

文章编号:1002-2082(2019)02-0233-08

基于原向反射式激光光幕厚度一致性研究

褚文博,赵冬娥,张 斌,陈宇轩

(中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室,山西 太原 030000)

摘要:在原向反射式激光光幕测速技术中,针对半导体激光光源产生的激光光束散射角使得出射光幕厚度不一致、原向反射屏产生的反射光幕剩余发散角使反射光幕厚度不一致这两方面导致弹丸穿过光幕不同位置触发光幕响应时间不一致的问题,根据几何光学原理,对半导体激光器弧矢与子午方向建立数学模型,设计了具有不同面型的非球面准直透镜组,将出射光斑尺寸控制在1 mm之内且子午和弧矢方向发散角分别为0.13 mrad、0.46 mrad。出射光束经过Powell透镜一维扩束后,形成厚度为1 mm、均匀度达到85.7%的扇形出射光幕,经过原向反射后,配合狭缝光阑使反射光幕有效厚度控制在1 mm。使用Zemax软件模拟弹丸过靶仿真,弹丸不遮挡系统光幕时探测器接收到原向反射光强1.54 mW,弹丸遮挡系统光幕时探测器接收到原向反射光强为1.03 mW。当弹丸紧贴出射光幕侧面边缘(即1 mm光幕边缘),分别距离光源100 mm、300 mm、500 mm处的弹丸触发探测器接收到的光强大小均为1.54 mW,显然,光强相对于无弹丸遮挡光幕情况下没有产生变化,证明系统有效可探测光幕厚度一致且为1 mm。该结果表明,本研究方案具有可行性。

关键词:激光光幕;高斯光束;准直;一维扩束;Zemax

中图分类号:TN249;O435

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0201009

Study on thickness consistency of primary reflection laser screen

CHU Wenbo, ZHAO Donge, ZHANG Bin, CHEN Yuxuan

Abstract: In the primary reflection type laser screen velocity measuring technique, the scattering angle of the laser beam generated by the semiconductor laser source makes the thickness of the emergent optic screen inconsistent, and the residual divergence angle of the reflected optic screen generated by the primary reflective screen makes the thickness of the reflected optic screen inconsistent, the two aspects from which lead to the problem that the projectile passing through different positions of the optic screen to trigger the response time of the optic screen inconsistent. According to the geometrical optics principle, the mathematical model of the sagittal and meridional directions of the semiconductor laser was established, and the aspherical collimating lens groups with different surface figures were designed, the size of the exit spot was controlled within 1 mm and the divergence angles of the meridional and sagittal directions were 0.13 mrad and 0.46 mrad, respectively. After the exit beam was one-dimensionally expanded by the Powell lens, a fan-shaped exit light screen with a thickness of 1 mm and a uniformity of 85.7% was

收稿日期:2018-08-06; **修回日期:**2018-09-06

基金项目:“十三五”国防技术基础科研项目(JSJL201608B006)

作者简介:褚文博(1994—),男,博士研究生,主要从事光学设计及光电检测技术研究。E-mail:icwb0707@163.com

formed. And after the original reflection, the effective thickness of the reflected light curtain was effectively controlled to 1 mm with the slit aperture. Moreover, the Zemax software was used to simulate the projectile passing through the screen. When the projectile did not block the system laser screen, the detector received the original reflected light intensity of 1.54 mW; when the projectile blocked the system laser screen, the detector received the original reflected light intensity of 1.03 mW; when the projectile was close to the side edge of the exit laser screen (ie, 1 mm from the screen edge), the light intensity received by the projectile trigger detector respectively at 100 mm, 300 mm, and 500 mm from the light source was all 1.54 mW. Obviously, there is no change in light intensity relative to the absence of the projectile blocking laser screen, which proves that the effective detectable optic screen thickness of the system is consistent and 1 mm. This result indicates that the research scheme is feasible.

Key words:laser light curtain; Gaussian beam; collimation; one dimensional beam expanding; Zemax

引言

弹丸速度的精确测量是靶场测试技术的重要内容,弹丸速度测量所得结果的精准性将为我国火炮武器的研究、生产、应用和发展产生深远的影响。目前,国内外用来测量弹丸初速的方法主要是使用区截装置,即通常所说的测速靶。光电靶属于区截装置之一,而光电靶中原向反射激光光幕式测速靶因其测速精度较高,抗干扰性强,易于安装组合等特点被广泛使用。但由于原向反射激光光幕式测速靶中光幕厚度不一致,影响弹丸测速精度,因此针对原向反射式激光光幕进行研究并改善激光光幕厚度一致性具有重要意义。

1 系统原理

在原向反射式激光光幕测速技术中^[1-5],针对半导体激光光源产生的激光光束散射角^[6]使得出射光幕厚度不一致、原向反射屏产生的反射光幕剩余发散角^[7-10]使反射光幕厚度不一致这两个方面的问题,如图 1 所示,弹丸 1、弹丸 2 和弹丸 3 分别从光幕的不同位置穿过,因为光幕不同位置厚度不同,导致弹丸 1、弹丸 2 和弹丸 3 穿过光幕时,触发探测器的响应时间不同,影响弹丸速度的精准测量^[9],设计了基于原向反射激光光幕厚度一致系统,使弹丸在通过光幕靶区测速时,弹丸在光幕靶区的任意高度,触发光幕响应时间一致,实现

弹丸速度精准的测试。

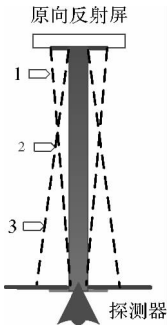


图 1 原向反射式激光光幕系统侧视图

Fig. 1 Side view of original reflection type laser screen system

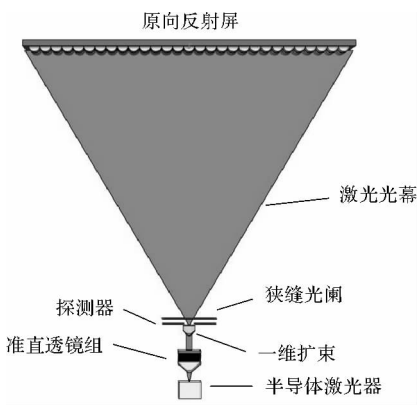


图 2 系统整体正视图

Fig. 2 Front view of whole system

如图 2 所示,原向反射式激光光幕系统的光学器件包括半导体激光器、准直透镜组、一维扩束透镜组、探测器、光阑、原向反射屏。半导体激光器经过透镜组准直,整形成平行光束,该平行光经过

Powell 透镜一维扩束后,形成扇形出射光幕^[11],该出射光幕厚度一致且为 1 mm。扇形出射光幕到达原向反射屏原向反射,形成反射光幕,由于原向反射玻璃微珠的特殊结构,大部分光将大致沿与入射光相逆的方向返回^[12],并在到达探测器之前,经由 1 mm 狭缝光阑的进一步限制与整形,使得光幕有效厚度控制在 1 mm。

2 数学分析

2.1 半导体输出光束参数

本次研究使用的半导体激光器在弧矢方向半峰半发散角为 7.5°,在子午方向半峰半发散角为 30°,上述两个角度为光强一半处的发散角,将其转换为光强峰值 1/e² 处发散角。由公式 $\theta_{1/e^2} = \sqrt{\frac{2}{\ln 2}} \times \theta_{1/2}$ 得, $\theta_f = 0.890 \times 10^3 \text{ mrad}$, $\theta_s = 0.222 \times 10^3 \text{ mrad}$ 。其中: θ_f 为子午方向发散角; θ_s 为弧矢方向发散角。由公式 $w_f = \frac{2\lambda}{\pi\theta_f}$ 、 $w_s = \frac{2\lambda}{\pi\theta_s}$ 计算得到子午方向光束束腰半径 $w_f = 0.465 \text{ }\mu\text{m}$,弧矢方向光束束腰半径 $w_s = 1.865 \text{ }\mu\text{m}$ 。

由于子午弧矢方向高斯光束的束腰位置在不同位置,半导体激光发出的光束具有像散,如图 3 所示,其中 A_s 即为像散。

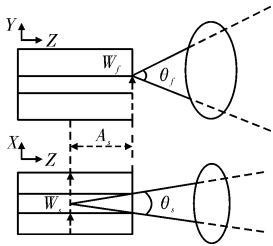


图 3 LD 光束发射特性

Fig. 3 LD beam emission characteristic

发光面处弧矢方向光源尺寸为 150 μm ,故发光面处光斑半径 $w_{As} = 75 \text{ }\mu\text{m}$,根据弧矢方向束腰半径 $w_s = 1.865 \text{ }\mu\text{m}$ 及公式 $w_{As} = w_s \times \sqrt{1 + \left[\frac{\lambda(A_s)}{\pi W_s^2} \right]^2}$, 得 $A_s = 676 \text{ }\mu\text{m}$ 。

2.2 非球面准直透镜设计

为了减小球差,使出射光束平行且口径为 1 mm,采用 2 个互相垂直的柱透镜组分别对 2 个方向的光束进行准直,选用的 2 个柱面镜面型为非球

面(图 4)。设光轴为 z 轴,取原点为非球面的定点,非球面方程^[13-15]可以表示为

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N a_i r^i \tag{1}$$

式中: r 为孔径半径, $r^2 = x^2 + y^2$; c 为曲率半径倒数; k 为圆锥系数; a 为 r 的各阶系数,当 $a = 0$ 时,有:

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \tag{2}$$

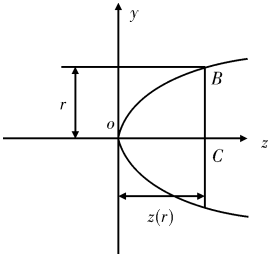


图 4 非球面示意图

Fig. 4 Aspherical diagram

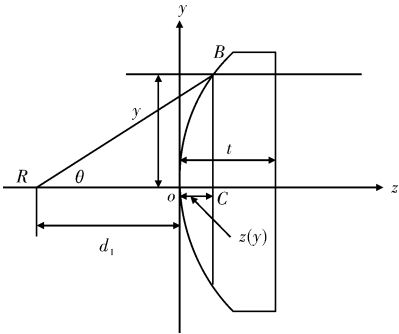


图 5 子午方向数学模型

Fig. 5 Mathematical model of meridian direction

子午方向分析计算。如图 5 所示,在 $yo z$ 平面内,光源从非球面透镜焦点 R 处以半角 θ 发射,到达折射率为 n 的非球面透镜,折射为平行光束出射。由费马定理得:

$$d_1 + t \cdot n = \sqrt{y^2 + (d_1 + z(y))^2} + (t - z(y)) \cdot n \tag{3}$$

整理得:

$$z(y) = \frac{\frac{1}{d_1(n-1)}y^2}{(1 + \sqrt{1 - (1-n)^2 \frac{1}{d_1^2(n-1)^2}y^2})} \tag{4}$$

当出射光斑半径为 y 时, $\tan(\theta_{\perp}) = \frac{y}{d_1 + z(y)}$,

同(4)式联立得:

$$d_1 = \frac{\sqrt{y^2 + (\frac{y}{\tan(\theta_{\perp})})^2} - n \cdot \frac{y}{\tan(\theta_{\perp})}}{1 - n} \quad (5)$$

即 $c_y = \frac{1}{d_1(n-1)}$, $r_y = d_1(n-1)$, $k_y = -n^2$ 。

弧矢方向分析计算。如图 6 所示,在 XOZ 平面内,由于半导体激光器固有像散,像散量 a ,即弧矢方向镜面焦点距离子午方向镜面焦点为 a ,又考虑到弧矢方向光束首先经过近似玻璃板的子午方向准直透镜,发生二次折射后进入弧矢方向准直透镜,由图可知弧矢方向模拟焦点位置应该为 R' 的位置。

由图中三角关系,整理得:

$$R_2R' = AD = \frac{AC(\tan\theta_{\parallel} - \tan\varphi_{\parallel})}{\tan\theta_{\parallel}} \quad (6)$$

$$R'O = d_1 - (R_2R' - a) \quad (7)$$

$$\varphi_{\parallel} = \arcsin \frac{\sin\theta_{\parallel}}{n} \quad (8)$$

即:

$$d_2 = R'O + AC + q = (d_1 + a + p + q) - \frac{p(\tan\theta_{\parallel} - \tan\varphi_{\parallel})}{\tan\theta_{\parallel}} \quad (9)$$

可知: $c_x = \frac{1}{d_2(n-1)}$; $r_x = d_2(n-1)$; $k_x = -n^2$ 。

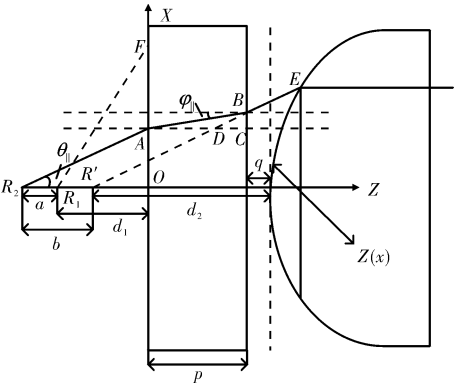


图 6 弧矢方向数学模型

Fig. 6 Mathematical model of sagittal direction

为了使出射光斑直径在弧矢子午方向上均压缩为 1 mm,即光斑半径最大取 $y = 1$;像散 $a = 676 \mu\text{m}$;选取折射率为 1.517 的 BK7 玻璃;子午方向准直透镜厚度取 $p = 2 \text{ mm}$,子午方向准直透镜与弧矢方向准直透镜距离 $q = 0.1 \text{ mm}$ 。代入 $\theta_{\perp}$ 、 $\theta_{\parallel}$ 、 y 、 n 得: $d_1 = 0.6069$, $R_y = 0.3138$, $K_y = -2.3013$, $c_y = 3.187$, $d_2 = 2.686$, $R_x = 1.387$, $K_x = -2.3013$, $c_x = 0.721$ 。

2.3 一维扩束设计

准直好出射光束光斑直径为 1 mm,设计使用 Powell 透镜对其进行一维扩束,消除激光光束高斯分布的中心热点和褪色边缘分布,如图 7 所示,其非球面方程为

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+Q)c^2y^2}} \quad (10)$$

式中: Q 为锥形系数(conic constant),其值介于 $-4.5 \sim -1.6$ 之间; c 为镜面曲率。当入射光接触到第一面后会在透镜内快速聚焦,造成光束的发散角非常大,在像平面会有线形的效果;而由于第一面只在一个方向具有非球面曲率,故在此方向上的出射光束直径等于像平面的有效宽度。

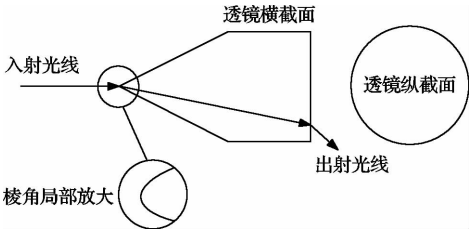


图 7 Powell 透镜结构图

Fig. 7 Structure diagram of Powell lens

为将 1 mm 光斑扩束成为宽度为 1 mm、发散角度为 60° 且均匀性良好的光幕,根据 Powell 透镜非球面方程,查阅光学手册可知,取锥形系数 Q 为 -1.6 ,第一面曲率半径为 0.2 mm。

3 建模仿真

3.1 非球面透镜组准直仿真

使用 Zemax 软件进行仿真,根据实际光源资料建立半导体激光器光源模型,在 Zemax 非序列模式下,根据上节公式推导,输入非球面准直透镜参数,得到非球面透镜组模型如图 8 所示。

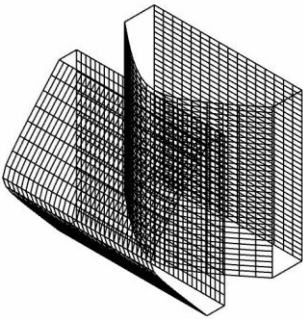


图 8 非球面透镜组建模

Fig. 8 Modeling of aspherical lens group

图 9(a)、(c)分别为未经过非球面透镜组准直在 10 mm 与 100 mm 处探测器光斑图,图 9(b)、(d)分别为经过非球面透镜组准直后在 10 mm 与 100 mm 处探测器光斑图,由图可知,准直后光斑明显变小,子午弧矢方向均有明显改善,光束质量得到提升。

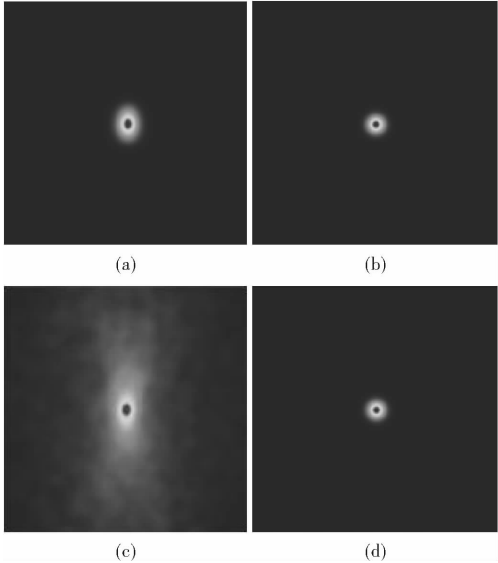


图 9 准直前后光斑比较

Fig. 9 Spot comparison before and after collimation

图 10(a)、(b)分别为距离光源 100 mm 处弧矢方向与子午方向光强分布曲线,查看 text 数据表, $R_{x1}=0.412\text{ mm}$, $R_{y1}=0.487\text{ mm}$;图 10(c)、(d)分别为距离光源 500 mm 处弧矢方向与子午方向光强分布曲线,查看 text 数据表, $R_{x2}=0.465\text{ mm}$, $R_{y2}=0.653\text{ mm}$ 。计算得到弧矢方向半发散角为 $\theta_{\parallel}=\arctan((R_{x2}-R_{x1})/(z_2-z_1))=0.13\text{ mrad}$, 子午方向半发散角为 $\theta_{\perp}=\arctan((R_{y2}-R_{y1})/(z_2-z_1))=0.47\text{ mrad}$ 。

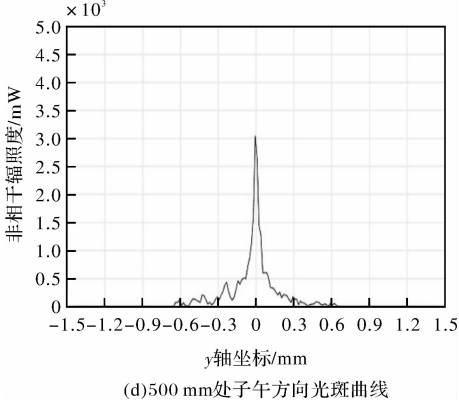
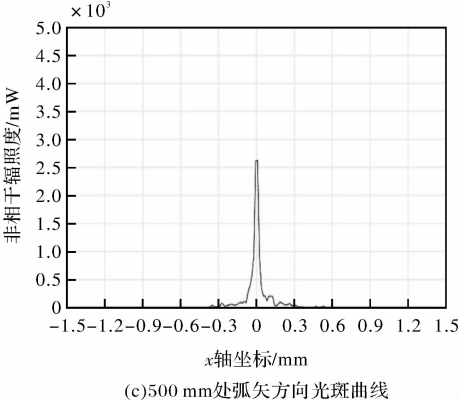
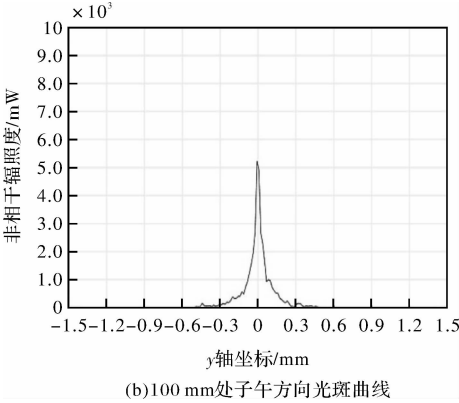
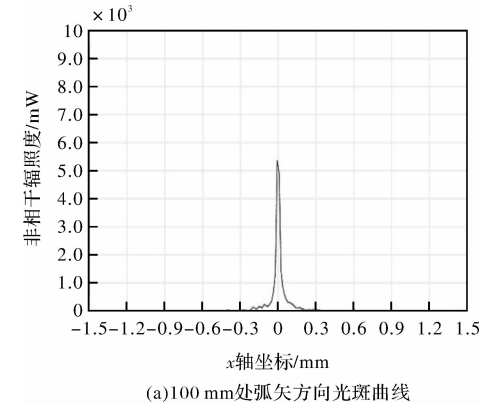


图 10 距离光源 100 mm、500 mm 处光斑在弧矢与子午方向光强分布曲线

Fig. 10 Light intensity distribution curves in meridian and sagittal directions at 100 mm, 500 mm away from light source

3.2 一维扩束仿真

根据上节分析对 Powell 透镜进行建模并导入 Zemax 中, Powell 透镜建模如图 11 所示。图 12 为准直后的直径 1 mm 光斑经过 Powell 透镜后光强分布,由图可知,经过 Powell 透镜一维扩束后,通过查看 text 数据表,平坦带占比(平坦带宽度与总宽度之比)为 $33.5/40=82.9\%$,平坦带均匀度

为 0.097 6/0.113 9=85.7%，均匀度良好。

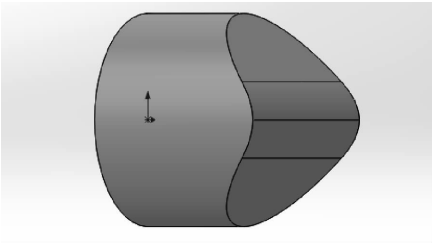


图 11 Powell 透镜建模

Fig. 11 Modeling of Powell lens

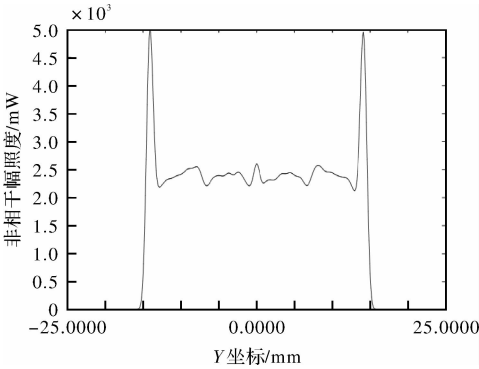
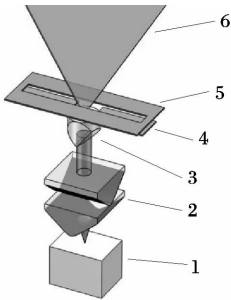


图 12 一维扩束后光强分布曲线

Fig. 12 Light intensity distribution curve after one-dimensional beam expansion

3.3 系统整体仿真

根据原向反射屏说明书提供的参数在 solid-works 中对该光学器件进行建模并导入 Zemax 中。已知上节针对系统出射光幕,将激光光幕厚度控制在 1 mm 之内,当光幕到达原向反射屏后会大致按原路返回,但仍有部分光线以一定的角度反射到出射口位置,为了使反射光幕中有效光幕与入射光幕厚度一致,即厚度均为 1 mm,在出射口设计 1 mm 的狭缝光阑,滤掉无用的具有一定角度的反射光线。系统发射接收各器件位置关系如图 13 所示,将探测器置于二维扩束出光口,狭缝光阑紧贴探测器并置于其上方。

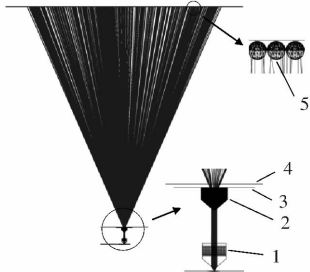


1.半导体激光器; 2.非球面准直透镜组; 3.Powell透镜; 4.探测器; 5.狭缝光阑; 6.光幕

图 13 系统各器件位置关系

Fig. 13 Elements position relationship of system

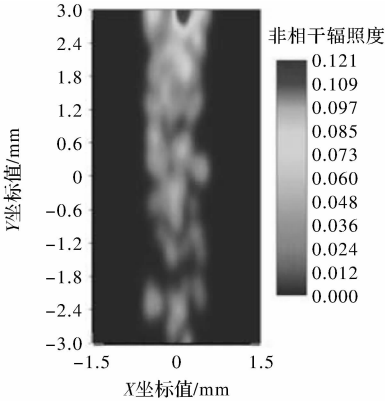
系统整体仿真效果如图 14 所示,图 15 为弹丸不经过系统光幕时探测器接收到原向反射光强 1.54 mW,弹丸穿过系统光幕时探测器接收到原向反射光强为 1.03 mW。图 16 为弹丸紧贴出射光幕侧面边缘(即 1 mm 光幕边缘),分别距离光源 100 mm、300 mm、500 mm 处的弹丸触发探测器接收到的光强大小均为 1.54 mW,显然,光强相对于无弹丸情况下没有产生变化,证明系统有效可探测光幕厚度一致且为 1 mm。



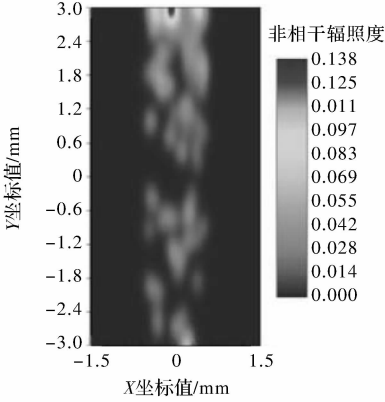
1.非球面准直透镜组; 2.Powell透镜; 3.探测器; 4.狭缝光阑; 5.原向反射玻璃微粒

图 14 系统整体仿真

Fig. 14 Overall system simulation



(a) 无弹丸情况下探测器接收光强



(b) 有弹丸情况下探测器接收光强

图 15 有无弹丸情况下探测器接收光强

Fig. 15 Detector receives light intensity with or without projectile

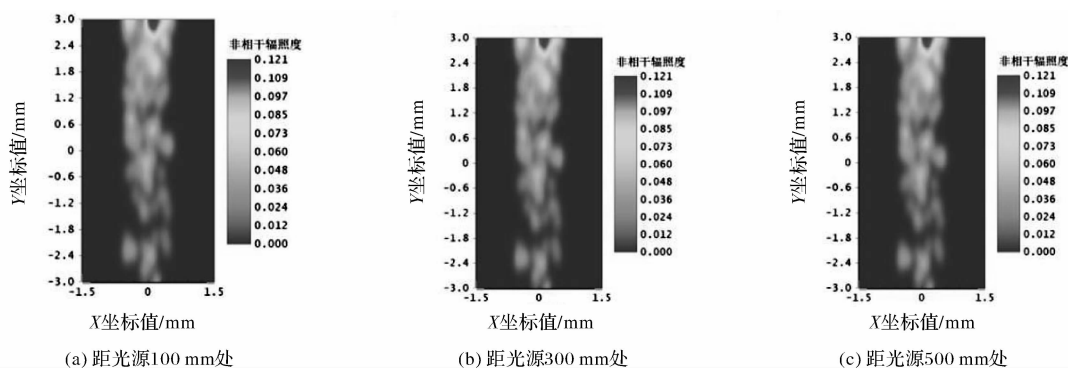


图 16 弹丸置于光幕厚度边缘处并分别距离光源不同距离时探测器接收光强

Fig. 16 Received intensities when projectile is placed at edge of screen thickness and is separated from light source at different distances

4 结论

本文针对原向反射式激光光幕系统,从理论出发,通过设计 2 个相互垂直的非球面透镜组,将出射光斑尺寸控制在 1 mm 之内且子午和弧矢方向发散角分别为 0.13 mrad、0.46 mrad,出射光束经过 Powell 透镜一维扩束后,形成厚度为 1 mm、均匀度达到 85.7% 的扇形出射光幕,经过原向反射后,配合狭缝光阑使反射光幕有效厚度控制在 1 mm。使用 Zemax 软件仿真,弹丸不经过系统光幕时探测器接收到原向反射光强 1.54 mW,弹丸穿过系统光幕时探测器接收到原向反射光强为 1.03 mW。当弹丸紧贴出射光幕侧面边缘(即 1 mm 光幕边缘),分别距离光源 100 mm、300 mm、500 mm 处的弹丸触发探测器接收到的光强大小均为 1.54 mW,显然,光强相对于无弹丸遮挡光幕情况下没有产生变化,证明系统有效可探测光幕厚度一致且为 1 mm。该结果表明,本研究方案具有可行性。

参考文献:

[1] ZHAO Donge, ZHOU Hanchang, LIU Ji, et al. High-precision velocity measuring system for projectiles based on retroreflective laser screen[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(6):544-548.

[2] LIU Ji, YU Lixia, ZHANG Bin, et al. A method for testing the fragment velocity of large yield explosion field based on flame spectrum analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(03):631-634.

刘吉,于丽霞,张斌,等.基于爆炸火光光谱分析的大当量爆炸场破片速度测试方法研究[J].光谱学与光谱分析,2016,36(03):631-634.

[3] GAO Fen, AN Ying, NI Jinping, et al. Improvement of infrared velocity light screen and analysis of measurement accuracy[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2010, 30(03):205-209.

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(03):205-209.

[4] ZHAO Donge, ZHOU Hangchang. Projectile velocity measurement technology based on large effective area laser screen [J]. Journal of Test and Measurement, 2005, 19(04):416-419.

[5] CAI Rongli, NI Jinping, TIAN Hui. Advances in optical screen technology research [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2013, 33 (08): 603-610.

蔡荣立,倪晋平,田会.光幕靶技术研究进展[J].西安工业大学学报,2013,33(08):603-610.

[6] ZHANG Xiaomei, ZHAO Donge, DING Jiangxia. Test the residual divergence angle of the original reflector[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(6):1197-1201.

章晓眉,赵冬娥,丁江霞.原向反射屏剩余发散角测试[J].应用光学,2011,32(6):1197-1201.

[7] AUSTIN R, SCHULTZ R. Guide to retroreflection safety principles and retroreflective measurements [EB/OL]. [2018-08-06]. www.roadvista.com.

[8] LI H, LEI Z. Study and analysis on a new optical detection design method for photo-electric detection target[J]. Sensor Review, 2013, 33(4):315-322.

[9] IVANOV L A, KISELEV N N, SLUGIN V A, et al. Measuring the retroreflection from glass microspheres and predicting the quality of retroreflective coatings[J]. Journal of Optical Technology, 2006, 73 (01):29-33.

[10] LIU Ji, ZHAO Donge, ZHOU Hanchang. A novel

- approach for warhead fragments velocity measurement based on laser screen[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2011, 2(03): 303-306.
- [11] CAI Fuhong, TANG Rongnian, WANG Shaowei. A compact line-detection spectrometer with a Powell lens. [J] Optik, 2018, 155(05): 267-272.
- [12] LI Mingwei, YU Xiaochen, SHAO Xiaoyang, et al. Semiconductor laser array beam shaping based on parallel glass plate[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(5): 864-869.
李明伟, 于晓晨, 邵晓阳, 等. 基于平行玻璃板的半导体激光器阵列光束整形[J]. 应用光学, 2013, 34(5): 864-869.
- [13] FANG Zhenzhen. Study on high power semiconductor laser aspherical lens group collimation shaping technology[D]. Chengdou: University of electronic science and technology, 2017.
- 方珍珍. 大功率半导体激光器非球面透镜组准直整形技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [14] YIN Zhiyong, WANG Yuefeng, YIN Shaoyun, et al. Design of semiconductor laser shaping system based on hyperboloid substrate microlens array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(06): 125-130.
殷智勇, 汪岳峰, 尹韶云, 等. 基于双曲面基底微透镜阵列的半导体激光器整形系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(06): 125-130.
- [15] WANG Peifang, XIANG Yang, GAO Jian, et al. Design of laser beam doubling collimation and beam expanding system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(09): 282-287.
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(09): 282-287.