

小口径反射式光学系统装调方法研究分析

李 星, 阚博涵, 尤宏波, 杨栋梁
(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘要:在红外光学装调系统中, 镜片间距是需要精密控制的重要装调参数。由于反射镜在红外光学系统中通常为折转光路, 传统装调方法无法直接应用, 所以高精度光学系统一直着重关注折转光路中距离的装调方法。文章提出了两种折转光路距离的装调方法, 即接触式装调与非接触式装调。针对这两种装调方法, 使用了小口径反射镜进行了实例验证。并对比两种装调方法的结果, 分析得出两种装调方法的优劣性。

关键词:小口径; 反射镜系统; 光学装调; 镜面定位仪; 误差分析

中图分类号:TH74; O436 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.019

Research and analysis on the installation and adjustment method of small aperture mirror

LI Xing, KAN Bo-han, YOU Hong-bo, YANG Dong-liang
(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: In infrared optical adjustment system, the lens distance is an important parameter that needs to be precisely controlled. Since the mirror is usually used in infrared optics as a folding path, traditional decoration methods cannot be directly applied, so the high-precision optical system has been focusing on the adjustment method at mid-distance from folding path. In this paper, two methods of mounting for folding the optical path namely contact-type adjustment and non-contact adjustment are proposed. The two adjustment methods are verified using small aperture mirrors. The results of the two methods are compared, and the advantages and disadvantages of the two installation and adjustment methods are analyzed.

Keywords: small aperture; system of reflector; optical adjustment; mirror locator; error analysis

1 引言

红外光学系统装调往往有复杂的结构与高精度的图像质量要求。近些年来, 无人侦查红外系统、红外体温检测仪等设备已经步入国内外视场。将大型红外光学系统进行拆分, 往往可以找到小型单组反射镜结构。反射镜折转光路距离是确定整个光学系统光轴的重要参数, 关系到整个光学系统视场大小、成像质量^[1]。

本文提出了两种折转光路距离的装调方法, 分别为接触式装调法与非接触式镜面定位仪装调法。通过对装调原理的剖析, 进一步进行误差分析, 从而判断两种装调方法的精确度与可行性, 甄别两种方法的优缺点, 选择适当的装调方法, 确定反射镜 L 型光路

的距离值, 精确控制 L 型光路距离这个关键参数, 对光学系统成像质量起到至关重要的作用^[2]。

德国 TRIOPTICS 公司研发的镜面定位仪, 可用于可见光、紫外光学元件中心厚度和光学镜头及光学系统空气间隔的检测, 精度可达到 $\pm 0.15 \mu\text{m}$, 文章介绍的非接触式装调方法主要基于镜面定位仪进行 L 型光路距离的装调。实验结果对光学系统反射镜装调有一定的参考意义。

2 反射镜装调方法分析

2.1 小口径反射镜存在公差分析及控制

2.1.1 小口径反射镜装调必要性分析

光学装调过程中需要对光路进行严格控制, 来实现光轴与机械轴的高度一致性。由于光学装调公

差越来越严格,国内机械加工与光学加工能力有限,不能通过加工保证产品的性能指数。尤其是小口径反射式光学系统,在设计时为了使产品获得更好的像质,常常使用较大的光圈数,光圈数公式如下所示:

$$F = \frac{f}{D} \quad (1)$$

式中, f 为光学系统焦距; D 为镜头有效口径直径。从上式可以看出,光圈数越大,镜头口径越小,其光路距离值与光轴误差值更为敏感。所以,在机械件、光学件加工保障的基础上,要对反射式光学系统进行进一步光学装调,对保证光学系统装调质量是至关重要的一环。

2.1.2 折转光路装调过程中存在公差分析

小口径反射式光学系统对公差要求严格,反射镜造成的光学系统的误差主要是由反射镜的旋转和平移引起的,而反射镜的位置由其安装面决定,即结构件上反射镜安装面的加工精度直接影响反射镜的位置精度。反射镜的位置偏差对出射光线位置偏差影响较大^[3],直接增加总体光学系统误差。出射光线位置在 x 轴、 y 轴偏差值可简化为: $[0 \sqrt{2}\theta L][2\theta L 0]$ 。可以看出,反射镜位置偏差是装调中需要精准控制的变量。

折转光路进行装调时,光路距离是调节反射镜光轴与机械轴重合的第一步,在调节好距离后,验证光路与机械轴的角度误差,进行细微调整。如果距离调节不精准,会产生较大偏心值,从而带来非对称性像差,导致光学系统性能下降,偏心角秒计算式如下:

$$\alpha = \frac{d \times f_i}{2f_c \times r} \quad (2)$$

式中, d 为 CCD 观测到的偏心量; f_i 为自准直仪目镜焦距; f_c 为自准直仪物镜焦距, r 为被测光学曲率半径。在调节过程中使光路距离值接近理想数值,减小偏心值,准确定位反射镜,使光轴尽可能与机械轴重合。以方便后续的验证与精调过程。

2.2 装调方法对比分析

光学系统反射镜装调方法有两种,传统式装调方法为接触式装调方法,这种装调方法简单易行,只需符合反射镜尺寸的用顶针工装测量反射镜到两个端面的距离,并调节反射镜组件的顶丝,将 L 型光路距离值调至理想值。本文提出的新的装调方法为非接触式反射镜装调方法,利用镜面定位仪、平板玻璃、反射镜固定工装组成非接触式反射镜装调系统,非接触式装调系统基于镜面定位仪装调,精度较高,

通过计算机软件与后期分析可得到反射镜组件 L 型光路的距离。

2.2.1 接触式装调

2.2.1.2 装调原理

接触式装调法是早期针对反射镜装调所设计出的一种装调方法,这种装调方法针对不同规格型号的反射镜所设计出不同尺寸的实心体工装及相对应的工装卡具,且与反射镜组件镜框尺寸相同,工装保持高精度的同轴度^[4]。

使用装调工装与反射镜组件匹配,工装可记录下反射镜距离端面的距离,并使用测高仪进一步测量反射镜到端面的精确数值。在这个过程中,工装承担了中间介质传导数据的作用,并精确传递了 L 型光路的数据参数。所以,在工装与工装卡具工装的设计通常要求高精度,以此来保证测量数值的准确性。

2.2.1.2 装调方法

利用接触式装调法的步骤如下所示:

(1)将反射镜组件放置于光学平台上,并使用镜头纸保护反射镜。

(2)将工装与反射镜框架上端面口径匹配后,选用大小合适的螺丝固定工装与工装卡具,固定成一体后,取下工装与卡具,分别测量上表面高度 h_1 与针尖高度 h_2 的距离(如图 1)。镜框上端面到反射镜距离值: $h = h_1 - h_2$ 。

(3)取下工装与工装卡具,重复上述操作步骤测量侧端面到反射镜距离 h' 。由公式: $H = h + h'$ 计算求出 L 型光路距离之和。比较距离值 H 与理想值大小,调节反射镜组件的顶丝与螺钉,重复步骤 (1)~(3)测量 L 型光路距离,直至 L 型光路距离值满足设计要求。

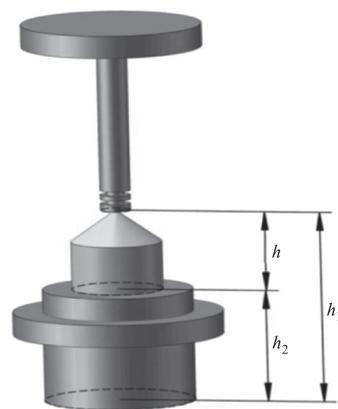


图 1 测量原理图

Fig. 1 Diagram of measurement principle

2.2.1.3 误差分析

接触式反射镜装调法虽然操作简便,但是过程中会产生一定范围的误差,其产生误差的环节主要有:工装同轴度误差、测高仪测试精度误差、镜框端面与卡具端面产生的平行度误差、工装轴向重复性安装误差。将各环节误差逐个进行分析,具体分析如下:

(1) 工装同轴度误差

工装与卡具在设计时,考虑反射镜装调的高精度要求,需对工装、工装卡具、提出与反射镜框架高度同轴的要求,工装加工要求保证精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$,即工装引起的反射镜距离误差 $\sigma_1 = 1 \mu\text{m}$ 。

(2) 测高仪测试精度误差

测高仪测试精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,在接触式反射镜装调过程中,需分别使用测高仪测量上端面与侧端面的距离值,共测试2次,即测试误差 $\sigma_2 = 1 \mu\text{m}$ 。

(3) 镜框端面、卡具端面平行度误差

在反射镜装调过程中,平行度误差会带来测量误差。所以往往对机械件的平行度有较高的加工要求,通常对于小口径的反射镜,平行度误差带来的变化测量误差 $\sigma_3 = \pm 1 \mu\text{m}$ 。

(4) 工装轴向重复性安装误差

卡具在镜框端面重复安装,卡具轴向偏心安装精度经统计为 $\pm 2''$,以直径80 mm的工装口径进行计算,其安装轴向精度误差 σ_4 满足:

$$\sigma_4 \approx \frac{1}{2} \times 80 \times \tan\left(\frac{2}{3600} \cdot \frac{\pi}{180}\right) = 0.000388 \quad (3)$$

即:工装轴向重复性安装误差 $\sigma_4 \approx \pm 0.4 \mu\text{m}$ 。

综上,接触式反射镜装调误差 σ 可以表示为:

$$\sigma \approx \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} \approx 1.774 \mu\text{m} \quad (4)$$

对于接触式装调法,会产生以上四种误差。在装调反射系统的过程当中,误差量会引起光路的变化。但是,此种装调方法对于日常装配的小体积反射系统完全满足设计所提出的装调要求。

2.2.2 基于镜面定位仪装调

2.2.2.1 镜面定位仪应用原理

本文使用的镜面定位仪是德国 TRIOPTICS 公司生产的精密光学测量设备,其测量激光波长为1310 nm,测试精度 $\pm 1 \mu\text{m}$,重复精度 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。镜面定位仪是一种光学测量的仪器(如图2),它采用了短相干光源的迈克尔逊干涉仪,参考镜的位置可以精确移动,当干涉仪测量臂程与参考臂程相等时,可以发生干涉。干涉信号经光电二极管转变为电信

号,再由显示屏显示。通过监控参考镜的移动位置,可以测量光学系统组件每一镜面之间的距离。镜面定位仪常常用于镜片间的距离检测,广泛使用于镜片检测、光学镜头组件检测应用^[5]。



图2 镜面定位仪

Fig. 2 Mirror locator

2.2.2.2 装调原理

该装调系统主要由四部分构成,镜面定位仪、待装调反射镜、平面反射镜、平板玻璃、夹具。发射光通过玻璃平板照射至待调节反射镜,光路在待调节反射镜上进行全反射,反射光反射至侧面的平面反射镜镜面,平面反射镜表面镀金,有反射率高,反射光原路返回(如图3)。CCD将接受到光信号转变为电信号,并将接收到的数据传至电脑端,显示屏显示玻璃平板与右侧反射镜之间的距离数值,比较理想值与测量值,调节反射镜后座上的顶丝与螺钉,将其调节至设计值。

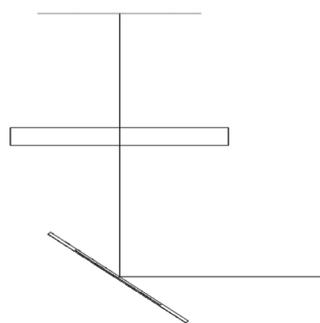


图3 光路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of optical path

2.2.2.3 装调方法

非接触式反射镜装调具体步骤如下:

(1) 将反射镜组件与固定工装1、平面反射镜固定,并将固定好的组件固定至镜面定位仪调节台(如图4)。

(2) 放置玻璃平板于组件上端面(如图5),打开镜面定位仪,可测量得到玻璃平板、玻璃平板下表

面到侧端平面反射镜的距离值 d' 。



图 4 固定工装示意图

Fig. 4 Schematic diagram of tooling fixation

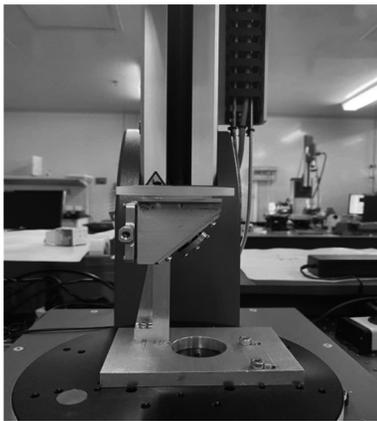


图 5 加盖玻璃示意图

Fig. 5 Schematic diagram of capping glass

(3) 测量反射镜镜框突出部分距离值 d'' (如图 6), 可得到 L 型光路距离: $d = d' - d''$ 。

(4) 比较测量值与理想值, 调节顶丝与螺钉改变 L 型光路距离数值, 重复上述操作步骤 (1) ~ (3), 直至测量数值结果满足理想要求。

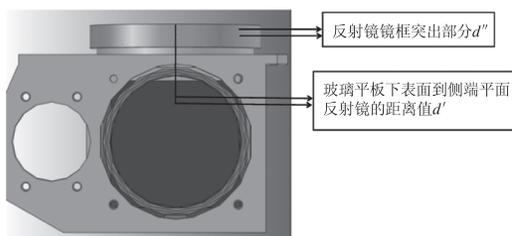


图 6 反射镜测量距离示意图

Fig. 6 Distance of reflector measurement

2.2.2.4 误差分析

非接触式反射镜装调法是应用于高精度仪器设备的新方法操作过程复杂程度较高, 但误差相较于接触式反射镜装调法较高。其产生误差的环节主要有: 镜面定位仪测试误差、平板玻璃重复安装引起的

误差、反射镜组件偏心引起的距离测量误差、机械应力造成的误差。将各环节误差逐个进行分析^[6], 具体分析如下:

(1) 镜面定位仪测试误差

非接触式反射镜装调通过镜面定位仪直接测量 L 型光路的距离, 设备精度 $\pm 0.5 \mu\text{m}$, 过程中使用一次仪器, 测试误差 $\sigma_1 = \pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

(2) 安装平面反射镜引起的误差

反射镜组件调节好轴向偏心后, 平面反射镜偏心重复安装精度经统计为 $\pm 2''$, 以宽度为 50 mm 的平面反射镜计算, 平板玻璃重复安装引起的误差 σ_2 满足:

$$\sigma_2 \approx \frac{1}{2} \times 50 \times \tan\left(\frac{2}{3600} \cdot \frac{\pi}{180}\right) = 0.000242 \quad (5)$$

即: 平面反射镜引起的误差 $\sigma_2 = \pm 0.24 \mu\text{m}$

(3) 机械应力造成的误差

通过调节反射镜的顶丝和螺钉, 反射镜框架会产生些微应力误差。针对应力导致的各向同性的影响导致的变化进行分析^[7], 应力导致镜片折射率的变化使出射光波产生附加的相位调制正比于应力与材料的厚度 d 。当波前复振幅为 $U_0(x, y)$ 的光波入射到反射镜后, 其反射光波波前复振幅 $U_1(x, y)$ 为:

$$U_1(x, y) = U_0(x, y) \cdot t_1(x, y) \cdot t_2(x, y) \quad (6)$$

其中:

$$t_1(x, y) = e^{i\delta(x, y)} \quad (7)$$

$$t_2(x, y) = e^{ik\Delta n} \cdot e^{-ik\frac{(x^2+y^2)}{2f}} \quad (8)$$

式中, t_1 为透镜的相位调制因子; t_2 为应力弹光效应所引起的光波相位调制。这种由应力产生的附加相位使得出射光波波前恶化, 从而使得 L 型光路距离值发生变化。

在反射镜组件的设计中, 通常采用不锈钢材质的材料。且工装的固定方式选用扭矩扳手四点受力均匀式固定, 尽量避免了应力带来的测量误差。经统计, 机械件应力产生的测量误差为 $0.5 \mu\text{m}$, 即: 测试误差 $\sigma_3 = \pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

(4) 反射镜组件偏心引起的距离测量误差

反射镜组件使用固定工装进行距离调节, 在找平反射镜端面时, 轴向中心偏差引起反射镜间距测量误差, 由装调偏心 β 引起的 L 型光路间距误差 σ_4 为:

$$\sigma_4 = d_j \cdot (1/\cos\beta - 1) \quad (9)$$

其中, β 为反射镜装调偏心; d_j 为沿测试方向存在矢高差。当红外透镜装调偏心 β 为 $1'$ 时, $\sigma_3 = 4.23 \times$

$10^{-8}d_j$, 反射镜装调的本质是对反射镜的角度做一调整, 使得反射镜的角度符合理想光路, 由装调中心偏差作为可调节部分^[8], 造成的间距计算误差可忽略不计。

综上, 非接触式反射镜装调误差 σ 可以表示为:

$$\sigma \approx \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \approx 0.7467 \mu\text{m} \quad (10)$$

经上述分析可知, 基于镜面定位仪的非接触式装调法理论误差值更小, 反射镜 L 型光路距离值测试更加精准。

3 实例验证分析

在某热像仪项目中, 分别使用接触式装调法和非接触式装调法进行反射镜装调, 并使用自准直仪对比分析两种方式装调出的光路。通过对比两种装调方法, 分析两种方法的装调效果和优缺点^[9]。实验所用的反射镜为镀高反膜的反射镜, 反射率可达 99.9%, 组件为小口径反射镜, 组件结构、反射镜 L 型光路三维图如图 7、8 所示。

使用本文中提到的两种装调方法多次装调反射镜, 记录两种方法调节后的 L 型光路距离值, 数据记录如表 1 所示。

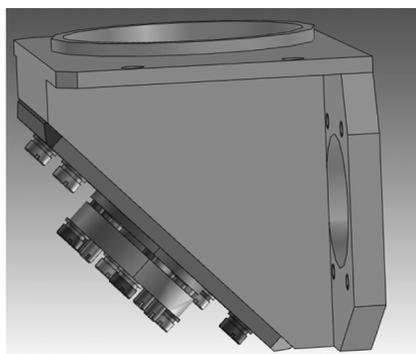


图7 反射镜结构

Fig. 7 Structure of reflector

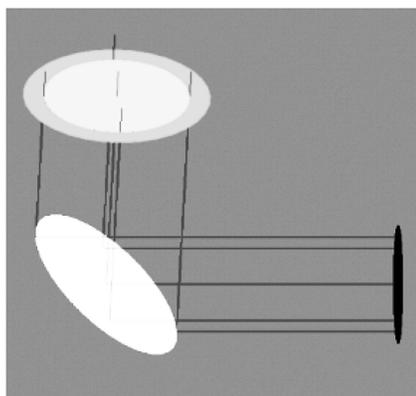


图8 L型光路三维图

Fig. 8 Three dimensional drawing of L-type optical path

表1 反射镜 L 型光路距离值

Tab. 1 Distance value of L-type optical path of reflector

装调方法	L 型光路距离值/mm					
	1	2	3	4	5	平均值
接触式装调法	49.997	49.993	49.994	49.995	49.995	49.9948
非接触式装调法	49.995	49.998	49.995	49.998	49.997	49.9966

在调节好 L 型光路距离后, 使用自准直仪记录反射镜的光路偏心数据, 以此分析两种装调方法的装调效果, 反射镜光路偏心数据如表 2 所示。

表2 反射镜光路偏心值

Tab. 2 Eccentri value of optical path of reflector

装调方法	反射镜光路偏心值/(")					
	1	2	3	4	5	平均值
接触式装调法	32.3	34.5	29.6	34.6	35.1	33.2
非接触式装调法	20.3	23.1	19.6	18.5	21.8	20.66

由上两表可知, L 型光路距离平均值相差不超过 0.004 mm, 两种装调方法的反射镜装调结果均满足目标要求。但是, 非接触式反射镜装调法较于反射镜装调法的光路偏心值更小, 即装调距离更精准, 光路质量更好。

在装调过程中, 分别记录了两种反射镜装调方法的装调时间, 以此来比较接触式装调法与非接触式装调法的复杂性与操作性, 反射镜装调时间如表 3 所示。

表3 反射镜装调时间

Tab. 3 Installation and adjustment time of reflector

装调方法	反射镜装调时间/min					
	1	2	3	4	5	平均值
接触式装调法	8	7	8	8	7	7.6
非接触式装调法	25	28	30	25	30	27.6

接触式装调法使用的仪器设备较为简单便捷, 易于操作, 使用此种装调方法所需时间短^[10]。基于镜面定位仪的非接触式装调法使用高精尖仪器设备, 操作过程繁琐, 进而使用这种装调方法的装调过程消耗的时间相较于接触式装调方法较长^[11]。对于大批量反射镜装调, 接触式装调法可以满足产品的进度要求; 对于小批量反射镜系统装调, 非接触式装调法可以满足其更高精度的要求。两种装调方法分别可以满足不同的装调要求。

4 结论

本文针对反射镜组件提出了两种装调方法,

对比了接触式反射镜装调与基于镜面定位的非接触式反射镜装调方法。两种方法研究分析,非接触式装调方法的测量精度优于接触式装调法,且非接触式装调法的测量精度优于 0.004 mm 。通过对反射镜组件进行实例验证,两种装调方法在实际应用中都能满足误差不超过 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 的要求,但采用非接触式装调法,使用自准直仪验证反射镜光路偏心可以达到 $30''$ 内,优于接触式装调法的 $60''$ 。两种装调方法都满足该项目所提的反射镜装调要求,但非接触式装调方法精度更高,一次装调后的效果更好。对于装调过程而言,非接触式装调法过程更复杂,所需时间也更多。两种方法都切实可行,分别涵盖不同的优缺点,我们可以根据需求选择不同的装调方法以达到自己预期的装调效果。

参考文献:

- [1] Li Jianguo, Wang Cheng. New thoughts on the develop airborne infrared detection system[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(7): 794 - 798. (in Chinese)
李江勇,王诚,机载红外探测系统的发展新思路[J]. 激光与红外, 2013, 43(7): 794 - 798.
- [2] Lee H, Dalton G B, Tosh I A J, et al. Computer-guided alignment I: phase and amplitude modulation of alignment-influenced optical wave front[J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3127 - 3139.
- [3] Zhao Qiang, Lu Fupo, Wu Qian, et al. Analysis of installation error of folding mirror in infrared optical and mechanical system[J]. Infrared Technology, 2014, 36(4): 275 - 280. (in Chinese)
赵强,吕复坡,吴倩,等. 红外光机系统中折叠反射镜组安装误差分析[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 275 - 280.
- [4] Cheng Ziqing, Luo Jinfeng, Hu Jixian, et al. Application of OTF instrument in the alignment of IR optical system[J]. Optical Instruments, 2007, 29(3): 9 - 13. (in Chinese)
程子清,罗劲峰,胡际先,等. 光学传递函数仪在红外光学系统装调中的应用[J]. 光学仪器, 2007, 29(3): 9 - 13.
- [5] Yang Xiaofei. Study on the computer-aided alignment of three-mirror optical system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, 2005: 22 - 24. (in Chinese)
- [6] Qu Liang. Research on the application of mirror interval non-contact measurement in the optical system of refractive optical path[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020, (3): 170 - 177. (in Chinese)
屈亮. 镜面定位仪在折转光路光学系统中的应用研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020, (3): 170 - 177.
- [7] Li Mengjuan, Liao Zhibo, Wang Chunyu. Analysis and control on assemblage tolerance in small-aperture high-precision refractive optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(2): 277 - 281. (in Chinese)
栗孟娟,廖志波,王春雨. 小口径高精度折射式光学系统装调公差的分析与控制[J]. 应用光学, 2015, 36(2): 277 - 281.
- [8] Ming Ming, Wang Jianli, Zhang Jingxu, et al. Error budget and analysis for optical system in large telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 104 - 107. (in Chinese)
明名,王建立,张景旭,等. 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 104 - 107.
- [9] Guo Banghui. Research on optical lens auxiliary assembly and adjustment equipment based on the measurement of mirror spacing and center deviation[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, 2014. (in Chinese)
郭邦辉. 基于镜面间隔和中心偏差测量的光学镜头辅助装调设备的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- [10] Zhang Limin, Wu Yuanhao. Research on multi degree of freedom fine tuning structure design of 45 degree tilt mirror[J]. Journal of Photonics, 2010, 19(12): 2139 - 2142. (in Chinese)
张丽敏,吴元昊. 45°倾斜镜多自由度精调结构设计研究[J]. 光子学报, 2010, 19(12): 2139 - 2142.
- [11] Niu Jinchuan, Zhang Kai, Zhao Yinglong, et al. A kind of non-contact infrared lens spacing test method[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2022, 43(2): 56 - 61. (in Chinese)
牛锦川,张凯,赵英龙,等. 一种非接触式红外透镜间距测试方法[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(2): 56 - 61.