

文章编号: 1672-8785(2019)02-0001-06

折反式周视红外成像系统光学设计

吴海清 曾宪宇 王 朋

(1. 凯迈(洛阳)测控有限公司, 河南 洛阳 471009;

2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 为增大周视成像系统视场的同时有效降低红外光学系统的复杂度, 采用折反式光学结构, 通过反射镜及透镜光焦度的合理分配, 引入衍射面。分别设计了视场为 $360^\circ \times (-40^\circ \sim 50^\circ)$ 的折反式一次成像非制冷红外周视成像光学系统及视场为 $360^\circ \times (-30^\circ \sim 50^\circ)$ 的折反式二次成像光学系统。其工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$, 光学系统 F 数为 1.2。该系统可实现 360° 全方位和一定俯仰角度范围内凝视成像。设计结果表明, 该系统的结构简单紧凑, 后截距大, 成像良好, 在空间频率 20 lp/mm 处的调制传递函数 (Modulated Transfer Function, MTF) 值大于 0.4, 能满足应用需求。

关键词: 周视成像系统; 光学设计; 红外光学; 衍射光学

中图分类号: O439; TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.02.001

Design of Catadioptric IR Panoramic Imaging Optical System

WU Hai-qing, ZENG Xian-yu, WANG Peng

(1. Measurement and Control Co. Ltd., Luoyang 471009, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: To reduce the complexity of the infrared optical system effectively while increasing the field of view of a panoramic imaging system, a catadioptric optical structure is used and a diffractive surface is introduced through reasonable rationing of the mirror and lens focal power. A catadioptric once-imaging uncooled infrared panoramic imaging optical system with the field of view up to $360^\circ \times (\text{from } -40^\circ \text{ to } 50^\circ)$ and a catadioptric secondary imaging uncooled infrared panoramic imaging system with the field of view up to $360^\circ \times (\text{from } -30^\circ \text{ to } 50^\circ)$ are designed respectively. The imaging system operates in the waveband from $8 \mu\text{m}$ to $12 \mu\text{m}$ and its F number is 1.2. It can implement staring imaging at a certain pitch angle in a 360-degree viewing range. The design results show that the system is simple and compact in structure, large in posterior intercept and good in imaging quality. Its modulation transfer function value at the special frequency of 20 lp/mm is greater than 0.4, which can meet the application requirements.

Key words: panoramic imaging system; optical design; IR optics; diffractive optics

收稿日期: 2019-01-28

作者简介: 吴海清(1982-), 男, 陕西榆林人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为成像光学系统设计方面的研究。E-mail: whqcust@163.com

0 引言

随着红外凝视成像技术的发展,周视成像系统由于能对 360° 方位角度及一定俯仰角度范围内的空间进行凝视成像,在舰船对宽距离海面范围内警戒和告警、管道内窥检测、安防监控、机器视觉导航等领域发挥着重要的作用。

大视场红外周视成像系统由于没有扫描部件,无需进行图像拼接,可直接获得 360° 全方位大视场范围内的图像信息,因此越来越受重视^[1-2]。

周视成像光学系统的结构有透射式鱼眼镜头和折反式周视镜头两种类型。与传统的透射式广角鱼眼镜头相比,折反式周视成像光学系统能够在实现大视场的同时缩短系统长度,简化系统结构,从而成为视觉领域的研究热点^[3]。

然而,周视成像光学系统属于超广角系统,采用传统的光学系统结构时需要较多的透镜来校正光学系统的轴外像差,从而造成系统的透过率低,分辨不高。折反式结构结合衍射元件形成的混合周视红外成像系统,利用衍射元件具有负色散及负温度的特性,有利于色差校正,消除由于温度变化造成的光学系统成像质量下降,从而实现光学系统的无热化设计,简化系统结构,降低系统的复杂程度^[4-6]。

针对长波红外非制冷探测器,本文设计了视场为 $360^\circ \times (-40^\circ \sim 50^\circ)$ 的一次成像非制冷红外周视成像光学系统及视场为 $360^\circ \times (-30^\circ \sim 50^\circ)$ 的二次成像非制冷红外周视成像光学系统。该系统适用于管道内窥检测、机器视觉导航和安全监控等领域。

1 设计思路

在红外周视成像系统设计中,由于长波红外材料的种类有限,红外材料的温度效应明显,因此,需要简化光学系统的结构,减少透镜的数量。这就要求在设计光学系统时需采用新的光学结构型式。本系统中,采用两面二次曲面反射镜,形成折反式结构型式。同时,在

光学系统中用衍射面形成衍射元件,利用衍射元件的负色散、负温度、负光焦度特性降低像差,并获得所需的波前质量,从而有效简化光学系统的结构,降低系统的复杂度。图 1 为折反式周视成像光学系统的结构图。该系统包含两个反射面,它可以在围绕光轴的 360° 全方位及垂轴方向上的一定视场范围内成像。

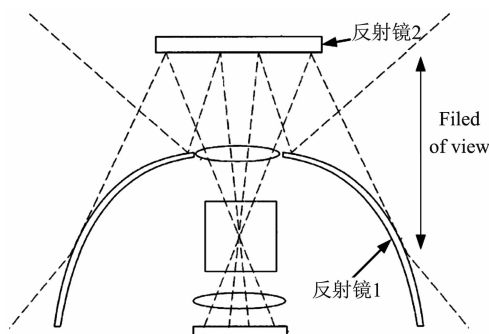


图 1 周视成像镜头的基本结构

2 设计结果及像差分析

根据上述基本设计思路,建立了折反式周视成像系统的初始结构模型,利用光学设计软件进行优化,分别设计了一次成像、二次成像两种长波红外周视成像光学系统。一次成像光学系统的轴向长度短,但在结构设计时需进行消杂光设计。二次成像光学系统的轴向长度比一次成像系统长。通过在一次像面处增加视场光阑,系统视场外的杂散光不能穿过视场光阑而到达像面,可有效降低杂散光对光学系统成像的影响,提高了系统的信噪比。

2.1 一次成像系统设计及像质分析

一次成像折反式红外周视成像光学系统的设计参数见表 1。

表 1 一次成像光学系统的设计参数

参数	技术指标
探测器	384×288 元(非制冷型)
像元尺寸	25 μm
工作波段	8~12 μm
F 数	1.2
视场	360°×(-40°~50°)

图 2 为本文的一次成像光学系统,图 3 为

本文一次成像系统的垂轴像差曲线。由图可见, 系统垂轴像差小于 $50\ \mu\text{m}$ 。图 4 为本文一次成像系统的 MTF 曲线, 横坐标为空间频率, 纵坐标为光学系统的传递函数值。由图可见, 在空间频率为 $20\ \text{lp/mm}$ 时, 该光学系统的全视场 MTF 均大于 0.4。图 5 为本文一次成像系统的点列图。由图可见, 该系统的弥散斑均方根的直径均小于探测器的像元尺寸, 满足设计要求。图 6 为本文一次成像系统的圆内

能量曲线。由图可见, 能量的 80% 包含在探测器的一个像元之内, 与探测器匹配良好, 为加工公差留下了一定余量, 能满足设计要求。

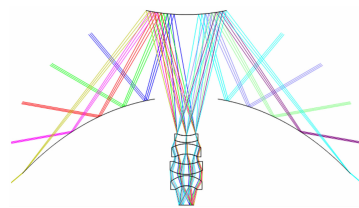


图 2 一次成像系统的结构图

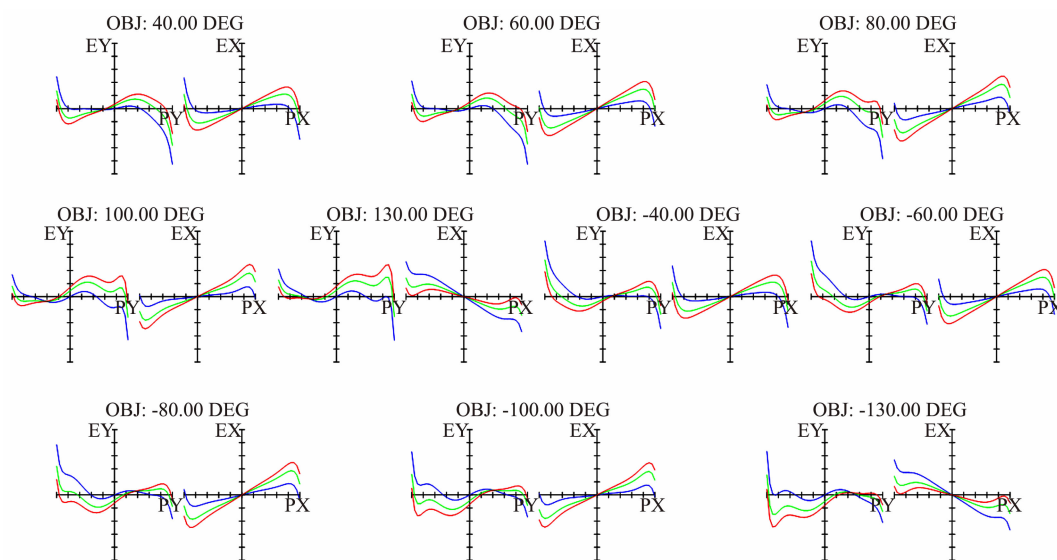


图 3 一次成像系统的点列图

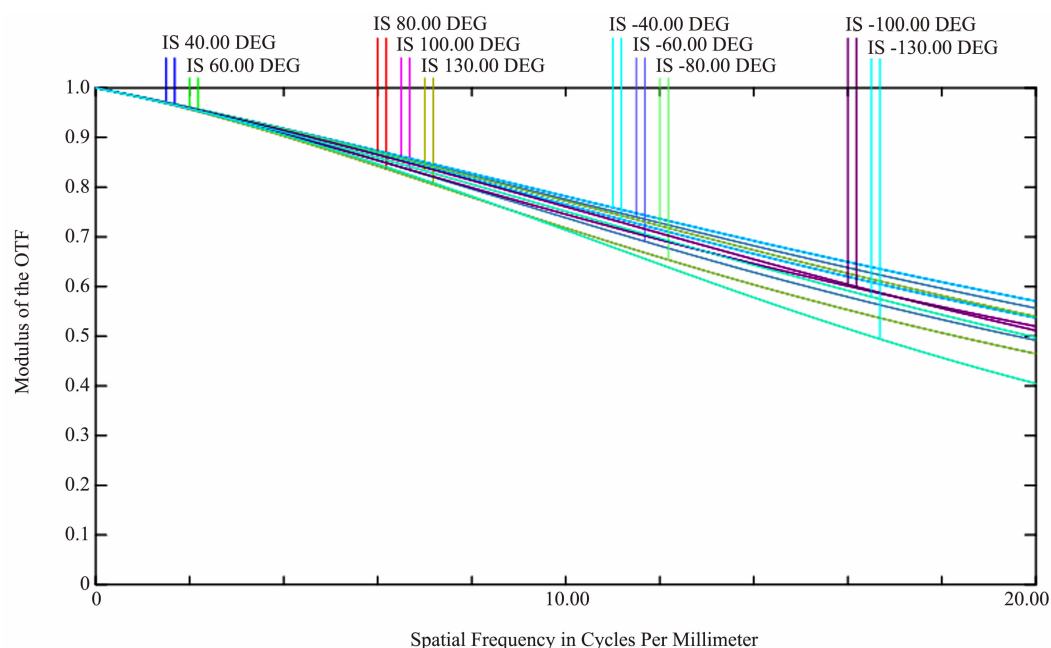


图 4 一次成像系统的调制传递函数

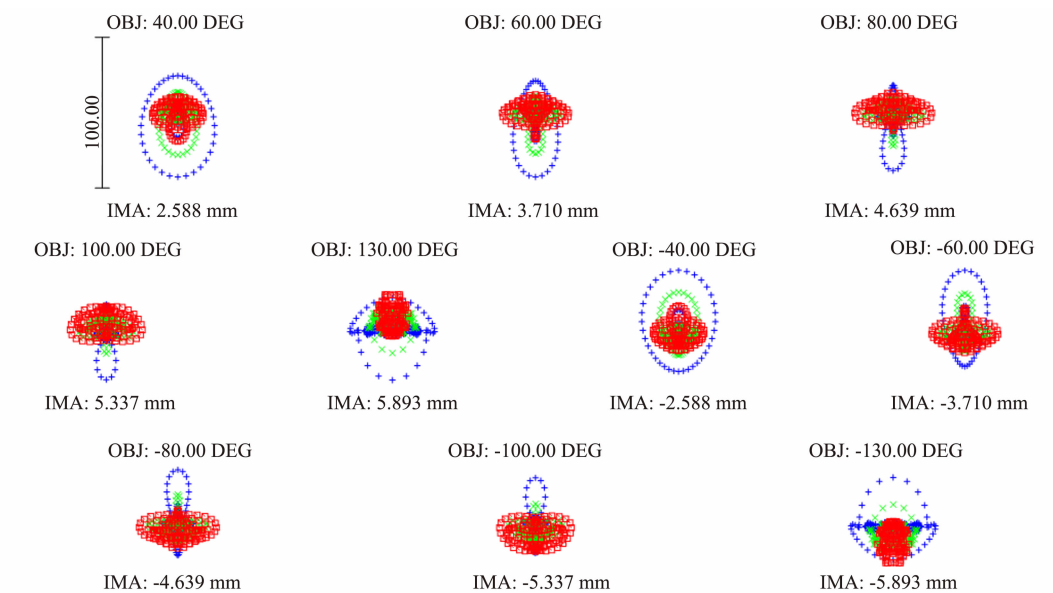


图 5 一次成像系统的点列图

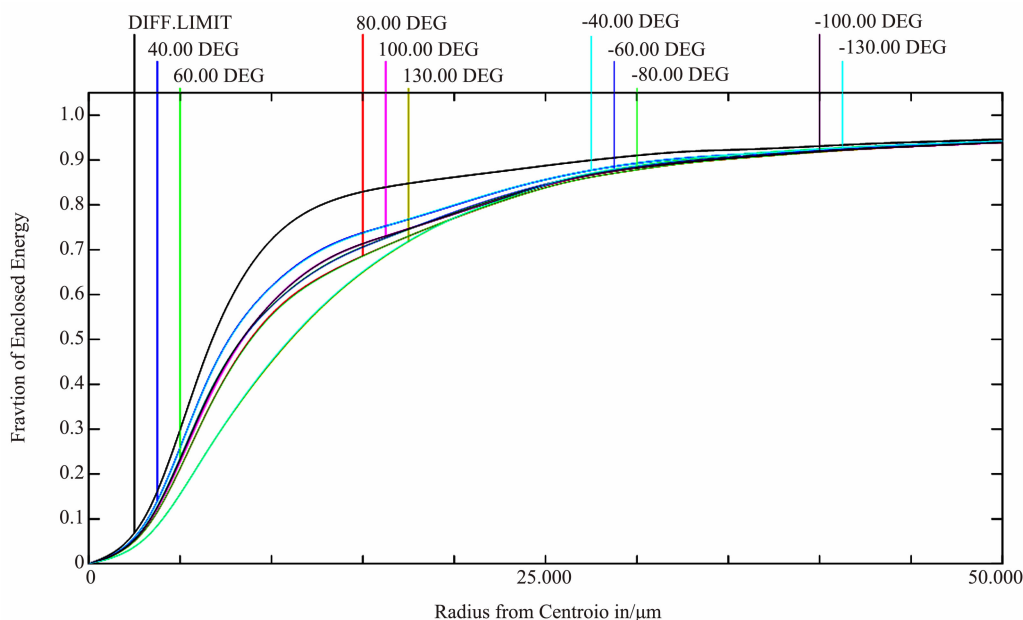


图 6 一次成像径向能量分布曲线

2.2 二次成像系统设计及像质分析

表 2 给出了二次成像折反式周视红外成像光学系统的设计参数。

表 2 二次成像光学系统的设计参数

参数	技术指标
探测器	384×288 元(非制冷型)
像元尺寸	25 μm
工作波段	8~12 μm
F 数	1.2
视场	360°×(-30°~50°)

图 7 为本文二次成像折反式周视红外成像光学系统图, 图 8 为本文二次成像折反式周视红外成像光学系统的垂轴像差曲线。可以看出, 系统垂轴像差小于 50 μm。图 9 为本文二次成像折反式周视红外成像光学系统的 MTF 曲线, 横坐标为空间频率, 纵坐标为光学系统的传递函数值。可以看出, 在空间频率为 20 lp/mm 时, 该光学系统的全视场 MTF 均大于 0.4。图 10 为本文二次成像折反式周视红外

成像光学系统的点列图。可以看出, 该系统的弥散斑的均方根直径均小于探测器的像元尺寸, 满足设计要求。图 11 为本文二次成像折反式周视红外成像光学系统的圆内能量曲线。可以看出, 能量的 80% 包含在探测器的一个像元之内, 与探测器匹配良好, 为加工公差留下了一定余量, 满足设计要求。

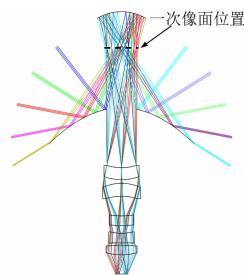


图 7 二次成像系统的结构图

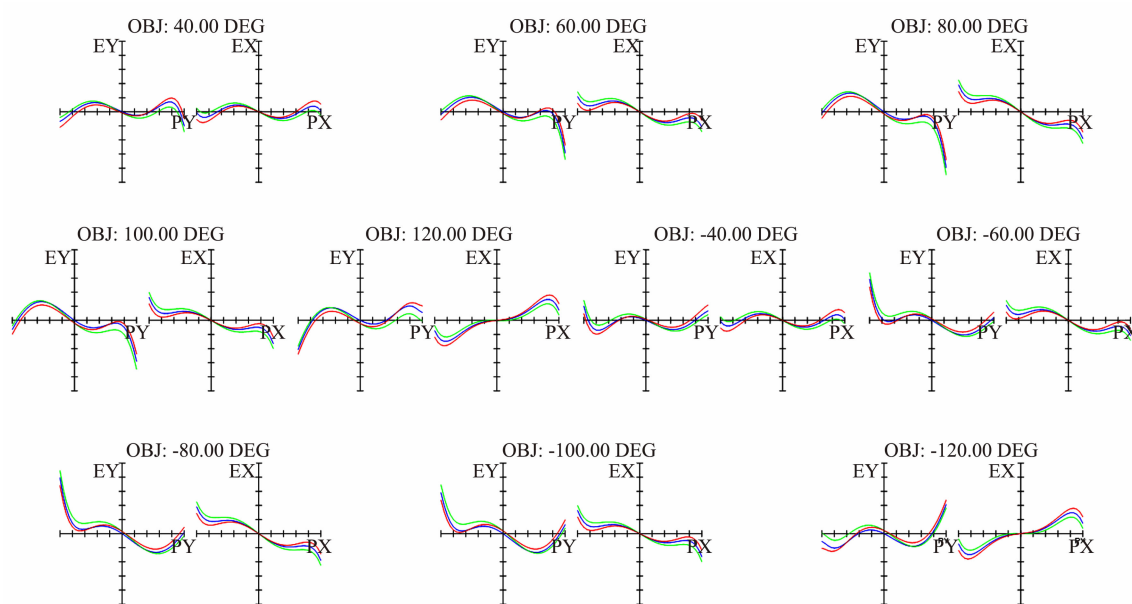


图 8 二次成像系统的垂轴像差图

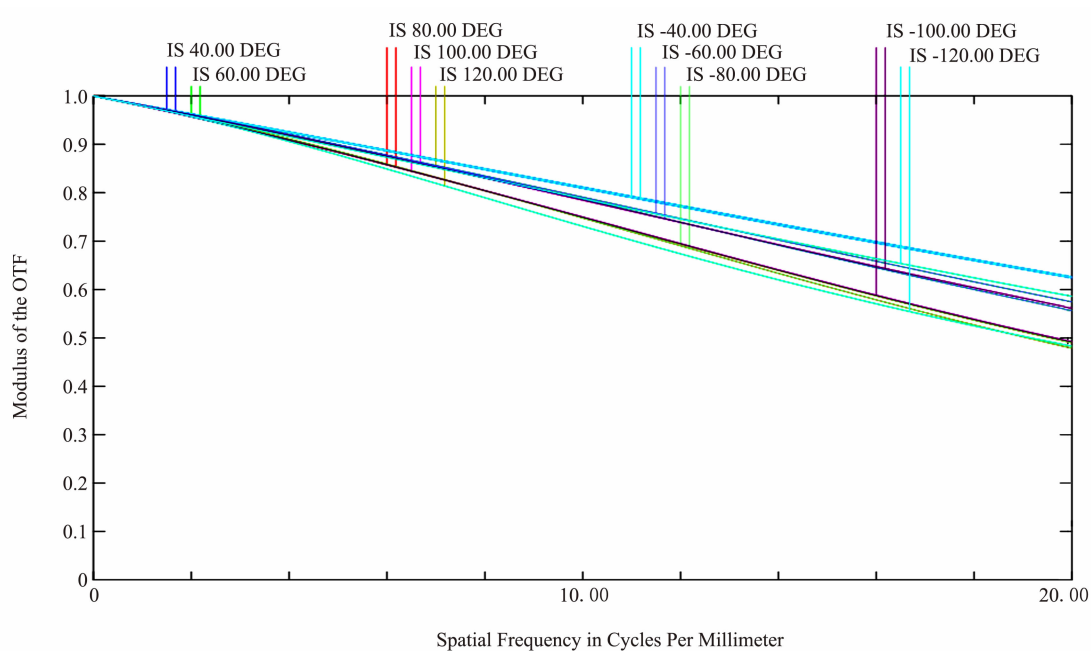


图 9 二次成像系统的 MTF

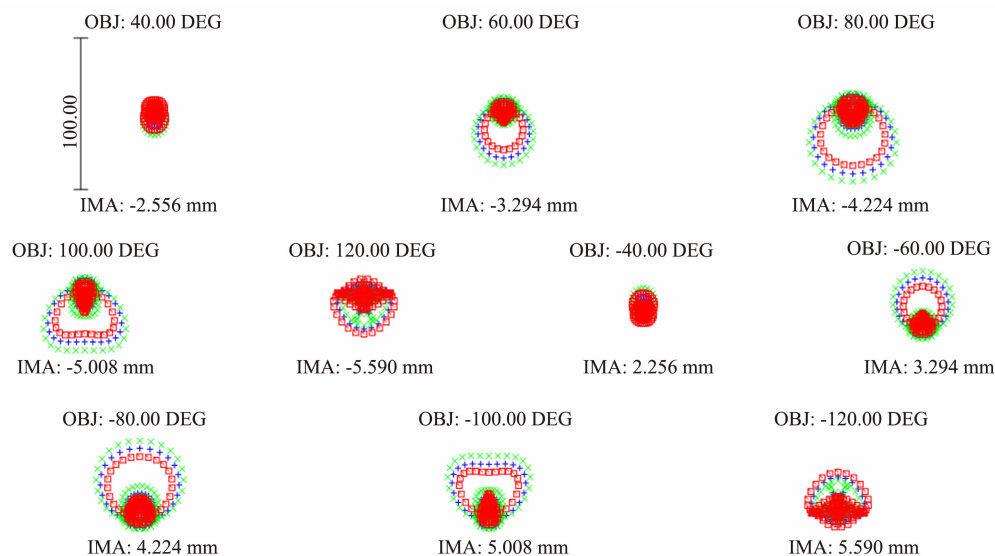


图 10 二次成像系统的点列图

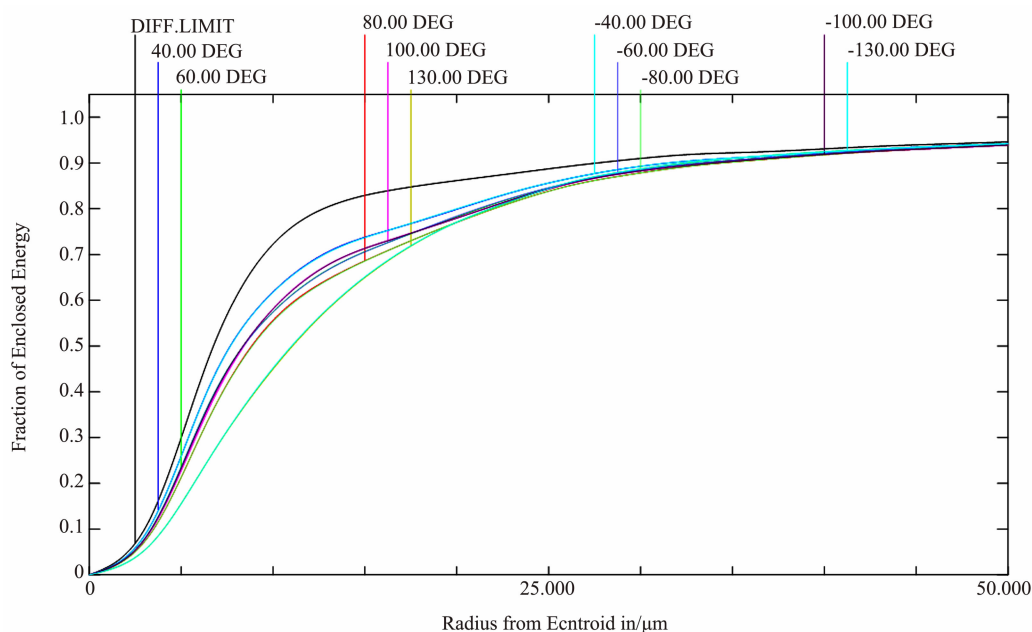


图 11 二次成像径向能量分布曲线

3 结论

论述了周视红外成像光学系统的原理, 利用折反式结构型式, 分别设计了视场为 $360^\circ \times (-40^\circ \sim 50^\circ)$ 的一次成像非制冷长波红外周视成像光学系统及视场为 $360^\circ \times (-30^\circ \sim 50^\circ)$ 的二次成像光学系统两种光学系统。来自物方的光线经两个曲面反射镜反射后进入后续折射式透镜, 形成折反式光学系统。该系统能实时获取 360° 全方位和垂直方向上一定角度范围内的全景图像。该系统结构紧凑, 透过率高, 能量损

失少, 适用于空间目标探测、管道内窥检测、机器视觉导航、安全监控等领域。

参考文献

- [1] 肖潇, 杨国光. 全景成像技术的现状和进展[J]. 光学仪器, 2007, 29(4): 84-89.
- [2] 曾吉勇, 苏显渝. 抛物面折反射全景成像系统[J]. 光电子·激光, 2003, 14(5): 485-488.
- [3] 曾吉勇, 苏显渝. 双曲面折反射全景成像系统[J]. 光学学报, 2003, 23(9): 1138-1142.

(下转第 35 页)