

制冷型红外光学系统冷反射的逆光路分析

张鹏¹, 罗长江², 熊钟秀¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471009; 2. 空军装备部科研订货部, 北京 100843)

摘要: 冷反射是评价制冷型红外光学系统成像质量的一个重要参数。分析了制冷红外光学系统产生冷反射的原因, 讨论了在光学设计软件中对冷反射现象的控制与分析方法; 提出了采用逆光路追迹光线的方法分析光学系统中各个光学表面产生的冷反射大小; 设计了一个工作在长波红外波段的制冷型光学系统, 系统焦距为 120 mm; 采用逆光路追迹像点弥散的方法分析了光学系统各个表面产生的冷反射大小。其结果与采用光学设计软件给出的冷反射评价参数 YNI 与 I/I_{bar} 以及利用经验公式计算得到的结果一致, 且采用逆光路追迹分析冷反射的方法更加直观。

关键词: 光学设计; 红外光学系统; 冷反射; YNI

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)06-0066-04

Analysis of Inverse Path Tracing Rays of Narcissus for Cooled Infrared Optical System

ZHANG Peng¹, LUO Changjiang², XIONG Zhongxiu¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China;

2. Scientific Research Ordering Department, Air Force Armament Ministry, Beijing 100843, China)

Abstract: The narcissus is an important parameter for evaluating the imaging quality of the cooled infrared optical system. The cause of narcissus for infrared optical system was analyzed. The method for controlling and analyzing narcissus in optical design software was discussed. A method of inverse path tracing rays was proposed for analyzing the magnitude of narcissus of each surface in the optical system. A cooled optical system working in the LWIR was designed, which focal length is 120 mm. The method of inverse path tracing rays was used to analyze the magnitude of narcissus of each surface of the optical system, which was in accordance with the YNI and I/I_{bar} parameters given by the optical design software, and the results calculated by the empirical formula. And the method of inverse path tracing rays for calculating narcissus is more direct.

Key words: optical design; infrared optical system; narcissus; YNI

0 引言

在制冷型红外光学系统的设计过程中, 必须要考虑冷反射现象(Narcissus)。对于工作中在中波红外(3 ~ 5 μm)或者长波红外(8 ~ 12 μm)波段的制冷型光学系统, 通常制冷型探测器工作在 77 K 的低温环境中, 而光学系统和被测目标的温度都为常温。由于制冷型红外探测器与环境温度存在很大的温差, 从杜瓦瓶中发出的冷光线穿过探测器窗口, 被光学系统的光学表面反射后又返回到杜瓦瓶中被探测器接收, 进而形成冷反射现象^[1-2]。冷反射的存在会影响光学系统的成像质量^[3]。

利用光学设计软件设计制冷型红外光学系统时, 对于光学系统冷反射的分析, 可以利用 YNI 与 I/I_{bar} 两个参数作为光学系统中各表面产生的冷反射强度的评价标准。目前, 已经有相关文章讨论了采用 YNI 和 I/I_{bar} 分析光学系统中各表面产生冷反射强度的方法^[4-5], 分析了利用等效温差(NETD)评价冷反射的方法, 实现了红外光学系统的冷像等效温差的计算和分析^[6-9], 讨论了红外扫描成像系统中冷反射的抑制等相关工作^[10-11]。针对冷反射大小的分析, 本文提出了一种新的方法, 即逆光路追迹像点弥散法分析制冷型红外系统的冷反射。

1 制冷型红外光学系统的冷反射分析方法

1.1 采用逆光路追迹分析冷反射的方法

冷反射是评价制冷红外光学系统成像质量的一个

重要参数。将制冷型红外光学系统的探测器视为冷光源,从冷光源发出的光线视为冷光线,追迹从探测器中心发出的边缘冷光线。当冷光线正入射到透镜表面或者冷光线聚焦在透镜表面时,根据光路的可逆原理,冷光线将会经光学系统反射后重新聚焦到焦平面上,进而在图像的中心形成一个冷斑,即探测器经光学系统的表面而观察到的自身形成的冷像。根据冷反射产生的原因,追迹从探测器发出的光线,经过光学系统各个透镜表面反射后打到探测器上的弥散斑大小,来分析光学系统产生的冷像大小,即为逆光路追迹像点弥散分析冷反射的方法。

1.2 利用光学设计软件分析冷反射的方法

在现有的光学设计软件中,无论是扫描红外系统还是凝视红外系统,一般都可以通过约束 YNI 与 I/\bar{bar} 这两个参数对制冷型红外光学系统的冷反射进行控制^[12]。从制冷探测器发射出的光线,当光线入射到某个透镜表面后按原路返回时,由光路可逆原理,必然会聚焦在探测器上,这时该面产生的冷反射最大。从图1中面1、2、5可以看出,当边缘冷光线在光学表面上的人射角度为 0° 时,冷反射现象最强;从图1中面3、4可以看出,当边缘冷光线在光学表面上的人射高度为0时,产生的冷反射现象也最强。所以,轴上视场产生的冷反射强度与近轴边缘光线在光学表面上的人射高度 Y 、入射介质的折射率 N 以及入射角度 I 的乘积 YNI 有直接关系。当 YNI 的数值接近于0时,该光学表面产生的冷反射最严重;当 YNI 的数值大于1时,可以认为该光学表面产生的冷反射很小, YNI 主要反映中心视场的冷像强度。 I/\bar{bar} 为近轴边缘光线在光学表面上的人射角度与近轴主光线的人射角度的比值,主要反映的是冷反射随视场的变化情况。如果 I/\bar{bar} 大于1,说明冷反射噪声几乎不随视场的变化而变化。

1.3 根据经验公式分析冷反射的方法

在评价冷反射现象对制冷型光学系统像面照度不均匀性的影响时,也可以利用下面的经验公式来分析各个光学表面产生的冷反射引起的像面温度变化^[13]。

$$\Delta T_N = \rho \Delta T / r^2 \quad (1)$$

式中: ρ 为折射透镜表面的反射率; ΔT 为制冷型探测器的温度与外界环境温度的差值; r 是由冷反射造成的像点弥散直径与正常像点弥散直径的比值。分别计算各个表面产生的冷反射引起的像面温度变化值,进行求和计算就能够得到系统所有表面引起的像面温度变化值。当由冷反射引起的像面温度变化量小于制冷型探测器的灵敏度时,冷反射引起的像面照度不均匀性对光学系统的影响不明显,可以忽略。

2 采用逆光路追迹方法分析制冷型光学系统产生的冷反射

针对一个已设计出的制冷型长波红外光学系统,采用逆光路追迹的方法进行冷反射分析。制冷型长波红外光学系统的结构示意图及表面编号如图1所示,工作波段范围为 $8 \sim 11 \mu\text{m}$,光学系统的焦距为 120 mm , $F/\#$ 为2,视场角为 $\pm 2.93^\circ$ 。光学系统的孔径光阑位于制冷型探测器的冷光阑位置,实现了100%的冷光阑效率。

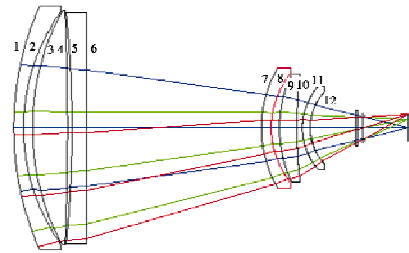


图1 制冷型长波红外光学系统的结构示意图

Fig. 1 Layout of an LWIR optical system

通过优化设计得到制冷型长波红外光学系统在 20°C 时的调制传递函数(MTF)曲线如图2所示,在 20 lp/mm 处的 MTF 大于0.4。

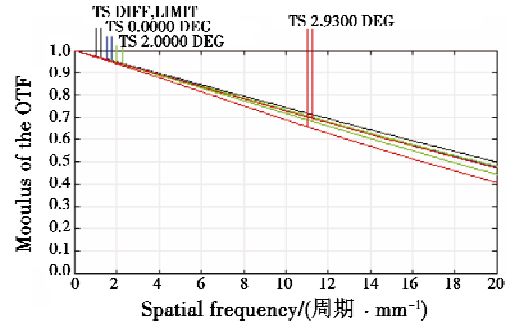


图2 光学系统的MTF曲线

Fig. 2 The MTF curve of the optical system

通过实际光线追迹得到光学系统的弥散斑如图3所示,光学系统的艾里斑半径为 $25.17 \mu\text{m}$,实际追迹光线得到的像点弥散基本在艾里斑半径的范围内。由傅里叶变换方法计算得到光学系统的点扩散函数的横截面图形如图4所示,包含了衍射效应的影响。

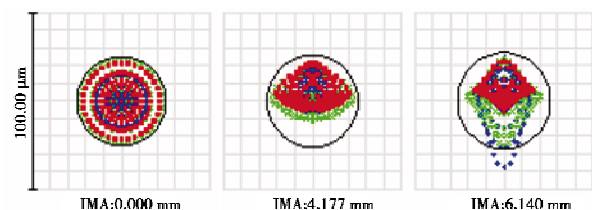


图3 光学系统的弥散斑

Fig. 3 Spot diagram of the optical system

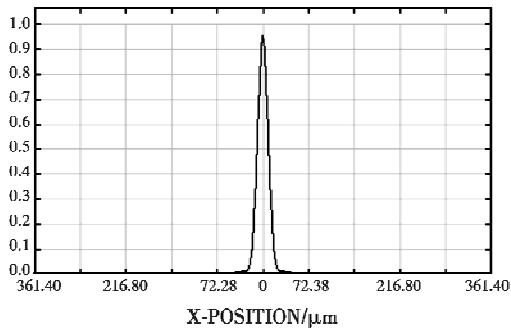


图4 光学系统点扩散函数的横截面示意图

Fig.4 Diagram of the point spread function of the optical system

通过对比图3和图4可知,由于该制冷型红外光学系统的中心波长较大,光学系统的 $F/\#$ 为2,所以,光学系统的衍射效应不显著,可以认为由实际光线追迹得到的光学系统弥散斑与通过傅里叶变换方法得到的弥散斑大小是一致的。

对光学系统中的各个表面进行逆光路追迹,得到经过光学表面反射到焦平面阵列上的弥散斑尺寸,进而分析光学系统的冷反射对系统性能的影响。例如对光学系统中的第一片透镜进行反向光路追迹光线,如图5所示,只有很小的一部分反射光线能够被探测器接收,而且分布比较均匀。所以,可以认为面1对光学系统的冷反射贡献量很小,可以忽略。

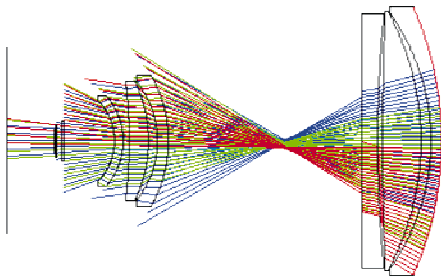


图5 逆光路追迹示意图

Fig.5 Inverse path tracing rays for first surface

分别对制冷型红外光学系统的每个光学表面进行实际的反向光路追迹,得到经过光学系统的各个表面反射后的光线到达探测器上的弥散斑半径尺寸,如表1所示。由于对应不同的视场,产生的冷反射弥散斑大小会有所变化,因此,表1中不仅给出了轴上点对应的冷反射弥散斑大小,也给出了所有视场对应的冷反射弥散斑的最小值。其中,冷反射弥散斑的大小都是采用以质心为中心的均方根半径(RMS Radius)表示的。当冷反射产生的弥散斑半径大于探测器半径的一半时,可以认为由该面产生的冷反射弥散斑均匀地分布在探测器上,即该光学表面对光学系统的冷反射影响很小。

表1 逆光路追迹光线的冷反射分析结果

Table 1 Cold reflection analysis result of inverse path tracing rays

表面序号	轴上点冷反射斑/mm	所有视场的冷反射斑最小值/mm	表面序号	轴上点冷反射斑/mm	所有视场的冷反射斑最小值/mm
1	5.83402	5.16029	7	12.0000	11.0000
2	6.16119	3.73552	8	9.80184	9.69727
3	5.47165	4.32917	9	12.0000	11.0000
4	5.23474	5.10779	10	6.23320	5.34048
5	5.06231	5.06231	11	9.72917	9.67580
6	4.58606	4.58606	12	14.0000	14.0000

对于该制冷型红外光学系统中的所有光学表面,对应的轴上点冷反射弥散斑的大小都大于探测器半径尺寸的一半;对比所有视场的各个光学表面产生的冷反射弥散斑的最小值,面2和面3产生的冷反射弥散斑相对较小,但仍大于探测器半径的一半,可以认为,光学系统的各个表面产生的冷反射都很小。

利用光学设计软件分析制冷型红外光学系统的各个表面的 YNI 和 $I/Ibar$ 值,如表2所示。对应各个光学表面的 YNI 值都大于1。光学表面4、5、6和10对应的 $I/Ibar$ 值小于1,说明对应这几个表面产生的冷反射弥散斑随视场的不同而发生改变。由表1可知,对于光学表面5和6,采用逆光路追迹得到的所有视场的最小弥散斑即为轴上点冷反射弥散斑;对于光学表面4和10,轴上点冷反射弥散斑与所有视场的冷反射弥散斑最小值不同,说明了对应这两个表面的冷反射随视场不同而不同,验证了光学设计软件给出的参数 $I/Ibar$ 的值。所以,采用逆光路追迹分析冷反射的方法与采用光学设计软件控制 YNI 与 $I/Ibar$ 的方法得到的结果是一致的,而采用反向光路追迹光线得到冷反射弥散斑的方法更加直观、准确。

表2 利用光学设计软件分析冷反射的结果

Table 2 Analysis result of optical design software

表面序号	YNI	$I/Ibar$	表面序号	YNI	$I/Ibar$
1	6.46348	-1.152	7	2.04377	-30.496
2	13.10597	-1.106	8	4.87193	-2.198
3	11.65129	-1.039	9	3.02136	-4.273
4	-8.44157	-0.791	10	-3.08198	-0.824
5	-9.10552	-0.802	11	1.60978	3.812
6	-3.95581	-0.684	12	2.17782	38.342

由图5可知,光学系统的正常像点弥散半径为 $25\mu m$,表1给出了采用逆光路追迹光线的方法达到的各个光学表面的像点弥散半径,各透镜表面的反射率 ρ 取1.5%,探测器放置在77K的液氮温度下,光学系统的外界温度为常温 $20^\circ C$,利用式(1)可以计算得到,对于轴上点,光学系统所有表面产生的冷反射引起

的总的像面温度变化为 0.56272 mK,而所有视场的冷反射弥散斑最小值引起的温度变化为 0.74010 mK,二者都远小于制冷型探测器的灵敏度 17 mK。因此,可以忽略光学系统的冷反射对系统产生的影响,从另一个角度也验证了采用逆光路追迹像点弥散分析冷反射的方法的准确性。

3 结论

对制冷型红外光学系统中的各个表面进行反向光线追迹,能够得到各个表面产生的冷反射弥散斑大小,同利用评价参数 YNI 与 I/I_{bar} 和经验公式计算分析得到的结果一致。采用逆光路追迹分析冷反射的方法能够直观、准确地实现制冷型红外光学系统对冷像的评估。

参 考 文 献

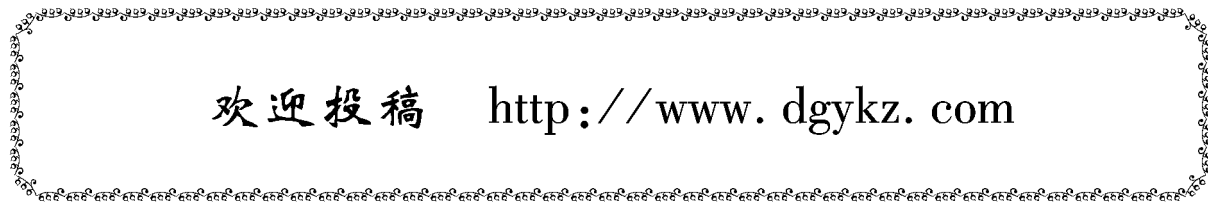
[1] LLOYD J M. Thermal imaging systems[M]. New York: Plenum Press, 1975:275-281.
 [2] HOWARD J W, ABEL I R. Narcissus; Reflections on retroreflections in thermal imaging systems[J]. Appl Opt, 1982, 21:3393-3397.
 [3] ARASA J, PIZARRO C, TOMAS N, et al. Contribution of ghost and narcissus effects in MTF calculation [J].

SPIE, 1999, 3737:118-124.
 [4] 栾亚东. 红外扫描成像系统中冷反射的光学抑制[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(s2):26-30.
 [5] 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.
 [6] 刘洋, 安晓强. 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):274-280.
 [7] 焦明印. 红外扫描成像系统中 Narcissus 等效温差的修正计算[J]. 光学学报, 1997, 17(1):126-127.
 [8] HE F Y, CUI J C, FENG S L, et al. Narcissus analysis for cooled staring IR system [J]. Proc. SPIE, 2007, 6722: 67224N.
 [9] 刘志祥, 马冬梅, 胡明鹏, 等. 凝视型红外成像系统中冷像的仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 702-705.
 [10] 顿雄, 陶玉, 孟军合. 双视场红外扫描成像系统冷反射抑制[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4):732-735.
 [11] 刘欣, 潘枝峰. 红外光学系统冷反射分析和定量计算方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7):1684-1688.
 [12] Code V reference manual [Z]. Version 9. 5, Optical Research Associates, 2004.
 [13] WOLFE W L. Optical engineer's desk reference [M]. Optical Society of America, 2003.

(上接第 61 页)

[7] 赵新生, 邢立新, 孙超. 末敏弹稳态扫描段扫描间隔分析[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4):900-903.
 [8] 宋磊, 黄长强, 王治军, 等. 红外导引头定向扫描控制研究[J]. 电光与控制, 2010, 17(5):14-17.
 [9] CARLSON B D, EVANS E D, WILSON S L. Search radar detection and track with the Hough transform part I: System concept[J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(1):102-108.

[10] WILSON S L, CARLSON B D, EVANS E D. Search radar detection and track with the Hough transform part II: Detection statistics[J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(1): 109-115.
 [11] EVANS E D, WILSON S L, CARLSON B D. Search radar detection and track with the Hough transform part III: Detection performance with binary integration [J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(1):116-125.



欢迎投稿 <http://www.dgykz.com>