

文章编号 1004-924X(2014)08-2103-06

微缩投影系统的计算机辅助装调

谢 耀*, 于 杰, 王丽萍, 王 辉, 周 烽

(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 130033)

摘要:为了解决主次镜结构的微缩投影系统在计算机辅助装调过程中的补偿器耦合问题,实现补偿器的合理筛选,介绍了一种基于光学系统敏感矩阵奇异值分解的计算机辅助装调算法。建立了微缩投影系统装调模型,针对算法和模型开展了计算机辅助装调实验。用光学软件 CODE V 建立了光学系统模型,采用零位补偿器检测获得了非球面元件面形;基于灵敏度矩阵的分析结果指导微缩投影系统优化,并将优化后的结构参数作为系统光机结构机械装配和定位的基准。新建立的系统装调模型更接近实际装调过程,能更有效地指导装调,解决了补偿器间的耦合问题,加快了装调过程的收敛。最后,基于自行研发的高精度干涉仪完成了计算机辅助装调实验。实验显示系统波像差由 46.39 nmRMS 收敛至 20.73 nmRMS,验证了装调算法和模型的准确性。

关键词:微缩投影系统;集成装调;计算机辅助装调;敏感度矩阵;奇异值分解

中图分类号:TH703;TP391.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2103

Computer-aided alignment for reduced projection systems

XIE Yao*, YU Jie, WANG Li-ping, WANG Hui, ZHOU Feng

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xie_yao3@163.com

Abstract: To solve the coupling problem between the compensators during the computer-aided alignment of a reduced projection system with primary and secondary mirrors and to select the compensators properly, a computer-aided alignment algorithm based on singular value decomposition of an optical system sensitive matrix was described. An alignment model for the reduced projection system was established, and both of the algorithm and the model were accomplished in the experiment. An aspherical surface figure detected with a null lens was introduced into the CODE V optical model, the analysis of the sensitivity matrix was used to supervise the optimization of the optical system, and the optimized structural parameters were considered as the benchmark of the assembly and positioning of optical and mechanical system. The experiments show that the created system alignment model is closer to the actual alignment process, and efficiently supervises system alignment, solves the coupling problem between the compensators, and accelerates the convergence process. Finally, computer-aided alignment experiment was completed based on a self-developed interferometer with high precision. It shows that the system wavefront error is minished from 46.39 nmRMS to 20.73 nmRMS, which veri-

收稿日期:2014-03-21;修订日期:2014-04-10.

基金项目:国家重大科技专项资助项目

fies the veracity of the algorithm and the alignment model.

Key words: reduced projection system; integrated assembly and alignment; computer-aided alignment; sensitivity matrix; singular value decomposition

1 引言

光学系统出瞳面波像差是衡量光学系统成像质量的关键指标,而光学系统设计残差、光学元件检测和加工误差以及光学系统装调误差是影响系统波像差的 3 个关键因素。随着光学设计软件功能的完善,光学加工和检测技术的不断发展,使得研制分辨率达到衍射极限的光学系统成为可能,例如光刻物镜^[1-4]。在光学设计、元件检测和加工精度满足要求的情况下,光学系统精密装调成为了提高光学系统成像质量的必要手段。

早期传统的光学系统精密装调采用采集到的多个视场的干涉图作为光学元件精确定位的依据^[5],这不仅需要装调人员具有丰富的实际操作经验,还会耗费大量的时间,且装调精度也不是很高。随着光学系统的复杂化和对光学系统成像质量需求的日益提高,光学系统的计算机辅助装调技术成为了研究重点^[6-12]。计算机辅助装调用于解决光学系统波像差与元件姿态的对应关系,通过元件姿态的调整弥补对应的像差,以使系统波像差达到最小。目前最为常用的装调算法是基于敏感矩阵的奇异值分解算法^[13-15],该方法已广泛应用于不同领域的光学系统集成,取得了理想的效果。

本文以微缩投影系统为研究对象,将基于敏感矩阵奇异值分解的牛顿迭代法引入系统的计算机辅助装调实验中。在实验中建立了基于真实非球面元件面形的装调模型,用于指导系统装配过程中元件的精确定位以及后续的粗装调和精密装调实验,通过对系统敏感度矩阵的分析,合理地选择了补偿器,有效控制了补偿器间的耦合,加速了装调过程的收敛,解决了由中心遮拦带来的分割波面在 Zernike 拟合过程中在被测区域内的正交问题。

2 微缩投影系统计算机辅助装调模型

出瞳面的波像差表征了实际波面和理想波面

之间的偏差,是评价光学系统成像质量的一种较为方便和直观的方法。Zernike 多项式可以有效地表征系统出瞳面的波像差,36 项 Fringe Zernike 也是目前最常用的波像差的表征方式,其中, Z_2 (倾斜)~ Z_9 (球差)反应了系统中元件的姿态(元件各方向的调整自由度)与系统波像差的关系,因此,寻找初级像差与元件姿态的对应关系是光学系统精密装调的关键问题,而计算机辅助装调是一种有效的解决方案。微缩投影系统的计算机辅助装调流程如图 1 所示,这是一个收敛的迭代过程,发生在系统机械装配(流程 5)后,主要包含两个过程:(1)计算机辅助装调模型的建立(流程 1、2、3);(2)系统的精密装调(流程 6、7、8、9)。



图 1 微缩投影系统计算机辅助装调流程

Fig. 1 Flow chart of computer-aided alignment procedure of reduced projection system

计算机辅助装调在系统集成过程中的重要作用包括敏感度矩阵的建立、补偿器的合理选择以及调整方向的判定和调整量的计算。光学系统敏感度矩阵作为计算机辅助装调的基础,可以通过在光学系统中人为引入失调量计算获得,此时的光学系统为载入实际元件面形并作相应优化的系统,以便计算机辅助装调模型更接近实际装调过程。

计算机辅助装调通过对光学系统敏感度矩阵的分析,选择合适补偿器(元件姿态)对相应的初级像差进行补偿,通过收敛的迭代过程使得最终的系统波像差满足要求。光学系统结构与系统波像差的对应关系可以通过 $z = z(x)$ 描述,其中 z

为光学系统像差, x 为系统结构向量, 计算机辅助装调的目的就是找到一个最佳的系统结构, 使得 $\|z(x)\|$ 最小, 这一过程与光学设计的优化过程类似, 但由于 z 与 x 为非线性关系, 而且各结构分量并非完全相互独立, 使得求解 $\|z(x)\|$ 最小的过程成为一个非定问题, 从而产生了一个收敛迭代过程。目前最常用的求解非定方程的算法是基于奇异值分解的牛顿迭代法, 通过解算 $z(x) = 0$ 实现 $\|z(x)\|$ 最小。为求解非定方程 $z(x) = 0$, 对其在适当的失调量附近进行 Taylor 展开:

$$z(x + \delta x) = z(x) + J\delta x + O(\delta x^2), \quad (1)$$

其中: J 为系统的敏感度矩阵, δx 为所要求解的系统的失调量, 使得 $z(x + \delta x) = 0$, 并忽略高阶项, 则:

$$J\delta x = -z(x), \quad (2)$$

式中: $z(x)$ 为实测系统波像差与优化后的理想系统波像差的偏差, 该方程表征了系统像差与结构的关系。通过求解式(2)可以获得失调量 δx , δx 的符号代表了调整方向。

3 系统敏感度矩阵的奇异值分解

由于像差数与系统结构数不能完全的一一对应, 不能获得满秩矩阵 J , 因而也就不能通过求 J 的逆矩阵的方式求得 δx , 而是需要对 J 进行奇异值分解, 求出 J 的广义逆, 最终求解出系统的失调量。 J 的奇异值分解为:

$$J = UWV^T, \quad (3)$$

式中: 列向量 U 、 V 分别为像差奇异值向量和系统的结构奇异值向量, W 为含有相应奇异值的对角阵。

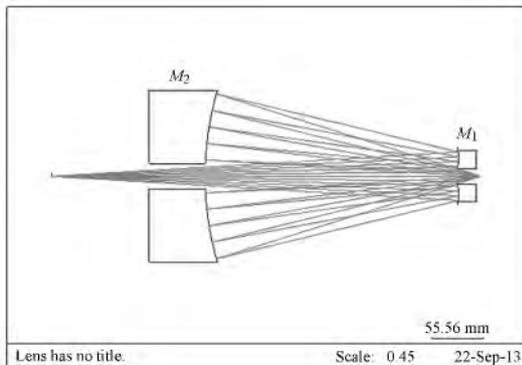


图 2 微缩投影系统设计

Fig. 2 Optical design of reduced projection system

微缩投影系统的敏感度矩阵通过在优化后的 CODE V 模型中人为引入失调量计算获得, CODE V 设计的微缩投影系统为轴对称系统, 如图 2 所示, 包含主镜 M_1 和次镜 M_2 2 个非球面元件, 系统采用类远心结构。系统 NA 为 0.25, 5 倍的微缩倍率, $0.50 \text{ mm} \times 0.30 \text{ mm}$ 的像方视场, 理想系统的设计综合波像差为 0.25 nmRMS , 具体参数如表 1 所示。

表 1 微缩投影系统设计参数

Tab. 1 Specifications of reduced projection system

设计项目	参数值
NA of image	0.25
λ	13.5 nm
Reduction ratio	1/5
Field size at wafer	$0.5 \times 0.3 \text{ mm}^2$
Composite WFE	0.23 nmRMS

微缩投影系统的敏感矩阵建立过程中, 预选物面的 x 、 y 、 z 3 个自由度, M_1 的 x 、 y (偏心)、 z (镜间距)、 T_x 、 T_y (倾斜) 5 个自由度以及像面的 z 作为补偿器, 以 $Z_2 \sim Z_9$ 作为像差向量, 通过敏感矩阵奇异值分解获得的最主要的前 5 个像差奇异值向量 u_i 和结构奇异值向量 v_i 如图 3 所示, v_i 中的 1~9 分别对应 9 个元件自由度, u_i 中的 1~8 分别对应 8 种像差。

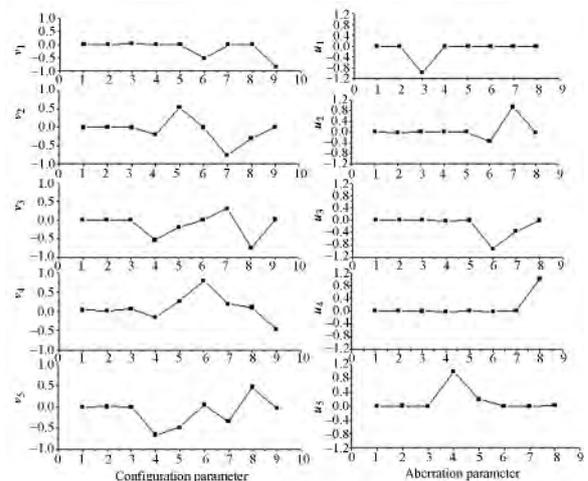


图 3 结构参数奇异值向量及对应的像差奇异值向量

Fig. 3 Plot of configuration singular vector and corresponding aberration singular vector

从图 3 中可以看出, 第一个结构奇异值向量 v_1 对系统有最大的敏感度, 每单位距离的调整对

应 293λ 的奇异值,影响最大的是系统的离焦 (Z_4),可以通过敏感度最大的像距 z 的调整得以补偿。第二个较为敏感的为 y 方向的彗差 (Z_7),可以通过 M_1 的 y 方向偏心或 x 方向倾斜 (T_x) 的调整实现补偿,每单位距离的调整对应的奇异值为 22.6λ ,以此类推。敏感度越大,说明该结构参数的调整对系统波像差的影响越大,计算机辅助装调过程中就可以通过确立的系统结构参数与波像差之间的关系和敏感度的大小分配调整自由度的优先级。随着敏感度的下降,各个预选补偿器间的耦合关系越明显,以 v_5 和 u_5 为例, M_1 的偏心和倾斜均会引入像散 (Z_7),但每单位距离的调整只对应了 0.2λ 的奇异值,考虑到 M_1 的偏心和倾斜也会引入彗差,通过比较选择了 M_1 的偏心 (x, y) 作为补偿器,而 Z_2, Z_3 对 M_1 的倾斜更加敏感,但同样的每单位距离的调整对应的奇异值很小,所以在装调过程中最后考虑。同样的原则,选出 M_1 和像面的 z 向调整分别补偿系统的球差和离焦。

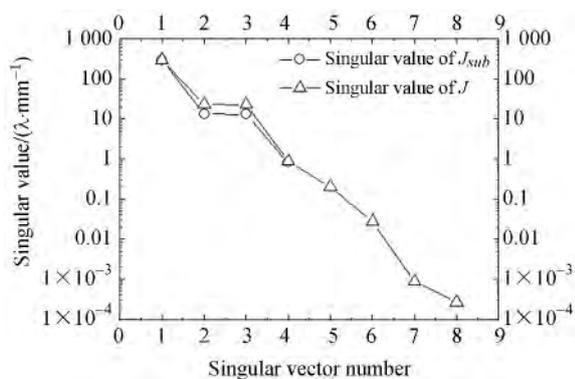


图 4 敏感矩阵 J 及其子矩阵 J_{sub} 的奇异值向量

Fig. 4 Singular values of sensitivity matrix J (triangles) and singular values of sub-matrix J_{sub} (circles)

最终从预选的 8 个补偿器筛选出了 M_1 的 x, y, z 以及像面 z 作为系统计算机辅助装调的补偿器,生成原敏感矩阵 J 的子矩阵 J_{sub} ,如表 2 所示,表中数据绝对值的大小是补偿器选择的依据,装调过程中选取绝对值最大的数据对应的系统结构作为补偿器用以补偿相应的像差,对应的奇异值如图 4 所示。从图中可以看出 J_{sub} 的奇异值非

常接近 J 的奇异值,说明子矩阵 J_{sub} 较准确地反映了系统的敏感度,而且 J_{sub} 解决了各调整自由度间的相互耦合,提高了装调过程的迭代收敛速度。

表 2 微缩投影系统敏感矩阵 J_{sub}

Tab. 2 Sub-sensitivity matrix J_{sub} of reduced projection system

$\Delta Z/\Delta X$	$M_1-\Delta x$	$M_1-\Delta y$	$M_1-\Delta z$	$I_m-\Delta z$
Power (Z_4)	5.8×10^{-2}	7.6×10^{-2}	1.5×10^2	2.5×10^2
Astig x (Z_5)	3.4×10^{-2}	-1.5×10^{-2}	-5.4×10^{-3}	-3.3×10^{-3}
Astig y (Z_6)	1.9×10^{-2}	-1.0×10^{-3}	-2.8×10^{-3}	1.5×10^{-4}
Coma x (Z_7)	1.3×10	1.1×10^{-2}	6.4×10^{-4}	-3.7×10^{-3}
Coma y (Z_8)	-8.2×10^{-3}	1.3×10	5.0×10^{-3}	8.1×10^{-3}
Sph (Z_9)	4.7×10^{-2}	8.7×10^{-2}	1.7	1.3

4 计算机辅助装调实验及结果分析

依据元件面形的检测结果,对 CODE V 内的微缩投影系统进行优化(以选定的补偿器为变量),并以此为基准在三坐标机上完成了光机结构的定位,机械装配过程如图 5 所示。



图 5 微缩投影系统装配

Fig. 5 Assembly of reduced projection system

图 6 所示为微缩投影系统的装调检测结构示意图,测试光通过系统后,经由一个 $PV \lambda/50, NA 0.65$ 的球面反射镜返回干涉仪,与参考光进行干涉,完成测量。与单程光路测试系统相比,双程光路的测试结构提高了系统像差对应于机械结构的敏感度,有利于装调过程的快速收敛。相比于 $PV \lambda/10$ 左右的非球面元件面形, $PV \lambda/50$ 球面

反射镜的面形在装调过程中可以忽略,以保证系统波像差检测的准确性。

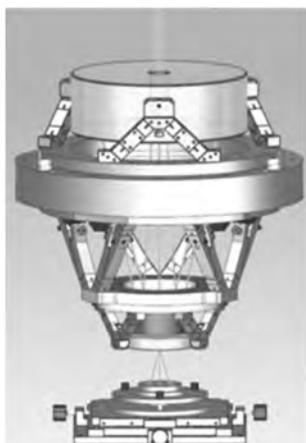


图 6 微缩投影系统装调检测模型示意图

Fig. 6 Optical test layout of reduced projection system

计算机辅助装调实验在自主研发的超高精度和超高稳定性的干涉仪装置上进行,检测波长为 632.8 nm,如图 7 所示。完成粗装调后的系统波像差为 35.43 nmRMS,其中除了元件本身带有的高阶像差外,还包含了大量彗差、像散和球差,这需要通过调整 M_1 偏心、两镜间距和像距进行补偿。



图 7 微缩投影系统的计算机辅助装调

Fig. 7 Computer-aided alignment of reduced projection system

采用基于奇异值分解的牛顿迭代法的装调方案,结合敏感矩阵完成了微缩投影系统的计算机辅助装调。图 8 所示为装调的迭代收敛过程,环形的波面被中心遮拦分成了 4 个区域,利用一种

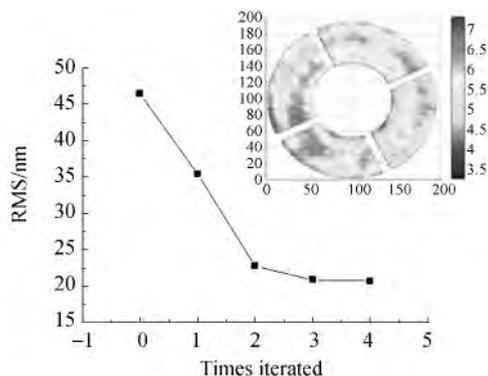


图 8 计算机辅助装调的迭代过程

Fig. 8 Iteration of computer-aided alignment

特殊的波面拼接算法,使得像差多项式在被测区域内正交,3 次迭代后,系统波像差减小为 20.73 nmRMS,如表 3 所示,接近于优化后 CODE V 模型中的 19.2 nmRMS,验证了装调算法和装调模型的正确性。

表 3 微缩投影系统装调结果

Tab. 3 Alignment results of reduced projection system

补偿量	$M_1-\Delta x$ /mm	$M_1-\Delta y$ /mm	$M_1-\Delta z$ /mm	$I_m-\Delta z$ /mm	系统波像差 /nmRMS
机械装配	—	—	—	—	46.39
粗装调	—	—	2.17	0.13	35.43
三次迭代	0.088	0.066	0.083	0.007	20.73

5 结 论

本文建立了基于实测元件面形的微缩投影系统计算机辅助装调模型,使得该模型更接近实际装调过程,加快了装调过程中的迭代收敛速度。采用该模型完成了基于光学系统灵敏度矩阵奇异值分解的微缩投影系统的集成和初级像差的补偿,通过对敏感矩阵的分析和奇异值分解,合理选择补偿器,控制补偿器间的耦合,有效补偿了系统波像差中的离焦、彗差和球差,经过系统粗装调和计算机辅助装调的 3 次迭代过程,系统波像差由机械装配后的 46.39nmRMS 减小至 20.73 nmRMS,与理论的 19.2 nmRMS 较为接近,验证了该装调算法和模型在微缩投影系统集成过程中的积极作用。实验中通过一种特殊的波面拼接算法,解决了由中心遮拦带来的 zernike 多项式在被测区域内不正交的问题。

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]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1): 66-70. (in Chinese)
- [2] VLADIMIRSKY Y, TAYLOR J S, SOMMARGREN G E, *et al.*. Fabrication and testing of optics for EUV projection lithography[C]. *Proc. SPIE* 3331, 1998: 580-590.
- [3] 王丽萍. 极紫外投影光刻光学系统[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(5): 452-461.
WANG L P. Optical system of extreme ultraviolet lithography [J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(5): 452-461. (in Chinese)
- [4] GLATZEL H, ASHWORTH D, BREMER M, *et al.*. Projection optics for extreme ultraviolet lithography (EUVL) micro-field exposure tools (METs) with a numerical aperture of 0.5 [C]. *Proc. SPIE*, 8679, 2013: 867917.
- [5] JEONG H W, LAWRENCE G N, NAHM K B. Auto-alignment of a three-mirror off-axis telescope by reverse optimization and end-to-end aberration measurements [C]. *In Current Developments in Optical Engineering II*, *Proc. SPIE* 818, 1987: 419-430.
- [6] HENRY N C, DONALD W S. Rigorous method for compensation selection and alignment of micro lithographic optical systems [C]. *Proc. SPIE* 3331, 1998: 102-113.
- [7] 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.
SUN J W, CHEN T, WANG J L, *et al.*. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2156-2163. (in Chinese)
- [8] 胡春晖, 颜昌翔. 基于高斯光学齐次坐标变换的光机装调[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(11): 2353-2359.
HU CH H, YAN CH X. Optical-mechanical assembly based on gaussian optical homogeneous coordinate transformation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2353-2359. (in Chinese)
- [9] SEONGHUI K, HOSOOON Y, YUN-WOO L, *et al.*. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5059-5068.
- [10] LEE J H, RYOO S, PARK K W, *et al.*. Development of a computer-aided alignment simulator for an EO/IR dual-band airborne camera [C]. *Proc. SPIE* 8417, 2012: 84170E.
- [11] 杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元. Zemax 软件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.
YANG X F, ZHANG X H, HAN CH Y. Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 270-274. (in Chinese)
- [12] 刘琳, 王洋, 张兴德. 基于 DWC 波前检测的计算机辅助装调技术[J]. 激光与红外, 2013, 43(4): 428-432.
LIU L, WANG Y, ZHANG X D. Computer-aided alignment based on DWC wave-front testing [J]. *Laser and Infrared*, 2013, 43(4): 428-432. (in Chinese)
- [13] 林强, 金春水, 向鹏, 等. 离轴照明 Schwarzschild 投影物镜的计算机辅助装调方法[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(2): 144-150.
LIN Q, JIN CH SH, XIANG P, *et al.*. Computer-aided alignment of schwarzschild objective with off-axis illumination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2): 144-150. (in Chinese)
- [14] CLAMPIN M C, BOS B J, HOWARD J M, *et al.*. Global alignment optimization strategies, procedures, and tools for the James Webb Space Telescope (JWST) Integrated Science Instrument Module (ISIM) [C]. *SPIE* 8442, 2012: 84423I.
- [15] 赵阳, 巩岩. 投影物镜小比率模型的计算机辅助装调[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 394-400.
ZHAO Y, GONG Y. Computer aided alignment of small scale projected objective [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 394-400. (in Chinese)

作者简介:



谢 耀(1982-), 男, 浙江兰溪人, 助理研究员, 2005 年、2007 年、2011 年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位, 主要从事光学设计和系统集成的研究。E-mail: xie_yao3@163.com