

# 一种可变远距离大功率激光聚焦系统的设计

胡明勇, 封志伟\*, 范二荣, 赵奇, 李明杰

合肥工业大学光电技术研究院, 安徽 合肥 230000

**摘要** 基于初级像差理论,将卡式系统与前端透镜组相结合,设计了一种可变远距离大功率激光聚焦光学系统。目标物体在 500~5000 m 范围内变化时,通过调节前端透镜组到卡式系统的距离来改变焦面位置,实现对聚焦光斑大小的控制;通过透镜组的位置可反推出不同的目标距离。使用 Zemax 光学软件对初始结构进行优化,设计结果表明,在不同目标距离下,光斑大小均能满足设计指标要求。

**关键词** 光学设计; 高斯光束; 折反系统; 变焦系统

中图分类号 O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.062204

## Design of High Power Laser Focus System over Variable Long Distance

Hu Mingyong, Feng Zhiwei, Fan Errong, Zhao Qi, Li Mingjie

Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230000, China

**Abstract** The classic Cassegrain system combined with a front lens group is chosen and a high-power laser-beam focus system over a variable long distance is designed based on the primary aberration theory. When the moving distance of the target objects is within 500-5000 m, it is achievable to control the focusing spot size by the adjustment of the distance between the front lens group and the Cassegrain system and the different object distances can be reversed from the location of the lens group. The initial structure is optimized with the Zemax optical software, and the design results show that the spot sizes under different object distances all meet the design requirements.

**Key words** optical design; Gaussian beam; refraction-reflection system; zoom system

**OCIS codes** 220.3620; 140.3290

## 1 引言

激光具有单色性好、方向性好等优点,在现代光学领域中的应用越来越广泛。激光工作距离主要取决于激光发射系统出射的光束质量,将激光能量最大限度聚集在目标物上,需要较大的光束宽度与较小的发散角,在实际应用中常对光束先扩束再聚焦<sup>[1]</sup>。

目前,激光光学系统可分为三大类,第一类是透射式系统,第二类是反射式系统,第三类是折反式系统<sup>[2-5]</sup>。透射式系统结构简单,可由球面透镜组构成,能够通过改变透镜组之间的间距来实现对激光

的变倍扩束,但是开普勒系统具有实际光束聚焦点,容易将空气击穿而造成元件损伤,此外透射式系统存在大口径透镜加工困难的问题。反射式系统可采用大口径的反射镜组,不但能够大幅增大扩束比,而且可以避免产生色差,但若要对不同距离处目标的聚焦,则只能通过改变镜间距来改变系统焦距,过程复杂且精度难以控制。折反式系统除具有反射式扩束系统体积小、扩束比大的优点外,还可通过前端透镜组对系统调焦,使用方便,易于控制。

本文所述的光学系统能用于可变远距离激光聚焦。由于目标在远距离处运动,激光光束需整形扩束后再对目标位置聚焦。考虑到大口径透镜加工较

收稿日期: 2017-12-21; 收到修改稿日期: 2017-12-27

作者简介: 胡明勇(1976—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光学精密仪器制备方面的研究。

E-mail: humy8@126.com

\* 通信联系人。E-mail: fengzwchn@163.com

困难,反射式系统焦距调整较复杂,本文采用卡式系统和透镜组相结合的形式,出射前端使用透镜组扩束发散,后接卡式系统聚焦发射,通过改变透镜组到主镜的距离以调整系统焦距,进而使激光聚焦在运动目标上。根据像差理论计算初始结构参数,利用Zemax光学软件进行优化设计,并对设计结果进行了分析和评价。

## 2 理论设计

### 2.1 高斯光束参数计算

高斯光束经光学系统的传播矩阵<sup>[6]</sup>为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_1 + \frac{\Delta}{f_1} & l \\ -\frac{\Delta}{f_1 f_2} & \frac{1}{M_1} + \frac{\Delta}{f_2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中  $f_1$ 、 $f_2$  分别为前端透镜组与卡式系统的焦距,系统两镜间距离  $l = f_1 + f_2 - \Delta$ ,  $\Delta$  为失调量,系统放大倍数  $M_1 = -f_2/f_1$ 。激光器出射的高斯光束经光学系统传播后,远场发散角  $\theta'$  以及激光在距离  $z$  处的聚焦光斑直径  $D$  分别为

$$\theta' = \frac{2\lambda}{\pi\omega'}, \quad (2)$$

$$D = 2\omega' \sqrt{1 + (z/z_0)^2}, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为激光波长,  $z_0$  为瑞利长度,  $\omega'$  为激光腰斑大小。由(2)、(3)式可知,腰斑大小与发散角成反比,当目标距离一定时,聚焦光斑直径与腰斑大小成正比。研究表明,当激光束作长距离传输时,若聚焦透镜足够大,则在不考虑大气影响的条件下,激光束聚焦焦距变化趋近于0<sup>[7]</sup>。因此,考虑到设计中目标距离较远,若要在远场获得较高的激光功率密度,使聚焦光斑直径满足技术要求,必须先尽量减小高斯光束的发散角<sup>[8]</sup>。

### 2.2 卡式系统参数计算

根据目标位置聚焦光斑与发散角的要求,可计算得到卡式系统的最小通光口径,卡式系统通光口径也随之确定。为尽量缩短系统长度,主镜相对口径不能太大,考虑到加工难度与相对口径的立方成正比,一般可取1:2甚至稍大一点的相对口径<sup>[9]</sup>。

系统轮廓尺寸由两个参数决定:次镜放大倍数  $\beta$  与次镜遮拦比  $\alpha$ , 二者分别为

$$\beta = f_2/f_1', \quad (4)$$

$$\alpha = l_2/f_1', \quad (5)$$

式中  $f_1'$  为主镜焦距,  $l_2$  为次镜到主镜焦点的距离。在经典卡式系统中  $\beta$  为负值。由  $\alpha$ 、 $\beta$  参数可确定主

镜顶点曲率半径  $\dot{R}_1$ 、次镜顶点曲率半径  $\dot{R}_2$  及镜间距离  $d$  分别为

$$\dot{R}_1 = 2 \times \frac{D_1}{A_1}, \quad (6)$$

$$\dot{R}_2 = \frac{\alpha\beta}{\beta+1} \dot{R}_1, \quad (7)$$

$$d = f_1'(1-\alpha), \quad (8)$$

式中  $D_1$  为主镜口径,  $A_1$  为主镜相对口径。卡式系统主镜为抛物面,利用卡式系统对球差进行校正,主镜及次镜的面型系数  $e_1^2$ 、 $e_2^2$  分别为

$$\begin{cases} e_1^2 = 1 \\ e_2^2 = (1-\beta)^2 / (1+\beta)^2 \end{cases} \quad (9)$$

至此,经典卡式系统的初试结构参数已经基本确定,卡式系统的结构示意图如图1所示。

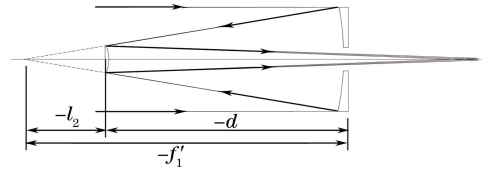


图1 卡式系统的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of Cassegrain system

### 2.3 前端透镜组参数计算

所用激光器属于强激光源,采用胶合透镜作为前端透镜组会产生脱胶现象。考虑到本系统视场角较小,相对口径也不大,需主要校正的像差为球差与彗差<sup>[10]</sup>,故选用双分离的透镜组形式。设第一、二透镜的光焦度分别为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ , 透镜之间的间隔为  $d_F$ , 可以得到系统总光焦度<sup>[11]</sup>为

$$\Phi = \varphi_1 + \varphi_2 - d_F \varphi_1 \varphi_2. \quad (10)$$

根据初级像差公式<sup>[12]</sup>, 系统的球差与弧矢彗差可分别表示为

$$\delta L' = -\frac{1}{2n_2' u_2'} \sum_1^2 S_I = -\frac{1}{2n_2' u_2'} [h_1^4 A(\rho_1) + h_2^4 A(\rho_3)], \quad (11)$$

$$K_s' = -\frac{1}{2n_2' u_2'} \sum_1^2 S_{II} = -\frac{1}{2n_2' u_2'} (S_{II1} + S_{II2}), \quad (12)$$

式中  $n_2'$  为像方折射率,  $u_2'$  为像方孔径角,  $\sum_1^2 S_I$  为整个系统的初级球差分布系数,  $A(\rho_1)$ 、 $A(\rho_3)$  分别为第一透镜第一面曲率半径 ( $\rho_1 = 1/r_1$ ) 和第二透镜第一面曲率半径 ( $\rho_3 = 1/r_3$ ) 的函数式,  $h_1$ 、 $h_2$  分别为边缘光线在两透镜上的入射高度,  $\sum_1^2 S_{II}$  为整个物镜系统

的初级彗差分布系数,  $S_{\parallel 1}$ 、 $S_{\parallel 2}$  分别为第一、第二透镜的初级彗差分布系数。通过推导计算,可以得到

$$\delta L' = -\frac{h_1^4}{2n_2' u_2'} \left[ \frac{n_1+2}{n_1} \varphi_1 \rho_1^2 - \left( \frac{2n_1+1}{n_1-1} \varphi_1^2 + \frac{4n_1+4}{n_1} \varphi_1 \sigma_1 \right) \rho_1 + \frac{3n_1+1}{n_1-1} \varphi_1^2 \sigma_1 + \frac{3n_1+2}{n_1} \varphi_1 \sigma_1^2 + \frac{n_1^2}{(n_1-1)^2} \varphi_1^3 \right] - \frac{h_2^4}{2n_2' u_2'} \left[ \frac{n_2+2}{n_2} \varphi_2 \rho_2^2 - \left( \frac{2n_2+1}{n_2-1} \varphi_2^2 + \frac{4n_2+4}{n_2} \varphi_2 \sigma_2 \right) \rho_2 + \frac{3n_2+1}{n_2-1} \varphi_2^2 \sigma_2 + \frac{3n_2+2}{n_2} \varphi_2 \sigma_2^2 + \frac{n_2^2}{(n_2-1)^2} \varphi_2^3 \right], \quad (13)$$

$$K_s' = -\frac{1}{2n_2' u_2'} \sum_1^2 S_{\parallel} = -\frac{y' h_2^2}{2} \left( \frac{n_1+1}{n_1} \varphi_1 \rho_1 - \frac{2n_1+1}{n_1} \varphi_1 \sigma_1 - \frac{n_1}{n_1-1} \varphi_1^2 + \frac{n_2+1}{n_2} \varphi_2 \rho_2 - \frac{2n_2+1}{n_2} \varphi_2 \sigma_2 + \frac{n_2}{n_2-1} \varphi_2^2 \right) - \frac{y' h_2^3 h_{p_2}}{2} \left[ \frac{n_2+1}{n_2} \varphi_1 \rho_1^2 - \left( \frac{2n_2+1}{n_2-1} \varphi_2^2 + \frac{4n_2+4}{n_2} \varphi_2 \sigma_2 \right) \rho_2 + \frac{3n_2+1}{n_2-1} \varphi_2^2 \sigma_2 + \frac{3n_2+2}{n_2} \varphi_2 \sigma_2^2 + \frac{n_2^2}{(n_2-1)^2} \varphi_2^3 \right], \quad (14)$$

式中  $\sigma_1 = 1/l_{F1}$ ,  $\sigma_2 = 1/l_{F2}$ , 其中  $l_{F1}$ 、 $l_{F2}$  分别为前后截距;  $n_1$ 、 $n_2$  分别为第一、第二透镜材料的折射率,  $y'$  为系统像高,  $h_{p_2}$  为主光线在第二透镜的入射高度。当选定透镜材料时,对系统的球差和彗差进行校正,即令(13)、(14)式为0,联立方程得到满足条件的光焦度  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  及第一透镜第一面曲率半径  $r_1$  和第二透镜第一面曲率半径  $r_3$ ,再根据关系式

$$\begin{cases} \varphi_1 = (n_1 - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \\ \varphi_2 = (n_2 - 1) \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \end{cases}, \quad (15)$$

可求得第一透镜第二面曲率半径  $r_2$  和第二透镜第二面曲率半径  $r_4$ 。

### 3 设计结果

激光聚焦系统主要技术指标:视场角  $\pm 1.2$  mrad,激光器波长 1070 nm,发射功率为万瓦级,激光光束口径 10.5 mm,激光扩束发射发散角优于 0.4 mrad,目标位置在 500~5000 m 距离范围内变化。出射光在目标表面处的聚焦光斑大小分布要求见表 1。

表 1 聚焦光斑尺寸分布要求

Table 1 Specifications of size distribution of focusing spot

| Object distance / m | Spot diameter / mm |
|---------------------|--------------------|
| 500-1000            | <40                |
| 1000-2000           | <60                |
| 2000-3000           | <80                |
| 3000-4000           | <110               |
| 4000-5000           | <150               |

普通玻璃材料经激光长时间照射会发生折射率温漂,这会损伤光学元件,透镜组选用熔石英材料的“正+负”双分离透镜组的形式<sup>[13]</sup>,对于 1070 nm 波长,其折射率为 1.4505。透镜组具有负光焦度,光束经透镜组发散,通过具有正光焦度的卡式系统后对远距离目标聚焦。根据激光器参数与聚焦光斑大小技术要求,前端透镜组最佳通光孔径应为 15.8 mm,可忽略高斯光束的衍射效应。出射端发散角要求优于 0.4 mrad,目标距离为 500 m 时发散角最大,若此时发散角为 0.4 mrad,则计算可得出射口径为 397.9 mm。使用 Zemax 软件对初始参数进行优化:目标距离为 500 m 时,出射口径为 359.8 mm,发散角为 0.362 mrad;目标距离为 5000 m 时,出射口径为 350.4 mm,发散角为 0.036 mrad。根据上述计算结果,为避免衍射效应,前端透镜组孔径为 16 mm,后端卡式系统主镜口径为 400 mm,出射端光束发散角优于 0.4 mrad,满足技术要求。

为使系统结构更加紧凑,卡式系统焦距需尽量长,光圈数要尽量大<sup>[14]</sup>。在设计时,考虑到光源为激光,只需校正轴上球差及彗差。卡式系统无法校正轴外像差,需通过透镜组对轴外像差进行校正,根据像差理论分配光焦度,计算得到系统初始结构,结合多重结构对系统进行优化,设计出一种使用方便的变焦距激光聚焦系统。表 2 所示为目标距离 5000 m 时的系统结构参数,其中 Conic 表示圆锥系数。图 2 所示为光学系统图。

表 2 目标距离为 5000 m 时的系统参数

Table 2 System parameters when object distance is 5000 m

| No. | Surface Radius / Thickness / |         | Surface Diameter / |      | Conic  |
|-----|------------------------------|---------|--------------------|------|--------|
|     | mm                           | mm      | type               | mm   |        |
| 1   | Infinity                     | 10      |                    | 10.5 | 0      |
| 2   | 166.67                       | 3       | Lens               | 16   | 0      |
| 3   | -27.91                       | 2       |                    | 16   | 0      |
| 4   | -31.660                      | 3       | Lens               | 16   | 0      |
| 5   | 31.660                       | 920.67  |                    | 16   | 0      |
| 6   | 392.86                       | -475    | Mirror             | 98   | -1.906 |
| 7   | 1280                         | 5000000 | Mirror             | 400  | -1     |

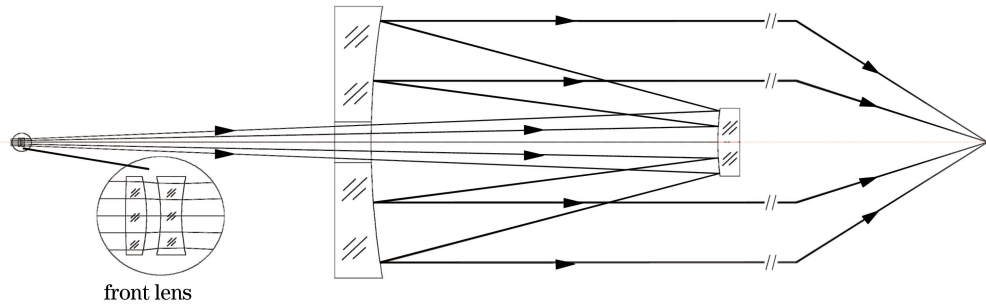


图 2 光学系统结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of optical system

激光光源自身带有发散角且激光光束口径固定,主光学系统的口径固定,高斯光束经光学系统聚焦后在目标位置的光斑大小主要与系统的焦距有关。通过调节前透镜组到卡式系统的距离来调整出射光束的焦点位置与发散角,实现系统在 500~5000 m 范围内聚焦。利用 Zemax 光学设计软件仿真计算,得到目标距离对应的系统焦距与聚焦光斑大小,见表 3。图 4 所示为系统焦距、聚焦光斑大小与目标距离之间的关系。根据拉氏不变量原理,在聚焦距离不断变大的过程中,随着像方孔径角不断变小,光斑逐渐变大。当系统像差得到较完善的校

## 4 分析讨论

卡式系统主次镜间距为 475 mm,主镜最大非球面度为 0.0247 mm,次镜最大非球面度为 0.00603 mm。成像质量如图 3 所示,其中中心视场点列图优于  $8 \mu\text{m}$ ,小于艾里斑半径。中心视场波像差为  $0.013\lambda$ ,满足装调所需精度要求,系统可单独进行自准直检测。

正时,聚焦光斑大小与目标距离近似呈线性关系,聚焦光斑大小与系统焦距也近似呈线性关系,利用这种关系能够方便得到不同位置处聚焦光斑的大小,亦可通过透镜组到卡式系统的距离,反推出目标距离。目标距离在 500~5000 m 范围内变化时,其前透镜组移动变化量为 29.71 mm,通过简单调节可使焦距产生较大变化,使用便捷,且在要求的目标距离内各个位置具备良好的像质。图 5、6 所示分别为目标位于不同距离时的全视场点列图与能量包容图 (MTF),系统像质达到衍射极限。图 7 所示为系统实物的正面图与背面图。

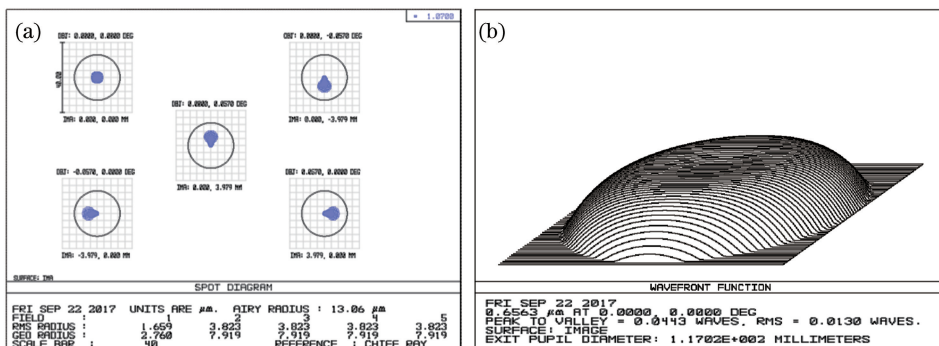


图 3 卡式系统。(a)点列图;(b)波前图

Fig. 3 Cassegrain system. (a) Spot diagram; (b) wavefront map

表 3 目标距离与聚焦光斑直径大小间的关系

Table 3 Relationship between object distance and focusing spot diameter

| Object distance /m | System focal length /mm | Distance to secondary mirror /mm | Spot diameter /mm |
|--------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 500                | 14590.8                 | 950.38                           | 12.3              |
| 800                | 23572.5                 | 937.82                           | 19.8              |
| 1000               | 29536.8                 | 933.7                            | 25.3              |
| 2000               | 59352.4                 | 925.52                           | 50.5              |
| 3000               | 88844.9                 | 922.83                           | 76.7              |
| 4000               | 118361                  | 921.48                           | 101.9             |
| 5000               | 147829                  | 920.67                           | 127.1             |

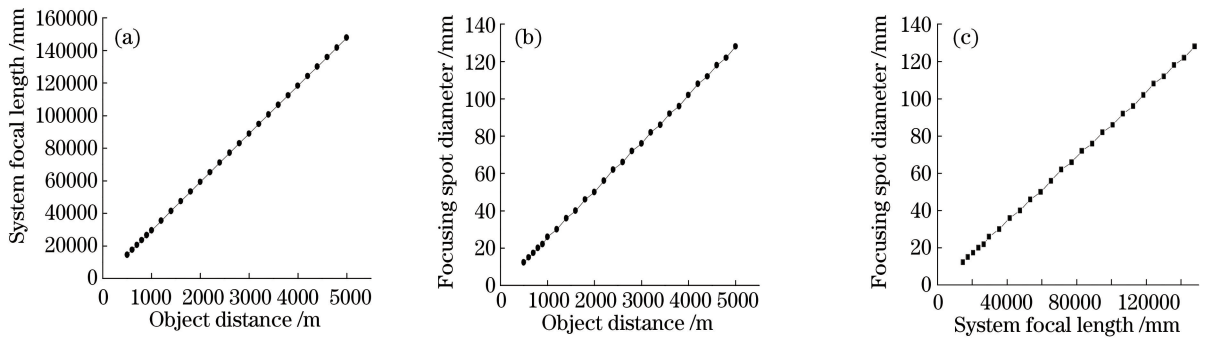


图 4 (a) 目标距离与系统焦距间的关系; (b) 目标距离与聚焦光斑大小间的关系; (c) 系统焦距与聚焦光斑大小间的关系

Fig. 4 (a) Relationship between object distance and system focal length; (b) relationship between object distance and focusing spot diameter; (c) relationship between system focal length and focusing spot diameter

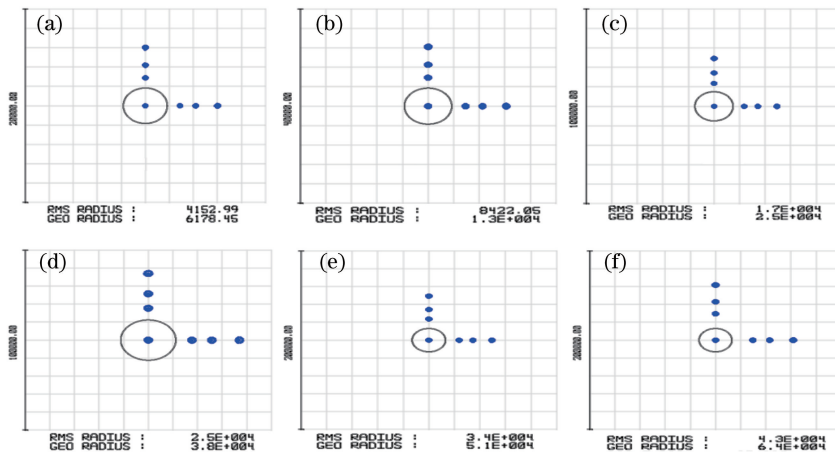


图 5 不同目标距离下的全视场点列图。(a) 500 m; (b) 1000 m; (c) 2000 m; (d) 3000 m; (e) 4000 m; (f) 5000 m

Fig. 5 Full field spot diagrams under different object distances. (a) 500 m; (b) 1000 m; (c) 2000 m; (d) 3000 m; (e) 4000 m; (f) 5000 m

## 5 结 论

采用双分离透镜组与卡式系统相结合的光学形式,设计了一种对可变远距离目标聚焦的光学系统。透镜组选用熔石英材料,能够在高功率激光器下稳定工作,卡式系统可自准直检测,达到精度要求后与透

镜组联调。使用 Zemax 光学软件对初始结构加以优化,给出了光学设计过程与扩束后聚焦光斑的成像分析。在实际工作过程中,卡式光学结构主次镜固定不动,通过改变透镜组到主镜的距离来调整焦距,使用方便。经过加工与装调,所提系统已工作于实际环境中,能够达到使用要求,具有良好的使用效果。

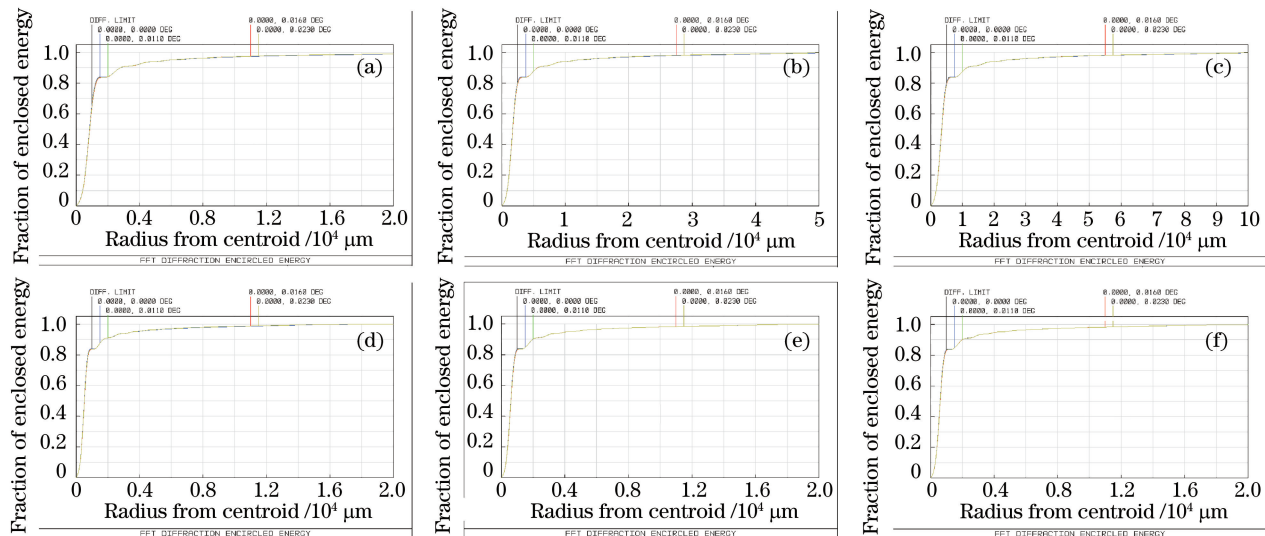


图 6 不同目标距离下的 MTF。(a) 500 m;(b) 1000 m;(c) 2000 m;(d) 3000 m;(e) 4000 m;(f) 5000 m

Fig. 6 MTF under different object distances. (a) 500 m; (b) 1000 m; (c) 2000 m; (d) 3000 m; (e) 4000 m; (f) 5000 m

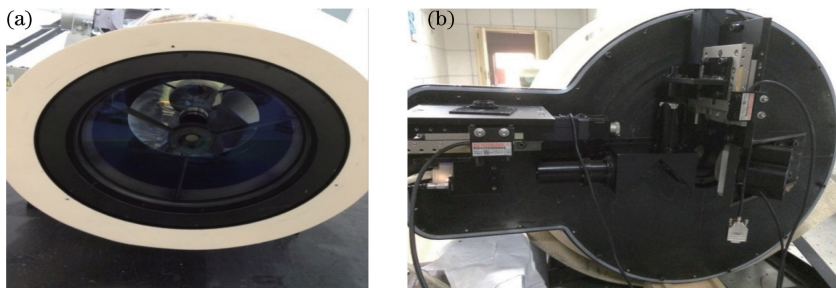


图 7 系统实物。(a)正面图;(b)背面图

Fig. 7 Practical system. (a) Front view; (b) back view

## 参 考 文 献

- [1] Chen H M, Zhao X Y, Wang J L. Principle and applications of laser[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 92-96.  
陈鹤鸣, 赵新彦, 汪静丽. 激光原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 92-96.
- [2] Hu M Y, Chi R L, Sun D S, *et al.* Design and testing of beam expander of 1.064  $\mu\text{m}$  wind lidar[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(4): 467-470.  
胡明勇, 迟如利, 孙东松, 等. 1.064  $\mu\text{m}$  测风激光雷达扩束系统的设计[J]. 量子电子学报, 2006, 23(4): 467-470.
- [3] Wang P F, Xiang Y, Gao J, *et al.* Design of collimating and beam expanding laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0922007.  
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): 0922007.
- [4] Jia Y, Gao Y G. A switch zoom design for reflective laser beam expander[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022003.  
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): 1022003.
- [5] Xue Q S. Optical design and stray light analysis for large aperture catadioptrical sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0222001.  
薛庆生. 折反式大口径星敏感器光学设计及杂散光分析[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0222001.
- [6] Lü B D. Laser: Optical beam description, transmission transform and optical cavity technical physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1986: 105-119.  
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986: 105-119.
- [7] Li X Q, Cheng Z G, Jiang J B, *et al.* The study of laser beam focusing on long distance transmitting in the atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3): 324-329.  
李现勤, 程兆谷, 蒋金波, 等. 激光束在大气中远距离传输聚焦特性的研究[J]. 光学学报, 2001,

- 21(3): 324-329.
- [8] Xiao Z X. Engineering optical design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 222-234.  
萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 222-234.
- [9] Pan J H. Design and processing of optical aspheric surface[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 14-33.  
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 14-33.
- [10] Luo Y J, Ji X L. Characteristics of coma beams propagation through oceanic turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0805003.  
罗嫣娟, 季小玲. 彗差光束通过海洋湍流的传输特性[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0805003.
- [11] Cheng H T, Guo S J, Lü J, *et al.* Research development trends of zoom system with variable focal power device[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080007.  
程洪涛, 郭世俊, 吕杰, 等. 可调光焦度器件的变焦光学系统研究发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080007.
- [12] Zhang Y M. Applied optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 210-232.  
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 210-232.
- [13] Huang J, Ren H, Lü H B, *et al.* Comparison of damage action of fused silica at three different laser wavelengths[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2007, 5(6): 5-8.  
黄进, 任寰, 吕海兵, 等. 三种不同波长的激光对熔石英损伤行为的对比研究[J]. 光学与光电技术, 2007, 5(6): 5-8.
- [14] Li X Y, Li Y C, Ma Z, *et al.* Optical system design of space camera with large  $F$  number and long focal length[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2093-2097.  
李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 大  $F$  数长焦距空间相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2093-2097.