

聚合物定子超声电机驱动的变倍激光扩束镜*

潘松¹, 肖忠^{1,3}, 徐张凡¹, 陈雷¹, 徐洪波²

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

(2. 潍柴动力扬州柴油机有限责任公司 扬州, 225000)

(3. 上海航天控制技术研究所导航与惯性事业部 上海, 201109)

摘要 针对激光扩束镜动态连续变倍需求, 提出了利用单一中空旋转行波超声电机作为驱动源的连续变倍激光扩束镜。根据变焦准直扩束原理, 提出了变倍组透镜和补偿组透镜的移动距离转换关系。采用 3D 建模软件对扩束镜的凸轮机构、导向机构和驱动机构进行了设计, 并进行了受力分析, 加工出了一套扩束比为 3~6 的扩束镜样机。为了降低装置整体的重量, 采用聚合物作为超声电机定子的材料。搭建了实验平台, 对扩束镜样机的性能进行了测试。结果表明: 扩束镜光学扩束效果良好, 瞬态性能优良, 定位误差小于 0.01 mm。笔者提出的聚合物质子超声电机作为扩束镜的驱动变倍激光扩束镜, 系统整体重量更小, 能够满足扩束镜快速高精度的光学变倍需求。

关键词 超声电机; 连续变倍; 激光扩束镜; 聚合物定子
中图分类号 TH133

引言

因为激光具有单色性好、方向性强和准直性强等优点, 在军事和民用领域得到广泛应用^[1]。激光器发出的光束直径通常在毫米量级, 然而在激光全息、光信息处理、激光测距等领域中需要有较宽光束^[2-3]。激光扩束镜的作用就是把窄细的激光束扩束变成宽阔的准直光束, 同时压缩激光束的空间发散角, 从而在较远距离传输后获得所需光束尺寸^[4]。现有扩束镜多为固定倍数^[5], 扩束比不可调节, 缺乏灵活性。此外还存在部分手动调节扩束镜, 通过手动调节螺纹来实现扩束比的调整^[6]。对于这类扩束镜, 人们无法实现远程操控, 且手动调节螺纹的方式控制精度不高。近年来也有利用传统电磁电机(主要以步进电机为主)来驱动扩束镜, 实现扩束比的连续可调^[7]。这类扩束镜镜筒外侧加工有齿轮, 电机通过齿轮啮合的方式将动力传递给移动镜组。由于是外加结构, 该类电动激光扩束镜传动精度较低, 噪音大, 整体结构尺寸较大。基于此, 有必要考虑设计一种既能满足激光束的准直扩束要求, 又能对扩束比连续可调, 且控制精度高, 结构紧凑的电动激光扩束镜。

超声电机是一种新型电机, 它利用了压电材料

的逆压电效应, 在压电材料上施加交流信号产生交变电场, 进而激发出压电材料在超声频段内的振动, 并将这一振动放大, 通过摩擦作用转换为电机转子的运动, 作为功率输出并驱动其他负载^[8]。与传统电机相比, 超声电机具有大力矩、响应速度快、控制精度高等优点, 将其应用于调焦系统可以实现快速准确定位^[9]。在有些应用中如果负载较小, 对电机驱动力矩要求较低, 电机定子材料可以采用非金属材料——聚苯硫醚 (polyphenylene sulfide, 简称 PPS)^[10], 以便进一步减轻整个系统的重量。

针对激光扩束要求, 笔者提出了一种采用 3 组透镜的扩束镜, 通过调节透镜组之间的距离来实现对入射激光束的准直扩束。采用非金属定子的中空超声电机作为驱动源, 并对其结构进行了优化分析。设计加工了一套扩束镜样机和驱动用超声电机, 通过搭建实验平台, 对电机的驱动性能和扩束镜的运动特性进行了实验验证和分析。使用超声电机驱动的激光扩束镜可以很好地满足高精度定位和扩束比精确调节的要求。

1 扩束镜的光学设计

以二组元准直扩束系统为例, 激光束的准直扩

* 国家自然科学基金面上资助项目(51575260); 工信部 2017 年智能制造综合标准化与新模式应用专项资助项目; 江苏高校优势学科建设工程资助项目

收稿日期: 2019-07-26; 修回日期: 2021-03-12

束原理^[11]可以用图1来解释。图1中束腰半径为 ω_0 的激光束经由透镜 L_1 所成的像与透镜 L_2 的前焦点重合,而后光束平行于光轴射出。经过这样的一个二组元准直扩束系统,系统的准直倍率为

$$\beta = \frac{\theta_0}{\theta_2} = \frac{\omega_2}{\omega_0} = \frac{f_2 \omega_s}{f_1 \omega_0} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{1 + \left(\frac{s\lambda}{\pi\omega_0^2}\right)^2} = M \sqrt{1 + \left(\frac{s\lambda}{\pi\omega_0^2}\right)^2} \quad (1)$$

其中: $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ 为激光束的束腰半径; ω_s 为激光束在透镜 L_1 上的光斑半径; $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ 为激光束的发散角; f_1, f_2 分别为透镜 L_1 和 L_2 的焦距; λ 为激光束波长; s 为光束束腰与透镜 L_1 的距离; M 为扩束比(无量纲),是两透镜焦距的比值。

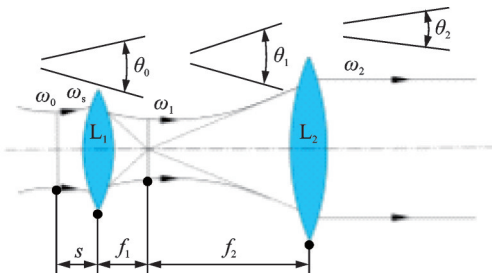


图1 二组元准直扩束原理

Fig.1 Principle of two components collimation beam system

由式(1)可知,扩束系统的准直倍率与激光束的光学参数和透镜的焦距有关,可以通过改变系统的焦距来调节出射光束的发散角和直径。要达到连续改变系统焦距的目的,必须通过3组及以上的透镜相互配合运动才能来实现^[12-14]。考虑到扩束镜整体结构尺寸不至于过大,笔者提出采用一个动力源来实现镜头间的相互运动。为此,文中采用3组透镜来实现系统焦距的连续调节,从而达到扩束镜连续变倍的目的。图2是笔者设计的3组元变焦距光学系统示意图。图中: F_1 为固定组的焦点; F_3 为补偿组的焦点; $A_n(n=1,2,3)$ 为固定组和变倍组所成的像点; $B_n(n=1,2,3)$ 为固定组、变倍组和补偿组所成的像; A_n 与焦点 F_1 重合; B_n 与焦点 F_3 重合。

在图2中,3组透镜分别称为固定组 L_{S1} 、变倍组 L_{S2} 和补偿组 L_{S3} 。固定组的位置始终保持不变,通过设计合理的运动轨迹,让变倍组和补偿组按照设定的曲线进行运动配合,则可以实现倍率的连续变化。3组透镜 L_{S1}, L_{S2} 和 L_{S3} 的初始间距分别为 d_1, d_2 。变焦过程中,变倍组 L_2 移动距离为 q ,透镜 L_3 移动相应的距离 e 进行补偿,使得出射光束始终平行光轴射出^[15]。3组元扩束系统是通过调节透镜组之

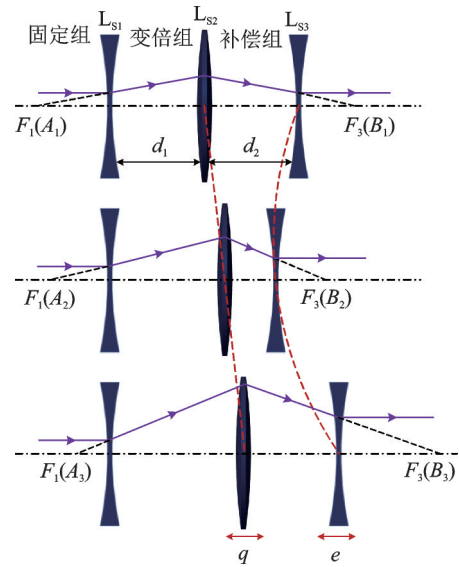


图2 3组元准直扩束原理

Fig.2 Principle of three components varifocal beam system

间的距离来改变系统的焦距。透镜 L_{S3} 的移动量 e 和透镜 L_{S2} 的移动量 q 具有如下关系^[16-17]

$$e = \frac{f_1 f_2 - (d_1 - q) f_2}{f_1 + f_2 - (d_1 - q)} + f_3 - d_2 \quad (2)$$

其中: f_1, f_2, f_3 分别为透镜 L_{S1}, L_{S2}, L_{S3} 的焦距。

扩束比与变倍组移动量 q 满足表达式

$$\begin{cases} f_{12} = f_1 m_2(q) \\ m_2(q) = \frac{f_2}{f_1 + f_2 - (d_1 - q)} \\ M = -\frac{f_3}{f_{12}} = -\frac{f_3 [f_1 + f_2 - (d_1 - q)]}{f_1 f_2} \end{cases} \quad (3)$$

其中: f_{12} 为固定组和变倍组的组合焦距; $m_2(q)$ 为变倍组放大倍率。

笔者设计的扩束镜包含3组透镜,固定组和补偿组为凹透镜,变倍组为凸透镜;考虑到扩束镜整体结构的尺寸,设计扩束比3~6倍,系统具体的光学参数如表1所示。以固定组为坐标原点,变焦过程中不同扩束比对应的固定组、变倍组、补偿组间的距离如图3所示。可见,变倍组扩束比随间距变化呈线性关系,而补偿组随间距变化呈非

表1 扩束系统光学参数

Tab.1 Optical parameters of beam expanding system

参数/mm	数值	参数/mm	数值
f_1	-19.37	d_1	60.00
f_2	50.00	d_2	50.00
f_3	-75.00		

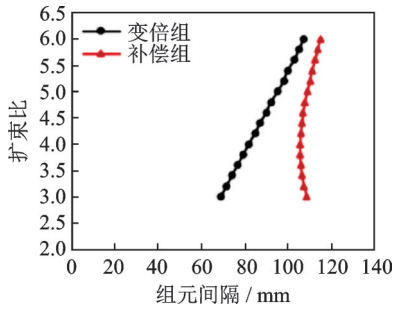


图3 扩束比与组元间隔的关系

Fig.3 Relation between beam expansion ratio and component interval

线性关系。

2 扩束镜的主要机械结构设计

2.1 凸轮机构设计

变焦扩束过程中,变倍组镜头作线性直线移动,补偿组镜头作非线性直线移动^[18]。为了使移动镜头运动同步,设计了圆柱凸轮机构,圆柱凸轮旋转的同时带动变倍组和补偿组作平行光轴的直线移动^[19-20]。

扩束镜的结构如图4所示,主要包括超声电机、变焦凸轮、固定筒、导杆、固定镜组和可移动镜组。凸轮机构将超声电机转子的旋转运动转化为变倍、补偿镜组沿光轴方向的平移运动。根据图3所示的扩束比与组元间隔的关系曲线,在圆柱凸轮上加工出两条空间曲线槽,3组透镜间的距离由这两条曲线槽控制,结构如图5所示。准直扩束过程中,变焦凸轮跟随超声电机转子一起作旋转运动,带动导钉在变倍、补偿曲线槽中滑动,同时导钉带动变倍、补偿组镜架在导杆上沿着光轴方向平行移动。

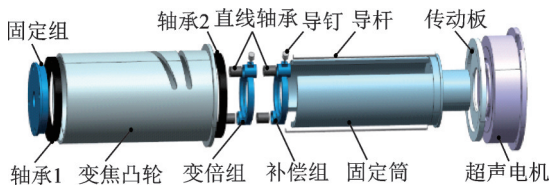


图4 扩束镜结构图

Fig.4 Diagram of beam expander structure

变倍组运动路径为一条倾斜的直线,将其附着在圆柱凸轮上时便形成了螺旋线。凸轮直径 D 、工作转角 φ 、光学导程 H 及螺旋升角 α 之间的关系式^[21]为

$$D = \frac{2H}{\varphi \tan \alpha} \quad (4)$$

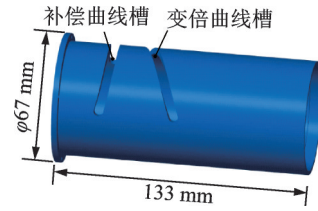


图5 凸轮结构图

Fig.5 Diagram of cam structure

对于变焦凸轮来说,为使加工的螺旋槽带动变倍组平稳顺畅运动, α 需合理取值。当 α 较小时,变焦过程镜组移动所需的驱动力矩小,滑动更平稳顺畅;但 α 过小会导致凸轮直径 D 太大,不利于结构的小型化。为了避免运动过程出现迟滞或卡死现象,通常要求 α 小于 45° 。同时为了保证凸轮的刚度,工作转角 φ 需小于 200° ^[21]。

设计的变倍组光学导程 $H=38.163$ mm,利用式(4)计算得到 $D=56$ mm, $\varphi=135.26^\circ$, $\alpha=30^\circ$ 。

2.2 导向机构设计

为了保证可移动镜组沿光轴方向的平滑运动,设计了两根均布的圆柱导轨^[22],移动镜组通过直线轴承套在导轨上,如图6所示。为了保证导向精度,对导杆进行了受力分析。变焦过程中,移动镜组分别受到重力、切向力和轴向力的作用。以变倍组为例,切向力 F_r 与轴向力 F_a 可由下列公式计算

$$\begin{cases} F_r = F \sin \alpha \\ F_a = F \cos \alpha \end{cases} \quad (5)$$

其中: F 为凸轮带动变倍组运动的力; α 为变倍曲线的升角。

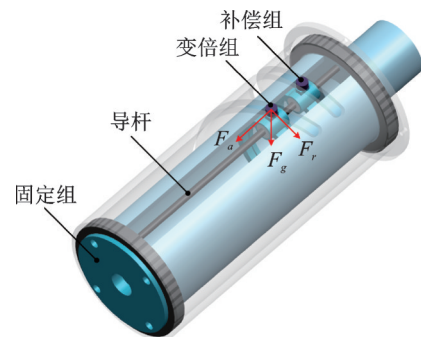


图6 导杆受力情况

Fig.6 Force analysis of guide mechanism

将导杆简化为简支梁,变倍组移动到距导杆一端 x 处时,其挠度 f_x ^[21]为

$$f_x = \frac{F_g \cdot l^2 \cdot x}{48EJ} \left[3 - 4 \left(l - \frac{x}{l} \right)^2 \right] \quad (6)$$

其中： l 为导杆长度； E 为导杆材料的弹性模量； J 为导杆的轴惯性矩。

导杆的作用是保证可移动镜组平行光轴移动，过细的导杆刚度不足，镜组或扭转的力矩可能会造成导杆变形，从而使移动镜组迟滞或卡死；若导杆过粗，则会造成扩束镜整体结构过大，因此需对导杆直径合理取值。如图 6 所示，导杆的挠度主要由变焦凸轮对镜组的切向力 F_r 和移动镜组本身的重力 F_g 造成。在本设计中，导杆的直径为 3 mm，通过式 (6) 计算得到切向力和重力对导杆的挠度值分别为 0.04, 0.6 μm ，导杆满足刚度要求^[7]。

2.3 驱动机构设计

为了确定电机驱动移动镜组运动所需的力矩大小，对移动镜组进行了受力分析，如图 7 所示。镜架的运动方向水平向右，图中： F_a, F_r 分别为变焦凸轮对移动镜组施加的轴向力和切向力； F_g 为镜架所受重力； F_{n1}, F_{n2} 为导杆对镜架的支持力； f_1, f_2 为变焦过程中镜架所受的摩擦力； v 为移动速度。

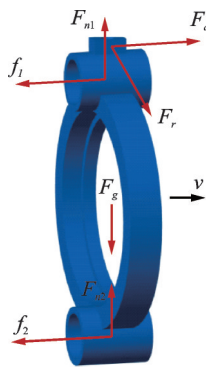


图 7 移动镜组受力情况

Fig.7 Force analysis of the removable mirror group

变焦凸轮带动镜组移动所需的轴向力满足

$$\begin{cases} F_a = f_1 + f_2 = \mu F_r + \mu(F_{n1} + F_{n2}) \\ F_{n1} + F_{n2} = mg \\ F_r/F_a = \tan\alpha \end{cases} \quad (7)$$

其中： μ 为摩擦因数； α 为凸轮变焦曲线的升角； m 为移动镜组质量。

电机所需的输出扭矩为

$$\begin{cases} F_a v = T\omega \\ v = \frac{\omega r}{\tan\alpha} \end{cases} \quad (8)$$

其中： ω 为转子角速度； T 为电机输出力矩； r 为凸轮半径。

各参数取值如表 2 所示。

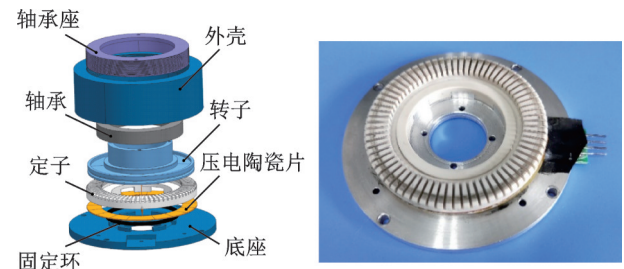
表 2 驱动机构设计参数

Tab.2 Parameters of driving mechanism

参 数	数值
变倍曲线升角 $\alpha/(\circ)$	30
可移动镜组质量 m/g	80
摩擦因数 μ	0.1
凸轮半径 r/mm	29.5

通过计算得到镜组滑动所需 F_a 为 84.9 mN，转换为驱动镜头组件所需的电机驱动力矩 T 为 4.34 mN·m。该尺寸传统金属定子超声电机输出力矩约为 1 N·m，远远超过驱动镜组移动所需力矩，因此采用超声电机作为扩束镜的驱动源具有可行性，且存在较大的优化空间。

本设计采用中空旋转行波超声电机作为扩束镜的驱动源，电机结构如图 8(a) 所示。为了便于定子安装于底座上，定子底部加工有 6 个齿，同时底座上加工了相应尺寸的 6 个凹槽，通过齿和齿槽的配合将定子固定在底座上；定子直径方向的固定则由一个固定环来实现。电机外壳上加工了内螺纹，轴承座上加工了外螺纹，通过螺纹的旋合来调整定子和转子之间的预压力。加工的 PPS 材料定子如图 8(b) 所示。



(a) 超声电机结构图 (b) 电机定子实物图
(a) Ultrasonic motor structure (b) The practicality picture of USM stator

图 8 超声电机结构及实物

Fig.8 Structure and picture of the USM

由于电机定子的固有模态对整个超声电机的性能至关重要，文中利用 COMSOL 有限元分析软件对电机定子进行了模态分析和谐响应分析，并对电机定子的齿宽、齿高、腹板厚度进行了优化^[23]。定子采用 PPS 材料，相比于传统的磷青铜定子材料，PPS 密度小，在满足扩束镜基本机械性能需求的同时，能进一步减轻电机的重量。文中所用 PPS 材料的性能参数见表 3^[24]。

利用多普勒激光测振系统 (PSV-300F-B, Polytec Inc, Waldbronn, Germany) 对电机样机的定

表 3 PPS、磷青铜的材料参数

Tab.3 Mechanical constants of PPS, phosphor-bronze

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
PPS	1.35	3.45	0.36
磷青铜	8.87	117	0.41

子进行模态实验,测量结果如图 9 所示。通过实验得到定子两相的 B₀₉ 模态的特征频率分别为 21.039, 21.031 kHz。

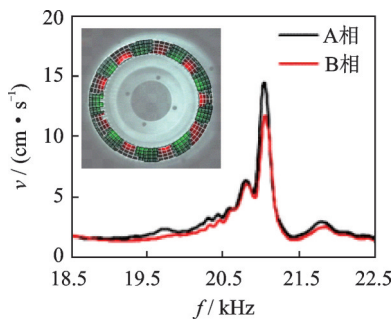


图 9 电机定子的频率响应

Fig.9 Frequency response of stator

3 实 验

根据前文的光学设计和机械结构设计,加工出了一套扩束镜样机。为了测试样机的准直扩束效果,搭建了如图 10(b)所示的测试平台。测试平台主要包括 4 部分:激光位移传感器(LK-H020, Keyence Corp., Osaka, Japan),传感器控制器、信号发生器和功率放大器。激光位移传感器测量移动镜组的位移并将测试数据传送到传感器控制器中;传

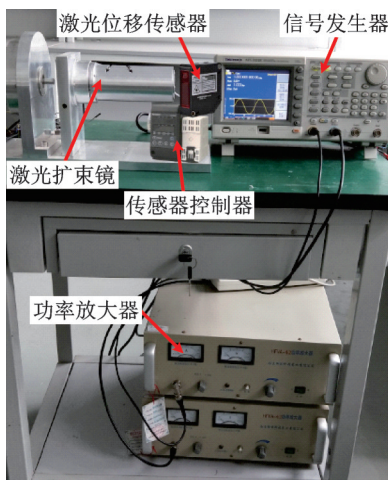


图 10 实验测试平台

Fig.10 Experimental test platform

感器控制器与信号发生器、功率放大器连接,根据镜组位移测试数据控制电机信号的输入,从而实现扩束镜的镜组运动的控制。

3.1 机械特性实验

机械特性是衡量电机最重要的性能指标,通过实验得到了电机样机的角速度与扭矩的关系曲线,如图 11 所示。实验中电机的驱动电压为 400 V,驱动频率为 21.85 kHz。

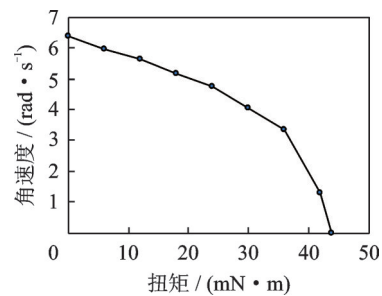


图 11 机械特性实验曲线

Fig.11 Mechanical characteristics

实验结果表明,电机的角速度随着扭矩的增加而降低,堵转力矩为 44 mN·m,远远大于驱动移动镜组所需的力矩 4.34 mN·m。

3.2 瞬态特性实验

瞬态特性是超声电机启动和关断瞬态过程所表现的特性,主要可用启动响应时间和关断响应时间来描述^[25]。实验中给超声电机施加相位差 $\pi/2$,峰值为 400 V 的两相电压,工作频率变化范围为 21.70~22.15 kHz。本实验获得的超声电机启动和关断特性曲线如图 12 和图 13 所示。

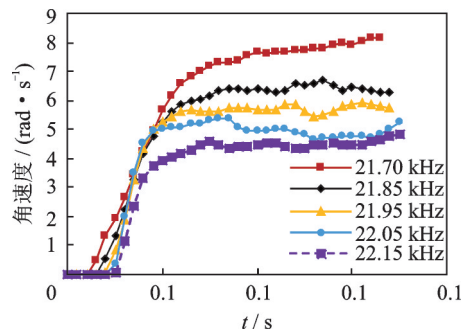


图 12 启动特性实验曲线

Fig.12 Measured startup characteristics for ultrasonic motor

由图 12,13 可知,对于不同的驱动频率,电机的启动时间都约为 0.05 s,经过 0.13 s 速度达到稳定;关断时间约为 0.03 s。电机启动和关断过程的时间

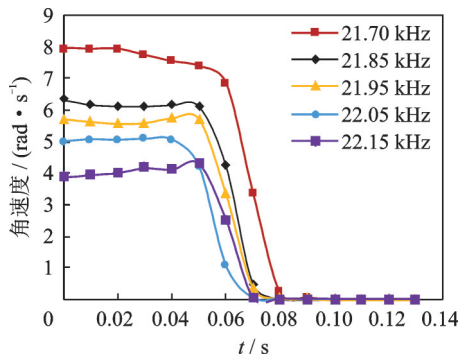


图 13 关断特性实验曲线

Fig.13 Measured shutdown characteristics for beam expander

都特别短,具有良好的瞬态特性。

3.3 定位实验

连续变倍激光扩束镜是通过改变透镜组间的距离来实现扩束比的连续可调,因此移动镜组的定位精度对扩束镜的性能至关重要。通过实验测试了扩束镜的定位性能,实验系统的原理如图 14 所示。在实验过程中,将信号发生器的输出端接到功率放大器上,调节电机的输入电压到 400 V,频率为 21.85 kHz,把经过功率放大器放大后的电压信号通过导线施加给电机,驱动扩束镜工作。镜头的位移由激光位移传感器测得,当移动距离达到设定的目标值时电机停止旋转。

扩束镜的定位误差与电机的转速有关,可以通过调节电机工作电压频率和相位差的大小来改变电机转速。为了研究定位误差与驱动电压频率、相位差的关系,分别改变电压频率 21.7~22.3 kHz 和相

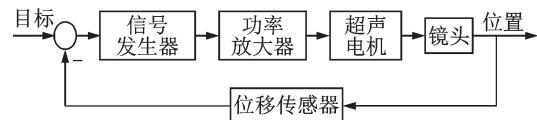


图 14 扩束镜实验系统原理

Fig.14 Principle of beam expander experimental system

位差 30~90°。实验得到的定位误差与驱动频率和相位差之间的关系分别如图 15 和图 16 所示。

由图 15 可知,随着电压频率增大,电机转速减小,扩束镜的定位误差逐渐减小。由图 16 可知,两相电压相位差增大,电机转速上升,扩束镜定位误差逐渐增大。文中测试的是简单的到位停止控制,如采用其他定位控制算法,控制精度会有进一步提高,这是后续研究内容。

扩束镜的连续变倍是通过控制镜组元间的距离来实现的,因此对变焦凸轮上的变倍、补偿曲线槽加工精度要求较高。本设计实验得到了样机的两条变焦曲线槽分别对移动镜组位移的影响,结果如图 17 所示。

从图 17 中可知,变倍组镜头和补偿组镜头在各自的曲线槽中运动的位移误差平均值分别为 0.007 9, 0.008 6 mm。因为变倍组移动量线性变化,所以约束变倍组移动的曲线槽为一条定升角螺旋线;补偿组移动量作非线性变化,所以补偿组曲线槽为一条变升角螺旋线,加工精度较变倍曲线槽难保证,故其造成的镜头位移误差大于变倍曲线槽。

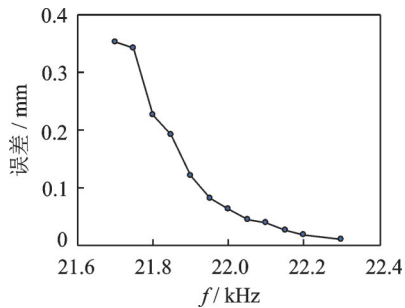


图 15 定位误差随频率变化曲线

Fig.15 The relation between positioning error and frequency

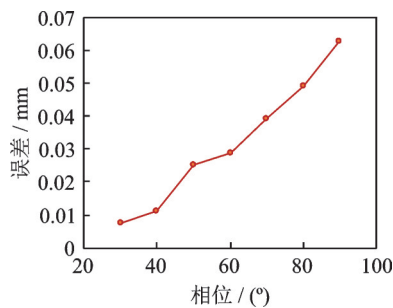


图 16 定位误差随相位差变化曲线

Fig.16 The relation between positioning error and phase difference

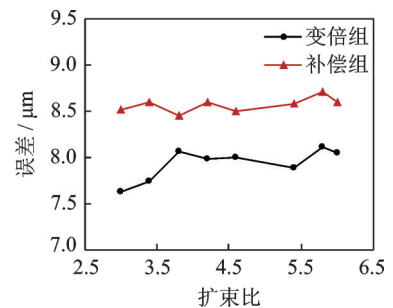


图 17 变焦曲线对镜头位移的影响

Fig.17 The influence of zoom curve on lens displacement

3.4 扩束实验

对扩束比为 3X~6X 的扩束镜样机进行了光学扩束实验^[26]。初始入射激光束直径为 2 mm,连续调节凸轮变焦机构,得到了不同直径大小的出射激

光束。不同放大倍率下的扩束结果如图 18 所示,实验结果图 18 中,黄色虚线圆圈为扩束比分别为 3X, 4X, 4.5X, 5X, 6X 的理论出射光束光斑大小。实验表明,文中设计的扩束镜满足激光扩束的基本性能。

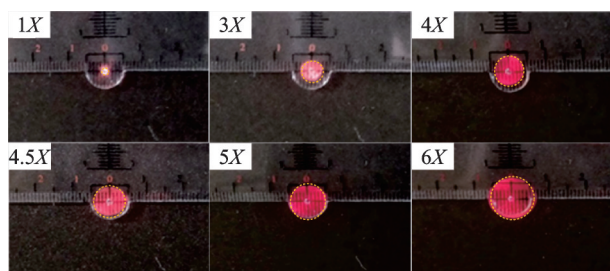


图18 扩束实验结果

Fig.18 The results of beam expansion experiment

由于实验设备的限制,只能以简单的方式测量其光斑大小,后续还将对该扩束镜进行像差分析。

4 结束语

根据准直扩束光学原理,笔者设计加工了一套连续变倍激光扩束镜,以单一中空旋转行波超声电机作为驱动源,实现变倍、补偿镜组的同时移动。基于激光扩束镜的工作原理,对扩束镜的主要机械结构进行了设计,并搭建了实验平台,对该扩束镜样机的性能进行了测试。实验结果表明,该样机瞬态性能良好,启动和关断响应时间均在0.05 s以内,定位误差小于0.01 mm,光学扩束效果良好,以超声电机作为扩束镜的驱动元件能满足扩束镜性能的基本需求。

参 考 文 献

- [1] 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):274-279.
WANG Peifang, XIANG Yang, GAO Jian, et al. Design of collimating and beam expanding laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 274-279. (in Chinese)
- [2] 刘涣宝,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,2010,33(4):43-45.
LIU Huanbao, AN Zhiyong, GAO Yuhang, et al. System design of a varifocal beam expander[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2010, 33(4): 43-45. (in Chinese)
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] 李颖奎,齐冀,张洁,等. 基于液晶空间光调制器的变倍率激光扩束技术研究[J]. 液晶与显示,2018,33(9):764-771.
LI Yingkui, QI Ji, ZHANG Jie, et al. Laser beam expanding technology based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2018, 33(9): 764-771. (in Chinese)
- [5] 赵鑫. 高倍率激光扩束望远镜的光学设计[J]. 通讯世界,2015(21):233-234.
ZHAO Xin. Optical design of high power laser beam expanding telescope[J]. Telecom World, 2015(21): 233-234. (in Chinese)
- [6] 赵娜,刘群华. 激光扩束望远镜的光学变焦设计[J]. 科技信息,2009(11):93-94.
ZHAO Na, LIU Qunhua. Optical zoom design of laser beam expanding telescope[J]. Science & Technology Information, 2009(11): 93-94. (in Chinese)
- [7] 侯振岩. 20倍变焦镜头结构设计[D]. 长春:长春理工大学,2012.
- [8] 陈维山,赵学涛,刘军考,等. 压电超声波马达发展现状及研究方向[J]. 电机与控制学报,2006,10(5):498-502.
CHEN Weishan, ZHAO Xuetao, LIU Junkao, et al. A survey and current research of ultrasonic motor[J]. Electric Machines and Control, 2006, 10(5): 498-502. (in Chinese)
- [9] 周铁英,陈宇,鹿存跃,等. 螺母型超声电机驱动的集成透镜调焦系统[J]. 中国科学(E辑),2009,39(10):1650-1654.
ZHOU Tiewing, CHEN Yu, LU Cunyue, et al. Integrated lens auto-focus system driven by a nut-type ultrasonic motor USM[J]. Science in China(Series E), 2009, 39(10): 1650-1654. (in Chinese)
- [10] WU J, MIZUNO Y. Ultrasonic motors with polymer-based vibrators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(12): 2169-2177.
- [11] 黄耀林,王敏,寇远凤. 一种激光连续变倍准直扩束系统的设计[J]. 光学仪器,2018,40(2):38-43.
HUANG Yaolin, WANG Min, KOU Yuanfeng. Design of continuously variable collimating and beam expanding system for lasing[J]. Optical Instruments, 2018, 40(2): 38-43. (in Chinese)
- [12] 于陶然,王超,唐晓军,等. 基于ZEMAX的二维变焦扩束光学系统设计[J]. 激光与红外,2016,46(6):747-751.
YU Taoran, WANG Chao, TANG Xiaojun, et al. Design of two-dimensional zoom beam expander optical system based on ZEMAX[J]. Laser and Infrared, 2016, 46(6): 747-751. (in Chinese)
- [13] MIKŠ A, NOVÁK P. Paraxial properties of three-

- element zoom systems for laser beam expanders [J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21535-21540.
- [14] DUERR F, THIENPONT H. Analytic design of a zoom XY-beam expander with freeform optical surfaces [J]. Optics Express, 2015, 23(23): 30438-30447.
- [15] 单娟, 张鹏, 付玉虎. 激光变焦扩束光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(4): 72-76.
SHAN Juan, ZHANG Peng, FU Yuhu. Design of optical zooming system used for collimation laser beams[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2013, 11(4): 72-76. (in Chinese)
- [16] 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): 7-11.
KONG Xianglei, HAO Peiming. Optical design of vari-focal beam expanding system [J]. Journal of Applied Optics, 2001, 22(5): 7-11. (in Chinese)
- [17] 杨海波, 王柏林, 张大有, 等. 一种变倍扩束镜的设计[J]. 光电技术应用, 2007, 22(1): 8-11.
YANG Haibo, WANG Bailin, ZHANG Dayou, et al. Design of afocal zoom collimating expander[J]. Electro-Optic Technology Application, 2007, 22(1): 8-11. (in Chinese)
- [18] GAO H, FU R, ZHUO R. Novel high magnification zoom laser beam expander [J]. Optoelectronics Letters, 2006, 2(6): 436-438.
- [19] 丁亚林, 田海英, 王家琪. 空间遥感相机调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2004, 9(1): 35-37.
DING Yalin, TIAN Haiying, WANG Jiaqi. Design on the focusing mechanism of space remote-sensing camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 9(1): 35-37. (in Chinese)
- [20] 李永刚, 张葆, 丁金伟. 红外连续变焦镜头的结构设计[J]. 长春理工大学学报, 2009, 32(1): 60-63.
LI Yonggang, ZHANG Bao, DING Jinwei. Mechanism design of continuous infrared zoom lens[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2009, 32(1): 60-63. (in Chinese)
- [21] 于永芳, 邢满堂. 高倍率变焦镜头凸轮曲线的精度分析与整调[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1989, 12(3): 67-72.
YU Yongfang, XING Mantang. Accuracy analysis and adjustment of cam curve for high-magnification zoom lens [J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1989, 12(3): 67-72. (in Chinese)
- [22] 廖胜, 沈忙作. 连续变焦望远镜导向机构的设计与研究[J]. 光电工程, 1999, 26: 53-58.
LIAO Sheng, SHEN Mangzuo. Design and study on guide mechanism for continuous zoom telescope [J]. Opto-Electronic Engineering, 1999, 26: 53-58. (in Chinese)
- [23] 夏长亮, 郑尧, 史婷娜, 等. 行波接触型超声波电机定子振动有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 25-28.
XIA Changliang, ZHENG Yao, SHI Tingna, et al. FEM analysis on stator vibration of traveling wave type contact ultrasonic motor [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2001, 21(2): 25-28. (in Chinese)
- [24] WU J, MIZUNO Y, NAKAMURA K. Structural parameter study on polymer-based ultrasonic motor [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(11): 1-10.
- [25] 胡敏强, 王心坚, 金龙, 等. 行波型超声波电机瞬态特性的测试及分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 120-125.
HU Minqiang, WANG Xinjian, JIN Long, et al. Measurement and analysis on transient response of traveling-wave ultrasonic motor [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(23): 120-125. (in Chinese)
- [26] JYH S, WEI A. Compact beam expander based on planar structure to avoid inner focus [J]. Optical Review, 2016, 23(5): 842-847.



第一作者简介:潘松,男,1978年10月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为压电作动器和超声电机的驱动控制技术。曾发表《超声电机直驱的电动物镜控制方法》(《振动、测试与诊断》2016年第36卷第4期)等论文。
E-mail: pansong@nuaa.edu.cn