第 47 卷　第 5 期
2025 年 10 月

光　学　仪　器
OPTICAL INSTRUMENTS

Vol. 47, No. 5
October, 2025

文章编号：1005-5630(2025)05-0038-09　　**DOI**: 10.3969/j.issn.1005-5630.202403230060

近红外无热化高光谱成像系统优化设计

刘宇翔[1]，谢翔宇[1]，胡潇逸[1]，曹欣爽[1]，李宇康[1]，王双保[1]，徐智谋[1,2]，张学明[1]

（1. 华中科技大学 光学与电子信息学院，湖北 武汉 430000；
2. 华中科技大学 武汉光电国家研究中心，湖北 武汉 430000）

摘要：设计并优化了一种近红外无热化高光谱成像系统，其具备非接触式测量红外光谱信息的能力。该光学系统由前置双高斯透镜、微透镜阵列、分光镜以及红外探测器构成，可用来探测 750～1 050 nm 的近红外光辐射。结构中的微透镜阵列可以大幅度提升微弱光的成像质量，分光系统能提高探测器对近红外特定波长范围的敏感度。ZEMAX 光学仿真软件的仿真结果表明，其前置光学系统总长 12 mm，在空间频率 80 lp/mm 处，各波长的调制传递函数（modulation transfer function，MTF）均大于 0.6，成像质量良好，在−20 ℃ 到 50 ℃ 温度内像质几乎不变，公差分析结果显示有 90% 以上的样本符合设计指标，具有良好的实用性。

关键词：无热化；非接触式探测；近红外；微透镜阵列；高光谱图像
中图分类号：TN 202　**文献标志码**：A

Optimization design of near-infrared athermalized hyperspectral imaging system

LIU Yuxiang[1], XIE Xiangyu[1], HU Xiaoyi[1], CAO Xinshuang[1], LI Yukang[1],
WANG Shuangbao[1], XU Zhimou[1,2], ZHANG Xueming[1]

（1. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China;
2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China）

Abstract: A near-infrared athermalized hyperspectral imaging system was designed and optimized, which was capable of non-contact measurement of infrared spectral information. The optical system consists of a front double Gaussian lens, a microlens array, a beam splitter, and an infrared detector for detecting near-infrared optical radiation from 750 nm to 1 050 nm. The designed microlens array can substantially improve the imaging quality of the weak light, and the beam splitter system improves the detector's sensitivity to a specific wavelength range of the near-infrared. The ZEMAX simulation showed that the total length of the front optical system was 12 mm at a spatial frequency 80 lp/mm, and the MTF (modulation transfer function) of each wavelength was greater than 0.6. The imaging quality was good because the image quality was

收稿日期：2024-03-23
基金项目：湖北省重点研发计划项目（2022BBA0074）；湖北省级应用光学一流课程建设项目（2022-65）；华中科技大学省级创新创业项目（GD2022082）
第一作者：刘宇翔 (2002—)，男，本科生，研究方向为光学设计。E-mail：u202114256@hust.edu.cn
通信作者：张学明 (1968—)，男，讲师，研究方向为光学设计。E-mail：optzhang@163.com

almost unchanged in the temperature range from −20 ℃ to 50 ℃. The tolerance analysis yielded that more than 90% of the samples agreed with the design specifications, which was of good practicability.

Keywords: athermalized; non-contact detection; near-infrared; microlens arrays; hyperspectral image

近年来，随着农业科技的迅速发展，高光谱遥感技术在农业领域的应用逐渐受到关注。20 世纪 80 年代起，国外已开始将光谱检测技术用于农作物品质分类的研究。相比之下，我国的光谱检测技术起步较晚，但近年来该技术也已应用于玉米、燕麦饲草、猕猴桃等经济作物的品质检测。它为农作物内部品质分级提供了更可靠、精准的依据。近红外光谱技术在农作物品质含量定量检测研究方面已取得显著进展。人们已成功利用该技术对苹果、梨、柑橘等农产品进行了定量检测。检测指标包括可溶性固形物含量、硬度、水分含量、内部病变等。这些研究展现了良好的预测效果，为农作物品质评估和病虫害防护提供了可靠手段。

叶绿素和氮素作为水稻生长所需的重要营养物质，对水稻的健康生长和产量提升起关键作用[1]。由于叶绿素很难吸收近红外波段的光[2]，在 750～1 050 nm 的近红外波段，叶绿素含量多的水稻会表现出更高的反射率。同时，不同氮含量的高光谱在 750～1 050 nm 的近红外波段也较容易区分[3]。因此，采用近红外高光谱技术来监测水稻叶绿素含量和氮素水平的变化有助于水稻的精准施肥、产量提高和病虫害预防。

本研究利用 ZEMAX 仿真软件设计了一款工作于近红外波段的高光谱成像系统。该成像系统具有视场大、成像质量高和体型小等优点，能够准确捕捉水稻的特征光谱信息，为后续的生长检测提供重要帮助。该设计还引入了微透镜阵列系统。微透镜阵列在可见光探测领域较为常见[4]，它可以显著降低由于传感像元之间存在的空隙所导致的光能损耗，并能加快成像速度，提高图像的信噪比[5-6]。参考可见光探测器领域内的微透镜阵列，通过数值计算得到了一款适用于近红外波段的微透镜阵列，它能显著提高系统整体的光能利用率。

1　设计原理

1.1　无热化原理

消除红外光学系统的热差有利于确保其在特定温度范围内实现良好的成像质量，因此在设计时必须同时考虑光焦度、消色差以及热差的要求。对于无热化前置光学系统而言，需要满足以下几个方程：

总光焦度为各光学元件的光焦度之和

$$\sum_{i=1}^{n} H_i \phi_i = \phi' \tag{1}$$

式中：H_i 为第一近轴光线在第 i 个透镜的入射高度；ϕ_i 为第 i 个透镜的光焦度；ϕ' 为透镜的总光焦度。

轴向光学元件的色差之和为 0

$$\left(\frac{1}{H_1\phi'}\right)^2 \sum_{i=1}^{n} H_i^2 w_i \phi_i = 0 \tag{2}$$

式中：w_i 为第 i 个透镜的色散因子。

消热差方程

$$\left(\frac{1}{H_1\phi'}\right)^2 \sum_{i=1}^{n} H_i^2 \chi_i \phi_i = \alpha_h L \tag{3}$$

式中：χ_i 为第 i 个透镜的光膨胀系数；α_h 为物体离轴高度为 h 的位置外部机械结构材料的线膨胀系数；L 为机械结构的长度。

1.2　分光结构设计原理

由于透射式光栅适用的光谱范围会受到光栅材料的限制，因此目前市面上的光谱仪普遍采用反射式光栅。根据面型，反射式光栅可分为平面反射光栅、凹面反射光栅以及凸面反射光栅三类。其中凸面反射光栅结构更为紧凑且像质更高[7]，适用于本研究需要的小型近红外高光谱成像仪。

1.2.1　最佳成像圆理论

Offner 光谱成像系统是一种经典的凸面反射光栅结构。最基本的同轴 Offner 光谱成像系统由一块凹面反射镜和一块凸面光栅组成。

如图 1 所示，图中 $R1$、$R2$ 分别是凸面光栅的半径以及凹面反射镜的半径，h 为物点的离轴高度。当 h 满足式(4)时，可得到最好的像质，此时系统物点及像点处于最佳成像圆位置[8]。

$$R2=\frac{R1}{2\sqrt{1-h^2/R1^2}} \tag{4}$$

对式(4)近似处理可得

$$R2\approx\frac{R1}{2} \tag{5}$$

$$h\approx 2A_n * R2 \tag{6}$$

式中，A_n 为系统的数值孔径。

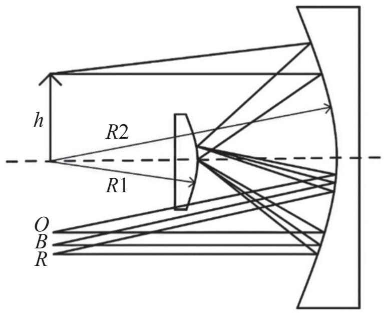


图 1　同轴 Offner 光谱成像系统

Fig. 1　Coaxial Offner spectral imaging system

系统的成像质量会随着物点和像点与最佳成像圆位置的偏离变大而变差，因此该结构更适用于短狭缝系统。

1.2.2　可矫正像散的同轴 Offner 结构

由于同轴 Offner 光谱成像系统存在固有的正像散，因此可以通过在凸面光栅前面加一个具有负像散的弯月透镜来进行校正[9]。

如图 2 所示，该结构在校正了基本同轴 Offner 的固有正像散的同时，也增大了系统的视场。同时，引入校正透镜也增大了优化的自由度，更有利于提高系统的像质。

1.3　微透镜阵列设计原理

采用折射型微透镜阵列的光谱成像系统[10]，其结构如图 3 所示。

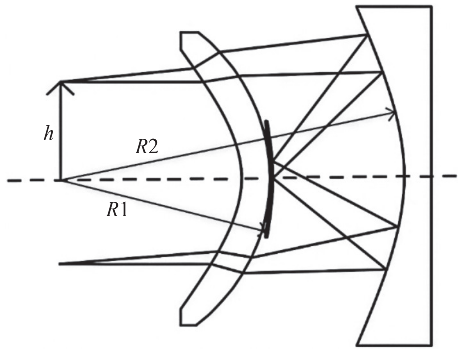


图 2　可矫正像散的同轴 Offner 光谱成像系统

Fig. 2　Coaxial Offner spectral imaging system with correctable dispersion

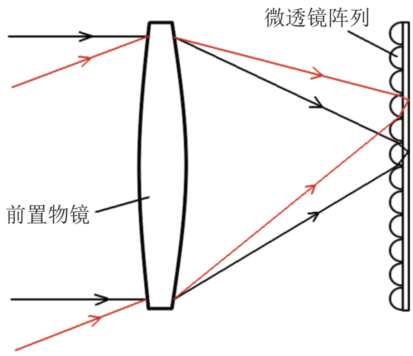


图 3　含微透镜阵列的光谱成像系统结构

Fig. 3　Structure of the spectral imaging system with a microlens array

首先研究微透镜单元，接着根据前置光学系统口径大小确定 x 方向和 y 方向微透镜单元，即可获得完整的系统参数。如图 4 所示，根据前置光学系统的 F 数(F-number，又称光圈数)F、微透镜的焦距 f、微透镜理想焦平面和微透镜边缘的连线与光轴的夹角 θ、微透镜材料的折射率 n、探测器单个像元的尺寸、像元上光敏区的宽度 d、微透镜阵列处观察前置物镜的半视场角 α_0 以及入射光线的波长大小，可以计算得到焦平面上最大视场光线的 y 轴坐标 y_0 以及上下边缘光

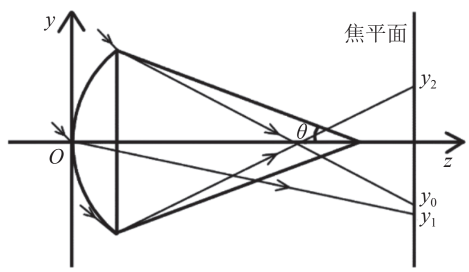


图 4　单个微透镜的光线追迹分析

Fig. 4　Analysis of ray tracing through a single microlens

线的 y 轴坐标 y_1 和 y_2 的具体表达式。

为使探测器的占空比接近 1，则 y_0、y_1 和 y_2 的值都应位于探测器光敏区范围之内，即上述微透镜的相关参数需满足以下不等关系

$$f \leqslant \frac{d}{2}\sqrt{n^2(4F^2+1)-1} \tag{7}$$

$$-\tan\left\{\theta-\arcsin\left[\frac{1}{n}\cdot\sin\left(\theta-\arcsin\frac{1}{\sqrt{4F^2+1}}\right)\right]\right\}\cdot \left[f-\frac{D(1-\cos\theta)}{2\sin\theta}\right]+\frac{D}{2}\leqslant\frac{d}{2} \tag{8}$$

$$\tan\left\{\theta-\arcsin\left[\frac{1}{n}\cdot\sin\left(\theta-\arcsin\frac{1}{\sqrt{4F^2+1}}\right)\right]\right\}\cdot \left[f-\frac{D(1-\cos\theta)}{2\sin\theta}\right]-\frac{D}{2}\leqslant\frac{d}{2} \tag{9}$$

式中：取硫系红外材料硫化镉 CdS 作为微透镜材料，其折射率 $n=1.7$；D 为微透镜阵列单元口径。

2 前置光学系统设计

2.1 设计思路

系统光学设计参数如表 1 所示。

表 1 系统光学设计参数
Tab. 1 Optical design parameters

设计项	参 数
焦距/mm	9
F数	2
波长数据/μm	0.75～1.05
最大半视场/(°)	12
最大畸变	＜3%
几何圈入能量	＞90%
总长/mm	＜15

本设计采用六片式手机镜头作为初始结构[11]，具体结构如图 5 所示。该光学系统包含两个双胶合透镜组，两块分立透镜以及一块平行平板。光阑位于两个双胶合透镜组之间，使其形成对称结构，这样可以有效减小畸变以及系统的横向宽度。其中第一、第六块透镜分别采用 MGO 和 BAFN10，中间两组双胶合透镜分别采用 N–SK2HT/N–SF10和 N–LLF1/ALON。

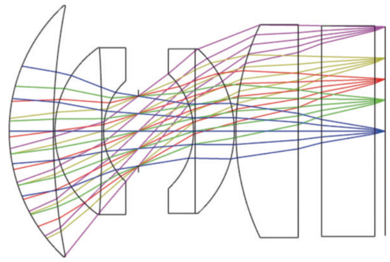


图 5 用于优化设计的光学系统初始结构
Fig. 5 The initial optical configuration for design optimization

将系统仿真的波长范围设置为 0.75～1.05 μm，并采用红外光学材料，经默认的优化函数初步优化后，使用自定义优化函数进一步优化。利用 EFFL 操作数对镜头的有效焦距进行控制；利用 TOTR 操作数对镜头的光学总长进行控制；利用 CVVA 操作数、RECI 操作数和 DMVA 操作数对镜片曲率半径和孔径半径的关系进行限制；利用 TTHI 操作数限制后焦距，使其大于总长的 0.2 倍；利用 REAY 操作数控制入射到像面的光线(减小像差、提高成像质量)；利用 MTFA 操作数、MTFS 操作数控制传递函数大小；利用 DIMX 操作数控制畸变范围。

在一系列优化后，查看各像差和透镜结构情况，修改目标值和权重，进一步优化，得到最优透镜结构参数。随后用利用 ZEMAX 软件的锤形优化功能把前置光学系统的玻璃材料替换为硫系玻璃。

2.2 设计结果

优化后的镜头如图 6 所示，系统总长为 12.11 mm，焦距为 8.80 mm，全视场为 24.604°，像高为 3.76 mm。考虑到加工成本，且非球面镜片对系统的性能提升帮助不大，因此结构中的曲面镜片面型均采用球面。

调制传递函数(modulation transfer function,

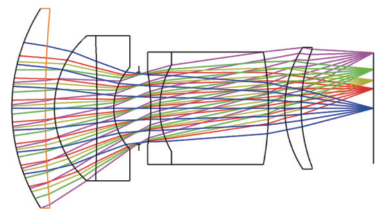


图 6 前置光学系统布局图
Fig. 6 Layout of the front optical system

MTF)曲线能够综合评价光学系统的成像质量。图 7(a)~(c)所示为系统在−20~50 ℃ 的 MTF 曲线图。在该温度区间内，系统的 MTF 差别很小，全视场 MTF 在 150 lp/mm 处均大于 0.6，在 45 lp/mm 处均大于 0.9，接近衍射极限。

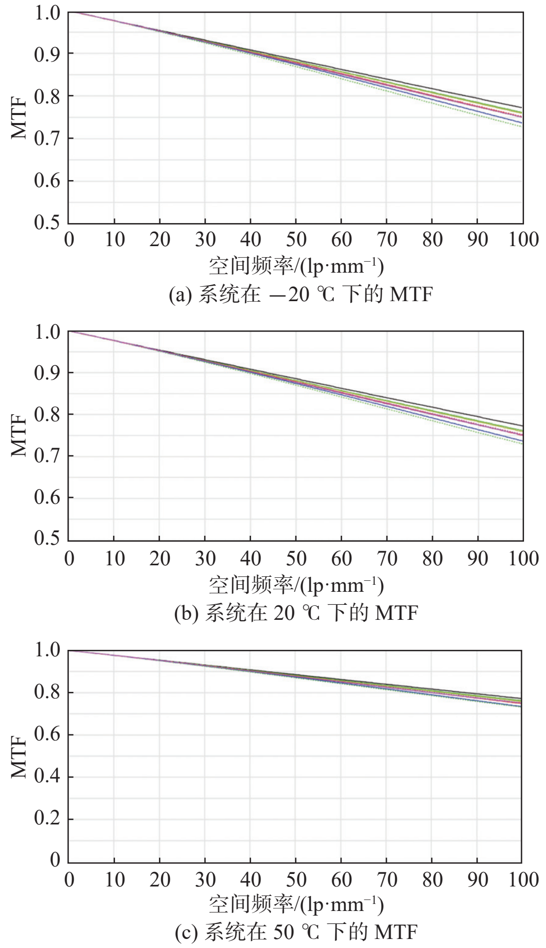


图 7　系统在 −20~50 ℃ 下的 MTF

Fig. 7　The system MTF at−20~50 ℃

在 20 ℃ 下，系统成像的点列图如图 8 所示，场曲和畸变曲线如图 9 所示。可以看到，系统边缘视场的均方根像差(root mean square, RMS)半径最大，为 1.21 μm，小于艾里斑半径 2.07 μm，且全视场场曲小于 0.03 mm，相对畸变小于 0.03%，满足设计要求。

3　分光系统设计

3.1　技术指标

为了与前置光学系统相结合，分光系统的物方数值孔径需等于前置光学系统的数值孔径，

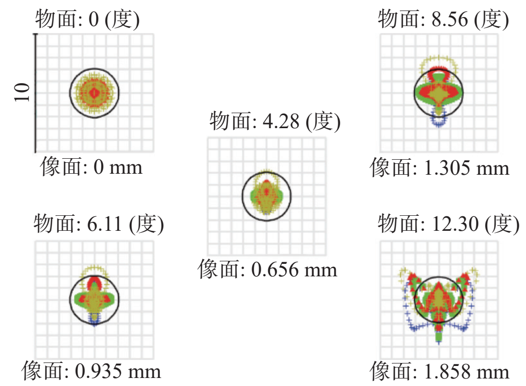


图 8　系统在 20 ℃ 下的点列图

Fig. 8　Spot diagram of the system at 20 ℃

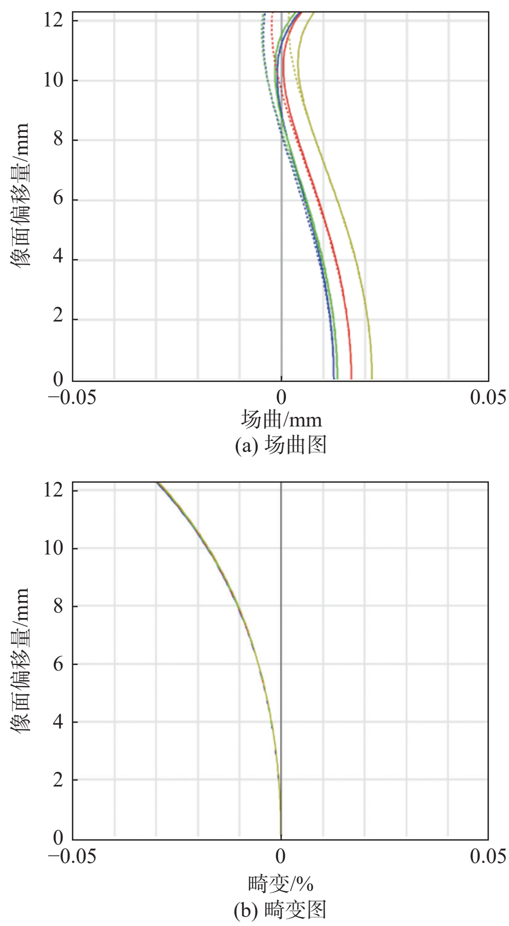


图 9　20 ℃ 下的场曲和畸变图

Fig. 9　Field curvature and distortion at 20 ℃

即 $A_n = 0.25$，同时分光系统的最大视场需大于前置光学系统的像高[12]，因此将分光系统的视场为设置(4 ± 2)mm。具体技术指标见表 2。

3.2　设计结果

以可矫正像散的同轴 Offner 光谱成像系统

表 2　分光系统的技术指标
Tab. 2　Technical specifications of the spectroscopic system

技术指标	数 值
光谱范围/μm	0.75～1.05
总视场/mm	4 ± 2
数值孔径	0.25
总长/mm	＜40
色散宽度/μm	280
光谱畸变/μm	＜1

作为初始结构[13]。将各面曲率半径以及空气厚度设为变量，使用 TOTL 操作数限制系统的总长。之后加入多个 REAY 操作数，使每个波长下相同视场入射的所有光线尽量聚焦在一点，同时加入控制畸变的 DIMX 操作数和控制 MTF 的 MTFA 操作数，不断调整各操作数的权重进行优化。

优化后的同轴光谱成像系统结构如图 10 所示。系统总长为 39.42 mm，以物高表示的视场为(4 ± 2)mm，色散宽度为 289.2 μm，且全波长畸变远小于 1 μm，满足设计需求。

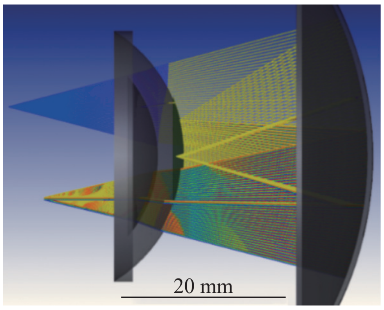


图 10　优化后的同轴 Offner 光谱成像系统
Fig. 10　Coaxial Offner spectral imaging system after optimization

4　成像光谱仪一体化设计分析

4.1　成像光谱仪一体化设计

在前述设计中已确保前置光学系统与分光系统能相互匹配，利用 ZEMAX 软件将两部分进行耦合对接，即可得到完整的成像光谱仪。系统整体的成像质量主要取决于前置光学系统[7]，因此将系统光阑设置在与前置光学系统中的相同位置。通常，直接对接后的系统像质会有所下降，经过微调后得到的最终成像光谱仪如图 11 所示。

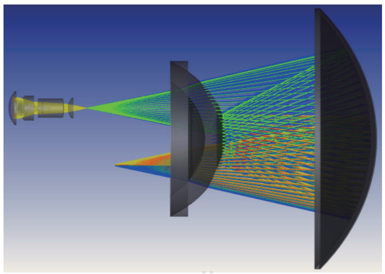


图 11　成像光谱仪整体光路图
Fig. 11　The overall optical path diagram for the imaging spectrometer

4.2　像质评价

前置光学系统与分光系统对接以后，两部分的各类相差会产生叠加[14]，相较于某个单独系统而言，成像光谱仪的整体相差一定会有所增大。对成像光谱仪进行像质评价，可以从各波长下的点列图、MTF、场曲和畸变曲线几个方面进行。

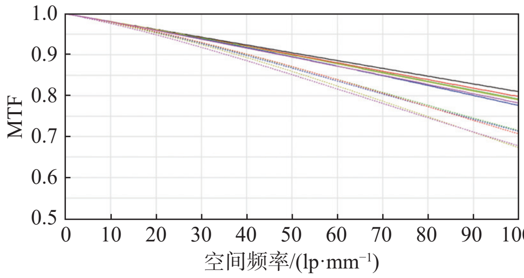
图 12(a)～(c)所示为系统在 0.75～1.05 μm 的 MTF 曲线。可以看到，相较于前置光学系统，引入分光结构后各波长下的 MTF 都有所下降，在 80 lp/mm 下各波长的 MTF 均大于 0.6，仍在可接受范围内。

各波长下的点列图如图 13 所示。边缘视场下有较多离散像点位于艾里斑外，但各波长各视场下的 RMS 半径都小于艾里斑半径，在可接受范围内。系统在 0.9 μm 下的场曲和畸变曲线如图 14 所示，与前置光学系统相比，场曲和畸变变化均不大，仍然满足全视场场曲小于 0.03 mm，相对畸变小于 3%，符合设计需求。

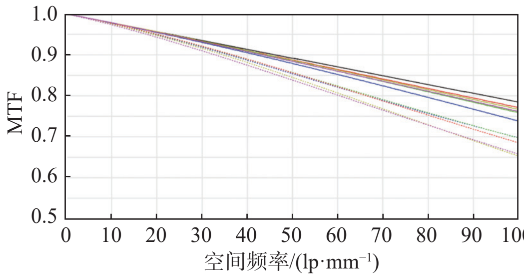
4.3　公差分析

在光学系统的加工和装配过程中，由于设备的精度有限，难免产生误差。公差分析能够使设计者了解各种加工装配误差对光学系统像质带来的影响，指导日后的加工生产。

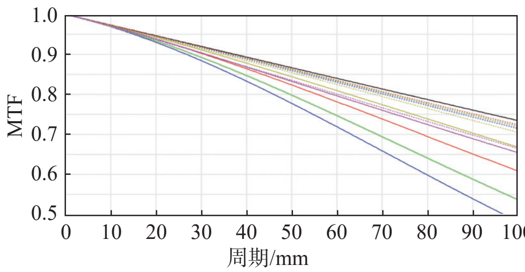
选取中心波长 $\lambda = 0.9$ μm 作为标准进行公差分析。根据目前精密模压的工艺水平，采用 Q5 加工精度，将曲率半径公差、厚度公差、偏心公差都设置为 0.025 mm，倾斜公差 0.02°，表面不规则度公差 0.2，折射率公差 0.001，阿贝数



(a) 系统在 0.75 μm 下的 MTF



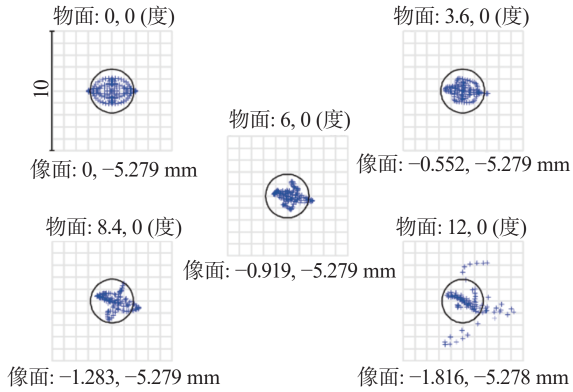
(b) 系统在 0.9 μm 下的 MTF



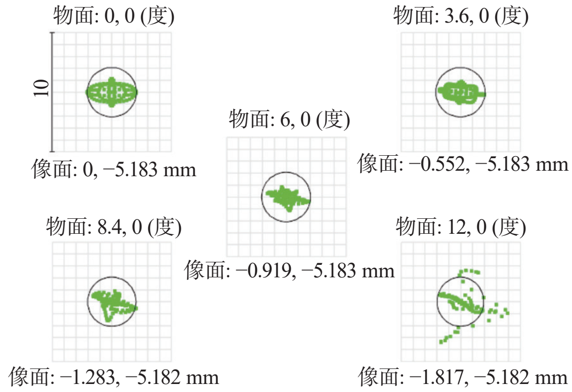
(c) 系统在 1.05 μm 下的 MTF

图 12　系统在 0.75～1.05 μm 下的 MTF

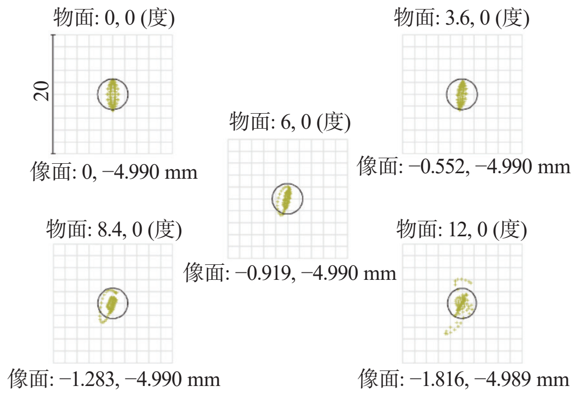
Fig. 12　MTF of the system at 0.75～1.05 μm



(a) 系统在 0.75 μm 下的点列图



(b) 系统在 0.90 μm 下的点列图



(c) 系统在 1.05 μm 下的点列图

图 13　系统在 0.75～1.05 μm 下的点列图

Fig. 13　Spot diagram of the system at 0.75～1.05 μm

公差 0.1%。在蒙特卡罗公差分析中[15] 取 100 个样本，分析它们在 80 lp/mm 时的敏感度，分析结果如表 3 所示。结果表明：在边缘视场下，90% 以上的样本点列图半径小于艾里斑半径(2.2 μm)；且在 80 lp/mm 处，有 90% 以上样本的 MTF 大于 0.4，满足生产加工要求。

5　微透镜阵列设计

5.1　设计参数

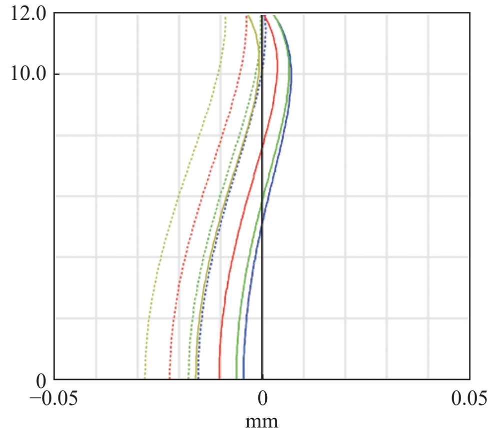
微透镜阵列中单个微透镜口径为 0.3 mm，曲率半径为 0.42 mm，阵列个数为 10×10，红外材料折射率为 1.7，具体参数可见表 4。

5.2　微透镜阵列仿真

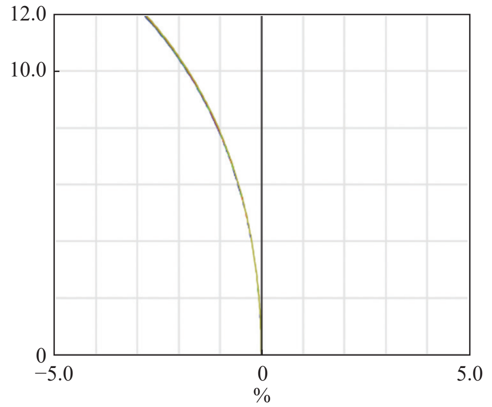
利用 ZEMAX 软件对设计的微透镜阵列进行仿真，得到的局部光线汇聚效果如图 15 所示，所设计的微透镜阵列光线汇聚效果良好。

在 ZEMAX 软件中将微透镜阵列和红外焦平面的距离设置为 0.05 mm，通过探测器可以观察到中心视场和边缘视场的光线汇聚情况如图 16(a)和(b)所示。

图 16(a)和(b)分别反映了中心视场和边缘视场的光线在探测器上汇聚光的非相干辐照度，4 个图案对应 2×2 微透镜阵列的汇聚效应。可以看出汇聚效果非常好，探测器光敏区的实际需要



(a) 场曲



(b) 畸变

图 14　0.9 μm 下的场曲和畸变

Fig. 14　Field curvature and distortion at 0.9 μm

表 3　蒙特卡罗公差分析结果

Tab. 3　Results of Monte Carlo tolerance analysis

样本比例/%	点列图半径/μm	MTF
90	0.118 218 98	0.466 274 06
80	0.118 174 27	0.509 011 90
50	0.118 087 72	0.580 011 73
20	0.117 970 44	0.652 470 30
10%	0.117 904 35	0.673 875 96

面积大约只占整个探测器面积的 20%，远小于理论计算结果，对成本的节省超出预期。

5.3　微透镜阵列光学增益计算

光学增益是指光学系统通过焦平面的辐射通量与入瞳所在平面的辐射通量的比值，即

$$G = \gamma \cdot \frac{S_0}{S_1} \tag{10}$$

表 4　微透镜阵列参数

Tab. 4　Microlens array parameters

参数名称	数值
口径/mm	0.3
曲率半径/mm	0.42
阵列厚度/mm	0.6
单个微透镜焦距/mm	0.6
x方向阵列个数	10
y方向阵列个数	10
材料折射率	1.7

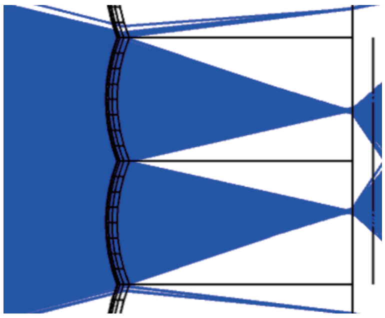
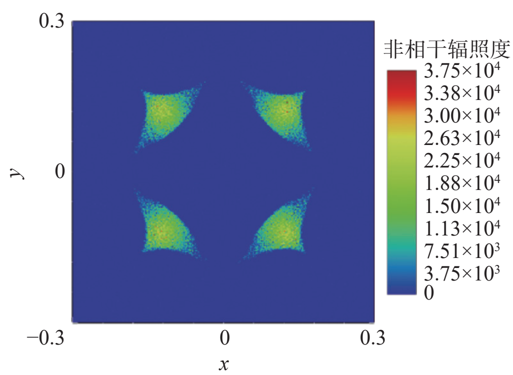


图 15　微透镜阵列汇聚效果局部放大图

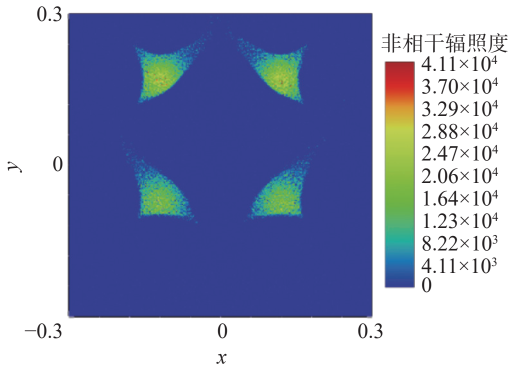
Fig. 15　Localized enlargement of the convergence effect of microlens array

式中：γ 为光学系统的透过率；S_0 为光学系统入瞳面积；S_1 为探测器光敏区的面积。若未加微透镜阵列时系统光学增益为 G_0，入瞳口径为 D_0，加上微透镜阵列后系统的光学增益为 G_1，微透镜入瞳口径为 D_1，则光学增益的增大倍数 k 为

$$k = \frac{G_1}{G_0} = \frac{\gamma_1 \pi \left(\frac{D_1}{2}\right)^2}{\gamma_0 \pi \left(\frac{D_0}{2}\right)^2} \approx \frac{(F_0)^2}{(F_1)^2} \tag{11}$$



(a) 中心视场光线汇聚情况



(b) 边缘视场光线汇聚情况

图 16　中心视场和边缘视场的光线汇聚情况

Fig. 16　The convergence of light in the center and edge fields

式中：$F_0=2$；$F_1=f/D_1=0.2$。理论上增大倍数可以达到 100 倍。

6 结　论

本文提出了一种用于非接触式检测水稻叶绿素与氮素含量的无热化近红外高光谱成像系统。利用硫系玻璃温度系数与折射率的差异，在−20 ℃到 50 ℃ 实现了系统的无热化；微透镜阵列减少了系统间隙间的光能损失，理论增大倍数可达 100 倍，满足微弱信号的探测需求；探测器借助分光系统可高效检测特定波长范围的红外光，总体上提高了能量利用率和信噪比。该系统在农业非接触式水稻等农作物叶绿素与氮素含量检测领域具有广阔应用前景。

参考文献：

[1] 马鹏, 杨志远, 李郁, 等. 轮作体系下麦/油减量施氮与水稻氮肥运筹对作物产量和氮素吸收的影响 [J]. 浙江农业学报, 2019, 31(11): 1769 – 1778.

[2] 祖梅, 鄢峰, 甘沅丰, 等. 模拟绿色植被光谱特征的高光谱伪装材料与技术研究进展 [J]. 红外技术, 2022, 44(10): 1018 – 1026.

[3] 王芳东. 红壤地区油茶和水稻叶绿素、全氮含量高光谱特征研究 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2022.

[4] 肖纳川, 孙拓, 胡力允, 等. 大视场小型无热化长波红外镜组设计 [J]. 红外技术, 2024, 46(1): 20 – 26.

[5] 余金清. 基于微透镜阵列的计算成像研究 [D]. 成都: 中国科学院研究生院 (光电技术研究所), 2014.

[6] 杜春雷, 林祥棣, 周礼书, 等. 微透镜列阵提高红外探测器探测能力的方法研究 [J]. 光学学报, 2001, 21(2): 246 – 249.

[7] 张营. 长波红外高光谱成像仪光学技术研究 [D]. 上海: 中国科学院研究生院 (上海技术物理研究所), 2016.

[8] 赵美红, 李文昊, 巴音贺希格, 等. Offner 成像光谱仪的消像差技术 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 3001 – 3011.

[9] 张营, 丁学专, 杨波, 等. 大视场小 F 数同轴 Offner 结构热红外光谱仪的设计 [J]. 红外技术, 2016, 38(7): 537 – 541.

[10] 张玉虹. 用按需滴定技术制备聚合物折射微透镜阵列 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2005.

[11] 黄耀林, 王敏, 郭王凯. 一款 1600 万像素手机镜头设计 [J]. 光学仪器, 2018, 40(1): 39 – 43.

[12] 刘光宏, 吴刚, 凌青, 等. Offner 成像光谱仪建模及像差分析 [J]. 光学学报, 2011, 31(3): 229 – 236.

[13] 徐达, 张国玉, 孙高飞. 改进 Offner 型凸面光栅光谱辐射定标光学系统设计 [J]. 光学学报, 2020, 40(8): 120 – 127.

[14] 常凌颖, 张强, 邱跃洪. 宽谱段一体化 AOTF 成像光谱仪光学系统设计 [J]. 光学学报, 2021, 41(7): 122 – 131.

[15] ZHONG Y, CHANG J, CHEN W, et al. Design and tolerance analysis of a large-diameter diffractive telescope[J]. Journal of Modern Optics, 2022, 69: 566 – 574.

（编辑：李晓莉）