

# 光学学报

## 方位传递系统中透镜参数对偏振传输的影响分析

杨志勇, 李顺\*, 罗李娜, 蔡伟, 张志伟

火箭军工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025

**摘要** 在基于保偏光纤的非通视方位传递系统中, 针对经保偏光纤传输后出射光束直径太小的问题, 可以引入扩束系统进行解决。透镜对偏振传输影响的研究是引入扩束系统的关键, 但相关研究主要集中在对入射光不同偏振态单一因素的讨论。因此, 以伽利略扩束系统为例, 详细分析了透镜中偏振传输的过程, 推导了含透镜参数的偏转角公式, 仿真了透镜参数对偏转角的影响, 最后验证了理论与实验结果的一致性。结果表明: 透镜参数对偏振传输的影响使偏振方位角发生偏转, 其中曲率半径与偏转角成反比关系; 中心厚度与偏转角成线性关系; 折射率和光斑半径与偏转角均成平方关系。该研究结果对在基于保偏光纤的非通视方位传递系统中引入扩束系统具有一定的指导意义。

**关键词** 线偏振光; 透镜; 扩束系统; 方位传递; 偏转角

**中图分类号** O436.3

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS230817

### 1 引言

在基于保偏光纤的非通视方位传递系统<sup>[1-2]</sup>使用过程中, 针对经光纤传输后出射光束直径太小, 导致光纤输出端与光电转换接收孔之间必须严格对准的问题, 可以引入扩束系统进行解决, 使系统在非对准状态下实现方位的传递。该系统在空间站航天器对接、隧道工程及高精度仪器测量等诸多领域有广阔的应用前景。

经典的折射式扩束系统由多块透镜组成, 例如有开普勒系统和伽利略系统<sup>[3]</sup>。对透镜的研究是扩束系统研究的基础。Chipman<sup>[4-5]</sup>引入偏振像差函数来表征仪器偏振, 即与光学系统相关的偏振。陈卫斌等<sup>[6-10]</sup>分析了透镜对偏振像差的影响, 提出了描述偏振像差、测量透镜波前像差和校正偏振像差的方法。在透镜对偏振光影响的计算方面, Chipman<sup>[11]</sup>基于傍轴光线轨迹, 给出了折射系统偏振像差系数的计算方法。沈学举等<sup>[12-13]</sup>利用光线追迹方法, 得出了通过透镜之后偏振光偏振度会发生变化的结论, 并研究了不同入射发散角的偏振光通过透镜后偏振度的分布变化规律。此外, 原晶等<sup>[14-18]</sup>验证了线偏振光通过透镜之后, 偏振态变化主要体现在偏振方位角的偏转, 并推导了偏振光经过单透镜前后偏振角度差的一般表达式。Kukushkin等<sup>[19]</sup>发现了透镜的形状和多元件透镜对偏振光双衰减大小有显著的影响。经总结分析, 将透镜对线偏振光的影响因素分为 3 类: 入射光本身的偏振

态; 透镜分界面折射作用; 透镜本身的材料性质。然而, 对透镜的研究都集中于第一类, 即透镜对不同偏振态入射光的影响, 缺少对透镜其他两类参数的分析, 以及对透镜组构成的扩束系统的全面研究。而透镜对偏振传输影响的研究是引入扩束系统的关键, 因此分析透镜对偏振传输的影响有着重要意义。

针对上述问题, 本文基于菲涅耳方程和琼斯矩阵理论, 以伽利略扩束系统为例, 首先推导了偏振方位角变化的表达式, 然后通过仿真讨论了扩束系统中透镜参数与偏振方位角之间的规律, 最后利用实验充分分析了透镜参数对偏振传输的影响。

### 2 基本原理

图 1 为基于保偏光纤的非通视方位传递系统, 其中上、下仪器之间利用保偏光纤传输, 在磁光调制之后引入扩束系统。上仪器中激光器发出的光束通过起偏系统 (PSG) 变成线偏振光, 携带了方位信息的线偏振光耦合进保偏光纤, 传输至下仪器的磁光调制系统中。经调制器, 在调制信号驱动产生的交变磁场作用下, 偏振光得到调制。调制后的偏振光经扩束系统完成光束的扩展。之后光依次经过检偏系统 (PSA)、光电转换模块、信号检测处理模块等, 提取出与方位角对应的电信号, 实现方位信息的传递。非通视方位传递系统中, 偏振光在扩束系统中传输, 所以透镜对偏振传输的影响决定了方位传递的准确性。因此分析透镜对偏振传输的影响有着重要意义。

收稿日期: 2023-04-14; 修回日期: 2023-05-16; 录用日期: 2023-05-24; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金 (61505254)

通信作者: \*lshun1675@163.com

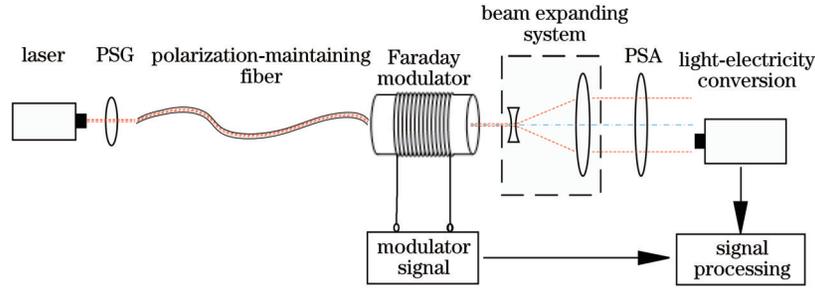


图 1 基于保偏光纤的非视距方位传递系统原理

Fig. 1 Schematic of non-line-of-sight azimuth transmission system based on polarization-maintaining fiber

对透镜分析时,利用琼斯矢量表示偏振光,入射光和折射光的琼斯矢量关系通过琼斯矩阵计算。从菲涅耳方程可知,透镜分界面上光束折射的琼斯矩阵可以用振幅透射比表示<sup>[20]</sup>。利用几何光线追迹分析法计算振幅透射比。

线偏振光通过伽利略扩束系统的三维光路和几何光路分别如图 2 和图 3 所示。平行入射光经双凹透镜后光斑直径得到扩展,再经双凸透镜后光束得到准直,成为平行出射光,便完成了光束的扩展。其中  $S_1$  和  $S_2$  分别为双凹透镜的前和后球面,  $S_3$  和  $S_4$  为双凸透镜的前和后球面,  $r_1$  和  $r_2$  为凹透镜的曲率半径,  $r_3$  和  $r_4$  为凸透镜的曲率半径,  $d_1$  为凹透镜的中心厚度,  $d_2$  为凸透镜的中心厚度,  $h_1$  为扩束系统前入射光的光斑半径,  $h_4$  扩束系统后出射光的光斑半径,  $i_1, i_3, i_5$  和  $i_7$  分别为扩束系统中的入射角,  $i_2, i_4, i_6$  和  $i_8$  则为扩束系统中的折射角,  $n$  为透镜的折射率,  $f_1$  和  $f_2$  分别为凹透镜和凸透镜的焦距。

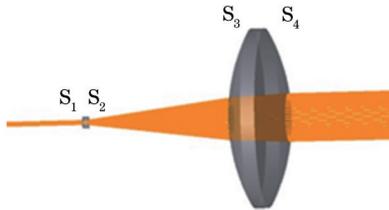


图 2 扩束系统的三维光路

Fig. 2 3D optical path of beam expanding system

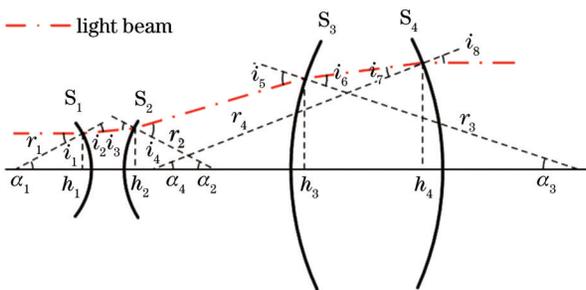


图 3 扩束系统的几何光路

Fig. 3 Geometric optical path of beam expanding system

根据光线追迹法,入射光依次通过伽利略扩束系统中球面  $S_1, S_2, S_3$  和  $S_4$  发生折射。光束在透镜内部和短距离的空气中传输,传输空间均可以看作各向同

性的物质,对偏振特性不产生影响。光束完成扩束后,入射光和出射光的琼斯矢量关系为

$$\begin{bmatrix} E_{op} \\ E_{os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{p4}t_{p3}t_{p2}t_{p1} & 0 \\ 0 & t_{s4}t_{s3}t_{s2}t_{s1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $E_{ip}$  和  $E_{is}$  分别表示入射光琼斯矢量的平行和垂直分量的振幅;  $E_{op}$  和  $E_{os}$  分别表示出射光琼斯矢量的平行和垂直分量的振幅;  $t$  为振幅透射比,  $t_{px}$  为振幅透射比平行分量,  $t_{sx}$  为振幅透射比垂直分量,  $x$  取 1、2、3、4, 分别对应透镜组中 4 个透镜球面的振幅透射系数。

当入射光的偏振方位角为  $\alpha_i$  时,琼斯矢量表示为  $[E_{ip} \ E_{is}]^T = [\cos \alpha_i \ \sin \alpha_i]^T$ , 则出射光的琼斯矢量为

$$\begin{bmatrix} E_{op} \\ E_{os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{p4}t_{p3}t_{p2}t_{p1} \cos \alpha_i \\ t_{s4}t_{s3}t_{s2}t_{s1} \sin \alpha_i \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由式(2)可得出射光的偏振方位角  $\alpha_o$  为

$$\tan \alpha_o = \frac{E_{os}}{E_{op}}. \quad (3)$$

将出射光与入射光偏振方位角之间的夹角称为偏转角  $\Delta\beta$ , 偏转角公式为

$$\Delta\beta = \alpha_o - \alpha_i = \arctan\left(\frac{t_{s4}t_{s3}t_{s2}t_{s1} \sin \alpha_i}{t_{p4}t_{p3}t_{p2}t_{p1} \cos \alpha_i}\right) - \alpha_i. \quad (4)$$

令  $\rho$  为扩束系统的总振幅透射系数, 当入射光偏振方位角  $\alpha_i$  确定时, 出射光偏振方位角发生变化的主要因素是总振幅透射系数  $\rho$  的不同:

$$\rho = \frac{t_{s4}t_{s3}t_{s2}t_{s1}}{t_{p4}t_{p3}t_{p2}t_{p1}}. \quad (5)$$

设每个面的振幅透射系数为  $\rho_x$ , 由菲涅耳方程可知

$$\rho_x = \frac{t_{sx}}{t_{px}} = \cos(i_a - i_b), \quad (6)$$

式中:  $i_a=1, 3, 5, 7$  为入射角,  $i_b=2, 4, 6, 8$  为折射角。对式(6)进行函数变换和泰勒展开, 略去高阶项, 得

$$\rho_x = 1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot i_w^2, \quad (7)$$

式中:  $i_w=1, 4, 5, 8$  为入射角或折射角。扩束系统中透镜焦距的计算公式为

$$f_1 = \frac{1}{(n-1) \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{(n-1)d_1}{nr_1r_2} \right]}. \quad (8)$$

根据光线追迹法,由图 3 的扩束系统光路,可得几何关系,其中角度关系的三角函数取值均比较小,所以对各项中的三角函数进行泰勒展开并忽略高次项,得

$$\begin{cases} h_4 = \frac{f_2}{f_1} \cdot h_1 \\ i_1 = \frac{h_1}{r_1} \\ i_2 = \frac{h_1}{n \cdot r_1} \\ i_3 = \frac{h_1}{n \cdot f_1} + \frac{h_1}{n \cdot r_2} \\ i_4 = \frac{h_1}{f_1} + \frac{h_1}{r_2} \\ i_5 = \frac{h_4}{f_2} + \frac{h_4}{r_3} \\ i_6 = \frac{h_4}{n \cdot f_2} + \frac{h_4}{n \cdot r_3} \\ i_7 = \frac{h_4}{n \cdot r_4} \\ i_8 = \frac{h_4}{r_4} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} i_5 = \frac{h_4}{f_2} + \frac{h_4}{r_3} \\ i_6 = \frac{h_4}{n \cdot f_2} + \frac{h_4}{n \cdot r_3} \\ i_7 = \frac{h_4}{n \cdot r_4} \\ i_8 = \frac{h_4}{r_4} \end{cases} \quad (10)$$

将式(9)和式(10)代入式(7)中,由菲涅耳方程可得每一透镜球面的振幅透射系数:

$$\begin{cases} \rho_1 = \frac{t_{s1}}{t_{p1}} = 1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot i_1^2 = \\ 1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot \left(\frac{h_1}{r_1}\right)^2 \\ \rho_2 = \frac{t_{s2}}{t_{p2}} = 1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot i_4^2 = \\ 1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot \left(\frac{h_1}{r_2} + \frac{h_1}{f_1}\right)^2 \\ \rho_3 = \frac{t_{s3}}{t_{p3}} = 1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot i_5^2 = \\ 1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot \left(\frac{h_4}{r_3} + \frac{h_4}{f_2}\right)^2 \\ \rho_4 = \frac{t_{s4}}{t_{p4}} = 1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot i_8^2 = \\ 1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot \left(\frac{h_4}{r_4}\right)^2 \end{cases} \quad (11)$$

计算得出通过扩束系统的总振幅透射系数为

$$\rho = \rho_1 \rho_2 \rho_3 \rho_4 = \left[1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot \left(\frac{h_1}{r_1}\right)^2\right] \cdot \left[1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot \left(\frac{h_1}{r_2} + \frac{h_1}{f_1}\right)^2\right] \cdot \left[1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot \left(\frac{h_4}{r_3} + \frac{h_4}{f_2}\right)^2\right] \cdot \left[1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot \left(\frac{h_4}{r_4}\right)^2\right] \quad (12)$$

将式(12)总振幅透射系数代入式(4)中,则整个扩束系统的偏转角公式为

$$\Delta\beta = \arctan\left(\frac{t_{s4} t_{s3} t_{s2} t_{s1}}{t_{p4} t_{p3} t_{p2} t_{p1}} \cdot \tan \alpha_i\right) - \alpha_i = \arctan(\rho \cdot \tan \alpha_i) - \alpha_i \quad (13)$$

由式(13)可知,入射光为线偏振光,透镜对偏振传输的影响主要是透镜中振幅透射系数变化导致偏振方位角发生变化。

通过理论分析及公式推导,可知透镜参数对偏振传

输有影响,为了探究透镜中各参数对偏振传输的影响规律,利用MATLAB软件对推导的式(13)进行仿真。

### 3 仿真分析

将透镜对偏振光产生的影响因素分为 3 类,如图 4 所示:入射光本身偏振态,主要为入射光的偏振方位角  $\alpha_i$ ;透镜分界面折射作用,主要为折射角  $i$ ,其他影响因素有透镜曲率半径  $r$ 、入射光半径  $h_1$  和透镜中心厚度  $d$ ;透镜本身的材料性质,主要为透镜的折射率  $n$ 。

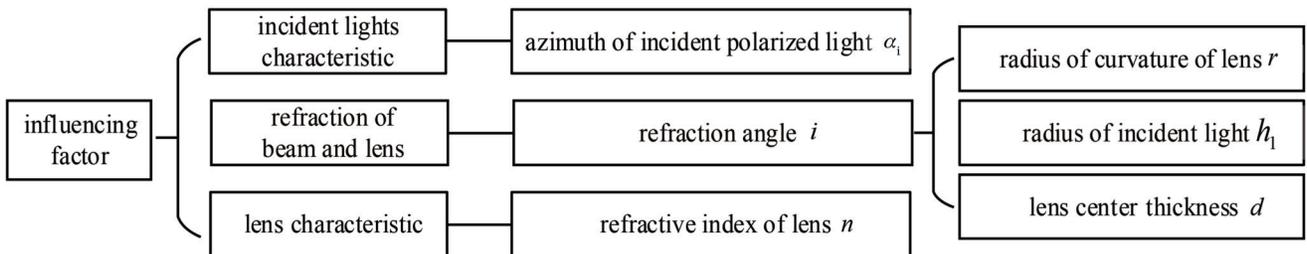


图 4 扩束系统影响因素分类

Fig. 4 Classification of influencing factors of beam expansion system

### 3.1 透镜曲率半径影响分析

图 5 为透镜曲率半径的影响分析。参数设置:凹透镜中心厚度  $d_1$  为 1 mm,凸透镜中心厚度  $d_2$  为

31.5 mm,透镜折射率  $n$  为 1.5168,入射光半径  $h_1$  为 0.5 mm,凹透镜的曲率半径为  $r_1 = r_2 = r_{cave}$ ,凸透镜曲率半径为  $r_3 = r_4 = r_{vex}$ 。将参数代入式(13)中,得

$$\Delta\beta = \arctan \left\{ \left( 1 - \frac{0.015}{r_{cave}^2} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0.125}{r_{cave}} + \frac{0.021}{r_{cave}^2} + \frac{0.125r_{cave}r_{vex} + 0.021r_{vex}}{1.034r_{cave}^2r_{vex} - 5.547r_{cave}^2} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0.246}{r_{vex}} + \frac{0.021}{r_{vex}^2} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0.125r_{cave}r_{vex} + 0.021r_{vex}}{1.034r_{cave}^2r_{vex} - 5.547r_{cave}^2} \right)^2 \right] \right\} - \frac{\pi}{4} \quad (14)$$

由图 5 可知:伽利略扩束系统中,透镜曲率半径的不同对偏转角的影响不同,且凹透镜曲率半径对偏转角的影响较大,凸透镜曲率半径对偏转角影响较小;偏转角与凹透镜曲率半径成反比例关系,凹透镜的曲率半径越大,对偏转角的影响越小,并且在曲率半径为 0~10 mm 时偏转角变化较大,在大于 10 mm 以后偏转角变化缓慢减小并趋近于 0。

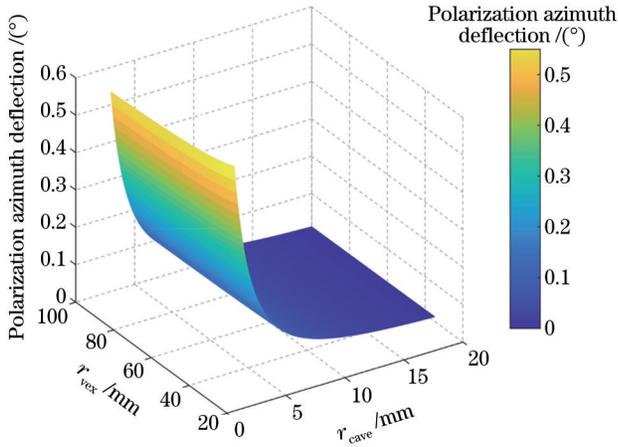


图 5 透镜组曲率半径影响  
Fig. 5 Effect of radius of curvature of lens

### 3.2 入射光半径影响分析

图 6 为入射光半径的影响分析。参数设置:凹透镜曲率半径  $r_1 = r_2 = 4.3$  mm,凹透镜中心厚度  $d_1$  为 1 mm,凸透镜曲率半径  $r_3 = r_4 = 98.5$  mm,凸透镜中心厚度  $d_2$  为 31.5 mm,透镜折射率  $n$  为 1.5168,入射光半径为  $h_1 = h$ 。将参数代入式(13)中,得

$$\Delta\beta = \arctan \left( 1 + 2.388 \cdot 10^{-9} \cdot h^8 + 4.090 \cdot 10^{-4} \cdot h^4 - 1.728 \cdot 10^{-6} \cdot h^6 - 0.035 \cdot h^2 \right) - \frac{\pi}{4} \quad (15)$$

由图 6(a)可知:入射光半径不同,透镜对偏转角的影响也不同,偏转角与入射光半径成平方关系,随着入射光半径的增大,偏转角也增大;入射光半径趋近于 0 时,偏转角也趋近于 0。由图 6(b)可知,入射光半径不同情况下,偏转角随凹透镜曲率半径变化的曲线趋势一致,入射光半径越小曲线越平,入射光半径趋近于 0 时,曲线趋近于直线。

### 3.3 透镜中心厚度影响分析

图 7 为透镜中心厚度的影响分析。参数设置:凹透镜曲率半径  $r_1 = r_2 = 4.3$  mm,凸透镜曲率半径  $r_3 = r_4 = 98.5$  mm,透镜折射率  $n$  为 1.5168,入射光半径  $h_1$  为 0.5 mm,凹透镜中心厚度为  $d_1 = d_{cave}$ ,凸透镜中心厚度为  $d_2 = d_{vex}$ 。将参数代入式(13)中,得

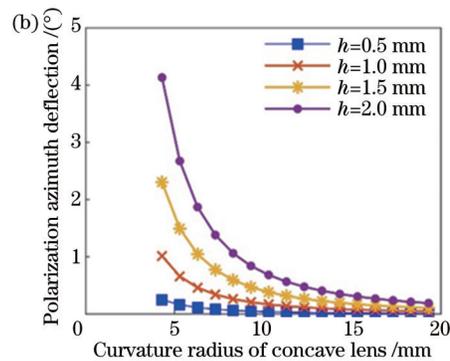
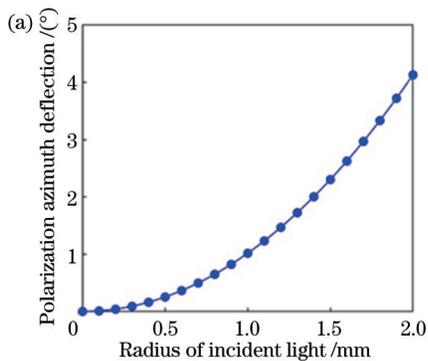


图 6 不同入射光半径的影响。(a)偏转角随光斑半径的变化;(b)偏转角随凹透镜曲率半径的变化

Fig. 6 Effects of incident spot radius. (a) Variation of deflection angle with spot radius; (b) variation of deflection angle with radius of curvature of concave lens

$$\Delta\beta = \arctan \left\{ 0.999 \cdot \left[ 1 - \left( 1.840 \cdot 10^{-5} d_{cave} - \frac{3.81 \cdot 10^{-6} d_{cave} + 9.14 \cdot 10^{-5}}{1.815 \cdot 10^{-5} d_{vex} - 0.0105} + 9.14 \cdot 10^{-3} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1.223 \cdot 10^{-5} d_{cave} + 2.935 \cdot 10^{-4}}{1.181 \cdot 10^{-5} d_{vex} - 0.010} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 - (0.001 d_{cave} + 0.057)^2 \right] \right\} - \frac{\pi}{4} \quad (16)$$

由图 7 可知:伽利略扩束系统中透镜组中心厚度不同,系统对偏转角的影响不同;凹透镜的中心厚度对偏转角影响较大,凸透镜的中心厚度对偏转角影响较小;且凹透镜中心厚度与偏转角成线性关系,中心厚度越大偏转角越大。

### 3.4 透镜折射率影响分析

图 8 为透镜折射率的影响分析。其他参数设置:凹透镜曲率半径  $r_1 = r_2 = 4.3 \text{ mm}$ ,凹透镜中心厚度  $d_1$  为  $1 \text{ mm}$ ,凸透镜曲率半径  $r_3 = r_4 = 98.5 \text{ mm}$ ,凸透镜中心厚度  $d_2$  为  $31.5 \text{ mm}$ ,入射光半径  $h_1$  为  $0.5 \text{ mm}$ ,透镜折射率为  $n$ 。将参数代入式(13)中,得

$$\Delta\beta = \arctan \left\{ \left[ 1 - 6.760 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(n-1)^2}{n^2} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot \left[ \frac{0.027(n-1)^2}{n} + 0.233n - 0.1171 \right]^2 \right] \cdot \left[ 1 - \frac{(n-1)^2}{2n^2} \cdot \left( \frac{2.745 \cdot 10^{-4}}{0.017n + 0.003} - \frac{0.003n}{0.003 + 0.017n} - 0.2596n + \frac{0.027}{n} - 0.287 \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 - \frac{(n-1)^2}{n^2} \cdot \left( \frac{2.583 \cdot 10^{-4} + 2.491 \cdot 10^{-3} n}{0.017n + 0.003} \right)^2 \right] \right\} - \frac{\pi}{4} \quad (17)$$

由图 8(a)可知:透镜的几何折射率不同,对偏转角的影响也不同;偏转角与折射率成平方关系,且随着折射率的增大,偏转角也变大;随着折射率的增大,在球面上光束的折射角也增大,导致偏转角变大,当折射率趋近于 1 时,偏转角趋近于 0。由图 8(b)可知,折射率不同情况下,偏转角随凹透镜曲率半径变化的曲线趋势一致,折射率越小曲线越平,折射率趋近于 1 时,曲线趋近于直线。

## 4 实验验证

线偏振光通过扩束系统后,分析透镜参数的变化对偏振传输的影响,通过改变扩束系统中透镜的曲率半径、中心厚度、入射光半径参数,探究线偏振光通过扩束系统后偏转角的变化。

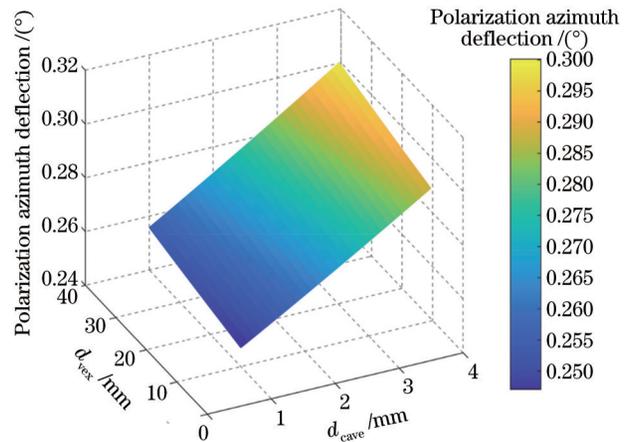


图 7 透镜组中心厚度影响  
Fig. 7 Effect of lens center thickness

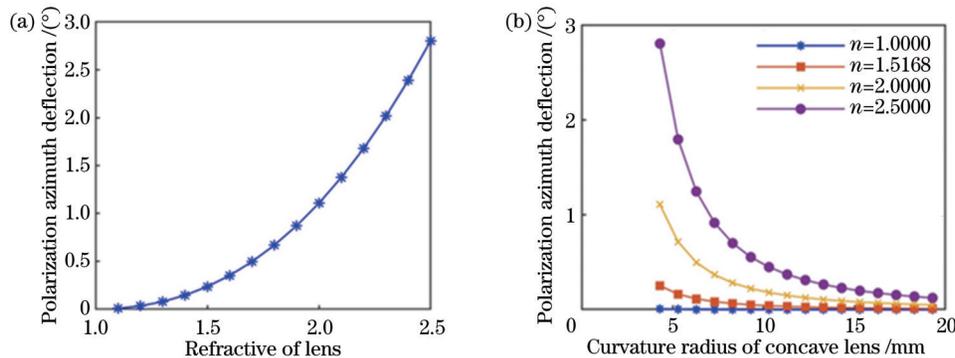


图 8 不同折射率的影响。(a)偏转角随折射率的变化;(b)偏转角随凹透镜曲率半径的变化  
Fig. 8 Effects of refractive index of the lens. (a) Variation of deflection angle with refractive index; (b) variation of deflection angle with radius of curvature of concave lens

### 4.1 实验系统搭建

实验系统如图 9 所示,实验系统包括:波长为 589.3 nm 的激光器、起偏系统(PSG)、扩束系统、检偏系统(PSA,内含两块透光轴相互垂直的偏振片 A 和

B)、光功率计(PPS)及不同参数的透镜库。

### 4.2 实验步骤

透镜参数变化对偏振传输影响的实验原理如图 10 所示。

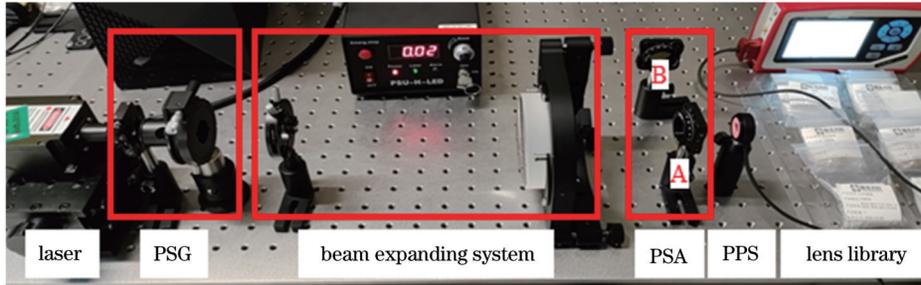


图 9 扩束参数影响的实验系统

Fig. 9 Test system of beam expansion parameter influence

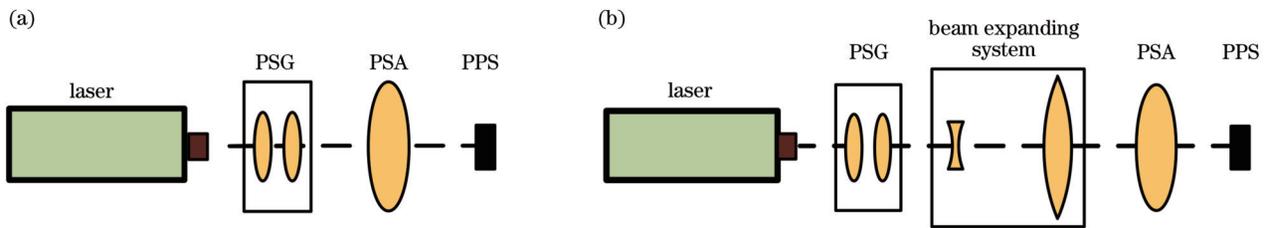


图 10 扩束系统实验原理。(a)入射光测量;(b)出射光测量

Fig. 10 Experimental principle of beam expansion system. (a) Incident light measurement; (b) outgoing light measurement

1)首先如图 10(a)所示,激光器发出的光束经起偏系统变为线偏振光。利用光功率计测量线偏振光通过检偏系统中偏振片 A 之后的光强,记为  $I_x$ 。

2)将检偏系统中偏振片 A 更换为透光轴与之垂直的偏振片 B,利用光功率计再测量一次光强,记为  $I_y$ 。

3)此时加入扩束系统,如图 10(b)所示,类似步骤 1)和步骤 2),利用光功率计测量光束通过检偏系统偏振片 A 之后的光强,记为  $I_{ox}$ ,将偏振片 A 更换为偏振片 B,再次测量通过检偏系统之后的光强,记为  $I_{oy}$ 。

4)从透镜库中更换扩束系统的透镜,重复步骤 3),测量光束通过不同参数透镜组成的扩束系统之后的光强。

### 4.3 实验数据及分析

利用马吕斯定律计算实验中利用光功率计得出的光强数据  $I_x$  和  $I_y$ ,得到入射光的相对方位角  $\alpha_r$ :

$$\alpha_r = \arctan \sqrt{\frac{I_y}{I_x}} \quad (18)$$

利用马吕斯定律计算  $I_{ox}$  和  $I_{oy}$ ,得到不同参数透镜对应出射光的相对方位角  $\alpha_{or}$ :

$$\alpha_{or} = \arctan \sqrt{\frac{I_{oy}}{I_{ox}}}, \quad (19)$$

其中,相对方位角为线偏振光方位角与偏振片 A 透光轴的夹角,偏转角为出射光相对方位角减去入射线偏振光相对方位角的差值,将相对方位角  $\alpha_r$  和  $\alpha_{or}$  作差,

得到偏转角  $\Delta\beta$ 。实验中所有功率单位为 mW。

#### 4.3.1 透镜曲率半径影响分析

分析透镜曲率半径对偏转角的影响。参数设置:凹透镜中心厚度  $d_1$  为 1 mm,凸透镜中心厚度  $d_2$  为 31.5 mm,透镜折射率  $n$  为 1.5168,入射光半径  $h_1$  为 0.5 mm。利用不同曲率半径透镜组成扩束系统,测量扩束之后的光强。入射光为  $I_x = 183.303$  mW 和  $I_y = 15.563$  mW,相对方位角  $\alpha_r = 16.675^\circ$ 。实验数据如表 1 所示。

图 11 为仿真数据和表 1 中实验数据的对比。由图 11 可知:仿真结果和实验结果趋势吻合;凹透镜对偏转角的影响较大,凸透镜对偏转角影响较小。分析原因为当光束水平入射,凹透镜曲率半径越大,光束的入射角越小,所以偏转角也越小。当曲率半径趋近于无限大时,水平光束垂直分界面入射,所以偏转角趋近于 0;凸透镜则因为需要对扩展后的光斑进行准直,所以凸透镜的曲率半径都较大,由图 11 可知当曲率半径大于 10 mm 以后,曲率半径的变化对偏转角的影响较小,所以在伽利略扩束系统中,凸透镜对偏转角影响较小。

#### 4.3.2 入射光半径影响分析

分析入射光半径对偏转角的影响。参数设置:凹透镜中心厚度  $d_1$  为 1 mm,凸透镜曲率半径  $r_3 = r_4 = 98.5$  mm,凸透镜中心厚度  $d_2$  为 31.5 mm,透镜折射率

表 1 透镜曲率半径影响的实验数据

Table 1 Test data on the effect of curvature radius of lens

$r_{cave} /$ mm	$I_{ox} / \text{mW}$				$I_{oy} / \text{mW}$			
	$r_{vex}=98.5 \text{ mm}$	$r_{vex}=61.39 \text{ mm}$	$r_{vex}=48.59 \text{ mm}$	$r_{vex}=38.85 \text{ mm}$	$r_{vex}=98.5 \text{ mm}$	$r_{vex}=61.39 \text{ mm}$	$r_{vex}=48.59 \text{ mm}$	$r_{vex}=38.85 \text{ mm}$
3.37	23.659	26.080	29.222	31.427	2.109	2.328	2.611	2.812
4.3	28.198	29.723	30.834	32.127	2.468	2.605	2.705	2.820
6.67	32.856	33.498	35.089	36.418	2.821	2.879	3.016	3.135
10.5	35.347	38.131	40.658	41.046	3.016	3.256	3.472	3.504
12.56	38.455	40.216	42.789	43.499	3.274	3.424	3.645	3.705
16.69	40.315	43.898	45.884	46.270	3.428	3.733	3.901	3.936

$r_{cave} /$ mm	$\alpha_{or} / (^\circ)$				$\Delta\beta / (^\circ)$			
	$r_{vex}=98.5 \text{ mm}$	$r_{vex}=61.39 \text{ mm}$	$r_{vex}=48.59 \text{ mm}$	$r_{vex}=38.85 \text{ mm}$	$r_{vex}=98.5 \text{ mm}$	$r_{vex}=61.39 \text{ mm}$	$r_{vex}=48.59 \text{ mm}$	$r_{vex}=38.85 \text{ mm}$
3.37	17.085	17.096	17.103	17.116	0.410	0.421	0.428	0.441
4.3	16.928	16.942	16.947	16.953	0.253	0.267	0.272	0.278
6.67	16.770	16.776	16.777	16.790	0.095	0.101	0.102	0.115
10.5	16.715	16.723	16.724	16.721	0.040	0.048	0.049	0.046
12.56	16.697	16.699	16.702	16.702	0.022	0.024	0.027	0.027
16.69	16.686	16.687	16.686	16.690	0.011	0.012	0.011	0.015

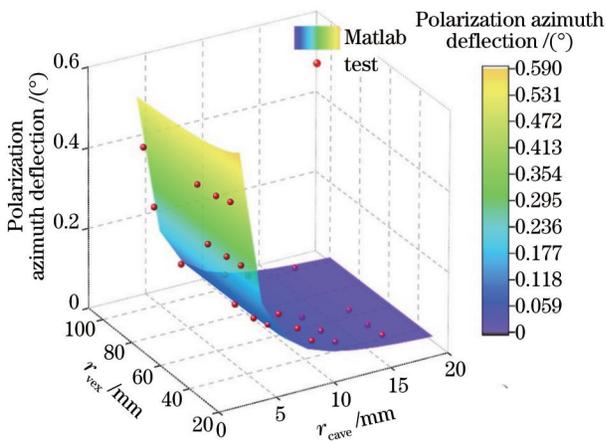


图 11 透镜曲率半径影响实验结果

Fig. 11 Test result on the effect of curvature radius of lens

$n$  为 1.5168。入射光为  $I_x=183.303 \text{ mW}$  和  $I_y=15.563 \text{ mW}$ , 相对方位角  $\alpha_r=16.675^\circ$ 。通过光阑调节入射光半径, 实验数据如表 2 所示。

图 12 为仿真数据和表 2 中实验数据的对比。由图 12 可知: 仿真结果和实验结果趋势吻合, 通过原理分析, 可知入射光半径主要影响透镜球面  $S_1$  入射角的大小。因为当透镜曲率半径一定, 水平入射的入射光半径越小, 光束就越接近透镜中心轴线, 入射角越小偏转角也越小; 且入射光半径趋近于 0 时, 水平光束从轴线, 与分界面垂直入射, 所以偏转角趋近于 0。

### 4.3.3 透镜中心厚度影响分析

分析透镜中心厚度对偏转角的影响。参数设置: 凹透镜曲率半径  $r_1=r_2=4.3 \text{ mm}$ , 凸透镜曲率半径  $r_3=r_4=98.5 \text{ mm}$ , 透镜折射率  $n$  为 1.5168, 入射光半径  $h_1$  为 0.5 mm。入射光为  $I_x=183.303 \text{ mW}$  和  $I_y=$

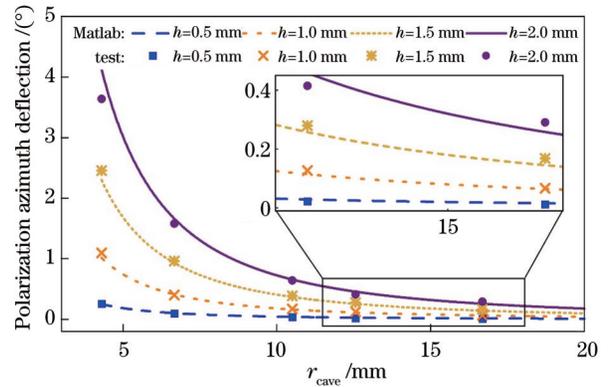


图 12 透镜入射光半径影响的实验结果

Fig. 12 Test result on the effect of lens incident light spot radius

15.563 mW, 相对方位角  $\alpha_r=16.675^\circ$ 。利用不同中心厚度的透镜组成扩束系统, 测量扩束之后的光强, 实验数据如表 3 所示。

图 13 为仿真数据和表 3 中实验数据的对比。由图 13 可知: 实验结果和仿真结果趋势吻合, 在伽利略扩束系统中可以看出凹透镜的中心厚度对偏转角影响较大, 凸透镜的中心厚度对偏转角影响较小。主要是因为光束通过凹透镜球面  $S_1$  后在透镜内部传输, 中心厚度越大, 光束在凹透镜球面  $S_2$  上的光点离光轴的距离越大, 入射角越大, 那么偏转角也越大; 而凸透镜曲率半径较大, 中心厚度变化虽也会导致球面  $S_4$  上光点位置的不同, 但光点位置变化引起的入射角变化较小, 对偏转角的影响也较小。

## 5 结 论

以菲涅耳方程和琼斯矩阵理论为基础, 分析了透镜参数对偏振传输的影响, 影响主要体现在偏振光的

表 2 入射光半径影响的实验数据  
Table 2 Test data on the effect of incident light spot radius

$r_{cave} / \text{mm}$	$I_{ox} / \text{mW}$				$I_{oy} / \text{mW}$			
	$h_1=0.5 \text{ mm}$	$h_1=1 \text{ mm}$	$h_1=1.5 \text{ mm}$	$h_1=2 \text{ mm}$	$h_1=0.5 \text{ mm}$	$h_1=1 \text{ mm}$	$h_1=1.5 \text{ mm}$	$h_1=2 \text{ mm}$
4.3	28.198	28.213	28.283	28.301	2.468	2.723	3.166	3.577
6.67	32.856	32.916	33.143	37.138	2.821	2.932	3.150	3.783
10.5	35.347	35.504	35.786	41.379	3.016	3.078	3.183	3.790
12.56	38.455	38.950	40.125	43.486	3.274	3.358	3.522	3.879
16.69	40.315	42.899	43.456	45.765	3.428	3.672	3.765	4.023

$r_{cave} / \text{mm}$	$\alpha_{or} / (^\circ)$				$\Delta\beta / (^\circ)$			
	$h_1=0.5 \text{ mm}$	$h_1=1 \text{ mm}$	$h_1=1.5 \text{ mm}$	$h_1=2 \text{ mm}$	$h_1=0.5 \text{ mm}$	$h_1=1 \text{ mm}$	$h_1=1.5 \text{ mm}$	$h_1=2 \text{ mm}$
4.3	16.928	17.773	19.131	20.315	0.253	1.098	2.456	3.640
6.67	16.770	17.078	17.638	18.256	0.095	0.403	0.963	1.581
10.5	16.715	16.849	17.065	17.316	0.040	0.174	0.390	0.641
12.56	16.697	16.802	16.954	17.089	0.022	0.127	0.279	0.414
16.69	16.686	16.742	16.844	16.966	0.011	0.067	0.169	0.291

表 3 透镜中心厚度影响的实验数据  
Table 3 Test data on the effect of lens center thickness

$d_2 / \text{mm}$	$I_{ox} / \text{mW}$				$I_{oy} / \text{mW}$			
	$d_1=1 \text{ mm}$	$d_1=2 \text{ mm}$	$d_1=3 \text{ mm}$	$d_1=4 \text{ mm}$	$d_1=1 \text{ mm}$	$d_1=2 \text{ mm}$	$d_1=3 \text{ mm}$	$d_1=4 \text{ mm}$
13.59	28.793	28.660	28.536	28.356	2.518	2.511	2.503	2.490
16.85	28.668	28.577	28.367	28.271	2.508	2.504	2.489	2.484
20.4	28.421	28.370	28.226	28.072	2.487	2.487	2.478	2.467
31.52	28.198	28.176	28.205	27.967	2.468	2.471	2.476	2.461

$d_2 / \text{mm}$	$\alpha_{or} / (^\circ)$				$\Delta\beta / (^\circ)$			
	$d_1=1 \text{ mm}$	$d_1=2 \text{ mm}$	$d_1=3 \text{ mm}$	$d_1=4 \text{ mm}$	$d_1=1 \text{ mm}$	$d_1=2 \text{ mm}$	$d_1=3 \text{ mm}$	$d_1=4 \text{ mm}$
13.59	16.922	16.938	16.947	16.957	0.247	0.263	0.272	0.282
16.85	16.924	16.940	16.950	16.962	0.249	0.265	0.275	0.287
20.4	16.927	16.943	16.954	16.965	0.252	0.268	0.279	0.290
31.52	16.929	16.944	16.954	16.974	0.254	0.269	0.279	0.299

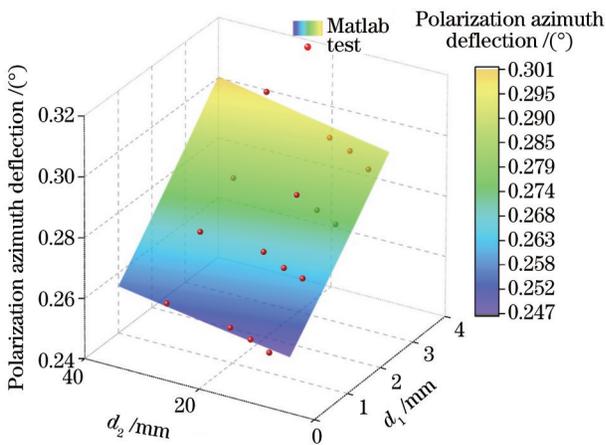


图 13 透镜中心厚度影响的实验结果

Fig. 13 Test result on the effect of lens center thickness

偏振方位角的变化。以伽利略扩束系统为例,利用光线追迹法分析扩束系统中光路的几何关系,推导了多参数的偏转角公式,仿真了曲率半径、中心厚度、光斑

半径和折射率参数对偏转角的影响,并分析说明了规律背后的原理。结果表明:曲率半径与偏转角成反比例关系,曲率半径越大偏转角越小,曲率半径趋于 $\infty$ ,偏转角趋近于0;中心厚度与偏转角为线性关系,随着中心厚度的增大偏转角增大;光斑半径与偏转角成平方关系,随着光斑半径的增大偏转角增大,光斑半径趋近于0时,偏转角也趋于0;折射率与偏转角成平方关系,随着折射率增大偏转角也增大,折射率趋于1时,偏转角趋于0。研究结果给基于保偏光纤的非通视方位传递系统中引入扩束系统提供了一定的参考。

参 考 文 献

[1] 蔡伟, 赵钟浩, 杨志勇, 等. 基于保偏光纤的非通视方位传递技术[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1512001.  
Cai W, Zhao Z H, Yang Z Y, et al. Non-line-of-sight azimuth transmission technology based on polarization-maintaining fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1512001.

[2] 杨志勇, 宋俊辰, 蔡伟, 等. 温度和电场作用下保偏光纤对方位传递的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2106002.

- Yang Z Y, Song J C, Cai W, et al. Influence of polarization-maintaining fibers on azimuth transmission under variable temperature and electric field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2106002.
- [3] 肖忠. 超声电机驱动的电动激光扩束镜研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.  
Xiao Z. Research on the electric laser beam expander driven by ultrasonic motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [4] Chipman R A. Polarization analysis of optical systems[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(2): 90-99.
- [5] Chipman R A. Polarization analysis of optical systems, II[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1166: 79-94.
- [6] 陈卫斌, 顾培夫, 郑臻荣. 投影光学系统中的偏振像差分析[J]. *光学学报*, 2005, 25(5): 696-700.  
Chen W B, Gu P F, Zheng Z R. Analysis of polarization aberration in projection system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(5): 696-700.
- [7] He W J, Fu Y G, Liu Z Y, et al. Three-dimensional polarization aberration functions in optical system based on three-dimensional polarization ray-tracing calculus[J]. *Optics Communications*, 2017, 387: 128-134.
- [8] Shen Y X, Chen B G, He C, et al. Polarization aberrations in high-numerical-aperture lens systems and their effects on vectorial-information sensing[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1932.
- [9] 贾文涛, 贺文俊, 吴凌昊, 等. 偏振激光雷达中望远系统的偏振像差校正[J]. *光学学报*, 2022, 42(2): 0226002.  
Jia W T, He W J, Wu L H, et al. Polarization aberration correction for telescopic system in polarization lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(2): 0226002.
- [10] 高锦瑞, 李大海, 赖恒, 等. 基于相位测量偏折术的透镜波前像差测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(2): 0212001.  
Gao J R, Li D H, Lai H, et al. Measurement of wavefront aberration of lens based on phase measuring deflectometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(2): 0212001.
- [11] Chipman R A. Polarization aberrations of lenses[J]. *Proceedings of SPIE*, 1986, 0554: 82-87.
- [12] 沈学举, 刘秉琦. 部分偏振光通过透镜时的偏振度分析[J]. *应用光学*, 1996, 17(5): 22-30.
- Shen X J, Liu B Q. The analysis of polarizability of partially polarized light passing through lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 1996, 17(5): 22-30.
- [13] 沈学举, 刘秉琦, 王斧. 部分偏振光通过透镜时的偏振像差分析[J]. *光学技术*, 1998, 24(2): 51-54.  
Shen X J, Liu B Q, Wang F. Analysis on polarizing aberration when partially polarized light penetrate lens[J]. *Optical Technology*, 1998, 24(2): 51-54.
- [14] 原晶, 李志超, 杨虎. 单透镜系统的偏振像差[J]. *激光杂志*, 2015, 36(10): 21-23.  
Yuan J, Li Z C, Yang H. The polarization aberration of single lens system[J]. *Laser Journal*, 2015, 36(10): 21-23.
- [15] 张艺蓝, 史浩东, 王超, 等. 离轴自由曲面光学系统偏振像差特性研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1822002.  
Zhang Y L, Shi H D, Wang C, et al. Research on polarization aberration characteristics of off-axis freeform surface optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1822002.
- [16] 黄佐华, 朱映彬. 透镜对线偏振光偏振状态影响的初步研究[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 39(1): 48-52.  
Huang Z H, Zhu Y B. Primary study on the influence for the state of line polarized light through a lens[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2007, 39(1): 48-52.
- [17] Yang Z Y, Song J C, Cai W, et al. Effect analysis of polarization aberration in the non-line-of-sight azimuth transmission[EB/OL]. [2023-02-01]. <https://pdfs.semanticscholar.org/3acc/41f0d388400e9645c744253edd108590059f.pdf>.
- [18] Shen L N, Li S K, Wang X Z, et al. Analytical analysis of the impact of polarization aberration of projection lens on lithographic imaging[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2015, 14(4): 043504.
- [19] Kukushkin D E, Zhukova T I, Bakholdin A V. Polarization property analysis of single lenses[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(17): 5198-5204.
- [20] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Liao Y B. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press, 2003.

## Influence of Lens Parameters on Polarization Transmission in Azimuth Transmission Systems

Yang Zhiyong, Li Shun\*, Luo Lina, Cai Wei, Zhang Zhiwei

*Armament Launch Theory and Technology Key Discipline Laboratory of PRC, Rocket Force Engineering University, Xi'an 710025, Shaanxi, China*

### Abstract

**Objective** In the case of a non-line-of-sight azimuth transmission system based on polarization-maintaining fiber, aligning the output light passing through the fiber with the photoelectric conversion receiver is necessary to increase the extremely small diameter of the outgoing light after transmission through the fiber. A beam-expanding system can be introduced to solve this problem, and the azimuth transmission can be achieved in a non-line-of-sight condition. Because the classical refractive beam spreading system is composed of lenses, the influence of lenses in polarization transmission determines the accuracy of the azimuth transmission. However, general studies of the lens focused on the influence of polarization states of incident light and lacked analyses regarding lens parameters and beam-expanding systems comprising lens groups. In the non-line-of-sight azimuth transmission system, the influence of lenses on polarization transmission is key to introducing the beam-expanding system. This system has broad application prospects in many fields, including spacecraft docking in space

stations, tunneling engineering, and high-precision instrument measurement.

**Methods** In this study, the analysis related to lenses is based on the Jones matrix principle and the Fresnel equation. First, the Jones vector is used to characterize the incident polarized light. Second, the incident light gets refracted after passing through the lens and the Jones vector relationship between the incident and refracted light is calculated using the Jones matrix with respect to the lens. Subsequently, the Jones matrix with respect to the lens can be characterized using the amplitude transmission ratio, which is the ratio between the angle of incidence and angle of refraction. These angles are derived based on the Fresnel equation. Finally, the geometric relationship between the light and lens is analyzed using the ray-tracing method to determine the angle of incidence and refraction. Using the Galileo beam expanding system as an example, the process of polarization transmission with respect to the lens is analyzed in detail and the equation of the deflection angle comprising lens parameters is derived. The influence of the lens parameters on polarization azimuth deflection is simulated and verified via experiments.

**Results and Discussions** In this study, the influencing factors with respect to the linearly polarized light using lenses are divided into three categories: first, the polarization state of the incident light; second, the refractive effect of lens spheres; and third, the material properties of lenses. The polarization-azimuth-deflection equation comprising the lens parameters was obtained based on the study of the lens parameters and beam-expanding system comprising the lens group (Eq. 12). Simulations and experiments conducted herein show that the polarization azimuth deflection is inversely related to the radius of curvature of the lens. When the curvature radius of the lens increases, the polarization azimuth deflection decreases and tends to zero (Fig. 5 and Fig. 11). The polarization azimuth deflection is squared with the incident light radius. When the radius of incident light increases, the polarization azimuth deflection increases, and when the incident radius tends to zero, the polarization azimuth deflection tends to zero (Fig. 6 and Fig. 12). The central thickness of the lens is linearly related to the polarization azimuth deflection; that is, when the center thickness of the lens increases, the polarization azimuth deflection increases (Figs. 7 and 13). Furthermore, the polarization azimuth deflection is squared with the refractive index; that is, when the refractive index increases, the polarization azimuth deflection increases (Fig. 8).

**Conclusions** Based on Fresnel equations and Jones matrixes, this study analyzes the influence of lens parameters on polarization transmission, which is mainly reflected in the polarization azimuth deflection of polarized light. Using the Galileo beam spreading system as an example, the geometric relationship of light in the beam spreading system is analyzed via the ray-tracing method. Then, the polarization azimuth deflection equation comprising the lens parameters is derived. Subsequently, the influence of curvature radius, center thickness, the radius of incident light, and refractive index on the polarization azimuth deflection are simulated, and the principle is analyzed. The results of our study show that the curvature radius is inversely related to the polarization azimuth deflection; that is, when the curvature radius decreases, the polarization azimuth deflection increases, and when the curvature radius tends to approach  $\infty$ , the polarization azimuth deflection tends to be zero. Meanwhile, the center thickness is linearly related to the polarization azimuth deflection; that is, when the center thickness increases, the deflection angle increases. The incident light radius is squaredly related to the polarization azimuth deflection; that is, when the incident light radius increases, the polarization azimuth deflection increases, and when the incident light radius tends to be zero, the polarization azimuth deflection also tends to be zero. The refractive index is squared with the deflection angle; that is, when the refractive index increases, the polarization azimuth deflection also increases, and when the refractive index tends to zero, the polarization azimuth deflection tends to be zero. This study provides a reference for the introduction of the beam-expanding system in the non-line-of-sight azimuth transmission system based on the polarization-maintaining fiber.

**Key words** linearly polarized light; lens; beam expanding system; azimuth transmission; deflection angle