

文章编号 1004-924X(2003)02-0144-07

离轴照明 Schwarzschild 投影物镜的计算机辅助装调方法

林 强, 金春水, 向 鹏, 曹健林

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要:介绍计算机辅助装调方法在离轴照明 EUVL 光学系统中的应用, 阐述了一种基于奇异值分解(SVD)的牛顿迭代法来求解失调量。利用该方法对敏感矩阵进行分解, 从中分析得到影响不同像差的结构参数的敏感性, 并筛选出补偿器, 求出相应失调量的大小。在此基础上进行多次模拟装调, 证明各种情况都是收敛的, 可以实现精密装调的目的。

关键词:极紫外投影光刻; 光学系统装调; 奇异值分解

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

Computer-aided alignment of Schwarzschild objective with off-axis illumination

LIN Qiang, JIN Chun-shui, XIANG Peng, CAO Jian-lin

(The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: The application of computer-aided alignment in Schwarzschild objective system with off-axis illumination is described and a Newton's method based on the singular value decomposition (SVD) was used to calculate the value of misalignment. With the use of SVD to decompose the sensitivity matrix, the sensitivity of the configuration was obtained for the aberration and the compensators were selected from the configuration. The simulation alignments were carried out in this way on a large number of random misalignments and all of them were converged.

Key words: EUVL; optical system alignment; singular value decomposition

1 引言

在电子信息产业发展过程中, 集成电路技术在计算机系统、通信设备、现代化工业应用和人们的日常生活等许多领域都发挥越来越重要的作用。迫切需要特征尺寸小、集成度高的集成电路芯片。表 1^[1]反映了动态随机存储器(DRAM)的发展历程及趋势。每隔 3 年集成电路的集成度增加 4 倍, 特征尺寸缩小 0.7 倍。据 SIA (semicon-

ductor industry association) 统计表明, 极紫外投影光刻(extreme ultraviolet lithography 简称 EUVL)是制作特征尺寸为 0.1 μm 以下的超大规模集成电路的主导技术之一^[2-3]。

表 1 DRAM 发展历程及趋势

Tab. 1 Development and trend of DRAM

	1992	1995	1998	2001	2004	2007	2010
特征尺寸/ μm	0.5	0.35	0.25	0.18	0.13	0.1	0.07
晶体管数/片 (bit)	16 M	64 M	256 M	1 G	4 G	16 G	64 G

收稿日期: 2002-10-17; 修订日期: 2003-01-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 69938020); 中国科学院创新基金项目

为了满足高精度的成像质量要求,许多光学系统要求达到近衍射极限的分辨率。根据 Rayleigh $\lambda/4$ 原则和 Marechal 条件,其综合波像差(wave front error 简称 WFE)分别为: $\delta = \lambda/4$ 峰谷值(peak to valley 简称 P-V), $\sigma = \lambda/14$ 均方根值(root mean square 简称 RMS)。对于 EUVL 光刻系统,为了满足近衍射极限的分辨率,在使用波长 $\lambda = 13.4 \text{ nm}$ 时要求的最终波像差达到 1 nm RMS 值。这么高的精度,对光学系统的设计、加工和装调等技术都提出了空前的挑战。

光学设计软件的不断完善,加工技术特别是非球面加工和检测技术的提高,使设计制造上述系统成为可能。在光学设计及元件加工精度满足要求的条件下,实现光学系统高质量成像的关键是保证各光学机械组装后整个系统的装调和调整的精确性。传统的装调方法很难满足这么高精度的设计要求。

光学系统的计算机辅助装调技术是随着光学技术的发展、光学系统复杂化和为了满足系统高精度要求而提出和发展的。它利用计算机的强大处理和运算能力,从而辅助光学系统的高精度装调。这一工作早在 20 世纪 80 年代初就有许多公司提出并发展应用,如美国的 Eastman Kodak^[4]、Itek 公司^[5]、德国的 Zeiss 公司^[6-7]等。尤其在近几年,美国、日本等国将该技术应用到 EUVL 系统中,并取得了较理想的效果^[8-12]。

在此将介绍计算机辅助装调方法在离轴照明的 EUVL 光学系统中的应用。应用光学设计软件来求解结构参数对波像差的敏感矩阵,利用奇异值分解(singular value decomposition 简称 SVD)方法对敏感矩阵进行分解,从中分析影响各种像差的结构参数的敏感性,去除对像差影响不敏感的结构参数,筛选出有效的补偿器,得到敏感矩阵的子矩阵,以此来求解相应失调量的大小,并进行多次模拟装调,验证了实现精密装调的可行性。

2 偏心孔径光阑离轴照明 Schwarzschild 投影物镜

为了满足更小的特征尺寸的要求,有必要逐渐

地减小光学系统的工作波长,同时设计具有更大数值孔径的光学系统。光学系统的分辨率 δ 和焦深 Δ 可以表示为

$$\delta = k_1 \lambda / NA, \quad (1)$$

$$\Delta = k_2 \lambda / (NA)^2. \quad (2)$$

k_1, k_2 是与系统控制工艺相关的,在大容量的 IC 制造(光刻)过程中,一般取值 0.6 或更大。 λ 是成像系统所使用的波长,NA 是数值孔径。从式(1)中可以看出,提高分辨率可以通过减小 λ 和提高 NA 来达到。然而,在提高 NA 的同时 Δ 却减小了,这就带来了焦深控制的困难。所以,在 Δ 控制范围有限的情况下,都采取了减小 λ 的方式。光刻系统所使用的波长,从早期使用的 i 线(365 nm),KrF(248 nm),ArF(193 nm)到下一代光刻 EUV(13.4 nm)都体现了这种趋势。

由于 EUVL 使用的波长很短,由此带来了一系列相关的技术问题,如光源技术、多层膜技术、光学加工和检测技术、光学装调技术、掩模技术以及光刻胶技术等^[10-11]。在此主要研究计算机辅助光学系统精密装调技术,并把该技术应用到 EUVL 投影物镜装调中。

已经采用计算机辅助方法装调一套由两个球面镜组成的共轴照明 Schwarzschild 投影物镜,装调后的最终波像差达 $0.025 \lambda (\lambda = 0.6328 \mu\text{m})$ ^[13-14]。

为了消除系统的中心遮拦和提高焦深,进一步设计了如图 1 所示的偏心孔径光阑离轴照明方式 Schwarzschild 投影物镜。该投影物镜是由两个球面镜组成,像方数值孔径 $NA = 0.08$,微缩比为 10:1。每个镜面上镀上中心波长为 13.4 nm 的 Mo/Si 反射多层膜。系统设计参数见表 2。

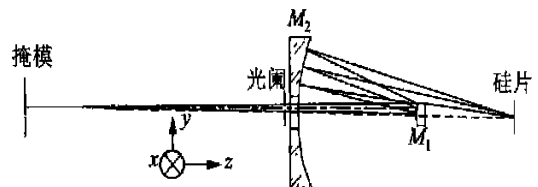


图 1 偏心孔径光阑离轴照明 Schwarzschild 投影物镜

Fig.1 Schematic diagram of Schwarzschild objective with eccentric aperture and off-axis illumination

表 2 系统设计参数

Tab.2 Configuration of system

微缩比	0.1
数值孔径 NA	0.08
物距(mm)	229.5
两镜间距(mm)	69.5
像距(mm)	126.5
主镜 M_1	$D = \varphi 12 \text{ mm}, r = 31.48 \text{ mm}$
次镜 M_2	$D = \varphi 78 \text{ mm}, r = 101.1 \text{ mm}$
设计残差	$0.071 \lambda \text{ RMS} (\lambda = 13 \text{ nm})$

如上所述,微缩投影物镜需要极高的光学装调精度;同时,反射镜各自由度对光学系统波像差的贡献比较复杂,需要采用计算机辅助装调技术。它是通过装调过程中对微缩投影物镜出瞳位置波面的检测,计算出反射镜的失调量,从而指导系统的精密装调。装调流程如图 2 所示。

3 计算机辅助装调的数学模型

3.1 系统的像差向量和敏感矩阵

光学系统的性能可用出瞳位置的波像差来描述,把波像差分解为 Zernike 系数形式就构成了波像差向量 Z 。由光学系统结构参数向量和波像差向量构成的函数关系 $Z = Z(X)$,建立了波像差的数学模型。

描述系统最佳成像质量就是使 $\|Z\|$ 最小,所以找到一种结构形式 X 使 $\|Z\|$ 最小就等同于优化光学设计的过程。由于 $Z(X)$ 和 X 的非线性以及结构参数之间的互相关性,在用最小二乘法求解 $\|Z\|$ 最小时存在不适定问题,即会有许多近似解。 $Z(X)$ 和 X 的非线性需要在求解过程中反复迭代,不利于装调过程尽快收敛;结构参数之间的互相关性增加了装调过程的不确定性。基于 SVD 的牛顿迭代法能够很好地解决这个问题。

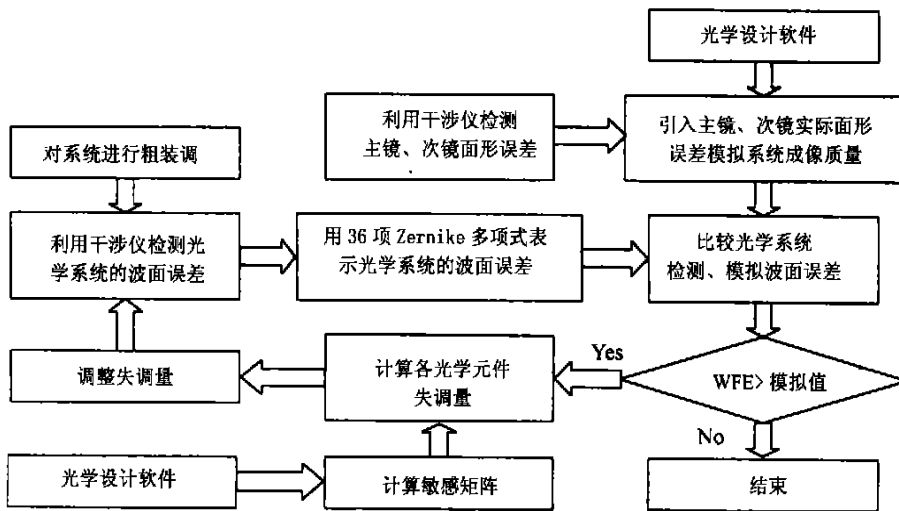


图 2 Schwarzschild 微缩投影物镜计算机辅助装调流程图

Fig.2 Flow chart of computer aided alignment of Schwarzschild objective

假定找到原始结构参数的一个微小失调量 δX ,使系统的波像差为零,即 $Z(X + \delta X) = 0$,用 Taylor 公式展开:

$$Z(X + \delta X) = Z(X) + J \cdot \delta X + O(\delta X^2), \quad (3)$$

其中: J 就是 $n_z \times n_x$ 敏感矩阵。 n_z 为 Zernike 系数项数,即 Z 的维数; n_x 为结构调整的自由度。 $J_{ij} = \partial Z_i / \partial X_j$, $i = 1, 2, \dots, n_z; j = 1, 2, \dots, n_x$ 。用牛顿迭代法(忽略高次项)求解上式,即:

$$J \cdot \delta X = -Z(X), \quad (4)$$

在式(4)中,由于忽略了高次非线性项,所以需要多次迭代求解 δX 。

3.2 矩阵的奇异值和奇异值分解^[15]

设 $m \times n$ 矩阵 A ,存在 m 阶酉矩阵 U 和 n 阶酉矩阵 V ,使得

$$U^T A V = \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中对角矩阵 $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$, 而 $\sigma_i (i = 1, 2, \dots, r)$ 为矩阵 A 的全部非零奇异值。

$$\text{则 } A = U \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^T$$

上式即为 A 的奇异值分解。

奇异值矩阵 A 的奇异值分解的求解过程:

计算 Hermite 矩阵 $A^T A$ 的特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r > \lambda_{r+1} = \dots = \lambda_n = 0$, 特征向量, 由此得到 Σ 。

$$\text{由 } V^T(A^T A)V = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ 计}$$

算得到 V 。

$$\text{由 } U^T(A^T A)U = \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ 计算得到 } U。$$

3.3 敏感矩阵和失调量的计算

从式(5)可知,为了求解 δX ,首先要知道敏感矩阵 J 和波像差向量 $Z(X)$ 。

敏感矩阵可以用光学设计软件 Zemax 来进行计算。首先计算原始光学系统结构下波像差并以 Zernike 系数构成的向量 Z_0 来表示。人为对某个初始结构参数改变一个微小增量 δX_i , 计算出 Zernike 系数 Z_i , 其变化量 $\delta Z_i = Z_i - Z_0$, 则相应的 $J_y = \delta Z_i / \delta X_i$ 。对每一个参数都按这一方法进行计算即可得到敏感矩阵 J 。

用干涉仪检测装调后系统的波像差,得到以 Zernike 系数表示的波像差向量 $Z(X)$ 。

在已知敏感矩阵 J 和波像差向量 $Z(X)$ 的情况下,对式(5)近似线性方程组求解,即得校正量 δX 。但是由于敏感矩阵 J 是奇异矩阵,求解过程需要对它进行 SVD 分解。根据“3.2”条定义,设敏感矩阵 J 的 SVD 分解表示为

$$J = UWV^T, \quad (5)$$

其中: U 、 V 是列正交向量,它们的列分别代表波像差奇异值向量和结构参数奇异值向量。 W 是包含相应奇异值对角矩阵,且这些奇异值按照递减排列; $\omega_1 \geq \omega_2 \geq \dots \geq \omega_n \geq 0$, 其中 ω_i 是第 i 个奇异值。

由式(5),且 U 、 V 是列正交向量得:

$$Jv_i = \omega_i u_i, \quad (6)$$

表 4 敏感矩阵

Tab. 4 Sensitivity matrix

各种 WFE (Zernike 系数)	Ob- Δz	M ₁ - Δx	M ₁ - Δy	M ₁ - Δz	Im- Δz
离焦(No.4)	9.20	-1.03	-77.79	-2255.91	1011.80
沿 y 方向彗差(No.7)	0	-92.28	0	0	0
沿 x 方向彗差(No.8)	2.66	-0.1544	-51.98	-652.49	293.58
球差(No.9)	-0.97	0.13	-30.60	235.88	-101.34

u_i 、 v_i 分别是 U 、 V 第 i 列向量。奇异值 ω_i 代表了对结构参数作单位调整时波像差的变化量; ω_i 越大, v_i 的调整对波像差 u_i 的影响越大,也就是越敏感。图 4 画出了 v_i 和 u_i 以及 ω_i 对应关系。

由式(5)、(6)即得失调量向量 δX :

$$\delta X = -V \frac{1}{W} U^T Z(X), \quad (7)$$

4 调整像差和补偿器的选择

一般地,按照各个光学元件的平移和旋转定义光学系统的结构参数。每个光学元件都有 5 个刚体自由度,分别为:绕 x 、 y 轴的旋转量 θ_x 、 θ_y , 沿着每个坐标轴的平移量 Δx 、 Δy 、 Δz 。

对于选用的 Schwarzschild 系统中的两个球面来说,旋转 θ_x 、 θ_y 分别和平移 Δy 、 Δx 相当,所以只要采用 Δx 、 Δy 、 Δz 或 θ_x 、 θ_y 、 Δz 三个参数就可定义其结构参数。在装调中,固定 M_2 , 先假定以表 3 所示结构参数作为补偿器。

表 3 预选补偿器

Tab. 3 Preselected compensators

补偿器序号	预选补偿器
No.1	Object- Δz
No.2	M ₁ - Δx
No.3	M ₁ - Δy
No.4	M ₁ - Δz
No.5	Image- Δz

在装调系统过程中,由于高级像差始终不变,所以只须校正初级像差。该系统只采用单一波长 $\lambda = 13 \text{ nm}$, 而且是全反射系统,所以不存在色差部分。像面倾斜对于小视场来说不影响系统的成像质量,所以不予考虑。系统中只要校正了彗差,像散也就得以校正。因此选择离焦、彗差和球差作为校正对象。

首先按第 3 条描述来计算敏感矩阵 J ,如表 4 所示。结构参数的调整单位为 mm。

然后对敏感矩阵 J 进行奇异值分解,得到的结果如图 3 和 4 所示。

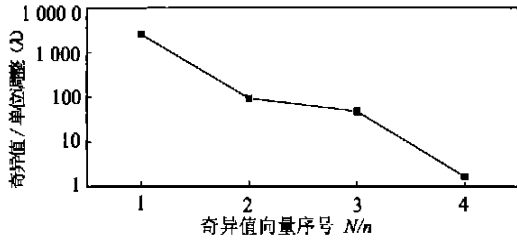


图 3 敏感矩阵的奇异值
Fig. 3 Singular values of sensitivity matrix

图 3 为敏感矩阵的奇异值。可以看出,奇异值 w 按从大到小排列,并呈急剧下降趋势。图 4 表示了像差奇异值向量和补偿器调整之间的关系。像差第 1 项离焦,第 2、3 项代表彗差,第 4 项代表球差。

补偿器 1 代表物方 Δx , 补偿器 2 代表 $M_1 - \Delta x$, 补偿器 3 代表 $M_1 - \Delta y$, 补偿器 4 代表 $M_1 - \Delta z$, 补偿器 5 代表像方 Δz 。

从图中可以看出, v_1 是最敏感的,每单位调整量(调整单位为 mm)对应 2588.1λ 奇异值,对应像差奇异向量 u_1 主要为 Zernike 系数第 4 项,即离焦,通过调整 $M_1 - \Delta z$ 来补偿。调整像方 Δz 在一定程度上也是补偿离焦,但它不如调整 $M_1 - \Delta z$ 敏感,所以考虑对它不作调整。其次是 v_2 ,每单位调整量对应 92.28λ 奇异值,对应像差奇异向量 u_2 主要为 Zernike 系数第 7 项,即沿 y 轴方向彗差项。主要通过调整补偿器 2 即 $M_1 - \Delta x$ 来补偿。同样 v_3 是通过调整 $M_1 - \Delta y$ 来补偿球差和沿 x 轴方向彗差,对应奇异值为 48.55λ 。而 v_4 就不敏感了,每单位调整量对应的奇异值仅 1.72λ ,所以不对该向量进行调整。

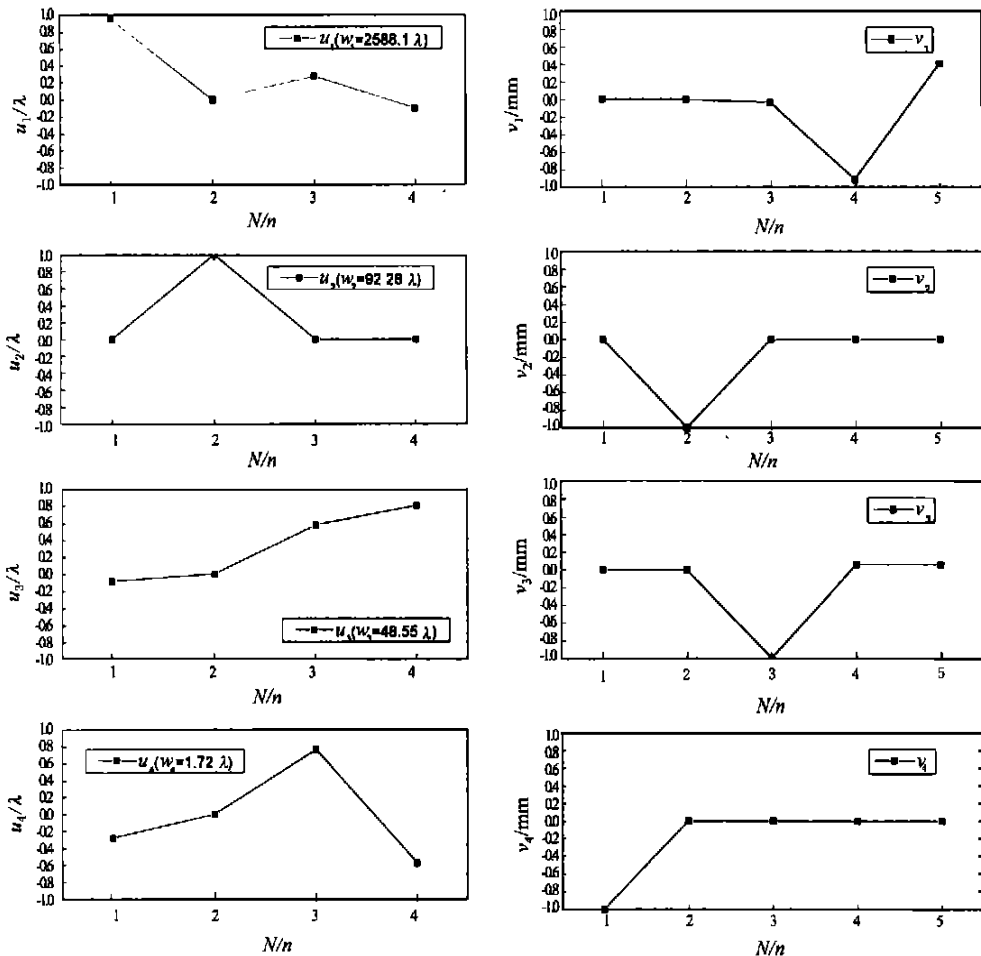


图 4 像差奇异值向量及相应结构参数奇异值向量
Fig. 4 Aberration singular vector corresponding to configuration singular vector

基于上述分析,从预选的补偿器中筛选出 $M_1 - \Delta z, M_1 - \Delta y, M_1 - \Delta x$ 作为补偿器,相应补偿系统的离焦、彗差和球差。由此得到原敏感矩阵(表 4)的子矩阵 J_{sub} :

$$J_{sub} = \begin{bmatrix} -1.03 & -77.79 & -2255.91 \\ -92.28 & 0 & 0 \\ -0.15 & -51.98 & -652.49 \\ 0.13 & -30.60 & 235.88 \end{bmatrix} \quad (8)$$

5 装调模拟

首先对(8)式的 J_{sub} 进行 SVD,得

$$J_{sub} = U_{sen} W_{sen} V_{sen}^T \quad (9)$$

其中: $U_{sen}, W_{sen}, V_{sen}$ 就是最终得到的敏感向量。

然后对结构参数给定一个较大的随机扰动,用 Zemax 软件计算像面位置波面的 Zernike 系数,得到波像差向量 $Z(X)$,按照式(7)计算失调量向量 δX :

$$\delta X = -V \frac{1}{W_{sen}} U_{sen}^T Z(X) \quad (10)$$

如图 5(a),对结构参数给定一个较大的随机扰动,产生 $278 \lambda (\lambda = 13 \text{ nm})$ 的残余误差,经四次迭代,残差控制在 $\lambda/14$ RMS 值范围内。如图 5(b),当对结构参数给定一个随机扰动产生 30λ 的残差时,只进行两次迭代,残差就控制在 $1/14 \lambda$ RMS 值范围内。进行了多次模拟实验,情况都是如此。由此说明只要结构的扰动控制在一定的范围内,用该方法总是收敛的,而且装调的初始结构越接近设计结构,则收敛速度越快。

参考文献:

[1] 金春水,王占山,曹健林.软 X 射线投影光刻原理装置的设计[J].光学精密工程,2000,8(1):66-70.
JIN CH SH, WANG ZH SH, CAO J L. The design of soft X-ray projection lithography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000,8(1):66-70. (in Chinese)

[2] HIROO K, TAKEO W. Three-aspherical-mirror system for EUV lithography[J]. *SPIE*, 1998,3331:20-31.

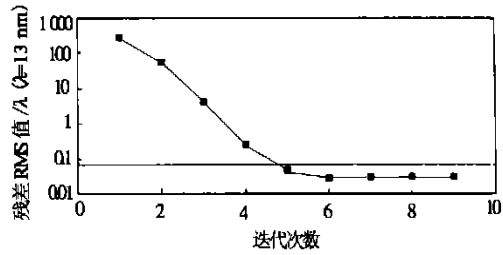
[3] TAYLOR J S, SOMMARGREN G E. Fabrication and testing of optics for EUV projection lithography[J]. *SPIE*, 1998,3331:580-590.

[4] FEHNIGER M J. Alignment of a full aperture system test of a cassagrain telescope[J]. *SPIE*, 1980,251:21-28.

[5] EGDALL I M. Manufacture of a three-mirror wide-field optical system[J]. *Optical Eng*, 1985,24 (2):285-289.

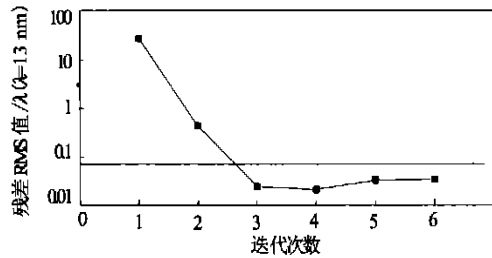
[6] BECKSTETTE K, ASCHENBACH B, SCHMIDT M. Assembly of the ROSAT flight X-ray mirror system[J]. *SPIE*, 1998, 982:2-9.

[7] SCHMIDT M, BECKSTETTE K, DINGER U, et al. An optical test and alignment method for the XMM mirror module



(a)随机扰动较大时

(a)On larger random misalignment



(b)随机扰动较小时

(b)On smaller random misalignment

图 5 残差随迭代次数的变化

Fig.5 Residual rms aberration changing with number of iterations

6 结束语

介绍了计算机辅助装调方法在离轴照明的 EUVL 光学系统中的应用。利用基于奇异值分解(SVD)的牛顿迭代法来求解失调量,并进行多次模拟装调,验证了该方法对各种失调情况都是收敛的,因而对精密装调是切实可行的。

- [J]. *SPIE*, 1989,1159:625-637.
- [8] IRIE S, WATNABE T, KINOSHITA H, *et al.* Development for the alignment procedure of three-aspherical mirror optics[J]. *SPIE*, 2000,3997:807-813.
- [9] SUGISAKI K, OSHINO T, MURAKAMI K, *et al.* Assembly and alignment of three-aspherical-mirror optics for extreme ultraviolet projection lithography[J]. *SPIE*, 2000,3997:751-756.
- [10] CHAPMAN H N, SWEENEY D W. Rigorous method for compensation selection and alignment of microlithographic optical systems[J]. *SPIE*, 1998,3331:102-113.
- [11] DESCOUR M R, WILLER M R, CLARKE D S, *et al.* EUVL projection-camera alignment methods[J]. *SPIE*, 1999, 3676:663-668.
- [12] GOLDBERG K A, NAULLEAU P P, BOKOR, *et al.* Honing the accuracy of extreme-ultraviolet optical system testing: at-wavelength and visible-light measurements of the ETS Set-2 projection optic[J]. *SPIE*, 2002,4688:329-337.
- [13] 金春水,王占山,曹健林.软 X 射线投影光刻技术[J].*强激光与粒子束*,2000,12(3):559-564.
JIN CH SH, WANG ZH SH, CAO J L. Soft X-ray projection lithography technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000,12(3):559-564.
- [14] 金春水,马月英,裴舒,等.极紫外投影光刻实验装置的集成[J].*光学 精密工程*,2001,9(5):418-423.
JIN CH SH, MA Y Y, PEI SH. *et al.* Development of an experimental EUVL system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001,9(5):418-423. (in Chinese)
- [15] 程云鹏.矩阵论[M].西安:西北工业大学出版社,2000. 225-233.
CHENG Y P. *Matrix theory* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2000. 225-233.
- 作者简介:林 强(1974 -) ,男,福建永泰人,1998年毕业于长春光学精密机械学院,现为中科院长春光机与物理研究所在读硕士,主要从事光学仪器及检测技术研究。