文章编号　2095-1531(2018)01-0108-07

激光合束光学系统气体热效应影响分析

兰　硕[1,2,4],李新南[1,3*],徐　晨[1,3]
(1. 中国科学院 国家天文台南京天文光学技术研究所,江苏 南京 210042;
2. 中国航天科工集团 第九总体设计部,湖北 武汉 430040;
3. 中国科学院 天文光学技术重点实验室,南京 210042;
4. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了分析激光合束光学系统的成像质量,本文研究了激光合束光学系统的热耦合效应。借助光学设计软件建立激光合束系统模型,基于传热学理论,根据光学系统结构及流场条件参数建立气体流体模型。根据光线追迹法编写用户自定义函数,通过数值模拟定量研究了介质气体热效应引起的波像差系数。仿真分析了气体热效应在不同时间下对激光合束光学系统的影响。结果表明,受重力影响激光合束系统热效应的旋转对称性变得不再明显,随着温度升高呈现分层变化,且非均匀热效应以低阶像差为主。将波像差系数导入光学设计软件,可实现复杂光场与热场耦合传函的定量分析,波像差劣化 0.3λ,传递函数下降 0.1。

关　键　词:激光合束;热效应;气体光学
中图分类号:TN012　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20181101.0108

Influence of gas thermal effect on beam combination system

LAN Shuo[1,2,4], LI Xin-nan[1,3*], XU Chen[1,3]
(1. *National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210042, *China*;
2. *The 9th Designing of China Aerospace Science Industry Corp.*, *Wuhan* 430040, *China*;
3. *Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210042, *China*;
4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: xnli@ niaot. ac. cn*

Abstract: The thermal coupling effecting on laser beam combining optical system is studied in this paper in order to analyze the imaging quality of the system. The laser beam combining system is modeled using optical design software, and the gas fluid model is established based on heat transfer theory according to the structure of the optical system and the parameters of the flow field. According to the ray tracing method, a user-defined function is defined and the wave aberration coefficient caused by the thermal effect of the medium gas is quan-

收稿日期:2017-09-11;**修订日期**:2017-11-12

titatively studied through numerical simulation. The influence of gas thermal effect on the laser optical system at different time is simulated and analyzed. The results show that the rotational symmetry of the thermal effect in the beam combination system is no longer noticeable under the influence of gravity, but stratification changes with increasing temperature, and the non-uniform thermal effect is dominated by low-order aberrations. The wave aberration coefficient can be imported into the optical design software to quantitatively analyze the transfer function of the coupling of the complex optical field and the thermal field. At this time, the wave aberration is deteriorated by 0.3λ, and the transfer function value is decreased by 0.1.

Key words: laser beam combination; imaging quality; thermal effects; atmospheric optics

1　引　言

在激光光学系统工作过程中热效应可分为主动热效应和被动热效应。被动热效应泛指由于工作环境温度、外界杂光引入的热影响。主动热效应指内部热源辐射的能量在光学膜层、光学元件上热能沉积,引起光学元件热变形产生像差[1],以及光路传输通道中气体分子和粒子因吸收周围能量而被加热,引起气体密度的起伏和局部折射率变化引入热像差。热像差使激光在光学系统内光路中传输相位发生畸变,导致光学系统像质退化,在实际工程应用中不容忽视。国外专家学者很早就针对激光光学系统热效应问题进行了理论模拟与实验分析[2-4]。国内,中国科学院光电技术研究所[5]、四川大学[6]、国防科技大学[7]和北京应用物理与计算数学研究所[8]等采用数值计算方法分析了单路高能量密度激光在光学系统内所产生的热效应对远场光斑质量和能量分布的影响。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所[9]采用光机热耦合分析方法研究了三路光束镀膜合束时各波段激光所产生的耦合热效应对各路波前畸变的影响。

随着对激光总功率需求的不断提高,实际工程中多采用激光合束技术实现功率提升,对于高精度激光光学系统而言,热效应逐渐成为工程研制中的关键问题[10-12]。本文主要针对空间功率合成系统中的气体热效应问题进行研究,在多路激光空间合束光学系统,由于受激光作用,光学元件处于非热平衡状态,吸收激光热量、发生局部温升,受重力等影响会造成激光束产生非对称性,这种传输光路热光耦合效应更复杂,不仅影响远场激光光强分布,对于具备成像与发射共口径的激光系统,还会对成像质量造成严重影响。本文基于光学设计软件建立激光合束光学模型,根据激光源参数,利用流场分析软件计算传输链路内光路气体热流情况,最后基于光线追迹方法对数据进行后处理,计算得到内光路气体热效应引入的热像差,将热像差迭代到光学设计软件中,完成对激光合束系统热效应致像质劣化的计算分析,为热效应像差补偿提供一定参考。

2　理论基础

在激光光学系统中光束途经介质吸收能量会加热产生温度梯度,考虑系统内部的热传导过程以及有气体流动情况下的对流换热过程,根据传热学理论,激光加热一定容积的静态介质气体,其热导方程为[13]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \vec{\nu}}{\partial t} + \vec{\nu} \cdot \nabla \vec{\nu} = -\dfrac{1}{\rho_1} \nabla p + \vec{g} \\ \dfrac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_1 \vec{\nu}) \\ \dfrac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nu} \cdot \nabla T - \nabla \cdot \left(\dfrac{\lambda}{\rho_1 C_p} \nabla T\right) = \dfrac{Q(r,t)}{\rho_1 C_p} \end{cases}, \tag{1}$$

式中,p 是气体压强,ν 是速度矢量,T 是气体温度,$Q(r,t)$是气体介质吸收的激光热量,t 和 r 为独立时间与空间变量,g 为重力加速度。λ、κ、ρ_1 和 C_p为气体热导率、热扩散率、密度和比热容。

由于温度梯度会引起气体折射率变化,定义加热后气体的折射率为[14]:

$$n = n_0 + \Delta n , \tag{2}$$

式中,n_0为气体初始折射率,Δn 为激光加热引起

的气体折射率变化，假设连续激光对气体的加热是瞬时完成的，且只改变气体的密度和温度，并不改变气体的压强。那么，加热引起的气体折射率变化为[14]：

$$\Delta n = \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} \cdot \theta , \tag{3}$$

式中，θ 为气体的温升，定义折射温度系数为率 $n_T = \mathrm{d}n/\mathrm{d}t$。

封闭光学系统沿光束传输方向热效应产生的波前像差可以表示为[13]

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\int \Delta n \mathrm{d}z , \tag{4}$$

式中，λ 为光束波长，$\Delta\phi$ 为波前相位变化量，z 为传输路径。通过联立式(1)～(4)可得到气体热场-光场耦合方程。

描述波前相位有多种形式，较为常见的是泽尼克多项式，泽尼克多项式是在圆域上表征径向变量和角度变量的函数，且具有正交性，对于复杂波前的分析精度较高。由于内光路通道受热产生的波前像差随时间而变化，与光学系统的固定像差显著不同，因此，可利用泽尼克多项式的变化特性定量研究热效应对成像质量的影响。泽尼克多项式表达式为[15]。

$$Z_n^m(\rho,\theta) = \begin{cases} R_n^m(\rho)\cos(m\theta) & (m \geqslant 0) \\ R_n^m(\rho)\sin(m\theta) & (m < 0) \end{cases} , \tag{6}$$

泽尼克多项式正交性质为：

$$\int_0^{2\pi}\int_0^1 Z_n^m(\rho,\theta) Z_n^{m'}(\rho,\theta)\rho \mathrm{d}\rho \mathrm{d}\theta = \pi\delta_{ii'} , \tag{7}$$

式中，ρ、θ 为极坐标，m、n 为阶次，$Z_n^m(\rho,\theta)$ 为波前函数，$R(\rho)$ 为多项式系数。

3 仿真计算及结果分析

假设高能激光空间合束系统激光强度分布为高斯光束，激光束从主镜位置传输到窗口，不考虑激光在镜筒内来回反射。流场模型中只考虑介质气体与镜子热耦合，重力以及介质气体与镜子吸收激光能量引起的光学相位变化。介质与光学系统初始温度均为 300 K，介质气体为氮气，初始状态为静止。计算采用的参数如表 1、表 2 所示。

表 1 标准状态下介质气体参数

Tab. 1 Parameters of gas medium in standard state

Parameters	Value
Density ρ/(kg · m^{-3})	1.250 6
Thermal conductivity λ/[W/(m · K)]	0.026
Thermal expansivity α_T/[1/K]	0.003 356
Capacity C_p/[J/(kg · K)]	1 040.67
Refractive index n_0	1.000 279 3
Thermal refractive index coefficient n_T/[1/K]	-0.929×10^{-6}
Absorption coefficient α/[1/m]	1×10^{-5} [6]

表 2 光学结构及流场条件参数

Tab. 2 Parameters of optical structure and fluid field

Parameters	Value
Single channel heat flux Q/[w/m^2]	200
Operating pressure P_0/Pa	101 325
Entrance pupil diameter D/mm	800
Single channel EPD D_{single}/mm	200
Optical path difference O_{PD}/mm	1 000
Gravity acceleration g/[m/s^2]	9.8
Wavelength λ/nm	1 060

为有效提高占空比，本文参考 6 路空间合束光学结构形式，6 路激光位置采用旋转对称排布。利用光学设计软件 CodeV，设计得到理想光学模型如图 1 所示。考虑系统装调加工公差，对光学系统进行了公差分配，并对光学系统 6 路激光位置的出瞳处波像差进行放置分析，分析表明光学系统波像差优于 0.2λ，像质良好。图 2 为 6 路激光在出瞳位置的波像差分析结果。

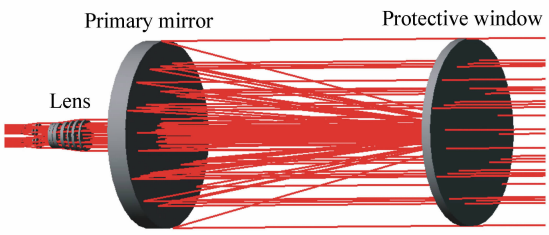


图 1 光学模型

Fig. 1 Optical model

根据光学结构及流场条件参数，建立流体模

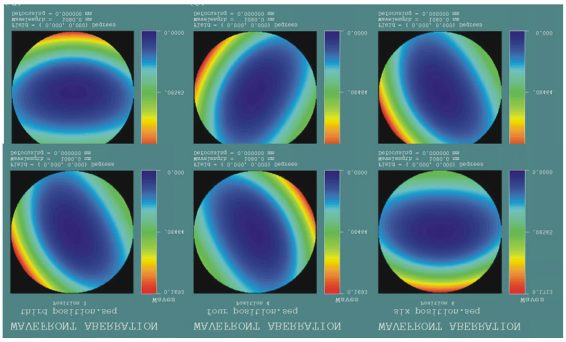


图 2　不同位置处光学系统出瞳波相差

Fig. 2　Wavefront map at exit pupil of optical system in different position

型如图 3 所示。热源来自 6 路激光辐射能量,能量通过介质气体,使光学传输介质处于非热平衡状态。随时间积累,介质气体产生温度梯度。受重力影响,不同温度条件下气体密度也发生变化。光线从光疏介质传输到光密介质,沿传输路径的光程随之发生变化,叠加到光学系统内产生热像差。为了分析传输光路热光耦合效应,对 1 688 根光线进行光线追迹。分别对 5 s 和 60 s 仿真,通过数据后处理将热传导引起的折射率变化换算得到光学镜筒内气流受热引起的相位分布,如图 4(a)和图 5(a)所示,分析表明气体受 6 路激光辐射5 s条件下,气体热效应引起的相位仍呈旋转对称分布,随着时间累积,当激光辐射 60 s 时,气体热效应的旋转对称性变得不再明显,随着温度升高气体呈现分层变化。为了更直观且量化的分析气体热效应引起的相位影响,利用泽尼克多项式的变化特性定量研究热效应对成像质量的影响,对相位进行了泽尼克多项式分解,得到前 36 项系数如图 4(b)和图 5(b)所示,将前 8 项定义为低阶像差,分析表明多路激光光学系统热效应以低阶像差为主,其中倾斜、离焦、像散等低阶像差影响占了 80% 以上。

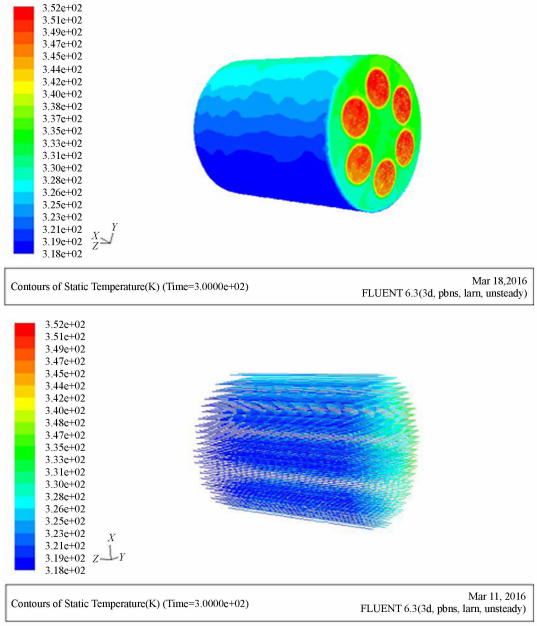
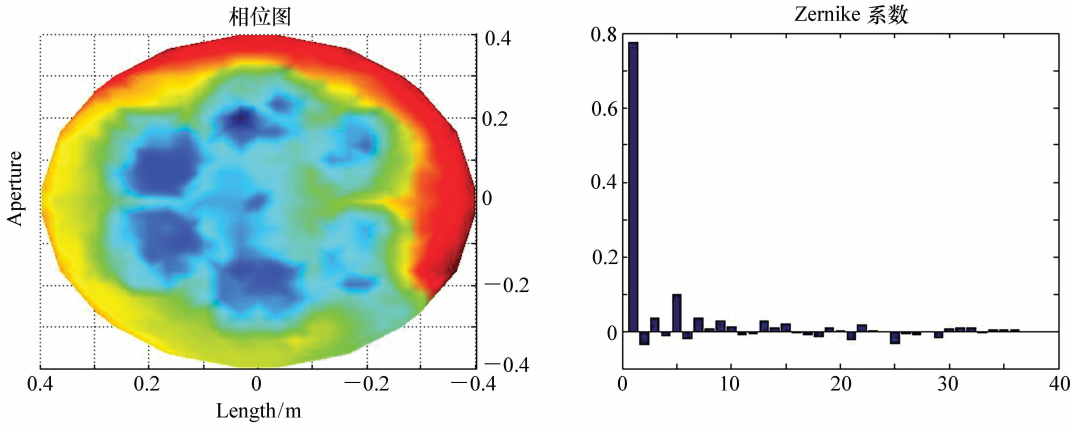


图 3　流体模型(a)和光线追迹模型(b)

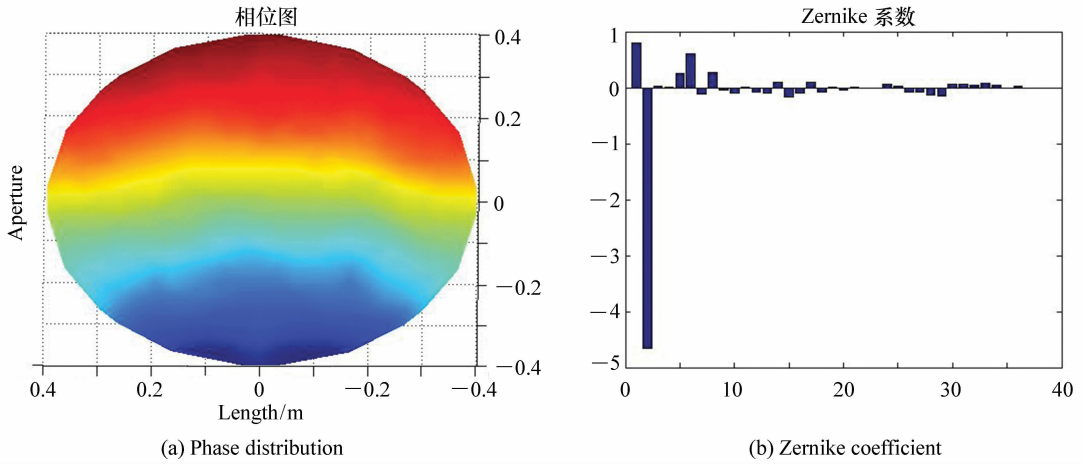
Fig. 3　Fluid model(a) and ray trace model(b)



(a) Phase distribution　　(b) Zernike coefficient

图 4　5 s 条件下气体相位分布(a)和泽尼克系数(b)

Fig. 4　Phase distribution(a) and Zernike coefficient(b) under radiation for 5 s



(a) Phase distribution (b) Zernike coefficient

图 5 60 s 条件下气体相位分布(a)及泽尼克系数(b)

Fig. 5 Phase distribution(a) and Zernike coefficient(b) under radiation for 60 s

本文将不同时间下气体波前相位的泽尼克系数作为光学表面输入到光学系统软件 CodeV 中，对光学系统六路激光位置的中低频传递函数进行仿真分析，光学系统在 60 lp/mm 处的传递函数分析结果如表 3 所示。分析表明随着时间积累，温度升高使光学系统受到的热湍流影响越来越大，由于重力的影响，破坏了系统上下对称性，介质气体随着激光热效应的时间积累产生了温度分层，光学系统出瞳波前的规则对称性逐渐被破坏，经光学设计软件对系统传递函数进行分析，系统传递函数下降也越加严重。对 60 s 条件下六路位置的出瞳波像差进行分析，分析结果如图 6 所示，分析表明光学系统出瞳波前的规则对称性逐渐被破坏，与初始条件相比波像差劣化 0.3λ。

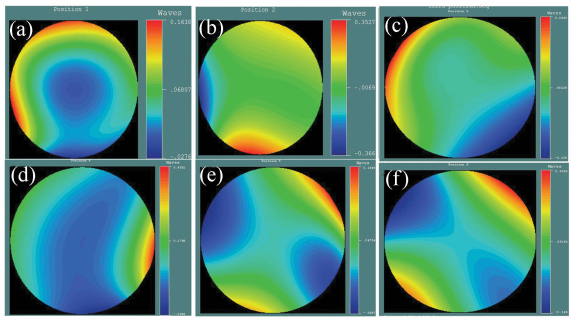


图 6 不同位置处光学系统出瞳波像差

Fig. 6 Pupil map of optical system in different position

表 3 光学传递函数(60 lp/mm)

Tab. 3 Optical Diffraction MTF(60 lp/mm)

	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
0 s Focus Position	0.412	0.407	0.407	0.407	0.407	0.412
5 s Focus Position	0.411	0.405	0.391	0.410	0.402	0.398
60 s Focus Position	0.410	0.339	0.359	0.349	0.375	0.286

4 结 论

本文提出将光线追迹算法应用于激光合束光学系统的气体热耦合效应分析中，有效建立了复杂热场和光场的联合分析方法，分析结果表明，在本文假设条件下气体热效应引起的相位呈旋转对称分布，随着时间累积，受重力作用，当激光辐射 60 s 时，气体热效应的旋转对称性变得不再明显，随着温度升高气体呈现分层变化，合束激光光学系统气体热效应以低阶像差为主，其中倾斜、离焦、像散等低阶像差影响占了 80% 以上，波像差

劣化 0.3λ,传递函数下降 0.1。通过该方法不仅可以有效预测合束激光光学系统在激光热载荷作用下的光学性能变化,使研究人员在设计阶段从光学系统成像质量角度对合束激光系统进行合理设计和评价,而且为热效应低阶像差补偿等工作提供参考,具有实际意义。

参考文献:

[1] 张巍,于新峰,周连生,等. 精密光学系统的热像差[J]. 光学 精密工程,2015,23(11):3033-3040.
ZHANG W,YU X F,ZHOU L SH,*et al*.. Thermal aberration in precision optical system[J]. *Opt. Precision Eng*.,2015,23(11):3033-3040. (in Chinese)

[2] BREAUX H,EVERS W,SEPUCHA R,*et al*.. Algebraic model for cw thermal-blooming effects[J]. *Applied Optics*,1979,18(15):2638-2644.

[3] LADERMAN A J. Thermal blooming in axial pipe flow:comment[J]. *Applied Optics*,1980,19(14):2269-2270.

[4] STEPHENS T,JOHNSON D C,LANGUIRAND M T. Beam path conditioning for high-power laser system[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*,1900,3(2):225-244.

[5] 金钢,刘顺发,李树民,等. 激光热效应对光束控制系统发射光束质量的影响[J]. 中国激光,2002,A29(10):895-899.
JIN G,LIU SH F,LI SH M,*et al*.. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality[J]. *Chinese J. Lasers*,2002,A29(10):895-899. (in Chinese)

[6] 季小玲,陶向阳,吕百达. 激光非均匀性和内光路热效应对远场特性的影响[J]. 中国激光,2004,31(10):1193-1197.
JI X L,TAO X Y,LÜ B D. Influence of laser nonuniformity and thermal effects in an inner optical system on the far-field behavior[J]. *Chinese J. Lasers*,2004,31(10):1193-1197. (in Chinese)

[7] 孙运强,习锋杰,许晓军,等. 内通道流场与光场能量耦合的数值模拟[J]. 中国激光,2011,38(2):020213.
SUN Y Q,XI F J,XU X J,*et al*.. Model for the optical field and fluent field coupling effects[J]. *Chinese J. Lasers*,2011,38(2):020213. (in Chinese)

[8] 胡鹏,苏华,安建祝,等. 封闭管道中热耦合效应对激光传输的影响[J]. 强激光与粒子束,2013,25(7):1651-1656.
HU P,SU H,AN J ZH,*et al*. Thermal coupling effects on laser propagation in closed tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2013,25(7):1651-1656. (in Chinese)

[9] 孙毅,高云国,邵帅. 高功率 热效应对合束系统的影响[J]. 光学 精密工程,2015,23(1):3097-3106.
SUN Y,GAO Y G,SHAO SH. Influence of high power laser thermal effect on beam combination system[J]. *Opt. Precision Eng*.,2015,23(11):3097-3106. (in Chinese)

[10] 聂山钧,郭劲,邵俊峰,等. 激光辐照下镀铬介质高吸收镜的热变形[J]. 中国光学,2015,8(1):84-90.
NIE SH J,GUO J,SHAO J F,*et al*.. Thermal deformation of high absorption chrome plated mirror irradiated by laser [J]. *Chinese Optics*,2015,8(1):84-90. (in Chinese)

[11] 安海霞,邓坤,闭治跃. 高功率激光装备小型化轻量化技术[J]. 中国光学,2017,10(3):321-330.
AN H X,DENG K,BI ZH Y. Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment[J]. *Chinese Optics*,2017,10(3):321-330. (in Chinese)

[12] 张克非,蒋涛,邵龙,等. 基于新型模糊 PID 控制单元的 LD 精密温控研究[J]. 光学 精密工程,2017,25(3):648-655.
ZHANG K F,JIANG T,SHAO L,*et al*.. Research on precision temperature control of laser diode based on the novel fuzzy-PID control unit[J]. *Opt. Precision Eng*.,2017,25(3):648-655. (in Chinese)

[13] YU H H,HU P,AN J ZH,*et al*.. Thermal blooming effects of gas on laser propagation in a closed tube[J]. *Proc. SPIE*,2014,9255:92552Z1-10.

[14] 孙运强. 激光内通道传输的气体热效应研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011:11-12.
SUN Y Q. Study on the Thermal blooming of beam propagation in the inner channel[D]. Changsha:National University of Defense Technology. 2011:11-12. (in Chinese)

[15] 刘剑峰,龙夫年,张伟,等. 基于泽尼克多项式进行面形误差拟合的频域分析[J]. 光学学报,2005,25(8):1062-1066.
LIU J F,LONG F N,ZHANG W,*et al*.. Frequency domain analysis of surface figure fitting based on zernike polynomials [J]. *Acta Optica Sinica*,2005,25(8):1062-1066. (in Chinese)

作者简介:

兰 硕(1987—),女,黑龙江佳木斯人,博士研究生,工程师,2011 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事激光光学系统设计加工检测及热效应分析方面的研究。E-mail:slan@ niaot. ac. cn

李新南(1963—),男,江苏苏州人,硕士,研究员,博士生导师,1983 年于华东工程学院获得学士学位,1991 年于紫金山天文台获得硕士学位,1999 年 1 ~ 6 月,美国亚历桑那大学访问学者,主要从事大口径光学技术应用方面的研究。E-mail:xnli@ niaot. ac. cn

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

* 美国工程索引 EI 核心期刊
* 中国出版政府奖期刊提名奖
* 中国精品科技期刊
* 中文核心期刊
* 百种中国杰出学术期刊
* 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院
主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
中国仪器仪表学会
地址:长春市东南湖大路 3888 号 邮编:130033
电话:0431-86176855 传真:0431-84613409
电邮:gxjmgc@ sina. com 网址:http://www. eope. net
定价:100.00 元/册