

## 多色分图层激光扫描自聚焦投影技术

杨帆 牟达 侯茂盛 杨嘉亮 王文博 刘洋

### Multi-color layer laser scanning and auto-focus projection technology

YANG Fan, MU Da, HOU Maosheng, YANG Jialiang, WANG Wenbo, LIU Yang

引用本文:

杨帆, 牟达, 侯茂盛, 等. 多色分图层激光扫描自聚焦投影技术[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 427–436. DOI: 10.5768/JAO202344.0207001

YANG Fan, MU Da, HOU Maosheng, et al. Multi-color layer laser scanning and auto-focus projection technology[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 427–436. DOI: 10.5768/JAO202344.0207001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0207001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 应用于激光扫描投影仪器的动态聚焦技术研究

Research on dynamic focusing system of laser scanning projection instrument

应用光学. 2018, 39(5): 605–612 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501003>

#### 超连续谱激光干扰多色CCD探测器建模仿真研究

Modeling and simulation of multi-color CCD detector under super-continuum laser jamming

应用光学. 2017, 38(6): 1018–1024 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0607003>

#### 基于改进Fleury算法的激光扫描投影路径规划方法

Research on path optimization method of laser scanning projection based on improved Fleury algorithm

应用光学. 2019, 40(3): 493–499 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0307002>

#### 便携式投影仪投影物镜设计

Design on projection objective of portable projector

应用光学. 2019, 40(2): 316–322 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0205003>

#### 双通道红外准直投影光学系统设计

Design of dualchannel infrared collimating projection optic system

应用光学. 2019, 40(1): 58–62 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0105003>

#### 双通道红外准直投影光学系统设计

Design of dual-channel infrared collimating projection optic system

应用光学. 2019, 40(1): 58–62 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0105003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0427-10

# 多色分图层激光扫描自聚焦投影技术

杨帆<sup>1</sup>, 牟达<sup>1,2</sup>, 侯茂盛<sup>1,2</sup>, 杨嘉亮<sup>1</sup>, 王文博<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学光电工程学院 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学光电工程学院 光电工程国家级实验教学示范中心, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为了突破常规激光投影仪由于单一波长的局限性造成应用场景的限制, 同时实现对不同零件、不同材料、不同装配工艺的分图层投影, 设计并搭建了多色分图层激光扫描自聚焦投影系统。系统采用2种波长的激光作为光源, 根据二向色镜的位置不同, 提出了多色共光轴和分光路2种激光扫描自聚焦投影方案, 并推导了相应的光学系统数学模型。通过系统的自聚焦功能调节镜组间距, 均可以实现在不同距离的投影面上聚焦出不同颜色的最小光斑。利用ZEMAX光学设计软件对2种投影光学系统进行仿真, 并从系统可靠性和投影效果上对2种系统进行比较分析。实验结果表明: 在3 m处的投影面上, 共光轴系统各种波长的光斑直径均在0.8 mm以内, 且光斑大小均匀, 可以实现多色分图层的扫描自聚焦投影功能。

**关键词:** 激光投影仪; 多色扫描自聚焦投影; 共光轴; 分光路; ZEMAX

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0207001

## Multi-color layer laser scanning and auto-focus projection technology

YANG Fan<sup>1</sup>, MU Da<sup>1,2</sup>, HOU Maosheng<sup>1,2</sup>, YANG Jialiang<sup>1</sup>, WANG Wenbo<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Optical Information Transmission Technology (Ministry of Education), College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Optoelectronic Engineering Education, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to break through the restriction of application scene caused by the limitation of single wavelength of conventional laser projector and realize the layer projection of different parts, different materials and different assembly processes, a multi-color layer laser scanning and auto-focus projection system was designed and established. Two wavelengths of laser were adopted as the light source, and according to the different positions of dichromatic mirror, the two laser scanning and auto-focus projection schemes of multi-color co-optical axis and separate optical paths were proposed, and the corresponding mathematical models of optical system were deduced. By adjusting the distance between mirror groups through the auto-focus function of the system, the minimum light spots of different colors could be focused on the projectors at different distances. Two kinds of projection optical systems were simulated by ZEMAX optical design software, and the reliability and projection effect of the two systems were compared and analyzed. The experimental results show that on the projection plane at 3 m, the spot diameter of various wavelengths of the co-optical axis system is within 0.8 mm and the spot size is uniform, which can achieve the scanning and auto-focus projection

收稿日期: 2022-06-27; 修回日期: 2022-08-02

基金项目: 吉林省自然科学基金 (20200201229JC)

作者简介: 杨帆 (1994—), 男, 硕士, 主要从事三维激光投影技术研究。E-mail: 446597155@qq.com

通信作者: 牟达 (1979—), 女, 博士, 教授, 硕导, 主要从事现代光学测试技术、光学设计、太赫兹技术研究。

E-mail: muda@cust.edu.cn

function of multi-color layers.

**Key words:** laser projector; multi-color scanning and auto-focus projection; common optical axis; beam splitting; ZEMAX

## 引言

目前,激光扫描自聚焦投影技术已被广泛应用在制造领域,对我国先进制造技术的发展具有重大意义<sup>[1]</sup>。激光扫描自聚焦投影由振镜快速摆动使激光发生偏转<sup>[2]</sup>,根据CAD数模图形实现在投影面上的投影<sup>[3]</sup>。

扫描投影目标由于其自身形状、位置、角度等差异,需要在不移动投影仪的情况下实现对物体的扫描投影,因此,在固定机位情况下需要系统具有自聚焦功能,实现对任意位置的精确投影。因此,激光扫描自聚焦投影系统可以有效地提升装配效率,然而,对于特殊目标的区分上依然对装配工艺员有较高的要求,需要对装配工艺有较强的工艺流程规划能力,且熟悉装配过程<sup>[4-5]</sup>,对此单一的投影目标功能略显呆板,不利于装配效率的进一步提高。因此,对于投影的零件实现不同零件、不同材料的分图层投影可以减少装配时间,提升装配效率<sup>[6]</sup>。研究显示,人眼对绿光感知最为明显<sup>[7]</sup>,因此,扫描自聚焦投影系统多采用人眼敏感绿色激光,这一波长的激光在多数表面上可见性良好。然而,有些物体的表面颜色和结构可能更适合其他颜色,对于绿色则有很强吸收作用,此场景绿色激光不再适用。

为解决单色光系统这一局限性,同时拓展系统的辅助功能,本文提出了多色分图层投影系统,将

绿色、红色2种波长激光结合起来,通过计算机控制,实现在不同投影面上投出多种色光<sup>[8]</sup>,提升装配效率。

本文阐述了多色分图层投影系统的工作原理,依据光学基本原理设计了2种多色扫描自聚焦投影光路,并利用光学设计软件进行光路仿真,依据仿真结果对2种系统进行分析比较,证明了2种多色扫描自聚焦投影方案的可行性,搭建多色共光轴扫描自聚焦投影光路,验证了共光轴系统单一及混合色光的实际效果。

## 1 多色分图层投影系统工作原理

多色分图层系统主要用来解决单色光对于特殊环境适应性不强,实现对不同零件、不同材料、不同装配工艺的分图层投影,系统主要由红光系统、绿光系统、合束系统、光学部分、移动导轨等部分组成<sup>[9]</sup>。本文搭建的多色分图层激光扫描自聚焦投影系统主要包括:红光激光器、绿光激光器、光学镜组、二向色镜、分光棱镜、振镜模块、波片、探测系统、滤波器、位移平台及测量控制模块<sup>[10]</sup>。

根据实际需求设计出多色共光轴以及多色分光路2种方案,实现多色分图层投影。多色共轴扫描系统如图1所示。激光器发出红色、绿色激光光束,通过二向色镜进入光学镜组,通过光学镜组

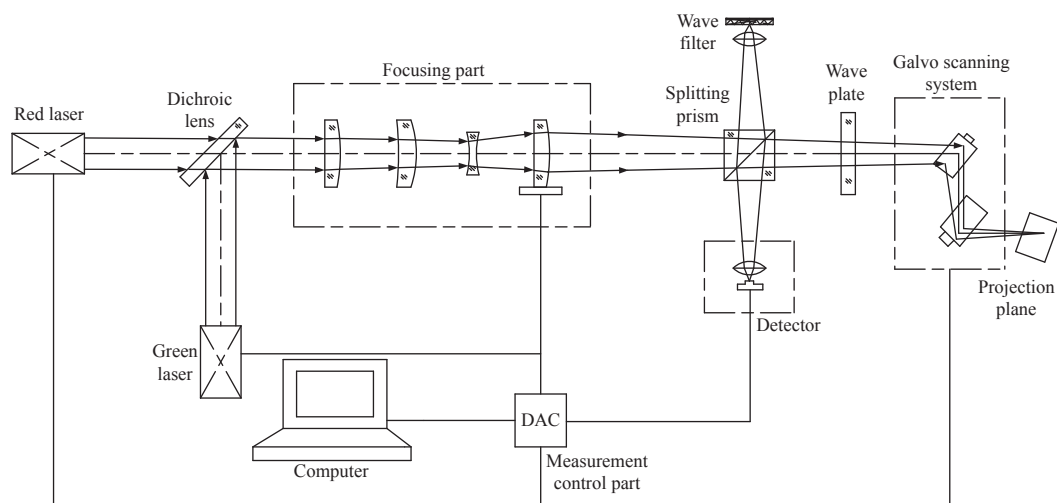


图1 多色共光轴激光扫描系统工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of multi-color co-optical axis laser scanning system

的聚焦整型模块汇聚后进入分光棱镜, 分光棱镜将光束分为 2 束, 一束垂直于原光路进入滤波器; 另一束沿原光路通过波片进入振镜模块, 经由振镜到达投影面<sup>[11]</sup>。计算机通过测量控制模块实现系统的多色投影功能, 结合振镜的坐标转化关系, 测量模块可以根据反射信号同样通过测量控制模块实现对精密位移平台的控制<sup>[12]</sup>, 保证系统在不同

投影位置具有最小的光斑<sup>[13]</sup>。

多色分光路激光扫描系统方案如图 2 所示。激光器发出的激光束分别通过对应的准直扩束光路, 将激光光束扩束以压缩光束发散角, 同时平行地传输至自聚焦镜组, 随后, 红色和绿色激光通过二向色镜合束后, 再通过光学镜组汇聚后进入偏振分光棱镜, 后续光路部分与方案一相同。

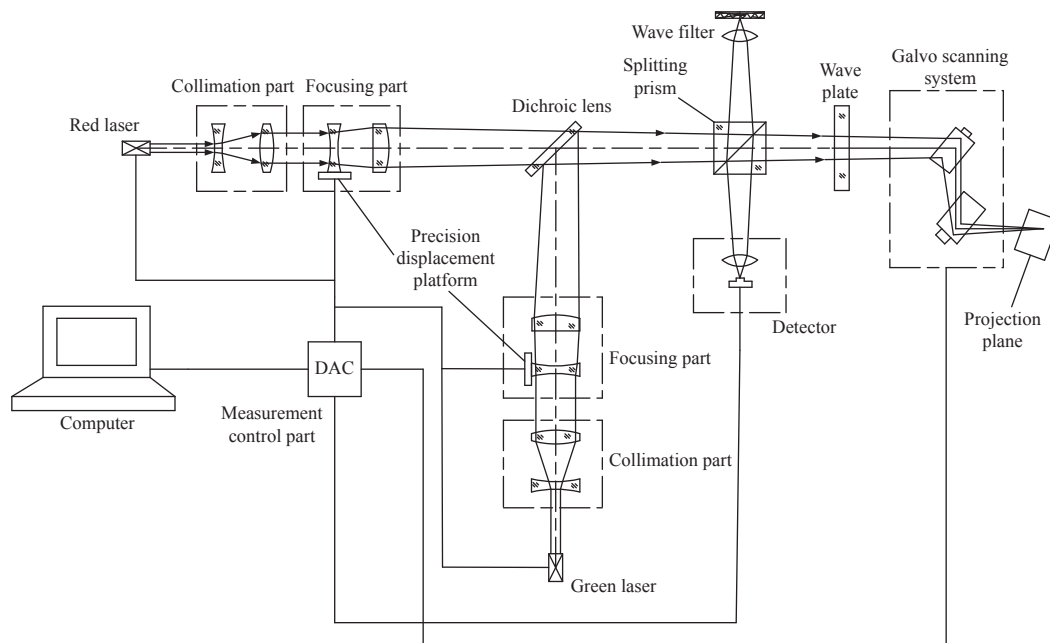


图 2 多色分光路激光扫描系统工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of multi-color beam splitting laser scanning system

## 2 多色分图层投影光学系统

为实现多色功能, 系统采用红光 635 nm、绿光 532 nm 激光器, 实现红、绿、黄三色激光投影, 其中红光和绿光可以单独投影, 黄光需要红、绿色光混合后输出。依据使用情况不同, 通过测量控制模块控制激光器通断达到投影目的。同时, 为了实现不同色光的在投影面上光斑大小均匀, 本文提出了多色共光轴以及分光路 2 种方案, 对 2 种方案进行分析并设计了对应的投影光路。

### 2.1 多色共光轴激光扫描自聚焦投影系统

图 3 为多色共光轴激光扫描自聚焦投影系统的光学结构。该结构采用 2 块正透镜、1 块弯月透镜以及 1 块负透镜组成, 光路中通过高精度位移平台移动第 4 块正透镜控制透镜间距, 实现不同距离的投影。在上述结构中, 正透镜焦距相同  $f_1=f_4$ , 弯月透镜焦距  $f_2$ , 负透镜焦距  $f_3$ , 各透镜间距如图 3 所示, 分别为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ , 此时光斑在  $S_1$  位置聚焦。正透镜移动  $z$  距离时, 光斑在相对于移动后的透

镜  $S_2$  的位置聚焦。

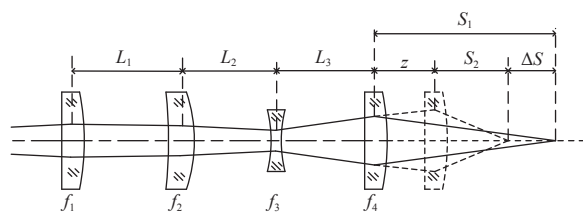


图 3 多色共光轴激光扫描自聚焦投影系统光路原理图

Fig. 3 Optical path diagram of multi-color co-optical axis laser scanning and auto-focus projection system

根据组合透镜的焦距公式, 则透镜  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  的组合焦距<sup>[14]</sup>为

$$f'' = \frac{f_1 f_2 f_3}{f_1 f_2 + f_2 L_1 + (f_3 - L_2)(f_1 + f_2 - L_1)} \quad (1)$$

像方主平面的位置为

$$L'_H = -f'' \frac{d}{f'} \quad (2)$$

系统总焦距为

$$f''' = \frac{f'' f_1}{f'' + f_1 - (L'_H + L_3 + z)} \quad (3)$$

式中:  $f'$  表示透镜  $f_1$ 、 $f_2$  的组合焦距;  $d$  表示组合透镜的像方主平面与透镜  $f_3$  主平面的距离, 表示为

$$f' = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - L_1} \quad (4)$$

$$d = L_2 - f' \frac{L_1}{f_1} \quad (5)$$

当  $z=0$  时, 系统的像方焦点位置为

$$S_1 = f''' \left( 1 - \frac{L_3 + L'_H}{f''} \right) \quad (6)$$

当  $z \neq 0$  时, 系统的像方焦点位置为

$$S_1 = f''' \left( 1 - \frac{z + L_3 + L'_H}{f''} \right) \quad (7)$$

因此, 光斑位置移动量和透镜间距的关系为

$$\Delta S = S_1 - S_2 - z = \frac{z(f''' - 1)}{f''} \quad (8)$$

## 2.2 多色分光路激光扫描自聚焦投影系统

图4为多色分光路激光扫描自聚焦投影系统的光学结构。该光学系统由准直部分和聚焦部分组成, 准直部分为伽利略望远结构, 采用一正一负2块透镜组成, 将激光器高斯光束转化为平行光束, 同时减小了光束的发散角<sup>[13]</sup>。聚焦部分由焦距为  $f_1$  的负透镜和焦距为  $f_2$  的正透镜组成, 与共光轴系统相同, 在该光路中移动聚焦部分的正透镜控制透镜间距, 实现不同距离的投影。在图4中, 设聚焦部分透镜的间距为  $L=f_2$ , 光斑在  $S_1$  位置聚焦; 正透镜移动距离为  $z$  时光斑在相对于移动后的透镜  $S_2$  的位置聚焦。由牛顿公式<sup>[14]</sup>可知光斑位置:

$$S_1 = \frac{-f_2^2}{f_1} + f_2 \quad (9)$$

$$S_2 = f_2 + z - \frac{(z + f_2)^2}{f_1} \quad (10)$$

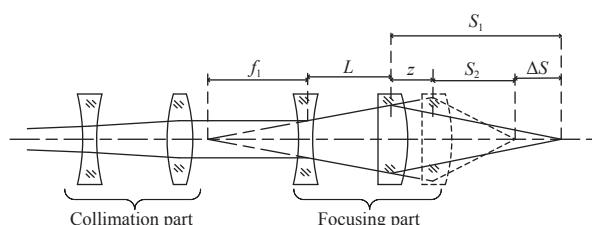


图4 多色分光路激光扫描自聚焦投影系统光路原理图

Fig. 4 Optical path diagram of multi-color beam splitting laser scanning and auto-focus projection system

因此光斑位置移动量和透镜间距的关系为:

$$\Delta S = S_1 - S_2 - z = \frac{z^2 + 2z(f_2 - f_1)}{f_1} \quad (11)$$

## 3 仿真与实验

目前常见的激光扫描自聚焦投影线宽即光斑直径一般在 0.5 mm~1 mm 之间, 本文以 0.8 mm 为汇聚光斑的直径要求设计多色分层投影系统<sup>[15]</sup>。

### 3.1 多色共光轴激光扫描自聚焦投影系统

采用 ZEMAX 对多色共光轴系统的光学结构进行仿真。采用波长为 635 nm 的红色以及波长为 532 nm 的绿色激光器, 光路由双凹透镜、平凸透镜、弯月透镜组成, 透镜参数机械口径  $\Phi$ , 曲率半径  $R$ , 焦距  $f$ , 后截距  $f_b$ , 中心厚度  $T_c$ , 边缘厚度  $T_e$  如表1所示。

表1 多色共光轴激光扫描自聚焦投影系统镜组数据

Table 1 Lens group data of multi-color co-optical axis laser scanning and auto-focus projection system

| 透镜   | $\Phi/\text{mm}$ | $R/\text{mm}$ | $f/\text{mm}$ | $f_b/\text{mm}$ | $T_c/\text{mm}$ | $T_e/\text{mm}$ | 材料    |
|------|------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| 平凸透镜 | 20               | 51.686        | 100           | 98              | 3               | 2               | H-K9L |
| 弯月透镜 | 20               | -79.91/-31.48 | 104.46        | 98.16           | 4               | 3               | H-K9L |
| 双凹透镜 | 12.7             | 26.592        | -25.4         | -26             | 2               | 3.6             | H-K9L |

将投影面放置在 3 000 mm 处进行 ZEMAX 仿真优化, 设置第 3 块与第 4 块透镜间距为变量, 当间距为 38.75 mm 时黄色混合光斑 RMS 直径差达最小值, 此时绿光光斑直径 0.578 mm, 红光直径 0.578 mm, 混合而成的黄光直径 0.578 mm, 其光路图和光线追迹图如图5所示。

仅仅优化红光, 第 1、2、3 块透镜保持不变, 第 3 块与第 4 块间隔为 39.255 mm 时红色光斑的 RMS 直径达到最小值, 光斑直径甚至优于 0.2 mm。同样仅优化绿光, 继续保持第 1、2、3 块透镜不变, 当第 3 块与第 4 块间隔为 39.121 mm 时绿色光斑的 RMS 直径达到最小值, 光斑直径也优于 0.2 mm。

根据上述结果固定各个透镜, 在 3 000 mm 处前后移动投影面, 记录光斑直径与投影面位置数据, 其关系曲线如图6所示。

通过图6(a)可以看出, 投影面位于 3 000 mm 时红、绿光斑直径最小, 当投影面位置发生变化时光斑直径变大。对于混合而成的黄光则需要红、绿 2 种色光的大小基本相同, 如此混合效果最佳。图6(b)中可以看出, 投影面位于 3 000 mm 时红绿光斑的直径差最小, 此时红光、绿光大小基本相同, 混合而成的黄光光斑均匀, 当投影面位置发生变化时红、绿光斑直径差均变大, 使得混色光斑出现失真, 最终不能混合为黄光, 同时超出线宽要求。因此, 对于单一色光而言, 不同的投影位置都

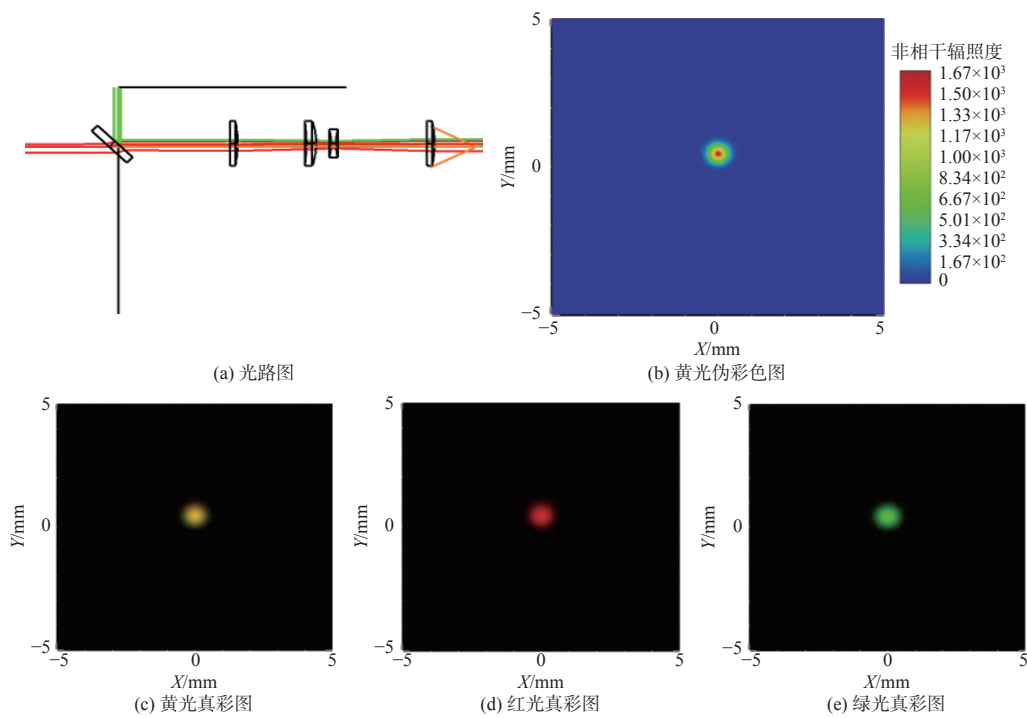


图 5 共光轴光路图与光斑图

Fig. 5 Diagram of co-optical axis optical path and light spots

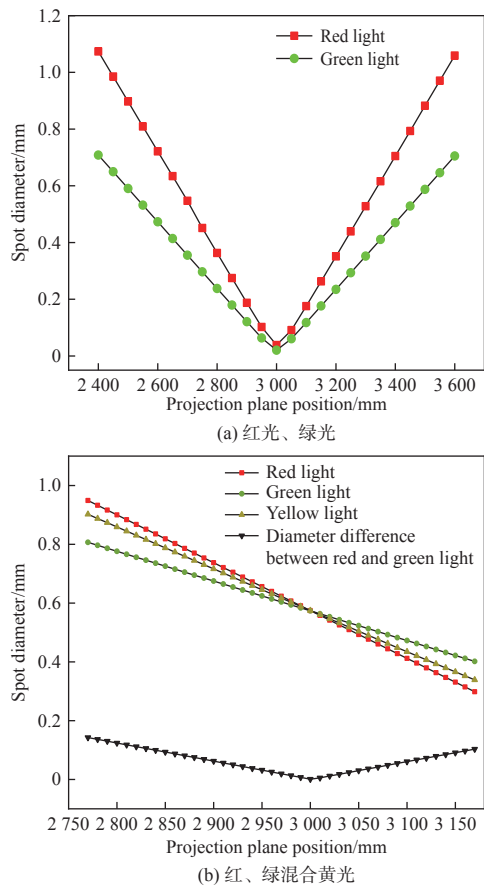


图 6 光斑直径随投影面位置变化曲线

Fig. 6 Variation curves of spot diameter with position of projection plane

有其对应的最小光斑,当投影面位置发生变化时,对应透镜间距也要相应地发生变化;对于混合色光,不同投影位置都对应一个均匀的混合光斑,投影面位置需要与透镜间距相对应。

3.2 多色分光路激光扫描自聚焦投影系统

采用 ZEMAX 对多色分光路系统的光学结构进行仿真。依旧采用 532 nm 和 635 nm 的激光器。4 块透镜分为 2 组,准直扩束镜组以及聚焦镜组。准直扩束镜组采用伽利略望远镜结构,负透镜选取焦距为-30 mm 的双凹透镜,正透镜选取焦距为 60 mm 的平凸透镜组成 2 倍扩束镜组;聚焦镜组由焦距为-60 mm 的透镜与焦距为 60 mm 的透镜组成,其结构参数如表 2 所示。

表 2 多色分光路激光扫描自聚焦投影系统镜组数据

Table 2 Lens group data of multi-color beam splitting laser scanning and auto-focus projection system

| 透镜   | $\Phi/\text{mm}$ | $R/\text{mm}$ | $f/\text{mm}$ | $f_b/\text{mm}$ | $T_c/\text{mm}$ | $T_f/\text{mm}$ | 材料    |
|------|------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| 双凹镜片 | 20               | 31.48         | -30           | -30.8           | 2.7             | 6               | H-K9L |
| 平凸镜片 | 20               | 31.009        | 60            | 57.6            | 3.7             | 2               | H-K9L |
| 双凹镜片 | 20               | 62.476        | -60           | -61.2           | 2.7             | 4.3             | H-K9L |
| 平凸镜片 | 20               | 51.686        | 100           | 98              | 3               | 2               | H-K9L |

将投影面放置在 3 000 mm 处进行 ZEMAX 仿真优化,设置第 3 块与第 4 块透镜间距为变量,得

到在红光光路中第 3 块双凹透镜与第 4 块平凸透镜间距为 45.572 mm 时光斑 RMS 直径为 0.226 mm; 绿光光路中第 3 块双凹透镜与第 4 块平凸透镜间

距为 41.245 mm 时光斑 RMS 直径为 0.226 mm; 2 条光路混合而成的黄光直径为 0.226 mm, 其光路图和光线追迹图如图 7 所示。

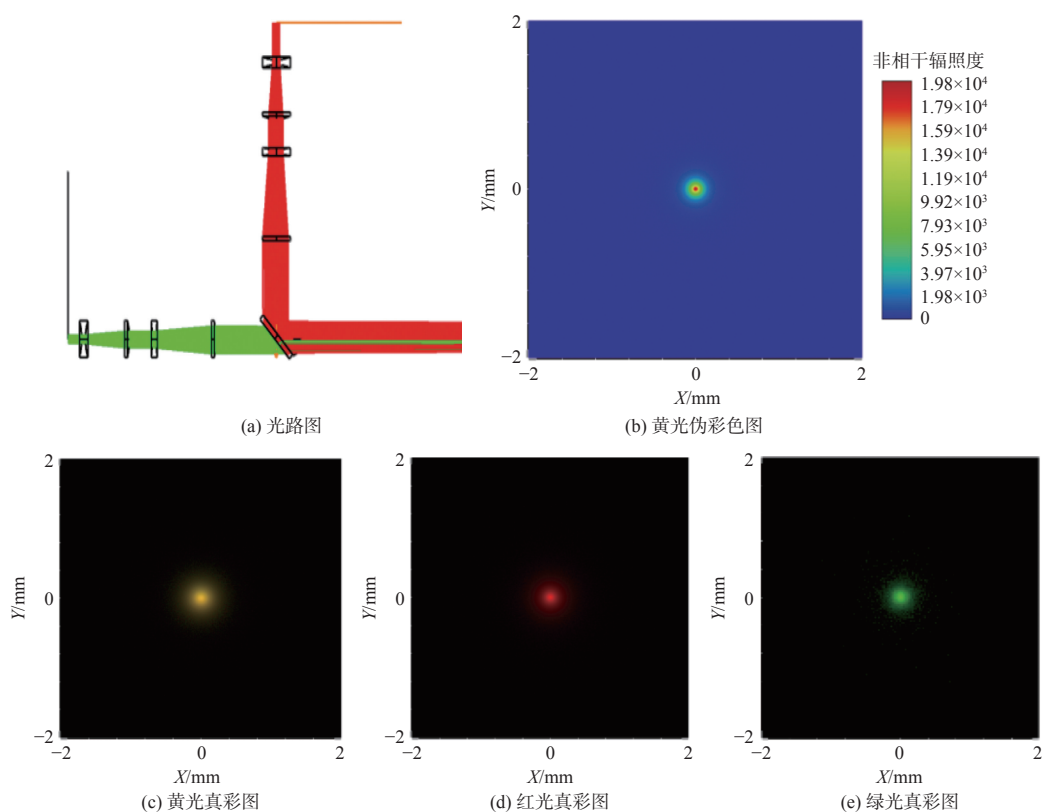


图 7 分光路系统光路图与光斑图

Fig. 7 Diagram of beam splitting optical path and light spots

根据上述结果固定各个透镜, 在 3 000 mm 处前后移动投影面, 记录光斑直径与投影面位置数据, 其关系曲线如图 8 所示。

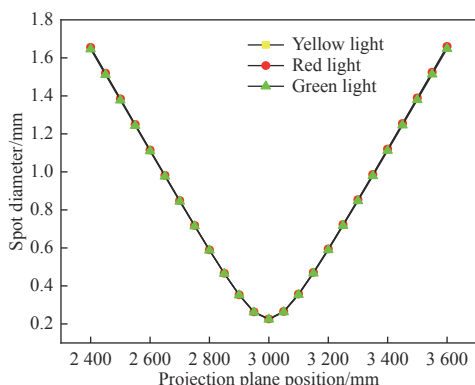


图 8 光斑直径随投影面位置变化曲线

Fig. 8 Variation curves of spot diameter with position of projection plane

通过图 8 可以看出, 投影面位于 3 000 mm 时 3 种颜色光斑直径均最小。投影面位置发生变化

时红、绿、黄光斑直径均逐渐变大, 三色光斑直径变化趋势相同。因此, 不同的投影位置都有其对应的最小光斑, 当投影面位置发生变化时, 对应透镜间距也要相应地发生变化。

### 3.3 多色分光路与共光轴激光扫描自聚焦投影系统比较分析

利用 ZEMAX 光学设计软件, 模拟 2 种系统不同投影位置的情况。从 1 500 mm 处开始增加投影距离至 7 500 mm 处, 记录不同位置投影面所对应的透镜间距和光斑直径。分别对分光路系统与共光轴系统进行仿真, 并根据所得数据研究 2 种系统透镜移动量与投影面之间的关系。

图 9 为多色共光轴激光扫描自聚焦投影系统不同波长色光的透镜移动量与不同投影面位置关系曲线。由图 9 可知随着投影面位置的变化透镜移动位置是连续的, 且红光与绿光在同一聚焦位置的透镜移动量基本相同, 因此, 有利于融合成为均匀黄光。

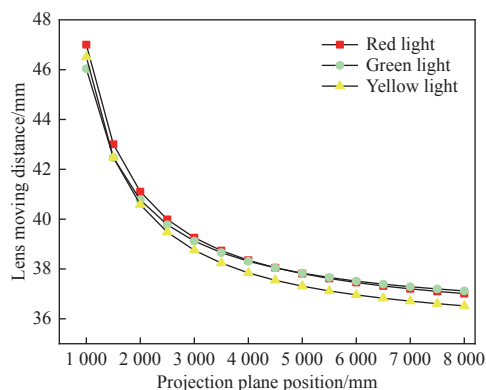


图9 多色共光轴系统透镜移动量与投影面位置关系

Fig. 9 Relationship between lens movement and position of projection plane in multi-color co-optical axis system

图10为多色分光路系统中单一红色波长与绿色波长对应的透镜移动量与投影面位置变化关系曲线,整体变化趋势与共光轴系统相似,说明多色共光轴激光扫描自聚焦投影系统透镜移动位置同样是连续的。在分光路系统中由于红光与绿光分别由各自的聚焦模块控制,系统优势就在于光斑大小的灵活控制。

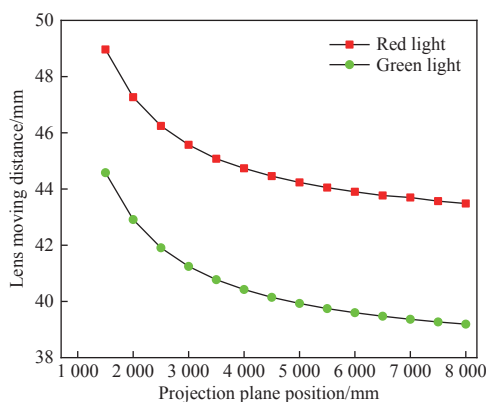


图10 多色分光路系统透镜移动量与投影面位置关系

Fig. 10 Relationship between lens movement and position of projection plane in multi-color beam splitting system

依据 ZEMAX 仿真所得数据绘制多色分光路和共光轴系统不同投影面上光斑直径的大小关系如图11、12所示。

由图11、12可以看出,在共光轴系统中红、绿单一色光光斑大小稳定,且光斑直径小。然而,混合而成的黄光随着投影距离的增大光斑的大小逐渐变大并最终超过 0.8 mm,达不到投影定位的精度要求。分光路系统光斑变化量与投影面成正比例关系,光斑大小符合投影定位的精度要求。

通过对比多色分光路激光扫描自聚焦投影系

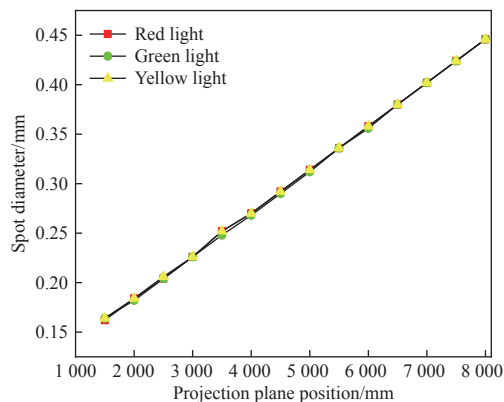


图11 多色分光路系统在不同距离投影面上光斑直径的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of spot diameter of multi-color beam splitting system on projection plane with different distances

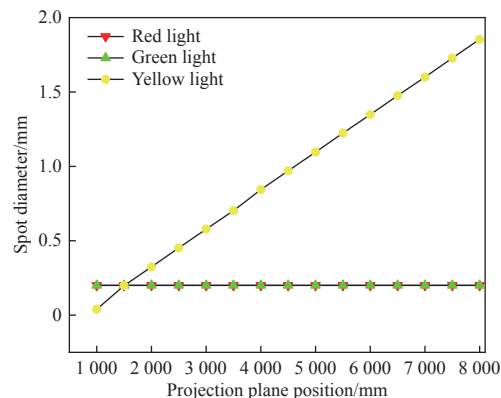


图12 多色共光轴系统在不同距离投影面上光斑直径的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of spot diameter of multi-color co-optical axis system on projection plane with different distances

统与多色共光轴激光扫描自聚焦投影系统可以看出:

1) 2种系统结构都相对简单,都能实现在不同距离投影面上的投影;

2) 对比二者结构,共光轴系统结构相对于分光路的系统结构更加简单,镜片更少,结构更加紧凑,装配难度更低;

3) 对比 ZEMAX 光斑仿真中2个系统红、绿单一色光在投影面上的汇聚光斑直径,两系统光斑直径均在 0.8 mm 以内,且共光轴系统的线宽更小,更加稳定,相对分光路结构能很好地提升系统的投影定位精度;

4) 对比黄色光斑在投影面上的直径发现,随着投影距离的增加,2种系统的混合光斑直径均增大。然而在共光轴激光扫描自聚焦投影系统中,

当透镜间距在 37.842 mm 而投影面在 4 000 mm 之外时,光斑直径超出 0.8 mm,达不到投影定位的精度要求。

对比 2 种系统结构发现其各有优劣,在面对高精度需求时共光轴激光扫描自聚焦投影系统线宽更小精度更高,但是只有 2 种单一的色光可以满足要求,后续可以考虑在系统中添加不同的二向色镜、更多波长的激光器来适应更加复杂的环境要求。在面对多色光要求时,分光路系统可以自由地在不同距离的投影面上投影出多种色光,且光斑直径均能达到投影定位的需求,然而其结构复杂、镜片较多,装配难度更高。后续同样可以增加不同的二向色镜、更多波长的激光器以及对应的结构来适应更加复杂的环境,在这种情况下分光路系统的优势在于采用红、绿、蓝 3 种色光就可以搭配出不同颜色的投影光斑。

### 3.4 光路搭建实验

图 13 为多色共光轴激光扫描自聚焦投影系统实验装置。控制图 13 中可移动镜片前后移动可实现不同色光的调焦功能。若搭载精密位移平台实现更高量级的控制,则可以进一步提高投影精度。

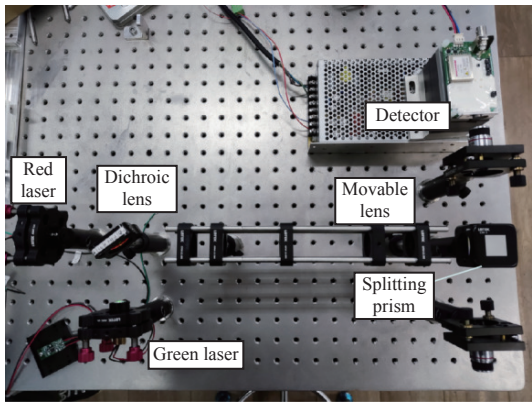


图 13 多色共光轴激光扫描自聚焦投影系统实验装置图  
Fig. 13 Experimental device diagram of multi-color co-optical axis laser scanning and auto-focus projection system

用图 13 中共光轴系统进行投影实验,测量汇聚光斑的直径,实验中采用索雷博 BP100 光束质量分析仪测量光斑直径。手动调节可移动镜片使得接受面的黄光光斑最小,记录此时光斑大小。图 14 为混合光斑中单一红光、绿光聚焦光斑的情况图。图 15 为光束质量分析仪记录的光斑大小,直径均约为 0.7 mm,优于实验设计的 0.8 mm,可以达到投影定位要求。图 16 为混合黄光的效果图,

由于混合之后色光饱和度过高,相机拍摄光斑与肉眼观察到的情况不符,相机不能反映出此时的光斑颜色情况,即使关闭实验室灯光仍然无法反映出实际光斑颜色。因此,采用泡沫塑料反映混合色光的效果,后续可以考虑降低激光器功率来改善这一情况。

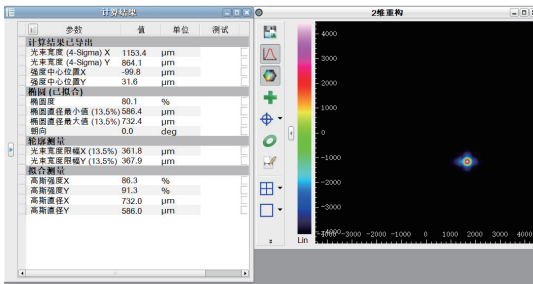


(a) 红光

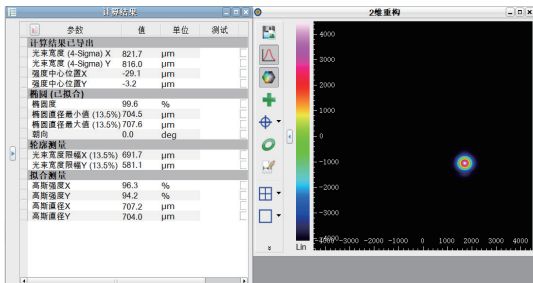


(b) 绿光

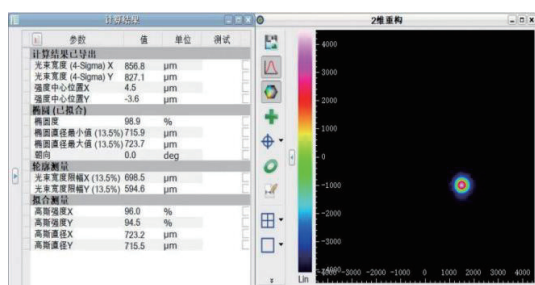
图 14 3 000 mm 位置光束质量分析仪接收聚焦光斑图  
Fig. 14 Focal spots diagram received by beam quality analyzer at 3 000 mm position



(a) 单一红光光斑直径



(b) 单一绿光光斑直径



(c) 混合黄光光斑直径

图 15 光束质量分析仪上的光斑直径

Fig. 15 Spot diameters recorded on beam quality analyzer

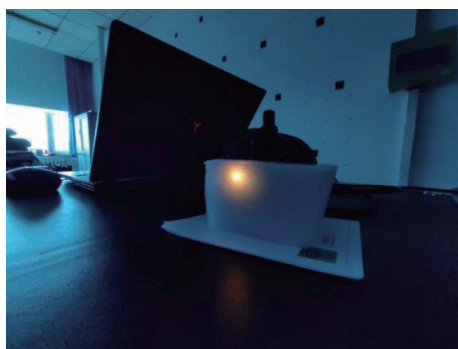


图 16 3 000 mm 位置混合黄光图

Fig. 16 Effect diagram of mixed yellow light at 3 000 mm position

实验主要测量了在 3 000 mm 左右位置混合色光情况, 在 3 000 mm~3 500 mm 位置仿真光斑大小为 0.578 mm~0.7 mm。实验中测得的光斑直径在 0.7 mm 左右, 基本与仿真结果相似, 期间误差的产生一方面是由于调节移动镜片没有加入精密位移平台, 采用手动调节的方式精度达不到要求; 另一方面在实验过程中测量的投影距离是光学平台边缘到光束质量分析仪的距离, 仿真过程中这段距离表示为分光棱镜到投影面位置, 实验过程中分光棱镜到光学平台边缘仍有约 100 mm 距离; 此外由于激光光束质量分析仪与激光器及镜片系统不在同一水平高度, 且在左右仍然有一定的偏差角度, 因此实际的投影距离比 3 000 mm 远, 从而造成实际接收的光斑偏大。而对于单一色光, 根据仿真结果, 在 1 500 mm~7 500 mm 处红光自聚焦镜片移动距离为 37.1 mm~43 mm, 绿光自聚焦镜片移动距离为 37.2 mm~42.5 mm。虽然在 3 000 mm 投影距离中红光和绿光对应的可移动透镜位置不同, 但是实验过程中在同一投影距离, 2 种颜色的光斑可以满足使用要求。相较于单色光, 混色光斑由于需要兼顾合束的均匀性, 对于光斑直径有牺牲, 表现在混色光斑直径大于单色光斑, 但也满

足使用要求。

## 4 结论

本文介绍了多色分图层激光扫描自聚焦投影系统原理, 设计了多色分光路和共光轴 2 种多色自聚焦光路, 并根据几何光学的基本原理推导出 2 种系统透镜间距与投影面位置之间的关系。利用光学设计软件对 2 种多色激光扫描系统进行光路仿真, 得出了透镜移动量与投影面位置关系曲线, 同时得出投影面上多种色光的直径, 易知对于单一色光 2 种系统的光斑均能满足投影定位的精度需求。而共光轴系统汇聚的光斑直径更小, 而对于混合色光, 共光轴系统仅在 4 m 之内能满足投影定位的需求, 分光路系统不仅能满足系统的精度需求, 且混合光斑及单色光斑大小均匀更具灵活性, 且多色共光轴系统光路结构更为简单。搭建了多色共光轴激光扫描自聚焦投影系统, 通过 3 000 mm 位置混合光斑直径的测量实验验证了仿真的结果, 分析了误差产生的原因, 表明混合色光在 3 000 mm 左右的位置基本可以达到先进制造中对于光斑的要求。同时由于实验条件有限, 后期需要设计更合理的机械结构与光学结构相配合, 同时结合一定的算法, 进一步提升产品性能。

## 参考文献:

- [1] 李涛, 李思宁. 飞机复杂系统总装的数字化工厂路径探索[J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 41-47.  
LI Tao, LI Sining. Investigations of digital factory approaches for aircraft complex systems manufacturing in final assembly stage[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 41-47.
- [2] 侯茂盛, 刘继强, 刘大礼, 等. 基于激光测距的激光扫描投影系统标定技术研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 237-245.  
HOU Maosheng, LIU Jiqiang, LIU Dali, et al. Research on calibration technology of laser scanning projection system based on laser ranging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 237-245.
- [3] 郭丽丽, 李丽娟, 乔晓利, 等. 激光 3D 投影高精度校准建模方法[J]. 光子学报, 2018, 47(1): 178-185.  
GUO Lili, LI Lijuan, QIAO Xiaoli, et al. High precision calibration model of laser 3D projection[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 178-185.
- [4] 林海峰. 基于激光投影的飞机装配定位技术应用[J]. 科

- 学技术创新, 2018(34): 33-34.
- LIN Haifeng. Application of aircraft assembly positioning technology based on laser projection[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2018(34): 33-34.
- [5] 韩炜. 激光投影定位技术在飞机装配中的应用研究[J]. *科技创新与应用*, 2019(8): 142-143.
- HAN Wei. Research on the application of laser projection positioning technology in aircraft assembly[J]. *Technology Innovation and Application*, 2019(8): 142-143.
- [6] 范成博. 多色激光扫描投影系统及路径优化方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- FAN Chengbo. Research on multicolor laser scanning projection system and path optimization method[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [7] 王飞霞. 激光显示视觉健康与感知特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- WANG Feixia. Study on visual health and perceptual characteristics for laser display[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [8] 范成博, 张梦梦, 刘继强, 等. 基于IGES的激光扫描投影文件解析方法研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(3): 611-617.
- FAN Chengbo, ZHANG Mengmeng, LIU Jiqiang, et al. Research on analytical method of laser scanning projection files based on IGES[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 611-617.
- [9] 杨帆. 自聚焦激光扫描投影技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- YANG Fan. Research on autofocus laser scanning projection technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [10] 陈志斌, 范磊, 肖文健, 等. 二维振镜扫描系统调向误差分析[J]. *应用光学*, 2018, 39(2): 180-186.
- CHEN Zhibin, FAN Lei, XIAO Wenjian, et al. Directional error analysis of 2D galvanometer scanning system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(2): 180-186.
- [11] 李桂存, 方亚砂, 纪荣祎, 等. 基于二维振镜与位置灵敏探测器的高精度激光跟踪系统[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 206-212.
- LI Guicun, FANG Yami, JI Rongyi, et al. High-precision laser tracking system based on two-dimensional galvanometers and position sensitive detectors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 206-212.
- [12] 曲松. 振镜扫描式激光三维投影系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- QU Song. Research on galvanometric scanning laser 3D projection system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [13] 侯茂盛, 杨帆, 孙明利, 等. 应用于激光扫描投影仪器的动态聚焦技术研究[J]. *应用光学*, 2018, 39(5): 605-612.
- HOU Maosheng, YANG Fan, SUN Mingli, et al. Research on dynamic focusing system of laser scanning projection instrument[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(5): 605-612.
- [14] 王文生. *应用光学*[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010: 31-55.
- WANG Wensheng. *Applied optics*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2010: 31-55.
- [15] 曲松, 李丽娟, 侯茂盛, 等. 提高激光扫描投影系统精度的方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 147-151.
- QU Song, LI Lijuan, HOU Maosheng, et al. Methods to improve accuracy of laser scanning projection system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 147-151.