

文章编号: 1671-7449(2024)05-0520-07

基于气炮弹测速的单光源三光幕研究

雷芙蓉, 武志超*

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 随着气体炮中弹丸加载速率及其测试精度的不断提高, 对激光测试系统的光幕光能分布均匀性和平行性的要求越来越高。采用衍射光学元件(DOE)将激光束整形为线状均匀光束, 利用菲涅尔透镜形成均匀平行光幕, 经过1/3分光镜、半透半反镜和全反射镜, 实现高度平行的一体化单光源三光幕。利用改进GS(Gale-Shapley)算法设计DOE元件得到线状分布光束, 实验测试其均匀度为83.7%; 对三光幕的平行性进行测试, 得到最大偏差为0.279 mrad。该单光源三光幕系统可满足超高速气炮弹测速时对光幕灵敏度及测速精度的需求。

关键词: 单光源三光幕; 均匀性; 平行性; 衍射光学元件(DOE); 改进GS(Gale-Shapley)算法

中图分类号: TJ06

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024060

引用格式: 雷芙蓉, 武志超. 基于气炮弹测速的单光源三光幕研究[J]. 测试技术学报, 2024, 38(5): 520-526.

LEI Furong, WU Zhichao. Research on single-light-source three-light curtain based on air gun projectile velocity measurement[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(5): 520-526.

Research on Single-Light-Source Three-Light Curtain Based on Air Gun Projectile Velocity Measurement

LEI Furong, WU Zhichao*

(School of Opto-electronical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: With the continuous improvement of the loading rate of projectiles in gas guns and their testing accuracy, the requirements for the uniformity and parallelism of the light energy distribution of the light curtain of the laser test system are getting higher and higher. A diffractive optical element (DOE) is used to shape the laser beam into a linear uniform beam, and a Fresnel lens is utilized to form a uniform parallel light curtain, which passes through a 1/3 beam splitter, a half-transparent half-reflector and a total-reflector mirror to realize a highly parallel integrated single-light-source three-light curtain. Using the improved GS algorithm to design the DOE element to obtain a linear distribution of the beam, the uniformity of the experimental test is 83.7%; the parallelism of the three-light curtain is tested, and the maximum deviation is 0.279 mrad. This single-light-source three-light curtain system can meet the needs of ultra-high-speed gas shell speed measurement on the sensitivity of the light curtains and the demand for speed accuracy.

Key words: single-light-source three-light curtain; uniformity; parallelism; diffractive optical element (DOE); improved Gale-Shapley(GS) algorithm

收稿日期: 2023-11-22

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室资助项目(20JS057)

作者简介: 雷芙蓉(2000-), 女, 硕士生, 主要从事光电测试技术研究。E-mail: m18992742701_1@163.com。

* 通信作者: 武志超(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事测试计量与应用、光电测试技术、测控技术及仪器等研究。E-mail: wuzhichao06@163.com。

0 引言

气炮弹的速度是空气炮的一个重要被测参数^[1-2],常用的气炮弹测速方法有磁感应测速法^[3]、激光测速法^[4]和高速摄影法^[5]等。磁感应测速法易受到外界磁场的干扰,高速摄影法精度高但工序复杂,而激光测速法具有非接触、响应速度快、性价比高等优点,是目前实验室主要测量手段之一。在气炮弹测速系统中,炮管内气体冲击和发光、烟雾、残渣等因素使测速环境变得非常复杂,高弹速也会使弹前激波的压力和温度同时升高,给激光测速带来干扰。遮挡式激光光幕测速法若采用单束窄激光测速,很容易受到干扰,引起测速信号紊乱。用激光光幕代替单束窄激光可提高激光的抗干扰能力和捕捉飞行弹丸能力,增大测速系统的适用范围^[6]。在整个激光测速系统设计中,考虑加入窄带滤波片、消波结构、抗干扰电路和抗震设计等提高测试系统的稳定性与信噪比,适应环境对测速系统的影响。激光光幕测速系统的光幕光能分布均匀性^[7-9]是衡量计时精度的重要参考依据,确保弹丸在有效靶面内对探测器阵列光能量响应一致,即探测灵敏度相同,避免对小口径高速弹丸的漏判,最终影响测速精度。对光束能量均匀化的整形方案有复杂棱镜^[10]、透镜系统^[11]、微透镜阵列^[12]、衍射光学元件(Diffractive

Optical Element, DOE)^[13]等。复杂棱镜和透镜系统整形后仍存在能量分布不均的问题,微透镜阵列系统复杂且加工难度大,目前常用的将激光束整形为线光束的方法为柱透镜与鲍威尔棱镜,使用柱透镜形成的线光束具有中间能量分布较高,边缘能量分布较低的特点,鲍威尔棱镜形成的线光束均匀度可达80%~90%,但对入射光束的尺寸、光轴和安装有严格要求。而DOE体积小、质量轻、整形均匀性好、相对成本低,可将光束整形为强度分布平整的平顶光束,均匀度和光能利用率达90%以上,且对入射光没有特殊要求。光幕之间的平行性^[14]也是影响测速精度的重要因素之一。现有激光测试系统一般采用多组独立光学系统构成多个光幕,使得各个光幕之间的平行性难以保证,对测试结果精度造成影响。

综上,本文采用DOE元件将激光束整形为均匀线状光束,利用菲涅尔透镜的平行聚焦特性形成一道均匀平行光幕,再利用1/3分光镜、半透半反镜和全反射镜实现高度平行的一体化单光源三光幕系统。

1 单光源三光幕系统设计

本文利用DOE元件、菲涅尔透镜、1/3分光镜、半透半反镜和全反射镜等器件构成了单光源三光幕系统,如图1所示。

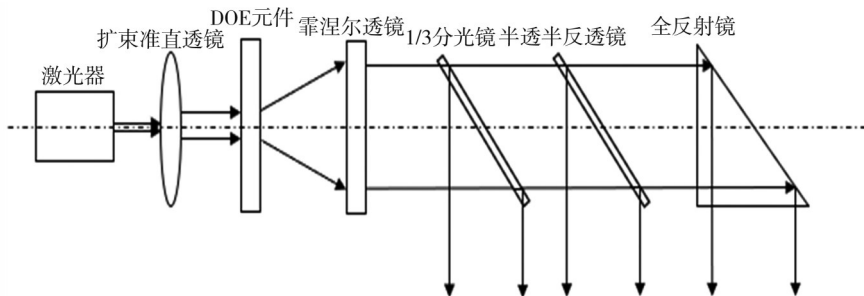


图1 单光源三光幕系统

Fig. 1 Single-light-source three-light curtain system

图1中,波长为632.8 nm的半导体激光器经扩束准直透镜扩束准直至3 mm,经DOE元件整形为线形均匀光束,再利用焦距为100 mm的菲涅尔透镜的平行聚焦特性,形成一道均匀的平行光幕。该光幕再经间距为100 mm的1/3分光镜、半透半反镜和全反射镜实现单光源三光幕系统,光幕均匀且平行,每个光幕尺寸为20 mm×3 mm。

单光源三光幕系统的关键器件为DOE元件,其设计直接影响光幕均匀性,本系统的DOE元件

设计模型如图2所示。

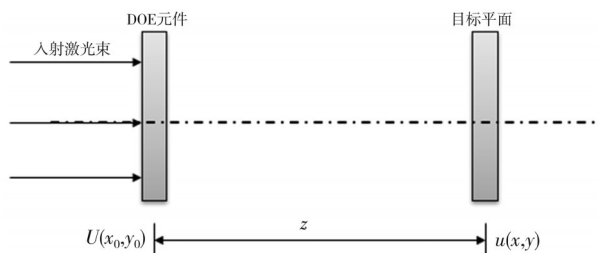


图2 DOE元件设计模型

Fig. 2 DOE component design model

设入射光的振幅为 $A_0(x_0, y_0)$, 相位为 $\varphi_0(x_0, y_0)$, 垂直入射 DOE 元件, DOE 元件相位分布为 $\varphi(x_0, y_0)$, 透过 DOE 的光场复振幅变为 $u(x_0, y_0)$, 其公式为

$$u(x_0, y_0) =$$

$A_0(x_0, y_0) \exp [i\varphi_0(x_0, y_0) + \varphi(x_0, y_0)]$, (1) 传输至距离 z 的目标平面时的复振幅为 $u(x, y)$ 。对于上述传输过程, 由标量衍射理论, $u(x, y)$ 与 $u(x_0, y_0)$ 可建立如下关系

$$u(x, y) = \frac{-ik}{2\pi z} e^{ikz} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x_0, y_0) H(x_0 - x, y_0 - y, z) dx_0 dy_0, \quad (2)$$

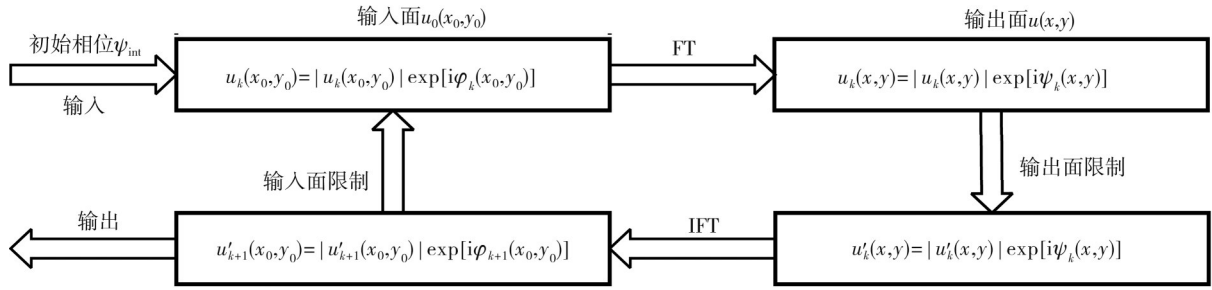


图3 改进GS算法流程图

Fig. 3 Improved GS algorithm flow chart

寻找理想的初始相位, 使局部最优解成为全局最优解作为 DOE 初始相位 ψ_{int} , 用式(1)进行积分变换和反变换, 且每次将输出面振幅用 $u'_k(x, y)$ 来代替, 输入面振幅用 $u'_k(x_0, y_0)$ 来限制, 当输出面实际振幅 $u(x, y)$ 与 $u'_k(x, y)$ 的均方误差 $e < 0.000001$ 且不均匀度 $rms < 0.1$ 时迭代结束, 可求得 DOE 元件相位 $\varphi(x_0, y_0)$ 。通过此方法可以提高输出光束的均匀度且加快收敛速度。均方误差 e 和均匀度 rms 公式如下

$$e = \frac{\sum_{(x,y)} |I(x, y) - I_{ideal}(x, y)|^2}{\sum_{(x,y)} |I_{ideal}(x, y)|^2}, \quad (4)$$

$$rms = \sqrt{\sum_{(x,y) \in W} \left[\frac{I(x, y) - \bar{I}(x, y)}{\bar{I}(x, y)} \right]^2 / (n - 1)}, \quad (5)$$

式中: W 为输出面光能均匀分布的区域; $I(x, y)$ 为输出面实际输出光强,

$$I(x, y) = |u(x, y)|^2; \quad (6)$$

$I_{ideal}(x, y)$ 为输出面期望输出光强,

式中:

$$H(x_0 - x, y_0 - y, z) = \exp \left\{ \frac{ik}{2z} [(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2] \right\}; \quad (3)$$

$k = 2\pi/\lambda$ 为波矢; z 为衍射距离。

通过求解上述非线性方程, 可以获得 DOE 相位分布 $\varphi(x_0, y_0)$ 。

GS算法^[15]编程简单、效率高、可快速收敛, 因此采用GS算法进行求解, 但其会陷入局部最优且输出光束的不均匀度较高, 故对GS算法进行改进, 算法流程如图3所示。

$$I_{ideal}(x, y) = |u_{ideal}(x, y)|^2; \quad (7)$$

n 为 W 区域内总采样点数; $\bar{I}(x, y)$ 为 W 区域内平均光强,

$$\bar{I}(x, y) = \frac{\sum_{(x,y) \in W} |I(x, y)|}{n}. \quad (8)$$

具体改进如下:

1) 寻找理想的初始相位, 使局部最优解成为全局最优解。在寻找理想的初始相位时, 与遗传算法相似, 选取多个初始相位, 利用GS算法求取对应的相位解及评判条件 F 值。根据评判条件 F 值, 将满足要求的与淘汰的群体重新调整 q_1 和 q_2 值组成新群体, 进行再次计算与选择, 重复上述规则, 在进化与淘汰中, 留下的满足要求的个体逐渐减小, 最终可选出最优初始相位。

相位解的评判条件 F 为

$$F = q_1 \times e + q_2 \times rms, \quad (9)$$

式中: q_1 和 q_2 为权重, 且满足

$$q_1 + q_2 = 1; \quad (10)$$

e 为均方误差; rms 为顶部不均匀度。 F 越小说明初始相位越优异。初始相位的改进模型如图4

所示。

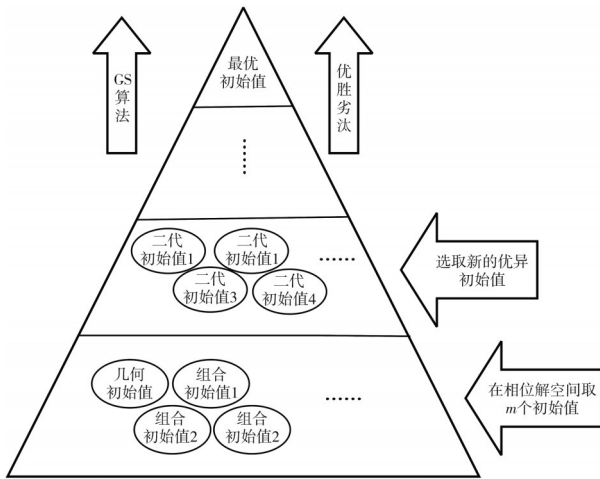


图 4 初始相位选择模型

Fig. 4 Initial phase selection model

初始相位选取模型具体如下：

① 选取 m 个初始相位，并利用 GS 算法求取 DOE 的 m 个解及 F 值；

② 选取 m_1 ($m_1 < m$) 个 F 较小的相位解，其余的 $m - m_1$ 个 F 较大的重新进行权重组合，形成 $(m - m_1)/2$ 个新相位，两者共同组成 $(m + m_1)/2$ 个新相位，作为下一次迭代的初始相位，得到 $(m + m_1)/2$ 个相位解及对应的 F 值。

③ 选取 m_2 ($m_2 < (m + m_1)/2$) 个 F 较小的相位解，其余的 $(m + m_1)/2 - m_2$ 个 F 较大的重新进行权重组合，形成 $(m + m_1 - 2m_2)/4$ 个新相位，两者共同组成 $(m + m_1 + 2m_2)/4$ 个新相位，得到 $(m + m_1 + 2m_2)/4$ 个相位解及对应的 F 值。

④ 重复上述步骤，得到设计 DOE 的最优初始相位。

2) 改变 GS 算法的输入面与输出面的限制条件，即对输入面与输出面的振幅进行改进。本文设计 DOE 时，要求其均匀性好，为了提高均匀度，将输出面的振幅调整为 $u'_k(x, y)$ ，公式如下

$$u'_k(x, y) = \begin{cases} 2\alpha |u_{\text{ideal}}(x, y)| - |u_k(x, y)|, & (x, y) \in S \\ |u_k(x, y)|, & (x, y) \notin S \end{cases}, \quad (11)$$

式中：

$$\alpha = \frac{\sum |u_k(x, y)|}{\sum |u_{\text{ideal}}(x, y)|}, \quad (12)$$

$u_{\text{ideal}}(x, y)$ 为 GS 算法的输出光束振幅。该调整只对约束区域内振幅进行调整，对无关区域的振幅忽略，可以促使顶部不均匀度下降，从而提高均匀度。

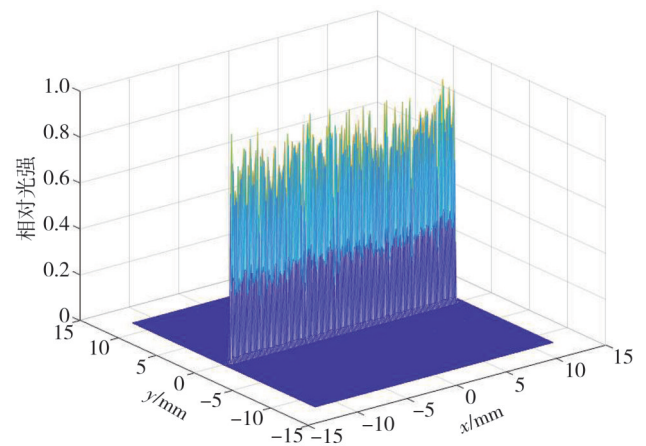
对输入面振幅作以下调整

$$|u_k(x_0, y_0)| = \begin{cases} |u_k(x_0, y_0)| - \beta |u'_{k+1}(x_0, y_0)|, & (x_0, y_0) \in S' \\ |u'_{k+1}(x_0, y_0)|, & (x_0, y_0) \notin S' \end{cases}, \quad (13)$$

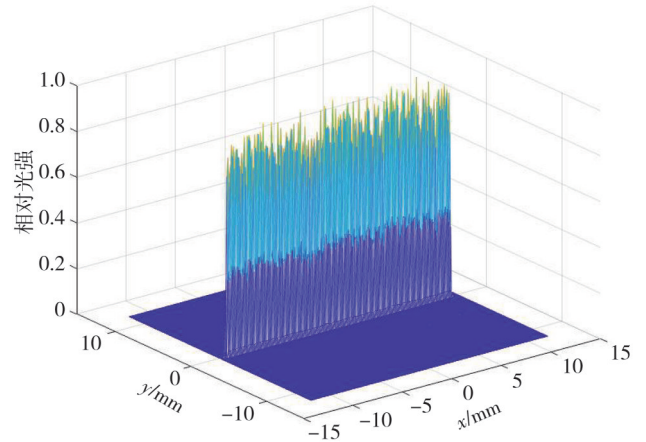
式中： β 取值为 0~1 之间； S' 为输入面约束区域。该调整为输入光场分布引入负反馈，从而提升算法的收敛速度。求得 DOE 相位后，用光能利用率 η 、不均匀度 rms 和均匀误差 e 来衡量 DOE 元件的性能^[16]。

$$\eta = \frac{\sum_{(x,y) \in W} I(x, y)}{\sum_{(x,y)} I(x, y)}. \quad (14)$$

采用半导体激光器入射到 DOE 元件上，在衍射距离 $z=100$ mm 处得到 $24 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 均匀线状光束，输入、输出上的采样点数为 256×128 。利用 GS 算法和改进 GS 算法分别对入射高斯光束进行整形，整形结果如图 5(a)、图 5(b) 所示。



(a) GS算法整形设计结果

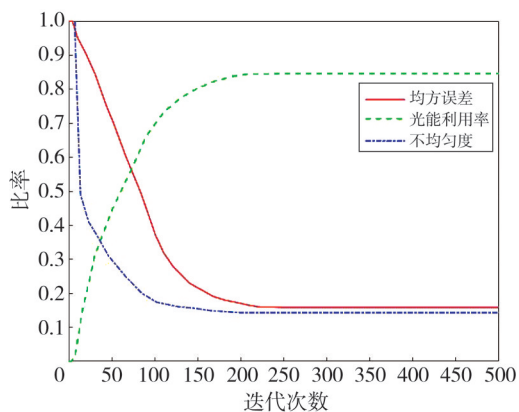


(b) 改进GS算法整形设计结果

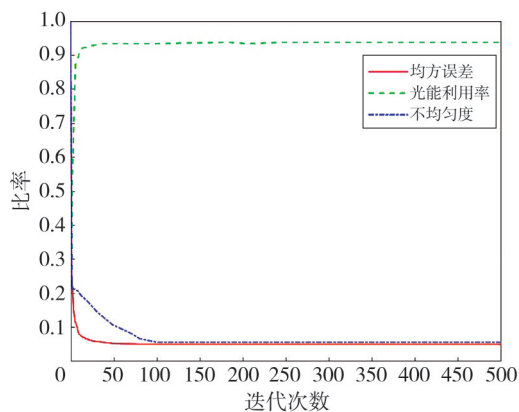
图 5 整形设计结果

Fig. 5 Shaping design results

从图5可以看出,利用改进GS算法整形得到的输出光束比GS算法的光束顶部更加平坦。利用光能利用率 η 、不均匀度 rms 和均匀误差 e 对算法进行客观评价,如图6(a)、图6(b)所示。



(a) GS算法评价



(b) 改进GS算法评价

图6 算法评价

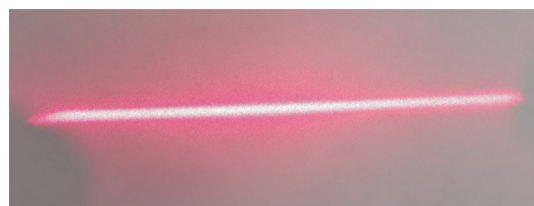
Fig. 6 Evaluation of algorithm

从图6可知,改进GS算法均方误差为0.08,均匀度达到92%,光能利用率为93%,且迭代100时光束质量趋于稳定,与GS算法相比,均匀度提高了5%,光能利用率提高了7%。改进GS算法的均方误差 e 和不均匀度 rms 在迭代初期处于快速下降并趋于平缓,而GS算法处于缓慢下降状态且达到200次时才趋于平缓,说明改进GS算法中对初始相位的改进是有效的,使整形光束在迭代初期就趋于理想状态附近。总之,改进GS算法的光束质量优于GS算法。

2 实验测试及分析

2.1 DOE元件整形均匀性测试

采用波长为632.8 nm的半导体激光器作为光源,利用相机拍摄激光经过DOE元件整形后的光束分布,如图7(a)所示。同样,激光器经鲍威尔棱镜整形后的光束分布如图7(b)所示。



(a) DOE元件

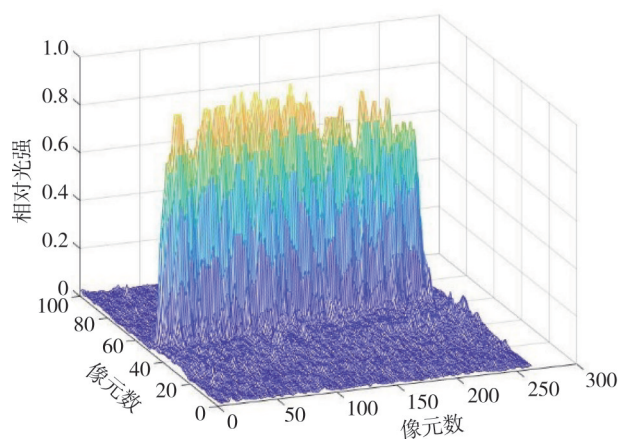


(b) 鲍威尔棱镜

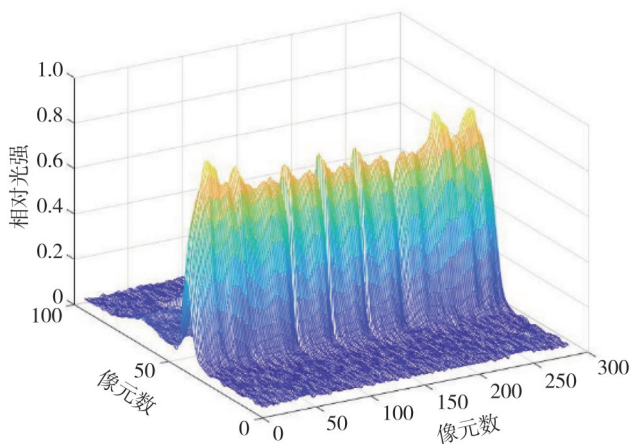
图7 整形光束分布

Fig. 7 Shaping beam distribution

从图7(a)可以看出,经DOE元件整形后,光束变为线状分布光束,人眼观察线状分布光束整体较为均匀。为了对其进行定量分析,利用Matlab软件对图7(a)进行处理得到整形激光束的三维光强分布,如图8(a)所示。



(a) DOE元件



(b) 鲍威尔棱镜

图8 整形激光束光强三维分布图

Fig. 8 Three-dimensional distribution of the intensity of the plastic laser beam

从图 7(b) 可以看出, 经鲍威尔棱镜整形后光束也变为线状分布光束, 人眼观察线状分布光束整体较为均匀, 但其两端出现亮点。同样, 为了对其进行定量分析, 利用 Matlab 软件对图 7(b) 进行处理, 得到图 8(b) 所示的光强三维分布图。

从图 8(a) 可以看出, 光强三维分布整体较为均匀, 但边缘效果没有中间部位的效果好, 且有的部位明显凹陷, 可能的原因为接收屏并不是理想的漫反射或 DOE 元件本身可能存在缺陷。从图 8(b) 可以看出, 光强三维分布整体也较为均匀, 与图 7(b) 相呼应, 两端光强较强。

光斑能量均匀度计算公式为

$$\gamma = \left(1 - \frac{\sum |E_i - \bar{E}|}{n \cdot \bar{E}} \right) \times 100\%, \quad (15)$$

式中: n 为光斑取样点数; E_i 为每一个取样点的能量值; \bar{E} 为 n 个取样点能量值的平均值。

利用式(15)进行计算, 得到经 DOE 元件整形后的均匀度为 83.7%, 经鲍威尔棱镜整形后的均匀度为 79.8%。采用 DOE 元件整形与鲍威尔棱镜整形相比, 均匀度提高了 5%。而且, 在安装鲍威尔棱镜时光轴要严格对准, 夹装也不方便, 但 DOE 元件的夹装较为容易。

2.2 三光幕平行性测试

使用光束质量分析仪对三光幕的平行性进行测试, 但由于光束质量分析仪的视场有限, 采用 500 mm×30 mm 的非涅尔透镜对三光幕的光斑图进行会聚, 成像于同一平面, 且不改变三光幕的平行性, 结果如图 9 所示。

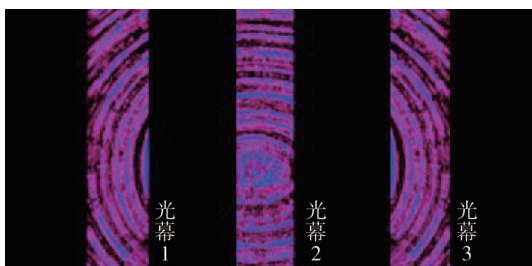


图 9 三光幕平行性测试

Fig. 9 Three-light curtain parallelism test

图 9 中的 3 个光幕图像呈现圆环状的条状光束, 但大都不是完整的圆环, 是因为非涅尔透镜是圆环分布的, 且所用的尺寸为截取同心圆环的一部分。从图 9 观察, 3 个光幕图像颜色基本一致, 说明其光强基本相同。光幕 1 和光幕 3 关于光幕 2 的图像对称分布, 说明光幕 1 与光幕 2 之间的

距离和光幕 2 和光幕 3 之间的距离基本相同。以像面的竖直方向为基准, 观察 3 个光幕图像, 都与其基本平行。为了定量获知 3 个光幕的平行性, 对图 9 进行处理, 得到三光幕中心平面方程来代表每个光幕, 分别为

$$y_1 = 37.07x_1 - 27\,511.14, \quad (16)$$

$$y_2 = 89.22x_2 - 71\,261.98, \quad (17)$$

$$y_3 = 219.29x_3 - 205\,401.71. \quad (18)$$

计算 3 个光幕之间的平行度, 光幕之间的夹角最大偏差为 $\Delta\gamma = 0.279$ mrad, 气炮弹的靶距大多在 1 m 范围之内, 故假设靶距为 $L = 1$ m, 光源与接收系统之间的距离为 $H = 1$ m, 光幕之间的不平行引起的靶距误差 $\Delta S = H \cdot \tan(\Delta\gamma) = 0.03$ mm, 引起的测速误差为 $\Delta S/L \times 100\% = 0.03\%$ 。

3 结 论

本文利用改进 GS 算法设计了 DOE 元件, 配合菲涅尔透镜、1/3 分光镜、半透半反镜和全反射镜, 实现了均匀一体化单光源三平行光幕。实测了利用 DOE 元件对激光调制的输出情况, 计算得到其线状光束光强均匀度为 83.7%; 利用光束质量分析仪接收三光幕, 对其图像处理获得各个光幕的中心平面方程, 计算得到光幕平行性最大偏差为 0.279 mrad; 当光源与接收系统之间的距离为 1 m 时, 由光幕之间的不平行引起的测速误差为 0.03%。气炮弹的速度越快, 所需的灵敏度越高, 而幕面均匀性越高越有助于灵敏度的提高, 故本文的单光源三光幕系统还可适用于超高灵敏度及测试精度的气炮弹测速系统。

参考文献:

- [1] 王金贵. 气体炮原理及技术[M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] 赵新艳, 胡志云, 赵军卫, 等. 二级轻气炮弹速激光测量系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S1): 223-226.
ZHAO Xinyan, HU Zhiyun, ZHAO Junwei, et al. System utilizing laser diode for two-stage light gas-gun projectile velocity measurement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S1): 223-226. (in Chinese)
- [3] 李士彦, 蔡德咏. 基于电磁感应的炮口测速装置设计与试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(10): 80-82.
LI Shiyuan, CAI Deyong. Design and experimental

- study of muzzle velocity testing device based on electromagnetic induction [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40 (10): 80-82. (in Chinese)
- [4] 李进, 李运良, 钱秉文, 等. 用于三级轻气炮弹速测量的改进型激光测速系统[J]. *兵工学报*, 2017, 38 (S1): 146-149.
LI Jin, LI Yunliang, QIAN Bingwen, et al. Improved laser velocity-measuring system for measuring the projectile velocity of three-stage light-gas gun [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(S1): 146-149. (in Chinese)
- [5] 赵奇峰, 李进, 李运良, 等. 基于高速摄影图像的轻气炮弹速测量研究[J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (11): 132-136.
ZHAO Qifeng, LI Jin, LI Yunliang, et al. Study on velocity measurement of light gas projectile based on high speed photographic images [J]. *Computer Measurement & Control*, 2021, 29 (11): 132-136. (in Chinese)
- [6] 邓云飞, 张伟, 贾斌, 等. 二级轻气炮遮挡式激光光幕测速系统[J]. *高压物理学报*, 2011, 25 (4): 296-302.
DENG Yunfei, ZHANG Wei, JIA Bin, et al. A system for measuring two-stage light gas gun projectile velocity with laser screen and photodetector [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25 (4): 296-302. (in Chinese)
- [7] 王占选, 赵冬娥, 刘吉, 等. 基于激光测速技术的空气炮弹丸速度测试系统设计[J]. *弹箭与制导学报*, 2014, 34(2): 51-54.
WANG Zhanxuan, ZHAO Donge, LIU Ji, et al. Design of air gun projectile velocity measurement system based on laser velocity measurement [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(2): 51-54. (in Chinese)
- [8] 段中兴, 杨琪凡, 李进, 等. 用于轻气炮弹速测量的新型高信噪比激光测速系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(5): 154-160.
DUAN Zhongxing, YANG Qifan, LI Jin, et al. New laser projectile velocity-measuring system with high SNR for light-gas gun [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35 (5): 154-160. (in Chinese)
- [9] 陈宇轩, 张斌, 褚文博. 大靶面激光光幕测速系统灵敏度研究[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(2): 1-4.
CHEN Yuxuan, ZHANG Bin, CHU Wenbo. Research on the sensitivity of large target surface velocity measurement system with laser screen [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2020, 39 (2): 1-4. (in Chinese)
- [10] HOFFNAGLE J A, JEFFERSON C M. Design and performance of a refractive optical system that converts a Gaussian to a flattop beam [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(30): 5488-5499.
- [11] 黄坤, 何平安, 范若, 等. 线激光束均匀化整形方法研究[J]. *应用光学*, 2009, 30(3): 523-526.
HUANG Kun, HE Ping'an, FAN Ruo, et al. Uniformization shaping method of line laser beam [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30 (3): 523-526. (in Chinese)
- [12] 周叶, 祝启欣, 黄中亚, 等. 基于柱面微透镜阵列的激光匀化系统设计及实验研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(4): 486-492.
ZHOU Ye, ZHU Qixin, HUANG Zhongya, et al. Design and experimental investigations of laser homogenization system based on cylindrical microlens array [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 486-492. (in Chinese)
- [13] 徐嫻, 王常宇, 王涌天, 等. 衍射光学元件设计方法综述[J]. *光学学报*, 2023, 43(8): 117-136.
XU Yuan, WANG Changyu, WANG Yongtian, et al. Review of design methods of diffractive optical element [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 117-136. (in Chinese)
- [14] 高芬, 安莹, 倪晋平, 等. 红外测速光幕靶改进及测量精度分析[J]. *西安工业大学学报*, 2010, 30(3): 205-209.
GAO Fen, AN Ying, NI Jinping, et al. Advanced design of infrared light screen target and accuracy analysis [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2010, 30(3): 205-209. (in Chinese)
- [15] DOKOLOVICH L L, MINGAZOV A A, BYZON E V, et al. Hybrid design of diffractive optical elements for optical beam shaping [J]. *Optics Express*, 2021, 29 (20): 31875-31890.
- [16] 张玉莹, 赵帅, 郑昕. 基于改进GS算法设计DOE制备紫外波段微米级均匀光斑[J]. *光学学报*, 2023, 43 (7): 119-126.
ZHANG Yuying, ZHAO Shuai, ZHENG Xin. Design of DOE based on modified GS algorithm for preparation of micron-scale uniform light spot in ultraviolet band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43 (7): 119-126. (in Chinese)