

文章编号:1002-2082(2014)05-0841-07

基于像差校正的望远系统装调方法研究

李 莉, 李 刚, 徐春梅, 沈洪斌, 王元铂, 殷建玲

(军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要:为了保证望远镜装配完成后的成像质量和其他关键指标,提出基于像差校正的望远镜装调方法。首先利用 Zemax 建立光学系统模型,模拟光学零件失调状态,分析各零件的每种失调状态对各类像差的影响情况,进而定量计算光学零件对系统像差的敏感矩阵,得出系统失调特性,拟定最佳装调方案。在此理论分析的指导下,进行基于星点检验法的装调实验,装调后仪器各项指标达到要求,分辨率优于技术指标要求 7.5",验证了基于像差校正的光学系统装调方案的可行性。

关键词:光学系统装调;像差;Zemax;望远镜

中图分类号:TN248.1;TP39

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201435.0503003

Assembly and adjustment method based on aberrations correction for telescope optical system

Li Li, Li Gang, Xu Chunmei, Shen Hongbin, Wang Yuanbo, Yin Jianling

(School of Electronics and Optic Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to ensure the imaging quality of certain type telescope at assembly stage, an alignment method based on aberrations correction was proposed. The optical system model of this telescope was set up and the misalignment phenomena for every optical element was simulated to analyze the changes of aberrations, then the sensitivity matrix of optical element for aberrations was calculated and the best alignment scheme was determined to improve the assembly quality and efficiency. Finally the alignment experiment based on star test was conducted, the results show that the technique indicators are all satisfied after alignment and the resolution is better than required 7.5", which could validate the feasibility of our method and offer operability for the assembly and adjustment of this kind of instrument.

Key words: optical system assembly and alignment; aberration; Zemax; telescope

引言

望远镜作为光电装备中最常用的双目仪器,除观察外兼具瞄准和测距的功能,望远光学系统是其核心部件,其装配质量直接决定着仪器的各项性能指标,指标的下降会直接影响观察效果和

瞄准、测量精度,甚至造成装备无法使用。目前装备生产部门和部队各级修理机构对望远系统的检查和装调是分指标项进行的,精度有限。而各项指标的超差,与光学零件装调不到位有关,零件的失调也直接反映在成像质量的下降^[1-3]等方面。成

收稿日期:2013-12-31; 修回日期:2014-05-26

基金项目:军械工程学院基金资助(YJJXM12026)

作者简介:李莉(1981—),女,河北邢台人,硕士,讲师,主要从事光学设计、光电装备检测技术方面的研究。

E-mail: lilippt@163.com

像质量是整机一个综合性能指标,一些高成像质量要求的光学系统已经进行了新装调方法研究^[4-5]。因此本文结合此望远系统像质要求和光机结构,提出基于像差校正的装调方法,利用 Zemax 建立望远镜光学系统模型,进行基于像差校正的装调方法研究,将像差与零件失调联系起来,并将研究结果用于指导实践。在实践环节,利用直观、灵敏且普及的星点检验法,对望远系统进行基于像差校正的装调,提高光学系统的装调质量,探寻适合此类仪器的新的装调方法。

1 望远镜光学系统建立

本文所建立的望远系统是典型的开普勒望远

系统,附加保罗I式转像棱镜组,技术指标如表 1 所示。在进行系统装调工作之前,需完成光学零件的检查,确保零件面型误差、棱镜光学平行差和透镜焦距在允差之内,不对装调精度造成影响,检查的技术要求如表 2 所示,建立的光学系统如图 1 所示。

表 1 望远系统技术指标
Table 1 Qualification of telescope

放大率 Γ	$8\times$
视场 2ω	$8^{\circ}20'$
出瞳直径 D'	3.7 mm
出瞳距离 L'_e	11.2 mm
鉴别率 α	$7.5''$

表 2 光学零件技术检查要求
Table 2 Technical inspection list of optical element

面型误差				分划板 /mm	棱镜的光学 平行差/(′)	透镜焦距/mm
物镜/mm	目镜组/mm	棱镜/mm				
		直角面	斜面			
$N=3$	$N=5$	$N=0.5$	$N=2$	$N=15$	$\theta_{45^{\circ}}=8$	$f'_{\text{物镜}}=124.73$
$\Delta N=0.5$	$\Delta N=0.5$	$\Delta N=0.3$	$\Delta N=0.3$	$\Delta N=5$	$\theta_2=6$	$f'_{\text{场镜}}=174.6$
					$\theta_1=10$	$f'_{\text{中场镜}}=37.29$
						$f'_{\text{接眼镜}}=36.01$

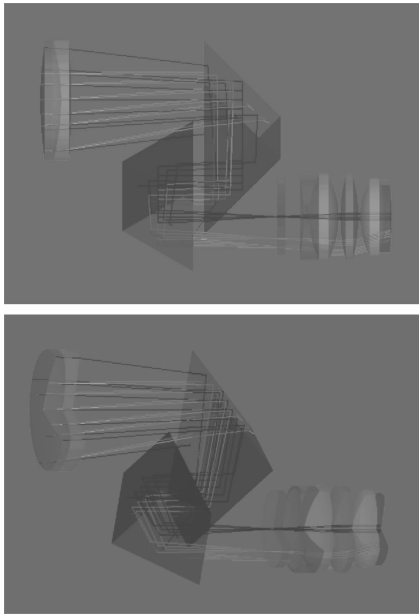


图 1 望远系统光学系统图

Fig. 1 Layout of telescope optical system

建立完成的望远系统像面处 0 视场和 0.7 视场的波前图分别如图 2 和图 3 所示。

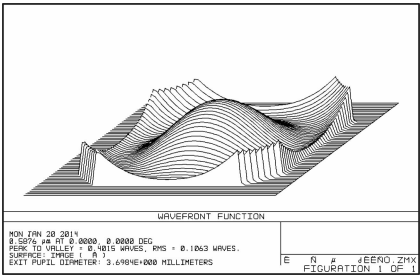


图 2 0 视场波前图

Fig. 2 Wavefront map of system at 0 field

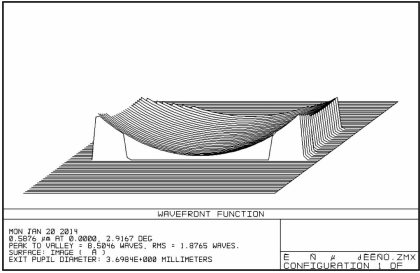


图 3 0.7 视场波前图

Fig. 3 Wavefront map of system at 0.7 field

2 光学系统失调特性分析

2.1 系统调整自由度和调整像差的选择

系统中两块棱镜有 6 个刚体自由度,分别为:绕 x, y, z 轴的旋转量 T_x, T_y, T_z ,沿每个坐标轴的平移量 D_x, D_y, D_z 。物镜组和目镜组由于轴对称特性,具有 5 个刚体自由度,为 T_x, T_y, D_x, D_y, D_z 。

光学调整主要以调整系统的初级像差为主^[6]。根据像差理论可知,Zernike 多项式中的 Z_5, Z_6, Z_7, Z_8, Z_9 可分别表示系统的初级像差^[7],如表 3 所示。

2.2 光学零件失调特性分析

利用光学设计软件 Zemax 把系统中各零件的调整变量改变一个小量 Δx ^[8],求出 0 视场和 0.707 视场的各像差变化量 ΔF ,然后取差商 $\Delta F/\Delta x$,求

出调整变量对各像差的敏感程度,进而分析系统失调特性。以物镜组为例进行说明,物镜组有 5 个调整自由度,分别为物镜组与上棱镜之间的空气间隔(TTHI),物镜组沿 X 方向的偏心(TEDX),沿 Y 方向的偏心(TEDY),绕 X 轴的旋转(TETX),绕 Y 轴的旋转(TETY)。其中平移量的单位为 mm,旋转量的单位为($^\circ$)。表 4 为计算所得的物镜组的敏感矩阵。

表 3 初级像差列表

Table 3 Primary aberration list

Z_5	0° 或 90° 像散
Z_6	45° 像散
Z_7	X 方向彗差
Z_8	Y 方向彗差
Z_9	球差

表 4 物镜组的敏感矩阵

Table 4 Sensitivity matrix of objective

初级像差		TTHI	TEDX	TEDY	TETX	TETY
0 视场	Z_5	0	-0.052 9	0.059 7	-0.253 1	0.253
	Z_6	0	-0.000 5	0	0	-0.000 1
	Z_7	0	-0.239 3	0	0	0.325 4
	Z_8	-0.000 5	0	-0.239 3	-0.325 4	0
	Z_9	0.315 7	-0.004 1	-0.004 1	0.012 6	0.012 6
0.7 视场	Z_5	2.935 3	-0.11	4.254 5	-2.946 7	0.592 8
	Z_6	0	-2.254 4	0	0	-2.573 9
	Z_7	0	-0.184 2	0	0	0.723 3
	Z_8	-1.194 9	0.042 7	0.391 25	-1.087 7	-0.066
	Z_9	0.108 8	-0.021 7	-0.081 7	0.113 2	0.017 2

通过对上表物镜组的敏感矩阵分析可以得到,物镜组的失调特性如下:

1) 物镜组沿光轴方向的平移影响整个系统的球差,并会对轴外 $0^\circ/90^\circ$ 像散和 Y 方向彗差造成较大影响。

2) 物镜组沿 X 方向和 Y 方向的偏心对系统彗差和像散都有影响,对于中心 0 视场, X 方向的偏心对 X 方向彗差造成影响, Y 方向的偏心对 Y 方向的彗差造成影响。对于轴外 0.7 视场,沿 X 方向的偏心极大地影响 45° 像散,沿 Y 方向的偏心极大地影响 $0^\circ/90^\circ$ 像散,对于轴外彗差的影响相对较小,但同中心视场相同, X 方向的偏心对 X 方向彗差造成影响, Y 方向的偏心对 Y 方向的彗差造成影响。

3) 物镜组绕 X 轴和 Y 轴的旋转同样对系统彗差和像散都有影响,与沿 X 方向和 Y 方向的偏心动作形成耦合作用。对于中心 0 视场,绕 X 轴和 Y 轴的旋转影响的是 $0^\circ/90^\circ$ 像散,且绕 X 轴的旋转对 Y 方向彗差造成影响,绕 Y 轴的旋转对 X 方向彗差造成影响。对于轴外 0.7 视场,绕 X 方向的旋转极大地影响 $0^\circ/90^\circ$ 像散,绕 Y 方向的旋转极大地影响 45° 像散,对于轴外彗差的影响相对较小,但同中心视场相同绕 X 方向的旋转对 Y 方向彗差造成影响,绕 Y 方向的旋转对 X 方向的彗差造成影响。

4) 从敏感矩阵中也可以看出,TEDY 与 TETX 可以相互校正,TEDX 与 TETY 可以相互校正。

2.3 系统失调特性分析

将各零件的敏感矩阵综合起来对比分析可以

得到望远系统的失调特性。表 5~表 7 为其余各

零件的敏感矩阵。

表 5 上棱镜的敏感矩阵

Table 5 Sensitivity matrix of upper prism

初级像差		TTHI	TEDX	TEDY	TETX	TETY
0 视场	Z_5	0	0	0.065 0	−0.344 9	0
	Z_6	0	0	0	0.001 4	0
	Z_7	0	0	0	0.301 6	0
	Z_8	0	0.235 3	0.106 33	0	0
	Z_9	0	0.010 3	−0.001 9	0.041 8	0
0.7 视场	Z_5	0	−5.207 5	2.242 7	−0.259 9	0
	Z_6	0	0	0	6.094	0
	Z_7	0	0	0	0.055 5	0
	Z_8	0	−0.189 2	0.588	0.069 4	0
	Z_9	0	−0.011 7	−0.047 8	0.008 5	0

表 6 下棱镜的敏感矩阵

Table 6 Sensitivity matrix of lower prism

初级像差		TTHI	TEDX	TEDY	TETX	TETY
0 视场	Z_5	-0.390 6	0	-0.197 25	-0.058 7	0
	Z_6	0.001 3	0	0	-0.000 33	0
	Z_7	0.235 2	0	0	0.099 2	0
	Z_8	0	0	-0.547 2	0	0
	Z_9	0.010 3	0	0.045 33	-0.001 9	0
0.7 视场	Z_5	-0.557 1	0	7.929 0	-0.147 2	0.122 7
	Z_6	5.298 8	0	0	-1.861 1	-1.550 9
	Z_7	0.012 9	0	0	0.380 2	0.316 8
	Z_8	0.104 8	0	0.127 1	0.007 0	0.005 8
	Z_9	-0.011 6	0	0.068 3	-0.003 8	-0.003 2

表 7 目镜组的敏感矩阵

Table 7 Sensitivity matrix of eyepiece

初级像差		TTHI	TEDX	TEDY	TETX	TETY
0 视场	Z_5	0	-0.093 4	0.094	-0.049 5	0.049 8
	Z_6	0	-0.000 6	0	0	0.000 3
	Z_7	0	-0.120 5	0	0	-0.230 9
	Z_8	0.008	0	-0.120 5	0.230 9	0
	Z_9	0.320 4	-0.002 7	0.002 7	0.004 4	0.004 4
0.7 视场	Z_5	2.935 3	-0.134 2	4.215 7	0.415 7	0.097 3
	Z_6	0	-2.589 5	0	0	1.221 4
	Z_7	0	-0.019 7	0	0	-0.548 8
	Z_8	-1.195 4	0.025 9	-0.481 4	-0.673 9	-0.019 4
	Z_9	0.361 9	-0.002 7	-0.043 4	-0.100 7	0.006

据此分析望远系统的失调特性如下:

1) 系统的球差主要受零件轴向位置失调的影响。

2) 0 视场产生彗差是由于零件在该方向上产

生了不对称性,相应的几个自由度耦合作用导致,如 X 方向的彗差由物镜组或目镜组沿 X 轴偏心或绕 Y 轴的旋转造成的。轴外视场彗差的增大也同 0 视场原因类似,尤其受物镜组和目镜组的偏心

和旋转的影响较棱镜影响大。另外,物镜组和目镜组的轴向位置失调会造成轴外 Y 方向彗差的较大改变,敏感程度在1以上。

3) 0° 视场会因为零件的失调产生 $0^\circ/90^\circ$ 像散,且主要是受上、下棱镜的旋转以及物镜的旋转造成。轴外视场不管是 $0^\circ/90^\circ$ 像散还是 45° 像散都受到造成该方向上产生不对称性的几个自由度耦合作用的极大影响,尤其是受到上、下棱镜的偏心或倾斜影响,敏感程度在1.5~8之间。物镜组和目镜组的偏心、倾斜也会造成两方向上像散的较大改变,敏感程度在1~4之间。另外,物镜组和目镜组的轴向位置误差会比较明显地影响 $0^\circ/90^\circ$ 像散,敏感程度为2.9。

4) 物镜组和目镜组的失调特性类似。

5) 由于上、下棱镜的厚度尺寸较光束口径大,因此在较小失调范围内,沿棱镜厚度方向的失调对各像差无影响。如上棱镜沿 X 方向的偏移以及下棱镜沿 Y 方向的偏移。

3 系统装调方案

通过以上对望远系统失调特性的分析,可以拟定如下的基于像差的系统装调方案。

1) 调整物镜组和目镜组的间隔使系统 0° 视场球差达到要求,由于物镜组和目镜组的间隔变化对轴外 Y 方向彗差和 $0^\circ/90^\circ$ 像散影响明显,所以调整过程中同时监测轴外 Y 方向彗差和 $0^\circ/90^\circ$ 像散。

2) 物镜组和目镜组的轴向间隔调整完毕后,监测 0° 视场彗差情况,调整物镜组和目镜组的偏心以及倾斜,使 0° 视场和轴外视场彗差达到要求。

3) 最后进行上、下棱镜的调整,根据对上、下棱镜的敏感矩阵分析,调整上、下棱镜的偏心以及倾斜,使系统 $0^\circ/90^\circ$ 像散和 45° 像散达到要求。

4 装调试验

4.1 像质检验方法选取

评价实际光学系统像质常用的方法有星点检验、分辨率测试、干涉法检测等。

分辨率检验能以确定的数值作为评价被测系统像质的综合性指标,但所获得的有关被测系统的像质信息量不及星点检验多,发现像差的灵敏度也不如星点检验高,与之前的理论分析不能形成对应。

干涉检验法是定量获取光学系统波像差的方法^[9-10],具有检测快,精度高,通用性强,适合各类光学系统的优点,但是此类方法往往需要平面基准镜,成本较高,且对检测环境要求苛刻。

星点检验法是通过成像系统对无穷远目标成星点图像,根据星点像的大小和光能量分布情况判断系统波前存在的像差,是一种迅速、可靠而灵敏度又非常高的检验方法^[11],并且此方法在装备研制部门和部队各级装备保障部门中也容易开展实施。另外,可以利用星点像与像差之间的联系,采用傅里叶变换迭代算法恢复相位,再从相位展开得到波面并拟合出波前像差的具体系数,定量地进行像质评判。鉴于此,本文选取星点检验法,结合望远系统光机结构进行装调试验。

4.2 星点检验装置

星点检验装置示意图如图4所示。

试验中选用的平行光管,物镜焦距3 000 mm,相对孔径1:10,采用像质优良的双分离消色差物镜结构。

根据衍射环宽度所做的理论估算和实验表明,星孔最大允许直径 $d_{\max} = (0.61\lambda/D_{\text{被测系统}}) f'_{\text{平行光管}} = 0.025\ 62\ \text{mm}$,实验选取0.02 mm星点板,并用聚光镜将发光面积小而亮的白炽灯聚焦在星点上,照亮星点。

试验中选用 $20\times$ 自准前置镜,焦距400 mm,相对孔径1:8,分辨率2.8"。

为了便于正确评价像质的好坏,用星点照相装置将被检系统像点像拍摄成照片进行分析、判定。

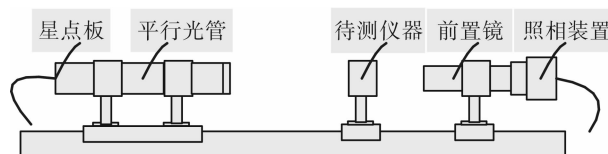


图4 星点检验装置示意图

Fig. 4 Setup of star test device

4.3 系统装调

望远镜构造包括三大部分:物镜部分、棱镜室部分、目镜部分。各部件组装完毕后进行总体装配与校正。

1) 物镜组、目镜组轴向位置装调

棱镜室本体上端与目镜座以螺纹旋接、以制螺固定,下端与物镜座旋接。调整望远镜光轴与平行光管和前置镜光轴一致,旋动物镜座和目镜座,对应物镜组和目镜组敏感矩阵中的TTHI,根

据星点像有最小球差判定物镜组和目镜组的位置正确。据此进行的物镜组、目镜组轴向位置装调,可以分别代替传统的物镜组视差检校和利用视度筒的目镜组视度零位检校。图 5(a)为物镜组、目镜组调整过程中的星点图;图 5(b)是物镜组、目镜组轴向位置调整完毕后的星点图,通过位相复原,得到波前 Zernike 系数中较大的数据项为: $Z_7 = 0.605$, $Z_9 = 0.959$ 。出现的彗差情况说明光学系统中有些光学零件存在偏心或倾斜,需后续进一步校正。

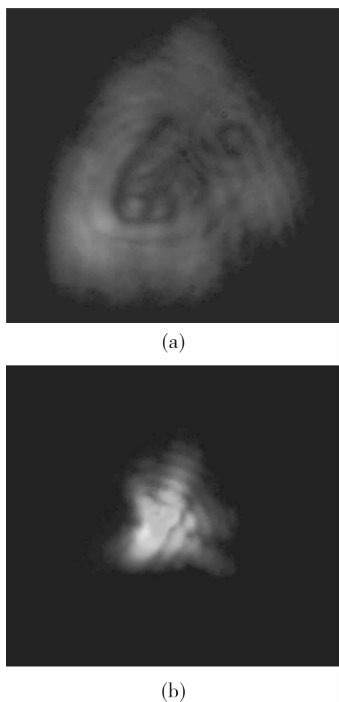


图 5 物镜组、目镜组调整过程中的星点图

Fig. 5 Star images for adjusting objective lens and eyepiece

2) 物镜组偏心装调

固定物镜的物镜框前端有偏心,偏心物镜框外套有偏心环,偏心量 0.4 mm,两者组成双偏心调整机构一起装在物镜座中,拨动偏心环或偏心物镜框,使两者对于物镜座转动,就可以使物镜做径向移动,对应物镜组敏感矩阵中的 TEDX 和 TEDY,在传统的分项目校正中达到校正双光轴平行性的目的。根据上述分析,物镜组的偏心较大影响轴外视场的像散和彗差,因此,拨动偏心物镜组,根据轴外视场的像散和彗差情况进行物镜组偏心的调校。图 6(a)为调整过程中的星点图,较大的 Zernike 系数项为: $Z_5 = 1.013$, $Z_7 = 1.739$;图 6(b)是调整完毕后的星点图,相应的 $Z_5 = 0.844$, $Z_7 = 1.121$ 。图像和定量计算均表明系统装调的正确性。

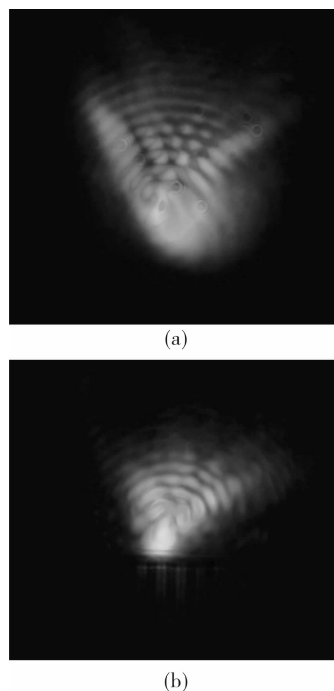


图 6 物镜组偏心调整过程中的星点图

Fig. 6 Star images for adjusting objective lens eccentric

据此进行的物镜组偏心装调,相比于传统的精校光轴时的偏心调校更直观简单,尤其对于新品的装调,非常方便。对于双镜筒连接轴存在径向松动等故障的待修品,可以先排除此故障,再进行物镜组偏心装调,同样能够达到较好的装调效果。

3) 上、下棱镜偏心及倾斜装调

棱镜室本体内有上棱镜座和下棱镜座,两棱镜座的装配基面不平行,其长轴互相垂直。棱镜座基面上用簧片固定上、下直角棱镜,理想状态下两棱镜斜面互相平行,其主截面互相垂直。初装后,棱镜在槽内的松动和定位面不平会引起光轴误差,并在像差中体现出来。推棱镜,就是使棱镜在槽内移动,对应棱镜敏感矩阵中的 TEDX 和 TEDY;垫棱镜,就是在棱镜槽中部的一侧与棱镜斜面接触处垫铝箔,使棱镜产生微量转动,解决定位面不平的问题,对应棱镜敏感矩阵中的 TETX 和 TETY。依据敏感矩阵,根据星点像中像散的变化,分别对上、下棱镜进行推垫处理。由上述分析可知,各像差受多个自由度耦合作用的影响,因此系统装调是一个反复的过程,尤其是步骤 2) 和步骤 3),物镜组的偏心和上下棱镜的偏心及倾斜都对像散和彗差有影响,需要在系统失调特性的分析指导下,反复进行,逐渐逼近较好的像质,使仪器各项指标达到验收技术标准。图 7 为最终装调完成后的系统星点像,对应图 7(a)的 Zernike 系

数项为: $Z_5=0.466, Z_7=0.831, Z_9=0.307$ 。

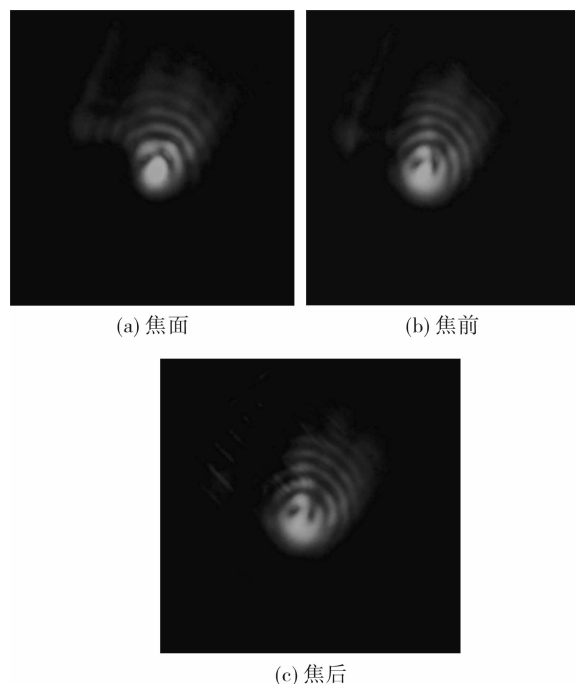


图7 系统装调完成后的星点像

Fig. 7 Star images at different focusing positions

4.4 精度及误差分析

对装调完成的望远镜进行分辨率检测,分辨率的检测直接在星点检验装置的基础上将星点板换为分辨率板。所得检测结果为 $6.16''$,高于验收技术标准的 $7.5''$,说明运用此装调方法进行装调的望远系统,实际检测精度达到了设计要求,装调方法可以满足该仪器的指标要求。

通过以上分析,造成装调精度降低的误差主要来自:1)辅助成像光学系统的影响,其中平行光管对精度的影响在于光能量分布是否均匀,前置镜对精度的影响在于其自身的像差难以忽略;2)光学材料中的应力或条纹;3)光学零件的装配应力。

5 结束语

本文通过建立实际望远镜光学系统模型,详细分析了光学零件失调对各类像差造成的影响,建立了像差与光学零件失调之间的关系,在此基础上获得系统的装调方案。在此理论指导下进行的基于星点检验法的装调实验,验证了基于像差校正的光学系统装调的可行性,为装备研制部门和部队各级装备保障部门提供了具有可操作性的新的装调方法。

参考文献:

- [1] Yang Hosoon, Kang Myungseok, Kim Sunghee, et al. Development of Cassegrain type 0.9 m collimator [J]. SPIE, 2005, 5869, :586913-1.
- [2] Jin Chunshui, Wang Liping, Zhang Lichao, et al. Development of an experimental EUVL system [J]. SPIE, 2007, 6724:672408.
- [3] Liu Ke, Li Yanqiu, Liu Jingfeng, et al. Computer aided alignment of a $20\times$ schwarzschild projection optics [J]. SPIE, 2008, 7130:713042.
- [4] Kim E D, Choi Youngwan, Kang Myungseok, et al. Lessons learned from the optics and focal plane alignment of a wide field of view RC telescope [J]. SPIE, 2005, 5877:58770C.
- [5] Zhao Xiting, Jiao Wenchun, Liao Zhibo, et al. Study on computer-aided alignment method of a three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. SPIE, 2010, 7656 :76566M.
- [6] Che Chicheng, Li Yingcai, Fan Xuewu. Research on computer-aided alignment based on vector aberration theory [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37 (8): 1630-1634.
- [7] Born M. Principles of optics [M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [8] Focus Software Incorporated. ZEMAX optical design program users guide [M]. New York: Focus Software Incorporated, 2009.
- [9] Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen, et al. Computer aided alignment method of coaxial three-mirror-anastigmat system [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 901-906.
- [10] Han Juan, Duan Jiayou, Zhang Jun. Alignment method for large aperture aspheric mirror [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(3), :490-495.
- [11] Sha Dingguo. Optical testing technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010.