

激光焊接检测视觉传感器405 nm波长半导体激光线光源

赵子豪 刘旭奇 刘彦 褚兆琪 王睿 彭浩 柳娟 唐霞辉

Laser welding inspection visual sensor 405 nm wavelength semiconductor laser line light source

ZHAO Zi-hao, LIU Xu-qi, LIU Yan, ZHU Zhao-qi, WANG Rui, PENG Hao, LIU Juan, TANG Xia-hui

引用本文:

赵子豪, 刘旭奇, 刘彦, 褚兆琪, 王睿, 彭浩, 柳娟, 唐霞辉. 激光焊接检测视觉传感器405 nm波长半导体激光线光源[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0042

ZHAO Zi-hao, LIU Xu-qi, LIU Yan, ZHU Zhao-qi, WANG Rui, PENG Hao, LIU Juan, TANG Xia-hui. Laser welding inspection visual sensor 405 nm wavelength semiconductor laser line light source[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0042

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0042>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究

Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 151 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0029>

具有横向效应的半导体激光器的同步传输技术

Synchronization transmission technology of semiconductor lasers with transverse effect

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 559 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0031>

光纤布拉格光栅长外腔反馈半导体激光器特性研究

Characteristics of a distributed feedback diode laser with feedback from a fiber-Bragg-grating-based long external cavity

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1035 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0016>

具有浅刻蚀光栅的785 nm 半导体激光器

785 nm semiconductor laser with shallow etched gratings

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 931 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0019>

半导体白激光作为水下成像系统光源与单色激光、LED白光的对比成像实验

Imaging comparison experiment of an underwater imaging system with a semiconductor white laser, a monochromatic laser and an LED white light as the light source

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 466 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0012>

444.2 nm蓝光半导体泵浦掺镨氟化钇锂晶体连续351 mW输出275 nm紫外激光器

275 nm ultraviolet laser with 351 mW continuous-wave output in a Pr:YLF laser pumped by a blue laser diode at 444.2 nm

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 376 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0024>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-12

激光焊接检测视觉传感器 405 nm 波长 半导体激光光源

赵子豪[†], 刘旭奇[†], 刘彦¹, 褚兆琪², 王睿¹, 彭浩^{1*}, 柳娟³, 唐霞辉¹

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

2. 厦门大学 信息学院, 福建 厦门 361102;

3. 厦门大学 萨本栋微米纳米科学技术研究院, 福建 厦门 361102)

† 共同第一作者

摘要: 针对于激光焊接检测过程在尖角焊缝焊接、高速焊接、高反射材料焊接中对视觉传感器检测光源宽度、均匀性的巨大挑战。本文分析了线激光宽度对于检测精度的影响, 针对窄宽度、高均匀性要求, 提出了一种基于衍射光学元件 (Diffractive Optical Element, DOE) 和鲍威尔棱镜的线激光整形设计, 波长为 405 nm 的半导体激光器产生的光源通过扩束准直后使用 DOE 面整形为理想高斯光束, 之后使用鲍威尔棱镜整形为线激光, 搭建模型仿真模拟上述过程, 设计相应的实验验证线激光宽度与检测精度的关系。结果表明经过该 DOE 面后得到高斯光束在 x 方向和 y 方向的 M^2 因子分别为 1.040 和 1.038, 瑞利长度分别为 316.1 mm 和 321.1 mm, 通过鲍威尔棱镜整形后在距离鲍威尔棱镜 150 mm 处光束宽度为 19.433 mm, 均匀性为 96.93%, 满足线激光视觉传感器光源窄宽度、高均匀性要求。

关键词: 激光焊接; 焊缝检测; 视觉传感器; 半导体激光器; 衍射光学元件

中图分类号: TN249; TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0042 CSTR: 32171.14.CO.2026-0042

Laser welding inspection visual sensor 405 nm wavelength semiconductor laser line light source

ZHAO Zi-hao[†], LIU Xu-qi[†], LIU Yan¹, ZHU Zhao-qi², WANG Rui¹,

PENG Hao^{1*}, LIU Juan³, TANG Xia-hui¹

(1. School of Optics and Electronic Information, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. School of Information Science, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China;

3. Peng-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University,
Xiamen, Fujian 361102, China)

† These authors contributed equally to this work

* Corresponding author, E-mail: penghao@hust.edu.cn

Abstract: In response to the significant challenges posed by the width and uniformity of illumination from

收稿日期: 2026-03-16; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金 (62375099)

Fund program: National Natural Science Foundation of China (62375099)

visual sensors during the inspection of sharp corner welds, high-speed welding, and the welding of highly reflective materials in the laser welding process, the influence of line laser width on inspection accuracy was analyzed in this paper. To meet the requirements of narrow width and high uniformity, a line laser shaping design based on a Diffractive Optical Element (DOE) and a Powell prism was proposed. The light generated by a semiconductor laser with a wavelength of 405 nm was shaped into an ideal Gaussian beam using a DOE after beam expansion and collimation, and subsequently shaped into a line laser using a Powell prism. A model was constructed to simulate the aforementioned process, and corresponding experiments were designed to verify the relationship between line laser width and inspection accuracy. The results showed that after passing through the DOE, the M^2 factors of the Gaussian beam in the x-direction and y-direction were 1.040 and 1.038, respectively, with Rayleigh lengths of 316.1 mm and 321.1 mm. After shaping by the Powell prism, the beam width at a distance of 150 mm from the prism was 19.433 mm, with a uniformity of 96.93%, satisfying the requirements of narrow width and high uniformity for the illumination source in line laser vision sensors.

Key words: laser welding; weld seam inspection; visual sensor; semiconductor laser; diffractive optical element

1 引言

近年来,基于线激光光源的激光视觉传感器技术被广泛应用于工业检测与测量^[1-3]、复杂物体扫描和测绘^[4-6]、医学成像辅助等领域中^[7-8]。在激光焊接领域,基于线激光视觉传感器的激光焊接机器人因其较高的焊接效率和焊接精度,广泛应用于智能制造领域。然而在实际使用过程中,由于环境干扰、标定精度、线激光宽度、线激光均匀性等因素,线激光传感器的性能会降低,检测的测量值偏离理论值。尤其在高精度激光焊接过程中,激光器线宽和均匀性对焊接精度有显著影响。对于表面微缺陷的凸起特征,激光器线宽需与凸起宽度相同,才能保证至少有一个采样点准确测量凸起高度;对于凹陷特征,激光器线宽需比凹陷宽度稍小,以避免光线遮挡。而线激光亮度均匀度直接影响中心提取的准确性,当线激光图像灰度值不均匀时,误差会明显增大。因此,为了提高激光焊接检测精度,需要尽可能减小线激光宽度,提高线激光的均匀性,对线激光光源的光束质量提出了要求。

为了减小线激光宽度,需要对产生线激光的半导体激光器光源进行整形,提高光束质量。目前,线激光光束的产生主要依靠柱面镜^[9]、鲍威尔棱镜^[10]等方式,相比于柱面镜,鲍威尔棱镜产生的线激光具有更好的均匀性,但该方式线激光宽

度依赖于入射光束的光束质量,难以对线激光宽度进一步优化。而基于衍射光学器件 (Diffractive Optical Element, DOE) 的光束整形技术由于可对于光束进行相位调制^[11-12],实现光场调控,广泛应用于平顶光束^[13-14]、涡旋光束^[15-16]等特殊光斑形状的产生中,具有提高光束质量,减小线激光宽度的整形能力。

本文基于窄宽度高均匀性线激光的需要,分析了线激光宽度对于激光视觉传感器的影响,构建了一套半导体激光器光束整形光学系统,使用 DOE 器件对于光源光束质量进行优化,使用鲍威尔棱镜的方式整形为线激光。并通过仿真和实验分析了该光学系统的性能,通过实验验证线激光宽度与传感器测量精度之间的关系。研究表明,该光学系统能够进一步减小线激光宽度,提高线激光的均匀性,线激光宽度与传感器测量精度之间正相关。

2 激光焊接视觉传感器设计

2.1 激光焊接机器人系统基本结构

激光焊接机器人系统通常由线激光光源、图像成像模块、图像处理模块、机器人控制模块、激光器控制模块构成,如图 1 所示。线激光光源和图像成像模块构成的线激光视觉传感器获取焊缝表面图像传输到图像处理模块,经过图像处理

生成焊缝三维模型和位置坐标, 通过机器人控制模块和激光器控制模块指引激光焊接机器人完成焊接。

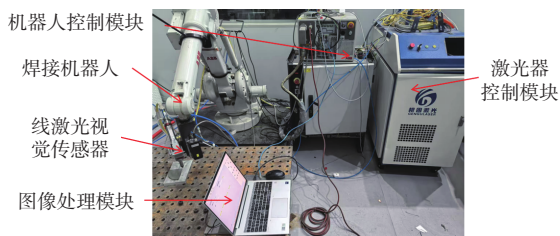


图 1 激光焊接机器人系统

Fig. 1 Basic structure of laser welding robot system

线激光视觉传感器在结构上普遍由光学系统、控制电路和保护外壳三个部分组成, 如图 2(a) 所示。其中光学系统由线激光光源、反射镜、成像镜头和相机组成。在焊缝识别的过程中, 线激光器产生的线激光光束通过反射镜照射到检测工件表面, 带有焊缝特征信息的光束被反射到成像镜头上, 在相机的感光芯片表面成像, 相机将获取的图像传输到图像处理终端, 提取焊缝表面的特征信息, 从而获取焊缝的位置和形状。控制电路控制相机对图像的接收和传输, 同时控制线激光器的开关, 保护外壳保护传感器内部光路和电路, 起到防止飞溅、散热、减震的作用。为了保证准确获取焊缝特征点的位置信息, 传感器在量程范围内始终输出清晰图像, 线激光光源、成像镜头和相机三者之间需要满足特定的空间位置关系, 如图 2 所示。

传感器的线激光产生的光束照射到参考面 H 上 O 点, 与成像镜头中心的距离为 l , 反射的光束通过成像镜头成像到相机感光芯片表面 O' , 与成像镜头中心的距离为 l' , 入射光与反射光夹角为 α , 相机感光芯片与主光轴夹角为 β , 测量平面为 H , 与入射激光交于 O_1 点, 在相机感光芯片成像点为 O_1' , 平面 H 与平面 H' 距离为 h , 点 O' 与点 O_1' 距离为 x , 成像镜头焦距为 f , 根据成像条件可得:

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{l - h \cos \alpha} + \frac{1}{l' + x \cos \beta} = \frac{1}{f}, \quad (2)$$

根据图 2(b) 中位置关系可得:

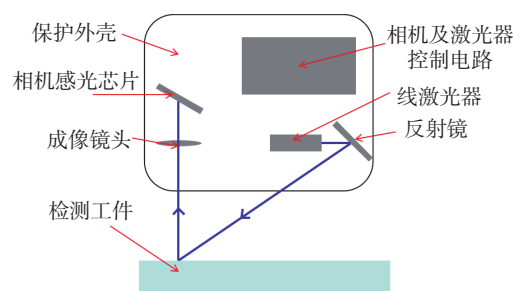
$$(l - h \cos \alpha) \tan \gamma = h \sin \alpha, \quad (3)$$

$$(l' + x \cos \beta) \tan \gamma = x \sin \beta, \quad (4)$$

将 (3)、(4) 带入 (1)、(2) 可得:

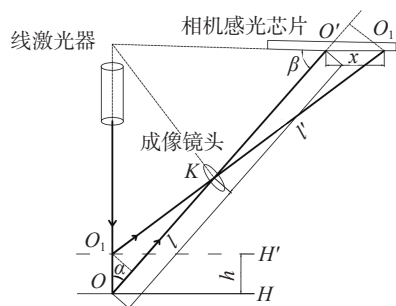
$$l \tan \alpha = l' \tan \beta, \quad (5)$$

式 (5) 为 schiefpflug 条件, 观察得到满足该条件时线激光器光轴、成像镜头光轴和相机感光芯片平面的延长线交于一点, 满足 schiefpflug 条件的光路为恒聚光路, 该条件保证了在线激光视觉传感器的量程范围内线激光照射的焊缝表面任意一点都能在满足物像关系的条件下成像到相机感光芯片上, 使得线激光始终能够成清晰像。



(a) 传感器基本结构

(a) Basic structure of sensor



(b) 传感器测量原理

(b) Sensor measurement principle

图 2 激光视觉传感器结构及测量原理

Fig. 2 Structure and measurement principle of laser vision sensor

2.2 传感器精度影响因素分析

线激光器受体积因素影响, 普遍使用半导体激光器通过聚焦准直为高斯光束后通过光束整形得到线激光。激光二极管产生的发散光束经过准直和整形后成为线激光, 在线长方向上具有发散特性, 需要具有较好的均匀性, 在线宽方向上具有准直特性, 需要有更长的瑞利距离, 根据高斯光束特性, 瑞利距离 z_R 的计算由式 (6) 可得:

$$\begin{aligned}
l_{DE} &= l_{OD} - l_{OE} = l_{OD} \left(1 - \frac{x_E}{l - h_1} \right) \\
&= l_{OD} \frac{y_D + h_1 \tan \alpha}{y_D - (l - h_1) \tan \alpha} \\
&= l_{OD} \frac{l_{CD}}{|y_D - (l - h_1) \tan \alpha|} , \quad (10)
\end{aligned}$$

根据成像原理, 成像光路的垂轴放大率 k 为:

$$k = \frac{l' + h_2}{l - h_1} , \quad (11)$$

以点 D' 、点 D'' 之间的距离作为因线激光宽度造成的失焦量, 结合式 (10), 点 D' 、点 D'' 之间的距离为:

$$\begin{aligned}
l_{D'D''} &= kl_{DE} \\
&= l_{CD} \frac{(l' + h_2)^2 \sqrt{(l - h_1)^2 + (l_{CD} - h_1 \tan \alpha)^2}}{|l \tan \alpha - l_{CD}|} , \quad (12)
\end{aligned}$$

从式 (12) 可得, 失焦量 $l_{D'D''}$ 与激光半宽度 l_{CD} 相关, 且随 l_{CD} 增大而增大, 说明线激光的非中心区域满足 *scheimpflug* 条件时无法在相机感光芯片上成清晰像, 线激光宽度增加导致焊缝图像质量下降, 使得焊缝特征提取精度下降, 最终导致焊缝识别跟踪精度降低, 为了进一步提高识别精度, 需要在传感器量程范围内获取更高光束质量的线激光, 使其瑞利距离大于量程内的线激光半传播距离, 同时在线宽方向上具有较小的光斑。

3 基于 DOE 及鲍威尔棱镜的窄宽度均匀性线激光整形方法

3.1 基于 DOE 元件的线激光整形原理

由于半导体激光器产生光束需要进行整形, 在慢轴方向上, 波导宽度较大容易激发多个横向模式, 导致光强分布不均匀, 其端面强度分布为超高斯分布, 在快轴方向上, 由于其波导厚度较小, 强烈的光场限制导致基膜占主导, 端面处强度分布近似接近于理想高斯分布。

半导体激光器产生的光束将通过两个正交的汇聚柱面镜进行预准直, 光束通过柱面镜后, 复振幅 U_{cyl} 分布变为:

$$U_{cyl} = U \exp \left[-ik \left(\frac{x^2}{2f_x} + \frac{y^2}{2f_y} \right) \right] , \quad (13)$$

根据标量衍射理论, 输入光场 $U_{cyl}(x, y, 0)$ 的

二维傅里叶变换为:

$$\begin{aligned}
A(\xi, \eta, 0) &= \int \int_{-\infty}^{+\infty} U_{cyl}(x, y, 0) \\
&\cdot \exp[-i2\pi(\xi x + \eta y)] dx dy , \quad (14)
\end{aligned}$$

式中: ξ 和 η 分别是 x 和 y 方向的空间频率。

传递函数为:

$$H(\xi, \eta, z) = \exp \left(i \frac{2\pi z}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda \xi)^2 - (\lambda \eta)^2} \right) , \quad (15)$$

传播后的角谱为:

$$A(\xi, \eta, z) = A(\xi, \eta, 0) \cdot H(\xi, \eta, z) , \quad (16)$$

通过逆傅里叶变换得到预准直后的光束传播到距离 DOE 元件前表面 z 处的光场复振幅 $U_{doe_in}(x, y)$ 为:

$$\begin{aligned}
U_{doe_in}(x, y, z) &= \iint_{-\infty}^{+\infty} A(\xi, \eta, z) \\
&\cdot \exp[i2\pi(\xi x + \eta y)] d\xi d\eta , \quad (17)
\end{aligned}$$

其光场强度分布 $I_{doe_in}(x, y)$ 为:

$$I_{doe_in}(x, y) = |U_{doe_in}(x, y)|^2 , \quad (18)$$

DOE 相位分布通过 Gerchberg-Saxton 算法优化, 其迭代过程如下:

初始时以随机相位分布 $\varphi_i^{(k)}(x, y)$ 替换 DOE 元件前表面处光场的相位分布,

$$U_{doe_in}^{(k)}(x, y) = \sqrt{I_{doe_in}(x, y)} \exp[i\varphi_i^{(k)}(x, y)] , \quad (19)$$

此时光场频域的复振幅 $U_o^{(k)}$ 分布为:

$$\begin{aligned}
U_o^{(k)}(\xi, \eta) &= \mathcal{F} \left[\sqrt{I_{doe_in}(x, y)} \exp[i\varphi_i^{(k)}(x, y)] \right] \\
&= \int \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{I_{doe_in}(x, y)} \exp[i\varphi_i^{(k)}(x, y)] \\
&\cdot \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda z} (\xi x + \eta y) \right] dx dy \\
&= \sqrt{I_o(\xi, \eta)} \exp[i\varphi_o^{(k)}(\xi, \eta)] , \quad (20)
\end{aligned}$$

式中: $I_o(\xi, \eta)$ 为光场强度, $\varphi_o^{(k)}(\xi, \eta)$ 为输出面光场相位分布, \mathcal{F} 代表傅里叶变换。

用目标光场分布 I_g 替换 I_o 作为振幅约束条件, 再次将其反向传播回输入面, 本论文中 I_g 为理想高斯光束光场分布:

$$\begin{aligned}
U_i^{(k)}(x,y) &= \mathcal{F}^{-1} \left[\sqrt{I_g(\xi,\eta)} \exp[i\varphi_o^{(k)}(\xi,\eta)] \right] \\
&= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{I_g(\xi,\eta)} \exp[i\varphi_o^{(k)}(\xi,\eta)] \\
&\quad \cdot \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda z} (\xi x + \eta y) \right] d\xi d\eta \\
&= \sqrt{I_i(x,y)} \exp[i\varphi_i^{(k+1)}(x,y)] \quad , \quad (21)
\end{aligned}$$

式中: I_i 为输入面光场强度, $\varphi_i^{(k+1)}$ 为迭代后的输入面光场相位分布, \mathcal{F}^{-1} 代表傅里叶逆变换。

用 $\varphi_i^{(k+1)}$ 替换式 (19) 中的 φ_i^k , 重复上述 (19)~(21) 过程, 直到 I_o 与 I_g 之间的差距符合需求时停止迭代, 最终得到的 $\varphi_i^{(k+1)}$ 即为 DOE 相位分布 φ_{doe} 。

由于 DOE 元件对于输入光场附加了相位 φ_{doe} , 在传播到目标面时光场强度分布为预期的 I_g , 相位分布 φ_{target} 可以按照式 (20) 得到, 为了使得目标面之后光束依旧以理想高斯光束传播, 需要在此处放置一相位分布为 $-\varphi_{\text{target}}$ 的 DOE 元件, 抵消前 DOE 元件造成的相位附加, 保证输出理想高斯光束。

3.2 基于鲍威尔棱镜的线激光匀化原理

在得到高光束质量的高斯光束后, 需要对其单一方向整形为线激光, 采用鲍威尔棱镜作为整形元件可以在保证不会影响另一个方向光束质量的前提下, 保证线激光的均匀性。其结构如图所示

鲍威尔棱镜的感光面由一个非球柱面构成, 如图 5 所示, 当准直后的高斯光束入射到鲍威尔棱镜的第一个曲面棱上时, 由于表面曲率沿一个方向上连续变化, 不同位置的光线会以不同角度发生折射, 引入大量球面像差并精确控制其分布, 实现了对高斯光束能量的重新分配, 其相当于一个相位调制器, 对入射激光的波前进行连续调制, 中心区域波前延迟较小, 边缘区域波前延迟较大, 这种相位分布使得出射光束的远场衍射图样呈现为均匀的线光斑, 构成了线激光的线长方向, 而另一方向光束特性不发生改变。

根据费马原理, 入射光线在了棱镜内部有如下表达式:

$$z(y) = \frac{\frac{1}{d} \frac{n}{(1-n)} y^2}{1 + \sqrt{1 - \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{1}{d^2} \frac{n^2}{(1-n)^2} y^2}} \quad , \quad (22)$$

式中: n 为鲍威尔棱镜的折射率, 曲率 C_y 和圆锥系数 k 表达式为:

$$\begin{cases} C_y = \frac{1}{d} \frac{n}{(1-n)} \\ k = -\frac{1}{n^2} \end{cases} \quad , \quad (23)$$

鲍威尔棱镜内部光线与光轴夹角 α 关系式为:

$$\tan \alpha = \frac{y}{d - z(y)} \quad , \quad (24)$$

光线出射后, 出射角 θ 根据折射定律推出表达式为:

$$n \sin(\alpha) = \sin(\theta) \quad , \quad (25)$$

作为相位调制器, 鲍威尔棱镜的相位调制函数表达式为:

$$\varphi(y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{C_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k) C_y^2 y^2}} + \sum_{m=2}^m a_{2m} y^{2m} \right] \quad , \quad (26)$$

式中: a_{2m} 为高阶矢高系数。

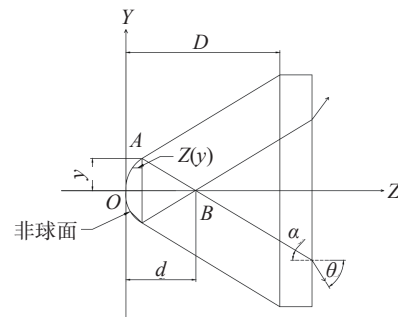


图 5 光线在鲍威尔棱镜内部的光路
Fig. 5 The light path inside the Powell prism

根据上述的计算公式, 可以对入射光的波前进行调控, 将准直激光光斑整形为传感器所需的线光斑, 调整鲍威尔棱镜的相关结构参数可以改变线光斑的具体参数, 准直激光的光束质量决定了线光斑的宽度和均匀性。

3.3 传感器光源优化仿真

本节光源优化仿真基于数值计算和光学传播仿真两步, 基本流程为使用 Gerchberg-Saxton 算法计算两个 DOE 面的相位分布, 通过非线性最小二乘拟合计算输出光束参数, 之后建立整体光路模型, 验证通过 DOE 面后的输出光束的 M^2 因子符合拟合计算的输出光束参数, 并搭建由鲍威尔

棱镜和聚焦柱面镜组成的线激光整形光路, 验证最终得到的线激光符合传感器要求。

3.3.1 DOE 面相位分布数值计算

首先构建 DOE 面的输入光场模型, 光束波长为 405 nm, 以椭圆高斯分布模拟预准直后的半导体激光器光束光场分布, 其具有椭圆高斯振幅分

布和像散球面相位分布的复振幅场, 如图 6 所示, 在 x 方向为模拟的慢轴方向, 此方向上束腰半径为 $2.5 \mu\text{m}$, 发散角为 4.5° , y 方向为模拟的快轴方向, 此方向上束腰半径为 $0.8 \mu\text{m}$, 发散角为 9.75° , 计算得到初始两个方向的 M^2 因子分别为 1.607 和 1.055。

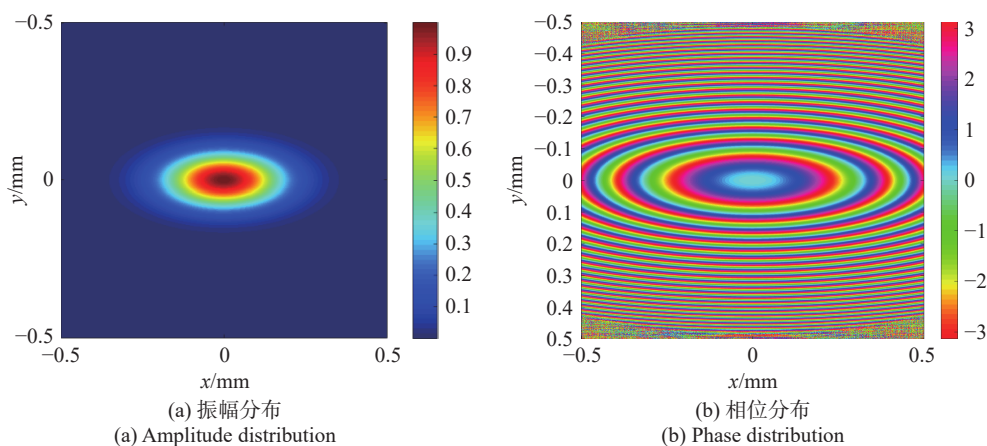


图 6 输入光场的复振幅分布

Fig. 6 Complex amplitude distribution of the input light field

布 Gerchberg-Saxton 算法中的传播函数采用角谱法, 迭代次数为 50 次, 得到第一 DOE 面的相位分布如图 7(a) 所示。通过第一 DOE 面后传播 20 mm

到目标平面, 光场相位分布如图 7(b) 所示。将目标平面光场相位分布反向后, 得到第二 DOE 面相位分布如图 7(c) 所示。

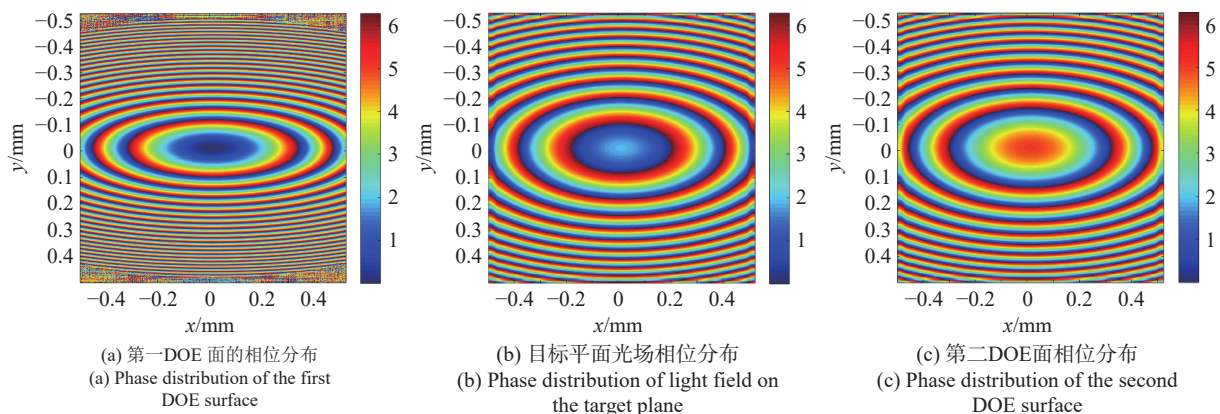


图 7 DOE 面及目标平面光场相位分布

Fig. 7 Phase distribution of DOE surface and target plane light field

最终输出的高斯光束半径为 0.2 mm , 强度分布如图 8 所示:

实际检测中, 线激光在焊缝表面的传播距离受传感器安装方式、焊接工件尺寸限制, 其有效测量量程通常覆盖束腰位置前后 $1.5 \sim 2.0 z_R$ 的范围, 而在 $\pm 1.8 z_R$ 处, 经高斯光束双曲线公式计算, 高斯光束的宽度约为束腰宽度的 2 倍, 该距离可

覆盖光束准直末端的完整特性区间。因此, 将得到的高斯分布前、后向分别传播 $\pm 1.8 z_R$ 的距离后, 通过角谱法计算不同位置的光场分布得到的 n 组数据 (z_i, w_i) 进行拟合, 拟合的目标是最小化残差平方和:

$$\min_{w_0, \theta, z_0} \sum_{i=1}^n \left[w_i^2 - \left(w_0^2 + \theta^2 (z_i - z_0)^2 \right) \right]^2, \quad (27)$$

式中: w_0 为束腰半径 ($1/e^2$ 强度半径), θ 为远场发散角 (半角), z_0 为束腰位置。

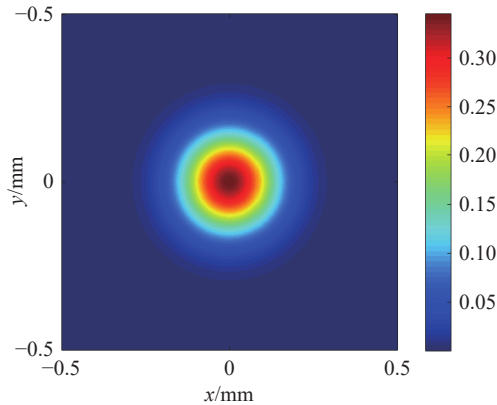


图 8 DOE 整形光束强度分布

Fig. 8 Output beam intensity distribution

使用非线性曲线拟合 lsqcurvefit 函数, 根据式 (27) 对上述数据进行拟合, 得到光束在 x 方向和 y 方向上的光束参数如表 1 所示。

表 1 光束在 x 方向和 y 方向上的光束参数

Tab. 1 Beam parameters in the x and y directions.

	w_0/mm	θ/mrad	z_R/mm	M^2
x 方向	0.202	0.637	316.1	0.99637
y 方向	0.203	0.632	322.1	0.99671

光束宽度传播曲线如图 9 所示。

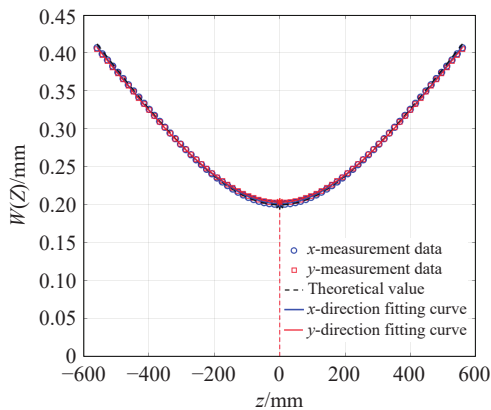


图 9 光束宽度传播曲线

Fig. 9 Beam width propagation curve

从上述数据计算可得, 光束在 x 方向和 y 方向上的 M^2 与理想高斯光束的差距分别为 0.363% 和 0.329%, 可以认为光束已经被整形为理想高斯光束。

3.3.2 DOE 和鲍威尔棱镜光束传输分析

使用切趾因子和入瞳直径定义一个束腰半径为 $0.8 \mu\text{m}$ 的高斯光源, 切趾因子 G 的具体计算由式 (28) 可得。

$$G = \left(\frac{D}{2w_0} \right)^2, \quad (28)$$

式中: D 为入瞳直径, w_0 为束腰半径。

根据式 (28), 为了精确模拟无截断的高斯光束传播, 归一化光瞳半径的 40% 处对应的切趾因子为 6.25, 使得光瞳边缘处的光束能量几乎衰减为零, 避免了孔径生硬截断产生的非期望衍射效应, 因此取切趾因子 $G=6.25$, 入瞳直径 D 可由式 (28) 计算得到为 0.004 mm 。由于 DOE 元件对波前质量要求严格, 因此使用理想准直透镜对光源扩束准直, 使用近轴面 XY 和操作数 RAED 和 RAID 将 x 方向上扩束为 $2.5 \mu\text{m}$, x 方向和 y 方向上的发散角为 4.5° 和 9.75° , 但是这样建立的光源相当于在束腰处用理想透镜加了一个球面波前, 光线最终收缩于理想透镜的前焦点, 与非序列模式中定义的二极管光源的工程近似有差别, 两种模式在观察面 z 处的均方根光斑半径工程近似为分别由式 (29)、(30) 可得。

$$w(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{w_0^2 + (\theta z)^2}, \quad (29)$$

$$w(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left| 1 + \frac{z}{z_R} \right| w_0, \quad (30)$$

当 z 远大于 z_R 时, 二者趋于相等, 计算上述角度和束腰下 x 方向和 y 方向上瑞利距离 z_R 分别为 0.047 mm 和 0.03183 mm , 因此需要在光源传播 1 mm 后进行扩束准直, 最终在序列模式和非序列模式得到的二极管光源非相干辐照度分布如图 10(a) 图 10(b) 所示, 从中可以看出两者的非相干辐照度区域一致。

将第一、第二 DOE 面的相位分布导入中, 按照 3.2.1 节仿真过程搭建光路, 得到在通过第二 DOE 面后的光场分布如图 10(c) 所示。运行物理光学分析, 通过操作数 POPD 计算得到该输出光斑在 x 方向的 M^2 因子为 1.040, 在 y 方向的 M^2 因子为 1.038, 说明该输出光束光场分布近似于理想高斯光束光场分布。

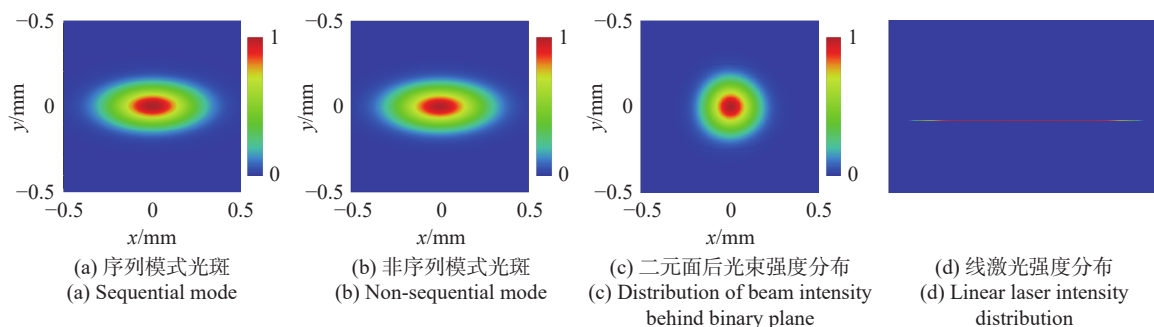
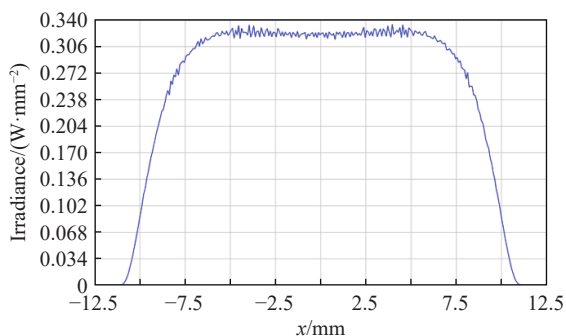


图 10 整形过程中光斑强度分布变化

Fig. 10 Changes in the intensity distribution of the light spot during the shaping process

使用鲍威尔棱镜将该高斯光束整形为线光束, 通过双锥面模拟鲍威尔棱镜, 设置鲍威尔棱镜的前表面中心距离第二 DOE 面 15 mm, 根据操作数优化得到的双锥面 x 方向半径为 1.049 mm, 圆锥系数为 -43.126, 距离鲍威尔棱镜前表面 150 mm 处的光斑图像和 x 方向截面强度分布如图 10(d) 和图 11 所示。

图 11 线激光 x 方向截面强度分布Fig. 11 Intensity distribution of the line laser in the x -direction cross-section

根据上述截面数据计算平均值 I_i , 由式 (31) 可以计算线激光的均匀度 U_{RMS} 。

$$U_{RMS} = \left(1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{I_i - \bar{I}}{\bar{I}} \right)^2} \right) \times 100\% \quad , \quad (31)$$

统计强度阈值在最大功率 85% 以上的所有包含的功率, 占总功率的比例为 83.41%, 计算得到的均匀性 $U_{RMS}=96.93\%$, 说明通过上述整形后得到的该线激光具有较高的均匀性。

4 实验验证

通过实验验证激光线款对对线激光视觉传感器精度的影响, 根据 2.1 节中传感器测量原理, 搭

建传感器实验平台如图 12 所示。实验平台由 xyz 三轴运动平台、线激光器、成像镜头、成像相机、测量 CCD 相机、测量块规组成, 线激光、成像镜头、相机之间的位置关系满足 schimpflug 条件, 线激光入射角度为 30° , 激光焦点距离出光口 150 mm, 相机倾斜角度为 60° 。线激光光束照射到测量块规表面, 通过成像镜头成像到相机, 通过图像处理算法获取块规的测量值, 通过 xyz 三轴运动平台对线激光的位置进行调整, 获取不同宽度的线激光进行测量。

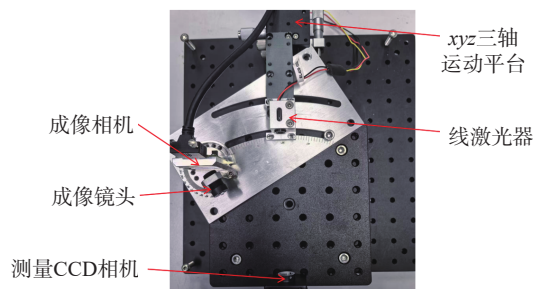
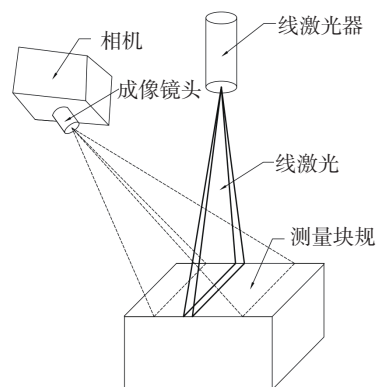
(a) 线激光束腰宽度测量
(a) Measurement of waist width of linear laser beam(b) 块规尺寸测量示意图
(b) Schematic diagram for measuring gauge size

图 12 线激光宽度及块规尺寸测试

Fig. 12 Line laser width and gauge block size testing

使用线激光器波长为 405 nm, 线激光线宽方向束腰半径测量结果如图 13 所示, 对光束传

播曲线进行拟合, 拟合得到的激光焦点处线激光束宽方向束腰半径为 $35\mu\text{m}$, 位置距离出光口 150.095 mm , 发散角为 5.545 mrad 。

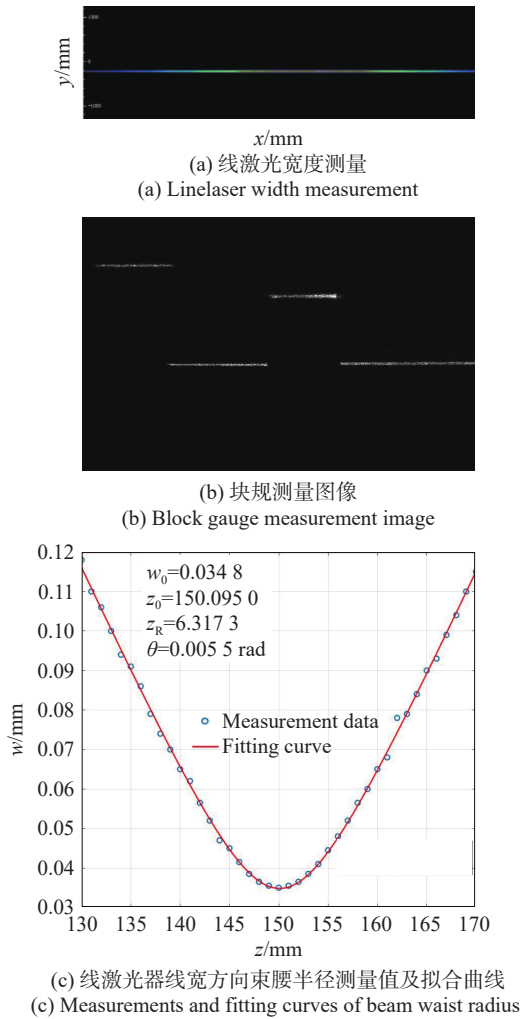


图 13 线激光束腰半径及块规宽度测量

Fig. 13 Measurement of line laser beam waist radius and gauge block width

分别测量不同尺寸块规宽度, 测量结果如图 14 所示。

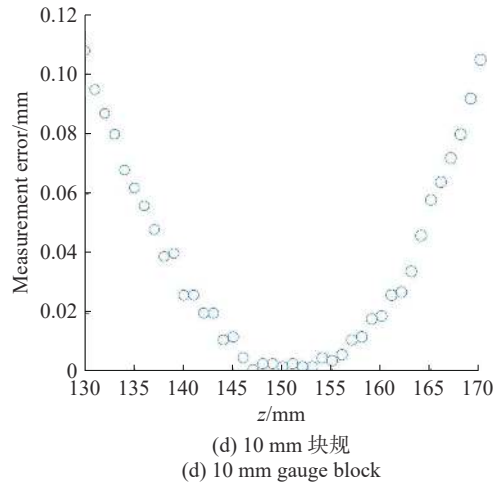
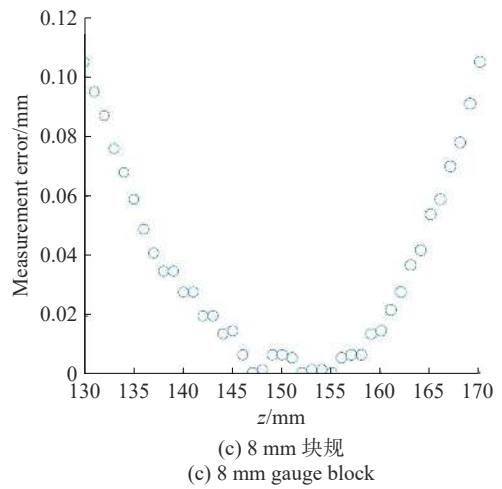
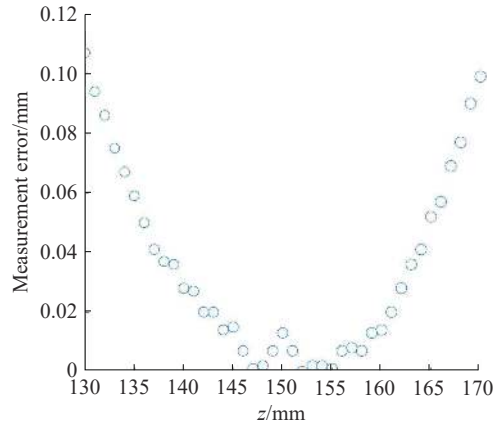
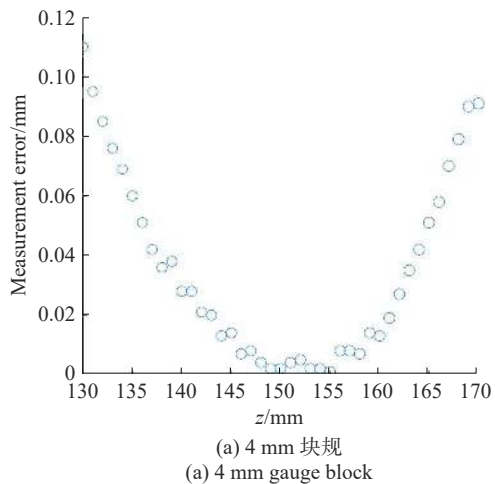


图 14 线光斑在不同束腰位置处测量块规尺寸误差
Fig. 14 Measurement of block gauge size error of line spot at different waist positions

通过以上实验结果可得, 束腰位置在线激光准直距离范围内时, 线激光宽度变化较小, 测量误差基本相等, 在偏离线激光焦点位置、远离准直距离后, 线激光宽度因线激光束宽方向发散而增加, 使用宽度增加后的线激光作为线激光视觉传感器的光源对物体进行测量, 测量误差明显增大,

且测量误差与线激光宽度成正相关关系, 验证了前文中的理论分析结果。

5 结 论

本文针对激光视觉传感器测量精度提升的需求, 分析了线激光宽度对于传感器测量精度的影响, 结合 DOE 元件和鲍威尔棱镜提出了一种提高线激光光束质量的光路结构, 计算光束 M^2 因子和均匀度验证线激光光束质量, 得到的主要结论如下:

(1) 从激光视觉传感器满足的 *scheimpflug* 条件出发, 分析了线激光入射角度对于线激光准直距离的影响, 通过推导线激光宽度与相机图像离

焦量之间的定量关系研究了线激光宽度对于传感器图像质量的影响。

(2) 提出了一种基于 DOE 元件和鲍威尔棱镜的线激光整形光路设计, 使用 DOE 元件将半导体激光器光源整形为理想高斯光束, 使用鲍威尔棱镜将高斯光束整形为线光束, 通过仿真计算得到的高斯光束在 x 方向和 y 方向上的 M^2 因子分别为 1.040 和 1.038, 准直距离分别为 316.1 mm 和 322.1 mm, 线激光线长方向上的均匀性为 96.93%。

(3) 通过对不同宽度块规的测量, 验证了线激光器作为线激光视觉传感器光源时, 线激光宽度与测量误差的正相关关系, 提出的线激光整形光路有效地提高了线激光光束质量, 满足了激光视觉传感器的窄宽度高均匀性线激光的需要。

参考文献:

- [1] RIVERA S J, AMINZADEH A, HOUBAN I, *et al.*. 3D laser inspection based on point cloud mapping, parameter effect analysis and optimization with ANOVA for geometrical distortion of welded tailor blanks of aluminum 5052-H32[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2026, 143(5-6): 2427-2449.
- [2] 赖洋, 王金栋, 郭浩然, 等. 基于线激光测量的地铁受电弓磨耗在线检测方法[J]. *中国激光*, 2023, 50(23): 2304001.
- [3] LAI Y, WANG J D, GUO H R, *et al.*. Online detection method for metro pantograph wear based on line-laser measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(23): 2304001. (in Chinese).
- [4] 李森成, 杨岳, 易兵, 等. RC-IRLSCF 方法及服役车轮踏面线激光检测应用[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0904005.
- [5] LI M CH, YANG Y, YI B, *et al.*. RC-IRLSCF method and application of laser detection of tread line of service wheel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0904005. (in Chinese).
- [6] 张东波, 王卓琳, 蒋利学. 三维激光扫描技术在外墙外保温系统缺陷检测中的应用[J]. *施工技术*, 2020, 49(9): 20-23.
- [7] ZHANG D B, WANG ZH L, JIANG L X. Application of 3D laser scanning technology in defect detection of external wall thermal insulation system[J]. *Construction Technology*, 2020, 49(9): 20-23. (in Chinese).
- [8] SINGH P D, YADAV M. DRU-Net3D: Deep Residual U-Net framework for urban building identification using three-dimensional airborne laser scanning point cloud data[J]. *Applied Geomatics*, 2026, 18(1): 48.
- [9] 郭钰, 杨永明. 3 维激光扫描技术在历史建筑保护中的应用[J]. *激光技术*, 2024, 48(4): 608-612.
- [10] GUO Y, YANG Y M. Application of 3-D laser scanning technology in the preservation of historical buildings[J]. *Laser Technology*, 2024, 48(4): 608-612. (in Chinese).
- [11] 阮立奇, 王玲, 胡劲涛, 等. 可设定角度线性激光辅助仪在椎体穿刺中的应用[J]. *中国骨伤*, 2025, 38(11): 1139-1144.
- [12] RUAN L Q, WANG L, HU J T, *et al.*. Clinical application of angle-settable linear laser auxiliary instrument in vertebral puncture[J]. *China Journal of Orthopaedics and Traumatology*, 2025, 38(11): 1139-1144. (in Chinese).
- [13] 李娇. 线性激光在尿道下裂阴茎头部解剖特征数据化描述中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- [14] LI J. *The applications of linear laser in the digitization description of glanular anatomical features in hypospadias*[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024. (in Chinese).
- [15] 黄坤, 何平安, 范若, 等. 线激光束均匀化整形方法研究. *应用光学*, 2009, 30(3): 523-526.
- [16] HUANG K, HE P A, FAN R, *et al.*. Uniformization shaping method of line laser beam[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 523-526. (in Chinese).
- [17] 李青岩, 邬佳杰, 陈飞跃, 等. 非接触式微小缺陷检测系统设计. *应用光学*, 2025, 46(4): 725-730.
- [18] LI Q Y, WU J J, CHEN F Y, *et al.*. Design of non-contact micro defect detection system[J]. *Journal of Applied Optics*,

- 2025, 46(4): 725-730. (in Chinese).
- [11] 杨亮亮, 沈法华, 赵琪, 等. 基于扩展标量衍射理论的衍射光学元件设计[J]. *光电子技术*, 2023, 43(1): 62-66.
YANG L L, SHEN F H, ZHAO Q, *et al.*. Design of diffractive optical element based on extended scalar diffraction theory[J]. *Optoelectronic Technology*, 2023, 43(1): 62-66. (in Chinese).
- [12] 段慧慧, 杨艳芳, 何英, 等. 4π 聚焦系统中衍射光学元件对聚焦场多光球结构的影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2026001.
DUAN H H, YANG Y F, HE Y, *et al.*. Clinical application of angle-settable linear laser auxiliary instrument in vertebral puncture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2026001. (in Chinese).
- [13] 戴深宇, 郑昕, 赵帅. 光束质量对平顶衍射光学元件输出的影响[J]. *光学学报*, 2023, 43(14): 1405001.
DAI SH Y, ZHENG X, ZHAO SH. Influence of beam quality on output of flat-topped diffractive optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(14): 1405001. (in Chinese).
- [14] 修龙汪, 李文青, 杨鹏, 等. 基于双曲初始相位的 GS 改进算法[J]. *光子学报*, 2022, 51(4): 0405001.
XIU L W, LI W Q, YANG P, *et al.*. Improved GS algorithm based on hyperbolic initial phase[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(4): 0405001. (in Chinese).
- [15] DU J, QUAN ZH Q, LI K, *et al.*. Optical vortex array: generation and applications [Invited] [J]. *Chinese Optics Letters*, 2024, 22(2): 020011.
- [16] KHONINA S N, KARPEEV S V, BUTT M A. Spatial-light-modulator-based multichannel data transmission by vortex beams of various orders[J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 2988.

作者简介:



赵子豪 (2000—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 2018 年于华中科技大学取得学士学位, 主要从事激光焊接检测及蓝光半导体激光器方面的研究。
E-mail: m202373262@hust.edu.cn



刘旭奇 (1999—), 男, 湖南益阳人, 硕士, 2024 年于华中科技大学取得硕士学位, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: 675956685@qq.com



彭浩 (1977—), 男, 湖北荆州人, 博士, 讲师, 2012 年于华中科技大学取得博士学位, 主要从事高功率射频 CO_2 激光器、蓝光半导体激光器及应用方面的研究。E-mail: penghao@hust.edu.cn