



## OPO激光测距机发射端变倍扩束系统设计

蔡震 吉俊文

### Design of zoom beam-expansion system for OPO laser rangefinder transmitter

CAI Zhen, JI Junwen

引用本文:

蔡震, 吉俊文. OPO激光测距机发射端变倍扩束系统设计[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 1118–1124. DOI: 10.5768/JAO202344.0507003

CAI Zhen, JI Junwen. Design of zoom beam-expansion system for OPO laser rangefinder transmitter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(5): 1118–1124. DOI: 10.5768/JAO202344.0507003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0507003>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [高变倍比大相对口径长波红外变焦系统设计](#)

Design of high zoom ratio LWIR zoom system with large relative aperture

应用光学. 2018, 39(6): 773–779 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601002>

#### [紧凑型大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计](#)

Compact MWIR continuous zoom optical system with large zoom range

应用光学. 2019, 40(1): 33–38 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101006>

#### [50 mm ~ 1 000 mm大变倍比变焦光学系统设计](#)

Design of 50 mm~1 000 mm zoom optical system with high zoom ratio

应用光学. 2020, 41(6): 1147–1152 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0601002>

#### [紧凑型连续大变倍比枪瞄镜光学系统设计](#)

Design of compact continuous high zoom-ratio gun sighting telescope optical system

应用光学. 2021, 42(3): 423–428 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301008>

#### [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>

#### [高变倍比中波制冷型连续变焦光学系统设计](#)

Design of cooled MWIR continuous zooming optical system with high zoom ratio

应用光学. 2019, 40(6): 998–1003 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601011>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2023) 05-1118-07

# OPO 激光测距机发射端变倍扩束系统设计

蔡 震, 吉俊文

(江苏亮点光电科技有限公司, 江苏 苏州 215100)

**摘要:** 设计了一种 OPO 激光测距机发射端变倍扩束系统。该系统采用两级激光扩束, 将 OPO (optical parametric oscillation) 激光器出射光束发散角二次压缩, 一级激光扩束为变倍扩束, 二级激光扩束为定倍扩束, 使出射光束发散角可连续调节, 以实现激光测距机大范围测距, 提高了激光测距过程的人眼安全性。OPO 激光器出射光束发散角为 6 mrad, 出射光束直径为  $\phi 7$  mm, 扩束倍率 6~12 倍, 其中, 一级激光变倍扩束倍率为 2~4 倍, 二级激光扩束倍率为 3 倍。设计的光学系统满足较大口径光束入射, 且具有变倍扩束功能, 突破了现有变倍扩束系统仅能实现小口径光束入射的限制。最终设计的变倍扩束系统总长度为 285 mm, 结构简单, 利于工程化。

**关键词:** 光学设计; OPO 激光器; 扩束; 无焦变倍; 人眼安全

中图分类号: TN249; O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0507003

## Design of zoom beam-expansion system for OPO laser rangefinder transmitter

CAI Zhen, JI Junwen

(Jiangsu Lumispot Technology Co.,Ltd., Suzhou 215100, China)

**Abstract:** A zoom beam expansion system for OPO(optical parametric oscillation) laser rangefinder transmitter was designed. The system adopted two-stage laser beam expansion, which compressed the divergence angle of OPO laser beam for the twice. The primary laser beam expansion was variable magnification beam expansion, and the secondary laser beam expansion was constant magnification beam expansion, so that the divergence angle of the output beam could be continuously adjusted to realize the wide range ranging of the laser rangefinder and improve the human-eye safety in the laser ranging process. The divergence angle of the output beam of OPO laser is 6 mrad, the diameter of the output beam is  $\phi 7$  mm, and the beam expansion rate is 6 to 12 times, among which the variable magnification beam expansion rate of the primary laser is 2 to 4 times, and the beam expansion rate of the secondary laser is 3 times. The designed optical system meets the requirements of large-aperture beam incidence, and has the function of variable magnification beam expansion, which break through the limitation that the existing variable magnification beam expansion system can only achieve small-aperture beam incidence. The total length of the finally designed optical system is 285 mm, which is simple in structure and conducive to engineering.

**Key words:** optical design; optical parametric oscillation laser; beam expansion; afocal zoom; human-eye safety

## 引言

激光扩束镜头在激光测距领域应用广泛, 通过压缩激光出射光束发散角, 可进一步提高光束准直性<sup>[1-6]</sup>。为满足不同距离的测距要求, 激光扩束镜头的出射光束发散角需连续可调。OPO 激光器

具有阈值低、转换效率高、重复频率高等特点, 出射激光为人眼安全波长, 是激光测距领域激光源的选型趋势<sup>[7-9]</sup>。因此, 设计一款适用于 OPO 激光测距机发射端的变倍扩束镜头是很有必要的。

许多文献报道了激光变倍扩束镜头, 但均不适

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2023-01-12

基金项目: 十三五某目标综合电子防护系统——高精度激光探测设备项目

作者简介: 蔡震 (1976—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光器、激光光电总体系统研究。E-mail: caiz@lumispot.cn

用于 OPO 激光测距机。王培芳等人设计了一款激光变倍准直扩束镜头, 其入射光束口径仅为  $\phi 1\text{ mm}$ , 远小于 OPO 激光器出射光束口径<sup>[10]</sup>; 贾勇等人设计的激光变倍扩束镜头, 引入非球面反射元件, 存在加工成本高、装调流程繁琐等问题<sup>[11-14]</sup>; 刘宇承等人设计的激光变倍扩束镜头, 入射光束直径仅为  $\phi 3.6\text{ mm}$ , 扩束倍率为 2~3.5 倍, 且引入胶合面, 强激光照射胶合面易损坏<sup>[15]</sup>。

为了实现大范围激光测距, 提升激光测距过程中人眼安全性, 本文提出采用 OPO 激光器作为激光测距机发射端光源, 其出射激光中心波长为 1 570 nm(人眼安全波长), 避免了激光测距过程对人眼的损伤, 并具有烟、雾穿透能力强的优势。设计的光学系统可满足较大口径光束入射, 且具有变倍扩束功能, 突破了现有变倍扩束镜头仅能实现小口径光束入射的限制。OPO 激光器出射光束发散角为 6 mrad, 出射光束直径为  $\phi 7\text{ mm}$ 。变倍扩束系统采用两级扩束, 一级激光变倍扩束倍率为 2~4 倍, 二级激光扩束倍率为 3 倍, 系统扩束倍率为 6~12 倍, 采用球面设计, 无胶合面, 易于装调, 利于工程化。

## 1 设计指标

激光变倍扩束系统设计指标如下:

- 1) 波长: 1 570 nm;
- 2) 输入激光光束直径:  $\phi 7\text{ mm}$ ;
- 3) 输入激光发散角: 6 mrad;
- 4) 变倍扩束倍率: 6~12 倍;
- 5) 系统总长: <300 mm。

## 2 光学系统设计

发射端采用发射波长为 1 570 nm 的 OPO 激光器, 输出激光光束直径为  $\phi 7\text{ mm}$ , 发散角为 6 mrad。输入激光光束直径较大, 采用两级扩束子系统。一级扩束子系统入射激光光束直径较大, 采用低倍率折射式变倍扩束形式, 其扩束倍率为 2~4 倍; 二级扩束子系统输入光束直径相比一级扩束子系统更大, 采用折射式定倍率扩束形式, 扩束倍率为 3 倍。变倍扩束功能由一级扩束子系统和二级扩束子系统共同实现, 变倍扩束倍率可达 6~12 倍。

发射端采用的激光器峰值功率较高, 与一般光学系统相比, 对光学系统的整体性能要求更高, 要求各光学元件具有高抗光损阈值, 热变形小, 且不使用胶合透镜。

激光变倍扩束系统作为发射端, 若仅进行几何光学追迹, 设计结果与实际情况存在偏差。激光光源为高斯光, 球差在光瞳边缘的效应相比均匀光小很多, 因此, 引入高斯光束作为其光源输入形式。设置高斯切趾为 1, 则光瞳边缘光强度是峰值光强度的  $1/e^2$ (13.5%), 与 OPO 激光器出射光束光强分布特征相符。

### 2.1 变倍扩束子系统设计

激光扩束分为反射式和折射式两种形式。反射式激光扩束主要包括卡塞格林、格里高利及离轴三反等形式, 其特点是使用大口径反射镜面, 增大扩束比, 非球面设计时像差校正效果好, 但卡塞格林扩束存在中心挡光现象; 离轴三反则会引入较大的轴外像差, 为保证光束质量, 需引入多个非球面, 增加了加工装调难度及成本。此外, 反射式扩束形式的扩束比不可调节, 只能针对某一光束口径进行设计, 应用范围受到限制。折射式激光变倍扩束形式则不存在上述问题。

变倍扩束镜头由前固定组、变倍组和补偿组构成, 扩束镜头不需要成像, 无需后固定组。在 3 组元透镜或镜组组合而成的变倍扩束镜头中, 变倍组移动时, 其放大率会有所变化, 即出射光束口径会通过变倍组的移动而变化。设计的变倍扩束子系统如图 1 所示。图 1 中, 透镜 1 为前固定组, 透镜 2 和透镜 3 为变倍组, 透镜 4 为补偿组。

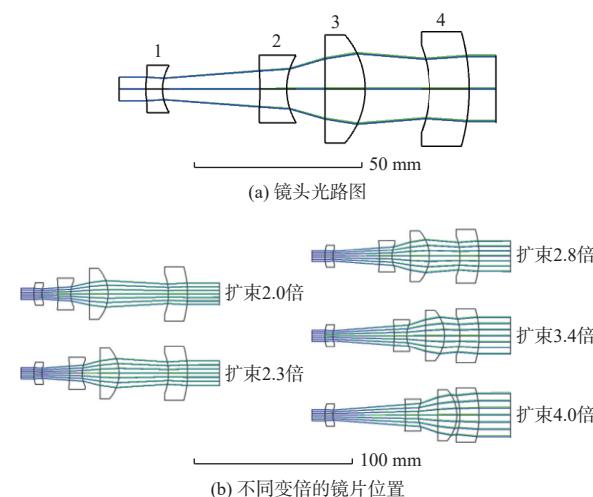


图 1 变倍扩束子系统

Fig. 1 Zoom beam-expansion subsystem

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。变倍扩束子系统原始扩束比为  $D_2/D_1$ , 当变倍组移动时, 固定组与变倍组的等效焦距发生改变, 从而获得新的扩束比, 扩束比增大到  $D_3/D_1$ 。扩束比越大, 越有利于减

小激光测距机出射光束发散角,有利于增大测距距离。变倍扩束子系统参数如表1所示。

表1 变倍扩束子系统参数

Table 1 Parameters of zoom beam-expansion subsystem

参数	指标
中心工作波长/nm	1 570
系统长度/mm	97
变倍扩束倍数/倍	2~4
入射光束直径 $\phi$ /mm	7
入射光束发散角/mrad	6
出射光束直径 $\phi$ /mm	14~28
出射光束发散角/mrad	约1.8~3

激光扩束镜头是小像差系统,一般采用波像差和光学传递函数评价设计质量。光学镜头波像差越小,调制传递函数越接近衍射极限,表明该光学镜头设计质量越好。

变倍扩束子系统2倍扩束时波面图如图2所示。从图2可以看出,轴上点波像差为0.0091 $\lambda$ ,边缘视场波像差为0.0332 $\lambda$ ,优于0.25 $\lambda$ ,满足扩束子系统对波前的要求。变倍扩束子系统4倍扩束时波面图如图3所示。从图3可以看出,轴上点波像差为0.0618 $\lambda$ ,边缘视场波像差为0.2159 $\lambda$ ,优于0.25 $\lambda$ ,满足扩束子系统对波前的要求。

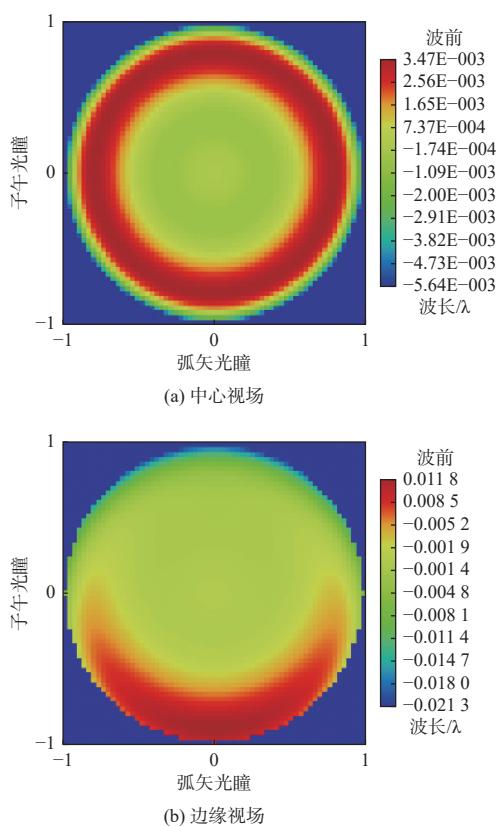


图2 扩束2倍波面图

Fig. 2 Wavefront with beam expansion rate of 2 times

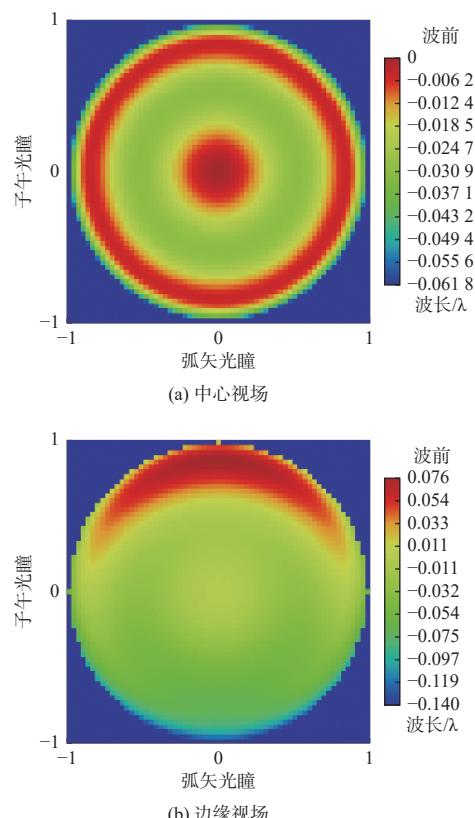


图3 扩束4倍波面图

Fig. 3 Wavefront with beam expansion rate of 4 times

激光扩束镜头的光学传递函数曲线如图4所示。从图4可以看出,各扩束子系统的传递函数曲线均接近衍射极限,表明此变倍扩束子系统设计质量较好。

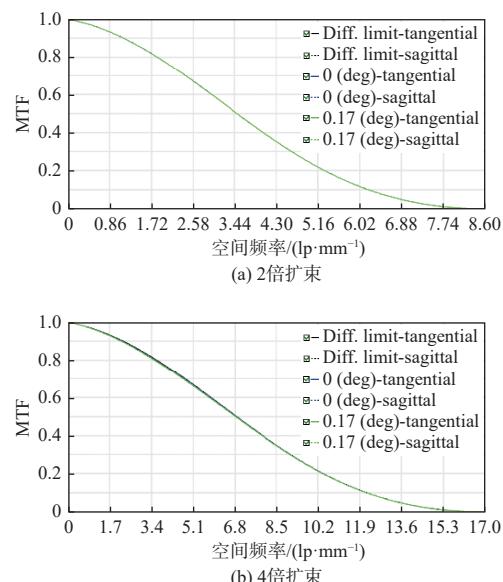


图4 光学传递函数曲线

Fig. 4 MTF curve

## 2.2 定倍扩束子系统设计

从一级扩束子系统出射的激光束, 是具有一定口径, 且发散角较小的平行光束。对于二级定倍扩束子系统, 入射光束引起的轴外像差很小, 主要像差为轴上宽光束引起的球差。反射式扩束形式仍存在加工成本高, 装调流程繁琐的问题, 因此, 采用折射式扩束形式实现定倍扩束功能。

折射式激光扩束子系统一般由两片或多片透镜组成, 分为开普勒和伽利略两种形式。开普勒形式存在激光聚焦点, 强激光聚焦时会产生空气击穿, 光学元件易损伤。伽利略形式则为虚焦点, 不存在空气击穿问题, 实际应用中, 一般采用伽利略形式, 不仅结构简单, 且可缩小外形尺寸。设计的定倍扩束子系统如图 5 所示。该子系统由 4 片透镜构成, 实现 3 倍定倍扩束, 系统长度 180 mm。定倍扩束子系统参数见表 2 所示。

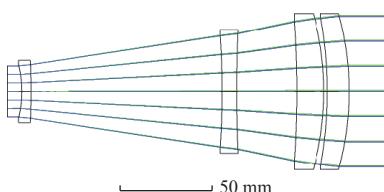


图 5 定倍扩束子系统光路

Fig. 5 Beam expansion subsystem with fixed magnification

表 2 定倍扩束子系统参数

Table 2 Parameters of beam expansion subsystem with fixed magnification

参数	指标
中心工作波长/nm	1 570
系统长度/mm	180
扩束倍率/倍	3
入射光束直径 $\Phi$ /mm	28
出射光束直径 $\Phi'$ /mm	84

定倍扩束子系统波面图如图 6 所示。从图 6 可以看出, 轴上点波像差为  $0.0437\lambda$ , 优于  $0.1\lambda$ ; 边缘视场波像差为  $0.0515\lambda$ , 优于  $0.25\lambda$ , 满足扩束子系统对波前的要求。定倍扩束子系统光学传递函数曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出, 各视场的传递函数曲线均接近衍射极限, 说明该定倍扩束子系统设计质量较好。

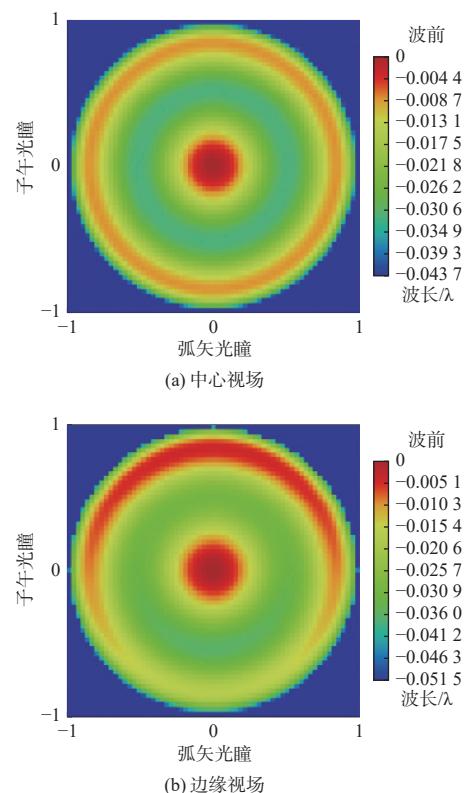


图 6 定倍扩束子系统波面图

Fig. 6 Wavefront of fixed beam expansion subsystem

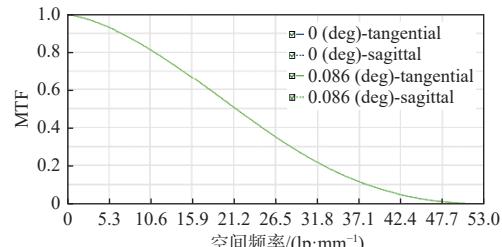


图 7 光学传递函数曲线

Fig. 7 MTF curve

## 3 变倍扩束子系统与定倍扩束子系统组合

将变倍扩束子系统和定倍扩束子系统组合, 并再次优化, 得到 OPO 激光测距机发射端变倍扩束系统, 如图 8 所示, 系统参数见表 3 所示。

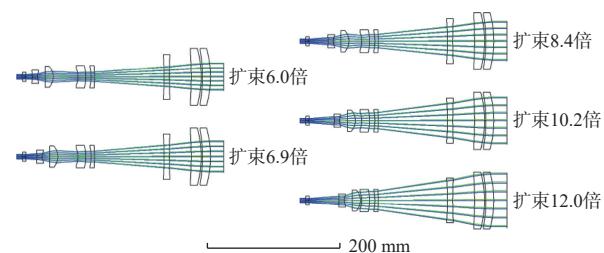


图 8 OPO 激光测距机发射端变倍扩束系统

Fig. 8 Zoom beam expansion system of OPO laser rangefinder transmitter

表 3 变倍扩束系统参数

Table 3 System parameters

参数	指标
中心工作波长/nm	1 570
系统长度/mm	285
变倍扩束倍率/倍	6~12
入射光束直径 $\phi$ /mm	7
入射光束发散角/mrad	6

OPO 激光测距机发射端扩束 6 倍时, 波面图如图 9 所示。从图 9 可以看出, 轴上点波像差为  $0.0394\lambda$ , 优于  $0.1\lambda$ ; 边缘视场波像差为  $0.049\lambda$ , 优于  $0.25\lambda$ , 满足发射端扩束系统对波前的要求。OPO 激光测距机发射端扩束 12 倍时, 波面图如图 10 所示。从图 10 可以看出, 轴上点波像差为  $0.1\lambda$ ; 边缘视场波像差为  $0.1794\lambda$ , 优于  $0.25\lambda$ , 满足扩束系统发射端对波前的要求。

OPO 激光测距机发射端变倍扩束系统的光学传递函数曲线如图 11 所示。从图 11 可以看出, 系统的传递函数曲线与衍射极限一致, 说明该光学系统设计质量良好。

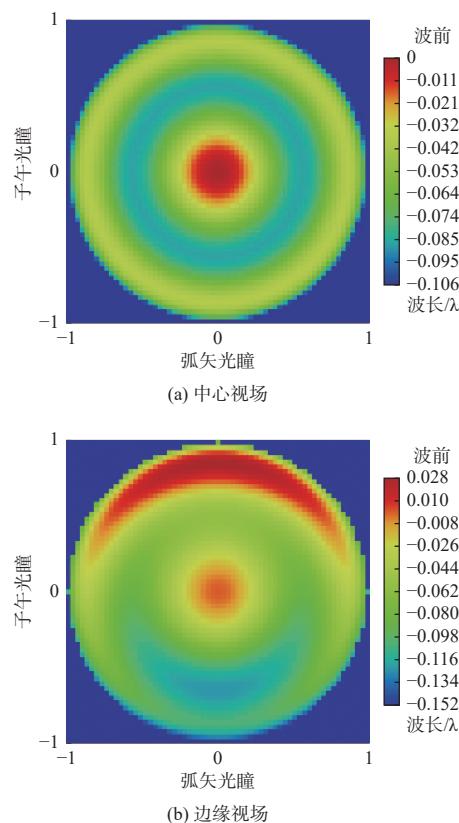


图 10 扩束 12 倍波面图

Fig. 10 Wavefront with beam expansion rate of 12 times

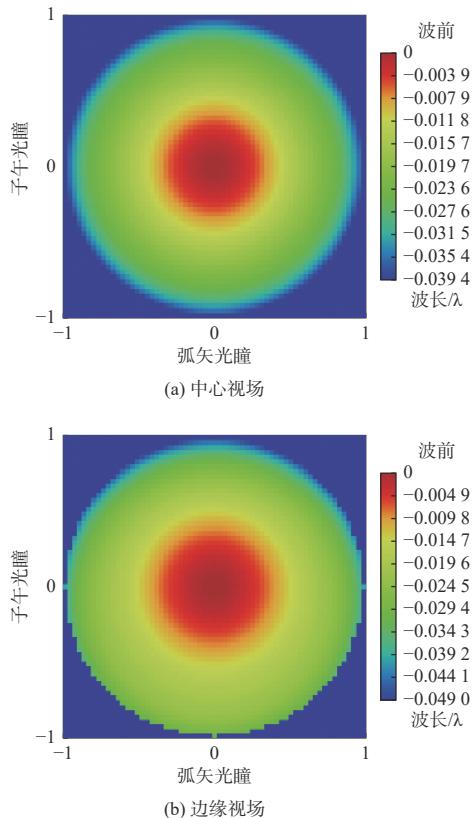


图 9 扩束 6 倍波面图

Fig. 9 Wavefront with beam expansion rate of 6 times

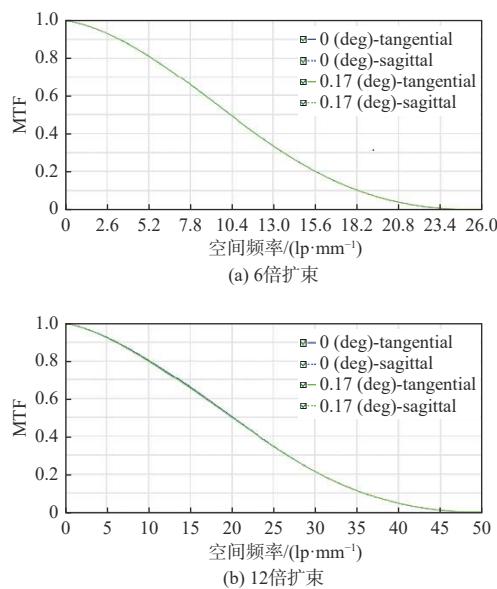


图 11 光学传递函数曲线

Fig. 11 MTF curve

#### 4 公差分析

OPO 激光测距机发射端变倍扩束系统为无焦系统, 出射光束为平行光, 在发射端出光口设置理

想透镜, 将其转换为会聚系统。发射端变倍扩束系统设计时, 采用的多重结构包括 5 种工况, 需要分别进行公差分析, 以得出较合适的公差参数, 如表 4 所示。

表 4 公差参数

Table 4 Tolerance parameters

参数	指标
光圈数	3
不规则度	0.2
表面偏心/mm	±0.05
表面倾斜/(°)	1
元件偏心/mm	±0.05
元件倾斜/(°)	2
厚度/mm	±0.03
折射率	0.001
阿贝数/%	±0.5

根据现有光学及机械元件的加工能力, 确定透镜曲率半径公差为 3 光圈, 厚度公差为  $\pm 0.03$  mm,  $X$  偏心和  $Y$  偏心公差为  $\pm 0.05$  mm,  $X$  倾斜和  $Y$  倾斜公差为 1'; 透镜装配  $X$  偏心和  $Y$  偏心公差为  $\pm 0.05$  mm,  $X$  倾斜和  $Y$  倾斜公差为 2'; 折射率和阿贝数公差分别为 0.001 和  $\pm 0.5\%$ 。

采用灵敏度公差分析方法, 以 Diff.MTF.Avg 为评价标准, 对各工况进行蒙特卡罗分析, 分析次数 100 次。分析结果表明, 上述公差参数符合设计要求, 便于加工和装调。

## 5 结论

本文采用 OPO 激光器作为激光源, 基于两级激光扩束, 设计了一款 OPO 激光测距机发射端变倍扩束系统。该光学系统可实现大范围测距, 并可有效避免测距过程激光对人眼造成损伤。系统由 8 片透镜组成, 镜头性价比高, 利于工程化。该发射端变倍扩束系统具有较宽松的公差范围, 能够满足实际应用要求。通过对系统波面图和光学传递函数曲线的分析结果可知, 该光学系统满足激光测距功能要求。

## 参考文献:

[1] 吴金才, 陈结祥, 张毅, 等. 多波长透射式扩束器设计[J]. 激光与红外, 2007, 37(9): 818-820.

WU Jincai, CHEN Jiexiang, ZHANG Yi, et al. Design of laser expanding systems for multi-wave length[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(9): 818-820.

[2] 郑盼, 杨应平, 郭洪云, 等. 基于伽利略结构的二级激光扩束系统的设计[J]. 应用光学, 2008, 29(3): 347-350.

ZHENG Pan, YANG Yingping, GAO Hongyun, et al. Design of two-level laser beam expander based on Galilean structure[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(3): 347-350.

[3] 李良钰, 李常春, 李银柱, 等. 多波长激光扩束系统的设计[J]. 中国激光, 2001, 28(8): 714-716.

LI Liangyu, LI Changchun, LI Yinzhuh, et al. Design of laser expanding systems for multi-wave length[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(8): 714-716.

[4] 衣同胜, 吴从均, 颜昌翔, 等. 大视场反射式激光扩束系统光学设计[J]. 应用光学, 2012, 33(6): 1156-1160.

YI Tongsheng, WU Congjun, YAN Changxiang, et al. Optical design of wide field laser beam expander with reflection method[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1156-1160.

[5] 袁莉, 潘宝珠, 郝沛明, 等. 大口径平像场激光扩束器光学系统的研制[J]. 激光与红外, 2007, 37(7): 672-675.

YUAN Li, PAN Baozhu, HAO Peiming, et al. Study of the laser beam-expander optical system with large aperture and non-curvature of field[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(7): 672-675.

[6] 潘松, 肖忠, 徐张凡, 等. 聚合物定子超声电机驱动的变倍激光扩束镜[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(5): 855-862.

PAN Song, XIAO Zhong, XU Zhangfan, et al. Multi-multiple beam expander driven by ultrasonic motor with polymer-based stator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(5): 855-862.

[7] 孙国正. 固体 Raman 激光器与 OPO 激光器比较[J]. 激光技术, 2011, 35(3): 338-342.

SUN Guozheng. Comparison between all-solid-state Raman lasers and OPO lasers[J]. Laser Technology, 2011, 35(3): 338-342.

[8] 陈波, 程勇. 加固型人眼安全 OPO 激光器的设计[J]. 激光技术, 2004, 28(1): 91-93.

CHEN Bo, CHENG Yong. Consolidated design of eye-safe OPO laser[J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 91-93.

[9] 刘旭, 程勇, 王淑云, 等. 棱镜腔技术在 1.57  $\mu\text{m}$  人眼安全 OPO 激光器中的应用[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(增刊2): 351-356.

LIU Xu, CHENG Yong, WANG Shuyun, et al. Application of prism resonator in 1.57 $\mu$ m eye-safe OPO laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 351-356.

[ 10 ] 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): 1-6.

WANG Peifang, XIANG Yang, GAO Jian, et al. Design of collimating and beam expanding laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 1-6.

[ 11 ] 贾勇, 高云国. 反射式激光扩束器的切换变倍技术[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1-8.

JIA Yong, GAO Yunguo. A switch zoom design for reflective laser beam expander[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1-8.

[ 12 ] 辛企明. 光学塑料非球面制造技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 1-5.

XIN Qiming. Manufacturing technology of plastic aspheric lens[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 1-5.

[ 13 ] 师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(1): 26-46.

SHI Tu, YANG Yongying, ZHANG Lei, et al. Surface testing methods of aspheric optical elements[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 26-46.

[ 14 ] 杨力. 现代光学制造工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-10.

YANG Li. Modern optical manufacturing engineering[M]. Beijing: Chinese Science Press, 2009: 1-10.

[ 15 ] 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.

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.