

文章编号 1004-924X(2016)01-0001-06

微缩投影系统的垂轴放大率测量

谢 耀*, 王丽萍, 郭本银, 王 君, 苗 亮, 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: 考虑有限距光学系统的成像质量与系统垂轴放大率相关, 本文提出了基于系统波像差检测的垂轴放大率测量方案。以给定的光学系统中像平面位置与物平面位置满足高斯公式和牛顿公式的原理为出发点, 通过系统波像差中离焦量的变化监控物点移动微小量后像点的移动距离。然后, 对牛顿公式或高斯公式微分导出轴向放大率, 最终求出系统垂轴放大率。建立了垂轴放大率测量模型, 给出物点的微小位移量和初始离焦量的选取标准, 并系统地分析了光学元件形位公差和像点定位精度对垂轴放大率测量结果的影响。搭建了基于点衍射干涉仪的微缩投影系统波像差检测平台, 测量了系统的垂轴放大率。实验显示, 系统垂轴放大率的测量值与理论值的偏差优于 0.24%, 验证了提出的垂轴放大率测量方法的可行性和理论分析的准确性。

关键词: 成像系统; 微缩投影系统; 垂轴放大率测量; 点衍射干涉仪; 离焦

中图分类号: TH703; TH741.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162401.0001

Measurement of transversal magnification for reduced projection system

XIE Yao*, WANG Li-ping, GUO Ben-yin, WANG Jun, MIAO Liang, 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: As the imaging performance of an optical system is related to its transversal magnification, this paper proposes a transversal magnification measurement scheme based on wavefront error metrology for the optical system. On the basis of that the locations of image plane and object plane satisfy the Newton's and Gauss's formulas in a given optical system, the defocus in wavefront error was used to monitor the movement of image point. According to the minor movement of object point, the longitudinal magnification could be calculated by the differential of Newton's and Gauss's formulas, and the transversal magnification was obtained finally. In order to validate the scheme, a model of transversal magnification measurement was established, and the criterions of the object point shift and the initial defocus were summarized. Then, the influences of geometric tolerance and positioning accuracy of the image point on transversal magnification were analyzed. Finally, an experimental platform based on a point diffraction interferometer was established for measuring the wavefront error of a reduced projection system, and the transversal magnification of the system was measured. It shows that the difference between theoretical and measured results is lower than 0.24%, which verifies the feasibility and veracity of this scheme.

Key words: imaging system; reduced projection system; transversal magnification measurement; point diffraction interferometer; defocus

收稿日期: 2015-08-11; 修订日期: 2015-09-10.

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No. 2008ZX02501-008)

1 引言

系统波像差和垂轴放大率均是衡量如光刻系统^[1-4]等有限距光学系统成像质量的关键指标^[5]。其中,光学系统的垂轴放大率仅取决于系统共轭面位置,其像差矫正通常也针对特定的物像共轭点,即在满足特定的系统垂轴放大率需求的前提下完成波像差优化。

目前,垂轴放大率测量方法主要有成像法和畸变标定两种。其中,成像法有以下两种实现方式:(1)对位于入瞳处的已知尺寸物体(直线或网格板等)成像,通过精确测量出瞳处像的尺寸计算系统的垂轴放大率^[6]; (2)用准直光照明视场光阑,通过被测系统后,在探测器上测得视场光阑上标记的尺寸,以此计算被测系统的垂轴放大率^[7]。

畸变标定时,在物像面安置小孔板,开展系统畸变标定的同时完成垂轴放大率测量^[8-10]。

通过成像测得系统垂轴放大率,原理简单,但测量精度与入瞳面、出瞳面以及像面位置的定位精度息息相关,特别是对于结构复杂的光学系统,入瞳面、出瞳面,甚至是像面的确定都将是一个非常艰巨的任务。而在畸变测量过程中完成系统垂轴放大率检测的方案,需要精确控制并反馈物像面小孔板的位移,执行成本高,不易控制和实现。

众所周知,理想光学系统的像平面位置是物平面位置的函数,满足高斯公式和牛顿公式^[11]。系统轴向放大率表征光轴上一对共轭点轴向移动量之间的关系。当物平面的移动量 ΔL 很小时,通过对牛顿公式和高斯公式进行微分处理可以导出轴向放大率;再根据物方焦距和像方焦距的关系可知,当光学系统的物方空间和像方空间的介质一样时,系统的轴向放大率与垂轴放大率满足平方关系。此外,在一个给定物距下,光学系统中存在唯一一个与之对应的像点,使得该系统有最好的成像质量,而系统波像差则能有效地表征光学系统的成像质量。由于波像差中的离焦量^[12]能够表征实际像点与理想像点的位置偏差,可根据离焦量的变化有效地监控并推算出物点移动微小量后像点的移动距离。因此,可通过移动物点,并调整像点位置补偿离焦量的方式来计算光学系

统的轴向放大率,并最终导出垂轴放大率。本文设计了一个基于系统波像差检测的垂轴放大率测量方案,并在搭建的基于点衍射干涉仪的波像差检测平台上完成了系统垂轴放大率的测量,通过对比测量值和仿真结果验证了该方案的可行性。

2 垂轴放大率测量原理

在理想光学系统中,当物点沿光轴移动一微小距离 ΔL 时,系统的像点将移动相应的距离 $\Delta L'$,两者之比为轴向放大率 α ,即 $\alpha = \Delta L' / \Delta L$ 。理想光学系统的垂轴放大率测量原理如图 1 所示,物点沿轴从 O 点移动有限距离 ΔL_{-1} 到 O_{-1} ,相应的像点从 I 点移动至 I_{-1} 点,移动距离为 $\Delta L_{-1}'$,当光学系统的物方空间和像方空间的介质一样时,轴向放大率为:

$$\alpha_1 = \Delta L'_{-1} / \Delta L_{-1} = \beta_0 \beta_{-1}, \quad (1)$$

其中: β_0 为物点处于物距为 L_0 时的垂轴放大率; β_{-1} 为物点移动 ΔL_{-1} 后处于物距为 L_{-1} 时的垂轴放大率。同理:

$$\alpha_2 = \Delta L'_{+1} / \Delta L_{+1} = \beta_0 \beta_{+1}, \quad (2)$$

$$\alpha_3 = (\Delta L'_{-1} + \Delta L'_{+1}) / (\Delta L_{-1} + \Delta L_{+1}) = \beta_{-1} \beta_{+1}, \quad (3)$$

其中: β_{+1} 为物点移动 ΔL_{+1} (从 O 点移动至 O_{+1}) 距离后处于物距为 L_{+1} 时的垂轴放大率。利用式(1)、式(2)和式(3)分别算得物点处于 3 个不同物距下的垂轴放大率 β_{-1} , β_0 和 β_{+1} 。

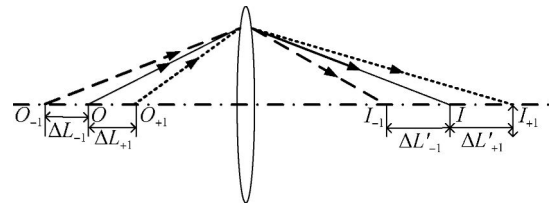


图 1 系统垂轴放大率的测量原理

Fig. 1 Theory of transversal magnification measurement

3 微缩投影系统垂轴放大率测量的仿真和精度分析

本文结合垂轴放大率的理论分析,设计仿真模型用于分析该测量方案的可行性,并完成了系

统的垂轴放大率测量实验,以验证仿真结果的准确性。

待检微缩投影系统为轴对称系统^[13],如图 2 所示,包含主镜 M_1 和次镜 M_2 两个非球面元件。数值孔径 NA 为 0.25,微缩倍率为 $5\times$,像方视场为 $0.5\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$ 。

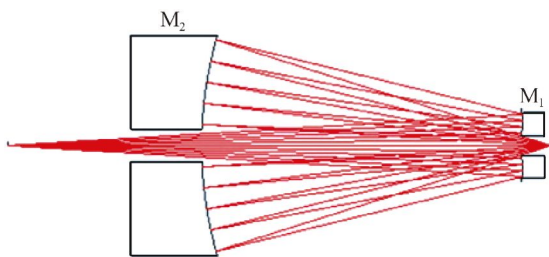


图 2 微缩投影系统设计

Fig. 2 Optical design of reduced projection system

系统轴向放大率的获得,是通过测量物点微小移动量和像点与之对应的移动量来实现的。为了提高垂轴放大率的测试和计算精度,在仿真过程中,需要充分考虑与放大率直接相关的物点微小移动量和初始离焦量(即像点变化量的监控)的选取,并分析元件加工和系统装配公差对垂轴放大率计算结果的影响。

3.1 物点微小移动量的选取

为了定义物点微小移动量的置信区间,分析了物点在不同移动量下获得的垂轴放大率与 CodeV 软件定义的相同位置处垂轴放大率的关系。

图 3 为 $\Delta\beta$ 随物点移动距离(ΔOD)的变化。其中 $\Delta\beta$ 表征了仿真过程中,在给定物距下,采用该方案计算获得的垂轴放大率与 CodeV 软件定义的该位置垂轴放大率的偏差, $\Delta\beta_0$, $\Delta\beta_{+1}$, $\Delta\beta_{-1}$ 分别为物点在当前位置以及左右移动后的垂轴放大率偏差。从图中可以看出,当物点的移动距离小于 $200\ \mu\text{m}$ 时, $\Delta\beta_0$ (0.00144), $\Delta\beta_{+1}$ (0.00143), $\Delta\beta_{-1}$ (0.00143) 三者近乎相等,即采用该方案获得的垂轴放大率与软件定义的垂轴放大率存在一个固定的偏差,该偏差来源于软件定义的像点与离焦量所确定的像点存在一个固有的位置偏差,且

在小于 $200\ \mu\text{m}$ 的移动范围内,该固定偏差不影响垂轴放大率的计算精度。

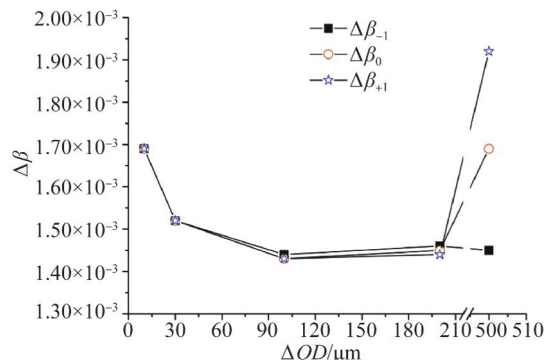


图 3 $\Delta\beta$ 随物点移动距离的变化

Fig. 3 Variation of $\Delta\beta$ with object plane moving distance

3.2 初始离焦量的选取

图 4 为 $\Delta\beta$ 随离焦量的变化。从图中可以看出,当离焦量小于 4 nm 时,3 个位置的 $\Delta\beta$ 为一固定值(0.00143)。换言之,当离焦量小于 4 nm 时,在系统垂轴放大率测量中,该算法不会引入额外的误差。

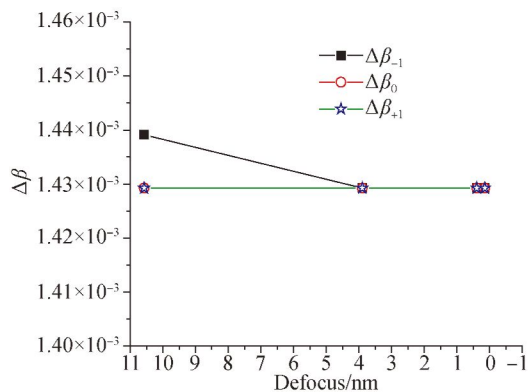


图 4 $\Delta\beta$ 随离焦量的变化

Fig. 4 Variation of $\Delta\beta$ with defocus

3.3 系统结构参数的加工和装配公差对仿真结果的影响

对系统垂轴放大率影响较大的主要是对称公差,如元件曲率半径、元件的间隔公差以及物点和像点的定位误差。表 1 为两镜系统的曲率半径、镜间距以及物点的定位误差对 $\Delta\beta$ 的影响,其中 $\Delta\beta'$ 为形位公差造成的 $\Delta\beta$ 的计算误差。

表 1 系统形位公差对 $\Delta\beta$ 的影响Tab. 1 Influence of geometric tolerances on $\Delta\beta$

Geometric tolerance/mm	$\Delta\beta'_{-1}$	$\Delta\beta'_0$	$\Delta\beta'_{+1}$
Positioning accuracy of object point	± 0.22		
Distance between convex and concave	± 0.2		
Vertex radius of curvature (convex)	$\pm 2.6 \times 10^{-5}$	$\pm 2.5 \times 10^{-5}$	$\pm 2.5 \times 10^{-5}$
Vertex radius of curvature (concave)	± 0.07		
Vertex radius of curvature (concave)	± 0.01		

表 2 像点定位精度对 $\Delta\beta$ 的影响Tab. 2 Influence of positioning accuracy of image point on $\Delta\beta$

Positioning accuracy of image point	$\Delta\beta'_{-1}$	$\Delta\beta'_0$	$\Delta\beta'_{+1}$
$\pm 2 \text{ nm}$	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 1 \times 10^{-4}$	$\pm 2 \times 10^{-4}$

表 2 为像点的定位误差对 $\Delta\beta$ 的影响。其中 $\Delta\beta'$ 为像点定位精度造成的 $\Delta\beta$ 的计算误差,像点位置通过离焦量确定,实验过程中系统离焦量可由像面位置安装的 PI 公司的压电陶瓷 (PZT) 严格控制。PZT 的重复定位精度优于 3 nm,位置噪声小于 1 nm。

综上所述,这种方案获得的垂轴放大率 β_{-1} , β_0 , β_{+1} 测量精度分别为 $\pm 0.000 23$, $\pm 0.000 13$ 和 $\pm 0.000 23$ 。

4 微缩投影系统垂轴放大率测量实验

在此基础上完成了基于自主研发的高精度点衍射干涉仪 (Point Diffraction Interferometer, PDI)^[14] 微缩投影系统的垂轴放大率测量实验。PDI 由会聚照明系统、衍射波生成系统、移相系统和成像系统组成,工作波长为 632.8 nm。

图 5 为微缩投影系统的垂轴放大率测量实验,整个测量过程在自主研发的高精度 PDI 上完成。测试光从物点处,即 PDI 的衍射小孔发出,通过系统后经由一个球面反射镜返回干涉仪,与

参考光进行干涉,完成系统波像差测量。像面位置位于球面反射镜的球心处,球面反射镜通过 x/y 调整台连接在 PZT 上,通过调整 PZT 实现测试光通过球面反射镜后汇聚到像点处,并沿原光路返回到干涉仪中,以实现零条纹下的波像差检测。

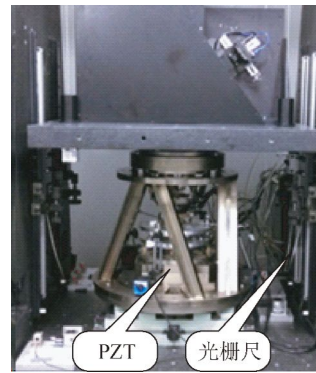


图 5 微缩投影系统的垂轴放大率测量实验

Fig. 5 Experimental setup for transversal magnification measurement of reduced projection system

实验过程中,物点移动微小的距离 ΔL_{+1} ($102 \mu\text{m}$)、 ΔL_{-1} ($-110 \mu\text{m}$) 由分辨率优于 $1 \mu\text{m}$ 的光栅尺记录。在波像差检测过程中,通过调整球面反射镜 (即调整像点位置) $\Delta L'_{+1}$ ($4.153 \mu\text{m}$)、 $\Delta L'_{-1}$ ($-4.471 \mu\text{m}$) 补偿离焦量,使得在 3 个位置测得的系统波像差中的离焦量均小于 4 nm。

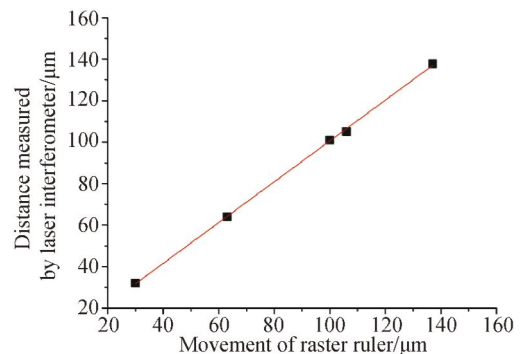


图 6 光栅尺的标定结果

Fig. 6 Calibration result of raster ruler

为了精确定位物点的移动量,通过双屏激光干涉仪 (Renishaw XL80) 标定光栅尺的移动量,

结果如图6所示。从图中可以看出,两者偏差呈线性分布,偏差的均方根为 $0.9189\ \mu\text{m}$ 。

通过式(1)、式(2)和式(3)和标定后的物点移动量算得在3个物点处微缩投影系统的垂轴放大率,结果如表3所示。其中理论计算的系统垂轴放大率是指在仿真模型中,物点微小位移量与实验中物点移动距离一致时,通过调整模型中像面位置补偿离焦量后算得的系统垂轴放大率。

表3 实际测量和理论计算的系统垂轴放大率

Tab. 3 Comparison of theoretical and measured transversal magnification

垂轴放大率	β_{-1}	β_0	β_{+1}
理论值	-0.201 69 $\pm 0.000\ 23$	-0.201 69 $\pm 0.000\ 13$	-0.201 69 $\pm 0.000\ 23$
实测值	-0.201 517 $\pm 0.001\ 95$	-0.201 697 $\pm 0.001\ 96$	-0.201 865 $\pm 0.001\ 96$

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] 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 Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(5): 452-461. (in Chinese)
- [3] 王君,金春水,王丽萍,等. 极紫外光刻投影物镜中多层膜分析模型的建立及应用[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0811002.
WANG J, JIN CH SH, WANG L P, et al.. Foundation and application of model for multilayers analysis in extreme ultra-violet lithography projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0811002. (in Chinese)
- [4] 赵阳,巩岩. 投影物镜小比率模型系统补偿量的选择[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3029-3036.
ZHAO Y, GONG Y. Selection of system compensators for small scale projected objective [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3029-3036. (in Chinese)

5 结论

本文通过调整像点补偿物点移动微小距离所导致的系统离焦量变化的方式导出光学系统的轴向放大率,最终计算出垂轴放大率。首先建立了微缩投影系统垂轴放大率的模型并确认测量方案,给出了物点微小位移量和初始离焦量的置信区间,即当物点的移动量 $<200\ \mu\text{m}$,初始离焦量 $<4\ \text{nm}$ 时,该垂轴放大率测量方案不会在垂轴放大率测量结果中引入额外的误差。在此基础上,系统地分析了元件加工和装配误差以及物点和像点的定位精度对垂轴放大率测量精度的影响。最后,在搭建的基于点衍射干涉仪的微缩投影系统波像差检测平台上完成了垂轴放大率测量实验。实测结果与理论值的偏差小于 0.24% ,充分证明了模型的正确性和理论分析的准确性。

- [5] 许伟才,黄玮,杨旺. 投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1122003.
XU W C, HUANG W, YANG W. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1122003. (in Chinese)
- [6] 刘秉琦,沈学举. CCD测望远系统放大率[J]. 光电工程, 1998, 25(3): 70-72.
LIU B Q, SHEN X J. Measurement of the magnification of the telescopic system with CCD [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, 25(3): 70-72. (in Chinese)
- [7] 汪伟,尚长水,谭显祥. 转镜分幅相机中分幅系统放大倍率的校正[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 708-712.
WANG W, SHANG CH SH, TAN X X. Correction of transversal magnification for framing system in high-speed rotating mirror framing camera [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(5): 708-712. (in Chinese)
- [8] 郭羽,杨红,杨照全,等. CCD摄像系统镜头的畸变测量[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 279-282.
GUO Y, YANG H, YANG ZH J, et al.. Distortion measurement of lens in CCD camera system [J]. *Journal Applied Optics*, 2008, 29(2): 279-282. (in Chinese)
- [9] JEFFREY B, PATRICK N. *System for interfero-*

- metric distortion measurements that define an optical path*: United States Patent, US 6559952 B1 [P], 2003-05-06.
- [10] MICHAEL S. *System for correcting aberrations and distortions in EUV lithography*: United States Patent, US 6897940 B2 [P], 2005-05-24.
- [11] 郝道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 24-26.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 24-26. (in Chinese)
- [12] 马拉卡拉 D. 光学车间检测[M]. 杨力等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012: 369-405.
MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. YANG L *et al.*, Transl., Beijing: China Machine Press, 2012: 369-405. (in Chinese)
- [13] 谢耀, 于杰, 王丽萍, 等. 微缩投影系统的计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2103-2108.
XIE Y, YU J, WANG L P, *et al.*, Computer-aided alignment for reduced projection systems[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2103-2108. (in Chinese)
- [14] 代晓珂, 金春水, 于杰. 点衍射干涉仪波面参考源误差及公差分析[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 855-862.
DAI X K, JIN CH SH, YU J. Analysis on error and tolerance for the wavefront reference source of point diffraction interferometer[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 855-862. (in Chinese)

作者简介:



谢耀(1982—),男,浙江兰溪人,副研究员,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