

# 基于大功率高光密度发光二极管的投弹照明灯设计

金志樑<sup>\*\*</sup>, 王沛沛, 郭立泉, 李伟民, 王海洋, 熊大曦<sup>\*</sup>

中国科学院苏州生物医学工程技术研究所光与健康研究中心, 江苏 苏州 215163

**摘要** 设计了一种基于大功率高光密度发光二极管(LED)光源的投弹照明灯。基于非成像光学理论,利用ZEMAX软件建立了以大口径高透过率菲涅耳透镜为核心元件的准直光学系统。利用焦距为1500 mm的柱面菲涅耳透镜对准直光束进行一维方向的扩散,再将灯具以6.85°的倾斜角度照射靶面,实现了大面积光斑照明。利用TracePro软件进行仿真分析,得到光斑水平方向和垂直方向的发散角分别为18.1°和2.46°。样机在靶标上投射出一个清晰、对比度高的类椭圆形亮斑,中心最大照度可达110 lx,能够满足战斗机夜间投弹训练的要求。

**关键词** 光学设计; 大功率发光二极管(LED)光源; 投弹照明灯; 非成像光学理论; 柱面菲涅耳透镜

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.122203

## Design of Projectile Spotlights Based on Light Emitting Diode with High-Power and High Optical Density

Jin Zhiliang<sup>\*\*</sup>, Wang Peipei, Guo Liquan, Li Weimin, Wang Haiyang, Xiong Daxi<sup>\*</sup>

Research Center of Light for Health, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

**Abstract** A projectile spotlight is designed based on the light emitting diode(LED) source with a high power and a high optical density. Based on the non-imaging optical theory and by using the ZEMAX software, a collimating optical system with the large-aperture and high-transmissivity Fresnel lens as the core element is established. A cylindrical Fresnel lens with a focal length of 1500 mm is used for the diffusion of the collimated beam along one-dimensional direction and then the spotlight is irradiated at the target surface with a tilt angle of 6.85° and finally a large area illumination is realized. The simulation analysis by the TracePro software shows that the divergence angles of light spot in the horizontal and vertical directions are 18.1° and 2.46°, respectively. A clear and high contrast oval-like shaped bright spot is obtained when the prototype is projecting on the aiming target, and the maximum illuminance at its center is over 110 lx, which meets the requirement of the night shooting for fighters.

**Key words** optical design; light emitting diode (LED) source with high power; projectile spotlights; non-imaging optical theory; cylindrical Fresnel lens

**OCIS codes** 220.2945; 220.4298; 080.2175; 150.2945

## 1 引言

投弹照明灯用于照亮一个面积较大的地面靶标,可应用于夜间战斗机的空中投弹演练。战斗机投弹训练在距离靶标3 km以外的上空开始操作,因此照射靶标的光斑太大、太小、太暗都会影响飞行员对靶标的判断。只有当光斑刚好照亮靶标、中心最大照度达到100 lx以上时,飞行员才能更高效地

完成投弹训练任务。此外,投弹照明灯需要离靶标有一定的安全爆破距离,这也对灯具的出光角度提出了苛刻的要求。

目前,市面上的大功率投光灯<sup>[1]</sup>普遍采用高压钠灯、高压汞灯、金卤灯等气体放电灯作为光源,功率一般在1000 W以上,光束出光角度也无法满足投弹照明的要求。近年来,也有以大功率发光二极管(LED)作为投光灯光源的报道<sup>[2-3]</sup>,但是现有

收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-06-29; 录用日期: 2018-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(51376191)、中国科学院重点部署项目(KZCC-EW-109)

\* E-mail: xiongd@sibet.ac.cn; \*\* E-mail: jinzl@sibet.ac.cn

LED光源大都以增大发光面积为代价来实现大功率照明,光源的光学扩展量较大,无法设计出能够满足投弹照明用的灯具。此外,LED光源的准直设计主要依靠自由曲面透镜或透射与反射镜结合的方法实现<sup>[4-6]</sup>,大功率LED则需要尺寸更大的透镜,加工难度大、成本高,不利于批量化生产。为填补投弹照明灯的技术空白,解决战斗机夜间训练靶场照明的迫切需求,本文研发了大功率高光密度LED光源,并以大口径高透过率菲涅耳透镜为核心元件,在远

程投光灯<sup>[7]</sup>的设计基础上加入柱面菲涅耳透镜,实现了光束特定发散角度的远距离大面积照明。

## 2 投弹照明灯的设计要求

根据靶场实际使用的要求,投弹照明灯安装在距离靶标100 m以外的灯塔上。灯塔高度约为12 m,要求灯具能在靶标区域照出一个直径约为30 m的近似圆形光斑。照射示意图如图1所示,可以根据比例关系计算出灯具与水平线间的角度为 $6.85^\circ$ 。

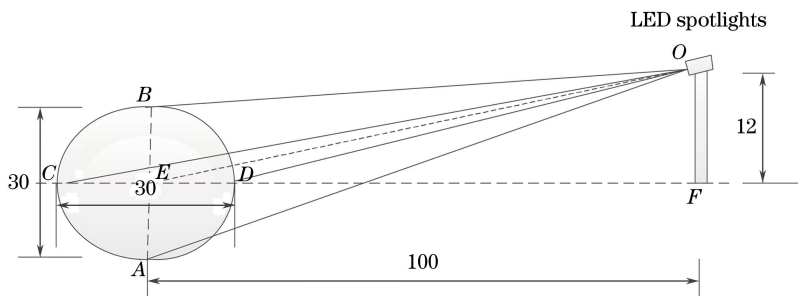


图1 LED投弹照明灯的照射示意图

Fig. 1 Schematic of irradiation of LED projectile spotlights

由图1可知,光线OA与OB之间的夹角远大于OC与OD之间的夹角,投弹照明灯的配光曲线需要满足这个要求。定义光线OA与OB之间的夹角为水平角度,光线OC与OD之间的夹角为垂直角度。根据几何关系可以计算出光线OA与OB之间的夹角约为 $17^\circ$ ,光线OC与OD之间的夹角约为 $2^\circ$ 。OF为投弹照明灯的安装高度h,OE为光斑中心点到灯的距离e,AB为光斑的直径d,DF为光斑最近点与灯塔所在位置的水平距离 $l_1$ ,CF为光斑最远点与灯塔所在位置的水平距离 $l_2$ 。则水平角度的计算公式为

$$\theta_1 = 2 \arctan\left(\frac{d}{2e}\right). \quad (1)$$

垂直角度的计算公式为

$$\theta_v = \arctan\left(\frac{h}{l_1}\right) - \arctan\left(\frac{h}{l_2}\right). \quad (2)$$

## 3 设计理论及仿真

### 3.1 大功率高光密度LED光源的设计

大功率LED芯片属高热流密度器件,其工作产生大量的热量需要不同的热通道传递至大气,实现与外界的热交换。高导热的垂直结构芯片的基底材料和高导热固晶材料的选择、固晶层的厚度控制、烘烤温度和时间控制以及封装基板的设计都对大功率模组的封装起着至关重要的影响。其中封装基板作

为整个LED散热系统中最重要的组成部分,除了承载芯片,更是将芯片产生的热传给冷却装置的载体。AlN陶瓷<sup>[8]</sup>作为一种新型的LED封装基板材料,具有热导率高(其理论热导率可达 $180 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )、强度高、热膨胀系数小、介电损耗小、耐高温和化学腐蚀且无毒环保等优点。故以AlN陶瓷基板和铜基板作为复合材料基板,导热界面材料的光电性能优于银胶的纳米银材料。所用芯片为垂直结构芯片,激发波长为452 nm,主波长为560 nm,单颗芯片光源的发光尺寸为 $1.2 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 。采用丝网印刷技术,以正性、负性两种油墨掩模方式制作电路图型,完成了一款八串四并的陶瓷基板印刷电路,将垂直结构芯片超紧密地贴在陶瓷基板电路上,完成了超大功率芯片模组的封装。如图2(a)所示,光源由32颗芯片组成,在500 W电功率的恒流源驱动下,芯片的电功率密度大于 $800 \text{ W}/\text{cm}^2$ ,光源色温为7500 K,可发出光通量大于 $2.7 \times 10^4 \text{ lm}$ 的光,光谱曲线如图2(b)所示。

### 3.2 投弹照明灯的配光曲线设计

投弹照明灯的光学系统主要由大功率高光密度LED光源、玻璃透镜、菲涅耳透镜及柱面菲涅耳透镜组成,如图3所示。首先对LED光源进行一次配光,利用透镜组配合菲涅耳透镜的光学系统使出射角度等于垂直角度。再进行二次配光,保持垂直角度不变,通过调节柱面菲涅耳透镜使水平角度满足要求。

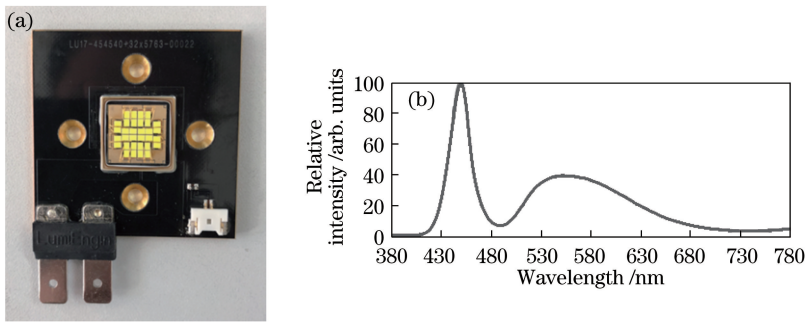


图2 LED光源。(a)模组实物图;(b)光谱曲线

Fig. 2 LED light source. (a) Real map of module; (b) spectral curve

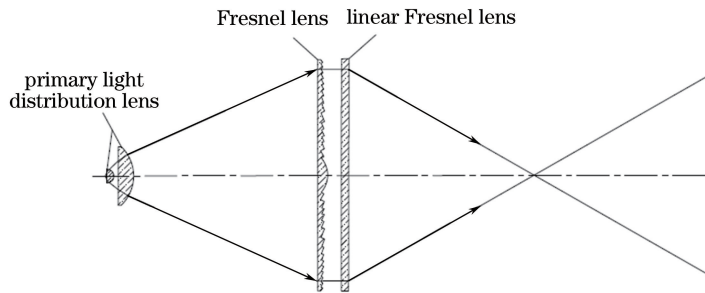


图3 LED投弹照明灯的光学系统组成

Fig. 3 Structural diagram of optical system for LED projectile spotlights

### 3.2.1 菲涅耳透镜的设计

菲涅耳透镜<sup>[9-10]</sup>的设计思路是将透镜分成若干个具有不同曲率的环带,使通过每一环带的光线近似会聚在同一焦点上。在大孔径光学系统中,以菲涅耳透镜代替单透镜或二次曲面透镜,可以减小透镜的质量和厚度,并在一定程度上减小球差。菲涅耳透镜的主要参数有通光直径、基面厚度、材料折射率及透镜焦距。

在非成像设计和照明光学中,当光传输过程中无吸收、散射、增益或菲涅耳反射时,可以认为光学扩展量是守恒的<sup>[11]</sup>。光学扩展量的定义为

$$\xi = n^2 \iint \cos \theta dA_s d\Omega, \quad (3)$$

式中  $n$  为光源的空间折射率;  $A_s$  为光源面积;  $\theta$  为微元面积  $dA$  的法线与微元立体角  $d\Omega$  的中心轴间的夹角;  $\Omega$  为空间立体角。若平面光源的法向正对入瞳,其面积  $A_s$  变化不会显著改变入瞳所对应的立体角。立体角由视场接收角  $\theta_a$  求出,视场接收角表示从入瞳进入的光将无损地从出瞳出射。故系统的扩展量可表示为

$$\xi = n^2 A_s \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_a} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \pi n^2 A_s \sin^2 \theta_a, \quad (4)$$

式中  $\varphi$  为光源微元平面内的空间方位角。

所采用的大功率 LED 的光源面积约为  $62 \text{ mm}^2$ ,收集角度设置为  $120^\circ$ ,根据(4)式及投弹照明灯要求的垂直角度为  $2^\circ$ ,可以计算出菲涅耳透镜的通过孔径至少需要  $436 \text{ mm}$ 。

投弹照明灯的使用环境比较恶劣,因此灯具尺寸不宜过大。考虑灯具长度与灯具直径尺寸相当时比较合理,因此在去除 LED 光源热沉厚度以及灯罩灯保护结构的厚度后,菲涅耳透镜的焦距确定为  $235 \text{ mm}$ 。环带高度  $H_j$  ( $j=1,2,\dots,n'$ )由菲涅耳透镜的通光孔径和环带分割数量  $n$  决定,设定菲涅耳透镜的焦距为  $L$ ,可采用向量及折射定律结合的方法<sup>[12]</sup>求解菲涅耳透镜的结构参数。菲涅耳透镜环带结构的示意图如图4所示,其中,  $\mathbf{N}_0$  为环带的法向量,  $\mathbf{N}_1$  为入射光的单位矢量,  $\mathbf{N}_2$  为透射进入菲涅耳透镜光线的单位矢量,  $\mathbf{N}_3$  为透射出菲涅耳透镜光线的单位矢量,  $R_1$  为环带的半径,  $p$  为第一环带计算起始点,  $D$  为菲涅耳透镜出射面与环带起始点曲率中心的距离,  $O_1$  为各环带起始点曲率中心,  $A_1$  为菲涅耳透镜的焦点。

折射定律的矢量形式可以表示为

$$[1 + n^2 - 2n(\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})]^{1/2} \cdot \mathbf{N} = n \cdot \mathbf{I} - \mathbf{O}, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{O}$  为光线经反射或折射后的单位矢量;  $\mathbf{I}$  为入射光线的单位矢量。

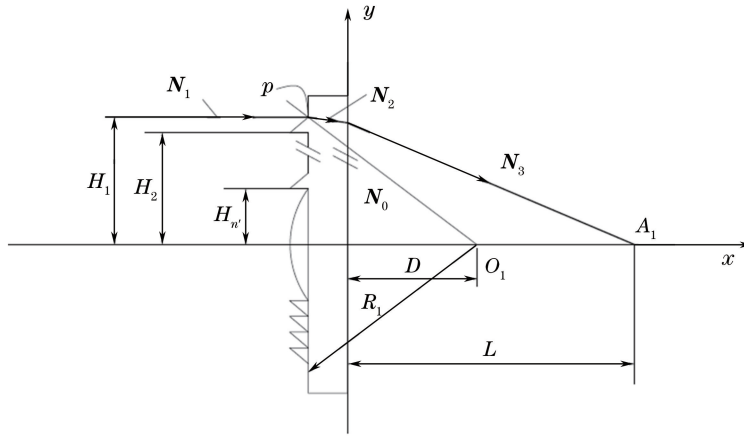


图4 菲涅耳透镜环带结构的示意图

Fig. 4 Schematic of ring structure for Fresnel lens

由图4可知,计算出环带的法向量 $\mathbf{N}_0$ 后,即可得到第一环的倒角 $\alpha = \arctan(-N_{0x}/N_{0y})$ ,其中 $N_{0x}$ 、 $N_{0y}$ 分别为 $\mathbf{N}_0$ 在 $x$ 、 $y$ 轴上的分量。根据环带高度 $H_1$ 和 $L$ ,可以得到

$$\mathbf{N}_3 = (L, -H_1) \xrightarrow{\text{normalize}} \mathbf{N}'_3 = \left( \frac{L}{S}, -\frac{H_1}{S} \right), \quad (6)$$

式中 $S = \sqrt{L^2 + H_1^2}$ 。

根据折射定律求得 $\mathbf{N}_2$ 为

$$\mathbf{N}_2 = \left( \frac{S+L}{S \cdot n}, -\frac{H_1}{S \cdot n} \right). \quad (7)$$

$\mathbf{N}_1$ 平行于光轴,故 $\mathbf{N}_1$ 可以表示为

$$\mathbf{N}_1 = (1, 0). \quad (8)$$

此时,已知出射光线、入射光线向量,即可求出 $\mathbf{N}_0$ 为

$$\mathbf{N}_0 = n \cdot \frac{\mathbf{N}_2}{|\mathbf{N}_2|} - \frac{\mathbf{N}_1}{|\mathbf{N}_1|}. \quad (9)$$

依次类推,可以得到除中心以外的所有环带的倒角参数。当环带数比较多时,中心环的半径 $R$ 可近似为 $L/2$ 。

### 3.2.2 一次配光透镜组设计

非成像光学主要研究光学系统对光能量传输的控制,因此,投弹照明灯得配光系统主要需要完成两个任务:1)将来自光源的光线投射到目标区域形成特定的光强分布;2)在完成第一个任务的前提下实

现尽可能高的效率。

利用ZEMAX软件进行一次配光透镜组的设计和优化。根据LED芯片的排列形状,计算出光源集成的芯片外接圆直径约为12 mm。根据3.2.1小节的推导,菲涅耳透镜的直径和焦距分别定为450 mm和300 mm。光线经过面光源出射,经过两个玻璃透镜和一个菲涅耳透镜后,折射成近平行光束,由像平面接收。

#### 1) 平凸透镜组的初始参数设置

平凸透镜组采用无焦、物方远心的设置;设置第一个准直透镜的直径为50 mm,第二个准直透镜的直径为80 mm;光源简化成直径为12 mm的圆形发光面,发光角度设置为全角 $120^\circ$ ;采取物高视场,物点分别选取0, 3, 6 mm。

#### 2) 平凸透镜组的优化参数设置

在ZEMAX的评价函数中使用角度优化和尺寸控制设置。考虑投弹照明灯的生产周期和加工成本,将第一个透镜的凸面设置为四阶偶次非球面,第二个透镜的凸面设置球面透镜。通过优化得到光线追迹的示意图如图5所示。可以看出,LED光源经过透镜组和菲涅耳透镜准直后出光角度压缩至 $2.0^\circ$ ,能够满足光束垂直角度的要求。

### 3.2.3 柱面菲涅耳透镜的设计

正柱面镜是一维放大应用的理想选择,可以只作用于入射光的一个方向。但是对于大尺寸光束,

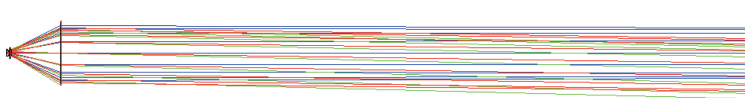


图5 光路追迹

Fig. 5 Optical path tracing



柱面菲涅耳透镜在加工和成本上均优于传统玻璃柱面镜。柱面菲涅耳透镜<sup>[13]</sup>在传统菲涅耳透镜基础上,将圆形条纹调整为横向排列,可以将平行光会聚成一条亮线,此时透镜中心到光斑之间的直线距离即为柱面菲涅耳透镜的焦距。柱面菲涅耳透镜的线聚焦示意图如图6所示。

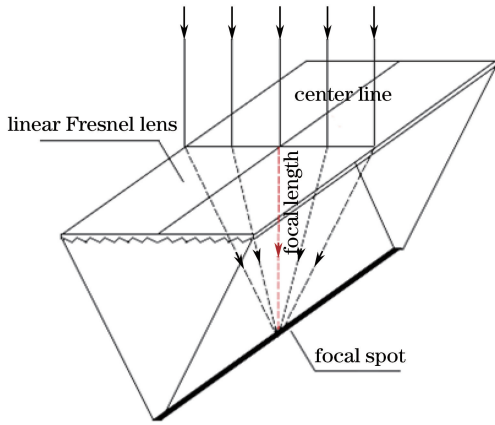


图6 柱面菲涅耳透镜聚焦示意图

Fig. 6 Schematic of focusing by cylindrical Fresnel lens

投弹照明灯的照射要求是在 100 m 的距离处得到一个直径约为 30 m 的光斑,根据图7所示的几何比例,可以计算出柱面菲涅耳透镜的焦距  $f$  为

$$f = d' \cdot p / d, \quad (10)$$

式中  $d'$  为投弹照明灯通光孔径  $MN$ ,  $p$  为柱面菲涅耳透镜焦点与靶面中心的距离  $PE$ 。计算得到柱面菲涅耳透镜的焦距  $f$  为 1500 mm。

柱面菲涅耳透镜的参数计算可以参考3.2.1小

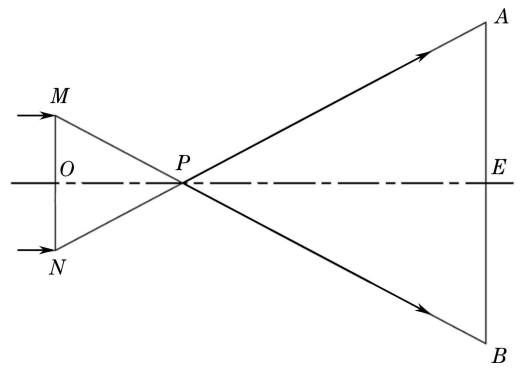


图7 柱面菲涅耳透镜的成像示意图

Fig. 7 Schematic of imaging by cylindrical Fresnel lens

节中菲涅耳透镜的参数推导过程,只是将环带倒角改为横向斜面的倒角。在已知柱面菲涅耳透镜的尺寸、焦距以及横向斜面分割数量时,可以得到柱面菲涅耳透镜每一个横向斜面的倒角参数。

### 3.3 光型及照度仿真模拟

通过 TracePro 软件利用蒙特卡罗追迹法对设计的光学系统进行仿真与分析。系统中涉及的非涅耳透镜和柱面菲涅耳透镜均采用聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 材质加工,折射率  $n = 1.49$ 。LED 光源按图1(a)所示的实物尺寸排列,设置光源为朗伯体发光,总光通量为  $2.7 \times 10^4$  lm,光线追迹数为 320 万条。

将光学系统放置于距离水平位置 12 m 的高度,并以角度  $6.85^\circ$  往水平面照射。在 100 m 的地方设置一接收面。光线追迹结果如图8(a)所示。

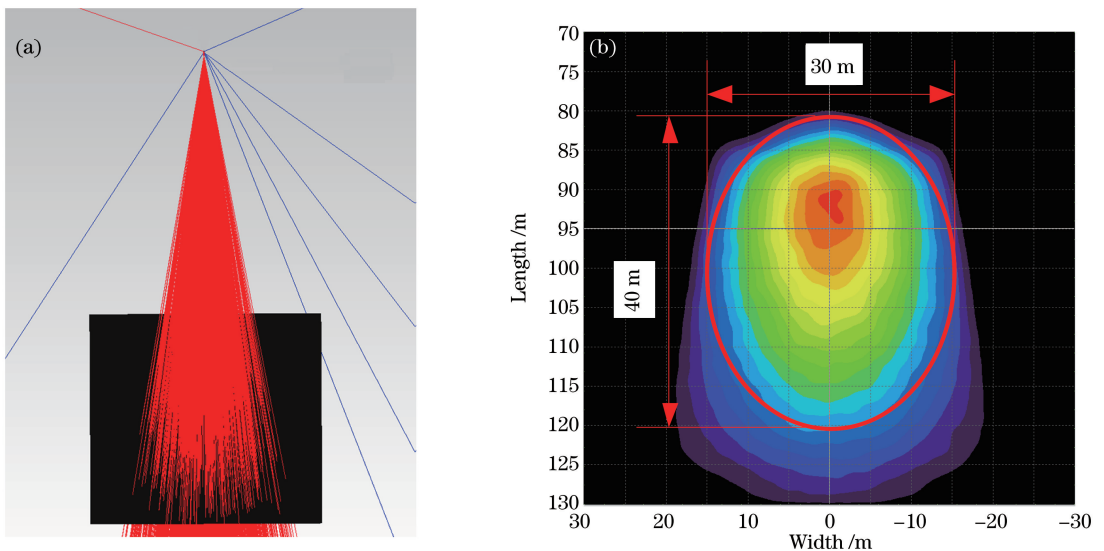


图8 仿真结果。(a)光线追迹结果;(b)接收面的照度分布

Fig. 8 Simulation results. (a) Results by ray tracing; (b) illuminance distribution on receiving surface

仿真照度分布如图 8(b)所示,可以看出,接收面上的光斑近似呈椭圆形分布,最大宽度约为 30 m,长度约为 40 m。可以计算出光束的水平发散角为  $18.1^\circ$ ,垂直发散角为  $2.46^\circ$ 。靶面中心的照度值最大为 125 lx,能够满足实际使用需求。

## 4 实验测试结果分析

根据软件设计的仿真结果,完成了光学元件的加工和装配。基于大功率高光密度 LED 光源的户

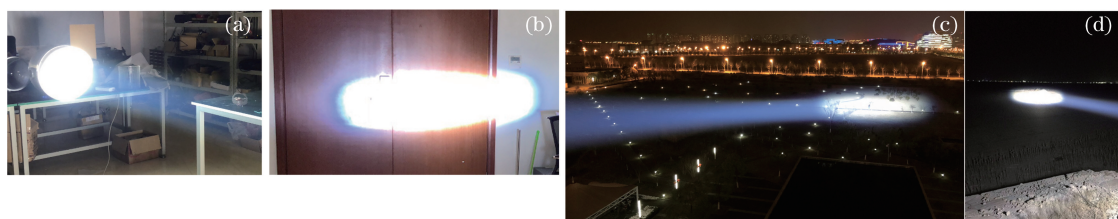


图 9 投弹照明灯实验效果。(a)实物图;(b)室内照射光斑的效果图;(c)室外实测效果图;(d)某军用靶标照射效果图  
Fig. 9 Experimental effects of projectile spotlight. (a) Real map; (b) indoor lighting effect; (c) outdoor test effect; (d) irradiation effect of some military target

外投弹照明灯可以清晰地照亮圆形靶标,光斑尺寸大小与 TracePro 软件的仿真结果基本一致。沿垂直方向和水平方向的分散角都较理论值有所增大,光斑有所变形。这是因为实际照射中,LED 的发光为  $180^\circ$ 周向发光,经过透镜组和非涅耳透镜准直后,光束发散角增大,经过  $6.85^\circ$ 的倾斜照射后,垂直方向的长度以小角度正切函数反比增大,水平方向的长度则按正切函数正比增大。光斑中心照度的测试值与仿真值的偏差有可能是由于非涅耳透镜和柱面非涅耳透镜的加工误差引起光的透过率有所下降,空气的散射和吸收也是原因之一。

## 5 结 论

针对战斗机夜间投弹的训练要求,设计了一款基于大功率高光密度 LED 光源的户外投弹照明灯。根据实际的照射要求,在远程投光灯的基础上,采用柱面非涅耳透镜对光束进行水平方向的扩散,并以一定角度倾斜投射,在靶标上投射出了一个清晰、对比度大的类椭圆形亮斑。该投弹照明灯已成功应用到某空军后勤保障基地,弥补了我国户外投弹照明灯具的空白,对提高战斗机的夜间训练效果具有重要意义。

### 参 考 文 献

[1] Cheng S Y, Song G, Pan F Y. The optical system design of floodlight based on green lighting[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2017, 28(2): 126-

外投弹照明灯的整机直径为 479 mm,长度为 450 mm,重量为 27 kg,实物如图 9(a)所示。投弹照明灯的出射光通量为  $2.2 \times 10^4$  lm,能量利用率大于 80%。在距离灯具 1.5 m 处形成一会聚光斑;在距离灯具 6.5 m 处形成一长条形光斑,光斑水平长度为 1.6 m,垂直长度为 0.5 m,中心照度最大值大于  $5 \times 10^4$  lx,如图 9(b)所示。图 9(c)、(d)所示分别为在 12 m 的高楼和灯塔上拍摄的效果图。使用照度计测试 100 m 处光斑中心的照度最大为 110 lx。

132.

程世友,宋刚,潘飞跃. 基于绿色照明理念的投光照明灯具的光学设计[J]. 照明工程学报, 2017, 28(2): 126-132.

- [2] Florian R, William J, Jannick P. Designing freeform reflectors for extended sources[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7423: 742302.
- [3] Wang H, Wang H, Du N, *et al.* Study on optical design method for LED extended sources[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7655: 765536.
- [4] Zhu M, Lou J, Pan Y J, *et al.* Design of freeform surface with uniform illumination based on new LED collimation system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0422002.
- 朱民,楼俊,潘玉珏,等. 基于新型 LED 准直系统的自由曲面均匀照明设计[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0422002.
- [5] Zhao H, Li C G, Chen Z T, *et al.* Design of collimating lens with uniform illumination for LED based on double freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0422001.
- 赵欢,李长庚,陈志涛,等. 基于双自由曲面的 LED 均匀照明准直透镜设计[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0422001.
- [6] Li Y X, Liang W Y, Ye H G, *et al.* COB LED based optical design of transmitting end with uniform luminous intensity distribution for visible light communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1022002.

- 李远兴, 梁文跃, 叶湖贵, 等. 基于 COB LED 的均匀光强分布可见光通信系统发射端的光学设计[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1022002.
- [7] Jin Z L. LED long distance illumination optical collimation system: CN10434329B[P]. 2014-12-30. 金志樑. LED 远程照明光学准直系统: CN10434329B[P]. 2014-12-30.
- [8] Chen B. Study on ceramic copper cladding based on high power LED[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 52-56. 陈波. 基于大功率 LED 散热的陶瓷覆铜基板研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 52-56.
- [9] Chen Z M. Study on concentration performance of Fresnel lens[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2013: 12-15. 陈志明. 菲涅耳透镜聚光性能研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2013: 12-15.
- [10] Yang M H, Tian Z S, Yin T T, *et al.* Design of Fresnel lens with high efficiency short focal length and large size[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(11): 98-101. 杨茂华, 田兆硕, 尹田田, 等. 高效大尺寸短焦距菲涅耳透镜设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(11): 98-101.
- [11] Koshel R J. Illumination engineering: Design with nonimaging optics[M]. Ge P, Zhao M, Liu X B, Transl. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2015: 30-35. Koshel R J. 照明工程: 非成像光学设计[M]. 葛鹏, 赵茗, 刘祥彪, 译. 武汉: 华中科技大学出版社, 2015: 30-35.
- [12] Luo Y, Feng Z X, Han Y J, *et al.* Optics in solid state lighting[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900117. 罗毅, 冯泽心, 韩彦军, 等. 面向半导体照明的光学[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900117.
- [13] Chen H, Sun K, Zhou Z J. Study on the outgoing light characteristics of cylindrical Fresnel lens [J]. Technological Development of Enterprise, 2013, 32(15): 28-29. 陈红, 孙可, 周泽军. 柱面菲涅耳透镜出光特性研究[J]. 企业技术开发, 2013, 32(15): 28-29.