

适用于高精度激光测距的光学系统设计

刘宇承 王春泽 宋有建 谢洪波 杨磊

Design of optical system for high-precision laser ranging

LIU Yucheng, WANG Chunze, SONG Youjian, XIE Hongbo, YANG Lei

引用本文:

刘宇承, 王春泽, 宋有建, 等. 适用于高精度激光测距的光学系统设计[J]. 应用光学, 2022, 43(2): 191–197. DOI: 10.5768/JAO202243.0201002

LIU Yucheng, WANG Chunze, SONG Youjian, et al. Design of optical system for high-precision laser ranging[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 191–197. DOI: 10.5768/JAO202243.0201002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于激光测距的小F数接收光学系统设计

Design of small F-number receiving optical system for laser ranging

应用光学. 2020, 41(1): 18–23 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0101003>

大口径长焦距变焦光学系统设计

Design of large aperture and long focal length zoom optical system

应用光学. 2018, 39(5): 644–649 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501009>

跟踪通信一体化接收光学系统设计

Design of tracking communication integrated receiving optical system

应用光学. 2019, 40(6): 973–979 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601007>

超高倍变焦光学系统设计

Design of ultra-high zoom optical system

应用光学. 2018, 39(4): 466–469 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0401004>

用于激光定向红外对抗的光学系统设计

Optical system design for laser directional infrared countermeasure

应用光学. 2021, 42(3): 398–403 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301004>

一种可实现收发一体连续扫描的微透镜阵列

Micro-lens array for integrative transmitting and receiving continuous scanning

应用光学. 2018, 39(5): 613–618 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082(2022)02-0191-07

适用于高精度激光测距的光学系统设计

刘宇承, 王春泽, 宋有建, 谢洪波, 杨 磊

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 随着激光雷达技术的发展和测距精度需求的提高, 对发射和接收光学系统提出了新的要求, 需具有光束可调节、测量光斑小、回波效率高等特性。设计一种工作于 1 550 nm 光通信波段的收发一体光学系统, 发射与接收模块共用部分光路, 以减小接收视野盲区, 同时有利于结构小型化。为解决不同测量距离、不同表面倾角造成的回波能量差异问题, 将光学系统的扩束组件设计成放大倍率为 2[~]3.5[~]的连续可调结构; 使用两组双胶合透镜进行色差校正, 以降低光谱宽度对系统传播距离的影响。经设计优化, 系统准直后的激光发散角小于 0.3 mrad, 出射光斑直径在 6.26 mm[~]10.20 mm 连续可调, 对于 50 m 内的测量目标, 照射光斑直径均小于 20 mm, 且在不同变焦位置发散角和光斑直径均满足设计要求。

关键词: 光学设计; 激光测距; 收发一体系统; 变焦系统

中图分类号: TN202; TH744.5

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202243.0201002](https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201002)

Design of optical system for high-precision laser ranging

LIU Yucheng, WANG Chunze, SONG Youjian, XIE Hongbo, YANG Lei

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the development of laser radar technology and the improvement of ranging accuracy requirements, the new requirements are put forward for the transmitting and receiving optical system, which should have the characteristics of adjustable beam, small measurement spot and high echo efficiency. An transceiver integrated optical system working in the optical communication band of 1 550 nm was designed. The transmitting and receiving modules share part of the optical paths to reduce the receiving blind area and facilitate the miniaturization of the structure. In order to solve the problem of echo energy difference caused by different measurement distances and different surface inclinations, the beam expansion components of the optical system were made into a continuously adjustable structure with the magnification of 2~3.5 times. The two sets of double gluing lenses were used for chromatic aberration correction to reduce the influence of spectral width on the system propagation distance. After design optimization, the laser divergence angle after system collimation is less than 0.3 mrad, and the diameter of the emergent light spot is continuously adjustable from 6.26 mm to 10.20 mm. For the measurement targets within 50 m, the diameter of the irradiation light spot is less than 20 mm, and the divergence angle as well as the light spot diameter meets the above requirements at different zoom positions.

Key words: optical design; laser ranging; transceiver integrated system; zoom system

收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-09-30

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2018B090944001)

作者简介: 刘宇承 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: yucliu@tju.edu.cn

通信作者: 杨磊, E-mail: yanglei@tju.edu.cn

引言

自 20 世纪 60 年代,世界上第一台激光测距仪由美国研制成功后,激光雷达在非接触测量领域显得越来越重要。激光雷达主动发射激光,照射到被探测目标表面,通过收集回波信号测量目标的距离。相比于传统的红外测距、超声测距、毫米波测距等方法,激光测距的探测距离更远,测量精度更高^[1-4]。近年来,激光雷达在军民领域均发展迅速,应用需求持续增加,激光测距技术的优越性也得到充分地发挥。在高精尖技术层面,如航空航天、卫星遥感、碎片探测领域^[5],高精度的激光雷达探测技术已经成为各国争先研制的焦点。

随着激光器和芯片技术的进步,激光测距朝着测程远、精度高、小型化的方向发展^[6],因此对光学系统也提出更高的要求。此外,若测距精度在毫米级以下,则需要考虑非同轴带来的系统误差。然而,现有的绝大部分激光雷达光学系统,发射系统和接收系统使用不同的光路,相互独立且不同轴,存在接收视野盲区。为了提高测距精度,同时保证系统的小型化,亟待研制收发一体式的紧凑型激光雷达。

本文设计一款收发一体的激光测距光学系统,在激光波长选择上使用 1 550 nm 的光通信波段^[7],该波长不仅拥有更好的大气透过率,还具备人眼安全的优势,可应用于人口密集的场合。同时,充分利用光纤接口的低背景噪声优势,使用单模光纤作为激光束的发射端口^[8]。为有效解决传统系统非共轴带来的接收视野盲区问题,发射系统与接收系统共用扩束光路。最后为适应不同距离的测量,兼顾系统的可调节能力,将扩束光路做成变倍结构。本文设计、优化的光学系统,将为后续工程样机的研制提供理论和实验基础。

1 收发一体激光测距的工作原理

收发一体激光测距系统的工作原理如图 1 所示,其中光学部分由准直模块、分束器、扩束模块和聚焦模块 4 部分构成(图中透镜均为模型示意)。激光信号从光纤端口出射,首先被准直模块整形为平行光束,然后透过分束镜(beam splitter, BS),经扩束模块放大光束口径,最终照射到待测目标表面。激光束在待测表面发生漫反射后,部分回波信号重新被光学系统收集,从而被雪崩光电二极管(avanlanche photodiode, APD)接收放大。为计

算激光从发射到收集的时间间隔,系统设置了参考反射镜,可比较两束脉冲光在收集时刻的差异,间接计算到待测目标的相对距离^[9]。

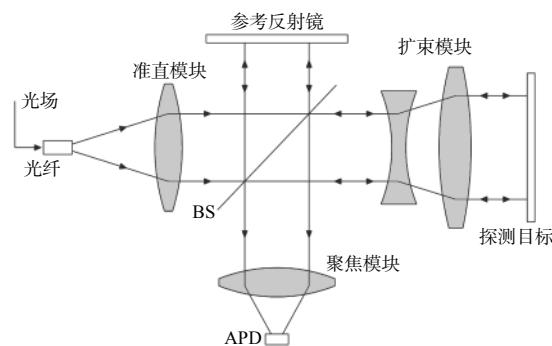


图 1 收发一体激光雷达构成示意图

Fig. 1 Schematic of transceiver integrated laser radar

从光路上看,准直模块最先参与激光整形,直接影响后续光束的传播效果;扩束模块同时参与发射与接收,是收发一体系统设计的重点。因此,准直模块和扩束模块的设计质量将直接影响到系统收发效率和测量精度。

2 系统设计的理论模型

由于系统准直模块和扩束模块的设计过程较为复杂,涉及激光整形和连续变焦原理,需要分别建立理论模型,以指导光学系统设计。

2.1 准直模块设计

经光纤出射的激光束具有高斯光束的性质,在传输过程中其曲率中心与曲率半径不断改变,但振幅和强度在横截面内始终保持高斯分布特性^[10]。因此在对高斯光束做整形时,不能简单使用几何光学来模拟计算,需要考虑其束腰、发散角、瑞利范围等物理光学传播参数。

准直光学系统原理图如图 2 所示。激光束从光纤端面出射,初始束腰半径为 ω_0 ,发散角为 θ ,与整形透镜距离为 l 。经透镜整形后,光束依然有着

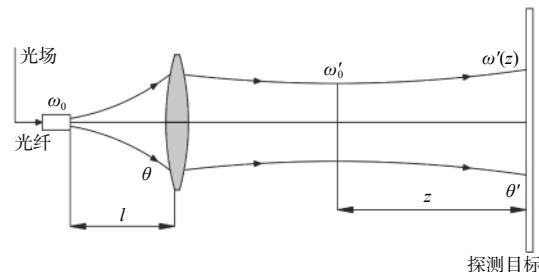


图 2 准直光学系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of collimating optical system

高斯光束的性质, 新光束的束腰半径为 ω'_0 , 其光斑半径 $\omega'(z)$ 是传播距离 z 的函数^[11]。

根据高斯光束在透镜前后位置的传播情况, 可给出有关远场发散角的表达式:

$$\begin{cases} \theta = \frac{2\lambda}{\pi \omega_0} \\ \theta' = \frac{2\lambda}{\pi \omega'_0} \end{cases} \quad (1)$$

经过透镜后, 高斯光束束腰变换公式为

$$\omega_0'^2 = \frac{f^2 \omega_0^2}{(f-l)^2 + (\pi \omega_0^2 / \lambda)^2} \quad (2)$$

将(2)式带入(1)式, 可得透镜整形后远场发散角的表达式为

$$\theta' = \frac{2\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{l}{f}\right)^2 + \frac{1}{f^2} \left(\frac{\pi \omega_0}{\lambda}\right)^2} \quad (3)$$

为了提高准直度, 减小远场发散角。根据(3)式可知, 当 $l=f$, 即光纤端口到透镜的距离等于透镜的焦距时, 可使出射高斯光束远场发散角 θ' 最小, 此时发散角 $\theta' = 2\omega_0/f$ 。为减小发散角, 可在合适范围内适当增大透镜的焦距 f 。

2.2 扩束模块设计

为了实现将平行光扩束的功能, 通常选用望远镜结构。由于反射式望远镜存在接收视野盲区, 不适于高精度测距, 故采用透射式结构。常用的透射式结构有开普勒式和伽利略式。开普勒式会在空间产生一个能量较强的焦点^[12], 出于安全考虑决定以伽利略式望远镜作为初始结构。为适应不同探测距离, 同时提高系统的可调节能力, 将扩束模块做成放大倍率为 $2^{\circ} \sim 3.5^{\circ}$ 的连续可调结构。

虽然变焦系统相比于定焦系统有着更好的调节能力, 但机械结构更加复杂, 变焦系统需要在改变焦距的同时, 保证像面稳定不动^[13]。一种性能优良的变焦系统, 通常由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组透镜组成, 通过旋钮、滑轨等方式实现变焦。望远镜系统作为无焦系统不需要成像, 因此结构上不需要设置后固定组^[14]。三组元变倍扩束系统的变倍过程如图3所示, 其中透镜组1为前固定组, 透镜组2为变倍组, 透镜组3为补偿组。对于光焦度确定的多个镜片, 可通过改变镜片间的距离实现总光焦度的变化。图3(a)中, 原透镜组扩束比为 D_2/D_1 , 当变倍组移动 q , 固定组与变倍组的等效焦距发生改变, 产生新的焦点。为使新的焦点稳定在补偿组的焦点上, 补偿组对应移动 Δ , 从而获得新的扩束比。图3(b)中, 新透镜组的

扩束比增大到了 D_3/D_1 , 扩束比越大, 越有利于减小激光传播的远场发散角。连续变倍结构也增大了系统的适用范围。

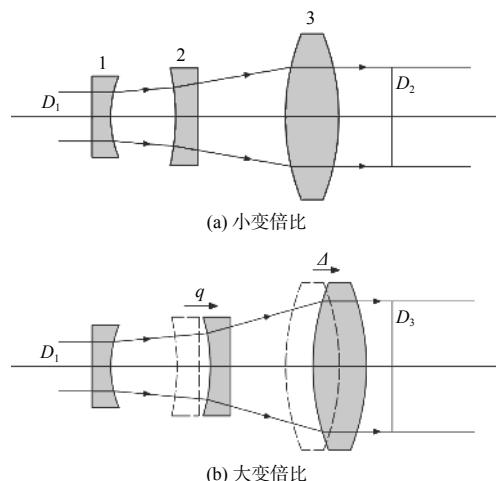


图3 三组元变倍系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of magnification system of three lenses

设三组元变倍系统的透镜光焦度分别是 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 , 总光焦度为 φ , 透镜间空气间隔为 d_1 、 d_2 , 将所有的调焦间隔设置为扩束比 M 的函数, 则可得到方程组:

$$\begin{cases} d_1 = F_1(M), d_2 = F_2(M) \\ \varphi = g(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, d_1, d_2) \\ \varphi \approx 0 \\ 2 \leq M \leq 3.5 \end{cases} \quad (4)$$

方程组(4)构成变焦系统的约束条件, 带入光学设计软件中进行计算, 将不同变倍状态下出射光准直效果作为优化目标, 便可获得变倍扩束系统的初始结构。

3 系统设计结果

获得理论模型后, 还应充分考虑使用环境、加工工艺、生产成本等因素, 不断完善光学系统设计, 最终完成满足加工要求的光学设计方案。

3.1 准直模块设计

根据原理分析可知, 增大焦距能获得更好的准直效果。然而准直透镜组的焦距不能无限增加, 因为焦距增大, 会使出射光斑口径变大, 不利于高精度激光测距。受限于光斑尺寸, 应在合理范围内增加焦距值, 以提高准直效果。

使用3组球面透镜对激光束进行准直, 在获得更好准直效果的同时, 设计中还应注意以下3个问

题。首先,避免衍射效应。光纤出射的光束初始口径极小,但发散较快,在使用光学镜头整形时,应留有更大的通光口径,如将设计值 $NA=0.12$ 提高到 $NA=0.2$,以此减少衍射对系统整形的影响。其次,考虑热稳定性。高功率的激光束,有可能会对镜片和镀膜造成损伤,尤其是第一面玻璃,由于照射的光斑口径相对较小,造成平均功率密度较大,因此应选用热性能较好的石英镜片,镀膜选择超光滑镀膜。最后,降低公差敏感性。作为 3 片式系统,需要合理分配光焦度,避免某一面承担过重。此外还要控制好各表面曲率,使得光线在各透镜间走势平缓。

最终优化得到的准直系统如图 4 所示。使用 Zemax 模拟物理传播过程,出射光斑口径为 $\Phi 3.2\text{ mm}$,远场发散角为 0.32 mrad ,准直效果较好。由于扩束系统是无焦系统,难以直接进行像质评价,于是在光学系统后加入一个理想透镜对其聚焦,观察其波像差,如图 5 所示。经波前图模拟,理论上该系统的峰谷差值为 0.0008λ , RMS 值为 0.0002λ ,理论值低于高精度仪器要求的 $(1/20)\lambda$ 。

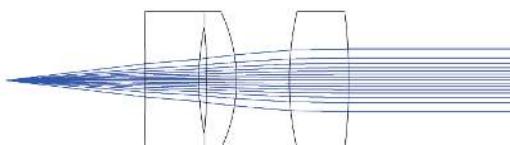


图 4 准直光学系统光路图

Fig. 4 Optical path diagram of collimating optical system

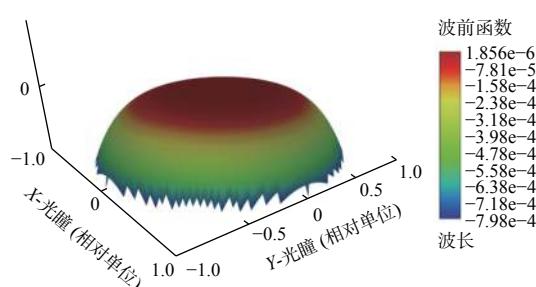


图 5 理想透镜聚焦后的系统波前图

Fig. 5 Wavefront diagram of system after ideal lens focusing

3.2 扩束模块设计

由于激光经光纤出射有一定的色散,导致光谱宽度展宽约 27 nm 。为消除光谱宽度引入的色差,在变倍组和补偿组分别引入一组双胶合透镜进行校正^[15]。同时,为减小补偿组的光焦度压力,添加一块分离的弯月正透镜,最终得到的连续变倍扩

束镜的结构如图 6 所示。图 6 中自上而下,变倍比分别为 2.0^* , 2.8^* , 3.5^* , 第 1 片为前固定组,第 2、3 片为变倍组,第 4、5、6 片为补偿组。

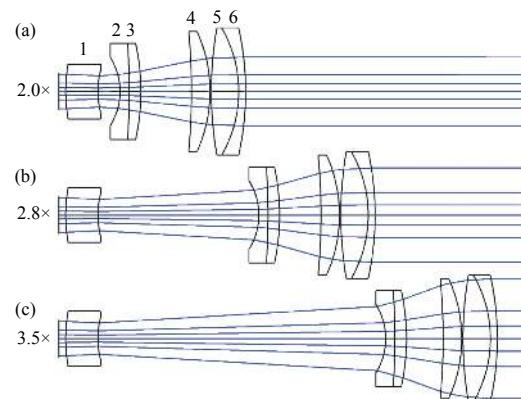


图 6 优化后的变倍扩束系统结构图

Fig. 6 Structure diagram of optimized zoom beam expansion system

扩束系统最终设计为放大倍率 $2^*\sim 3.5^*$ 的连续变倍结构,低变倍不易产生相干或衍射条纹,更易获得均匀性好的光斑。经仿真测试,系统在任意变倍状态均保持较好的出射平行度,加入近轴面评价其波前图,可知各变焦位置 PV 值小于 0.1λ , RMS 值小于 0.03λ 。系统变焦的凸轮曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,随着变倍比 M 变化,各组元间隔的变动近似为一条直线,有利于后续机械结构的设计。

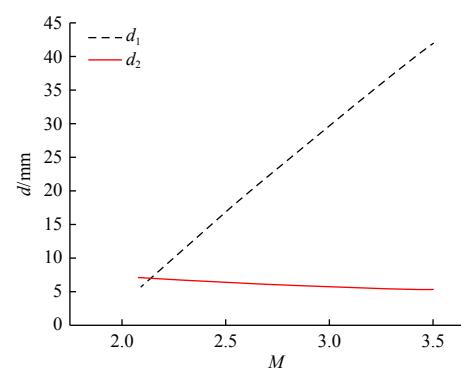


图 7 变倍扩束系统的凸轮曲线

Fig. 7 Cam curve of zoom beam expansion system

3.3 聚焦模块设计

由于系统使用收发一体结构,发射与接收部分共用扩束模块,因此在设计聚焦模块时,需要将扩束模块作为前置光路,并预留分束模块的机械长度,再补充 2 片透镜进行聚焦,最终设计的聚焦光路如图 8 所示。

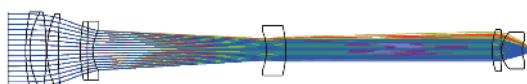


图 8 聚焦模块光路示意图

Fig. 8 Optical path diagram of focusing module

用于激光测距的聚焦光路更关注光束的接收面积和能量收集效率。为提升聚焦能力, 使用 2 片高折射率玻璃, 第 1 片玻璃压缩光束大小, 第 2 片弯月透镜将不同视场的光线收集到 APD 探测范围以内($\Phi 0.3\text{ mm}$)。

4 系统设计评价

将准直模块、扩束模块和聚焦模块进行整合, 得到如图 9 所示的整体光路。

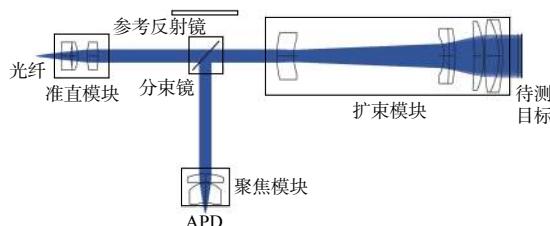
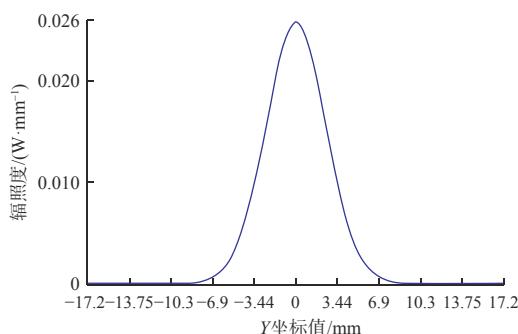


图 9 整体光路结构图

Fig. 9 Structure diagram of overall optical path

首先, 对发射系统进行评价。若光纤数值孔径按 $NA=0.12$ 计算, 经过准直整形为 $\Phi 3.6\text{ mm}$ 的平行光束, 然后扩束 $2^*\sim 3.5^*$, 则出射光斑直径在 $6.4\text{ mm}\sim 11.2\text{ mm}$ 连续可调。激光束在实际传播中, 不能简单通过几何光学计算, 更应该考虑其物理光学传播模型。经仿真模拟, 当变倍比为 2.5^* 时, 刚出射的光斑在 Y 截面上的能量分布如图 10 所示。

图 10 出射光在 Y 截面辐照度分布图(2.5^* 组态)Fig. 10 Irradiance distribution of emergent light at Y section (2.5^* configuration)

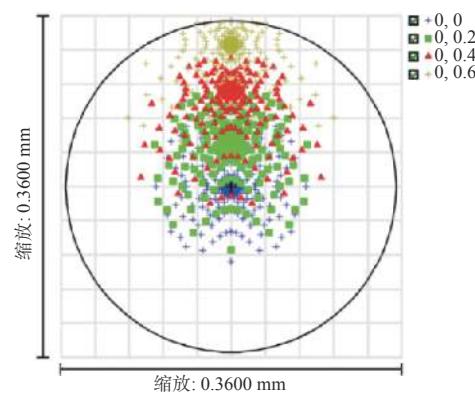
如表 1 所示, 给出了不同距离、各组态下光束的口径及发散角。

表 1 出射光束传播特性

Table 1 Propagation characteristics of emergent beam

倍数	远场发散角/(°)	0.01 m处光斑直径/mm	50 m处光斑直径/mm
2^*	0.258	6.26	17.70
2.5^*	0.135	7.70	13.62
3^*	0.111	9.04	13.80
3.5^*	0.209	10.20	12.62

其次, 对接收系统评价。APD 感光面上, 聚焦模块的光斑接收能力如图 11 所示(2^* 组态)。图 11 中, 不同形状颜色的散点代表不同视场光线落在像面的位置。经数据统计分析可知, 0 视场(蓝色)接收系统对视场 0.4° 范围内的光束收集效率为 98%, 对 0.6° 范围内的光束收集效率为 90%。在不同变倍结构下, 回波收集效率均满足使用要求。

图 11 聚焦面能量接收示意图(2^* 组态)Fig. 11 Energy receiving diagram of focal plane (2^* configuration)

不同变倍结构的接收效果如表 2 所示。从表 2 可看出, 变倍比越小, 接收视场角越大, 各组态对 1° 视场内的回波接收效率均高于 90%。

表 2 各组态下不同接收效率对应的视场大小

Table 2 Field of view corresponding to different receiving efficiency in each configuration

变倍比	视场/(°)	
	98%接收效率	90%接收效率
2^*	0.9	1
2.5^*	0.82	1.2
3^*	0.72	1.06
3.5^*	0.64	1

最后, 对系统进行公差分析。将面型误差、元件倾斜偏心误差、材料折射率、阿贝数误差纳入公

差评价指标, 公差设置情况如表 3 所示。

表 3 公差指标及数值设置

Table 3 Tolerance indexes and value setting

	类别	数值
表面公差	光圈数	3
	不规则度	0.5
元件公差	偏心/mm	± 0.05
	倾斜/(°)	± 2
	厚度/mm	0.03
材料公差	折射率	$\pm 30 \times 10^{-5}$
	阿贝数/%	± 0.5

由于单模光纤的芯径小, 对准难度高, 可使用标准转接件控制偏心公差。对光纤对准的偏心量进行公差分析, 结果表明, 光纤偏心时对长距离的目标瞄准精度有一定影响, 但对发散角的影响非常小, 实际使用过程中可配合电机进行校偏。

将发散角作为发射系统的评价标准, 经软件进行 1 000 次蒙特卡罗模拟, 结果表明, 几何光线发散角有 98% 概率小于 0.5 mrad, 具备可加工性。公差最敏感的是扩束模块中固定组、变倍组和补偿组的相对距离, 因此对变焦凸轮曲线准确程度有一定要求。将弥散斑半径作为接收系统的评价标准, 经公差分析可知, 弥散斑仅扩大 20%, 也满足加工要求。

5 结论

本文设计了一款适用于高精度测距的光学系统, 不仅实现了收发一体, 还使用了连续变倍结构, 具备光束可调节的优势。仅使用 11 片透镜, 降低了加工成本, 采用模块化设计方法, 将光路分解为准直模块、扩束模块和聚焦模块, 然后对各模块进行原理分析, 并分别设计优化。最终得到的光学系统, 从发射来看, 各变倍组态下整形后的出射光束的远场发散角小于 0.3 mrad, 出射光斑直径在 6.26 mm~10.20 mm 连续可调, 对于 50 m 内的测量目标, 系统照射光斑直径均小于 20 mm; 从接收来看, 各组态对 1°视场内的回波接收效率均高于 90%。该光学系统最大的特点在于共轴收发, 从结构上消除了发射端和接收端的非同轴误差, 有利于测距精度的提升, 可为收发一体的激光雷达系统设计提供参考。

参考文献:

[1] 卢炤宇, 葛春风, 王肇颖, 等. 频率调制连续波激光雷达

技术基础与研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 7-20.
LU Zhaoyu, GE Chunfeng, WANG Zhaoying, et al. Basics and developments of frequency modulation continuous wave lidar[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 7-20.

[2] SWATANTRAN A, HAO T, BARRETT T, et al. Rapid, high-resolution forest structure and terrain mapping over large areas using single photon lidar[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28277.

[3] 刘博, 于洋, 姜朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 21-33.

LIU Bo, YU Yang, QIANG Shuo. Review of advances in lidar detection and 3D imaging.[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 21-33.

[4] 张小梅. 车载激光雷达测距方法及精度分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

ZHANG Xiaomei. Ranging method and accuracy analysis is based on vehicle laser radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.

[5] 汪备. 基于激光雷达的行星软着陆自主障碍检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

WANG Bei. Research on lidar-based hazard detection algorithms for soft planetary landing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[6] 程鹏飞. 大动态范围高精度激光测距关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2014.

CHENG Pengfei. Research of key technologies of wide dynamic range and high precision laser distance measurement[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Shanghai Institute of Technical Physics), 2014.

[7] 余超. 面向激光雷达应用的单光子探测技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.

YU Chao. Research of single-photon detection technology in lidar applications[D]. Hefei: University of Science And Technology of China, 2020.

[8] 杨宏志, 赵长明, 张海洋, 等. 全光纤激光雷达发射和接收光学系统设计与优化[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 65-72.

YANG Hongzhi, ZHAO Changming, ZHANG Haiyang, et al. Design and optimization of all-fiber lidar transmitting and receiving optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 65-72.

[9] 康玮玮. 全站式激光准直系统中的测距技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.

- KANG Weiwei. Study on laser range finding technology in total station laser alignment system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [10] WALTER K. Solid state laser engineering[M]. 6th ed. New York: Springer Science Business Media Inc, 2006: 215.
- [11] WU Zhong, YE Yunxia, ZHANG Yongkang, et al. Study on propagation properties of flattened Gaussian beam passing through a beam expander[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(6): 861-864.
- [12] 巩盾, 王红, 田铁印, 等. 大功率激光扩束器的光学设计[J]. *激光技术*, 2009, 33(4): 426-428.
- GONG Dun, WANG Hong, TIAN Tieyin, et al. The optical design of high-power laser-beam expander[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(4): 426-428.
- [13] SANSON M C, CORNELL J, ANDRESEN B F, et al. MWIR continuous zoom with large zoom range[J]. SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2010, 7660: 76601X-1-12.
- [14] 王培芳, 向阳, 高健, 等. 激光变倍准直扩束系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 282-287.
- WANG Peifang, XIANG Yang, GAO Jian, et al. Design of collimating and beam expanding laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 282-287.
- [15] 陈悦, 谢洪波, 杨童, 等. 一款小型化可见光两档 7.5^{\times} 变焦系统的设计[J]. *应用光学*, 2021, 42(1): 30-35.
- CHEN Yue, XIE Hongbo, YANG Tong, et al. Design of miniaturized two-steps 7.5^{\times} zoom system in visible band[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(1): 30-35.