

文章编号 1004-924X(2018)04-0743-06

大口径非球面系统的共基准加工与检验

王孝坤*, 薛栋林, 张学军

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术
重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:针对大口径离轴非球面系统加工与装调的难点,提出了非球面光学系统共基准加工与检测的方法,对该方法的基本原理和实现过程进行了分析和研究。当光学系统的主镜和第三镜面形的 RMS 值优于 $\lambda/10$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) 时,对主镜和第三镜进行共基准装调和测试,并进行背板一体化装嵌,然后利用离子束对其进行一体化共基准加工。结合工程实例,对一大口径非球面系统口径为 $724\text{ mm}\times 247\text{ mm}$ 的非球面主镜和口径为 $632\text{ mm}\times 205\text{ mm}$ 的第三镜进行了共基准加工与检测,最终利用离子束共基准一体化精抛光得到主镜和第三镜面形的 RMS 值分别为 0.019λ 和 0.017λ ,满足光学成像。

关键词: 光学加工; 光学检测; 非球面; 三镜消像散系统; 共基准; 离子束加工

中图分类号: TN305.2; O436.1 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20182604.0743

Fabrication and testing of large aspheric system based on common reference

WANG Xiao-kun*, XUE Dong-lin, ZHANG Xue-jun

(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: jimwxk@sohu.com

Abstract: A key technology for fabricating and testing three mirror astigmatism (TMA) was proposed based on a common reference, to overcome the difficulty of manufacturing and aligning large off-axis aspheric systems. The analysis and research of the basic principles involved were presented. When the Root Mean Square (RMS) of the surface error of the primary mirror and tertiary mirrors was better than $\lambda/10$ (for wavelength λ at 632.8 nm), the primary and tertiary mirrors were measured and aligned with the common reference and the same supporting back plate, with the two mirrors were then being polished by Ion Beam Figuring (IBF). A large TMA system with primary and tertiary mirror apertures of $724\text{ mm}\times 247\text{ mm}$ and $632\text{ mm}\times 205\text{ mm}$, respectively was fabricated and tested based on the proposed method. The integrated mirrors were polished by IBF, and the RMSs of the surface error of the primary and tertiary mirrors are 0.019λ and 0.017λ , respectively.

Key words: optical fabrication; optical testing; aspheric surface; Three Mirror Astigmatism(TMA); common reference; Ion Beam Figuring(IBF)

收稿日期: 2017-10-09; 修订日期: 2017-11-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61036015)

1 引言

在光学系统中,使用非球面可以矫正像差,改善像质,大幅提高光学系统的性能;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,非球面元件越来越多地被用于深空探测、光电跟踪、天文观测等诸多光电设备中^[1-6]。尤其在空间光学领域,由于离轴三反消像散非球面系统(Three Mirror Astigmatism, TMA)具有组数少、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,大口径非球面元件在空间遥感中得到了广泛的应用^[7-13]。

离轴三反非球面系统一般先进行单个镜体的加工与检测,待所有组件满足设计要求时方可进行整个系统的装调与检验。每个单镜个体有各自的几何量加工误差,包含顶点曲率半径误差、离轴量误差和镜体左右位置偏差等,在进行系统装调时需要对组件支撑背板和框架机构进行反复修正及多次迭代收敛,才能完成整个系统的装调,装调过程繁杂,而且主镜和第三镜的加工误差时常不匹配,整个光学系统很难达到很好的成像效果^[14-15]。

本文提出了一种将离轴三反系统主镜和第三镜进行共基准加工和检测的方法,即在最后抛光阶段对主镜和第三镜进行背板一体化装调,采用同光轴共基准光学检测,并对主镜和第三镜进行共基准一体化离子束精抛光,最终使得主镜和第三镜面形误差满足设计要求。

2 基本原理

离轴三反非球面系统光路如图 1 所示,即入射光线经过离轴非球面主镜后进行第一次反射,反射光束入射到次镜(一般为同轴非球面)后进行第二次反射,第二次反射后的光束入射到离轴第三镜进行第三次反射,反射后的光束经平面调焦镜转折后入射到 CCD 焦面上成像。在该系统中,主镜和第三镜均为离轴非球面,次镜一般为回转对称的同轴非球面镜,光轴位于次镜的几何中心,主镜和第三镜的光轴是统一的。

为了使主镜和第三镜的加工误差配合得足够好,确保主镜与第三镜的位置相对于光轴保持一

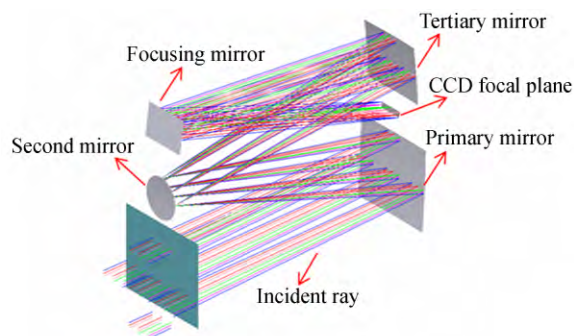


图 1 离轴三反非球面光学系统光路图

Fig. 1 Optical path of TMA system

致,减少后续整个光学系统的装调工作量,本文对主镜和第三镜进行了背板一体化设计,并进行共基准检测与加工,其基本原理如图 2 所示,具体实现流程如图 3 所示。

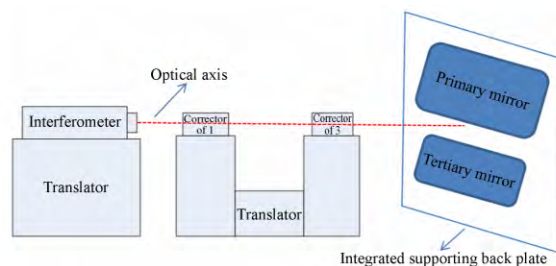


图 2 主镜和第三镜共基准检测原理及示意图

Fig. 2 Sketch and principle of testing primary mirror and tertiary mirror based on common reference

首先对光学系统的主镜和第三镜进行铣磨、研磨和粗抛光加工,当主镜和第三镜全口径面形的 PV 值优于 $2\ \mu\text{m}$ 时,对它们进行零位补偿干涉测量,根据检测结果利用计算机光学表面成形(Computer-Controlled Optical Surfacing, CCOS)技术对非球面进行多次加工,直至主镜和第三镜面形的 RMS 值都优于 $\lambda/10$,检测过程中利用莱卡经纬仪进行精确测量和控制,修研使主镜和第三镜补偿器的中心在一条直线上,即主镜和第三镜共光轴;其次,将主镜固定在背板上(背板主镜和第三镜一体化公用),利用激光跟踪仪精确控制并调整干涉仪、主镜补偿器和主反射镜之间的相对位置关系,利用零位补偿光学检测对主镜进行干涉测量,并确定主镜补偿器的位置;固定主反射镜、干涉仪以及主镜和第三镜补偿器调整机构,移去主镜补偿器,在光路中安装第三镜补偿器,通过

精确修正第三镜支撑面和一体化背板上第三镜的连接面,使得第三镜较好地完成零位补偿光学检验。非球面主镜和第三镜在加工过程中采用共基准检测方法,确保主镜与第三镜的位置相对于光轴保持一致,从而确保加工完成后主镜和第三镜在系统中的位置,系统装调时只剩下次镜这一个环节,大大提高了装调的精度和效率。

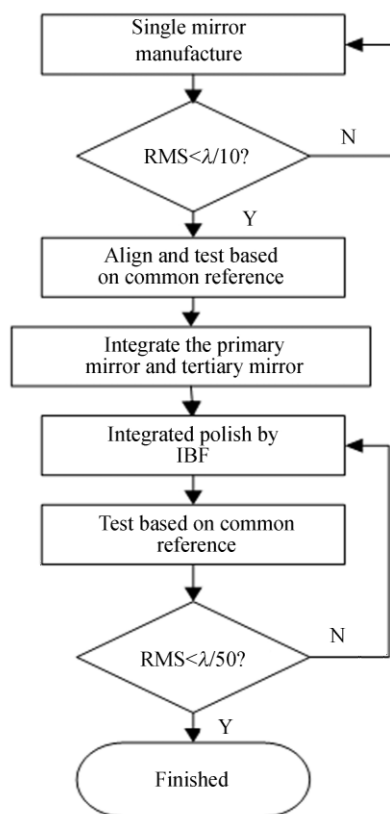


图3 共基准加工检测流程图

Fig. 3 Flow chart of fabrication and test based on common reference

共基准检测后的主镜和第三镜要进行背板一体化固定和装嵌,然后进行共基准一体化离子束精抛光加工。离子束抛光技术(Ion Beam Figuring, IBF)是一种高精度的确定性加工技术,利用该技术加工非球面的原理如图4所示。该技术在真空状态下用离子束对光学表面特定区域进行轰击,通过离子束与光学元件表面材料的物理溅射作用来实现对非球面表面材料的分子级去除,经过精确控制离子束的能量密度和加工驻留时间,实现超高精度的非球面光学表面面形加工^[16-18]。离子束抛光机的基本原理属于子孔径加工技术,

其基本控制算法与CCOS类似,该技术根据定量的面形测量结果,即主镜和第三镜的共基准检测结果,由计算机控制离子束,按照一定的加工轨迹对主镜和第三镜进行一体化共基准加工,经多次共基准检测和加工迭代直到主镜和第三镜面形的RMS值优于 $\lambda/50$,从而完成加工。

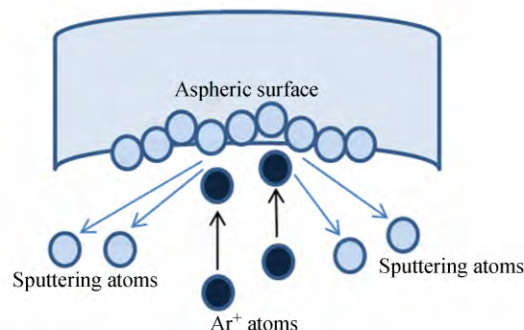


图4 非球面离子束加工原理图

Fig. 4 Principle of asphere fabrication by IBF

离子束共基准加工示意图如图5所示。首先,根据共基准干涉测定的主镜和第三镜的面形分布综合分析选择合适口径的离子束源,规划合理的加工轨迹并计算驻留时间。然后,利用离子束在同一加工周期内依次对主镜和第三镜进行精密抛光,对一体化共基准加工后的主镜和第三镜进行共基准检测,经过多轮共基准检测与加工,直至主镜和第三镜面形误差满足精度要求。在加工过程中,离子束的去除函数非常稳定,无需修正去除函数,可以实现对镜面分子级的精确去除,且加工应力很小,基本不会引起主镜和第三镜一体化位置的变化。

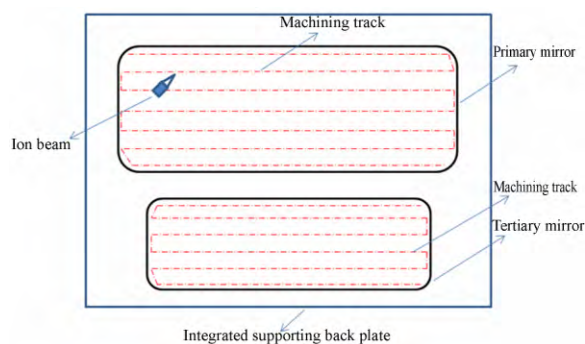


图5 离子束共基准加工轨迹示意图

Fig. 5 Sketch of machining tracks of finishing aspheric system based on common reference

3 实验加工与检测

结合工程实践,这里对一大口径离轴三反非球面系统进行了共基准加工与检测。该系统的主镜为 $724\text{ mm} \times 247\text{ mm}$ 的圆角矩形,它为高次离轴双曲面,第三镜为 $632\text{ mm} \times 205\text{ mm}$ 的圆角矩形,离轴量为 221.35 mm 。首先运用 CCOS 技术在实验室自行研制的非球面数控光学加工中心 FSGJ-2 上对光学系统的主镜和第三镜进行小磨头研磨和粗抛光加工,加工设备如图 6 所示。

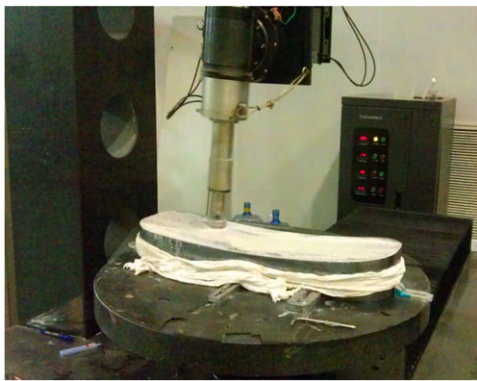


图 6 FSGJ-2 非球面数控加工中心上第三反射镜装置的加工

Fig. 6 Computer controlled machine (FSGJ-2) for manufacturing tertiary mirror

FSGJ-2 非球面数控加工中心是一台基于 CCOS,集研磨、抛光以及研磨阶段的在线轮廓检测于一体的 6 轴联动非球面自动数控机床,其加工非球面的最大尺寸为 $1\,000\text{ mm}$ 。CCOS 技术根据定量的面形测量结果,在加工过程控制模型的基础上,用计算机控制尺寸相对较小的磨头对光学非球面进行研磨或抛光,通过控制磨头在工件表面的驻留时间及磨头与工件间的相对压力来控制材料的去除量,按照一定的加工轨迹对光学表面进行数控加工,经多次迭代直到满足精度要求^[19-21]。期间利用轮廓仪或三坐标测量仪对其面形进行精确测量,根据设计要求,当全口径面形 PV 值优于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时,对其进行干涉补偿测量,依据测定结果利用 CCOS 技术对非球面进行多次加工,直至主镜和第三镜面形的 RMS 值都优于 $\lambda/10$ 。然后对其进行共基准装调和检测,主镜和第三镜共基准检测光路及设备如图 7 所示,共基准装调完毕零位补偿测量得到主镜和第三镜的面

形分布和干涉图,分别如图 8 和图 9 所示,其面形的 RMS 值分别为 0.070λ 和 0.063λ ,满足共基准检测和加工的要求。

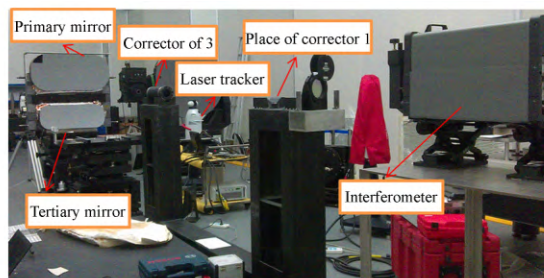


图 7 主镜和第三镜共基准检测设备

Fig. 7 Setup for testing primary mirror and tertiary mirror based on common reference

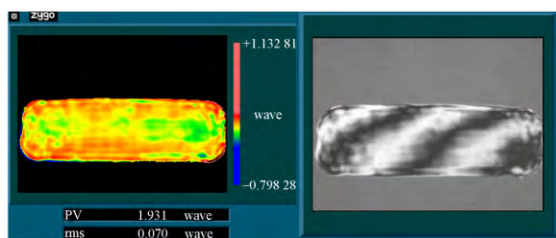


图 8 离子束抛光前主反射镜的面形测量结果

Fig. 8 Testing results of primary mirror before IBF

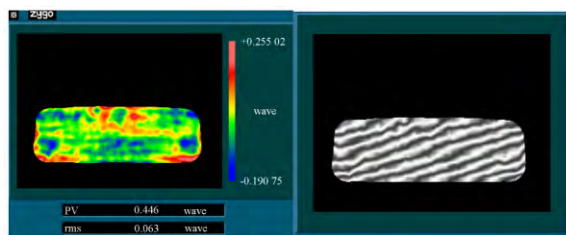


图 9 离子束抛光前第三反射镜的面形测量结果

Fig. 9 Testing results of tertiary mirror before IBF

将主镜和第三镜一体化装嵌后,利用离子束对其进行两个周期的超精抛光加工,得到最终的

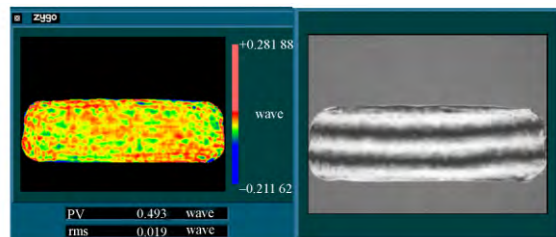


图 10 主反射镜最终面形测量结果

Fig. 10 Testing results of primary mirror after IBF

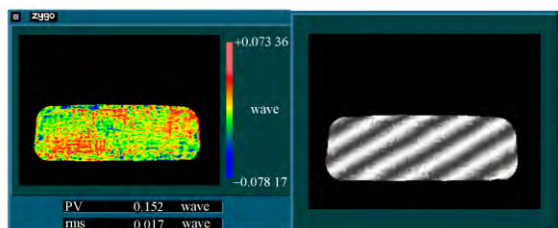


图11 第三反射镜最终面形测量结果

Fig. 11 Testing results of primary tertiary after IBF

主镜和第三镜的面形检测结果分别如图10和图11所示,其中主镜面形的RMS值为 0.019λ ,第三镜面形的RMS值为 0.017λ ,面形误差RMS值均优于 $\lambda/50$,满足设计要求。

4 结 论

为了克服大口径非球面光学系统加工与测试

参考文献:

- [1] BURGE J H, BENJAMIN S, CAYWOOD D, *et al.*. Fabrication and testing of 1.4-m convex off-axis aspheric optical surfaces[J]. *SPIE*, 2009, 7426: 74260L.
- [2] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [3] ZHANG X J, CAO J L. Manufacturing of a three mirror anastigmat telescope [J]. *SPIE*, 2003, 4829: 884-885.
- [4] 郭兵, 张春雨, 王金虎, 等. ALON高陡度薄壁成形非球面的超精密磨削工艺[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 93-99.
- GUO B, ZHANG CH Y, WANG J H, *et al.*. Ultra-precision grinding process of high-gradient thin conformal aspheric on ALON ceramic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 93-99. (in Chinese)
- [5] 孟晓辉, 王永刚, 李文卿, 等. $\Phi 420$ mm高次非球面透镜的加工与检测[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 3068-3075.
- MENG X H, WANG Y G, LI W Q, *et al.*. Fabricating and testing of $\Phi 420$ mm high-order aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12): 3068-3075. (in Chinese)
- [6] 殷龙海, 王孝坤, 李龙响, 等. 大口径SiC离轴非球面的高效磨削加工[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2497-2505.
- YIN L H, WANG X K, LI L X, *et al.*. Fast

的难题,本文提出了离轴非球面系统共基准加工与检测的方法,对该方法的基本原理进行了分析和研究,并对其具体的实现步骤进行了规划。结合工程实践,首先利用实验室自行研制的非球面数控光学加工中心FSGJ-2对一大口径离轴非球面系统的主镜和第三镜进行了CCOS研磨和粗抛光,当其面形的RMS值都优于 $\lambda/10$ 时,对主镜和第三镜进行共基准装调和测量,并进行背板一体化装嵌,然后利用离子束进行一体化共基准超精加工,最终得到主镜和第三镜面形的RMS值均优于 $\lambda/50$ 。该方法保证了反射镜加工检验过程与相机装调过程的基准共享,极大地缩短了光学系统的后续装调时间,提高了装调的精度及效率,且利用离子束进行一体化精抛光,去除函数稳定、确定性高、加工应力很小。

- grinding of large SiC off-axis aspheric surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2497-2505. (in Chinese)
- [7] 赵汝成, 包建勋. 大口径轻质SiC反射镜的研究与应用[J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 552-558.
- ZHAO R CH, BAO J X. Investigation and application of large scale lightweight SiC mirror[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 552-558. (in Chinese)
- [8] 康健, 宣斌, 谢京江. 表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状[J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 824-833.
- KANG J, XUAN B, XIE J J. Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 824-833. (in Chinese)
- [9] 王孝坤. 激光跟踪仪检验非球面面形的方法[J]. *光子学报*, 2012, 41(4): 379-383.
- WANG X K. Measurement of aspherical surfaces by laser tracker [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(4): 379-383. (in Chinese)
- [10] CHANG J, WANG Y T, ZHANG T C, *et al.*. All-reflective zoom systems for infrared optics [J]. *SPIE*, 2006, 6342: 63421Q.
- [11] HUXFORD R B. Wide-FOV head-mounted display using hybrid optics [J]. *SPIE*, 2004, 5249: 230-237.
- [12] BURGE J H, KOT L B, MARTIN H M, *et al.*. Design and analysis for interferometric measurements of the GMT primary mirror segments [J]. *SPIE*, 2006, 6273: 62730M.

- [13] ROBICHAUD J L, SCHWARTZ J, LANDRY D, *et al.*. Recent advances in reaction bonded silicon carbide optics and optical systems [J]. *SPIE*, 2005, 5868: 9-15.
- [14] 潘宝珠, 程灏波, 文永富, 等. 基于波像差函数建立大口徑施密特校正板方程[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0222001.
- PAN B ZH, CHENG H B, WEN Y F, *et al.*. Establishment of an equation of Schmidt corrector plate with large aperture based on wavefront aberration functions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222001. (in Chinese)
- [15] 张学敏, 韩娟, 段嘉友, 等. 共轴偏光瞳折轴三反射光学系统装调方法[J]. *中国激光*, 2012, 36(4): 0416003.
- ZHANG X M, HAN J, DUAN J Y, *et al.*. Alignment method of coaxial eccentric-pupil three-mirror system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 36(4): 0416003. (in Chinese)
- [16] HYLTON K W, CARNAL C L, JACKSON J R, *et al.*. Ion beam milling of silicon carbide optical components[J]. *SPIE*, 1994, 1994: 16-26.
- [17] GEYL R, RINCHET A, ROLLAND E. Large optics ion figuring[J]. *SPIE*, 1999, 3739: 161-166.
- [18] 焦长君, 解旭辉, 李圣怡, 等. 光学镜面离子束加工的材料去除效率[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(8): 1343-1348.
- JIAO CH J, XIE X H, LI SH Y, *et al.*. Material removal efficiency in ion beam figuring for optical component[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1343-1348. (in Chinese)
- [19] 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. (in Chinese)
- [20] ZHANG X J, ZHANG ZH Y, LI Z L. Manufacturing and testing of 1-m class SiC aspherical mirror[J]. *SPIE*, 2007, 6721: 672109.
- [21] JONES R A. Computer simulation of smoothing during computer-controlled optical polishing[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(7): 1162-1169.

作者简介:



王孝坤(1980—),男,江苏丹阳人,研究员,博士生导师,2003 年于江苏师范大学获得学士学位,2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学制造与测试技术的研究。E-mail: jimwxk@sohu.com



薛栋林(1979—),男,江苏靖江人,研究员,博士生导师,2001 年于长春理工大学获得学士学位,2006 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学总体设计与分析技术的研究。Email: xuedl@ciomp.ac.cn