

红外双反射镜折转光学系统的 MTF 测量

黄 声, 李桂秀, 郭怡君, 薛开勇, 李晓斌, 徐志文, 管照阳
(北方夜视科技研究院集团有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 为了压缩总长度, 红外热像仪普遍采用双反射镜折布局 (U 型) 及箱式壳体, 而现有传函仪仅能测量非折转布局 (一字型) 的光学系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF), 导致传函仪无法接到 U 型光学系统的像面, 因此无法测量其 MTF。为了解决该难题, 本文采用光瞳衔接的方式, 设计和加工一个中继镜组把 U 型光学系统的像面引出, 通过测量组合系统的 MTF, 再计算出 U 型光学系统的 MTF, 从而解决其 MTF 测量的难题。然后使用 6 个同一个型号的红外热像仪对测量方法进行验证, 在排除影响测量的干扰因素以后, 通过测量组合系统 MTF, 再计算出 U 型光学系统的 MTF。同时, 在测量过程中发现 5#、6#红外热像仪的 U 型光学系统的 MTF 下降较多, 通过红外中心偏差测量仪的测量, 发现第三、四镜片的中心偏差较大, 故重新装调和控制, 从而使 U 型光学系统的 MTF 有大幅提升。该方法为 U 型光学系统的 MTF 测量和性能提升提供了新的思路。

关键词: 双反射镜折转; MTF 测量; 光瞳衔接

中图分类号: TN205 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)01-0099-08

MTF Measurement Method For Infrared Dual-Mirror-Refracted Optical System

HUANG Sheng, LI Guixiu, GUO Yijun, XUE Kaiyong, LI Xiaobing, XU Zhiwen, GUAN Zhaoyang
(North Night Vision Science & Technology Research Institute Group Co. Ltd., Kunming 650223, China)

Abstract: To compress their total length, infrared thermal imagers commonly have a double-reflector folded layout (U-shaped) and a box-shaped shell. Existing transmission instruments can only measure the modulation transfer function (MTF) of optical systems with a non-folded (straight) layout owing to the inability of the transmission instrument to receive the image plane of U-shaped optical systems. To solve this problem, this study used the pupil connection method and designed and processed a relay lens group to direct the image plane of the U-shaped optical system. The MTF of the U-shaped optical system was calculated by measuring the MTF of the combined system, thereby solving the MTF measurement problem. Six infrared thermal imagers of the same model were used to verify the measurement method. After eliminating the interference factors affecting the measurements, the MTF of the U-shaped optical system was calculated by measuring the MTF of the combined system. During measurement, the the U-shaped optical system MTF of infrared thermal imagers 5 and 6 decreased significantly. Using an infrared center-deviation measuring instrument, it was found that the center deviations of the third and fourth lenses were relatively large. Therefore, they were reinstalled and controlled, resulting in a significant improvement in the MTF of the U-shaped optical system. This method provides a new approach for MTF measurement and performance improvement in U-shaped optical systems.

Key words: double reflective mirror folding, MTF measurement, pupil convergence

0 引言

调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 是一个准确、客观并且定量的像质评价指标,

用它评价光学系统像质, 被公认为最有效、最全面的方法。据查阅的资料^[1], 在光学系统的设计、加工和装调中也越来越多地将 MTF 作为像质评价的标准, 因此在光学系统设计和制造完成后, 测量 MTF 并评

收稿日期: 2021-09-02; 修订日期: 2022-01-28.

作者简介: 黄声 (1985-), 男, 高级工程师, 主要从事光学系统检测和装调工作。E-mail:35095961@qq.com.

价光学系统的像质是一项重要的工作。

用来评价红外热像仪性能的 MTF，主要考虑 3 项：光学系统的 MTF、探测器的 MTF_d和电路部分的 MTF_e。红外热像仪整个系统的传递函数等于各子系统传递函数的乘积^[2]。多数文献对红外热像仪整机 MTF 测量进行研究，如张春仙等人使用改进的倾斜刀口法测试整机 MTF，李航等人改进倾斜刀边法用于红外成像系统 MTF 的测量^[3]，胡涛等人利用刀刀法测量红外相机 MTF^[4]，黄海乐等人研究刀边法检测空间相机 MTF^[5]，但没有资料涉及折转型（U 型）红外光学系统的 MTF 测量的问题。因此，本文主要针对 U 型红外光学系统的 MTF 测量进行研究。

1 测量方法

在设计红外热像仪的光机结构时，为了使光机结构紧凑，同时考虑到采用二次成像的光学系统总长度较长的特点，以及相匹配的制冷型探测器也较长的特点，采用双反射镜折转（U 型）布局，使其由细长状变为短平状，如图 1 所示。

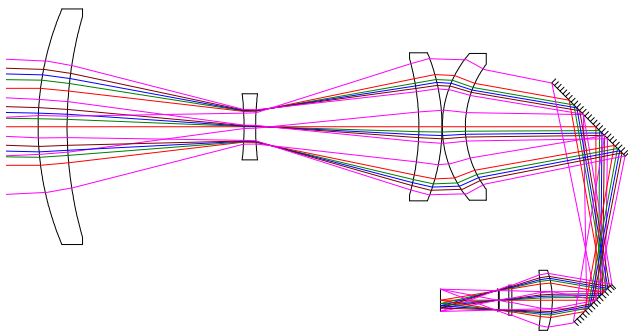


图 1 U 型红外光学系统布局图

Fig.1 Layout diagram of U-shaped infrared optical system

一个线性或近似线性的光学系统由光学系统 I 和 II 级联组成，并且两部分光学系统也均是线性的或近似线性的，其中，光学系统 I 的像是光学系统 II 的物，则由传递函数的定义及傅里叶变换的性质，可知组合光学系统 MTF 是各个子系统的乘积。也就是说，要测量一个组合系统的 MTF，只需分别测得子系统的 MTF 然后相乘即可。

然而这种简单的相乘很方便，有时候却不一定正确^[6]。成像光学系统满足 MTF 相乘规律的前提是：各个子系统都是线性的，并且各个中间像都是非相干的。在实际应用中，非相干光经过有限孔径的成像光学系统后成为部分相干。但是，在成像光学系统和中继镜组组成的组合系统中只有一个孔径光阑，为了方便计算和评价成像光学系统的 MTF，在本文的研究中假定各子系统均为线性非相干的，因此，可以通过测

量和计算得出成像光学系统的 MTF，为了方便以下简称 MTF。

先测量中继镜组的 MTF_r和组合系统的 MTF_c，再使用公式(1)计算出成像光学系统的 MTF。

$$MTF=MTF_c / MTF_r \tag{1}$$

由于制冷型红外热像仪采用普遍采用双反射镜折转布局（U 型）及箱式壳体，使得现有 TRIOPTICS 传函仪无法接到 U 型红外光学系统的像面，因此不能直接在现有传函测量仪上测量其 MTF，如图 2 所示。

为解决红外热像仪的 U 型红外光学系统测量的问题，采用把像面引出测量的思路来，即加入一个中继镜组和 U 型红外光学系统组合成一个组合系统，组合系统将会是三次成像的形式，分别测量中继镜组的 MTF_r和组合系统的 MTF_c，再计算出 U 型红外光学系统 MTF。通过以上讨论可知，为了降低中继镜组的 MTF_r对组合系统 MTF_c测量值影响，考虑将中继镜组的 MTF_r设计得贴近衍射极限。

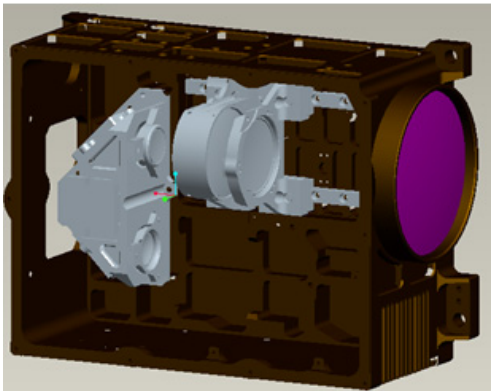


图 2 红外热像仪光机机构示意图

Fig.2 Schematic diagram of opto mechanical structure of infrared thermal imager

2 中继镜组的设计

在确定采用中继镜组把像面引出测量的思路以后，再结合需测量的 U 型红外光学系统的参数进行中继镜组设计。

2.1 技术指标

中继镜组技术指标见表 1。

表 1 技术指标要求

	Table 1 Technical indicators requirements	
	Relay lens group	U-shaped infrared optical system
Working band/ μm	3-5	3-5
F# or NA	0.2	3
Magnification	1×	-
Object height/mm	12	-

2.2 方案分析

中继镜组必须与 U 型红外光学系统相互匹配,需考虑中继镜组和 U 型红外光学系统的光瞳衔接问题,以及光瞳像差对组合光学系统 MTF_c的影响,中继镜组的数值孔径与 U 型红外光学系统的 F#(相对孔径的倒数)相匹配的问题。

对于光瞳衔接问题,在设计时就要考虑产品的光学系统和中继镜组的入瞳、出瞳位置及大小,使中继镜组的入瞳与产品的光学系统的出瞳衔接,并且组合光学系统的出瞳要与传函测量仪的入瞳衔接,只有这样才能不会造成视场的切割,不会影响 MTF_c测量结果的准确性。

对于中继镜组的数值孔径与产品的光学系统的 F#(相对孔径的倒数)相匹配的问题,由于中继镜组采用显微物镜的结构,中继镜组数值孔径(NA)和产品的光学系统相对孔径(D/f')之间近似符合以下关系^[4]:

$$D/f' = 2NA \tag{2}$$

为了满足 F#为 2 及以上产品的光学系统测量,则取中继镜组的数值孔径 NA=0.2。

2.3 中继镜组光学设计

中继镜组的镜片选取性能稳定、性价比高的单晶锗(Ge)和硅(Si)材料组合,且该类型镜片的加工工艺和检测方法都很成熟,能够保证系统的可靠性。为保证中继镜组具有较好的像质,采用了二个非球面及非球面加衍射二元面来消像差和色差,完成设计的中继镜组如图 3 所示。

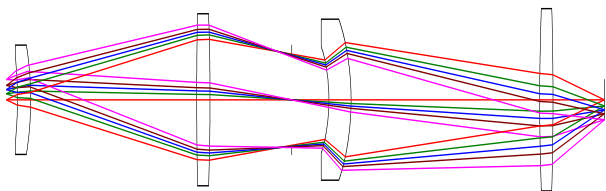


图 3 中继镜组原理图

Fig.3 Schematic diagram of relay lens group

由图 4 可知,中继镜组在中心视场下 MTF 接近衍射极限,在奈奎斯特频率(30 lp/mm)处的数值在 0.58 左右,只有全视场略有下降,说明其具有较好的像质。

点列图 4 是光学系统对点目标成像时所形成的几何像斑,成像全视场内弥散斑最大只有 8 μm,如图 5 可见,弥散斑的均方根(Root-mean-square, RMS)都远小于艾利斑半直径 12.8 μm,满足使用要求。

从图 6 可以看出中继镜组件的像差不大,畸变控制在 0.4%之内,能最大程度地降低对组合光学系统性能的影响。另外,光学零件的加工公差以及光学系统

装配公差均给得比较宽松,用以保证制造完成的中继镜组件性能接近理论值。因此,近衍射极限的 MTF 的设计,以及比较宽松的公差,能够保证中继镜组件能满足测量需求。

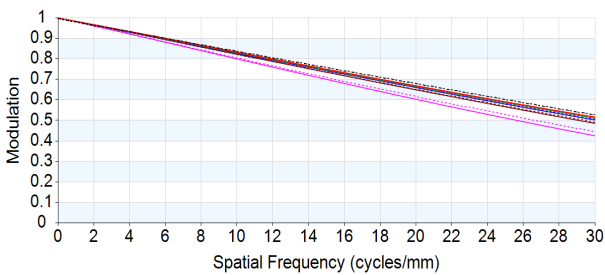


图 4 中继镜组的 MTF_r 理论值

Fig.4 Theoretical value of MTF_r for relay lens group

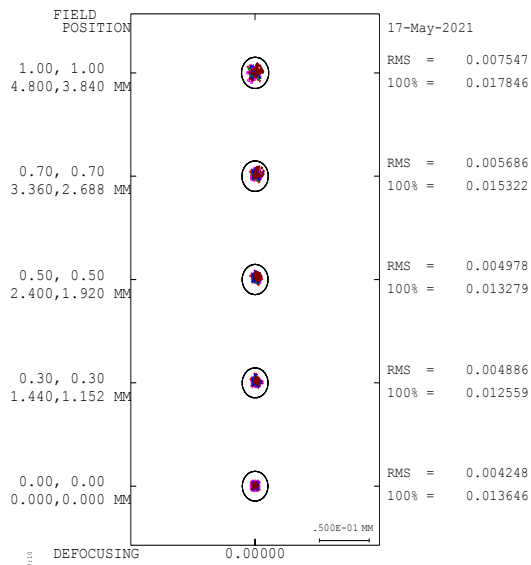


图 5 中继镜组点列图

Fig.5 Spot diagram of relay lens group

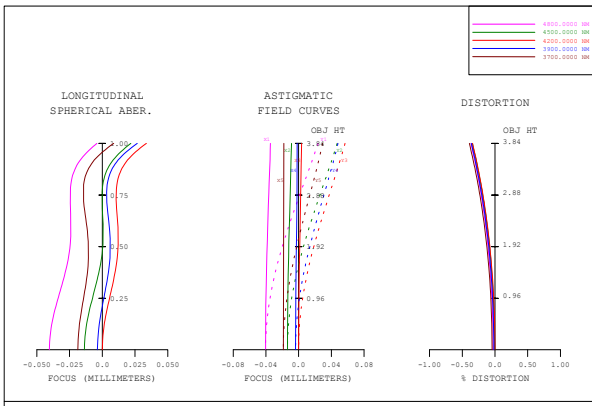


图 6 中继镜组像差曲线图

Fig.6 Aberration curve of relay lens group

2.4 中继镜组结构设计

在结构设计过程中,以红外热像仪的探测器安装面和定位销为基准,实现 U 型红外光学系统和中继镜组的光轴对准。并且采用两块反射镜,将光路进行两

次 90°折转，使出射光路和入射光路平行，从而实现把 U 型红外光学系统的像面引出的目的，详见图 7。

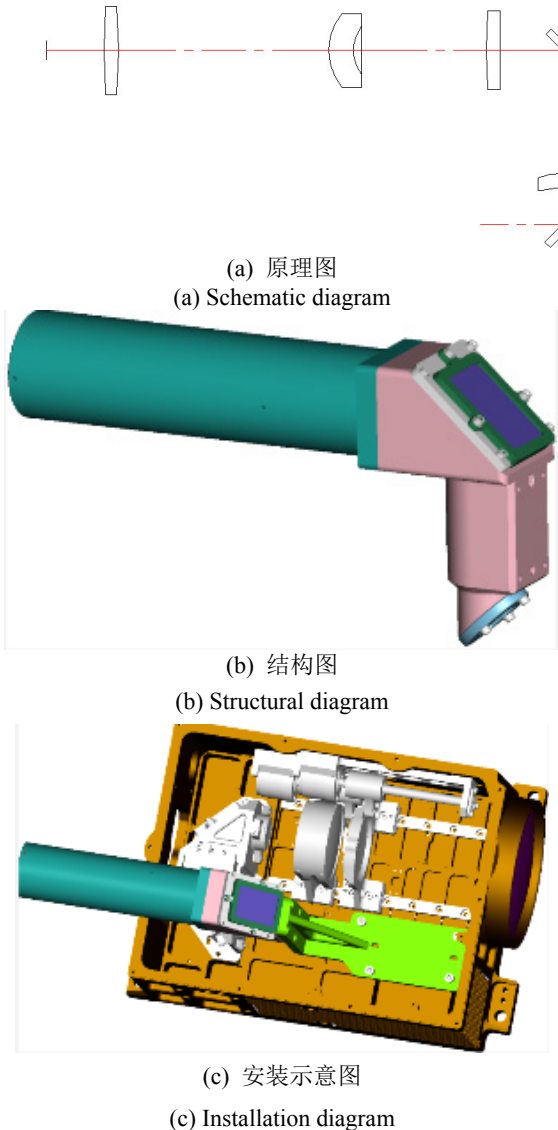


图 7 中继镜组结构设计图

Fig.7 Structural diagram of relay lens group

3 中继镜组 MTF_r 测量

在中继镜组完成加工装调以后，需测量 MTF，用以判断是否满足设计和使用的要求。同样采用组合测量的思路，即使用一个辅助镜头和一个反射镜组，见图 8，和中继镜组组成一个组合系统 I，把中继镜组的像面引出，然后测量出组合系统 I 的 MTF，再计算出中继镜组 MTF_r。

首先，在传函测量仪上测量辅助镜头的 MTF，测量结果见图 9 所示，可知辅助镜头的 MTF 接近衍射极限，性能满足设计要求。因此在后续对组合系统 MTF 测量的过程中，能够减少对测量结果的影响，保证数据的可靠性。

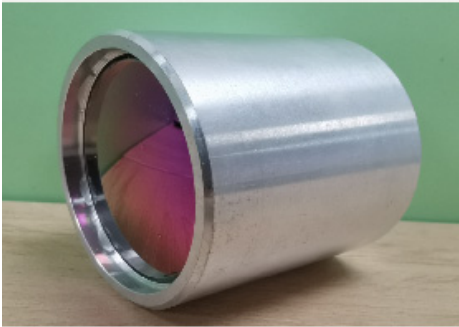


图 8 辅助镜头

Fig.8 Auxiliary lens

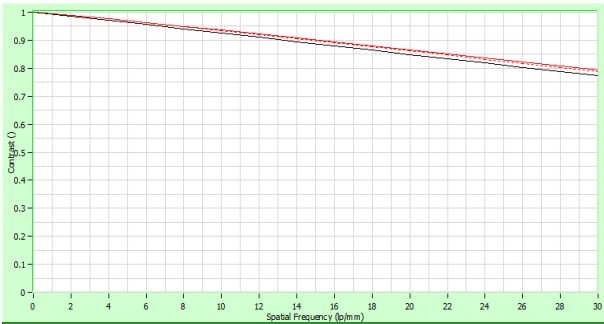


图 9 辅助镜头的 MTF 测量值

Fig.9 The measured value of MTF for Auxiliary lens

然后，按图 10 所示，把辅助镜头、反射镜组和中继镜组组成一个组合系统 I，进行 MTF 的测量，测量值如图 11 所示。

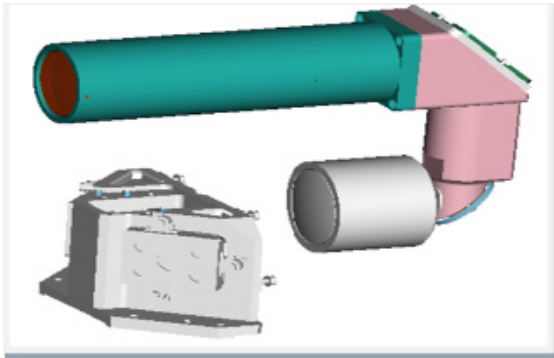


图 10 组合系统 I 示意图

Fig.10 Diagram of combination system I

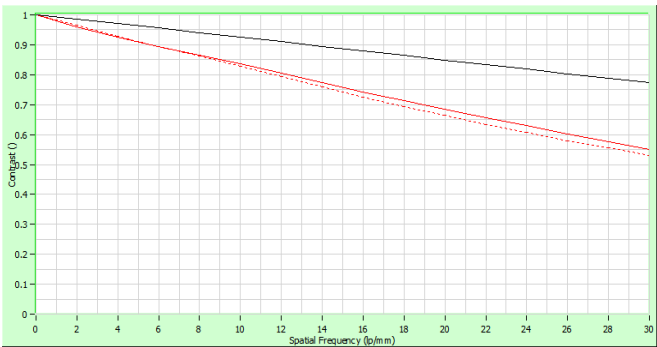


图 11 组合系统 I 的 MTF 测量值

Fig.11 The measured value of MTF for combination system I

最后,根据所测组合系统 I 的 MTF,计算出中继 镜组 MTF_r ,结果如表 2。

表 2 中继镜组的 MTF_r 理论值与实测值

表 2 Theoretical and measured values of MTF_r for relay lens group

Frequency/ (lp/mm)	MTF			
	The measured value of MTF for Auxiliary lens	The measured value of MTF for combination system I	Calculated value of MTF for relay lens group	Theoretical value of MTF for relay lens group
0	1.0	1.0	1.0	1.0
5	0.96	0.89	0.92	0.93
10	0.93	0.82	0.86	0.88
15	0.88	0.72	0.80	0.82
20	0.85	0.66	0.73	0.77
25	0.82	0.57	0.66	0.70
30	0.79	0.52	0.60	0.67

从表 2 可知,中继镜组的 MTF_r 的理论值和加工装调以后的实测值相差较小,满足设计性能和测量的使用要求,因此对后续的组合光学系统 MTF 测量结果影响较小。

4 组合系统 MTF_c 测量

把中继镜组和 U 型红外光学系统组成一个组合系统,使用现有 TRIOPTICS 传函测量仪测量组合系统的 MTF_c ,再计算出 U 型红外光学系统的 MTF。组合系统原理图如图 12 所示。

4.1 排除接口工装安装方式对 MTF 测量结果的影响

为了对准红外热像仪和传函测量仪的轴线,以保证测量结果的可靠性。通过设计接口工装,采用销孔定位,以使两者的安装基准实现对准。如图 13 所示。

然后使用同一个红外热像仪,测量了接口工装多种安装方式下的 MTF,如图 14 所示。

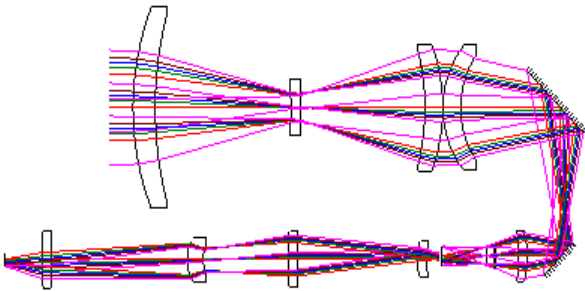


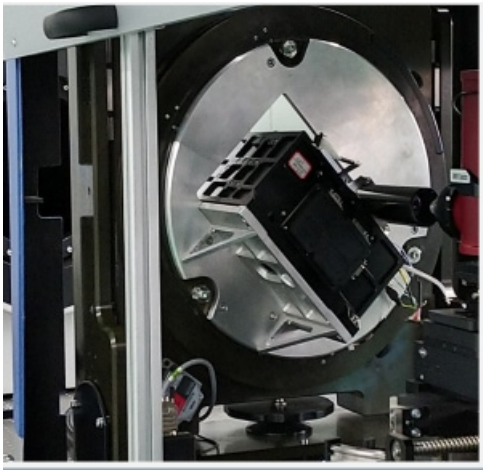
图 12 组合系统原理图

Fig.12 Combination system schematic diagram



(a)安装基准对准 1

(a) Align the installation benchmark 1



(b) 安装基准对准 2

(b) Align the installation benchmark 2

图 13 红外热像仪和传函仪的安装基准对准

Fig.13 Align the installation benchmark of infrared thermal imager and transmitter

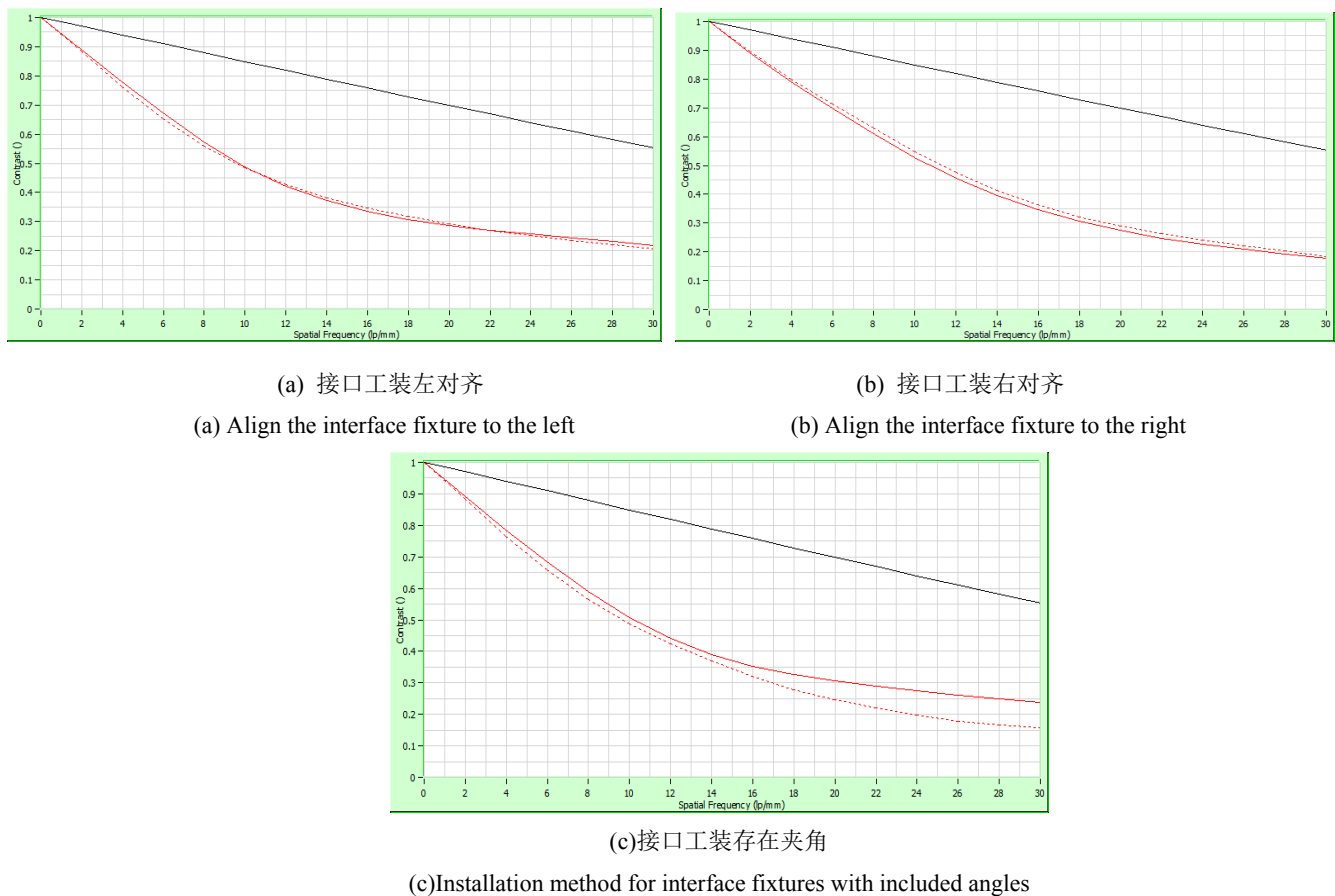


图 14 接口工装左、右对和存在夹角安装方式的 MTF

Fig.14 MTF with multiple installation methods for interface tooling

通过对以上测量结果进行分析,可知在使用接口工装对准红外热像仪和传函测量仪的轴线以后,能够保证测量结果具有较高的重复性精度。

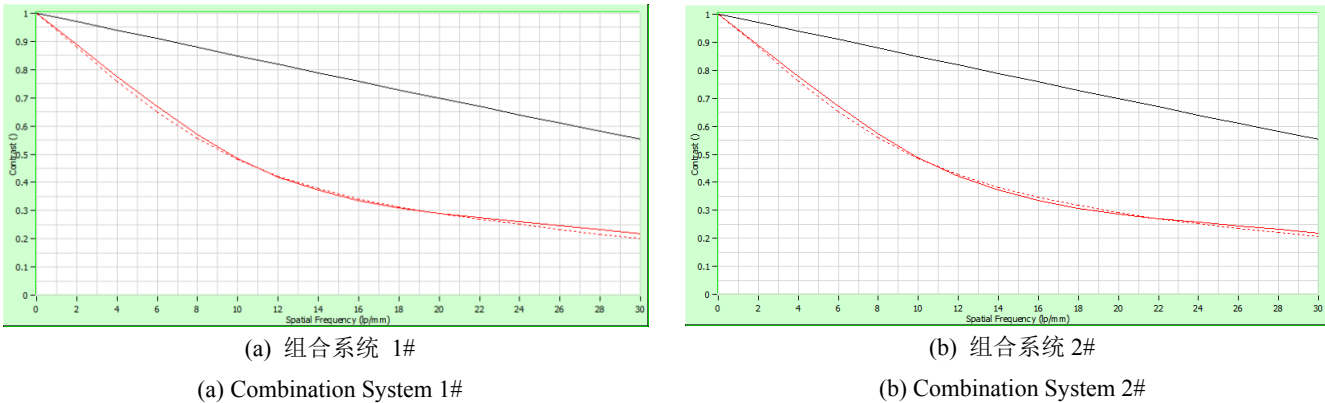
4.2 组合系统的 MTF_c测量

把测量过 MTF_r的中继镜组,和 6 个同一型号的红外热像仪进行组合,共搭建了 6 个组合系统,然后分别测量组合系统的 MTF_c,再对测量结果进行统计分析,测量结果详见图 15 和表 3。

测量过程中使用的 TRIOPTICS 传函仪,已用计量机构检定的参考镜头进行标定,MTF 测量重复性精度为 ±0.02,测量数据具有溯源性,保证测量结果真实可靠。

4.3 计算 U 型红外光学系统 MTF

由表 3 数据和公式(1)计算出 U 型红外光学系统 MTF 的测量值,见表 4。



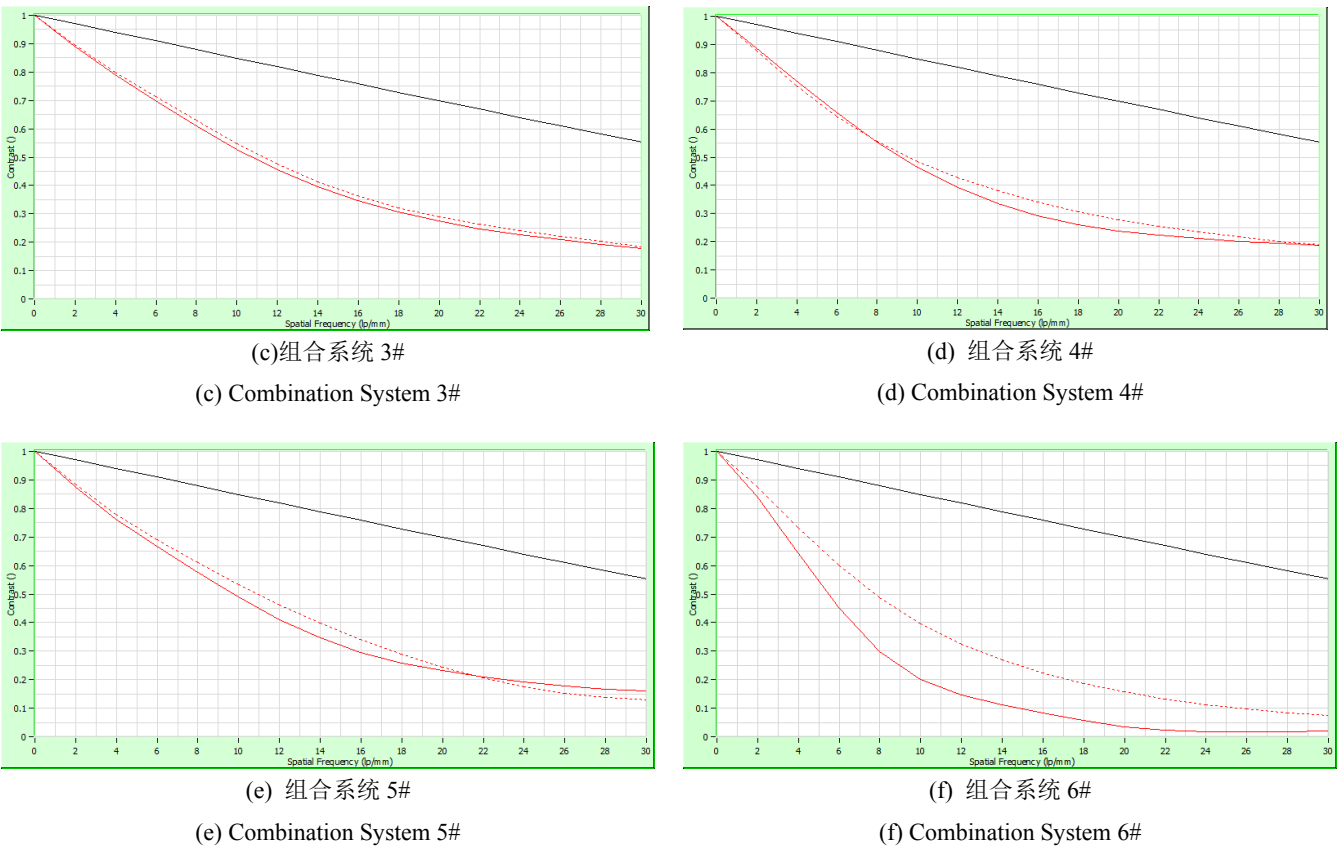


图 15 测量 6 个组合系统 MTF_c

Fig.15 The measured value of MTF_c for 6 Combination System

表 3 6 个组合系统的 MTF 测量值

表 3 The measured value of MTF_c for 6 Combination System

Order	Frequency					
	5lp/mm	10lp/mm	15lp/mm	20lp/mm	25lp/mm	30lp/mm
1#	0.73	0.5	0.38	0.326	0.28	0.241
2#	0.72	0.48	0.35	0.28	0.25	0.22
3#	0.71	0.483	0.35	0.277	0.22	0.188
4#	0.71	0.46	0.35	0.26	0.22	0.18
5#	0.6	0.298	0.21	0.166	0.14	0.125
6#	0.65	0.395	0.25	0.155	0.1	0.07

表 4 红外热像仪 U 型红外光学系统的 MTF 测量值

表 4 The measured value of MTF for U-shaped infrared optical system

Order	Frequency/(lp/mm)					
	5	10	15	20	25	30
1#	0.777	0.581	0.475	0.453	0.424	0.402
2#	0.766	0.558	0.438	0.389	0.379	0.367
3#	0.755	0.562	0.438	0.385	0.333	0.313
4#	0.755	0.535	0.438	0.361	0.333	0.300
5#	0.638	0.347	0.263	0.231	0.212	0.208
6#	0.691	0.459	0.313	0.215	0.152	0.117

U 型红外光学系统 MTF 理论值如图 16。

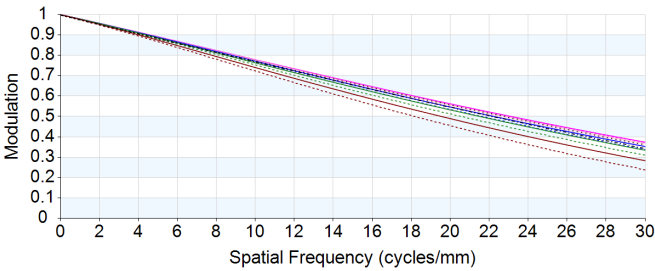


图 16 U 型红外光学系统的 MTF 理论值

Fig.16 Theoretical value of MTF for U-shaped infrared optical system

把 U 型红外光学系统 MTF 的测量值和理论值进

行对比分析,发现以下两个问题。第一,6个U型红外光学系统,在中心视场下MTF测量值和理论值相比较下降约0.2,这可能是设计和镜片加工的原因。第二,5#、6#红外热像仪和其他4个热像仪比较,其U型红外光学系统MTF下降较多,主要考虑产品装调过程中镜片间隔或偏心误差大造成的。

4.4 查找U型红外光学系统MTF下降原因

主要从装调误差方面入手,查找5#、6#红外热像仪的U型红外光学系统MTF下降较多的原因。使用TRIOPTICS红外中心偏差测量仪测量光学系统中心偏差,即使用工装把红外热像仪固定到仪器上,然后依次从光学系统的第一透镜到第六透镜,逐面测量中心偏差,详见表5。

从中心偏差测量数据可知,5#、6#热像仪的第三、四镜片的中心偏差明显比其他镜片大的多,故重新调整第三、四镜片,并把中心偏差控制在10μm以内。然后重新测量并计算5#、6#热像仪U型红外光学系统MTF,其MTF均有大幅提高,详见表6。

表5 红外热像仪各镜组的中心偏差

表5 Center deviation of each lens for Infrared thermal imager

Lens	Order	Center deviation /μm	
		5#	6#
First lens	1	5	3
	2	8	5
Second lens	3	8	11
	4	10	6
Third lens	5	33	22
	6	56	38
Fourth lens	7	24	54
	8	18	46
Fifth lens	9	9	7
	10	6	9
Sixth lens	11	10	8
	12	3	5

表6 U型红外光学系统重新装调后的MTF测量值
(5#、6#红外热像仪)

表6 The measured value of MTF for U-shaped infrared optical system After reinstallation and adjustment (5#、6# Infrared thermal imager)

Order	Frequency/(lp/mm)					
	5	10	15	20	25	30
5#	0.761	0.575	0.442	0.386	0.342	0.315
6#	0.760	0.58	0.438	0.372	0.337	0.306

根据红外热像仪实际的验收情况,在U型红外光学系统装调过程中,划定MTF的技术要求,即:在

中心视场下,10lp/mm≥0.50,30lp/mm≥0.30,子午及弧矢两个方向MTF值相差不超过0.05。在后续的红外热像仪生产中,以此技术要求,对U型红外光学系统像质进行过程控制,当MTF满足此技术要求时,关键指标最小可分辨温差(Minimum Resolvable temperature difference,MRTD)均满足检验要求。

5 结论

为了解决U型红外光学系统MTF测量的难题,本文采用光瞳衔接的方式,设计和加工一个中继镜组把U型光学系统的像面引出,通过测量组合系统的MTF_c,再计算出U型光学系统的MTF。

然后使用6个同一个型号红外热像仪对测量方法进行验证,在排除了影响测量的干扰因素以后,通过测量和计算得出U型红外光学系统的MTF。而对于5#、6#红外热像仪的U型红外光学系统MTF下降较多问题,采用红外中心偏差测量仪测量镜片偏心,查明原因后重新装调,使其MTF有大幅提升。最终该方法为U型光学系统的MTF测量和MTF性能提升提供了新的思路。

参考文献:

[1] 李林,黄一帆,王涌天.现代光学设计方法[M].北京:北京理工大学出版社,2018:152.
LI lin, HUANG Yifan, WANG Yongtian. *Modern Optical Design*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018: 152.

[2] 张春仙,李忠升,张昇润.红外热成像系统传递函数的测量研究[J].激光与红外,2019,49(4):442-446.
ZHANG Chunxian, LI Zhongsheng, ZHANG Haorun. Study on measurement of MTF in IR systems[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(4): 442-446.

[3] 李航,颜昌翔,于平,等.红外成像系统的调制传递函数测试[J].光学精密工程,2016,24(4):699-707.
LI Hang, YAN Changxiang, YU Ping, et al. Measurement of modulation transfer function for IR imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 699-707.

[4] 胡涛,张冬冬.高精度刃边法测量红外相机MTF的研究[J].红外,2015,36(7):10-15.
HU Tao, ZHANG Dongdong. Research on high-precision edge method for measuring MTF of infrared cameras[J]. *Infrared*, 2015, 36(7): 10-15.

[5] 黄海乐,朱雷鸣,彭宇,等.刃边法检测空间相机MTF的方法研究[J].光学与光电技术,2013,11(2):71-73.
HUANG Haile, ZHU Leiming, PENG Yu, et al. Research on edge method for detecting MTF of space cameras[J]. *Optics and Optoelectronics Technology*, 2013, 11(2): 71-73.

[6] 于谦.光学检查镜头的MTF测量方法研究[D].杭州:浙江大学,2010:15-18.
YU Qian. Research on MTF Testing Methods of Optical Inspection Lenses[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 15-18.