中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

大口径多波段光束质量检测系统设计

刘才 于信 潘国涛 贺国强 倪小龙 白素平

Design of large-aperture multi-band beam quality detection system

LIU Cai, YU Xin, PAN Guo-tao, HE Guo-qiang, NI Xiao-long, BAI Su-ping

引用本文:
刘才, 于信, 潘国涛, 贺国强, 倪小龙, 白素平. 大口径多波段光束质量检测系统设计[J]. 中国光学, 2024, 17(4): 932–942. doi: 10.37188/CO.2023–0228
LIU Cai, YU Xin, PAN Guo-tao, HE Guo-qiang, NI Xiao-long, BAI Su-ping. Design of large-aperture multi-band beam quality detection system[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 932-942. doi: 10.37188/CO.2023-0228

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2023–0228

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

矩形大口径激光光束质量评价光学系统设计
Design of optical system for quality evaluation of a large rectangular aperture laser beam
中国光学（中英文）. 2022, 15(2): 306 https://doi.org/10.37188/CO.2021–0130

高能激光光束质量 β 因子的影响因素分析
Analysis of effects on the beam quality β factor of high power laser
中国光学（中英文）. 2021, 14(2): 353 https://doi.org/10.37188/CO.2020–0137

半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展
Recent advances in lateral mode control technology of diode lasers
中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 895 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0143

分孔径紫外多波段成像光学系统设计
Aperture–divided ultraviolet multiband imaging optical system
中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1476 https://doi.org/10.37188/CO.2021–0052

深紫外大口径非球面反射膜的均匀性研究
Film thickness uniformity of deep ultraviolet large aperture aspheric mirror
中国光学（中英文）. 2022, 15(4): 740 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0005

基于差分传递函数法的大口径平面镜检测
Detection of large aperture flat mirror based on the differential optics transfer function method
中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 992 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0122

文章编号　2097-1842(2024)04-0932-11

大口径多波段光束质量检测系统设计

刘　才[1], 于　信[1], 潘国涛[2], 贺国强[1], 倪小龙[1], 白素平[1*]
（1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033）

摘要: 光谱合成技术是实现高能激光输出的重要技术途径, 如何在高功率输出的前提下, 保证高光束质量的激光输出已成为当前光谱合成技术最迫切要解决的问题。本文针对 155 mm×140 mm 矩形口径、(1 064±3)nm、(1 030±3)nm 和 (635±5)nm 波段光束的参数检测问题, 设计了大口径多波段多参数检测系统。波前检测单元基于开普勒的望远结构, 在构建变形镜与微透镜共轭关系的同时, 压缩光束口径以匹配探测器尺寸。前组物镜采用卡塞格林结构, 以解决大口径、多波段的色差校正难题; 后组镜采用三片式复消色差折射镜组, 补偿色差的同时, 兼顾无热化设计, 用以补偿前组物镜的残余热差和后组镜热差。经波前检测单元后进行分光探测, 实现光束质量和光束均匀性检测。为了提高系统的环境适应性, 采用光学被动无热化方法对系统进行了 20 °C±10 °C 的无热化设计。最后, 对系统进行装调测试, 采用泽尼克波前复原方法对波前探测相机采集的光斑图像进行波前复原, 测得 10 °C ~ 30 °C 下系统波前的 RMS 值优于 0.052 4λ(λ=632.8 nm), 光束均匀性优于 0.893, 光束质量 β 因子优于 1.26 倍衍射极限。

关　键　词: 多波段多参数检测; 无热化设计; 波前测量; 光束均匀性; 光束质量
中图分类号: TG502.33; TH74　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2023-0228

Design of large-aperture multi-band beam quality detection system

LIU Cai[1], YU Xin[1], PAN Guo-tao[2], HE Guo-qiang[1], NI Xiao-long[1], BAI Su-ping[1*]
(1. *School of Opto-Electronic Engineering*, *Changchun University of Science and Technology*, *Changchun* 130022, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics*, *Fine Mechanics and Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *baisp@126.com*

Abstract: Spectral synthesis technology is an important technical approach to achieving high-energy laser output. Ensuring high-quality laser output under the premise of high-power output has become the most urgent goal in further developing spectral synthesis technology. Aiming at the challenge of parameter detection for 155 mm × 140 mm rectangular aperture, (1 064 ± 3) nm, (1 030 ± 3) nm, and (635 ± 5) nm band beams,

收稿日期: 2023-12-20; **修订日期:** 2024-01-09
基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 62205032); 吉林省科技发展计划项目(No. 20210201139GX); 长春理工大学青年基金(No. XQNJJ-2019-01)
Supported by Youth Fund of the National Natural Science Foundation of China (No. 62205032); Science and Technology Development Project of Jilin Province (No. 20210201139GX); Youth Fund of Changchun University of Science and Technology (No. XQNJJ-2019-01)

we design a large-aperture multi-band multi-parameter detection system. The wavefront detection unit is based on Kepler's telescopic structure, the conjugate relationship between the deformable mirror and the microlens is constructed, at the same time, the compressed beam matches the detector size. The front group objective lenses adopt a Cassegrain structure to solve the problem of color difference correction in large-aperture and multi-band. The rear group of mirrors adopts a three-piece apochromatic refractor group, which compensates for the color difference while accounting for the non-thermal design. It can be used for compensation to the residual thermal difference of the front group of objectives and the thermal difference of the rear group of mirrors. After passing through the wavefront detection unit, the beam quality and beam uniformity can be measured. In order to improve the environmental adaptability of the system, it was designed through an optical passive anthermic method at 20 °C±10 °C. Finally, the system was installed and tested, and the wavefront spot image collected by the wavefront detection camera was restored using the Zernike wavefront restoration method. The measured RMS value of the wavefront of the system is better than 0.052 4 λ (λ=632.8 nm), the beam uniformity is better than 0.893, and the beam quality β factor is better than 1.26 times the diffraction limit at 10 °C−30 °C.

Key words: multi-band multi-parameter detection; non-thermalized design; wavefront measurement; beam uniformity; beam quality

1　引　言

随着激光技术[1,2]的不断进步，其在国防[3]、民用及科研[4-5]等领域的应用逐渐增多，特别是在激光熔覆[6]和材料加工[7]等领域，对高功率[8]、多波段[9]激光的需求日益增强。在众多种类的激光器中，板条激光器[10]因其具有体积小、重量轻以及转换效率高等优势，已成为最有应用潜力的高功率激光器之一。高输出功率以及高光束质量一直是板条固体激光器不断追求的目标，但随着功率需求的不断提升，增益介质尺寸也随之增加，导致其输出光束口径逐渐增大，另一方面，受限于非线性效应及热效应，单口径输出的固体激光器功率始终难以突破上限。光谱合成技术[11]是实现高能激光输出的重要技术途径。如何在高功率输出的前提下，保证高光束质量的激光输出已成为当前光谱合成技术最迫切的目标。自适应光学[12]系统能够有效校正波前畸变，是目前改善高能激光光束质量的重要技术手段，其逐渐朝着高带宽、小型化的方向发展，这也对其探测系统（光束质量检测系统）提出了更高的要求。

2012 年，Schulze C[13]提出通过空间光调制器来分解激光模式进而测得激光的光束质量；2013 年 Niedrriter R D 等人[14]将一种可调焦的液体透镜应用到激光光束质量测量系统中，得到了激光光束在空间中的能量分布；2016 年，Du Y ZH[15]基于自参考干涉仪波前探测器，通过解算干涉图中包含的信息，来重建激光光束的光强分布和相位信息，进而得到光场复振幅用以测量光束质量；2017 年，张成栋等人[16]实现了大功率光纤激光器的光束质量 β 因子的测量；2020 年，张禹、杨忠明等[17]设计的大口径多光谱通道波前测量系统，能够实现可见光、近红外和中红外波段的波前测量，测得系统的波前优于 0.05λ（λ=532 nm）；2022 年，潘国涛等[18]设计的矩形大口径光束质量评价系统，能够实现激光的多参数检测，但该系统只能实现 1 064 nm 单一波段的检测。综上所述，现有的光束质量检测系统，或仅能实现激光光束单一参数的检测，或仅能实现激光光束单一波段的检测，因此对于多波段、多参数光束质量检测系统的研究具有一定的意义。

本文主要开展了自适应光学校正系统中探测系统（大口径多波段光束质量检测系统）的设计工作。目的是实现 155 mm×140 mm 矩形口径、（1 064±3）nm、（1 030±3）nm 和（635±5）nm 多波段激光光束的多参数（波前畸变、光束均匀性和光束质量）检测与评估。该研究成果一方面可为自适应光学系统提供反馈，另一方面可用来评估校正结果。

其主要难点在于：（1）由于系统的探测口径较

大(155 mm×140 mm)，在设计时球差校正难度较大，最主要的问题在于体积受限(360 mm×200 mm×300 mm(长×宽×高))后，倾斜公差比较敏感，需兼顾筒长和公差两方面进行统筹优化；(2)对于大口径、多波段光学系统，其色差校正比较困难；(3)由于被测激光能量较高，对环境温度有一定的影响，需考虑如何实现探测系统的无热化设计；(4)装调后探测系统的精度要求极其严格，要求调校后探测系统 RMS 波前值优于 λ/15。

2 大口径多波段光束质量检测系统设计

2.1 检测系统总体设计方案

本文采用大口径光束压缩后分光探测的方案实现激光光束的多参数检测。系统的整体示意图如图 1 所示，包括：波前检测系统、光束均匀性检测系统和光束质量检测系统，系统机械结构的技术指标如表 1 所示。

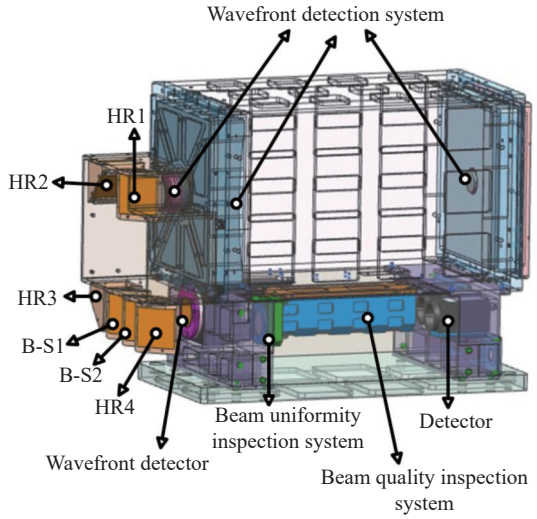

图 1 大口径多波段光束质量检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of large-aperture multi-band beam quality detection system

表 1 大口径多波段光束质量检测系统机械结构技术指标

Tab. 1 Technical index of mechanical structure of large-aperture multi-band beam quality detection system

指标	数值
系统整体尺寸	360 mm×200 mm×300 mm(长×宽×高)
系统重量	≤25 kg

大口径多波段光束质量检测系统之所以需要有波前检测系统、光束均匀性检测系统和光束质量检测系统，是因为这 3 个部分共同工作可以全面评估和优化激光的性能。

波前检测系统主要用于测量激光的波前畸变，通过对波前的准确测量，可以根据测量结果进行自适应光学校正，从而提高激光的光束质量。系统基于开普勒的望远结构，在构建变形镜与微透镜共轭关系的同时，压缩光束匹配微透镜及探测器尺寸。波前检测单元前组物镜采用卡塞格林的初始结构，解决了大口径、多波段的色差校正难题，此外，还在兼顾公差的前提下，压缩系统筒长。后组镜采用三片式复消色差的折射镜组，在补偿色差的同时，兼顾无热化设计，补偿前组物镜的残余热差和后组镜热差。经波前探测单元后进行分光探测，分别实现光束均匀性和光束质量的检测。光束均匀性检测系统基于波前检测系统配合后续光束均匀性检测子系统来测量光束的均匀性，子系统采用开普勒式望远结构实现像传递，并对光束口径进行二次压缩以与后续探测器检测相匹配。光束质量检测系统基于波前检测系统和光束质量检测子系统通过测量光束的 β 因子来评价光束质量。

为了提高系统的环境适应性，采用光学被动无热化[19]方法对系统进行 20 °C±10 °C 的无热化设计。原理是基于透镜材料折射率变化以及光学元件和镜筒材料的膨胀或收缩，首先匹配反射镜与主次镜间的镜筒材料，使其膨胀系数尽可能的相等，反射镜采用 JGS2 作为基底，综合考虑膨胀系数和系统的重量，镜筒材料选择 TC4(钛合金)。其次，对透镜部分进行无热化设计，将透镜的温度影响与透镜镜筒材料(TC4)的热膨胀系数匹配，在光学设计软件中建立不同温度的多重结构实现优化。

2.2 波前检测系统设计与分析

通过在波前检测系统的出瞳位置处放置微透镜和波前探测器，实现对波前的检测。为解决大口径、多波段的色差校正问题，系统前组物镜采用卡塞格林初始结构，后组镜采用三片式复消色差折射镜组以补偿前组物镜的残余热差和后组镜的热差。波前检测系统的技术指标如表 2 所示。系统的矩形通光孔径为 155 mm×140 mm，对应的外接圆形口径为 210 mm。

表 2　波前检测系统技术指标

Tab. 2　Technical index of the wavefront detection system

指标	数值
视场	±3'
波段	(1 064±3) nm、(1 030±3) nm、(635±5) nm
口径	155 mm×140 mm
缩束倍率	1∶10.2
畸变	≤1%
装调精度(RMS波前)	≤λ/15
工作环境	20 °C±10 °C
10 °C ~ 30 °C光学系统设计结果波前PV值和RMS值的波动范围	PV≤λ/10, RMS≤λ/20
公差指标(RMS波前)	≤λ/8

2.2.1　波前检测系统光学设计结果

根据波前检测系统的技术指标, 结合卡塞格林系统结构初始参数求解公式[20], 运用光学仿真软件对系统进行设计, 最终确定波前检测系统的光学结构如图 2 所示。前组镜焦距为 1540.24 mm, 后组镜焦距为 150.81 mm, 出瞳距为 268.784 mm, 缩束倍率为 10.21 倍, 筒长为 307.759 mm, 波前检测系统透镜数据如表 3 所示。

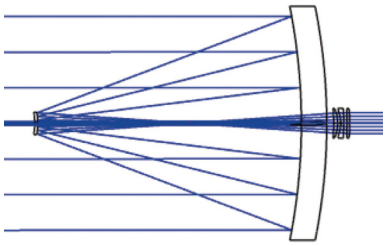

图 2　波前检测系统光学结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the optical structure of the wavefront detection system

表 3　波前检测系统透镜相关系数

Tab. 3　Lens parameters of wavefront detection system

表面类型	曲率半径/mm	厚度/mm	材料
标准面	−576.126	−260.000	MIRROR
标准面	−69.040	150.000	MIRROR
标准面	Infinity	141.761	—
标准面	−192.097	4.000	H-ZPK5
标准面	−35.350	2.998	—
标准面	−33.460	3.000	H-F4
标准面	−236.455	3.000	—
标准面	−376.700	3.000	H-LAF3B
标准面	−116.680	30.000	—

2.2.2　波前检测系统成像质量分析

为了提高系统的环境适应性, 对系统进行 20 °C±10 °C 的无热化设计。波前检测系统的结构矩阵点列图如图 3(彩图见期刊电子版)所示, 光斑的 RMS 半径优于 6.343 μm。

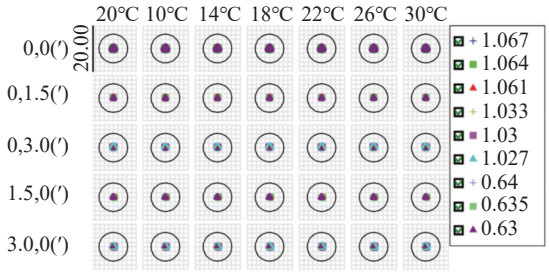

图 3　波前检测系统的结构矩阵点列图

Fig. 3　Point diagram of structure matrix of wavefront detection system

波前检测系统在 10 °C、20 °C、30 °C 下的畸变曲线如图 4(彩图见期刊电子版)所示, 分别为 0.011 2%, 0.011 1% 和 0.011 0%, 系统成像质量良好。

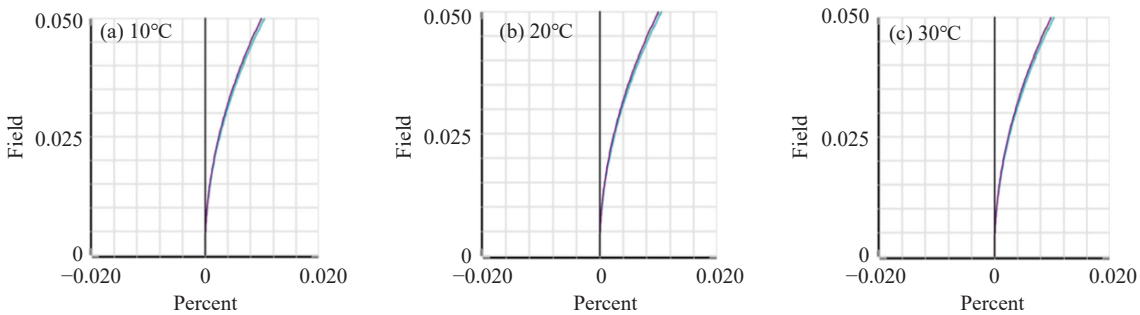

图 4　波前检测系统畸变曲线

Fig. 4　Distortion curves of wavefront detection system

波前检测系统 λ_1(1 064 nm)、λ_2(1 030 nm)和 λ_3(635 nm)波段激光在 10 °C ~ 30 °C 下的波像差如图 5(彩图见期刊电子版)所示。由图 5 可知, 3 个波段下, PV 值的变化分别为 0.018λ_1、

0.019λ_2 和 0.026λ_3，RMS 值的变化分别为 0.005λ_1、0.006λ_2 和 0.008λ_3，满足指标要求。

对光学系统而言，公差是评估该系统是否可行的关键因素之一，波前检测系统的公差数据如表 4 所示。由于卡式系统装调难度较大，对其偏心（0.01 mm）和倾斜（0.6′）的公差要求比较严格，其余公差要求 3 个系统（波前检测系统、光束均匀性检测系统和光束质量检测系统）完全一致，后面对其余两个系统进行公差分析时，便不过多赘述。

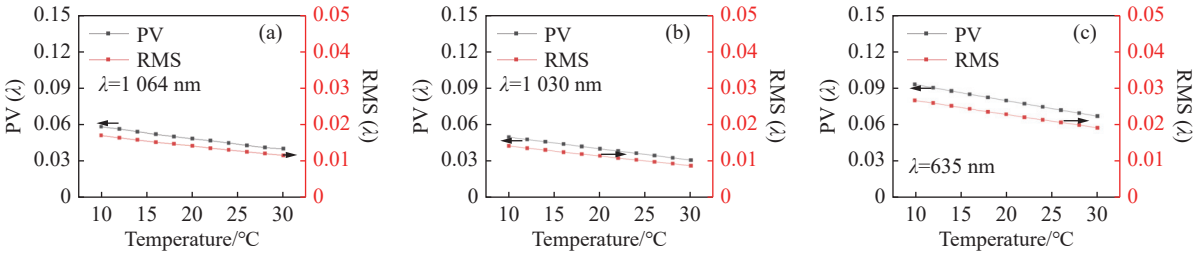

图 5 波前检测系统的波像差

Fig. 5 Wave aberrations of wavefront detection system

表 4 波前检测系统公差数据

Tab. 4 Tolerance of wavefront detection system

No.	光圈数	厚度/mm	透镜偏心/mm	透镜倾斜/(′)	折射率	阿贝误差%
镜1	3	0.05	0.01	0.6	0.001	0.3
镜2	3	0.05	0.01	0.6	0.001	0.3
镜3	3	0.05	0.03	1.5	0.001	0.3
镜4	3	0.05	0.03	1.5	0.001	0.3
镜5	3	0.05	0.03	1.5	0.001	0.3

波前检测系统 λ_1、λ_2、λ_3 波段 300 次蒙特卡洛公差分析结果见表 5。RMS 波前值有 90% 的概率小于 0.093 1λ_1、0.092 2λ_2、0.130 3λ_3，因为 λ_3 波段为干涉仪调试波段，对其公差要求可以放宽一些，接近公差要求即可，由分析结果可知，其满足设计要求。

表 5 波前检测系统 λ_1、λ_2、λ_3 波段蒙特卡洛分析结果

Tab. 5 Monte Carlo analysis results for λ_1、λ_2、λ_3 in wavefront detection system

指标	数值		
	λ_1	λ_2	λ_3
蒙特卡洛分析/%	90	90	90
RMS波前	0.093 1λ_1	0.092 2λ_2	0.130 3λ_3

2.3 光束均匀性检测系统设计与分析

光束均匀性检测系统由波前检测系统配合后续光束均匀性检测子系统来测量光束的均匀性。子系统采用开普勒式望远结构实现像传递，物镜组采用 3 片式，目镜组采用 2 片式，光学筒长为 141.936 mm，出瞳距为 30.628 mm，缩束倍率为 4.5 倍，对光束口径进行二次压缩以与后续探测器的检测匹配，光束均匀性检测系统技术指标如表 6 所示。

表 6 光束均匀性检测系统技术指标

Tab. 6 Technical index of beam uniformity detection system

指标	数值
缩束倍率	1:4.5
畸变	≤1%
均匀性检测指标	≥0.8
10 °C ~ 30 °C光学系统设计结果波前PV值和RMS值的波动范围	PV≤λ/10, RMS≤λ/20
公差指标（RMS波前）	≤λ/8

2.3.1 光束均匀性检测子系统光学设计结果

光束均匀性检测子系统光学结构如图 6 所示，透镜数据如表 7 所示。

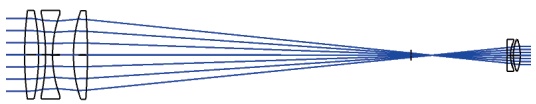

图 6 光束均匀性检测子系统光学结构图

Fig. 6 Optical structure of beam uniformity detection sub-system

表 7　光束均匀性检测子系统透镜数据

Tab. 7　Lens parameters of beam uniformity detection subsystem

表面类型	曲率半径/mm	厚度/mm	材料
标准面	98.136	4.000	H-LAF3B
标准面	−61.232	2.000	—
标准面	−54.883	2.000	H-F4
标准面	32.964	5.984	—
标准面	38.503	4.000	H-ZPK5
标准面	−172.545	92.637	—
标准面	Infinity	27.515	—
标准面	557.963	1.000	H-F4
标准面	9.375	0.800	—
标准面	11.436	2.000	H-ZPK5
标准面	−12.687	10.000	—

2.3.2　光束均匀性检测系统成像质量分析

通过在系统末端添加一个理想透镜, 使光线聚焦到成像面上, 来分析系统的成像质量, 光束均匀性检测系统光路如图 7 所示。

系统的结构矩阵点列图如图 8(彩图见期刊电子版)所示, 光斑的 RMS 半径优于 25.44 μm。

光束均匀性检测系统在 10 °C、20 °C、30 °C 下的畸变曲线如图 9(彩图见期刊电子版)所示, 分别为 0.214 3%, 0.213 7% 和 0.213 1%, 结果表明系统成像质量良好。

光束均匀性检测系统 λ_1、λ_2 和 λ_3 波段激光在 10 °C ~ 30 °C 下的波像差如图 10(彩图见期刊电子版)所示。由图 10 可知, 3 个波段下, PV 值的变化分别为 $0.045\lambda_1$、$0.063\lambda_2$ 和 $0.091\lambda_3$, RMS 值的变化分别为 $0.017\lambda_1$、$0.021\lambda_2$ 和 $0.028\lambda_3$, 满足指标要求。

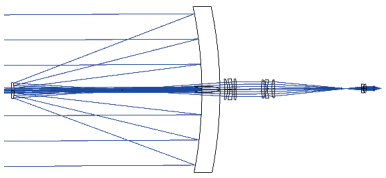

图 7　光束均匀性检测系统光路图

Fig. 7　Optical path diagram of beam uniformity detection system

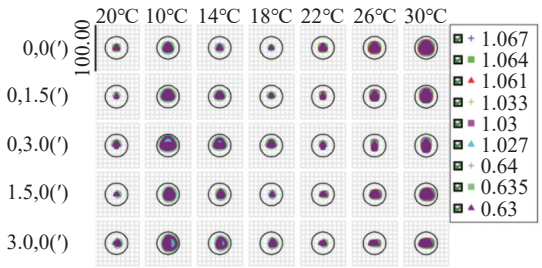

图 8　光束均匀性检测系统的结构矩阵点列图

Fig. 8　Point diagram of structure matrix of beam uniformity detection system

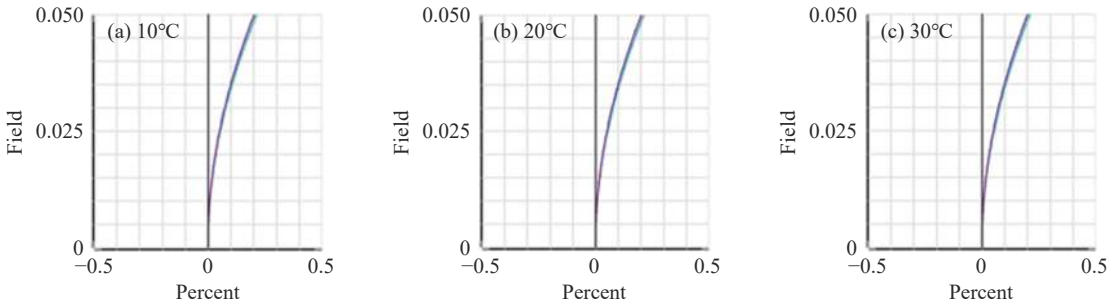

图 9　光束均匀性检测系统畸变曲线

Fig. 9　Distortion curves of beam uniformity detection system

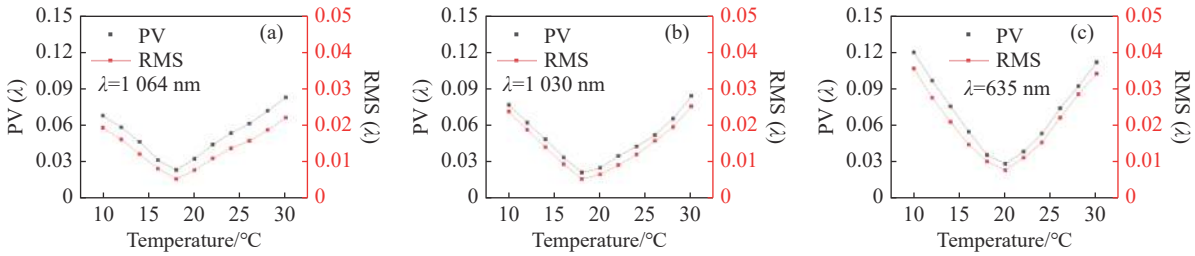

图 10　光束均匀性检测系统的波像差

Fig. 10　Wave aberrations of beam uniformity detection system

光束均匀性检测系统 λ_1、λ_2、λ_3 波段的 300 次蒙特卡洛公差分析结果如表 8 所示。可见，RMS 波前值有 90% 的概率小于 0.1101λ_1、0.1172λ_2、0.1439λ_3，满足设计要求。

表 8　光束均匀性检测系统 λ_1、λ_2、λ_3 波段蒙特卡洛分析结果

Tab. 8　Monte Carlo analysis results for λ_1、λ_2、λ_3 in beam uniformity detection system

指标	数值		
	λ_1	λ_2	λ_3
蒙特卡洛分析/%	90	90	90
RMS波前	0.1101λ_1	0.1172λ_2	0.1439λ_3

2.4　光束质量检测系统设计与分析

光束质量检测系统基于波前检测系统和光束质量检测子系统通过测量光束的 β 因子来评价光束质量，光束质量检测系统技术指标如表 9 所示。

表 9　光束质量检测系统技术指标

Tab. 9　Technical index of beam quality detection system

指标	数值
光束质量β因子	β≤1.3
10 °C ~ 30 °C光学系统设计结果波前PV值和RMS值的波动范围	PV≤λ/10，RMS≤λ/20

2.4.1　光束质量检测子系统光学设计结果

光束质量检测子系统的透镜数据如表 10 所示，系统由三片透镜组成，焦距为 102.037 mm，筒长为 107.538 mm，光学结构如图 11 所示。

表 10　光束质量检测子系统透镜数据

Tab. 10　Lens parameters of beam quality detection subsystem

表面类型	曲率半径/mm	厚度/mm	材料
标准面	88.158	4.000	H-LAF3B
标准面	−54.625	2.090	—
标准面	−44.584	2.000	H-F4
标准面	37.738	2.121	—
标准面	35.877	4.000	H-ZPK5
标准面	−779.682	93.327	—

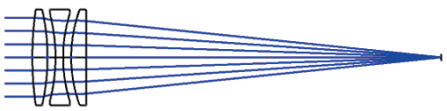

图 11　光束质量检测子系统光学结构图

Fig. 11　Optical structure of beam quality detection subsystem

2.4.2　光束质量检测系统成像质量分析

光束质量检测系统光路如图 12 所示，系统的结构矩阵点列图如图 13（彩图见期刊电子版）所示，光斑的 RMS 半径优于 6.437 μm，系统的 PSF 如图 14（彩图见期刊电子版）所示，复色光的 PSF 能够达到 0.953，满足使用要求。

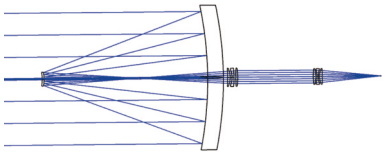

图 12　光束质量检测系统光路图

Fig. 12　Optical path of beam quality detection system

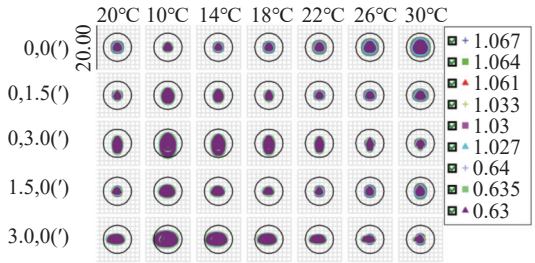

图 13　光束质量检测系统结构矩阵点列图

Fig. 13　Point diagram of structure matrix of beam quality detection system

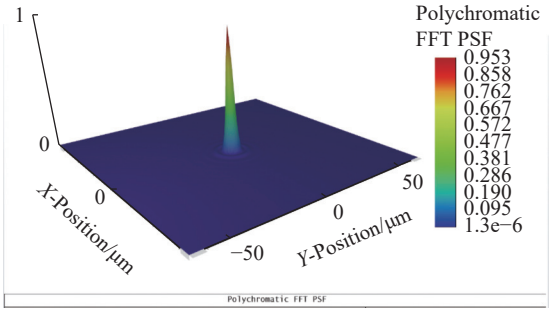

图 14　光束质量检测系统 PSF

Fig. 14　PSF of beam quality detection system

光束质量检测系统 λ_1、λ_2 和 λ_3 波段激光在 10 °C ~ 30 °C 温度下的波像差如图 15 所示。可见，在 3 个波段下，PV 值的变化分别为 0.051λ_1、0.055λ_2 和 0.085λ_3，RMS 值的变化分别为 0.017λ_1、0.019λ_2 和 0.023λ_3，满足指标要求。

采用蒙特卡洛计算方法进行 300 次计算，以分析偏心、倾斜等因素对光学系统成像质量的影响，仿真结果如图 16（彩图见期刊电子版）所示。由图 16 可知，环围能量在 83.6% 时，90% 的情况下，组合系统的光束质量 β 因子分别为 1.16 倍衍射极限（对应 λ_1）、1.18 倍衍射极限（对应 λ_2）、1.26 倍衍射极限（对应 λ_3），满足指标要求。

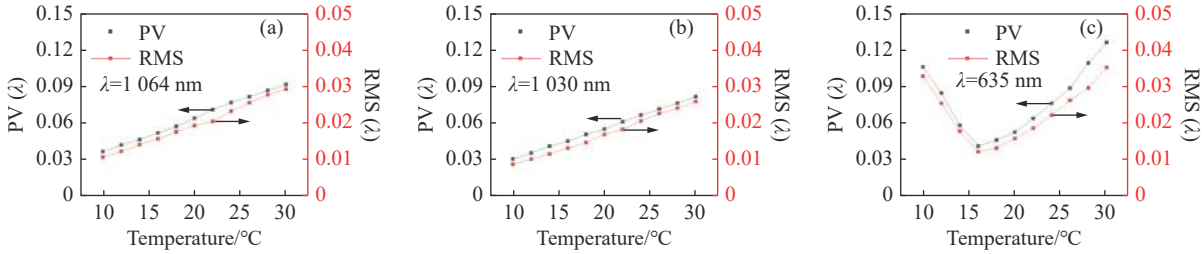

图 15　光束质量检测系统的波像差

Fig. 15　Wave aberration of beam quality detection system

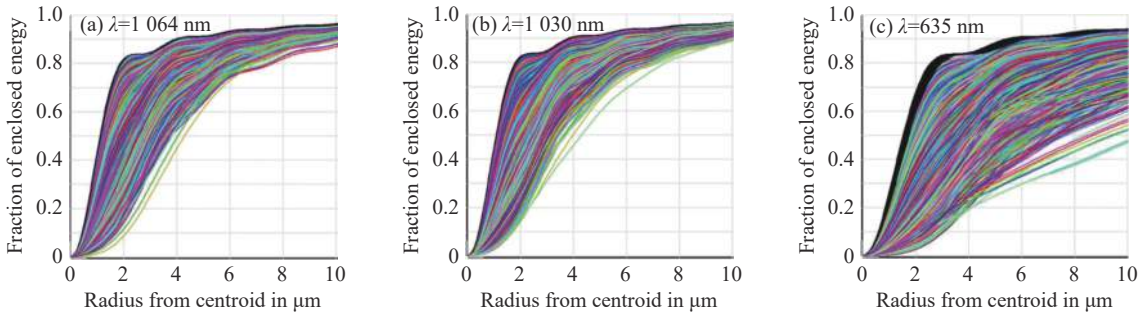

图 16　加工、装调引起的光束质量变动

Fig. 16　Changes in beam quality caused by machining and setting

3　测量实验与结果

基于光学系统和机械结构设计, 搭建大口径多波段光束质量检测系统, 如图 17 所示。系统的集成尺寸为 358 mm×196 mm×292 mm(长×宽×高), 重量为 24.62 kg。离轴反射式平行光管的输出光束口径为 250 mm, 其作用是为系统提供≥210 mm 等效圆口径的平行光束, 并且采用控温加热片对系统进行 10 °C ~ 30 °C 的温度控制。因为 λ_1、λ_2、λ_3 三个波段的实验结果区别不大, 为避免实验图像重复, 本文只列出 λ_1 波段的实验结果。波前探测相机采集的光斑及其波前复原图如图 18(彩图见期刊电子版)所示, 光束均匀性探测相机采集的光斑及其光强分布如图 19(彩图见期刊电子版)所示, 光束质量探测相机采集的光斑如图 20 所示。

采用泽尼克波前复原方法对哈特曼波前探测相机采集的光斑阵列图像进行波前复原, 测得 3 个设计波长在 10 °C、20 °C 和 30 °C 的波前 RMS 值, 分别为: 0.046 6λ_1、0.045 7λ_1、0.047 9λ_1; 0.048 6λ_2、0.048 4λ_2、0.049 1λ_2; 0.049 8λ_3、0.049 3λ_3、0.052 4λ_3, 优于 λ/15, 满足指标要求。

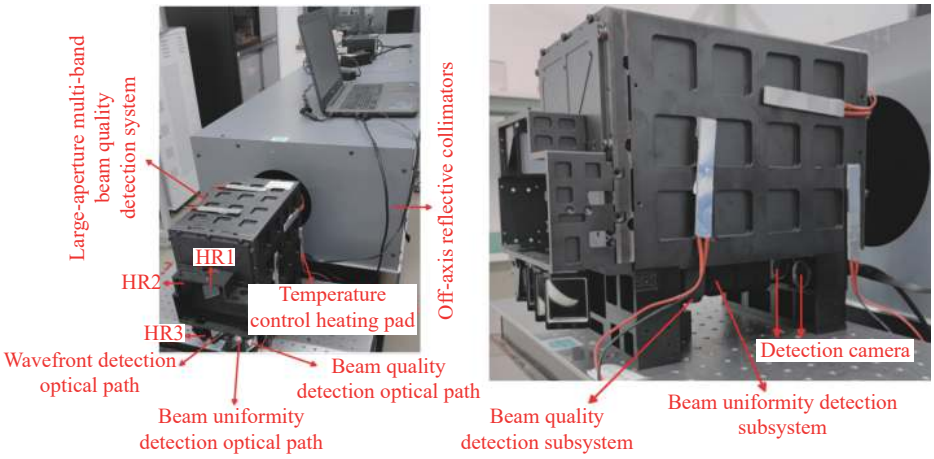

图 17　大口径多波段光束质量检测系统

Fig. 17　Large-aperture multi-band beam quality detection system

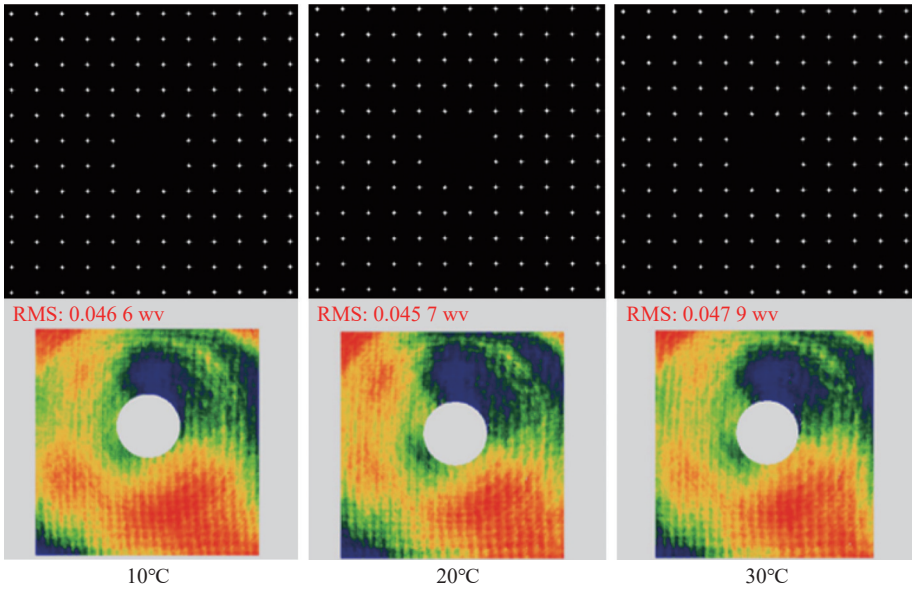

图 18　波前探测相机探测到的 λ_1 波段光斑图像及其波前复原结果

Fig. 18　Spot images detected by the wavefront detection camera and their wavefront restoration results at λ_1 band

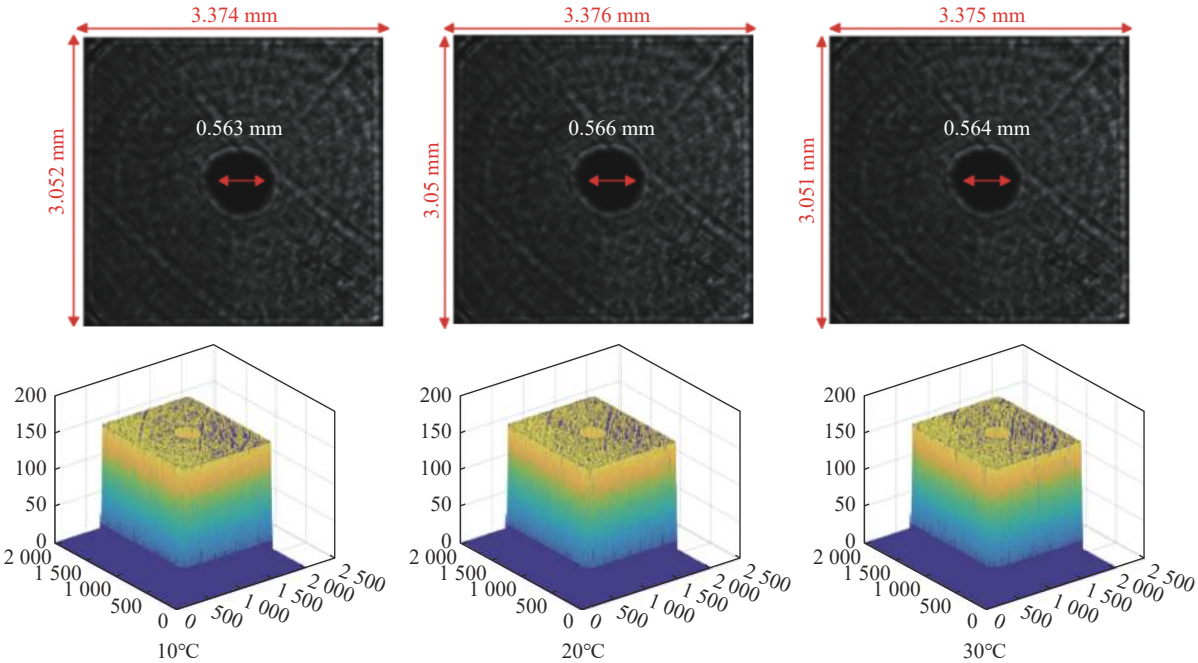

图 19　光束均匀性相机探测到的 λ_1 波段光斑及其光强分布图像

Fig. 19　Spot images and the intensity distribution detected by the beam uniformity camera at λ_1 band

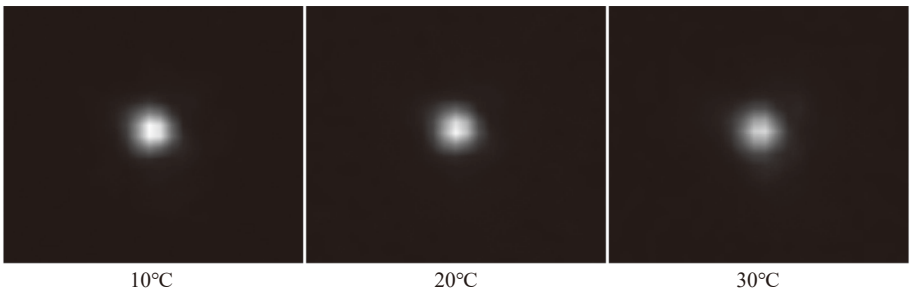

图 20　光束质量探测相机探测到的 λ_1 波段光斑图像

Fig. 20　Spot images detected by the beam quality detection camera at λ_1 band

利用 MATLAB 对光斑进行处理和应用公式(1)光斑均匀性计算公式[21]计算图 19 中光斑的均匀性, 3 个设计波长在 10 °C、20 °C 和 30 °C 下光束的均匀性分别为 0.906、0.912、0.908; 0.901、0.905、0.903; 0.893、0.898、0.896, 优于 0.8, 满足技术指标要求。

$$uniformity = (I_{\max} - I_{\min}) / I_{ave} \quad , \qquad (1)$$

式中 $I_{\max}$ 表示图像中光束强度最大值, $I_{\min}$ 表示图像中光束强度最小值, I_{ave} 表示图像中光束强度的平均值。

计算图 20 中光斑的光束质量, 3 个设计波长在 10 °C、20 °C 和 30 °C 的光束质量 β 因子分别为 1.15 倍衍射极限、1.12 倍衍射极限、1.13 倍衍射极限; 1.16 倍衍射极限、1.14 倍衍射极限、1.15 倍衍射极限; 1.26 倍衍射极限、1.23 倍衍射极限、1.25 倍衍射极限, 满足设计指标要求, 光束质量 β 因子的计算如公式(2)所示:

$$\beta = \sqrt{S / S_{DL}} \quad , \qquad (2)$$

式中, S 与 S_{DL} 分别表示环围能量为 83.6% 处, 实际系统成像光斑大小与系统衍射极限光斑大小[22]。

4　结　论

针对探测口径大、多波段、多参数、小型化等技术要求, 利用卡塞格林反射结构无色差特点, 采用大倍率光束压缩后分光探测的设计方案, 实现(1 064±3)nm、(1 030±3)nm、(635±5)nm 波段,口径为 155 mm×144 mm 矩形光束的波前、光束均匀性和光束质量的多参数检测。测得 10 °C ~ 30 °C 下系统波前的 RMS 值优于 0.052 4λ(λ=632.8 nm), 系统的光束均匀性优于 0.893, 光束质量 β 因子优于 1.26 倍衍射极限, 满足设计指标要求。

参考文献:

[1] 崔宇龙, 周智越, 黄威, 等. 中红外光纤激光技术研究进展与展望[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0900001.
CUI Y L, ZHOU ZH Y, HUANG W, *et al*.. Progress and prospect of mid-infrared fiber laser technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0900001. (in Chinese).

[2] 王辉华, 林龙信, 叶辛, 等. 国外新型电驱动高能激光技术现状与发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(1): 20220283.
WANG H H, LIN L X, YE X, *et al*.. Status and development trend of overseas new type electric drive high-energy laser technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(1): 20220283. (in Chinese).

[3] KALISKY Y Y, KALISKY O. The status of high-power lasers and their applications in the battlefield[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(9): 091003.

[4] 顾勇刚, 牛健, 杨坚, 等. 激光在医疗领域中的应用[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(2): 283-295.
GU Y G, NIU J, YANG J, *et al*.. Application of laser in the medical field[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 283-295. (in Chinese).

[5] LV F R, LIU Y K, GAO SH J, *et al*.. Research on bandwidth improvement of fine tracking control system in space laser communication[J]. *Photonics*, 2023, 10(11): 1179.

[6] 刘立培, 陈皓, 杨仁人, 等. 基体预热对激光熔覆制备 M2 钢熔覆层表面硬度均匀性的影响[J]. 中国激光, 2023: 1-24.
LIU L P, CHEN H, YANG R R, *et al*. . Effect of substrate preheating on the uniformity of surface hardness of M2 cladding layer prepared by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023: 1-24. (in Chinese).

[7] 李苏, 张占辉, 韩善果, 等. 激光技术在材料加工领域的应用与发展[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 76-85.
LI S, ZHANG ZH H, HAN SH G, *et al*.. Application and development of laser technology in the field of material processing[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2020, 12(4): 76-85. (in Chinese).

[8] 周子超, 崔文达, 奚小明, 等. 高功率光纤激光器纤芯温度在线测量技术及其应用研究进展[J]. 光学学报, 2023, 43(17): 1714006.
ZHOU Z C, CUI W D, XI X M, *et al*.. Real-time temperature measurement of high-power fiber laser core and its applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(17): 1714006. (in Chinese).

[9] 曲锐. 机载多波段共孔径动态成像光学系统研究[D]. 西安: 中国科学院大学 (中国科学院西安光学精密机械研究所), 2023.

QU R. *Research on airborne multi-band common aperture dynamic imaging optical system*[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanins, Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese).

[10] 苏春轩. 板条固体激光器自适应光学优化控制技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2021.
SU CH X. *Optimal control adaptive optics system for solid-state slab lasers*[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese).

[11] 李霄. 板条激光放大器相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
LI X. *Study on coherent beam combination technology of slab lasers*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese).

[12] 马士青. 基于自适应光学的混合腔板条固体激光器光束质量控制技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2021.
MA SH Q. *Research on beam quality control technology of hybrid-cavity slab solid-state laser based on adaptive optics*[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese).

[13] SCHULZE C, FLAMM D, DUPARRÉ M, *et al*.. Beam-quality measurements using a spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4687-4689.

[14] NIEDERRITER R D, GOPINATH J T, SIEMENS M E. Measurement of the M^2 beam propagation factor using a focus-tunable liquid lens[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(8): 1591-1598.

[15] DU Y ZH, FU Y Q, ZHENG L X. Complex amplitude reconstruction for dynamic beam quality M^2 factor measurement with self-referencing interferometer wavefront sensor[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(36): 10180-10186.

[16] 张成栋. 激光光束质量诊断与测量研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.
ZHANG CH D. *Diagnosis and measurement of laser beam quality*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese).

[17] 张禹, 杨忠明, 刘兆军, 等. 大口径多光谱通道波前测量系统设计[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(8): 20190559.
ZHANG Y, YANG ZH M, LIU ZH J, *et al*.. Design of large aperture multi-spectra channel wavefront measurement system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20190559. (in Chinese).

[18] 潘国涛, 闫钰锋, 于信, 等. 矩形大口径激光光束质量评价光学系统设计[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 306-317.
PAN G T, YAN Y F, YU X, *et al*.. Design of optical system for quality evaluation of a large rectangular aperture laser beam[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 306-317. (in Chinese).

[19] 李晶. 基于次镜像移补偿的航空折反式光学系统降敏与无热化技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2023.
LI J. *Research on desensitization and athermal technology of aerial catadioptric optical system based on the secondary mirror image motion compensation*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese).

[20] 张大庆. 基于卡式结构的红外光学系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
ZHANG D Q. *Design of infrared optical system based on gassegrain-type*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese).

[21] CHEN ZH ZH, XU Y T, GUO Y D, *et al*.. 8.2 kW high beam quality quasi-continuous-wave face-pumped Nd: YAG slab amplifier[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 5011-5015.

[22] ALLIK T H, DIXON R E, PROFFITT R P, *et al*.. Beam uniformity analysis of infrared laser illuminators[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(2): 026103.

作者简介：

白素平(1970—), 女, 山西朔州人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 2005 年于长春理工大学获得硕士学位, 主要研究方向包括: 精密仪器总体结构设计、大口径光学系统装调技术、武器装备参数无损检测技术。E-mail: baisp@126.com