

# 基于 Q 型非球面的全景环带红外光学系统设计

刘一帆<sup>1</sup> 周峰<sup>2,\*</sup> 胡斌<sup>1</sup> 晋利兵<sup>1</sup>

(1 北京空间机电研究所, 北京 100094)

(2 北京邮电大学, 北京 100876)

**摘要** 全景环带光学系统凭借周视范围实时成像的特点已在超大视场光学领域中得到了广泛应用。传统的全景环带光学系统将折射、反射面集成在一片块状透镜中, 光线在其内部进行多次折、反射导致头部单元体积较大, 同时红外透镜材料密度大、折射率温度稳定性差等特点也与光学遥感器轻量化、可靠性高的应用需求相矛盾。文章基于像差理论, 讨论了全景环带两反射镜红外光学系统头部单元初始结构设计方法, 将 Q 型 (Q-Type 多项式) 非球面引入全景头部单元增加优化变量, 用偏离因子因子  $k_{RMS}$  数值表征非球面加工难度, 设计了以两反射镜为头部单元的全景环带红外光学系统。该系统在奈奎斯特频率 (20 线对/mm) 处调制传递函数优于 0.5; 全视场像元 (25  $\mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$  区域内) 能量集中度优于 65%, 像质评价结果表明其成像品质良好。该设计在缩小系统体积、提高光学设计优化效率方面有很大的改进, 满足超大视场实时成像的应用需求。

**关键词** 全景环带光学系统 超大视场 Q 型非球面 光学遥感器

中图分类号: O439

文献标志码: A

文章编号: 1009-8518(2024)01-0090-09

DOI: [10.3969/j.issn.1009-8518.2024.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-8518.2024.01.008)

## Design of a Panoramic Band Infrared Optical System Based on Q-Type Aspherical Surface

LIU Yifan<sup>1</sup> ZHOU Feng<sup>2,\*</sup> HU Bin<sup>1</sup> JIN Libing<sup>1</sup>

(1 Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

(2 Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** The panoramic band optical system has been widely used in the field of ultra-large field of view optics due to the characteristics of real-time imaging around the view range. For the traditional panoramic ring optical system integrating the refraction and reflection surfaces in a block lens, the light is repeatedly folded and reflected inside the lens to limit the size reduction of the head unit. Moreover, the infrared lens material has high density, low transmittance, and poor refractive index temperature stability, which is contradictory to the needs of high stability and lightweight optical remote sensors. Based on the aberration theory, the initial structure design method of the head unit of the infrared optical system with a panoramic ring and two mirrors is discussed in this paper. Q-Type aspherical surface was introduced into the panoramic head unit to increase the optimization

收稿日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金 (1210030377)

引用格式: 刘一帆, 周峰, 胡斌, 等. 基于 Q 型非球面的全景环带红外光学系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2024, 45(1): 90-98.

LIU Yifan, ZHOU Feng, HU Bin, et al. Design of a Panoramic Band Infrared Optical System Based on Q-Type Aspherical Surface[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2024, 45(1): 90-98. (in Chinese)

variables. A panoramic band infrared optical system with two mirrors as the head unit is designed to describe the difficulty in aspherical surface processing. The modulation transfer function of the system is better than 0.5 at Nyquist frequency (20 lp/mm). The energy concentration of full-field pixels (within  $25\ \mu\text{m}\times 25\ \mu\text{m}$ ) is better than 65%, and the image quality evaluation results show that the image quality is good. This design has great improvement in reducing the size of the system and improving the efficiency of optical design optimization and meets the application requirements of real-time imaging with large field of view.

**Keywords** panoramic ring optical system; wide field of view; Q-Type aspheric surface; optical remote sensor

## 0 引言

在航天遥感领域, 全景成像的光学系统需要具备超大视场、实时成像和轻量化的特点。近年来, 国内外研究出多种技术手段可实现超大视场全景成像, 其中包括: 单镜头扫描成像、多镜头视场拼接成像、多尺度成像以及鱼眼透镜的超半球凝视成像等。这些技术手段可以提供准确、清晰的全景图像从而满足应用需求, 但也存在不足之处: 单镜头扫描成像因引入了机械结构, 导致系统的可靠性降低<sup>[1]</sup>; 多镜头拼接成像与多尺度成像一般由多个镜头和多个图像传感器构成, 体积及成本较高, 无法对感兴趣目标进行实时不间断观测<sup>[2]</sup>; 鱼眼透镜能够提供超大的视场, 但其存在较大的畸变, 同时弯月透镜的体积较大, 后期加工难度较大<sup>[3]</sup>。相比于上述几种系统, 全景环带光学系统将两个反射面和两个透射面集成到一个镜头上, 形成块状透射式头部单元, 简称“全景块”。采用头部成像单元与中继透镜相结合的方式压缩系统体积, 具有景深大、体积小、实时性高、抗干扰能力强等优点, 在航天遥感、安防监控、内壁检测等领域都有广泛的应用<sup>[4]</sup>。

由于红外材料的特殊性质, 将传统透射式“全景块”应用于红外波段将面临一系列问题。红外透镜材料具有密度大、折射率温度系数敏感、材料折射率均匀性差和材料吸收系数大的特点, 采用透射式全景块将增大头部单元质量, 同时受光学材料折射率均匀性、折射率温度稳定性等条件的制约而影响系统可靠性<sup>[5]</sup>。因此, 本文提出用由两反射镜组成的全反射式头部单元代替单透镜透射式头部单元, 一方面能够压缩系统长度, 减轻头部单元质量; 另一方面选用低膨胀系数的反射镜可以提高系统的温度稳定性。同时提出在头部单元中引入非球面以增加头部单元的设计自由度, 达到校正系统像差、简化系统结构的目的。近年来, 国内外科科研机构对 Q 型非球面应用于成像光学领域做了大量的研究工作: 文献 [6] 基于 Q 型非球面设计了 F 数 2.8 的 300 万像素手机镜头; 文献 [7] 设计了全视场角为  $180^\circ$  的全景监控鱼眼镜头; 文献 [8] 利用 Q 型非球面设计了一款全视场角为  $110^\circ$  的电子内窥镜物镜; 文献 [9] 利用 Q 型非球面设计了视场角为  $30^\circ\times 120^\circ$  的全景环带光学系统。调研发现, Q 型非球面技术与传统偶次非球面相比, 不仅能提升系统的优化效率, 还能减轻非球面元件加工和检测的复杂性。基于此, 本文超大视场全景环带红外光学系统采用 Q 型非球面面形描述技术, 以达到简化光学元件设计过程、提高系统灵活性和可靠性的效果<sup>[10]</sup>。

本文根据超大视场实时成像的应用指标要求设计了全景环带红外光学系统, 采用两反射镜代替传统全景环带红外光学系统块状透射式头部单元; 根据初级像差理论计算两反射镜初始结构参数; 头部单元利用 Q 型非球面面形描述方法代替传统偶次非球面面形描述方法, 并通过  $k_{\text{RMS}}$  数值 (非球面陡度) 表征非球面元件的加工难易程度。

# 1 超大视场全景环带红外光学系统设计

## 1.1 系统参数

根据超大视场光学传感器实时全景成像的应用需求<sup>[11]</sup>, 总结得出本文全景环带红外光学系统的各项设计指标, 如表 1 所示。

表 1 光学系统设计指标  
Tab.1 Optical system design index

项目	指标要求
焦距/mm	7.5
视场角	(50°~70°) × 360°
F 数	1.5
光学系统入瞳直径/mm	5
谱段/μm	7.5~10.5

## 1.2 结构型式选择

传统全景环带头部单元光学系统采用折反式光学系统结构, 如图 1 所示, 面 1、面 4 为透射面, 面 2、面 3 为反射面。入射光线在块状头部单元中分别进行两次折射和反射, 反射面会对成像光线形成遮挡; 光线通过透射式头部单元容易引入色差, 增加中继透镜组校正残余像差的压力, 影响成像品质。

本文提出的全反射式头部单元光学系统, 由两片反射镜代替块状透射镜, 成像原理图如图 2 所示, 反射镜  $M_1$  为主镜,  $M_2$  为次镜。一次成像光学系统的轴向长度短, 且两反射镜头部单元光学系统没有色差、光线透过率高、能在紫外至红外波段范围工作, 同时反射镜能够有效折叠光路, 有利于进一步缩小头部单元体积, 实现系统轻量化的应用需求。

## 1.3 头部单元光学系统初始结构求解

基于初级像差理论, 计算头部单元采用两反射镜光学系统初始结构设计参数<sup>[12-13]</sup>。如图 2 所示, 光线依次经过主镜  $M_1$ 、次镜  $M_2$ ,  $l_1$  为主镜的物方截距,  $l_1'$  为主镜的像方截距,  $l_2$  为次镜的物方截距,  $l_2'$  为次镜的像方截距;  $u_1$  为主镜的物方孔径角,  $u_1'$  为主镜的像方孔径角,  $u_2$  为次镜的物方孔径角,  $u_2'$  为次镜的像方孔径角。光学系统光阑与主镜重合, 令  $l_1 = \infty$ ,  $u_1 = 0$ ,  $l_2' = \infty$ ,  $u_2' = 0$ 。

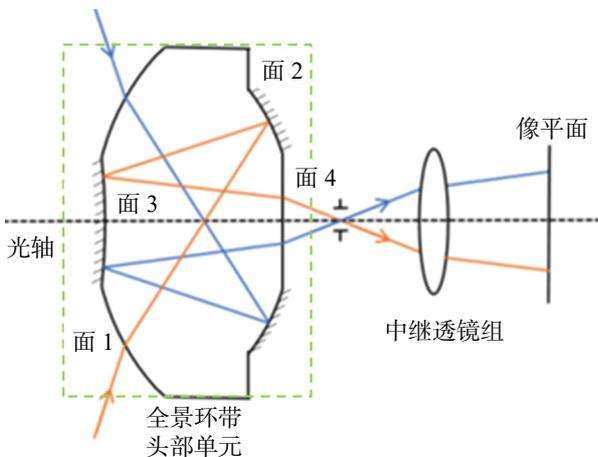


图 1 块状头部单元成像原理图

Fig.1 Imaging principle diagram of the transversal panoramic ring optical system

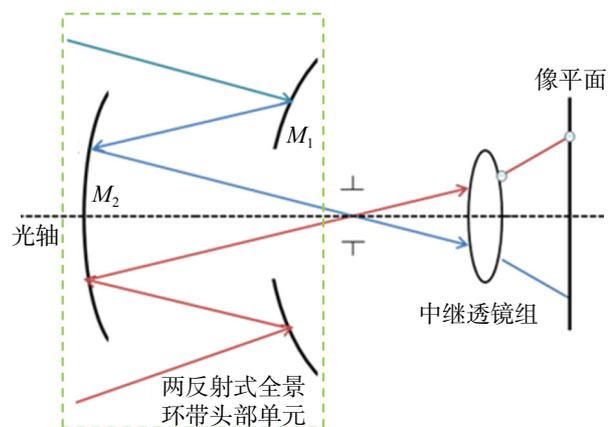


图 2 两反射式头部单元成像原理图

Fig.2 Two-trans head unit imaging schematic

$$\alpha = \frac{l_2}{f_1'} = \frac{2l_2}{R_1} = \frac{h_2}{h_1} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{l_2'}{l_2} = \frac{u_2}{u_2'} \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为轴向放大率;  $\beta$  为垂轴放大率;  $f_1'$  为主镜的焦距;  $h_1$  和  $h_2$  分别为主镜、次镜的轴上光束通光口径之半;  $R_1$  为主镜的归一化半径; 令  $h_1 = 1$ ,  $f_1' = \frac{1}{\beta}$ ,  $u_1' = u_2 = \beta$ , 得到归一化结构参数方程 (3) ~ (5):

$$R_1 = \frac{2}{\beta} \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{1+\beta} R_1 \quad (4)$$

$$d_1 = f_1'(1-\alpha) \quad (5)$$

式中  $R_2$  为次镜的归一化半径;  $d_1$  为归一化间隔。

根据光学单色像差的表述, 采用  $S_I$ 、 $S_{II}$ 、 $S_{III}$ 、 $S_{IV}$  及  $S_V$  分别表示初级球差、彗差、像散、场曲、畸变系数。  $K$  表征归一化非球面系数;  $P$  表征初级球差;  $W$  表征初级彗差;  $\Phi$  表征归一化光焦度;  $\psi$  表征归一化光焦度与折射率的比值;  $e$  为二次曲面的偏心率; 得到方程 (6) ~ (10):

$$P_1 = -\frac{\beta^3}{4}; P_2 = \frac{(1-\beta)^2(1+\beta)}{4} \quad (6)$$

$$W_1 = \frac{\beta^2}{2}; W_2 = \frac{1-\beta^2}{2} \quad (7)$$

$$\psi_1 = \beta; \psi_2 = -(1+\beta) \quad (8)$$

$$\Phi_1 = -\beta; \Phi_2 = \frac{1+\beta}{\alpha} \quad (9)$$

$$K_1 = \frac{e_1^2}{4}\beta^3; K_2 = -\frac{e_2^2(1+\beta)^3}{4\alpha^3} \quad (10)$$

式中  $P_1$  表示主镜球差;  $P_2$  表示次镜球差;  $W_1$  表示主镜慧差;  $W_2$  表示次镜慧差;  $\psi_1$  表示主镜归一化光焦度与折射率比值;  $\psi_2$  表示次镜归一化光焦度与折射率比值;  $\Phi_1$  表示主镜归一化光焦度;  $\Phi_2$  表示次镜归一化光焦度;  $K_1$  表示主镜归一化非球面系数;  $K_2$  表示次镜归一化非球面系数;  $e_1$  表示主镜二次曲面偏心率;  $e_2$  表示次镜二次曲面偏心率。

利用系统初级球差、彗差、像散、场曲、畸变公式可求出系统两反射面的非球面系数:

$$S_I = \left[ \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4} - \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4} \right] - \frac{\beta^3}{4}(1-e_1^2) \quad (11)$$

$$S_{II} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \left[ \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta} e_2^2 - \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta} \right] - \frac{1}{2} \quad (12)$$

$$S_{III} = \left( \frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^2 \left[ \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta^2} - \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta^2} e_2^2 \right] - \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta} - \frac{\alpha\beta-\beta-1}{\alpha} \quad (13)$$

$$S_{IV} = \beta - \frac{1+\beta}{\alpha} \quad (14)$$

$$S_V = \left( \frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^3 \left[ \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta^3} e_2^2 - \frac{\alpha(1-\beta)^2(1+\beta)}{4\beta^3} \right] - \frac{3(1-\alpha)^2(1-\beta)(1+\beta)}{2\alpha^2\beta^2} - \frac{2(1-\alpha)(1+\beta)}{\alpha^2\beta} \quad (15)$$

令  $S_I=S_{II}=S_{III}=S_{IV}=0$ ，即全景环带红外光学系统的初级球差、慧差、像散、场曲均为 0，可求出系统两反射面的二次曲面参数。

#### 1.4 中继透镜组初始结构

在全景环带成像光学系统中，中继透镜组在成像和校正头部单元残余像差方面扮演着非常重要的角色。由于全景环带头部单元要满足超大的视场角，中继透镜组的视场较大，与视场相关的彗差、像散、场曲、畸变、垂轴像差等较为明显。中继透镜组二维结构图如图 3 所示。为了使全景环带系统具有较好的成像品质，头部单元中的残余像差需要用中继透镜组来补偿<sup>[14]</sup>且头部单元出瞳的位置需要与中继透镜组入瞳的位置相同。

本文中继单元选取能够有效消除超大视场成像所产生彗差、像散等轴外像差的对称式结构，初始对称式中继透镜组系统给定焦距值为 17.26 mm，同时对中继透镜组的体积进行控制。如图 4 所示，将全景环带头部单元与中继透镜组进行组合，最终得到超大视场全景环带红外光学系统初始结构图。

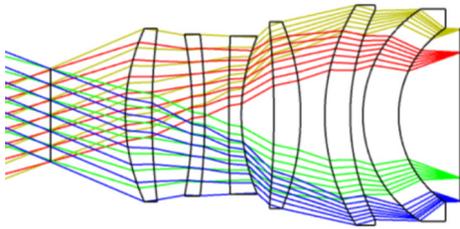


图 3 中继透镜光路图  
Fig.3 Relay lens light path diagram

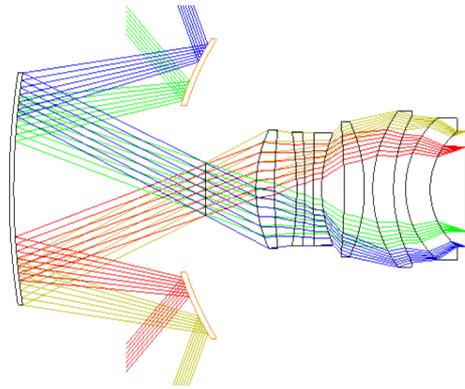


图 4 系统初始光路图  
Fig.4 Initial optical path diagram of the system

## 2 Q 型非球面全景环带光学系统优化设计

在头部单元中增加非球面以增加头部单元的优化变量，分担中继透镜组校正像差的压力，提高系统成像品质。近年来，光学非球面在光学成像领域的应用越来越广泛<sup>[15]</sup>。常用的偶次非球面在对复杂系统进行优化时存在效率较低、结果不理想的情况，由美国的 G. W. Forbes 提出的 Q 型非球面解决了上述问题，提高了光学系统的优化效率。Forbes 先后提出了两种非球面多项式： $Q_{con}$  型、 $Q_{bfs}$  型非球面多项式<sup>[16-18]</sup>。本文使用  $Q_{bfs}$  型多项式  $z$ ，其非球面表达式为

$$z = \frac{c_{bfs}r^2}{1 + \sqrt{1 - c_{bfs}r^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 - c_{bfs}^2r^2}} \left[ m^2(1 - m^2) \sum_{n=0}^N a_n Q_n(m^2) \right] \quad (16)$$

式中  $m = r/r_{max}$ ， $r_{max}$  为表面的最大通光半径， $r$  为表面通光半径； $c_{bfs}$  指的是与式 (16) 中描述的非球面面型最接近的球面的曲率半径； $a_n$  为 Q 型非球面多项式系数； $n$  为阶数； $N$  为最大阶数； $Q_n(m)^2$  是由  $a_n$  作为系数的  $n$  阶正交化 Jacobi 多项式<sup>[19]</sup>。

非球面陡度（即非球面对最接近球面在法线方向上的偏离量）的均方值<sup>[20-21]</sup>可表示为

$$k_{RMS} = \left\{ \frac{1}{r_{max}} \frac{d}{dm} \left[ m^2(1 - m^2) \sum_{n=0}^N a_n Q_n(m^2) \right] \right\}^2 = \frac{1}{r_{max}^2} \sum_{n=0}^N a_n^2 \quad (17)$$

由 (17) 式知，非球面陡度  $k_{RMS}$  可以表示为由多项式系数表达的简单关系式， $k_{RMS}$  与干涉仪观察到的条纹密度相关， $k_{RMS}$  值越大，条纹越密，非球面的加工检测难度越大<sup>[22]</sup>。在 ZEMAX 光学软件中通过操作数 PMVA 和 QSUM 返回  $\sum_{n=0}^N a_n^2$  的值，可以利用 OPLT 操作数降低非球面陡度，提升光学元件的加工

和检测灵敏度、提高系统优化效率<sup>[23]</sup>。

如图 5 所示, 经过数次迭代优化, 得到了头部单元主镜、次镜为五阶  $Q_{bfs}$  型多项式非球面, 中继透镜组中第五、十二、十三面为八阶偶次非球面、系统总长为 78 mm 的超大视场全景环带红外光学系统光路图。

由图 5 知, 入射光线经全景环带红外光学系统头部单元反射后进入中继透镜组成像。表 2 为上述光学系统中各光学元件所对应的材料。

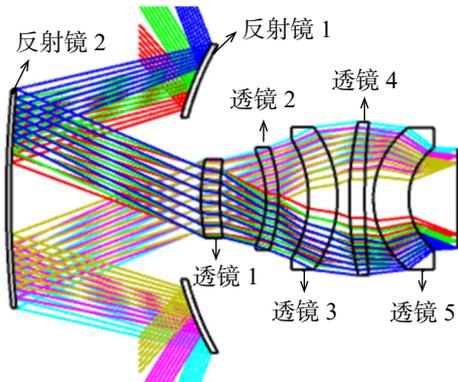


图 5 光学系统光路图

Fig.5 Optical path diagram of the optical system

表 2 光学材料  
Tab.2 Optical material

全景环带光学系统	镜片	光学材料
头部单元	反射镜 1	碳化硅
	反射镜 2	
中继透镜组	透镜 1	锗
	透镜 2	硫系玻璃
	透镜 3	锗
	透镜 4	锗
	透镜 5	锗

以头部单元中次镜为例, 利用 ZEMAX 自带的“非球面类型转换”项将 Q 型非球面面型转换为偶次非球面面型, 级次设置为 5, 与 Q 型非球面级次相同, 两者多项式系数对比如表 3 所示。

表 3 Q 型非球面与对应偶次非球面参数  
Tab.3 Q-Type asphere and corresponding even-order asphere parameters

Q 型非球面							
表面	最大通光半径/mm	曲率半径/mm	一阶项	二阶项	三阶项	四阶项	五阶项
次镜	20.347	0.01	-0.013	-0.025	$-5.732 \times 10^{-3}$	$-2.040 \times 10^{-3}$	$-1.214 \times 10^{-3}$
偶次非球面							
表面	曲率	圆锥系数	四阶项	六阶项	八阶项	十阶项	十二阶项
次镜	39.202	0.004 2	$1.443 \times 10^{-6}$	$-1.005 \times 10^{-8}$	$2.933 \times 10^{-11}$	$-4.530 \times 10^{-14}$	$2.875 \times 10^{-17}$

根据表 3, Q 型非球面多项式的系数数量级大于等于  $10^{-3}$ , 而通过面型转换后的偶次非球面多项式系数数量级则小于  $10^{-6}$ , 最小的达到了  $10^{-17}$ , 两者之间相差 3~14 个数量级。因此, 在相同的优化条件下, 偶次非球面多项式系数的数量级范围跨度更大, 项数较多时会产生系数之间互相抵消的情况, 影响优化效率; 而 Q 型非球面多项式系数数量级的分布则更加均衡, 并且能够利用更少的有效数字位数合理的描述面形。综上所述, Q 型非球面能够在提高光学系统优化效率的同时降低非球面元件的加工难度, 提高系统的成像品质。

### 3 像质评价

光学系统 MTF (Modulation Transfer Function) 曲线如图 6 所示, 奈奎斯特频率 20 线对/mm 处 MTF 值优于 0.50; 能量集中度曲线如图 7 所示, 全视场像元 ( $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$  区域内) 能量集中度优于 65%; 弥散斑半径如图 4 所示, 全视场最大均方根弥散斑半径小于艾里斑半径  $15.73 \mu\text{m}$ , 综上, 该系统成像品质良好, 满足设计要求。

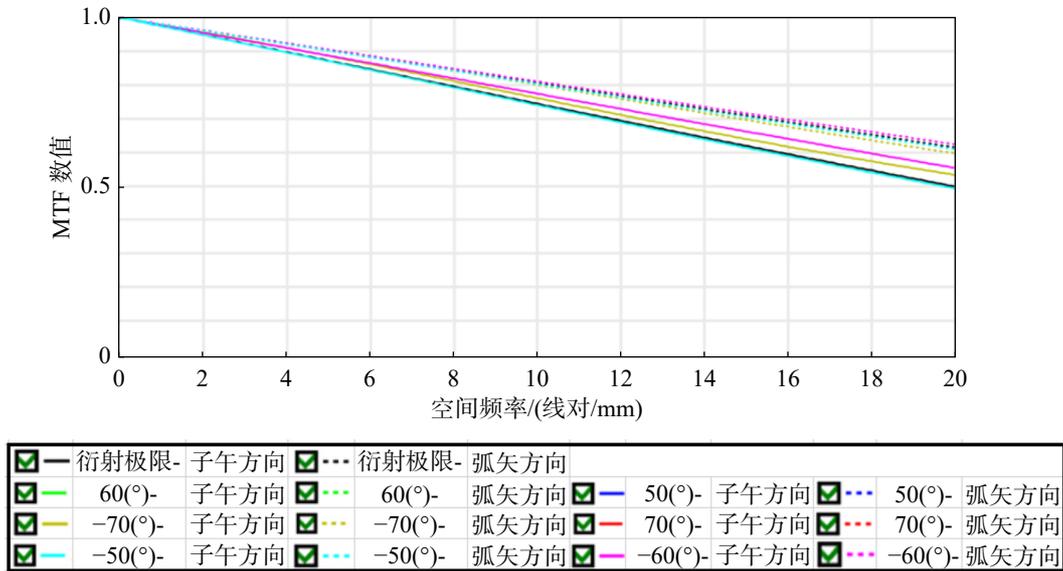


图6 MTF曲线  
Fig.6 MTF curve

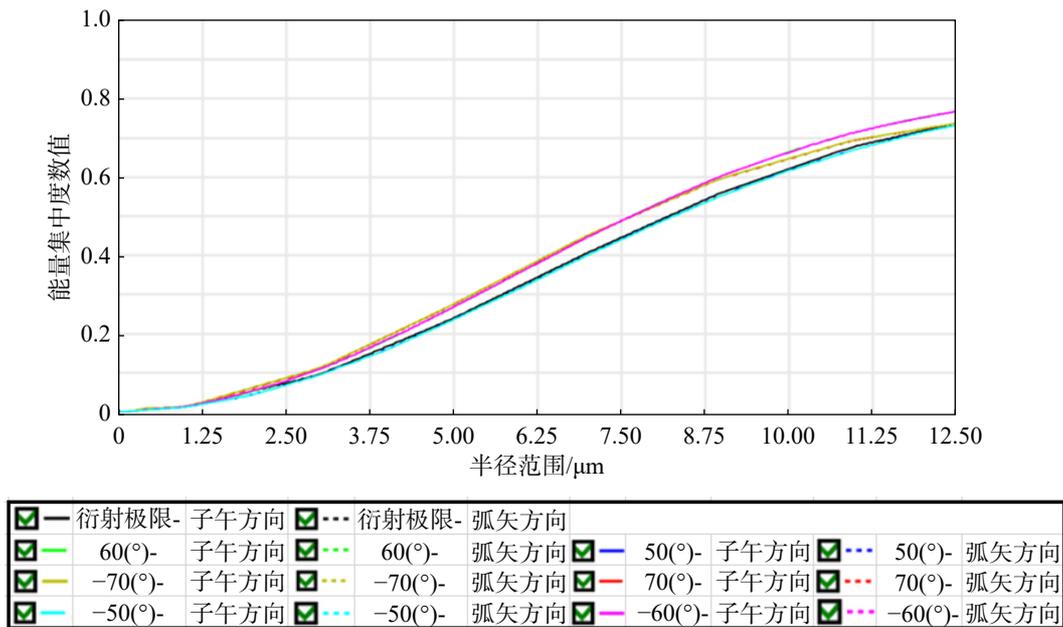


图7 能量集中度  
Fig.7 Energy concentration

表4 弥散斑半径

Tab.4 System point diagram

视场	50°	60°	70°
均方根弥散斑半径/ $\mu\text{m}$	6.665	7.949	9.241
几何半径/ $\mu\text{m}$	12.859	8.348	21.711

## 4 结束语

本文以超大视场红外光学遥感器的应用需求为背景,研究了头部单元为两反射镜的全景环带红外光学系统,解算了两反射镜头部单元的结构参数,提出了基于Q型非球面的超大视场全景环带光学系统优

化设计方法,并采用 $k_{\text{RMS}}$ 参数表征非球面的加工和检测难度。设计结果表明,全视场调制传递函数在奈奎斯特频率(20线对/mm)处优于0.5,成像品质良好。本系统兼顾了超大视场实时成像和系统轻量化的应用需求,在超大视场空间红外遥感器的光学设计中具有广泛的应用前景。

### 参考文献 (References)

- [1] WOLFGANG H S W. The Design of an Inexpensive Very High-Resolution Scan Camera System[J]. *Computer Graphics Forum*, 2004, 23(3): 441-450.
- [2] 刘璐, 胡斌, 周峰, 等. 二维大视场紧凑型离轴四反光学系统设计[J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(1): 73-84.  
LIU Lu, HU Bin, ZHOU Feng, et al. Design of Compact Off-axis Four-mirror Optical System with Two-dimensional Large Field of View[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(1): 73-84. (in Chinese)
- [3] 江云峰, 罗敏, 何红星, 等. 鱼眼镜头的研究进展及应用[J]. *红外技术*, 2023, 45(4): 342-351.  
JIANG Yunfeng, LUO Min, HE Hongxing, et al. Research and Application of Fisheye Lens[J]. *Infrared Technology*, 2023, 45(4): 342-351. (in Chinese)
- [4] 张晓菲. 红外成像系统及其超分辨率重建技术的研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.  
ZHANG Xiaofei. Study on the Imaging and Super-resolution Reconstruction of the Infrared Optical System[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optical Precision Machinery and Physical), 2020. (in Chinese)
- [5] 戚均恺, 周峰, 姚罡, 等. 一种新型超大视场小畸变光学系统[J]. *航天返回与遥感*, 2013, 34(2): 30-35.  
QI Junkai, ZHOU Feng, YAO Gang, et al. A New Super-large Field of View and Small Distortion Optical System[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(2): 30-35. (in Chinese)
- [6] BIN M, KATELYNN S, THOMPSON P K, et al. Mobile Device Camera Design with Q-type Polynomials to Achieve Higher Production Yield[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17454-17463.
- [7] 梁久伟, 罗春华, 杨铭. 用于监控系统的鱼眼镜头光学设计[J]. *光学技术*, 2011, 5(6): 691-694.  
LIANG Jiuwei, LUO Chunhua, YANG Ming. Optical Design of Fish—Eye Lens Used for Monitoring System[J]. *Journal of Optics*, 2011, 5(6): 691-694. (in Chinese)
- [8] 李闯, 薛常喜, 杨红芳, 等. 基于Q-type非球面的电子内窥镜物镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 202-210.  
LI Chuang, XUE Changxi, YANG Hongfang, et al. Optical System Design of Electronic Endoscope Objective with Q-type Aspheres[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 202-210. (in Chinese)
- [9] 周向东, 白剑. Q-Type非球面小畸变全景环带光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 299-305.  
ZHOU Xiangdong, BAI Jian. Small Distortion Panoramic Annular Lens Design with Q-Type Aspheres[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 299-305. (in Chinese)
- [10] 周向东. 超大视场高分辨率全景环带光学系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
ZHOU Xiangdong. Super-wide Angle High-resolution Panoramic Annular Lens Design[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [11] 刘剑峰, 龙夫年, 张伟. 大视场航天遥感器的光学系统设计[J]. *光学技术*, 2004(2): 187-188, 192.  
LIU Jianfeng, LONG Funian, ZHANG Wei. Optical System Design of Space Sensor with Wide Field of View[J]. *Optical Technique*, 2004(2): 187-188, 192. (in Chinese)
- [12] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
YU Daoyin, TAN Hengying. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [13] 李林, 黄一帆. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.  
LI Lin, HUANG Yifan. *Applied Optics*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017. (in Chinese)
- [14] 张坤. 高精度大视场空间目标测量光学系统研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.  
ZHANG Kun. Big Field of Space Target High Precision Optical System Research[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optical Precision Machinery and Physical), 2021. (in Chinese)

- [15] 贾孟, 薛常喜. 基于Q-type非球面的双波段红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 267-274.  
JIA Meng, XUE Changxi. Design of Dual-band Infrared Optical System with Q-type Asphere[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 267-274. (in Chinese)
- [16] FORBES W G. Shape Specification for Axially Symmetric Optical Surfaces[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5218-5226.
- [17] FORBES W G. Robust and Fast Computation for the Polynomials of Optics[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13851-13862.
- [18] FORBES W G. Robust, Efficient Computational Methods for Axially Symmetric Optical Aspheres[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19700-19712.
- [19] 陈伟, 赵果. 神经网络在非球面镜面型多项式反求中的应用[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2009, 27(4): 21-24.  
CHEN Wei, ZHAO Fu. Study on Application of Bp Neural Network to Reverse Design of Aspheric's Surface Polynomial[J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science), 2009, 27(4): 21-24. (in Chinese)
- [20] 郑玮. 基于Q-type非球面技术的低边缘图像压缩的全景镜头设计[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.  
ZHENG Wei. Based on the Q-type Aspheric Technology of Low Edge Image Compression Panoramic Lens Design[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013. (in Chinese)
- [21] 刘锦琳. Q型非球面及其在光学系统设计中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.  
LIU Jinlin. Q-Type Aspheres and Its Application in Optical System Design[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [22] YU B, TING X, YA J. Applying Q-Type Aspheres in the Ultraviolet Lithography Objective Lens[J]. Institute of Optics and Electronics (China), 2016, 9948: 1-11.
- [23] 张云哲, 冯厅, 王郭玲. 基于ZEMAX的反射式望远镜设计[J]. 江苏科技信息, 2019, 36(26): 39-41.  
ZHANG Yunzhe, FENG Ting, WANG Guoling. Research on Design of Reflection-type Telescope Objective Lens with ZEMAX[J]. *Jiangsu Science and Technology Information*, 2019, 36(26): 39-41. (in Chinese)

#### 通讯作者

周峰, 男, 1974年生, 2006年获中国空间技术研究院空间飞行器专业博士学位, 研究员。主要研究方向为红外探测器 and 红外系统。E-mail: [zfsimon@163.com](mailto:zfsimon@163.com)。

(编辑: 庞冰)