

## 方形孔径自由曲面反射式系统装调技术研究

王超<sup>1,2</sup>, 张新<sup>1</sup>, 王灵杰<sup>1</sup>, 王钰<sup>1,2</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对方形孔径自由曲面反射系统, 构造方形域上正交多项式用于波前解析, 得到方形孔径系统波像差系数。在计算机辅助装调阶段, 为确保装调结果准确, 用方形域上正交多项式和光学设计软件来建立系统的灵敏度矩阵, 结合自准直干涉法得到的多个视场得波像差来求解系统失调量; 在多次迭代后得到系统平均 RMS 为 0.164 1(632.8 nm) 实测系统平均传递函数达到 0.453 4 的理想结果; 证明该装调方法正确性, 并适用于其他形状孔径自由曲面离轴反射系统式系统装调。

**关键词:** 方形域正交多项式; 方形孔径; 离轴自由曲面; 计算机辅助装调; 灵敏度矩阵

**中图分类号:** V248.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1518-08

## Adjustment of abnormity aperture off-axis freeform system based on square aperture

Wang Chao<sup>1,2</sup>, Zhang Xin<sup>1</sup>, Wang Lingjie<sup>1</sup>, Wang Yu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In accordance with a three mirror off-axis freeform square aperture system, orthogonal Zernike polynomial in square area was created to analyze wavefront and receive aberration parameter. During computer-aided alignment, by collecting interferograms of several fields of optical system by means of autocollimating interferometry, aberrations could be obtained from those interferograms. Furthermore, the sensitivity matrix related to the incorrect parameters derived from optical design software and these parameters of orthogonal polynomials in square area were used to determine the incorrect parameter. The results show that the averaging RMS value of the system is 0.164 1 waves (632.8 nm) and the averaging MTF value of the system is 0.453 4 after iterations, which proves it is right, and it can be used in off-axis freeform reflected system with other types of aperture.

**Key words:** orthogonal polynomial in square area; square aperture; off-axis freeform; computer-aided alignment; sensitivity matrix

收稿日期: 2014-09-05; 修订日期: 2014-10-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61007009)

作者简介: 王超(1986-), 男, 博士生, 主要从事光学系统设计和成像超分辨方面的研究。Email: wangchao32050609@163.com

导师简介: 张新(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事非常规复杂光学系统设计等方面的研究。

## 0 引言

TMA 系统是当前大视场空间光学系统的常用光学方案。针对空间遥感光学系统追求大幅宽的应用需求,将自由曲面应用于四反射式离轴 TMA 光学系统中,以平衡剧烈增加的轴外像差,但是也使得系统像差变得异常复杂<sup>[1]</sup>。目前国内外对于离轴自由曲面光学系统像差理论的研究,比较热门的是矢量像差理论和 Jannick P. Rolland 等人提出的节点像差理论,但也停留理论研究阶段,并未指导实际自由曲面三镜反射系统装调。所以目前此类系统主要采用灵敏度矩阵方法进行装调,以波前误差的均方根值为评价标准。但对于偏光瞳、偏视场的非圆形孔径自由曲面反射式系统装调中,直接利用条纹泽尼克多项式建立灵敏度矩阵是不正确的,因为条纹泽尼克多项式解析非圆形孔径系统波前是不正确的。

文中针对以上问题,计算机辅助装调阶段对现有的条纹泽尼克多项式进行适用于方形孔径的正交化修正,并将其应用于离轴方形孔径自由曲面计算机辅助装调过程中,得到了该系统的灵敏度矩阵,解算了失调量,并能实现波像差完备的定量描述,最终实际装调结果验证此装调方法正确性。

## 1 方形孔径光学系统理论模型

在计算机辅助装调阶段需要解析系统波前得到像差参数,从而计算系统失调量。在方形域上条纹泽尼克多项式已不正交,需要构造方形域上正交多项式用于解析方形孔径系统波前。

### 1.1 条纹泽尼克多项式正交性

对于方形孔光学系统波前解析,一般采用如图 1

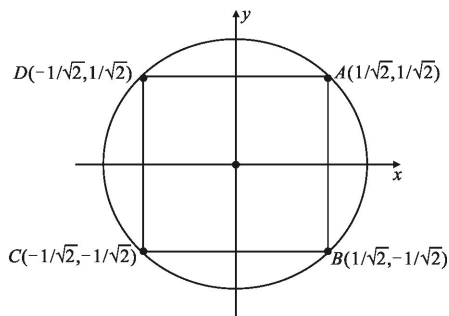


图 1 单位圆内接正方形

Fig.1 Square inscribed inside a unit circle

所示的数学模型:在圆形域截取出方形孔径区域,如图 1 所示,利用正交多项式对其进行解析。

$$\int_{\text{pupil}} z_j(x, y)z_{j'}(x, y)dxdy = \delta_{jj'} \quad (1)$$

利用公式(1)证明泽尼克多项式在在图 1 单位圆域内上正交,但图 1 方形区域上已不正交,所以直接用条纹泽尼克多项式解析非圆形孔径系统波前不正确。

### 1.2 建立方形孔径下正交泽尼克多项式

在 1.1 节中已经证明条纹泽尼克多项式在方形域下已不正交,因此装调时需要构造在方形域上的正交多项式用于解析方形孔径系统波前。

在笛卡尔坐标系中,像差方程  $W(x, y)$  可以展开为光瞳内正交的多项式  $F_j(x, y)$ , 展开式和多项式正交性如公式(2)所示:

$$W(x, y) = \sum_j a_j F_j(x, y) \frac{1}{A} \int_{\text{pupil}} F_j(x, y) F_{j'}(x, y) dxdy = \delta_{jj'}$$

$$A = \int_{\text{pupil}} dxdy$$

$$a_j = \frac{1}{A} \int_{\text{pupil}} W(x, y) F_j(x, y) dxdy \quad (2)$$

式中:  $a_j$  就为展开式多项式  $F_j(x, y)$  的像差系数;  $A$  为单位元内接光瞳区域的积分面积;  $\delta_{jj'}$  为克罗内克算符。格雷姆-施瓦兹正交化方法是正交变换中普遍使用的方法,所以方形域上的正交多项式  $F_j(x, y)$  可以由如下方法得到<sup>[2]</sup>。给定初始条纹泽尼克多项式  $\{Z_j\}_{j=1}^n$ ,  $\{G_j\}_{j=1}^n$  代表方形域正交、非归一化多项式,  $\{F_j\}_{j=1}^n$  代表方形域上正交、归一化多项式<sup>[3]</sup>, 见公式(3)

$$G_1 = Z_1 = 1 \quad C_{j+1,k} = -\frac{1}{A} \int_{\text{pupil}} Z_{j+1} F_k dxdy$$

$$G_{j+1} = Z_{j+1} + \sum_{k=1}^j C_{j+1,k} F_k \quad F_{j+1} = \frac{G_{j+1}}{\left| \frac{1}{A} \int_{\text{pupil}} G_{j+1}^2 dxdy \right|^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

由于文中采用方形域,见图 1,正方形每个边为  $\sqrt{2}$ , 则  $A=2$ , 所以

$$C_{j+1,k} = -\frac{1}{2} \int_{-1/\sqrt{2}}^{1/\sqrt{2}} dy \int_{-1/\sqrt{2}}^{1/\sqrt{2}} Z_j F_k dx \cdot$$

$$\frac{1}{2} \int_{-1/\sqrt{2}}^{1/\sqrt{2}} dy \int_{-1/\sqrt{2}}^{1/\sqrt{2}} F_j F_{j'} dx = \delta_{jj'} \quad (4)$$

利用公式(3)、(4)在方形域上构造的正交多项式和泽尼克正交多项式形式的前 11 项以及转换关系,具体见表 1、表 2。

表 1 方形域正交多项式和条纹泽尼克正交多项式

Tab.1 Orthogonal polynomials in circle area and fringe Zernike polynomial square area

Orthogonal polynomial in square area	Fringe Zernike
1	1
$\sqrt{6} \rho \cos \varphi$	$\rho \cos \varphi$
$\sqrt{6} \rho \sin \varphi$	$\rho \sin \varphi$
$\sqrt{5/2} (3\rho^2-1)$	$-1+2\rho^2$
$3\sqrt{5/2} \rho^2 \cos 2\varphi$	$\rho^2 \cos 2\varphi$
$3\rho^2 \sin 2\varphi$	$\rho^2 \sin 2\varphi$
$\sqrt{21/31} (15\rho^2-7)\rho \cos \varphi$	$(-2+3\rho^2)\rho \cos \varphi$
$\sqrt{21/31} (15\rho^2-7)\rho \sin \varphi$	$(-2+3\rho^2)\rho \sin \varphi$
$1/(2\sqrt{67})(315\rho^4-240\rho^2+31)$	$1-6\rho^2+6\rho^4$
$\sqrt{5/31} /2(31\rho^3 \cos 3\varphi+3(13\rho^2-4)\cos \varphi)$	$\rho^3 \cos 3\varphi$
$\sqrt{5/31} /2(31\rho^3 \sin 3\varphi-3(13\rho^2-4)\sin \varphi)$	$\rho^3 \sin 3\varphi$
$35/\sqrt{2} /4(3\rho^2-2)\rho^2 \cos 2\varphi$	$\rho^2(-3+4\rho^2)\cos 2\varphi$

表 2 方形域正交多项式与条纹泽尼克多项式转换关系

Tab.2 Relation of conversion between orthogonal polynomials in square area and fringe Zernike polynomial

Relation of conversion
$Z_1$
$\sqrt{6} Z_2$
$\sqrt{6} Z_3$
$3\sqrt{5/2} /2Z_4+\sqrt{5/2} /2Z_1$
$3\sqrt{5/2} Z_5$
$3Z_6$
$5\sqrt{21/31} Z_7+3\sqrt{21/31} Z_2$
$5\sqrt{21/31} Z_8+3\sqrt{21/31} Z_3$
$105\sqrt{1/67} /4Z_9+75\sqrt{1/67} /4Z_4+41\sqrt{1/67} /2Z_1$
$\sqrt{155} /2Z_{10}+13\sqrt{155} /62Z_7+7\sqrt{155} /31Z_2$
$\sqrt{155} /2Z_{11}-13\sqrt{155} /62Z_8+7\sqrt{155} /31Z_3$

从表 3 可以看出方形域上正交多项式与条纹泽尼克多项式形式上类似，但各项表示像差意义与条纹泽尼克表示像差不同，但像差类型并没有增加。利用方形域上的正交多项式，解析波前，利用表 2 的转换关系的到方形孔径光学系统泽尼克多项式系数用方孔径光学系统装调。

表 3 方形域正交多项式各项像差意义

Tab.3 Type of aberration orthogonal polynomials in square area

Orthogonal polynomial in square area	Type of aberration
1	Piston
2	Tilt(X)
3	Tilt(Y)
4	Defocus+Piston
5	Astigmatism(0° or 90°)
6	Astigmatism(±45°)
7	Coma(X)+Tilt(X)
8	Coma(Y)+Tilt(Y)
9	Spherical+Defocus+Piston
10	Trefoil(X)+Coma(X)+Tilt(X)
11	Trefoil(Y)+Coma(Y)+Tilt(Y)

1.3 光学系统实例验证

利用条纹泽尼克多项式直接解析方形孔径系统波前是不正确的，此节以 ZEMAX 示例中“Yolo0.ZMX”为例对此理论进行证明，系统光学参数如表 4 所示，系统结构如图 2 所示。

表 4 系统光学参数

Tab.4 Parameter of optical system

Name of parameter	Value of parameter
Focal length/mm	3 383.52
Field of view/(°)	0.183 8
Diameter of entrance pupil/mm	250
Wavelength/nm	632.8

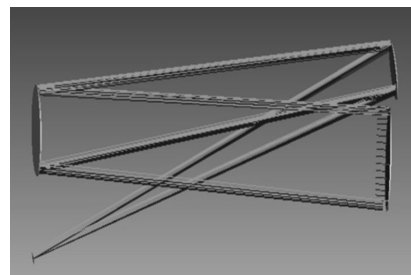


图 2 系统结构图

Fig.2 Frame of system

将 ZEMAX 软件产生的系统波前数据导入 MATLAB 中，得到圆形孔径和方形孔径波前解析图；采用最小二乘法，利用方形域正交多项式和条纹泽尼克多项式对导入波前数据进行拟合，得到波前拟合残差，拟合残差在都为  $10^{-8}$  waves(632.8 nm)。

系统光瞳未偏置情况下：圆形孔径和方形孔径波前解析情况如图 3 所示，图(a)为条纹泽尼克解析

圆形孔径系统波前,图(b)为条纹泽尼克解析方形孔径系统波前,图(c)为方形域正交多项式解析方形孔径系统波前,图(d)为圆域波前残差,图(e)为泽尼克拟合方形孔径系统波前残差,图(f)为拟合方孔径波前残差。方形域正交多项式和条纹泽尼克多项式解析系统波前残差相同。利用表 5 和表 6 解析的像差参数得出如下结论,同一光学系统孔径光阑由圆形

变为方形,像差系数应有所变化;直接用条纹泽尼克多项式解析方形孔径光学系统波前,与用方形域正交多项式解析波前和表 2 转换关系得到的波相差系数相比并不相同;这证明直接利用条纹泽尼克多项式解析方形孔径系统波前并不正确。

表 6 解析的像差参数

Tab.6 Analytic aberration parameter

Orthogonal polynomial in square area(square aperture)	Modify parameter of fringe Zernike(square aperture)
-0.083 744 379 926 947 5	-0.086 458 587 123 014 0
-0.001 175 126 267 049 61	-0.001 685 957 608 576 19
-0.000 155 345 490 396 906	-0.001 443 499 662 991 14
-0.034 837 535 308 376 5	-0.045 040 083 851 748 2
0.000 840 698 174 539 805	0.003 500 814 926 062 84
0.000 419 914 951 745 566	0.001 834 856 188 606 19
-0.001 167 280 981 655 80	-0.000 983 916 454 918 319
0.000 200 309 653 167 373	-0.001 244 921 135 216 73
0.015 136 810 293 850 8	0.054 421 186 960 465 6
0.001 521 165 213 493 07	0.009 226 867 304 956 86
0.000 701 807 822 231 678	0.004 055 365 291 137 95
-8.118 815 542 278 40e-05	-0.000 780 872 983 678 574

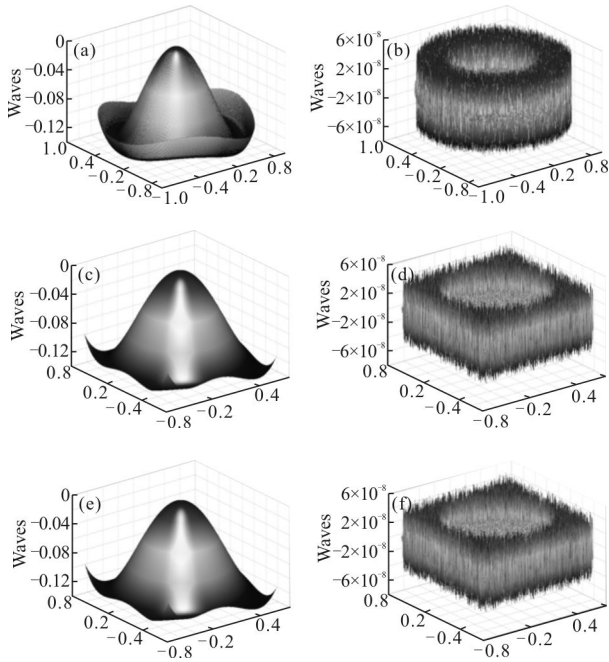


图 3 圆形和方形孔径系统波前解析残差对比

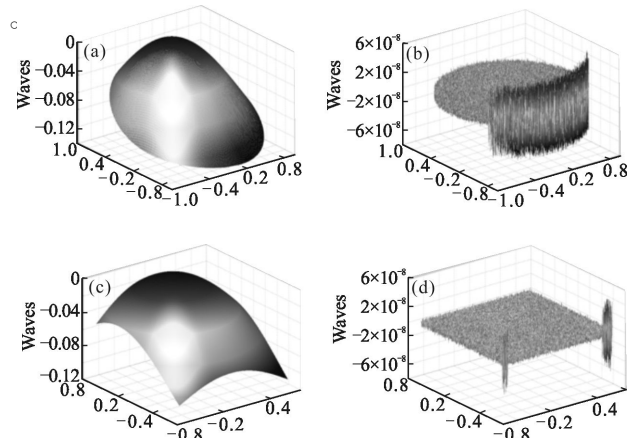
Fig.3 Contrast of circle and square aperture system wavefront error

表 5 解析的像差参数

Tab.5 Analytic aberration parameter

Parameter of fringe Zernike (circle aperture)	Parameter of fringe Zernike (square aperture)
-0.096 465 920 530 743 8	-0.096 458 587 123 008 5
-0.001 491 757 352 579 94	-0.001 485 957 608 576 50
-0.001 850 324 286 458 97	-0.001 843 499 662 980 86
-0.049 847 934 132 897 9	-0.050 040 083 851 733 5
0.003 002 597 557 064 63	0.003 000 814 926 078 61
0.001 440 336 324 694 86	0.001 434 856 188 606 30
-0.000 887 575 184 287 535	-0.000 883 916 454 917 534
-0.001 048 997 534 300 34	-0.001 044 921 135 201 94
0.046 620 687 368 526 3	0.046 421 186 960 476 7
0.009 156 284 371 264 87	0.009 126 867 304 958 96
0.004 269 084 408 375 05	0.004 255 365 291 128 07
-0.000 723 977 066 582 589	-0.000 720 872 983 662 473

系统光瞳偏置情况下:圆形孔径和方形孔径波前解析情况如图 4 中(a)、(b)和(c)所示,方形域正交多项式和条纹泽尼克多项式解析系统波前残差相同。从表 7、表 8 解析的波像差参数得出如下结论:在光瞳偏置情况下,同一光学系统孔径光阑由圆形变为方形,像差系数应有所变化;直接用条纹泽尼克多项式解析方形孔径光学系统波前,与用方形域正交多项式和表 2 转换关系得到的波相差系数相比并不相同;这也证明直接利用泽尼克多项式解析非圆孔径系统波前并不正确。



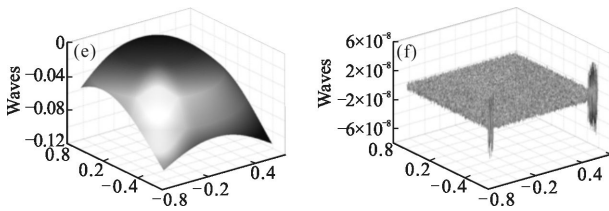


图 4 (a)、(c)和(e)为圆形和方形孔径系统波前;(b)、(d)和(f)为系统波前解析残差

Fig.4 (a), (c) and (e) represent the wavefront of circle and square aperture system, (b), (d) and (f) depict the fitting error of wavefront

表 7 解析的像差参数

Tab.7 Parsing aberration parameter

Orthogonal polynomial in square area(square aperture)	Modify parameter of fringe Zernike(square aperture)
-0.047 573 933 713 686 3	-0.047 505 657 203 175 6
-0.000 647 879 553 800 299	-0.000 646 708 721 132 125
0.044 280 212 293 091 9	0.044 265 688 372 088 3
-0.034 763 451 445 842 6	-0.034 707 560 344 017 2
-0.003 196 507 673 711 56	-0.003 189 347 011 883 50
0.001 367 400 107 706 84	0.001 364 291 646 632 95
-0.000 108 296 776 935 795	-0.000 107 922 687 272 550
-0.007 690 632 716 105 85	-0.007 665 917 596 512 35
0.002 894 714 045 718 14	0.002 882 328 567 995 56
0.001 171 500 641 094 18	0.001 167 739 037 289 40
0.000 590 857 336 296 947	0.000 588 959 832 403 908
-4.920 013 606 030 45e-05	-4.898 996 160 955 03e-05

表 8 解析的像差参数

Tab.8 Parsing aberration parameter

Orthogonal polynomial in square area(square aperture)	Modify parameter of fringe Zernike(square aperture)
-0.038 533 979 031 513 9	-0.036 128 602 618 753 3
-0.000 406 780 899 122 547	-0.000 815 411 952 607 835
0.023 703 594 116 129 9	0.048 983 104 894 530 6
-0.013 840 534 701 858 2	-0.036 766 276 301 057 7
-0.001 045 161 647 673 60	-0.003 126 361 353 176 20
0.000 513 290 146 430 289	0.001 347 562 893 499 01
-0.000 133 239 614 591 282	-0.000 595 359 060 335 157
-0.002 029 706 589 469 63	-0.007 416 840 582 935 77
0.000 783 891 127 383 431	0.002 882 395 761 741 86
0.000 170 734 862 410 562	0.001 168 636 522 465 22
8.749 323 422 701 95e-05	0.000 587 963 354 6287 85
-4.704 855 493 874 35e-06	-4.898 392 279 129 81e-05

由以上证明可以得出如下结论：条纹泽尼克多项式不可以直接解析非圆形系统波前，因此在此系统计算机辅助装调阶段，采用构造的方形域上正交多项式进行波前解析，利用表 2 中转换关系得到修正后的条纹泽尼克多项式系数用于此类光学系统装调；并且由以上数据可以看出，同一光学系统由圆形孔径变为方形孔径，孔径变小了，因此像差系数也呈现变小的规律。

## 2 装调实例及理论验证

考虑到相机分辨率和地面覆盖宽度要求，具体光学系统参数见表 9<sup>[4]</sup>，结构图见图 5。如果主镜也采用自由曲面，如表 10 所示。系统轴外高阶像差会得到更好的平衡效果，但主镜为大口径凸自由曲面不适于光学加工和检测，装调。因此主镜采用球面，其他反射镜都采用自由曲面，最大限度平衡轴外像差，使得视场角达到 76°，并且全视场平均 MTF>0.5，如图 6 所示。

表 9 光学参数

Tab.9 Optical parameter

Name of parameter	Value of parameter
Focal length/mm	550
Field of view/(°)	76
F#	6.5

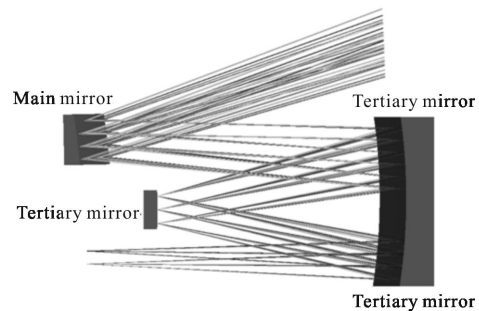


图 5 光学系统结构图

Fig.5 Optical system frame

表 10 面型和离轴量

Tab.10 Type of surface and decenter

Mirror	Type of surface	Decenter/mm
Main mirror	Sphere	120
Secondary mirror	Freeform surface	80
Tertiary mirror	Freeform surface	0
Fourth mirror	Freeform surface	135

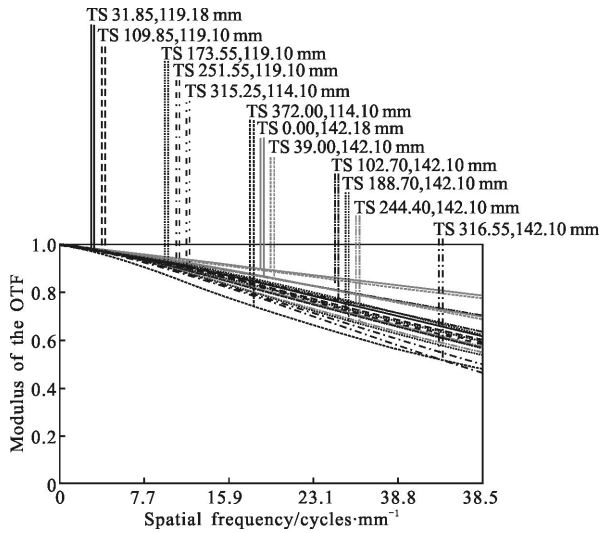


图6 各视场的光学传递函数

Fig.6 Modulate Transfer Functions of each field of view

计算机辅助装调是运用光学手段实测系统多个视场的初级像差(像散、彗差和球差),再由计算机反算得到光学元件的调整方向和具体量值,通过各种定位工具和调整工具使各元件的相互位置可以接近于理论设计参数<sup>[5]</sup>。

### 2.1 数学模型和灵敏度矩阵

计算机辅助装调理论模型如下所示:将用于表征波像差的泽尼克系数进行泰勒展开,  $k$  为泽尼克项数,  $x_0$  为理想空间位置,  $x_0'$  为设计空间位置,在基准传递过程使像差和结构参数之间接近线性<sup>[6]</sup>,所以可以简化为公式(5):

$$Z_k(x) - Z_k(x_0) = \sum_{i=1}^N \frac{\partial Z_k(x_0)}{\partial x_{0i}} (x_i - x_{0i}) \quad (5)$$

装调过程中需要建立多个视场下如公式(2)的线性方程,用  $m$  来表征视场,则公式(2)转化为公式(3)形式<sup>[7]</sup>,采用广义逆<sup>[8]</sup>方法求解失调量  $\Delta X$ 。

$$\Delta F = A \Delta X \quad \Delta X = \text{pinv}(A) \Delta F$$

$$\Delta F = \begin{bmatrix} Z_{1m}(x) \\ \vdots \\ Z_{km}(x) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{1m}(x_0) \\ \vdots \\ Z_{km}(x_0) \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_{1m}(x_0)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial Z_{1m}(x_0)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Z_{km}(x_0)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial Z_{km}(x_0)}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} x_1 - x_{01} \\ \vdots \\ x_n - x_{0n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $A$  为系统灵敏度矩阵;  $\Delta X$  为系统失调量矩阵;  $\Delta F$  为系统各像差随失调量的变化值<sup>[9]</sup>。

使用第 3 节中构造的方形域正交泽尼克正交多项式对光学设计软件 CODE V 中生成系统出瞳波面的虚拟波前图进行解析,通过表 2 中转换关系建立起调整量与初级像差系数关系的灵敏度矩阵  $A$ <sup>[10]</sup>。利用表 1、表 2 建立的灵敏度矩阵,以 0 视场为例(具体见表 11)。

表 11 中心视场灵敏度矩阵

Tab.11 Sensitivity matrix of central field

Main mirror	$T_{\alpha, \text{main}}$	$T_{\beta, \text{main}}$	$T_{\gamma, \text{main}}$
z5	-0.048 121	0.000 000	0.000 000
z6	0.000 000	-0.123 343	0.000 000
z7	0.000 000	-0.017 161	0.000 000
z8	-0.072 536	0.000 000	0.000 000
z9	-0.118 729	0.003 348	0.000 000
Main mirror	$D_{x, \text{main}}$	$D_{y, \text{main}}$	$D_{z, \text{main}}$
z5	0.000 000	0.000 000	0.000 000
z6	0.000 000	0.000 000	0.000 000
z7	0.000 000	0.000 000	-0.000 109
z8	0.000 000	0.000 000	0.000 000
z9	0.001 134	0.002 431	0.001 245
Tertiary mirror	$T_{\alpha, \text{tert}}$	$T_{\beta, \text{tert}}$	$T_{\gamma, \text{tert}}$
z5	0.362 452	0.000 101	-0.000 100
z6	0.0000 00	-0.127 319	0.200 100
z7	0.000 000	-0.027 122	0.001 200
z8	-0.267 635	0.000 000	0.000 000
z9	-0.384 012 3	0.001 838	0.001 421
Tertiary mirror	$D_{x, \text{tert}}$	$D_{y, \text{tert}}$	$D_{z, \text{tert}}$
z5	0.000 000	-0.055 335	0.363 813
z6	0.001 734	0.000 000	0.000 000
z7	-0.014 625	-0.000 109	0.000 000
z8	0.000 000	-0.013 803	-0.267 323
z9	0.003 301	-0.000 411	-0.346 537

### 2.2 装调过程

光学系统具体装调过程如下:

- (1) 三镜 CGH 装调。
- (2) 以三镜 CGH 为基准,装调三镜。
- (3) 以三镜 CGH 为基准完成二四镜 CGH 装调。
- (4) 以二四镜 CGH 为基准完成二四镜装调。
- (5) 以三镜 CGH 为基准完成主镜装调。

(6) 以三镜 CGH 为基准完成像面装调。

为了与实际装调情况相符合,将公差作为调整量单位。由于三镜和主镜自身空间位置对系统成像形式存在互补关系,所以不能仅通过中心视场的像差形式对整个系统进行判断,文中选取测 1 视场和 0 视场之间共选取 19 个视场的波相差,以此进行计算机辅助装调。利用 19 个视场的波像差和表 12 灵敏度矩阵计算系统空间位置调整量和调整方向,调整后测得系统波面误差 RMS 值不满足条件,如果按照图 7 的流程进行多次反复迭代,最终各元件的相互位置将接近于理论设计值。

表 12 系统实际失调量与计算结果

Tab.12 Real misalignment data and calculating value of system

Misalignment of main mirror	Real value of misalignment	Value of misalignment
$T_{\alpha,main}$	30"	28.49903"
$T_{\beta,main}$	28.0"	28.99683"
$T_{\gamma,main}$	42.0"	43.154209"
$D_{x,main}$	-0.50 mm	-0.489 311 mm
$D_{y,main}$	0.40 mm	0.416 756 mm
$D_{z,main}$	-0.08 mm	-0.081 901 mm

Misalignment of secondary-fourth mirror	Real value of misalignment	Value of misalignment
$T_{\alpha,tert}$	20"	20.997 99"
$T_{\beta,tert}$	-25"	-26.456 140"
$T_{\gamma,tert}$	-10"	-9.481 620 5"
$D_{x,tert}$	0.04 mm	0.042 821 mm
$D_{y,tert}$	-0.07 mm	-0.068 351 mm
$D_{z,tert}$	-0.03 mm	-0.024 933 mm

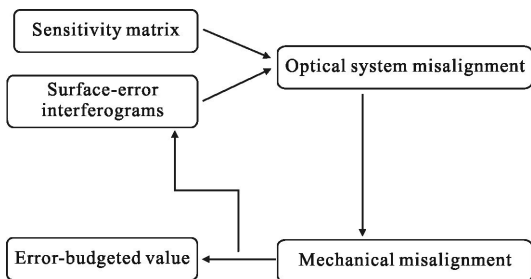


图 7 计算机辅助装调流程

Fig.7 Process of computer-aided alignment

二四镜失调主要是由三镜 CGH 和二四镜 CGH 基底面之间的传递误差造成的;在此传递误差基础上,再叠加主镜与三镜 CGH 基底面之间传递误差导致主镜失调。

2.3 装调结果

在图 8、图 9 中给出了±0.7 视场和 0 视场初装调和最终装调结果的波面误差等高图。

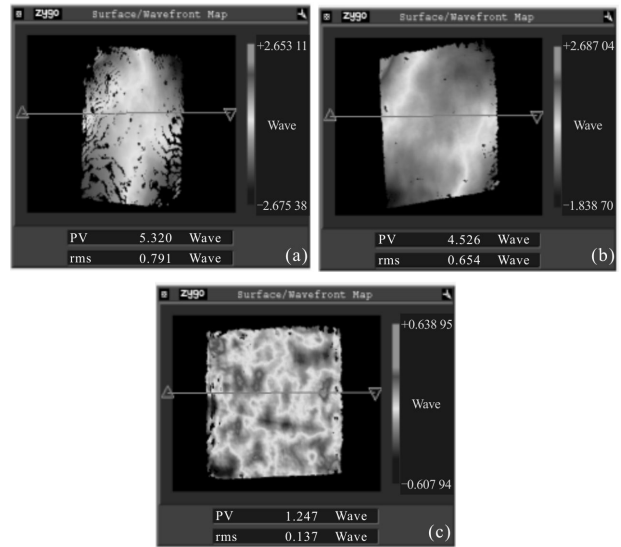


图 8 初装调时±0.7 视场和 0 视场波面误差等高图

Fig.8 ±0.7 and 0 field of view contour map of wavefront error

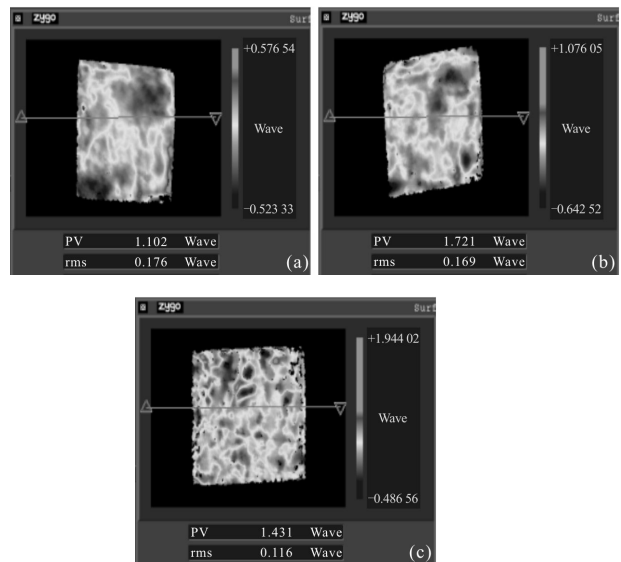


图 9 最终±0.7 视场和 0 视场波面误差等高图

Fig.9 ±0.7 and 0 field of view contour map of wavefront error

在波长为 632.8 nm 时期望装调结果和实际装调结果在表 7 中已经列出。系统全视场平均调制传递函数值 0.5237,期望全视场平均调制传递函数值为 0.5739;

而系统实际全视场平均 RMS 值 0.164 1 waves(632.8 nm) 与期望值全视场平均 RMS 值 0.148 57 waves(632.8 nm) 接近,达到指标要求(具体见表 13),也验证了文中采取的针对异形孔径自由曲面反射系统装调方法和理论的实用性和正确性。

表 13 期望装调校正值和实际装调值

Tab.13 Predicted and real alignment correction

values			
Unitary field of view	-0.4	-0.7	-1
Expectation RMS waves(632.8 nm)	0.127 7	0.154 9	0.193 4
Real RMS waves(632.8 nm)	0.133	0.169	0.211
Expectation average MTF	0.619 5	0.572	0.498
Real average MTF	0.556 4	0.521 2	0.444 2
Unitary field of view	0.4	0.7	1
Expectation RMS waves(632.8 nm)	0.127 7	0.154 9	0.193 4
Real RMS waves(632.8 nm)	0.138	0.175	0.211
Expectation average MTF	0.619 5	0.572	0.498
Real average MTF	0.568 9	0.518 3	0.444 2
Unitary field of view	0		
Expectation RMS waves(632.8 nm)	0.088		
Real RMS waves(632.8 nm)	0.116		
Expectation average MTF	0.638 5		
Real average MTF	0.599 7		

### 3 结论

文中解决了方形孔径自由曲面反射系统装调的问题,在方形域上条纹泽尼克多项式已不正交,因此用其解析波前得到的像差已不正确,因此构造方形域正交泽尼克多项式来解析波前,利用表 2 转换关系得到修正的条纹泽尼克多项式系数,用于计算机辅助装调,以其确保装调结果准确性。最终系统 MTF 与波面误差 RMS 值与理论值接近,证明此装调方法是正确的,并且适用于其他形状孔径自由曲面光学系统装调。

### 参考文献:

[1] Wang Lingjie, Zhang Xin, Zhang Jianping, et al. Free-form surface space optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(6): 1040-1046. (in Chinese)

王灵杰,张新,张建萍,等.自由曲面空间光学系统设计研究[J].*应用光学*,2012,33(6):1040-1046.

- [2] Li Mengyang, Li Dahai, Wang Qionghua, et al. Wavefront reconstruction with orthonormal polynomials in a square area [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (11): 1108011-1-8. (in Chinese)  
李萌阳,李大海,王琼华,等.用方形区域内的标准正交多项式重构波前[J].*中国激光*,2012,39(11):1108011-1-8.
- [3] Mahajan Virendra N. Orthonormal aberration polynomials for anamorphic optical imaging systems with circular pupils [J]. *Applied Optics*, 2012, 7(51): 4087-4091.
- [4] Zhang Xin, Zheng Ligong, He Xin, et al. Design and fabrication of imaging optical system with freeform surface [C]//SPIE, 2012, 8486: 848607.
- [5] Zhu Shiyu, Zhang Xin, Li Wei. Alignment of off-axis TMA system by combing computer aided adjustment and traditional benchmark pass method [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 571-575. (in Chinese)  
朱时雨,张新,李威.计算机辅助装调与传统基准传递技术相结合实现三镜消像散系统的装调 [J].*中国光学*,2011,4(6):571-575.
- [6] Liu Jianfeng, Long Funian, Zhang Wei. Study on computer-aided alignment method of off-axis three-mirror system [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(5): 571-576. (in Chinese)  
刘剑峰,龙夫年,张伟.离轴三镜系统计算机辅助装调方法研究[J].*光学技术*,2004,30(5):571-576.
- [7] Weisstein E W. Gram-schmidt orthonormalization [Z]. 2012 Form Math World-A Wolfram WEB Resource.
- [8] Li Qingyang, Wang Nengchao, Yi Dayi. Numerical Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)  
李庆扬,王能超,易大义.数值分析 [M].北京:清华大学出版社,2008.
- [9] Yang Xiaofei, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(3): 270-274. (in Chinese)  
杨晓飞,张晓辉,韩昌元. Zemax 在离轴三反射镜系统计算机辅助装调中的应用[J].*光学精密工程*,2004,12(3):270-274.
- [10] Zhang Bin, Han Changyuan. Study on optimization of computer-aided alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21 (1): 54-58. (in Chinese)  
张斌,韩昌元.离轴非球面三反射镜光学系统装调中的计算机优化方法的研究[J].*光学学报*,2001,21(1):54-58.