

文章编号:1001-5078(2024)03-0404-07

· 红外材料与器件 ·

连续变焦红外热像仪结构设计及装调工艺研究

石 彰, 贺 媛, 潘 栋

(中电科光电科技有限公司, 北京 100015)

摘 要: 本文研究了连续变焦红外热像仪的结构设计和装调工艺。在设计阶段进行了振动、冲击仿真分析。提出了连续变焦组件的光机装调工艺方法。搭建了小视场与安装基准偏轴度的测量方法。完成了该红外热像仪的光轴一致性检测和光轴稳定性验证试验。检测和试验验证结果表明各项关键机械性能指标优良, 证明该红外热像仪的整机系统结构设计满足工程化应用需求。

关键词: 红外热像仪; 连续变焦; 装调工艺

中图分类号: TH702; TN216 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.03.011

Research on the structural design and assembly process of continuous zoom thermal imager

SHI Zhang, HE Yuan, PAN Dong

(CETE Electro-Optics Technology Co. Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: In this paper, the structural design and assembly process of continuous zoom thermal imager are studied. Vibration and shock simulation analysis are carried out at the design stage. The optical-mechanical assembly process of continuous zoom module is proposed. The measurement method of off-axis degree between narrow field and assembly reference is built. The optical axis consistency test and optical axis stabilization test are finished. The results of testing and experimental verification show that the key mechanical performance indicators are excellent, and prove that the system structure of the thermal imager is designed to meet the needs of engineering applications.

Keywords: thermal imager; continuous zoom; assembly process

1 引 言

红外探测技术是现代信息获取的主要手段之一, 随着红外材料、红外器件、成像系统、智能图像处理等相关技术的发展, 近年来红外探测器水平的快速提高, 红外探测技术已被广泛应用于军事国防、安防监控、医疗检测等各个领域^[1-3]。在地面机动车载平台配装红外热像仪, 主要用于对地面目标、低空直升机和无人机的探测搜索以及对目标的前视瞄准, 在执行任务时, 需要根据目标大小随时切换光学系统的焦距。连续变焦红外热像仪视场可连续缩放, 能够避免

多视场红外热像仪在视场切换过程中可能丢失目标的问题, 具有大视场搜索和跟踪目标、小视场识别和瞄准目标的优势^[4], 因此连续变焦红外热像仪更适合配装于机动车载平台上执行任务。由于热像仪工作于强振动冲击的环境下, 因此对光轴一致性和光轴稳定性性能提出了更高的要求。

本文针对配装于某机动车载平台的某型连续变焦红外热像仪的结构设计、抗振动冲击仿真、光机装调工艺、光轴一致性检测和光轴稳定性试验等进行了分析与研究。

2 红外热像仪结构设计

2.1 系统组成

红外热像仪整机的外观如图1所示。整机结构采用模块化设计思路,主要由物镜组件、连续变焦组件、反射调焦成像镜组件、探测器组件、控制电路、主框架等组成,如图2所示。主框架为主要支撑和安装基础,同时也是整机外壳,其余组件分别安装在主框架上。主框架采用整体框架结构设计,横竖方向有侧板支撑,提高刚度和强度。各组件与主框架的安装面以及整机对外安装接口是重要的基准面,需保证加工精度。

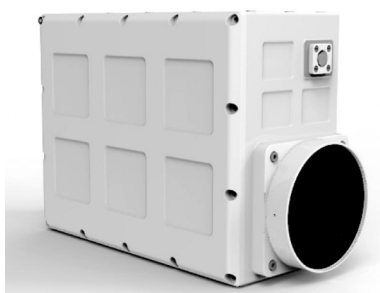


图1 红外热像仪3D模型图

Fig. 1 3D model of the thermal imager

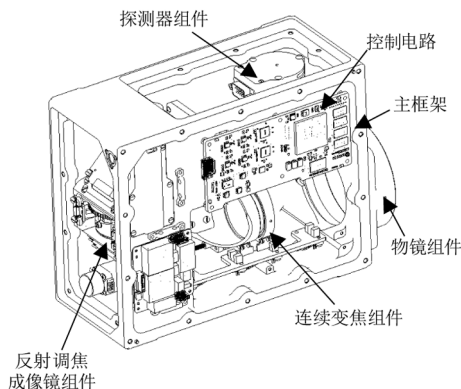


图2 红外热像仪结构组成图

Fig. 2 Structural composition of the thermal imager

2.2 固定镜组件设计与装配

整机系统中,固定镜组件完成光机组装后,利用螺钉固定安装于主框架上,固定镜片在整机系统中位置确定,不再移动。

物镜组件镜片采用定中心方式安装于镜筒中,镜片在光学中心偏测量仪上调好位置后,先与镜筒粘接再用

压圈压紧,压圈和镜片接触位置采用圆弧接触,避免产生压接应力集中。反射调焦成像镜组件采用一体化框架的结构形式,可独立完成组件的装调,减

少整机系统分组件数量,进而减少累积误差,提高整机装配精度。根据光学系统的光路设计,组件两侧是两个反射镜组件,中间位置是调焦镜组件,通过后端成像镜组件安装止口和主框架连接,并通过定位销钉确定水平方向的位置。反射镜装在反射镜底座上,在反射镜与底座的缝隙处粘接,并安装保护压板,然后再装到一体化框架上。调焦组件设计,选择了圆柱凸轮式变焦机构。调焦镜片和成像镜片均利用镜筒与镜片加工精度保证安装精度,镜片固定同样采用先粘接再用压圈压紧的形式。

2.3 连续变焦组件设计

连续变焦组件光机系统,通过变倍、补偿镜组轴向间隙的连续变化而改变光学系统的焦距值,实现光学系统焦距值的连续变化。工作时,变倍镜组和补偿镜组沿光轴方向移动过程中会造成系统光轴的跳动,光轴跳动量的大小直接影响光学系统的成像质量,因此变倍镜组和补偿镜组移动的导向机构设计是结构设计的核心技术,同时,连续变焦组件的装调工艺也是保证视场光轴一致性的关键所在^[5]。

常用的导向机构形式中,采用直线轴承加导杆的方案,目前发现轴承和导杆之间存在间隙,会导致移动镜组角度偏转。采用圆柱凸轮驱动机构,由于镜片移动行程长,变倍、补偿镜组的移动规律不一致,造成凸轮设计复杂,加工难度大。本文所设计的连续变焦组件最终确定的方案是高精度导轨加长滑块方案,分别用两组直线电机驱动变倍、补偿镜组。直线电机配有螺母,通过螺母和螺杆带动变倍、补偿镜组实现线性运动。导轨固定安装于主框架上,导轨上配装两组长滑块分别安装变倍、补偿镜组,选用长滑块,提高变倍、补偿镜组的安装和移动稳定性。连续变焦组件的结构组成如图3所示。

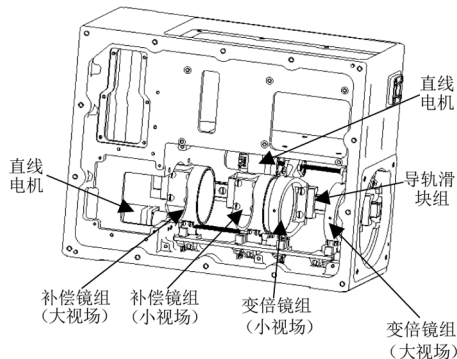


图3 连续变焦组件结构组成图

Fig. 3 Structural composition of the continuous zoom module

2.4 探测器组件及控制电路安装

探测器组件与主框架安装设计采用了增加调整垫片的安装方式,并且调整垫片加工不同厚度,使得探测器的高低既可以向上调整,也可以向下调整,探测器组件和整机之间装调完成后,通过配打的定位销孔,保证振动、冲击可靠性。整机系统的控制电路按照占用空间大小及相互接线关系分布安装于光机组件外围,且考虑散热需求,控制电路相应发热元件均设计有导热片,将热量传导于主框架和盖板等结构件上。

2.5 振动、冲击仿真分析

强振动、冲击环境下工作,会引起红外热像仪的光轴不稳定,零位走动,工作中成像抖动等问题,严重时会引起故障。振动、冲击可能引起的红外热像仪故障模式有:部件松动、磨损、脱落、机构卡滞、断裂;电路组件元器件功能下降或失效、电连接疲劳或损坏、焊点断裂等^[6]。因此,抗振动、冲击设计及前期的仿真分析优化设计至关重要。本文所设计的红外热像仪根据环境适应性要求,振动环境条件满足 GJB150.16A—2009 履带车典型振动要求;冲击条件满足 GJB150.18A—2009 后峰锯齿波,最小峰值 P 为 75 g,持续时间 6 ms,三轴向,正负各两次的要求^[7]。

选用 ANSYS 有限元分析软件进行仿真,为提高效率,删除红外热像仪整机中体积小、重量轻的机械附件,保留光机组装结构件、光学镜片、电路板等电子元器件,镜片粘接方式按实际硅橡胶粘接建模仿真。最终整机方案的最大振动、冲击仿真应力应变云图如图 4、5 所示。仿真结果显示,最大应力值为 46 Mpa,小于材料的许用应力。最大应变发生在侧盖板处,冲击条件下最大应变值为 0.05 mm。

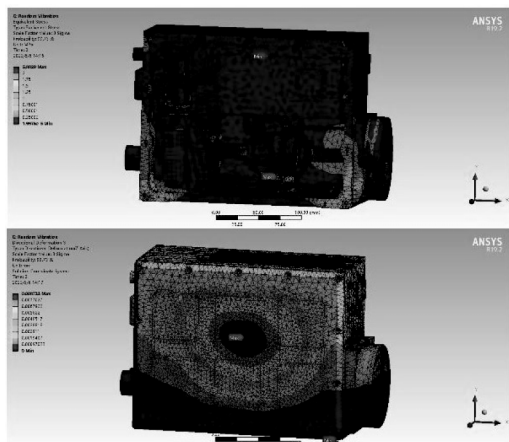


图4 振动条件下应力应变云图

Fig.4 The stress and strain cloud under vibration condition

3 连续变焦组件光机装调工艺

连续变焦组件的光机装调,是该红外热像仪装调的重点,其装调精度是影响整机光轴一致性和光轴稳定性指标的重要因素。

3.1 导轨装调

导轨装调的目的是保证变倍、补偿镜组安装的水平、竖直精度,是保证变倍、补偿镜片光轴与整机系统光轴重合的基础。综合考虑装调操作空间尺寸和红外热像仪的量产装配效率,本文采用机械工装的方案装调导轨。分别设计移动工装和基准轴工装模拟变倍、补偿镜框和光轴位置,导轨装调原理图如图 6 所示。将导轨滑块组参照厂家提供的安装方法装配到底座上,测量导轨顶面的平面度以及两个滑块的平行度。移动工装采用加长设计,增加导向。移动工装装配在两个滑块上,基准轴工装安装在镜筒位置,模拟出光轴位置,然后调整导轨,保证移动工装能在基准轴工装上顺畅滑动,无卡滞,最后用螺钉固定锁紧导轨。

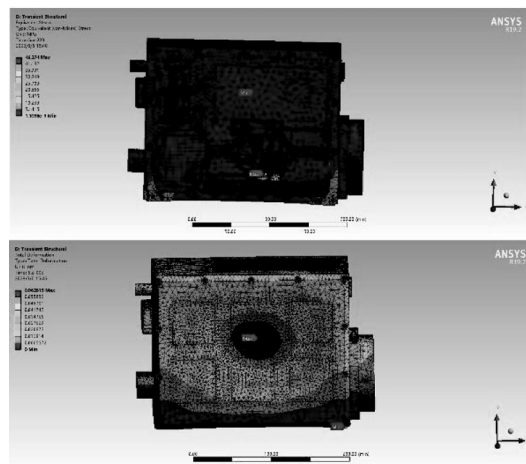


图5 冲击条件下应力应变云图

Fig.5 The stress and strain cloud under impact condition

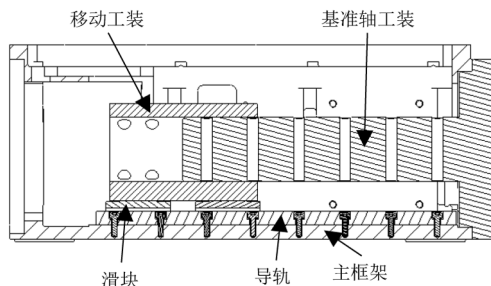


图6 导轨装调原理图

Fig.6 Schematic diagram of rail assembly

3.2 变倍、补偿镜组装调

变倍、补偿镜片采用定中心方式安装于镜框中。需要利用光学中心偏测量仪来完成镜片与镜框的定位安装,再将变倍、补偿镜组配装于导轨滑块组上,在此过程中,需要保证变倍、补偿镜组与导轨滑块组的配装位置精度。基于以上两点装调需求,本文设计一种镜组工装,模拟导轨滑块组与变倍、补偿镜组的安装方式,并设计基准安装接口,用于使用光学中心偏测量仪进行镜片中心位置调整。变倍、补偿镜组的装调方法一致,因此,本文以变倍镜组为例具体展开说明装调工艺方法。

镜组工装设计有镜框底面和侧面两个面与变倍镜框配合安装。变倍镜框另一侧面设计螺纹孔,变倍镜组安装于镜组工装时,利用螺钉从侧面顶紧,确保变倍镜组底面和侧面安装到位;镜组工装设计有圆柱面基准安装接口,该圆柱面与镜框圆柱面设计同轴。镜组工装与变倍镜组的安装形式完全模拟导轨滑块组与变倍镜组的安装形式,装调示意图如图7所示。安装变倍镜框后,将变倍镜片装入镜框中,然后将镜组工装和变倍镜组装于光学中心偏测量仪调试平台上,进行镜片中心偏调整。调好位置后,镜片侧面粘胶固定于镜框中。变倍镜片装调示意图如图8所示。

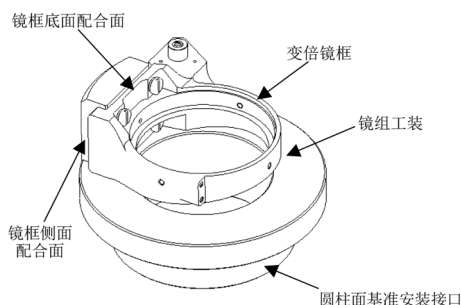


图7 变倍镜框装调示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the zoom frame assembly

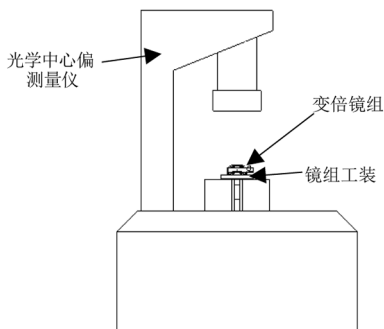


图8 变倍镜片装调示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the zoom lens assembly

同样的方法完成补偿镜组的装调后,拆除镜组工装,按照安装于镜组工装的安装形式,分别将变倍、补偿镜组安装于导轨滑块组上。然后再将两组直线电机及相关配件按设计位置安装到主框架上,电控调试驱动连续变焦组件,确认变倍、补偿镜组可按光学系统设计位置完成前后移动。

4 系统机械性能测试

整机系统组装完成后,需要进行一系列的检测、试验工作,验证红外热像仪的研发设计是否满足应用指标要求。

4.1 小视场安装基准偏轴度检测

为保证红外热像仪产品的互换性,即光轴与安装基准面的偏轴度一致性要求,设计时需要考虑光轴与安装基准面的平行度要求。本文所设计的红外热像仪要求小视场安装基准偏轴度指标为不大于 0.15 mrad 。检测设备包括红外平行光管、高精度二维转台、光学经纬仪、立方晶体、机械检测工装、显控器和上位机等。具体检测流程说明如下:

1)如图9所示,将光学经纬仪对齐红外平行光管,调节光学经纬仪,使红外平行光管的靶中心位于光学经纬仪视场中心,即保证光学经纬仪光轴与红外平行光管光轴平行,锁紧光学经纬仪支架,完成光学经纬仪与红外平行光管自准。

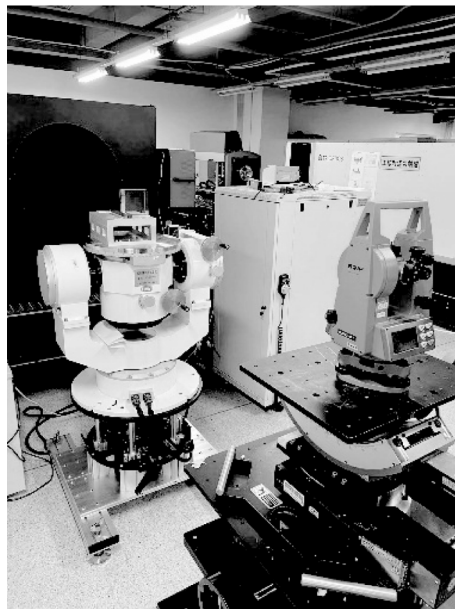


图9 基准搭建图

Fig. 9 Diagram of reference build

2)将机械检测工装固定在高精度二维转台上,立方晶体放置于工装上,侧面和底面与工装贴紧,保

持红外平行光管、立方晶体和光学经纬仪在同一水平线区域。通过光学经纬仪观察经过立方晶体反射的像,调节高精度二维转台,使像位于视场中心,此时认为工装安装基准同红外平行光管平行。使用立方晶体的目的是为了转换基准,便于检测。

3)如图10所示,撤下立方方晶,安装红外热像仪,侧面和底面基准面与工装贴紧固定,利用线缆将红外热像仪、显控器和上位机等设备连接好,上电启动完成后,切换到小视场,通过小视场观察靶位置,视场中心到靶中心的水平和垂直距离均方根即为小视场安装基准偏轴度数值。重复检测3次,得出小视场安装基准偏轴度检测结果如表1所示。

测得小视场安装基准偏轴度为:

$$A = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3} = 0.109 (\text{mrad})$$

分析以上检测数据可得,小视场安装基准偏轴度满足指标要求。

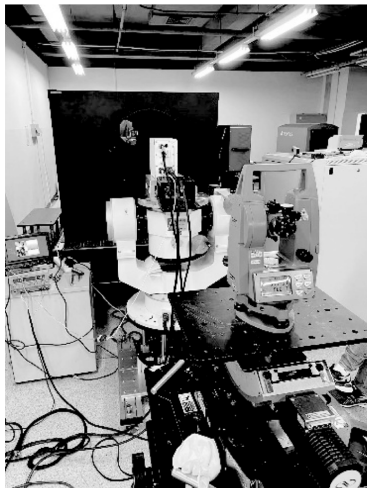


图10 偏轴度检测图

Fig. 10 Measuring diagram of off-axis degree

表1 小视场安装基准偏轴度

Tab. 1 Off-axis degree between narrow field and installation reference

编号	偏轴度/mrad
1	0.096
2	0.110
3	0.121

4.2 光轴一致性检测

连续变焦红外热像仪的光轴一致性指从小视场切换到大视场的整个过程中,光轴的同轴度偏差,本

文所设计的红外热像仪要求视场光轴一致性指标为不大于0.15 mrad。检测设备包括红外平行光管、高精度二维转台、显控器和上位机等。具体检测流程说明如下:

1)如图11所示,将红外热像仪架设在红外平行光管前的高精度二维转台上,利用线缆将红外热像仪、显控器和上位机等设备连接好。



图11 光轴一致性检测图

Fig. 11 Measuring diagram of optical axis coaxiality

2)红外热像仪上电启动完成后,切换至小视场,红外热像仪的十字分划中心位于视场中心,调整高精度二维转台的位置,瞄准红外平行光管的靶中心,用测试软件直接计算出小视场靶中心(X_0, Y_0)。

3)红外热像仪随机切换至小视场到大视场之间的中间视场,用测试软件直接计算出该视场靶中心(X_1, Y_1)与小视场靶中心(X_0, Y_0)的水平和垂直距离的均方根,作为小视场到该中视场光轴一致性偏差。

4)红外热像仪切换至大视场,用测试软件直接计算出大视场靶中心(X_2, Y_2)与小视场靶中心(X_0, Y_0)的水平和垂直距离的均方根,作为小视场到大视场光轴一致性偏差。

重复检测3次,得出光轴一致性偏差结果如表2所示。

测得光轴一致性偏差为:

$$B = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}{3} = 0.139 (\text{mrad})$$

分析以上检测数据可得,光轴一致性满足指标要求。

表2 光轴一致性偏差

Tab. 2 Optical axis coaxiality deviation

编号	偏差值/mrad
1	0.135
2	0.140
3	0.143

4.3 光轴稳定性试验

红外热像仪的光轴稳定性是指振动、冲击试验前后光轴的零位走动量,本文所设计的红外热像仪要求小视场瞄准线零位走动量不大于0.15 mrad。

采用如前所述的光轴一致性检测设备搭建检测平台,不同的是,需要在红外热像仪后端壳体上粘接基准反射镜,保证其与壳体紧固、平整,无相对位移。具体试验流程说明如下:

1)按照前述方法将红外热像仪与检测设备完成连接,调节红外平行光管、转台和红外热像仪,使红外平行光管经反射镜的像位于其视场中心后,锁紧红外平行光管、转台和红外热像仪,使用测试软件记录红外平行光管靶中心位置,同时记录十字位置坐标。

2)红外热像仪上电启动完成后,切换至小视场,使平行光管靶中心位于视场内,使用测试软件识别并存储靶中心位置。

3)取下红外热像仪,进行振动、冲击试验,如图12所示。

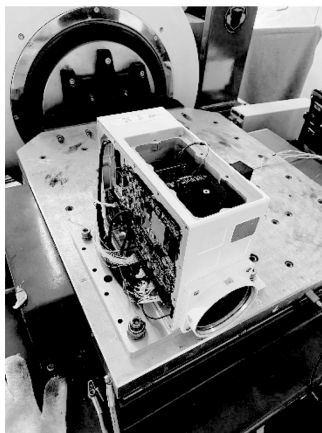


图12 振动、冲击试验

Fig. 12 vibration and impact test

4)振动、冲击试验后,将红外热像仪重新放置到转台上,调节红外热像仪使红外平行光管经反射镜的像位于其视场中心。

5)开机切换红外热像仪至小视场,记录并存储

振动、冲击后的靶中心位置,利用测试软件计算出振动、冲击前后的靶中心水平和垂直距离的均方根,作为零位走动量测试结果。

重复检测3次,得出振动、冲击前后的零位走动量如表3所示。

测得振动、冲击后的零位走动量为:

$$C = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = 0.025 (\text{mrad})$$

分析以上检测数据可得,光轴稳定性满足指标要求。

表3 振动冲击零位走动量

Tab. 3 Zero bit after vibration and impact test

编号	零位走动量/mrad
1	0.025
2	0.022
3	0.028

5 结 论

本文设计的一种连续变焦红外热像仪,结构紧凑、定位精度高、占用空间小。本文采用的连续变焦装调工艺,装调过程简单高效,装调精度高,可以推广到之后的量产装配阶段使用,也可以指导相关领域光机结构设计人员改进光机装调工艺。本文所述的红外热像仪,小视场安装基准偏轴度为0.109 mrad,光轴一致性偏差为0.139 mrad,光轴稳定性指标可达0.025 mrad,满足高精度设计要求和互换性要求,红外热像仪的整机系统结构设计满足工程化应用需求。

参考文献:

- [1] Cai Yi, Wang Lingxue. Nine issues associated with infrared imaging technology[J]. Infrared Technology, 2013, 35(11): 671-682. (in Chinese)
蔡毅,王岭雪. 红外成像技术中的9个问题[J]. 红外技术, 2013, 35(11): 671-682.
- [2] Wang Yifeng. The infrared technology of China in 2013[J]. Infrared Technology, 2014, 36(1): 10-21. (in Chinese)
王忆锋. 2013年的中国红外技术(上)[J]. 红外技术, 2014, 36(1): 10-21.
- [3] The summit of national infrared technology and infrared application technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(4):

776. (in Chinese)
全国红外技术及其应用技术峰会[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(4): 776.
- [4] Chen Jinjin, Su Junhong, Jin Ning, et al. A long-distance detection/identification continuous zoom thermal imager based on MW MCT detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 282(4): 97 – 104. (in Chinese)
陈津津, 苏君红, 金宁, 等. 基于中波制冷型碲镉汞探测器的远距离探测/识别连续变焦热像仪[J]. 红外与激光工程, 2018, 282(4): 97 – 104.
- [5] Li Yundong, Sun Shuwang, Helei. Study on varifocal mechanism design for infrared system[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(5): 87 – 90, 104. (in Chinese)
李运动, 孙树旺, 何磊. 红外系统变倍机构研究与分析[J]. 电光与控制, 2012, 19(5): 87 – 90, 104.
- [6] Tao Liang, Zhao Jinsong, Liu Chuanming, et al. Design methods of high reliability thermal imagers[J]. Infrared Technology, 2014, 36(12): 941 – 948. (in Chinese)
陶亮, 赵劲松, 刘传明, 等. 高可靠性红外热像仪的设计方法[J]. 红外技术, 2014, 36(12): 941 – 948.
- [7] 总装电子信息基础部. GJB 150A—2009. 军用装备实验室环境试验方法[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2009.