文章编号：1672-8785(2020)12-0036-07

用于建筑施工质量检测的红外热成像光学系统设计

王玮超

（洛阳建工集团有限公司，河南 洛阳 471009）

摘 要：为适应不同类型建筑的红外非接触式安全与质量检测需求，针对像元尺寸为 14 μm×14 μm 的 1024×768 元高性能非制冷长波红外探测器，采用变倍组光焦度为负值、补偿组光焦度为正值的正组补偿结构形式，并合理分配各组透镜的光焦度，设计了一种焦距为 30～180 mm、工作波段为 8～12 μm、*F* 数为 1.2 的大变倍比非制冷红外连续变焦成像光学系统，然后对其成像效果进行了分析。结果表明，该系统在变焦过程中成像质量良好，在探测器 36 1p/mm 特征频率处的光学调制传递函数(Modulation Transfer Function，MTF)值大于 0.3，满足应用需求。

关键词：建筑工程；质量检测；光学设计；连续变焦系统

中图分类号：TN219；TU714 **文献标志码**：A

DOI：10.3969/j.issn.1672-8785.2020.12.006

Design of Infrared Thermal Imaging Optical System for Construction Quality Inspection of Buildings

WANG Wei-chao

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

Abstract: In order to adapt to safety and quality inspection requirements of different types of constructions based on the infrared non-contact method, a large zoom-ratio uncooled infrared continuous zoom imaging optical system with a focal length of 30～180 mm is designed based on a new type of high-performance uncooled longwave infrared detector whose resolution is 1024×768, and pixel size is 14 μm×14 μm. The system uses positive group compensation structure whose variable times group focal degree is negative and compensation group focal degree is positive, and distributes the focal degree of each lens group reasonably as well. Its operating band is 8–12 μm, and *F* number is 1.2. The imaging effect of the system is analyzed, and the results show that the system has a good image quality in the zoom process, and the MTF value at the detector characteristic frequency 36 1p/mm is greater than 0.3, which meets the application requirements.

Key words: construction engineering; quality inspection; optical design; continuous zoom system

收稿日期：2020-08-19

作者简介：王玮超(1984-)，女，河南洛阳人，工程师，主要研究方向为建筑工程设计。

E-mail: whqcust@163.com

0 引言

近年来，随着国内科技的进步以及经济的发展，基础设施建设和房地产市场的规模逐步扩大，各类科技含量高、施工难度大的大型建筑工程也日益增多。这有力提升了我国的综合实力。然而，由于建筑施工涉及的技术领域众多、过程程序复杂，由此带来的安全事故层出不穷。在建设过程以及后期使用中出现的任何建筑安全事故均会造成人民群众的经济财产损失甚至威胁人身安全。这对施工过程中的安全管理以及监理单位的质量检测等均提出了新的挑战[1-3]。如何在建设施工以及监理单位的质量检测过程中及早发现建筑物存在的缺陷是质检单位、建设单位、监理单位和施工单位的研究热点，并已成为亟需重点解决的问题之一。

然而大量的建筑工程缺陷位于建筑物的内部，传统的目测手段已不能检测出这些缺陷（如混凝土内部缺陷、电气接触不良等）。红外热像仪通过对物体表面辐射的红外线进行成像，反映了物体表面温度场的分布情况。例如：在太阳光照射下，建筑物外墙的表面温度会升高，墙体空鼓部位的温度比正常部位高。因此，存在外墙空鼓、包层脱落等缺陷的部位，在红外热图像上表现出与正常部位不同的特征。检测人员可通过该图像快速发现和定位建筑质量缺陷的部位。

根据物体表面温度场定量测量物体的温度分布，是一种被动的非接触式检测手段。在建筑工程安全与质量检测领域，它具有远距离、非接触以及不影响被测物体的优势，并已广泛应用于建筑物外墙保温层空鼓与剥落检测、结构件的裂缝与空洞检测、电气接头缺陷检测等方面。该方法可以帮助质检单位、建设单位、监理单位和施工单位及时发现隐蔽问题，从而尽早寻求有效的解决方法以避免安全事故的发生。

随着芯片制造工艺的进步，非制冷红外探测器的像元尺寸不断减小，同时也实现了大面阵、高帧频以及高灵敏度。制造工艺的发展极大地降低了探测器的生产成本，并有力推进了非制冷红外系统在各领域的广泛应用[4-5]。

焦距固定的红外成像光学系统可以满足固定目标的检测需求。然而现代社会中的建筑物种类繁多且结构复杂，检测人员很难靠近某些需要检测的目标。定焦红外成像光学系统难以满足此类目标的检测要求。而连续变焦红外光学系统的视场则可根据观察需要进行调节。大视场可用于大范围的检测，小视场可用于远距离检测不易靠近的目标或者详查疑似缺陷区域的细节。根据观察需要，可以调整变焦系统的焦距并选择合适的视场，从而有效提高建筑施工质量的检测效率[6-7]。

本文针对像元数为 1024×768、像元尺寸为 14 μm×14 μm 的高性能非制冷长波红外探测器，设计了一种焦距在 30～180 mm 范围内连续可变的大靶面光学系统。该系统适用于各类建筑工程的安全检测、安防监控等领域。

1 设计参数

本文基于烟台艾睿光电科技有限公司生产的 1024×768 元非制冷红外探测器设计了一种连续变焦光学系统。该探测器的像元尺寸为 14 μm×14 μm，响应波长为 8～12 μm。表 1 列出了这种光学系统的设计参数。

表 1 光学系统设计参数

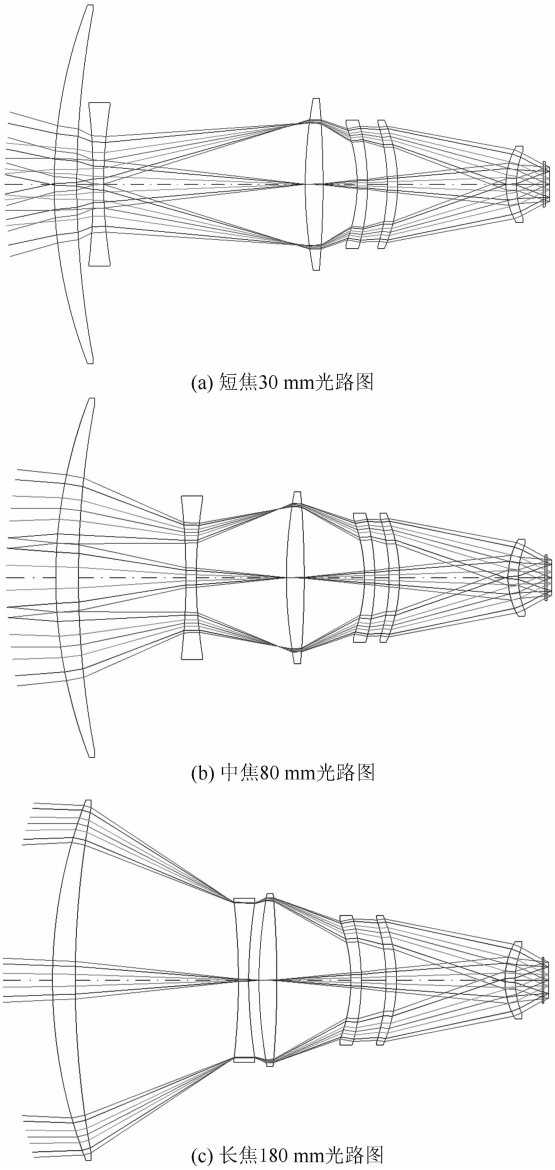
参数	数值
探测器像元数	1024×768（非制冷型）
像元尺寸	14 μm×14 μm
光谱范围	8～12 μm
F 数	1.2
焦距	30～180 mm
视场	26.8°×20.3°～4.6°×3.4°
像面直径	18 mm

2 设计结果及成像质量分析

2.1 设计结果

采用变倍组光焦度为负值、补偿组光焦度为正值的正组补偿结构形式，并利用光学优化设计软件进行像差校正。最终设计的连续变焦

光学系统由六片透镜组成。通过变倍与补偿透镜的移动能够实现焦距在 30～180 mm 范围内连续变化。图 1 为该系统的光路图。其中，第五片透镜的光学材料为硒化锌，其余五片透镜的光学材料均为单晶锗。第四片透镜的后表面与第六片透镜的前表面均为非球面。



(a) 短焦30 mm光路图

(b) 中焦80 mm光路图

(c) 长焦180 mm光路图

图 1 连续变焦光学系统的光路图

2.2 成像质量分析

对于成像光学系统，MTF 为像与物的调制度之比。它是空间频率的函数，能够表示目标背景经过成像系统后在各个频率分量上的对比度变化情况。高频、中频以及低频部分分别反映了物体细节传递、层次传递以及轮廓传递情况。MTF 是评判成像光学系统性能最全面的判据。在分析连续变焦光学系统的成像质量时，选取短焦、中焦、长焦三个点进行评价。图 2、图 3 和图 4 分别为本文光学系统在短焦 30 mm、中焦 80 mm 和长焦 180 mm 条件下的 MTF 曲线。像元尺寸为 14 μm×14 μm 的 1024×768 元非制冷探测器的奈奎斯特频率为 36 lp/mm。从图 2、图 3 和图 4 中可以看出，在其奈奎斯特频率处，不同视场条件下光学系统的 MTF 值均大于 0.3，表明系统成像优良，满足使用要求。

在几何光学的成像过程中，由于光学系统存在像差，由物面上一点发出的光线经过光学系统成像之后，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)。用点列图评价光学系统的像质是一种方便易行的方法。以光学系统弥散斑直径的均方根(Root Mean Square，RMS)值为直径的圆包含了大约 68%的能量。图 5、图 6 和图 7 分别为本文光学系统在短焦 30 mm、中焦 80 mm 和长焦 180 mm 条件下的点列图。可以看出，该系统在不同焦距段的 RMS 弥散斑直径的最大值为 20.4 μm，而它的艾里斑直径为 29.3 μm。因此，弥散斑直径小于艾里斑直径，满足应用要求。

图像畸变是指经过光学系统成像后图像与原实物相比的变形情况。畸变主要表现在边缘视场上，中心视场的畸变为 0，而且畸变不影响图像的清晰度。图 8、图 9 和图 10 分别为本文光学系统在短焦 30 mm、中焦 80 mm 和长焦 180 mm 条件下的场曲与畸变图。可以看出，该系统在短焦 30 mm 时的畸变小于 3%，在长焦 180 mm 时的畸变小于 2.5%，满足应用要求。

在连续变焦镜头结构中，通常采用变焦凸轮来带动变倍组与补偿组进行移动。将变倍组和补偿组透镜分别装在两个滑架上，并在每个滑架上固定一个沿凸轮曲线槽运动的导钉。在变焦过程中，伺服控制系统控制电机来驱动变

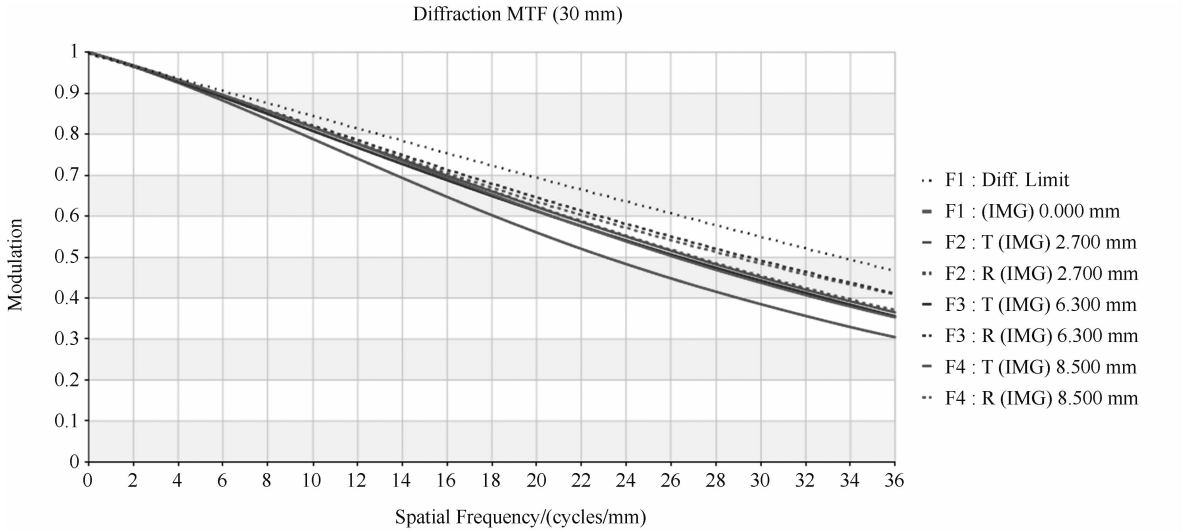


图 2 短焦 30 mm 时的系统 MTF 曲线

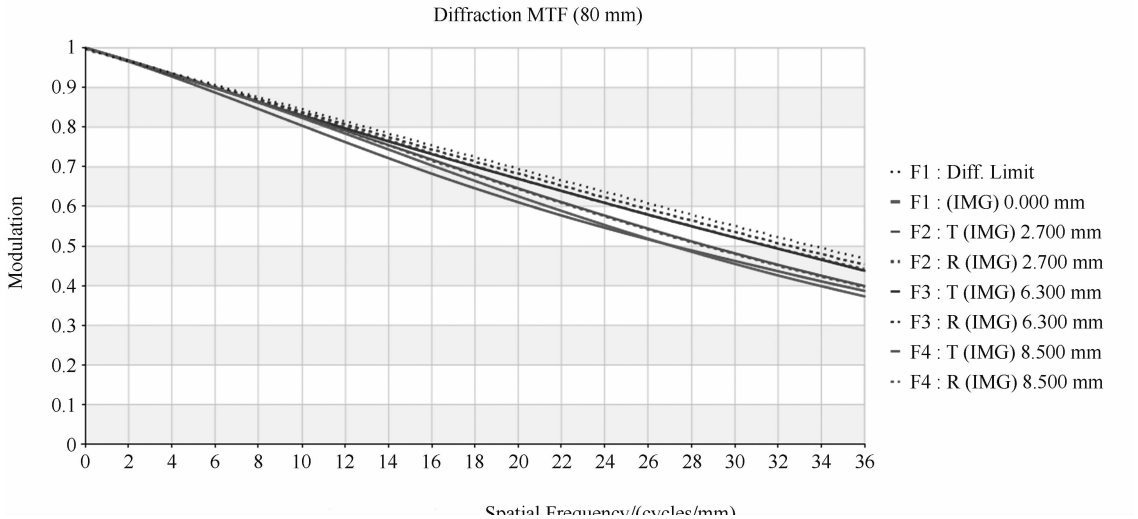


图 3 中焦 80 mm 时的系统 MTF 曲线

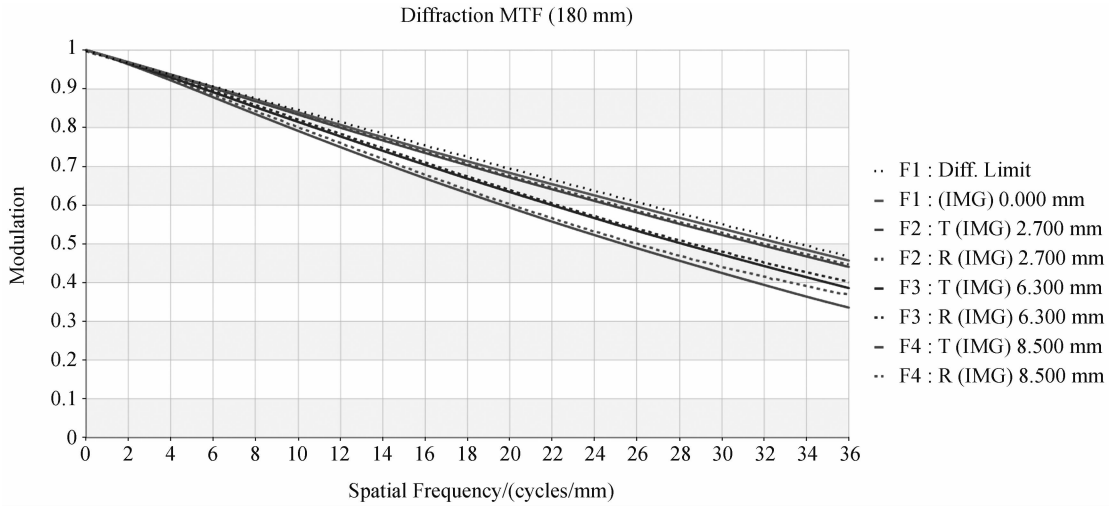


图 4 长焦 180 mm 时的系统 MTF 曲线

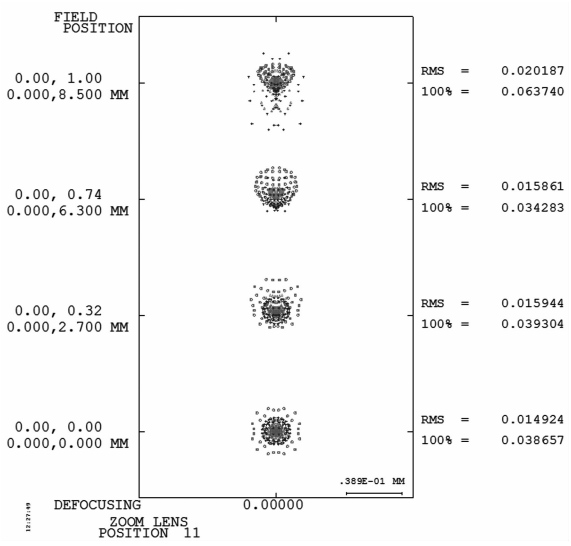


图 5 短焦 30 mm 时的系统点列图

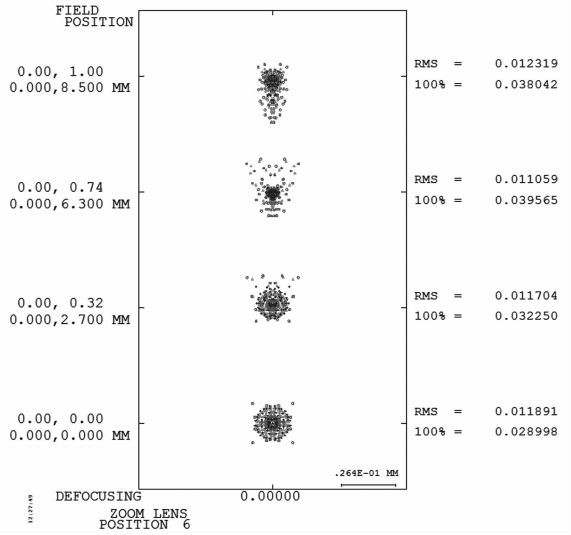


图 6 中焦 80 mm 时的系统点列图

焦凸轮转动，使导钉沿着凸轮槽运动，并带动变倍透镜与补偿透镜按变焦曲线规定的方式沿着光轴运动。采用变焦凸轮结构形式时，其伺服控制系统无需复杂的控制算法，因此系统可靠性得到了有效提升。此外，随着数控加工技术的进步，导钉与凸轮槽之间的配合精度得到了很大的提高。装配后的系统具有运动过程空回小、变焦过程无跳动等优点。由于变焦凸轮曲线槽是在数控机床中根据变焦曲线数据加工而成的，连续变焦光学系统中变焦曲线的拟合是连接光学设计与光机结构设计的关键环节。图 11 所示为焦距在 30～180 mm 范围内变化时

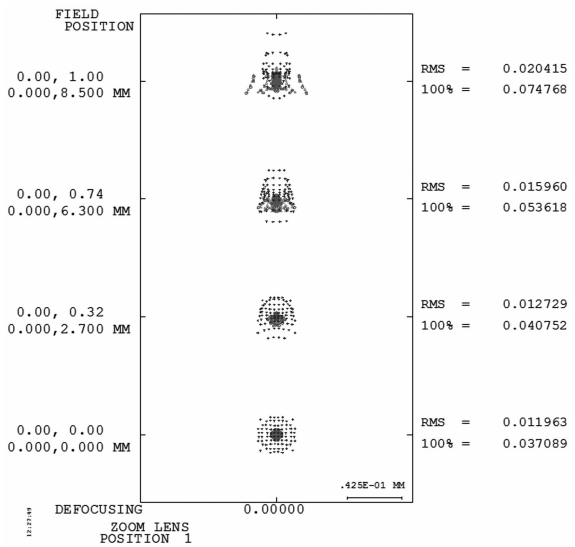


图 7 长焦 180mm 时的系统点列图

变倍组与补偿组的运动轨迹曲线。可以看出，在焦距变化过程中，该系统变倍组与补偿组的运动过程连续，且不存在突变点，可有效避免连续变焦系统在变焦过程中产生跳变以及在高低温极限环境下出现抱死与卡滞现象。

3 结论

本文对用于建筑施工安全监测的连续变焦红外光学系统设计进行了研究。针对像元尺寸为 14 μm×14 μm 的 1024×768 元非制冷长波红外探测器，设计了一种 30～180 mm 连续变焦的非制冷长波红外成像光学系统。该系统结构简单紧凑、后截距大，并且有良好的成像质量，在建筑物安防监控、建筑节能与质量检测等领域具有广阔的应用前景。

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

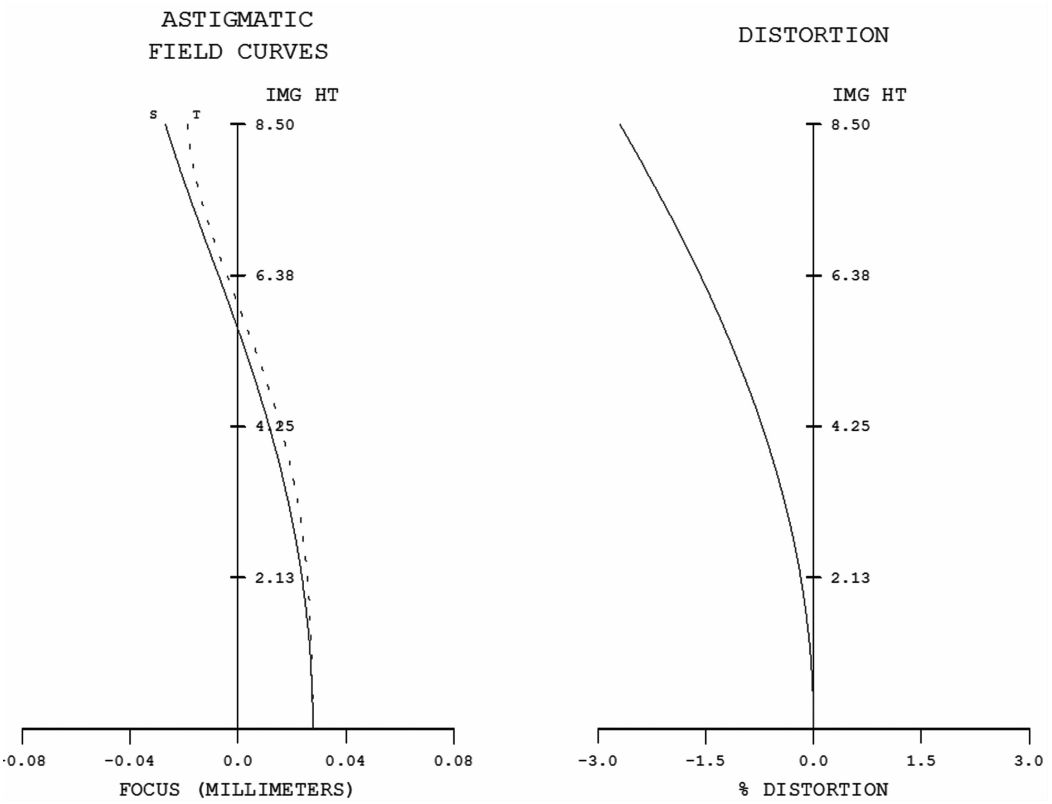


图 8 短焦 30 mm 时的系统场曲与畸变图

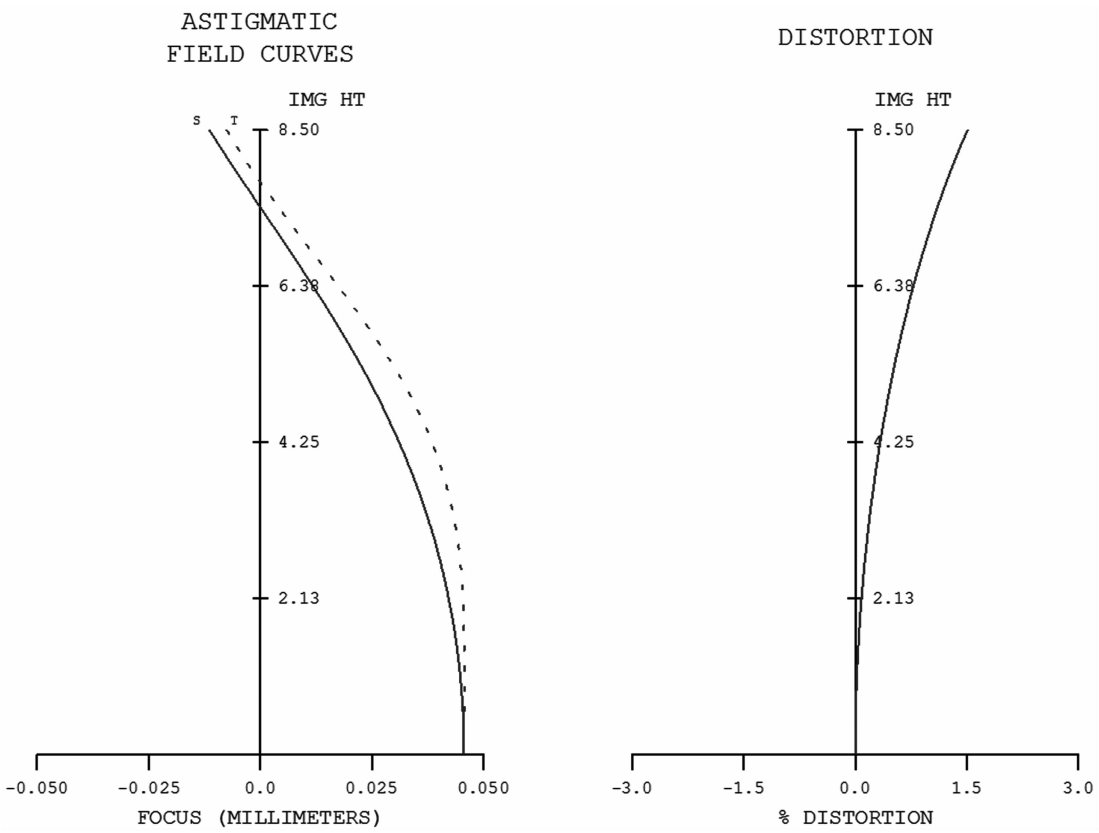


图 9 中焦 80 mm 时的系统场曲与畸变图

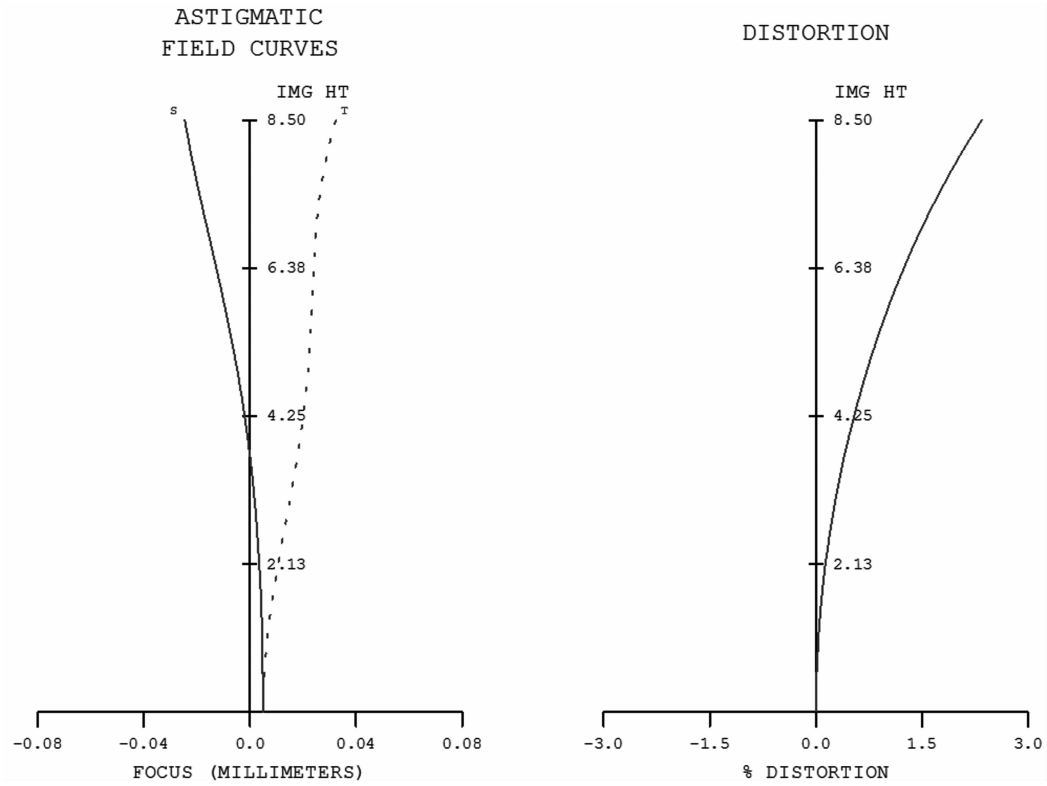


图 10 长焦 180 mm 时的系统场曲与畸变图

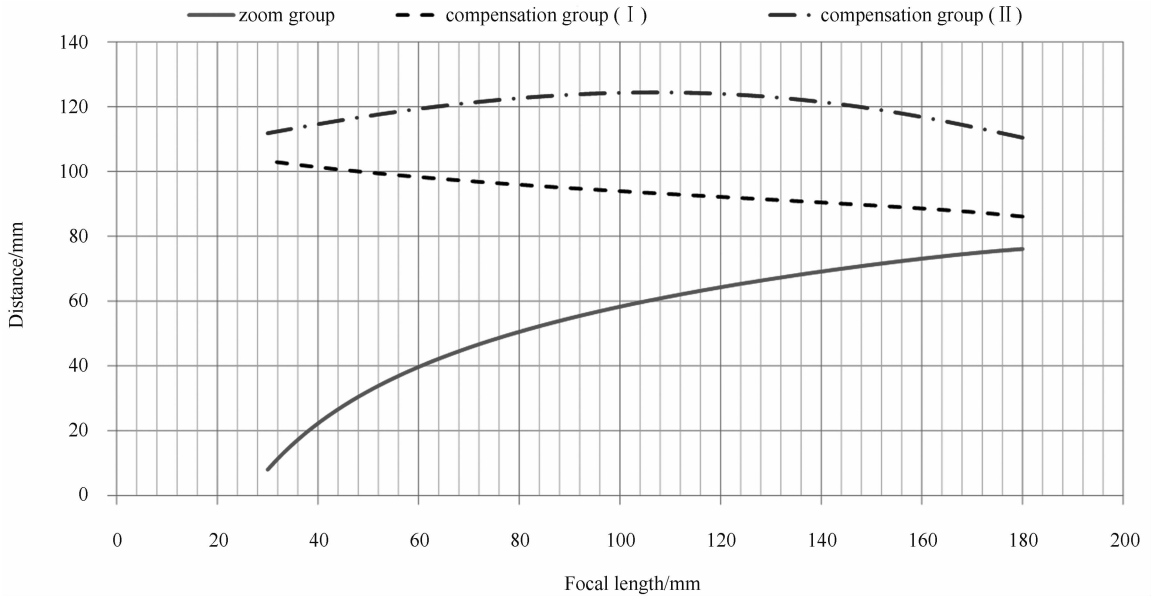


图 11 光学系统变倍组与补偿组的变焦运动曲线

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, 李同海, 赵新亮, 等. 大靶面中波红外连续变焦光学系统设计 [J]. **红外**, 2019, **40**(1): 7-10.

[7] 吴海清, 王朋. 小型化大面阵非制冷红外连续变焦光学系统设计 [J]. **红外**, 2020, **41**(2): 1-6.