文章编号　1004-924X(2013)05-1129-08

大变倍比近红外无焦激光扩束系统

叶井飞，高志山*，叶海水，刘晓莉，成晓强
（南京理工大学 电子工程与光电技术学院，江苏 南京 210094）

摘要：为研究闪电特性，设计了用于闪电实验室场景模拟的大变倍比近红外无焦激光扩束光学系统，用于模拟不同光斑尺寸的闪电单元。根据高斯光学几何法计算系统外形尺寸，合理确定了各组份的口径及光焦度；由 ZEMAX 软件包优化设计得到系统的光学结构参数，并对系统整体性能进行了分析评价。该系统变倍比为 13，出射光束光斑均匀、无衍射环，满足研究闪电信号特性的需求。激光扩束系统的中心工作波长为 777.4 nm，入射光束直径为 1.0 mm，入射激光光束在步进电机驱动下连续可调，使得出射光束可从 φ0.8 mm 变化到 φ10.6 mm。系统具有镜片少，结构简单，变焦轨迹平滑无卡滞等优点，可用于模拟不同尺寸的闪电单元。

关　键　词：激光扩束系统；光学设计；闪电模拟；大变倍比；近红外变倍
中图分类号：TN216　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20132105.1129

Near-infrared afocal laser beam expanding system with large zoom ratio

YE Jing-fei, GAO Zhi-shan*, YE Hai-shui, LIU Xiao-li, CHENG Xiao-qiang

(*Institute of Electrical Engineering & Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing* 210094, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhishgao@mail.njust.edu.cn*

Abstract: To explore lightning properties, a near-infrared afocal continuous zoom laser beam expanding system with large zoom ratio was designed to simulate lightning spot elements with different sizes for the lightning scene in a laboratory. On the basis of Gaussian geometric method, the overall dimensions of the system was calculated and the diameters and focal powers of lenses were determined reasonably. By using ZEMAX optical design software, optical structural parameters of the system were optimized, then total performance of the system was analyzed and evaluated. As the results, the system shows a 13X beam expansion ratio and excellent emitting beams with higher energies, uniform spots, and diffraction-free rings, which meets the requirements for simulating lightning properties. Furthermore, the central wavelength of the afocal laser beam expanding system is 777.4 nm, the incident laser beam with a diameter of 1.0 mm is continuously adjustable by a stepper motor and the emitted beam diameter ranges from φ0.8 mm to φ10.6 mm. The beam expanding system has some advantages of fewer lenses, simple structures and smoothly zoom trajectory, and it is suitable for simulating lighting elements with different sizes.

Key words: laser beam expanding system; optical design; lightning simulation; large zoom ratio; near-infrared zoom

---

收稿日期：2012-10-30；**修订日期**：2012-12-12.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(No. 60977008)；教育部博士点基金项目(No. 20103219110014)；中科院重点实验室开放基金项目(No. 2008DP173445)

1 引 言

闪电现象是一种全球性的自然气候现象，闪电活动与雷暴雨发生有密切联系。通过监控地球局部区域或全球区域的闪电活动规律，可以获得对流层降雨过程的相关信息，例如，对流层的降雨量及降雨率，对流层的潜热释放率，强暴雨的垂直结构、数量及其分布等。通过探测闪电分布及其活动规律，对气象进行观察和预测，会给人类的生产生活带来极大的便利，因此美国在这方面进行了大量研究[1]。

有效地捕捉和控制自然界的闪电信号很有难度，为研究闪电特性，闪电实验室的场景模拟具有重要意义。闪电信号是由一系列瞬时放电点发光组成的，在实验室场景模拟中可以采用方位随机、尺寸变化、强度不同的激光光斑模拟闪电。因此，大变倍比近红外无焦激光扩束光学系统是闪电实验室场景模拟系统中的一个重要组成部分。

激光扩束系统在激光雷达、激光测距等领域中有重要的应用。通常激光扩束系统的扩束比是固定的，如激光干涉领域的激光扩束系统可将光束直径由 100 mm 扩大到 150 mm。扩束系统可分为折射式、反射式和折反射式。现有的激光扩束光学系统大部分是根据变焦距摄像系统改进而来的，其结构形式有三组份折射式的[2-6]，固定组位于运动组份变倍组和补偿组之间，补偿组份使用双分离式组合透镜，这给系统装校带来不便；另外也有折反射式的[7]。当变倍比较大时，各组份中镜片数量多，工作时易形成激光相干噪声或衍射散斑条纹，从而影响扩束光斑的均匀性。本文针对中心波长为 777.4 nm 的闪电信号设计了变倍比达 13、扩束光斑均匀性高、无衍射环的近红外无焦激光扩束系统。该系统采用“正-负-正-双胶合”透镜结构形式，可用于模拟不同光斑尺寸的闪电单元。

2 系统结构与原理

闪电实验室场景模拟一般采用尺寸变化的激光光斑来模拟不同尺寸的闪电单元。根据总体设计要求，大变倍比近红外无焦激光扩束系统的技术指标如表 1 所示。

表 1 大变倍比近红外无焦激光扩束系统技术指标

Tab. 1 Parameters of near-infrared afocal laser beam expanding system with large zoom ratio

技术指标	参数
中心工作波长	777.4 nm
激光光源	大功率激光器
入射光束直径	1.0 mm
出射光束直径变化	0.8～10.6 mm
激光扩束比	13
光斑均匀性	≥85%

2.1 系统结构选型

系统光源为大功率激光器，其中心波长为 777.4 nm，光束束腰直径约为 1 mm，采用光纤耦合输出的形式，以得到能量分布均匀性较好、近似平行入射到系统的激光光束。由于激光具有良好的相干性，若系统采用复杂的结构形式，光学面较多会引起各个光学面之间的多次折反射，极易形成相干噪声或者衍射散斑；因此本设计采用的透镜数量较少，以简化系统结构，降低镜片表面多次折反射引起的噪声，提高观察屏上模拟闪电光斑的均匀性。

近红外无焦激光扩束光学系统结构形式为倒置望远系统，其变焦核元[8]选用负组变倍、正组补偿的形式，由前固定组、变倍组和补偿组组成。相比于光学补偿法，这种机械式正组补偿法的系统孔径较小，同时变焦镜头的像质和焦平面更加稳定。

初始设计时变焦镜头的 3 个组份分别使用单片平凸、平凹和平凸透镜，以简化系统结构。变焦核元中，补偿组在连续变倍中光线偏折范围较大，尤其在高倍部分，可能出现较大球差。通过平衡补偿组与变倍组和前固定组之间的像差，使变焦核元整体像质得到优化，剩余像差由后固定组补偿。使用双胶合透镜来控制后固定组的相对孔径，保证了出射光束在连续变倍过程中的准直性。

系统结构原理如图 1 所示，直径为 1 mm 的平行激光光束入射到前固定组 Φ_1，经变倍组 Φ_2、补偿组 Φ_3 和后固定组 Φ_4 平行出射。当变倍组沿轴向做微小移动 q 时，补偿组则沿轴向做相应的微小补偿 δ，保证在变倍过程中变焦镜头的焦平面稳定，进一步使得出射光束在观察屏上的光斑径向稳定。

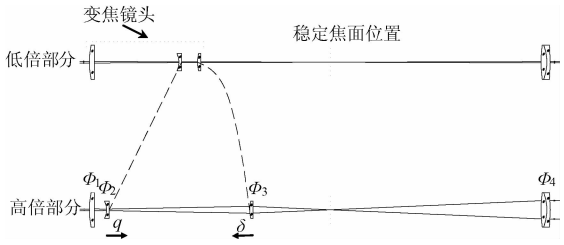


图 1　大变倍比近红外无焦激光扩束系统结构图

Fig. 1　Structure of near-infrared afocal laser beam expanding system with large zoom ratio

2.2　系统初始结构计算

整个无焦激光扩束系统由变焦镜头和准直透镜两部分组成，如图 1 所示。其中，$\Phi_1 \sim \Phi_3$ 组成变焦镜头，Φ_4 为准直透镜。无焦激光扩束系统的扩束比高达 13 倍，经计算，变焦镜头焦距约为 13.0～171.0 mm。根据高斯光学几何法[9]合理确定系统变焦镜头各组份的焦距和运动组份之间的位置关系。

具体分析如下，直径为 φ_0 的平行光束入射到扩束系统中，出射光束的直径为 φ，理想薄透镜系统的示意图如图 2 所示。

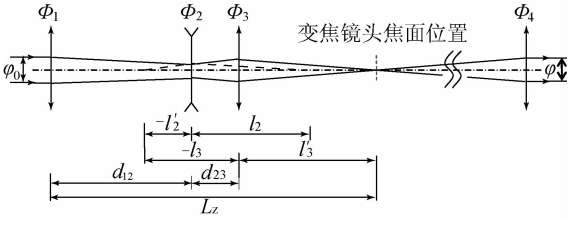


图 2　理想薄透镜系统

Fig. 2　Ideal thin lens system

变焦镜头各组份的物像位置关系为：

$$l_1 = \infty, l'_1 = f'_1, \tag{1}$$

$$\begin{cases} l_2 = l'_1 - d_{12} = f'_2\left(\dfrac{1}{m_2} - 1\right) \\ l'_2 = \dfrac{l_2 f'_2}{l_2 + f'_2} = f'_2(1 - m_2), \\ m_2 = \dfrac{l'_2}{l_2} = \dfrac{f'_2}{l_2 + f'_2} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} l_3 = l'_2 - d_{23} = f'_3\left(\dfrac{1}{m_3} - 1\right) \\ l'_3 = \dfrac{l_3 f'_3}{l_3 + f'_3} = f'_3(1 - m_3), \\ m_3 = \dfrac{f'_3}{l_3 + f'_3} \end{cases} \tag{3}$$

同时变焦镜头的组合焦距 f'_z 为：

$$\begin{cases} \Delta_{12} = f'_1 + f'_2 - d_{12} \\ f'_{12} = -\dfrac{f'_1 f'_2}{\Delta_{12}} \\ \Delta = \dfrac{f_2'^2}{\Delta_{12}} - f'_2 - f'_3 + d_{23} \end{cases}, \tag{4}$$

$$f'_z = -\frac{f'_{12} f'_3}{\Delta}. \tag{5}$$

将式(1)～(4)代入式(5)可化简为：

$$f'_z = f'_1 m_2 m_3, \tag{6}$$

$$f'_4 = \frac{\varphi}{\varphi_0} f'_z = M f'_1 m_2 m_3, \tag{7}$$

$$L_z = d_{12} + d_{23} + l'_3, \tag{8}$$

$$L = L_z + f'_4, \tag{9}$$

式中：f'_1, f'_2, f'_3, f'_4 分别为前固定组焦距，变倍组焦距，补偿组焦距，后固定组焦距；l_1, l'_1 分别为前固定组的物距和像距；l_2, l'_2 分别为变倍组的物距和像距；l_3, l'_3 分别为补偿组的物距和像距；m_2，m_3 分别为变倍组放大率和补偿组放大率；d_{12}, d_{23} 分别为前固定组和变倍组主面之间的间隔，变倍组和补偿组主面之间的间隔；Δ_{12}, f_{12}' 分别为前固定组和变倍组的光学间隔和组合焦距；Δ 为等效透镜(前固定组和变倍组)与补偿组的光学间隔；M 为系统变倍比；L_z 为前固定组到变焦镜头稳定焦平面的长度；L 为系统总长。

如图 2 所示，系统入射光束的直径一定，要能够实现大变倍比，需要注意以下几个问题：(1)是否采用换根补偿形式；(2)选择合适的起始位置；(3)合理确定各个组份的焦距；(4)保证各个组份在长焦和短焦端都有足够的间距。

以变焦镜头的长焦位置作为计算起始位置，将各参量取归一化值，假设 $f'_2 = -1$，起始位置变倍组的放大率设为 m_{2l}，补偿组放大率为 m_{3l}，变倍组和补偿组主面间隔为 d_{23l}。变焦镜头采用换根补偿的形式以获得大变焦比，要能够实现平滑换根，在换根点处变倍组放大率为 -1，同时补偿组放大率也为 -1，该位置称为次长焦位置，即 $m_{2ml} = -1$，$m_{3ml} = -1$，同时变倍组和补偿组主面的间隔设为 d_{23ml}。变倍组经换根点向长焦位置移动，系统变焦比变化梯度增大[9]，变倍组只能做少量移动，那么起始长焦位置 m_{2l} 变化不是很大，其约束范围可设为 $m_{2l} \in \{-1.5, -1.4, -1.3,$

$-1.2,-1.1\}$，为等间隔离散归一化值。换根补偿会导致 f_3' 增大，为避免变倍组和补偿组接触，令 $d_{23ml} > d_{23l} \geqslant 0.5$，又有次长焦位置处 $d_{23ml} = 2f'_3 - 2$，即 d_{23ml} 仅依赖于 f'_3，那么 f'_3 约束范围可设为 $f'_3 \in [1.25, 1.95]$，为0.05等间距离散归一化值。对于每一组 f'_3，m_{2l} 可以计算出相应的 m_{3l}，d_{23l}。

$$m_{3l} = \frac{A - \sqrt{A^2 - 4}}{2}, \tag{10}$$

其中：$A = \frac{1}{f'_3}\left(2 + \frac{1}{m_{2l}} + m_{2l}\right) - 2$.

$$d_{23l} = m_{2l} - 1 + f'_3 - \frac{f'_3}{m_{3l}}. \tag{11}$$

对于每一组 f'_3，m_{2l}，m_{3l}，d_{23l}，即变焦镜头的起始长焦位置，变倍组经换根点位置平滑向短焦位置移动，每移动 q（$q \in [0.5, 2.5]$，为 0.5 等间距离散归一化值），变倍组的放大倍率 m_2 为：

$$m_2 = \frac{1}{-1-q}, \tag{12}$$

补偿组的放大倍率 m_3 为：

$$m_3 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4}}{2}, \tag{13}$$

其中：$B = \frac{1}{f'_3}\left(2 + \frac{1}{m_2} + m_2\right) - 2$。

在 q 位置补偿组相应的补偿量 Δ 为：

$$\Delta = f'_3(m_3 + 1), \tag{14}$$

变焦镜头在该位置的放大倍率 m 为：

$$m = m_2 m_3, \tag{15}$$

那么变倍组每移动 q，系统实现总变焦比 Γ 为：

$$\Gamma = \frac{m_{2l} m_{3l}}{m_2 m_3}. \tag{16}$$

根据系统大变倍比、快速变焦要求筛选出合适的起始长焦位置 m_{2l} 和 f'_3，本文初步确定的起始长焦位置变倍组的放大率 $m_{2l} = -1.4$，补偿组焦距 $f'_3 = 1.65$。

初步确定变焦初始长焦位置后，系统的总变焦比也达到了预定的要求，变倍组移动到短焦位置，为了保证前固定组和变倍组的间距 d_{12s} 足够大，通常有 $d_{12s} \geqslant 0.5$，此时可以计算出前固定组焦距 f'_1：

$$f'_1 = d_{12s} + \frac{f'_2(1 - m_{2s})}{m_{2s}}. \tag{17}$$

设 $d_{12s} = 0.5$，同时由式(6)和式(7)计算系统前固定组和后固定组的实际焦距，以满足变焦镜头焦距的变化范围和系统扩束比。文中初步确定各组份焦距的计算框图如图 3 所示。

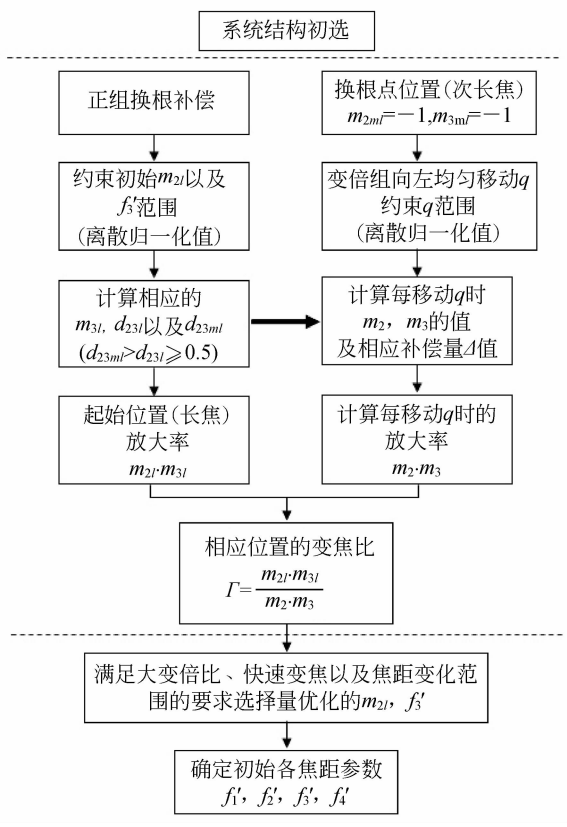


图 3 初始焦距计算框图

Fig. 3 Diagram of calculation of initial focal length

由此得到本系统各个组份的初始焦距，如表 2 所示。

表 2 各组份初始焦距(归一化值)

Tab. 2 Initial focal lengths of groups (normalized values)

f'_1	f'_2	f'_3	f'_4
4.50	−1.00	1.65	6.55

2.3 变倍组和补偿组联动关系

在确定了系统各组份焦距后，变倍组由换根点向两侧等间距线性移动，计算出补偿组相应的补偿量。这样运动组份从长焦位置开始运动，经换根点平滑过渡向短焦移动，达到系统扩束比要求，得到二者之间的联动关系，用于凸轮曲线槽的设计和加工。图 4 是系统变倍组和补偿组的联动关系图，图中横坐标为变倍组和补偿组轴向位置

关系，变倍组轴向移动的分辨率为 0.3 mm，纵坐标为凸轮转过的角度，转角为 0～284°。由图可见联动曲线平滑无突变点，便于机械加工。

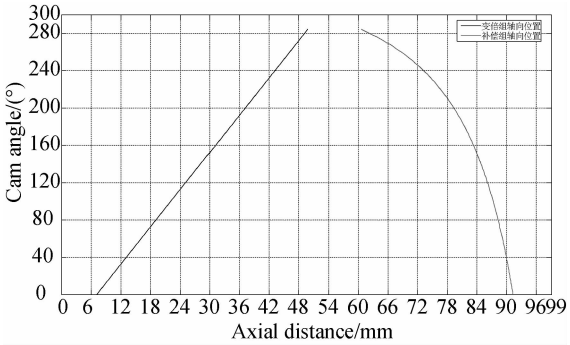


图 4　变倍组和补偿组轴向位置关系图

Fig. 4　Positions of zoom group and compensating group along axis

3　系统设计结果

结合各组份的初始焦距参数，用像差特性参数 PW 法[10]求解透镜系统的具体结构参数：镜面曲率半径 R、曲面顶点间距 d 和使用材料折射率 n。利用 ZEMAX 光学设计软件，设置优化函数，反复优化计算的初始结构参数，最终得到满足系统设计要求的光学结构参数。

3.1　系统参数

大变倍比近红外无焦激光扩束光学系统的透镜数量少，结构简单；实现连续变倍，变倍比大；变焦轨迹平滑无卡滞。系统参数的设计结果如表 3 所示。

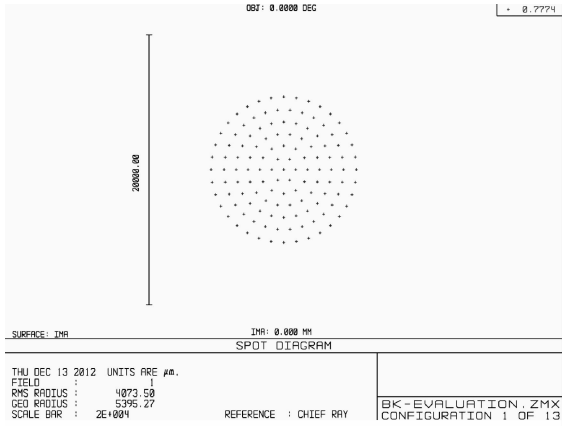
表 3　系统参数的设计结果

Tab. 3　Parameters of near-infrared afocal laser beam expanding system with large zoom ratio

指标	参数
中心工作波长	777.4 nm
系统总长	<300 mm
变焦镜头焦距	12.9～171.6 mm
光束扩束比	13.25
出射光束直径	0.8～10.6 mm
系统调节方式	计算机控制，连续可调

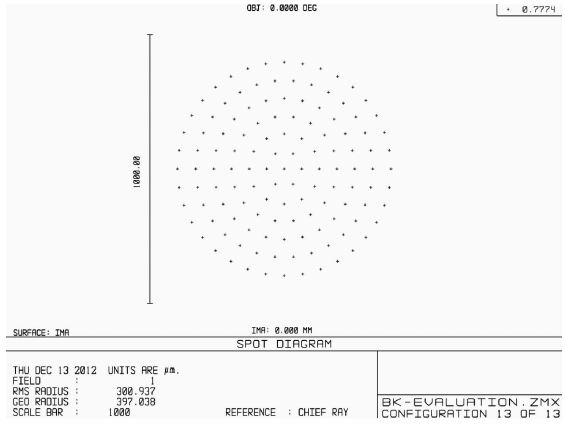
3.2　系统准直性

近红外无焦激光扩束系统设计中出射光束的准直性也很重要，在连续变倍过程中 15 000 mm 像面处的最高倍和最低倍点列图如图 5 所示。



(a)最高倍点列图

(a)High ratio



(b)最低倍点列图

(b)Low ratio

图 5　系统点列图

Fig. 5　Spot diagrams of proposed system

激光扩束系统从高倍到低倍端弥散圆半径的 RMS 最大值约为 4.073 mm，最小值约为 0.3 mm，则系统角像差变化不超过 $\alpha_{max}=4.073$ mm/15 000 mm≈0.000 27 rad，约为 1″，系统具有很高的准直性。

4　系统装校

4.1　出射光斑中心跳动问题

在光学组件装调过程中，最重要是保证系统

运动组份在变焦过程中出射光斑中心稳定，最佳效果为光斑径向不跳动。因此在初始装调阶段，采用自准直法检查变倍组和补偿组在移动过程中自准直返回像是否跳动。自准直法检查光路如图 6 所示。

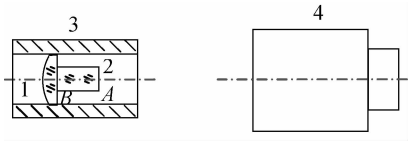


图 6　自准直法检查光路图

Fig. 6　Layout of auto-collimation method

在图 6 中，1 为运动组份；2 为高平行度平行平板，平行度达到 2″；3 为直槽筒，变倍组和补偿组都位于直槽筒中；4 为自准直测角仪，测角精度达到角秒级。

由于变倍组和补偿组分别为平凹和平凸结构，当变倍透镜和补偿透镜置于各自镜座上时均以球面为基准面，以保证光轴和机械轴的唯一性。同时在进行光轴和机械轴对准时，整个系统以直槽筒的机械轴为参考轴。自准直测角仪的物镜口径远大于直槽筒外径。

利用自准直测角仪检查光路时，依次装调变倍透镜和补偿透镜，首先在透镜四周点胶，轻轻置于镜座上；其次在平行平板的 B 面蘸水使 B 面与运动组份的平面紧密贴合，这样二者能够联为一体。调节自准直测角仪，在视场中观察到返回十字像，如图 7 所示。十字像 1 和 1′距离非常近，且它们都比十字像 2 亮。同时在运动组份整个行程中，十字像 1 和 1′保持不动，而十字像 2 在跳动。对透镜轻微调整使得十字像 2 尽量与十字像 1 重合，且保证运动过程中不动；但在实际加工中，因直槽筒同心度和圆柱度加工精度的限制和影响，十字像 2 不可能完全不动，只是在角秒级范围内做微小量跳动。最后当检查效果满足要求后直接对透镜进行紫外曝光，使得透镜胶固于镜座上。自准直法保证了系统光轴和机械轴的精度一致，提高了系统出射光束的中心稳定性能。

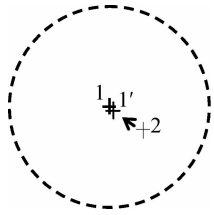


图 7　自准直法返回十字像

Fig. 7　Layout of cross images by auto-collimation method

4.2　装校结果

用于闪电实验室模拟不同尺寸闪电单元的近红外无焦激光扩束系统整体装校图如图 8 所示。实现连续变倍的机构由蜗轮蜗杆、步进电机、变倍初始零位限位器和驱动控制系统组成，具有很高的调节精度。

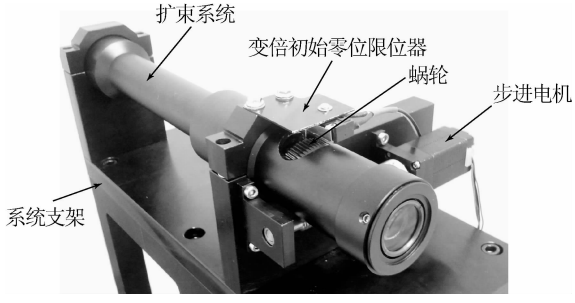


图 8　激光扩束系统实物图

Fig. 8　Photo of laser beam expanding system

测试得到在距出射端约 3 500 mm 的观察屏上，在变倍过程中光斑中心的最大径向跳动量不超过 4 mm，且位于低倍附近；而在高倍部分光斑中心基本不动，重复性好。计算得到变倍过程的最大中心偏 $\alpha_{max}=2/3\ 500\approx0.000\ 57$ rad，约为 2″，与设计要求有所偏差，这是由机械加工和装校误差引起的，但总体来说系统的整体性能可以达到要求。

激光扩束系统在步进电机驱动下，使入射光连续变倍扩束，用 CCD 采集观察屏上的光斑，如图 9 所示。通过分析得到，出射光束的光斑能量分布不均匀性均值小于 10%，无明显衍射环，达到了设计效果。

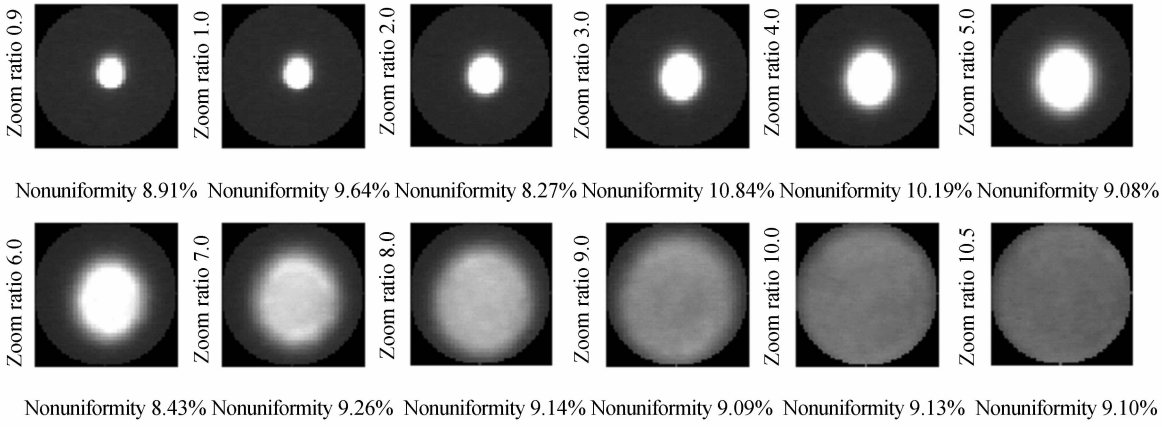


图 9　连续变倍扩束光斑图

Fig. 9　Spots of continuous zoom expander

5　结　论

本文设计了用于闪电实验室场景中模拟不同尺寸闪电单元的近红外无焦激光扩束光学系统，实现了大变倍比（达13倍），保证了出射光束在观察屏上光斑能量的均匀性高，无衍射环。该系统可满足研究闪电信号特性的需求。在系统装调中采用自准直法，提高了系统的装配精度，保证了系统的优良性能。该系统还具有镜片少、结构简单、连续可调、变焦轨迹平滑无卡滞、出射光束准直性好等优点。

参考文献：

[1] Algorithm theoretical basis document for the lightning imaging sensor [R]. *NASA*, 2000.

[2] 赖爱光，林峰，蔡长达，等. 连续可变扩束比的激光扩束系统[J]. 光学仪器，1992，14(1)：13-16.
LAI A G, LING F, CAI CH D, *et al*.. A laser expander system with variable expansion ratio [J]. *Optical Instruments*, 1992, 14(1): 13-16. (in Chinese)

[3] 蔡长达. 变焦距激光扩束系统的结构设计[J]. 激光与红外，1996，26(1)：30-31.
CAI CH D. The structure design of variable focus laser expander system [J]. *Laser&Infrared*, 1996, 26(1): 30-31. (in Chinese)

[4] 孔祥蕾，郝沛明. 变焦扩束系统的光学设计[J]. 应用光学，2001，22(5)：6-13.
KONG X L, HAO P M. Optical design of varifocal beam expander [J]. *Journal of Applied Optics*, 2001, 22(5): 6-13. (in Chinese)

[5] 赵延仲，宋丰华，孙华燕. 高斯光束的激光变焦扩束光学系统设计[J]. 装备指挥技术学院学报，2007，18(5)：85-89.
ZHAO Y ZH, SONG F H, SUN H Y. Design of laser expanding optical system with variable focus of Gaussian beam[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2007, 18(5): 85-89. (in Chinese)

[6] 刘焕宝，安志勇，高瑀含，等. 一种激光变焦扩束光学系统设计[J]. 长春理工大学学报（自然科学版），2010，33(4)：43-45.
LIU H B, AN ZH Y, GAO Y H, *et al*.. System design of a varifocal beam expander [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 33(4): 43-45. (in Chinese)

[7] 赵伊宁，王鑫，向阳. 折反射式连续大变倍比扩束系统设计[J]. 长春理工大学学报（自然科学版），2012，35(1)：46-48.
ZHAO Y N, WANG X, XIANG Y. Design of catadioptric variable focus beam expanding optical system [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(1): 46-48. (in Chinese)

[8] 徐有木. 20 倍近红外变焦镜头的设计[J]. 红外与激光工程，1986，2：40-47.

XU Y M. Design of 20× near-infrared zoom lenses [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1986, 2: 40-47. (in Chinese)

[9] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,1988.
TAO CH K. *Design of Zoom Optical System*[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1988. (in Chinese)

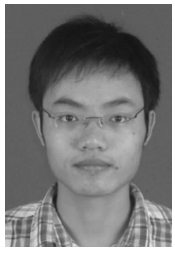
[10] 徐金镛,孙培家. 光学设计[M]. 北京:国防工业出版社,1989.
XU J Y, SUN P J. *Optical Design*[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1989. (in Chinese)

作者简介:

叶井飞(1988－),男,江苏泰兴人,博士研究生,2010年于南京理工大学获得工学学士学位,主要从事光学自由曲面设计和光学测试方面的研究。E-mail: yjfei_2010@126.com

叶海水(1986－),男,江西景德镇人,博士研究生,2007年于南京理工大学获得工学学士学位,主要从事光学设计、眼视光学理论和技术方面的研究。E-mail: yhs.1986@163.com

刘晓莉(1988－),女,江苏南通人,硕士研究生,2011年于南京理工大学获得工学学士学位,主要从事光学自由曲面设计以及光学测试技术方面的研究。E-mail: liuxiaoli0814@163.com



成晓强(1988－),男,江苏南通人,硕士研究生,2011年于南京理工大学获得理学学士学位,主要从事精密光学仪器与测试的研究。E-mail: cxq_1988@outlook.com

导师简介:

高志山(1966－),男,江苏涟水人,博士,教授,博士生导师,1989年于哈尔滨科学技术大学(现哈尔滨理工大学)获得理学学士学位,1992年于中国科学院长春光机所获得理学硕士学位,1999年于南京理工大学获得工学博士学位,主要从事光学测试、光学设计和眼视光学等方面的研究。E-mail: zhishgao@mail.njust.edu.cn

(版权所有　未经许可　不得转载)