表目前低温光学最高水平的詹姆斯·韦伯空间望远镜已经能够实现-240 ℃下的真空极限低温测试。但是国内低温光学的研究开展较晚,目前多处于实验室研究阶段,见诸期刊和报道的工程进展很少，比如成都光电技术研究所研究过小口径低温光学系统的研制,但只给出了结果,低温测试和数据处理过程一笔带过[9],没有成熟的测试方法和数据处理方法可供参考。

低温镜头多用于深冷环境下对暗弱点目标进行探测，能量集中度是评价该类镜头探测能力的一项重要指标。镜头在特定范围内的能量集中度越高,焦面上探测到的点目标像点能量越高，获得的图像信噪比就越高,系统对点目标的探测能力就更强[11]。文中以一个采用热卸载结构设计的低温镜头为试验对象,设计了低温镜头能量集中度测试方案,搭建了低温测试系统,分析了测试系统中的误差类,标定了常温到低温转换时测试系统本身造成的测试误差,采用质心提取算法和高斯曲面拟合算法处理数据,并剔除了测试误差对测量结果的影响，实现了低温镜头的能量集中度测试，可用于评价低温镜头研制质量,评估遥感器在轨工作性能。

1 能量集中度测试方案

1.1 低温镜头主要参数

低温镜头在深冷环境下工作时，采用热卸载结构的柔性支撑方式，能将结构收缩形变隔离在光学镜头之外，减小甚至消除热形变应力对镜头成像质量的影响。为了验证热卸载结构设计的有效性,评价低温镜头工作性能,需要开展低温镜头能量集中度测试。

某采用热卸载结构的低温镜头的光学系统设计结果如图 1 所示。光学系统采用透射式像方远心光路,由多片红外透镜组成,入瞳直径 300 mm,焦距525 mm,视场角 2ω=10°,成像谱段 3~5 μm,工作温度200 K,设计平均能量集中度为 0.81@30 μm×30 μm。

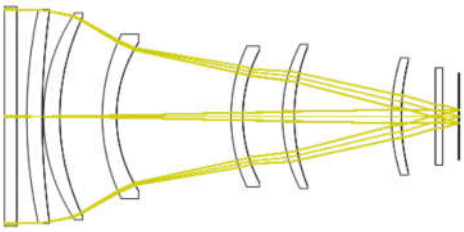


图 1 低温镜头的光学系统

Fig.1 Optical system of the cryogenic lens

1.2 测试方案

针对 1.1 节所述的镜头开展低温下的能量集中度测试实验,评价镜头性能。整个测试方案包括实验前的仿真分析、实验验证、以及误差分析和处理三部分,如图 2 所示。

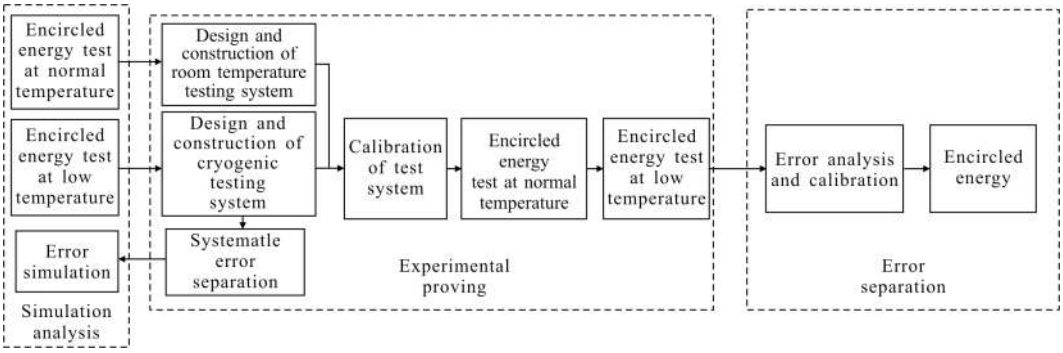


图 2 低温镜头能量集中度测试流程

Fig.2 Procedure for encircled energy test of cryogenic lens

仿真分析,包括常温下镜头能量集中度、低温下镜头能量集中度、温度偏差对焦面离焦的影响、以及低温温度稳定性对镜头能量集中度的影响等，分别如图 3~图 5 所示。

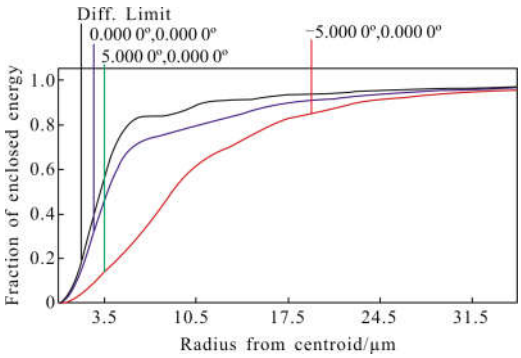


图 3 最佳焦面常温下镜头能量集中度曲线

Fig.3 Encircled energy of lens at normal temperature at best focal plane

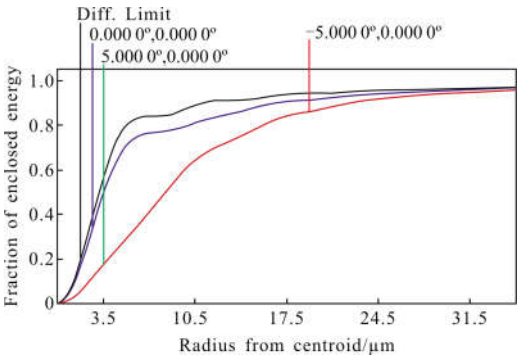


图 4 最佳焦面低温下镜头能量集中度曲线

Fig.4 Encircled energy of lens at low temperature at best focal plane

由仿真结果可知,温度越低,镜头的焦面位置越往焦前移动,当从常温 295 K 到低温 200 K,镜头焦面位置离焦 0.4 mm。如果精确调焦,镜头常温下和低温下能量集中度几乎一致。温度偏差对最佳焦面处的能量集中度几乎没有影响,即每到一个温度点,精确调焦后测量镜头能量集中度，数据近似没有变化,如图 6 所示。因此,可以用常温下镜头能量集中度作为低温下镜头能量集中度的评价标准。

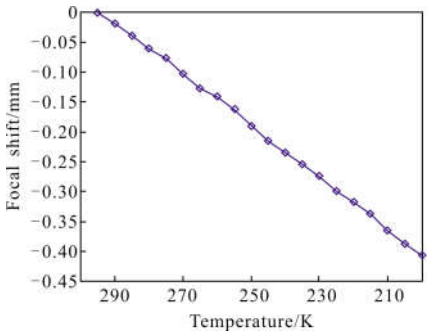


图 5 温度偏差与离焦的关系

Fig.5 Relationship between temperature deviation and focal shift

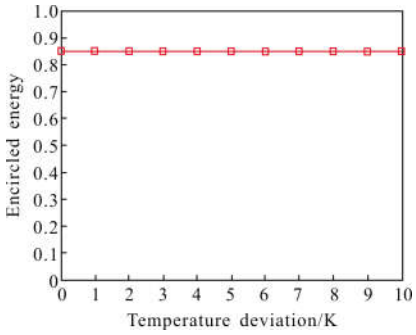


图 6 调焦后温度偏差与能量集中度的关系

Fig.6 Relationship between temperature deviation and encircled energy after focusing

在实验验证阶段，分别搭建常温测试系统和低温测试系统,开展镜头能量集中度测试。其中,常温下镜头能量集中度在实验室内进行，测试系统如图 7

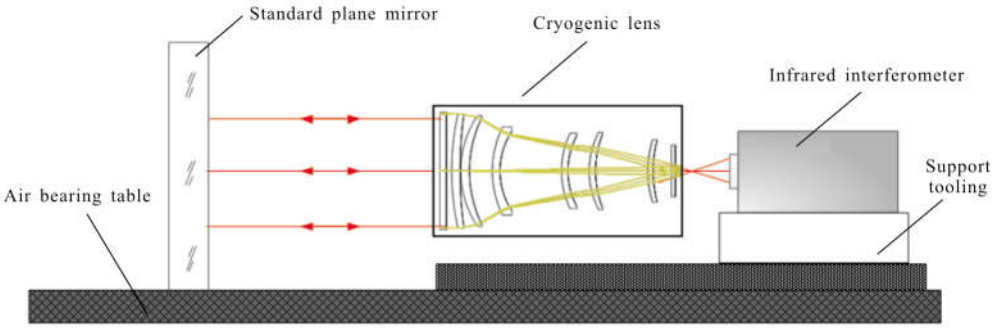


图 7 常温下能量集中度测试系统

Fig.7 Test system of encircled energy at normal temperature

所示,系统构成简单,测试设备和测试光路可精确控制,误差可忽略。低温下镜头能量集中度在真空罐内进行,测试系统如图 8 所示。真空压力及低温会对平行光管结构、真空罐内行车等造成形变,造成平行光管像质下降和待测镜头相对目标的视场变化。其中平行光管像质的下降需要实际标定,作为系统误差。镜头的视场 $2w=10°$,当视场变化 0.3°时,不足全视场的十五分之一,像质基本不变,因此,当低温造成的测试系统结构形变带来视场偏差时,对镜头能量集中度的测试结果几乎没有影响,可以忽略。

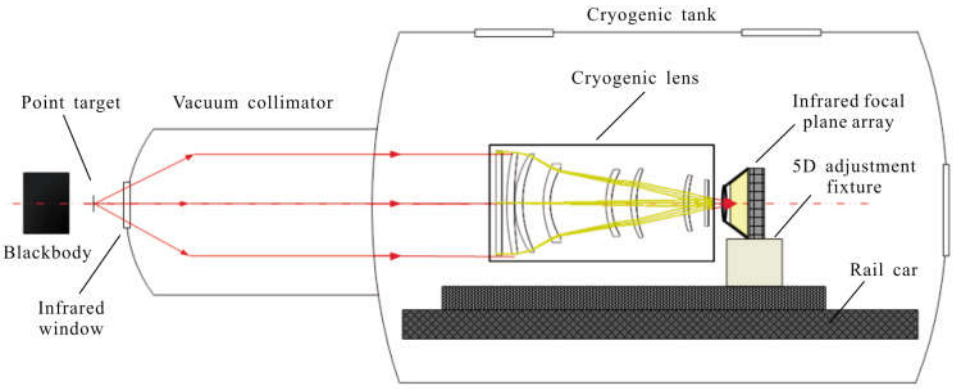


图 8 低温下镜头能量集中度测试系统

Fig.8 Test system of encircled energy at low temperature

在误差分析部分,主要针对测试系统及测试过程中可能造成测试偏差的影响因素进行分析、归类,并尽可能对每项误差进行实际测试标定,或给出不确定度分析。详见文中误差分析部分。

2 实验测试

2.1 常温能量集中度测试

按照图 7 所示的光路搭建测试系统,实际测试系统如图 9 所示,干涉仪为中波红外干涉仪,标准平面镜面形 RMS=0.02λ,口径 500 mm。

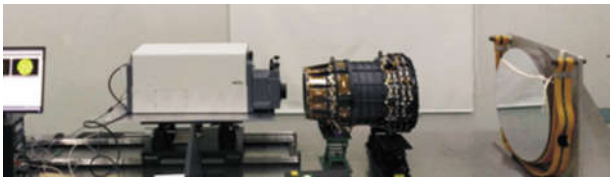


图 9 常温下镜头能量集中度实测

Fig.9 Measurement experiment of encircled energy of lens at normal temperature

使用中波干涉仪可以测得镜头的波前,根据波前可以计算镜头的能量集中度。具体计算方法如下:由衍射理论可知,存在波像差的光学系统的光瞳函数可表示为:

$$P(x,y)=A(x,y)\exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}W(x,y)\right] \tag{1}$$

式中:$A(x,y)$为光瞳函数的振幅部分;$W(x,y)$为光学系统的波像差。

由光瞳函数,根据基尔霍夫近似得到像面上的复振幅分布为:

$$U(x',y')=\frac{i}{\lambda}\iint_A P(x,y)\exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}d\right]\frac{1}{d}\mathrm{d}A \tag{2}$$

式中:A 为光瞳范围;d 为光瞳上的点(x,y)到对应像面上点(x',y')的距离。

像面上星点像的点扩散函数可表示为:

$$\mathrm{PSF}(x',y')=|U(x',y')|^2 \tag{3}$$

能量集中度反映的是星点目标成像到像面上的能量分布,可以通过点扩散函数积分得到:

$$Ee=\int_0^x\int_0^y \mathrm{PSF}(x',y')\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'=\int_0^a\int_0^{2\pi}\mathrm{PSF}(r',\theta')r'\mathrm{d}r'\mathrm{d}\theta' \tag{4}$$

式中:Ee 表示能量集中度。

实测得到的镜头波前和能量集中度如表 1 所示,作为镜头实际像质的标准值,用于验证低温下镜头的能量集中度。

表 1 常温下镜头能量集中度测试值 @30 μm×30 μm

Tab.1 Test value of encircled energy of lens at normal temperature @30 μm×30 μm

Field	Wavefront	Encircled energy
(0,0)	0.01	0.80
(5,0)	0.013	0.72
(-5,0)	0.013	0.71

2.2 低温能量集中度测试

按照图 8 所示光路搭建测试系统，实物测试系统如图 10 所示。红外焦面组件固定在真空五维调整台上，调整台最小步距 1 μm，转角精度 5″，通过多维调整可以实现焦面组件的精确定焦。测试系统所用的真空平行光管焦距 12 m，口径 600 mm。在待测镜头前架设筒状冷屏，确保镜头温度边界的稳定。红外焦面组件的 F=1.7，基本与镜头 F 数匹配，像元大小 30 μm。理想情况下星点靶标经过镜头后成理想像点，因此星点像越小，计算时就能够消除星点靶标尺寸带来的误差，结果越准确。但是考虑图像信噪比，选择星点像大小占 1 个像元。根据平行光管焦距、镜头焦距以及像元尺寸，计算得到星点靶标尺寸为 0.69 mm。实际上，由于衍射等因素，星点像总是弥散的，选取 3×3 的区域作为像点计算能量集中度。

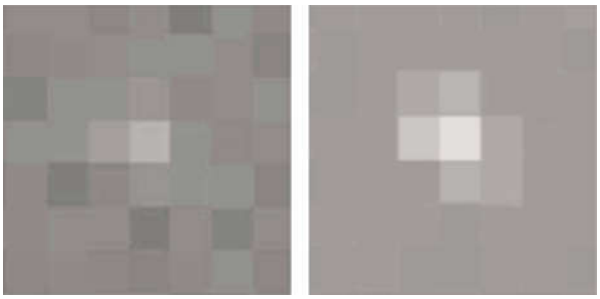
图 10 低温下镜头能量集中度实测

Fig.10 Measurement experiment of encircled energy of lens at low temperature

实验时在镜头组件上贴测温点，温度在 200 K 稳定 2 h 后开始测试，焦面组件采集星点像。由于红外焦面组件的噪声较大，对采集到的星点像进行减背景处理，如图 11 所示。在 Matlab 环境下，选取 3×3 区域作为像点计算能量集中度。计算时，对能量矩阵进行差值填充，并做最大值归一化处理，采用高斯函数拟合星点像的能量分布，计算星点像的质心，见公式(5)，(x_0, y_0)即为质心坐标。对拟合结果进行两次反卷积计算，得到星点像的点扩散函数，如图 12 所示，反卷积就是去除像元矩形边界的积分效应的过程。根据点扩散函数，计算星点像的能量集中度[12]。低温下镜头的能量集中度实测结果如表 2 所示。

$$f(x,y)=A\cdot\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x-x_0}{\sigma_x}\right)^2+\left(\frac{y-y_0}{\sigma_y}\right)^2\right]\right\} \tag{5}$$

式中：A、σ_x、σ_y、x_0，y_0 都是高斯函数参数，通过拟合求解。



(a) 星点像原图 (b) 减背景后的星点像

(a) Original image of the point source (b) Image of the point source after removing the background

图 11 星点像原图及去除背景后的图像

Fig.11 Original image and image after removing the background of the point source

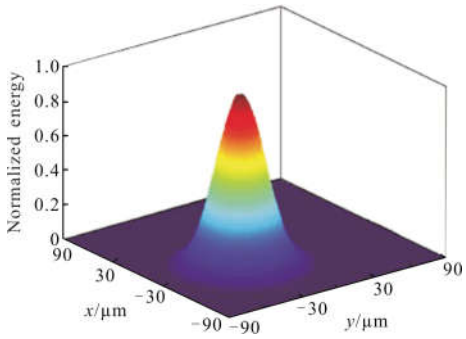


图 12 像点高斯曲面拟合及反卷积处理结果

Fig.12 Gauss fitting and deconvolution processing result of point source image function

表 2 低温下镜头能量集中度测试值 @30 μm×30 μm

Tab.2 Test value of encircled energy of lens at low temperature @30 μm×30 μm

Field	Encircled energy
(0,0)	0.75
(5,0)	0.66
(-5,0)	0.66

3 误差分析

低温下镜头能量集中度测试结果的误差包括以下几方面：

(1) 平行光管像质造成的镜头像质下降

平行光管的低温像质通过系统标定得到。在开展低温测试前，在平行光管焦面处架设 4D 干涉仪，并使用微晶标准平面镜自准平行光管出射光，在低温下测试平行光管像质。多次测量得到低温下平行光管波前 RMS=0.06λ (λ=632.8 nm)，带入光学模型中，仿真其对镜头能量集中度的影响，造成能量集中度下降约 δ_1=0.005。

(2) 红外焦面组件的定焦精度造成的测试误差

镜头焦深 23 μm，低温测试时，通过星点像的灰度值判定最佳焦面位置。采集星点图像时，在焦深方向每 20 μm 采集一组，总计 5 组，计算时以最高一组数据为准，有效消除了红外焦面组件的定焦精度(微小离焦)造成的测试误差。

(3) 架设工装的低温形变带来的镜头测试视场误差

采用同平行光管像质测试相同的测试方法，测量平行光管焦面处返回像点与出射像点间距，计算得到由于测试系统在低温下的形变带来的镜头测试视场偏差为 0.9′，不足镜头视场的 1/100，该部分误差可忽略不计。

(4) 红外焦面 F 数与镜头 F 数匹配差异带来的测试误差

常温采用干涉仪测试，低温采用焦面组件测试。红外焦面组件 F 数与低温镜头 F 数存在微小的匹配差异，ΔF=0.05，带入光学模型仿真计算，所用红外焦面组件测试结果比实际高 δ_2=0.007。

(5) 红外焦面组件性能相对于干涉仪的不一致性误差

红外焦面组件本身性能对测试数据有衰减，即采用干涉仪测试和红外焦面组件测试，两个测试结果存在系统性不一致性误差，且红外焦面组件测试数据偏小。采用标准红外镜头，分别使用干涉仪和红外焦面组件测试，标定红外焦面组件与干涉仪的不一致性误差。经标定红外焦面组件与干涉仪的不一致性误差 δ_3=0.01。

(6) 气流和抖动引起的测试不稳定误差

气流扰动引起的测试，通过多次测试求解平均值的方法计算均值误差。文中的测试进行了 25 次，剔除粗大误差后得到的能量集中度测试不确定度为 σ=0.01。

综上所述，低温下采用焦面组件测试能量集中度相对于常温下采用红外干涉仪测试的方法，测试误差为 $\delta=\delta_1-\delta_2+\delta_3=0.008$，测试不确定度 σ=0.01。修正后低温镜头能量集中度测试结果为中心视场能量集中度 0.748±0.01，边缘视场能量集中度 0.668±0.01。与常温下测试得到的标准值比较，测试精度为

$$\varepsilon_1=\frac{0.80-0.758}{0.80}=5.3\%,\ \varepsilon_2=\frac{0.72-0.675}{0.72}=7.2\% \quad (6)$$

综上，文中提出的测试方案中的低温镜头能量集中度测试精度优于7.5%。

4 结 论

文中提出了一种在 200 K 真空低温下测试镜头能量集中度的方案，该方案采用星点靶标成像，利用精密调焦技术和离焦采样实现对星点像的精确采集，采用高斯曲面拟合算法和反卷积算法处理实验数据，计算镜头的能量集中度。并搭建了低温测试系统，开展了实测实验，分析并标定了测试过程中的系统误差和测量误差。实验结果表明，文中提出的低温镜头能量集中度测试方法合理可行，测试精度优于7.5%，可用于低温镜头性能的定量测试和评价，具有很好的工程应用价值。

参考文献：

[1] Lu Yan, Liu Enguang, Xie Rongjian. Development of cryogenic optical technology in space infrared observation [J]. ***Vacuum & Cryogenics***, 2011, 8(S1): 530-536. (in Chinese)
陆燕, 刘恩光, 谢荣建. 国外空间红外观测中的低温光学技术发展概况[J]. 真空与低温, 2011, 8(S1): 530-536.

[2] Liu Fulong, Li Chunlin. Application of cryogenic optical technology in space remote sensor [J]. ***Vacuum & Cryogenics***, 2011, 8(S1): 537-543. (in Chinese)
刘伏龙, 李春林. 低温光学技术在航天遥感器上的应用研究[J]. 真空与低温, 2011, 8(S1): 537-543.

[3] Zhang Yue, Zhou Feng, Ruan Ningjuan, et al. Overview of cryogenic refrigeration technology in space infrared astronomical telescopes [J]. ***Spacecraft Recovery & Remote***

Sensing, 2013, 34(5): 46-54. (in Chinese)

[4] Stephen M Volz, Russell B Schweickart, Bruce Heurich. Superfluid helium cryostat for the SIRTF cryogenic telescope assembly. IR space telescopes and instruments [C]//SPIE, 2003, 4850: 1038-1049.

[5] Masayuki H, Katsuhiro N, Shoji T, et al. Thermal design and its on-orbit performance of the AKARI cryostat [J]. ***Cryogenics***, 2008, 48(5): 189-197.

[6] Michael T M, Marie B, Michael D, et al. Systems Engineering on the James Webb Space Telescope [C]//SPIE, 2010: 1002-1015.

[7] Peng Qingqing, Luo Shoujun, He Wubin. Assembling and alignment of cryogenic optical system atroom temperaturebased on phase compensation [J]. ***Laser & Infrared***, 2013, 43(4): 433-437. (in Chinese)

[8] Zhou Chao. Opto-mechanical design for a cryogenic IR system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(8): 2092-2096. (in Chinese)

[9] Shen Mangzuo, Ma Wenli, Liao Sheng, et al. Development of a cryogenic optical system [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2001, 21(2): 202-205. (in Chinese)

[10] Zhang Haiyan, Guan Jianan, Zhuang Fulong, et al. Measurement and error analysis of low temperature deformationof infrared focal plane arrays [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(5): 0504001. (in Chinese)

[11] Xiao Fugen, Liu Guoqing. The application of cryogenic engineering in aerospace [J]. ***Spacecraft Environment Engineering***, 2002, 19(3): 10-19. (in Chinese)

[12] Yang Tianyuan, Zhou Feng, Xing Mailing. A method for calculating the energy concentration degree of pointtarget detection system [J]. ***Space Craft Recovery & Remote Sensing***, 2017, 38(2): 41-47. (in Chinese)