文章编号:1001-5078(2020)02-0204-07

光电技术与系统・

# 用于激光合束系统的光束位置监测装置设计

陈昌博<sup>12</sup> 韩旭东<sup>1</sup> 徐新行<sup>1</sup>

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为了实现近场可见光波段、多路不同波长激光合束中位置误差监测,设计了一种光 斑位置监测装置,该装置以缩束系统为基础对同指向激光束位置进行自动监测,在激光合束系 统中与快速反射镜相配合,能有效提高合束系统的精度和合束效率。首先对监测装置光学系 统进行了设计和仿真分析,使其实现缩束功能的同时减小色差对监测精度的影响。接着,根据 设计要求选择了合适的光电探测器。然后,设计了镜筒并对装置的箱体进行有限元优化设计 以减轻质量并防止产生共振,使其可以在复杂的环境中工作。最后,根据光斑的特性选择了合 适的光斑中心定位算法。实验检测结果表明:缩束倍数达到了15.6 倍,监测精度达到了 0.1 mm。系统基本上可以使所有激光束成像在 CCD 上,且光斑能在 CCD 上成完全像,稳定性 较好,精度高,满足使用要求。

关键词: 近场; 波长合束; 位置监测; 缩束系统 中图分类号: TH741 文献标识码: A **DOI**: 10.3969/j.issn.1001 – 5078.2020.02.013

# Design of beam position monitoring device for laser beam combining system

CHEN Chang – bo<sup>1 2</sup> ,HAN Xu – dong<sup>1</sup> ,XU Xin – hang<sup>1</sup>

( 1. Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences , Changchun 130033 , China;
 2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

**Abstract**: In order to realize the position monitoring of the laser beam in the near – field visible light band and multiple different wavelengths of laser combining a spot position monitoring device is designed. The device monitors the position of the same pointing laser beam based on the shrink – beam system. In the beam combining system it cooperates with the FMS to effectively increase the accuracy and beam combining efficiency of the beam combining system. Firstly the optical system of the device was designed simulated and analyzed to shrink beam and reduce the influence of chromatic aberration on accuracy. Then according to the design requirements the appropriate photodetector was selected. Then the drawtube is designed and the device's cabinet is finite element optimized to prevent resonance making it work in complex environments. Finally a suitable calculation method of spot centering is selected according to the characteristic of the spot. The experimental results show that the multiplier of shrink – beam system reaches 15.6 times and the monitoring accuracy reaches 0.1 mm. The system can basically image all the laser beams on the CCD and the spot can be completely imaged on the CCD and its stability is good the precision is high and the design requirements are met.

Keywords: near - field; wavelength combination; position monitoring; shrink - beam system

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(No. 20180520185JH) 资助。

# 1 引 言

自 1960 年梅曼造出了世界上第一台红宝石激 光器后,各种各样的激光器相继问世,如半导体激光 器自 20 世纪 60 年代诞生以来,经历了飞速的发 展<sup>[1]</sup>。激光技术也随之发展,激光在军事、医疗、通 信等领域的应用也越来越多。近年来,各领域如材 料加工、激光熔覆<sup>[2-3]</sup>等对高功率、多波段激光的应 用需求越来越旺盛。但是,单台激光器受热损伤、非 线性效应、热透镜效应<sup>[4]</sup>、元件结构、散热条件等因 素的影响,输出激光的波长和功率有限<sup>[5]</sup>。如何获 得具有高功率、宽波长、高光束质量的激光输出已成 为国际上的重大瓶颈问题,激光合束技术被证明是 解决该难题的有效手段之一<sup>[6]</sup>。

激光合束技术种类较多,主要分为相干合束 和非相干合束。相干合束是通过控制各个光束的 频率、振幅、相位差等参数,使各光束通过干涉合 成一束<sup>[7]</sup>。这种合束方法虽然得到的光束性能比 较好,但是,对合束激光单元的光谱、偏振及相位 等特性均有严格要求,并且随着合束激光单元数 量的增加,系统复杂程度急剧上升<sup>[8]</sup>,因此尚未得 到较为广泛的应用。非相干合束又可以分为光谱 合束、偏振合束、波长合束和空间合束。四种合束 方式各有优缺点:光谱合束可用于合束的单元器 件数量多,合束功率明显提高,但是输出光束质量 不佳; 偏振合束的效率高,主要用于单一波长工 作 而且成本较高;波长合束可以对较宽波段范围 内的多路激光进行合束,但是对合束镜的要求较 高;空间合束的效率高,但是光束质量较差。针对 不同的目的和环境要求,可以选择不同的合束方 式进行激光合束。

在激光合束中 影响合束质量的因素较多,如远 场中气体热效应<sup>[9]</sup>、合束镜膜的透过率、导光镜组 件的稳定性、自动校正机构的精度和分辨率等。为 了提高合束质量与合束效率需要相应的监测装置来 对子光束进行实时监测,并为误差修正提供依 据<sup>[10]</sup>,这对激光合束效果的提升有非常重要的 意义。

目前,常用的监测内容包括激光指向监测与位置监测。远场工作的合束,受激光平行性影响较大, 而对激光位置偏差要求不高,因此现阶段的监测装 置多用来监测激光方向,尤其是在远场中,激光发射 系统指向监测系统往往决定了整个外场试验效果的 优劣<sup>[11]</sup>。而忽视光束位置偏差的监测与校正,这在 一些对合束精度要求极高的场合是不能接受的,尤 其是兼顾近场工作的合束激光,位置监测是必要的。 所谓位置监测就是对光束或光束中心位置的监测, 在完成各光束平行性校正后,各个光束中心位置偏 差越小,重合面积越大,则激光合束的精度就越高。 本文针对合束系统的近、远场高精度应用要求设计 了一种主要用于可见光波段、多波长激光合束的位 置监测装置,当已完成平行校正的子激光束之间没 有完全重合的时候,激光束通过位置监测系统在光 电探测器上形成的光斑图像中心坐标会产生差异, 通过计算可以得出各个激光束间实际位置,进而可 以通过调节导光镜的方法来消除该位差,提高合束 精度。

#### 2 设计要求

激光合束系统不仅是在 300 ~ 500 m 的近场进 行工作 而且还要在 20 ~ 30 km 的远场中应用。根 据各子光束的波长、截面尺寸、位置合束精度以及安 装空间等要求 确定该位置监测装置的设计指标如 表1所示。

#### 表1 位置监测系统整体设计指标

#### Tab. 1 Design requirements for the position

monitoring system

项目	指标	
通光口径/mm	≥60	
缩束倍率	≥15	
位置监测精度/mm	优于 0.5	
外形尺寸/mm	≤350 ×150 ×130	
波段/nm	400 ~ 900	

#### 3 整体设计

#### 3.1 光学设计

位置监测装置的原理主要是通过对各个子光束 经过必要的衰减后在光电探测器上形成的光斑位置 的监测,来实现对激光束位置的监测,但是由于光电 探测器的靶面尺寸有限,当光斑较大或各子光束位 置偏差较大时,所有子光束无法在光电探测器上成 完全像,因此在光电探测器之前加入一个缩束系统 来实现对所有子光束位置的监测,如图1所示。在 该光学系统中,光斑缩小的倍数与子激光束相对位 置缩小的倍数是相同的。



Fig. 1 Optical schematic of the position monitoring device

光学系统的口径要确保合束激光的子光束能够 全部都进入到光学系统中,因此光学系统的口径必 须大于子光束的尺寸,但是如果口径太大将会使整 个位置监测装置的体积过于庞大,无法适应合束系 统的应用需求。所以选择位置监测装置的口径为 60 mm 不仅大于最大子光束的直径,约为50 mm, 而且有一定的位置偏差余量,又能实现装置的小 体积。

另外,考虑到参与合束的子光束的波长差异较 大,导致色差的存在,使得同一位置不同波长的子光 束在光电探测器上形成的光斑大小和位置存在偏 差,进而会降低位置监测装置的精度。因此,用正透 镜和负透镜的组合以及合适的材料来消色差。设计 优化后,选用 H – ZPK1、H – ZF5 和 H – ZF2 三种材 料分别来制作三个透镜,其消色差效果的仿真分析 结果如图 2 所示。



图 2 色差仿真结果图

Fig. 2 The result of the simulation of chromatic aberration

仿真分析中使用了三种不同波段的光束,理想 的艾里斑半径为3.711 μm,而仿真结果得到的 RMS 分别为2.761 μm、2.805 μm、2.943 μm,均比艾里 斑半径小很多,且各波段之间弥散斑半径则比较相 近,说明在不同的视场条件下针对不同的工作波段, 系统成像的质量均比较优异,消色差效果良好。

3.2 CCD 的选择

在位置检测装置中,通过激光束在光电探测器 上成像来实现对光束位置的监测。因此,光电探测 器一定程度上决定了监测装置的性能。光电探测器 主要有三种:电荷耦合器件(CCD)、四象限探测器、 CMOS 图像传感器。三种探测器优缺点如表 2 所示。

# 表 2 三种探测器的优缺点

Tab. 2 Advantages and disadvantages

of three	detectors
----------	-----------

	CCD	四象限探测器	CMOS 图像传感器
优点	功耗小 ,分辨率 高 ,质量轻 ,抗冲 击性能好 ,响应 速度快	均匀性好 ,灵敏度 高 ,噪声小 ,响应 速度 快 , 光 谱 范 围宽	低成本 ,低功耗 , 高整合度
缺点	灵敏度和响应度 低 ,工艺复杂 ,价 格高	测量精度易受光 斑和大气环境的 影响	分辨率低 ,灵敏 度 差 , 噪 声 控 制差

在这三种光电探测器中,CCD的光谱响应范围 在300~1100 nm 且分辨力高 符合设计需求。而且 CCD 的环境适应力强,抗冲击性能好,能够在车载 等复杂工况条件下工作,所以选择 CCD 作为本装置 中的光电探测元件。

根据设计指标要求,最终选择 CCD 相机的性能 参数如表 3 所示。

使用相机时,必须注意 CCD 探测器极易受到激 光的损伤<sup>[12]</sup>,而且如果光太强会导致在 CCD 上形 成的灰度图上的光斑的灰度过饱和,影响光斑中心 的定位。因此激光束必须经过必要的衰减才能进入 到位置监测系统中,否则会引起 CCD 的损坏。

## 表 3 所选择 CCD 相机性能参数表

Tab. 3 Industrial camera performance parameter table

传感器	2/3"CCD	
像元尺寸/µm	3.5×3.5	
分辨率	2448 × 2048	
相机尺寸/mm	$29 \times 29 \times 40$	
帧频/(f・s <sup>-1</sup> )	22	
工作波段/nm	300 ~ 1100	

#### 3.3 机械结构设计

# 3.3.1 镜筒的设计

将三个透镜可以直接放置在箱体中,但是这样 对于装调来说就比较困难,很难将三个透镜的光轴 实现同轴。因此在本装置中,设计出一个镜筒,使用 前先将透镜装到镜筒内固定好,这样透镜的相对位 置便于调节,光轴也可以最大程度的实现重合。然 后可以很方便地将装上透镜的镜筒在箱体内部进行 集成。除此之外,镜筒的使用还可以避免杂光对光 学系统成像质量的影响,且镜筒的结构更加稳定,在 车载等工况下透镜间的距离也不易发生变化,从而

# 保证光学系统成像质量。

完成光学系统结构优化设计后,如图 3 所示,该 光学系统长 209 mm,最大外径 84 mm,最小内径即 光学系统口径 60 mm。



图 3 位置监测装置光学系统的组成结构图 Fig. 3 Composition diagram of the optical system in the position monitoring device

#### 3.3.2 箱体的设计与优化分析

位置监测装置的箱体用来为光学系统与 CCD 相机提供安装与集成平台,为了保证位置监测装 置稳定的工作性能,箱体必须具备足够的结构刚 度,同时要保证位置监测装置的结构刚度足够的 情况下,还要对箱体进行必要的轻量化,以方便 使用。

初步设计出位置监测装置的箱体,箱体内部的 长宽高尺寸为 295 mm×100 mm×104 mm,壁厚为 10 mm 材料为铝合金,同时为了减小箱体的重量, 在箱体两边进行开槽,如图4所示。



图 4 箱体的三维图 Fig. 4 3D illustration of the cabinet

在有限元软件 ANSYS 中,对其进行模态分析。 模态分析是计算结构振动特性的数值技术,结构振 动特性包括固有频率和振型,振动特性确定后,可以 对结构进行优化使其更加稳定。 将箱体的槽深设为输入参数,将箱体的整体变 形、一阶频率和质量设为输出参数。使用 ANSYS 中 的模态分析和优化设计工具。令箱体的槽深取值为 2~7 mm 范围内的六个整数值,然后进行模态分析, 最后得到六组各个槽深所对应的最大变形、一阶频 率和质量,结果显示随着槽深的增加,最大变形和一 阶频率都呈增加趋势,质量则是减少,其中最大变形 和质量的变化与槽深大致呈正比例函数的关系,而 一阶频率与槽深的关系如图 5 所示。





图 5 中 横坐标为槽深的序号 ,即 1 代表槽深为 2 mm 2 代表槽深为 3 mm ,以此类推。纵坐标为一 阶频率 ,从图中可以看出一阶频率的变化范围在 490~515 Hz 之间 ,变化并不大。另一方面 ,变形和 质量变化趋势相反 ,因此不能同时满足变形和质量 同时减小的优化要求。

因此本文选择一个折中点,即槽深取5 mm,此 时箱体的质量和变形与其它点的值相比也处于中间 位置,可以达到质量和变形都较小的要求。这时的 模态分析一阶和二阶振型如图6,一阶振频为496. 22 Hz,二阶振频为721.67 Hz。此时的质量为3.19 kg,比未开槽时的质量3.9 kg 轻了18.2%,质量减 轻的同时,前两阶振频也较高满足车载的条件。

模态分析中得到的变形量并非真实值,而是一 个相对量,因此要对箱体继续进行谐响应分析,取 200~800 Hz 的范围,使其包含前两阶振频,进行扫 频后可以得到在前两阶振频附近的最大变形量分别 为 8×10<sup>-7</sup>mm 和 1.9×10<sup>-5</sup>mm,都比较小,可以忽 略不计。

从振频、变形以及轻量化上可以看出设计的箱 体可以满足多种在工况下工作的需求。





图 6 槽深为 5 mm 时的前两阶振型图

Fig. 6 First two modes when the groove depth is 5 mm

完成对位置监测装置的光学设计、机械设计与 CCD 相机的选择后,获得位置监测装置的实物如图 7 所示,该装置满足合束系统的应用需求。



图 7 实物图 Fig. 7 The device

3.4 光斑中心定位

在监测系统中,选定光电探测器后,接下来就是 找出光斑的中心坐标,进而求出光束的偏转角度和 位置偏差。一个好的算法对提高整个系统的准确性 和精度十分关键。对于光斑中心的定位,已经出现 了很多算法,主要有三种:质心法,拟合法,Hough 法。这些算法适应不同的环境,有各自的优缺点,如 表4所示。

如图 8 所示光斑在 CCD 上成的图像,可以看出

光斑图像的背景颜色较深,灰度值非常小,而光斑本 身的亮度非常大,灰度值非常高,目标与背景的灰度 值相差很大。另一方面,光斑特性主要受噪声和通 信信道中杂光、衍射和湍流效应的影响,而在本装置 的机械设计上已经避免了杂光和减小了振动对装置 的影响,环境不会对系统形成特别大的干扰,近场中 衍射和湍流效应的影响又比较小,因此光斑的特性 几乎不受通信信道的影响。此外,可以通过对光斑 图像进行去噪处理来保证定位精度。再考虑到系统 的实时性对合束精度的影响比较大,综合以上因素, 质心法比较适合本装置,因此本文选择质心法来定 位光斑中心。

# 表4 三种光斑中心定位算法

	质心法	拟合法	Hough 法
适用 条件	背景灰度值较小, 目标灰度值较大	拟合方法与目标特 性要比较一致	所有条件都适用
优点	计算速度快, 实时性好	精度较高	抗干扰能力好
缺点	抗干扰能力差	计算速度慢, 实时性差	精度高, 计算量大

Tab. 4 Three calculation methods of spot centering



图 8 光斑图像 Fig. 8 Spot

质心法就是应用像素的灰度值作为权重来计算 光斑的质心<sup>[13]</sup>,对于大小为 *X* × *Y* 像素的图像的灰 度重心计算公式为:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{X} \sum_{j=1}^{Y} G[i \ j] \times i}{\sum_{i=1}^{X} \sum_{j=1}^{Y} G[i \ j]}$$
(1)

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{X} \sum_{j=1}^{Y} G[i \ j] \times i}{\sum_{i=1}^{X} \sum_{j=1}^{Y} G[i \ j]}$$
(2)

其中  $G[i_j]$ 为第 i 行 ,第 j 列的像素的灰度值。

4 装置性能的实验检测

室温条件下对光束位置监测装置的缩束倍率与 监测精度进行了检测 检测装置主要包括激光器、快 速反射镜、滤波片、衰减片、监测装置和控制及显示 单元,如图9所示。激光经过快速反射镜反射,然后 经过滤波片滤掉杂光,再经过衰减片衰减,最后进入 监测系统成像。



图 9 实验装置图 Fig. 9 Experimental devices

4.1 缩束倍数的检测

首先,要对激光束实际的光斑直径进行测量,对 于光斑实际直径的测量是使用人工测量,为了减小 误差,实验中不是对一个光斑进行测量,而是对同时 多个光斑的距离进行测量。本实验中,如图9所示, 由一束激光经反射镜在前后两个面多次反射后产生 多条平行激光束,通过调节衰减用反射镜在光路中 的角度获得进入位置监测装置中一串光斑。利用其 中的四个光斑,对两端的光斑,即第一个和第四个光 斑的实际中心位置之间的距离进行测量,如图 10 (a)所示。



(a)光斑实际位置



(b)屏幕上的位置
 图 10 实际和显示的光斑位置
 Fig. 10 Actual and displayed spot position

然后,对在 CCD 上成像的第一个和第四个光斑 的中心距离进行测量:在屏幕上对显示的对应的第 一个和第四个光斑中心进行标记,如图 10(b)所示, 通过显示软件获得两标记点的位置坐标,其横坐标 之差即为 *x* 轴方向上相差的像元数。

最后 根据缩束倍数公式计算:

$$k = \frac{D}{d} \tag{3}$$

$$d = N \cdot \delta_0 \tag{4}$$

其中 k 为缩束倍数; D 为实际光斑中心距离; d 为屏 幕上光斑中心距离; N 为像元数 ,即 x 方向的坐标 差;  $\delta_0$  为像元在 x 轴方向的尺寸。

为减小误差,进行多次测量和计算,取平均值, 最终得到缩束倍数为15.6倍。

4.2 位置监测精度的实验检测

位置监测装置的监测精度与相机的位置分辨率 直接相关,并由软件对光斑脱靶量提取的跳动量最 终决定。因此通过监测光斑脱靶量的跳动量,计算 获得位置监测装置的监测精度,公式如下:

 $\eta_0 = k \cdot \delta_0 \tag{5}$ 

 $\boldsymbol{\varepsilon}_{L} = \Delta N \cdot \boldsymbol{\eta}_{0} \tag{6}$ 

其中  $\eta_0$  为像元分辨率;  $\Delta N$  为最大跳动值;  $\varepsilon_L$  为监测精度。

最后,通过计算得到监测精度为0.1 mm。

通过实验,得到设计的位置监测系统的缩束倍数为15.6,监测精度为0.1 mm,符合设计要求,满 足使用需要。

误差的产生受光束特性影响较大,包括形状、能 量分布、衰减效果等,此外还有 CCD 测量时的误差 及数据处理的误差等。

5 结 论

本文从位置监测装置的功能出发 结合光学、机

械以及算法等各个方面的知识对位置监测装置进行 了设计和器件的选择。对位置监测装置的实验结果 表明装置的性能符合设计要求,功能上能够实现对 位置的监测,能够在不同的环境中精确地、实时地监 测各个激光束的位置,进而提高波长合束的精度与 效率。

# 参考文献:

 Hai Yina Zou Yonggang ,Tian Kun ,et al. Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers [J]. Chinese Optics ,2017 ,10(2): 194 - 206. (in Chinese)

海一娜 ,邹永刚 ,田锟 ,等. 水平腔面发射半导体激光 器研究进展[J]. 中国光学 2017 ,10(2):194-206.

- [2] Zhu Hongbo ,Hao Mingming Zhang Jianwei ,et al. Development and thermal management of 10 kW CW ,direct diode laser source [J]. Optics & Laser Technology 2016 , 76:101 – 105.
- [3] Mi Qinggai , Wang Xubao , Xiao Rongshi. Double wavelength combination and focus system of high power laser diodes stack [J]. Infrared and Laser Engineering ,2018 , 47(12):237-242. (in Chinese)

米庆改, 王旭葆,肖荣诗. 高功率半导体激光堆栈双波 长合束及聚焦系统 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47 (12): 237-242.

- [4] Chen Zilun Zhou Xuanfeng, Wang Zefeng, et al. Review of all fiber signal combiner for high power fiber lasers (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering 2018 47 (1):65 71. (in Chinese)
  陈子伦,周旋风,王泽锋,等.高功率光纤激光器功率 合束器的研究进展(特邀) [J]. 红外与激光工程, 2018 47(1):65 71.
- [5] Xia Lei ,Han Xudong Shao Junfeng. Laser beam combination accuracy of wavelength multiplexing [J]. Chinese Optics 2014 7(5):801-807. (in Chinese)
  夏蕾 韩旭东 邵俊峰. 激光波长合束精度研究[J].中国光学 2014 7(5):801-807.
- [6] Wang Lijun ,Peng Hangyu ,Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. Chinese Optics ,2015 ,8 (4):517 534. (in Chinese)

王立军 彭航宇,张俊.大功率半导体激光合束进展 [J].中国光学 2015 8(4):517-534.

- [7] Cao Yuxuan Shu Shili Sun Fangyuan et al. Development of beam combining technology in mid – infrared semicon– ductor lasers(invited) [J]. Infrared and Laser Engineer– ing 2018 47(10):18-25.(in Chinese)
  曹宇轩 舒世立,孙方圆,等.中红外半导体激光器合 束技术研究进展(特邀) [J]. 红外与激光工程 2018, 47(10):18-25.
- [8] Wang Lijun Peng Hangyu Zhang Jun ,et al. Development of beam combining of high power high brightness diode lasers [J]. Infrared and Laser Engineering ,2017 ,46(4): 8 - 17. (in Chinese)

- [9] Lan Shuo ,Li Xinnan ,Xu Chen. Influence of gas thermal effect on beam combination system [J]. Chinese Optics , 2018 ,11(1):108 114. (in Chinese)
  兰硕 ,李新南 徐晨. 激光合束光学系统气体热效应影响分析[J]. 中国光学 2018 ,11(1):108 114.
- [10] Jin Xuyang ,Gao Yunguo ,Yu Ping ,et al. Research on the all sky detection method of the laser beam optical axis parallelism [J]. Infrared and Laser Engineering ,2015 ,45 (2):176-180. (in Chinese)
  金旭阳 ,高云国 ,于萍 ,等. 全天域激光发射光轴平行

度检测方法研究 [J]. 激光与红外,2015,45(2): 176-180.

- [11] Yu Ping ,Xue Xiangyao. Study on the measurement method of laser pointing error for the lasing system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation ,2014 ,28 (11):1185-1189.(in Chinese) 于萍 薛向尧. 激光发射系统光束指向检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报 2014 28(11):1185-1189.
- [12] Wang Ming , Wang Tingfeng , Shao Junfeng. Analysis of femtosecond laser induced damage to array CCD camera [J]. Chinese Optics 2013 β(1):96-102. (in Chinese) 王明,王挺峰 邵俊峰. 面阵 CCD 相机的飞秒激光损伤 分析 [J]. 中国光学 2013 β(1):96-102.
- [13] Li Daoping ,Yang Bo. High precision center location algorithm of light spot [J]. Optical Instruments ,2018 ,40 (4):20-25.(in Chinese)
  李道萍 杨波.高精度光斑中心定位算法[J].光学仪器 2018 ,40(4):20-25.