

文章编号 1004-924X(2008)12-2421-08

非均匀性校正正在红外杂散辐射抑制中的应用

张 葆¹, 洪永丰^{1,2}, 史光辉¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 红外系统中常规的光机设计尚无法完全抑制杂散辐射, 其残余的杂散辐射还可能引起图像异常。通过分析红外探测器非均匀性产生的原因, 提出运用非均匀性校正的方法抑制红外杂散辐射, 并给出了用两点温度标定法抑制杂散辐射的理论依据。对某型三档中波红外变焦系统进行了杂散辐射分析, TracePro 红外辐射仿真分析表明: 系统中残余的杂散辐射主要源自变焦过程中镜片移动引起的冷反射变化, 两点温度校正后红外图像的非均匀性由 0.066% 降低到 0.027%, 成功消除了视场中的阴影, 得到了满意的红外图像。实验结果证明, 该方法能有效改善红外系统中残余杂散辐射引起的图像异常。

关键词: 红外辐射; 杂散辐射; 冷反射; 100% 冷阑效率; 非均匀性校正

中图分类号: TN216; TP391.4 **文献标识码:** A

Application of non-uniformity correction to stray radiation suppression of infrared optical system

ZHANG Bao¹, HONG Yong-feng^{1,2}, SHI Guang-hui¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The residual stray radiation may cause image abnormality after suppressing the stray radiation by optical and mechanical design in infrared optical system, such as narcissus variation in the system caused from lens movement during zooming. To minimize the effects, a direct and fast method for suppressing the narcissus variation by two-point non-uniformity correction is proposed. As an example, the stray radiation analysis and suppression of an infrared zoom optical system are presented. Experiments show that non-uniformity of IR picture is reduced from 0.066% to 0.027% and the shading effects are removed by two-point temperature correction successfully. The result confirms that proposed method can improve image abnormality caused by residual stray radiation.

Key words: infrared radiation; stray radiation; narcissus; 100% cold-stop efficiency; non-uniformity correction

收稿日期: 2008-08-06; 修订日期: 2008-09-09.

基金项目: 国防科技预研基金资助项目 (No. 1040603)

1 引言

杂散辐射会造成像面上的辐照度不均匀,物体和背景的对比度和信噪比降低,探测距离下降。因而消除杂散辐射是任何光学系统都需考虑的重要环节,对红外系统更为重要,而且也更难控制。这是因为红外系统一方面期望获得景物很小的温差;而另一方面,系统对热能敏感,任何来自成像辐射锥之外并到达探测器的辐射都会降低系统的灵敏度,在某些情况下甚至造成图像异常,尤其是这种热辐射还可能会改变。这样系统中的常规杂散辐射抑制设计无法完全抑制辐射,其残留的杂散辐射仍有可能引起红外图像异常。

常规红外杂散辐射抑制设计主要从光辐射能量的传输途径考虑,找出杂散辐射是如何传输到焦平面或探测器上,再采用阻挡的方法或更改设计以消除这些路径^[1]。如:在遮光罩筒壁上加挡光环结构,其核心思想是通过改变镜筒的几何形状因子来阻挡和散射大入射的杂散光直接照射在主镜上,且保证挡光环的布置不会遮拦视场角以内的光线^[2];消杂散辐射涂料是利用涂料的表面粗糙度和多孔性散射特性,通过对杂散辐射的吸收作用来降低筒壁的 BRDF 值;红外系统中特有的 100%冷阑效率和温栏-阑匹配的方法^[3]也是采取阻挡杂散辐射能量到达探测器焦面,而只让探测器记录来自景物的能量的办法;另外对“危险元件”进行温度控制(如在主镜后加冷却板以降低在成像光谱范围内的辐射率)和选择绝热材料或自身辐射小的材料,都是为了消除潜在的杂散辐射源而采取的措施^[4]。

消除残余杂散辐射的影响,目前采用的解决方法有图像反卷积的方法和类似噪声滤波的方法,两者都是从数字图像处理的角度进行考虑。前者要事先得到系统的点扩散函数;后者将杂散信号作为一种噪声,假定系统满足独立同分布和非时变等特性,提取其统计特征值,然后逐步从图像中消除。如国家卫星气象中心在对 FY-2 的云图处理中,通过对地球圆盘外的冷空间全部为零的先验知识,统计冷空间的杂散光分布特征值,确定模型参数,进而依据地球圆盘内的杂散光具有相同的统计特性的假定,进行相应的处理^[5]。因此需要一种更为简便有效的解决方法。本文通过

分析红外探测器非均匀性产生的因素,提出运用非均匀性校正的方法抑制红外系统中残余的杂散辐射,给出两点温度标定对杂散辐射抑制的理论依据,并将该方法运用到某型三档中波红外变焦系统的杂散辐射分析与抑制中,成功地解决了系统中残余的杂散辐射引起的图像异常,得到了满意的红外图像。

2 非均匀性校正对杂散辐射抑制机理

红外探测器非均匀性产生的因素主要可分为三大类。第一类是器件自身的非均匀性,导致这种非均匀性的原因与材料质量、工艺过程等有关,使得在均匀输入的情况下,各个像素的响应不一致^[6-7];第二类是器件工作状态引入的非均匀性,即焦平面器件的工作环境温度的均匀性、红外探测器及读出电路的驱动信号等,使得在非均匀输入的情况下,各个像素的输出不一致;第三类是与外界输入相关的非均匀性,即目标和背景的红外辐射强度变化范围、红外光学系统的背景辐射等外界特征均会对焦平面的非均匀性产生影响。

通过以上分析知,非均匀性校正要解决的问题是:均匀输入情况下的输出不均匀和非均匀输入情况下的输出不均匀。由杂散辐射的来源可知,残余杂散辐射可视为外界输入相关的非均匀,属于红外系统的背景辐射条件变化,将直接影响红外探测器所处的工作环境、工作参数和工作性能。因而理论上,通过非均匀性校正可以弱化残余杂散辐射引起的图像非均匀。

非均匀性校正的方法有很多,主要分为两类:基于参照源和基于场景的校正技术。基于参照源的校正技术要求在特定温度下由黑体产生的均匀辐射对红外焦平面阵列定标,通常使用两点定标技术或多点定标技术。基于场景的方法不需要黑体标定,而是根据场景的运动,在每一探测器单元上产生场景温度的变化,依照温度变化依次提供的统计参考点,自适应校正探测器的非均匀性响应,主要包括恒定统计平均法、时域高通滤波法和人工神经网络法^[8]。

两点温度定标法^[8-9],算法简单,有利于硬件实时处理,在目前工程中比较成熟且应用最广泛。因此本文重点分析该方法对系统中残余杂散辐射的抑制作用。假定探测器在一定温度范围内是线

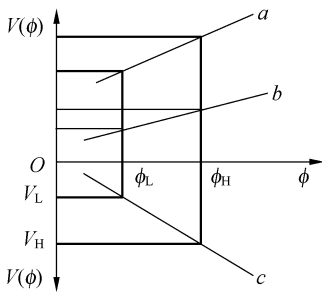
性的,在时间上是稳定的,并假定 $1/f$ 噪声(电流噪声中的一种,其功率谱随频率呈反比变化,通常在几百赫兹以下的低频段显著)的影响较小,则非均匀性引入固定模式的乘性和加性噪声,在此条件下,红外焦平面在非均匀辐射背景下任一探测元的响应输出可以表示为:

$$V_{i,j}(\phi + \Delta\phi_{i,j}) = K_{i,j} \times (\phi + \Delta\phi_{i,j}) + B_{i,j}, \quad (1)$$

式中 $V_{i,j}(\phi + \Delta\phi_{i,j})$ 为探测元的响应输出值, ϕ 为背景辐射通量, $\Delta\phi_{i,j}$ 为杂散辐射通量, $K_{i,j}$ 和 $B_{i,j}$ 分别为焦平面阵列第 i 行、第 j 列的增益和偏移量。对于每一个探测元, $K_{i,j}$ 和 $B_{i,j}$ 的值在两个标定点内是固定的,并且不随时间变化。因此采用两点法校正即可实现红外焦平面阵列图像的非均匀校正,即

$$V'_{i,j} = G_{i,j} \times V_{i,j}(\phi + \Delta\phi_{i,j}) + O_{i,j}, \quad (2)$$

$G_{i,j}$, $O_{i,j}$ 分别为两点校正法的校正增益和校正偏移量, $V'_{i,j}$ 为校正后的输出,如图 1 所示。



注:直线 a 和直线 b 分别代表一个阵列单元的响应特性,直线 c 为校正后所有阵列单元的响应特性

图 1 两点校正法示意图

Fig.1 Diagram of two point non-uniformity correction

两点校正法分别在光路中插入均匀辐射黑体,通过各阵列单元对高温 T_H 和低温 T_L 下的均匀黑体辐射的响应计算出校正增益 $G_{i,j}$ 和校正偏置 $O_{i,j}$,从而实现非均匀校正,公式如下

$$\bar{V}_H = G_{i,j} \times V_{i,j}(\phi_H + \Delta\phi_{i,j}) + O_{i,j}, \quad (3)$$

$$\bar{V}_L = G_{i,j} \times V_{i,j}(\phi_L + \Delta\phi_{i,j}) + O_{i,j}. \quad (4)$$

校正增益和校正偏移量即可通过下式计算出来

$$G_{i,j} = \frac{\bar{V}_H - \bar{V}_L}{V_{i,j}(\phi_H + \Delta\phi_{i,j}) - V_{i,j}(\phi_L + \Delta\phi_{i,j})}, \quad (5)$$

$$O_{i,j} = \frac{\bar{V}_L V_{i,j}(\phi_H + \Delta\phi_{i,j}) - \bar{V}_H V_{i,j}(\phi_L + \Delta\phi_{i,j})}{V_{i,j}(\phi_H + \Delta\phi_{i,j}) - V_{i,j}(\phi_L + \Delta\phi_{i,j})}. \quad (6)$$

其中, $\bar{V}_H = \frac{1}{N} \sum V_{i,j}(\phi_H + \Delta\phi_{i,j})$, $\bar{V}_L = \frac{1}{N} \sum V_{i,j}(\phi_L + \Delta\phi_{i,j})$, 分别为高温和低温辐射背景下,探测器焦面的响应均值。 $V_{i,j}(\phi_H + \Delta\phi_{i,j})$ 和 $V_{i,j}(\phi_L + \Delta\phi_{i,j})$ 分别为像元 (i, j) 在高温和低温辐射背景下的响应。

工程应用中,将各阵列单元的校正增益和校正偏移量预先存储起来,在探测过程中以此对探测器的响应值按式(2)不断进行校正,因而响应电压高的阵列单元受到抑制,而响应电压低的阵列单元却被放大,使红外图像均匀性得到改善。通过以上分析可知,非均匀性校正对红外杂散辐射的抑制,实质上是将残余杂散辐射作为外界输入引入的非均匀性,校正后将背景辐射和残余杂散辐射综合作用的平均响应作为背景电压,从而弱化了残余杂散辐射引起的图像异常,实际上没有改变杂散辐射的传输途径或到达像面的杂散辐射能量大小,是一种被动的方法。

通过对探测器阵列单元的响应进行校正和补偿,能够移除凝视型红外系统中由冷反射造成的阴影图像。但当光学系统出现以下情况之一时:(1)目标背景和探测器之间的温度差产生变化;(2)调焦或变焦过程中的镜片移动;(3)视场变化,冷反射可能会发生明显变化,影响图像质量^[10],这时需要重新进行非均匀性校正。

3 实例分析

对一个中波红外三档变焦系统进行杂散辐射分析与抑制,该系统焦距为 $20 \sim 80 \sim 320$ mm,相对孔径为 $1:4$,选用像元数为 320×240 、像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$ 的凝视焦平面阵列制冷型探测器。

3.1 光机结构的杂散辐射抑制设计

首先,为了减小物镜的直径并保证 100% 的冷光阑效率,光学结构设计为二次成像的双共轭系统,使探测器只记录来自景物的能量而避免筒壁辐射产生的杂散辐射进入像面;其次,利用光阑组合抑制杂散辐射,即分别在孔径光阑位置和中间像面位置设置光阑,以限制被照射表面的面积和降低光学系统衍射杂散辐射,使到达像面的杂散辐射经过多次衍射衰减;最后,采取镀多层增透膜提高透过率的办法,降低透镜表面反射产生的

杂散辐射。

设计结果如图 2 所示,采用光学补偿式,变焦系统由 4 部分组成:第一组和第三组透镜构成变焦组,一起做同方向等速的线性移动;第二为固定组,第四和第五组透镜构成二次成像组。它们对

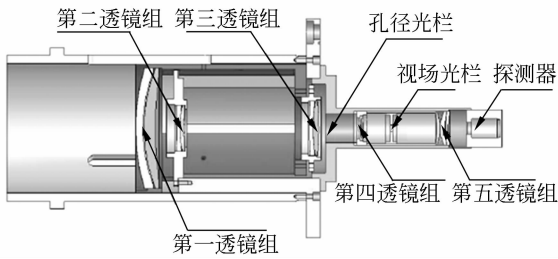


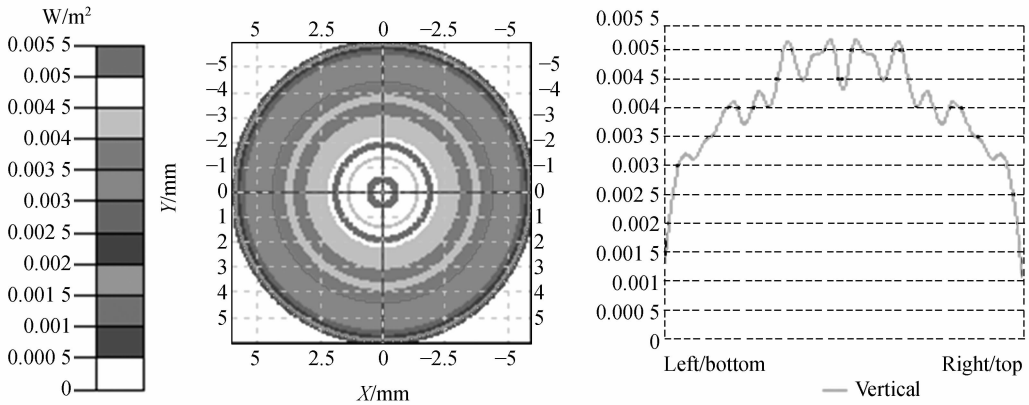
图 2 光学补偿式红外变焦系统结构图

Fig. 2 Structure for infrared optically compensated zoom system

系统光焦度的贡献分别为正、负、正、正、正,系统中各面均为球面。

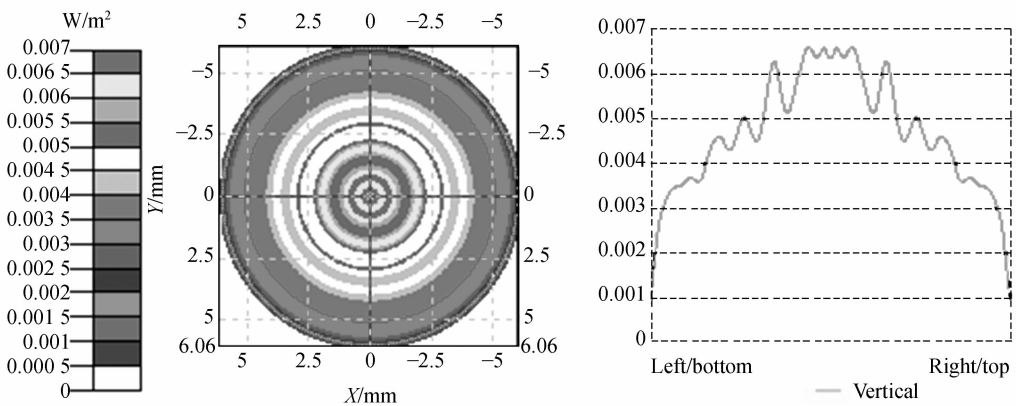
3.2 残余杂散辐射分析

采取了以上常规光机结构的杂散辐射抑制措施后,利用 TracePro 红外热辐射分析软件进行残余杂散辐射分析:先建立变焦系统的三维光机模型并对材料的相关属性进行定义,再将探测器焦平面设置为均匀辐射面源(辐射出射度为 10 W/m^2)和能量接收面,通过光线追迹得到系统冷反射的辐照度分布图^[11],如图 3 所示。由表 1 给出的相关数据可知:各焦距位置处,残余杂散辐射引起的最大辐照度和平均辐照度均不相同,其中长焦位置冷反射最严重,中焦位置次之,而短焦位置相对较弱。所以系统中残余杂散辐射主要来源于镜片的冷反射,且冷反射量会发生变化。



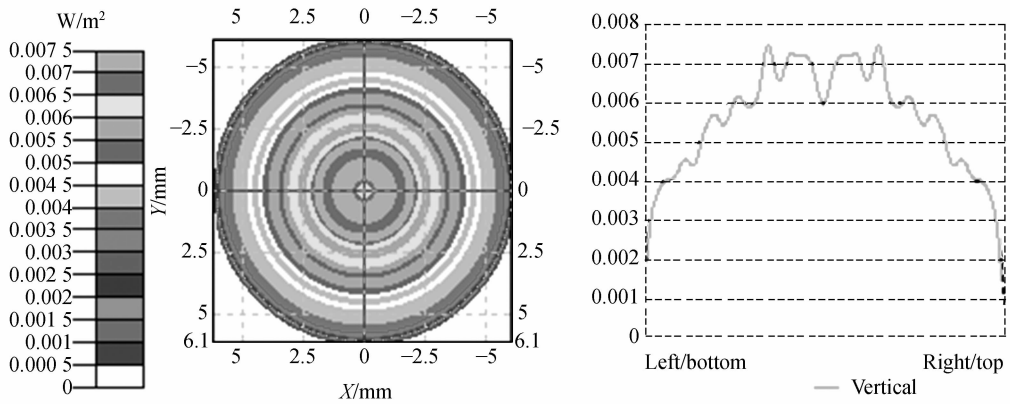
(a) 短焦位置焦平面的辐照度分布图

(a) Total irradiance map for reverse flux FPA at $F=20 \text{ mm}$



(b) 中焦位置焦平面的辐照度分布图

(b) Total irradiance map for reverse flux FPA at $F=80 \text{ mm}$



(c) 长焦位置焦平面的辐照度分布图

(c) Total irradiance map for reverse flux FPA at $F=320$ mm

图 3 不同焦距位置的系统冷反射分布图

Fig. 3 Overlay distributions of narcissuses induced by all lens surfaces at $F=20$ mm, 80 mm and 320 mm

表 1 各焦距位置系统冷反射的相关参数

Tab. 1 Parameters of total irradiance for reverse flux FPA at $F=20$ mm, 80 mm and 320 mm

	最小辐照度 (W/m^2)	最大辐照度 (W/m^2)	平均辐照度 (W/m^2)	总的辐射通量 (W)	焦平面的辐射度 (W/m^2)
$F=20$ mm	1.60×10^{-17}	0.005 2	0.002 8	4.05×10^{-7}	10
$F=80$ mm	2.72×10^{-18}	0.006 6	0.003 2	4.70×10^{-7}	10
$F=320$ mm	2.34×10^{-19}	0.007 5	0.003 9	5.78×10^{-7}	10

利用 CODE V 进行鬼像分析,考察焦平面被每个透镜表面反射所成像的情况,找出各焦距位置冷反射最严重的透镜表面。如果该像距离焦平面很近(后焦距差值的绝对值小)且反射光束在焦平面上的半径很小,则该面的冷反射严重。由表

2 可知:短焦位置,表面 10 的冷反射贡献最大;中焦位置,表面 6 的冷反射贡献最大;长焦位置,表面 6 的冷反射贡献最大。所以冷反射量发生变化的原因在于变焦过程中第二透镜组和第三透镜组的移动,造成冷反射斑的大小和强度均发生变化。

表 2 各焦距位置冷反射最严重的表面

Tab. 2 Surfaces of lens with the most noticeable narcissuses at $F=20$ mm, 80 mm and 320 mm

	反射面 1	反射面 2	后焦距差值	等效焦距	反射光束在初级像面上的半径值	光瞳比	放大率
$F=20$ mm	探测器焦平面	透镜表面 10	-1.99	20.92	-0.24	1.00	-1.06
$F=80$ mm	探测器焦平面	透镜表面 6	4.88	93.66	6.53	1.05	-1.15
$F=320$ mm	探测器焦平面	透镜表面 6	-17.89	311.58	5.92	1.00	-0.35

目前减小冷反射效应的方法有两种:第一是使用抗冷反射膜,降低透镜表面的反射率,这些减反射膜在中波或长波具有 0.2%~0.3% 的平均反射比;第二是改变冷反射透镜表面 6 和表面 10 的相对弯曲,减小冷反射辐射的立体角。下面采用本文提出的办法,即两点温度标定的方法减小冷反射效应。

3.3 两点温度标定对残余杂散辐射的抑制

整个光机系统装配完毕后,进行成像实验,并运用两点温度校正来抑制残余杂散辐射的影响。

图 4(a)为采取常规杂散辐射抑制措施后校正前的原始图像。在中焦和长焦位置红外图像视场中心明显出现亮斑,且长焦位置冷反射最严重,中焦位置次之,而短焦位置相对较弱,与残余杂散

辐射分析的结果一致。

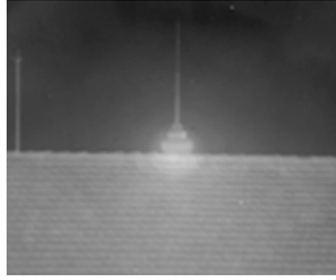
图 4(b)为在中焦位置进行两点温度校正后的红外图像。中焦位置的残余杂散辐射得到有效抑制,但在长焦位置,视场中心出现非常明显的黑斑;短焦位置时也出现一定程度的黑斑;其原因在

于背景电压的调整使得长焦位置的冷反射效果反而更为突出。

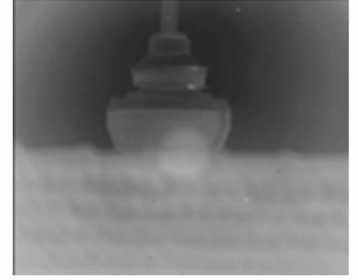
图 4(c)为在长焦位置进行两点温度校正后的红外图像,结果表明在各个焦距位置的冷反射均受到较好抑制。



短焦位置
 $F=20\text{ mm}$



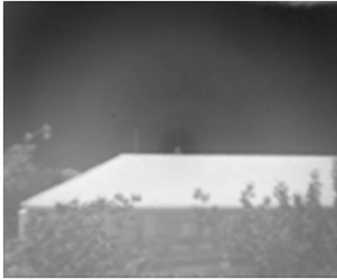
中焦位置
 $F=80\text{ mm}$



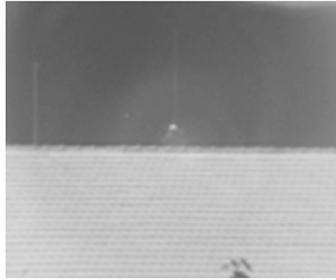
长焦位置
 $F=320\text{ mm}$

(a) 校正前的红外图像

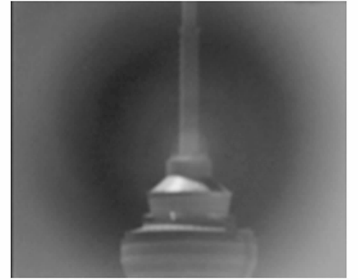
(a) Infrared pictures before correction



短焦位置
 $F=20\text{ mm}$



中焦位置
 $F=80\text{ mm}$



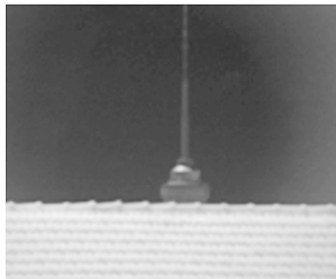
长焦位置
 $F=320\text{ mm}$

(b) 中焦位置校正后的红外图像

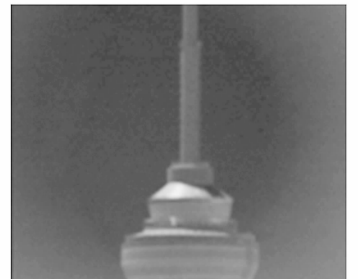
(b) Infrared pictures after two-point correction at $F=80\text{ mm}$



短焦位置
 $F=20\text{ mm}$



中焦位置
 $F=80\text{ mm}$



长焦位置
 $F=320\text{ mm}$

(c) 长焦位置校正后的红外图像

(c) Infrared pictures after two-point correction at $F=320\text{ mm}$

图 4 不同焦距位置两点温度校正后的红外图像

Fig. 4 Infrared pictures after two-point correction at $F=80\text{ mm}$, 320 mm

3.4 杂散辐射的非均匀性计算

杂散辐射引起的非均匀性定义为:在均匀辐射输入下,到达焦平面阵上的最大杂散辐射值与最小杂散辐射值之差与焦平面片上平均辐射值的百分比值。

$$UN = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\text{avg}}} \times 100\%, \quad (7)$$

根据文中分析的非均匀性校正对杂散辐射的抑制机理,公式(7)中的 E_{avg} 是焦平面自身的辐射值与到达焦平面的平均杂散辐射值之和,校正后 E_{\min} 值变为所选校正位置处到达焦平面的平均杂散辐射值。

下面以中焦位置两点温度校正为例,计算校

正前后短焦图像的非均匀性。

$$\text{校正前: } UN = \frac{(0.0052 - 1.6 \times 10^{-17}) W/m^2}{(10 + 0.028) W/m^2} \times 100\% \approx 0.052\%$$

$$\text{校正后: } UN = \frac{(0.0052 - 0.0032) W/m^2}{(10 + 0.0032) W/m^2} \times 100\% \approx 0.02\%$$

结合表 1 给出的相关数据,计算出中焦位置和长焦位置两点温度校正前后红外图像的非均匀性,如表 3 所示。由此可以看出:两点温度校正能够降低杂散辐射引起的图像非均匀。需要指出的是,这里我们只单一考虑冷反射引起的图像非均匀,其他因素并未考虑在内,所得数据不是图像的实际非均匀性值,但并不影响上述结论的成立。

表 3 校正前后红外图像的非均匀性

Tab. 3 UN before and after two-point correction at $F=80$ mm and 320 mm

校正位置	校正前 UN 值			校正后 UN 值		
	$F=20$ mm	$F=80$ mm	$F=320$ mm	$F=20$ mm	$F=80$ mm	$F=320$ mm
$F=80$ mm	0.052%	0.075%	0.066%	0.02%	0.042%	0.034%
$F=320$ mm	0.052%	0.075%	0.066%	0.013%	0.036%	0.027%

4 结 论

通过实验证明:

(1) 对光机结构无法完全抑制的杂散辐射,两点温度校正能有效消除红外系统中残余杂散辐射引起的图像异常;

(2) 因变焦使冷反射产生显著的变化,冷反射黑斑大小会随着透镜移动而变化。当偏离校正

位置后,冷反射仍可能引起图像异常。选择不同焦距位置进行非均匀性校正,其抑制效果会不同;

在光机设计的各个阶段都应该认真考虑红外光学系统杂散辐射分析与抑制,并采取多种抑制措施以得到预期效果。随着计算机技术的迅猛发展,光学、结构和热学分析与仿真的集成化将是杂散辐射分析与抑制的有效手段。另外数字图像处理技术的成熟和完善也将作为最后的手段,在解决杂散辐射问题上发挥重要作用。

参考文献:

- [1] PETERSON G L. Stray light calculation methods with optical ray trace software[J]. *SPIE*, 1999,3780:132-137.
- [2] BREAULT R P. Problems and techniques in stray radiation suppression[J]. *SPIE*, 1977, 107:58-65.
- [3] FISCHER R E. What's so different about IR lens design[M]. *SPIE CR41*,1992:117-126.
- [4] 王 霖,张锦旭,郭 劲. 红外系统中杂散辐射的抑制方法[J]. *光机电信息*,2002(12):21-24.
WANG Q, ZHANG J X, GUO J. The suppression of stray radiation in infrared system [J]. *Optical-Mechanical-Electronic Information*, 2002(12):21-24. (in Chinese)
- [5] GUO Q, XU J M, ZHANG W J. Stray light modeling and analysis for the FY-2 meteorological satellite [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(13): 2817-2830.
- [6] 陈迎娟,张之江,张智强. CCD 像素响应不均匀性的校正方法[J]. *光学精密工程*, 2004,12(2):216-220.
CHEN Y J, ZHANG ZH J, ZHANG ZH Q. Correction of CCD pixel nonuniformity[J]. *Opt. Precision Eng.*,

2004,12(2):216-220. (in Chinese)

- [7] 陈万胜,赵杰,蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀性的校正方法[J]. 光学 精密工程,2008,16(2):314-318.
CHEN W SH, ZHAO J, CAI H G. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):314-318. (in Chinese)
- [8] 陈锐,谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术, 2002,24(1):1-3.
CHEN R, TAN X Q. Study on non-uniformity correction of infrared image [J]. *Infrared Technology*, 2002,24(1):1-3. (in Chinese)
- [9] 代少升,袁祥辉. 红外图像非均匀性实时校正的新技术[J]. 光学 精密工程,2004,12(2):201-204.
DAI SH SH, YUAN X H. Real-time correction of infrared image nonuniformity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(2):201-204. (in Chinese)
- [10] SCHERR L M, ORLANDO H J, HALL J T, *et al.*. Narcissus considerations in optical designs for infrared staring arrays[J]. *SPIE*, 1996,2864:442-451.
- [11] HE F Y, CUI J C, FENG S L, *et al.*. Narcissus analysis for cooled staring IR system[J]. *SPIE*, 2007,6722:67224.

作者简介:张 葆(1966—),男,吉林磐石人,研究员,工学博士,博士生导师,主要从事航空光电成像技术的研究。E-mail: cleresky@vip. sina. com

洪永丰(1980—),男,湖北潜江人,研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail:hyfciomp@163. com

史光辉(1935—),男,吉林长春人,研究员,工学学士,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: shighciomp@163. com

● 下期预告

离轴非球面数控抛光路径的自适应规划

邓伟杰^{1,2}, 郑立功¹, 史亚莉^{1,2}, 王孝坤¹, 张学军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

根据质点系平衡的加权平均思想,提出了一种新的适用于离轴非球面数控抛光的路径规划方法。根据影响抛光结果的因素,给出了权因子的组成元素及其计算方法,包括常数、加工残差分布以及与工件边缘的距离并给出了权因子间影响系数的粗略确定方法。对一组面形数据进行虚拟加工,与常规的 X-Y 直角坐标系型加工路径相比,面形均方根收敛率从 0.36 提高到 0.62,其它各项数值的表现也均优于常规方法。最后,对算法中的一些问题做了简要的说明和讨论。这种规划方法原理简单,效果显著,满足实际使用要求。