

文章编号: 1672-8785(2020)10-0037-07

用于建筑工程安全监控的红外 热像仪光学系统设计

王玮超

(洛阳建工集团有限公司, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 由于我国幅员辽阔, 不同地域的环境温度差别巨大。为满足建筑工程安全监控用红外热像仪的环境适应性要求, 采用了折射/衍射混合光学被动无热化设计方式。通过对不同红外光学材料透镜的光焦度进行合理分配, 设计了一种能够在 $-55\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内工作、视场为 $24.1^{\circ}\times 19.4^{\circ}$ 的小型化非制冷红外成像光学系统。该系统的工作波段为 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$, F 数为 1.0。设计结果表明, 系统结构简单、体积小且成像良好, 在空间频率 42 lp/mm 处的光学调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值大于 0.3, 可以满足应用需求。

关键词: 建筑工程; 监控; 红外热像仪; 光学系统

中图分类号: TN219; TU714 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.10.006

Design of Optical System of Infrared Thermal Imager for Safety Monitoring of Building Engineering

WANG Wei-chao

(Luoyang Construction Engineering Group Co., Ltd., Luoyang 471009, China)

Abstract: Due to the vast territory of China, the environmental temperatures in different regions vary greatly. In order to meet the environmental adaptability requirements of the infrared thermal imager for safety monitoring of building engineering, the passive uncooled design mode of refraction and diffraction mixed optics is adopted. Through the reasonable distribution of optical focal degree of the lens with different materials, a miniaturized uncooled infrared imaging optical system is designed, which can work in the range of $-55\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ and has a field-of-view of $24.1^{\circ}\times 19.4^{\circ}$. The operating wavelength range is $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$, and F number is 1.0. The design results show that the system has simple structure, small volume and good imaging quality. The value of optical modulation transfer function (MTF) at the spatial frequency 42 lp/mm is greater than 0.3, which can meet the application requirements.

Key words: building engineering; monitoring; infrared thermal imager; optical system

收稿日期: 2020-07-29

作者简介: 王玮超(1984-), 女, 河南洛阳人, 工程师, 学士, 主要研究方向为建筑设计与施工管理。

E-mail: whqcust@163.com

0 引言

近年来,随着科学技术的进步和经济的快速发展,我国已成为基建强国。各类工程规模不断扩大,大型建筑物层出不穷,基础设施的建设走向现代化,极大地体现了我国的综合实力。而建筑安全事故会造成人民经济财产的重大损失,并威胁施工人员和房屋建筑使用者的人身安全。因此,对建筑物的安全监控成为工程领域重点关注的问题之一。利用红外成像设备对建筑物的重点部位进行实时在线监控,能够快速发现人眼无法看到的内部安全故障并对其进行准确定位,从而指导施工人员及时修缮。该方法可以起到预防建筑安全事故和灾害发生、保障使用者生命财产安全和正常生产生活的作用,进而避免发生由建筑安全事故造成的生产停工、产能下降、能源损耗、火灾等事件^[1-2]。

红外热成像是在物体自身辐射的红外线经过成像系统后完成成像观察的。因此,红外热成像可以实现白天和夜间的全天时成像,具有全天候监控建筑目标的能力。此外,由于红外热成像具有非接触、整体温度分布显示的特点,红外热像仪目前主要用于监控建筑渗漏、隔热层缺失及损坏、电气设备、暖通空调系统和管路系统等。随着非制冷红外技术的发展,红外热像仪在建筑渗水、外墙空鼓、管道密封不良、电气故障等建筑安全监控中占有越来越重要的地位^[3-5]。

由于我国地域广阔,不同地区和季节的环境温度差异极大。红外热像仪光学系统材料的折射率随温度的变化会发生很大改变,因此工作温度的变化会引起光学成像系统像差改变和像面离焦,从而导致红外热像仪在高低温环境中的成像质量不佳并影响观察效果。为了消除或减小由温度效应带来的不利影响,通常采用一定的补偿技术(即无热化技术),使红外成像系统在不同的温度条件下均能清晰成像。

1 设计思路

红外光学系统的无热化实现方式主要有机

械主动无热化、机械被动无热化以及光学被动无热化三种。其中,机械主动无热化方式在系统中加入了能够测量周围环境温度变化的非接触式热电阻或热电偶器件,然后利用环境温度的变化量计算出由其引起的光学系统离焦量,并采用伺服控制系统驱动光学系统中的某一透镜沿着光轴方向移动,使得该系统的像面位置保持不动,以消除温度变化对红外光学系统成像质量的影响,从而实现无热化设计。

机械被动无热化方式利用高、低膨胀系数材料之间的配合,调节两种材料的长度,然后通过不同膨胀系数材料的膨胀和收缩,使红外光学系统中的某一片或整组透镜沿着光轴方向移动,并使不同温度条件下的像面位置均保持不变,从而实现光学系统的无热化。

光学被动无热化方式利用了不同透镜的红外光学材料具有不同光热膨胀系数的特点。在无热化设计中,不同的透镜采用光热膨胀系数不同的光学材料进行组合。这样可以使不同温度条件下由温度变化导致的系统像面移动量保持在系统的焦深范围以内,以消除由温度变化引起的光学系统离焦,进而实现系统的无热化。

机械主动无热化光学系统采用伺服系统来驱动温度补偿透镜沿光轴方向移动。因此,在光机结构设计中需要有相应的移动结构及伺服控制系统。而运动部件增加了系统的结构尺寸和后期的维护成本,同时降低了系统的可靠性。机械被动无热化光学系统的镜筒由高、低膨胀系数材料制成的内外筒组成,其结构较为复杂。光学被动无热化光学系统采用多种光学材料的组合,降低了光机结构设计的难度,提高了系统的可靠性和装配效率。它在对无热化镜头有大批量需求的应用领域中具有很大的优势^[6-7]。

在设计普通的光学被动无热化光学系统时,至少需要利用三种不同光热膨胀系数的材料进行组合。这使得光学系统的镜片数量增多,导致无热化镜头的透过率下降,不利于提

高系统的灵敏度。在传统的折射透镜表面上, 通过用金刚石车削加工出连续浮雕结构来形成衍射透镜。衍射光学透镜具有负色散特性, 为校正色差提供了条件, 且有利于减小系统的单色像差。同时, 折射元件的光热膨胀系数为负值, 而衍射元件的光热膨胀系数为正值。当折射透镜与衍射透镜组成折射/衍射混合系统时, 可以达到很好的无热化效果。

在红外光学系统中, 折射透镜的光热膨胀系数为

$$\chi_{f,r} = \frac{1}{f} \frac{df}{dt} = \alpha_g - \frac{1}{n-n_0} \left[\frac{dn}{dt} - \frac{dn_0}{dt} \right] \quad (1)$$

式中, α_g 为透镜所用的红外光学材料的热胀系数, n 为透镜材料的折射率, n_0 为环境介质的折射率。

衍射透镜的焦距是由环带的位置决定的, 即 $f = n_0 r_m^2 / 2m\lambda$ 。其中, r_m 为第 m 个环带的径向距离, λ 为工作波长。当温度改变时, 环带半径和折射率都会发生变化。由 $r_m(i) = r_m(1 + \alpha_g \Delta T)$ 可得, 与 α_g 相关的衍射透镜的光热膨胀系数为

$$\chi_{f,d} = \frac{1}{f} \frac{df}{dt} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dt} \quad (2)$$

由式(1)可以看出, 折射透镜的光热膨胀系数取决于所用材料的热胀系数 α_g 和折射率温度系数 dn/dt ; 由式(2)可以看出, 衍射透镜的光热膨胀系数取决于光学材料的热胀系数 α_g , 而与折射率温度系数 dn/dt 无关。

在进行光学被动无热化光学系统设计时, 需要满足光焦度方程、消色差方程和消热差方程:

$$\sum_{i=1}^n h_i \phi_i = \phi \quad (3)$$

$$\Delta f = \left[\frac{1}{h_1 \phi} \right] \sum_{i=1}^n h_i^2 \omega_i \phi_i = 0 \quad (4)$$

$$df/dt = \left[\frac{1}{h_1 \phi} \right] \sum_{i=1}^n h_i^2 \chi_i \phi_i = \alpha_h L \quad (5)$$

式中, h_i 为第一近轴光线在第 i 个透镜上的入射高度, ϕ_i 为第 i 个透镜的光焦度, ϕ 为总光焦度, χ_i 为第 i 个透镜所用光学材料的光热膨胀系数, ω_i 为光学材料的色散因子(取值为光

学材料阿贝数的倒数), α_h 为镜头机械结构所用材料的热胀系数, L 为镜头光机结构的长度。

在光学系统的像差校正过程中, 利用折射和衍射元件的光热膨胀系数分别为负值和正值的特性, 并结合不同种类的红外光学材料具有不同光热膨胀系数的特点, 选取多种红外光学材料进行组合, 同时引入衍射面进行无热化设计, 使红外光学镜头及其机械结构由环境温度变化引起的像面位置移动量互相补偿, 从而保证红外光学系统在不同环境温度条件下均能够清晰成像。

2 设计参数

随着红外技术的发展, 640×512 元非制冷型红外探测器已经得到了广泛应用。本文针对像元数为 640×512 、像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 、工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的新型非制冷长波红外探测器进行了无热化光学系统设计(参数见表 1)。

表 1 光学系统设计参数

参数	设计值
像元数	640×512 (非制冷)
像元尺寸	$12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$
工作波段	$8 \sim 12 \mu\text{m}$
F 数	1.0
视场	$24.1^\circ \times 19.4^\circ$
工作温度	$-55^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$

3 设计结果及像质评价

3.1 设计结果

下面介绍利用光学设计软件进行无热化设计的主要流程。首先, 在常温下设计出一个像质较好的系统。由于该系统视场较大, 轴外像差和高级像差都比较大。针对高级像差校正, 设计中引入了高次非球面和衍射面, 可以较好地平衡轴外和轴上像差。

系统采用折射/衍射混合设计。由于 ZnSe 与 ZnS 材料的折射率和温度特性均相差不大, 且 ZnS 的加工精度与透过率不高, 因此系统的

光学材料选择常用的 Ge 和 ZnSe。首先建立四片式结构初始模型,完成常温条件下的优化设计。然后通过建立不同温度条件下的多重结构来分析系统像质变化情况,并在系统中引入非球面来消除系统球差。最后采用无热技术进行优化,即利用衍射面的光热膨胀系数与红外光学材料不同的特点以及不同的色散特性来进行消色差和无热化设计,使得成像质量在各种温度条件下都满足要求。

该无热化光学系统(见图 1)由四片透镜组成。其中三片为非球面透镜,一片为球面透镜。第 1 片和第 3 片透镜的后表面为非球面基底上的衍射面,第 2 片为非球面透镜,第 4 片为球面透镜。第 1 片和第 3 片透镜的光学材料均为 ZnSe。第 2 片和第 4 片透镜的光学材料均为单晶 Ge。

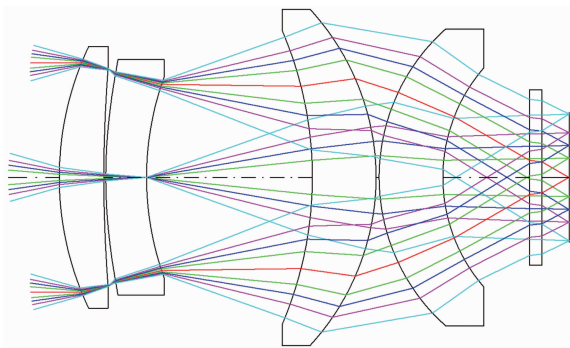


图 1 红外热像仪光学系统的光路图

3.2 成像质量评价

对于光学成像系统而言,MTF 是像与物

的调制度之比,是空间频率的函数。高频、中频和低频部分分别反映了物体的细节、层次和轮廓传递情况。这种方式是光学成像系统性能评价中最为全面的判据。探测器的像元尺寸为 $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$,特征频率为 42 lp/mm。在 $20\ ^\circ\text{C}$ 、 $-55\ ^\circ\text{C}$ 和 $70\ ^\circ\text{C}$ 温度条件下,光学系统的 MTF 均大于 0.35 (分别见图 2、图 3 和图 4),表明该系统成像良好,可满足应用需求。

在几何光学的成像过程中,由于光学系统存在像差,物面上一点发出的光线经过光学系统成像后在像面上不再集中于一点,而是形成一个分布在一定范围内的几何像斑(称为点列图)。为像质评价提供依据的点列图是一种方便易行的方法。以弥散斑直径的均方根值为直径的圆包含了大约 68% 的能量。在 $20\ ^\circ\text{C}$ 、 $-55\ ^\circ\text{C}$ 和 $70\ ^\circ\text{C}$ 温度条件下,光学系统的点列图分别如图 5、图 6 和图 7 所示。可以看出,该系统的弥散斑直径均方根的最大值为 $19.2\ \mu\text{m}$,而艾里斑直径为 $24.4\ \mu\text{m}$ 。因此,弥散斑直径小于艾里斑直径,可以满足应用要求。

图像畸变是指图像与原实物相比的变形情况,主要表现在边缘视场上。中心视场的畸变为 0,并且不影响图像的清晰度。图 8 为光学系统的场曲与畸变图。可以看出,边缘视场畸变在 2.3% 以内,0.7 视场畸变在 1.2% 以内,可以满足系统的使用要求。

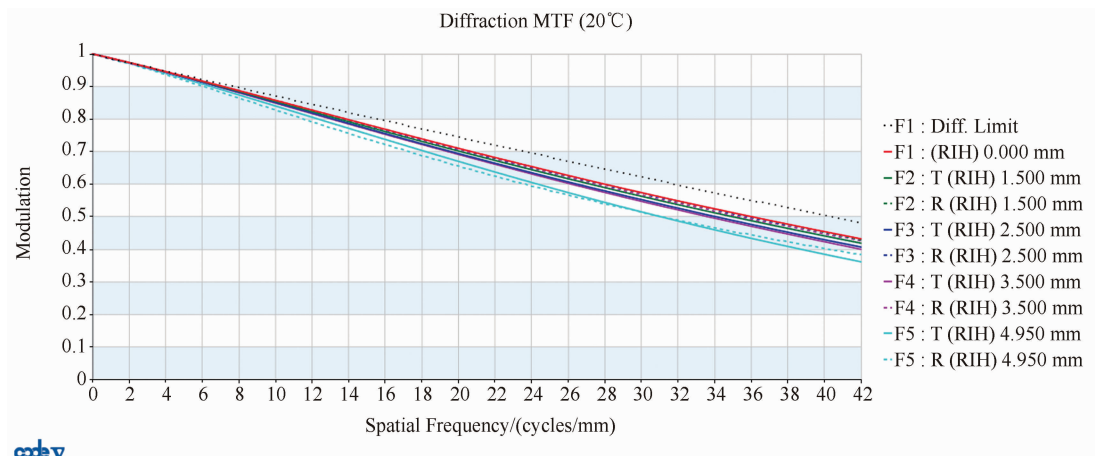


图 2 常温 $20\ ^\circ\text{C}$ 时的 MTF 图

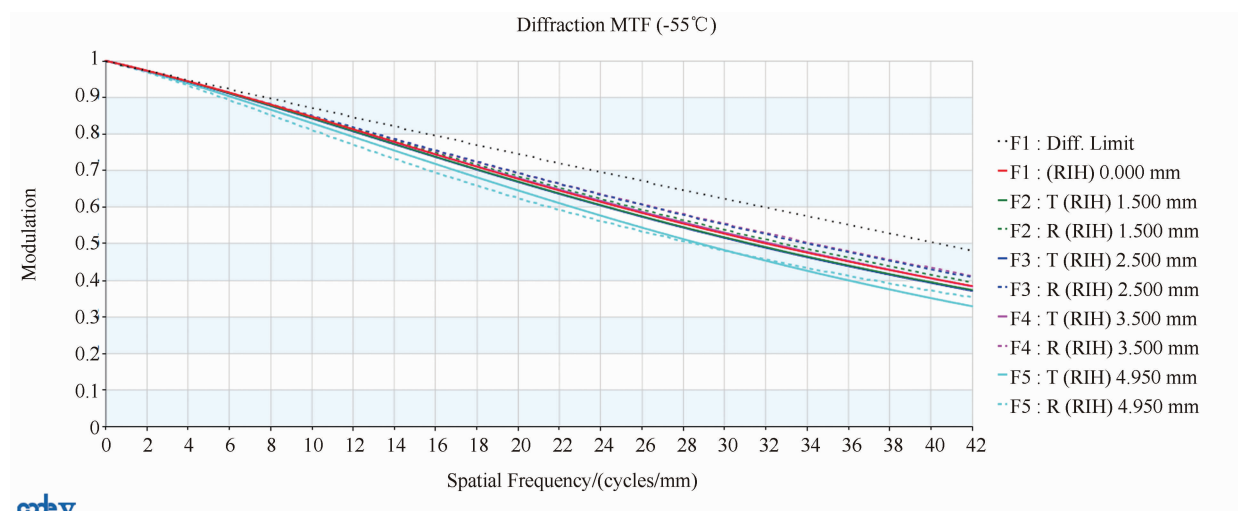


图 3 低温 -55 °C 时的 MTF 图

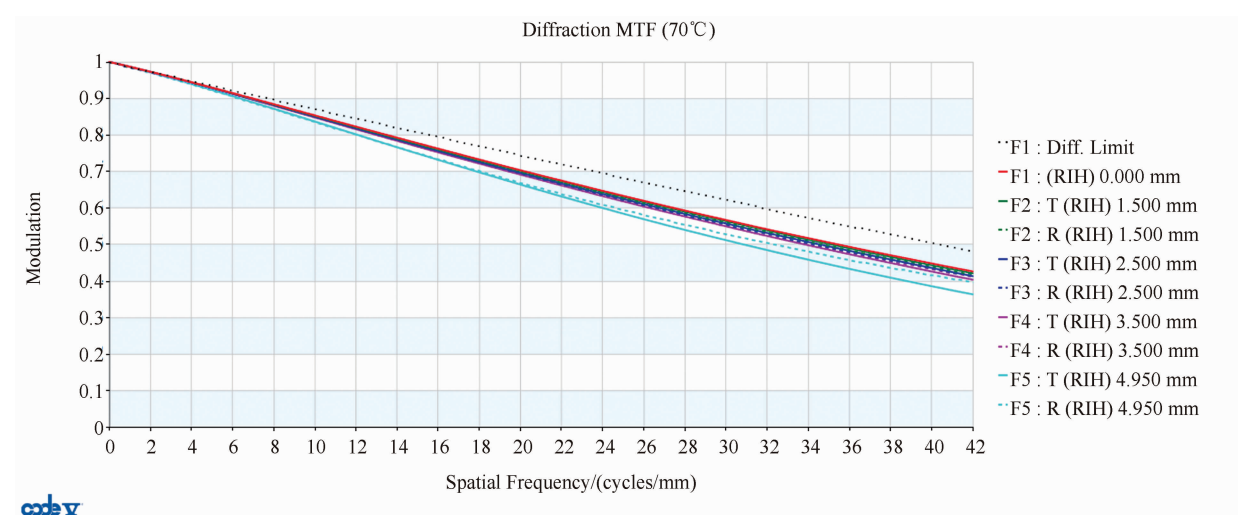


图 4 高温 70 °C 时的 MTF 图

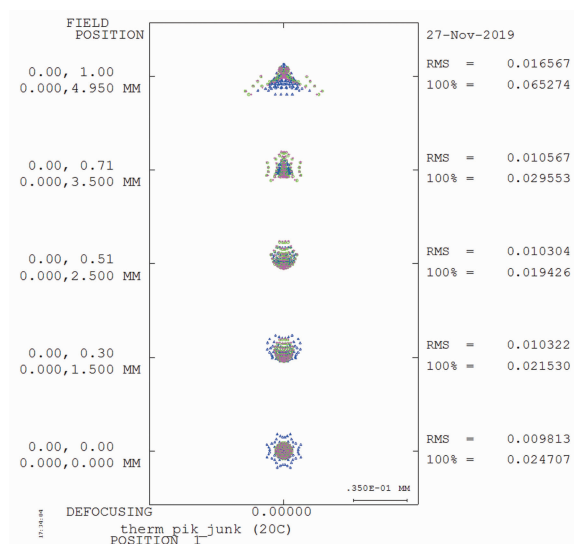


图 5 常温 20 °C 时的点列图

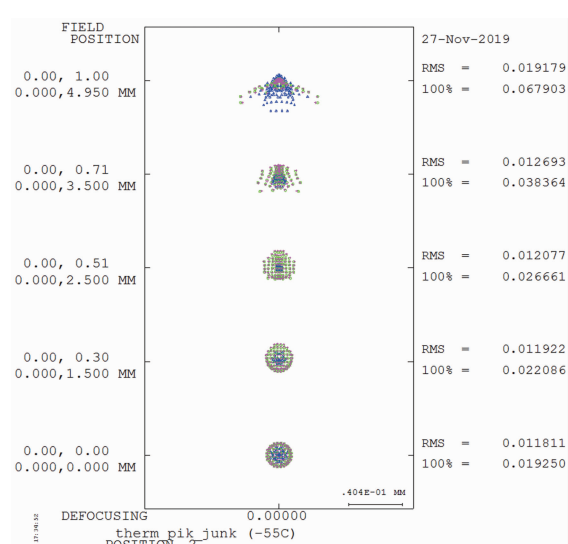


图 6 低温 -55 °C 时的点列图

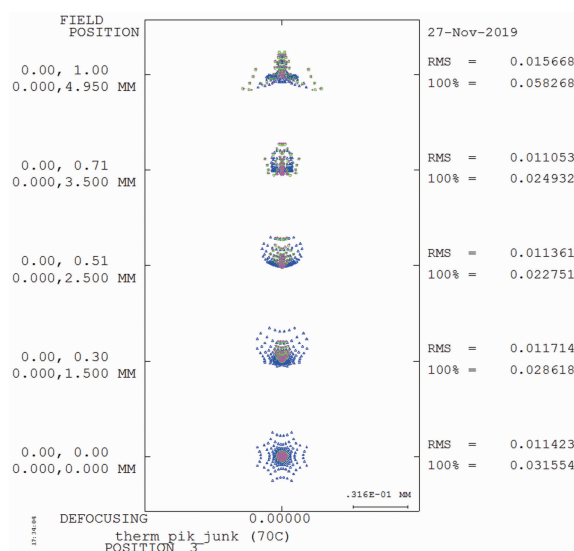


图 7 高温 70 °C 时的点列图

通过对各透镜及镜筒的公差进行分配，可以使整个光学系统的公差灵敏度降至较低值，从而更好地保障产品的性能。表 2 列出了主要公差值。图 9 所示为公差曲线。

经分析可知，在以上公差范围内，光学系统在 42 lp/mm 处的中心视场、0.7 视场和边缘

表 2 主要公差参数

主要参数	公差值
光圈	3
局部光圈	0.5
镜片厚度	± 0.02 mm
镜片间距	± 0.02 mm
偏心	± 0.02 mm
倾斜	1'

视场的 MTF 达到 0.40、0.35 和 0.28 的概率均超过 90%。

4 结论

本文对用于建筑工程监控的宽温无热化红外光学系统设计进行了研究。基于目前应用成熟的像元数为 640×512 、像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的非制冷长波红外探测器，采用光学被动无热化方式设计了一种在 $-55 \sim 70$ °C 宽温范围内均能实现良好成像且视场为 $24.1^\circ \times 19.4^\circ$ 的非制冷长波红外成像系统。该系统结构简单紧凑、后截距大且成像质量良好，因此

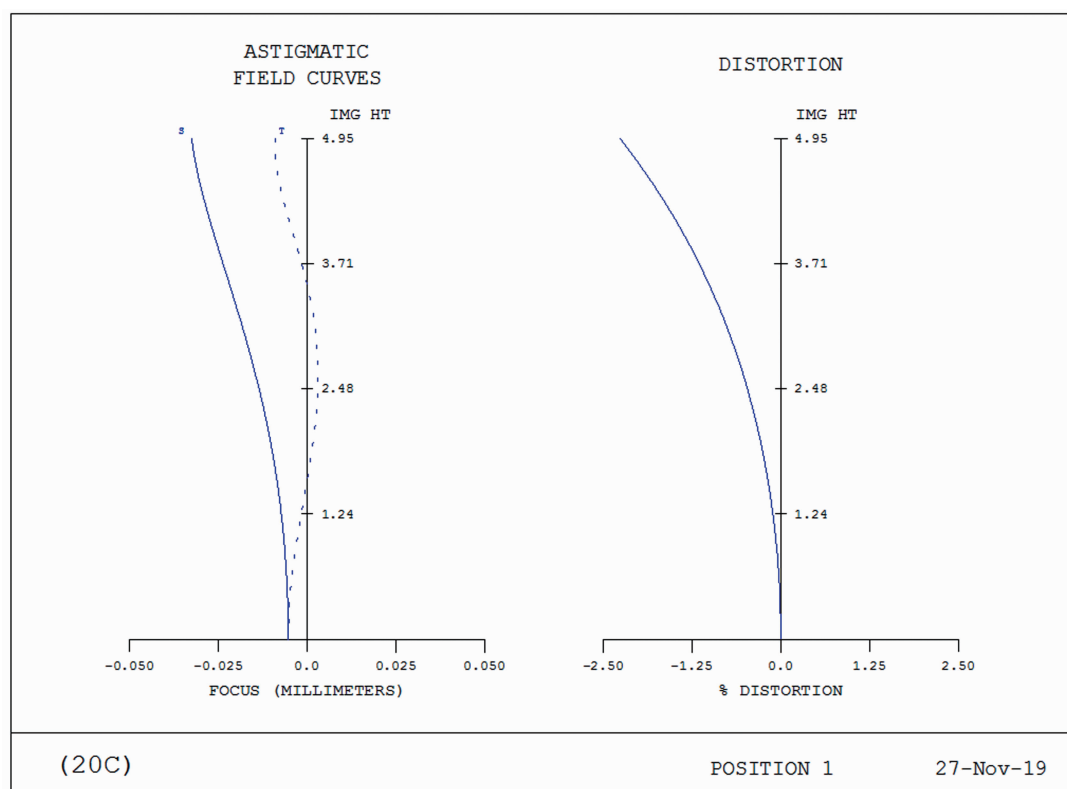


图 8 光学系统的场曲与畸变图

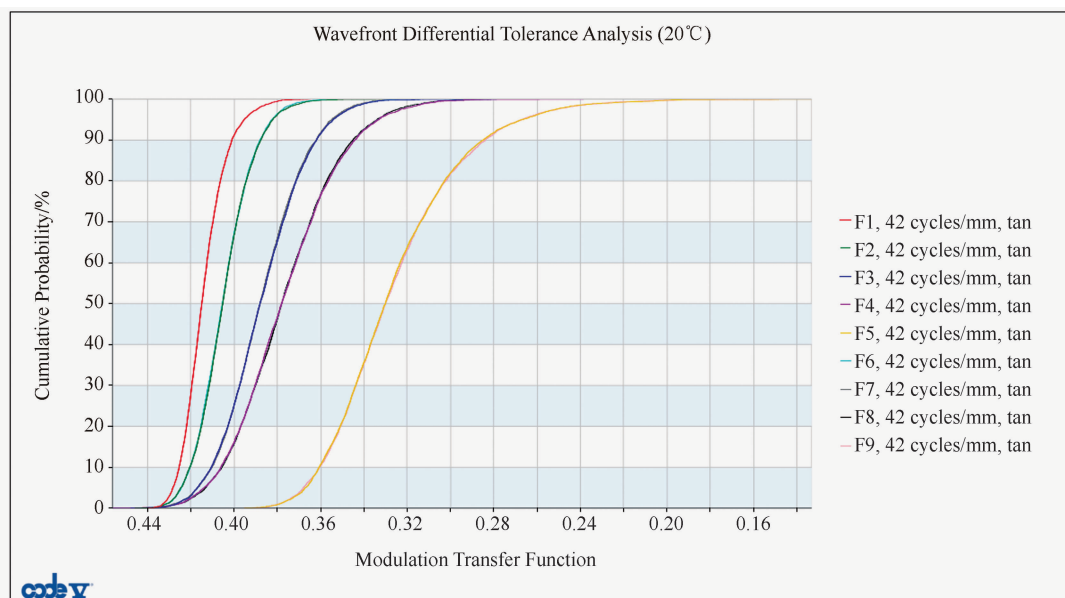


图 9 公差曲线

在建筑物安全监控、建筑质量检测以及建筑物节能检测等领域具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 高治军. 基于无线传感器网络的建筑安全监测技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [2] 曹通宁. 高层房屋建设项目施工安全风险评估与控制 [D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [3] 王丽萍. 基于多传感器信息融合技术的火灾探测系统研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [4] 雷述宇, 方辉, 刘俊, 等. 国产 640×512 非制冷

氧化钒红外焦平面探测器的研制 [J]. 红外技术, 2013, 35(12): 759-763.

- [5] 李煜, 方辉, 谭果. 高性能 17 μm 非制冷氧化钒红外焦平面探测器的研制 [J]. 红外技术, 2017, 39(9): 785-797.
- [6] 吴海清, 曾宪宇, 王朋. 微型长波红外无热化光学系统设计 [J]. 红外, 2019, 40(3): 1-5.
- [7] 吴海清, 田海霞, 崔莉. 大视场大相对孔径长波红外机械无热化光学系统设计 [J]. 红外, 2015, 36(8): 1-4.