

## 用于激光周向探测的发射光学系统

王泽宇<sup>1</sup>, 谢洪波<sup>1</sup>, 段文浩<sup>2</sup>, 杨童<sup>1</sup>, 陈洁<sup>1</sup>, 杨磊<sup>1\*</sup><sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;<sup>2</sup>电磁空间安全全国重点实验室, 天津 300308

**摘要** 为了提高激光周向探测中出射光场的均匀度, 增加其有效作用区域, 本文提出了一种采用圆锥型视场的前倾探测方案。基于六象限分区的布局方式, 该系统利用非球面透镜对激光二极管的输出光束在子午和弧矢两个方向同时进行准直, 通过鲍威尔棱镜实现弧矢方向扩束匀光, 采用偏转棱镜保证光束前倾角为  $60^\circ$ , 并借助弧矢方向上的柱面镜进行完整的圆锥型视场拼接。在不同距离处的模拟仿真结果表明, 系统在子午方向上出射视场角为  $\pm 0.75^\circ$ , 在弧矢方向上可以覆盖  $360^\circ$  视场完成周向探测。系统出射光场在四个目标平面上的照度均匀度均大于  $90\%$ , 能量利用率可达  $98\%$  以上。该系统结构紧凑, 整体仅由三片透镜构成, 实现了一体化设计, 为激光周向探测系统中的光学设计提供了参考。

**关键词** 周向探测; 六象限分区; 激光; 前倾探测; 圆锥型视场

中图分类号 TJ430 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231311

## 1 引言

激光周向探测技术是一种发射激光束对全周目标进行主动探测的技术<sup>[1]</sup>, 具有主动性好、方向性强、不易受电子干扰等优点<sup>[2]</sup>。目前常用的光束布局方式包括多辐射方案、分区方案、区域扫描方案和同步扫描方案。与多辐射方案相比, 分区方案可探测到的最小目标尺寸较小; 与区域扫描方案和同步扫描方案相比, 分区方案的结构简单, 无需旋转扫描系统即可形成  $360^\circ$  探测视场<sup>[3]</sup>。分区方案在每个区域内都配备相应的辐射源。由于半导体激光器及其阵列在快轴和慢轴两个方向上的光束尺寸不对称且发散角大<sup>[4]</sup>, 存在本征像散且远场光斑分布不均匀, 出射光场多呈椭圆高斯型<sup>[5]</sup>。因此, 需要发射光学系统对其进行光束整形, 对快轴发散角进行准直, 并根据分区要求将慢轴发散角精准扩束到相应的角度, 从而实现对整个圆周的无盲区探测。

目前, 国内外已经有许多学者对发射光学系统的设计进行了深入的研究。王涛等<sup>[6]</sup>通过两个弧矢面相互正交的柱面镜来改善光束发散角, 利用四个扇区来实现空间的周向探测。高洁等<sup>[7]</sup>通过三片柱面镜对光束的快轴发散角进行准直, 对慢轴发散角进行扩束, 以三象限扇形轮流发射的方式实现周向探测。Xu 等<sup>[8]</sup>通过单透镜对激光光束进行准直且对单透镜进行了扁平化设计以减小系统的尺寸, 提出了一种脉冲激光周向探测系统小型化的解决方案。Gan 等<sup>[9]</sup>和徐孝彬

等<sup>[10]</sup>采用非球面准直透镜对脉冲激光准直后入射到发射平面镜上, 借助高速旋转全反射镜实现周向探测。

然而, 上述方法只强调如何改变光束在快轴和慢轴两个方向的发散度, 并未考虑探测系统在作用范围内目标面上的能量均匀性。祝晓晨等<sup>[11]</sup>采用棱镜与柱面镜拼接的面型进行混光, 保证了在  $15\text{ m}$  内出射光的均匀性。郑翔等<sup>[12]</sup>利用非球面柱透镜阵列对慢轴进行配光, 得到在弧矢面上角均匀分布的出射光束。虽然上述方法可以实现在作用区域内能量分布均匀, 但不同分区的出射光束仍然是线状光束且出射视场仍然为棱锥型视场。与圆锥型视场相比, 棱锥型视场的作用区域小, 而且易出现各发射视场交接的区域无交叉或者过度交叉的问题, 破坏整个视场内的能量均匀性, 影响激光周向探测的抗干扰能力和探测精度。

针对激光周向探测发射光学系统的要求以及现阶段研究的局限性, 本文提出了一种基于六象限分区的发射光学方案。该方案系统采用前倾探测并形成圆锥型视场, 在  $2\sim 15\text{ m}$  探测范围内, 实现了光束以窄视场角 ( $\pm 0.75^\circ$ ) 的均匀出射。本文详细介绍了基于几何光学的设计方法, 并结合物理光学对其进行了分析与验证。整套系统结构简单、透镜片数少, 能够在紧凑的结构中实现激光周向探测。

## 2 周向探测系统模型的建立

激光周向探测系统的分区方案是在弹体径向均匀

收稿日期: 2023-07-26; 修回日期: 2023-09-07; 录用日期: 2023-09-11; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 电磁空间安全全国重点实验室基金

通信作者: \*yanglei@tju.edu.cn

地放置收发系统,通常采用 4~8 个探测象限<sup>[13]</sup>。光束需要扩束的角度与分区数量有关,分区越多,每个分区需要覆盖的角度越小,对光学设计越有利<sup>[14]</sup>。然而,分区增加就会增加激光器数量,导致系统的成本和复杂性上升,因此本文采用六象限分区方案。受激光器功率和光学系统结构的限制,传统周向探测系统的探测能量较低。为了避免能量浪费,通常采用垂直探测,其探测视场与弹轴垂直<sup>[15]</sup>,易产生探测时间短、

信号处理时间短带来的抗干扰失效等问题。而前倾探测能够提前获取目标的有关信息因而可以有效地进行目标识别和抵抗干扰。前倾角度越大,探测系统就会越早获取目标信息,但同时会导致系统结构变得复杂,对发射能量要求变高。本文将借助偏转棱镜使光束前倾角为 60°,并形成圆锥型探测视场。发射光学系统可以放置在与弹轴垂直的水平面上,整体结构如图 1 所示。

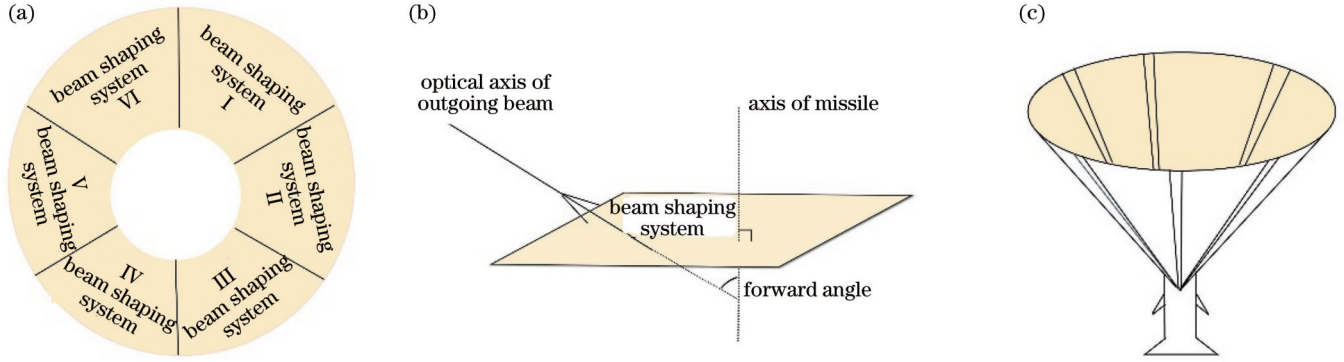


图 1 激光周向探测系统整体结构。(a)六象限分区方案;(b)单个分区结构图;(c)圆锥型探测视场  
Fig. 1 Overall structure of laser circumferential detection system. (a) Six quadrant partition scheme; (b) single partition structure; (c) conical detection field of view

选用窄脉冲半导体激光器阵列作为激光周向探测系统的光源,其输出光束在快轴方向为基模高斯模式,在慢轴方向为多模厄米-高斯模式<sup>[16]</sup>。半导体激光器不仅快轴和慢轴的光强分布不一致,而且两个方向上的束腰位置也不重合。快轴和慢轴束腰之间的距离称为本征像散 $l_{as}$ ,已知发光面在快、慢轴方向的尺寸和发散角分别为 $d_f$ 和 $d_s$ 、 $\theta_f$ 和 $\theta_s$ ,激光波长为 $\lambda$ ,则本征像散 $l_{as}$ <sup>[17]</sup>为

$$l_{as} = \left| \frac{2}{\theta_f} \sqrt{d_f^2 - \frac{4\lambda^2}{\pi^2 \theta_f^2}} - \frac{2}{\theta_s} \sqrt{d_s^2 - \frac{4\lambda^2}{\pi^2 \theta_s^2}} \right|. \quad (1)$$

### 3 光束整形方法

本文采用如图 2 所示的步骤对半导体激光光源进行光束整形。首先,利用非球面透镜对光束快轴和慢轴两个方向的分散角进行准直,再借助鲍威尔棱镜使得光束在慢轴方向扩束匀光,最后通过偏转棱镜实现前倾探测。

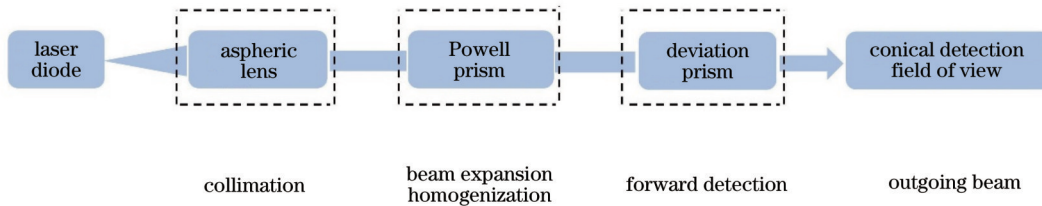


图 2 光束整形系统结构框图  
Fig. 2 Structure diagram of beam shaping system

#### 3.1 快轴和慢轴准直

若要将半导体激光光源在快轴和慢轴两个方向上同时进行准直,则光学系统在子午方向和弧矢方向上需要具有不同的焦距。本文采用非球面透镜来进行光束整形,当入射光束的束腰位于非球面透镜的前焦点上时,可以得到最佳的准直效果。基于等光程原理,通过光线追迹的方式可以获得非球面面型的表达式。确定非球面透镜的折射率后即可求得圆锥系数,圆锥

系数的取值范围决定非球面的面型<sup>[18]</sup>。

#### 3.2 慢轴扩束匀光

鲍威尔棱镜的前表面为非球面柱面,后表面为平面。经过非球面透镜的准直光束进入鲍威尔棱镜后发生折射,光线在透镜内迅速聚焦并以更大的发散角出射。通过引入大量球差<sup>[19]</sup>实现光强在一个维度上的均匀化,不同圆锥系数和曲率半径的鲍威尔棱镜会导致光束的出射角度和均匀度不同。

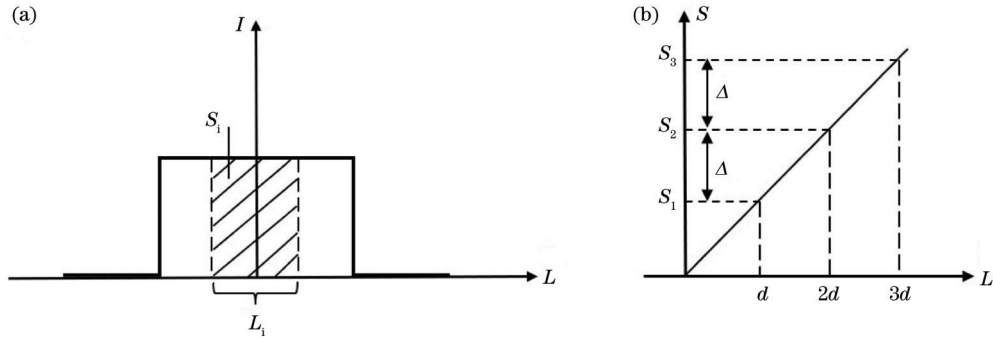


图 3 理想的平顶分布。(a)不同长度处的光强分布;(b)能量分布与光斑尺寸的关系

Fig. 3 Ideal flat top distribution. (a) Light intensity distributions at different lengths; (b) relationship between energy distribution and spot size

如图 3(a)所示,若输出光斑的能量在弧矢(慢轴)方向上呈现理想的平顶分布,则光斑上不同长度处的光强分布为矩形。不同长度 \$L\_i\$ 处的能量表现为该长度下小矩形的面积 \$S\_i\$,当长度 \$L\_i\$ 均匀增长时,小矩形面积 \$S\_i\$ 随之线性增长,相邻小矩形面积的差值 \$\Delta\$ 相等,如图 3(b)所示。通过对鲍威尔棱镜的参数进行优化,可以将每个分区在弧矢方向的光束角度扩束展宽,且使得目标面上的照度均匀,进而实现 \$360^\circ\$ 周

向探测。

### 3.3 前倾探测

在快慢轴准直、慢轴扩束匀光后加入偏转棱镜,使得光束产生一定角度的偏转并形成圆锥型探测视场。如图 4 所示,光束经过棱镜后产生前倾角度 \$\beta\$。其中, \$\alpha\$ 为偏转棱镜的顶角, \$\gamma\$ 为弧矢方向上入射于棱镜斜面的光线与光轴的夹角, \$\omega\$ 为弧矢方向上入射于棱镜斜面的光线与棱镜斜面法向量 \$\vec{n}\$ 之间的夹角。

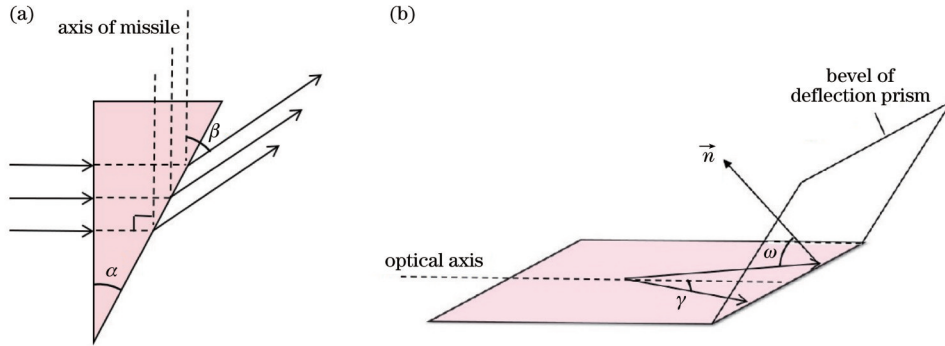


图 4 光束入射于棱镜的偏转情况。(a)子午面;(b)弧矢面

Fig. 4 Deflection of a beam incident on a prism. (a) Meridian plane; (b) sagittal plane

棱镜的顶角和折射率决定前倾角度的大小,同时棱镜的材料受棱镜斜面全反射临界条件的制约,可以得到如下关系,用于求解初始参数:

$$\begin{cases} \sin(\beta + \alpha) = n \times \sin \alpha \\ \cos \omega = \cos \gamma \cos \alpha \\ \sqrt{1 - (\cos \omega)^2} < 1/n \end{cases}, \quad (2)$$

进而得到:

$$\tan \alpha = (1/2) / (n - \sqrt{3}/2), \quad (3)$$

$$\sqrt{1 - (\cos \gamma)^2} \times 1 / \left[ \left( \frac{1/2}{n - \sqrt{3}/2} \right)^2 + 1 \right] < 1/n. \quad (4)$$

## 4 仿真与分析

根据激光周向探测原理和应用需求,得到设计指标如表 1 所示。

### 4.1 光源选型

选用的半导体激光阵列由三个周期性排列的发光单元构成,激光波长为 905 nm。单个发光单元在快轴方向上的发散角为 \$25^\circ\$,几何尺寸为 \$2 \mu\text{m}\$;在慢轴方向上发散角为 \$9^\circ\$,几何尺寸为 \$200 \mu\text{m}\$。三个发光单元沿快轴方向排列,整个发光区的尺寸为 \$200 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}\$,像散 \$L\_{as}\$ 为 \$762.068 \mu\text{m}\$。

表 1 发射光学系统设计指标

Table 1 Design indexes for emission optical systems

Parameter	Wavelength /nm	Forerake angle /(\$^\circ\$)	Detection range /m	Exit field of view angle /(\$^\circ\$)	Uniformity /%
Design index	895-915	60	2-15	\$\leq 2\$	\$\geq 85\$

### 4.2 非球面透镜设计

对于发散角较大的半导体激光光束,光束整形系统需要的数值孔径较大,选用折射率较大的材料可以有效减小系统体积,用一片非球面透镜即可实现准直。选用高折射率的玻璃材料 H-ZF7LA,设置透镜前表面为非球面柱面,其圆锥系数为 0,后表面为偶次非球面。因此得到偶次非球面的圆锥系数为 -0.315。

非球面透镜的有效焦距  $f$  与其前焦距  $F_{FD}$ 、曲率半径以及前表面顶点与前主面之间的距离  $Z$  满足以下关系:

$$\begin{cases} f = F_{FD} + Z \\ Z = \frac{t\varphi_2}{n\varphi} \\ \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - t\varphi_1\varphi_2 = \frac{1}{f} \\ \varphi_1 = \frac{n_2 - n_1}{n_2 R_1} \quad \varphi_2 = -\frac{n_2 - n_1}{R_2} \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $t$  为透镜厚度;  $\varphi$  为透镜的光焦度;  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  为透镜前后表面的光焦度;  $R_1$ 、 $R_2$  为透镜前后表面的曲率半径;

$n_1$ 、 $n_2$  分别为空气和透镜材料的折射率。设置非球面柱面在弧矢方向上曲率为 0,子午方向上存在焦距;透镜的厚度为 2 mm,子午方向上前焦距为 10 mm,因此弧矢方向上前焦距为 10.762 mm。通过在子午面和弧矢面上对光线进行追迹,根据式(5)计算得到非球面透镜的面型参数如表 2 所示。

表 2 非球面透镜的面型参数  
Table 2 Surface parameters of aspherical lenses

Object	Z		Material	R/mm	k
	position / mm	mm			
Toroidal	10		H-ZF7LA	58.118	0
Even asphere	12		H-ZF7LA	-9.255	-0.315

在初始结构的基础上对镜头参数进行优化,准直效果如图 5 所示,在 15 m 处子午方向上光斑大小为 300 mm,快轴发散角为 1.2°,在弧矢方向上光斑大小为 320 mm,慢轴发散角为 1°,说明单个非球面透镜的准直作用显著。

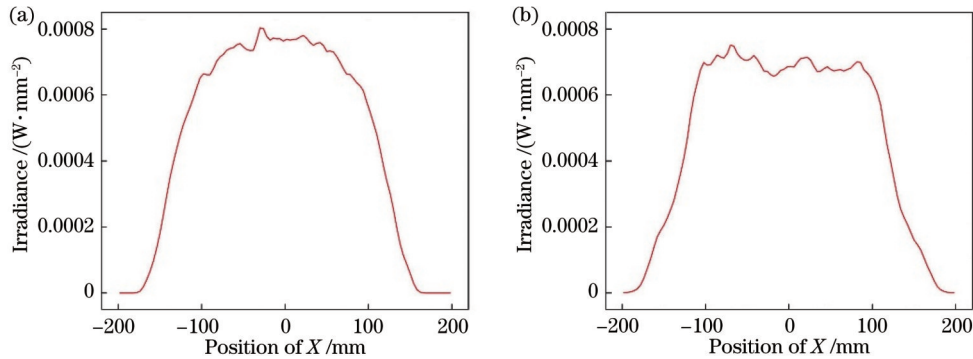


图 5 非球面透镜准直效果图。(a) 15 m 处子午方向光斑的能量分布; (b) 15 m 处弧矢方向光斑的能量分布

Fig. 5 Effect of aspheric lens collimation. (a) Energy distribution of meridional light spot at 15 m; (b) energy distribution of sagittal light spot at 15 m

### 4.3 鲍威尔棱镜设计

设置鲍威尔棱镜的初始参数,曲率半径为 2.5 mm,圆锥系数为 -2,棱镜材料为 D-ZLAF85A,依据上文获得理想平顶光束的原理对其进行优化。借助 ZEMAX 中的操作数 GENF,可以获取特定距离处  $X$  (弧矢) 方向上的能量占比。当  $L_i$  等于输出光斑的尺寸时,能量占比为 1,输出光斑的尺寸与传播距离和出射光的扩束角度有关。将 15 m 处光斑的质心作为参考点,当与质心的距离线性增加时, $X$  方向上的能量占比也作线性变化。因此,利用这一变化规律来建立评价函数,通过局部优化确定面型参数,进而实现光斑能量在 15 m 内均匀分布。15 m 处弧矢 ( $X$ ) 方向上的能量占比与  $X$  方向尺寸之间的关系如图 6 所示。

为了对光束能量分布进行更真实准确的模拟,采用 LightTools 对系统进行建模、验证以及优化。在 LightTools 中,将输出光束的均匀性和能量利用率作

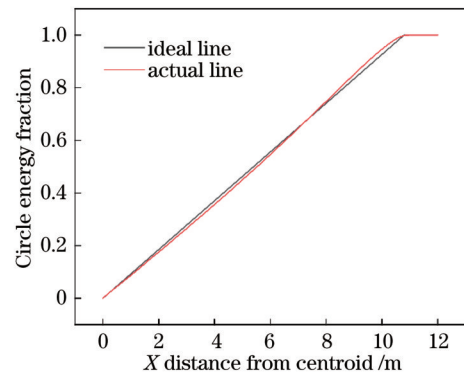


图 6 15 m 处  $X$  方向上的能量占比与  $X$  方向尺寸之间的关系  
Fig. 6 Relationship between proportion of energy in  $X$  direction at 15 m and size in  $X$  direction

为约束条件,对 ZEMAX 中优化完成的结构再次优化。不同距离处的弧矢方向能量分布如图 7 所示,在 2~15 m 范围内等间距地选取四个目标面,在四个目标平

面上弧矢方向的激光光束近似实现了平顶分布。利用下式对光斑的均匀性作定量分析:

$$\gamma = 1 - \frac{\sqrt{\sum (E_i - \bar{E})^2 / N}}{\bar{E}}, \quad (6)$$

式中:  $E_i$  为采样点数值;  $\bar{E}$  为采样点平均值;  $N$  为采样点个数。

不同距离处的均匀度结果如表 3 所示, 均匀度值

越大, 能量分布越均匀。

表 3 不同距离处的均匀度和能量利用率数据

Table 3 Uniformity and energy utilization data at different distances				
Distance / m	2	6	10	15
Uniformity / %	86.40	86.46	86.37	86.31
Energy utilization rate / %	98.94	98.59	98.42	98.31

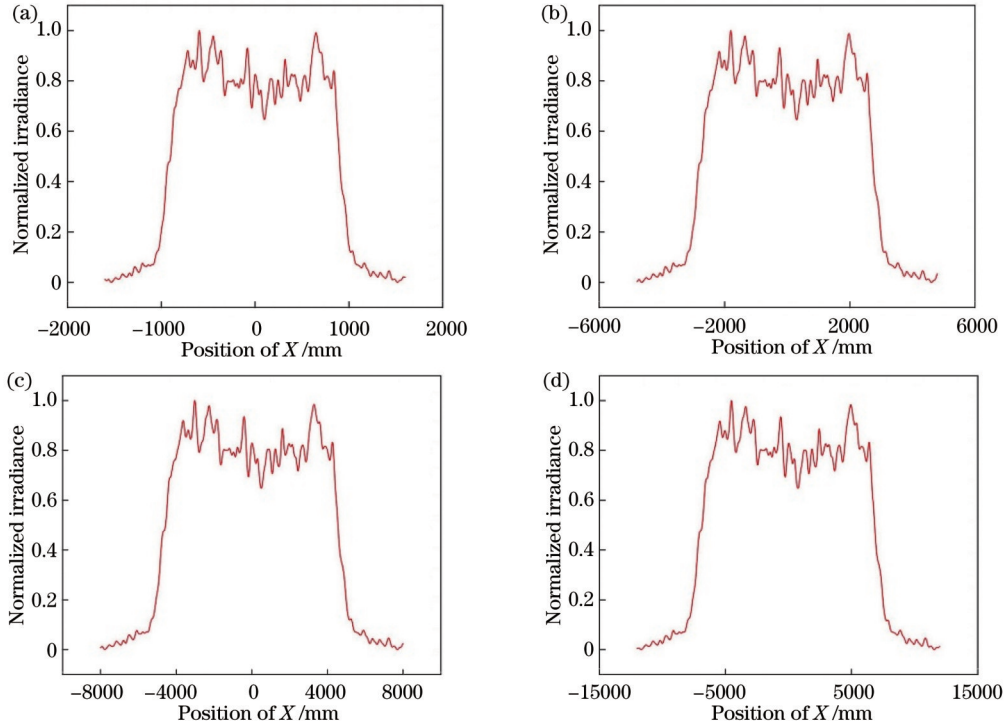


图 7 不同距离处弧矢方向的能量分布。(a) 2 m; (b) 6 m; (c) 10 m; (d) 15 m

Fig. 7 Energy distributions in sagittal direction at different distances. (a) 2 m; (b) 6 m; (c) 10 m; (d) 15 m

#### 4.4 偏转棱镜设计

偏转棱镜作为一种光学元件, 具有两个关键参数: 折射率  $n$  和顶角  $\alpha$ 。通过求解式(4)能够确定棱镜折射率的取值范围。考虑到采用模压技术将鲍威尔棱镜和偏转棱镜制成一个透镜, 本文选择了低熔点玻璃 D-ZLAF85A 作为棱镜的材料, 进而棱镜的顶角  $\alpha$  为  $27.2^\circ$ 。同时, 为了在作用范围内产生圆锥型视场, 借助棱镜的斜面来进行光程补偿, 保证不同孔径下的光束与弹轴之间的夹角相同, 都为  $60^\circ$ 。本文将斜面面型设置为扩展多项式, 选取扩展多项式在  $X$  方向的偶次幂项:  $x^0y, x^2y^0, x^0y^2, x^2y^1$ , 避免单个分区的出射光束在弧矢方向失去对称性。最后利用操作数 RAGB 来控制光束与全局坐标系下  $Z$  轴之间夹角的余弦值相同, 优化后得到的扩展多项式的表达式为

$$z = 0.0024x^0y^1 - 3.7876x^2y^0 + 0.0355x^0y^2 + 10.3031x^2y^1. \quad (7)$$

尽管使用扩展多项式面型作为棱镜的斜面可以在目标面上形成扇形光束, 但同时也会对弧矢 ( $X$ ) 方向上的光束角度进行压缩, 这导致单个分区在弧矢方向

上无法覆盖  $\pm 30^\circ$  的视场范围。因此, 本文在偏转棱镜后加入弧矢 ( $X$ ) 方向的扩束展宽柱面镜, 调整柱面镜的曲率半径以及其与偏转棱镜之间的距离, 六个分区将拼接成完整的环形视场。单个分区的结构如图 8(a) 所示, 将六个分区在垂直于弹轴的水平面上依次排布, 整体布局如图 8(b) 所示。

为了保证探测距离, 出射光束在子午面上应以窄视场发射。根据出射视场角与作用距离、目标面上环形视场的径向宽度以及前倾角的几何关系求得在子午面上出射视场角为  $\pm 0.75^\circ$ 。同时, 每个分区在弧矢面上分别覆盖  $\pm 30^\circ$  的视场, 六个分区实现  $360^\circ$  视场无盲区探测。不同探测距离下目标面上环形视场的辐照度分布如图 9 所示。按照逆时针方向将整个圆周平均分成 360 份, 通过对每个角度处环形视场径向上的辐照度进行均值处理, 得到每个角度对应的唯一辐照度值。在对数坐标系下, 以目标面上  $X$  轴正方向为基准, 横坐标为各方向与  $X$  轴正方向之间的夹角, 各方向的辐照度与其角度之间的关系如图 10 所示。根据式(6)计算得到整个圆环在周向上的均匀度依次为:  $91.66\%$ 、

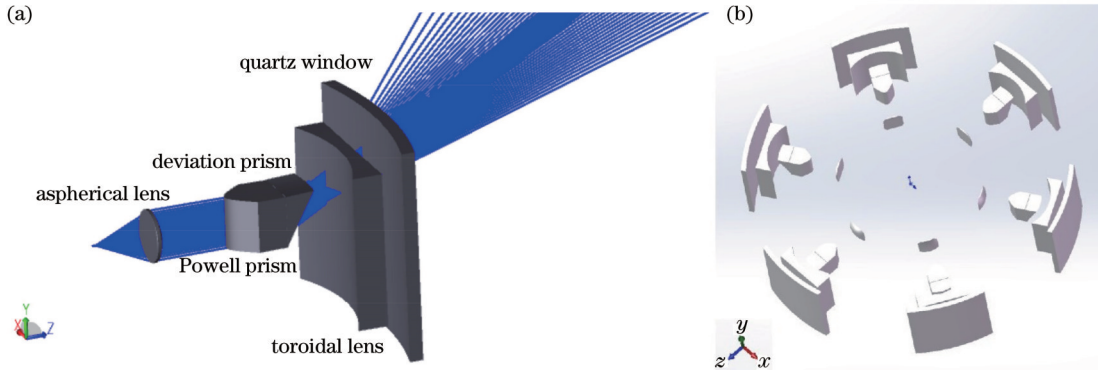


图8 发射光学系统的整体结构。(a)单个分区结构图;(b)六个分区结构图

Fig. 8 Overall structure of emission optical system. (a) Structur diagram of single partition; (b) structure diagram of six partitions

91.87%、91.85%、91.95%。由于各个分区的边缘光线彼此产生交叠,与单个分区的均匀度相比,整个环形

视场上的均匀度有所提高,可达91%以上,能量利用率可达98%以上。

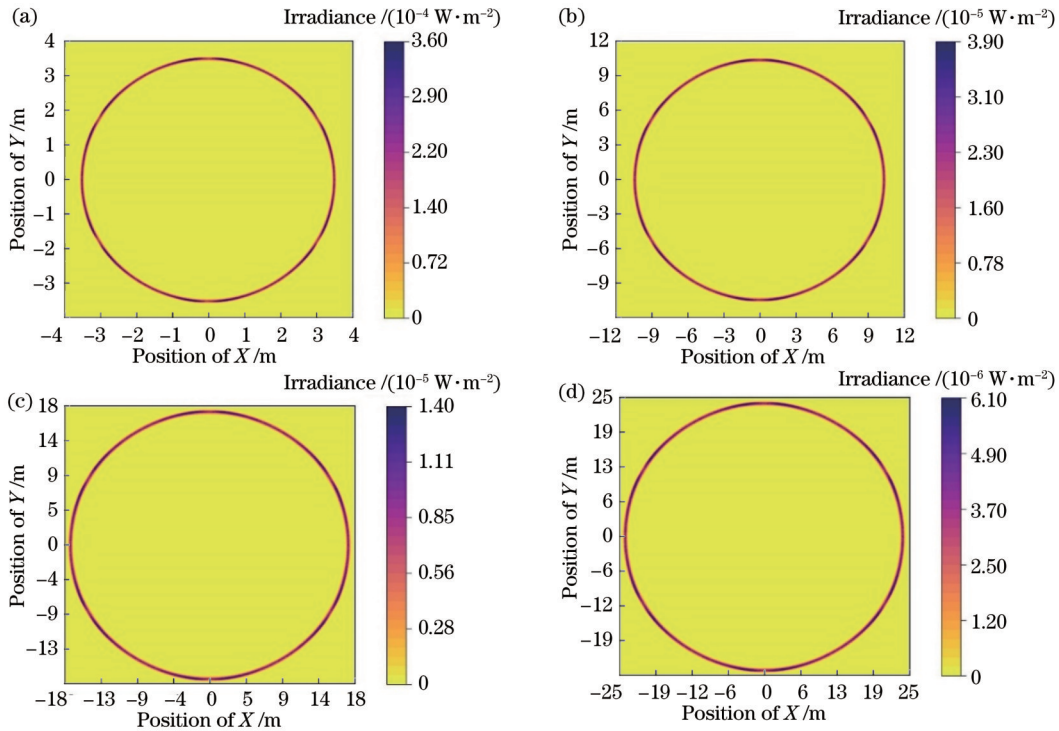


图9 整套系统在不同距离目标面上的照度分布。(a)2 m;(b)6 m;(c)10 m;(d)15 m

Fig. 9 Irradiance distributions of overall system on target surfaces at different distances. (a) 2 m; (b) 6 m; (c) 10 m; (d) 15 m

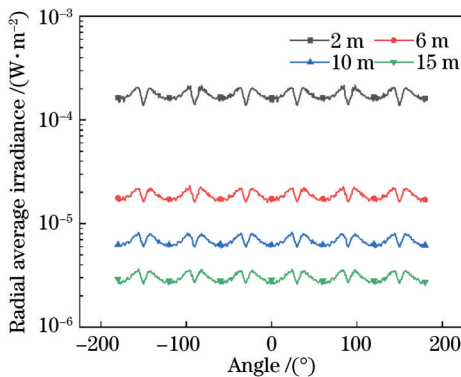


图10 环形视场周向平均辐照度与角度的关系

Fig. 10 Relationship between circumferential average irradiance and angle of annular field of view

### 5 结 论

针对周向探测系统对探测距离、出射发散角以及能量均匀度的要求,提出了基于圆锥型探测视场的六象限分区方案,并设计了一套光学前倾角为60°的发射光学系统。采用光线追迹的方式计算出非球面透镜、鲍威尔棱镜以及偏转棱镜的初始参数,通过软件约束优化得到最终面型结构。整套发射光学系统可以水平放置于与弹轴垂直的平面上,在子午面上以±0.75°的发散角出射,在弧矢面上覆盖360°视场实现周向探测。同时,在2、6、10、15 m处目标平面上光束的照度均匀度均大于90%,能量利用率高达98%。为了实现紧凑型结构,采用模压的方式将鲍威尔棱镜和偏转棱镜制

成一片,整体仅由三片透镜构成,满足工程化与轻量化的应用需求,对激光周向探测系统的光学设计有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 徐孝彬, 张合, 陈杉杉. 脉冲激光周向探测平面目标回波特性[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0414003.  
Xu X B, Zhang H, Chen S S. Echo characteristics of plane target detected by pulsed laser in circumferential direction[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0414003.
- [2] 张祥金, 甘霖, 冯颖. 激光引信非球面光学准直透镜设计[J]. 中国激光, 2012, 39(s2): s216002.  
Zhang X J, Gan L, Feng Y. A single aspheric collimating lens of the laser proximity fuze[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(s2): s216002.
- [3] 张正辉, 杨明, 许士文. 激光引信光束布局方式的选择与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 700-704.  
Zhang Z H, Yang M, Xu S W. Analysis of FOV configuration in laser proximity fuze[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(6): 700-704.
- [4] 陈本永, 徐哲毅, 张世华, 等. 基于复振幅调制的半导体激光光束整形方法[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0605005.  
Chen B Y, Xu Z Y, Zhang S H, et al. Laser diode beam shaping method based on complex amplitude modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0605005.
- [5] 孙玉博, 熊玲玲, 张普, 等. 半导体激光器光束匀化系统的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 1205003.  
Sun Y B, Xiong L L, Zhang P, et al. Optical design of laser diode beam-homogenizing system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(12): 1205003.
- [6] 王涛. 一种新型激光周视引信光学系统[J]. 应用光学, 2006, 27(5): 412-414.  
Wang T. A novel optical system for laser panoramic fuze[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(5): 412-414.
- [7] 高洁, 张大庆, 陆长平, 等. 激光引信大视场小型化发射光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(5): 0518001.  
Gao J, Zhang D Q, Lu C P, et al. Design of emission optical system for laser fuze with large FOV and miniaturization[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(5): 0518001.
- [8] 徐孝彬, 张合, 张祥金, 等. 激光周向探测小型化发射技术[J]. 光子学报, 2016, 45(3): 0314005.  
Xu X B, Zhang H, Zhang X J, et al. Miniaturized transmitting technology of laser circumferential detection[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(3): 0314005.
- [9] Gan L, Zhang H. Research on laser proximity detection method based on optical circumferential scanning technology[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10846: 1084607.
- [10] 徐孝彬, 张合. 激光周向探测系统最佳脉冲频率与扫描转速[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0508002.  
Xu X B, Zhang H. Optimal pulsed frequency and scanning speed of laser circumferential detection system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0508002.
- [11] 谢洪波, 祝晓晨, 吕二阳, 等. 一种可用于激光周视探测的发射光学系统设计[J]. 激光技术, 2013, 37(2): 191-194.  
Xie H B, Zhu X C, Lü E Y, et al. An emitting optical system design for laser panorama detection[J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 191-194.
- [12] 郑翔, 赵柏秦. 用于周向探测的均匀配光非球面柱透镜设计[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0522003.  
Zheng X, Zhao B Q. Design of aspheric cylindrical lens of uniform light distribution for circumferential detection[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0522003.
- [13] 陈红, 李世中, 杨超. 六分位探测引信战斗部起爆控制的建模及仿真[J]. 现代防御技术, 2022, 50(5): 140-151.  
Chen H, Li S Z, Yang C. Modeling and simulation of warhead initiation control of sextant detection fuze[J]. Modern Defence Technology, 2022, 50(5): 140-151.
- [14] 郑大勇. 半导体激光引信发射系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.  
Zheng D Y. Research on launching system of semiconductor laser fuze[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
- [15] 侯素霞, 罗积军, 赵福宇, 等. 激光引信探测技术研究[J]. 光学技术, 2006, 32(S1): 605-606, 609.  
Hou S X, Luo J J, Zhao F Y, et al. Study on laser fuze detection technique[J]. Optical Technique, 2006, 32(S1): 605-606, 609.
- [16] 胡玥, 辛德胜, 杨帆. 半导体激光引信光束准直技术研究[J]. 科技创新导报, 2012, 9(22): 25-26.  
Hu Y, Xin D S, Yang F. Research on beam collimation technology of semiconductor laser fuze[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2012, 9(22): 25-26.
- [17] 廖明星, 王翔, 简伟明. 基于双焦距微透镜的半导体激光束准直的研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 294-299.  
Liao M X, Wang X, Jian W M. Beam collimation of laser diode based on double-focus micro-lens[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(3): 294-299.
- [18] 靳伍银, 高姣林, 刘昌峰. 基于Zemax的消球差非球面透镜的优化设计[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(5): 168-172.  
Jin W Y, Gao J L, Yan C F. Zemax-based optimum design of aspherical lens for elimination of spherical aberration[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(5): 168-172.
- [19] 胡亚斌. 基于三线式结构光测量的关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2016.  
Hu Y B. Research on key technology based on three-wire structured light measurement[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2016.

# Emission Optical System for Laser Circumferential Detection

Wang Zeyu<sup>1</sup>, Xie Hongbo<sup>1</sup>, Duan Wenhao<sup>2</sup>, Yang Tong<sup>1</sup>, Chen Jie<sup>1</sup>, Yang Lei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, School of Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Tianjin 300308, China

## Abstract

**Objective** Laser circumferential detection systems actively detect all-round targets by emitting laser beams and feature good initiative, good directionality, and less susceptibility to electronic interference. The emission optical system is an important part that determines the detection range of the system and affects the detection accuracy. In the emission optical system, cylindrical lenses and aspherical lenses are usually adopted to change the divergence of semiconductor laser light sources, and the complex surface spliced by prisms and cylindrical mirrors and aspherical cylindrical lens arrays make the energy uniform within the active area. However, the outgoing light field of the above method is still a linear beam, and the areas where the emission fields meet are prone to non-crossing or excessive crossing, which will damage the energy uniformity within the entire field of view (FOV) and affect the anti-interference ability and detection accuracy of laser circumferential detection. To improve the uniformity of the outgoing light field and enhance its effective area, we propose a forward-tilt detection scheme using a conical FOV.

**Methods** The partition scheme of the laser circumferential detection system generally places the transmitting and receiving system evenly in the radial missile direction, usually divided into four to eight quadrants. We use a six-partition layout and set the beam's forward tilt angle to  $60^\circ$ , detecting the target in advance and obtaining relevant information. A single partition is mainly divided into three parts: fast-axis and slow-axis collimation, slow-axis beam expansion and homogenization, and forward-tilt detection. Firstly, the output beam of the semiconductor laser is collimated in both meridional and sagittal directions by employing an aspheric lens. Then, a Powell prism is utilized to realize beam expansion and homogenization in the sagittal direction. Finally, a deflection prism is leveraged to ensure that the forward tilt angle of the beam is  $60^\circ$ , and a complete conical FOV is assembled by a cylindrical lens in the sagittal direction. Additionally, we describe how to obtain the initial parameters of the aspherical lens, the principle of the Powell prism for beam expansion and homogenization, and the beam deflection in the deflection prism.

**Results and Discussions** Based on the principle of equal optical paths, the initial parameters of the aspherical lens are obtained by ray tracing in the meridian and sagittal directions (Table 2). The optimized fast axis divergence angle and slow axis divergence angle of the beam are  $\pm 0.6^\circ$  and  $\pm 0.5^\circ$ . By adopting the interactive design of ZEMAX and LightTools, the laser beams approximately achieve a flat-top distribution in the sagittal direction on the four target planes, with irradiance uniformity exceeding 86%. According to the refraction law and total reflection conditions to be met when the beam deflects in the prism, the low melting point glass D-ZLAF85A is selected as the prism material, and the apex angle of the prism is set to  $27.2^\circ$ . Meanwhile, an extended polynomial surface is employed for optical path compensation to ensure that the angle between the missile beam and axis at different apertures is the same as  $60^\circ$  to generate a conical FOV. The optimized extended polynomial [Eq. (7)] is obtained. After the deflection prism, a beam expanding and broadening cylindrical lens is added in the sagittal direction. When the radius curvature of the cylindrical lens and its distance from the deflection prism are adjusted, the six partitions will be spliced into a complete circular FOV. The entire system [Fig. 8(b)] has a FOV angle of  $\pm 0.75^\circ$  on the meridian plane, and each partition covers a FOV of  $\pm 30^\circ$  on the sagittal plane, and the six partitions realize a  $360^\circ$  FOV without blind spot detection. The irradiance uniformity of the annular FOV in the circumferential direction can reach more than 91%, and the energy utilization rate can reach over 98%.

**Conclusions** Aiming at the requirements of the circumferential detection system for the detection distance, emission divergence angle, and energy uniformity, we propose a six-quadrant partition scheme based on the conical detection FOV and design a set of emission optical system with a forward tilt angle of  $60^\circ$ . The entire system can emit at a divergence angle of  $\pm 0.75^\circ$  on the meridian plane, and cover a  $360^\circ$  FOV on the sagittal plane to achieve circumferential detection. It can be placed horizontally on a plane perpendicular to the missile axis. Meanwhile, the irradiance uniformity of the beam on the four target planes is greater than 90%, and the energy utilization rate is as high as 98%. Considering the actual processability, the Powell prism and the deflection prism are made into one piece by molding to achieve a more compact structure. The optical system consists of only three lenses to meet the requirements of engineering and light weight applications.

**Key words** circumferential detection; six-quadrant partitions; laser; forward detection; conical field of view