红外目标模拟器动态校准系统光学系统设计

李生好

(重庆工程职业技术学院,重庆 402260)

摘　要: 基于红外目标模拟器动态校准系统的应用场景,分析了动态校准系统光学系统的设计特点,指出光学系统应选择折反式二次成像光路结构。基于经典的光学系统无热化原理,以光机材料精密搭配与计算为基础细化了该折反式光学系统的无热化方法,基于该方法设计了 *F*/2、焦距 370 mm、工作波段 3.7~4.8 μm、总长为 182 mm 的光学系统,光学系统采用 512×512、15 μm×15 μm 规格的斯特林制冷式探测器,光学系统在-40~60 ℃范围内成像质量接近衍射极限。建立了光学系统鬼像和冷反射分析模型,分析结果表明:光学系统杂散光抑制能力较强、性能优异,满足红外目标模拟器动态校准系统在复杂恶劣环境下的使用要求。

关键词: 光学设计;　红外目标模拟器动态校准系统;　无热化;　鬼像;　冷反射

中图分类号: TN216　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.3788/IRLA201847.0918007

Optical system design in infrared target simulator dynamic calibration system

Li Shenghao

(Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China)

Abstract: Based on application scenarios of infrared target simulator dynamic calibration system, the design characteristics of the optical system in dynamic calibration system were analyzed, then it was pointed out that the optical system should select the refraction-reflective secondary imaging optical structure. Based on the classical optics athermal principle, refraction-reflective system athermal methods was refined by calculating then matching the optics and machine material precisely. By the method, a optical system with *F*/2, focal length of 370 mm, working band of 3.7 to 4.2 μm, total length of 182 mm was designed. The optical system selected 512×512, 15 μm×15 μm specification Stirling refrigeration detector, and imaging quality in the −40−60 ℃ was close to the diffraction limit. The ghost and Narcissus analysis models were established, the results show that the optical system has strong ability to suppress stray light and others excellent performance. The optical system satisfies the requirement of dynamic calibration system of infrared target simulator used in complex harsh environment.

Key words: optical design;　infrared target simulator dynamic calibration system;　athermal;　ghost image;　Narcissus

收稿日期: 2018-04-11;　**修订日期:** 2018-05-20

基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究专项项目(cstc2016jcyjA0480);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1732433)

作者简介: 李生好(1973-),男,副教授,博士,主要从事光电系统及量子信息方面的研究。Email:shlicvie@126.com

0 引 言

红外目标模拟器是红外探测系统进行仿真测试的关键设备,它可模拟真实探测阶段的目标特性,如辐出度、辐亮度和信噪比等,以此测试探测系统的探测能力和识别能力。目前国内外红外目标模拟器研究主要集中在静态试验条件下,然而静态条件下的测试结果对复杂背景环境下(动态条件)使用的系统来说是不全面的。这是因为在动态条件下红外目标模拟器的红外特性参数是变化的,而红外特性参数的准确性又关系到红外探测系统的性能指标。红外目标模拟器动态校准系统(下文简称“动态校准系统”)通过对外场条件下的红外目标模拟器进行红外特性参数实时校准,使得红外成像系统测试设备综合参数满足动态环境条件下的要求。

光学系统作为动态校准系统的信号收集系统,将处于动态复杂场镜中的红外目标模拟器输出的辐射参量实时收集传递给信号处理控制系统,对动态校准系统的性能起着关键作用。因此,该光学系统需要具有高空间分辨率和较大的视场范围;同时该校准系统用于外场试验环境,校准装置应具有集成便携性要求,光学长度受到严格限制;外场试验环境温度多变,光学系统应进行精密无热化设计。目前国内外相关研究主要集中在对静态试验室条件下使用一段时间后的发生漂移的红外目标模拟器进行校准[1-2],此类校准系统的光学系统结构复杂、体积庞大、环境适应性差,几乎不能在复杂背景下的移动场地中使用;鉴于对动态恶劣环境下的红外目标模拟器的校准技术研究较少,因此开展作为红外目标模拟器动态校准系统关键组合的高灵敏度、强适应性光学系统研究具有重要意义。

1 动态校准系统光学系统设计原理

1.1 动态校准系统光学系统的特点

动态校准系统结构示意图如图 1 所示。动态校准系统光学系统兼顾室外复杂恶劣试验环境,因此

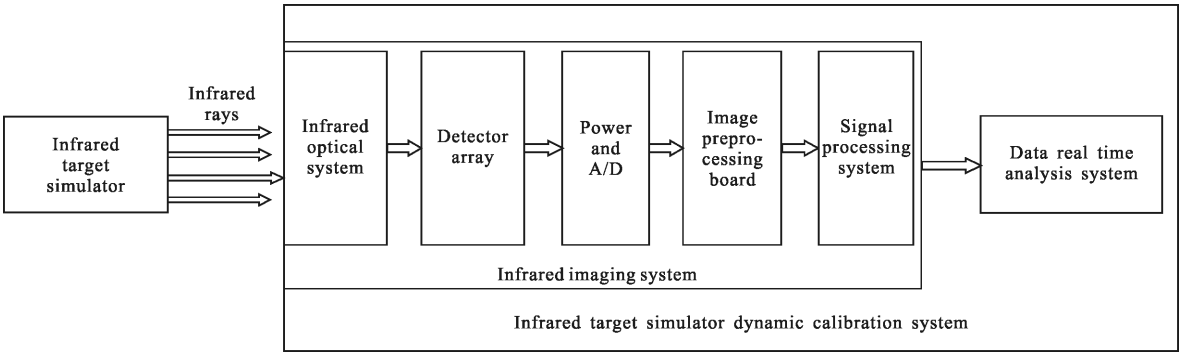


图 1 红外目标模拟器动态校准系统结构

Fig.1 Structure of infrared target simulator dynamic calibration system

其具有以下特点:

(1) 良好的环境温度适应性,温度变化对光学系统成像质量的影响要小于 5%;

(2) 紧凑的结构外形与较轻的质量,便于室外场地的携带与装调;

(3) 高空间分辨率,光学系统相对孔径要不小于 0.5,探测器像元要尽量小;

(4) 较强的杂散光抑制能力,一是要尽量抑制外杂光的影响,二是自身热辐射要小、灵敏度要高,因此光学系统冷光阑效率要为 100%,光路结构要留出视场光阑的接口。

根据以上特点,可以分析得到:此类光学系统必须采用二次成像结构形式,二次成像结构的中间像位置可考虑加入视场光阑;反射镜的引入十分有利于缩短长度和提高杂散光抑制能力[3],该动态校准系统光学系统可采用如图 2 所示的二次成像折反式结构;反射镜镜坯材料、反射镜支撑材料、透镜材料与透镜支撑材料的选择与精密搭配是系统环境温度适应性(无热化)的关键,也是系统轻量化的关键,这是此类光学系统设计的最大难点。

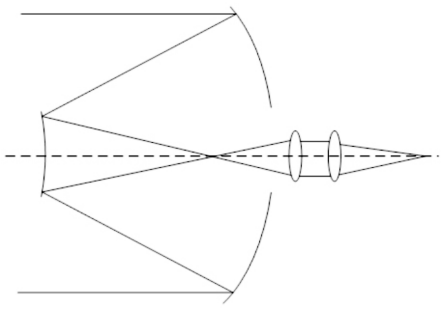


图 2 带中间像的折反结构

Fig.2 Refraction-reflective structure with intermediate image

1.2 动态校准系统光学系统无热化原理

红外光机系统成像质量受温度影响较大:(1) 红外玻璃材料的折射率温度系数 dn/dt 很大,一般要比可见光玻璃大数十倍;(2) 红外玻璃材料热膨胀系数的差异导致光学元件曲率半径和中心间隔因热胀冷缩发生变化;(3) 红外光机结构材料与红外玻璃材料的热膨胀系数的差异性使得当温度变化时光学元件的位置发生偏移。表 1 列出了常用红外透镜材料和可见光透镜材料 K9 的热特性系数的对比,表 2 列出了常用的光机结构材料的热特性系数。由于以上原因,红外光机系统在温度变化时会产生热离焦,使成像光斑弥散,像面模糊。

表 1 常用红外透镜材料及 K9 的热特性系数

Tab.1 Thermal coefficient of commonly used infrared lens materials and K9

Materials	Refractive index(4 μm)	dn/dt/℃	Expansion coefficient/℃
Ge	4.025	424×10^{-6}(4 μm)	6.0×10^{-6}(25 ℃)
Si	3.425	130×10^{-6}	2.7×10^{-6}–3.1×10^{-6}
ZnS	2.252	43.3×10^{-6}	4.6×10^{-6}
ZnSe	2.433	100×10^{-6}	7.1×10^{-6}(20 ℃)
AMTIR1	2.513	72×10^{-6}	12×10^{-6}
K9	Opaque	3.4×10^{-6}	7.1×10^{-6}

表 2 常用光机结构材料的热特性系数

Tab.2 Thermal coefficient of commonly used opto-mechanical structural materials

Materials	Expansion coefficient/℃	E/ρ/N·m·g^{-1}
Al	23.6×10^{-6}	2.5×10^{4}
Be	11.5×10^{-6}	15.1×10^{4}
BeAl	13.8×10^{-6}	9.5×10^{4}
Ti	10×10^{-6}	2.6×10^{4}
Carbon fiber	2.6×10^{-6}	8.9×10^{4}
Invar steel	1.26×10^{-6}	1.26×10^{4}

红外光学系统无热化方法可分为机械被动式、电子主动式和光学被动式三种。机械被动式和电子主动式无热化方法可靠性差、成本高、光机系统体积较大重量较重,不适用于动态校准系统,因此采用光学被动式无热化方法。

红外光机系统的被动式无热化就是合理分配光焦度,选择、搭配光学材料和光机结构材料,使得二者的热胀冷缩效应互相抵消,消除热离焦,即满足下式:

$$\left(\frac{1}{h_1\Phi}\right)^2\sum(h_i^2x_i\Phi_i)=\sum\alpha_iL_i \tag{1}$$

式中:Φ 为常温下系统光焦度;h_i 为光线在第 i 个光学元件的入射高度;x_i 为第 i 个光学元件的热差系数;i 为第 i 个结构件线性膨胀系数;L_i 为第 i 个结构件长度。

具体到动态校准系统的折反式光学结构,无热化设计时一方面要考虑到无热化指标,另一方面要考虑到光机系统加工及装调的可实现性和工艺性:选取透镜材料时应选至少三种红外材料[4],这有利于消除热差及色差,但不宜使用过多透镜以免降低系统灵敏度;选取反射镜镜坯材料时,要使镜坯热膨胀系数匹配反射镜光焦度分配,同时还要考虑镜坯材料的加工特性、轻量化特性和装调工艺性[5];选取机械结构材料时,在满足消热差的基础上,应合理考虑材料的比刚度,使光机系统结构更稳定、重量更轻[6]。动态校准系统光学系统具体的无热化设计原理如图 3 所示,以光机系统安装基准面(法兰面)为

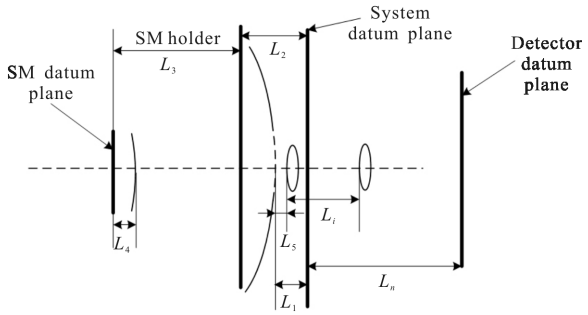


图 3 光学系统无热化设计示意图

Fig.3 Illustration of athermal optical system

基准,按照实际光机系统结构布局和光路中光线走向,依次计算各个光学元件和结构件的光轴方向的热伸缩量以及光学元件弯曲表面的变形量,将光机

系统所有热变形量全部传递、统计、求和到安装基准面得到最终的热离焦量，以该热离焦量为评价函数，多次循环迭代，最终使得热离焦量在光学系统焦深范围内。

2 动态校准系统光学系统设计指标

红外目标模拟器是为红外制导、红外探测等系统提供目标信息的，这些系统的一个重要工作波段就是大气窗口中的中波红外波段，因此确定动态校准系统光学系统的工作波段为 3.7~4.8 μm；根据动态校准系统光学系统相对孔径不小于 0.5 的要求，确定光学系统为 *F*/2 系统；为实现动态校准系统具有较高的角分辨率，同时还能具有较大的视场，选定系统焦距为 370 mm；为了保证动态校准系统的高空间分辨率与使用方便性，探测器采用 512×512、15 μm×15 μm 规格斯特林制冷红外焦平面阵列。根据光学系统焦距 f'、视场角 ω 和探测器高 h 的三角关系：

$$\tan\omega=h/f' \tag{2}$$

可计算得到光学系统视场角为 1.12°×1.12°。

为了使校准系统工作性能最优，系统冷光阑效率应为 100%。为了保证实验室外测试要求，光学系统在−40~60 ℃应具有良好的工作性能且光学系统包络长度不能超过 200 mm。为了对不同波段的目标特性进行精确校准，光学系统中应留出带通滤光片接口。表 3 列出了动态校准系统光学系统的主要技术指标。

表 3 动态校准系统光学系统主要技术指标

Tab.3 Main technical index of optical system in dynamic calibration system

Index	Value
F/#	2
Band/μm	3.7−4.8
Focal length/mm	370
Field/(°)	1.12×1.12
Cold shield effectiveness	100%
Temperature/℃	−40−60
Length/mm	<200

3 动态校准系统光学系统设计

根据上文所述原理及指标，设计的动态校准系统光学系统光路图如图 4 所示。为了零件加工及检测的便捷性，在设计时采用以下材料搭配：抛物面主反射镜和 8 阶偶次非球面次反射镜，材料均为铝合金，连接主镜和次镜的支架采用钛合金，相比目前大多数情况下玻璃反射镜匹配殷钢的结构，可以做到更轻、更易加工和更易装调；透镜安装结构件、透镜筒均采用铝合金；4 片透镜采用 Si、Ge、ZnS 三种材料搭配，其中在 Ge 透镜和 ZnS 透镜上分别采用了一个 8 阶偶次非球面。如图 4 所示光路中，次反射镜至焦平面长度为 182 mm，带通滤光片放置于次反射镜与透镜之间。采用光学系统的光学传递函数可以表征光学系统的成像质量，光学系统在各温度条件下的传递函数曲线如图 5 所示，从图 5 可以看出：该光学系统在−40~60 ℃范围内成像质量接近衍射极限，说明该光学系统温度适应性强、成像质量优异。折反系统存在次镜遮拦。图 6 为系统在边缘视场考虑遮拦后的光线足迹图，可见边缘视场时仍然有 86.35%的光线能通过，表明该系统次镜遮拦较小、遮拦引起的能量损失较少。校准系统的精度与像面能

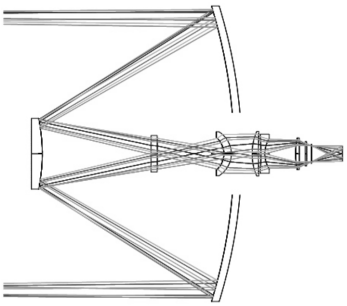
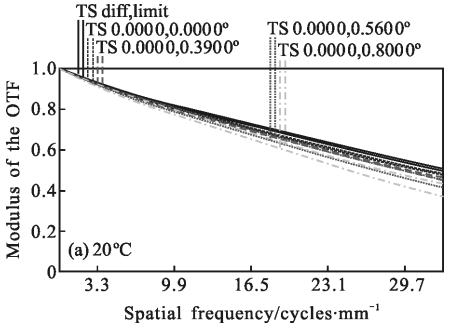


图 4 光学系统光路图

Fig.4 Light path diagram of the optical system



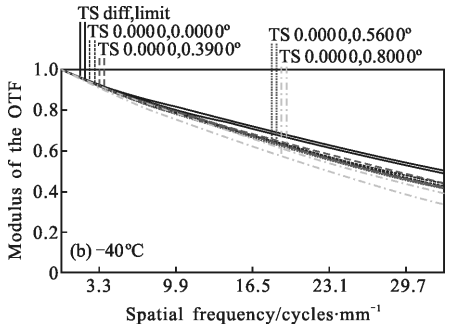


图 5 光学系统在-40~60 ℃下的传递函数曲线

Fig.5 MTF of the optical system at -40-60 ℃ temperature range

量均匀性有一定关系。图 7 为光学系统像面相对照度均匀性，边缘视场与中心视场的照度相差 10%左右，效果较好。

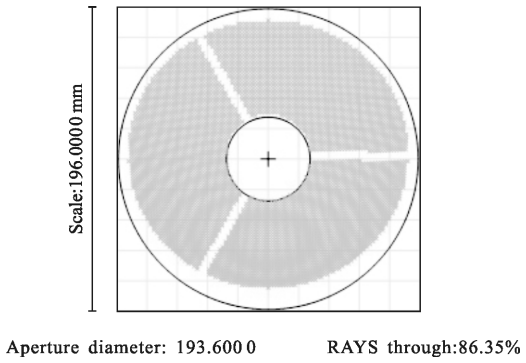


图 6 边缘视场光线足迹图

Fig.6 Footprint of the marginal field

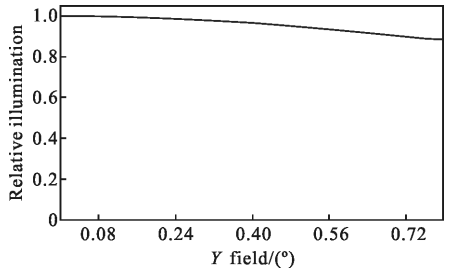


图 7 像面相对照度均匀性

Fig.7 Relative illuminance uniformity at the focal plane

4 杂散光分析

4.1 鬼像分析

鬼像是由透镜表面的剩余反射引起的，其在焦面形成一个或多个相伴目标而存在的“鬼目标”，严重干扰正常的成像或探测。任何带透镜的光学系统都必须对鬼像进行分析计算，因为如果在实际使用过程中发现鬼像，一般是难以消除的[7]。为精确计算光学系统焦面鬼像的分布情况，一般的近轴计算方法已经失效，需要建立更加精确的非序列计算模型。建立如图 9 所示的鬼像计算模型，分析动态校准系统光学系统焦面鬼像分布情况，如果焦面存在鬼像，则应在目标的周围出现一个或多个“鬼目标”。为提高分析计算针对性，可将剩余反射的比例恶化为 10%，由于鬼像能量相对目标能量较弱，为了更清晰地看出鬼像分布，将计算结果显示阈值下调，如图 9 所示，可见该光学系统焦面只有很强的目标以及均匀分布的背景杂光，说明该系统鬼像抑制效果良好。

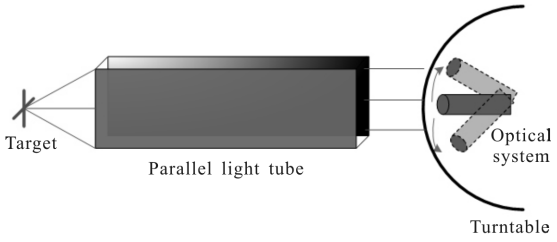


图 8 鬼像计算模型

Fig.8 Calculation model of ghost image

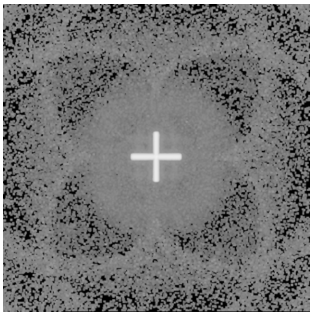


图 9 焦面能量分布情况(显示阈值下调到正常的 1/10 000)

Fig.9 Energy distribution on focal plane (threshold down to normal 1/10 000)

4.2 冷反射分析

冷反射是由于红外光学系统中剩余反射的存在，使得制冷探测器的冷表面被探测器自己看到，从

而在焦面形成冷的黑斑，严重影响红外光学系统的工作。尽管凝视型红外探测系统的冷反射效应可以通过后期的非均匀校正等图像处理措施解决掉[8-9]，但非均匀校正效果经常会随周围环境的温度变化而产生漂移，因此冷反射效应仍然是制冷型红外光学系统设计工作者需要关注的重要问题之一，尤其是需要作为标准去实时校准模拟器设备的精密动态校准系统，更需要关注冷反射效应。分析动态校准系统光学系统的冷反射效应时，应以探测器作为光源向前追迹光线，再分析光学元件反射回探测器的光线，若存在冷反射效应，则会在探测器表面形成明显的亮斑，该亮斑就是实际的冷反射黑色区域。为提高分析计算针对性，将剩余反射的比例恶化为 10%，冷反射分析结果如图 10 所示，可见像面接收到的冷反射能量分布均匀，没有冷反射黑斑出现，说明光学系统的冷反射抑制效果良好。

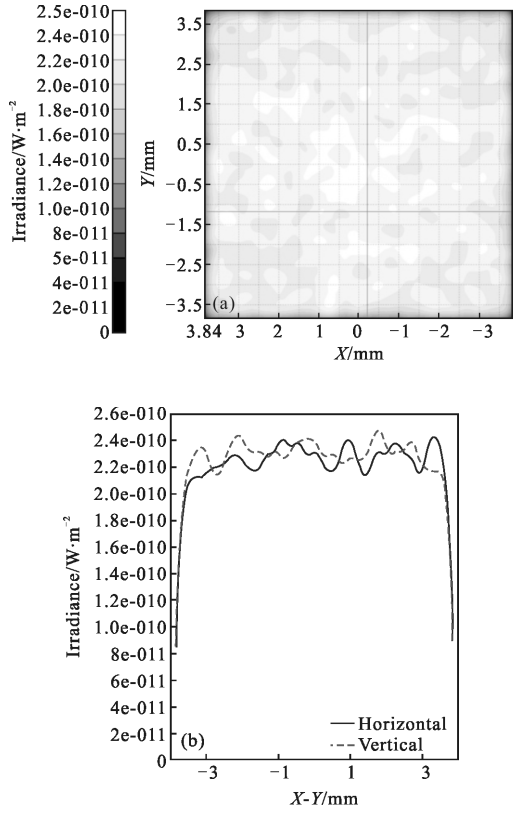


图 10 冷反射能量分布图

Fig.10 Energy distribution of Narcissus

5 结 论

动态校准系统是对红外目标模拟器进行实时校准的重要设备，一般应用于高灵敏度、低背景探测等领域，其具有实时性、复杂性和高精确性使得目前国内外对其研究较少，文中根据动态校准系统的使用特性指出了动态校准系统光学系统的特点，基于光学系统的特点，提出了光学系统设计的思路。在传统消热差理论基础上，考虑光机系统加工及装配合理性、工艺性，指出了该系统具体的无热化设计思想。最终通过光学材料和光机结构材料的合理搭配，设计了一种在-40~60 ℃范围内具有良好性能的红外目标模拟器动态校准系统光学系统，并对其鬼像、冷反射等杂散光特性进行了分析。该系统无特殊元件，易于加工、装调，同时成像质量良好，光线遮拦较小，像面照度均匀，不存在热成像缺陷，满足红外目标模拟器动态校准系统在复杂恶劣环境下的使用要求。

参考文献：

[1] Liang Pei, Zhu Mingyi. Development and application of infrared target simulator calibration system [J]. ***Journal of Infrared and Millimeter Waves***, 2003, 22 (4): 251-254. (in Chinese)
梁培, 朱明义. 红外目标模拟器校准系统的研制与应用[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(4): 251-254.

[2] Dai Jingmin, Xiao Peng. Review of infrared target simulator cal ibration system and its appl ications[J]. ***Chinese Journal of Scientific Instrument***, 2007, 28(4): 96-99. (in Chinese)
戴景民, 萧鹏. 红外目标模拟器校准系统研究与分析[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 96-99.

[3] Zhou Jun, Li Juan, Wang Qingfeng, et al. Optimized design of infrared opto-mechanical systems based on the spontaneous em ission suppression [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2015, 35(3): 0322003. (in Chinese)
周军, 李娟, 王庆丰, 等. 基于自发辐射抑制的红外光机系统优化设计[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0322003.

[4] Zhang Ying, Ding Xuezhuan, Yang Bo, et al. Design of three-lens athermalized and cooled midwave infrared objective [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(4): 0418005. (in Chinese)
张营, 丁学专, 杨波, 等. 三分离式消热差制冷型中红外物镜的设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0418005.

[5] Paul R Yoder, Jr. Optomechanical System Design [M]. Translated by Zhou Haixian, Cheng Yunfang. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese)

Paul R Yoder, Jr. 光机系统设计 [M]. 周海宪, 程云芳译. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[6] Sun Chiquan, Zhao Kan, Meng Junhe, et al. IR optical system design of roll-elevation seeker[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(2): 0204005. (in Chinese)
孙赤全, 赵侃, 孟军合, 等. 滚仰式导引头红外光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0204005.

[7] Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, et al. Optical system design and ghost analysis for ultraviolet star sensor[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(1): 0118003. (in Chinese)
朱杨, 张新, 伍雁雄, 等. 紫外星敏感器光学系统设计及其鬼像分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0118003.

[8] Liu Yang, An Xiaoqiang. Analysis and control of narcissus effect of cooling IR focal plane system [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2012, 32(2): 0222007. (in Chinese)
刘洋, 安小强. 制冷型红外焦平面系统冷反射效应的分析与控制[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222007.

[9] Yang Zheng, Qu Enshi, Cao Jianzhong, et al. The Narcissus study in the optical system for the infrared staring array[J]. ***Laser & Infrared***, 2008, 38(1): 35-38. (in Chinese)
杨正, 屈恩世, 曹剑中, 等. 对凝视红外热成像冷反射现象的研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(1): 35-38.