

基于矢量波像差理论的两镜系统装调技术研究

孔小辉^{1,2} 樊学武¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 针对含有离轴非球面的两镜光学系统,利用三阶矢量波像差理论建立了离轴抛物面主镜的波像差模型和系统内失调量与波像差泽尼克多项式系数的关系模型。在对复杂光学系统的粗装调完成后,利用高精度的自准干涉检测以得到系统各个视场的干涉图,处理后得到系统的波像差,并以泽尼克多项式系数表示;对比理想系统的波像差得到系统波像差的变化量,代入失调模型中,计算出系统元件失调量,以此为依据对系统进行调整。以无遮拦、大口径、长焦距离轴二镜光学系统为模型进行了仿真计算,结果表明,基于矢量波像差理论的计算机辅助装调技术可行,并可用于大型光学系统的装调。

关键词 光学设计;应用光学;计算机辅助装调;矢量波像差;泽尼克多项式系数;离轴抛物面

中图分类号 V556.5

OCIS 220.1140, 220.4830

文献标识码 A

Alignment of Two-Mirror Aspherical Optical System Based on Vector Aberration Theory

Kong Xiaohui^{1,2} Fan Xuewu¹

¹Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Xi'an, Shaanxi 710119, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract In order to solve the problems in the alignment of the off-axis aspherical optical system, the relationship between system wavefront aberration and Zernike coefficient is investigated based on vector aberration theory. The model of off-axis paraboloidal mirror and misalignment optical system is built. By collecting interferograms of several fields of optical system by means of autocollimating interferometry, the Zernike coefficient of coma and astigmatism can be obtained from those interferograms. Compared with the coefficients calculated by the software, the changes of the Zernike coefficients are obtained and the misalignment values of the system are then calculated with the model. The feasibility of this model using the CODE V software is analyzed. The results demonstrate that the alignment scheme is feasible and guidable to the alignment of complex optical system.

Key words optical design; applied optics; computer-aided alignment; vector aberration; Zernike polynomial coefficient; off-axis paraboloid

1 引言

近年来,随着计算机辅助研磨与抛光技术的发展,离轴非球面得到了广泛的应用。长焦距、大视场大口径的反射相机系统越来越广泛地用于空间对地观测,如 R-C 系统、卡塞格林系统及三镜消像散系统(TMA)等。随着计算机及相关光学软件的开发,这些光学系统的设计已经不再是一个难题,但是对这类系统的装调却不容易。原因之一是球面只有唯一的光轴,且离轴系统中光轴常在镜面之外,另一个原因是以零彗差作为找到光轴的条件时,可能会在全视场范围内引入离轴像差,如彗差、像散等^[1~3]。与同轴系统相比,离轴系

收稿日期: 2010-02-26; 收到修改稿日期: 2010-04-01

作者简介: 孔小辉(1985—),男,硕士研究生,主要从事光学检测和计算机辅助装调等方面的研究。

E-mail: xhkong@opt.ac.cn

导师简介: 樊学武(1972—),男,博士,研究员,主要从事光学设计,光学检测,光学装调等方面的研究。

E-mail: 3076048309@sina.com

统的装调问题成为系统成像质量好坏的一个重要环节,依靠装调人员的经验来装调已经不切合实际。计算机辅助装调正是针对传统装调方法不可视、不定量、随机成分多、装调周期长等缺点而提出的一种新的装调方法,它能定量地给出失调量,从而指导装调过程。

计算机辅助装调要用到干涉检测技术。高准确度的干涉检测技术使系统性能的检测准确度优于 $\lambda/100$ 水平,干涉检测的结果可以反映系统当前的像差特性。自 R. A. Buchroeder 于 1976 年在 R. V. Shack 等首先提出的矢量形式波像差的基础上发展了三阶矢量波像差,随后又由 R. V. Shack 等对此进行了更深入的研究和发展^[4~7],使描述非对称系统中的像差特性成为可能。通过矢量波像差理论与干涉检测技术的结合,可以得到系统内部各元件的偏差,从而可用于指导光学系统的装调。国内近年来也对计算机辅助装调技术进行了研究^[8~13]。

本文以矢量波像差的三阶像差理论为基础,利用系统波像差与泽尼克系数的关系式,引入系统各元件的失调参量,以离轴平行光管光学系统为数学模型,利用 CODE V 软件和自编程序对该模型进行了仿真分析,并对仿真结果进行了分析。

2 光学系统的矢量波像差数学模型

根据 Buchroeder^[4]的矢量波像差理论,理想对称光学系统的三阶波像差在极坐标下为

$$W_{\text{system}} = \sum_j (W_{040j}\rho^4 + W_{131j}H\rho^3 \cos \varphi + W_{220j}H^2\rho^2 + W_{222j}H^2\rho^2 \cos^2 \varphi + W_{311j}H^3\rho \cos \varphi), \quad (1)$$

式中 H 和 ρ 为归一化的视场和瞳坐标; φ 为任意选择的子午平面的瞳方位角; j 为光学系统中光学元件的表面数。各项系数分别代表球差、彗差、场曲、像散和畸变。在将 H 和 ρ 用矢量代替后,得到矢量表示的三阶波像差表示式

$$W_{\text{system}}(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}) = \sum_j [W_{040j}(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^2 + W_{131j}(\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho})(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + W_{220j}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + W_{222j}(\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho})^2 + W_{311j}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho})]. \quad (2)$$

在笛卡尔坐标系下,视场矢量 \mathbf{H} 在 X 和 Y 方向的分量分别为 x 和 y ;瞳矢量 $\boldsymbol{\rho}$ 在 X 和 Y 方向的分量分别为 $\rho \sin \varphi$ 和 $\rho \cos \varphi$,根据波像差的矢量乘法定义,对其三阶波像差的矢量式进行变换,可得到

$$\begin{aligned} W_{\text{system}} = & W_{040}\rho^4 + W_{131}(x\rho^3 \sin \varphi + y\rho^3 \cos \varphi) + W_{222}\left[xy\rho^2 \sin 2\varphi + \frac{y^2 - x^2}{2}\rho^2 \cos 2\varphi + \frac{y^2 - x^2}{2}\rho^2\right] + \\ & W_{220}(x^2 + y^2)\rho^2 + W_{311}[(x^3 + xy^2)\rho \sin \varphi + (y^3 + x^2y)\rho \cos \varphi] = \\ & \left(\frac{W_{220}}{4} + \frac{W_{222}}{2}\right)(x^2 + y^2) - \frac{W_{040}}{3} + \left[W_{311}(y^3 + x^2y) + \frac{2W_{131}}{3}y\right]\rho \cos \varphi + \\ & \left[W_{311}(x^3 + xy^2) + \frac{2W_{131}}{3}x\right]\rho \sin \varphi + \left[\left(\frac{W_{220}}{4} + \frac{W_{222}}{2}\right)(x^2 + y^2) - \frac{W_{040}}{3}\right](2\rho^2 - 1) + \\ & W_{222}\frac{y^2 - x^2}{2}\rho^2 \cos 2\varphi + W_{222}xy\rho^2 \sin 2\varphi + \\ & \frac{W_{131}}{3}y(3\rho^3 - 2\rho)\cos \varphi + \frac{W_{131}}{3}x(3\rho^3 - 2\rho)\sin \varphi + \frac{W_{040}}{6}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1). \end{aligned} \quad (3)$$

在文献[3~6]中均指出,系统元件的失调并不影响系统波像差中的球差项。光学元件的失调主要引起的是彗差和像散项,为简化分析过程,在考虑系统波像差时,仅考虑彗差和像散项。在系统内元件失调时,系统的彗差和像散的矢量波像差式为^[9]

$$W_{\text{coma}} = W_{131j}(\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho})\rho^2 - W_{131j}(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})\rho^2, \quad (4)$$

$$W_{\text{ast}} = \frac{1}{2}W_{222}H^2 \cdot \boldsymbol{\rho}^2 - W_{222}H^2 \cdot \boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}^2 + \frac{1}{2}W_{222}\boldsymbol{\rho}^2 \cdot \boldsymbol{\rho}^2, \quad (5)$$

式中 $\boldsymbol{\rho}$ 表示各面像差场与系统理想对称状态时的偏离量。在系统状态一定时 W_{222} , W_{131} 和 $\boldsymbol{\rho}$ 均为常量。其偏离量与该面(或该组件)的倾斜或偏心都有关系,在较小量的倾斜或偏心情况下, $\boldsymbol{\rho}$ 可认为与倾斜或偏心量为线性关系,因此可以定义矢量 $\boldsymbol{\sigma}$ 对 W_{222} 在 x, y 方向的分量 σ_x, σ_y 分别为 $M_1 D_x + M_2 T_y$ 和 $M_3 D_y + M_4 T_x$, 对于 W_{131} 在 x, y 方向的分量 σ_x, σ_y 分别为 $M_5 D_x + M_6 T_y$ 和 $M_7 D_y + M_8 T_x$, D_x, D_y, T_x, T_y 分别为该面沿 x

与 y 方向相对于主光线的偏心与倾斜,代入(4),(5)式后可得到彗差、像散与系统的波像差表达式为

$$W_{\text{coma}} = W_{131}(x\rho^3 \sin \varphi + y\rho^3 \cos \varphi) - W_{131}\sigma_x(\rho^3 \sin \varphi) - W_{131}\sigma_y(\rho^3 \cos \varphi), \quad (6)$$

$$W_{\text{ast}} = W_{222}[xy\rho^2 \sin 2\varphi + (y^2 - x^2)\rho^2 \cos 2\varphi] - [(W_{222}\sigma_x y + W_{222}\sigma_y x)\rho^2 \sin 2\varphi + (W_{222}\sigma_x x + W_{222}\sigma_y y)\rho^2 \cos 2\varphi] + W_{222}[\sigma_x \sigma_y \rho^2 \sin 2\varphi + (\sigma_x^2 - \sigma_y^2)\rho^2 \cos 2\varphi], \quad (7)$$

$$W_j = W_{222} \left[\frac{y^2 - x^2}{2} + (M_1 D_x + M_2 T_y)x - (M_3 D_y + M_4 T_x)y - \frac{(M_1 D_x + M_2 T_y)^2 - (M_3 D_y + M_4 T_x)^2}{2} \right] \times \rho^2 \cos 2\varphi + W_{222} [xy - (M_1 D_x + M_2 T_y)y - (M_3 D_y + M_4 T_x)x - (M_1 D_x + M_2 T_y)(M_3 D_y + M_4 T_x)] \times \rho^2 \sin 2\varphi + W_{131}/3[y - (M_7 D_y + M_8 T_x)](3\rho^3 - 2\rho) \cos \varphi + W_{131}/3[x - (M_5 D_x + M_6 T_x)](3\rho^3 - 2\rho) \sin \varphi. \quad (8)$$

对于系统的波像差又可用泽尼克多项式进行描述

$$W = \sum_j \left\{ \left[\sum_i C_i^j(x, y) \right] \cdot Z_i(\rho, \varphi) \right\}, \quad (9)$$

式中 Z_i 为泽尼克多项式, i 为泽尼克多项式的项数, $C_i^j(x, y)$ 为 Z_i 的系数, 是视场坐标 (x, y) 的函数, j 表示系数与视场相关性的幂数, J 为光学系统中光学元件表面数。

系统的波像差可以通过干涉检测得到, 其波像差用 Fringe 泽尼克多项式时, 多项式各项及其含义如表 1 所示。由此得到系统各视场位置与系统 Fringe 泽尼克系数之间的矩阵关系式。

表 1 三阶像差的泽尼克多项式对应的像差项

Table 1 Aberrations corresponding to the first nine Zernike terms

Term	Fringe Zernike polynomial	Aberration name
1	1	Piston or bias
2	$\rho \cos \varphi$	Tilt x
3	$\rho \sin \varphi$	Tilt y
4	$2\rho^2 - 1$	Power
5	$\rho^2 \cos 2\varphi$	Astigmatism 0° or 90°
6	$\rho^2 \sin 2\varphi$	Astigmatism 45°
7	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \varphi$	Coma X
8	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \varphi$	Coma Y
9	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Primary spherical

F 对于代表系统像散和彗差的三阶像差系数, 依据表 1 的关系可建立失调光学系统失调量、视场、波像差与泽尼克系数之间的矩阵关系式。令 $\alpha_1 = W_{222}(M_1 \Delta D_x + M_2 \Delta T_y)$, $\alpha_2 = W_{222}(M_3 \Delta D_y + M_4 \Delta T_x)$, $\alpha_3 = -W_{222}/2[(M_1 \Delta D_x + M_2 \Delta T_y)^2 - (M_3 \Delta D_y + M_4 \Delta T_x)^2]$, $\alpha_4 = W_{222}(M_1 D_x + M_2 T_y)(M_3 D_y + M_4 T_x)$, $\beta_1 = W_{131}/3(M_5 D_x + M_6 T_y)$, $\beta_2 = W_{131}/3(M_7 D_y + M_8 T_x)$, 有

$$\begin{bmatrix} C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y^2 - x^2}{2} & x & -y & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ xy & -y & -x & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{x}{3} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{y}{3} & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{222} \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ W_{131} \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

根据(10)式的对应关系, 针对光学元件失调所主要反映出像散和彗差的产生, 对于代表系统像散和彗差的三阶波像差系数, 可建立理想情况下光学系统的视场坐标、波像差与泽尼克系数之间的矩阵关系式

$$\begin{bmatrix} C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x^2 - y^2}{2} & 0 \\ xy & 0 \\ 0 & \frac{x}{3} \\ 0 & \frac{y}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{m222} \\ W_{m131} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

离轴情况下理想系统的波像差模型会随离轴量变化,但实际上泽尼克系数各项的变化规律并不相同,经软件仿真计算得知,像散系数随离轴量变化,且为线性变化,与像差方向相关,但彗差系数不变,所以建立离轴时的像差模型为

$$\begin{bmatrix} C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x^2 - y^2}{2} + M_1 P_y & 0 \\ xy + M_2 P_x & 0 \\ 0 & \frac{x}{3} \\ 0 & \frac{y}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{m222} \\ W_{m131} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 P 为离轴量, x, y 为视场坐标, W_{m222}, W_{m131} 分别为主镜波像差的像差和彗差项系数。

主镜为抛物面,相对孔径 1/10,口径为 1000 mm,离轴量为 -850 mm。各系数经计算得

$$W_{m222} = 0.000186; W_{m131} = -0.04494; M_1 = -0.498701; M_2 = 0.499597.$$

将各系数代入(12)式,数值模型与光学软件计算结果相比较可验证模型准确性,如表 2 所示。

表 2 数值模型与光学软件计算结果比较

Table 2 Results of numerical model versus results of software

Imagefield coordinate/mm	Zenike coefficient	Optical software	Numerical model
(-10, -10)	C_5	-0.7860	-0.7868
	C_6	0.8074	0.8067
	C_7	0.1497	0.1498
	C_8	0.1492	0.1498
(0, 10)	C_5	0.7769	0.7775
	C_6	0	0
	C_7	0	0
	C_8	-0.1492	-0.1498
(10, 0)	C_5	0.0093	0.0093
	C_6	-0.7889	-0.7882
	C_7	-0.1497	-0.1498
	C_8	0	0

对于偏轴二镜系统,当抛物面主镜在不同的离轴量时,入射光线的主光线相对于次镜的入射角度也随主镜的离轴量发生改变,等效于次镜相对与主镜入射的主光线发生了倾斜和偏心,使次镜顶点绕主镜的中心像点旋转,即次镜本身引入了 $D_y T_x$,则此时理想系统的波像差可表示为

$$\begin{bmatrix} C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x^2 - y^2}{2} + M_1 P_y & 0 \\ xy + M_2 P_x & 0 \\ 0 & \frac{x}{3} \\ 0 & \frac{y}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{m222} \\ W_{m131} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \frac{y^2 - x^2}{2} & x & -y & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ xy & -y & -x & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{x}{3} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{y}{3} & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{s222} \\ 0 \\ W_{s222} (M_{s1} D_y + M_{s2} T_x) \\ \frac{W_{222}}{2} (M_{s1} D_y + M_{s2} T_x)^2 \\ 0 \\ W_{s131} \\ 0 \\ \frac{W_{131}}{3} (M_{s3} D_y + M_{s4} T_x) \end{bmatrix} \quad (13)$$

系统装调时以主镜为基准,且只考虑次镜的偏心和倾斜,即 $\Delta D_x, \Delta D_y, \Delta T_x, \Delta T_y$,则失调量与坐标和泽尼克系数的关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta C_5 \\ \Delta C_6 \\ \Delta C_7 \\ \Delta C_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & -y & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -y & -x & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{222} (M_1 \Delta D_x + M_2 \Delta T_y) \\ W_{222} (M_3 \Delta D_y + M_4 \Delta T_x) \\ \frac{W_{222}}{2} \{ [M_3 (D_y + \Delta D_y) + M_4 (T_x + \Delta T_x)]^2 - \\ (M_1 \Delta D_x + M_2 \Delta T_y)^2 - (M_3 \Delta D_y + M_4 \Delta T_x)^2 \} \\ W_{222} (M_1 \Delta D_x + M_2 \Delta T_y) [M_3 (D_y + \Delta D_y) + M_4 (T_x + \Delta T_x)] \\ \frac{W_{131}}{3} (M_5 \Delta D_x + M_6 \Delta T_y) \\ \frac{W_{131}}{3} (M_7 \Delta D_y + M_8 \Delta T_x) \end{bmatrix} \quad (14)$$

3 数学仿真计算

3.1 仿真模型

以一个离轴两镜光学系统为例,其光学系统结构形式如图1所示。图中1,5分别为前、后密封窗;2,3分别为主镜和次镜,均为二次曲面,其中主镜为离轴抛物面,次镜为离轴双曲面;6为校正透镜组,由2片透镜组成;7为分光棱镜;8,9为系统焦面。系统焦距为 $f' = 30000$ mm,相对孔径 $D/f' = 1/30$,视场角为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,主镜为抛物面,次镜为双曲面,主镜离轴量 -850 mm。

3.2 计算流程及结果

该光学系统可以看作偏瞳使用的 R-C 系统加上校正镜,装调的关键在于主次镜的调整,两镜都为离轴使用,装调难度大,主次镜调整好后再装其他组件。仿真过程通过 CODE V 软件和自编程序完成。首先根据理论设计值得到理想状态时系统像面彗差和像散所对应的泽尼克系数,随后给次镜在 x, y 方向加入一定的偏心量和倾斜量,通过程序计算系统像面不同位置视场的波像差。依据波像差的变化量计算出次镜的各种失调状态下对应的失调系数 $M_1 \sim M_8$,将其代入(14)式,由此可得到一次像面系统的失调矩阵,系统失调矩阵的计算流程如图2所示,计算得系统中次镜失调矩阵的失调系数如表3所示。

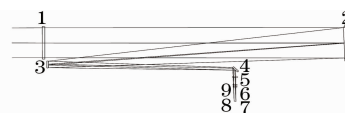


图1 平行光管光学系统

Fig. 1 Optical schematic of collimator

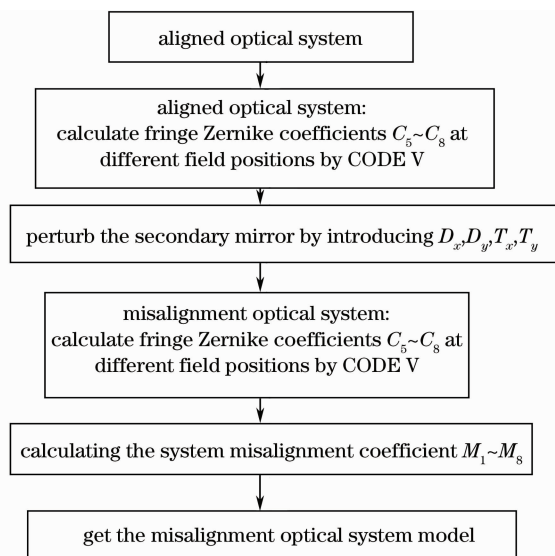


图2 系统失调系数矩阵计算流程

Fig. 2 Flow chart of calculating the system misalignment coefficient matrix

表 3 系统中次镜失调矩阵的失调系数

Table 3 System misalignment coefficient of the secondary mirror

M_1	-5.244025	$W_{131}M_5$	0.044722
M_2	-916.161069	$W_{131}M_6$	1.6550529
M_3	5.476613	$W_{131}M_7$	0.0442888
M_4	-923.83659	$W_{131}M_8$	-1.6391307
$W_{222}/10^{-5}$	0.5756		

从表 3 可以看出,该系统中次镜的倾斜对系统的彗差和像散比较敏感。将各系数代入(14)式中,对次镜引入任意失调量,经软件计算得到各视场位置坐标下的波像差系数,将泽尼克系数的变化量代入失调模型中,通过计算解出失调值,对次镜状态进行调整。计算得出次镜的失调量如表 4 所示。系统失调后的调制传递函数(MTF)和根据计算值调整后的系统 MTF 如图 3 所示。

表 4 实际失调量与计算结果的比较

Table 4 Comparison of misalignment data and calculation result data

		Misalignment data	Calculation result
Secondary mirror	$\Delta D_x/\text{mm}$	0.50	0.4994969
	$\Delta D_y/\text{mm}$	0.05	0.0503093
	$\Delta T_x/(\text{^\circ})$	0.08	0.0800504
	$\Delta T_y/(\text{^\circ})$	0.10	0.1000379

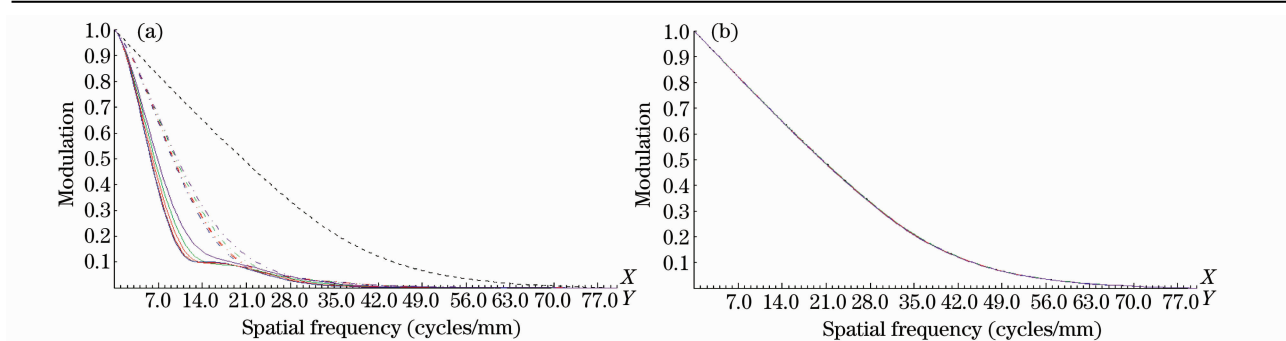


图 3 (a)系统失调时的 MTF;(b)系统调整后的 MTF

Fig. 3 MTF of misalignment system (a) versus MTF of aligned system (b)

通过仿真结果可以看出,该方法对系统失调量的计算有相当好的近似。若将装调过程中的系统波像差通过高准确度的干涉检测技术获得,即可将其用于含有大口径非球面光学系统的装调,并能获得接近设计水平的系统性能。在实际装调中,各个状态的调整有一定的先后次序,这样才能保证装调效果最佳,先后次序的确定依据失调状态与像差的相关程度和对像差影响的大小来判定,原则上失调量与多个像差相关的或是对像差影响系数大的先进行调整。

4 结 论

本文以矢量波像差理论为基础,利用 CODE V 光学设计软件,结合泽尼克多项式,建立了离轴抛物面波像差模型和系统不同视场波像差与系统内部元件失调量的数学模型,利用该模型求解出的系统次镜失调量与随机加入的失调量吻合得相当好。仿真结果表明,基于该方法的装调方案可行,装调中用高准确度的干涉检测技术获得装调中系统的波像差,即可将其用于含有大口径非球面光学系统的装调,并获得优异的像质。但是本文未考虑系统像质干涉检测过程中引入的误差,即干涉仪检测点位置、元件支撑面型变化、环境因素如空气扰动和振动等,这些误差对模型的影响需要进一步的研究,在实际的检测过程中需要详细考虑。

参 考 文 献

- 1 Y. Ho-soon, L. Yun-Woo, E. D. Kin *et al.*. Alignment methods for cassegrain and RC telescope with field of view [C]. *SPIE*, 2004, **5528**: 334~341

- 2 J. W. Figoski, T. E. Shrode, G. F. Moore. Computer aided alignment of a wide-field, three-mirror, unobscured, high-resolution sensor [C]. *SPIE*, 1989, **1049**: 166~171
- 3 Zhang Wei, Liu Jianfeng, Long Funian *et al.*. Study on compensation relationships among the elements in off-axis three-mirror system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1160~1164
张 伟, 刘剑峰, 龙夫年 等. 离轴三镜系统光学元件间补偿关系研究 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1160~1164
- 4 R. A. Buchroeder. Tilted Component Optical Systems [D]. Tucson: University of Arizona. 1976
- 5 R. V. Shack, K. P. Thompson. Influence of alignment errors of a telescope system on its aberration field [C]. *SPIE*, 1980, **251**: 146~153
- 6 T. S. Turne. Vector aberration theory on a spreadsheet: analysis of tilted and decentered systems [C]. *SPIE*, 1992, **1752**: 184~195
- 7 K. P. Thompson. A graphic approach to the analysis of perturbed optical systems [C]. *SPIE*, 1980, **237**: 127~134
- 8 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
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
- 9 Che Chicheng, Li Yingcai, Fan Xuewu *et al.*. Research on computer aided alignment based on vector aberration theory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1630~1634
车驰骋, 李英才, 樊学武 等. 基于矢量波像差理论的计算机辅助装调技术研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1630~1634
- 10 Yang Xiaofei, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system by using gradual aberration optimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 115~120
杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元. 用像差逐项优化法装调离轴三反射镜光学系统 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 115~120
- 11 Liu Zhixiang, Ma Dongmei, Tian Yuan *et al.*. Computer-aided alignment method based on DDE interface technique [J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, **30**(3): 486~490
刘志祥, 马冬梅, 田 园 等. 基于 DDE 接口技术的计算机辅助装调方法 [J]. *应用光学*, 2009, **30**(3): 486~490
- 12 He Xu, Wu Guodong, Han Bing. Study of large-diameter, long focal length collimator assemble technical [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(5): 781~784
何 煦, 吴国栋, 韩 冰. 大口径、长焦距平行光管装调技术研究 [J]. *光学技术*, 2009, **35**(5): 781~784
- 13 Shi Yali, Gao Yunguo, Deng Weijie. Model for computer-aided alignment of reflective optical system [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(4): 427~430
史亚莉, 高云国, 邓伟杰. 反射光路的计算机辅助装调模型 [J]. *激光与红外*, 2009, **39**(4): 427~430