

文章编号 2095-1531(2016)01-0130-07

# 大口径离轴凸非球面系统拼接检验技术

王孝坤

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室,吉林 长春 130033)

**摘要:**针对大口径离轴凸非球面面形检测的困难,本文将光学系统波像差检验技术与子孔径拼接干涉技术相结合,提出了凸非球面系统拼接检测方法。对该方法的基本原理和具体实现过程进行了分析和研究,并建立了合理的子孔径拼接数学模型。当离轴三反光学系统的主镜和三镜加工完成以后,对整个系统进行装调和测试,并依次测定光学系统各视场的波像差分布,通过综合优化子孔径拼接算法和全口径面形数据插值可以求解得到大口径非球面全口径的面形信息,从而为非球面后续加工和系统的装调提供了依据和保障。结合工程实例,对一口径为 287 mm × 115 mm 的离轴非球面次镜进行了系统拼接测试和加工,经过两个周期的加工和测试,其面形分布的 RMS 值接近  $1/30\lambda$  ( $\lambda = 632.8$  nm)。

**关键词:**光学检测;大口径非球面;三镜消像散系统;波像差检验;子孔径拼接干涉技术

**中图分类号:**TQ171.65; O436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20160901.0130

## Measurement of large off-axis convex asphere by systemic stitching testing method

WANG Xiao-kun

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: jmwkx@sohu.com

**Abstract:** In order to overcome the difficulty of testing large off-axis convex asphere, the convex asphere systemic stitching testing method combining with wave aberration testing and subaperture stitching interferometry (SSI) is proposed. The basic principle and flow chart of this method are analyzed and researched, and the stitching mathematical model is established. When the primary mirror and second mirror of the three mirror a-stigmatism (TMA) system have been fabricated, we align and calibrate the optical system, and test wave aberration of all the fields successively. Then we can obtain the phase map of the whole aperture by the synthetical optimization stitching algorithm and interpolation, which provides the guarantee of the subsequent fabrication

收稿日期:2015-09-11;修订日期:2015-10-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 08663NJ090);国家重大基础研究计划(973计划)资助项目(No. 2011CB0132005);国家自然科学基金重点资助项目(No. 61036015)

Supported by National High-tech R&D Program of China (No. 08663NJ090), National Program on Key Basic Research Projects of China (No. 2011CB0132005), National Natural Science Foundation of China (No. 61036015)

and systemic testing. With engineering examples, a large convex mirror with the aperture of  $287\text{ mm} \times 115\text{ mm}$  is tested by the method, and the value of RMS of the surface error is close to  $1/30\lambda$  ( $\lambda = 632.8\text{ nm}$ ) after two cycles of fabricating and testing.

**Key words:** optical testing; large aspheric surface; three mirror astigmatism (TMA); wave aberration testing; subaperture stitching interferometry (SSI)

## 1 引言

在光学系统中,使用非球面元件可以很好地平衡和矫正系统像差,改善成像质量,大幅提升光学系统的性能;同时可以简化系统,减轻系统的重量,降低系统的复杂程度。因此,非球面元件被广泛用于深空探测、光电跟踪、天文观测等诸多光电设备中<sup>[1-3]</sup>。尤其在空间光学领域,由于离轴三反消像散非球面系统(TMA)具有组件少、长焦距、大视场、宽波段、调制传递函数高、抑制杂光能力强等优异特性,使得大口径非球面元件在空间遥感中得到了广泛应用<sup>[4-7]</sup>。

凸非球面尤其是离轴凸非球面镜面形的测量一直是光学检测中的难点,经典的测试方法是借助大口径Hindle球利用无像差点法进行测量。但是,对于大口径离轴凸非球面的检测,Hindle球的尺寸往往是待测镜面的几倍,高精度、大口径Hindle球的制造延长了工程周期,并增加了成本,此外,利用该方法检测时存在中心遮拦<sup>[8]</sup>。

利用补偿透镜或者衍射光学元件-计算全息对凸非球面进行零位补偿干涉测量,仍是当前检测凸非球面面形最常规的方法<sup>[9-11]</sup>。但是凸非球面补偿透镜的制备非常困难和复杂,因为其透镜本身也含有非球面,要想实现对补偿透镜的加工、装调和测试,还须为补偿透镜设计和加工一套补偿元件。利用计算全息可以很好地实现对浅度凸非球面的零位补偿测量,但是对于大偏离量离轴凸非球面面形的检测,其计算全息的线频密度很高,现有光刻设备根本无法实现<sup>[12-13]</sup>。此外,为了与被测曲面吻合,检测凸非球面面形需要汇聚波面入射,这就需要测量干涉仪、补偿透镜和计算全息的口径大于被检非球面元件。大尺寸的补偿透镜和计算全息的制备目前存在诸多的困难,大口

径干涉仪的价格更是昂贵。

对于浅度(非球面度在  $10\text{ }\mu\text{m}$  以内)凸非球面的检测,通过小口径的干涉仪可以对准和测量大口径凸非球面镜上多个小区域(子孔径)的相位数据,利用子孔径拼接算法能够重构获得大口径非球面全口径的面形分布。但是如果直接采用子孔径拼接法检测大口径、大偏离量的凸非球面,子孔径数目将会很多,分析和计算非常复杂,还会引入拼接误差传递和累积<sup>[14-16]</sup>。

为了克服以上困难,本文将光学系统波像差测试技术与子孔径拼接技术相结合,提出了大口径离轴凸非球面系统拼接测试方法,通过对光学系统各视场波像差的测定和拼接计算,能够获得大口径凸非球面全口径的面形分布。

## 2 基本原理

离轴三反非球面系统的光路图如图1所示,即入射光线经过非球面主镜后进行第一次反射,反射后的光束入射到次镜上进行第二次反射,第二次反射后的光束入射到第三镜进行第三次反

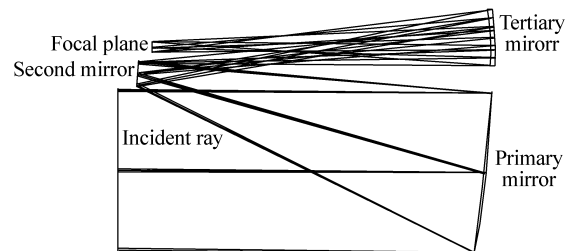


图1 离轴三反非球面光学系统光路图

Fig. 1 Optical path of TMA system

射,反射后的光束入射到 CCD 焦面上成像。在该系统中,主镜和第三镜均为离轴非球面反射镜,次镜是凸非球面反射镜,对于如图1所示的二次成

像离轴三反非球面系统(光束在汇聚于成像焦面以前有过一次汇聚),其次镜为大口径离轴凸非球面反射镜。

系统拼接测试大口径凸非球面的设备装置和原理如图2所示,其主要包括离轴三反光学系统各组件、高精度平面反射镜、激光干涉仪和激光跟踪仪等。

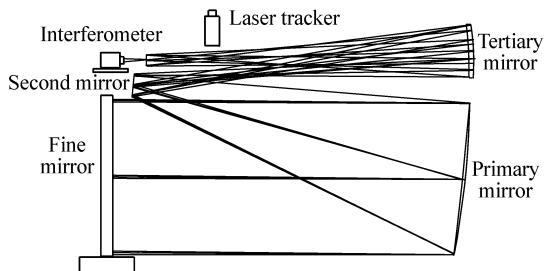


图2 大口径离轴凸非球面系统拼接检测原理示意图

Fig. 2 Sketch and principle of testing large off-axis convex asphere by systemic stitching method

在光学系统的主镜和三镜加工完成满足精度后,对整个系统进行装调,并对各视场的系统波像差进行测量,此时主镜和三镜的面形已经完好,所得到的各视场系统波像差的一半(来回两次反射)即为次镜凸非球面对应各子区域(子孔径)的面形误差,通过子孔径拼接算法可以求解得到大口径离轴凸非球面全口径的面形数据,从而为其进一步加工提供依据和保障。

### 3 步骤和流程

离轴凸非球面面形系统拼接检测方法的流程如图3所示,具体步骤如下:

#### (1) 系统装调

首先,当主镜和三镜完成加工后,对离轴三反非球面系统进行系统装调,并利用激光跟踪仪对系统的几何参数(各反射镜的位置姿态以及各镜体之间的相对位置关系)进行测定和监控。激光跟踪仪是一种高精度、大容量的便携式三位坐标测量设备,其使用两个旋转角编码器和一个激光距离测量系统,以跟踪和测量靶标球的位置,从而

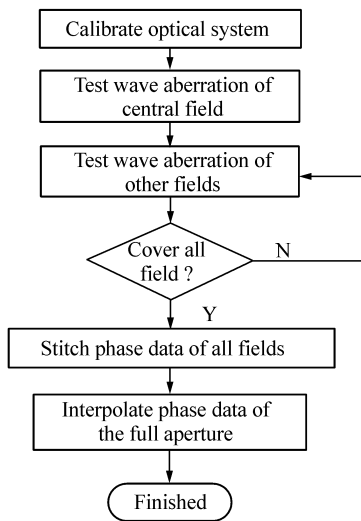


图3 大口径离轴凸非球面系统拼接检测流程图

Fig. 3 Flow chart of testing large off-axis convex asphere by systemic stitching method

可以很好地测定各反射镜之间的空间位置关系。

激光跟踪仪的高精度选项-干涉仪(IFM)的最大允许误差为 $2\ \mu\text{m} + L \cdot 0.4\ \mu\text{m}/\text{m}$ ,其中 $L$ 为激光跟踪仪与待测物体之间的距离,光学系统测试光路一般在10 m以内,因此各反射镜位置误差可以控制在 $6\ \mu\text{m}$ 以内。而光学设计中各反射镜顶点曲率半径的公差一般为几十微米甚至毫米量级,因此,利用激光跟踪仪可以很好地指导光学系统调整,使干涉仪出射的汇聚光精确地与三反系统成像焦面对准,其对准偏差以及各反射镜之间的位置误差远小于光学系统设计允差,可以忽略。

#### (2) 中心视场波像差检测

经过反复调整光路,当利用激光跟踪仪测定得到光学系统中的各几何位置关系均在设计公差范围之内时,利用调整机构调整激光干涉仪,使干涉仪的出射光线汇聚在 $0^\circ$ 视场(中心视场)成像的焦面位置,根据光路可逆原理,该光束将会先经过第三镜后进行反射,反射后的光线经过次镜后再次反射,反射后的光线入射到主镜后将会变为平行光出射。在原入射光孔位置设置一高精度平面反射镜,通过调整机构调整高精度平面反射镜,使其与出射平行光垂直,从而使经主镜出射后的平行光束垂直入射到高精度平面反射镜上并沿原

路返回,经过主镜、次镜和第三镜与干涉仪系统内的参考光束形成干涉条纹,从而可以测定光学系统中心视场的波像差。高精度平面反射镜的面形非常完好,主镜和第三镜的面形误差可以通过各自单镜零位补偿干涉测量获得,所得到的中心视场系统波像差的一半(来回两次反射)减去主镜和第三镜中心视场区域的面形误差即为次镜中心区域(中心子孔径)的面形误差。

### (3) 其它视场波像差检测

利用调整机构调整激光干涉仪,使干涉仪的出射光线分别汇聚在其他视场成像的焦面位置,重复步骤2操作,可以依次测定得到其它各视场系统的波像差,从而得到次镜凸非球面其它区域(其它子孔径)的面形误差。

### (4) 各视场面形数据拼接计算

假定离轴三反非球面系统共有  $M$  个视场,即共有  $M$  个子孔径拼接测量才能覆盖整个大口径凸非球面次镜(为了保证光学系统成像质量,非球面口径比各视场成像叠加所需的理论口径略

大,所以存在很小的子孔径未覆盖区域),子孔径拼接示意图如图4所示,各子孔径间有一定的重叠区域。

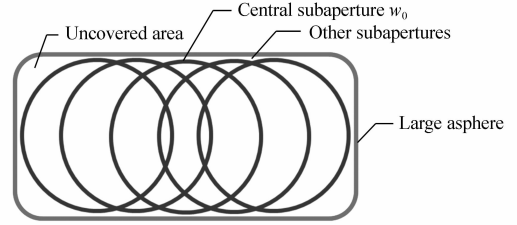


图4 子孔径拼接示意图

Fig.4 Sketch of subaperture stitching

为了便于拼接计算,一般选定非球面中心区域的子孔径(即中心视场波像差测量时对应非球面区域)作为基准子孔径。测试过程中,大口径非球面各子孔径位置的定位不准将会引入3种初级像差,即为相对平移、倾斜和离焦。定义中心基准子孔径的相位数据为  $w_0$ ,则其它子孔径与基准子孔径相位数据的关系可表示为式(1):

$$\begin{aligned} w_0 &= w_1 + p_1 + a_1 x_1 + b_1 y_1 + c_1 (x_1^2 + y_1^2) \\ &= w_2 + p_2 + a_2 x_2 + b_2 y_2 + c_2 (x_2^2 + y_2^2) \\ &\vdots \\ &= w_{M-1} + p_{M-1} + a_{M-1} x_{M-1} + b_{M-1} y_{M-1} + c_{M-1} (x_{M-1}^2 + y_{M-1}^2), \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $w_1, w_2, \dots, w_{M-1}$  是其它子孔径的相位数据,  $a_i, b_i$  分别是其它子孔径相对基准子孔径沿  $x$  方向和  $y$  方向的倾斜系数,  $c_i$  和  $p_i$  是相对离焦系数

和转移系数。

通过最小二乘拟合,使所有重叠区域相位数据差的平方和为最小,即为式(2):

$$\begin{aligned} S &= \sum_{j_1 \neq 0}^{N_1} \sum_{i_1 \in W_0, W_{j_1}}^n \{ W_0(x_{1i_1}, y_{1i_1}) - [W_{j_1}(x_{j_1 i_1}, y_{j_1 i_1}) + p_{j_1} x_{j_1 i_1} + a_{j_1} x_{j_1 i_1} + b_{j_1} y_{j_1 i_1} + c_{j_1} (x_{j_1 i_1}^2 + y_{j_1 i_1}^2)] \}^2 + \\ &\quad \sum_{j_2 \cap j_3 \neq 0}^{N_2} \sum_{i_2 \in W_{j_2}, W_{j_3}}^n \{ [W_{j_2}(x_{j_2 i_2}, y_{j_2 i_2}) + p_{j_2} x_{j_2 i_2} + a_{j_2} x_{j_2 i_2} + b_{j_2} y_{j_2 i_2} + c_{j_2} (x_{j_2 i_2}^2 + y_{j_2 i_2}^2)] - \\ &\quad [W_{j_3}(x_{j_3 i_2}, y_{j_3 i_2}) + p_{j_3} x_{j_3 i_2} + a_{j_3} x_{j_3 i_2} + b_{j_3} y_{j_3 i_2} + c_{j_3} (x_{j_3 i_2}^2 + y_{j_3 i_2}^2)] \}^2 = \min, \end{aligned} \quad (2)$$

其中重叠区域有两种,一种为其它子孔径与中心基准子孔径的重叠区域,定义为  $N_1$ ,另一种为其它子孔径间的重叠区域,定义为  $N_2$ ,所有重叠区域内的采样点数定义为  $n$ 。

对各拼接因子分别求偏导并令其数值为零即为式(3):

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial p_i} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_i} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b_i} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial c_i} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中,  $1 \leq i \leq M-1$ , 通过式(3)就能够求解各子孔径相对基准子孔径的最佳拼接因子, 从而获得大口径凸非球面各视场拼接以后的面形信息。

#### (5) 全口径面形数据插补

由于非球面口径比各视场成像叠加所需的理论口径略大, 所以由步骤(4)拼接获得的非球面面形数据并没有完全覆盖整个非球面口径, 依据拼接面形数据, 通过插值计算能够求解得到未覆盖区域的面形数据, 从而可以获得大口径凸非球面全口径的面形数据。

根据步骤(5)所得的全口径面形数据可以对大口径离轴凸非球面次镜进行进一步加工, 从而为整个光学系统的加工、装调和测试提供了依据和保障。

## 4 试验

结合工程实践, 对一离轴三反光学系统进行

了系统拼接测试, 该光学系统视场角为  $2^\circ$ , 凸非球面次镜外形为类椭圆形, 口径为  $287 \text{ mm} \times 115 \text{ mm}$ , 顶点曲率半径为  $1\,360.787 \text{ mm}$ , 二次曲面常数为  $-4.647$ , 离轴量为  $-102.531 \text{ mm}$ 。主镜和第三镜通过各自的零位补偿光学测量, 其面形误差的 RMS 值均优于  $1/50\lambda$ , 且几何量误差(顶点曲率半径偏差、离轴量误差等)均控制在光学设计公差范围以内。

首先, 在激光跟踪仪指导的基础上, 组建并调整测试光路, 测定得到光学系统  $0^\circ$  视场、 $-1^\circ$  视场和  $1^\circ$  视场相位分布如图 5 所示。分离主镜及第三镜面形误差后, 通过子孔径拼接算法及面形数据插补得到大口径离轴凸非球面次镜全口径面形分布如图 6 所示, 在此基础上对凸非球面次镜进行两次系统拼接测试和加工后, 得到其面形分布如图 7 所示, 其面形得到了很好的收敛, 全口径面形误差的 RMS 值为  $0.035\lambda$ 。由于该光学系统正处于原理测试和验证阶段, 次镜面形和整个光

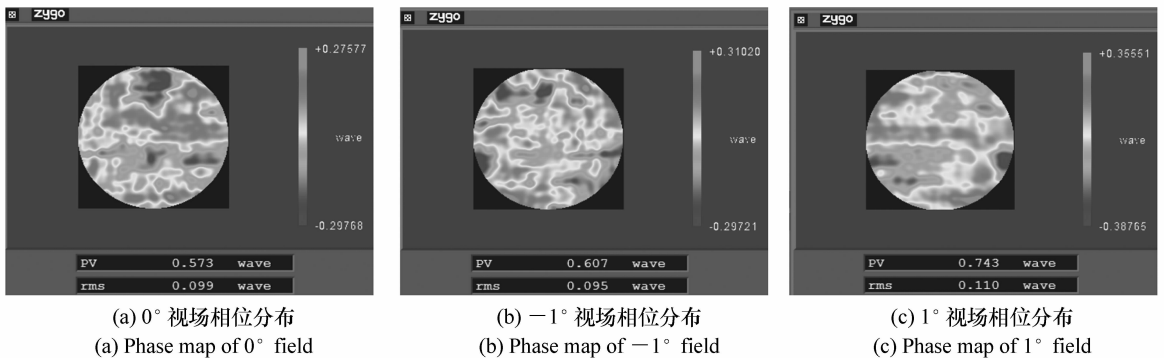


图 5 各视场相位分布

Fig. 5 Phase map of 3 different field

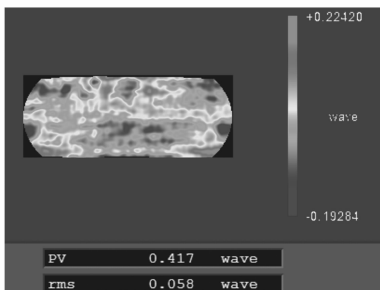


图 6 系统拼接测试凸非球面次镜面形分布  
Fig. 6 Surface map of secondary mirror by systemic stitching testing method

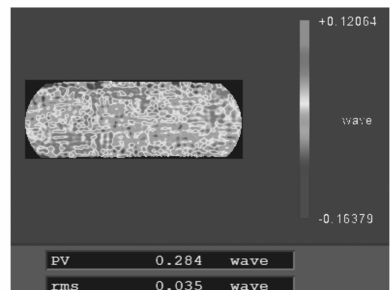


图 7 两次系统拼接测试和加工后次镜面形分布  
Fig. 7 Surface map of secondary mirror after two cycles of fabricating and testing

学系统波像差还有待于进一步提高。

## 5 结 论

本文在简要分析和总结各种检测凸非球面技术优缺点的基础上,提出了大口径离轴凸非球面系统拼接检测技术,对该方法的基础理论进行了分析和研究,建立了合理的拼接数学模型,并结合

工程实例,对一离轴三反非球面系统凸非球面次镜进行了系统拼接测试和加工。该方法将光学系统波像差测试和子孔径拼接测量技术结合在一起完成对大口径离轴凸非球面面形的检测,拼接子孔径数目少,操作和运算简易,且在凸非球面次镜的加工和检测过程中实现了整个光学系统的装调和测试,节省了时间,降低了成本。

## 参考文献:

- [1] BURGE J H, BENJAMIN S, CAYWOOD D. Fabrication and testing of 1.4-m convex off-axis aspheric optical surfaces[J]. *SPIE*, 2009, 7426: 692-697.
- [2] MALACARA D. *Optical Shop Testing*[M]. New York: J. Wiley & Sons, 1992.
- [3] ZHANG X J. Manufacturing of a three mirror anastigmat telescope[J]. *SPIE*, 2003, 4829: 884-885.
- [4] CHANG J, WANG Y T, ZHANG T CH, *et al.*. All reflective zoom systems for infrared optics[J]. *SPIE*, 2006, 6342: 63421Q-1-63421Q-9.
- [5] HUXFORDR B. Wide FOV head mounted display using hybrid optics[J]. *SPIE*, 2004, 5249: 230-237.
- [6] BURGE J H, KOT L B, MARTIN H M. Design and analysis for interferometric measurements of the GMT primary mirror segments[J]. *SPIE*, 2006, 6273: 361-367.
- [7] ROBICHAUD J, SCHWARTZ J, LANDRY D, *et al.*. Recent advances in reaction bonded silicon carbide optics and optical systems[J]. *SPIE*, 2005, 5868(2): 1-7.
- [8] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工和检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994.  
PAN J H. *Design, Fabrication and Testing of Optical Aspheres*[M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese)
- [9] GUO P J, YU J CH. Design and certification of a null corrector to test hyperboloid convex mirror[J]. *SPIE*, 2006, 6150: 259-263.
- [10] 张峰. 高精度离轴凸非球面反射镜的加工及检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2557-2563.  
ZHANG F. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2557-2563.
- [11] ZHANG X J, ZHANG ZH Y, LI ZH L. Manufacturing and testing of 1-m class SiC aspherical mirror[J]. *SPIE*, 2007, 6721: 672109-1-672109-5.
- [12] BURGE J H, ANDERSON D S. Full-aperture interferometric test of convex secondary mirrors using holographic test plates[J]. *SPIE*, 1994, 2199: 181-190.
- [13] QI Y J, WANG P, XIE J H. A novel method of measuring convex aspheric lens using hologram optical elements[J]. *SPIE*, 2005, 6024: 60241F-1-60241F-7.
- [14] MURPHY P, FLEIG J, FORBES G. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres[J]. *SPIE*, 2006, 6293: 62930J-1-62930J-10.
- [15] WANG X K, ZHENG L G, ZHANG B ZH, *et al.*. Test of an off-axis asphere by subaperture stitching interferometry[J]. *SPIE*, 2009, 7283: 72832J-1-72832J-6.
- [16] ZHAO CH Y, BURGE J H. Stitching of off-axis sub-aperture null measurements of an aspheric surface[J]. *SPIE*, 2008, 7063: 7063-1-7.

作者简介:



王孝坤(1980—),男,江苏丹阳人,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学超精加工和检测技术方面的研究。E-mail:jimwxk@sohu.com

## 《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04;国内外公开发行,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- |                 |                |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊     |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊     |
| ★ 美国《化学文献》      | ★ 中国光学学会会刊     |
| ★ 波兰《哥白尼索引》     | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》     | ★ 中国期刊全文数据库    |
|                 | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
|                 | ★ 中国科技期刊数据库    |
|                 | ★ 中国光学期刊网数据库   |

**主要栏目:**微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

**发稿类型:**学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

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

协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版:《中国光学》编辑部

投稿网址:<http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址:[chineseoptics@ciomp.ac.cn](mailto:chineseoptics@ciomp.ac.cn); [zgxcn@126.com](mailto:zgxcn@126.com)

联系电话:0431-86176852; 0431-84627061                      传      真:0431-84627061

编辑部地址:长春市东南湖大路3888号(130033)