

# 基于 Alvarez 透镜的紧凑型红外连续变倍系统设计

欧阳琦<sup>1,2</sup>, 柳萌遥<sup>1</sup>, 宁妍<sup>3</sup>, 曹杰<sup>1,2</sup>, 郝群<sup>1,2</sup>, 程阳<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学仿生机器人与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

<sup>2</sup>北京理工大学长三角研究院(嘉兴), 浙江 嘉兴 314003;

<sup>3</sup>西安现代控制技术研究所, 西安 陕西 710065

**摘要** 针对传统轴向移动机械光学变倍系统结构复杂、体积大的问题, 提出基于 Alvarez 透镜的横向移动红外光学连续变倍系统。该系统由两组 Alvarez 透镜、光阑、定焦透镜和红外探测器组成。两组 Alvarez 透镜构成开普勒式望远结构, 其中, 第一组 Alvarez 透镜作为变焦组, 第二组 Alvarez 透镜作为补偿组。无限远入射光线经过两组 Alvarez 透镜后出射, 出射的平行光通过定焦透镜聚焦成像到红外探测器的靶面上。使用 Zemax 软件进行光学仿真, 该光学变倍系统覆盖 8~12  $\mu\text{m}$  的长波红外波段, 最大视场角为  $6^\circ$ , 最大入瞳直径为 6 mm, F 数为 2, 畸变量小于 2.1%, 光学总长度约为 74 mm。Alvarez 透镜仅需横向移动约 1 mm 即可实现 5 $\times$  到 15 $\times$  的连续光学放大。该系统在红外探测器分辨率为  $320 \times 240$ 、像元尺寸为 30  $\mu\text{m}$  时调制传递函数达到 0.5@17 lp/mm。仿真设计结果表明, 该系统具有放大倍率大、结构紧凑、成像质量高的优点, 有望应用于小型化红外变倍成像领域。

**关键词** 光学设计; Alvarez 透镜; 光学变倍系统; 开普勒结构; 红外成像

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232324

## Design of a Compact Infrared Continuous Optical Zoom System Based on Alvarez Lenses

Ouyang Qi<sup>1,2</sup>, Liu Mengyao<sup>1</sup>, Ning Yan<sup>3</sup>, Cao Jie<sup>1,2</sup>, Hao Qun<sup>1,2</sup>, Cheng Yang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Biomimetic Robots and Systems Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup>Yangtze Delta Region Academy of Beijing Institute of Technology, Jiaxing 314003, Zhejiang, China;

<sup>3</sup>Xi'an Modern Control Technology Research Institute, China North Industries Group Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaanxi, China

**Abstract** In this study, a transverse moving infrared optical continuous zoom system based on the Alvarez lens is proposed to address the challenges associated with the complex structure and large volume of traditional axial-moving mechanical optical zoom systems. The system consists of two sets of Alvarez lenses, apertures, focusing lenses, and infrared detectors. Herein, two sets of Alvarez lenses adopt a Kepler-type telescope structure, where the first set of Alvarez lenses functions as the zoom group and the second set of Alvarez lenses serves as the compensation group. The infinitely far incident light passes through two sets of Alvarez lenses and exits, the emitted parallel light is then focused and imaged onto the target surface of the infrared detector through a fixed focal lens. Utilizing Zemax software for optical simulation, our designed optical zoom system covers the 8–12  $\mu\text{m}$  long wave infrared band, with a maximum field of view angle of  $6^\circ$ , a maximum pupil diameter of 6 mm, an F-number of 2, distortion of  $<2.1\%$ , and a total optical length of  $\sim 74$  mm. The Alvarez lens only requires to be horizontally moved by  $\sim 1$  mm to achieve continuous optical magnification from 5 $\times$  to 15 $\times$ . Moreover, the modulation transfer function of the proposed optical zoom system can attain up to 0.5@17 lp/mm, assuming a resolution of  $320 \times 240$  and pixel sizes of 30  $\mu\text{m}$  for the infrared detector. The simulation results indicate that the system has the advantages of high magnification, a compact structure, and high imaging quality, making it a promising candidate for applications in the field of miniaturized infrared zoom imaging.

**Key words** optical design; Alvarez lens; zoom system; Kepler structure; infrared imaging

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2023-10-21; 录用日期: 2023-11-01; 网络首发日期: 2023-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(62275017)、嵩山实验室预研项目(YYJC072022008)、北京理工大学青年教师学术启动计划(202204006)

通信作者: \*yangcheng2007@163.com

## 1 引言

成像系统是获取目标信息的重要途径,光学变倍成像系统具有变化的焦距和可调节的视场,大视场可用于大范围搜索目标,小视场可用于精准识别目标,在医疗、民生等方面发挥着巨大的作用。传统光学变倍成像系统由固定焦距的透镜组、机械控制模块和图像传感器等部分组成,通过沿光轴机械移动透镜组之间的相对位置改变焦距,同时为了保证像面的稳定至少需要一个机械补偿组进行非线性移动<sup>[1-2]</sup>。因此,传统光学变倍成像系统不仅结构复杂、体积庞大、质量较重、操作繁琐、功耗较高,而且大多数为固定的离散放大倍率,较难实现放大倍率的连续可调,限制了变倍光学成像系统的进一步应用和发展。

自适应透镜是可变焦的单透镜,具有小型化、响应快速、寿命长、功耗低、成本低等优点,可为光学变倍成像系统的小型化、轻量化,以及低功耗提供新思路。自适应透镜的焦距变化可通过改变表面的曲率半径<sup>[3]</sup>或者光学介质的折射率<sup>[4-5]</sup>实现。现有的自适应透镜主要包括液晶透镜<sup>[6]</sup>、电润湿液体透镜<sup>[7]</sup>、介电泳液体透镜<sup>[8]</sup>和弹性薄膜液体透镜<sup>[9]</sup>。胡轶瑶等<sup>[6]</sup>选用两个液晶透镜搭建伽利略式的望远结构,实现放大倍率为 0.5× 到 2× 的变倍系统。四川大学 Wang 等<sup>[7]</sup>把电润湿液体透镜和定焦透镜组合,设计了一款最大放大倍率为 2.1× 的镜头。韩国檀国大学 Park 等<sup>[8]</sup>将介电泳液体变焦透镜和定焦透镜相结合,设计出一款放大倍率为 3× 的可调焦相机系统。美国加利福尼亚大学 Zhang 等<sup>[9]</sup>采用两个自适应液体透镜设计最大变倍比约为 4.5× 的变焦镜头。然而液体透镜和液晶透镜均存在缺点,例如:液晶透镜对偏振敏感、透过率低、变倍范围小;液体透镜容易受到温度、振动和重力等环境因素影响,且存在液体挥发和泄漏的风险,导致成像性能不稳定。

不同于液晶透镜和液体透镜,Alvarez 透镜通过垂直于光轴移动的方式实现变焦功能,具有更加小型化、大变焦比、高稳定性等优点。Alvarez 透镜是光学设计者 Lohmann<sup>[10]</sup>公开的可实现变焦功能的非旋转对称自由曲面固体透镜,该透镜模型以他的名字命名,之后 Lohman 对该结构进行了优化改进,提出一种三次 XY 多项式的自由曲面结构。由于当时自由曲面的加工技术不够成熟,Alvarez 透镜始终没有被应用到实际场合,随着金刚石车铣和超精密注塑成模技术的快速发展,目前已经能够生产出具有足够调制深度和表面粗糙度的自由曲面,才使得 Alvarez 透镜逐渐进入实际应用。2012 年,北卡罗来纳大学 Smilie 等<sup>[11]</sup>首次报道了一种金刚石微磨蚀 Alvarez 透镜组的设计,并通过实验验证了该透镜的变焦和成像能力。2013 年,新加坡国立大学 Zhou 等<sup>[12]</sup>报道了一种 MEMS 驱动的 Alvarez 透镜,并在 2017 年,报道了一个 1× 到 3× 的超紧凑光

学变焦内窥镜系统<sup>[13]</sup>,该变倍系统变焦范围小,且需要复杂的驱动装置分别在 X 和 Y 方向使各组 Alvarez 透镜产生横向位移。2018 年,杭州电子科技大学 Hou 等<sup>[14]</sup>采用伽利略式望远结构设计了一个 1× 到 3× 光学变倍系统,该变倍结构可在光照良好的可见光环境下使用。因此,设计覆盖红外波段且放大倍率高的紧凑型连续光学变倍系统具有重要意义。

红外成像系统因其具有全天候工作、穿透烟雾能力强和隐蔽性好等优点,在医疗、电力、安防、监控等领域具有广泛应用<sup>[15]</sup>。本文将采用新型变焦原理的 Alvarez 透镜应用于长波红外波段的连续光学变倍系统。该系统避免了机械式变焦透镜的轴向移动,通过横向移动的 Alvarez 透镜改变光焦度,实现了光学长度的有效压缩,同时两组 Alvarez 透镜的最大横向位移仅需约 1 mm,即可实现放大倍率 5× 到 15× 的红外连续光学变倍。

## 2 Alvarez 透镜变焦原理

Alvarez 透镜由两片面形互补的透镜组成,其中,每一片透镜都由一个平面和一个高阶多项式自由曲面组成,如图 1 所示。当两片透镜沿垂直于光轴方向移动很小距离  $\delta$  时,整个透镜组的光焦度随之产生较大的变化<sup>[10]</sup>。

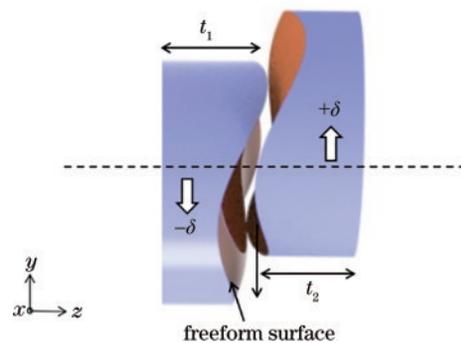


图 1 Alvarez 透镜示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Alvarez lenses

Alvarez 透镜的两片透镜沿光轴的厚度可以分别描述为

$$\begin{cases} t_1(x, y) = A \left( \frac{1}{3} y^3 + x^2 y \right) + Dy + E \\ t_2(x, y) = -A \left( \frac{1}{3} y^3 + x^2 y \right) - Dy + E \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $t_1$  和  $t_2$  是两片透镜沿光轴的轴向厚度;  $x$  和  $y$  是垂直于光轴的横向坐标;  $A$  是自由曲面的矢高调制系数,通过控制曲面峰谷之间的高度差控制 Alvarez 透镜在给定区域表面的光焦度;  $D$  是楔形量的影响因子;  $E$  是每片透镜中心的厚度,可确保透镜最薄的部分有足够的机械强度。

由于 Alvarez 透镜中两片透镜之间的空气间隙可

忽略,因此入射到第二片透镜上的波前与紧邻第一片透镜后的波前相同。当两片透镜沿着垂直于光轴方向发生横向位移  $\delta$  时,两片透镜相对于光轴的复合厚度的表达式为

$$T(x, y) = t_1(x, y + \delta) + t_2(x, y - \delta) = 2A\delta(x^2 + y^2) + \frac{2}{3}A\delta^3 + 2D\delta + 2E. \quad (2)$$

由式(2)可知:第一项  $2A\delta(x^2 + y^2)$  仅与  $x, y$  的平方和相关,为类球面项,可以替换为球面半径  $r$ ;其余两项均与  $x, y$  无关,为材料厚度的附加项。则两片透镜的组合厚度值随着横向移动距离  $\delta$  变化呈类似球面的变化规律。

在近轴光学设计理论中,薄透镜焦距公式为

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (3)$$

式中: $f$ 是透镜的焦距值; $n$ 是透镜材料的折射率; $r_1, r_2$ 分别是透镜两个表面的曲率半径。当 Alvarez 透镜发

生横向位移  $\delta$  时,可将组合后的两片透镜看作是平凸或者平凹透镜,即令  $r_2 = 0$ 。则式(3)可简化为

$$r = f(n - 1). \quad (4)$$

在近轴光学计算中,对于已知曲率半径的球面,其矢高函数可近似为一抛物面方程:

$$t = \frac{x^2 + y^2}{2r}. \quad (5)$$

将式(5)与式(2)中的第一项联立后,有

$$r = \frac{1}{4A\delta}. \quad (6)$$

因此,可得到 Alvarez 透镜的等效焦距值与两片透镜的相对横向移动距离  $\delta$  之间的关系:

$$f = \frac{1}{4A\delta(n - 1)}. \quad (7)$$

由式(7)可得:当  $\delta = 0$  时, Alvarez 透镜的光焦度为 0,类似平行平板;当  $\delta > 0$  时, Alvarez 透镜的光焦度大于 0,类似正光焦度的平凸透镜;当  $\delta < 0$  时,类似于负光焦度的平凹透镜,如图 2 所示。

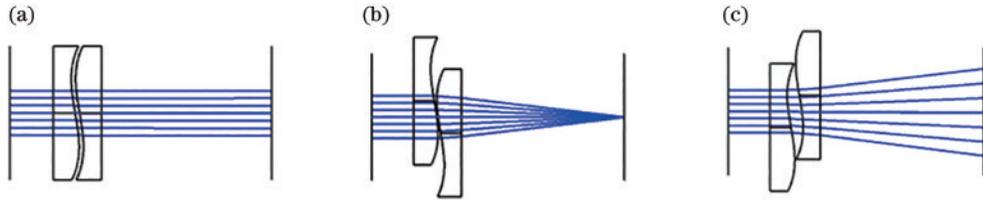


图 2 Alvarez 透镜变焦原理图。(a)光焦度为 0; (b)光焦度大于 0; (c)光焦度小于 0

Fig. 2 Varifocal schematic diagrams of the Alvarez lenses. (a) The focal power is 0; (b) the focal power is more than 0; (c) the focal power is less than 0

### 3 设计实例

#### 3.1 设计指标

本研究期望设计能够应用在长波红外波段的光学连续变倍成像系统,系统选用分辨率为  $320 \times 240$ 、像元尺寸为  $30 \mu\text{m}$  的非制冷型红外探测器,主要设计指标如表 1 所示。

表 1 红外连续光学变倍成像系统的设计指标  
Table 1 Design indicators of infrared continuously optical zoom system

Parameter	Specification
Wave band / $\mu\text{m}$	8-12
Full field of view / ( $^\circ$ )	2-6
Entrance pupil diameter / mm	2-6
Exit pupil diameter / mm	0.4
Working F number	2
Magnification	$5 \times - 15 \times$
Distortion / %	Less than 2.1
Total track length / mm	73.6

#### 3.2 连续光学变倍系统初始设计

所设计的连续光学变倍系统是基于 Alvarez 变焦透镜实现的,简化的薄透镜变倍原理如图 3 所示。该变倍系统由两组 Alvarez 变焦透镜、光阑、一个定焦透镜组和红外探测器组成,所有透镜的光学材料均为 Ge 材料。通过改变两组 Alvarez 透镜的焦距实现系统光学倍率的调节。每组 Alvarez 透镜由两片紧密放置具有自由形状的透镜组成,微小的垂直于光轴的横向位移使 Alvarez 透镜发生显著的光焦度变化。采用开普勒式望远结构进行设计,两组 Alvarez 透镜的轴向距离  $L$ 、第一组 Alvarez 透镜的焦距  $f_1$  和第二组 Alvarez 透镜的焦距  $f_2$  满足式(8),系统的放大倍率  $M$  满足式(9)。

$$L = f_1 + f_2, \quad (8)$$

$$M = \frac{f_1}{f_2}. \quad (9)$$

依据薄透镜理论推理出合适的连续光学变倍系统初始结构参数。对两组 Alvarez 透镜进行光焦度的合理分配,使其始终满足式(8),保持两组 Alvarez 透镜的距离  $L$  为 48 mm 恒定不变,同时系统的放大倍率  $M$  满足式(9),最终优化出合理的系统初始结构。理论上:当光

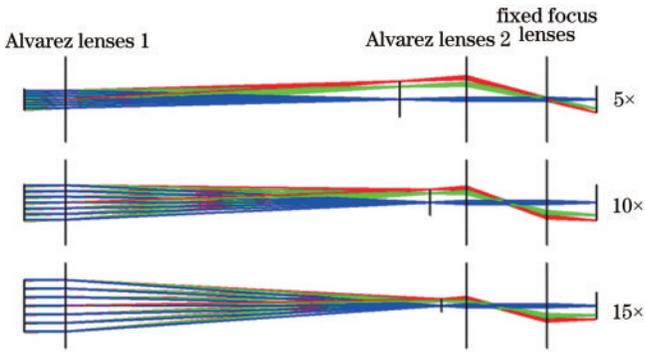


图 3 光学变倍系统初始结构的薄透镜变焦原理分析  
Fig. 3 Initiating structure analysis of the optical zoom system using thin lens zoom principle

学变倍系统实现的放大倍率为 5× 时,第一组 Alvarez 透镜焦距  $f_1$  分配为 40 mm,第二组 Alvarez 透镜焦距  $f_2$  分配为 8 mm;当光学变倍系统实现的放大倍率为 10× 时,第一组 Alvarez 透镜焦距  $f_1$  分配为 43.64 mm,第二组 Alvarez 透镜焦距  $f_2$  分配为 4.36 mm;当光学变倍系统实现的放大倍率为 15× 时,第一组 Alvarez 透镜焦距  $f_1$  分配为 45 mm,第二组 Alvarez 透镜焦距  $f_2$  分配为 3 mm。因此,两组 Alvarez 透镜能够较好地实现开普勒式的望远结构,保证平行光进入第一组 Alvarez 透镜后在中间像面聚焦,并经过第二组 Alvarez 透镜平行出射,出射光线经过定焦透镜组,最终会聚到红外探测器上成像。

### 3.3 连续光学变倍系统设计

选用 Zemax 软件进行光学仿真。首先,在系统选项中设置如表 1 所示的系统孔径、视场、波长等参数。为了保证光学系统的 F 数固定不变,在焦距改变的同时入瞳直径也应该相应地按比例放缩,因此将光阑设置为可浮动的。其次,分别优化设计合理的单组 Alvarez 透镜,由第 2 节 Alvarez 透镜的变焦原理和式(7)可知,对于 Alvarez 透镜的优化设计,最重要的是振幅  $A$  和横向位移  $\delta$ 。若振幅  $A$  值设计偏小,Alvarez 变焦透镜对横向位移  $\delta$  过于灵敏,会破坏系统的稳定性;若振幅  $A$  值设计偏大,则达到相同变焦范围需要更大的横向位移  $\delta$ ,将对 Alvarez 透镜的驱动装置的设计带来挑战。因此在前期设计过程中,重点是依据设计指标控制透镜间距和系统光学长度,合理分配光焦度,进而建立合适的 Alvarez 透镜多重结构参数以及横向位移。前端变倍系统设计完成后,仍需要一个后组的红外目镜结构将平行出射的光线聚焦到非制冷红外探测器的靶面上。基于薄透镜模型以及前组变倍系统出射平行光的口径和视场等参数,单独设计优化一个焦距为 5 mm 红外目镜结构,矫正像差的同时将平行光会聚。

Zemax 软件提供了许多自由曲面的面型供设计者选择,本文选择的自由曲面面型是扩展多项式表面,通

过插入坐标间断面模拟 Alvarez 透镜的相对横向移动。为了减小 Alvarez 透镜的像差,提高成像质量,设计了高阶系数。所设计的红外变倍光学系统选取六阶系数作为变量进行优化。虽然 Alvarez 透镜是非旋转对称的光学结构,但是在三维坐标系中关于  $xoz$  面对称,因此在高阶系数中可以忽略  $x$  的奇次项系数。考虑加工成本的限制,每组 Alvarez 透镜中的两片透镜结构参数保持一致。优先设计优化单组 Alvarez 透镜,然后拼接两组 Alvarez 透镜,最后设计定焦目镜透镜组会聚光束,为了减小光学系统的复杂度,在定焦目镜设计过程中选用的透镜均为球面镜,主要承担会聚光线和矫正像差的任务。依次拼接第一组 Alvarez 透镜、第二组 Alvarez 透镜和定焦透镜组,建立初始透镜结构,设置评价函数进行局部优化和全局优化。在这个过程中优化操作数的修改加权和像质评价分析环节需要反复多次迭代,直至达到设计技术指标。优化后的两组 Alvarez 透镜的结构参数以及横向位移如表 2 所示。

表 2 两组 Alvarez 透镜的特征参数  
Table 2 Characteristic parameters of two sets of Alvarez lenses

Alvarez lenses No.	$A / \text{mm}^{-2}$	$D$	$E / \text{mm}$	$\delta / \text{mm}$		
				5×	10×	15×
Alvarez lenses 1	0.007	0.071	1.500	1.003	0.913	0.892
Alvarez lenses 2	0.081	-0.148	1.500	0.465	0.826	1.191

分别改变两组 Alvarez 透镜的横向位移,使其焦距改变,在此基础上设计实现了 5× 到 15× 的连续光学变倍。受篇幅所限,以连续光学变倍中典型的 5×、10×、15× 放大倍率为例,图 4 为 3 种不同倍率下的光学仿真 3D 视图。图 4 表明,系统无需沿光轴移动透镜

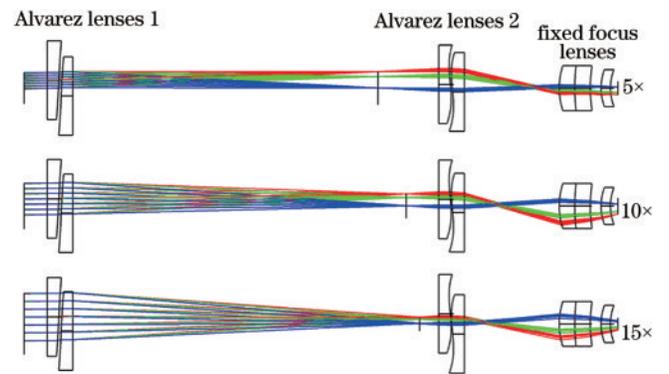


图 4 基于 Alvarez 透镜的紧凑型红外连续光学变倍系统的 3D 视图  
Fig. 4 3D views of the infrared continuous optical zoom system based on Alvarez lenses

位置,即可实现光学系统放大倍率的连续改变。图 5 为系统不同放大倍率下的两组 Alvarez 透镜的横向位移。由图 5 可知,通过调节两组 Alvarez 透镜的横向位移,可使该光成像系统的放大倍率从 5× 到 15× 连续可调。

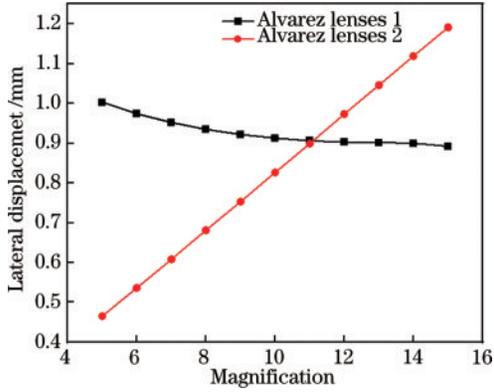


图 5 系统光学放大率与两组 Alvarez 透镜横向位移关系图  
Fig. 5 The relationship between the optical magnification and the lateral displacement of two sets of Alvarez lenses

### 4 成像质量评价

设计的基于 Alvarez 透镜连续红外光学变倍系统

在各放大倍率组态的标准点列图如图 6 所示。图 6 表明,随着入瞳口径的增加,光斑聚焦效果略微扩散,各个组态下的均方根(RMS)半径值远小于艾里斑半径值,光斑聚焦效果优异,该变倍成像系统的成像质量较好。

系统在各放大倍率组态下的光学传递函数(MTF)曲线如图 7(a)、(c)、(e)所示,系统在各个放大倍率组态下的 MTF 曲线均逼近衍射极限,且在 17 lp/mm 的特征频率下,MTF 值约为 0.5。各倍率组态的场曲/畸变曲线如图 7(b)、(d)、(f)所示,不同组态的最大畸变值分别是 2.059%、0.639%、0.756%。综合评价指标表明,该变倍光学成像系统成像质量良好。

公差分析能够评价各项公差对光学系统成像质量的影响,并且评估光学零件加工工艺、光机装调的难易程度。在进行公差分析时,首先需要根据现有的加工精度进行公差预设,本文选择 RMS 半径作为参考标准进行分析,然后查找分析报告中对系统影响较大的公差因素,适当调整制造公差和组装公差,该过程需要进行多次迭代优化。主要考虑的公差操作数如表 3 所示,此外,还需要进一步保证扩展多项式曲面满足一定的矢高差和 PV 面型误差需求。矢高差  $R_s$  即自由曲面表面粗糙度的表征参数,在多项式曲面内要求上升斜率区域的表面粗糙度为 30 nm,下降斜率区域的表面

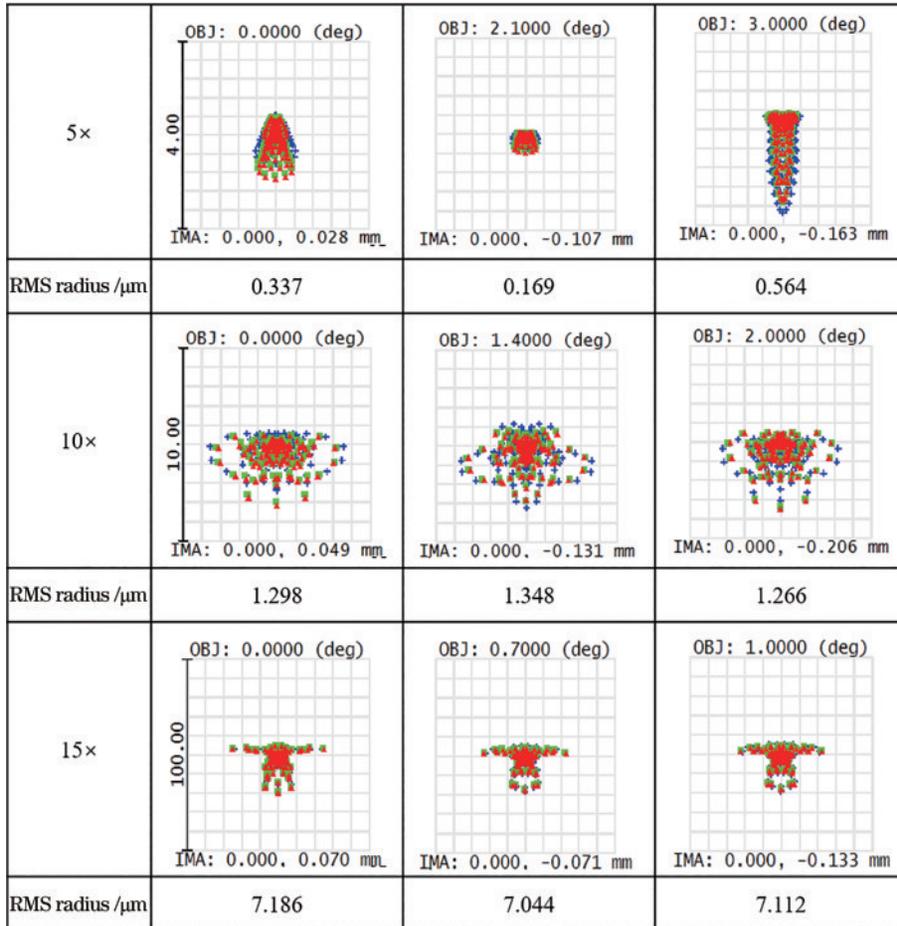


图 6 各组态对应的标准点列图  
Fig. 6 Standard point column diagrams under different configurations

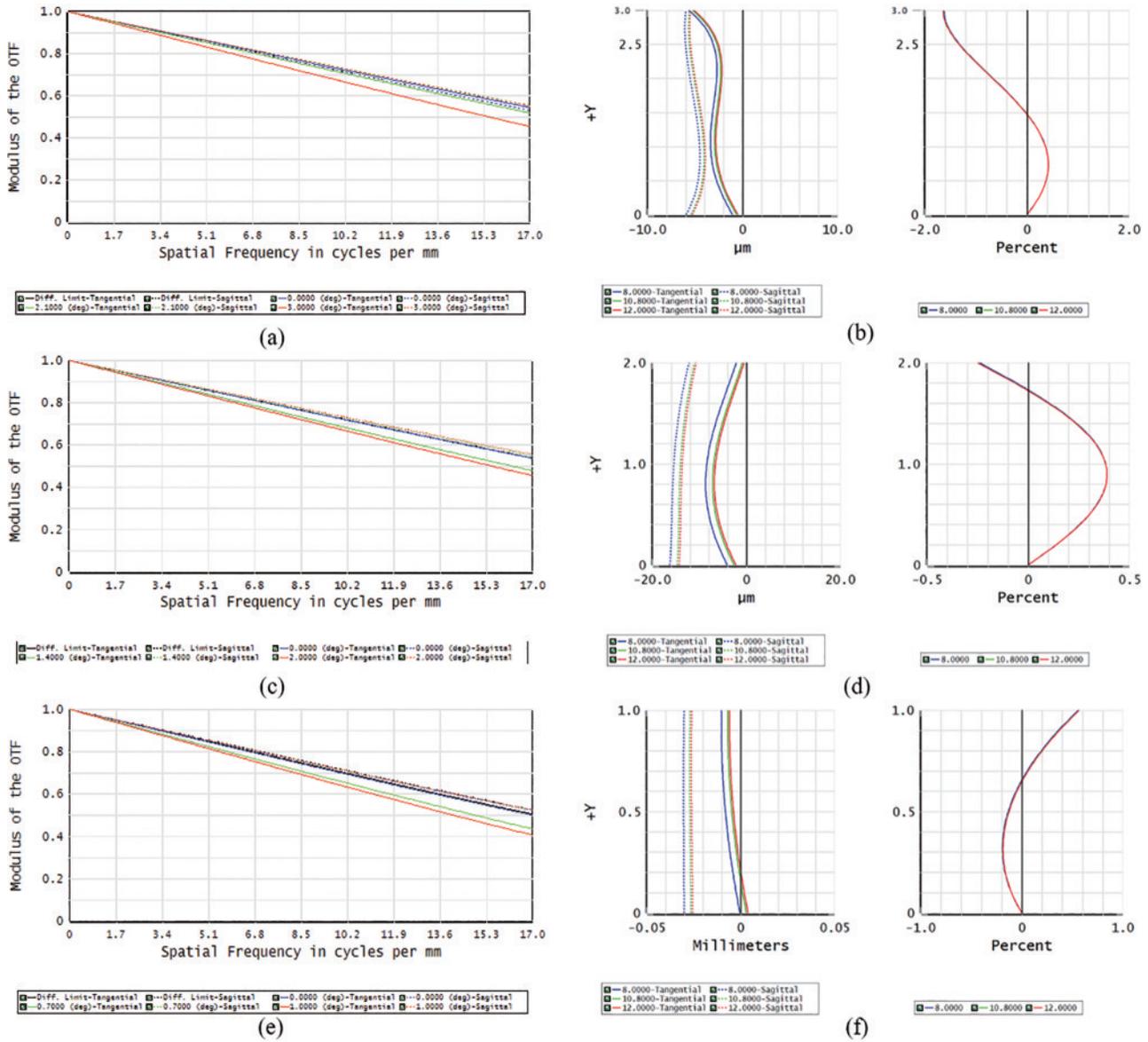


图 7 各组态对应的 MTF 曲线和场曲/畸变图。(a)(c)(e)5×、10×、15×时的 MTF 曲线；(b)(d)(f)5×、10×、15×时的场曲/畸变图

Fig. 7 MTF curves and field curve/distortion diagrams under different configurations. (a) (c) (e) MTF curves at 5 × , 10 × , 15 × ; (b) (d) (f) field curvature/distortion diagrams at 5 × , 10 × , 15 ×

表 3 光学变焦系统选取的公差操作数  
Table 3 The tolerance operand selected by the optical zoom system

Tolerance	Operator	Item	Target
Material	TIND	Index	0.001
	TABB	Abbe	1
Surfacequality	TIRR	Irregularity	0.2
Thickness	TTHI	Thickness /mm	0.1
Surfacetolerance	TSDX(Y)	Decenter /mm	0.02
	TSTX(Y)	Tilt / (°)	0.04
Element	TEDX(Y)	Decenter /mm	0.02
	TETX(Y)	Tilt / (°)	0.04

粗糙度为 10 nm,自由曲面其他区域的表面粗糙度为 10 nm;PV 面型误差为 1 μm。设置蒙特卡罗循环 1000 次,最终得到的公差结果如表 4 所示。以 5×的组态为例,系统弥散斑 RMS 半径的设计名义值为 0.321 μm,最佳的弥散斑 RMS 半径值为 0.327 μm,最差的弥散斑 RMS 半径值为 3.521 μm,平均弥散斑 RMS 半径值为 1.277 μm,标准差为 0.454 μm。结果表明,所设计系统的公差在成熟的非球面透镜的制造工艺以及组装中均较容易得到保证。

此外,对两组 Alvarez 透镜的偏移位置误差进行了分析,由于微小的横向位移可以使 Alvarez 透镜产生较大的焦距变化,选取精度为 0.01 mm 和 0.001 mm 的横向位移差进行分析,以 RMS 半径值作为参考指标,

表 4 不同放大倍率组态公差分析的弥散斑 RMS 半径估计值

Table 4 Estimated radius of spot RMS under different configurations for tolerance analysis

unit:  $\mu\text{m}$ 

5×	10×	15×
Nominal: 0.321	Nominal: 0.772	Nominal: 3.645
Best: 0.327	Best: 1.083	Best: 3.353
Worst: 3.521	Worst: 10.678	Worst: 24.938
Mean: 1.277	Mean: 4.135	Mean: 10.187
Standard Deviation: 0.454	Standard deviation: 1.500	Standard deviation: 3.812

系统在不同放大倍率和不同横向位移偏移误差下的 RMS 半径如表 5 所示。结果表明,精度为 0.01 mm 和 0.001 mm 的横向位移均能满足该光学系统变倍及成像清晰的需求。

表 5 不同放大倍率的横向位移偏移误差分析

Table 5 Analysis of lateral displacement offset error at different magnifications

Magnification	Transverse displacement error /mm	RMS radius / $\mu\text{m}$		
		FOV 1	FOV 2	FOV 3
5×	0.01	0°	2.1°	3°
		1.516	1.647	2.035
		0.592	0.755	1.199
10×	0.001	0°	1.4°	2°
		4.350	4.632	4.052
		1.804	2.034	1.701
15×	0.01	0°	0.7°	1°
		9.330	10.214	10.466
		6.794	6.829	6.936

## 5 结 论

基于 Alvarez 透镜新型变焦原理设计了一款紧凑型红外连续光学变倍系统,利用 Alvarez 透镜的微小横向移动实现系统放大倍率的改变,通过两组 Alvarez 透镜搭建开普勒式的系统结构,该光学系统视场为  $2^\circ \sim 6^\circ$ 、入瞳直径为 2~6 mm、Alvarez 透镜口径为 10 mm、光学放大率变化范围为 5× 到 15×、变倍比为 3、F 数为 2、光学总长度约为 74 mm,能够较好地满足紧凑型需求,且成像质量分析结果表明该系统可以获得理想的成像质量,具有成像质量好、变焦范围大的特点。下一步将进行系统加工和实验系统的搭建。预期采用介电弹性体驱动 Alvarez 透镜沿垂直于光轴方向移动。

## 参 考 文 献

- [1] 江伦, 黄玮. 高变倍比变焦距系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1222006.  
Jiang L, Huang W. Lens design for optical system of high zoom ratio[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1222006.
- [2] 蔡伟, 张鹰, 张新, 等. 多组全动型变焦系统新型设计[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322008.  
Cai W, Zhang Y, Zhang X, et al. New method for all movable zoom lens design[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322008.
- [3] Choi J M, Son H M, Lee Y J. Biomimetic variable-focus lens system controlled by winding-type SMA actuator[J]. Optics Express, 2009, 17(10): 8152-8164.
- [4] Chien C Y, Li C H, She C R. An electrically tunable liquid crystal lens with coaxial bi-focus and single focus switching modes[J]. Crystals, 2017, 7(7): 209.
- [5] Xu L H, Zhang Y L, Liu Z Q, et al. Liquid crystal lens with four driving voltages and its applications in imaging system with rectangular aperture[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2022, 61(2): 028001.
- [6] 胡轶瑶, 刘志强, 孙涛, 等. 利用液晶透镜实现的局部变倍成像系统[J]. 光学学报, 2022, 42(23): 2311001.  
Hu Y Y, Liu Z Q, Sun T, et al. Local zoom imaging system using liquid crystal lens[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(23): 2311001.
- [7] Wang J H, Tang W P, Li L Y, et al. Hybrid driving variable-focus optofluidic lens[J]. Optics Express, 2019, 27(24): 35203-35215.
- [8] Park S C, Lee W S. Paraxial design method based on an analytic calculation and its application to a three-group inner-focus zoom system[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2014, 64(11): 1671-1676.
- [9] Zhang D Y, Justis N, Lo Y H. Fluidic adaptive zoom lens with high zoom ratio and widely tunable field of view [J]. Optics Communications, 2005, 249(1/2/3): 175-182.
- [10] Lohmann A W. A new class of varifocal lenses[J].

- Applied Optics, 1970, 9(7): 1669-1671.
- [11] Smilie P J, Suleski T J, Dutterer B, et al. Design and characterization of an infrared Alvarez lens[J]. Optical Engineering, 2012, 51(1): 013006.
- [12] Zhou G Y, Yu H B, Chau F S. Microelectromechanically-driven miniature adaptive Alvarez lens[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1226-1233.
- [13] Zou Y C, Chau F S, Zhou G Y. Ultra-compact optical zoom endoscope using solid tunable lenses[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20675-20688.
- [14] Hou C L, Xin Q, Zang Y. Optical zoom system realized by lateral shift of Alvarez freeform lenses[J]. Optical Engineering, 2018, 57(4): 045103.
- [15] 张洪博, 闫阿奇, 何双亮, 等. 大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 1222002.  
Zhang H B, Yan A Q, He S L, et al. Optical system design of MWIR continuous zoom lens with high zoom ratio[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 1222002.