光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021121701

基于红外波段的大视场谐衍射透镜设计

郑伊迪[1,2]，何一苇[1]，雷柏平[1*]，杜俊峰[1]，杨　虎[1]

（1. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 针对目前光学设计中，通过增加光学元件数量、限制视场角等方法来平衡像差，导致光学系统较复杂的问题，提出了一种基于红外波段的大视场谐衍射透镜设计方法。使用光学设计软件 Zemax 进行光学设计，使用 DLL 编写了一种可以自定义的表面面型，使用这种表面进行分区优化，并结合标量衍射理论进行了成像效果分析。结果显示，所设计的谐衍射透镜具有 21°的视场角，截止频率（以 0.1 作为对比度极限）为 11.4 lp/mm，并通过实验验证了该透镜的大视场单透镜成像的可行性。

关键词： 谐衍射光学元件；单透镜成像；大视场；光线追迹；标量衍射

中图分类号： O439　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0619－06

Design of Harmonic Diffractive Lens with Large Field of View Based on Infrared Band

ZHENG Yidi[1,2], HE Yiwei[1], LEI Boping[1], DU Junfeng[1], YANG Hu[1]

（1. Institute of Optics and Electronics of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN）

Abstract: Aiming at the problem of increasing the number of optical elements and limiting the angle of view to balance the aberrations in the current optical design, which makes the optical system more complex, a design method of harmonic diffractive lenses based on the infrared waveband with a large field of view is proposed. The optical design software ZEMAX was used for optical design, a customizable surface profile was written using DLL, and this surface was used for partition optimization, and combined with scalar diffraction theory, the imaging effect was analyzed. The results show that the designed harmonic diffractive lens has a field of view of 21°, and the cutoff frequency (with 0.1 as the contrast limit) is 11.4 lp/mm, and the feasibility of the lens with a large field of view single lens imaging is verified through experiments.

Key words: harmonic diffractive optical element; single lens imaging; large field of view; ray tracing; scalar diffraction

0　引言

自光学成像系统诞生以来，高质量成像就一直是人们致力发展的目标，如今的相机已经能够在各种场景下实现与之适配的各种功能，然而为了实现高质量成像，在平衡各种像差的同时，光学系统被设计得越来越复杂。比如，iPhone X 的光学系统中包含超过 6 个非球面元件，而专业的变焦光学器件，以单反为例，则包含超过 20 个单独的光学元件[1]，这种设计遵循了传统的像差理论，并且减少了高斯光学线性模型的偏移，取得了不错的效果，但是同时也带来了光学系统复杂的问题。而衍射成像有望提供解决方案。

衍射光学元件（DOE）由于具有设计自由度高、面型公差要求宽松等特点，在光学系统中扮演了重要角色[2]。根据 DOE 的特性，人们开发了诸多经

收稿日期：2021－12－17.

* 通信作者：雷柏平　E-mail：laser@ioe.ac.cn

典的光学系统。如折衍射混合消色差系统、多层衍射元件消色差系统、Schupmann 消色差系统等。

使用折衍射混合消色差的方法首先由 Swanson 等提出，在红外系统中使用[3-4]。传统光学元件的折射率随波长增大而减小，与之相反，DOE 的折射率随波长的减小而增大，所以，若能将传统透镜与 DOE 的优势相结合，可以实现消色差的光学系统[5]。然而受限于 DOE 只在设计波长处具有 100%的衍射效率，在设计波长附近的波长的衍射效率则急剧下降，所以这种方法的应用波段范围被局限，难以继续发展[6]。

双层衍射元件消色差系统理论在 1998 年被提出[7]，目前针对双层衍射元件进行的设计多是由两个相同周期、不同微结构高度的谐衍射光学元件组成[8]。而三层衍射元件则是将双层衍射元件系统中的空气换成其他光学介质。这种多层衍射元件系统在带宽以及视场上都有一些优势，但是这些设计大多停留在仿真阶段，因为这种系统在应用阶段的限制条件较多，如对准精度要求高等，实用性较弱。

Schupmann 消色差结构是由 Schupmann 在 1889 年提出的一种折射消色差结构，通过使用两个光焦度相反的透镜来完成光学系统的消色差功能，由 Hyde 等[9]在 1999 年应用到了衍射光学系统中。这种光学系统由于其能够在短波段内消除色差的特性，已经被广泛用于大口径的衍射光学系统中[10-11]。但是常规 Schupmann 消色差系统的光路中有遮拦，于是中科院光电所[12]、中科院长光所[13]分别研究了离轴三反衍射镜光学系统，这种光学系统结构紧凑，公差宽松，并且系统内无遮拦，可以较好地实现宽波段的消色差功能。但是 Schupmann 消色差系统在消色差过程中依然会引入较多的光学元件，导致该系统结构较复杂、光路较长，在加工以及装调方面难度较大。并且该光学系统的视场角也会被限制在近轴区域内。

为了解决上述问题，本文提出了一种由基于红外波段的单片谐衍射光学元件组成的成像系统的设计方法。使用 DLL 编写自定义表面，使用光学设计软件 Zemax 完成大视场谐衍射光学元件的光学设计。搭建了成像光路，实验结果表明，使用这种方法设计的谐衍射光学元件具有大视场单透镜成像的功能，使用单透镜成像的光学系统结构紧凑且无需对准，并且单片谐衍射光学元件具有一系列分立波长，可以在分立波长处实现较好的聚焦性能。

1 原理分析

谐衍射光学元件的概念在 1995 年由 Sweeney 等提出[14-15]，其实质上是传统衍射光学元件的一般形式，两者的区别在于相位深度因子，谐衍射光学元件为 p（p 是大于 1 的正数），而传统衍射光学元件为 1，如图 1 所示。

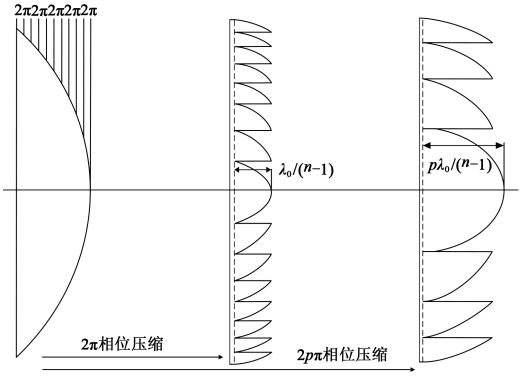


图 1 相位压缩示意图

首先使用相位压缩来对一个可以成理想像的传统透镜进行分析。在此假设透镜为无限薄，焦距 $f=700$ mm，原始透镜材料的折射率 $n=2$，透镜的直径为 50 mm，设计波长在 $\lambda=550$ nm 处，入射角为 0°。若该透镜可以做到理想成像，则可知该透镜在其上任意坐标为 x_i 的点上的相位延迟为

$$\varphi_{\text{lens}}=(700-\sqrt{f^2+x_i^2})\times\frac{2\pi}{\lambda} \tag{1}$$

式中，φ_{lens} 为透镜的相位延迟，f 为焦距，n 为透镜材料的折射率，λ 为透镜的设计波长，x_i 为透镜后表面的径向坐标。

接下来对该结果进行相位压缩操作，普通的衍射光学元件是以 2π 相位差进行压缩，而谐衍射光学元件则以 2π 的 p 倍相位差进行压缩，这里的压缩就是对上文的理想透镜的相位延迟进行取余操作，即使用相位延迟除以 $2\pi p$，最终得到的余数就是进行压缩以后的相位，利用该相位除以所假设透镜与空气的光程差即可得到谐衍射光学元件的表面微结构数据，公式如下：

$$H_{\text{doe}}=\text{mod}(\varphi_{\text{lens}},p\times 2\pi)\times\frac{\lambda}{(n-1)\times 2\pi} \tag{2}$$

式中，H_{doe} 为透镜的微结构高度，mod 为取余操作，则任意波长为 λ_n 的光线通过该谐衍射光学元件后在其后表面的相位 φ_{rays} 为

$$\varphi_{\text{rays}}=H_{\text{doe}}\times(n-1)\times\frac{2\pi}{\lambda_n} \tag{3}$$

而该处的复振幅表达式为

$$y_i = 1 \times \exp(j \times \varphi_{rays}) \times \exp\left(j \times 2\pi \times \frac{r}{\lambda_n}\right) \quad (4)$$

式中，y_i 为该处的复振幅，j 为虚数单位。r 代表光线入射角度，当入射光为平行光时，$r=0$。

在得到光线在透镜后表面的复振幅分布后，对其使用夫琅禾费衍射公式，可得到像面复振幅分布 y_o：

$$y_o = \left(\frac{-j}{\lambda f} \times \Delta x\right) \times y_i \times \exp\left(j \times \frac{2\pi}{\lambda} \times S\right) \times \exp\left(-j \times \frac{2\pi}{\lambda f} \times (x_i \times x_o)\right) \quad (5)$$

式中，Δx 是 x_i 均分成若干段后的一段，f 为设定好的焦距，S 是坐标 x_i 处到焦点的距离，x_o 是提前设定好的像面坐标的范围。

对 y_o 取绝对值并平方，即可得到像面的光强分布，即光强 PSF。对 y_o 做逆傅里叶变换，就可以得到透镜后表面的波前复振幅，提取该复振幅分布的幅角即为该波前的相位，通过相位就可以得到光程。对该值进行拟合，拟合成二次函数，可以得到实际的焦距，与设计焦距相减就是光线在透镜坐标 x_i 处入射时的离焦。

图 2 展示了相同参数 m 下，不同波长的离焦分布规律，可以看出，随着参数 p 的增大，所有波长中，最大离焦量 Δf 越来越小。中心波长正离焦半周期是在某一波长离焦为 0 时，以此波长为中心波长，在一定范围内，正离焦随着波长数值增加而增加，正离焦最大时为半个周期。图 3 展示了随着参数 p 的增大，离焦周期越来越小，这表示离焦为 0 的点更多，具有更好的聚焦性能。

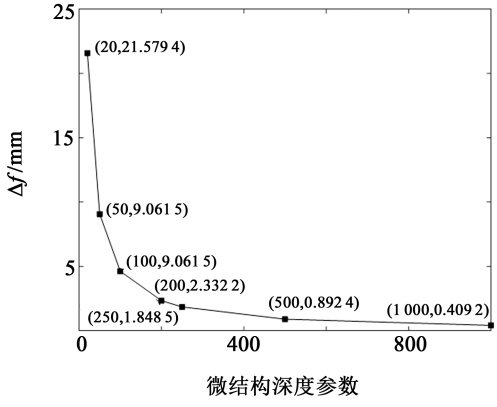


图 2　最大离焦的规律

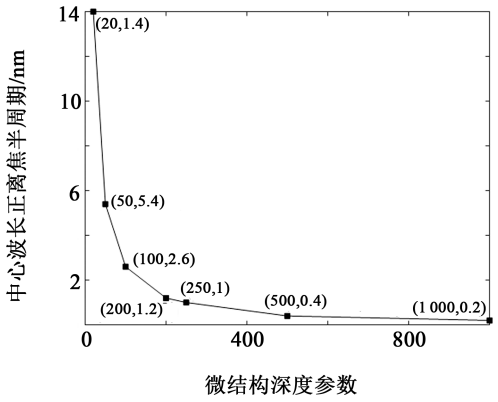


图 3　离焦周期规律

2　光学设计

光学设计部分选择 ZEMAX 软件来进行。然而 ZEMAX 软件中可以进行的表面设计都是传统连续面型的表面，没有能够直接进行具有突变结构面型的表面设计的功能，所以编写了可以自定义的表面面型，使用 DLL 实现，达成设计所需光学表面的目的。

这种方法的核心公式以及面型求解方式如下：

$$z_h = \frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}} \quad (6)$$

式中，c 是曲率（半径的倒数），r 是径向以透镜单位为单位的坐标，k 是圆锥常数，z_h 是微结构高度的坐标。

为了得到可以直接对面型数据进行操作的 DLL 文件，使用 C++进行编写。假设 Z 表示某个区域的序号，微结构从某个已设定好的非球面向下偏移，则每个区域终止点的径向坐标 z_o 为

$$z_o = \frac{c_2 R_m^2}{1+\sqrt{1-(1+k_2)c_2^2R_m^2}} - \frac{c_1 R_m^2}{1+\sqrt{1-(1+k_1)c_1^2R_m^2}} \quad (7)$$

式中，设定好的非球面有曲率 c_2，圆锥系数 k_2，此时第 Z 个区域起始点处的径向坐标为 R_m，第 Z 个区域，即本区域，有曲率 c_1，圆锥系数 k_1。

整个微结构相对于已设定好的非球面的偏移量 z 为

$$z = z_o + \frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}} \quad (8)$$

式中，设非起始点或者终止点的径向坐标为 r，有曲率 c，圆锥系数 k。

提出的 DLL 流程图如图 4 所示。在本次光学设计中，使用上述 DLL 进行光学设计，一共对该谐衍射光学元件分了 16 个区，设定每个区的曲率半径为变量进行优化，从第一个区开始优化，通过合理设定每个区的最大半径将微结构高度约束在上文所述的条件内，来实现尽量多的分立波长，具有较好的聚焦功能。将 16 个分区都优化到位，再调整光阑尺寸及焦距，直至点列图中各个视场的光线都可以聚集在艾里斑之内，则优化完毕。由 ZEMAX 得到的光路图和点列图分别如图 5，6 所示。

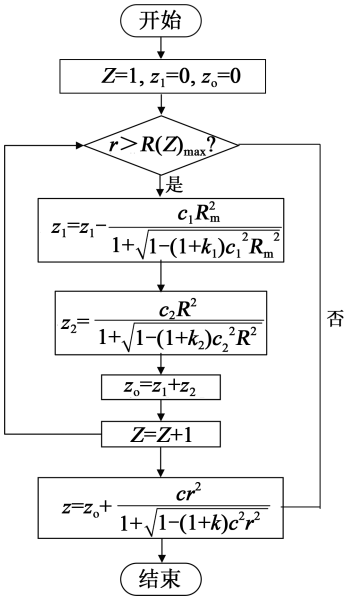


图 4 DLL 流程图

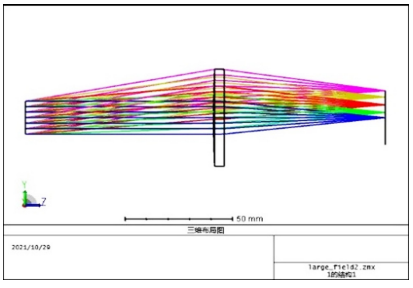


图 5 谐衍射元件光路图

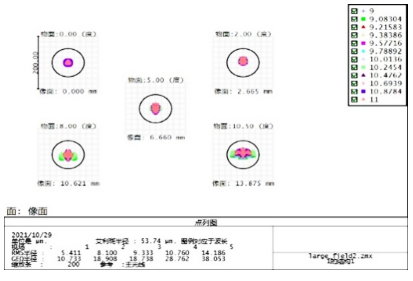


图 6 谐衍射元件点列图

3 成像效果分析

使用不交轴光线的光线追迹法完成了光学仿真，如图 7 所示，该方法是在给定入射光方向余弦 (L,M,N) 和入射点坐标等条件下求解出入射角余弦值，设此时某入射点的法线方向余弦为 (l_n,m_n,n_n)，则有：

$$\cos i=|L\times l_n+M\times m_n+N\times n_n| \tag{9}$$

式中，$\cos i$ 为入射角的余弦值；L,M,N 分别为入射光方向余弦在 x,y,z 方向的分量；l_n,m_n,n_n 分别为法线在 x,y,z 方向的分量。

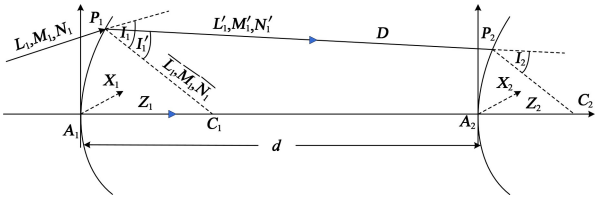


图 7 不交轴光线的光线追迹

根据折射定律，有：

$$\cos I'=\sqrt{1-\left((1-\cos I^2)\times\left(\frac{n}{n'}\right)^2\right)} \tag{10}$$

式中，$\cos I'$ 为折射角的余弦值，n 为入射面的介质折射率，n' 为折射面的介质折射率。

则出射光的方向余弦 (L',M',N') 为

$$\begin{cases}L'=\left(\frac{n}{n'}\right)\times L+\left(\left(\frac{n}{n'}\right)\times\cos I-\cos I'\right)\times l_n\\ M'=\left(\frac{n}{n'}\right)\times M+\left(\left(\frac{n}{n'}\right)\times\cos I-\cos I'\right)\times m_n\\ N'=\left(\frac{n}{n'}\right)\times N+\left(\left(\frac{n}{n'}\right)\times\cos I-\cos I'\right)\times n_n\end{cases} \tag{11}$$

式中，L',M',N' 分别为出射光方向余弦在 x,y,z 方向的分量。

借助上述方程，就完成了第一个面的光线追迹，则相对于第二个面，有：

$$\begin{cases}X'_1=X_1\\ Y'_1=Y_1\\ Z'_2=Z_1-D\end{cases} \tag{12}$$

式中，D 为两个面极点之间的距离，X_1,Y_1,Z_1 为光线与第一个面的交点坐标，X'_1,Y'_1,Z'_1 为相对于第二个面的坐标。

则第一个面的折射光线与第二个面的交点坐标 (X_2,Y_2,Z_2) 为

$$\begin{cases} X_2 = X'_1 + L' \times D \\ Y_2 = Y'_1 + M' \times D \\ Z_2 = Z'_1 + N' \times D \end{cases} \tag{13}$$

重复式(9),(10)和(11),可以得到最后一个面的出射光的方向余弦,由于本次仿真只涉及两个面,所以只列出了对于两个面的光线追迹方程,若所进行的仿真大于两个面,重复上述步骤即可[16]。

在本文的仿真中,计算了从物面的某个等相位面到第一个面,第一个面到第二个面以及第二个面到其后方波前的光程,将该光程代入上述等相位面的复振幅表达式中,就得到了第二个面后方的波前的复振幅表达式 $u(x_0, y_0)$。

波前到焦点的传播在空气中进行,根据标量衍射理论[17],在傍轴近似的条件下,这一段传播可以视为夫琅禾费衍射传播,此时该光学系统的脉冲响应的复振幅分布 $u(x, y)$可以近似为

$$u(x,y) = \frac{1}{\mathrm{j}\lambda d}\exp(\mathrm{j}kd)\exp\left[\mathrm{j}\frac{k}{2d}(x^2+y^2)\right] \times \iint_{-\infty}^{+\infty} u(x_0,y_0)\exp\left[-\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda d}(xx_0+yy_0)\right]\mathrm{d}x_0\mathrm{d}y_0 \tag{14}$$

式中,d 为衍射光学元件到像面的距离,(x, y)与(x_0, y_0)分别为物面和像面的坐标,λ 为光波长,k 为波矢,$u(x_0, y_0)$为第二个面后方的复振幅分布。则此时像面的光强输出 $U(x, y)$可表示为

$$U(x,y) = (u(x,y))^2 \tag{15}$$

使用傅里叶变换将该空域信息转换成频域信息:

$$G(f_x, f_y) = \mathscr{F}(U(x,y)) \tag{16}$$

式中,f_x 和 f_y 分别是在频域中沿着 x 和 y 方向上的空间频率表示,$\mathscr{F}$ 为傅里叶变换,$G(f_x, f_y)$为频域中的分布。该式能表征光学系统的光学传递函数(OTF),OTF 反映了光学系统在 f_x 和 f_y 方向上的传递能力。OTF 可以表达成幅值和相位的形式,可以表示为

$$OTF(f_x, f_y) = |H(f_x, f_y)| \times \exp(\phi(f_x, f_y)) \tag{17}$$

式中,$OTF(f_x, f_y)$为系统的光学传递函数,$|H(f_x, f_y)|$就是光学系统的调制传递函数(MTF),MTF 反映了光学系统的成像能力,$\exp(\phi(f_x, f_y))$的指数部分就是光学系统的相位传递函数(PTF)。

使用 ZEMAX 中的表面数据,结合上述方法,进行光学模拟,得到的光学系统在 9～11 μm 波段的复合 MTF 如图 8 所示。

分析复合波长的 MTF 可知,光学系统的截止频率(以 0.1 作为对比度极限)为 11.4 lp/mm,结合上文的光学仿真结果,初步分析可知所设计的谐衍射光学元件具有大视场单透镜成像的功能。

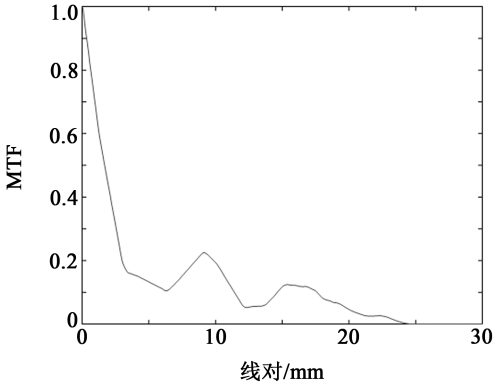


图 8　谐衍射光学元件复合波长 MTF

4　实验及分析

谐衍射光学元件使用车削工艺进行加工,最终得到的实物如图 9 所示。

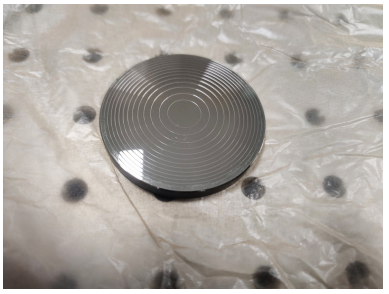


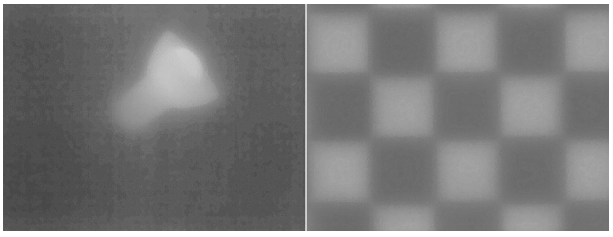
图 9　谐衍射光学元件

本次实验的 CCD 相机选用了烟台艾瑞光电公司的 LT384003Y01910XCNPX 型号,分辨率为 384×288,像元间距为 17 μm,镜头焦距为 19 mm。为了验证谐衍射光学元件的单透镜成像功能,将该相机的已有镜头拆下,使用谐衍射光学元件作为镜头,CCD 的靶面直接作为谐衍射光学元件的像面接收信息。选用了一个台灯和一个可控温靶标进行拍摄,白炽灯功率为 100 W,靶标的温度可以在 0～150 ℃之间调整。

使用谐衍射光学元件对台灯进行拍摄,得到的结果如图 10(a)所示,使用谐衍射光学元件对可调温靶标进行拍摄,将靶标加热至 150 ℃,结果如图 10(b)所示。

分析拍摄结果可知,该谐衍射光学元件成功完成

了单透镜成像的任务。棋盘格可调温靶标的一个小格子约为 2.5 cm，靶标距离光学系统约为 122.6 cm，此时光学系统的视场角为 5.24°，相对于将视场角限制在几度的近轴光学系统有较大提升。实验与仿真结果呈现出视场角的不同是因为 CCD 相机靶面较小，导致靶面不能接收所有图像信息，影响了成像质量，选择靶面更大的 CCD 会获得与仿真更接近的实验结果。



(a) 台灯 (b) 可调温靶标

图 10 拍摄结果

5 总结与展望

本文使用光学设计软件 ZEMAX 中的自定义表面功能进行光学设计，设计了一种基于红外波段的大视场谐衍射光学元件，光学设计结果显示该谐衍射光学元件具有 21°视场角。通过光学仿真以及实验验证了这种谐衍射光学元件的大视场单透镜成像的功能，实验中该谐衍射光学元件的视场角达到 12°，相对于在近轴区域成像的传统透镜的视场角提升了一个数量级。后续在此设计的基础上缩小 F 数，可以得到更小的光斑，能更好地匹配 CCD 相机，进一步地，在成像环节加入数字图像处理，可以提高对比度等数据，从而提升成像质量。

参考文献：

[1] Peng Y, Sun Q, Dun X, et al. Learned large field-of-view imaging with thin-plate optics[J]. ACM Trans. Graph., 2019, 38(6): 211-219.

[2] 巩畅畅，刘 鑫，范 斌，等. 基于 RGB 三波段的消色差衍射透镜设计与分析[J]. 光学学报，2021，41(11)：1105001.
Gong Changchang, Liu Xin, Fan Bin, et al. Design and analysis of achromatic diffractive lens based on RGB three-band [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1105001.

[3] Swanson G J, Veldkamp W B. Infrared applications of diffractive optical elements[J]. Proc. of SPIE, 1988, 883: 155-162.

[4] Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats[J]. Appl. Opt., 1988, 27(14): 2960-2971.

[5] Davidson N, Friesem A A, Hasman E. Analytic design of hybrid diffractive-refractive achromats[J]. Appl. Opt., 1993, 32(25): 4770-4774.

[6] 巩畅畅. 宽波段消色差衍射透镜的设计与分析[D]. 北京：中国科学院大学，2021.
Gong Changchang. Design and analysis of wide-band achromatic diffractive lens[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.

[7] Arieli Y, Ozeri S, Eisenberg N, et al. Design of a diffractive optical element for wide spectral bandwidth[J]. Opt. Lett., 1998, 23(11): 823-824.

[8] Nakai T, Ogawa H. Research on multi-layer diffractive optical elements and their application to camera lenses[C]// Proc. of the Diffractive Optics and Micro-Optics, 2002.

[9] Hyde R A. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes[J]. Appl. Opt., 1999, 38(19): 4198-4212.

[10] Wang H, Kang F Z, Zhao W, et al. An optical design for dual-band infrared diffractive telescope[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(1): 39-43.

[11] Zhao W, Wang X, Liu H, et al. Development of space-based diffractive telescopes[J]. Frontiers of Information Technol. & Electronic Engin., 2020, 21(6): 1-19.

[12] He C, Huang P, He Y, et al. Simplified unobscured optics design for a diffractive telescope[J]. Appl. Opt., 2020, 59(6): 1660-1666.

[13] Faklis D, Morris G M. Spectral properties of multiorder diffractive lenses[J]. Appl. Opt., 1995, 34(14): 2462-2468.

[14] 杨月英. 谐衍射光学元件在红外双波段光学系统中的应用[D]. 北京：中国科学院研究生院，2013.
Yang Yueying. Application of harmonic diffractive optical element in infrared dual-band optical system[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2013.

[15] 张 楠，卢振武，李凤有. 衍射望远镜光学系统设计[J]. 红外与激光工程，2007，36(1)：106-108.
Zhang Nan, Lu Zhenwu, Li Fengyou. Design of the optical system of the diffractive telescope[J]. Infrared and Laser Engin., 2007, 36(1): 106-108.

[16] Born M, Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light [M]. Amsterdam: Elsevier, 2013.

[17] 郁道银，谈恒英. 工程光学[M]. 第 4 版. 北京：机械工业出版社，2015.
Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics[M]. 4th Edition. Beijing: Machinery Industry Press, 2015.

作者简介：

郑伊迪(1997—)，男，硕士研究生，主要研究方向为衍射计算成像；

雷柏平(1976—)，男，博士，高级工程师，硕士生导师，主要从事空间光机系统设计及测试技术方面的研究。