

R-C 光学系统的计算机辅助装调

刘 波,丁亚林,贾继强,苏东风,张 雷

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量技术研究部,
吉林 长春 130033)

摘要: R-C 光学系统是现代光学工程中常用的光学系统,以某一 R-C 光学系统为例,对其计算机辅助装调技术进行了研究。分析了 R-C 系统装调理论,确定以主镜为装调基准,调整次镜五个自由度的装调方法,建立起次镜失调量与系统 Zernike 系数的关系,以此指导装调工作,达到明确装调方向、缩短装调周期的目的。整机光学系统的波像差 RMS 值优于 $1/10$ 波长,达到了成像质量的要求。对相机进行实验室和地面外场成像,获得的图像清晰,层次丰富,验证了装调工作的正确性。

关键词: R-C 光学系统; 计算机辅助装调; Zernike 系数; 波像差

中图分类号: TH745 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0318001

Computer aided alignment of R-C optical system

Liu Bo, Ding Yalin, Jia Jiqiang, Su Dongfeng, Zhang Lei

(Department of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: R-C optical system was a commonly used optical system in modern optical engineering, a case study of alignment technique of R-C optical system was studied. The alignment theory of R-C optical system was analyzed. The main mirror was the adjustment datum, the five degree of freedom of secondary mirror was adjusted to improve the wavefront error of the whole optical system. The relationship between secondary mirror misalignment and Zernike coefficient of the whole system was obtained by computer-aided alignment and was used to guide alignment of secondary mirror. By use of this method, the alignment purpose was very clearly, that was adjusting the position of secondary mirror to reduce Zernike coefficient. The alignment period was then reduced. After alignment, wavefront error of the whole optical system was better than $1/10\lambda$ (RMS). It satisfies the design requirement. The images obtained from laboratory and outfield indicate the alignment is valid.

Key words: R-C optical system; computer aided alignment; Zernike coefficient; wavefront error

收稿日期:2015-07-11; 修订日期:2015-08-13

基金项目:国家自然科学基金(61308099)

作者简介:刘波(1985-),男,博士,主要从事航空相机光机结构设计方面的研究。Email: liubo1985@gmail.com

0 引言

光学系统的装调是通过相应手段使各个光学元件处于设计位置公差范围之内过程,它是光学仪器研制过程中极为重要的环节。光学系统装调质量的好坏直接影响到光学仪器的成像质量。

传统的光学装调主要依靠装调人员的经验和较简单的装调工艺装备来完成,这对于通常的像质要求不高的光学系统,可以最终达到要求。传统光学装调存在很大的盲目性,装调周期也很长,精度也不高。近年来随着计算机技术、先进光学检测技术等学科的发展,计算机辅助装调成为现代光学装调的主流^[1-4]。计算机辅助装调在现代光学仪器生产过程中是十分必要的,这是因为:人们对光学仪器成像质量的要求不断提高,高质量的成像系统的成像质量达到衍射极限,如此高精度的要求传统的光学装调很难满足;光学系统日益复杂化,另外对于离轴式的光学系统,传统的装调方式往往显得无能为力。

在反射式光学系统中,两镜系统有重要的应用。经典的两镜系统有卡塞格林(Cassegrain)系统和格里高里(Gregory)系统。卡塞格林系统和格里高里系统只消除了球差而轴外像差没有校正,使用上受到某些限制。为此,Chretien 提出主镜和次镜都为双曲面使球差和彗差同时得到校正的改进形式的卡塞格林系统,由 Ritchey 实现,故称为 R-C 系统。R-C 系统的主次镜均为非球面镜,主镜为凹的双曲面镜,次镜为凸的双曲面镜。由于纯两镜 R-C 系统的视场角不大,把它作为成像仪器的光学系统时,一般在其后加入校正透镜组来校正轴外像差,以扩大视场。R-C 系统在现代光学工程中是一种常用的光学系统^[5-6]。

文中以某一 R-C 光学系统为研究对象,在分析该光学系统装调理论基础,对其系统的装调方法和步骤进行研究。该系统主镜口径为 300 mm, F 数为 6,光学设计要求装调完成后系统波像差 RMS 值优于 $1/10$ 波长。

1 R-C 光学系统装调的理论分析

对光学系统进行计算机辅助装调时,为了减少

要调整的量,可以将被装调系统中一光学元件作为基准不动,这样就可以减少几个自由度不去考虑。通过光学软件分析,系统波像差相对于次镜位置失调量灵敏度比较高,另外次镜的尺寸和重量较小,调整比较方便,所以以主镜作为装调基准,即主镜不动,调整次镜位置。

若以主镜为装调基准,R-C 系统的装调过程实际上就是调整次镜位置,使其相对于主镜同轴和与主镜的间隔满足光学设计公差要求。从运动学角度说,次镜有六个自由度,包括三个方向的平移和三个方向的旋转,如图 1 所示。由于次镜为轴对称结构,故沿 Z 轴的旋转不会引起系统的像差。而次镜其他五个自由度的位置改变都会引入像差,即 R-C 系统装调有五个调整参量,主镜与次镜之间的空气间隔 H ,次镜沿 X 轴方向的偏心量 D_x 、次镜沿 Y 轴方向的偏心量 D_y ,次镜绕 X 轴方向的倾斜量 R_x ,次镜绕 Y 轴方向的倾斜量 R_y 。

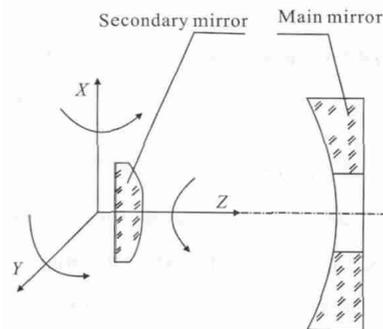


图 1 次镜自由度

Fig.1 Secondary mirror degree of freedom

经过长期的工程实践所掌握的经验,消除轴上点彗差是两反射式系统处于共轴的必要条件,但是没有理论表明消除轴上点彗差就可以认为光学系统处于共轴状态。事实上,次镜的偏心产生的彗差和次镜倾斜产生的彗差在满足某种条件下能够相互补偿,从而使系统轴上点彗差为零^[7]。因而,装调时必须分析测得的干涉图的 Zernike 多项式系数,当它们与设计值接近时才能认为系统装调质量良好。具体来说就是使 Zernike 系数 $Z_5 \sim Z_9$ 项接近光学设计理论值^[8-9]。

利用光学设计软件 CODE V 对系统 0 视场进行失调量模拟。五个调整参量与 Zernike 系数变化量的

关系如表 1 所示。

从表 1 可以看出, Z9 只与主镜、次镜之间的间隔有关系, 次镜 X 轴方向的偏心与 Y 方向的倾斜之间的相关性较好, 次镜沿 Y 轴方向的偏心量和次镜绕 X 轴方向的倾斜量之间的相关性较好, 装调过程中两者可以相互补偿。

通过以上对次镜失调特性的模拟和以往的装调经验, 装调过程可以按以下方案进行:

(1) 利用 Zernike 系数项调整主次镜之间的空气间隔;

(2) 粗装调: 调整次镜沿 X、Y 方向的偏心量, 把系统彗差减少到一定量;

(3) 精装调: 把粗装调测得的波像差的 Zernike 系数利用计算机软件进行模拟, 得出系统失调量。根据失调量, 交替调整绕 X、Y 方向的倾斜量 R_x 、 R_y 和 X、Y 该方向的偏心量 D_x 、 D_y , 最终达到装调指标要求。

表 1 零视场次镜五个调整参量与 Zernike 系数变化量的关系

Tab.1 Relationship between the misalignment of secondary mirror and Zernike coefficient at 0 field

	$D_x=0.1\text{mm}$	$D_y=0.1\text{mm}$	$R_x=1''$	$R_y=1''$	$H=0.1\text{mm}$
Z5	0	0	0	0	0
Z6	0	0	0	0	0
Z7	-0.038	0	0	0.190	0
Z8	0	-0.038	-0.190	0	0
Z9	0	0	0	0	0.038 4

2 R-C 光学系统的装调步骤

2.1 主次镜的检测

R-C 系统的装调的首要步骤就是对加工好的主次镜进行检测, 检测合格后方可进行后续工作。

对于二次曲面而言, 零位干涉测试在非球面镜实际制造和测试中获得了广泛的应用。零位干涉测试主要是通过辅助镜得到同心光束而进行零位检

测, 可分为无像差点法及补偿法。

主镜为凹的双曲面, 如果采用无像差点法检测需要一个高精度的辅助凹球面反射镜。由于主镜口径较大, 故辅助球面反射镜的口径也较大。高精度大尺寸的反射镜加工较困难, 因此主镜采用补偿法进行检测。目前广泛使用的补偿系统有 Dall 补偿器、Offner 补偿器和镜式补偿器^[10]。Dall 补偿器结构简单, 加工容易, 对中等以下相对孔径的非球面能提供足够的补偿量。Offner 补偿器结构复杂, 加工困难, 但对大相对孔径的非球面能给出很好的补偿, 而且直径小。如果有大型球面反射镜, 则镜式补偿检验是一种最为可靠的方法。此文研究的主镜相对口径较大, 且不具备大型球面反射镜, 故采用 Offner 补偿器检测主镜, 如图 2 所示。Offner 补偿器由补偿镜和场镜两块透镜组成, 补偿镜几乎全部补偿非球面产生的球差, 场镜则把补偿镜成像在非球面上。检测出的主镜面型如图 3 所示。

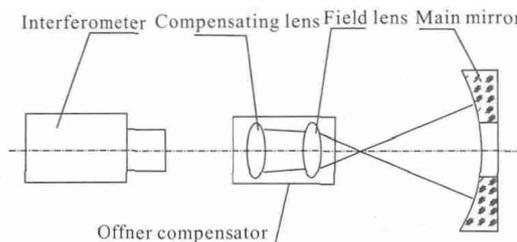


图 2 主镜检测光路

Fig.2 Optical testing of main mirror

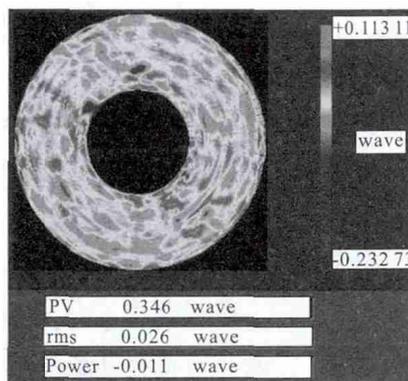


图 3 主镜检测面型

Fig.3 Interference pattern of main mirror

次镜为凸的双曲面, 由于次镜尺寸不大, 采用无像差点法检测, 其原理如图 4 所示。检测的次镜面型如图 5 所示。

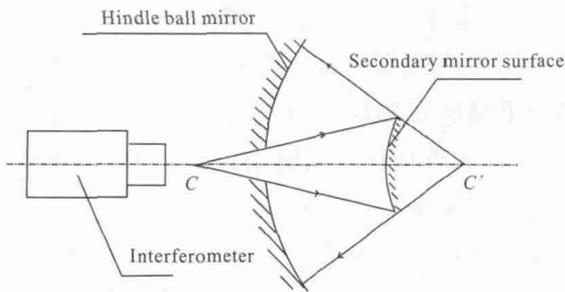


图 4 次镜检测光路

Fig.4 Optical testing of secondary mirror

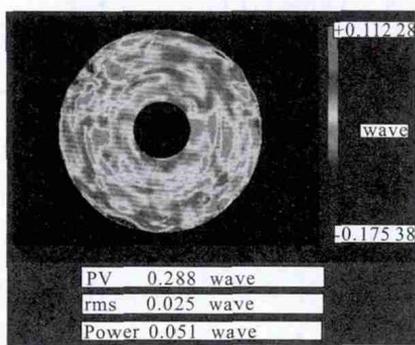


图 5 次镜检测面型

Fig.5 Interference pattern of secondary mirror

2.2 系统光轴的引入

如前所述,R-C 系统的装调以主镜为装调基准,即主镜不动,调整次镜位置。由于该系统装调时以主镜为基准,系统的光轴实际上是主镜光轴,而在光学加工的过程中,主镜光轴是检测时所用的补偿器的光轴,因而系统光轴必须由补偿器引入。

在主镜安装到结构件上以后,先检测主镜,光路如图 2 所示,当干涉仪检测的主镜面型值达到或接近设计值时,认为整个光路已经调好。这时,干涉仪、补偿器和主镜三者光轴同轴。保证主镜和干涉仪的位置不变,在主镜和干涉仪之间放入一块工装平面镜,如图 6(a)所示。工装平面镜的前后两面平行(平行度优于 1"),且均镀有反射膜。调整工装平面镜的位置,使其干涉条纹达到 0 级。这时,工装平面镜与干涉仪光轴垂直,也就与主镜光轴垂直。保证工装平面镜的位置不动,把干涉仪移到主镜后面(干涉仪位置 2),调整干涉仪的位置,检测工装平面镜的另一反射面使其干涉条纹达到 0 级。由于工装平面镜的两反射面平行,因此干涉仪的光轴与主镜光轴是平行的。移除工装平面镜,保证主镜和干涉仪的位置不变,把一块标准平面镜置于主镜之前合适位置(大于

主次镜的间隔),如图 6(b)所示。调整标准平面镜的位置,使其检测的干涉条纹达到 0 级。这时,认为标准平面镜与干涉仪光轴垂直,进而与主镜光轴垂直。把此标准平面镜作为 R-C 系统装调时的准直平面镜,这样检测的光线即为轴上光线。

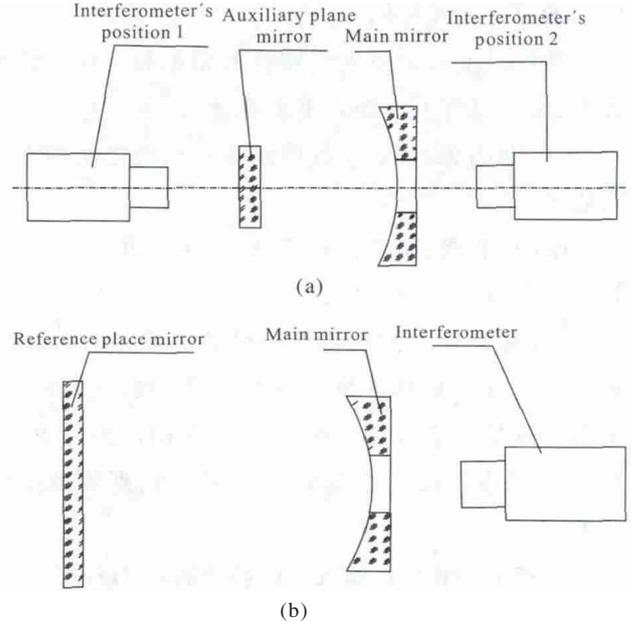


图 6 系统光轴的引入

Fig.6 Introduce of R-C optical axis

2.3 次镜位置的调整

在完成前述工作后,就可以进行次镜位置的调整。系统装调光路如图 7 所示。

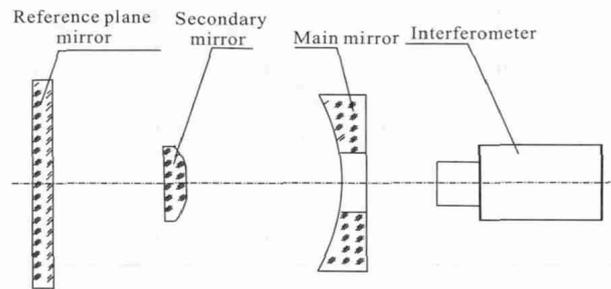


图 7 R-C 系统装调光路

Fig.7 Alignment optical path of R-C system

先修研次镜调整垫的厚度,使 0°视场的 Zernike 系数 Z9 的项减小到 0.01 以下。再进行粗装调,即调整次镜沿 X、Y 方向的偏心量 D_x 、 D_y ,把系统彗差减少到一定量。R-C 系统经过粗装调后,在 0°视场得到的结果如图 8 所示,其 RMS 值为 0.101λ。0°视场的 Zernike 系数如表 2 所示。由于 0°视场的 Zernike

系数 Z5~Z9 项理论值均为 0,由表中可以看出 Z5 项数据比较大,说明次镜还存在较大的位置偏差。

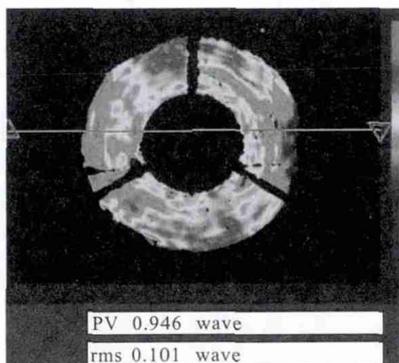


图 8 粗装调后 0°视场的干涉图

Fig.8 Interference pattern at 0° field after coarse adjustment

将表 2 中 Zernike 系数代入光学软件 CODE V 中进行模拟计算,计算产生几何调整量如下: X、Y、Z 离心值分别为 -0.0931 6、-0.105 85、7.575 08e-014, α 、 β 、 γ 倾斜分别为 -0.033 25、0.027 69、0.000 00。

表 2 粗装调后 0°视场的 Zernike 系数

Tab.2 Zernike coefficient at 0° field after coarse adjustment

Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
-0.031	-0.031	-0.03	-0.001	0.002

根据计算出的次镜位置失调量调整次镜,再重复之前的干涉检验采集干涉图,得到 R-C 系统 Zernike 系数如表 3 所示,0°视场的干涉图样如图 9 所示。其中 0°视场 RMS 值为 0.083 λ ,与理论值比较接近。此时联调校正镜组后,得到整个光学系统的干涉图如图 10 所示。从图中可以看出,0°视场 RMS 值为 0.078 λ ,+1°视场 RMS 值为 0.085 λ ,-1°视场 RMS 值为 0.094 λ ,R-C 系统的轴外像散经过校正镜组后得到了校正,整机光学系统的波像差 RMS 值优于 1/10 波长,系统各视场成像质量均满足设计要求。

表 3 精装调后 0°视场的 Zernike 系数

Tab.3 Zernike coefficient at 0° field after fine adjustment

Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
-0.050	0.031	-0.022	0.028	0.004 0

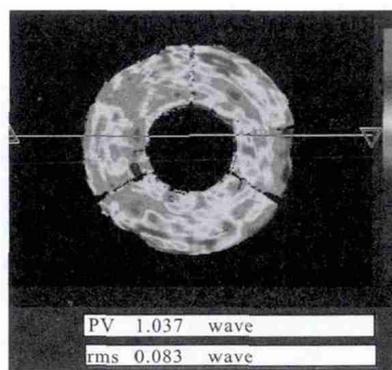
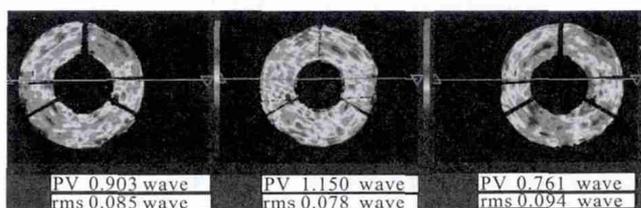


图 9 精装调后 0°视场的干涉图

Fig.9 Interference pattern at 0° field after fine adjustment



(a) -1° field (b) 0° field (c) +1° field

图 10 精装调后 -1°,0°, +1°视场的干涉图

Fig.10 Interference pattern at -1°,0°, +1° field after final adjustment

3 整机成像实验

在整机装调完成以后,分别在实验室对分辨率板进行静态成像实验,在地面外场进行远距离成像实验。图 11 为实验室获取的分辨率板的图像,从图中可以看出相机静态分辨率达到了 CCD 的像元极限分辨率 62.5 lp/mm。图 12 为相机地面外场进行远距离成像实验获取的图像,从中可以看出图像清晰,层次丰富。从整机成像实验可以证明 R-C 系统的装调质量良好。

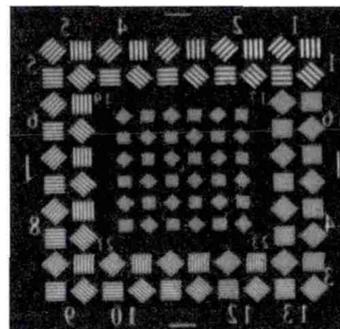


图 11 实验室对分辨率板成像

Fig.11 Image of resolution panel at laboratory

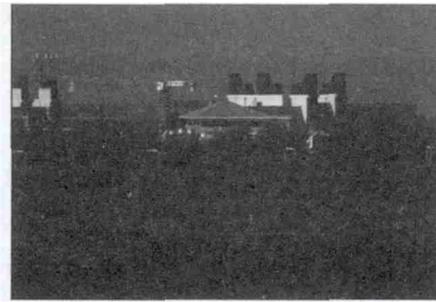


图 12 地面外场远距离成像

Fig.12 Image of out door scene

4 结 论

对 R-C 系统的装调技术进行了研究。分析了 R-C 系统装调理论、步骤和装调方法。应用计算机辅助装调技术,建立起次镜失调量与 Zernike 系数的关系,以此指导装调工作,达到明确装调方向、缩短装调周期的目的。整机光学系统的波像差 RMS 值优于 1/10 波长,达到了成像质量的要求。对相机进行实验室和地面外场成像,获得的图像清晰,层次丰富,验证了装调工作的正确性。

参考文献:

- [1] Ho-Soon Yang, Yun-Woo Lee, E D Kim, et al. Alignment methods for Cassegrain and RC telescope with wide-field of view [C]// SPIE, 2004, 5528: 334-341.
- [2] Leigh D, Freiman D. Computer aided optical system alignment with CODE V[C]// SPIE, 1988, 1038: 288-294.
- [3] Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1754-1759. (in Chinese)
巩盾, 田铁印, 王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1754-1759.
- [4] Zhang Dongge, Fu Yutian. Surrogate model used for computeraided alignment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 680-685. (in Chinese)
张东阁, 傅雨田. 计算机辅助装调的代理模型方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 680-685.
- [5] Li Gang, Yang Xiaoxu, Zhang Hengjin, et al. Design of cooled infrared switch-zoom optical system with long effective focal length based on R-C system [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 293-300. (in Chinese)
李刚, 杨晓许, 张恒金, 等. 基于卡塞格林系统的红外制冷型长焦分档变倍光学系统的设计 [J]. *中国光学*, 2014, 7(2): 293-300.
- [6] Zhao Hongchao, Zhang Jingxu, Zhang Limin, et al. Prediction of TMT tertiary mirror surface figure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 3983-3987. (in Chinese)
赵宏超, 张景旭, 张丽敏, 等. TMT 三镜面形评价过程设计 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 3983-3987.
- [7] Sun Jingwei, Chen Tao, Wang Jianli, et al. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2156-2163. (in Chinese)
孙敬伟, 陈涛, 王建立, 等. 主次镜系统的计算机辅助装调 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2156-2163.
- [8] Luo Miao, Zhu Yongtian. Application of computer-aided alignment to off-axis cassegrain system [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(4): 514-517. (in Chinese)
罗淼, 朱永田. 计算机辅助装调方法在离轴卡塞格林系统中的应用 [J]. *光学技术*, 2008, 34(4): 514-517.
- [9] Wang Bin, Jiang Shilei. Study on computer-aided alignment method of cassegrain system [J]. *Optical Instruments*, 2008, 30(1): 50-54. (in Chinese)
王彬, 蒋世磊. 卡塞格林系统计算机辅助装调技术研究 [J]. *光学仪器*, 2008, 30(1): 50-54.
- [10] Wu Fan. The design of Offner compensator for aspheric testing [J]. *Applied Optics*, 1993, 14(3): 8-12. (in Chinese)
伍凡. 非球面零检验的 Offner 补偿器设计 [J]. *应用光学*, 1993, 14(3): 8-12.