

用于光纤激光雷达收集系统的非球面环带菲涅耳透镜设计

李浩然¹, 张帅¹, 解博夫¹, 文雅¹, 徐绍伟³, 陶宇亮³, 赵星^{1,2*}, 刘伟伟^{1,2}

¹南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所, 天津 300350;

²天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350;

³北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 为满足激光雷达收集系统对远距离荧光信号探测要求,提出了一种基于多软件协同循环优化各环带面形的非球面环带菲涅耳透镜设计方法,并进行了透镜面形误差分析及透镜样件性能测试。利用该方法设计了一个直径为 300 mm、焦距为 670 mm 的高收集效率菲涅耳透镜,使用 LightTools 软件对设计的菲涅耳透镜进行了光学仿真,收集效率可达 52.2%。仿真和实验结果均表明:在 400~950 nm 光谱范围内,设计的菲涅耳透镜减小了透镜球差和色差对收集系统的影响,具有较高的能量收集效率,提高了系统光能利用率,满足系统性能指标要求。

关键词 非线性光学; 光学设计; 菲涅耳透镜; 光纤激光雷达; 收集系统; 非球面透镜

中图分类号 TH74

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230471

1 引言

经济社会的不断发展对大气环境污染的控制和治理提出了更高的要求。利用基于光纤激光雷达的大气污染多组分监测技术,能够对大气环境中的激发污染物荧光信号进行光谱分析,获取检测区域内的大气污染情况。为了能够在远距离宽光谱条件下收集信号,需要设计高收集效率的大口径菲涅耳透镜收集系统,以便将荧光光谱信号会聚耦合进光纤光谱仪系统中。目前,国内外研究人员及制造商设计的大口径菲涅耳透镜在光伏聚光系统和均匀照明系统中得到了广泛的应用。赵会富等^[1]通过改变菲涅耳透镜的设计方法,改善了焦平面辐照度分布,提高了整体的辐照均匀性,从而提高了光伏电池的光电转换效率。Ryu 等^[2]提出并设计了一种基于模块化菲涅耳透镜的新型太阳聚光器,其在接收面上具有光强一致性和稳定的集光率。传统的非成像聚光菲涅耳透镜尽管有较好的能量收集效率,但在光纤激光雷达收集系统中会受到大口径透镜球差和色差的影响^[3],导致不同波长的光轴向聚焦特性不同,进而光纤束接收端在焦点附近不同位置处采集到的光谱信号存在差异。同时,会聚平面上的光斑尺寸较大,能量较为分散,导致耦合进入光纤的信号能量较低,后续光谱分析系统难以获得高分辨率分析结果。

为了提高菲涅耳透镜的聚光效率,常采用 Zemax 软件序列模式下的菲涅耳面直接进行设计和模拟。在宽光谱条件下,为了达到理想设计结果,往往需要进行复杂的几何光学理论推导以及光线追迹分析,难以对大口径菲涅耳透镜的能量收集效率和会聚光斑大小进行同步优化以获得满足系统要求的菲涅耳透镜设计^[4-5]。针对上述设计优化问题,本文设计了一种非球面表面菲涅耳透镜,使用 Code V 和 MATLAB 软件数据接口开展了多环带菲涅耳透镜优化设计,利用 LightTools 软件进行了菲涅耳透镜整体建模,实现了光能透过率和收集效率的光学性能仿真分析,在聚焦平面上有效抑制了透镜像差。分析了面形误差对设计结果的影响,在此基础上进行了菲涅耳透镜样件的加工及实验测试,证明了所设计的菲涅耳透镜能够对远距离宽光谱信号实现高效收集。

2 设计指标

菲涅耳透镜收集系统的设计需要考虑收集信号源参数、自身体积尺寸、后续分析系统指标和透镜性能指标。不同条件下的菲涅耳透镜设计方法存在差异,本文中信号源为远距离条件下光纤激发出的 400~950 nm 荧光光谱信号。为了满足提高收集信号强度以及会聚光线能量的需求,菲涅耳透镜有效孔径的要求为不小于 1 m,厚度小于 10 mm。考虑大口径透镜像差对收

收稿日期: 2023-01-31; 修回日期: 2023-02-18; 录用日期: 2023-03-13; 网络首发日期: 2023-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504400)、国家自然科学基金(62075106)

通信作者: *zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn

集效率的影响,参考商品化菲涅耳透镜的口径和相关参数,确定收集系统采用图 1 所示的菲涅耳透镜阵列方案,其中,菲涅耳透镜直径为 300 mm,焦距为 670 mm,厚度小于 10 mm。在实际使用中,透镜阵列置于载物台上方,透镜端朝飞秒激光激发的荧光光源方向,后端光纤输出端接入光谱仪,实现对收集荧光光谱的实时分析。

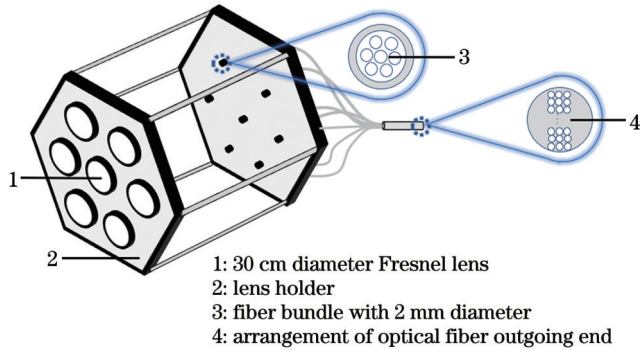


图 1 菲涅耳透镜阵列图

Fig. 1 Diagram of Fresnel lens array

为满足后端光纤光谱仪分辨率要求,考虑到光纤束端面直径较小且有数值孔径为 0.22 的限制,要求 300 mm 口径菲涅耳透镜的会聚光斑半径小于 1 mm,会聚孔径角与光纤束数值孔径 0.22 匹配,且耦合进入光纤束的能量与会聚光斑的能量比即透镜能量收集效率大于 33.3%,同时透镜的出射能量与入射能量比即透镜的透过率大于 80.0%^[6]。其中,能量收集效率受会聚光斑尺寸、会聚光束孔径角和能量空间分布的影响,是体现菲涅耳透镜光收集性能的最重要综合指标,在设计中应着重考虑。所有技术指标要求如表 1 所示。

表 1 菲涅耳透镜的设计指标
Table 1 Design indexes of Fresnel lens

Index	Value
Spot radius	<1 mm
Lens transmittance	>80.0%
Energy collection efficiency	>33.3%
Effective aperture	300 mm
Wavelength range	400–950 nm
Focal length	670 mm

3 设计原理

菲涅耳透镜是由多个折射环带叠加而成的特殊透镜,这些环带对指定光谱范围的光带通起到折射的作用。每个环带都相当于一个独立的折射面,不同半径位置处的环带将光线会聚并集中到光轴上的设定位置处,从而形成透镜中心焦点,如图 2 所示。菲涅耳透镜

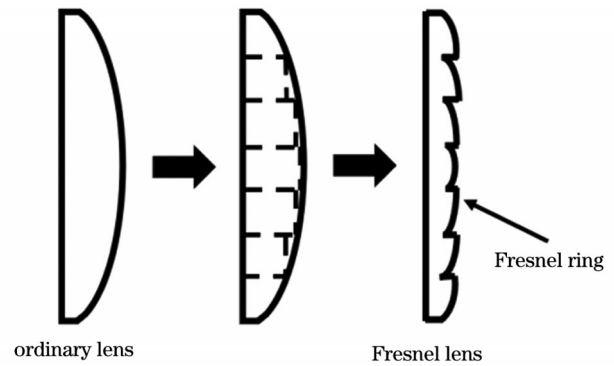


图 2 菲涅耳透镜示意图

Fig. 2 Schematic of Fresnel lens

与普通透镜相比,具有质轻体小、用材少等优点,能够大幅减小大口径光学系统的整体质量。

在实际应用中,受到菲涅耳透镜球差和色差的影响,不同波长光束的轴向聚焦特性不同。为了减小透镜球差和光学介质造成的色散的影响^[7],提出了宽光谱菲涅耳透镜的整体设计,思路如图 3 所示。构建初始环带面形后,使用 Code V 软件,以焦平面上的光斑半径和光束角度为主要优化目标,对环带面形进行优化,按照同样的优化方法在 MATLAB 软件中建立循环以进行多环带优化,并在 LightTools 软件中拼接构建含有多环带的菲涅耳透镜。在透镜性能评估方面,通过 Code V 软件分析每个环带焦平面的几何光斑直径,并利用 LightTools 软件分析计算菲涅耳透镜会聚光斑的半峰全宽和能量收集效率。对于满足设计指标

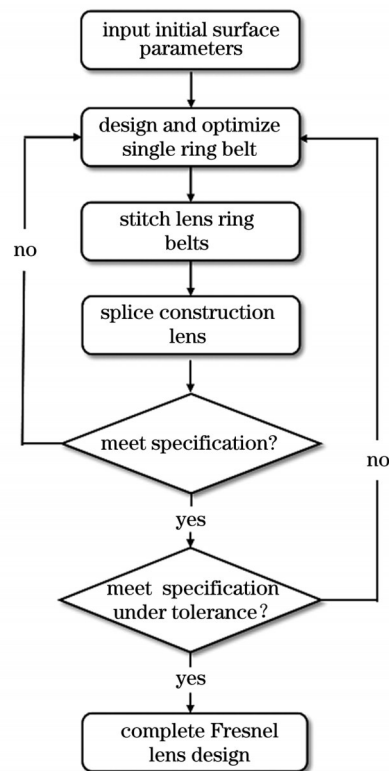


图 3 菲涅耳透镜的设计流程图

Fig. 3 Design flow diagram of Fresnel lens

要求的透镜,按照加工工艺所需的公差改变表面面形,分析其对透镜性能的影响,完成公差分析。

4 菲涅耳透镜设计

4.1 菲涅耳透镜面形设计

根据设计指标,菲涅耳透镜工作于 400~950 nm 波段,综合考虑宽光谱条件下透镜材料的特性、加工难易程度等因素,最终选择光学级聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 作为透镜材料,该材料在 280~1000 nm 波长范围内具有良好的透明性,透光率能达到 92.0% 以上,可以方便进行热成型或机械加工,同时密度仅为常用的 K9 光学玻璃和熔融石英玻璃的一半,适合作为大口径薄透镜的加工材料。

普通球面面形难以保证不同孔径处的入射光束同时满足表 1 中的设计指标要求,因此本文使用比球面具有更大设计自由度的二次曲面进行环带设计,使之具有较强的像差控制能力和较好的光学性能。考虑加工工艺的可实现性,设置 300 mm 口径菲涅耳透镜的环带宽度为 1 mm,即透镜共包含 150 个环带。在 Code V 软件中设置权重相等的 7 个设计波长:400、500、600、700、800、900、950 nm。设置各环带具有相同的初始结构,根据各环带沿透镜径向的孔径位置,采

用中心遮拦方式对各环带进行建模,将各环带表面的二次曲面系数和曲率半径设为优化变量,以透镜后端 670 mm 处焦平面内的几何光斑直径和光束像方孔径角为优化目标,对各环带逐一进行优化设计。为了自动优化设计大量环带结构,利用 Matlab 与 Code V 软件的数据交互接口,循环优化每个环带结构,并记录优化后的各环带结构的面形参数及不同波长光束的聚焦几何光斑直径,从而获得全口径菲涅耳透镜的会聚几何光斑尺寸,以此评估优化设计后的菲涅耳透镜的会聚性能。经过调整参数,在反复优化设计后,最终可得透镜各环带的面形参数。由设计结果可知,透镜总体厚度小于 3 mm。因篇幅所限,表 2 给出了 8 个环带面形参数的优化结果,图 4 为第 15 环带的光线追迹图,图 5 为第 15 环带的光斑点列图。随着环带的增加,初始非球面的口径也会相应增大,平行入射至环带的光线在焦平面上的会聚位置会向光轴外侧偏移,造成几何光斑尺寸增大。由第 15 环带仿真结果可知:不同波长的光线在会聚光斑内的位置不同,波长越长,位置越靠外侧,且光斑内部的能量分布不均匀^[8],集中于中心位置,因此几何光斑大小取决于 950 nm 波长光线的光斑直径。图 6 为第 150 环带的几何光斑直径分布图。

表 2 菲涅耳透镜环带的优化设计结果

Table 2 Optimization design results of Fresnel lens annuluses

Band No.	Radius /mm	Radius of curvature /mm	Thickness /mm	Quadric coefficient	Spot radius /mm
5	5	-332.286	5.00	8.00000	0.142
25	25	-327.562	5.80	-6.55594	0.798
45	45	-324.636	7.81	-3.66291	1.418
65	65	-321.006	11.07	-2.91641	2.217
85	85	-316.763	15.58	-2.63004	3.094
105	105	-312.407	21.34	-2.49031	3.901
125	125	-306.418	28.42	-2.41282	5.049
145	145	-300.822	36.70	-2.36496	6.019

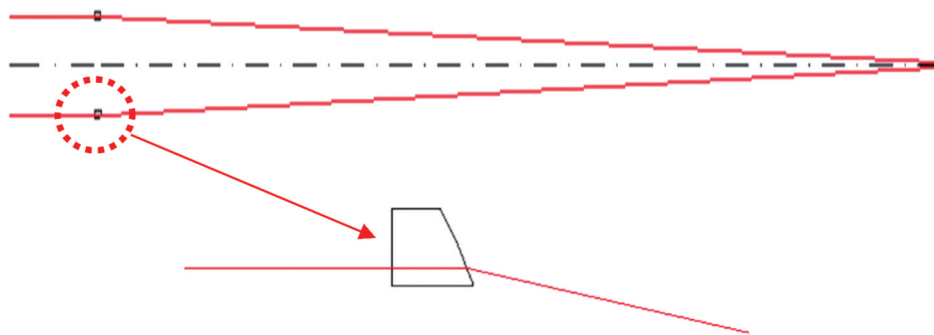


图 4 菲涅耳透镜第 15 环带面形优化后的光线追迹图

Fig. 4 Ray tracing diagram of Fresnel lens after optimization of 15th annulus shape

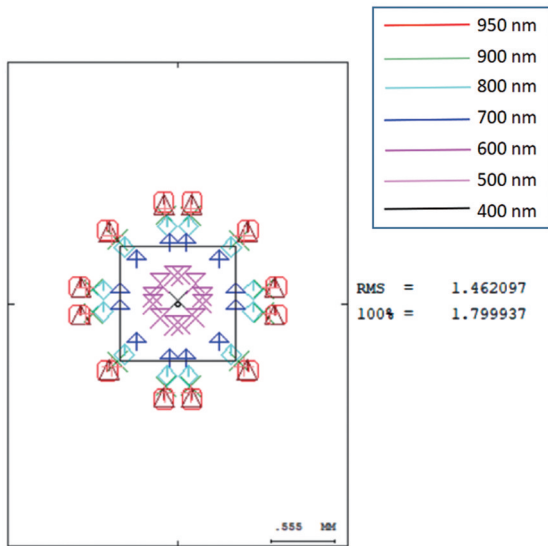


图 5 菲涅耳透镜第 15 环带的光斑点列图

Fig. 5 Spot sequence diagram of 15th annulus of Fresnel lens

获得各环带面形参数后,在 LightTools 仿真软件中对各环带进行建模^[9],并利用布尔操作将所有环带拼接组合为完整的菲涅耳透镜。对建模后的菲涅耳透镜进行光线追迹分析,如图 7 所示,设置光谱范围为

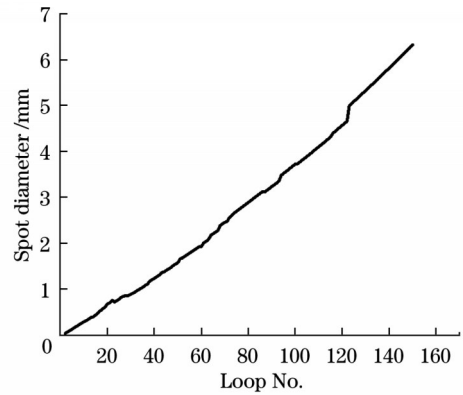


图 6 设计的透镜环带光斑直径

Fig. 6 Designed lens annulus spot diameters

400~950 nm、总功率为 1 W 的平行入射光束,在距离透镜后端 670 mm 处设置接收器 A 以查看会聚光斑大小;同时,为了仿真光纤束的数值孔径对入射光束角度的限制,在该位置处设置直径为 2 mm 的光阑,并在其后端 100 mm 处增设直径为 25.4 mm 的接收器 B,用于分析光纤束收集的光能量。利用软件追迹 100 万条光线,根据透镜前后表面和接收器平面上的光能量,即可计算分析菲涅耳透镜的透过率和能量收集效率。

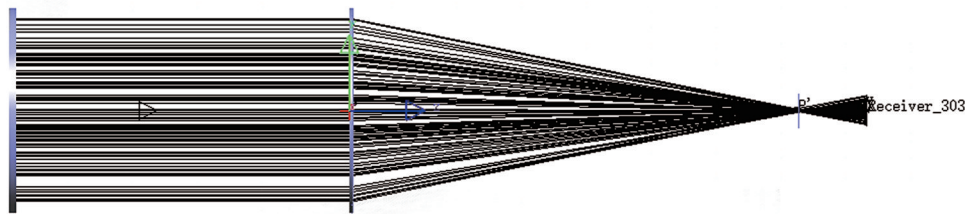


图 7 菲涅耳透镜光束会聚性能的仿真分析

Fig. 7 Simulation analysis of beam convergence performance of Fresnel lens

通过对仿真建模结果的分析,可知能量透过率为 92.0%;菲涅耳透镜在光纤束端面上的会聚光斑能量分布不均匀,300 mm 口径菲涅耳透镜在光纤束端面

接收器位置处的会聚光斑半峰全宽为 2.051 mm,如图 8(a)所示;对图 8(b)所示的探测器 B 的包围圆能量进行计算,可得透镜能量收集效率为 52.2%。

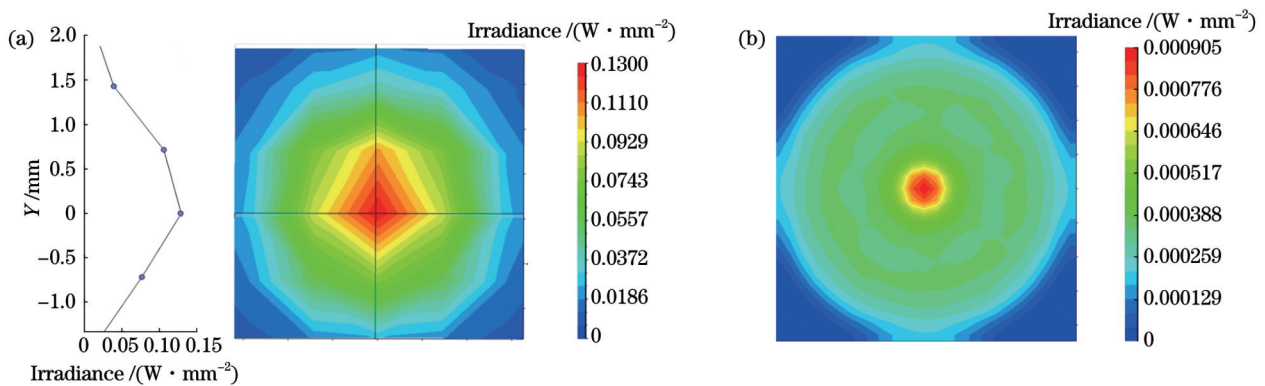


图 8 菲涅耳透镜接收器的仿真模拟图。(a)接收器 A;(b)接收器 B

Fig. 8 Simulation diagrams of Fresnel lens receivers. (a) Receiver A; (b) receiver B

4.2 菲涅耳透镜面形误差分析

为了验证菲涅耳透镜设计结果的可加工性,根据厂商所采用的金刚石车削超精密加工工艺参数^[10],重

点研究了非球面面形偏差即移除名义非球面后光学表面上的最高点和最低点之间的高度误差(P-V 误差)对光斑大小和透镜能量收集效率的影响。

使用 Code V 软件矢高公差分析模块对多重环带的面形偏差特性进行蒙特卡洛分析和计算,当各环带面形 P-V 误差为 5 μm 时,在 97.7% 概率下得到全部环带会聚光斑尺寸的变化,结果如图 9 所示。

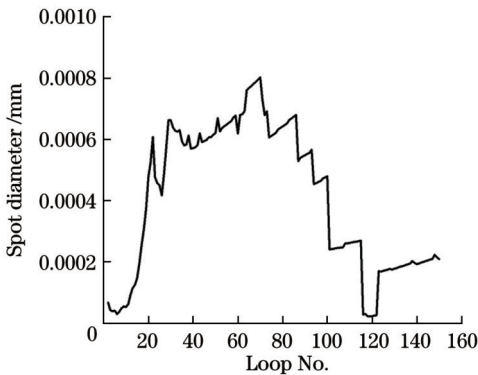


图 9 公差影响下的不同环带的会聚光斑直径

Fig. 9 Convergent spot diameters of different annuluses under influence of tolerance

利用面形矢高误差与二次曲面面形公式,可计算得到 5 μm 矢高公差对应的面形参数变化值。使用与多环带设计和仿真建模相同的方法,在 LightTools 软件中构建得到含有表面误差的非涅耳透镜,利用软件追迹 100 万条光线,得到此时接收器 A 和接收器 B 平面处的能量分布。

分析结果表明:在面形 P-V 误差为 5 μm 的情况下,能量透过率为 83.5%,光纤束端面接收器位置的会聚光斑直径为 2.070 mm,透镜的能量收集效率为 51.2%,仍能满足透镜的设计指标要求。因此非涅耳透镜设计结果的可加工性较好。

5 菲涅耳透镜样件的加工及性能测试

使用金刚石车削超精密加工方法对菲涅耳透镜设计结果进行透镜样件加工,根据实际加工工艺对菲涅耳透镜径厚比的要求^[11],在原设计结果基础上,将透镜中心厚度设置为 10 mm,等效于在原透镜后方密接一个平行平板,该平板使光斑会聚位置沿光轴后移,对会聚光束能量的空间分布的影响不大,加工实物如图 10 所示。



图 10 菲涅耳透镜加工实物图

Fig. 10 Fresnel lens processing physical picture

经检测可知:透镜直径为 299.2 mm,中心厚度为 9.80 mm,与设计结果稍有偏差。环带非球面面形经干涉仪检测可知,面形 P-V 误差值为 0.0027 mm,在前文菲涅耳透镜面形误差分析范围内。

为了对透镜能量透过率进行检测,使用由卤素灯与滤光片构成的实验光源,将光源置于菲涅耳透镜前方光轴上,用功率计测量入射到透镜表面的总能量和透射的总能量,即可算出菲涅耳透镜的能量透过率。由于透镜孔径(R)较大,无法直接对全口径进行测量,故以菲涅耳透镜 $0.5R$ 位置为界,将菲涅耳透镜分成图 11 所示的圆形和环形两部分。在水平和垂直方向上 $0.25R$ 和 $0.75R$ 位置,依次测量图 11 中各点的能量透过率,将 $0.25R$ 和 $0.75R$ 位置处的平均透过率分别视作圆形区域和环形区域的能量透过率,再以两部分面积与总面积的比值作为权重,求得菲涅耳透镜的能量透过率。根据此方法实验测得菲涅耳透镜的光能利用率为 92.1%,满足项目指标透镜能量透过率大于 80.0% 要求。

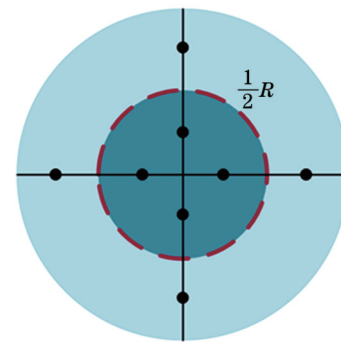


图 11 能量透过率检测光路示意图

Fig. 11 Schematic of detection optical path of energy transmittance

会聚光斑直径检测实验的光路原理图和实物图如图 12、13 所示,将实验光源放置在菲涅耳透镜前 100 m 处,使用电荷耦合器件(CCD)相机在透镜焦平面附近对会聚光斑进行采集,记录得到的透镜后方 670 mm 处的光斑如图 14 所示,根据会聚光斑强度和半峰全宽,可得光斑半径为 1.18 mm,略大于光斑半径小于 1 mm 的指标。

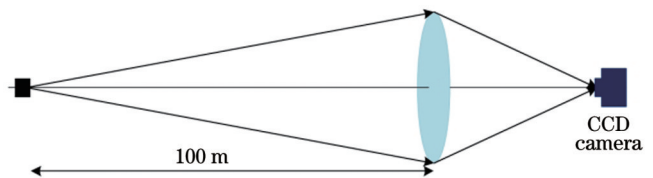


图 12 光斑直径测量

Fig. 12 Spot diameter measurement

将端面直径为 2 mm、数值孔径为 0.22 的定制光纤束置于 CCD 相机平面,使用光功率计分别测量光纤束入射及出射端面的光功率,在设计焦距位置测得光能

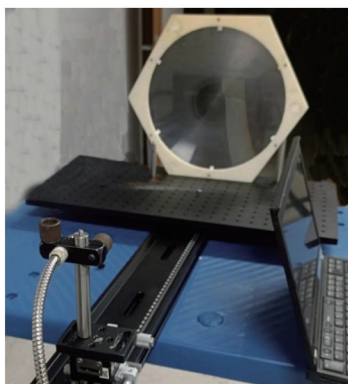


图 13 能量耦合效率实验图

Fig. 13 Experimental diagram of energy coupling efficiency

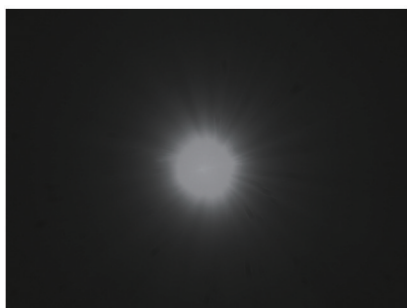


图 14 距离菲涅耳透镜 670 mm 处的会聚光斑

Fig. 14 Focusing spot at 670 mm from Fresnel lens

收集效率为 20.0%，低于设计指标要求。考虑到会聚光斑能量分布的不均匀性、透镜厚度增加对光斑会聚位置的影响以及实验测量误差，为了使设计所得的透镜收集系统获得最大的能量收集效率，满足光丝激光雷达光谱信号分析需求，在透镜后方移动光纤束探头，得到不同位置处的光谱信号强度分布，如图 15 所示。由此可知，在透镜后端 689 mm 处，透镜收集系统的最大光能收集效率为 34.9%，满足透镜收集系统的指标要求。

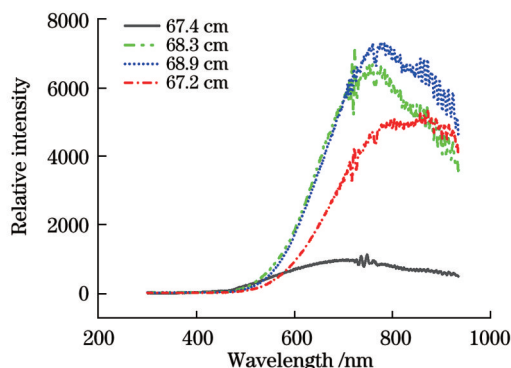


图 15 不同位置处的光谱信号强度

Fig. 15 Spectral signal intensities at different positions

6 结 论

基于光丝激光雷达收集系统要求，对菲涅耳透镜展开了研究，提出了一种基于多个软件仿真平台的宽

光谱大口菲涅耳透镜设计方法，提高了系统收集效率，减小了菲涅耳透镜像差造成的影响。使用 Code V 和 MATLAB 软件数据接口，开展了多环带菲涅耳透镜优化设计，利用 LightTools 软件进行了建模和光学性能仿真分析，实现了对透镜像差的抑制。透镜的光能透过率和收集效率的仿真分析结果显示，菲涅耳透镜的光能透过率为 91.9%，收集效率为 52.2%。分析了面形误差对菲涅耳透镜性能的影响，在此基础上进行了菲涅耳透镜样件的加工和性能测试，测得透镜的光能透过率为 92.1%，收集效率为 34.9%。由于存在加工误差和测量误差等，实验中的收集效率低于仿真结果，但是达到了系统指标要求。通过后续调整透镜加工工艺，可提高菲涅耳透镜的收集效率。仿真及实验结果表明：所设计的菲涅耳透镜能够对远距离宽光谱信号实现高效收集。

参 考 文 献

- [1] 赵会富, 朱浩宇, 童宏伟, 等. 能量均匀分布的菲涅耳聚光系统的设计[J]. 激光杂志, 2018, 39(12): 10-14.
Zhao H F, Zhu H Y, Tong H W, et al. Design of energy uniform distribution Fresnel concentration system[J]. Laser Journal, 2018, 39(12): 10-14.
- [2] Ryu K, Rhee J G, Park K M, et al. Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system[J]. Solar Energy, 2006, 80(12): 1580-1587.
- [3] 解博夫, 赵星, 陶诗诗, 等. 自由曲面补偿飞秒激光成丝系统像差的应用研究[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822055.
Xie B F, Zhao X, Tao S S, et al. Research on the application of free-form surface compensation for the aberration of femtosecond laser filamentation system[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822055.
- [4] 徐欢, 李湘宁, 周果. 基于 Zemax 软件的大齿距等厚菲涅耳透镜的设计[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(1): 99-102.
Xu H, Li X N, Zhou G. Design of Fresnel lens with big grooves and equal thickness based on the software Zemax[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2007, 29(1): 99-102.
- [5] 杨茂华, 田兆硕, 尹田田, 等. 高效大尺寸短焦距菲涅耳透镜设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(11): 99-101.
Yang M H, Tian Z S, Yin T T, et al. Design of efficient large size and short focal length Fresnel lens[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(11): 99-101.
- [6] 缪莹莹. 基于 LED 照明的 DLP 投影显示系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
Miao Y Y. Research on DLP projection display system based on LED lighting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [7] 石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
Shi S X, Zhang H X, Liu J S. Physical optics and applied optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000.
- [8] 刘永强, 申作春, 芦宇, 等. 均匀会聚菲涅耳透镜设计及性能研究[J]. 光电子技术, 2012, 32(4): 263-266, 272.
Liu Y Q, Shen Z C, Lu Y, et al. Design and performance research of uniform concentrating Fresnel lens[J]. Optoelectronic Technology, 2012, 32(4): 263-266, 272.
- [9] 陈朋波, 高兴宇. 基于 Lighttools 的太阳能电池聚光棱镜的结构优化[J]. 光学与光电技术, 2016, 14(2): 78-81.
Chen P B, Gao X Y. Structure optimization of solar cell collection prism based on Lighttools[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2016, 14(2): 78-81.

[10] 陈和, 孙雨婷, 檀望舒, 等. 多级共焦抛物面反射式激光扩束系统光学设计[J]. 光学学报, 2022, 42(13): 1322001.
Chen H, Sun Y T, Tan W S, et al. Optical design of multi-stage confocal parabolic reflection laser beam expander[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(13): 1322001.

[11] 高翔, 李闯, 坎金艳, 等. CaF₂衍射光学元件的金刚石车削工艺优化[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2205001.
Gao X, Li C, Kan J Y, et al. Optimization of diamond turning process for CaF₂ diffractive optical elements[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2205001.

Design of Aspheric Surface Annular Fresnel Lens for Filament Lidar Collection System

Li Haoran¹, Zhang Shuai¹, Xie Bofu¹, Wen Ya¹, Xu Shaowei³, Tao Yuliang³, Zhao Xing^{1,2*},
Liu Weiwei^{1,2}

¹*Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;*

²*Tianjin Key Laboratory of Micro-scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China;*

³*Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China*

Abstract

Objective To collect long-distance and wide-spectrum signals of laser filament-induced plasma spectroscopy, a high-efficiency collecting system with a large-aperture Fresnel lens is necessary so that the fluorescence spectrum signals can be converged and coupled into a fiber spectrometer. Although conventional non-imaging Fresnel lenses have superior energy collection efficiencies, the focusing performance of the lens is affected by spherical aberration and dispersion, which are induced by the increased aperture. This leads to difficulties in spectrum analysis at high resolution. Therefore, optimizing the ring shape of the Fresnel lens and improving the performance by considering source parameters, volume size, and lens specifications are crucial to the design of the collecting system.

Methods A large-aperture Fresnel lens collecting system is designed using loop optimization of each ring with multiple software programs. The system consists of seven Fresnel lenses with a diameter of 300 mm and a focal length of 670 mm. To optimize the energy collection efficiency and the focusing spot size in the Zemax sequence mode, a multi-ring aspheric Fresnel lens is designed using Code V and MATLAB softwares, and the lens is modeled and analyzed using the LightTools software. This method reduces the spherical and chromatic aberrations of the large-aperture Fresnel lens, making the efficiency of energy coupling into the optical fiber improved and the convergence spot size reduced. Therefore, the signal intensity of the fiber spectrometer can be raised effectively.

Results and Discussions The surface shape of the single-ring band is optimized in the Code V software by controlling the light spot radius and the convergence angle (Fig. 4). The loop optimization of multi-ring bands is carried out in the MATLAB software using the same optimization method (Table 2) and the focusing spot size is analyzed in the Code V software. In addition, the Fresnel lens model is constructed in the LightTools software (Fig. 7), and the full width at half maximum of the focus spot and the energy collection efficiency are calculated (Fig. 8). Finally, the tolerance of the lens is analyzed according to the manufacturing process (Fig. 9). In the simulation, the Fresnel lens energy collection efficiency and the spot diameter are 52.2% and 2.051 mm, respectively. In contrast, the energy collection efficiency measured in the experiment and the light spot diameter are 34.9% and 2.260 mm, respectively. The differences between the simulation and experiment results are possibly owing to the errors in manufacturing and assembly.

Conclusions In this study, the large-aperture Fresnel lens is investigated according to the requirements of the collecting system of laser filament-induced plasma spectroscopy. A design method of large-aperture Fresnel lenses is proposed using several software platforms, which improve the collection efficiency and reduce the influence of aberration. After the design and optimization of the multi-ring using Code V and MATLAB softwares, along with modeling and analysis using LightTools software, a collection efficiency of 52.2% for the lens and a focusing spot size of 2.051 mm are achieved. Due to the errors in manufacturing and measurement, the collection efficiency is 34.9% in the experiment, which meets the application requirements of the system. The simulation and experiment results show that the design method can reduce the aberration of a large-aperture Fresnel lens and facilitate collection of long-distance and wide-spectrum signals efficiently.

Key words nonlinear optics; optical design; Fresnel lens; filamentation Lidar; collection system; aspherical lens